

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
12
篇

常用公式和数表

主 编 周康年 丁为联

编 写 周康年 丁为联 夏利霞
钟丹华 黄长清 徐东求

审 稿 欧阳红群



中国机械工程学会
中国机械设计大典编委会

第 1 章 量 和 单 位

1 国际单位制与法定计量单位

1.1 国际单位制

国际单位制是由国际计量大会所采用和推荐的一贯单位制，国际上把国际单位制简称为 SI，它是在米制基础上发展起来的单位制。

国际单位制的单位包括 SI 单位以及 SI 单位的倍数单位。SI 单位的倍数单位包括 SI 单位的十进倍数和分数单位。SI 单位是国际单位制中由基本单位和导出单位构成一贯单位制的那些单位。除质量外，均不带 SI 词头（如质量的 SI 单位为 kg）。国际单位制的构成见图 12.1-1。

国际单位制是我国法定计量单位的基础，一切属于国际单位制的单位都是我国的法定计量单位。

1.2 法定计量单位

我国的法定计量单位（以下简称法定单位）包括：

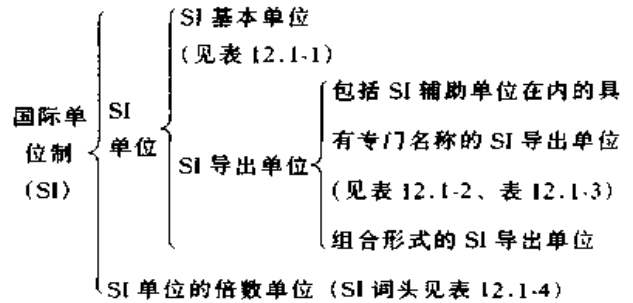


图 12.1-1 国际单位制的构成

- 1) 国际单位制的基本单位（见表 12.1-1）；
- 2) 国际单位制的导出单位（见表 12.1-2、表 12.1-3）。
- 3) 国家选定的非国际单位制单位（见表 12.1-5）。
- 4) 由以上单位构成的组合形式的单位。
- 5) 由 SI 词头和以上单位构成的十进倍数和分数单位（SI 词头见表 12.1-4）。

表 12.1-1 SI 基本单位和辅助单位（摘自 GB 3100—1993）

量的名称	单位名称	单位符号	定 义
长 度	米	m	米是光在真空中，(1/299 792 458) s 时间间隔内所经路径的长度
质 量	千克(公斤)	kg	千克是质量单位，等于国际千克原器的质量
时 间	秒	s	秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间
电 流	安[培]	A	安培是电流的单位。在真空中，截面积可忽略的两根相距 1 m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N，则每根导线中的电流为 1 A
热力学温度	开[尔文]	K	热力学温度开尔文是水三相点热力学温度的 1/273.16
物质的量	摩[尔]	mol	摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12 的原子数目相等。在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合
发光强度	坎[德拉]	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 (1/683) W/sr

量的名称	单位名称	单位符号	定义
[平面]角 ^①	弧度	rad	弧度是一个圆内两条半径间的平面角, 这两条半径截取的弧长与半径相等
立体角 ^①	球面度	sr	球面度是一个立体角, 其顶点位于球心, 而它球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积

注: 1. 圆括号中的名称, 是它前面的名称的同义词, 下同。

2. 无方括号的量的名称与单位名称均为全称。方括号中的字, 在不致引起混淆、误解的情况下, 可以省略。去掉方括号中的字即为其名称的简称。下同。

3. 人民生活和贸易中, 质量习惯称为重量。

①为辅助单位。

表 12.1-2 具有专门名称的 SI 导出单位
(摘自 GB 3100—1993)

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
频率	赫[兹]	Hz	1 Hz = 1 s ⁻¹
力	牛[顿]	N	1 N = 1 kg·m/s ²
压力、压强、应力	帕[斯卡]	Pa	1 Pa = 1 N/m ²
能[量]、功、热量	焦[耳]	J	1 J = 1 N·m
功率、辐[射能]通量	瓦[特]	W	1 W = 1 J/s
电荷[量]	库[仑]	C	1 C = 1 A·s
电压、电动势、电位、(电势)	伏[特]	V	1 V = 1 W/A
电容	法[拉]	F	1 F = 1 C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1 Ω = 1 V/A
电导	西[门子]	S	1 S = 1 Ω ⁻¹
磁通[量]	韦[伯]	Wb	1 Wb = 1 V·s
磁通[量]密度、磁感应强度	特[斯拉]	T	1 T = 1 Wb/m ²
电感	亨[利]	H	1 H = 1 Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	1℃ = 1 K
光通量	流[明]	lm	1 lm = 1 cd·sr
[光]照度	[勒]克斯	lx	1 lx = 1 lm/m ²

表 12.1-3 由于人类健康安全防护上的需要而确定的具有专门名称的 SI 导出单位
(摘自 GB 3100—1993)

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	1 Bq = 1 s ⁻¹
吸收剂量			
比授[子]能	戈[瑞]	Gy	1 Gy = 1 J/kg
比释动能			
剂量当量	希[沃特]	Sv	1 Sv = 1 J/kg

表 12.1-4 SI 词头 (摘自 GB 3100—1993)

因数	词头名称		符号
	英文	中文	
10 ²⁴	yotta	尧[它]	Y
10 ²¹	zetta	泽[它]	Z
10 ¹⁸	exa	艾[可萨]	E
10 ¹⁵	peta	拍[它]	P
10 ¹²	tera	太[拉]	T
10 ⁹	giga	吉[咖]	G
10 ⁶	mega	兆	M
10 ³	kilo	千	k
10 ²	hecto	百	h
10 ¹	deca	十	da
10 ⁻¹	deci	分	d
10 ⁻²	centi	厘	c
10 ⁻³	milli	毫	m
10 ⁻⁶	micro	微	μ
10 ⁻⁹	nano	纳[诺]	n

续表 12.1-4

因 数	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文	
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[每托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	么[科托]	y

表 12.1-5 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位 (摘自 GB 3100—1993)

量的名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时间	分	min	1 min = 60 s
	[小]时	h	1 h = 60 min = 3 600 s
	日,(天)	d	1 d = 24 h = 86 400 s
[平面]角	度	°	1° = ($\pi/180$) rad
	[角]分	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10 800$) rad
	[角]秒	"	1" = (1/60)' = ($\pi/648 000$) rad
体积	升	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
质量	吨	t	1 t = 10 ³ kg
	原子质量单位	u	1 u \approx 1.660 540 \times 10 ⁻²⁷ kg
旋转速度	转每分	r/min	1 r/min = (1/60) s ⁻¹
长度	海里	n mile	1 n mile = 1 852 m (只用于航行)
速度	节	kn	1 kn = 1 n mile/h = (1 852/3 600) m/s (只用于航行)
能	电子伏	eV	1 eV \approx 1.602 177 \times 10 ⁻¹⁹ J
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1 tex = 10 ⁻⁶ kg/m
面积	公顷	hm ²	1 hm ² = 10 ⁴ m ²

注: 1. 平面角单位度、分、秒的符号, 在组合单位中应采用(°)、(')、(")的形式。

例如: 不用°/s, 而用(')/s。

2. 升的两个符号属同等地位, 可任意选用。

3. 公顷的国际通用符号为 ha。

1.3 法定计算单位使用方法

(1) 法定单位的名称

1) 组合单位的中文名称与其符号表示的顺序一致。符号中的乘号没有对应的名称, 除号的对应名称为“每”字, 无论分母中有几个单位, “每”字只出现一次。

例如: 质量热容单位的符号是 J/(kg·K)。其单位名称是“焦耳每千克开尔文”, 而不是“每千克开尔文焦耳”或“焦耳每千克每开尔文”。

2) 乘方形式的单位名称, 其顺序应是指指数名称在前, 单位名称在后。相应的指数名称由数字加“次方”二字而成。

例如: 截面二次矩的单位 m⁴ 的名称为“四次方米”。

3) 如果长度的 2 次和 3 次幂是表示面积和体积, 则相应的指数名称为“平方”和“立方”, 并置于长度单位之前, 否则应称为“二次方”和“三次方”。

例如: 体积单位 dm³ 的名称是“立方分米”, 而断面系数单位 m³ 的名称是“三次方米”。

4) 书写单位名称时不加任何表示乘或除的符号或其他符号。

例如: 电阻率单位 $\Omega \cdot m$ 的名称是“欧姆米”而不是“欧姆·米”、“欧姆·米”, “[欧姆][米]”等。

例如: 密度单位 kg/m³ 的名称为“千克每立方米”而不是“千克/立方米”。

(2) 法定单位和词头的符号

1) 在初中、小学课本和普通书刊中有必要时, 可将单位的简称(包括带有词头的单位简称)作为符号使用, 这样的符号称为“中文符号”。

2) 法定单位和词头的符号, 不论拉丁字母或希腊字母, 一律用正体, 不附省略点, 且无复数形式。

3) 单位符号的字母一般用小写体, 若单位名称来源于人名, 则其符号的第一个字母用大写体。

例如: 时间单位“秒”的符号是 s。

例如: 压力、压强的单位“帕斯卡”的符号是 Pa。

4) 词头符号的字母当其所表示的因数小于 10⁶ 时, 一律用小写体, 大于或等于 10⁶ 时, 用大写体。

5) 由两个以上单位相乘构成的组合单位,

其符号有下列两种形式： $N\cdot m$ ， Nm 。

若组合单位符号中某单位的符号同时又是某词头的符号，并有可能发生混淆时，则应尽量将它置于右侧。

例如：力矩单位“牛顿米”的符号应写成 Nm ，而不宜写成 mN ，以免误解为“毫牛顿”。

6) 由两个以上单位相乘所构成的组合单位，其中文符号只用一种形式，即用居中圆点代表乘号。

例如：动力黏度单位“帕斯卡秒”的中文符号是“帕·秒”而不是“帕秒”、“〔帕〕〔秒〕”、“帕·〔秒〕”、“帕-秒”、“(帕)(秒)”、“帕斯卡·秒”等。

7) 由两个以上单位相除所构成的组合单位，其符号可用下列三种形式之一：

$$kg/m^3 \quad kg\cdot m^{-3} \quad kgm^{-3}$$

当可能发生误解时，应尽量用居中圆点或斜线(/)的形式。

例如：速度单位“米每秒”的法定符号用 $m\cdot s^{-1}$ 或 m/s ，而不用 ms^{-1} ，以免误解为“每毫秒”。

8) 由两个以上单位相除所构成的组合单位，其中文符号可采用以下两种形式之一：

$$\text{千克}/\text{米}^3 \quad \text{千克}\cdot\text{米}^{-3}$$

9) 在进行运算时，组合单位中的除号可用水平横线表示。

例如：速度单位可以写成 $\frac{m}{s}$ 或 $\frac{\text{米}}{\text{秒}}$ 。

10) 分子无量纲而分母有量纲的组合单位(即分子为1的组合单位)的符号，一般不用分式而用负数幂的形式。

例如：波数单位的符号是 m^{-1} ，而不是 $1/m$ 。

11) 在用斜线表示相除时，单位符号的分子和分母都与斜线处于同一行内。当分母中包含两个以上单位符号时，整个分母应加圆括号。在一个组合单位的符号中，除加括号避免混淆外，斜线不得多于一条。

例如：热导率单位的符号是 $W/(m\cdot K)$ ，而不是 $W/m\cdot K$ 或 $W/K/m$ 。

12) 词头的符号和单位的符号之间不得有间隙，也不加表示相乘的任何符号。

13) 单位和词头的符号应按其名称或者简称读音，而不得按字母读音。

14) 摄氏温度的单位“摄氏度”的符号 $^{\circ}C$ ，

可作为中文符号使用，可与其他中文符号构成组合形式的单位。

15) 非物理量的单位(如：件、台、人、圆等)可用汉字与符号构成组合形式的单位。

(3) 法定单位和词头的使用规则

1) 单位与词头的名称，一般只宜在叙述性文字中使用。单位和词头的符号，在公式、数据表、曲线图、刻度盘和产品铭牌等需要简单明了表示的地方使用，也可用于叙述性文字中。

应优先采用符号。

2) 单位的名称或符号必须作为一个整体使用，不得拆开。

例如：摄氏温度单位“摄氏度”表示的量值应写成并读成“20 摄氏度”，不得写成并读成“摄氏 20 度”。

例如：30 km/h 应读成“三十千米每小时”。

3) 选用 SI 单位的倍数单位或分数单位，一般应使量的数值处于 0.1~1 000 范围内。

例如： $1.2\times 10^4 N$ 可以写成 12 kN。

0.003 94 m 可以写成 3.94 mm。

11 401 Pa 可以写成 11.401 kPa。

$3.1\times 10^{-8} s$ 可以写成 31 ns。

某些场合习惯使用的单位可以不受上述限制。

例如：大部分机械制图使用的长度单位可以用“mm(毫米)”；导线截面积使用的面积单位可以用“ mm^2 (平方毫米)”。

在同一个量的数值表中或叙述同一个量的文章中，为对照方便而使用相同的单位时，数值不受限制。

词头 h、da、d、c(百、十、分、厘)，一般用于某些长度、面积和体积的单位中，但根据习惯和方便也可用于其他场合。

4) 有些非法定单位，可以按习惯用 SI 词头构成倍数单位或分数单位。

例如：mCi、mGal、mR 等。

法定单位中的摄氏度以及非十进制的单位，如平面角单位“度”、“〔角〕秒”与时间单位“分”、“时”、“日”等，不得用 SI 词头构成倍数单位或分数单位。

5) 不得使用重叠的词头。

例如：应该用 nm，不应该用 $m\mu m$ ；应该用 am，不应该用 $\mu\mu m$ ，也不应该用 nm 。

6) 亿(10^8)、万(10^4)等我国习惯用的数

词, 仍可使用, 但不是词头。习惯使用的统计单位, 如万公里可记为“万 km”或“ 10^4 km”; 万吨公里可记为“万 t·km”或“ 10^4 t·km”。

7) 只是通过相乘构成的组合单位在加词头时, 词头通常加在组合单位中的第一个单位之前。

例如: 力矩的单位 kN·m, 不宜写成 N·km。

8) 只通过相除构成的组合单位或通过乘和除构成的组合单位在加词头时, 词头一般应加在分子中的第一个单位之前, 分母中一般不用词头。但质量的 SI 单位 kg, 这里不作为有词头的单位对待。

例如: 摩尔内能单位 kJ/mol 不宜写成 J/mmol。

例如: 比能单位可以是 J/kg。

9) 当组合单位分母是长度、面积和体积单位时, 按习惯与方便, 分母中可以选用词头构成倍数单位或分数单位。

例如: 密度的单位可以选用 g/cm^3 。

10) 一般不在组合单位的分子分母中同时采用词头, 但质量单位 kg 这里不作为有词头对待。

例如: 电场强度的单位不宜用 kV/mm, 而用 mV/m; 质量摩尔浓度可以用 mmol/kg。

11) 倍数单位和分数单位的指数, 指包括词头在内的单位的幂。

例如: $1 \text{ cm}^2 = 1 (10^{-2} \text{ m})^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 而 $1 \text{ cm}^2 \neq 10^{-2} \text{ m}^2$ 。 $1 \mu\text{s}^{-1} = 1 (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

12) 在计算中, 建议所有量值都采用 SI 单位表示, 词头应以相应的 10 的幂代替 (kg 本身是 SI 单位, 故不应换成 10^3 g)。

13) 将 SI 词头的部分中文名称置于单位名称的简称之前构成中文符号时, 应注意避免与中文数词混淆, 必要时应使用圆括号。

例如: 旋转频率的量值不得写为 3 千秒⁻¹。

如表示“三每千秒”, 则应写为“3 (千秒)⁻¹”(此处“千”为词头);

如表示“三千每秒”, 则应写为“3 千(秒)⁻¹”(此处“千”为数词)。

例如: 体积的量值不得写为“2 千米³”。

如表示“二立方千米”, 则应写为“2 (千米)³”(此处“千”为词头);

如表示“二千方立方米”, 则应写为“2 千(米)³”(此处“千”为数词)。

2 常用物理量符号及其法定单位 (表 12.1-6)

表 12.1-6 常用物理量符号及其法定单位
(摘自 GB 3102.1~3102.7—1993)

量的名称及符号	单位名称及符号
空间和时间	
(平面)角 $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	弧度 rad 度 ° [角]分 ' [角]秒 "
立体角 Ω	球面度 sr
长度 l, L	米 m 海里 n mile
宽度 b	米 m
高度 h	米 m
厚度 d, δ	米 m
半径 r, R	米 m
直径 d, D	米 m
程长 s	米 m
面积 $A, (S)$	平方米 m^2
体积 V	立方米 m^3 升 L, l
时间, 时间间隔, 持续时间	秒 s 分 min [小]时 h 日, (天) d
角速度 ω	弧度每秒 rad/s
角加速度 α	弧度每二次方秒 rad/s^2
速度 v, c	米每秒 m/s
u, v, w	千米每小时 km/h 节 kn
加速度 a	米每二次方秒 m/s^2
周期及其有关现象	
周期 T	秒 s
时间常数 τ	秒 s
频率 f, ν	赫[兹] Hz
旋转频率, 转速 n	每秒 s^{-1} 转每分 r/min
角频率, 圆频率 ω	弧度每秒 rad/s
波长 λ	米 m
波数 σ	每米 m^{-1}
角波数 k	弧度每米 rad/m
阻尼系数 δ	每秒 s^{-1}
衰减系数 α	每米 m^{-1}
相位系数 β	每米 m^{-1}
传播系数 γ	每米 m^{-1}

续表 22.1-6

量的名称及符号	单位名称及符号
力 学	
质量	m 千克,(公斤) kg 吨 t
体积质量,[质量]密度	ρ 千克每立方米 kg/m ³ 吨每立方米 t/m ³ 千克每升 kg/L
相对[质量]密度	d — 1
质量体积,比体积	V 立方米每千克 m ³ /kg
线密度	ρ_l 千克每米 kg/m 特[克斯] tex
面密度	$\rho_A, (\rho_s)$ 千克每平方米 kg/m ²
动量	p 千克米每秒 kg·m/s
动量矩,角动量	L 千克二次方米每秒 kg·m ² /s
转动惯量,(惯性矩)	$J, (I)$ 千克二次方米 kg·m ²
力	F 牛[顿] N
重量	$W, (P, G)$ 牛[顿] N
力矩,力偶矩	M 牛[顿]米 N·m
转矩	M, T 牛[顿]米 N·m
压力,压强	p 帕[斯卡] Pa
正应力	σ 帕[斯卡] Pa
切应力	τ 帕[斯卡] Pa
线应变,(相对变形)	ϵ, e — 1
切应变	γ — 1
体应变	θ — 1
泊松比	μ, ν — 1
弹性模量	E 帕[斯卡] Pa
切变模量	G 帕[斯卡] Pa
体积模量	K 帕[斯卡] Pa
[体积]压缩率	κ 每帕[斯卡] Pa ⁻¹
截面二次矩	$I_x, (I)$ 四次方米 m ⁴
截面二次极矩	I_p 四次方米 m ⁴
截面系数	W, Z 三次方米 m ³
静摩擦系数	$\mu_s, (f_s)$ — 1
动摩擦因数	$\mu, (f)$ — 1
[动力]黏度	$\eta, (\mu)$ 帕[斯卡]秒 Pa·s
运动黏度	ν 二次方米每秒 m ² /s
表面张力	γ, σ 牛[顿]每米 N/m
功	$W, (A)$ 焦[耳] J 电子伏 eV
能[量]	E 同功的单位
势能,位能	$E_p, (V)$ 同功的单位
动能	$E_k, (T)$ 同功的单位
功率	P 瓦[特] W
质量流量	q_m 千克每秒 kg/s
体积流量	q_v 立方米每秒 m ³ /s
效 率	η — 1

续表 12.1-6

量的名称及符号	单位名称及符号
热 学	
热力学温度	$T, (\Theta)$ 开[尔文] K
摄氏温度	t, θ 摄氏度 ℃
线[膨]胀系数	α_l 每开[尔文] K ⁻¹
体[膨]胀系数	$\alpha_v, (\alpha, \gamma)$ 每开[尔文] K ⁻¹
热,热量	Q 焦[耳] J
热流量	Φ 瓦[特] W
热流[量]密度	q, φ 瓦[特]每平方米 W/m ²
热导率,(导热系数)	λ, κ 瓦[特]每米开[尔文] W/(m·K)
传热系数	$K, (k)$ 瓦[特]每平方米开[尔文] W/(m ² ·K)
表面传热系数	$h, (\alpha)$ 瓦[特]每平方米开[尔文] W/(m ² ·K)
热扩散率	a 平方米每秒 m ² /s
热容	C 焦[耳]每开[尔文] J/K
质量热容	c 焦[耳]每千克开[尔文] J/(kg·K)
质量热容比	γ — 1
焓	S 焦[耳]每开[尔文] J/K
比焓,质量焓	s 焦[耳]每千克开[尔文] J/(kg·K)
热力学能	U 焦[耳] J
焓	H 焦[耳] J
亥姆霍兹自由能	A, F 焦[耳] J
吉布斯自由能	G 焦[耳] J
质量热力学能	u 焦[耳]每千克 J/kg
质量焓	h 焦[耳]每千克 J/kg
电学和磁学	
电流	I 安[培] A
电荷[量]	Q 库[仑] C
电荷[体]密度	$\rho, (\eta)$ 库[仑]每立方米 C/m ³
电荷面密度	σ 库[仑]每平方米 C/m ²
电场强度	E 伏[特]每米 V/m
电位,(电势)	V, φ 伏[特] V
电位差,(电势差),电压	伏[特] V
电动势	$U, (V)$ 伏[特] V
电通[量]密度	D 库[仑]每平方米 C/m ²
电通[量]	Ψ 库[仑] C
电容	C 法[拉] F
介电常数,(电容率)	ϵ 法[拉]每米 F/m
相对介电常数,(相对电容率)	ϵ_r — 1
电极化率	χ, χ_e — 1
电极化强度	P 库[仑]每平方米 C/m ²
电偶极矩	$p, (p_e)$ 库[仑]米 C·m
电流密度	$J, (S)$ 安[培]每平方米 A/m ²
电流线密度	$A, (a)$ 安[培]每米 A/m
[直流]电阻	R 欧[姆] Ω
电抗	X 欧[姆] Ω

续表 12.1-6

量的名称及符号	单位名称及符号	
(直流)电导	G	西[门子] S
电纳	B	西[门子] S
导纳,(复[数]导纳)	Y	西[门子] S
电阻率	ρ	欧[姆]米 $\Omega \cdot m$
电导率	γ, σ	西[门子]每米 S/m
自感	L	亨[利] H
互感	M, L_{12}	亨[利] H
耦合因数,(耦合系数)	$k, (\kappa)$	— 1
漏磁因数,(漏磁系数)	σ	— 1
绕组的匝数	N	— 1
相数	m	— 1
[交流]电阻	R	欧[姆] Ω
品质因数	Q	— 1
相[位]差,相[位]移	φ	弧度 rad
[有功]功率	P	瓦[特] W
[有功]电能[量]	W	焦[尔] J
磁场强度	H	安[培]每米 A/m
磁通势,磁动势	F, F_m	安[培] A
磁位差,(磁势差)	U_m	安[培] A
磁通[量]密度,	B	特[斯拉] T
磁感应强度		
磁通[量]	Φ	韦[伯] Wb
磁矢位,(磁矢势)	A	韦[伯]每米 Wb/m
坡印廷矢量	S	瓦[特]每平方米 W/m^2
磁导率	μ	亨[利]每米 H/m
相对磁导率	μ_r	— 1
磁化率	$\kappa, (\chi_m, \chi)$	— 1
[面]磁矩	m	安[培]平方米 $A \cdot m^2$
磁化强度	$M, (H_i)$	安[培]每米 A/m
磁极化强度	$J, (B_i)$	特[斯拉] T
磁阻	R_m	每亨[利] H^{-1}
磁导	$\Lambda, (P)$	亨[利] H
光及有关电磁辐射		
辐[射]能 $Q, W, (U, Q_e)$		焦[耳] J
辐[射]功率,辐[射能]通量 $P, \Phi, (\Phi_e)$		瓦[特] W
辐[射]强度 $I, (I_e)$	瓦[特]每球面度	W/sr
辐[射]亮度,辐射度 $L, (L_e)$	瓦[特]每球面度平方米	$W/(sr \cdot m^2)$
辐[射]出[射]度 $M, (M_e)$	瓦[特]每平方米	W/m^2
辐[射]照度 $E, (E_e)$	瓦[特]每平方米	W/m^2
发射率	ϵ	— 1
光通量	$\Phi, (\Phi_e)$	流[明] lm
光量	$Q, (Q_e)$	流[明]秒 $lm \cdot s$
发光强度	$I, (I_e)$	坎[德拉] cd

续表 12.1-6

量的名称及符号	单位名称及符号	
[光]亮度 $L, (L_e)$	坎[德拉]每平方米	cd/m^2
光出射度 $M, (M_e)$	流[明]每平方米	lm/m^2
[光]照度 $E, (E_e)$	勒[克斯]	lx
曝光量	H	勒[克斯]秒 $lx \cdot s$
光视效能	K	流[明]每瓦[特] lm/W
光谱光视效能 $K(\lambda)$	流[明]每瓦[特]	lm/W
最大光谱光视效能 K_m	流[明]每瓦[特]	lm/W
光谱光视效率, (视见函数)	$V(\lambda)$	— 1
光谱吸收比,	$a(\lambda)$	— 1
光谱吸收因数		
光谱反射比,	$\rho(\lambda)$	— 1
光谱反射因数		
光谱透射比,	$\tau(\lambda)$	— 1
光谱透射因数		
线性吸收系数	a	每米 m^{-1}
线性衰减系数,	μ, μ_t	每米 m^{-1}
线性消光系数		
摩尔吸收系数	κ	平方米每摩[尔] m^2/mol
折射率	n	— 1
声学		
静压 $p, (P_0)$	帕[斯卡]	Pa
(瞬时)声压 p	帕[斯卡]	Pa
质点速度 u, v	米每秒	m/s
体积流量 U	立方米每秒	m^3/s
声速 c	米每秒	m/s
声能密度 $w, (e), (D)$	焦[耳]每立方米	J/m^3
声功率 W, P	瓦[特]	W
声强[度] I, J	瓦[特]每平方米	W/m^2
声阻抗率 Z, Z_s	帕[斯卡]秒每米	$Pa \cdot s/m$
声阻抗 Z, Z_v	帕[斯卡]秒每立方米	$Pa \cdot s/m^3$
力阻抗 Z_m	牛[顿]秒每米	$N \cdot s/m$
声功率级 L_w	贝[尔]	B
声压级 L_p	贝[尔]	B
声强级 L_I	贝[尔]	B
阻尼系数 δ	每秒	s^{-1}
反射因数, (反射系数)	$\gamma, (\rho)$	— 1
透射因数,(透射系数) τ	—	1
吸声因数,(吸声系数) α	—	1
隔声量 R	贝[尔]	B
混响时间 $T, (T_{60})$	秒	s

注: 1. 物理量名称和单位名称中带方括号的字可以省略。

2. 圆括号中的名称为习惯的同义词; 圆括号中的符号为备用符号。

3 常见非法定计量单位的换算 (表 12.1-7)

表 12.1-7 常见非法定计量单位的换算

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算		
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号			
长 度	米	m	费密		1 费密 = 1 fm = 10^{-15} m		
	海里	n mile	埃	Å	1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m		
			英尺	ft	1 ft = 0.304 8 m		
			英寸	in	1 in = 0.025 4 m		
			英里	mile	1 mile = 1 609.344 m		
			密耳	mil	1 mil = 25.4×10^{-6} m		
面 积	平方米	m ²	公亩	a	1 a = 10^2 m ²		
			公顷	ha	1 ha = 10^4 m ²		
			平方英尺	ft ²	1 ft ² = 0.092 903 0 m ²		
			平方英寸	in ²	1 in ² = $6.451 6 \times 10^{-4}$ m ²		
			平方英里	mile ²	1 mile ² = $2.589 99 \times 10^6$ m ²		
体 积	立方米	m ³	立方英尺	ft ³	1 ft ³ = 0.028 316 8 m ³		
	升	L, l	立方英寸	in ³	1 in ³ = $1.638 71 \times 10^{-5}$ m ³		
			英加仑	UKgal	1 UKgal = 4.546 09 dm ³		
			美加仑	USgal	1 USgal = 3.785 41 dm ³		
质 量	千克 (公斤)	kg	磅	lb	1 lb = 0.453 592 37 kg		
	吨	t	英担	cwt	1 cwt = 50.802 3 kg		
	原子质量单位	u	英吨	ton	1 ton = 1 016.05 kg		
			短吨	sh ton	1 sh ton = 907.185 kg		
			盎司	oz	1 oz = 28.349 5 g		
			格令	gr, gn	1 gr = 0.064 798 9 kg		
			夸特	qr, qtr	1 qr = 12.700 6 kg		
			米制克拉		1 米制克拉 = 2×10^{-4} kg		
			温度	开 [尔文]	K		表示温度差和温度间隔时: 1℃ = 1K, 1°F = $\frac{5}{9}$ ℃
			摄氏度	℃			温度值换算式: $|k| = \begin{cases} |t| + 273.15 \\ \frac{5}{9}(|f| + 459.67) \\ \frac{5}{9}|r| \end{cases}$ $|t| = \begin{cases} |k| - 273.15 \\ \frac{5}{9}(|f| - 32) \\ \frac{5}{9}(|r| - 491.67) \end{cases}$
		华氏度	°F				
		兰氏度	°R	|k| 表示温度的数值, 单位为 K |t| 表示温度的数值, 单位为 ℃ |f| 表示温度的数值, 单位为 °F |r| 表示温度的数值, 单位为 °R			

续表 12.1-7

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
旋转速度	每秒 转每分	s^{-1} r/min		rpm	1 rpm = 1 r/min = (1/60) s^{-1}
力; 重力	牛(顿)	N	达因 千克力 磅力 吨力	dyn kgf lbf tf	1 dyn = 10^{-5} N 1 kgf = 9.806 65 N 1 lbf = 4.448 22 N 1 tf = 9.806 65 $\times 10^3$ N
压力、压强; 应力	帕(斯卡)	Pa	巴 千克力每平方米 毫米水柱 毫米汞柱 托 工程大气压 标准大气压 磅力每平方英尺 磅力每平方英寸	bar kgf/cm ² mmH ₂ O mmHg Torr at atm lbf/ft ² lbf/in ²	1 bar = 10^5 Pa 1 kgf/cm ² = 0.098 066 5 MPa 1 mmH ₂ O = 9.806 65 Pa 1 mmHg = 133.322 Pa 1 Torr = 133.322 Pa 1 at = 980 66.5 Pa = 98.066 5 kPa 1 atm = 101 325 Pa = 101.325 kPa 1 lbf/ft ² = 47.880 3 Pa 1 lbf/in ² = 6.894 76 kPa
能量; 功; 热	焦(耳) 电子伏 千瓦小时	J eV kW·h	尔格 千克力米 英马小时 卡 热化学卡 马力小时 电工马小时 英热单位	erg kgf·m hp·h cal cal _{th} Btu	1 erg = 10^{-7} J 1 kgf·m = 9.806 65 J 1 hp·h = 2.684 52 MJ 1 cal = 4.186 8 J 1 cal _{th} = 4.184 0 J 1 马力小时 = 2.647 79 MJ 1 电工马小时 = 2.685 60 MJ 1 Btu = 1 055.06 J = 1.055 06 kJ 1 kW·h = 3.6 MJ
功率, 辐(射能)量	瓦(特)	W	千克力米每秒 马力, 米制马 力 英马力 电工马力 卡每秒 千卡每小时 热化学卡每秒 伏安 乏 英热单位每小时	kgf·m/s 法 ch, CV; 德 PS hp cal/s kcal/h cal _{th} /s V·A var Btu/h	1 kgf·m/s = 9.806 65 W 1 ch = 735.499 W 1 hp = 745.700 W 1 电工马力 = 746 W 1 cal/s = 4.186 8 W 1 kcal/h = 1.163 W 1 cal _{th} /s = 4.184 W 1 V·A = 1 W 1 var = 1 W 1 Btu/h = 0.293 071 W

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
电 导	西[门子]	S	姆欧	U	1 U = 1 S
磁通[量]	韦[伯]	Wb	麦克斯韦	Mx	1 Mx = 10^{-8} Wb
磁通[量]密度、 磁感应强度	特[斯拉]	T	高斯	Gs, G	1 Gs = 10^{-4} T
[光]照度	勒[克斯]	lx	英尺烛光	lm/ft ²	1 lm/ft ² = 10.76 lx
速 度	米每秒 节 千米每小时 米每分	m/s kn km/h m/min	英尺每秒 英寸每秒 英里每小时	ft/s in/s mile/h	1 ft/s = 0.304 8 m/s 1 in/s = 0.025 4 m/s 1 mile/h = 0.447 04 m/s 1 km/h = 0.277 778 m/s 1 m/min = 0.016 666 7 m/s
加速度	米每二次方秒	m/s ²	英尺每二次方秒 伽	ft/s ² Gal	1 ft/s ² = 0.304 8 m/s ² 1 Gal = 10^{-2} m/s ²
线密度	千克每米 特[克斯]	kg/m tex	旦[尼尔] 磅每英尺 磅每英寸	den lb/ft lb/in	1 den = 0.111 112 × 10^{-6} kg/m 1 lb/ft = 1.488 16 kg/m 1 lb/in = 17.858 0 kg/m
[质量]密度	千克每立方米	kg/m ³	磅每立方英尺 磅每立方英寸	lb/ft ³ lb/in ³	1 lb/ft ³ = 16.018 5 kg/m ³ 1 lb/in ³ = 27 679.9 kg/m ³
比体积 (质量体积)	立方米每千克	m ³ /kg	立方英尺每磅 立方英寸每磅	ft ³ /lb in ³ /lb	1 ft ³ /lb = 0.062 428 0 m ³ /kg 1 in ³ /lb = 3.612 73 × 10^{-5} m ³ /kg
质量流量	千克每秒	kg/s	磅每秒 磅每小时	lb/s lb/h	1 lb/s = 0.453 592 kg/s 1 lb/h = 1.259 98 × 10^{-4} kg/s
体积流量	立方米每秒 升每秒	m ³ /s L/s	立方英尺每秒 立方英寸每小时	ft ³ /s in ³ /h	1 ft ³ /s = 0.028 316 8 m ³ /s 1 in ³ /h = 4.551 96 × 10^{-6} L/s
转动惯量 (惯性矩)	千克二次方米	kg·m ²	磅二次方英尺 磅二次方英寸	lb·ft ² lb·in ²	1 lb·ft ² = 0.042 140 1 kg·m ² 1 lb·in ² = 2.926 40 × 10^{-4} kg·m ²
动 量	千克米每秒	kg·m/s	磅英尺每秒	lb·ft/s	1 lb·ft/s = 0.138 255 kg·m/s
角动量、动量 矩	千克二次方米 每秒	kg·m ² /s	磅二次方英尺每 秒	lb·ft ² /s	1 lb·ft ² /s = 0.042 140 1 kg·m ² /s
力 矩	牛顿米	N·m	千克力米 磅力英尺 磅力英寸	kgf·m lbf·ft lbf·in	1 kgf·m = 9.806 65 N·m 1 lbf·ft = 1.355 82 N·m 1 lbf·in = 0.112 985 N·m
[动力]黏度	帕斯卡秒	Pa·s	泊 厘泊 千克力秒每平方 米 磅力秒每平方英 尺 磅力秒每平方英 寸	P, Po cP kgf·s/m ² lbf·s/ft ² lbf·s/in ²	1 P = 10^{-1} Pa·s 1 cP = 10^{-3} Pa·s 1 kgf·s/m ² = 9.806 65 Pa·s 1 lbf·s/ft ² = 47.880 3 Pa·s 1 lbf·s/in ² = 689 4.76 Pa·s

续表 12.1-7

物理量名称	法定计量单位		非法定计量单位		单位换算
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
运动黏度, 热扩散率	二次方米每秒	m^2/s	斯〔托克斯〕	St	$1 \text{ St} = 10^{-4} m^2/s$
			厘斯〔托克斯〕	cSt	$1 \text{ cSt} = 10^{-6} m^2/s$
			二次方英尺每秒	ft^2/s	$1 \text{ ft}^2/s = 9.29030 \times 10^{-2} m^2/s$
			二次方英寸每秒	in^2/s	$1 \text{ in}^2/s = 6.4516 \times 10^{-4} m^2/s$
比能, 质量能	焦耳每千克	J/kg	千卡每千克	kcal/kg	$1 \text{ kcal/kg} = 4186.8 \text{ J/kg}$
			热化学千卡每千克	kcal _{th} /kg	$1 \text{ kcal}_{th}/\text{kg} = 4184 \text{ J/kg}$
			英热单位每磅	Btu/lb	$1 \text{ Btu/lb} = 2326 \text{ J/kg}$
比热容, 比嫡, 质量热容	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)	千卡每千克开尔文	kcal/(kg·K)	$1 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot\text{K}) = 4186.8 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
			热化学千卡每千克开尔文	kcal _{th} /(kg·K)	$1 \text{ kcal}_{th}/(\text{kg}\cdot\text{K}) = 4184 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
			英热单位每磅华氏度	Btu/(lb·°F)	$1 \text{ Btu}/(\text{lb}\cdot^{\circ}\text{F}) = 4186.8 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
传热系数	瓦特每平方米开尔文	W/(m ² ·K)	卡每平方厘米秒开尔文	cal/(cm ² ·s·K)	$1 \text{ cal}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K}) = 41868 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
			千卡每平方米小时开尔文	kcal/(m ² ·h·K)	$1 \text{ kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K}) = 1.163 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
			英热单位每平方英尺小时华氏度	Btu/(ft ² ·h·°F)	$1 \text{ Btu}/(\text{ft}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{F}) = 5.67826 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
热导率 (导热系数)	瓦特每米开尔文	W/(m·K)	卡每厘米开尔文	cal/(cm·s·K)	$1 \text{ cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}) = 418.68 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
			千卡每米小时开尔文	kcal/(m·h·K)	$1 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K}) = 1.163 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
			英热单位每英尺小时华氏度	Btu/(ft·h·°F)	$1 \text{ Btu}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{F}) = 1.73073 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

第 2 章 常用资料和数据

1 优先数系和标准尺寸 (表 12.2-1, 表 12.2-2)

表 12.2-1 优先数系 (摘自 GB/T 321—1980)

	基本系列				化整值	优先数的序号 N			计算值	基本系列的数值与计算值之间的误差 (%)	对数尾数	补充系列 R80		衍生系列及复合系列	
	R5	R10	R20	R40		从 0.1 至 1	从 1 至 10	从 10 至 100				1.00	3.15		
	数 值	1.00	1.00	1.00		1.00		-40				0	40		1.000 0	0	000	1.00	3.15	衍生系列： 是在基本系列中，递次隔 2、3、4、……或几个项数选取优先数值导出的系列。例如：在 R5 系列中，每隔 1 项选取一项可得 R5/2 系列；在 R10 系列中，每隔 3 项选取一项可得 R10/4 系列；在 R20 系列中，每隔 6 项选取一项可得 R20/7 系列；在 R40 系列中，每隔 5 项选取一项，可得 R40/6 系列 复合系列： 是由几个不同相对差的分段组成的一个系列。例如：复合系列 R40/7 (0.4…2.2)、R40/6 (2.2…25)、R40/5 (25…80)、R10 (80…100)；其中第一段的相对差为 50%；第二段的相对差为 40%；第三段的相对差为 32%；第四段的相对差为 25%
				1.06	1.05	-39	1	41	1.059 3	+0.07	025	1.03	3.25		
				1.12	1.1	-38	2	42	1.122 0	-0.18	050	1.06	3.35		
				1.18	1.2	-37	3	43	1.188 5	-0.71	075	1.09	3.45		
			1.25	1.25	(1.2)	-36	4	44	1.258 9	-0.71	100	1.12	3.55		
				1.32	1.3	-35	5	45	1.333 5	-1.01	125	1.15	3.65		
			1.40	1.40		-34	6	46	1.412 5	-0.88	150	1.18	3.75		
				1.50		-33	7	47	1.496 2	+0.25	175	1.22	3.87		
			1.60	1.60	1.60	(1.5) [*]	-32	8	48	1.584 9	+0.95	200	1.25	4.00	
					1.70		-31	9	49	1.678 8	+1.26	225	1.28	4.12	
				1.80	1.80		-30	10	50	1.778 3	+1.22	250	1.32	4.25	
					1.90		-29	11	51	1.883 6	+0.87	275	1.36	4.37	
			2.00	2.00	2.00		-28	12	52	1.995 3	+0.24	300	1.40	4.50	
					2.12	2.1	-27	13	53	2.113 5	+0.31	325	1.45	4.62	
		2.24		2.24	2.2	-26	14	54	2.238 7	+0.06	350	1.50	4.75		
				2.36	2.4	-25	15	55	2.371 4	-0.48	375	1.55	4.87		
		2.50	2.50	2.50		-24	16	56	2.511 9	-0.47	400	1.60	5.00		
				2.65	2.6	-23	17	57	2.660 7	-0.40	425	1.65	5.15		
				2.80	2.80	-22	18	58	2.818 4	-0.65	450	1.70	5.30		
			3.00			-21	19	59	2.985 4	+0.49	475	1.75	5.45		
				3.15	3.15	(3); 3.2	-20	20	60	3.162 3	-0.39	500	1.80	5.60	
			3.35		3.4	-19	21	61	3.349 7	+0.01	525	1.85	5.80		
			3.55		3.55	(3.5); 3.6	-18	22	62	3.548 1	+0.05	550	1.90	6.00	
				3.75	3.8	-17	23	63	3.758 4	-0.22	575	1.95	6.15		
		4.00	4.00	4.00		-16	24	64	3.981 1	+0.47	600	2.00	6.30		
				4.25	4.2	-15	25	65	4.217 0	+0.78	625	2.06	6.50		
				4.50	4.50		-14	26	66	4.466 8	+0.74	650	2.12	6.70	
			4.75		4.8	-13	27	67	4.731 5	+0.39	675	2.18	6.90		
			5.00	5.00	5.00		-12	28	68	5.011 9	-0.24	700	2.24	7.10	
					5.30		-11	29	69	5.308 8	-0.17	725	2.30	7.30	
		5.60		5.60 (5.5)	-10	30	70	5.623 4	-0.42	750	2.36	7.50			
		6.30	6.30	6.30	(6.0)	-8	32	72	6.309 6	-0.15	800	2.50	8.00		
				6.70		-7	33	73	6.683 4	+0.25	825	2.58	8.25		
			7.10	7.10	(7.0)	-6	34	74	7.079 5	+0.29	850	2.65	8.50		
				7.50		-5	35	75	7.498 9	+0.01	875	2.72	8.75		

续表 12.2-1

基本系列				化整值	优先数的序号 N			计算值	基本系列的数值与计算值之间的误差 (%)	对数尾数	补充系列 R80		派生系列 及复合系列
R5	R10	R20	R40		从 0.1 至 1	从 1 至 10	从 10 至 100				R80	R80	
数值	6.30	8.00	8.00	8.00	-4	36	76	7.943 3	+0.71	900	2.80	9.00	
			8.50		-3	37	77	8.414 0	+1.02	925	2.90	9.25	
		9.00	9.00		-2	38	78	8.912 5	+0.98	950	3.00	9.50	
			9.50		-1	39	79	9.440 6	+0.63	975	3.07	9.75	
10.00	10.00	10.00	10.00	0	40	80	10.000	0	000				
公比	$\sqrt[3]{10}$ ≈1.6	$\sqrt[10]{10}$ ≈1.25	$\sqrt[20]{10}$ ≈1.12	$\sqrt[40]{10}$ ≈1.06							$\sqrt[80]{10}$ ≈1.03		
主要特性	1. 基本系列中任意两项之积和商, 任意一项的整数乘方或开方, 都为优先数, 其运算应通过序号 N 去实现 2. 大于 10 或小于 1 的优先数均可用 10、100、1 000…或用 0.1、0.01…乘以基本系列或补充系列优先数求得												

注: 1. 序号 N 的运用

(1) 求优先数之积 当求优先数 M_1 、 M_2 之积时, 只需将这两个优先数相应的序号相加, 求得新序号, 与之对应的优先数为所求之值。

例如: 求两优先数之积: 3.15×1.6

对应序号之和: $20 + 8 = 28$

对应于序号 28 之优先数为 5 (相当于 3.15×1.6 之优先数)。

(2) 求优先数之商 当求优先数 M_1 、 M_2 之商时, 只需将这两个优先数相应的序号相减, 求得新序号, 与之对应的优先数为所求之值。

例如: 求两优先数之商: $4.25 \div 25$

对应序号之差: $25 - 56 = -31$

对应于序号 -31 之优先数为 0.17 (相当于 $4.25 \div 25$ 之优先数)。

(3) 求优先数之乘方 当求优先数 M 之 n 次乘方 (M^n) 时, 只需将乘方指数 n 乘以 M 的相应序号求得新序号, 与之对应的优先数为所求之值。

例如: 求优先数之平方: $(1.18)^2$

对应序号与乘方指数之积: $3 \times 2 = 6$

对应于序号 6 之优先数为 1.4 (相当于 1.18^2 之优先数)。

(4) 求优先数之开方 当求优先数 M 之 n 次方根 ($\sqrt[n]{M}$) 时, 只需将 M 的相应序号除以根指数求得新序号, 与之对应的优先数为所求之值。

例如: 求优先数之平方根: $\sqrt{0.16}$

对应序号与根指数之商: $-32 \div 2 = -16$

对应于序号 -16 之优先数为 0.4 (相当于 $\sqrt{0.16}$ 之优先数)。

2. 化整值中括号内尺寸, 特别是标有 * 号的数值 1.5, 应尽可能不用。

3. N 是优先数在 R40 系列中序号 N_{40} 的简写。

续表 12.2-2

1 000 ~ 20 000 mm					
R					
R10	R20	R40	R10	R20	R40
4 000	4 000	3 750	20 000	20 000	19 000
		4 000			20 000
	4 250				
	4 500				
	4 500	4 750			

注：1. Ra 系列中的黑体字，为 R 系列相应各项优先数的化整值。

2. 本标准规定 0.01 ~ 20 000 mm 范围内机械制造业中常用的标准尺寸系列，适用于有互换性或系列化要求的主要尺寸。其他结构尺寸也应尽量采用。

2 常用材料弹性模量及泊松比 (表 12.2-3)

表 12.2-3 常用材料弹性模量及泊松比

名称	弹性模量 E/ GPa	切变模量 G/ GPa	泊松比 ν	名称	弹性模量 E/ GPa	切变模量 G/ GPa	泊松比 ν
灰铸铁	118 ~ 126	44.3	0.3	轧制锌	82	31.4	0.27
球墨铸铁	173		0.3	铅	16	6.8	0.42
碳钢、铸碳钢、合金钢	206	79.4	0.3	玻璃	55	1.96	0.25
铸钢	202		0.3	有机玻璃	2.35 ~ 29.42		
轧制纯铜	108	39.2	0.31 ~ 0.34	橡胶	0.007 84		0.47
冷拔纯铜	127	48.0		电木	1.96 ~ 2.94	0.69 ~ 2.06	0.35 ~ 0.38
轧制磷锡青铜	113	41.2	0.32 ~ 0.35	夹布酚醛塑料	3.92 ~ 8.83		
冷拔黄铜	89 ~ 97	34.3 ~ 36.3	0.32 ~ 0.42	赛璐珞	1.71 ~ 1.89	0.69 ~ 0.98	0.4
轧制锰青铜	108	39.2	0.35	尼龙 1010	1.07		
轧制铝	68	25.5 ~ 26.5	0.32 ~ 0.36	硬聚氯乙烯	3.14 ~ 3.92		0.34 ~ 0.35
拔制铝线	69			聚四氟乙烯	1.14 ~ 1.42		
铸铝青铜	103	41.1	0.3	低压聚乙烯	0.54 ~ 0.75		
铸锡青铜	103		0.3	高压聚乙烯	0.147 ~ 0.245		
硬铝合金	70	26.5	0.3	混凝土	13.73 ~ 39.2	4.9 ~ 15.69	0.1 ~ 0.18

3 常用材料的线膨胀系数及密度 (表 12.2-4, 表 12.2-5)

表 12.2-4 材料线膨胀系数 α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

材料	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$								
	20	20 ~ 100	20 ~ 200	20 ~ 300	20 ~ 400	20 ~ 600	20 ~ 700	20 ~ 900	70 ~ 1 000
工程用钢		16.6 ~ 17.1	17.1 ~ 17.2	17.6	18 ~ 18.1	18.6			
黄铜		17.8	18.8	20.9					
青铜		17.6	17.9	18.2					
铸铝合金	18.44 ~ 24.5								
铝合金		22.0 ~ 24.0	23.4 ~ 24.8	24.0 ~ 25.9					
碳钢		10.6 ~ 12.2	11.3 ~ 13	12.1 ~ 13.5	12.9 ~ 13.9	13.5 ~ 14.3	14.7 ~ 15		
铬钢		11.2	11.8	12.4	13	13.6			
3Cr13		10.2	11.1	11.6	11.9	12.3	12.8		
1Cr18Ni9Ti		16.6	17	17.2	17.5	17.9	18.6	19.3	
铸铁		8.7 ~ 11.1	8.5 ~ 11.6	10.1 ~ 12.1	11.5 ~ 12.7	12.9 ~ 13.2			
镍铬合金		14.5							17.6
砖	9.5								
水泥、混凝土	10 ~ 14								
胶木、硬橡皮	64 ~ 77								
玻璃		4 ~ 11.5							
赛璐珞		100							
有机玻璃		130							

表 12.2-5 常用材料的密度

材料名称	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	材料名称	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	材料名称	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
碳钢	7.8~7.85	轧锌	7.1	酚醛层压板	1.3~1.45
铸钢	7.8	铅	11.37	尼龙6	1.13~1.14
高速钢(含钨9%)	8.3	锡	7.29	尼龙66	1.14~1.15
高速钢(含钨18%)	8.7	金	19.32	尼龙1010	1.04~1.06
合金钢	7.9	银	10.5	橡胶夹布传动带	0.8~1.2
镍铬钢	7.9	汞	13.55	木材	0.4~0.75
灰铸铁	7.0	镁合金	1.74	石灰石	2.4~2.6
白口铸铁	7.55	硅钢片	7.55~7.8	花岗石	2.6~3.0
可锻铸铁	7.3	锡基轴承合金	7.34~7.75	砌砖	1.9~2.3
纯铜	8.9	铅基轴承合金	9.33~10.67	混凝土	1.8~2.45
黄铜	8.4~8.85	硬质合金(钨钴)	14.5~14.9	生石灰	1.1
铸造黄铜	8.62	硬质合金(钨钴钛)	9.5~12.4	熟石灰	1.2
锡青铜	8.7~8.9	胶木板, 纤维板	1.3~1.4	水泥	1.2
无锡青铜	7.5~8.2	纯橡胶	0.93	黏土耐火砖	2.10
轧制磷青铜	8.8	皮革	0.4~1.2	硅质耐火砖	1.8~1.9
冷拉青铜	8.8	聚氯乙烯	1.35~1.40	镁质耐火砖	2.6
工业用铝	2.7	聚苯乙烯	0.91	镁铬质耐火砖	2.8
可铸铝合金	2.7	有机玻璃	1.18~1.19	高铬质耐火砖	2.2~2.5
铝镍合金	2.7	无填料的电木	1.2	碳化硅	3.10
镍	8.9	赛璐珞	1.4		

4 松散物料的堆密度和安息角(表 12.2-6)

表 12.2-6 松散物料的堆密度和安息角

物料名称	堆密度/ $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	安息角/ (°)		物料名称	堆密度/ $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$	安息角/ (°)	
		运动	静止			运动	静止
无烟煤(干, 小)	0.7~1.0	27~30	27~45	铅精矿	1.9~2.4		40
烟煤	0.8	30	35~45	锌精矿	1.3~1.7		40
褐煤	0.6~0.8	35	35~50	铅锌精矿	1.3~2.4		40
泥煤	0.29~0.5	40	45	铁烧结块	1.7~2.0	35	45~50
泥煤(湿)	0.55~0.65	40	45	碎烧结块	1.4~1.6		
焦炭	0.36~0.53	35	50	铅烧结块	1.8~2.2		
木炭	0.2~0.4			铅锌烧结块	1.6~2.0		
无烟煤粉	0.84~0.89		37~45	锌烟尘	0.7~1.5		
烟煤粉	0.4~0.7		37~45	黄铁矿烧渣	1.7~1.8		
粉状石墨	0.45		40~45	铅锌团矿	1.3~1.8		
磁铁矿	2.5~3.5	30~35	40~45	黄铁矿球团矿	1.2~1.4		
赤铁矿	2.0~2.8	30~35	40~45	平炉渣(粗)	1.6~1.85		45~50
褐铁矿	1.2~2.1	30~35	40~45	高炉渣	0.6~1.0	35	50
硫铁矿(块)			45	铅锌水碎渣(湿)	1.5~1.6		42
锰矿	1.7~1.9		35~45	干煤灰	0.64~0.72		35~45
镁砂(块)	2.2~2.5		40~42	煤灰	0.70		15~20
粉状镁砂	2.1~2.2		45~50	粗砂(干)	1.4~1.9		50
铜矿	1.7~2.1		35~45	细砂(干)	1.4~1.65	30	
铜精矿	1.3~1.8		40	细砂(湿)	1.8~2.1		30~35

续表 12.2-6

物料名称	堆密度/ $t \cdot m^{-3}$	安息角/ ($^{\circ}$)		物料名称	堆密度/ $t \cdot m^{-3}$	安息角/ ($^{\circ}$)	
		运动	静止			运动	静止
造型砂	0.8~1.3	30	45	碎白云石	1.8~1.9	35	
石灰石 (大块)	1.6~2.0	30~35	40~45	砾石	1.5~1.9	30	30~45
石灰石 (中块)	1.2~1.5	30~35	40~45	黏土 (小块)	0.7~1.5	40	50
石灰石 (小块)	1.2~1.5	30~35	40~45	黏土 (湿)	1.7		27~45
生石灰	1.7~1.8	25	45~50	水泥	0.9~1.7	35	40~45
碎石	1.32~2.0	35	45	熟石灰 (粉)	0.5		
白云石 (块)	1.2~2.0	35		熟石灰 (块)	2.0		

5 常用金属材料的熔点、比热容和导热系数 (表 12.2-7)

表 12.2-7 常用金属材料的熔点、比热容和导热系数

名称	熔点/ $^{\circ}C$	比热容/ $J \cdot (g \cdot K)^{-1}$	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	名称	熔点/ $^{\circ}C$	比热容/ $J \cdot (g \cdot K)^{-1}$	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	名称	熔点/ $^{\circ}C$	比热容/ $J \cdot (g \cdot K)^{-1}$	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
灰铸铁	1 200	480	54	青铜	995	377	64	锡	232	224	64
碳素钢	1 400~ 1 500	480	48	纯铜	1 083	418	407	锌	419	383	117
不锈钢		510	24.5	铝	658	877	238	镍	1 452	444	94
黄铜	1 083	368	106	铅	327	126	35	钛	1 668	472	22.4

注：表中导热系数为0℃时的数据。

6 常用材料极限强度的近似关系(表 12.2-8)

表 12.2-8 常用材料极限强度的近似关系

材料名称	极限强度					
	对称应力疲劳极限			脉动应力疲劳极限		
	抗拉压疲劳极限 σ_{-1}	抗弯疲劳极限 σ_{-1}	抗扭疲劳极限 τ_{-1}	抗拉压脉动 疲劳极限 σ_{0-1}	抗弯脉动 疲劳极限 σ_{0-1}	抗扭脉动 疲劳极限 τ_{0-1}
结构钢	$\approx 0.3\sigma_b$	$\approx 0.43\sigma_b$	$\approx 0.25\sigma_b$	$\approx 1.42\sigma_{-1}$	$\approx 1.33\sigma_{-1}$	$\approx 1.5\tau_{-1}$
铸 铁	$\approx 0.225\sigma_b$	$\approx 0.45\sigma_b$	$\approx 0.36\sigma_b$	$\approx 1.42\sigma_{-1}$	$\approx 1.35\sigma_{-1}$	$\approx 1.35\tau_{-1}$
铝合金	$\approx \frac{\sigma_b}{6} + 73.5 \text{ MPa}$	$\approx \frac{\sigma_b}{6} + 73.5 \text{ MPa}$	$\approx (0.55 \sim 0.58)\sigma_{-1}$	$\approx 1.5\sigma_{-1}$		

7 各种硬度值对照表 (表 12.2-9)

表 12.2-9 各种硬度值对照表

洛氏 HRC	肖氏 HS	维氏 HV	布 氏		洛氏 HRC	肖氏 HS	维氏 HV	布 氏		洛氏 HRC	肖氏 HS	维氏 HV	布 氏	
			HBS ($30D^2$)	d/mm (10/3 000)				HBS ($30D^2$)	d/mm (10/3 000)				HBS ($30D^2$)	d/mm (10/3 000)
70		1 037	—	—	65	90.5	856	—	—	60	81.4	713	—	—
69		997	—	—	64	88.4	825	—	—	59	79.7	688	—	—
68	96.6	959	—	—	63	86.5	795	—	—	58	78.1	664	—	—
67	94.6	923	—	—	62	84.8	766	—	—	57	76.5	642	—	—
66	92.6	889	—	—	61	83.1	739	—	—	56	74.9	620	—	—

续表 12.2-9

洛氏 HRC	肖氏 HS	维氏 HV	布 氏		洛氏 HRC	肖氏 HS	维氏 HV	布 氏		洛氏 HRC	肖氏 HS	维氏 HV	布 氏	
			HBS (30D ²)	d/mm (10/3 000)				HBS (30D ²)	d/mm (10/3 000)				HBS (30D ²)	d/mm (10/3 000)
55	73.5	599	—	—	41	54.7	388	380	3.13	27	39.7	268	263	3.74
54	71.9	579	—	—	40	53.5	377	370	3.17	26	38.8	261	257	3.78
53	70.5	561	—	—	39	52.3	367	360	3.21	25	37.9	255	251	3.83
52	69.1	543	—	—	38	51.1	357	350	3.26	24	37	249	245	3.87
51	67.7	525	501	2.73	37	50	347	341	3.30	23	36.3	243	240	3.91
50	66.3	509	488	2.77	36	48.8	338	332	3.34	22	35.5	237	234	3.95
49	65.0	493	474	2.81	35	47.8	329	323	3.39	21	34.7	231	229	4.00
48	63.7	478	461	2.85	34	46.6	320	314	3.43	20	34	226	225	4.03
47	62.3	463	449	2.89	33	45.6	312	306	3.48	19	33.2	221	220	4.07
46	61	449	436	2.93	32	44.5	304	298	3.52	18	32.6	216	216	4.11
45	59.7	436	424	2.97	31	43.5	296	291	3.56	17	31.9	211	211	4.15
44	58.4	423	413	3.01	30	42.5	289	283	3.61	—	—	—	—	—
43	57.1	411	401	3.05	29	41.6	281	276	3.65	—	—	—	—	—
42	55.9	399	391	3.09	28	40.6	274	269	3.70	—	—	—	—	—

8 机械传动效率 (表 12.2-10)

表 12.2-10 机械传动效率的概略数值

类 别	传 动 型 式	效 率 η
圆柱齿轮 传动	很好跑合的 6 级精度和 7 级精度齿轮传动(稀油润滑)	0.98~0.995
	8 级精度的一般齿轮传动(稀油润滑)	0.97
	9 级精度的齿轮传动(稀油润滑)	0.96
	加工齿的开放式齿轮传动(干油润滑)	0.94~0.96
	铸造齿的开放式齿轮传动	0.90~0.93
圆锥齿轮 传动	很好跑合的 6 级和 7 级精度齿轮传动(稀油润滑)	0.97~0.98
	8 级精度的一般齿轮传动(稀油润滑)	0.94~0.97
	加工齿的开放式齿轮传动(干油润滑)	0.92~0.95
	铸造齿的开放式齿轮传动	0.88~0.92
蜗杆传动	自锁蜗杆	0.40~0.45
	单头蜗杆	0.70~0.75
	双头蜗杆	0.75~0.82
	三头和四头蜗杆	0.82~0.92
	环面蜗杆传动	0.85~0.95

续表 12.2-10

类 别	传 动 型 式	效 率 η
带传动	平带无压紧轮的开放式传动	0.98
	平带有压紧轮的开放式传动	0.97
	平带交叉传动	0.90
	V 带传动	0.95
	同步齿形带传动	0.96~0.98
链传动	开放式	0.90~0.93
	闭式	0.95~0.97
滑动轴承	润滑不良	0.94
	润滑正常	0.97
	润滑特好(压力润滑)	0.98
	液体摩擦	0.99
滚动轴承	球轴承(稀油润滑)	0.99
	滚子轴承(稀油润滑)	0.98
摩擦传动	平摩擦传动	0.85~0.96
	槽摩擦传动	0.88~0.90
	卷绳轮	0.95
联轴器	浮动联轴器	0.97~0.99
	齿式联轴器	0.99
	弹性联轴器	0.99~0.995
	万向联轴器 ($\alpha \leq 3^\circ$)	0.97~0.98
	万向联轴器 ($\alpha > 3^\circ$)	0.95~0.97
梅花形弹性联轴器	0.97~0.98	

续表 12.2-10

类别	传动型式	效率 η
复合轮组	滑动轴承 ($i=2-6$)	0.98~0.90
	滚动轴承 ($i=2-6$)	0.99~0.95
卷筒		0.96
螺旋传动	滑动丝杠	0.30~0.60
	滚动丝杠	0.85~0.9
减(变)速器 ^①	单级圆柱齿轮减速器	0.97~0.98
	双级圆柱齿轮减速器	0.95~0.96
	单级行星圆柱齿轮减速器 (NGW 类型负号机构)	0.95~0.98
	单级行星摆线针轮减速器	0.90~0.97
	单级圆锥齿轮减速器	0.95~0.96
	双级圆锥-圆柱齿轮减速器	0.94~0.95
	无级变速器	0.92~0.95
	轧机人字齿轮座 (滑动轴承)	0.93~0.95
	轧机人字齿轮座 (滚动轴承)	0.94~0.96
	轧机主减速器 (包括主接手和电机接手)	0.93~0.96

① 滚动轴承的损耗考虑在内。

9 摩擦系数(表 12.2-11~表 12.2-16)

表 12.2-11 常用材料的滑动摩擦系数

材料名称	摩擦系数 f			
	静摩擦		动摩擦	
	无润滑剂	有润滑剂	无润滑剂	有润滑剂
钢-钢	0.15	0.1~0.12	0.15	0.05~0.1
钢-软钢			0.2	0.1~0.2
钢-铸铁	0.3		0.18	0.05~0.15
钢-青铜	0.15	0.1~0.15	0.15	0.1~0.15
软钢-铸铁	0.2		0.18	0.05~0.15
软钢-青铜	0.2		0.18	0.07~0.15
铸铁-铸铁	0.2	0.18	0.15	0.07~0.12
铸铁-青铜			0.15~0.2	0.07~0.15
青铜-青铜		0.1	0.2	0.07~0.1
软钢-榉木	0.6	0.12	0.4~0.6	0.1
软钢-榆木			0.25	
铸铁-榉木	0.65		0.3~0.5	0.2
铸铁-榆、扬木			0.4	0.1
青铜-榉木	0.6		0.3	
木材-木材	0.4~0.6	0.1	0.2~0.5	0.07~0.15
皮革(外)-榉木	0.6		0.3~0.5	
皮革(内)-榉木	0.4		0.3~0.4	
皮革-铸铁	0.3~0.5	0.15	0.6	0.15
橡皮-铸铁			0.8	0.5
麻绳-榉木	0.8		0.5	

表 12.2-12 常用材料滚动摩擦系数 (大约值)

摩擦材料	滚动摩擦系数 k/cm	摩擦材料	滚动摩擦系数 k/cm	摩擦材料	滚动摩擦系数 k/cm
软钢与软钢	0.005	木材与钢	0.03~0.04	淬火圆柱车轮与钢轨	0.05~0.07
淬火钢与淬火钢	0.001	木材与木材	0.05~0.08	橡胶轮胎与路面	0.2~0.4
铸铁与铸铁	0.005	淬火圆锥车轮与钢轨	0.08~0.1		

表 12.2-13 物体的摩擦系数

名称		摩擦系数 f	名称		摩擦系数 f	
滚动轴承	深沟球轴承	径向载荷	0.002	滚动轴承	圆柱滚子轴承	0.002
		轴向载荷	0.004		长圆柱或螺旋滚子轴承	0.006
	单列角接触球轴承	径向载荷	0.003		滚针轴承	0.008
		轴向载荷	0.005		推力球轴承	0.003
	单列圆锥滚子轴承	径向载荷	0.008		双列调心滚子轴承	0.004
		轴向载荷	0.02		金属在管子或金属条上	0.4~0.6
	双列调心球轴承	0.0015	金属在炉底砖上		0.6~1	

续表 12.2-13

名称		摩擦系数 f	名称		摩擦系数 f
滑动轴承	液体摩擦	0.001~0.008	轧辊轴承	特殊密封的液体摩擦轴承	0.003~0.005
	半液体摩擦	0.008~0.08		特殊密封半液体摩擦轴承	0.005~0.01
	半干摩擦	0.1~0.5	密封软填料盒中填料与轴的摩擦	0.2	
轧辊轴承	滚动轴承(滚子)	0.002~0.005	热钢在辊道上摩擦	0.3	
	层压胶木轴瓦	0.004~0.006	冷钢在辊道上摩擦	0.15~0.18	
	青铜轴瓦(用于热轧辊)	0.007~0.1	制动器普通石棉制动带(无润滑) $p = 0.2 \sim 0.6 \text{ MPa}$	0.35~0.48	
	青铜轴瓦(用于冷轧辊)	0.004~0.08	离合器装有黄铜丝的压制石棉带 $p = 0.2 \sim 1.2 \text{ MPa}$	0.43~0.4	

表 12.2-14 各种工程用塑料的摩擦系数

下试样 (塑料)	上试样(钢)		上试样(塑料)		下试样 (塑料)	上试样(钢)		上试样(塑料)		
	静摩擦	动摩擦	静摩擦	动摩擦		静摩擦	动摩擦	静摩擦	动摩擦	
聚四氟乙烯	0.10	0.05	0.04	0.04	聚碳酸酯	0.60	0.53	—	—	
聚全氟乙丙烯	0.25	0.18	—	—	聚苯二甲酸乙二 醇酯	0.29	0.28	0.27 ^①	0.20 ^①	
聚乙烯	低密度	0.27	0.26	0.33	0.33	聚酰胺	0.37	0.34	0.42 ^①	0.35 ^①
	高密度	0.18	0.08~0.12	0.12	0.11	聚三氟氯乙烯	0.45 ^①	0.33 ^①	0.43 ^①	0.32 ^①
聚甲醛	0.14	0.13	—	—	聚氯乙烯	0.45 ^①	0.40 ^①	0.50 ^①	0.40 ^①	
聚偏二氯乙烯	0.33	0.25	—	—	聚偏二氯乙烯	0.68 ^①	0.45 ^①	0.90 ^①	0.52 ^①	

① 表示粘滑运动。

表 12.2-15 滑动摩擦系数与速度变化的关系

钢轮缘在钢轨上		铸铁闸瓦在钢轮缘上		软钢轮缘在干钢轨上		钢轮缘在钢轨上		铸铁闸瓦在钢轮缘上		软钢轮缘在干钢轨上	
$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	f	$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	f	$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	f	$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	f	$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	f	$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	f
起动	0.242	起动	0.330	16.56	0.209	43.90	0.070	40.30	0.166	51.48	0.145
10.93	0.088	8.05	0.273	26.28	0.206	65.80	0.057	72.36	0.127	72	0.136
21.80	0.072	16.09	0.242	31.68	0.171	87.60	0.038	96.48	0.074	79.2	0.112

表 12.2-16 滑动摩擦系数与压力变化的关系

压力/ MPa	软钢	铸铁	钢	黄铜	压力/ MPa	软钢	铸铁	钢	黄铜
	在软钢上		在铸铁上			在软钢上		在铸铁上	
0.86	0.14	0.174	0.166	0.157	3.34	0.403	0.366	0.356	0.221
1.28	0.25	0.275	0.300	0.225	3.61	0.409	0.366	0.357	0.223
1.54	0.271	0.292	0.333	0.219	3.86		0.367	0.358	0.233
1.79	0.285	0.321	0.340	0.214	4.14		0.367	0.359	0.234
2.05	0.297	0.329	0.344	0.211	4.37	表面损伤	0.367	0.367	0.235
2.32	0.312	0.333	0.347	0.215	4.63		0.376	0.403	0.233
2.57	0.350	0.351	0.351	0.206	4.90		0.434		0.234
2.69	0.376	0.363	0.353	0.205	5.11		表面损伤	表面损伤	0.232
3.09	0.395	0.365	0.354	0.208	5.65				0.273

注：本表系根据连尼氏测得的滑动摩擦系数与压力的关系。

10 机械防护安全距离 (表 12.2-17~表 12.2-22)

表 12.2-17 上伸可及的安全距离 (摘自 GB 12265.1-1997) (mm)

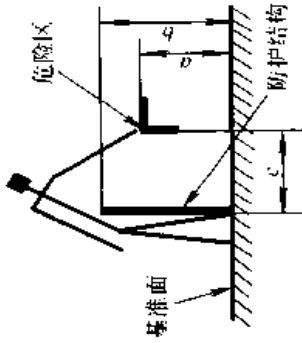
示意图	危险区的高度 h	
	低风险	高风险
	≥ 2500	≥ 2700 或采用其他安全措施

表 12.2-18 弧形可及的安全距离 (摘自 GB 12265.1-1997) (mm)

运动限制	安全距离 S_r	示意图
只在肩部和腋窝运动受限制	≥ 850	
臂被支承至肘部	≥ 550	
臂被支承至腕部	≥ 230	
臂和手被支承至指关节	≥ 130	

① 圆形开口的直径或方形口的边长, 或槽形口的宽度。
 ② A 为臂的运动范围。
 ③ 本表所示为 14 岁及 14 岁以上人的基本运动。

表 12.2-19 越过防护结构可及的安全距离 (摘自 GB 12265.1-1997) (mm)



危险区 高度 a	防护结构高度 b ^①																				
	1 000		1 200		1 400 ^②		1 600		1 800		2 000		2 200		2 400		2 500		2 700		
	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	低风险	高风险	
2 700 ^③	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2 600	900	800	800	700	600	600	600	600	600	600	500	400	400	400	300	300	300	300	300	100	100
2 500 ^②	—	1 100	1 000	900	800	800	800	700	700	700	600	400	400	400	300	300	300	300	100	100	100
2 400	100	1 100	1 000	900	800	800	800	700	700	700	600	400	400	400	300	300	300	300	100	100	100
2 200	600	1 300	1 200	1 000	900	900	900	800	800	800	600	400	400	400	300	300	300	300	—	—	—
2 000	1 100	1 400	1 300	1 100	1 000	1 000	1 000	900	900	900	800	500	500	500	400	400	400	400	—	—	—
1 800	1 100	1 500	1 400	1 200	1 100	1 100	1 100	1 000	1 000	1 000	800	600	600	600	500	500	500	500	—	—	—
1 600	1 300	1 500	1 400	1 200	1 100	1 100	1 100	1 000	1 000	1 000	800	600	600	600	500	500	500	500	—	—	—
1 400	1 300	1 500	1 400	1 200	1 100	1 100	1 100	1 000	1 000	1 000	800	600	600	600	500	500	500	500	—	—	—
1 200	1 400	1 500	1 400	1 200	1 100	1 100	1 100	1 000	1 000	1 000	800	600	600	600	500	500	500	500	—	—	—
1 000	1 400	1 500	1 400	1 200	1 100	1 100	1 100	1 000	1 000	1 000	800	600	600	600	500	500	500	500	—	—	—
800	1 300	1 500	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	900	600	600	600	600	600	600	600	—	—	—
600	1 200	1 400	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	800	600	600	600	600	600	600	600	—	—	—
400	1 200	1 400	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	800	600	600	600	600	600	600	600	—	—	—
200	1 100	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	900	600	600	600	600	600	600	600	—	—	—
0	1 100	1 100	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

① 防护结构高度低于 1 000 mm 的不包括在内, 因其不能有效地限制身体运动。
 ② 低风险的危险区高度在 2 500 mm 以上的, 高风险的危险区在 2 700 mm 以上的参见表 12.2-17。
 ③ 高风险防护结构低于 1 400 mm 的, 如果没有另外安全措施, 不应采用。

表 12.2-20 通过规则开口触及的安全距离 (摘自 GB 12265.1—1997) (mm)

身体部位	示意图	开口	安全距离 S_r					
			14 岁及 14 岁以上			3 岁至 14 岁		
			槽形	方形	圆形	槽形	方形	圆形
指尖		$e \leq 4$	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2
		$4 < e \leq 6$	≥ 10	≥ 5	≥ 5	≥ 20	≥ 10	≥ 10
指至指关节或手		$6 < e \leq 8$	≥ 20	≥ 15	≥ 5	≥ 40	≥ 30	≥ 20
		$8 < e \leq 10$	≥ 80	≥ 25	≥ 20	≥ 80	≥ 60	≥ 60
		$10 < e \leq 12$	≥ 100	≥ 80	≥ 80	≥ 100	≥ 80	≥ 80
		$12 < e \leq 20$	≥ 120	≥ 120	≥ 120	$\geq 900^{\text{①}}$	≥ 120	≥ 120
		$20 < e \leq 30$	$\geq 850^{\text{②}}$	≥ 120	≥ 120			
臂至肩关节		$20 < e \leq 30$				≥ 900	≥ 550	≥ 120
		$30 < e \leq 40$	≥ 850	≥ 200	≥ 120	≥ 900	≥ 900	≥ 900
		$40 < e \leq 100$	≥ 850	≥ 850	≥ 850	≥ 900	≥ 900	≥ 900
		$100 < e \leq 120$	≥ 850	≥ 850	≥ 850			

① 如果槽形开口长度 ≤ 40 mm, 大拇指将受到阻滞, 安全距离可减小到 120 mm。
 ② 如果槽形开口长度 ≤ 65 mm, 大拇指将受到阻滞, 安全距离可减小到 200 mm。
 注: 1. 对 3 岁至 14 岁儿童, 当开口大于 100 mm 时, 安全距离应根据表 12.2-19 的规定使用。
 2. 开口尺寸 e 表示方形开口边长、圆形开口直径和槽形开口窄边长。

表 12.2-21 多重防护结构安全距离 (摘自 GB 12265.1—1997) (mm)

运动限制	安全距离 S_r	示意图
在肩部和腋窝限制运动 两个分离的防护结构, 一个允许腕部运动, 另一个允许肘部运动	$S_{r1} \geq 230$ $S_{r2} \geq 550$ $S_{r3} \geq 850$	

运动限制	安全距离 S_r	示意图
在肩部和腋部限制运动 一个分离的防护结构, 允许 由手指到指关节运动	$S_{r3} \geq 850$ $S_{r4} \geq 130$	

注: 1. 臂可依托防护结构上任意角度倾斜。

2. 本表所示为 14 岁至 14 岁以上人的基本运动。

表 12.2-22 避免人体各部位受挤压的最小间距 (摘自 GB 12265.3—1997) (mm)

身体部位	最小间距 a	示意图	身体部位	最小间距 a	示意图
身体	500		脚趾	50	
头部	300		臂	120	
腿	250		手腕拳	100	
脚	120		手指	25	

注: 1. 如从表中所选取的最小间距不能保证足够的安全, 应采取其他附加措施 (见 GB/T 15706.1, GB/T 15706.2 和 GB 12265.1)。

2. 如穿厚防护服、厚底鞋等应适当增加相关最小间距。

11 常用物理量常数 (表 12.2-23)

表 12.2-23 常用物理量常数

名称	符号	数值及单位
冰点的绝对温度	T_0	273.15 K
纯水三相点的绝对温度	T	273.16 K
通用气体常数	R	8.314 41 J/(mol·K)
4℃ 时水的密度		0.999 973 g/cm ³

续表 12.2-23

名 称	符 号	数 值 及 单 位
0℃时水银的密度		13.595 1 g/cm ³
在标准条件下干燥空气的密度		0.001 293 g/cm ³
标准条件下空气中的声速	c	331.4 m/s
真空中的光速	c_0	$2.997\ 92 \times 10^{10}$ cm/s
标准自由落体加速度	g_0	980.665 cm/s ²
真空介电常数	ϵ_0	$8.854\ 187\ 818 \times 10^{-12}$ F/m
电子静止质量	m_e	$9.109\ 534 \times 10^{-28}$ g
质子静止质量	m_p	$1.672\ 648\ 5 \times 10^{-24}$ g
中子静止质量	m_n	$1.674\ 954\ 3 \times 10^{-24}$ g
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m

第 3 章 常用数学公式

1 代数

1.1 因式分解、二项式公式与多项式公式

(1) 因式分解

$$1) a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$$

$$2) a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2)$$

$$3) a^4 - b^4 = (a - b)(a + b)(a^2 + b^2)$$

$$4) a^n - b^n = (a - b)(a^{n-1} + a^{n-2}b + \dots + ab^{n-2} + b^{n-1}), n \text{ 为正整数}$$

$$5) a^n - b^n = (a + b)(a^{n-1} - a^{n-2}b + a^{n-3}b^2 - \dots - a^2b^{n-3} + ab^{n-2} - b^{n-1})$$

n 为正偶数

$$6) a^n + b^n = (a + b)(a^{n-1} - a^{n-2}b + \dots - ab^{n-2} + b^{n-1}), n \text{ 为正奇数}$$

$$7) a^3 + b^3 + c^3 - 3abc = (a + b + c)(a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ca)$$

(2) 二项式公式

$$(a \pm b)^n = a^n \pm na^{n-1}b + \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} a^{n-2}b^2 \pm \frac{n(n-1)(n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} a^{n-3}b^3 + \dots + (\pm 1)^n b^n$$

式中 n —— 正整数。

特别有

$$1) (a \pm b)^1 = a \pm b$$

$$2) (a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

$$3) (a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$4) (a \pm b)^4 = a^4 \pm 4a^3b + 6a^2b^2 \pm 4ab^3 + b^4$$

$$5) (a \pm b)^5 = a^5 \pm 5a^4b + 10a^3b^2 \pm 10a^2b^3 + 5ab^4 \pm b^5$$

(3) 多项式公式

$$(a + b + c + \dots)^n$$

$$= \sum_{p+q+r+\dots=n} \frac{n!}{p! q! r! \dots} a^p b^q c^r \dots$$

其中 n 是正整数。

特别有

$$(a + b + c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2bc + 2ac$$

1.2 行列式

(1) 行列式的展开

$$1) \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1$$

$$2) \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = a_1 b_2 c_3 + a_2 b_3 c_1 + a_3 b_1 c_2 - a_1 b_3 c_2 - a_2 b_1 c_3 - a_3 b_2 c_1$$

(2) 行列式的性质

1) 行列依次对调时, 其值不变,

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}$$

2) 两行 (或两列) 对调后, 其值变号,

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_3 & b_3 & c_3 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_1 & b_1 & c_1 \end{vmatrix}$$

3) 某行 (或列) 各元素乘以 k , 其值为原行列式的 k 倍,

$$\begin{vmatrix} a_1 & kb_1 & c_1 \\ a_2 & kb_2 & c_2 \\ a_3 & kb_3 & c_3 \end{vmatrix} = k \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

4) 某两行 (或两列) 的元素对应成比例, 其值为零,

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ ka_2 & kb_2 & kc_2 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix} = 0$$

5) 某行 (或列) 的元素都是二项式, 该行 (或列) 可分解为两个行列式的和,

$$\begin{vmatrix} a_1 + d & b_1 + e & c_1 + f \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} d & e & f \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

6) 某行 (或列) 所有元素乘以同一数, 加到另

行(或列)的对应元素上,其值不变,

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 + kc_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 + kc_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 + kc_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

1.3 指数与根式

(1) 指数运算法则

- 1) $a^x \cdot a^y = a^{x+y}$
- 2) $a^x \div a^y = a^{x-y}$
- 3) $(a^x)^y = a^{xy}$
- 4) $(ab)^x = a^x \cdot b^x$
- 5) $(\frac{a}{b})^x = \frac{a^x}{b^x}$
- 6) $a^{\frac{n}{m}} = \sqrt[m]{a^n}$ ($a \geq 0$, m, n 是正整数)
- 7) $a^{-\frac{n}{m}} = \frac{1}{\sqrt[m]{a^n}}$ ($a > 0$)
- 8) $a^{-n} = \frac{1}{a^n}$ ($a \neq 0$)

(2) 根式运算法则

- 1) $\sqrt{a} \pm \sqrt{b} = \sqrt{a+b \pm 2\sqrt{ab}}$ ($a > b$)
- 2) $\frac{1}{\sqrt{a} \pm \sqrt{b}} = \frac{\sqrt{a} \mp \sqrt{b}}{a-b}$
- 3) $\frac{1}{\sqrt[3]{a} \pm \sqrt[3]{b}} = \frac{\sqrt[3]{a^2} \mp \sqrt[3]{ab} + \sqrt[3]{b^2}}{a \pm b}$

1.4 对数

- 1) $\log_a 0 = -\infty$, $\log_a 1 = 0$, $\log_a a = 1$
- 2) $\log_a (bc) = \log_a b + \log_a c$
- 3) $\log_a (b/c) = \log_a b - \log_a c$
- 4) $\log_a b^x = x \log_a b$
- 6) $\log_a (b_1 \cdot b_2 \cdots b_n)$
 $= \log_a b_1 + \log_a b_2 + \cdots + \log_a b_n$
- 7) $\log_a b = \log_c b / \log_c a$
- 8) $\log_e x = \log_e 10 \cdot \log_{10} x$
 $\approx 2.30258509 \log_{10} x$
 $\log_{10} x = \log_{10} e \cdot \log_e x$
 $\approx 0.43429448 \log_e x$

1.5 级数

(1) 等差级数

- $a + (a+d) + (a+2d) + \cdots$ (公差为 d)
 第 n 项 $a_n = a + (n-1)d$

前 n 项和 $S_n = [a + \frac{1}{2}(n-1)d]n$

(2) 等比级数

$$a + aq + aq^2 + \cdots \text{(公比为 } q)$$

第 n 项 $a_n = aq^{n-1}$

前 n 项和 $S_n = a(q^n - 1)/(q - 1)$

(3) 特殊级数之和

- 1) $1 + 2 + 3 + \cdots + n$
 $= (1/2)n(n+1)$
- 2) $1^2 + 2^2 + 3^2 + \cdots + n^2$
 $= (1/6)n(n+1)(2n+1)$
- 3) $1^3 + 2^3 + 3^3 + \cdots + n^3$
 $= [(1/2)n(n+1)]^2$
- 4) $1^4 + 2^4 + 3^4 + \cdots + n^4$
 $= \frac{n^5}{5} + \frac{n^4}{2} + \frac{n^3}{3} - \frac{n}{30}$
- 5) $1 + 3 + 5 + \cdots + (2n-1) = n^2$
- 6) $1^2 + 3^2 + 5^2 + \cdots + (2n-1)^2$
 $= (1/3)n(2n-1)(2n+1)$
- 7) $1^3 + 3^3 + \cdots + (2n-1)^3 = n^2(2n^2-1)$
- 8) $1 \times 2 + 2 \times 3 + 3 \times 4 + \cdots + n(n+1)$
 $= (1/3)n(n+1)(n+2)$
- 9) $1 \times 2 \times 3 + 2 \times 3 \times 4 + 3 \times 4 \times 5 + \cdots + n(n+1)(n+2)$
 $= (1/4)n(n+1)(n+2)(n+3)$
- 10) $\frac{1}{1 \times 2} + \frac{1}{2 \times 3} + \frac{1}{3 \times 4} + \cdots + \frac{1}{n(n+1)}$
 $= \frac{n}{n+1}$
- 11) $\frac{1}{1 \times 2 \times 3} + \frac{1}{2 \times 3 \times 4} + \frac{1}{3 \times 4 \times 5} + \cdots$
 $+ \frac{1}{n(n+1)(n+2)}$
 $= \frac{1}{2} [\frac{1}{1 \times 2} - \frac{1}{(n+1)(n+2)}]$

(4) 特殊无穷级数

- 1) $1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \cdots = \frac{\pi}{4}$
- 2) $1 - \frac{1}{5} + \frac{1}{7} - \frac{1}{11} + \frac{1}{13} - \cdots = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}$
- 3) $\frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{n^2} + \cdots = \frac{\pi^2}{6}$
- 4) $\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} + \cdots = \frac{\pi^2}{12}$
- 5) $\frac{1}{1 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 5} + \frac{1}{5 \cdot 7} + \cdots = \frac{1}{2}$
- 6) $1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \cdots + \frac{1}{n!} + \cdots = e$

1.6 不等式

- 1) $\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \geq \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n}$
($a_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$)
- 2) $\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \leq |a_1| + |a_2| + \dots + |a_n|$
- 3) $(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2)(b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2) \geq (a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n)^2$
- 4) $\left(\frac{a_1 + \dots + a_n}{n}\right)^k \leq \frac{a_1^k + \dots + a_n^k}{n}$
($a_i > 0, i = 1, 2, \dots, n, k$ 是正整数)
- 5) $\sqrt{(a_1 + b_1)(a_2 + b_2) \dots (a_n + b_n)} \geq \sqrt{a_1 \dots a_n} + \sqrt{b_1 \dots b_n}$
- 6) $1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{n}} > 2\sqrt{n+1} - 2$
- 7) $\frac{1}{2} < 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} - \ln n < 1 \quad (n > 1)$

1.7 代数方程

(1) 二元一次方程组

$$\begin{cases} a_1 x + b_1 y = c_1 \\ a_2 x + b_2 y = c_2 \end{cases}$$

$$x = \frac{D_1}{D}, y = \frac{D_2}{D} \quad (D \neq 0), \text{ 其中}$$

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}, D_1 = \begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}, D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}$$

(2) 三元一次方程组

$$\begin{cases} a_1 x + b_1 y + c_1 z = d_1 \\ a_2 x + b_2 y + c_2 z = d_2 \\ a_3 x + b_3 y + c_3 z = d_3 \end{cases}$$

$$x = \frac{D_1}{D}, y = \frac{D_2}{D}, z = \frac{D_3}{D} \quad (D \neq 0), \text{ 其中}$$

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}, D_1 = \begin{vmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix},$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{vmatrix}, D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{vmatrix}$$

(3) 一元二次方程

$$ax^2 + bx + c = 0$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$x_1 + x_2 = -\frac{b}{a}, x_1 x_2 = \frac{c}{a}$$

判别式:

$$b^2 - 4ac \begin{cases} > 0 & \text{不等二实根} \\ = 0 & \text{相等二实根} \\ < 0 & \text{共轭复数根} \end{cases}$$

2 三角函数

2.1 三角函数的基本公式

(1) 一个角的诸函数的基本关系

1) $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$

2) $\sec^2 \alpha - \tan^2 \alpha = 1$

3) $\csc^2 \alpha - \cot^2 \alpha = 1$

4) $\sin \alpha \cdot \csc \alpha = 1$

5) $\cos \alpha \cdot \sec \alpha = 1$

6) $\tan \alpha \cdot \cot \alpha = 1$

7) $\sin \alpha / \cos \alpha = \tan \alpha$

8) $\cos \alpha / \sin \alpha = \cot \alpha$

(2) 和差公式

1) $\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$

2) $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$

3) $\tan(\alpha \pm \beta) = (\tan \alpha \pm \tan \beta) / (1 \mp \tan \alpha \tan \beta)$

4) $\cot(\alpha \pm \beta) = (\cot \alpha \cot \beta \mp 1) / (\cot \alpha \pm \cot \beta)$

(3) 倍角公式

1) $\sin 2\theta = 2\sin \theta \cos \theta$

2) $\sin 3\theta = \sin \theta (3 - 4\sin^2 \theta)$

3) $\sin 4\theta = \sin \theta \cos \theta (4 - 8\sin^2 \theta)$

4) $\sin 5\theta = \sin \theta (5 - 20\sin^2 \theta + 16\sin^4 \theta)$

5) $\sin 6\theta = \sin \theta \cos \theta (6 - 32\sin^2 \theta + 32\sin^4 \theta)$

6) $\sin 7\theta = \sin \theta (7 - 56\sin^2 \theta + 112\sin^4 \theta - 64\sin^6 \theta)$

7) $\cos 2\theta = 2\cos^2 \theta - 1$

8) $\cos 3\theta = \cos \theta (4\cos^2 \theta - 3)$

9) $\cos 4\theta = 8\cos^4 \theta - 8\cos^2 \theta + 1$

10) $\cos 5\theta = \cos \theta (16\cos^4 \theta - 20\cos^2 \theta + 5)$

11) $\cos 6\theta = 32\cos^6 \theta - 48\cos^4 \theta + 18\cos^2 \theta - 1$

12) $\cos 7\theta = \cos \theta (64\cos^6 \theta - 112\cos^4 \theta + 56\cos^2 \theta - 7)$

13) $\tan 2\theta = \frac{2\tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}$

14) $\tan 3\theta = \frac{3\tan \theta - \tan^3 \theta}{1 - 3\tan^2 \theta}$

(4) 积化和差公式

- 1) $2\sin\alpha\cos\beta = \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)$
- 2) $2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$
- 3) $2\sin\alpha\sin\beta = -\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$
- 4) $\tan\alpha\tan\beta = (\tan\alpha + \tan\beta)/(\cot\alpha + \cot\beta)$
 $= -(\tan\alpha - \tan\beta)/(\cot\alpha - \cot\beta)$
- 5) $\cot\alpha\cot\beta = (\cot\alpha + \cot\beta)/(\tan\alpha + \tan\beta)$
 $= -(\cot\alpha - \cot\beta)/(\tan\alpha - \tan\beta)$

(5) 和差化积公式

- 1) $\sin\alpha + \sin\beta$
 $= 2\sin\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha - \beta)$
- 2) $\sin\alpha - \sin\beta$
 $= 2\cos\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\sin\frac{1}{2}(\alpha - \beta)$
- 3) $\cos\alpha + \cos\beta$
 $= 2\cos\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha - \beta)$
- 4) $\cos\alpha - \cos\beta$
 $= -2\sin\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\sin\frac{1}{2}(\alpha - \beta)$
- 5) $\tan\alpha \pm \tan\beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos\alpha\cos\beta}$
- 6) $\cot\alpha \pm \cot\beta = \frac{\sin(\beta \pm \alpha)}{\sin\alpha\sin\beta}$
- 7) $\sin\alpha \pm \cos\alpha = \sqrt{2}\sin(\alpha \pm \frac{\pi}{4})$
 $= \pm\sqrt{2}\cos(\alpha \mp \frac{\pi}{4})$
- 8) $\sin^2\alpha - \sin^2\beta = \cos^2\beta - \cos^2\alpha$
 $= \sin(\alpha + \beta)\sin(\alpha - \beta)$
- 9) $\cos^2\alpha - \sin^2\beta = \cos^2\beta - \sin^2\alpha$
 $= \cos(\alpha + \beta)\cos(\alpha - \beta)$

(6) 半角公式

- 1) $\sin\frac{\alpha}{2} = \pm\sqrt{\frac{1 - \cos\alpha}{2}}$
- 2) $\cos\frac{\alpha}{2} = \pm\sqrt{\frac{1 + \cos\alpha}{2}}$
- 3) $\tan\frac{\alpha}{2} = \pm\sqrt{\frac{1 - \cos\alpha}{1 + \cos\alpha}} = \frac{1 - \cos\alpha}{\sin\alpha} = \frac{\sin\alpha}{1 + \cos\alpha}$

(7) 正弦和余弦的幂

- 1) $\sin^2\alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)$
- 2) $\sin^3\alpha = \frac{1}{4}(3\sin\alpha - \sin 3\alpha)$
- 3) $\cos^2\alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$
- 4) $\cos^3\alpha = \frac{1}{4}(\cos 3\alpha + 3\cos\alpha)$

(8) 其他公式

- 1) $\sin\alpha = 2\tan\frac{\alpha}{2}/(1 + \tan^2\frac{\alpha}{2})$
- 2) $\cos\alpha = (1 - \tan^2\frac{\alpha}{2})/(1 + \tan^2\frac{\alpha}{2})$
- 3) $\tan\alpha = 2\tan\frac{\alpha}{2}/(1 - \tan^2\frac{\alpha}{2})$
- 4) $(1 + \tan\alpha)/(1 - \tan\alpha) = \tan(\frac{\pi}{4} + \alpha)$
- 5) $(1 - \tan\alpha)/(1 + \tan\alpha) = \tan(\frac{\pi}{4} - \alpha)$
- 6) 设 $a > 0, b > 0$, 且 A, B 为正锐角, 设

$A = \arctan\frac{a}{b}, B = \arctan\frac{b}{a}$, 则

$$\begin{aligned} a\cos\alpha + b\sin\alpha &= \sqrt{a^2 + b^2}\sin(A + \alpha) \\ &= \sqrt{a^2 + b^2}\cos(B - \alpha) \\ a\cos\alpha - b\sin\alpha &= \sqrt{a^2 + b^2}\sin(A - \alpha) \\ &= \sqrt{a^2 + b^2}\cos(B + \alpha) \end{aligned}$$

2.2 任意三角形常用公式

如图 12.3-1 所示的平面三角形 ABC , 设其三条边的边长分别为 a, b, c , 三条边 a, b, c 所对的角分别为 A, B, C . R 为三角形的外接圆半径, r 为内切圆半径, p 为三角形三边之和之半, $[p = (a + b + c)/2]$, 则

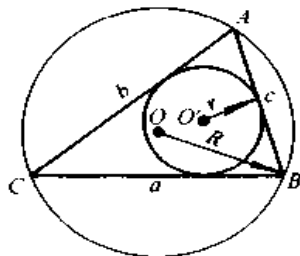


图 12.3-1 平面三角形

正弦定理

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} = 2R$$

余弦定理

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos A$$

正切定理

$$\begin{aligned} \frac{a+b}{a-b} &= \tan\frac{A+B}{2}/\tan\frac{A-B}{2} \\ &= \tan\frac{C}{2}/\tan\frac{A-B}{2} \end{aligned}$$

面积

$$S = \frac{1}{2}ab\sin C = 2R^2\sin A\sin B\sin C = rp$$

$$= \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$$

a 边上的高

$$h_a = b \sin C = c \sin B$$

a 边上的中线

$$m_a = \frac{1}{2} \sqrt{b^2 + c^2 + 2bc \cos A}$$

A 角的二等分线

$$l_a = 2bc \cos \frac{A}{2} / (b+c)$$

外接圆半径

$$R = \frac{a}{2 \sin A} = \frac{b}{2 \sin B} = \frac{c}{2 \sin C}$$

内切圆半径

$$r = \frac{\sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)/p}}{p} \\ = p \tan \frac{A}{2} \tan \frac{B}{2} \tan \frac{C}{2}$$

半角公式

$$1) \sin \frac{A}{2} = \sqrt{(p-b)(p-c)/(bc)}$$

$$2) \sin \frac{B}{2} = \sqrt{(p-a)(p-c)/(ac)}$$

$$3) \sin \frac{C}{2} = \sqrt{(p-a)(p-b)/(ab)}$$

$$4) \cos \frac{A}{2} = \sqrt{p(p-a)/(bc)}$$

$$5) \cos \frac{B}{2} = \sqrt{p(p-b)/(ac)}$$

$$6) \cos \frac{C}{2} = \sqrt{p(p-c)/(ab)}$$

$$7) \tan \frac{A}{2} = r / (p-a)$$

$$8) \tan \frac{B}{2} = r / (p-b)$$

$$9) \tan \frac{C}{2} = r / (p-c)$$

2.3 反三角函数间的关系

$$1) \arcsin x + \arccos x = \frac{1}{2} \pi$$

$$2) \arctan x + \operatorname{arccot} x = \frac{1}{2} \pi$$

$$3) \arcsin x = \pm \arccos \sqrt{1-x^2} \\ = \arctan(x/\sqrt{1-x^2}) \text{ 正负与 } x \text{ 同}$$

$$4) \arccos x = \arcsin \sqrt{1-x^2} \\ = \arctan(\sqrt{1-x^2}/x) \quad (x > 0) \\ = \pi - \arcsin \sqrt{1-x^2} \quad (x < 0) \\ = \pi + \arctan(\sqrt{1-x^2}/x) \quad (x < 0)$$

$$5) \arctan x = \arcsin(x/\sqrt{1+x^2})$$

$$= \pm \arccos(1/\sqrt{1+x^2}) \text{ 正负与 } x \text{ 同}$$

$$6) \arctan x = \operatorname{arccot}(1/x) \quad (x > 0)$$

$$= \operatorname{arccot}(1/x) - \pi \quad (x < 0)$$

$$7) \arcsin x \pm \arcsin y$$

$$= \arcsin(x\sqrt{1-y^2} \pm y\sqrt{1-x^2})$$

$$-\frac{1}{2}\pi \leq \arcsin x \pm \arcsin y \leq \frac{1}{2}\pi$$

$$8) \arccos x \pm \arccos y$$

$$= \arccos(xy \mp \sqrt{1-x^2}\sqrt{1-y^2})$$

$$0 \leq \arccos x \pm \arccos y \leq \pi$$

$$9) \arctan x \pm \arctan y = \arctan \frac{x \pm y}{1 \mp xy}$$

$$-\frac{\pi}{2} < \arctan x \pm \arctan y < \frac{\pi}{2}$$

$$10) \arcsin(-x) = -\arcsin x$$

$$11) \arccos(-x) = \pi - \arccos x$$

$$12) \arctan(-x) = -\arctan x$$

$$13) \operatorname{arccot}(-x) = \pi - \operatorname{arccot} x$$

3 微积分

3.1 微分常用公式

(1) 求导法则

设 $u, v, w \dots$ 为 x 的函数, a 为常数。

$$1) \frac{d}{dx}(a+u) = \frac{du}{dx}$$

$$2) \frac{d}{dx}(au) = a \frac{du}{dx}$$

$$3) \frac{d}{dx}(u+v) = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dx}$$

$$4) \frac{d}{dx}(uv) = \frac{du}{dx}v + u \frac{dv}{dx}$$

$$5) \frac{d}{dx}\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{vdu/dx - u dv/dx}{v^2}$$

$$6) \frac{d}{dx}u^v = u^v \left(\ln u \frac{dv}{dx} + \frac{v}{u} \frac{du}{dx} \right)$$

$$7) \frac{d}{dx}(uvw \dots)$$

$$= (uvw \dots) \left(\frac{1}{u} \frac{du}{dx} + \frac{1}{v} \frac{dv}{dx} + \frac{1}{w} \frac{dw}{dx} + \dots \right)$$

$$8) \frac{d^n(uv)}{dx^n} = \frac{d^n u}{dx^n} v + C_n^1 \frac{d^{n-1} u}{dx^{n-1}} \frac{dv}{dx} + C_n^2 \frac{d^{n-2} u}{dx^{n-2}} \frac{d^2 v}{dx^2} + \dots + u \frac{d^n v}{dx^n}$$

C_n^r 为组合数

9) 当 $y = f(z)$, $z = g(x)$ 时, 则

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dz} \frac{dz}{dx} = f'(z)g'(x)$$

10) 当 $y = f(x)$, $x = \phi(y)$ 时, 则

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{dx/dy}, f'(x) = \frac{1}{\phi'(y)}$$

11) 当 $x = \phi(t)$, $y = \psi(t)$ 时, 则

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/dt}{dx/dt} = \frac{\psi'(t)}{\phi'(t)}$$

(2) 导数基本公式

设 m, a 为常数。

$$1) \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x} \right) = -\frac{1}{x^2}$$

$$2) \frac{d\sqrt{x}}{dx} = \frac{1}{2\sqrt{x}}$$

$$3) \frac{d(x^m)}{dx} = mx^{m-1}$$

$$4) \frac{de^x}{dx} = e^x$$

$$5) \frac{da^x}{dx} = a^x \ln a$$

$$6) \frac{d \ln x}{dx} = \frac{1}{x}$$

$$7) \frac{d \lg x}{dx} = \frac{1}{x} \lg e$$

$$8) \frac{d \sin x}{dx} = \cos x$$

$$9) \frac{d \cos x}{dx} = -\sin x$$

$$10) \frac{d \tan x}{dx} = \sec^2 x$$

$$11) \frac{d \cot x}{dx} = -\csc^2 x$$

$$12) \frac{d \sec x}{dx} = \sec x \tan x$$

$$13) \frac{d \csc x}{dx} = -\csc x \cot x$$

$$14) \frac{d \arcsin x}{dx} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$15) \frac{d \arccos x}{dx} = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$16) \frac{d \arctan x}{dx} = \frac{1}{1+x^2}$$

$$17) \frac{d \operatorname{arccot} x}{dx} = -\frac{1}{1+x^2}$$

$$18) \frac{d \operatorname{arcsec} x}{dx} = \frac{1}{x \sqrt{x^2-1}}$$

$$19) \frac{d \operatorname{arccsc} x}{dx} = -\frac{1}{x \sqrt{x^2-1}}$$

$$20) \frac{d \ln(\sin x)}{dx} = \cot x$$

$$21) \frac{d \ln(\cos x)}{dx} = -\tan x$$

$$22) \frac{d \ln(\tan x)}{dx} = \frac{2}{\sin 2x}$$

$$23) \frac{d \ln(\cot x)}{dx} = -\frac{2}{\sin 2x}$$

$$24) \frac{d \sinh x}{dx} = \cosh x$$

$$25) \frac{d \cosh x}{dx} = \sinh x$$

$$26) \frac{d \tanh x}{dx} = \operatorname{sech}^2 x$$

$$27) \frac{d \coth x}{dx} = -\operatorname{cosech}^2 x$$

$$28) \frac{d \operatorname{sech} x}{dx} = -\operatorname{sech} x \tanh x$$

$$29) \frac{d \operatorname{cosech} x}{dx} = -\operatorname{cosech} x \coth x$$

$$30) \frac{d \operatorname{arsinh} x}{dx} = \frac{1}{\sqrt{x^2+1}}$$

$$31) \frac{d \operatorname{arcosh} x}{dx} = \frac{1}{\sqrt{x^2-1}}$$

$$32) \frac{d \operatorname{artanh} x}{dx} = \frac{1}{1-x^2}$$

$$33) \frac{d \operatorname{arcoth} x}{dx} = \frac{1}{1-x^2}$$

$$34) \frac{d \operatorname{arsech} x}{dx} = -\frac{1}{x \sqrt{1-x^2}}$$

$$35) \frac{d \operatorname{arcosech} x}{dx} = -\frac{1}{x \sqrt{x^2+1}}$$

3.2 不定积分常用公式

(1) 不定积分法则

$$1) \int f'(x) dx = f(x) + C$$

$$2) \int a f(x) dx = a \int f(x) dx \quad (a \text{ 为常数})$$

$$3) \int [f(x) + g(x) + \cdots + h(x)] dx \\ = \int f(x) dx + \int g(x) dx + \cdots + \int h(x) dx$$

$$4) \int uv' dx = uv - \int vu' dx \quad (\text{分部积分法})$$

$$5) \int f[\varphi(x)] d\varphi(x) = f[\varphi(x)] + C \\ (\text{配元积分法})$$

$$6) \int f(x) dx = \int f[\varphi(y)] \varphi'(y) dy \\ (\text{换元积分法})$$

(2) 基本积分公式

1) $\int a dx = ax + C$ (a 为常数)

2) $\int x^a dx = \frac{1}{a+1} x^{a+1} + C$, ($a \neq -1$)

3) $\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$

4) $\int e^x dx = e^x + C$

5) $\int a^x dx = \frac{1}{\ln a} a^x + C$

6) $\int \sin x dx = -\cos x + C$

7) $\int \cos x dx = \sin x + C$

8) $\int \sec^2 x dx = \int \frac{dx}{\cos^2 x} = \tan x + C$

9) $\int \csc^2 x dx = \int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\cot x + C$

10) $\int \sec x \tan x dx = \sec x + C$

11) $\int \csc x \cot x dx = -\csc x + C$

12) $\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$

13) $\int \frac{dx}{1+x^2} = \arctan x + C$

14) $\int \sinh x dx = \cosh x + C$

15) $\int \cosh x dx = \sinh x + C$

(3) 常见函数的积分

1) $\int (ax+b)^n dx$

$$= \begin{cases} \frac{1}{a(n+1)}(ax+b)^{n+1} + C & (a \neq -1) \\ \frac{1}{a} \ln|ax+b| + C & (a = -1) \end{cases}$$

2) $\int \frac{x dx}{ax+b} = \frac{x}{a} - \frac{b}{a^2} \ln|ax+b| + C$

3) $\int \frac{x^2 dx}{ax+b}$

$$= \frac{1}{a^3} \left[\frac{1}{2}(ax+b)^2 - 2b(ax+b) + b^2 \ln|ax+b| \right] + C$$

4) $\int \frac{x dx}{(ax+b)^2}$

$$= \frac{1}{a^2} \left[\frac{b}{ax+b} + \ln|ax+b| \right] + C$$

5) $\int \frac{x^2 dx}{(ax+b)^2} = \frac{1}{a^3} \left[ax+b - \frac{b^2}{ax+b} - 2b \ln|ax+b| \right] + C$

6) $\int \frac{dx}{x(ax+b)} = \frac{1}{b} \ln \left| \frac{x}{ax+b} \right| + C$

7) $\int \frac{dx}{x^2(ax+b)} = \frac{-1}{bx} + \frac{a}{b^2} \ln \left| \frac{ax+b}{x} \right| + C$

8) $\int \frac{dx}{x(ax+b)^2}$

$$= \frac{1}{b(ax+b)} - \frac{1}{b^2} \ln \left| \frac{ax+b}{x} \right| + C$$

9) $\int \frac{dx}{x^2(ax+b)^2} = \frac{-1}{b^2} \left(\frac{a}{ax+b} + \frac{1}{x} \right)$

$$+ \frac{2a}{b^3} \ln \left| \frac{ax+b}{x} \right| + C$$

10) $\int \frac{dx}{a+bx^2} = \frac{1}{\sqrt{ab}} \arctan \sqrt{\frac{b}{a}} x + C$
 $(a > 0, b > 0)$

11) $\int \frac{dx}{a-bx^2}$

$$= \frac{1}{2\sqrt{ab}} \ln \left| \frac{\sqrt{a} + \sqrt{bx}}{\sqrt{a} - \sqrt{bx}} \right| + C$$

 $(a > 0, b > 0)$

12) $\int x(a+bx^2)^n dx$

$$= \frac{1}{2(n+1)b} (a+bx^2)^{n+1} + C$$

 $(n \neq -1)$

13) $\int \frac{x dx}{a+bx^2} = \frac{1}{2b} \ln|a+bx^2| + C$

14) $\int \frac{dx}{x(a+bx^2)} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x^2}{a+bx^2} \right| + C$

15) $\int \frac{x^2 dx}{(a+bx^2)^2}$

$$= \frac{-x}{2b(a+bx^2)} + \frac{1}{2b\sqrt{ab}} \arctan \sqrt{\frac{b}{a}} x + C$$

16) $\int \frac{dx}{x^2(a+bx^2)} = -\frac{1}{ax} - \frac{b}{a} \int \frac{dx}{a+bx^2}$

17) $\int \frac{dx}{a+bx+cx^2}$

$$= -\frac{2}{b+2cx} + C \quad (D = b^2 - 4ac = 0)$$

$$= \frac{2}{\sqrt{-D}} \arctan \frac{b+2cx}{\sqrt{-D}} + C \quad (D < 0)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{D}} \ln \frac{b+2cx-\sqrt{D}}{b+2cx+\sqrt{D}} + C \quad (D > 0)$$

18) $\int \sqrt{ax+bdx} = \frac{2}{3a} (ax+b)^{3/2} + C$

19) $\int x \sqrt{ax+bdx}$

$$= \frac{6ax-4b}{15a^2} (ax+b)^{3/2} + C$$

$$20) \int x^2 \sqrt{ax+b} dx \\ = \frac{2}{105a^3} (15a^2x^2 - 12abx + 8b^2) \times \\ (ax+b)^{3/2} + C$$

$$21) \int \frac{dx}{\sqrt{ax+b}} = \frac{2}{a} (ax+b)^{1/2} + C$$

$$22) \int \frac{x dx}{\sqrt{ax+b}} \\ = \frac{2}{3a^2} (ax-2b) (ax+b)^{1/2} + C$$

$$23) \int \frac{x^2 dx}{\sqrt{ax+b}} = \frac{2}{15a^3} (3a^2x^2 - 4abx + 8b^2) \times \\ (ax+b)^{1/2} + C$$

$$24) \int \frac{dx}{x^2 \sqrt{ax+b}} \\ = \frac{-\sqrt{ax+b}}{bx} - \frac{a}{2b} \int \frac{dx}{x \sqrt{ax+b}}$$

$$25) \int \frac{\sqrt{ax+b}}{x} dx \\ = 2\sqrt{ax+b} + b \int \frac{dx}{x \sqrt{ax+b}}$$

$$26) \int \sqrt{a^2-x^2} dx \\ = \frac{x}{2} \sqrt{a^2-x^2} + \frac{a^2}{2} \arcsin \frac{x}{a} + C$$

$$27) \int x \sqrt{a^2-x^2} dx = -\frac{1}{3} (a^2-x^2)^{3/2} + C$$

$$28) \int x^2 \sqrt{a^2-x^2} dx \\ = \frac{x}{8} (2x^2-a^2) \sqrt{a^2-x^2} \\ + \frac{a^4}{8} \arcsin \frac{x}{a} + C$$

$$29) \int x^3 \sqrt{a^2-x^2} dx \\ = \frac{-1}{15} (\sqrt{a^2-x^2})^3 (3x^2+2a^2) + C$$

$$30) \int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C$$

$$31) \int \frac{x dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = -\sqrt{a^2-x^2} + C$$

$$32) \int \frac{x^2 dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = -\frac{x}{2} \sqrt{a^2-x^2} + \\ \frac{a^2}{2} \arcsin \frac{x}{a} + C$$

$$33) \int \frac{dx}{x \sqrt{a^2-x^2}} \\ = \frac{-1}{a} \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2-x^2}}{x} \right) + C$$

$$34) \int \frac{dx}{x^2 \sqrt{a^2-x^2}} = -\frac{\sqrt{a^2-x^2}}{a^2x} + C,$$

$$35) \int \frac{\sqrt{a^2-x^2}}{x} dx \\ = \sqrt{a^2-x^2} - a \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2-x^2}}{x} \right) + C$$

$$36) \int (a^2-x^2)^{3/2} dx = \frac{x}{a^2} \sqrt{a^2-x^2} + C$$

$$37) \int \frac{x dx}{(a^2-x^2)^{3/2}} = \frac{1}{\sqrt{a^2-x^2}} + C$$

$$38) \int \frac{x^2 dx}{(a^2-x^2)^{3/2}} = \frac{x}{\sqrt{a^2-x^2}} - \arcsin \frac{x}{a} + C$$

$$39) \int \sqrt{x^2+a^2} dx \\ = \frac{x}{2} \sqrt{x^2 \pm a^2} \pm a^2 \ln(x + \sqrt{x^2 \pm a^2}) + C$$

$$40) \int x \sqrt{x^2 \pm a^2} dx = \frac{1}{3} (x^2 \pm a^2)^{3/2} + C$$

$$41) \int x^2 \sqrt{x^2 \pm a^2} dx \\ = \frac{x}{8} (2x^2 \pm a^2) \sqrt{x^2 \pm a^2} - \\ \frac{a^4}{8} \ln(x + \sqrt{x^2 \pm a^2}) + C$$

$$42) \int \sin(ax+b) dx \\ = -\frac{1}{a} \cos(ax+b) + C$$

$$43) \int \cos(ax+b) dx \\ = \frac{1}{a} \sin(ax+b) + C$$

$$44) \int \tan(ax+b) dx \\ = -\frac{1}{a} \ln|\cos(ax+b)| + C$$

$$45) \int \cot(ax+b) dx \\ = \frac{1}{a} \ln|\sin(ax+b)| + C$$

$$46) \int \sec ax dx = \frac{1}{a} \ln|\sec ax + \tan ax| + C$$

$$47) \int \csc ax dx = -\frac{1}{a} \ln|\csc ax + \cot ax| + C$$

$$48) \int \sin^2 ax dx = \frac{1}{2a} (ax - \sin ax \cos ax) + C$$

$$49) \int \cos^2 ax dx = \frac{1}{2a} (ax + \sin ax \cos ax) + C$$

3.3 定积分常用公式

(1) 定积分与不定积分的基本关系

$$\int_a^b f(x) dx = \int f(x) dx \Big|_a^b = F(b) - F(a)$$

($F(x)$ 是 $f(x)$ 的任一个原函数)

(2) 定积分的主要性质

$$1) \int_a^b kf(x) dx = k \int_a^b f(x) dx \quad (k \text{ 为常数})$$

$$2) \int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx \pm$$

$$3) \int_a^b [f(x) \pm \varphi(x)] dx = \int_a^b f(x) dx \pm \int_a^b \varphi(x) dx$$

$$4) \int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

($a < c < b$)

(3) 重要定积分

$$1) \int_{-\pi}^{\pi} \cos nx dx = \int_{-\pi}^{\pi} \sin nx dx = 0$$

$$2) \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \sin nx dx = 0$$

$$3) \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cos nx dx = \int_{-\pi}^{\pi} \sin mx \sin nx dx = \begin{cases} 0 & \text{当 } m \neq n \text{ 时} \\ \pi & \text{当 } m = n \text{ 时} \end{cases}$$

$$4) \int_0^{\pi} \cos mx \cos nx dx = \int_0^{\pi} \sin mx \sin nx dx = \begin{cases} 0 & \text{当 } m \neq n \text{ 时} \\ \frac{\pi}{2} & \text{当 } m = n \text{ 时} \end{cases}$$

$$5) \int_0^{\infty} \frac{a dx}{a^2 + x^2} = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & (a > 0) \\ -\frac{\pi}{2} & (a < 0) \end{cases}$$

$$6) \int_0^{\pi} \frac{dx}{a + b \cos x} = \frac{\pi}{\sqrt{a^2 - b^2}} \quad (a > b \geq 0)$$

$$7) \int_0^{2\pi} \frac{dx}{1 + a \cos x} = \frac{2\pi}{\sqrt{1 - a^2}} \quad (a^2 < 1)$$

$$8) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{a^2 \sin^2 x + b^2 \cos^2 x} = \frac{\pi}{2ab}$$

$$9) \int_0^{\pi} \ln \sin x dx = \int_0^{\pi} \ln \cos x dx = -\pi \ln 2$$

$$10) \int_0^a \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \frac{\pi}{2}$$

$$11) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \sin x dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \cos x dx$$

$$= - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{x}{\tan x} dx = -\frac{\pi}{2} \ln 2$$

$$12) \int_0^1 \frac{\ln x}{1+x} dx = - \int_0^1 \frac{\ln(1+x)}{x} dx = -\frac{\pi^2}{12}$$

$$13) \int_0^1 \left(\ln \frac{1}{x} \right)^n dx = n!$$

$$14) \int_0^1 x \ln(1-x) dx = -\frac{3}{4}$$

$$15) \int_0^1 x \ln(1+x) dx = \frac{1}{4}$$

$$16) \int_0^{\infty} e^{-nx} \sqrt{x} dx = \frac{1}{2n} \sqrt{\frac{\pi}{n}}$$

$$17) \int_0^{\infty} \frac{e^{-nx}}{\sqrt{x}} dx = \sqrt{\frac{\pi}{n}}$$

$$18) \int_0^{\infty} \frac{\sin x}{x} dx = \int_0^{\infty} \frac{\cos x}{\sqrt{x}} dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

$$19) \int_0^1 \left(\ln \frac{1}{x} \right)^{1/2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$20) \int_0^{\infty} \frac{x^{a-1}}{1+x} dx = \frac{\pi}{\sin a\pi} \quad (0 < a < 1)$$

$$21) \int_0^{\infty} \frac{\sin^2 x}{x^2} dx = \frac{\pi}{2}$$

$$22) \int_0^{\infty} \frac{\sin ax}{x} dx = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & (a > 0) \\ -\frac{\pi}{2} & (a < 0) \end{cases}$$

$$23) \int_0^{\infty} \frac{\sin ax \sin bx}{x} dx = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{a+b}{a-b} \right)$$

$$24) \int_0^{\infty} \frac{\sin ax \cos bx}{x} dx = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & (0 < b < a) \\ 0 & (0 < a < b) \\ \frac{\pi}{4} & (0 < a = b) \end{cases}$$

$$25) \int_0^{\infty} \frac{\tan x}{x} dx = \frac{\pi}{2}$$

$$26) \int_0^{\infty} \sin^2 x dx = \int_0^{\infty} \cos^2 x dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

$$27) \int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}} \quad (a > 0)$$

$$28) \int_0^{\infty} e^{-ax} dx = \frac{1}{a} \quad (a > 0)$$

$$29) \int_0^{\infty} e^{-ax} \cos bx dx = \frac{a}{a^2 + b^2} \quad (a > 0)$$

30) $\int_0^{\infty} e^{-ax} \sin bx dx = \frac{b}{a^2 + b^2} \quad (a > 0)$
 31) $\int_0^{\infty} \frac{e^{-ax} - e^{-bx}}{x} dx = \ln \frac{b}{a}$
 32) $\int_0^{\infty} e^{-a^2 x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a}$
 33) $\int_0^{\infty} e^{-ax} (\cos mx) dx = \frac{a}{a^2 + m^2} \quad (a > 0)$
 34) $\int_0^{\infty} e^{-ax} (\sin mx) dx = \frac{m}{a^2 + m^2} \quad (a > 0)$

3.4 微分方程

(1) 一阶常微分方程

1) 变量可分离方程

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f(x)}{g(y)}$$

通解: $\int f(x) dx = \int g(y) dy + C$

2) 齐次方程

$$\frac{dy}{dx} = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

通解: $\ln x = \int \frac{du}{f(u) - u} + C_1$
 (设 $u = y/x$)

3) 线性方程

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x)$$

$q(x) = 0$ 为齐次方程。

$q(x) \neq 0$ 为非齐次方程, 其通解为

$$y = e^{-\int p(x) dx} \left[\int q(x) e^{\int p(x) dx} dx + C \right]$$

4) 伯努利方程

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x)y^n \quad (n \neq 0, 1)$$

令 $z = y^{1-n}$, 化原方程为线性方程, 其通解为

$$y^{1-n} e^{(1-n)\int p(x) dx} = (1-n) \int q(x) e^{(1-n)\int p(x) dx} dx + C$$

5) 全微分方程

$$p(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0, \text{ 且满足 } \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial Q}{\partial x}$$

如方程左边恰好是 $u = v(x, y)$ 的全微分, 则

$$du = P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0, \text{ 其通解 } u(x, y) = C, \text{ 其中}$$

$$u(x, y) = \int^{(x, y)} P(x, y)dx + Q(x, y)dy$$

(2) 二阶常微分方程

常系数二阶齐次方程

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + a \frac{dy}{dx} + by = 0 \quad (a, b \text{ 为实常数})$$

令 $y = e^{\lambda x}$, 代入原方程, 得到特征方程

$$\lambda^2 + a\lambda + b = 0$$

其根为 λ_1, λ_2

1) $\lambda_1 \neq \lambda_2$ (实根), 通解 $y = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{\lambda_2 x}$, C_1, C_2 是任意常数

2) $\lambda_1 = \lambda_2$, 通解 $y = (C_1 + C_2 x) e^{\lambda_1 x}$

3) $\lambda_1 = \alpha + \beta i, \lambda_2 = \alpha - \beta i$, 通解 $y = e^{\alpha x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$

4 常用几何体的体积、面积及几何重心的计算公式

表 12.3-1 常用几何体的体积、面积及几何重心的计算公式

(1) 长方体

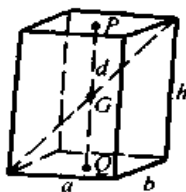
体积 $V = abh$

表面积 $S = 2(ab + ah + bh)$

侧面积 $M = 2h(a + b)$

对角线 $d = \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}$

重心 G 在对角线交点上



(2) 正六棱柱

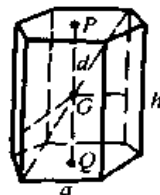
体积 $V = \frac{3\sqrt{3}}{2} a^2 h$

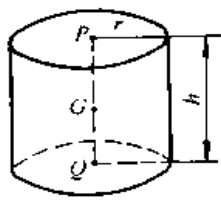
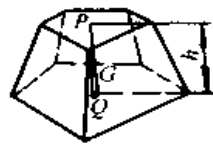
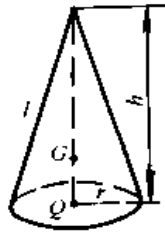
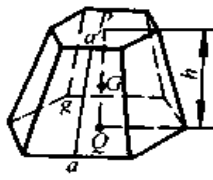
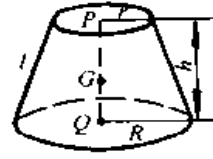
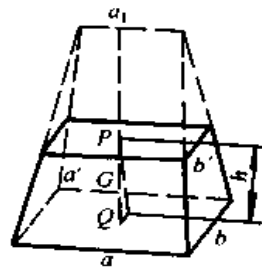
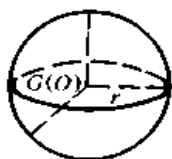
表面积 $S = 3\sqrt{3} a^2 + 6ah$

侧面积 $M = 6ah$

对角线 $d = \sqrt{h^2 + 4a^2}$

重心 $GQ = \frac{1}{2} h$ (P, Q 分别为上、下底的重心)



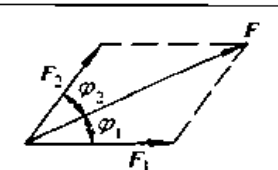
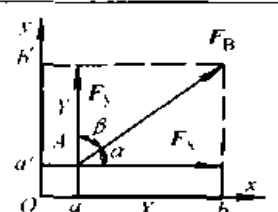
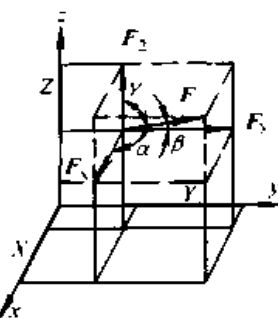
<p>(3) 正棱锥</p> <p>体积 $V = \frac{1}{3} Fh$ (F 为底面积)</p> <p>表面积 $S = M + F$</p> <p>侧面积 $M = nF' = \frac{1}{2} n a g$</p> <p>($F'$ 为一侧三角形面积, n 为棱数, g 为斜高)</p> <p>重心 $GQ = \frac{1}{4} h$ (Q 为底面重心)</p>	<p>(7) 圆柱体</p> <p>体积 $V = \pi r^2 h$</p> <p>表面积 $S = 2\pi r(r + h)$</p> <p>侧面积 $M = 2\pi r h$</p> <p>重心 $GQ = \frac{1}{2} h$</p> <p>(P、Q 分别为上下底圆心)</p> 
<p>(4) 棱台</p> <p>体积 $V = \frac{1}{3} h(F + F' + \sqrt{FF'})$</p> <p>($F'$、$F$ 分别为上下底面积)</p> <p>重心 $GQ = \frac{h}{4} \times \frac{F + 2\sqrt{FF'} + 3F'}{F + F' + \sqrt{FF'}}$</p> <p>($P$、$Q$ 分别为上、下底重心)</p> 	<p>(8) 圆锥体</p> <p>体积 $V = \frac{1}{3} \pi r^2 h$</p> <p>表面积 $S = \pi r(r + l)$</p> <p>侧面积 $M = \pi r l$</p> <p>母线 $l = \sqrt{r^2 + h^2}$</p> <p>重心 $GQ = \frac{1}{4} h$</p> <p>(Q 为底圆圆心)</p> 
<p>(5) 正棱台</p> <p>体积 $V = \frac{1}{3} hF[1 + \frac{a'}{a} + (\frac{a'}{a})^2]$</p> <p>表面积 $S = M + F' + F$</p> <p>侧面积 $M = \frac{1}{2} n(a' + a)g$</p> <p>($F'$、$F$ 分别为上、下底面积, n 为棱数, g 为斜高)</p> <p>重心 $GQ = \frac{h}{4} \times \frac{a^2 + 2a'a + 3a'^2}{a^2 + a'a + a'^2}$</p> <p>($P$、$Q$ 分别为上下底重心)</p> 	<p>(9) 圆台</p> <p>体积 $V = \frac{1}{3} \pi h(R^2 + r^2 + Rr)$</p> <p>表面积 $S = M + \pi(R^2 + r^2)$</p> <p>侧面积 $M = \pi l(R + r)$</p> <p>母线 $l = \sqrt{(R - r)^2 + h^2}$</p> <p>重心 $GQ = \frac{1}{4} h(R^2 + 2Rr + 3r^2)/(R^2 + Rr + r^2)$</p> 
<p>(6) 拟棱台</p> <p>体积 $V = \frac{1}{6} h[ab + (a + a') \times (b + b') + a'b']$</p> <p>截头棱长 $a_1 = (a'b - ab')/(b - b')$</p> <p>重心 $GQ = \frac{1}{2} h(ab + ab' + a'b + 3a'b')/(2ab + ab' + a'b + 2a'b')$</p> <p>($P$、$Q$ 分别为上下底重心)</p> 	<p>(10) 球</p> <p>体积 $V = \frac{4}{3} \pi r^3$</p> <p>表面积 $S = 4\pi r^2$</p> <p>重心 G 与球心重合</p> 

原书缺页

第4章 力学公式

1 静力学

表 12.4-1 力的分解及在直角坐标轴上的投影

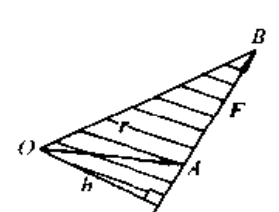
序号	分解类型	图示	计算式	说明
1	力沿两非正交方向的分解		$F = F_1 + F_2$ $F_1 = \frac{F}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \sin \varphi_2$ $F_2 = \frac{F}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \sin \varphi_1$	分力 F_1 、 F_2 与力 F 作用点相同
2	力沿平面直角坐标轴方向的分解与投影		$F = F_x + F_y$ $= Xi + Yj$ <p>式中 $X = F_x = F \cos \alpha$ } 分别称为力 F</p> <p style="margin-left: 150px;">$Y = F_y = F \cos \beta$ } F 在 x、y</p> <p style="margin-left: 150px;">轴上的投影</p> $F = \sqrt{X^2 + Y^2}$	分力 F_x 、 F_y 与力 F 作用点相同
3	力沿空间直角坐标轴的分解与投影		$F = F_x + F_y + F_z$ $= Xi + Yj + Zk$ <p>式中</p> $X = F_x = F \cos \alpha$ } 分别称为力 F $Y = F_y = F \cos \beta$ } 在 X 、 Y 和 Z 轴 $Z = F_z = F \cos \gamma$ } 上的投影 $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$	分力 F_x 、 F_y 、 F_z 与力 F 作用点相同

注：1. i 、 j 、 k 分别为沿坐标轴 x 、 y 和 z 的单位矢量。

2. 规定如力的始末端在坐标轴上的投影指向与坐标轴正向一致，则力在该轴上的投影为正，反之为负。

3. 本表力的分解与投影的计算方法也适用于其他力学矢量，如后面提到的力矩、动量和动量矩矢量等。

表 12.4-2 力矩和力偶矩的计算式

序号	类型	图示	计算公式	说明
1	平面力系的力对作用面上一点 O 的矩		$M_o(F) = \pm Fh = 2\Delta OAB \text{ 面积}$	为代数量，规定力绕 O 点逆时针转，力矩为正，反之为负

续表 12.4-2

序号	类型	图示	计算公式	说明
2	空间力系的力对一点O的矩	<p> $r = xi + yj + zk$ $F = Xi + Yj + Zk$ </p>	$M_0(F) = r \times F = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x & y & z \\ X & Y & Z \end{vmatrix}$ $= M_x(F)i + M_y(F)j + M_z(F)k$ <p> 式中 $M_x(F) = yZ - zY$ $M_y(F) = zX - xZ$ $M_z(F) = xY - yX$ </p> <p> 分别为力 F 对 x, y, z 轴的矩 </p> $|M_0(F)| = \sqrt{M_x^2(F) + M_y^2(F) + M_z^2(F)}$	力矩矢 $M_0(F)$ 作用于 O 点, 垂直于 F 和 O 点确定的平面, 指向按右手螺旋规则确定。 $M_x(F), M_y(F)$ 和 $M_z(F)$ 为代数量, 规定沿相应轴正方向看, 逆时针转为正, 顺时针转为负
3	力对任一方向轴 λ 的矩	<p> $r = xi + yj + zk$ $F = Xi + Yj + Zk$ </p>	$M_\lambda(F) = (r \times F) \cdot n$ $= \begin{vmatrix} x & y & z \\ X & Y & Z \\ \alpha & \beta & \gamma \end{vmatrix}$ $= (yZ - zY)\alpha + (zX - xZ)\beta + (xY - yX)\gamma$	$n = \alpha i + \beta j + \gamma k$ 为沿 λ 轴的单位矢量, α, β, γ 为单位矢量方向余弦。 i, j, k 分别为沿 x, y, z 轴的单位矢量
4	平面力系对面内一点的合力矩		$M_0 = \sum M_0(F_i)$	若平面力系可简化为一个合力 R , 则有如下合力矩定理: $\sum M_0(F_i) = M_0(R)$
5	空间力系对任一点的合力矩		$M_0 = \sum M_0(F_i)$	若空间力系可简化为一个合力 R , 则有如下合力矩定理: $\sum M_0(F_i) = M_0(R)$
6	力偶矩		$M(F, F') = Fdk$ <p> 式中 d—力偶臂, 为两平行力 F 和 F' 间的垂直距离; k—力偶作用面垂直轴 z 的单位矢量 </p>	力偶矩矢 $M(F, F')$ 垂直 F, F' 的作用面, 指向按右手螺旋规则确定

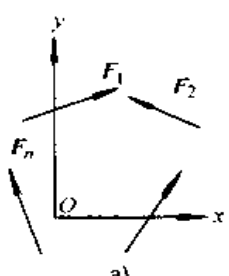
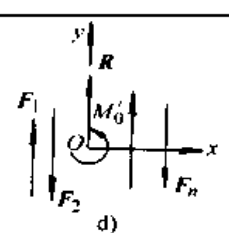
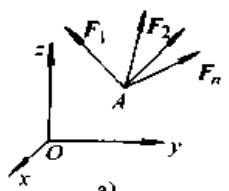
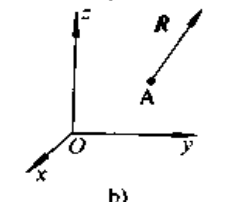
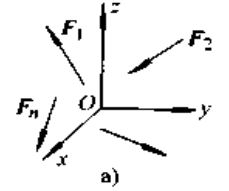
续表 12.4-2

序号	类型	图示	计算公式	说明
7	平面力偶系的合力偶矩		$M = \sum M(F_i, F_i')$	规定力偶矩、逆时针向为正, 顺时针向为负
8	空间力偶系的合力偶矩		$M = \sum M(F_i, F_i')$	

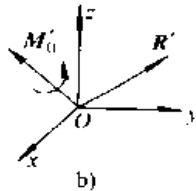
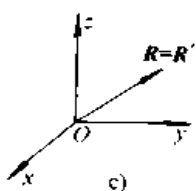
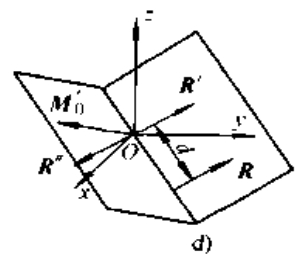
表 12.4-3 力系的简化与合成及平衡条件 (平衡方程)

序号	力系类型	图示	简化与合成	平衡条件 (平衡方程)
1	两同向平行力		合力大小 $R = F_1 + F_2$ 合力作用线位置 $\frac{AC}{CB} = \frac{F_2}{F_1}$ (R 与两力平行)	不能平衡
2	两反向平行力		合力大小 $R = F_2 - F_1$ 合力作用线位置 (在大力 F2 外侧) $\frac{BC}{AB} = \frac{F_1}{R}$ (R 与两力平行)	不能平衡
3	平面汇交力系		合成为过力系汇交点的合力 $R = R_x i + R_y j$ 式中 合力在 x、y 轴上的投影 $R_x = \sum X_i$ $R_y = \sum Y_i$ 称合力投影定理 合力大小 $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2}$ 合力与 x 轴夹角 $\tan(R, i) = \frac{\sum Y_i}{\sum X_i}$	$\sum X_i = 0$ $\sum Y_i = 0$

续表 12.4-3

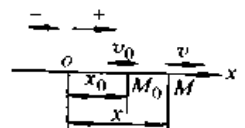
序号	力系类型	图示	简化与合成	平衡条件 (平衡方程)
4	平面 一般力系	 <p>a)</p>	<p>向任一点 O 简化得主矢和主矩 (图 b)</p> <p>主矢 $R' = R'_x i + R'_y j$ (与简化中心位置无关)</p> <p>其中 $R'_x = \sum X_i, R'_y = \sum Y_i$</p> $R' = \sqrt{(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2}$ $\tan(R', i) = \frac{\sum Y_i}{\sum X_i}$ <p>主矩 $M'_0 = \sum M_0(F_i)$ (与简化中心位置有关)</p> <p>若 1) $R' = 0, M'_0 \neq 0$ 即力系合成为一个合力偶, 合力偶矩即为 M'_0 (此时与 O 的位置无关)</p> <p>2) $R' \neq 0, M'_0 = 0$, 即力系合成为一个合力 $R = R'$, 作用线通过 O 点</p> <p>3) $R' \neq 0, M'_0 \neq 0$, 力系也合成为一个合力 R (图 c), 大小与方向与主矢同, 其作用线到 O 点的垂直距离:</p> $d = \frac{M'_0}{R'}$ <p>且 R 对 O 的转向与 M'_0 相同</p>	<p>基本形式</p> $\left. \begin{aligned} \sum X_i &= 0 \\ \sum Y_i &= 0 \\ \sum M_0(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\}$ <p>两矩式</p> $\left. \begin{aligned} \sum X_i &= 0 \\ \sum M_A(F_i) &= 0 \\ \sum M_B(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{两矩心} \\ A, B \text{ 的} \\ \text{连线不能} \\ \text{与 } x \text{ 轴} \\ \text{垂直} \end{array}$ <p>三矩式</p> $\left. \begin{aligned} \sum M_A(F_i) &= 0 \\ \sum M_B(F_i) &= 0 \\ \sum M_C(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{三矩心} \\ A, B, C \text{ 不} \\ \text{能在一条直} \\ \text{线上} \end{array}$
		 <p>d)</p>	<p>特例若为平行力系, 并取 x 轴与力作用线垂直 (图 d)</p> <p>主矢 $R = R_y j$</p> $R = R_y = \sum Y_i$ <p>主矩 $M'_0 = \sum M_0(F_i)$</p>	<p>基本形式</p> $\left. \begin{aligned} \sum Y_i &= 0 \\ \sum M_0(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\}$ <p>两矩式</p> $\left. \begin{aligned} \sum M_A(F_i) &= 0 \\ \sum M_B(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{矩心 } A, B \\ \text{连线不能} \\ \text{与力作用} \\ \text{线平行} \end{array}$
5	空间汇 交力系	 <p>a)</p>  <p>b)</p>	<p>可合成为过力系汇交点的合力 (图 b)</p> $R = R_x i + R_y j + R_z k$ <p>式中合力 R 在三坐标轴上的投影</p> $R_x = \sum X_i, R_y = \sum Y_i, R_z = \sum Z_i$ <p>合力大小</p> $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$ $= \sqrt{(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2 + (\sum Z_i)^2}$ <p>合力方位</p> $\cos(R, i) = \frac{\sum X_i}{R}, \cos(R, j) = \frac{\sum Y_i}{R}$ $\cos(R, k) = \frac{\sum Z_i}{R}$	$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= 0 \\ \sum Y_i &= 0 \\ \sum Z_i &= 0 \end{aligned} \right\}$
6	空间一 般力系	 <p>a)</p>	<p>向任一点 O 简化得主矢和主矩矢 (图 b)</p> <p>主矢</p> $R' = R'_x i + R'_y j + R'_z k \text{ (与 } O \text{ 点位置无关)}$	

续表 12.4-3

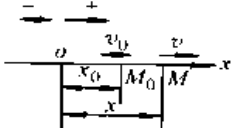
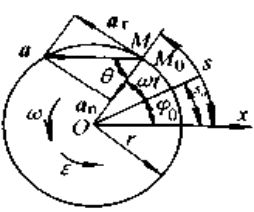
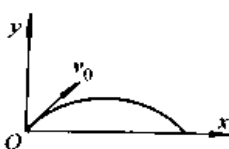
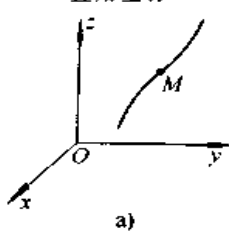
序号	力系类型	图示	简化与合成	平衡条件 (平衡方程)
6	空间一般力系	 <p>b)</p>  <p>c)</p>  <p>d)</p> <p>($R'' = R' = R$)</p>	<p>式中主矢在坐标轴上的投影</p> $R'_x = \sum X_i, R'_y = \sum Y_i, R'_z = \sum Z_i$ <p>主矢大小</p> $R' = \sqrt{R_x'^2 + R_y'^2 + R_z'^2}$ $= \sqrt{(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2 + (\sum Z_i)^2}$ <p>主矢方位</p> $\cos(R', i) = \frac{\sum X_i}{R'}, \cos(R', j) = \frac{\sum Y_i}{R'}$ $\cos(R', k) = \frac{\sum Z_i}{R'}$ <p>主矩矢</p> $M_0 = \sum M_0(F_i) = \sum M_x(F_i)i + \sum M_y(F_i)j + \sum M_z(F_i)k \text{ (与 } O \text{ 点位置有关)}$ <p>主矩矢大小</p> $M_0 = \sqrt{(\sum M_x(F_i))^2 + (\sum M_y(F_i))^2 + (\sum M_z(F_i))^2}$ <p>主矩矢方位</p> $\cos(M_0, i) = \frac{\sum M_x(F_i)}{M_0}$ $\cos(M_0, j) = \frac{\sum M_y(F_i)}{M_0}$ $\cos(M_0, k) = \frac{\sum M_z(F_i)}{M_0}$ <p>若</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) $R' \neq 0, M_0 \neq 0$ 则力系合成为一个合力 $R = R'$ (图 c) 2) 若 $R' \neq 0, M_0 \neq 0$, 但 R' 与 M_0 垂直仍可合成为一个合力 R (图 d), 其大小和方向与 R' 同, 且 R 与 R' 确定的平面与 M_0 垂直, R 作用线到 O 点垂直距离 $d = \frac{M_0}{R}$ 3) $R' = 0, M_0 \neq 0$, 即力系合成为一个合力偶 $M_0 = M_0'$ 4) $R' \neq 0, M_0 \neq 0$, 且 R' 不与 M_0 垂直, 则为一般情况 	$\left. \begin{aligned} \sum X_i &= 0 \\ \sum Y_i &= 0 \\ \sum Z_i &= 0 \\ \sum M_x(F_i) &= 0 \\ \sum M_y(F_i) &= 0 \\ \sum M_z(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\}$ <p>特例</p> <p>若为空间平行力系, 取 z 轴与各力作用线平行</p> $\left. \begin{aligned} \sum Z_i &= 0 \\ \sum M_x(F_i) &= 0 \\ \sum M_y(F_i) &= 0 \end{aligned} \right\}$

2 运动学

表 12.4-4 质点的运动方程、速度和加速度的计算式

序号	质点运动类型	描述运动的坐标系	运动方程、速度和加速度计算式	说明
1	直线运动		<p>匀速直线运动</p> $x = x_0 + vt$ $v = \text{常数}$ $a = 0$	<p>t—时间</p> <p>v—速度</p> <p>a—加速度</p> <p>x_0—初始位置</p>
2			<p>匀变速运动</p> $x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ $v = v_0 + at$ $a = \text{常数}$ $x - x_0 = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$	<p>v_0—初速度</p> <p>若为自由落体运动</p> <p>$a = g$ (重力加速度)</p>

续表 12.4.4

序号	质点运动类型	描述运动的坐标系	运动方程、速度和加速度计算式	说明
3	直线运动		一般变速运动 $x = x(t)$ $v = \frac{dx}{dt} \left\{ \begin{array}{l} x = x_0 + \int_0^t v dt \\ v = v_0 + \int_0^t a dt \end{array} \right.$	运动方程 $x(t)$ 函数已知, 或由给定条件导出, 或由速度方程积分求得 (初始条件给定)
4			简谐运动 $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ $v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ $a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0)$	A—振幅, 即动点距原点最大距离 ω —圆频率 φ_0 —初位相角
5	圆周运动		$s = r(\varphi_0 + \int_0^t \omega dt)$ $v = r\omega$ $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$ 式中 切向加速度 $a_t = r \frac{d\omega}{dt} = r\varepsilon$ 法向加速度 $a_n = \frac{v^2}{r} = r\omega^2$ 加速度方位角 $\theta = \arctan \frac{a_t}{a_n} = \arctan \frac{\varepsilon}{\omega^2}$	ω —角速度 ε —角加速度 r —运动轨迹半径 当匀速圆周运动时 $\omega = \text{常数}$ $\varepsilon = a_t = 0$
6	抛物线运动		$x = v_{0x}t$ $y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$ $v_x = v_{0x}$ $v_y = v_{0y} - gt$ $a_x = 0$ $a_y = -g$	v_{0x} —初速度沿 x 方向的分量 v_{0y} —初速度沿 y 方向的分量
7	一般曲线运动	直角坐标 	$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$ $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$ $(v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt})$ $\cos\alpha = \frac{v_x}{v}, \cos\beta = \frac{v_y}{v}, \cos\gamma = \frac{v_z}{v}$ $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$ $(a_x = \frac{dv_x}{dt}, a_y = \frac{dv_y}{dt}, a_z = \frac{dv_z}{dt})$ $\cos\alpha' = \frac{a_x}{a}, \cos\beta' = \frac{a_y}{a}, \cos\gamma' = \frac{a_z}{a}$	α, β, γ 分别为速度矢量与 x, y, z 轴的夹角 α', β', γ' 分别为加速度矢量与 x, y, z 轴的夹角 若为平面运动轨迹 $z(t) = v_z = a_z = 0$

续表 12.4-4

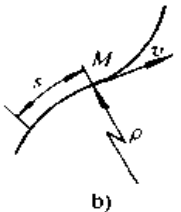
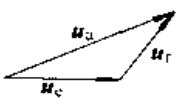
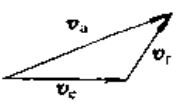
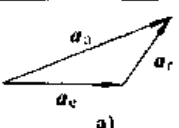
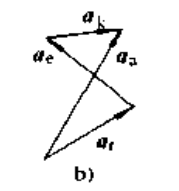
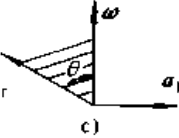
序号	质点运动类型	描述运动的坐标系	运动方程、速度和加速度计算式	说明
7	一般曲线运动	自然坐标 	$s = s(t)$ $v = \frac{ds}{dt}$ $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$ $a_t = \frac{dv}{dt}, a_n = \frac{v^2}{\rho}$	速度 v 及切向加速度 a_t 的方向沿轨迹切向, 法向加速度 a_n 沿轨迹主法线方向, 并指向曲率中心; ρ 为质点所处位置轨迹的曲率半径

表 12.4-5 点的合成运动的计算公式

序号	合成运动量	计算公式	图示与说明
1	位移	$u_a = u_e + u_r$	
2	速度	$v_a = v_e + v_r$	
3	加速度	牵连运动为平动(图 a) $a_a = a_e + a_r$	
		牵连运动为转动(图 b) $a_a = a_e + a_r + a_k$ 式中哥氏加速度 $a_k = 2\omega \times v_r$ (图 c) $a_k = 2\omega v_r \sin\theta$ a_k 垂直 ω 和 v_r 所在平面, 方向按右手螺旋规则确定	 

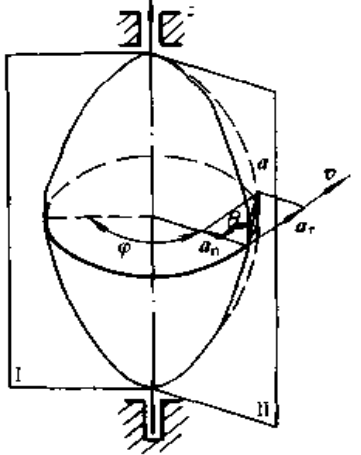
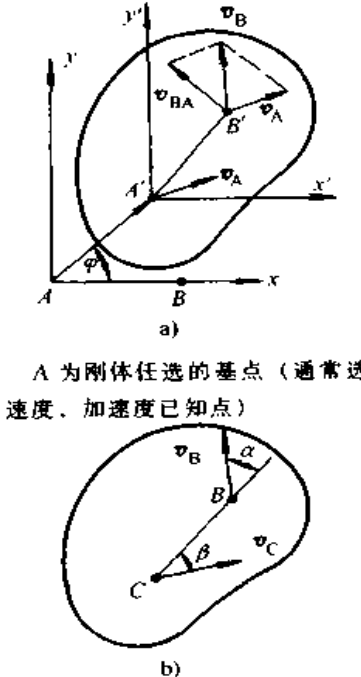
注: 1. u, v, a 和 ω 分别为位移、速度、加速度和角速度矢量, 其下标 a, e, r 、分别表示绝对、牵连和相对运动引起的。

2. 计算可用矢量合成的图解法, 也可用直角坐标投影解析求解。

表 12.4-6 刚体运动的常用计算公式

序号	运动类型	刚体整体运动的计算式	刚体内任一点运动的计算式	图示与说明
1	平动	刚体内各点运动的轨迹、速度和加速度相同, 故其计算与点的运动一样(表 12.4-4)		

续表 12.4-6

序号	运动类型	刚体整体运动的计算式	刚体内任一点运动的计算式	图示与说明
2	定轴转动	转角 $\varphi = \varphi(t)$ 角速度 $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ 角加速度 $\epsilon = \frac{d\omega}{dt}$ $\varphi = \varphi_0 + \int_0^t \omega dt$ $\omega = \omega_0 + \int_0^t \epsilon dt$ 特例 1) 匀速转动 ($\epsilon = 0$) $\omega = \text{常数}$ $\varphi = \varphi_0 + \omega t$ 2) 匀变速转动 ($\epsilon = \text{常数}$) $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \epsilon t^2$ $\omega = \omega_0 + \epsilon t$ $\omega^2 = \omega_0^2 + 2\epsilon(\varphi - \varphi_0)$	$s = r\varphi = r(\varphi_0 + \int_0^t \omega dt)$ $v = r\omega$ $a = \sqrt{a_r^2 + a_n^2}$ $a_r = r\epsilon, a_n = r\omega^2$ $\theta = \arctan \frac{\epsilon}{\omega^2} < 90^\circ$ 特例 1) 匀速转动 $s = r(\varphi_0 + \omega t)$ $v = r\omega$ $a_r = 0, a_n = r\omega^2 = a$ $\theta = 0$ 2) 匀变速转动 $s = r(\varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \epsilon t^2)$ $v = r(\omega_0 + \epsilon t)$ $a_r = r\epsilon, a_n = r\omega^2$ $a = r\sqrt{\epsilon^2 + \omega^4}$ $\theta = \arctan \frac{\epsilon}{\omega^2} < 90^\circ$	 <p>I — 固定平面 II — 随刚体转动平面</p> <p>1) 规定从 ϵ 轴正向看去, 逆时针转的 φ_0, φ 角为正, 顺时针转为负 2) $d\varphi > 0, \omega$ 为正; $d\varphi < 0, \omega$ 为负 3) $d\omega > 0, \epsilon$ 为正; $d\omega < 0, \epsilon$ 为负 4) 切向加速度 a_r 垂直半径, ϵ 为正时, 与 ω 方向同, ϵ 为负时, 与 ω 方向相反。法向加速度沿径向指向转轴</p>
3	平面运动	为随基点 A 的牵连运动和绕基点的相动转动的合成。基点的位移、速度与加速度分别为 u_A, v_A, a_A (与所选的基点位置有关), 绕基点的转角、角速度、角加速度分别为 φ, ω 和 ϵ (与基点选择无关) xAy —固定坐标系 $x'A'y'$ —与基点 A 固结, 相对 xAy 作平动的坐标系 A、B—初始点位置 A'、B'—某瞬时位置	速度合成法 (图 a) $v_B = v_A + v_{BA}$ $v_{BA} = \overline{AB}\omega$ (v_{BA} 方向垂直 AB, 沿 ω 转向) $v_B \cos \alpha = v_A \cos \beta$ (图 b) (速度投影定理)	 <p>A 为刚体任选的基点 (通常选速度、加速度已知点) B、C 为刚体上的任两点</p>

续表 12.4-6

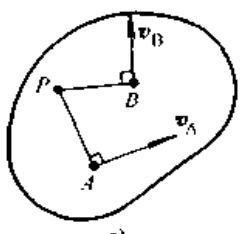
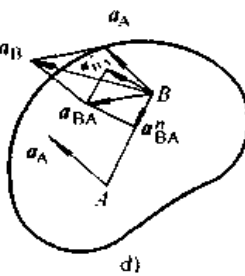
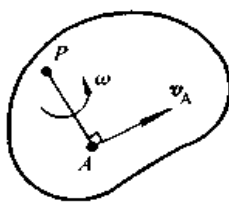
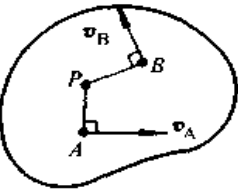
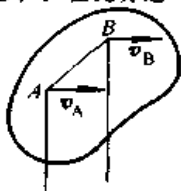
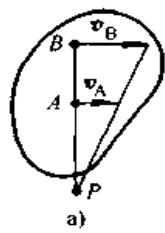
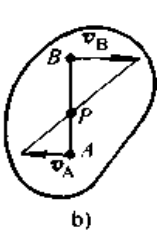
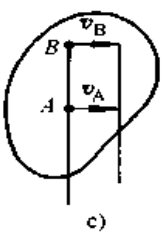
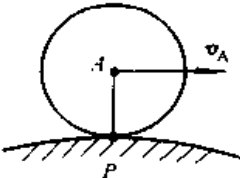
序号	运动类型	刚体整体运动的计算式	刚体内任一点运动的计算式	图示与说明
3	平面运动		瞬心法： $v_B = \overline{BP}\omega$ (图 c) v_B 垂直于 BP ，沿 ω 转向 $a_B = a_A + a_{BA}^t + a_{BA}^n$ (图 d) $a_{BA}^t = \overline{AB} \times \epsilon$ (与 ϵ 向同) $a_{BA}^n = \overline{AB}\omega^2$ (由 B 指向 P 点) $\alpha = \arctan \frac{\epsilon}{\omega^2} < 90^\circ$	 <p>c)</p> 速度瞬心位置 P 的确定见表 12.4-7  <p>d)</p>

表 12.4-7 确定刚体平面运动速度瞬心的方法

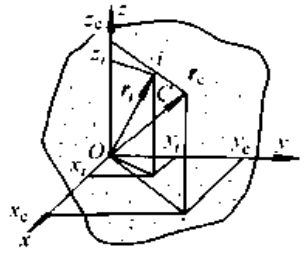
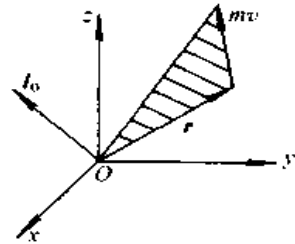
序号	已知条件	图示	确定方法
1	已知点 A 速度 v_A 的大小和方向、及刚体角速度 ω 的大小和转向		将 v_A 顺 ω 方向转 90° 作一直线，在该直线上由 $\overline{AP} = \frac{v_A}{\omega}$ 定速度瞬心 P 点
2	已知 A 、 B 两点速度 v_A 、 v_B 的方向 (序号 3 的情况除外)	特例： v_A 、 v_B 平行且不垂直 AB ， P 在无穷远  <p>a)</p>  <p>b)</p>	过 A 、 B 点作 v_A 、 v_B 的垂线，其交点即为速度瞬心 P
3	已知 A 、 B 两点速度 v_A 、 v_B 的大小及方向，且两者平行，并垂直于 AB 连线	特例： $v_A = v_B$ 在无穷远  <p>a)</p>  <p>b)</p>  <p>c)</p>	A 、 B 两点速度端点的连线与 AB 直线的交点即为速度瞬心 P

续表 12.4-7

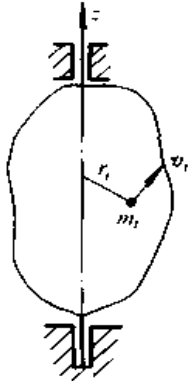
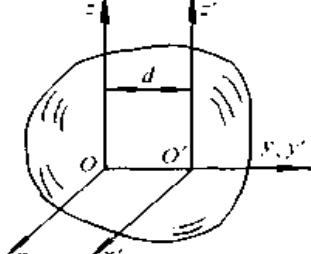
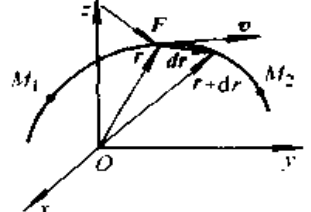
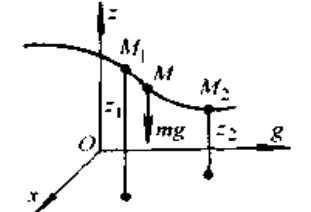
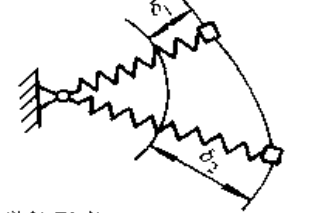
序号	已知条件	图示	确定方法
4	刚体沿某固定面作无滑动的滚动		刚体与固定面的接触点即为速度瞬时

3 动力学

表 12.4-8 常用动力学物理量的计算公式

序号	物理量名称	计算公式	图示与说明
1	质点系的质量 中心位置 r_c (x_c, y_c, z_c)	矢径 $r_c = \frac{\sum m_i r_i}{M}$ 坐标公式 (又称质心运动方程) $x_c = \frac{\sum m_i x_i}{M}, y_c = \frac{\sum m_i y_i}{M}$ $z_c = \frac{\sum m_i z_i}{M}$	 r_i, x_i, y_i, z_i 分别为某质点的矢径和坐标 r_c, x_c, y_c, z_c 分别为质心的矢径和坐标 m_i, M 分别为某质点质量和质点系总质量
2	动量 p	质点动量 $p = mv = m(v_x i + v_y j + v_z k)$ 质点系动量 $p = \sum m_i v_i = mv_c$ $v_c = v_{cx} i + v_{cy} j + v_{cz} k$	v_x, v_y, v_z 为质点速度 v 沿 x, y, z 轴的分量 v_{cx}, v_{cy}, v_{cz} 为质心速度沿 x, y, z 轴的分量
3	力的冲量 I	$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt$ $= \int_{t_1}^{t_2} X dt i + \int_{t_1}^{t_2} Y dt j + \int_{t_1}^{t_2} Z dt k$	X, Y, Z 分别为力 F 在三直角坐标 x, y, z 轴上的投影
4	动量矩 I_0 和 L_0	质点动量对固定点 o 的动量矩 (图 a) 矢量式: $I_0 = M_0(mv) = r \times mv$ 投影式 (即为质点动量对坐标轴的矩) $I_x = M_x(mv) = y(mv_z) - z(mv_y)$ $I_y = M_y(mv) = z(mv_x) - x(mv_z)$ $I_z = M_z(mv) = x(mv_y) - y(mv_x)$	 I_0 垂直于 r 和 mv 所在平面, 指向按右手螺旋规则确定

续表 12.4-8

序号	物理量名称	计算公式	图示与说明
4	动量矩 I_0 和 L_0	质点系对某固定点 O 的动量矩 矢量式 $L_0 = \sum I_0 = \sum r_i \times m v_i$ 投影式 (即质点系对原点为 o 的三坐标轴的动量矩) $L_x = \sum I_x = \sum (y_i m_i v_{iz} - z_i m_i v_{iy})$ $L_y = \sum I_y = \sum (z_i m_i v_{ix} - x_i m_i v_{iz})$ $L_z = \sum I_z = \sum (x_i m_i v_{iy} - y_i m_i v_{ix})$ 特例: 刚体绕定轴 z 的动量矩 (图 b) $L_z = J_z \omega$	 <p>$J_z = \sum m_i r_i^2$—刚体对 z 轴转动惯量</p>
5	刚体转动惯量 J_z 与回转半径 ρ_z	对 z 轴的转动惯量 $J_z = \sum m_i r_i^2 \xrightarrow{\text{当质量连续分布}} \int_M r^2 dm$ 回转半径 $\rho_z = \sqrt{\frac{J_z}{M}}$ 平行移轴定理 $J'_z = J_z + Md^2$	 <p>z' 与 z 平行相距距离为 d, M 为刚体总质量</p>
6	功 W	一般计算式: $W = \int_{M_1}^{M_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ $= \int_{M_1}^{M_2} (Xdx + Ydy + Zdz)$	 <p>X、Y、Z 为力 F 在坐标轴上的投影</p>
		重力的功 $W = mg(z_1 - z_2)$	 <p>z_1、z_2 为物体重心在始末位置的高度</p>
		弹性力的功 $W = \frac{1}{2} k (\delta_1^2 - \delta_2^2)$	 <p>k—弹簧刚度 δ_1、δ_2—弹簧在始末位置的变形量</p>

续表 12.4.8

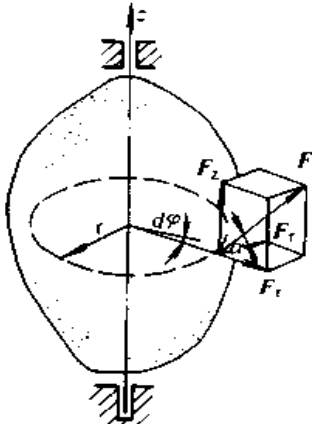
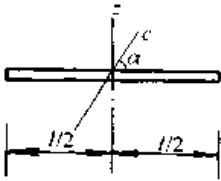
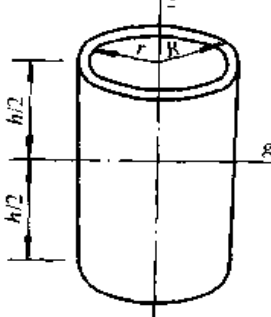
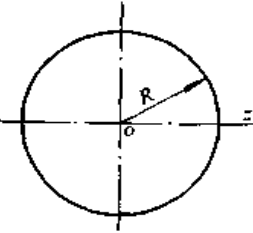
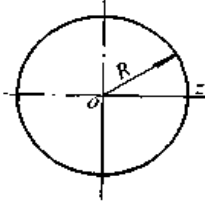
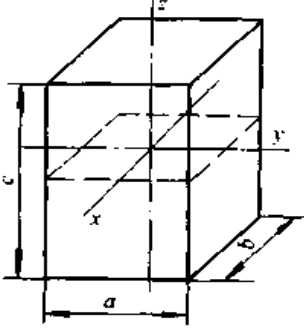
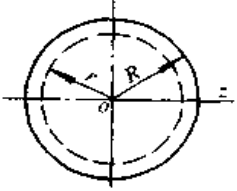
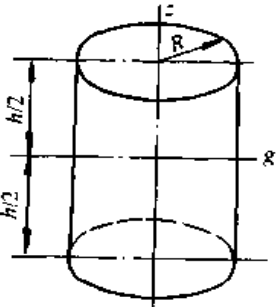
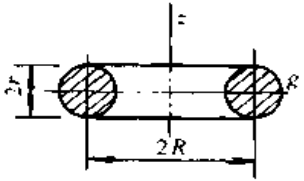
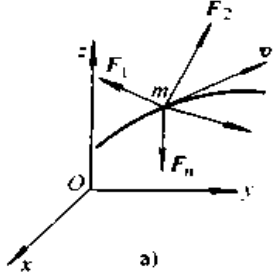
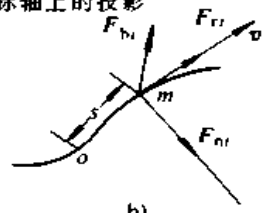
序号	物理量名称	计算公式	图示与说明
6	功 W	作用于绕定轴转动刚体上力的功 $W = \int_0^{\varphi} r(F \cos \alpha) d\varphi$ $= \int_0^{\varphi} M_z(F) d\varphi$	 <p>$M_z(F)$—力 F 对轴的力矩 (或力偶矩)</p>
7	动能 T	质点的动能 $T = \frac{1}{2} m v^2$ 质点系的动能 $T = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2$ 平动刚体的动能 $T = \frac{1}{2} M v_c^2$ 绕定轴 z 转动的刚体的动能 $T = \frac{1}{2} J_z \omega^2$ 平动刚体的动能 $T = \frac{1}{2} M v_c^2 + \frac{1}{2} J_c \omega^2$	m, m_i —质点的质量 v, v_i —质点的速度 M —刚体总质量 v_c —质心 C 的速度 J_z, J_c —刚体绕 z 轴和质心轴的转动惯量 ω —刚体的转动角速度
8	势能 V	重力势能 $V = Mgz$ 弹性力势能 $V = \frac{1}{2} k \delta^2$ 牛顿引力势能 $V = -f \frac{M_1 M_2}{r}$	z —质心到选定零势面的高度 δ —弹簧变形量 (选弹簧原长为零势面) M —重物质量 M_1, M_2 —1、2 两物体质量 f —引力常数 r —1、2 两物体质心距离
9	功率 P	通过力计算: $P = F \cdot v = F v \cos \alpha$ 通过力矩或力偶矩计算 $P = M \omega$	α —力 F 与速度 v 的夹角 M —力对转轴的矩或力偶矩 ω —角速度

表 12.4-9 均质物体的转动惯量

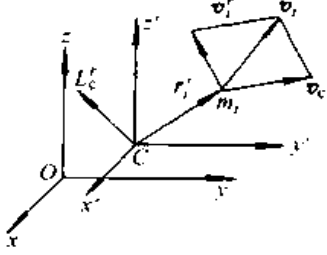
序号	物体图形	转动惯量	序号	物体图形	转动惯量
1	<p>细直杆</p> 	$J_z = \frac{M}{12} l^2$ $J_x = \frac{M}{12} l^2 \sin^2 \alpha$	5	<p>正空心圆柱体</p> 	$J_z = M \frac{R^2 + r^2}{2}$ $J_x = M \frac{1}{4} (R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3})$
2	<p>薄圆板</p> 	$J_z = M \frac{R^2}{4}$ $J_x = M \frac{R^2}{2}$	6	<p>球体</p> 	$J_z = M \frac{2}{5} R^2$
3	<p>正六面体</p> 	$J_x = M \frac{a^2 + c^2}{12}$ $J_y = M \frac{b^2 + c^2}{12}$ $J_z = M \frac{a^2 + b^2}{12}$	7	<p>空心球体</p> 	$J_z = M \frac{2}{5} \cdot \frac{(R^5 - r^5)}{(R^3 - r^3)}$
4	<p>正圆柱体</p> 	$J_z = M \frac{R^2}{2}$ $J_x = M \frac{3R^2 + h^2}{12}$	8	<p>圆截面环形体</p> 	$J_z = M(R^2 + \frac{3r^2}{4})$ $J_x = M(\frac{R^2}{2} + \frac{5r^2}{8})$

注：M 为物体的质量。

表 12.4-10 动力学普遍定理

序号	定理名称	关系式	图示与说明
1	恒质量质点的动量定理	<p>直角坐标投影式 (图 a)</p> <p>矢量式</p> $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum \mathbf{F}_i, \quad \begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = m\ddot{x} = \sum X_i, \\ m \frac{dv_y}{dt} = m\ddot{y} = \sum Y_i, \\ m \frac{dv_z}{dt} = m\ddot{z} = \sum Z_i, \end{cases}$ <p>自然坐标的投影式 (图 b)</p> $\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = m\ddot{s} = \sum F_n \\ m \frac{v^2}{\rho^2} = m \frac{\dot{s}^2}{\rho} = \sum F_n \\ 0 = \sum F_b \end{cases}$ <p>质点动量守恒情况: 若 $\sum \mathbf{F}_i = 0$, 则 $m\mathbf{v} = \text{常矢量}$ 若 $\sum X_i = 0$, 则 $mv_x = \text{常量}$</p>	 <p>a)</p> <p>x, y, z—质点瞬时坐标 X_i, Y_i, Z_i—第 i 个力在三坐标轴上的投影</p>  <p>b)</p> <p>τ, n, b 分别为沿轨迹切向、主法线方向和副法线方向的单位矢量 F_{ni}, F_{ni}, F_b 分别为沿 τ, n 和 b 方向的第 i 个力 F 的三个分量</p>
2	变质量质点的动量定理	<p>直角坐标投影式</p> <p>矢量式</p> $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum \mathbf{F}_i + \frac{dm}{dt} \mathbf{v}_r, \quad \begin{cases} m\ddot{x} = \sum X_i + \frac{dm}{dt} v_{rx} \\ m\ddot{y} = \sum Y_i + \frac{dm}{dt} v_{ry} \\ m\ddot{z} = \sum Z_i + \frac{dm}{dt} v_{rz} \end{cases}$	<p>\mathbf{v}_r 为流出或进入原质点质量的相对速度</p>
3	质点系动量定理	<p>直角坐标投影式</p> <p>矢量式</p> $\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d\sum m_i \mathbf{v}_i}{dt} = \sum \mathbf{F}_i, \quad \begin{cases} \frac{dp_x}{dt} = \frac{d\sum m_i v_{ix}}{dt} = \sum X_i \\ \frac{dp_y}{dt} = \frac{d\sum m_i v_{iy}}{dt} = \sum Y_i \\ \frac{dp_z}{dt} = \frac{d\sum m_i v_{iz}}{dt} = \sum Z_i \end{cases}$ <p>质点系动量守恒情况: 若 $\sum \mathbf{F}_i = 0$, 则 $\mathbf{p} = \sum m_i \mathbf{v}_i = \text{常矢量}$ 若 $\sum X_i = 0$, 则 $p_x = \sum m_i v_{ix} = \text{常量}$</p>	<p>$\sum \mathbf{F}_i$ 为作用质点系各外力的矢量和, $\sum X_i, \sum Y_i, \sum Z_i$ 分别为各外力在三坐标轴上的投影代数和</p>

续表 12.4-10

序号	定理名称	关系式	图示与说明
4	质心运动定理	<p style="text-align: center;">直角坐标投影式</p> <p>矢量式</p> $M\mathbf{a}_c = \sum \mathbf{F}_i \quad \begin{cases} Ma_{cx} = M\dot{v}_{cx} = \sum X_i \\ Ma_{cy} = M\dot{v}_{cy} = \sum Y_i \\ Ma_{cz} = M\dot{v}_{cz} = \sum Z_i \end{cases}$ <p>质心运动守恒情况： 若 $\sum \mathbf{F}_i = 0$, 则 $\mathbf{v}_c =$ 常矢量 若 $\sum X_i = 0$, 则 $v_{cx} =$ 常量</p>	<p>由质点系动量定理导出 \mathbf{F}_i 为作用于质点系的外力 M 为质点系总质量 \mathbf{a}_c 为质心的加速度, 其沿 x, y, z 轴的分量为 a_{cx}, a_{cy} 和 a_{cz}</p>
5	质点动量矩定理	<p style="text-align: center;">直角坐标投影式</p> <p>矢量式</p> $\frac{dI_0}{dt} = \frac{dM_0(m\mathbf{v})}{dt} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = M_0(\mathbf{F}) \quad \begin{cases} \frac{dI_x}{dt} = M_x(\mathbf{F}) \\ \frac{dI_y}{dt} = M_y(\mathbf{F}) \\ \frac{dI_z}{dt} = M_z(\mathbf{F}) \end{cases}$ <p>质点动量矩守恒情况： 若 $M_0(\mathbf{F}) = 0$, 则 $I_0 =$ 常矢量 若 $M_x(\mathbf{F}) = 0$, 则 $I_x =$ 常量</p>	<p>I_0, I_x, I_y, I_z 的计算见表 12.4-8 $M_0(m\mathbf{v}), M_x(\mathbf{F}), M_y(\mathbf{F}), M_z(\mathbf{F})$ 的计算见表 12.4-2</p>
		<p>1) 相对于固定点 (或轴) 的动量矩定理</p> <p style="text-align: center;">直角坐标投影式</p> <p>矢量式</p> $\frac{dL_0}{dt} = \frac{d}{dt} \sum M_0(m, \mathbf{v}_i) = \sum M_0(\mathbf{F}_i) \quad \begin{cases} \frac{dL_x}{dt} = \sum M_x(\mathbf{F}_i) \\ \frac{dL_y}{dt} = \sum M_y(\mathbf{F}_i) \\ \frac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\mathbf{F}_i) \end{cases}$ <p>质点系动量守恒情况： 若 $\sum M_0(\mathbf{F}_i) = 0, L_0 =$ 常矢量 若 $\sum M_x(\mathbf{F}_i) = 0, L_x =$ 常量</p>	<p>各力 \mathbf{F}_i 为外力 L_0, L_x, L_y, L_z 计算见表 12.4-8 $M_x(\mathbf{F}_i), M_y(\mathbf{F}_i), M_z(\mathbf{F}_i)$ 计算见表 12.4-2</p>
6	质点系动量矩定理	<p>2) 相对于质心的动量矩定理</p> $\frac{dL'_c}{dt} = m_c$ <p>$L'_c = \sum \mathbf{r}'_i \times m_i \mathbf{v}'_i$ 为质点系对于质心相对运动的动量矩</p>	 <p>$Cx'y'z'$ 以质心 C 为原点的平动坐标系 (质心坐标系) $Oxyz$ 以固定点 O 为原点的坐标系 \mathbf{v}'_i—任一质点对质心坐标系的相对速度</p>

续表 12.4-10

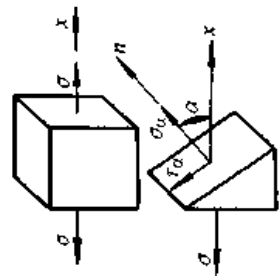
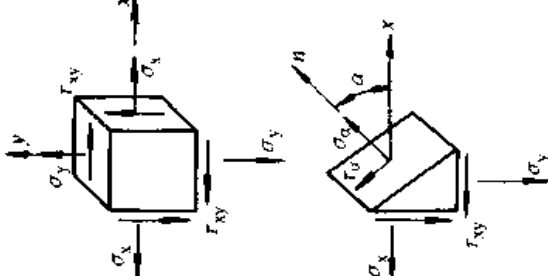
序号	定理名称	关系式	图示与说明
7	动能定理	$T - T_0 = \sum W_i$	T_0 、 T —分别为质点或质点系始末位置的动能 $\sum W_i$ —为作用在质点或质点系上所有外力和内力，从运动初始到终了所做的功
8	机械能守恒定律	$T + V = \text{常量}$	T 、 V —质点或质点系某瞬时的动能和势能 本定律仅在有力作用下适用。如还有其他力作用，但其不做功，本定律仍适用

表 12.4-11 质点及刚体的运动微分方程

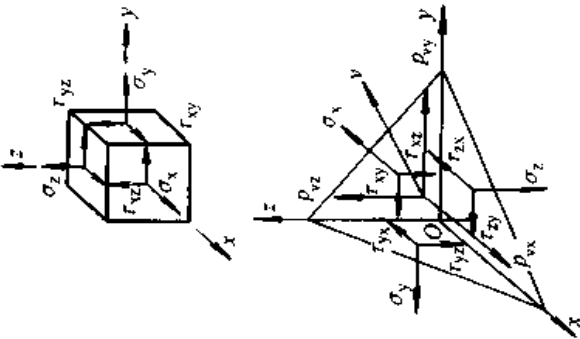
序号	运动类型	运动微分方程	说明
1	质点运动 (恒质量)	直角坐标系 自然坐标系 $m\ddot{x} = \sum X_i$ $m\ddot{s} = \sum F_{\tau i}$ $m\ddot{y} = \sum Y_i$ $m \frac{\dot{s}^2}{\rho} = \sum F_{n i}$ $m\ddot{z} = \sum Z_i$	即恒质量质点动量定理，见表 12.4-10
2	刚体平动	$M\ddot{x}_c = \sum X_i$ $M\ddot{y}_c = \sum Y_i$ $M\ddot{z}_c = \sum Z_i$	\ddot{x}_c 、 \ddot{y}_c 、 \ddot{z}_c —刚体质心在 x 、 y 、 z 方向的加速度分量。 M —刚体总质量
3	刚体定轴转动	$J_z \ddot{\varphi} = M_z$	由动量矩定理导出 J_z —刚体对 z 轴的转动惯量 M_z —作用于刚体外力对 z 轴的合力矩
4	刚体平面运动	$M\ddot{x}_c = \sum X_i$ $M\ddot{y}_c = \sum Y_i$ $J_c \ddot{\varphi} = M_c$	由质心运动定理和相对于质心动量矩定理导出。 M —刚体总质量 J_c —刚体对质心轴的转动惯量 M_c —作用于刚体外力对质心轴合力矩

4 点的应力、应变状态分析和强度理论

表 12.4-12 点的应力状态分析

序号	应力状态类型	图示	斜截面上的应力	主应力	主方向	主切应力和最大切应力
1	单向应力状态		$\sigma_\alpha = \frac{1}{2} \sigma (1 + \cos 2\alpha)$ $\tau_\alpha = -\frac{1}{2} \sigma \sin 2\alpha$	$\sigma_1 = \sigma$ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	$\alpha_p = \begin{cases} 0^\circ \\ 90^\circ \end{cases}$	$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma$ <p>(作用面法线与 x 成 45°)</p>
2	双向应力状态		$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha$ $\tau_\alpha = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha$	$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$ <p>据 $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 及另一主应力 (为零) 代数值的大小, 由大至小依次定为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$</p>	$\tan 2\alpha_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$ <p>若取 $2\alpha_p$ 为主值 $(-\frac{\pi}{2} \leq 2\alpha_p \leq \frac{\pi}{2})$, 则当 $\sigma_x \geq \sigma_y$ 时, 由 x 转 α_p 角至 σ_{\max}, 若 $\sigma_x < \sigma_y$, 由 x 转 α_p 角至 σ_{\min}</p>	<p>主切应力</p> $\tau_{1,2} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$ <p>(在垂直 xy 面的斜截面中)</p> <p>最大切应力</p> $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ <p>(作用面与 σ_2 平行, 与 σ_1, σ_3 向成 45°)</p>

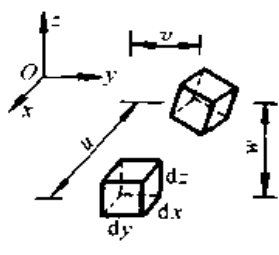
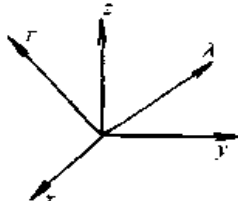
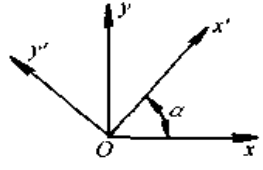
续表 12.4.12

序号	应力状态类型	图示	斜截面上的应力	主应力	主方向	主切应力和最大切应力
3	三向应力状态		<p>斜截面上总应力沿坐标轴的三个分量:</p> $P_{xx} = \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n$ $P_{yy} = \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n$ $P_{zz} = \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n$ <p>(l, m, n 为斜截面法线与 x, y, z 轴的方向余弦)</p>	<p>三个主应力值(σ_1, σ_2 和 σ_3)由下式解得:</p> $\sigma^3 - \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 = 0$ <p>(下标 i 为 I, II, III 表示三个主应力)式中</p> $\sigma_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ $\sigma_2 = -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$ $\sigma_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2$ <p>$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别称为第一、二、三应力不变量。按解得 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的代数值得,由大到小,顺序定为 σ_1, σ_2 和 σ_3</p>	<p>三个主应力方向的方向余弦由如下方程前三个的任二个及第四个方程联立求得</p> $(\sigma_x - \sigma_1)l + \tau_{xy}m + \tau_{xz}n = 0$ $\tau_{yx}l + (\sigma_y - \sigma_1)m + \tau_{yz}n = 0$ $\tau_{zx}l + \tau_{zy}m + (\sigma_z - \sigma_1)n = 0$ $l^2 + m^2 + n^2 = 1$	<p>主切应力</p> $\tau_1 = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ $\tau_2 = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)$ $\tau_3 = \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)$ <p>最大切应力</p> $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ <p>(作用面与 σ_2 平行与 σ_1 和 σ_3 成 45°)</p>

注: 1. 规定在外法线指向坐标轴正向的单元体表面上, 如作用的应力分量沿坐标轴正向, 则取其为正值, 反之取负值; 在外法线指向坐标轴负向的单元体表面上, 如作用的应力分量沿坐标轴负向, 则取其为正值, 反之取负值。

2. 按高等代数, 求主应力的三次方程的三个根为: $\sigma_1 = \frac{\sigma_1}{3} + R \cos \frac{\varphi + 2\pi}{3}$, $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{3} + R \cos \frac{\varphi + 4\pi}{3}$ 。式中 $R = \frac{2}{3} \sqrt{\sigma_1^3 + 3\sigma_2 \sigma_3}$, $\cos \varphi = \frac{2\sigma_1^3 + 9\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 + 27\sigma_3^2}{2(\sigma_1^3 + 3\sigma_2 \sigma_3)^{3/2}}$

表 12.4-13 点的应变状态分析 (小变形条件)

序号	分析项目	图 示	表示或关系式
1	点的应变状态表示及应变点的位移间的关系	 <p>u, v, w 分别为点沿 x, y, z 向位移为点的坐标的函数</p>	<p>单元体三棱边单位长度的伸长或缩短量—线应变</p> $\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$ <p>(拉伸变形为正, 压缩变形为负)</p> <p>单元体三正交棱边直角的改变量—切应变</p> $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$ <p>(直角减小, 切应变为正, 反之, 切应变为负)</p>
2	一般应变状态	 <p>过一点沿任意两正交方向, λ 和 τ 对 x, y, z 轴的方向余弦分别为 l, m, n 和 l', m', n'</p>	<p>沿任意方向 τ 的线应变</p> $\epsilon_\lambda = \epsilon_x l^2 + \epsilon_y m^2 + \epsilon_z n^2 + \gamma_{xy} lm + \gamma_{yz} mn + \gamma_{zx} nl$ <p>沿 $\lambda-\tau$ 正交方向的切应变</p> $\gamma_{\lambda\tau} = 2(\epsilon_x ll' + \epsilon_y mm' + \epsilon_z nn') + \gamma_{xy}(lm' + l'm) + \gamma_{yz}(mn' + m'n) + \gamma_{zx}(nl' + n'l)$ <p>主应变:</p> <p>由如下方程求得三个实根 $\epsilon_I, \epsilon_{II}, \epsilon_{III}$</p> $\epsilon^3 - J_1 \epsilon^2 - J_2 \epsilon - J_3 = 0 \quad (\nu \text{ 取 I, II, III})$ <p>式中</p> $J_1 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ $J_2 = -(\epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_y \epsilon_z + \epsilon_z \epsilon_x) + \frac{1}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)$ $J_3 = \epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z + \frac{1}{4}(\gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx} - \epsilon_x \gamma_{yz}^2 - \epsilon_y \gamma_{zx}^2 - \epsilon_z \gamma_{xy}^2)$ <p>(J_1, J_2, J_3 分别称为第一、二、三应变不变量)</p> <p>按解得的 $\epsilon_I, \epsilon_{II}, \epsilon_{III}$ 的代数值, 由大到小, 顺序定为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$</p> <p>三主应变的方向余弦, 可由如下前三个方程的任二个及第四个方程求得:</p> $(\epsilon_x - \epsilon_1) l + \frac{1}{2} \gamma_{xy} m + \frac{1}{2} \gamma_{zx} n = 0$ $\frac{1}{2} \gamma_{xy} l + (\epsilon_y - \epsilon_1) m + \frac{1}{2} \gamma_{yz} n = 0$ $\frac{1}{2} \gamma_{zx} l + \frac{1}{2} \gamma_{yz} m + (\epsilon_z - \epsilon_1) n = 0$ $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ <p>最大切应变</p> $\gamma_{\max} = \epsilon_1 - \epsilon_3$
3	与平面应力状态相应的应变状态 ($\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0, \epsilon_z = \epsilon_z(x, y)$)		<p>x' 向的线应变</p> $\epsilon_{x'} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\alpha + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\alpha$ <p>$x'-y'$ 正交方向的切应变</p> $\frac{1}{2} \gamma_{x'y'} = -\frac{(\epsilon_x - \epsilon_y)}{2} \sin 2\alpha + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\alpha$

续表 12.4-13

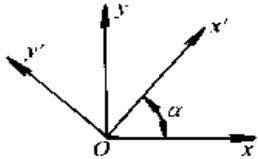
序号	分析项目	图 示	表示或关系式
3	与平面应力状态相应的应变状态 ($\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0, \epsilon_z = \epsilon_z(x, y)$)		<p>主应变</p> $\epsilon_{\max/\min} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$ <p>主方向</p> <p>[若取 $2\alpha_0$ 为主值 ($-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$), 则当 $\epsilon_x \geq \epsilon_y$ 时, 由 x 转 α_0 至 ϵ_{\max} 反之 ϵ_{\min}]</p> <p>按 $\epsilon_{\max}, \epsilon_{\min}$ 及另一个零主应变的代数值由大至小, 顺序定为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$</p> <p>最大切应变 $\gamma_{\max} = \epsilon_1 - \epsilon_3$</p>

表 12.4-14 线弹性材料的应力应变关系式 (广义虎克定律)

序号	应力状态	用应力分量表示应变分量	用应变分量表示应力分量
1	三向应力状态	$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$ $= \frac{1}{2G} (\sigma_x - \frac{\nu}{1+\nu} \Theta_1) \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$ $\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]$ $= \frac{1}{2G} (\sigma_y - \frac{\nu}{1+\nu} \Theta_1) \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$ $\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$ $= \frac{1}{2G} (\sigma_z - \frac{\nu}{1+\nu} \Theta_1) \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$	$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)]$ $= 2G\epsilon_x + \lambda\theta \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}$ $\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_z + \epsilon_x)]$ $= 2G\epsilon_y + \lambda\theta \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}$ $\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)]$ $= 2G\epsilon_z + \lambda\theta \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx}$
2	平面应力状态 ($\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$)	$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu\sigma_y)$ $\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu\sigma_x)$ $\epsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$ $\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$	$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu\epsilon_y)$ $\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu\epsilon_x)$ $\tau_{xy} = G\gamma_{xy}$
3	平面应变状态 ($\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$)	$\epsilon_x = \frac{1-\nu^2}{E} (\sigma_x - \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_y)$ $\epsilon_y = \frac{1-\nu^2}{E} (\sigma_y - \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_x)$ $\epsilon_z = 0$ $\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$	$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_x + \nu\epsilon_y]$ $\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_y + \nu\epsilon_x]$ $\sigma_z = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\epsilon_x + \epsilon_y)$ $\tau_{xy} = G\gamma_{xy}$

注: 1. E, G, ν, λ 分别为材料的弹性模量、切变弹性模量、泊松比和拉梅弹性常数。它们之间有关系式

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ 和 } \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

2. $\Theta_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \theta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$

3. 表中应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (或 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) 及应变 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ (或 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$) 间的关系也适用于主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 与 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 间的关系。

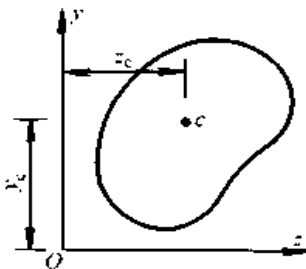
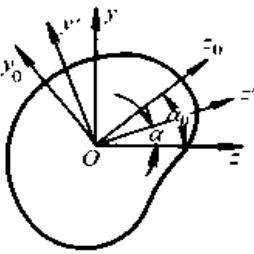
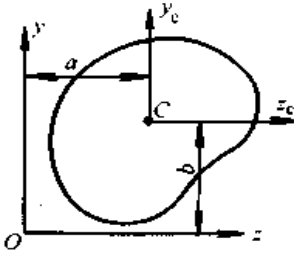
表 12.4-15 常用的强度理论

序号	强度理论名称	破坏条件	强度条件	适用范围	
				破坏形式	应力状态与材料
1	第一强度理论 (最大拉应力理论)	$\sigma_1 = \sigma_M$ (σ_M —拉伸强度极限,下同)	$\sigma_1 \leq \sigma_{blp} \leq \frac{\sigma_{blp}}{n}$ (σ_{blp} —许用拉伸应力 n —安全系数)	正断	1) 单向拉伸、二向应力状态(二向压缩除外)的极脆材料 2) 单向拉伸、二向应力状态(压大于拉或二向压缩除外)的抗拉、压强度极限不等的脆材或低塑性材料 3) 三向拉伸应力状态的塑材和脆材
2	第二强度理论 (最大伸长线应变理论)	$\epsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$ $= \epsilon_M = \frac{\sigma_M}{E}$	$\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq \sigma_{blp} = \frac{\sigma_M}{n}$	正断	1) 石料、混凝土等脆材的单向压缩 2) 拉压强度极限不等的脆材或低塑性材料的压缩应力大于拉伸应力的二向应力状态
3	第三强度理论 (最大切应力理论) (下同)	$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$ (σ_s —屈服极限,下同)	$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{ps} = \frac{\sigma_s}{n}$	屈服	1) 除三向拉伸之外各种应力状态的塑性材料 2) 三向压缩应力状态的脆材
4	第四强度理论 (形状改变比能理论)	$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$ $= \sigma_s$	$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_{ps} = \frac{\sigma_s}{n}$	屈服	1) 除三向拉伸之外各种应力状态的塑性材料 2) 三向压缩应力状态的脆材
5	莫尔强度理论	$\sigma_1 - \frac{\sigma_{bl}}{\sigma_{bc}} \sigma_3 = \sigma_{bl}$ (σ_{bc} —压缩强度极限)	$\sigma_1 - \frac{\sigma_{blp}}{\sigma_{pbc}} \sigma_3 \leq \sigma_{blp} = \frac{\sigma_{blp}}{n}$ ($\sigma_{bc} = \frac{\sigma_{bc}}{n}$ 、许用压应力)	切断	单向拉伸和二向应力状态的拉、压强度极限不等的脆材或低塑性材料

注: 极脆材料如淬硬工具钢和陶瓷等; 拉、压强度极限不等的材料如铸铁、混凝土和岩石等; 低塑性材料如淬硬高强度钢等; 塑性材料如低碳钢、非淬硬中碳钢、退火球墨铸铁、和钢、铝等。

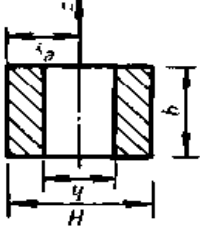
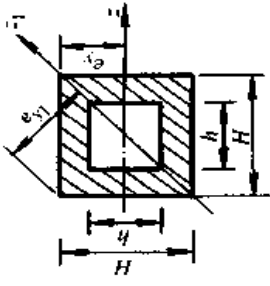
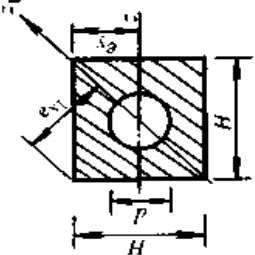
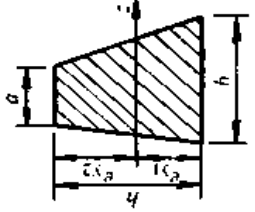
5 平面图形的几何性质

表 12.4-16 任意平面图形的几何性质的一般计算式

图 示	定 义 和 计 算 式
 <p>xOy 为任选位置直角坐标系, 图形面积为 A</p>	<p>形心位置的坐标 $y_c = \frac{\int_A y dA}{A}, x_c = \frac{\int_A x dA}{A} \quad (1)$</p> <p>静矩 $S_x = \int_A y dA = Ay_c, S_y = \int_A x dA = Ax_c \quad (2)$</p> <p>惯性积 $I_{xy} = \int_A xy dA \quad (3)$</p> <p>惯性矩 $I_x = \int_A y^2 dA, I_y = \int_A x^2 dA \quad (4)$</p> <p>极惯性矩 $I_o = \int_A \rho^2 dA = \int_A (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y \quad (5)$</p>
 <p>xOy—任选位置坐标系 $x'Oy'$—由 xOy 绕 O 点转动 α 角的坐标系 x_0Oy_0—过 O 点的主惯性轴坐标系</p>	<p style="text-align: center;">转轴公式与形心主惯性矩</p> <p>惯性积 $I_{x_0y_0} = \frac{I_x - I_y}{2} \sin 2\alpha + I_{xy} \cos 2\alpha \quad (6)$</p> <p>惯性矩 $I_{x_0} = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\alpha - I_{xy} \sin 2\alpha \quad (7)$</p> <p>$I_{y_0} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2} \cos 2\alpha + I_{xy} \sin 2\alpha \quad (8)$</p> <p>主惯性轴方位 (满足 $I_{x_0y_0} = 0$ 的直角坐标轴 x_0Oy_0)</p> $\alpha_0 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{-2I_{xy}}{I_x - I_y} \right) \quad (9)$ <p>主惯性矩 (对主惯性轴的惯性矩)</p> $I_{x_0} = \frac{1}{2} (I_x + I_y) \pm \sqrt{\left(\frac{I_x - I_y}{2} \right)^2 + I_{xy}^2} \quad (10)$ <p>(若取 α_0 为 $-\frac{\pi}{4} \leq \alpha_0 \leq \frac{\pi}{4}$ 范围的值, 当 $I_x \geq I_y$ 时, 则由 x 转 α_0 至 x_0 轴, 才有上式; 如 $I_x < I_y$, 则由 x 转 α_0 至 x_0, 上式等号右第二项“\pm”号应改为“\mp”)</p> <p>形心主惯性轴坐标原点 O 与形心 C 重合时的主惯性轴 x_0Cy_0, 其方位角仍按式 (9) 计算, 但 xOy 坐标原点 O 应与形心 C 重合。</p> <p>形心主惯性矩对形心主惯性轴的惯性矩, 可按式 (10) 计算, 但 xOy 坐标原点 O 要与形心 C 重合。</p>
 <p>x_cCy_c 为通过形心任一方位的直角坐标 xOy 为与 x_cCy_c 平行的直角坐标</p>	<p style="text-align: center;">平 行 移 轴 公 式</p> $I_x = I_{x_c} + b^2 A$ $I_y = I_{y_c} + a^2 A$ $I_{xy} = I_{x_c y_c} + abA$

注: 对由任意个图形组合的平面图形, 根据定义的积分式可得: 其静矩、惯性积、惯性矩和极惯性矩可由各个图形对同一轴 (或同一极点) 相应量之和算得 (空心图形面积可视为负值)。

表 12.4.17 常用截面几何性质的计算式

序号	截面图形	面积 A	形心主惯性矩 I	惯性半径 $i = \sqrt{I/A}$	形心到边缘距离 e	抗弯截面系数 $W = \frac{I}{e}$	特例
1		$A = b(H - h)$	$I_x = \frac{b}{12}(H^3 - h^3)$	$i_x = \frac{1}{\sqrt{12}} \sqrt{\frac{H^3 - h^3}{H - h}}$	$e_y = \frac{H}{2}$	$W_x = \frac{b(H^3 - h^3)}{6H}$	$h = 0$ 即为实 心矩形 截面
2		$A = H^2 - h^2$	$I_x = \frac{1}{12}(H^4 - h^4)$	$i = 0.289 \sqrt{H^2 + h^2}$	$e_y = \frac{H}{2}$ $e_{y_1} = \frac{\sqrt{2}}{2} H$	$W_x = \frac{H^4 - h^4}{6H}$ $W_{x_1} = \frac{\sqrt{2}(H^4 - h^4)}{12H}$	$h = 0$ 即为实 心方形 截面
3		$A = H^2 - \frac{\pi d^2}{4}$	$I_x = \frac{1}{12}(H^4 - \frac{3\pi}{16} d^4)$	$i = \sqrt{\frac{16H^4 - 3\pi d^4}{48(4H^2 - \pi d^2)}}$	$e_y = \frac{H}{2}$ $e_{y_1} = \frac{\sqrt{2}}{2} H$	$W_x = \frac{1}{6H}(H^4 - \frac{3\pi}{16} d^4)$ $W_{x_1} = \frac{\sqrt{2}}{12H}(H^4 - \frac{3\pi}{16} d^4)$	$d = 0$ 即为实 心方形 截面
4		$A = \frac{(a + b)}{2} h$	$I_x = \frac{(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a + b)} h^3$	$i_x = \frac{h}{\sqrt{3(a + b)}} \sqrt{\frac{a^2 + 4ab + b^2}{2}}$	$e_{y_1} = \frac{(2a + b)h}{3(a + b)}$ $e_{y_2} = \frac{(a + 2b)h}{3(a + b)}$	$W_{x_1} = \frac{(a^2 + 4ab + b^2)}{12(2a + b)} h^2$ $W_{x_2} = \frac{(a^2 + 4ab + b^2)}{12(a + 2b)} h^2$	$a = 0$ 即为任 意三角 形截面

续表 12.4-17

序号	截面图形	面积 A	形心主惯性矩 I	惯性半径 $i = \sqrt{I/A}$	形心到边缘距离 e	抗弯截面系数 $W = \frac{I}{e}$	特例
5	<p>正多边形 n—边数 R—外接圆半径 $r = R \cos \frac{\pi}{n}$—内接圆半径 $a = 2R \sin \frac{\pi}{n}$—边长 e_1—形心到任一边垂直距离 e_2—形心到棱角点距离</p>	$A = \frac{nar}{2}$ $= \frac{nR^2}{2} \sin \frac{2\pi}{n}$ <p>$n=6:$ $A = 2.598R^2$ $n=8:$ $A = 2.828R^2$</p>	$I = \frac{A}{24} (6R^2 - a^2)$ $= \frac{n}{24} \sin \frac{2\pi}{n} \times \left(1 + \cos^2 \frac{\pi}{n} \right) R^4$ <p>$n=6:$ $I = 0.541R^4$ $n=8:$ $I = 0.638R^4$</p>	$i = \frac{1}{\sqrt{24}} \sqrt{6R^2 - a^2}$ $= \frac{R}{\sqrt{12}} \sqrt{1 + 2\cos^2 \frac{\pi}{n}}$ <p>$n=6:$ $i = 0.456R$ $n=8:$ $i = 0.475R$</p>	$e_1 = r = R \cos \frac{\pi}{n}$ $e_2 = R$ <p>$n=6:$ $e_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} R$ $n=8:$ $e_1 = 0.924R$</p>	$W_1 = \frac{n}{12} \sin \frac{\pi}{n} \left(1 + 2\cos^2 \frac{\pi}{n} \right) R^3$ $W_2 = \frac{n}{24} \sin \frac{2\pi}{n} \left(1 + 2\cos^2 \frac{\pi}{n} \right) R^3$ <p>$n=6:$ $W_1 = 0.625R^3, W_2 = 0.541R^3$ $n=8:$ $W_1 = 0.691R^3, W_2 = 0.638R^3$</p>	
6		$A = BH + bh$	$I_x = \frac{BH^3 + bh^3}{12}$	$i_x = \sqrt{\frac{BH^3 + bh^3}{12(BH + bh)}}$	$e_y = \frac{H}{2}$	$W_x = \frac{BH^3 + bh^3}{6H}$	

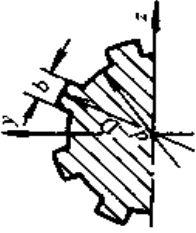
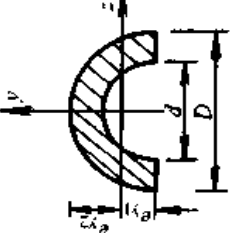
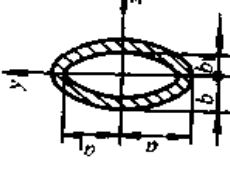
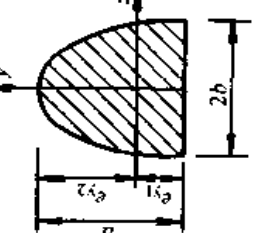
续表 12.4-17

序号	截面图形	面积 A	形心主惯性矩 I	惯性半径 $i = \sqrt{I/A}$	形心到边缘距离 e	抗弯截面系数 $W = \frac{I}{e}$	特例
7		$A = BH - bh$	$I_x = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$i_x = \sqrt{\frac{BH^3 - bh^3}{12(BH - bh)}}$	$e_x = \frac{H}{2}$	$W_x = \frac{BH^2 - bh^2}{6H}$	
8		$A = BH - b \times (e_{y2} + h)$	$I_x = \frac{1}{3} (Be_{y1}^3 + ae_{y2}^3 + bh^3)$	$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$	$e_{y1} = \frac{aH^2 + bt^2}{2(aH + bt)}$ $e_{y2} = H - e_{y1}$	$W_{x1} = \frac{I_x}{e_{y1}}$ $W_{x2} = \frac{I_x}{e_{y2}}$	

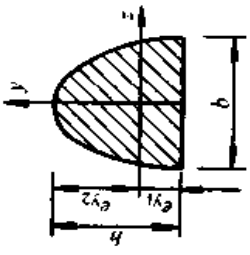
续表 12.4-17

序号	截面图形	面积 A	形心主惯性矩 I	惯性半径 $i = \sqrt{I/A}$	形心到边缘距离 e	抗弯截面系数 $W = \frac{I}{e}$	特例
9		$A = \frac{\pi}{4}(1 - \alpha^2)D^2$ $\alpha = \frac{d}{D}$	$I = \frac{\pi}{64}(1 - \alpha^4)D^4$	$i = \frac{\sqrt{(1 + \alpha^2)}D}{4}$	$e = \frac{D}{2}$	$W = \frac{\pi(1 - \alpha^4)}{32}D^3$	当 $d = 0$, 即为圆截面 当 $\alpha = 0$ 时, 为实心圆截面
10		$A = \frac{\pi}{4}d^2 - d_1d$	$I_z = \frac{\pi d^4}{64}(1 - 1.69\beta)$ $I_y = \frac{\pi d^4}{64}(1 - 1.69\beta^3)$ $\beta = \frac{d_1}{d}$	$i_z = \frac{d}{4}\sqrt{\frac{(1 - 1.69\beta)}{(1 - \beta)}}$ $i_y = \frac{d}{4}\sqrt{\frac{(1 - 1.69\beta^3)}{(1 - \beta)}}$	$e_x = \frac{d}{2}$ $e_y = \frac{d}{2}$	$W_z = \frac{\pi d^3}{32}(1 - 1.69\beta)$ $W_y = \frac{\pi d^3}{32}(1 - 1.69\beta^3)$	
11		$A = \frac{\pi d^2}{4} - A_1$ $A_1 = \begin{cases} bh & \text{(单槽)} \\ 2bh & \text{(双槽)} \end{cases}$	$I_z = \frac{\pi d^4}{64} - \frac{A_1(d - t)^2}{4}$ $I_y = \frac{\pi d^4}{64} - \frac{A_1 b^2}{12}$	$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$ $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$e_x = \frac{d}{2}$ $e_y = \frac{d}{2}$	$W_z = \frac{\pi d^3}{32} - \frac{A_1(d - t)^2}{2d}$ $W_y = \frac{\pi d^3}{32} - \frac{A_1 b^2}{6d}$	

续表 12.4-17

序号	截面图形	面积 A	形心主惯性矩 II	惯性半径 $i = \sqrt{I/A}$	形心到边缘距离 e	抗弯截面系数 $W = \frac{I}{e}$	特例
12		$A = \frac{\pi d^2}{4} + \frac{zb(D-d)}{2}$ —花键轴齿数	$I_x = \frac{\pi d^4}{64} + \frac{bz(D-d)(D+d)^2}{64}$	$i_x = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi d^4 + bz(D-d)(D+d)^2}{\pi d^2 + 2zb(D-d)}}$	$r_y = \frac{D}{2}$ $r_z = \frac{d}{2}$	$W_z = \frac{\pi d^4 + bz(D-d)(D+d)^2}{32D}$	
13		$A = \frac{\pi}{8}(1-a^2)D^2$ $a = \frac{d}{D}$	$I_x = 0.00686(1-a^4) \times D^4 - \frac{0.017a^2(1-a)^2}{(1+a)} D^4$ $I_y = \frac{\pi}{128}(1-a^4)D^4$	$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$ $i_y = \frac{D}{4} \sqrt{1+a^2}$	$e_{y1} = \frac{2(1+a+e^2)}{3\pi(1+a)}$ $e_{y2} = \frac{D}{2} - e_{y1}$ $e_z = \frac{D}{2}$	$W_{z1} = \frac{I_x}{e_{y1}}$ $W_{z2} = \frac{I_x}{e_{y2}}$ $W_y = \frac{\pi}{64}(1-a^4)D^3$	当 $d = a = 0$, 即为实圆截面
14		$A = \pi(ab - a_1b_1)$	$I_x = \frac{\pi}{4}(a^2b \cdot a_1^2b_1)$ $I_y = \frac{\pi}{4}(ab^3 - a_1b_1^3)$	$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$ $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$e_v = a$ $e_z = b$	$W_y = \frac{\pi(a^3b - a_1^3b_1)}{4}$ $W_{y'} = \frac{\pi(ab^3 - a_1b_1^3)}{4b}$	当 $a_1 = b_1 = 0$, 即为实圆截面
15		$A = \frac{\pi ab}{2}$	$I_x = 0.10975ba^3$ $I_y = \frac{\pi}{8}ab^3$	$i_x = 0.2643a$ $i_y = \frac{b}{2}$	$e_{y1} = \frac{4}{3\pi}a$ $e_{y2} = (1 - \frac{4}{3\pi})a$ $e_z = b$	$W_{z1} = 0.2586a^2b$ $W_{z2} = 0.1907ba^2$ $W_y = \frac{\pi}{8}ab^2$	


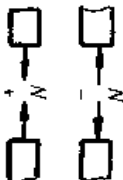

续表 12.4-17

序号	截面图形	面积 A	形心主惯性矩 I	惯性半径 $i = \sqrt{I/A}$	形心到边缘距离 e	抗弯截面系数 $W = \frac{I}{e}$	特例
16	 <p>抛物线</p>	$A = \frac{2}{3}bh$	$I_z = \frac{8}{175}bh^3$ $I_y = \frac{bh^3}{30}$	$i_z = \frac{2}{5}\sqrt{\frac{3}{7}}h$ $i_y = \frac{b}{2\sqrt{5}}$	$e_{y1} = \frac{2}{5}h$ $e_{y2} = \frac{3}{5}h$ $e_z = b/2$	$W_{z1} = \frac{4}{35}bh^2$ $W_{z2} = \frac{8}{105}bh^2$ $W_y = \frac{hb^2}{15}$	


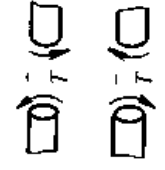
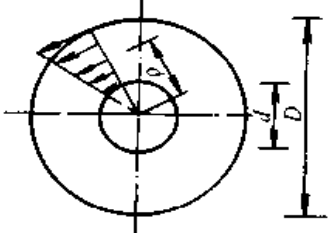
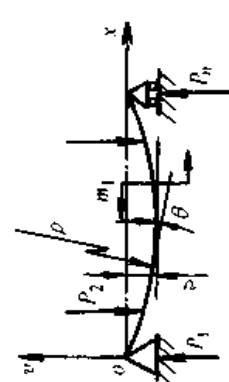
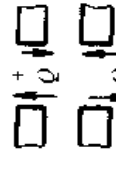
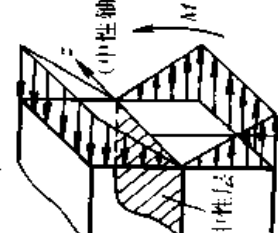
注：1. 表中 I 、 i 和 W 未注下标者，系指对过形心任一轴。
 2. 某些组合图形的形心主惯性矩可将图形分块查本表，再应用平行移轴公式（见表 12.4.16）分别计算，然后求和得到。

6 杆件的强度和刚度


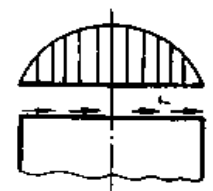
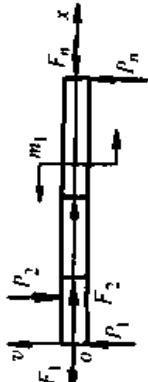
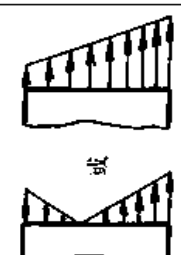
表 12.4-18 直杆的内力、应力、变形和位移计算式及强度与刚度条件

序号	变形类型与图示	内力计算	横截面的应力分布与计算	强度条件	变形和位移		刚度条件	外力的适用范围
					应变	横截面位移和变形量		
	轴向拉伸与压缩 	轴力 $N = \sum_{\text{轴}} F_i$ 正负规定 	拉伸 压缩  $\sigma = \frac{N}{A}$ A—横截面面积	$\sigma_{\max} = \left(\frac{N}{A}\right)_{\max} \leq [\sigma]$	1) 轴向线应变 $\epsilon = \frac{du}{dx} = \frac{\sigma}{E}$ 2) 横轴向线应变。 $\epsilon' = -\nu\epsilon$	1) 轴向位移 $u = \int \frac{Ndx}{EA} + C$ 积分常数 C 由边界条件定。 2) 伸长或缩短量（在 l 长度段内） $\Delta l = \int_0^l \frac{Ndx}{EA}$	$u_{\max} \leq [u]$ 或 $\Delta l \leq [\Delta l]$	作用于各截面上的外力 F_i 的合力 F_i 通过轴线


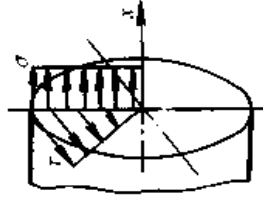
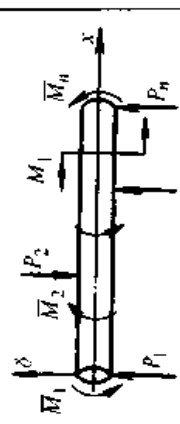
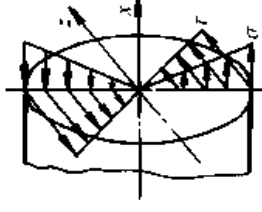
续表 12.4-18

序号	变形类型与图示	内力计算	横截面上的应力分布与计算	强度条件	变形和位移		刚度条件	外力的适用范围
					应变	横截面的位移和变形量		
2	<p>圆截面直杆的扭转</p>  <p>(非圆截面直杆扭转的应力和变形计算见表 12.4-19)</p>	<p>扭矩</p> $T = \sum_{i=1}^n \overline{M}_i$ <p>正负规定</p> 	 <p>极惯性矩</p> $I_p = \frac{\pi D^4}{64} (1 - \alpha^4)$ $\alpha = d/D$	$\tau_{\max} = \left(\frac{T}{W_n}\right)_{\max} \leq \tau_p$ <p>抗扭截面系数</p> $W_n = \frac{\pi D^3}{32} (1 - \alpha^4)$	<p>切应变</p> $\gamma = \rho \frac{d\varphi}{dx} = \tau/G$	<p>1) 横截面绕轴线转角:</p> $\varphi = \int \frac{T dx}{GI_p} + C$ <p>积分常数 C 由边界条件定</p> <p>2) 相对转角 (l 段)</p> $\Delta\varphi = \int_l \frac{T dx}{GI_p}$ <p>3) 单位杆长相对扭转角</p> $\theta = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{T}{GI_p}$	$\theta_{\max} = \frac{180^\circ}{\pi} \times \left(\frac{T}{GI_p}\right)_{\max} \leq \theta_p$	<p>作用于一些横截面上绕轴线的力偶 \overline{M}_i</p>
3	<p>平面弯曲</p>  <p>v—横截面挠度(垂直位移), 向上为正, 向下为负 θ—横截面转角, 反时针转为正, 反之 为负 ρ—挠曲线(弯曲变形后的轴线)任一处的曲率半径</p>	<p>1) 剪力</p> $Q = \sum_{i=1}^n P_i$ <p>正负规定</p>  <p>2) 弯矩</p> $M = \sum_{i=1}^n m_i$ <p>m_i—指截面一侧第 i 个力(或力偶)对计算截面中性轴之矩;</p>	<p>1) 弯曲正应力</p>  <p>(沿宽度方向均布, 沿高度方向线性分布)</p> $\sigma = \frac{M y}{I_x}$	<p>1) 对上、下底边:</p> $\sigma_{\max} = \left(\frac{M}{W_x}\right)_{\max} \leq \sigma_p$ <p>2) 对中性层:</p> $\tau_{\max} \leq \tau_p$ <p>3) 对其他各点:</p> <p>第三强度理论</p> $\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq \sigma_p$	<p>1) 轴向线应变</p> $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ <p>2) 横向线应变</p> $\epsilon' = -\nu \epsilon$ <p>3) 切应变</p> $\gamma = \frac{\tau}{G}$	<p>1) 曲率</p> $k = \frac{1}{\rho} \approx \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M}{EI}$ <p>2) 转角</p> $\theta = \int \frac{M dx}{EI} + C$ <p>3) 挠度</p> $v = \iint \frac{M dx dx}{EI} + Cx + D$ <p>积分常数 C、D 由边界条件和光滑连续条件确定 (某些受载梁的挠度和转角见表 12.4-22)</p>	$\nu_{\max} \leq \nu_p$ $\theta_{\max} \leq \theta_p$	<p>外力 P_i (或 m_i) 作用线(或作用面)通过弯曲中心且与形心主惯性平面平行或重合(常用截面的弯曲中心位置见表 12.4-21)</p>

续表 12.4-18

序号	变形类型与图示	内力计算	横截面上的应力分布与计算	强度条件	变形和位移		刚度条件	外力的适用范围
					应变	横截面的位移和变形量		
3		<p>正负规定</p> 	<p>2) 弯曲切应力(对矩形及开口薄壁截面)</p>  <p>(沿厚度方向均布)</p> $\tau = \frac{QS_x^*}{bI_z}$ <p>I_z—对截面对中性轴惯性矩 S_x^*—所求点一侧截面对中性轴的静矩 b—所求点厚度</p>	<p>第四强度理论</p> $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_p$				
4	<p>拉伸(或压缩)与弯曲的组合变形</p> 	<p>1) 轴力</p> $N = \sum_{\text{轴}} F_i$ <p>2) 剪力</p> $Q = \sum_{\text{轴}} P_i$ <p>3) 弯矩</p> $M = \sum_{\text{轴}} m_i$	<p>当拉与正弯组合时</p>  <p>或</p> $\sigma = \frac{N}{A} + \frac{My}{I}$	<p>危险点—一般在上下底</p> $\left(\frac{N}{A} + \frac{M}{W}\right)_{\max} \leq \sigma_p$	<p>序号 1 与序号 3 叠加</p>	<p>No1 和 No3 的组合</p>		

续表 12.4-18

序号	变形类型与图示	内力计算	横截面上的应力分析与计算	强度条件	变形和位移		刚度条件	外力的适用范围
					应变	横截面的位移和变形量		
5	圆截面直杆的拉伸(或压缩)与扭转组合变形 	1) 轴力 $N = \sum_{i=1}^n P_i$ 2) 扭矩 $T = \sum_{i=1}^n \bar{M}_i$	 $\sigma = \frac{N}{A}$ $\tau = \frac{T\rho}{I_p}$	危险点在周边 第三强度理论 $\sqrt{\left(\frac{N}{A}\right)^2 + \left(\frac{T}{W_t}\right)^2} \leq \sigma_p$ 第四强度理论 $\sqrt{\left(\frac{N}{A}\right)^2 + 0.75 \left(\frac{T}{W_t}\right)^2} \leq \sigma_p$	序号 1 与序号 2 的叠加	No1 与 No2 的组合		
6	圆截面直杆弯曲与扭转的组合变形 	1) 剪力 $Q = \sum_{i=1}^n P_i$ 2) 弯矩 $M = \sum_{i=1}^n m_i$ 3) 扭矩 $T = \sum_{i=1}^n \bar{M}_i$	 $\sigma = \frac{My}{I_z}$ $\tau = \frac{T\rho}{I_p}$ 此外还有弯曲切应力(略)	危险点在周边 最大弯曲应力 第二强度理论 $\sqrt{M^2 + T^2} \leq \sigma_p$ 第四强度理论 $\sqrt{M^2 + 0.75 T^2} \leq \sigma_p$	序号 2 与序号 3 的叠加	No2 与 No3 的组合		

注: 1. 表中所列各类变形的应力和变位计算式只限于线弹性材料和截面无突变的直杆段。

2. 求内力式中 $\sum_{i=1}^n$ 是指对计算横截面一侧各外力所引起的内力求和。

3. F_1 、 G 、 ν 和 σ_p 、 τ_p 分别指材料的弹性模量、切变弹性模量、泊松比及许用拉压力和许用切应力。

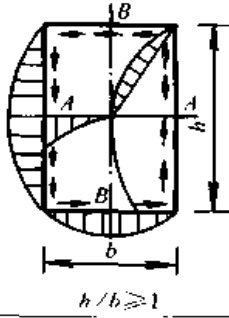
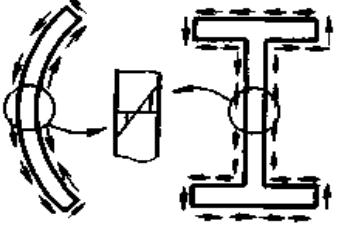
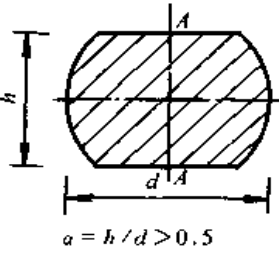
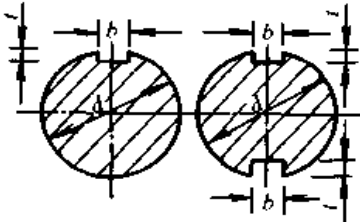
4. 某些常用截面的弯曲切应力的具体分布和计算式见表 12.4-20。

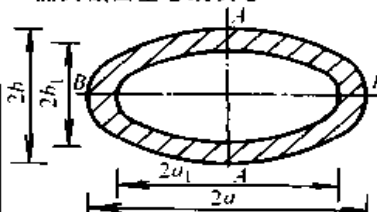
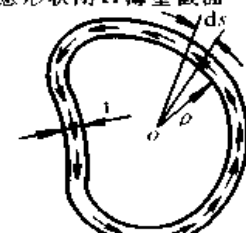
5. 表中未列其它组合变形可类似本表序号 4~序号 6 的方法, 应用序号 1~序号 3 计算式叠加法计算。

表 12.4-19 常用非圆截面直杆自由扭转时的切应力及变形计算式

最大扭转切应力 $\tau_{\max} = \frac{T}{W_k}$ 单位杆长相对扭转角 $\theta = \frac{T}{GI_k}$

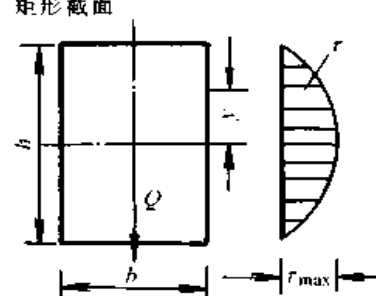
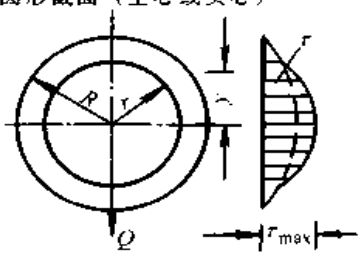
式中 T —扭矩, G —切变弹性模量, I_k —截面相当极惯性矩, W_k —相当抗扭截面系数

序号	截面形状及切应力分布	W_k	I_k	附注						
1	矩形截面  $h/b \geq 1$	$W_k = ab^2h$			$I_k = \beta b^3h$ τ_{\max} 在长边中点 A, 在短边中点 B 的切应力 $\tau_B = \gamma \tau_{\max}$ 对狭长矩形 $W_k \approx \frac{1}{3} b^2h$ $I_k \approx \frac{1}{3} b^3h$					
		h/b	1	1.2		1.5	1.75	2	2.5	3
		α	0.208	0.219		0.231	0.239	0.246	0.258	0.267
		β	0.141	0.166		0.196	0.214	0.229	0.249	0.263
		γ	1.0	0.930		0.860	0.820	0.795	0.766	0.753
		h/b	4	5		6	8	10	∞	
		α	0.282	0.291		0.299	0.307	0.312	0.333	
β	0.281	0.291	0.299	0.307	0.312	0.333				
γ	0.745	0.744	0.743	0.742	0.742	0.742				
2	正多边形 (边长为 a)	$W_k = \begin{cases} 0.05a^3 (\text{正三角形}) \\ 0.981a^3 (\text{正六边形}) \\ 2.605a^3 (\text{正八边形}) \end{cases}$	$I_k = \begin{cases} 0.02165a^4 (\text{正三角形}) \\ 1.039a^4 (\text{正六边形}) \\ 3.658a^4 (\text{正八边形}) \end{cases}$	τ_{\max} 在各边中点						
3	开口薄壁截面  切应力平行周边, 沿厚度方向线性分布 (中线处为零)	$W_k = \frac{I_k}{t_{\max}}$ t_{\max} —最大厚度	$I_k = \frac{2}{3} \sum s_i t_i^3$ s_i —每个狭矩形 (直的或弯的) 的长度 t_i —每个狭矩形的厚度 修正系数 $\eta = \begin{cases} 1.0 \text{ 角钢} \\ 1.12 \text{ 槽钢} \\ 1.15 \text{ T 字钢} \\ 1.20 \text{ I 字钢} \end{cases}$	τ_{\max} 在最大厚度周边点						
4	带光平面的圆截面  $a = h/d > 0.5$	$W_k = \frac{d^3 (2.6\alpha - 1)}{8 (0.3\alpha + 0.7)}$	$I_k = \frac{d^4}{16} (2.6\alpha - 1)$	τ_{\max} 在平切边的中点 A						
5	带键槽的圆截面 	$W_k = \frac{\pi d^3}{16} - \frac{A_1 (d-t)^2}{2d}$ $A_1 = \begin{cases} bt \text{ 单键槽} \\ 2bt \text{ 双键槽} \end{cases}$	$I_k = \frac{\pi d^4}{32} - \frac{A_1 (d-t)^2}{4}$							

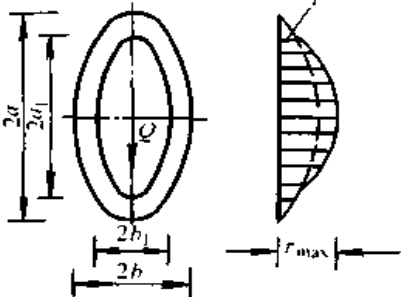
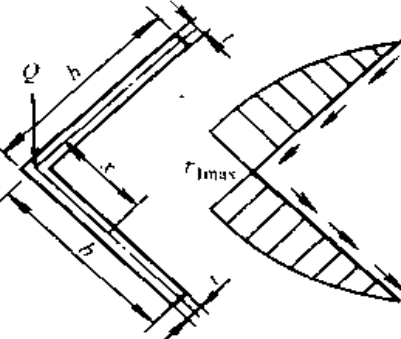
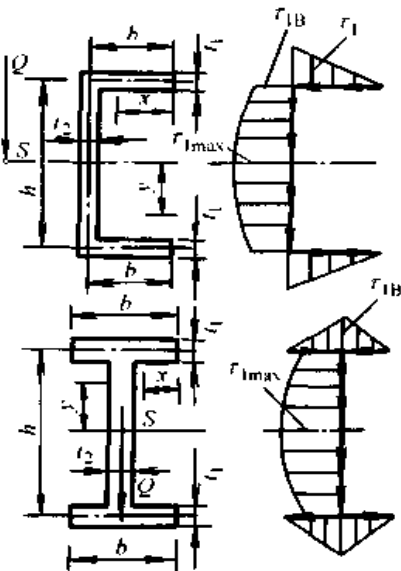
序号	截面形状及切应力分布	W_k	I_k	附注
6	<p>椭圆截面空心或实心</p>  <p>$\frac{a}{b} = \frac{a_1}{b_1} = h > 1 \quad \frac{a_1}{a} = \frac{b_1}{b} = \alpha < 1$ (对实心椭圆 $\alpha = 0$)</p>	$W_k = \frac{\pi b^3 h}{2} (1 - \alpha^4)$	$I_k = \frac{\pi b^4 h^3}{h^2 + 1} (1 - \alpha^4)$	τ_{\max} 发生在 A 点、B 点切应力为 $\frac{\tau_{\max}}{h}$
7	<p>任意形状闭口薄壁截面</p>  <p>切应力沿厚度方向均布、方向与扭矩转向同</p>	$W_k = 2\omega t_{\min}$ $\omega = \oint \rho ds$ 即截面中线所围面积的两倍 t_{\min} —最小厚度	$I_k = \frac{4\omega^2}{\oint \frac{ds}{t}}$ 若 $t = \text{常数}$ $I_k = \frac{4\omega^2 t}{s}$ $s = \oint ds$ 即截面中线长度	τ_{\max} 在最小厚度线上各点

注：各种形状截面周边处的切应力与周边相切，方向与扭矩转向同。

表 12.4-20 平面弯曲切应力的分布和计算公式

序号	截面形状和弯曲切应力分布	垂直切应力 τ 、沿周边切应力 τ_1 和最大切应力
1	<p>矩形截面</p> 	$\tau = \tau_1 = \frac{3Q}{2A} [1 - 4(\frac{y}{h})^2]$ $(A = bh)$ $y = 0$ 处： $\tau_{\max} = \tau_{1\max} = \frac{3Q}{2A}$
2	<p>圆形截面 (空心或实心)</p>  <p>(对实心圆截面 $r = 0$)</p>	$r \leq y \leq R$ ： $\tau = \frac{4}{3} \frac{(R^2 - y^2) Q}{(R^2 + r^2) A} \quad (A = \pi (R^2 - r^2))$ $0 \leq y \leq r$ ： $\tau = \frac{4 [R^2 + r^2 - 2y^2 + \sqrt{(R^2 - y^2)(r^2 - y^2)}] Q}{3 (R^2 + r^2) A}$ $0 \leq y \leq R$ ： $\tau_1 = \frac{\tau}{\sqrt{1 - (\frac{y}{R})^2}}$ $y = 0, \tau_{\max} = \tau_{1\max} = \frac{4 (R^2 + Rr + r^2) Q}{3 (R^2 + r^2) A}$

续表 12.4-20

序号	截面形状和弯曲切应力分布	垂直切应力 τ 、沿周边切应力 τ_1 和最大切应力
3	<p>椭圆形截面 (空心或实心)</p>  <p>$\frac{a_1}{a} = \frac{b_1}{b} = \beta$ (对实心椭圆截面 $a_1 = b_1 = \beta = 0$)</p>	<p>$a_1 \leq y \leq a$:</p> $\tau = \frac{4(1 - \frac{y^2}{a^2})Q}{3(1 - \beta^2)A} \quad (A = \pi ab)$ <p>$0 \leq y \leq a_1$:</p> $\tau = \frac{4[(1 - \frac{y^2}{a^2})^{\frac{1}{2}} - \beta^2(1 - \frac{y^2}{a_1^2})^{\frac{1}{2}}]Q}{3(1 - \beta^2)[(1 - \frac{y^2}{a^2})^{1/2} - \beta(1 - \frac{y^2}{a_1^2})^{1/2}]A}$ <p>$y = 0$:</p> $\tau_{\max} = \tau_{1\max} = \frac{4(1 - \beta^2)Q}{3(1 - \beta^2)(1 - \beta^2)A}$
4	<p>“L”形薄壁截面</p> 	$\tau_1 = \frac{3\sqrt{2}}{2} [1 - (\frac{x}{b})^2] \frac{Q}{A}$ <p>$x = 0$</p> $\tau_{1\max} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \frac{Q}{A}$ <p>$A = 2bt$</p>
5	<p>“工” “口”形薄壁截面 (翼缘壁厚 t_1、腹板壁厚 t_2)</p> 	<p>翼缘</p> $\tau_1 = \frac{Qh}{2I_z} x$ <p>腹板</p> $\tau_1 = \frac{Q}{2t_2 I_z} [hbt_1 + (\frac{h^2}{4} - y^2) t_2]$ <p>$y = 0, \tau_{1\max} = \frac{Qh}{2t_2 I_z} (bt_1 + \frac{h}{4} t_2)$</p> $I_z = \frac{1}{2} bt_1 h^2 (1 + \frac{ht_2}{6bt_1})$

序号	截面形状和弯曲切应力分布	垂直切应力 τ 、沿周边切应力 τ_1 和最大切应力
6	<p>开口圆弧薄壁截面</p>	$\tau_1 = \frac{Q [\sin\alpha \sin\theta - \cos\alpha (1 - \cos\theta)]}{r t (\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)}$ $\theta = \alpha$ $\tau_{1max} = \frac{2Q\alpha (1 - \cos\alpha)}{\Lambda (\alpha - \sin\alpha \cos\alpha)}$ $\Lambda = 2\alpha r t$ <p>当 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ $\tau_{1max} = 2 \frac{Q}{\Lambda}$</p> <p>$\alpha = \pi$ $\tau_{1max} = 4 \frac{Q}{\Lambda}$</p>

注：1. 对于薄壁截面切应力沿厚度方向均布。
2. 弯曲中心 S 的位置见表 12.4-21。

表 12.4-21 常用截面弯曲中心的位置

序号	截面形状	弯曲中心位置
1	具有两个对称轴的截面	两对称轴的交点
2	实心截面或闭口薄壁截面	通常与形心位置很接近
3	<p>各窄条矩形中心线汇交于一点的开口薄壁组合截面</p>	在各矩形中心线的汇交点
4	<p>I 字形薄壁截面 (非对称)</p>	$e_x = \frac{t_1 b_1^3}{t_1 b_1^3 + t_2 b_2^3} h$
5	<p>槽形薄壁截面</p>	$e_x = \frac{3b^2 t_1}{6b t_1 + h t}$

续表 12.4-21

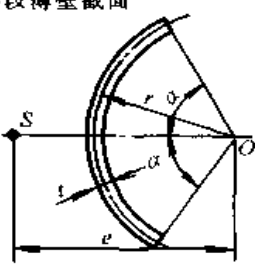
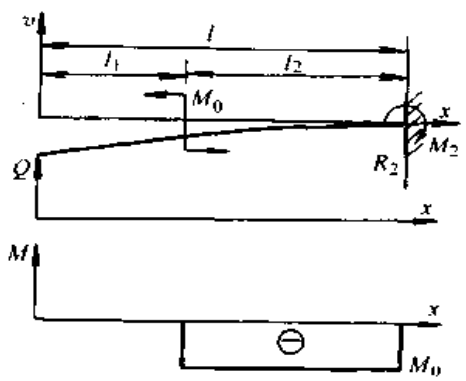
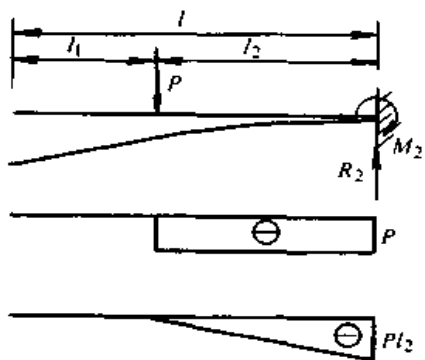
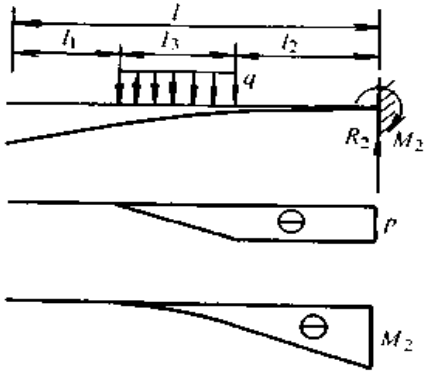
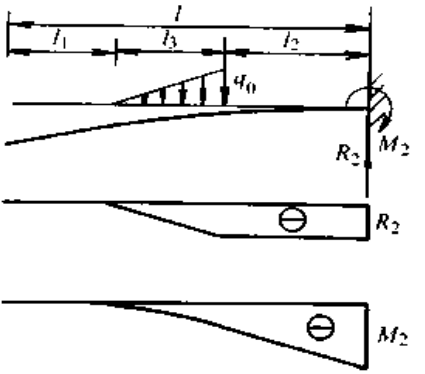
序号	截面形状	弯曲心中位置
6		$e = 2 \frac{(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)}{(\alpha - \sin \alpha \cos \alpha)} r$ $\text{当 } \alpha = \frac{\pi}{2} \quad e = \frac{4}{\pi} r$ $\alpha = \pi \quad r = 2r$

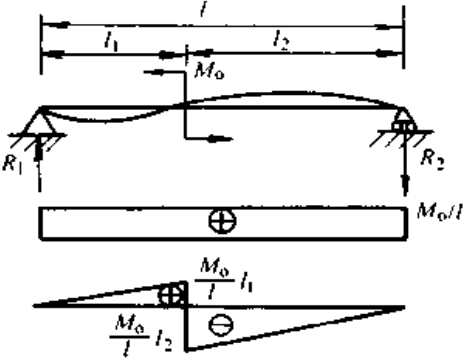
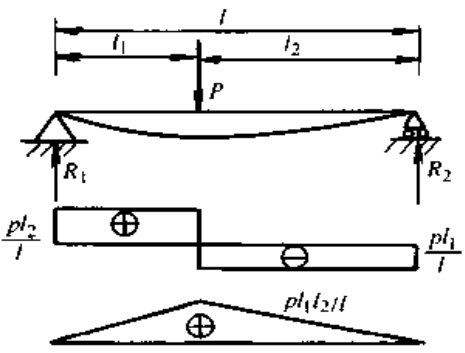
表 12.4-22 单跨直梁的切力、弯矩和挠度及转角的计算公式

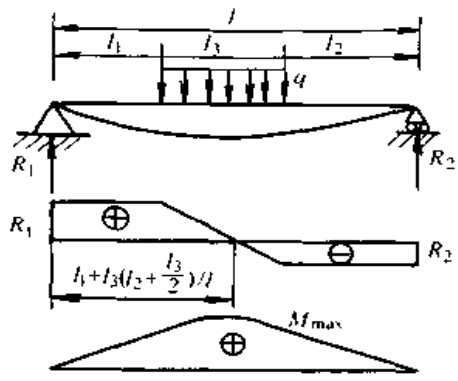
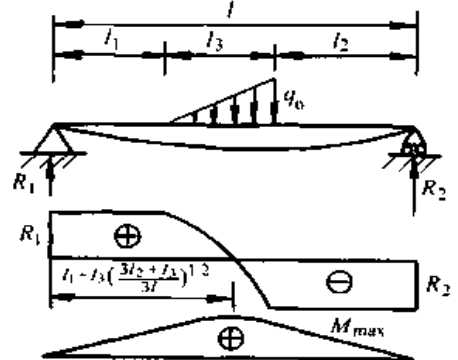
序号	载荷、支反力、内力图和挠曲线	挠度	转角
1	 <p style="text-align: center;">$R_2 = 0, M_2 = M_0$</p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{M_0}{2EI} [l_1^2 + 2l_2(l_1 - x)]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{M_0}{2EI} (l - x)^2$ $x = 0: \quad v_{\max} = -\frac{M_0 l_1^2}{2EI} (2l_1 + l_2)$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{M_0}{EI} l_2$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{M_0}{EI} (l - x)$ $0 \leq x \leq l_1:$ $\theta_{\max} = \frac{M_0 l_1}{EI}$
	<p style="text-align: center;">当 M_0 作用于左端 ($l_1 = 0, l_2 = l$)</p> $\delta = -\frac{M_0}{2EI} (l - x)^2$ <p style="text-align: center;">在 $x = 0: \quad v_{\max} = -\frac{M_0 l^2}{2EI}$</p>	$\theta = \frac{M_0}{EI} (l - x)$ <p style="text-align: center;">在 $x = 0: \quad \theta_{\max} = \frac{M_0 l}{EI}$</p>	
2	 <p style="text-align: center;">$R_2 = P, M_2 = Pl_2$</p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{Pl_1^2}{3EI} \left[1 - \frac{3(x - l_1)}{2l_2} \right]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{Pl_1^2}{3EI} \left[1 - \frac{3(x - l_1)}{2l_2} + \frac{(x - l_1)^2}{2l_2^2} \right]$ $x = 0: \quad v_{\max} = -\frac{Pl_1^2}{3EI} \left(1 + \frac{3l_1}{2l_2} \right)$ $x = l_1: \quad v = -\frac{Pl_1^2}{3EI}$ <p style="text-align: center;">当 P 作用于梁的左端 ($l_1 = 0, l_2 = l$)</p> $v = -\frac{Pl^2}{3EI} \left(1 - \frac{3x}{2l} + \frac{x^2}{2l^2} \right)$ $x = 0: \quad v_{\max} = -\frac{Pl^2}{3EI}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{Pl_1^2}{2EI}$ $0 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{Pl_1^2}{2EI} \left[1 - \frac{(x - l_1)^2}{l_2^2} \right]$ $0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \theta_{\max} = \frac{Pl_1^2}{2EI}$ <p style="text-align: center;">当 P 作用于梁左端 ($l_1 = 0, l_2 = l$)</p> $\theta = \frac{Pl^2}{2EI} \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right)$ $x = 0: \quad \theta_{\max} = \frac{Pl^2}{2EI}$

续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠 度	转 角
3	 <p data-bbox="228 911 610 957">$R_2 = P = ql_3, M_2 = \frac{ql_3}{2}(2l_2 + l_3)$</p> <p data-bbox="228 968 412 999">当 q 沿全长均布</p> <p data-bbox="228 1010 513 1056">$R_2 = P = ql, M_2 = \frac{1}{2}ql^2$</p>	<p data-bbox="737 348 857 380">$0 \leq x \leq l_1:$</p> <p data-bbox="716 390 1097 485">$v = -\frac{P}{24EI}[4(3l_1^2 + 3l_2l_3 + l_3^2)(l-x) - (4l_1^3 + 6l_2^2l_3 + 4l_3l_1^2 + l_3^3)]$</p> <p data-bbox="737 495 911 527">$l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$</p> <p data-bbox="716 537 1097 632">$v = -\frac{P}{24EI}[6(2l_2 + l_3)(l-x)^2 - 4(l-x)^3 + \frac{1}{l_3}(l_1 + l_3 - x)^4]$</p> <p data-bbox="737 663 902 695">$l_1 + l_3 \leq x \leq l:$</p> <p data-bbox="716 705 1097 800">$v = -\frac{P}{12EI}[3(2l_2 + l_3)(l-x)^2 - 2(l-x)^3]$</p> <p data-bbox="737 810 805 842">$x = 0:$</p> <p data-bbox="716 852 1097 947">$v_{\max} = -\frac{P}{24EI}[4(3l_1^2 + 3l_2l_3 + l_3^2)l - (4l_1^3 + 6l_2^2l_3 + 4l_3l_1^2 + l_3^3)]$</p> <p data-bbox="737 957 1114 989">当 q 沿全长均布 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$)</p> <p data-bbox="737 999 1008 1052">$v = -\frac{ql^4}{8EI}(1 - \frac{4x}{3l} + \frac{x^4}{3l^3})$</p> <p data-bbox="737 1062 805 1094">$x = 0:$</p> <p data-bbox="737 1104 878 1157">$v_{\max} = -\frac{ql^4}{8EI}$</p>	<p data-bbox="1143 369 1263 401">$0 \leq x \leq l_1:$</p> <p data-bbox="1122 411 1398 506">$\theta = \frac{P}{6EI}(3l_1^2 + 3l_2l_3 + l_3^2)$</p> <p data-bbox="1143 474 1317 506">$l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$</p> <p data-bbox="1122 516 1414 674">$\theta = \frac{P}{6EI}[3(2l_2 + l_3)(l-x) - 3(l-x)^2 + \frac{1}{l_3}(l_1 + l_3 - x)^2]$</p> <p data-bbox="1143 684 1308 716">$l_1 + l_3 \leq x \leq l:$</p> <p data-bbox="1122 726 1414 821">$\theta = \frac{P}{2EI}[(2l_2 + l_3)(l-x) - (l-x)^2]$</p> <p data-bbox="1143 831 1263 863">$0 \leq x \leq l_1:$</p> <p data-bbox="1122 873 1398 926">$\theta_{\max} = \frac{P}{6EI}(3l_1^2 + 3l_2l_3 + l_3^2)$</p> <p data-bbox="1143 978 1325 1031">$\theta = \frac{ql^3}{6EI}(1 - \frac{x^3}{l^3})$</p> <p data-bbox="1143 1062 1211 1094">$x = 0:$</p> <p data-bbox="1143 1104 1252 1157">$\theta_{\max} = \frac{ql^3}{6EI}$</p>
4	 <p data-bbox="220 1703 618 1749">$R_2 = P = \frac{1}{2}q_0l_3, M_2 = \frac{P}{3}(3l_2 + l_3)$</p> <p data-bbox="220 1759 428 1791">当载荷沿全长分布</p> <p data-bbox="220 1801 529 1848">$R_2 = P = \frac{1}{2}q_0l, M_2 = \frac{q_0}{3}l^2$</p>	<p data-bbox="711 1188 831 1220">$0 \leq x \leq l_1:$</p> <p data-bbox="711 1230 1105 1325">$v = -\frac{1}{60EI}[5(6l_1^2 + 4l_2l_3 + l_3^2)(l_1 - x) + 4(5l_1^3 + 10l_2^2l_3 + 5l_3l_1^2 + l_3^3)]$</p> <p data-bbox="737 1335 911 1367">$l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$</p> <p data-bbox="711 1377 1105 1493">$v = -\frac{P}{60EI}[20l_1^3 + 10l_2^2l_3 - l_3^3 - 5x(6l_1^2 + 4l_2l_3 + l_3^2)(x - l_1 - l_3) + \frac{1}{l_3^3}(x - l_1)^5]$</p> <p data-bbox="737 1503 902 1535">$l_1 + l_3 \leq x \leq l:$</p> <p data-bbox="711 1545 1105 1598">$v = -\frac{P}{6EI}[(3l_2 + l_3)(l-x)^2 - (l-x)^3]$</p> <p data-bbox="737 1608 805 1640">$x = 0:$</p> <p data-bbox="711 1650 1105 1703">$v_{\max} = -\frac{P}{60EI}[5(6l_1^2 + 4l_2l_3 + l_3^2)l_1 + 4(5l_1^3 + 10l_2^2l_3 + 5l_3l_1^2 + l_3^3)]$</p> <p data-bbox="737 1713 1105 1745">当载荷沿全长分布 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$)</p> <p data-bbox="737 1755 1008 1808">$v = -\frac{q_0l^4}{30EI}(1 - \frac{5x}{4l} + \frac{x^5}{4l^5})$</p> <p data-bbox="737 1818 805 1850">$x = 0:$</p> <p data-bbox="737 1860 878 1913">$v_{\max} = -\frac{q_0l^4}{30EI}$</p>	<p data-bbox="1143 1230 1263 1262">$0 \leq x \leq l_1:$</p> <p data-bbox="1122 1272 1398 1367">$\theta = \frac{P}{12EI}(6l_1^2 + 4l_2l_3 + l_3^2)$</p> <p data-bbox="1143 1335 1317 1367">$l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$</p> <p data-bbox="1122 1377 1414 1472">$\theta = \frac{1}{12EI}[6l_1^2 + 4l_2l_3 + l_3^2 - \frac{1}{l_3^3}(x - l_1)^4]$</p> <p data-bbox="1143 1482 1308 1514">$l_1 + l_3 \leq x \leq l:$</p> <p data-bbox="1122 1524 1414 1619">$\theta = \frac{P}{6EI}[2(3l_2 + l_3)(l-x) - 3(l-x)^2]$</p> <p data-bbox="1143 1629 1263 1661">$0 \leq x \leq l_1:$</p> <p data-bbox="1122 1671 1198 1703">$\theta_{\max} = \theta$</p> <p data-bbox="1122 1755 1308 1808">$\theta = \frac{q_0l^3}{24EI}(1 - \frac{x^4}{l^4})$</p> <p data-bbox="1122 1818 1198 1850">$x = 0:$</p> <p data-bbox="1122 1860 1235 1913">$\theta_{\max} = \frac{q_0l^3}{24EI}$</p>

续表 12.4.22

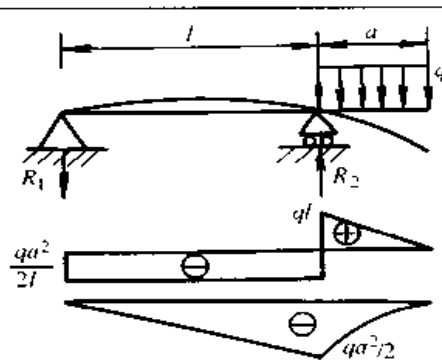
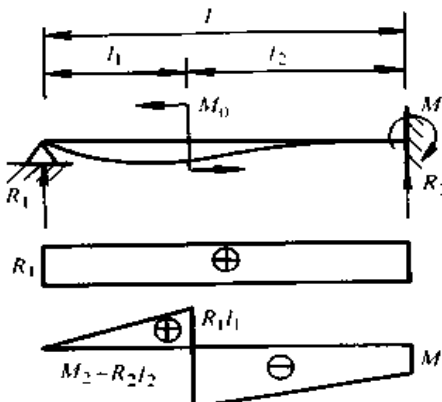
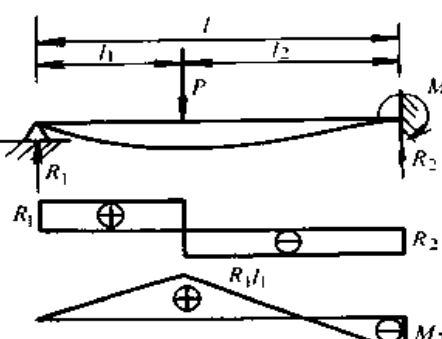
序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠度	转角
5	 <p>$R_1 = R_2 = \frac{M_0}{l}$</p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = \frac{M_0 x}{6EI} [x^2 - (l_1^2 + 2l_1 l_2 - 2l_2^2)]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -6 \frac{M_0}{EI} (l-x) [(l-x)^2 + (2l_1^2 - 2l_1 l_2 - l_2^2)]$ $x = l_1: v = -\frac{M_0}{3EI} l l_2 (l_1 - l_2)$ 当 M_0 作用在左端 ($l_1 = 0, l_2 = l$) $v = \frac{M_0}{6EI} (x^3 + 2l^2 x - 3lx^2)$ $x = 0.422l:$ $v_{\max} = 0.0642 \frac{M_0 l^2}{EI}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{M_0}{6EI} [3x^2 - (l_1^2 + 2l_1 l_2 - 2l_2^2)]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = -\frac{M_0}{6EI} [3(1-x)^2 + (2l_1^2 - 2l_1 l_2 - l_2^2)]$ $x = 0:$ $\theta = -\frac{M_0}{6EI} (l_1^2 + 2l_1 l_2 - 2l_2^2)$ 当 M_0 作用在左端 $\theta = \frac{M_0}{6EI} (3x^2 + 2l^2 - 6lx)$ $x = 0:$ $\theta_{\max} = \frac{M_0 l}{3EI}$
6	 <p>$R_1 = \frac{Pl_2}{l}, R_2 = \frac{Pl_1}{l}$ 当 P 作用于中点: $R_1 = R_2 = \frac{P}{2}, M_{\max} = \frac{Pl}{4}$</p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{P}{6EI} l_1^2 l_2^2 (\frac{2x}{l_1} + \frac{x}{l_2} - \frac{x^3}{l_1^2 l_2})$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{Pl_1}{6EI} [l_2(2l_1 + l_2)(l-x) - (l-x)^3]$ $l_1 > l_2$ 时: $x = \sqrt{(l^2 - l_2^2)/3}$ $v_{\max} = -\frac{Pl_2(l^2 - l_2^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}EI}$ $x = \frac{l}{2}:$ $v = -\frac{Pl_2(3l^2 - 4l_2^2)}{48EI}$ $x = l_1:$ $v = -\frac{Pl_1^2 l_2^2}{3EI}$ 当 P 作用于中点 ($l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$) $0 \leq x \leq \frac{l}{2}:$ $v = -\frac{Pl^3}{48EI} (\frac{3x}{l} - \frac{4x^3}{l^3})$ $x = \frac{l}{2}: v_{\max} = -\frac{Pl^3}{48EI}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = -\frac{Pl_1 l_2^2}{6EI} (2 + \frac{l_1}{l_2} - \frac{3x^2}{l_1 l_2})$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{Pl_1}{6EI} [l_2(2l_1 + l_2) - 3(l-x)^2]$ $x = 0:$ $\theta = \frac{Pl_1 l_2}{6EI} (l_1 + 2l_2)$ $x = l:$ $\theta = \frac{Pl_1 l_2}{6EI} (2l_1 + l_2)$ $0 \leq x \leq \frac{l}{2}:$ $\theta = -\frac{Pl^2}{16EI} (1 - \frac{4x^2}{l^2})$ $x = 0: \theta_{\max} = \mp \frac{Pl^2}{16EI}$

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠 度	转 角
7	 <p> $R_1 = \frac{ql_3}{l} (l_2 + \frac{l_3}{2}), R_2 = \frac{ql_3}{2} (l_1 + \frac{l_3}{2})$ $M_{max} = \frac{ql_3}{2} (l_2 + \frac{l_3}{2}) (l_1 + \frac{2l_2l_3 + l_3^2}{4l})$ 当 q 沿全长均布: $R_1 = R_2 = \frac{ql}{2}, M_{max} = \frac{ql^2}{8}$ </p>	<p> $0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{ql_3x}{6EI} (l_2 + \frac{l_3}{2}) [(l_1 + \frac{l_3}{2})(l + l_2 + \frac{l_3}{2}) - \frac{1}{4}l_3^2 - x^2]$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $v = -\frac{ql_3}{6EI} \left\{ x(l_2 + \frac{l_3}{2}) [(l_1 + \frac{l_3}{2}) \times (l + l_2 + \frac{l_3}{2}) - \frac{1}{4}l_3^2 - x^2] - \frac{l}{4l_3} (x - l_1)^2 \right\}$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{ql_3}{6EI} (l_1 + \frac{l_3}{2})(l - x) [(l_2 + \frac{l_3}{2}) \times (l + l_1 + \frac{l_3}{2}) - \frac{l_3^2}{4} - (l - x)^2]$ </p> <p>当 q 沿全长均布 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$): $v = -\frac{ql^4}{24EI} (\frac{x}{l} - \frac{2x^3}{l^3} + \frac{x^4}{l^4})$ $x = \frac{l}{2}:$ $v_{max} = -\frac{5ql^4}{384EI}$ </p>	<p> $0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = -\frac{ql_3}{6EI} (l_2 + \frac{l_3}{2}) [(l_1 + \frac{l_3}{2})(l + l_2 + \frac{l_3}{2}) - \frac{l_3^2}{4} - 3x^2]$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $\theta = -\frac{ql_3}{6EI} \left\{ (l_2 + \frac{l_3}{2}) [(l_1 + \frac{l_3}{2}) \times (l + l_2 + \frac{l_3}{2}) - \frac{l_3^2}{4} - 3x^2] + \frac{l}{l_3} (x - l_1) \right\}$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{ql_3}{6EI} (l_1 + \frac{l_3}{2}) [(l_2 + \frac{l_3}{2})(l + l_1 + \frac{l_3}{2}) - \frac{l_3^2}{4} - 3(l - x)^2]$ </p> <p> $\theta = -\frac{ql^3}{24EI} (1 - \frac{6x^2}{l^2} + \frac{4x^3}{l^3})$ $x = \begin{cases} 0: & \theta_{max} = \frac{ql^3}{24EI} \\ l: & \theta_{max} = -\frac{ql^3}{24EI} \end{cases}$ </p>
8	 <p> $R_1 = \frac{P}{3l} (3l_2 + l_3), R_2 = \frac{P}{3l} (3l_1 + 2l_3)$ $P = \frac{1}{2} q_0 l_3$ $M_{max} = P (\frac{3l_2 + l_3}{3l}) [l_1 + \frac{2}{3} l_3 (\frac{3l_2 + l_3}{3l})^2]$ 载荷作用全长: $R_1 = \frac{q_0 l}{6}, R_2 = \frac{q_0 l}{3}$ </p>	<p> $0 \leq x \leq l_1:$ $v = \frac{P}{18EI} \left\{ (3l_2 + l_3)(x^3 - l^2x) + x \times [\frac{1}{9}(3l_2 + l_3)^3 + \frac{1}{2}l_2l_3^2 + \frac{17}{90}l_3^3] \right\}$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $v = \frac{P}{18EI} \left\{ (3l_2 + l_3)(x^3 - 3l^2x) + x \times [\frac{1}{9}(3l_2 + l_3)^3 + \frac{1}{2}l_2l_3^2 + \frac{17}{90}l_3^3] - \frac{3}{10} \frac{l}{l_3^2} (x - l_1)^2 \right\}$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $v = \frac{P}{18EI} \left\{ (3l_1 + 2l_3)(l - x)^3 - (l - x) [\frac{1}{9}(3l_2 + l_3)^3 + \frac{1}{2}l_2l_3^2 + \frac{17}{90}l_3^3] - l(3l_2 + l_3)^2 + \frac{1}{2}l_3^3 + 2(3l_2 + l_3)l^2 \right\}$ </p>	<p> $0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{P}{18EI} \left\{ (3l_2 + l_3)(3x^2 - l^2) + [\frac{1}{9}(3l_2 + l_3)^3 + \frac{1}{2}l_2l_3^2 + \frac{17}{90}l_3^3] \right\}$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $\theta = \frac{P}{18EI} \left\{ (3l_2 + l_3)(3x^2 - l^2) + [\frac{1}{9}(3l_2 + l_3)^3 + \frac{1}{2}l_2l_3^2 + \frac{17}{90}l_3^3] - \frac{3}{2} \times \frac{l}{l_3^2} (x - l_1)^2 \right\}$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $\theta = -\frac{P}{18EI} \left\{ 3(3l_1 + 2l_3)(l - x)^2 - [\frac{1}{9}(3l_2 + l_3)^3 + \frac{1}{2}l_2l_3^2 + \frac{17}{90}l_3^3] - l(3l_2 + l_3)^2 + \frac{1}{2}l_3^3 + 2(3l_2 + l_3)l^2 \right\}$ </p>

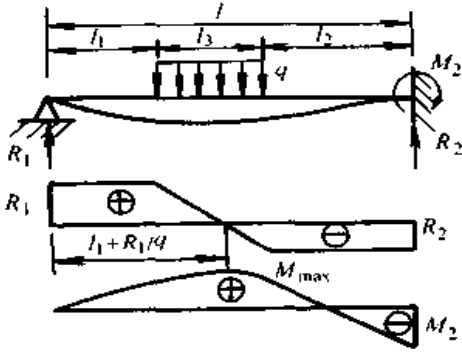
续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠度	转角
8	<p>载荷作用在全长 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$):</p> <p>$x = 0.5774l$; $M_{\max} = 0.064 q_0 l^2$</p>	<p>挠度:</p> <p>$v = -\frac{q_0}{360EI}(3x^5 - 10l^2x^3 + 7l^4x)$</p> <p>$x = 0.519l$; $v_{\max} = -0.00652 \frac{q_0 l^4}{EI}$</p>	<p>转角:</p> <p>$\theta = -\frac{q_0}{360EI}(15x^4 - 30l^2x^2 + 7l^4)$</p> <p>$x = 0: \theta = -\frac{7q_0 l^3}{360EI}$</p> <p>$x = l: \theta = +\frac{8q_0 l^3}{360EI}$</p>
9	<p>$R_1 = R_2 = \frac{q_0 l}{4}$</p>	<p>$0 \leq x \leq \frac{l}{2}$:</p> <p>$v = -\frac{q_0 l^4}{24EI}(\frac{5x}{8l} - \frac{x^3}{l^3} + \frac{2x^5}{5l^5})$</p> <p>$x = \frac{l}{2}$; $v_{\max} = -\frac{q_0 l^4}{120EI}$</p>	<p>$0 \leq x \leq \frac{l}{2}$</p> <p>$\theta = -\frac{q_0 l^3}{24EI}(\frac{5}{8} - 3\frac{x^2}{l^2} + 2\frac{x^4}{l^4})$</p> <p>$x = \begin{cases} 0: & \theta_{\max} = \mp \frac{5q_0 l^3}{192EI} \\ l: & \end{cases}$</p>
10	<p>$R_1 = R_2 = \frac{M_0}{l}$</p>	<p>$0 \leq x \leq l$; $v = \frac{M_0 x}{6EI}(l^2 - x^2)$</p> <p>$l \leq x \leq l+a$; $v = -\frac{M_0}{6EI}(l^2 - 4lx + 3x^2)$</p> <p>$x = l/\sqrt{3}: v_{\max} = \frac{M_0 l^2}{9\sqrt{3}EI}$</p> <p>$x = l/2: v = \frac{M_0 l^2}{16EI}$</p> <p>$x = l+a: v = -\frac{M_0 a}{6EI}(2l+3a)$</p>	<p>$0 \leq x \leq l$; $\theta = \frac{M_0}{6EI}(l^2 - 3x^2)$</p> <p>$l \leq x \leq l+a$; $\theta = \frac{M_0}{3EI}(2l-3x)$</p> <p>$x = 0: \theta = \frac{M_0 l}{6EI}$</p> <p>$x = l: \theta = -\frac{M_0 l}{3EI}$</p> <p>$x = l+a: \theta = -\frac{M_0}{3EI}(l+3a)$</p>
11	<p>$R_1 = \frac{Pa}{l}, R_2 = (\frac{a}{l} + 1)P$</p>	<p>$0 \leq x \leq l$; $v = \frac{Pax}{6EI}(l^2 - x^2)$</p> <p>$l \leq x \leq l+a$; $v = -\frac{P(l-x)}{6EI}[a(3x-l) - (x-l)^2]$</p> <p>$x = l/\sqrt{3}: v_{\max} = \frac{Pal^2}{9\sqrt{3}EI}$</p> <p>$x = l/2: v = \frac{Pal^2}{16EI}$</p> <p>$x = l+a: v = -\frac{Pa^2}{3EI}(l+a)$</p>	<p>$0 \leq x \leq l$; $\theta = \frac{Pa}{6EI}(l^2 - 3x^2)$</p> <p>$l \leq x \leq l+a$; $\theta = -\frac{P}{6EI}[6ax - 4la - 3(x-l)^2]$</p> <p>$x = 0: \theta = \frac{Pal}{6EI}$</p> <p>$x = l: \theta = -\frac{Pal}{3EI}$</p> <p>$x = l+a: \theta = -\frac{Pa}{6EI}(2l+3a)$</p>

续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠 度	转 角
12	 <p> $R_1 = \frac{qa^2}{2l}, R_2 = (1 + \frac{a}{2l})qa$ </p>	$0 \leq x \leq l:$ $v = \frac{qa^2x}{12EI}(l^2 - x^2)$ $l \leq x \leq l+a:$ $\delta = -\frac{q(x-l)}{24EI} [4a^2l + 6a^2(x-l) - (x-l)^3]$ $x = l/\sqrt{3}: v_{max} = \frac{qa^2l^2}{18\sqrt{3}EI}$ $x = \frac{l}{2}: v = \frac{qa^2l^2}{32EI}$ $x = l+a: v = -\frac{qa^3}{24EI}(4l+3a)$	$0 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{qa^2}{12EI}(l^2 - 3x^2)$ $l \leq x \leq l+a:$ $\theta = -\frac{q}{6EI} [a^2l + 3a^2(x-l) - 3a(x-l)^2 + (x-l)^3]$ $x=0: \theta = \frac{qa^2l}{12EI}$ $x=l: \theta = -\frac{qa^2l}{6EI}$ $x=l+a: \theta = -\frac{qa^2}{6EI}(l+a)$
13	 <p> $R_1 = -R_2 = \frac{3M_0}{2l^3}(l^2 - l_1^2)$ $M_2 = (\frac{3l_1^2}{2l^2} - \frac{1}{2})M_0$ 当 M_0 作用于左端: $R_1 = -R_2 = \frac{3M_0}{2l}, M_2 = -\frac{M_0}{2}$ </p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = \frac{M_0}{4EI} [\frac{(l^2 - l_1^2)}{l^3} (x^3 - 3l^2x) + 4(l - l_1)x]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = \frac{M_0}{4EI} [\frac{(l^2 - l_1^2)}{l^3} (x^3 - 3l^2x + 2l^3) - 2(l-x)^2]$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{M_0}{4EI} [3 \frac{(l^2 - l_1^2)}{l^3} (x^2 - l^2) + 4(l - l_1)]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{M_0}{4EI} [3 \frac{(l^2 - l_1^2)}{l^3} (x^2 - l^2) + 4(l - x)]$ $x=0:$ $\theta = \frac{M_0}{4EI}(l - l_1) [4 - \frac{3(l+l_1)}{l}]$
		当 M_0 作用于左端 ($l_1 = 0, l_2 = l$): $v = \frac{M_0}{4EI} [\frac{1}{l}(x^3 - 3l^2x) + 4lx - 2x^2]$	$\theta = \frac{M_0}{4EI} [\frac{3}{l}(x^2 - l^2) + 4l - 4x]$ $x=0: \theta = \frac{M_0l}{4EI}$
14		$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{Pl_1^2}{12EI} [3l_1x - \frac{(3l_1 + 2l_2)}{l^2} x^3]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{Pl_1}{12EI} [\frac{3l_2(2l_1 + l_2)}{l} (l-x)^2 - \frac{(2l_1^2 + 6l_1l_2 + 3l_2^2)}{l^2} (l-x)^3]$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = -\frac{Pl_1^2}{4EI} [l_1 - \frac{(3l_1 + 2l_2)}{l^2} x^2]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{Pl_1}{4EI} [\frac{2l_2(2l_1 + l_2)}{l_2} (l-x) - \frac{(2l_1^2 + 6l_1l_2 + 3l_2^2)}{l^2} (l-x)^2]$

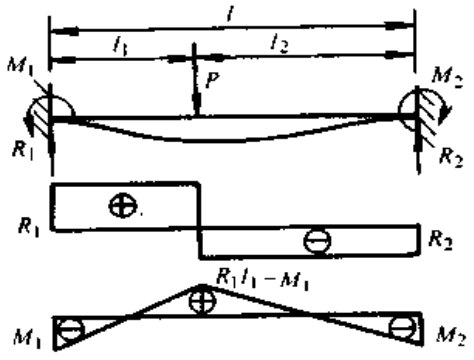
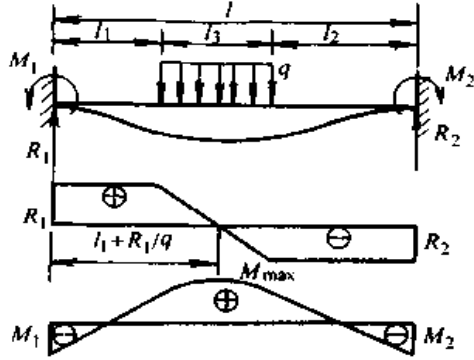
续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠度	转角
14	$R_1 = \frac{Pl_2^2}{2l^2}(3l_1 + 2l_2), R_2 = P - R_1$ $M_2 = \frac{Pl_1l_2}{2l^2}(2l_1 + l_2)$ 当 P 作用于中点: $R_1 = \frac{5}{16}P, R_2 = \frac{11}{16}P, M_2 = \frac{3}{16}Pl$	$x = l_1:$ $v = -\frac{Pl_1^2l_2^2(4l_1 + 3l_2)}{12EI^3}$ 当 P 作用在中点 ($l_1 = l_2 = l/2$) $0 \leq x \leq \frac{l}{2}:$ $v = -\frac{Pl^3}{32EI} \left(\frac{x}{l} - \frac{5x^3}{3l^3} \right)$ $\frac{l}{2} \leq x \leq l:$ $v = -\frac{Pl^3}{32EI} \left(-\frac{2}{3} + \frac{5x}{l} - \frac{8x^2}{l^2} + \frac{11x^3}{3l^3} \right)$ $x = \frac{l}{2}: v = -\frac{7Pl^3}{768EI}$ $x = \frac{l}{\sqrt{5}}: v = -\frac{Pl^3}{48\sqrt{5}EI}$	$x = 0: \theta = -\frac{Pl_1l_2^2}{4EI}$ $0 \leq x \leq \frac{l}{2}:$ $\theta = \frac{-Pl^2}{32EI} \left(1 - \frac{5x^2}{l^2} \right)$ $\frac{l}{2} \leq x \leq l:$ $\theta = -\frac{Pl^2}{32EI} \left(5 - 16\frac{x}{l} + 11\frac{x^2}{l^2} \right)$ $x = 0: \theta = -\frac{Pl^2}{32EI}$
15	 $R_1 = \frac{ql_3}{8l^2} [4l(3l_2^2 + 3l_2l_3 + l_3^2) - 4l_2^3 - 6l_2^2l_3 - 4l_2l_3^2 - l_3^3], R_2 = ql_3 - R_1$ $M_2 = \frac{ql_3}{8l^2} [4l^2(2l_2 + l_3) - 4l(3l_2^2 + 3l_2l_3 + l_3^2) + 4l_2^3 + 6l_2^2l_3 + 4l_2l_3^2 + l_3^3]$ 当 q 沿全长分布: $R_1 = \frac{3ql}{8}, R_2 = \frac{5ql}{8}, M_2 = \frac{ql^2}{8}, M_{\max} = \frac{9ql^2}{128}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = \frac{ql_3}{6EI}(3l_2^2 + 3l_2l_3 + l_3^2)x + \frac{R_1}{6EI}(x^3 - 3l^2x)$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $v = -\frac{ql_3}{24EI} [6(2l_2 + l_3)(l-x)^2 - 4(l-x)^3 + \frac{(l_1 + l_3 - x)^4}{l_3}] + \frac{R_1}{6EI}(x^3 - 3l^2x + 2l^3)$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{ql_3}{12EI} [3(2l_2 + l_3)(l-x)^2 - 2(l-x)^3] + \frac{R_1}{6EI}(x^3 - 3l^2x + 2l^3)$ 当 q 沿全长分布 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$): $v = -\frac{ql^4}{48EI} \left(\frac{x}{l} - 3\frac{x^3}{l^3} + 2\frac{x^4}{l^4} \right)$ $x = 0.4215l: v_{\max} = -0.0054 \frac{ql^4}{EI}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{ql_3}{6EI}(3l_2^2 + 3l_2l_3 + l_3^2) - \frac{R_1}{2EI}(l^2 - x^2)$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $\theta = \frac{ql_3}{6EI} [3(2l_2 + l_3)(l-x) - 3(l-x)^2 + \frac{(l_1 + l_3 - x)^3}{l_3}] - \frac{R_1}{2EI}(l^2 - x^2)$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{ql_3}{2EI} [(2l_2 + l_3)(l-x) - (l-x)^2] + \frac{R_1}{2EI}(x^2 - l^2)$ $x = 0:$ $\theta = \frac{ql_3}{6EI}(3l_2^2 + 3l_2l_3 + l_3^2) - \frac{R_1}{2EI}l^2$ $x = 0: \theta = -\frac{ql^3}{48EI} \left(1 - 9\frac{x^2}{l^2} + 8\frac{x^3}{l^3} \right)$ $x = 0: \theta = \frac{ql^3}{48EI}$

续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠度	转角
16	<p> $R_1 = \frac{q_0 l_3}{40 l^3} [5 l_1 - (6 l_3^2 + 4 l_2 l_3 + l_3^2) + 4 \times (5 l_3^2 + 10 l_2^2 l_3 + 5 l_2 l_3^2 + l_3^3)]$ $R_2 = \frac{q_0 l_3}{2} - R_1, M_2 = -R_1 l + \frac{q_0 l_3}{6} (3 l_2 + l_3)$ $M_{\max} = R_1 (l_1 + \frac{2}{3} l_3 \sqrt{\frac{2 R_1}{q_0 l_3}})$ 当载荷作用全长: $R_1 = \frac{q_0 l}{10}, R_2 = \frac{4}{10} q_0 l$ $M_2 = 0.0667 q_0 l^2, M_{\max} = 0.0298 q_0 l^2$ </p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{q_0 l_3}{24 E I} (6 l_3^2 + 4 l_2 l_3 + l_3^2) x + \frac{R_1}{6 E I} (x^3 - 3 l^2 x)$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $v = -\frac{q_0 l_3}{120 E I} [5 (6 l_3^2 + 4 l_2 l_3 + l_3^2) x - \frac{(x - l_1)^5}{l_3^3}] + \frac{R_1}{6 E I} (x^3 - 3 l^2 x)$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{q_0 l_3}{12 E I} [(3 l_2 + l_3) (l - x)^2 - (l - x)^3] + \frac{R_1}{6 E I} (x^3 - 3 l^2 x + 2 l^3)$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{q_0 l_3}{24 E I} (6 l_3^2 + 4 l_2 l_3 + l_3^2) - \frac{R_1}{2 E I} (l^2 - x^2)$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $\theta = -\frac{q_0 l_3}{24 E I} [6 l_3^2 + 4 l_2 l_3 + l_3^2 - \frac{(x - l_1)^4}{l_3^3}] - \frac{R_1}{2 E I} (l^2 - x^2)$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{q_0 l_3}{12 E I} [2 (3 l_2 + l_3) (l - x) - 3 (l - x)^2] - \frac{R_1}{2 E I} (l^2 - x^2)$ $x = 0:$ $\theta = -\frac{q_0 l_3}{24 E I} (6 l_3^2 + 4 l_2 l_3 + l_3^2) - \frac{R_1 l^2}{2 E I}$
17	<p> $R_1 = -R_2 = 6 M_0 \frac{l_1 l_2}{l^3}, M_1 = \frac{M_0}{l^2} (2 l_1 l_2 - l_2^2), \frac{l}{2}$ $M_2 = -\frac{M_0}{l^2} (l_1^2 - 2 l_1 l_2)$ 当 M_0 作用在中点 $R_1 = -R_2 = \frac{3 M_0}{2 l}, M_1 = M_2 = \frac{M_0}{4}$ </p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{1}{6 E I} (3 M_1 x^2 - R_1 x^3)$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{1}{6 E I} [3 M_2 (l - x)^2 - R_2 (l - x)^3]$ 当 $l_1 > \frac{l}{3}, x = \frac{2 M_1}{R_1}:$ $v_{\max} = -\frac{2 M_1^2}{3 E I R_1^2}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = -\frac{1}{2 E I} (2 M_1 x - R_1 x^2)$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{1}{2 E I} [2 M_2 (l - x) - R_2 \times (l - x)^2]$
		当力偶 M_0 作用在中点 ($l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$) $0 \leq x \leq \frac{l}{2}:$ $v = -\frac{M_0 x^2}{8 E I} (1 - 2 \frac{x}{l})$ $x = \frac{l}{3}: v_{\max} = -\frac{M_0 l^2}{216 E I}$	$0 \leq x \leq \frac{l}{2}:$ $\theta = -\frac{M_0 x}{4 E I} (1 - 3 \frac{x}{l})$

续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠 度	转 角
18	 <p> $R_1 = \frac{l_2^2}{l^3}(3l_1 + l_2)P, M_1 = \frac{Pl_1l_2^2}{l^2}$ $R_2 = \frac{l_1^2}{l^3}(3l_2 + l_1)P, M_2 = \frac{Pl_1^2l_2}{l^2}$ 当 P 作用在中点: $R_1 = R_2 = \frac{P}{2}, M_1 = M_2 = \frac{Pl}{8}$ </p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{Pl_1l_2^2}{6EI} \left[3\frac{x^2}{l^2} - \frac{(3l_1 + l_2)x^3}{l_1l^3} \right]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{Pl_1^2l_2}{6EI} \left[\frac{3(l-x)^2}{l^2} - \frac{(l_1+3l_2)(l-x)^3}{l_2l^3} \right]$ $x = l_1: v = -\frac{Pl_1^3l_2^2}{3EI l^3}$ 当 $l_1 > l_2$ 时, $x = \frac{2l_1l}{3l_1 + l_2}$ $v_{\max} = \frac{-2Pl_1^3l_2^2}{3EI(3l_1 + l_2)^2}$ 当 $l_1 < l_2$ 时, $x = l - \frac{2l_2l}{3l_2 + l_1}$ $v_{\max} = \frac{-2Pl_1^2l_2^3}{3EI(3l_2 + l_1)^2}$ 当 P 作用在中点 ($l_1 = l_2 = l/2$) $0 \leq x \leq l/2:$ $v = -\frac{Pl^3}{16EI} \left(\frac{x^2}{l^2} - \frac{4x^3}{3l^3} \right)$ $x = \frac{l}{2}$ $v_{\max} = -\frac{Pl^3}{192EI}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{Pl_1l_2^2}{2EI} \left[\frac{(3l_1 + l_2)x^2}{l_1l^2} - \frac{2x}{l} \right]$ $l_1 \leq x \leq l:$ $\theta = -\frac{Pl_1^2l_2}{2EI} \left[\frac{(l_1+3l_2)(l-x)^2}{l_2l^2} - \frac{2(l-x)}{l} \right]$ $0 \leq x \leq l/2:$ $\theta = -\frac{Pl^2}{8EI} \left(\frac{x}{l} - \frac{2x^2}{l^2} \right)$ $x = \frac{l}{4}$ $\theta_{\max} = -\frac{Pl^2}{64EI}$
19	 <p> $R_1 = \frac{ql_3}{2l^2} [(2l_2 + l_3)l^2 - (l_1 - l_2)(2l_1l_2 + l_2l_3 + l_3l_1)], R_2 = q_0l_3 - R_1$ $M_1 = \frac{ql_3}{8l^2} [(2l_2 + l_3)^2(2l_1 + l_3) + \frac{1}{3}l_3^2 \times (2l - 6l_2 - 3l_3)]$ $M_2 = \frac{ql_3}{8l^2} [(2l_1 + l_3)^2(2l_2 + l_3) + \frac{1}{3}l_3^2 \times (2l - 6l_1 - 3l_3)]$ 当 q 沿全长分布: $R_1 = R_2 = \frac{ql}{2}, M_1 = M_2 = \frac{ql^2}{12}$ </p>	$0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{1}{6EI} (3M_1x^2 - R_1x^3)$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $v = -\frac{1}{6EI} [3M_1x^2 - R_1x^3 + \frac{q}{4} \times (x - l_1)^4]$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{1}{6EI} [3M_2(l-x)^2 - R_2(l-x)^3]$ 当 q 沿全长分布 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$): $v = -\frac{ql^4}{24EI} \left(\frac{x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} + \frac{x^4}{l^4} \right)$ $x = \frac{l}{2}$ $v_{\max} = -\frac{ql^4}{384EI}$	$0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = \frac{-x}{2EI} (2M_1 - R_1x)$ $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $\theta = -\frac{1}{2EI} [2M_1x - R_1x^2 + \frac{q}{3}(x - l_1)^3]$ $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{1}{2EI} [2M_2(l-x) - R_2 \times (l-x)^2]$ $\theta = -\frac{ql^3}{12EI} \left(\frac{x}{l} - 3\frac{x^2}{l^2} + \frac{2x^3}{l^3} \right)$ $x = l \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{6} \right)$ $\theta_{\max} = \pm \frac{\sqrt{3}ql^3}{216EI}$

续表 12.4-22

序号	载荷、支反力、内力图 and 挠曲线	挠度	转角
20	<p> $R_1 = \frac{q_0 l_3}{6l^3} [(L^2 + \frac{1}{2} l_3^2)l - \frac{2}{9} L^3 - \frac{17}{45} l_3^3 - l_2 l_3^2]$ $R_2 = \frac{1}{2} q_0 l_3 - R_1$ $M_1 = \frac{q_0 l_3}{6l^2} [(\frac{1}{3} L^2 + \frac{1}{6} l_3^2)l - \frac{1}{9} L^3 - \frac{17}{90} l_3^3 - \frac{1}{2} l_2 l_3^2]$ $M_2 = \frac{q_0 l_3}{6l^2} [\frac{1}{9} L^3 + \frac{17}{90} l_3^3 + \frac{1}{2} l_3 l_3^2 - (\frac{2}{3} L^2 + \frac{1}{3} l_3^2)l + L l^2]$ $L = 3l_2 + l_3$ 当载荷沿全长分布: $R_1 = \frac{3}{20} q_0 l, R_2 = \frac{7}{20} q_0 l$ $M_1 = \frac{1}{30} q_0 l^2, M_2 = \frac{1}{20} q_0 l^2$ </p>	<p> $0 \leq x \leq l_1:$ $v = -\frac{1}{6EI} (3M_1 x^2 - R_1 x^3)$ </p> <p> $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $v = -\frac{1}{60EI} [30M_1 x^2 - 10R_1 x^3 + \frac{q_0}{2l_3} (x - l_1)^5]$ </p> <p> $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $v = -\frac{1}{6EI} [3M_2 (l-x)^2 - R_2 (l-x)^3]$ </p> <p>当载荷沿全长分布 ($l_1 = l_2 = 0, l_3 = l$): $v = -\frac{q_0 l^4}{120EI} (2 \frac{x^2}{l^2} - 3 \frac{x^3}{l^3} + \frac{x^5}{l^5})$ $x = 0.525l;$ $v = v_{max} = -0.0131 \frac{q_0 l^4}{EI}$ </p>	<p> $0 \leq x \leq l_1:$ $\theta = -\frac{1}{2EI} (2M_1 x - R_1 x^2)$ </p> <p> $l_1 \leq x \leq l_1 + l_3:$ $\theta = -\frac{1}{12EI} [12M_1 x - 6R_1 x^2 + \frac{q_0 (x - l_1)^4}{2l_3}]$ </p> <p> $l_1 + l_3 \leq x \leq l:$ $\theta = \frac{1}{2EI} [2M_2 (l-x) - R_2 \times (l-x)^2]$ </p> <p> $\theta = -\frac{q_0 l^3}{120EI} (4 \frac{x}{l} - 9 \frac{x^2}{l^2} + 5 \frac{x^4}{l^4})$ </p>

注: 1. 表中图示指向的支反力 (支反力矩) 为正, 反之为负。剪力、弯矩和挠度及转角的正负规定见表 12.4-18

2. E 为材料的弹性模量, I 为截面对弯曲中性轴的惯性矩 (见表 12.4-17)。

3. 某些其他载荷作用下单跨梁的挠度及转角可根据叠加原理据本表计算式叠加求得。

表 12.4-23 双跨连续梁的支反力、弯矩和挠度的计算公式

支座弯矩 $M_B = \alpha_1 q l^2$ (或 $\alpha_1 P l$)

跨内最大弯矩 AB 跨 $M_{I \max} = \alpha_2 q l^2$ (或 $\alpha_2 P l$)

BC 跨 $M_{II \max} = \alpha_3 q l^2$ (或 $\alpha_3 P l$)

支座反力 $R_A = \beta_1 q l$ (或 $\beta_1 P$)

$R_B = \beta_2 q l$ (或 $\beta_2 P$)

$R_C = \beta_3 q l$ (或 $\beta_3 P$)

最大挠度: $v_{\max} = -\gamma \frac{q l^4}{EI}$ (或 $\gamma \frac{P l^3}{EI}$)

续表 12.4-23

受力简图	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	γ
	-0.125	0.070	0.070	0.375	1.250	0.375	0.005 20
	-0.063	0.096	—	0.438	0.625	-0.063	0.009 06
	-0.188	0.156	0.156	0.313	1.375	0.313	0.009 15
	-0.094	0.203	—	0.406	0.688	-0.094	0.015 02

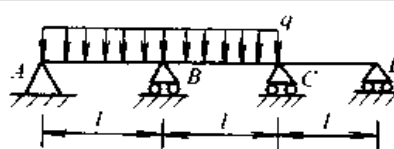
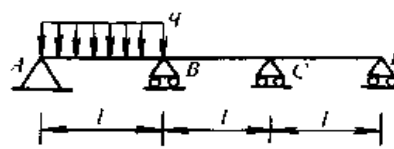
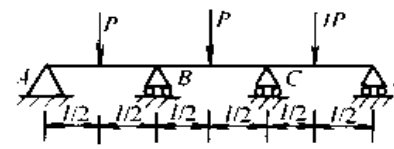
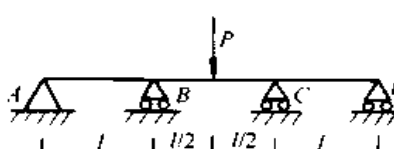
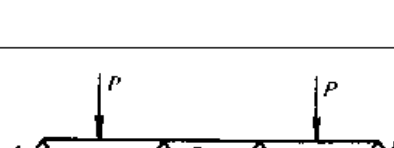
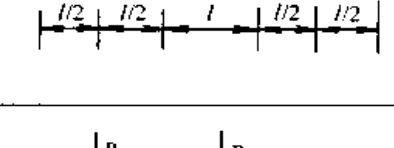
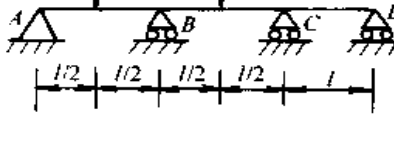
注：弯矩和挠度的正负规定见表 12.4-18，支反力向上为正，向下为负。

表 12.4-24 三等跨连续梁的支反力、弯矩和挠度的计算公式

支座弯矩 $M_A = \alpha_1 ql^2$ (或 $\alpha_1 Pl$)	支座反力 $R_A = \beta_1 ql$ (或 $\beta_1 P$)	最大挠度 AB 跨 $\delta_{I \max} = \gamma_1 \frac{ql^4}{EI}$ (或 $\gamma_1 \frac{Pl^3}{EI}$)
$M_C = \alpha_2 ql^2$ (或 $\alpha_2 Pl$)	$R_B = \beta_2 ql$ (或 $\beta_2 P$)	
跨内最大弯矩 AB 跨 $M_{I \max} = \alpha_3 ql^2$ (或 $\alpha_3 Pl$)	$R_C = \beta_3 ql$ (或 $\beta_3 P$)	BC 跨 $\delta_{II \max} = \gamma_2 \frac{ql^4}{EI}$ (或 $\gamma_2 \frac{Pl^3}{EI}$)
BC 跨 $M_{II \max} = \alpha_4 ql^2$ (或 $\alpha_4 Pl$)	$R_D = \beta_4 ql$ (或 $\beta_4 P$)	
CD 跨 $M_{III \max} = \alpha_5 ql^2$ (或 $\alpha_5 Pl$)		

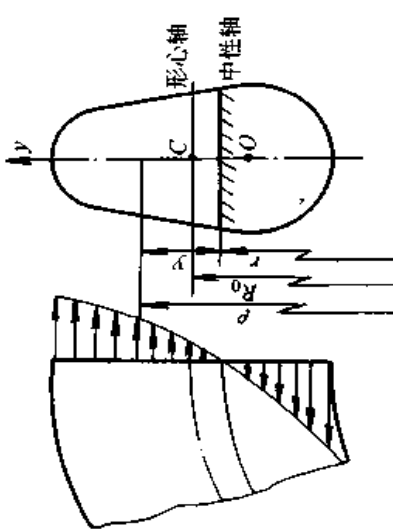
受力简图	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	β_1	β_2	β_3	β_4	γ_1	γ_2
	-0.100	-0.100	0.080	0.025	0.080	0.400	1.100	1.100	0.400	-0.006 8	-0.000 5
	-0.050	-0.050	—	0.075	—	-0.050	0.550	0.550	-0.050	—	-0.006 8
	-0.050	-0.050	0.101	—	0.101	0.450	0.550	0.550	0.450	-0.009 9	—

续表 12.4-24

受 力 简 图	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	β_1	β_2	β_3	β_4	γ_1	γ_2
	-0.117	-0.033	0.073	0.054	—	0.383	1.200	0.450	-0.033	—	—
	-0.067	0.017	0.094	—	—	0.433	0.650	-0.100	0.017	-0.008 8	—
	-0.150	-0.150	0.175	0.100	0.175	0.350	1.150	1.150	0.350	-0.011 5	-0.002 1
	-0.075	-0.075	—	0.175	—	-0.075	0.575	0.575	-0.075	—	-0.011 5
	-0.075	-0.075	0.213	—	0.213	0.425	0.575	0.575	0.425	-0.016 2	—
	-0.175	-0.050	0.163	0.138	—	0.325	1.300	0.425	-0.050	—	—
	-0.100	0.025	0.200	—	—	0.400	0.725	-0.150	0.025	-0.014 6	—

注：弯矩和挠度的正负规定见表 12.4-18，支反力向上为正，向下为负。

表 12.4-25 曲杆平面弯曲时的应力和位移计算式

横截面上的正应力	强度条件	任一截面形心处的广义位移	刚度条件
<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">$\sigma = \sigma_B + \sigma_C$</p> <p style="text-align: center;">式中 弯曲正应力 $\sigma_B = \frac{My}{Sp}$</p> <p style="text-align: center;">拉伸(或压缩应力) $\sigma_C = \frac{N}{A}$</p>	<p style="text-align: center;"> $\sigma_{\max} \leq \sigma_{sp}$ $\sigma_{\min} \leq \sigma_{cp}$ </p>	<p style="text-align: center;"> $\Delta_1 = \int_s \left[\frac{MM^0}{ESR_0} + \frac{MN^0 + NM^0}{EAR_0} + \frac{NN^0}{EA} + k \frac{QQ^0}{GA} \right] ds$ </p>	<p style="text-align: center;">$\Delta_{\max} \leq \Delta_{sp}$</p>

注：1. M —弯矩，使曲杆的曲率增大为正，反之则为负； N —轴力，拉为正，压为负； Q —剪力，对截面一侧任一点顺时针转为正，逆时针转为负。 M^0 、 N^0 、 Q^0 —依次为各单位广义力引起的弯矩、轴力和剪力，其正负规定与 M 、 Q 、 N 同。

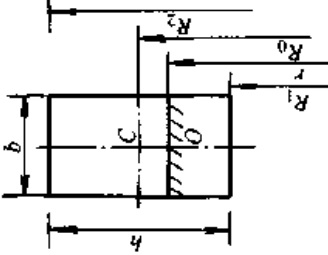
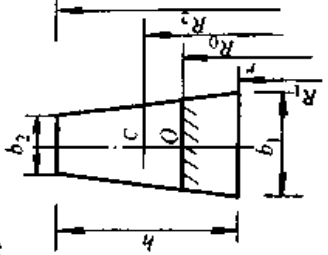
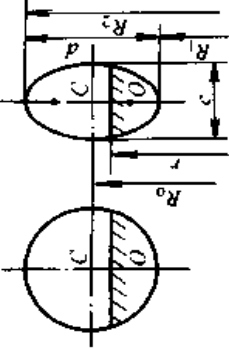
2. y —所求应力点到中性轴的距离； $\rho = r + y$ —所求应力点所在层的曲率半径； $r = A / \int_A \frac{dp}{A}$ —中性层的曲率半径； R_0 —形心层的曲率半径； $S = A$ (R_0 —横截面对中性轴的静矩； A —横截面面积。常用曲杆横截面的 A 、 r 、 R_0 计算式见表 12.4-26。

3. E 、 G 、 σ_w 、 σ_{cp} —分别为材料的弹性模量、切变弹性模量、许用拉应力和许用压应力。

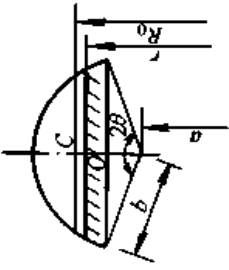
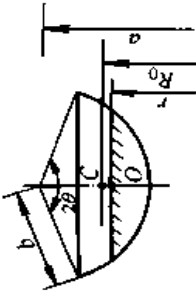
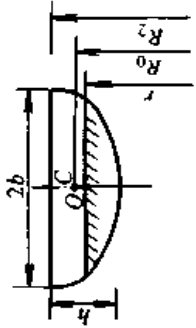
4. k —与截面形状有关的系数 (矩形 $k = \frac{6}{5}$ ，圆形 $k = \frac{10}{9}$)。

5. 若为小曲率 ($R_0/h > 5$) 曲杆，应力和位移可按直杆弯曲公式计算，与切力 Q 对应的切应力一般很小，可略去。

表 12.4-26 常用曲杆横截面的 A 、 r 和 R_0 计算式

序号	横截面形状	A	r	R_0
1	矩形 	bh	$\frac{h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$	$R_1 + \frac{h}{2}$
2	等腰梯形 	$\frac{1}{2}(b_1 + b_2)h$ 对等腰三角形 ($b_1 = b, b_2 = 0$) $\frac{1}{2}bh$	$\frac{\frac{1}{2}(b_1 + b_2)h}{(b_1 R_2 - b_2 R_1) \ln \frac{R_2}{R_1} - (b_1 - b_2)}$ $\frac{h}{2 \left(\frac{R_2}{h} \ln \frac{R_2}{R_1} - 1 \right)}$	$R_1 + \frac{(b_1 + 2b_2)h}{3(b_1 + b_2)}$ $R_1 + \frac{h}{3}$
3	圆形及椭圆形 	$\frac{\pi}{4}d^2$ (对圆形) $\frac{\pi}{4}cd$ (对椭圆)	$\frac{d^2}{8R_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2R_0} \right)^2} \right]}$	$R_1 + \frac{d}{2}$

续表 12.4-26

序号	横截面形状	A	r	R_u
4	弓形 	$b^2\theta - \frac{b^2}{2}\sin 2\theta$	若 $a > b$ 设 $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ $\frac{b^2(\theta - 0.5\sin 2\theta)}{2a\theta - 2b\sin\theta - \pi c + 2c\sin^{-1}\left[\frac{b+a\cos\theta}{a+b\cos\theta}\right]}$ 若 $a < b$ 设 $d = \sqrt{b^2 - a^2}$ $\frac{b^2(\theta - 0.5\sin 2\theta)}{2a\theta - 2b\sin\theta + 2d\ln\frac{b+a\cos\theta+d\sin\theta}{a+b\cos\theta}}$	$a + \frac{4b\sin^3\theta}{3(2\theta - \sin 2\theta)}$
5	倒弓形 	$b^2\theta - \frac{b^2}{2}\sin 2\theta$	$b^2\theta - \frac{b^2}{2}\sin 2\theta$ $\frac{2a\theta + 2b\sin\theta - \pi\sqrt{a^2 - b^2} - 2\sqrt{a^2 - b^2}\arcsin\left[\frac{b - a\cos\theta}{a - b\cos\theta}\right]}{2a\theta + 2b\sin\theta - \pi\sqrt{a^2 - b^2} - 2\sqrt{a^2 - b^2}\arcsin\left[\frac{b - a\cos\theta}{a - b\cos\theta}\right]}$	$a - \frac{4b\sin^3\theta}{3(2\theta - \sin 2\theta)}$
6	半椭圆 	$\frac{1}{2}\pi b h$	$\frac{\frac{1}{2}\pi b h}{2b + \frac{\pi b}{h}(R_2 - \sqrt{R_2^2 - h^2}) - \frac{2b}{h}\sqrt{R_2^2 - h^2}\arcsin\left(\frac{h}{R_2}\right)}$	$R_2 - \frac{4h}{3\pi}$

续表 12.4-26

序号	截面形状	A	r	R_0
7	<p>“T”“□”字形</p>	$b_1 h_1 + b_2 h_2$	$r = \frac{b_1 h_1 + b_2 h_2}{b_1 \ln \frac{a}{R_1} + b_2 \ln \frac{R_2}{a}}$	$R_1 + \frac{\frac{1}{2} b_1 h_1^2 + b_2 h_2 (\frac{h_2}{2} + h_1)}{b_1 h_1 + b_2 h_2}$
8	<p>“I”字形</p>	$b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3$	$r = \frac{b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3}{b_1 \ln \frac{a}{R_1} + b_2 \ln \frac{e}{a} + b_3 \ln \frac{R_2}{e}}$ $e = R_1 + h_1 + h_2$	$R_1 + \frac{\frac{1}{2} b_1 h_1^2 + b_2 h_2 (\frac{h_2}{2} + h_1) + b_3 h_3 (\frac{h_3}{2} + h_2 + \frac{h_1}{2})}{b_1 h_1 + b_2 h_2 + b_3 h_3}$

注：对其他由几部分图形组合的截面， $r = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n \int_{A_i} \frac{dA}{\rho}}$ ， $R_0 = R_1 + \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_{ic}}{\sum_{i=1}^n A_i}$ (y_{ic} 为第 i 个面积形心到曲线杆内侧面底边的距离)。

7 杆系结构的内力、应力和位移计算

表 12.4-27 杆系结构在载荷作用下，横截面的位移计算公式

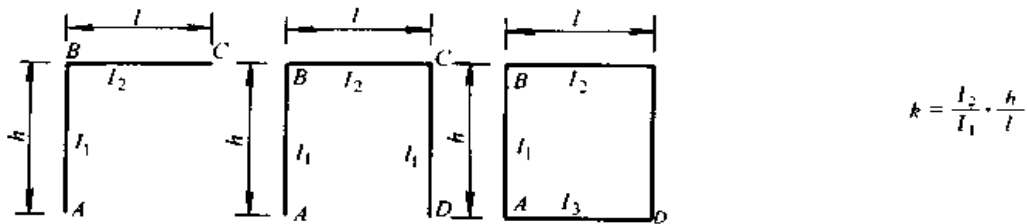
结构类型	梁与刚架	桁架	组合构架
横截面的位移 Δ , 计算式	$\Delta_s = \sum \int_l \frac{MM^0}{EI} dx$	$\Delta_s = \sum \frac{NN^0 l}{EA}$	$\Delta_s = \sum \int_l \frac{MM^0}{EI} dx + \sum \frac{NN^0 l}{EA}$

注：1. Δ_s —广义位移，可以是线位移、角位移，也可以是相对线位移或相对角位移等； M 、 N —载荷引起的弯矩与轴力； M^0 、 N^0 —所加单位广义力引起的弯矩和轴力；积分分别沿各段杆进行，然后对各积分求和。

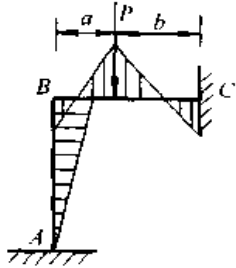
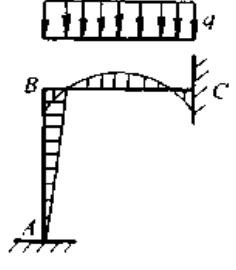
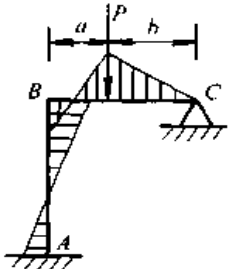
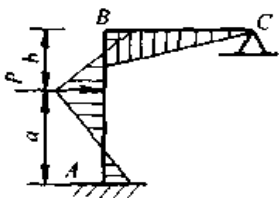
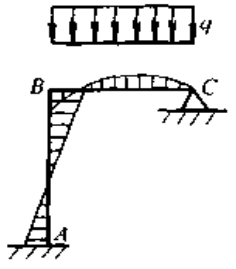
2. 对受扭转的圆截面杆，计算式中还应加 $\sum \int_l \frac{TT^0}{GI_p} dx$ 项， T 与 T^0 分别为载荷及单位广义力引起的扭矩。

3. E 、 G —材料的弹性模量和切变模量； I 、 A 、 I_p —截面的惯性矩，面积和极惯性矩。

表 12.4-28 简单静不定刚架的弯矩计算式

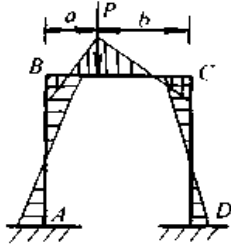
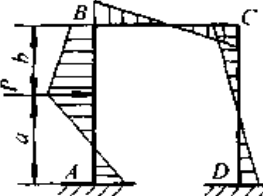
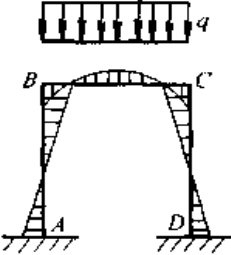
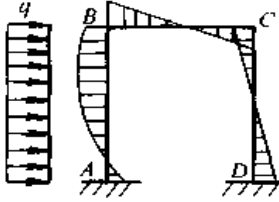
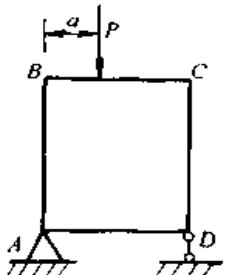


序号	载荷及弯矩图	特征截面上的弯矩计算式
$N = k + 1; \beta = b/l$		
1		$M_B = \frac{\beta(1+\beta)}{2N} Pa$ $M_C = \beta \left[1 - \frac{\beta(1+\beta)}{2N} \right] Pa$
2		$M_B = \frac{ql^2}{8N}$

序号	载荷及弯矩图	特征截面上的弯矩计算式
$N = k + 1; \beta = b/l$		
3		$M_A = \frac{\beta^2}{2N} Pa, \quad M_B = \frac{\beta^2}{N} Pa$ $M_C = [(2 - \beta)k + 2(1 - \beta)] \frac{\beta}{2N} Pa$ $M_P = \beta Pa - \beta M_B - (1 - \beta) M_C$
4		$M_A = \frac{ql^2}{24N}, \quad M_B = \frac{ql^2}{12N}$ $M_C = (2 + 3k) \frac{ql^2}{24N}$
$N = 3k + 4; \beta = b/l; \gamma = b/h$		
5		$M_A = \frac{\beta(1 + \beta)}{N} Pa$ $M_B = \frac{2\beta(1 + \beta)}{N} Pa$ $M_P = \beta \left[1 - \frac{2\beta(1 + \beta)}{N} \right] Pa$
6		$M_A = [2 + (2 + 3k)\gamma] \frac{\gamma}{N} Pa$ $M_B = \frac{3k\gamma(1 - \gamma)}{N} Pa$ $M_P = \gamma Pa - \gamma M_A - (1 - \gamma) M_B$
7		$M_A = \frac{ql^2}{4N}$ $M_B = \frac{ql^2}{2N}$

续表 12.4-28

序号	载荷及弯矩图	特征截面上的弯矩计算式
$N = 3k + 4; \beta = b/l; \gamma = b/h$		
8		$M_A = \frac{(2+k)}{4N} qh^2$ $M_B = \frac{k}{4N} qh^2$
$N = 2k + 3; \gamma = b/h$		
9		$M_B = M_C = \frac{3ab}{2Nl} P$ $M_A = \frac{(3+4k)}{2Nl} abP$
10		$M_B = \left[1 - \frac{(2-\gamma) \gamma k}{N} \right] \frac{Pa}{2}$ $M_C = \left[1 + \frac{(2-\gamma) \gamma k}{N} \right] \frac{Pa}{2}$ $M_P = (1-\gamma) (Pb + M_B)$
11		$M_B = M_C = \frac{ql^2}{4N}$ $M_{max} = (1+2k) \frac{ql^2}{8N}$
12		$M_A = (2+k) \frac{3qh^2}{8N}$ $M_C = (6+5k) \frac{qh^2}{8N}$

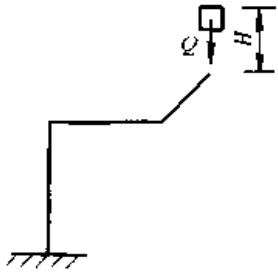
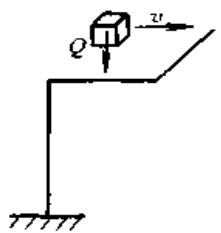
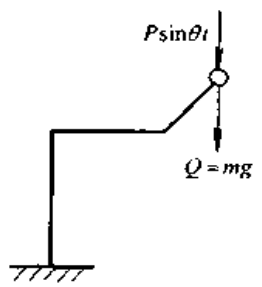
序号	载荷及弯矩图	特征截面上的弯矩计算式
$N_1 = k + 2; N_2 = 6k + 1; \beta = \frac{b}{l}; \gamma = \frac{b}{h}$		
13		$M_A = Pa\beta \left(\frac{1}{2N_1} - \frac{2\beta - 1}{2N_2} \right), M_B = Pa\beta \left(\frac{1}{N_1} + \frac{2\beta - 1}{2N_2} \right)$ $M_C = Pa\beta \left(\frac{1}{N_1} - \frac{2\beta - 1}{2N_2} \right), M_D = Pa\beta \left(\frac{1}{N_1} + \frac{2\beta - 1}{2N_2} \right)$
14		$M_A = \left[1 - \frac{3(1-\gamma)k}{N_2} \pm \frac{\gamma[1+\gamma(1+k)]}{N_1} \right] \frac{Pa}{2}$ $M_D = \left[\frac{3(1-\gamma)k}{N_2} \mp \frac{\gamma(1-\gamma)k}{N_1} \right] \frac{Pa}{2}$
15		$M_A = M_D = \frac{ql^2}{12N_1}$ $M_B = M_C = \frac{ql^2}{6N_1}$ $M_{max} = \frac{(2+3k)}{24N_1} ql^2$
16		$M_A = \left(\frac{1+4k}{N_2} \pm \frac{3+k}{6N_1} \right) \frac{qh^2}{4}$ $M_D = \left(\frac{2}{N_2} \mp \frac{1}{6N_1} \right) k \frac{qh^2}{4}$
$m = l_2/l_1; \beta = a/l; \gamma = a/h; n = (2+k) + (3+2k)m/k; \mu = 1+6k+m$		
17		<p>当 P 作用在 BC 段上:</p> $M_A = \beta(1-\beta) \left(\frac{1}{n} \mp \frac{1-2\beta}{\mu} \right) \frac{Pl}{2}$ $M_D = -\beta(1-\beta) \left(\frac{2k+3m}{kn} \pm \frac{1-2\beta}{\mu} \right) \frac{Pl}{2}$ <p>当 P 作用在 AD 段上:</p> $M_A = \beta(1-\beta) m \left(\frac{3+2k}{kn} \pm \frac{1-2\beta}{\mu} \right) \frac{Pl}{2}$ $M_D = -\beta(1-\beta) m \left(\frac{1}{n} \mp \frac{1-2\beta}{\mu} \right) \frac{Pl}{2}$

续表 12.4-28

序号	载 荷	特征截面上的弯矩计算式
$m = I_2/I_3; \beta = a/l; \gamma = a/h; n = (2+k) + (3+2k)m/k; \mu = 1+6k+m$		
18		$\begin{aligned} M_A &= M_D = \gamma \left\{ \frac{1-\gamma}{n} [\gamma(1+k) - (2+k)] \mp \frac{1}{\mu} [1+3k(2-\gamma)] \right\} \frac{Ph}{2} \\ M_B &= M_C = \gamma \left\{ -\frac{1-\gamma}{n} [\gamma(k+m) + m] \pm \frac{1}{\mu} (3\gamma k + m) \right\} \frac{Ph}{2} \end{aligned}$
19		$M_A = M_B = M_C = M_D = -\frac{1+k}{1+k} \frac{h^2}{l^2} \cdot \frac{ql^2}{12}$ <p>(当 $I_2 = I_3$)</p>
20		<p>当 q 作用在 BC 段上:</p> $M_A = M_D = \frac{ql^2}{12n}$ $M_B = M_C = -\frac{2k+3m}{kn} \cdot \frac{ql^2}{12}$ <p>当 q 作用在 AD 段上:</p> $M_A = M_D = \frac{3+2k}{kn} \cdot \frac{Mql^2}{12}$ $M_B = M_C = -\frac{m}{n} \cdot \frac{ql^2}{12}$
21		$\begin{aligned} M_A &= -\left(\frac{3+k}{6n} \pm \frac{1+4k}{\mu} \right) \frac{qh^2}{4} \\ M_D &= -\left(\frac{k+3m}{6n} \pm \frac{2k+m}{\mu} \right) \frac{qh^2}{4} \end{aligned}$
22		$\begin{aligned} M_A &= M_D = -\frac{8+3k}{n} \cdot \frac{qh^2}{60} \\ M_B &= M_C = -\frac{7+2k}{n} m \frac{qh^2}{60} \end{aligned}$

注：弯矩图画在受压的一侧，无弯矩图者、特征截面弯矩计算值为正时，框架内侧受拉。

表 12.4-29 杆结构的冲击和振动应力及位移的计算式

类 型	冲击或振动动荷系数 K_d	动应力 σ_d	动位移 Δ_d
自由落体冲击 	$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\Delta_{st}^*}}$	$\sigma_d = K_d \sigma_{st}$	$\Delta_d = K_d \Delta_{st}$
水平匀速冲击 	$K_d = \sqrt{1 + \frac{v^2}{g \Delta_{st}^*}}$		
单自由度小阻尼强迫振动 (简谐载荷) 	$K_d = 1 + \beta \frac{\Delta_p}{\Delta_{st}^*}$ $\beta = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2}\right)^2 + 4 \left(\frac{n}{\omega}\right)^2 \left(\frac{\theta}{\omega}\right)^2 \right]}}$	$\sigma_{d\max} = K_d \sigma_{st}$ $\sigma_{d\min} = \left(1 - \beta \frac{\Delta_p}{\Delta_{st}^*}\right) \sigma_{st}$	$\Delta_{d\max} = K_d \Delta_{st}$ $\Delta_{d\min} = \left(1 - \beta \frac{\Delta_p}{\Delta_{st}^*}\right) \Delta_{st}$

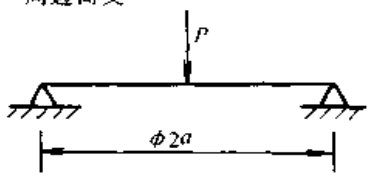
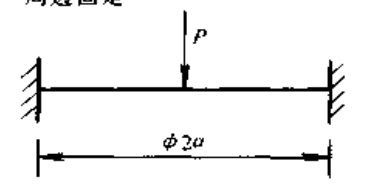
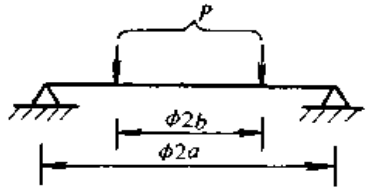
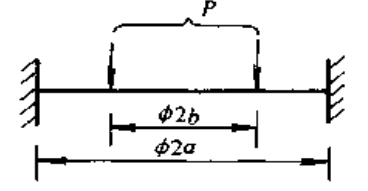
符号含义： Δ_{st}^* 、 Δ_{st} —分别为在冲击点（或集中质量 m 处）沿冲击（或振动）方向，在静载 Q 作用下，于该处及所求点所产生的静位移； Δ_p —在最大干扰力 P 静载作用下，在集中质量 m 处沿振动方向产生的位移； σ_{st} —在冲击点（或集中质量 m 处）静载 Q 作用下，于所求点所产生的静应力； $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ —结构的固有频率； k —结构的刚度（在冲击点或集中质量 m 处，沿冲击或振动方向产生单位位移所需的力）； θ —简谐载荷的圆频率； n —阻尼系数

注：1. 表中计算式适用于单杆、折杆、刚架和桁架等各种杆结构。

2. 表中 K_d 的计算略去了杆结构的质量。

8 薄板

表 12.4.30 等厚薄圆板的最大应力和最大挠度 ($\nu=0.3$)

序号	载荷与支座	最大应力	最大挠度																																				
(1) 在板中心作用集中力 P																																							
1	<p>周边简支</p> 	<p>在 $k=0$ 处的下表面:</p> $\sigma_{r\max} = \sigma_{\theta\max} = (1.1535 + 0.6305 \ln m) \frac{P}{l^2}$	<p>在 $k=0$ 处:</p> $w_{\max} = 0.552 m^2 \frac{P}{Et}$																																				
2	<p>周边固定</p> 	<p>在 $k=0$ 处的下表面:</p> $\sigma_{r\max} = \sigma_{\theta\max} = (0.676 + 0.6305 \ln m) \frac{P}{l^2}$	<p>在 $k=0$ 处:</p> $w_{\max} = 0.217 m^2 \frac{P}{Et}$																																				
(2) 在半径为 b 的圆周上作用均布的载荷(合力为 P)																																							
3	<p>周边简支</p> 	<p>在 $0 \leq k \leq K$:</p> $\sigma_r = \sigma_{\theta} = \sigma_{\max} = \mp \alpha \frac{P}{l^2}$ $\alpha = 0.1671(1 - K^2) - 0.6207 \ln K$	<p>在 $k=0$ 处:</p> $w = w_{\max} = \beta m^2 \frac{P}{Et}$ $\beta = 0.5515(1 - K^2) + 0.4345 K^2 \ln K$																																				
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>K</th> <th>0</th> <th>0.1</th> <th>0.2</th> <th>0.3</th> <th>0.4</th> <th>0.5</th> <th>0.6</th> <th>0.7</th> <th>0.8</th> <th>0.9</th> <th>1.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>—</td> <td>1.595</td> <td>1.159</td> <td>0.899</td> <td>0.709</td> <td>0.556</td> <td>0.424</td> <td>0.307</td> <td>0.199</td> <td>0.097</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.552</td> <td>0.536</td> <td>0.501</td> <td>0.455</td> <td>0.400</td> <td>0.338</td> <td>0.273</td> <td>0.205</td> <td>0.136</td> <td>0.068</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	—	1.595	1.159	0.899	0.709	0.556	0.424	0.307	0.199	0.097	0	β	0.552	0.536	0.501	0.455	0.400	0.338	0.273	0.205	0.136	0.068	0	
K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																												
α	—	1.595	1.159	0.899	0.709	0.556	0.424	0.307	0.199	0.097	0																												
β	0.552	0.536	0.501	0.455	0.400	0.338	0.273	0.205	0.136	0.068	0																												
4	<p>周边固定</p> 	<p>当 $K < 0.32$, 在 $0 \leq k \leq K$:</p> $\sigma_r = \sigma_{\theta} = \sigma_{\max} = \mp \alpha \frac{P}{l^2}$ $\alpha = 0.3104(K^2 - 2 \ln K - 1)$ <p>当 $K > 0.32$, 在 $k=1$ 处:</p> $\sigma_r = \sigma_{\max} = \pm \alpha \frac{P}{l^2}$ $\alpha = 0.4775(1 - K^2)$	<p>在 $k=0$ 处:</p> $w = w_{\max} = \beta m^2 \frac{P}{Et}$ $\beta = 0.4335 K^2 \ln K + 0.2172(1 - K^2)$																																				
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>K</th> <th>0</th> <th>0.1</th> <th>0.2</th> <th>0.3</th> <th>0.4</th> <th>0.5</th> <th>0.6</th> <th>0.7</th> <th>0.8</th> <th>0.9</th> <th>1.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>—</td> <td>1.122</td> <td>0.701</td> <td>0.465</td> <td>0.401</td> <td>0.358</td> <td>0.306</td> <td>0.244</td> <td>0.172</td> <td>0.091</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.217</td> <td>0.205</td> <td>0.181</td> <td>0.151</td> <td>0.119</td> <td>0.088</td> <td>0.059</td> <td>0.035</td> <td>0.016</td> <td>0.004</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	—	1.122	0.701	0.465	0.401	0.358	0.306	0.244	0.172	0.091	0	β	0.217	0.205	0.181	0.151	0.119	0.088	0.059	0.035	0.016	0.004	0	
K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																												
α	—	1.122	0.701	0.465	0.401	0.358	0.306	0.244	0.172	0.091	0																												
β	0.217	0.205	0.181	0.151	0.119	0.088	0.059	0.035	0.016	0.004	0																												

(3) 在半径为 b 的圆域内作用均布载荷 q

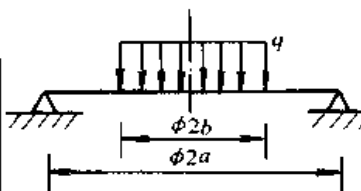
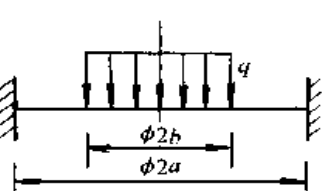
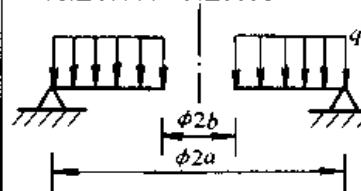
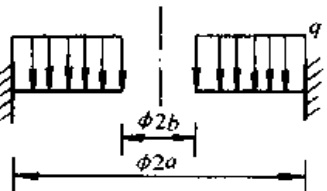
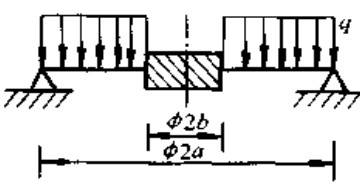
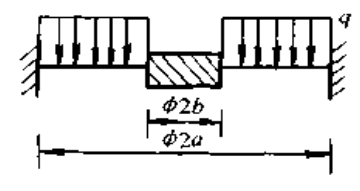
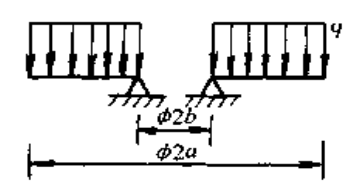
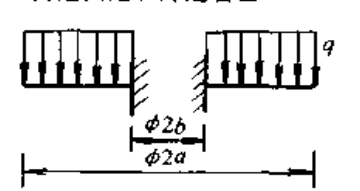
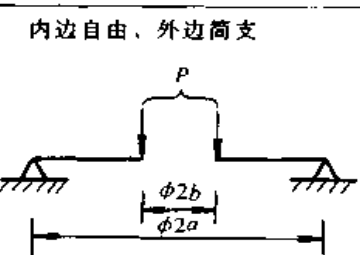
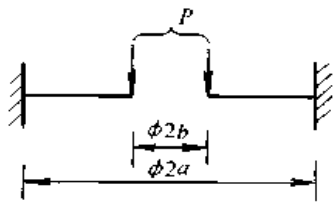
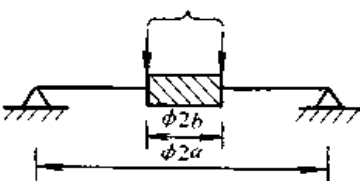
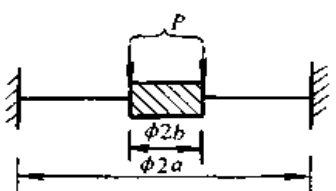
序号	载荷与支座	最大应力	最大挠度																																	
5		在 $k=0$ 处: $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_{\max} = \mp am^2q$ $\alpha = 1.5K^2 - 0.2625K^4 - 1.95K^2 \ln K$	在 $k=0$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$ $\beta = 1.7325K^2 - 1.0369K^4 + 0.6825K^4 \ln K$																																	
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>0.060</td><td>0.185</td><td>0.344</td><td>0.519</td><td>0.697</td><td>0.865</td><td>1.013</td><td>1.131</td><td>1.209</td><td>1.238</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.017</td><td>0.066</td><td>0.141</td><td>0.235</td><td>0.339</td><td>0.444</td><td>0.542</td><td>0.622</td><td>0.676</td><td>0.696</td></tr> </table>	K	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	0.060	0.185	0.344	0.519	0.697	0.865	1.013	1.131	1.209	1.238	β	0.017	0.066	0.141	0.235	0.339	0.444	0.542	0.622	0.676	0.696	
		K	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																								
α	0.060	0.185	0.344	0.519	0.697	0.865	1.013	1.131	1.209	1.238																										
β	0.017	0.066	0.141	0.235	0.339	0.444	0.542	0.622	0.676	0.696																										
6		当 $K < 0.569$, 在 $k=0$ 处: $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_{\max} = \mp am^2q$ $\alpha = 0.4875K^4 - 1.95K^2 \ln K$ 当 $K > 0.569$, 在 $k=1$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \pm am^2q$ $\alpha = 1.5K^2 - 0.75K^4$	在 $k=0$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$ $\beta = (0.683 - 0.512K^2 + 0.683K^2 \ln K)K^2$																																	
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>0.045</td><td>0.126</td><td>0.215</td><td>0.298</td><td>0.368</td><td>0.443</td><td>0.555</td><td>0.653</td><td>0.723</td><td>0.750</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.017</td><td>0.025</td><td>0.051</td><td>0.080</td><td>0.109</td><td>0.134</td><td>0.153</td><td>0.165</td><td>0.170</td><td>0.171</td></tr> </table>	K	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	0.045	0.126	0.215	0.298	0.368	0.443	0.555	0.653	0.723	0.750	β	0.017	0.025	0.051	0.080	0.109	0.134	0.153	0.165	0.170	0.171	
		K	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																								
α	0.045	0.126	0.215	0.298	0.368	0.443	0.555	0.653	0.723	0.750																										
β	0.017	0.025	0.051	0.080	0.109	0.134	0.153	0.165	0.170	0.171																										
说明	σ_r 、 σ_θ —板上、下表面处的径向与周向弯曲应力, 式前的“+”、“-”号中, 上面的指上板面、下面的指下表面; w —挠度, 向下为正; r —所求点半径; $k = \frac{r}{a}$; $K = \frac{b}{a}$; $m = \frac{a}{t}$; t —板厚。																																			

表 12.4-31 等厚圆环薄板的最大应力和最大挠度 ($\nu=0.3$)

序号	载荷与支座	最大应力	最大挠度																																				
(1) 在整个板面作用均布载荷 q																																							
1	内边自由, 外边简支 	在 $k=K$ 处: $\sigma_\theta = \sigma_{\max} = \mp am^2q$	在 $k=K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$																																				
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>2.475</td><td>2.379</td><td>2.192</td><td>1.964</td><td>1.710</td><td>1.443</td><td>1.165</td><td>0.881</td><td>0.592</td><td>0.298</td><td>0</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.696</td><td>0.750</td><td>0.813</td><td>0.831</td><td>0.787</td><td>0.682</td><td>0.530</td><td>0.354</td><td>0.184</td><td>0.053</td><td>0</td></tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	2.475	2.379	2.192	1.964	1.710	1.443	1.165	0.881	0.592	0.298	0	β	0.696	0.750	0.813	0.831	0.787	0.682	0.530	0.354	0.184	0.053	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	2.475	2.379	2.192	1.964	1.710	1.443	1.165	0.881	0.592	0.298	0																												
β	0.696	0.750	0.813	0.831	0.787	0.682	0.530	0.354	0.184	0.053	0																												
2	内边自由, 外边固定 	当 $k < 0.168$, 在 $k=K$ 处: $\sigma_\theta = \sigma_{\max} = \mp am^2q$ 当 $k > 0.168$, 在 $k=1$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \pm am^2q$	在 $k=K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$																																				
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>0.975</td><td>0.869</td><td>0.730</td><td>0.681</td><td>0.596</td><td>0.480</td><td>0.348</td><td>0.217</td><td>0.105</td><td>0.028</td><td>0</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.171</td><td>0.181</td><td>0.175</td><td>0.144</td><td>0.100</td><td>0.058</td><td>0.013</td><td>0.009</td><td>0.002</td><td>0.001</td><td>0</td></tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	0.975	0.869	0.730	0.681	0.596	0.480	0.348	0.217	0.105	0.028	0	β	0.171	0.181	0.175	0.144	0.100	0.058	0.013	0.009	0.002	0.001	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	0.975	0.869	0.730	0.681	0.596	0.480	0.348	0.217	0.105	0.028	0																												
β	0.171	0.181	0.175	0.144	0.100	0.058	0.013	0.009	0.002	0.001	0																												

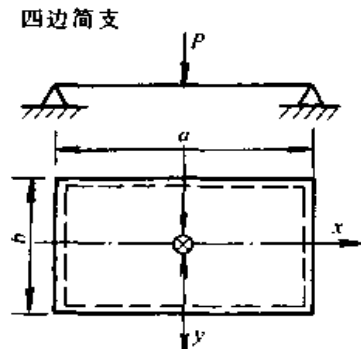
续表 12.4-31

序号	载荷及支座	最大应力	最大挠度																																				
3	内边可动固定, 外边简支 	在 $k = K$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \mp \alpha m^2 q$	在 $k = K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$																																				
		<table border="1"> <tr> <td>K</td><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td><td>1.904</td><td>1.802</td><td>1.585</td><td>1.311</td><td>1.017</td><td>0.733</td><td>0.481</td><td>0.282</td><td>0.122</td><td>0.030</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>β</td><td>0.696</td><td>0.628</td><td>0.493</td><td>0.343</td><td>0.211</td><td>0.113</td><td>0.050</td><td>0.017</td><td>0.003</td><td>0.0002</td><td>0</td> </tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	1.904	1.802	1.585	1.311	1.017	0.733	0.481	0.282	0.122	0.030	0	β	0.696	0.628	0.493	0.343	0.211	0.113	0.050	0.017	0.003	0.0002	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	1.904	1.802	1.585	1.311	1.017	0.733	0.481	0.282	0.122	0.030	0																												
β	0.696	0.628	0.493	0.343	0.211	0.113	0.050	0.017	0.003	0.0002	0																												
4	内边可动固定, 外边固定 	在 $k = 1$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \pm \alpha m^2 q$	在 $k = K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$																																				
		<table border="1"> <tr> <td>K</td><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td><td>0.750</td><td>0.728</td><td>0.668</td><td>0.580</td><td>0.474</td><td>0.361</td><td>0.250</td><td>0.151</td><td>0.072</td><td>0.017</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>β</td><td>0.171</td><td>0.150</td><td>0.112</td><td>0.075</td><td>0.044</td><td>0.023</td><td>0.010</td><td>0.003</td><td>0.0007</td><td>0</td><td>0</td> </tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	0.750	0.728	0.668	0.580	0.474	0.361	0.250	0.151	0.072	0.017	0	β	0.171	0.150	0.112	0.075	0.044	0.023	0.010	0.003	0.0007	0	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	0.750	0.728	0.668	0.580	0.474	0.361	0.250	0.151	0.072	0.017	0																												
β	0.171	0.150	0.112	0.075	0.044	0.023	0.010	0.003	0.0007	0	0																												
5	内边简支, 外边自由 	在 $k = K$ 处: $\sigma_\theta = \sigma_{\max} = \pm \alpha m^2 q$	在 $k = 1$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$																																				
		<table border="1"> <tr> <td>K</td><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td><td>-</td><td>7.641</td><td>5.092</td><td>3.688</td><td>2.745</td><td>2.048</td><td>1.499</td><td>1.045</td><td>0.656</td><td>0.312</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>β</td><td>1.037</td><td>1.217</td><td>1.309</td><td>1.265</td><td>1.117</td><td>0.902</td><td>0.656</td><td>0.412</td><td>0.202</td><td>0.055</td><td>0</td> </tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	-	7.641	5.092	3.688	2.745	2.048	1.499	1.045	0.656	0.312	0	β	1.037	1.217	1.309	1.265	1.117	0.902	0.656	0.412	0.202	0.055	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	-	7.641	5.092	3.688	2.745	2.048	1.499	1.045	0.656	0.312	0																												
β	1.037	1.217	1.309	1.265	1.117	0.902	0.656	0.412	0.202	0.055	0																												
6	内边固定, 外边自由 	在 $k = K$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \pm \alpha m^2 q$	在 $k = 1$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^4 \frac{qt}{E}$																																				
		<table border="1"> <tr> <td>K</td><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td><td>-</td><td>5.787</td><td>3.680</td><td>2.462</td><td>1.633</td><td>1.041</td><td>0.618</td><td>0.324</td><td>0.135</td><td>0.032</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>β</td><td>1.037</td><td>0.827</td><td>0.560</td><td>0.347</td><td>0.193</td><td>0.094</td><td>0.038</td><td>0.012</td><td>0.002</td><td>0.0001</td><td>0</td> </tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	-	5.787	3.680	2.462	1.633	1.041	0.618	0.324	0.135	0.032	0	β	1.037	0.827	0.560	0.347	0.193	0.094	0.038	0.012	0.002	0.0001	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	-	5.787	3.680	2.462	1.633	1.041	0.618	0.324	0.135	0.032	0																												
β	1.037	0.827	0.560	0.347	0.193	0.094	0.038	0.012	0.002	0.0001	0																												
(2) 在内周边上作用均布载荷, 其合力为 P																																							
7	内边自由, 外边简支 	在 $k = K$ 处: $\sigma_\theta = \sigma_{\max} = \mp \alpha \frac{P}{t^2}$	在 $k = K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^2 \frac{P}{Et}$																																				
		<table border="1"> <tr> <td>K</td><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td><td>-</td><td>3.222</td><td>2.415</td><td>1.977</td><td>1.688</td><td>1.482</td><td>1.325</td><td>1.202</td><td>1.104</td><td>1.023</td><td>0.955</td> </tr> <tr> <td>β</td><td>0.550</td><td>0.632</td><td>0.704</td><td>0.733</td><td>0.721</td><td>0.672</td><td>0.590</td><td>0.478</td><td>0.341</td><td>0.181</td><td>0</td> </tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	-	3.222	2.415	1.977	1.688	1.482	1.325	1.202	1.104	1.023	0.955	β	0.550	0.632	0.704	0.733	0.721	0.672	0.590	0.478	0.341	0.181	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	-	3.222	2.415	1.977	1.688	1.482	1.325	1.202	1.104	1.023	0.955																												
β	0.550	0.632	0.704	0.733	0.721	0.672	0.590	0.478	0.341	0.181	0																												

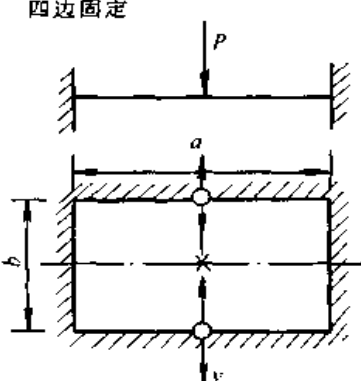
序号	载荷与支座	最大应力	最大挠度																																				
8	内边自由, 外边固定 	当 $K < 0.385$, 在 $k = K$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \mp a \frac{P}{r^2}$ 当 $K > 0.385$, 在 $k = 1$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \pm a \frac{P}{r^2}$	在 $k = K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^2 \frac{P}{Et}$																																				
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>—</td><td>2.203</td><td>1.305</td><td>0.797</td><td>0.510</td><td>0.454</td><td>0.379</td><td>0.290</td><td>0.194</td><td>0.097</td><td>0</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.217</td><td>0.247</td><td>0.238</td><td>0.191</td><td>0.123</td><td>0.081</td><td>0.042</td><td>0.017</td><td>0.005</td><td>0.001</td><td>0</td></tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	—	2.203	1.305	0.797	0.510	0.454	0.379	0.290	0.194	0.097	0	β	0.217	0.247	0.238	0.191	0.123	0.081	0.042	0.017	0.005	0.001	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	—	2.203	1.305	0.797	0.510	0.454	0.379	0.290	0.194	0.097	0																												
β	0.217	0.247	0.238	0.191	0.123	0.081	0.042	0.017	0.005	0.001	0																												
9	内边可动固定, 外边简支 	在 $k = K$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \mp a \frac{P}{r^2}$	在 $k = K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^2 \frac{P}{Et}$																																				
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>—</td><td>2.440</td><td>1.746</td><td>1.320</td><td>1.004</td><td>0.753</td><td>0.546</td><td>0.373</td><td>0.227</td><td>0.104</td><td>0</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.551</td><td>0.468</td><td>0.352</td><td>0.241</td><td>0.153</td><td>0.088</td><td>0.044</td><td>0.018</td><td>0.005</td><td>0.0006</td><td>0</td></tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	—	2.440	1.746	1.320	1.004	0.753	0.546	0.373	0.227	0.104	0	β	0.551	0.468	0.352	0.241	0.153	0.088	0.044	0.018	0.005	0.0006	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	—	2.440	1.746	1.320	1.004	0.753	0.546	0.373	0.227	0.104	0																												
β	0.551	0.468	0.352	0.241	0.153	0.088	0.044	0.018	0.005	0.0006	0																												
10	内边可动固定, 外边固定 	在 $k = K$ 处: $\sigma_r = \sigma_{\max} = \mp a \frac{P}{r^2}$	在 $k = K$ 处: $w = w_{\max} = \beta m^2 \frac{P}{Et}$																																				
		<table border="1"> <tr><th>K</th><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><th>α</th><td>—</td><td>1.744</td><td>1.123</td><td>0.786</td><td>0.564</td><td>0.405</td><td>0.285</td><td>0.190</td><td>0.114</td><td>0.052</td><td>0</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.217</td><td>0.169</td><td>0.115</td><td>0.073</td><td>0.044</td><td>0.024</td><td>0.011</td><td>0.005</td><td>0.0007</td><td>0.0002</td><td>0</td></tr> </table>	K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	α	—	1.744	1.123	0.786	0.564	0.405	0.285	0.190	0.114	0.052	0	β	0.217	0.169	0.115	0.073	0.044	0.024	0.011	0.005	0.0007	0.0002	0	
		K	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0																										
α	—	1.744	1.123	0.786	0.564	0.405	0.285	0.190	0.114	0.052	0																												
β	0.217	0.169	0.115	0.073	0.044	0.024	0.011	0.005	0.0007	0.0002	0																												

注: 符号表示与表 12.4-30 同。

表 12.4-32 等厚矩形板的最大应力和最大挠度 ($\nu = 0.3$)

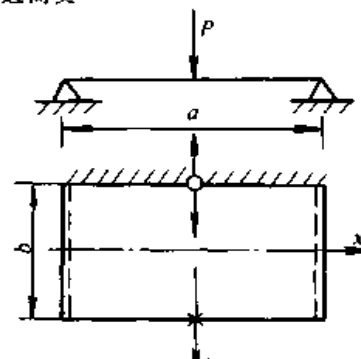
序号	约束条件, σ_{\max} , w_{\max} 位置	α 、 β 系数值																		
(1) 在板的中心作用集中力 P																				
		$\sigma_{\max} = \alpha \frac{P}{t^2} \quad w_{\max} = \beta \left(\frac{b}{t} \right)^2 \frac{P}{Et}$																		
1	四边简支 	<table border="1"> <tr><th>a/b</th><td>1.0</td><td>1.2</td><td>1.4</td><td>1.6</td><td>1.8</td><td>2.0</td><td>3.0</td><td>∞</td></tr> <tr><th>β</th><td>0.1267</td><td>0.1478</td><td>0.1621</td><td>0.1714</td><td>0.1769</td><td>0.1803</td><td>0.1845</td><td>0.1851</td></tr> </table>	a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	∞	β	0.1267	0.1478	0.1621	0.1714	0.1769	0.1803	0.1845	0.1851
		a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	∞										
β	0.1267	0.1478	0.1621	0.1714	0.1769	0.1803	0.1845	0.1851												
载荷作用点附近的应力分布大致与半径为 $0.64b$ 、中心受集中力的简支圆板相同 (表 12.4-30 序号 1)																				

续表 12.4-32

序号	约束条件, σ_{\max} , w_{\max} 位置	α , β 系数值																								
2	<p>四边固定</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a/b</th> <th>1.0</th> <th>1.2</th> <th>1.4</th> <th>1.6</th> <th>1.8</th> <th>2.0</th> <th>∞</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>0.754 2</td> <td>0.894 0</td> <td>0.962 4</td> <td>0.990 6</td> <td>1.000 0</td> <td>1.00 4</td> <td>1.008</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.061 15</td> <td>0.070 65</td> <td>0.075 45</td> <td>0.077 75</td> <td>0.078 62</td> <td>0.078 84</td> <td>0.079 17</td> </tr> </tbody> </table>	a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞	α	0.754 2	0.894 0	0.962 4	0.990 6	1.000 0	1.00 4	1.008	β	0.061 15	0.070 65	0.075 45	0.077 75	0.078 62	0.078 84	0.079 17
		a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞																	
α	0.754 2	0.894 0	0.962 4	0.990 6	1.000 0	1.00 4	1.008																			
β	0.061 15	0.070 65	0.075 45	0.077 75	0.078 62	0.078 84	0.079 17																			

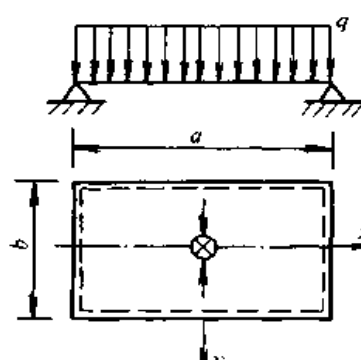
(2) 集中力 P 作用在自由边中点

$$\sigma_{\max} = \alpha \frac{P}{t^2} \quad w_{\max} = \beta \left(\frac{b}{t} \right)^2 \frac{P}{Et}$$

3	<p>受载边自由, 对边固定, 另一对边简支</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a/b</th> <th>0.25</th> <th>0.5</th> <th>0.667</th> <th>1.0</th> <th>1.5</th> <th>2.0</th> <th>3.0</th> <th>4.0</th> <th>∞</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>0.000 20</td> <td>0.070 20</td> <td>0.273 00</td> <td>0.978 0</td> <td>2.196</td> <td>2.616</td> <td>2.988</td> <td>3.042</td> <td>3.054</td> </tr> </tbody> </table>	a/b	0.25	0.5	0.667	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	∞	α	0.000 20	0.070 20	0.273 00	0.978 0	2.196	2.616	2.988	3.042	3.054
		a/b	0.25	0.5	0.667	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	∞											
α	0.000 20	0.070 20	0.273 00	0.978 0	2.196	2.616	2.988	3.042	3.054													
		<p>当 $a \gg b$ $\beta = 1.835$</p>																				

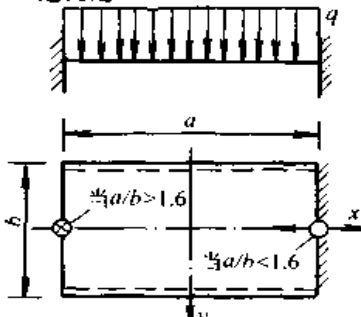
(3) 在整个板上作用均布载荷 q

$$\sigma_{\max} = \alpha \left(\frac{b}{t} \right)^2 q \quad w_{\max} = \beta \left(\frac{b}{t} \right)^4 \frac{qt}{E}$$

4	<p>四边简支</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a/b</th> <th>1.0</th> <th>1.1</th> <th>1.2</th> <th>1.3</th> <th>1.4</th> <th>1.5</th> <th>1.6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>0.287 4</td> <td>0.331 8</td> <td>0.375 6</td> <td>0.415 8</td> <td>0.451 8</td> <td>0.487 2</td> <td>0.517 2</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.044 3</td> <td>0.053 0</td> <td>0.061 6</td> <td>0.069 7</td> <td>0.077 0</td> <td>0.084 3</td> <td>0.090 6</td> </tr> </tbody> </table>	a/b	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	α	0.287 4	0.331 8	0.375 6	0.415 8	0.451 8	0.487 2	0.517 2	β	0.044 3	0.053 0	0.061 6	0.069 7	0.077 0	0.084 3	0.090 6
		a/b	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6																	
α	0.287 4	0.331 8	0.375 6	0.415 8	0.451 8	0.487 2	0.517 2																			
β	0.044 3	0.053 0	0.061 6	0.069 7	0.077 0	0.084 3	0.090 6																			
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>a/b</th> <th>1.7</th> <th>1.8</th> <th>1.9</th> <th>2.0</th> <th>3.0</th> <th>4.0</th> <th>∞</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>α</td> <td>0.544 8</td> <td>0.568 8</td> <td>0.591 0</td> <td>0.610 2</td> <td>0.713 4</td> <td>0.741 0</td> <td>0.750 0</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.096 4</td> <td>0.101 7</td> <td>0.106 4</td> <td>0.110 6</td> <td>0.133 6</td> <td>0.140 0</td> <td>0.142 2</td> </tr> </tbody> </table>	a/b	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	∞	α	0.544 8	0.568 8	0.591 0	0.610 2	0.713 4	0.741 0	0.750 0	β	0.096 4	0.101 7	0.106 4	0.110 6	0.133 6	0.140 0	0.142 2
a/b	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0	4.0	∞																			
α	0.544 8	0.568 8	0.591 0	0.610 2	0.713 4	0.741 0	0.750 0																			
β	0.096 4	0.101 7	0.106 4	0.110 6	0.133 6	0.140 0	0.142 2																			

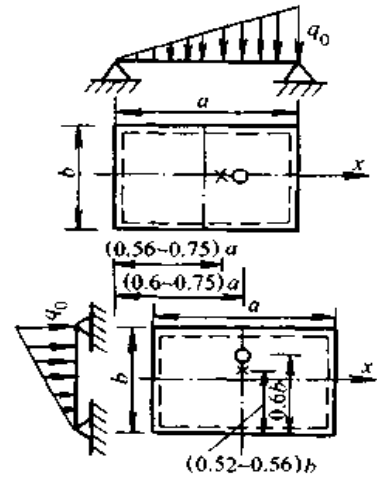
序号	约束条件, σ_{\max} , w_{\max} 位置	α 、 β 系数值																																																
5	<p>四边固定</p>	<table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>2.0</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.307 8</td> <td>0.383 4</td> <td>0.435 6</td> <td>0.468 0</td> <td>0.487 2</td> <td>0.497 4</td> <td>0.500 0</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.013 8</td> <td>0.018 8</td> <td>0.022 6</td> <td>0.025 1</td> <td>0.026 7</td> <td>0.027 7</td> <td>0.028 4</td> </tr> </table>	a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞	α	0.307 8	0.383 4	0.435 6	0.468 0	0.487 2	0.497 4	0.500 0	β	0.013 8	0.018 8	0.022 6	0.025 1	0.026 7	0.027 7	0.028 4																								
		a/b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞																																									
α	0.307 8	0.383 4	0.435 6	0.468 0	0.487 2	0.497 4	0.500 0																																											
β	0.013 8	0.018 8	0.022 6	0.025 1	0.026 7	0.027 7	0.028 4																																											
6	<p>一对边简支, 另一对边固定</p>	<table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>0</td> <td>0.5</td> <td>1/1.8</td> <td>1/1.6</td> <td>1/1.4</td> <td>1/1.2</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.750</td> <td>0.714 6</td> <td>0.691 2</td> <td>0.654 0</td> <td>0.598 8</td> <td>0.520 8</td> <td>0.418 2</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.142 2</td> <td>0.092 2</td> <td>0.080 0</td> <td>0.065 8</td> <td>0.050 2</td> <td>0.034 9</td> <td>0.021 0</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>2.0</td> <td>∞</td> <td></td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.462 6</td> <td>0.486 0</td> <td>0.496 8</td> <td>0.497 1</td> <td>0.497 3</td> <td>0.500 0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.024 3</td> <td>0.026 2</td> <td>0.027 3</td> <td>0.028 0</td> <td>0.028 3</td> <td>0.028 5</td> <td></td> </tr> </table> <p>当 $a/b < 1$ $\sigma_{\max} = \alpha \left(\frac{a}{t}\right)^2 q$, $w_{\max} = \beta \left(\frac{a}{t}\right)^4 \frac{qt}{E}$</p>	a/b	0	0.5	1/1.8	1/1.6	1/1.4	1/1.2	1.0	α	0.750	0.714 6	0.691 2	0.654 0	0.598 8	0.520 8	0.418 2	β	0.142 2	0.092 2	0.080 0	0.065 8	0.050 2	0.034 9	0.021 0	a/b	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞		α	0.462 6	0.486 0	0.496 8	0.497 1	0.497 3	0.500 0		β	0.024 3	0.026 2	0.027 3	0.028 0	0.028 3	0.028 5	
		a/b	0	0.5	1/1.8	1/1.6	1/1.4	1/1.2	1.0																																									
α	0.750	0.714 6	0.691 2	0.654 0	0.598 8	0.520 8	0.418 2																																											
β	0.142 2	0.092 2	0.080 0	0.065 8	0.050 2	0.034 9	0.021 0																																											
a/b	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞																																												
α	0.462 6	0.486 0	0.496 8	0.497 1	0.497 3	0.500 0																																												
β	0.024 3	0.026 2	0.027 3	0.028 0	0.028 3	0.028 5																																												
7	<p>三边简支, 一边固定</p>	<table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>1/4</td> <td>1/3.5</td> <td>1/3</td> <td>1/2.5</td> <td>1/2</td> <td>1/1.5</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> <td>0.74</td> <td>0.73</td> <td>0.67</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.139</td> <td>0.137</td> <td>0.132</td> <td>0.122</td> <td>0.101</td> <td>0.071</td> <td>0.030</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> <td>2.5</td> <td>3.0</td> <td>3.5</td> <td>4.0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.66</td> <td>0.73</td> <td>0.74</td> <td>0.74</td> <td>0.75</td> <td>0.75</td> <td></td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.046</td> <td>0.054</td> <td>0.056</td> <td>0.057</td> <td>0.058</td> <td>0.058</td> <td></td> </tr> </table> <p>当 $a/b < 1$ $\sigma_{\max} = \alpha \left(\frac{a}{t}\right)^2 q$, $w_{\max} = \beta \left(\frac{a}{t}\right)^4 \frac{qt}{E}$</p>	a/b	1/4	1/3.5	1/3	1/2.5	1/2	1/1.5	1.0	α	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73	0.67	0.50	β	0.139	0.137	0.132	0.122	0.101	0.071	0.030	a/b	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0		α	0.66	0.73	0.74	0.74	0.75	0.75		β	0.046	0.054	0.056	0.057	0.058	0.058	
		a/b	1/4	1/3.5	1/3	1/2.5	1/2	1/1.5	1.0																																									
α	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73	0.67	0.50																																											
β	0.139	0.137	0.132	0.122	0.101	0.071	0.030																																											
a/b	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0																																												
α	0.66	0.73	0.74	0.74	0.75	0.75																																												
β	0.046	0.054	0.056	0.057	0.058	0.058																																												
8	<p>三边简支, 一边自由</p>	<table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>1/2</td> <td>2/3</td> <td>1.0</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> <td>3.0</td> <td>4.0</td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>0.36</td> <td>0.50</td> <td>0.67</td> <td>0.768</td> <td>0.79</td> <td>0.798</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>0.080</td> <td>0.106</td> <td>0.140</td> <td>0.160</td> <td>0.165</td> <td>0.166</td> <td>0.167</td> </tr> </table>	a/b	1/2	2/3	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	α	0.36	0.50	0.67	0.768	0.79	0.798	0.80	β	0.080	0.106	0.140	0.160	0.165	0.166	0.167																								
		a/b	1/2	2/3	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0																																									
α	0.36	0.50	0.67	0.768	0.79	0.798	0.80																																											
β	0.080	0.106	0.140	0.160	0.165	0.166	0.167																																											

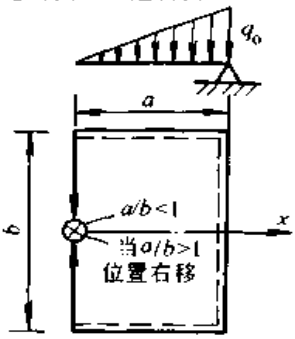
续表 12.4-32

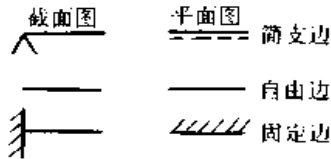
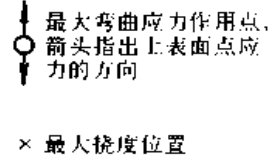
序号	约束条件, σ_{max} , w_{max} 位置	α , β 系数值																														
9	一对边简支, 一边自由 一边固定 	<table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>0</td> <td>1/3</td> <td>1/2</td> <td>2/3</td> <td>1.0</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> <td>3.0</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>α</td> <td>3.00</td> <td>2.57</td> <td>1.91</td> <td>1.36</td> <td>0.714</td> <td>0.744</td> <td>0.786</td> <td>0.798</td> <td>0.798</td> </tr> <tr> <td>β</td> <td>1.370</td> <td>1.030</td> <td>0.636</td> <td>0.366</td> <td>0.123</td> <td>0.154</td> <td>0.164</td> <td>0.166</td> <td>0.166</td> </tr> </table> <p>当 $a/b \leq 1.6$ $\sigma_{max} = \alpha \left(\frac{a}{t}\right)^2 q$; 当 $a/b < 1$ $w_{max} = \beta \left(\frac{a}{t}\right)^4 \frac{qt}{E}$</p>	a/b	0	1/3	1/2	2/3	1.0	1.5	2.0	3.0	∞	α	3.00	2.57	1.91	1.36	0.714	0.744	0.786	0.798	0.798	β	1.370	1.030	0.636	0.366	0.123	0.154	0.164	0.166	0.166
	a/b	0	1/3	1/2	2/3	1.0	1.5	2.0	3.0	∞																						
α	3.00	2.57	1.91	1.36	0.714	0.744	0.786	0.798	0.798																							
β	1.370	1.030	0.636	0.366	0.123	0.154	0.164	0.166	0.166																							

(4) 在整个板面沿 x 方向作用线性分布载荷 $q = \frac{x}{a} q_0$

$$\sigma_{max} = \alpha \left(\frac{b}{t}\right)^2 q_0, \quad w_{max} = \beta \left(\frac{b}{t}\right)^4 \frac{q_0 t}{E}$$

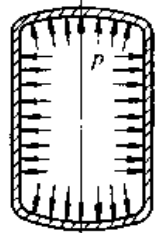
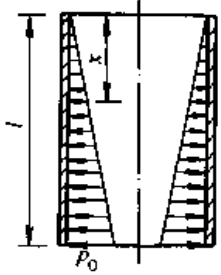

序号	约束条件	Diagram	系数值									
			沿长边 线性分 布	沿短边 线性分 布	a/b 系数	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
10	四边简支		α	0.16	0.26	0.34	0.38	0.43	0.47	0.49	0.53	
			β	0.022	0.043	0.060	0.070	0.078	0.086	0.091	0.110	
			α	0.16	0.26	0.32	0.35	0.37	0.38	0.38	0.38	
			β	0.022	0.042	0.056	0.063	0.067	0.069	0.070	0.071	

序号	约束条件	Diagram	系数值									
a/b	0.5	0.667	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0			
11	三边简支, 一边自由		α	0.11	0.16	0.20	0.28	0.32	0.35	0.36	0.37	0.37
			β	0.026	0.033	0.040	0.050	0.058	0.064	0.067	0.069	0.070

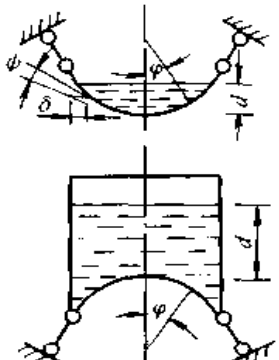
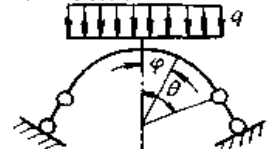
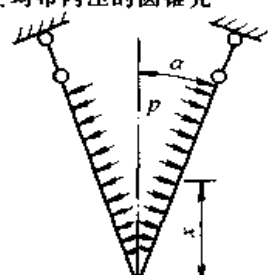
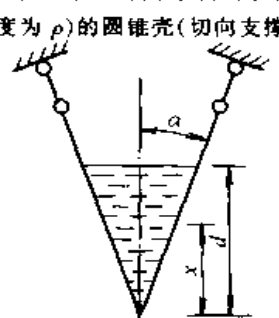
序号	约束条件, σ_{\max} 、 w_{\max} 位置	α 、 β 系数值
说明	σ_{\max} —最大弯曲正应力; w_{\max} —最大挠度; t —板厚	
		

9 薄壳

表 12.4-33 旋转面壳的内力与位移 (无矩理论解)

序号	载荷与边界条件	内力	位移
1	受均匀内压圆柱壳 	两端封口 $N_1 = \frac{pa}{2}$ $N_2 = pa$ 两端开口 $N_1 = 0$ $N_2 = pa$	两端封口 $\delta = \frac{pa^2}{Et} (1 - \frac{\nu}{2})$ $\psi = 0$ 两端开口 $\delta = \frac{pa^2}{Et}$ $\psi = 0$
2	受线性变化内压 $\frac{x}{l} p_0$ 的圆柱壳 (两端开口) 	$N_1 = 0$ $N_2 = \frac{p_0 a x}{l}$	$\delta = \frac{p_0 a^2 x}{Et}$ $\psi = \frac{p_0 a^2}{Et}$
3	受均匀内压的球壳 	$N_1 = N_2 = \frac{pa}{2}$	$\delta = \frac{pa^2 (1 - \nu) \sin \varphi}{2Et}$ $\psi = 0$

续表 12.4-33

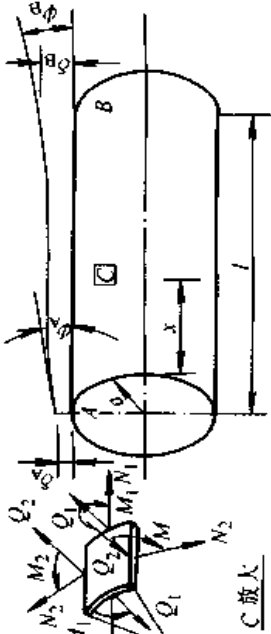
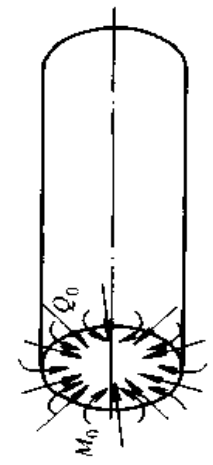
序号	载荷与边界条件	内 力	位 移
4	装有深 d 的液体或松散物料 (密度为 ρ) 的球壳(边界切向支 撑) 	$x < d$: $N_1 = \frac{\rho g a^2}{6} \left[3 \frac{d}{a} - 1 + \frac{2 \cos^2 \varphi}{(1 + \cos \varphi)} \right]$ $N_2 = \frac{\rho g a^2}{6} \left[3 \frac{d}{a} - 5 + \frac{(3 + 2 \cos \varphi) 2 \cos \varphi}{(1 + \cos \varphi)} \right]$ $x > d$: $N_1 = \frac{P}{2\pi a \sin^2 \varphi} \quad N_2 = -N_1$ (P 为物料总重)	$x < d$: $\delta = \frac{\rho g a^3}{6 E t} \sin \varphi \left[3(1 - \nu) \frac{d}{a} - 5 + \nu + 2 \cos \varphi \times \frac{3 + (2 - \nu) \cos \varphi}{(1 + \cos \varphi)} \right]$ $\varphi = -\frac{\rho g a^2}{E t} \sin \varphi$ $x > d$: $\delta = \frac{-(1 + \nu) P}{2\pi E t \sin \varphi} \quad \psi = 0$
		$N_1 = -\frac{\rho g a^2}{6} \left(-1 + 3 \frac{d}{a} - \frac{2 \cos^2 \varphi}{1 + \cos \varphi} \right)$ $N_2 = -\frac{\rho g a^2}{6} \left(-1 + 3 \frac{d}{a} - \frac{4 \cos^2 \varphi - 6}{1 + \cos \varphi} \right)$	$\delta = -\frac{\rho g a^3}{6 E t} \sin \varphi \left[3 \left(1 + \frac{d}{a} \right) (1 - \nu) - 6 \cos \varphi - \frac{2(1 + \nu)}{\sin^2 \varphi} (\cos^2 \varphi - 1) \right]$ $\psi = \frac{\rho g a^2}{E t} \sin \varphi$
5	在水平投影面内受均布载荷的 球壳(切向支撑) 	$\theta \leq 90^\circ$: $N_1 = -\frac{q a}{2}$ $N_2 = -\frac{q a}{2} \cos 2\varphi$	$\delta = \frac{q a^2}{E t} \sin \varphi \left[-\cos^2 \varphi + \frac{(1 + \nu)}{2} \right]$ $\psi = -\frac{q a}{2 E t} (3 + \nu) \sin 2\varphi$
6	受均布内压的圆锥壳 	$N_1 = \frac{\rho x \tan \alpha}{2 \cos \alpha}$ $N_2 = \frac{\rho x \tan \alpha}{\cos \alpha}$	$\delta = \frac{\rho x^2 \tan^2 \alpha}{E t \cos \alpha} \left(1 - \frac{\nu}{2} \right)$ $\psi = \frac{3 \rho x \tan^2 \alpha}{2 E t \cos \alpha}$
7	装有深度 d 的流体或松散物料 (密度为 ρ) 的圆锥壳(切向支撑) 	$x < d$: $N_1 = \frac{\rho g x \tan \alpha}{2 \cos \alpha} \left(d - \frac{2x}{3} \right)$ 在 $x = \frac{3}{4} d$ 处: $N_1 = N_{1\max} = \frac{3 \rho g d^2 \tan \alpha}{16 \cos \alpha}$ $N_2 = \frac{\rho g x (d - x)}{\cos \alpha} \tan \alpha$ 在 $x = \frac{d}{2}$ 处: $N_2 = N_{2\max} = \frac{\rho g d^2 \tan \alpha}{4 \cos \alpha}$ $x > d$: $N_1 = \frac{\rho g d^2 \tan \alpha}{6 x \cos \alpha}, \quad N_2 = 0$	$x < d$: $\delta = \frac{\rho g x^2 \tan^2 \alpha}{E t \cos \alpha} \left[d \left(1 - \frac{\nu}{2} \right) - x \left(1 - \frac{\nu}{3} \right) \right]$ $\psi = \frac{\rho g x \sin^2 \alpha}{6 E t \cos^3 \alpha} (9d - 16x)$ $x > d$: $\delta = \frac{-\nu \rho g d^3 \tan^2 \alpha}{6 E t \cos \alpha}$ $\psi = \frac{-\rho g d^3 \sin^2 \alpha}{6 E t x \cos^3 \alpha}$

注: 1. δ —沿平行圆径向的位移; ψ —经线转角; δ 、 ψ 按图示方向为正; g —重力加速度。

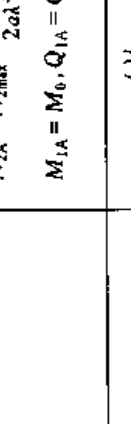
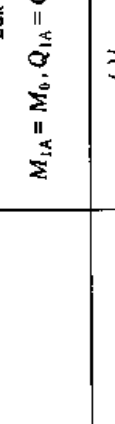

2. 薄壳的应力计算式为: 经线方向正应力 $\sigma_1 = \frac{N_1}{t}$, 纬线方向正应力 $\sigma_2 = \frac{N_2}{t}$ 。

3. 表中三种薄壳如受均匀外压作用, 计算式中的 ρ 取负值。

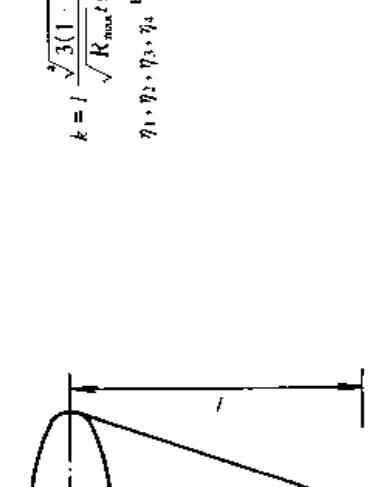
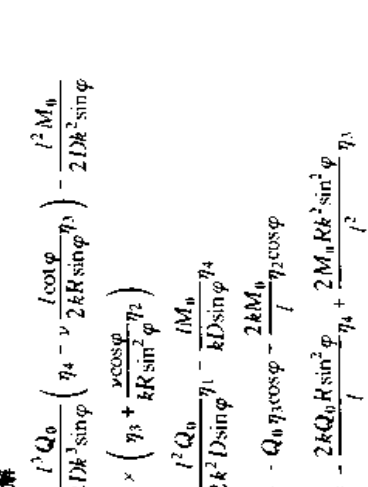
表 12.4-34 旋转壳的内力和位移(有矩理论)

序号	载 荷	位移与内力	特定截面的位移与内力	
(1) 圆柱壳	 <p style="text-align: center;">C 放大</p> $y_1 = \cosh \lambda x \cos \lambda x$ $y_2 = \frac{1}{2} (\cosh \lambda x \sinh \lambda x + \sinh \lambda x \cos \lambda x)$ $y_3 = \frac{1}{2} \sinh \lambda x \sin \lambda x$ $y_4 = \frac{1}{4} (\cosh \lambda x \sin \lambda x - \sinh \lambda x \cos \lambda x)$ $C_1 = y_1(\lambda l) \quad \eta_1 = e^{-\lambda l} (\sin \lambda x + \cos \lambda x)$ $C_2 = y_2(\lambda l) \quad \eta_2 = e^{-\lambda l} \sin \lambda x$ $C_3 = y_3(\lambda l) \quad \eta_3 = e^{-\lambda l} (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$ $C_4 = y_4(\lambda l) \quad \eta_4 = e^{-\lambda l} \cos \lambda x$ <p style="text-align: center;">以上各系数数值查表 12.4-35</p>	$\lambda = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{d^3 t^2} \right]^{1/4}$ $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ $C_{11} = \sinh^2 \lambda l - \sin^2 \lambda l$ $C_{12} = \cosh \lambda l \sinh \lambda l + \cos \lambda l \sin \lambda l$ $C_{13} = \cosh \lambda l (\sinh \lambda l - \cos \lambda l \sin \lambda l)$ $C_{14} = \sinh^2 \lambda l + \sin^2 \lambda l$	<p>沿左端周边均布径向力 Q_0 和弯矩 M_0, 右端自由</p>  <p>精确解</p> $\delta = \delta_{A\psi_1} + \frac{\psi_A y_2}{\lambda} \delta_{Ay_2} - \frac{Q_0}{D\lambda^3} y_4 - \frac{M_0}{D\lambda^2} y_3$ $\psi = \psi_{Ay_1} - 4\delta_{Ay_4} - \frac{Q_0}{D\lambda^2} y_3 - \frac{M_0}{D\lambda} y_2$ $N_1 = 0, N_2 = \frac{Et}{a} \delta$ $M_1 = 4D\lambda^2 \delta_{Ay_3} + 4D\lambda \psi_{Ay_4} + \frac{Q_0}{\lambda} y_2 + M_0 y_1$ $M_2 = \psi M_1$ $Q_1 = 4D\lambda^3 \delta_{Ay_2} + 4D\lambda^2 \psi_{Ay_3} + Q_0 y_1 - 4\lambda M_0 y_4$ $Q_2 = 0$ <p>对长壳 ($\lambda l \geq 3$) 的近似解</p> $\delta = \frac{Q_0}{2\lambda^3 D} \eta_4 - \frac{M_0}{2\lambda^2 D} \eta_3, \psi = \frac{Q_0}{2\lambda^2 D} \eta_1 + \frac{M_0}{\lambda D} \eta_2$	<p>精确解</p> $r = 0 \text{ 处}$ $\delta_A = \delta_{\max} = -\frac{Q_0 C_{13}}{2D\lambda^3 C_{11}} - \frac{M_0 C_{14}}{2D\lambda^2 C_{11}}$ $\psi_A = \psi_{\max} = \frac{Q_0 C_{14}}{2D\lambda^2 C_{11}} + \frac{M_0 C_{12}}{D\lambda C_{11}}$ $r = l \text{ 处}$ $\delta_B = \frac{Q_0}{2D\lambda^3} C_{11} + \frac{M_0}{D\lambda^2} C_{11}$ $\psi_B = \frac{Q_0}{2D\lambda^2} C_{11} + \frac{M_0}{D\lambda} C_{11}$ <p>对长壳 ($\lambda \geq 3$) 的近似解</p> $r = 0 \text{ 处}$ $\delta_A = \delta_{\max} = \frac{Q_0}{2\lambda^3 D} - \frac{M_0}{2\lambda^2 D}, \psi_A = \psi_{\max} = \frac{Q_0}{2\lambda^2 D} + \frac{M_0}{\lambda D}$

续表 12.4-34

序号	载 荷	位移与内力	特定截面的位移与内力
2	<p>在中截面沿圆周径向均布载荷 q (两端自由)</p> 	<p>对于长壳 ($\frac{\lambda l_1}{\lambda l_2} \geq 3$) 的近似解</p> $\delta = -\frac{q}{8\lambda^3 D} \eta_1, \psi = \frac{q}{4\lambda^2 D} \eta_2$ $N_1 = 0, N_2 = -\frac{E t}{8\alpha \lambda^3 D} q \eta_1$ $M_1 = -\frac{q}{4\lambda} \eta_3, M_2 = \nu M_1$ $Q_1 = \frac{q}{2} \eta_4, Q_2 = 0$	<p>对于长壳 ($\frac{\lambda l_1}{\lambda l_2} \geq 3$) 的近似解</p> $x=0 \text{ 处:}$ $\delta = \delta_{\max} = -\frac{q}{8\lambda^3 D}, \psi = 0$ $N_2 = N_{2\max} = -\frac{E t}{8\alpha \lambda^3 D} q$ $M_1 = M_{1\max} = -\frac{q}{4\lambda}$ $Q_1 = Q_{1\max} = \frac{q}{2} \left(x=0 \text{ (偏右截面)} \right)$
(2) 球壳		<p>近似解</p> $\delta = R Q_0 \sin \varphi_0 \sin \varphi_0 (2m\eta_4 - \nu\eta_3 \cot \varphi) \frac{1}{E t} - \frac{1}{E t}$ $2mM_0 \sin \varphi (m\eta_3 + \nu\eta_2 \cot \varphi) \frac{1}{E t}$ $\psi = \frac{2m^4}{E t} Q_0 \eta_1 \sin \varphi_0 - \frac{4m^3}{E t R} M_0 \eta_4$	<p>近似解</p> $m = \left[\frac{3(1-\nu^2)R^2}{t^2} \right]^{1/4}, D = \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)}$ <p>$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 与圆柱壳同, 但要以 $m\alpha$ 代替 λx</p>
3	<p>沿边缘均布径向力 Q_0 和弯矩 M_0</p> 	<p>近似解</p> $\delta = \frac{R Q_0 \sin \varphi_0}{E t} (2m \sin \varphi_0 - \nu \cos \varphi_0) - \frac{2m^2 M_0}{E t} \sin \varphi_0$ $\psi = \frac{2m^4 Q_0}{E t} \sin \varphi_0 - \frac{4m^3 M_0}{E t R}$	<p>近似解</p> $\delta = \frac{R Q_0 \sin \varphi_0}{E t} (2m \sin \varphi_0 - \nu \cos \varphi_0) - \frac{2m^2 M_0}{E t} \sin \varphi_0$ $\psi = \frac{2m^4 Q_0}{E t} \sin \varphi_0 - \frac{4m^3 M_0}{E t R}$

续表 12.4.34

序号	载 荷	位移与内力	特定截面的位移与内力
		$N_1 = Q_0 \eta_3 \sin \varphi_0 \cot \varphi + \frac{2M_0 m}{R} \eta_2 \cot \varphi$ $N_2 = 2Q_0 m \eta_4 \sin \varphi_0 - \frac{2M_0 m^2}{R} \eta_1$ $M_1 = \frac{Q_0 R}{m} \eta_2 \sin \varphi_0 + \eta_1 M_0$ $M_2 = \nu M_1$ $Q_1 = Q_0 \eta_3 \sin \varphi_0 + \frac{2M_0 m}{R} \eta_2$ $Q_2 = 0$	$N_1 = Q_0 \cos \varphi_0$ $N_2 = -\frac{2m^2 M_0}{R} + 2Q_0 m \sin \varphi_0$ $M_1 = M_0$ $M_2 = \nu M_0$ $Q_1 = Q_0 \sin \varphi_0$ $Q_2 = 0$
(3)	圆锥壳		$k = l \frac{\sqrt{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{R_{max} l \sin \varphi}}, D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ <p>$\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 与圆柱壳同, 但要以 $k\xi$ 代替 λx</p>
4	沿边缘均匀布径向力 Q_0 和弯矩 M_0		<p>近似解</p> $\delta = \frac{l^3 Q_0}{2Dk^3 \sin \varphi} \left(\eta_4 - \nu \frac{l \cot \varphi}{2kR \sin \varphi} \eta_3 \right) - \frac{l^2 M_0}{2lk^2 \sin \varphi}$ $\times \left(\eta_3 + \frac{\nu \cos \varphi}{kR \sin^2 \varphi} \eta_2 \right)$ $\psi = \frac{l^2 Q_0}{2k^2 D \sin \varphi} \eta_1 - \frac{l M_0}{kD \sin \varphi} \eta_4$ $N_1 = -Q_0 \eta_3 \cos \varphi - \frac{2kM_0}{l} \eta_2 \cos \varphi$ $N_2 = -\frac{2kQ_0 R \sin^2 \varphi}{l} \eta_4 + \frac{2M_0 R k^2 \sin^2 \varphi}{l^2} \eta_3$ <p>近似解 $\xi = 0$ 处: $\delta = \frac{l^3 Q_0}{2Dk^3 \sin \varphi} \left(1 - \frac{\nu l \cot \varphi}{2kR \sin \varphi} \right) - \frac{l^2 M_0}{2lk^2 \sin \varphi}$ $\psi = \frac{l^2 Q_0}{2lk^2 \sin \varphi} - \frac{l M_0}{lk \sin \varphi}$</p>

续表 12.4-34

序号	载 荷	位移与内力	特定截面的位移与内力
		$M_1 = \frac{l}{k} Q_0 \eta_2 - M_0 \eta_1,$ $M_2 = \frac{l^2 Q_0 \cot \varphi}{2 R k^2 \sin \varphi} \eta_1 - \frac{l \cot \varphi}{R k \sin \varphi} \eta_2 M_0 + \nu M_1$ $Q_1 = -Q_0 \eta_3 \sin \varphi - \frac{2 k \sin \varphi}{l} \eta_2 M_0$ $Q_2 = 0$	

注：1. δ —壳面一点沿纬线径向的位移； ψ —壳面一点经线切向的转角；各位移及内力按图示方向为正； l —壳厚。

2. 壳的正应力计算式为：经线方向正应力 $\sigma_1 = \frac{N_1}{r} + \frac{6M_1}{r^2}$ ；纬线方向正应力 $\sigma_2 = \frac{N_2}{r} + \frac{6M_2}{r^2}$ 。

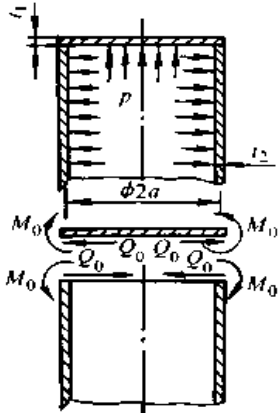
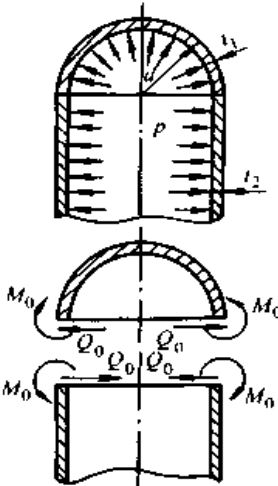
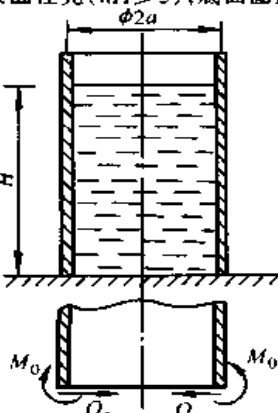
表 12.4-35 函数 $\eta_1 \sim \eta_4$ 、 $y_1 \sim y_4$ 及 $C_{11} \sim C_{14}$ 的数值

λx	η_1	η_2	η_3	η_4	y_1	y_2	y_3	y_4	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
0.0	1.000 0	0.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
0.1	0.990 7	0.090 3	0.810 0	0.900 3	0.999 98	0.100 00	0.005 00	0.000 17	0.000 07	0.200 00	0.001 33	0.020 00
0.2	0.965 1	0.162 7	0.639 8	0.802 4	0.999 73	0.199 90	0.020 00	0.001 33	0.001 07	0.400 09	0.010 67	0.080 01
0.3	0.926 7	0.218 9	0.488 8	0.707 7	0.998 65	0.299 92	0.045 00	0.004 50	0.005 40	0.600 65	0.036 01	0.180 06
0.4	0.878 4	0.261 0	0.356 4	0.617 4	0.995 73	0.399 66	0.079 98	0.010 67	0.017 07	0.802 73	0.085 38	0.320 36
0.5	0.823 1	0.290 8	0.241 5	0.532 3	0.989 58	0.498 96	0.124 91	0.020 83	0.041 69	1.008 34	0.166 87	0.501 39
0.6	0.762 8	0.309 9	0.143 1	0.453 0	0.978 41	0.597 41	0.179 74	0.035 98	0.086 51	1.220 75	0.288 71	0.724 15
0.7	0.699 7	0.319 9	0.059 9	0.370 8	0.960 01	0.694 40	0.244 35	0.057 10	0.160 43	1.444 88	0.459 43	0.990 47
0.8	0.635 4	0.322 3	-0.009 3	0.313 1	0.931 80	0.789 08	0.318 54	0.085 17	0.274 13	1.687 57	0.688 00	1.303 33
0.9	0.571 2	0.318 5	-0.065 7	0.252 7	0.890 82	0.880 33	0.402 05	0.121 12	0.440 14	1.958 01	0.984 16	1.667 34
1.0	0.508 3	0.309 6	-0.110 8	0.198 8	0.833 73	0.966 71	0.494 45	0.165 87	0.673 02	2.268 08	1.358 78	2.089 17
1.1	0.447 6	0.296 7	-0.145 7	0.151 0	0.756 83	1.046 42	0.595 17	0.220 29	0.989 70	2.632 80	1.824 30	2.578 20
1.2	0.389 9	0.280 7	-0.171 6	0.109 1	0.656 11	1.117 28	0.703 44	0.285 16	1.409 78	3.070 85	2.395 38	3.147 17
1.3	0.335 5	0.262 6	-0.189 7	0.072 9	0.527 22	1.176 70	0.818 25	0.361 19	1.956 06	3.605 12	3.089 62	3.812 95

续表 12.4-35

λx	η_1	η_2	η_3	η_4	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
1.4	0.284 9	0.243 0	-0.201 1	0.041 9	0.365 58	1.221 64	0.938 30	0.448 98	2.655 25	4.263 45	3.928 47	4.597 48		
1.5	0.238 4	0.222 6	-0.206 3	0.015 8	0.166 40	1.248 57	1.061 97	0.548 97	3.538 84	5.079 50	4.938 38	5.528 83		
1.6	0.195 9	0.201 8	-0.207 7	-0.005 9	-0.075 26	1.253 50	1.187 28	0.661 43	4.644 18	6.093 76	6.152 13	6.642 47		
1.7	0.157 6	0.181 2	-0.204 7	-0.023 5	-0.364 41	1.231 93	1.311 79	0.786 40	6.015 97	7.354 91	7.610 45	7.982 77		
1.8	0.123 4	0.161 0	-0.198 5	-0.037 6	-0.706 02	1.178 87	1.432 61	0.922 67	7.708 01	8.921 47	9.363 99	9.604 77		
1.9	0.093 2	0.141 5	-0.189 9	-0.048 4	-1.104 92	1.088 82	1.546 33	1.072 69	9.785 41	10.863 78	11.475 63	11.576 37		
2.0	0.066 7	0.123 1	-0.179 4	-0.056 3	-1.565 63	0.955 82	1.648 95	1.232 57	12.327 30	13.266 56	14.023 36	13.980 94		
2.1	0.043 9	0.105 7	-0.167 5	-0.061 8	-2.092 24	0.773 50	1.735 85	1.401 96	15.430 20	16.232 05	17.103 62	16.920 46		
2.2	0.024 4	0.089 6	-0.154 8	-0.065 2	-2.688 22	0.535 06	1.801 78	1.579 04	19.212 12	19.883 85	20.835 45	20.519 46		
2.3	0.008 0	0.074 8	-0.141 6	-0.066 8	-3.3518 0	0.2334 5	1.8407 6	1.761 42	23.817 52	24.371 72	25.365 41	24.929 67		
2.4	-0.005 6	0.061 3	-0.128 2	-0.066 9	-4.097 66	-0.138 62	1.846 12	1.946 07	29.423 41	29.877 47	30.873 63	30.335 92		
2.5	-0.016 6	0.049 1	-0.114 9	-0.065 8	-4.912 84	-0.588 54	1.810 44	2.129 27	36.246 81	36.622 15	37.581 07	36.963 15		
2.6	-0.025 4	0.038 3	-0.101 9	-0.063 6	-5.800 28	-1.123 60	1.725 57	2.306 52	44.553 70	44.874 96	45.758 41	45.085 19		
2.7	-0.032 0	0.028 7	-0.089 5	-0.060 8	-6.756 55	-1.750 89	1.582 64	2.472 45	54.670 08	54.964 10	55.736 86	55.035 39		
2.8	-0.036 9	0.020 4	-0.077 7	-0.057 3	-7.775 91	-2.477 02	1.372 10	2.620 79	66.995 32	67.290 05	67.921 32	67.219 75		
2.9	-0.040 3	0.013 2	-0.066 6	-0.053 4	-8.849 88	-3.307 90	1.083 75	2.744 28	82.018 42	82.341 84	82.806 45	82.132 90		
3.0	-0.042 26	0.007 03	-0.056 32	-0.049 29	-9.966 91	-4.248 44	0.706 86	2.834 59	100.337 92	100.716 88	100.996 30	100.377 75		
3.1	-0.043 14	0.001 87	-0.046 88	-0.045 01	-11.111 88	-5.302 22	0.230 28	2.882 33						
3.2	-0.043 07	-0.002 38	-0.038 31	-0.040 69	-12.265 69	-6.471 11	-0.357 42	2.876 94	149.958 28	150.519 13	150.402 58	149.965 10		
3.3	-0.042 24	-0.005 82	-0.030 60	-0.036 42	-13.404 80	-7.754 87	-1.067 77	2.806 76						
3.4	-0.040 79	-0.008 53	-0.023 74	-0.032 27	-14.500 75	-9.150 64	-1.912 13	2.658 92	223.896 82	224.708 62	224.214 51	224.027 42		
3.5	-0.038 87	-0.010 59	-0.017 69	-0.028 28	-15.519 73	-10.652 46	-2.901 44	2.419 50						
3.6	-0.036 59	-0.012 09	-0.012 41	-0.024 50	-16.422 14	-12.250 71	-4.045 84	2.073 46	334.162 10	335.254 38	334.4607 2	334.553 75		
3.7	-0.034 07	-0.013 10	-0.007 87	-0.020 97	-17.162 16	-13.931 48	-5.354 34	1.604 85						
3.8	-0.031 38	-0.013 69	-0.004 01	-0.017 70	-17.687 44	-15.675 99	-6.834 27	0.996 88	498.674 78	500.032 86	499.064 94	499.423 52		
3.9	-0.028 62	-0.013 92	-0.000 77	-0.014 69	-17.938 76	-17.459 85	-8.490 85	0.232 11						
4.0	-0.025 83	-0.013 86	0.001 89	-0.011 97	-17.849 85	-19.252 41	-10.326 54	0.707 26	744.166 90	745.734 16	744.744 80	745.312 40		

表 12.4-36 组合壳体连接处的弯曲内力

壳体与载荷	连接处的弯曲内力
<p>(1) 受内压 p (或外压 $-\rho$) 的具有平底长圆柱壳 ($\lambda l \geq 3$)</p> 	$M_0 = \frac{\frac{\rho a^3 \lambda^2 D_2}{4D_1(1+\nu)} + \frac{2\rho a^2 \lambda^3 t_1 D_2}{t_2 \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) [Et_1 + 2aD_2 \lambda^3 (1-\nu)]}{2\lambda + \frac{2a\lambda^2 D_2}{D_1(1+\nu)} - \frac{\lambda Et_1}{Et_1 + 2D_2 \lambda^3 a(1-\nu)}}$ $Q_0 = M_0 \left[2\lambda + \frac{2a\lambda^2 D_2}{D_1(1+\nu)} \right] - \frac{\rho a^3 \lambda^2 D_2}{4D_1(1+\nu)}$ $D_1 = \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)}, D_2 = \frac{Et_2^3}{12(1-\nu^2)}, \lambda = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{a^2 t_2^2} \right]^{1/4}$ <p>柱壳的应力按表 12.4-33 序号 1 和 12.4-34 序号 1 相应内力所引起应力的叠加求得。底板的应力由 p, M_0 产生的弯曲应力和 Q_0 产生的薄膜应力叠加</p>
<p>(2) 受均匀内压 p (或外压 $-\rho$) 具有半球形壳底的长圆柱壳 ($\lambda l \geq 3$)</p> 	$M_0 = \frac{\rho a t_1}{4\sqrt{3(1-\nu^2)}} \times \frac{[C(2-\nu) - (1-\nu)](1-C^2)}{(1-C^2)^2 - 2(1+C^{2.5})(1+C^{1.5})}$ $Q_0 = 2M_0 \lambda_1 \left(\frac{C^{2.5} + 1}{C^2 - 1} \right)$ $C = \frac{t_1}{t_2}, \lambda_1 = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{a^2 t_1^2} \right]^{1/4}$ <p>当 $C = 1, M_0 = 0, Q_0 = \frac{\rho}{8\lambda_1}$</p> <p>当 $C = \frac{1-\nu}{2-\nu}, M_0 = 0, Q_0 = 0$</p> <p>圆柱壳的应力按表 12.4-33 序号 1 和表 12.4-34 序号 1 相应内力引起的应力叠加求得。球壳的应力按表 12.4-33 序号 3 和表 12.4-34 序号 3 相应内力引起的应力叠加求得</p>
<p>(3) 装有密度为 ρ 的液体的平底长圆柱壳 ($\lambda H \geq 3$), 底面固定</p> 	$M_0 = \frac{-\rho g a t H}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} \left(1 - \frac{1}{\lambda H} \right)$ $Q_0 = \frac{\rho g a t}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} (2\lambda H - 1)$ $\lambda = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{a^2 t^2} \right]^{1/4}$ <p>圆柱壳的应力按表 12.4-33 序号 2 和表 12.4-34 序号 1 相应的内力引起的应力叠加求得</p>

10 厚壳

表 12.4-37 在均匀内压或外压作用下,厚壁圆筒的应力和位移计算式

计算量	端部条件	均匀内压 p_i 作用	均匀外压 p_0 作用
径向应力 σ_r	任意	$\frac{\sigma_r}{p_i} = -\frac{(K^2/k^2-1)}{K^2-1}$	$\frac{\sigma_r}{p_0} = -\frac{(K^2-K^2/k^2)}{K^2-1}$
周向应力 σ_θ	任意	$\frac{\sigma_\theta}{p_i} = \frac{K^2/k^2+1}{K^2-1}$	$\frac{\sigma_\theta}{p_0} = -\frac{(K^2+K^2/k^2)}{K^2-1}$
轴向应力 σ_z 和径向位移 u	两端封闭	$\frac{\sigma_z}{p_i} = \frac{1}{K^2-1}$ $\frac{u}{R_i} = \frac{[(1-2\nu)k+(1+\nu)K^2/k]}{E(K^2-1)} p_i$	$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\frac{K^2}{K^2-1}$ $\frac{u}{R_i} = \frac{-K^2}{E(K^2-1)} [(1-2\nu)k+(1+\nu)/k] p_0$
	平面应变	$\frac{\sigma_z}{p_i} = \frac{2\nu}{K^2-1}$ $\frac{u}{R_i} = \frac{(1+\nu)}{E(K^2-1)} [(1-2\nu)k+K^2/k] p_i$	$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\frac{2\nu K^2}{K^2-1}$ $\frac{u}{R_i} = \frac{-(1+\nu)K^2}{E(K^2-1)} [(1-2\nu)k+1/k] p_0$
	两端开口	$\frac{\sigma_z}{p_i} = 0$ $\frac{u}{R_i} = \frac{1}{E(K^2-1)} [(1-\nu)k+(1+\nu)K^2/k] p_i$	$\frac{\sigma_z}{p_0} = 0$ $\frac{u}{R_i} = \frac{-K^2}{E(K^2-1)} [(1-\nu)k+(1+\nu)/k] p_0$
	一般情况	$\frac{\sigma_z}{p_i} = \frac{2\nu}{K^2-1} + \frac{E\epsilon_0}{p_i}$ $\frac{u}{R_i} = \frac{1}{E(K^2-1)} [(1-\nu)k+(1+\nu)K^2/k] p_i - \frac{\nu\sigma_z k}{E}$	$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\frac{2\nu K^2}{K^2-1} + \frac{E\epsilon_0}{p_0}$ $\frac{u}{R_i} = \frac{-K^2}{E(K^2-1)} [(1-\nu)k+(1+\nu)/k] p_0 - \frac{\nu\sigma_z k}{E}$

说明 $K = \frac{R_0}{R_i}$; $k = \frac{r}{R_i}$; r —所求点半径; R_i —内半径; R_0 —外半径; E, ν —分别为材料的弹性模量及泊松比; ϵ_0 —常数, 由轴向合力的条件 $\int_A \sigma_z dA = T$ (给定) 确定 (A 为横截面积)

表 12.4-38 双层组合圆筒的界面压力 p_r 计算式

内外筒的厚薄程度	引起界面压力的原因	界面压力
内外筒均为厚壁	过盈配合	$p_{12} = \frac{E_s \delta}{AR_i}$
	内压 p_i	$p_{12} = \frac{p_i}{A} \left(\frac{2}{K_1^2-1} \right)$
内筒薄壁、外筒厚壁	过盈配合	$p_{12} = \frac{E_s \delta}{B R_i^2}$
	内压 p_i	$p_{12} = \frac{1}{B} p_i$
内外筒均为薄壁	过盈配合	$p_{12} = \frac{E_s \delta}{C R_i^2}$
	内压 p_i	$p_{12} = \frac{1}{C} p_i$

续表 12.4-38

内外筒的厚薄程度	引起界面压力的原因	界面压力
说明	$A = \frac{K_i^2 + 1}{K_i^2 - 1} + \frac{E_i}{E_0} \left(\frac{K_0^2 + 1}{K_0^2 - 1} \right) + \frac{E_i}{E_0} \nu_0 - \nu_i; B = 1 + \frac{E_i s_i}{E_0 R_i} \left[\frac{K_0^2 + 1}{K_0^2 - 1} + \nu_0 \right]; C = \frac{E_0 s_0 + E_i s_i}{E_0 s_0}; K_0 = \frac{R_0}{R_i}; K_i = \frac{R_i}{R_i};$ $\frac{R_i}{R_i}; R_i \text{—内筒内半径}; R_i \text{—界面半径}; R_0 \text{—外筒外半径}; s_i, s_0 \text{—内、外筒壁厚}; E_i, E_0 \text{—内、外筒材料的弹性模量}; \nu_i, \nu_0 \text{—内、外筒材料的泊松比}; \delta \text{—内、外筒界面半径的过盈量}$	

表 12.4-39 在均匀内压或外压作用下，厚壁球壳的应力和位移计算公式

计算量	均匀内压 p_i 作用	均匀外压 p_0 作用
径向应力 σ_r	$\frac{\sigma_r}{p_i} = -\frac{1}{K^3 - 1} (1/k^3 - 1)$	$\frac{\sigma_r}{p_0} = -\frac{K^3}{K^3 - 1} (1 - 1/k^3)$
周向应力 σ_θ	$\frac{\sigma_\theta}{p_i} = \frac{1}{K^3 - 1} (1/2k^3 + 1)$	$\frac{\sigma_\theta}{p_0} = -\frac{K^3}{K^3 - 1} (1 + 1/2k^3)$
径向位移 u	$\frac{u}{R_0} = \frac{k^3}{E(K^3 - 1)} \left[(1 - 2\nu) + \frac{(1 + \nu)}{2k^3} \right] p_i$	$\frac{u}{R_0} = -\frac{kK^3}{E(K^3 - 1)} \left[(1 - 2\nu) + \frac{(1 + \nu)}{2k^3} \right] p_0$
说明	R_i, R_0 —球壳内、外半径; r —所求点半径; $K = \frac{R_0}{R_i}; k = \frac{r}{R_i}; k' = \frac{r}{R_0}; E, \nu$ —材料的弹性模量和泊松比	

表 12.4-40 厚壁圆筒和厚壁球壳的强度设计公式（在均匀内压作用下，按弹性失效准则）

厚壳类型	导出依据	许用压力 p_p	许用外力径比 $K = \frac{R_0}{R_i}$	计算壁厚 s' (不包含附加量)	适用范围
厚壁圆筒	第一强度理论	$\frac{K^2 - 1}{K^2 + 1} \varphi \sigma_p$	$\sqrt{\frac{\varphi \sigma_p + p}{\varphi \sigma_p - p}}$	$\left(\sqrt{\frac{\varphi \sigma_p + p}{\varphi \sigma_p - p}} - 1 \right) R_i$	脆性材料
	第三强度理论	$\frac{K^2 - 1}{2K^2} \varphi \sigma_p$	$\sqrt{\frac{\varphi \sigma_p}{\varphi \sigma_p - 2p}}$	$\left(\sqrt{\frac{\varphi \sigma_p}{\varphi \sigma_p - 2p}} - 1 \right) R_i$	屈强比较高的高强钢
	第四强度理论	$\frac{K^2 - 1}{\sqrt{3}K^2} \varphi \sigma_p$	$\sqrt{\frac{\varphi \sigma_p}{\varphi \sigma_p - \sqrt{3}p}}$	$\left(\sqrt{\frac{\varphi \sigma_p}{\varphi \sigma_p - \sqrt{3}p}} - 1 \right) R_i$	一般塑性材料
	中径公式 (按薄壁容器)	$\frac{2(K-1)}{K+1} \varphi \sigma_p$	$\frac{2\varphi \sigma_p + p}{2\varphi \sigma_p - p}$	$\frac{2p}{2\varphi \sigma_p - p} R_i$	各种材料
厚壁球壳	第一强度理论	$\frac{2(K^3 - 1)}{K^3 + 2} \varphi \sigma_p$	$\sqrt[3]{\frac{\varphi \sigma_p + p}{\varphi \sigma_p - 0.5p}}$	$\left(\sqrt[3]{\frac{\varphi \sigma_p + p}{\varphi \sigma_p - 0.5p}} - 1 \right) R_i$	脆性材料
	第三、第四强度理论	$\frac{2(K^3 - 1)}{3K^3} \varphi \sigma_p$	$\sqrt[3]{\frac{\varphi \sigma_p}{\varphi \sigma_p - 1.5p}}$	$\left(\sqrt[3]{\frac{\varphi \sigma_p}{\varphi \sigma_p - 1.5p}} - 1 \right) R_i$	塑性材料
	中径公式 (按薄壁球壳)	$\frac{4(K-1)}{K+1} \varphi \sigma_p$	$\frac{4\varphi \sigma_p + p}{4\varphi \sigma_p - p}$	$\frac{2p}{4\varphi \sigma_p - p} R_i$	各种材料
说明	R_i, R_0 —壳体内、外半径; p —内压; φ —焊缝系数; σ_p —设计温度下材料的许用应力; φ, σ_p 的取值查有关设计规范				

11 旋转圆筒和旋转圆盘

12 接触应力

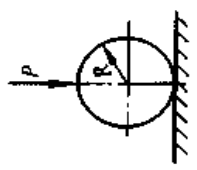
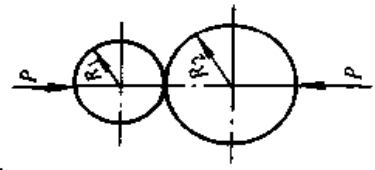
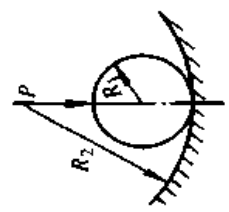
表 12.4-41 匀速旋转长圆筒和匀速旋转实心长圆柱的应力和位移计算式

计算量	圆筒	实心圆柱
周向应力 σ_θ	$\frac{\sigma_\theta}{q} = 1 + \frac{1}{K^2} \left(1 + \frac{1}{k'^2} \right) - Hk'^2$ 在内壁 ($k' = \frac{1}{K}$) 有最大值 $\left(\frac{\sigma_\theta}{q} \right)_{\max} = 2 + \frac{1}{K^2} (1 - H)$ $K \rightarrow \infty, \left(\frac{\sigma_\theta}{q} \right)_{\max} = 2$ $K \rightarrow 1, \left(\frac{\sigma_\theta}{q} \right)_{\max} \xrightarrow{\nu=0.3} 2.33$	$\frac{\sigma_\theta}{q} = 1 - Hk'^2$ 在 $k' = 0$ 处有最大值: $\left(\frac{\sigma_\theta}{q} \right)_{\max} = 1$
径向应力 σ_r	$\frac{\sigma_r}{q} = 1 + \frac{1}{K^2} \left(1 - \frac{1}{k'^2} \right) - k'^2$ 在 $k' = \sqrt{\frac{1}{K}}$ 处有最大值 $\left(\frac{\sigma_r}{q} \right)_{\max} = \left(1 - \frac{1}{K} \right)^2$	$\frac{\sigma_r}{q} = 1 - k'^2$ 在 $k' = 0$ 处有最大值: $\left(\frac{\sigma_r}{q} \right)_{\max} = 1$
轴向应力 σ_z	$\frac{\sigma_z}{q} = \begin{cases} \frac{2\nu}{3-2\nu} \left(1 + \frac{1}{K^2} - 2k'^2 \right) & \text{(两端无轴力)} \\ 2\nu \left(1 + \frac{1}{K^2} - \frac{2}{3-2\nu} k'^2 \right) & \text{(平面应变)} \end{cases}$ 在 $k' = 1/K$ 处, $\frac{\sigma_z}{q}$ 最大	$\frac{\sigma_z}{q} = \begin{cases} \frac{2\nu}{3-2\nu} (1 - 2k'^2) & \text{(两端无轴力)} \\ 2\nu \left(1 - \frac{2}{3-2\nu} k'^2 \right) & \text{(平面应变)} \end{cases}$ 在 $k' = 0$ 处, $\frac{\sigma_z}{q}$ 最大
径向位移 u	$\frac{u}{R_o} = \begin{cases} (1+\nu) \frac{q}{E} k' \left[\frac{(3-5\nu)}{(1+\nu)(3-2\nu)} \left(\frac{1}{K^2} + 1 \right) + \frac{1}{K^2 k'^2} - \frac{(1-2\nu)}{3-2\nu} k'^2 \right] & \text{(两端无轴力)} \\ (1+\nu) \frac{q}{E} k' \left[(1-2\nu) \left(\frac{1}{K^2} + 1 \right) + \frac{1}{K^2 k'^2} - \frac{(1-2\nu)}{(3-2\nu)} k'^2 \right] & \text{(平面应变)} \end{cases}$	$\frac{u}{R_o} = \begin{cases} \frac{(1+\nu) q}{3-2\nu E} k' \left[\frac{3-5\nu}{1+\nu} - (1-2\nu) k'^2 \right] & \text{(两端无轴力)} \\ (1+\nu)(1-2\nu) \frac{q}{E} k' \left[1 - \frac{k'^2}{(3-2\nu)} \right] & \text{(平面应变)} \end{cases}$
说明	$K = R_o/R_i, k' = r/R_o; R_i, R_o$ —筒体内、外半径; r —所求点半径; $q = \frac{3-2\nu}{8(1-\nu)} \rho \omega^2 R_o^2$; $H = \frac{1+2\nu\nu=0.3}{3-2\nu} 0.667$; ω —角速度; ρ, ν —材料的密度和泊松比	

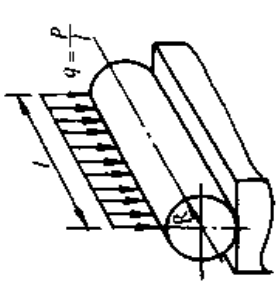
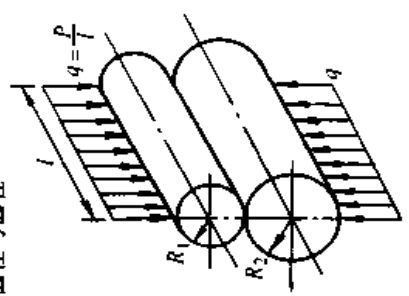
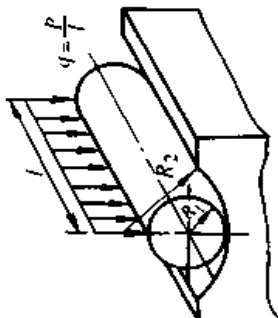
表 12.4-42 匀速旋转等厚圆盘的应力和位移计算式

计算量	空心圆盘	实心圆盘
径向应力 σ_r	$\frac{\sigma_r}{q} = \left[1 + \frac{1}{K^2} \left(1 - \frac{1}{k'^2} \right) - k'^2 \right]$	$\frac{\sigma_r}{q} = (1 - k'^2)$
周向应力 σ_θ	$\frac{\sigma_\theta}{q} = \left[1 + \frac{1}{K^2} \left(1 + \frac{1}{k'^2} \right) - \frac{1+3\nu}{3+\nu} k'^2 \right]$	$\frac{\sigma_\theta}{q} = \left(1 - \frac{1+3\nu}{3+\nu} k'^2 \right)$
径向位移 u	$\frac{u}{R_o} = \frac{qk'}{E} \left[(1-\nu)(1+1/K^2) + (1+\nu) \frac{1}{K^2 k'^2} - \frac{(1-\nu^2)}{3+\nu} k'^2 \right]$	$\frac{u}{R_o} = \frac{qk'}{E} \left[(1-\nu) - \frac{(1-\nu^2)}{3+\nu} k'^2 \right]$
说明	$K = \frac{R_o}{R_i}; k' = \frac{r}{R_o}; R_i, R_o$ —内、外半径; r —所求点半径; $q = \frac{(3+\nu)\rho\omega^2 R_o^2}{8}$; ω —角速度; ρ, E, ν —材料的密度, 弹性模量和泊松比	

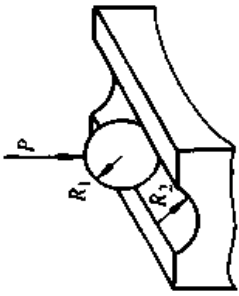
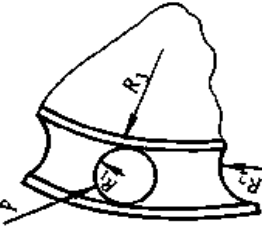
表 12.4.43 线弹性体接触参数的计算公式

序号	接触类型	接触面尺寸	最大应力 σ_{\max}	物体接触后移近距离 Δ
1	球与平面 	$a = b = 0.9086 \sqrt[3]{PR \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $a = b = 1.109 \sqrt[3]{\frac{PR}{E}}$ $A = B = \frac{1}{2R}$	$\sigma_{\max} = 0.5784 \sqrt[3]{\frac{P}{R^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\sigma_{\max} = 0.388 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R^2}}$ $\tau_{\max} = \frac{1}{3} \sigma_{\max}$ $\sigma_{1\max} = 0.133 \sigma_{\max}$	$\Delta = 0.8255 \sqrt[3]{\frac{P^2}{R} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\Delta = 1.231 \sqrt[3]{\left(\frac{P}{E} \right)^2 \cdot \frac{1}{R}}$
2	球与球 	$a = b = 0.9086 \sqrt[3]{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $a = b = 1.109 \sqrt[3]{\frac{P \cdot R_1 R_2}{E \cdot (R_1 + R_2)}}$ $A = B = \frac{R_1 + R_2}{2R_1 R_2}$	$\sigma_{\max} = 0.5784 \sqrt[3]{\frac{P \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\sigma_{\max} = 0.388 \sqrt[3]{\frac{PE^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ $\tau_{\max} = \frac{1}{3} \sigma_{\max}$ $\sigma_{1\max} = 0.133 \sigma_{\max}$	$\Delta = 0.8255 \sqrt[3]{\frac{P^2}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\Delta = 1.231 \sqrt[3]{\left(\frac{P}{E} \right)^2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}}$
3	球与凹形球面  $R_2 > R_1$	$a = b = 0.9086 \sqrt[3]{\frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $a = b = 1.109 \sqrt[3]{\frac{P \cdot R_1 R_2}{E \cdot (R_2 - R_1)}}$ $A = B = \frac{R_2 - R_1}{2R_1 R_2}$	$\sigma_{\max} = 0.5784 \sqrt[3]{\frac{P \left(\frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\sigma_{\max} = 0.388 \sqrt[3]{\frac{PE^2 \left(\frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ $\tau_{\max} = \frac{1}{3} \sigma_{\max}, \sigma_{1\max} = 0.133 \sigma_{\max}$	$\Delta = 0.8255 \sqrt[3]{\frac{P^2}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\Delta = 1.231 \sqrt[3]{\left(\frac{P}{E} \right)^2 \cdot \frac{(R_2 - R_1)}{R_1 R_2}}$

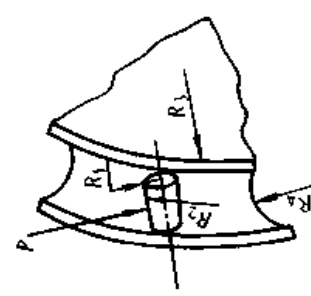
续表 12.4-43

序号	接触类型	接触面尺寸	最大应力 σ_{\max}	物体接触后移近距离 Δ
4	圆柱与平面 	$b = 1.131 \sqrt{\frac{PR}{l} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $b = 1.526 \sqrt{\frac{PR}{lE}}$ $B = \frac{l}{2R}$	$\sigma_{\max} = 0.564 \sqrt{\frac{P}{Rl} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{Rl}}$	圆柱体两个受压边界之间直径减小量 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\Delta D = 1.159 \frac{P}{lE} \left(0.41 + \ln \frac{4R}{b} \right)$
5	圆柱与圆柱 	$b = 1.128 \sqrt{\frac{P}{l} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $b = 1.522 \sqrt{\frac{P}{lE} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$ $B = \frac{R_1 + R_2}{2R_1 R_2}$	$\sigma_{\max} = 0.564 \sqrt{\frac{P}{l} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{l} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}$	$\Delta = \frac{2P}{\pi l} \left[\frac{1}{E_1} \left(\ln \frac{2R_1}{b} + 0.407 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\ln \frac{2R_2}{b} + 0.407 \right) \right]$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\Delta = 0.579 \frac{P}{lE} \left(\ln \frac{4R_1 R_2}{b^2} + 0.814 \right)$
6	圆柱与凹形圆柱 	$b = 1.128 \sqrt{\frac{P}{l} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $b = 1.522 \sqrt{\frac{P}{lE} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}}$ $B = \frac{R_2 - R_1}{R_2 R_1}$	$\sigma_{\max} = 0.564 \sqrt{\frac{P}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ 若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则 $\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{l} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1 R_2}}$	若 $E_1 = E_2 = E/0.91$ $\Delta = 1.82 \frac{P}{lE} (1 - \ln b)$

续表 12.4-43

序号	接触类型	接触面尺寸	最大应力 σ_{max}	物体接触后移近距离 Δ
7	<p>球与圆柱形凹面</p>  <p style="text-align: center;">$R_2 > R_1$</p>	$a = 1.145n_1 \sqrt[3]{\frac{R_1 R_2}{2R_2 - R_1} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ $b = 1.145n_2 \sqrt[3]{\frac{R_1 R_2}{R_3 - R_1} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$ <p>若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则</p> $a = 1.397n_1 \sqrt[3]{\frac{P}{E} \cdot \frac{R_1 R_2}{(2R_2 - R_1)}}$ $b = 1.397n_2 \sqrt[3]{\frac{P}{E} \cdot \frac{R_1 R_2}{(2R_2 - R_1)}}$ $A = \frac{R_2 - R_1}{2R_1 R_2}, B = \frac{1}{2R_1}$	$\sigma_{max} 0.365n_3 \sqrt[3]{P \frac{\left(\frac{2R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ <p>若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则</p> $\sigma_{max} 0.245n_3 \sqrt[3]{PE^2 \left(\frac{2R_2 - R_1}{R_1 R_2} \right)^2}$	$\Delta 0.655n_4 \sqrt[3]{\frac{P^2 (2R_2 - R_1)}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}$ <p>若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则</p> $\Delta 0.977n_4 \sqrt[3]{\left(\frac{P}{E} \right)^2 \frac{2R_2 - R_1}{R_1 R_2}}$
8	<p>球与圆弧形凹面</p> 	$a = 1.145n_1 \sqrt[3]{\frac{P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}{2 \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$ $b = 1.145n_2 \sqrt[3]{\frac{P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}{2 \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$ <p>若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则</p> $a = 1.397n_1 \sqrt[3]{\frac{P/E}{2 \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$ $b = 1.397n_2 \sqrt[3]{\frac{P/E}{2 \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$ $A = \frac{R_2 - R_1}{2R_1 R_2}, B = \frac{R_3 + R_1}{2R_1 R_3}$	$\sigma_{max} 0.365n_3 \sqrt[3]{P \frac{\left(\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^2}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}}$ <p>若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则</p> $\sigma_{max} 0.245n_3 \sqrt[3]{PE^2 \left(\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^2}$	$\Delta 0.655n_4 \times \sqrt[3]{\frac{P^2 \left(\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}{}}$ <p>若 $E_1 = E_2 = E/0.91$, 则</p> $\Delta 0.977n_4 \sqrt[3]{\left(\frac{P}{E} \right)^2 \left(\frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^2}$

续表 12.4-43

序号	接触类型	接触面尺寸	最大应力 σ_{max}	物体接触后移近距离 Δ
9	滚柱与圆弧形凹面	 $a = 1.145n_1 \sqrt{\frac{P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4}}}$ $b = 1.145n_2 \sqrt{\frac{P \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4}}}$ <p>若 $E_1' = E_2' = E/0.91$, 则</p> $a = 1.397n_1 \sqrt{\frac{P}{E} \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4}}}$ $b = 1.397n_2 \sqrt{\frac{P}{E} \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4}}}$ <p>$A = (R_4 - R_2)/2R_2R_3$ $B = (R_1 + R_3)/2R_1R_3$</p>	$0.365n_3 \sqrt{\frac{P}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \left(\frac{1}{E_1'} + \frac{1}{E_2'} \right)^2}}$ <p>若 $E_1' = E_2' = E/0.91$, 则</p> $0.245n_3 \sqrt{\frac{PE^2}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right)^2}}$	$0.655n_4 \sqrt{\frac{P^2}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \left(\frac{1}{E_1'} + \frac{1}{E_2'} \right)^2}}$ <p>若 $E_1' = E_2' = E/0.91$</p> $0.977n_4 \sqrt{\frac{PE}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right)}}$

注: 1. a, b —椭圆形接触面长短半轴; τ_{max} —最大切应力; σ_{limax} —最大拉应力; A, B —椭圆方程系数; n_1, n_2, n_3, n_4 —系数, 见表 12.4-44。
 2. 接触问题的强度条件为: $\sigma_{max} \leq \sigma_{lim}$ (许用接触应力), 对 Q235, $\sigma_{lim} = 330 \text{ MPa}$, 对 45 钢 $\sigma_{lim} = 430 \sim 470 \text{ MPa}$ 。

表 12.4-44 系数 n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 的数值

A/B	n_1	n_2	n_3	n_4	A/B	n_1	n_2	n_3	n_4
1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.173 9	1.916	0.605 9	0.861 4	0.856 6
0.962 3	1.013	0.987 3	0.999 9	0.999 9	0.160 3	1.979	0.593 8	0.850 7	0.845 1
0.924 0	1.027	0.947 2	0.999 7	0.999 7	0.146 2	2.053	0.580 8	0.838 6	0.832 0
0.885 2	1.042	0.960 6	0.999 2	0.999 2	0.131 7	2.141	0.566 5	0.824 6	0.816 8
0.845 9	1.058	0.946 5	0.998 5	0.998 5	0.116 6	2.248	0.550 5	0.808 2	0.799 0
0.805 9	1.076	0.931 8	0.997 4	0.997 4	0.101 0	2.381	0.532 5	0.788 7	0.777 5
0.765 2	1.095	0.916 5	0.996 0	0.996 0	0.092 87	2.463	0.522 4	0.777 4	0.765 0
0.723 8	1.117	0.900 5	0.994 2	0.994 2	0.084 56	2.557	0.511 4	0.764 7	0.750 9
0.681 6	1.141	0.883 7	0.991 9	0.991 9	0.076 00	2.669	0.499 3	0.750 4	0.734 9
0.638 4	1.168	0.866 0	0.989 0	0.988 9	0.067 15	2.805	0.485 8	0.733 8	0.716 3
0.594 2	1.198	0.847 2	0.985 3	0.985 2	0.057 97	2.975	0.470 4	0.714 4	0.694 3
0.548 9	1.233	0.827 1	0.980 5	0.980 4	0.483 8	3.199	0.452 4	0.690 9	0.667 5
0.502 2	1.274	0.805 6	0.974 6	0.974 4	0.046 39	3.253	0.448 4	0.685 6	0.661 3
0.454 0	1.322	0.782 2	0.966 9	0.966 7	0.044 39	3.311	0.444 2	0.679 9	0.654 9
0.404 0	1.381	0.756 5	0.957 1	0.956 6	0.042 37	3.373	0.439 8	0.674 0	0.648 1
0.351 8	1.456	0.727 8	0.944 0	0.943 2	0.040 32	3.441	0.435 2	0.667 8	0.640 9
0.341 0	1.473	0.721 6	0.940 9	0.940 0	0.038 23	3.514	0.430 4	0.661 2	0.633 3
0.330 1	1.491	0.715 2	0.937 6	0.936 6	0.036 13	3.594	0.425 3	0.654 2	0.625 1
0.319 1	1.511	0.708 6	0.934 0	0.932 9	0.034 00	3.683	0.419 9	0.646 7	0.616 4
0.308 0	1.532	0.701 9	0.930 2	0.929 0	0.031 83	3.781	0.414 2	0.638 7	0.607 1
0.296 7	1.554	0.694 9	0.926 2	0.924 8	0.029 62	3.890	0.408 0	0.630 0	0.597 0
0.285 3	1.578	0.687 6	0.921 9	0.920 3	0.027 37	4.014	0.401 4	0.620 6	0.586 0
0.273 8	1.603	0.680 1	0.917 2	0.915 5	0.025 08	4.156	0.394 2	0.610 4	0.574 1
0.262 0	1.631	0.672 3	0.912 1	0.910 2	0.022 73	4.320	0.386 4	0.599 0	0.560 8
0.250 1	1.660	0.664 2	0.906 7	0.904 5	0.020 33	4.515	0.377 7	0.586 4	0.546 0
0.238 0	1.693	0.655 7	0.900 8	0.898 3	0.017 87	4.750	0.368 0	0.572 1	0.529 2
0.225 7	1.729	0.646 8	0.894 4	0.891 6	0.015 33	5.046	0.356 8	0.555 5	0.509 6
0.213 2	1.768	0.637 4	0.887 3	0.884 1	0.012 69	5.432	0.343 6	0.535 8	0.486 4
0.200 4	1.812	0.627 6	0.876 6	0.875 9	0.009 93	5.976	0.327 3	0.511 2	0.457 4
0.187 3	1.861	0.617 1	0.871 0	0.866 8	0.007 02	6.837	0.305 8	0.478 3	0.418 6

13 构件的稳定性

表 12.4-45 中心压杆的临界载荷计算式

临界载荷计算式	适用范围
欧拉公式 $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} A = \eta \frac{EI}{l^2}$	线弹性 $\lambda \geq \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}$
抛物线经验公式 $P_{cr} = (a - b\lambda^2)A$	超过比例极限 $\lambda \leq \lambda_k = \pi \sqrt{\frac{E}{0.57\sigma_s}}$
直线经验公式 $P_{cr} = (c - d\lambda)A$	$\lambda_1 \geq \lambda \geq \lambda_2 = \frac{C - \sigma_s}{d}$
说明 $\lambda = \mu l / \sqrt{\frac{I}{A}}$ —压杆的柔度; μ —长度系数; $\eta = \frac{\pi^2}{\mu^2}$ —稳定系数; 某些受载压杆的 μ, η 值见表 12.4-46~表 12.4-50; a, b, c, d —与材料强度性能有关的系数, 见表 12.4-51	

表 12.4-46 中心受压等截面直杆的长度系数 μ 及稳定系数 η 值

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} = \eta \frac{EI}{l^2}; \quad (ql)_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} = \eta \frac{EI}{l^2}$$

序号	1	2	3	4	5	6	7	
载荷与支座								
μ	0.5	0.699		1		2		
η	39.48	20.20		9.87		2.467		
序号	8	9	10	11	12	13		
载荷与支座								
μ	0.366	0.434	0.577	0.723	0.725	1.122		
η	73.68	52.40	29.64	18.78	18.78	7.84		

续表 12.4-46

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} = \eta \frac{EI}{l^2}; \quad (ql)_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} = \eta \frac{EI}{l^2}$$

支座简图含义



—不允许转动与位移



—不允许转动与侧向位移, 轴向位移自由



—不允许转动, 侧向与轴向位移自由



—不允许位移, 转动自由

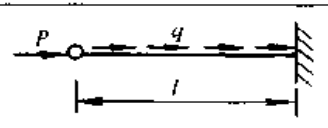


—转动与位移均自由

- 注: 1. 考虑到实际固定端不可能对位移完全限制, 可将表中序号 1、2、5、6 的 μ 值适当加大, 分别取值为 0.65、0.80、1.20 及 2.10。
2. 考虑到桁架中有结点的腹杆, 其两端并非理想铰支, 可适当将 μ 值减小, 取值为 $\mu = 0.8$ (在桁架平面内) 和 $\mu = 0.9$ (在侧平面内)。
3. 压杆两端如为滑动轴承支座, 依轴套长与内直径 d 之比取 μ 值分别为:
 当两端均有 $l/d \geq 3$ 时, $\mu = 0.5$;
 当一端 $l/d \geq 3$, 另一端 $1.5 < l/d < 3$, $\mu = 0.6$;
 当两端均有 $1.5 < l/d < 3$, $\mu = 0.75$;
 当两端均有 $l/d \leq 1.5$ $\mu = 1.0$

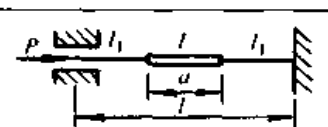
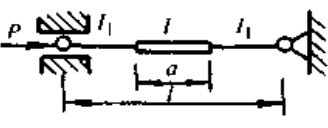
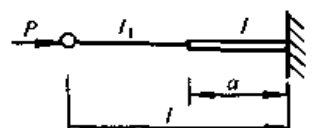
表 12.4-47 受两种中心载荷等截面压杆的稳定系数 η

序号	载荷与支座	稳定系数 η																																																
1	<p>$(P_1 + P_2)_{cr} = \eta \frac{EI}{l^2}$</p>	<table border="1"> <tr> <th>P_2/P_1</th> <td>0</td> <td>0.25</td> <td>0.50</td> <td>0.75</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <th>η</th> <td>9.87</td> <td>10.93</td> <td>11.92</td> <td>12.46</td> <td>13.04</td> <td>14.68</td> </tr> </table>	P_2/P_1	0	0.25	0.50	0.75	1	2	η	9.87	10.93	11.92	12.46	13.04	14.68																																		
P_2/P_1	0	0.25	0.50	0.75	1	2																																												
η	9.87	10.93	11.92	12.46	13.04	14.68																																												
2	<p>$(P_1 + P_2)_{cr} = \eta \frac{EI}{l^2}$</p>	<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">a/l</th> <th colspan="6">P_2/P_1</th> </tr> <tr> <th>0</th> <th>0.2</th> <th>0.5</th> <th>1.0</th> <th>2.0</th> <th>5.0</th> </tr> <tr> <th>0.2</th> <td>2.467</td> <td>2.953</td> <td>3.679</td> <td>4.880</td> <td>7.207</td> <td>13.78</td> </tr> <tr> <th>0.4</th> <td>2.467</td> <td>2.904</td> <td>3.525</td> <td>4.470</td> <td>6.074</td> <td>9.187</td> </tr> <tr> <th>0.5</th> <td>2.467</td> <td>2.856</td> <td>3.384</td> <td>4.136</td> <td>5.268</td> <td>7.060</td> </tr> <tr> <th>0.6</th> <td>2.467</td> <td>2.793</td> <td>3.211</td> <td>3.759</td> <td>4.497</td> <td>5.504</td> </tr> <tr> <th>0.8</th> <td>2.467</td> <td>2.636</td> <td>2.821</td> <td>3.040</td> <td>3.280</td> <td>3.551</td> </tr> </table>	a/l	P_2/P_1						0	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	0.2	2.467	2.953	3.679	4.880	7.207	13.78	0.4	2.467	2.904	3.525	4.470	6.074	9.187	0.5	2.467	2.856	3.384	4.136	5.268	7.060	0.6	2.467	2.793	3.211	3.759	4.497	5.504	0.8	2.467	2.636	2.821	3.040	3.280	3.551
a/l	P_2/P_1																																																	
	0	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0																																												
0.2	2.467	2.953	3.679	4.880	7.207	13.78																																												
0.4	2.467	2.904	3.525	4.470	6.074	9.187																																												
0.5	2.467	2.856	3.384	4.136	5.268	7.060																																												
0.6	2.467	2.793	3.211	3.759	4.497	5.504																																												
0.8	2.467	2.636	2.821	3.040	3.280	3.551																																												
3	<p>$P_{cr} = \eta \frac{EI}{l^2}$</p>	<table border="1"> <tr> <th>$ql/\pi^2 EI/l^2$</th> <td>0.25</td> <td>0.50</td> <td>0.75</td> <td>1.0</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <th>η</th> <td>8.62</td> <td>7.40</td> <td>6.08</td> <td>4.77</td> <td>-0.66</td> </tr> </table> <p>$\eta \approx (1 - 0.5ql/\pi^2 EI/l^2) \pi^2$ 当 η 为负值时, 为了杆的平衡稳定性, P 应为拉力</p>	$ql/\pi^2 EI/l^2$	0.25	0.50	0.75	1.0	2.0	η	8.62	7.40	6.08	4.77	-0.66																																				
$ql/\pi^2 EI/l^2$	0.25	0.50	0.75	1.0	2.0																																													
η	8.62	7.40	6.08	4.77	-0.66																																													

序号	载荷与支座	稳定系数 η									
		$ql/\pi^2 EI/l^2$	0.25	0.5	0.75	1.0	2.0				
4	 $P_{cr} = \eta \frac{EI}{l^2}$	$\eta \approx \left(1 - 0.3 \frac{ql/\pi^2 EI}{l^2}\right) \frac{\pi^2}{4}$									
		<table border="1"> <tr> <td>η</td> <td>2.28</td> <td>2.08</td> <td>1.91</td> <td>1.72</td> <td>0.96</td> </tr> </table>	η	2.28	2.08	1.91	1.72	0.96			
η	2.28	2.08	1.91	1.72	0.96						

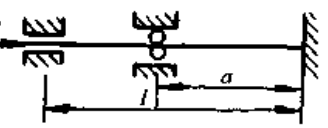
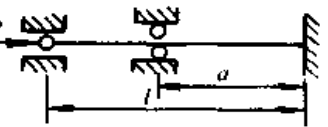
注：支座的图示意义同表 12.4-46。

表 12.4-48 中心受压变截面直杆的稳定系数 η

序号	载荷与支座	稳定系数 η					
		a/l	0.4	0.6	0.8		
1	 $P_{cr} = \eta \frac{EI}{l^2}$	l_1/l	0.4	0.6	0.8		
		0.4	24.9	26.3	27.5		
		0.6	30.6	31.1	32.5		
		0.8	35.3	35.4	36.4		
2	 $P_{cr} = \eta \frac{EI}{l^2}$	l_1/l	0.4	0.6	0.8		
		0.4	6.68	8.51	9.67		
		0.6	8.19	9.24	9.78		
		0.8	9.18	9.63	9.84		
3	 $P_{cr} = \eta \frac{EI_1}{l^2}$	l_1/l	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
		1/3	1.50	1.76	2.03	2.26	2.40
		1/2	1.88	2.07	2.24	2.36	2.44
		2/3	2.14	2.26	2.35	2.42	2.45

注：支座的图示意义同表 12.4-46。

表 12.4-49 具有中间支承中心受压等截面直杆的长度系数 μ 和稳定系数 η

序号	载荷与支座	a/l	μ, η										
			0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1		μ	0.500	0.463	0.426	0.391	0.362	0.350	0.362	0.391	0.426	0.463	0.500
		η	39.5	46.1	54.5	64.6	75.2	80.8	75.2	64.6	54.5	46.1	39.5
2		μ	0.699	0.646	0.593	0.539	0.487	0.439	0.410	0.412	0.436	0.467	0.500
		η	20.2	23.6	28.1	34.0	41.7	51.1	58.8	58.2	52.0	45.3	39.5

续表 12.4-49

序号	载荷与支座	a/l μ, η	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
			μ	0.699	0.652	0.604	0.558	0.518	0.500	0.518	0.558	0.604	0.652	0.699
	η	20.2	23.2	27.1	31.8	36.8	39.5	36.8	31.8	27.1	23.2	20.2	
4		μ	1.00	0.925	0.850	0.776	0.704	0.636	0.575	0.530	0.507	0.501	0.500
	η	9.87	11.5	13.7	16.4	19.9	24.4	29.8	35.1	38.4	39.4	39.5	
5		μ	1.00	0.933	0.868	0.804	0.746	0.699	0.672	0.668	0.679	0.693	0.699
	η	9.87	11.3	13.1	15.3	17.7	20.2	21.9	22.1	21.4	20.6	20.2	
6		μ	2.00	1.85	1.70	1.55	1.40	1.26	1.11	0.975	0.852	0.757	0.699
	η	2.47	2.88	3.41	4.11	5.02	6.26	7.99	10.4	13.6	17.2	20.2	
7		μ	2.00	1.87	1.73	1.60	1.47	1.35	1.23	1.13	1.06	1.01	1.00
	η	2.47	2.83	3.28	3.85	4.55	5.44	6.51	7.73	8.87	9.64	9.87	

注：中间支座仅限制压杆在该处的侧向位移，支座图示意同表 12.4-46。

表 12.4-50 具有弹性支座压杆的临界载荷 P_{cr} 和稳定系数 η

序号	1	2	3
支座类型	上端铰支、下端不能移动、但能弹性转动 	上端自由、下端不能移动但能弹性转动 	上端可弹性侧移、下端固定
稳定方程	$\tan nl = \frac{nl}{1 + \frac{EI}{\beta_1 l} (nl)^2}$	$nl \tan nl = \frac{\beta_1 l}{EI}$	$\tan nl = nl - \frac{EI (nl)^3}{\beta_2 l^3}$
临界载荷和稳定系数	$P_{cr} = (nl)^2 \frac{EI}{l^2} = \eta \frac{EI}{l^2}$ 式中稳定系数 $\eta = (nl)^2$ 中的 nl 为由稳定方程解得 nl 的最小正根		
说明	E —材料的弹性模量； I —压杆横截面的形心主惯性矩； β_1 —支座抗转动弹簧刚度； β_2 —支座抗侧移弹簧刚度		


表 12.4-51 临界载荷经验公式中的系数 a 、 b 、 c 及 d 的取值

材 料	σ_s/MPa	σ_b/MPa	a/MPa	b/MPa	c/MPa	d/MPa	λ 适用范围
Q235A	235.2	372.4	235.2	0.668×10^{-2}	304	1.12	0~123 (抛物线公式) 61~100 (直线公式)
Q275	274.4	490.0	274.4	0.855×10^{-2}	—	—	0~96 (抛物线公式)
16Mn	343.0	509.6	343.0	1.418×10^{-2}	—	—	0~102 (抛物线公式)
优质钢	304	≥ 471	—	—	460	2.57	60~100 (直线公式)
硅 钢	353	≥ 510	—	—	578	3.74	
铬钼钢			—	—	981	5.30	≥ 55 (直线公式)
硬 铝			—	—	373	2.14	≥ 50
铸 铁		392	392	1.891×10^{-2}	331.9	1.45	0~102 (抛物线公式)
松 木			—	—	39.2	0.199	≥ 59

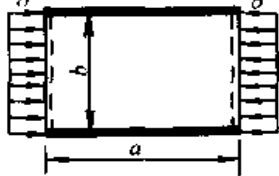
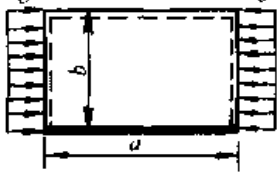

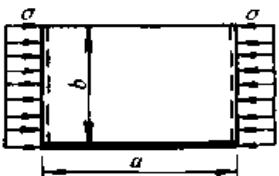
表 12.4-52 中心压杆的稳定性条件

压杆类型	n_w	压杆类型	n_w
结构中的压杆和柱子	钢 1.8~3.0	机床走刀丝杆	2.5~4
	铸铁 5~5.5	水平长丝杆及精密丝杆	>4
	木材 2.8~3.2	磨床等油缸中的活塞杆	4~6
矿山设备中的压杆	4~8	起重螺旋	3.5~5
空压机及内燃机的连杆	3~8	拖拉机转向纵、横推杆	>5
发动机的挺杆	低速 4~6		
	高速 2~5		

表 12.4-53 平板的临界载荷

序号	载 荷 及 支 座	临 界 载 荷																				
1	面内单向均匀受压，四边简支 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$																				
		<table border="1"> <tr><td>a/b</td><td>0.2</td><td>0.3</td><td>0.4</td><td>0.5</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>k</td><td>27</td><td>13.2</td><td>8.41</td><td>6.25</td><td>5.14</td><td>4.53</td><td>4.20</td><td>4.04</td><td>4.00</td></tr> </table>	a/b	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	k	27	13.2	8.41	6.25	5.14	4.53	4.20	4.04	4.00
		a/b	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0											
		k	27	13.2	8.41	6.25	5.14	4.53	4.20	4.04	4.00											
		<table border="1"> <tr><td>a/b</td><td>1.1</td><td>1.2</td><td>1.3</td><td>1.4</td><td>1.5</td><td>1.6</td><td>1.7</td><td>1.8</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>k</td><td>4.04</td><td>4.13</td><td>4.28</td><td>4.47</td><td>4.34</td><td>4.20</td><td>4.11</td><td>4.04</td><td>4.00</td></tr> </table>	a/b	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0	k	4.04	4.13	4.28	4.47	4.34	4.20	4.11	4.04	4.00
a/b	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0													
k	4.04	4.13	4.28	4.47	4.34	4.20	4.11	4.04	4.00													
<table border="1"> <tr><td>a/b</td><td>2.2</td><td>2.4</td><td>2.6</td><td>2.8</td><td>3.0</td><td>3.5</td><td>≥ 4.0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>k</td><td>4.04</td><td>4.13</td><td>4.08</td><td>4.02</td><td>4.00</td><td>4.07</td><td>4.0</td><td></td><td></td></tr> </table>	a/b	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.5	≥ 4.0			k	4.04	4.13	4.08	4.02	4.00	4.07	4.0				
a/b	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.5	≥ 4.0															
k	4.04	4.13	4.08	4.02	4.00	4.07	4.0															
$k = \left(\frac{\beta}{m} + \frac{m}{\beta}\right)^2$, $\beta = \frac{a}{b}$, m 为沿 a 向的半波数 $\beta \leq \sqrt{2}$, $m = 1$ $\sqrt{6} \leq \beta \leq \sqrt{12}$, $m = 3$ $\sqrt{2} \leq \beta \leq \sqrt{6}$, $m = 2$ $\sqrt{12} \leq \beta \leq \sqrt{20}$, $m = 4$																						

续表 12.4-53

序号	载荷及支座	临界载荷																																																																																				
2	<p>面内单向均匀受压, 加载边简支, 非加载边固定</p> 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>0.4</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>9.44</td> <td>7.68</td> <td>7.05</td> <td>7.00</td> <td>7.30</td> <td>7.83</td> <td>7.69</td> <td>7.05</td> <td>7.00</td> </tr> <tr> <td>a/b</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>2.1</td> <td>3.0</td> <td>3.5</td> <td>∞</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>7.30</td> <td>7.05</td> <td>7.00</td> <td>7.07</td> <td>7.00</td> <td>6.97</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	a/b	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	k	9.44	7.68	7.05	7.00	7.30	7.83	7.69	7.05	7.00	a/b	1.6	1.8	2.1	3.0	3.5	∞				k	7.30	7.05	7.00	7.07	7.00	6.97																																															
a/b	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4																																																																													
k	9.44	7.68	7.05	7.00	7.30	7.83	7.69	7.05	7.00																																																																													
a/b	1.6	1.8	2.1	3.0	3.5	∞																																																																																
k	7.30	7.05	7.00	7.07	7.00	6.97																																																																																
3	<p>面内单向均匀受压, 加载边简支, 非加载边一边固定一边简支</p> 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>6.85</td> <td>5.92</td> <td>5.41</td> <td>5.74</td> <td>5.92</td> <td>5.51</td> </tr> <tr> <td>a/b</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>1.95</td> <td>2.4</td> <td>3.2</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>5.4</td> <td>5.50</td> <td>5.67</td> <td>5.41</td> <td>5.41</td> <td>5.41</td> </tr> </table>	a/b	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	k	6.85	5.92	5.41	5.74	5.92	5.51	a/b	1.6	1.8	1.95	2.4	3.2	∞	k	5.4	5.50	5.67	5.41	5.41	5.41																																																								
a/b	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4																																																																																
k	6.85	5.92	5.41	5.74	5.92	5.51																																																																																
a/b	1.6	1.8	1.95	2.4	3.2	∞																																																																																
k	5.4	5.50	5.67	5.41	5.41	5.41																																																																																
4	<p>面内单向均匀受压, 受载边简支, 非受载边一边简支, 一边自由</p> 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <p>$\nu = 0.25, k \approx (0.456 + 1/\beta^2)$ (当 $\beta = a/b \geq 2$)</p> <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>0.5</td> <td>1.0</td> <td>1.2</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>2.0</td> <td>2.5</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>4.4</td> <td>1.44</td> <td>1.14</td> <td>0.835</td> <td>0.755</td> <td>0.698</td> <td>0.610</td> <td>0.564</td> </tr> </table> <p>$\nu = 0.3, k \approx (0.425 + 1/\beta^2)$ (当 $\beta = \frac{a}{b} \geq 2$)</p> <table border="1"> <tr> <td>a/b</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>1.00</td> <td>1.25</td> <td>1.50</td> <td>1.75</td> <td>2.00</td> <td>2.50</td> <td>3.00</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1.954</td> <td>1.631</td> <td>1.402</td> <td>1.047</td> <td>0.858</td> <td>0.742</td> <td>0.669</td> <td>0.582</td> <td>0.533</td> </tr> </table>	a/b	0.5	1.0	1.2	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	k	4.4	1.44	1.14	0.835	0.755	0.698	0.610	0.564	a/b	0.8	0.9	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	k	1.954	1.631	1.402	1.047	0.858	0.742	0.669	0.582	0.533																																														
a/b	0.5	1.0	1.2	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0																																																																														
k	4.4	1.44	1.14	0.835	0.755	0.698	0.610	0.564																																																																														
a/b	0.8	0.9	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00																																																																													
k	1.954	1.631	1.402	1.047	0.858	0.742	0.669	0.582	0.533																																																																													
5	<p>面内单向均匀受压, 受载边简支, 非受载边一边固定, 一边自由</p> 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <table border="1"> <tr> <td rowspan="2">$\nu = 0.25$</td> <td>a/b</td> <td>1.0</td> <td>1.1</td> <td>1.2</td> <td>1.3</td> <td>1.4</td> <td>1.5</td> <td>1.6</td> <td>1.7</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1.70</td> <td>1.56</td> <td>1.47</td> <td>1.41</td> <td>1.36</td> <td>1.34</td> <td>1.33</td> <td>1.33</td> <td>1.34</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">$\nu = 0.25$</td> <td>a/b</td> <td>1.9</td> <td>2.0</td> <td>2.2</td> <td>2.5</td> <td>3</td> <td>∞</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1.36</td> <td>1.38</td> <td>1.45</td> <td>1.59</td> <td>1.36</td> <td>1.33</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">$\nu = 0.3$</td> <td>a/b</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>1.0</td> <td>1.25</td> <td>1.5</td> <td>1.645</td> <td>1.75</td> <td>2.0</td> <td>2.25</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>2.15</td> <td>1.85</td> <td>1.66</td> <td>1.39</td> <td>1.29</td> <td>1.28</td> <td>1.29</td> <td>1.34</td> <td>1.42</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">$\nu = 0.3$</td> <td>a/b</td> <td>2.5</td> <td>3.0</td> <td>3.5</td> <td>4.0</td> <td>4.5</td> <td>4.94</td> <td>5.25</td> <td>6.00</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1.39</td> <td>1.29</td> <td>1.29</td> <td>1.34</td> <td>1.29</td> <td>1.28</td> <td>1.29</td> <td>1.29</td> <td>1.28</td> </tr> </table>	$\nu = 0.25$	a/b	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	k	1.70	1.56	1.47	1.41	1.36	1.34	1.33	1.33	1.34	$\nu = 0.25$	a/b	1.9	2.0	2.2	2.5	3	∞				k	1.36	1.38	1.45	1.59	1.36	1.33				$\nu = 0.3$	a/b	0.8	0.9	1.0	1.25	1.5	1.645	1.75	2.0	2.25	k	2.15	1.85	1.66	1.39	1.29	1.28	1.29	1.34	1.42	$\nu = 0.3$	a/b	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	4.94	5.25	6.00	∞	k	1.39	1.29	1.29	1.34	1.29	1.28	1.29	1.29	1.28
$\nu = 0.25$	a/b	1.0		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8																																																																											
	k	1.70	1.56	1.47	1.41	1.36	1.34	1.33	1.33	1.34																																																																												
$\nu = 0.25$	a/b	1.9	2.0	2.2	2.5	3	∞																																																																															
	k	1.36	1.38	1.45	1.59	1.36	1.33																																																																															
$\nu = 0.3$	a/b	0.8	0.9	1.0	1.25	1.5	1.645	1.75	2.0	2.25																																																																												
	k	2.15	1.85	1.66	1.39	1.29	1.28	1.29	1.34	1.42																																																																												
$\nu = 0.3$	a/b	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	4.94	5.25	6.00	∞																																																																												
	k	1.39	1.29	1.29	1.34	1.29	1.28	1.29	1.29	1.28																																																																												

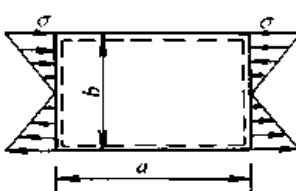
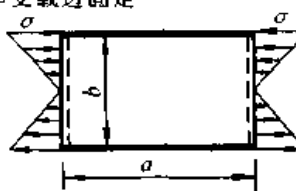
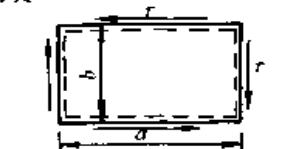
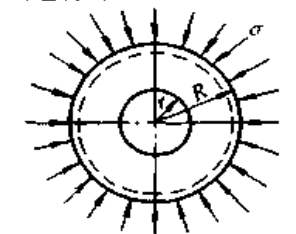
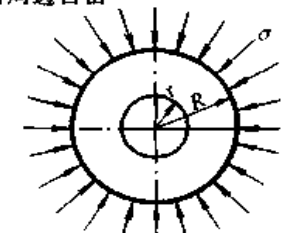
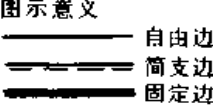
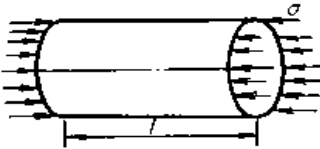
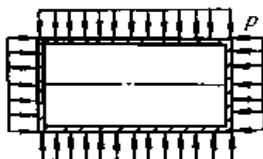
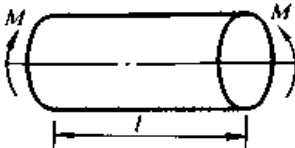
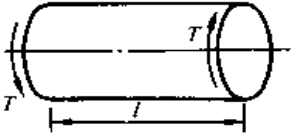
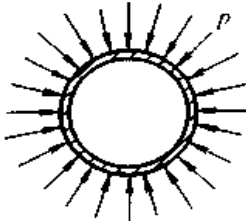
序号	载 荷 及 支 座	临 界 载 荷																								
6	面内受弯曲作用,四边简支 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <table border="1" data-bbox="779 399 1234 546"> <tr> <td>a/b</td> <td>0.40</td> <td>0.50</td> <td>0.60</td> <td>0.667</td> <td>0.75</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>29.1</td> <td>25.6</td> <td>24.1</td> <td>23.9</td> <td>24.1</td> </tr> <tr> <td>a/b</td> <td>0.80</td> <td>0.90</td> <td>1.0</td> <td>1.5</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>24.4</td> <td>25.6</td> <td>25.6</td> <td>24.1</td> <td>23.9</td> </tr> </table> <p>当 $a/b \leq \frac{2}{3}$ $k \approx 15.87 + 1.87/\beta^2 + 8.6\beta^2$ ($\beta = a/b$) 当 $a/b > \frac{2}{3}$ $k \approx 23.9$</p>	a/b	0.40	0.50	0.60	0.667	0.75	k	29.1	25.6	24.1	23.9	24.1	a/b	0.80	0.90	1.0	1.5	∞	k	24.4	25.6	25.6	24.1	23.9
a/b	0.40	0.50	0.60	0.667	0.75																					
k	29.1	25.6	24.1	23.9	24.1																					
a/b	0.80	0.90	1.0	1.5	∞																					
k	24.4	25.6	25.6	24.1	23.9																					
7	面内弯曲作用,受载边简支, 非受载边固定 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <table border="1" data-bbox="617 777 1380 871"> <tr> <td>a/b</td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>0.8</td> <td>1.0</td> <td>1.5</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>47.3</td> <td>40.7</td> <td>39.7</td> <td>41.8</td> <td>43.0</td> <td>40.7</td> <td>39.7</td> <td>39.7</td> <td>39.7</td> </tr> </table> <p>$a/b \geq 1, k \approx 39.7$</p>	a/b	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.5	2.0	k	47.3	40.7	39.7	41.8	43.0	40.7	39.7	39.7	39.7				
a/b	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.5	2.0																	
k	47.3	40.7	39.7	41.8	43.0	40.7	39.7	39.7	39.7																	
8	面内受均匀剪切作用,四边 简支 	$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$ <p>$a/b \leq 1, k \approx 4.0 + 5.34\left(\frac{b}{a}\right)^2; a/b \geq 1, k \approx 5.34 + 4.00\left(\frac{b}{a}\right)^2$ 精确解</p> <table border="1" data-bbox="812 1081 1201 1165"> <tr> <td>a/b</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>9.35</td> <td>6.48</td> <td>6.04</td> <td>5.35</td> </tr> </table>	a/b	1	2	3	∞	k	9.35	6.48	6.04	5.35														
a/b	1	2	3	∞																						
k	9.35	6.48	6.04	5.35																						
9	面内径向压缩,外周边简支, 内周边自由 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{R}\right)^2$ <table border="1" data-bbox="600 1312 1412 1407"> <tr> <td>r/R</td> <td>0</td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.7</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>0.426</td> <td>0.402</td> <td>0.365</td> <td>0.328</td> <td>0.280</td> <td>0.256</td> <td>0.231</td> <td>0.219</td> <td>0.207</td> <td>0.195</td> </tr> </table>	r/R	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	k	0.426	0.402	0.365	0.328	0.280	0.256	0.231	0.219	0.207	0.195		
r/R	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9																
k	0.426	0.402	0.365	0.328	0.280	0.256	0.231	0.219	0.207	0.195																
10	面内径向压缩,外周边固定, 内周边自由 	$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{R}\right)^2$ <table border="1" data-bbox="730 1617 1266 1711"> <tr> <td>r/R</td> <td>0</td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>k</td> <td>1.48</td> <td>1.42</td> <td>1.35</td> <td>1.47</td> <td>1.80</td> <td>2.52</td> </tr> </table>	r/R	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	k	1.48	1.42	1.35	1.47	1.80	2.52										
r/R	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5																				
k	1.48	1.42	1.35	1.47	1.80	2.52																				
说 明	t—板厚 图示意义 																									

表 12.4-54 柱壳与球壳的临界载荷

序号	载荷与壳体	临界载荷
1	<p>轴向均匀受压的圆柱壳</p>  <p>D—平均直径 R—平均半径 t—厚度(下同)</p>	<p>短壳 $(z = (\frac{l}{R})^2 (\frac{R}{t}) \sqrt{1-\nu^2} < 2.85)$;</p> $\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(l/t)^2} \quad k = \begin{cases} (1+12z^2)/\pi^4 & \text{(两端简支)} \\ (4+3z^2)/\pi^4 & \text{(两端固定)} \end{cases}$ <p>中长壳 ($z > 2.85$): 经典理论解 $\sigma_{cr} = \frac{l}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{Et}{R}$ (两端简支或固定) (理想圆柱壳) 实测值 (有缺陷圆柱壳) $\sigma'_{cr} = (\frac{1}{5} - \frac{1}{3}) \sigma_{cr}$</p> <p>长壳 ($z$ 很大的细长壳): $\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \left(\lambda = \frac{\sqrt{2}\mu l}{R} > \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}}, \mu \text{ 为长度系数见表 12.4-46} \right)$</p>
2	<p>静水外压的非加劲圆柱壳或环向加劲圆柱壳在环肋之间的屈曲</p>  <p>l 为柱壳两相邻环肋之间或一端口与相邻环肋之间的距离。若两端为半球头壳,当柱壳发生屈曲,头部仍保持稳定,则可当作较长柱壳,每端各加长 $\frac{\pi D}{2n}$ (n 为环向出现压陷时的瓣数)</p>	<p>当 $\frac{2}{[12(1-\nu^2)]^{0.25} \sqrt{D/t}} < l/D \leq \frac{10}{[12(1-\nu^2)]^{0.25} \sqrt{D/t}}$</p> $p_{cr} = \frac{2.42E}{(1-\nu^2)^{0.75}} \left[\frac{(t/D)^{2.5}}{l/D - 0.45(t/D)^{0.5}} \right]$ <p>当 $\frac{10}{[12(1-\nu^2)]^{0.25} \sqrt{D/t}} < l/D \leq \frac{\sqrt{D/t}}{[12(1-\nu^2)]^{0.25}}$</p> $p_{cr} = \frac{2.42E}{(1-\nu^2)^{0.75} (D/t)^{2.5} (l/D)}$ <p>当 $\frac{\sqrt{D/t}}{[12(1-\nu^2)]^{0.25}} < l/D \leq \frac{4\sqrt{D/t}}{[12(1-\nu^2)]^{0.25}}$</p> $p_{cr} = \frac{2E(t/D)}{3 + \lambda^2/2} \left\{ \frac{(t/D)^2}{3(1-\nu^2)} [(4 + \lambda^2)^2 - 7] + \frac{\lambda^4}{(4 + \lambda^2)^2} \right\}$ <p>当 $l/D > \frac{4\sqrt{D/t}}{[12(1-\nu^2)]^{0.25}}$</p> $p_{cr} = \frac{2E(t/D)^2}{1-\nu^2}$
3	<p>纵向对称面受弯矩作用的圆柱壳</p> 	<p>中长壳: $M_{cr} = \frac{\pi ERt^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}$</p> <p>实测值: $M'_{cr} = (0.4-0.7)M_{cr}$</p>





















序号	载荷与壳体	临界载荷																						
4	<p>两端受扭圆柱壳</p>  <p>$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 t}$</p>	$\tau_{cr} = k \left(\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(l/t)^2} \right)$ <p>短壳 [$z = (l/R)^2 (R/t) \sqrt{1-\nu^2} < 50$]:</p> $k = \begin{cases} 5.35 + 0.213z & (\text{两端简支}) \\ 8.98 + 0.101z & (\text{两端固定}) \end{cases}$ <p>中长壳 [$100 \leq z \leq 19.2(1-\nu^2)(D/t)^2$]:</p> $k = 0.85z^{0.75} (\nu = 0.3, \text{无论何边界})$ <p>考虑初始缺陷影响, 建议 k 比上式低 15%.</p> <p>长壳: $k = \frac{0.416z}{(D/t)^{0.5}}$</p>																						
5	<p>径向均匀外压球壳</p> 	<p>经典理论解 $p_{cr} = \frac{2Et^2}{R^2 \sqrt{3(1-\nu^2)}}$</p> <p>实测值 $p_{cr} = \left(\frac{1}{4} - \frac{2}{3} \right) p_{cr}$</p> <p>经典解适用于碟形和椭圆形封头, 但式中的 R 应为碟形封头球面部分的内半径; 用于椭圆封头时, 式中 R 应取下表中的当量半径 R_0.</p> <table border="1" data-bbox="621 989 1409 1234"> <tr> <td>长短半轴比 a/b</td> <td>3.0</td> <td>2.8</td> <td>2.6</td> <td>2.4</td> <td>2.2</td> <td>2.0</td> <td>1.8</td> <td>1.6</td> <td>1.4</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>当量半径与容器外直径比 R_0/D</td> <td>1.36</td> <td>1.27</td> <td>1.18</td> <td>1.08</td> <td>0.99</td> <td>0.90</td> <td>0.81</td> <td>0.73</td> <td>0.65</td> <td>0.57</td> </tr> </table>	长短半轴比 a/b	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	当量半径与容器外直径比 R_0/D	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57
长短半轴比 a/b	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2														
当量半径与容器外直径比 R_0/D	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57														

第 5 章 实验应力分析常用公式和技术数据

1 电阻应变测量

1.1 电阻应变计类型、特点和选择

表 12.5-1 电阻应变计型号组成的表示方法

表示方法	电阻应变计型号依次由左至右共七项（某些情况后两项可省略）用汉语拼音字母或数字组成							
	项次	表示内容	字母或数字表示的含义规定					
	第一项	应变计类别	S—丝绕式，D—短接式，B—箔式，A—半导体式，T—特种用途					
	第二项	基底材料种类	Z—纸基，H—环氧类，F—酚醛类，J—聚酯类，X—缩醛类，A—聚酰亚胺，B—玻璃纤维布浸胶，L—临时基底，Q—纸浸胶，P—金属薄片，E—聚乙烯醇缩丁醛					
	第三项	标称电阻值/ Ω	60, (90), 120, (150), 200, (250), 350, 500, (650), 1 000 (带括号规格不推荐采用)					
	第四项	应变计栅长/ mm	02, 03, 05, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 20, 40, 60, 100, 150, 200 (02, 03, 05 分别表示 0.2, 0.3 和 0.5 mm)					
型号中各项的内容及字母或数字表示含义的规定	第五项	敏感栅结构 (只列出常用的，其他结构由制造单位规定)	代表字母	结构形状	说 明	代表字母	结构形状	说 明
			AA		单轴	EA		二轴四栅 45°
			BA		二轴 90°	EB		二轴四栅 90°
			BB		二轴 90°	FB		平行轴二栅
			BC		二轴 90°重迭	FC		平行轴三栅
			CA		三轴 45°	FD		平行轴四栅
			CB		三轴 45°重迭	GB		同轴二栅
			CC		三轴 60°	GC		同轴三栅
			CD		三轴 120°	GD		同轴四栅
			DA		四轴 60°/90°	HA		二轴二栅 45°
			DB		四轴 45°/90°	HB		二轴四栅 45°





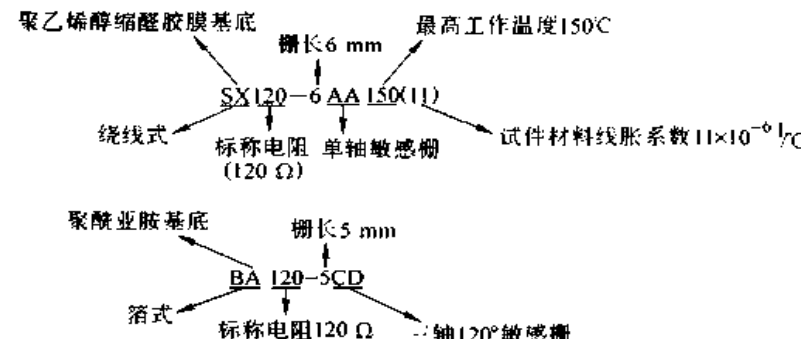
项次	表示内容	字母或数字表示的含义规定					
		代表字母	结构形状	说 明	代表字母	结构形状	说 明
第五项	敏感栅结构 (只列出常用的, 其他结构由制造单位规定)	HC		二轴六栅 45°	KA		圆膜栅
		HD		二轴八栅 45°			
		JA		螺旋栅			
第六项	极限工作温度/℃	用数字表示(常温应变计可省略此项)低温应变计(-30℃以下至-270℃), 常温应变计(-30~80℃), 中温应变计(80~350℃), 高温应变计(350℃以上)					
第七项	可温度自补偿材料的线胀系数($\times 10^{-6}/\text{℃}$)	用带括号数字表示温度自补偿应变计适用试件材料的线胀系数(对非温度自补偿应变计此项省略), 常用材料如下: 9—铁, 11—钢, 16—不锈钢, 23—铝, 27—镁, 65—塑料					
型号表示实例	<p>  </p>						

表 12.5-2 电阻应变计类型、规格的特点与选择

项目	特点与选择
类别	<p>箔式——敏感栅面积大, 易传递试件表面变形, 易粘贴在表面为平面或曲面的试件上; 横向灵敏度、蠕变和机械滞后均小, 输出信号大, 散热能力强, 有较高测量精度; 易制成各种应变花和极小的尺寸(栅长≤ 2 mm), 价格低, 广泛使用于多种应变测量</p> <p>丝绕式——横向效应大, 难于制成极小尺寸, 一般用于低、中、高温和特殊场合的应变测量。为减小横向效应, 可采用短接式, 但疲劳寿命低</p> <p>半导体式——灵敏系数比一般金属应变计高数十甚至百倍; 频率响应高; 横向灵敏度、蠕变和机械滞后均小、频率响应高(响应时间10^{-11} s量级), 既可测静态也可测高频动应变; 易制成超小型应变计。但灵敏系数随温度变化大, 且应变和电阻变化间的非线性也比较大, 应变极限也小。宜用于小应变及静态应变测量, 不宜作温度变化大、精度要求高的应变测量</p> <p>特殊型——对于不使用加热固化应变计的高温 and 大型构件, 宜采用焊接式或陶瓷喷涂型应变计; 在高、低温测量和传感器中宜使用温度自补偿应变计; 在水中或潮湿环境中的测量, 选用防水型应变计; 大变形的测量(应变$> 2\%$), 采用大应变量应变计; 测量疲劳寿命采用 S/N 疲劳寿命应变计; 测量裂纹扩展采用裂纹扩展应变计</p>

续表 12.5-2

项目	特点与选择
应变计尺寸	测试部位应力梯度大或可贴面积小的试件要选用小栅长应变计; 材质不均匀表面粗糙的试件(如铸铝、铸镁合金、混凝土等), 小应变不足以反映宏观变形, 应选栅长大的应变计; 动态应变测量, 应变计栅长应为振动波波长 λ 的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}$ ($\lambda = \text{声波传播速度 (m/s)} / \text{振动频率}$)
标称电阻	一般应变测量采用标称电阻为 120 Ω , 为提高信噪比(当电路中有电阻变化的随机源时), 或提高灵敏度(如传感器中的应变计)应选用电阻值大(如 > 350 Ω)的应变计
敏感栅的结构	对已知应力方向的单向应力状态, 选用单轴应变计; 已知两主应力方向的平面应力状态, 选用二轴应变计; 对两主应力方向未知的平面应力状态, 选用三轴或四轴应变计

表 12.5-3 国产常用粘结剂的特点和适用范围

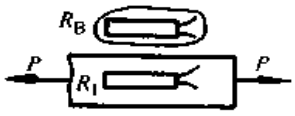
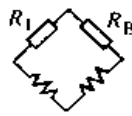
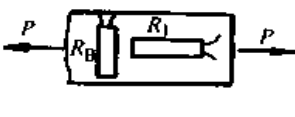

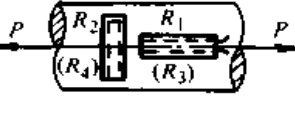
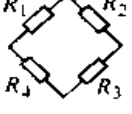
类型	牌号	最低限度固化条件	使用温度 $^{\circ}\text{C}$	特点	适用范围
氰基丙烯酸酯	CK501	指压、室温固化	-60~60 粘贴 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h 可提高粘接力	无需加压、加温处理, 室温短时即固化; 对多种金属、玻璃、塑料(聚乙烯等除外)有很强粘贴作用; 浸醇、苯、汽油中基本强度不变; 不耐酸、碱, 耐湿性差, 溶于丙酮	广泛用于一般测量的各类应变计
	501				
	502 (502胶 T-1型) KY-2				
环氧类	J06-2	压力 0.2~0.3 MPa, 150 $^{\circ}\text{C}$ 3 h	-196~250	通用性好, 粘接力强, 抗湿性和绝缘性好, 固化时收缩量小, 不致产生残余应变	SB、SP 等系列应变计
	J37	指压 80 $^{\circ}\text{C}$, 6 h	-150~150		测量
	BR610	压力 0.1~0.3 MPa, 135 $^{\circ}\text{C}$ 2 h; 165 $^{\circ}\text{C}$ 2 h	短期-269~370 长期-269~288		适用于 BH 系列应变计, 高精度传感器和应变测量, 也可用于 BE、BA 等系列应变计
	NE-13	压力 0.05 MPa, 160 $^{\circ}\text{C}$ 2 h	-30~80		制传感器或测量
	AST-1	压力 0.05~0.1 MPa, 70 $^{\circ}\text{C}$ 1 h, 140 $^{\circ}\text{C}$ 2 h, 190 $^{\circ}\text{C}$ 3 h	-100~200		SX、BF、BX、BH 等系列应变计
	AST-2	后固化处理 190 $^{\circ}\text{C}$ 2 h			BA、BF、BX、BH 等系列应变计
酚醛树脂类	G1720	压力 0.05~0.1 MPa, 70 $^{\circ}\text{C}$ 1 h, 140 $^{\circ}\text{C}$ 1 h, 185 $^{\circ}\text{C}$ 2 h	-60~80 特殊-196~150	需加热才能聚合, 且有水生成。为避免形成水泡, 要给应变计适当加压力, 使用不太方便。对酚醛树脂为基底的应变计较为有利	用于中低温测量 BXC、BQC、BBC 系列应变计
	JSF-4	压力 0.1~0.2 MPa, 60 $^{\circ}\text{C}$ 1/2 h, 100 $^{\circ}\text{C}$ 1/2 h, 140 $^{\circ}\text{C}$ 2 h	-100~80		耐强碱
	JSF-2	压力 0.1~0.2 MPa, 80 $^{\circ}\text{C}$ 1/2 h, 160 $^{\circ}\text{C}$ 1 h	-50~100		耐强酸

续表 12.5-3



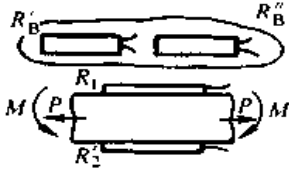
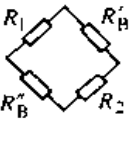
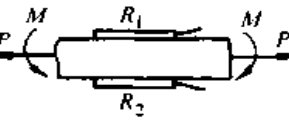

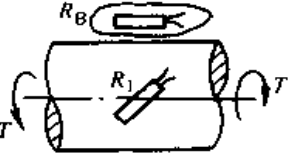
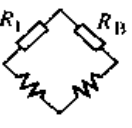
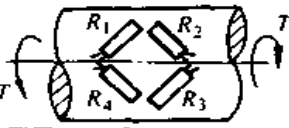
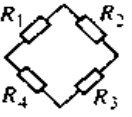
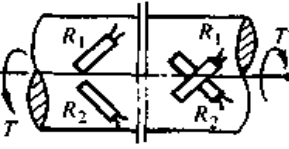
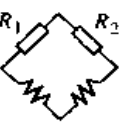
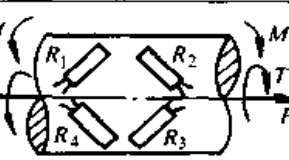
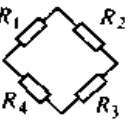
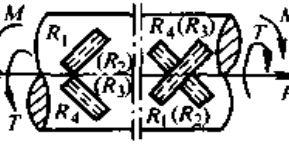
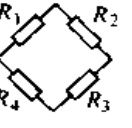
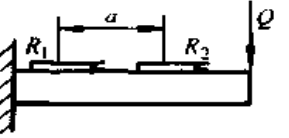
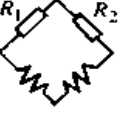
类型	牌号	最低限度固化条件	使用温度/℃	特 点	适用范围
酚醛树脂类	Ky-5	压力 0.05 ~ 0.1MPa, 70℃ 1 h, 100℃ 1 h, 160℃ 2 h	-40~80 特殊 -196~180	需加热才能聚合, 且有水生成。为避免形成水泡, 要给应变计适当压力, 使用不太方便。对酚醛树脂为基底的应变计较为有利	对聚酰亚胺基底粘接力强, 主要用于传感器
	CK-4	压力 0.05 ~ 0.1MPa, 160℃ 4 h 后固化 180℃ 2 h, 70℃ 1 h, 100℃ 1 h, 160℃ 1 h 后固化 180℃ 2 h	短期 -190~180 长期 -190~160		适于 BA 系列应变计、高精度传感器
	JFH-1	压力 0.2MPa, 100℃ 1h, 150℃ 2h, 250℃ 4h	-30~250		适于 BB, DB 系列应变计
聚酰亚胺	30-14	压力 0.1 ~ 0.3 MPa, 200℃ 1 h, 280℃ 2 h	-60~250 短期可到 300	耐中、低温, 抗辐射, 电绝缘性好, 并有良好的耐水、酸、溶剂等, 应变极限高 (20%)	
聚树脂脂	Ky-3	压力 0.03 ~ 0.05 MPa 室温 24 h	-50~100	粘接力好, 耐水、油、稀酸, 使用前配制	
聚胺脂	PPS	使其快干可加温固化 压力 0.05 MPa, 80℃ 2 h	-30~60	具有良好防水、防潮、防毒及电绝缘性优良, 室温下自干	适用于水下应变剂粘剂及其他应变计防护剂
有机硅	F18-2 B19	压力 0.05 ~ 0.2MPa, 180℃ 1 h 卸压后 300℃ 3 h, 480℃ 2 h	450	溶剂中含苯、甲苯, 有毒性	适用于玻璃纤维布基底的应变计 (如 SB 系列等) 不能在核辐射环境中应用

1.2 静态应变测量计算公式

表 12.5-4 几种杆件受载方式下, 所测应力和载荷的计算公式

载荷形式	载荷及布片图	接桥图	ϵ'/ϵ	所测应力及载荷计算公式
轴向拉伸 或压缩			1	$\sigma = E\epsilon'$ $P = EA\epsilon'$
			$1 + \mu$	$\sigma = \frac{E\epsilon'}{1 + \mu}$ $P = \frac{EA\epsilon'}{1 + \mu}$
			$2(1 + \mu)$	$\sigma = \frac{E\epsilon'}{2(1 + \mu)}$ $P = \frac{EA\epsilon'}{2(1 + \mu)}$

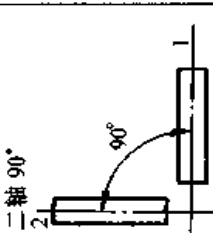
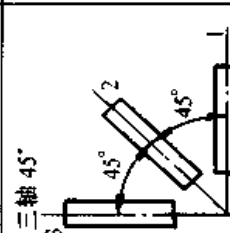
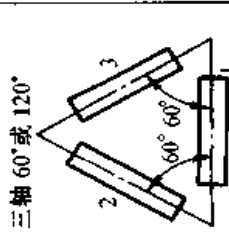
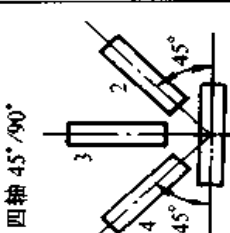
续表 12.5-4

载荷形式	载荷及布片图	接桥图	ϵ'/ϵ	所测应力及载荷计算公式
平面弯曲			1	$\sigma = E\epsilon'$ $M = EW\epsilon'$
拉(压)弯组合			2	$\sigma = \frac{E\epsilon'}{2}$ $P = \frac{EA\epsilon'}{2}$
			2	$\sigma = \frac{E\epsilon'}{2}$ $M = \frac{EW\epsilon'}{2}$
扭转			1	$\tau = \frac{E\epsilon'}{1+\mu}$ $T = \frac{EW_n\epsilon'}{1+\mu}$
			4	$\tau = \frac{E\epsilon'}{4(1+\mu)}$ $T = \frac{EW_n\epsilon'}{4(1+\mu)}$
拉(压)扭组合			2	$\tau = \frac{E\epsilon'}{2(1+\mu)}$ $T = \frac{EW_n\epsilon'}{2(1+\mu)}$
拉(压)弯扭组合 (弯矩沿轴向无梯度)			4	$\tau = \frac{E\epsilon'}{4(1+\mu)}$ $T = \frac{EW_n\epsilon'}{4(1+\mu)}$
拉(压)弯扭组合 (弯矩沿轴向有梯度)			4	$\tau = \frac{E\epsilon'}{4(1+\mu)}$ $T = \frac{EW_n\epsilon'}{4(1+\mu)}$
剪切			1	$Q = \frac{EW\epsilon'}{a}$

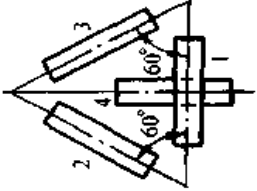
注：1. ϵ' —仪器测得指示应变， ϵ —试件实际应变， A —杆件横截面面积， W 、 W_n —分别为杆件横截面的抗弯、抗扭截面系数。

2. 倾斜布片均为 45° 倾角。括号内电阻片粘贴于杆后面。

表 12.5-5 常用应变花求主应变、主方向及主应力的计算公式

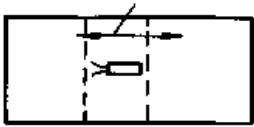


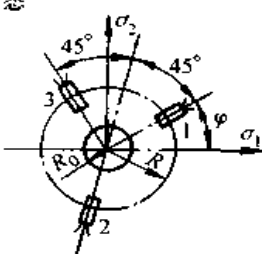
序号	应变花类型	主应变 $\epsilon_{max}, \epsilon_{min}$	主方向角 φ	主应力 $\sigma_{max}, \sigma_{min}$
1	<p>二轴 90°</p> 	ϵ_1, ϵ_2 中代数数值大者为 ϵ_{max} , 小者为 ϵ_{min}	$\varphi = 0$	$\sigma_{max} = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{max} + \nu\epsilon_{min})$ $\sigma_{min} = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{min} + \nu\epsilon_{max})$
2	<p>三轴 45°</p> 	$\epsilon_{max/min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}$	$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{(2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)}{(\epsilon_1 - \epsilon_3)}$ <p>若 $\epsilon_1 \geq \epsilon_3$, 由 1 轴转 φ 角至 ϵ_{max} (或 σ_{max}) $\epsilon_1 < \epsilon_3$, 由 1 轴转 φ 角至 ϵ_{min} (或 σ_{min})</p>	$\sigma_{max/min} = \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_3)}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \times \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right]$
3	<p>三轴 60° 或 120°</p> 	$\epsilon_{max/min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$	$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sqrt{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{(2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3)}$ <p>$\epsilon_1 \geq \frac{\epsilon_2 + \epsilon_3}{2}$, 由 1 轴转 φ 角至 ϵ_{max} (或 σ_{max}) $\epsilon_1 < \frac{\epsilon_2 + \epsilon_3}{2}$, 由 1 轴转 φ 角至 ϵ_{min} (或 σ_{min})</p>	$\sigma_{max/min} = \frac{E}{3} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \right]$
4	<p>四轴 45°/90°</p>  <p>桥式式 $\epsilon_1 + \epsilon_3 = \epsilon_2 + \epsilon_4$</p>	$\epsilon_{max/min} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4}{4} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_4)^2} \\ \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \\ \frac{\epsilon_2 + \epsilon_4}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_4)^2} \\ \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + (\epsilon_4 - \epsilon_1)^2} \\ \frac{\epsilon_2 + \epsilon_4}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_4 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2} \end{array} \right.$	$\varphi = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \arctan \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_4)}{(\epsilon_1 - \epsilon_3)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{(2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)}{(\epsilon_1 - \epsilon_3)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_4)}{(\epsilon_2 + \epsilon_1 - 2\epsilon_3)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_4)}{(\epsilon_1 - \epsilon_3)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_4)}{(2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_4)} \end{array} \right.$	$\sigma_{max/min} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4}{2(1-\nu)} \pm \frac{1}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_4)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_3)}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_2 + \epsilon_4)}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_4)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + (\epsilon_4 - \epsilon_1)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_2 + \epsilon_4)}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_4 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2} \right] \end{array} \right.$

续表 12.5-5

序号	应变花类型	主应变 $\epsilon_{\max}, \epsilon_{\min}$	主方向角 φ	主应力 $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$
5	四轴 $60^\circ/90^\circ$  桥式 $\epsilon_1 + 3\epsilon_4 = 2(\epsilon_2 + \epsilon_3)$	$\epsilon_{\max} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{4}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}}{2}$ $\epsilon_{\min} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4) \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}}{3}$ $\epsilon_{\max} = \frac{(\epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \pm \sqrt{(\epsilon_2 + \epsilon_3 - 2\epsilon_4)^2 + \frac{1}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}}{2}$ $\epsilon_{\min} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{1}{3}(4\epsilon_3 - \epsilon_1 - 3\epsilon_4)^2}}{2}$ $\epsilon_{\min} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{1}{3}(4\epsilon_2 - \epsilon_1 - 3\epsilon_4)^2}}{2}$	$\varphi = \begin{cases} \frac{1}{2} \arctan \frac{2(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{\sqrt{3}(\epsilon_1 - \epsilon_4)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{\sqrt{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{2(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{\sqrt{3}(\epsilon_2 + \epsilon_3 - 2\epsilon_4)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{(\epsilon_1 + 3\epsilon_4 - 4\epsilon_3)}{(\epsilon_1 - \epsilon_4)} \\ \frac{1}{2} \arctan \frac{(4\epsilon_2 - \epsilon_1 - 3\epsilon_4)}{\sqrt{3}(\epsilon_1 - \epsilon_4)} \end{cases}$	$\sigma_{\max} = \begin{cases} \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4)}{(1-\nu)} \pm \frac{1}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{4}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right] \\ \frac{E}{3} \left[\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)}{(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4)}{(1-\nu)} \pm \frac{1}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_2 + \epsilon_3 - 2\epsilon_4)^2 + \frac{1}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4)}{(1-\nu)} \pm \frac{1}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{1}{3}(4\epsilon_3 - \epsilon_1 - 3\epsilon_4)^2} \right] \\ \frac{E}{2} \left[\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_4)}{(1-\nu)} \pm \frac{1}{(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{1}{3}(4\epsilon_2 - \epsilon_1 - 3\epsilon_4)^2} \right] \end{cases}$

注：1. 线应变（包括主应变）及主应力取拉为正，压为负； φ 角由1轴逆时针转为正。
 2. 主方向角 φ 取值范围 $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ 。序号4和5算得主方位角对应哪个主应变分别与序号2、3的判断式相同。
 3. E, ν 为所测材料的弹性模量及泊松比。

表 12.5-6 电阻应变计测量残余应力的计算公式

序号	测量方法	被测残余应力状态及应变计布置	残余应力计算公式
1		残余应力方向已知的单向应力状态  (虚线为切割线,下同)	$\sigma = -E\varepsilon$
2	切割法	残余应力主方向已知的平面应力状态 	$\sigma_1 = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$ $\sigma_2 = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$
3		残余应力主方向未知的平面应力状态 	$\sigma_1 = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$ $\sigma_2 = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$ $\tau_{12} = -\frac{E}{2(1+\nu)}(2\varepsilon_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ $\sigma_{\max/\min} = -\frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1-\nu} \mp \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right]$ 主方向角 $\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$ 若 $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$ 由 1 转 φ 至 σ_{\min} $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ 由 1 转 φ 至 σ_{\max}
4	一次钻孔法	残余应力主方向未知的平面应力状态  σ_1, σ_2 为两主应力值(未规定哪个大), σ_1 的方向由 ε_1 转至 σ_1 的 φ 角确定, 顺时针为正	$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1(A + B\cos 2\varphi) - \varepsilon_3(A - B\cos 2\varphi)}{4AB\cos 2\varphi}$ $\sigma_2 = \frac{\varepsilon_3(A + B\cos 2\varphi) - \varepsilon_1(A - B\cos 2\varphi)}{4AB\cos 2\varphi}$ $\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$ 式中 $A = -\frac{(1+\nu)\beta^2}{2E}$ $B = -\frac{(1+\nu)}{2E} \left[\frac{4\beta^2}{(1+\nu)} - 3\beta^4 \right]$ $\beta = \frac{R_0}{R}$

注: 1. E 、 μ 分别为被测材料的弹性模量及泊松比。

2. 序号 3 中 φ 的取值范围为 $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$, 规定由 1 轴逆时针转为正。

3. 所测释放残余应变 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 及算得的残余应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_{\max} 、 σ_{\min} , 拉为正, 压为负。

4. 序号 4 算得 σ_1 或 σ_2 两主应力之一为零时即为单向应力状态。

5. 本表测量方法适用于残余应力沿厚度变化不大的平面应力状态。

2 光弹性法测量

2.1 光弹性材料的性能、配比及模型固化工艺

表 12.5-7 几种光弹性材料的主要参考性能

材料	性 能										
	室温下					临界温度下					
	条纹值 f_a / (kN/m)	比例 极限	抗拉 强度 MPa	弹性模量 E	泊松比 ν	条纹值 f_a / (kN/m)	比例 极限	抗拉 强度 MPa	弹性模量 E	泊松比 ν	临界 温度/ ℃
E-44 环 氧树脂	11.20	30~35	71~80	3200	0.36	0.29~ 0.39	0.98	1.27~ 1.47	21~27	0.48~ 0.5	110~ 135
CR39	15.4	20.3	48	1690	0.42	3.92~ 4.9	2.5~3		294~ 392	0.5	80~85
Homa- lite-100	23.6	48.3		3780	0.35						
聚碳酸 酯	6.86	34.5	46~54	2430	0.38	0.103	0.59	7.84	4.9	0.47~ 0.5	145
聚氨基甲 酸酯橡胶	0.176	0.14		2.94	0.46						

表 12.5-8 常用环氧树脂光弹性材料配比

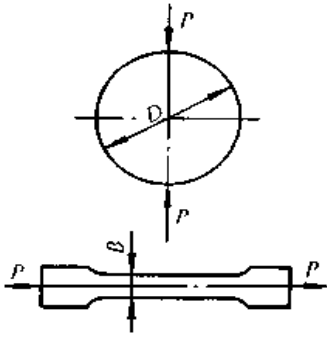
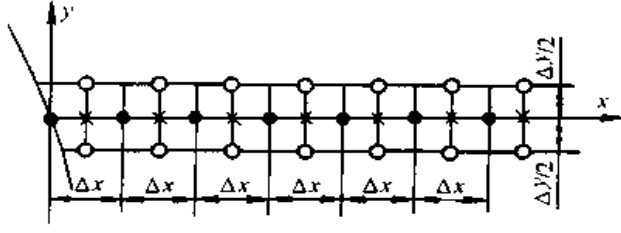
(一) 高温固化					(二) 室温固化			
原材料	环氧树脂	顺丁烯二 酸 酐	邻苯二甲 酸二丁脂	二甲基 苯 胺	原材料	环氧树脂	乙二胺	邻苯二甲 酸二丁脂
配比/份	100	30~35	0~5	0~0.5	配比/份	100	7~9	5~10

表 12.5-9 模型浇注和固化工艺

浇注 工艺	<p>将环氧树脂和固化剂在 60~70℃ 温度下预热，待固化剂溶化后，倒入环氧树脂中充分搅拌，然后注入模具，置于恒温箱按如下固化曲线（温度时间曲线）使模型固化</p>
固 化 曲 线	<p>对厚度不大于 10 mm 的平板模型采用一次固化法，其固化曲线为</p> <p>对三维光弹性模型，采用二次固化法，其固化曲线为</p>

2.2 光弹性法测量平面应力的基本计算公式

表 12.5-10 光弹性法测量平面应力的基本计算公式

序号	测量项目	计算公式	图示与说明
1	材料的应力条纹值	径向受压圆盘试件： $f_\sigma = \frac{8P}{\pi Nf_\sigma}$ 拉伸试件： $f_\sigma = \frac{P}{EN}$	
2	模型的边界应力与应力集中系数	自由边界： $\sigma_1, \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{h}$ 边界受已知法向应力： $\sigma_1, \sigma_2 = \pm \frac{Nf_\sigma}{h} - |p|$ 应力集中系数： $K = \frac{N_{max}f_\sigma}{h\sigma_0}$	算得的边界应力是 σ_1 或是 σ_2 需根据符号来确定，可采用如下“钉压法”：对被测点施加一微小法向压力，如条纹级数增加，则该点边界应力为第一主应力 σ_1 ，反之则为 σ_2 。也可用其他方法判断
3	内部应力（切应力差法）	$\tau_{xy} = \frac{Nf_\sigma}{2h} \sin 2\theta$ $\sigma_x = \sigma_{x0} - \sum_{ij} \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x$ $\sigma_y = \sigma_x - \frac{Nf_\sigma}{h} \cos 2\theta$ $\sigma_1, \sigma_2 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{f_\sigma}{h} N \right]$	 <p>●—σ_x 计算点 ○—τ_{xy} 计算点 ×—$\Delta \tau_{xy} / \Delta y$ 的计算点</p> <p>$\Delta \tau_{xy}$—沿 y 轴 $\pm \Delta y/2$ 两平行直线上计算点切应力 τ_{xy} 之差</p> <p>σ_{x0}—边界处坐标原点 x 向正应力，可由序号 2 边界主应力求得</p>

注：1. N —所测点处的等差线条纹级数。序号 1 中径向受压圆盘，计算式的 N 指圆盘中心处的条纹级数；
 θ —第一主应力 σ_1 与 x 轴的夹角，逆时针转为正，由等倾线获得；
 h —模型的厚度；
 σ_0 —应力集中处的名义计算应力。

2. 原型应力 σ_p 与测得模型应力 σ_m 之间的关系 $\sigma_p = \frac{F_p l_m h_m}{F_m l_p h_p} \sigma_m$ ，式中 F 为力载荷， l 为长度， h 为厚度，下标 m, p 分别表示模型和原型。

参考文献

- 1 李慎安编. 法定计量单位手册. 南京: 江苏科技出版社, 1984
- 2 杜荷聪、陈维新、张振威编. 计量单位及其换算. 北京: 计量出版社, 1990
- 3 数学手册编写组编. 数学手册. 北京: 人民教育出版社, 1979
- 4 北京矿业学院高等数学教研组编著. 数学手册. 北京: 煤炭工业出版社, 1976
- 5 日本机械学会编. 机械技术手册(上). 王崇宇译. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 6 徐灏主编. 机械设计手册(第一卷). 北京: 机械工业出版社, 1990
- 7 北京有色冶金设计院主编. 机械设计手册(第一卷). 第三版. 北京: 化学工业出版社, 1993
- 8 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册(基础理论卷). 第二版. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 9 南京工学院、西安交通大学主编. 理论力学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1986
- 10 刘鸿文主编. 材料力学(上、下册). 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1992
- 11 [苏] Г. С皮萨连柯等著. 材料力学手册. 宋俊杰、刘茂江译. 石家庄: 河北科学出版社, 1984
- 12 徐芝纶. 弹性力学(上、下册). 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1990
- 13 [美] R.J. 罗克等著. 应力应变公式. 汪一麟、汪一骏译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985
- 14 Н.С.АчЕРКАН 等 Лравочник Машиностроите Томз. Москва: Машгиз. 1962
- 15 西拉德著. 板的理论和分析. 陈太平等译. 北京: 中国铁道出版社, 1984
- 16 陈铁之、陈伯真. 弹性薄壳力学. 武汉: 华中工学院出版社, 1981
- 17 范钦珊. 轴对称应力分析. 北京: 高等教育出版社, 1985
- 18 B.G.Johnston 主编. 金属结构稳定性设计解说. 董其震等译. 北京: 中国铁道出版社, 1981
- 19 吴宗岱、陶宝祺主编. 应变电测原理及技术. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 20 天津大学材料力学教研室主编. 光弹性原理及测试技术. 北京: 科学出版社, 1982

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
13
篇

通用基础标准

主 编 杨树华 强 毅

编 写 杨树华 强 毅 于 源
明翠新 李 晓 滨 王 欣 玲
李 晓 评 钟 丹 华 戴 水 清
杨 光 耀 周 家 林 朱 剑 平

审 稿 李 骏 斌



中国机械工程学会
中国机械设计大典编委会

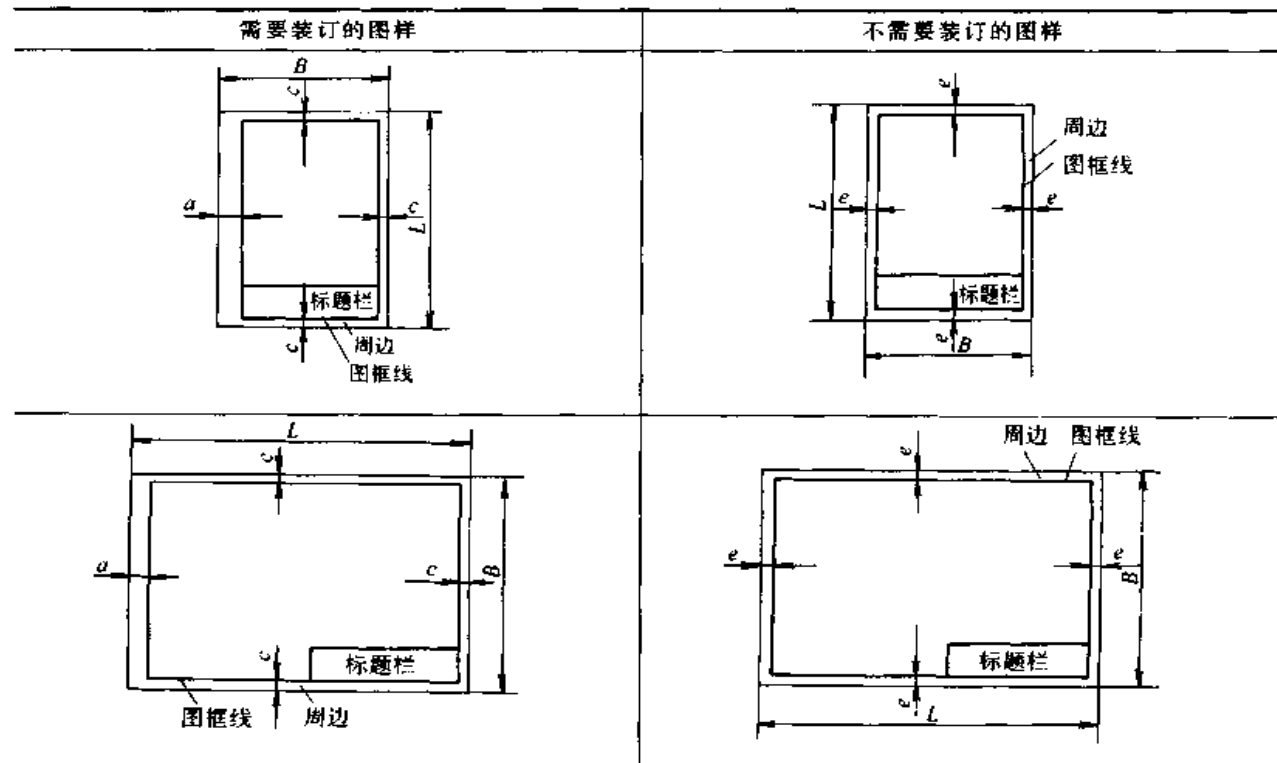
第1章 技术制图

1 基本规定

1.1 图框格式和图幅尺寸 (表 13.1-1) (GB/T 14689—1993)

表 13.1-1 图框格式和图幅尺寸

(mm)



基本幅面						加长幅面								
幅面代号	A0	A1	A2	A3	A4	第二选择		第三选择						
	幅面代号	尺寸 B×L		幅面代号	尺寸 B×L		幅面代号	尺寸 B×L						
宽度×长度 (B×L)	841×1189	594×841	420×594	297×420	210×297	A3×3	420×891	A0×2	1189×1682	A3×5	420×1486			
留装订边	装订边宽 a					25		A3×4	420×1189	A0×3	1189×2523	A3×6	420×1783	
	其他周边宽 c					10		A4×3	297×630	A1×3	841×1783	A3×7	420×2080	
						5		A4×4	297×841	A1×4	841×2378	A4×6	297×1261	
								A4×5	297×1051	A2×3	594×1261	A4×7	297×1471	
不留装订边	周边宽 e					20				A2×4	594×1682	A4×8	297×1682	
					10						A2×5	594×2102	A4×9	297×1892

注：1. 加长幅面是由基本幅面的短边成整数倍增加后得出；

2. 加长幅面的图框尺寸，按所选用的基本幅面大一号的图框尺寸确定。例如 A2×3 的图框尺寸，按 A1 的图框尺寸确定，即 e 为 20 (或 c 为 10)。

1.2 标题栏和明细栏 (图 13.1-1, 图 13.1-2) (GB/T 10609.1~10609.2—1989)

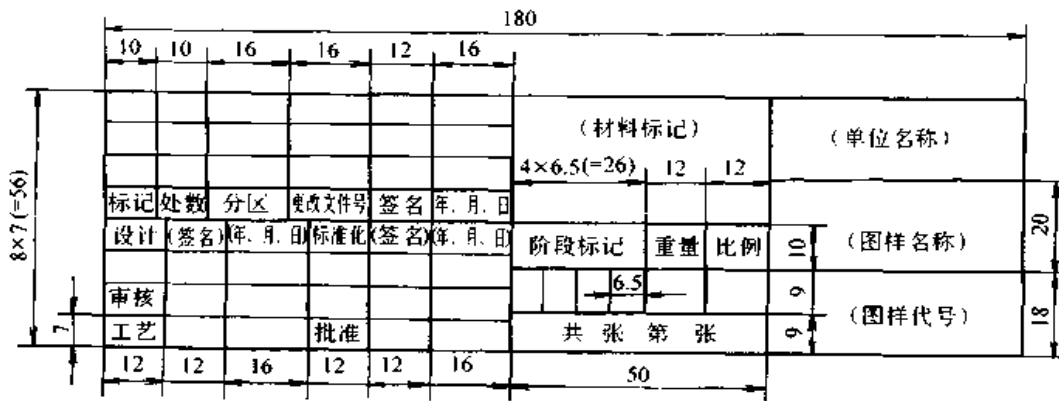


图 13.1-1 标题栏

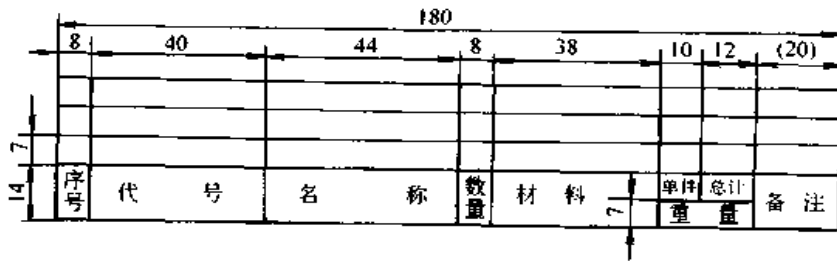


图 13.1-2 明细栏

1.3 比例 (表 13.1-2) (GB/T 14690—1993)

表 13.1-2 技术制图常用的比例

与原值比例	1:1	说 明
缩小的比例	1:2 1:5 1:10 1:2×10 ⁿ 1:5×10 ⁿ 1:1×10 ⁿ (1:1.5) (1:2.5) (1:3) (1:4) (1:6) (1:1.5×10 ⁿ) (1:2.5×10 ⁿ) (1:3×10 ⁿ) (1:4×10 ⁿ) (1:6×10 ⁿ)	1. 比例: 图中图形与其实物相应要素的线性尺寸之比 2. 原值比例: 比值为1的比例, 即1:1 3. 放大比例: 比值大于1的比例, 如2:1等 4. 缩小比例: 比值小于1的比例, 如1:2等 5. 当某个视图或剖视图需要采用不同比例时, 必须另行标注
放大的比例	5:1 2:1 5×10 ⁿ :1 2×10 ⁿ :1 1×10 ⁿ :1 (4:1) (2.5:1) (4×10 ⁿ :1) (2.5×10 ⁿ :1)	

注: 1. n 为正整数。

2. 带括号的为必要时允许采用的比例。

1.4 图线 (表 13.1-3~表 13.1-6) (GB/T 17450—1998、GB/T 4457.4—1984)

表 13.1-3 基本线型








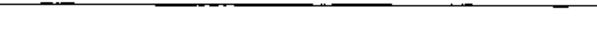

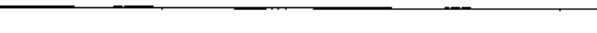
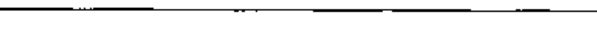

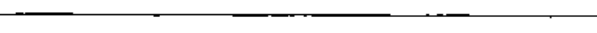

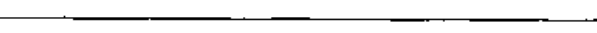
代码 No.	基本线型	名称
01		实线
02		虚线
03		间隔划线
04		点划线
05		双点划线
06		三点划线
07		点线
08		长划短划线
09		长划双短划线
10		划点线
11		双画单点线
12		画双点线
13		双画双点线
14		画三点线
15		双画三点线

表 13.1-4 基本线型变形




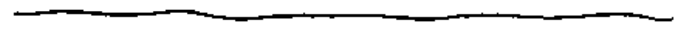
基本线型的变形	名称
	规则波浪连续线
	规则螺旋连续线
	规则锯齿连续线
	波浪线 (徒手连续线)

表 13.1-5 图线的组合

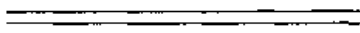
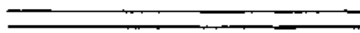
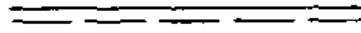

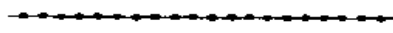
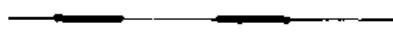



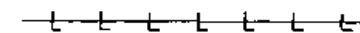
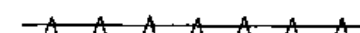
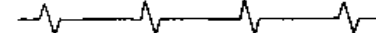

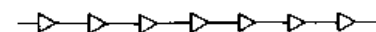


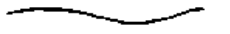
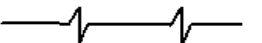
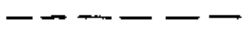
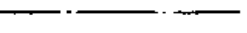

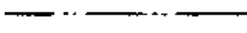
说 明	示 例	
两条或两条以上图线相互平行地排列	 	 
两条不同线型图线重叠地排列	1) 不同宽度图线的重叠	 <p>一条实线和点线的重叠</p>  <p>一条实线和间隔划线的重叠</p>
	2) 相邻排列	
	3) 两条相互平行的实线之间图形要素规则地分布	 <p>图形要素为涂黑圆</p>  <p>图形要素为涂黑梯形</p>
	4) 在实线上几何图形要素规则地分布	  <p>实线不间断</p>    <p>实线间断</p>

表 13.1-6 机械制图用图线

图线名称	图 线 型 式	图线代号	图线宽度	一 般 应 用
粗 实 线		A	d	A1 可见轮廓线 A2 可见过渡线
细 实 线		B	约 $d/2$	B1 尺寸线及尺寸界线 B2 剖面线 B3 重合剖面的轮廓线 B4 螺纹的牙底线及齿轮的齿根线 B5 引出线 B6 分界线及范围线 B7 弯折线 B8 辅助线 B9 不连续的同—表面的连线 B10 成规律分布的相同要素的连线
波 浪 线		C	约 $d/2$	C1 断裂处的边界线 C2 视图和剖视的分界线
双 折 线		D	约 $d/2$	D1 断裂处的边界线

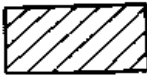
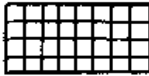
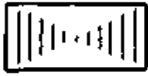


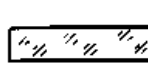
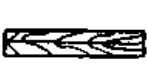

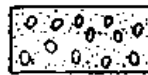
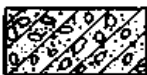




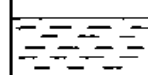
续表 13.1-6

图线名称	图线型式	图线代号	图线宽度	一般应用
虚线		F	约 $d/2$	F1 不可见轮廓线 F2 不可见过渡线
细点划线		G	约 $d/2$	G1 轴线 G2 对称中心线 G3 轨迹线 G4 节圆及节线
粗点划线		J	d	J1 有特殊要求的线或表面的表示线
双点划线		K	约 $d/2$	K1 相邻辅助零件的轮廓线 K2 极限位置的轮廓线 K3 坯料的轮廓线或毛坯图中制成品的轮廓线 K4 假想投影轮廓线 K5 试验或工艺用结构(成品上不存在的轮廓线) K6 中断线

注：图线宽度 d 系列为：0.13、0.18、0.35、0.5、0.7、1.0、1.4、2.0 mm。

1.5 剖面符号 (表 13.1-7、表 13.1-8) (GB/T 17453—1998、GB/T 4457.5—1984)

表 13.1-7 剖面符号的种类

金属材料 (已有规定剖面符号者除外)		线圈绕组元件		转子、电枢、变压器和电抗器等的迭钢片	
非金属材料 (已有规定剖面符号者除外)		型砂、填砂、粉末冶金、砂轮、陶瓷刀片、硬质合金刀片等		玻璃及供观察用的其他透明材料	
木质胶合板 (不分层数)		基础周围的泥土		混凝土	
钢筋混凝土		砖		格网 (筛网、过滤网等)	
木材 (纵剖面)		木材 (横剖面)		液体	

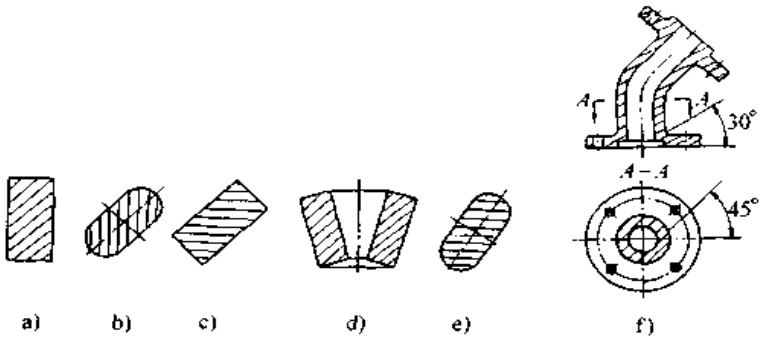
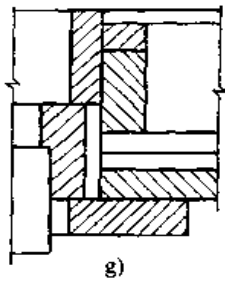
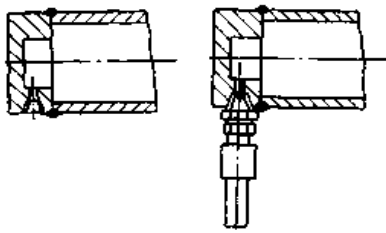
注：1. 剖面符号仅表示材料的类别，材料的名称和代号必须另行标注。

2. 迭钢片的剖面线方向应与束装中的迭钢片的方向一致。

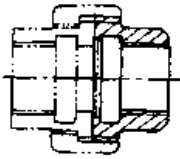

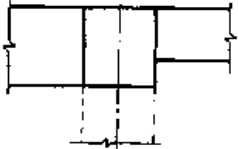

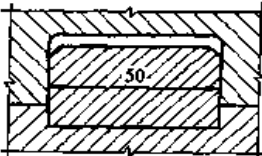
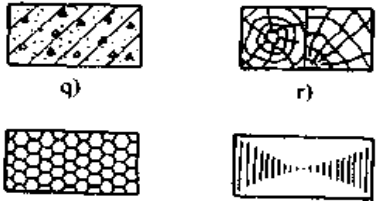
3. 液面用细实线绘制。

4. 木材、玻璃、液体、迭钢片、砂轮及硬质合金刀片等剖面符号，也可在外形视图中画出部分或全部作为材料标志。

表 13.1-8 剖面区域的表示法

说 明	画 法 示 例
<p>通用的剖面线应以适当宽度的细实线绘制，最好与主要轮廓或剖面区域的对称线成 45°，如右图 a~e。必要时，也可以采用右图 f) 的形式，采用 30° 或 60° 等角度绘制</p>	 <p>a) b) c) d) e) f)</p>
<p>通用剖面线的表示</p> <p>在装配图中，同一物体的各个剖面区域，其剖面线画法应一致。相邻物体的剖面线必须以不同的方向或以不同的间隔画出</p>	 <p>g)</p>
<p>当绘制接合件图样时，各零件的剖面符号应按上述的规定绘制，如右图 h。</p> <p>当绘制接合件与其他零件的装配图时，如接合件中各零件剖面符号相同，可作为一个整体画出，如右图 i。如不同，则应分别画出</p>	 <p>h) i)</p>

续表 13.1-8

说 明	画 法 示 例	
<p>相邻辅助零件 (或部件)一般不画 剖面符号。必要时, 也可画出</p>	 <p>j)</p>	
<p>允许在剖面区域 内用点阵或涂色代 替通用剖面线,如 右图 k 和 e</p>	 <p>k) l)</p>	
<p>通用剖面线 的表示</p>	<p>薄壁件的剖面区域 允许采用加粗轮廓 线表示</p>	 <p>m)</p>
<p>窄剖面区域(宽度 小于或等于2mm 的狭小剖面区域) 可全剖涂黑表示。 但相邻两剖面区域 之间必须留有不少于 0.7 mm 的间隙, 如右图 n、o</p>	 <p>n) o)</p>	
<p>剖面区域内注数字、 字母等处的剖面 线必须断开</p>	 <p>p)</p>	
<p>特定材料的表示</p>	<p>若需在剖面区域 中表示材料的类别 时,应采用特定的 剖面符号表示。必要 时,也可在图样上 用图例的方式说明</p>	 <p>q) r) s) t)</p>

2 图样画法

2.1 投影法 (表 13.1-9) (GB/T 14692—1993)

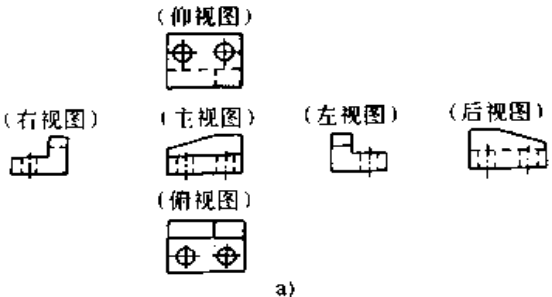
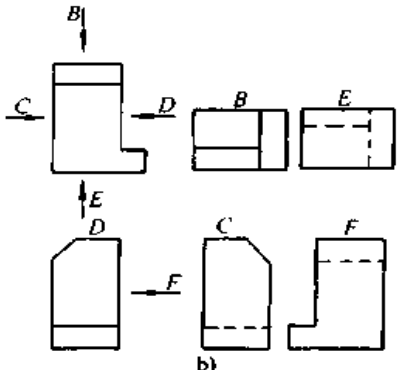
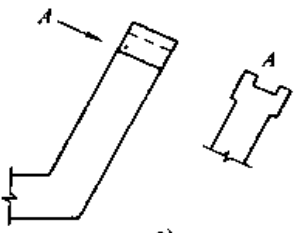
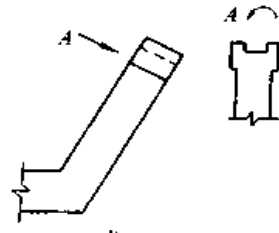
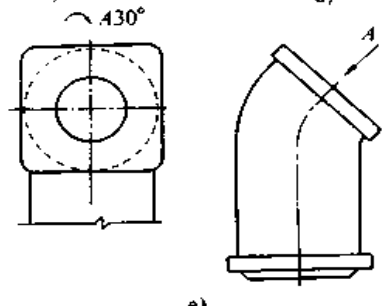
表 13.1-9 第一角投影法和第三角投影法

投影法	说 明	画 法
<p style="text-align: center;">第一角投影法</p>	<p>将物体置于投影体系中的第一角内,即将物体处于观察者与投影面之间进行投影,然后按规定展开投影面,六个基本投影面的展开方法见图 a,各视图的配置见图 b,第一角画法的识别符号见图 c</p>	
<p style="text-align: center;">第三角投影法</p>	<p>将物体置于投影体系中的第三角内,即将投影面处于观察者与物体之间进行投影,然后按规定展开投影面,六个基本投影面的展开方法见图 d,各视图的配置见图 e,第三角画法的识别符号见图 f</p>	

注: 绘制机械制图时,应以采用正投影法为主,以轴侧投影法及透视投影法为辅。

2.2 视图 (表 13.1-10) (摘自 GB/T 17451—1998、GB/T 4458.1—1984)

表 13.1-10 四种常用视图

分类	说 明	图 例
基本视图	<p>基本视图 机件向基本投影面投射所得的视图。六个基本视图的名称如下：</p> <p>主视图 由前向后投影所得的视图。</p> <p>左视图 由左向右投影所得的视图。</p> <p>俯视图 由上向下投影所得的视图。</p> <p>右视图 由右向左投影所得的视图。</p> <p>仰视图 由下向上投影所得的视图。</p> <p>后视图 由后向前投影所得的视图。</p> <p>在同一张图纸内，按图 a 配置视图时，一律不标注视图名称</p>	
向视图	<p>向视图 可以自由配置的视图。应在视图上方标出视图的名称“×” (“×”为大写拉丁字母)，在相应的视图附近用箭头指明投影方向，并注上同样的字母 (图 b)</p>	
斜视图	<p>斜视图 机件向不平行于任何基本投影面投射所得的视图。</p> <p>画斜视图时，必须在视图的上方标出视图的名称“×”，在相应的视图附近用箭头指明投射方向，并注上同样的字母 (图 c)。</p> <p>斜视图一般按投影关系配置 (图 c)，必要时也可配置在其他适当位置，在不引起误解时，允许将图形旋转，表示该视图名称的大写拉丁字母应靠近旋转符号的箭头端 (图 d)，也允许将旋转角度标注在字母之后 (图 e)。</p> <p>斜视图的断裂边界应以波浪线表示，当所表示的局部结构是完整的，且外轮廓又成封闭时，波浪线可省略不画</p>	  

分类	说 明	图 例
局部视图	<p>局部视图 将机件的某一部分向基本投影面投射所得的视图。</p> <p>画局部视图时，一般在局部视图上方标出视图的名称“×向”，在相应的视图附近用箭头指明投影方向，并注上同样的字母（图 f）。</p> <p>当局部视图按投影关系配置，中间又没有其他图形隔开时，可省略标注（图 g 中俯视图）。</p> <p>局部视图的断裂边界应以波浪线表示（图 f A 向视图）。当所表示的局部结构是完整的、且外轮廓又成封闭时，波浪线可省略不画（图 f B 向视图）</p>	
	<p>为了节省绘图时间和图幅，对称机件的视图可只画一半或四分之一，并在对称中心线的两端画出两条与其垂直的平行细实线（图 h 和图 i）</p>	

注：绘制机械图样优先采用第一角画法。必要时，也允许采用第三角画法。

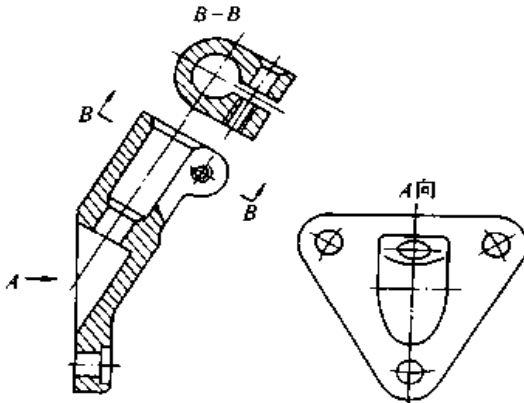
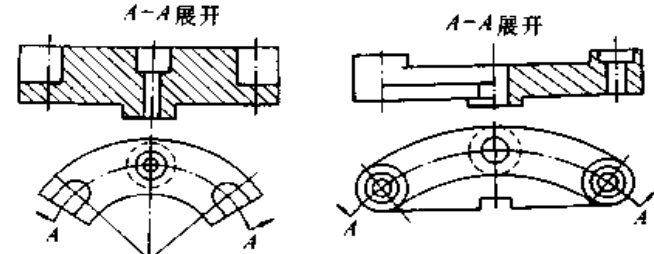
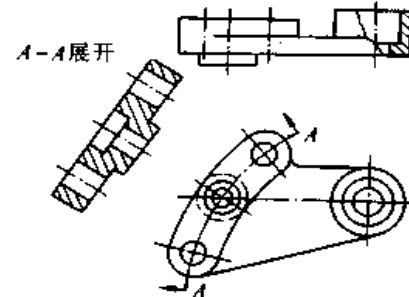
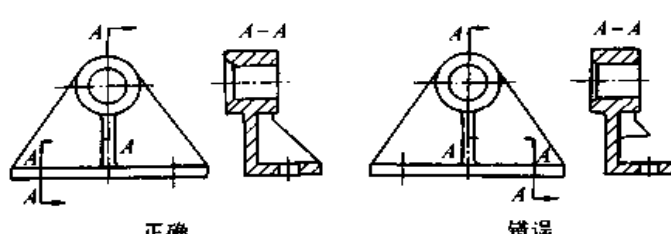
2.3 剖视图和断面图（摘自 GB/T 17452—1998、GB/T 44581.1—1984）

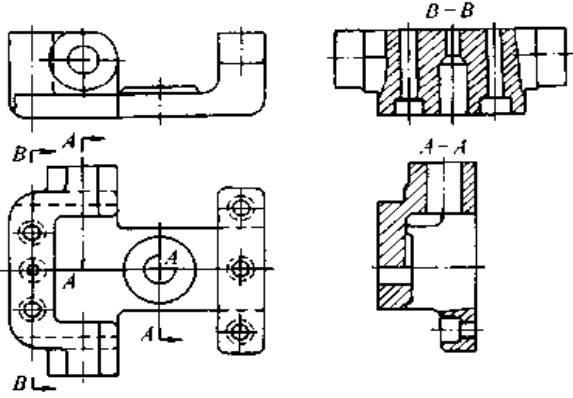
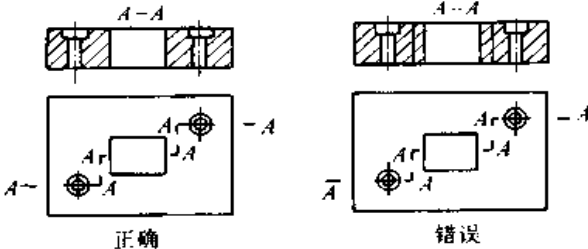
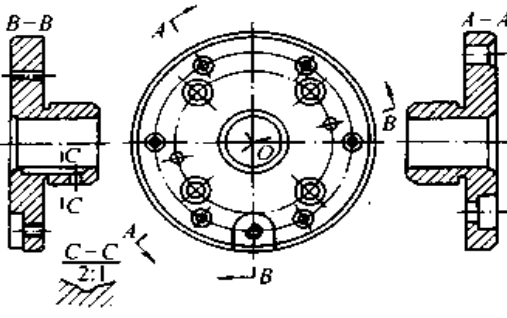
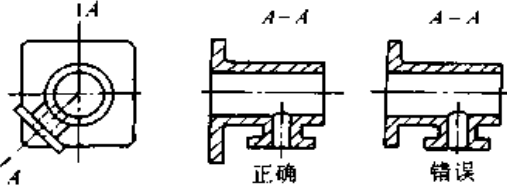
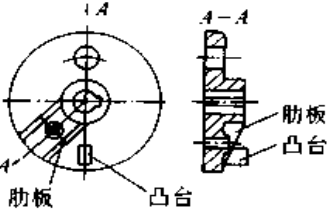
2.3.1 剖切面画法（表 13.1-11）

表 13.1-11 剖切面的画法

分类	说 明	图 例
单一剖切面	<p>单一剖切平面可获得全剖视图、半剖视图和局部剖视图</p>	

续表 13.1-11

分类	说 明	图 例
	<p>单一斜剖切面可获得全剖视图、半剖视图和局部剖视图</p>	
<p>单一剖切面</p>	<p>单一剖切柱面（通常应展开绘制）可获得全剖视图、半剖视图和局部剖视图</p>	
	<p>单一斜剖切柱面（通常应展开绘制）可获得全剖视图、半剖视图和局部剖视图</p>	
<p>几个平行的剖切平面</p>	<p>采用几个平行的剖切平面画剖视图时，要着重注意以下几个问题： 1. 要正确选择剖切平面的位置，在图形内不应出现不完整要素</p>	

分类	说 明	图 例
几个平行的剖切平面	<p>2. 当机件上的两个要素在图形上具有公共对称中心线或轴线时, 可以各画一半, 此时应以对称中心线或轴线为界 (A-A 剖切平面)</p>	
几个平行的剖切平面	<p>3. 采用几个平行的剖切平面剖开机件所绘制的剖视图规定要表示在同一个图形上, 所以不能在剖视图中画出各剖切平面的交线</p>	
几个相交的剖切平面	<p>采用几个相交的剖切平面画剖视图时, 要着重注意以下几个问题:</p> <p>1. 几个相交的剖切面必须保证其交线垂直于某一投影面</p>	
几个相交的剖切平面	<p>2. 绘制剖视图时, 应假想按剖切位置剖开机件, 然后将被剖切面剖开的结构及有关部分旋转到与选定的投影面平行再进行投射</p>	
几个相交的剖切平面	<p>3. 绘制剖视图时, 在剖切平面后的其他结构 (图中的凸台) 一般仍按原来的位置投射</p>	

续表 13.1-11

分类	说 明	图 例
几个相交的剖切平面	4. 当剖切后产生不完整要素时, 应将此部分按不剖绘制 (图中的臂板)	

2.3.2 剖视图画法 (表 13.1-12)

表 13.1-12 剖视图画法

分类	说 明	图 例
全剖视图	全剖视图 用剖切面完全剖开机件所得的剖视图 (图 a、b)	
半剖视图	<p>半剖视图 当机件具有对称平面时, 在垂直于对称平面的投影面上投影所得的图形, 可以对称中心线为界, 一半画成剖视, 另一半画成视图 (图 c、d)。</p> <p>机件的形状接近对称, 且不对称部分已另有图形表达清楚时, 也可画成半剖视 (图 d)</p>	

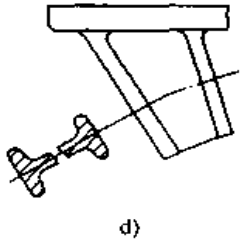
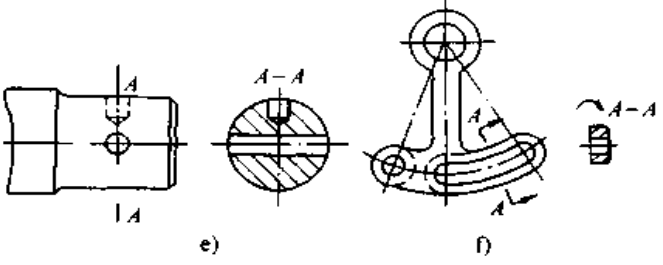
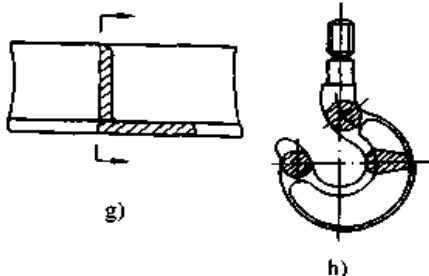
分类	说 明	图 例
局 部 剖 视 图	<p>局部剖视图 用剖切平面局部地剖开机件所得的剖视图 (图 e、f)。</p> <p>局部剖视图用波浪线分界, 波浪线不应和图样上其他图线重合。当被剖结构为回转体时, 允许将该结构的中心线作为局部剖视与视图的分界线 (图 g)</p>	

2.3.3 断面图画法 (表 13.1-13)

表 13.1-13 断面图画法

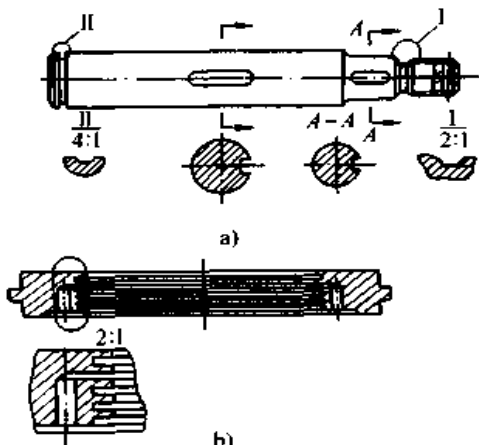
分类	说 明	图 例
移	<p>移出断面的轮廓线用粗实线绘制, 应尽量配置在剖切符号或剖切平面迹线的延长线上 (图 a)</p>	
出 断 面	<p>必要时可将移出断面配置在其他适当位置。在不引起误解时, 允许将图形旋转 (图 b)</p> <p>当断面图形对称时, 也可画在视图的中断处 (图 c)</p>	

续表 13.1-13

分类	说 明	图 例
移出断面	<p>由两个或多个相交剖切平面剖切得出的移出断面，中间一般应断开（图 d）</p>	 <p style="text-align: center;">d)</p>
断面	<p>当剖切平面通过回转面形成的孔或凹坑的轴线时，这些结构按剖视绘制（图 e）。</p> <p>当剖切平面通过非圆孔，会导致出现完全分离的两个断面时，则这些结构应按剖视绘制（图 f）</p>	 <p style="text-align: center;">e) f)</p>
重合断面	<p>重合断面的轮廓线用细实线绘制，当视图中的轮廓线与重合断面的图形重叠时，视图中的轮廓线仍应连续画出，不可间断（图 g、h）</p>	 <p style="text-align: center;">g) h)</p>

2.3.4 局部放大图画法（表 13.1-14）

表 13.1-14 局部放大图画法

说 明	图 例
<p>局部放大图可画成视图、剖视、断面，它与被放大部分的表达方式无关（图 a）。局部放大图应尽量配置在被放大部位的附近。</p> <p>绘制局部放大图时，除螺纹牙型、齿轮和链轮的齿形外，应用细实线圈出被放大的部位。</p> <p>当同一机件上有几个被放大的部分时，必须用罗马数字依次标明被放大的部位，并在局部放大图的上方标注相应的罗马数字和采用的比例（图 a）。</p> <p>当机件上被放大部分仅一个时，在局部放大图上只需注明所采用的比例（图 b）</p>	 <p style="text-align: center;">a) b)</p>

说 明	图 例
<p>同一机件上，由不同的部位得到相同的局部放大图时，只需绘制一个局部放大图（图 c）。</p> <p>必要时可以采用几个视图表达同一个被放大部分的结 构（图 d）。</p>	

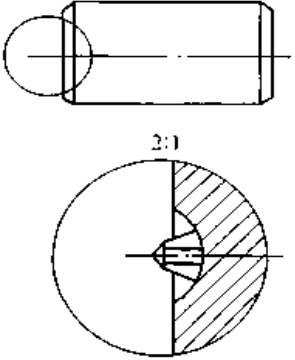
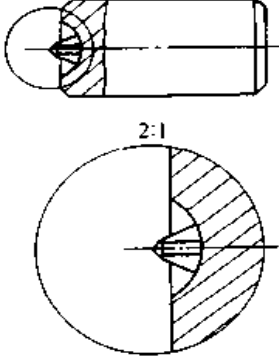
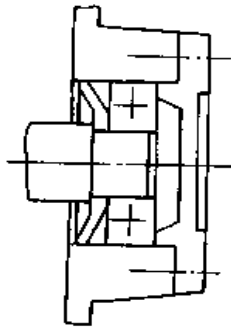
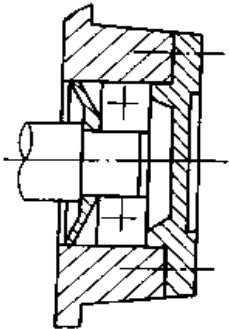
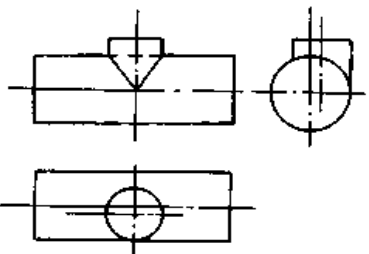
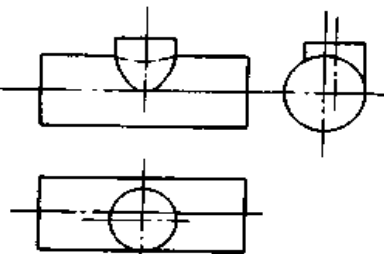
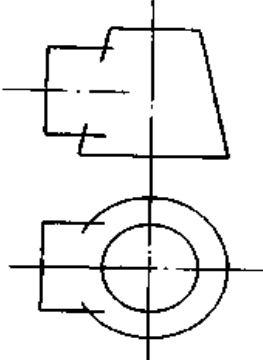
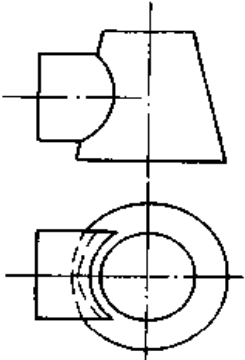
局
部
放
大
图
画
法
与
标
注

2.4 简化画法（表 13.1-15）（GB/T 16675.1—1996）

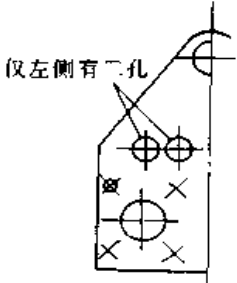
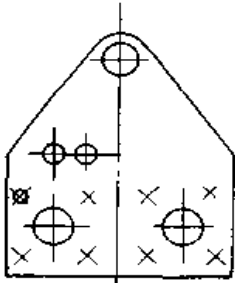
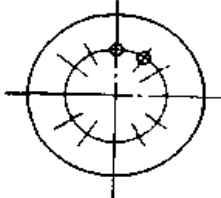
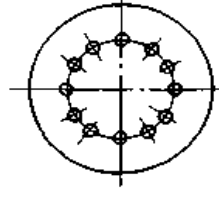
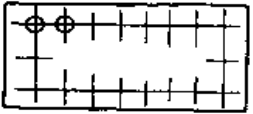
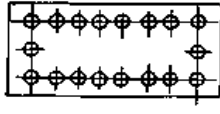
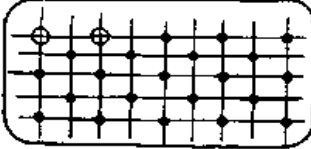
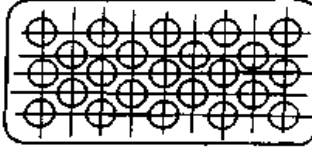
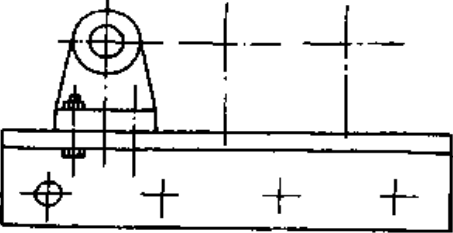
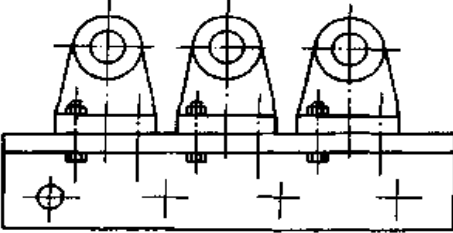
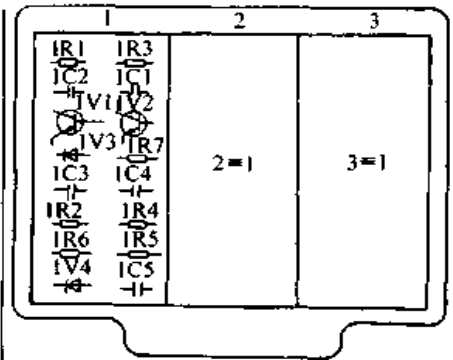
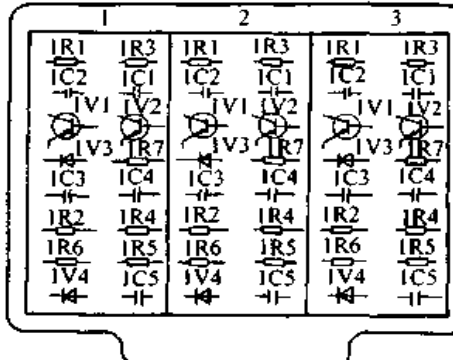
表 13.1-15 简化画法

简 化 后	简 化 前	说 明
<p>零件 1 (LH) 如图 零件 2 (RH) 对称</p>	<p>零件 1 (LH) 零件 2 (RH)</p>	<p>对于左右手零件和装配件，允许仅画出其中一件，另一件则用文字说明，其中“LH”为左件，“RH”为右件</p>

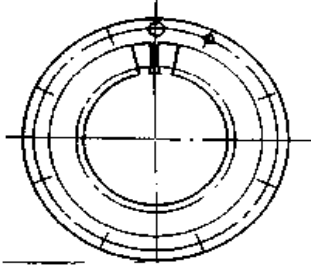
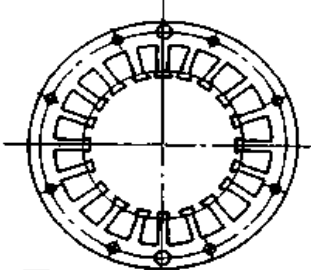
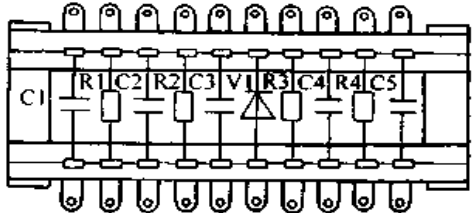


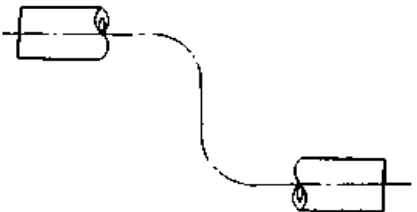
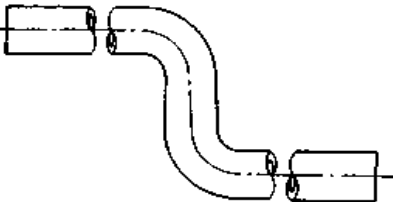
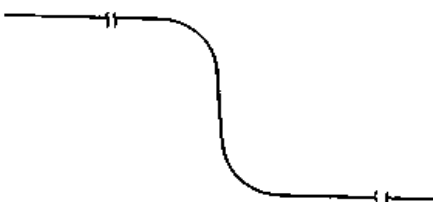
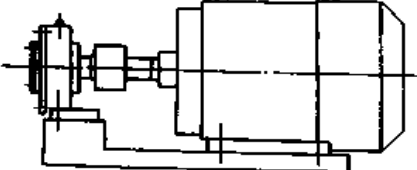
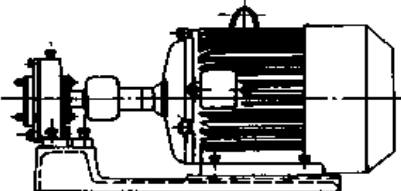
续表 13.1-15

简化后	简化前	说明
		<p>在局部放大图表达完整的前提下, 允许在原视图中简化被放大部位的图形</p>
		<p>在不致引起误解的情况下, 剖面符号可省略</p>
		<p>在不致引起误解时, 图形中的过渡线、相贯线可以简化, 例如用圆弧或直线代替非圆曲线</p>
		<p>也可采用模糊画法表示相贯线</p>

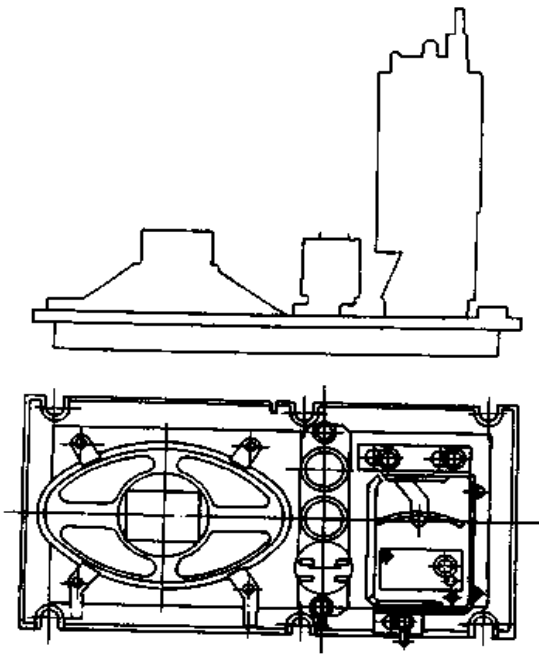
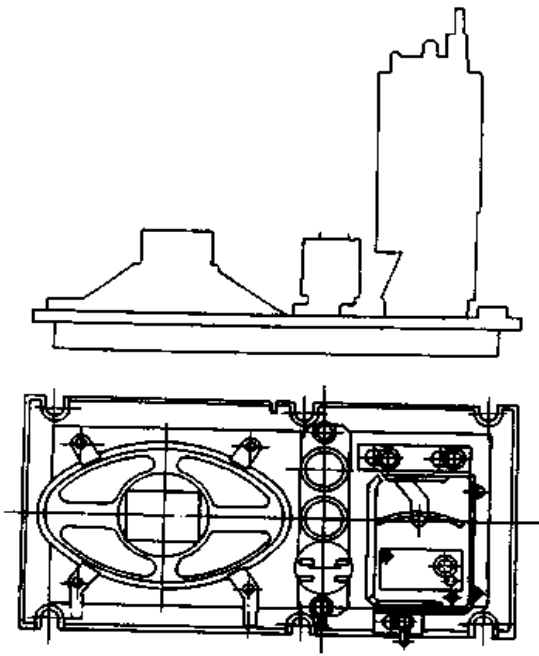
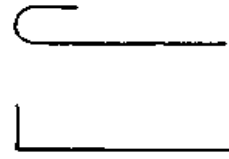
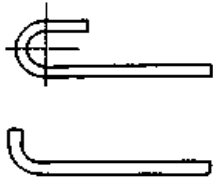


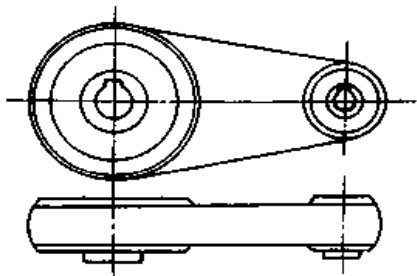
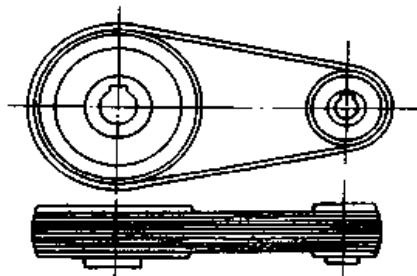
续表 13.1-15

简化后	简化前	说明
 <p>仅左侧有二孔</p>		<p>基本对称的零件仍可按对称零件的方式绘制, 但应对其中不对称的部分加注说明</p>
		<p>若干直径相同且成规律分布的孔, 可以仅画出一个或少量几个, 其余只需用细点划线或“◆”表示其中心位置</p>
		<p>若干直径相同且成规律分布的孔, 可以仅画出一个或少量几个, 其余只需用细点划线或“◆”表示其中心位置</p>
		<p>若干直径相同且成规律分布的孔, 可以仅画出一个或少量几个, 其余只需用细点划线或“◆”表示其中心位置</p>
		<p>对于装配图中若干相同的零部件组, 可仅详细地画出一组, 其余只需用细点划线表示出其位置</p>
		<p>对于装配图中若干相同的单元, 可仅详细地画出一组, 其余可采用如左图(简化后)所示的方法表示</p>

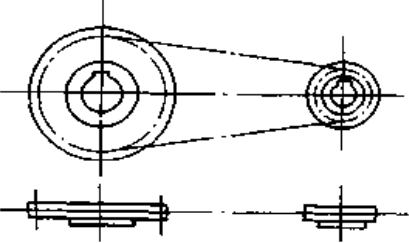
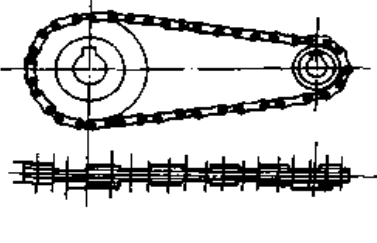
续表 13.1-15

简化后	简化前	说明
		<p>当机件具有若干相同结构（如齿、槽等），并按一定规律分布时，只需画出几个完整的结构，其余用细实线联接。在零件图中则必须注明该结构的总数</p>
		<p>仅以焊接固定而无其他紧固工序的电子元器件，可用 GB/T4728.2 ~ 4728.8 中规定的图形符号绘制</p>
		<p>软管接头可参照左图（简化后）所示的方法绘制</p>
		<p>管子可仅在端部画出部分形状，其余用细点画线画出其中心线</p>
		<p>管子可用与管子中心线重合的单根粗实线表示</p>
		<p>在能够清楚表达产品特征和装配关系的条件下，装配图可仅画出其简化后的轮廓</p>

续表 13.1-15

简化后	简化前	说明
		<p>已在一个视图中表示清楚的产品组成部分，在其他视图中可仅画出其外形轮廓</p>
		<p>钢筋与钢箍图可用单根粗实线表示</p>
		<p>钢筋与钢箍图可用单根粗实线表示</p>
		<p>在装配图中，可用粗实线表示带传动中的带；用细点画线表示链传动中的链。必要时，可在粗实线或细点画线上绘制出表示带</p>

续表 13.1-15

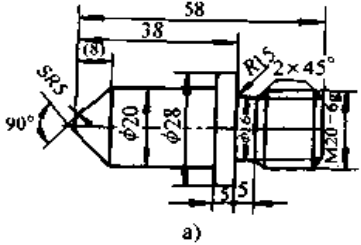
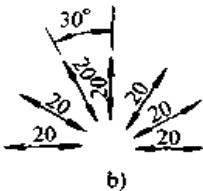
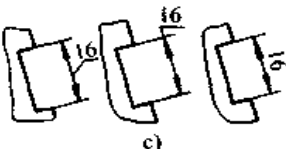
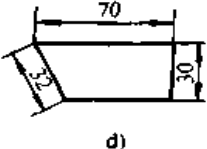
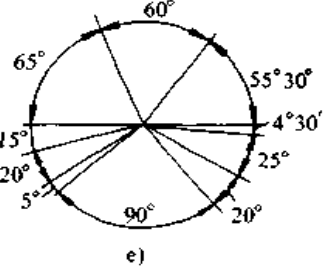
简化后	简化前	说明
		类型或链类型的符号

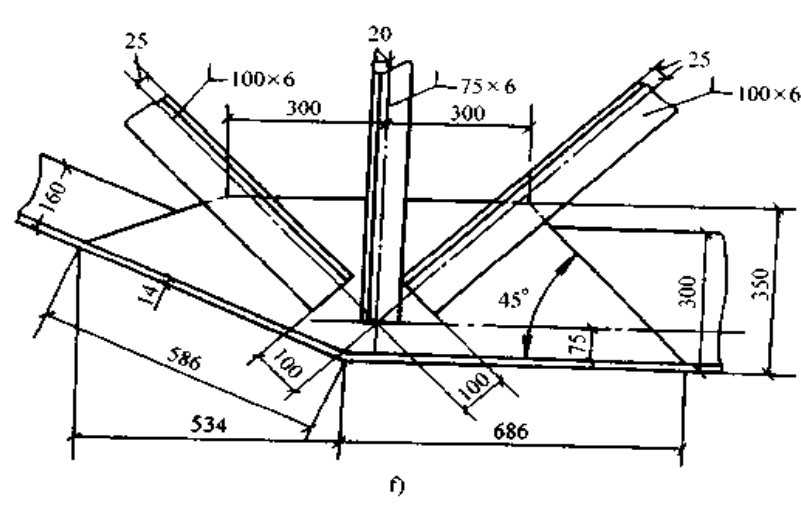
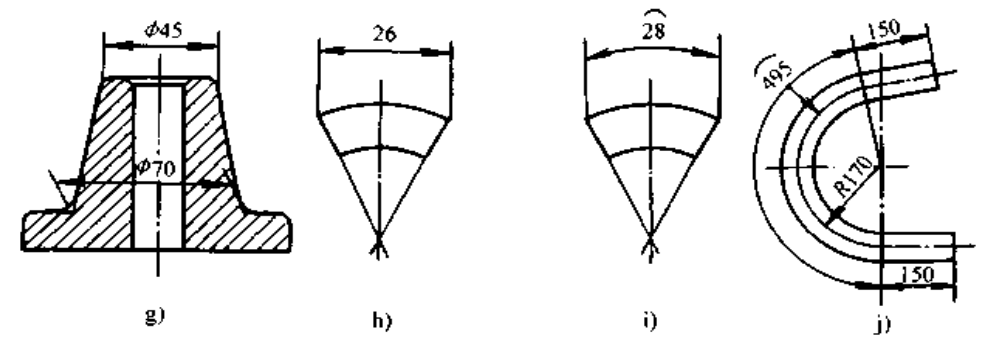
3 注法

3.1 尺寸注法 (GB/T 4458.4—1984)

3.1.1 标注尺寸的三要素 (表 13.1-16)

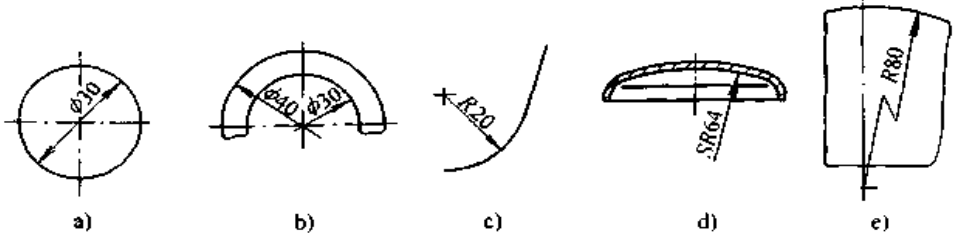
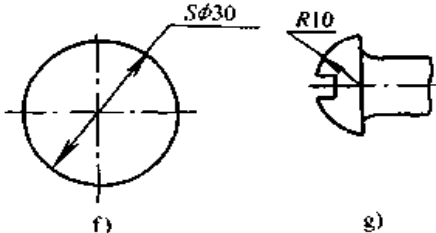
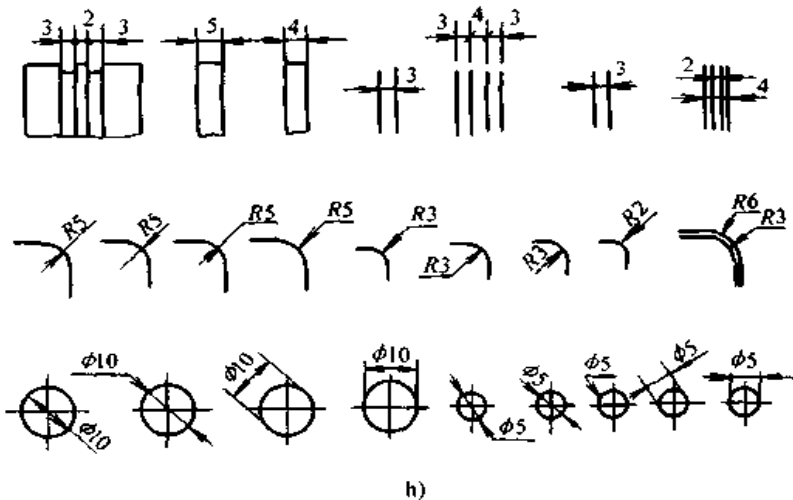
表 13.1-16 标注尺寸的三要素


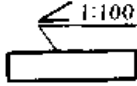
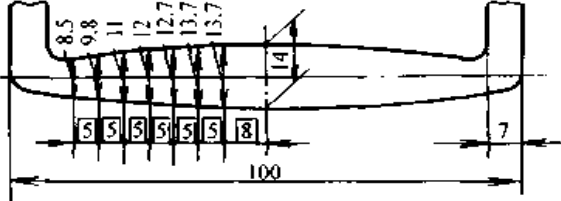
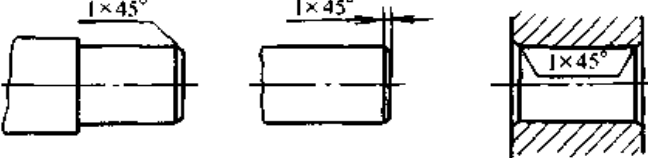
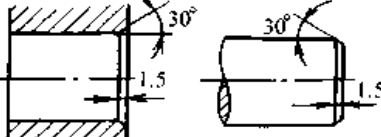
标注要素	说 明 及 图 例
线性尺寸的尺寸数字	<p>线性尺寸的数字一般应注写在尺寸线的上方，也允许注写在尺寸线的中断处 (图 a)</p> <p>线性尺寸的数字方向一般应采用图 b 所示方向注写，并尽可能避免在图示 30° 范围内标注尺寸。当无法避免在 30° 范围内标注尺寸，可按图 c 的形式标注</p> <p>在不致引起误解时，也允许采用对非水平方向尺寸，其数字也可水平地注写在尺寸线中断处 (图 d)</p> <p>在一张图样中应尽可能采用一种标注方法</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> </div> </div>
角度尺寸的尺寸数字	<p>角度尺寸数字一律写成水平方向，一般注写在尺寸线的中断处，必要时注写在尺寸线的上方或引出标注 (图 e)</p> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> </div>

标注要素	说 明 及 图 例
<p>尺 寸 线</p>	<p>尺寸线用细实线绘制。尺寸线不能用其他图线代替，一般也不得与其他图线重合或画在它们的延长线上</p> <p>标注线性尺寸时，尺寸线必须与所标注的线段平行</p> <p>尺寸线的终端有箭头（图 a）和斜线（图 f）两种形式，当尺寸线终端采用斜线形式时，尺寸线与尺寸界线必须相互垂直（图 f）</p> <p>当尺寸线与尺寸界线相互垂直时，同一张图样中只能采用一种尺寸终端的形式。当采用箭头时，在地位不够的情况下，允许用圆点（图 a）或斜线代替箭头</p>  <p style="text-align: center;">f)</p>
<p>尺 寸 界 线</p>	<p>尺寸界线用细实线绘制，并应由图形的轮廓线、轴线、对称中心线处引出。也可利用轮廓线、轴线、对称中心线作尺寸界线（图 a）</p> <p>尺寸界线一般应与尺寸线垂直，必要时才允许倾斜。在光滑过渡处标注尺寸时，必须用细实线将轮廓线延长，从它们的交点处引出尺寸界线（图 g）</p> <p>标注角度的尺寸界线应沿径向引出。标注弦长或弧长的尺寸界线应平行于该弦的垂直平分线（图 h、i），当弧度较大时，可沿径向引出（图 j）</p>  <p style="text-align: center;">g) h) i) j)</p>

3.1.2 有关规定注法 (表 13.1-17)

表 13.1-17 有关规定注法

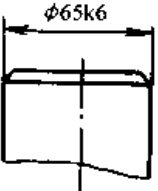
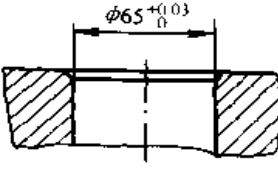
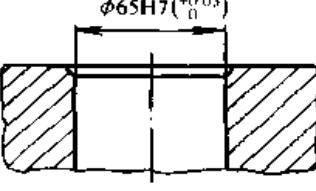
标注对象	说 明 及 图 例
直径、半径的注法	<p>标注直径时,应在尺寸数字前加注符号“ϕ”(图 a、b);标注半径时,应在尺寸数字前加注符号“R”(图 c、e)</p> <p>圆的直径和圆弧半径尺寸线的终端应画成箭头,并按图 a、b、c、d、e 所示方式标注</p> <p>当圆弧的半径过大或在图纸范围内无法标出其圆心位置时,可按图 d 的形式标注。若不需要标出其圆心位置时,可按图 e 的形式标注</p> 
球面直径、半径注法	<p>标注球面直径或半径时,应在符号“ϕ”或“R”前加注符号“S”(图 d、f)</p> <p>对于螺钉、铆钉的头部、轴(包括螺杆)的端部等,在不致引起误解的情况下,可以省去“S”字(图 g)</p> 
小尺寸的注法	<p>在没有足够的位置画箭头或注写尺寸数字时,可按图 h 的形式标注</p> 

标注对象	说 明 及 图 例	
斜度注法	斜度符号的方向应与斜度的方向一致 (图 k、l) <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>k)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>l)</p> </div> </div>	
曲线轮廓注法	当表示曲线轮廓上各点的坐标时, 可将尺寸线或它的延长线作尺寸界线 (图 m) <div style="text-align: center;">  <p>m)</p> </div>	
倒角注法	45°倒角的标注形式 (图 n) <div style="text-align: center;">  <p>n)</p> </div>	非 45°倒角的标注形式 (图 o) <div style="text-align: center;">  <p>o)</p> </div>

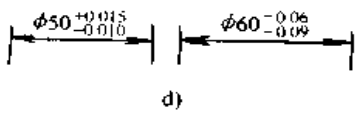
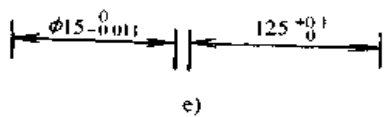
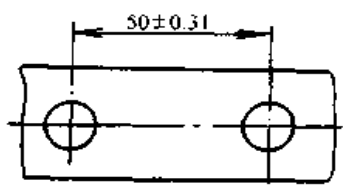
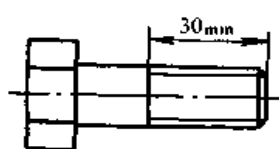
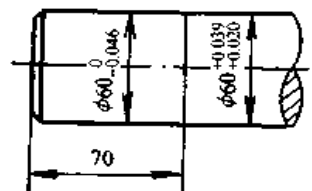
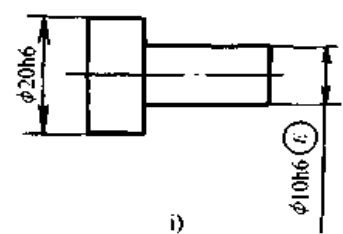
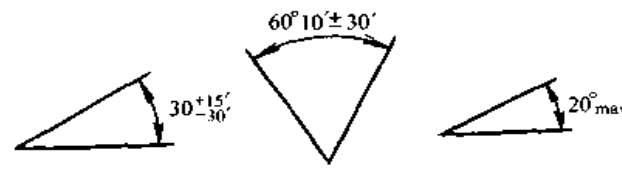
3.2 尺寸公差与配合注法

3.2.1 零件图中尺寸公差注法 (表 13.1-18)

表 13.1-18 零件图中尺寸公差注法

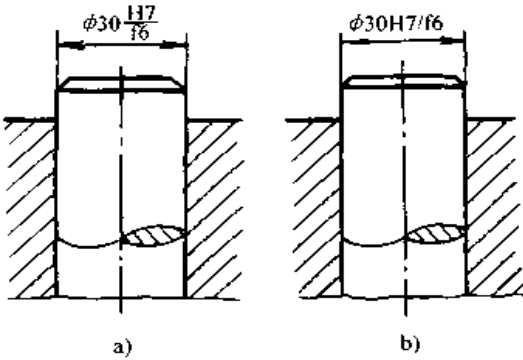
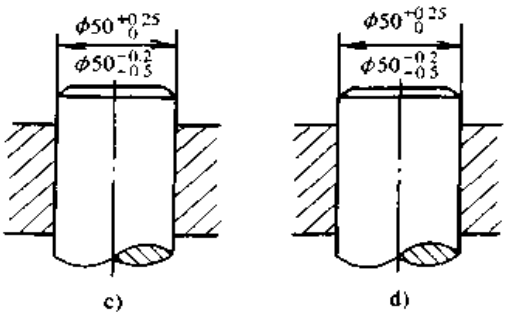
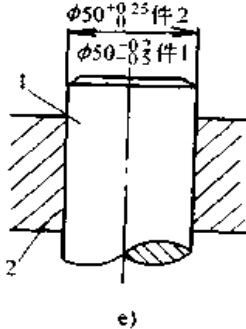
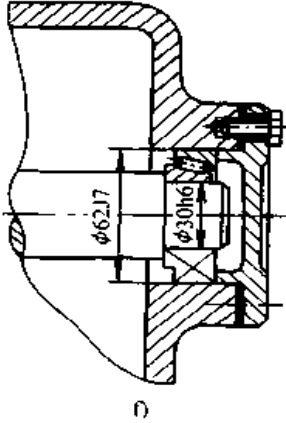
标注对象	说 明 及 图 例		
线性尺寸的公差标注形式	当采用公差带代号标注线性尺寸的公差时, 公差带代号应注在基本尺寸右边 (图 a) <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> </div>	当采用极限偏差标注线性尺寸公差时, 上偏差应注在基本尺寸右上方, 下偏差应与基本尺寸注在同一底线上 (图 b) <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> </div>	当要求同时标注公差带代号和相应的极限偏差时, 则后者应加圆括号 (图 c) <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> </div>

续表 13.1-18

标注对象	说 明 及 图 例		
<p>线性尺寸的公差标注形式</p>	<p>当标注极限偏差时，上下偏差的小数点必须对齐，小数点后的位数也必须相同（图 d）</p>  <p style="text-align: center;">d)</p>	<p>当上偏差或下偏差为“零”时，用数字“0”标出，并与下偏差或上偏差的小数点前的个位数对齐（图 e）</p>  <p style="text-align: center;">e)</p>	<p>当公差带相对于基本尺寸对称地配置即两个偏差相同时，偏差只需注写一次，并应在偏差与基本尺寸之间注出符号“±”，且两者数字高度相等（图 f）</p>  <p style="text-align: center;">f)</p>
<p>线性尺寸公差的附加符号注法</p>	<p>当尺寸仅需要限制单个方向的极限时，应在该极限尺寸的右边加注符号“max”或“min”（图 g）（实际尺寸只要不超过这个极限值都符合要求）</p>  <p style="text-align: center;">g)</p>	<p>同一基本尺寸的表面，若具有不同的公差时，应用细实线分开，并分别注出公差（图 h）</p>  <p style="text-align: center;">h)</p>	<p>如果要素的尺寸公差和形位公差的关系遵循包容原则时，应在尺寸公差的右边加注符号“Ⓔ”（图 i）</p>  <p style="text-align: center;">i)</p>
<p>角度公差的标注</p>	<p>角度公差标注的基本规则与线性尺寸公差的标注方法相同（图 j）</p>  <p style="text-align: center;">j)</p>		

3.2.2 装配图中配合代号及极限偏差注法 (表 13.1-19)

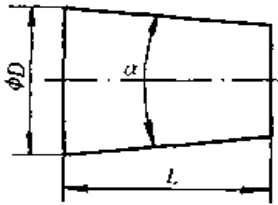
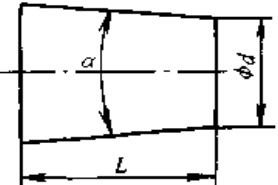
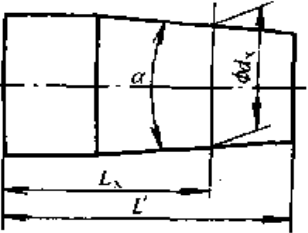
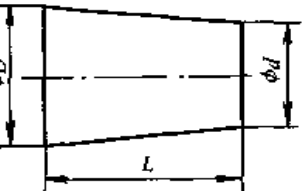
表 13.1-19 装配图中配合代号及极限偏差注法

标注对象	说 明 及 图 例	
标注配合代号	<p>在装配图中标注线性尺寸的配合代号时, 必须在基本尺寸的右边用分数的形式注出, 分子为孔的公差代号, 分母为轴的公差代号 (图 a), 必要时也允许按图 b 的形式标注</p> 	
标注极限偏差	<p>在装配图中标注相配零件的极限偏差时, 孔的基本尺寸及极限偏差写在尺寸线上方, 轴的基本尺寸及极限偏差注写在尺寸线的下方 (图 c) 必要时也允许按图 d 的形式标注</p> 	
特殊情况标注	<p>当基本尺寸相同的多个轴 (孔) 与同一个孔 (轴) 相配合而又必须在图外标注其配合时, 为了明确各自的配合对象, 可在公差带代号或极限偏差之后加注装配件的序号 (图 e)</p> 	<p>标注标准件、外购件与零件 (轴或孔) 的配合代号时, 可以仅标注相配零件的公差代号 (图 f)</p> 

3.3 圆锥的尺寸和公差注法(表 13.1-20、表 13.1-21) (GB/T 15754—1995)

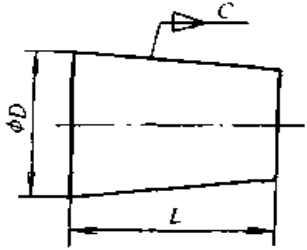
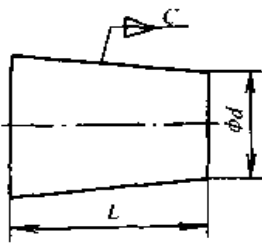
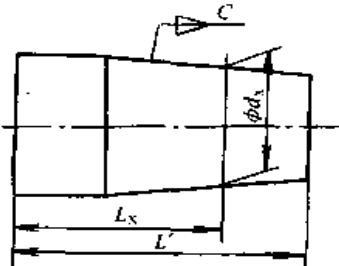
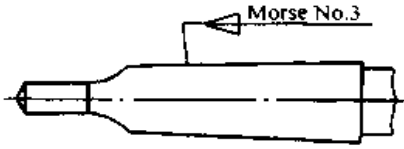
3.3.1 圆锥尺寸注法 (表 13.1-20)

表 13.1-20 圆锥尺寸注法

标注用特征参数	图 例
$\phi D, L, \alpha$	
$\phi d, L, \alpha$	
$\phi d_x, L_x, L', \alpha$	
$\phi D, \phi d, L$	

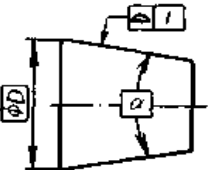
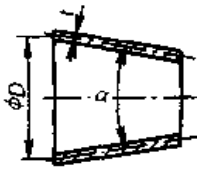
3.3.2 锥度注法 (表 13.1-21)

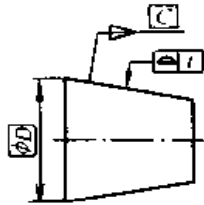
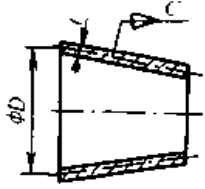
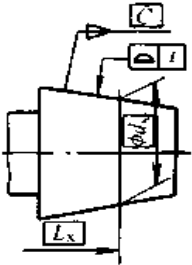
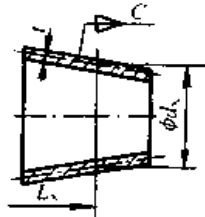
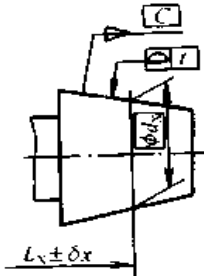
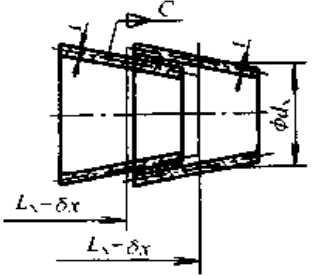
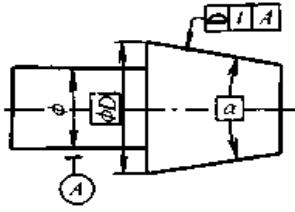
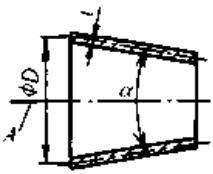
表 13.1-21 锥度注法

标注用特征参数	图 例
$\phi D, C, L$	
$\phi d, C, L$	
$\phi d_x, C, L_x, L'$	
标准圆锥	

3.3.3 有配合要求的圆锥公差注法 (表 13.1-22、表 13.1-23)

表 13.1-22 面轮廓度注法

注法	图 例	
	图 样 上 标 注	说 明
给定圆锥角的圆锥公差注法		

注法	图 例	
	图 样 上 标 注	说 明
给定锥度的圆锥公差注法		
给定圆锥轴向位置的圆锥公差注法		
给定圆锥轴向位置公差的圆锥公差注法		
与基准线有关的圆锥公差注法 (同时确定同轴关系)		

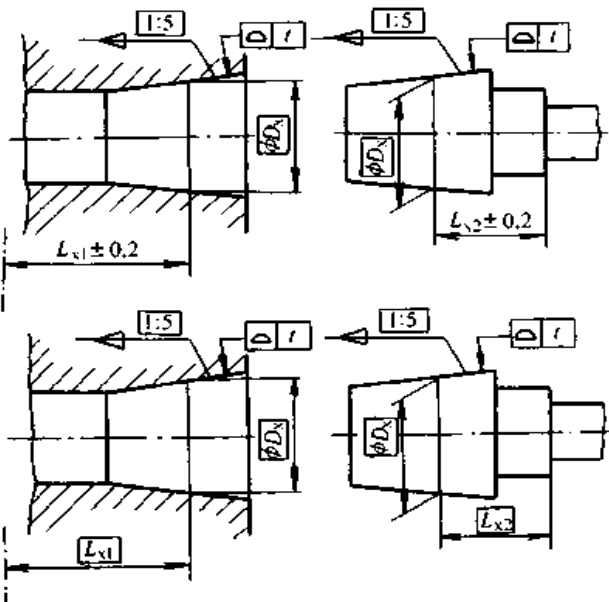
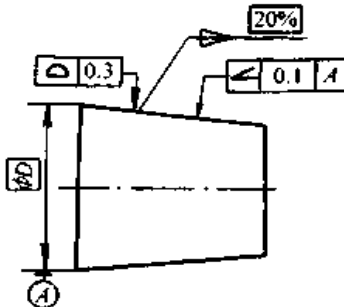
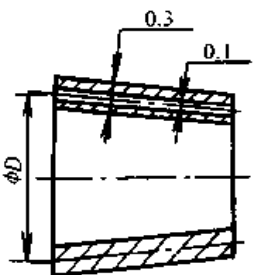
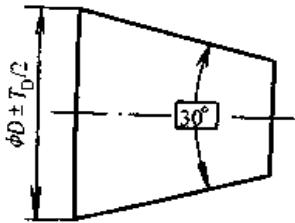
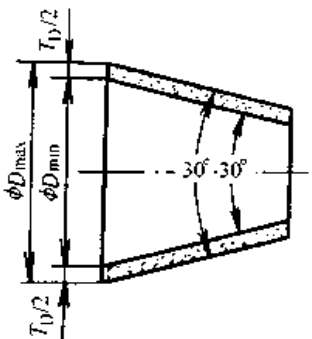
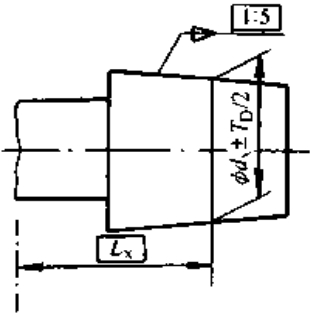
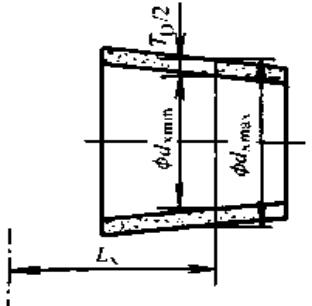
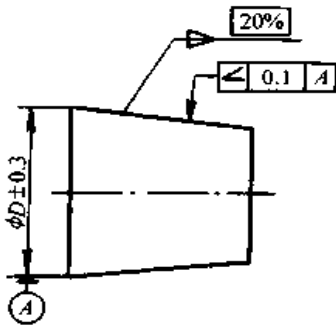
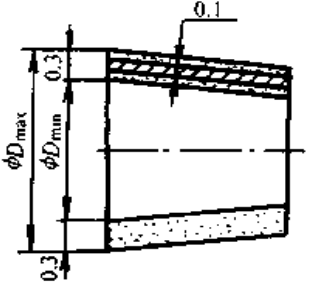
注法	图 例 图 样 上 标 注	说 明
<p>相配合的圆锥公差注法</p>		<p>标注两个相配圆锥的尺寸及公差时,应确定:</p> <ul style="list-style-type: none"> 具有相同的锥度和锥角 标注尺寸公差的圆锥直径的基本尺寸应一致 确定直径和位置的理论正确尺寸与两装配件的基准平面有关
<p>限定条件:如给出形位公差要求和有关技术要求(如量规涂色检验,接触率大于80%)等,以保证圆锥实际要素不超过给定的公差带</p>		 <p>注: 倾斜度公差带(包括素线的直线度)在轮廓度公差带内浮动</p>

表 13.1-23 基本锥度法

注法	图 例	
	图 样 上 标 注	说 明
给定圆锥直径公差 T_D		
给定截面圆锥直径公差 T_{DS}		
给定圆锥的形状公差 T_F		

注：倾斜度公差带（包括素线的直线度）可位于尺寸公差带的任何位置

续表 13.1-23

注法	图 例	
	图 样 上 标 注	说 明
相配合圆锥的公差注法		<p>标注两个相配圆锥的尺寸及公差时,应确定:</p> <ul style="list-style-type: none"> 具有相同的锥度和锥角 标注尺寸公差的圆锥直径的基本尺寸应一致 确定直径和位置的理论正确尺寸与两装配件的基准平面有关

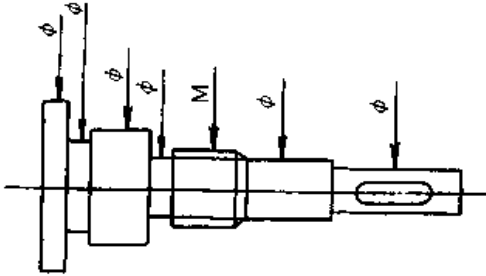
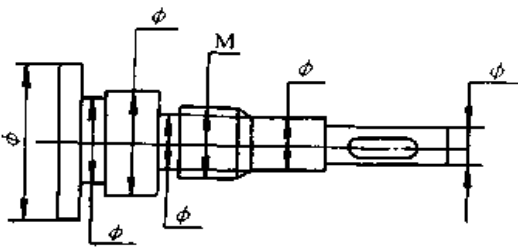
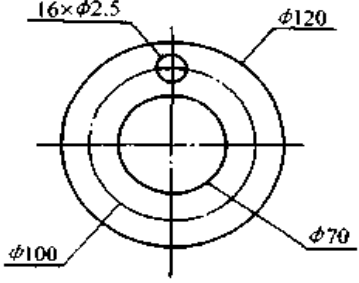
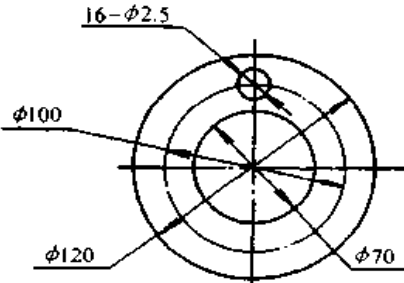
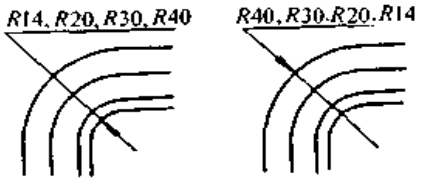
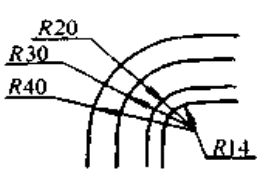
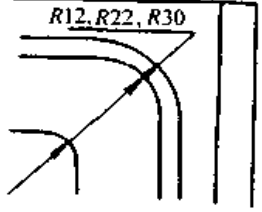
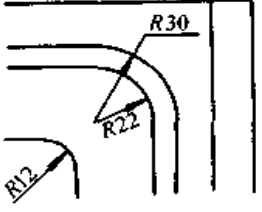
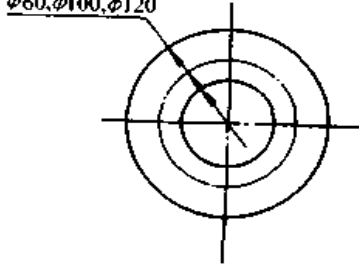
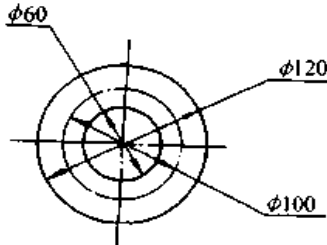
注:基本锥度法是表示圆锥要素尺寸与其几何特征具有相互从属关系的一种公差带的标注方法,即由两同轴圆锥面形成两个具有理想形状的包容面公差带。实际圆锥处处不得超越这两个包容面。因此,该公差带既控制圆锥直径的大小及圆锥角的大小,也控制圆锥表面的形状。若有需要,可附加给出圆锥角公差和有关形位公差要求作进一步的控制。

3.4 简化注法 (表 13.1-24)

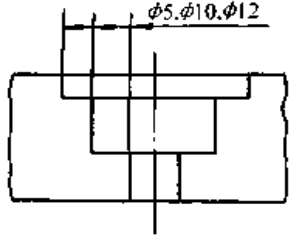
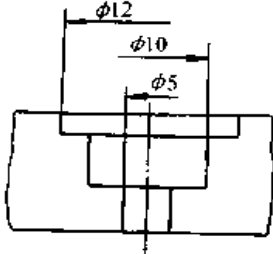
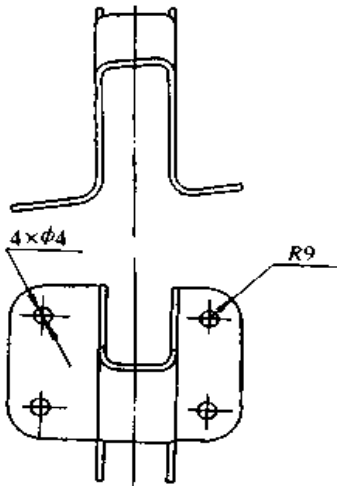
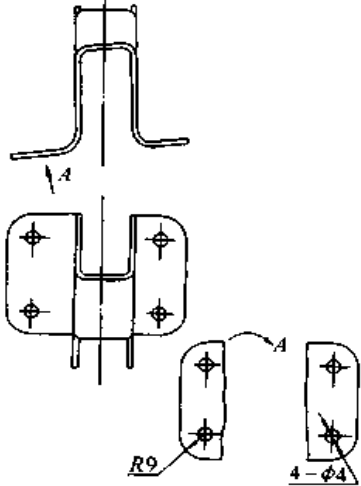
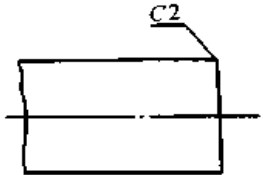
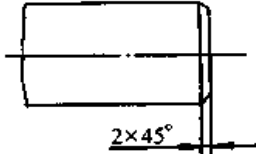
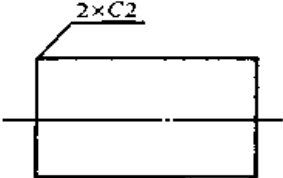
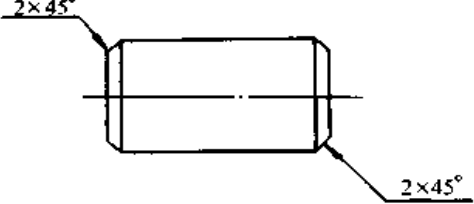
表 13.1-24 简化注法 (GB/T 16675.2—1996)

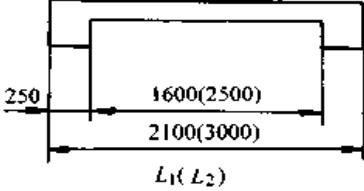
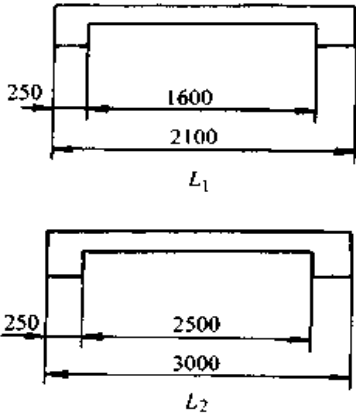
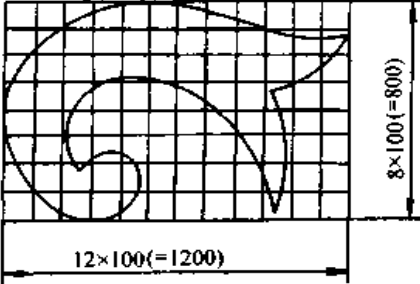
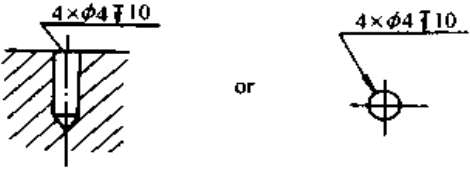
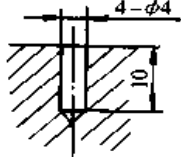
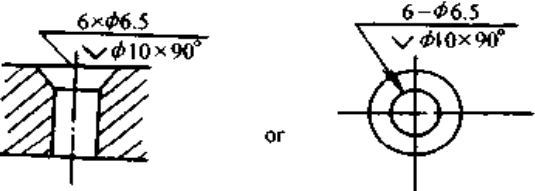
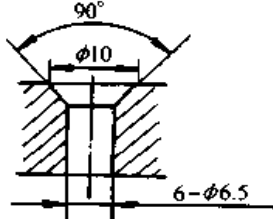
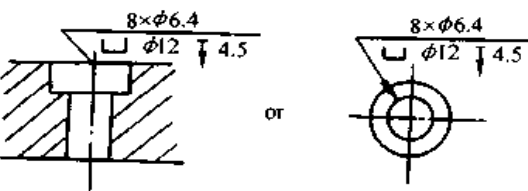
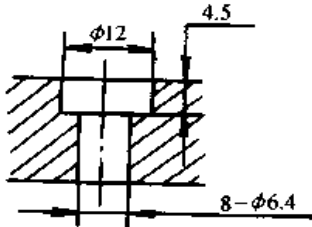
简化后	简化前	说 明
		<p>标注尺寸时,可使用单边箭头</p>

续表 13.1-24

简化后	简化前	说明
		<p>标注尺寸时,可采用带箭头的指引线</p>
		<p>标注尺寸时,也可采用不带箭头的指引线</p>
		<p>一组同心圆弧或圆心位于一条直线上的多个不同心圆弧的尺寸,可用共用的尺寸线箭头依次表示</p>
		<p>一组同心圆或尺寸较多的台阶孔的尺寸,也可用共用的尺寸线和箭头依次表示</p>
		<p>一组同心圆或尺寸较多的台阶孔的尺寸,也可用共用的尺寸线和箭头依次表示</p>

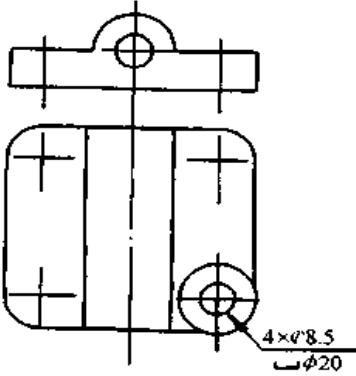
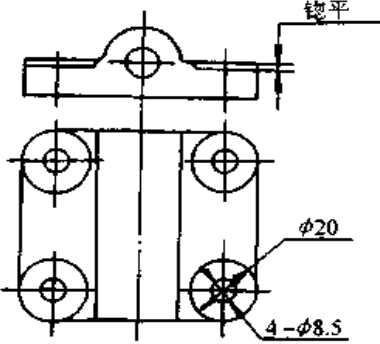
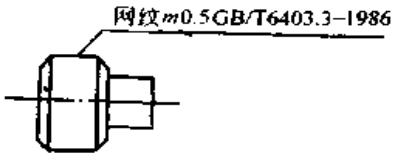
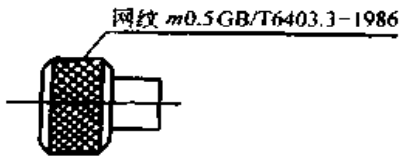
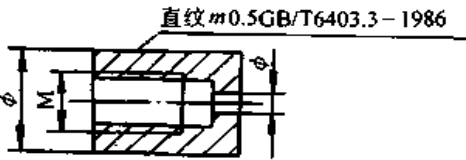
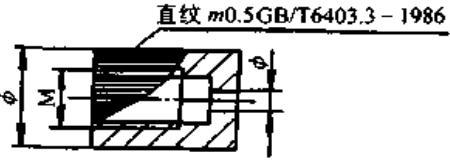
续表 13.1-24

简化后	简化前	说明
 <p>Diagram showing a simplified drawing of a stepped hole. The dimensions are indicated as $\phi 5, \phi 10, \phi 12$.</p>	 <p>Diagram showing the original drawing of a stepped hole. The dimensions are indicated as $\phi 12, \phi 10, \phi 5$.</p>	<p>一组同心圆或尺寸较多的台阶孔的尺寸，也可用共用的尺寸线和箭头依次表示</p>
 <p>Diagram showing a simplified drawing of a part with four holes and a fillet. The dimensions are indicated as $4 \times \phi 4$ and $R9$.</p>	 <p>Diagram showing the original drawing of a part with four holes and a fillet. The dimensions are indicated as $4 \times \phi 4$ and $R9$.</p>	<p>在不反映真实大小的投影上，用在尺寸数值下加画粗实线短划的方法标注其真实尺寸</p>
 <p>Diagram showing a simplified drawing of a part with a chamfered edge. The dimension is indicated as $C2$.</p>	 <p>Diagram showing the original drawing of a part with a chamfered edge. The dimension is indicated as $2 \times 45^\circ$.</p>	<p>在不致引起误解时，零件图中的倒角可以省略不画，其尺寸也可简化标注</p>
 <p>Diagram showing a simplified drawing of a part with chamfered ends. The dimension is indicated as $2 \times C2$.</p>	 <p>Diagram showing the original drawing of a part with chamfered ends. The dimension is indicated as $2 \times 45^\circ$.</p>	<p>在不致引起误解时，零件图中的倒角可以省略不画，其尺寸也可简化标注</p>

简化后	简化前	说明
 <p style="text-align: center;">$L_1(L_2)$</p>	 <p style="text-align: center;">L_1</p> <p style="text-align: center;">L_2</p>	<p>两个形状相同但尺寸不同的构件或零件，可共用一张图表示，但应将另一件名称和不相同的尺寸列入括号中表示</p>
		<p>在土木、建筑等工程图样中较复杂的图形中可用网格方式加注尺寸表示</p>
 <p style="text-align: center;">or</p>		
 <p style="text-align: center;">or</p>		
 <p style="text-align: center;">or</p>		

各类孔可采用旁注和符号相结合的方法标注

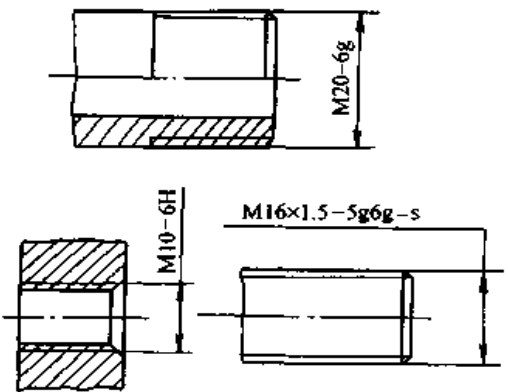
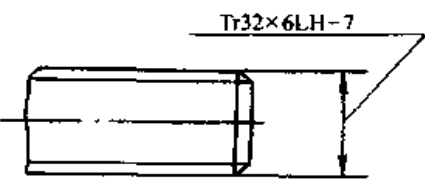
续表 13.1-24

简化后	简化前	说明
		<p>对于铲平孔, 也可采用简化标注</p>
		<p>滚花可采用左图(简化后)的方法标注</p>
		<p>滚花可采用左图(简化后)的方法标注</p>

4 常用结构要素和常用件的表示法

4.1 螺纹及螺纹紧固件表示法 (表 13.1-25~表 13.1-27) (GB/T 4459.1—1995)

表 13.1-25

普通螺纹	梯形螺纹
	

管螺纹	普通螺纹副
<p>GIA</p> <p>NPT3/4-LH</p> <p>Rc1/2</p> <p>R3/4</p>	<p>M14x1.5-6H/6g</p>
米制锥螺纹	管螺纹副
<p>2M14-S</p> <p>ZM18</p> <p>7</p> <p>7</p>	<p>Rc3/8 R3/8</p>
非标准螺纹	米制锥螺纹副
<p>M12x0.5-6H</p> <p>$\phi 16_{-0.032}^{-0.268}$</p> <p>60°</p> <p>10:1</p> <p>15</p> <p>$\phi 14.8$</p> <p>$\phi 15_{-0.032}^{-0.172}$</p> <p>$\phi 16_{-0.032}^{-0.268}$</p>	<p>M10x1 GB/T1415/ZM10-S</p>

表 13.1-26 常用螺纹的标记方法

螺纹类别	标准编号	特征代号	标记示例	螺纹副标记示例	附注	
普通螺纹	GB/T 197—1981	M	M10-5g6g-S M20×2LH-6H	M20×2LH-6H/6g	普通螺纹粗牙不注螺距 中等旋合长度不标N(以下同)	
小螺纹	GB/T 15054.4—1994	S	S0.8 4H5 S1.2 LH5h3	S0.9H5/5h3	内螺纹中径公差带为4H,顶径公差等级为5级 外螺纹中径公差带为5h,顶径公差等级为3级	
梯形螺纹	GB/T 5796.4—1986	Tr	Tr40×7-7H Tr40×14(P7)LH-7e	Tr36×6-7H/7e	多线 螺纹螺距和导程都可参照此格式标注	
锯齿形螺纹	GB/T 13576—1992	B	B40×7-7A B40×14(P7)LH-8c-L	B40×7-7A/7c		
米制锥螺纹	GB/T 1415—1992	ZM	ZM10 M10×1 GB/T 1415 ZM10-S	ZM10/ZM10 M10×1 GB/T 1415/ ZM10-S	圆锥内螺纹与圆锥外螺纹配合 圆柱内螺纹与圆锥外螺纹配合 S为短基距代号,标准基距不注代号(以下同)	
60°圆锥管螺纹	GB/T 12716—1991	NPT	NPT $\frac{1}{2}$ -LH		内、外螺纹均仅有一种公差带,故不注公差带代号(以下同)	
非螺纹密封的管螺纹	GB/T 7307—1987	G	G1 $\frac{1}{2}$ A G $\frac{1}{2}$ -LH	G1 $\frac{1}{2}$ G1 $\frac{1}{2}$ A	外螺纹公差等级分A级和B级两种,内螺纹公差等级只有一种	
用螺纹密封的管螺纹	圆锥外螺纹 圆锥内螺纹 圆柱内螺纹	GB/T 7306.1—2000 GB/T 7306.2—2000	R	R $\frac{1}{2}$ -LH	Rc1 $\frac{1}{2}$ R1 $\frac{1}{2}$	内外螺纹均只有一种公差带
			Rc	Rc $\frac{1}{2}$	Rc1 $\frac{1}{2}$ R1 $\frac{1}{2}$ -LH	
			Rp	Rp $\frac{1}{2}$	Rp1 $\frac{1}{2}$ R1 $\frac{1}{2}$	
自攻螺钉用螺纹	GB/T 5280—1985	ST	GB/T 5280 ST3.5		使用时,应先制出螺纹底孔(预制孔)	
自攻锁紧螺钉用螺纹 (粗牙普通螺纹)	GB/T 6559—1986	M	GB/T 6559 M5×20		使用时,应先制出螺纹底孔(预制孔)标记示例中的20指螺杆长度	

表 13.1-27 常用紧固件简化画法

形式	简化画法	形式	简化画法
六角头 (螺栓)		六角 (螺母)	
方头 (螺栓)		方头 (螺母)	
圆柱头 内六角 (螺钉)		六角 开槽 (螺母)	
无头 内六角 (螺钉)		六角 法兰面 (螺母)	
无头 开槽 (螺钉)		蝶形 (螺母)	
沉头 开槽 (螺钉)		沉头 十字槽 (螺钉)	
半沉头 开槽 (螺钉)		半沉头 十字槽 (螺钉)	
圆柱头 开槽 (螺钉)		盘头 十字槽 (螺钉)	
盘头 开槽 (螺钉)		六角 法兰面 (螺栓)	
沉头 开槽 (自攻螺钉)		圆头 十字槽 (木螺钉)	

4.2 齿轮画法 (表 13.1-28、表 13.1-29) (GB/T 445.9—1984)

表 13.1-28 齿轮件画法

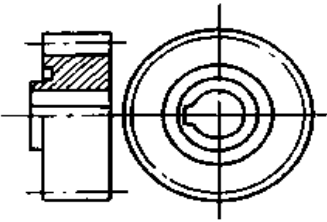
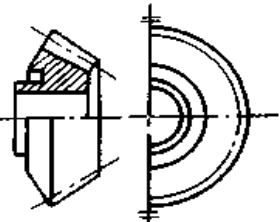
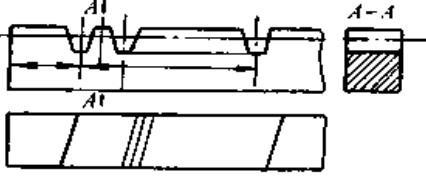
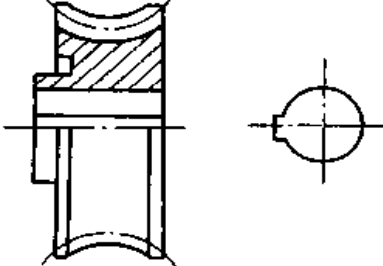
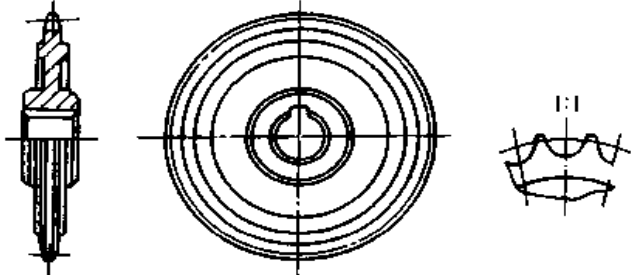
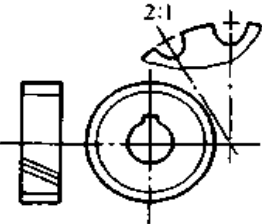
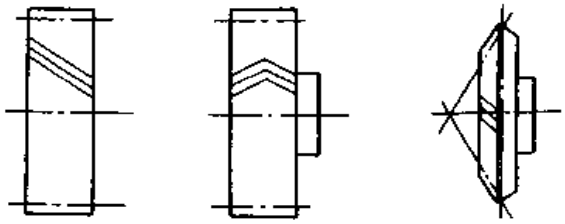
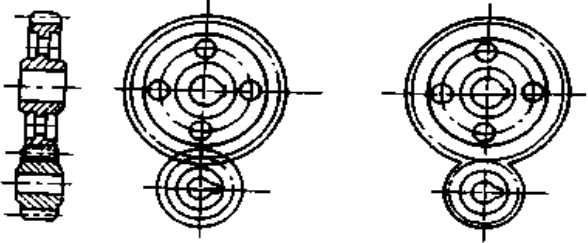
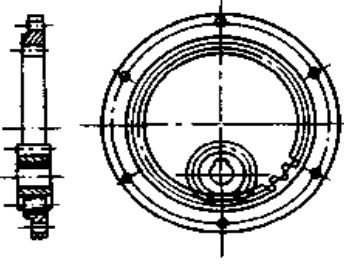
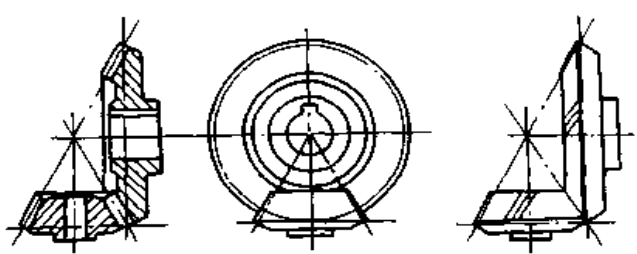
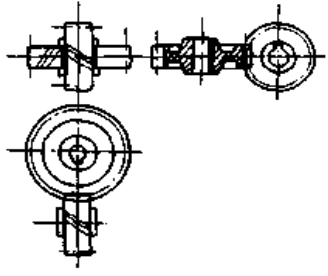
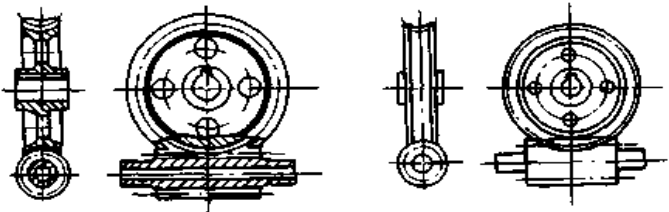
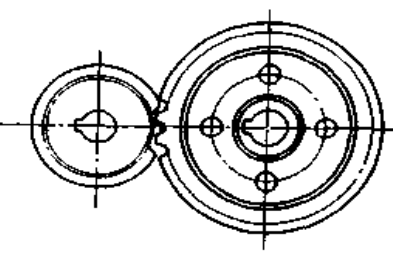
圆柱齿轮	圆锥齿轮	齿条
		
蜗 轮	链 轮	
		
圆弧齿轮	表示出齿线方向的齿轮	
		

表 13.1-29 齿轮啮合画法

圆柱齿轮外啮合画法	圆柱齿轮内啮合画法
	

<p style="text-align: center;">圆锥齿轮啮合画法</p> 	<p style="text-align: center;">螺旋齿轮啮合画法</p> 
<p style="text-align: center;">蜗轮蜗杆啮合画法</p> 	<p style="text-align: center;">圆弧齿轮啮合画法</p> 

4.3 花键画法 (表 13.1-30、表 13.1-31)

表 13.1-30 花键及花键联结的画法和标注

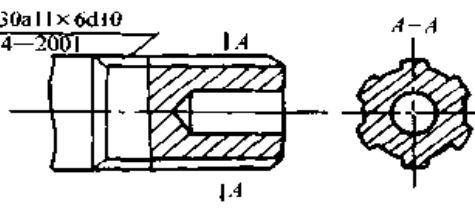
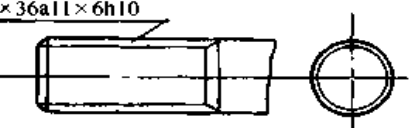
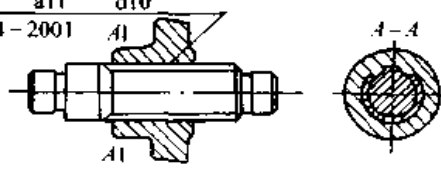
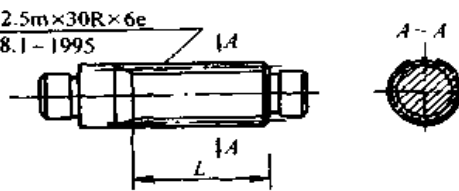
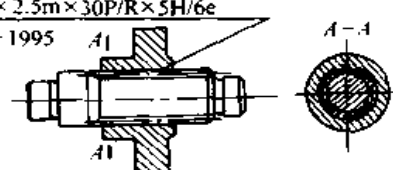
<p style="text-align: center;">矩形花键的画法与标注</p> <p> $\text{H}6 \times 26\text{f}7 \times 30\text{a}11 \times 6\text{d}10$ GB/T1144-2001 </p>  <p style="text-align: center;"> $\text{H}8 \times 32\text{h}7 \times 36\text{a}11 \times 6\text{h}10$ </p> 	<p style="text-align: center;">矩形花键联结的画法与标注</p> <p> $\text{H}6 \times 26 \frac{\text{H}7}{\text{f}7} \times 30 \frac{\text{H}10}{\text{a}11} \times 6 \frac{\text{H}11}{\text{d}10}$ GB/T1144-2001 </p> 
<p style="text-align: center;">渐开线花键的画法与标注</p> <p> $\text{H} \text{EXT} 30\text{Z} \times 2.5\text{m} \times 30\text{R} \times 6\text{e}$ GB/T3478.1-1995 </p> 	<p style="text-align: center;">渐开线花键联结的画法与标注</p> <p> $\text{H} \text{INT/EXT} 30\text{Z} \times 2.5\text{m} \times 30\text{P/R} \times 5\text{H}/6\text{e}$ GB/T3478.1-1995 </p> 

表 13.1-31 矩形花键、渐开线花键的标记方法

类别	示 例	标 记 方 法	
矩形花键	花键副, 键数 $N=6$ 、小径 $d = 23H7/f7$ 、大径 $D = 26 \frac{H10}{a11}$ 、 键宽 $B = 6 \frac{H11}{d10}$	花键副	$6 \times 23 \frac{H7}{f7} \times 26 \frac{H10}{a11} \times 6 \frac{H11}{d10}$ GB/T 1144—2001
		内花键	$6 \times 23H7 \times 26H10 \times 6H11$ GB/T 1144—2001
		外花键	$6 \times 23f7 \times 26a11 \times 6d10$ GB/T 1144—2001
渐开线花键	花键副, 齿数 24、模数 2.5、 30°圆齿根、公差等级为 5 级、 配合类别为 H/h	花键副	INT/EXT 24Z × 2.5m × 30R × 5H/5h GB/T 3478.1—1995
		内花键	INT 24Z × 2.5m × 30R × 5 GB/T 3478.1—1995
		外花键	EXT 24Z × 2.5m × 30R × 5h GB/T 3478.1—1995
	花键副, 齿数 24、模数 2.5、 内花键为 30°平齿根、公差等 级为 6 级、外花键为 30°圆齿 根, 其公差等级为 5 级、配合 类别为 H/h	花键副	INT/EXT 24Z × 2.5m × 30P/R × 6H/5h GB/T 3478.1—1995
		内花键	INT 24Z × 2.5m × 30P × 6H GB/T 3478.1—1995
		外花键	EXT 24Z × 2.5m × 30R × 5h GB/T 3478.1—1995
	花键副, 齿数 24、模数 2.5、 37.5°圆齿根、公差等级为 6 级、配合类别为 H/h	花键副	INT/EXT 24Z × 2.5m × 37.5 × 6H/6h GB/T 3478.1—1995
		内花键	INT 24Z × 2.5m × 37.5 × 6H GB/T 3478.1—1995
		外花键	EXT 24Z × 2.5m × 37.5 × 6h GB/T 3478.1—1995
	花键副, 齿数 24、模数 2.5、 45°圆齿根、内花键公差等级为 6 级、外花键公差等级为 7 级、 配合类别为 H/h	花键副	INT/EXT 24Z × 2.5m × 45 × 6H/7h GB/T 3478.1—1995
		内花键	INT 24Z × 2.5m × 45 × 6H GB/T 3478.1—1995
		外花键	EXT 24Z × 2.5m × 45 × 7H GB/T 3478.1—1995

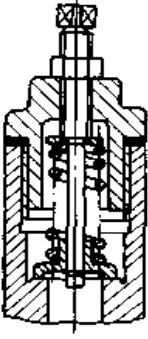
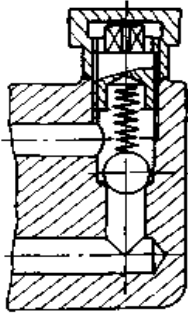
4.4 弹簧画法 (表 13.1-32) (GB/T 4459.4—1984)

表 13.1-32 弹簧画法

画法	图 例		
	视 图	剖 视 图	示 意 图
圆柱螺旋压缩弹簧			

画法	图 例		
	视 图	剖 视 图	示 意 图
截锥螺旋压缩弹簧			
圆柱螺旋拉伸弹簧			
圆柱螺旋扭转弹簧			
截锥涡卷弹簧			
碟形弹簧			
平面涡卷弹簧			





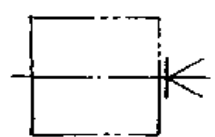
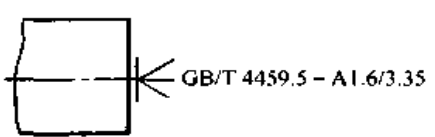
续表 13.1-32

画法	图 例		
	视 图	剖 视 图	示 意 图
弹簧的 装配画 法			

4.5 中心孔表示法 (GB/T 4459.5—1999)

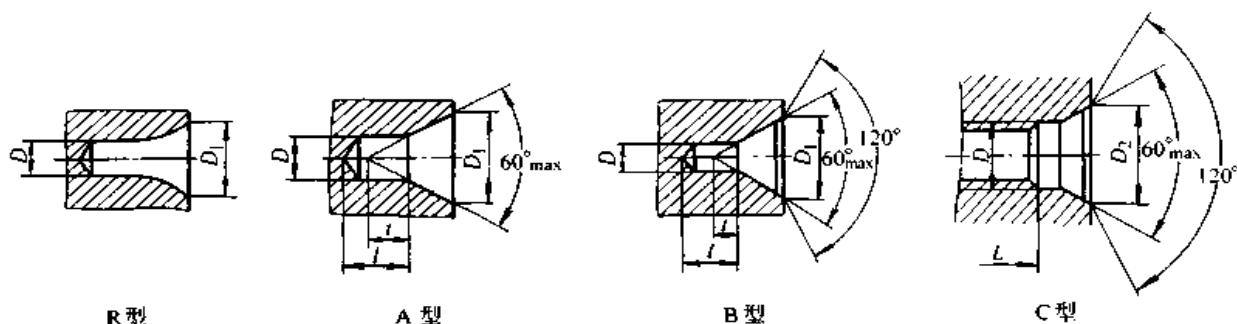
4.5.1 中心孔符号 (表 13.1-33)

表 13.1-33 中心孔符号

要 求	符 号	表示法示例	说 明
在完工的零件上要求保留中心孔			采用 B 型中心孔 D = 2.5mm D ₁ = 8mm 在完工的零件上要求保留
在完工的零件上可以保留中心孔			采用 A 型中心孔 D = 4mm D ₁ = 8.5mm 在完工的零件上是否保留都可以
在完工的零件上不允许保留中心孔			采用 A 型中心孔 D = 1.6mm D ₁ = 3.35mm 在完工的零件上不允许保留

4.5.2 中心孔的型式和尺寸参数 (表 13.1-34)

表 13.1-34 中心孔的型式和尺寸参数 (mm)



型式	公称尺寸 D														
	(0.5)	(0.63)	(0.8)	1.0	(1.25)	1.6	2.0	2.5	3.15	4.0	(5.0)	6.3	(8.0)	10.0	
R型	D_1			2.12	2.65	3.35	4.25	5.3	6.7	8.5	10.6	13.2	17.0	21.2	
A型	D_1	1.06	1.32	1.70	2.12	2.65	3.35	4.25	5.30	6.70	8.50	10.60	13.20	17.00	21.20
	t	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.4	1.8	2.2	2.8	3.5	4.4	5.5	7.0	8.7
B型	D_1			3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	18	22.4	28	
	t				0.9	1.1	1.4	1.8	2.2	2.8	3.5	4.4	5.5	7.0	8.7
C型	D	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24				
	D_2	5.8	7.4	8.8	10.5	13.2	16.3	19.8	25.3	31.3	38.0				

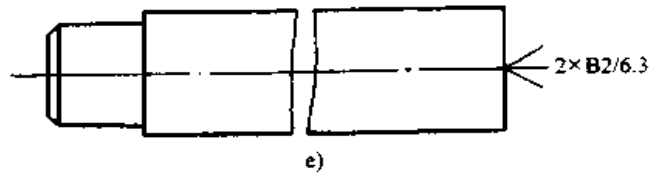
- 注：1. 尽量避免选用括号中的尺寸。
 2. 尺寸 t 取决于中心钻的长度，不能小于 t 。
 3. 尺寸 L 取决于零件的功能要求。

表 13.1-35 中心孔在图样上的简化注法

<p>如需指明中心孔标记中的标准编号时，也可按图 a 和图 b 的方法标注</p> <p>a)</p> <p>b)</p>	<p>以中心孔的轴线为基准时，基准代号可按图 c 和图 d 的方法标注</p> <p>c)</p> <p>d)</p>
---	---

续表 13.1-35

在不致引起误解时,可省略标记中的标准编号。如同一轴的两端中心孔相同,可只在某一端标出,但应注出其数量,如图 e



4.6 动密封圈表示法 (表 13.1-36~表 13.1-38) (GB/T 4459.6—1996)

表 13.1-36 常用旋转轴唇形密封圈的特征画法和规定画法

特征画法	规定画法	应用
	<p style="text-align: center;">GB/T 9877.1, B形</p> <p style="text-align: center;">GB/T 9877.2, W形</p> <p style="text-align: center;">GB/T 9877.3, Z形</p>	<p>主要用于旋转轴唇形密封圈。也可用于往复运动活塞杆唇形密封圈及结构类似的防尘圈(轴用)</p>
		<p>主要用于旋转轴唇形密封圈。也可用于往复运动活塞杆唇形密封圈及结构类似的防尘圈(孔用)</p>

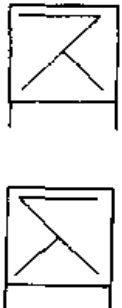
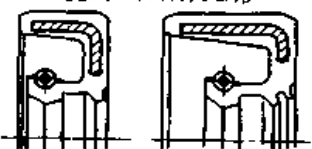
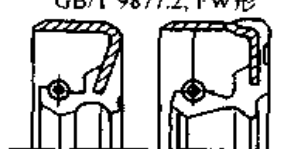
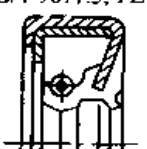
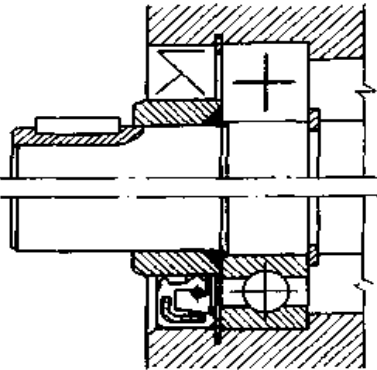
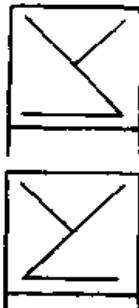
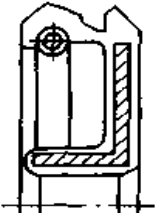
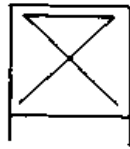
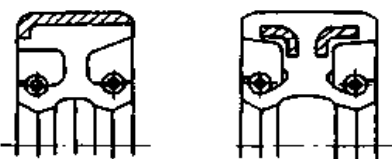
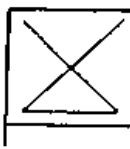
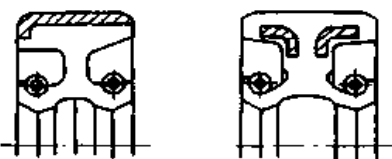

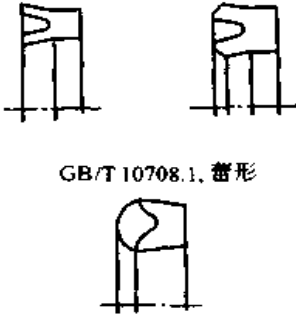
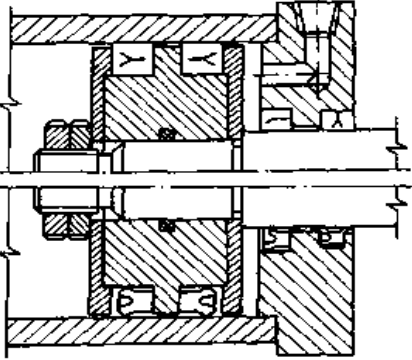


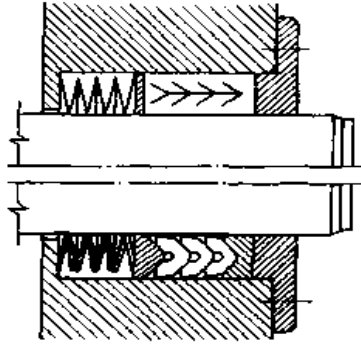

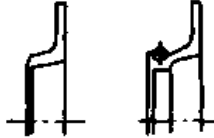
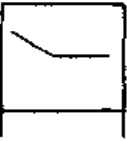
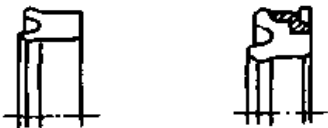
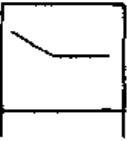

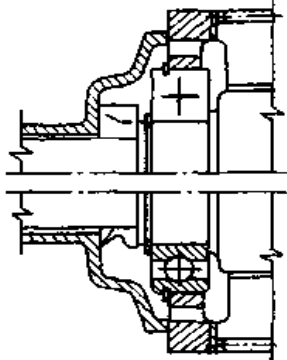
特征画法	规定画法	应用
	<p>GB/T 9877.1, FB形</p>  <p>GB/T 9877.2, FW形</p>  <p>GB/T 9877.3, FZ形</p> 	<p>主要用于有副唇的旋转轴唇形密封圈。也可用于结构类似的往复运动活塞杆唇形密封圈（轴用）</p> 
		<p>主要用于有副唇的旋转轴唇形密封圈。也可用于结构类似的往复运动活塞杆唇形密封圈（孔用）</p>
		<p>主要用于双向密封旋转轴唇形密封圈。也可用于结构类似的往复运动活塞杆唇形密封圈（轴用）</p>
		<p>主要用于双向密封旋转轴唇形密封圈。也可用于结构类似的往复运动活塞杆唇形密封圈（孔用）</p>

表 13.1-37 常用往复运动橡胶密封圈的特征画法和规定画法

特征画法	规定画法	应用
	<p>JB/T 6375, Y形 GB/T 10708.1, Y形</p>  <p>GB/T 10708.1, 蕾形</p>	<p>用于 Y 形、U 形及蕾形橡胶密封圈</p> 
		<p>用于 V 形橡胶密封圈</p> 
		<p>用于 J 形橡胶密封圈</p>
	<p>GB/T 10708.1, Y形 JB/T 6375, Y形</p> 	<p>用于高低层 Y 形橡胶密封圈 (孔用) 和橡胶防尘密封圈</p>
	<p>JB/T 6994, S形、A形</p> 	<p>用于起端面密封和防尘功能的 V_D 形橡胶密封圈</p> 

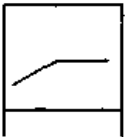
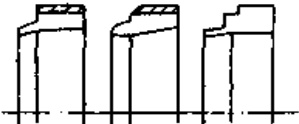
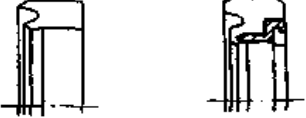
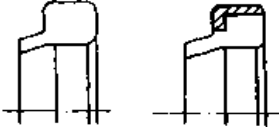
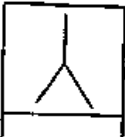


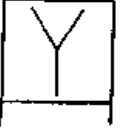


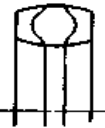
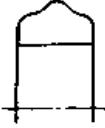
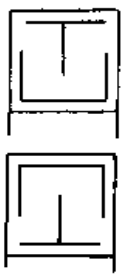
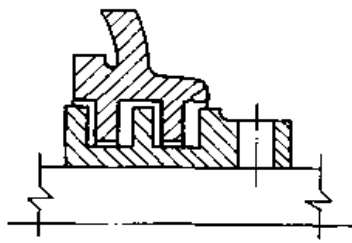
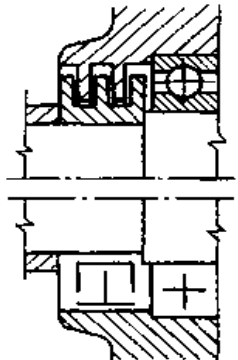
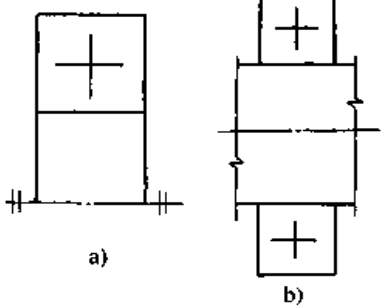
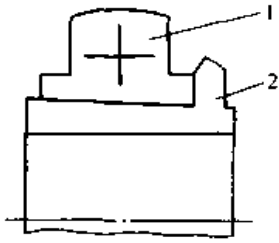
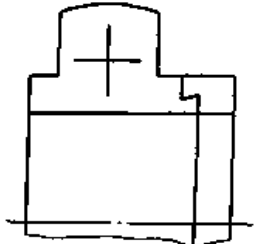
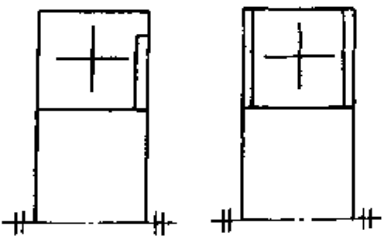
特征画法	规定画法	应用
	 <p data-bbox="412 499 815 529">GB/T 10708.1, Y形 JB/T 6375, Y形</p>  <p data-bbox="412 680 815 709">GB/T 10708.1, A形 GB/T 10708.1, B形</p> 	<p data-bbox="873 575 1409 646">用于高低唇 Y 形橡胶密封圈（轴用）和橡胶防尘密封圈</p>
	 <p data-bbox="522 1079 711 1108">GB/T 10708.3, C形</p> 	<p data-bbox="873 1079 1409 1150">用于有双向唇的橡胶防尘密封圈。也可用于结构类似的防尘密封圈（轴用）</p>
		<p data-bbox="873 1381 1409 1453">用于有双向唇的橡胶防尘密封圈。也可用于结构类似的防尘密封圈（孔用）</p>
	<p data-bbox="506 1537 727 1566">GB/T 10708.2, 鼓形</p>  <p data-bbox="506 1726 727 1755">GB/T 10708.2, 山形</p> 	<p data-bbox="896 1696 1328 1726">用于鼓形橡胶密封圈和山形橡胶密封圈</p>

表 13.1-38 常见迷宫式密封的特征画法和规定画法

特征画法	规定画法	应用
		<p>非接触密封的迷宫式密封</p> 

4.7 滚动轴承表示法 (表 13.1-39、表 13.1-40) (GB/T 4459.7—1998)

表 13.1-39 滚动轴承的通用画法

说明	图 例	说明	图 例
<p>在剖视图中, 当不需要确切地表示滚动轴承的外形轮廓、载荷特征、结构特征时, 可用矩形线框及位于线框中央正立的十字形符号表示, 如图 a</p> <p>通用画法应绘制在轴的两侧, 如图 b</p>		<p>滚动轴承常有附件或零件时, 则这些附件或零件也可只画出其外形轮廓, 如图 d</p>	 <p>d)</p> <p>1—外球面球轴承 (GB/T 3882) 2—紧定套 (GB/T 7919.2)</p>
<p>如需确切地表示滚动轴承的外形, 则应画出其剖面轮廓, 并在轮廓中央画出正立的十字符号, 如图 c</p>	 <p>c)</p>	<p>当需要表示滚动轴承的防尘盖和密封圈时, 可按图 e 和图 f 绘制</p>	 <p>e) f)</p>

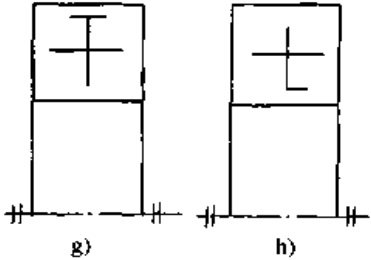
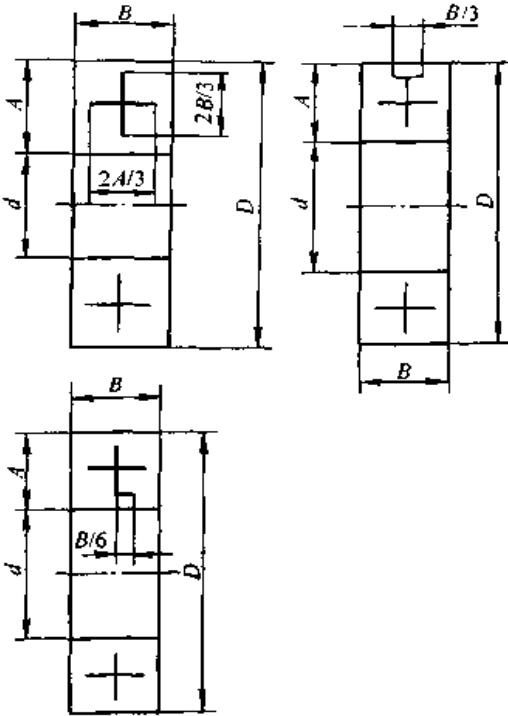
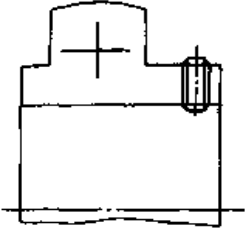
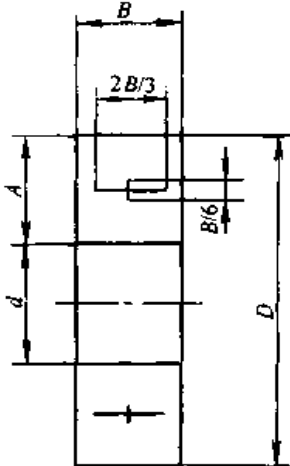
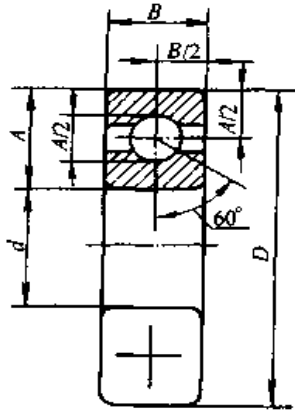
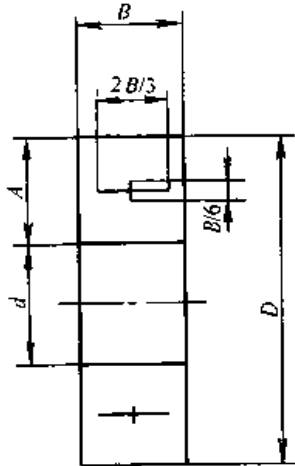
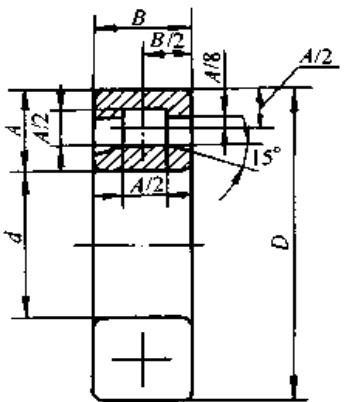
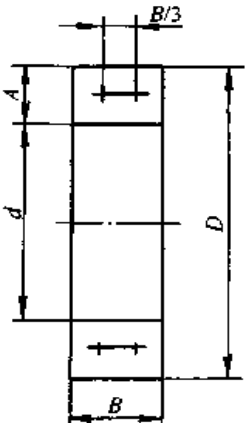
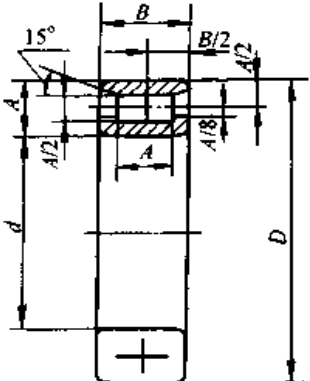
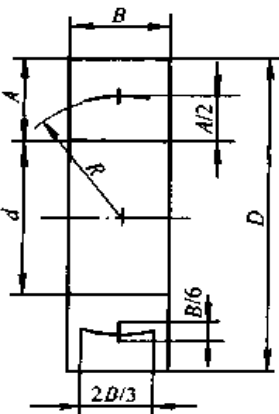
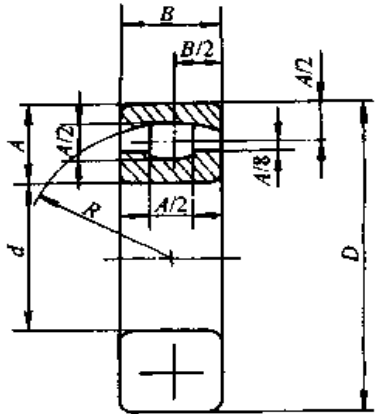
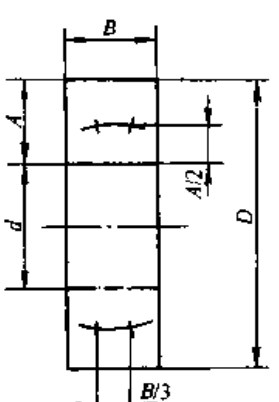
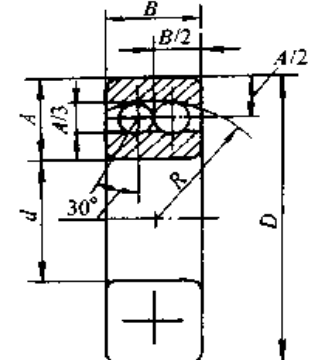
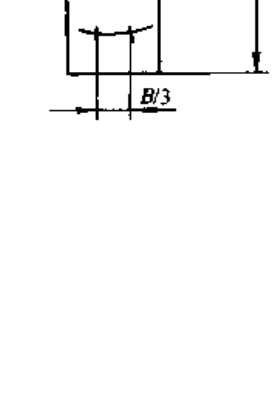
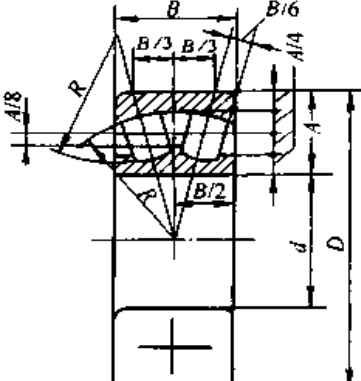
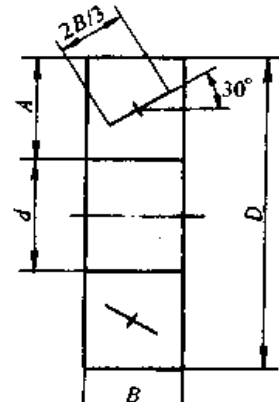
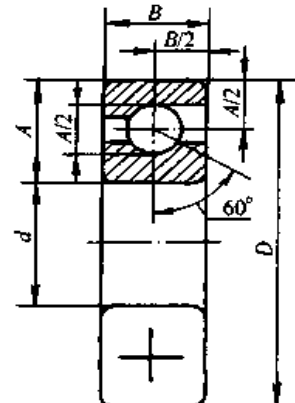
说明	图 例	说明	图 例
<p>当需要表示滚动轴承内圈或外圈有、无挡边时，可按图 g 和图 h 方法绘制</p>	 <p style="text-align: center;">g) h)</p>	<p>滚动轴承通用画法的尺寸比例</p>	
<p>在装配图中，为了表达滚动轴承的安装方法，可画出滚动轴承的某些零件，如图 i 所示</p>	 <p style="text-align: center;">i)</p>		

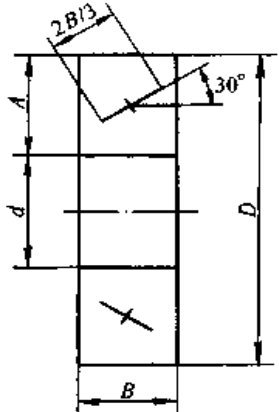
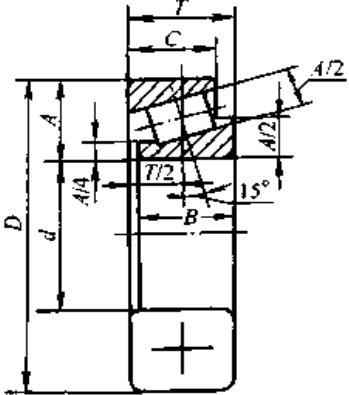
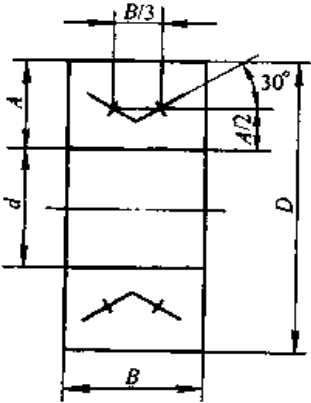
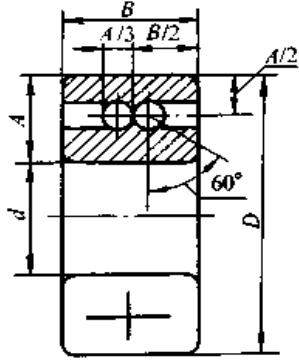
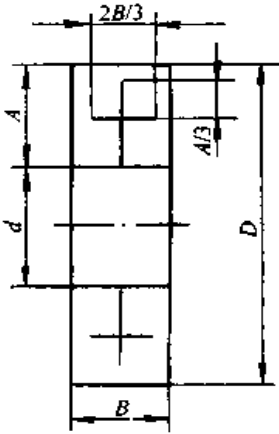
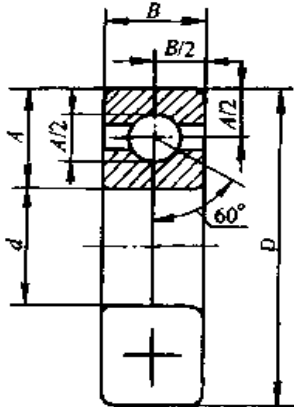
表 13.1-40 滚动轴承特征画法和规定画法的尺寸比例示例

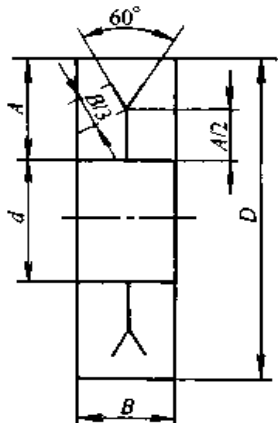
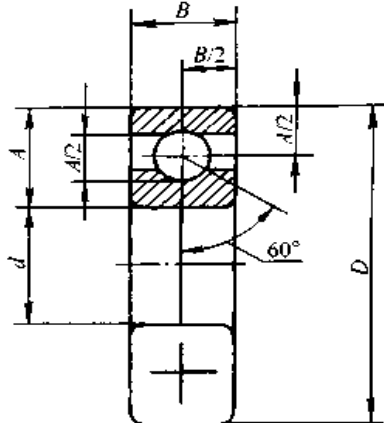
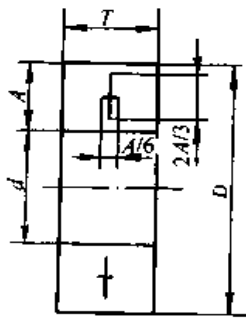
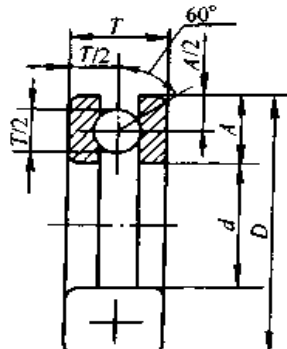
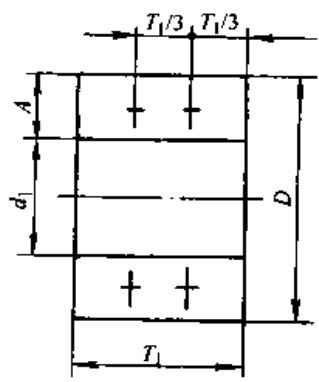
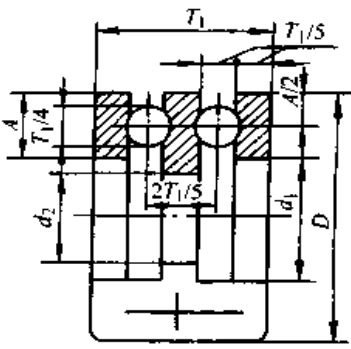
特 征 画 法	规 定 画 法
	<p style="text-align: center;">深沟球轴承 (GB/T 276—1994)</p> 

续表 13.1-40

特征画法		规定画法
	<p>圆柱滚子轴承 (GB/T 283—1994)</p>	
	<p>双列圆柱滚子轴承 (GB/T 285—1994)</p>	
		

特征画法	规定画法
	<p style="text-align: center;">调心球轴承 (GB/T 281—1994)</p> 
	<p style="text-align: center;">调心滚子轴承 (GB/T 288—1994)</p> 
	<p style="text-align: center;">角接触球轴承 (GB/T 292—1994)</p> 

特征画法		规定画法
	<p>圆锥滚子轴承 (GB/T 297—1994)</p>	
	<p>双列角接触球轴承 (GB/T 296—1994)</p>	
	<p>四点接触球轴承 (GB/T 294—1994)</p>	

特征画法		规定画法
	<p>三点接触球轴承 (GB/T 294—1994)</p>	
	<p>锥力球轴承 (GB/T 301—1995)</p>	
	<p>双向锥力球轴承 (GB/T 301—1995)</p>	

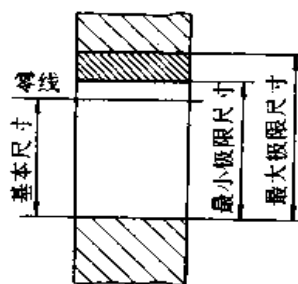
第 2 章 极限与配合

1 尺寸极限(公差)与配合

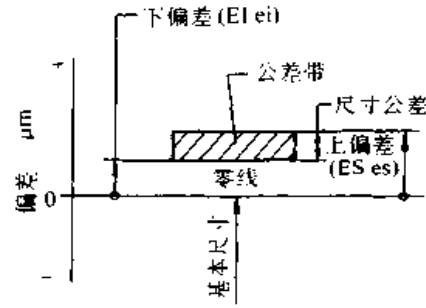
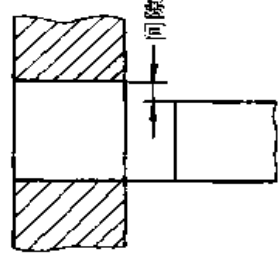
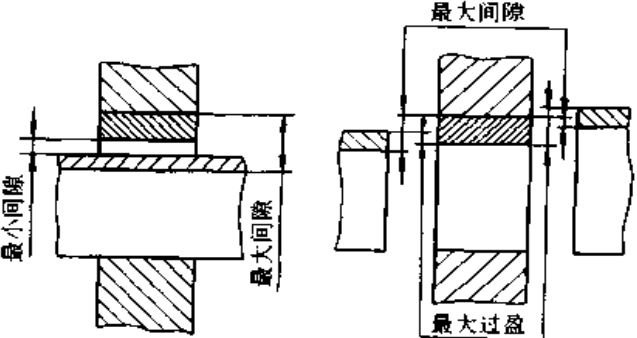
1.1 术语及定义 (表 13.2-1)

表 13.2-1 极限与配合术语及定义 (摘自 GB/T 1800.1—1997)

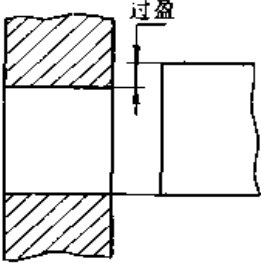
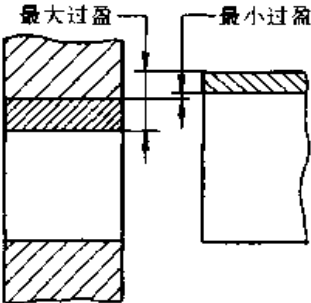
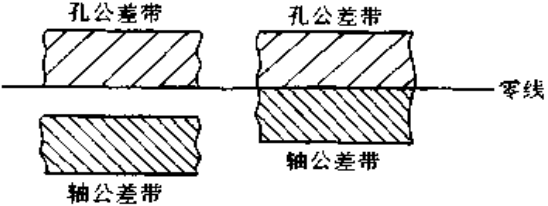
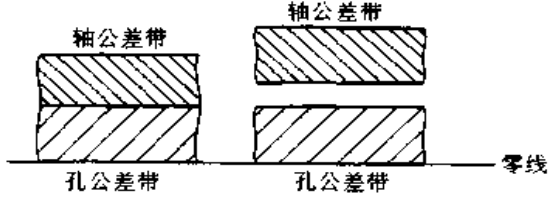
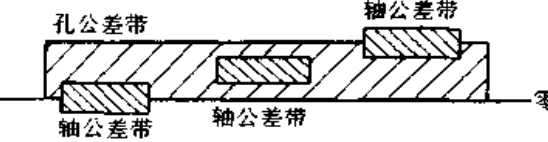
术语名称	定义或说明
轴	指工件的圆柱形外表面, 也包括非圆柱形外表面 (由两平行平面或切面形成的被包容面)
基准轴	在基准制配合中选作基准的轴。 在极限与配合制中, 即上偏差为零的轴
孔	指工件的圆柱形内表面, 也包括非圆柱形内表面 (由两平行平面或切面形成的被包容面)
基准孔	在基准制配合中选作基准的孔。 在极限与配合制中, 即下偏差为零的孔
尺寸	以特定单位表示线性尺寸的数值
基本尺寸	通过它应用上、下偏差可算出极限尺寸的尺寸 (图 a) 注: 基本尺寸可以是一个整数或一个小数值
实际尺寸	通过测量获得的某一孔、轴的尺寸
局部实际尺寸	一个孔或轴的任意横截面中的任一距离, 即任何两相对点之间测得的尺寸
极限尺寸	一个孔或轴允许的尺寸的两个极端。实际尺寸应位于其中, 也可达到极限尺寸
最大极限尺寸	孔或轴允许的最大尺寸 (图 a)
最小极限尺寸	孔或轴允许的最小尺寸 (图 a)
极限制	经标准化的公差与偏差制度
零线	在极限与配合图解中, 表示基本尺寸的一条直线, 以其为基准确定偏差和公差 (图 a) 通常, 零线沿水平方向绘制, 正偏差位于其上, 负偏差位于其下 (图 b)
偏差	某一尺寸 (实际尺寸、极限尺寸等) 减其基本尺寸所得的代数差

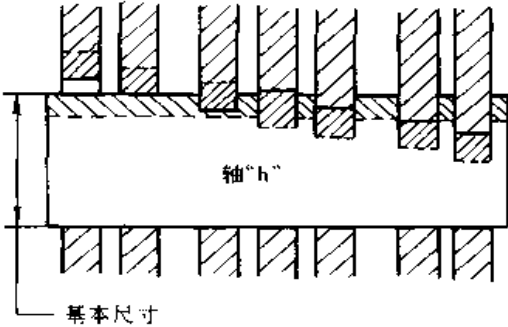
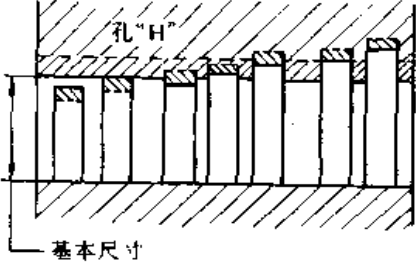


a) 基本尺寸、最大极限尺寸和最小极限尺寸

术语名称	定义或说明	
极限偏差	上偏差和下偏差	
上偏差	最大极限尺寸减其基本尺寸所得的代数差 (图 b)	 <p style="text-align: center;">b) 公差带图解</p>
下偏差	最小极限尺寸减其基本尺寸所得的代数差 (图 b)	
基本偏差	在极限与配合制中，确定公差带相对零线位置的那个极限偏差 (图 b) 注：它可以是上偏差或下偏差，一般为靠近零线的那个偏差，图 b 为下偏差	
尺寸公差 (简称公差)	最大极限尺寸减最小极限尺寸之差，或上偏差减下偏差之差。它是允许尺寸的变动量 尺寸公差是一个没有符号的绝对值	
标准公差 (IT)	在极限与配合制中，所规定的任一公差 字母 IT 为国际公差的符号	
标准公差等级	在极限与配合制中，同一公差等级 (例如 IT7) 对所有基本尺寸的一组公差被认为具有同等精确程度	
公差带	在公差带图解中，由代表上偏差和下偏差或最大极限尺寸和最小极限尺寸的两条直线所限定的区域。它是由公差大小和其相对零线的位置如基本偏差来确定 (图 b)	
标准公差因子 (i)	在极限与配合制中，用以确定标准公差的基本单位，该因子是基本尺寸的函数 标准公差因子 i 用于基本尺寸至 500mm；标准公差因子 I 用于基本尺寸大于 500mm	
间隙	孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸之差为正 (图 c)	 <p style="text-align: center;">c) 间隙</p>
最小间隙	在间隙配合中，孔的最小极限尺寸减轴的最大极限尺寸之差 (图 d)	 <p style="text-align: center;">d) 间隙配合 e) 过渡配合</p>
最大间隙	在间隙配合或过渡配合中，孔的最大极限尺寸减轴的最小极限尺寸之差 (图 d 和图 e)	

续表 13.2-1

术语名称	定义或说明	
过盈	孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸之差为负 (图 f)	 <p data-bbox="1068 646 1154 674">f) 过盈</p>
最小过盈	在过盈配合中, 孔的最大极限尺寸减轴的最小极限尺寸之差 (图 g)	 <p data-bbox="1040 1031 1182 1058">g) 过盈配合</p>
最大过盈	在过盈配合或过渡配合中, 孔的最小极限尺寸减轴的最大极限尺寸之差 (图 e 和图 g)	
配合	基本尺寸相同的, 相互结合的孔和轴公差带之间的关系	 <p data-bbox="1040 1325 1182 1352">h) 间隙配合</p>
间隙配合	具有间隙 (包括最小间隙等于零) 的配合, 此时, 孔的公差带在轴的公差带之上 (图 h)	
过盈配合	具有过盈 (包括最小过盈等于零) 的配合。此时, 孔的公差带在轴的公差带之下 (图 i)	 <p data-bbox="1040 1612 1182 1640">i) 过盈配合</p>
过渡配合	可能具有间隙或过盈的配合。此时, 孔的公差带与轴的公差带相互交叠 (图 j)	 <p data-bbox="1040 1850 1182 1877">j) 过渡配合</p>
配合公差	组成配合的孔、轴公差之和。它是允许间隙或过盈的变动量 注: 配合公差是一个没有符号的绝对值	

术语名称	定义或说明	
配合制	同一极限的孔和轴组成配合的一种制度	
基轴制配合	<p>基本偏差为一定的轴的公差带，与不同基本偏差的孔的公差带形成各种配合的一种制度。</p> <p>在极限与配合制中，是轴的最大极限尺寸与基本尺寸相等、轴的上偏差为零的一种配合制（图 k）。</p> <p>注：1. 水平实线代表孔或轴的基本偏差； 2. 虚线代表另一极限，表示孔和轴之间可能的不同组合与它们的公差等级有关</p>	 <p style="text-align: center;">k) 基轴制配合</p>
基孔制配合	<p>基本偏差为一定的孔的公差带，与不同基本偏差的轴的公差带形成各种配合的一种制度。</p> <p>在极限与配合制中，是孔的最小极限尺寸与基本尺寸相等、孔的下偏差为零的一种配合制（图 l）。</p> <p>注：1. 水平实线代表孔或轴的基本偏差； 2. 虚线代表另一极限，表示孔和轴之间可能的不同组合与它们的公差等级有关</p>	 <p style="text-align: center;">l) 基孔制配合</p>
最大实体极限 (MML)	<p>对应于孔或轴最大实体尺寸的那个极限尺寸，即：</p> <p>——轴的最大极限尺寸</p> <p>——孔的最小极限尺寸</p> <p>最大实体尺寸是孔或轴具有允许的材料量为最多时状态下的极限尺寸</p>	
最小实体极限 (LML)	<p>对应于孔或轴最小实体尺寸的那个极限尺寸，即：</p> <p>——轴的最小极限尺寸</p> <p>——孔的最大极限尺寸</p> <p>最小实体尺寸是孔或轴具有允许的材料量为最少时状态下的极限尺寸</p>	

1.2 公差、偏差和配合的基本规定 (GB/T 1800.2—1998)

1.2.1 公差、偏差和配合的代号

1) 标准公差等级代号 标准公差等级代号用符号 IT 和数字组成，例如：IT7。当其与代表基本偏差的字母一起组成公差带时，省略 IT

字母，如 h7。

标准公差等级分 IT01、IT0、IT1 至 IT18 共 20 级。

2) 基本偏差代号 基本偏差代号，对孔用大写字母 A、……、ZC 表示；对轴用小写字母 a、……、zc 表示（图 13.2-1 和图 13.2-2），各 28 个。其中，基本偏差 H 代表基准孔；h 代表

基准轴。

3) 上偏差代号 上偏差的代号, 对孔用大写字母“ES”表示, 对轴用小写字母“es”表示。

4) 下偏差代号 下偏差的代号, 对孔用大写字母“EI”表示, 对轴用小写字母“ei”表示。

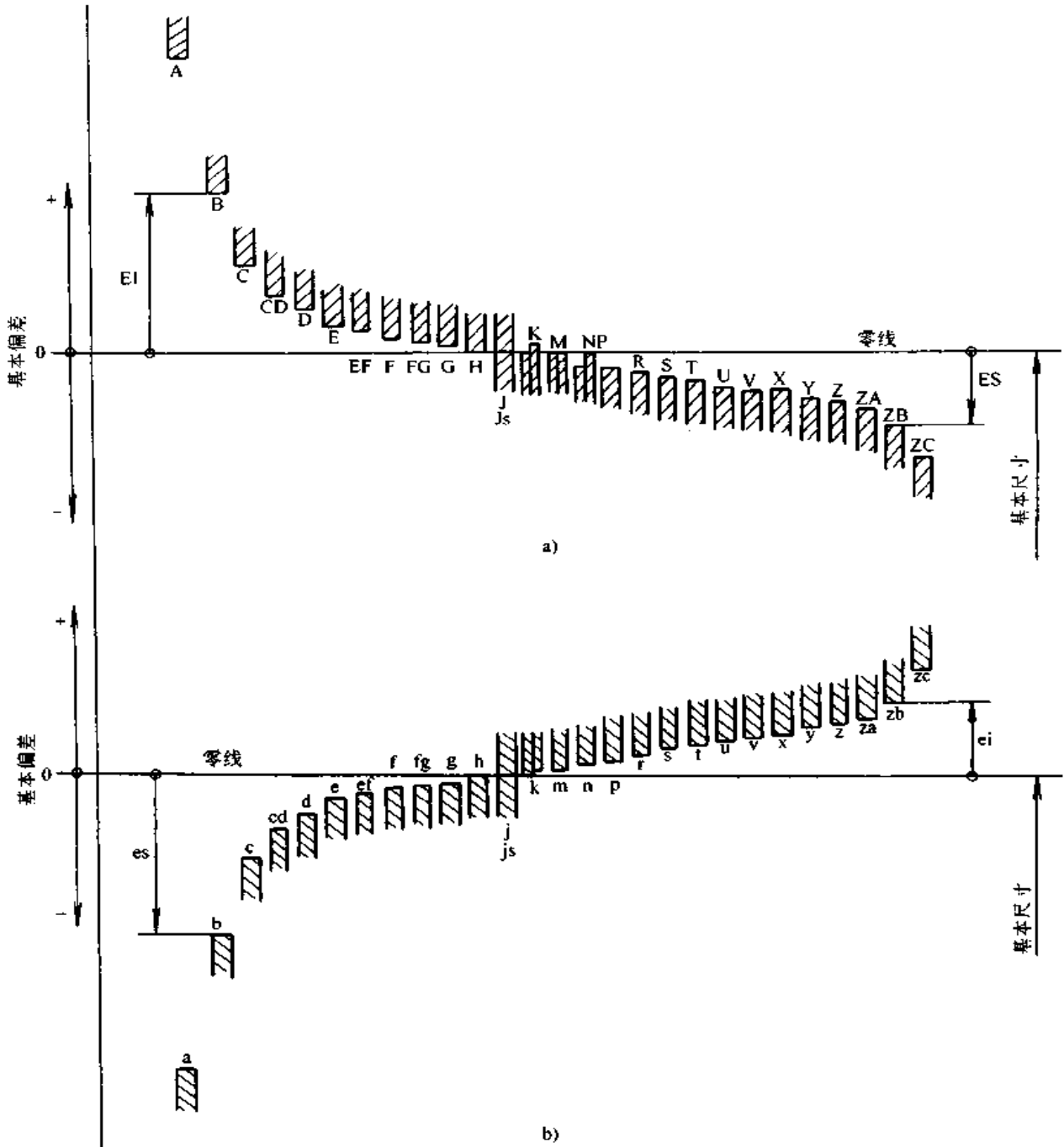
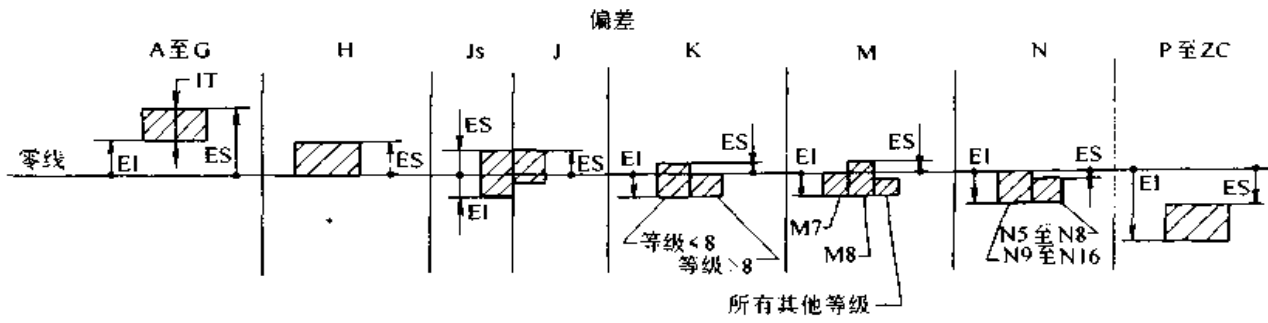


图 13.2-1 基本偏差系列示意图

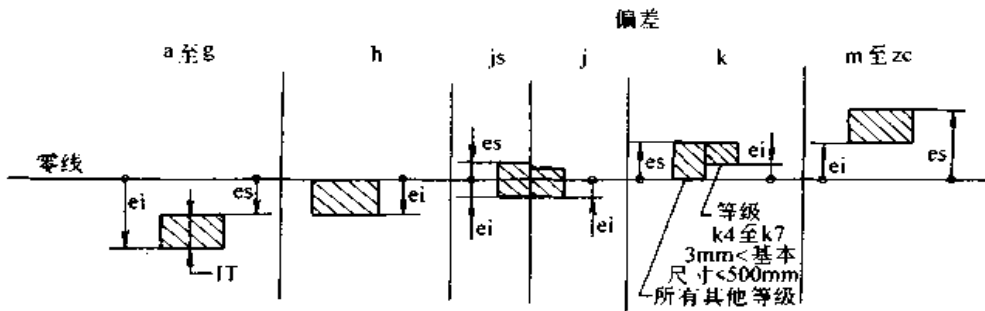
a) 孔 b) 轴

注: J/j, K/k, M/m 和 N/n 的基本偏差详见图 13.2-2



注: $ES=EI+IT$, 或 $EI=ES-IT$

a)



注: $ei=es-IT$, 或 $es=ei+IT$

b)

图 13.2.2 孔和轴的偏差

a) 孔 b) 轴

1.2.2 公差带、注公差尺寸和配合的表示

1) 公差带的表示 公差带用基本偏差的字母和公差数字表示。

例如: H7 孔公差带; h7 轴公差带。

2) 注公差尺寸的表示 注公差尺寸用基本尺寸后跟所要求的公差带或(和)对应的偏差值表示。

例如: 32H7; 80js15; 100g6; $100_{-0.034}^{0.012}$; 100g6 (-0.034)

当使用有限的字母组的装置传输信息时, 例如电报, 在标注前加以下字母:

对孔为 H 或 h; 对轴为 S 或 s。

例如: 50H5 或为 H50H5 或 h50H5;

50h6 或为 S50h6 或 s50h6。

这种表示方法不能在图样上使用。

3) 配合的表示 配合用相同的基本尺寸后跟孔、轴公差带表示。孔、轴公差带写成分数形式, 分子为孔公差带, 分母为轴公差带。

例如: 52H7/g6 或 $52 \frac{H7}{g6}$

当使用有限的字母组的装置传输信息时, 例如电报, 在标注前加注以下字母:

对孔为 H 或 h; 对轴为 S 或 s。

例如: 52H7/g6 或为 H52H7/S52g6 或 h52H7/s52g6。

1.2.3 注公差尺寸的解釋

(1) 公差标注按 GB/T 4249

在图样上注明“公差原则按 GB/T 4249”的工件公差应按以下情况解释:

1) 线性尺寸公差 线性尺寸公差仅控制要素的局部实际尺寸(两点法测量), 不控制要素本身的形状误差(如圆柱要素的圆度和轴线直线度误差或平行平面要素的平面度误差)。尺寸公差也不能控制单一要素的几何相关要素。

2) 包容要求 结合零件具有配合功能的单一要素, 不论是圆柱表面还是两平行表面, 图样上应在其尺寸极限偏差或公差带代号之后加注符

号“Ⓔ”。这表明尺寸和形状彼此相关，并且不能超越以工件最大实体尺寸形成的理想包容面。

(2) 公差标注不按 GB/T 4249

在图上未注明“公差原则按 GB/T 4249”的工件公差在规定的长度内应按下列方式解释：

1) 对孔 与实际孔表面内接的最大理想圆柱体直径不小于孔的最大实体极限；孔上任何位置的最大直径应不超出孔的最小实体极限。

2) 对轴 与实际轴表面外接的最小理想圆柱体直径应不大于轴的最大实体极限；轴上任何位置的最小直径应不小于轴的最小实体极限。

上述解释意味着，如果工件处处位于最大实体极限，则该工件将具有理想的圆和直线，即理想圆柱。除另有规定外，在上述要求的条件下，理想圆柱误差可达到给定的直径公差的全值。

注：在特殊情况下，由上述解释允许的最大形状误差可能太大，导致装配件不能达到令人满意的功能作用。在此情况下，可对形状给出独立公差，如圆柱度和(或)直线度。

1.2.4 配合分类

配合分基孔制配合和基轴制配合。在一般情况下，优先选用基孔制配合。如有特殊需要，允许将任一孔、轴公差带组成配合。

配合有间隙配合、过渡配合和过盈配合。属于哪一种配合取决于孔、轴公差带的相互关系。

基孔制（基轴制）配合中：

基本偏差 a 至 h (A 至 H) 用于间隙配合；

基本偏差 j 至 zc (J 至 ZC) 用于过渡配合和过盈配合。

1.2.5 基准温度

极限与配合制规定的基准温度是 20℃。

1.2.6 图解表示

图 13.2-3 用图解表示了 GB/T 1800.1 中确定的主要术语。

实际上，可用如图 13.2-4 所示的示意图表示。通常工件的轴线始终位于图的下方（在图中未表示出）。该图例中，孔的两个偏差均为正，轴的两个偏差均为负。

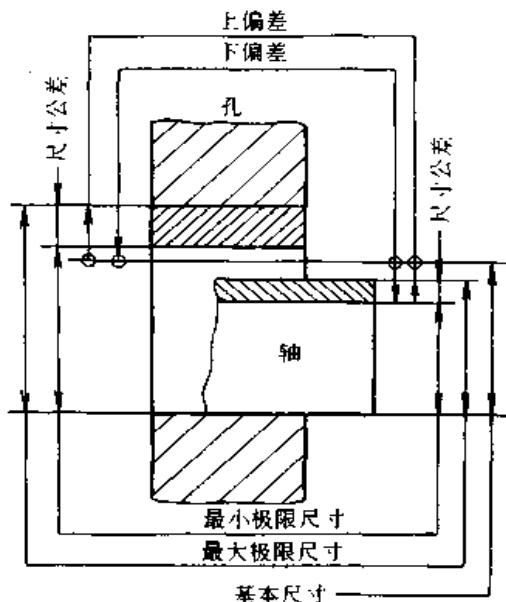


图 13.2-3 术语图解

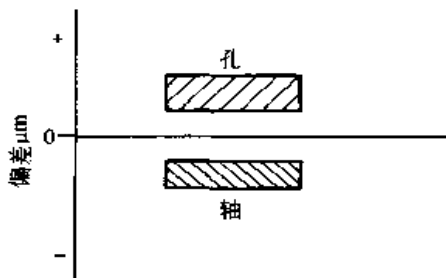


图 13.2-4 公差带示意图

1.3 标准公差和基本偏差

(GB/T 1800.3—1998)

轴、孔的基本偏差数值分别见表 13.2-2，表 13.2-3，标准公差见表 13.2-4。

1.4 孔、轴的极限偏差

(GB/T 1800.4—1999)

孔的极限偏差见表 13.2-5～表 13.2-19，轴的极限偏差见表 13.2-20～表 13.2-35。表中有的用双细横线将基本尺寸至 500mm 和基本尺寸大于 500mm 的两者极限偏差数值隔开以示区别，因两者的计算基础不同。

表 13.2.2 轴的基本偏差

基本尺寸/ mm		上 偏 差 es											基 本					
		所 有 标 准 公 差 等 级											IT5 和 IT6	IT7	IT8	IT4 至 IT7		
		a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h					js	j
—	3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	js IT _n 偏差 = ± $\frac{IT_n}{2}$, 式中 IT _n 是 IT 值数	-2	-4	-6	0	
3	6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0		-2	-4		+1	
6	10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0		-2	-5		+1	
10	14																	
14	18	-290	-150	-95		-50	-32		-16		-6	0		-3	-6		+1	
18	24																	
24	30	-300	-160	-110		-65	-40		-20		-7	0		-4	-8		+2	
30	40	-310	-170	-120														
40	50	-320	-180	-130		-80	-50		-25		-9	0		-5	-10		+2	
50	65	-340	-190	-140														
65	80	-360	-200	-150		-100	-60		-30		-10	0		-7	-12		+2	
80	100	-380	-220	-170														
100	120	-410	-240	-180		-120	-72		-36		-12	0		-9	-15		+3	
120	140	-460	-260	-200														
140	160	-520	-280	-210		-145	-85		-43		-14	0		-11	-18		+3	
160	180	-580	-310	-230														
180	200	-660	-340	-240														
200	225	-740	-380	-260		-170	-100		-50		-15	0		-13	-21		+4	
225	250	-820	-420	-280														
250	280	-920	-480	-300														
280	315	-1 050	-540	-330		-190	-110		-56		-17	0		-16	-26		+4	
315	355	-1 200	-600	-360														
355	400	-1 350	-680	-400		-210	-125		-62		-18	0		-18	-28		+4	
400	450	-1 500	-760	-440														
450	500	-1 650	-840	-480		-230	-135		-68		-20	0		-20	-32		+5	
500	560																	
560	630					-260	-145		-76		-22	0						0
630	710																	
710	800					-290	-160		-80		-24	0						0
800	900																	
900	1 000					-320	-170		-86		-26	0					0	
1 000	1 120																	
1 120	1 250					-350	-195		-98		-28	0					0	
1 250	1 400																	
1 400	1 600					-390	-220		-110		-30	0					0	
1 600	1 800																	
1 800	2 000					-430	-240		-120		-32	0					0	
2 000	2 240																	
2 240	2 500					-480	-260		-130		-34	0					0	
2 500	2 800																	
2 800	3 150					-520	-290		-145		-38	0					0	

注：1. 基本尺寸 ≤ 1mm 时，基本偏差 a 和 b 均不采用。

2. 公差带 js7 至 js11，若 IT_n 值数是奇数，则取偏差 = ± $\frac{IT_n - 1}{2}$ 。

数值 (摘自 GB/T 1800.3—1998)

(μm)

偏差数值														
下 偏 差 e_i														
$\leq IT3$ $> IT7$	所有标准公差等级													
k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
0	+2	+4	+6	+10	+14		+18		+20		+26	+32	+40	+60
0	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	+80
0	+6	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	+97
0	+7	+12	+18	+23	+28		+33		+40		+50	+64	+90	+130
								+39	+45		+60	+77	+108	+150
0	+8	+15	+22	+28	+35		+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188
						+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218
0	+9	+17	+26	+34	+43		+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200
						+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274
						+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325
0	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405
				+43	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480
0	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+124	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585
				+54	+79	+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690
				+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800
0	+15	+27	+43	+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900
				+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1 000
				+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1 150
0	+17	+31	+50	+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1 250
				+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1 050	+1 350
0	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1 200	+1 550
				+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1 000	+1 300	+1 700
0	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1 150	+1 500	+1 900
				+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1 000	+1 300	+1 650	+2 100
0	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1 100	+1 450	+1 850	+2 400
				+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1 000	+1 250	+1 600	+2 100	+2 600
0	+26	+44	+78	+150	+280	+400	+600							
				+155	+310	+450	+660							
0	+30	+50	+88	+175	+340	+500	+740							
				+185	+380	+560	+840							
0	+34	+56	+100	+210	+430	+620	+940							
				+220	+470	+680	+1 050							
0	+40	+66	+120	+250	+520	+780	+1 150							
				+260	+580	+840	+1 300							
0	+48	+78	+140	+300	+640	+960	+1 450							
				+330	+720	+1 050	+1 600							
0	+58	+92	+170	+370	+820	+1 200	+1 850							
				+400	+920	+1 350	+2 000							
0	+68	+110	+195	+440	+1 000	+1 500	+2 300							
				+460	+1 100	+1 650	+2 500							
0	+76	+135	+240	+550	+1 250	+1 900	+2 900							
				+580	+1 400	+2 100	+3 200							

表 13.2-3 孔的基本偏差

基本尺寸 / mm		下 偏 差 EI											基 本 偏 差									
		所有 标准 公差 等级											IT6	IT7	IT8	≤ IT8	> IT8	≤ IT8	> IT8	≤ IT8	> IT8	
大于	至	A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	Js	J	K	M	N					
—	3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	偏差 = ± $\frac{IT_n}{2}$, 式中 IT _n 是 IT 值数	+2	+4	+6	0	0	2	-2	-4	-4
3	6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0		+5	+6	+10	-1+Δ	-4+Δ	-4	-8+Δ	0	
6	10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+5	+8	+12	1+Δ	-6+Δ	-6	-10+Δ	0	
10	14	+290	+150	+95		+50	+32		+16		+6	0		+6	+10	+15	-1+Δ	-7+Δ	-7	-12+Δ	0	
14	18													+8	+12	+20	-2+Δ	-8+Δ	-8	-15+Δ	0	
18	24	+300	+160	+110		+65	+40		+20		+7	0		+8	+12	+20	-2+Δ	-8+Δ	-8	-15+Δ	0	
24	30													+10	+14	+24	-2+Δ	-9+Δ	-9	-17+Δ	0	
30	40	+310	+170	+120		+80	+50		+25		+9	0		+10	+14	+24	-2+Δ	-9+Δ	-9	-17+Δ	0	
40	50	+320	+180	+130										+13	+18	+28	-2+Δ	-11+Δ	-11	-20+Δ	0	
50	65	+340	+190	+140		+100	+60		+30		+10	0		+13	+18	+28	-2+Δ	-11+Δ	-11	-20+Δ	0	
65	80	+360	+200	+150										+16	+22	+34	-3+Δ	-13+Δ	-13	-23+Δ	0	
80	100	+380	+220	+170		+120	+72		+36		+12	0		+16	+22	+34	-3+Δ	-13+Δ	-13	-23+Δ	0	
100	120	+410	+240	+180										+18	+26	+41	-3+Δ	-15+Δ	-15	-27+Δ	0	
120	140	+460	+260	+200		+145	+85		+43		+14	0		+18	+26	+41	-3+Δ	-15+Δ	-15	-27+Δ	0	
140	160	+520	+280	+210										+22	+30	+47	-4+Δ	-17+Δ	-17	-31+Δ	0	
160	180	+580	+310	+230		+170	+100		+50		+15	0		+22	+30	+47	-4+Δ	-17+Δ	-17	-31+Δ	0	
180	200	+660	+310	+240										+25	+36	+55	-4+Δ	-20+Δ	-20	-34+Δ	0	
200	225	+740	+380	+260		+190	+110		+56		+17	0		+25	+36	+55	-4+Δ	-20+Δ	-20	-34+Δ	0	
225	250	+820	+420	+280										+29	+39	+60	-4+Δ	-21+Δ	-21	-37+Δ	0	
250	280	+920	+480	+300		+210	+125		+62		+18	0		+29	+39	+60	-4+Δ	-21+Δ	-21	-37+Δ	0	
280	315	+1 050	+540	+330										+33	+43	+66	-5+Δ	-23+Δ	-23	-40+Δ	0	
315	355	+1 200	+600	+360		+230	+135		+68		+20	0		+33	+43	+66	-5+Δ	-23+Δ	-23	-40+Δ	0	
355	400	+1 350	+680	+400										0		-26		-44				
400	450	+1 500	+760	+440		+260	+145		+76		+22	0						-26		-44		
450	500	+1 650	+840	+480										0		-30		-50				
500	560					+290	+160		+80		+24	0						-30		-50		
560	630													0		-34		-56				
630	710					+320	+170		+86		+26	0						-34		-56		
710	800													0		-40		-65				
800	900					+350	+195		+98		+28	0						-40		-65		
900	1 000												0		-48		-78					
1 000	1 120					+390	+220		+110		+30	0					-48		-78			
1 120	1 250												0		-58		-92					
1 250	1 400					+430	+240		+120		+32	0					-58		-92			
1 400	1 600												0		-68		-110					
1 600	1 800					+480	+260		+130		+34	0					-68		-110			
1 800	2 000												0		-76		-135					
2 000	2 240					+520	+290		+145		+38	0					-76		-135			
2 240	2 500																					
2 500	2 800																					
2 800	3 150																					

注：1. 基本尺寸 ≤ 1mm 时，基本偏差 A 和 B 及大于 IT8 的 N 均不采用。

2. 公差带 Js7 至 Js11，若 IT_n 值数是奇数，则取偏差 = ± $\frac{IT_n - 1}{2}$ 。

3. 对小于或等于 IT8 的 K、M、N 和小于或等于 IT7 的 P 至 ZC，所需 Δ 值从表内右侧选取。

例如：18 ~ 30 mm 段的 K7：Δ = 8 μm，所以 ES = -2 + 8 = +6 μm；

18 ~ 30 mm 段的 S6：Δ = 4 μm，所以 ES = -35 + 4 = -31 μm

4. 特殊情况：250 ~ 315 mm 段的 M6，ES = -9 μm（代替 -11 μm）。

数值 (摘自 GB/T 1800.3—1998)

(μm)

数值													Δ 值						
上 偏 差 ES																			
$\leq IT7$	标准公差等级大于 IT7												标准公差等级						
P 至 ZC	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	
	-6	-10	-14		-18		-20		-26	-32	-40	-60	0	0	0	0	0	0	
	-12	-15	-19		-23		-28		-35	-42	-50	-80	1	1.5	1	3	4	6	
	-15	-19	-23		-28		-34		-42	-52	-67	-97	1	1.5	2	3	6	7	
	-18	-23	-28		-33		-40		-50	-64	-90	-130	1	2	3	3	7	9	
					-39	-45		-60	-77	-108	-150								
	-22	-28	-35		-41	-47	-54	-63	-73	-98	-136	-188	1.5	2	3	4	8	12	
				-41	-48	-55	-64	-75	-88	-118	-160	-218							
	-26	-34	-43		-48	-60	-68	-80	-94	-112	-148	-200	-274	1.5	3	4	5	9	14
				-54	-70	-81	-97	-114	-136	-180	-242	-325							
	-32	-41	-53	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405	2	3	5	6	11	16	
		-43	-59	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-480							
	-37	-51	-71	-91	-124	-146	-178	-214	-258	-335	-445	-585	2	4	5	7	13	19	
		-54	-79	-104	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690							
	-43	-63	-92	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23	
		-65	-100	-134	-190	-228	-280	-340	-415	-535	-700	-900							
		-68	-108	-146	-210	-252	-310	-380	-465	-600	-780	-1 000							
	-50	-77	-122	-166	-236	-284	-350	-425	-520	-670	-880	-1 150	3	4	6	9	17	26	
		-80	-130	-180	-258	-310	-385	-470	-575	-740	-960	-1 250							
		-84	-140	-196	-284	-340	-425	-520	-640	-820	-1 050	-1 350							
	-56	-94	-158	-218	-315	-385	-475	-580	-710	-920	-1 200	-1 550	4	4	7	9	20	29	
		-98	-170	-240	-350	-425	-525	-650	-790	-1 000	-1 300	-1 700							
	-62	-108	-190	-268	-390	-475	-590	-730	-900	-1 150	-1 500	-1 900	4	5	7	11	21	32	
		-114	-208	-294	-435	-530	-660	-820	-1 000	-1 300	-1 650	-2 100							
	-68	-126	-232	-330	-490	-595	-740	-920	-1 100	-1 450	-1 850	-2 400	5	5	7	13	23	34	
		-132	-252	-360	-540	-660	-820	-1 000	-1 250	-1 600	-2 100	-2 600							
	-78	-150	-280	-400	-600														
		-155	-310	-450	-660														
	-88	-175	-340	-500	-740														
		-185	-380	-560	-840														
	-100	-210	-430	-620	-940														
		-220	-470	-680	-1 050														
	-120	-250	-520	-780	-1 150														
		-260	-580	-810	-1 300														
	-140	-300	-640	-960	-1 450														
		-330	-720	-1 050	-1 600														
	-170	-370	-820	-1 200	-1 850														
		-400	-920	-1 350	-2 000														
	-195	-440	-1 000	-1 500	-2 300														
		-460	-1 100	-1 650	-2 500														
	-240	-550	-1 250	-1 900	-2 900														
		-580	-1 400	-2 100	-3 200														

在大于 IT7 的相应数值上增加一个 Δ 值

表 13.2-4 标准公差数值 (摘自 GB/T 1800.3—1998)

基本尺寸/ mm		标准公差等级																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于	至	μm												mm					
—	3	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.1	0.14	0.25	0.4	0.6	1	1.4
3	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.3	0.48	0.75	1.2	1.8
6	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.9	1.5	2.2
10	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.7	1.1	1.8	2.7
18	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.3	2.1	3.3
30	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1	1.6	2.5	3.9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.3	0.46	0.74	1.2	1.9	3	4.6
80	120	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.4	2.2	3.5	5.4
120	180	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.4	0.63	1	1.6	2.5	4	6.3
180	250	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.9	4.6	7.2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.3	2.1	3.2	5.2	8.1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.4	2.3	3.6	5.7	8.9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.5	4	6.3	9.7
500	630	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0.7	1.1	1.75	2.8	4.4	7	11
630	800	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0.8	1.25	2	3.2	5	8	12.5
800	1 000	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0.9	1.4	2.3	3.6	5.6	9	14
1 000	1 250	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1.05	1.65	2.6	4.2	6.6	10.5	16.5
1 250	1 600	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1.25	1.95	3.1	5	7.8	12.5	19.5
1 600	2 000	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1.5	2.3	3.7	6	9.2	15	23
2 000	2 500	22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1100	1.75	2.8	4.4	7	11	17.5	28
2 500	3 150	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2.1	3.3	5.4	8.6	13.5	21	33

注: 1. 基本尺寸大于 500mm 的 IT1 至 IT5 的标准公差数值为试行的。

2. 基本尺寸小于或等于 1mm 时, 无 IT14 至 IT18。

表 13.2-5 孔 A、B 和 C 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

(μm)

基本尺寸/ mm	A						B						C					
	9	10	11	12	13		8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13
大于至																		
—	+295 +270	+310 +270	+330 +270	+370 +270	+410 +270		+154 +140	+165 +140	+180 +140	+200 +140	+240 +140	+280 +140	+74 +60	+85 +60	+100 +60	+120 +60	+160 +60	+200 +60
3	+300 +270	+318 +270	+345 +270	+390 +270	+450 +270		+158 +140	+170 +140	+188 +140	+215 +140	+260 +140	+320 +140	+88 +70	+100 +70	+118 +70	+145 +70	+190 +70	+250 +70
6	+316 +280	+338 +280	+370 +280	+430 +280	+500 +280		+172 +150	+186 +150	+208 +150	+240 +150	+300 +150	+370 +150	+102 +80	+116 +80	+138 +80	+170 +80	+230 +80	+300 +80
10	+333 +290	+360 +290	+400 +290	+470 +290	+560 +290		+177 +150	+193 +150	+220 +150	+260 +150	+330 +150	+420 +150	+122 +95	+138 +95	+165 +95	+205 +95	+275 +95	+365 +95
18	+352 +300	+384 +300	+430 +300	+510 +300	+630 +300		+193 +160	+212 +160	+244 +160	+290 +160	+370 +160	+490 +160	+143 +110	+162 +110	+194 +110	+240 +110	+320 +110	+440 +110
30	+372 +310	+410 +310	+470 +310	+560 +310	+700 +310		+209 +170	+232 +170	+270 +170	+330 +170	+420 +170	+560 +170	+159 +120	+182 +120	+220 +120	+280 +120	+370 +120	+510 +120
40	+382 +320	+420 +320	+480 +320	+570 +320	+710 +320		+219 +180	+242 +180	+280 +180	+340 +180	+430 +180	+570 +180	+169 +130	+192 +130	+230 +130	+290 +130	+380 +130	+520 +130
50	+414 +340	+460 +340	+530 +340	+640 +340	+800 +340		+236 +190	+264 +190	+310 +190	+380 +190	+490 +190	+650 +190	+186 +140	+214 +140	+260 +140	+330 +140	+440 +140	+600 +140
65	+434 +360	+480 +360	+550 +360	+660 +360	+820 +360		+246 +200	+274 +200	+320 +200	+390 +200	+500 +200	+660 +200	+196 +150	+224 +150	+270 +150	+340 +150	+450 +150	+610 +150
80	+467 +380	+520 +380	+600 +380	+730 +380	+920 +380		+274 +220	+307 +220	+360 +220	+440 +220	+570 +220	+760 +220	+224 +170	+257 +170	+310 +170	+390 +170	+520 +170	+710 +170
100	+497 +410	+550 +410	+630 +410	+760 +410	+950 +410		+294 +240	+327 +240	+380 +240	+460 +240	+590 +240	+780 +240	+234 +180	+267 +180	+320 +180	+400 +180	+530 +180	+720 +180
120	+560 +460	+620 +460	+710 +460	+860 +460	+1 090 +460		+323 +260	+360 +260	+420 +260	+510 +260	+660 +260	+890 +260	+263 +200	+300 +200	+360 +200	+450 +200	+600 +200	+830 +200

续表 13.2.5

基本尺寸/ mm	A												B												C											
	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13													
大于 140	+620	+680	+770	+920	+1 150	+343	+380	+440	+530	+680	+910	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+210	+210	+210	+210	+210	+210	+310	+310	+310	+310	+310	+310	+310	+370	+370	+370	+370	+370	+370
160	+520	+520	+520	+520	+520	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+210	+210	+210	+210	+210	+210	+230	+230	+230	+230	+230	+230	+230	+210	+210	+210	+210	+210	+210
180	+680	+740	+830	+980	+1 210	+373	+410	+470	+560	+710	+940	+310	+310	+310	+310	+310	+310	+293	+330	+390	+480	+630	+860	+230	+230	+230	+230	+230	+230	+230	+240	+240	+240	+240	+240	+240
200	+775	+845	+950	+1 120	+1 380	+412	+455	+525	+630	+800	+1 060	+340	+340	+340	+340	+340	+340	+312	+355	+425	+530	+700	+960	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240	+240
225	+855	+925	+1 030	+1 200	+1 460	+452	+495	+565	+670	+840	+1 100	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+332	+375	+445	+550	+720	+980	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260
250	+740	+740	+740	+740	+740	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+380	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280
280	+935	+1 005	+1 110	+1 280	+1 540	+492	+535	+605	+710	+880	+1 140	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+352	+395	+465	+570	+740	+1 000	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280
280	+820	+820	+820	+820	+820	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+420	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280	+280
250	+1 050	+1 130	+1 240	+1 440	+1 730	+561	+610	+690	+800	+1 000	+1 290	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+381	+430	+510	+620	+820	+1 110	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300
280	+920	+920	+920	+920	+920	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300	+300
315	+1 180	+1 260	+1 370	+1 570	+1 860	+621	+670	+750	+860	+1 060	+1 350	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+411	+460	+540	+650	+850	+1 140	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330
315	+1 050	+1 050	+1 050	+1 050	+1 050	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+540	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330	+330
355	+1 340	+1 430	+1 560	+1 770	+2 000	+689	+740	+830	+960	+1 170	+1 490	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+449	+500	+590	+720	+930	+1 250	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400
355	+1 200	+1 200	+1 200	+1 200	+1 200	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360	+360
400	+1 490	+1 580	+1 710	+1 920	+2 240	+769	+820	+910	+1 040	+1 250	+1 570	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+489	+540	+630	+760	+970	+1 290	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400
400	+1 350	+1 350	+1 350	+1 350	+1 350	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+680	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400	+400
450	+1 655	+1 750	+1 900	+2 130	+2 470	+857	+915	+1 010	+1 160	+1 390	+1 730	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+537	+595	+690	+840	+1 070	+1 410	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440
450	+1 500	+1 500	+1 500	+1 500	+1 500	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+760	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440	+440
500	+1 805	+1 900	+2 050	+2 280	+2 620	+937	+995	+1 090	+1 240	+1 470	+1 810	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+577	+635	+730	+880	+1 110	+1 450	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480
500	+1 650	+1 650	+1 650	+1 650	+1 650	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+840	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480

注:基本尺寸小于1mm时,各级的A和B均不采用。

表 13.2-6 孔 CD、D 和 E 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

(μm)

基本尺寸/ mm	CD										D										E									
	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	11	12	13	5	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10						
大于至																														
—	+40 +34	+44 +34	+48 +34	+59 +34	+74 +34	+26 +20	+30 +20	+34 +20	+45 +20	+60 +20	+80 +20	+120 +20	+160 +20	+18 +14	+20 +14	+24 +14	+28 +14	+39 +14	+54 +14	+20 +14	+20 +14	+20 +14	+20 +14	+20 +14						
3	+54 +46	+58 +46	+64 +46	+76 +46	+94 +46	+38 +30	+42 +30	+48 +30	+60 +30	+78 +30	+105 +30	+150 +30	+210 +30	+25 +20	+28 +20	+32 +20	+38 +20	+50 +20	+68 +20	+20 +20	+20 +20	+20 +20	+20 +20	+20 +20						
6	+65 +56	+71 +56	+78 +56	+92 +56	+114 +56	+49 +40	+55 +40	+62 +40	+76 +40	+98 +40	+130 +40	+190 +40	+260 +40	+31 +25	+34 +25	+40 +25	+47 +25	+61 +25	+83 +25	+25 +25	+25 +25	+25 +25	+25 +25	+25 +25						
10						+61 +50	+68 +50	+77 +50	+93 +50	+120 +50	+160 +50	+230 +50	+320 +50	+40 +32	+43 +32	+50 +32	+59 +32	+75 +32	+102 +32	+32 +32	+32 +32	+32 +32	+32 +32	+32 +32						
18						+78 +65	+86 +65	+98 +65	+117 +65	+149 +65	+195 +65	+275 +65	+395 +65	+49 +40	+53 +40	+61 +40	+73 +40	+92 +40	+124 +40	+40 +40	+40 +40	+40 +40	+40 +40	+40 +40						
30						+96 +80	+105 +80	+119 +80	+142 +80	+180 +80	+240 +80	+330 +80	+470 +80	+61 +50	+66 +50	+75 +50	+89 +50	+112 +50	+150 +50	+50 +50	+50 +50	+50 +50	+50 +50	+50 +50						
50						+119 +100	+130 +100	+146 +100	+174 +100	+220 +100	+290 +100	+400 +100	+560 +100	+73 +60	+79 +60	+90 +60	+106 +60	+134 +60	+180 +60	+60 +60	+60 +60	+60 +60	+60 +60	+60 +60						
80						+142 +120	+155 +120	+174 +120	+207 +120	+260 +120	+340 +120	+470 +120	+660 +120	+87 +72	+94 +72	+107 +72	+125 +72	+159 +72	+212 +72	+72 +72	+72 +72	+72 +72	+72 +72	+72 +72						
120						+170 +145	+185 +145	+208 +145	+245 +145	+305 +145	+395 +145	+545 +145	+775 +145	+103 +85	+110 +85	+125 +85	+148 +85	+185 +85	+245 +85	+85 +85	+85 +85	+85 +85	+85 +85	+85 +85						
180						+199 +170	+216 +170	+242 +170	+285 +170	+355 +170	+460 +170	+630 +170	+890 +170	+120 +100	+129 +100	+146 +100	+172 +100	+215 +100	+285 +100	+100 +100	+100 +100	+100 +100	+100 +100	+100 +100						
250						+222 +190	+242 +190	+271 +190	+320 +190	+400 +190	+510 +190	+710 +190	+1000 +190	+133 +110	+142 +110	+162 +110	+191 +110	+240 +110	+320 +110	+110 +110	+110 +110	+110 +110	+110 +110	+110 +110						

续表 13.2-6

基本尺寸/ mm	CD				D										E					
	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	11	12	13	5	6	7	8	9	10	
大于																				
315						+246	+267	+299	+350	+440	+570	+780	+1 100	+150	+161	+182	+214	+265	+355	
400						+210	+210	+210	+210	+210	+210	+210	+210	+125	+125	+125	+125	+125	+125	
500						+270	+293	+327	+385	+480	+630	+860	+1 200	+162	+175	+198	+232	+290	+385	
630						+230	+230	+230	+230	+230	+230	+230	+230	+135	+135	+135	+135	+135	+135	
800						+304	+330	+370	+435	+540	+700	+960	+1 360	+189	+189	+215	+255	+320	+425	
1 000						+260	+260	+260	+260	+260	+260	+260	-260	+145	+145	+145	+145	+145	+145	
1 250						+340	+370	+415	+490	+610	+790	+1 090	+1 540	+210	+210	+240	+285	+360	+480	
1 600						+290	+290	+290	+290	+290	+290	+290	+290	+160	+160	+160	+160	+160	+160	
2 000						+376	+410	+460	+550	+680	+880	+1 220	+1 720	+226	+226	+260	+310	+400	+530	
2 500						+320	+320	+320	+320	+320	+320	+320	+320	+170	+170	+170	+170	+170	+170	
3 150						+416	+455	+515	+610	+770	+1 010	+1 400	+2 000	+261	+261	+300	+360	+455	+615	
						+350	+350	+350	+350	+350	+350	+350	+350	+195	+195	+195	+195	+195	+195	
						+468	+515	+585	+700	+890	+1 170	+1 640	+2 340	+298	+298	+345	+415	+530	+720	
						+390	+390	+390	+390	+390	+390	+390	+390	+220	+220	+220	+220	+220	+220	
						+522	+580	+660	+800	+1 030	+1 350	+1 930	+2 730	+332	+332	+390	+470	+610	+840	
						+430	+430	+430	+430	+430	+430	+430	+430	+240	+240	+240	+240	+240	+240	
						+590	+655	+760	+920	+1 180	+1 580	+2 230	+3 280	+370	+370	+435	+540	+700	+960	
						+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+480	+260	+260	+260	+260	+260	+260	
						+655	+730	+850	+1 060	+1 380	+1 870	+2 620	+3 820	+425	+425	+500	+620	+830	+1 150	
						+520	+520	+520	+520	+520	+520	+520	+520	+290	+290	+290	+290	+290	+290	

注：各级的 (D) 主要用于精密机械和钟表制造业。

表 13.2-7 孔 EF 和 F 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		EF								F							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	+12 +10	+13 +10	+14 +10	+16 +10	+20 +10	+24 +10	+35 +10	+50 +10	+8 +6	+9 +6	+10 +6	+12 +6	+16 +6	+20 +6	+31 +6	+46 +6
3	6	+16.5 +14	+18 +14	+19 +14	+22 +14	+26 +14	+32 +14	+44 +14	+62 +14	+12.5 +10	+14 +10	+15 +10	+18 +10	+22 +10	+28 +10	+40 +10	+58 +10
6	10	+20.5 +18	+22 +18	+24 +18	+27 +18	+33 +18	+40 +18	+54 +18	+76 +18	+15.5 +13	+17 +13	+19 +13	+22 +13	+28 +13	+35 +13	+49 +13	+71 +13
10	18									+19 +16	+21 +16	+24 +16	+27 +16	+34 +16	+43 +16	+59 +16	+86 +16
18	30									+24 +20	+26 +20	+29 +20	+33 +20	+41 +20	+53 +20	+72 +20	+104 +20
30	50									+29 +25	+32 +25	+36 +25	+41 +25	+50 +25	+64 +25	+87 +25	+125 +25
50	80											+43 +30	+49 +30	+60 +30	+76 +30	+104 +30	
80	120											+51 +36	+58 +36	+71 +36	+90 +36	+123 +36	
120	180											+61 +43	+68 +43	+83 +43	+106 +43	+143 +43	
180	250											+70 +50	+79 +50	+96 +50	+122 +50	+165 +50	
250	315											+79 +56	+88 +56	+108 +56	+137 +56	+186 +56	
315	400											+87 +62	+98 +62	+119 +62	+151 +62	+202 +62	
400	500											+95 +68	+108 +68	+131 +68	+165 +68	+223 +68	
500	630												+120 +76	+146 +76	+186 +76	+251 +76	
630	800												+130 +80	+160 +80	+205 +80	+280 +80	
800	1 000												+142 +86	+176 +86	+226 +86	+316 +86	
1 000	1 250												+164 +98	+203 +98	+263 +98	+358 +98	
1 250	1 600												+188 +110	+235 +110	+305 +110	+420 +110	
1 600	2 000												+212 +120	+270 +120	+350 +120	+490 +120	
2 000	2 500												+240 +130	+305 +130	+410 +130	+570 +130	
2 500	3 150												+280 +145	+355 +145	+475 +145	+685 +145	

注：各级的 EF 主要用于精密机械和钟表制造业。

表 13.2-8 孔 FG 和 G 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		FG								G							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	+6 +4	+7 +4	+8 +4	+10 +4	+14 +4	+18 +4	+29 +4	+44 +4	+4 +2	+5 +2	+6 +2	+8 +2	+12 +2	+16 +2	+27 +2	+42 +2
3	6	+8.5 +6	+10 +6	+11 +6	+14 +6	+18 +6	+24 +6	+36 +6	+54 +6	+6.5 +4	+8 +4	+9 +4	+12 +4	+16 +4	+22 +4	+34 +4	+52 +4
6	10	+10.5 +8	+12 +8	+14 +8	+17 +8	+23 +8	+30 +8	+44 +8	+66 +8	+7.5 +5	+9 +5	+11 +5	+14 +5	+20 +5	+27 +5	+41 +5	+63 +5
10	18									+9 +6	+11 +6	+14 +6	+17 +6	+24 +6	+33 +6	+49 +6	+76 +6
18	30									+11 +7	+13 +7	+16 +7	+20 +7	+28 +7	+40 +7	+59 +7	+91 +7
30	50									+13 +9	+16 +9	+20 +9	+25 +9	+34 +9	+48 +9	+71 +9	+109 +9
50	80											+23 +10	+29 +10	+40 +10	+56 +10		
80	120											+27 +12	+34 +12	+47 +12	+66 +12		
120	180											+32 +14	+39 +14	+54 +14	+77 +14		
180	250											+35 +15	+44 +15	+61 +15	+87 +15		
250	315											+40 +17	+49 +17	+69 +17	+98 +17		
315	400											+43 +18	+54 +18	+75 +18	+107 +18		
400	500											+47 +20	+60 +20	+83 +20	+117 +20		
500	630												+66 +22	+92 +22	+132 +22		
630	800												+74 +24	+104 +24	+149 +24		
800	1 000												+82 +26	+116 +26	+166 +26		
1 000	1 250												+94 +28	+133 +28	+193 +28		
1 250	1 600												+108 +30	+155 +30	+225 +30		
1 600	2 000												+124 +32	+182 +32	+262 +32		
2 000	2 500												+144 +34	+209 +34	+314 +34		
2 500	3 150												+173 +38	+248 +38	+368 +38		

注：各级的 FG 主要用于精密机械和钟表制造业。

表 13.2-9 孔 H 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

基本尺寸/ mm		H																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
大于	至	偏 差																	
		μm									mm								
—	3	+0.8 0	+1.2 0	+2 0	+3 0	+4 0	+6 0	+10 0	+14 0	+25 0	+40 0	+60 0	+0.1 0	+0.14 0	+0.25 0	+0.4 0	+0.6 0		
3	6	+1 0	+1.5 0	+2.5 0	+4 0	+5 0	+8 0	+12 0	+18 0	+30 0	+48 0	+75 0	+0.12 0	+0.18 0	+0.3 0	+0.48 0	+0.75 0	+1.2 0	+1.8 0
6	10	+1 0	+1.5 0	+2.5 0	+4 0	+6 0	+9 0	+15 0	+22 0	+36 0	+58 0	+90 0	+0.15 0	+0.22 0	+0.36 0	+0.58 0	+0.9 0	+1.5 0	+2.2 0
10	18	+1.2 0	+2 0	+3 0	+5 0	+8 0	+11 0	+18 0	+27 0	+43 0	+70 0	+110 0	+0.18 0	+0.27 0	+0.43 0	+0.7 0	+1.1 0	1.8 0	+2.7 0
18	30	+1.5 0	+2.5 0	+4 0	+6 0	+9 0	+13 0	+21 0	+33 0	+52 0	+84 0	+130 0	+0.21 0	+0.33 0	+0.52 0	+0.84 0	+1.3 0	+2.1 0	+3.3 0
30	50	+1.5 0	+2.5 0	+4 0	+7 0	+11 0	+16 0	+25 0	+39 0	+62 0	+100 0	+160 0	+0.25 0	+0.39 0	+0.62 0	+1 0	+1.6 0	+2.5 0	+3.9 0
50	80	+2 0	+3 0	+5 0	+8 0	+13 0	+19 0	+30 0	+46 0	+74 0	+120 0	+190 0	+0.3 0	+0.46 0	+0.74 0	+1.2 0	+1.9 0	+3 0	+4.6 0
80	120	+2.5 0	+4 0	+6 0	+10 0	+15 0	+22 0	+35 0	+54 0	+87 0	+140 0	+220 0	+0.35 0	+0.54 0	+0.87 0	+1.4 0	+2.2 0	+3.5 0	+5.4 0
120	180	+3.5 0	+5 0	+8 0	+12 0	+18 0	+25 0	+40 0	+63 0	+100 0	+160 0	+250 0	+0.4 0	+0.63 0	+1 0	+1.6 0	+2.5 0	+4 0	+6.3 0
180	250	+4.5 0	+7 0	+10 0	+14 0	+20 0	+29 0	+46 0	+72 0	+115 0	+185 0	+290 0	+0.46 0	+0.72 0	+1.15 0	+1.85 0	+2.9 0	+4.6 0	+7.2 0
250	315	+6 0	+8 0	+12 0	+16 0	+23 0	+32 0	+52 0	+81 0	+130 0	+210 0	+320 0	+0.52 0	+0.81 0	+1.3 0	+2.1 0	+3.2 0	+5.2 0	+8.1 0

续表 13.2-9

基本尺寸/ mm		H																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
大于	至	偏差																	
		μm									mm								
315	400	+7 0	+9 0	+13 0	+18 0	+25 0	+36 0	+57 0	+89 0	+140 0	+230 0	+360 0	+0.57 0	+0.89 0	+1.4 0	+2.3 0	+3.6 0	+5.7 0	+8.9 0
400	500	+8 0	+10 0	+15 0	+20 0	+27 0	+40 0	+63 0	+97 0	+155 0	+250 0	+400 0	+0.63 0	+0.97 0	+1.55 0	+2.5 0	+4 0	+6.3 0	+9.7 0
500	630	+9 0	+11 0	+16 0	+22 0	+32 0	+44 0	+70 0	+110 0	+175 0	+280 0	+440 0	+0.7 0	+1.1 0	+1.75 0	+2.8 0	+4.4 0	+7 0	+11 0
630	800	+10 0	+13 0	+18 0	+25 0	+36 0	+50 0	+80 0	+125 0	+200 0	+320 0	+500 0	+0.8 0	+1.25 0	+2 0	+3.2 0	+5 0	+8 0	+12.5 0
800	1 000	+11 0	+15 0	+21 0	+28 0	+40 0	+56 0	+90 0	+140 0	+230 0	+360 0	+560 0	+0.9 0	+1.4 0	+2.3 0	+3.6 0	+5.6 0	+9 0	+14 0
1 000	1 250	+13 0	+18 0	+24 0	+33 0	+47 0	+66 0	+105 0	+165 0	+260 0	+420 0	+660 0	+1.05 0	+1.65 0	+2.6 0	+4.2 0	+6.6 0	+10.5 0	+16.5 0
1 250	1 600	+15 0	+21 0	+29 0	+39 0	+55 0	+78 0	+125 0	+195 0	+310 0	+500 0	+780 0	+1.25 0	+1.95 0	+3.1 0	+5 0	+7.8 0	+12.5 0	+19.5 0
1 600	2 000	+18 0	+25 0	+35 0	+46 0	+65 0	+92 0	+150 0	+230 0	+370 0	+600 0	+920 0	+1.5 0	+2.3 0	+3.7 0	+6 0	+9.2 0	+15 0	+23 0
2 000	2 500	+22 0	+30 0	+41 0	+55 0	+78 0	+110 0	+175 0	+280 0	+440 0	+700 0	+1 100 0	+1.75 0	+2.8 0	+4.4 0	+7 0	+11 0	+17.5 0	+28 0
2 500	3 150	+26 0	+36 0	+50 0	+68 0	+96 0	+135 0	+210 0	+330 0	+540 0	+860 0	+1 350 0	+2.1 0	+3.3 0	+5.4 0	+8.6 0	+13.5 0	+21 0	+33 0

注: 1. IT18 只用于大于 1 mm 的基本尺寸。

2. 黑框中的数值, 即基本尺寸大于 500~3 150 mm, IT1 至 IT5 的偏差值, 为试用的。

表 13.2-10 孔 JS 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

基本尺寸/ mm	JS																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
大于至	偏差																	
	μm																	
—	±0.4	±0.6	±1	±1.5	±2	±3	±5	±7	±12	±20	±30	±0.05	±0.07	±0.125	±0.2	±0.3		
3	±0.5	±0.75	±1.25	±2	±2.5	±4	±6	±9	±15	±24	±37	±0.06	±0.09	±0.15	±0.24	±0.375	±0.6	±0.9
6	±0.5	±0.75	±1.25	±2	±3	±4.5	±7	±11	±18	±29	±46	±0.075	±0.11	±0.18	±0.29	±0.45	±0.75	±1.1
10	±0.6	±1	±1.5	±2.5	±4	±5.5	±9	±13	±21	±36	±55	±0.09	±0.135	±0.215	±0.35	±0.55	±0.9	±1.35
18	±0.75	±1.25	±2	±3	±4.5	±6.5	±10	±16	±26	±42	±65	±0.105	±0.165	±0.26	±0.42	±0.65	±1.05	±1.65
30	±0.75	±1.25	±2	±3.5	±5.5	±8	±12	±19	±31	±50	±80	±0.125	±0.195	±0.31	±0.5	±0.8	±1.25	±1.95
50	±1	±1.5	±2.5	±4	±6.5	±9.5	±15	±23	±37	±60	±95	±0.15	±0.23	±0.37	±0.6	±0.95	±1.5	±2.3
80	±1.25	±2	±3	±5	±7.5	±11	±17	±27	±43	±70	±110	±0.175	±0.27	±0.435	±0.7	±1.1	±1.75	±2.7
120	±1.75	±2.5	±4	±6	±9	±12.5	±20	±31	±50	±80	±125	±0.2	±0.315	±0.5	±0.8	±1.25	±2	±3.15
180	±2.25	±3.5	±5	±7	±10	±14.5	±23	±36	±57	±92	±145	±0.23	±0.36	±0.575	±0.925	±1.45	±2.3	±3.6
250	±3	±4	±6	±8	±11.5	±16	±26	±40	±65	±105	±160	±0.28	±0.405	±0.65	±1.05	±1.6	±2.6	±4.05
315	±3.5	±4.5	±6.5	±9	±12.5	±18	±28	±44	±70	±115	±180	±0.285	±0.445	±0.7	±1.15	±1.8	±2.85	±4.45
400	±4	±5	±7.5	±10	±13.5	±20	±31	±48	±77	±125	±200	±0.315	±0.485	±0.775	±1.25	±2	±3.15	±4.85
500	±4.5	±5.5	±8	±11	±16	±22	±35	±55	±87	±140	±220	±0.35	±0.55	±0.875	±1.4	±2.2	±3.5	±5.5
630	±5	±6.5	±9	±12.5	±18	±25	±40	±62	±100	±160	±250	±0.4	±0.625	±1	±1.6	±2.5	±4	±6.25
800	±5.5	±7.5	±10.5	±14	±20	±28	±45	±70	±115	±180	±280	±0.45	±0.7	±1.15	±1.8	±2.8	±4.5	±7
1 000	±6.5	±9	±12	±16.5	±23.5	±33	±52	±82	±130	±210	±330	±0.525	±0.825	±1.3	±2.1	±3.3	±5.25	±8.25
1 250	±7.5	±10.5	±14.5	±19.5	±27.5	±39	±62	±97	±155	±250	±390	±0.625	±0.975	±1.55	±2.5	±3.9	±6.25	±9.75
1 600	±9	±12.5	±17.5	±23	±32.5	±46	±75	±115	±185	±300	±460	±0.75	±1.15	±1.85	±3	±4.6	±7.5	±11.5
2 000	±11	±15	±20.5	±27.5	±39	±55	±87	±140	±220	±350	±550	±0.875	±1.4	±2.2	±3.5	±5.5	±8.75	±14
2 500	±13	±18	±25	±34	±48	±67.5	±105	±165	±270	±430	±675	±1.05	±1.65	±2.7	±4.3	±6.75	±10.5	±16.5

注: 1. 为避免相同值的重复, 表列值以“±X”给出, 可为ES=+X, EI=-X, 例如, $^{+0.23}_{-0.23}$ mm。

2. IT14 至 IT18 只用于大于 1 mm 的基本尺寸。

3. 黑框中的数值, 即基本尺寸大于 500 ~ 3 150 mm, IT1 至 IT5 的偏差值, 为试用的。

表 13.2-11 孔 J 和 K 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		J				K							
大于	至	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	+2 -4	+4 -6	+6 +8		0 -2	0 -3	0 -4	0 -6	0 -10	0 -14	0 -25	0 -40
3	6	+5 -3	± 6	+10 -8		0 -2.5	+0.5 -3.5	0 -5	+2 -6	+3 -9	+5 -13		
6	10	+5 -4	+8 -7	+12 -10		0 -2.5	+0.5 -3.5	+1 -5	+2 -7	+5 -10	+6 -16		
10	18	+6 -5	+10 -8	+15 -12		0 -3	+1 -4	+2 -6	+2 9	+6 -12	+8 -19		
18	30	+8 -5	+12 -9	+20 -13		-0.5 -4.5	0 -6	+1 -8	+2 -11	+6 -15	+10 -23		
30	50	+10 -6	+14 -11	+24 -15		-0.5 -4.5	+1 -6	+2 -9	+3 -13	+7 -18	+12 -27		
50	80	+13 -6	+18 -12	+28 -18				+3 -10	+4 -15	+9 -21	+14 -32		
80	120	+16 -6	+22 -13	+34 -20				+2 -13	+4 -18	+10 -25	+16 -38		
120	180	+18 -7	+26 -14	+41 -22				+3 -15	+4 -21	+12 -28	+20 -43		
180	250	+22 -7	+30 -16	+47 -25				+2 -18	+5 -24	+13 -33	+22 -50		
250	315	+25 -7	+36 -16	+55 -26				+3 -20	+5 -27	+16 -36	+25 -56		
315	400	+29 -7	+39 -18	+60 -29				+3 -22	+7 -29	+17 -40	+28 -61		
400	500	+33 -7	+43 -20	+66 -31				+2 -25	+8 -32	+18 -45	+29 -68		
500	630								0 -44	0 -70	0 -110		
630	800								0 -50	0 80	0 -125		
800	1 000								0 -56	0 -90	0 -140		
1 000	1 250								0 -66	0 -105	0 -165		
1 250	1 600								0 -78	0 -125	0 -195		
1 600	2 000								0 -92	0 -150	0 -230		
2 000	2 500								0 -110	0 -175	0 -280		
2 500	3 150								0 -135	0 -210	0 -330		

- 注: 1. J9、J10 等公差带对称于零线, 其偏差值可见 Js9、Js10 等。
 2. 基本尺寸大于 3 mm 时, 大于 IT8 的 K 的偏差值不作规定。
 3. 基本尺寸大于 3~6 mm 的 J7 的偏差值与对应尺寸段的 Js7 等值。

表 13.2-12 孔 M 和 N 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		M								N										
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
—	3	-2 -4	-2 -5	-2 -6	-2 -8	-2 -12	-2 -16	-2 -27	-2 -42	-4 -6	-4 -7	-4 -8	-4 -10	-4 -14	-4 -18	-4 -29	-4 -44	-4 -64		
3	6	-3 -5.5	-2.5 -6.5	-3 -8	-1 -9	0 -12	+2 -16	-4 -34	-4 -52	-7 -9.5	-6.5 -10.5	-7 -12	-5 -13	-4 -16	-2 -20	0 -30	0 -48	0 -75		
6	10	-5 -7.5	-4.5 -8.5	-4 -10	-3 -12	0 -15	+1 -21	-6 -42	-6 -64	-9 -11.5	-8.5 -12.5	-8 -14	-7 -16	-4 -19	-3 -25	0 -36	0 -58	0 -90		
10	18	-6 -9	-5 -10	-4 -12	-4 -15	0 -18	+2 -25	-7 -50	-7 -77	-11 -14	-10 -15	-9 -17	-9 -20	-5 -23	-3 -30	0 -43	0 -70	0 -110		
18	30	-6.5 -10.5	-6 -12	-5 -14	-4 -17	0 -21	+4 -29	-8 -60	-8 -92	-13.5 -17.5	-13 -19	-12 -21	-11 -24	-7 -28	-3 -36	0 -52	0 -84	0 -130		
30	50	-7.5 -11.5	-6 -13	-5 -16	-4 -20	0 -25	+5 -34	-9 -71	-9 -109	-15.5 -19.5	-14 -21	-13 -24	-12 -28	-8 -33	-3 -42	0 -62	0 -100	0 -160		
50	80			-6 -19	-5 -24	0 -30	+5 -41					-15 -28	-14 -33	-9 -39	-4 -50	0 -74	0 -120	0 -190		
80	120			-8 -23	-6 -28	0 -35	+6 -48					-18 -33	-16 -38	-10 -45	-4 -58	0 -87	0 -140	0 -220		
120	180			-9 -27	-8 -33	0 -40	+8 -55					-21 -39	-20 -45	-12 -52	-4 -67	0 -100	0 -160	0 -250		
180	250			-11 -31	-8 -37	0 -46	+9 -63					-25 -45	-22 -51	-14 -60	-5 -77	0 -115	0 -185	0 -290		
250	315			-13 -36	-9 -41	0 -52	+9 -72					-27 -50	-25 -57	-14 -66	-5 -86	0 -130	0 -210	0 -320		
315	400			-14 -39	-10 -46	0 -57	+11 -78					-30 -55	-26 -62	-16 -73	-5 -94	0 -140	0 -230	0 -360		
400	500			-16 -43	-10 -50	0 -63	+11 -86					-33 -60	-27 -67	-17 -80	-6 -103	0 -155	0 -250	0 -400		
500	630			-26 -70	-26 -96	-26 -136						-44 -88	-44 -114	-44 -154	-44 -219					
630	800			-30 -80	-30 -110	-30 -155						-50 -100	-50 -130	-50 -175	-50 -250					
800	1 000			-34 -90	-34 -124	-34 -174						-56 -112	-56 -146	-56 -196	-56 -286					
1 000	1 250			-40 -106	-40 -145	-40 -205						-66 -132	-66 -171	-66 -231	-66 -326					
1 250	1 600			-48 -126	-48 -173	-48 -243						-78 -156	-78 -203	-78 -273	-78 -388					
1 600	2 000			-58 -150	-58 -208	-58 -288						-92 -184	-92 -242	-92 -322	-92 -462					
2 000	2 500			-68 -178	-68 -243	-68 -348						-110 -220	-110 -285	-110 -390	-110 -550					
2 500	3 150			-76 -211	-76 -286	-76 -406						-135 -270	-135 -345	-135 -465	-135 -675					

注：公差带 N9、N10 和 N11 只用于大于 1 mm 的基本尺寸。

表 13.2-13 孔 P 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

(μm)

基本尺寸/ mm		P							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	-6 -8	-6 -9	-6 -10	-6 -12	-6 -16	-6 -20	-6 -31	-6 -46
3	6	-11 -13.5	-10.5 -14.5	-11 -16	-9 -17	-8 -20	-12 -30	-12 -42	-12 -60
6	10	-14 -16.5	-13.5 -17.5	-13 -19	-12 -21	-9 -24	-15 -37	-15 -51	-15 -73
10	18	-17 -20	-16 -21	-15 -23	-15 -26	-11 -29	-18 -45	-18 -61	-18 -88
18	30	-20.5 -24.5	-20 -26	-19 -28	-18 -31	-14 -35	-22 -55	-22 -74	-22 -106
30	50	-24.5 -28.5	-23 -30	-22 -33	-21 -37	-17 -42	-26 -65	-26 -88	-26 -126
50	80			-27 -40	-26 -45	-21 -51	-32 -78	-32 -106	
80	120			-32 -47	-30 -52	-24 -59	-37 -91	-37 -124	
120	180			-37 -55	-36 -61	-28 -68	-43 -106	-43 -143	
180	250			-44 -64	-41 -70	-33 -79	-50 -122	-50 -165	
250	315			-49 -72	-47 -79	-36 -88	-56 -137	-56 -186	
315	400			-55 -80	-51 -87	-41 -98	-62 -151	-62 -202	
400	500			-61 -88	-55 -95	-45 -108	-68 -165	-68 -223	
500	630				-78 -122	-78 -148	-78 -188	-78 -253	
630	800				-88 -138	-88 -168	-88 -213	-88 -288	
800	1 000				-100 -156	-100 -190	-100 -240	-100 -330	
1 000	1 250				-120 -186	-120 -225	-120 -285	-120 -380	
1 250	1 600				-140 -218	-140 -265	-140 -335	-140 -450	
1 600	2 000				-170 -262	-170 -320	-170 -400	-170 -540	
2 000	2 500				-195 -305	-195 -370	-195 -475	-195 -635	
2 500	3 150				-240 -375	-240 -450	-240 -570	-240 -780	

表 13.2-14 孔 R 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		R							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	-10 -12	-10 -13	-10 -14	-10 -16	-10 -20	-10 -24	-10 -35	-10 -50
3	6	-14 -16.5	-13.5 -17.5	-14 -19	-12 -20	-11 -23	-15 -33	-15 -45	-15 -63
6	10	-18 -20.5	-17.5 -21.5	-17 -23	-16 -25	-13 -28	-19 -41	-19 -55	-19 -77
10	18	-22 -25	-21 -26	-20 -28	-20 -31	-16 -34	-23 -50	-23 -66	-23 -93
18	30	-26.5 -30.5	-26 -32	-25 -34	-24 -37	-20 -41	-28 -61	-28 -80	-10 -112
30	50	-32.5 -36.5	-31 -38	-30 -41	-29 -45	-25 -50	-34 -73	-34 -96	-34 -134
50	65			-36 -49	-35 -54	-30 -60	-41 -87		
65	80			-38 -51	-37 -56	-32 -62	-43 -89		
80	100			-46 -61	-44 -66	-38 -73	-51 -105		
100	120			-49 -64	-47 -69	-41 -76	-54 -108		
120	140			-57 -75	-56 -81	-48 -88	-63 -126		
140	160			-59 -77	-58 -83	-50 -90	-65 -128		
160	180			-62 -80	-61 -86	-53 -93	-68 -131		
180	200			-71 -91	-68 -97	-60 -106	-77 -149		
200	225			-74 -94	-71 -100	-63 -109	-80 -152		
225	250			-78 -98	-75 -104	-67 -113	-84 -156		
250	280			-87 -110	-85 -117	-74 -126	-94 -175		
280	315			-91 -114	-89 -121	-78 -130	-98 -179		
315	355			-101 -126	-97 -133	-87 -144	-108 -197		

基本尺寸/ mm		R							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
355	400			- 107 - 132	- 103 - 139	- 93 - 150	- 114 - 203		
400	450			- 119 - 146	- 113 - 153	- 103 - 166	- 126 - 223		
450	500			- 125 - 152	- 119 - 159	- 109 - 172	- 132 - 229		
500	560				- 150 - 194	- 150 - 220	- 150 - 260		
560	630				- 155 - 199	- 155 - 225	- 155 - 265		
630	710				- 175 - 225	- 175 - 255	- 175 - 300		
710	800				- 185 235	- 185 - 265	- 185 - 310		
800	900				- 210 - 266	- 210 - 300	- 210 - 350		
900	1 000				- 220 - 276	- 220 - 310	- 220 - 360		
1 000	1 120				- 250 - 316	- 250 - 355	- 250 - 415		
1 120	1 250				- 260 - 326	- 260 - 365	- 260 - 425		
1 250	1 400				- 300 - 378	- 300 - 425	- 300 - 495		
1 400	1 600				- 330 - 408	- 330 - 455	- 330 - 525		
1 600	1 800				- 370 - 462	- 370 - 520	- 370 - 600		
1 800	2 000				- 400 - 492	- 400 - 550	- 400 - 630		
2 000	2 240				- 440 - 550	- 440 - 615	- 440 - 720		
2 240	2 500				- 460 - 570	- 460 - 635	- 460 - 740		
2 500	2 800				- 550 - 685	- 550 - 760	- 550 - 880		
2 800	3 150				- 580 - 715	- 580 - 790	- 580 - 910		

表 13.2-15 孔 S 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		S							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	-14 -16	-14 -17	-14 -18	-14 -20	-14 -24	-14 -28	-14 -39	-14 -54
3	6	-18 -20.5	-17.5 -21.5	-18 -23	-16 -24	-15 -27	-19 -37	-19 -49	-19 -67
6	10	-22 -24.5	-21.5 -25.5	-21 -27	-20 -29	-17 -32	-23 -45	-23 -59	-23 -81
10	18	-27 -30	-26 -31	-25 -33	-25 -36	-21 -39	-28 -55	-28 -71	-28 -98
18	30	-33.5 -37.5	-33 -39	-32 -41	-31 -44	-27 -48	-35 -68	-35 -87	-35 -119
30	50	-41.5 -45.5	-40 -47	-39 -50	-38 -54	-34 -59	-43 -82	-43 -105	-43 -143
50	65			-48 -61	-47 -66	-42 -72	-53 -99	-53 -127	
65	80			-54 -67	-53 -72	-48 78	-59 105	-59 -133	
80	100			-66 -81	-64 -86	-58 -93	-71 -125	-71 -158	
100	120			-74 -89	-72 -94	-66 -101	-79 -133	-79 -166	
120	140			-86 -104	-85 -110	-77 -117	-92 -155	-92 -192	
140	160			-94 -112	-93 -118	-85 -125	-100 -163	-100 -200	
160	180			-102 -120	-101 -126	-93 -133	-108 -171	-108 -208	
180	200			-116 -136	-113 -142	-105 -151	-122 -194	-122 -237	
200	225			-124 -144	-121 -150	-113 -159	-130 -202	-130 -245	
225	250			-134 -154	-131 -160	-123 -169	-140 -212	-140 -255	
250	280			-151 -174	-149 -181	-138 -190	-158 -239	-158 -288	
280	315			-163 -186	-161 -193	-150 -202	-170 -251	-170 -300	
315	355			-183 -208	-179 -215	-169 -226	-190 -279	-190 -330	
355	400			-201 -226	-197 -233	-187 -244	-208 -297	-208 -348	
400	450			-225 -252	-219 -259	-209 -272	-232 -329	-232 -387	
450	500			-245 -272	-239 -279	-229 -292	-252 -349	-252 -407	

续表 13.2-15

基本尺寸/ mm		S							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
500	560				- 280 - 324	- 280 - 350	- 280 - 390		
560	630				- 310 - 354	- 310 - 380	- 310 - 420		
630	710				- 340 - 390	- 340 - 420	- 340 - 465		
710	800				- 380 - 430	- 380 - 460	- 380 - 505		
800	900				- 430 - 486	- 430 - 520	- 430 - 570		
900	1 000				- 470 - 526	- 470 - 560	- 470 - 610		
1 000	1 120				- 520 - 586	- 520 - 625	- 520 - 685		
1 120	1 250				- 580 - 646	- 580 - 685	- 580 - 745		
1 250	1 400				- 640 - 718	- 640 - 765	- 640 - 835		
1 400	1 600				- 720 - 798	- 720 - 845	- 720 - 915		
1 600	1 800				- 820 - 912	- 820 - 970	- 820 - 1 050		
1 800	2 000				- 920 - 1 012	- 920 - 1 070	- 920 - 1 150		
2 000	2 240				- 1 000 - 1 110	- 1 000 - 1 175	- 1 000 - 1 280		
2 240	2 500				- 1 100 - 1 210	- 1 100 - 1 275	- 1 100 - 1 380		
2 500	2 800				- 1 250 - 1 385	- 1 250 - 1 460	- 1 250 - 1 580		
2 800	3 150				- 1 400 - 1 535	- 1 400 - 1 610	- 1 400 - 1 730		

表 13.2-16 孔 T 和 U 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		T				U					
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9	10
—	3					-18 -22	-18 -24	-18 -28	-18 -32	-18 -43	-18 -58
3	6					-22 -27	-20 -28	-19 -31	-23 -41	-23 -53	-23 -71
6	10					-26 -32	-25 -34	-22 -37	-28 -50	-28 -64	-28 -86
10	18					-30 -38	-30 -41	-26 -44	-33 -60	-33 -76	-33 -103
18	24					-38 -47	-37 -50	-33 -54	-41 -74	-41 -93	-41 -125
24	30	-38 -47	-37 -50	-33 -54	-41 -74	-45 -54	-44 -57	-40 -61	-48 -81	-48 -100	-48 -132
30	40	-44 -55	-43 -59	-39 -64	-48 -87	-56 -67	-55 -71	-51 -76	-60 -99	-60 -122	-60 -160
40	50	-50 -61	-49 -65	-45 -70	-54 -93	-66 -77	-65 -81	-61 -86	-70 -109	-70 -132	-70 -170
50	65		-60 -79	-55 -85	-66 -112		-81 -100	-76 -106	-87 -133	-87 -161	-87 -207
65	80		-69 -88	-64 -94	-75 -121		-96 -115	-91 -121	-102 -148	-102 -176	-102 -222
80	100		-84 -106	-78 -113	-91 -145		-117 -139	-111 -146	-124 -178	-124 -211	-124 -264
100	120		-97 -119	-91 -126	-104 -158		-137 -159	-131 -166	-144 -198	-144 -231	-144 -284
120	140		-115 -140	-107 -147	-122 -185		-163 -188	-155 -195	-170 -233	-170 -270	-170 -330
140	160		-127 -152	-119 -159	-134 -197		-183 -208	-175 -215	-190 -253	-190 -290	-190 -350
160	180		-139 -164	-131 -171	-146 -209		-203 -228	-195 -235	-210 -273	-210 -310	-210 370
180	200		-157 -186	-149 -195	-166 -238		-227 -256	-219 -265	-236 -308	-236 -351	-236 -421
200	225		-171 -200	-163 -209	-180 -252		-249 -278	-241 -287	-258 -330	-258 -373	-258 -443
225	250		-187 -216	-179 -225	-196 -268		-275 -304	-267 -313	-284 -356	-284 -399	-284 -469
250	280		-209 -241	-198 -250	-218 -299		-306 -338	-295 -347	-315 -396	-315 -445	-315 -525
280	315		-231 -263	-220 -272	-240 -321		-341 -373	-330 -382	-350 -431	-350 -480	-350 -560
315	355		-257 -293	-247 -304	-268 -357		-379 -415	-369 -426	-390 -479	-390 -530	-390 -620

续表 13.2-16

基本尺寸/ mm		T				U					
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9	10
355	400		-283 -319	-273 -330	-294 -383		-424 -460	-414 -471	-435 -524	-435 -575	-435 -665
400	450		-317 -357	-307 -370	-330 -427		-477 -517	-467 -530	-490 -587	-490 -645	-490 -740
450	500		-347 -387	-337 -400	-360 -457		-527 -567	-517 -580	-540 -637	-540 -695	-540 -790
500	560		-400 -444	-400 -470	-400 -510		-600 -644	-600 -670	-600 -710		
560	630		-450 -494	-450 -520	-450 -560		-660 -704	-660 -730	-660 -770		
630	710		500 -550	500 -580	500 -625		-740 -790	-740 -820	-740 -865		
710	800		-560 -610	-560 -640	-560 -685		-840 -890	-840 -920	-840 -965		
800	900		-620 -676	-620 -710	-620 -760		-940 -996	-940 -1 030	-940 -1 080		
900	1 000		-680 -736	-680 -770	-680 -820		-1 050 -1 106	-1 050 -1 140	-1 050 -1 190		
1 000	1 120		-780 -846	-780 -885	-780 -945		-1 150 -1 216	-1 150 -1 255	-1 150 -1 315		
1 120	1 250		-840 -906	-840 -945	-840 -1 005		-1 300 -1 366	-1 300 -1 405	-1 300 -1 465		
1 250	1 400		-960 -1 038	-960 -1 085	-960 -1 155		-1 450 -1 528	-1 450 -1 575	-1 450 -1 645		
1 400	1 600		-1 050 -1 128	-1 050 -1 175	-1 050 -1 245		-1 600 -1 678	-1 600 -1 725	-1 600 -1 795		
1 600	1 800		-1 200 -1 292	-1 200 -1 360	-1 200 -1 430		-1 850 -1 942	-1 850 -2 000	-1 850 -2 080		
1 800	2 000		-1 350 -1 442	-1 350 -1 500	-1 350 -1 580		-2 000 -2 092	-2 000 -2 150	-2 000 -2 230		
2 000	2 240		-1 500 -1 610	-1 500 -1 675	-1 500 -1 780		-2 300 -2 410	-2 300 -2 475	-2 300 -2 580		
2 240	2 500		-1 650 -1 760	-1 650 -1 825	-1 650 -1 930		-2 500 -2 610	-2 500 -2 675	-2 500 -2 780		
2 500	2 800		-1 900 -2 035	-1 900 -2 110	-1 900 -2 230		-2 900 -3 035	-2 900 -3 110	-2 900 -3 230		
2 800	3 150		-2 100 -2 235	-2 100 -2 310	-2 100 -2 430		-3 200 -3 335	-3 200 -3 410	-3 200 -3 530		

注：基本尺寸至 24 mm 的 T5 至 T8 的偏差值未列入表内，建议以 U5 至 U8 代替。如非要 T5 至 T8，则可按表 13.2-2、表 13.2-3 和表 13.2-4 计算。

表 13.2-17 孔 V、X 和 Y 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		V				X						Y				
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
—	3					-20	-20	-20	-20	-20	-20					
						-24	-26	-30	-34	-45	-60					
3	6					-27	-25	-24	-28	-28	-28					
						-32	-33	-36	-46	-58	-76					
6	10					-32	-31	-28	-34	-34	-34					
						-38	-40	-43	-56	-70	-92					
10	14					-37	-37	-33	-40	-40	-40					
						-45	-48	-51	-67	-83	-110					
14	18	-36	-36	-32	-39	-42	-42	-38	-45	-45	-45					
		-44	-47	-50	-66	-50	-53	-56	-72	-88	-115					
18	24	-44	-43	-39	-47	-51	-50	-46	-54	-54	-54	-59	-55	-63	-63	-63
		-53	-56	-60	-80	-60	-63	-67	-87	-106	-138	-72	-76	-96	-115	-147
24	30	-52	-51	-47	-55	-61	-60	-56	-64	-64	-64	-71	-67	-75	-75	-75
		-61	-64	-68	-88	-70	-73	-77	-97	-116	-148	-84	-88	-108	-127	-159
30	40	-64	-63	-59	-68	-76	-75	-71	-80	-80	-80	-89	-85	-94	-94	-94
		-75	-79	-84	-107	-87	-91	-96	-119	-142	-180	-105	-110	-133	-156	-194
40	50	-77	-76	-72	-81	-93	-92	-88	-97	-97	-97	-109	-105	-114	-114	-114
		-88	-92	-97	-120	-104	-108	-113	-136	-159	-197	-125	-130	-153	-176	-214
50	65		-96	-91	-102		-116	-111	-122	-122		-138	-133	-144		
			-115	-121	-148		-135	-141	-168	-196		-157	-163	-190		
65	80		-114	-109	-120		-140	-135	-146	-146		-168	-163	-174		
			-133	-139	-166		-159	-165	-192	-220		-187	-193	-220		
80	100		-139	-133	-146		-171	-165	-178	-178		-207	-201	-214		
			-161	-168	-200		-193	-200	-232	-265		-229	-236	-268		
100	120		-165	-159	-172		-203	-197	-210	-210		-247	-241	-254		
			-187	-194	-226		-225	-232	-264	-297		-269	-276	-308		
120	140		-195	-187	-202		-241	-233	-248	-248		-293	-285	-300		
			-220	-227	-265		-266	-273	-311	-348		-318	-325	-363		
140	160		-221	-213	-228		-273	-265	-280	-280		-333	-325	-340		
			-246	-253	-291		-298	-305	-343	-380		-358	-365	-403		
160	180		-245	-237	-252		-303	-295	-310	-310		-373	-365	-380		
			-270	-277	-315		-328	-335	-373	-410		-398	-405	-443		
180	200		-275	-267	-284		-341	-333	-350	-350		-416	-408	-425		
			-304	-313	-356		-370	-379	-422	-465		-445	-454	-497		
200	225		-301	-293	-310		-376	-368	-385	-385		-461	-453	-470		
			-330	-339	-382		-405	-414	-457	-500		-490	-499	-542		

续表 13.2-17

基本尺寸/ mm		V				X						Y				
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
225	250		-331 -360	-323 -369	-340 -412		-416 -445	-408 -454	-425 -497	-425 -540		-511 -540	-503 -549	-520 -592		
250	280		-376 -408	-365 -417	-385 -466		-466 -498	-455 -507	-475 -556	-475 -605		-571 -603	-560 -612	-580 -661		
280	315		-416 -448	-405 -457	-425 -506		-516 -548	-505 -557	-525 -606	-525 -655		-641 -673	-630 -682	-650 -731		
315	355		-464 -500	-454 -511	-475 -564		-579 -615	-569 -626	-590 -679	-590 -730		-719 -755	-709 -766	-730 -819		
355	400		-519 -555	-509 -566	-530 -619		-649 -685	-639 -696	-660 -749	-660 -800		-809 -845	-799 -856	-820 -909		
400	450		-582 -622	-572 -635	-595 -692		-727 -767	-717 -780	-740 -837	-740 -895		-907 -947	-897 -960	-920 -1 017		
450	500		-647 -687	-637 -700	-660 -757		-807 -847	-797 -860	-820 -917	-820 -975		-987 -1 027	-977 -1 040	-1 000 -1 097		

注：1. 基本尺寸至 14 mm 的 V5 至 V8 的偏差值未列入表内，建议以 X5 至 X8 代替。如非要 V5 至 V8，则可按表 13.2-2、表 13.2-3 和表 13.2-4 计算。

2. 基本尺寸至 18 mm 的 Y6 至 Y10 的偏差值未列入表内，建议以 Z6 至 Z10 代替。如非要 Y6 至 Y10，则可按表 13.2-2、表 13.2-3 和表 13.2-4 计算。

表 13.2-18 孔 Z 和 ZA 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		Z						ZA					
大于	至	6	7	8	9	10	11	6	7	8	9	10	11
—	3	-26 -32	-26 -36	-26 -40	-26 -51	-26 -66	-26 -86	-32 -38	-32 -42	-32 -46	-32 -57	-32 -72	-32 -92
3	6	-32 -40	-31 -43	-35 -53	-35 -65	-35 -83	-35 -110	-39 -47	-38 -50	-42 -60	-42 -72	-42 -90	-42 -117
6	10	-39 -48	-36 -51	-42 -64	-42 -78	-42 -100	-42 -132	-49 -58	-46 -61	-52 -74	-52 -88	-52 -110	-52 -142
10	14	-47 -58	-43 -61	-50 -77	-50 -93	-50 -120	-50 -160	-61 -72	-57 -75	-64 -91	-64 -107	-64 -134	-64 -174
14	18	-57 -68	-53 -71	-60 -87	-60 -103	-60 -130	-60 -170	-74 -85	-70 -88	-77 -104	-77 -120	-77 -147	-77 -187
18	24	-69 -82	-65 -86	-73 -106	-73 -125	-73 -157	-73 -203	-94 -107	-90 -111	-98 -131	-98 -150	-98 -182	-98 -228
24	30	-84 -97	-80 -101	-88 -121	-88 -140	-88 -172	-88 -218	-114 -127	-110 -131	-118 -151	-118 -170	-118 -202	-118 -248

续表 13.2-18

基本尺寸/ mm		Z						ZA					
大于	至	6	7	8	9	10	11	6	7	8	9	10	11
30	40	-107 -123	-103 -128	-112 -151	-112 -174	-112 -212	-112 -272	-143 -159	-139 -164	-148 -187	-148 -210	-148 -248	-148 -308
40	50	-131 -147	-127 -152	-136 -175	-136 -198	-136 -236	-136 -296	-175 -191	-171 -196	-180 -219	-180 -242	-180 -280	-180 -340
50	65		-161 -191	-172 -218	-172 -246	-172 -292	-172 -362		-215 -245	-226 -272	-226 -300	-226 -346	-226 -416
65	80		-199 -229	-210 -256	-210 -284	-210 -330	-210 -400		-263 -293	-274 -320	-274 -348	-274 -394	-274 -464
80	100		-245 -280	-258 -312	-258 -345	-258 -398	-258 -478		-322 -357	-335 -389	-335 -422	-335 -475	-335 -555
100	120		-297 -332	-310 -364	-310 -397	-310 -450	-310 -530		-387 -422	-400 -454	-400 -487	-400 -540	-400 -620
120	140		-350 -390	-365 -428	-365 -465	-365 -525	-365 -615		-455 -495	-470 -533	-470 -570	-470 -630	-470 -720
140	160		-400 -440	-415 -478	-415 -515	-415 -575	-415 -665		-520 -560	-535 -598	-535 -635	-535 -695	-535 -785
160	180		-450 -490	-465 -528	-465 -565	-465 -625	-465 -715		-585 -625	-600 -663	-600 -700	-600 -760	-600 -850
180	200		-503 -549	-520 -592	-520 -635	-520 -705	-520 -810		-653 -699	-670 -742	-670 -785	-670 -855	-670 -960
200	225		-558 -604	-575 -647	-575 -690	-575 -760	-575 -865		-723 -769	-740 -812	-740 -855	-740 -925	-740 -1 030
225	250		-623 -669	-640 -712	-640 -755	-640 -825	-640 -930		-803 -849	-820 -892	-820 -935	-820 -1 005	-820 -1 110
250	280		-690 -742	-710 -791	-710 -840	-710 -920	-710 -1 030		-900 -952	-920 -1 001	-920 -1 050	-920 -1 130	-920 -1 240
280	315		-770 -822	-790 -871	-790 -920	-790 -1 000	-790 -1 110		-980 -1 032	-1 000 -1 081	-1 000 -1 130	-1 000 -1 210	-1 000 -1 320
315	355		-879 -936	-900 -989	-900 -1 040	-900 -1 130	-900 -1 260		-1 129 -1 186	-1 150 -1 239	-1 150 -1 290	-1 150 -1 380	-1 150 -1 510
355	400		-979 -1 036	-1 000 -1 089	-1 000 -1 140	-1 000 -1 230	-1 000 -1 360		-1 279 -1 336	-1 300 -1 389	-1 300 -1 440	-1 300 -1 530	-1 300 -1 660
400	450		-1 077 -1 140	-1 100 -1 197	-1 100 -1 255	-1 100 -1 350	-1 100 -1 500		-1 427 -1 490	-1 450 -1 547	-1 450 -1 605	-1 450 -1 700	-1 450 -1 850
450	500		-1 227 -1 290	-1 250 -1 347	-1 250 -1 405	-1 250 -1 500	-1 250 -1 650		-1 577 -1 640	-1 600 -1 697	-1 600 -1 755	-1 600 -1 850	-1 600 -2 000

表 13.2-19 孔 ZB 和 ZC 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		ZB					ZC				
大于	至	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11
—	3	-40	-40	-40	-40	-40	-60	-60	-60	-60	-60
		-50	-54	-65	-80	-100	-70	-74	-85	-100	-120
3	6	-46	-50	-50	-50	-50	-76	-80	-80	-80	-80
		-58	-68	-80	-98	-125	-88	-98	-110	-128	-155
6	10	-61	-67	-67	-67	-67	-91	-97	-97	-97	-97
		-76	-89	-103	-125	-157	-106	-119	-133	-155	-187
10	14	-83	-90	-90	-90	-90	-123	-130	-130	-130	-130
		-101	-117	-133	-160	-200	-141	-157	-173	-200	-240
14	18	-101	-108	-108	-108	-108	-143	-150	-150	-150	-150
		-119	-135	-151	-178	-218	-161	-177	-193	-220	-260
18	24	-128	-136	-136	-136	-136	-180	-188	-188	-188	-188
		-149	-169	-188	-220	-266	-201	-221	-240	-272	-318
24	30	-152	-160	-160	-160	-160	-210	-218	-218	-218	-218
		-173	-193	-212	-244	-290	-231	-251	-270	-302	-348
30	40	-191	-200	-200	-200	-200	-265	-274	-274	-274	-274
		-216	-239	-262	-300	-360	-290	-313	-336	-374	-434
40	50	-233	-242	-242	-242	-242	-316	-325	-325	-325	-325
		-258	-281	-304	-342	-402	-341	-364	-387	-425	-485
50	65	-289	-300	-300	-300	-300	-394	-405	-405	-405	-405
		-319	-346	-374	-420	-490	-424	-451	-479	-525	-595
65	80	-349	-360	-360	-360	-360	-469	-480	-480	-480	-480
		-379	-406	-434	-480	-550	-499	-526	-554	-600	-670
80	100	-432	-445	-445	-445	-445	-572	-585	-585	-585	-585
		-467	-499	-532	-585	-665	-607	-639	-672	-725	-805
100	120	-512	-525	-525	-525	-525	-677	-690	-690	-690	-690
		-547	-579	-612	-665	-745	-712	-744	-777	-830	-910
120	140	-605	-620	-620	-620	-620	-785	-800	-800	-800	-800
		-645	-683	-720	-780	-870	-825	-863	-900	-960	-1 050
140	160	-685	-700	-700	-700	-700	-885	-900	-900	-900	-900
		-725	-763	-800	-860	-950	-925	-963	-1 000	-1 060	-1 150
160	180	-765	-780	-780	-780	-780	-985	-1 000	-1 000	-1 000	-1 000
		-805	-843	-880	-940	-1 030	-1 025	-1 063	-1 100	-1 160	-1 250
180	200	-863	-880	-880	-880	-880	-1 133	-1 150	-1 150	-1 150	-1 150
		-909	-952	-995	-1 065	-1 170	-1 179	-1 222	-1 265	-1 335	-1 440
200	225	-943	-960	-960	-960	-960	-1 233	-1 250	-1 250	-1 250	-1 250
		-989	-1 032	-1 075	-1 145	-1 250	-1 279	-1 322	-1 365	-1 435	-1 540
225	250	-1 033	-1 050	-1 050	-1 050	-1 050	-1 333	-1 350	-1 350	-1 350	-1 350
		-1 079	-1 122	-1 165	-1 235	-1 340	-1 379	-1 422	-1 465	-1 535	-1 640
250	280	-1 180	-1 200	-1 200	-1 200	-1 200	-1 530	-1 550	-1 550	-1 550	-1 550
		-1 232	-1 281	-1 330	-1 410	-1 520	-1 582	-1 631	-1 680	-1 760	-1 870
280	315	-1 280	-1 300	-1 300	-1 300	-1 300	-1 680	-1 700	-1 700	-1 700	-1 700
		-1 332	-1 381	-1 430	-1 510	-1 620	-1 732	-1 781	-1 830	-1 910	-2 020
315	355	-1 479	-1 500	-1 500	-1 500	-1 500	-1 879	-1 900	-1 900	-1 900	-1 900
		-1 536	-1 589	-1 640	-1 730	-1 860	-1 936	-1 989	-2 040	-2 130	-2 260
355	400	-1 629	-1 650	-1 650	-1 650	-1 650	-2 079	-2 100	-2 100	-2 100	-2 100
		-1 686	-1 739	-1 790	-1 880	-2 010	-2 136	-2 189	-2 240	-2 330	-2 460
400	450	-1 827	-1 850	-1 850	-1 850	-1 850	-2 377	-2 400	-2 400	-2 400	-2 400
		-1 890	-1 947	-2 005	-2 100	-2 250	-2 440	-2 497	-2 555	-2 650	-2 800
450	500	-2 077	-2 100	-2 100	-2 100	-2 100	-2 577	-2 600	-2 600	-2 600	-2 600
		-2 140	-2 197	-2 255	-2 350	-2 500	-2 640	-2 697	-2 755	-2 850	-3 000

表 13.2-20 轴 a、b 和 c 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

基本尺寸/ mm	a						b						c					
	9	10	11	12	13	至	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	
—	-270	-270	-270	-270	-270	3	-140	-140	-140	-140	-140	-140	-60	-60	-60	-60	-60	
3	-295	-310	-330	-370	-410	6	-154	-165	-180	-200	-240	-280	-74	-85	-100	-120	-160	
6	-270	-270	-270	-270	-270	10	-140	-140	-140	-140	-140	-140	-70	-70	-70	-70	-70	
10	-300	-318	-345	-390	-450	18	-158	-170	-188	-215	-260	-320	-88	-100	-118	-145	-190	
18	-280	-280	-280	-280	-280	30	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-80	-80	-80	-80	-80	
30	-316	-338	-370	-430	-500	40	-172	-186	-208	-240	-300	-370	-102	-116	-138	-170	-230	
40	-290	-290	-290	-290	-290	50	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-95	-95	-95	-95	-95	
50	-333	-360	-400	-470	-560	65	-177	-193	-220	-260	-330	-420	-122	-138	-165	-205	-275	
65	-300	-300	-300	-300	-300	80	-160	-160	-160	-160	-160	-160	-110	-110	-110	-110	-110	
80	-352	-384	-430	-510	-630	100	-193	-212	-244	-290	-370	-490	-143	-162	-194	-240	-320	
100	-310	-310	-310	-310	-310	120	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-120	-120	-120	-120	-120	
120	-372	-410	-470	-560	-700	140	-209	-232	-270	-330	-420	-560	-159	-182	-220	-280	-370	
140	-320	-320	-320	-320	-320	160	-180	-180	-180	-180	-180	-180	-130	-130	-130	-130	-130	
160	-382	-420	-480	-570	-710	180	-219	-242	-280	-340	-430	-570	-169	-192	-230	-290	-380	
180	-340	-340	-340	-340	-340	200	-190	-190	-190	-190	-190	-190	-140	-140	-140	-140	-140	
200	-414	-460	-530	-640	-800	220	-236	-264	-310	-380	-490	-650	-186	-214	-260	-330	-440	
220	-360	-360	-360	-360	-360	240	-200	-200	-200	-200	-200	-200	-150	-150	-150	-150	-150	
240	-434	-480	-550	-660	-820	260	-246	-274	-320	-390	-500	-660	-196	-224	-270	-340	-450	
260	-380	-380	-380	-380	-380	280	-220	-220	-220	-220	-220	-220	-170	-170	-170	-170	-170	
280	-467	-520	-600	-730	-920	300	-274	-307	-360	-440	-570	-760	-224	-257	-310	-390	-520	
300	-410	-410	-410	-410	-410	320	-240	-240	-240	-240	-240	-240	-180	-180	-180	-180	-180	
320	-497	-550	-630	-760	-950	340	-294	-327	-380	-460	-590	-780	-234	-267	-320	-400	-530	
340	-460	-460	-460	-460	-460	360	-260	-260	-260	-260	-260	-260	-200	-200	-200	-200	-200	
360	-560	-620	-710	-860	-1 090	380	-323	-360	-420	-510	-660	-890	-263	-300	-360	-450	-600	

续表 13.2-20

基本尺寸/ mm	a										b						c						
	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	13	8	9	10	11	12	
大于																							
140	-520 -620	-520 -680	-520 -770	-520 -920	-520 -1 150	-280 -343	-280 -380	-280 -440	-280 -530	-280 -680	-280 -910	-210 -273	-210 -310	-210 -370	-210 -460	-210 -610							
160	-580 -680	-580 -740	-580 -830	-580 -980	-580 -1 210	-310 -373	-310 -410	-310 -470	-310 -560	-310 -710	-310 -940	-230 -293	-230 -330	-230 -390	-230 -480	-230							
180	-660 -775	-660 -845	-660 -950	-660 -1 120	-660 -1 380	-340 -412	-340 -455	-340 -525	-340 -630	-340 -800	-340 -1 060	-240 -312	-240 -355	-240 -425	-240 -530	-240							
200	-740 -855	-740 -925	-740 -1 030	-740 -1 200	-740 -1 460	-380 -452	-380 -495	-380 -565	-380 -670	-380 -840	-380 -1 100	-260 -332	-260 -375	-260 -445	-260 -550	-260							
225	-820 -935	-820 -1 005	-820 -1 110	-820 -1 280	-820 -1 540	-420 -492	-420 -535	-420 -605	-420 -710	-420 -880	-420 -1 140	-280 -352	-280 -395	-280 -465	-280 -570	-280							
250	-920 -1 050	-920 -1 130	-920 -1 240	-920 -1 440	-920 -1 730	-480 -561	-480 -610	-480 -690	-480 -800	-480 -1 000	-480 -1 290	-300 -381	-300 -430	-300 -510	-300 -620	-300							
280	-1 050 -1 180	-1 050 -1 260	-1 050 -1 370	-1 050 -1 570	-1 050 -1 860	-540 -621	-540 -670	-540 -750	-540 -860	-540 -1 060	-540 -1 350	-330 -411	-330 -460	-330 -540	-330 -650	-330							
315	-1 200 -1 340	-1 200 -1 430	-1 200 -1 560	-1 200 -1 770	-1 200 -2 090	-600 -689	-600 -740	-600 -830	-600 -960	-600 -1 170	-600 -1 490	-360 -449	-360 -500	-360 -590	-360 -720	-360							
355	-1 350 -1 490	-1 350 -1 580	-1 350 -1 710	-1 350 -1 920	-1 350 -2 240	-680 -769	-680 -820	-680 -910	-680 -1 040	-680 -1 250	-680 -1 570	-400 -489	-400 -540	-400 -630	-400 -760	-400							
400	-1 500 -1 655	-1 500 -1 750	-1 500 -1 900	-1 500 -2 130	-1 500 -2 470	-760 -857	-760 -915	-760 -1 010	-760 -1 160	-760 -1 390	-760 -1 730	-440 -537	-440 -595	-440 -690	-440 -840	-440							
450	-1 650 -1 805	-1 650 -1 900	-1 650 -2 050	-1 650 -2 280	-1 650 -2 620	-840 -937	-840 -995	-840 -1 090	-840 -1 240	-840 -1 470	-840 -1 810	-480 -577	-480 -635	-480 -730	-480 -880	-480							

注：基本尺寸小于 1 mm 时，各级的 a 和 b 均不采用。

表 13.2-21 轴 cd 和 d 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		cd										d									
大于	至	5	6	7	8	9	10	5	6	7	8	9	10	11	12	13					
—	3	-34 -38	-34 -40	-34 -44	-34 -48	-34 -59	-34 -74	-20 -24	-20 -26	-20 -30	-20 -34	-20 -45	-20 -60	-20 -80	-20 -120	-20 -160					
3	6	-46 -51	-46 -54	-46 -58	-46 -64	-46 -76	-46 -94	-30 -35	-30 -38	-30 -42	-30 -48	-30 -60	-30 -78	-30 -105	-30 -150	-30 -210					
6	10	-56 -62	-56 -65	-56 -71	-56 -78	-56 -92	-56 -114	-40 -46	-40 -49	-40 -55	-40 -62	-40 -76	-40 -98	-40 -130	-40 -190	-40 -260					
10	18							-50 -58	-50 -61	-50 -68	-50 -77	-50 -93	-50 -120	-50 -160	-50 -230	-50 -320					
18	30							-65 -74	-65 -78	-65 -86	-65 -98	-65 -117	-65 -149	-65 -195	-65 -275	-65 -395					
30	50							-80 -91	-80 -96	-80 -105	-80 -119	-80 -142	-80 -180	-80 -240	-80 -330	80 470					
50	80							-100 -113	-100 -119	-100 -130	-100 -146	-100 -174	-100 -220	-100 -290	-100 -400	-100 -560					
80	120							-120 -135	-120 -142	-120 -155	-120 -174	-120 -207	-120 -260	-120 -340	-120 -470	-120 -660					
120	180							-145 -163	-145 -170	-145 -185	-145 -208	-145 -245	-145 -305	-145 -395	-145 -545	-145 -775					
180	250							-170 -190	-170 -199	-170 -216	-170 -242	-170 -285	-170 -355	-170 -460	-170 -630	170 890					
250	315							-190 -213	-190 -222	-190 -242	-190 -271	-190 -320	-190 -400	-190 -510	-190 -710	190 1 000					

续表 13.2-21

基本尺寸/ mm	cd										d															
	大于	至	5	6	7	8	9	10	5	6	7	8	9	10	11	12	13									
315		400							-210	-210	-210	-210	-210	-210	-210	-210	-210	-235	-246	-267	-299	-350	-440	-570	-780	-1 100
400		500							-230	-230	-230	-230	-230	-230	-230	-230	-230	-257	-270	-293	-327	-385	-480	-630	-860	-1 200
500		630																		-260	-260	-370	-435	-540	-700	
630		800																		-290	-290	-415	-490	-610	-790	
800		1 000																		-320	-320	-460	-550	-680	-880	
1 000		1 250																		-350	-350	-455	-515	-610	-770	-1 010
1 250		1 600																		-390	-390	-585	-700	-890	-1 170	
1 600		2 000																		-430	-430	-660	-800	-1 030	-1 350	
2 000		2 500																		-480	-480	-760	-920	-1 180	-1 580	
2 500		3 150																		-520	-520	-850	-1 060	-1 380	-1 870	

注：各级的 cd 主要用于精密机械和钟表制造业。

表 13.2-22 轴 e 和 ef 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		e						ef							
大于	至	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	-14 -18	-14 -20	-14 -24	-14 -28	-14 -39	-14 -54	-10 -12	10 -13	-10 -14	-10 -16	-10 -20	-10 -24	-10 -35	-10 -50
3	6	-20 -25	-20 -28	-20 -32	-20 -38	-20 -50	-20 -68	-14 -16.5	-14 -18	-14 -19	-14 -22	-14 -26	-14 -32	-14 -44	-14 -62
6	10	-25 -31	-25 -34	-25 -40	-25 -47	-25 -61	-25 -83	-18 -20.5	-18 -22	-18 -24	-18 -27	-18 -33	-18 -40	-18 -54	-18 -76
10	18	-32 -40	-32 -43	-32 -50	-32 -59	-32 -75	-32 -102								
18	30	-40 -49	-40 -53	-40 -61	-40 -73	-40 -92	-40 -124								
30	50	-50 -61	-50 -66	-50 -75	-50 -89	-50 -112	-50 -150								
50	80	-60 -73	-60 -79	-60 -90	-60 -106	-60 -134	-60 -180								
80	120	-72 -87	-72 -94	-72 -107	-72 -126	-72 -212	-72 -159								
120	180	-85 103	-85 -110	-85 -125	-85 -148	-85 -185	-85 -245								
180	250	-100 -120	-100 -129	-100 -146	-100 -172	-100 -215	-100 -285								
250	315	-110 -133	-110 -142	-110 -162	-110 -191	-110 -240	-110 -320								
315	400	-125 -150	-125 -161	-125 -182	-125 -214	-125 -265	-125 -355								
400	500	-135 -162	-135 -175	-135 -198	-135 -232	-135 -290	-135 -385								
500	630		-145 -189	-145 -215	-145 -255	-145 -320	-145 -425								
630	800		-160 -210	-160 -240	-160 -285	-160 -360	-160 -480								
800	1 000		-170 -226	-170 -260	-170 -310	-170 -400	-170 -530								
1 000	1 250		-195 -261	-195 -300	-195 -360	-195 -455	-195 -615								
1 250	1 600		-220 -298	-220 -345	-220 -415	-220 -530	-220 -720								
1 600	2 000		-240 -332	-240 -390	-240 -470	-240 -610	-240 -840								
2 000	2 500		-260 -370	-260 -435	-260 -540	-260 -700	-260 -960								
2 500	3 150		-290 -425	-290 -500	-290 -620	-290 -830	-290 -1 150								

注：各级的 ef 主要用于精密机械和钟表制造业。

表 13.2-23 轴 f 和 fg 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		f								fg							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	-6 -8	-6 -9	-6 -10	-6 -12	-6 -16	-6 -20	-6 -31	-6 -46	-4 -6	-4 -7	-4 -8	-4 -10	-4 -14	-4 -18	-4 -29	-4 -44
3	6	-10 -12.5	-10 -14	-10 -15	-10 -18	-10 -22	10 -28	-10 -40	-10 -58	-6 -8.5	-6 -10	-6 -11	-6 -14	-6 -18	-6 -24	-6 -36	-6 -54
6	10	-13 -15.5	-13 -17	-13 -19	-13 -22	-13 -28	-13 -35	-13 -49	-13 -71	-8 -10.5	-8 -12	-8 -14	-8 -17	-8 -23	-8 -30	-8 -44	-8 -66
10	18	-16 -19	-16 -21	-16 -24	-16 -27	-16 -34	-16 -43	-16 -59	-16 -86								
18	30	-20 -24	-20 -26	-20 -29	-20 -33	-20 -41	-20 -53	-20 -72	-20 -104								
30	50	-25 -29	-25 -32	-25 -36	-25 -41	-25 -50	-25 -64	-25 -87	-25 -125								
50	80		-30 -38	-30 -43	-30 -49	-30 -60	-30 -76	-30 -104									
80	120		-36 -46	-36 -51	-36 -58	-36 -71	-36 -90	-36 -123									
120	180		-43 55	-43 61	-43 -68	-43 -83	-43 -106	-43 -143									
180	250		-50 -64	-50 -70	-50 -79	-50 -96	-50 -122	-50 -165									
250	315		-56 -72	-56 -79	-56 -88	-56 -108	-56 -137	-56 -185									
315	400		-62 -80	-62 -87	-62 -98	-62 -119	-62 -151	-62 -202									
400	500		-68 -88	-68 -95	-68 -108	-68 -131	-68 -165	-68 -223									
500	630				-76 -120	-76 -146	-76 -186	-76 -251									
630	800				-80 -130	-80 -160	-80 -205	-80 -280									
800	1 000				-86 -142	-86 -176	-86 -226	-86 -316									
1 000	1 250				-98 -164	-98 -203	-98 -263	-98 -358									
1 250	1 600				-110 -188	-110 -235	-110 -305	-110 -420									
1 600	2 000				-120 -212	-120 -270	-120 -350	-120 -490									
2 000	2 500				130 -240	130 -305	-130 -410	-130 -570									
2 500	3 150				-145 -280	-145 -355	-145 -475	-145 -685									

注：各级的 fg 主要用于精密机械和钟表制造业。

表 13.2-24 轴 g 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		g							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	-2 -4	-2 -5	-2 -6	-2 -8	-2 -12	-2 -16	-2 -27	-2 -42
3	6	-4 -6.5	-4 -8	-4 -9	-4 -12	-4 -16	-4 -22	-4 -34	-4 -52
6	10	-5 -7.5	-5 -9	-5 -11	-5 -14	-5 -20	-5 -27	-5 -41	-5 -63
10	18	-6 -9	-6 -11	-6 -14	-6 -17	-6 -24	-6 -33	-6 -49	-6 -76
18	30	-7 -11	-7 -13	-7 -16	-7 -20	-7 -28	-7 -40	-7 -59	-7 -91
30	50	-9 -13	-9 -16	-9 -20	-9 -25	-9 -34	-9 -48	-9 -71	-9 -109
50	80		-10 -18	-10 -23	-10 -29	-10 -40	-10 -56		
80	120		-12 -22	-12 -27	-12 -34	-12 -47	-12 -66		
120	180		-14 -26	-14 -32	-14 -39	-14 -54	-14 -77		
180	250		-15 -29	-15 -35	-15 -44	-15 -61	-15 -87		
250	315		-17 -33	-17 -40	-17 -49	-17 -69	-17 -98		
315	400		-18 -36	-18 -43	-18 -54	-18 -75	-18 -107		
400	500		-20 -40	-20 -47	-20 -60	-20 -83	-20 -117		
500	630				-22 -66	-22 -92	-22 -132		
630	800				-24 -74	-24 -104	-24 -149		
800	1 000				-26 -82	-26 -116	-26 -166		
1 000	1 250				-28 -94	-28 -133	-28 -193		
1 250	1 600				-30 -108	-30 -155	-30 -225		
1 600	2 000				-32 -124	-32 -182	-32 -262		
2 000	2 500				-34 -144	-34 -209	-34 -314		
2 500	3 150				-38 -173	-38 -248	-38 -368		

表 13.2-25 轴 h 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

基本尺寸/ mm		h																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
大	至	偏 差																	
		mm																	
		μm																	
—	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	-0.8	-1.2	-2	-3	-4	-6	-10	-14	-25	-40	-60	-0.1	-0.14	-0.25	-0.4	-0.6		
3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	-1	-1.5	-2.5	-4	-5	-8	-12	-18	-30	-48	-75	-0.12	-0.18	-0.3	-0.48	-0.75	-1.2	-1.8
6	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	-1	-1.5	-2.5	-4	-6	-9	-15	-22	-36	-58	-90	-0.15	-0.22	-0.36	-0.58	-0.9	-1.5	-2.2
10	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	-1.2	-2	-3	-5	-8	-11	-18	-27	-43	-70	-110	-0.18	-0.27	-0.43	-0.7	-1.1	-1.8	-2.7
18	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30	-1.5	-2.5	-4	-6	-9	-13	-21	-33	-52	-84	-130	-0.21	-0.33	-0.52	-0.84	-1.3	-2.1	-3.3
30	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50	-1.5	-2.5	-4	-7	-11	-16	-25	-39	-62	-100	-160	-0.25	-0.39	-0.62	-1	-1.6	-2.5	-3.9
50	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	80	-2	-3	-5	-8	-13	-19	-30	-46	-74	-120	-190	-0.3	-0.46	-0.74	-1.2	-1.9	-3	-4.6
80	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	120	-2.5	-4	-6	-10	-15	-22	-35	-54	-87	-140	-220	-0.35	-0.54	-0.87	-1.4	-2.2	-3.5	5.4
120	180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	180	-3.5	-5	-8	-12	-18	-25	-40	-63	-100	-160	-250	-0.4	-0.63	-1	-1.6	-2.5	4	6.3
180	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	250	-4.5	-7	-10	-14	-20	-29	-46	-72	-115	-185	-290	-0.46	-0.72	-1.15	-1.85	-2.9	-4.6	-7.2
250	315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	315	-6	-8	-12	-16	-23	-32	-52	-81	-130	-210	-320	-0.52	-0.81	-1.3	-2.1	-3.2	-5.2	8.1

续表 13.2-25

基本尺寸/ mm		b																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
大于		偏差																	
		μm																	
至		mm																	
315	400	0 -7	0 -9	0 -13	0 -18	0 -25	0 -36	0 -57	0 -89	0 -140	0 -230	0 -360	0 -570	0 -890	0 -1360	0 -2040	0 -3060	0 -4590	0 -6855
400	500	0 -8	0 -10	0 -15	0 -20	0 -27	0 -40	0 -63	0 -97	0 -155	0 -250	0 -400	0 -630	0 -970	0 -1455	0 -2205	0 -3360	0 -5040	0 -7425
500	630	0 -9	0 -11	0 -16	0 -22	0 -32	0 -44	0 -70	0 -110	0 -175	0 -280	0 -440	0 -670	0 -1010	0 -1515	0 -2265	0 -3420	0 -5145	0 -7605
630	800	0 -10	0 -13	0 -18	0 -25	0 -36	0 -50	0 -80	0 -125	0 -200	0 -320	0 -500	0 -750	0 -1125	0 -1700	0 -2550	0 -3825	0 -5670	0 -8445
800	1 000	0 -11	0 -15	0 -21	0 -28	0 -40	0 -56	0 -90	0 -140	0 -230	0 -360	0 -560	0 -840	0 -1260	0 -1890	0 -2835	0 -4252.5	0 -6378.75	0 -9463.125
1 000	1 250	0 -13	0 -18	0 -24	0 -33	0 -47	0 -66	0 -105	0 -165	0 -260	0 -420	0 -660	0 -1005	0 -1507.5	0 -2261.25	0 -3391.875	0 -5087.8125	0 -7631.71875	0 -11447.578125
1 250	1 600	0 -15	0 -21	0 -29	0 -39	0 -55	0 -78	0 -125	0 -195	0 -310	0 -500	0 -780	0 -1170	0 -1755	0 -2632.5	0 -3948.75	0 -5923.125	0 -8884.6875	0 -13327.03125
1 600	2 000	0 -18	0 -25	0 -35	0 -46	0 -65	0 -92	0 -150	0 -230	0 -370	0 -600	0 -920	0 -1380	0 -2070	0 -3105	0 -4657.5	0 -6986.25	0 -10479.375	0 -15719.0625
2 000	2 500	0 -22	0 -30	0 -41	0 -55	0 -78	0 -110	0 -175	0 -280	0 -440	0 -700	0 -1050	0 -1575	0 -2362.5	0 -3543.75	0 -5315.625	0 -7973.4375	0 -11960.15625	0 -17940.234375
2 500	3 150	0 -26	0 -36	0 -50	0 -68	0 -96	0 -135	0 -210	0 -330	0 -540	0 -860	0 -1350	0 -2025	0 -3037.5	0 -4556.25	0 -6834.375	0 -10251.5625	0 -15377.34375	0 -23066.015625

注: 1. IT14至IT18只用于大于1 mm的基本尺寸。

2. 黑框中的数值, 即基本尺寸大于500~3 150 mm, IT1至IT5的偏差值, 为试用的。

表 13.2-26 轴 js 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

基本尺寸/ mm	js																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
大于	μm																	
至	mm																	
—	±0.4	±0.6	±1	±1.5	±2	±3	±5	±7	±12	±20	±30	±0.05	±0.07	±0.125	±0.2	±0.3		
3	±0.5	±0.75	±1.25	±2	±2.5	±4	±6	±9	±15	±24	±37	±0.06	±0.09	±0.15	±0.24	±0.375	±0.6	±0.9
6	±0.5	±0.75	±1.25	±2	±3	±4.5	±7	±11	±18	±29	±45	±0.075	±0.11	±0.18	±0.29	±0.45	±0.75	±1.1
10	±0.6	±1	±1.5	±2.5	±4	±5.5	±9	±13	±21	±35	±55	±0.09	±0.135	±0.215	±0.35	±0.55	±0.9	±1.35
18	±0.75	±1.25	±2	±3	±4.5	±6.5	±10	±16	±26	±42	±65	±0.105	±0.165	±0.26	±0.42	±0.65	±1.05	±1.65
30	±0.75	±1.25	±2	±3.5	±5.5	±8	±12	±19	±31	±50	±80	±0.125	±0.195	±0.31	±0.5	±0.8	±1.25	±1.95
50	±1	±1.5	±2.5	±4	±6.5	±9.5	±15	±23	±37	±60	±95	±0.15	±0.23	±0.37	±0.6	±0.95	±1.5	±2.3
80	±1.25	±2	±3	±5	±7.5	±11	±17	±27	±43	±70	±110	±0.175	±0.27	±0.435	±0.7	±1.1	±1.75	±2.7
120	±1.75	±2.5	±4	±6	±9	±12.5	±20	±31	±50	±80	±125	±0.2	±0.315	±0.5	±0.8	±1.25	±2	±3.15
180	±2.25	±3.5	±5	±7	±10	±14.5	±23	±36	±57	±92	±145	±0.23	±0.36	±0.575	±0.925	±1.45	±2.3	±3.6
250	±3	±4	±6	±8	±11.5	±16	±26	±40	±65	±105	±160	±0.26	±0.405	±0.65	±1.05	±1.6	±2.6	±4.05
315	±3.5	±4.5	±6.5	±9	±12.5	±18	±28	±44	±70	±115	±180	±0.285	±0.445	±0.7	±1.15	±1.8	±2.85	±4.45
400	±4	±5	±7.5	±10	±13.5	±20	±31	±48	±77	±125	±200	±0.315	±0.485	±0.775	±1.25	±2	±3.15	±4.85
500	±4.5	±5.5	±8	±11	±16	±22	±35	±55	±87	±140	±220	±0.35	±0.55	±0.875	±1.4	±2.2	±3.5	±5.5
630	±5	±6.5	±9	±12.5	±18	±25	±40	±62	±100	±160	±250	±0.4	±0.625	±1	±1.6	±2.5	±4	±6.25
800	±5.5	±7.5	±10.5	±14	±20	±28	±45	±70	±115	±180	±280	±0.45	±0.7	±1.15	±1.8	±2.8	±4.5	±7
1 000	±6.5	±9	±12	±16.5	±23.5	±33	±52	±82	±130	±210	±330	±0.525	±0.825	±1.3	±2.1	±3.3	±5.25	±8.25
1 250	±7.5	±10.5	±14.5	±19.5	±27.5	±39	±62	±97	±155	±250	±390	±0.625	±0.975	±1.55	±2.5	±3.9	±6.25	±9.75
1 600	±9	±12.5	±17.5	±23	±32.5	±46	±75	±115	±185	±300	±460	±0.75	±1.15	±1.85	±3	±4.6	±7.5	±11.5
2 000	±11	±15	±20.5	±27.5	±39	±55	±87	±140	±220	±350	±550	±0.875	±1.4	±2.2	±3.5	±5.5	±8.75	±14
2 500	±13	±18	±25	±34	±48	±67.5	±105	±165	±270	±430	±675	±1.05	±1.65	±2.7	±4.3	±6.75	±10.5	±16.5

注: 1. 为避免相同值的重复, 表列值以“±X”给出, 可为 es = +X, ei = -X, 例如, $\begin{matrix} +0.23 \\ 0.23 \end{matrix}$ mm.

2. IT14 至 IT18 只用于大于 1 mm 的基本尺寸。

3. 黑框中的数值, 即基本尺寸大于 500 ~ 3 150 mm, IT3 至 IT5 的偏差值, 为试用的。

表 13.2-27 轴 j 和 k 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		j				k											
大于	至	5	6	7	8	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
—	3	±2	+4 -2	+6 -4	+8 -6	+2 0	+3 0	+4 0	+6 0	+10 0	+14 0	+25 0	+40 0	+60 0	+100 0	+140 0	
3	6	+3 -2	+6 -2	+8 -4		+2.5 0	+5 +1	+6 +1	+9 +1	+13 +1	+18 0	+30 0	+48 0	+75 0	+120 0	+180 0	
6	10	+4 -2	+7 -2	+10 -5		+2.5 0	+5 +1	+7 +1	+10 +1	+16 +1	+22 0	+36 0	+58 0	+90 0	+150 0	+220 0	
10	18	+5 -3	+8 -3	+12 -6		+3 0	+6 +1	+9 +1	+12 +1	+19 +1	+27 0	+43 0	+70 0	+110 0	+180 0	+270 0	
18	30	+5 -4	+9 -4	+13 -8		+4 0	+8 +2	+11 +2	+15 +2	+23 +2	+33 0	+52 0	+84 0	+130 0	+210 0	+330 0	
30	50	+6 -5	+11 -5	+15 -10		+4 0	+9 +2	+13 +2	+18 +2	+27 +2	+39 0	+62 0	+100 0	+160 0	+250 0	+390 0	
50	80	+6 -7	+12 -7	+18 -12			+10 +2	+15 +2	+21 +2	+32 +2	+46 0	+74 0	+120 0	+190 0	+300 0	+460 0	
80	120	+6 -9	+13 -9	+20 -15			+13 +3	+18 +3	+25 +3	+38 +3	+54 0	+87 0	+140 0	+220 0	+350 0	+540 0	
120	180	+7 -11	+14 -11	+22 -18			+15 +3	+21 +3	+28 +3	+43 +3	+63 0	+100 0	+160 0	+250 0	+400 0	+630 0	
180	250	+7 -13	+16 -13	+25 -21			+18 +4	+24 +4	+33 +4	+50 +4	+72 0	+115 0	+185 0	+290 0	+460 0	+720 0	
250	315	+7 -16	±16	±26			+20 +4	+27 +4	+36 +4	+56 +4	+81 0	+130 0	+210 0	+320 0	+520 0	+810 0	
315	400	+7 -18	±18	+29 -28			+22 +4	+29 +4	+40 +4	+61 +4	+89 0	+140 0	+230 0	+360 0	+570 0	+890 0	
400	500	+7 -20	±20	+31 -32			+25 +5	+32 +5	+45 +5	+68 +5	+97 0	+155 0	+250 0	+400 0	+630 0	+970 0	
500	630								+44 0	+70 0	+110 0	+175 0	+280 0	+440 0	+700 0	+1 100 0	
630	800								+50 0	+80 0	+125 0	+200 0	+320 0	+500 0	+800 0	+1 250 0	
800	1 000								+56 0	+90 0	+140 0	+230 0	+360 0	+560 0	+900 0	+1 400 0	
1 000	1 250								+66 0	+105 0	+165 0	+260 0	+420 0	+660 0	+1 050 0	+1 650 0	
1 250	1 600								+78 0	+125 0	+195 0	+310 0	+500 0	+780 0	+1 250 0	+1 950 0	
1 600	2 000								+92 0	+150 0	+230 0	+370 0	+600 0	+920 0	+1 500 0	+2 300 0	
2 000	2 500								+110 0	+175 0	+280 0	+440 0	+700 0	+1 100 0	+1 750 0	+2 800 0	
2 500	3 150								+135 0	+210 0	+330 0	+540 0	+860 0	+1 350 0	+2 100 0	+3 300 0	

注: js5、js6 和 js7 的某些极限值与 js5、js6 和 js7 一样用“±X”表示。

表 13.2-28 轴 m 和 n 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		m							n						
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8	9
—	3	+4 +2	+5 +2	+6 +2	+8 +2	+12 +2	+16 +2	+27 +2	+6 +4	+7 +4	+8 +4	+10 +4	+14 +4	+18 +4	+29 +4
3	6	+6.5 +4	+8 +4	+9 +4	+12 +4	+16 +4	+22 +4	+34 +4	+10.5 +8	+12 +8	+13 +8	+16 +8	+20 +8	+26 +8	+38 +8
6	10	+8.5 +6	+10 +6	+12 +6	+15 +6	+21 +6	+28 +6	42 6	+12.5 +10	+14 +10	+16 +10	+19 +10	+25 +10	+32 +10	+46 +10
10	18	+10 +7	+12 +7	+15 +7	+18 +7	+25 +7	+34 +7	+50 +7	+15 +12	+17 +12	+20 +12	+23 +12	+30 +12	+39 +12	+55 +12
18	30	+12 +8	+14 +8	+17 +8	+21 +8	+29 +8	+41 +8	+60 +8	+19 +15	+21 +15	+24 +15	+28 +15	+36 +15	+48 +15	+67 +15
30	50	+13 +9	+16 +9	+20 +9	+25 +9	+34 +9	+48 +9	+71 +9	+21 +17	+24 +17	+28 +17	+33 +17	+42 +17	+56 +17	+79 +17
50	80		+19 +11	+24 +11	+30 +11	+41 +11				+28 +20	+33 +20	+39 +20	+50 +20		
80	120		+23 +13	+28 +13	+35 +13	+48 +13				+33 +23	+38 +23	+45 +23	+58 +23		
120	180		+27 +15	+33 +15	+40 +15	+55 +15				+39 +27	+45 +27	+52 +27	+67 +27		
180	250		+31 +17	+37 +17	+46 +17	+63 +17				+45 +31	+51 +31	+60 +31	+77 +31		
250	315		+36 +20	+43 +20	+52 +20	+72 +20				+50 +34	+57 +34	+66 +34	+86 +34		
315	400		+39 +21	+46 +21	+57 +21	+78 +21				+55 +37	+62 +37	+73 +37	+94 +37		
400	500		+43 +23	+50 +23	+63 +23	+86 +23				+60 +40	+67 +40	+80 +40	+103 +40		
500	630				+70 +26	+96 +26						+88 +44	+114 +44		
630	800				+80 +30	+110 +30						+100 +50	+130 +50		
800	1 000				+90 +34	+124 +34						+112 +56	+146 +56		
1 000	1 250				+106 +40	+145 +40						+132 +66	+171 +66		
1 250	1 600				+126 +48	+173 +48						+156 +78	+203 +78		
1 600	2 000				+150 +58	+208 +58						+184 +92	+242 +92		
2 000	2 500				+178 +68	+243 +68						+220 +110	+285 +110		
2 500	3 150				+211 +76	+286 +76						+270 +135	+345 +135		

表 13.2-29 轴 p 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		p							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	+8 +6	+9 +6	+10 +6	+12 +6	+16 +6	+20 +6	+31 +6	+46 +6
3	6	+14.5 +12	+16 +12	+17 +12	+20 +12	+24 +12	+30 +12	+42 +12	+60 +12
6	10	+17.5 +15	+19 +15	+21 +15	+24 +15	+30 +15	+37 +15	+51 +15	+73 +15
10	18	+21 +18	+23 +18	+26 +18	+29 +18	+36 +18	+45 +18	+61 +18	+88 +18
18	30	+26 +22	+28 +22	+31 +22	+35 +22	+43 +22	+55 +22	+74 +22	+106 +22
30	50	+30 +26	+33 +26	+37 +26	+42 +26	+51 +26	+65 +26	+88 +26	+126 +26
50	80		+40 +32	+45 +32	+51 +32	+62 +32	+78 +32		
80	120		+47 +37	+52 +37	+59 +37	+72 +37	+91 +37		
120	180		+55 +43	+61 +43	+68 +43	+83 +43	+106 +43		
180	250		+64 +50	+70 +50	+79 +50	+96 +50	+122 +50		
250	315		+72 +56	+79 +56	+88 +56	+108 +56	+137 +56		
315	400		+80 +62	+87 +62	+98 +62	+119 +62	+151 +62		
400	500		+88 +68	+95 +68	+108 +68	+131 +68	+165 +68		
500	630				+122 +78	+148 +78	+188 +78		
630	800				+138 +88	+168 +88	+213 +88		
800	1 000				+156 +100	+190 +100	+240 +100		
1 000	1 250				+186 +120	+225 +120	+285 +120		
1 250	1 600				+218 +140	+265 +140	+335 +140		
1 600	2 000				+262 +170	+320 +170	+400 +170		
2 000	2 500				+305 +195	+370 +195	+475 +195		
2 500	3 150				+375 +240	+450 +240	+570 +240		

表 13.2-30 轴 r 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

(μm)

基本尺寸/ mm		r							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	+12 +10	+13 +10	+14 +10	+16 +10	+20 +10	+24 +10	+35 +10	+50 +10
3	6	+17.5 +15	+19 +15	+20 +15	+23 +15	+27 +15	+33 +15	+45 +15	+63 +15
6	10	+21.5 +19	+23 +19	+25 +19	+28 +19	+34 +19	+41 +19	+55 +19	+77 +19
10	18	+26 +23	+28 +23	+31 +23	+34 +23	+41 +23	+50 +23	+66 +23	+93 +23
18	30	+32 +28	+34 +28	+37 +28	+41 +28	+49 +28	+61 +28	+80 +28	+112 +28
30	50	+38 +34	+41 +34	+45 +34	+50 +34	+59 +34	+73 +34	+96 +34	+134 +34
50	65		+49 +41	+54 +41	+60 +41	+71 +41	+87 +41		
65	80		+51 +43	+56 +43	+62 +43	+72 +43	+89 +43		
80	100		+61 +51	+66 +51	+73 +51	+86 +51	+105 +51		
100	120		+64 +54	+69 +54	+76 +54	+89 +54	+108 +54		
120	140		+75 +63	+81 +63	+88 +63	+103 +63	+126 +63		
140	160		+77 +65	+83 +65	+90 +65	+105 +65	+128 +65		
160	180		+80 +68	+86 +68	+93 +68	+108 +68	+131 +68		
180	200		+91 +77	+97 +77	+106 +77	+123 +77	+149 +77		
200	225		+94 +80	+100 +80	+109 +80	+126 +80	+152 +80		
225	250		+98 +84	+104 +84	+113 +84	+130 +84	+156 +84		
250	280		+110 +94	+117 +94	+126 +94	+146 +94	+175 +94		
280	315		+114 +98	+121 +98	+130 +98	+150 +98	+179 +98		
315	355		+126 +108	+133 +108	+144 +108	+165 +108	+197 +108		

续表 13.2-30

基本尺寸/ mm		r							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
355	400		+132 +114	+139 +114	+150 +114	+171 +114	+203 +114		
400	450		+146 +126	+153 +126	+166 +126	+189 +126	+223 +126		
450	500		+152 +132	+159 +132	+172 +132	+195 +132	+229 +132		
500	560				+194 +150	+220 +150	+260 +150		
560	630				+199 +155	+225 +155	+265 +155		
630	710				+225 +175	+255 +175	+300 +175		
710	800				+235 +185	+265 +185	+310 +185		
800	900				+266 +210	+300 +210	+350 +210		
900	1 000				+276 +220	+310 +220	+360 +220		
1 000	1 120				+316 +250	+355 +250	+415 +250		
1 120	1 250				+326 +260	+365 +260	+425 +260		
1 250	1 400				+378 +300	+425 +300	+495 +300		
1 400	1 600				+408 +330	+455 +330	+525 +330		
1 600	1 800				+462 +370	+520 +370	+600 +370		
1 800	2 000				+492 +400	+550 +400	+630 +400		
2 000	2 240				+550 +440	+615 +440	+720 +440		
2 240	2 500				+570 +460	+635 +460	+740 +460		
2 500	2 800				+685 +550	+760 +550	+880 +550		
2 800	3 150				+715 +580	+790 +580	+910 +580		

表 13.2-31 轴 s 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999)

(μm)

基本尺寸/ mm		s							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
—	3	+16 +14	+17 +14	+18 +14	+20 +14	+24 +14	+28 +14	+39 +14	+54 +14
3	6	+21.5 +19	+23 +19	+24 +19	+27 +19	+31 +19	+37 +19	+49 +19	+67 +19
6	10	+25.5 +23	+27 +23	+29 +23	+32 +23	+38 +23	+45 +23	+59 +23	+81 +23
10	18	+31 +28	+33 +28	+36 +28	+39 +28	+46 +28	+55 +28	+71 +28	+98 +28
18	30	+39 +35	+41 +35	+44 +35	+48 +35	+56 +35	+68 +35	+87 +35	+119 +35
30	50	+47 +43	+50 +43	+54 +43	+59 +43	+68 +43	+82 +43	+105 +43	+143 +43
50	65		+61 +53	+66 +53	+72 +53	+83 +53	+99 +53	+127 +53	
65	80		+67 +59	+72 +59	+78 +59	+89 +59	+105 +59	+133 +59	
80	100		+81 +71	+86 +71	+93 +71	+106 +71	+125 +71	+158 +71	
100	120		+89 +79	+94 +79	+101 +79	+114 +79	+133 +79	+166 +79	
120	140		+104 +92	+110 +92	+117 +92	+132 +92	+155 +92	+192 +92	
140	160		+112 +100	+118 +100	+125 +100	+140 +100	+163 +100	+200 +100	
160	180		+120 +108	+126 +108	+133 +108	+148 +108	+171 +108	+208 +108	
180	200		+136 +122	+142 +122	+151 +122	+168 +122	+194 +122	+237 +122	
200	225		+144 +130	+150 +130	+159 +130	+176 +130	+202 +130	+245 +130	
225	250		+154 +140	+160 +140	+169 +140	+186 +140	+212 +140	+255 +140	
250	280		+174 +158	+181 +158	+190 +158	+210 +158	+239 +158	+288 +158	
280	315		+186 +170	+193 +170	+202 +170	+222 +170	+251 +170	+300 +170	
315	355		+208 +190	+215 +190	+226 +190	+247 +190	+279 +190	+330 +190	

续表 13.2-31

基本尺寸/ mm		s							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
355	400		+ 226 + 208	+ 233 + 208	+ 244 + 208	+ 265 + 208	+ 297 + 208	+ 348 + 208	
400	450		+ 252 + 232	+ 259 + 232	+ 272 + 232	+ 295 + 232	+ 329 + 232	+ 387 + 232	
450	500		+ 272 + 252	+ 279 + 252	+ 292 + 252	+ 315 + 252	+ 349 + 252	+ 407 + 252	
500	560				+ 324 + 280	+ 350 + 280	+ 390 + 280		
560	630				+ 354 + 310	+ 380 + 310	+ 420 + 310		
630	710				+ 390 + 340	+ 420 + 340	+ 465 + 340		
710	800				+ 430 + 380	+ 460 + 380	+ 505 + 380		
800	900				+ 486 + 430	+ 520 + 430	+ 570 + 430		
900	1 000				+ 526 + 470	+ 560 + 470	+ 610 + 470		
1 000	1 120				+ 586 + 520	+ 625 + 520	+ 685 + 520		
1 120	1 250				+ 646 + 580	+ 685 + 580	+ 745 + 580		
1 250	1 400				+ 718 + 640	+ 765 + 640	+ 835 + 640		
1 400	1 600				+ 798 + 720	+ 845 + 720	+ 915 + 720		
1 600	1 800				+ 912 + 820	+ 970 + 820	+ 1 050 + 820		
1 800	2 000				+ 1 012 + 920	+ 1 070 + 920	+ 1 150 + 920		
2 000	2 240				+ 1 110 + 1 000	+ 1 175 + 1 000	+ 1 280 + 1 000		
2 240	2 500				+ 1 210 + 1 100	+ 1 275 + 1 100	+ 1 380 + 1 100		
2 500	2 800				+ 1 385 + 1 250	+ 1 460 + 1 250	+ 1 580 + 1 250		
2 800	3 150				+ 1 535 + 1 400	+ 1 610 + 1 400	+ 1 730 + 1 400		

表 13.2-32 轴 t 和 u 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4—1999) (μm)

基本尺寸/ mm		T				u				
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9
—	3					+22 +18	+24 +18	+28 +18	+32 +18	+43 +18
3	6					+28 +23	+31 +23	+35 +23	+41 +23	+53 +23
6	10					+34 +28	+37 +28	+43 +28	+50 +28	+64 +28
10	18					+41 +33	+44 +33	+51 +33	+60 +33	+76 +33
18	24					+50 +41	+54 +41	+62 +41	+74 +41	+93 +41
24	30	+50 +41	+54 +41	+62 +41	+74 +41	+57 +48	+61 +48	+69 +48	+81 +48	+100 +48
30	40	+59 +48	+64 +48	+73 +48	+87 +48	+71 +60	+76 +60	+85 +60	+99 +60	+122 +60
40	50	+65 +54	+70 +54	+79 +54	+93 +54	+81 +70	+86 +70	+95 +70	+109 +70	+132 +70
50	65	+79 +66	+85 +66	+96 +66	+112 +66	+100 +87	+106 +87	+117 +87	+133 +87	+161 +87
65	80	+88 +75	+94 +75	+105 +75	+121 +75	+115 +102	+121 +102	+132 +102	+148 +102	+176 +102
80	100	+106 +91	+113 +91	+126 +91	+145 +91	+139 +124	+146 +124	+159 +124	+178 +124	+211 +124
100	120	+119 +104	+126 +104	+139 +104	+158 +104	+159 +144	+166 +144	+179 +144	+198 +144	+231 +144
120	140	+140 +122	+147 +122	+162 +122	+185 +122	+188 +170	+195 +170	+210 +170	+233 +170	+270 +170
140	160	+152 +134	+159 +134	+174 +134	+197 +134	+208 +190	+215 +190	+230 +190	+253 +190	+290 +190
160	180	+164 +146	+171 +146	+186 +146	+209 +146	+228 +210	+235 +210	+250 +210	+273 +210	+310 +210
180	200	+186 +166	+195 +166	+212 +166	+238 +166	+256 +236	+265 +236	+282 +236	+308 +236	+351 +236
200	225	+200 +180	+209 +180	+226 +180	+252 +180	+278 +258	+287 +258	+304 +258	+330 +258	+373 +258
225	250	+216 +196	+225 +196	+242 +196	+268 +196	+304 +284	+313 +284	+330 +284	+356 +284	+399 +284
250	280	+241 +218	+250 +218	+270 +218	+299 +218	+338 +315	+347 +315	+367 +315	+396 +315	+445 +315
280	315	+263 +240	+272 +240	+292 +240	+321 +240	+373 +350	+382 +350	+402 +350	+431 +350	+480 +350
315	355	+293 +268	+304 +268	+325 +268	+357 +268	+415 +390	+426 +390	+447 +390	+479 +390	+530 +390

续表 13.2-32

基本尺寸/ mm		r				u				
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9
355	400	+ 319 + 294	+ 330 + 294	+ 351 + 294	+ 383 + 294	+ 460 + 435	+ 471 + 435	+ 492 + 435	+ 524 + 435	+ 575 + 435
400	450	+ 357 + 330	+ 370 + 330	+ 393 + 330	+ 427 + 330	+ 517 + 490	+ 530 + 490	+ 553 + 490	+ 587 + 490	+ 645 + 490
450	500	+ 387 + 360	+ 400 + 360	+ 423 + 360	+ 457 + 360	+ 567 + 540	+ 580 + 540	+ 603 + 540	+ 637 + 540	+ 695 + 540
500	560		+ 444 + 400	+ 470 + 400			+ 644 + 600	+ 670 + 600	+ 710 + 600	
560	630		+ 494 + 450	+ 520 + 450			+ 704 + 660	+ 730 + 660	+ 770 + 660	
630	710		+ 550 + 500	+ 580 + 500			+ 790 + 740	+ 820 + 740	+ 865 + 740	
710	800		+ 610 + 560	+ 640 + 560			+ 890 + 840	+ 920 + 840	+ 965 + 840	
800	900		+ 676 + 620	+ 710 + 620			+ 996 + 940	+ 1 030 + 940	+ 1 080 + 940	
900	1 000		+ 736 + 680	+ 770 + 680			+ 1 106 + 1 050	+ 1 140 + 1 050	+ 1 190 + 1 050	
1 000	1 120		+ 846 + 780	+ 885 + 780			+ 1 216 + 1 150	+ 1 255 + 1 150	+ 1 315 + 1 150	
1 120	1 250		+ 906 + 840	+ 945 + 840			+ 1 366 + 1 300	+ 1 405 + 1 300	+ 1 465 + 1 300	
1 250	1 400		+ 1 038 + 960	+ 1 085 + 960			+ 1 528 + 1 450	+ 1 575 + 1 450	+ 1 645 + 1 450	
1 400	1 600		+ 1 128 + 1 050	+ 1 175 + 1 050			+ 1 678 + 1 600	+ 1 725 + 1 600	+ 1 795 + 1 600	
1 600	1 800		+ 1 292 + 1 200	+ 1 350 + 1 200			+ 1 942 + 1 850	+ 2 000 + 1 850	+ 2 080 + 1 850	
1 800	2 000		+ 1 442 + 1 350	+ 1 500 + 1 350			+ 2 092 + 2 000	+ 2 150 + 2 000	+ 2 230 + 2 000	
2 000	2 240		+ 1 610 + 1 500	+ 1 675 + 1 500			+ 2 410 + 2 300	+ 2 475 + 2 300	+ 2 580 + 2 300	
2 240	2 500		+ 1 760 + 1 650	+ 1 825 + 1 650			+ 2 610 + 2 500	+ 2 675 + 2 500	+ 2 780 + 2 500	
2 500	2 800		+ 2 035 + 1 900	+ 2 110 + 1 900			+ 3 035 + 2 900	+ 3 110 + 2 900	+ 3 230 + 2 900	
2 800	3 150		+ 2 235 + 2 100	+ 2 310 + 2 100			+ 3 335 + 3 200	+ 3 410 + 3 200	+ 3 530 + 3 200	

注：基本尺寸至 24 mm 的 t_5 至 t_8 的偏差值未列入表内，建议以 u_5 至 u_8 代替。如非要 t_5 至 t_8 ，则可按表 13.2-2、表 13.2-3 和表 13.2-4 计算。

续表 13.2-33

基本尺寸/ mm		y								x								z											
		5	6	7	8	5	6	7	8	9	10	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
大于	至																												
120	140	+220	+227	+242	+265	+273	+288	+311	+348	+408	+425	+440	+471	+516	+566	+612	+661	+731	+819	+890	+960	+1017	+1097	+1177	+1257	+1337	+1417	+1497	+1577
140	160	+202	+202	+202	+202	+248	+248	+248	+248	+280	+280	+320	+343	+380	+440	+500	+560	+620	+680	+740	+800	+860	+920	+980	+1040	+1100	+1160	+1220	+1280
160	180	+228	+228	+228	+228	+298	+291	+298	+305	+320	+280	+280	+280	+280	+340	+400	+460	+520	+580	+640	+700	+760	+820	+880	+940	+1000	+1060	+1120	+1180
180	200	+304	+313	+330	+356	+370	+396	+422	+465	+535	+605	+675	+745	+815	+885	+955	+1025	+1095	+1165	+1235	+1305	+1375	+1445	+1515	+1585	+1655	+1725	+1795	
200	225	+330	+339	+356	+382	+405	+431	+457	+500	+570	+640	+710	+780	+850	+920	+990	+1060	+1130	+1200	+1270	+1340	+1410	+1480	+1550	+1620	+1690	+1760	+1830	
225	250	+360	+369	+386	+412	+445	+471	+497	+540	+610	+680	+750	+820	+890	+960	+1030	+1100	+1170	+1240	+1310	+1380	+1450	+1520	+1590	+1660	+1730	+1800	+1870	
250	280	+408	+417	+437	+466	+498	+527	+556	+605	+685	+765	+845	+925	+1005	+1085	+1165	+1245	+1325	+1405	+1485	+1565	+1645	+1725	+1805	+1885	+1965	+2045	+2125	
280	315	+448	+457	+477	+506	+548	+577	+606	+655	+735	+815	+895	+975	+1055	+1135	+1215	+1295	+1375	+1455	+1535	+1615	+1695	+1775	+1855	+1935	+2015	+2095	+2175	
315	355	+500	+511	+532	+564	+615	+647	+679	+730	+810	+890	+970	+1050	+1130	+1210	+1290	+1370	+1450	+1530	+1610	+1690	+1770	+1850	+1930	+2010	+2090	+2170	+2250	
355	400	+555	+566	+587	+619	+685	+717	+749	+800	+880	+960	+1040	+1120	+1200	+1280	+1360	+1440	+1520	+1600	+1680	+1760	+1840	+1920	+2000	+2080	+2160	+2240	+2320	
400	450	+622	+635	+658	+692	+767	+803	+837	+895	+970	+1050	+1130	+1210	+1290	+1370	+1450	+1530	+1610	+1690	+1770	+1850	+1930	+2010	+2090	+2170	+2250	+2330	+2410	
450	500	+687	+700	+723	+757	+847	+883	+917	+975	+1050	+1130	+1210	+1290	+1370	+1450	+1530	+1610	+1690	+1770	+1850	+1930	+2010	+2090	+2170	+2250	+2330	+2410	+2490	

注: 1. 基本尺寸至 14 mm 的 y5 至 y8 的偏差值未列入表内, 建议以 x5 至 x8 代替。如非要 y5 至 y8, 则可按表 13.2.2.2、表 13.2.3 和表 13.2.4 计算。

2. 基本尺寸至 18 mm 的 y6 至 y10 的偏差值未列入表内, 建议以 z6 至 z10 代替。如非要 y6 至 y10, 则可按表 13.2.2、表 13.2.3 和表 13.2.4 计算。

表 13.2-35 轴 zb 和 zc 的极限偏差 (摘自 GB/T 1800.4-1999) (μm)

基本尺寸/ mm		zb					zc				
大于	至	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11
—	3	+50 +40	+54 +40	+65 +40	+80 +40	+100 +40	+70 +60	+74 +60	+85 +60	+100 +60	+120 +60
3	6	+62 +50	+68 +50	+80 +50	+98 +50	+125 +50	+92 +80	+98 +80	+110 +80	+128 +80	+155 +80
6	10	+82 +67	+89 +67	+103 +67	+125 +67	+157 +67	+112 +97	+119 +97	+133 +97	+155 +97	+187 +97
10	14	+108 +90	+117 +90	+133 +90	+160 +90	+200 +90	+148 +130	+157 +130	+173 +130	+200 +130	+240 +130
14	18	+126 +108	+135 +108	+151 +108	+178 +108	+218 +108	+168 +150	+177 +150	+193 +150	+220 +150	+260 +150
18	24	+157 +136	+169 +136	+188 +136	+220 +136	+266 +136	+209 +188	+221 +188	+240 +188	+272 +188	+318 +188
24	30	+181 +160	+193 +160	+212 +160	+244 +160	+290 +160	+239 +218	+251 +218	+270 +218	+302 +218	+348 +218
30	40	+225 +200	+239 +200	+262 +200	+300 +200	+360 +200	+299 +274	+313 +274	+336 +274	+374 +274	+434 +274
40	50	+267 +242	+281 +242	+304 +242	+342 +242	+402 +242	+350 +325	+364 +325	+387 +325	+425 +325	+485 +325
50	65	+330 +300	+346 +300	+374 +300	+420 +300	+490 +300	+435 +405	+451 +405	+479 +405	+525 +405	+595 +405
65	80	+390 +360	+406 +360	+434 +360	+480 +360	+550 +360	+510 +480	+526 +480	+554 +480	+600 +480	+670 +480
80	100	+480 +445	+499 +445	+532 +445	+585 +445	+665 +445	+620 +585	+639 +585	+672 +585	+725 +585	+805 +585
100	120	+560 +525	+579 +525	+612 +525	+665 +525	+745 +525	+725 +690	+744 +690	+777 +690	+830 +690	+910 +690
120	140	+660 +620	+683 +620	+720 +620	+780 +620	+870 +620	+840 +800	+863 +800	+900 +800	+960 +800	+1 050 +800
140	160	+740 +700	+763 +700	+800 +700	+860 +700	+950 +700	+940 +900	+963 +900	+1 000 +900	+1 060 +900	+1 150 +900
160	180	+820 +780	+843 +780	+880 +780	+940 +780	+1 030 +780	+1 040 +1 000	+1 063 +1 000	+1 100 +1 000	+1 160 +1 000	+1 250 +1 000
180	200	+926 +880	+952 +880	+995 +880	+1 065 +880	+1 170 +880	+1 196 +1 150	+1 222 +1 150	+1 265 +1 150	+1 335 +1 150	+1 440 +1 150
200	225	+1 006 +960	+1 032 +960	+1 075 +960	+1 145 +960	+1 250 +960	+1 296 +1 250	+1 322 +1 250	+1 365 +1 250	+1 435 +1 250	+1 540 +1 250

续表 13.2-35

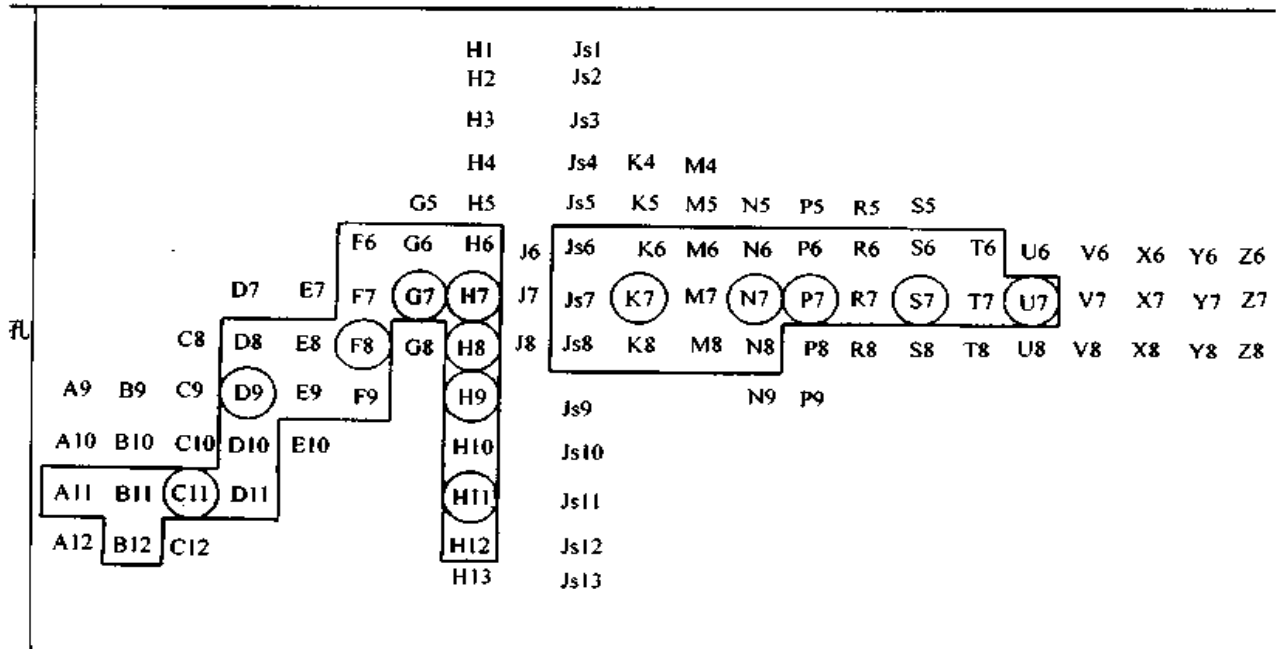
基本尺寸/ mm		zb					zc				
大于	至	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11
225	250	+1 096 +1 050	+1 122 +1 050	+1 165 +1 050	+1 235 +1 050	+1 340 +1 050	+1 396 +1 350	+1 422 +1 350	+1 465 +1 350	+1 535 +1 350	+1 640 +1 350
250	280	+1 252 +1 200	+1 281 +1 200	+1 330 +1 200	+1 410 +1 200	+1 520 +1 200	+1 602 +1 550	+1 631 +1 550	+1 680 +1 550	+1 760 +1 550	+1 870 +1 550
280	315	+1 352 +1 300	+1 381 +1 300	+1 430 +1 300	+1 510 +1 300	+1 620 +1 300	+1 752 +1 700	+1 781 +1 700	+1 830 +1 700	+1 910 +1 700	+2 020 +1 700
315	355	+1 557 +1 500	+1 589 +1 500	+1 640 +1 500	+1 730 +1 500	+1 860 +1 500	+1 957 +1 900	+1 989 +1 900	+2 040 +1 900	+2 130 +1 900	+2 260 +1 900
355	400	+1 707 +1 650	+1 739 +1 650	+1 790 +1 650	+1 880 +1 650	+2 010 +1 650	+2 157 +2 100	+2 189 +2 100	+2 240 +2 100	+2 330 +2 100	+2 460 +2 100
400	450	+1 913 +1 850	+1 947 +1 850	+2 005 +1 850	+2 100 +1 850	+2 250 +1 850	+2 463 +2 400	+2 497 +2 400	+2 555 +2 400	+2 650 +2 400	+2 800 +2 400
450	500	+2 163 +2 100	+2 197 +2 100	+2 255 +2 100	+2 350 +2 100	+2 500 +2 100	+2 663 +2 600	+2 697 +2 600	+2 755 +2 600	+2 850 +2 600	+3 000 +2 600

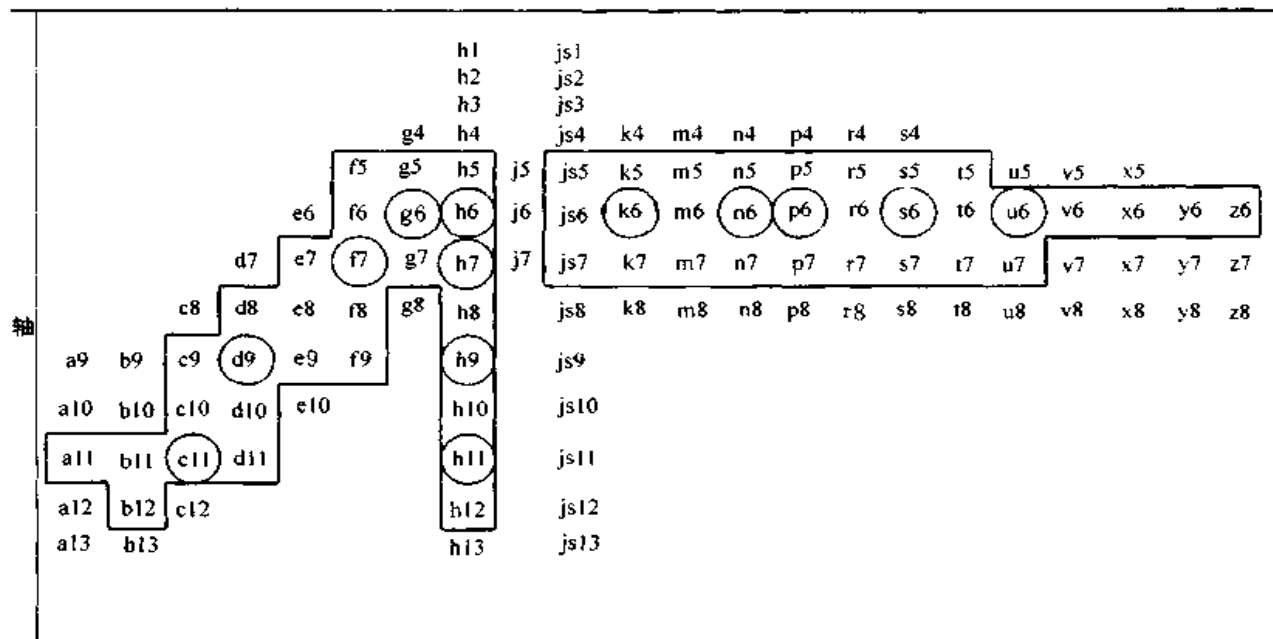
1.5 孔、轴公差带 (GB/T 1801—1999)

1) 基本尺寸至 500 mm 的孔、轴公差带见表 13.2-36, 相应的极限偏差见表 13.2-5 ~

表 13.2-18 和表 13.2-20 ~ 表 13.2-34。选择时, 应优先选用圆圈中的公差带, 其次选用方框中的公差带, 最后选用其他的公差带。

表 13.2-36 基本尺寸至 500 mm 的孔、轴公差带 (摘自 GB/T 1801—1999)





2) 基本尺寸大于 500~3 150 mm 的孔、轴公差带见表 13.2-37, 相应的极限偏差见表 13.2-6~表 13.2-12 和表 13.2-21~表 13.2-32。选择时, 按需要选用适合的公差带。

表 13.2-37 基本尺寸大于 500~3 150 mm 的孔、轴公差带 (摘自 GB/T 1801—1999)

孔							轴												
	G6	H6	Js6	K6	M6	N6		g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6	r6	s6	t6	u6	
	F7	G7	H7	Js7	K7	M7	N7	f7	g7	h7	js7	k7	m7	n7	p7	r7	s7	t7	u7
D8	E8	F8	H8	Js8				d8	e8	f8	h8	js8							
D9	E9	F9	H9	Js9				d9	e9	f9	h9	js9							
D10			H10	Js10				d10			h10	js10							
D11			H11	Js11				d11			h11	js11							
			H12	Js12							h12	js12							

1.6 基孔制与基轴制优先和常用配合

配合是基本尺寸相同的, 相互结合的孔和轴公差带之间的关系。

在配合中, 孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸所得的代数差为正值时是间隙, 为负值时是过盈。

根据孔、轴公差带关系所形成配合的间隙或过盈情况, 配合分为间隙配合、过盈配合、过渡配合等三类。

间隙配合的孔、轴公差带的关系见图 13.2-5, 过盈配合的孔、轴公差带的关系见图 13.2-6, 过渡配合的孔、轴公差带的关系见图 13.2-7。

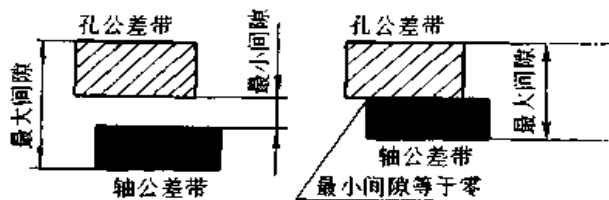


图 13.2-5 间隙配合

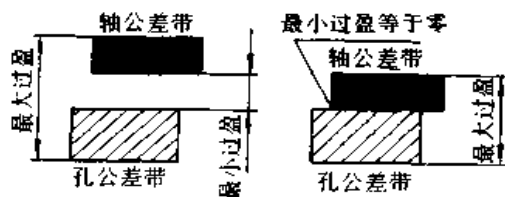


图 13.2-6 过盈配合

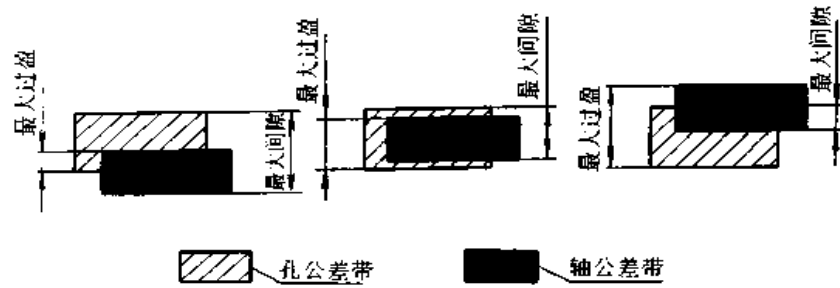


图 13.2-7 过渡配合

配合有两种基准制，即基孔制和基轴制。在一般情况下，优先采用基孔制。如有特殊需要，允许将任一孔、轴公差带组成配合。

基孔制的孔为基准孔，其下偏差为零，基本偏差代号为H；基轴制的轴为基准轴，其上偏差为零，基本偏差代号为h。基孔制和基轴制都有三种配合，其孔、轴公差带的关系见图 13.2-8 和图 13.2-9。

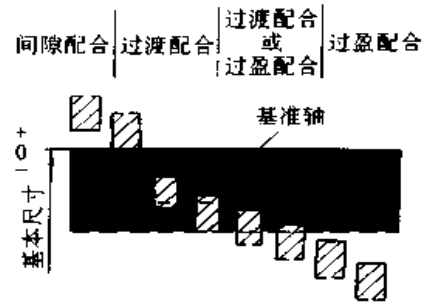


图 13.2-9 基轴制配合

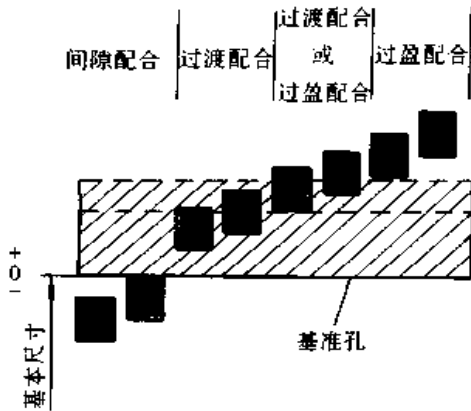


图 13.2-8 基孔制配合

基孔制优先和常用配合见表 13.2-38，基轴制优先和常用配合见表 13.2-39。其极限间隙或极限过盈见表 13.2-40。

1.7 配制配合 (GB/T 1801—1999)

基本尺寸大于 500 mm 的零件除采用互换性生产外，根据其制造特点，可采用配制配合。所谓配制配合是以一个零件的实际尺寸为基数，来配制另一个零件的一种工艺措施。采用配制配合，在保证配合要求的前提下，可扩大零件的制造公差，但不能互换。

配制配合一般用于公差等级较高、单件小批

表 13.2-38 基孔制优先和常用配合 (摘自 GB/T 1801—1999)

基准孔	轴																				
	a	b	c	d	e	f	g	h	js	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z
	间隙配合					过渡配合					过盈配合										
H6						H6/f5	H6/g5	H6/h5	H6/js5	H6/k5	H6/m5	H6/n5	H6/p5	H6/r5	H6/s5	H6/t5					
H7						H7/f6	H7/g6	H7/h6	H7/js6	H7/k6	H7/m6	H7/n6	H7/p6	H7/r6	H7/s6	H7/t6	H7/u6	H7/v6	H7/x6	H7/y6	H7/z6
H8					H8/e7	H8/f7	H8/g7	H8/h7	H8/js7	H8/k7	H8/m7	H8/n7	H8/p7	H8/r7	H8/s7	H8/t7	H8/u7				

基准孔	轴																					
	a	b	c	d	e	f	g	h	js	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	
	间隙配合							过渡配合					过盈配合									
H8				$\frac{H8}{d8}$	$\frac{H8}{e8}$	$\frac{H8}{f8}$		$\frac{H8}{h8}$														
H9			$\frac{H9}{c9}$	$\frac{H9}{d9}$	$\frac{H9}{e9}$	$\frac{H9}{f9}$		$\frac{H9}{h9}$														
H10			$\frac{H10}{c10}$	$\frac{H10}{d10}$				$\frac{H10}{h10}$														
H11	$\frac{H11}{a11}$	$\frac{H11}{b11}$	$\frac{H11}{c11}$	$\frac{H11}{d11}$				$\frac{H11}{h11}$														
H12		$\frac{H12}{b12}$						$\frac{H12}{h12}$														

注：1. $\frac{H6}{n5}$ 、 $\frac{H7}{p6}$ 在基本尺寸小于或等于 3 mm 和 $\frac{H8}{r7}$ 在小于或等于 100 mm 时，为过渡配合。

2. 标注▽的配合为优先配合。

表 13.2-39 基轴制优先和常用配合 (摘自 GB/T1801—1999)

基准轴	孔																					
	A	B	C	D	E	F	G	H	JS	K	M	N	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	
	间隙配合							过渡配合					过盈配合									
h5						$\frac{F6}{h5}$	$\frac{G6}{h5}$	$\frac{H6}{h5}$	$\frac{JS6}{h5}$	$\frac{K6}{h5}$	$\frac{M6}{h5}$	$\frac{N6}{h5}$	$\frac{P6}{h5}$	$\frac{R6}{h5}$	$\frac{S6}{h5}$	$\frac{T6}{h5}$						
h6						$\frac{F7}{h6}$	$\frac{G7}{h6}$	$\frac{H7}{h6}$	$\frac{JS7}{h6}$	$\frac{K7}{h6}$	$\frac{M7}{h6}$	$\frac{N7}{h6}$	$\frac{P7}{h6}$	$\frac{R7}{h6}$	$\frac{S7}{h6}$	$\frac{T7}{h6}$	$\frac{U7}{h6}$					
h7					$\frac{E8}{h7}$	$\frac{F8}{h7}$		$\frac{H8}{h7}$	$\frac{JS8}{h7}$	$\frac{K8}{h7}$	$\frac{M8}{h7}$	$\frac{N8}{h7}$										
h8				$\frac{D8}{h8}$	$\frac{E8}{h8}$	$\frac{F8}{h8}$		$\frac{H8}{h8}$														
h9				$\frac{D9}{h9}$	$\frac{E9}{h9}$	$\frac{F9}{h9}$		$\frac{H9}{h9}$														
h10				$\frac{D10}{h10}$				$\frac{H10}{h10}$														
h11	$\frac{A11}{h11}$	$\frac{B11}{h11}$	$\frac{C11}{h11}$	$\frac{D11}{h11}$				$\frac{H11}{h11}$														
h12		$\frac{B12}{h12}$						$\frac{H12}{h12}$														

注：标注▽的配合为优先配合。

表 13.2-40 优先、常用配合的极限间隙或极限过盈 (摘自 GB/T 1801—1999) (μm)

基孔制	H6/f5	H6/g5	H6/h5	H7/f6	H7/g6	H7/h6	H8/e7	H8/f7	H8/g7	H8/h7	H8/d8	H8/e8	H8/f8	H8/h8	H9/c9	H9/d9	
基轴制	F6/h5	G6/h5	H6/h5	F7/h6	G7/h6	H7/h6	E8/h7	F8/h7		H8/h7	D8/h8	E8/h8	F8/h8	H8/h8		D9/h9	
基本尺寸/mm	间 隙 配 合																
大于																	
至																	
—	3	+16 +6	+12 +2	+10 0	+22 +6	+18 +2	+16 0	+38 +14	+30 +6	+26 +2	+24 0	+48 +20	+42 +14	+34 +6	+28 0	+110 +60	+70 +20
3	6	+23 +10	+17 +4	+13 0	+30 +10	+24 +4	+20 0	+50 +20	+40 +10	+34 +4	+30 0	+66 +30	+56 +20	+46 +10	+36 0	+130 +70	+90 +30
6	10	+28 +13	+20 +5	+15 0	+37 +13	+29 +5	+24 0	+62 +25	+50 +13	+42 +5	+37 0	+84 +40	+69 +25	+57 +13	+44 0	+152 +80	+112 +40
10	14	+35 +16	+25 +6	+19 0	+45 +16	+35 +6	+29 0	+77 +32	+61 +16	+51 +6	+45 0	+104 +50	+86 +32	+70 +16	+54 0	+181 +95	+136 +50
14	18	+42 +20	+29 +7	+22 0	+54 +20	+41 +7	+34 0	+94 +40	+74 +20	+61 +7	+54 0	+131 +65	+106 +40	+86 +20	+66 0	+214 +110	+169 +65
18	24	+52 +25	+36 +9	+27 0	+66 +25	+50 +9	+41 0	+114 +50	+89 +25	+73 +9	+64 0	+158 +80	+128 +50	+103 +25	+78 0	+244 +120	+204 +80
24	30	+62 +30	+42 +10	+32 0	+79 +30	+59 +10	+49 0	+136 +60	+106 +30	+86 +10	+76 0	+192 +100	+152 +60	+122 +30	+92 0	+288 +140	+248 +100
30	40	+73 +36	+49 +12	+37 0	+93 +36	+69 +12	+57 0	+161 +72	+125 +36	+101 +12	+89 0	+228 +120	+180 +72	+144 +36	+108 0	+344 +170	+294 +120
40	50	+86 +43	+57 +14	+43 0	+108 +43	+79 +14	+65 0	+188 +85	+146 +43	+117 +14	+103 0	+271 +145	+211 +85	+169 +43	+126 0	+400 +200	+345 +145
50	65	+99 +50	+64 +15	+49 0	+125 +50	+90 +15	+75 0	+218 +100	+168 +50	+133 +15	+118 0	+314 +170	+244 +100	+194 +50	+144 0	+470 +240	+400 +170
65	80	+111 +56	+72 +17	+55 0	+140 +56	+101 +17	+84 0	+243 +110	+189 +56	+150 +17	+133 0	+352 +190	+272 +110	+218 +56	+162 0	+560 +300	+450 +190
80	100	+123 +62	+79 +18	+61 0	+155 +62	+111 +18	+93 0	+271 +125	+208 +62	+164 +18	+146 0	+388 +210	+303 +125	+240 +62	+178 0	+640 +360	+490 +210
100	120	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
120	140	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
140	160	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
160	180	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
180	200	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
200	225	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
225	250	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
250	280	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
280	315	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
315	355	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
355	400	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
400	450	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230
450	500	+135 +68	+87 +20	+67 0	+171 +68	+123 +20	+103 0	+295 +135	+228 +68	+180 +20	+160 0	+424 +230	+329 +135	+262 +68	+194 0	+750 +440	+540 +230

注：1. 表中“+”值为间隙量，“-”值为过盈量。

2. 标注▣的配合为优先配合。

续表 13.2-40

基孔制	$\frac{H9}{e9}$	$\frac{H9}{f9}$	$\frac{H9}{h9}$	$\frac{H10}{c10}$	$\frac{H10}{d10}$	$\frac{H10}{h10}$	$\frac{H11}{a11}$	$\frac{H11}{b11}$	$\frac{H11}{c11}$	$\frac{H11}{d11}$	$\frac{H11}{h11}$	$\frac{H12}{b12}$	$\frac{H12}{h12}$	$\frac{H6}{js5}$		
基轴制	$\frac{E9}{h9}$	$\frac{F9}{h9}$	$\frac{H9}{b9}$		$\frac{D10}{h10}$	$\frac{H10}{h10}$	$\frac{A11}{h11}$	$\frac{B11}{h11}$	$\frac{C11}{h11}$	$\frac{D11}{h11}$	$\frac{H11}{h11}$	$\frac{B12}{h12}$	$\frac{H12}{h12}$		$\frac{JS6}{h5}$	
基本尺寸/ mm		间隙配合												过渡配合		
大于	至															
—	3	+64 +14	+56 +6	+50 0	+140 +60	+100 +20	+80 0	+390 +270	+260 +140	+180 +60	+140 +20	+120 0	+340 +140	+200 0	+8 -2	+7 -3
3	6	+80 +20	+70 +10	+60 0	+166 +70	+126 +30	+96 0	+420 +270	+200 +140	+220 +70	+180 +30	+150 0	+380 +140	+240 0	+10.5 -2.5	+9 -4
6	10	+97 +25	+85 +13	+72 0	+196 +80	+156 +40	+116 0	+460 +280	+330 +150	+260 +80	+220 +40	+180 0	+450 +150	+300 0	+12 -3	+10.5 -4.5
10	14	+118 +32	+102 +16	+86 0	+235 +95	+190 +50	+140 0	+510 +290	+370 +150	+315 +95	+270 +50	+220 0	+510 +150	+360 0	+15 -4	+13.5 -5.5
14	18	+144 +40	+124 +20	+104 0	+278 +110	+233 +65	+168 0	+560 +300	+420 +160	+370 +110	+325 +65	+260 0	+580 +160	+420 0	+17.5 -4.5	+15.5 -6.5
18	24	+174 +50	+149 +25	+124 0	+320 +120	+280 +80	+200 0	+630 +310	+490 +170	+440 +120	+400 +80	+320 0	+670 +170	+500 0	+21.5 -5.5	+19 -8
24	30	+208 +60	+178 +30	+148 0	+380 +140	+340 +100	+240 0	+720 +340	+570 +190	+520 +140	+480 +100	+380 0	+790 +190	+600 0	+25.5 -6.5	+22.5 -9.5
30	40	+246 +72	+210 +36	+174 0	+450 +170	+400 +120	+280 0	+820 +380	+660 +220	+610 +170	+560 +120	+440 0	+920 +220	+700 0	+29.5 -7.5	+26 -11
40	50	+285 +85	+243 +43	+200 0	+520 +200	+465 +145	+320 0	+960 +460	+760 +260	+700 +200	+645 +145	+500 0	+1060 +260	+800 0	+34 -9	+30.5 -12.5
50	65	+330 +100	+280 +50	+230 0	+610 +240	+540 +170	+370 0	+1020 +740	+780 +340	+710 +240	+645 +170	+500 0	+1080 +280	+800 0	+34 -10	+30.5 -14.5
65	80	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
80	100	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
100	120	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
120	140	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
140	160	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
160	180	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
180	200	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
200	225	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
225	250	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
250	280	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
280	315	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
315	355	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
355	400	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
400	450	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16
450	500	+405 +125	+342 +62	+280 0	+630 +260	+540 +170	+370 0	+1080 +820	+920 +420	+840 +280	+750 +170	+580 0	+1110 +310	+920 0	+39 -11	+34.5 -16

续表 13.2-40

基孔制		$\frac{H8}{m7}$	$\frac{H8}{n7}$	$\frac{H8}{p7}$	$\frac{H6}{n5}$	$\frac{H6}{p5}$	$\frac{H6}{r5}$	$\frac{H6}{s5}$	$\frac{H6}{t5}$	$\frac{H7}{p6}$							
基轴制		$\frac{M8}{h7}$	$\frac{N8}{h7}$		$\frac{N6}{h5}$	$\frac{P6}{h5}$	$\frac{R6}{h5}$	$\frac{S6}{h5}$	$\frac{T6}{h5}$	$\frac{P7}{h6}$							
基本尺寸/ mm		过渡配合					过盈配合										
大于	至																
—	3	+12 -12	+8 -16	+10 -14	+6 -18	+8 -16	+2 -8	0 -10	0 -10	-2 -12	-4 -14	-6 -16	-8 -18	-10 -20	—	+4 -12	0 -16
3	6	+14 -16	+10 -20	+6 -24	0 -13	-4 -17	-7 -20	-11 -24	—	0 -20							
6	10	+16 -21	+12 -25	+7 -30	-1 -16	-6 -21	-10 -25	-14 -29	—	0 -24							
10	14	+20 -25	+15 -30	+9 -36	-1 -20	-7 -26	-12 -31	-17 -36	—	0 -29							
14	18																
18	24	+25 -29	+18 -36	+11 -43	-2 -24	-9 -31	-15 -37	-22 -44	—	-1 -35							
24	30																
30	40	+30 -34	+22 -42	+13 -51	-1 -28	-10 -37	-18 -45	-27 -54	—	-1 -42							
45	50																
50	65	+35 -41	+26 -50	-14 -62	-1 -33	-13 -45	-22 -54	-34 -66	-47 -79	-2 -51							
65	80																
80	100	+41 -48	+31 -58	+17 -72	-1 -38	-15 -52	-29 -66	-49 -86	-69 -106	-2 -59							
100	120																
120	140																
140	160	+48 -55	+36 -67	+20 -83	-2 -45	-18 -61	-38 -81	-67 -110	-97 -140	-3 -68							
160	180																
180	200																
200	225	+55 -63	+41 -77	+22 -96	-2 -51	-21 -70	-48 -97	-93 -142	-137 -186	-4 -79							
225	250																
250	280	+61 -72	+47 -86	+25 -108	-2 -57	-24 -79	-62 -117	-126 -181	-186 -241	-4 -88							
280	315																
315	355	+68 -78	+52 -94	+27 -119	-1 -62	-26 -87	-72 -133	-154 -215	-232 -293	-5 -98							
355	400																
400	450	+74 -86	+57 -103	+29 -131	0 -67	-28 -95	-86 -153	-192 -259	-290 -357	-5 -108							
450	500																

注： $\frac{H6}{n5}$ 、 $\frac{H7}{p6}$ 在基本尺寸小于或等于 3 mm 时，为过渡配合。

续表 13.2-40

基孔制		$\frac{H7}{r6}$		$\frac{H7}{s6}$		$\frac{H7}{t6}$		$\frac{H7}{u6}$		$\frac{H7}{v6}$		$\frac{H7}{x6}$		$\frac{H7}{y6}$		$\frac{H7}{z6}$		$\frac{H8}{r7}$		$\frac{H8}{s7}$		$\frac{H8}{t7}$		$\frac{H8}{u7}$		
基轴制		$\frac{R7}{h6}$		$\frac{S7}{h6}$		$\frac{T7}{h6}$		$\frac{U7}{h6}$																		
基本尺寸/ mm		过 盈 配 合																								
大于	至																									
—	3	0 -16	-4 -20	-4 -20	-8 -24	—	-8 -24	-12 -28	—	-10 -26	—	-16 -32	+4 -20	0 -24	—	-4 -28										
3	6	-3 -23	-7 -27	—	-11 -31	—	-16 -36	—	-23 -43	+3 -27	-1 -31	—	-5 -35													
6	10	-4 -28	-8 -32	—	-13 -37	—	-19 -43	—	-27 -51	+3 -34	-1 -38	—	-6 -43													
10	14	-5 -34	-10 -39	—	-15 -44	—	-22 -51	—	-32 -61	+4 -41	-1 -46	—	-6 -51													
14	18																									
18	24	-7 -41	-14 -48	—	-20 -54	-26 -60	-33 -67	-42 -76	-52 -86	+5 -49	-2 -56	—	-8 -62													
24	30																									
30	40	-9 -50	-18 -59	-23 -64	-35 -76	-43 -84	-55 -96	-69 -110	-87 -128	+5 -59	-4 -68	—	-9 -73													
40	50																									
50	65	-11 -60	-23 -72	-36 -85	-57 -106	-72 -121	-92 -141	-114 -163	-142 -191	+5 -71	-7 -83	-20 -96	-41 -117													
65	80	-13 -62	-29 -78	-45 -94	-72 -121	-90 -139	-116 -165	-144 -193	-180 -229	+3 -73	-13 -89	-29 -105	-56 -132													
80	100	-16 -73	-36 -93	-56 -113	-89 -146	-111 -168	-143 -200	-179 -236	-223 -280	+3 -86	-17 -106	-37 -126	-70 -159													
100	120	-19 -76	-44 -101	-69 -126	-109 -166	-137 -194	-175 -232	-219 -276	-275 -332	0 -89	-25 -114	-50 -139	-90 -179													
120	140	-23 -88	-52 -117	-82 -147	-130 -195	-162 -227	-208 -273	-260 -325	-325 -390	0 -103	-29 -132	-59 -162	-107 -210													
140	160	-25 -90	-60 -125	-94 -159	-150 -215	-188 -253	-240 -305	-300 -365	-375 -440	-2 -105	-37 -140	-71 -174	-127 -230													
160	180	-28 -93	-68 -133	-106 -171	-170 -235	-212 -277	-270 -335	-340 -405	-425 -490	-5 -108	-45 -148	-83 -186	-147 -250													
180	200	-31 -106	-76 -151	-120 -195	-190 -265	-238 -313	-304 -379	-379 -454	-474 -549	-5 -123	-50 -168	-94 -212	-164 -282													
200	225	-34 -109	-84 -159	-134 -209	-212 -287	-264 -339	-339 -414	-424 -499	-529 -604	-8 -126	-58 -176	-108 -226	-186 -304													
225	250	-38 -113	-94 -169	-150 -225	-238 -313	-294 -369	-379 -454	-474 -549	-594 -669	-12 -130	-68 -186	-124 -242	-330 -447													
250	280	-42 -126	-106 -190	-166 -250	-263 -347	-333 -417	-423 -507	-528 -612	-658 -742	-13 -146	-77 -210	-137 -270	-234 -367													
280	315	-46 -130	-118 -202	-188 -272	-298 -382	-373 -457	-473 -557	-598 -682	-738 -822	-17 -150	-89 -222	-159 -292	-269 -402													
315	355	-51 -144	-133 -226	-211 -304	-333 -426	-418 -511	-533 -626	-673 -766	-843 -936	-19 -165	-101 -247	-179 -325	-301 -447													
355	400	-57 -150	-151 -244	-237 -330	-378 -471	-473 -566	-603 -696	-763 -856	-943 -1 036	-25 -171	-119 -265	-205 -351	-346 -492													
400	450	-63 -166	-169 -272	-267 -370	-427 -530	-532 -635	-677 -780	-857 -960	-1 037 -1 140	-29 -189	-135 -295	-233 -393	-393 -553													
450	500	-69 -172	-189 -292	-297 -400	-477 -580	-597 -700	-757 -860	-937 -1 040	-1 187 -1 290	-35 -195	-155 -315	-263 -423	-443 -603													

注： $\frac{H8}{r7}$ 在小于或等于100 mm时，为过渡配合。

生产的配合零件。是否采用配制配合由设计者根据零件的生产和使用情况决定。

配制配合用代号 MF 表示。它出自英文“Matched Fit”一词。

关于配制配合的应用，举例说明如下。

1) 选取配合 根据产品的使用要求，按互换性生产选取配合，配制的结果应满足配合公差。

例如，有一基本尺寸为 $\phi 3\ 000\ \text{mm}$ 的孔和轴，要求配合的最大间隙为 $0.450\ \text{mm}$ ，最小间隙为 $0.140\ \text{mm}$ ，根据零件的生产和使用情况决定采用配制配合。为满足此配合要求，按互换性生产选取配合为 $\phi 3\ 000\text{H}6/h6$ 或 $\phi 3\ 000\text{F}6/h6$ ，其最大间隙为 $0.415\ \text{mm}$ ，最小间隙为 $0.145\ \text{mm}$ 。

如先加工件为孔，借用基准孔的代号 H 表示先加工件，则在装配图上标注为：

$$\phi 3\ 000\text{H}6/h6\ \text{MF}$$

如先加工件为轴，借用基准轴的代号 h 表示先加工件，则在装配图上标注为：

$$\phi 3\ 000\text{F}6/h6\ \text{MF}$$

2) 确定先加工件 一般选择较难加工，但能得到较高测量精度的那个零件（在多数情况下是孔）作为先加工件，给定一个比较容易达到的公差，例如 H8，在零件图上标注为：

$$\phi 3\ 000\text{H}8\ \text{MF}$$

若按“未注公差尺寸的极限偏差”加工，则标注为：

$$\phi 3\ 000\ \text{MF}$$

3) 配制件 配制件（多数情况是轴）的公差按配合公差选取。在本例中即可按要求的极限间隙来考虑，选取合适的公差带。例如选用 f7，此时最大间隙为 $0.355\ \text{mm}$ ，最小间隙为 $0.145\ \text{mm}$ ，满足此配合要求。在零件图上标注为：

$$\phi 3\ 000\text{f}7\ \text{MF}\ \text{或}\ \phi 3\ 000\text{-}\frac{0}{-0.145}\ \text{MF}$$

若选 f8，则其最大间隙为 $0.475\ \text{mm}$ ，最小间隙仍为 $0.145\ \text{mm}$ ，最大间隙超过要求，故不适用。

4) 配制件极限偏差与极限尺寸的计算 配制件的极限偏差和极限尺寸，都以先加工件的实际尺寸为基数来确定。因此，应尽可能准确地测出先加工件的实际尺寸，以此作为配制件极限尺寸计算的起始尺寸。如本例，经加工后测得孔的

实际尺寸为 $\phi 3\ 000.195\ \text{mm}$ ，则轴 f7 的极限尺寸为

$$\begin{aligned}\text{最大极限尺寸} &= 3\ 000.195 - 0.145 \\ &= 3\ 000.050\ \text{mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{最小极限尺寸} &= 3\ 000.195 - 0.355 \\ &= 2\ 999.840\ \text{mm}\end{aligned}$$

由于配制件的偏差是以先加工件的实际尺寸为起始尺寸来确定的，故配制件上偏差的绝对值就是最小间隙或最大过盈，下偏差的绝对值就是最大间隙或最小过盈，因此，只看配制件的极限偏差就能了解配合性质。

5. 注意事项 配制配合是关于尺寸极限（公差）方面的技术规定，不涉及其他技术要求，如零件的形位公差，表面粗糙度等，不因采用配制配合而降低。

测量对保证配合性质有很大关系，要注意温度、形位误差对测量结果的影响。配制配合应采用尺寸相互比较的测量方法；在同样条件下测量，使用同一基准装置或校对量具，由同一组检验人员进行测量等，以提高测量精度。

1.8 公差与配合的选择和应用

在设计机械产品时，选择公差与配合是必不可少的重要环节，也是确保产品质量、性能的一项很重要的工作。

选择公差与配合的原则是，在保证机械产品功能的条件下，工艺简单可行，即对产品的技术经济要求适度合理。使机械产品的使用价值与制造成本的综合经济效果最佳。

公差与配合的选择包括基准制的选择、配合种类的选择和公差等级的选择。

1.8.1 基准制的选择

各种配合可以通过基孔制或基轴制来实现。基准制的选择，主要是以经济观点考虑，同时兼顾到功能、结构、工艺条件和其他方面的要求。

1) 一般情况下，应优先选用基孔制。因为从工艺上看，加工中等尺寸的孔通常要用价格昂贵的扩孔钻，铰刀、拉刀等定值（不可调）刀具加工，用定值量具（如光滑极限量规）检验。而加工轴则可用一把车刀或砂轮加工不同直径的轴。因此，采用基孔制可以减少备用定值刀、量具的规格和数量，降低生产成本，提高加工的经济性。至于尺寸较大的孔及低精度孔，虽一般不

采用定值刀、量具加工与检验，从工艺上讲，采用基孔制或基轴制都一样，但为了统一和考虑生产上的习惯，也宜于采用基孔制。

2) 在下列情况下，采用基轴制比采用基孔制更合适。基本尺寸相同的同一根轴上与几个孔配合，且有不同的配合性质，为简化轴的加工和装配，采用基轴制更为有利；直接采用冷拉棒材制造光轴，其配合表面不经切削加工即能满足产品性能要求，则与它相配的孔宜采用基轴制。

3) 与标准件配合的零件，其基准制选择通常按标准件所用基准制而定。如滚动轴承外圈与机座孔的配合，轴、轴套的键和槽的配合等均采用基轴制；滚动轴承内圈与轴的配合采用基孔制。

4) 若选用基孔制或基轴制都不适合时，为满足配合的特殊需要，允许采用任一孔、轴公差带组成配合。此种配合只用于同一孔（或轴）与几个轴（或孔）组成不同性能要求的配合，而孔（或轴）又需按基轴制（或基孔制）的某种配合

制造的情况而定。

1.8.2 公差等级的选择

选择公差等级的实质就是正确解决机器零件使用要求与制造工艺及成本之间的矛盾。

选择公差等级的原则，是在满足零件使用要求的前提下，尽可能选用较低的公差等级。精度要求应与生产的可能性协调一致，即要采用合理的加工工艺、装配工艺和现有设备。但是，在必要的情况下，则要采取提高设备精度和改进工艺的方法来保证产品的精度。

对配合尺寸选取适当的公差等级是极为重要的。因为在很多情况下，它将决定配合零件的工作性能、使用寿命及可靠性，同时又决定零件的制造成本和生产效率。

1) 选择公差等级首先应保证使用要求。各个公差等级的应用范围没有严格的划分，公差等级大致的应用范围见表 13.2-41。具体可参照表 13.2-42 的应用示例，通过对比分析来选择公差等级。

表 13.2-41 公差等级的应用范围

应 用	公 差 等 级 (IT)																						
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
块 规	——																						
量 规			——																				
配 合 尺 寸							——																
特别精密零件的配合				——																			
非配合尺寸 (大制造公差)														——									
原材料公差										——													

表 13.2-42 公差等级的选择及应用

公差等级	应 用 范 围 及 举 例
IT01	用于特别精密的尺寸传递基准，例如特别精密的标准量块
IT0	用于特别精密的尺寸传递基准及宇航中特别重要的精密配合尺寸。例如，特别精密的标准量块，个别特别重要的精密机械零件尺寸，校对检验 IT6 级轴用量规的校对量规
IT1	用于精密的尺寸传递基准、高精密度测量工具、特别重要的极个别精密配合尺寸。例如，高精密度标准量规，校对检验 IT7 至 IT9 级轴用量规的校对量规，个别特别重要的精密机械零件尺寸

续表 13.2-42

公差等级	应用范围及举例
IT2	用于高精度的测量工具, 特别重要的精密配合尺寸。例如, 检验 IT6 至 IT7 级工件用量规的尺寸制造公差, 校对检验 IT8 至 IT11 级轴用量规的校对塞规, 个别特别重要的精密机械零件尺寸
IT3	用于精密测量工具, 小尺寸零件的高精度的精密配合以及和 C 级滚动轴承配合的轴径与外壳孔径。例如, 检验 IT8 至 IT11 级工件用量规和校对检验 IT9 至 IT13 级轴用量规的校对量规, 与特别精密的 P4 级滚动轴承内环孔 (直径至 100 mm) 相配的机床主轴、精密机械和高速机械的轴颈, 与 P4 级向心球轴承外环相配合的壳体孔径, 航空及航海工业中导航仪器上特殊精密的个别小尺寸零件的精度配合
IT4	用于精密测量工具、高精度的精密配合和 P4 级、P5 级滚动轴承配合的轴径和外壳孔径。例如, 检验 IT9 至 IT12 级工件用量规和校对 IT12 至 IT14 级轴用量规的校对量规, 与 P4 级轴承孔 (孔径 > 100 mm) 及与 P5 级轴承孔相配的机床主轴, 精密机械和高速机械的轴颈, 与 P4 级轴承相配的机床外壳孔, 柴油机活塞销及活塞销座孔径, 高精度 (1 级至 4 级) 齿轮的基准孔或轴径, 航空及航海工业中用仪器的特殊精密的孔径
IT5	用于配合公差要求很小, 形状公差要求很高的条件下, 这类公差等级能使配合性质比较稳定, 相当于旧国标中最高精度, 用于机床、发动机和仪表中特别重要的配合尺寸, 一般机械中应用较少。例如, 检验 IT11 至 IT14 级工件用量规和校对 IT14 至 IT15 级轴用量规的校对量规, 与 P5 级滚动轴承相配的机床箱体孔, 与 E 级滚动轴承孔相配的机床主轴, 精密机械及高速机械的轴颈, 机床尾架套筒, 高精度分度盘轴颈, 分度头主轴, 精密丝杠基准轴颈, 高精度镗套的外径等; 发动机中主轴的外径, 活塞销外径与活塞的配合, 精密仪器中轴与各种传动件轴承的配合, 航空及航海工业仪器仪表中的精密孔的配合, 5 级精度齿轮的基准孔及 5 级、6 级精度齿轮的基准轴
IT6	配合表面有较高均匀性的要求, 能保证相当高的配合性质, 使用稳定可靠, 相当于旧国标 2 级轴和 1 级精度孔, 广泛的应用于机械中的重要配合。例如, 检验 IT12 至 IT15 级工件用量规和校对 IT15 至 IT16 级轴用量规的校对量规; 与 E 级轴承相配的外壳孔及与滚子轴承相配的机床主轴轴颈, 机床制造中装配式青铜蜗轮、轮壳外径安装齿轮、蜗轮、联轴器、皮带轮、凸轮的轴颈; 机床丝杠支承轴颈、矩形花键的定心直径、摇臂钻床的立柱等; 机床夹具的导向件的外径尺寸, 精密仪器中的精密轴, 航空及航海仪器仪表中的精密轴, 自动化仪表, 邮电机械, 手表中特别重要的轴, 发动机中气缸套外径, 曲轴主轴颈, 活塞销、连杆衬套, 连杆和轴瓦外径; 6 级精度齿轮的基准孔和 7 级、8 级精度齿轮的基准轴颈, 特别精密如 1 级或 2 级精度齿轮的顶圆直径
IT7	在一般机械中广泛应用, 应用条件和 IT6 相似, 但精度稍低, 相当于旧国标中 3 级精度轴或 2 级精度孔的公差。例如, 检验 IT14 至 IT16 级工件用量规和校对 IT16 级轴用量规的校对量规; 机床中装配式青铜蜗轮轮廓孔径, 联轴器、皮带轮、凸轮等的孔径, 机床卡盘座孔, 摇臂钻床的摇臂孔, 车床丝杠的轴承孔, 机床夹头导向件的内孔, 发动机中连杆孔、活塞孔, 铰制螺栓柱定位孔; 纺织机械中的重要零件, 印染机械中要求较高的零件, 精密仪器中精密配合的内孔, 电子计算机、电子仪器、仪表中重要内孔, 自动化仪表中重要内孔, 7 级、8 级精度齿轮的基准孔和 9 级、10 级精密齿轮的基准轴
IT8	在机械制造中属于中等精度, 在仪器、仪表及钟表制造中, 由于基本尺寸较小, 所以属于较高精度范围, 在农业机械、纺织机械、印染机械、自行车、缝纫机、医疗器械中应用最广。例如, 检验 IT16 级工件用量规, 轴承座衬套沿宽度方向的尺寸配合, 手表中跨齿轴, 棘爪拨针轮等与夹板的配合, 无线电仪表中的一般配合, 电子仪器、仪表中较重要的内孔, 计算机中变数齿轮孔和轴的配合尺寸, 电机制造中铁芯和机座的配合尺寸, 发动机活塞油环槽宽, 连杆轴瓦内径, 9 级至 12 级精度齿轮的基准孔和 11 级至 12 级精度齿轮基准轴, 6 级至 8 级精度齿轮的齿顶圆

续表 13.2-42

公差等级	应用范围及举例
IT9	应用条件与 IT8 相类似, 但精度低于 IT8 时采用, 比旧国标 4 级精度公差值稍大。例如, 机床中轴套外径与孔, 操纵件与轴, 空转皮带轮与轴, 操纵系统的轴与轴承等的配合, 纺织机械、印染机械中一般配合零件, 发动机中机油泵体内孔, 气门导管内孔, 飞轮与飞轮套的配合, 自动化仪表中的一般配合尺寸, 手表中要求较高零件的未注公差尺寸, 单键联接中键宽配合尺寸, 打字机中运动件的配合尺寸
IT10	应用条件与 IT9 相类似, 但要求精度低于 IT9 时采用, 相当于旧国标的 5 级精度公差。例如, 电子仪器、仪表中支架上的配合, 导航仪器中绝缘衬套孔与汇电环衬套轴, 打字机中铆合件的配合尺寸, 手表中基本尺寸小于 18 mm 时要求一般的未注公差尺寸, 及大于 18 mm 要求较高的未注公差尺寸, 发动机中油封挡圈孔与曲轴皮带轮毂配合的尺寸
IT11	广泛应用于间隙较大, 且有显著变动也不会引起危险的场合, 亦可用于配合精度较低, 装配后允许有较大的间隙, 相当于旧国标的 6 级精度公差。例如, 机床上法兰盘止口与孔、滑块与滑移齿轮、凹槽等; 农业机械、机车车箱部件及冲压加工的配合零件, 钟表制造中不重要的零件, 手表制造用的工具及设备中未注公差尺寸, 纺织机械中较粗糙的活动配合, 印染机械中要求较低的配合尺寸, 磨床制造中的螺纹联接及粗糙的动联接, 不作测量基准用的齿轮顶圆直径公差等
IT12	配合精度要求很低, 装配后有很大的间隙, 适用于基本上无配合要求的部位, 要求较高的未注公差尺寸极限偏差, 比旧国标的 7 级精度公差稍小。例如, 非配合尺寸及工序间尺寸, 发动机分离杆, 手表制造中工艺装备的未注公差尺寸, 计算机工业中金属加工的未注公差尺寸的极限偏差, 机床制造业中扳手孔和扳手座的联接等
IT13	应用条件与 IT12 相类似, 但比旧国标 7 级精度公差值稍大。例如, 非配合尺寸及工序间尺寸, 计算机、打字机中切削加工零件及圆片孔, 二孔中心距的未注公差尺寸
IT14	用于非配合尺寸及不包括在尺寸链中的尺寸, 相当于旧国标的 8 级精度公差。例如, 在机床、汽车、拖拉机、冶金机械、矿山机械、石油化工、电机、电器、仪器仪表、航空航海、医疗器械、钟表、自行车、缝纫机、造纸与纺织机械等机械加工零件中未注公差尺寸的极限偏差
IT15	用于非配合尺寸及不包括在尺寸链中的尺寸, 相当于旧国标的 9 级精度公差。例如, 冲压件、木模铸造零件、重型机床制造, 当基本尺寸大于 3 150 mm 时的未注公差尺寸极限偏差
IT16	用于非配合尺寸, 相当于旧国标的 10 级精度公差。例如, 打字机中浇铸件尺寸, 无线电制造业中箱体外形尺寸, 手术器械中的一般外形尺寸, 压弯延伸加工用尺寸, 纺织机械中木件的尺寸, 塑料零件的尺寸, 木模制造及自由锻造的尺寸
IT17 IT18	用于非配合尺寸, 相当于旧国标的 11 级或 12 级精度的公差, 用于塑料成型尺寸, 手术器械中的一般外形尺寸, 冷作和焊接用尺寸的公差

2) 选择公差等级时, 既要满足设计要求, 也要考虑工艺的可能性及经济性。选择最佳加工精度是一个非常复杂的技术经济问题。它不仅要考虑加工成本, 而且要考虑由于加工精度的提高而增加的装配成本, 以及精度对产品使用性能和经济指标(可靠性、寿命、燃料消耗等)的影响。

常用加工方法可能达到的公差等级见表 13.2-43, 表 13.2-44 推荐了与各公差等级相对应的经济加工方法, 公差等级与成本的关系见表 13.2-45。

3) 在选择公差等级时, 还应考虑表面粗糙度的要求。轴、孔公差等级与表面粗糙度的关系见表 13.4-14。

表 13.2-43 常用加工方法可能达到的公差等级

加工方法	IT 等 级																	
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
研 磨																		
珩 磨																		
圆 磨																		
平 磨																		
金刚石车																		
金刚石镗																		
拉 削																		
铰 孔																		
车																		
镗																		
铣																		
刨 插																		
钻 孔																		
滚压、挤压																		
冲 压																		
压 铸																		
粉末冶金成形																		
粉末冶金烧结																		
砂型铸造、气割																		
锻 造																		

表 13.2-44 各公差等级对应的经济加工方法

公差等级		加工方法 (括号内的数字, 是可达公差等级的可能变化范围)
轴	孔	
4~5	5~6	外圆精磨; 精拉削 (6~7); 精扩孔 (5~6); 精抛光 ^① , 精研磨; 中精磨 (5~6), 细精磨; 圆柱镗磨 (6~7); 精研磨; 超级精加工 ^① ; 阳极-机械磨削 (5~6), 精磨削
6~7	7~8	金刚石精车削或金刚石精镗孔; 金刚石细车、细镗 (6~9); 细铰、精铰 (6~7) ^② ; 细拉削、精拉削; 外圆细磨; 平面细磨, 精磨; 细抛光 (7~9); 铰孔或铰孔后用滚珠或心轴定径加工; 滚珠或滚柱滚压或扩径 (6~9); 细扩孔; 细研磨; 普通拉削; 粗研磨; 平面镗磨; 预研磨和中研磨; 阳极-机械粗磨削 (6~9), 细磨削; 装饰电抛光 (6~9); 普通机电车削 (6~9), 机电细车削; 机电刨削; 冷冲裁——经修整和校准过的平面零件的外形尺寸
8~9	9	精刨削 (7 ^③ ; 8 ^③); 精铣切 (7 ^③); 横进刀精车削 (8~11); 半细铰 (9~10), 铸铁半细铰 (8); 半细拉削; 精刮; 钳工锉 (9~11); 切割和铣切后砂布修整 (9~11); 外圆半细磨 (8~11); 钻削后用滚珠或心轴定径加工孔; 冷拉延——形状简单的空心零件的高度尺寸 (9~12); 冷冲裁——修正过的平面零件的外形尺寸; 未经校准的热体积模压件 (9~11)

续表 13.2-44

公差等级		加工方法 (括号内的数字, 是可达公差等级的可能变化范围)
轴	孔	
10		细扩孔 (10~11); 冷拉延——简单形状的空心零件外径 (10~11)。也可参看9级标准公差 (公差等级的可能变化范围) 所采用的加工方法
11		细刨削 (11~13), (10 ^②); 细铣削 (10 ^②); 快速细铣削 (11~13); 横进刀细车削 (11~13); 快速车削; 端面切断 (11~13); 钻模钻孔 (11~13); 粗刮削; 阳极-机械普通切割毛坯 (11~13), 特种切割; 板材电接触切割 (11~13); 熔模铸造黑色金属小零件 (11~13); 拉延模冷拉延——简单形状的空心零件拉深; 平面零件落料。也可参看9级和10级标准公差 (公差等级的可能变化范围) 所采用的加工方法
12~13		粗刨削 (12~14); 细插削; 粗铣切 (12~14), (11 ^②); 快速铣切 (12~14); 纵进刀半细车削 (12~14); 无钻模钻孔 (12~14); 扩孔 (12~14); 黑皮粗扩孔 (12~15); 半细镗孔 (12~14); 壳型铸造——黑色金属零件 (12~14); 冷冲裁冲切的平面零件的外形尺寸; 砂轮切割 (12~15)

- ① 抛光和超精研磨时所能达到的尺寸精度, 取决于预加工的精度。
- ② 铸铁的经济精度。
- ③ 大零件精加工时 (床身、架等) 龙门刨床的刨削精度可以达到7级公差。

表 13.2-45 不同公差等级加工成本比较

尺寸	加工方法	公差等级 (IT)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
外 径	普通车削																
	六角车床车削																
	自动车削																
	外圆磨																
	无心磨																
内 径	普通车削																
	六角车床车削																
	自动车削																
	钻																
	铰																
	镗																
	精 镗																
	内 圆 磨																
长 度	研 磨																
	普通车削																
	六角车床车削																
	自动车削																
	铣																

注: 虚线、实线、点划线表示成本比例为 1:2.5:5。

4) 对于基本尺寸 ≤ 500 mm的配合,公差等级高于或等于IT8时,推荐选用孔的公差等级比轴低一级;对于公差等级低于IT8或基本尺寸 > 500 mm的配合,推荐采用孔、轴同级公差。

1.8.3 配合的选择

选择配合主要是为了解决结合零件、孔与轴在工作时的相互关系,保证机器工作时各个零件之间的协调,以实现预定的工作性质。

选择配合有类比法、计算法和试验法三种方法。

类比法是根据设计零件的使用情况,参照经过生产实践验证的同类机器已有配合的经验资料或国内、外各种手册、技术文件资料中推荐的经验数据来确定配合的方法。按类比法选择配合,要对设计对象和参照对象的功能、结构、材料和使用条件进行充分了解和析,才能选择适当。

计算法是根据零件的材料、结构和功能要求,按一定的理论和公式,通过计算来确定所需的间隙或过盈量,然后根据计算的间隙或过盈量选择相应配合的方法。按计算法选取配合比较科学,有指导意义。

试验法是通过模拟试验和分析选择最佳配合的方法。按试验法选取配合,最为可靠,但周期较长,成本较高,一般只用于特别重要的、关键性配合的选取。

选择配合时,可采用其中的一种方法,有时也需相互补充。如根据类比法选择的配合,再用计算法校验;对较重要的配合,在计算的基础上,再进行试验验证。但是,无论采用哪种方法,都应使选择的配合合理、最佳。否则,如配合类别选择得不合适,即使零件公差控制得很小,加工精度很高,也不能得到高质量的产品。

在设计机械产品时,大量的配合都是用类比法确定的。这是最常用和最方便的一种方法,比较经济、可靠。

选择配合时首先根据使用要求确定配合类别、配合公差和配合代号等三方面的问题。若工作时配合件有相对运动,则选择间隙配合,其间隙根据相对运动的速度大小来选择。速度大时,配合的间隙需大些;速度小,则间隙可小。若要求保持零件间不产生相对运动,则要选用过盈配合。配合件有定位要求的,基本上选用过渡配

合。当结合零件间由键、销或螺钉等外加紧固件紧固时,根据情况也可用间隙配合、过渡配合或过盈配合。

配合公差是允许间隙或过盈的变动量。对于有相对运动要求的配合件,要考虑相对运动的方向、速度、结构和工作条件等因素;对于不能有相对运动,而且要完全依靠过盈传递力或转矩的配合件,要考虑传递力或转矩的大小、材料、结构和工作条件等因素;对于有定位要求的配合件,要考虑定位精度、结构、装拆要求等因素来确定适宜的间隙或过盈的变动量。

配合件承受载荷的大小以及有无冲击和振动,也是选择配合应考虑的因素。单位压力大,则间隙要小;在静联接中,传动力大或有冲击振动时,过盈也要大。

配合件定位精度要求很高时,选用过渡配合。装拆频繁的,所选配合的间隙要大些或过盈要小些,一般用g、h或j、js组成的配合;不常装拆的,可用k组成的配合;不装拆的,用m或n组成的配合。

当配合类别和配合公差确定后,按标准选用适当的配合代号。选用配合代号时,要同时确定选用什么基准制、什么标准公差等级以及非基准件选用什么基本偏差代号。

选择配合时,要掌握基本偏差的特点。若采用基孔制,则选择配合时首先要确定轴的基本偏差代号;若用基轴制,则选择配合时首先确定孔的基本偏差代号。同时,按配合公差要求确定孔、轴公差等级。

对于间隙配合,由于基本偏差的绝对值等于最小间隙的绝对值,故可按要求的最小间隙来选择基本偏差代号。对于过盈配合,在确定基准件公差等级后,即可按要求的最小过盈来选择基本偏差代号。

对基本尺寸至500 mm的常用尺寸段,选择配合时,应尽可能选用优先配合。当优先配合不能满足使用要求时,可选用基孔制常用配合或基轴制常用配合。如优先、常用配合尚不能满足要求时,则再选用标准推荐的一般用途的孔、轴公差带,组成所需的配合。特殊需要时,还可按标准规定的标准公差与基本偏差另行组成孔、轴公差带及配合。

表13.2-46为基孔制配合中轴的各种基本偏

差应用实例, 表 13.2-47 为优先、常用配合的特性及应用举例, 供按类比法选择配合时参考。

若按同类型机器的配合使用情况, 采用类比

法选择配合时, 要考虑所设计机器的具体工作状态对间隙或过盈的影响, 并进行适当修正。工作状态对间隙和过盈的影响见表 13.2-48。

表 13.2-46 轴的各种基本偏差的应用

配合	基本偏差	配合特性及应用	配合	基本偏差	配合特性及应用
间隙配合	a、b	可得到特别大的间隙, 应用很少	过渡配合	js	为完全对称偏差 ($\pm IT/2$), 平均起来为稍有间隙的配合, 多用于 IT4~IT7 级, 要求间隙比 h 轴配合时小, 并允许略有过盈的定位配合, 如联轴器、齿圈与钢制轮毂, 一般可用手或木锤装配
	c	可得到很大间隙, 一般适用于缓慢、松弛的动配合, 用于工作条件较差 (如农业机械), 受力变形, 或为了便于装配, 而必须有较大间隙时。推荐配合为 H11/c11。其较高等级的配合, 如 H8/c7 适用于轴在高温工作的紧密动配合, 例如内燃机排气阀和导管		k	平均起来没有间隙的配合, 适用于 IT4~IT7 级, 推荐用于要求稍有过盈的定位配合, 例如为了消除振动的定位配合, 一般用木锤装配
	d	一般用于 IT7~IT11 级, 适用于松的转动配合, 如密封盖、滑轮、空转带轮等与轴的配合。也适用于大直径滑动轴承配合, 如透平机、球磨机、轧滚成形和重型弯曲机及其他重型机械中的一些滑动支承		m	平均起来具有不大过盈的过渡配合, 适用于 IT4~IT7 级。一般可用木锤装配, 但在最大过盈时, 要求相当的压入力
	e	多用于 IT7~IT9 级, 通常适用于要求有明显间隙, 易于转动的支承配合, 如大跨距支承, 多支点支承等配合, 高等级的 e 轴适应于大的、高速重载支承, 如蜗轮发电机, 大的电动机支承等, 也适用于内燃机主要轴承, 凸轮轴支承、摇臂支承等配合		n	平均过盈比用 m 轴时稍大, 很少得到间隙, 适用于 IT4~IT7 级。用锤或压力机装配。通常推荐用于紧密的组件配合。H6/n5 为过盈配合
	f	多用于 IT6~IT8 级的一般转动配合。当温度差别不大, 对配合基本上没影响时, 被广泛用于普通润滑油 (或润滑脂) 润滑的支承, 如齿轮箱、小电动机、泵等的转轴与滑动支承的配合		p	与 H6 或 H7 孔配合时是过盈配合, 而与 H8 孔配合时为过渡配合。对非铁类零件, 为较轻的压入配合, 当需要时易于拆卸。对钢、铸铁或铜-钢组件装配是标准压入配合。对弹性材料, 如轻合金等, 往往要求很小的过盈, 可采用 p 轴配合
	g	多用于 IT5~IT7 级, 配合间隙很小, 制造成本高, 除很轻负荷的精密装置外, 不推荐用于转动配合, 最适合不回转的精密滑动配合, 也用于插销等定位配合, 如精密连杆轴承、活塞及滑阀、连杆销等		r	对铁类零件, 为中等打入配合; 对非铁类零件, 为轻的打入配合, 当需要时可以拆卸。与 H8 孔配合, 直径在 $\phi 100$ mm 以上时为过盈配合, 直径小时为过渡配合
	h	多用于 IT4~IT11 级, 广泛应用于无相对转动的零件, 作为一般的定位配合。若没有温度、变形的影响, 也用于精密滑动配合		s	用于钢和铁制零件的永久性和半永久性装配, 过盈量充分, 可产生相当大的结合力。当用弹性材料, 如轻合金时, 配合性质与铁类零件的 p 轴相当。例如套环压在轴上、阀座等配合。尺寸较大时, 为了避免损伤配合表面, 需用热胀或冷缩法装配
				t、u、v、x、y、z	过盈量依次增大, 除 u 外, 一般不推荐

表 13.2-47 优先、常用配合特性及应用举例

配合制		装配方法	配合特性及使用条件		应用举例	
基孔	基轴					
H7/z6		温差法	特重型压入配合	用于承受很大的转矩或变载、冲击、振动载荷处。配合处不加紧固件。材料的许用应力要求很大	中小型交流电动机轴壳上绝缘体和接触环、柴油机传动轴壳体和分电器衬套	
H7/y6					小轴肩和环	
H7/x6					钢和轻合金或塑料等不同材料的配合。如柴油机销轴与壳体、气缸盖与进气门座等的配合	
H7/v6		压力机或温差	重型压入配合	用于传递较大转矩。配合处不加紧固件即可得到十分牢固的联接。材料的许用应力要求较大	偏心压床的块与轴、柴油机销轴与壳体、连杆孔和衬套外径等配合	
H7/u6	U7/h6				车轮轮箍与轮芯、联轴器与轴、轧钢设备中的辊子与心轴、拖拉机活塞销和活塞壳、船舵尾轴和衬套等的配合	
H8/u7					蜗轮青铜轮缘与轮芯、安全联轴器销轴与套、螺纹车床蜗杆轴衬和箱体孔等的配合	
H6/t5	T6/H5	压力机或温差	中型压入配合	不加紧固件可传递较小的转矩。当材料强度不够时。可用来自重压入配合。但需加紧固件	齿轮孔和轴的配合	
H7/t6	T7/h6				联轴器与轴 含油轴承和轴承座、农业机械中曲柄盘与销轴	
H8/t7					柴油机连杆衬套和轴瓦、主轴承孔和主轴承瓦等的配合	
H6/s5	S6/h5				减速器中轴与蜗轮、空压机连杆头与衬套、辊道辊子和轴、大型减速器低速齿轮与轴的配合	
H7/s6	S7/h6				青铜轮缘与轮芯、轴衬与轴承座、空气钻外壳盖与套筒、安全联轴器销钉和套、压气机活塞销和汽缸、拖拉机齿轮泵小齿轮和轴等配合	
H8/s7						
H7/r6	R7/h6	压力机或温差	轻型压入配合	用于不拆卸的轻型过盈联接。不依靠配合过盈量传递摩擦载荷。传递转矩时要增加紧固件。以及用于以高的定位精度达到部件的刚性及对中性要求	重载齿轮与轴、车床齿轮箱中齿轮与衬套、蜗轮青铜轮缘与轮芯、轴和联轴器、可换铰套与铰模板等的配合	
H6/p5	P6/h5				冲击振动的重载荷的齿轮和轴、压缩机十字销轴和连杆衬套、柴油机缸体上口和主轴承瓦、凸轮孔和凸轮轴等配合	
H7/p6	P7/h6					
H8/p7		压力机压入	过盈概率 66.8% ~ 93.6%	用于可承受很大转矩、振动及冲击（但需附加紧固件）。不经常拆卸的地方。同心度及配合紧密性较好	升降机用蜗轮或带轮的轮缘和轮心、链轮轮缘和轮心、高压循环泵缸和套等的配合	
H6/n5	N6/h5				80%	可换铰套与铰模板、增压器主轴和衬套等的配合
H7/n6	N7/h6				77.7% ~ 82.4%	爪型联轴器与轴、链轮轮缘与轮心、蜗轮青铜轮缘与轮心、破碎机振动机械的齿轮和轴的配合。柴油机泵座与泵缸、压缩机连杆衬套和曲轴衬套。圆柱销与销孔的配合
H8/n7	N8/h7				58.3% ~ 67.6%	安全联轴器销钉和套、高压泵缸和缸套、拖拉机活塞销和活塞套等的配合

续表 13.2-47

配合制		装配方法	配合特性及使用条件		应用举例
基孔	基轴				
H6/m5	M6/h5	铜锤打	过盈概率	用于配合紧密不经常拆卸的地方。当配合长度大于 1.5 倍直径时, 用来代替 H7/n6, 同心度好	压缩机连杆头与衬套、柴油机活塞孔和活塞销的配合
H7/m6	M7/h6		50% ~ 62.1%		蜗轮青铜轮缘与铸铁轮芯、齿轮孔与轴、定位销与孔的配合
H8/m7	M8/h7		50% ~ 56%		升降机构中的轴与孔、压缩机十字销轴与座
H6/k5	K6/h5	手锤打	46.2% ~ 49.1%	用于受不大的冲击载荷处, 同心度较好, 用于常拆卸部位。为广泛采用的一种过渡配合	精密螺纹车床主轴箱体孔和主轴前轴承外圈的配合
H7/k6	K7/h6		41.7% ~ 45%		机床不滑动齿轮和轴、中型电动机轴与联轴器或带轮、减速器蜗轮与轴、齿轮和轴的配合
H8/k7	K8/h7		41.7% ~ 51.2%		压缩机连杆孔与十字头销、循环泵活塞与活塞杆
H6/js5	Js6/h5	手或木锤装卸	19.2% ~ 21.1%	用于频繁拆卸同心度要求不高的地方, 是最松的一种过渡配合, 大部分都将得到间隙	木工机械中轴与轴承的配合
H7/js6	Js7/h6		18.8% ~ 20%		机床变速箱中齿轮和轴、精密仪表中轴和轴承、增压器衬套间的配合
H8/js7	Js8/h7		17.4% ~ 20.8%		机床变速箱中齿轮和轴, 轴端可卸下的皮带轮和手轮、电动机机座与端盖等的配合
H6/h5	H6/h5	加油后用手旋进	配合间隙较小, 能较好的对准中心, 一般多用于常拆卸或在调整时需移动或转动的联接处, 或工作时滑移较慢并要求较好的导向精度的地方, 和对同心度有一定要求通过紧固件传递转矩的固定联接处	间隙定位配合, 适用于同心度要求较低、工作时一般无相对运动的配合及负载不大, 无振动、拆卸方便, 加键可传递转矩的情况	剃齿机主轴与剃刀衬套、车床尾座体与套筒、高精度分度盘轴与孔、光学仪器中变焦距系统的孔轴配合
H7/h6	H7/h6				机床变速箱的滑移齿轮和轴、离合器与轴、钻床横臂与立柱、风动工具活塞与缸体、往复运动的精导向的压缩机连杆孔和十字头、定心的凸缘与孔的配合
H8/h7	H8/h7				安全扳手销钉和套、一般齿轮和轴、带轮和轴、螺旋搅拌机叶轮与轴、离合器与轴、操纵件与轴、拨叉和导向轴、滑块和导向轴、减速器油标尺与箱体孔, 部分式滑动轴承壳和轴瓦、电动机座上口和端盖
H8/h8	H8/h8	手旋进	具有很小间隙, 适用于有一定相对运动、运动速度不高并且精密定位的配合, 以及运动可能有冲击但又能保证零件同心度或紧密性的配合		起重链轮与轴、对开轴瓦与轴承座两侧的配合、联接端盖的定心凸缘、一般的铰接、粗糙机构中拉杆、杠杆等配合
H9/h9	H9/h9				光学分度头主轴与轴承、刨床滑块与滑槽
H10/h10	H10/h10				精密机床主轴与轴承、机床传动齿轮与轴、中等精度分度头主轴与轴套、矩形花键定心直径、可换钻套与钻模板、柱塞燃油泵的轴承壳体与销轴、拖拉机连杆衬套与曲轴的配合
H11/h11	H11/h11	手旋进			柴油机气缸体与挺杆、手电钻中的配合等
H6/g5	G6/h5				
H7/g6	G7/h6				
H8/g7	G8/h7				

续表 13.2-47

配合制		装配方法	配合特性及使用条件	应用举例	
基孔	基轴				
H6 f5	F6 h5	手 推 滑	具有中等间隙, 广泛适用于普通机械中转速不大用普通润滑油或润滑脂润滑的滑动轴承, 以及要求在轴上自由转动或移动的配合场合	精密机床中变速箱、进给箱的转动件的配合, 或其他重要滑动轴承、高精度齿轮轴套与轴承衬套、柴油机的凸轮轴与衬套孔等的配合	
	H7 f6			F7 h6	爪型离合器与轴、机床中一般轴与滑动轴承、机床夹具、钻模、镗模的导套孔、柴油机机体套孔与汽缸套、柱塞与缸体等的配合
	H8 f7			F8 h7	中等速度、中等载荷的滑动轴承, 机床滑移齿轮与轴、蜗杆减速器的轴承端盖与孔, 离合器活动爪与轴
H8 f8	F8 h8	进	配合间隙较大, 能保证良好润滑, 允许在工作中发热, 故可用于高转速或大跨度或多支点的轴和轴承以及精度低、同心度要求不高的在轴上转动零件与轴的配合	滑块与导向槽, 控制机构中的一般轴和孔, 支承跨距较大或多支承的传动轴和轴承的配合	
H9 f9	F9 h9			安全联轴器轮毂与套, 低精度含油轴承与轴、球体滑动轴承与轴承座及轴、链条张紧轮或传动带导轮与轴, 柴油机活塞环与环槽宽等配合	
H8 e7	E8 h7	手 轻 推	配合间隙较大, 适用于高转速载荷不大、方向不变的轴与轴承的配合, 或虽是中等转速但轴跨度长或三个以上支点的轴与轴承的配合	汽轮发电机、大电动机的高速轴与滑动轴承, 风扇电机的销轴与衬套	
H8 e8	E8 h8			外圆磨床的主轴与轴承、汽轮发电机轴与轴承、柴油机的凸轮轴与轴承, 船用链轮轴、中小型电机轴与轴承、手表中的分轮、时轮轮片与轴承的配合	
H9 e9	E9 h9			用于精度不高且有较松间隙的转动配合	
H8 d8	D8 h8	进	配合间隙比较大, 用于精度不高, 高速及负载不高的配合或高温条件下的转动配合, 以及由于装配精度不高而引起偏斜的联接	机车车辆轴承、缝纫机梭摆与梭床空压机活塞环与环槽宽度的配合	
H9 d9	D9 h9			通用机械中的平键联接、柴油机活塞环与环槽宽、空压机活塞与压杆, 印染机械中汽缸活塞密封环, 热工仪表中精度较低的轴与孔、滑动轴承及较松的皮带轮与轴的配合	

表 13.2-48 工作状况对过盈和间隙的影响

具体工作状况	过盈应 增或减	间隙应 增或减	具体工作状况	过盈应 增或减	间隙应 增或减
材料许用应力小	减	—	装配时可能偏斜	减	增
经常装卸	减	—	旋转速度较高	增	增
有冲击载荷	增	减	有轴向运动	—	增
工作时, 孔的温度高于轴的温度	增	减	润滑油黏度大	—	增
工作时, 轴的温度高于孔的温度	减	增	表面较粗糙	增	减
配合长度较大	减	增	装配精度较高	减	减
配合表面形位误差大	减	增	装配精度较低	增	增

1.8.4 选择公差与配合时应注意的其他因素

1) 温度条件 在选择公差与配合时, 要注意温度条件。标准中和图样上规定或标注的尺寸是以温度 20℃ 为基准的。但是, 机器零件的工作温度往往不是 20℃, 某些机械如化工机械、飞机、发动机等可以在 800℃ 至 -60℃ 的高温或低温条件下工作, 如果孔、轴材料不同, 其线膨胀系数相差较大时, 应考虑温度造成的热变形影响。因此, 在选择配合时, 应进行必要的核算和修正。计算公式如下:

$$x_{fmax} = x_{wmax} + d_f [\alpha_s (t_s - t) \mp \alpha_h (t_h - t)] \quad (13.2-1)$$

$$x_{fmin} = x_{wmin} + d_f [\alpha_s (t_s - t) \mp \alpha_h (t_h - t)] \quad (13.2-2)$$

式中 x_{fmax} 、 x_{fmin} ——最大与最小的装配间隙 (mm);

t_h 、 t_s ——孔、轴的工作温度 (℃);

x_{wmax} 、 x_{wmin} ——最大与最小的工作间隙 (mm);

t ——装配时环境的温度 (℃);

d_f ——结合直径 (mm);

α_h 、 α_s ——孔、轴材料的线胀系数 (1/℃)。

式 (13.2-1) 及式 (13.2-2) 中的负号, 用在当温度提高, 孔的尺寸扩大的情况下; 正号用在当温度提高而孔的尺寸缩小的情况下 (例如质量大的零件上不大的孔局部加热时, 及放置在加热壳体上, 小而薄的套筒的孔, 均由于温度提高使孔的尺寸缩小)。

例: 铝制活塞与钢制缸体的结合。已知活塞与汽缸的结合直径 $d_f = 150$ mm, 工作温度 $t_h = 110$ ℃, $t_s = 180$ ℃, 线胀系数 $\alpha_h = 12 \times 10^{-6}$ 1/℃, $\alpha_s = 24 \times 10^{-6}$ 1/℃, 装配温度 $t = 20$ ℃, 要求工作间隙在 0.1~0.3 mm 内, 试选择配合。

解: 由式 (13.2-1) 及式 (13.2-2) 得, 最大与最小装配间隙为:

$$x_{fmax} = 0.3 + 150 [24 \times 10^{-6} (180 - 20) - 12 \times 10^{-6} (110 - 20)] = 0.714 \text{ mm}$$

$$x_{fmin} = 0.1 + 150 [24 \times 10^{-6} (180 - 20) - 12 \times 10^{-6} (110 - 20)] = 0.514 \text{ mm}$$

按要求的最小间隙, 由表 13.2-2, 可选轴的基本偏差 $a = -520 \mu\text{m}$ 。

由配合公差 $T_f = (0.3 - 0.1) \text{ mm} = 0.2 \text{ mm} = T_h + T_s$, 可取 $T_h = T_s = 100 \mu\text{m}$, 由表 13.2-4 可取 IT9, 故所选配合并标注在图样上的为: $\phi 150 \frac{\text{H9}}{\text{a9}}$, 其最小间隙为 0.52 mm, 最大间隙为 0.72 mm。

2) 装配引起的变化 在一些机械结构中, 由于套筒外表面的配合有过盈, 使压装后套筒内孔收缩变小, 影响套筒内孔与轴的配合。因此, 对有装配变形的套筒类零件, 应考虑压装后孔的收缩率, 其收缩率与材质、壁厚、配合长度、表面粗糙度、压装方式等因素有关。

如图 13.2-10 左侧所示的结构, 套筒外表面与机体孔的配合为 $\phi 70\text{H7}/\text{m6}$, 套筒内表面与轴的配合为 $\phi 60\text{H7}/\text{f7}$, 它们的公差带见图 13.2-10 右侧。由于套筒外表面与机体孔配合的最大过盈量为 0.03 mm, 其内孔可能收缩 0.045 mm (假定内孔收缩量为过盈量的 1.5 倍)。而原定套筒内孔与轴配合的最小间隙量为 0.03 mm, 因此, 在这种情况下就会使此套筒内孔与轴之间产生 0.015 mm 的过盈, 改变了原来要求的间隙配合性质。为使套筒内孔与轴仍具有间隙配合的性质, 就要将套筒内孔的公差带上移或使轴的公差带下移, 也可将套筒装入机体内再按 $\phi 60\text{H7}$ 加工它的内孔。

一般情况下, 装配图样上标注的配合都是指装配之后的要求。为此, 当遇到装配因素会引起配合变化时, 应采取相应措施予以解决。

3) 尺寸分布特性引起的变化 孔、轴尺寸随机误差的分布状况对配合效果有影响。如图 13.2-11 所示的配合 $\phi 50\text{H7}/\text{js6}$, 若孔、轴尺寸随机误差均为正态分布, 且分布中心与公差带的中心相重合, 则其平均间隙量为 13.5 μm , 亦即这种配合间隙量为 13 μm 时的概率密度最大, 这种配合的间隙概率大于过盈的概率。若孔、轴尺寸随机误差的分布曲线均偏向其最大实体尺寸一边, 如图中双点划线所示, 则孔的尺寸均值减去轴的尺寸均值为负数, 亦即为过盈, 其配合过盈的概率超过间隙的概率, 即同为 $\phi 50\text{H7}/\text{js6}$ 配合, 由于孔、轴尺寸随机误差分布的不同, 后者比前者偏紧较多。

为了控制孔、轴尺寸随机误差分布特性, 采用统计尺寸公差是一种有效的方法 (见本章第 3 节)。

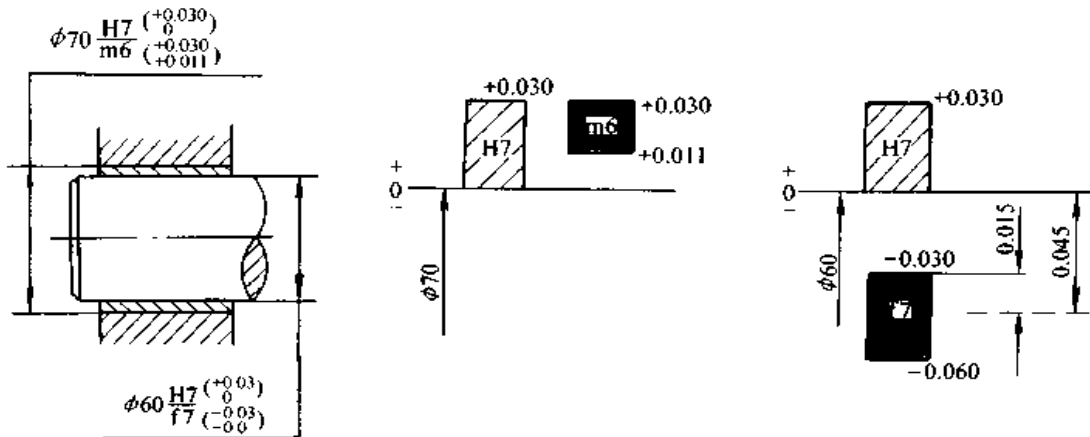


图 13.2-10 套筒结构与公差带图

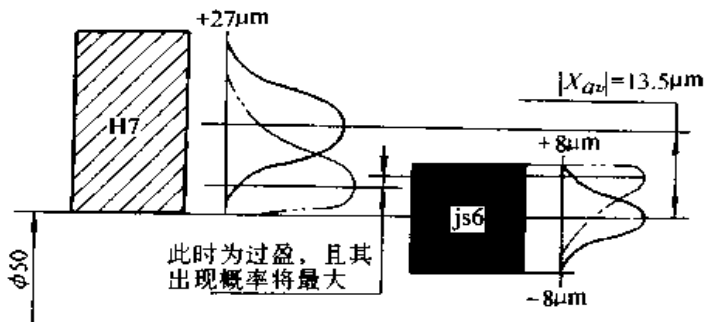


图 13.2-11 过渡配合孔、轴尺寸随机误差分布

2 未注公差的线性和角度尺寸的一般公差 (GB/T 1804—2000)

一般公差指在车间通常加工条件下可保证的公差。采用一般公差的尺寸，在该尺寸后不需注出其极限偏差数值。

选取图样上未注公差尺寸的一般公差的公差等级时，应考虑通常的车间精度并由相应的技术文件或标准作出具体规定。

对任一单一尺寸，如功能上要求比一般公差更小的公差或允许更大的公差并更为经济时，其相应的极限偏差要在相关的基本尺寸后注出。

由不同类型的工艺（例如切削和铸造）分别加工形成的两表面之间的未注公差的尺寸应按规定的两个一般公差数值中的较大值控制。

以角度单位规定的一般公差仅控制表面的线或素线的总方向，不控制它们的形状误差。从实

际表面得到的线的总方向是理想几何形状的接触线方向。接触线和实际线之间的最大距离是最小可能值。

2.1 一般公差的公差等级和极限偏差

一般公差有精密 f、中等 m、粗糙 c、最粗 v 4 个公差等级。其极限偏差按线性尺寸和角度尺寸分别给出。

(1) 线性尺寸

线性尺寸的极限偏差数值列于表 13.2-49；倒圆半径和倒角高度尺寸的极限偏差列于表 13.2-50。

(2) 角度尺寸

角度尺寸的极限偏差数值列于表 13.2-51，其值按角度短边长度确定，对圆锥角按圆锥素线长度确定。

表 13.2-49 线性尺寸的极限偏差数值 (摘自 GB/T 1804—2000) (mm)

公差等级	基本尺寸分段							
	0.5~3	>3~6	>6~30	>30~120	>120~400	>400~1 000	>1 000~2 000	>2 000~4 000
精密 f	±0.05	±0.05	±0.1	±0.15	±0.2	±0.3	±0.5	—
中等 m	±0.1	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2
粗糙 c	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2	±3	±4
最粗 v	—	±0.5	±1	±1.5	±2.5	±4	±6	±8

表 13.2-50 倒圆半径和倒角高度尺寸的极限偏差数值 (摘自 GB/T 1804—2000) (mm)

公差等级	基本尺寸分段			
	0.5~3	>3~6	>6~30	>30
精密 f	±0.2	±0.5	±1	±2
中等 m				
粗糙 c	±0.4	±1	±2	±4
最粗 v				

表 13.2-51 角度尺寸的极限偏差数值 (摘自 GB/T 1804—2000)

分差等级	长度分段 /mm				
	≤10	>10~50	>50~120	>120~400	>400
精密 f	±1°	±30′	±20′	±10′	±5′
中等 m					
粗糙 c	±1°30′	±1°	±30′	±15′	±10′
最粗 v	±3°	±2′	±1′	±30′	±20′

2.2 适用的尺寸和图样表示法

(1) 适用的未注公差尺寸

表 13.2-49~表 13.2-51 中的一般公差和极限偏差适用于金属切削加工的尺寸,也适用于一般的冲压加工的尺寸。非金属材料和其他工艺方法加工的尺寸可参照采用。

它仅适用于下列未注公差的尺寸:

1) 线性尺寸 (例如外尺寸、内尺寸、阶梯尺寸、直径、半径、距离、倒圆半径和倒角高度);

2) 角度尺寸,包括通常不注出角度值的角度尺寸,例如直角 (90°);

3) 机加工组装件的线性和角度尺寸。

不适用于下列尺寸:

1) 其他一般公差标准涉及的线性和角度尺

寸;

2) 括号内的参考尺寸;

3) 矩形框格内的理论正确尺寸。

(2) 图样表示法

采用标准规定的一般公差 (表 13.2-49、表 13.2-50、表 13.2-51 表列的),应在图样标题栏附近或技术要求、技术文件 (如企业标准) 中注出标准号及选取的公差等级代号。例如选取中等等级时,标注为:

GB/T 1804-m

3 统计尺寸公差 (JB/T 9184—1999)

3.1 统计尺寸公差的含义

统计尺寸公差是对实际尺寸概率分布特性作出规定的尺寸公差。根据设计要求,对实际尺

寸,不但要限定它的变动量,而且还要限定它的概率分布特性。

采用统计尺寸公差控制公差范围内实际尺寸(极限偏差)的分布,需将公差范围采用简化办法,划分为上边区、下边区和中间区(见图13.2-12)三个区间,并规定区间内的频率。

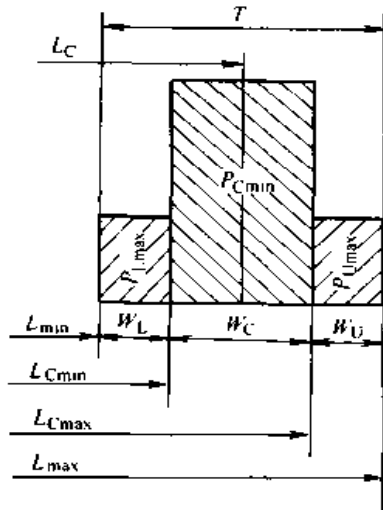


图 13.2-12 统计尺寸公差带图

图中 T 为公差; L_C 为中间尺寸; 最大极限尺寸 (L_{max}) 与最小极限尺寸 (L_{min}) 的算术平均值; 以最大极限尺寸 (L_{max}) 为上限的尺寸公差带的部分区域为上边区; W_U 为上边区宽度; 上边区所占有的部分尺寸公差; 以最小极限尺寸 (L_{min}) 为下限的尺寸公差带的部分区域为下边区; W_L 为下边区宽度; 下边区所占有的部分尺寸公差; 位于上边区与下边区之间的尺寸公差带的部分区域为中间区; W_C 为中间区宽度; 中间区所占有的部分尺寸公差; L_{Cmax} 为中间区上限(上边区下限); 中间区与上边区的分界尺寸; L_{Cmin} 为中间区下限(下边区上限); 中间区与下边区的分界尺寸; P_{Umax} 为上边区频率; 允许零件实际尺寸落在上边区内的最大频率; P_{Lmax} 为下边区频率; 允许零件实际尺寸落在下边区内的最大频率; P_{Cmin} 为中间区频率; 允许零件实际尺寸落在中间区内的最小频率。

3.2 规定实际尺寸概率分布特性的方案及标注

(1) 规定实际尺寸概率分布特性的方案

可用以下三种方案之一对实际尺寸概率分布特性作出规定。

方案 a 规定实际尺寸的中间区上限 L_{Cmax} 、下限 L_{Cmin} 及中间区频率 P_{Cmin} 或规定实际尺寸的上边区上限 L_{max} 、下限 L_{Cmax} 及上边区频率 P_{Umax} 和下边区上限 L_{Cmin} 、下限 L_{min} 及下边区频率 P_{Lmax} ;

方案 b 规定实际尺寸算术平均区间 $B_{\bar{x}}$;

算术平均区间为限制实际尺寸算术平均值的区间。

方案 c 规定实际尺寸中位数区间 $B_{\bar{x}}$ 。

中位数区间为限制实际尺寸中位数的区间;

在某些情况下,当采用方案 b 或方案 c 时,还应规定允许实际尺寸标准差的最大值,即标准差上限 σ_{max} 。

(2) 统计尺寸公差在图样上的标注

1) 按方案 a 标注

例如: $55 \pm 0.06 \pm 0.03P86\%$

其中: 55 mm 为基本尺寸; $(55 + 0.06)$ mm 为最大极限尺寸; $(55 - 0.06)$ mm 为最小极限尺寸; P86% 表示 P_{Cmin} 等于 86%; 即在中间区 (55 ± 0.03) mm 范围内至少包含有 86% 的零件。

如无特别说明,则: $P_{Umax} = P_{Lmax} = \frac{1 - P_{Cmin}}{2} \times 100\% = 7\%$ 。即在上边区 $(55 \pm_{-0.03}^{+0.06})$ mm 或下边区 $(55 \pm_{-0.06}^{+0.03})$ mm 的范围内最多包含有 7% 的零件。

2) 按方案 b 标注

例如: $55 \pm 0.06 \pm 0.02\bar{x}$

表示实际尺寸的算术平均值必须位于 (55 ± 0.02) mm 的区间内。

如需要规定 σ_{max} 时,可加注在括号内:

$55 \pm 0.06 \pm 0.02\bar{x} (\sigma_{max} < 0.02)$

3) 按方案 c 标注

例如: $55 \pm 0.06 \pm 0.02\bar{x}$

表示实际尺寸的中位数必须位于 (55 ± 0.02) mm 区间内。如需要规定 σ_{max} 时,可加注在括号内:

$55 \pm 0.06 \pm 0.02\bar{x} (\sigma_{max} < 0.02)$

4) 简化标注

统计尺寸公差也可按图 13.2-13 所示的方法标注。但对统计尺寸公差的具体要求应在技术条件中作具体说明,或由技术文件统一规定。

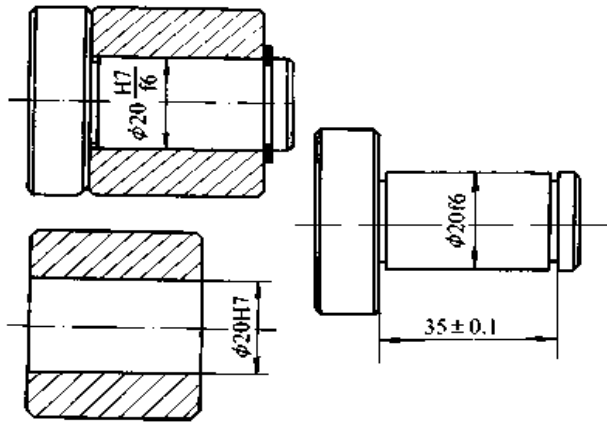


图 13.2-13 简化标注

3.3 统计尺寸公差在孔、轴配合中的应用

(1) 对孔、轴实际尺寸概率分布特性要求的规定

1) 公差带的划分

①对于对称分布,推荐:

$$T:W_C = 2:1$$

②对于非对称分布,三个区间的划分可根据实际情况决定。

2) 频率的决定

①实际尺寸按对称分布 当近似于正态分布时,若公差带的划分按 $T:W_C = 2:1$,则推荐 $P_{Cmin} = 86\%$;此时上、下边区允许的最大频率为 $\frac{1 - P_{Cmin}}{2} = 7\%$;

当近似于辛普松(三角形)分布时,若公差带的划分按 $T:W_C = 2:1$,则推荐 $P_{Cmin} = 75\%$;此时上、下边区允许的最大频率为 $\frac{1 - P_{Cmin}}{2} = 12.5\%$;

当近似于均匀分布时,若公差带的划分按 $T:W_C = 2:1$,则推荐 $P_{Cmin} = 50\%$;此时上、下边区允许的最大频率为 $\frac{1 - P_{Cmin}}{2} = 25\%$ 。

②实际尺寸按非对称分布 一般应同时规定上边区频率 P_{Umax} 以及下边区频率 P_{Lmax} 。

③根据设计要求,仅考虑某一边区的频率要求时,可以只规定上边区的频率 P_{Umax} 或者下边区的频率 P_{Lmax} 。

3) 标注举例

①对于对称分布,如: $\phi 55 \pm 0.06 \pm 0.03 P86\%$,表示上、下边区的频率均不能超过 7%;

②对于非对称分布,如: $\phi 55 \pm 0.06 \begin{matrix} +0.09 \\ -0.05 \end{matrix} P9\%$,表示上边区频率不能超过 9%,下边区频率不能超过 5%。

③仅规定某一边区的频率,如: $\phi 55 \pm 0.06 \begin{matrix} -0.03 \\ 0 \end{matrix} P7\%$,表示仅对下边区有频率要求,且不能超过 7%。

4) 当孔、轴实际尺寸按正态分布 ($T:W_C = 2:1, P_{Cmin} = 86\%$) 时,表 13.2-52 给出了优先与常用配合的统计极限“间隙或过盈”。

(2) 应用举例

例 1 根据使用要求,某机床部件的配合选为 $\phi 40 \frac{H8}{h7}$,但应避免实际偏差为零的孔、轴装在一起。此时,可采用统计尺寸公差。

若规定:

$$\text{孔 } \phi 40 \begin{matrix} +0.039 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} +0.03 \\ -0.01 \end{matrix} P86\%$$

$$\text{轴 } \phi 40 \begin{matrix} 0 \\ 0.025 \end{matrix} \begin{matrix} -0.006 \\ 0 \end{matrix} P86\%$$

由表 13.2-52 查得统计最小间隙 = +9 μm ;
统计最大间隙 = +55 μm

由此可见,孔、轴在装配时基本上不会发生间隙为零的不利情况。

为了突出对小间隙发生频率的限制,也可以仅仅规定某一边区的频率:

$$\text{孔 } \phi 40 \begin{matrix} +0.039 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} +0.01 \\ 0 \end{matrix} P7\%$$

$$\text{轴 } \phi 40 \begin{matrix} 0 \\ 0.025 \end{matrix} \begin{matrix} 0 \\ 0.006 \end{matrix} P7\%$$

例 2 某配合选为 $\phi 60 \frac{H8}{g7}$,间隙为 +0.01 ~ +0.086 mm,但根据设计要求,间隙在 +0.029 ~ +0.067 mm 之间时使用性能最佳。此时可采用统计尺寸公差:

$$\text{孔 } \phi 60 \begin{matrix} +0.046 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} +0.034 \\ 0 \end{matrix} P86\%$$

$$\text{轴 } \phi 60 \begin{matrix} -0.010 \\ 0.040 \end{matrix} \begin{matrix} -0.018 \\ 0.032 \end{matrix} P86\%$$

按此规定,将有 86% 的孔、轴在装配后处于最佳间隙状态。

表 13.2-52 优先与常用配合的统计极限“间隙或过盈” ($T:W_c = 2:1, P_{Cmin} = 86\%$)
(摘自 JB/T 9184—1999) (μm)

基 孔 制	H6/f5	H6/g5	H6/h5	H7/f6	H7/g6 ▽	H7/h6 ▽	H8/e7	H8/f7 ▽	H8/g7	H8/h7 ▽	H8/d8
基 轴 制	F6/h5	G6/h5	H6/h5	F7/h6	G7/h6 ▽	H7/h6 ▽	E8/h7	F8/h7 ▽		H8/h7 ▽	D8/h8
基本尺寸/ mm											
≤3	+15	+11	+9	+20	+16	+14	+35	+27	+23	+21	+44
	+7	+3.4	+1.4	+8	+4.2	+2.2	+17	+9	+5	+3.4	+24
>3~6	+21	+15	+11	+27	+21	+17	+46	+36	+30	+26	+61
	+12	+6	+1.8	+13	+7	+2.8	+24	+14	+8	+4.2	+35
>6~10	+26	+18	+13	+34	+26	+21	+57	+45	+37	+32	+77
	+15	+7	+2.1	+16	+8	+3.3	+30	+18	+10	+5	+46
>10~14	+32	+23	+16	+41	+31	+25	+71	+55	+45	+39	+96
	+19	+9	+2.7	+20	+10	+4	+38	+22	+12	+6	+58
>14~18	+39	+26	+19	+49	+36	+29	+87	+67	+54	+47	+121
	+23	+10	+3.1	+25	+12	+4.7	+47	+27	+14	+7	+75
>18~24	+48	+32	+23	+60	+44	+35	+105	+80	+64	+55	+147
	+29	+13	+3.8	+31	+15	+6	+59	+34	+18	+9	+91
>24~30	+58	+38	+28	+72	+52	+42	+126	+96	+76	+66	+178
	+34	+14	+4.5	+37	+17	+7	+70	+40	+20	+10	+114
>30~40	+68	+44	+32	+85	+61	+49	+149	+113	+89	+77	+212
	+41	+17	+5	+44	+20	+8	+84	+48	+24	+12	+136
>40~50	+80	+51	+37	+99	+70	+56	+174	+132	+103	+89	+252
	+49	+20	+6	+52	+23	+9	+99	+57	+28	+14	+164
>50~65	+92	+57	+42	+115	+80	+65	+202	+152	+117	+102	+293
	+57	+22	+7	+60	+25	+10	+116	+66	+31	+16	+191
>65~80	+103	+64	+47	+128	+90	+72	+225	+171	+132	+115	+328
	+64	+25	+8	+68	+28	+12	+128	+74	+35	+18	+214
>80~100	+114	+70	+52	+142	+98	+80	+251	+188	+144	+126	+362
	+71	+27	+9	+75	+31	+13	+145	+82	+38	+20	+236
>100~120	+126	+78	+58	+157	+109	+89	+273	+206	+158	+138	+396
	+77	+29	+9	+82	+34	+14	+157	+90	+42	+22	+258
>120~140											
>140~160											
>160~180											
>180~200											
>200~225											
>225~250											
>250~280											
>280~315											
>315~355											
>355~400											
>400~450											
>450~500											

注：1. 表中“+”值为间隙量，“-”值为过盈量。
2. 标注 ▽ 的配合为优先配合。

续表 13.2-52

基 孔 制	H8/e8	H8/f8	H8/h8	H9/c9	H9/d9	H9/e9	H9/f9	H9/h9	H10/c10	H10/d10	H10/h10
基 轴 制	E8/h8	F8/h8	H8/h8		D9/h9	E9/h9	F9/h9	H9/h9		D10/h10	H10/h10
基本尺寸/ mm											
≤3	+38 +18	+30 +10	+24 +4.1	+103 +67	+63 +27	+57 +21	+49 +13	+43 +7	+128 +72	+88 +32	+68 +12
>3~6	+51 +25	+41 +15	+31 +5	+122 +79	+81 +39	+71 +29	+61 +19	+51 +9	+152 +84	+112 +44	+82 +14
>6~10	+63 +31	+51 +19	+38 +6	+142 +90	+102 +50	+86 +36	+74 +24	+62 +10	+179 +97	+139 +57	+99 +17
>10~14	+78	+62	+46	+163	+123	+105	+89	+73	+214	+170	+120
>14~18	+40	+24	+8	+108	+63	+45	+29	+13	+116	+70	+20
>18~24	+96	+76	+56	+199	+154	+129	+109	+89	+253	+208	+143
>24~30	+50	+30	+10	+125	+80	+55	+35	+15	+135	+90	+25
>30~40	+117	+92	+67	+226 +133	+186	+156	+131	+106	+291 +149	+251	+171
>40~50	+61	+36	+11	+236 +148	+98	+68	+43	+18	+301 +159	+109	+29
>50~65	+138	+108	+78	+266 +162	+226	+186	+156	+126	+345 +175	+305	+205
>65~80	+74	+44	+14	+276 +172	+122	+82	+52	+22	+355 +185	+135	+35
>80~100	+164	+128	+92	+318 +196	+268	+220	+184	+148	+409 +211	+359	+239
>100~120	+88	+52	+16	+328 +206	+146	+98	+62	+26	+419 +221	+161	+41
>120~140				+371 +229					+473 +247		
>140~160	+192 +104	+150 +62	+108 +18	+381 +239	+316 +174	+256 +114	+214 +72	+171 +29	+483 +257	+418 +192	+273 +47
>160~180				+401 +295					+503 +277		
>180~200				+436 +274					+556 +294		
>200~225	+223 +121	+173 +71	+123 +21	+456 +294	+366 +204	+296 +134	+246 +84	+196 +34	+576 +314	+486 +224	+316 +54
>225~250				+476 +314					+596 +334		
>250~280	+248	+194	+138	+522 +338	+412	+332	+278	+222	+658 +362	+548	+358
>280~315	+134	+80	+24	+552 +368	+228	+148	+94	+38	+688 +392	+252	+62
>315~355	+277	+214	+152	+599 +401	+449	+364	+301	+239	+753 +427	+603	+393
>355~400	+151	+88	+26	+639 +441	+251	+166	+103	+41	+793 +467	+277	+67
>400~450	+301	+234	+166	+705 +485	+495	+400	+333	+265	+867 +513	+657	+427
>450~500	+163	+96	+28	+745 +525	+275	+180	+113	+45	+907 +553	+303	+73

续表 13.2-52

基 孔 制	H11/a11	H11/b11	H11/c11	H11/d11	H11/h11	H12/b12	H12/h12	H6/js5		H6/k5	
基 轴 制	A11/h11	B11/h11	C11/h11	D11/h11	H11/h11	B12/h12	H12/h12		JS6/h5		K6/h5
基本尺寸/ mm											
≤3	+372 +288	+242 +158	+162 +78	+122 +38	+102 +18	+311 +169	+171 +29	+7 -0.6	+6 -1.6	+4.6 -2.6	+2.6 -4.6
>3~6	+398 +292	+268 +162	+198 +92	+158 +52	+128 +22	+345 +175	+205 +35	+9 -0.7	+7 -2.2	+5	-4.2
>6~10	+434 +306	+304 +176	+234 +106	+194 +66	+154 +26	+406 +194	+256 +44	+10 -0.9	+8 -2.4	+6	-5
>10~14	+478	+338	+283	+238	+188	+457	+307	+12	+11	+7	
>14~18	+322	+182	+127	+82	+22	+203	+53	-1.3	-2.8	-6	
>18~24	+522	+382	+332	+282	+222	+518	+358	+14	+12	+8	
>24~30	+338	+198	+148	+98	+38	+202	+62	-1.4	-3.4	-8	
>30~40	+583 +357	+443 +217	+393 +167	+353	+273	+597 +243	+427	+18	+15	+10	
>40~50	+593 +367	+453 +227	+403 +177	+127	+47	+607 +254	+73	-1.7	-4.2	-9	
>50~65	+664 +396	+514 +246	+464 +196	+424	+324	+702 +278	+512	+21	+18	+12	
>65~80	+684 +416	+524 +256	+474 +206	+156	+56	+712 +288	+88	-2	-5	-10	
>80~100	+756 +444	+596 +284	+546 +234	+496	+376	+818 +322	+598	+24	+21	+14	
>100~120	+786 +474	+616 +304	+556 +244	+184	+64	+838 +342	+102	-2	-6	-13	
>120~140	+887 +533	+687 +333	+627 +273			+943 +377					
>140~160	+947 +593	+707 +353	+637 +283	+572 +218	+427 +73	+963 +397	+683 +117	+28 -2.9	+24 -6	+16 -15	
>160~180	+1 007 +653	+737 +383	+657 +303			+993 +427					
>180~200	+1 155 +745	+835 +425	+735 +325			+1 125 +475					
>200~225	+1 235 +825	+875 +465	+755 +345	+665 +255	+495 +85	+1 165 +515	+785 +135	+32 -3.1	+28 -8	+18 -17	
>225~250	+1 315 +905	+915 +505	+775 +365			+1 205 +555					
>250~280	+1 446 +1 014	+1 026 +574	+846 +394	+736	+546	+1 368 +632	+887	+36	+31	+20	
>280~315	+1 596 +1 144	+1 086 +634	+876 +424	+284	+94	+1 428 +692	+152	-3.7	-8	-19	
>315~355	+1 815 +1 305	+1 215 +705	+975 +465	+824	+614	+1 573 +767	+973	+40	+34	+23	
>355~400	+1 965 +1 455	+1 294 +785	+1 015 +505	+316	+106	+1 653 +847	+167	-3.9	-9	-20	
>400~450	+2 183 +1 617	+1 443 +877	+1 123 +557	+913	+693	+1 836 +944	+1 076	+44	+38	+26	
>450~500	+2 338 +1 767	+1 523 +957	+1 163 +597	+347	+117	+1 916 +1 024	+184	-4.1	-11	-23	

续表 13.2-52

基孔制	H6/m5		H7/js6		H7/k6		H7/m6		H7/n6		H8/js7
基轴制		M6/h5		JS7/h6		K7/h6		M7/h6		N7/h6	
基本尺寸/ mm											
≤3	+2.6 -4.6	+0.6 -6.5	+11 -0.8	+9 -2.8	+8 -3.8	+3.8 -7.8	+6 -6	+1.8 -10	+3.8 -8	+0.2 -12	+16 -1.6
>3~6	+2.2 -7		+13 -1.2	+11 -3.2	+8 -6		+5 -9		+1.2 -13		+2.0 -1.8
>6~10	+0.9 -10		+16 -1.2	+13 -3.7	+11 -7		+6 -12		+1.7 -16		+24 -1.8
>10~14	+1.3		+20	+16	+13		+7		+2		+30
>14~18	-12		-1.5	-5	-8		-14		-19		-2.7
>18~24	+1.9		+23	+18	+14		+8		+1.3		+36
>24~30	-14		-1.8	-5	-10		-16		-23		-2.6
>30~40	+3.2		+27	+22	+17		+10		+2.3		+42
>40~50	-16		-2.3	-6	-12		-19		-27		-3.2
>50~65	+3.5		+33	+27	+21		+12		+3.3		+50
>65~80	-20		-2.8	-8	-14		-23		-32		-4.5
>80~100	+3.8		+38	+31	+24		+14		+4.2		+59
>100~120	-23		-3.2	-9	-17		-27		-37		-4.1
>120~140	+3.9		+44	+36	+28		+16		+4.1		+69
>140~160	-2.7		-3.6	-11	-19		-31		-43		-6
>160~180											
>180~200	+5		+50	+42	+32		+19		+4.7		+79
>200~225	-30		-4.2	-13	-23		-36		-50		-7
>225~250											
>250~280	+4.2	+6	+56	+46	+36		+20		+6		+89
>280~315	-35	-33	-4.5	-14	-24		-40		-54		-8
>315~355	+6		+62	+51	+40		+23		+7		+97
>355~400	-37		-5	-15	-27		-44		-60		-8
>400~450	+81		+69	+57	+44		+26		+9		+106
>450~500	-41		-6	-17	-31		-49		-66		-9

续表 13.2-52

基孔制		H8/k7		H8/m7		H8/n7		H8/p7	H6/n5		H6/p5	
基轴制	JS8/h7		K8/h7		M8/h7		N8/h7			N6/h5		P6/h5
基本尺寸/ mm												
≤3	+14 -3.6	+11 -7	+7 -11	+9 -9	+4.6 -13	+7 -11	+2.6 -15	+4.6 -13	+0.6 -7	-1.4 -9	-1.4 -9	-3.4 -11
>3~6	+17 -4.8	+13 -9		+10 -12		+6 -16		+1.8 -20	-1.8 -11			-6 -15
>6~10	+21 -6	+16 -11		+11 -16		+7 -20		+1.8 -25	-3.1 -14			-8 -19
>10~14	+25	+20		+14		+9		+2.7	-3.7			-10
>14~18	-7	-13		-19		-24		-30	-17			-23
>18~24	+30	+24		+18		+11		+3.6	-5			-12
>24~30	-9	-16		-22		-29		-36	-21			-28
>30~40	+35	+28		+21		+13		+4.2	-4.8			-14
>40~50	-10	-18		-25		-33		-42	-24			-33
>50~65	+42	+34		+24		+16		+3.5	-6			-18
>65~80	-12	-22		-30		-40		-52	-28			-40
>80~100	+50	+39		+29		+19		+4.7	-6			-20
>100~120	-15	-26		-36		-46		-60	-33			-47
>120~140	+57	+46		+34		+22		+6	-8			-24
>140~160	-17	-29		-41		-53		-69	-39			-55
>160~180												
>180~200	+66	+52		+39		+25		+6	-9			-28
>200~225	-20	-34		-47		-61		-80	-44			-63
>225~250												
>250~280	+74	+59		+43		+29		+7	-10			-32
>280~315	-22	-38		-54		-68		-90	-49			-71
<315~355	+81	+65		+48		+32		+7	-10			-35
>355~400	-24	-41		-58		-74		-99	-53			-78
>400~450	+89	+70		+52		+35		+7	-10			-37
>450~500	-26	-46		-64		-81		-109	-58			-86

续表 13.2-52

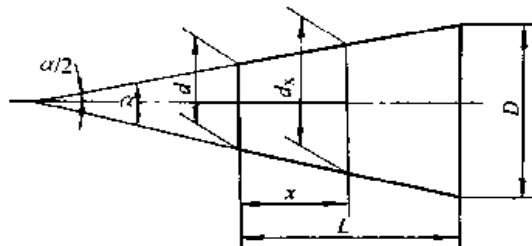
基孔制	H6/r5		H6/s5		H6/t5	H7/p6 ▼		H7/r6		H7/s6 ▼	
基轴制		R6/h5		S6/h5	T6/h5		P7/h6 ▼		R7/h6		S7/h6 ▼
基本尺寸/ mm											
≤3	-5 -13	-7 -15	-9 -1	-11 -19	—	+1.8 -10	-2.2 -14	-2.2 -14	-6 -18	-6 -18	-10 -22
>3~6	-9 -18		-13 -22		—	-2.8 -17		-6 -20		-10 -24	
>6~10	-12 -23		-16 -27		—	-3.3 -21		-7 -25		-11 -29	
>10~14	-15		-20		—	-4		-9		-14	
>14~18	-28		-33		—	-25		-30		-35	
>18~24	-18		-25		—	-6		-12		-19	
>24~30	-34		-41		-31 -47	-30		-36		-43	
>30~40	-22		-41		-36 -55	-7		-15		-24	
>40~50	-41		-50		-42 -61	-36		-44		-53	
>50~65	-26 -50		-38 -62		-52 -74	-9		-18 -53		-30 -65	
>65~80	-28 -52		-44 -68		-60 -84	-44		-20 -55		-36 -71	
>80~100	-34 -61		-54 -81		-74 -101	-10		-24 -65		-44 -85	
>100~120	-37 -64		-62 -89		-87 -114	-51		-27 -68		-52 -93	
>120~140	-44 -75		-73 -104		-103 -134			-32 -79		-61 -108	
>140~160	-46 -77		-81 -112		-115 -146	-12 -59		-34 -81		-69 -116	
>160~180	-49 -80		-89 -120		-127 -158			-37 -84		-77 -124	
>180~200	-55 -90		-100 -135		-144 -179			-41 -96		-86 -141	
>200~225	-58 -93		-108 -143		-158 -193	-14 -69		-44 -99		-94 -149	
>225~250	-62 -97		-118 -153		-174 -209			-48 -103		-104 -159	
>250~280	-70 -109		-134 -173		-194 -233	-16		-54 -114		-118 -178	
>280~315	-74 -113		-146 -185		-216 -255	-76		-58 -118		-130 -190	
>315~355	-81 -124		-163 -206		-241 -284	-18		-64 -131		-146 -213	
>355~400	-87 -130		-181 -224		-267 -310	-85		-70 -137		-164 -231	
>400~450	-95 -144		-201 -250		-299 -348	-19		-77 -152		-183 -258	
>450~500	-101 -150		-221 -270		-329 -378	-94		-83 -158		-203 -278	

续表 13.2-52

基 孔 制	H7/r6	H7/u6		H7/v6	H7/x6	H7/y6	H7/z6	H8/r7	H8/s7	H8/t7	H8/u7
基 轴 制	T7/h6		U7/h6								
基本尺寸/ mm											
≤3	—	-10 -22	-14 -26	—	-12 -24	—	-18 -30	+0.6 -17	-3.4 -21	—	-7 -25
>3~6	—	-14 -28	—	—	-19 -33	—	-26 -40	-1.2 -23	-5 -27	—	-9 -31
>6~10	—	-16 -34	—	—	-22 -40	—	-30 -48	+2.2 -29	-6 -33	—	-11 -38
>10~14	—	-19	—	—	-26 -47	—	-36 -57	-2.3	-7	—	-12
>14~18	—	-40	—	-25 -46	-31 -52	—	-46 -67	-35	-40	—	-45
>18~24	—	-25 -49	—	-31 -55	-38 -62	-47 -71	-57 -81	-2.4	-9	—	-15 -55
>24~30	-25 -49	-32 -56	—	-39 -63	-50 -72	-59 -83	-72 -96	-42	-49	-15 -55	-22 -62
>30~40	-29 -58	-41 -70	—	-49 -78	-61 -90	-75 -104	-93 -122	-3.8	-13	-18 -64	-30 -76
>40~50	-35 -64	-51 -80	—	-62 -91	-78 -107	-95 -124	-117 -146	-50	-59	-24 -70	-40 -86
>50~65	-43 -78	-64 -99	—	-79 -114	-99 -134	-121 -156	-149 -184	-6 -60	-18 -72	-30 -86	-52 -106
>65~80	-52 -87	-79 -114	—	-97 -132	-123 -158	-151 -186	-187 -222	-8 -62	-24 -78	-40 -94	-66 -122
>80~100	-64 -105	-97 -138	—	-119 -160	-151 -192	-187 -228	-231 -272	-9 -74	-29 -94	-49 -114	-82 -147
>100~120	-77 -118	-117 -158	—	-145 -186	-183 -224	-227 -268	-283 -324	-12 -77	-37 -102	-62 -127	-102 -167
>120~140	-91 -138	-139 -186	—	-171 -218	-217 -264	-269 -316	-334 -381	-14 -89	-43 -118	-73 -148	-121 -196
>140~160	-103 -150	-159 -206	—	-197 -244	-249 -296	-309 -356	-384 -431	-16 -91	-51 -126	-85 -160	-141 -216
>160~180	-115 -162	-179 -226	—	-221 -268	-279 -326	-349 -396	-434 -481	-19 -94	-59 -134	-97 -172	-161 -236
>180~200	-130 -185	-200 -255	—	-248 -303	-314 -369	-389 -444	-484 -539	-21 -107	-66 -152	-110 -196	-180 -266
>200~225	-144 -199	-222 -277	—	-274 -329	-349 -404	-434 -489	-539 -594	-24 -110	-74 -160	-124 -210	-202 -208
>225~250	-160 -215	-248 -303	—	-304 -359	-389 -444	-484 -539	-604 -659	-28 -114	-84 -170	-140 -226	-208 -314
>250~280	-178 -238	-274 -336	—	-344 -406	-434 -496	-540 -600	-670 -730	-31 -128	-95 -192	-155 -252	-253 -349
>280~315	-200 -260	-310 -371	—	-384 -446	-484 -546	-610 -670	-750 -810	-35 -132	-107 -204	-177 -274	-287 -384
>315~355	-224 -291	-346 -413	—	-431 -498	-546 -613	-686 -753	-856 -923	-39 -145	-121 -227	-199 -305	-321 -427
>355~400	-250 -317	-391 -458	—	-486 -553	-616 -683	-776 -843	-956 -1 024	-45 -151	-139 -245	-225 -331	-366 -472
>400~450	-281 -356	-441 -516	—	-546 -621	-691 -766	-871 -946	-1 051 -1 126	-51 -167	-157 -273	-255 -371	-415 -531
>450~500	-311 -386	-491 -566	—	-611 -686	-771 -846	-951 -1 026	-1 021 -1 276	-57 -173	-177 -293	-285 -401	-465 -581

4 圆锥的锥度与锥角、棱体的角度与斜度系列 4.1 锥度与锥角系列 (表 13.2-53)

表 13.2-53 锥度与锥角系列 (摘自 GB/T 157—1989)



$$\text{锥度 } C = \frac{D-d}{L} = 2 \tan \frac{\alpha}{2}$$

一般用途圆锥的锥度与锥角

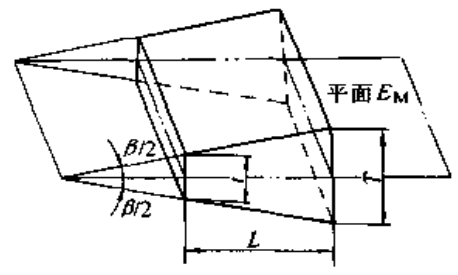
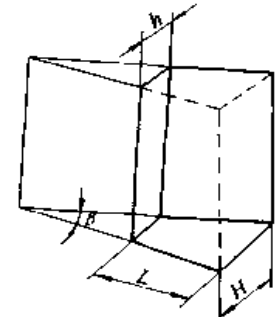
基本值		推算值		应用举例		
系列 1	系列 2	圆锥角 α	锥度 C			
120°	75°	—	—	1:0.288 675	螺纹孔的内倒角、填料盒内填料的锥度	
90°		—	—	1:0.500 000	沉头螺钉头、螺纹倒角、轴的倒角	
60°		—	—	1:0.651 613	车床顶尖、中心孔	
45°		—	—	1:0.866 025	车床顶尖、中心孔	
30°		—	—	1:1.207 107	轻型螺旋管接口的锥形密合	
1:3		—	—	1:1.866 025	摩擦离合器	
1:5		1:4	18°55'28.7"	18.924 644°	—	有极限转矩的摩擦圆锥离合器
1:10		1:6	14°15'0.1"	14.250 033°	—	易拆机件的锥形联接、锥形摩擦离合器
	1:7	11°25'16.3"	11.421 186°	—	—	
	1:8	9°31'38.2"	9.527 283°	—	—	
	1:12	8°10'16.4"	8.171 234°	—	重型机床顶尖、旋塞	
	1:15	7°9'9.6"	7.152 669°	—	联轴器和轴的圆锥面联接	
	1:20	5°43'29.3"	5.724 810°	—	受轴向力及横向力的锥形零件的接合面、电动机及其他机械的锥形轴端	
	1:30	4°46'18.8"	4.771 888°	—	固定球及滚子轴承的衬套	
	1:40	3°49'5.9"	3.818 305°	—	受轴向力的锥形零件的接合面、活塞与活塞杆的联接	
	1:50	2°51'51.1"	2.864 192°	—	机床主轴精度、刀具尾柄、米制锥度铰刀、圆锥螺栓	
	1:100	1°54'34.9"	1.909 682°	—	装柄的铰刀及扩孔钻	
	1:200	1°25'56.8"	1.432 222°	—	圆锥销、定位销、圆锥销孔的铰刀	
	1:500	1°8'45.2"	1.145 877°	—	承受陡振及静变载荷的不须拆开的联接机件	
		0°34'22.6"	0.572 953°	—	承受陡振及冲击变载荷的需拆开的零件、圆锥螺栓	
		0°17'11.3"	0.286 478°	—	—	
		0°6'52.5"	0.114 591°	—	—	

特殊用途圆锥的锥度与锥角				
基本值	推算值		锥度 C	应用举例
	圆锥角 α	锥度 C		
18°30'	—	—	1:3.070 115	} 纺织工业
11°54'	—	—	1:4.797 451	
8°40'	—	—	1:6.598 442	
7°40'	—	—	1:7.462 208	
7:24	16°35'39.4"	16.594 290°	1:3.428 571	机床主轴、工具配合
1:9	6°21'34.8"	6.359 660°	—	电池接头
1:16.666	3°26'12.2"	3.436 716°	—	医疗设备
1:12.262	4°40'11.6"	4.669 884°	—	贾氏锥度 No.2
1:12.972	4°24'53.1"	4.414 746°	—	No.1
1:15.748	3°38'13.4"	3.637 060°	—	No.33
1:18.779	3°3'1.0"	3.050 200°	—	No.3
1:19.264	2°58'24.8"	2.973 556°	—	No.6
1:20.288	2°49'24.7"	2.823 537°	—	No.0
1:19.002	3°0'52.4"	3.014 543°	—	莫氏锥度 No.5
1:19.180	2°59'11.7"	2.986 582°	—	No.6
1:19.212	2°58'53.8"	2.981 618°	—	No.0
1:19.254	2°58'30.6"	2.975 179°	—	No.4
1:19.922	2°52'31.5"	2.875 406°	—	No.3
1:20.020	2°51'41.0"	2.861 377°	—	No.2
1:20.047	2°51'26.7"	2.857 417°	—	No.1

注：1. 一般用途圆锥的锥度与锥角，优先选用第一系列，当不能满足需要时，选用第二系列。
 2. 特殊用途的圆锥，通常只用于表中最后一栏所指的适用范围。

4.2 棱体的角度与斜度系列 (表 13.2-54)

表 13.2-54 棱体的角度与斜度系列 (摘自 GB/T 4096—1983)

 <p>比率 $C_P = \frac{T-t}{L}$</p> $C_P = 2 \tan \frac{\beta}{2} = 1 : \frac{1}{2} \cot \frac{\beta}{2}$	 <p>斜度 $S = \frac{H-h}{L}$</p> $S = \tan \beta = 1 : \cot \beta$
--	---

续表 13.2-54

一般用途棱体的角度与斜度					
基本值			推算值		
系列 1	系列 2	S	C_p	S	β
120°	—	—	1:0.288 675	—	—
90°	—	—	1:0.500 000	—	—
—	75°	—	1:0.651 613	1:0.267 949	—
60°	—	—	1:0.866 025	1:0.577 350	—
45°	—	—	1:1.207 107	1:1.000 000	—
—	40°	—	1:1.373 739	1:1.191 754	—
30°	—	—	1:1.866 025	1:1.732 051	—
20°	—	—	1:2.835 641	1:2.747 477	—
15°	—	—	1:3.797 877	1:3.732 051	—
—	10°	—	1:5.715 026	1:5.671 282	—
—	8°	—	1:7.150 333	1:7.115 370	—
—	7°	—	1:8.174 928	1:8.144 346	—
—	6°	—	1:9.540 568	1:9.514 364	—
—	—	1:10	—	—	5°42'38"
5°	—	—	1:11.451 883	1:11.430 052	—
—	4°	—	1:14.318 127	1:14.300 666	—
—	3°	—	1:19.094 230	1:19.081 137	—
—	—	1:20	—	—	2°51'44.7"
—	2°	—	1:28.644 982	1:28.636 253	—
—	—	1:50	—	—	1°8'44.7"
—	1°	—	1:57.294 327	1:57.289 962	—
—	—	1:100	—	—	0°34'25.5"
—	0°30'	—	1:114.590 832	1:114.588 650	—
—	—	1:200	—	—	0°17'11.3"
—	—	1:500	—	—	0°6'52.5"

特殊用途棱体的角度与斜度		
基本值	推算值	用途
角度 β	C_p	
108°	1:0.363 271 3	V形架
72°	1:0.688 191 0	V形架
55°	1:0.960 491 1	导轨
50°	1:1.072 253 5	榫

注：1. 一般用途棱体的角度与斜度，优先选用第一系列，当不能满足需要时，选用第二系列。
 2. 特殊用途的棱体，通常只用于表中最后一栏所指的适用范围。

5 圆锥公差与配合

5.1 圆锥公差 (GB/T 11334—1989)

5.1.1 术语及定义

1) 基本圆锥 设计给定的圆锥(图 13.2-14)。基本圆锥可用两种形式确定:一种形式是用一个基本圆锥直径(最大圆锥直径 D 、最小圆锥直径 d 、给定截面圆锥直径 d_x)、基本圆锥长度 L 、基本圆锥角 α 或基本锥度 C ; 另一种形式是用两个基本圆锥直径和基本圆锥长度 L 。

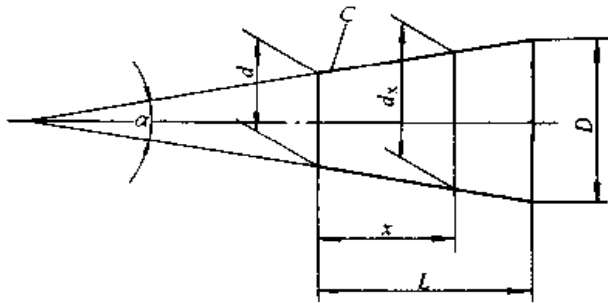


图 13.2-14 基本圆锥

2) 实际圆锥、实际圆锥直径和实际圆锥角 实际存在而通过测量所得的圆锥。在实际圆锥的任一轴向截面内,包容圆锥素线且距离最小的两对平行直线之间的夹角,称为实际圆锥角(图

13.2-15)。在实际圆锥上测得的直径,称为实际圆锥直径 d_o (图 13.2-16)。

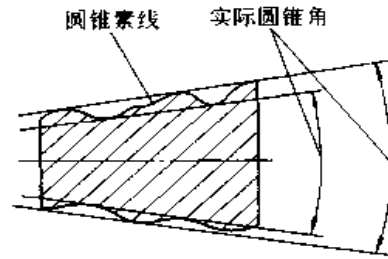


图 13.2-15 实际圆锥角

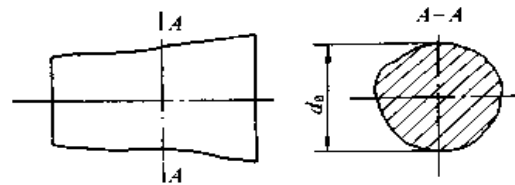


图 13.2-16 实际圆锥直径

3) 极限圆锥、极限圆锥直径 与基本圆锥共轴且圆锥角相等,直径分别为最大极限尺寸和最小极限尺寸的两个圆锥称极限圆锥(图 13.2-17)。在垂直圆锥轴线的任一截面上,这两个圆锥的直径差都相等。垂直于极限圆锥轴线的截面上的直径,称为极限圆锥直径,例如图 13.2-17 中的 D_{max} 、 D_{min} 、 d_{max} 、 d_{min} 。

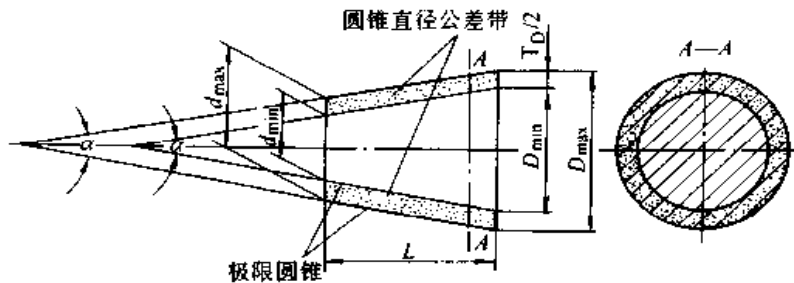


图 13.2-17 极限圆锥

4) 圆锥直径公差、圆锥直径公差带 圆锥直径的允许变动量,称为圆锥直径公差。两个极限圆锥所限定的区域,称为圆锥直径公差带(图 13.2-17)。

5) 极限圆锥角、圆锥角公差带 允许的最大或最小的圆锥角称极限圆锥角(图 13.2-18)。圆锥角的允许变动量,称为圆锥角公差。两个极限圆锥角所限定的区域,称为圆锥角公差带。

6) 给定截面圆锥直径公差 T_{DS} 在垂直于圆锥轴线的给定截面内,圆锥直径的允许变动量

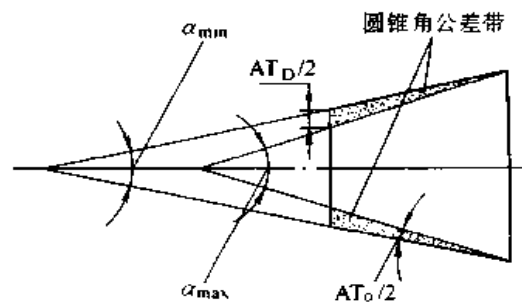


图 13.2-18 极限圆锥角

(见图 13.2-19)。在给定的圆锥截面内，由两个同心圆所限定的区域，称为给定截面圆锥直径公差带。

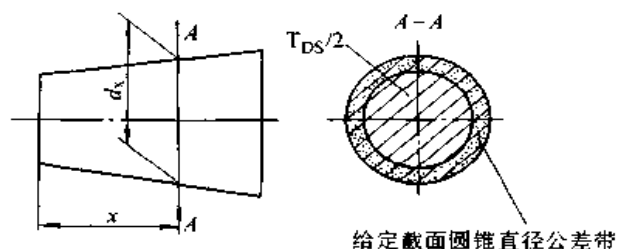


图 13.2-19 给定截面圆锥直径公差及公差带

5.1.2 圆锥公差的项目和给定方法

(1) 圆锥公差的项目

- 1) 圆锥直径公差 T_D ;
- 2) 圆锥角公差 AT ，用角度值 AT_0 或线值 AT_D 给定;
- 3) 圆锥的形状公差 T_F ，包括素线直线度公差和截面圆度公差;
- 4) 给定截面圆锥直径公差 T_{DS} 。

(2) 圆锥公差的给定方法

1) 给出圆锥的理论正确圆锥角 α (或锥度 C) 和圆锥直径公差 T_D 。由 T_D 确定两个极限圆锥。此时，圆锥角误差和圆锥的形状误差均应在极限圆锥所限定的区域内。

当对圆锥角公差、圆锥的形状公差有更高的要求时，可再给出圆锥角公差 AT 、圆锥形状公差 T_F 。此时， AT 和 T_F 仅占 T_D 的一部分。

2) 给出给定截面圆锥直径公差 T_{DS} 和圆锥角公差 AT 。此时，给定截面圆锥直径和圆锥角应分别满足这两项公差的要求。 T_{DS} 和 AT 的关系见图 13.2-20。

该方法是在假定圆锥素线为理想直线的情况

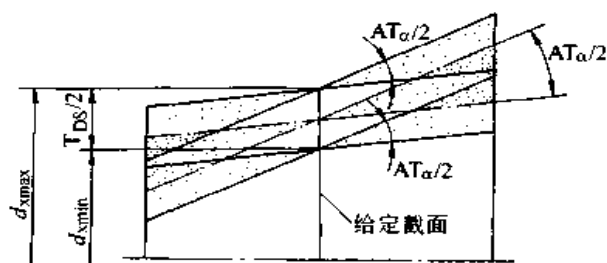


图 13.2-20 T_{DS} 和 AT 的关系

下给出的。

当对圆锥公差有更高的要求时，可再给出圆锥的形状公差 T_{Fc} 。

5.1.3 圆锥公差数值

1) 圆锥直径公差 圆锥直径公差 T_D 的数值是以基本圆锥直径 (一般取最大圆锥直径 D) 为基本尺寸，按 GB/T 1800.3 规定的标准公差选取，选取的公差值适用于圆锥长度全长。

给定截面圆锥直径公差 T_{DS} ，是以给定截面圆锥直径 d_s 为基本尺寸，按 GB/T 1800.3 规定的标准公差选取，选取的公差数值仅适用于该给定截面，不适用于圆锥长度全长。

2) 圆锥角公差 圆锥角公差 AT 共分 12 个公差等级，用 $AT1$ 、 $AT2$ 、……、 $AT12$ 表示。圆锥角公差的数值见表 13.2-55。表 13.2-55 中数值用于棱体的角度时，以该角短边长度作为 L 选取公差值。如需要更高或更低等级的圆锥角公差时，按公比 1.6 向两端延伸得到。更高等级用 $AT0$ 、 $AT01$ 、……表示，更低等级用 $AT13$ 、 $AT14$ 、……表示。

圆锥公差可用两种形式表示： AT_0 ——以角度单位微弧度 (μrad) 或以度、分、秒表示； AT_D ——以长度单位微米 (μm) 表示。

圆锥角的极限偏差可按单向或双向 (对称或不对称) 取值，如图 13.2-21 所示。

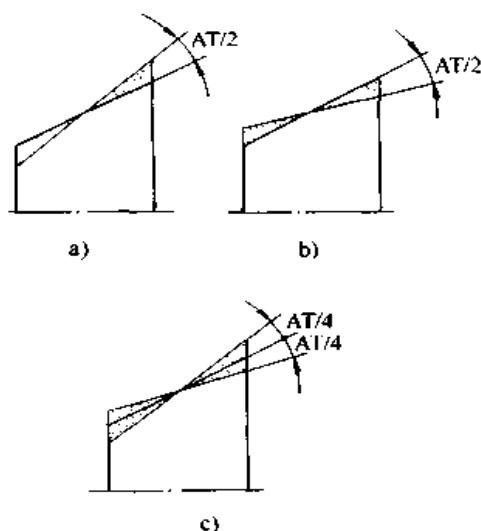


图 13.2-21 圆锥角极限偏差取值方向

a) $\alpha + AT$ b) $\alpha - AT$ c) $\alpha \pm AT/2$

表 13.2-55 圆锥角公差数值

基本圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级									
		AT1				AT2				AT3	
		AT_a		AT_D		AT_a		AT_D		AT_a	AT_D
大于	至	μrad	($^\circ$)	μm	μrad	($^\circ$)	μm	μrad	($^\circ$)	μm	
自 6	10	50	10	>0.3~0.5	80	16	>0.5~0.8	125	26	>0.8~1.3	
10	16	40	8	>0.4~0.6	63	13	>0.6~1.0	100	21	>1.0~1.6	
16	25	31.5	6	>0.5~0.8	50	10	>0.8~1.3	80	16	>1.3~2.0	
25	40	25	5	>0.6~1.0	40	8	>1.0~1.6	63	13	>1.6~2.5	
40	63	20	4	>0.8~1.3	31.5	6	>1.3~2.0	50	10	>2.0~3.2	
63	100	16	3	>1.0~1.6	25	5	>1.6~2.5	40	8	>2.5~4.0	
100	160	12.5	2.5	>1.3~2.0	20	4	>2.0~3.2	31.5	6	>3.2~5.0	
160	250	10	2	>1.6~2.5	16	3	>2.5~4.0	25	5	>4.0~6.3	
250	400	8	1.5	>2.0~3.2	12.5	2.5	>3.2~5.0	20	4	>5.0~8.0	
400	630	6.3	1	>2.5~4.0	10	2	>4.0~6.3	16	3	>6.3~10.0	
基本圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级									
		AT4			AT5			AT6			
		AT_a		AT_D	AT_a		AT_D	AT_a		AT_D	
大于	至	μrad	($^\circ$)	μm	μrad	($^\circ$)	μm	μrad	($^\circ$)	μm	
自 6	10	200	41	>1.3~2.0	315	1'05"	>2.0~3.2	500	1'43"	>3.2~5.0	
10	16	160	33	>1.6~2.5	250	52"	>2.5~4.0	400	1'22"	>4.0~6.3	
16	25	125	26	>2.0~3.2	200	41"	>3.2~5.0	315	1'05"	>5.0~8.0	
25	40	100	21	>2.5~4.0	160	33"	>4.0~6.3	250	52"	>6.3~10.0	
40	63	80	16	>3.2~5.0	125	26"	>5.0~8.0	200	41"	>8.0~12.5	
63	100	63	13	>4.0~6.3	100	21"	>6.3~10.0	160	33"	>10.0~16.0	
100	160	50	10	>5.0~8.0	80	16"	>8.0~12.5	125	26"	>12.5~20.0	
160	250	40	8	>6.3~10.0	63	13"	>10.0~16.0	100	21"	>16.0~25.0	
250	400	31.5	6	>8.0~12.5	50	10"	>12.5~20.0	80	16"	>20.0~32.0	
400	630	25	5	>10.0~16.0	40	8"	>16.0~25.0	63	13"	>25.0~40.0	

续表 13.2-55

基本圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		AT7			AT8			AT9		
		AT _a		AT _D	AT _a		AT _D	AT _a		AT _D
大于	至	μrad	(') (")	μm	μrad	(') (")	μm	μrad	(') (")	μm
自 6	10	800	2'45"	>5.0~8.0	1 250	4'18"	>8.0~12.5	2 000	6'52"	>12.5~20
10	16	630	2'10"	>6.3~10.0	1 000	3'26"	>10.0~16.0	1 600	5'30"	>16~25
16	25	500	1'43"	>8.0~12.5	800	2'45"	>12.5~20.0	1 250	4'18"	>20~32
25	40	400	1'22"	>10.0~16.0	630	2'10"	>16.0~20.5	1 000	3'26"	>25~40
40	63	315	1'05"	>12.5~20.0	500	1'43"	>20.0~32.0	800	2'45"	>32~50
63	100	250	52"	>16.0~25.0	400	1'22"	>25.0~40.0	630	2'10"	>40~63
100	160	200	41"	>20.0~32.0	315	1'05"	>32.0~50.0	500	1'43"	>50~80
160	250	160	33"	>25.0~40.0	250	52"	>40.0~63.0	400	1'22"	>63~100
250	400	125	26"	>32.0~50.0	200	41"	>50.0~80.0	315	1'05"	>80~125
400	630	100	21"	>40.0~63.0	160	33"	>63.0~100.0	250	52"	>100~160

基本圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		AT10			AT11			AT12		
		AT _a		AT _D	AT _a		AT _D	AT _a		AT _D
大于	至	μrad	(') (")	μm	μrad	(') (")	μm	μrad	(') (")	μm
自 6	10	3 150	10'49"	>20~32	5 000	17'10"	>32~50	8 000	27'28"	>50~80
10	16	2 500	8'35"	>25~40	4 000	13'44"	>40~63	6 300	21'38"	>63~100
16	25	2 000	6'52"	>32~50	3 150	10'49"	>50~80	5 000	17'10"	>80~125
25	40	1 600	5'30"	>40~63	2 500	8'35"	>63~100	4 000	13'44"	>100~160
40	63	1 250	4'18"	>50~80	2 000	6'52"	>80~125	3 150	10'49"	>125~200
63	100	1 000	3'26"	>63~100	1 600	5'30"	>100~160	2 500	8'35"	>160~250
100	160	800	2'45"	>80~125	1 250	4'18"	>125~200	2 000	6'52"	>200~320
160	250	630	2'10"	>100~160	1 000	3'26"	>160~250	1 600	5'30"	>250~400
250	400	500	1'43"	>125~200	800	2'45"	>200~320	1 250	4'18"	>320~500
400	630	400	1'22"	>160~250	630	2'10"	>250~400	1 000	3'26"	>400~630

- 注：1. 1 μrad 等于半径为 1 m，弧长为 1 μm 所对应的圆心角。5 μrad ≈ 1" (秒)；300 μrad ≈ 1' (分)。
 2. AT_a 和 AT_D 的关系为：AT_D = AT_a × L × 10⁻³，式中 AT_D 单位为 μm；AT_a 单位为 μrad；L 为圆锥长度，单位为 mm。
 3. 本表仅给出与圆锥长度 L 的尺寸段相对应的 AT_D 范围值。对于 L 尺寸段中间的 AT_D 值则应按注 2 的公式计算，计算结果的尾数按 GB/T 4112-4116 的规定进行修约，其有效位数应与本表所列该 L 尺寸段的最大范围值的位数相同。

计算举例：

- 1) L 为 63 mm，选用 AT7，查表得 AT_a 为 315 μrad 或 1'05"，AT_D 为 20 μm。
- 2) L 为 50 mm，选用 AT7，查表得 AT_a 为 315 μrad 或 1'05"，则：AT_D = AT_a × L × 10⁻³ = 315 × 50 × 10⁻³ μm = 15.75 μm，取 AT_D 为 15.8 μm。

3) 圆锥直径公差所能限制的最大圆锥角误差 表 13.2-56 给出圆锥长度 L 为 100 mm, 圆锥直径公差 T_D 所能限制的最大圆锥角误差 $\Delta\alpha_{max}$ 。

4) 圆锥的形状公差 圆锥的形状公差包括素线直线度公差和垂直圆锥轴线的截面圆度公差。一般情况下不单独给出圆锥形状公差, 而是

由对应的圆锥直径公差带限制。只有当功能需要、对圆锥形状公差有更高要求时, 再另外给出圆锥形状公差, 但它应小于圆锥直径公差的一半。

对于有配合要求的圆锥, 其素线直线度误差和圆锥截面圆度误差影响配合的接触质量。圆锥素线直线度公差和圆锥截面圆度公差数值按 GB/T 1184 选取。

表 13.2-56 圆锥直径公差所能限制的最大圆锥角误差 (圆锥长度 $L = 100\text{mm}$)

圆锥直径公差等级	圆锥直径 /mm												
	≤ 3	>3	>6	>10	>18	>30	>50	>80	>120	>180	>250	>315	>400
	~ 6	~ 10	~ 18	~ 30	~ 50	~ 80	~ 120	~ 180	~ 250	~ 315	~ 400	~ 500	
$\Delta\alpha_{max}/\mu\text{rad}$													
IT01	3	4	4	5	6	6	8	10	12	20	25	30	40
IT0	5	6	6	8	10	10	12	15	20	30	40	50	60
IT1	8	10	10	12	15	15	20	25	35	45	60	70	80
IT2	12	15	15	20	25	25	30	40	50	70	80	90	100
IT3	20	25	25	30	40	40	50	60	80	100	120	130	150
IT4	30	40	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180	200
IT5	40	50	60	80	90	110	130	150	180	200	230	250	270
IT6	60	80	90	110	130	160	190	220	250	290	320	360	400
IT7	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
IT8	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720	810	890	970
IT9	250	300	360	430	520	620	740	870	1 000	1 150	1 300	1 400	1 550
IT10	400	480	580	700	840	1 000	1 200	1 400	1 600	1 850	2 100	2 300	2 500
IT11	600	750	900	1 000	1 300	1 600	1 900	2 200	2 500	2 900	3 200	3 600	4 000
IT12	1 000	1 200	1 500	1 800	2 100	2 500	3 000	3 500	4 000	4 600	5 200	5 700	6 300
IT13	1 400	1 800	2 200	2 700	3 300	3 900	4 600	5 400	6 300	7 200	8 100	8 900	9 700
IT14	2 500	3 000	3 600	4 300	5 200	6 200	7 400	8 700	10 000	11 500	13 000	14 000	15 500
IT15	4 000	4 800	5 800	7 000	8 400	10 000	12 000	1 4000	16 000	18 500	21 000	23 000	25 000
IT16	6 000	7 500	9 000	11 000	13 000	16 000	19 000	22 000	25 000	29 000	32 000	36 000	40 000
IT17	10 000	12 000	15 000	18 000	21 000	25 000	30 000	35 000	40 000	46 000	52 000	57 000	63 000
IT18	14 000	18 000	22 000	27 000	33 000	39 000	46 000	54 000	63 000	72 000	81 000	89 000	97 000

注: 圆锥长度不等于 100 mm 时, 需将表中的数值乘以 $100/L$, L 的单位为 mm。

5.1.4 圆锥公差标注

当圆锥公差给出圆锥的理论正确圆锥角 α (或锥度 C) 和圆锥直径公差 T_D 时, 推荐在圆锥直径的极限偏差后标注符号 “ \textcircled{T} ”, 如:

$$\phi 50^{+0.039}_0 \textcircled{T}$$

5.2 圆锥配合 (GB/T 12360—1990)

5.2.1 术语及定义

1) 圆锥配合 基本圆锥相同的内、外圆锥直径之间, 由于结合不同所形成的相互关系。圆锥配合的配合特征是通过相互结合的内、外圆锥规定的轴向位置来形成间隙或过盈。间隙或过盈是在垂直于圆锥表面方向起作用, 但按垂直于圆锥轴线方向给定并测量; 对锥度小于或等于 1:3 的圆锥, 垂直于圆锥表面与垂直于圆锥轴线给定的数值之间的差异可忽略不计。按确定相结合的内、外圆锥轴向位置的不同方法, 圆锥配合分为结构型圆锥配合和位移型圆锥配合两种类型。对于结构型圆锥配合, 其配合性质由内、外圆锥直径公差带决定; 对于位移型圆锥配合, 其配合性质由内、外圆锥相对轴向位移 (E_a) 决定。

2) 结构型圆锥配合 由结构本身或结构尺寸来确定内、外圆锥相对轴向位置而获得的配合。其配合的形成方式有两种:

一种是由内、外圆锥的结构确定装配的最终位置而获得配合。这种方式可以得到间隙配合、过渡配合和过盈配合。图 13.2-22 为由轴肩接触得到间隙配合的示例。

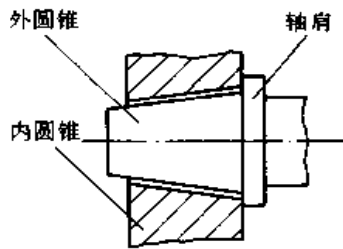


图 13.2-22 结构型圆锥间隙配合

另一种是由内、外圆锥基准平面之间的尺寸确定装配的最终位置而获得配合。这种方式可以得到间隙配合、过渡配合和过盈配合。图 13.2-23 为由结构尺寸 a 得到过盈配合的示例。

3) 位移型圆锥配合 由规定轴向位移或产生轴向位移的轴向力的大小来确定内、外圆锥相

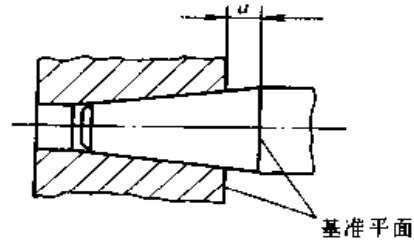


图 13.2-23 结构型圆锥过盈配合

对轴向位置而获得的配合。其配合的形成方式有两种:

一种是由内、外圆锥实际初始位置 (P_a) 开始, 作一定的相对轴向位移 (E_a) 而获得配合。这种方式可以得到间隙配合和过盈配合; 图 13.2-24 为间隙配合的示例。

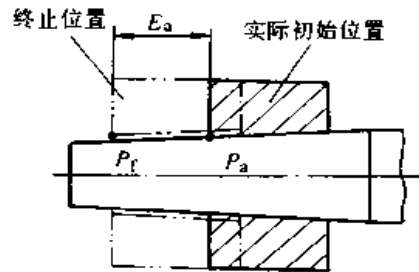


图 13.2-24 位移型圆锥间隙配合

另一种是由内、外圆锥实际初始位置 (P_a) 开始, 施加一定的装配力产生轴向位移而获得配合。这种方式只能得到过盈配合(见图 13.2-25)。

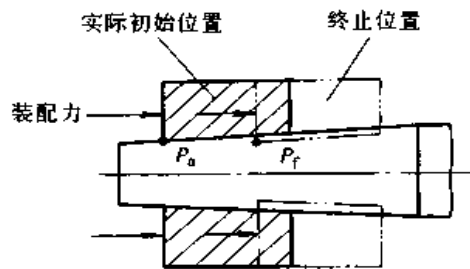


图 13.2-25 位移型圆锥过盈配合

位移型圆锥配合的有关术语如下:

①初始位置 P 在不施加力的情况下, 相互结合的内、外圆锥表面接触时的轴向位置。

②极限初始位置 P_1 、 P_2 初始位置允许的界限。极限初始位置 P_1 为内圆锥以最小极限圆锥, 外圆锥以最大极限圆锥接触时的位置; 极限初始位置 P_2 为内圆锥以最大极限圆锥, 外圆锥以最小极

限圆锥接触时的位置,如图13.2-26所示。

③初始位置公差 T_P 初始位置允许的变动量。它等于极限初始位置 P_1 和 P_2 之间的距离(见图13.2-26)。

$$T_P = \frac{1}{C}(T_{Di} + T_{De})$$

式中 C ——锥度;

T_{Di} ——内圆锥直径公差;

T_{De} ——外圆锥直径公差。

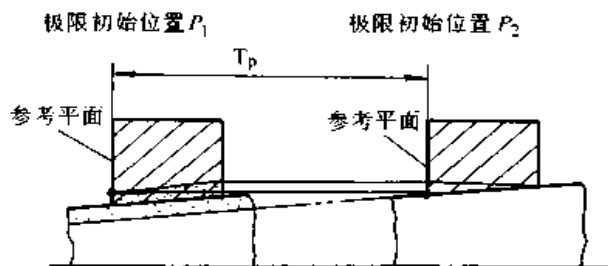


图13.2-26 位移型圆锥配合的极限初始位置

④实际初始位置 P_a 相互结合的内、外实际圆锥的初始位置(见图13.2-24、图13.2-25)。它应位于极限初始位置 P_1 和 P_2 之间。

⑤终止位置 P_f 相互结合的内、外圆锥,为使其终止状态得到要求的间隙或过盈,所规定的相互轴向位置(见图13.2-24、图13.2-25)。

⑥装配力 F_a 相互结合的内、外圆锥,为在终止位置(P_f)得到要求的过盈所施加的轴向力(见图13.2-25)。

⑦轴向位移 E_a 相互结合的内、外圆锥,从实际初始位置(P_a)到终止位置(P_f)移动的距离(见图13.2-24)。

⑧最小轴向位移 $E_{a\min}$ 在相互结合的内、外圆锥的终止位置上,得到最小间隙或最小过盈的轴向位移。

⑨最大轴向位移 $E_{a\max}$ 在相互结合的内、外圆锥的终止位置上,得到最大间隙或最大过盈的轴向位移。图13.2-27为在终止位置上得到最大、最小过盈的示例。

⑩轴向位移公差 T_E 轴向位移允许的变动量。它等于最大轴向位移($E_{a\max}$)与最小轴向位移($E_{a\min}$)之差(见图13.2-27)。

$$T_E = E_{a\max} - E_{a\min}$$

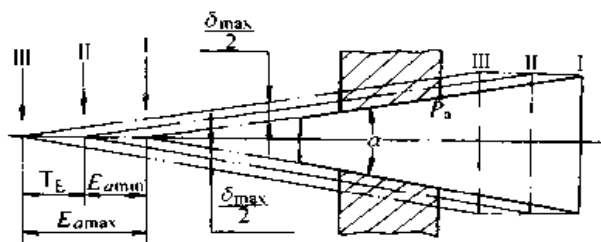


图13.2-27 轴向位移及公差

I—实际初始位置 II—最小过盈位置

III—最大过盈位置

(4)圆锥直径配合公差 T_{DP} 圆锥配合在配合的直径上允许的间隙或过盈的变动量。

对于结构型圆锥配合:

$$\text{间隙配合 } T_{DP} = S_{\max} - S_{\min}$$

$$\text{过盈配合 } T_{DP} = \delta_{\max} - \delta_{\min}$$

$$\text{过渡配合 } T_{DP} = S_{\max} + \delta_{\max}$$

$$T_{DP} = T_{Di} + T_{Dx}$$

对于位移型圆锥配合:

$$\text{间隙配合 } T_{DP} = S_{\max} - S_{\min}$$

$$\text{过盈配合 } T_{DP} = \delta_{\max} - \delta_{\min}$$

$$T_{DP} = T_E \cdot C$$

式中 S_{\max} 、 S_{\min} ——最大间隙量、最小间隙量;

δ_{\max} 、 δ_{\min} ——最大过盈量、最小过盈量;

T_{Di} 、 T_{Dx} ——内圆锥直径公差、外圆锥直径公差;

T_E ——轴向位移公差;

C ——锥度。

5.2.2 圆锥配合的一般规定

1) 结构型圆锥配合推荐优先采用基孔制。内、外圆锥直径公差带及配合按 GB/T 1801 选取。如 GB/T 1801 给出的常用配合仍不能满足需要,可按 GB/T 1800.3 规定的基本偏差和标准公差组成所需配合。

2) 位移型圆锥配合的内、外圆锥直径公差带的基本偏差推荐选用 H、h; Js、js。其轴向位移的极限值按 GB/T 1801 规定的极限间隙或极限过盈来计算。

3) 位移型圆锥配合的轴向位移极限值和轴向位移公差按下列公式计算:

$$\text{间隙配合 } E_{a\min} = \frac{1}{C} \times S_{\min}$$

$$E_{u\max} = \frac{1}{C} \times S_{\max}$$

$$T_E = E_{u\max} - E_{u\min} = \frac{1}{C} (S_{\max} - S_{\min})$$

过盈配合 $E_{u\min} = \frac{1}{C} \times \delta_{\min}$

$$E_{u\max} = \frac{1}{C} \times \delta_{\max}$$

$$T_E = E_{u\max} - E_{u\min} = \frac{1}{C} (\delta_{\max} - \delta_{\min})$$

式中 S_{\max} 、 S_{\min} ——最大间隙量、最小间隙量；
 δ_{\max} 、 δ_{\min} ——最大过盈量、最小过盈量；
 $E_{u\max}$ 、 $E_{u\min}$ ——最大轴向位移、最小轴向位移；
 T_E ——轴向位移公差；
 C ——锥度。

5.2.3 圆锥轴向极限偏差的计算

圆锥轴向极限偏差是圆锥的某一极限圆锥与其基本圆锥轴向位置的偏离。最小极限圆锥与基本圆锥的偏离为轴向上偏差 (es_z 、 ES_z)；最大极限圆锥与基本圆锥的偏离为轴向下偏差 (ei_z 、 EI_z)。轴向上偏差与轴向下偏差之代数差的绝对值为轴向公差 (T_z)。外圆锥和内圆锥轴向极限偏差示意图见图 13.2-28 和图 13.2-29。

根据圆锥轴向极限偏差可以确定圆锥配合的极限初始位置和圆锥配合后基准平面之间的极限轴向距离；当用圆锥量规检验圆锥直径时，还可用以确定与圆锥直径极限偏差相应的圆锥量规的轴向距离。

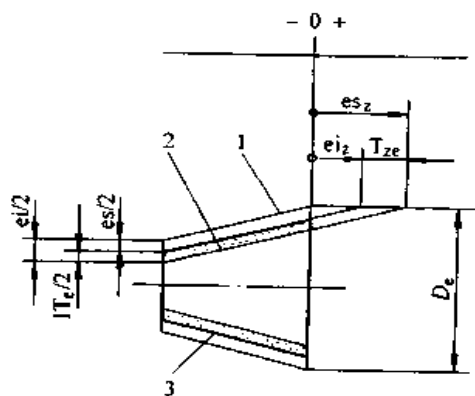


图 13.2-28 外圆锥轴向极限偏差示意图
 1—基本圆锥 2—最小极限圆锥
 3—最大极限圆锥

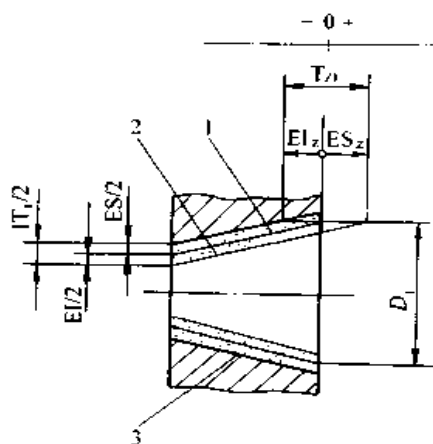


图 13.2-29 内圆锥轴向极限偏差示意图
 1—基本圆锥 2—最小极限圆锥
 3—最大极限圆锥

圆锥轴向极限偏差的计算公式见表 13.2-57。表 13.2-58 和表 13.2-59 给出锥度 $C = 1:10$ 时，按 GB/T 1800.3 规定的基本偏差和标准公差计算所得的外圆锥的轴向基本偏差 e_z 和轴向公差 T_z 的数值。当锥度 $C \neq 1:10$ 时，圆锥的轴向基本偏差和轴向公差按表 13.2-58、表 13.2-59 给出的数值，乘以表 13.2-60、表 13.2-61 的换算系数进行计算。基准孔的轴向极限偏差按表 13.2-58~表 13.2-61 中的数值由表 13.2-62 的公式计算。

表 13.2-57 圆锥轴向极限偏差计算公式

偏差或公差名称	外圆锥	内圆锥
轴向上偏差	$es_z = -\frac{1}{C} ei$	$ES_z = -\frac{1}{C} EI$
轴向下偏差	$ei_z = -\frac{1}{C} es$	$EI_z = -\frac{1}{C} ES$
轴向基本偏差	$e_z = -\frac{1}{C} \times \text{直径基本偏差}$	$E_z = -\frac{1}{C} \times \text{直径基本偏差}$
轴向公差 T_z	$T_{ze} = \frac{1}{C} IT_e$	$T_{zi} = \frac{1}{C} IT_i$

表 13.2-58 锥度 $C = 1:10$ 时, 外圆锥的轴向基本偏差 (e_s) 数值 (mm)

基本偏差		a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js	j		
基本尺寸/ mm		公差等级														
大于	至	所有等级														
—	3	+2.7	+1.4	+0.6	+0.34	+0.20	+0.14	+0.1	+0.06	+0.04	+0.02	0		+0.02	+0.04	+0.06
3	6	+2.7	+1.4	+0.7	+0.46	+0.30	+0.20	+0.14	+0.10	+0.06	+0.04	0		+0.02	+0.04	—
6	10	+2.8	+1.5	+0.8	+0.56	+0.40	+0.25	-0.18	+0.13	+0.08	+0.05	0		+0.02	+0.05	—
10	14	+2.9	+1.5	+0.95	—	+0.50	+0.32	—	+0.16	—	0.06	0		+0.03	+0.06	—
14	18															
18	24	+3.0	+1.6	+1.1	—	+0.65	+0.40	—	+0.20	—	+0.07	0		+0.04	+0.08	—
24	30															
30	40	+3.1	+1.7	+1.2	—	+0.80	+0.50	—	+0.25	—	+0.09	0		+0.05	+0.10	—
40	50	+3.2	+1.8	+1.3												
50	65	+3.4	+1.9	+1.4	—	+1.0	+0.60	—	+0.30	—	+0.10	0		+0.07	+0.12	—
65	80	+3.6	+2.0	+1.5												
80	100	+3.8	+2.2	+1.7	—	+1.2	+0.72	—	+0.36	—	+0.12	0		+0.09	+0.15	—
100	120	+4.1	+2.4	+1.8												
120	140	+4.6	+2.6	+2.0	—	+1.45	+0.85	—	+0.43	—	+0.14	0		+0.11	+0.18	—
140	160	+5.2	+2.8	+2.1												
160	180	+5.8	+3.1	+2.3	—											
180	200	+6.6	+3.4	+2.4												
200	225	+7.4	+3.8	+2.6	—	+1.7	+1.0	—	+0.50	—	+0.15	0		+0.13	+0.21	—
225	250	+8.2	+4.2	+2.8												
250	280	+9.2	+4.8	+3.0	—	+1.9	+1.1	—	+0.56	—	+0.17	0		+0.16	+0.26	—
280	315	+10.5	+5.4	+3.3												
315	355	+12.0	+6.0	+3.6	—	+2.1	+1.25	—	+0.62	—	+0.18	0		+0.18	+0.28	—
355	400	+13.5	+6.8	+4.0												
400	450	+15.0	+7.6	+4.4	—	+2.3	+1.35	—	+0.68	—	+0.2	0		+0.20	+0.32	—
450	500	+16.5	+8.4	+4.8												

$$e_s = \pm \frac{IT_8}{2}$$

续表 13.2-58

基本偏差		k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	ab	zc	
基本尺寸/ mm		所 有 等 级															
大于	至	≤3	4至7	≤3	4至7	≤3	4至7	≤3	4至7	≤3	4至7	≤3	4至7	≤3	4至7	≤3	4至7
—	3	0	-0.02	-0.04	-0.06	-0.10	-0.14	—	-0.18	—	-0.20	—	-0.26	-0.32	-0.4	-0.6	
3	6	0	-0.04	-0.08	-0.12	-0.15	-0.19	—	-0.23	—	-0.28	—	-0.35	-0.42	-0.5	-0.8	
6	10	0	-0.06	-0.10	-0.15	-0.19	-0.23	—	-0.28	—	-0.34	—	-0.42	-0.52	-0.67	-0.97	
10	14	0	-0.07	-0.12	-0.18	-0.23	-0.28	—	-0.33	—	-0.40	—	-0.5	-0.64	-0.9	-1.3	
14	18	0	-0.08	-0.15	-0.22	-0.28	-0.35	—	-0.33	-0.39	-0.45	—	-0.6	-0.77	-1.08	-1.5	
18	24	0	-0.08	-0.15	-0.22	-0.28	-0.35	—	-0.41	-0.47	-0.54	-0.63	-0.73	-0.98	-1.36	-1.88	
24	30	0	-0.09	-0.17	-0.26	-0.34	-0.43	-0.48	-0.48	-0.55	-0.64	-0.75	-0.88	-1.18	-1.6	-2.18	
30	40	0	-0.09	-0.17	-0.26	-0.34	-0.43	-0.48	-0.6	-0.68	-0.8	-0.94	-1.12	-1.48	-2.0	-2.74	
40	50	0	-0.11	-0.20	-0.32	-0.43	-0.53	-0.54	-0.7	-0.81	-0.97	-1.14	-1.36	-1.8	-2.40	-3.25	
50	65	0	-0.11	-0.20	-0.32	-0.43	-0.53	-0.66	-0.87	-1.02	-1.22	-1.44	-1.72	-2.25	-3.0	-4.05	
65	80	0	-0.13	-0.23	-0.37	-0.51	-0.71	-0.91	-1.24	-1.46	-1.78	-2.14	-2.58	-3.35	-4.45	-5.85	
80	100	0	-0.13	-0.23	-0.37	-0.54	-0.79	-1.04	-1.44	-1.72	-2.10	-2.54	-3.1	-4.0	-5.25	-6.9	
100	120	0	-0.15	-0.27	-0.43	-0.63	-0.92	-1.22	-1.7	-2.02	-2.48	-3.0	-3.65	-4.7	-6.2	-8	
120	140	0	-0.15	-0.27	-0.43	-0.65	-1.0	-1.34	-1.9	-2.28	-2.8	-3.4	-4.15	-5.35	-7	-9	
140	160	0	-0.15	-0.27	-0.43	-0.68	-1.08	-1.46	-2.1	-2.52	-3.1	-3.8	-4.65	-6.0	-7.8	-10	
160	180	0	-0.17	-0.31	-0.50	-0.77	-1.22	-1.66	-2.36	-2.84	-3.5	-4.25	-5.2	-6.7	-8.8	-11.5	
180	200	0	-0.17	-0.31	-0.50	-0.80	-1.3	-1.8	-2.58	-3.1	-3.85	-4.7	-5.75	-7.4	9.6	12.5	
200	225	0	-0.17	-0.31	-0.50	-0.84	-1.4	-1.96	-2.84	-3.4	-4.25	-5.2	-6.4	-8.2	-10.5	13.5	
225	250	0	-0.20	-0.34	-0.56	-0.94	-1.58	-2.18	-3.15	-3.85	-4.75	-5.8	-7.1	-9.2	-12	-15.5	
250	280	0	-0.20	-0.34	-0.56	-0.98	-1.7	-2.4	-3.5	-4.25	-5.25	-6.5	7.9	10	13	17	
280	315	0	-0.21	-0.37	-0.62	-1.08	-1.9	-2.68	-3.9	-4.75	-5.9	-7.3	9	-11.5	15	-19	
315	355	0	-0.21	-0.37	-0.62	-1.14	-2.08	-2.94	-4.35	-5.3	-6.6	-8.2	-10	-13	-16.5	-21	
355	400	0	-0.23	-0.40	-0.68	-1.26	-2.32	-3.3	-4.9	-5.95	-7.4	-9.2	-11	-14.5	-18.5	-24	
400	450	0	-0.23	-0.40	-0.68	1.32	2.56	3.6	5.4	6.6	8.2	10	12.5	16	21	26	
450	500	0	-0.23	-0.40	-0.68	1.32	2.56	3.6	5.4	6.6	8.2	10	12.5	16	21	26	

表 13.2-59 锥度 $C=1:10$ 时, 轴向公差 (T_z) 数值 (mm)

基本尺寸		公差等级									
大于	至	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12
—	3	0.02	0.03	0.04	0.06	0.10	0.14	0.25	0.40	0.60	1.0
3	6	0.025	0.04	0.05	0.08	0.12	0.18	0.30	0.48	0.75	1.2
6	10	0.25	0.04	0.06	0.09	0.15	0.22	0.36	0.58	0.90	1.5
10	18	0.03	0.05	0.08	0.11	0.18	0.27	0.43	0.70	1.1	1.8
18	30	0.04	0.06	0.09	0.13	0.21	0.33	0.52	0.84	1.3	2.1
30	50	0.04	0.07	0.11	0.16	0.25	0.39	0.62	1.0	1.6	2.5
50	80	0.05	0.08	0.13	0.19	0.30	0.46	0.74	1.2	1.9	3.0
80	120	0.06	0.10	0.15	0.22	0.35	0.54	0.87	1.4	2.2	3.5
120	180	0.08	0.12	0.18	0.25	0.40	0.63	1.0	1.6	2.5	4.0
180	250	0.10	0.14	0.20	0.29	0.46	0.72	1.15	1.85	2.9	4.6
250	315	0.12	0.16	0.23	0.32	0.52	0.81	1.3	2.1	3.2	5.2
315	400	0.13	0.18	0.25	0.36	0.57	0.89	1.4	2.3	3.6	5.7
400	500	0.15	0.20	0.27	0.40	0.63	0.97	1.55	2.5	4.0	6.3

表 13.2-60 一般用途圆锥的换算系数

基本值	系列 1	1:3	1:5					1:10				1:20	1:30			1:50	1:100	1:200	1:500
	系列 2		1:4	1:6	1:7	1:8		1:12	1:15			1:40							
换算系数		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.5	2	3	4	5	10	20	50		

表 13.2-61 特殊用途圆锥的换算系数

基本值	换算系数	基本值	换算系数	基本值	换算系数	基本值	换算系数	基本值	换算系数
18°30'	0.3	7:24	0.34	1:15.748	1.57	1:19.180	1.92	1:19.922	1.99
11°54'	0.48	1:9	0.9	1:16.666	1.67	1:19.212	1.92	1:20.020	2
8°40'	0.66	1:12.262	1.2	1:18.779	1.8	1:19.254	1.92	1:20.047	2
7°40'	0.75	1:12.972	1.3	1:19.002	1.9	1:19.264	1.92	1:20.288	2

表 13.2-62 基孔制轴向极限偏差计算公式

轴向极限偏差	内圆锥	外圆锥			
	基本偏差	基本偏差			
	H	a~g	h	js	j~zc
上偏差	$ES_2 = 0$	$es_2 = e_2 + T_{zc}$	$es_2 = +T_{zc}$	$es_2 = +\frac{T_{zc}}{2}$	$es_2 = e_2$
下偏差	$EI_2 = -T_{zc}$	$ei_2 = e_2$	$ei_2 = 0$	$ei_2 = -\frac{T_{zc}}{2}$	$ei_2 = e_2 - T_{zc}$

第3章 形状和位置公差

1 术语、定义和符号

1.1 术语及定义 (表 13.3-1)

表 13.3-1 形位公差的术语与定义

术 语	定 义	术 语	定 义
要素	指零件上的特征部分——点、线、面。这些要素是实际存在的，也可以是由实际要素取得的轴线或中心平面	形状和位置公差带	公差带的形状取决于被测要素的几何理想要素和设计要求，并以此评定形位误差。示例及说明如下： 在给定平面内的直线度公差要求被测要素上各点相对其理想线的距离应等于或小于给定的公差值，理想线的方向由最小条件确定，即两平行直线包容被测线，且其间距离为最小 平面度公差要求被测要素上的各点相对其理想平面的距离等于或小于给定的公差值，理想平面的方向由最小条件确定，即两平行平面包容被测面且其间距离为最小 圆度公差要求被测要素处于两个同心圆间的区域内，两圆的半径差应小于或等于给定的公差值。该两圆中心点的位置和半径差值的选择应符合最小条件，即必须使两圆间的半径差为最小 单一被测要素的圆柱度公差要求被测要素处于两个同轴圆柱面之间的区域内，两圆柱面的半径差应小于或等于给定的公差值。该两圆柱面轴线的位置和半径差值的选择应符合最小条件，即必须使两同轴圆柱面间的半径差为最小
理想要素	具有几何学意义的要素	固定公差带	公差带的位置是由图样上给定的基准来确定，不是随着实际形状或位置的变动而变动
实际要素	零件上实际存在的要素。测量时由测得要素来代替。此时它并非该要素的真实状况	浮动公差带	公差带的位置是随着零件实际表面在尺寸公差带内随实际尺寸的变动而变动
被测要素	给出了形状或（和）位置公差的要素	延伸公差带	根据零件的功能要求，位置度和对称度公差带延伸到被测要素的长度界限之外时，该公差带称延伸公差带
基准要素	用来确定被测要素方向或（和）位置的要素	理论正确尺寸	对于要素的位置度、轮廓度或倾斜度，其尺寸由不带公差的理论正确位置、轮廓或角度确定，这种尺寸称理论正确尺寸
单一要素	仅对其本身给出形状公差要求的要素		
关联要素	对其他要素有功能关系的要素		
形状公差	单一实际要素的形状所允许的变动全量		
位置公差	关联实际要素的位置对基准所允许的变动全量		
定向公差	关联实际要素对基准在方向上允许的变动全量		
定位公差	关联实际要素对基准在位置上允许的变动全量		
跳动公差	关联实际要素绕基准轴线回转一周或连续回转时所允许的最大跳动量		
形状和位置公差带	限制实际要素变动的区域。公差带是一个给定的区域，是误差的最大允许值，它由大小、形状、方向、位置四个因素来决定。 根据被测要素的特征和结构尺寸，公差带有下述几种形式：圆内的区域、两同心圆之间的区域、两同轴圆柱面之间的区域、两等距曲线之间的区域、两平行直线之间的区域、圆柱面内的区域、两等距曲面之间的区域、两平行平面之间的区域、球内的区域		

术 语	定 义	术 语	定 义
基准	理想基准要素的简称,它是确定要素间几何系的依据,分别称为基准点、基准直线(轴线)和基准平面(中心平面)	最大实体实效尺寸	最大实体实效状态下的体外作用尺寸;对于内表面为最大实体尺寸减形位公差值(加注符号Ⓜ的);对于外表面为最大实体尺寸加形位公差值(加注符号Ⓜ的)
单一基准要素	作为单一基准使用的单个要素	最小实体实效状态	在给定长度上,实际要素处于最小实体状态且其中心要素的形状或位置误差等于给出公差值时的综合极限状态
组合基准要素	作为单一基准使用的一组要素	最小实体实效尺寸	最小实体实效状态下的体内作用尺寸;对于内表面为最小实体尺寸加形位公差值(加注符号Ⓜ的);对于外表面为最小实体尺寸减形位公差值(加注符号Ⓜ的)
三基准体系	由三个互相垂直的基准平面组成的基准体系,它的三个平面是确定和测量零件上各要素几何关系的起点		
基准目标	为构成基准体系的各基准平面而在要素上指定的点、线、面		
局部实际尺寸(简称实际尺寸)	在实际要素的任意正截面上,两对应点之间测得的距离	边界	由设计给定的具有理想形状的极限包容面。边界的尺寸为极限包容面的直径或距离
体外作用尺寸	在被测要素的给定长度上,与实际内表面体外相接的最大理想面或与实际外表面体外相接的最小理想面的直径或宽度。对于关联要素,该理想面的轴线或中心平面必须与基准保持图样给定的几何关系	最大实体边界	尺寸为最大实体尺寸的边界
体内作用尺寸	在被测要素的给定长度上,与实际内表面体内相接的最小理想面或与实际外表面体内相接的最大理想面的直径或宽度。对于关联要素,该理想面的轴线或中心平面必须与基准保持图样给定的几何关系	最小实体边界	尺寸为最小实体尺寸的边界
		最大实体实效边界	尺寸为最大实体实效尺寸的边界
		最小实体实效边界	尺寸为最小实体实效尺寸的边界
最大实体状态	实际要素在给定长度上处处位于尺寸极限之内并具有实体最大时的状态	独立原则	图样上给定的每一个尺寸和形状、位置要求均是独立的,应分别满足要求的公差原则。独立原则是尺寸公差和形位公差相互关系遵循的基本原则
最大实体尺寸	实际要素在最大实体状态下的极限尺寸。对于外表面为最大极限尺寸,对于内表面为最小极限尺寸	相关要求	图样上给定的尺寸公差和形位公差相互有关的公差要求,系指包容要求、最大实体要求(包括可逆要求应用于最大实体要求)和最小实体要求(包括可逆要求应用于最小实体要求)
最小实体状态	实际要素在给定长度上处处位于尺寸极限之内并具有实体最小时的状态	包容要求	实际要素应遵守其最大实体边界,其局部实际尺寸不得超出最小实体尺寸的一种公差要求。包容要求适用于单一要素如图柱表面或两平行表面。采用包容要求的单一要素应在其尺寸极限偏差或公差带代号之后加注符号“Ⓜ”
最小实体尺寸	实际要素在最小实体状态下的极限尺寸。对于外表面为最小极限尺寸,对于内表面为最大极限尺寸	最大实体要求	被测要素的实际轮廓应遵守其最大实体实效边界,当其实际尺寸偏离最大实体尺寸时,允许其形位误差值超出在最
最大实体实效状态	在给定长度上,实际要素处于最大实体状态且其中心要素的形状或位置误差等于给出公差值时的综合极限状态		

续表 13.3-1

术 语	定 义	术 语	定 义
最小实体要求	大实体状态下给出的公差值的一种公差要求。最大实体要求适用于中心要素。此时应在图样标注符号“ Ⓜ ” 被测要素的实际轮廓应遵守其最小实体实效边界，当其实际尺寸偏离最小实体尺寸时，允许其形位误差值超出在最小实体状态下给出的公差值的一种公差要求。最小实体要求适用于中心要素。此时应在图样上标注符号“ Ⓛ ”	零形位公差	出在最小实体状态下给出的形位公差值。当其形位误差值小于给出的形位公差值时，也允许其实际尺寸超出最小实体尺寸的一种要求 被测要素采用最大实体要求或最小实体要求时，其给出的形位公差值为零，用 0“ Ⓜ ”或 0“ Ⓛ ”表示
可逆要求	中心要素的形位误差值小于给出的形位公差值时，允许在满足零件功能要求的前提下扩大尺寸公差的一种公差要求	检测原则	与理想要素比较原则 将被测实际要素与其理想要素相比较，量值由直接法或间接法获得；理想要素用模拟方法获得
可逆要求用于最大实体要求	被测要素的实际轮廓应遵守其最大实体实效边界，当其实际尺寸偏离最大实体尺寸时，允许其形位误差值超出在最大实体状态下给出的形位公差值。当其形位误差值小于给出的形位公差值时，也允许其实际尺寸超出最大实体尺寸的一种要求		测量坐标值原则 测量被测实际要素的坐标值（如直角坐标值、极坐标值、圆柱面坐标值），并经过数据处理获得形位误差值
可逆要求用于最小实体要求	被测要素的实际轮廓应遵守其最小实体实效边界，当其实际尺寸偏离最小实体尺寸时，允许其形位误差值超		测量特征参数原则 测量被测实际要素上具有代表性的参数（即特征参数）来表示形位误差值
			测量跳动原则 被测实际要素绕基准轴线回转过程中，沿给定方向测量其对某参考点、或线的变动量。变动量是指指示器最大与最小读数之差
		控制实效边界原则	检测被测实际要素是否超过实效边界，以判断合格与否

1.2 形位公差的符号 (GB/T 1182—1996)

2) 被测要素、基准要素的标注要求及其他附加符号见表 13.3-3。

1) 形位公差特征的符号见表 13.3-2。

表 13.3-2 形位公差特征的符号

公差	特征	符号	有或无基准要求	公差	特征	符号	有或无基准要求		
形状公差	形状	直线度		无	位置公差	平行度		有	
		平面度		无		定向	垂直度		有
		圆 度		无			倾斜度		有
		圆柱度		无			定位	位置度		有或无
		轮廓	线轮廓度			有或无		同轴（同心）度		有
	面轮廓度			有或无		对称度		有	
	跳动					圆跳动		有	
						全跳动		有	

表 13.3-3 被测要素、基准要素的标注及其他附加符号


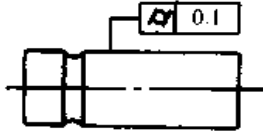


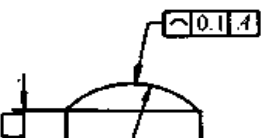
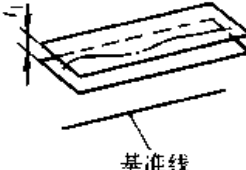
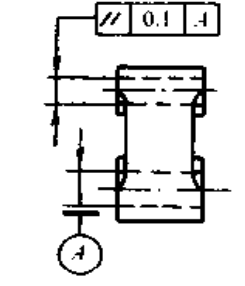
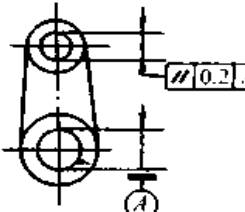

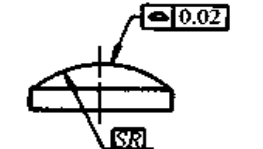
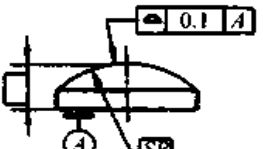
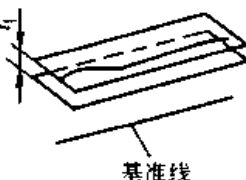
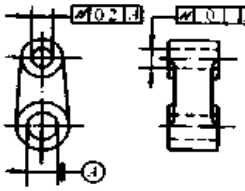
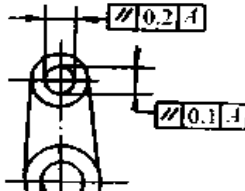
项 目	符 号	项 目	符 号	项 目	符 号
被测要素的标注	直接 	理论正确尺寸 	可逆要求 		
	用字母 	包容要求 	延伸公差带 		
基准要素的标注 	最大实体要求 	自由状态 (非刚性零件) 条件 			
基准目标的标注 	最小实体要求 	全周 (轮廓) 			

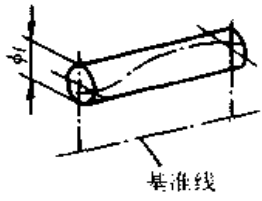
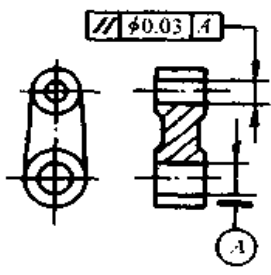
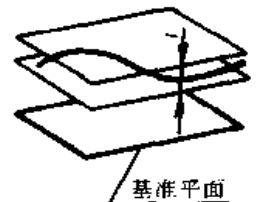
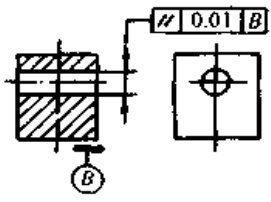
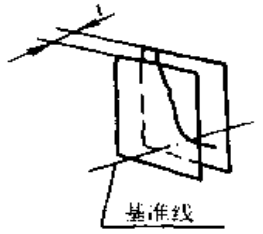
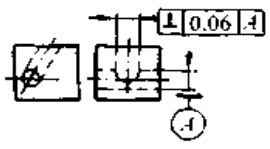
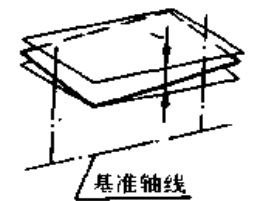
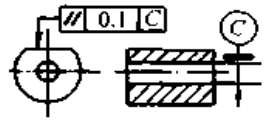
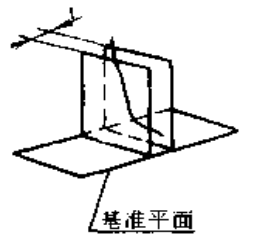
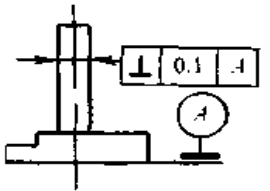
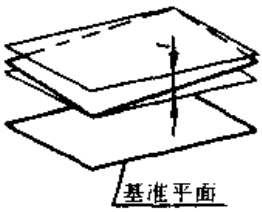
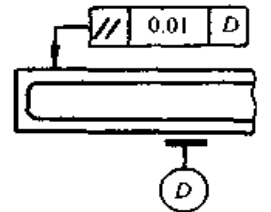
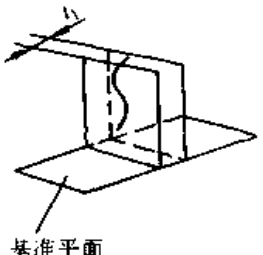
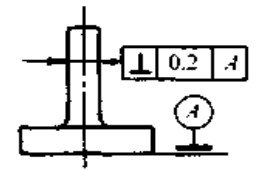
1.3 形位公差带的定义 (GB/T 1182—1996)

表 13.3-4 形位公差带的定义

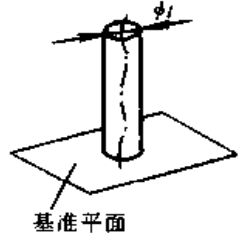
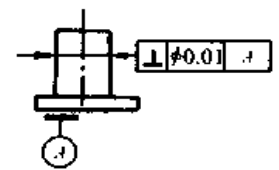
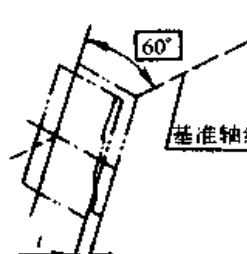
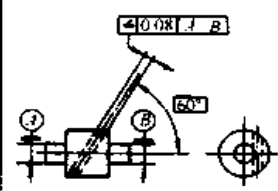
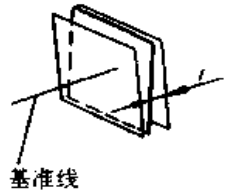
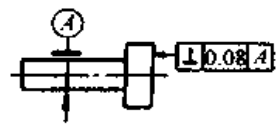
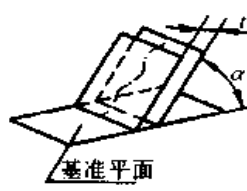
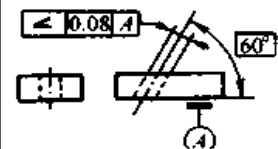
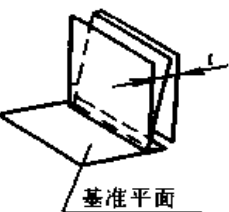
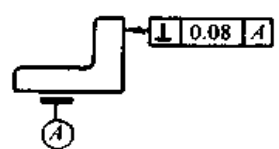
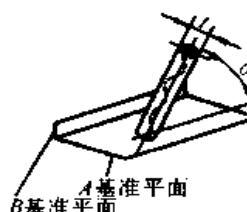
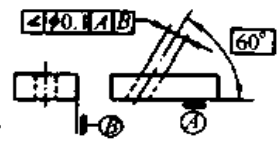
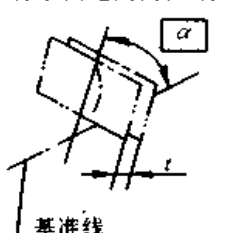
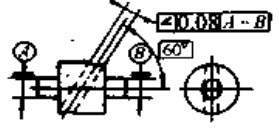
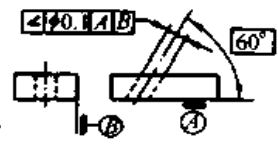
项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释
直线度公差	在给定平面内, 公差带是距离为公差值 t 的两平行直线之间的区域 	被测表面的要素, 必须位于平行于图样所示投影面且距离为公差值 0.1 的两平行直线内 	圆度公差	公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域 	被测表面必须位于距离为公差值 0.08 的两平行平面内
	在给定方向上公差带是距离为公差值 t 的两平行平面之间的区域 	被测圆柱面的任一素线必须位于距离为公差值 0.1 的两平行平面之内 		公差带是在同一正截面上, 半径差为公差值 t 的两同心圆之间的区域 	被测圆柱面任一正截面的圆周必须位于半径差为公差值 0.03 的两同心圆之间
	如在公差值前加注 ϕ , 则公差带是直径为 t 的圆柱面的区域 	被测圆柱体内的轴线必须位于直径为 $\phi 0.08$ 的圆柱面内 		公差带是在同一正截面上, 半径差为公差值 t 的两同心圆之间的区域 	被测圆锥面任一正截面上的圆周必须位于半径差为公差值 0.1 的两同心圆之间

续表 13.3-4

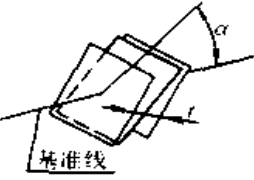
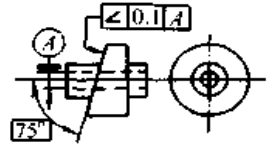

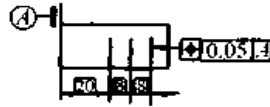
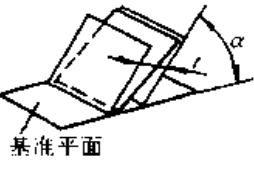
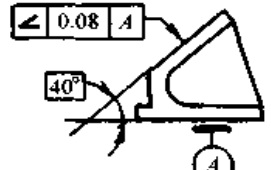
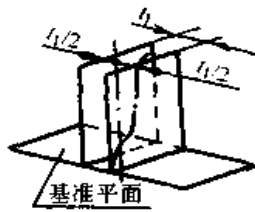
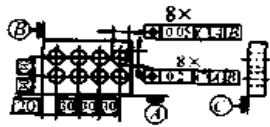
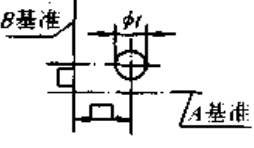
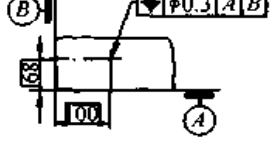
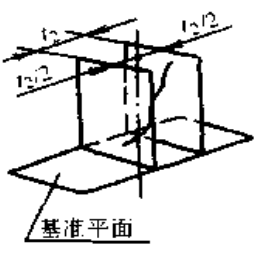

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释	
圆柱度公差	公差带是半径差为公差值 t 的两同轴圆柱面之间的区域	被测圆柱面必须位于半径差为 0.1 的两同轴圆柱面之间	平行度公差	线对线平行度公差		
				公差带是距离为公差值 t 、且平行于基准线、并位于给定方向上的两平行平面之间的区域	被测轴线必须位于距离为公差值 0.1、且在给定方向上平行于基准轴线的两平行平面之间	
线轮廓度公差	公差带是包络一系列直径为公差值 t 的圆的两包络线之间的区域，诸圆的圆心位于具有理论正确几何形状的线上	在平行于图样所示投影面的任一截面上，被测轮廓线必须位于包络一系列直径为公差值 0.04、且圆心位于具有理论正确几何形状的线上的两包络线之间	平行度公差	 <p>$d = t$</p> <p>无基准要求的线轮廓度公差见图 a</p> <p>有基准要求的线轮廓度公差见图 b</p>	 <p>a)</p>  <p>b)</p>	 <p>基准线</p>  <p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.2、且在给定方向上平行于基准轴线的两个平行平面之间</p> 
	面轮廓度公差	公差带是包络一系列直径为公差值 t 的球的两包络面之间的区域，诸球的球心应位于具有理论正确几何形状的面上		被测轮廓面必须位于包络一系列球的两包络面之间，诸球的直径为公差值 0.02，且球心位于具有理论正确几何形状的面上的两包络面之间	平行度公差	公差带是两对相互垂直的距离为 t_1 和 t_2 、且平行于基准线的两平行平面之间的区域	被测轴线必须位于距离分别为公差值 0.2 和 0.1 的在给定的互相垂直方向上且平行于基准轴线的两组平行平面之间
 <p>$d = t$</p> <p>无基准要求的面轮廓度公差见图 a</p> <p>有基准要求的面轮廓度公差见图 b</p>		 <p>a)</p>  <p>b)</p>	 <p>基准线</p>  			

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释	
平 行 度 公 差	<p>如在公差值前加注 ϕ、公差带是直径为公差值 t、且平行于基准线的圆柱面内的区域</p>  <p>基准线</p>	<p>被测轴线必须位于直径为公差值 0.03 且平行于基准轴线的圆柱面内</p> 	垂 直 度 公 差	<p>线对线垂直度公差</p>		
	<p>公差带是距离为公差值 t、且平行于基准平面的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准平面</p>	<p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.01、且平行于基准表面 B (基准平面) 的两平行平面之间</p> 		<p>公差带是距离为公差值 t、且垂直于基准线的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准线</p>		<p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.06、且垂直于基准线 A (基准轴线) 的两平行平面之间</p> 
	<p>线对面的平行度公差</p>			<p>线对面垂直度公差</p>		
	<p>公差带是距离为公差值 t、且平行于基准线的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准轴线</p>	<p>被测表面必须位于距离为公差值 0.1、且平行于基准线 C (基准轴线) 的两平行平面之间</p> 		<p>在给定方向上, 公差带是距离为公差值 t 且垂直于基准面的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准平面</p>	<p>在给定方向上被测轴线必须位于距离为公差值 0.1、且垂直于基准表面 A 的两平行平面之间</p> 	
	<p>面对线的平行度公差</p>			<p>面对面垂直度公差</p>		
<p>公差带是距离为公差值 t、且平行于基准面的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准平面</p>	<p>被测表面必须位于距离为公差值 0.01、且平行于基准表面 D (基准平面) 的两平行平面之间</p> 	<p>公差带分别是互相垂直的距离为 t_1 和 t_2 且垂直于基准面的两对平行平面之间的区域</p>  <p>基准平面</p>	<p>被测轴线必须位于距离分别为公差值 0.2 和 0.1 的互相垂直且垂直于基准平面的两对平行平面之间</p> 			

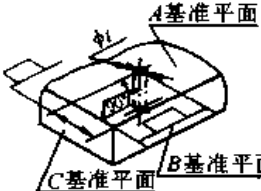
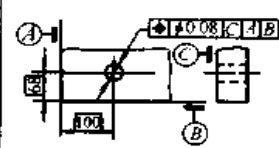
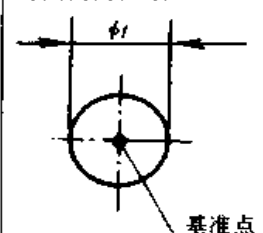
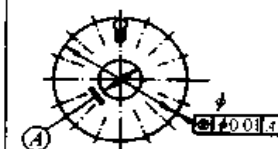
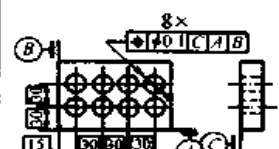

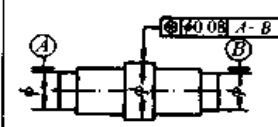
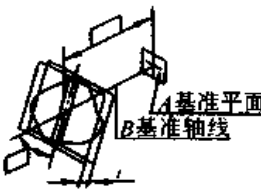
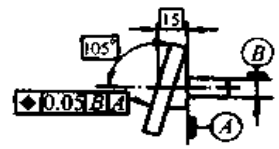
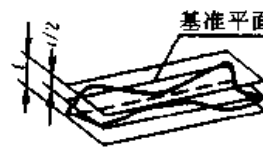
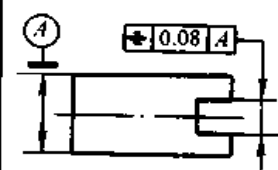

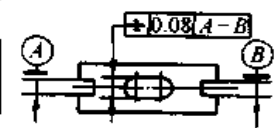
续表 13.3-4

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释		
垂直度公差	<p>如公差值前加注 ϕ, 则公差带是直径为公差值 t, 且垂直于基准面的圆柱面内的区域</p>  <p>基准平面</p>	<p>被测轴线必须位于直径为公差值 0.01, 且垂直于基准面 A (基准平面) 的圆柱面内</p> 	倾斜度公差	<p>线对线倾斜度公差</p> <p>被测线与基准线不在同一平面内, 公差带是距离为公差值 t, 且与基准成一给定角度的两平行平面之间的区域。由于被测线与基准不在同一平面内, 则被测线应投影到包含基准轴线并平行于被测轴线的平面上, 公差带是相对于投影到该平面的线而言</p>  			
	<p>面对线垂直度公差</p> <p>公差带是距离为公差值 t, 且垂直于基准线的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准线</p>			<p>被测面必须位于距离为公差值 0.08, 且垂直于基准线 A (基准轴线) 的两平行平面之间</p> 	<p>线对面的倾斜度公差</p> <p>公差带是距离为公差值 t, 且与基准成一给定角度的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准平面</p>		<p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.08, 且与基准面 A (基准平面) 成理论正确角度 60° 的两平行平面之间</p> 
	<p>面对面垂直度公差</p> <p>公差带是距离为公差值 t, 且垂直于基准面的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准平面</p>			<p>被测面必须位于距离为公差值 0.08 且垂直于基准平面 A 的两平行平面之间</p> 	<p>如在公差值前加注 ϕ, 则公差带是直径为公差值 t 的圆柱面内的区域, 该圆柱面的轴线应平行于基准的平面, 并与基准体系呈一给定的角度</p>  <p>A 基准平面 B 基准平面</p>		<p>被测轴线必须位于直径为 0.1 的圆柱公差带内, 该公差带应平行于基准平面 B 并与基准表面 A (基准平面) 呈理论正确角度 60°</p> 
倾斜度公差	<p>线对线倾斜度公差</p> <p>被测线和基准线在同一平面内, 公差带是距离为公差值 t, 且与基准线成一给定角度的两平行平面之间的区域</p>  <p>基准线</p>		<p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.08, 且与 A-B 公共基准线成一理论正确角度的两平行平面之间</p> 	<p>被测轴线必须位于直径为 0.1 的圆柱公差带内, 该公差带应平行于基准平面 B 并与基准表面 A (基准平面) 呈理论正确角度 60°</p> 			

续表 13.3-4

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释
倾 斜 度 公 差	面对线的倾斜度公差		位 置 度 公 差	线的位置度公差	
	<p>公差带是距离为公差值 t、且与基准线成一给定角度的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测表面必须位于距离为公差值 0.1, 且与基准线 A (基准轴线) 成理论正确角度 75° 的两平行平面之间</p> 		<p>公差带是距离为公差值 t、且以线的理想位置为中心线对称配置的两平行直线之间的区域。中心线的位置, 由相对于基准 A 的理论正确尺寸确定, 此位置度公差仅给定一个方向</p> 	<p>每根刻线的中心线必须位于距离为公差值 0.05, 且相对于基准 A 所确定的理想位置对称的两平行直线之间</p> 
公 差	面对面的倾斜度公差		位 置 度 公 差	各个被测孔的轴线必须分别位于两对互相垂直的距离为 t_1 和 t_2 、且以轴线的理想位置为中心对称配置的两平行平面之间的区域, 轴线的理想位置由相对于三基准体系的理论正确尺寸确定, 此位置度公差相对于基准给定互相垂直的两个方向	
	<p>公差带是距离为公差值 t、且与基准面成一给定角度的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测表面必须位于距离为公差值 0.08, 且与基准面 A (基准平面) 成理论正确角度 40° 的两平行平面之间</p> 			
位 置 度 公 差	点的位置度公差		公 差	被测球的球心必须位于直径为公差值 0.03 的球内。该球的球心位于相对基准 A、B、C 所确定的理想位置上	
	<p>如公差值前加注 ϕ, 公差带是直径为公差值 t 的圆内的区域。圆公差带的中心点的位置由相对于基准 A 和 B 的理论正确尺寸确定</p> 	<p>两个中心线的交点必须位于直径为公差值 0.3 的圆内, 该圆的圆心位于相对基准 A 和 B (基准直线) 所确定的点的理想位置上</p> 			

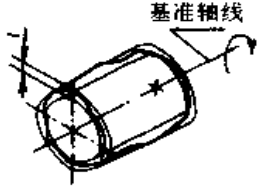
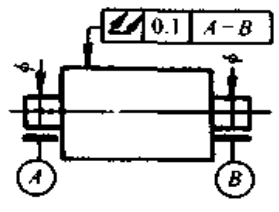
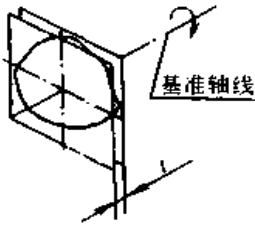
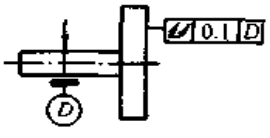
续表 13.3-4

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释		
位置公差	<p>如在公差值前加注 ϕ, 则公差带是直径为 t 的圆柱面内的区域, 公差带的轴线的位置由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定</p> 	<p>被测轴线必须位于直径为公差值 0.08, 且以相对于 C、A、B 基准表面 (基准平面) 所确定的理想位置为轴线的圆柱面内</p> 	同轴度公差	<p>公差带是公差值为 ϕt, 且与基准圆心同心的圆内的区域</p> 	<p>外圆的圆心必须位于公差值为 $\phi 0.01$, 且与基准圆心同心的圆内</p> 		
		<p>每个被测轴线必须位于直径为公差值 0.1, 且以相对于 C、A、B 基准表面 (基准平面) 所确定的理想位置为轴线的圆柱面内</p> 		<p>公差带是公差值 ϕt 的圆柱面的区域, 该圆柱面的轴线与基准轴线同轴</p> 	<p>大圆的轴线必须位于公差值为 $\phi 0.08$, 且与公共基准线 A-B (公共基准轴线) 同轴的圆柱面内</p> 		
	<p>平面或中心平面的位置度公差</p>	<p>公差带是距离为公差值 t, 且以面的理想位置为中心对称配置的两平行平面之间的区域, 面的理想位置由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定</p> 		<p>被测表面必须位于距离为公差值 0.05, 且以相对于基准线 B (基准轴线) 和基准表面 A (基准平面) 所确定的理想位置对称配置的两平行平面之间</p> 	对称度公差	<p>公差带是距离为公差值 t, 且相对基准的中心平面对称配置的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测中心平面必须位于距离为公差值 0.08, 且相对于基准中心平面 A 对称配置的两平行平面之间</p> 
		<p>公差带是距离为公差值 t, 且以面的理想位置为中心对称配置的两平行平面之间的区域, 面的理想位置由相对于三基面体系的理论正确尺寸确定</p> 		<p>被测中心平面必须位于距离为公差值 0.08, 且相对于公共基准中心平面 A-B 对称配置的两平行平面之间</p> 			

续表 13.3-4

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释	
圆跳动公差	圆跳动公差是被测要素某一固定参考点围绕基准轴线旋转一周时(零件和测量仪器间无轴向位移)允许的最大变动量 t 。圆跳动公差适用于每一个不同的测量位置 注:圆跳动可能包括圆度、同轴度、垂直度或平面度误差。这些误差的总值不能超过给定的圆跳动公差		端面圆跳动公差			
	径向圆跳动公差 公差带是在垂直于基准轴线的任一测量平面内半径差为公差值 t ，且圆心在基准轴线上的两个同心圆之间的区域	当被测要素围绕基准线 A (基准轴线) 并同时受基准表面 B (基准平面) 的约束旋转一周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量均不得大于 0.1		公差带是在与基准同轴的任一半径位置的测量圆柱面上距离为 t 的两圆之间的区域	被测面围绕基准 D (基准轴线) 旋转一周时，在任一测量平面内的轴向跳动量均不得大于 0.1	
	跳动通常是围绕轴线旋转一整周，也可对部分圆周进行控制	被测要素绕基准线 A (基准轴线) 旋转一个给定的部分圆周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量不得大于 0.2		斜向圆跳动公差		
		当被测要素围绕公共基准线 A-B (公共基准轴线) 旋转一周时，在任一测量平面内的径向圆跳动量均不得大于 0.1		公差带是在与基准同轴的任一测量圆锥面上，距离为 t 的两圆之间的区域。除另有规定，其测量方向应与被测面垂直	被测面绕基准线 C (基准轴线) 旋转一周时，在任一测量圆锥面上的跳动量不得大于 0.1	
			公差带是在与基准同轴的任一给定角度的测量圆锥面上，距离为 t 的两圆之间的区域	被测曲面绕基准线 C (基准轴线) 旋转一周时，在任一测量曲面内的跳动量均不得大于 0.1		
			斜向 (给定角度的) 圆跳动公差			
			公差带是在与基准同轴的任一给定角度的测量圆锥面上，距离为 t 的两圆之间的区域	被测面绕基准线 A (基准轴线) 旋转一周时，在给定角度的任一测量圆锥面上的跳动量均不得大于 0.1		

续表 13.3.4

项目	公差带定义	标注和解释	项目	公差带定义	标注和解释
全 跳 动 公 差	径向全跳动公差		端面全跳动公差		
	公差带是半径差为公差值 t ，且与基准同轴的两圆柱面之间的区域	被测要素围绕基准线 $A-B$ 作若干次旋转，并在测量仪器与工件间同时作轴向移动，此时在被测要素上各点间的示值差均不得大于 0.1 ，测量仪器或工件必须沿基准轴线方向并相对于公共基准轴线 $A-B$ 移动	公差带是距离为公差值 t ，且与基准垂直的两平行平面之间的区域	被测要素围绕基准轴线 D 作若干次旋转，并在测量仪器与工件间作径向移动，此时，在被测要素上各点间的示值差均不得大于 0.1 ，测量仪器或工件必须沿着轮廓具有理想正确形状的线和相对于基准轴线 D 的正确方向移动	
					

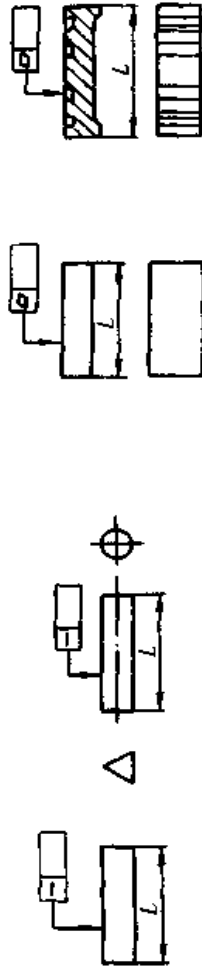
2 形位公差数值及应用 (GB/T 1184—1996)

表 13.3.5 未注形位公差的公差值 (mm)

直线度、平面度				垂直度			对称度			圆跳动												
基本长度	公差等级			基本长度	公差等级			基本长度	公差等级			公差等级										
	H	K	L		H	K	L		H	K	L	H	K	L								
≤10	0.02	0.05	0.1	≤100	0.2	0.4	0.6	≤100	0.5	0.6	0.6	0.1	0.2	0.5								
>10~30	0.05	0.1	0.2												>100~300	0.3	0.6	1.0	>100~300	0.5	0.6	1.0
>30~100	0.1	0.2	0.4												>300~1000	0.4	0.8	1.5	>300~1000	0.5	0.8	1.5
>100~300	0.2	0.4	0.8	>1000~3000	0.5	1.0	2.0	>1000~3000	0.5	1.0	2.0											
>300~1000	0.3	0.6	1.2																			
>1000~3000	0.4	0.8	1.6																			
公差项目	公差值																					
圆度	等于给出的直径公差值，但不能大于径向圆跳动值																					
圆柱度	不作规定。圆柱度误差由圆度、直线度和相对应线的平行度误差等三部分组成，而其中每一项误差均由它们的注出公差或未注公差控制；如因功能原因，圆柱度应小于圆度、直线度和平行度的未注公差的综合反应，应在被测要素上按 GB/T 1182 注出圆柱度公差数值，有时由于配合要求也可采用包容要求																					
平行度	等于给出的尺寸公差值或是直线度和平面度未注公差值的较大者																					
同轴度	未作规定。在极限状况下，同轴度的未注公差值可以和径向圆跳动的未注公差值相等																					

注：线轮廓度、面轮廓度、倾斜度与位置度的未注公差值均未作具体规定。

表 13.3-6 直线度、平面度公差值及应用举例

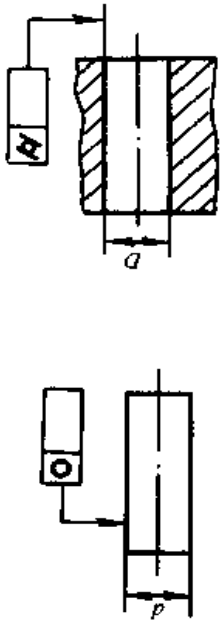


公差等级	主 参 数 L/mm													应 用 举 例															
	≤10	>10 ~ 16	>16 ~ 25	>25 ~ 40	>40 ~ 63	>63 ~ 100	>100 ~ 160	>160 ~ 250	>250 ~ 400	>400 ~ 630	>630 ~ 1 000	>1 000 ~ 1 600	>1 600 ~ 2 500		>2 500 ~ 4 000	>4 000 ~ 6 300	>6 300 ~ 10 000												
	公 差 值 / μm																												
1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	用于精密量具、测量仪器和精度要求极高的精密机械零件, 如高精度量规、样板平尺、工具显微镜等精密测量仪器的导轨面、喷油嘴针阀体端面, 油泵柱塞套端面等高精度零件
2	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	用于 0 级及 1 级宽平尺的工作面、1 级样板平尺的工作面, 测量仪器圆弧导轨、测量仪器测杆等			
3	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	用于量具、测量仪器和高精度机床的导轨, 如 0 级平板, 测量仪器的 V 形导轨, 高精度平面磨床的 V 形滚动导轨、轴承磨床床身导轨, 液压阀芯等						
4	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	用于 1 级平板、2 级宽平尺、平面磨床的纵导轨、垂直导轨、立柱导轨及工作台, 液压龙门刨床和六角车床床身的导轨、柴油机进、排气门导杆								
5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	用于普通机床导轨面, 如普通车床、龙门刨床、滚齿机、自动车床等的床身导轨、立柱导轨、滚齿机、卧式镗床、铣床的工作台及机床上轴箱导轨、柴油机体结合面等										
6	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	用于普通机床导轨面, 如普通车床、龙门刨床、滚齿机、自动车床等的床身导轨、立柱导轨、滚齿机、卧式镗床、铣床的工作台及机床上轴箱导轨、柴油机体结合面等												

续表 13.3-6

公差等级	主 参 数 L / mm													应 用 举 例			
	≤ 10	> 10 ~ 16	> 16 ~ 25	> 25 ~ 40	> 40 ~ 63	> 63 ~ 100	> 100 ~ 160	> 160 ~ 250	> 250 ~ 400	> 400 ~ 630	> 630 ~ 1 000	> 1 000 ~ 1 600	> 1 600 ~ 2 500		> 2 500 ~ 4 000	> 4 000 ~ 6 300	> 6 300 ~ 10 000
	公 差 值 / μm																
7	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	用于 2 级平板, 0.02 游标卡尺尺身, 机床床头箱体、摇臂钻床底座工作台、镗床工作台、液压泵盖等
8	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	用于机床传动箱体, 挂轮箱体, 车床溜板箱体, 主轴箱体, 柴油机汽缸体, 连杆分离面, 缸盖结合面, 汽车发动机缸盖、曲轴箱体及减速箱箱体的结合面等
9	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	用于 3 级平板、机床溜板箱、立钻工作台、螺旋磨床的挂轮架, 金相显微镜的载物台, 柴油机汽缸体, 连杆的分离面, 缸盖的结合面, 阀片的平面度, 空气压缩机的汽缸体、液压管件和法兰的球接面等
10	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	用于 3 级平板, 自动车床床身底面的平面度, 车床挂轮架的平面度, 柴油机汽缸体, 摩托车的曲轴箱体、汽车变速箱的壳体, 汽车发动机缸盖结合面、阀片的平面度, 以及辅助机构及手动机械的支承面
11	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1 000	用于易变形的薄片、薄壳零件, 如离合器的摩擦片、汽车发动机缸盖的结合面, 手动机械支架、机床法兰等
12	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1 000	1 200	1 500	2 000	

表 13.3-7 圆度、圆柱度公差值及应用举例



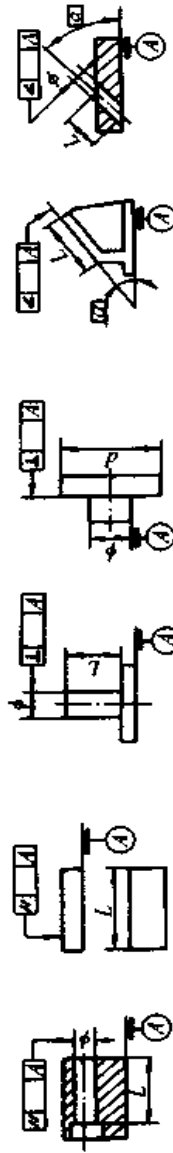
公差等级	主参数 $d(D)/\text{mm}$													应用举例
	公差值 / μm													
	≤ 3	$>3 \sim 6$	$>6 \sim 10$	$>10 \sim 18$	$>18 \sim 30$	$>30 \sim 50$	$>50 \sim 80$	$>80 \sim 120$	$>120 \sim 180$	$>180 \sim 250$	$>250 \sim 315$	$>315 \sim 400$	$>400 \sim 500$	
1	0.2	0.2	0.25	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	1	1.2	1.6	2	2.5	高精度量仪主轴、高精度机床主轴、滚动轴承滚珠和滚柱等
2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.8	1	1.2	2	2.5	3	4	精密量仪主轴、外套、阀套；高压油泵柱塞及套；纺织轴承、高速柴油机进、排气门，精密机床主轴轴颈、针阀圆柱表面、喷油泵柱塞及柱塞套
3	0.5	0.6	0.8	0.8	1	1	1.2	1.5	2	3	4	5	6	小工具显微镜套管外圆、高精度外圆磨床、轴承、磨床砂轮主轴套筒、喷嘴针阀体、高精度微型轴承内、外圈
4	0.8	1	1.2	1.5	1.5	1.5	2	2.5	3.5	4.5	6	7	8	较精密机床主轴、精密机床主轴箱孔；高压阀门活套、活套销、阀体孔；小工具显微镜顶针，高压油泵柱塞，较高精度滚动轴承配合的轴、铣床动力头箱体孔等
5	1.2	1.5	2	2.5	2.5	2.5	3	4	5	7	8	9	10	一般量仪主轴、测杆外圆、陀螺仪轴颈，一般机床主轴，较精密机床主轴箱孔，柴油机、汽油机活套、活套销孔，铣床动力头、轴承箱座孔，高压空气压缩机十字头销、活套，较低精度滚动轴承配合的轴
6	2	2.5	3	4	4	4	5	6	8	10	12	13	15	仪表端盖外圆，一般机床主轴及箱孔，中等压力液压装置工作面（包括泵、压缩机的活套和汽缸），汽车发动机凸轮轴，纺织、通用减速器轴轴颈，高速船用发动机曲轴，拖拉机曲轴轴颈
7	3	4	5	6	6	7	8	10	12	14	16	18	20	大功率低速柴油机曲轴；活套、活套销，连杆、汽缸；高速柴油机箱体孔、千斤顶或压力油缸活套，液压传动系统的分配机构，机车传动轴，水泵及一般减速器轴轴颈

续表 13.3-7

公差等级	主参数 $d(D)/\text{mm}$											应用举例			
	公差值 / μm														
	≤ 3	>3 ~ 6	>6 ~ 10	>10 ~ 18	>18 ~ 30	>30 ~ 50	>50 ~ 80	>80 ~ 120	>120 ~ 180	>180 ~ 250	>250 ~ 315		>315 ~ 400		
8		4	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27	低速发动机、减速器、大功率曲柄轴轴颈, 压气机连杆盖、体; 拖拉机汽缸体、活塞; 炼胶机冷铸轴辊, 印刷机传墨辊; 内燃机曲轴, 柴油机机体孔, 凸轮轴, 拖拉机, 小型船用柴油机汽缸套
9		6	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40	空气压缩机缸体, 液压传动筒, 通用机械连杆与拉杆同套筒销子, 拖拉机活塞环、套筒孔
10	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63	印染机导布辊、铰车、吊车、起重机的滑动轴承轴颈等	
11	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72	81	89	97		
12	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155		

表 13.3-8 平行度、垂直度、倾斜度公差值及应用举例

公差等级	主参数 $L, d(D)/\text{mm}$											应用举例					
	公差值 / μm																
	≤ 10	>10 ~ 16	>16 ~ 25	>25 ~ 40	>40 ~ 63	>63 ~ 100	>100 ~ 160	>160 ~ 250	>250 ~ 400	>400 ~ 630	>630 ~ 1000		>1000 ~ 1600	>1600 ~ 2500	>2500 ~ 4000	>4000 ~ 6300	>6300
1	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	平行度 垂直度和倾斜度
																	高精度机床、测量仪器以及量具等主要基准面和工作面



续表 13.3-8

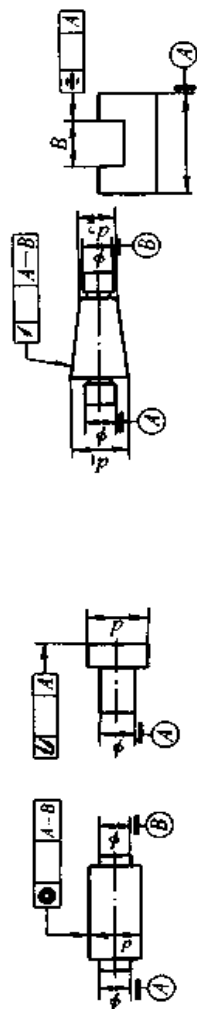
公差等级	主 参 数 $L, d(D)/mm$											应 用 举 例					
	≤ 10	$>10 \sim 16$	$>16 \sim 25$	$>25 \sim 40$	$>40 \sim 63$	$>63 \sim 100$	$>100 \sim 160$	$>160 \sim 250$	$>250 \sim 400$	$>400 \sim 630$	$>630 \sim 1000$		垂 直 度 和 倾 斜 度				
	公 差 值 $/\mu m$																
2	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	精密机床导轨、普通机床主要导轨、机床主轴轴向定位面；精密机床主轴肩端面、滚动轴承座端面、齿轮测量仪的心轴、光学分度头心轴、量具的基准面和端面
3	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	普通机床导轨、精密机床重要零件、普通机床重要支撑面、普通机床主轴偏摆、发动机轴和离合器的凸缘；汽缸的支撑端面、装4、5级轴承的箱体的凸肩、液压传动轴瓦端面、量具、量仪的重要端面
4	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	精密机床、测量仪器、量具及模具的基准面和端面、高精度轴承座圈、端盖、挡圈的端面
5	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	普通机床、测量仪器、量具及模具的基准面和端面、高精度轴承座圈、端盖、挡圈的端面
6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	一般机床零件的工作面或基准面、压力和锻锤的工作面、中等精度钻模的工作面、一般刀、量、模具；机床一般轴承孔对基准面的要求，床头箱一般孔间要求，变速器箱孔；主花键对定心直径、重型机械轴承盖的端面、卷扬机的传动轴、汽缸轴线的
7	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	低精度机床主要基准面和端面、回转工作台端面跳动、一般导轨、主轴箱体孔、刀架、砂轮架及工作台回转中心、机床轴肩、汽缸配合面对其轴线、活塞销孔对活塞中心线以及装6、0级轴承壳体孔的轴线等
8	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	低精度机床主要基准面和端面、回转工作台端面跳动、一般导轨、主轴箱体孔、刀架、砂轮架及工作台回转中心、机床轴肩、汽缸配合面对其轴线、活塞销孔对活塞中心线以及装6、0级轴承壳体孔的轴线等

续表 13.3-8

公差等级	主 参 数 $L, d(D)/mm$															应 用 举 例		
	公 差 值 / μm															平 行 度	垂 直 度 和 倾 斜 度	
	≤ 10	$>10 \sim 16$	$>16 \sim 25$	$>25 \sim 40$	$>40 \sim 63$	$>63 \sim 100$	$>100 \sim 160$	$>160 \sim 250$	$>250 \sim 400$	$>400 \sim 630$	$>630 \sim 1000$	$>1000 \sim 2500$	$>2500 \sim 4000$	$>4000 \sim 6300$	$>6300 \sim 10000$			
9	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	低精度零件、重型机械滚动轴承端盖、柴油机、燃气发动机的曲轴孔、轴颈等	花键轴轴肩端面、皮带输送机法兰盘端面、手动卷扬机及传动装置中轴承端面、减速器壳体平面等
10	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500		
11	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	零件的非工作面、卷扬机运输机上用的	农业机械齿轮端面等
12	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000		

表 13.3-9 同轴度、对称度、圆跳动和全跳动公差值及应用举例

公差等级	主 参 数 $d(D), B, L/mm$															应 用 举 例	
	公 差 值 / μm																
	≤ 1	$>1 \sim 3$	$>3 \sim 6$	$>6 \sim 10$	$>10 \sim 18$	$>18 \sim 30$	$>30 \sim 50$	$>50 \sim 120$	$>120 \sim 250$	$>250 \sim 500$	$>500 \sim 800$	$>800 \sim 1250$	$>1250 \sim 2000$	$>2000 \sim 3150$	$>3150 \sim 5000$		$>5000 \sim 8000$	$>8000 \sim 10000$
1	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	用于同轴度或旋转精度要求很高的零件，一般需要按尺寸公差 IT5 级或高于 IT5 级制造的零件；如 1、2 级用于精密测量仪器的主轴和顶尖，柴油机喷油嘴针阀等；3、4 级用于机床主轴轴颈、砂轮轴轴颈，汽轮机主轴，测量仪器的小齿轮轴，高精度滚动轴承内、外圈等
2	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	
3	1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	
4	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	



续表 13.3-9

公差等级	主 参 数 $d(D), B, L / \text{mm}$													应 用 举 例																							
	≤ 1	>1	>3	>6	>10	>18	>30	>50	>120	>250	>500	>800	>1250		>2000	>3150	>5000	>8000																			
	~3	~6	~10	~18	~30	~50	~120	~250	~500	~800	~1250	~2000	~3150		~5000	~8000	~10000																				
公 差 值 / μm																																					
5	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	3000	4000						
6	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000			
7	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000	20000		
8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000	20000	25000	30000	
9	15	20	30	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000	20000	25000	30000	40000	50000	60000	
10	25	40	50	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000	20000	25000	30000	40000	50000	60000	80000	100000	
11	40	60	80	100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000	20000	25000	30000	40000	50000	60000	80000	100000	120000	150000	200000
12	60	120	150	200	250	300	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000	12000	15000	20000	25000	30000	40000	50000	60000	80000	100000	120000	150000	200000	250000	300000	400000

应用范围较广的精度等级，用于精度要求比较高，一般按尺寸公差 IT6 或 IT7 级制造的零件；如 5 级精度常用在机床轴颈，测量仪器的测量杆、汽轮机主轴、柱塞油泵转子，高精度滚动轴承外圈，一般精度轴承内圈；如 7 级精度用于内燃机曲轴、凸轮轴轴颈、水泵轴、齿轮轴、汽车后桥输出轴、电机转子，0 级精度滚动轴承内圈、印刷机传墨辊等

用于一般精度要求，通常按尺寸公差 IT9~IT10 级制造的零件。如 8 级精度用于拖拉机发动机分配轴轴颈；9 级精度以下齿轮轴的配合面，水泵叶轮，离心泵泵体、棉花精梳机前后滚子；9 级精度用于内燃机汽缸套配合面，自行车中轴；10 级精度用于摩托车活塞、印染机导布辊，内燃机活塞环槽底径对活塞中心，汽缸套外圈对内孔等

用于无特殊要求，一般按尺寸精度 IT12 级制造的零件

3 形位公差的选择与应用

3.1 图样上是否注出形位公差的条件

形位公差的要求用一般机床加工能保证时,在图样上不必注出形位公差。但不注出形位公差并不是没有形位公差的要求,实际应符合 GB/T 1184 关于形位公差未注公差的规定。未注形位公差值通常不需一一检查,只在必要时作仲裁依据。

形位公差的要求高于或低于 GB/T 1184 关于形位公差未注公差规定的公差级别时,均应在图样上按 GB/T 1182 的规定明确标出。注出的形位公差值主要根据功能需要,尽可能采用标准化、系列化了的数值,具体可参考表 13.3-6~表 13.3-9 选取。

3.2 注出公差值的选用

1) 形位公差项目的选择 在充分了解零件各要素功能的基础上,结合工艺条件,按零件要素的几何特征、结构及零件的功能要求,综合考虑检测方便和经济性,分析对比形位公差项目的定义及特点,正确合理的选择公差项目,是保证零件质量的重要措施。

形位公差项目选择的基本原则是,在保证零件形位精度要求的前提下,应方法简便,尽可能减少形位公差的项目。

要素的几何特征是选择单一要素形状公差项目的基本依据,关联要素和基准间的几何方位关系是选择关联要素位置公差项目的基本依据。

圆柱要素的形状公差,选择圆柱度是理想的综合控制圆柱各形状误差的项目。但是,目前圆柱度检测不方便,因此,也可选用圆度、直线度和素线平行度分项控制,或者选用径向全跳动,因为径向全跳动可以同时控制圆柱度和同轴度误差。如果径向截面轮廓是圆柱形状误差主要要求时,则可只规定圆度公差,其他按未注形状公差要求。

具有公共轴线的两个回转体的位置公差,可以用同轴度、位置度或跳动来控制。应根据这些项目的特征,综合分析零件要素的结构特点和使用要求之后,方可确定所选用的项目。上述三个项目的特征:同轴度主要用于限制轴线间的偏

差;位置度以确定位置为主,适宜采用最大实体要求(MMR),检验采用综合量规;跳动是综合限制要素形位误差的项目,并且测量也方便。从具有公共轴线的两个回转体的要素特点及使用要求分析:加工制造的回转表面同时存在形状误差和位置误差,如圆柱弯曲及横截面轮廓不圆,其轴线的确定极为困难。因此,从结构特点和使用要求考虑,必须明确限制轴线的偏移,或者限制轴线偏移是主要指标时,选用同轴度是正确的。如果不要求区分出轴线及要素的形状和位置误差,则可以选用跳动或位置度;如允许应用最大实体要求,则采用位置度更为便利。跳动公差按公差带定义,只能用于以回转轴线为基准的回转面及端面,且不能应用最大实体要求,但跳动公差检测方便,且与工作状态比较吻合,在一定条件下,可用跳动限制某些项目的要求,如用径向圆跳动代替圆度(不计位置误差时),或代替同轴度(不计形状误差时),用端面全跳动限制端面对轴线的垂直度误差等。

公差项目替换列于表 13.3-10。

表 13.3-10 公差项目替换

综合控制项目	综合或单项控制项目
圆柱度	圆度、直线度、素线平行度
径向圆跳动 端面圆跳动 斜向圆跳动	同轴度、圆度 垂直度(不充分) 同轴度、圆度(不充分)
径向全跳动 端面全跳动	同轴度、圆柱度 垂直度

零件被测要素的实际位置、实际方向和实际形状,总是相互联系的。关联要素所测得的位置误差,是实际位置和形状的综合结果,即测得的位置误差包含有形状误差。当位置公差对形状公差的控制尚不能满足要素形状公差要求时,可再给出形状公差项目,其数值应小于位置公差值。

通常定位公差可以控制定向公差要求,如果定位公差对定向公差要求的控制尚不能满足时,可以进一步给出定向公差项目,其定向公差只能占定位公差的一部分,且其公差带只能包容在定位公差带之内。

2) 形位公差等级和公差值的选择 形位公差值的选用方法有类比法和计算法, 计算法目前应用较少, 常用类比法。类比法是根据已有的经验资料, 参照经生产验证的同类产品及类似零件的要求, 通过对比分析确定形位公差等级和数

值。采用类比法确定形位公差数值时, 应考虑如下几方面的问题:

①在满足零件功能要求的前提下, 尽量选用较低的公差等级。形位公差等级的应用可参考表 13.3-11。

表 13.3-11 形位公差等级应用举例

公差等级	直线度和平面度	圆度和圆柱度	面对面平行度	面对线、线对线平行度	垂直度	同轴度、对称度、圆跳动、全跳动
1	精密量具、测量仪器以及精度要求较高的精密机械零件, 如 0 级样板、平尺、工具显微镜等精密测量仪器的导轨面, 喷油嘴针阀体端面平面度, 油泵柱塞套端面的平面度等	高精度量仪主轴、高精度机床主轴、滚动轴承的滚珠、滚柱等	高精度机床、高精度测量仪器及量具等主要基准和工作面		高精度机床、高精度测量仪器以及量具等主要基准面和工作面	用于同轴度或旋转精度要求很高的零件, 一般要按尺寸公差 IT5 级或高于 IT5 级制造的零件。如 1、2 级用于精密测量仪器的
2		高压油泵柱塞及套, 纺锭轴承、高速柴油机进、排气门, 精密机床主轴轴颈、针阀圆柱面, 喷油泵柱塞及柱塞套	精密机床、精密测量仪器、量具以及夹具的基准面和工作面	精密机床上重要箱体主轴孔对基准面及对其他孔的要求	精密机床导轨, 普通机床重要导轨, 机床主轴轴向往定位面, 精密机床主轴肩端面, 滚动轴承座圈端面	的主轴和顶尖, 柴油机喷油针阀等; 3、4 级用于机床主轴轴颈、砂轮轴轴颈、汽轮机主轴, 高精度滚动轴承内、外圈等
3	用于 0 级及 1 级宽平尺工作面, 1 级样板平尺的工作面, 测量仪器圆弧导轨的直线度测量仪器的测杆等	工具显微镜套管外圆, 高精度外圆磨床轴承, 磨床砂轮主轴套筒, 喷油嘴针阀体, 高精度微型轴承内外圈				
4	量具、测量仪器和机床导轨。如测量仪器的 V 型导轨, 高精度平面磨床的 V 型导轨和滚动导轨, 轴承磨床及平面磨床床身直线度等	较精密机床主轴, 精密机床主轴箱孔, 高压阀门活塞、活塞销、阀体孔、高压油泵柱塞, 较高精度滚动轴承配合轴, 铣削动力头箱体孔等	普通机床, 测量仪器、量具的基准面和工作面, 高精度轴承座圈, 端盖, 挡圈的端面	机床主轴孔对基准面要求, 重要轴承孔对基准面要求, 主轴箱体重要孔间要求, 齿轮泵的端面等	普通机床导轨, 精密机床重要零件, 机床重要支承面, 普通机床主轴偏摆, 测量仪器、刀、量具, 液压传动轴瓦端面	

续表 13.3-11

公差等级	直线度和平面度	圆度和圆柱度	面对面平行度	面对线、线对线平行度	垂直度	同轴度、对称度、圆跳动、全跳动
5	平面磨床纵导轨、垂直导轨、立柱导轨和平面磨床的工作台、液压龙门刨床导轨面、滑鞍转塔车床床身导轨面、柴油机进排气门导杆等	一般机床主轴、较精密机床主轴及主轴箱孔、柴油机、汽油机活塞、活塞销孔、高压空气压缩机十字头销、活塞、较低精度滚动轴承配合轴等				应用范围较广的公差等级、用于精度要求比较高、一般按尺寸公差 IT6 或 IT7 级制造的零件。如 5 级常用在机床轴颈、汽轮机主轴、柱塞油泵转子、高精度滚动轴承外圈、一般精度轴承内圈；6、7 级用在内燃机曲轴、凸轮轴轴颈、水泵轴、齿轮轴、汽车后桥输出轴、电机转子、0 级精度滚动轴承内圈、印刷机传墨辊等
6	卧式车床床身及龙门刨床导轨面、滚齿机立柱导轨、床身导轨及工作台、自动车床床身导轨、平面磨床垂直导轨、卧式镗床、铣床工作台及机床主轴箱导轨、柴油机进排气门导杆直线度、柴油机机体上部结合面等	一般机床主轴及箱体孔、中等压力下液压装置工作面(包括泵、压缩机的活塞和汽缸)、汽车发动机凸轮轴、纺锭子、通用减速器轴颈、高速船用发动机曲轴、拖拉机曲轴轴颈	一般机床零件的工作面和基准面、一般刀、量、夹具	机床一般轴承孔对基准面要求、主轴箱一般孔间要求、主轴花键对定心直径要求、刀、量、模具	普通精度机床主要基准面和工作面、回转工作台端面、一般导轨、主轴箱体孔、刀架、砂轮架及工作台回转中心、一般轴肩对其轴线	
7	机床主轴箱体、滚齿机床身导轨的直线度、镗床工作台、摇臂钻底座工作台、柴油机气门导杆、液压泵盖的平面度、压力机导轨及滑块	大功率低速柴油机曲轴、活塞、活塞销、连杆、汽缸、高速柴油机箱体孔、千斤顶或压力油缸活塞、液压传动系统的分配机构、机车传动轴、水泵及一般减速器轴颈				
8	车床溜板箱体、机床主轴和传动箱体、自动车床底座的直线度、汽缸盖结合面、汽缸座、内燃机连杆分离面的平面度、减速器壳体结合面	低速发动机、减速器、大功率曲柄轴轴颈、压气机连杆杆盖、体、拖拉机汽缸体、活塞、炼胶机冷铸轴辊、印刷机传墨辊、内燃机曲轴、柴油机机体孔、凸轮轴、拖拉机、小型船用柴油机汽缸套				用于一般精度要求，通常按尺寸公差 IT9 或 IT10 级制造的零件。8 级用于拖拉机、发动机分配轴轴颈，9 级以下齿轮轴的配合面、水泵叶轮、离心泵泵体、棉花精梳机前后滚子；9 级用于内燃机汽缸套配合面、自行车中轴；10 级用于摩托车活塞、印染机导布辊、内燃机活瓣环槽底径对活塞中心、汽缸套外圈对内孔等
9	机床溜板箱、钻床工作台、螺纹磨床的交换齿轮架、柴油机汽缸体连杆的分离面、缸盖的结合面、阀片的平面度、锻压机汽缸体、柴油机缸孔环面的平面度、以及手动机械的支承面	空压机缸体、液压传动筒、通用机械杠杆与拉杆用套筒销孔、拖拉机活塞环、套筒孔	低精度零件、重型机械滚动轴承端盖	柴油机和煤气发动机的曲轴孔、轴颈等	花键轴轴肩端面、皮带运输机法兰盘等端面、手动卷扬机及传动装置中轴承端面、减速器壳体平面等	

续表 13.3-11

公差等级	直线度和平面度	圆度和圆柱度	面对面平行度	面对线、线对线平行度	垂直度	同轴度、对称度、圆跳动、全跳动
10	自动车床床身底面的平面度, 车床交换齿轮架的平面度, 柴油机汽缸体、摩托车的曲轴箱体, 汽车变速箱的壳体与汽车发动机缸盖结合面, 阀片的平面度, 以及液压、管件和法兰的联接面等	印染机导布辊、绞车、吊车、起重机滑动轴承轴颈等				
11、12	用于易变形的薄片零件, 如离合器的摩擦片, 汽车发动机缸盖的结合面等		零件的非工作面, 卷扬机, 运输机用的减速器壳体平面		农业机械齿轮端面等	用于无特殊要求, 一般按尺寸公差 IT12 级制造的零件

注: 1. 在满足零件的功能要求前提下, 考虑到加工的经济性, 对于线对线和线对线的平行度和垂直度公差等级, 应选用低于面对面的平行度和垂直度公差等级。

2. 使用本表选择面对面平行度和垂直度时, 宽度应不大于 1/2 长度; 若大于 1/2, 则降低一级公差等级选用。

②考虑零件的结构特点和工艺性, 对于刚性差的零件(如细长轴)和具有某种结构特点的要素(如跨距较大的孔、轴), 加工和测量时都较难保证形位精度。对于下列情况, 考虑到加工的难易程度和除主参数外其他参数的影响, 在满足零件功能的要求下, 适当降低 1~2 级选用。

a) 孔相对于轴;
b) 细长比较大的轴或孔;
c) 距离较大的轴或孔;
d) 宽度较大(一般大于 1/2 长度)的零件表面;

e) 线对线和线对面相对于面对面的平行度;
f) 线对线和线对面相对于面对面的垂直度。

③考虑各种加工方法所能达到的直线度和平面度公差等级(见表 13.3-12); 平行度、垂直度、倾斜度的公差等级(见表 13.3-13); 圆度、圆柱度公差等级(见表 13.3-14); 圆跳动、全跳动、同轴度、对称度的公差等级(见表 13.3-15)。

④综合考虑形状、位置和尺寸等三种公差的

相互关系。形状公差、位置公差和尺寸公差的关系一般为:

$$T_{\text{形状}} < T_{\text{位置}} < T_{\text{尺寸}}$$

在同一要素上给出的形状公差值应小于位置公差值; 平行的两个表面, 其平面度公差值应小于平行度公差值;

圆柱形零件的形状公差值(轴线的直线度除外)一般情况下应小于其尺寸公差值;

平行度公差值应小于其相应的距离公差值。

a) 形状公差和位置公差的关系 位置公差可以控制相应的形状误差。综合的形状公差可以控制单项的形状误差, 如圆度公差可控制该要素的圆度误差和素线直线度误差; 表面的平面度公差可控制该要素的直线度误差; 曲面的面轮廓度公差可控制该要素的线轮廓度误差等。定向公差可控制与其有关的形状误差, 如面的平行度公差可以控制该表面的平面度和直线度误差; 轴线的垂直度公差可控制该轴线的直线度误差等。定位公差可控制与其有关的形状和定向误差, 如轴

表 13.3-16 各级圆度、圆柱度公差占相应级尺寸公差的百分比

尺寸公差等级	圆度、圆柱度公差等级	公差带相应所占的百分比	尺寸公差等级	圆度、圆柱度公差等级	公差带相应所占的百分比	尺寸公差等级	圆度、圆柱度公差等级	公差带相应所占的百分比
IT01	0	66	IT5	4	40	IT9	10	80
IT0	0	40		5	60	IT10	7	15
	1	80		6	95		8	20
IT1	0	25	IT6	3	16		9	30
	1	50		4	26	10	50	
	2	75		5	40	11	70	
IT2	0	16	IT7	6	66	IT11	8	13
	1	33		7	95		9	20
	2	50		4	16		10	33
	3	85		5	24		11	46
IT3	0	10	IT8	6	40	IT12	12	83
	1	20		7	60		9	12
	2	30		8	80		10	20
	3	50		5	17		11	28
	4	80		6	28		12	50
IT4	1	13	IT9	7	43	IT13	10	14
	2	20		8	57		11	20
	3	33		9	85		12	35
	4	53		6	16		11	11
	5	80		7	24		12	20
IT5	2	15	IT9	8	32	IT14	12	20
	3	25		9	48				IT15	12	12

c) 位置公差和尺寸公差的关系 平行度、垂直度和倾斜度公差等级与尺寸公差等级的对应关系见表 13.3-17。同轴度、对称度、圆跳动和全跳动公差等级与尺寸公差等级的对应关系见表 13.3-18。

表 13.3-17 平行度、垂直度和倾斜度公差等级与尺寸公差等级的对应关系

平行度(线对线、面对面)公差等级	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
尺寸公差等级(IT)				3, 4	5, 6	7, 8, 9	10, 11, 12	12, 13, 14	14, 15, 16	
垂直度和倾斜度公差等级	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
尺寸公差等级(IT)		5	6	7, 8	8, 9	10	11, 12	12, 13	14	15

表 13.3-18 同轴度、对称度、圆跳动和全跳动公差等级与尺寸公差等级的对应关系

同轴度、对称度、径向圆跳动、径向全跳动公差等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
尺寸公差等级 (IT)	2	3	4	5	6	7, 8	8, 9	10	11, 12	12, 13	14	15
端面圆跳动、斜向圆跳动、端面全跳动公差等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
尺寸公差等级 (IT)	1	2	3	4	5	6	7, 8	8, 9	10	11, 12	12, 13	14

⑤考虑形状公差与表面粗糙度的关系 单一表面的形状公差与表面粗糙度的要求应协调。零件表面几何形状误差包括形状误差（即宏观的几何形状误差）和表面粗糙度（即微观的几何形状误差）两类。在一定的加工条件下，两者存在着一定的比例关系。为保证形状公差，应以下列几种情况考虑限制其最大表面粗糙度 R_a 值。

a) 对于一般中等精度，表面粗糙度的 R_a 值约占形状公差的 25% ~ 20%。

b) 对于高精度，其表面粗糙度相对形状公差应取较大比例，一般对圆柱面取 1/2，对平面

取 1。

c) 对低精度、小尺寸零件，其形状公差与表面粗糙度也取较大的比例。

d) 对于长度与直径的比值较大的零件，由于加工易振动，使表面粗糙，故也取较大的比例。

直线度、平面度各公差等级所要求的最高表面粗糙度 R_a 值见表 13.3-19；圆度、圆柱度各公差等级所要求的最高表面粗糙度 R_a 值见表 13.3-20。

表 13.3-19 直线度、平面度各公差等级所要求的最大表面粗糙度 R_a 值 (μm)

主参数/ mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 25	0.025	0.05	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	1.6	1.6	3.2	6.3
$> 25 \sim 160$	0.05	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5
$> 160 \sim 1\,000$	0.1	0.2	0.4	0.4	0.8	1.6	1.6	3.2	3.2	6.3	12.5	12.5
$> 1\,000 \sim 10\,000$	0.2	0.4	0.8	1.6	1.6	3.2	6.3	6.3	12.5	12.5	12.5	12.5

表 13.3-20 圆度、圆柱度各公差等级所要求的最大表面粗糙度 R_a 值 (μm)

主参数/ mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
≤ 6	0.012	0.012	0.025	0.05	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	3.2
$> 6 \sim 30$	0.012	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5
$> 30 \sim 120$	0.025	0.05	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	12.5
$> 120 \sim 315$	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	1.6	3.2	6.3	12.5	12.5	12.5
$> 315 \sim 500$	0.2	0.2	0.4	0.8	1.6	1.6	3.2	6.3	12.5	12.5	12.5	12.5

④根据选择的公差等级和确定的主参数尺寸,由表13.3-6~表13.3-9确定要素相应的公差值。各形位公差项目的主参数按表13.3-21确定。

表 13.3-21 形位公差各项目的主参数

形位公差项目	主 参 数
直线度、平面度	长度 L
圆度、圆柱度	直径 $d(D)$
平行度、垂直度、倾斜度	长度 L 、直径 $d(D)$
同轴度、对称度、圆跳动、全跳动	直径 $d(D)$ 、宽度 B 、长度 L

3.3 未注公差值的应用

应用未注公差的总原则是:实际要素只要在图样上有给定的各种要求(包括注出的尺寸和形位公差,某些专门的规定和特定的工艺方法等)将形位误差控制在某种限度之内,就不必用未注公差来限定。只有当图样上所有要求都无法控制形位误差时,才需要用 GB/T 1184—1996 中规定的未注公差来限定。

形位公差的未注公差值既适用于遵守独立原则的零件要素,也适用于遵守包容要求的零件要素,在要素处处都是最大实体尺寸时也适用。

图样上大部分要素没有注出形位公差框格或有关这方面的文字说明时,意味着这些要素的形位公差由一般的加工方法已能保证,不必再说明或提出多余的要求。这些要素一般不需要检测,只有在调整机床工具时作首检或产生争执时作仲裁用。

对于形状和位置公差 14 个项目的未注公差,在应用时应注意以下几点。

1) 对于直线度、平面度和对称度等项目,其本身的定形尺寸(直线的长度,平面的长×宽,对称平面的轮廓要素)不能对上述误差进行控制,如没有其他规定限制时,它们的未注形位公差按 GB/T 1184 的规定(见表 13.3-5)。

2) 对于上述项目和同轴度,如图样中的规定已能控制,则不必再用未注公差控制。

3) 在确定平面度未注公差时,应以被测表面上的长边作为主参数查取平面度未注公差值。

4) 直线度未注公差应用于圆柱要素时,只

需限制素线直线度的未注公差,因其必然限制住轴线直线度的误差。

5) 需要检测同轴度、对称度的未注公差时,应注意选择较大、较稳定的支承面作基准,也可以根据零件的功能确定基准。当遇到阶梯轴孔时,应选择起支承、定位作用的轴或孔的公共轴线作基准。

6) 直线度、平面度、垂直度、对称度的未注公差值表中所列数值仅适用于机械加工零件,对于那些非机械加工的零件要素不宜采用。

7) 圆度是自身尺寸公差能够控制形位误差的项目。对于“圆度的未注公差值等于给出的直径公差值”这一规定,是考虑了棱圆情况而作出的。一般的圆度误差如椭圆、任意波浪形等可控制在 $\frac{1}{2}$ 尺寸公差内。

a) 直径尺寸后面若不标注符号④,按独立原则,其直径尺寸用两点法测量。

b) 直径尺寸后面若标注符号④,按包容要求,其圆度误差受最大实体边界控制,一般的圆度误差不会大于尺寸公差值的一半,但棱圆误差最大可达尺寸公差值。

8) 圆柱度也属于可用尺寸公差控制的项目,另外还与被测要素是否遵守包容要求有关。因此,确定圆柱度未注公差值有两种情况:

a) 对于标有④的圆柱度,其圆柱度应遵守包容要求规定,圆柱度误差被控制在尺寸公差带内,不能超出,即在最大实体边界之内。当实际直径处处都为最大实体尺寸时,其允许的圆柱度误差为零,即不允许出现圆柱度误差值。

b) 对于不标④的圆柱表面,按独立原则,其圆柱度由圆度和素线的直线度未注公差值以及尺寸公差分别控制。

9) 平行度误差也是可用尺寸公差控制的项目。也分为两种情况:

a) 标有符号④,其平行度遵守包容要求,平行度公差控制在尺寸公差内,即在最大实体边界之内。

b) 不标符号④,由平面度或直线度的未注公差和平行要素间的尺寸公差分别控制。

对于线对线、线对面和面对线等平行度:

不存在标④的情况,当图样上所有标注都控制不住这类平行度时,由要素的平面度、直线度

未注公差和尺寸公差控制。

10) 未注公差的垂直度和倾斜度误差, 虽不能由自身尺寸公差控制, 但可由角度公差(若定向角未注公差时, 按角度未注公差)和要素自身的形状未注公差(如平面度、直线度)分别控制, 即在检验工件时, 除角度公差合格外, 其要素本身未注形状公差还需合格。

11) 未注圆跳动和全跳动公差, 其误差值由被测要素的形状(如圆度、圆柱度)和位置(如同轴度)的未注公差所产生的综合结果来控制, 其跳动误差的最大值不应超过该被测要素的形状和位置未注公差的总和。圆跳动(包括径向、端面和

斜向)的未注公差值也可按 GB/T 1184 中的规定(见表 13.3-5)。

12) 对于线、面轮廓度和位置度, 如果在图样上未注出公差值, 则必然会注有相应的定形尺寸和定位尺寸。这时完全可以由这些尺寸的公差(未注公差)来控制该要素的形状和位置。因此, 不必要专门考虑它们的未注公差值。

对于以上 14 项形位公差, 由于各自的特点不同, 所以其未注公差的取值和控制方法也不完全相同, 需根据具体情况确定。

形位公差未注公差值的确定方法列于表 13.3-22。

表 13.3-22 未注公差值的确定方法

项 目	与自身尺寸公差的关系		未注公差值的确定方法
	控制情况	是否遵守包容要求	
圆 度	自身尺寸公差(包括角度公差)能控制的形位公差	—	等于给出的直径公差值, 但不能大于表 13.3-5 的径向圆跳动值
圆 柱 度		遵守	必须在最大实体边界之内, 可充满整个尺寸公差带。当处处都为最大实体尺寸时, 圆柱度误差为 0
		不遵守	由圆度、素线的直线度未注公差控制(限于用两点法测量)
平行度		遵守	必须在最大实体边界之内, 其未注公差值等于给出的尺寸公差值或直线度和平面度未注公差值中的较大者
		不遵守	由平面度、直线度未注公差值控制
垂直度 倾斜度	—	由角度公差和要素自身的直线度或平面度未注公差值分别控制。垂直度未注公差值可从表 13.3-5 中选取	
直线度 平面度	尺寸公差不能控制的形位公差	—	由表 13.3-5 选取
同轴度		—	未规定。在极限状态下, 和表 13.3-5 规定的径向圆跳动的未注公差值相等
对称度		—	由表 13.3-5 选取
圆跳动	—	—	由表 13.3-5 选取
全跳动	不需给定未注公差值的形位公差	—	未给出。由相应的形状公差(如圆度、圆柱度)和位置公差(如同轴度)未注公差值控制
线轮廓度 面轮廓度 位置度		—	未给出。由相应的定位、定形尺寸公差控制

3.4 形位公差综合应用实例

例1 图13.3-1为圆柱齿轮零件图。试根据零件的功能和装配要求,确定形位公差项目、公差等级和公差值,并按规定标注在零件图上。

依据形位公差的选择方法,在图样上给出六项形位公差要求,其说明列于表13.3-23。

例2 图13.3-2为摇臂钻床主轴套零件图。试根据零件的功能和装配要求,确定形位公差等级和形位公差值,并按规定标注在零件图上。

1) 两端 $\phi 68j6$ 孔形位公差的选择 两端 $\phi 68j6$ 孔用于安装轴承,支承主轴运转,所以孔自身尺寸公差要求较高,并应有形位公差要求。

①为保证 $\phi 68j6$ 孔的轴线与 $\phi 80h5$ 轴线同轴要求,应给出同轴度公差要求。考虑到测量方便,可以给出径向圆跳动公差要求,圆跳动公差合格了,同轴度也必定合格。

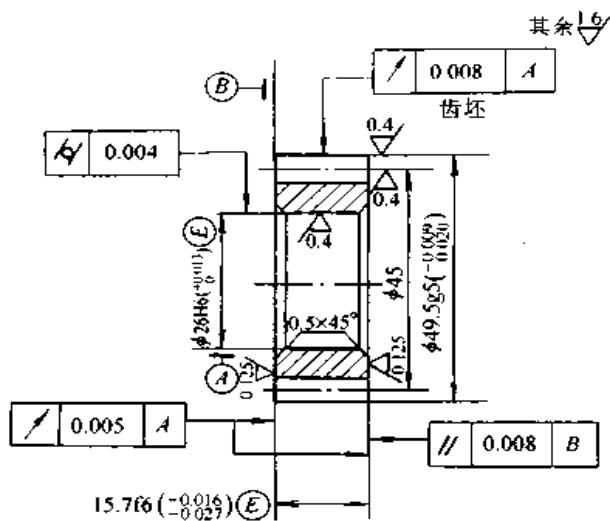
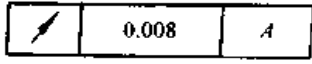
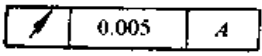
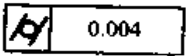
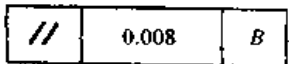


图13.3-1 圆柱齿轮

表13.3-23 图13.3-1所示形位公差代号的说明

代号	读法	说明
$\phi 26H6 \left(\begin{smallmatrix} +0.013 \\ 0 \end{smallmatrix} \right) \textcircled{1}$	$\phi 26H6$ ①孔应遵守包容要求	①尺寸公差后加①是表示遵守包容要求,其形位误差不得超过尺寸公差。实际圆柱面必须位于直径为最大实体尺寸的理想圆柱面的包容面内 ②检验尺寸公差时应遵守极限尺寸判断原则
$15.7f6 \left(\begin{smallmatrix} -0.016 \\ -0.027 \end{smallmatrix} \right) \textcircled{1}$	15.7f6 ①的两平行平面应遵守包容要求	①尺寸公差加注①是表示遵守包容要求,两平面的平行度误差不得超过尺寸公差 ②检验尺寸应遵守极限尺寸判断原则
	齿坯外圆对基准A的径向圆跳动公差为0.008 mm	公差带是在垂直于基准A的任一测量平面内,半径为公差值0.008 mm,且圆心在基准轴线上的两同心圆之间的区域
	左右端面对基准A(轴线)的端面圆跳动公差为0.005 mm	公差带是在与基准轴线A同轴的任一直径位置的测量圆柱面上,沿母线方向宽度为公差值0.005 mm的圆柱面内区域
	$\phi 26H6$ ②孔的圆柱面的圆柱度公差为0.004 mm	①被测要素为整个圆柱面 ②公差带是半径为0.004 mm的两同轴圆柱面内的区域 ③实际要素必须位于两同轴圆柱面之间的公差带和直径为最大实体尺寸理想圆柱面的包容面内
	左右两端面的平行度公差为0.008 mm	公差带是距离为0.008 mm的两平行平面之间的区域

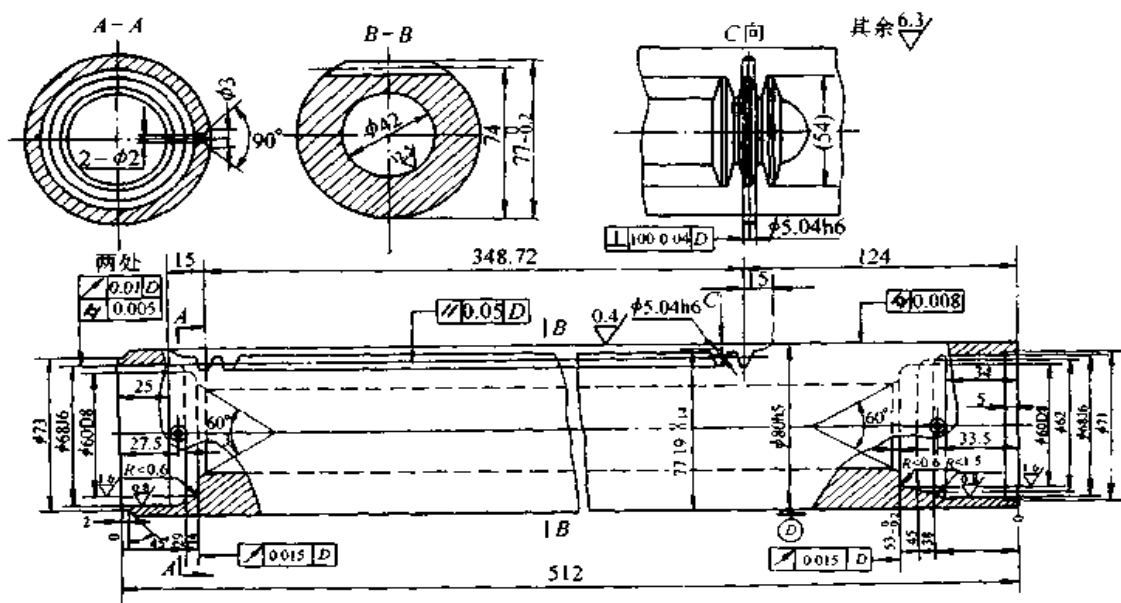


图 13.3-2 摇臂钻床主轴套

②为保证装入两端 $\phi 68J6$ 孔的轴承不受损坏, $\phi 68J6$ 孔表面必须有一定的圆度和圆柱度, 所以给出圆柱度公差要求。

③形位公差项目确定后, 根据孔尺寸公差等级较高对相应的形位公差要求也高的原则, 根据加工方法选择形位公差。如采用普通镗床加工, 查表 13.3-15 加工方法所能达到的圆跳动公差等级为 4~7 级, 选定径向圆跳动公差等级 5 级为宜, 查表 13.3-9, 取其公差值为 0.01 mm。查表 13.3-14 加工方法所能达到的圆柱度公差等级为 5~8 级, 选定圆柱度公差等级 6 级, 查表 13.3-7, 取其公差值为 0.005 mm。

2) $\phi 80h5$ 轴表面形位公差的选择 为保证 $\phi 80h5$ 外圆柱面与套筒内圆柱面配合间隙均匀, 对 $\phi 80h5$ 轴表面提出了圆柱度要求。

可采用形状公差等级与尺寸公差等级的对应关系(表 13.3-16)或形状公差等级与表面粗糙度的对应关系(表 13.3-20)来确定形位公差等级。但从 $\phi 80h5$ 与 $\phi 68J6$ 的配合关系来看, $\phi 80h5$ 为间隙配合, 而 $\phi 68J6$ 为过渡配合; 所以对 $\phi 80h5$ 的形状公差要求相对可以降低一些, 选定圆柱度公差等级为 7 级, 查表 13.3-7, 取公差值为 0.008 mm。

3) 两端 $\phi 60D8$ 孔的端面形位公差的选择 两孔是装推力轴承的, 为保证孔端面与推力轴承相接触, 应避免端面产生轴向跳动, 所以应有端

面圆跳动的形位公差要求。

对端面圆跳动公差等级的选择, 可根据形位公差等级与尺寸公差等级的对应关系来确定, 查表 13.3-18 端面圆跳动一栏尺寸公差等级, 对应的较高的形位公差等级是 7 级。查表 13.3-9, 取公差值为 0.025 mm。

4) 齿间对称中心面形位公差的选择 为保证主轴作上下垂直滑动, 要求齿条必须垂直于 $\phi 80h5$ 的轴线, 所以要由垂直度公差来保证。

对垂直度公差等级的选择, 可根据齿条的检验棒尺寸公差等级 IT6 级, 齿间相当于孔, 按孔相对轴可降低 1~2 级等级选择的原则, 齿间可选尺寸公差等级为 IT8 级, 查表 13.3-17, 8 级尺寸公差等级对应的垂直度公差等级为 6 级。按齿条长 54 mm 的尺寸分段, 查表 13.3-8, 取公差值为 0.02 mm。在图样上标注时, 应标在检验棒上, 若检验棒的长度为 100 mm, 其公差值也应为 2 倍, 即 0.04 mm。

5) 各齿条分度线形位公差的选择 为保证主轴套作上下滑动时与套筒配合间隙均匀, 必须要求各齿条分度线构成的分度面与 $\phi 80h5$ 的轴线平行, 所以要由给出的平行度公差来保证。

对平行度公差等级的选择, 因同一个齿条均以 $\phi 80h5$ 的轴线为基准, 所以, 平行度可选取与垂直度为同一形位公差等级 6 级, 查表 13.3-8, 取公差值为 0.05 mm。

4 公差原则的应用

GB/T 4249—1996 和 GB/T 16671—1996 规定了确定尺寸（线性尺寸和角度尺寸）公差和形位公差之间相互关系的原则，即独立原则、包容要求、最大实体要求、最小实体要求和可逆要求。这些公差原则适用于技术制图和有关文件中的尺寸、尺寸公差和形位公差，以确定零件要素的大小、形状和位置特征。

公差原则的选用应从零件的功能要求出发，结合零件的使用性能和要求，以及制造工艺、装配、检验的可能性与经济性等进行具体的分析，

对于尺寸公差与形位公差需要分别满足要求，两者不发生联系的要素，采用独立原则；对于尺寸公差与形位公差需要发生联系，用理想边界综合控制的要素，采用相关要求。根据所需用的理想边界的不同，当用最大实体边界控制时，采用包容要求；当用最大实体实效边界控制时，采用最大实体要求（包括可逆要求应用于最大实体要求）；当用最小实体实效边界控制时，采用最小实体要求（包括可逆要求应用于最小实体要求）。独立原则及各种相关要求的应用场合、边界、极限尺寸，常用的测量手段见表 13.3-24。

表 13.3-24 公差原则的应用范围及测量方法

公差原则	应用对象		标注符号	应用场合	被测要素应遵循的边界	被测要素的极限尺寸		测量手段	
	要素	项目				最大实体尺寸	最小实体尺寸	形位误差	实际尺寸
独立原则	轮廓要素、中心要素	形位公差各项	无	应用广泛，是形位公差和尺寸公差关系所遵循的一项基本原则，不论尺寸和形位的精度要求如何，均可采用。如两孔之间的尺寸公差和它们的同轴度要求；辘子的尺寸公差和它的圆柱度要求等	无控制边界	局部实际尺寸	局部实际尺寸	通用量仪控制形位误差不超过给定值	两点测量控制其局部实际尺寸不超过最大和最小实体尺寸
相关要求	包容要求	适用于单一要素，如圆柱表面或两平行表面	①	单一要素。主要满足配合性能，如与滚动轴承相配的轴颈等，或必须遵守最大实体状态边界，如轴、孔的作用尺寸不允许超过最大实体尺寸，要素的任意局部实际尺寸不得超过最小实体尺寸	最大实体边界	最大实体边界尺寸	局部实际尺寸	通端极限量规控制其作用尺寸不超过其最大实体边界尺寸	通端极限量规控制最大实体尺寸；止端极限量规控制最小实体尺寸
	最大实体要求	中心要素	② ③	满足装配要求但无严格的配合要求时采用，如螺栓孔轴线的位置度、两轴线的平行度等 满足装配要求。由②或③转成④或⑤可增大尺寸公差，扩大零件合格率，提高加工经济性	最大实体实效边界	局部实际尺寸	局部实际尺寸	综合量规控制其最大实体实效边界 综合量规或专用检具控制其体外作用尺寸不超过其最大实体边界尺寸	两点测量控制其最大实体尺寸，两点法测量其最小实体尺寸

续表 13.3-24

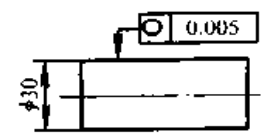
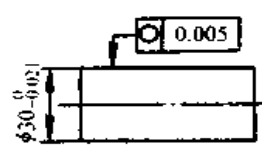
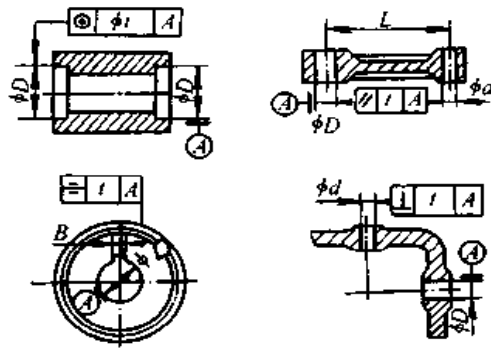
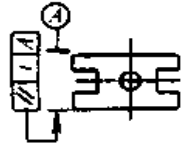
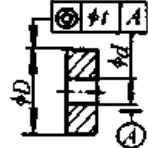
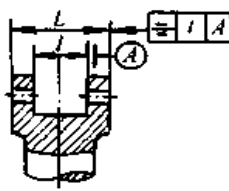
公差原则	应用对象		标注符号	应用场合	被测要素应遵循的边界	被测要素的极限尺寸		测量手段		
	要素	项目				最大实体尺寸	最小实体尺寸	形位误差	实际尺寸	
相关要求	最小实体要求	中心要素	同轴度位置度	①	满足临界设计值的要求, 以控制最小壁厚, 提高对中度, 保证强度	最小实体实效边界	局部实际尺寸	局部实际尺寸	三坐标测量机等测量仪经数据处理控制其最小实体实效边界	通用量仪控制最小实体实效尺寸, 两点法测量最大实体尺寸
				0①	同①。由 r ①或 ϕ ①转为 0 ①或 ϕ 0 ①可扩大零件合格率	最小实体边界	局部实际尺寸	最小实体边界尺寸	三坐标测量机等测量仪经数据处理后控制其最小实体实效边界	通用量仪控制最小实体尺寸, 两点法测量最大实体尺寸
	可逆要求	中心要素	适用于②和③的各项目	②③	对最大实体尺寸没有严格要求的场合	最大实体实效边界	最大实体实效尺寸	最小实体尺寸	综合量规控制其最大实体实效边界	两点法测量其最小实体尺寸
				④⑤	对最小实体尺寸没有严格要求的场合	最小实体实效边界	最大实体尺寸	最小实体实效尺寸	三坐标测量机控制其最小实体实效边界	通用量仪控制其最小实体尺寸, 两点法测量其最大实体尺寸

4.1 独立原则的应用 (表 13.3-25)

表 13.3-25 独立原则的应用

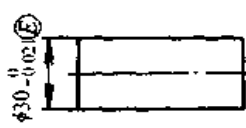
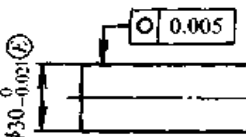
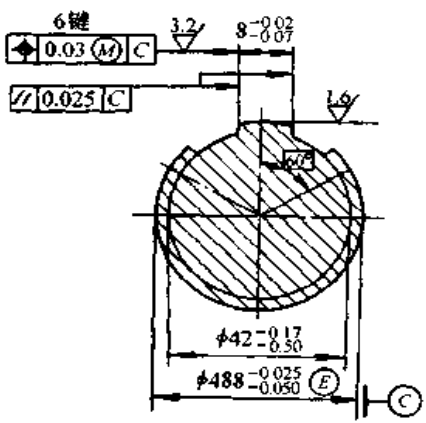
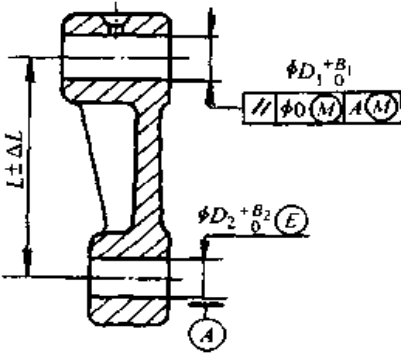
应用要点	应用示例	说明
1) 独立原则按其定义是图样上给出的形状、位置公差与尺寸公差相互没有关系, 检测时分别进行各自满足本身的要求的公差原则。被测要素不存在尺寸与形位的综合要求, 独立原则没有控制边界, 只有各自的控制极限		销轴, 未注尺寸公差和形状公差
		极限尺寸不控制轴线直线度误差和由棱圆形成的圆度误差。实际要素的局部实际尺寸由给定的极限尺寸控制, 形状误差由未注形状公差控制, 两者分别满足要求

续表 13.3-25

应用要点	应用示例	说明
<p>2) 独立原则是产品设计中处理尺寸与形位关系的主要原则和基本原则, 因此 ISO 标准和各国标准对于绝大多数情况下采用的原则不加以任何符号, 以方便设计和制造者。我国标准与世界各国标准是一致的, 独立原则无符号。也即图样上除了采用相关要求时需标出 $\textcircled{1}$、\textcircled{M}、\textcircled{L}、\textcircled{U}、\textcircled{R} 和 \textcircled{L}、\textcircled{R} 外, 其他各要素均采用独立原则, 不加注任何符号</p>		<p>未注尺寸公差, 注出形状公差。最大极限尺寸与最小极限尺寸之间任何实际尺寸的圆度公差都是 $\phi 0.005 \text{ mm}$</p>
<p>3) 采用独立原则时, 零件实际尺寸应符合尺寸公差要求, 不论实际尺寸如何, 被测要素的形位误差始终受给定的形位公差值控制</p>		<p>极限尺寸不控制轴线直线度误差和由棱圆形成的圆度误差。实际要素的局部实际尺寸由给定的极限尺寸控制, 形状误差由圆度公差控制, 两者分别满足要求</p>
<p>4) 独立原则的应用场合: 对形位精度要求严格, 而单独加以控制而不允许受尺寸影响的要素; 形位精度要求较高, 尺寸精度要求低的要素; 尺寸精度要求较高, 形位精度要求低的要素; 形位与尺寸本身无必然联系的要素; 形位与尺寸均要求较低的非配合要素; 未注形位公差与注出尺寸公差的要素; 可与尺寸发生关系, 但要求互相不影响的要素</p>		<p>影响装配和工作时的过盈或间隙的均匀性, 因而影响密封、压合紧度部位</p> <p>影响零件运动精度的部位</p>
		<p>影响摩擦寿命的部位, 如滑块两工作表面的平行度</p>
		<p>影响旋转平衡、强度、重量、外观等部位, 如高速飞轮安装内孔 A 和外表面的同轴度</p>
		<p>所有量规、夹具、定位元件、引导元件的工作表面之间的相互位置公差等</p>

4.2 包容要求的应用 (表 13.3-26)

表 13.3-26 包容要求的应用

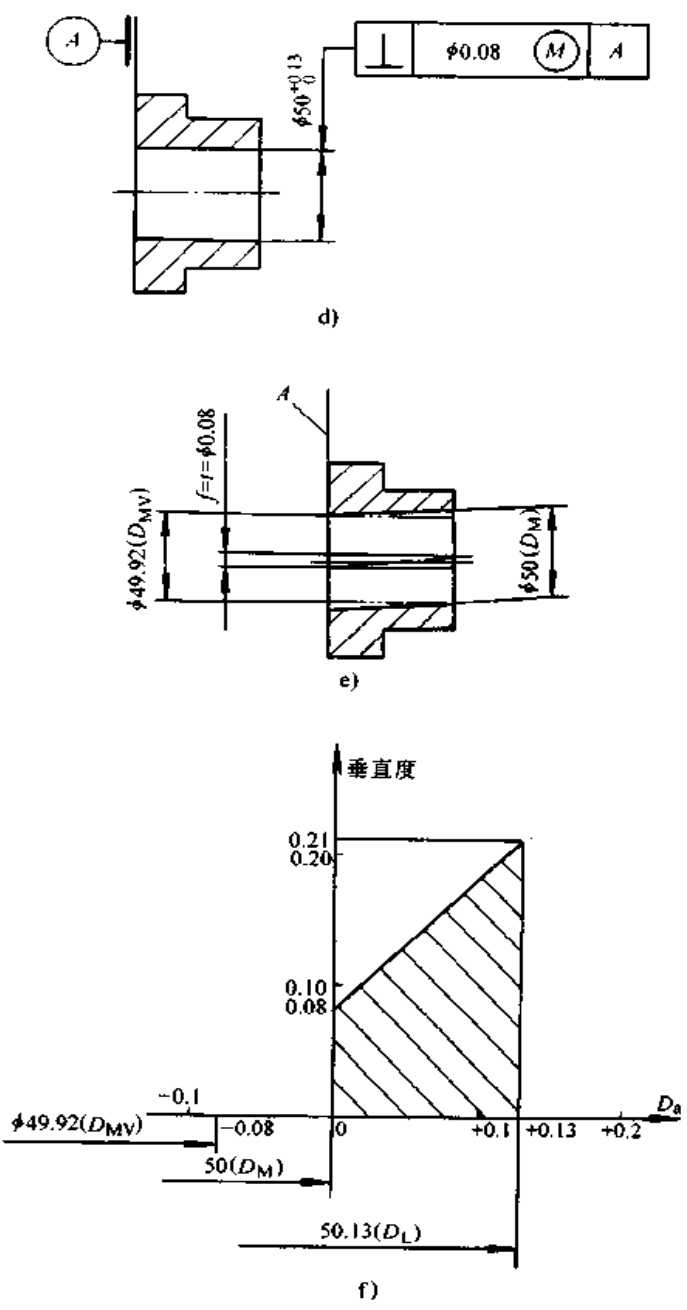
应用要点	应用示例	说明
<p>1) 包容要求即实际要素处处位于以最大实体尺寸形成的、具有理想形状的包容面内的一种公差要求,也就是以零件的最大实体尺寸形成的最大实体边界来控制被测要素的实际尺寸和形位误差。被测要素不得超过最大实体边界,其实际尺寸不能超过最小实体尺寸。包容要求对于单一要素,适用于圆柱面和两平行平面,对于关联要素,适用于轴线和中心平面,因此包容要求所允许的形位公差值是随机的,随着实际尺寸变化而变化</p>		<p>由最大极限尺寸形成的最大实体边界 (φ30 mm) 控制了轴的尺寸大小和形状误差。形状误差受极限尺寸控制,最大可达尺寸公差 (0.021 mm),不必考虑未注形状公差的控制</p>
<p>2) 单一要素采用包容要求时,必须在其尺寸及公差带代号或数值后面加注符号 \textcircled{M}。关联要素采用包容要求时,应在公差框格的数值格中注出 0 \textcircled{M}。此时,与采用最大实体要求时给出位置公差值为 0 时的含义是一样的,控制效果也相同。只是前者是从尺寸控制位置的角度解释,而后者从尺寸补偿给位置这一角度解释</p>		<p>由最大极限尺寸形成的最大实体边界 (φ30 mm) 控制了轴的尺寸大小和形状误差。形状误差除受极限尺寸控制外,还必须满足对轴线圆度公差 (0.005 mm) 的进一步要求</p>
<p>3) 包容要求的应用场合: 单一要素的包容要求主要用于保证零件的配合性质和公差带配置要求。用最大实体边界对尺寸和形位的控制来保证所需要的最小间隙或最大过盈。对于较精密配合的孔轴系统和严格要求过盈量的配合部位应采用包容要求</p>		<p>花键轴, 齿外圆采用包容要求以保证与花键孔的配合</p>
<p>单一要素的包容要求主要用于保证零件的配合性质和公差带配置要求。用最大实体边界对尺寸和形位的控制来保证所需要的最小间隙或最大过盈。对于较精密配合的孔轴系统和严格要求过盈量的配合部位应采用包容要求</p>		<p>包容要求用于关联要素,采用零形位公差,以保证装配要求 零件的上孔 ϕD_1, 轴线相对基准 A 有准确方向要求采用 0 \textcircled{M}, 下孔 ϕD_2 要求有严格的配合,采用 \textcircled{M}</p>

4.3 最大实体要求的应用 (表 13.3-27)

表 13.3-27 最大实体要求的应用

应用要点	应用示例	说明
<p>1) 最大实体要求是当被测要素或基准要素偏离最大实体状态时, 形状公差或位置公差可获得补偿值的一种相关要求。被测要素可以与基准要素同时采用最大实体要求, 此时形状公差或位置公差可得到来自两方面的补偿值</p> <p>2) 采用最大实体要求时, 必须了解以下几点:</p> <p>①所给出的形状或位置公差值, 是在被测要素处于最大实体状态, 或基准要素处于最大实体状态的前提下给定的, 所以它的符号Ⓜ紧接在公差值的后面</p> <p>②被测要素的最大实体实际状态是受由最大实体尺寸和形位公差值综合形成的最大实体实效边界控制的。当被测要素处于该实效状态时, 装配间隙为最小。被测要素的实际尺寸偏离其最大实体尺寸时, 可使形状或位置公差值超过所允许的值, 但必须位于该实效边界内。在一般情况下, 被测要素处于最小实体状态时, 形位公差所得到的补偿量为最大</p> <p>③当基准要素采用</p>	<p>a)</p> <p>b)</p> <p>c)</p>	<p>图 a 表示轴 $\phi 20_{-0.3}^0$ 的轴线直线度公差采用最大实体要求。当被测要素处于最大实体状态时, 其轴线直线度公差为 $\phi 0.1$ mm, 如图 b 所示。图 c 给出了表达上述关系的动态公差带图</p> <p>该轴应满足下列要求:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 实际尺寸为 $\phi 19.7 - \phi 20$ mm 2) 实际轮廓不超出最大实体实效边界, 即其体外作用尺寸不大于最大实体实效尺寸 $d_{MV} = d_M + t$ $= \phi 20.1 \text{ mm}$ <p>当该轴处于最小实体状态时, 其轴线直线度误差允许达到最大值, 即等于图样给出的直线度公差值 ($\phi 0.1$ mm) 与轴的尺寸公差 (0.3 mm) 之和 $\phi 0.4$ mm</p>

续表 13.3-27

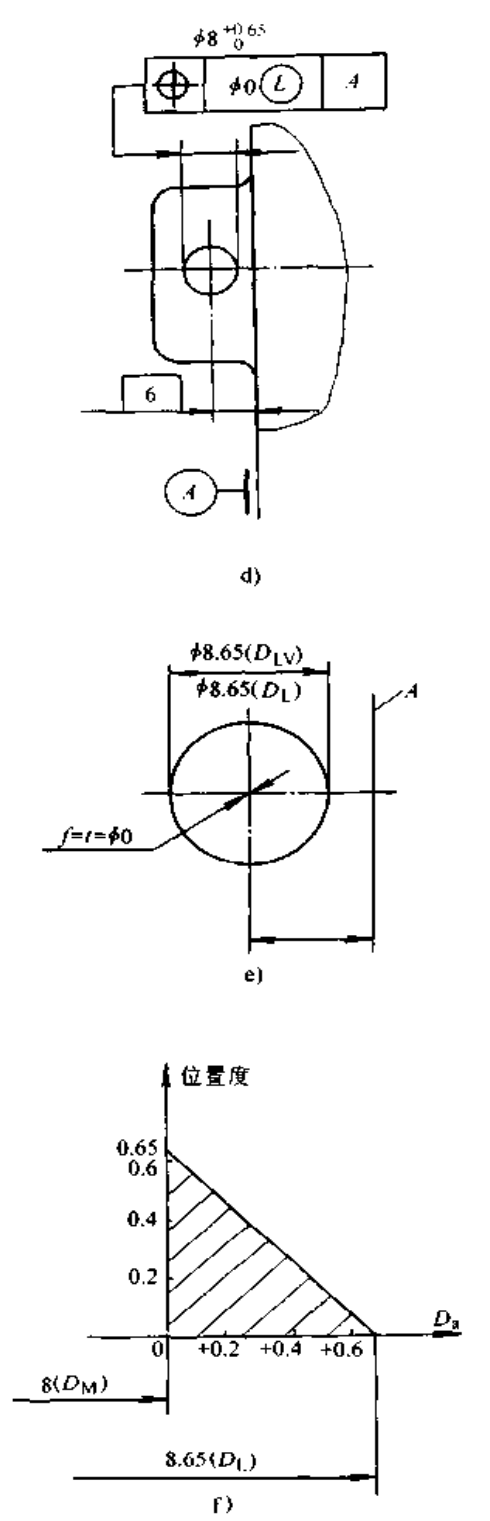
应用要点	应用示例	说明
<p>最大实体要求时，由基准要素本身的要求而定。如采用包容要求，则基准要素受其最大实体边界的控制，当实际尺寸偏离最大实体尺寸时，可使被测要素得到补偿量。如不采用包容要求，则其边界除考虑基准要素的最大实体尺寸外，还应考虑未注形位公差的影响，此时，基准要素受由其最大实体尺寸和未注形位公差值综合形成的最大实体实效边界控制，当实际尺寸偏离最大实体实效尺寸时就可使被测要素得到补偿值</p> <p>3) 需要特别注意的是：</p> <p>①基准要素是以它的体外作用尺寸而不是实际尺寸对控制边界的偏离来考虑其偏离量的</p> <p>②如被测要素是成组要素，则从基准要素作用尺寸对控制边界偏离所得到的补偿量只能补偿给成组要素即几何图框，而不是补偿给每一个被测要素</p> <p>③基准采用最大实体要求时，其偏离量并不一定 100% 地补偿给被测要素。受零件结构的影响，有时只能部分补偿给被测要素</p>		<p>图 d 表示孔 $\phi 50_{+0.13}^{+0.13}$ 的轴线对 A 基准的垂直度公差采用最大实体要求。当被测要素处于最大实体状态时，其轴线对 A 基准的垂直度公差为 $\phi 0.08$ mm，如图 e 所示。图 f 给出了表达上述关系的动态公差带图</p> <p>该孔应满足下列要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 实际尺寸为 $\phi 50 - \phi 50.13$ mm 2) 实际轮廓不超出关联最大实体实效边界，即其关联体外作用尺寸不小于关联最大实体实效尺寸 $D_{MV} = D_M - f$ $= 49.92 \text{ mm}$ <p>当该孔处于最小实体状态时，其轴线对 A 基准的垂直度误差允许达到最大值，即等于图样给出的垂直度公差 ($\phi 0.08$ mm) 与孔的尺寸公差 (0.13 mm) 之和 $\phi 0.21$ mm</p>

应用要点	应用示例	说明
<p>4) 当被测要素的形位误差小于给定的形位公差, 又允许其实际尺寸超出最大实体尺寸时, 可将可逆要求应用于最大实体要求。此时应同时在其形位公差框格中最大实体要求的形位公差值后标注符号“(M)”</p> <p>5) 最大实体要求主要用于保证装配的部位, 应在成批生产的零件上使用, 以便于用量规检验。最大实体要求必需用于中心要素, 既可用于被测要素, 也可用于基准要素, 并可同时采用。当采用三基面体系时, 其中的中心要素可采用最大实体要求。最大实体要求主要用于位置公差, 常见用于同轴度、对称度、位置度等。对于形状公差只有轴线直线度才能采用。加拿大、美国等国也用于素线直线度、圆柱度等, 这些会造成理解上的不一致, ISO 及我国均不采用</p>		<p>图 g 表示孔 $\phi 50_{-0.08}^{+0.13}$ 的轴线对 A 基准的垂直度公差采用最大实体要求的零形位公差。当该孔处于最大实体状态时, 其轴线对 A 基准的垂直度误差值为 0, 如图 g 所示。当该孔处于最小实体状态时, 其轴线对 A 基准的垂直度误差允许达到最大值, 即孔的尺寸公差值 $\phi 0.21$ mm。图 i 表示上述关系的动态公差带图</p> <p>该孔应满足下列要求:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 实际尺寸不大于 $\phi 50.13$ mm 2) 实际轮廓不超出关联最大实体边界, 即其关联体外作用尺寸不小于最大实体尺寸 $D_M = \phi 49.92$ mm

4.4 最小实体要求的应用 (表 13.3-28)

表 13.3-28 最小实体要求的应用

应用要点	应用示例	说明
<p>1) 最小实体要求是当被测要素或基准要素偏离最小实体状态时, 形位公差可获得补偿值的一种公差要求。被测要素可以与基准要素同时采用最小实体要求, 此时, 形位公差可得到来自两方面的补偿值</p> <p>2) 最小实体要求既可用于被测要素, 也可用于基准要素。当用于被测要素时, 应在被测要素形位公差框格中的公差值后标注符号“Ⓜ”; 当用于基准要素时, 应在形位公差框格内的基准字母代号后标注符号“Ⓜ”</p> <p>3) 被测要素的最小实体实际状态是受由最小实体尺寸和形位公差值综合形成的最小实体实效边界控制的。当被测要素处于该实效状态时, 其实际轮廓就应处于最小实体实效边界之内, 如实际尺寸偏离了最小实体尺寸时, 允许形位误差值超出所给出的公差值。这就保证零件的实际轮廓不会超出图样设计中所限定的边界, 以此来保证零件的强度和最小壁厚。当给出的形位公差值为零时, 则为零形位公差。此时, 被测要素的最小实体实效边界等于最小实体边界, 最小实体实效尺寸等于最小实体尺寸</p> <p>4) 最小实体要求应用于基准要素时, 基准要素应遵守的相应的边界由基准要素本身的要求而定。如基准要素本身采用最小实体要求, 则相应的边界为最小实体实</p>	<p>a)</p> <p>b)</p> <p>c)</p>	<p>图 a 表示孔 $\phi 8_{-0.25}^{+0.25}$ 的轴线对 A 基准的位置度公差采用最小实体要求。当被测要素处于最小实体状态时, 其轴线对 A 基准的位置度公差为 $\phi 0.4$ mm, 如图 b 所示。图 c 给出了表达上述关系的动态公差带图</p> <p>该孔应满足下列要求:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 实际尺寸为 $\phi 8 - \phi 8.25$ mm 2) 实际轮廓不超出关联最小实体实效边界, 即其关联体内作用尺寸不大于最小实体实效尺寸 <p>$D_{LV} = D_L + r = 8.65$ mm</p> <p>当该孔处于最大实体状态时, 其轴线对 A 基准的位置度误差允许达到最大值, 即等于图样给出的位置度公差 ($\phi 0.4$ mm) 与孔的尺寸公差 ($\phi 0.25$ mm) 之和 $\phi 0.65$ mm</p>

应用要点	应用示例	说明
<p>效边界；如基准要素本身不采用最小实体要求，相应的边界为最小实体边界。若基准要素的实际轮廓偏离相应的边界，即其体内作用尺寸偏离相应的边界尺寸，则允许基准要素在一定范围内浮动</p> <p>5) 当被测要素的形位公差小于给定的形位公差，又允许其实际尺寸超出最小实体尺寸时，可将可逆要求应用于最小实体要求。此时应同时在其形位公差框格中最小实体要求的形位公差值后标注符号“Ⓜ”</p> <p>6) 最小实体要求适用于中心要素，主要用于保证装配的部位，应在成批生产的零件上使用，以便于用量规检验。最小实体要求主要用于位置公差，常见的有位置度、同轴度、对称度等</p>	 <p>图 d 表示孔 $\phi 8^{+0.65}_0$ 的轴线对 A 基准的位置度公差采用最小实体要求的零形位公差</p> <p>该孔应满足下列要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 实际尺寸不小于 $\phi 8$ mm 2) 实际轮廓不超出关联最小实体边界，即其关联体内作用尺寸不大于最小实体尺寸 $D_L = \phi 8.65$ mm <p>当该孔处于最小实体状态时，其轴线对 A 基准的位置度误差应为零，如图 e 所示。当该孔处于最大实体状态时，其轴线对 A 基准的位置度误差允许达到最大值，即孔的尺寸公差 $\phi 0.65$ mm；图 f 给出了表达上述关系的动态公差带图</p>	<p>图 d 表示孔 $\phi 8^{+0.65}_0$ 的轴线对 A 基准的位置度公差采用最小实体要求的零形位公差</p> <p>该孔应满足下列要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 实际尺寸不小于 $\phi 8$ mm 2) 实际轮廓不超出关联最小实体边界，即其关联体内作用尺寸不大于最小实体尺寸 $D_L = \phi 8.65$ mm <p>当该孔处于最小实体状态时，其轴线对 A 基准的位置度误差应为零，如图 e 所示。当该孔处于最大实体状态时，其轴线对 A 基准的位置度误差允许达到最大值，即孔的尺寸公差 $\phi 0.65$ mm；图 f 给出了表达上述关系的动态公差带图</p>

5 形位公差在图样上的标注方法 (表 13.3-29)

表 13.3-29 形位公差在图样上的标注方法 (摘自 GB/T 1182—1996)

标注方法	标注示例
<p>形位公差框格的标注</p> <p>公差要求在矩形方框中给出, 该方框由两格或多格组成。框格中的内容从左到右按以下次序填写</p> <ul style="list-style-type: none"> ——公差特征的符号 ——公差值用线性值, 如公差带是圆形或圆柱形的则在公差值前加注 ϕ, 如是球形的, 则加注 “Sϕ” ——如需要用一或多个字母表示基准要素或基准体系 	
<p>被测要素的标注</p> <p>用带箭头的指引线将公差框格与被测要素相连, 按以下方式标注:</p> <ul style="list-style-type: none"> ——当公差涉及线或表面时, 将箭头置于要素的轮廓线或轮廓线的延长线上 (但必须与尺寸线明显分开) ——当指向实际表面时, 箭头可置于带点的参考线上, 该点指在实际表面上; ——当公差涉及轴线、中心平面或由带尺寸要素确定的点时, 则带箭头的指引线应与尺寸线的延长线重合 ——当一个以上要素作为被测要素, 如 6 个要素, 应在公差框格上方标明如 “6\times”、“6 槽” ——当同一被测要素有多项形位公差要求时, 为方便起见可将一个公差框格放在另一公差框格的下面 	
<p>基准要素的标注</p> <p>相对于被测要素的基准, 由基准字母表示。带小圆的大写字母用细实线与粗的短横线相连, 表示基准的字母也应注在公差框格内</p>	

标注方法	标注示例
<p>带有基准字母的短横线应放置于： ——当基准要素是轮廓线或表面时，在要素的 X 轮廓上或它的延长线上（但应与尺寸线明显区分开），基准符号还可置于用圆点指向实际表面的参考线上 ——当基准要素是轴线或中心平面或由带尺寸的要素确定的点时，则基准符号中的线与尺寸线一致。如尺寸线处安排不下两个箭头，则另一个箭头可用短横线代替</p>	
<p>单一基准要素用大写字母表示。由两个要素组成的公共基准，用横线隔开的两个大写字母表示。由 2 个或 3 个要素组成的基准体系，如多基准组合，表示基准的大写字母应按基准的优先次序从左至右分别置于各格中 为不致引起误解，字母 E、I、J、M、O、P、L、R、F 不用</p>	
<p>当需要在基准要素上指定某些点、线或局部表面来体现各基准平面时，应标注基准目标。当基准目标为点时，用“X”表示；当基准目标为线时，用细实线表示，并在棱边上加“X”；当基准目标为局部表面时，用细实线绘出该局部表面的图形，并画上与水平成 45° 的细实线</p>	
<p>如仅要求要素的某一部分作为基准，则该部分应用粗点划线表示并加注尺寸</p>	
<p>任选基准的标注</p>	


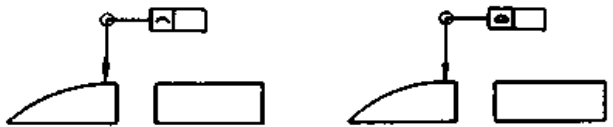
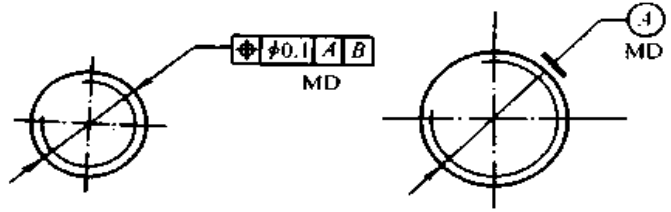
续表 13.3.29

标注方法	标注示例
<p>除另有规定 (图 f、g) 外, 公差带的宽度方向就是给定的方向 (见图 a、b、c) 或垂直于被测要素的方向 (见图 d、e)</p> <p>对于圆度, 公差带的宽度是形成两同心圆的半径方向</p> <p>图 f 中的角度 α (包括 90°) 必须注出</p>	
<p>几个表面有同一数值的公差带要求的标注</p>	
<p>用同一公差带控制几个被测要素时, 应在公差框格上注明“共面”或“共线”</p>	
<p>如对同一要素的公差值在全部被测要素内的任一部分有进一步的限制时, 该限制部分 (长度或面积) 的公差值要求应放在公差值的后面, 用斜线相隔。这种限制要求可以直接放在表示全部被测要素公差要求的框格下面</p>	
<p>如仅要求要素某一部分的公差值, 则用粗点划线表示其范围, 并加注尺寸</p>	

公差带和符号的标注

标注方法	标注示例
<p>如要求在公差带内进一步限定被测要素的形状, 则应在公差值后面加注符号:</p> <p>(-) 表示只许中间向材料内凹下</p> <p>(+) 表示只许中间向材料外凸起</p> <p>(▷) 表示只许从左至右减小</p> <p>(◁) 表示只许从右至左减小</p>	
<p>最大实体要求的符号为“Ⓜ”。当应用于被测要素时, 将符号“Ⓜ”标注在公差值之后; 当应用于基准要素时, 将符号“Ⓜ”标注在相应的基准字母之后; 当同时应用于被测要素和基准要素时, 将符号“Ⓜ”同时标注在公差值和相应的基准字母之后</p> <p>最小实体要求的符号为“Ⓟ”, 其标注方法与最大实体要求相同</p> <p>可逆要求的符号为“Ⓜ”。当可逆要求用于最大实体要求时, 将符号“Ⓜ”标在被测要素的形位公差值后的符号“Ⓜ”的后面; 当可逆要求用于最小实体要求时, 将符号“Ⓜ”标在公差值后的符号“Ⓟ”的后面</p>	
<p>包容要求的符号为“Ⓢ”。当单一要素要求遵守包容要求时, 应在该尺寸公差后加注符号“Ⓢ”; 当关联要素要求遵守包容要求时, 则应用零形位公差“0Ⓢ”的形式标出</p>	
<p>延伸公差带的符号为“Ⓟ”。当被测范围需要延长到被测要素之外时, 应采用延伸公差带的标注方法, 延伸公差带的延伸部分用双点画线绘制, 并在图样上注出其延伸长度。在延伸部分的尺寸前和公差框格中公差值后加注符号“Ⓟ”</p>	

续表 13.3-29

标注方法	标注示例
<p>公差带和有关符号的标注</p> <p>对于非刚性的自由状态条件用符号“\textcircled{F}”表示，此符号置于给出的公差值后面</p>	
<p>全周符号</p> <p>形位公差项目如轮廓度公差适用于横截面内的整个外轮廓线或整个外轮廓面时，应采用全周符号</p>	
<p>特殊表示法</p> <p>螺纹、齿轮和花键标注</p> <p>在一般情况下，螺纹轴线作为被测要素或基准要素均为中径轴线，如采用大径轴线则应用“MD”表示，采用小径轴线用“LD”表示</p> <p>由齿轮和花键轴线作为被测要素或基准要素时，节径轴线用“PD”表示，大径（对外齿轮是顶圆直径，对内齿轮是根圆直径）轴线用“MD”表示，小径（对外齿轮是根圆直径，对内齿轮是顶圆直径）轴线用“LD”表示</p>	

第4章 表面结构

表面结构是控制零件表面功能的一项重要技术指标。表面结构包括表面粗糙度、表面波紋度、表面缺陷、表面几何形状等表面特性。

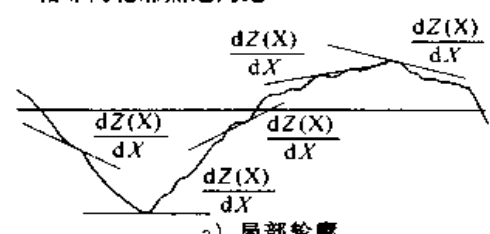
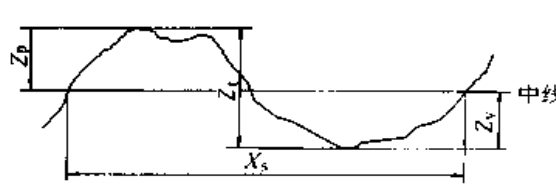
表面结构的各種特性都是零件表面的几何形状误差，只是在金属切削加工过程中，由于工艺等因素的不同，致使零件加工表面的几何形状误差有所不同。因几何特性不同，因此对零件工作

性能和使用寿命的影响也有所不同。对表面质量要求高的零件，往往需对各项表面特性分别提出明确的要求。

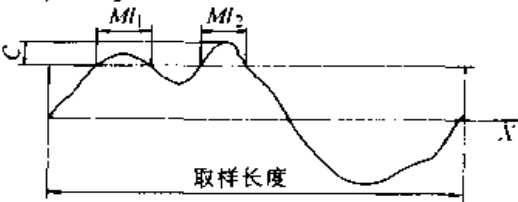
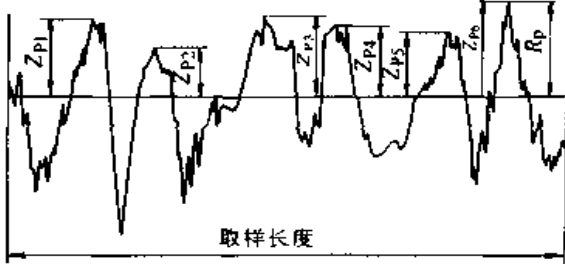
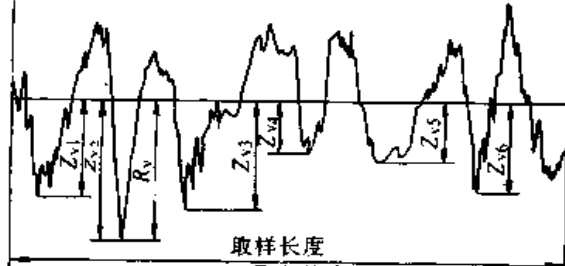
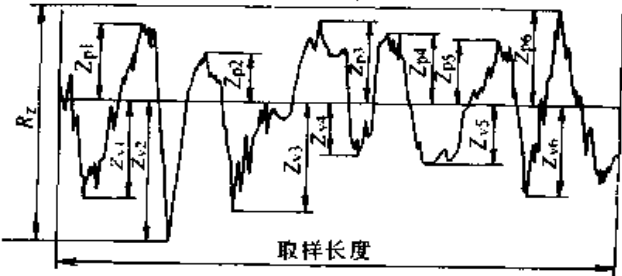
1 术语、定义、符号和代号

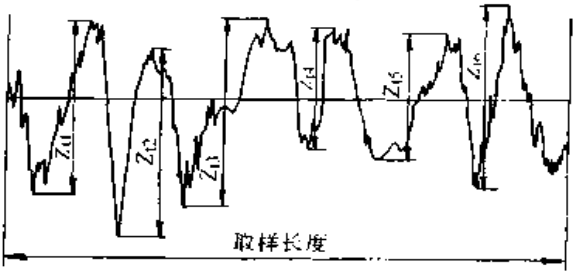
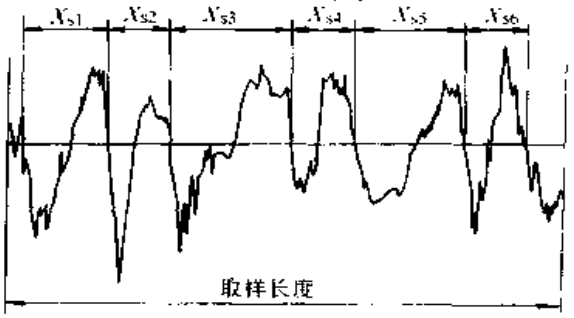
1.1 表面粗糙度术语及定义 (表 13.4-1)

表 13.4-1 表面粗糙度的常用术语及定义 (摘自 GB/T 3505—2000)

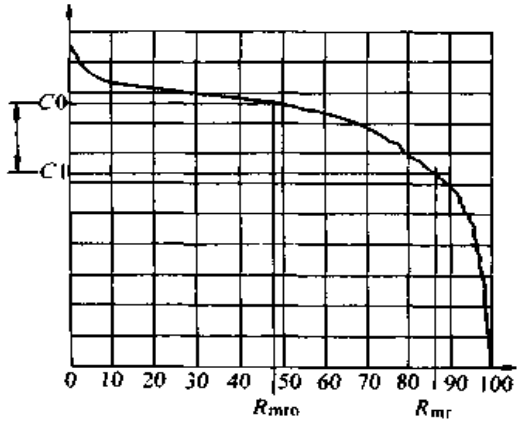
术 语	参数符号		定 义
	新	旧	
取样长度	l_r	l	用于判别被评定轮廓的不规则特征的 x 轴方向上的长度。评定表面粗糙度的取样长度 l_r 在数值上与轮廓滤波器 λ_r 的标志波长相等
评定长度	l_n	l_n	用于判别被评定轮廓的 x 轴方向上的长度。评定长度可包含一个或几个取样长度
纵坐标值	$Z(x)$	Y	被评定轮廓在任一位置距 x 轴的高度。若纵坐标位于 x 轴下方，该高度被视作负值，反之则为正值
中线			具有几何轮廓形状并划分轮廓的基准线
粗糙度轮廓中线			用轮廓滤波器 λ_r 抑制了长波轮廓成分相对应的中线
局部斜率	$\frac{dZ}{dx}$	—	评定轮廓在某一位置 x_i 的斜率 $\frac{dZ_i}{dx} = \frac{1}{60\Delta x} (Z_{i+3} - 9Z_{i+2} + 45Z_{i+1} - 45Z_{i-1} + 9Z_{i-2} - Z_{i-3})$ 式中 Z_i —— 第一个轮廓点的高度 Δx —— 相邻两轮廓点之间距 <div style="text-align: center;">  </div>
轮廓峰高	Z_p	Y_p	轮廓最高点距 x 轴线的距离 <div style="text-align: center;">  </div>

续表 13.4-1

术 语	参数符号		定 义
	新	旧	
轮廓谷深	Z_v	Y_v	x 轴线与轮廓谷最低点之间的距离 (图 b)
轮廓单元的高度	Z_L	—	一个轮廓单元的峰高和谷深之和 (图 b)
轮廓单元的宽度	X_L	—	x 轴线与轮廓单元相交线段的长度 (图 b)
在水平位置 c 上轮廓的实体材料长度	$Ml(c)$	η_n	<p>在一个给定水平位置 c 上用一条平行于 x 轴的线与轮廓单元相截所获得的各段截线长度之和 (图 c)</p> <p>$Ml(c) = Ml_1 + Ml_2$</p>  <p>c) 实体材料长度</p>
最大轮廓峰高	R_p	R_p	<p>在一个取样长度内, 最大的轮廓峰高 Z_p</p>  <p>d) 最大轮廓峰高</p>
最大轮廓谷深	R_v	R_m	<p>在一个取样长度内, 最大的轮廓谷深 Z_v</p>  <p>e) 最大轮廓谷深</p>
轮廓的最大高度	$R_z^{\text{①}}$	R_z	<p>在一个取样长度内, 最大轮廓峰高 Z_p 和最大轮廓谷深 Z_v 之和的高度</p>  <p>f) 轮廓的最大高度</p>

术 语	参数符号		定 义
	新	旧	
轮廓单元的平均线高度	R_c	R_c	<p>在一个取样长度内, 轮廓单元高度 Z_i 的平均值</p> $R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_i$  <p style="text-align: center;">g) 轮廓单元的高度</p>
轮廓的总高度	R_t	—	<p>在评定长度内, 最大轮廓峰高 Z_p 和最大轮廓谷深 Z_v 之和</p>
评定轮廓的算术平均偏差	R_a	R_a	<p>在一个取样长度内, 纵坐标值 $Z(x)$ 绝对均值的算术平均值</p> $R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$
评定轮廓的均方根偏差	R_q	R_q	<p>在一个取样长度内, 纵坐标值 $Z(x)$ 的平方根值</p> $R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx}$
评定轮廓的偏斜度	R_{sk}	S_k	<p>在一个取样长度内, 纵坐标值 $Z(x)$ 三次方的平均值与 R_q 的三次方的比值</p> $R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left(\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right)$
评定轮廓的陡度	R_{ku}	—	<p>在一个取样长度内, 纵坐标值 $Z(x)$ 四次方的平均值与 R_q 的四次方的比值</p> $R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left(\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right)$
轮廓单元的平均宽度	RS_m	S_m	<p>在一个取样长度内, 轮廓单元宽度 X_i 的平均值</p> $RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i$  <p style="text-align: center;">h) 轮廓单元的宽度</p>

续表 13.4-1

术 语	参数符号		定 义
	新	旧	
评定轮廓的均方根斜率	$R\Delta q$	Δq	在取样长度内, 纵坐标斜率 dZ/dx 的均方根值
轮廓的支承长度率	$R_{mr(c)}$	—	在给定水平位置 c 上轮廓的实体材料长度 $MI(c)$ 与评定长度的比率 $R_{mr(c)} = \frac{MI(c)}{l_n}$
轮廓截面高度	$R\delta_c$	—	给定支承比率的两个水平截面之间的垂直距离 $R\delta_c = C(R_{mr1}) - C(R_{mr2}) \quad (R_{mr1} < R_{mr2})$
相对支承比率	R_{mr}	t_p	在一个轮廓水平截面 $R\delta_c$ 确定的, 与起始零位 $C0$ 相关的支承比率 $R_{mr} = R_{mr}(C1)$ 式中 $C1 = C0 - R\delta_c$ $C0 = C(R_{mr0})$  <p style="text-align: center;">i) 轮廓水平截面的幅度差</p>
微观不平度十点高度	—	Rz ^①	在取样长度内 5 个最大的轮廓峰高的平均值与 5 个最大轮廓谷深的平均值之和 $Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 Z_{p_i} + \sum_{i=1}^5 Z_{v_i}}{5}$ 式中 Z_{p_i} ——第 i 个最大的轮廓高 Z_{v_i} ——第 i 个最大的轮廓谷深

① 在 GB/T 3505—1983 中, Rz 是指“微观不平度的十点高度”, 而在 GB/T 3505—2000 中, Rz 是指“轮廓的最大高度”。在使用中的一些表面粗糙度测量仪器大多是测量以前的 Rz 参数。因此, 当采用现行的技术文件和图样时必须小心慎重, 因为用不同类型的仪器按不同的规则计算所取得的结果之间的差别并不都是微小而可忽略。

1.2 表面粗糙度常用符号与代号(GB/T 131—1993)

表 13.4-2 表面粗糙度常用的符号、代号及意义

符号	意义	代号	意义	代号	意义
	基本符号,表示表面可用任何方法获得		用任何方法获得的表面粗糙度, R_a 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$		用任何方法获得的表面粗糙度, R_a 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$
	基本符号加一短划,表示表面是用去除材料的方法获得,如车、铣等		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$
			用不去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$		用不去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$
	基本符号加一小圆,表示表面是用不去除材料的方法获得,或者是用于保持原供应状况的表面		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$, R_a 的下限值为 $1.6 \mu\text{m}$		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$, R_a 的最小值为 $1.6 \mu\text{m}$
			用任何方法获得的表面粗糙度, R_y 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$		用任何方法获得的表面粗糙度, R_y 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$
	在上述三个符号的长边上均可加一横线,用于标注有关参数和说明		用不去除材料方法获得的表面粗糙度, R_z 的上限值为 $200 \mu\text{m}$		用不去除材料方法获得的表面粗糙度, R_z 的最大值为 $200 \mu\text{m}$
			用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_z 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$, 下限值为 $1.6 \mu\text{m}$		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_z 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$, 最小值为 $1.6 \mu\text{m}$
	在上述三个符号上均可加一小圆,表示所有表面具有相同的表面粗糙度要求		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$, R_y 的下限值为 $12.5 \mu\text{m}$		用去除材料方法获得的表面粗糙度, R_a 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$, R_y 的最大值为 $12.5 \mu\text{m}$
			用任何方法获得的表面粗糙度, R_y 的上限值为 $3.2 \mu\text{m}$		用任何方法获得的表面粗糙度, R_y 的最大值为 $3.2 \mu\text{m}$

2 表面粗糙度参数及其数值

(GB/T 1031—1995)

2.1 评定表面粗糙度的参数及其数值系列

1) 表面粗糙度的评定参数应从轮廓算术平均偏差 R_a 、微观不平度十点高度 R_z 、轮廓最大高度 R_y 中选取。在高度特性参数常用的参数值范围内 (R_a 为 $0.025 \sim 6.3 \mu\text{m}$, R_z 为 $0.1 \sim 25 \mu\text{m}$) 推荐优先选用 R_a 。轮廓算术平均偏差 R_a 的数值见表 13.4-3, 微观不平度十点高度 R_z 和轮廓最大高度 R_y 的数值见表 13.4-4。

2) 根据表面功能的需要, 除表面粗糙度高

度参数 R_a 、 R_z 、 R_y 外, 可选用下列的附加评定参数: 轮廓微观不平度的平均间距 S_m 、轮廓的单峰平均间距 S 、轮廓支承长度率 t_p 。附加的评定参数轮廓微观不平度的平均间距 S_m 和轮廓的单峰平均间距 S 的数值见表 13.4-5, 轮廓支承长度率 t_p 的数值见表 13.4-6。

选用轮廓支承长度率参数时必须同时给出轮廓水平截距 C 值。它可用 μm 或 R_y 的百分数表示。 R_y 的百分数系列如下 (%): 5、10、15、20、25、30、40、50、60、70、80、90。

轮廓的单峰(谷) S 的最小间距规定为取样长度 l 的 1%。轮廓峰(谷、单峰、单谷)的最小高度规定为轮廓最大高度 R_y 的 10%。对 R_a 、 R_z 和 R_y 参数亦适用。

表 13.4-3 轮廓算术平均偏差 R_a 的数值系列 (μm)

基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列
	0.008		0.032		0.125		0.50		2.0
	0.010		0.040		0.160		0.63		2.5
0.012		0.05		0.2		0.8		3.2	
	0.016		0.063		0.25		1.00		4.0
	0.020		0.080		0.32		1.25		5.0
0.025		0.1		0.4		1.6		6.3	
	8.0		16.0		32		63		
	10.0		20		40		80		
12.5		25		50		100			

注: 根据表面功能和生产的经济合理性, 优先选用基本系列, 当选用基本系列值不能满足要求时, 可选取补充系列值。

表 13.4-4 微观不平度十点高度 R_z 和轮廓最大高度 R_y 的数值系列 (μm)

基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列
0.025			0.25		2.5		25		250
	0.032		0.32		3.2		32		320
	0.040	0.4			4.0		40	400	
0.05			0.50		5.0		50		500
	0.063		0.63		6.3		63		630
	0.080	0.8			8.0		80	800	
0.1			1.00		10.0		100		1000
	0.125		1.25	12.5			125		1250
	0.160	1.6			16.0		160	1600	
0.2			2.0		20		200		

注: 优先选用基本系列, 当选用基本系列值不能满足要求时, 可选取补充系列值。

① 在 GB/T 3505—2000 中, 轮廓最大高度用 R_z 表示, 微观不平度十点高度未作规定。

表 13.4.5 轮廓微观不平度的平均间距 S_m^J 和轮廓的单峰平均间距 S 的数值系列 (mm)

基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列	基本系列	补充系列
	0.002		0.016	0.1			0.63		4.0
	0.003		0.020		0.125	0.8			5.0
	0.004	0.025			0.160		1.00	6.3	
	0.005		0.032	0.2			1.25		8.0
0.006			0.040		0.25	1.6			10.0
	0.008	0.05			0.32		2.0	12.5	
	0.010		0.063	0.4			2.5		
0.0125			0.080		0.5	3.2			

注：优先选用基本系列，当选用基本系列值不能满足要求时，可选取补充系列值。

① 在 GB/T3505—2000 中，轮廓微观不平度的平均间距称为轮廓单元的平均宽度，用 RS_m 表示。

表 13.4.6 轮廓支承长度率 $r_p^{\text{①}}$ 的数值系列 (%)

$r_p^{\text{①}}$	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90
------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

① 在 GB/T3505—2000 中，轮廓支承长度率称为相对支承比率，用 R_{nr} 表示。

2.2 取样长度的数值和选用

1) 取样长度 l 的数值见表 13.4.7。一般情况下，在测量 R_a 、 R_z 和 R_y 时推荐按表 13.4.8 和表 13.4.9 选用对应的取样长度值，此时取样长度值的标注在图样上或技术文件中可省略。当有特殊要求时应给出相应的取样长度值，并在图样上或技术文件中注出。对于微观不平度间距较大的端铣、滚铣及其他大进给量走刀的加工表面，应按表 13.4.7 中规定的取样长度系列选取比表 13.4.8 或表 13.4.9 中更大的取样长度值。如 R_a 为 $3.2 \mu\text{m}$ ，表面采用端铣加工获得，则应选取比表 13.4.8 中对应取样长度 2.5 mm 大的取样长度，即可取 8 mm。

2) 评定长度的选用 由于加工表面的不均匀性，在评定表面粗糙度时其评定长度应根据不同的加工方法和相应的取样长度来确定。一般情况下，当测量 R_a 、 R_z 和 R_y 时推荐按表 13.4.8 和表 13.4.9 选取相应的评定长度值。如被测表面均匀性较好，测量时可选用小于 $5l$ 的评定长度值，均匀性较差的表面选用大于 $5l$ 的评定长度值。根据表面加工均匀性程度，推荐：

表 13.4.7 取样长度 $l^{\text{①}}$ 的数值系列

$l^{\text{①}}$	0.08	0.25	0.8	2.5	8	25
----------------	------	------	-----	-----	---	----

① 在 GB/T 3505—2000 中，取样长度用 l_s 表示。

表 13.4.8 R_a 的取样长度 l 与评定长度 l_n 的选用值

$R_a/\mu\text{m}$	l/mm	$l_n (l_n=5l) / \text{mm}$
$\geq 0.008 \sim 0.02$	0.08	0.4
$> 0.02 \sim 0.1$	0.25	1.25
$> 0.1 \sim 2.0$	0.8	4.0
$> 2.0 \sim 10.0$	2.5	12.5
$> 10.0 \sim 80.0$	8.0	40.0

表 13.4.9 R_z 、 R_y 的取样长度 l 与评定长度 l_n 的选用值

$R_z, R_y/\mu\text{m}$	l/mm	$l_n (l_n=5l) / \text{mm}$
$\geq 0.025 \sim 0.10$	0.08	0.4
$> 0.10 \sim 0.50$	0.25	1.25
$> 0.50 \sim 10.0$	0.8	4.0
$> 10.0 \sim 50.0$	2.5	12.5
$> 50 \sim 320$	8.0	40.0

车、铣、刨等规则加工表面， $l = 2.5 \text{ mm}$ 时， $l_n = (1 \sim 3)l$

精车、磨加工表面， $l = 0.8 \text{ mm}$ 时， $l_n = (2 \sim 6)l$

精磨、研磨等不规则加工表面， $l = 0.25 \text{ mm}$ 时， $l_n = (6 \sim 17)l$

3 表面粗糙度的选择

3.1 表面粗糙度对零件功能的影响

表面粗糙度对零件功能的影响与其他几何参数不一样，它的特点是多功能的。由于表面微观不平度在不同方向的特性参数对各种不同功能要求表现出的敏感程度不一样，如有的对微观不平度高度方向的特性参数敏感；有的对微观不平度间距方向的特性参数敏感；有的对与微观不平度形状有关的特性参数敏感；同是高度方向的特性参数，有的对单个峰谷高度参数敏感；有的对平均高度参数敏感。而同一零件上往往同时有几种功能的要求，这样就使表面粗糙度参数的类型和数量较多，有它复杂性的方面。这也是它的一个特点。

表面粗糙度对下述各种功能产生影响：如摩擦系数、磨损、疲劳强度、冲击强度、耐腐蚀性、接触刚度和抗振性、间隙配合中的间隙、过盈配合中的结合强度、测量精度、导热性、导电性和接触电阻、密封性、粘结强度、涂漆性能、镀层质量、流体流动阻力、对光的反射性能、食品卫生、外观、喷涂金属质量、钢板冲压时的润滑作用等。下面对其中的主要影响做些分析与介绍。

1) 对配合性质的影响 影响配合性能的可靠性和稳定性。对间隙配合，由于初期磨损，峰顶会很快磨去，使间隙加大；对过盈配合，装配压合时，也会挤平波峰，减少实际有效过盈，尤其对小尺寸配合影响更为显著。因此，配合性质稳定性要求高的结合面、动配合配合间隙小的表面、要求联接牢固可靠，承受载荷大的静配合的 Ra 值要低。同一公差等级的小尺寸比大尺寸（特别是1~3级公差等级）、同一公差等级的轴比孔的 Ra 值要小，而且配合性质相同，零件尺寸愈小，它的 Ra 值愈小。

2) 对耐磨性的影响 加工后的零件表面，由于存在峰谷，使接触表面只是一些峰顶接触，从而减小了接触面积，比压增大，磨损加剧。因此，摩擦表面比非摩擦表面、滚动摩擦表面比滑动摩擦表面的运动速度高，单位压力大的摩擦表面的 Ra 值要小。

3) 对接触刚度的影响 两表面接触时，由

于实际接触面积为理想接触面积的一部分，使单位面积压应力增大，受外力时，易产生接触变形，因此，降低 Ra 值可提高结合件的接触刚度。

4) 对抗疲劳强度的影响 零件表面越粗糙，对应力集中越敏感，从而导致零件疲劳损坏，因此，受循环载荷的表面及易引起应力集中的部分，如圆角、沟槽处的 Ra 值要低。表面粗糙度对零件疲劳强度的影响程度随其材料不同而异，对铸铁件的影响不甚明显，对于钢件则强度愈高影响愈大。

5) 对冲击强度的影响 钢件表面的冲击强度随表面粗糙度 Ra 值的降低而提高，在低温状态下，尤为明显。

6) 对测量精度的影响 由于工件表面有微观不平度，测量时，测量杆实际接触在峰顶上，虽然测量力不大，但接触面积小，单位面积上的力却不小，于是引起一定的接触变形。由于表面微观不平度有一定的峰谷起伏，如测量时，测量头和被测表面间要作相对滑动，这使测量杆也随被测表面的峰谷起伏而上下波动，影响到示值也有波动。

在用光波干涉法测量量块时，由于光射到表面上再反射回来的过程中，对各种不同材料的表面有不同的微量透入深度，致使反射出的光波和人射光波之间产生一个相移。在石英、玻璃等绝缘体表面上，透入深度实际为零，而在钢等导体表面上就不一样。对很好抛光过的钢的表面，透入深度约为 $0.018 \mu\text{m}$ 。所以当钢制量块粘合在石英平晶上作干涉测量时，对所测得的结果要加一个 $+0.018 \mu\text{m}$ 的修正量。表面粗糙度对光透入材料的深度有影响。量块表面的 Ra 值一般为 $0.007 \sim 0.012 \mu\text{m}$ ，这使光的透入深度也发生变化。在同一套量块中相差可达 $0.06 \mu\text{m}$ 。

7) 对密封性的影响 对无相对滑动的静密封表面，微观不平度谷底过深，受预压后的密封材料不能完全填满，而留有缝隙，造成泄漏。表面愈粗糙，泄漏愈厉害。对有相对滑动的动密封表面，由于相对运动，其微观不平度一般为 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ ，用于储存润滑油较为有利，如表面太光滑，不仅不利于储存润滑油，反而会引起摩擦磨损。此外，密封性的好坏也和加工纹理方向有关。

8) 对抗腐蚀性的影响 表面粗糙则零件表面上的腐蚀性气体或液体易于积聚,而且向零件表面层渗透,加剧腐蚀,因此,在有腐蚀性气体或液体条件下工作的零件表面的 Ra 值要小。

9) 对流体流动阻力的影响 流体在管道中流动时,受到阻力。当管道内发生紊流时,摩擦阻力就大。管壁的粗糙度 $\epsilon = Rz/r$ (r 为管孔半径)的数值可作为是否发生紊流的一个指标。管径愈小,流速愈大,管壁表面粗糙度对摩擦损失的影响愈大。摩擦阻力和微观不平度深度与层流厚度之比有关,也和微观不平度轮廓形状有关,特别是和微观不平度峰谷侧面的倾斜角有关。

10) 对金属表面涂镀质量的影响 工件镀锌、铬、铜后,其表面微观不平度的深度比镀前增加一倍,而镀镍后,则会比镀前减小一半。又因粗糙的表面能吸收喷涂金属层冷却时产生的拉伸应力,故不易产生裂纹,在喷涂金属前须使其表面有一定的粗糙度。

11) 对表面电流的影响 当高频电流在导体表面流通时,电流聚集在导体表面 $1\ \mu\text{m}$ 深的薄层中,由于表面粗糙度的影响,表面电阻的实际值要超过理论值。

12) 对振动和噪声的影响 机械设备的运动副表面粗糙不平,运转中会产生振动及噪声,尤以高速运转的滚动轴承、齿轮及发动机曲轴、凸轮轴等零部件,这类现象更为明显。因此,运动副表面粗糙度 Ra 值愈小,则运动件愈平稳无声。

表面粗糙度参数对零件功能的影响情况见表 13.4-10。

3.2 规定表面粗糙度要求的一般规则

1) 在规定表面粗糙度要求时,必须给出表面粗糙度值和测定时的取样长度值两项基本要求,必要时也可规定表面加工纹理、加工方法,或加工顺序和不同区域的表面粗糙度等附加要求。

2) 为保证制品表面质量,可按功能需要规定表面粗糙度参数值。否则,可不规定其参数值,也不需检查。

3) 表面粗糙度各参数的数值是指在垂直于基准面的各截面上获得的数值。对给定的表面,如截面方向与高度参数 (Ra 、 Rz 、 Ry) 最大值的方向一致时,则可不规定测量截面的方向,否则应在图样上标出。

表 13.4-10 表面粗糙度参数影响零件功能的情况

零件功能	Ra	Rz	Ry	S_m	S	t_p	r	r'	表面加工纹理
干摩擦	(+)	(+)	(+)	(+)		+	+		+
摩擦	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+
带润滑摩擦	+	(+)	(+)	+	(+)	+	(+)	(+)	+
选择性转移	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)	(+)	(+)	+
疲劳强度	(+)	(+)	+	(+)				+	+
接触刚度	(+)	(+)	(+)	(+)		+	+		+
抗振性	(+)	(+)	(+)	+		+	+		+
耐腐蚀性	(+)	(+)	(+)	+	(+)	(+)		(+)	
过盈联接强度	(+)	(+)		(+)		+	+		+
联接密封性	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+		+	
涂层粘贴强度	(+)	+	(+)	+		(+)	(+)	(+)	+
流体流动阻力	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	+	+

注: r 为轮廓峰顶曲率半径;
 r' 为轮廓谷底曲率半径;
 + 表示此参数对所指零件功能有一定的影响;
 (+) 表示此参数对所指零件功能有较大的影响。

4) 对表面粗糙度的要求不适用于表面缺陷。在评定过程中不应把表面缺陷(如沟槽、气孔、划痕等)包含进去。必要时,应单独规定对表面缺陷的要求。

5) 根据表面功能和生产的经济合理性,当选用表 13.4-3~表 13.4-5 的基本系列值不能满足要求时,可选取补充系列值。

3.3 表面粗糙度参数值的选择

1) 表面粗糙度既要满足零件的功能要求,又要考虑工艺经济性。因此,在满足零件表面功能要求的前提下,尽量选用数值大的粗糙度,见表 13.4-11。各种功能表面所允许的 Rz 值见表 13.4-12。

2) 对新设计的零件,可以参照已经实践验证的实例,用类比的方法选定其表面粗糙度,类比的原则列于表 13.4-13。

表 13.4-11 按表面功能选用表面粗糙度

表面功能要求	性能										Ra/μm																
	形状精度	密封性	无应力	耐腐蚀性	抗应力集中	抗磨损	抗流体侵入	抗油污	抗滑	抗光	抗磨	轮廓算术平均偏差十度	纹理方向	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50		
可见表面																											
毛面并清理	●																										
光亮, 加工	●																										
光亮, 高亮度	●																										
镀层底面																											
采用光亮漆	●																										
采用结构漆	●																										
采用金属镀层	●																										
应力极限表面																											
静态																											
动态																											
支撑表面																											
静态密封表面																											
采用密封胶																											
在旋转件上	●																										
在法兰上	●																										
不用密封胶	●																										
密封表面																											
相对密封纵向运动	●																										
相对密封回转运动 (径向密封)	●																										

注: 表示最低粗糙度值不
限
表示最低粗糙度有要求
①表示不加
②表示加工

续表 13.4-11

表面功能要求	性能															纹理	Ra/ μm	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	0.4	0.63	1	1.6	2.5	3.2	6.3	10	16	25	40	63	100	160	250	
	形状精度	密封性	耐腐蚀性	抗应力集中	抗冲击	流体承载能力	抗摩擦	光滑性	消音性	附着能力	粘附性	耐腐蚀性	位置公差	形状公差	轮廓算术平均偏差																														平整度
基准表面	●											●	●																																
间隙配合表面	●	●		●	●	●	●	●				●	●																																
过渡配合表面	●			●		●	●					●	●																																
过盈配合表面	●			●	●		●					●	●																																
粘台表面	●			●	●		●					●	●																																
冲击表面	●			●	●		●					●	●																																
测量表面	●			●	●		●					●	●																																
无润滑油滑动表面	●			●	●		●					●	●																																
润滑油滑动表面	●			●	●		●					●	●																																
无密封	●			●	●		●					●	●																																
有密封	●	●		●	●		●					●	●																																
滚动表面	●			●	●		●					●	●																																
齿面滑动表面	●			●	●		●					●	●																																
流体用表面	●			●	●		●					●	●																																
切割体表面	●			●	●		●					●	●																																
制动表面	●			●	●		●					●	●																																
手柄等表面	●			●	●		●					●	●																																
离合器结合表面	●			●	●		●					●	●																																

注：——表示最低粗糙度值不限
 ——表示最低粗糙度有要求
 ○表示不加工
 ⊙表示加工

注：“●”表示表面功能对该项性能和粗糙度的要求。

表 13.4-12 各种功能表面所允许的 Rz 值范围

各种功能的表面	允许的 Rz 值范围/ μm											
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10	20	50	100
刀刃表面												
电作用表面												
压入及过渡配合												
收缩配合表面												
支承表面												
涂镀层表面												
测量表面												
块规测量面												
金相试样表面												
无密封材料的密封面												
有密封材料的动密封面												
有密封材料的静密封面												
滑动面												
间隙配合表面												
导流表面												
制动的表面												
滚子的表面												
滚动表面												
结合面												
应力表面												

表 13.4-13 表面粗糙度类比原则

表面工作情况	表面粗糙度要求(Ra 值)	
	小一些	大一些
工作表面	✓	
非工作表面		✓
摩擦表面	✓	
非摩擦表面		✓
间隙配合表面	✓	
过盈配合表面		✓
受交变载荷表面	✓	
可能发生应力集中的圆角或凹槽处	✓	

3) 参考尺寸公差、形状公差与表面粗糙度的关系选择表面粗糙度。选定表面粗糙度要与其公差等级相适应,一般地说,公差等级高时,表面粗糙度值也应较小。轴、孔公差等级与表面粗糙度的对应关系见表 13.4-14,与常用、优先公差带相适应的表面粗糙度 Ra 值见表 13.4-15,配合间隙或过盈与表面粗糙度的对应关系见表 13.4-16。

一般情况下,表面形状公差值 t 、尺寸公差值 T 和 Ra 、 Rz 之间,有如下的经验对应关系:

$$\begin{aligned} \text{若 } t \approx 0.6T \text{ 则 } Ra &\leq 0.05T; Rz \leq 0.2T \\ t \approx 0.4T \quad Ra &\leq 0.025T; Rz \leq 0.1T \\ t \approx 0.25T \quad Ra &\leq 0.0125T; Rz \leq 0.05T \end{aligned}$$

表 13.4-14 轴、孔公差等级与表面粗糙度的对应关系

公差等级	轴		孔	
	基本尺寸 / mm	粗糙度参数 R_a	基本尺寸 / mm	粗糙度参数 R_a
	IT5	≤ 6	0.10	≤ 6	0.10
IT5	$> 6 \sim 30$	0.20	$> 6 \sim 30$	0.20
	$> 30 \sim 180$	0.40	$> 30 \sim 180$	0.40
	$> 180 \sim 500$	0.80	$> 180 \sim 500$	0.80
	IT6	≤ 10	0.20	≤ 50	0.40
IT6	$> 10 \sim 80$	0.40	$> 50 \sim 250$	0.80
	$> 80 \sim 250$	0.80		
	$> 250 \sim 500$	1.60	$> 250 \sim 500$	1.60
	IT7	≤ 6	0.40	≤ 6	0.40
IT7	$> 6 \sim 120$	0.80	$> 6 \sim 80$	0.80
	$> 120 \sim 500$	1.60	$> 80 \sim 500$	1.60
IT8	≤ 3	0.40	≤ 3	0.40
	$> 3 \sim 50$	0.80	$> 3 \sim 30$	0.80
	$> 50 \sim 500$	1.60	$> 30 \sim 250$	1.60
			$> 250 \sim 500$	3.20

续表 13.4-14

公差等级	轴		孔	
	基本尺寸 / mm	粗糙度参数 R_a	基本尺寸 / mm	粗糙度参数 R_a
	IT9	≤ 6	0.80	≤ 6	0.80
$> 6 \sim 120$		1.60	$> 6 \sim 120$	1.60
$> 120 \sim 400$		3.20	$> 120 \sim 400$	3.20
$> 400 \sim 500$		6.30	$> 400 \sim 500$	6.30
IT10	≤ 10	1.60	≤ 10	1.60
	$> 10 \sim 120$	3.20	$> 10 \sim 180$	3.20
	$> 120 \sim 500$	6.30	$> 180 \sim 500$	6.30
IT11	≤ 10	1.60	≤ 10	1.60
	$> 10 \sim 120$	3.20	$> 10 \sim 120$	3.20
IT12	$> 120 \sim 500$	6.30	$> 120 \sim 500$	6.30
	≤ 80	3.20	≤ 80	3.20
	$> 80 \sim 250$	6.30	$> 80 \sim 250$	6.30
IT13	$> 250 \sim 500$	12.50	$> 250 \sim 500$	12.50
	≤ 30	3.20	≤ 30	3.20
IT13	$> 30 \sim 120$	6.30	$> 30 \sim 120$	6.30
	$> 120 \sim 500$	6.30	$> 120 \sim 500$	12.50

表 13.4-15 与常用、优先公差带相适应的表面粗糙度 R_a 值 (μm)

公差带代号	基本尺寸 / mm												
	< 3	$> 3 \sim 6$	$> 6 \sim 10$	$> 10 \sim 18$	$> 18 \sim 30$	$> 30 \sim 50$	$> 50 \sim 80$	$> 80 \sim 120$	$> 120 \sim 180$	$> 180 \sim 250$	$> 250 \sim 315$	$> 315 \sim 400$	$> 400 \sim 500$
h1, js1, H1, Js1	$> 0.02 \sim 0.04$												
h2, js2, H2, Js2	(0.025)												
h3, js3, H3, Js3	$> 0.04 \sim 0.08 (0.05)$												
g4, h4, js4, k4, m4, n4, r4, s4	$> 0.08 \sim 0.16 (0.1)$												
H4, Js4, K4, M4	$> 0.16 \sim 0.32 (0.2)$												
f5, g5, h5, js5, k5, m5, n5, p5, r5, s5, t5, u5, v5, x5, y5, z5	$> 0.32 \sim 0.63 (0.4)$												
G5, H5, Js5, K5, M5, N5, P5, R5, S5	$> 0.08 \sim 0.16 (0.1)$	$> 0.16 \sim 0.32 (0.2)$											$> 0.63 \sim 1.25 (0.8)$
e6, f6, g6, h6, js6, k6, m6, n6, p6, r6, s6, t6, u6, v6, x6, y6, z6	$> 0.32 \sim 0.63 (0.4)$												
F6, G6, H6, J6, Js6, K6, M6, N6, P6, R6, S6, T6, U6, V6, X6, Y6, Z6	$> 0.63 \sim 1.25 (0.8)$												
d7, e7, f7, g7, h7, j7, js7, k7, m7, n7, p7, r7, s7, t7, u7, v7, x7, y7, z7	$> 0.63 \sim 1.25 (0.8)$												
D7, E7, F7, G7, H7, J7, Js7, K7, M7, N7, P7, S7, T7, U7, V7, X7, Y7, Z7	$> 0.63 \sim 1.25 (0.8)$												

续表 13.4.15

公差带代号	基本尺寸 /mm													
	<3	>3 ~6	>6 ~10	>10 ~18	>18 ~30	>30 ~50	>50 ~80	>80 ~120	>120 ~180	>180 ~250	>250 ~315	>315 ~400	>400 ~500	
c8, d8, e8, f8, g8, h8, js8, k8, m8, n8, p8, r8, s8, t8, u8, v8, x8, y8, z8								>1.25~2.5 (1.6)						
C8, D8, E8, F8, G8, H8, J8, Js8, K8, M8, N8, P8, R8, S8, T8, U8, V8, Y8, Z8														
a9, b9, c9, d9, e9, f9, h9, js9														
A9, B9, C9, D9, E9, F9, H9, Js9, N9, P9														
a10, b10, c10, d10, e10, h10, js10														
A10, B10, C10, D10, E10, H10, Js10														
a11, b11, c11, d11, h11, js11														
A11, B11, C11, D11, H11, Js11														
a12, b12, c12, h12, js12														
A12, B12, C12, H12, Js12														
a13, b13, c13, h13, js13, H13, Js13														

- 注：1. 本表适用于一般通用机械，并且不考虑形状公差对表面粗糙度的要求。
 2. 对于特殊的配合件，例如配合件孔、轴公差等级相差较多时，应按其较高等级的公差带来选取。
 3. 对于重型机械中采用配制配合时，应仍按完全互换性配合要求的公差带来选取。
 4. 括号内数据为常用数据。

$t < 0.25T \quad Ra \leq 0.15T; \quad Rz \leq 0.6T$

对于直线度和平面度：1~4级， $Rz = 0.50t$ ；5~9级， $Rz = 0.25t$

对于圆柱度：1~3级， $Rz = 0.25t$ ；4~11级， $Rz = 0.50t$

4) 表面粗糙度与加工方法有密切的关系，在确定表面粗糙度时，应考虑可能采用的加工方法。表 13.4-17 和表 13.4-18 列出了不同加工方法可能达到的表面粗糙度参数 Ra 和 Rz 值的对应关系，表 13.4-19 给出了各种加工工艺能够达到的零件表面粗糙度参数 Ra 和 Rz 值，供参考。

表 13.4-17~表 13.4-19 给出的可能达到的

表 13.4-16 间隙或过盈配合与表面粗糙度的对应关系

间隙或过盈/ μm	表面粗糙度 Ra 值	
	轴	孔
≤ 2.5	0.025	0.05
>2.5~4	0.05	0.10
>4~6.5		0.20
>6.5~10	0.10	
>10~16	0.20	0.40
>16~25	0.20	
>25~40	0.40	0.80

续表 13.4-18

加工方法		表面粗糙度 $R_z / \mu\text{m}$																								
		0.04	0.06	0.1	0.16	0.25	0.4	0.63	1	1.6	2.5	4.0	6.3	10	16	25	40	63	100	160	250	400	630	1000		
主要 分类	名称																									
	沉孔																									
	铰孔																									
	圆周铣																									
	端铣																									
	拉削																									
	锉																									
	圆纵磨																									
	圆平磨																									
	圆切入磨																									
	平圆周磨																									
	平端面磨																									
	抛光磨																									
长行程珩磨																										
短行程珩磨																										
圆研磨																										
平研磨																										
振动研磨																										
抛光研磨																										
喷射																										
深筒抛光																										
火焰切割																										

切

削

表 13.4-19 各种加工工艺能够达到的零件表面粗糙度

加工方法		表面粗糙度		加工方法		表面粗糙度		
		$Ra/\mu m$	$Rz/\mu m$			$Ra/\mu m$	$Rz/\mu m$	
自动气割、带锯或圆盘锯切断		>10~80	>40~320	圆柱铣刀铣削	精	>0.63~5	>3.2~20	
切 断	车	>10~80	>40~320	圆柱铣刀铣削	细	>0.32~1.25	>1.6~6.3	
	铣	>10~40	>40~160		半细铰 (一次铰孔)	钢	>2.5~10	>10~40
车削外圆	砂轮	>1.25~5	>6.3~20	半细铰 (第二次铰)		黄铜	>1.25~10	>6.3~40
	粗车	>5~20	>20~80		铸铁	>0.63~5	>3.2~20	
	半精车	金属	>2.5~10	>10~40	精铰 (第二次铰)	钢、轻合金	>0.63~2.5	>3.2~10
		非金属	>1.25~5	>6.3~20		黄铜、青铜	>0.32~1.25	>1.6~6.3
	精车	金属	>0.63~5	>3.2~20	细铰	钢	>0.16~1.25	>0.8~6.3
		非金属	>0.32~2.5	>1.6~10		轻合金	>0.32~1.25	>1.6~6.3
细车	金属	>0.16~1.25	>0.8~6.3	黄铜、青铜		>0.08~0.32	>0.4~1.6	
(或金刚石车)非金属		>0.08~0.63	>0.4~3.2	端铣刀铣削	粗	>2.5~20	>10~80	
车削端面	粗车	>5~20	>20~80	端铣刀铣削	精	>0.32~5	>1.6~20	
	半精车	金属	>2.5~10		>10~40	高速铣削	粗	>0.63~2.5	>3.2~10
		非金属	>1.25~10	>6.3~20	精		>0.16~0.63	>0.8~3.2
	精车	金属	>1.25~10	>6.3~40	刨 刨	粗	>5~20	>20~80
		非金属	>1.25~10	>6.3~40		精	>1.25~5	>6.3~20
	细车	金属	>0.32~1.25	>1.6~6.3		细(光整加工)	>0.16~1.25	>0.8~6.3
非金属		>0.16~1.25	>0.8~6.3	插 削	粗	>10~40	>40~160	
切 槽	一次行程	>10~20	>40~80	插 削	精	>1.25~10	>0.3~40	
	二次行程	>2.5~10	>10~40		拉 削	精	>0.32~2.50	>1.6~10
高速车削		>0.16~1.25	>0.8~6.3	拉 削	细	>0.08~0.32	>0.4~1.6	
钻	$\leq \phi 15mm$	>2.5~10	>10~40		推 削	精	>0.16~1.25	>0.8~6.3
	$> \phi 15mm$	>5~40	>20~160	细		>0.02~0.63	>0.1~3.2	
扩 孔	粗(有表皮)	>5~20	>20~80	推 削	半 精	>0.63~10	>3.2~40	
	精	>1.25~10	>6.3~40		精	>0.16~1.25	>0.8~6.3	
德倒角(孔的)		>1.25~5	>6.3~20	外圆磨 内圆磨	细	>0.08~0.32	>0.4~1.6	
带导向的德平面		>2.5~10	>10~40		用精密修整的砂轮磨削	>0.02~0.08	>0.1~0.4	
镗 孔	粗 镗	>5~20 >20~80		平面磨	精	>0.32~1.25	>1.6~6.3	
		半精镗	金属		>2.5~10	>10~40	细	>0.04~0.32	>0.2~1.6
	非金属		>1.25~10	>6.3~40	研 磨	粗(一次加工)		>0.16~1.25	>0.8~6.3
	精 镗	金属	>0.63~5	>3.2~20		精(细)	>0.02~0.32	>0.1~1.6
		非金属	>0.32~2.5	>1.6~10	粗		>0.16~0.63	>0.8~3.2
	细 镗	金属	>0.16~1.25	>0.8~6.3	精	>0.04~0.32	>0.2~1.6	
(或金刚石镗)非金属	>0.16~0.63	>0.8~3.2	高速镗	>0.16~1.25	>0.8~6.3			
圆柱铣刀铣削	粗	>2.5~20	>10~80	研 磨	精	>0.04~0.32	>0.2~1.6	

续表 13.4-19

加工方法		表面粗糙度		加工方法		表面粗糙度			
		Ra/μm	Rz/μm			Ra/μm	Rz/μm		
研磨	细(光整加工)	<0.08	<0.4	螺纹加工	切削	研磨	>0.04~1.25 >0.2~6.3		
	精	>0.08~1.25	>0.4~6.3			搓丝模	>0.63~2.5 >3.2~10		
超精加工	细	>0.04~0.16	>0.2~0.8	滚轧		滚丝磨	>0.16~2.5 >0.8~10		
	镜面的(两次加工)	<0.04	<0.2			粗滚	>1.25~5 >6.3~20		
刮	粗	>0.63~5	>3.2~20	齿轮及花键加工	切削	细滚	>0.63~2.5 >3.2~10		
	精	>0.04~0.63	>0.2~3.2			细插	>0.63~2.5 >3.2~10		
抛光	精	>0.08~1.25	>0.4~6.3			细刨	>0.63~5 >3.2~20		
	细(镜面的)	>0.02~0.16	>0.1~0.4			拉	>1.25~5 >6.3~20		
	砂带抛光	>0.08~0.32	>0.4~1.6			剃齿	>0.16~1.25 >0.8~6.3		
	砂布抛光	>0.08~2.5	>0.4~10			磨	>0.08~1.25 >0.4~6.3		
	电抛光	>0.01~2.5	>0.05~10			研	>0.16~0.63 >0.8~3.2		
螺纹加工	切削	板牙、丝锥、自开式板牙头	>0.63~5 >3.2~20			滚轧		热轧	>0.32~1.25 >1.6~6.3
		车刀或梳刀车、铣	>0.63~10 >3.2~40					冷轧	>0.08~0.32 >0.4~1.6
	磨		>0.16~1.25 >0.8~6.3			液压加工		>0.04~0.63 >0.2~3.2	
				钳工锉削		>0.63~20 >3.2~80			
			砂轮清理		>5~80 >20~320				

按加工方法确定表面粗糙度时，应考虑加工的经济成本。不同加工方法所得表面粗糙度 Ra 值与相应加工时间的关系见图 13.4-1。一般来说，表面粗糙度参数值越小，零件的工作性能也越好，使用寿命也越长，但如果不顾成本或功能的需要，耗费大量的加工时间去要求过小的表面粗糙度参数值是不合适的。对某些特定表面来说可能适得其反。

3.4 表面粗糙度参数值应用实例

1) 一些常见表面的粗糙度参数值的选用见表 13.4-20 和表 13.4-21。

2) 选用恰当的 Ra 或 Rz 值，用于合适的零件表面，见表 13.4-22。

4 表面光洁度级别与表面粗糙度参数值对照 (表 13.4-23、表 13.2-24)

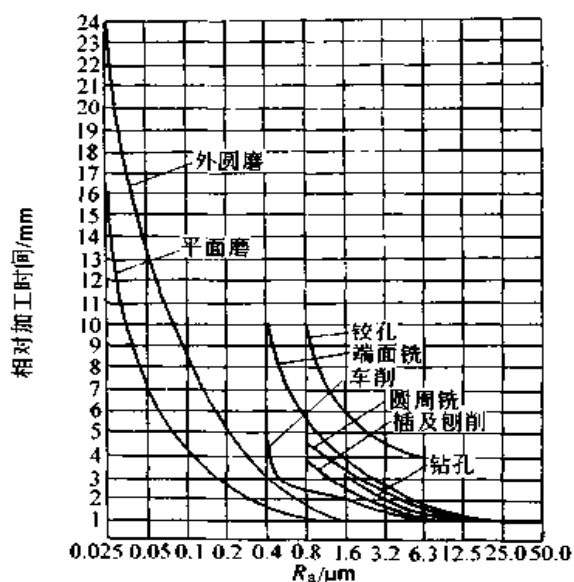


图 13.4-1 不同加工方法所得表面粗糙度 Ra 值与相应加工时间之关系

注：本图不拟作不同加工方法的成本比较
 举例：如果一给定表面磨至 Ra3.2 μm，约需 1 min，要磨到 Ra0.2 μm 则约需 2.5 min

表 13.4-20 一些常用表面的粗糙度参数值 Ra

(μm)

配合表面	公差等级	表面	基本尺寸/mm		液压系统的 液压缸活 塞等表面	表面	高 压		普 通					
			≤ 50	$> 50 \sim 500$			直 径/mm		压力	低 压				
							≤ 10	> 10						
	5	轴	0.2	0.4	密封材料 处的孔、轴 表面	轴	0.025	0.05	0.1	0.2				
		孔	0.4	0.8		孔	0.05	0.1	0.2	0.4				
	6	轴	0.4	0.8		密封材料 速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	≤ 3	5	> 5					
		孔	0.4~0.8	0.8~1.6			橡胶	0.8~1.6 抛光	0.4~0.8 抛光	0.2~0.4 抛光				
	7	轴	0.4~0.8	0.8~1.6			毛毡	0.8~1.6 抛光		—				
		孔	0.8	1.6			迷宫式的	3.2~6.3		—				
	8	轴	0.8	1.6			涂油槽的	3.2~6.3		—				
		孔	0.8~1.6	1.6~3.2										
过盈配合	压入装配	公差等级	基本尺寸/mm				导轨面	性质	速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	平面度公差/ $(\mu\text{m}/100\text{mm})$				
			≤ 50	$> 50 \sim 120$	$> 120 \sim 500$					≤ 6	10	20	60	> 60
		5	轴	0.1~0.2	0.4	0.4		滑 动	≤ 0.5	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2
			孔	0.2~0.4	0.8	0.8		> 0.5	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	
		6~7	轴	0.4	0.8	1.6		滚 动	≤ 0.5	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6
			孔	0.8	1.6	1.6		> 0.5	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	
	8	轴	0.8	0.8~1.6	1.6~3.2	端面支承 表面、端面 轴承等		速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	端面跳动公差/ μm					
		孔	1.6	1.6~3.2	3.2			~ 6	16	25	> 25			
	热装	—	轴	1.6				球面支承	~ 0.5	0.1	0.4	0.8~1.6	3.2	
			孔	1.6~3.2					> 0.5	0.1	0.2	0.8	1.6	
分组装配的零件表面	表面	分组公差/ μm					端面接触 不动的支承 面(法兰 等)	垂直度公差/ $(\mu\text{m}/100\text{mm})$						
		< 2.5	2.5	5	10	20		≤ 25	60	> 60				
		轴	0.05	0.1	0.2	0.4		0.8	1.6	3.2	6.3			
定心精度高的配合表面	表面	径向跳动公差/ μm						箱体分界面 (减速器)	密封的		无垫片			
		2.5	4	6	10	16	20		3.2~6.3	0.8~1.6				
	轴	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	不密封的		6.3~12.5					
	孔	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2~6.3							
滑动轴承表面	表面	公差等级		流体润滑	凸 轮 和 靠 模 工 作 面	类型	线轮廓度公差/ μm							
		IT6~IT9	IT10~IT12				≤ 6	30	50	> 50				
	轴	0.4~0.8	0.8~3.2	0.1~0.4			用刀口或滑块	0.4	0.8	1.6	3.2			
孔	0.8~1.6	1.6~3.2	0.2~0.8	用滚柱	0.8	1.6	3.2	6.3						

表 13.4-21 一些零件表面的粗糙度高度参数值和附加参数值要求

表 面	Ra/ μm	t _v /% c = 20%	l/ mm	表 面	Ra/ μm	t _v /% c = 20%	l/ mm	
和滑动轴承配合的支承轴颈 ^①	0.32	30	0.8	齿轮齿面	0.63~ 1.25		0.8	
和青铜轴瓦配合的支承轴颈	0.40	15	0.8	蜗杆牙侧面	0.32		0.25	
和巴比特合金轴瓦配合的支承轴颈	0.25	20	0.25	铸铁箱体的主要孔	1.0~ 2.0		0.8	
和铸铁轴瓦配合的支承轴颈	0.32	40	0.8	钢箱体上的主要孔	0.63~ 1.6		0.8	
和石墨片轴瓦配合的支承轴颈	0.32	40	0.8	箱体和盖的结合面 ^②			2.5	
和滚动轴承配合的支承轴颈滚动轴承的钢球和滚柱的工作面	0.8		0.8	机床滑动导轨	普通的	0.63		0.8
					高精度的	0.10	15	0.25
					重型的	1.6		0.25
滚动导轨		0.16		0.25				
保证摩擦为选择性转移情况的表面	0.25	15	0.25	缸体工作面	0.40	40	0.8	
和齿轮孔配合的轴颈	1.6		0.8	活塞环工作面	0.25		0.25	
按疲劳强度设计的轴表面		60	0.8	曲轴轴颈	0.32	30	0.8	
				曲轴连杆轴颈	0.25	20	0.25	
喷镀过的滑动摩擦面	0.08	10	0.25	活塞侧缘	0.80		0.8	
准备喷镀的表面 ^③			0.8	活塞上的活塞销孔	0.50		0.8	
				活塞销	0.25	15	0.25	
电化学镀层前的表面	0.2~ 0.8			分配轴轴颈和凸轮部分	0.32	30	0.8	
				油针偶件	0.08	15	0.25	
齿轮配合孔	0.5~ 2.0		0.8	摇杆小轴孔和轴颈	0.63		0.8	
				腐蚀性的表面 ^④	0.063	10	0.25	

①R_v = 1 μm; ②R_z = 125 μm, S_m = 0.5 mm; ③R_z = 10 μm; ④R_m = 0.032 mm。

表 13.4-22 表面粗糙度选用举例

Ra/μm ≤	表面状况	加工方法	应用举例
100	明显可见的刀痕	粗车、镗、刨、钻	粗加工的表面，如粗车、粗刨、切断等表面，用粗铣刀和粗砂轮等加工的表面，一般很少采用
25、50			粗加工后的表面，焊接前的焊缝、粗钻孔壁等
12.5	可见刀痕	粗车、刨、铣、钻	一般非结合表面，如轴的端面、倒角、齿轮及带轮的侧面、键槽的非工作表面，减重孔眼表面等
6.3	可见加工痕迹	车、镗、刨、钻、铣、锉、磨、粗绞、铣齿	不重要零件的非配合表面，如支柱、支架、外壳、衬套、轴、盖等的端面。紧固件的自由表面，紧固件通孔的表面，内、外花键的非定心表面，不作为计量基准的齿轮顶圆表面等
3.2	微见加工痕迹	车、镗、刨、铣、刮1~2点/cm ² 、拉、磨、锉、滚压、铣齿	和其他零件联接不形成配合的表面，如箱体、外壳、端盖等零件的端面。要求有定心及配合特性的固定支承面如定心的轴肩，键和键槽的工作表面，不重要的紧固螺纹的表面，需要滚花或氧化处理的表面等

续表 13.4.22

$Ra/\mu\text{m}$ \leq	表面状况	加工方法	应用举例
1.6	看不清加工痕迹	车、镗、刨、铣、铰、拉、磨、滚压、刮 1~2 点/cm ² 、铣齿	安装直径超过 80 mm 的 G 级轴承的外壳孔，普通精度齿轮的齿面，定位销孔，V 带轮的表面，外径定心的内花键外径，轴承盖的定中心凸肩表面等
0.8	可辨加工痕迹的方向	车、镗、拉、磨、立铣、刮 3~10 点/cm ² 、滚压	要求保证定心及配合特性的表面，如锥销与圆柱销的表面，与 G 级精度滚动轴承相配合的轴颈和外壳孔，中速转动的轴颈，直径超过 80 mm 的 E、D 级滚动轴承配合的轴颈及外壳孔，内、外花键的定心内径，外花键键侧及定心外径，过盈配合 IT7 级的孔 (H7)，间隙配合 IT8~IT9 级的孔 (H8, H9)，磨削的轮齿表面等
0.4	微辨加工痕迹的方向	铰、磨、镗、拉、刮 3~10 点/cm ² 、滚压	要求长期保持配合性质稳定的配合表面，IT7 级的轴、孔配合表面，精度较高的轮齿表面，受变应力作用的重要零件，与直径小于 80 mm 的 E、D 级轴承配合的轴颈表面，与橡胶密封件接触的轴表面，尺寸大于 120 mm 的 IT13~IT16 级孔和轴用量规的测量表面
0.2	不可辨加工痕迹的方向	布轮磨、磨、研磨、超级加工	工作时受变应力作用的重要零件的表面，保证零件的疲劳强度、防腐性和耐久性，并在工作时不破坏配合性质的表面，如轴颈表面、要求气密的表面和支承表面，圆锥定心表面等。IT5、IT6 级配合表面、高精度齿轮的齿面，与 C 级滚动轴承配合的轴颈表面，尺寸大于 315 mm 的 IT7~IT9 级孔和轴用量规及尺寸大于 120~315 mm 的 IT10~IT12 级孔和轴用量规的测量表面等
0.1	暗光泽面	超级加工	工作时承受较大变应力作用的重要零件的表面，保证精确定心的锥体表面，液压传动用的孔表面，汽缸套的内表面，活塞销的外表面，仪器导轨面，阀的工作面，尺寸小于 120 mm 的 IT10~IT12 级孔和轴用量规测量表面等
0.05	亮光泽面	超级加工	保证高度气密性的接合表面，如活塞、柱塞和汽缸内表面，摩擦离合器的摩擦表面，对同轴度有精确要求的轴和孔，滚动导轨中的钢球或滚子和高速摩擦的工作表面
0.025	镜状光泽面		高压柱塞泵中柱塞和柱塞套的配合表面，中等精度仪器零件配合表面，尺寸大于 120 mm 的 IT6 级孔用量规、小于 120 mm 的 IT7~IT9 级轴用和孔用量规测量表面
0.012	雾状镜面	超级加工	仪器的测量表面和配合表面尺寸超过 100 mm 的块规工作面
0.0063			块规的工作表面，高精度测量仪器的测量面，高精度仪器摩擦机构的支承表面

表 13.4-23 表面光洁度级别与表面粗糙度 R_a 系列值的对照 (μm)

表面光洁度级别 R_a 范围 (GB/T 1031-1968)	表面粗糙度 R_a 系列值 (GB/T 1031-1995)	表面光洁度级别 R_a 范围 (GB/T 1031-1968)	表面粗糙度 R_a 系列值 (GB/T 1031-1995)	表面光洁度级别 R_a 范围 (GB/T 1031-1968)	表面粗糙度 R_a 系列值 (GB/T 1031-1995)
$\nabla 1$	100	$\nabla 6$	3.2	$\nabla 11$	0.10
$>40 \sim 80$	80	$>1.25 \sim 2.5$	2.5	$>0.04 \sim 0.08$	0.08
	63		2.0		0.063
$\nabla 2$	50	$\nabla 7$	1.6	$\nabla 12$	0.050
$>20 \sim 40$	40	$>0.63 \sim 1.25$	1.25	$>0.02 \sim 0.04$	0.04
	32		1.00		0.032
$\nabla 3$	25	$\nabla 8$	0.80	$\nabla 13$	0.025
$>10 \sim 20$	20	$0.32 \sim 0.63$	0.63	$>0.01 \sim 0.02$	0.02
	16		0.50		0.016
$\nabla 4$	12.5	$\nabla 9$	0.40	$\nabla 14$	0.012
$>5 \sim 10$	10	$>0.16 \sim 0.32$	0.32	≤ 0.01	0.010
	8		0.25		0.008
$\nabla 5$	6.3	$\nabla 10$	0.20		
$>2.5 \sim 5.0$	5.0	$>0.08 \sim 0.16$	0.16		
	4.0		0.125		
	3.2		0.10		

注：带黑圆点的数值为标准附录中的补充系列值，仅在标准中规定的数值不能满足表面功能和生产经济合理性时使用。

表 13.4-24 表面光洁度级别与表面粗糙度 R_z 系列值的对照 (μm)

表面光洁度级别 R_z 范围 (GB/T 1031-1968)	表面粗糙度 R_z 系列值 (GB/T 1031-1995)	表面光洁度级别 R_z 范围 (GB/T 1031-1968)	表面粗糙度 R_z 系列值 (GB/T 1031-1995)	表面光洁度级别 R_z 范围 (GB/T 1031-1968)	表面粗糙度 R_z 系列值 (GB/T 1031-1995)
$\nabla 1$	400	$\nabla 6$	12.5	$\nabla 11$	0.4
$>160 \sim 320$	320	$>6.3 \sim 10$	10	$0.2 \sim 0.4$	0.32
	250		8		0.25
$\nabla 2$	200	$>3.2 \sim 6.3$	6.3	$\nabla 12$	0.2
$>80 \sim 160$	160		5	$>0.1 \sim 0.2$	0.16
	125	$\nabla 8$	4		0.125
$\nabla 3$	100	$>1.6 \sim 3.2$	3.2	$\nabla 13$	0.1
$>40 \sim 80$	80		2.5	$>0.05 \sim 0.1$	0.08
	63	$\nabla 9$	2		0.063
$\nabla 4$	50	$>0.8 \sim 1.6$	1.6	$\nabla 14$	0.05
$>20 \sim 40$	40		1.25	≤ 0.05	0.040
	32	$\nabla 10$	1		0.032
$\nabla 5$	25	$>0.4 \sim 0.8$	0.8		0.025
$>10 \sim 20$	20		0.63		
	16		0.5		

注：带黑圆点的数值为标准附录中的补充系列值，仅在标准中规定的数值不能满足表面功能和生产经济合理性时使用。

5 主要工业国家表面粗糙度参数及其数值对照 (表 13.4-25 ~ 表 13.4-29)

表 13.4-25 各国表面粗糙度评定参数及其符号

国别	算术平均偏差	微观不平度十点高度	轮廓最大高度	不平度的平均间距	单峰平均间距	轮廓支承长度率	轮廓不平度的平均高度	轮廓均根偏差	轮廓最大峰高
ISO 468	R_a	R_z	R_y	S_m	S	t_p			
中国	R_a	R_z	R_y	S_m	S	t_p			
前苏联	R_a	R_z	R_y	S_m	S	t_p			
英国	R_a	R_z	R_y	S_m	S	t_p			
美国	R_a	R_z	$R_y (R_t)$		S	t_p	R_v	R_u	R_p
日本	R_a	R_z	R_{max}			t_p			R_p
德国	R_a	R_z	R_{max}	A_r					
意大利	R_a		R_{max}			t			R_v
奥地利	R_a	R_z	R_t			t_p			R_p
法国	R_a			A_k					
波兰	R_a	R_z				t_p			
罗马尼亚	R_a	R_z	R_{max}						
瑞士	R_a								
澳大利亚	R_a								
丹麦	R_a	R_z	R_{max}						R_u
捷克	R_a	R_z	R_{max}						
南斯拉夫	R_a	R_z	R_{max}			t_p			
瑞典	R_a	R_z	R_{max}		K	K_B			
新西兰	R_a								
匈牙利	R_a		R_{max}						R_t
芬兰	R_a								
加拿大	R_a	R_z	R_{max}						
保加利亚	R_a	R_z	R_{max}						
阿根廷	h_m								
荷兰	R_a								
西班牙	h_m								

表 13.4-26 各国 R_a 系列值的对照 (μm)

ISO	中国	英国	日本	波兰	奥地利	意大利	德国	法国	罗马尼亚	瑞士	澳大利亚	丹麦	捷克	美国	前苏联
(0.008)	(0.008)			0.008	0.006	(0.008)	0.006						(0.008)		
(0.010)	(0.010)			0.010		(0.01)						0.10	(0.010)		
0.012	0.012	0.025	0.013	0.012	0.012	(0.012)	0.012	0.0125	0.012				0.012	(0.012)	0.012
(0.016)	(0.016)			0.016		(0.016)						0.016	(0.016)		

续表 13.4-26

ISO	中国	英国	日本	波兰	奥地利	意大利	德国	法国	罗马尼亚	瑞士	澳大利亚	丹麦	捷克	美国	前苏联
(0.020)	(0.020)			0.020		(0.02)							(0.020)		
0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
(0.032)	(0.032)			0.032		(0.032)							(0.032)		
(0.040)	(0.040)			0.040		(0.04)						0.04	(0.04)		
0.050	0.050	0.05	0.05	0.050	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.050	0.050	0.05
(0.063)	(0.063)			0.063		(0.063)						0.063	(0.063)		
(0.080)	(0.080)			0.080		(0.08)							(0.080)		
0.100	0.100	0.1	0.1	0.100	0.1	0.1	0.1	0.1	0.10	0.10	0.10	0.100	0.100	0.10	0.10
(0.125)	(0.125)			0.125		(0.125)							(0.125)		
(0.160)	(0.160)			0.160		(0.16)						0.160	(0.16)		
0.20	0.20	0.2	0.2	0.20	0.2	0.2	0.2	0.2	0.20	0.20	0.20		0.20	0.20	0.20
(0.25)	(0.25)			0.25		(0.25)						0.25	(0.25)		
(0.32)	(0.32)			0.32		(0.32)							(0.32)		
0.40	0.40	0.4	0.4	0.40	0.4	0.4	0.4	0.4	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
(0.50)	(0.50)			0.50		(0.5)							(0.50)		
(0.63)	(0.63)			0.63		(0.63)						0.63	(0.63)		
0.80	0.80	0.8	0.8	0.80	0.8	0.8	0.8	0.8	0.80	0.80	0.80		0.80	0.80	0.80
(1.00)	(1.00)			1.00		(1)						1.00	(1.00)		
(1.25)	(1.25)			1.25		(1.25)							(1.25)		
1.60	1.60	1.6	1.6	1.60	1.6	1.6	1.6	1.6	1.60	1.60	1.60	1.60	1.6	1.60	1.60
(2.0)	(2.0)			2.0		(2)							(2.0)		
(2.5)	(2.5)			2.5		(2.5)						2.5	(2.5)		
3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2		3.2	3.2	3.2
(4.0)	(4.0)			4.0		(4)						4.0	(4.0)		
(5.0)	(5.0)			5.0		(5)							(5.0)		
6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
(8.0)	(8.0)			8.0		(8)							(8.0)		
(10.0)	(10.0)			10.0		(10)						10	(10.0)		

续表 13.4-26

ISO	中国	英国	日本	波兰	奥地利	意大利	德国	法国	罗马尼亚	瑞士	澳大利亚	丹麦	捷克	美国	前苏联
12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5		12.5	12.5	12.5
(16.0)	(16.0)			16.0		(16)						16	(16)		
(20)	(20)			20		(20)							(20)		
25	25	25	25	25	25	(25)	25	25	25	25	25	25	25	25	25
(32)	(32)			32		(32)							(32)		
(40)	(40)			40		(40)						40	(40)		
50	50	50	50	50	50	(50)	50	50	50	50	50		50	50	50
(63)	(63)			63		(63)						63	(63)		
(80)	(80)			80		(80)							(80)		
100	100	100	100	100	100	(100)		100	100			100	100		100
(125)				125									(125)		
(160)				160									(160)		
200		200		200				200					(200)		200
(250)				250									(250)		

注：括号内的数值为补充系列值或第2系列值。

表 13.4-27 各国 R_z 、 R_y (R_{max}) 系列值的对照 (μm)

ISO	中国	英国	日本	波兰	奥地利	意大利	西德	罗马尼亚	丹麦	捷克	前苏联
0.025	0.025	0.025								0.025	0.025
(0.032)	(0.032)									(0.032)	
(0.040)	(0.040)			0.040	0.040	0.04	0.04		0.04	(0.040)	
0.05	0.05	0.05	0.05	0.050		0.05				0.050	0.05
(0.063)	(0.063)			0.063	0.063	0.063	0.06	0.063	0.063	(0.063)	
(0.080)	(0.080)			0.080		0.08				(0.080)	
0.100	0.100	0.1	0.1	0.100	0.10	0.1	0.1		0.10	0.100	0.10
(0.125)	(0.125)			0.125		0.125		0.125		(0.125)	
(0.160)	(0.160)			0.160	0.16	0.16	0.16		0.16	(0.160)	
0.20	0.20	0.2	0.2	0.20		0.2				0.20	0.20
(0.25)	(0.25)			0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	(0.25)	
(0.32)	(0.32)			0.32		0.32				(0.32)	
0.40	0.40	0.4	0.4	0.40	0.40	0.4	0.4		0.40	0.40	0.40
(0.50)	(0.50)			0.50		0.5		0.5		(0.50)	
(0.63)	(0.63)			0.63	0.63	0.63	0.63		0.63	(0.63)	

续表 13.4-27

ISO	中国	英国	日本	波兰	奥地利	意大利	西德	罗马尼亚	丹麦	捷克	前苏联
0.80	0.80	0.8	0.8	0.80		0.8				0.80	0.80
(100)	(1.00)			1.00	1.0	1	1.0	1.0	1.00	(1.00)	
(1.25)	(1.25)			1.25		1.25				(1.25)	
1.60	1.60	1.6	1.6	1.60	1.6	1.6	1.6		1.60	1.6	1.60
(2.0)	(2.0)			2.0		2		2.0		(2.0)	
(2.5)	(2.5)			2.5	2.5	2.5	2.5		2.5	(2.5)	
3.2	3.2	3.2	3.2	3.2		3.2				3.2	3.2
(4.0)	(4.0)			4.0	4.0	4	4.0	4.0	4.0	(4.0)	
(5.0)	(5.0)			5.0		5				(5.0)	
6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3		6.3	6.3	6.3
(8.0)	(8.0)			8.0		8		8.0		(8.0)	
(10.0)	(10.0)			10.0	10	10	10		10	(10.0)	
12.5	12.5	12.5	12.5	12.5		12.5		12.5		12.5	12.5
(16.0)	(16.0)			16.0	16	16	16		16	(16)	
(20)	(20)			20		20				(20)	
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
(32)	(32)			32		32				(32)	
(40)	(40)			40	40	40	40		40	(40)	
50	50	50	50	50		50		50		50	50
(63)	(63)			63	63	63	63		63	(63)	
(80)	(80)			80		80				(80)	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
(125)	(125)			125		125				(125)	
(160)	(160)			160	160	160	160		160	(160)	
200	200	200	200	200		200		200		200	200
(250)	(250)			250	250	250	250		250	(250)	
(320)	(320)			320		320				(320)	
400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
(500)	(500)			500						(500)	
(630)	(630)			630	630		630			(630)	
800	800	800		800						800	
(1000)	(1000)			1000	1000		1000			1000	
1250	1250			1250						1250	
1600	1600	1600		1600	1600		1600			1600	
				2500	2500		2500				

注：括号内的数值为补充系列值或第2系列值。

表 13.4-28 各国 S、S_m 系列值比较 (mm)

ISO	中国	英国	前苏联	捷克	ISO	中国	英国	前苏联	捷克	ISO	中国	英国	前苏联	捷克
(0.002)	(0.002)		0.002	0.002	0.050	0.050	0.05	0.050	0.050	(1.00)	(1.00)		1.00	1.00
(0.003)	(0.003)		0.003	0.003	(0.063)	(0.063)		0.063	0.063	(1.25)	(1.25)		1.25	1.25
(0.004)	(0.004)		0.004	0.004	(0.080)	(0.080)		0.080	0.080	1.60	1.60	1.6	1.6	1.6
(0.005)	(0.005)		0.005	0.005	0.100	0.100	0.1	0.100	0.100	(2.0)	(2.0)		2.0	2.0
0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	(0.125)	(0.125)		0.125	0.125	(2.5)	(2.5)		2.5	2.5
(0.008)	(0.008)		0.008	0.008	(0.160)	(0.160)		0.160	0.160	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
(0.010)	(0.010)		0.010	0.010	0.20	0.20	0.2	0.2	0.2	(4.0)	(4.0)		4.0	4.0
0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	(0.25)	(0.25)		0.25	0.25	(5.0)	(5.0)		5.0	5.0
(0.0160)	(0.0160)		0.0160	0.0160	(0.32)	(0.32)		0.32	0.32	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
(0.020)	(0.020)		0.020	0.020	0.40	0.40	0.4	0.40	0.40	(8.0)	(8.0)		8.0	8.0
0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	(0.50)	(0.50)		0.50	0.50	(10.0)	(10.0)		10.0	10.0
(0.032)	(0.032)		0.032	0.032	(0.63)	(0.63)		0.63	0.63	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
(0.040)	(0.040)		0.040	0.040	0.80	0.80	0.8	0.80	0.80					

注：表中未加括号的值为优先采用值。前苏联、波兰、捷克标准中，对 S_m、S 参数的数值未有优先采用值的规定。

表 13.4-29 各国 r_p 系列值比较 (%)

ISO	中国	前苏联	意大利	德国	奥地利	捷克	ISO	中国	前苏联	意大利	德国	奥地利	捷克
10	10	10	10	10	10	10	50	50	50	50	50	50	50
15	15	15	15	15	16	16	60	60	60	60	60	63	63
20	20	20	20	20	20	20	70	70	70	70	70	70	70
25	25	25	25	25	25	25	80	80	80	80	80	80	80
30	30	30	30	30	32	30	90	90	90	90	90	90	90
40	40	40	40	40	40	40				95	95	95	

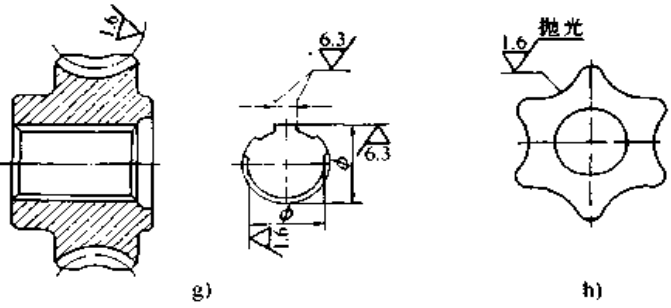
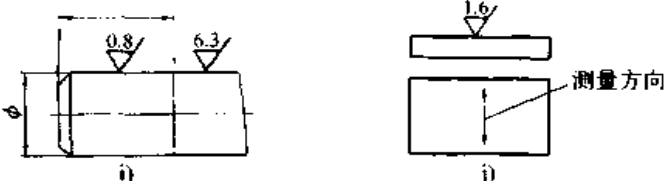
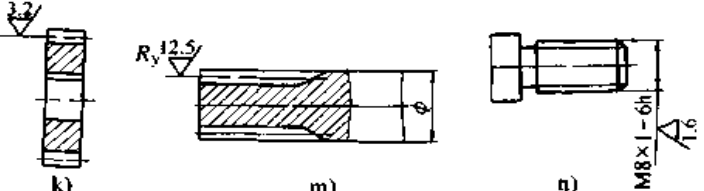
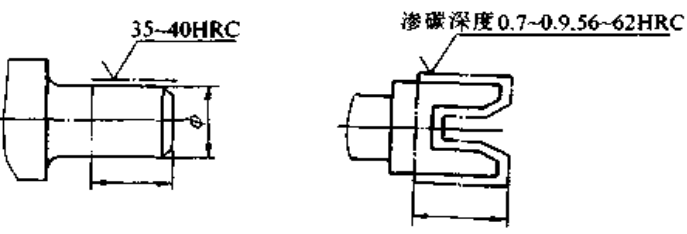
6 表面粗糙度在图样上的标注方法 (表 13.4-30)

表 13.4-30 表面粗糙度的图样表示法 (摘自 GB/T 131—1993)

标注方法	图 例
<p>表面粗糙度符号、代号一般注在可见轮廓线、尺寸界线、引出线或它们的延长线上。符号的尖端必须从材料外指向表面</p> <p>表面粗糙度代号中数字及符号的方向必须按图 a、图 b 的规定标注，带有横线的表面粗糙度符号应按图 c 的规定标注</p>	

标注方法	图 例
<p>在同一图样上, 每一表面一般只标注一次符号、代号, 并尽可能靠近有关的尺寸线, 见图 a。当地位狭小或不便标注时, 符号代号可以引出标注, 如图 d</p>	
<p>当零件所有表面具有相同的表面粗糙度要求时, 其符号、代号可在图样的右上角统一标注, 见图 e 或图 f。当零件的大部分表面具有相同的表面粗糙度要求时, 对其中使用最多的一种符号、代号可以统一注在图样的右上角, 并加注“其余”两字, 见图 a、图 d</p>	
<p>为了简化标注方法或者标注位置受到限制时, 可以标注简化代号, 也可采用省略的注法, 但必须在标题栏附近说明这些简化符号、代号的含义</p>	
<p>中心孔的工作表面, 键槽工作面, 倒角、圆角的表面粗糙度代号, 可以简化标注</p>	

续表 13.4-30

标注方法	图 例
<p>零件上连续表面及重复要素（孔、槽、齿…等）的表面（图 g、图 h）和用细实线联接不连续的同一表面（图 d），其表面粗糙度符号、代号只标注一次</p>	 <p>g) h)</p>
<p>同一表面上有不同的表面粗糙度要求时，须用细实线画出其分界线，并注出相应的表面粗糙度代号和尺寸（图 i）</p> <p>需要规定表面粗糙度测量截面的方向时，其标注方法见图 j）</p>	 <p>i) j)</p>
<p>齿轮、渐开线花键、螺纹等工作表面没有画出齿（牙）形时，其表面粗糙度代号可按图 k、图 m、图 n 的方式标注</p>	 <p>k) m) n)</p>
<p>需要将零件局部热处理或局部镀（涂）覆时，应用粗点划线画出其范围并标注相应的尺寸，也可将其要求注写在表面粗糙度符号长边的横线上</p>	 <p>35-40HRC 渗碳深度 0.7~0.9.56-62HRC</p>

第 5 章 螺 纹

1 螺纹的种类、特点和应用 (表 13.5-1)

表 13.5-1 螺纹的种类、特点和应用

种 类	螺纹代号	特 点	应 用	
紧 固 螺 纹	普通螺纹 GB/T 192—1981	M	牙型角为 60° ，是联接螺纹的基本形式，牙根强度高，具有良好的自锁性能。普通螺纹按螺距 P 不同分为粗牙和细牙两种，细牙螺距小径比粗牙大，强度高，自锁性更好，但细牙螺纹不耐磨，易滑扣	工程中应用最广泛，一般联接常采用粗牙螺纹，细牙螺纹多用于薄壁管件或承受振动冲击和变载荷的联接，还可用于轻载和精密的微调机构中的螺旋副
管 螺 纹	非螺纹密封的圆柱管螺纹 GB/T 7307—1987	G	牙型角为 55° ，公称直径指管子内径，内、外螺纹公称牙型间没有间隙，螺纹副没有密封性，联接后需要有密封性时，可压紧螺纹副外的密封面，亦可在密封面间添加密封物	通常用于压力低于 1.5MPa 的水、煤气管路，润滑及电线管路中，如旋塞阀、管接头及其他附件
	用螺纹密封的圆锥管螺纹 GB/T 7306—1987	R—圆锥外螺纹 R _c —圆锥内螺纹 R _p —圆柱内螺纹	牙型角为 55° ，公称直径指管子内径，螺纹分布在 1:16 的圆锥管壁上。它包括圆锥内螺纹与圆锥外螺纹和圆柱内螺纹与圆锥外螺纹两种联接形式。必要时，允许在螺纹副内添加密封物，以保证联接的密封性	通常用于高温、高压系统和润滑系统，如管子、管接头、旋塞、阀门及其他附件
	60°圆锥管螺纹 GB/T 12716—1991	NPT	牙型角 $\alpha = 60^\circ$ ，其他与 55° 圆锥管螺纹相同	用于汽车、拖拉机、航空机械、机床的燃料、油、水、气输送系统的管联接
	米制锥螺纹 GB/T 1415—1992	ZM		用于依靠螺纹密封的联接螺纹（水、煤气管道用管螺纹除外）
传 动 螺 纹	矩形螺纹		牙型为正方形，牙型角 $\alpha = 0^\circ$ ，牙厚为螺距的一半。效率高，精确制造困难（为便于加工，可制成牙型角 $\alpha = 10^\circ$ ），螺纹副磨损后，间隙难以补偿与修复；对中精度低，牙根强度弱	用于传动或传动螺旋

续表 13.5-1

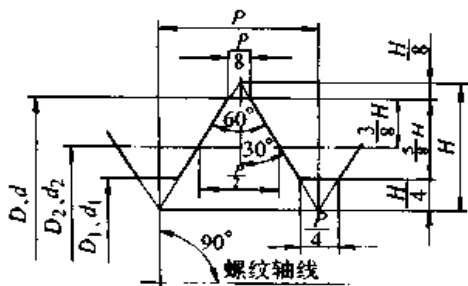
种 类	螺纹代号	特 点	应 用
传动 螺 纹	梯形螺纹 GB/T 5796.1-1986	Tr	牙型角 $\alpha = 30^\circ$ ，螺纹副的大径和小径处，有相等的径向间隙。牙根强度高，螺纹的工艺性好；内外螺纹以锥面贴合，对中性好，不易松动；用剖分式螺母，可以调整和消除间隙。与矩形螺纹比，效率较低
	锯齿形螺纹 GB/T 13576.1-1992	B	牙型角 $\alpha = 33^\circ$ （承载面的斜角为 3° 、非承载面的斜角为 30° ），综合了矩形螺纹效率高和梯形螺纹牙根强度高的特点。外螺纹的牙底为较大的圆弧，减小了应力集中。螺纹副的大径处无间隙，便于对中

2 紧固螺纹

2.1 普通螺纹

2.1.1 普通螺纹基本牙型和基本尺寸 (表 13.5-2)

表 13.5-2 普通螺纹基本牙型及其基本尺寸 (GB/T 192-1981、GB/T 193-1981、GB/T 196-1981)
(mm)



$$D_1 = D - 2 \times \frac{5}{8} H \quad D_2 = D - 2 \times \frac{3}{8} H$$

$$d_1 = d - 2 \times \frac{5}{8} H \quad d_2 = d - 2 \times \frac{3}{8} H$$

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P = 0.866\ 025\ 404 P$$

D—内螺纹大径；d—外螺纹大径；
D₂—内螺纹中径；d₂—外螺纹中径；
D₁—内螺纹小径；d₁—外螺纹小径；
P—螺距；H—原始三角形高度

公称直径 D、d			螺距 P	中径 D ₂ 或 d ₂	小径 D ₁ 或 d ₁	公称直径 D、d			螺距 P	中径 D ₂ 或 d ₂	小径 D ₁ 或 d ₁
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列			
1			0.25*	0.838	0.729	1.4			0.3*	1.205	1.075
			0.2	0.870	0.783				0.2	1.270	1.183
	1.1		0.25*	0.938	0.829	1.6			0.35*	1.373	1.221
			0.2	0.970	0.883				0.2	1.470	1.383
1.2			0.25*	1.038	0.929	1.8			0.35*	1.573	1.421
			0.2	1.070	0.983				0.2	1.670	1.583

续表 13.5-2

公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列			
2			0.4*	1.740	1.567	12			1.75	10.863	10.106
			0.25	1.838	1.729				1.5	11.026	10.376
	2.2		0.45*	1.908	1.713				1.25	11.188	10.647
			0.25	2.038	1.929				1	11.350	10.917
2.5			0.45*	2.208	2.013				(0.75)	11.513	11.188
			0.35	2.273	2.121				(0.5)	11.675	11.459
3			0.5*	2.675	2.459			14	2	12.701	11.835
			0.35	2.773	2.621				1.5	13.026	12.376
	3.5		(0.6)	3.110	2.850				1.25	13.188	12.647
			0.35	3.273	3.121				1	13.350	12.917
4			0.7*	3.545	3.242				(0.75)	13.513	13.188
			0.5	3.675	3.459				(0.5)	13.675	13.459
	4.5		(0.75)*	4.013	3.688			15	1.5	14.026	13.376
			0.5	4.175	3.959				(1)	14.350	13.917
5			0.8*	4.480	4.134	16			2	14.701	13.835
			0.5	4.675	4.459				1.5	15.026	14.376
		5.5	0.5	5.175	4.959				1	15.350	14.917
									(0.75)	15.513	15.188
6			1*	5.350	4.917				(0.5)	15.675	15.459
			0.75	5.513	5.188				17	1.5	16.026	15.376
			(0.5)	5.675	5.459			(1)		16.350	15.917
		7	1*	6.350	5.917				2.5*	16.376	15.294
			0.75	6.513	6.188				2	16.701	15.835
			(0.5)	6.675	6.459			18	2.5	17.026	16.376
			1.25*	7.188	6.647				1	17.350	16.917
8			1	7.350	6.917				(0.75)	17.513	17.188
			0.75	7.513	7.188				(0.5)	17.675	17.459
			(0.5)	7.675	7.459				2.5*	18.376	17.294
									2	18.701	17.835
		8.5	(1.25)*	8.188	7.647	20			1.5	19.026	18.376
									1	19.350	18.917
	9		1	8.350	7.917				(0.75)	19.513	19.188
			0.75	8.513	8.188				(0.5)	19.675	19.459
			(0.5)	8.675	8.459				2.5*	20.376	19.294
									2	20.701	19.835
10			1.5*	9.026	8.376			22	1.5	21.026	20.376
			1.25	9.188	8.647				1	21.350	20.917
			1	9.350	8.917				(0.75)	21.513	21.188
			0.75	9.513	9.188				(0.5)	21.675	21.459
			(0.5)	9.675	9.459						
		11	(1.5)*	10.026	9.376	24			3*	22.051	20.752
			1	10.350	9.917				2	22.701	21.835
			0.75	10.513	11.188				1.5	23.026	22.376
			(0.5)	10.675	10.459				1	23.350	22.917
									(0.75)	23.513	23.188

续表 13.5-2

公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列			
		25	2 1.5 (1)	23.701 24.026 24.350	22.835 23.376 23.917	42			4.5 [*] (4) 3 2 1.5 (1)	39.077 39.402 40.051 40.701 41.026 41.350	37.129 37.670 38.752 39.835 40.376 40.917
		26	1.5	25.026	24.376						
	27		3 [*] 2 1.5 1 (0.75)	25.051 25.701 26.026 26.350 26.513	23.752 24.835 25.376 25.917 26.188	45			4.5 [*] (4) 3 2 1.5 (1)	42.077 42.402 43.051 43.701 44.026 44.350	40.129 40.670 41.752 42.835 43.376 43.917
		28	2 1.5 1	26.701 27.026 27.350	25.835 26.376 26.917						
30			3.5 (3) 2 1.5 1 (0.75)	27.727 28.051 28.701 29.026 29.350 29.513	26.211 26.752 27.835 28.376 28.917 29.188	48			5 [*] (4) 3 2 1.5 (1)	44.752 45.402 46.051 46.701 47.026 47.350	44.587 43.670 44.752 45.835 46.376 46.917
		32	2 1.5	30.701 31.026	29.835 30.376				50	(3) (2) 1.5	48.051 48.701 49.026	46.752 47.835 48.376
	33		3.5 (3) 2 1.5 (1) (0.75)	30.727 31.051 31.701 32.026 32.350 32.513	29.211 29.752 30.835 31.376 31.917 32.188	52			5 [*] (4) 3 2 1.5 (1)	48.752 49.402 50.051 50.701 51.026 51.350	46.587 47.670 48.752 46.835 50.376 50.917
		35	1.5	34.026	33.376					(4) (3) 2 1.5	52.402 53.051 53.701 54.026	55.670 51.752 52.835 53.376
36			4 [*] 3 2 1.5 (1)	33.402 34.051 34.701 35.026 35.350	31.670 32.752 33.835 34.376 34.917	56			5.5 [*] 4 3 2 1.5 (1)	52.428 53.402 54.051 54.701 55.026 55.350	50.046 51.670 52.752 53.835 54.376 54.917
		38	1.5	37.026	36.376					(4) (3) 2 1.5	55.402 56.051 56.701 57.026	53.670 54.752 55.835 56.376
	39		4 [*] 3 2 1.5 (1) (3)	36.402 37.051 37.701 38.026 38.350 38.051	34.670 35.752 36.835 37.376 37.917 36.752	58			(4) (3) 2 1.5	55.402 56.051 56.701 57.026	53.670 54.752 55.835 56.376
		40	(2) 1.5	38.701 39.026	37.835 38.376						

续表 13.5-2

公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列			
	60		(5.5)*	56.428	54.046				6	72.103	69.505
			4	57.402	55.670				4	73.402	71.670
			3	58.051	56.752				3	74.051	72.752
			2	58.701	57.835		76		2	74.701	73.835
			1.5	59.026	58.376				1.5	75.026	74.376
			(1)	59.350	58.917				(1)	75.350	74.917
			(4)	59.402	57.670				2	76.701	75.835
		62	(3)	60.051	58.752				6	76.103	73.505
			2	60.701	56.835				4	77.402	75.670
			1.5	61.026	60.376		80		3	78.051	76.752
			6*	60.103	57.505				2	78.701	77.835
		4	61.402	59.670				1.5	79.026	78.376	
		3	62.051	60.752				(1)	79.350	78.917	
64			2	62.701	61.835				2	80.701	79.835
			1.5	63.026	62.376		82		6	81.103	78.505
			(1)	63.350	62.917				4	82.402	80.670
			(4)	62.402	60.670				3	83.051	81.752
		(3)	63.051	61.752		85			2	83.701	82.835
		2	63.701	62.835				(1.5)	84.026	83.376	
		1.5	64.026	63.376				6	86.103	83.505	
		6*	64.103	61.505				4	87.402	85.670	
	68		4	65.402	63.670				3	88.051	86.752
			3	66.051	64.752		90		2	88.701	87.835
			2	66.701	65.835				(1.5)	89.026	88.376
			1.5	67.026	66.376				6	91.103	88.605
			(1)	67.350	66.917				4	92.402	90.670
		(6)	66.103	63.505				3	93.051	91.752	
		70	(4)	67.402	65.670		95		2	93.701	92.835
			(3)	68.051	66.752				(1.5)	94.026	93.376
			2	68.701	67.835				6	96.103	93.505
			1.5	69.026	68.376				4	97.402	95.670
			6	63.103	65.505		100		3	98.051	96.752
		4	69.402	67.670				2	98.701	97.835	
		3	70.051	68.752				(1.5)	99.026	98.376	
		2	70.701	69.835				6	101.103	98.505	
72			1.5	71.026	70.376				4	102.402	100.670
			(1)	71.350	70.917		105		3	103.051	101.752
			(4)	72.402	70.670				2	103.701	102.835
			(3)	73.051	71.752				(1.5)	104.026	103.376
		2	73.701	72.835				6	106.103	103.505	
		75	1.5	74.026	73.376		110		4	107.402	105.670

续表 13.5-2

公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列				
110			3	108.051	106.752		150		2	148.701	147.835	
			2	108.701	107.835				(1.5)	149.026	143.376	
			(1.5)	109.026	108.376				6	151.103	148.505	
115			6	111.103	108.505			155	4	152.402	150.670	
			4	112.402	110.670				3	153.051	151.752	
			3	113.051	111.752				2	153.701	152.835	
			2	113.701	112.835				160	6	156.103	153.505
			(1.5)	114.026	113.376					4	157.402	155.670
120			6	116.103	113.505			165	3	158.051	156.752	
			4	117.402	115.670				2	158.701	154.835	
			3	118.051	116.752				(2)	158.701	154.835	
			2	118.701	117.835				6	161.103	158.505	
			(1.5)	119.026	118.376				4	162.402	160.670	
125			6	121.103	118.505			170	3	163.051	161.752	
			4	122.402	120.670				2	163.701	162.835	
			3	123.051	121.752				(2)	163.701	162.835	
			2	123.701	122.835				6	166.103	163.505	
			(1.5)	124.026	123.376				4	167.402	165.670	
130			6	126.103	123.505			175	3	168.051	166.752	
			4	127.402	125.670				(2)	168.701	167.835	
			3	128.051	126.752				6	171.103	168.505	
			2	128.701	127.835				4	172.402	170.670	
			(1.5)	129.026	128.376				3	173.051	171.752	
135			6	131.103	128.505			180	2	173.701	172.835	
			4	132.402	130.670				6	176.103	173.505	
			3	133.051	131.752				4	177.402	175.670	
			2	133.701	132.835				3	178.051	176.752	
			(1.5)	134.026	133.376				(2)	178.701	177.835	
140			6	136.103	133.505			185	6	181.103	178.505	
			4	137.402	135.670				4	182.402	180.670	
			3	138.051	136.752				3	183.051	181.752	
			2	138.701	137.835				2	183.701	182.835	
			(1.5)	138.026	138.376				6	186.103	183.505	
145			6	141.103	138.505			190	4	187.402	185.670	
			4	142.402	140.670				3	188.051	186.752	
			3	143.051	141.752				(2)	188.701	187.835	
			2	143.701	142.835				6	191.103	188.505	
			(1.5)	144.026	143.376				4	192.402	190.670	
150			6	146.103	143.505			195	3	193.051	191.752	
			4	147.402	145.670				2	193.701	192.835	
			3	148.051	146.752				6	196.103	193.505	
			2	148.701	147.835				4	197.402	190.670	
			(1.5)	144.026	143.376				3	198.051	196.752	
200			6	146.103	143.505			205	(2)	198.701	197.835	
			4	147.402	145.670				6	201.103	198.505	
			3	148.051	146.752				4	202.402	200.670	

续表 13.5-2

公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列			
		205	3	203.051	201.752				6	276.103	273.505
	210		6	206.103	203.505	280			4	277.402	275.670
			4	207.402	205.670				(3)	278.051	276.752
			3	208.051	206.752					6	281.103	278.505
		215	6	211.103	208.505			285	4	282.402	280.670
			4	212.402	210.670				(3)	283.051	281.752
			3	213.051	211.752					6	286.103	283.505
220			6	216.103	213.505			290	4	287.402	285.670
			4	217.402	215.670				(3)	288.051	286.752
			3	218.051	216.752					6	291.103	288.505
		225	6	221.103	218.505			295	4	292.402	290.670
			4	222.402	220.670				(3)	293.051	291.752
			3	223.051	221.752					6	296.103	293.505
		230	6	226.103	223.505		300		4	297.402	295.670
			4	227.402	225.670				(3)	298.051	296.752
			3	228.051	226.752					6	306.103	303.505
		235	6	231.103	228.505			310	4	307.402	305.670
			4	232.402	230.670				6	316.103	313.505
			3	233.051	231.752	320			4	317.402	315.670
	240		6	236.103	233.505				6	326.103	323.505
			4	237.402	235.670				4	327.402	325.670
			3	238.051	236.752			330	6	336.103	333.505
		245	6	241.103	238.505		340		4	337.402	335.670
			4	242.402	240.670					6	346.103
			3	243.051	241.752				4	347.402	345.670
250			6	246.103	243.505			350	6	356.103	353.505
			4	247.402	245.670				4	357.402	355.670
			3	248.051	246.752	360			6	366.103	363.505
	255		6	251.103	248.505				4	367.402	365.670
			4	252.402	250.670			370	6	376.103	373.505
			(3)	253.051	251.752		4		377.402	375.670	
		6	256.103	253.505		380	6		386.103	383.505	
	260		4	257.402	255.670				4	387.402	385.670
			(3)	258.051	256.752				390	6	396.103	393.505
			6	261.103	258.505			4		397.402	395.670
		265	4	262.402	260.670	400		6		406.103	403.505
			(3)	263.051	261.752				4	416.103	413.505
			6	286.103	263.505				6	426.103	423.505
		270	4	267.402	265.670			420	6	436.103	433.505
			(3)	268.051	266.752				6	446.103	443.505
			6	271.103	268.505		440		6	456.103	453.505
	275		4	272.402	270.670				6	466.103	463.505
			(3)	273.051	271.752	450			6	476.103	473.505
			6	286.103	263.505				6	486.103	483.505

续表 13.5-2

公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1	公称直径 D, d			螺距 P	中径 D_2 或 d_2	小径 D_1 或 d_1
第一系列	第二系列	第三系列				第一系列	第二系列	第三系列			
	460		6	456.103	453.505		540		6	536.103	533.505
		470	6	466.103	463.505		550		6	546.103	543.505
	480		6	476.103	473.505		560		6	556.103	553.505
		490	6	486.103	483.505			570	6	566.103	563.505
500			6	496.103	493.505		580		6	576.103	573.505
		510	6	506.103	503.505			590	6	586.103	583.505
	520		6	516.103	513.505				6	596.103	593.505
		530	6	526.103	523.505	600			6		

- 注：1. 优先选用第一系列，第三系列尽可能不用。
 2. 括号内的尺寸尽可能不用。带“*”的螺距为粗牙参数，其余为细牙螺距。
 3. M14×1.25 仅用于火花塞，M35×1.5 仅用于滚动轴承锁紧螺母。
 4. 对直径 150~600 mm 的螺纹，需要使用螺距大于 6 mm 的螺纹，应优先选用 8 mm 的螺距。

2.1.2 普通螺纹公差与配合

(1) 公差带的位置

螺纹公差带由其相对于基本牙型的位置和大小组成。公差带的位置由基本偏差确定。外螺纹的上偏差 es 为基本偏差；内螺纹的下偏差 EI 为基本偏差，如图 13.5-1 所示。

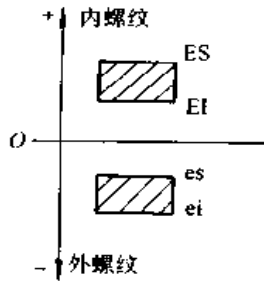


图 13.5-1 螺纹公差带及基本偏差

内螺纹规定了两种公差带位置，其代号分别为 G 和 H；外螺纹规定了四种公差带位置，其代号为 e、f、g 和 h。内外螺纹的公差带位置如图 13.5-2 和图 13.5-3 所示。

(2) 公差等级

公差带的大小由公差等级表示，内外螺纹中径和顶径的公差等级如下：

螺纹直径	公差等级
外螺纹中径 d_2	3、4、5、6、7、8、9
外螺纹大径 d	4、6、8

内螺纹中径 D_2 4、5、6、7、8
 内螺纹小径 D_1 4、5、6、7、8

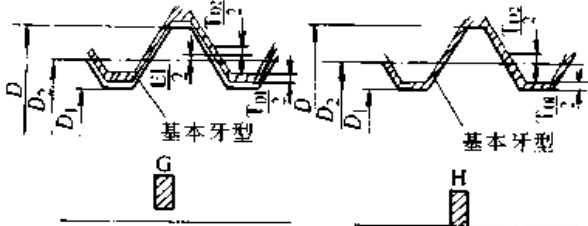


图 13.5-2 内螺纹公差带位置

T_{D1} —内螺纹小径公差 T_{D2} —内螺纹中径公差

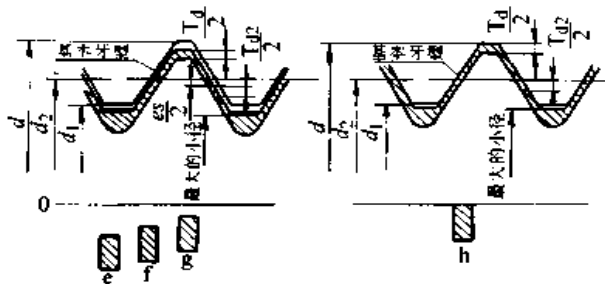


图 13.5-3 外螺纹公差带位置

T_d —外螺纹大径公差 T_{d2} —外螺纹中径公差

(3) 旋合长度

普通螺纹公差与配合标准根据螺纹直径和螺距的大小将螺纹的旋合长度分为二个组，即短旋

合长度组 S, 中等旋合长度组 N 和长旋合长度组 L。旋合长度是由联接的设计决定的, 通常宜采用 N 组。

(4) 公差带选用

根据螺纹配合的要求, 可将公差等级和公差位置组合, 得到多种公差带。为减少量刀具的品种,

给出公差带选用原则:

精密: 用于精密螺纹, 要求配合性质变动较小;

中等: 适用于一般用途;

粗糙: 精度要求低或加工制造困难的螺纹。

公差带的选用见表 13.5-3。

表 13.5-3 内、外螺纹公差带选用 (摘自 GB/T 197-1981)

内 螺 纹 选 用 公 差 带												
精 度	公差带位置 G						公差带位置 H					
	S		N		L		S		N		L	
精 密							4H		4H 5H		5H 6H	
中 等	(5G)		(6G)		(7G)		* 5H		* 6H		* 7H	
粗 糙			(7G)						7H			

外 螺 纹 选 用 公 差 带												
精 度	公差带位置 e			公差带位置 f			公差带位置 g			公差带位置 h		
	S	N	L	S	N	L	S	N	L	S	N	L
精 密										(3h4h)	* 4h	(5h4h)
中 等		* 6e			* 6f		(5g6g)	* 6g	(7g6g)	(5h6h)	* 6h	(7h6h)
粗 糙								8g			(8g)	

注: 1. 大量生产的精密紧固件螺纹, 推荐采用带方框的公差带。

2. 带 * 的公差带应优先选用, 括号内公差带尽量不用。

3. 精密配合用于精密螺纹, 其配合性质稳定; 一般配合采用中等配合; 精度要求不高或加工较困难的螺纹采用粗糙配合。

4. 内外螺纹的选用公差带可随意组合, 为保证有足够的接触高度, 加工后的零件的最优配合为 H/g、H/h 或 G/h。若公称直径小于 1.4 mm 的螺纹副, 应采用 5H/6h 或更精密的配合。

(5) 螺纹的配合

为保证螺纹副工作时有足够的接触高度, 普通螺纹的配合可参考表 13.5-4。

e) 可以容纳大多数螺纹表面的涂镀层厚度。但对厚镀层 (例如热镀锌), 普通螺纹的基本偏差无法满足容纳镀层的要求, 而需采用热镀锌螺纹 (ISO 965-4: 1998 和 ISO 965-5: 1998)。

2.2 热镀锌螺纹 (ISO 965-4~5: 1998)

容纳厚镀层有两种作法: 在外螺纹上留出容纳普通螺纹的公差带位置 (H、G、h、g、f、间隙 (az); 在内螺纹上留出容纳间隙 (AZ 或 AX)。

表 13.5-4 普通螺纹配合的选择

工作要求	配合的选择
一般联接螺纹	优先采用 H/h、H/g 或 G/h; 小于 M1.4 的螺纹, 应选用 5H/6h 或更精密的配合
经常装拆的螺纹	推荐采用 H/g
高温工作下的螺纹	工作温度在 450°C 以下, 选用 H/g; 高于 450°C 时应选用 H/e、G/h 或 G/g
需要涂镀的螺纹 ^①	薄镀层螺纹件选用 H/g; 中等腐蚀条件、中等镀层厚度的螺纹件选用 H/f; 严重腐蚀条件、较厚镀层的螺纹件选用 H/e 或 G/e

① 不论采用何种配合, 螺纹涂镀后的实际轮廓上, 任何点均不得超过由 H、h 确定的最大实体牙型。

不能同时在内、外螺纹上留出大间隙（不要将两种带大间隙的内、外螺纹相互旋合），这种作法会使螺纹因接触高度过低而导致螺纹联接失效。

要考虑因留大间隙而对螺纹件联接强度的影响。

2.2.1 热镀锌螺纹的牙型和尺寸

热镀锌螺纹的基本牙型和设计牙型与普通螺

纹的牙型相同。

热镀锌螺纹的直径与螺距系列是从普通螺纹系列中选出来的（第一、二直径系列的粗牙螺纹，直径范围为 10 ~ 64 mm），具体见表 13.5-5。

热镀锌螺纹的基本尺寸可从普通螺纹基本尺寸表中查取（见表 13.5-2）。

表 13.5-5 直径与螺距系列（摘自 ISO 965-4~5: 1998） (mm)

公称直径 D, d		螺距 P 粗牙	公称直径 D, d		螺距 P 粗牙
第一系列	第二系列		第一系列	第二系列	
10		1.5		33	3.5
12		1.75	36		4
	14	2		39	4
16		2	42		4.5
	18	2.5		45	4.5
20		2.5	48		5
	22	2.5		52	5
24		3	56		5.5
	27	3		60	5.5
30		3.5	64		6

注：优先选用第一系列直径。

2.2.2 热镀锌螺纹的公差与配合

(1) 公差带位置

外螺纹的上偏差(es)和内螺纹的下偏差(EI)为基本偏差。基本偏差值见表 13.5-6。

表 13.5-6 基本偏差(摘自 ISO 965-4~5:1998) (μm)

螺距 P/mm	外螺纹 az es	内 螺 纹	
		AZ EI	AX EI
1.5	-330	+330	+310
1.75	-335	+335	+365
2	-340	+340	+420
2.5	-350	+350	+530
3	-360	+360	+640
3.5	-370	+370	+750
4	-380	+380	+860
4.5	-390	+390	+970
5	-400	+400	+1 080
5.5	-410	+410	+1 190
6	-420	+420	+1 300

注：内、外螺纹不允许相互旋合。

(2) 公差等级

热镀锌内、外螺纹中径和顶径的公差等级为 6 级。各直径公差值与普通螺纹公差值相同。

(3) 旋合长度

热镀锌螺纹采用中等旋合长度 (N)，其数值与普通螺纹旋合长度相同。

(4) 内、外螺纹公差带位置的组合

热镀锌时仅对外螺纹表面进行热镀锌，内螺纹表面上无镀层。容纳外螺纹表面厚镀层有两种作法。

1) 作法一 (ISO 965-4: 1998)

热镀锌前后内、外螺纹的公差带位置见表 13.5-7。

表 13.5-7 第一种作法的公差带位置

作法一	热镀锌前公差带位置	热镀锌后公差带位置
外螺纹	az (es)	h (es)
内螺纹	H 或 G (EI)	H 或 G (EI) (牙表面上无镀层)

注： $es_{az} = - (300 + 20P)$

2) 作法二 (ISO 965-5: 1998)

热镀前后内、外螺纹的公差带位置见表 13.5-8。

表 13.5-8 第二种作法的公差带位置

作法二	热镀前公差带位置	热镀后公差带位置
外螺纹	h (es)	$es \leq EI_{AZ}$ (镀后经离心转甩的薄镀层)
		$es \leq EI_{AX}$ (厚镀层, 未经离心转甩)
内螺纹	AZ 或 AX (EI)	AZ 或 AX (EI) (牙表面上无镀层)

注: 1. $EI_{AZ} = + (300 + 20P)$;

2. $EI_{AX} = + (220P - 20)$

2.2.3 热镀锌螺纹的极限尺寸

6_{AZ} 粗牙热镀锌外螺纹的极限尺寸见表 13.5-9。 6_{AX} 粗牙热镀锌内螺纹的极限

尺寸分别见表 13.5-10 和表 13.5-11 (内螺纹表面上无镀锌层)。

2.3 过渡配合螺纹 (GB/T 1167—1996)

过渡配合螺纹是指内外螺纹配合后在中径上具有过渡配合性质的螺纹。这种螺纹能牢固地将螺栓固定于螺孔中。适用于钢制双头螺柱或其他螺纹联接, 与其配合的内螺纹机体材料可以为铸铁、钢和铝合金等。

2.3.1 过渡配合螺纹的牙型和尺寸

过渡配合螺纹的基本牙型与普通螺纹基本牙型相同。外螺纹的设计牙型推荐采用 GB/T 197—1981 中规定的圆弧状牙底。

螺纹直径与螺距系列见表 13.5-12; 螺纹的基本尺寸见表 13.5-13

表 13.5-9 6_{AZ} 外螺纹的极限尺寸 (摘自 ISO 965-4: 1998)

(mm)

螺纹规格	旋合长度 N		大径		中径		小径 (用于应力计算) max	牙底圆 弧半径 mm
	>	≤	max	min	max	min		
M10	5	15	9.670	9.434	8.696	8.564	7.829	0.188
M12	6	18	11.665	11.400	10.528	10.378	9.518	0.219
M14	8	24	13.660	13.380	12.361	12.201	11.206	0.250
M16	8	24	15.660	15.380	14.361	14.201	13.206	0.250
M18	10	30	17.650	17.315	16.026	15.856	14.583	0.313
M20	10	30	19.650	19.315	18.026	17.856	16.583	0.313
M22	10	30	21.650	21.315	20.026	19.856	18.583	0.313
M24	12	36	23.640	23.265	21.691	21.491	19.959	0.375
M27	12	36	26.640	26.265	24.691	24.491	22.959	0.375
M30	15	45	29.630	29.205	27.357	27.145	25.336	0.438
M33	15	45	32.630	32.205	30.357	30.145	28.336	0.438
M36	18	53	35.620	35.145	33.022	32.798	30.713	0.500
M39	18	53	38.620	38.145	36.022	35.798	33.713	0.500
M42	21	63	41.610	41.110	38.687	38.451	36.089	0.563
M45	21	63	44.610	44.110	41.687	41.451	39.089	0.563
M48	24	71	47.600	47.070	44.352	44.102	41.465	0.625
M52	24	71	51.600	51.070	48.352	48.102	45.465	0.625
M56	28	85	55.590	55.030	52.018	51.753	48.842	0.688
M60	28	85	59.590	59.030	56.018	55.753	52.842	0.688
M64	32	95	63.580	62.980	59.683	59.403	56.219	0.750

表 13.5-10 6AZ 内螺纹的极限尺寸 (摘自 ISO 965-5: 1998) (mm)

螺纹规格	旋合长度 N		大径 min	中径		小径	
	>	≤		max	min	max	min
M10	5	15	10.330	9.536	9.356	9.006	8.706
M12	6	18	12.335	11.398	11.198	10.776	10.441
M14	8	24	14.340	13.253	13.041	12.550	12.175
M16	8	24	16.340	15.253	15.041	14.550	14.175
M18	10	30	18.350	16.950	16.726	16.094	15.644
M20	10	30	20.350	18.950	18.726	18.094	17.644
M22	10	30	22.350	20.950	20.726	20.094	19.644
M24	12	36	24.360	22.676	22.411	21.612	21.112
M27	12	36	27.360	25.676	25.411	24.612	24.112
M30	15	45	30.370	28.377	28.097	27.141	26.581
M33	15	45	33.370	31.377	31.097	30.141	29.581
M36	18	53	36.380	34.082	33.782	32.650	32.050
M39	18	53	39.380	37.082	36.782	35.650	35.050
M42	21	63	42.390	39.782	39.467	38.189	37.519
M45	21	63	45.390	42.782	42.467	41.189	40.519
M48	24	71	48.400	45.487	45.152	43.697	42.987
M52	24	71	52.400	49.487	49.152	46.697	46.987
M56	28	85	56.410	53.193	52.838	51.206	50.456
M60	28	85	60.410	57.193	56.838	55.206	54.456
M64	32	95	64.420	60.898	60.523	58.725	57.925

① 直牙侧结束点处的螺纹大径值。

表 13.5-11 6AX 内螺纹的极限尺寸 (摘自 ISO 965-5: 1998) (mm)

螺纹规格	旋合长度 N		大径 min	中径		小径	
	>	≤		max	min	max	min
M10	5	15	10.310	9.516	9.336	8.986	8.686
M12	6	18	12.365	11.428	11.228	10.806	10.471
M14	8	24	14.420	13.333	13.121	12.630	12.255
M16	8	24	16.420	15.333	15.121	14.630	14.255
M18	10	30	18.530	17.130	16.906	16.274	15.824
M20	10	30	20.530	19.130	18.906	18.274	17.824
M22	10	30	22.530	21.130	20.906	20.274	19.824
M24	12	36	24.640	22.956	22.691	21.892	21.392
M27	12	36	27.640	25.956	25.691	24.892	24.392
M30	15	45	30.750	28.757	28.477	27.521	26.961
M33	15	45	33.750	31.757	31.477	30.521	29.961
M36	18	53	36.860	34.562	34.262	33.130	32.530
M39	18	53	39.860	37.562	37.262	36.130	35.530
M42	21	63	42.970	40.362	40.047	38.769	38.099
M45	21	63	45.970	43.362	43.047	41.769	41.099

续表 13.5-11

螺纹规格	旋合长度 N		大径 min	中径		小径	
	>	≤		max	min	max	min
M48	24	71	49.080	46.167	45.832	44.377	43.667
M52	24	71	53.080	50.167	49.832	48.377	47.667
M56	28	85	57.190	53.973	53.618	51.986	51.236
M60	28	85	61.190	57.973	57.618	55.986	55.236
M64	32	95	65.300	61.778	61.403	59.605	58.805

① 直牙侧结束点处的螺纹大径值。

表 13.5-12 过渡配合螺纹直径与螺距系列 (mm)

公称直径		螺 距		公称直径		螺 距	
第一系列	第二系列	粗牙	细牙	第一系列	第二系列	粗牙	细牙
5		0.8		20		2.5	1.5
6		1			22	2.5	1.5
8		1.25	1	24		3	2
10		1.5	1.25		27	3	
12		1.75	1.25	30		3.5	
	14	2	1.5		33	3.5	
16		2	1.5	36		4	
	18	2.5	1.5		39	4	

注：优先选用第一系列。

表 13.5-13 基本尺寸 (mm)

公称直径 D, d	螺距 P	中径 $D_2 = d_2$	小径 $D_1 = d_1$	公称直径 D, d	螺距 P	中径 $D_2 = d_2$	小径 $D_1 = d_1$
5	0.8	4.480	4.134	18	1.5	17.026	16.376
6	1	5.350	4.917	20	2.5	18.376	17.294
8	1.25	7.188	6.647		1.5	19.026	18.376
	1	7.350	6.917	22	2.5	20.376	19.294
10	1.5	9.026	8.376		1.5	21.026	20.376
	1.25	9.188	8.647	24	3	22.051	20.752
12	1.75	10.863	10.106		2	22.701	21.835
	1.25	11.188	10.647	27	3	25.051	23.752
14	2	12.701	11.835	30	3.5	27.727	26.211
	1.5	13.026	12.376	33	3.5	30.727	29.211
16	2	14.701	13.835		36	4	33.402	31.670
	1.5	15.026	14.376	39	4	36.402	34.670
18	2.5	16.376	15.294				

2.3.2 过渡配合螺纹的公差与配合

过渡配合螺纹的公差与配合符合普通螺纹公差制的规定。

(1) 公差带及其基本偏差

内螺纹中径公差带为 3H、4H 或 5H；小径公差带为 5H，具体数值见表 13.5-14。外螺纹中径公差带为 3k、2km、4kj；大径公差带为 6h，具体数值见表 13.5-15。

(2) 旋合长度

过渡配合螺纹采用中等旋合长度 (N)。

(3) 公差带选用

过渡配合螺纹公差带选用原则：

精密：配合较紧，且配合性质变化较小的重要联接；

一般：一般用途的联接。

螺纹配合公差带按表 13.5-16 选择，并优先选择不带括号的配合公差带。

表 13.5-14 内螺纹公差 (μm)

直径 d / mm	螺距 P / mm	中 径			小 径		
		上偏差			下偏差	上偏差	下偏差
		3H	4H	5H	3H、4H、5H	5H	5H
5	0.8	+63	+80	+100	0	+160	0
6	1	+75	+95	+118	0	+190	0
8	1.25	+80	+100	+125	0	+212	0
	1	+75	+95	+118	0	+190	0
10	1.5	+90	+112	+140	0	+236	0
	1.25	+80	+100	+125	0	+212	0
12	1.75	+100	+125	+160	0	+265	0
	1.25	+90	+112	+140	0	+212	0
14	2	+106	+132	+170	0	+300	0
	1.5	+95	+118	+150	0	+236	0
16	2	+106	+132	+170	0	+300	0
	1.5	+95	+118	+150	0	+236	0
18	2.5	+112	+140	+180	0	+355	0
	1.5	+95	+118	+150	0	+236	0
20	2.5	+112	+140	+180	0	+355	0
	1.5	+95	+118	+150	0	+236	0
22	2.5	+112	+140	+180	0	+355	0
	1.5	+95	+118	+150	0	+236	0
24	3	+132	+170	+212	0	+400	0
	2	+112	+140	+180	0	+300	0
27	3	+132	+170	+212	0	+400	0
30	3.5	+140	+180	+224	0	+450	0
33	3.5	+140	+180	+224	0	+450	0
36	4	+150	+190	+236	0	+475	0
39	4	+150	+190	+236	0	+475	0

表 13.5-15 外螺纹公差 (μm)

直径 d / mm	螺距 P / mm	中 径				大 径	
		上偏差	下偏差			上偏差	下偏差
		3k、2km、4kj	3k	2km	4kj	6h	6h
5	0.8	+48	0	+10	-12	0	-150
6	1	+56	0	+11	-15	0	-180
8	1.25	+60	0	+12	-15	0	-212
	1	+56	0	+11	-15	0	-180
10	1.5	+67	0	+14	-18	0	-236
	1.25	+60	0	+12	-15	0	-212
12	1.75	+75	0	+15	-20	0	-265
	1.25	+67	0	+14	-18	0	-212
14	2	+80	0	+17	-20	0	-280
	1.5	+71	0	+15	-19	0	-236
16	2	+80	0	+17	-20	0	-280
	1.5	+71	0	+15	-19	0	-236
18	2.5	+85	0	+18	-21	0	-335
	1.5	+71	0	+15	-19	0	-236
20	2.5	+85	0	+18	-21	0	-335
	1.5	+71	0	+15	-19	0	-236
22	2.5	+85	0	+18	-21	0	-335
	1.5	+71	0	+15	-19	0	-236
24	3	+100	0	+20	-25	0	-375
	2	+80	0	+17	-20	0	-280
27	3	+100	0	+20	-25	0	-375
30	3.5	+106	0	+21	-26	0	-425
33	3.5	+106	0	+21	-26	0	-425
36	4	+112	0	+22	-28	0	-475
39	4	+112	0	+22	-28	0	-475

表 13.5-16 内外螺纹优选公差带

使用场合	内螺纹公差带/外螺纹公差带
精密	4H/2km; (3H/3k)
一般	4H/4kj; (4H/3k); (5H/3k)

2.3.3 辅助锁紧结构

在实际螺纹副不能提供足够的配合过盈量时, 为保证螺柱在机体材料中紧固的可靠性, 可在螺栓有效螺纹之外采用辅助锁紧结构, 辅助锁紧结构的型式及应用见表 13.5-17。

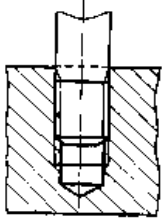
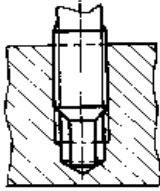
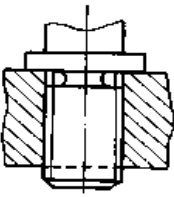
2.4 过盈配合螺纹 (GB/T 1181—1998)

过盈配合螺纹是指内外螺纹配合后在中径上具有过盈配合性质的螺纹。主要适用于钢制双头螺柱或其他螺纹联接, 与其配合的内螺纹机体材料为铝合金、镁合金、钛合金和钢。

2.4.1 过盈配合螺纹的牙型和尺寸

过盈配合螺纹的基本牙型与普通螺纹基本牙型相同。外螺纹设计牙型的牙底为圆滑曲线, 牙底圆弧符合 GB/T 197—1981 对性能等级高于 8.8 级紧固件螺纹牙底的规定, 牙底圆弧的最小半径不允许小于 $0.125P$ 。

表 13.5-17 辅助锁紧结构

辅助锁紧型式	机体材料	用 途	辅助锁紧型式	机体材料	用 途
 <p>螺纹收尾</p>	钢、铸铁和铝合金等	最常用的锁紧型式 用于透孔和盲孔 不适用于动载荷较大的场合 螺尾的最大轴向长度为 2.5P	 <p>端面顶尖</p>	钢、铸铁和铝合金等	用于盲孔 顶尖的光滑圆柱直径应小于内螺纹的小径；顶尖的圆锥角应与麻花钻钻头的刃角重合
 <p>平凸台</p>	铝合金等	用于透孔和盲孔 凸台端面应与螺纹轴线垂直；其直径应不小于 1.5d	厌氧型螺纹锁固密封剂	钢、铸铁和铝合金等	涂于螺纹表面，具有锁固和密封功能；可与上述三种辅助锁紧型式结合使用，可使螺柱的承载能力进一步提高

螺纹直径与螺距系列及其基本尺寸见表 13.5-18。

2.4.2 过盈配合螺纹的公差与配合

过盈配合螺纹的公差与配合符合普通螺纹公

差制的规定。

(1) 公差带及其基本偏差

内螺纹中径公差带为 2H；小径公差带为 4D

或 5D（螺距 $P=1.5\text{ mm}$ 时，小径公差带为 4C

表 13.5-18 过盈配合螺纹的直径与螺距系列及其基本尺寸 (mm)

公称直径 D, d		螺距 P		中径 D_2, d_2	小径 D_1, d_1
第一系列	第二系列	粗牙	细牙		
5		0.8		4.480	4.134
6		1		5.350	4.917
8		1.25		7.188	6.647
			1	7.350	6.917
10		1.5		9.026	8.376
			1.25	9.188	8.647
12			1.5	11.026	10.376
			1.25	11.188	10.647
	14		1.5	13.026	12.376
16			1.5	15.026	14.376
	18		1.5	17.026	16.376
20			1.5	19.026	18.376

注：1. 优先选用第一系列。

2. 公称直径为 8 mm 和 10 mm 的螺纹，优先选用粗牙螺纹。

或 5C)。机体材料为铝合金或镁合金时，小径公差等级取 5 级；机体材料为钢或钛合金时，小径公差等级取 4 级。

外螺纹中径公差带为 3p、3n 或 3m；大径公差带为 6e(螺距 $P=1.5\text{ mm}$ 时，公差带为 6C)。

内螺纹中、小径和外螺纹大、中径的基本偏差和公差值见表 13.5-19 和表 13.5-20。

(2) 公差带选用

螺纹中径公差带根据机体材料按表 13.5-21

选择。

螺纹中径公差带分组位置如图 13.5-4 所示。内外螺纹中径分组极限偏差见表 13.5-22 ~ 表 13.5-24。

(3) 过盈配合螺纹的旋合长度及装配力矩

过盈配合螺纹的旋合长度按表 13.5-25 选取。与旋合长度不符合表值时，为满足装配力矩的要求，可适当调整螺纹公差。装配力矩的数值见表 13.5-26。

表 13.5-19 过盈配合螺纹基本偏差 (μm)

螺距 P/mm	内 螺 纹			外 螺 纹				
	中径 D_2	小径 D_1		大径 d		中径 d_2		
	下偏差 EI	下偏差 EI		上偏差 es		下偏差 ei		
	H	D	C	e	c	m	n	p
0.8	0	+90	—	-60	—	+24	+34	+48
1	0	+90	—	-60	—	+26	+38	+53
1.25	0	+95	—	-63	—	+28	+42	+56
1.5	0	—	+140	—	-140	+32	+45	+63

表 13.5-20 过盈配合螺纹公差 (μm)

公称直径 $D、d/\text{mm}$		螺距 P/mm	内 螺 纹			外 螺 纹	
>	≤		中径 T_{D_2}	小径 T_{D_1}		大径 T_d	中径 T_{d_2}
				4 级	5 级		
2.8	5.6	0.8	50	125	160	150	48
5.6	11.2	1	60	150	190	180	56
		1.25	63	170	212	212	60
		1.5	71	190	236	236	67
11.2	22.4	1.25	71	170	212	212	67
		1.5	75	190	236	236	71

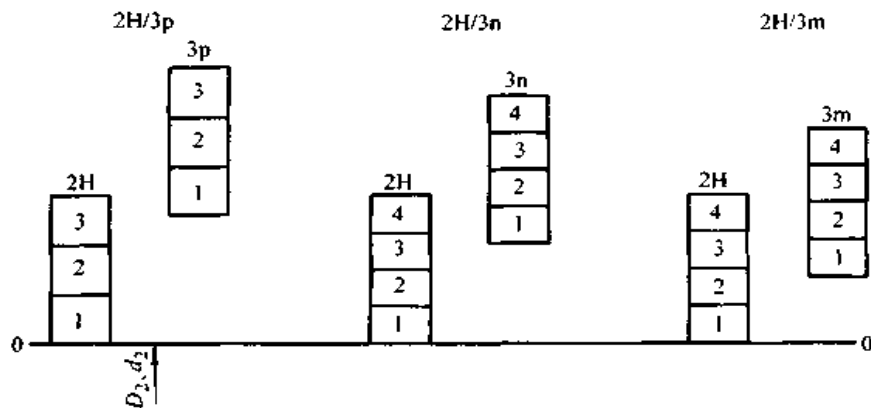


图 13.5-4 过盈配合螺纹中径公差带分组位置

表 13.5-21 过盈配合螺纹中径公差带及其分组数

内螺纹材料/ 外螺纹材料	内螺纹公差带/ 外螺纹公差带	中径公差带 分组数
铝合金或 镁合金/钢	2H/3p	3
钢/钢	2H/3n	4
钛合金/钢	2H/3m	4

2.5 统一螺纹 (ASME B1.1—1989)

统一螺纹即系一般用途的英制螺纹。在英制中，联接螺纹均采用统一螺纹 UN。其牙型角

$\alpha = 60^\circ$ ，基本牙型与我国的普通螺纹相同。其中外螺纹牙底做成相应圆弧（半径为 $0.10825P \sim 0.14434P$ ）的则用 UNR 表示。统一螺纹的公称直径（大径）以英寸为单位，螺距以每英寸长的牙数表示。同一公称直径，按螺距的不同，可分为粗牙 UNC、细牙 UNF 和超细牙 UNEF（称为标准系列）。此外，还有恒定螺距系列，由每英寸 4、6、8、12、16、20、28 和 32 牙系列构成，并尽可能优先选用 8UN、12UN 和 16UN，常用于多次装拆或重新翻修的螺纹零件。按中径公差的大小，外螺纹分为 1A、2A、3A 级，内螺纹分为 1B、2B、3B 级，1A 和 1B 级公差最大，安装后的间隙大。

表 13.5-22 2H/3p 螺纹中径分组极限偏差 (μm)

公称直径 $D, d /$ mm		螺距 $P /$ mm	外 螺 纹 3p				内 螺 纹 2H				中径径向过 盈量 (平均)	
$>$	\leq		es	3-2 交界	2-1 交界	ei	ES	3-2 交界	2-1 交界	EI	max	min
2.8	5.6	0.8	+96	+80	+64	+48	+50	+33	+16	0	64	31
5.6	11.2	1	+109	+90	+71	+53	+60	+40	+20	0	70	31
		1.25	+116	+96	+76	+56	+63	+42	+21	0	75	34
		1.5	+130	+108	+85	+63	+71	+47	+23	0	84	38
11.2	22.4	1.25	+123	+101	+78	+56	+71	+47	+23	0	77	31
		1.5	+134	+110	+86	+63	+75	+50	+25	0	85	36

注：1. $(n+1) - n$ 交界栏给出了第 $(n+1)$ 组公差带的下偏差和第 n 组公差带的上偏差。
2. 外螺纹在轴向长度的中部按单一中径进行分组；内螺纹按作用中径分组。

表 13.5-23 2H/3n 螺纹中径分组极限偏差 (μm)

公称直径 $D, d /$ mm		螺距 $P /$ mm	外 螺 纹 3n				内 螺 纹 2H				中径径向过 盈量 (平均)			
$>$	\leq		es	4-3 交界	3-2 交界	2-1 交界	ei	ES	4-3 交界	3-2 交界	2-1 交界	EI	max	min
2.8	5.6	0.8	+82	+70	+58	+46	+34	+50	+38	+25	+13	0	45	21
5.6	11.2	1	+94	+80	+66	+52	+38	+60	+45	+30	+16	0	50	21
		1.25	+102	+87	+72	+57	+42	+63	+47	+32	+16	0	56	25
		1.5	+112	+95	+78	+61	+45	+71	+53	+36	+18	0	60	25
11.2	22.4	1.25	+109	+92	+75	+58	+42	+71	+53	+36	+18	0	57	22
		1.5	+116	+98	+80	+62	+45	+75	+56	+38	+20	0	61	24

注：同表 13.5-22 注。

续表 13.5-27

公称直径/in		基本 大径/ in	牙 数										
			螺距分等系列			恒定螺距系列							
第一系列	第二系列		粗牙 UNC	细牙 UNF	超细牙 UNEF	4-UN	6-UN	8-UN	12-UN	16-UN	20-UN	28-UN	32-UN
...	3	0.099 0	48	56	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	0.112 0	40	48	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	...	0.125 0	40	44	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6	...	0.138 0	32	40	...	...	...	...	...	...	...	...	UNC
8	...	0.164 0	32	36	...	...	...	...	...	...	...	...	UNC
10	...	0.190 0	24	32	...	...	...	...	...	...	...	...	UNF
...	12	0.216 0	24	28	32	...	...	...	...	...	...	UNF	UNEF
1/4	...	0.250 0	20	28	32	...	...	...	...	...	UNC	UNF	UNEF
5/16	...	0.312 5	18	24	32	...	...	...	...	...	20	28	UNEF
3/8	...	0.375 0	16	24	32	...	...	...	...	UNC	20	28	UNEF
7/16	...	0.437 5	14	20	28	...	...	...	...	16	UNF	UNEF	32
1/2	...	0.500 0	13	20	28	...	...	...	...	16	UNF	UNEF	32
9/16	...	0.562 5	12	18	24	...	...	...	UNC	16	20	28	32
5/8	...	0.625 0	11	18	24	...	...	...	12	16	20	28	32
...	11/16	0.687 5	...	...	24	...	...	...	12	16	20	28	32
3/4	...	0.750 0	10	16	20	...	...	...	12	UNF	UNEF	28	32
...	13/16	0.812 5	...	...	20	...	...	...	12	16	UNEF	28	32
7/8	...	0.875 0	9	14	20	...	...	...	12	16	UNEF	28	32
...	15/16	0.937 5	...	...	20	...	...	...	12	16	UNEF	28	32
1	...	1.000 0	8	12	20	...	...	UNC	UNF	16	UNEF	28	32
...	1 1/8	1.062 5	...	...	18	...	...	8	12	16	20	28	...
1 1/8	...	1.125 0	7	12	18	...	...	8	UNF	16	20	28	...
...	1 1/4	1.187 5	...	...	18	...	...	8	12	16	20	28	...
1 1/4	...	1.250 0	7	12	18	...	...	8	UNF	16	20	28	...
...	1 1/2	1.312 5	...	...	18	...	...	8	12	16	20	28	...
1 1/2	...	1.375 0	6	12	18	...	UNC	8	UNF	16	20	28	...
...	1 3/8	1.437 5	...	...	18	...	6	8	12	16	20	28	...
1 3/8	...	1.500 0	6	12	18	...	UNC	8	UNF	16	20	28	...
...	1 3/4	1.562 5	...	...	18	...	6	8	12	16	20	...	...
1 3/4	...	1.625 0	...	...	18	...	6	8	12	16	20	...	...
...	1 7/8	1.687 5	...	...	18	...	6	8	12	16	20	...	...
1 7/8	...	1.750 0	5	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
...	1 5/8	1.812 5	...	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
1 5/8	...	1.875 0	...	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
...	1 5/4	1.937 5	...	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...

续表 13.5-27

公称直径/in		基本 大径/ in	牙 数										
第一系列	第二系列		螺距分等系列			恒定螺距系列							
			粗牙 UNC	细牙 UNF	超细牙 UNEF	4-UN	6-UN	8-UN	12-UN	16-UN	20-UN	28-UN	32-UN
2	...	2.000 0	4½	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
...	2¼	2.125 0	...	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
2¼	...	2.250 0	4½	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
...	2¾	2.375 0	...	...	...	...	6	8	12	16	20	...	...
2½	...	2.500 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	20	...	...
...	2%	2.625 0	...	...	...	4	6	8	12	16	20	...	...
2¾	...	2.750 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	20	...	...
...	2¾	2.875 0	...	...	...	4	6	8	12	16	20	...	...
3	...	3.000 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	20	...	...
...	3¼	3.125 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
3¼	...	3.250 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	...	...	...
...	3¾	3.375 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
3½	...	3.500 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	...	...	...
...	3%	3.625 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
3¾	...	3.750 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	...	...	...
...	3%	3.875 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
4	...	4.000 0	4	...	...	UNC	6	8	12	16	...	...	...
...	4¼	4.125 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
4¼	...	4.250 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	4¾	4.375 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
4½	...	4.500 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	4%	4.625 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
4¾	...	4.750 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	4¾	4.875 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
5	...	5.000 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	5¼	5.125 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
5¼	...	5.250 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	5%	5.375 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
5½	...	5.500 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	5%	5.625 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
5¾	...	5.750 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
...	5%	5.875 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...
6	...	6.000 0	...	...	...	4	6	8	12	16	...	...	...

注：外螺纹分为对牙底圆弧半径无要求的 UN 螺纹（包括 UNC、UNF 和 UNEF）和对牙底最小圆弧半径有要求的 UNR 螺纹（包括 UNRC、UNRF 和 UNREF）。当采用 UNR 螺纹时，用“UNR”代换表中所有“UN”。

表 13.5-28 统一螺纹标准系列的尺寸

大径 ^① / in	UNC 系列			UNF 系列			UNEF 系列			六角螺母 对边宽/in
	每英寸 牙数	公称中径/ in	计算面 积 ^② /in ²	每英寸 牙数	公称中径/ in	计算面 积 ^② /in ²	每英寸 牙数	公称中径/ in	计算面 积 ^② /in ²	
0.060 0				80	0.051 9	0.001 8				
0.086 0	56	0.074 4	0.003 7	64	0.075 9	0.003 9				
0.112 0	40	0.095 8	0.006 0	48	0.098 5	0.006 6				
0.125 0	40	0.108 8	0.008 0	44	0.110 2	0.008 3				
0.138 0	32	0.117 7	0.009 1	40	0.121 8	0.010 2				
0.164 0	32	0.143 7	0.014 0	36	0.146 0	0.014 7				
0.190 0	24	0.162 9	0.017 5	32	0.169 7	0.020 0				
0.250 0	20	0.217 5	0.031 8	28	0.226 8	0.036 4	32	0.229 7	0.037 9	7/16
0.312 5	18	0.276 4	0.052 4	24	0.258 4	0.058 0	32	0.292 2	0.062 5	1/2
0.375 0	16	0.334 4	0.077 5	24	0.347 9	0.087 8	32	0.354 7	0.093 2	9/16
0.437 5	14	0.391 1	0.106 3	20	0.405 0	0.118 7	28	0.414 3	0.127 4	5/8
0.500 0	13	0.450 0	0.141 9	20	0.467 5	0.159 9	28	0.476 8	0.170 0	3/4
0.562 5	12	0.508 4	0.182	18	0.526 4	0.203	24	0.535 4	0.214	13/16
0.625 0	11	0.566 0	0.226	18	0.588 9	0.256	24	0.597 9	0.268	15/16
0.750	10	0.685 0	0.334	16	0.709 4	0.373	20	0.717 5	0.386	1 ¹ / ₈
0.875	9	0.802 8	0.462	14	0.828 6	0.509	20	0.8425	0.536	1 ⁵ / ₈
1.000	8	0.918 8	0.606	12	0.945 4	0.663	20	0.967 5	0.711	1 ¹ / ₂
1.125	7	1.032 2	0.763	12	1.070 9	0.856	18	1.088 9	0.901	1 ¹¹ / ₁₆
1.250	7	1.157 2	0.969	12	1.195 9	1.073	18	1.213 9	1.123	1 ³ / ₄
1.375	6	1.266 7	1.155	12	1.320 9	1.315	18	1.338 9	1.370	2 ¹ / ₈
1.500	6	1.391 7	1.405	12	1.445 9	1.581	18	1.463 9	1.640	2 ¹ / ₄
1.750	5	1.620 1	1.900				16	1.709 4	2.240	2 ⁵ / ₈
2.000	4 ¹ / ₂	1.8557	2.50				16	1.9594	2.95	3
2.250	4 ¹ / ₂	2.1057	3.25							
2.500	4	2.3376	4.00							
2.750	4	2.5876	4.93							
3.000	4	2.8376	5.97							

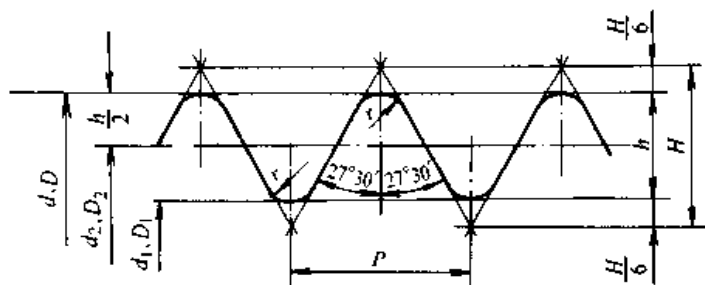
① 大径即公称直径，标准有两个系列，本表只列优先选用的第一系列。

② 是进行强度计算时螺纹部分的应力面积。

3 管螺纹

3.1 非螺纹密封的管螺纹
(GB/T 7307—1987)

表 13.5-29 非螺纹密封的管螺纹的基本牙型和基本尺寸 (mm)



$$P = 25.4/n$$

$$H = 0.960491P$$

$$h = 0.640327P$$

$$r = 0.137329P$$

$$H/6 = 0.160082P$$

$$d_2 = D_2 = d - 0.640327P$$

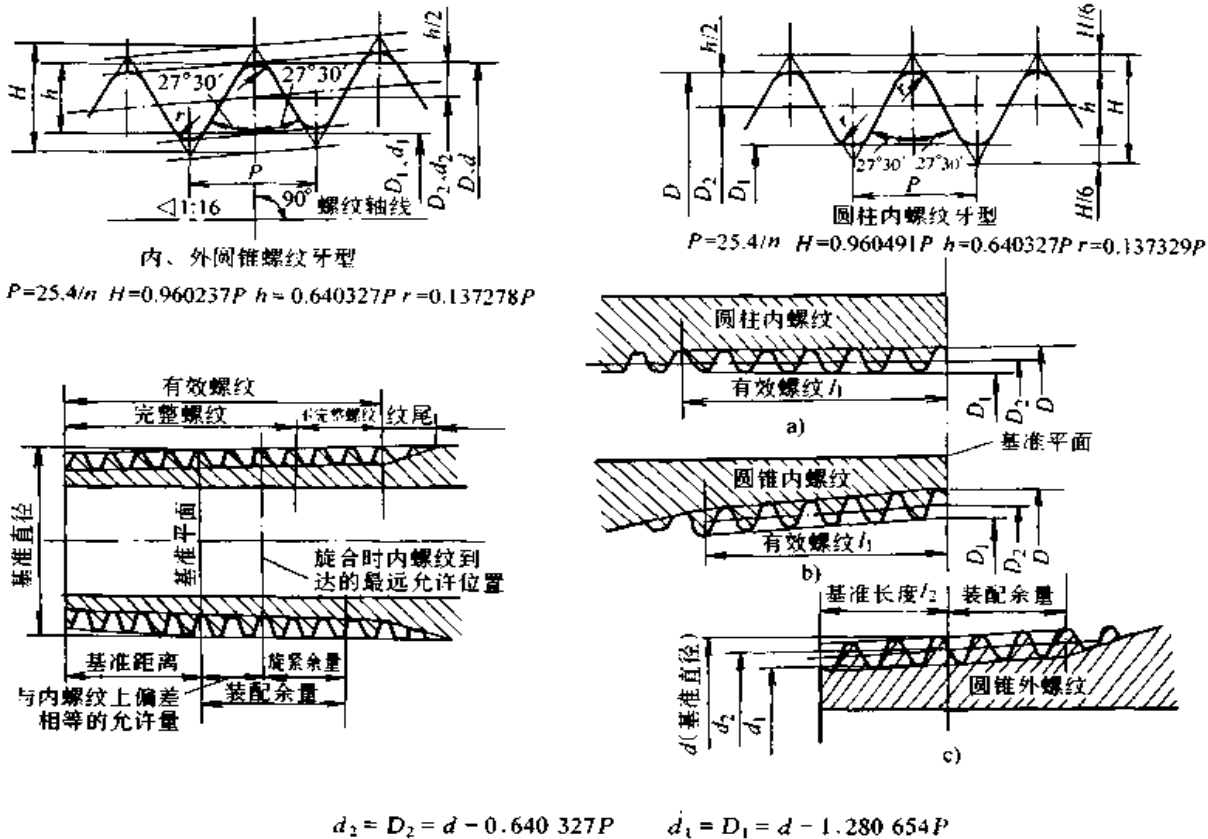
$$d_1 = D_1 = d - 1.280654P$$

基本牙型

尺寸代号	每 25.4 mm 内的牙数 n	螺距 P	牙高 h	圆弧半径 $r \approx$	基本直径		
					大径 $d = D$	中径 $d_2 = D_2$	小径 $d_1 = D_1$
1/16	28	0.907	0.581	0.125	7.723	7.142	6.561
1/8	28	0.907	0.581	0.125	9.728	9.147	8.566
1/4	19	1.337	0.856	0.184	13.157	12.301	11.445
3/8	19	1.337	0.856	0.184	16.662	15.806	14.950
1/2	14	1.814	1.162	0.249	20.955	19.793	18.631
5/8	14	1.814	1.162	0.249	22.911	21.749	20.587
3/4	14	1.814	1.162	0.249	26.441	25.279	24.117
7/8	14	1.814	1.162	0.249	30.201	29.039	27.877
1	11	2.309	1.479	0.317	33.249	31.770	30.291
1 1/4	11	2.309	1.479	0.317	37.897	36.418	34.939
1 1/2	11	2.309	1.479	0.317	41.910	40.431	38.952
1 3/4	11	2.309	1.479	0.317	47.803	46.324	44.845
2	11	2.309	1.479	0.317	53.746	52.267	50.788
2 1/4	11	2.309	1.479	0.317	59.614	58.135	56.656
2 1/2	11	2.309	1.479	0.317	65.710	64.231	62.752
2 3/4	11	2.309	1.479	0.317	75.184	73.705	72.226
3	11	2.309	1.479	0.317	81.534	80.055	78.576
3 1/2	11	2.309	1.479	0.317	87.884	86.405	84.926
4	11	2.309	1.479	0.317	100.330	98.851	97.372
4 1/2	11	2.309	1.479	0.317	113.030	111.551	110.072
5	11	2.309	1.479	0.317	125.730	124.251	122.772
5 1/2	11	2.309	1.479	0.317	138.430	136.951	135.472
6	11	2.309	1.479	0.317	151.130	149.651	148.172
6	11	2.309	1.479	0.317	163.830	162.351	160.872

3.2 用螺纹密封的管螺纹 (GB/T 7306—1987)

表 13.5-30 用螺纹密封的管螺纹基本牙型和基本尺寸 (mm)

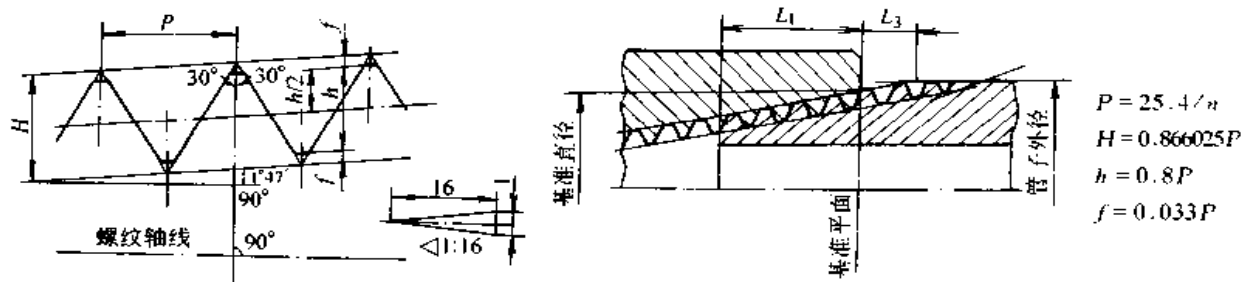


尺寸代号	每 25.4 mm 内的牙数 n	螺距 P	牙高 h	圆弧半径 r ≈	基面上的基本直径			基准距离	有效螺纹长度	装配余量	
					大径 (基准直径) d = D	中径 d ₂ = D ₂	小径 d ₁ = D ₁			余量	圈数
1/16	28	0.907	0.581	0.125	7.723	7.142	6.561	4.0	6.5	2.5	2¼
1/8	28	0.907	0.581	0.125	9.728	9.147	8.566	4.0	6.5	2.5	2¼
1/4	19	1.337	0.856	0.184	13.157	12.301	11.445	6.0	9.7	3.7	2¾
3/8	19	1.337	0.856	0.184	16.662	15.806	14.950	6.4	10.1	3.7	2¾
1/2	14	1.814	1.162	0.249	20.955	19.793	18.631	8.2	13.2	5.0	2¾
3/4	14	1.814	1.162	0.249	26.441	25.279	24.117	9.5	14.5	5.0	2¾
1	11	2.309	1.479	0.317	33.249	31.770	30.291	10.4	16.8	6.4	2¾
1¼	11	2.309	1.479	0.317	41.910	40.431	38.952	12.7	19.1	6.4	2¾
1½	11	2.309	1.479	0.317	47.803	46.324	44.845	12.7	19.1	6.4	2¾
2	11	2.309	1.479	0.317	59.614	58.135	56.656	15.9	23.4	7.5	3¼
2½	11	2.309	1.479	0.317	75.184	73.705	72.226	17.5	26.7	9.2	4
3	11	2.309	1.479	0.317	87.884	86.405	84.926	20.6	29.8	9.2	4
4	11	2.309	1.479	0.317	113.030	111.551	110.072	25.4	35.8	10.4	4½
5	11	2.309	1.479	0.317	138.430	136.951	135.472	28.6	40.1	11.5	5
6	11	2.309	1.479	0.317	163.830	162.351	160.872	28.6	40.1	11.5	5

注：1. 本表包括圆锥内螺纹与圆锥外螺纹，圆柱内螺纹与圆锥外螺纹两种联接形式。
 2. 本表适用于管子、管接头、旋塞、阀门和其他螺纹联接的附件。

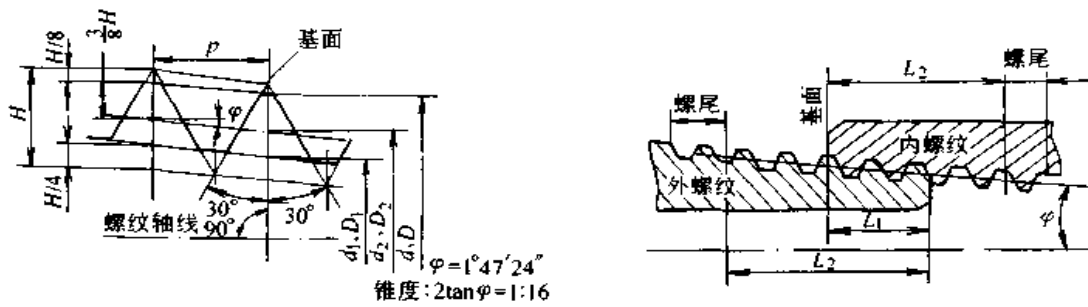
3.3 60°圆锥管螺纹 (GB/T 12716—1991) 3.4 米制锥螺纹 (GB/T 1415—1992)

表 13.5-31 60°圆锥管螺纹的基本牙型和基本尺寸 (mm)



螺纹尺寸代号	每 25.4mm 内的螺纹牙数 n	基面上的基本直径			基准距离 L_1		装配余量 L_3		管子外径	圆锥外螺纹小端面处的螺纹小径
		大径 (基准直径) $d = D$	中径 $d_2 = D_2$	小径 $d_1 = D_1$	距离	牙数	距离	牙数		
1/16	27	7.895	7.142	6.389	4.064	4.32	2.822	3	7.938	6.135
1/8	27	10.242	9.489	8.736	4.102	4.36	2.822	3	10.287	8.480
1/4	18	13.616	12.487	11.358	5.786	4.10	4.234	3	13.716	10.997
3/8	18	17.055	15.926	14.797	6.096	4.32	4.234	3	17.145	14.416
1/2	14	21.223	19.772	18.321	8.128	4.48	5.443	3	21.336	17.813
3/4	14	26.568	25.117	23.666	8.611	4.75	5.443	3	26.670	23.128
1	11.5	33.228	31.461	29.694	10.160	4.60	6.627	3	33.401	29.059
1¼	11.5	41.985	40.218	38.451	10.668	4.83	6.627	3	42.164	37.784
1½	11.5	48.054	46.287	44.520	10.688	4.83	6.627	3	48.260	43.854
2	11.5	60.092	58.325	56.558	11.074	5.01	6.627	3	60.325	55.866
2½	8	72.699	70.159	67.619	17.323	5.46	6.350	2	73.025	66.536
3	8	88.608	86.068	83.528	19.456	6.13	6.350	2	88.900	82.312
3½	8	101.316	98.776	96.236	20.853	6.57	6.350	2	101.600	94.932
4	8	113.973	111.433	108.893	21.438	6.75	6.350	2	114.300	107.553
5	8	140.952	138.412	135.872	23.800	7.50	6.350	2	141.300	134.384
6	8	167.792	165.252	162.712	24.333	7.66	6.350	2	168.275	161.191
8	8	218.441	215.901	213.361	27.000	8.50	6.350	2	219.075	211.673
10	8	272.312	269.772	267.232	30.734	9.68	6.350	2	273.050	265.311
12	8	323.032	320.492	317.952	34.544	10.88	6.350	2	323.850	315.793

表 13.5-32 米制锥螺纹的基本牙型和基本尺寸 (mm)



螺纹 公称直径 d, D	螺距 P	基面上螺纹直径			基准距离 L_1		有效螺纹长度 L_2	
		大径 $d = D$	中径 $d_2 = D_2$	小径 $d_1 = D_1$	标准基 准距离	短基准 距 离	标准有效 螺纹长度	短有效 螺纹长度
6	1	6.000	5.350	4.917	5.5	2.5	8	5
8		8.000	7.350	6.917				
10		10.000	9.350	8.917				
12	1.5	12.000	11.026	10.376	7.5	3.5	11	7
14		14.000	13.026	12.376				
16		16.000	15.026	14.376				
18		18.000	17.026	16.376				
20		20.000	19.026	18.376				
22		22.000	21.026	20.376				
24	24.000	23.026	22.376					
27	2	27.000	25.701	24.835	11	5	16	10
30		30.000	28.701	27.835				
33		33.000	31.701	30.835				
36		36.000	34.701	33.835				
39		39.000	37.701	36.835				
42		42.000	40.701	39.835				
45		45.000	43.701	42.835				
48		48.000	46.701	45.835				
52		52.000	50.701	49.835				
56		56.000	54.701	53.835				
60	60.000	58.701	57.835					

注：与圆锥外螺纹配合的圆柱内螺纹采用普通螺纹，其有效螺纹长度不得小于相应规格 L_2 的 80%。

4 传动螺纹

4.1.1 梯形螺纹的牙型和基本尺寸

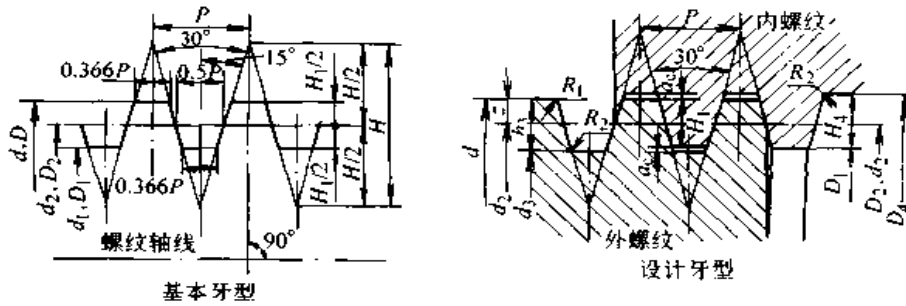
4.1 梯形螺纹

(表 13.5-33)

(GB/T 5796.1~5796.4-1986)

表 13.5-33 梯形螺纹的牙型和基本尺寸

(mm)



螺距 P	a_c	$H_3 = h_3$	R_{1max}	R_{2max}	螺距 P	a_c	$H_3 = h_3$	R_{1max}	R_{2max}	基本尺寸计算公式
1.5	0.15	0.9	0.075	0.15	14	1	8	0.5	1	
2	0.25	1.25	0.125	0.25	16	1	9	0.5	1	
3	0.25	1.75	0.125	0.25	18	1	10	0.5	1	
4	0.25	2.25	0.125	0.25	20	1	11	0.5	1	
5	0.25	2.75	0.125	0.25	22	1	12	0.5	1	
6	0.5	3.5	0.25	0.5	24	1	13	0.5	1	
7	0.5	4	0.25	0.5	28	1	15	0.5	1	
8	0.5	4.5	0.25	0.5	32	1	17	0.5	1	
9	0.5	5	0.25	0.5	36	1	19	0.5	1	
10	0.5	5.5	0.25	0.5	40	1	21	0.5	1	
12	0.5	6.5	0.25	0.5	44	1	23	0.5	1	

公称直径 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	大径 D_4	小径		公称尺寸 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	大径 D_4	小径	
第一系列	第二系列				d_3	D_1	第一系列	第二系列				d_3	D_1
8		1.5*	7.25	8.3	6.2	6.5		18	2	17	18.5	15.5	16
	9	1.5	8.25	9.3	7.2	7.5		20	4*	16	18.5	13.5	14
		2*	8.00	9.5	6.5	7.0			2	19	20.5	17.5	18
									4*	18	20.5	15.5	16
10		1.5	9.25	10.3	8.2	8.5			3	20.5	22.5	18.5	19
		2*	9.00	10.5	7.5	8.0			5*	19.5	22.5	16.5	17
	11	2*	10.00	11.5	8.5	9.0			8	18	23	13	14
		3	9.50	11.5	7.5	8.0							
12		2	11.00	12.5	9.5	10.0			3	22.5	24.5	20.5	21
		3*	10.50	12.5	8.5	9.0			5*	21.5	24.5	18.5	19
									8	20	25	15	16
	14	2	13	14.5	11.5	12							
		3*	12.5	14.5	10.5	11							
16		2	15	16.5	13.5	14			3	24.5	26.5	22.5	23
		4*	14	16.5	11.5	12			5*	23.5	26.5	20.5	21
									8	22	27	17	18

续表 13.5-33

公称直径 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	大径 D_4	小径		公称尺寸 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	大径 D_4	小径	
第一系列	第二系列				d_3	D_1	第一系列	第二系列				d_3	D_1
28		3	26.5	28.5	24.5	25			3	53.5	55.5	51.5	52
		5*	25.5	28.5	22.5	23		55	9*	50.5	56	45	46
		8	24	29	19	20			14	48	57	39	41
	30	3	28.5	30.5	26.5	27			3	58.5	60.5	56.5	57
		6*	27	31	23	24	60		9*	55.5	61	50	51
		10	25	31	19	20			14	53	62	44	46
32		3	30.5	32.5	28.5	29			4	63	65.5	60.5	61
		6*	29	33	25	26		65	10*	60	66	54	55
		10	27	33	21	22			16	57	67	47	49
	34	2	32.5	34.5	30.5	31			4	68	70.5	65.5	66
		6*	31	35	27	28	70		10*	65	71	59	60
		10	29	35	23	24			16	62	72	52	54
36		3	34.5	36.5	32.5	33			4	73	75.5	70.5	71
		6*	33	37	29	30		75	10*	70	76	64	65
		10	31	37	25	26			16	67	77	57	59
	38	3	36.5	38.5	34.5	35			4	78	80.5	75.5	76
		7*	34.5	39	30	31	80		10*	75	81	69	70
		10	33	39	27	28			16	72	82	62	64
40		3	38.5	40.5	36.5	37			4	83	85.5	80.5	81
		7*	36.5	41	32	33		85	12*	79	86	72	73
		10	35	41	29	30			18	76	87	65	67
	42	3	40.5	42.5	38.5	39			4	88	90.5	85.5	86
		7*	38.5	43	34	35	90		12*	84	91	77	78
		10	37	43	31	32			18	81	92	70	72
44		3	42.5	44.5	40.5	41			4	93	95.5	90.5	91
		7*	40.5	45	36	37		95	12*	89	96	82	83
		12	38	45	31	32			18	86	97	75	77
	46	3	44.5	46.5	42.5	43			4	98	100.5	95.5	96
		8*	42.0	47	37	38	100		12*	94	101	87	88
		12	40.0	47	33	34			20	90	102	78	80
48		3	46.5	48.5	44.5	45			4	108	110.5	105.5	106
		8*	44	49	39	40		110	12*	104	110	97	98
		12	42	49	35	36			20	100	112	88	90
	50	3	48.5	50.5	46.5	47			6	117	121	113	114
		8*	46	51	41	42	120		14*	113	122	104	106
		12	44	51	37	38			22	109	122	96	98
52		3	50.5	52.5	48.5	49			6	127	131	123	124
		8*	48	53	43	44		130	14*	123	132	114	116
		12	46	53	39	40			22	119	132	106	108

续表 13.5-33

公称直径 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	大径 D_4	小径		公称尺寸 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	大径 D_4	小径	
第一系列	第二系列				d_3	D_1	第一系列	第二系列				d_3	D_1
140		6	137	141	133	134			8	226	231	221	222
		14*	133	142	124	126		230	20*	220	232	208	210
		24	128	142	114	116			36	212	232	192	194
150	150	6	147	151	143	144	240		8	236	241	231	232
		16*	142	152	132	134			22*	229	242	216	218
		24	138	152	124	126			36	222	242	202	204
160		6	157	161	153	154	250		12	244	251	237	238
		16*	152	162	142	144			22*	239	252	226	228
		28	146	162	130	132			40	230	252	208	210
170	170	6	167	171	163	164	260		12	254	261	247	248
		16*	162	172	152	154			22*	249	262	236	238
		28	156	172	140	142			40	240	262	218	220
180		8	176	181	171	172	270		12	264	271	257	258
		18*	171	182	160	162			24*	258	272	244	246
		28	166	182	150	152			40	250	272	228	230
190	190	8	186	191	181	182	280		12	274	281	267	268
		18*	181	192	170	172			24*	268	282	254	256
		32	174	192	156	158			40	260	282	238	240
200		8	196	201	191	192	290		12	284	291	277	278
		18*	191	202	180	182			24*	278	292	264	266
		32	184	202	166	168			44	268	292	244	246
210	210	8	206	211	201	202	300		12	294	301	287	288
		20*	200	212	188	190			24*	288	302	274	276
		36	192	212	172	174			44	278	302	254	256
220		8	216	221	211	212			12	294	301	287	288
		20*	210	222	198	200			24*	288	302	274	276
		36	202	222	182	184			44	278	302	254	256

- 注：1. 优先选用第一直径系列。
 2. 带“*”号的螺距为优先选择。
 3. 特殊需要允许选用表中邻近直径对应的螺距。

4.1.2 梯形螺纹的公差与配合

(1) 公差带位置

外螺纹的上偏差 (es) 和内螺纹的下偏差 (EI) 为基本偏差。

除外螺纹中径 (d_2) 有三种基本偏差 (h、e、c) 外, 其余的螺纹直径 (D_4 、 D_2 、 D_1 、 d 、 d_3) 基本偏差均为零 (H 或 h)。

(2) 公差等级

螺纹各直径的公差等级见表 13.5-34。

表 13.5-34 公差等级

直 径	公 差 等 级
内螺纹小径 D_1	4
外螺纹大径 d	4
内螺纹中径 D_2	7、8、9
外螺纹中径 d_2	7、8、9
外螺纹小径 d_3	7、8、9

注：外螺纹小径的公差等级与外螺纹中径的公差等级永远相同。

(3) 旋合长度

按公称直径 d 和螺距 P 的大小, 梯形螺纹的旋合长度分为中和长两组, 其代号分别为 N 和 L。

(4) 螺纹精度和公差带选用

梯形螺纹精度有中等和粗糙两种, 其选用原则是:

中等 一般用途;

粗糙 用于精度要求不高的场合。

梯形公差带的选用见表 13.5-35。

对于多线螺纹, 其顶径和底径公差与单线螺纹相同; 中径公差则按线数不同, 将单线螺纹中径公差乘一系数, 其系数值见表 13.5-36。

表 13.5-35 梯形螺纹公差带的选用

精度	内 螺 纹		外 螺 纹	
	N	L	N	L
中等	7H	8H	7h, 7e	8e
粗糙	8H	9H	8e, 8c	9c

表 13.5-36 多线螺纹中径公差的修正系数

线数	2	3	4	≥ 5
系数	1.12	1.25	1.4	1.6

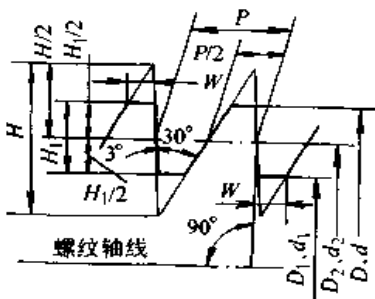
4.2 锯齿形螺纹

(GB/T 13576.1~13576.4—1992)

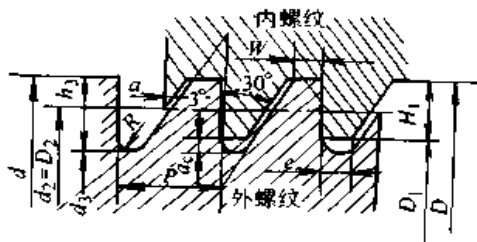
4.2.1 锯齿形螺纹的牙型和基本尺寸

(表 13.5-37)

表 13.5-37 锯齿形螺纹的牙型和基本尺寸



基本牙型



设计牙型

$$\begin{aligned}
 H &= 1.5878P \\
 a_c &= 0.11777P \\
 W &= 0.26384P \\
 H_1 &= 0.75P \\
 e &= W - a \\
 a &= 0.1\sqrt{P} \\
 h_3 &= H_1 + a_c = 0.86777P \\
 D_1 &= d - 2H_1 = d - 1.5P \\
 d_3 &= d - 2h_3 = d - 1.73554P \\
 d_2 &= D_2 = d - 0.75P \\
 R &= 0.12427P
 \end{aligned}$$

P	a_c	a	e	h_3	R	P	a_c	a	e	h_3	R
2	0.236	0.1414	0.386	1.736	0.249	14	1.649	0.3742	3.320	12.149	1.740
3	0.353	0.1732	0.618	2.063	0.373	16	1.884	0.4000	3.821	13.884	1.988
4	0.471	0.2000	0.855	3.471	0.497	18	2.120	0.4243	4.325	15.620	2.237
5	0.589	0.2236	1.096	4.339	0.621	20	2.355	0.4472	4.830	17.355	2.485
6	0.707	0.2449	1.338	5.207	0.746	22	2.501	0.4690	5.335	19.091	2.734
7	0.824	0.2646	1.582	6.074	0.870	24	2.826	0.4899	5.812	20.826	2.982
8	0.912	0.2828	1.828	6.942	0.994	28	3.298	0.5292	6.858	24.298	3.480
9	1.060	0.3000	2.075	7.810	1.118	32	3.769	0.5657	7.877	27.769	3.977
10	1.178	0.3162	2.322	8.678	1.243	36	4.240	0.6000	8.898	31.240	4.474
12	1.413	0.3461	2.820	10.413	1.491	40	4.711	0.6325	9.921	34.711	4.971

续表 13.5-37

公称直径 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	小 径		公称直径 d		螺距 P	中径 $d_2 = D_2$	小 径			
第一系列	第二系列			d_1	D_1	第一系列	第二系列			d_3	D_1		
10		2*	8.50	6.529	7.0			3	39.75	36.793	37.5		
12		2	10.50	8.529	9.0		42	7*	36.75	29.851	31.5		
		3*	9.75	6.793	7.5			10	34.50	24.645	27.0		
	14	2	12.50	10.529	11.0	44		3	41.75	38.793	39.5		
		3*	11.75	8.793	9.5			7*	38.75	31.851	33.5		
16		2	14.50	12.529	13.0			12	35.00	23.174	26.0		
		4*	13.00	9.058	10.0			46		3	43.75	40.793	41.5
	18	2	16.50	14.529	15.0					8*	40.00	32.116	34.0
		4*	15.00	11.058	12.0			12	37.00	25.174	28.0		
20		2	18.50	16.529	17.0	48		3	45.75	42.793	43.5		
		4*	17.00	13.058	14.0			8*	42.00	34.116	36.0		
	22	3	19.75	16.793	17.5			12	39.00	27.174	30.0		
		5*	18.25	13.332	14.5			50		3	47.75	44.793	45.5
		8	16.00	8.116	10.0					8*	44.00	36.116	38.0
24		3	21.75	18.793	19.5			12	41.00	29.174	32.0		
		5*	20.25	15.332	16.5			52		3	49.75	46.793	47.5
		8	18.00	10.116	12.0					8*	46.00	38.116	40.0
	26	3	23.75	20.793	21.5			12	43.00	31.174	34		
		5*	22.25	17.332	18.5			55		3	52.75	49.793	50.5
		8	20.00	12.116	14.0					9*	48.25	39.380	41.5
28		3	25.75	22.793	23.5			14	44.50	30.702	34.0		
		5*	24.25	19.332	20.5			60		3	57.75	54.793	55.5
		8	22.00	14.116	16.0					9*	53.25	44.380	46.5
	30	3	27.75	24.793	25.5			14	49.50	35.702	39.0		
		6*	25.50	19.587	21.0			65		4	62.00	58.058	59.0
		10	22.50	12.045	15.0					10*	57.50	46.645	50.0
32		3	29.75	26.793	27.5			16	53.00	37.231	41.0		
		6*	27.50	21.587	23.0			70		4	67.00	63.058	64.0
		10	24.50	14.645	17.0					10*	62.50	52.645	55.0
	34	3	31.75	28.793	29.5			16	58.00	42.231	46.0		
		6*	29.50	23.587	25.0			75		4	72.00	68.058	69.0
		10	26.50	16.645	19.0					10*	67.50	57.645	60.0
36		3	33.75	30.793	31.5			16	63.00	47.231	51.0		
		6*	31.50	25.587	27.0			80		4	77.00	73.058	74.0
		10	28.50	18.645	21.0					10*	72.50	62.645	65.0
	38	3	35.75	32.793	33.5			16	68.00	52.231	56.0		
		7*	32.75	25.851	27.5			85		4	82.00	78.058	79.0
		10	30.50	20.645	23.0					12*	76.00	64.174	67.0
40		3	37.75	34.793	35.5			18	71.50	53.760	58.0		
		7*	34.75	27.851	29.5			90		4	87.00	83.058	84.0
		10	32.50	22.645	25.0					12*	81.00	69.174	72.0
								18	76.50	58.760	63.0		

续表 13.5-37

公称直径 d		螺距 p	中径 $d_2 = D_2$	小 径		公称直径 d		螺距 p	中径 $d_2 = D_2$	小 径	
第一系列	第二系列			d_3	D_1	第一系列	第二系列			d_3	D_1
	95	4	92.00	88.058	89.0			8	204.0	196.116	198
		12*	86.00	74.174	77.0		210	20*	195.0	175.289	180
		18	81.50	63.760	68.0			36	188.0	147.521	156
100		4	97.00	93.058	94.0	220		8	214.0	206.116	208
		12*	91.00	79.171	82.0			20*	205.0	185.289	190
		20	85.00	65.289	70.0			36	193.0	157.521	166
	110	4	107.00	103.058	104.0			8	224.0	216.116	218
		12*	101.00	89.174	92.0		230	20*	215.0	195.289	200
		20	95.00	75.289	80.0			36	203.0	167.521	176
120		6	115.5	109.587	111	240		8	234.0	226.116	228
		14*	109.5	95.702	99			22*	223.5	201.818	207
		22	103.5	81.819	90			36	213.0	177.521	186
	130	6	135.5	129.587	131			12	241.0	229.174	232
		14*	129.5	115.702	119		250	22*	233.5	211.818	217
		24	122.0	98.347	104			40	220.0	180.579	190
140		6	125.5	119.587	121.0	260		12	251.0	239.174	242
		14	119.5	105.702	109.0			22*	243.5	221.818	227
		22	113.5	91.818	97.0			40	230.0	190.579	200
	150	6	145.5	139.587	141			12	261.0	249.174	252
		16*	138.0	122.231	126		270	24*	252.0	228.347	234
		24	132.0	108.347	114			40	240.0	200.579	210
160		6	155.5	149.587	151	280		12	271.0	259.174	262
		16*	148.0	132.231	136			24*	262.0	288.347	244
		28	139.0	111.405	118			40	250.0	210.579	220
	170	6	165.5	159.587	161			12	281.0	269.174	272
		16*	158.0	142.231	146		290	24*	272.0	248.347	254
		28	149.0	121.405	128			44	257.0	213.636	224
180		8	174.0	166.116	168	300		12	291.0	279.174	282
		18*	166.5	148.760	153			24*	282.0	258.847	264
		28	159.0	131.405	138			44	267.0	223.636	234
	190	8	184.0	176.116	178			12	311.0	299.174	302
		18*	176.5	158.760	163		320	44	287.0	243.636	254
		32	166.0	134.463	142						
200		8	194.0	186.116	188	340		12	331.0	319.174	322
		18*	186.5	168.760	173			44	307.0	263.636	274
		32	176.0	144.463	152						

续表 13.5-37

公称直径 d		螺距 p	中径 $d_2 = D_2$	小 径		公称直径 d		螺距 p	中径 $d_2 = D_2$	小 径	
第一系列	第二系列			d_3	D_1	第一系列	第二系列			d_3	D_1
380	360	12	351.0	339.174	342	500		18	486.5	468.760	473
		12	371.0	359.174	362		520	24	502.0	478.347	484
420	400	12	391.0	379.174	382	540		24	522.0	498.347	504
		18	406.5	388.760	393		560	24	542.0	518.347	524
460	440	18	426.5	408.760	413	580		24	562.0	538.347	544
		18	446.5	428.760	433		600	24	582.0	558.347	564
	480	18	466.5	448.760	453	620		24	602.0	578.347	584
							640	24	622.0	598.347	604

注：1. 优先选用第一系列的直径。
 2. 优先选择带“*”号的螺距。
 3. 特殊需要时，允许选用表中临近的直径所对应的螺距。

4.2.2 锯齿形螺纹的公差与配合

(1) 公差带的位置和公差等级

锯齿形螺纹的外螺纹上偏差 es 与内螺纹下偏差 Ei 为基本偏差。内螺纹大径 D 和小径 D_1 只有一种公差位置 H ，其基本偏差为零；中径 D_2 的公差带位置为 A ，其基本偏差为正值。外螺纹中径 d_2 有两种公差带位置 e 、 c ，其基本偏差为负值；大径 d 和小径 d_3 只有一种公差位置 h ，其基本偏差为零。

锯齿形螺纹的公差等级见表 13.5-38。

表 13.5-38 锯齿形螺纹公差等级

螺纹直径		公差等级
内螺纹	大径 D	H10
	中径 D_2	7、8、9
	小径 D_1	4
外螺纹	大径 d	h9
	中径 d_2	7、8、9
	小径 d_3	7、8、9

注：外螺纹小径 d_3 所选取的公差等级必须与其中径 d_2 的公差等级相同。

(2) 旋合长度

根据公称直径和螺距的大小，锯齿形螺纹的旋合长度分为中等和长两组，其代号分别为 N 、 L 。

(3) 精度和公差带的选用

锯齿形螺纹规定了中等和粗糙两种精度，其选择原则是：一般用途选用中等精度；对精度要求不高的场合选用粗糙精度。

锯齿形螺纹只需选择和标注中径公差带，通常可根据其精度和旋合长度由表 13.5-39 选用。

对于多线锯齿形螺纹，其顶径公差与单线锯齿形螺纹相同，中径公差是在单线锯齿形螺纹的基础上按线数不同分别乘一系数而得，系数值见表 13.5-40。

表 13.5-39 锯齿形螺纹中径公差带的选用

精度	内螺纹		外螺纹	
	N	L	N	L
中等	7H	8H	7e	8e
粗糙	8H	9H	8c	9c

表 13.5-40 多线锯齿形螺纹中径公差系数

线数	2	3	4	≥ 5
系数	1.12	1.25	1.4	1.6

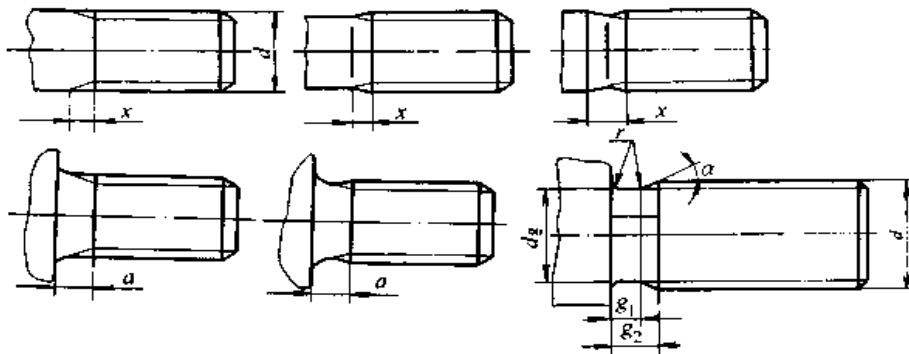
第6章 设计要素

1 螺纹件设计要素

1.1 普通螺纹收尾、肩距、退刀槽和倒角 (表 13.6-1、表 13.6-2)(GB/T 3—1997)

表 13.6-1 外螺纹的收尾、肩距和退刀槽

(mm)



螺距 P	收 尾 x max		肩 距 a max			退 刀 槽			
	一般	短的	一般	长的	短的	g_1 min	g_2 max	d_g	r \approx
0.25	0.6	0.3	0.75	1	0.5	0.4	0.75	$d-0.4$	0.12
0.3	0.75	0.4	0.9	1.2	0.6	0.5	0.9	$d-0.5$	0.16
0.35	0.9	0.45	1.05	1.4	0.7	0.6	1.05	$d-0.6$	0.16
0.4	1	0.5	1.2	1.6	0.8	0.6	1.2	$d-0.7$	0.2
0.45	1.1	0.6	1.35	1.8	0.9	0.7	1.35	$d-0.7$	0.2
0.5	1.25	0.7	1.5	2	1	0.8	1.5	$d-0.8$	0.2
0.6	1.5	0.75	1.8	2.4	1.2	0.9	1.8	$d-1$	0.4
0.7	1.75	0.9	2.1	2.8	1.4	1.1	2.1	$d-1.1$	0.4
0.75	1.9	1	2.25	3	1.5	1.2	2.25	$d-1.2$	0.4
0.8	2	1	2.4	3.2	1.6	1.3	2.4	$d-1.3$	0.4
1	2.5	1.25	3	4	2	1.6	3	$d-1.6$	0.6
1.25	3.2	1.6	4	5	2.5	2	3.75	$d-2$	0.6

螺距 P	收 尾 r max		肩 距 a max			退 刀 槽			
	一般	短的	一般	长的	短的	g_1 min	g_2 max	d_s	r \approx
1.5	3.8	1.9	4.5	6	3	2.5	4.5	$d-2.3$	0.8
1.75	4.3	2.2	5.3	7	3.5	3	5.25	$d-2.6$	1
2	5	2.5	6	8	4	3.4	6	$d-3$	1
2.5	6.3	3.2	7.5	10	5	4.4	7.5	$d-3.6$	1.2
3	7.5	3.8	9	12	6	5.2	9	$d-4.4$	1.6
3.5	9	4.5	10.5	14	7	6.2	10.5	$d-5$	1.6
4	10	5	12	16	8	7	12	$d-5.7$	2
4.5	11	5.5	13.5	18	9	8	13.5	$d-6.4$	2.5
5	12.5	6.3	15	20	10	9	15	$d-7$	2.5
5.5	14	7	16.5	22	11	11	17.5	$d-7.7$	3.2
6	15	7.5	18	24	12	11	18	$d-8.3$	3.2
参考值	$\approx 2.5P$	$\approx 1.25P$	$\approx 3P$	$= 4P$	$= 2P$	—	$\approx 3P$	—	—

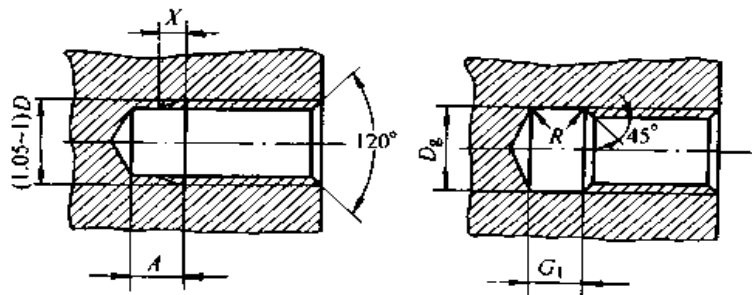
注：1. 应优先选用“一般”长度的收尾和肩距；“短”收尾和“短”肩距仅用于结构受限制的螺纹件上；产品等级为B或C级的螺纹紧固件可采用“长”肩距。

2. d 为螺纹公称直径代号。

3. d_s 公差为：h13 ($d > 3$ mm)；
h12 ($d \leq 3$ mm)。

表 13.6-2 内螺纹的收尾、肩距和退刀槽

(mm)



续表 13.6-2

螺距 P	收 尾 r		肩 距 A		退 刀 槽		D_k	R \approx
	max		max		G_1			
	一般	短的	一般	长的	一般	短的		
0.25	1	0.5	1.5	2			D + 0.3	
0.3	1.2	0.6	1.8	2.4				
0.35	1.4	0.7	2.2	2.8				
0.4	1.6	0.8	2.5	3.2				
0.45	1.8	0.9	2.8	3.6				
0.5	2	1	3	4	2	1		0.2
0.6	2.4	1.2	3.2	4.8	2.4	1.2		0.3
0.7	2.8	1.4	3.5	5.6	2.8	1.4		0.4
0.75	3	1.5	3.8	6	3	1.5		0.4
0.8	3.2	1.6	4	6.4	3.2	1.6		0.4
1	4	2	5	8	4	2	0.5	
1.25	5	2.5	6	10	5	2.5	0.6	
1.5	6	3	7	12	6	3	0.8	
1.75	7	3.5	9	14	7	3.5	0.9	
2	8	4	10	16	8	4	1	
2.5	10	5	12	18	10	5	1.2	
3	12	6	14	22	12	6	1.5	
3.5	14	7	16	24	14	7	1.8	
4	16	8	18	26	16	8	2	
4.5	18	9	21	29	18	9	2.2	
5	20	10	23	32	20	10	2.5	
5.5	22	11	25	35	22	11	2.8	
6	24	12	28	38	24	12	3	
参考值	$\approx 4P$	$\approx 2P$	$\approx (6 \sim 5)P$	$\approx (8 \sim 6.5)P$	$= 4P$	$= 2P$	—	$\approx 0.5P$

注：1. 应优先选用“一般”长度的收尾和肩距；容屑需要较大空间时可选用“长”肩距，结构限制时可选用“短”收尾。

2. “短”退刀槽仅在结构受限制时采用。

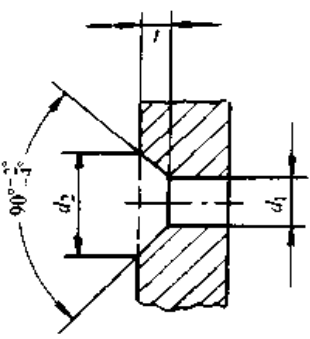
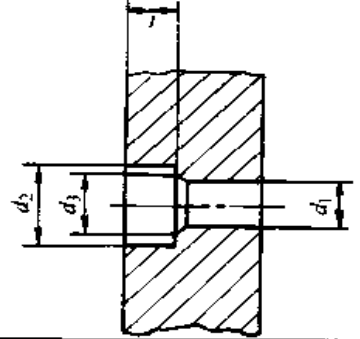
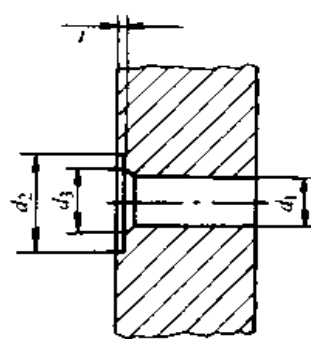
3. D_k 公差为 H13。

4. D 为螺纹公称直径代号。

1.2 紧固件用沉孔 (表 13.6-3) (GB/T 152.2~152.4—1988)

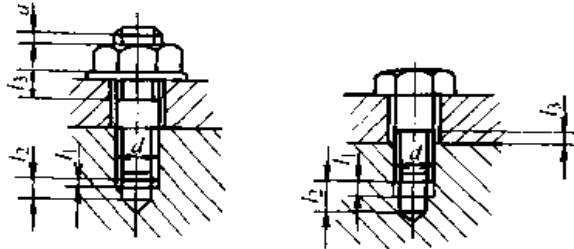
表 13.6-3 紧固件用沉孔尺寸

(mm)

 <p>沉头用 沉孔 (GB/T152.2 —1988)</p>	螺纹规格	1.6	2	2.5	3	3.5	4	5	6	8	10	12	14	16	20		
	d_2	3.7	4.5	5.6	6.4	8.4	9.6	10.6	12.6	17.6	20.3	24.4	28.4	32.4	40.4		
	$t \approx$	1.0	1.2	1.5	1.6	2.4	2.7	2.7	3.3	4.6	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0		
 <p>圆柱头用 沉孔 (GB/T152.3 —1988)</p>	螺纹规格	1.6	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	20	36		
	d_2	3.3	4.3	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	15.0	18.0	20.0	24.0	26.0	33.0	40.0	57.0	
	t	1.8	2.3	2.9	3.4	4.6	5.7	6.8	9.0	11.0	13.0	15.0	17.5	21.5	25.5	38.0	
 <p>六角头 螺栓和六 角螺母用 沉孔 (GB/T152.4 —1988)</p>	d_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	18	20	24	42		
	d_1	1.8	2.4	2.9	3.4	4.5	5.5	6.6	9.0	11.0	13.5	15.5	17.5	22.0	26.0	33.0	39.0
	螺纹规格	4	5	6	8	10	12	14	16	20	24	26	36				
<p>适用于 GB/T 70 的 圆柱头沉孔</p> <p>适用于 GB/T 65 用 圆柱头沉孔</p>	d_2	3.2	4	4.7	6.0	7.0	8.0	9.0	10.5	12.5							
	d_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	d_1	1.8	2.4	2.9	3.4	4.5	5.5	6.6	9.0	11.0	13.5	15.5	17.5	22.0	26.0	33.0	39.0
<p>适用于 GB/T 65 用 圆柱头沉孔</p>	螺纹规格	4	5	6	8	10	12	14	16	20	24	26	36				
	d_2	8	10	11	15	18	20	24	26	36							
	t	3.2	4	4.7	6.0	7.0	8.0	9.0	10.5	12.5							
<p>适用于 GB/T 65 用 圆柱头沉孔</p>	d_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	d_1	4.5	5.5	6.6	9.0	11.0	13.5	15.5	17.5	22.0							
	螺纹规格	1.6	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20		
<p>适用于 GB/T 65 用 圆柱头沉孔</p>	d_2	5	6	8	9	10	11	13	18	22	26	30	33	36	40		
	d_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	d_1	1.8	2.4	2.9	3.4	4.5	5.5	6.6	9.0	11.0	13.5	15.5	17.5	20.0	22.0		
<p>适用于 GB/T 65 用 圆柱头沉孔</p>	螺纹规格	22	24	27	30	33	36	39	42	45	48	52	55	60	64		
	d_2	43	48	53	61	66	71	76	82	89	98	107	112	118	125		
	d_3	26	28	33	36	39	42	45	48	51	56	60	68	72	76		
<p>适用于 GB/T 65 用 圆柱头沉孔</p>	d_1	24	26	30	33	36	39	42	45	48	52	56	62	66	70		

1.3 普通螺纹内、外螺纹余留长度、钻孔余留深度、螺栓突出螺母末端长度
(表 13.6-4) (JB/ZQ 4247—1997)

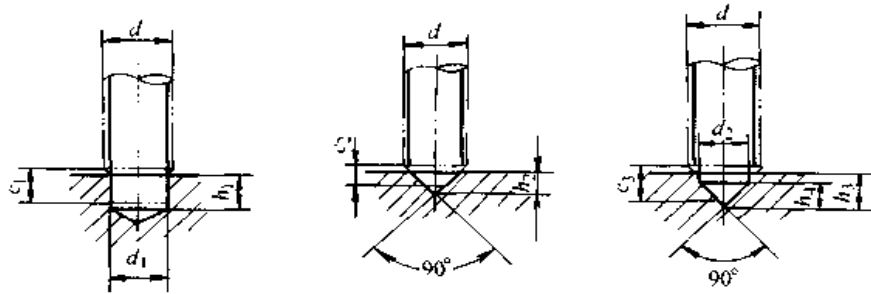
表 13.6-4 普通螺纹内、外螺纹余留长度、钻孔余留深度、螺栓突出螺母末端长度
(mm)



螺距	螺 纹 直 径		余 留 长 度			末端长度
	粗 牙	细 牙	内螺纹	钻 孔	外螺纹	
p	d		l_1	l_2	l_3	a
0.5	3	5	1	4	2	1~2
0.7	4			5		
0.75		6	1.5	6	2.5	2~3
0.8	5					
1	6	8, 10, 14, 16, 18	2	7	3.5	2.5~4
1.25	8	12	2.5	9	4	
1.5	10	14, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33	3	10	4.5	3.5~5
1.75	12		3.5	13	5.5	
2	14, 16	24, 27, 30, 33, 36, 39, 45, 48, 52	4	14	6	4.5~6.5
2.5	18, 20, 22		5	17	7	
3	24, 27	36, 39, 42, 45, 48, 56, 60, 64, 72, 76	6	20	8	5.5~8
3.5	30		7	23	10	
4	36	56, 60, 64, 68, 72, 76	8	26	11	7~11
4.5	42		9	30	12	
5	48		10	33	13	
5.5	56		11	36	16	10~15
6	64, 72, 76		12	40	18	

1.4 轴上固定螺钉用孔 (表 13.6-5) (JB/ZQ 4251—1997)

表 13.6-5 轴上固定螺钉用孔 (mm)



d	3	4	6	8	10	12	16	20	24
d_1			4.5	6	7	9	12	15	18
d_2					7	9	12	15	
c_1			4	5	6	7	8	10	12
c_2	1.5	2	3	3	3.5	4	5	6	
c_3					6	7	8	10	
$h_1 \geq$			4	5	6	7	8	10	12
h_2	1.5	2	3	3	3.5	4	5	6	
$h_3 \leq$					6	7	8	10	
h_4					3.5	4.5	6	7.5	

注：工作图上除 c_1 、 c_2 和 c_3 外，其他尺寸应全部注出。

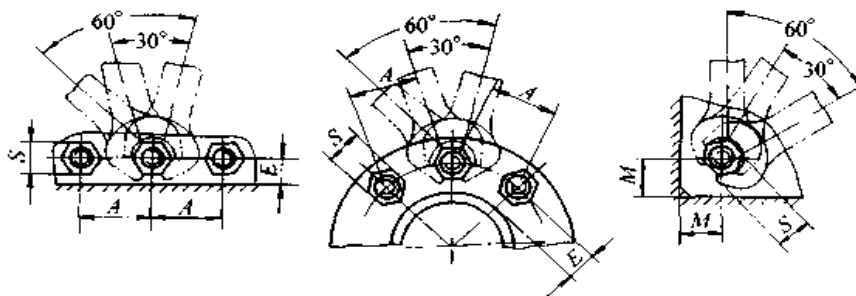
1.5 底座地脚螺栓孔尺寸 (表 13.6-6) (JB/ZQ 4171—1997)

表 13.6-6 底座地脚螺栓孔尺寸 (mm)

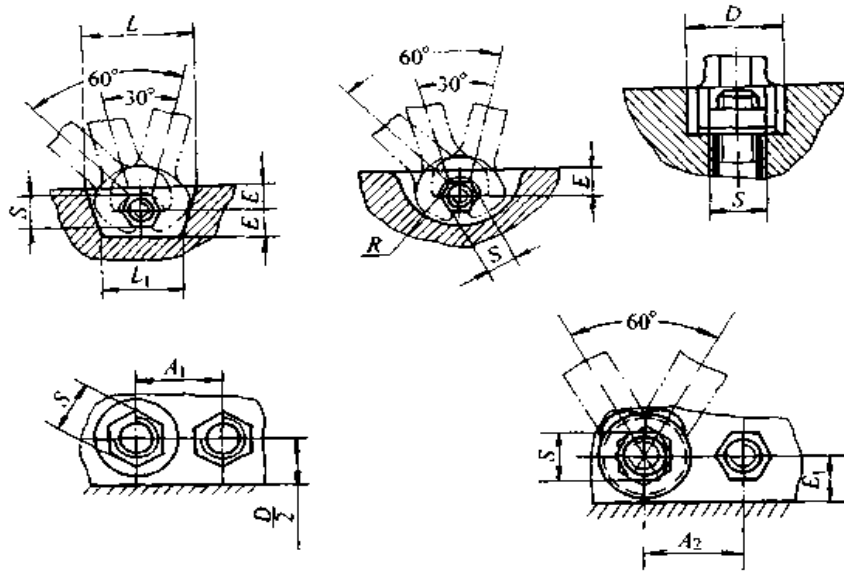
地脚螺栓 d	M 8	M 10	M 12	M 16	M 20	M 24	M 30	M 36	M 42	M 48	M 56	M 64	M 72	M 80	M 90	M 100	M 110	M 125	M 140	M 160
地脚螺栓孔 D	15	17	20	24	28	34	40	46	52	58	66	74	82	90	100	110	120	135	155	175

1.6 扳手空间 (表 13.6-7) (JB/ZQ 4005—1997)

表 13.6-7 扳手空间 (mm)



续表 13.6-7



螺纹直径 d	S	A	A_1	A_2	E	E_1	M	L	L_1	R	D
3	5.5	18	12	12	5	7	11	30	24	15	14
4	7	20	16	14	6	7	12	34	28	16	16
5	8	22	16	15	7	10	13	36	30	18	20
6	10	26	18	18	8	12	15	46	38	20	24
8	13	32	24	22	11	14	18	55	44	25	28
10	16	38	28	26	13	16	22	62	50	30	30
12	18	42	—	30	14	18	24	70	55	32	—
14	21	48	36	34	15	20	26	80	65	36	40
16	24	55	38	38	16	24	30	85	70	42	45
18	27	62	45	42	19	25	32	95	75	46	52
20	30	68	48	46	20	28	35	105	85	50	56
22	34	76	55	52	24	32	40	120	95	58	60
24	36	80	58	55	24	34	42	125	100	60	70
27	41	90	65	62	26	36	46	135	110	65	76
30	46	100	72	70	30	40	50	155	125	75	82
33	50	108	76	75	32	44	55	165	130	80	88
36	55	118	85	82	36	48	60	180	145	88	95
39	60	125	90	88	38	52	65	190	155	92	100
42	65	135	96	96	42	55	70	205	165	100	106
45	70	145	105	102	45	60	75	220	175	105	112
48	75	160	115	112	48	65	80	235	185	115	126
52	80	170	120	120	48	70	84	245	195	125	132
56	85	180	126	—	52	—	90	260	205	130	138

续表 13.6-7

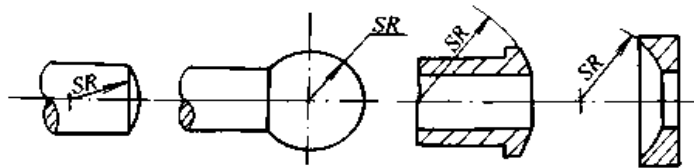
螺纹直径 d	S	A	A_1	A_2	E	E_1	M	L	L_1	R	D
60	90	185	134	—	58	—	95	275	215	135	145
64	95	195	140	—	58	—	100	285	225	140	152
68	100	205	145	—	65	—	105	300	235	150	158
72	105	215	155	—	68	—	110	320	250	160	168
76	110	225	—	—	70	—	115	335	265	165	—
80	115	235	165	—	72	—	120	345	275	170	178
85	120	245	175	—	75	—	125	360	285	180	188
90	130	260	190	—	80	—	135	390	310	190	208
95	135	270	—	—	85	—	140	405	320	200	—
100	145	290	215	—	95	—	150	435	340	215	238
105	150	300	—	—	98	—	155	450	350	220	—
110	155	310	—	—	100	—	160	460	360	225	—
115	165	330	—	—	108	—	170	495	385	245	—
120	170	340	—	—	108	—	175	505	400	250	—
125	180	360	—	—	115	—	185	535	420	270	—
130	185	370	—	—	115	—	190	545	430	275	—
140	200	385	—	—	120	—	205	585	465	295	—
150	210	420	310	—	130	—	215	625	495	310	350

2 金属切削加工件设计要素

2.1 球面半径 (表 13.6-8) (GB/T 6403.1—1986)

表 13.6-8 球面半径

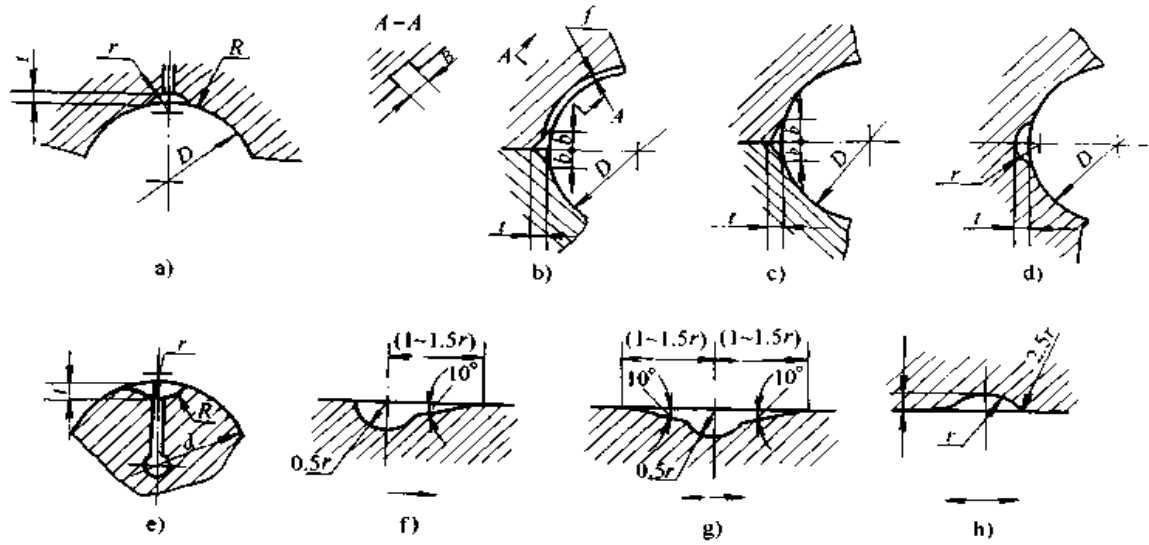
(mm)



系 列	第1系列	0.2	0.4	0.6	1.0	1.6	2.5	4.0	6.0	10	16	20
	第2系列	0.3	0.5	0.8	1.2	2.0	3.0	5.0	8.0	12	18	22
	第1系列	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
	第2系列	28	36	45	56	71	90	110	140	180	220	280
	第1系列	320	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 200
	第2系列	360	450	560	710	900	1 100	1 400	1 800	2 200	2 800	

2.2 润滑槽 (表 13.6-9~表 13.6-10) (GB/T 6403.2-1986)

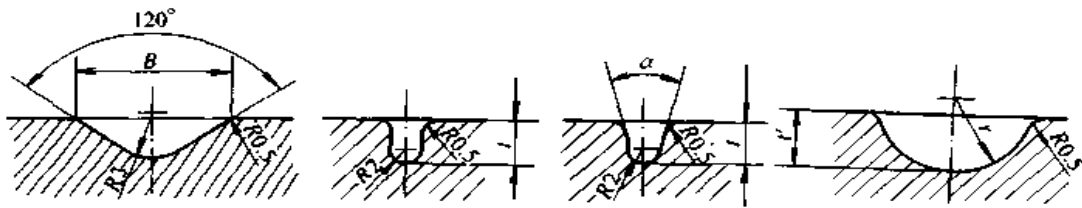
表 13.6-9 滑动轴承用润滑槽的型式和尺寸 (mm)



直径	t	r	R	B	f	b
D d						
≤50	0.8	1.0	1.0	—	—	—
	1.0	1.6	1.6	—	—	—
	1.6	3.0	6.0	5.0	1.6	4.0
>50~120	2.0	4.0	10	8.0	2.0	6.0
	2.5	5.0	16	10	2.0	8.0
	3.0	6.0	20	12	2.5	10
>120	4.0	8.0	25	16	3.0	12
	5.0	10	32	20	3.0	16
	6.0	12	40	25	4.0	20

注：图中箭头说明运动为单向或双向。a)、b)、c)、d) 用于轴瓦、轴套；e) 用于轴上；f)、g) 用于推力轴承；h) 用于轴端面。

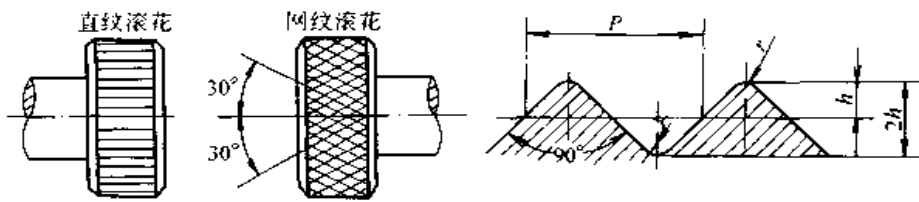
表 13.6-10 平面上用的润滑槽型式和尺寸 (mm)



B	$\alpha/ (^{\circ})$	t	t'	1.0	1.6	2.0
4、6、10、12、16	15、30、45	3、4、5	r	1.6	2.5	4.0

2.3 滚花 (表 13.6-11) (GB/T 6403.3—1986)

表 13.6-11 滚花 (mm)

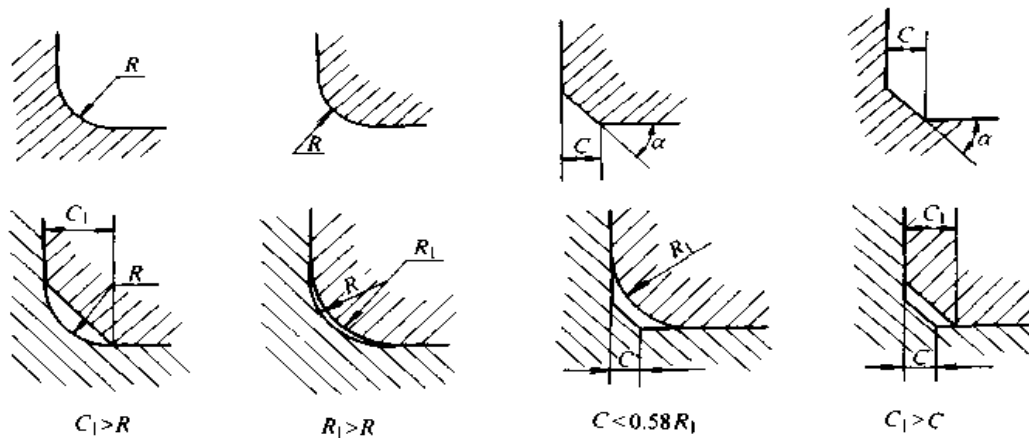


模数 m	h	r	节距 P	标记示例 模数 $m = 0.3 \text{ mm}$ 的直纹滚花: 直纹 $m0.3 \text{ GB/T 6403.3—1986}$ 模数 $m = 0.3 \text{ mm}$ 的网纹滚花: 网纹 $m0.3 \text{ GB/T 6403.3—1986}$
0.2	0.132	0.06	0.628	
0.3	0.198	0.09	0.942	
0.4	0.264	0.12	1.257	
0.5	0.326	0.16	1.571	

- 注: 1. 表中 $h = 0.785m - 0.414r$ 。
 2. 滚花前工件表面的粗糙度的轮廓算术平均偏差 R , 最大允许值为 $12.5 \mu\text{m}$ 。
 3. 滚花后工件直径大于滚花前直径, 其值 $\Delta \approx (0.8 \sim 1.6)m$, m 为模数。

2.4 零件倒圆与倒角 (表 13.6-12) (GB/T 6403.4—1986)

表 13.6-12 零件倒圆与倒角 (mm)

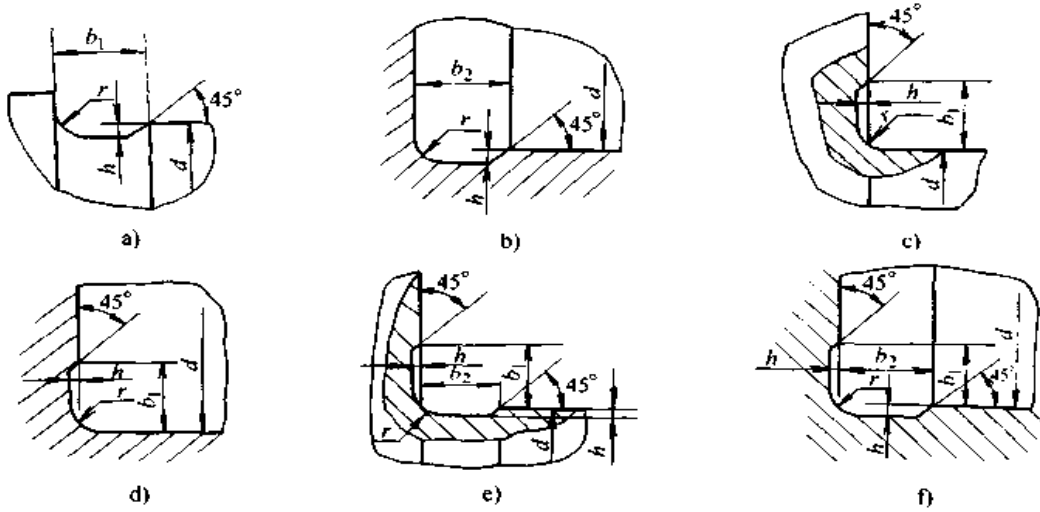


直径 D	≤ 3		$> 3 \sim 6$		$> 6 \sim 10$		$> 10 \sim 18$		$> 18 \sim 30$		$> 30 \sim 50$		$> 50 \sim 80$		$> 80 \sim 120$		$> 120 \sim 180$	
	R	R_1		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0	2.5	3.0		
C	C_{max} ($C < 0.58R_1$)		—	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6			
直径 D	$> 180 \sim 250$		$> 250 \sim 320$		$> 320 \sim 400$		$> 400 \sim 500$		$> 500 \sim 630$		$> 630 \sim 800$		$> 800 \sim 1000$		$> 1000 \sim 1250$		$> 1250 \sim 1600$	
	R	R_1		4.0	5.0	6.0	8.0	10	12	16	20	25						
C	C_{max} ($C < 0.58R_1$)		2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	12							

注: α 一般采用 45° , 也可采用 30° 或 60° 。

2.5 砂轮越程槽 (表 13.6-13~15) (GB/T 6403.5—1986)

表 13.6-13 回转面及端面砂轮越程槽型式及尺寸 (mm)



a) 磨外圆 b) 磨内圆 c) 磨外端面 d) 磨内端面 e) 磨外圆及端面 f) 磨内圆及端面

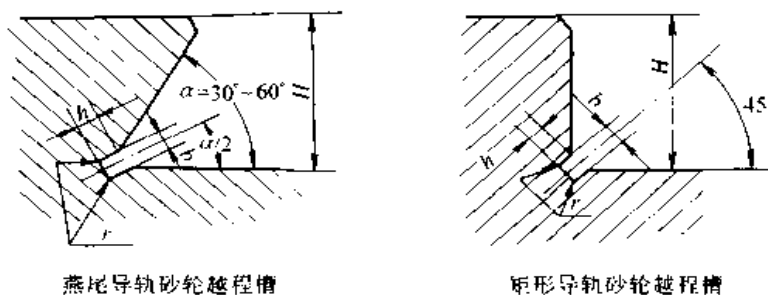
b_1	0.6	1.0	1.6	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0	10
b_2	2.0	3.0		4.0		5.0		8.0	10
h	0.1	0.2		0.3	0.4		0.6	0.8	1.2
r	0.2	0.5		0.8	1.0		1.6	2.0	3.0
d	~10			>10~50		>50~100		>100	

注: 1. 越程槽内两直线相交处, 不允许产生尖角。
 2. 越程槽深度 h 与圆弧半径 r , 应满足 $r \leq 3h$ 。

表 13.6-14 平面砂轮越程槽和 V 型砂轮越程槽的型式及尺寸 (mm)

<p>平面砂轮越程槽</p> <p>V 型砂轮越程槽</p>	b	r	h
	2	0.5	1.6
	3	1.0	2.0
	4	1.2	2.5
	5	1.6	3.0

表 13.6-15 燕尾导轨砂轮越程槽、矩形导轨砂轮越程槽型式及尺寸 (mm)



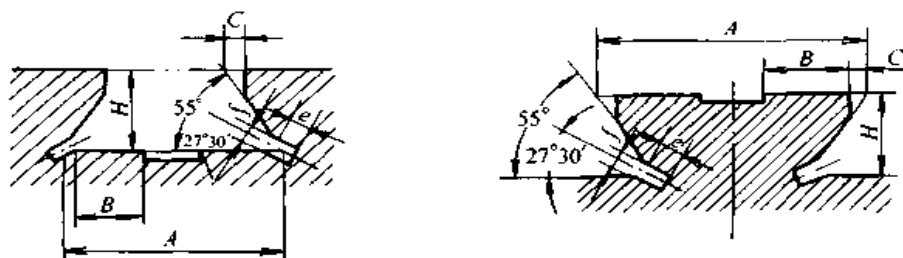
燕尾导轨砂轮越程槽

矩形导轨砂轮越程槽

尺寸	燕尾导轨砂轮越程槽												矩形导轨砂轮越程槽											
	H ≤ 5	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100
b	1	2	3		4			5		6	2			3			5	8						
h	1	2	3		4			5		6	1.6			2.0			3.0	5.0						
r	0.5	0.5	1.0		1.6			1.6		2.0	0.5			1.0			1.6	2.0						

2.6 燕尾槽 (表 13.6-16) (JB/ZQ 4241—1997)

表 13.6-16 燕尾槽 (mm)



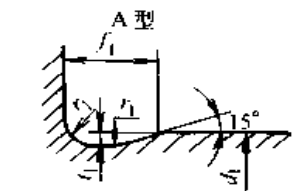
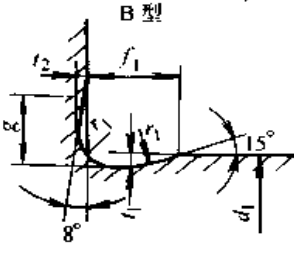
A	40~65	50~70	60~90	80~125	100~160	125~200	160~250	200~320	250~400	320~500
B	12	16	20	25	32	40	50	65	80	100
C	1.5~5									
e	2		3				4			
f	2		3				4			
H	8	10	12	16	20	25	32	40	50	65

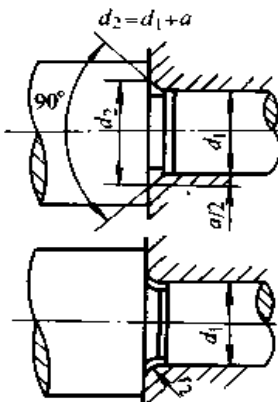
注: 1. “A”的系列为: 40, 45, 50, 60, 65, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 320, 360, 400, 450, 500。

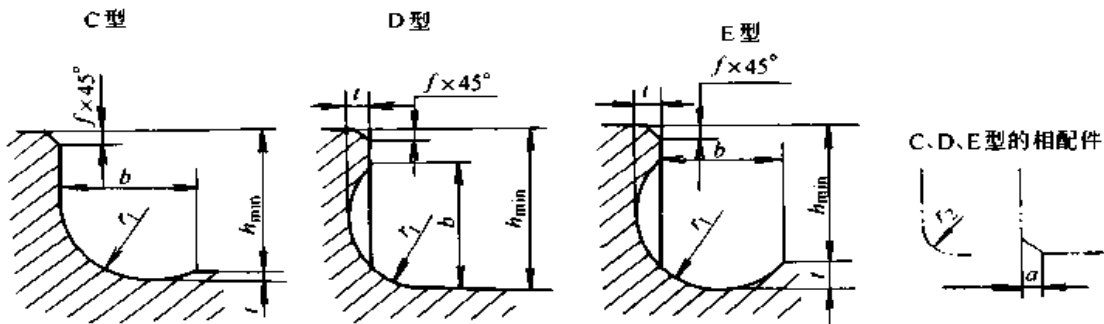
2. “C”为推荐值。

2.7 退刀槽 (表 13.6-17~20) (JB/ZQ 4238—1997)

表 13.6-17 退刀槽及其配合尺寸 (mm)

 A型  B型	r_1	t_1 ($^{+0.1}$)	f_1	$R \approx$	t_2 ($^{+0.05}$)	推荐的配合直径 d_1	
						用在一般载荷	用在交变载荷
	0.6	0.2	2	1.4	0.1	< 18	—
	0.6	0.3	2.5	2.1	0.2	> 18 ~ 80	
	1	0.4	4	3.2	0.3	> 80	
	1	0.2	2.5	1.8	0.1	—	> 18 ~ 50
	1.6	0.3	4	8.1	0.2		> 50 ~ 80
	2.5	0.4	5	4.8	0.3		> 80 ~ 125
	4	0.5	7	6.4	0.3		125

 退刀槽尺寸	倒角最小值 a		倒圆最小值 r_2	
	$r_1 \times t_1$	A型	B型	A型	B型
0.6 × 0.2	0.4	0.1	1	0.3
0.6 × 0.3	0.3	0	0.8	0
1 × 0.4	0.6	0	1.5	0
1 × 0.2	0.8	0.4	2	1
1.6 × 0.3	1.3	0.6	3.2	1.4
2.5 × 0.4	2.1	1.0	5.2	2.4
4 × 0.5	3.5	2.0	8.8	5



续表 13.6-17

轴					相 配 件 (孔)				
h_{min}	r_1	t	b		f_{max}	a	极限偏差	r_2	极限偏差
			C、D 型	E 型					
2.5	1.0	0.25	1.6	1.1	0.2	1	+0.6	1.2	+0.6
4	1.6	0.25	2.4	2.2	0.2	1.6	+0.6	2.0	+0.6
6	2.5	0.25	3.6	3.4	0.2	2.5	+1.0	3.2	+1.0
10	4.0	0.4	5.7	5.3	0.4	4.0	+1.0	5.0	+1.0
16	6.0	0.4	8.1	7.7	0.4	6.0	+1.6	8.0	+1.6
25	10.0	0.6	13.4	12.8	0.4	10.0	+1.6	12.5	+1.6
40	16.0	0.6	20.3	19.7	0.6	16.0	+2.5	20.0	+2.5
60	25.0	1.0	32.1	31.1	0.6	25.0	+2.5	32.0	+2.5

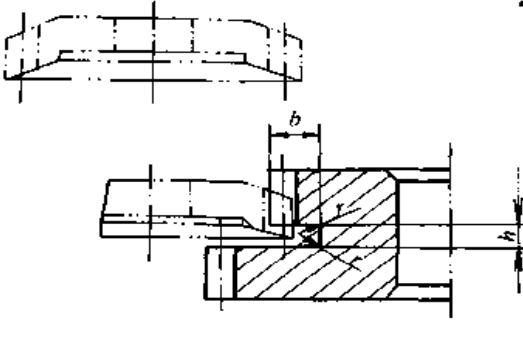
F 型	相 配 件					
	h_{min}	r_1	t_1	t_2	b	f_{max}
	4	1.0	0.4	0.25	1.2	0.2
	5	1.6	0.6	0.4	2.0	
	8	2.5	1.0	0.6	3.2	
	12.5	4.0	1.6	1.0	5.0	0.4
	20	6.0	2.5	1.6	8.0	
	30	10.0 ^①	4.0	2.5	12.5	

① $r_1 = 10$ 不适用于精整孔。

表 13.6-18 公称直径相同具有不同配合的退刀槽 (mm)

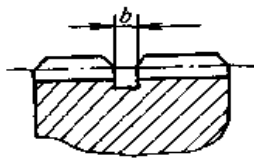
	A 型						B 型 (b)					
r	2.5	4	6	10	16	25	2.5	4	6	10	16	25
t	0.25	0.4	0.4	0.6	0.6	1.0	0.25	0.4	0.4	0.6	0.6	1.0
$b \approx$	2.2	3.5	4.3	6.8	8.7	14.0	2.2	3.5	4.3	6.8	8.7	14.0

表 13.6-19 插齿空刀槽各部尺寸 (mm)



模数	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	
h_{\min}	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10	12	
b_{\min}	5	6	7.5	10.5	13	15	16	19	22	24	28	33	38	42	46	51	58	
r	0.5			1.0														

表 13.6-20 滚人字齿轮退刀槽各部尺寸

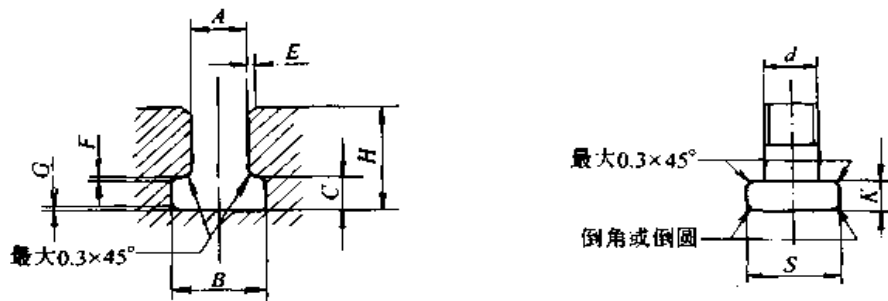


法向模数 m_n / mm	螺旋角 β				法向模数 m_n / mm	螺旋角 β			
	25°	30°	35°	40°		25°	30°	35°	40°
	退刀槽最小宽度 b /mm					退刀槽最小宽度 b /mm			
4	46	50	52	54	18	164	175	184	192
5	58	58	62	64	20	185	198	208	218
6	64	66	72	74	22	200	212	224	234
7	70	74	78	82	25	215	230	240	250
8	78	82	86	90	28	238	252	266	278
9	84	90	94	98	30	246	260	276	290
10	94	100	104	108	32	264	270	300	312
12	118	124	130	136	36	284	304	322	335
14	130	138	146	152	40	320	330	350	370
16	148	158	165	174					

注：退刀槽深度由设计者决定。

2.8 T形槽 (表 13.6-21~24) (GB/T 158—1996)

表 13.6-21 T形槽和相应螺栓头部尺寸 (mm)



E、F 和 G 倒 45°角或倒圆

续表 13.6-21

T 形 槽										螺 栓 头 部		
A	B		C		H		E	F	G	d	S	K
基本尺寸	最小尺寸	最大尺寸	最小尺寸	最大尺寸	最小尺寸	最大尺寸	最大尺寸	最大尺寸	最大尺寸	公称尺寸	最大尺寸	最大尺寸
5	10	11	3.5	4.5	8	10	1	0.6	1	M4	9	3
6	11	12.5	5	6	11	13				M5	10	4
8	14.5	16	7	8	15	18				M6	13	6
10	16	18	7	8	17	21				M8	15	6
12	19	21	8	9	20	25				M10	18	7
14	23	25	9	11	23	28	1.6	1	1.6	M12	22	8
18	30	32	12	14	30	36				M16	28	10
22	37	40	16	18	38	45		2.5	1	2.5	M20	34	14
28	46	50	20	22	48	56	M24				43	18
36	56	60	25	28	61	71	2.5	1.6	4	M30	53	23
42	68	72	32	35	74	85				M36	64	28
48	80	85	36	40	84	95		2	6	M42	75	32
54	90	95	40	44	94	106				M48	85	36

- 注：1. T形槽底部允许有空刀槽，其宽度为 A，深度为 1~2 mm。
 2. T形槽宽度 A 的极限偏差：有配合要求的基准槽为 H8；无配合要求基准槽和固定槽为 H12。T形槽直接铸出时，其尺寸偏差自定。
 3. T形槽宽度两侧面的表面粗糙度 Ra 最大允许值；基准槽为 3.2 μm；固定槽为 6.3 μm。其余表面的粗糙度 Ra 最大允许值为 12.5 μm。

表 13.6-22 T形槽间距 (mm)

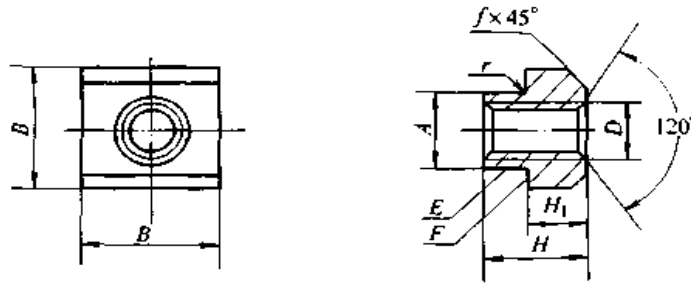
槽宽 A	5	6	8	10	12	14	18	22	28	36	42	48	54
	间距 P					(40)	(50)	(63)	(80)	100	125	160	200	250
	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	320
	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	320	400
	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	320	400	500

- 注：1. T形槽间距 P 栏中，括号内的数值与 T形槽槽底宽度最大值之差值，可能较小，应避免采用。
 2. 与 T形槽宽度 A 相对应的 T形槽间距 P (有 3 个或 4 个尺寸) 的尺寸，一般由制造厂根据工作台尺寸和使用要求的 T形槽数来选择。若需采用间距尺寸，大于或小于表中所列 T形槽间距 P 尺寸范围时，应从 GB/T321 中的 R10 系列中选取；若采用尺寸在表中所列数值范围内，则应从 R20 系列中选取。
 3. 尽可能将 T形槽对称排列，中央槽为基准 T形槽，当槽数为偶数时，基准槽应在机床工作台标明。

表 13.6-23 T形槽不通端型式及尺寸 (mm)

<p style="text-align: center;">$K = H + 2$</p>	T形槽 宽度 A	5	6	8	10	12	14	18	22	28	36	42	48	54	
	K	12	15	20	23	27	30	38	47	58	73	87	97	108	
	D	基本尺寸	15	16	20	22	28	32	42	50	62	76	92	108	122
		极限偏差	+1 0	+1.5 0						+2 0					
	e	0.5	1			1.5			2						

表 13.6-24 T形槽用螺母型式及尺寸 (mm)



T形槽 宽度 A	D	A		B		H ₁		H		f	r
	公称 尺寸	基本 尺寸	极限 偏差	基本 尺寸	极限 偏差	基本 尺寸	极限 偏差	基本 尺寸	极限 偏差	最大 尺寸	最大 尺寸
5	M4	5	-0.3	9	±0.29	3	±0.2	6.5	±0.29	1	0.3
6	M5	6		10		4		8			
8	M6	8		13		6		10			
10	M8	10	-0.5	15	±0.35	6	±0.24	12	±0.35	1.6	0.4
12	M10	12		18		7		14			
14	M12	14		22		8		16			
18	M16	18	-0.6	23	±0.42	10	±0.29	20	±0.42	2.5	0.5
22	M20	22		34		14		28			
28	M24	28		43		18		36			
36	M30	36	-0.4	53	±0.5	18	±0.35	36	±0.5	4	0.8
42	M36	42		64		23		44			
48	M42	48		75		28		52			
54	M48	54	-0.7	85	±0.6	32	±0.42	60	±0.6	6	0.8

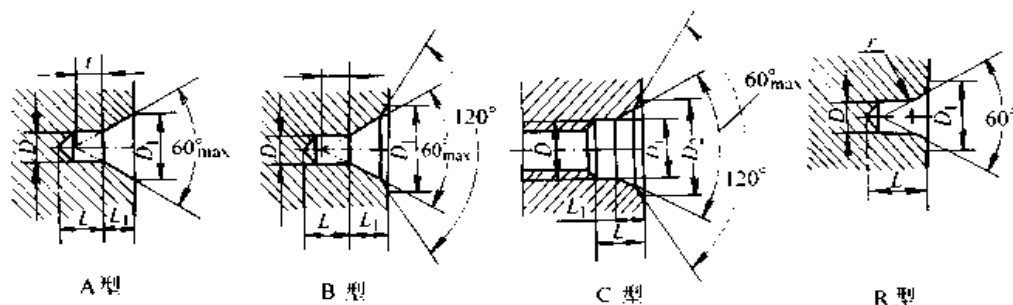
注：1. 螺母进行热处理，并发兰，热处理硬度为 35HRC。

2. 螺母表面粗糙度 R_a 最大允许值：基准槽用螺母为 $3.2 \mu m$ ，其余表面为 $6.3 \mu m$ 。

2.9 中心孔 (表 13.6-25~27)

表 13.6-25 60°中心孔 (摘自 GB/T 145—1985)

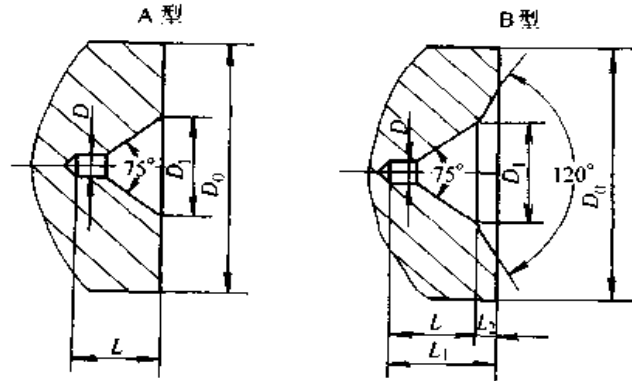
(mm)



D			D ₁			L ₁ (参考)		r (参考)		L _{min}	r		D	D ₁	D ₂	L	L ₁ (参考)	选择中心孔的参考数据			
A型	B型	R型	A型	B型	R型	A型	B型	A型	B型	R型			C型					原料端部最小直径 D ₁	轴状原料最大直径 D ₀	工件最大重量 r	
(0.50)	—	—	1.06	—	—	0.48	—	0.5	—	—	—	—									
(0.63)	—	—	1.32	—	—	0.60	—	0.6	—	—	—	—									
(0.80)	—	—	1.70	—	—	0.78	—	0.7	—	—	—	—									
1.00			2.12	3.15	2.12	0.97	1.27	0.9	2.3	3.15	2.50										
(1.25)			2.65	4.00	2.65	1.21	1.60	1.1	2.8	4.00	3.15										
1.60			3.35	5.00	3.35	1.52	1.99	1.4	3.5	5.00	4.00										
2.00			4.25	6.30	4.25	1.05	2.54	1.8	4.4	6.30	5.00							8	>10~18	0.12	
2.50			5.30	8.00	5.30	2.42	3.20	2.2	5.5	8.00	6.30							10	>18~30	0.2	
3.15			6.70	10.00	6.70	3.07	4.03	2.8	7.0	10.00	8.00	M3	3.2	5.8	2.6	1.8	12	>30~50	0.5		
4.00			8.50	12.50	8.50	3.90	5.05	3.5	8.9	12.50	10.00	M4	4.3	7.4	3.2	2.1	15	>50~80	0.8		
(5.00)			10.60	16.00	10.60	4.85	6.41	4.4	11.2	16.00	12.50	M5	5.3	8.8	4.0	2.4	20	>80~120	1		
6.30			13.20	18.00	13.20	5.98	7.36	5.5	14.0	20.00	16.00	M6	6.4	10.5	5.0	2.8	25	>120~180	1.5		
(8.00)			17.00	22.40	17.00	7.79	9.36	7.0	17.9	25.00	20.00	M8	8.4	13.2	6.0	3.3	30	>180~220	2		
10.00			21.20	28.00	21.20	9.70	11.66	8.7	22.5	31.50	25.00	M10	10.5	16.3	7.5	3.8	35	>180~220	2.5		
												M12	13.0	19	9.5	4.4	42	>220~260	3		
												M16	17.0	25.3	12.0	5.2	50	>260~300	5		
												M20	21.0	31.3	15.0	6.4	60	>300~360	7		
												M24	25.0	38.0	18.0	8.0	70	>360	10		

- 注：1. 对于重要的轴，须选定中心孔尺寸和表面粗糙度，并在零件图上画出。
 2. 中心孔的表面粗糙度按其用途由设计者选定。
 3. C型孔的 L₁ 根据固定螺钉尺寸决定，但不得小于表中 L₁ 的数据。
 4. 不要求保留中心孔的零件采用 A 型；要求保留中心孔的零件采用 B 型；将零件固定在轴上的中心孔采用 C 型。
 5. 括号内尺寸尽量不用。

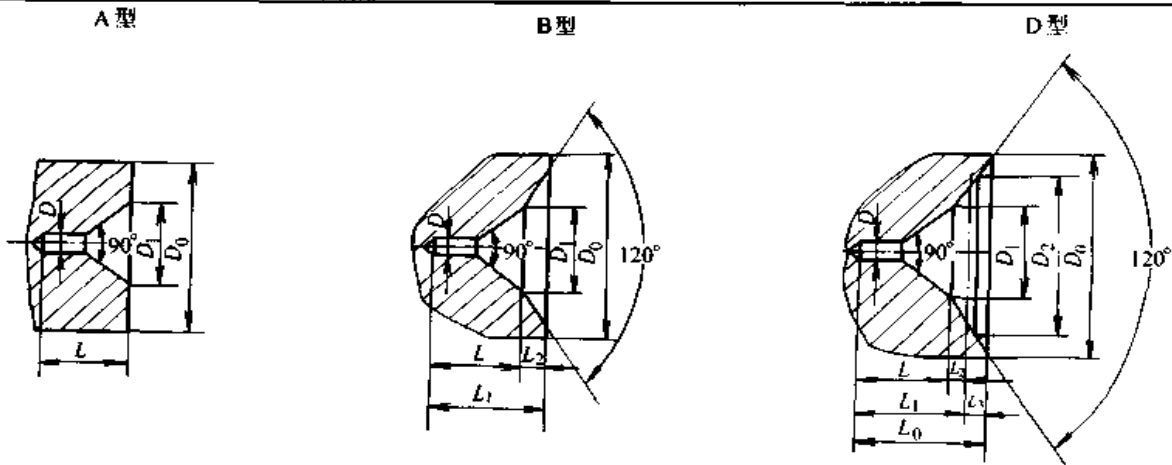
表 13.6-26 75°中心孔 (摘自 JB/ZQ 4236—1997) (mm)



规格 D	D ₁	L	L ₁	L ₂	选择中心孔的参考数据	
					毛坯轴端直径 D ₀ , mm	毛坯重量, kg max
3	9	7	8	1	30	200
4	12	10	11.5	1.5	50	360
6	18	14	16	2	80	800
8	24	19	21	2	120	1 500
12	36	28	30.5	2.5	180	3 000
20	60	50	53	3	260	9 000
30	90	70	74	4	360	20 000
40	120	95	100	5	500	35 000
45	135	115	121	6	700	50 000
50	150	140	148	8	900	80 000

注：1. 中心孔的尺寸主要根据轴端直径 D_0 和零件毛坯总重量（如轴上装有齿轮、齿圈及其他零件等）来选择。若毛坯总重量超过表中 D_0 相对应的重量时，则依据毛坯重量确定中心孔尺寸。
2. 当加工零件毛坯总重量超过 5 000 kg 时，一般宜选择 B 型中心孔。

表 13.6-27 90°中心孔 (摘自 JB/ZQ 4237—1997) (mm)



续表 13.6-27

规格 D	D_1	D_2	L	L_1	L_2	L_3	L_{11}	选择中心孔的参考数据	
								毛坯轴端 直径 D_{0min}	毛坯重量 /kg Δ_{max}
14	56	77	36	38.5	2.5	6	44.5	250	5 000
16	64	85	40	42.5	2.5	6	48.5	300	10 000
20	80	108	50	53	3	8	61	400	20 000
24	96	124	60	64	4	8	72	500	30 000
30	120	155	80	84	4	10	94	600	50 000
40	160	195	100	105	5	10	115	800	80 000
45	180	222	110	116	6	12	128	900	100 000
50	200	242	120	128	8	12	140	1 000	150 000

注：1. 中心孔的尺寸主要根据轴端直径 D_0 和零件毛坯总重量（如轴上装有齿轮、齿圈及其他零件等）来选择。若毛坯总重量超过表中 D_0 相对应的重量时，则依据毛坯重量确定中心孔尺寸。

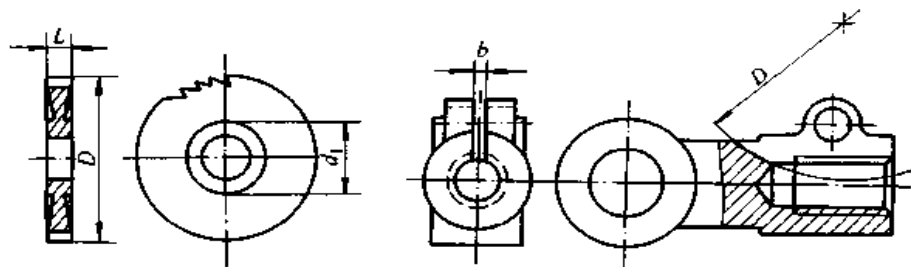
当加工零件毛坯总重量超过 5 000 kg 时，一般宜选择 B 型中心孔。

2. D 型中心孔是属于中间型式，在制造时要考虑到在机床上加工去掉余量“ L_3 ”以后，应与 B 型中心孔相同。

2.10 锯缝尺寸（表 13.6-28）（JB/ZQ 4246—1997）

表 13.6-28 锯缝尺寸

(mm)



D	d_{1mm}	L 或 b										
		0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
80	34 (40)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
125				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
160	47				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
200	63					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
250							✓	✓	✓	✓	✓	✓
315	80							✓	✓	✓	✓	✓

3 轴端

3.1 机器轴高 (表 13.6-29) (GB/T 12217—1990)

表 13.6-29 机器轴高 (mm)

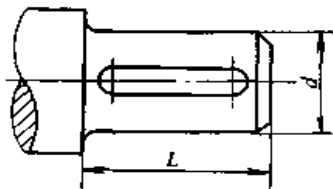
轴高 h 基本尺寸系列				轴高 h 基本尺寸系列				轴高 h 基本尺寸系列				轴高 h 基本尺寸系列																													
I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV																										
25	25	25	25	100	100	100	75	250	250	250	250	1000	1000	1000	1000																										
			26				80									80	80	225	225	670																					
		28	28				100									100	100	85	315	315	315	236	280	280	800	800	800	710	710												
			30															90												90	90	265	800	800	800						
		40	40				32									32	160	160	160	95	400	400	400	400	1600	1600	1600	1600													
																34				125									125	125	500	500	500	375	1250	1250	1250	1400	1400		
							36									105																								105	105
							63									63				40									40	200	200	200	118	630	630	630	630	1600	1600	1600	1600
42	180			180	180	530		1600	1600	1600	1600	1600	1600																												
45														132	132					132									400				400								
50	50			200	200	200		150	630	630	630	450	450	475	1400					1400									1400				1500								
	53							160																																	
63	63	63	63	200	200	200		170	630	630	630	630	1600	1600	1600		1600																								
			56					170										170	170	500	500	500	530	1600	1600	1600															
			60					180										180	180	530	1600	1600	1600	1600	1600	1600															
63	63	63	63	200	200	200	190	630	630	630	630	1600	1600	1600	1600																										
			67				200									200	200	600	600	600	600	600	600	600																	
			71				212									212	212	630	630	630	630	630	630	630	630																

注：1. 机器轴高适用于主动机器和从动机器，系指轴伸中心线到机器支承平面的距离，该距离不包括安装所用的垫片在内，如果机器需配备绝缘垫片时，其垫片的厚度应包括在内。

2. 机器轴高优先选用第 I 系列数值，如果不能满足需要时，可选用第 II 系列值，尽量不采用第 IV 系列数值。

3.2 圆柱形轴伸 (表 13.6-30) (GB/T 1569—1990)

表 13.6-30 圆柱形轴伸 (mm)



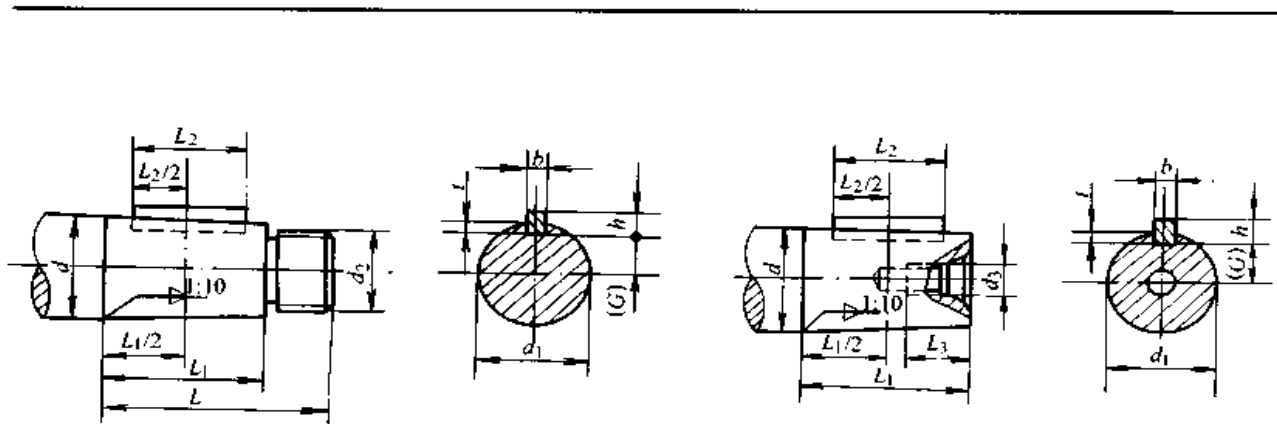
续表 13.6-30

d		L		d		L		d		L	
基本尺寸	极限偏差	长系列	短系列	基本尺寸	极限偏差	长系列	短系列	基本尺寸	极限偏差	长系列	短系列
6	+0.006	16	—	45	+0.018	110	82	190	+0.046	350	280
	-0.002			48	+0.002			k6				110	82	200	350	280
7	+0.007	16	—	50	+0.030	110	82	220	+0.017	350	280
8		20	—	55		110	82	240		410	330
9	-0.002	20	—	60	+0.011	140	105	250	+0.052	410	330
10	+0.008	23	20	65		140	105	260		+0.020	410	330
11		-0.003	30	25	70	140	105	280	+0.057		470	380
12	+0.009	30	25	75	+0.035	140	105	300		+0.021	470	380
14		-0.004	40	28		80	170	130	320		+0.063	470	380
16	+0.009	40	28	85	+0.013	170	130	340	+0.023	470		380
18		-0.004	50	36		90	170	130		360	+0.070	550	450
19	+0.018	50	36	95	+0.015	170	130	380	+0.026	550		450
20		-0.004	50	36		100	210	165		400	+0.070	550	450
22	+0.018	50	36	110	+0.040	210	165	420	+0.070	650		540
24		-0.004	60	42		120	210	165		440	+0.070	650	540
25	+0.018	60	42	130	+0.015	210	165	450	+0.070	650		540
28		-0.004	80	58		140	250	200		480	+0.070	650	540
30	+0.018	80	58	150	+0.015	250	200	500	+0.070	650		540
32		-0.004	80	58		160	250	200		530	+0.070	800	680
35	+0.018	80	58	170	+0.015	300	240	560	+0.070	800		680
38		-0.002	80	58		180	300	240		600	+0.026	800	680
40	+0.018	110	82			300	240	630	+0.026	800		680
42		-0.002	110	82			300	240		630	800	680

3.3 圆锥形轴伸 (表 13.6-31~34) (GB/T 1570—1990)

表 13.6-31 圆锥形轴伸

(mm)

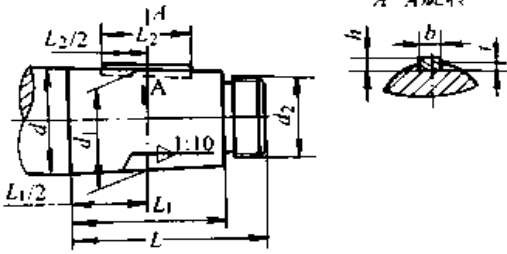


续表 13.6-31

d	b	h	t	长系列					短系列					d ₂	d ₃	L ₃
				L	L ₁	L ₂	d ₁	(G)	L	L ₁	L ₂	d ₁	(G)			
6	—	—	—	16	10	6	5.5	—						M4	—	—
7	—	—	—				6.5	—								
8	—	—	—	20	12	8	7.4	—								
9	—	—	—				8.4	—								
10	—	—	—				9.25	—								
11	2	2	1.2	23	15	12	10.25	3.9								
12	2	2	1.2				11.1	4.3								
14	3	3	1.8	30	18	16	13.1	4.7						M8 × 1	M4	10
16	3	3	1.8				14.6	5.5								
18	4	4	2.5	40	28	25	16.6	5.8	28	16	14	15.2	5.8	M10 × 1.25	M5	13
19	4	4	2.5				17.6	6.3				17.2	6.1			
20	4	4	2.5				18.2	6.6				18.2	6.6			
22	4	4	2.5	50	36	32	20.2	7.6	36	22	20	18.9	6.9	M12 × 1.25	M6	16
24	5	5	2.5				22.2	8.1				20.9	7.9			
25	5	5	3				22.9	8.4				22.9	8.4			
28	5	5	3	60	42	36	25.9	9.9	42	24	22	23.8	8.9	M16 × 1.5	M8	19
30	5	5	3				27.1	10.5				26.8	10.4			
32	6	6	3.5				29.1	11.0				28.2	11.1			
35	6	6	3.5	80	58	50	32.1	12.5	58	36	32	30.2	11.6	M20 × 1.5	M10	22
38	6	6	3.5				35.1	14.0				33.2	13.1			
40	10	8	5				35.9	12.9				36.2	14.6			
42	10	8	5				37.9	13.9				37.3	13.6	M24 × 2	M12	28
45	12	8	5				40.9	15.4				39.3	14.6			
48	12	8	5	110	82	70	43.9	16.9	82	54	50	42.3	16.1	M30 × 2	M16	36
50	12	8	5				45.9	17.9				45.3	17.6			
55	14	9	5.5				50.9	19.9				47.3	18.6			
56	14	9	5.5				51.9	20.4				52.3	20.6	M36 × 3		
60	16	10	6				54.75	21.4				53.3	21.1			
63	16	10	6				57.75	22.9				56.5	22.2	M42 × 3	M20	42
65	16	10	6				59.75	23.9				59.5	23.7			
70	18	11	7	140	105	100	64.75	25.4	105	70	63	61.5	24.7	M48 × 3	M24	50
71	18	11	7				65.75	25.9				66.5	26.2			
75	18	11	7				69.75	27.9				67.5	26.7			
80	20	12	7.5				73.5	29.2				71.5	28.7			
85	20	12	7.5				78.5	31.7				75.5	30.2	M56 × 4		
90	22	14	9	170	130	110	83.5	32.7	130	90	80	80.5	32.7			
95	22	14	9				88.5	35.2				85.5	33.7	M64 × 4		
100	25	14	9				91.75	36.9				90.5	36.2			
110	25	14	9	210	165	140	101.75	41.9	165	120	110	94	38	M72 × 4		
120	28	16	10				111.75	45.9				104	43	M80 × 4		
125	28	16	10				116.75	48.3				114	47	M90 × 4		
130	28	16	10				120	50				119	49.5			
140	32	18	11	250	200	180	130	54	200	150	125	122.5	51.2	M100 × 4	—	—
150	32	18	11				140	59				132.5	55.2			
160	36	20	12				148	62				142.5	60.2	M110 × 4		
170	36	20	12	300	240	220	158	67	240	180	160	151	63.5	M125 × 4		
180	40	22	13				168	71				161	68.5			
190	40	22	13				176	75				171	72.5	M140 × 6		
200	40	22	13	350	280	250	186	80	280	210	180	179.5	76.7			
220	45	25	15				206	88				189.5	81.7	M160 × 6		
												209.5	89.7			

- 注：1. $\phi 220$ mm 及以下的圆锥轴伸键槽底面与圆锥轴线平行。
 2. 键槽深度 t 可由测量 G 来代替，或按表 13.6-34 的规定，测量 t_2 。
 3. L_2 可根据需要选取小于表中的数值。

表 13.6-32 长系列 $\phi 220$ mm 以上圆锥形轴伸 (mm)

	d	b	h	t				d_1	d_2
					L	L_1	L_2		
	240	50	28	17	410	330	280	223.5	M180 × 6
	250							233.5	
	260							243.5	
	280	56	32	20	470	380	320	261	M220 × 6
	300							281	
	320	63						301	M250 × 6
	340	70	36	22	550	450	400	317.5	M280 × 6
	360							337.5	
	380							357.5	
	400	80	40	25	650	540	450	373	M320 × 6
	420							393	
	440							413	
	450	90	45	28	800	680	500	423	M380 × 6
	460							433	M420 × 6
	480							453	M450 × 6
	500							473	M500 × 6
	530	100	50	31	800	680	500	496	M500 × 6
	560							526	
600	566								
630	596							M550 × 6	

注：1. 直径 $\phi 220$ mm 以上的圆锥轴伸，键槽底面与圆锥母线平行。
 2. L_2 可根据需要选取小于表中的数值。

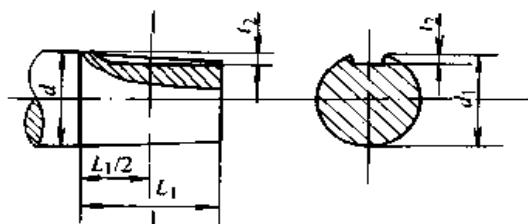
表 13.6-33 圆锥形轴伸圆锥角公差 (mm)

直径 d	6~10	11~18	19~30	32~50	55~80	85~120	125~180	190~250	260~300	320~400	420~500	530~630
L_1 的轴向 极限偏差	0 -0.22	0 -0.27	0 -0.33	0 -0.39	0 -0.46	0 -0.54	0 -0.63	0 -0.72	0 -0.81	0 -0.89	0 -0.97	0 -1.10
基本直径 d 公差	IT8											
1:10 圆锥角公差	AT6											

注：用圆锥环规检验时，研合的轴向力应为 100 N，涂层厚度当圆锥长度 L_1 为 10~40 mm 时为 $0.5 \mu\text{m}$ ；当圆锥长度 L_1 大于 40~100 mm 时 $1 \mu\text{m}$ ；当圆锥长度 L_1 大于 100~250 mm 时为 $1.5 \mu\text{m}$ ；当圆锥长度 L_1 大于 250~630 mm 时为 $2.5 \mu\text{m}$ ；在检验中接触率应不小于 70%。

表 13.6-34 圆锥形轴伸大端处键槽深度尺寸

(mm)



d	t ₂		d	t ₂		d	t ₂		d	t ₂	
	长系列	短系列		长系列	短系列		长系列	短系列		长系列	短系列
11	1.6		30	4.5	3.9	60	8.6	7.8	120	14.1	13.0
12	1.7		32	5.0	4.4	65	8.6	7.8	125	14.1	13.0
14	2.3		35	5.0	4.4	70	9.6	8.8	130	15.0	13.8
16	2.5	2.2	38	5.0	4.4	71	9.6	8.8	140	16.0	14.8
18	3.2	2.9	40	7.1	6.4	75	9.6	8.8	150	16.0	14.8
19	3.2	2.9	42	7.1	6.4	80	10.6	9.8	160	18.0	16.5
20	3.4	3.1	45	7.1	6.4	85	10.8	9.8	170	18.0	16.5
22	3.4	3.1	48	7.1	6.4	90	12.3	11.3	180	19.0	17.5
24	3.9	3.6	50	7.1	6.4	95	12.3	11.3	190	20.0	18.3
25	4.1	3.6	55	7.6	6.9	100	13.1	12.0	200	20.0	18.3
28	4.1	3.6	56	7.6	6.9	110	13.1	12.0	220	22.0	20.3

注：对键槽底面平行于轴线的键槽，当按照轴伸大端直径来检验键槽深度时，其数值应符合本表中 t_2 的规定， t_2 的极限偏差与 t 的极限偏差相同，此时表 13.6-31 中的 t 作为参考尺寸。

参考文献

- 汪恺，蒋寿伟编著. 技术制图与机械制图标准实用手册. 北京：中国标准出版社，1998
- 徐灏主编. 新编机械设计师手册. 北京：机械工业出版社，1995
- 重型机械标准编写委员会编. 重型机械标准：第一卷. 北京：中国标准出版社，1998
- 中国标准出版社编. 中国机械工业标准汇编：极限与配合卷. 北京：中国标准出版社，1999
- 中国标准出版社编. 中国机械工业标准汇编：形状和位置公差及其误差检测卷. 北京：中国标准出版社，1998
- 中国标准出版社编. 中国机械工业标准汇编：螺纹卷. 北京：中国标准出版社，1999
- 汪恺主编. 机械设计标准应用手册：第1卷. 北京：机械工业出版社，1997
- 汪恺，刘巽尔主编. 新编形状和位置公差标注示例图册. 北京：中国标准出版社，1998
- 于源编著. 螺纹标准手册. 北京：中国标准出版社，1997

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
14
篇

机械工程材料

主 编 方 昆 凡

编 写 方 昆 凡 张 以 忱
单 宝 峰 张 茵 麦

审 稿 熊 帷 皓



中国机械工程学会
中国机械设计大典编委会

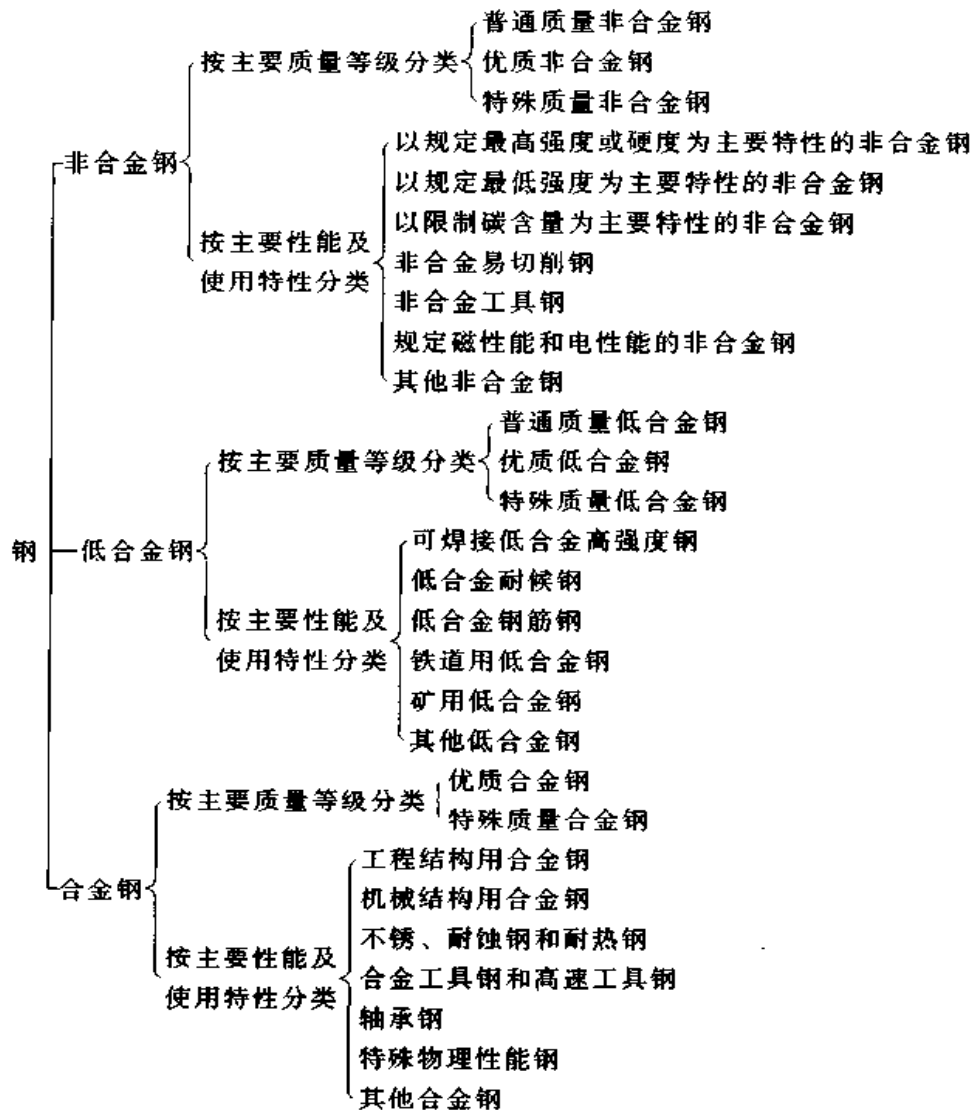
第 1 章 概 述

1 金属材料分类

1.1 黑色金属材料分类

黑色金属材料（钢铁材料）分为生铁、铸钢和钢三类。生铁含碳的质量分数大于 2%，按用途可分为炼钢用生铁和铸造用生铁。铸铁含碳的质量分数一般为 2.5% ~ 3.5%，按生产工艺和

组织性能可将铸铁分为普通灰铸铁、孕育铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁及特殊性能铸铁。钢含碳的质量分数不超过 2%，按 GB/T 13304—1991《钢分类》的规定，钢包括铸钢和变形钢。按化学成分分为非合金钢、低合金钢和合金钢；按主要质量等级和主要性能及使用特性分为非合金钢、低合金钢和合金钢。钢的主要分类体系如下。



非合金钢、低合金钢和合金钢的合金元素规定质量分数界限值见表 14.1-1；非合金钢、低合

金钢和合金钢按主要质量等级和特性分类及举例见表 14.1-2 ~ 表 14.1-4。

表 14.1-1 非合金钢、低合金钢和合金钢的合金元素规定质量分数界限值
(摘自 GB/T 13304—1991)

合金元素	合金元素规定质量分数界限值/%			合金元素	合金元素规定质量分数界限值/%		
	非合金钢<	低合金钢	合金钢≥		非合金钢<	低合金钢	合金钢≥
Al	0.10	—	0.10	Se	0.10	—	0.10
B	0.000 5	—	0.000 5	Si	0.50	0.50~<0.90	0.90
Bi	0.10	—	0.10	Te	0.10	—	0.10
Cr	0.30	0.30~<0.50	0.50	Ti	0.05	0.05~<0.13	0.13
Co	0.10	—	0.10	W	0.10	—	0.10
Cu	0.10	0.10~<0.50	0.50	V	0.04	0.04~<0.12	0.12
Mn	1.00	1.00~<1.40	1.40	Zr	0.05	0.05~<0.12	0.12
Mo	0.05	0.05~<0.10	0.10	RE	0.02	0.02~<0.05	0.05
Ni	0.30	0.03~<0.50	0.50	其他规定 元素(S、P、 C、N除外)	0.05	—	0.05
Nb	0.02	0.02~<0.06	0.06				
Pb	0.40	—	0.40				

表 14.1-2 非合金钢按主要质量等级和特性分类及举例 (摘自 GB/T 13304—1991)

按主要特 性分类	按主要质量等级分类		
	普通质量非合金钢	优质非合金钢	特殊质量非合金钢
以规定最 高强度为主 要特性的非 合金钢	普通质量低碳结构钢板和钢带 GB/T 912 中的低碳钢牌号 GB/T 2517 中的 RJ216、RJ235、 RJ255、RJ294、RJ343、RJ392	冲压薄板低碳钢 GB/T 5213 中的 08Al	
		供镀锡、镀锌、镀铅板带和原 板用碳素钢 GB/T 2518 } 中全部碳素钢牌号 GB/T 2520 }	
		不经热处理的冷顶锻和冷挤压 用钢	
以规定最 低强度为主 要特性的非 合金钢	碳素结构钢 GB/T 700 中的 Q195、Q215 的 A、B 级、Q235 的 A、B 级、Q255 的 A、B 级、 Q275	碳素结构钢 GB/T 700 中除普通质量 A、B 级 钢以外的所有牌号及 A、B 级规定 冷成型性及模锻性特殊要求者	优质碳素结构钢 GB/T 699 中的 65Mn、 70Mn、70.75、80、85 钢
	碳素钢筋钢 GB/T 13013 中的 Q235	优质碳素结构钢 GB/T 699 中除 65Mn、70Mn、70、 75、80、85 以外的所有牌号	保证淬透性钢 GB/T 5216 中的 45H

续表 14.1-2

按主要特性分类	按主要质量等级分类		
	普通质量非合金钢	优质非合金钢	特殊质量非合金钢
以规定最低强度为主要特性的非合金钢	铁道用钢 GB/T 11264 中的 50Q、55Q GB/T 11265 中的 Q235 - A、Q255 - A GB/T 11266 轻轨垫板用的碳素钢 GB/T 2826 钢轨垫板用的碳素钢	锅炉和压力容器用钢 GB/T 713 中的 20g、22g GB/T 3087 中的 10、20 GB/T 5310 中的 20G GB/T 6479 中的 10、20G GB/T 6653 中的 20HP、15MnHP GB/T 6654 中的 20R	保证厚度方向性能钢 GB/T 5313 中的所有非合金钢
	钢板桩钢	造船用钢 GB712 中的 A、B、D、E、AH32、DH32、EH32 GB/T 5312 中的 C10、C20 GB/T 9945 中的 A、B	铁道用钢 GB/T 5068 中的 LZ、JZ GB/T 8601 中的 CL60A 级 GB/T 8602 中的 LG60 与 LG65 的 A 级
	一般工程用不进行热处理的普通质量碳素钢 YB/T170 中的所有普通质量碳素钢	铁道用钢 GB/T 2585 中的 U71、U74 GB/T8601 中的 CL60B 级 GB/T8602 中的 LG60B 级与 LG65B 级	航空用钢 包括所有航空专用非合金结构钢牌号
		桥梁用钢 YB/T168 中的 16q	兵器用钢 包括各种兵器用非合金结构钢牌号
		输油及输气管用钢	
		工程结构用铸造碳素钢 GB/T 11352 中的 ZG200 - 400、ZG230 - 450、ZG270 - 500、ZG310 - 570、ZG340 - 640 GB/T 7659 中的 ZG200 - 400H、ZG230 - 450H、ZG275 - 485H	
		预应力及混凝土钢筋用优质非合金钢	
	以碳含量为主要特性的非合金钢	普通碳素钢盘条 GB/T 701 中的所有碳素钢牌号	
一般用途低碳钢丝 GB/T 343 中的所有低碳钢牌号		冷镦用钢 GB/T 715 中的 BL2、BL3 GB/T 5953 中的 ML10~ML45 GB/T 6478 中的 ML08~ML45、ML25Mn~ML45Mn	碳素弹簧钢 GB/T 1222 中的 65~85、65Mn GB/T 4357 中的所有非合金钢
花纹钢板 GB/T 3277 中的普通质量碳素结构钢		花纹钢板 GB/T 3277 优质非合金钢	

续表 14.1-2

按主要特性分类	按主要质量等级分类		
	普通质量非合金钢	优质非合金钢	特殊质量非合金钢
以碳含量为主要特性的非合金钢		盘条钢 GB/T 4354 中的 25~65、40Mn~60Mn	非合金调质钢
		非合金调质钢 (特殊质量钢除外)	非合金表面硬化钢
		非合金表面硬化钢 (特殊质量钢除外)	火焰及感应加热淬火硬化钢
		非合金弹簧钢 (特殊质量钢除外)	冷顶锻和冷挤压钢
非合金易切削钢		易切削结构钢 GB/T 8731 中的 Y12、Y12Pb、Y15、Y15Pb、Y20、Y30、Y35、Y45Ca	特殊易切削钢 要求测定热处理后冲击韧度等
非合金工具钢			碳素工具钢 GB/T 1298 中的全部牌号
			碳素中空钢 GB/T 1301 中的 ZKT8
规定磁性能和电性能的非合金钢		非合金电工钢板、带 GB/T 2521 无硅电工钢板、带	具有规定导电性能 ($\geq 9S/m$) 的非合金电工钢
		具有规定导电性能 ($< 9S/m$) 的非合金电工钢	具有规定磁性能的非合金软磁材料 GB/T 6983、GB/T 6984、GB/T 6985 中的 DT3、DT3A、DT4、DT4A、DT4E、DT4C
其他非合金钢	栅栏用钢丝		原料纯铁 GB/T 9971 中的 YT1F、YT2F、YT3、YT4

表 14.1-3 低合金钢按主要质量等级和特性分类及举例 (摘自 GB/T 13304—1991)

按主要特性分类	按主要质量等级分类		
	普通质量低合金钢	优质低合金钢	特殊质量低合金钢
可焊接低合金高强度结构钢	一般用途低合金结构钢 GB/T 1591 中的 Q295、Q345	一般用途低合金结构钢 GB/T 1591 中的 Q390、Q420	核能用低合金钢
		锅炉和压力容器用低合金钢 GB/T 713 中的 Q295g、Q345g、Q390g GB/T 6653 中的 12MnHP、16MnHP、12MnCrVHP、10MnNbHP GB/T 6654 中的 16MnR、15MnVR、15MnVNR GB/T 6479 中的 16Mn、15MnV	压力容器用低合金钢 GB/T 3531 中的 16MnDR、06MnNbDR

续表 14.1-2

按主要特性分类	按主要质量等级分类		
	普通质量非合金钢	优质非合金钢	特殊质量非合金钢
可焊接低合金高强度结构钢		造船用低合金钢 GB/T 712 中的 AH36、DH36、EH36	保证厚度方向性能低合金钢 GB/T 5313 中的所有低合金钢牌号
		汽车用低合金钢 GB/T 3273 中的 09MnREL、06TiL、08TiL、10TiL、09SiVL、16MnL、16MnREL	舰船、兵器用低合金钢
		桥梁用低合金钢 YB/T168 中的 12Mnq、12MnVq、16Mnq、15MnVq、15MnVNq YB(T)10 中的 16Mnq、16MnCuq、15MnVq、15MnVNq	
低合金耐候钢		低合金高耐候性钢 GB/T 4171 中的 09CuPCrNiA、09CuPCrNi-B、09CuP	
		可焊接低合金耐候钢 GB/T 4172 中的 16CuCr、12MnCuCr、15MnCuCr、15MnCuCr-QT	
低合金钢筋钢	一般低合金钢筋钢 GB/T 1499 中的 20MnSi、20MnTi、20MnSiV、25MnSi、20MnNb		
铁道用低合金钢	低合金轻轨钢 GB/T 11264 中的 45SiMnP、50SiMnP	低合金重轨钢 GB/T 2585 中的 U71Cu、U71Mn、U70MnSi、U71MnSiCu	铁路用低合金车轮钢 GB/T 8601 中的 CL45MnSiV
矿用低合金钢	矿用低合金结构钢 GB/T 3414 中的 20MnK、25MnK、24Mn2K (热轧)、30Mn2K	矿用低合金结构钢 GB/T 3414 中的 20Mn2K (调质)、20MnVK、34SiMnK	
其他低合金钢		易切削结构钢 GB/T 8731 中的 Y40Mn	刮脸刀片用低合金钢

表 14.1-4 合金钢按主要质量等级和特性分类及举例 (摘自 GB/T 13304—1991)

主要质量等级	1		2	3	4	5	6	7	8	
	优质合金钢		特殊质量合金钢							
主要使用特性	工程结构用钢	其他	工程结构用钢	机械结构用钢 (第 4、6 除外)	不锈、耐蚀和耐热钢	工具钢	轴承钢	特殊物理性能钢	其他	
按其他特性对钢进一步分类	11 一般工程结构用合金钢	16 电工用硅(铝)钢(无磁导率要求)	21 压力容器用合金钢(4类除外)	31 Mn(X)系钢	41 马氏体型或 42 铁素体型	411/421 Cr(X)系钢	51 合金工具钢	511 Cr(X)系钢	61 高碳铬轴承钢	71 软磁钢(除 16 外)
				32 SiMn(X)系钢		412/422 CrNi(X)系钢		512 Ni(X), CrNi(X)系钢		
	12 合金钢筋钢	17 铁道用合金钢	22 热处理合金钢筋钢	33 Cr(X)系钢	43 奥氏体型或 44 奥氏体铁素体型或 45 沉淀硬化型	413/423CrNi(X)	52 高速工具钢	513 Mo(X), CrMo(X)系钢	62 渗碳轴承钢	72 水磁钢
						414/424CrAl(X) CrSi(X)系钢					415/425 其他	514 V(X), CrV(X)系钢
	13 地质石油钻探用合金钢(23除外)	23 经热处理的地质、石油钻探用合金钢	34 CrMo(X)系钢	35 CrNiMo(X)系钢	43 奥氏体型或 44 奥氏体铁素体型或 45 沉淀硬化型	413/441/451 CrNi(X)系钢	52 高速工具钢	515 W(X), CrW(X)系钢	63 不锈钢轴承钢	73 无磁钢
						432/442/452 CrNiMo(X)系钢					433/443/453 CrNi+Ti 或 Nb 钢	516 其他
	13 地质石油钻探用合金钢(23除外)	24 高锰钢	36 Ni(X)系钢	37 B(X)系钢	45 沉淀硬化型	434/444/454 CrNiMo+Ti 或 Nb 钢	52 高速工具钢	521 WMo 系钢	64 高温轴承钢	74 高电阻钢和合金
						435/445/455 CrNi+V, W, Co 钢					436/446 CrNiSi(X)系钢	522 W 系钢
	13 地质石油钻探用合金钢(23除外)	24 高锰钢	36 Ni(X)系钢	37 B(X)系钢	45 沉淀硬化型	437 CrMnNi(X)系钢	52 高速工具钢	523 Co 系钢	65 无磁轴承钢	74 高电阻钢和合金
						438 其他				

注：(X)表示该合金系列中还包括有其他合金元素，如 Cr(X)系，除 Cr 钢外，还包括 CrMn 钢等。

1.2 有色金属材料分类

按密度和自然界中储藏量，将有色金属分为轻金属、重金属、稀有金属、贵金属和半金属。轻金属的密度小于 4.5 g/cm^3 ，包括铝、镁、钠、

钾、钙、锶、钡等。重金属的密度大于 4.5 g/cm^3 ，包括铜、镍、铅、锌、锡、铋、钴、汞、镉、铟等。稀有金属一般指在自然界中含量稀少、分布很散或者难以从原料中提取的金属；稀有轻金属包括钛、铍、锂、铷、铯等；稀有难熔金属包括

钨、钼、钽、铌、钨、钼、钒、铀等，熔点均高达1700℃以上，钨的熔点为3400℃；稀有金属包括镓、铟、铊、锗等，除铊外，均为半导体材料；稀土金属包括镧系元素和钪、铈等共17种元素；稀有放射性金属包括钋、镭、锕、钍、铀、钚等。贵金属包括金、银、铂、钯、铱、铑、钌、铈等。

钨、钼、钽、铌、钨、钼、钒、铀等，熔点均高达1700℃以上，钨的熔点为3400℃；稀有金属包括镓、铟、铊、锗等，除铊外，均为半导体材料；稀土金属包括镧系元素和钪、铈等共17种元素；稀有放射性金属包括钋、镭、锕、钍、铀、钚等。贵金属包括金、银、铂、钯、铱、铑、钌、铈等。

按生产工艺和用途，可将有色金属及其合金进行分类，见表14.1-5。

表 14.1-5 有色金属材料（按生产工艺及用途）分类

分类名称	特点及其他有关说明
有色冶炼产品	指以冶炼方法得到的各种有色纯金属或合金产品。纯金属冶炼产品一般分为工业纯度及高纯度两类，按照金属的不同，可分为纯铜、纯铝、纯镍、纯锡……等许多产品；合金冶炼产品是按铸造有色合金的成分配比而生产的一种原始铸锭，如铸造黄铜锭、铸造青铜锭、铸造铝合金锭……等
有色加工产品 (或称变形合金)	指以压力加工方法生产出来的各种管、棒、线、型、板、箔、条、带等有色半成品材料，它包括纯金属加工产品和合金加工产品两部分。按照有色金属和合金系统，可分为：纯铜加工产品、黄铜加工产品、青铜加工产品、白铜加工产品、铝及铝合金加工产品、锌及锌合金加工产品、钛及钛合金加工产品……等
铸造有色合金	指以铸造方法，用有色金属材料直接浇铸各种形状机械零件，其中最常用的有：铸造铜合金（包括铸造黄铜和铸造青铜）、铸造铝合金、铸造镁合金、铸造锌合金等
轴承合金	指制作滑动轴承轴瓦的有色金属材料，按其基体材料的不同，可分为：锡基、铅基、铜基、铝基、锌基、镉基和银基等轴承合金。实质上，它也是一种铸造有色合金，但因其属于专用合金，故通常都把它划分出来，单独列为一类
硬质合金	指以难熔硬质金属化合物（如碳化钨、碳化钛）作基体，以钴、铁或镍作粘结剂，采用粉末冶金法（也有铸造的）制作而成的一种硬质工具材料。其特点是：它具有比高速工具钢更好的红硬性和耐磨性。常用的硬质合金有钨钴合金、钨钴钛合金和通用硬质合金三类
中间合金	指熔炼过程中，为了使合金元素能准确而均匀地加入合金中去而配制的一种过渡性合金，中间合金主要用二元的，常见的有：铜硅中间合金、铜锰中间合金、铜锡中间合金、铜锑中间合金、铝硅中间合金、铝铜中间合金、铝锰中间合金、铝铁中间合金……等
印刷合金	指专用于印刷工业的铅字合金，其特点是：熔点低、流动性高、凝固时收缩小，且具有一定的机械强度，能耐印刷油和清洗物的侵蚀。根据不同的印刷生产用途，印刷合金可分为三类：活字铸字合金、排字机合金及沿板印刷合金。所有这些合金都属于铅锡锡系合金，只是各个元素的含量有所不同而已
焊料	指焊接金属制件时所用的有色合金。焊料应具有的基本特性是：熔点较低，粘合力较强，焊接处有足够的强度和韧性等。按照化学成分和用途的不同，焊料通常分为三类： ①软焊料 即铅基和锡基焊料，熔点在220~280℃之间； ②硬焊料 即铜基和锌基焊料，熔点在825~880℃之间； ③银焊料 熔点在720~850℃之间，属硬焊料，但这类焊料比较贵，主要用于电子仪器和仪表中，因为它除了具有上述一般特性外，还具有在熔融状态不氧化（或微弱氧化）和高的电化学稳定性
金属粉末	指粉状的有色金属材料，如镁粉、铝粉、铜粉……等

分类名称	特点及其他有关说明
特殊合金	<p>指具有特殊物理、化学性能或特殊组织结构的有色金属材料，常见的有：</p> <p>①高温合金 指比耐热钢有更高的抗热性的高温材料，如镍基合金、钴基合金和铁-镍基合金等</p> <p>②精密合金 指具有特殊物理性能的合金，其特点是：成分控制严格、性能稳、加工精。通常分为磁性的和非磁性的两大类，前者包括硬磁、软磁合金，后者包括各种精密导电合金、电触头、精密电阻、高弹性及恒弹性合金、低膨胀及恒膨胀合金、热双金属等。绝大多数精密合金是以黑色金属为基的，有色金属为基的只占少数。精密合金主要用于各种精密测量、控制、遥测、遥控仪表元件等</p> <p>③复合材料 主要是指用压力加工方法或其他方法，将两种以上金属或合金压合在一起的复合金属材料，也称双金属。</p> <p>双金属的种类甚多，其用途也较广泛，例如铝-铜或铝-铜-铝复合材料用作导体可节约铜，用于高频装置、无线电装置、导线、线圈及电缆等。铝-镍双金属用于电真空技术。铜-银用于电触头材料，铅-锡用于蓄电池等。</p> <p>钢和有色金属复合的材料用于电工技术及高压热交换器以及其他工业技术方面。钢与铂复合，镍与铂复合，硬铝与铝复合作耐蚀材料或耐磨材料，用于化工设备及仪表零件，以及其他结构材料。</p> <p>还有一种复合材料称复合强化材料。它是纤维呈规则几何排列、并与金属（合金）或陶瓷材料（作为基体）很好地结合，可达到很高的强度。如钨纤维强化钨基合金材料，用于制造火箭喷嘴。碳纤维强化硅复合材料，用于宇宙飞船的结构材料等</p>

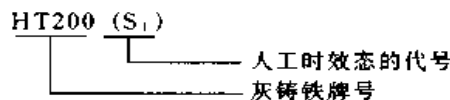
2 金属材料热处理状态及代号

2.1 铸铁件热处理状态名称及代号 (表 14.1-6)

表 14.1-6 铸铁件热处理状态名称及代号 (摘自 GB/T 5614—1985)

热处理状态名称	代号	热处理状态名称	代号
退火态	T	铸态	Z
高温石墨化退火态	T ₁	等温淬火态	D
低温石墨化退火态	T ₂	完全奥氏体化等温淬火态	D ₁
正火态	Zh	低碳奥氏体化等温淬火态	D ₂
完全奥氏体化正火态	Z ₁	部分奥氏体化等温淬火态	D ₃
低碳奥氏体化正火态	Z ₂	完全奥氏体化上贝氏体等温淬火态	D ₁₋₁
部分奥氏体化正火态	Z ₃	完全奥氏体化下贝氏体等温淬火态	D ₁₋₂
淬火态	C	低碳奥氏体化上贝氏体等温淬火态	D ₂₋₁
完全奥氏体化淬火态	C ₁	低碳奥氏体化下贝氏体等温淬火态	D ₂₋₂
低碳奥氏体化淬火态	C ₂	部分奥氏体化上贝氏体等温淬火态	D ₃₋₁
部分奥氏体化淬火态	C ₃	部分奥氏体化下贝氏体等温淬火态	D ₃₋₂
回火态	H	表面淬火态	B
高温回火态	H ₁	火焰加热表面淬火态	B ₁
中温回火态	H ₂	感应加热表面淬火态	B ₂
低温回火态	H ₃	高频感应加热表面淬火态	B ₂₋₁
时效态	S	中频感应加热表面淬火态	B ₂₋₁
人工时效态	S ₁	电接触加热表面淬火态	B ₃
自然时效态	S ₂	化学热处理态	H _V
		渗氮态	H _{V1}
		软渗氮态	H _{V2}
		渗硼态	H _{V3}

注：铸铁件热处理状态代号示例：



2.2 铸钢件热处理状态名称及代号 (表 14.1-7)

表 14.1-7 铸钢件热处理状态名称及代号 (摘自 GB/T 5615—1985)

名 称	代号	定 义
铸态	Z	铸件未经任何热处理的状态
退火态	T	根据不同钢种和处理目的, 将铸件加热到临界点 Ac_3 以上, 或者 Ac_1 至 Ac_{cm} 之间, 或者 Ac_1 以下的适当温度, 经过保温, 然后缓慢冷却, 获得接近平衡状态的组织
去除应力退火态	Q	为了去除铸造、焊接和其他加工等造成的应力, 将铸件加热到一定的温度, 保持适当的时间, 然后缓慢冷却
均匀化退火态	J	铸件加热到低于固相线适当的温度, 长时间的保温, 然后缓慢冷却, 以便达到化学成分均匀的目的
稳定化处理态	W	含钛、铌的奥氏体不锈钢铸件加热到低于完全退火的一适当温度, 经过保温, 使钢中的碳充分地 与钛、铌化合形成稳定的碳化物
正火态	Zh	根据不同钢种将铸件加热到临界点 (亚共析钢为 Ac_3 , 过共析钢为 Ac_1) 以上适当的温度, 经过保温使钢奥氏体化, 然后空冷, 以便调整组织, 改善力学性能
淬火态	C	将不同钢种的铸件加热到临界点 (亚共析钢为 Ac_3 , 过共析钢为 Ac_1 以上适当的温度, 经过保温, 再快速冷却, 获得不稳定组织, 一般为马氏体
回火态	H	淬火或正火后的铸件加热到 Ac_1 以下 (个别钢种在 Ac_1 以上) 适当温度, 经过保温, 再以适当的速度冷却
沉淀硬化态	Cn	由过饱和固溶体中析出的溶质偏聚区, 或者由之析出第二相微粒弥散分布于基体中而导致硬化
固溶热处理态	G	铸件加热到高温单相区, 经过保温, 使过剩相充分溶于固溶体中, 形成单相固溶体, 然后快速冷却, 使这些溶入的组分保持在固溶体中

注: Ac_1 ——加热使奥氏体开始形成的温度。

Ac_3 ——加热使铁素体完全转变成奥氏体的温度。

Ac_{cm} ——过共析钢在加热中, 渗碳体完全熔入奥氏体的温度。

示例:

ZG19Mn12Si7 (Zh·H)

铸钢牌号

回火代号

正火代号

第 2 章 铸 铁

1 灰铸铁 (表 14.2-1~表 14.2-4)

表 14.2-1 灰铸铁件预计的力学性能及应用 (摘自 GB/T 9439—1988)

牌 号		铸件壁厚 / mm		σ_b / MPa	应 用 举 例	
		>	≤			
新牌号	旧牌号				≥	
HT100	—	2.5	10	130	机床中受轻负荷, 磨损无关重要的铸件, 如托盘、盖、罩、手轮、把手、重锤等形状简单且性能要求不高的零件; 冶金矿山设备中的高炉平衡锤、炼钢炉重锤、钢锭模	
		10	20	100		
		20	30	90		
		30	50	80		
HT150	HT15-33	2.5	10	175	承受中等弯曲应力, 摩擦面间压强不高于 0.49 MPa 的铸件, 如多数机床的底座, 有相对运动和磨损的零件, 如溜板、工作台等, 汽车中的变速箱、排气管、进气管等; 拖拉机中的配气轮室盖, 液压泵进、出油管, 鼓风机底座, 后盖板, 高炉冷却壁, 热风炉篦, 流渣槽, 渣缸, 炼焦炉保护板, 轧钢机托辊, 夹板, 加热炉盖, 冷却头, 内燃机车水泵壳, 止回阀体, 阀盖, 泵体, 电动机轴承盖, 汽轮机操纵座外壳, 缓冲器外壳	
		10	20	145		
		20	30	130		
		30	50	120		
HT200	HT20-40	2.5	10	220	承受较大弯曲应力, 要求保持气密性的铸件, 如机床立柱, 刀架, 齿轮箱体, 多数机床床身, 滑板, 箱体, 液压缸, 泵体, 阀体, 刹车毂, 飞轮, 气缸盖, 分离器本体, 左半轴, 右半轴壳, 鼓风机座, 带轮, 轴承盖, 叶轮, 压缩机机身, 轴承架, 冷却器盖板, 炼钢浇注平台, 煤气喷嘴, 真空过滤器销气盘, 喉管, 内燃机车气缸体, 阀套, 汽轮机、气缸中部, 隔板套, 前轴承座主体, 中机架, 电机接器缸, 活塞, 导水套筒, 前缸盖	
		10	20	195		
		20	30	170		
		30	50	160		
HT250	HT25-47	4.0	10	270	炼钢用轨道板, 气缸套, 齿轮, 机床立柱, 齿轮箱体, 机床床身, 磨床转体, 液压缸泵体, 阀体	
		10	20	240		
		20	30	220		
		30	50	200		
HT300	HT30-54	10	20	290	承受高弯曲应力, 拉应力, 要求保持高度气密性的铸件, 如重型机床床身, 多轴机床主轴箱, 卡盘齿轮, 高压液压缸, 泵体, 阀体, 水泵出水段, 进水段, 吸入盖, 双螺旋分级机左机座, 右机座, 锥齿轮, 大型卷筒, 轧钢机座, 焦化炉导板, 汽轮机隔板, 泵壳, 收缩管, 轴承支架, 主配阀壳体, 环形缸座	
		20	30	250		
		30	50	230		
HT350	HT35-60	10	20	340	轧钢滑板, 辘子, 炼焦柱塞, 圆筒混合机齿圈, 支承轮座, 挡轮座	
		20	30	290		
		30	50	260		

注: 1. 当一定牌号的铁水浇注壁厚均匀而形状简单的铸件时, 壁厚变化所造成抗拉强度的变化, 可从本表查出参考性数据, 当铸件壁厚不均匀, 或有型芯时, 此表仅能近似地给出不同壁厚处的大致的抗拉强度值, 铸件设计应根据关键部位的实测值进行。

2. 当供需双方协商同意时, 也可从预计有上述性能的铸件上取样, 测定其抗拉强度值作为验收依据。
3. 应用举例为非标准所列资料, 只供参考。

表 14.2-2 灰铸铁单铸试棒、附铸试棒(块)力学性能(摘自 GB/T 9439—1988)

牌 号		$\sigma_b/MPa \geq$	铸件壁厚/mm		$\sigma_t/MPa \geq$				铸件 (仅供参考)
新牌号	旧牌号				单铸试棒	附铸试棒		附铸试块	
		$\phi 30$ mm	>	\leq	$\phi 30$ mm	$\phi 50$ mm	R15 mm	R25 mm	
HT150	HT15-33	150	20	40	130	—	(120)	—	120
			40	80	115	(115)	110	—	105
			80	150	—	105	—	100	90
			150	300	—	100	—	90	80
HT200	HT20-40	200	20	40	180	—	(170)	—	165
			40	80	160	(155)	150	—	145
			80	150	—	145	—	140	130
			150	300	—	135	—	130	120
HT250	HT25-47	250	20	40	220	—	(210)	—	205
			40	80	200	(190)	190	—	180
			80	150	—	180	—	170	165
			150	300	—	165	—	160	150
HT300	HT30-54	300	20	40	260	—	(250)	—	245
			40	80	235	(230)	225	—	215
			80	150	—	210	—	200	195
			150	300	—	195	—	185	180
HT350	HT35-60	350	20	40	300	—	(290)	—	285
			40	80	270	(265)	260	—	255
			80	150	—	240	—	230	225
			150	300	—	215	—	210	205

- 注: 1. HT100 (HT10-26) 单铸试棒的最小抗拉强度 σ_b 为 100 MPa。
 2. HT100 牌号的灰铸铁件在厚断面处强度太低, 没有实用价值。
 3. 当铸件壁厚超过 300 mm 时, 其力学性能应由供需双方协商确定。
 4. 括弧内的数值仅适于铸件壁厚大于试样直径时使用。

表 14.2-3 灰铸铁件的硬度牌号(摘自 GB/T 9439—1988)

硬度牌号	H145	H175	H195	H215	H235	H255
铸件上的硬度范围 HBS	≤ 170	150~200	170~220	190~240	210~260	230~280

表 14.2-4 灰铸铁的硬度与抗拉强度间的关系 (摘自 GB/T 9439—1988)

σ_b /MPa	RH					σ_b /MPa	RH				
	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2		0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
	HBS						HBS				
80	82	92	102	112	122	260	171	192	214	235	257
100	93	105	116	128	140	280	178	200	223	245	267
120	105	118	131	144	157	300	185	208	231	255	278
140	116	131	145	160	174	320	192	216	240	264	288
160	129	144	160	176	192	340	199	224	249	274	298
180	139	157	174	192	209	360	205	232	258	283	309
200	150	169	188	206	225	380	213	240	266	293	320
220	157	177	196	216	236	400	220	248	275	303	330
240	164	185	205	226	247						

注: RH称为相对硬度,其值由原材料、熔化工艺、热处理工艺、铸件冷却速度等因素确定, RH的确定方法参见 GB/T 9439—1988。

2 可锻铸铁 (表 14.2-5)

表 14.2-5 可锻铸铁的力学性能及应用 (摘自 GB/T 9440—1988)

类型	牌 号		试样 直径 d/mm	σ_b / MPa ≥	$\sigma_{0.2}$ / MPa ≥	δ / % ($L_0=3d$) ≥	HBS	应 用 举 例
	新牌号	旧牌号						
黑心 (铁素体) 可锻 铸铁	KTH300-06	KT30-6	12 或 15	300	—	6	≤150	黑心可锻铸铁比灰铸铁强度高,塑性与韧性更好,可承受冲击和扭转载荷,具有良好的耐蚀性,切削性能良好。制作薄壁铸件,多用于机床零件,运输机零件,升降机械零件,管道配件,低压阀门;KTH300-06、KTH330-08可耐800~1400kPa的压力(气压、水压),可用于自来水管路、配件,高压锅炉管路配件,压缩空气管道配件以及农机零件。KTH350-10和KTH370-12能承受较大的冲击载荷,在寒冷环境(-40℃)下工作,不产生低温脆断,在汽车和拖拉机中用作后桥外壳,转向机构,弹簧钢板支座,农机中的收割机升降机构,护刃器,压刃器,捆束器等
	KTH330-08 ①	KT33-8		330	—	8		
	KTH350-10	KT35-10		350	200	10		
	KTH370-12 ①	KT37-12		370	—	12		

续表 14.2-5

类型	牌 号		试样 直径 d/mm	σ_1 / MPa ≥	$\sigma_{0.2}$ / MPa ≥	δ / % ($L_0=3d$) ≥	HBS	应 用 举 例
	新牌号	旧牌号						
珠 光 体 可 锻 铸 铁	KTZ450-06	KTZ45-5	12 或 15	450	270	6	150~200	珠光体可锻铸铁的塑性、韧性比黑心可锻铸铁稍差,但其强度高,耐磨性好,低温性能优于球墨铸铁,加工性良好,可替代有色合金、低合金钢及低中碳钢制作较高强度和耐磨性的零件。KTZ450-06用于制作插销,轴承座。KTZ550-04用于制作一定强度、韧性适当的零件,如汽车前轮轮毂,发动机支架,传动箱及拖拉机履带轨板。KTZ650-02用于制作较高强度的零件,如柴油机活塞、差速器壳、摇臂及农业机械的犁刀、犁片,齿轮箱。KTZ700-2用于制作高强度的零件,如曲轴、万向轴吊,传动齿轮、凸轮轴、活塞环等
	KTZ550-04	KTZ50-4		550	340	4	180~250	
	KTZ650-02	KTZ60-3		650	430	2	210~260	
	KTZ700-02	KTZ70-2		700	530	2	240~290	
白 心 可 锻 铸 铁	KTB350-04	—	9	340	—	5	≤230	将低碳低硅的白口铸铁和氧化铁一起加热,进行脱碳软化后的铸铁称为白心可锻铸铁,断口呈白色。表面层大量脱碳形成铁素体,心部为珠光体基体,且有少量残余游离碳,因而心部韧性难于提高,一般仅限于薄壁件的制造,由于工艺复杂,生产周期长,性能较差,国内在机械工业中较少应用,KTB380-12适用于对强度有特殊要求和焊接后不需进行热处理的零件
			12	350	—	4		
			15	360	—	3		
	KTB380-12	—	9	320	170	13	≤200	
12			380	200	12			
15			400	210	8			
KTB400-05	—	9	360	200	8	≤220		
		12	400	220	5			
		15	420	230	4			
KTB450-07	—	9	400	230	10	≤220		
		12	450	260	7			
		15	480	280	4			

注: 1. 对珠光体试样两种直径, 如需方无要求, 供方可以任选其中一种。

2. 白心可锻铸铁试样直径, 由需方和供方按铸件壁厚尺寸双方协定。

3. 如果采用正确的工艺, 所有牌号的白心可锻铸铁均可焊接。

4. 当需方对屈服强度有要求时, 供需双方协议才进行测定。

5. 硬度值仅作参考, 如需规定硬度值, 则由供需双方协定。

①为过渡牌号。

3 球墨铸铁 (表 14.2-6~表 14.2-8)

表 14.2-6 球墨铸铁牌号、单铸试块力学性能及应用 (摘自 GB/T 1348—1988)

牌 号		σ_1 / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	HBS	特 性 及 应 用 举 例
新牌号	旧牌号	\geq	\geq	\geq		
QT900-2	—	900	600	2	280~360	具有高强度、耐磨性、较高的弯曲疲劳强度。用于制作内燃机中的凸轮轴、拖拉机的减速齿轮、汽车中的准双曲面齿轮、农机中的耙片、犁铧
QT800-2	QT80-2	800	480	2	245~335	具有较高的强度、耐磨性及一定的韧性。用于制作部分机床的主轴、空压机、冷冻机、制氧机、泵的曲轴、缸体、缸套、球磨机齿轴、矿车轮、桥式起重机大小车滚轮、小型水轮发电机主轴、3.725~2.980 kW 柴油机、汽油机的曲轴、部分轻型柴油机、汽油机的凸轮轴、气缸套、进排气门座、连杆、脱粒机齿条、畜力犁铧、小载荷齿轮
QT700-2	QT70-2	700	420	2	225~305	
QT600-3	QT60-2	600	370	3	190~270	
QT500-7	QT50-5	500	320	7	170~230	具有中等的强度和韧性。用于制作内燃机中油泵齿轮、汽轮机的中温气缸隔板、水轮机阀门体、机车车辆轴瓦、输电线路的联板
QT450-10	QT42-10	450	310	10	160~210	
QT400-15	—	400	250	15	130~180	韧性高、低温性能较好。且有一定的耐蚀性。用于制作汽车拖拉机中的牵引框、轮毂、驱动桥壳体、离合器壳体、差速器壳体、减速器壳、离合器拨叉、弹簧吊耳、16~64 大气压阀门的阀体、阀盖、支架、压缩机中较高温度的高低压气缸、输气管、铁道的垫板、农机中的犁铧、犁柱、犁托、犁侧板、牵引架、收割机的导架、护刀器
QT400-18	QT40-17	400	250	18	130~180	

注：本表牌号适于砂型（或导热性与砂型相近）铸造的普通和低合金球墨铸铁件，不适于球墨铸铁管件的连续铸造的球铁件。

表 14.2-7 球墨铸铁件附铸试块力学性能 (摘自 GB/T 1348—1988)

牌 号	参考壁厚 t /mm	最小抗拉强度/ MPa	最小屈服强度/ MPa	最小伸长率/ %	仅 供 参 考	
					HBS	主要金相组织
QT700-2A	$30 < t \leq 60$	700	400	2	220~320	珠光体
	$60 < t \leq 200$	650	380	1		
QT600-3A	$30 < t \leq 60$	600	360	2	180~270	珠光体 + 铁素体
	$60 < t \leq 200$	550	340	1		
QT500-7A	$30 < t \leq 60$	450	300	7	170~240	铁素体 + 珠光体
	$60 < t \leq 200$	420	290	5		
QT400-15A	$30 < t \leq 60$	390	250	15	130~180	铁素体
	$60 < t \leq 200$	370	240	12		
QT400-18A	$30 < t \leq 60$	390	250	15	130~180	铁素体
	$60 < t \leq 200$	370	240	12		

注：牌号后面的字母 A 表示该牌号在附铸试块上测定的力学性能，以区别表 14.2-6 的单铸试块测定的性能。

表 14.2-8 球墨铸铁件硬度等级 (摘自 GB/T 1348—1988)

硬度等级	HBS	主要金相组织	参 考 值		
			最小抗拉强度/ MPa	最小屈服强度/ MPa	最小伸长率/ %
QT-H330	280~360	贝氏体或回火马氏体	900	600	2
QT-H300	245~335	珠光体或回火组织	800	480	2
QT-H265	225~305	珠光体	700	420	2
QT-H230	190~270	珠光体和铁素体	600	370	3
QT-H200	170~230	铁素体和珠光体	500	320	7
QT-H185	160~210	铁素体	450	310	10
QT-H155	130~180	铁素体	400	250	15
QT-H150	130~180	铁素体	400	250	15

4 高硅耐蚀铸铁 (表 14.2-9)

表 14.2-9 高硅耐蚀铸铁力学性能及应用 (摘自 GB/T 8491—1987)

牌 号	最小抗弯强度 σ_w /MPa	最小挠度 f /mm	最大硬度 HRC	特 性 及 应 用
STSi11 Cu2CrR	190	0.80	42	具有较好的力学性能, 可以用一般的机械加工方法进行生产, 在 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) \geq 10\%$, $w(\text{HNO}_3) \leq 46\%$, 两者的混合酸及 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) \geq 70\%$ 加氟、苯、苯磺酸等介质中具有较稳定的耐蚀性能, 但不允许有急剧的交变载荷, 冲击载荷和温度突变, 用于制造化工设备及零部件, 如卧式离心机、潜水泵、阀门、旋塞、塔罐、冷却排水管、弯头等
STSi15R STSi17R	140 130	0.66 0.66	48 48	在氧化性酸 (各种温度和浓度的硝酸、硫酸、铬酸)、各种有机酸和一系列盐溶液中具有较好的耐蚀性, 但在卤素酸、盐液中 (氟化物、氢氟酸) 和强碱溶液中不耐蚀, 不允许有急剧的交变载荷, 冲击载荷及温度突变。如制作离心泵、阀、旋塞、管道配件、塔罐、低压容器及各种非标准零部件
STSi15 Mo3R	130	0.66	48	在各种浓度和温度的硫酸、硝酸、盐酸中, 在碱水液和盐水液中, 当同一铸件上各部位温差不大于 30°C 时, 且没有动载荷、交变载荷和脉冲载荷时, 具有特别高的耐蚀性能。如制作各种离心泵、阀类、旋塞、管道配件、塔罐、低压容器及各种非标准零部件
STSi15 Cr4R	130	0.66	48	具有优良的耐电化学腐蚀性能, 并有改善抗氧化性条件的耐蚀性能, 高硅铬铸件中的铬可提高其钝化性和点蚀击穿电位, 不允许有急剧交变载荷和温度突变, 如制作在外加电流的阴极保护系统中, 大量用作辅助阳极铸件

- 注: 1. 高硅耐蚀铸铁力学性能一般不作要求, 在需方要求时, 应符合本表的规定。
2. 铸件的其他工艺要求参见 GB/T 8491—1987 的有关规定。

5 耐热铸铁 (表 14.2-10)

表 14.2-10 耐热铸铁件牌号、力学性能及应用 (摘自 GB/T 9437—1988)

牌 号	室温力学性能		高温短时力学性能 σ_b /MPa					应 用 举 例
	σ_b /MPa \geq	HBS	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	
RTCr	200	189~288	225	114	—	—	—	在空气、炉气中耐热温度 550℃, 制作炉条, 高炉支架式水箱, 金属型玻璃模
RTCr2	150	207~288	243	166	—	—	—	在空气、炉气中耐热 600℃, 制作煤气炉内灰盆, 矿山烧结车挡板
RTCr16	340	400~450	—	—	—	144	88	在空气、炉气中耐热 900℃, 室温及高温下有耐磨性、耐硝酸腐蚀, 制作退火罐, 煤粉烧嘴、炉棚、水泥焙烧炉零件, 化工机械零件
RTSi5	140	160~270	—	—	41	27	—	在空气、炉气中耐热 700℃, 制作炉条, 煤粉烧嘴, 锅炉用梳形定位板, 换热器针状管, 二氧化碳反应瓶
RQTSi4	480	187~269	—	—	75	35	—	在空气、炉气中耐热 650℃, 硅含量为上限时可到 750℃, 制作玻璃窑烟道闸门, 加热炉两端管架
RQTSi4Mo	540	197~280	—	—	101	46	—	在空气、炉气中耐热 680℃, 硅含量为上限时可到 780℃, 高温力学性能好, 制作罩式退火炉导向器, 烧结机中后热筛板, 加热炉吊梁
RQTSi5	370	228~302	—	—	67	30	—	在空气、炉气中耐热 800℃, 硅含量上限时可到 900℃, 制作煤粉烧嘴, 炉条, 辐射管, 烟道闸门, 加热炉中间管架
RQTA14Si4	250	285~341	—	—	—	82	32	在空气、炉气中耐热 900℃, 制作烧结机蓖条, 炉用件
RQTA15Si5	200	302~363	—	—	—	167	75	在空气、炉气中耐热 1050℃, 制作焙烧机蓖件, 炉用件
RQTA122	300	241~364	—	—	—	130	77	在空气、炉气中耐热 1100℃, 抗高温硫化性好, 制作锅炉用侧密封块, 链式加热炉炉爪, 黄铁矿焙烧炉零件

6 蠕墨铸铁 (表 14.2-11)

表 14.2-11 蠕墨铸铁牌号、单铸试块力学性能及应用 (摘自 JB/T4403—1987)

牌号	σ_b	$\sigma_{0.2}$	伸长率 $\delta/\%$	硬度 HBS	蠕化率/ %	性能特点及应用举例
	MPa \geq					
RuT420	420	335	0.75	200~280	50	蠕墨铸铁是一种很有发展前景的新型材料,即蠕虫状石墨铸铁,材质性能介于球铁和灰铸铁之间,它既有球铁的强度、刚性及一定的韧性,且有良好的耐磨性;同时它的铸造性及热传导性又相近于灰铸铁,它较快地用于制造液压件、排气管件、底座、大型机床床身、钢锭模及飞轮等铸件,铸件的重量有的已高达数十吨
RuT380	380	300	0.75	193~274		
RuT340	340	270	1.0	170~249		
RuT300	300	240	1.5	140~217		
RuT260	260	195	3.0	121~197		

- 注: 1. 蠕墨铸铁件的力学性能以单铸试块的抗拉强度为验收条件, RuT260 增加伸长率验收项目。
 2. 铸铁金相组织中石墨的蠕化率一般按本表规定,但可根据供需双方协商,另定蠕化率的要求。
 3. 本表规定的力学性能可经热处理之后达到。

7 耐磨铸铁 (表 14.2-12)

表 14.2-12 耐磨铸铁牌号及力学性能 (摘自 JB/ZQ4304—1997)

牌 号	力 学 性 能 \geq					挠度 $f/\text{mm} \geq$		
	σ_{bb}/MPa		σ_b/MPa	A_K/J	HB (HRC)	砂型	金属型	
	试样直径/mm					支距/mm		
	30	50	300	500				
MT-4	355	—	175	—	195~260	—	—	
Cu-Cr-Mo 合金铸铁	430	—	235	—	200~255	—	—	
中锰抗磨球墨铸铁	MQTMn6	510	390	—	31	(44)	3.0	2.5
	MQTMn7	470	440	—	35	(41)	3.5	3.0
	MQTMn8	430	490	—	39	(38)	4.0	3.5

- 注: 1. MT-4 耐磨铸铁的金相组织是细小珠光体和细小片状石墨,珠光体的质量分数 $>85\%$,磷共晶为细小网状并均匀分布;不允许有游离的渗碳体。用作一般耐磨零件。
 2. Cu-Cr-Mo 合金铸铁熔炼过程与一般灰铸铁相同,合金材料完全在炉内加入,石墨主要是分散片状。可用作活塞环,机床床身,卷筒,密封圈等耐磨零件。
 3. 中锰抗磨球墨铸铁的基体组织以马氏体和奥氏体为主。主要用作选矿用螺旋分级机叶片,磨衬板等。表中的锰含量范围、挠度和砂型铸造直径 30 mm 的抗弯试棒的抗弯强度值,除订货协议有规定外,不作为验收依据。

8 冷硬铸铁 (表 14.2-13)

表 14.2-13 冷硬铸铁的类型、力学性能及应用举例

类 型	白口层硬度 HRC	灰口部分性能		用途举例
		σ_t /MPa	σ_{10h} /MPa	
普通冷硬铸铁	450~550(HBW)			冷铸犁镜
	≥ 50	200~250	400~470	柴油机气门挺杆、拖拉机拖带轮
	48~50	>150	>330	拖拉机拖链轮
镍铬铜冷硬铸铁	铸态 53~56 600℃回火 后 50~55	200~250	400~470	发动机气门挺杆
铬钼稀土冷硬铸铁	≥ 53	250	470	柴油机气门挺杆
硼冷硬铸铁	50~51	150	330	纺织机的桃子投梭鼻、打梭转子
稀土冷硬铸铁	42	400~500	700~900	碾砂机碾轮

9 活塞环用耐磨铸铁 (表 14.2-14)

表 14.2-14 活塞环用耐磨铸铁的品种、力学性能及应用举例

铸铁品种	物 理 力 学 性 能						弹力消 失率 ϕ /%	应 用 举 例
	HRB	硬度差 HRB	σ_{10h} /MPa	E /MPa	E/σ_{10h}	残余变形 c /%		
钨铸铁	101~103	3.0	469	88 400	190	5.3	22.6	汽车、拖拉机活 塞环
钨钒钛铸铁	100~102	3.0	485	95 000	196	4.2	25	
钨铬钼铸铁	98~102	3.0	500	76 400~83 400	150~168	5.6~10	25	
钼铬铸铁	99~102	3.0	448	74300	164	6.0	25	汽车、拖拉机活 塞环
钼铬铸铁	98~108	3.0	≥ 550	100 000~140 000	≤ 220	< 10	≤ 20	柴油机活塞环
钼铬铜铸铁	96~107	3.0	≥ 600	100 000~130 000	≤ 220	< 10	18	柴油机、压缩机 活塞环
钼铬铜铸铁	98~105	3.0	≥ 600	110 000~140 000	≤ 220	< 10	18	大型船用柴油机 活塞环
钼铬铜钛铸铁	98~105	3.0	≥ 550	100 000~14 0000	≤ 220	< 10	18	工作温度高的火 焰平环、重要的柴 油发动机活塞环
镍铬钼铸铁	98~107	3.0	≥ 550	100 000~130 000	≤ 220	< 10	20	船用或内燃机车 柴油机活塞环
镍铬铸铁	98~106	3.0	≥ 550	100 000~140 000	≤ 220	—	20	冷冻机活塞环
铜钒钛铸铁	103~107	3.0	539	94 300	176	4.5	24.6	内燃机活塞环
磷铸铁	101~103	3.0	450	90 600	201	5.5	25	内燃机活塞环
磷稀土铸铁	100~102	3.0	440	87 000	199	6.6	25	

10 气缸套用耐磨铸铁 (表 14.2-15)

表 14.2-15 气缸套用耐磨铸铁的品种、力学性能及应用举例

铸铁品种	力 学 性 能				应 用 举 例
	σ_b /MPa	σ_{bh} /MPa	HBS	硬度差 HBS	
磷铬铸铁	>200	>400	220~280	<30	汽车、拖拉机缸套(金属型离心铸造)
磷铸铁	>200	>400	>220	<30	柴油机缸套
磷铬铜铸铁	250	470	190~240	<30	柴油机缸套
磷钒铸铁	>200	>400	>220	<30	汽车、拖拉机缸套
磷铬铝铸铁	250	470	240~280	<30	柴油机缸套(金属型离心铸造)
铬钼铜铸铁	250	470	—	—	中小型柴油机缸套
铬钼铜铸铁	300	540	202~255	—	内燃机车柴油机缸套(砂型铸造)
铬钼铜铸铁	≥ 280	≥ 480	190~248	—	大型船用柴油机缸套
磷铈铸铁	200	240	>190	—	汽车缸套
硼铸铁	250	470	—	—	中小型柴油机缸套

第 3 章 铸 钢

1 焊接结构用碳素钢铸件 (表 14.3-1)

表 14.3-1 焊接结构用碳素钢铸件的牌号及力学性能 (摘自 GB/T 7659—1987)

牌 号	力 学 性 能 \geq					
	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	A_{KV} /J	a_{KU} /J·cm ⁻²
ZG200-400H	200	400	25	40	30	59
ZG230-450H	230	450	22	35	25	44
ZG275-485H	275	485	20	35	22	34

- 注：1. 本表适用于一般工程结构用、且焊接性好的碳素钢铸件。
 2. 冲击性能中，当供方不具备夏比（V型缺口）试样加工条件时，允许按夏比（U型缺口）试样的冲击韧度值 a_{KU} 交货。
 3. 铸件热处理工艺由供方决定，常用热处理为退火、正火、正火加回火（回火温度不低于 550℃）。

2 一般工程用铸造碳钢件 (表 14.3-2)

表 14.3-2 一般工程用铸造碳钢件的力学性能及应用 (摘自 GB/T 11352—1989)

牌 号		室温力学性能, 最小值						特 点	应 用 举 例
新牌号	旧牌号	σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b / MPa	δ / %	按合同规定				
					ψ / %	A_{KV} / J	a_K / J·cm ⁻²		
ZG200-400	ZG15	200	400	25	40	30	60	低碳铸钢，韧性及塑性均好，但强度和硬度较低，低温冲击韧性大，脆性转变温度低，导磁、导电性能良好，焊接性好，但铸造性差	机座，电气吸盘，变速箱体等受力不大、但要求韧性的零件
ZG230-450	ZG25	230	450	22	32	25	45		用于载荷不大、韧性较好的零件，如轴承盖，底板，阀体，机座，侧架，轧钢机架，铁道车辆摇枕，箱体，犁柱，砧座等
ZG270-500	ZG35	270	500	18	25	22	35	中碳铸钢，有一定的韧性及塑性，强度和硬度较高，切削性良好，焊接性尚可，铸造性能比低碳钢好	应用广泛，用于制作飞轮，车辆车钩，水压机工作缸，机架，蒸气锤气缸，轴承座，连杆，箱体，曲拐
ZG310-570	ZG45	310	570	15	21	15	30		用于重载荷零件，如联轴器，大齿轮，缸体，气缸，机架，制动轮，轴及辊子

续表 14.3-2

牌 号		室温力学性能, 最小值						特 点	应 用 举 例
新牌号	旧牌号	σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ MPa	σ_b / MPa	δ / %	按合同规定				
					ψ / %	A_{KV} / J	a_K / $J \cdot cm^{-2}$		
ZG340-640	ZG55	340	640	10	18	10	20	高碳铸钢, 具有高强度、高硬度及高耐磨性, 塑性韧性低, 铸造焊接性均差, 裂纹敏感性较大	起重运输机齿轮, 联轴器, 齿轮, 车轮, 棘轮, 叉头

注: 1. 表内所列各牌号铸钢的性能适用于厚度为 100 mm 以下的铸件, 当厚度超过 100 mm 时, 表中规定的 $\sigma_{0.2}$ 仅供设计使用。当需从经过热处理的铸件上切取或从代表铸件的大型试块上取样时, 性能指标由供需双方商定。

- 需方无特殊要求, 热处理工艺由供方决定, 常用的热处理工艺为: 退火, 加热超过 A_{c3} , 炉冷; 正火, 加热超过 A_{c3} , 空冷; 淬火, 加热超过 A_{c3} , 快冷; 回火, 加热低于 A_{c1} 。
- 表中 A_{KV} ——冲击吸收功 (V 型); a_K ——冲击韧度 (V 型)。
- 断面收缩率和冲击韧度, 如需方无要求, 由制造厂选择其一。

3 一般工程与结构用低合金铸钢件 (表 14.3-3)

表 14.3-3 一般工程与结构用低合金铸钢件牌号及力学性能 (摘自 GB/T 14408—1993)

牌 号	最 小 值			
	屈服强度 (σ_s 或 $\sigma_{0.2}$) /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_s /%	收缩率 ψ /%
ZGD270-480	270	480	18	35
ZGD290-510	290	510	16	35
ZGD345-570	345	570	14	35
ZGD410-620	410	620	13	35
ZGD535-720	535	720	12	30
ZGD650-830	650	830	10	25
ZGD730-910	730	910	8	22
ZGD840-1030	840	1030	6	20

注: 1. 表中力学性能值取自 28 mm 厚标准试块。

- 若以冲击功作为检验指标, 可代替断面收缩率。冲击试样应采用 V 型缺口, 具体数值由供需双方协商确定。

4 大型低合金钢铸件 (表 14.3-4)

表 14.3-4 大型低合金钢铸件力学性能及应用 (摘自 JB/T6402—1992)

牌 号	热处 理 状 态	σ_s / MPa \geq	σ_b / MPa \geq	δ / % \geq	ψ / % \geq	A_{KV} / J \geq	A_{KV} / J \geq	A_{KJVM} / J \geq	HBS	应 用 举 例
ZG30Mn	正火 + 回火	300	558	18	30	—	—	—	163	用于较小负荷下耐 磨和耐冲击的零件, 如齿轮、连杆等
ZG40Mn	正火 + 回火	295	640	12	30	—	—	—	163	用于在较高负荷下 承受摩擦和冲击的零 件, 如齿轮等
ZG40Mn2	正火 + 回火	395	590	20	55	—	—	—	179	用于承受摩擦的零 件, 如齿轮等
	调 质	685	835	13	45	35	—	35	269~302	
ZG50Mn2	正火 + 回火	445	785	18	37	—	—	—	—	用于高强度零件, 如齿轮、齿轮缘等
ZG20Mn	正火 + 回火	295	510	14	30	39	—	—	156	焊接及流动性良 好, 作水压机缸、叶 片、喷嘴体、阀、弯 头等
	调 质	300	500~650	24	—	—	45	—	150~190	
ZG35Mn	正火 + 回火	345	570	12	20	24	—	—	—	用于承受摩擦的零 件
	调 质	415	640	12	25	27	—	27	—	
ZG36SiMnMo	正火 + 回火	395	640	12	20	24	—	—	—	制造载荷较大的零 件
	调 质	490	690	12	25	27	—	27	—	
ZG35CrMnSi	正火 + 回火	345	690	14	30	—	—	—	217	用于承受冲击磨损 的零件, 如齿轮
ZG20MnMo	正火 + 回火	295	490	16	—	39	—	—	156	用于受压容器, 如 泵壳等
ZG55CrMnMo	正火 + 回火	不规定	不规定	—	—	—	—	—	—	有一定的红硬性, 用于锻模等
ZG40Cr	正火 + 回火	345	630	18	26	—	—	—	212	用于高强度齿轮
ZG34Cr2Ni2Mo	调 质	700	950~1 000	12	—	—	32	—	240~290	用于特别要求零 件, 如锥齿轮、小齿 轮
ZG20CrMo	调 质	245	460	18	30	24	—	—	—	用于齿轮、锥齿 轮及高压缸零件等
ZG34Cr1Mo	调 质	510	740~880	12	—	—	—	27	—	用于齿轮、电炉支 承轮轴套、齿圈等
ZG42Cr1Mo	调 质	490	690~830	11	—	—	—	24	200~250	用于高载荷零件, 齿轮、锥齿轮等
ZG50Cr1Mo	调 质	520	740~880	11	—	—	—	34	200~260	用于减速器零件, 齿轮、小齿轮等

续表 14.3-4

牌 号	热处 理 状 态	σ_s / MPa \geq	σ_b / MPa \geq	δ / % \geq	ψ / % \geq	A_{KU} / J \geq	A_{KV} / J \geq	A_{KJVM} / J \geq	HBS	应 用 举 例
ZG65Mn	正火+回火	不规定	不规定	—	—	—	—	—	—	用于球磨机衬板等
ZG28NiCrMo	—	420	630	20	40	—	—	—	—	适用于直径大于 300 mm 的齿轮铸件
ZG30NiCrMo	—	590	730	17	35	—	—	—	—	适用于直径大于 300 mm 的齿轮铸件
ZG35NiCrMo	—	660	830	14	30	—	—	—	—	适用于直径大于 300 mm 的齿轮铸件

5 高锰钢铸件 (表 14.3-5)

表 14.3-5 高锰钢铸件牌号、力学性能及应用 (摘自 GB/T 5680—1998)

牌 号	力 学 性 能				应 用 举 例
	σ_b / MPa	δ_5 / %	a_{KU} / $J \cdot cm^{-2}$	硬 度 HBS	
ZGMn13-1	635	20	—	—	高锰钢铸件具有高强度,良好塑性和韧性,在使用中受冲击和强大压力而变形时,产生高耐磨的表面层,里层仍具有优良韧性,故能承受冲击载荷,用于铸造各种耐冲击,抗磨损的零件。ZGMn13-1和ZGMn13-2适用于铸造形状结构简单,耐磨为主的低冲击零件,如破碎壁、辊套、齿板、衬板、铲齿等。ZGMn13-4的耐冲击能力高于ZGMn13-3,此两个牌号适用于结构复杂,要求以韧性为主的承受强烈冲击载荷的零件,如斗前壁,提梁和履带板等
ZGMn13-2	685	25	≥ 147	≤ 300	
ZGMn13-3	735	30			
ZGMn13-4	735	20	—	—	
ZGMn13-5	—	—	—	—	

注: 1. ZGMn13-4中Cr的质量分数为1.50%~2.50%, ZGMn13-5中Mo的质量分数为0.90%~1.20%。

2. 铸件均匀加热和保温,水韧处理温度不低于1040℃,保证铸件中碳化物均匀、固溶。

3. ZGMn13-4的 $\sigma_s \geq 390$ MPa。

6 铸造锚链钢 (表 14.3-6)

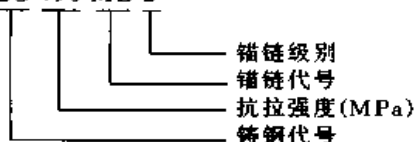
表 14.3-6 铸造锚链钢牌号、力学性能 (摘自 GB/T 552—1996)

牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_5 /%	夏比 V 型缺口 冲击功 A_{KV} /J \geq (试验温度 0℃)	断面收缩率 ψ /% \geq	热 处 理
ZG490ML2	490	22	—	—	调质
ZG690ML3	690	17	59	35	正火加调质

注: 1. 铸造锚链钢按抗拉强度分为两类: 二级, 其 σ_b 下限大于490 MPa; 三级, 其 σ_b 下限大于690 MPa。

2. 热处理工艺由制造厂决定。

3. 牌号说明: ZG 490 ML 2



7 不锈钢耐酸钢铸件 (表 14.3-7)

表 14.3-7 不锈钢耐酸钢铸件牌号、力学性能及应用 (摘自 GB/T 2100—1980)

组织类型	牌 号	热 处 理			力 学 性 能 \geq					性能特点及应用举例
		类型	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却介质	σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ / %	ψ / %	a_k / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	
马氏体	ZG1Cr13	退火 淬火 回火	950 1 050 750	水 空气	560	400	20	50	800	铸造性能较好, 具有良好的力学性能, 在大气、水和弱腐蚀介质 (如盐水溶液、稀硝酸及某些浓度不高的有机酸) 和温度不高的情况下, 均有良好的耐蚀性, 可用于承受冲击载荷, 要求韧性高的铸件, 如泵壳、阀、叶轮, 水轮机转轮或叶片、螺旋桨等
	ZG2Cr13	退火 淬火 回火	950 1 050 750~800	油 空气	630	450	16	40	600	基本性能与 ZG1Cr13 相似, 由于含碳量比 ZG1Cr13 高, 故具有更高的硬度, 但耐腐蚀性较低, 焊接性能较差, 用途也与 ZG1Cr13 相似, 可用作较高硬度的铸件, 如热油泵、阀门等
铁素体	ZG1Cr17	退火	750~800	—	400	250	20	30	—	铸造性能较差, 晶粒易粗大, 韧性较低, 但在氧化性酸中具有良好的耐蚀性, 如在温度不太高的工业用稀硝酸, 大部分有机酸 (醋酸、蚁酸、乳酸) 及有机酸盐水溶液, 在草酸中不耐蚀, 主要用于制造硝酸生产上的化工设备, 也可制造食品和人造纤维工业用的设备, 但一般在退火后使用, 不宜用于 304 kPa 以上或受冲击的零件
	ZG1Cr19Mo2	退火	800	—	400	—	—	—	—	铸造工艺性能与 ZG1Cr17 相似, 晶粒易粗大, 韧性较低, 在磷酸与沸腾的醋酸等还原性介质中具有良好的耐蚀性, 主要用于沸腾温度下的各种浓度的醋酸介质中不受冲击的维尼纶、电影胶片以及造纸漂液工段用的铸件, 代替部分 Cr18Ni12Mo2Ti 和 ZGCr28
	ZGCr28	退火	850	—	350	—	—	—	—	铸造性能差, 热裂倾向大, 韧性低, 但在浓硝酸介质中具有很好的耐蚀性, 在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下仍有很好的抗氧化性, 主要用于不受冲击载荷的高温硝酸浓缩设备的铸件如泵、阀等, 也可用于制造次氯酸钠及磷酸设备和高温抗氧化耐热零件

续表 14.3-7

组织类型	牌 号	热 处 理			力 学 性 能 \geq					性能特点及应用举例
		类型	加热温度/°C	冷却介质	σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ / %	ψ / %	a_K / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	
奥 氏 体 型	ZG00Cr18Ni10	淬火	1 050~1 100	水	400	180	25	3	1 000	超低碳不锈钢, 冶炼要求高, 在氧化性介质(如硝酸)中具有良好的耐蚀性及良好的抗晶间腐蚀性能, 焊后不出现刀口腐蚀, 主要用于化学、化肥、化纤及国防工业上重要的耐蚀铸件和铸焊结构件等
	ZG0Cr18Ni9	淬火	1 080~1 130	水	450	200	25	32	1 000	典型的不锈钢耐酸钢, 铸造性能比含钛的同类型不锈钢耐酸钢好, 在硝酸、有机酸等介质中具有良好的耐蚀性, 在固溶处理后具有良好的抗晶间腐蚀性能, 但在敏化状态下的抗晶间腐蚀性能会显著下降, 低温冲击性能好, 主要用于硝酸、有机酸、化工石油等工业用泵阀等铸件
	ZG1Cr18Ni9	淬火	1 050~1 100	水	450	200	25	32	1 000	典型的不锈钢耐酸钢, 与 ZG0Cr18Ni9 相似, 由于含碳量比 ZG0Cr18Ni9 高, 故其耐蚀性和抗晶间腐蚀性能较低, 用途与 ZG0Cr18Ni9 相同
	ZG0Cr18Ni9Ti	淬火	950~1 050	水	450	200	25	32	1 000	由于含有稳定化元素钛, 提高了抗晶间腐蚀的能力, 但铸造性能比 ZG0Cr18Ni9 差, 易使铸件生产夹杂、缩松、冷隔等铸造缺陷, 主要用于硝酸、有机酸等化工、石油、原子能工业的泵、阀、离心机铸件
	ZG1Cr18Ni9Ti	淬火	950~1 050	水	450	200	25	32	1 000	与 ZG0Cr18Ni9Ti 相似, 由于含碳量较高, 故抗晶间腐蚀性能比 ZG0Cr18Ni9Ti 稍低, 基本性能与用途同 ZG1Cr18Ni9Ti
	ZG0Cr18Ni12-Mo2Ti	淬火	1 100~1 150	水	500	220	30	30	1 000	铸造性能与 ZG1Cr18Ni9Ti 相似, 由于含钼明显提高了对还原性介质和各种有机酸、碱、盐类的耐蚀性, 抗晶间腐蚀(比 18/8Ti)好, 主要制造常温硫酸、较低浓度的沸腾磷酸、蚁酸、蜡酸介质中用的铸件
	ZG1Cr18Ni12-Mo2Ti	淬火	1 100~1 150	水	500	220	30	30	1 000	同 ZG0Cr18Ni12MoTi, 但由于含碳量较高, 故其耐蚀性较差些
	ZG1Cr24Ni20-Mo2Cu3	淬火	1 100~1 150	水	450	250	20	32	1 000	具有良好的铸造性能, 力学性能和加工性能, 在 60°C 以下各种浓度硫酸介质和某些有机酸、磷酸、硝酸混酸中均具有很好的耐蚀性, 主要用于硫酸、硫酸、磷酸、硝酸混酸等工业制作泵、叶轮等铸件
ZG1Cr18Mn8-Ni4N	淬火	1 100~1 150	水	600	250	40	50	1 500	节镍的铬锰氮不锈钢耐酸铸钢, 铸造工艺较稳定, 力学性能好, 在硝酸及若干有机酸中具有良好的耐蚀性, 可部分代替 ZG1Cr18Ni9 及 ZG1Cr18Ni9Ti 的铸件	

组织类型	牌 号	热 处 理			力 学 性 能 \geq					性能特点及应用举例
		类型	加热温度/℃	冷却介质	σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ / %	ψ / %	a_k / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	
奥氏体 + 铁素体型	ZG1Cr17Mn9- Ni4Mo3Cu2N	淬火	1 150~1 180	水	600	400	25	35	1 000	节镍的铬锰氮不锈钢铸件, 其耐腐蚀性与 ZG1Cr18Ni12Mo2Ti 基本相同, 而在硫酸和含氧离子的介质中具有比 ZG1Cr18Ni12Mo2Ti 更好的耐蚀和抗点蚀性能, 抗晶间腐蚀较好, 有良好的冶炼和铸造及焊接性能, 主要用于代替 ZG1Cr18Ni12Mo2Ti 在硫酸、硫酸、漂白粉、维尼纶、聚丙烯睛介质中的泵、阀、离心机铸件
	ZG1Cr18Mn- 13Mo2CuN	淬火	1 100~1 150	水	600	400	30	40	1 000	无镍的不锈钢铸件, 在大多数化工介质中的耐蚀性能相当或优于 ZG1Cr18Ni9Ti, 尤其是在腐蚀与磨损兼存的条件下比 ZG1Cr18Ni9Ti 更优, 力学性能和铸造性能好, 但气孔敏感性比 ZG1Cr18Ni9Ti 大, 主要用于代替 ZG1Cr18Ni9Ti 在硝酸、硝酸、有机酸等化工工业中的泵、阀、离心机等铸件
沉淀硬化型	ZG0Cr17Ni4- Cu4Nb	淬火 时效	1 020~1 100 485~570	水、 空气	1 000	800	5	10	HB ≥ 337	在 40% 以下的硝酸、10% 盐酸 (30℃) 和浓缩醋酸介质中具有良好的耐腐蚀性, 是强度高、韧性好较耐磨的沉淀型马氏体不锈钢铸件, 主要用于化工、造船、航空等具有一定耐腐蚀性的耐磨和高强度的铸件

注: 1. 在确切的屈服点 (σ_s) 不能测出时, 允许用屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 代替, 但需注明为屈服强度。

2. 需要稳定化的 ZG0Cr18Ni9Ti 和 ZG1Cr18Ni9Ti 铸件, 其稳定化处理的工艺和处理后的力学性能由双方商定。

3. ZG1Cr13 和 ZG2Cr13 马氏体牌号的铸件需要在退火状态交货, 应在双方协议中商定。

8 工程结构用中、高强度不锈钢铸件 (表 14.3-8)

表 14.3-8 工程结构用中、高强度不锈钢铸件牌号、力学性能及应用 (摘自 GB/T 6967—1986)

牌 号	力 学 性 能 \geq							应 用 举 例
	σ_s / MPa	σ_b / MPa	δ / %	ψ / %	A_k /J	a_k / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HBS	
ZG10Cr13	350	550	18	40	—	—	163~229	耐大气腐蚀好、力学性能较好, 可用于承受冲击负荷且韧性较高的零件, 可耐有机酸水液、聚乙烯醇、碳酸氢钠、橡胶液, 还可做水轮机转轮叶片、水压机阀
ZG20Cr13	400	600	16	35	—	—	170~235	
ZG10Cr13Ni1	450	600	16	35	—	—	170~241	

续表 14.3-8

牌 号	力 学 性 能 \geq							应 用 举 例
	σ_s / MPa	σ_b / MPa	δ / %	ψ / %	A_K/J	$\alpha_K/kJ \cdot m^{-2}$	HBS	
ZG10Cr13Ni1Mo	450	630	16	35	—	—	170~241	综合力学性能高, 抗大气 蚀, 水中抗疲劳性能均好, 钢的焊接性良好, 焊后不必 热处理, 铸造性能尚好, 耐 泥砂磨损, 可用于制作大型 水轮机转轮(叶片)
ZG06Cr13Ni4Mo	560	760	15	35	50	600	217~286	
ZG06Cr13Ni6Mo	560	760	15	35	50	600	221~286	
ZG06Cr16Ni5Mo	600	800	15	35	40	500	221~286	

注: 1. 表中牌号为 ZG10Cr13、ZG20Cr13、ZG10Cr13Ni1、ZG10Cr13Ni1Mo 铸钢的力学性能, 适用于壁厚 100 mm 以下的铸件。牌号为 ZG06Cr13Ni4Mo、ZG06Cr13Ni6Mo、ZG06Cr16Ni5Mo 铸钢适用于壁厚 200 mm 以下的铸件。

2. 对于壁厚小于 500 mm 的铸件, 表中力学性能的相应降低数值, 应依据不同制造工艺由双方商定。

9 大型不锈钢铸件 (表 14.3-9)

表 14.3-9 大型不锈钢铸件牌号及力学性能 (摘自 JB/T 6405—1992)

牌 号	热处理规范	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	HBS
		\geq				
ZG15Cr13	加热到 $\geq 995^\circ\text{C}$, 空冷, 并在 $\geq 595^\circ\text{C}$ 回火或者在 \geq 790 $^\circ\text{C}$ 退火	620	450	18	30	≤ 241
ZG20Cr13		588	392	16	35	170~235
ZG30Cr13		690	485	15	25	≤ 269
ZG12Cr18Ni9Ti	加热到 $\geq 1040^\circ\text{C}$, 保持足 够时间, 水淬或采用能达到 验收条件的其他方法	440	195	25	32	—
ZG06Cr13Ni14Mo	退火应 $> 600^\circ\text{C}$; 正火和 淬火在 A_{c3} 以上进行回火在 A_{c1} 点上下进行一次或二次 回火	760	550	15	35	≥ 220
ZG06Cr13Ni6Mo		750	550	15	35	≥ 220
ZG08Cr19Ni9	加热到 $\geq 1040^\circ\text{C}$, 保持 足够时间, 水淬或用其他快 冷方式	485	205	35	—	—
ZG08Cr19Ni11Mo3		520	240	25	—	—
ZG12Cr22Ni12		485	195	35	—	—
ZG20Cr25Ni20	加热到 $\geq 1093^\circ\text{C}$, 保持 足够时间, 水淬或其他快速 冷却方式	450	195	30	—	—
ZG12Cr17Mn9Ni4- Mo3CuN	加热到 $1100 \sim 1150^\circ\text{C}$, 保持足够时间, 水淬或其他 快速冷却方式	588	294	25	35	—
ZG12Cr18Mn13- Mo2CuN		588	294	30	40	—

10 耐热钢铸件 (表 14.3-10)

表 14.3-10 耐热钢铸件牌号、力学性能、特性及应用举例 (摘自 GB/T 8492—1987)

牌 号	$\sigma_{0.2}$ / MPa ≥	σ_b / MPa ≥	δ_5 / % ≥	最高使 用温度/ ℃	特 性 及 应 用 举 例
ZG40Cr9Si2	—	550	—	800	高温强度低, 抗氧化最高至 800℃, 长期工作的受载件的工作温度低于 700℃。用于坩埚、炉门、底板等构件
ZG30Cr18Mn12-Si2N	—	490	8	950	高温强度和抗热疲劳性较好。用于炉罐、炉底板、料筐、传送带导轨、支承架、吊架等炉用构件
ZG35Cr24Ni7SiN	340	540	12	1 100	抗氧化性好。用于炉罐、炉辊、通风机叶片、热滑轨、炉底板、玻璃水泥窑及搪瓷窑等构件
ZG30Cr26Ni5	—	590	—	1 050	承载情况使用温度可达 650℃, 轻载荷时可达 1 050℃, 在 650~870℃ 之间易析出 σ 相。可用于矿石焙烧炉, 也可用于不需要高温强度的高硫环境下工作的炉用构件
G30Cr20Ni10	235	490	23	900	基本上不形成 σ 相。可用于炼油厂加热炉、水泥干燥窑、矿石焙烧炉和热处理炉构件
ZG35Cr26Ni12	235	490	8	1 100	高温强度高、抗氧化性能好, 在规格范围内调整其成分, 可使组织内含有一些铁素体, 也可为单相奥氏体。能广泛地用于许多类型的炉子构件, 但不宜用于温度急剧变化的地方
ZG35Cr28Ni16	235	490	8	1 150	力学性能同单相 ZG40Cr25Ni12, 具有较高温度的抗氧化性能, 用途同 ZG40Cr25Ni12、ZG40Cr25Ni20
ZG40Cr25Ni20	235	440	8	1 150	具有较高的蠕变和持久强度, 抗高温气体腐蚀能力强, 常用于作炉辊、辐射管、钢坯滑板、热处理炉炉辊、管支架、制氢转化管、乙烯裂介管以及需要较高蠕变强度的零件
ZG40Cr30Ni20	245	450	8	1 150	在高温含硫气体中耐蚀性好, 用于气体分离装置、焙烧炉衬板
ZG35Ni24Cr18Si2	195	390	5	1 100	加热炉传送带、螺杆、紧固件等高温承载零件
ZG30Ni35Cr15	195	440	13	1 150	抗热疲劳性好, 用于渗碳炉构件、热处理炉板、导轨、轮子、铜焊夹具、蒸馏器、辐射管、玻璃轧辊、搪瓷窑构件以及周期加热的紧固件
ZG45Ni35Cr26	235	440	5	1 150	抗氧化及抗渗碳性良好, 高温强度高。用于乙烯裂介管、辐射管、弯管、接头、管支架、炉辊以及热处理用夹具等
ZGCr28	—	—	—	1 050	抗氧化性能好, 使用于无强度要求的炉用构件以及含有硫化物、重金属蒸气的焙烧炉构件等

注: 1. 交货状态除 ZG40Cr9Si2 为 950℃ 退火外, 其余牌号的铸件均可不经热处理, 以铸态交货。

2. 铸件的力学性能一般不作验收项目, 只有在合同中明确提出时, 测定项目应符合表列规定。

11 铸钢轧辊 (表 14.3-11)

表 14.3-11 铸钢轧辊牌号及力学性能 (摘自 GB/T 1503—1989)

分类	牌 号	抗拉强度	伸长率	冲击韧度	抗拉强度	伸长率	冲击韧度	硬度	
		σ_b/MPa	$\delta/\%$	$a_{KV}/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$a_{KV}/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	HS	
		不 小 于						辊身	辊颈 \leq
附铸试样			梅花试样						
优质 碳素 钢	ZU70	—	—	—	640	7	14.3	32~42	42
	ZU70Mn	—	—	—	740	6	12	32~42	42
	ZU80	—	—	—	710	6	9.8	34~44	44
合金钢	ZU60CrMnMo	—	—	—	740	6	14.3	32~42	42
	ZU65CrNiMo	650	6	9.8	—	—	—	35~45	45
	ZU70Mn2	—	—	—	740	6	9.8	34~44	44
	ZU70Mn2Mo	—	—	—	770	6	9.8	36~46	46
	ZU75CrMo	680	6	8.0	770	6	9.8	36~46	46
	ZU75CrNiMnMo	700	6	9.8	—	—	—	35~45	45
	ZU80Cr	—	—	—	790	6	9.8	38~48	48
半钢	ZUB140CrMo	490	—	—	590	—	—	38~48	48
	ZUB140CrNiMo	490	—	—	590	—	—	35~45	45
	ZUB160CrMo	392	—	—	540	—	—	40~50	50
	ZUB160CrNiMo	392	—	—	540	—	—	38~48 48~58	48
石墨钢	ZUS140SiCrMo	540	—	—	660	—	—	36~46	46
	ZUS150SiCrNiMo	500	—	—	600	—	—	40~50	50

注：1. 冲击韧性试样系用 U 型缺口试样。

2. 采用附铸试样性能应符合附铸试样要求，采用梅花试样性能应符合梅花试样要求。

3. 轧辊表面硬度值应符合本表规定。其他力学性能指标只当需方要求时，才按本表规定进行检验。

4. 光坯轧辊按规定图样制造。其他类型轧辊按需方图样加工。

第 4 章 变 形 钢

1 优质碳素结构钢 (表 14.4-1、表 14.4-2)

表 14.4-1 优质碳素结构钢牌号及交货状态下的力学性能 (摘自 GB/T 699—1999)

序号	牌号	试样 毛坯 尺寸/ mm	推荐热处理/°C			力学性能					钢材交货状态硬度 HBS	
			正火	淬火	回火	σ_b /	σ_s /	δ_5 /	ψ /	A_{KU2} /	10/3 000 不大于	
						MPa	MPa	%	%	J	未热处理钢	退火钢
						不小于						
1	08F	25	930			295	175	35	60		131	
2	10F	25	930			315	185	33	55		137	
3	15F	25	920			355	205	29	55		143	
4	08	25	930			325	195	33	60		131	
5	10	25	930			335	205	31	55		137	
6	15	25	920			375	225	27	55		143	
7	20	25	910			410	245	25	55		156	
8	25	25	900	870	600	450	275	23	50	71	170	
9	30	25	880	860	600	490	295	21	50	63	179	
10	35	25	870	850	600	530	315	20	45	55	197	
11	40	25	860	840	600	570	335	19	45	47	217	187
12	45	25	850	840	600	600	355	16	40	39	229	197
13	50	25	830	830	600	630	375	14	40	31	241	207
14	55	25	820	820	600	645	380	13	35		255	217
15	60	25	810			675	400	21	35		255	229
16	65	25	810			695	410	10	30		255	229
17	70	25	790			715	420	9	30		269	229
18	75	试样		820	480	1 080	880	7	30		285	241
19	80	试样		820	480	1 080	930	6	30		285	241
20	85	试样		820	480	1 130	980	6	30		302	255

续表 14.4-1

序号	牌号	试样 毛坯 尺寸 /mm	推荐热处理/℃			力学性能					钢材交货状态硬度 HBS	
			正火	淬火	回火	σ_b /	σ_s /	δ_5 /	ψ /	A_{KU2} /	10/3 000	
						MPa	MPa	%	%	J	不大于	
						不小于					未热处理钢	退火钢
21	15Mn	25	920			410	245	26	55		163	
22	20Mn	25	910			450	275	24	50		197	
23	25Mn	25	900	870	600	490	295	22	50	71	207	
24	30Mn	25	880	860	600	540	315	20	45	63	217	187
25	35Mn	25	870	850	600	560	355	18	45	55	229	197
26	40Mn	25	860	840	600	590	355	17	45	47	229	207
27	45Mn	25	850	840	600	620	375	15	40	39	241	217
28	50Mn	25	830	830	600	645	390	13	40	31	255	217
29	60Mn	25	810			695	410	11	35		269	229
30	65Mn	25	830			735	430	9	30		285	229
31	70Mn	25	790			785	450	8	30		285	229

注：1. 对于直径或厚度小于 25 mm 的钢材，热处理是在与成品截面尺寸相同的试样毛坯上进行。

2. 表中所列正火推荐保温时间不少于 30 min，空冷；淬火推荐保温时间不少于 30 min，75、80 和 85 钢油冷，其余钢水冷；回火推荐保温时间不少于 1 h。

表 14.4-2 优质碳素结构钢特性及应用

牌号	特 性	应 用 举 例	牌号	特 性	应 用 举 例
08F 10F	冷变形塑性很好，深冲压等冷加工性和焊接性很高，但成分偏析倾向较大，钢经时效处理后韧性下降较多（时效敏感性较明显），所以冷作件常经水韧处理及消除应力处理来消除时效敏感性，强度和硬度均很低，但生产成本低	常用于生产成钢带、薄板及冷拉钢丝，适用于制作深冲击、深拉伸的制品，如汽车车身、驾驶室、发动机罩、翼子板等不受负载的各种盖罩件，各种贮器、搪瓷设备、仪表板、管子、垫片，还可制作心部强度要求不高的渗碳、碳氮共渗零件，如套筒、支架、靠模和挡块等	08	强度和硬度都很低，是一种极软的低碳钢，韧性和塑性极高，深冲压、深拉伸、弯曲、锻造等冷加工性均良好，并有良好的焊接性，淬硬性及淬透性极低，且存在一定的时效敏感性，通常在热轧供应状态下或正火后使用，经冷拉或正火处理之后，能提高其切削性能，是一种塑性很好的冷冲压钢	这种钢常轧制成高精度的厚度小于 4 mm 的薄钢板或冷轧钢带，广泛用于制造无强度要求，而易加工成形的深冲压、深拉伸的盖罩件及焊接件，可制作心部强度不高而表面需要硬化的渗碳和氰化零件，如离合器盘、齿轮等，经退火处理后，这种钢还可制作具有良好导磁性能、剩磁较少的磁性零件，如电磁吸盘、软性电磁铁等

续表 14.4-2

牌号	特 性	应 用 举 例	牌号	特 性	应 用 举 例
10	渗碳钢, 塑性和韧性均高, 无回火脆性倾向, 在冷拉状态下或经正火处理之后的切削性明显提高, 焊接性能高, 在冷状态下, 易于挤压成形和压模成形, 但强度低, 且淬透性及淬硬性很差	采用锻、弯曲、冷冲、热压、拉延及焊接等多种加工方法, 制作各种韧性高、负荷小的零件, 如卡头、钢管垫片、垫圈、摩擦片、汽车车身、防尘罩、容器、深冲器皿、搪瓷制品、轴承砂架、冷锻螺栓螺母及各种受载较小的焊接件, 也可制作渗碳件, 如链轮、齿轮、链的滚子和套筒、犁壁等, 还可退火后制作电磁吸铁零件	20	低碳渗碳钢, 特性与 15 钢相近, 但强度比 15 钢稍高	车车辆上的十字头、活塞、气缸盖等铸件, 还可制作压力低于 6.08 MPa, 温度低于 450℃ 的无腐蚀介质中使用的管子、导管等锅炉零件
15	低碳渗碳钢, 塑性、韧性高, 并且有良好的焊接性及冷冲压性, 无回火脆性, 切削性低, 但经水韧处理或正火之后, 即能提高切削性, 强度较低, 且淬硬性和淬透性较低	用于制作受载不大、韧性要求较高的零件、渗碳件、冲模锻件、紧固件, 不需热处理的低负载零件, 焊接性能较好的中、小结构件, 如螺栓、螺钉、法兰盘、拉条、化工容器、蒸汽锅炉、小轴、挡铁、小模数齿轮、滚子、仿形板、摩擦片、销子、套筒、球轴承 (轻载, H 级) 的套圈和滚珠、起重钩、农机用链轮、链条、轴套等	25	和 20 钢的性能相近, 其强度各高于 20 钢, 塑性和韧性较好, 且具有一定的强度, 冷冲压性和焊接性较好, 有较好的切削性能, 无回火脆性, 但淬透性及淬硬性不高, 一般在热轧及正火后使用	用于制作焊接构件, 以及经锻造、热冲压和切削加工, 且负载较小的零件, 如棍子、轴、垫圈、螺栓、螺母、螺钉钉、连接器, 还用于制造压力小于 600 MPa, 温度低于 450℃ 的应力不大的锅炉零件, 如螺栓、螺母等, 在汽车拖拉机中, 常用作冲击钢板, 如厚度 4~11 mm 的钢板, 可制作横梁、车架、大梁、脚踏板等具有相当载荷的零件, 经淬火处理 (获得低碳马氏体), 可制造强度和韧性良好的零件, 如汽车轮胎螺钉等, 还可制作心部强度不高、表面要求良好耐磨性的渗碳和氰化零件
15F	特性和 15 钢相近, 但是沸腾钢成分偏析倾向较大, 热轧或冷轧成低碳薄钢板	用于制作心部强度不高的渗碳或氰化零件, 如套筒, 挡块, 支架, 短轴, 齿轮, 靠模, 离合器盘, 也可制作塑性良好的零件, 如管子、垫片、垫圈, 还可用于制作摇杆、吊钩、横担衬套、螺栓、车钩以及农机中的低负载零件, 亦可适于制作钣金件及各种冲压件 (最深冲压、深冲压等)	30	具有一定的强度和硬度, 塑性和焊接性较好, 通常在正火状态下使用, 也可调质, 截面尺寸不大的钢材调质处理后, 能得到较好的机械综合性能, 并且具有良好的切削性能	用于制造受载不大、工作温度低于 150℃ 的截面尺寸小的零件, 如化工机械中的螺钉、拉杆、套筒、丝杠、轴、吊环、键等, 在自动机床上加工的螺栓、螺母, 亦可制作心部强度较高、表面耐磨的渗碳及氰化零件、焊接构件及冷锻锻零件
20	低碳渗碳钢, 特性与 15 钢相近, 但强度比 15 钢稍高	在热轧或正火状态下用于制作负载不大、但韧性要求高的零件, 如重型及通用机械中的锻、压的拉杆、杠杆、钩环、套筒、夹具及衬垫, 在一般机械及汽车、拖拉机中, 用于制作不甚重要的中、小型渗碳、氰化零件, 如手刹车蹄片、杠杆轴、变速叉、被拉机上的凸轮轴、悬挂平衡器轴、内外衬套、机	35	中碳钢, 性能与 30 钢相似, 具有一定的强度, 良好的塑性, 冷变形塑性好, 可进行冷拉和冷锻及冷冲压, 并具有良好的切削加工性能, 其含碳量为规定含碳量的下限时, 焊接性能良好; 其含碳量为规定含碳量的上限时, 焊接性能不好; 钢的淬透性差, 通常在正火或调质状态下使用, 综合机械性能要求不高时, 亦可在热轧供货状态下使用	广泛地用于制造负载较大, 但截面尺寸较小的各种机械零件、热压件, 如轴销、轴、曲轴、横梁、连杆、杠杆、星轮、轮圈、垫圈、圆盘、钩环、螺栓、螺钉、螺母等, 还可不经热处理制作负载不大的锅炉用 (温度低于 450℃) 螺栓、螺母等紧固件, 这种钢通常不用于制作焊接件

续表 14.4.2

牌号	特 性	应 用 举 例	牌号	特 性	应 用 举 例
40	强度较高, 切削性能良好, 是一种高强度的中碳钢, 焊接性差, 但可焊接, 在焊前采用预热处理至 150℃, 冷变形塑性中等, 适于水淬和油淬, 但淬透性低, 形状复杂零件, 水淬易发生裂纹, 多在正火或调质或高频表面淬火热处理后使用	用于制造机器中的运动件, 心部强度要求不高, 表面耐磨性好的淬火零件及截面尺寸较小, 负载较大的调质零件, 应力不大的大型正火件, 如传动轴、心轴、曲轴、曲柄销、棍子、拉杆、连杆、活塞杆、齿轮、圆盘、链轮等, 一般不适用做焊接件	60	高强度中碳钢, 具有相当高的强度、硬度及弹性, 切削加工性不高, 冷变形塑性低, 淬透性低, 水中淬火产生裂纹倾向, 因此大型零件不适宜淬火, 多在正火状态下使用, 只有小型零件才适于淬火, 焊接性差, 回火脆性不敏感	主要用于制造耐磨、强度较高、受力较大、摩擦工作以及相当弹性的弹性零件, 如轴、偏心轴、轧棍、轮箍、离合器、钢丝绳、弹簧垫圈、弹簧圈、减震弹簧、凸轮及各种垫圈
45	高强度中碳调质钢, 具有一定的塑性和韧性, 较高的强度, 切削性能良好, 采用调质处理可获得很好的综合力学性能, 淬透性较差, 水淬易产生裂纹, 中、小型零件调质后可得到较好的韧性及较高的强度, 大型零件(截面尺寸超过 80 mm)以采用正火处理为宜, 但 45 钢的焊接性能较低, 仍可焊接, 不过焊前应将焊件进行预热, 且焊后应进行退火处理, 以消除焊接应力	适用于制造较高强度的运动零件, 如空压机、泵的活塞、蒸气透平机的叶轮、重型及通用机械中的轧制轴、连杆、蜗杆、齿条、齿轮、销子等, 通常在调质或正火状态下使用, 可代替渗碳钢, 用以制造表面耐磨的零件, 此时, 不须经高频或火焰表面淬火, 如曲轴、齿轮、机床主轴、活塞销、传动轴等, 还用于制造农机中等负荷的轴、脱粒滚筒、凹板钉齿、链轮、齿轮、以及钳工工具等	65	高强度中碳钢, 是一种广泛应用的碳素弹簧钢, 经适当的热处理, 其疲劳强度与合金弹簧钢相近, 并能得到良好的弹性和较高的强度, 切削加工性差, 淬透性低, 截面尺寸大于 7-18 mm 时, 在油中不能淬透, 水淬易产生裂纹, 小型零件多采用淬火, 大型尺寸零件多采用正火或水淬油冷, 回火脆性不敏感, 通常在淬火并中温回火状态下使用, 也可在正火状态下使用	主要用于制造弹簧垫圈、弹簧环、U 形卡、汽门弹簧、受力不大的扁形弹簧、螺旋弹簧等, 在正火状态下, 可制造轧棍、凸轮、轴、钢丝绳等耐磨零件
50	高强度中碳钢, 弹性性能较高, 切削加工性能尚好, 退火后切削加工性为 50%, 焊接性差, 冷应变塑性低, 淬透性能较低, 水中淬火易产生裂纹, 但无回火脆性, 一般在正火或淬火、回火以及高频表面淬火之后使用	主要用于制造动负载、冲击载荷不大以及要求耐磨性好的机械零件, 如锻造齿轮、轴摩擦盘、机床主轴、发动机曲轴、轧棍、拉杆、弹簧垫圈、不重要的弹簧、农机中掘土犁铧、翻土板、铲子、重载心轴及轴类零件	70	性能和 65 钢相近, 但其强度和弹性均比 65 钢稍高, 由于淬透性低, 直径大于 12-15 mm 不能淬透	仅适用于制造强度不高、截面尺寸较小的扁形、圆形、方形弹簧、钢带、钢丝、车轮圈、电车车轮及犁铧等
			75, 80	75 钢和 80 钢的性能和 65 钢相近, 其弹性比 65 钢稍差, 而强度较高, 淬透性较低, 一般在淬火回火状态下使用	用于制造强度不高, 截面尺寸较小的螺旋弹簧、板弹簧, 也用于制造承受摩擦工作的机械零件
55	高强度中碳钢, 弹性较高, 塑性及韧性低, 热处理后可获得高强度、高硬度, 切削加工性中等, 淬透性低, 水中淬火有产生裂纹的倾向, 焊接性以及冷变形性能均低, 一般在正火或淬火、回火后使用	主要用于制造耐磨、强度较高的机械零件以及弹性零件, 也可用于制作铸钢件, 如连杆、齿轮、机车轮箍、轮缘、轮圈、轧棍、扁弹簧	85	高耐磨性的高碳钢, 其性能与 65 钢相近, 但强度和硬度均比 65、70 钢要高, 但弹性稍低, 淬透性也不好	主要用于制造截面尺寸不大、强度不高的振动弹簧, 如普通机械中的扁形弹簧、圆形螺旋弹簧, 铁道车辆和汽车拖拉机中的板簧及螺旋弹簧, 农机中的清棉机锯齿片和摩擦盘以及其他用途的钢丝和钢带等

续表 14.4-2

牌号	特 性	应用 举例	牌号	特 性	应用 举例
15Mn 20Mn	高锰低碳渗碳钢, 其性能和 15 钢相近, 但其淬透性、强度和塑性均比 15 钢有所提高, 切削性能也有所提高, 低温冲击韧性及焊接性能良好, 通常在渗碳或正火或在热轧供货状态下使用, 20Mn 的含碳量略高于 15Mn, 因而其强度和淬透性比 15Mn 略高	主要用于制造中部力学性能较高的渗碳或氮化零件, 如凸轮轴、曲柄轴、活塞销、齿轮、滚动轴承(H 级, 轻载)的套圈以及圆柱、圆锥轴承中的滚动体等, 在正火或热轧状态下用于制造韧性高而应力较小的零件, 如螺钉、螺母、支架、铰链及铆焊结构件, 还可轧制成板材(4~10 mm), 制作低温条件下工作的油罐等容器	45Mn	中碳调质钢, 强度、韧性及淬透性均比 45 钢高, 调质处理可获得较好的综合力学性能, 切削加工性还好, 但焊接性差, 冷变形时塑性低, 并且有回火脆性倾向, 一般在调质状态下应用, 也可在淬火、回火或在正火状态下应用	一般用于较大负载及承受磨损工作条件的零件, 如曲轴、花键轴、轴、连杆、万向节轴、汽车半轴、啮合杆、齿轮、离合器盘、螺栓、螺母等
25Mn	强度比 25 钢和 20Mn 都较高, 其他性能和 25 钢、20Mn 相近	一般用于制造渗碳件和焊接件, 如连杆、销、凸轮轴、齿轮、联轴器、铰链等	50Mn	性能与 50 钢相近, 但淬透性较高, 因而热处理之后的强度、硬度及弹性均比 50 钢要好, 但有过热敏感性及回火脆性倾向, 焊接性差, 一般在淬火、回火后应用, 在某些个别情况也允许正火后应用	一般用于制造高耐磨性、高应力的零件, 如直径小于 80 mm 的心轴、齿轮轴、齿轮、摩擦盘、板弹簧等, 高频淬火后还可制造火车轴、蜗杆、连杆及汽车曲轴等
30Mn	强度和淬透性比 30 钢均高, 冷变形时塑性尚好, 切削加工性良好, 焊接性中等, 但有回火脆性倾向, 因而锻后要立即回火, 通常在正火或调质状态下使用	一般用于制造低负荷的各种零件, 如杠杆、拉杆、小轴、刹车踏板、螺栓、螺钉及螺母, 还可用于制造高应力负载的细小零件(采用冷拉钢制作), 如农机中的钩环链的链环、刀片、横向刹车机齿轮等	60Mn	强度较高, 淬透性较好, 脱脆倾向小, 但有过热敏感性及回火脆性倾向, 水淬易产生淬火裂纹, 通常在淬火回火后应用, 退火后的切削加工性良好	用于制造尺寸较大的螺旋弹簧, 各种扁、圆弹簧, 板簧, 弹簧片, 弹簧环、发条和冷拉钢丝(直径小于 7 mm)
35Mn	强度和淬透性均比 30Mn 要高, 切削加工性好, 冷变形时塑性中等, 焊接性较差, 常用作调质钢	一般用于制造载荷中等的零件, 如啮合杆、传动轴、螺栓、螺钉、螺母等, 还可用于制造受磨损的零件(采用淬火回火), 如齿轮、心轴、叉等	65Mn	高锰弹簧钢, 具有高的强度和硬度, 弹性良好, 淬透性较好, 适于油淬、水淬易产生裂纹, 直径大于 80 mm 的零件常采用水淬油冷, 但热处理后有过热敏感性及回火脆性, 退火后的切削性尚好, 冷作变形塑性较差, 焊接性能不好, 一般不适于作焊接构件, 通常在淬火、中温回火状态下应用	经淬火及低温回火或调质、表面淬火处理, 用于制造受摩擦、高弹性、高强度的机械零件, 如收割机铲、犁、切碎机切刀、翻土板、整地机械圆盘、机床主轴、机床丝杠、弹簧卡头、钢轨、螺旋滚子轴承的套圈, 经淬火、中温回火处理后, 用于制造中等负载的板弹簧(厚度 5~15 mm)、螺旋弹簧(直径 7~20 mm)、弹簧垫圈、弹簧卡环、弹簧发条轻型汽车的离合器弹簧、制动弹簧、气门弹簧
40Mn	淬透性比 40 钢稍高, 经热处理之后的强度、硬度及韧性都较 40 钢高, 切削加工性好, 冷变形时塑性中等, 存在回火脆性及过热敏感性, 水淬时易形成裂纹, 并且焊接性差, 40Mn 既可在正火状态下应用, 亦可在淬火与回火状态下应用	经调质处理后, 可代替 40Cr 使用, 用于制造在疲劳负载下工作的零件, 如曲轴、连杆、轴、轴以及高应力的螺栓、螺钉、螺母等	70Mn	淬透性比 70 钢要好, 经热处理可获得比 70 钢更好的强度、硬度及弹性, 但冷作变形塑性差, 焊接性能低, 热处理时易产生过热敏感性以及回火脆性, 易于脱碳, 水淬时易形成裂纹, 主要在淬火、回火状态下使用	用于制造耐磨、载荷较大的机械零件, 如止推环、离合器盘、弹簧圈、弹簧垫圈、锁紧圈、盘簧等

2 碳素结构钢 (表 14.4-3)

表 14.4-3 碳素结构钢牌号、力学性能和应用举例 (摘自 GB/T 700—1988)

牌 号	拉 伸 试 验										冲 击 试 验		冷 弯 试 验, $B=2a, 180^\circ$				应 用 举 例							
	屈服点 σ_s /MPa \geq					抗 拉 强 度 σ_b /MPa					伸 长 率 δ /%		V 型 (纵向)		钢 材 厚 度 或 直 径 /mm									
	钢 材 厚 度 (直 径) /mm					钢 材 厚 度 (直 径) /mm					钢 材 厚 度 (直 径) /mm		温 度 / $^\circ\text{C}$		弯 心 直 径 d			试 样 方 向						
	新 牌 号	旧 牌 号	≤ 16	~ 40	> 40	~ 40	~ 60	~ 100	~ 150	> 150	≤ 16	~ 40	~ 60	~ 100	~ 150	> 150		纵	横	纵	横	纵	横	纵	横
Q195	A1	(195)	—	—	—	—	—	—	—	33	32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	常用于制造地脚螺栓、铆钉、犁板、炉撑、低碳钢丝、薄板、焊管、拉杆、短轴、心轴、吊钩、垫圈、支架及焊接件
	B1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Q215-A	A2	215	205	195	185	175	165	155	145	31	30	29	28	27	26	—	—	—	—	—	—	—	—	广泛用于一般机械零件的制造,如:连杆、轴、螺丝、盖、螺母、螺栓、气缸、机架、焊接件、桥梁等用的角钢、工字钢及钢筋等
	C2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Q235-A	A3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	用于制造强度要求不高的零件,如螺栓、键、楔、摇杆、拉杆、心轴、销轴、钢结构用各种型钢、条钢、钢板
	C3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Q235-B	—	235	225	215	205	195	185	175	165	26	25	24	23	22	21	—	—	—	—	—	—	—	—	用于制作较高强度的零件,如齿轮、心轴、转轴、销轴、链轮、键、螺母、螺栓、垫圈、刹车杆、角尾板、农机机架、肥齿等
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Q255-A	A4	255	245	235	225	215	205	195	185	24	23	22	21	20	19	—	—	—	—	—	—	—	—	用于制作较高强度的零件,如齿轮、心轴、转轴、销轴、链轮、键、螺母、螺栓、垫圈、刹车杆、角尾板、农机机架、肥齿等
	C4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Q275	C5	275	265	255	245	235	225	215	205	20	19	18	17	16	15	—	—	—	—	—	—	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

注: 1. 牌号 Q195 的屈服点, 仅供参考, 不作为交货条件。
 2. 进行拉伸或弯曲试验时, 钢板、钢带应取纵向试样, 伸长率允许较上表降低 1% (绝对值), 型钢应取纵向试样。
 3. 冷弯试验中 B 为试样宽度, a 为钢材厚度或直径。

3 低合金高强度结构钢 (表 14.4-4、表 14.4-5)

表 14.4-4 低合金高强度结构钢力学性能 (摘自 GB/T 1591—1994)

牌号	质量等级	屈服强度 σ_s /MPa \geq				抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	纵向冲击功 A_{KV} /J				180°弯曲试验 $d =$ 弯心直径 $a =$ 试样厚度(直径)	
		厚度(直径, 边长)/mm						+20℃	0℃	-20℃	-40℃	钢材厚度(直径)/mm	
		≤ 16	$> 16 \sim 35$	$> 35 \sim 50$	$> 50 \sim 100$							≤ 16	$> 16 \sim 100$
Q295	A	295	275	255	235	390~570	23					$d = 2a$	$d = 3a$
	B	295	275	255	235	390~570	23	34				$d = 2a$	$d = 3a$
Q345	A	345	325	295	275	470~630	21					$d = 2a$	$d = 3a$
	B	345	325	295	275	470~630	21	34				$d = 2a$	$d = 3a$
	C	345	325	295	275	470~630	22		34			$d = 2a$	$d = 3a$
	D	345	325	295	275	470~630	22			34		$d = 2a$	$d = 3a$
	E	345	325	295	275	470~630	22				27	$d = 2a$	$d = 3a$
Q390	A	390	370	350	330	490~650	19					$d = 2a$	$d = 3a$
	B	390	370	350	330	490~650	19	34				$d = 2a$	$d = 3a$
	C	390	370	350	330	490~650	20		34			$d = 2a$	$d = 3a$
	D	390	370	350	330	490~650	20			34		$d = 2a$	$d = 3a$
	E	390	370	350	330	490~650	20				27	$d = 2a$	$d = 3a$
Q420	A	420	400	380	360	520~680	18					$d = 2a$	$d = 3a$
	B	420	400	380	360	520~680	18	34				$d = 2a$	$d = 3a$
	C	420	400	380	360	520~680	19		34			$d = 2a$	$d = 3a$
	D	420	400	380	360	520~680	19			34		$d = 2a$	$d = 3a$
	E	420	400	380	360	520~680	19				27	$d = 2a$	$d = 3a$
Q460	C	460	440	420	400	550~720	17		34			$d = 2a$	$d = 3a$
	D	460	440	420	400	550~720	17			34		$d = 2a$	$d = 3a$
	E	460	440	420	400	550~720	17				27	$d = 2a$	$d = 3a$

注: 1. 一般按热轧、控轧、正火及正火加回火状态交货, Q420、Q460 的 C、D、E 级钢可按淬火加回火状态交货, 并应在合同中注明, 否则由供方自定。

2. 拉伸、弯曲试验时, 板、带取横向试样, 宽度小于 600 mm 钢带、型钢和钢样取纵向试样。

3. 板、带的伸长率值允许比本表规定降低 1% (绝对值)。

4. 边长或直径大于 50~100 mm 的方钢和圆钢, 其伸长率可比本表规定降低 1% (绝对值)。

表 14.4-5 低合金高强度结构钢牌号对照及应用 (摘自 GB/T 1591—1994)

GB/T 1591—1994	GB/T 1591—1988	特性及应用举例
Q295	09MnV、09Mn2、 09MnNb、12Mn	具有优良的韧性、塑性, 冷弯性和焊接性均良好, 冲压成形性能良好, 一般在热轧或正火状态下使用, 适用于制作各种容器、螺旋焊管、车辆用冲压件, 建筑用结构件、农机结构件、储油罐、低压锅炉汽包、输油管道、造船及金属结构等
Q345	12MnV、14MnNb、 16Mn、16MnRE、18Nb	具有良好的综合力学性能, 塑性和焊接性良好, 冲击韧性较好, 一般在热轧或正火状态下使用, 适于制作桥梁、船舶、车辆、管道、锅炉、各种容器、油罐、电站、厂房结构、低温压力容器等结构件

续表 14.4.5

GB/T 1591—1994	GB/T 1591—1988	特性及应用举例
Q390	15MnV、15MnTi、 16MnNb	具有良好的综合力学性能，焊接性及冲击韧性较好，一般在热轧状态下使用，适于制作锅炉汽包、中、高压石油化工容器、桥梁、船舶、起重机、较高载荷的焊接件、联接构件等
Q420	15MnVN、14MnVTiRE	具有良好的综合力学性能，优良的低温韧性，焊接性好，冷热加工性良好，一般在热轧或正火状态下使用，适于制作高压容器、重型机械、桥梁、船舶、机车车辆、锅炉及其他大型焊接结构件

4 非调质机械结构钢 (表 14.4-6、表 14.4-7)

表 14.4-6 易切削非调质机械结构钢牌号及力学性能 (摘自 GB/T 15712—1995)

牌 号	力学性能 \geq										硬度 HBS	
	抗拉强度 σ_b /MPa		屈服强度 σ_s /MPa		伸长率 δ_5 /%		断面收缩率 ψ /%		冲击功 A_K /J		\leq	
	直径/mm ≤ 40	直径/mm >40~60	直径/mm ≤ 40	直径/mm >40~60	直径/mm ≤ 40	直径/mm >40~60	直径/mm ≤ 40	直径/mm >40~60	直径/mm ≤ 40	直径/mm >40~60	直径/mm ≤ 40	直径/mm >40~60
YF35V	590		390		18		40		47		229	
YF40V	640		420		16		35		37		255	
YF45V	685		440		15		30		35		257	
YF35MnV	735	710	460	440	17	15	35	33	37	35	257	257
YF40MnV	785	760	490	470	15	13	33	30	32	28	275	265
YF45MnV	835	810	510	490	13	12	28	28	28	25	289	275

注：1. 本表适用于非调质机械结构钢热轧（锻制）状态钢材的力学性能，尺寸范围指直径或边长。

2. 尺寸大于 60 mm 钢材的力学性能可由供需双方协定。

3. 钢材以热轧（锻制）状态交货。

表 14.4-7 热锻用非调质机械结构钢牌号及力学性能 (摘自 GB/T 15712—1995)

牌 号	抗拉强度 σ_b /	屈服强度 σ_s /	伸长率 δ_5 /	断面收缩率 ψ /	冲击功 A_K /	硬度 HBS
	MPa	MPa	%	%	J	
	\geq					
F45V	685	440	15	40	32	257
F35MnVN	785	490	15	40	39	269
F40MnV	785	490	15	40	36	275

注：本表适用于直径或边长不大于 80 mm 的热锻用非调质机械结构钢的直径 25 mm 试样毛坯，经 (950 ± 20)℃，保温 30 min，正火处理后的力学性能；尺寸大于 80 mm 的钢材，其试样力学性能及硬度值由供需双方协定。

5 保证淬透性结构钢 (表 14.4-8、表 14.4-9)

表 14.4-8 保证淬透性结构钢含硼钢材的冲击韧度及热处理 (摘自 GB/T 5216—1985)

牌 号	试样毛坯尺寸/ mm	正 火		淬 火		回 火		$\alpha_k/kJ \cdot m^{-2}$ ≥
		温度/℃	冷却剂	温度/℃	冷却剂	温度/℃	冷却剂	
40MnBH	25	880~900	空气	850±20	油	510±30	水	700
45MnBH	25	880~900	空气	850±20	油	510±30	水	600
20MnMoBH	15	930~950	空气	880±20	油	200±20	空气或水	700
20MnVBH	15	930~950	空气	860±10	油	200±10	空气或水	700
22MnVBH	15	930~950	空气	860±20	油	200±20	空气或水	700
20MnTiBH	15	930~950	空气	860±20	油	200±20	空气或水	700

注：保证淬透性结构钢适用于机械制造中用以保证淬透性的截面尺寸大于等于 30 mm 的热轧和锻制结构条钢。钢材的尺寸规格应符合 GB/T 702—1986 热轧圆钢和方钢品种和 GB/T 908—1987 锻制圆钢和方钢品种的规定。

表 14.4-9 保证淬透性结构钢牌号及淬透性指标 (摘自 GB/T 5216—1985)

牌 号	正火 温度/ ℃	端淬 温度/ ℃	离开淬火端下列距离 (mm) 处的 HRC												
			1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	12	15	18	21	24	27	30
45H	850~ 870	840± 5	61~ 54	60~ 37	55~ 28	40~ 26	35~ 24	33~ 23	31~ 21	29	28	27	26	25	24
20CrH	880~ 900	870± 5	48~ 41	47~ 37	42~ 30	37~ 25	33~ 22	30	26	24	22	21	20		
40CrH	860~ 880	850± 5	59~ 51	59~ 51	58~ 50	57~ 48	56~ 46	54~ 42	48~ 34	43~ 30	41~ 27	39~ 26	38~ 25	37~ 24	37~ 23
45CrH	860~ 880	850± 5	62~ 54	62~ 54	61~ 53	60~ 51	58~ 48	56~ 44	50~ 35	45~ 31	42~ 29	41~ 28	40~ 27	39~ 26	38~ 25
40MnBH	880~ 900	850± 5	60~ 51	60~ 50	59~ 49	58~ 48	57~ 46	55~ 43	51~ 27	45~ 23	40~ 21	36~ 20	34	32	31
45MnBH	880~ 900	850± 5	63~ 54	63~ 53	62~ 52	61~ 51	60~ 49	58~ 46	53~ 30	47~ 26	42~ 24	39~ 23	37~ 22	35~ 22	34~ 21
20MnMoBH	930~ 950	880± 5	48~ 41	48~ 41	48~ 40	47~ 39	46~ 37	45~ 34	40~ 27	35~ 22	32	30	28	27	27
20MnVBH	930~ 950	860± 5	48~ 40	48~ 40	47~ 39	46~ 37	45~ 35	44~ 32	41~ 26	38~ 23	35~ 21	33	31	29	28
22MnVBH	930~ 950	860± 5	50~ 42	50~ 42	50~ 42	50~ 41	49~ 40	48~ 38	46~ 33	43~ 27	40~ 24	38~ 22	36~ 20	34	33
20MnNBH	930~ 250	880± 5	48~ 40	48~ 40	48~ 39	47~ 37	46~ 35	44~ 32	41~ 25	37	33	30	27	25	24
20CrMoMoH	860~ 880	860± 5	50~ 42	50~ 42	50~ 41	50~ 40	49~ 39	48~ 37	46~ 34	43~ 31	41~ 29	40~ 28	39~ 27	38~ 26	38~ 26
20CrMnTiH	900~ 920	880± 5	48~ 40	48~ 39	47~ 37	46~ 35	44~ 32	42~ 30	38~ 26	35~ 22	33~ 20	33	31	30	29
20CrNi3H	850~ 870	830± 5	49~ 41	49~ 40	48~ 39	47~ 38	46~ 36	45~ 34	42~ 31	39~ 28	37~ 26	35~ 24	34~ 23	33~ 22	32~ 21
12Cr2Ni4H	880~ 900	860± 5	44~ 37	44~ 37	44~ 37	44~ 36	44~ 36	43~ 35	43~ 33	42~ 31	41~ 30	40~ 29	39~ 28	39~ 27	38~ 26
20CrNiMoH	930~ 950	925± 5	48~ 41	47~ 37	45~ 31	42~ 27	39~ 24	35~ 22	31	28	26	25	24	23	23

注：本表的数值系用预备热处理过的毛坯制成 $\phi 25$ mm 标准试样试验所得。

6 合金结构钢 (表 14.4-10、表 14.4-11)

表 14.4-10 合金结构钢牌号及纵向力学性能 (摘自 GB/T 3077—1999)

牌 号	试样 毛坯 尺寸/ mm	热 处 理				力 学 性 能 \geq						钢材退火或高 温回火供货状 态布氏硬度 HBS100/3 000 \leq
		淬 火		回 火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	断后伸长率 δ_5 /%	断面收缩率 ψ /%	冲击吸收功 A_{KU2} /J		
		加热温度/°C	冷却剂	加热 温度/ °C	冷却剂							
											第一次 淬 火	
20Mn2	15	850	—	水、油	200	水、空	785	590	10	40	47	187
		880	—	水、油	440	水、空						
30Mn2	25	840	—	水	500	水	785	635	12	45	63	207
35Mn2	25	840	—	水	500	水	835	685	12	45	55	207
40Mn2	25	840	—	水、油	540	水	885	735	12	45	55	217
45Mn2	25	840	—	油	550	水、油	885	735	10	45	47	217
50Mn2	25	820	—	油	550	水、油	930	785	9	40	39	229
20MnV	15	880	—	水、油	200	水、空	785	590	10	40	55	187
27SiMn	25	920	—	水	450	水、油	980	835	12	40	39	217
35SiMn	25	900	—	水	570	水、油	885	735	15	45	47	229
42SiMn	25	880	—	水	590	水	885	735	15	40	47	229
20SiMn2MnV	试样	900	—	油	200	水、空	1 380	—	10	45	55	269
25SiMn2MnV	试样	900	—	油	200	水、空	1 470	—	10	40	47	269
37SiMn2MnV	25	870	—	水、油	650	水、空	980	835	12	50	63	269
40B	25	840	—	水	550	水	785	635	12	45	55	207
45B	25	840	—	水	550	水	835	685	12	45	47	217
50B	20	840	—	油	600	空	785	540	10	45	39	207

续表 14.4-10

牌号	试样 毛坯 尺寸/ mm	热处理				力学性能 \geq					钢材退火或高温 回火供应状 态布氏硬度 HBS100/3 000 \leq	
		淬火		回火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	断后伸长率 δ_5 /%	断面收缩率 ψ /%	冲击吸收功 A_{K12} /J		
		加热温度/°C		冷却剂								
		第一次 淬火	第二次 淬火	加热 温度/ °C	冷却剂							
40MnB	25	850	—	油	500	水、油	980	785	10	45	47	207
45MnB	25	840	—	油	500	水、油	1 030	835	9	40	39	217
20MnMoB	15	880	—	油	2 000	油、空	1 080	885	10	50	55	207
15MnVB	15	860	—	油	200	水、空	885	635	10	45	55	207
20MnVB	15	860	—	油	200	水、空	1 080	885	10	45	55	207
40MnVB	25	850	—	油	520	水、油	980	785	10	45	47	207
20MnTiB	15	860	—	油	200	水、空	1 130	930	10	45	55	187
25MnTiBRE	试样	860	—	油	200	水、空	1 380	—	10	40	47	229
15Cr	15	880	780~820	水、油	200	水、空	735	490	11	45	55	179
15CrA	15	880	770~820	水、油	180	油、空	685	490	12	45	55	179
20Cr	15	880	780~820	水、油	200	水、空	835	540	10	40	47	179
30Cr	25	860	—	油	500	水、油	885	685	11	45	47	187
35Cr	25	860	—	油	500	水、油	930	735	11	45	47	207
40Cr	25	850	—	油	520	水、油	980	785	9	45	47	207
45Cr	25	840	—	油	520	水、油	1 030	835	9	40	39	217
50Cr	25	830	—	油	520	水、油	1 080	930	9	40	39	229
38CrSi	25	900	—	油	600	水、油	980	835	12	50	55	255

续表 14.4.10

牌 号	试样 毛坯 尺寸/ mm	热 处 理				力 学 性 能 \geq				钢材退火或高 温回火供应状 态布氏硬度 HBS100/3 000 \leq		
		淬 火		回 火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	断后伸长率 δ_5 /%	断面收缩率 ψ /%		冲击吸收功 A_{KU}/J	
		加热温度/°C		加 热 温度/ °C								
		第一次 淬 火	第二次 淬 火	冷 却 剂	冷 却 剂							
12CrMo	30	900	—	空	650	空	410	265	24	60	110	179
15CrMo	30	900	—	空	650	空	440	295	22	60	94	179
20CrMo	15	880	—	水、油	500	水、油	885	685	12	50	78	197
30CrMo	25	880	—	水、油	540	水、油	930	785	12	50	63	229
30CrMoA	15	880	—	油	540	水、油	930	735	12	50	71	229
35CrMo	25	850	—	油	550	水、油	980	835	12	45	63	229
42CrMo	25	850	—	油	560	水、油	1 080	930	12	45	63	217
12CrMoV	30	970	—	空	750	空	440	225	22	50	78	241
35CrMoV	25	900	—	油	630	水、油	1 080	930	10	50	71	241
12Cr1MoV	30	970	—	空	750	空	490	245	22	50	71	179
25Cr2MoVA	25	900	—	油	640	空	930	785	14	55	63	241
25Cr2Mo1VA	25	1 040	—	空	700	空	735	590	16	50	47	241
38CrMoAl	30	940	—	水、油	640	水、油	980	835	14	50	71	229
40CrV	25	880	—	油	650	水、油	885	735	10	50	71	241
50CrVA	25	860	—	油	500	水、油	1 280	1 130	10	40	—	255
15CrMn	15	880	—	油	200	水、空	785	590	12	50	47	179
20CrMn	15	850	—	油	200	水、空	930	735	10	45	47	187
40CrMn	25	840	—	油	550	水、油	980	835	9	45	47	229

续表 14.4-10

牌号	试样 毛坯 尺寸/ mm	热处理				力学性能				钢材退火或高 温回火供应状 态布氏硬度 HRS100/3 000 ≧		
		淬火		回火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	断后伸长率 δ_5 /%	断面收缩率 ψ /%		冲击吸收功 A_{KV} /J	
		加热温度/℃	冷却剂	加热温度/℃	冷却剂							
												第一次 淬火
20CrMnSi	25	880	—	油	480	水、油	785	635	12	45	55	207
25CrMnSi	25	880	—	油	480	水、油	1 080	885	10	40	39	217
30CrMnSi	25	880	—	油	520	水、油	1 080	885	10	45	39	229
30CrMnSiA	25	880	—	油	540	水、油	1 080	835	10	45	39	229
35CrMnSiA	试样	加热到 880℃, 于 280~310℃ 等温淬火				1 620	1 280	9	40	31	241	
	试样	950	890	油	230	空、油						
20CrMnMo	15	850	—	油	200	水、空	1 180	885	10	45	55	217
40CrMnMo	25	850	—	油	600	水、油	980	785	10	45	63	217
20CrMnTi	15	880	870	油	200	水、空	1 080	850	10	45	55	217
30CrMnTi	试样	880	850	油	200	水、空	1 470	—	9	40	47	229
20CrNi	25	850	—	水、油	460	水、油	785	590	10	50	63	197
40CrNi	25	820	—	油	500	水、油	980	785	10	45	55	241
45CrNi	25	820	—	油	530	水、油	980	785	10	45	55	255
50CrNi	25	820	—	油	500	水、油	1 080	835	8	40	39	255
12CrNi2	15	860	780	水、油	200	水、空	785	590	12	50	63	207
12CrNi3	15	860	780	油	200	水、空	930	685	11	50	71	217
20CrNi3	25	830	—	水、油	480	水、油	930	735	11	55	78	241
30CrNi3	25	820	—	油	500	水、油	980	785	9	45	63	241

续表 14.4-10

牌号	试样 毛坯 尺寸/ mm	热处理				力学性能 \geq						钢材退火或高 温回火供应状 态布氏硬度 HBS100/3 000 \leq
		淬火		回火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	断后伸长率 δ_5 /%	断面收缩率 ψ /%	冲击吸收功 A_{KU2} /J		
		加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却剂	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却剂							
											第一次 淬火	
37CrNi3	25	820	—	500	水、油	1 130	980	10	50	47	269	
12Cr2Ni4	15	860	780	200	油	1 080	835	10	50	71	269	
20Cr2Ni4	15	880	780	200	油	1 180	1 080	10	45	63	269	
20CrNiMo	15	850	—	200	油	980	785	9	40	47	197	
40CrNiMoA	25	850	—	600	油	980	835	12	55	78	269	
18CrMnNi- MoA	15	830	—	200	油	1 180	885	10	45	71	269	
45CrNiMoVA	试样	860	—	460	油	1 470	1 330	7	35	31	269	
18Cr2Ni4WA	15	950	850	200	空	1 180	835	10	45	78	269	
25Cr2Ni4WA	25	850	—	550	油	1 080	930	11	45	71	269	

注：1. 表中所列热处理温度允许调整范围：淬火 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ ，低温回火 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ，高温回火 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 。

2. 硼钢在淬火前可先经正火，正火温度应不高于其淬火温度，经锰钛钢第一次淬火可用正火代替。

3. 拉伸试验时试样钢上不能发现屈服，无法测定屈服点 σ_s 情况下，可以测定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 。

表 14.4-11 合金结构钢的性能特点及应用

牌 号	特 性	应 用 举 例
20Mn2	具有中等强度、较小截面尺寸的 20Mn2 和 20Cr 性能相似。低温冲击韧性、焊接性能较 20Cr 好，冷变形时塑性高，切削加工性良好，淬透性比相应的碳钢要高，热处理时有过热、脱碳敏感性及回火脆性倾向	用于制造截面尺寸小于 50 mm 的渗碳零件，如渗碳的小齿轮、小轴。力学性能要求不高的十字头销、活塞销、柴油机套筒、汽门顶杆、变速齿轮操纵杆、钢套、热轧及正火状态下用于制造螺栓、螺钉、螺帽及铆焊件等
30Mn2	30Mn2 通常经调质处理之后使用，其强度高、韧性好，并具有优良的耐磨性能。当制造截面尺寸小的零件时，具有良好的静强度和疲劳强度。拉丝、冷锻、热处理工艺性都良好，切削加工性中等，焊接性尚可，一般不做焊接件，需焊接时，应将零件预热到 200℃ 以上，具有较高的淬透性，淬火变形小，但有过热、脱碳敏感性及回火脆性	用于制造汽车、拖拉机中的车架、纵横梁、变速箱齿轮、轴、冷锻螺栓、较大截面的调质件，也可制造心部强度较高的渗碳件，如起重机的后车轴等
35Mn2	比 30Mn2 的含碳量高，因而具有更高的强度和更好的耐磨性，淬透性也提高，但塑性略有下降，冷变形时塑性中等，切削加工性能中等、焊接性低，且有白点敏感性、过热倾向及回火脆性倾向，水淬易产生裂纹，一般在调质或正火状态下使用	制造小于直径 20 mm 的较小零件时，可代替 40Cr，用于制造直径小于 15 mm 的各种冷锻螺栓、机械性能要求较高的小轴、轴套、小连杆、操纵杆、曲轴、风机配件、农机中的锄铲柄、锄铲
40Mn2	中碳调质锰钢，其强度、塑性及耐磨性均优于 40 号钢，并具有良好的热处理工艺性及切削加工性，焊接性差，当含碳量在下限时，需要预热至 100~425℃ 才能焊接，存在回火脆性，过热敏感性，水淬易产生裂纹，通常在调质状态下使用	用于制造重载工作的各种机械零件，如曲轴、车轴、轴、半轴、杠杆、连杆、操纵杆、蜗杆、活塞杆、承载的螺栓、螺钉、加固环、弹簧，当制造直径小于 40 mm 的零件时，其静强度及疲劳性能与 40Cr 相近，因而可代替 40Cr 制作小直径的重要零件
45Mn2	中碳调质钢，具有较高的强度、耐磨性及淬透性，调质后能获得良好的综合力学性能，适宜于油淬再高温回火，常在调质状态下使用，需要时也可在正火状态下使用，切削加工性尚可，但焊接性能差，冷变形时塑性低，热处理有过热敏感性和回火脆性倾向，水淬易产生裂纹	用于制造承受高应力和耐磨损的零件，如果制作直径小于 60 mm 的零件，可代替 40Cr 使用，在汽车、拖拉机及通用机械中，常用于制造轴、车轴、万向接头轴、蜗杆、齿轮轴、齿轮、连杆盖、摩擦盘、车厢轴、电车和蒸汽机车轴、重负载机架、冷拉状态中的螺栓和螺帽等
50Mn2	中碳调质高强度锰钢，具有高强度、高弹性及优良的耐磨性，并且淬透性亦较高，切削加工性尚好，冷变形塑性低，焊接性能差，具有过热敏感、白点敏感及回火脆性，水淬易产生裂纹，采用适当的调质处理，可获得良好的综合力学性能，一般在调质后使用，也可在正火及回火后使用	用于制造高应力、高磨损工作的大型零件，如通用机械中的齿轮轴、曲轴、各种轴、连杆、蜗杆、万向接头轴、齿轮等、汽车的传动轴、花键轴，承受强烈冲击负荷的心轴，重型机械中的滚动轴承支撑的主轴、轴及大型齿轮以及用于制造手卷簧、板弹簧等，如果用于制作直径小于 80 mm 的零件，可代替 45Cr 使用

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
27SiMn	27SiMn 的性能高于 30Mn2, 具有较高的强度和耐磨性, 淬透性较高, 冷变形塑性中等, 切削加工性良好, 焊接性能尚可, 热处理时, 钢的韧性降低较少, 水淬时仍能保持较高的韧性, 但有过热敏感性、白点敏感性及回火脆性倾向, 大多在调质后使用, 正火或热轧状态下也可使用	用于制造高韧性、高耐磨的热冲压件、不需热处理或正火状态下使用的零件, 如拖拉机履带销
35SiMn	合金调质钢, 性能良好, 可以代替 40Cr 使用, 还可部分代替 40CrNi 使用, 调质处理后具有高的静强度、疲劳强度和耐磨性以及良好的韧性, 淬透性良好, 冷变形时塑性中等, 切削加工性良好, 但焊接性能差, 焊前应预热, 且有过热敏感性、白点敏感性及回火脆性, 并且稍易脱碳	在调质状态下用于制造中速、中负载的零件, 在淬火回火状态下用于制造高负载、小冲击震动的零件以及制作截面较大、表面淬火的零件, 如汽轮机的主轴和轮毂(直径小于 250 mm, 工作温度小于 400℃)、叶轮(厚度小于 170 mm)以及各种重要紧固件, 通用机械中的传动轴、主轴、心轴、连杆、齿轮、蜗杆、电车轴、发电机轴、曲轴、飞轮及各种锻件, 农机中的锄铲柄、犁铧等耐磨件, 另外还可制作薄壁无缝钢管
42SiMn	性能与 35SiMn 相近, 其强度、耐磨性及淬透性均略高于 35SiMn, 在一定条件下, 此钢的强度、耐磨及热加工性能优于 40Cr, 还可代替 40CrNi 使用	在高频淬火及中温回火状态下, 用于制造中速、中载的齿轮传动件, 在调质后高频淬火、低温回火状态下, 用于制造较大截面的表面高硬度、较高耐磨的零件, 如齿轮、主轴、轴等, 在淬火后低、中温回火状态下, 用于制造中速、重载的零件, 如主轴、齿轮、液压泵转子、滑块等
20MnV	20MnV 性能好, 可以代替 20Cr、20CrNi 使用, 其强度、韧性及塑性均优于 15Cr 和 20Mn2, 淬透性亦好, 切削加工性尚可, 渗碳后, 可以直接淬火、不需要第二次淬火来改善心部组织, 焊接性较好, 但热处理时, 在 300~360℃ 时有回火脆性	用于制造高压容器、锅炉、大型高压管道等的焊接构件(工作温度不超过 450~475℃), 还用于制造冷轧、冷拉、冷冲压加工的零件, 如齿轮、自行车链条、活塞销等, 还广泛用于制造直径小于 20 mm 的矿用链环
20SiMn2MoV	高强度、高韧性低碳淬火新型结构钢, 有较高的淬透性, 油淬变形及裂纹倾向很小, 脱碳倾向低, 锻造工艺性能良好, 焊接性较好, 复杂形状零件焊前应预热至 300℃, 焊后缓冷, 但切削性差, 一般在淬火及低温回火状态下使用	在低温回火状态下可代替调质状态下使用的 35CrMo、35CrNi3MoA、40CrNiMoA 等中碳合金结构钢使用, 用于制造较重载荷、应力状况复杂或低温下长期工作的零件, 如石油机械中的吊卡、吊环、射孔器以及其他较大截面的连接件
25SiMn2MoV	性能与 20SiMn2MoV 基本相同, 但强度和淬硬性稍高于 20SiMn2MoV, 而塑性及韧性又略有降低	用途和 20SiMn2MoV 基本相同, 用该钢制成的石油钻机吊环等零件, 使用性能良好, 较之 35CrNi3Mo 和 40CrNiMo 制作的同类零件更安全可靠, 且质量小, 节省材料

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
37SiMn2MoV	高级调质钢, 具有优良的综合力学性能, 热处理工艺性良好, 淬透性好, 淬裂敏感性小, 回火稳定性高, 回火脆性倾向很小, 高温强度较佳, 低温韧性亦好, 调质处理后能得到高强度和高韧性, 一般在调质状态下使用	调质处理后, 用于制造重载、大截面的重要零件, 如重型机器中的齿轮、轴、连杆、转子、高压无缝钢管等, 石油化工用的高压容器及大螺栓, 制作高温条件下的大螺栓紧固件(工作温度低于450℃), 淬火低温回火后可做为超高强度钢使用, 可代替35CrMo、40CrNiMo使用
20MnTiB	具有良好的力学性能和工艺性能, 正火后切削加工性良好, 热处理后的疲劳强度较高	较多地用于制造汽车拖拉机中尺寸较小、中载的各种齿轮及渗碳零件, 可代替20CrMnTi使用
25MnTiBRE	综合力学性能比20CrMnTi好, 且具有很好的工艺性能及较好的淬透性, 冷热加工性良好, 锻造温度范围大, 正火后切削加工性较好, RE加入后, 低温冲击韧性提高, 缺口敏感性降低, 热处理变形比铬钢稍大, 但可以控制工艺条件予以调整	常用以代替20CrMnTi、20CrMo使用, 用于制造中载的拖拉机齿轮(渗碳), 推土机和中、小汽车变速箱齿轮和轴等渗碳、氰化零件
15MnVB	低碳马氏体淬硬钢, 可完全代替40Cr钢, 经淬火低温回火后, 具有较高的强度, 良好的塑性及低温冲击韧性, 较低的缺口敏感性, 淬透性好, 焊接性能亦佳	采用淬火低温回火, 用以制造高强度的重要螺栓零件, 如汽车上的气缸盖螺栓、半轴螺栓、连杆螺栓, 亦可用于制造中负载的渗碳零件
20MnVB	渗碳钢, 其性能与20CrMnTi及20CrNi相近, 具有高强度、高耐磨性及良好的淬透性, 切削加工性、渗碳及热处理工艺性能均较好, 渗碳后可直接降温淬火, 但淬火变形、脱碳较20CrMnTi稍大, 可代替20CrMnTi、20Cr、20CrNi使用	常用于制造较大载荷的中小渗碳零件, 如重型机床上的轴、大模数齿轮、汽车后桥的主、从动齿轮
40B	硬度、韧性、淬透性都比40钢高, 调质后的综合力学性能良好, 可代替40Cr使用, 一般在调质状态下使用	用于制造比40钢截面大、性能要求高的零件, 如轴、拉杆、齿轮、凸轮、拖拉机曲轴柄等, 制作小截面尺寸零件, 可代替40Cr使用
45B	强度、耐磨性、淬透性都比45钢好, 多在调质状态下使用, 可代替40Cr使用	用于制造截面较大、强度要求较高的零件, 如拖拉机的连杆、曲轴及其它零件, 制造小尺寸、且性能不高的零件, 可代替40Cr使用

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
50B	调质后, 比 50 钢的综合力学性能要高, 淬透性好, 正火时硬度偏低, 切削性尚可, 一般在调质状态下使用, 因抗回火性能较差, 调质时应降低回火温度 50℃ 左右	用于代替 50、50Mn、50Mn2, 制造强度较高、淬透性较高、截面尺寸不大的各种零件, 如凸轮、轴、齿轮、转向拉杆等
40MnB	具有高强度、高硬度, 良好的塑性及韧性, 高温回火后, 低温冲击韧性良好, 调质或淬火低温回火后, 承受动载荷能力有所提高, 淬透性和 40Cr 相近, 回火稳定性比 40Cr 低, 有回火脆性倾向, 冷热加工性良好, 工作温度范围为 -20~425℃, 一般在调质状态下使用	用于制造拖拉机、汽车及其它通用机器设备中的中小重要调质零件, 如汽车半轴、转向轴、花键轴、蜗杆和机床主轴、齿轴等, 可代替 40Cr 制造较大截面的零件, 如卷扬机中轴, 制造小尺寸零件时, 可代替 40CrNi 使用
45MnB	强度、淬透性均高于 40Cr, 塑性和韧性略低, 热加工和切削加工性良好, 加热时晶粒长大、氧化脱碳、热处理变形都小, 在调质状态下使用	用于代替 40Cr、45Cr 和 45Mn2, 制造中、小截面的耐磨的调质件及高频淬火件, 如钻床主轴、拖拉机拐轴、机床齿轮、凸轮、花键轴、曲轴、惰轮、左右分离叉、轴套等
40MnVB	综合性能优于 40Cr, 具有高强度、高韧性和塑性, 淬透性良好, 热处理的过热敏感性较小, 冷拔、切削加工性均好, 一般在调质状态下使用	常用于代替 40Cr、45Cr 及 38CrSi, 制造低温回火、中温回火及高温回火状态的零件, 还可代替 42CrMo、40CrNi 制作重要调质件, 如机床和汽车上的齿轮、轴等
38CrSi	具有高强度、较高的耐磨性及韧性, 淬透性好, 低温冲击韧性较高, 回火稳定性好, 切削加工性尚可, 焊接性差, 一般在淬火回火后使用	一般用于制造直径 30~40 mm, 强度和耐磨性要求较高的各种零件, 如拖拉机、汽车等机器设备中的小模数齿轮、拨叉轴、履带轴、小轴、起重钩、螺栓、进气阀、铆钉机压头等
20CrMn	渗碳钢, 强度、韧性均高, 淬透性良好, 热处理所得到的性能优于 20Cr, 淬火变形小, 低温韧性良好, 切削加工性较好, 但焊接性能低, 一般在渗碳淬火或调质后使用	用于制造重载大截面的调质零件及小截面的渗碳零件, 还可在制造中等负载、冲击较小的中小零件时, 代替 20CrNi 使用, 如齿轮、轴、摩擦轮、蜗杆调速器的套筒等
20CrMnSi	具有较高的强度和韧性, 冷变形加工塑性高, 冲压性能较好, 适于冷拔、冷轧等冷作工艺, 焊接性能较好, 淬透性较低, 回火脆性较大, 一般不用于渗碳或其它热处理, 需要时, 也可在淬火回火后使用	用于制造强度较高的焊接件、韧性较好的受拉力的零件以及厚度小于 16 mm 的薄板冲压件、冷拉零件、冷冲零件, 如矿山设备中的较大截面的链条、链环、螺栓等
30CrMnSi	高强度调质结构钢, 具有很高的强度和韧性, 淬透性较高, 冷变形塑性中等, 切削加工性能良好, 有回火脆性倾向, 横向的冲击韧性差, 焊接性能较好, 但厚度大于 3 mm 时, 先预热到 150℃, 焊后热处理, 一般调质后使用	多用于制造高负载、高速的各种重要零件, 如齿轮、轴、离合器、链轮、砂轮轴、轴套、螺栓、螺母等, 也用于制造耐磨、工作温度不高的零件、变载荷的焊接构件, 如高压鼓风机叶片、阀板以及非腐蚀管道用管

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
35CrMnSi	低合金超高强度钢, 热处理后具有良好的综合性能、高强度, 足够的韧性, 淬透性、焊接性(焊前预热)、加工成形性均较好, 但耐蚀和抗氧化性能低, 使用温度通常不高于200℃, 一般是低温回火或等温淬火后使用	用于制造中速、重载、高强度的零件及高强度构件, 如飞机起落架等高强度零件、高压鼓风机叶片, 在制造中小截面零件时, 可以部分替代相应的铬镍钼合金钢使用
40CrV	调质钢, 具有高强度和高屈服点, 综合性能比40Cr要好, 冷变形塑性和切削性均属中等, 过热敏感性小, 但有回火脆性倾向及白点敏感性, 一般在调质状态下使用	用于制造变载、高负荷的各种重要零件, 如机车连杆、曲轴、推杆、螺旋桨、横梁、轴套支架、双头螺柱、螺钉、不渗碳齿轮、经氮化处理的各各种齿轮和销子、高压锅炉水泵轴(直径小于30 mm)、高压气缸、钢管以及螺帽(工作温度小于420℃, 300大气压)等
50CrVA	合金弹簧钢, 具有良好的综合力学性能和工艺性, 淬透性较好, 回火稳定性良好、疲劳强度高, 工作温度最高可达500℃, 低温冲击韧性良好, 焊接性差, 通常在淬火并中温回火后使用	用于制造工作温度低于210℃的各种弹簧以及其它机械零件, 如内燃机气门弹簧、喷油嘴弹簧、锅炉安全阀弹簧、轿车缓冲弹簧
20CrMnTi	渗碳钢, 也可做为调质钢使用, 淬火低温回火后, 综合力学性能和低温冲击韧性良好, 渗碳后具有良好的耐磨性和抗弯强度, 热处理工艺简单, 热加工和冷加工性较好, 但高温回火时有回火脆性倾向	是应用广泛、用量很大的一种合金结构钢, 用于制造汽车拖拉机中的截面尺寸小于30 mm的中载或重载、冲击耐磨且高速的各种重要零件, 如齿轮轴、齿圈、齿轮、十字轴、滑动轴承支撑的主轴、蜗杆、爪牙离合器, 有时, 还可以代替20SiMnVB、20MnTiB使用
30CrMnTi	主要用做渗碳钢, 有时也可作为调质钢使用, 渗碳及淬火后具有耐磨性好、静强度高的特点, 热处理工艺性好, 渗碳后可直接降温淬火, 且淬火变形很小, 高温回火时有回火脆性	用于制造心部强度特高的渗碳零件, 如齿轮轴、齿轮、蜗杆等, 也可做调质零件, 如汽车、拖拉机上较大截面的主动齿轮等
12CrMo	耐热钢, 具有高的热强度, 且无热脆性, 冷变形塑性及切削性良好, 焊接性能尚可, 一般在正火及高温回火后使用	正火回火后用于制造蒸汽温度510℃的锅炉及汽轮机之主汽管、管壁温度不超过540℃的各种导管、过热器管, 淬火回火后还可制造各种高温弹性零件
15CrMo	耐热钢, 强度优于12CrMo, 韧性稍低, 在500~550℃温度以下, 持久强度较高, 切削性及冷应变塑性良好, 焊接性尚可(焊前预热至300℃, 焊后处理), 一般在正火及高温回火状态下使用	正火及高温回火后用于制造蒸汽温度至510℃的锅炉过热器、中高压蒸汽导管及联箱, 蒸汽温度至510℃的主汽管, 淬火回火后, 可用于制造常温工作的各种重要零件
20CrMo	热强性较高, 在500~520℃时, 热强度仍高, 淬透性较好, 无回火脆性, 冷应变塑性、切削性及焊接均良好, 一般在调质或渗碳淬火状态下使用	用于制造化工设备中非腐蚀介质及工作温度250℃以下、氮氢介质的高压管和各种紧固件, 汽轮机、锅炉中的叶片、隔板、锻件、轧制型材、一般机器中的齿轮、轴等重要渗碳零件, 还可以替代1Cr13钢使用, 制造中压、低压汽轮机处在过热蒸汽区压力级工作叶片

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
30CrMo	具有高强度、高韧性，在低于 500℃ 温度时，具有良好的高温强度，切削性良好，冷弯形塑性中等，淬透性较高，焊接性能良好，一般在调质状态下使用	用于制造 300 大气压，工作温度 400℃ 以下的导管、锅炉、汽轮机中工作温度低于 450℃ 的紧固件，工作温度低于 500℃、高压用的螺母及法兰，通用机械中受载荷大的主轴、轴、齿轮、螺栓、螺柱、操纵轮，化工设备中低于 250℃、氮氢介质中工作的高压导管以及焊接件
35CrMo	高温下具有高的持久强度和蠕变强度，低温韧性较好，工作温度高温可达 500℃，低温可至 -110℃，并具有高的静强度、冲击韧性及较高的疲劳强度，淬透性良好，无过热倾向，淬火变形小，冷变形时塑性尚可，切削性能中等，但有第一类回火脆性，焊接性不好，如果需焊接用时，焊前预热至 150~400℃，焊后处理以消除应力，一般在调质处理后使用，也可在高中频表淬或淬火及低、中温回火后使用	用于制造承受冲击、弯扭、高载荷的各种机器中的重要零件，如轧钢机人字齿轮、曲轴、锤杆、连杆、紧固件，汽轮发动机主轴、车轴，发动机传动零件，大型电动机轴，石油机械中的穿孔器，工作温度低于 400℃ 的锅炉用螺栓，低于 510℃ 的螺母，化工机械中高压无缝壁厚的导管（温度 450~500℃，无腐蚀性介质）等，还可代替 40CrNi 用于制造高载荷传动轴。汽轮发电机转子，大截面齿轮、支承轴（直径小于 500 mm）等
42CrMo	和 35CrMo 的性能相近，由于碳和铬含量增高，因而其强度和淬透性均优于 35CrMo，调质后有较高的疲劳强度和抗多次冲击能力，低温冲击韧性良好，且无明显的回火脆性，一般在调质后使用	一般用于制造比 35CrMo 强度要求更高、断面尺寸较大的重要零件，如轴、齿轮、连杆、变速箱齿轮、增压器齿轮、发动机气缸、弹簧、弹簧夹、1 200~2 000 mm 石油钻杆接头，打捞工具以及代替含镍较高的调质钢使用
20CrMnMo	高强度的高级渗碳钢，强度高于 15CrMnMo，塑性及韧性稍低，淬透性及力学性能比 20CrMnTi 较高，淬火低温回火后具有良好的综合力学性能和低温冲击性能，渗碳淬火后具有较高的抗弯强度和耐磨性能，但磨削时易产生裂纹，焊接性不好，适于电阻焊接，焊前预热，焊后回火处理，切削加工性和热加工性良好	常用于制造高硬度、高强度、高韧性的较大的重要渗碳件（其要求均高于 15CrMnMo），如曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮轴、齿轮、销轴，还可代替 12Cr2Ni4 使用
40CrMnMo	调质处理之后具有良好的综合力学性能，淬透性较好，回火稳定性较高，大多在调质状态下使用	用于制造重载、截面较大的齿轮轴、齿轮、大卡车的后桥半轴、轴、偏心轴、连杆、汽轮机的类似零件，还可代替 40CrNiMo 使用
12CrMoV	耐热钢，具有较高的高温力学性能，冷变形时塑性高，无回火脆性倾向，切削加工性较好，焊接性尚可（壁厚零件应焊前预热焊后处理消除应力），使用温度范围较大，高温达 560℃，低温可至 -40℃，一般在高温正火及高温回火状态下使用	用于制造汽轮机温度 540℃ 的主汽管道，转向导叶环，汽轮机隔板以及温度 ≤ 570℃ 的各种过热器管、导管

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
12Cr1MoV	此钢具有蠕变极限与持久强度数值相近的特点。在持久拉伸时，具有高的塑性，其抗氧化性及热强性均比 12CrMoV 更高，且工艺性与焊接性良好（焊前应预热，焊后处理消除应力），一般在正火及高温回火后使用	用于制造工作温度不超过 570~585℃ 的高压设备中的过热钢管、导管、散热器管及有关锻件
25Cr2MoVA	中碳耐热钢，强度和韧性均高，低于 500℃ 时，高温性能良好，无热脆倾向，淬透性较好，切削性尚可，冷变形塑性中等，焊接性差，一般在调质状态下使用，也可在正火及高温回火后使用	用于制造高温条件下的螺母（≤550℃）、螺栓、螺柱（<530℃），长期工作温度至 510℃ 左右的紧固件，汽轮机整体转子、套筒、主汽阀、调节阀，还可作为氮化钢，用以制作阀杆、齿轮等
38CrMoAl	高级氮化钢，具有很高的氮化性能和力学性能，良好的耐热性和耐蚀性，经氮化处理后，能得到高的表面硬度，高的疲劳强度及良好的抗过热性，无回火脆性，切削性尚可，高温工作温度可达 500℃，但冷弯形时塑性低，焊接性差，淬透性低，一般在调质及氮化后使用	用于制造高疲劳强度、高耐磨性、热处理后尺寸精确、强度较高的各种尺寸不大的氮化零件，如气缸套、座套、底盖、活塞螺栓、检验规、精密磨床主轴、车床主轴、搪杆、精密丝杠和齿轮、蜗杆、高压阀门、阀杆、仿模、滚子、样板、汽轮机的调速器、转动套、固定套、塑料挤压机上的一些耐磨零件
15Cr	低碳合金渗碳钢，较 15 钢，强度和淬透性均有提高，冷弯形塑性高，焊接性良好，退火后切削性较好，对性能要求不高且形状简单的零件，渗碳后可直接淬火，但热处理变形较大，有回火脆性，一般均做为渗碳钢使用	用于制造表面耐磨、心部强度和韧性较高、较高工作速度但断面尺寸在 30 mm 以下的各种渗碳零件，如曲柄销、活塞销、活塞环、联轴器、小凸轮轴、小齿轮、滑阀、活塞、衬套、轴承圈、螺钉、铆钉等，还可以用作淬火钢，制造要求一定强度和韧性，但变形要求较宽的小型零件
20Cr	比 15Cr 和 20 钢的强度和淬透性均有提高，经淬火低温回火后，能得到良好的综合力学性能和低温冲击性能，无回火脆性，渗碳时，钢的晶粒仍有长大的倾向，因而应当二次淬火以提高心部韧性，不宜降温淬火，冷弯形时塑性较高，可进行冷拉丝，高温正火或调质后，切削性良好，焊接性较好（焊前一般应预热至 100~150℃），一般作为渗碳钢使用	用于制造小截面（<30 mm），形状简单、较高转速、载荷较小、表面耐磨、心部强度较高的各种渗碳或氮化零件，如小齿轮、小轴、阀、活塞销、衬套棘轮、托盘、凸轮、蜗杆、爪形离合器等，对热处理变形小、耐磨性高的零件，渗碳后应高频表面淬火，如小模数（<3）齿轮、花键轴、轴等，也可作调质钢用于制造低速、中载（冲击）的零件
30Cr	强度和淬透性均高于 20 钢，冷弯形塑性尚好，退火或高温回火后的切削加工性良好，焊接性中等，一般在调质后使用，也可在正火后使用	用于制造耐磨或受冲击的各种零件，如齿轮、滚子、轴、杠杆、摇杆、连杆、螺栓、螺母等，还可用作高频表面淬火的用钢，制造耐磨、表面高硬度的零件
35Cr	中碳合金调质钢，强度和韧性较高，其强度比 35 钢高，淬透性比 30Cr 略高，性能基本上与 30Cr 相近	用于制造齿轮、轴、滚子、螺栓以及其它重要调质件，用途和 30Cr 基本相同

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
40Cr	经调质处理后,具有良好的综合力学性能、低温冲击性及低的缺口敏感性,淬透性良好,油淬时可得到较高的疲劳强度,水淬时复杂形状的零件易产生裂纹,冷弯形塑性中等,正火或调质后切削加工性好,但焊接性不佳,易产生裂纹,焊前应预热到100~150℃,一般在调质状态下使用,还可以氰化和高频淬火处理	使用最广泛的钢种之一,调质处理后用于制造中速、中载的零件,如机床齿轮、轴、蜗杆、花键轴、顶针套等,调质并表面高频淬火后用于制造表面高硬度、耐磨的零件,如齿轮、轴、主轴、曲轴、心轴、套筒、销子、连杆、螺钉、螺母、进气阀等,经淬火及中温回火后用于制造重载、中速冲击的零件,如油泵转子、滑块、齿轮、主轴、套环等,经淬火及低温回火后用于制造重载、低冲击、耐磨的零件,如蜗杆、主轴、轴、套环等,氰化处理后制造尺寸较大,低温韧性较高的传动零件,如轴、齿轮等,40Cr的代用钢有40MnB、45MnB、35SiMn、42SiMn、40MnVB、42MnV、40MnMoB、40MnWB等
45Cr	强度、耐磨性及淬透性均优于40Cr,但韧性稍低,性能与40Cr相近	与40Cr的用途相似,主要用于制造表面高频淬火的轴、齿轮、套筒、销子等
50Cr	淬透性好,在油淬及回火后,具有高强度、高硬度,水淬易产生裂纹,切削性良好,但冷弯形时塑性低,且焊接性不好,有裂纹倾向,焊前预热到200℃,焊后处理消除应力,一般在淬火及回火或调质状态下使用	用于制造重载、耐磨的零件,如600mm以下的热轧辊、传动轴、齿轮、止推环、支承辊的心轴、柴油机连杆、挺杆、拖拉机离合器、螺栓、重型矿山机械中耐磨、高强度的油膜轴承套、齿轮,也可制作高频表面淬火零件、中等弹性的弹簧等
20CrNi	具有高强度、高韧性、良好的淬透性,经渗碳及淬火后,心部具有韧性,表面硬度很高,切削性尚好,冷变形时塑性中等,焊接性差,焊前应预热到100~150℃,一般经渗碳及淬火回火后使用	用于制造重载大型重要的渗碳零件,如花键轴、对轴、键、齿轮、活塞销,也可用于制造高冲击韧性的调质零件
40CrNi	中碳合金调质钢,具有高强度、高韧性以及高的淬透性,调质状态下,综合力学性能良好,低温冲击性良好,有回火脆性倾向,水淬易产生裂纹,切削加工性良好,但焊接性差,在调质状态下使用	用于制造锻造和冷冲压且截面尺寸较大的重要调质件,如连杆、圆盘、曲轴、齿轮、轴、螺钉等
45CrNi	性能和40CrNi相近,由于含碳量高,因而其强度和淬透性均稍有提高	用于制造各种重要的调质件,和40CrNi用途相近,如制造变速箱曲轴,内燃机曲轴,汽车、拖拉机主轴、连杆、气门及螺栓等

续表 14.4-11

牌 号	特 性	应 用 举 例
12CrNi2	低碳合金渗碳结构钢, 具有高强度、高韧性及高淬透性, 冷加工时塑性中等、低温韧性较好, 切削性和焊接性较好, 热加工时有形成白点的倾向, 回火脆性倾向小	适于制造心部韧性较高, 强度要求不高的受力复杂的中、小渗碳或氰化零件, 如活塞销、轴套、推杆、小轴、小齿轮、齿套等
12CrNi3	高级渗碳钢, 淬火低温回火或高温回火后, 均具有良好的综合力学性能, 低温韧性好, 缺口敏感性小, 切削加工性及焊接性尚好, 但有回火脆性, 白点敏感性较高, 渗碳后均采用二次淬火, 特殊情况还需作冷处理	用于制造表面硬度高、心部力学性能良好、重负荷、冲击、磨损等要求的各种渗碳或氰化零件, 如传动轴、主轴、凸轮轴、心轴、连杆、齿轮、轴套、滑轮、气阀托盘、油泵转子、活塞胀圈、活塞销、万向联轴器十字头、重要螺杆、调节螺钉
30CrNi3	具有极佳的淬透性, 强度和韧性较高, 经淬火低温回火或高温回火后均具有良好的综合力学性能, 切削加工性良好, 但冷变形时塑性低, 焊接性差, 有白点敏感性及回火脆性倾向, 一般均在调质状态下使用	用于制造大型、载荷较高的重要零件或热锻、热冲压的负荷高的零件, 如轴、蜗杆、连杆、曲轴、传动轴、方向轴、前轴、齿轮、键、螺栓、螺母等
37CrNi3	具有高韧性, 淬透性很高, 油淬可把 $\phi 150$ mm的零件完全淬透, 在 450°C 时抗蠕变性稳定, 低温冲击韧性良好, 在 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ 范围内回火时有第二类回火脆性, 热加工时易形成白点, 由于淬透性很好, 必须采用正火及高温回火来降低硬度, 改善切削性, 一般在调质状态下使用	用于制造重载、冲击、截面较大的零件或低温受冲击的零件或热锻、热冲压的零件, 如转子轴、叶轮、重要的紧固件等
12Cr2Ni4	合金渗碳钢, 具有高强度、高韧性, 且淬透性良好, 渗碳淬火后表面硬度和耐磨性很高, 切削加工性尚好, 冷变形时塑性中等, 但有白点敏感性及回火脆性, 焊接性差, 焊前需预热, 一般在渗碳及二次淬火、低温回火后使用	采用渗碳及二次淬火、低温回火后, 用于制造高载荷的大型渗碳件, 如各种齿轮、蜗轮、蜗杆、轴、方向接手叉等, 也可经淬火及低温回火之后使用, 制造高强度, 高韧性的机械构件
20Cr2Ni4	强度、韧性及淬透性均高于12Cr2Ni4, 渗碳后不能直接淬火, 而在淬火前需进行一次高温回火, 以减少表层大量残余奥氏体, 冷变形塑性中等, 切削性尚可, 焊接性差, 焊前应预热到 150°C , 白点敏感性大, 有回火脆性倾向	用于制造要求高于12Cr2Ni4性能的大型渗碳件, 如大型齿轴、轴等, 也可用作强度、韧性均高的调质件
35CrMoV	强度较高, 淬透性良好, 焊接性差, 冷变形时塑性低, 经调质后使用	用于制造高应力下的重要零件, 如 $500\sim 520^{\circ}\text{C}$ 以下工作的汽轮机叶轮、高级涡轮鼓风机和压缩机的转子、盖盘、轴盘、发电机轴、强力发动机的零件

7 弹簧钢 (表 14.4-12)

表 14.4-12 弹簧钢牌号及力学性能 (摘自 GB/T 1222—1984)

牌 号	热 处 理			力 学 性 能 \geq					应 用 举 例
	淬火温度/ ℃	冷却 剂	回火温度/ ℃	σ_s /MPa	σ_b / MPa	δ_5 /%	δ_{10} /%	ψ / %	
65	840	油	500	800	1000	—	9	35	强度高, 塑性及韧性适当, 淬透性低, 制造汽车、机车车辆、拖拉机及一般机械用的板弹簧及螺旋弹簧
70	830	油	480	850	1 050	—	8	30	
85	820	油	480	1 000	1 150	—	8	30	
65Mn	830	油	540	800	1 000	—	8	30	强度高, 淬透性好, 易产生淬火裂纹, 有回火脆性, 制作较大尺寸的扁弹簧、座垫弹簧、弹簧发条、弹簧环、气门簧、冷卷簧
55Si2Mn	870	油	480	1 200	1 300	—	6	30	高温回火可得到良好综合力学性能, 用于制作汽车、拖拉机、机车车辆的板簧、螺旋弹簧, 安全阀及止回阀用弹簧, 工作温度低于 250℃ 的耐热弹簧, 高应力的重要弹簧
55Si2MnB	870	油	480	1 200	1 300	—	6	30	
55SiMnVB	860	油	460	1 250	1 400	—	5	30	
60Si2Mn	870	油	480	1 200	1 300	—	5	25	
60Si2MnA	870	油	440	1 400	1 600	—	5	20	
60Si2CrA	870	油	420	1 600	1 800	6	—	20	
60Si2CrVA	850	油	410	1 700	1 900	6	—	20	综合力学性能好, 强度高, 冲击韧性好, 过热敏感性低, 高温性能较稳定, 制作高负荷、耐冲击的重要弹簧, 工作温度低于 250℃ 的耐热弹簧
55CrMnA	830~860	油	460~510	$\sigma_{0.2}$ 1 100	1 250	9 ¹⁾	—	20	淬透性好, 综合性能好, 制作大尺寸端面较重要的板弹簧、螺旋弹簧
60CrMnA	830~860	油	460~520	$\sigma_{0.2}$ 1 100	1 250	9 ¹⁾	—	20	
60CrMnMoA	—	—	—	—	—	—	—	—	综合性能较佳, 淬透性好, 适于制作车辆中受力大的板簧、大直径螺旋弹簧等
55CrVA	850	油	500	1 150	1 300	10	—	40	综合力学性能较高, 冲击韧性良好, 回火后强度高, 高温性能稳定, 淬透性好, 制作大截面 (50 mm) 高应力螺旋弹簧, 工作温度低于 300℃ 的耐热弹簧
60CrMnBA	830~860	油	460~520	$\sigma_{0.2}$ 1 100	1 250	9 ¹⁾	—	20	与 60CrMnA 性能相似, 适于制作大型弹簧, 如推土机弹簧、扭簧
30W4Cr2VA	1 050~1 100	油	600	1 350	1 500	7	—	40	高强度, 耐热性好, 淬透性高, 540℃ 蒸汽电站用弹簧, 锅炉安全阀用弹簧

注: 1. 除规定热处理温度上下限外, 表中热处理温度允许偏差为: 淬火 $\pm 20^\circ\text{C}$, 回火 $\pm 50^\circ\text{C}$ 。根据需方特殊要求, 回火可按 $\pm 30^\circ\text{C}$ 进行。

2. 30W4Cr2VA 除抗拉强度外, 其他性能结果供参考。

3. 表中性能适于截面尺寸不大于 80 mm 的钢材。大于 80 mm 的钢材, 允许其伸长率、收缩率较表中规定分别降低 1 个单位及 5 个单位。

1) 试样可采用下列试样中的一种: 若按 GB/T 228《金属拉力试验法》作拉伸试验时, 所测 δ 值供参考。

试样一: 标距为 50 mm, 平行长度 60 mm, 直径 14 mm, 肩部半径大于 15 mm。

试样二: 标距为 $4\sqrt{A}$, 平行长度 1.2 倍标距长度, 肩部半径大于 15 mm。

8 高耐候性结构钢 (表 14.4-13)

表 14.4-13 高耐候性结构钢牌号及力学性能 (摘自 GB/T 4171—1984)

牌 号	交货状态	厚度/mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	180°冷弯试验	
						d —弯心直径	a —钢材厚度
09CuPCrNi—A	热轧	≤ 6	350	490	22	$d = a$	
		> 6				$d = 2a$	
09CuPCrNi—B		≤ 6	300	440	24	$d = a$	
		> 6				$d = 2a$	
09CuP		≤ 6	300	420	24	$d = a$	
		> 6				$d = 2a$	
09CuPCrNi—A	冷轧	≤ 2.5	320	460	26	$d = a$	
09CuPCrNi—B			270	410	27		
09CuP							

注: 1. 耐候钢即耐大气腐蚀钢, 高耐候钢是在钢中加入少量的合金元素, 如 Cu、P、Cr 和 Ni、Mo、Nb、Ti、V 等, 使其在金属基体表面上形成保护层, 以提高钢材的耐候性能, 这类钢的耐候性能比焊接结构用耐候钢好, 所以称为高耐候性结构钢, GB/T 4171—1984《高耐候性结构钢》适用于车辆、建筑、塔架和其他结构用的高耐候性低合金结构钢, 包括热轧、冷轧的钢板和型钢, 一般在交货状态下使用, 可制做螺栓连接、铆接和焊接的结构件。作为焊接结构用钢的厚度, 应限制在不大于 16 mm 范围内; 钢板及型钢的尺寸规格应符合有关标准规定。

2. 钢材以热轧或热轧后退火和冷拔状态交货; 冷轧钢板应退火后交货。
3. 厚度大于 16 mm 的钢材, 其力学性能按供需双方协议规定。
4. 供需双方协议, 热轧板可酸洗后交货。

9 焊接结构用耐候钢 (表 14.4-14)

表 14.4-14 焊接结构用耐候钢牌号及力学性能 (摘自 GB/T 4172—1984)

牌 号	钢材厚度/mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	180°冷弯试验 d —弯心直径 a —钢材厚度	V 型冲击试验					交货状态
						等级	钢材厚度/mm	试样方向	温度/℃	平均冲击功/J \geq	
16CuCr	≤ 16	250	410	22	$d = a$	A	12~50	纵向	—	—	热轧 或正火
	$> 16 \sim 40$	240		24	$d = 2a$	B			0	28	
	> 40	220	390	22		C			-20	28	
12MnCuCr	≤ 16	300	430	22	$d = 2a$	A			—	—	
	$> 16 \sim 40$	290		24	$d = 3a$	B			0	28	
	> 40	270	420	22		C			-20	28	

续表 14.4-14

牌 号	钢材厚度/ mm	σ_s / MPa \geq	σ_b / MPa \geq	δ_5 / % \geq	180°冷弯试验 d —弯心直径 a —钢材厚度	V型冲击试验					交货状态
						等级	钢材 厚度/ mm	试样 方向	温度/ ℃	平均冲 击功/ J \geq	
15MnCuCr	≤ 16	350	500	20	$d = 2a$	A	12~50	纵向	—	—	热轧 或正火
	$> 16 \sim 40$	340		22	$d = 3a$	B			0	28	
	> 40	320	480	20		C			-20	28	
15MnCuCr - QT	≤ 16	450	550~700	20	$d = 2a$			-20	32	淬火 加回火	
	$> 16 \sim 40$	440		22	$d = 3a$						
	> 40	420		20							

- 注：1. 经供需双方协议，小于 12 mm 的钢材可作 V 型冲击试验，其指标另外规定。
 2. 冲击试验结果按 3 个试样的平均值计算，单个值不应小于规定最小平均值的 70%。
 3. 提供厚度大于 50 mm 的钢材，其力学性能由供需双方协议规定。
 4. 钢板尺寸应符合 GB/T 709 热轧厚钢板规定；型钢尺寸规格应符合有关标准规定。适用于桥梁建筑及其它结构件之用。

10 易切削结构钢 (表 14.4-15)

表 14.4-15 易切削结构钢牌号、力学性能及应用举例 (摘自 GB/T 8731—1988)

牌 号	冷 拉 钢 材					热 轧 钢 材				应 用 举 例
	σ_b /MPa			δ_5 / % \geq	HBS	σ_b / MPa	δ_5 / % \geq	ψ / % \geq	HBS \leq	
	钢材尺寸/mm									
	8~20	>20~30	>30							
Y12	530~755	510~735	490~685	7.0	152~217	390~540	22	36	170	用于制造双头螺柱、螺 栓、螺钉、螺母等标准件
Y12Pb	530~755	510~735	490~685	7.0	152~217	390~540	22	36	170	
Y15	530~755	510~735	490~685	7.0	152~217	390~540	22	36	170	切削性优于 Y12，加工 效率比 Y12 高 30% 以上， 用于制造螺柱、螺栓、螺 钉、螺母等
Y15Pb	530~755	510~735	490~685	7.0	152~217	390~540	22	36	170	
Y20	570~785	530~745	510~705	7.0	167~217	450~600	20	30	175	用于制造形状较复杂， 加工不易的零件，如纺织 机及计算机中的一些零件
Y30	600~825	560~765	540~735	6.0	174~223	510~655	15	25	187	
Y35	625~845	590~785	570~765	6.0	176~229	510~655	14	22	187	
Y45Ca	695~920	655~855	635~835	6.0	196~255	690~745	12	26	241	用于用途与 Y20、Y30 相近，但力学性能要求较 高的零件
Y40Mn	590~785	590~785	590~785	17	179~229	590~735	14	20	207	

- 注：1. Y40Mn 以热轧或冷拉后高温回火状态交货，其他钢号以热轧或冷拉状态交货。
 2. 直径小于 8 mm 的钢丝，其力学性能指标由供需双方协定。

11 耐热钢 (表 14.4-16~21)

表 14.4-16 奥氏体型、铁素体型耐热钢牌号、热处理制度及力学性能 (摘自 GB/T 1221—1992)

类型	牌 号	热 处 理	拉 伸 试 验				硬 度 试 验
			$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\psi/$ %	HBS
			≥				
奥 氏 体 型	5Cr21Mn9Ni4N	固溶 1 100 ~ 1 200℃ 快冷, 时效 730 ~ 780℃ 空冷	560	885	8	—	≥302
	2Cr21Ni12N	固溶 1 050 ~ 1 150℃ 快冷, 时效 750 ~ 800℃ 空冷	430	820	26	20	≤269
	2Cr23Ni13	固溶 1 030 ~ 1 150℃ 快冷	205	560	45	50	≤201
	2Cr25Ni20	固溶 1 030 ~ 1 180℃ 快冷	205	590	40	50	≤201
	1Cr16Ni35	固溶 1 030 ~ 1 180℃ 快冷	205	560	40	50	≤201
	0Cr15Ni25Ti2- MoAlVB	固溶 885 ~ 915℃ 或 965 ~ 995℃ 快冷 时效 700 ~ 760℃, 16 h 空冷或缓冷	590	900	15	18	≥248
	0Cr18Ni9	固溶 1 010 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	60	≤187
	0Cr23Ni13	固溶 1 030 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	60	≤187
	0Cr25Ni20	固溶 1 030 ~ 1 180℃ 快冷	205	520	40	50	≤187
	0Cr17Ni12Mo2	固溶 1 010 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	60	≤187
	4Cr14Ni14W2Mo	退火 820 ~ 850℃ 快冷	315	705	20	35	≤248
	3Cr18Mn12Si2N	固溶 1 100 ~ 1 150℃ 快冷	390	680	35	45	≤248
	2Cr20Mn9Ni2S2N	固溶 1 100 ~ 1 150℃ 快冷	390	635	35	45	≤248
	0Cr19Ni13Mo3	固溶 1 010 ~ 1 150℃ 快冷	205	540	40	60	≤187
	1Cr18Ni9Ti	固溶 920 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	50	≤187
	0Cr18Ni10Ti	固溶 920 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	50	≤187
	0Cr18Ni11Nb	固溶 980 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	50	≤187
	0Cr18Ni13Si4	固溶 1 010 ~ 1 150℃ 快冷	205	520	40	60	≤207
1Cr20Ni14Si2	固溶 1 080 ~ 1 130℃ 快冷	295	590	35	50	≤187	
1Cr25Ni20Si2	固溶 1 080 ~ 1 130℃ 快冷	295	590	35	50	≤187	
铁 素 体 型	2Cr25N	退火 780 ~ 880℃ 快冷	275	510	20	40	≤201
	0Cr13Al	退火 780 ~ 830℃ 空冷或缓冷	177	410	20	60	≥183
	00Cr12	退火 700 ~ 820℃ 空冷或缓冷	196	365	22	60	≥183
	1Cr17	退火 780 ~ 850℃ 空冷或缓冷	205	450	22	50	≥183

注: 1. 对于 1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni10Ti 和 0Cr18Ni11Nb 根据需方要求可进行稳定化处理, 此时的热处理温度为 850 ~ 930℃。

2. 1Cr18Ni9Ti 与 0Cr18Ni10Ti 牌号, 其力学性能指标一致, 需方可根据耐腐蚀性的差别进行选用。

表 14.4-17 马氏体型耐热钢牌号、热处理制度及其力学性能 (摘自 GB/T 1221—1992)

类型	牌 号	热处理			退火后 硬度 HB ≤	经淬回火的力学性能					
		退火	淬火	回火		拉伸试验				冲击 试验 A _K / J	硬度试验 HBS
						σ _{0.2} / MPa	σ _b / MPa	δ ₅ / %	ψ/ %		
						≥					
马 氏 体 型	1Cr5Mo	—	900~950℃ 油冷	600~700℃ 空冷	200	390	590	18	—	—	—
	4Cr9Si2	—	1 020~1 040℃ 油冷	700~780℃ 油冷	269	590	885	19	50	—	—
	4Cr10Si2Mo	—	1 010~1 040℃ 油冷	120~160℃ 空冷	269	685	885	10	35	—	—
	8Cr20Si2Ni	800~900℃ 缓冷或约 720℃空冷	1 030~1 080℃ 油冷	700~800℃ 快冷	321	685	885	10	15	8	≥262
	1Cr11MoV	—	1 050~1 100℃ 空冷	720~740℃ 空冷	200	490	685	16	55	47	—
	1Cr12Mo	800~900℃ 缓冷或约 750℃快冷	950~1 000℃ 油冷	700~750℃ 快冷	255	650	685	18	60	78	217~248
	2Cr12Mo- VNbN	850~950℃ 缓冷	1 100~1 170℃ 油冷或空冷	600℃以上 空冷	269	685	835	15	30	—	≤321
	1Cr12WMoV	—	1 000~1 050℃ 油冷	680~700℃ 空冷	—	585	735	15	45	47	—
	2Cr12NiMo- WV	830~900℃ 缓冷	1 020~1 070℃ 油冷或空冷	600℃以上 空冷	269	735	885	10	25	—	≤341
	1Cr13	800~900℃ 缓冷或约 750℃快冷	950~1 000℃ 油冷	700~750℃ 快冷	200	345	540	25	55	78	≥150
	1Cr13Mo	830~900℃ 缓冷或约 750℃快冷	970~1 020℃ 油冷	650~750℃ 快冷	200	490	685	20	60	78	≥192
	2Cr13	800~900℃ 缓冷或约 750℃快冷	920~980℃ 油冷	600~750℃ 快冷	223	440	635	20	50	63	≥192
	1Cr17Ni12	—	950~1 050℃ 油冷	275~350℃ 空冷	285	—	1 080	10	—	39	—
1Cr11Ni2- W2MoV	—	1组 1 000~ 1 020℃正火 油冷或空冷 2组 1 000~ 1 020℃正火 油冷或空冷	660~710℃ 油冷或空冷 540~600℃ 油冷或空冷	269	735 885	885 1 080	15 12	55 50	71 55	269~321 311~388	

表 14.4-18 沉淀硬化型耐热钢的热处理制度及力学性能 (摘自 GB/T 1221—1992)

类型	牌 号	热 处 理		拉伸试验 \geq				硬度试验	
		种 类	条 件	$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\psi/$ %	HBS	HRC HV
沉淀硬化型	0Cr17Ni-14Cu4Nb	固溶	1 020~1 060℃快冷	—	—	—	—	≤ 363	≤ 38
		480℃时效	经固溶处理后,470~490℃空冷	1 180	1 310	10	40	≥ 375	≥ 40
		550℃时效	经固溶处理后,540~560℃空冷	1 000	1 060	12	45	≥ 331	≥ 35
		580℃时效	经固溶处理后,570~590℃空冷	865	1 000	13	45	≥ 302	≥ 31
		620℃时效	经固溶处理后,610~630℃空冷	725	930	16	50	≥ 277	≥ 28
	0Cr17-Ni7Al	固溶	1 000~1 100℃快冷	380	1 030	20	—	≤ 229	—
		565℃时效	经固溶处理后,(760±15)℃保持 90 min,在 1 h 冷却到 15℃以下,保持 30 min,再加热到(565±10)℃保持 70 min,空冷	960	1 140	5	25	≥ 363	—
		510℃时效	经固溶处理后,(955±10)℃保持 10 min,空冷到室温,在 24 h 内冷却到(-73±6)℃保持 8 h,再加热到(510±10)℃,保持 60 min 后空冷	1 030	1 230	4	10	≥ 388	—

表 14.4-19 耐热钢的高温力学性能

牌号	材料状态	试验温度/℃	热 处 理	高温短时间力学性能						高温长时间力学性能						
				$\sigma_b/$ MPa	$\sigma_s/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\psi/$ %	$a_K/$ kJ·m ⁻²	HBS \leq	蠕变强度 $\sigma_t/$ MPa			持久强度 $\sigma_b/$ MPa			
				10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ³	10 ⁴	10 ⁵							
1Cr13	调质	20	1 030~1 050℃淬油,750℃回火	610	410	22	60	1 100	—	—	—	—	—	—	—	—
		20	1 030~1 050℃淬油,680~700℃回火空冷	711	583	21.7	67.9	1 530	—	—	—	—	—	—	—	—
		100	—	680	520	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		200	—	640	490	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		200	1 030~1 050℃淬油,750℃回火	540	370	16	60	—	—	—	—	—	—	—	—	
		300	—	600	480	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		300	1 030~1 050℃淬油,680~700℃回火空冷	657	564	14.1	66	1 890	—	—	—	—	—	—	—	
		400	—	560	430	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
400	1 030~1 050℃淬油,750℃回火	500	370	16.5	58	2 000	—	—	123	—	—	—	—			

续表 14.4-19

牌号	材料状态	试验温度/ ℃	热 处 理	高温短时间力学性能						高温长时间力学性能					
				σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ_5 / %	ψ / %	a_K / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HBS \leq	蠕变强度 σ_1 /MPa			持久强度 σ_b /MPa		
										10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5
1Cr13	调质	430	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 750℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	300	210	—
		450	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 750℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	105	—	—	—
		470	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 750℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	300	260	220
		500	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 750℃ 回火	370	280	18	64	2 400	—	—	95	57	270	220	190
		500	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 680 ~ 700℃ 回火空冷	534	453	17.3	69.5	1 930	—	—	—	—	—	—	—
		500	—	420	300	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		530	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 750℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	230	190	160
		550	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 680 ~ 700℃ 回火空冷	455	428	19.8	73.3	—	—	—	—	—	—	—	—
		600	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 750℃ 回火	230	180	18	70	2 250	—	—	—	—	—	—	—
		600	1 030 ~ 1 050℃ 淬油, 680 ~ 700℃ 回火空冷	330	320	27.3	85.2	1 950	—	—	—	—	—	—	—
		700	—	100	70	63	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		800	—	40	10	66	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1Cr5Mo	退火	30	860℃ 炉冷	470	180	39	80	—	163	—	—	—	—	—	—
		400	860℃ 炉冷	365	145	3	77	—	163	—	—	—	—	—	—
		450	860℃ 炉冷	—	—	—	—	—	—	—	120	—	—	—	—
		480	860℃ 炉冷	335	140	28	77	—	163	—	106	81	—	—	—
		500	860℃ 炉冷	—	—	—	—	—	—	—	90~100	80	—	140	114
		540	860℃ 炉冷	310	120	28	74	—	163	—	71	53	—	—	—
		550	860℃ 炉冷	—	—	—	—	—	—	—	—	—	45	—	92	71

续表 14.4-19

牌号	材料状态	试验温度/ ℃	热 处 理	高温短时间力学性能						高温长时间力学性能						
				σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ_5 / %	ϕ / %	a_b / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HBS ≤	蠕变强度 σ_t /MPa			持久强度 σ_L /MPa			
				10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ³	10 ⁴	10 ⁵							
1Cr5Mo	退火	550	860℃ 炉冷	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	50~40	
		575	860℃ 炉冷	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	74	57	
		590	860℃ 炉冷	240	105	38	87	—	163	—	—	—	—	—	—	—
		600	860℃ 炉冷	—	—	—	—	—	—	—	40	20	—	50	45	
		650	860℃ 炉冷	180	75	46	91	—	163	—	21	12	—	—	20	
		705	860℃ 炉冷	135	70	65	95	—	163	—	13	6	—	—	10	
		760	860℃ 炉冷	90	50	65	96	—	163	—	—	—	—	—	—	
1Cr5Mo	正火、 回火	25	900℃ 空冷, 540℃ 回火, 6 h	1 270	1 205	17	61	—	353	—	—	—	—	—	—	
		315	900℃ 空冷, 540℃ 回火, 6 h	1 345	1 045	13	51.5	—	—	—	—	—	—	—	—	
		425	900℃ 空冷, 540℃ 回火, 6 h	1 250	990	14	55.4	—	—	—	—	—	—	—	—	
		500	1 000℃ 空冷, 700℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	228	190	
		525	1 000℃ 空冷, 700℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	168	128	
		540	900℃ 空冷, 540℃ 回火, 6 h	905	790	13.5	52.5	—	—	—	—	—	—	—	—	
		550	1 000℃ 空冷, 700℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	120	88	
		575	1 000℃ 空冷, 700℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	92	68	
		600	1 000℃ 空冷, 700℃ 回火	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	53	
1Cr5Mo	调质	25	900℃ 淬油, 540℃ 回火, 6 h	1 235	1 190	17	64.5	—	341	—	—	—	—	—	—	
		315	900℃ 淬油, 540℃ 回火, 6 h	1 170	935	15	55.5	—	—	—	—	—	—	—		
		425	900℃ 淬油, 540℃ 回火, 6 h	1 090	900	16.5	60	—	—	—	—	—	—	—		
		540	900℃ 淬油, 540℃ 回火, 6 h	820	690	16.5	62	—	—	—	—	—	—	—		

续表 14.4-19

牌号	材料状态	试验温度/ ℃	热 处 理	高温短时间力学性能						高温长时间力学性能					
				σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ_5 / %	ψ / %	a_K / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HBS \leq	蠕变强度 σ_t /MPa			持久强度 σ_h /MPa		
				10^2	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5						
4Cr9Si2	调质	800	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火油冷	80	50	22	92	—	—	—	—	—	—	—	—
		1 000	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火油冷	60	30	26	87	—	—	—	—	—	—	—	—
4Cr10-Si2Mo	调质	20	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	960	680	19	40.5	300	—	—	—	—	—	—	—
		100	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	861	580	13.5	25.5	—	—	—	—	—	—	—	—
		200	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	83.5	520	17.5	39	700	—	—	—	—	—	—	—
		300	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	850	530	14.5	35.5	830	—	—	—	—	—	—	—
		400	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	780	490	13	24	870	—	—	—	—	—	—	—
		500	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	680	465	21	41	890	—	—	200	130	300	220	160
		550	—	—	—	—	—	—	—	110	100	40	170	130	90
		600	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	440	375	30	70.5	—	—	—	50	20	—	—	—
		700	1 100℃ 淬油, 800℃ 回火水冷	225	205	41	91.5	1 150	—	—	—	—	—	—	—
1Cr18-Ni9Ti	固溶或固溶、时效	20	1 050℃ 淬水或淬空气	620	280	41	63	—	—	—	—	—	—	—	
		20	1 050~1 100 空冷 ①	577	244	69.7	79.6	2 800	—	—	—	—	—	—	
		20	1 130~1 160℃ 淬水, 800℃ 时效 10 h 或 700℃ 时效 20 h	655	310	55	75.5	2 500	—	—	—	—	—	—	
1Cr18-Ni9Ti	固溶或固溶、时效	200	1 130~1 160℃ 淬水, 800℃ 时效 10 h 或 700℃ 时效 20 h	465	205	38	70	3 700	—	—	—	—	—	—	
		300	1 130~1 160℃ 淬水, 800℃ 时效 10 h 或 700℃ 时效 20 h	460	220	29	66	3 350	—	—	—	—	—	—	
		300	1 050℃ 淬水或淬空气	460	200	31	65	—	—	—	—	—	—	—	
		400	1 050℃ 淬水或淬空气	450	180	31	65	—	—	—	—	—	—	—	

续表 14.4-19

牌号	材料状态	试验温度/ ℃	热 处 理	高温短时间力学性能						高温长时间力学性能					
				σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ_5 / %	ψ / %	a_k / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HBS ≤	蠕变强度 σ_1 /MPa			持久强度 σ_h /MPa		
										10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5
4Cr14Ni- 14W2Mo	固溶 并时效	550	1 175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h, 700℃ 时 效 1 000 h	550	275	18	43	—	—	—	—	—	—	—	—
				600	1 175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h	501	256	15.6	26.3	670	—	—	180	80	220	180	150
		600	1175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h { 550℃ 时效 1 000 h 600℃ 时效 1 000 h 700℃ 时效 1 000 h	570	270	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		600		570	315	21	19	—	—	—	—	—	—	—	
		600		490	260	20	46	—	—	—	—	—	—	—	
		650	1 175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h	448	241	12.6	24.9	750	—	175	80	40	170	130	100
		650	1175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h { 550℃ 时效 1 000 h 600℃ 时效 1 000 h 700℃ 时效 1 000 h	550	270	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		650		485	300	18.5	24	—	—	—	—	—	—	—	
		650		480	275	20	43	—	—	—	—	—	—	—	
		700	1 175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h	345	223	10.5	22	790	—	90	37	16	78	23	—
		700	1175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h { 550℃ 时效 1 000 h 600℃ 时效 1 000 h 700℃ 时效 1 000 h	410	250	26.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		700		410	285	25	30	—	—	—	—	—	—	—	
		700		400	260	17	39	—	—	—	—	—	—	—	
		750	1 175℃ 淬水, 750℃ 时效 5 h	288	201	8.8	17.5	830	—	—	—	—	—	—	—

注: 本表数据供参考之用。

① 管材 $\phi 219 \times 12$ mm

表 14.4-21 耐热钢的特性及用途 (摘自 GB/T 1221—1992)

牌 号	特 性 和 用 途
5Cr21Mn9Ni4N	以经受高温强度为主的汽油及柴油机用排气阀
2Cr21Ni12N	以抗氧化为主的汽油及柴油机用排气阀
2Cr23Ni13	承受 980℃ 以下反复加热的抗氧化钢。加热炉部件、重油燃烧器
2Cr25Ni20	承受 1 035℃ 以下反复加热的抗氧化钢。炉用部件、喷嘴、燃烧室
1Cr16Ni35	抗渗碳、氮化性大的钢种，1 035℃ 以下反复加热。炉用钢料、石油裂解装置
0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	耐 700℃ 高温的汽轮机转子、螺栓、叶片、轴
0Cr18Ni9	通用耐氧化钢，可承受 870℃ 以下反复加热
0Cr23Ni13	比 0Cr18Ni9 抗氧化性好，可承受 980℃ 以下反复加热。炉用材料
0Cr25Ni20	比 0Cr23Ni13 抗氧化性好，可承受 1 035℃ 加热。炉用材料、汽车净化装置用材料
0Cr17Ni12Mo2	高温具有优良的蠕变强度，作热交换用部件、高温耐蚀螺栓
4Cr14Ni14W2Mo	有较高的热强性，用于内燃机重负荷排气阀
3Cr18Mn12Si2N	有较高的高温强度和一定的抗氧化性，并且有较好的抗硫及抗增碳性。用于吊挂支架，渗碳炉构件、加热炉传送带、料盘、炉爪
2Cr20Mn9Ni2N	特性和用途同 3Cr18Mn12Si2N，还可用作盐浴塔坩和加热炉管道等
0Cr19Ni13Mo3	高温具有良好的蠕变强度，作热交换用部件
1Cr18Ni9Ti	有良好的耐热性及耐腐蚀性，作加热炉管、燃烧室筒体、退火炉罩
0Cr18Ni10Ti	在 400~900℃ 腐蚀条件下使用的部件，高温用焊接结构部件
0Cr18Ni11Nb	在 400~900℃ 腐蚀条件下使用的部件，高温用焊接结构部件
0Cr18Ni13Si4	具有与 0Cr25Ni20 相当的抗氧化性，汽车排气净化装置用材料
1Cr20Ni14Si2 1Cr25Ni20Si2	具有较高的高温强度及抗氧化性，对含硫气氛较敏感，在 600~800℃ 有析出相的脆化倾向，适于制作承受应力的各种炉用构件
2Cr25N	耐高温腐蚀性强，1 082℃ 以下不产生易剥落的氧化皮，用于燃烧室
0Cr13Al	由于冷却硬化少，作燃气透平压缩机叶片、退火箱、淬火台架
00Cr12	耐高温氧化，作要求焊接的部件，汽车排气阀净化装置、锅炉燃烧室、喷嘴
1Cr17	在 900℃ 以下耐氧化部件，散热器，炉用部件、油喷嘴
1Cr5Mo	能抗石油裂化过程中产生的腐蚀。作再热蒸汽管、石油裂解管、锅炉吊架、汽轮机气缸衬套、泵的零件、阀、活塞杆、高压加氢设备部件、紧固件
4Cr9Si2	有较高的热强性，作内燃机进气阀，轻负荷发动机的排气阀

续表 14.4-21

牌 号	特 性 和 用 途
4Cr10Si2Mo	有较高的热强性, 作内燃机进气阀, 轻负荷发动机的排气阀
8Cr20Si2Ni	作耐磨性为主的吸气、排气阀、阀座
1Cr11MoV	有较高的热强性, 良好的减振性及组织稳定性。用于透平叶片及导向叶片
1Cr12Mo	作汽轮机叶片
2Cr12MoVNbN	作汽轮机叶片、盘、叶轮轴、螺栓
1Cr12WMoV	有较高的热强性, 良好的减振性及组织稳定性。用于透平叶片、紧固件、转子及轮盘
2Cr12NiMoWV	作高温结构部件, 汽轮机叶片、盘叶轮轴、螺栓
1Cr13	作 800℃ 以下耐氧化用部件
1Cr13Mo	作汽轮机叶片、高温、高压蒸汽用机械部件
2Cr13	淬火状态下硬度高, 耐腐蚀性良好。汽轮机叶片
1Cr17Ni2	作具有较高程度的耐硝酸及有机酸腐蚀的零件、容器和设备
1Cr11Ni2W2MoV	具有良好韧性和抗氧化性能, 在淡水和湿空气中有较好的耐蚀性
0Cr17Ni4Cu4Nb	作燃气透平压缩机叶片、燃气透平发动机绝缘材料
0Cr17Ni7Al	作高温弹簧、膜片、固定器、波纹管

12 不锈钢 (表 14.4-22~31)

表 14.4-22 不锈钢奥氏体型、奥氏体-铁素体型、铁素体型钢牌号、
热处理制度及其力学性能 (摘自 GB/T 1220—1992)

类型	牌 号	热 处 理	拉 伸 试 验 \geq				冲 击 试 验	硬 度 试 验 \leq		
			$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$\delta_5/$ %	$\psi/$ %	$A_K/$ J	HBS	HRB	HV
奥 氏 体 型	1Cr17Mn6Ni5N	固溶 1 010~1 120℃ 快冷	275	520	40	45	—	241	100	253
	1Cr18Mn8Ni5N	固溶 1 010~1 120℃ 快冷	275	520	40	45		207	95	218
	1Cr18Mn10Ni5Mo3N	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	345	685	45	65		—	—	—
	1Cr17Ni7	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60		187	90	200
	1Cr18Ni9	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60		187	90	200
	Y1Cr18Ni9	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	50		187	90	200
	Y1Cr18Ni9Se	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	50		187	90	200
	0Cr18Ni9	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60		187	90	200
	00Cr19Ni10	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	177	480	40	60		187	90	200
	0Cr19Ni9N	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	275	550	35	50		217	95	220
	0Cr19Ni10NbN	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	345	685	35	50		250	100	260
	00Cr18Ni10N	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	245	550	40	50		217	95	220

续表 14.4-22

类型	牌 号	热 处 理	拉伸试验 \geq				冲击试验 A_K / J	硬度试验 \leq		
			$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ_5 / %	ψ / %		HBS	HRB	HV
奥氏体 型	1Cr18Ni12	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	177	480	40	60	—	187	90	200
	0Cr23Ni13	固溶 1 030~1 150℃ 快冷	205	520	40	60	—	187	90	200
	0Cr25Ni20	固溶 1 030~1 180℃ 快冷	205	520	40	50	—	187	90	200
	0Cr17Ni12Mo2	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60	—	187	90	200
	1Cr18Ni12Mo2Ti	固溶 1 000~1 100℃ 快冷	205	530	40	55	—	187	90	200
	0Cr18Ni2Mo2Ti	固溶 1 000~1 100℃ 快冷	205	530	40	55	—	187	90	200
	00Cr17Ni14Mo2	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	177	480	40	60	—	187	90	200
	0Cr17Ni12Mo2N	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	275	550	35	50	—	217	95	220
	00Cr17Ni13Mo2N	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	245	550	40	50	—	217	95	220
	0Cr18Ni12Mo2Cu2	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60	—	187	90	200
	00Cr18Ni14Mo2Cu2	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	177	400	40	60	—	187	90	200
	0Cr19Ni13Mo3	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60	—	187	90	200
	奥氏体 型	00Cr19Ni13Mo3	固溶 1 010~1 150℃ 快冷	177	480	40	60	—	187	90	200
1Cr18Ni12Mo3Ti		固溶 1 000~1 100℃ 快冷	205	530	40	55	—	187	90	200
0Cr18Ni12Mo3Ti		固溶 1 000~1 100℃ 快冷	205	530	40	55	—	187	90	200
0Cr18Ni16Mo5		固溶 1 030~1 180℃ 快冷	177	480	40	45	—	187	90	200
1Cr18Ni9Ti		固溶 920~1 150℃ 快冷	205	520	40	50	—	187	90	200
0Cr18Ni10Ti		固溶 920~1 150℃ 快冷	205	520	40	50	—	187	90	200
0Cr18Ni11Nb		固溶 980~1 150℃ 快冷	205	520	40	50	—	187	90	200
0Cr18Ni9Cu3		固溶 1 010~1 150℃ 快冷	177	480	40	60	—	187	90	200
0Cr18Ni13Si4		固溶 1 010~1 150℃ 快冷	205	520	40	60	—	207	95	218
奥氏体、 铁素体 型	0Cr26Ni5Mo2	固溶 950~1 100℃ 快冷	390	590	18	40	—	277	29	292
	1Cr18Ni11Si4AlTi	固溶 930~1 050℃ 快冷	440	715	25	40	63	—	—	—
	00Cr18Ni5Mo3Si2	固溶 920~1 150℃ 快冷	390	590	20	40	—	—	30	300
铁素 体 型	0Cr13Al	退火 780~830℃ 空冷或缓冷	177	410	20	60	78	183	—	—
	00Cr12	退火 700~820℃ 空冷或缓冷	196	265	22	60	—	183	—	—
	1Cr17	退火 780~850℃ 空冷或缓冷	205	450	22	50	—	183	—	—
	Y1Cr17	退火 680~820℃ 空冷或缓冷	205	450	22	50	—	183	—	—
	1Cr17Mo	退火 780~850℃ 空冷或缓冷	205	450	22	60	—	183	—	—
	00Cr30Mo2	退火 900~1 050℃ 快冷	295	450	20	45	—	228	—	—
	00Cr27Mo	退火 900~1 050℃ 快冷	245	410	20	45	—	219	—	—

注：1. 对于 0Cr18Ni10Ti、0Cr18Ni11Nb、1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni12Mo2Ti、0Cr18Ni12Mo3Ti 和 1Cr18Ni12Mo3Ti 根据需方要求可进行稳定化处理此时的热处理温度为 850~930℃，但必须在合同中注明。

2. 1Cr18Ni9Ti 与 0Cr18Ni10Ti、1Cr18Ni2Mo2Ti 与 0Cr18Ni12Mo2Ti、1Cr18Ni12Mo3Ti 与 0Cr18Ni12Mo3Ti 牌号，力学性能指标一致，需方可根据耐腐蚀性能的差别来选用。

表 14.4-24 不锈钢沉淀硬化型钢牌号、热处理制度及其力学性能 (摘自 GB/T 1220—1992)

类型	牌 号	热 处 理		拉 伸 试 验				硬 度 试 验	
		种 类	条 件	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ_5 / %	ψ / %	HBS	HRC
沉淀硬化型	0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶	1 020~1 060℃快冷	—	—	—	—	≤363	≤38
		480℃时效	经固溶处理后, 470~490℃空冷	≥1 180	≥1 310	≥10	≥40	≥375	≥40
		550℃时效	经固溶处理后, 540~560℃空冷	≥1 000	≥1 060	≥12	≥45	≥331	≥35
		580℃时效	经固溶处理后, 570~590℃空冷	≥865	≥1 000	≥13	≥45	≥302	≥31
		620℃时效	经固溶处理后, 610~630℃空冷	≥725	≥930	≥16	≥50	≥277	≥28
	0Cr17Ni7Al	固溶	1 000~1 100℃快冷	≤380	≤1 030	≥20	—	≤229	—
		565℃时效	经固溶处理后, 于 760 ± 15℃保持 90 min, 在 1 h 内冷却到 15℃以上, 保持 30 min, 再加热到 565 ± 10℃保持 90 min 空冷	≥960	≥1 140	≥5	≥25	≥363	—
		510℃时效	经固溶处理后, 955 ± 10℃保持 10 min, 空冷到室温, 在 24 h 以内冷却到 -73 ± 6℃, 保持 8 h, 再加热到 510℃ ± 10℃保持 60 min 后空冷	≥1 030	≥1 230	≥4	≥10	≥388	—
	0Cr15Ni7Mo2Al	固溶	1 000~1 100℃快冷					≤269	—
		565℃时效	经固溶处理后, 于 760 ± 15℃保持 90 min, 在 1 h 内冷却到 15℃以下, 保持 30 min, 再加热到 565 ± 10℃保持 90 min 空冷	≥1 100	≥1 210	≥7	≥25	≥375	—
		510℃时效	经固溶处理后, 于 955 ± 10℃保持 10 min, 空冷到室温在 24 h 内冷却到 -73 ± 6℃保持 8 h, 再加热到 510 ± 10℃保持 60 min 后空冷	≥1 210	≥1 320	≥6	≥20	≥388	—

表 14.4-25 不锈钢晶间腐蚀试验

牌 号	GB/T 4334.2		GB/T 4334.3		GB/T 4334.4	GB/T 4334.5	
	试验状态	腐蚀减量/ $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	试验状态	腐蚀减量/ $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	腐蚀度比	试验状态	试验弯曲面的状态
0Cr18Ni9	固溶	协议	固溶		协议	固溶	不得有晶间腐蚀裂纹
0Cr17Ni12Mo2			—		≤1.5		
0Cr18Ni12Mo2Cu2			—		≤1.5		
0Cr19Ni13Mo3			—		≤1.5		

续表 14.4-25

牌 号	GB/T 4334.2		GB/T 4334.3		GB/T 4334.4	GB/T 4334.5		
	试验状态	腐蚀减量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	试验状态	腐蚀减量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	腐蚀度比	试验状态	试验弯曲面的状态	
00Cr19Ni10	敏化	协议	敏化	协议	—	敏化	不得有晶间腐蚀裂纹	
00Cr17Ni14Mo2			—	—	—			
00Cr18Ni14Mo2Cu2								≤ 1.5
00Cr19Ni13Mo3			—	—	—			—
0Cr18Ni10Ti								
0Cr18Ni11Nb								
0Cr18Ni12Mo2Ti								
0Cr18Ni12Mo3Ti			—	—	—			—

注：1. 本表所列奥氏体型钢牌号应进行晶间腐蚀试验，试验方法由供需双方协定，并在合同中注明；合同不注明，可不作晶间腐蚀试验。

2. 对于其他牌号，当需方要求作晶间腐蚀试验时，其试验方法与要求，由供需双方协定，并在合同中注明。

表 14.4-26 不锈钢 GB/T 4334.1 中 10% 草酸浸蚀试验的判别

牌 号	试验状态	GB/T 4334.2 硫酸-硫酸铁 腐蚀试验	GB/T 4334.3 65% 硝酸 腐蚀试验	GB/T 4334.4 硝酸-氢氟酸 腐蚀试验	GB/T 4334.5 硫酸-硫酸铜 腐蚀试验	
0Cr18Ni9	固溶处理	沟状组织	沟状组织 凹状组织 II	—	沟状组织	
0Cr17Ni12Mo2			—	沟状组织		
0Cr18Ni12Mo2Cu2			—	沟状组织		
0Cr19Ni13Mo3			—	沟状组织		
00Cr19Ni10	敏化处理	沟状组织	沟状组织 凹状组织 II	—	沟状组织	
00Cr17Ni14Mo2			—	—		沟状组织
00Cr18Ni14Mo2Cu2						
00Cr19Ni13Mo3						
0Cr18Ni10Ti						
0Cr18Ni11Nb	—	—	—			

表 14.4-27 不锈钢 5% 硫酸腐蚀试验

牌 号	交货状态	腐蚀量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
0Cr17Ni12Mo2	固溶	≤ 5.5
00Cr17Ni14Mo2		≤ 5.5
0Cr18Ni12Mo2Cu2		≤ 4.5
00Cr18Ni4Mo2Cu2		≤ 4.5
0Cr19Ni13Mo3		≤ 6.0
00Cr19Ni13Mo3		≤ 6.0

注：按需方要求，供需双方协定，钢棒可按 GB/T 4334.6 方法进行腐蚀试验，其适用牌号和腐蚀要求符合本表规定。

表 14.4-28 不锈钢的高温力学性能

类型	牌 号	热处理制度	试验 温度/℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	a_{KIC} / J·cm ^{-3/2}
奥氏体型钢	1Cr18Mn8Ni5N (2.5 mm 厚板材)	1 075℃ 空冷	200	560		49		
			300	560		49		
			400	530		47		
			500	480	—	45.5		
			600	430		37		
			700	250		60.5		
	1Cr18Ni9	1 150℃ 水冷	650	380	98	33	40	
			760	210	98	17	18	
			870	135	69	19	27	
			900	82	—	34	61	—
			1 000	43	—	38.3	66.8	
			1 100	28	—	57.5	74	
	0Cr19Ni9	1 050℃ 水冷	400	410	108	45	69	
			480	385	98	45	69	
600			335	82	39	58		
700			235	74	35	36		
800			145	69	30	28		
00Cr19Ni11	1 050℃ 水冷	200	410	118	52	75		
		426	390	96	48	68	—	
		538	355	32	45	67		
0Cr18Ni12Mo2Ti	1 040℃ 水冷	2.0	590	225	} $\sigma_{0.2}$	65	75	255
		200	450	175		38	68	
		400	450	175		32	61	355
		500	430	128		40	62	355
		600	390	118		35	62	355
		700	305	118		47	47	325
00Cr18Ni14Mo2Cu2	1 100℃ 20 min 水冷	800	225		22.0	24.2		
		900	138		27.5	31.0		
		1 000	86	—	55.2	49.0	—	
		1 100	52		67.2	61.7		
		1 150	48		65.2	58.5		
		1 200	36		67.0	71.2		
00Cr19Ni13Mo3	1 050~1 100℃ 水冷	800	277		43.5	86.1		
		900	130		94.1	88.5		
		1 000	79	—	68.5	76.0	—	
		1 100	47		71.4	63.7		
		1 200	29		59.2			

续表 14.4-28

类型	牌 号	热处理制度	试验 温度/℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	$\alpha_{KU}/$ $J \cdot cm^{-2}$
奥氏体型钢	1Cr18Ni9Ti	1 050℃ 水冷	300	450	195	31	65	—
			400	440	175	31	65	
			500	440	175	29	65	
			600	390	175	25	61	
			700	275	155	26	59	
			800	175	98	35	69	
奥氏体型钢	0Cr18Ni11Nb	1 050℃ 水冷	20	560~635	235~275	53~61	63~69	205~275
			500	390~430	145~215	28~36	56~66	235~285
			600	365~385	135~185	28~34	54~65	245~305
			650	305~365	118~165	31~38	54~61	235~315
			700	245~305		31~42	44~60	245~295
奥氏体—铁素体型钢	0Cr26Ni5Mo2	950~1 000℃ 水冷	50	—	≥ 440	—	—	—
			100	—	≥ 420	—	—	—
			200	—	≥ 410	—	—	—
			300	—	≥ 375	—	—	—
	0Cr18Ni11Si4AlTi	950~1 050℃ 水冷 (棒材)	300	630	390	28	δ_{10}	57
			400	610	345	26		
		冷轧态 (板材)	300	735	635	11	δ_{10}	—
350	725		630	11				
400	715		630	11				
00Cr18Ni5Mo3Si2	950~1 050℃ 水冷	100	—	355	—	—	—	
		200	—	295	—	—	—	
		300	—	275	—	—	—	
		400	—	255	—	—	—	
铁素体型钢	1Cr17	982℃ 空冷	149	432	—	34	69.8	—
			288	407	—	31	66.9	
			472	—	—	34.5	68.5	
			538	—	—	31.5	70.5	
			649	—	—	49.5	91.1	
马氏体型钢	1Cr13	1 030~1 050℃ 油淬 750℃ 回火	20	600	400	22	60	108
			200	530	365	16	60	—
			400	490	365	16	58	195
			500	365	275	18	64	235
			600	225	175	18	70	215

续表 14.4-28

类型	牌 号	热处理制度	试验 温度/℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%	α_{KV} / J·cm ⁻²	
马氏体型钢	2Cr13	1 000~1 020℃油淬 720~750℃回火	20	705	510	21	68	64~172	
			300	544	390	18	66	118	
			400	520	397	16.5	58.5	201	
			450	485	375	17.5	57	235	
			470	485	410	22.5	71	—	
			500	430	353	32.5	75	245	
			550	345	280	36.5	83.5	220	
	3Cr13	1 000℃空冷 650℃回火	20	940	695	16	52	49	
			200	805	655	14	57	128	
			400	705	570	12	52	155	
			500	610	530	14	54	155	
			600	450	410	21	80	155	
	1Cr17Ni2	1 030℃油冷 680℃空淬	20	940	755	} $\sigma_{0.2}$	17	59	—
			300	855	685		14	53	
			400	785	635		13	57	
500			635	540	18		66		
600			355	355	29		88		
沉淀硬化型钢	0Cr17Ni7Al	固溶后 510℃时效	540	635	—	—	—	—	
	0Cr15Ni7Mo2Al		480	1 150	—	16	—	—	
			510	1 028	—	15.8	—	—	
			540	870	—	21.8	—	—	
			600	540	—	42.6	—	—	
			650	360	—	69.0	—	—	

注：本表数据供参考之用。

表 14.4-29 不锈钢的物理性能

牌 号	密度/ g· cm ⁻³	20℃ 比热容 c/ J·g ⁻¹ · K ⁻¹	热导率 λ /W·(m·K) ⁻¹								线胀系数 α /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹							电阻率 ρ / 10 ⁻⁶ Ω·m		熔点/ ℃
			20	100	200	300	400	500	600	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20℃	100℃		
			℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃				
1Cr17Mn- 6Ni5N	7.74	0.490		16.3													0.69		1 398 ~ 1 454	
1Cr18Mn- 8Ni5N	7.70	0.490	12.6	16.3						15.5	16.5	17.0	17.5	18.8			0.65		1 398 ~ 1 454	
1Cr17Ni7	8.03		14.6							16.9		17.1		18.2	18.7		0.72		1 398 ~ 1 420	
1Cr18Ni9	7.93	0.502	12.1	16.3				21.4		16.0	16.8	17.5	18.1				0.73		1 398 ~ 1 420	

续表 14.4-29

牌 号	密度/ g·cm ⁻³	20℃ 比热容 c/ J·g ⁻¹ ·K ⁻¹	热导率 λ/W·(m·K) ⁻¹							线胀系数 α/10 ⁻⁶ ·K ⁻¹							电阻率 ρ/ 10 ⁻⁶ Ω·m		熔点/ ℃
			20	100	200	300	400	500	600	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20℃	100℃	
			℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃			
Y1Cr18Ni9	7.93	0.502	12.1	16.3				21.4	17.3		17.8		18.4	18.7		0.73		1 398 ~ 1 420	
Y1Cr18-Ni9Se	7.93	0.502		16.3				21.4	17.3		17.8		18.4	18.7		0.73		1 399 ~ 1 421	
0Cr19Ni9	7.93	0.502	14.6	16.3				21.4	16.0	17.0	17.0	18.0	18.0	18.5		0.73		1 398 ~ 1 454	
00Cr19Ni11	7.93	0.502	14.6	16.3		18.4		20.9	16.8	17.1	17.5	17.9	18.3	18.7	19.0	0.73		1 398 ~ 1 454	
0Cr19Ni9N	7.93																		
0Cr19Ni-10NbN																			
00Cr18-Ni10N	7.93																		
1Cr18Ni12	7.93	0.502	16.3	16.3				21.4	17.3		17.8		18.4	18.7		0.72		1 398 ~ 1 454	
0Cr23Ni13	8.03	0.502	15.5	15.5				18.8	14.9		16.7		17.3	18.0		0.78		1 398 ~ 1 454	
0Cr25Ni20	8.03	0.502	12.1	14.2				18.8	15.8		16.2		16.9	17.5		0.88		1 398 ~ 1 454	
0Cr17Ni-12Mo2	7.98	0.502		19.7	20.5	21.4	23.0	24.3	25.1	16.0		16.2		17.5	18.5	0.75	0.85	1 371 ~ 1 398	
0Cr18Ni-12Mo2Ti	7.9	0.502		19.7	20.5	21.4	23.0	24.3	25.1	15.7	16.1	16.7	17.2	17.6	17.9	18.2	0.75	0.85	1 371 ~ 1 398
00Cr17-Ni14Mo2	7.98	0.502		15.1		18.4		20.9	16.0	17.0	17.5	17.8	18.0			0.71		1 371 ~ 1 398	
0Cr17Ni-12Mo2N	7.98																		
00Cr17Ni-13Mo2N	7.98																		
0Cr18Ni-12Mo2Cu2	7.98																		
00Cr18Ni-14Mo2Cu2	8.03	0.502		16.2				21.4	16.0					18.6					
0Cr19Ni-13Mo3	8.03	0.461		16.3				21.4	16.0		16.2		17.5	18.5		0.74		1 371 ~ 1 399	
00Cr19Ni-13Mo3	7.98	0.502		15.1		18.4		20.9	16.0	17.0	17.5	17.8				0.65		1 371 ~ 1 399	
0Cr18Ni-16Mo5	8.00																		
1Cr18Ni-9Ti	7.93	0.502		16.3		18.8		22.2	23.5	16.6	17.0	17.2	17.5	17.9	18.2	18.6	0.73		1 398 ~ 1 454

续表 14.4-29

牌 号	密度/ g·cm ⁻³	20℃ 比热容 c/ J·g ⁻¹ ·K ⁻¹	热导率 λ/W·(m·K) ⁻¹								线胀系数 α/10 ⁻⁶ ·K ⁻¹							电阻率 ρ/ 10 ⁻⁶ Ω·m		熔点/ ℃
			20	100	200	300	400	500	600	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20℃	100℃		
			℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃				
0Cr18Ni-11Ti	8.03	0.461	15.9	15.9				22.2	16.7			17.1			18.5	19.3		0.72		1 398 ~ 1 427
0Cr18Ni-11Nb	7.98	0.502		15.9	17.6	19.3	20.5	22.3	23.0	16.5	17.5	18.0	18.5	19.0				0.75		1 398 ~ 1 427
0Cr18Ni-9Cu3																				
0Cr18Ni-13Si4	7.75																			
0Cr26Ni-5Mo2	7.80	0.46~ 0.54		20.9				25.1							12.8					
1Cr18Ni-11Si4AlTi	7.51			13.4	14.6	15.9	17.6	19.3	21.3	16.3	16.5	18.5	19.5	20.4	21.2	24		1.04	1.08	
00Cr18Ni-5Mo3Si2	7.7		20.9	20.9		25.5		28.1		13.2	13.7	14.0	14.4	14.5	14.8	18				
0Cr13Al	7.75	0.461	26.8	27.8					10.8						13.5					
00Cr12	7.75																0.61			
1Cr17	7.72	0.461	25.1	26.1					10.0	10.0	10.5	10.5	11.0				0.60			
Y1Cr17	7.72	0.461		26.1				26.3	10.4		11.0		11.4	11.9			0.60			
1Cr17Mo	7.75	0.461	25.6						11.9								0.60			
00Cr30-Mo2	7.64																			
00Cr27-Mo	7.67																			
1Cr12	7.75	0.461	24.7	24.9					9.9						11.7		0.57			
1Cr13	7.75	0.461	24.7	25.1	26.0	26.8	28.1	28.9	10.5	11.0	11.5	12.0	12.0				0.55	0.70		
1Cr13Mo																				
Y1Cr13	7.75	0.461	24.7	25.1	26.0	26.8	28.1	28.9	9.9		11.0		11.5	11.7			0.55	0.70		
2Cr13	7.75	0.461		23.0	23.5	24.7	25.5	26.4	10.5	11.0	11.5	12.0	12.0				0.55	0.65		
3Cr13	7.76	0.473		25.1	25.5	25.5	25.5		10.5	11.0	11.5	12.0	12.0				0.55	0.65		
3Cr13Mo	7.71								10.5	10.9	11.2	11.7	11.9	11.7	11.5		0			
Y3Cr13	7.75	0.473		25.1	25.5	25.5	25.5		10.3		10.8		11.7	12.2			0.55	0.65		
1Cr17Ni2	7.75	0.461	20.9	21.8	22.6	23.4	24.3	25.1	26.0	10	10	11	11	11			0.70			

续表 14.4-29

牌 号	密度 / g·cm ⁻³	20℃ 比热容 c / J·g ⁻¹ ·K ⁻¹	热导率 λ / W·(m·K) ⁻¹								线胀系数 α / 10 ⁻⁶ ·K ⁻¹							电阻率 ρ / 10 ⁻⁸ Ω·m		熔点 t / ℃	
			20	100	200	300	400	500	600	20~ 100℃	20~ 200℃	20~ 300℃	20~ 400℃	20~ 500℃	20~ 600℃	20~ 700℃	20℃	100℃			
			℃	℃	℃	℃	℃	℃	℃												
7Cr17	7.75			24.2															0.60		1 371 ~ 1 510
8Cr17	7.75			24.2															0.60		1 371 ~ 1 510
11Cr17	7.75		24.2	24.2															0.60		1 371 ~ 1 483
Y11Cr17	7.75			24.2															0.60		1 371 ~ 1 482
0Cr17Ni4- Cu4Nb ^①	7.78 7.8	0.461		17.2	18.8	20.1	21.8	23.0		10.8	10.98	11.18	11.35						0.098 0.77		1 400 ~ 1 440
0Cr17Ni- 7Al ^②	7.81 7.65 7.65	0.461		150℃ 17.2	260℃ 18.4	480℃ 20.9				15.3 10.06 10.26			17.3 11.34 11.88						0.80 0.825 0.83		1 415 ~ 1 450
0Cr15Ni- 7Mo2Al ^③	7.804 7.685 7.680	0.461												11.66	12.04	12.34	12.51		0.80 0.82 0.83		1 415 ~ 1 450

- ① 固溶状态 480℃ 时效；
- ② 固溶状态 565℃ 时效，510℃ 时效；
- ③ 固溶状态 565℃ 时效，510℃ 时效。

表 14.4-30 不锈钢的耐腐蚀性能

牌 号	介质条件			腐蚀速度 / mm·a ⁻¹	介质条件			腐蚀速度 / mm·a ⁻¹	介质条件			腐蚀速度 / mm·a ⁻¹
	介质	质量分数 /%	温度 / ℃		介质	质量分数 /%	温度 / ℃		介质	质量分数 /%	温度 / ℃	
0Cr18Ni12Mo2Ti	硝酸	1~5	20	<0.1	硫酸	0.5	20	<0.1	草酸	2.5	20	<0.1
		1~5	80	<0.1		1	20	<0.1		2.5	60	<0.1
		5	沸	<0.1		3	20	<0.1		2.5	沸	<0.1
		20	20~80	<0.1		40	20	<0.1		10	20	<0.1
		50	20~50	<0.1		80	20	0.1~1.0		10	沸	1.0~3.0
		50	80	<0.1		98	20	<0.1		50	沸	0.1~1.0
		50	沸	<0.1	亚硫酸	2	20	<0.1	25	沸	<0.1	
		60	20~60	<0.1		20	20	<0.1	50	20	<0.1	
		60	沸	0.1~1.0	氢氟酸	10	20	<0.1	50	沸	<0.1	
		65	20	<0.1		10	100	1.0~3.0	68	120	<0.1	
		65	85	<0.1	氢氧化钠	10~20	沸	<0.1	高锰酸钾	5~10	20	<0.1
		65	沸	0.1~1.0		30	100	<0.1	10	沸	<0.1	
		90	20	<0.1		40	90	<0.1	盐酸	0.5		1.0~3.0
		90	70	0.1~1.0		50	90	<0.1		3		<0.1
		90	沸	1.0~3.0		50	100	<0.1		5		<0.1
		99	20	0.1~1.0		60	90	<0.1		10		0.1~1.0
		99	沸	3.0~10	70	90	<0.1	30		3.0~10		

续表 14.4-30

牌号	介质条件			腐蚀速度/ mm·a ⁻¹	介质条件			腐蚀速度/ mm·a ⁻¹	介质条件			腐蚀速度/ mm·a ⁻¹	
	介质	质量分数/%	温度/℃		介质	质量分数/%	温度/℃		介质	质量分数/%	温度/℃		
0Cr18Ni9	硝酸	1~5	20	<0.1	硫酸	0.4	36~40	0.0001	盐酸	0.5	20	0.1~1.0	
		1~5	80	<0.1		2	20	0~0.014		0.5	沸腾	>10	
		5	沸腾	<0.1		2	100	3.0~6.5		3	20	0.1~1.0	
		20	20~80	<0.1		5	50	3.0~4.5		5	20	0.1~1.0	
		50	20~50	<0.1		10~50	20	2.0~5.0		10	20	0.1~1.0	
		50	80	<0.1		10~65	50~100	不可用		30	20	>10	
		50	沸腾	<0.1		90~95	20	0.006~0.008		氢氟酸	10	20	0.1~1.0
		60	20~60	<0.1	亚硫酸	2	20	<1.0	10		100	3.0~10	
		60	沸腾	0.1~1.0		磷酸	20	20	<0.1	氢氧化钠	10	90	<0.1
		65	20	<0.1	1		20	<0.1	50		90	<0.1	
		65	85	<0.1	1	沸腾	<0.1	高锰酸钾	50	100	0.1~0.1		
		65	沸腾	0.1~1.0	10	20	<0.1		90	300	1.0~3.0		
		90	20	<0.1	10	沸腾	<0.1	氟化钠	熔盐	318	3.0~10		
		90	70	0.1~1.0	40	100	0.1~1.0		5~10	20	<0.1		
		90	沸腾	1.0~3.0	65	80	<0.1	苯	10	沸腾	<0.1		
		99	20	0.1~1.0	65	110	>10		5	20	0.1~1.0		
99	沸腾	3.0~10	80	60	<0.1	纯苯	20~沸	<0.1					
1Cr17	硝酸	5	20	<0.1	磷酸	10	20	<1.0	醋酸	10	20	<0.1	
		5	沸	<0.1		10	沸	<1.0		10	100	1.0~3.0	
		20	20	<0.1		45	20~沸	0.1~3.0	硫酸	5	20	>10.0	
		20	沸	<1.9		80	20	<1.0		50	20	>10.0	
		30	80	0.03		80	110~120	>10.0		80	20	1.0~3.0	
		65	85	<1.0									
		65	沸	2.20									
		90	70	1.0~3.0									
90	沸	1.0~3.0											
2Cr13	硝酸	5	20	<0.1	磷酸	65	沸	3.0~10.0	醋酸	10	20	<1.0	
		5	沸	3.0~10.0		90	20	<0.1		5	沸	>10.0	
		20	20	<0.1		90	沸	<10.0	柠檬酸	1	20	<0.1	
		20	沸	1.0~3.0	硼酸50~饱和		100	<0.1		20	沸	<10.0	
		50	20	<0.1	磷酸	1	90	<0.1		氢氧化钠	20	50	<0.1
		50	沸	<3.0		5	20	<1.0					
		65	20	<0.1									

续表 14.4-30

牌号	介质条件			腐蚀速度/ (mm·a ⁻¹)	介质条件			腐蚀速度/ (mm·a ⁻¹)	介质条件			腐蚀速度/ (mm·a ⁻¹)
	介质	质量分数/ %	温度/℃		介质	质量分数/ %	温度/℃		介质	质量分数/ %	温度/℃	
3Cr13	硫酸	2~50	20~100	腐蚀破坏	硫酸	52	60	8.6	硫酸	65	20	0.03
		52	15	2.11		63.4	15	2.1				
1Cr17Ni2	硝酸	10	50	<0.1	醋酸	10	75	<3.0	氢氧化钠	10	90	<0.1
		10	85	<0.1		10	90	3.0~10.0		20	50	
		30	60	<0.1		15	20	<1.0		20	沸	
		30	沸	<0.1		15	40	>3.0		30	20	
		50	50	<0.1		25	50	<1.0		30	100	
		50	80	0.1~1.0		25	90	<3.0		40	90	
	硫酸	50	沸	<3.0	25	沸	3.0~10.0	50	100	<1.0		
		60	60	<0.1	磷酸	5	20	<0.1	60		90	
		1	20	3.0~10.0		5	85	<0.1	25		沸	<0.1
			5	20		>10.0	10	20			<3.0	50	20	<0.1
	10		20	>10.0		25	20	3.0~10.0		50	沸	<1.0
	硫酸	10	50	<0.1	盐酸	1	20	<3.0	氢氧化钾	50	沸	<1.0
		10	沸	1.0~3.0		2	20	3.0~10.0		68	120	<1.0
	铝	10	沸	1.0~3.0		5	20	>10.0	熔体	300	>10.0	

注：本表数据供参考之用。

表 14.4-31 不锈钢的特性和应用 (摘自 GB/T 1220—1992)

类型	序号	牌 号	特 性 和 用 途
奥氏体	1	1Cr17Mn6Ni5N	节镍钢种，代替牌号 1Cr17Ni7，冷加工后具有磁性，铁道车辆用
	2	1Cr18Mn3Ni5N	节镍钢种，代替牌号 1Cr18Ni9
	3	1Cr18Mn10Ni5Mo3N	对尿素有良好的耐蚀性，可制造尿素腐蚀的设备
	4	1Cr17Ni7	经冷加工有高的强度，铁道车辆，传送带螺栓螺母用
	5	1Cr18Ni9	经冷加工有高的强度，但伸长率比 1Cr17Ni7 稍差。建筑用装饰部件
	6	Y1Cr18Ni9	提高切削性，耐烧蚀性，最适用于自动车床。螺栓螺母
	7	Y1Cr18Ni9Se	提高切削性，耐烧蚀性。最适用于自动车床。铆钉、螺钉
	8	0Cr18Ni9	作为不锈钢耐热钢使用最广泛，食品用设备，一般化工设备，原子能工业用设备
	9	00Cr19Ni10	比 0Cr19Ni9 碳含量更低的钢，耐晶间腐蚀性优越，为焊接后不进行热处理部件类
	10	0Cr19Ni9N	在牌号 0Cr19Ni9 上加 N，强度提高，塑性不降低。使材料的厚度减少，作为结构用强度部件
	11	0Cr19Ni10NbN	在牌号 0Cr19Ni9 上加 N 和 Nb 具有与 0Cr19Ni9 相同的特性和用途

续表 14.4-31

类型	序号	牌 号	特 性 和 用 途
奥氏体 型	12	00Cr18Ni10N	在牌号 00Cr19Ni10 上添加 N, 具有以上牌号同样特性, 用途与 0Cr19Ni9N 相同, 但耐晶间腐蚀性更好
	13	1Cr18Ni12	与 0Cr19Ni9 相比, 加工硬化性低, 旋压加工, 特殊拉拔, 冷墩用
	14	0Cr23Ni13	耐腐蚀性、耐热性均比 0Cr19Ni9 好
	15	0Cr25Ni20	抗氧化性比 0Cr23Ni13 好, 实际上多作为耐热钢使用
	16	0Cr17Ni12Mo2	在海水和其他各种介质中, 耐腐蚀性比 0Cr19Ni9 好, 主要作耐点蚀材料
	17	1Cr18Ni12Mo2Ti	用于抵抗硫酸、磷酸、蚁酸、醋酸的设备, 有良好耐晶间腐蚀性
	18	0Cr18Ni12Mo2Ti	用于抵抗硫酸、磷酸、蚁酸、醋酸的设备, 有良好耐晶间腐蚀性
	19	00Cr17Ni14Mo2	为 0Cr17Ni12Mo2 的超低碳钢, 比 0Cr17Ni12Mo2 耐晶间腐蚀性好
	20	0Cr17Ni12Mo2N	在牌号 0Cr17Ni12Mo2 中加入 N, 提高强度, 不降低塑性, 使材料的厚度减薄。作耐腐蚀性较好的强度较高的部件
	21	00Cr17Ni13Mo2N	在牌号 00Cr17Ni14Mo2 中加入 N, 具有以上牌号同样特性, 用途与 0Cr17Ni12Mo2N 相同, 但耐晶间腐蚀性更好
	22	0Cr18Ni12Mo2Cu2	耐腐蚀性、耐点腐蚀性比 0Cr17Ni12Mo2 好, 用于耐硫酸材料
	23	00Cr18Ni14Mo2Cu2	为 0Cr18Ni12Mo2Cu2 的超低碳钢, 比 0Cr18Ni12Mo2Cu2 的耐晶间腐蚀性好
	24	0Cr19Ni13Mo3	耐点腐蚀性比 0Cr17Ni12Mo2 好, 作染色设备材料等
	25	00Cr19Ni13Mo3	为 0Cr19Ni13Mo3 的超低碳钢, 比 0Cr19Ni13Mo3 耐晶间腐蚀性好
	26	1Cr18Ni12Mo3Ti	用于抵抗硫酸、磷酸、蚁酸、醋酸的设备, 有良好耐晶间腐蚀性
	27	0Cr18Ni12Mo3Ti	用于抵抗硫酸、磷酸、蚁酸、醋酸的设备, 有良好耐晶间腐蚀性
	28	0Cr18Ni16Mo5	吸取含氟离子溶液的热交换器, 醋酸设备, 磷酸设备, 漂白装置等, 在 00Cr17Ni14Mo2 和 00Cr19Ni13Mo3 不能适用的环境中使用
	29	1Cr18Ni9Ti	作焊芯, 抗磁仪表、医疗器械、耐酸容器及设备衬里输送管道等设备和零件
	30	0Cr18Ni10Ti	添加 Ti 提高耐晶间腐蚀性, 不推荐作装饰部件
	31	0Cr18Ni11Nb	含 Nb 提高耐晶间腐蚀性
	32	0Cr18Ni9Cu3	在牌号 0Cr19Ni9 中加入 Cu, 提高冷加工性的钢种, 冷墩用
	33	0Cr18Ni13Si4	在牌号 0Cr19Ni9 中增加 Ni, 添加 Si, 增加耐应力腐蚀断裂性。用于含氟离子环境
奥氏体-铁素体型	34	0Cr26Ni5Mo2	具有双相组织, 抗氧化性、耐点腐蚀性好。具有高的强度, 作耐海水腐蚀用等
	35	1Cr18Ni11Si4AlTi	制作抗高温浓硝酸介质的零件和设备
	36	00Cr18Ni5Mo3Si2	具有铁素体-奥氏体型双相组织, 耐应力腐蚀断裂性好, 耐点蚀性能与 00Cr17Ni13Mo2 相当, 具有较高的强度适于含氟离子的环境, 用于炼油、化肥、造纸、石油、化工等工业热交换器和冷凝器等

续表 14.4-31

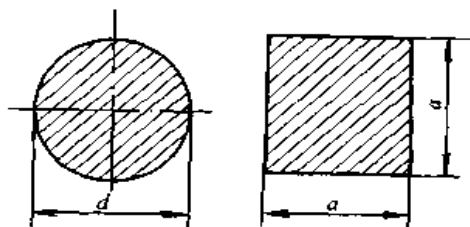
类型	序号	牌 号	特 性 和 用 途
铁素体型	37	0Cr13Al	从高温下冷却不产生显著硬化, 汽轮机材料, 淬火热用部件, 复合钢材
	38	00Cr12	比 0Cr13 含碳量低, 焊接部位弯曲性能、加工性能、耐高温氧化性能好。作汽车排气处理装置, 锅炉燃烧室、喷嘴
	39	1Cr17	耐腐蚀性良好的通用钢种, 建筑内装饰用、重油燃烧器部件, 家庭用具、家用电器部件
	40	Y1Cr17	比 1Cr17 提高切削性能。自动车床用, 螺栓、螺母等
	41	1Cr17Mo	为 1Cr17 的改良钢种, 比 1Cr17 抗盐溶液性强, 作为汽车外装饰材料使用
	42	00Cr30Mo2	高 Cr-Mo 系, C、N 降至极低, 耐腐蚀性很好, 作与乙酸、乳酸等有机酸有关的设备, 制造苛性碱设备, 耐卤离子应力腐蚀破裂, 耐点腐蚀
	43	00Cr27Mo	要求性能、用途、耐腐蚀性和软磁性与 00Cr30Mo2 类似
马氏体型	44	1Cr12	作为汽轮机叶片及高应力部件之良好的不锈钢耐热钢
	45	1Cr13	具有良好的耐腐蚀性, 机械加工性, 一般用途, 刀具类
	46	0Cr13	作较高韧性及受冲击载荷的零件, 如汽轮机叶片、结构类、不锈钢设备、衬里、螺栓、螺母等
	47	Y1Cr13	不锈钢中切削性能最好的钢种, 自动车床用
	48	1Cr13Mo	为比 1Cr13 耐腐蚀性高的高强度钢种, 汽轮机叶片、高温部件
	49	2Cr13	淬火状态下硬度高, 耐腐蚀性良好, 作汽轮机叶片
	50	3Cr13	比 2Cr13 淬火后硬度高, 作刀具、喷嘴、阀座、阀门等
	51	Y3Cr13	改善 3Cr13 切削性能的钢种
	52	3Cr13Mo	作较高硬度及高耐磨性的热油泵轴、阀片、阀门轴承、医疗器械、弹簧等零件
	53	4Cr13	作较高硬度及高耐磨性的热油泵轴、阀片、阀门轴承、医疗器械、弹簧等零件
	54	1Cr17Ni2	具有较高强度的耐硝酸及有机酸腐蚀的零件、容器和设备
	55	7Cr17	硬化状态下, 坚硬, 但比 8Cr17、11Cr17 韧性高, 作刀具、量具、轴承
	56	8Cr17	硬化状态下, 比 7Cr17 硬, 而比 11Cr17 韧性高。作刀具、阀门
	57	9Cr18	不锈钢切片机械刀具及剪切刀具、手术刀片、高耐磨设备零件等
58	11Cr17	在所有不锈钢、耐热钢中, 硬度最高。作喷嘴、轴承	
59	Y11Cr17	比 11Cr17 提高了切削性的钢种。自动车床用	
60	9Cr18Mo	轴承套圈及滚动体用的高碳铬不锈钢	
61	9Cr18MoV	不锈钢切片机械刀具及剪切工具、手术刀片、高耐磨设备零件等	
沉淀硬化型	62	0Cr17Ni4Cu4Nb	添加铜的沉淀硬化型钢种。轴类、汽轮机部件
	63	0Cr17Ni7Al	添加铝的沉淀硬化型钢种, 作弹簧、热圈、计器部件
	64	0Cr15Ni7Mo2Al	用于有一定耐蚀要求的高强度容器、零件及结构件

第5章 钢 材

I 型钢

1.1 热轧圆钢和方钢 (表 14.5-1)

表 14.5-1 热轧圆钢和方钢尺寸规格 (摘自 GB/T 702-1986)



d —圆钢直径

a —方钢边长

$d, a /$ mm	理论质量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$		$d, a /$ mm	理论质量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$		$d, a /$ mm	理论质量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	
	圆 钢	方 钢		圆 钢	方 钢		圆 钢	方 钢
5.5	0.186	0.237	27①	4.49	5.72	68①	28.5	36.3
6	0.222	0.283	28	4.83	6.15	70	30.2	38.5
6.5	0.260	0.332	29①	5.18	6.60	75	34.7	44.2
7	0.302	0.385	30	5.55	7.06	80	39.5	50.2
8	0.395	0.502	31①	5.92	7.54	85	44.5	56.7
9	0.499	0.636	32	6.31	8.04	90	49.9	63.6
10	0.617	0.785	33①	6.71	8.55	95	55.6	70.8
11①	0.746	0.950	34	7.13	9.07	100	61.7	78.5
12	0.888	1.13	35①	7.55	9.62	105	68.0	86.5
13	1.04	1.33	36	7.99	10.2	110	74.6	95.0
14	1.21	1.54	38	8.90	11.3	115	81.5	104
15	1.39	1.77	40	9.86	12.6	120	88.8	113
16	1.58	2.01	42	10.9	13.8	125	96.3	123
17	1.78	2.27	45	12.5	15.9	130	104	133
18	2.00	2.54	48	14.2	18.1	140	121	154
19	2.23	2.83	50	15.4	19.6	150	139	177
20	2.47	3.14	53	17.3	22.0	160	158	201
21	2.72	3.46	55①	18.6	23.7	170	178	227
22	2.98	3.80	56	19.3	24.6	180	200	254
23①	3.26	4.15	58①	20.7	26.4	190	223	283
24	3.55	4.52	60	22.2	28.3	200	247	314
25	3.85	4.91	63	24.5	31.2	220	298	
26	4.17	5.31	65①	26.0	33.2	250	385	

- 注：1. 本表的理论质量按密度 7.85 g/cm^3 计算所得。
 2. 方钢边长范围 $5.5 \sim 200 \text{ mm}$ 。
 3. 普通钢钢材长度：当 d 或 a 小于 25 mm ，长度为 $4 \sim 10 \text{ m}$ ；当 d 或 a 大于 25 mm ，长度为 $3 \sim 9 \text{ m}$ ；
 优质钢钢材的全部规格，其长度为 $2 \sim 6 \text{ m}$ ；工具钢钢材 d 或 a 大于 75 mm 时，其长度为 $1 \sim 6 \text{ m}$ 。
 4. 标记示例：用 40Cr 钢轧制的直径为 50 mm ，允许偏差为 2 组的圆钢，其标记为

圆钢 $\frac{50-2-GB/T702-1986}{40Cr-GB/T 3077-1999}$

5. 钢材的“理论质量”，按有关规定，在生活和生产贸易社会交流中，仍可称“理论重量”；即质量在生活及生产中按习惯可以称为重量。
 6. 产品采用的钢号、质量分数（化学成分）及力学性能均应符合相关标准的规定。
 ① 为不推荐采用的规格。

1.2 热轧六角钢和八角钢（表 14.5-2）

表 14.5-2 热轧六角钢和八角钢尺寸规格（摘自 GB/T 705—1989）

对边距离 S/mm	截面面积 A/cm^2		理论质量 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$		对边距离 S/mm	截面面积 A/cm^2		理论质量 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	
	六角钢	八角钢	六角钢	八角钢		六角钢	八角钢	六角钢	八角钢
8	0.554 3	—	0.435	—	28	6.790	6.492	5.33	5.10
9	0.701 5	—	0.551	—	30	7.794	7.452	6.12	5.85
10	0.866	—	0.680	—	32	8.868	8.479	6.96	6.66
11	1.048	—	0.823	—	34	10.011	9.572	7.86	7.51
12	1.247	—	0.979	—	36	11.223	10.731	8.81	8.42
13	1.464	—	1.15	—	38	12.505	11.956	9.82	9.39
14	1.697	—	1.33	—	40	13.86	13.25	10.88	10.40
15	1.949	—	1.53	—	42	15.28	—	11.99	—
16	2.217	2.120	1.74	1.66	45	17.54	—	13.77	—
17	2.503	—	1.96	—	48	19.95	—	15.66	—
18	2.806	2.683	2.20	2.16	50	21.65	—	17.00	—
19	3.126	—	2.45	—	53	24.33	—	19.10	—
20	3.464	3.312	2.72	2.60	56	27.16	—	21.32	—
21	3.819	—	3.00	—	58	29.13	—	22.87	—
22	4.192	4.008	3.29	3.15	60	31.18	—	24.50	—
23	4.581	—	3.60	—	63	34.37	—	26.98	—
24	4.988	—	3.92	—	65	36.59	—	28.72	—
25	5.413	5.175	4.25	4.06	68	40.04	—	31.43	—
26	5.854	—	4.60	—	70	42.43	—	33.30	—
27	6.314	—	4.96	—					

- 注：1. 本表理论质量按密度 7.85 kg/dm^3 计算。
 2. 产品通常长度：普通钢为 $3 \sim 8 \text{ m}$ ；优质钢为 $2 \sim 6 \text{ m}$ 。
 3. 产品采用的钢号质量分数（化学成分）及力学性能均应符合相关标准规定。

1.3 热轧扁钢(表 14.5-3)

表 14.5-3 热轧扁钢尺寸规格(摘自 GB/T 704—1988)

宽度 mm	厚 度 /mm											理 论 质 量 /kg·m ⁻¹														
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14		16	18	20	22	25	28	30	32	36	40	45	50	56	60
10	0.24	0.31	0.39	0.47	0.55	0.63																				
12	0.28	0.38	0.47	0.57	0.66	0.75																				
14	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88																				
16	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1.00	1.15	1.26																		
18	0.42	0.57	0.71	0.85	0.99	1.13	1.27	1.41																		
20	0.47	0.63	0.78	0.94	1.10	1.26	1.41	1.57	1.73	1.88																
22	0.52	0.69	0.86	1.04	1.21	1.38	1.55	1.73	1.90	2.07																
25	0.59	0.78	0.98	1.18	1.37	1.57	1.77	1.96	2.16	2.36	2.75	3.14														
28	0.66	0.88	1.10	1.32	1.54	1.76	1.98	2.20	2.42	2.64	3.08	3.53														
30	0.71	0.94	1.18	1.41	1.65	1.88	2.12	2.36	2.59	2.83	3.30	3.77	4.24													
32	0.75	1.00	1.26	1.51	1.76	2.01	2.26	2.55	2.76	3.01	3.52	4.02	4.52	5.02												
35	0.82	1.10	1.37	1.65	1.92	2.20	2.47	2.75	3.02	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50	6.04	6.87	7.69									
40	0.94	1.26	1.57	1.88	2.20	2.51	2.83	3.14	3.45	3.77	4.40	5.02	5.65	6.28	6.91	7.85	8.79									
45	1.06	1.41	1.77	2.12	2.47	2.83	3.18	3.53	3.89	4.24	4.95	5.65	6.36	7.07	7.77	8.83	9.89	10.60	11.30	12.72						
50	1.18	1.57	1.96	2.36	2.75	3.14	3.53	3.93	4.32	4.71	5.50	6.28	7.06	7.85	8.64	9.81	10.99	11.78	12.56	14.13						
55		1.73	2.16	2.59	3.02	3.45	3.89	4.32	4.75	5.18	6.04	6.91	7.77	8.64	9.50	10.79	12.09	12.95	13.82	15.54						
60		1.88	2.36	2.83	3.30	3.77	4.24	4.71	5.18	5.65	6.59	7.54	8.48	9.42	10.36	11.78	13.19	14.13	15.07	16.96						
65		2.04	2.55	3.06	3.57	4.08	4.59	5.10	5.61	6.12	7.14	8.16	9.18	10.20	11.28	12.76	14.29	15.31	16.33	18.37	18.84	21.20				

续表 14.5-3

宽度/ mm	厚 度 /mm												质 量 /kg·m ⁻¹														
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16		18	20	22	25	28	30	32	36	40	45	50	56	60	
70	2.20	2.75	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50	6.04	6.59	7.69	8.79	9.89	10.99	12.09	13.74	15.39	16.49	17.58	19.78	21.98	24.73						
75	2.36	2.94	3.53	4.12	4.71	5.30	5.89	6.48	7.07	8.24	9.42	10.60	11.78	12.95	14.72	16.48	17.66	18.84	21.20	23.55	26.49						
80	2.51	3.14	3.77	4.40	5.02	5.65	6.28	6.91	7.54	8.79	10.05	11.30	12.56	12.82	15.70	17.58	18.84	20.10	22.61	25.12	28.26	31.40	35.17				
85	3.34	4.00	4.67	5.34	6.01	6.67	7.34	8.01	9.34	10.68	12.01	13.34	14.68	16.68	18.68	20.02	21.35	24.02	26.69	30.03	33.36	37.37	40.04				
90	3.53	4.24	4.95	5.65	6.36	7.07	7.77	8.48	9.89	11.30	12.72	14.13	15.54	17.66	19.78	21.20	22.61	25.43	28.26	31.79	35.32	39.56	42.39				
95	3.73	4.47	5.22	5.97	6.71	7.46	8.20	8.95	10.44	11.93	13.42	14.92	16.41	18.64	20.88	22.37	23.86	26.85	29.83	33.56	37.29	41.76	44.74				
100	3.92	4.71	5.50	6.28	7.06	7.85	8.64	9.42	10.99	12.56	14.13	15.70	17.27	19.62	21.98	23.55	25.12	28.26	31.40	35.32	39.25	43.96	47.10				
105	4.12	4.95	5.77	6.59	7.42	8.24	9.07	9.89	11.54	13.19	14.84	16.48	18.13	20.61	23.08	24.73	26.38	29.67	32.97	37.09	41.21	46.16	49.46				
110	4.32	5.18	6.04	6.91	7.77	8.64	9.50	10.36	12.09	13.82	15.54	17.27	19.00	21.59	24.18	25.90	27.63	31.09	34.54	38.86	43.18	48.36	51.81				
120	4.71	5.65	6.59	7.54	8.48	9.42	10.36	11.30	13.19	15.07	16.96	18.84	20.72	23.55	26.38	28.26	30.14	33.91	37.68	42.39	47.10	52.75	56.52				
125	5.89	6.87	7.85	8.83	9.81	10.79	11.78	13.74	15.70	17.66	19.62	21.58	24.53	27.48	29.44	31.40	35.32	39.25	44.16	49.06	54.95	58.88					
130	6.12	7.14	8.16	9.18	10.20	11.23	12.25	14.29	16.33	18.37	20.41	22.45	25.51	28.57	30.62	32.66	36.74	40.82	45.92	51.02	57.15	61.23					
140																											
150																											

注: 1. 本表产品常用钢号为: Q235A, 20, 45, Q345, 其质量分数(化学成分)及性能要求应符合相关标准规定。

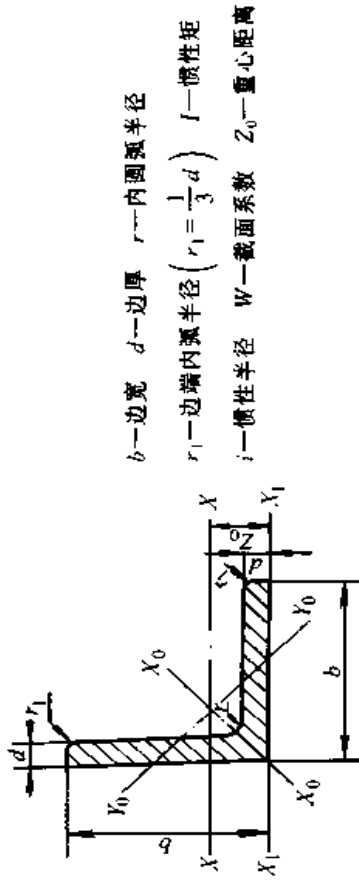
2. 表中粗线为扁钢分组: 第 1 组理论质量 ≤ 19 kg/m; 第 2 组理论质量 > 19 kg/m。

3. 产品长度: 普通钢第 1 组 3~9 m, 第 2 组 3~7 m; 优质钢全部规格的长度为 2~6 m。

4. 标记示例: 用 45 号钢轧制的 10 mm \times 30 mm 的扁钢, 标记为 扁钢 $\frac{10 \times 30}{45}$ -GB/T 704-1988
45-GB/T 699-1999

1.4 热轧等边角钢(表 14.5-4)

表 14.5-4 热轧等边角钢尺寸规格(摘自 GB/T 9787—1988)



b —边宽 d —边厚 r —内圆弧半径

r_1 —一端内弧半径 ($r_1 = \frac{1}{3}d$) I —惯性矩

i —惯性半径 W —截面系数 Z_0 —重心距离

型号	尺寸/ mm		截面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	外表面积/ m ² ·m ⁻¹	参 考 数 值												Z_0 / cm
						X-X			X ₀ -X ₀			Y ₀ -Y ₀			X ₁ -X ₁			
						I_x / cm ⁴	i_x / cm	W_x / cm ³	I_{x0} / cm ⁴	i_{x0} / cm	W_{x0} / cm ³	I_{y0} / cm ⁴	i_{y0} / cm	W_{y0} / cm ³	I_{x1} / cm ⁴	W_{y0} / cm ³	I_{x1} / cm ⁴	
2	3	20	1.132	0.889	0.078	0.40	0.59	0.29	0.63	0.75	0.45	0.17	0.39	0.20	0.81	0.60		
	4	25	1.459	1.145	0.077	0.50	0.58	0.36	0.78	0.73	0.55	0.22	0.38	0.24	1.09			
2.5	3	25	1.432	1.124	0.098	0.82	0.76	0.46	1.29	0.95	0.73	0.34	0.49	0.33	1.57	0.73		
	4	30	1.859	1.459	0.097	1.03	0.74	0.59	1.62	0.93	0.92	0.43	0.48	0.40	2.11			
3.0	3	30	1.749	1.373	0.117	1.46	0.91	0.68	2.31	1.15	1.09	0.61	0.59	0.51	2.71	0.85		
	4	36	2.276	1.786	0.117	1.84	0.90	0.87	2.92	1.13	1.37	0.77	0.58	0.62	2.63			
3.6	3	36	2.109	1.656	0.141	2.58	1.11	0.99	4.09	1.39	1.61	1.07	0.71	0.76	4.68	1.00		
	4	45	2.756	2.163	0.141	3.29	1.09	1.28	5.22	1.38	2.05	1.37	0.70	0.93	6.25			
	5	50	3.382	2.654	0.141	3.95	1.08	1.56	6.24	1.36	2.45	1.65	0.70	1.09	7.84			

续表 14.5-4

型号	尺寸/ mm		截面面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	外表面积/ m ² ·m ⁻¹	参 考 数 值											
						X - X			X ₀ - X ₀			Y ₀ - Y ₀			X ₁ - X ₁		
						I _X / cm ⁴	i _X / cm	W _X / cm ³	I _{X0} / cm ⁴	i _{X0} / cm	W _{X0} / cm ³	I _{Y0} / cm ⁴	i _{Y0} / cm	W _{Y0} / cm ³	I _{X1} / cm ⁴	Z ₀ / cm	
4	b	d	r	3	40	5	3.59	1.23	1.23	5.69	1.55	2.01	1.49	0.79	0.96	6.41	1.09
				4	40	5	4.60	1.22	1.60	7.29	1.54	2.58	1.91	0.79	1.19	8.56	1.13
				5	40	5	5.53	1.21	1.96	8.76	1.52	3.10	2.30	0.78	1.39	10.74	1.17
4.5	b	d	r	3	45	5	5.17	1.40	1.58	8.20	1.76	2.58	2.14	0.90	1.24	9.12	1.22
				4	45	5	6.65	1.38	2.05	10.56	1.74	3.32	2.75	0.89	1.54	12.18	1.26
				5	45	5	8.04	1.37	2.51	12.74	1.72	4.00	3.33	0.88	1.81	15.25	1.30
5	b	d	r	3	50	6	9.33	1.36	2.95	14.76	1.70	4.64	3.89	0.88	2.06	18.36	1.33
				3	50	6	7.18	1.55	1.96	11.37	1.96	3.22	2.98	1.00	1.57	12.50	1.34
				4	50	5.5	9.26	1.54	2.56	14.70	1.94	4.16	3.82	0.99	1.96	16.69	1.38
5.6	b	d	r	3	56	6	11.21	1.53	3.13	17.79	1.92	5.03	4.64	0.93	2.31	20.90	1.42
				5	56	6	13.05	1.52	3.68	20.68	1.91	5.85	5.42	0.93	2.63	25.14	1.46
				3	56	6	10.19	1.75	2.48	16.14	2.20	4.08	4.24	1.13	2.02	17.56	1.48
6.3	b	d	r	3	63	7	13.18	1.73	3.24	20.92	2.18	5.28	5.46	1.11	2.52	23.43	1.53
				5	63	7	16.02	1.72	3.97	25.42	2.17	6.42	6.61	1.10	2.98	29.33	1.57
				8	63	7	23.63	1.68	6.03	37.37	2.11	9.44	9.89	1.09	4.16	47.24	1.68
7	b	d	r	3	70	8	19.03	1.96	4.13	30.17	2.46	6.78	7.89	1.26	3.29	33.35	1.70
				4	70	8	23.17	1.94	5.08	36.77	2.45	8.25	9.57	1.25	3.90	41.73	1.74
				5	70	8	27.12	1.93	6.00	43.03	2.43	9.66	11.20	1.24	4.46	50.14	1.78
7	b	d	r	3	70	8	34.46	1.90	7.75	54.56	2.40	12.25	14.33	1.23	5.47	67.11	1.85
				8	70	8	41.09	1.88	9.39	64.85	2.36	14.56	17.33	1.22	6.36	84.31	1.93
				4	70	8	26.39	2.18	5.14	41.80	2.76	8.44	10.99	1.40	4.17	45.74	1.86
7	b	d	r	4	70	8	32.21	2.18	6.32	51.08	2.73	10.32	13.34	1.39	4.95	57.21	1.91
				5	70	8	37.77	2.15	7.48	59.93	2.71	12.11	15.61	1.38	5.67	68.73	1.95
				6	70	8	43.09	2.14	8.59	68.35	2.69	13.81	17.82	1.38	6.34	80.29	1.99
7	b	d	r	7	70	8	48.17	2.12	9.68	76.37	2.68	15.43	19.98	1.37	6.98	91.92	2.03
				8	70	8	54.09	2.12	10.81	85.31	2.68	17.14	22.21	1.37	7.74	104.84	2.08
				4	70	8	30.17	2.46	6.78	41.80	2.76	8.44	10.99	1.40	4.17	45.74	1.86

续表 14.5-4

型号	尺寸/ mm		截面面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	外表面积/ m ² ·m ⁻¹	参 考 数 值											
						X-X			X ₀ -X ₀			Y ₀ -Y ₀			X ₁ -X ₁		
						I _X / cm ⁴	i _X / cm	W _X / cm ³	I _{X0} / cm ⁴	i _{X0} / cm	W _{X0} / cm ³	I _{Y0} / cm ⁴	i _{Y0} / cm	W _{Y0} / cm ³	I _{X1} / cm ⁴	Z ₀ / cm	
7.5	75	5	7.412	5.818	0.295	39.97	2.33	7.32	63.30	2.92	11.94	16.63	1.50	5.77	70.56	2.04	
		6	8.797	6.905	0.294	46.95	2.31	8.64	74.38	2.90	14.02	19.51	1.49	6.67	84.55	2.07	
		7	10.160	7.976	0.294	53.57	2.30	9.93	84.96	2.89	16.02	22.18	1.48	7.44	98.71	2.11	
		8	11.503	9.030	0.294	59.96	2.28	11.20	95.07	2.88	17.93	24.86	1.47	8.19	112.97	2.15	
		10	14.126	11.089	0.293	71.98	2.26	13.64	113.92	2.84	21.48	30.05	1.46	9.56	141.71	2.22	
8	80	5	7.912	6.211	0.315	48.79	2.48	8.34	77.33	3.13	13.67	20.25	1.60	6.66	85.36	2.15	
		6	9.397	7.376	0.314	57.35	2.47	9.87	90.98	3.11	16.08	23.72	1.59	7.65	102.50	2.19	
		7	10.860	8.525	0.314	65.58	2.46	11.37	104.07	3.10	18.40	27.09	1.58	8.58	119.70	2.23	
		8	12.303	9.658	0.314	73.49	2.44	12.83	116.60	3.08	20.61	30.39	1.57	9.46	136.97	2.27	
		10	15.126	11.874	0.313	88.43	2.42	15.64	140.09	3.04	24.76	36.77	1.56	11.08	171.74	2.35	
9	90	6	10.637	8.350	0.354	88.77	2.79	12.61	131.26	3.51	20.63	34.28	1.80	9.95	145.87	2.44	
		7	12.301	9.656	0.354	94.83	2.78	14.54	150.47	3.50	23.64	39.18	1.78	11.19	170.30	2.48	
		8	13.944	10.946	0.353	106.47	2.76	16.42	168.97	3.48	26.55	43.97	1.78	12.35	194.80	2.52	
		10	17.167	13.476	0.353	128.58	2.74	20.07	203.90	3.45	32.04	53.26	1.76	14.52	244.07	2.59	
		12	20.306	15.940	0.352	149.22	2.71	23.57	236.21	3.41	37.12	62.22	1.75	16.49	293.76	2.67	
10	100	6	11.932	9.366	0.393	114.95	3.10	15.68	181.98	3.90	25.74	47.92	2.00	12.69	200.07	2.67	
		7	13.796	10.830	0.393	131.86	3.09	18.10	208.97	3.89	29.55	54.74	1.99	14.26	233.54	2.71	
		8	15.638	12.276	0.393	148.24	3.08	20.47	235.07	3.88	33.24	61.41	1.98	15.75	267.09	2.76	
		10	19.261	15.120	0.392	179.51	3.05	25.06	284.68	3.84	40.26	74.35	1.96	18.54	334.48	2.84	
		12	22.800	17.898	0.391	208.90	3.03	29.48	330.95	3.81	46.80	86.84	1.95	21.08	402.34	2.91	
11	110	14	26.256	20.611	0.391	236.53	3.00	33.73	374.06	3.77	52.90	99.00	1.94	23.44	470.75	2.99	
		16	29.627	23.257	0.390	262.53	2.98	37.82	414.16	3.74	58.57	110.89	1.94	25.63	539.80	3.06	
		7	15.196	11.928	0.433	177.16	3.41	22.05	280.94	4.30	36.12	73.38	2.20	17.51	310.64	2.96	
		8	17.238	13.532	0.433	199.46	3.40	24.95	316.49	4.28	40.69	82.42	2.19	19.39	355.20	3.01	
		10	21.261	16.690	0.432	242.19	3.38	30.60	384.30	4.25	49.42	99.98	2.17	22.91	444.65	3.09	
11	110	12	25.200	19.782	0.431	282.55	3.35	36.05	448.17	4.22	57.62	116.93	2.15	26.15	534.60	3.16	
		14	29.056	22.809	0.431	320.71	3.32	41.31	508.01	4.18	65.31	133.40	2.14	29.14	625.16	3.24	

续表 14.5-4

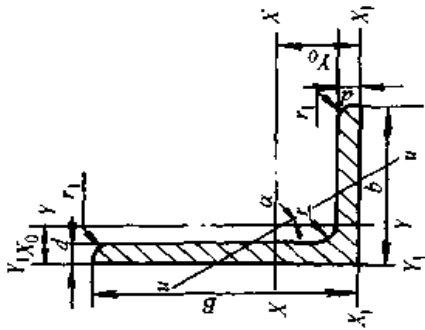
型号	尺寸 /mm		截面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	外表面积/ m ² ·m ⁻¹	参 考 数 值												Z ₀ / cm
						X - X			X ₀ - X ₀			Y ₀ - Y ₀			X ₁ · X ₁			
						I _X / cm ⁴	i _X / cm	W _X / cm ³	I _{X0} / cm ⁴	i _{X0} / cm	W _{X0} / cm ³	I _{Y0} / cm ⁴	i _{Y0} / cm	W _{Y0} / cm ³	I _{X1} / cm ⁴	I _{X1} / cm ⁴		
12.5	125	8	19.750	15.504	0.492	297.03	3.88	32.52	470.89	4.88	53.28	123.16	2.50	25.86	521.01	3.37		
		10	24.373	19.133	0.491	361.67	3.85	39.97	573.89	4.85	64.93	149.46	2.48	30.62	651.93	3.45		
		12	28.912	22.696	0.491	423.16	3.83	41.17	671.44	4.82	75.96	174.88	2.46	35.03	783.42	3.53		
		14	33.367	26.193	0.490	481.65	3.80	54.16	763.73	4.78	86.41	199.57	2.45	39.13	915.61	3.61		
14	140	10	27.373	21.488	0.551	514.65	4.34	50.58	817.27	5.46	82.56	212.04	2.78	39.20	915.11	3.82		
		12	32.512	25.522	0.551	603.68	4.31	59.80	938.79	5.43	96.85	248.57	2.76	45.02	1 099.28	3.90		
		14	37.567	29.490	0.550	688.81	4.28	68.75	1 093.56	5.40	110.47	284.06	2.75	50.45	1 284.22	3.98		
		16	42.539	33.390	0.549	770.24	4.26	77.46	1 221.81	5.36	123.42	318.67	2.74	55.55	1 470.07	4.06		
16	160	10	31.502	24.729	0.630	779.53	4.98	66.70	1 237.30	6.27	109.36	321.76	3.20	52.76	1 365.33	4.31		
		12	37.441	29.391	0.630	916.58	4.95	78.98	1 455.68	6.24	128.67	377.49	3.18	60.74	1 639.57	4.39		
		14	43.296	33.987	0.629	1 048.36	4.92	90.95	1 665.02	6.20	147.17	431.70	3.16	68.24	1 914.68	4.47		
		16	49.067	38.518	0.629	1 175.08	4.89	102.63	1 865.57	6.17	164.89	484.59	3.14	75.31	2 190.82	4.55		
18	180	12	42.241	33.159	0.710	1 321.35	5.59	100.82	2 100.10	7.05	165.00	542.61	3.58	78.41	2 332.80	4.89		
		14	48.896	38.383	0.709	1 514.48	5.56	116.25	2 407.42	7.02	189.14	621.53	3.58	88.38	2 723.48	4.97		
		16	55.467	43.542	0.709	1 700.99	5.54	131.13	2 703.37	6.98	212.40	698.60	3.55	97.83	3 115.29	5.05		
		18	61.955	48.634	0.708	1 875.12	5.50	145.64	2 988.24	6.94	234.78	762.01	3.51	105.14	3 502.43	5.13		
20	200	14	54.642	42.894	0.788	2 103.55	6.20	144.70	3 343.26	7.82	236.40	863.83	3.98	111.82	3 734.10	5.46		
		16	62.013	48.680	0.788	2 336.15	6.18	163.65	3 760.89	7.79	265.93	971.41	3.96	123.96	4 270.39	5.54		
		18	69.301	54.401	0.787	2 620.64	6.15	182.22	4 164.54	7.75	294.48	1 076.74	3.94	135.52	4 808.13	5.62		
		20	76.505	60.056	0.787	2 867.30	6.12	200.42	4 554.55	7.72	322.06	1 180.04	3.93	146.55	5 347.51	5.69		
24	240	16	90.661	71.168	0.785	3 338.25	6.07	236.17	5 294.97	7.64	374.41	1 381.53	3.90	166.55	6 457.16	5.87		

注: 1. 本表 $r_1 = d/3$ 及 r 数值仅用于孔型设计, 不做交货条件。

2. 标记示例: 碳素结构钢 Q235A, 尺寸为 160 mm × 160 mm × 16 mm 的热轧等边角钢, 标记为 热轧等边角钢 160 × 160 × 16—Q235A—GB/T 700—1988

1.5 热轧不等边角钢 (表 14.5-5)

表 14.5-5 热轧不等边角钢尺寸规格 (摘自 GB/T 9788—1988)



B —长边宽度 b —短边宽度
 d —边厚 r —内圆弧半径
 r_1 —边缘内圆弧半径 r —惯性矩
 i —惯性半径 W —截面系数
 X_0 —重心距离 Y_0 —重心距离

型号	尺寸/mm			参 考 数 值																
				截面面积/		理论质量/		X - X		Y - Y		X _j - X _i		Y _i - Y _j		u - u				
				cm ²	kg·m ⁻¹	m ² ·m ⁻¹	$I_x/$ cm ⁴	$i_x/$ cm	$W_x/$ cm ³	$I_y/$ cm ⁴	$i_y/$ cm	$W_y/$ cm ³	$I_{x1}/$ cm ⁴	$Y_0/$ cm	$I_{y0}/$ cm ⁴	$X_0/$ cm	$I_x/$ cm ⁴	$i_x/$ cm	$W_x/$ cm ³	$\tan\alpha$
2.5/1.6	B	25	16	1.162	0.912	0.080	0.70	0.78	0.43	0.22	0.44	0.19	1.56	0.86	0.43	0.42	0.14	0.34	0.16	0.392
	d	4	3.5	1.499	1.176	0.079	0.88	0.77	0.55	0.27	0.43	0.24	2.09	0.90	0.59	0.46	0.17	0.34	0.20	0.381
3.2/2	B	32	20	1.492	1.171	0.102	1.53	1.01	0.72	0.46	0.55	0.30	3.27	1.08	0.82	0.49	0.28	0.43	0.25	0.382
	d	4	3.5	1.939	1.522	0.101	1.93	1.00	0.93	0.57	0.54	0.39	4.37	1.12	1.12	0.53	0.35	0.42	0.32	0.374
4/2.5	B	40	25	1.890	1.484	0.127	3.08	1.28	1.15	0.93	0.70	0.49	6.39	1.32	1.59	0.59	0.56	0.54	0.40	0.386
	d	4	3.5	2.467	1.936	0.127	3.93	1.26	1.49	1.18	0.69	0.63	8.53	1.37	2.14	0.63	0.71	0.54	0.52	0.381
4.5/2.8	B	45	28	2.149	1.687	0.143	4.45	1.44	1.47	1.34	0.79	0.62	9.10	1.47	2.23	0.64	0.80	0.61	0.51	0.383
	d	4	3.5	2.806	2.203	0.143	5.69	1.42	1.91	1.70	0.78	0.80	12.13	1.51	3.00	0.68	1.02	0.60	0.66	0.380
5/3.2	B	50	32	2.431	1.908	0.161	6.24	1.60	1.84	2.02	0.91	0.82	12.49	1.60	3.31	0.73	1.20	0.70	0.68	0.404
	d	4	3.5	3.177	2.494	0.160	8.02	1.59	2.39	2.58	0.90	1.06	16.65	1.65	4.45	0.77	1.53	0.69	0.87	0.402
5.6/3.6	B	56	36	2.743	2.153	0.181	8.88	1.80	2.32	2.92	1.03	1.05	17.54	1.78	4.70	0.80	1.73	0.79	0.87	0.408
	d	5	3.5	3.590	2.818	0.180	11.45	1.79	3.03	3.76	1.02	1.37	23.39	1.82	6.33	0.85	2.23	0.79	1.13	0.408
				4.415	3.466	0.180	13.86	1.77	3.71	4.49	1.01	1.65	29.25	1.87	7.94	0.88	2.67	0.78	1.36	0.404

续表 14.5-5

型号	尺寸/ mm			参 考 数 值																					
				截面面积/				理论质量/		X-X				Y-Y				X ₁ -X ₁				Y ₁ -Y ₁		u-u	
				cm ²	kg·m ⁻¹	m ² ·m ⁻¹	I _X /cm ⁴	i _X /cm	W _X /cm ³	I _Y /cm ⁴	i _Y /cm	W _Y /cm ³	I _{X1} /cm ⁴	Y ₀ /cm	I _{Y0} /cm ⁴	X ₀ /cm	I _{X0} /cm ⁴	i _X /cm	W _X /cm ³	I _{Y1} /cm ⁴	i _Y /cm	W _Y /cm ³	tanα		
6.3/4	B	d	r	4.058	3.185	0.202	16.49	2.02	3.87	5.23	1.14	1.70	33.30	2.04	8.63	0.92	3.12	8.63	0.88	1.40	0.398				
	63	40	7	4.993	3.920	0.202	20.02	2.00	4.74	6.31	1.12	2.71	41.63	2.08	10.86	0.95	3.76	10.86	0.87	1.71	0.396				
		6		5.908	4.638	0.201	23.36	1.96	5.59	7.29	1.11	2.43	49.98	2.12	13.12	0.99	4.34	13.12	0.86	1.99	0.393				
		7		6.802	5.339	0.201	26.53	1.98	6.40	8.24	1.10	2.78	58.07	2.15	15.47	1.03	4.97	15.47	0.86	2.29	0.389				
7/4.5	B	d	r	4.547	3.570	0.226	23.17	2.26	4.86	7.55	1.29	2.17	45.92	2.24	12.26	1.02	4.40	12.26	0.98	1.77	0.410				
	70	45	7.5	5.609	4.403	0.225	27.95	2.23	5.92	9.13	1.28	2.65	57.10	2.28	15.39	1.06	5.40	15.39	0.98	2.19	0.407				
		6		6.647	5.218	0.225	32.54	2.21	6.95	10.62	1.26	3.12	68.35	2.32	18.58	1.09	6.35	18.58	0.98	2.59	0.404				
		7		7.657	6.011	0.225	37.22	2.20	8.03	12.01	1.25	3.57	79.99	2.36	21.84	1.13	7.16	21.84	0.97	2.94	0.402				
(7.5/5)	B	d	r	6.125	4.808	0.245	34.86	2.39	6.83	12.61	1.44	3.30	70.00	2.40	21.04	1.17	7.41	21.04	1.10	2.74	0.435				
	75	50	8	7.260	5.699	0.245	41.12	2.38	8.12	14.70	1.42	3.88	84.30	2.44	25.37	1.21	8.54	25.37	1.08	3.19	0.435				
		8		9.467	7.431	0.244	52.39	2.35	10.52	18.53	1.40	4.99	112.50	2.52	34.23	1.29	10.87	34.23	1.07	4.10	0.429				
		10		11.590	9.098	0.244	62.71	2.33	12.79	21.96	1.38	6.04	140.80	2.60	43.43	1.36	13.10	43.43	1.06	4.99	0.423				
8/5	B	d	r	6.375	5.005	0.255	41.96	2.56	7.78	12.82	1.42	3.32	85.21	2.60	21.06	1.14	7.66	21.06	1.10	2.74	0.388				
	80	50	8.5	7.560	5.935	0.255	49.49	2.56	9.25	14.95	1.41	3.91	102.53	2.65	25.41	1.18	8.85	25.41	1.08	3.20	0.387				
		7		8.724	6.848	0.255	56.16	2.54	10.58	16.96	1.39	4.48	119.33	2.69	29.82	1.21	10.18	29.82	1.08	3.70	0.384				
		8		9.867	7.745	0.254	62.83	2.52	11.92	18.85	1.38	5.03	136.41	2.73	34.32	1.25	11.38	34.32	1.07	4.16	0.381				
9/5.6	B	d	r	7.212	5.661	0.287	60.45	2.90	9.92	18.32	1.59	4.21	121.32	2.91	29.53	1.25	10.93	29.53	1.23	3.49	0.385				
	90	56	9	8.557	6.717	0.286	71.03	2.88	11.74	21.42	1.58	4.96	145.59	2.95	35.58	1.29	12.90	35.58	1.23	4.13	0.384				
		7		9.880	7.756	0.286	81.01	2.86	13.49	24.36	1.57	5.70	169.66	3.00	41.71	1.33	14.67	41.71	1.22	4.72	0.382				
		8		11.183	8.779	0.286	91.03	2.85	15.27	27.15	1.56	6.41	194.17	3.04	47.93	1.36	16.34	47.93	1.21	5.29	0.380				
10/6.3	B	d	r	9.617	7.550	0.320	99.06	3.21	14.64	30.94	1.79	6.35	199.71	3.24	50.50	1.43	18.42	50.50	1.38	5.25	0.394				
	100	63	10	11.111	8.722	0.320	113.45	3.20	19.88	35.26	1.78	7.29	233.00	3.28	59.14	1.47	21.00	59.14	1.38	6.02	0.393				
		8		12.584	9.878	0.319	127.37	3.18	19.08	39.39	1.77	8.21	266.32	3.32	67.88	1.50	23.50	67.88	1.37	6.78	0.391				
		10		15.467	12.142	0.319	153.81	3.15	23.32	47.12	1.74	9.98	333.06	3.40	85.73	1.58	28.33	85.73	1.35	8.24	0.387				
10/8	B	d	r	10.637	8.350	0.354	107.04	3.17	15.19	61.24	2.40	10.16	199.83	2.95	102.68	1.97	31.65	102.68	1.72	8.37	0.627				
	100	80	7	12.301	9.656	0.354	122.73	3.16	17.52	70.08	2.39	11.71	233.20	3.00	119.98	2.01	36.17	119.98	1.72	9.60	0.626				
		8		13.944	10.946	0.353	137.92	3.14	19.81	78.58	2.37	13.21	266.61	3.04	137.37	2.05	40.58	137.37	1.71	10.80	0.625				
		10		17.167	13.476	0.353	166.87	3.12	24.24	94.65	2.35	16.12	333.63	3.12	172.48	2.13	49.10	172.48	1.69	13.12	0.622				

续表 14.5.5

型号	尺寸/mm			截面面积/cm ²	理论质量/kg·m ⁻¹	外表面积/m ² ·m ⁻¹	参 考 数 值														
	B	d	r				X-X			Y-Y			X ₁ -X ₁			Y ₁ -Y ₁			u-u		
							I _x /cm ⁴	i _x /cm	W _X /cm ³	I _y /cm ⁴	i _y /cm	W _Y /cm ³	I _{x1} /cm ⁴	Y ₀ /cm	I _{x1} /cm ⁴	I _{y0} /cm ⁴	X ₀ /cm	I _{y0} /cm ⁴	I _u /cm ⁴	i _u /cm	W _u /cm ³	tanα
11/7		6		10.637	8.350	0.354	133.37	3.54	17.85	42.92	2.01	7.90	265.78	3.53	69.08	1.57	25.36	1.54	6.53	0.403	
	110	7	10	12.301	9.656	0.354	153.00	3.53	20.60	49.01	2.00	9.09	310.07	3.57	80.82	1.61	28.95	1.53	7.50	0.402	
		8		13.944	10.946	0.353	172.04	3.51	23.30	54.87	1.98	10.25	254.39	3.62	92.70	1.65	32.45	1.53	8.45	0.401	
		10		17.167	13.476	0.353	208.39	3.48	28.54	65.88	1.96	12.48	443.13	3.70	116.83	1.72	39.20	1.51	10.29	0.397	
12.5/8		7		14.096	11.066	0.403	227.98	4.02	26.86	74.42	2.30	12.01	454.99	4.01	120.32	1.80	43.81	1.76	9.92	0.408	
	125	8	11	15.989	12.551	0.403	256.77	4.01	30.41	83.49	2.28	13.56	519.99	4.06	137.85	1.84	49.15	1.75	11.18	0.407	
		10		19.712	15.474	0.402	312.04	3.98	37.33	100.67	2.26	16.56	950.09	4.14	173.40	1.92	59.45	1.74	13.64	0.404	
		12		23.351	18.330	0.402	364.41	3.95	44.01	116.67	2.24	19.43	780.39	4.22	209.67	2.00	69.35	1.72	16.01	0.400	
14/9		8		18.038	14.160	0.453	365.64	4.50	38.48	120.69	2.59	17.34	730.53	4.50	197.79	2.04	70.83	1.98	14.31	0.411	
	140	10	12	22.261	17.475	0.452	445.50	4.17	47.31	146.03	2.56	21.22	913.20	4.58	245.92	2.12	85.82	1.96	17.48	0.409	
		12		26.400	20.724	0.451	521.59	4.44	55.87	169.79	2.54	24.95	1096.09	4.66	296.89	2.19	100.21	1.95	20.54	0.406	
		14		30.456	23.908	0.451	594.10	4.42	64.18	192.10	2.51	28.54	1279.26	4.74	348.82	2.27	114.13	1.94	23.52	0.403	
16/10		10		25.315	19.872	0.512	668.69	5.14	62.13	205.03	2.85	26.56	1362.89	5.24	336.59	2.28	121.74	2.19	21.92	0.390	
	160	12	13	30.054	23.592	0.511	784.91	5.11	73.49	239.06	2.82	31.28	1635.56	5.32	405.94	2.36	142.33	2.17	25.79	0.388	
		14		34.709	27.247	0.510	896.30	5.08	84.56	271.20	2.80	35.83	1908.50	5.40	476.42	2.43	162.23	2.16	29.56	0.385	
		16		39.281	30.835	0.510	1003.04	5.05	95.33	301.60	2.77	40.24	2181.79	5.48	548.22	2.51	182.57	2.16	33.44	0.382	
18/11		10		28.373	22.273	0.571	956.25	5.80	78.96	278.11	3.13	32.49	1940.40	5.89	447.22	2.44	166.50	2.42	26.88	0.376	
	180	12	14	33.712	26.464	0.571	1124.72	5.78	93.53	325.03	3.10	38.32	2328.38	5.98	538.94	2.52	194.87	2.40	31.66	0.374	
		14		38.967	30.589	0.570	1286.91	5.75	107.76	369.55	3.08	43.97	2716.60	6.06	631.95	2.59	222.30	2.39	36.32	0.372	
		16		44.139	34.649	0.569	1443.06	5.72	121.64	411.85	3.06	49.44	3105.15	6.14	726.46	2.67	248.94	2.38	40.87	0.369	
20/12.5		12		37.912	29.761	0.641	1570.90	6.44	116.73	483.16	3.57	49.99	3193.85	6.54	787.74	2.83	285.79	2.74	41.23	0.392	
	200	14	16	43.867	34.436	0.640	1800.97	6.41	134.65	550.83	3.54	57.44	3726.17	6.62	922.47	2.91	326.58	2.73	47.34	0.390	
		16		49.739	39.045	0.639	2023.35	6.38	152.18	615.44	3.52	64.69	4258.86	6.70	1058.86	2.99	366.21	2.71	53.32	0.388	
		18		55.526	43.588	0.639	2238.30	6.35	169.33	677.19	3.49	71.74	4792.00	6.78	1197.13	3.06	404.83	2.70	59.18	0.385	

注：1. 括号内型号不推荐使用。

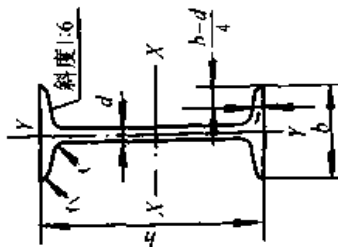
2. 截面图中的 $r_1 = d/3$ 及表中 r 值的数值仅用于孔型设计，不做交货条件。

3. 标记示例：碳素结构钢 Q235A，尺寸为 160 mm × 100 mm × 10 mm 热轧不等边角钢，标记为 热轧不等边角钢 Q235A—GB/T 700—1988

1.6 热轧工字钢 (表 14.5-6)

表 14.5-6 热轧工字钢尺寸规格 (摘自 GB/T 706—1988)

型号	尺寸 /mm						截面面积 / cm ²	理论质量 / kg·m ⁻¹	参 考 数 值					
	h	b	d	t	r	r ₁			X-X			Y-Y		
									I _X /cm ⁴	W _X /cm ³	i _X /cm	I _Y /cm ⁴	W _Y /cm ³	i _Y /cm
10	100	68	4.5	7.6	6.5	3.3	14.345	11.261	49	4.14	8.59	33.0	9.72	1.52
12.6	126	74	5	8.4	7.0	3.5	18.118	14.223	488	5.20	10.848	46.9	12.7	1.61
14	140	80	5.5	9.1	7.5	3.8	21.516	16.890	712	102	5.76	64.4	16.1	1.73
16	160	88	6.0	9.9	8.0	4.0	26.131	20.513	1 130	141	6.58	93.1	21.2	1.89
18	180	94	6.5	10.7	8.5	4.3	30.756	24.143	1 660	185	7.36	122	26.0	2.00
20a	200	100	7.0	11.4	9.0	4.5	35.578	27.929	2 370	287	8.15	158	31.5	2.12
20b	200	102	9.0	11.4	9.0	4.5	39.578	31.069	2 500	250	7.96	169	33.1	2.06
22a	220	110	7.5	12.3	9.5	4.8	42.128	33.070	3 400	309	8.99	225	40.9	2.31
22b	220	112	9.5	12.3	9.5	4.8	46.528	36.524	3 570	325	8.78	239	42.7	2.27
25a	250	116	8	13	10.0	5.0	48.541	38.105	5 020	402	10.20	280	48.3	2.4
25b	250	118	10	13	10.0	5.0	53.541	42.030	5 280	423	9.94	309	52.4	2.4
28a	280	122	8.5	13.7	10.5	5.3	55.404	43.492	7 110	508	11.3	345	56.6	2.50
28b	280	124	10.5	13.7	10.5	5.3	61.004	47.888	7 480	534	11.1	379	61.2	2.49
32a	320	130	9.5	15	11.5	5.8	67.156	52.777	11 100	692	12.8	460	70.8	2.62
32b	320	132	11.5	15	11.5	5.8	73.556	57.741	11 600	726	12.6	502	76	2.61
32c	320	134	13.5	15	11.5	5.8	79.956	62.765	12 200	760	12.3	544	81.2	2.61
36a	360	136	10.0	15.8	12.0	6.0	76.480	60.037	15 800	875	14.4	552	81.2	2.69



h—高度 r₁—端圆弧半径
 b—腿宽度 l—惯性矩
 d—腿厚度 W—截面系数
 t—平均腿厚度 i—惯性半径
 r—内圆弧半径 S—半截面的静力矩

续表 14.5-6

型号	尺寸/mm						截面面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	参 考 数 值						
	h	b	d	t	r	r ₁			X - X			Y - Y			
									I _x /cm ⁴	W _x /cm ³	i _x /cm	I _x :S _x	I _y /cm ⁴	W _y /cm ³	i _y /cm
36b	360	138	12.0	15.8	12.0	6.0	83.680	65.689	16 500	919	14.1	30.3	582	84.3	2.64
36c	360	140	14.0	15.8	12.0	6.0	90.880	71.341	17 300	962	13.8	29.9	612	87.4	2.60
40a	400	142	10.5	16.5	12.5	6.3	86.112	67.598	21 700	1 090	15.9	34.1	660	93.2	2.77
40b	400	144	12.5	16.5	12.5	6.3	94.112	73.878	22 800	1 140	15.6	33.6	692	96.2	2.71
40c	400	146	14.5	16.5	12.5	6.3	102.112	80.158	23 900	1 190	15.2	33.2	727	99.6	2.65
45a	450	150	11.5	18.0	13.5	6.8	102.446	80.420	32 200	1 430	17.7	38.6	855	114	2.89
45b	450	152	13.5	18.0	13.5	6.8	111.446	87.485	33 800	1 500	17.4	38.0	894	118	2.84
45c	450	154	15.5	18.0	13.5	6.8	120.446	94.550	35 300	1 570	17.1	37.6	938	122	2.79
50a	500	158	12.0	20.0	14.0	7.0	119.304	93.654	46 500	1 860	19.7	42.8	1 120	142	3.07
50b	500	160	14.0	20.0	14.0	7.0	129.304	101.504	48 600	1 940	19.4	42.4	1 170	146	3.01
50c	500	162	16.0	20.0	14.0	7.0	139.304	109.354	50 600	2 080	19	41.8	1 220	151	2.96
56a	560	166	12.5	21	14.5	7.3	135.435	106.316	65 600	2 340	22.0	47.7	1 370	165	3.18
56b	560	168	14.5	21	14.5	7.3	146.435	115.108	68 500	2 450	21.6	47.2	1 490	174	3.16
56c	560	170	16.5	21	14.5	7.3	157.835	123.9	71 400	2 550	21.3	46.7	1 560	183	3.16
63a	630	176	13.0	22	15	7.5	154.658	121.407	93 900	2 980	24.6	54.2	1 700	193	3.31
63b	630	178	15.0	22	15	7.5	167.258	131.298	98 100	3 160	24.2	53.5	1 810	204	3.29
63c	630	180	17.0	22	15	7.5	180.858	141.189	102 000	3 300	23.8	52.9	1 920	214	3.27
12①	120	74	5.0	8.4	7.0	3.5	17.818	13.987	436	72.7	4.95	10.3	46.9	12.7	1.62
24a①	240	116	8.0	13.0	10.0	5.0	47.741	37.477	4 570	381	9.77	20.7	280	48.4	2.42
24b①	240	118	10.0	13.0	10.0	5.0	52.541	41.245	4 800	400	9.57	20.4	297	50.4	2.38
27a①	270	122	8.5	13.7	10.5	5.3	54.554	42.825	6 550	485	10.9	23.8	345	56.6	2.51
27b①	270	124	10.5	13.7	10.5	5.3	59.954	47.064	6 870	509	10.7	22.9	366	58.9	2.47
30a①	300	126	9.0	14.4	11.0	5.5	61.254	48.084	8 950	597	12.1	25.7	400	63.5	2.55
30b①	300	128	11.0	14.4	11.0	5.5	67.254	52.794	9 400	627	11.8	25.4	422	65.9	2.50
30c①	300	130	13.0	14.4	11.0	5.5	73.254	57.504	9 850	657	11.6	26.0	445	68.5	2.46
55a①	550	168	12.5	21.0	14.5	7.3	134.185	105.335	62 900	2 290	21.6	46.9	1 370	164	3.19
55b①	550	168	14.5	21.0	14.5	7.3	145.185	113.970	65 600	2 390	21.2	46.4	1 420	170	3.14
55c①	550	170	16.5	21.0	14.5	7.3	156.185	122.605	68 400	2 490	20.9	45.8	1 480	175	3.08

注: 1. 工字钢长度: 型号 10~18, 长度为 5~19 m; 型号 20~63, 长度为 6~19 m。

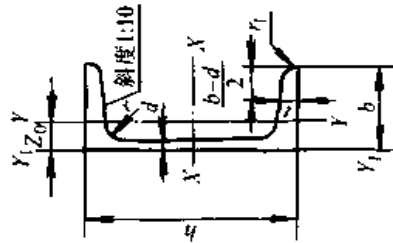
2. 标注示例: 碳素结构钢 Q235A, 尺寸为 400 mm×144 mm×12.5 mm×12.5 mm 的热轧工字钢。

标记为 热轧工字钢 $400 \times 144 \times 12.5$ —GB/T 706—1988
Q235A—GB/T 700—1988

①所列的规格型号经供需双方协定方能供应。

1.7 热轧槽钢 (表 14.5-7)

表 14.5-7 热轧槽钢尺寸规格 (摘自 GB/T 707-1988)



h —高度 r_1 —腿端圆弧半径
 b —腿宽度 I —惯性矩
 d —腿厚度 W —截面系数
 t —平均腿厚度 i —惯性半径
 r —内圆弧半径 Z_0 —YY 轴与 Y_1, Y_2 轴间距离

型号	尺寸/mm						截面面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	参 考 数 值							
	h	b	d	t	r	r_1			X-X			Y-Y			Y_1-Y_2	
									W_X / cm ³	I_X / cm ⁴	i_X / cm	W_Y / cm ³	I_Y / cm ⁴	i_Y / cm		$I_{Y_1-Y_2}$ / cm ⁴	$Z_0$/ cm
5	50	37	4.5	7.0	7.0	3.50	6.928	5.438	10.4	26.0	1.94	3.55	8.3	1.10	20.9	1.35
6.3	63	40	4.8	7.5	7.5	3.75	8.451	6.634	16.1	50.8	2.453	4.50	11.92	1.19	28.4	1.36
8	80	43	5.0	8.0	8.0	4.0	10.248	8.045	25.3	101	3.15	5.79	16.6	1.27	37.4	1.43
10	100	48	5.3	8.5	8.5	4.25	12.748	10.007	39.7	198	3.95	7.80	25.6	1.41	54.9	1.52
12.6	126	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.692	12.318	62.1	391	4.953	10.2	38	1.57	77.1	1.59
14a	140	58	6.0	9.5	9.5	4.75	18.516	14.535	80.5	564	5.52	13.0	53.2	1.70	107	1.71
14b	140	60	8.0	9.5	9.5	4.75	21.316	16.733	87.1	609	5.35	14.1	61.1	1.69	121	1.67
16a	160	63	6.5	10.0	10.0	5.0	21.962	17.240	108	866	6.28	16.30	73.3	1.83	144	1.80
16	160	65	8.5	10.0	10.0	5.0	25.162	19.752	117	935	6.10	17	83.4	1.82	161	1.75
18a	180	68	7.0	10.5	10.5	5.25	25.699	20.174	141	1270	7.04	20.0	98.6	1.96	190	1.88
18	180	70	9.0	10.5	10.5	5.25	29.299	23.000	152	1370	6.84	21.5	111	1.95	210	1.84
20a	200	73	7.0	11.0	11.0	5.5	28.837	22.637	178	1780	7.86	24.2	128	2.11	244	2.01
20	200	75	9.0	11.0	11.0	5.5	32.831	25.777	191	1910	7.64	25.9	144	2.09	268	1.95
22a	220	77	7.0	11.5	11.5	5.75	31.846	24.999	218	2390	8.67	28.2	158	2.23	298	2.10

续表 14.5-7

型 号	尺 寸 /mm					截面面积/ cm ²	理论质量/ kg·m ⁻¹	参 考 数 值								
	h	b	d	t	r			r ₁	X - X		Y - Y		Y ₁ - Y ₁	Z ₀ / cm		
									W _X / cm ³	I _X / cm ⁴	i _X / cm	W _Y / cm ³			I _Y / cm ⁴	i _Y / cm	I_{Y}/ cm^{4}
22	220	79	9.0	11.5	11.5	5.75	39.246	28.453	234	2 570	8.42	30.1	176	2.21	326	2.03
25a	250	78	7.0	12	12	6	34.917	27.410	270	3 370	9.82	30.6	176	2.24	322	2.07
25b	250	80	9.0	12	12	6	39.917	31.335	282	3 530	9.41	32.7	196	2.22	353	1.98
25c	250	82	11.0	12	12	6	44.917	35.260	295	3 690	9.07	35.9	218	2.21	384	1.92
28a	280	82	7.5	12.5	12.5	6.25	40.034	31.427	340	4 760	10.9	35.7	218	2.33	388	2.10
28b	280	84	9.5	12.5	12.5	6.25	45.634	35.823	366	5 130	10.6	37.9	242	2.30	428	2.02
28c	280	86	11.5	12.5	12.5	6.25	51.234	40.219	393	5 500	10.4	40.3	268	2.29	463	1.95
32a	320	88	8.0	14	14	7	48.513	38.083	475	7 600	12.5	46.5	305	2.50	552	2.24
32b	320	90	10.0	14	14	7	54.913	43.107	509	8 140	12.2	49.2	336	2.47	593	2.16
32c	320	92	12.0	14	14	7	61.313	48.131	543	8 690	11.9	52.6	374	2.47	643	2.09
36a	360	96	9.0	16	16	8	60.910	47.814	660	11 900	14.0	63.5	455	2.73	818	2.44
36b	360	98	11.0	16	16	8	68.110	53.466	703	12 700	13.6	66.9	497	2.70	880	2.37
36c	360	100	13.0	16	16	8	75.310	59.118	746	13 400	13.4	70.0	536	2.67	948	2.34
40a	400	100	10.5	18	18	9	75.068	58.928	879	17 600	15.3	78.8	592	2.81	1 070	2.49
40b	400	102	12.5	18	18	9	83.068	65.208	932	18 600	15.0	82.5	640	2.78	1 140	2.44
40c	400	104	14.5	18	18	9	91.068	71.488	986	19 700	14.7	86.1	688	2.75	1 220	2.42
6.5①	65	40	4.8	7.5	7.5	3.75	8.547	6.709	17.0	55.2	2.54	4.59	12.0	1.19	28.3	1.38
12①	120	53	5.5	9.0	9.0	4.5	15.362	12.059	57.7	346	4.75	10.2	37.4	1.56	77.7	1.62
24a①	240	78	7.0	12.0	12.0	6.0	34.217	26.86	254	3 050	9.45	30.5	174	2.25	325	2.10
24b①	240	80	9.0	12.0	12.0	6.0	39.017	30.628	274	3 280	9.17	32.5	194	2.23	355	2.03
24c①	240	82	11.0	12.0	12.0	6.0	43.817	34.396	293	3 570	8.96	34.4	213	2.21	388	2.00
27a①	270	82	7.5	12.5	12.5	6.25	39.284	30.838	323	4 360	10.5	35.5	216	2.34	393	2.13
27b①	270	84	9.5	12.5	12.5	6.25	44.684	35.077	347	4 690.1	10.3	37.7	239	2.31	428	2.06
27c①	270	86	11.5	12.5	12.5	6.25	50.084	39.316	372	5 018.1	10.1	39.8	261	2.28	467	2.03
30a①	300	85	7.5	13.5	13.5	6.75	43.902	34.463	403	6 047.9	11.7	41.1	260	2.43	467	2.17
30b①	300	87	9.5	13.5	13.5	6.75	49.902	39.173	433	6 497.9	11.4	44.0	289	2.41	515	2.13
30c①	300	89	11.5	13.5	13.5	6.75	55.902	43.883	463	6 947.9	11.2	46.4	316	2.38	560	2.09

注：1. 槽钢的长度：型号 5~8，长度 5~12 m；型号 10~18，长度 5~19 m；型号 20~40，长度 6~19 m。

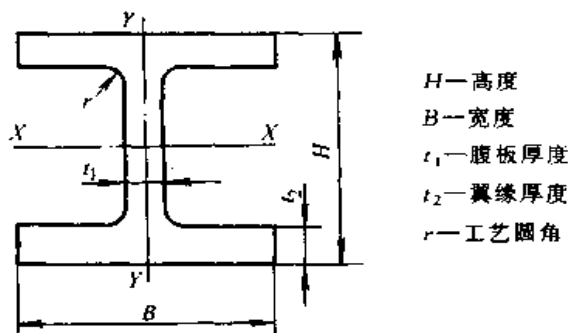
2. 标注示例：碳素结构钢 Q235A，尺寸为 180 mm×68 mm×7 mm 的热轧槽钢。

标记为 热轧槽钢 180×68×7—GB/T 707—1988
Q235A—GB/T 700—1988

① 表列此型号经供需双方协定方可供应。

1.8 热轧 H 型钢和剖分 T 型钢 (表 14.5-8~表 14.5-10)

表 14.5-8 热轧 H 型钢尺寸规格 (摘自 GB/T 11263—1998)



类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm				截面 面积/ cm ²	理论 质量/ kg·m ⁻¹	截面特性参数					
		$H \times B$	t_1	t_2	r			惯性矩/cm ⁴		惯性半径/cm		截面系数/cm ³	
								I_x	I_y	i_x	i_y	W_x	W_y
HW	100×100	100×100	6	8	10	21.90	17.2	383	134	4.18	2.47	76.5	26.7
	125×125	125×125	6.5	9	10	30.31	23.8	847	294	5.29	3.11	136	47.0
	150×150	150×150	7	10	13	40.55	31.9	1 660	564	6.39	3.73	221	75.1
	175×175	175×175	7.5	11	13	51.43	40.3	2 900	984	7.50	4.37	331	112
	200×200	200×200	8	12	16	64.28	50.5	4 770	1 600	8.61	4.99	477	160
		# 200×204	12	12	16	72.28	56.7	5 030	1 700	8.35	4.85	503	167
	250×250	250×250	9	14	16	92.18	72.4	10 800	3 650	10.8	6.29	867	292
		# 250×255	14	14	16	104.7	82.2	11 500	3 880	10.5	6.09	919	304
	300×300	# 294×302	12	12	20	108.3	85.0	17 000	5 520	12.5	7.14	1 160	365
		300×300	10	15	20	120.4	94.5	20 500	6 760	13.1	7.49	1 370	450
		300×305	15	15	20	135.4	106	21 600	7 100	12.6	7.24	1 440	466
	350×350	# 344×348	10	16	20	146.0	115	33 300	11 200	15.1	8.78	1 940	646
		350×350	12	19	20	173.9	137	40 300	13 600	15.2	8.84	2 300	776
	400×400	# 388×402	15	15	24	179.2	141	49 200	16 300	16.6	9.52	2 540	809
		# 394×398	11	18	24	187.6	147	56 400	18 900	17.3	10.0	2 860	951
		400×400	13	21	24	219.5	172	66 900	22 400	17.5	10.1	3 340	1 120
		# 400×408	21	21	24	251.5	197	71 100	23 800	16.8	9.73	3 560	1 170
		# 414×405	18	28	24	296.2	233	93 000	31 000	17.7	10.2	4 490	1 530
		# 428×407	20	35	24	361.4	284	119 000	39 400	18.2	10.4	5 580	1 930
		* 458×417	30	50	24	529.3	415	187 000	60 500	18.8	10.7	8 180	2 900
* 498×432		45	70	24	770.8	605	298 000	94 400	19.7	11.1	12 000	4 370	

续表 14.5-8

类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm				截面 面积/ cm ²	理论 质量/ kg·m ⁻¹	截面特性参数					
		H×B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/cm ⁴		惯性半径/cm		截面系数/cm ³	
								I _x	I _y	i _x	i _y	W _x	W _y
HM	150×100	148×100	6	9	13	27.25	21.4	1 040	151	6.17	2.35	140	30.2
	200×150	194×150	6	9	16	39.76	31.2	2 740	508	8.30	3.57	283	67.7
	250×175	244×175	7	11	16	56.24	44.1	6 120	985	10.4	4.18	502	113
	300×200	294×200	8	12	20	73.03	57.3	11 400	1 600	12.5	4.69	779	160
	350×250	340×250	9	14	20	101.5	79.7	21 700	3 650	14.6	6.00	1 280	292
	400×300	390×300	10	16	24	136.7	107	38 900	7 210	16.9	7.26	2 000	481
	450×300	440×300	11	18	24	157.4	124	56 100	8 110	18.9	7.18	2 550	541
	500×300	482×300	11	15	28	146.4	115	60 800	6 770	20.4	6.80	2 520	451
		488×300	11	18	28	164.4	129	71 400	8 120	20.8	7.03	2 930	541
	600×300	582×300	12	17	28	174.5	137	103 000	7 670	24.3	6.63	3 530	511
588×300		12	20	28	192.5	151	118 000	9 020	24.8	6.85	4 020	601	
594×302		14	23	28	222.4	175	137 000	10 600	24.9	6.90	4 620	701	
HN	100×50	100×50	5	7	10	12.16	9.54	192	14.9	3.98	1.11	38.5	5.96
	125×60	125×60	6	8	10	17.01	13.3	417	29.3	4.95	1.31	66.8	9.75
	150×75	150×75	5	7	10	18.16	14.3	679	49.6	6.12	1.65	90.6	13.2
	175×90	175×90	5	8	10	23.21	18.2	1 220	97.6	7.26	2.05	140	21.7
	200×100	198×99	4.5	7	13	23.59	18.5	1 610	114	8.27	2.20	163	23.0
		200×100	5.5	8	13	27.57	21.7	1 880	134	8.25	2.21	188	26.8
	250×125	248×124	5	8	13	32.89	25.8	3 560	255	10.4	2.78	287	41.1
		250×125	6	9	13	37.87	29.7	4 080	294	10.4	2.79	326	47.0
	300×150	298×149	5.5	8	16	41.55	32.6	6 460	443	12.4	3.26	433	59.4
		300×150	6.5	9	16	47.53	37.3	7 350	508	12.4	3.27	490	67.7
	350×175	346×174	6	9	16	53.19	41.8	11 200	792	14.5	3.86	649	91.0
		350×175	7	11	16	63.66	50.0	13 700	985	14.7	3.93	782	113
	#400×150	#400×150	8	13	16	71.12	55.8	18 800	734	16.3	3.21	942	97.9
	400×200	396×199	7	11	16	72.16	56.7	20 000	1 450	16.7	4.48	1 010	145
		400×200	8	13	16	84.12	66.0	23 700	1 740	16.8	4.54	1 190	174
	#450×150	#450×150	9	14	20	83.41	65.5	27 100	793	18.0	3.08	1 200	106
450×200	446×199	8	12	20	84.95	66.7	29 000	1 580	18.5	4.31	1 300	159	
	450×200	9	14	20	97.41	76.5	33 700	1 870	18.6	4.38	1 500	187	
#500×150	#500×150	10	16	20	98.23	77.1	38 500	907	19.8	3.04	1 540	121	
500×200	496×199	9	14	20	101.3	79.5	41 900	1 840	20.3	4.27	1 690	185	
	500×200	10	16	20	114.2	89.6	47 800	2 140	20.5	4.33	1 910	214	
	#506×201	11	19	20	131.3	103	56 500	2 580	20.8	4.43	2 230	257	

续表 14.5-8

类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm				截面 面积/ cm ²	理论 质量/ kg·m ⁻¹	截面特性参数					
		H×B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/cm ⁴		惯性半径/cm		截面系数/cm ³	
								I _X	I _Y	i _X	i _Y	W _X	W _Y
HN	600×200	596×199	10	15	24	121.2	95.1	69 300	1 980	23.9	4.04	2 330	199
		600×200	11	17	24	135.2	106	78 200	2 280	24.1	4.11	2 610	228
		#606×201	12	20	24	153.3	120	91 000	2 720	24.4	4.21	3 000	271
	700×300	#692×300	13	20	28	211.5	166	172 000	9 020	28.6	6.53	4 980	602
		700×300	13	24	28	235.5	185	201 000	10 800	29.3	6.78	5 760	722
	*800×300	*792×300	14	22	28	243.4	191	254 000	9 930	32.3	6.39	6 400	662
		*800×300	14	26	28	267.4	210	292 000	11 700	33.0	6.62	7 290	782
	*900×300	*890×299	15	23	28	270.9	213	345 000	10 300	35.7	6.16	7 760	688
		*900×300	16	28	28	309.8	243	411 000	12 600	36.4	6.39	9 140	843
		*912×302	18	34	28	364.0	286	498 000	15 700	37.0	6.56	10 900	1 040

注：1. “#”表示的规格为不常用规格。

2. “*”表示的规格目前国内尚未安排生产。

3. 型号属同一范围的产品，其内侧尺寸高度是一致的。

4. 截面面积计算公式为 $t_1(H-2t_2)+2Bt_2+0.858r^2$ 。

5. H型钢分为三类：宽翼缘—HW；中翼缘—HM；窄翼缘—HN。

6. 交货长度应在合同中注明。

7. 标注示例：高 300 mm、宽 150 mm，腹板厚度 6.5 mm、长度 1 000 mm 的 H 型钢。

标记为 H 型钢 H300×150×6.5×1 000 GB/T 11263—1998。

表 14.5-9 热轧 H 型钢桩尺寸规格（摘自 GB/T 11263—1998）

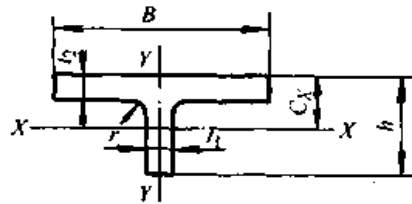
类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm				截面 面积 cm ²	理论 质量 kg·m ⁻¹	截面特性参数						
		H×B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/cm ⁴		惯性半径/cm		截面系数/cm ³		表面 面积 m ² ·m ⁻¹
								I _X	I _Y	i _X	i _Y	W _X	W _Y	
HP	200×200	200×204	12	12	16	72.28	56.7	5 030	1 700	8.35	4.85	503	167	1.16
	250×250	244×252	11	11	16	82.05	64.4	8 790	2 940	10.4	5.98	720	233	1.45
		250×255	14	14	16	104.7	82.2	11 500	3 880	10.5	6.09	919	304	1.46
	300×300	294×302	12	12	20	108.3	85.0	17 000	5 520	12.5	7.13	1 150	365	1.74
		300×300	10	15	20	120.4	94.5	20 500	6 760	13.1	7.49	1 370	450	1.75
		300×305	15	15	20	135.4	106	21 600	7 110	12.6	7.24	1 440	466	1.76
	350×350	338×351	13	13	20	135.3	106	28 200	9 380	14.4	8.33	1 670	535	2.02
		344×354	16	16	20	166.6	131	35 300	11 800	14.6	8.43	2 050	669	2.04
		350×350	12	19	20	173.9	137	40 300	13 600	15.2	8.84	2 300	776	2.04
		350×357	19	19	20	198.4	156	42 800	14 400	14.7	8.53	2 450	809	2.06

续表 14.5.9

类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm				截面 面积 cm ²	理论 质量 kg·m ⁻¹	截面特性参数						
		H×B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/cm ⁴		惯性半径/cm		截面系数/cm ³		表面 面积 m ² ·m ⁻¹
								I _x	I _y	i _x	i _y	W _x	W _y	
HP	400×400	388×402	15	15	24	179.2	141	49 200	16 300	16.6	9.52	2 540	809	2.31
		394×405	18	18	24	215.2	169	59 900	20 000	16.7	9.63	3 040	986	2.33
		400×400	13	21	24	219.5	172	66 900	22 400	17.5	10.1	3 340	1 120	2.33
		400×408	21	21	24	251.5	197	71 100	23 800	16.8	9.73	3 560	1 170	2.35
		414×405	18	28	24	296.2	233	93 000	31 000	17.7	10.2	4 490	1 530	2.37
		428×407	20	35	24	361.4	284	11 900	39 400	18.2	10.4	5 580	1 930	2.40
* 500×500	* 492×465	15	20	28	260.5	204	118 000	33 500	21.3	11.4	4 810	1 440	2.77	
	* 502×465	15	25	28	307.0	241	147 000	41 900	21.9	11.7	5 860	1 800	2.79	
	* 502×470	20	25	28	332.1	261	152 000	43 300	21.4	11.4	6 070	1 840	2.80	

- 注：1. “*”表示的规格，目前国内尚未安排生产。
 2. 型号属同一范围的产品，其内侧尺寸高度是一致的。
 3. 截面面积计算公式为 $t_1(H-2t_2) + 2Bt_2 + 0.858r^2$ 。
 4. HP表示H型钢桩的代号。
 5. H型钢桩的截面图形参见表14.5-8。
 6. H型钢、H型钢桩和剖分T型钢的钢号、化学成分和力学性能应符合GB/T 700或GB/T 712或GB/T 714或GB/T 1591或GB/T 4171的有关规定。

表 14.5-10 热轧剖分T型钢尺寸规格 (摘自GB/T 11263—1998)



类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm					截面 面积/ cm ²	理论 质量/ kg·m ⁻¹	截面特性参数						对应 H型钢 系列 型号	
		h	B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/ cm ⁴		惯性半径/ cm		截面系数/ cm ³			重心/ cm
									I _x	I _y	i _x	i _y	W _x	W _y			C_{x}
TW	50×100	50	100	6	8	10	10.95	8.56	16.1	66.9	1.21	2.47	4.03	13.4	1.00	100×100
	62.5×125	62.5	125	6.5	9	10	15.16	11.9	35.0	147	1.52	3.11	6.91	23.5	1.19	125×125
	75×150	75	150	7	10	13	20.28	15.9	66.4	282	1.81	3.73	10.8	37.6	1.37	150×150
	87.5×175	87.5	175	7.5	11	13	25.71	20.2	115	492	2.11	4.37	15.9	56.2	1.55	175×175
	100×200	100 200	100	200	8	12	16	32.14	25.2	185	801	2.40	4.99	22.3	80.1	1.73	200×200
#100 204		100	204	12	12	16	36.14	28.3	256	851	2.66	4.85	32.4	83.5	2.09	

续表 14.5-10

类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm					截面 面积/ cm ²	理论 质量/ kg·m ⁻¹	截面特性参数							对应 H型钢 系列 型号
		h	B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/ cm ⁴		惯性半径/ cm		截面系数/ cm ³		重心 cm	
									I _x	I _y	i _x	i _y	W _x	W _y			C_{x}
TW	125×250	125	250	9	14	16	46.09	36.2	412	1 820	2.99	6.29	39.5	146	2.08	250×250
		#125	255	14	14	16	52.34	41.1	589	1940	3.36	6.09	59.4	152	2.58	
	150×300	#147	302	12	12	20	54.16	42.5	858	2 760	3.98	7.14	72.3	183	2.83	300×300
		150	300	10	15	20	60.22	47.3	798	3 380	3.64	7.49	63.7	225	2.47	
		150	305	15	15	20	67.72	53.1	1 110	3 550	4.05	7.24	92.5	233	3.02	
	175×350	#172	348	10	16	20	73.00	57.3	1 230	5 620	4.11	8.78	84.7	323	2.67	350×350
		175	350	12	19	20	86.94	68.2	1 520	6 790	4.18	8.84	104	388	2.86	
	200×400	#194	402	15	15	24	89.62	70.3	2 480	8 130	5.26	9.52	158	405	3.69	400×400
		#197	398	11	18	24	93.80	73.6	2 050	9 460	4.67	10.0	123	476	3.01	
		200	400	13	21	24	109.7	86.1	2 480	11 200	4.75	10.1	147	560	3.21	
		#200	408	21	21	24	125.7	98.7	3 650	11 900	5.39	9.73	229	584	4.07	
		#207	405	18	28	24	148.1	116	3 620	15 500	4.95	10.2	213	766	3.68	
#214		407	20	35	24	180.7	142	4 380	19 700	4.92	10.4	250	967	3.90		
TM	74×100	74	100	6	9	13	13.63	10.7	51.7	75.4	1.95	2.35	8.80	15.1	1.55	150×100
	97×150	97	150	6	9	16	19.88	15.6	125	254	2.50	3.57	15.8	33.9	1.78	200×150
	122×175	122	175	7	11	16	28.12	22.1	289	492	3.20	4.18	29.1	56.3	2.27	250×175
	147×200	147	200	8	12	20	36.52	28.7	572	802	3.96	4.69	48.2	80.2	2.82	300×200
	170×250	170	250	9	14	20	50.76	39.9	1 020	1 830	4.48	6.00	73.1	146	3.09	350×250
	200×300	195	300	10	16	24	68.37	53.7	1 730	3 600	5.03	7.26	108	240	3.40	400×300
	220×300	220	300	11	18	24	78.69	61.8	2 680	4 060	5.84	7.18	150	270	4.05	450×300
	250×300	241	300	11	15	28	73.23	57.5	3 420	3 380	6.83	6.80	178	226	4.90	500×300
		244	300	11	18	28	82.23	64.5	3 620	4 060	6.64	7.03	184	271	4.65	
	300×300	291	300	12	17	28	87.25	68.5	6 360	3 830	8.54	6.63	280	256	6.39	600×300
294		300	12	20	28	96.25	75.5	6 710	4 510	8.35	6.85	288	301	6.08		
#297		302	14	23	28	111.2	87.3	7 920	5 290	8.44	6.90	339	351	6.33		

续表 14.5-10

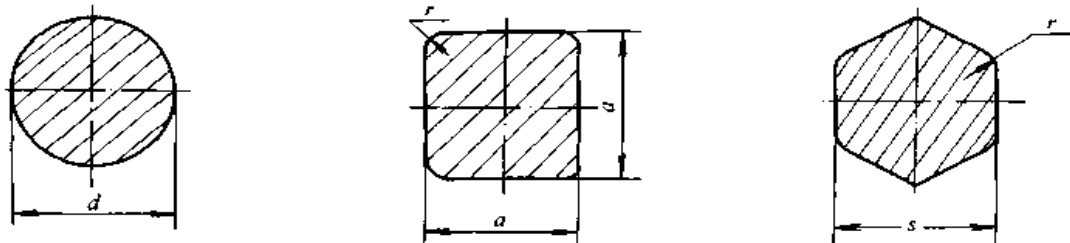
类别	型号 (高度×宽度)	截面尺寸/mm					截面 面积/ cm ²	理论 质量/ kg·m ⁻¹	截面特性参数							对应 H型钢 系列
		h	B	t ₁	t ₂	r			惯性矩/ cm ⁴		惯性半径/ cm		截面系数/ cm ³		重心/ cm	
									I _x	I _y	i _x	i _y	W _x	W _y		C _x	型号
TN	50×50	50	50	5	7	10	6.079	4.79	11.9	7.45	1.40	1.11	3.18	2.98	1.27	100×50
	62.5×60	62.5	60	6	8	10	8.499	6.67	27.5	14.6	1.80	1.31	5.96	4.88	1.63	125×60
	75×75	75	75	5	7	10	9.079	7.14	42.7	24.8	2.17	1.65	7.46	6.61	1.78	150×75
	87.5×90	87.5	90	5	8	10	11.60	9.11	70.7	48.8	2.47	2.05	10.4	10.8	1.92	175×90
	100×100	99	99	4.5	7	13	11.80	9.26	94.0	56.9	2.82	2.20	12.1	11.5	2.13	200×100
		100	100	5.5	8	13	13.79	10.8	115	67.1	2.88	2.21	14.8	13.4	2.27	
	125×125	124	124	5	8	13	16.45	12.9	208	128	3.56	2.78	21.3	20.6	2.62	250×125
		125	125	6	9	13	18.94	14.8	249	147	3.62	2.79	25.6	23.5	2.78	
	150×150	149	149	5.5	8	16	20.77	16.3	395	221	4.36	3.26	33.8	29.7	3.22	300×150
		150	150	6.5	9	16	23.76	18.7	465	254	4.42	3.27	40.0	33.9	3.38	
	175×175	173	174	6	9	16	26.60	20.9	681	396	5.06	3.86	50.0	45.5	3.68	350×175
		175	175	7	11	16	31.83	25.0	816	492	5.06	3.93	59.3	56.3	3.74	
	200×200	198	199	7	11	16	36.08	28.3	1 190	724	5.76	4.48	76.4	72.7	4.17	400×200
		200	200	8	13	16	42.06	33.0	1 400	868	5.76	4.54	88.6	86.8	4.23	
	225×200	223	199	8	12	20	42.54	33.4	1 880	790	6.65	4.31	109	79.4	5.07	450×200
		225	200	9	14	20	48.71	38.2	2 160	936	6.66	4.38	124	93.6	5.13	
	250×200	248	199	9	14	20	50.64	39.7	2 840	922	7.49	4.27	150	92.7	5.90	500×200
		250	200	10	16	20	57.12	44.8	3 210	1 070	7.50	4.33	169	107	5.96	
		# 253	201	11	19	20	65.65	51.5	3 670	1 290	7.48	4.43	190	128	5.95	
	300×200	298	199	10	15	24	60.62	47.6	5 200	991	9.27	4.04	236	100	7.76	600×200
		300	200	11	17	24	67.60	53.1	5 820	1 140	9.28	4.11	262	114	7.81	
		# 303	201	12	20	24	76.63	60.1	6 580	1 360	9.26	4.21	292	135	7.76	

注：1.“#”表示为不常用的规格。

2. 剖分T型钢分为三类：TW—宽翼缘；TM—中翼缘；TN—窄翼缘。

1.9 冷拉圆钢、方钢和六角钢 (表 14.5-11)

表 14.5-11 冷拉圆钢、方钢和六角钢尺寸规格 (摘自 GB/T 905—1994)



尺寸 d 、 a 、 s / mm	圆钢		方钢		六角钢	
	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
3.0	7.069	0.055 5	9.000	0.070 6	7.794	0.061 2
3.2	8.042	0.063 1	10.24	0.080 4	8.868	0.069 6
3.5	9.621	0.075 5	12.25	0.096 2	10.61	0.083 3
4.0	12.57	0.098 6	16.00	0.126	13.86	0.109
4.5	15.90	0.125	20.25	0.159	17.54	0.138
5.0	19.63	0.154	25.00	0.196	21.65	0.170
5.5	23.76	0.187	30.25	0.237	26.20	0.206
6.0	28.27	0.222	36.00	0.283	31.18	0.245
6.3	31.17	0.245	39.69	0.312	34.37	0.270
7.0	38.48	0.302	49.00	0.385	42.44	0.333
7.5	44.18	0.347	56.25	0.442	—	—
8.0	50.27	0.395	64.00	0.502	55.43	0.435
8.5	56.75	0.445	72.25	0.567	—	—
9.0	63.62	0.499	81.00	0.636	70.15	0.551
9.5	70.88	0.556	90.25	0.708	—	—
10.0	78.54	0.617	100.0	0.785	86.60	0.680

续表 14.5-11

尺寸 d 、 a 、 s / mm	圆钢		方钢		六角钢	
	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
10.5	86.59	0.680	110.2	0.865	—	—
11.0	95.03	0.746	121.0	0.950	104.8	0.823
11.5	103.9	0.815	132.2	1.04	—	—
12.0	113.1	0.888	144.0	1.13	124.7	0.979
13.0	132.7	1.04	169.0	1.33	146.4	1.15
14.0	153.9	1.21	196.0	1.54	169.7	1.33
15.0	176.7	1.39	225.0	1.77	194.9	1.53
16.0	201.1	1.58	256.0	2.01	221.7	1.74
17.0	227.0	1.78	289.0	2.27	250.3	1.96
18.0	254.5	2.00	324.0	2.54	280.6	2.20
19.0	283.5	2.23	361.0	2.83	312.6	2.45
20.0	314.2	2.47	400.0	3.14	346.4	2.72
21.0	346.4	2.72	441.0	3.46	381.9	3.00
22.0	380.1	2.98	484.0	3.80	419.2	3.29
24.0	452.4	3.55	576.0	4.52	498.8	3.92
25.0	490.9	3.85	625.0	4.91	541.3	4.25
26.0	530.9	4.17	676.0	5.31	585.4	4.60
28.0	615.8	4.83	784.0	6.15	679.0	5.33
30.0	706.9	5.55	900.0	7.06	779.4	6.12
32.0	804.2	6.31	1 024	8.04	886.8	6.96
34.0	907.9	7.13	1 156	9.07	1 001	7.86
35.0	962.1	7.55	1 225	9.62	—	—

续表 14.5-11

尺寸 d 、 a 、 s / mm	圆钢		方钢		六角钢	
	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	截面面积 / mm^2	理论质量 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$
36.0	—	—	—	—	1 122	8.81
38.0	1 134	8.90	1 444	11.3	1 251	9.82
40.0	1 257	9.86	1 600	12.6	1 386	10.9
42.0	1 385	10.9	1 764	13.8	1 528	12.0
45.0	1 590	12.5	2 025	15.9	1 754	13.8
48.0	1 810	14.2	2 304	18.1	1 995	15.7
50.0	1 968	15.4	2 500	19.6	2 165	17.0
52.0	2 206	17.3	2 809	22.0	2 433	19.1
55.0	—	—	—	—	2 620	20.5
56.0	2 463	19.3	3 136	24.6	—	—
60.0	2 827	22.2	3 600	28.3	3 118	24.5
63.0	3 117	24.5	3 969	31.2	—	—
65.0	—	—	—	—	3 654	28.7
67.0	3 526	27.7	4 489	35.2	—	—
70.0	3 848	30.2	4 900	38.5	4 244	33.3
75.0	4 418	34.7	5 625	44.2	4 871	38.2
80.0	5 027	39.5	64 00	50.2	5 543	43.5

- 注：1. 本表理论质量按密度 $7.85 \text{ kg}/\text{dm}^3$ 计算。对高合金钢应按相应牌号的密度计算理论质量。
2. 钢材通常长度为 $2\,000\sim 6\,000 \text{ mm}$ ，允许交付长度不小于 $1\,500 \text{ mm}$ 钢材，其质量不超过批总质量的 10% ；高合金钢钢材允许交付不小于 $1\,000 \text{ mm}$ 的钢材。质量不超过批总质量的 10% 。按要求可供应大于 $6\,000 \text{ mm}$ 的钢材。
3. 按定尺、倍尺长度交货，应在合同中注明，其长度允许偏差不大于 $^{\circ}0^{\text{mm}}$ 。
4. 钢材以直条交货。按双方协议，可以成盘交货，盘径和盘重由双方协定。
5. 标记示例：用 40Cr 制造、尺寸偏差 11 级、直径 d （或边长 a 或对边距离 s ）为 20 mm 的冷拉钢材，标记为

冷拉圆钢 11—20—GB/T 905—1994
40Cr—GB/T 3078—1994

1.10 银亮钢 (表 14.5-12)

表 14.5-12 银亮钢尺寸规格 (摘自 GB/T 3207—1988)

圆钢直径 d/mm	截面面积 mm^2	理论质量/ $\text{kg}\cdot 10^{-3}\cdot \text{m}^{-1}$	圆钢直径 d/mm	截面面积 mm^2	理论质量/ $\text{kg}\cdot 10^{-3}\cdot \text{m}^{-1}$	圆钢直径 d/mm	截面面积 mm^2	理论质量/ $\text{kg}\cdot 10^{-3}\cdot \text{m}^{-1}$
0.60	0.282 7	2.219	6.30	31.17	244.4	26.0	530.9	4 170
0.63	0.311 7	2.444	7.0	38.48	302.1	28.0	615.8	4 830
0.70	0.384 8	3.024	7.5	44.18	347	30.0	706.9	5 550
0.80	0.502 7	3.95	8.0	50.27	395	32.0	804.2	6 310
0.90	0.636 2	4.99	8.5	56.75	445	33.0	855.3	6 710
1.00	0.785 4	6.17	9.0	63.62	499	34.0	907.9	7 130
1.10	0.950 3	7.46	9.5	70.88	556	35.0	962.1	755 2
1.20	1.131	8.88	10.0	78.54	617	36.0	1 017.8	7 990
1.40	1.539	12.08	10.5	86.59	680	38.0	1 134	8 900
1.50	1.767	13.87	11.0	95.03	746	40.0	1 257	9 896
1.60	2.001	15.78	11.5	103.9	815	42.0	1 385	10 900
1.80	2.545	19.94	12.0	113.1	888	45.0	1 590	12 500
2.00	3.142	24.65	13.0	132.7	1 040	48.0	1 810	14 200
2.20	3.801	29.83	14.0	153.9	1 210	50.0	1 963	15 420
2.50	4.909	38.54	15.0	176.7	1 390	53.0	2 206	17 300
2.80	6.158	48.36	16.0	201.1	1 680	55.0	2 376	18 600
3.00	7.069	55.50	17.0	327.0	1 780	56.0	2 463	19 300
3.20	8.042	63.11	18.0	254.5	2 000	58.0	2 642	20 700
3.50	9.621	75.52	19.0	283.5	2 230	60.0	2 827	22 200
4.00	12.57	98.6	20.0	314.2	2 470	63.0	3 117	24 500
4.50	15.90	124.8	21.0	346.4	2 720	65.0	3 318	26 000
5.00	19.63	154.2	22.0	380.1	2 980	68.0	3 632	28 500
5.50	23.76	187.2	24.0	452.4	3 550	70.0	3 848	30 200
6.00	28.27	221.9	25.0	490.9	3 850	75.0	4 418	34 700
						80.0	5 027	39 500

注: 1. 银亮钢适于表面精加工的银亮圆钢和钢丝。

2. 交货状态分为: 抛光 (P)、磨光 (M)、磨拉 (ML)、切削 (Q); 交货状态应在合同中注明, 未注明者按切削或磨光状态交货。

3. 本表理论质量按密度 7.85 g/cm^3 计算。

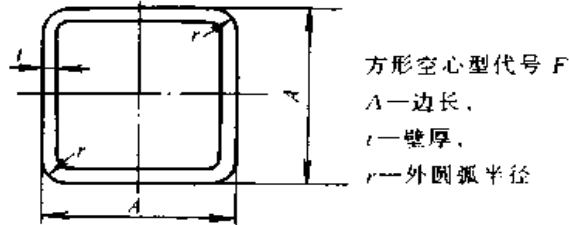
4. 银亮钢的钢号、化学成分应按相应标准规定, 其力学性能允许按相应标准规定上、下浮动 10% 或另作辅助规定。

5. 标记示例: GB/T 3206 软状态的 45 钢, 直径 4 mm, 磨光状态、允许偏差为 11 级的银亮钢, 其标记为

银亮钢 $\frac{4.0-M-11-GB/T 3207}{45-R-GB/T 3206}$

1.11 结构用冷弯空心型钢 (表 14.5-13、表 14.5-14)

表 14.5-13 结构用冷弯空心型钢尺寸规格 (摘自 GB/T 6728—1986)

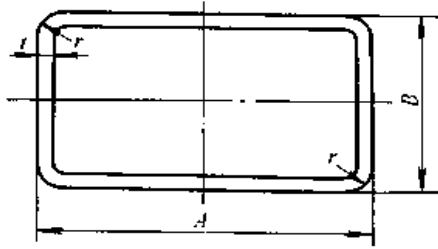


边长/ mm A	壁厚/ mm	理论 质量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	截面 面积/ cm^2	惯性矩/ cm^4	回转半径/ cm	截面系数/ cm^3	扭转常数	
				$I_x = I_y$	$r_x = r_y$	$W_x = W_y$	I_t/cm^4	W_t/cm^3
25	1.2	0.867	1.105	1.025	0.963	0.820	1.655	1.352
	1.5	1.061	1.352	1.216	0.948	0.973	1.998	1.643
	1.75	1.215	1.548	1.357	0.939	1.086	2.261	1.871
	2.0	1.363	1.736	1.482	0.923	1.186	2.502	2.085
30	2.5	2.032	2.589	3.154	1.103	2.102	5.347	3.720
	3.0	2.361	3.008	3.500	1.078	2.333	6.060	4.269
40	2.5	2.817	3.589	8.213	1.512	4.106	13.539	6.970
	3.0	3.303	4.208	9.320	1.488	4.660	15.628	8.109
	4.0	4.198	5.347	11.064	1.438	5.532	19.152	10.120
50	2.5	3.602	4.589	16.941	1.921	6.776	27.436	11.220
	3.0	4.245	5.408	19.463	1.897	7.785	31.972	13.149
	4.0	5.454	6.947	23.725	1.847	9.490	40.047	16.680
60	2.5	4.387	5.589	30.340	2.329	10.113	48.539	16.470
	3.0	5.187	6.608	35.130	2.305	11.710	56.892	19.389
	4.0	6.710	8.547	43.539	2.256	14.513	72.188	24.840
	5.0	8.129	10.356	50.468	2.207	16.822	85.560	29.767

续表 14.5-13

边长/ mm	壁厚/ mm	理论 质量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$	截面 面积/ cm^2	惯性矩/ cm^4	回转半径/ cm	截面系数/ cm^3	扭转常数	
				$I_x = I_y$	$r_x = r_y$	$W_x = W_y$	I_t/cm^4	W_t/cm^3
70	3.0	6.129	7.808	57.522	2.714	16.434	92.188	26.829
	4.0	7.966	10.147	72.108	2.665	20.602	117.975	34.600
	5.0	9.699	12.356	84.602	2.616	24.172	141.183	41.767
80	3.0	7.071	9.008	87.838	3.122	21.959	139.660	35.469
	4.0	9.222	11.747	111.031	3.074	27.757	179.808	45.960
	5.0	11.269	14.356	131.414	3.025	32.853	216.628	55.767
90	3.0	8.013	10.208	127.277	3.513	28.283	201.108	45.309
	4.0	10.478	13.347	161.907	3.482	35.979	260.088	58.920
	5.0	12.839	16.356	192.903	3.434	42.867	314.896	71.767
	6.0	15.097	19.232	220.420	3.385	48.982	365.452	83.837
100	4.0	11.734	14.947	226.337	3.891	45.267	361.213	73.480
	5.0	14.409	18.356	271.071	3.842	54.214	438.986	89.767
	6.0	16.981	21.632	311.415	3.794	62.283	511.558	105.197
120	4.0	14.246	18.147	402.260	4.708	67.043	635.603	107.400
	5.0	17.549	22.356	485.441	4.659	80.906	776.632	131.767
	6.0	20.749	26.432	562.094	4.611	93.683	910.281	155.117
	8.0	26.840	34.191	696.637	4.513	116.106	1 155.010	198.726
140	4.0	16.785	21.347	651.598	5.524	93.085	1 022.176	147.720
	5.0	20.689	26.356	790.523	5.476	112.931	1 253.565	181.767
	6.0	24.517	31.232	920.359	5.428	131.479	1 475.020	214.637
	8.0	31.864	40.591	1 153.735	5.331	164.819	1 887.605	276.806
160	4.0	19.270	24.547	987.152	6.341	123.394	1 540.134	194.440
	5.0	23.829	30.356	1 202.317	6.293	150.289	1 893.787	239.767
	6.0	28.285	36.032	1 405.408	6.245	175.676	2 234.573	283.757
	8.0	36.888	46.991	1 776.496	6.184	222.062	2 876.940	367.636

表 14.5-14 冷弯矩形空心型钢尺寸规格 (摘自 GB/T 6728—1986)



矩形空心型代号 J
 A—长边；B—短边；
 t—壁厚；r—外圆弧半径

边长/mm		壁厚/mm	理论质量/kg·m ⁻¹	截面面积/cm ²	惯性矩/cm ⁴		回转半径/cm		截面系数/cm ³		扭转常数	
A	B				I _x	I _y	r _x	r _y	W _x	W _y	I _t /cm ⁴	W _t /cm ³
50	25	1.2	1.338	1.705	5.502	1.875	1.796	1.048	2.200	1.500	4.534	2.780
		1.5	1.650	2.102	6.653	2.253	1.779	1.035	2.661	1.802	5.519	3.406
	30	2.5	2.817	3.589	11.296	5.050	1.774	1.186	4.518	3.366	11.666	6.470
		3.0	3.303	4.208	12.827	5.696	1.745	1.163	5.130	3.797	13.401	7.509
		4.0	4.198	5.347	15.239	6.682	1.688	1.117	6.095	4.455	16.244	9.320
		2.5	3.209	4.039	17.933	5.998	2.094	1.211	5.977	3.998	15.054	7.845
60	40	3.0	3.774	4.808	20.496	6.794	2.064	1.188	6.832	4.529	17.335	9.129
		4.0	4.826	6.147	24.691	8.045	2.004	1.143	8.230	5.363	21.141	11.400
		2.5	3.602	4.589	22.069	11.734	2.192	1.599	7.356	5.867	25.045	10.720
	50	3.0	4.245	5.408	25.374	13.436	2.166	1.576	8.458	6.718	29.121	12.549
		4.0	5.454	6.947	30.974	16.269	2.111	1.530	10.324	8.134	36.298	15.880
		3.0	5.187	6.608	44.046	26.099	2.518	1.987	12.584	10.439	53.426	18.789
70	50	4.0	6.710	8.547	54.663	32.210	2.528	1.941	15.618	12.884	67.613	24.040
		5.0	8.129	10.356	63.435	37.179	2.474	1.894	18.124	14.871	79.908	28.767
		2.5	4.387	5.589	45.103	15.255	2.840	1.652	11.275	7.627	37.467	14.470
	40	3.0	5.187	6.608	52.246	17.552	2.811	1.629	13.061	8.776	43.680	16.989
		4.0	6.710	8.547	64.780	21.474	2.752	1.585	16.195	10.737	54.787	21.640
		5.0	8.129	10.356	75.080	24.567	2.692	1.540	18.770	12.283	64.110	25.767
60	3.0	6.129	7.808	70.042	44.886	2.995	2.397	17.510	14.962	88.111	26.229	
	4.0	7.966	10.147	87.905	56.105	2.943	2.351	21.976	18.701	112.583	33.800	
	5.0	9.699	12.356	103.247	65.634	2.890	2.304	25.811	21.878	134.503	40.767	
90	40	3.0	5.658	7.208	70.487	19.610	3.127	1.649	15.663	9.805	51.193	19.209
		4.0	7.338	9.347	87.894	24.077	3.066	1.604	19.532	12.638	64.320	24.520
		5.0	8.914	11.356	102.487	27.651	3.004	1.560	22.774	13.825	75.426	29.267

续表 14.5-14

边 长/ mm		壁厚/ mm	理论质量/ kg·m ⁻¹	截面面积/ cm ²	惯性矩/ cm ⁴		回转半径/ cm		截面系数/ cm ³		扭转常数	
A	B				I _x	I _y	r _x	r _y	W _x	W _y	I _p /cm ⁴	W _p /cm ³
90	50	3.0	6.129	7.808	81.845	32.735	3.237	2.047	18.187	13.094	76.433	24.429
		4.0	7.966	10.147	102.696	40.695	3.181	2.002	22.821	16.278	97.162	31.400
		5.0	9.699	12.356	120.570	47.345	3.123	1.957	26.793	18.938	115.436	37.767
	60	3.0	6.600	8.408	93.203	49.764	3.329	2.432	20.711	16.588	104.552	29.649
		4.0	8.594	10.947	117.499	62.387	3.276	2.387	26.111	20.795	133.852	38.280
		5.0	10.484	13.356	138.653	73.218	3.222	2.341	30.811	24.406	160.273	46.267
100	50	3.0	6.600	8.408	106.451	36.053	3.558	2.070	21.290	14.421	88.311	27.249
		4.0	8.594	10.947	134.124	44.938	3.500	2.026	26.824	17.975	112.409	35.080
		5.0	10.484	13.356	158.155	52.429	3.441	1.981	31.631	20.971	133.758	42.267
120	60	3.0	8.013	10.208	189.113	64.398	4.304	2.511	31.518	21.466	156.029	39.909
		4.0	10.478	13.347	240.724	81.235	4.246	2.466	40.120	27.078	200.407	51.720
		5.0	12.839	16.356	286.941	95.968	4.188	2.422	47.823	31.989	240.869	62.767
	80	6.0	15.097	19.232	327.950	108.716	4.129	2.377	54.658	36.238	277.361	73.037
		3.0	8.955	11.408	230.189	123.430	4.491	3.289	38.364	30.857	255.128	53.949
		4.0	11.734	14.947	294.569	157.281	4.439	3.234	49.094	39.320	330.438	70.280
140	80	5.0	14.409	18.356	353.108	187.747	4.385	3.198	58.851	46.936	400.735	85.767
		6.0	16.981	21.632	405.998	214.977	4.332	3.152	67.666	53.744	465.940	100.397
		4.0	12.990	16.547	429.582	180.407	5.095	3.301	61.368	45.101	410.713	82.440
150	100	5.0	15.979	20.356	517.023	215.914	5.039	3.256	73.860	53.978	498.815	100.767
		6.0	18.865	24.032	596.935	247.905	4.983	3.211	85.276	61.976	580.919	118.157
		4.0	14.874	18.947	594.585	318.551	5.601	4.100	79.278	63.710	660.613	111.880
		5.0	18.334	23.356	719.164	383.988	5.549	4.054	95.888	76.797	806.733	137.267
160	80	6.0	21.691	27.632	834.615	444.135	5.495	4.009	111.282	88.827	945.022	161.597
		8.0	28.096	35.791	1 039.101	549.308	5.388	3.917	138.546	109.861	1 197.701	207.046
		4.0	14.246	18.147	597.691	203.532	5.738	3.348	74.711	50.883	493.129	94.600
		5.0	17.549	22.356	721.650	244.080	5.681	3.304	90.206	61.020	599.475	115.767
180	100	6.0	20.749	26.432	835.936	280.833	5.623	3.259	104.492	70.208	698.884	135.917
		8.0	26.840	34.191	1 036.485	343.599	5.505	3.170	129.560	85.899	876.599	173.126
		4.0	16.758	21.347	926.020	373.879	6.586	4.184	102.891	74.775	852.708	134.920
		5.0	20.689	26.356	1 124.156	451.738	6.530	4.140	124.906	90.347	1 042.589	165.767
180	100	6.0	24.517	31.232	1 809.531	523.767	6.475	4.095	145.503	104.753	1 222.933	195.437
		8.0	31.864	40.591	1 643.149	651.132	6.362	4.005	182.572	130.226	1 554.606	251.206

续表 14.5-16

宽度/ mm	厚 度/mm																										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100	110	120	130	140	150	160					
	理 论 质 量/kg·m ⁻¹																										
60	9.42	11.8	14.1	16.5	18.8	21.1	23.6																				
65	10.2	12.8	15.3	17.8	20.4	23.0	25.5																				
70	11.0	13.7	16.5	19.2	22.0	24.7	27.5	30.2	33.0																		
75	11.8	14.7	17.7	20.6	23.6	26.5	29.4	32.4	35.3																		
80	12.6	15.7	18.8	22.0	25.1	28.3	31.4	34.5	37.7	40.8	44.0																
90	14.1	17.2	21.2	24.7	28.3	31.8	35.3	38.8	42.4	45.9	49.4																
100	15.7	19.6	23.6	27.5	31.4	35.3	39.2	43.2	47.1	51.0	55.0	58.9	62.8	66.7													
110	17.3	21.6	25.9	30.2	34.5	38.8	43.2	47.5	51.8	56.1	60.4	64.8	69.1	73.4													
120	18.8	23.6	28.3	33.0	37.7	42.4	47.1	51.8	56.5	61.2	65.9	70.6	75.4	80.1													
130	20.4	25.3	30.6	35.7	40.8	45.9	51.0	56.1	61.2	66.3	71.4	76.5	81.6	86.7													
140	22.0	27.5	33.0	38.5	44.0	49.5	55.0	60.5	66.0	71.5	77.0	82.5	88.0	93.5	99.0	110											
150	23.6	29.4	35.3	41.2	47.1	53.0	58.9	64.8	70.7	76.6	82.5	88.4	94.3	100	106	118											
160	25.1	31.4	37.7	44.0	50.3	56.6	62.9	69.2	75.5	81.8	88.1	94.4	100	107	113	126	138	151									
170	26.7	33.4	40.4	46.7	53.0	59.3	65.6	71.9	78.2	84.5	90.8	97.1	103	110	117	124	131	138	145								
180	28.3	35.3	42.4	49.5	56.5	63.6	70.6	77.7	84.7	91.8	98.9	106	113	120	127	141	155	170	184	198							
190						67.1	74.6	82.0	89.5	96.9	104	112	119	127	134	149	164	179	194	209							
200						70.6	78.5	86.4	94.2	102	110	118	126	133	141	157	173	188	204	220							
210						74.2	82.4	90.5	98.9	107	115	124	132	140	148	165	181	198	214	231	247	264					
220						77.7	86.4	95.0	104	112	121	130	138	147	155	173	190	207	224	242	259	276					
230												135	144	153	162	180	199	217	235	253	271	289					
240												141	151	160	170	188	207	226	245	264	283	301					
250												147	157	167	177	196	216	235	255	275	294	314					
260												153	163	173	184	204	224	245	265	286	306	326					
280												165	176	187	198	220	242	264	286	308	330	352					
300												177	188	200	212	236	259	283	306	330	353	377					

注：1. 产品截面为矩形。按密度 7.85 g/cm³ 计算理论质量。

2. 扁钢通常长度不小于 1 000 mm，工具钢扁钢允许长度不小于 500 mm 短尺交货，其质量不超过批总质量的 10%。定尺、倍尺长度应在合同中注明，其允差为 +80 mm。

3. 标记示例：45 钢锻制，厚 80 mm、宽 120 mm，允许偏差 2 组的扁钢，标记为

扁钢 $\frac{80 \times 120-2-GB/T 16761-1997}{45-GB/T 699-1999}$

2 钢板和钢带

2.1 冷轧钢板和钢带

2.1.1 冷轧钢板和钢带的尺寸规格 (表 14.5-17)

表 14.5-17 冷轧钢板和钢带尺寸规格 (摘自 GB/T 708—1988)

标称厚度 /mm	宽 度 /mm																			
	0.6	0.65	0.70	0.71	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0	1.1	1.25	1.40	(1.42)	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
0.2~0.45	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	—	—	—	—	—	—
0.56~0.65	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	—	—	—	—	—	—
0.7, 0.75	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	—	—	—	—	—	—
0.8~1.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5	4.0	4.0	—	—	—	—	—	—
1.1~1.3	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
1.4~2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.2	4.2	—
2.2, 2.5	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5
2.8~3.2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
3.5~3.9	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5
4.0~4.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	—
4.8, 5.0	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5
厚度尺寸系列/mm	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.56	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1.7	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	3.9	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	—	—	—	—	—

注: 标记示例: 20 钢, 尺寸 1 000 mm × 1 500 mm (厚 × 宽 × 长), 表面质量 II 组, 拉伸 S 级的钢板, 标记为 钢板 $\frac{1.0 \times 1.000 \times 1.500}{20-II-S-GB/T 710-1988}$

2.1.2 优质碳素结构钢冷轧薄钢板和钢带 (表 14.5-18、表 14.5-19)

表 14.5-18 优质碳素结构钢冷轧薄板和钢带牌号、力学性能 (摘自 GB/T 13237—1991)

牌 号	拉 延 级 别				
	Z	S 和 P	Z	S	P
	抗拉强度/MPa		伸长率 $\delta_{10}/\%$ \geq		
08F	275~365	275~380	34	32	30
0.8、0.8Al、10F	275~390	275~410	32	30	28
10	295~410	295~430	30	29	28
15F	315~450	315~450	29	28	27
15	335~450	335~470	27	26	25
20	355~490	355~500	26	25	24
25	—	390~540	—	24	23
30	—	440~590	—	22	21
35	—	490~635	—	20	19
40	—	510~650	—	—	18
45	—	530~685	—	—	16
50	—	540~715	—	—	14
牌号化学成分的规定	产品采用的钢号的质量分数 (化学成分) 符合 GB/T 699 的规定				
尺寸规格规定	产品的尺寸规格符合 GB/T 708 的规定 (厚度不大于 4 mm)				

注：1. 厚度小于 2 mm 的钢板和钢带，伸长率允许比本表的规定降低 1% (绝对值)。

2. 正火状态下供应的钢板和钢带，其他要求符合本表规定时，抗拉强度允许比本表上限的规定提高 50 MPa。

3. 拉延级别：Z—最深拉延级；S—深拉延级；P—普通拉延级。

4. 产品适于汽车、航空工业部门以及其他工业部门应用。

表 14.5-19 优质碳素结构钢冷轧薄板及钢带的杯突值 (摘自 GB/T 13237—1991)

厚 度 /mm	牌号和拉延级别				
	Z	S	P	Z	S
	08F、08、 08Al、10F	08F、08、 08Al、10F	08F、08、 08Al、10F	10、15F、 15、20、	10、15F、 15、20
	冲压深度/mm \geq				
0.5	9.0	8.4	8.0	8.0	7.6
0.6	9.4	8.9	8.5	8.1	7.8
0.7	9.7	9.2	8.9	8.6	8.0
0.8	10.0	9.5	9.3	8.8	8.2
0.9	10.3	9.9	9.6	9.0	8.4
1.0	10.5	10.1	9.9	9.2	8.6

续表 14.5-19

厚 度 /mm	牌号和拉延级别				
	Z	S	P	Z	S
	08F、08、 08Al、10F	08F、08、 08Al、10F	08F、08、 08Al、10F	10、15F、 15、20、	10、15F、 15、20
冲压深度/mm \geq					
1.1	10.8	10.4	10.2	均不做试验	
1.2	11.0	10.6	10.4		
1.3	11.2	10.8	10.6		
1.4	11.3	11.0	10.8		
1.5	11.5	11.2	11.0		
1.6	11.6	11.4	11.2		
1.7	11.8	11.6	11.4		
1.8	11.9	11.7	11.5		
1.9	12.0	11.8	11.7		
2.0	12.1	11.9	11.8		

注：最深拉延级全部钢号及深拉延级的 15F、15、20、25 号的钢板和钢带，应在冷状态下做 180° 弯曲试验；厚度不大于 2 mm 的弯至两面接触，大于 2 mm 的垫上厚度相同的垫板。弯曲处不得有裂纹、裂口和分层。

2.1.3 合金结构钢薄钢板 (表 14.5-20、表 14.5-21)

表 14.5-20 合金结构钢薄钢板的牌号及力学性能 (摘自 YB/T5132—1993)

牌 号	σ_b /MPa	δ_{10} /%	牌 号	σ_b /MPa	δ_{10} /%
12Mn2A	390~570	≥ 22	30Cr ^①	490~685	≥ 17
16Mn2A	490~635	≥ 18	35Cr ^①	540~735	≥ 16
45Mn2A ^①	590~835	≥ 12	38CrA	540~735	≥ 16
35B	490~635	≥ 19	40Cr	540~785	≥ 14
40B	510~655	≥ 16	20CrMnSiA	440~685	≥ 18
45B	540~685	≥ 16	25CrMnSiA	490~685	≥ 18
50B、50BA	540~715	≥ 14	30CrMnSi、30CrMnSiA	490~735	≥ 16
15Cr ^① 、15CrA ^①	390~590	≥ 19	35CrMnSiAl ^①	590~785	≥ 14
20Cr	390~590	≥ 18			

- 注：1. 钢板厚度不大于 0.9 mm 时，伸长率仅供参考。
 2. 钢板应热处理（正火、退火、正火后回火或高温回火）后交货，在保证符合 YB/T5132—1993 其他规定条件时，可以不经热处理交货。
 3. 表面质量按 I 组（冷轧）、II 组（冷轧）供应的钢板应按酸洗后交货；III 组（冷轧或热轧）、IV 组（热轧）表面的钢板不经酸洗交货，按需求方要求也可酸洗交货。
 4. 本表未列入的牌号的性能指标，按供需双方协议。
 5. 钢板为热轧或冷轧，厚度不大于 4 mm，其尺寸规格应符合 GB/T 708—1988 的规定。
 6. 牌号的化学成分符合 GB/T 3077 的规定，其中 12Mn2A、16Mn2A、38CrA 三个牌号的化学成分按 YB/T5132—1993 的规定。

① 性能指标只供参考，不作报废依据。

表 14.5-21 不同牌号合金结构钢薄钢板杯突试验冲压深度 (摘自 YB/T5132—1993)

厚度/mm	冲压深度/mm \geq			厚度/mm	冲压深度/mm \geq		
	12Mn2A	16Mn2A、25CrMnSiA	30CrMnSiA		12Mn2A	16Mn2A、25CrMnSiA	30CrMnSiA
0.5	7.3	6.6	6.5	0.8	8.5	7.5	7.2
0.6	7.7	7.0	6.7	0.9	8.8	7.7	7.5
0.7	8.0	7.2	7.0	1.0	9.0	8.0	7.7

注：冷冲压用厚度 0.5~1.0 mm 的表列牌号的钢板，应作杯突试验，冲压深度应符合本表规定。

2.1.4 不锈钢冷轧钢板 (表 14.5-22~表 14.5-25)

表 14.5-22 不锈钢冷轧钢板尺寸规格 (摘自 GB/T 3280—1992)

尺寸规格	钢板尺寸及其允许偏差符合 GB/T 708 规定					尺寸规格	钢板尺寸及其允许偏差符合 GB/T 708 规定				
钢板平面度	≤ 10 mm/m					钢板平面度	≤ 10 mm/m				
冷作硬化状态钢板的平面度	宽度/mm	厚度/mm	平面度最大允许值/mm			冷作硬化状态钢板的平面度	宽度/mm	厚度/mm	平面度最大允许值/mm		
			DY	BY	Y、TY				DY	BY	Y、TY
	≥ 600 ~ < 1000	< 0.40	13	19	按供需双方 协议规定		≥ 1000 ~ < 1219	< 0.40	16	26	按供需双方 协议规定
		≥ 0.40 ~ < 0.80	16	22				≥ 0.40 ~ < 0.80	19	29	
≥ 0.80		19	22	≥ 0.80		25		29			

注：1. 冷作硬化钢板不平度的数值仅适用于 2Cr13Mn9Ni4 和 1Cr17Ni7，其他牌号不同冷硬状态的平面度由供需双方协商确定。

2. 冷作硬化状态代号：DY—低冷作硬化；BY—半冷作硬化；Y—冷作硬化；TY—特别冷作硬化。

表 14.5-23 不锈钢冷轧钢板牌号及力学性能 (摘自 GB/T 3280—1992)

牌 号	热处理种类	拉伸试验			硬度试验			弯曲试验 180° d—弯心直径 a—钢板厚度
		屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	伸长率 δ_5 / %	HB	HRB	HV	
1Cr17Mn6Ni5N	固溶处理	≥ 245	≥ 635	≥ 40	≤ 241	≤ 100	≤ 253	—
1Cr18Mn8Ni5N		≥ 245	≥ 590	≥ 40	≤ 207	≤ 95	≤ 218	
2Cr13Mn9Ni4		—	≥ 635	≥ 42	—	—	—	
1Cr17Ni7		≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200	
1Cr17Ni8		≥ 205	≥ 570	≥ 45	≤ 187	≤ 90	≤ 200	
1Cr18Ni9		≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200	
1Cr18Ni9Si3		≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 207	≤ 95	≤ 218	
0Cr18Ni9		≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200	
00Cr19Ni10		≥ 177	≥ 480	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200	
0Cr19Ni9N		≥ 275	≥ 550	≥ 35	≤ 217	≤ 95	≤ 220	
0Cr19Ni10NbN		≥ 345	≥ 685	≥ 35	≤ 250	≤ 100	≤ 260	
00Cr18Ni10N		≥ 245	≥ 550	≥ 40	≤ 217	≤ 95	≤ 220	
1Cr18Ni12	≥ 177	≥ 480	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200		

续表 14.5.23

牌 号	热处理种类	拉伸试验			硬度试验			弯曲试验 180° d—弯心直径 a—钢板厚度
		屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	伸长率 δ_5 / %	HB	HRB	HV	
0Cr23Ni13	固溶 处理	≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	—
0Cr25Ni20		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr17Ni12Mo2		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
00Cr17Ni14Mo2		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr17Ni12Mo2N		≥275	≥550	≥35	≤217	≤95	≤200	
00Cr17Ni13Mo2N		≥245	≥550	≥40	≤217	≤95	≤200	
0Cr18Ni12Mo2Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
1Cr18Ni12Mo2Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
0Cr18Ni12Mo2Cu2		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
00Cr18Ni14Mo2Cu2		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr18Ni12Mo3Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
1Cr18Ni12Mo3Ti		≥205	≥530	≥35	≤187	≤90	≤200	
0Cr19Ni13Mo3		≥205	≥530	≥40	≤187	≤90	≤200	
00Cr19Ni13Mo3		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr18Ni16Mo5		≥177	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr18Ni10Ti		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
1Cr18Ni9Ti		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr18Ni11Nb		≥205	≥520	≥40	≤187	≤90	≤200	
0Cr18Ni13Si4		≥205	≥520	≥40	≤207	≤95	≤218	
00Cr18Ni5Mo3Si2		≥390	≥590	≥20	—	≤30	≤300	
1Cr18Ni11Si4AlTi	—	≥715	≥30	—	—	—		
1Cr21Ni5Ti	—	≥635	≥20	—	—	—		
0Cr26Ni5Mo2	≥390	≥590	≥18	277	≤29	≤292		
0Cr13Al	退火 处理	7≥175	≥410	≥20	≤183	≤88	≤200	a < 8 mm d = a a ≥ 8 mm d = 2a
00Cr12		≥190	≥365	≥22	≤183	≤88	≤200	
1Cr15		≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	
1Cr17		≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	
00Cr17		≥175	≥365	≥22	≤183	≤88	≤200	
1Cr17Mo		≥205	≥450	≥22	≤183	≤88	≤200	d = 2a
00Cr17Mo		≥245	≥410	≥20	≤217	≤96	≤230	
00Cr18Mo2		≥245	≥410	≥20	≤217	≤96	≤230	
00Cr30Mo2		≥295	≥450	≥22	≤209	≤95	≤220	

续表 14.5-23

牌 号	热处理种类	拉伸试验			硬度试验			弯曲试验
		屈服强度 $\sigma_{0.2}/$ MPa	抗拉强度 $\sigma_b/$ MPa	伸长率 $\delta_5/$ %	HB	HRB	HV	180° d —弯心直径 a —钢板厚度
00Cr27Mo	退火处理	≥245	≥410	≥22	≤190	≤90	≤200	$d = 2a$
1Cr12		≥205	≥440	≥20	≤200	≤93	≤210	
0Cr13		≥205	≥440	≥20	≤200	≤93	≤210	
1Cr13		≥205	≥440	≥20	≤183	≤88	≤200	
2Cr13		≥225	≥520	≥18	≤223	≤97	≤234	—
3Cr13		≥225	≥540	≥18	≤235	≤99	≤247	—
4Cr13		≥225	≥590	≥15				—
3Cr16		≥225	≥520	≥18	≤241	≤100	≤253	—
7Cr17		≥245	≥590	≥15	≤225	HRC≤25	≤269	—
1Cr17Ni2			≥1 080	≥10				
0Cr17Ni7Al	固溶处理	≤380	≤1 030	≥20	≤190	—	≤92	≤200
	565℃时效	≥960	≥1 140	$a \leq 3.0$ mm ≥3 $a > 3.0$ mm ≥5	—	≥35	—	≥345
	510℃时效	≥1 030	≥1 230	$a \leq 3.0$ mm 不作规定 $a > 3.0$ mm ≥4	—	≥40	—	≥392
3Cr13 4Cr13 7Cr17	淬火、回火处理		—		—	≥40	—	—

注：1. 屈服强度及硬度，当需方要求并在合同中注明才进行测定。按钢板尺寸和状态在硬度试验中取其中一种方法即可。弯曲试验也是需方要求并在合同中注明才进行检验。

2. 牌号的化学成分符合 GB/T 3280—1992 的规定。

表 14.5-24 不锈钢冷轧钢板的力学性能（摘自 GB/T 3280—1992）

牌 号	状态符号	拉 伸 试 验				
		屈服强度 $\sigma_{0.2}/$ MPa	抗拉强度 $\sigma_b/$ MPa	伸长率 $\delta_5/$ %		
				厚度 > 0.4 mm	厚度 > 0.4 mm < 0.8 mm	厚度 ≥ 0.8 mm
2Cr13Mn9Ni4	TY	—	≥980	≥15		
1Cr17Ni7	DY	≥510	≥865	≥25	≥25	≥25
	BY	≥755	≥1 030	≥9	≥10	≥10
	Y	≥930	≥1 210	≥3	≥5	7
	TY	≥960	≥1 270	≥3	≥4	≥5

注：表列以外的牌号，以冷作硬化状态交货的力学性能及硬度由供需双方协商规定。

表 14.5-25 不锈钢冷轧钢板耐蚀性能 (摘自 YB/T 3280—1992)

10% 草酸浸 蚀试验的判 别	牌 号	试验状态	硫酸-硫酸铁 腐蚀试验	65% 硝酸 腐蚀试验	硝酸-氢氟酸 腐蚀试验	硫酸-硫酸铜 腐蚀试验
	0Cr18Ni9	交货状态 (固溶处理)	沟状组织	沟状组织 凹状组织 II	—	沟状组织
	0Cr17Ni12Mo2 0Cr18Ni12Mo2Cu2 0Cr19Ni16Mo3			—	沟状组织	
	00Cr19Ni10			沟状组织 凹状组织 II	—	
	00Cr17Ni14Mo2 00Cr18Ni14Mo2Cu2 00Cr19Ni13Mo3	敏化处理	沟状组织	—	—	沟状组织
	0Cr18Ni10Ti 0Cr18Ni11Nb					
硫酸-硫酸铁 腐蚀试验的 腐蚀减量	牌 号		试验状态		腐蚀减量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	
	0Cr18Ni9		交货状态 (固溶处理)		按供需双方协议	
	0Cr17Ni12Mo2					
	0Cr18Ni12Mo2Cu2					
	0Cr19Ni13Mo3		敏化处理		按供需双方协议	
	00Cr19Ni10					
	00Cr17Ni14Mo2					
	00Cr18Ni14Mo2Cu2					
00Cr19Ni13Mo3						
65% 硝酸腐 蚀试验的腐 蚀减量	0Cr18Ni9		交货状态 (固溶处理)		按供需双方协议	
	00Cr19Ni10		敏化处理			
硝酸-氢氟酸 腐蚀试验的 腐蚀度比	牌 号	腐蚀度比	牌 号		腐蚀度比	
	0Cr17Ni12Mo2	≤ 1.5	00Cr17Ni14Mo2		≤ 1.5	
	0Cr18Ni12Mo2Cu2	≤ 1.5	00Cr18Ni14Mo2Cu2		≤ 1.5	
	0Cr19Ni13Mo3	≤ 1.5	00Cr19Ni13Mo3		≤ 1.5	
硫酸-硫酸铜 腐蚀试验后 弯曲面状态	牌 号		试验状态		试验后弯曲面状态	
	0Cr18Ni9		交货状态 (固溶处理)		不得有晶间腐蚀裂纹	
	0Cr17Ni12Mo2					
	0Cr18Ni12Mo2Cu2					
0Cr19Ni13Mo3						

续表 14.5-25

硫酸-硫酸铜 腐蚀试验后 弯曲面状态	牌 号	试验状态	试验后弯曲面状态
	00Cr19Ni10	敏化处理	
	00Cr17Ni14Mo2		
	00Cr18Ni14Mo2Cu2		
	00Cr19Ni13Mo3		
	0Cr18Ni10Ti		
	0Cr18Ni11Nb		

2.1.5 单张热镀锌钢板 (表 14.5-26)

表 14.5-26 单张热镀锌钢板尺寸规格及性能要求 (摘自 YB/T 5131—1993)

钢板厚度 /mm	反复弯曲 次数 ≥	镀锌强度弯曲试验		杯 突 试 验 深 冲 级 别			
		d —弯心直径 a —试样厚度		Z	S	P	
		冷成型用 L	一般用途 Y	杯 突 深 度 /mm ≥			
0.35 0.40 0.45	8	$d=0$ (180°角)	$d=a$ (180°角)	7.2	6.2	5.9	
7.5				6.5	6.2		
0.50 0.55 0.60 0.65 0.70	7			$d=a$ (180°角)	8.0	6.9	6.6
8.5					7.2	6.9	
0.75 0.80	6	弯曲 90°角	8.9		7.5	7.2	
0.90			5		9.3	7.8	7.5
1.0	4				9.6	8.2	7.9
1.1			3		9.9	8.6	8.3
1.2	弯曲 90°角			9.9	8.6	8.3	
1.3			10.2	8.8	8.5		
1.4			10.4	9.0	8.7		
1.5	10.4		9.0	8.7			
			11.0	9.2	8.9		

钢 板 的 宽 度 和 长 度 规 格 mm×mm

710×1 420, 750×750, 750×1 500, 750×1 800, 800×800, 800×1 200,
800×1 600, 850×1 700, 900×900, 900×1 800, 900×2 000, 1 000×2 000

- 注: 1. 钢板牌号采用普通碳素钢的 Q195、Q215A、Q235A 号钢, 成分符合 GB/T 700—1988 规定。
2. 反复弯曲次数系将试样垂直夹在钳口半径 3 mm 的虎钳中, 向两边弯曲 90°角至折断时能经受的反复弯曲次数。
3. 镀锌强度 (锌层脱落) 试验, 系指试样弯曲到 180°角 (90°角) 时, 不应有露出钢板表面的镀锌层脱落 (在距试样边部 5 mm 内允许有锌层脱落)。
4. 标记示例: 尺寸为 0.50 mm×900 mm×1 800 mm, 一般用途钢板 (Y)、表面质量 A 组, 钢号为 Q235A 的单张热镀锌薄钢板, 标记为

热镀锌薄钢板 0.50×900×1 800-Y-A-YB/T 5131—1993
Q235A—GB/T 700—1988

续表 14.5-27

标称厚度 /mm	宽 度 /m																																				
	最 小 长 度									最 大 长 度																											
0.6-0.65	0.7	0.71	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.1	1.25	1.4	1.42	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8					
4.0-5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
6.7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
8-10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
11,12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
13-25	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
26-40	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
42-200	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

厚度尺寸 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.90, 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 3.2, 3.5, 3.8, 3.9, 4.0, 4.5, 5.6, 5.7, 5.8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 50, 52, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 125, 130, 140, 150, 160, 165, 170, 180, 185, 190, 195, 200

注: 1. 热轧钢板和钢带分为: 切边(Q), 不切边(HQ); 较高精度(A), 普通精度(B)。
 2. 热轧板的宽度可为 50 mm 或 10 mm 倍数的任何尺寸。钢板长度可为 100 mm 或 50 mm 倍数的任何尺寸, 但厚 ≤ 4 mm, 板最小长度不小于 1.2 m, 厚板 > 4 mm, 板最小长度不小于 2 m。
 3. 标记示例: 16Mn 轧制 10 mm × 1 800 mm × 1 200 mm 冷轧钢板, 标记为 钢板 $\frac{10 \times 1 800 \times 1 200 - \text{GB/T } 709 - 1988}{16\text{Mn} - \text{GB/T } 912 - 1989}$

表 14.5-28 热轧钢带的厚度及宽度尺寸 (摘自 GB/T 709—1988) (mm)

厚度	1.2, 1.4, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5, 2.8, 3.0, 3.2, 3.5, 3.8, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 25
宽度	600, 650, 700, 800, 850, 900, 950, 1 000, 1 050, 1 100, 1 150, 1 200, 1 250, 1 300, 1 350, 1 400, 1 450, 1 500, 1 550, 1 600, 1 700, 1 800, 1 900,

2.2.2 优质碳素结构钢热轧厚钢板和宽钢带 (表 14.5-29)

表 14.5-29 优质碳素结构钢热轧厚钢板和宽钢带牌号及力学性能 (摘自 GB/T 711—1988)

牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_5 /% \geq	180°弯曲试验 的弯心直径 d		牌 号	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_5 /% \geq	180°弯曲试验 的弯心直径 d	
			板厚 a /mm					板厚 a /mm	
			≤ 20	> 20				≤ 20	> 20
08F	315	34			50	625	16		
08	325	33	0	a	55	645	13	0	$d = a$
10F	325	32			60	675	12		
10	335	32	0	a	65	695	10		
15F	355	30			70	715	9		
15	370	30	$0.5a$	$1.5a$	20Mn	450	24	$d = 0.5a$	$d = 1.5a$
20F	380	27			25Mn	490	22		
20	410	28	a	$2a$	30Mn	540	20	$d = a$	$d = 2a$
25	450	24	$2a$	$3a$	40Mn	590	17		
30	490	22	$2a$	$2a$	50Mn	650	13	$d = 2a$	$d = 3a$
35	530	20	$2a$	$3a$	60Mn	695	11		
40	570	19			65Mn	735	9	—	—
45	600	17							

注：1. 钢板和钢带厚度不大于 4~60 mm，尺寸规格应符合 GB/T 709—1988 的规定。

2. 钢板和钢带应以热处理（正火、退火或高温回火）状态交货，并在合同中注明，未注明热处理类别者，由供方自定。连轧钢带或钢板允许以热轧状态交货。

3. 交货状态的钢板和钢带按本表规定，但退火或高温回火状态交货的钢板，当其伸长率较本表规定提高 2% 以上（绝对值）时，允许 σ_b 比表中规定下降 40 MPa。

4. 厚度大于 20 mm 厚度增加 1 mm 伸长率允许降低 0.25%（绝对值），但不得大于；厚度小于或等于 32 mm（2%），厚度大于 32 mm（3%）。

2.2.3 合金结构钢热轧厚钢板 (表 14.5-30)

表 14.5-30 合金结构钢热轧厚钢板牌号、尺寸规格及力学性能 (摘自 GB/T 11251—1989)

尺寸规格按 GB/T 709—1988 的规定

牌 号	力 学 性 能			牌 号	力 学 性 能		
	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /% \geq	布氏硬度 HBS		抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /% \geq	布氏硬度 HBS
45Mn2	600~850	13	—	30Cr	500~700	19	—
27SiMn	550~800	18	—	35Cr	550~750	18	—
40B	500~700	20	—	40Cr	550~800	16	—
45B	550~750	18	—	20CrMnSiA	450~700	21	—
50B	550~750	16	—	25CrMnSiA	500~700	20	152~221
15Cr	400~600	21	—	30CrMnSiA	550~750	19	152~221
20Cr	400~650	20	—	35CrMnSiA	600~800	16	—

- 注：1. 本表为退火状态交货钢板的性能，布氏硬度值仅当需方要求时才测定。
 2. 正火状态交货的钢板，伸长率符合本表规定条件下，抗拉强度上限允许较本表提高 50 MPa。
 3. 厚度大于 20 mm 的钢板，厚度每增加 1 mm，伸长率允许较本表降低 0.25% (绝对值)，但不得超过 2%。
 4. 对于 25CrMnSiA，淬火：850~890℃，油冷、回火：450~550℃，水或油冷，其抗拉强度 σ_b 为 1 000 MPa，伸长率 δ 为 10%，冲击功 A_{KU} 为 39J。
 对于 30CrMnSiA，淬火：860~900℃，油冷、回火：470~570℃油冷，其 σ_b 为 1 100 MPa， δ 为 10%， A_{KU} 为 39 J。
 5. 供冲压用的厚度不大于 10 mm 的钢板，应在冷状态下进行弯曲试验弯心直径 $d=2a$ (a 为试样厚度)。
 6. 按需方要求，可检验钢板脱碳层深度。厚度不大于 20 mm，全脱碳层 (铁素体) 深度每面不超过标称厚度的 2.5%，两面之和不超过 4%；厚度大于 20 mm 钢板，每面不超过标称厚度的 2.0%。

2.2.4 耐热钢板 (表 14.5-31)

表 14.5-31 耐热钢板尺寸规格、牌号及性能 (摘自 GB/T 4238—1992)

尺寸规格		耐热钢冷轧钢板尺寸规格按 GB/T 708 规定平面度 ≤ 10 mm/m						耐热钢热轧钢板尺寸规格按 GB/T 709 规定平面度 ≤ 15 mm/m	
		拉伸试验			硬度试验					弯曲试验
牌 号	热处理	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	HBS	HRB	HV	弯曲角度	d —弯心直径 a —钢板厚度
2Cr23Ni13	固溶处理	≥ 205	≥ 560	≥ 40	≤ 201	≤ 95	≤ 210	—	—
2Cr25Ni20	固溶处理	≥ 205	≥ 590	≥ 35	≤ 201	≤ 95	≤ 210		
1Cr16Ni35	固溶处理	≥ 205	≥ 560	≥ 35	≤ 201	≤ 95	≤ 210		
0Cr15Ni25-	固溶处理	—	≤ 725	≥ 25	≤ 192	≤ 91	≤ 202		
Ti2MoAlVB	固溶处理	≥ 590	≥ 900	≥ 15	≥ 248	≥ 101	≥ 261		
1Cr18Ni9Si3	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 207	≤ 95	≤ 218		
0Cr18Ni9	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200		
0Cr23Ni13	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200		

续表 14.5-31

牌 号	热 处 理	拉 伸 试 验			硬 度 试 验			弯 曲 试 验		
		屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta_5/\%$	HBS	HRB	HV	弯曲角度	d —弯心直径 a —钢板厚度	
0Cr25Ni20	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200	—	—	
0Cr17Ni12Mo2	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200			
0Cr19Ni13Mo3	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200			
1Cr18Ni9Ti ^①	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	$\leq 187^{\circ}$	≤ 90	≤ 200			
0Cr18Ni10Ti	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200			
0Cr18Ni10Nb	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 187	≤ 90	≤ 200			
0Cr18Ni13Si4	固溶处理	≥ 205	≥ 520	≥ 40	≤ 207	≤ 90	≤ 218			
1Cr20Ni14Si2 ^①	固溶处理	—	≥ 590	≥ 40	—	—	—			
1Cr25Ni20Si2 ^①	固溶处理	—	540	≥ 35	—	—	—			
1Cr19Al	退 火	≥ 245	≥ 440	≥ 15	≤ 210	≤ 95	≤ 220			—
0Cr11Ti		≥ 175	≥ 365	≥ 22	≤ 162	≤ 80	≤ 175	180°	$a < 8 \text{ mm } d = a$ $a \geq 8 \text{ mm } d = 2a$	
2Cr25N		≥ 275	≥ 510	≥ 20	≤ 201	≤ 95	≤ 210	135°	$a < 8 \text{ mm } d = a$ $a \geq 8 \text{ mm } d = 2a$	
0Cr13Al		≥ 175	≥ 410	≥ 20	≤ 183	≤ 88	≤ 200	180°	$a < 8 \text{ mm } d = a$ $a \geq 8 \text{ mm } d = 2a$	
0Cr12		≥ 185	≥ 365	≥ 22	≤ 183	≤ 88	≤ 200	180°	$d = 2a$	
1Cr17		≥ 205	≥ 450	≥ 22	≤ 183	≤ 88	≤ 200	180°	$d = 2a$	
1Cr17		≥ 205	≥ 450	≥ 22	≤ 183	≤ 88	≤ 200	180°	$d = 2a$	
牌 号	热 处 理	拉 伸 试 验			硬 度 试 验				弯 曲 试 验	
		屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	伸 长 率 $\delta_5/\%$	HBS	HRC	HRB	HV	弯曲角度	d —弯心直径 a —钢板厚度
0Cr17Ni7Al	固 溶	≤ 380	$\leq 1 030$	20	≤ 190	—	≤ 92	≤ 200	—	—
	565℃ 时 效	≥ 960	$\geq 1 140$	厚度 $\leq 3.0 \text{ mm}$: 3 厚度 $> 3.0 \text{ mm}$: 5	—	≥ 35	—	≥ 345		
	510℃ 时 效	$\geq 1 030$	$\geq 1 230$	厚度 $\leq 3.0 \text{ mm}$: 不 规 定 厚度 $> 3.0 \text{ mm}$: 4	—	≥ 40	—	≥ 392		
1Cr12	退 火	≥ 205	≥ 440	20	≤ 200	—	≤ 93	≤ 210	180°	$d = 2a$
1Cr13	退 火	≥ 205	≥ 440	20	≤ 200	—	≤ 93	≤ 210	180°	$d = 2a$
牌号化学 成分规定	各牌号的化学成分符合 GB/T 4238—1992 耐热钢板的有关规定									

注：1. 各类钢板的强度及屈服强度，仅在需方要求时，并在合同中注明，才进行测定。
 2. 表中硬度试验可根据钢板不同尺寸和状态按其中一种方法检验。
 ① 1Cr18Ni9Ti、1Cr20Ni14Si2、1Cr25Ni20Si2 钢板厚度大于 25 mm 时，力学性能供参考。
 ② 1Cr18Ni9Ti 的硬度值征得用户同意，允许 HBS ≤ 197 。

2.2.5 不锈钢热轧钢板 (表 14.5-32—表 14.5-34)

表 14.5-32 不锈钢热轧钢板的牌号及力学性能 (摘自 GB/T 4237—1992)

类 型	牌 号
奥氏体型	1Cr17Mn6Ni5N, 1Cr18Mn8Ni5N, 1Cr18Ni9, 1Cr18Ni9Si3, 0Cr19Ni9, 00Cr19Ni10 0Cr19Ni9N, 0Cr19Ni10NbN, 00Cr18Ni10N, 1Cr18Ni12, 0Cr23Ni13, 0Cr25Ni20, 0Cr17Ni12Mo2, 00Cr17Ni14Mo2, 0Cr17Ni12Mo2N, 00Cr17Ni13Mo2N, (1Cr18Ni12Mo2Ti), 0Cr18Ni12Mo2Ti, (1Cr18Ni12Mo3Ti), 0Cr18Ni12Mo3Ti, 0Cr18Ni12Mo2Cu2, 00Cr18Ni14Mo2Cu2, 0Cr19Ni13Mo3, 00Cr19Ni13Mo3, 0Cr18Ni16Mo5, (1Cr18Ni9Ti), 0Cr18Ni10Ti, 0Cr18Ni11Nb, 0Cr18Ni13Si4
奥氏体-铁素体型	0Cr26Ni5Mo2, 00Cr18Ni5Mo3Si2
铁素体型	0Cr13Al, 00Cr12, 1Cr15, 1Cr17, 1Cr17Mo, 00Cr17Mo, 00Cr18Mo2, 00Cr30Mo2, 00Cr27Mo
马氏体型	1Cr12, 1Cr13, 0Cr13, 2Cr13, 3Cr13, 3Cr16, 7Cr17, 4Cr13
沉淀硬化型	0Cr17Ni17Al
力学性能	各牌号的力学性能按 GB/T 1220—1992 的规定

注：表中括号内的牌号为不推荐使用。

表 14.5-33 不锈钢热轧钢板尺寸规定 (摘自 GB/T 4237—1992)

钢板尺寸规格	按 GB/T 709 的规定
钢板平面度	钢板厚 ≤ 25 mm, 平面度 ≤ 15 mm/m; 钢板厚 > 25 mm, 平面度由供需双方协定

表 14.5-34 不锈钢热轧钢板的耐蚀性能 (摘自 GB/T 4237—1992)

10% 草 酸浸蚀试 验的判别	牌 号	试验状态	硫酸-硫酸铁 腐蚀试验	65% 硝酸 (质量分数) 腐蚀试验	硝酸-氢氟酸 腐蚀试验	硫酸-硫酸铜 腐蚀试验
	0Cr18Ni9	交货状态 (固溶处理)	沟状组织	沟状组织	沟状组织 凹状组织 II	—	沟状组织
0Cr17Ni12Mo2 0Cr18Ni12Mo2Cu2 0Cr19Ni13Mo3	—				沟状组织	
00Cr19Ni10	沟状组织 凹状组织 II				—	
00Cr17Ni14Mo2 00Cr18Ni14Mo2Cu2 00Cr19Ni13Mo3	敏化处理	沟状组织	沟状组织	—	沟状组织	沟状组织
0Cr18Ni10Ti 0Cr18Ni11Nb					—	

硫酸-硫酸铁腐蚀试验的腐蚀减量	牌 号	试验状态		腐蚀减量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	
	0Cr18Ni9	交货状态 (固溶状态)	按供需双方协议		
0Cr17Ni12Mo2					
0Cr18Ni12Mo2Cu2					
0Cr19Ni13Mo3					
65%硝酸腐蚀试验的腐蚀减量	00Cr19Ni10	敏化处理		按供需双方协议	
	00Cr17Ni14Mo2				
	00Cr18Ni14Mo2Cu2				
	00Cr19Ni13Mo3				
65%硝酸腐蚀试验的腐蚀减量	0Cr18Ni9	交货状态(固溶处理) 敏化处理		按供需双方协议	
	00Cr19Ni10			按供需双方协议	
硝酸-氢氟酸腐蚀试验的腐蚀度比	牌 号	腐蚀度比	牌 号	腐蚀度比	
	0Cr17Ni12Mo2	≤ 1.5	00Cr17Ni14Mo2	≤ 1.5	
	0Cr18Ni12Mo2Cu2	≤ 1.5	00Cr18Ni14Mo2Cu2	≤ 1.5	
	0Cr19Ni13Mo3	≤ 1.5	00Cr19Ni13Mo3	≤ 1.5	

2.2.6 优质碳素结构钢热轧薄钢板和钢带 (表 14.5-35、表 14.5-36)

表 14.5-35 优质碳素结构钢热轧薄钢板和钢带牌号及力学性能 (摘自 GB/T 710—1991)

牌 号	拉 延 级 别				
	Z	S 和 P	Z	S	P
	抗拉强度/MPa		伸长率 $\delta_{10}/\%$ \geq		
08F	275~365	275~380	30	29	27
08、08A1、10F	275~390	275~410	28	27	25
10	295~410	295~430	27	26	24
15F	315~430	315~450	27	26	24
15	335~450	335~470	26	25	24
20	355~490	355~500	25	24	24
25	—	390~540	—	23	22
30	—	440~590	—	21	20
35	—	490~635	—	19	18
40	—	510~650	—	—	17
45	—	530~685	—	—	15
50	—	540~715	—	—	13

续表 14.5-35

尺寸规格	钢板和钢带的尺寸规定 (厚度不大于 4 mm) 应符合 GB/T 709 的规定
化学成分	各牌号的化学成分应符合 GB/T 699 的规定; 08Al、15Al 含 Al 量为 0.02% ~ 0.07% (质量分数) 化学成分按 08、15 钢规定; 08Al 的碳、锰含量下限不限制, 含硅量不大于 0.03% (质量分数)

- 注: 1. 拉延级别: Z—最深拉延; S—深拉延; P—普通拉延。
 2. 厚度小于 2 mm 的钢板和钢带, 伸长率允许比表中的规定降低 1% (绝对值)。
 正火状态下供应的钢板和钢带, 其他要求符合本表规定时, 抗拉强度允许比表中上限的规定提高 50 MPa。
 3. 对 25、35、40、45 和 50 号钢的钢板和钢带, 退火呈球状珠光体时 (评级图和允许级别由供需双方协商), 抗拉强度应按下表的规定交货, 但伸长率应符合本表的规定。

牌 号	σ_b /MPa	牌 号	σ_b /MPa	牌 号	σ_b /MPa
25	375~490	35	410~530	45	450~570
30	390~510	40	430~550	50	470~590

表 14.5-36 优质碳素结构钢热轧薄钢板和钢带的杯突值 (摘自 GB/T 710—1991)

厚 度 /mm	牌 号 和 拉 延 级 别				
	Z	S	P	Z	S
	08F、08、 08Al、10F	08F、08、 08Al、10F	08F、08、 08Al、10F	10、15F、15、 20	10、15F、15、 20
冲 压 深 度 /mm \geq					
0.5	9.0	8.4	8.0	8.0	7.6
0.6	9.4	8.9	8.5	8.4	7.8
0.7	9.7	9.2	8.9	8.6	8.0
0.8	10.0	9.5	9.3	8.8	8.2
0.9	10.3	9.9	9.6	9.0	8.4
1.0	10.5	10.1	9.9	9.2	8.6
1.1	10.8	10.4	10.2	不 做 试 验	
1.2	11.0	10.6	10.4		
1.3	11.2	10.8	10.6		
1.4	11.3	11.0	10.8		
1.5	11.5	11.2	11.0		
1.6	11.6	11.4	11.2		
1.7	11.8	11.6	11.4		
1.8	11.9	11.7	11.5		
1.9	12.0	11.8	11.7		
2.0	12.1	11.9	11.8		

- 注: 1. 中间厚度的钢板和钢带, 其杯突试验值按表中接近的小尺寸厚度钢板和钢带的冲压深度数值规定。
 2. 最深拉延级别全部钢号及深拉延级的 15F、15、20 和 25 号钢的钢板和钢带, 应在冷状态下做 180° 弯曲试验, 厚度不大于 2 mm 的弯至两面接触, 大于 2 mm 的垫以厚度相同的垫板, 弯曲处不得有裂纹、裂口及分层。

2.2.7 高强度结构钢热处理和控轧钢板和钢带 (表 14.5-37)

表 14.5-37 高强度结构钢热处理及控轧钢板和钢带牌号、尺寸规格及力学性能 (摘自 GB/T 16270—1996)

尺寸规定		钢板和钢带的尺寸规格按 GB/T 709—1988 热轧钢板钢带的规定 (厚度 ≤ 100 mm)									
牌号	质量等级	交货状态	屈服强度 (规定残余伸长应力) $\sigma_{0.2}/\text{MPa} \geq$		抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta_5/\%$ \geq	冲击功 A_{KV}/J \geq			180°冷弯试验 d —弯心直径 a —试样厚度	
			厚度/mm				0℃	-20℃	-40℃		
			≤ 50	> 50 ~ 100							
牌号 及力学 性能	Q420	C D E	淬火 + 回火、	420	400	520 ~ 670	18	40	40	27	$d = 3a$
	Q460	C D E	正火 + 回火、	460	440	550 ~ 710	17	40	40	27	$d = 3a$
	Q500	D E	正火、	500	480	610 ~ 770	16	—	40	27	$d = 3a$
	Q550	D E	控轧	550	530	670 ~ 830	16	—	40	27	$d = 3a$
	Q620	D E	淬火 + 回火、 或其他热	620	600	720 ~ 890	15	—	40	27	$d = 3a$
	Q690	D E	处理方法	690	670	770 ~ 940	14	—	40	27	$d = 3a$
	化学成分	各牌号的化学成分按 GB/T 16270—1996 的规定									

- 注：1. 进行拉伸和冷弯试验时，应取横向试样；进行冲击试验时，应取纵向试样。
 2. 夏比 (V 型缺口) 冲击试验结果，冲击功按一组三个试样算术平均值计算，允许其中一个试样单值低于本表规定值，但不得低于规定值的 70%。
 3. 当采用 5 mm × 10 mm × 55 mm 小尺寸试样做冲击试验时，其试验结果不小于规定值的 50%。
 4. 冷弯试验不得有裂纹，如生产厂能保证弯曲试验合格，可不做检验。

2.2.8 花纹钢板

花纹钢板的花纹图案分为菱形、扁豆形和圆豆形花纹三种，其形状及尺寸见图 14.5-1，花纹

纹高不小于基板厚度的 0.2 倍。花纹钢板的尺寸规格及牌号性能见表 14.5-38。

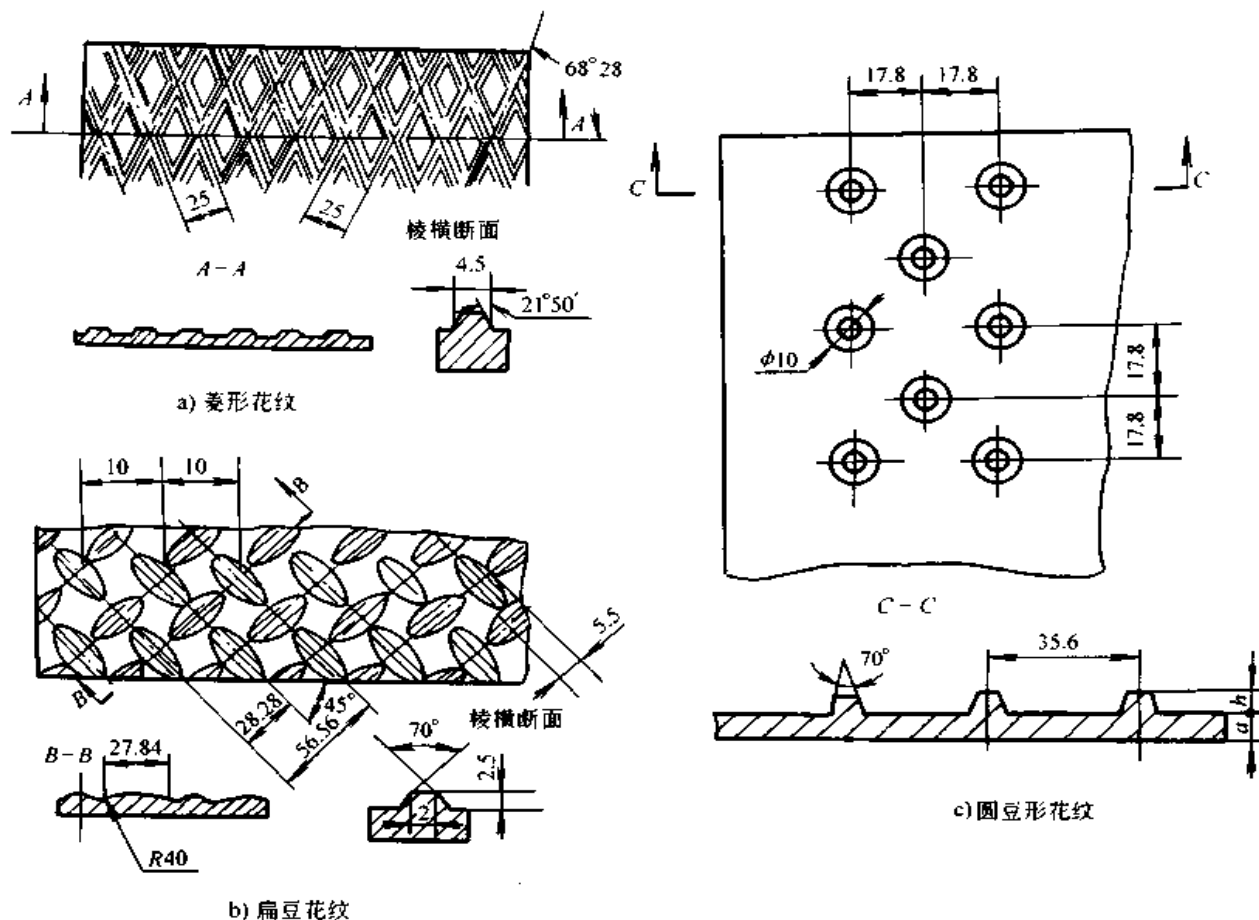


图 14.5-1 花纹钢板花纹图案

表 14.5-38 花纹钢板尺寸规格 (摘自 GB/T 3277—1991)

基本厚度/ mm	基本厚度 允许偏差/ mm	理论质量/kg·m ⁻¹			基本厚度/ mm	基本厚度 允许偏差/ mm	理论质量/kg·m ⁻¹		
		菱 形	扁 豆	圆 豆			菱 形	扁 豆	圆 豆
2.5	±0.3	21.6	21.3	21.1	5.5	+0.4	46.2	44.3	44.1
3.0	±0.3	25.6	24.4	24.3	6.0	-0.5	50.1	48.4	48.1
3.5	±0.3	29.5	28.4	28.3	6.0	+0.5	59.0	52.6	52.4
4.0	±0.4	33.4	32.4	32.3	7.0	-0.6	66.8	56.4	56.2
4.5	±0.4	37.3	36.4	36.2	7.0	+0.6			
5.0	+0.4 -0.5	42.3	40.5	40.2	8.0	-0.7			
5.0					8.0	+0.6			
5.0					8.0	-0.8			
宽度	钢板宽度为 600~1 800 mm, 按 50 mm 进级								
长度	钢板长度为 2 000~12 000 mm, 按 100 mm 进级								

- 注: 1. 产品用钢的牌号及化学成分按 GB/T 700、GB/T 712、GB/T 4171 的规定。
 2. 产品力学性能不作保证项目, 当需方要求时, 按有关标准规定, 也可由双方协定。
 3. 钢板以热轧状态交货。
 4. 标记示例: 用 Q235A 制成的尺寸为 4 mm×1 000 mm×4 000 mm, 圆豆形花纹钢板, 标记为
 圆豆形花纹钢板 Q235A-4×1 000×4 000—GB/T 3277—1991。

续表 14.5-39

外 径/ mm	壁 厚 /mm								
	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12
钢 管 理 论 质 量/kg·m ⁻¹									
32	4.32	4.53	4.73	—	—	—	—	—	—
38	5.35	5.64	5.92	—	—	—	—	—	—
42	6.04	6.38	6.71	7.02	7.32	7.60	7.89	—	—
45	6.56	6.94	7.30	7.65	7.99	8.32	8.63	—	—
50	7.42	7.86	8.29	8.70	9.10	9.49	9.86	—	—
54	8.11	8.60	9.07	9.54	9.99	10.43	10.85	11.67	—
57	8.63	9.16	9.67	10.17	10.65	11.13	11.59	12.48	13.32
60	9.15	9.71	10.26	10.79	11.32	11.83	12.33	13.29	14.21
63.5	9.75	10.36	10.99	11.53	12.10	12.65	13.19	14.24	15.24
68	10.53	11.19	11.84	12.47	13.09	13.71	14.30	15.46	16.57
70	10.88	11.56	12.23	12.89	13.54	14.17	14.80	16.01	17.16
73	11.39	12.11	12.82	13.52	14.20	14.88	15.54	16.82	18.05
76	11.91	12.67	13.42	14.15	14.87	15.58	16.28	17.63	18.94
83	13.12	13.96	14.80	15.62	16.42	17.22	18.00	19.53	21.01
89	14.15	15.07	15.98	16.87	17.76	18.63	19.48	21.16	22.79
95	15.19	16.18	17.16	18.13	19.09	20.03	20.96	22.79	24.56
102	16.40	17.48	18.54	19.60	20.64	21.67	22.69	24.69	26.63
108	17.43	18.59	19.73	20.86	21.97	23.08	24.17	26.31	28.41
114	18.47	19.70	20.91	22.11	23.30	24.48	25.65	27.94	30.19
121	19.68	20.99	22.29	23.58	24.86	26.12	27.37	29.84	32.26
127	20.71	22.10	23.48	24.84	26.19	27.53	28.85	31.47	34.03
133	21.75	23.21	24.66	26.10	27.52	28.93	30.33	33.10	35.81
140	22.96	24.51	26.04	27.56	29.07	30.57	32.06	34.99	37.88
146	23.99	25.62	27.22	28.82	30.41	31.98	33.54	36.62	39.66
152	25.03	26.73	28.41	30.03	31.74	33.39	35.02	38.25	41.43
159	26.24	28.02	29.79	31.55	33.29	35.02	36.75	40.15	43.50
168	27.79	29.68	31.56	33.43	35.29	37.13	38.97	42.59	46.17
180	29.86	31.90	33.93	35.95	37.95	39.94	41.92	45.84	49.72
194	32.28	34.49	36.69	38.88	41.06	43.22	45.38	49.64	53.86
203	33.83	36.16	38.47	40.77	43.06	45.33	47.59	52.08	56.52
219	36.60	39.12	41.63	44.12	46.61	49.08	51.54	56.42	61.26
245	41.08	43.93	46.76	49.57	52.38	55.17	57.95	63.48	68.95
273	45.92	49.10	52.28	55.44	58.59	61.73	64.86	71.07	77.24
299	—	53.91	57.41	60.89	64.36	67.82	71.27	78.13	84.93
325	—	58.72	62.54	66.34	70.13	73.02	77.68	85.18	92.63
351	—	—	67.67	71.79	75.90	80.01	84.10	92.23	100.32
377	—	—	—	—	81.67	86.10	90.51	99.28	108.02

续表 14.5-39

外 径/ mm	壁 厚/mm								
	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12
	钢 管 理 论 质 量/kg·m ⁻¹								
402	—	—	—	—	87.22	91.85	96.67	106.06	115.41
426	—	—	—	—	92.55	97.57	102.59	112.58	122.52
450	—	—	—	—	97.88	103.20	108.50	119.08	130.61
(465)	—	—	—	—	101.20	106.71	112.20	123.15	134.05
480	—	—	—	—	104.53	110.22	115.90	127.22	139.40
500	—	—	—	—	108.97	114.91	120.83	132.65	145.41
530	—	—	—	—	115.63	121.94	128.23	140.78	153.29
(550)	—	—	—	—	120.07	126.62	133.16	146.21	159.20
560	—	—	—	—	122.29	128.97	135.63	148.92	163.16
600	—	—	—	—	131.17	138.34	145.50	159.77	174.00
630	—	—	—	—	137.82	145.36	152.89	167.91	183.88

外 径/ mm	壁 厚 /mm						
	13	14	15	16	17	18	19
	钢 管 理 论 质 量/kg·m ⁻¹						
32、38、42、 45、50、54	—	—	—	—	—	—	—
57	14.11	—	—	—	—	—	—
60	15.07	15.88	—	—	—	—	—
63.5	16.19	17.09	—	—	—	—	—
68	17.63	18.64	19.60	20.52	—	—	—
70	18.27	19.33	20.34	21.31	—	—	—
73	19.23	20.37	21.45	22.49	23.48	24.41	25.30
76	20.20	21.40	22.56	23.67	24.73	25.75	26.71
83	22.44	23.82	25.15	26.44	27.67	28.85	29.99
89	24.36	25.89	27.37	28.80	30.18	31.52	32.80
95	26.29	27.96	29.59	31.17	32.70	34.18	35.61
102	28.53	30.38	32.18	33.93	35.63	37.29	38.89
108	30.46	32.45	34.40	36.30	38.15	39.95	41.70
114	32.38	34.52	36.62	38.67	40.36	42.61	44.51
121	34.62	36.94	39.21	41.43	43.60	45.72	47.79
127	36.55	39.01	41.43	43.80	46.12	48.38	50.60
133	38.47	41.08	43.65	46.16	48.63	51.05	53.41
140	40.71	43.50	46.24	48.93	51.56	54.15	58.69
146	42.04	45.57	48.46	51.29	54.08	56.82	59.50
152	44.56	47.64	50.68	53.66	56.59	59.48	62.32
159	46.80	50.06	53.27	56.42	59.53	62.59	65.60
168	49.69	53.17	56.59	59.97	63.30	66.58	69.81
180	63.54	57.31	61.03	64.71	68.33	71.91	75.43
194	58.02	62.14	66.21	70.23	74.20	78.12	81.99
203	60.91	65.25	69.54	73.78	77.97	82.12	86.21

续表 14.5-39

外 径/ mm	壁 厚 /mm						
	13	14	15	16	17	18	19
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹						
219	66.04	70.77	75.40	80.10	84.68	89.22	93.71
245	74.37	79.75	83.08	90.35	95.58	100.76	105.89
273	83.35	89.42	95.43	101.40	107.32	113.19	119.01
299	91.69	98.39	105.05	111.66	118.22	124.73	131.19
325	100.02	107.37	114.67	121.92	129.12	136.27	143.37
351	168.36	116.35	124.29	132.18	140.02	147.81	155.50
377	116.69	125.32	133.90	142.44	150.92	159.35	167.74
402	124.71	133.95	143.15	152.30	161.40	170.45	179.46
426	132.40	142.24	152.03	161.77	171.46	181.10	190.70
450	140.00	150.52	160.91	171.24	181.52	191.76	201.94
(465)	144.90	155.70	166.46	177.16	187.81	198.41	208.97
480	149.71	160.88	172.00	183.08	194.10	205.07	216.00
500	156.12	167.79	179.40	190.97	202.48	213.95	225.37
530	165.74	178.14	190.50	202.80	215.06	227.27	239.42
(550)	172.15	185.05	197.90	210.70	223.44	236.14	248.79
560	175.36	188.50	201.60	214.64	227.64	240.58	253.48
600	188.18	202.31	216.39	230.42	244.41	258.34	272.22
630	197.80	212.67	227.49	242.26	256.98	271.65	286.28

外 径/ mm	壁 厚 /mm							
	20	22	(24)	25	(26)	28	30	32
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹							
32、38、42、45、 50、54、57、60、 63.5、68、70、73、76	—	—	—	—	—	—	—	—
83	—	—	—	—	—	—	—	—
89	34.03	36.35	38.47	—	—	—	—	—
95	36.99	39.60	42.02	—	—	—	—	—
102	40.44	43.40	46.16	—	—	—	—	—
108	43.40	46.66	49.71	51.17	52.58	55.24	—	—
114	46.36	49.91	53.27	54.87	56.42	59.38	—	—
121	49.81	53.71	57.41	59.18	60.91	64.21	—	—
127	52.77	56.96	60.96	62.88	64.76	68.36	71.76	—
133	55.73	60.22	64.51	66.58	68.60	72.50	76.20	79.70
140	59.18	64.02	68.65	70.00	73.09	77.33	81.38	85.22
146	62.14	67.27	72.20	74.60	76.94	81.48	85.82	89.96
152	65.10	70.53	75.76	78.30	80.79	85.62	90.26	94.69
159	68.55	74.33	79.90	82.61	85.27	90.45	95.43	100.22
168	72.99	79.21	85.22	88.16	91.04	96.67	102.09	107.32
180	78.91	85.72	92.33	95.56	98.74	104.95	110.97	116.79

续表 14.5-39

外 径/ mm	壁 厚 /mm							
	20	22	(24)	25	(26)	28	30	32
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹							
194	85.82	93.31	100.61	104.19	107.71	114.62	121.33	127.84
203	90.26	98.20	105.94	109.74	113.49	120.83	127.99	134.94
219	98.15	106.88	115.41	119.60	123.74	131.88	139.82	147.57
245	110.97	120.98	130.80	135.63	140.41	149.83	159.06	168.08
273	124.78	136.17	147.37	152.89	158.37	169.17	179.77	190.18
299	137.60	150.28	162.76	168.92	175.04	187.12	199.01	210.70
325	150.43	164.38	178.14	184.95	191.71	205.07	218.24	231.21
351	163.25	178.49	193.53	200.98	208.38	223.04	237.48	251.73
377	176.07	192.59	208.92	217.01	225.05	240.98	256.71	272.25
402	188.40	206.16	223.72	232.42	241.08	258.24	275.21	291.07
426	200.24	219.18	237.92	247.22	256.46	274.81	292.96	310.01
450	212.08	232.20	252.12	262.01	271.85	291.38	310.72	329.85
(465)	219.47	240.34	261.00	271.26	281.47	301.74	321.81	341.69
480	226.37	248.47	269.88	280.51	291.09	312.10	332.91	353.53
500	236.74	259.32	281.72	292.84	303.91	325.91	347.71	369.31
530	251.53	275.60	299.47	311.33	323.14	346.62	369.90	392.98
(550)	261.40	286.45	311.31	323.66	335.97	360.43	384.70	408.76
560	266.33	291.88	317.23	—	—	—	—	—
600	286.06	313.58	340.90	—	—	—	—	—
630	300.85	329.85	358.66	—	—	—	—	—

外 径/ mm	壁 厚 /mm						
	(34)	(35)	36	(38)	40	(42)	(45)
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹						
32、38、42、45、50、 54、57、60、63.5、68、70、 73、76、83、89、95、102、 108、114、121、127、133	—	—	—	—	—	—	—
140	88.88	90.63	92.33	—	—	—	—
146	93.91	95.81	97.66	—	—	—	—
152	98.94	100.99	102.98	—	—	—	—
159	104.81	107.03	109.20	—	—	—	—
168	112.35	114.80	117.19	121.82	126.26	130.50	136.50
180	122.41	125.15	127.84	133.07	138.10	142.93	149.81
194	134.15	137.24	140.27	146.19	151.91	157.43	165.85
203	141.70	145.00	148.26	154.62	160.78	166.75	175.33
219	155.11	158.81	162.46	169.61	176.57	183.33	193.10
245	176.91	181.25	185.54	193.98	202.22	210.25	221.94
273	204.58	209.73	214.84	224.90	234.76	244.43	258.56
299	222.19	227.86	233.58	244.58	255.48	266.18	281.86
325	243.99	250.30	256.56	268.94	281.12	293.11	310.72
351	265.79	272.74	279.64	293.31	306.77	320.04	339.57
377	287.58	295.18	302.73	317.67	332.42	346.97	368.42

续表 14.5-39

外 径 / mm	壁 厚 /mm						
	(34)	(35)	36	(38)	40	(42)	(45)
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹						
402	308.55	316.76	324.92	341.10	357.08	372.86	396.16
426	328.67	337.47	346.23	363.59	380.75	397.72	422.80
450	348.79	358.19	367.53	386.08	404.42	422.57	449.43
(465)	361.37	371.13	380.85	400.13	419.22	438.11	466.07
480	373.94	384.08	394.17	414.19	436.02	453.64	482.72
500	390.71	401.34	411.92	432.93	453.74	474.36	504.91
530	415.87	427.23	438.55	461.04	483.34	505.43	538.20
(550)	432.64	444.50	456.31	479.79	503.06	526.15	560.40
560 600、630	—	—	—	—	—	—	—

外 径 / mm	壁 厚 /mm							
	(48)	50	56	60	63	(65)	70	75
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹							
32、38、42、45、50、54、 57、60、63.5、68、70、 73、76、83、89、95、 102、108、114、121、 127、133、140、146、 152、159、168、180、 194	—	—	—	—	—	—	—	—
203	183.47	188.65	—	—	—	—	—	—
219	202.41	208.38	—	—	—	—	—	—
245	233.18	240.44	—	—	—	—	—	—
273	272.45	281.12	—	—	—	—	—	—
299	297.10	307.02	335.57	353.62	366.64	375.08	395.30	414.29
325	327.88	339.08	371.48	392.09	407.04	416.75	440.34	462.28
351	358.66	371.13	407.38	430.56	447.43	458.43	485.24	510.46
377	389.43	403.19	443.29	469.03	487.82	500.10	529.98	558.55
402	419.02	434.02	477.81	506.02	526.66	540.18	573.10	604.79
426	447.43	463.61	510.96	541.53	563.95	578.65	614.56	649.21
450	475.84	493.20	544.10	577.04	601.24	617.12	655.96	693.56

外 径/ mm	壁 厚 /mm							
	(48)	50	56	60	63	(65)	70	75
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹							
(465)	493.59	511.70	564.81	599.24	624.54	641.16	681.84	721.31
480	511.35	530.19	585.53	621.43	647.84	665.20	707.74	749.05
500	535.02	554.85	613.15	651.02	678.91	697.26	742.27	786.04
530	570.53	591.84	654.58	695.41	725.52	745.35	794.05	841.52
(550)	594.21	616.50	682.19	725.00	756.59	777.41	828.58	878.51
560	—	—	—	—	—	—	—	—
600	—	—	—	—	—	—	—	—
630	—	—	—	—	—	—	—	—

注：表中带括号的规格，不推荐使用。

表 14.5-40 结构用冷拔（轧）无缝钢管尺寸规格（摘自 GB/T 8162—1999）

外径/ mm	壁 厚/mm																	
	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2
	钢管理论质量/kg·m ⁻¹																	
6	0.035 4	0.042 1	0.055 0	0.068 0	0.080 0	0.103 0	0.123 0	0.142 0	0.159 0	0.166 0	0.174 0	0.186 0	0.197	—	—	—	—	—
7	0.041 0	0.049 0	0.065 0	0.080 0	0.095 0	0.122 0	0.148 0	0.172 0	0.193 0	0.203 0	0.213 0	0.231 0	0.247 0	0.260 0	0.277	—	—	—
8	0.047 7	0.057 0	0.075 0	0.092 0	0.110 0	0.142 0	0.173 0	0.201 0	0.228 0	0.240 0	0.253 0	0.275 0	0.296 0	0.315 0	0.339	—	—	—
9	0.054	0.064	0.085 0	0.105 0	0.124 0	0.162 0	0.197 0	0.231 0	0.262 0	0.277 0	0.292 0	0.320 0	0.345 0	0.369 0	0.401 0	0.428	—	—
10	0.060	0.072	0.095 0	0.117 0	0.139 0	0.182 0	0.222 0	0.261 0	0.297 0	0.314 0	0.332 0	0.364 0	0.395 0	0.423 0	0.462 0	0.497 0	0.518 0	0.537
11	0.066	0.079	0.105 0	0.129 0	0.154 0	0.201 0	0.247 0	0.290 0	0.331 0	0.351 0	0.371 0	0.408 0	0.444 0	0.477 0	0.524 0	0.566 0	0.592 0	0.615
12	0.072	0.087	0.115 0	0.142 0	0.169 0	0.221 0	0.271 0	0.320 0	0.366 0	0.388 0	0.410 0	0.453 0	0.493 0	0.532 0	0.586 0	0.635 0	0.666 0	0.694
(13)	0.079	0.094	0.124 0	0.154 0	0.184 0	0.241 0	0.296 0	0.349 0	0.400 0	0.425 0	0.450 0	0.497 0	0.543 0	0.586 0	0.647 0	0.704 0	0.740 0	0.774
14	0.085	0.101	0.134 0	0.166 0	0.198 0	0.260 0	0.321 0	0.379 0	0.435 0	0.462 0	0.490 0	0.542 0	0.592 0	0.640 0	0.709 0	0.773 0	0.814 0	0.852
(15)	0.091	0.109	0.144 0	0.179 0	0.213 0	0.280 0	0.345 0	0.408 0	0.470 0	0.499 0	0.529 0	0.586 0	0.641 0	0.694 0	0.771 0	0.842 0	0.888 0	0.931
16	0.097	0.116	0.154 0	0.191 0	0.228 0	0.300 0	0.370 0	0.438 0	0.504 0	0.536 0	0.568 0	0.630 0	0.691 0	0.749 0	0.832	0.91	0.962	1.01
(17)	0.103	0.124	0.164 0	0.203 0	0.243 0	0.320 0	0.395 0	0.468 0	0.539 0	0.573 0	0.608 0	0.675 0	0.740 0	0.803 0	0.894	0.98	1.04	1.09
18	0.109	0.131	0.174 0	0.216 0	0.258 0	0.340 0	0.419 0	0.497 0	0.573 0	0.610 0	0.647 0	0.719 0	0.789 0	0.857 0	0.956	1.05	1.11	1.17
19	0.115	0.138	0.183 0	0.228 0	0.272 0	0.359 0	0.444 0	0.527 0	0.608 0	0.647 0	0.687 0	0.763 0	0.838 0	0.911	1.02	1.12	1.18	1.25
20	0.122	0.146	0.193 0	0.240 0	0.287 0	0.379 0	0.469 0	0.556 0	0.642 0	0.684 0	0.726 0	0.808 0	0.888 0	0.966	1.08	1.19	1.26	1.33
(21)	—	—	0.203 0	0.253 0	0.302 0	0.399 0	0.493 0	0.586 0	0.677 0	0.721 0	0.765 0	0.852 0	0.937	1.02	1.14	1.26	1.33	1.41
22	—	—	0.212 0	0.265 0	0.317 0	0.418 0	0.513 0	0.616 0	0.711 0	0.758 0	0.805 0	0.897 0	0.986	1.07	1.20	1.33	1.41	1.48
(23)	—	—	0.222 0	0.277 0	0.331 0	0.438 0	0.543 0	0.645 0	0.746 0	0.795 0	0.844 0	0.941	1.04	1.13	1.27	1.39	1.48	1.56
(24)	—	—	0.236 0	0.290 0	0.346 0	0.458 0	0.567 0	0.675 0	0.780 0	0.832 0	0.884 0	0.985	1.09	1.18	1.33	1.46	1.55	1.64
25	—	—	0.242 0	0.302 0	0.361 0	0.477 0	0.592 0	0.704 0	0.815 0	0.869 0	0.923	1.03	1.13	1.24	1.39	1.53	1.63	1.72
27	—	—	0.262 0	0.327 0	0.391 0	0.517 0	0.641 0	0.763 0	0.884 0	0.943	1.00	1.13	1.23	1.34	1.51	1.67	1.78	1.88
28	—	—	0.272 0	0.339 0	0.406 0	0.537 0	0.666 0	0.793 0	0.918	0.98	1.04	1.16	1.28	1.40	1.57	1.74	1.85	1.96

续表 14.5-40

外径/mm	壁 厚/mm																	
	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2
钢管理论质量/kg·m ⁻¹																		
29	—	—	0.282	0.351	0.412	0.556	0.691	0.823	0.953	1.02	1.08	1.21	1.33	1.45	1.63	1.81	1.92	2.04
30	—	—	0.292	0.364	0.435	0.576	0.715	0.852	0.987	1.05	1.12	1.25	1.38	1.51	1.70	1.88	2.00	2.12
32	—	—	0.311	0.388	0.465	0.616	0.765	0.911	1.056	1.13	1.20	1.34	1.48	1.62	1.82	2.02	2.15	2.27
34	—	—	0.331	0.413	0.494	0.655	0.814	0.971	1.125	1.20	1.28	1.43	1.58	1.72	1.94	2.15	2.29	2.43
(35)	—	—	0.341	0.425	0.509	0.675	0.838	1.000	1.160	1.24	1.32	1.47	1.63	1.78	2.00	2.22	2.37	2.51
36	—	—	0.350	0.438	0.524	0.695	0.863	1.080	1.195	1.28	1.36	1.52	1.68	1.83	2.07	2.29	2.44	2.59
38	—	—	0.370	0.462	0.553	0.734	0.912	1.089	1.26	1.35	1.44	1.61	1.78	1.94	2.19	2.43	2.59	2.75
40	—	—	0.390	0.487	0.583	0.774	0.962	1.148	1.33	1.42	1.52	1.69	1.87	2.05	2.31	2.57	2.74	2.90
42	—	—	—	—	—	—	1.010	1.207	1.40	1.50	1.60	1.79	1.97	2.16	2.44	2.71	2.89	3.06
44.5	—	—	—	—	—	—	1.073	1.281	1.49	1.59	1.69	1.90	2.10	2.29	2.59	2.88	3.07	3.26
45	—	—	—	—	—	—	1.090	1.296	1.51	1.61	1.71	1.92	2.12	2.32	2.62	2.91	3.11	3.30
48	—	—	—	—	—	—	1.160	1.385	1.61	1.72	1.83	2.05	2.27	2.48	2.81	3.12	3.33	3.54
50	—	—	—	—	—	—	1.21	1.44	1.68	1.79	1.91	2.14	2.37	2.59	2.93	3.26	3.48	3.70
51	—	—	—	—	—	—	1.23	1.47	1.71	1.83	1.95	2.18	2.42	2.65	2.99	3.33	3.65	3.77
53	—	—	—	—	—	—	1.28	1.53	1.78	1.91	2.03	2.27	2.52	2.76	3.11	3.47	3.70	3.93
54	—	—	—	—	—	—	1.31	1.56	1.82	1.94	2.07	2.32	2.56	2.81	3.18	3.54	3.77	4.01
56	—	—	—	—	—	—	1.36	1.62	1.89	2.02	2.15	2.41	2.66	2.92	3.30	3.67	3.92	4.17
57	—	—	—	—	—	—	1.38	1.65	1.92	2.05	2.19	2.45	2.71	2.97	3.36	3.74	4.00	4.25
60	—	—	—	—	—	—	1.46	1.74	2.02	2.16	2.31	2.58	2.86	3.14	3.55	3.95	4.22	4.48
63	—	—	—	—	—	—	1.53	1.83	2.13	2.27	2.42	2.72	3.01	3.30	3.73	4.16	4.44	4.72
65	—	—	—	—	—	—	1.58	1.89	2.20	2.35	2.50	2.81	3.11	3.41	3.85	4.29	4.59	4.88
(68)	—	—	—	—	—	—	1.65	1.98	2.30	2.46	2.62	2.94	3.26	3.57	4.04	4.50	4.81	5.11
70	—	—	—	—	—	—	1.70	2.04	2.37	2.53	2.70	3.03	3.35	3.68	4.16	4.64	4.96	5.27
73	—	—	—	—	—	—	1.78	2.12	2.47	2.64	2.82	3.16	3.50	3.84	4.35	4.85	5.18	5.51
75	—	—	—	—	—	—	1.82	2.18	2.54	2.72	2.90	3.25	3.60	3.95	4.47	4.99	5.33	5.67
76	—	—	—	—	—	—	1.85	2.21	2.58	2.76	2.94	3.29	3.65	4.00	4.53	5.05	5.40	5.75
80	—	—	—	—	—	—	—	—	2.71	2.90	3.09	3.47	3.85	4.22	4.78	5.33	5.70	6.06
(83)	—	—	—	—	—	—	—	—	2.82	3.02	3.21	3.60	4.00	4.38	4.96	5.54	5.92	6.30
85	—	—	—	—	—	—	—	—	2.89	3.09	3.29	3.69	4.09	4.49	5.09	5.68	6.07	6.46
89	—	—	—	—	—	—	—	—	3.02	3.24	3.45	3.87	4.29	4.71	5.33	5.95	6.36	6.77
90	—	—	—	—	—	—	—	—	3.06	3.27	3.49	3.91	4.34	4.76	5.39	6.02	6.44	6.85
95	—	—	—	—	—	—	—	—	3.23	3.46	3.69	4.14	4.59	5.03	5.70	6.37	6.81	7.24
100	—	—	—	—	—	—	—	—	3.40	3.64	3.88	4.36	4.83	5.31	6.01	6.71	7.18	7.64
(102)	—	—	—	—	—	—	—	—	3.47	3.72	3.96	4.45	4.93	5.41	6.13	6.85	7.32	7.80
108	—	—	—	—	—	—	—	—	3.68	3.94	4.20	4.71	5.23	5.74	6.50	7.26	7.77	8.27

续表 14.5-40

外径/ mm	壁 厚/mm																	
	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14
钢管理论质量/kg·m ⁻¹																		
36	2.81	3.16	3.50	3.82	4.14	4.44	4.73	5.01	5.27	5.52	—	—	—	—	—	—	—	—
38	2.98	3.35	3.72	4.07	4.41	4.74	5.05	5.35	5.64	5.92	6.18	6.44	—	—	—	—	—	—
40	3.15	3.55	3.94	4.32	4.68	5.03	5.37	5.70	6.01	6.31	6.60	6.88	—	—	—	—	—	—
42	3.32	3.75	4.16	4.56	4.95	5.33	5.69	6.04	6.38	6.71	7.02	7.32	—	—	—	—	—	—
44.5	3.54	4.00	4.44	4.87	5.29	5.70	6.09	6.47	6.84	7.20	7.55	7.88	—	—	—	—	—	—
45	3.58	4.04	4.49	4.93	5.36	5.77	6.17	6.56	6.94	7.30	7.65	7.99	8.32	8.63	—	—	—	—
48	3.84	4.34	4.83	5.30	5.76	6.21	6.65	7.08	7.49	7.89	8.28	8.66	9.02	9.37	—	—	—	—
50	4.01	4.54	5.05	5.55	6.04	6.51	6.97	7.42	7.86	8.29	8.70	9.10	9.49	9.89	10.58	11.25	—	—
51	4.10	4.64	5.16	5.67	6.17	6.66	7.13	7.60	8.05	8.48	8.91	9.32	9.72	10.11	10.85	11.54	—	—
53	4.27	4.83	5.38	5.92	6.44	6.95	7.45	7.94	8.42	8.88	9.33	9.77	10.19	10.60	11.39	12.13	—	—
54	4.38	4.93	5.49	6.04	6.58	7.10	7.61	8.11	8.60	9.08	9.54	9.99	10.43	10.85	11.67	12.43	—	—
56	4.53	5.13	5.71	6.29	6.85	7.40	7.93	8.46	8.97	9.47	9.96	10.43	10.89	11.34	12.21	13.02	—	—
57	4.62	5.23	5.83	6.41	6.99	7.55	8.10	8.63	9.16	9.67	10.17	10.65	11.13	11.59	12.48	13.32	14.11	—
60	4.88	5.52	6.16	6.78	7.39	7.99	8.58	9.15	9.71	10.23	10.80	11.32	11.83	12.33	13.29	14.21	15.07	15.83
63	5.14	5.82	6.49	7.15	7.80	8.43	9.06	9.67	10.26	10.85	11.42	11.98	12.53	13.07	14.11	15.09	—	—
65	5.31	6.02	6.71	7.40	8.07	8.73	9.38	10.01	10.63	11.25	11.84	12.43	13.00	13.56	14.65	15.68	—	—
(68)	5.57	6.31	7.05	7.77	8.48	9.17	9.86	10.53	11.19	11.84	12.47	13.10	13.71	14.30	15.46	16.57	17.63	18.64
70	5.74	6.51	7.27	8.01	8.75	9.47	10.18	10.88	11.56	12.23	12.89	13.54	14.17	14.80	16.01	17.16	18.27	19.33
73	6.00	6.81	7.60	8.38	9.16	9.91	10.66	11.39	12.11	12.82	13.52	14.20	14.88	15.54	16.82	18.05	19.24	20.37
75	6.17	7.00	7.82	8.63	9.43	10.21	10.98	11.74	12.48	13.22	13.94	14.65	15.34	16.03	17.36	18.64	—	—
76	6.26	7.10	7.93	8.75	9.56	10.36	11.14	11.91	12.67	13.42	14.15	14.87	15.58	16.28	17.63	18.94	20.20	21.41
80	6.60	7.50	8.38	9.25	10.10	10.95	11.78	12.60	13.41	14.20	14.99	15.76	16.52	17.26	18.72	20.12	—	—
(83)	6.86	7.70	8.71	9.62	10.51	11.39	12.26	13.12	13.96	14.80	15.62	16.42	17.22	18.00	19.53	21.01	22.44	23.82
85	7.04	7.99	8.93	9.86	10.78	11.69	12.58	13.46	14.33	15.19	16.04	16.87	17.69	18.49	20.07	21.60	—	—
89	7.38	8.38	9.38	10.36	11.33	12.28	13.22	14.16	15.07	15.98	16.87	17.76	18.63	19.48	21.16	22.79	24.36	25.89
90	7.47	8.48	9.49	10.48	11.46	12.43	13.38	14.33	15.22	16.18	17.08	17.98	18.86	19.73	21.43	23.08	—	—
95	7.90	8.98	10.04	11.10	12.14	13.17	14.19	15.19	16.18	17.16	18.13	19.09	20.03	20.96	22.79	24.56	—	—
100	8.33	9.47	10.60	11.71	12.82	13.91	14.99	16.05	17.11	18.15	19.18	20.20	21.20	22.19	24.14	26.04	—	—
(102)	8.50	9.67	10.82	11.96	13.09	14.21	15.31	16.40	17.48	18.55	19.60	20.64	21.67	22.69	24.69	26.63	—	—
108	9.02	10.26	11.49	12.70	13.90	15.09	16.27	17.44	18.59	19.73	20.86	21.97	23.08	24.17	26.31	28.41	—	—
110	9.19	10.48	11.71	12.95	14.17	15.39	16.59	17.78	18.96	20.12	21.28	22.42	23.54	24.66	26.85	29.00	—	—
120	10.08	11.44	12.82	14.18	15.53	16.87	18.20	19.51	20.81	22.10	23.37	24.64	25.89	27.13	29.57	31.96	—	—
125	10.49	11.94	13.37	14.80	16.21	17.61	18.99	20.37	21.73	23.08	24.42	25.75	27.06	28.36	30.92	33.44	—	—
130	10.92	12.43	13.93	15.41	16.89	18.35	19.80	21.23	22.66	24.07	25.47	26.85	28.23	29.59	32.23	34.92	—	—
138	11.18	12.72	14.26	15.78	17.29	18.79	20.28	21.75	23.21	24.66	26.10	27.52	28.93	30.33	33.10	35.81	—	—
140	11.78	13.42	15.04	16.65	18.24	19.83	21.40	22.96	24.51	26.04	27.56	29.03	30.57	32.06	34.99	37.88	—	—
150	12.65	14.40	16.15	17.88	19.60	21.31	23.00	24.68	26.36	28.01	29.66	31.29	32.91	34.52	37.71	40.84	—	—
160	13.51	15.39	17.26	19.11	20.96	22.79	24.60	26.41	28.20	29.99	31.76	33.51	35.26	36.99	40.42	43.80	—	—
170	14.37	16.37	18.37	20.34	22.31	24.27	26.21	28.14	30.05	31.96	33.85	35.73	37.60	39.46	43.13	46.76	—	—
180	15.23	17.36	19.48	21.58	23.67	25.75	27.81	29.87	31.90	33.93	35.95	37.95	39.94	41.92	45.84	49.72	—	—
190	—	18.35	20.58	22.81	25.02	27.22	29.41	31.59	33.75	35.90	38.04	40.17	42.29	44.39	48.56	52.67	—	—
200	—	19.33	21.69	24.04	26.38	28.70	31.02	33.32	35.60	37.88	40.14	42.39	44.63	46.85	51.27	55.63	—	—

注：表中带括号的规格，不推荐使用。

表 14.5-41 合金钢无缝钢管牌号及力学性能 (摘自 GB/T 8162—1999)

牌 号	热 处 理					力 学 性 能 \geq			钢管退火或高温回火供应状态 布氏硬度 HB \leq
	淬 火			回 火		抗拉强度 σ_b / MPa	屈服点 σ_s / MPa	断后伸长 率 δ_5 / %	
	温度 / $^{\circ}$ C		冷却剂	温度 / $^{\circ}$ C	冷却剂				
	第一次淬火	第二次淬火							
40Mn2	840	—	水、油	540	水、油	885	735	12	217
45Mn2	840	—	水、油	550	水、油	885	735	10	217
27SiMn	920	—	水	450	水、油	980	835	12	217
40MnB	850	—	油	500	水、油	980	785	10	207
45MnB	840	—	油	500	水、油	1 030	835	9	217
20Mn2B	880 ^②	—	油	200	水、空	980	785	10	187
20Cr	880 ^②	800	水、油	200	水、空	835 ^① 785 ^①	540 ^① 490 ^①	10 ^① 10 ^①	179 179
30Cr	860	—	油	500	水、油	885	685	11	187
35Cr	860	—	油	500	水、油	930	735	11	207
40Cr	850	—	油	520	水、油	980	785	9	207
45Cr	840	—	油	520	水、油	1 030	835	9	217
50Cr	830	—	油	520	水、油	1 080	930	9	229
38CrSi	900	—	油	600	水、油	980	835	12	255
12CrMo	900	—	空	650	空	410	265	24	179
15CrMo	900	—	空	650	空	440	295	22	179
20CrMo	880 ^②	—	水、油	500	水、油	885 ^① 845 ^①	685 ^① 635 ^①	11 ^① 12 ^①	197 197
35CrMo	850	—	油	550	水、油	980	835	12	229
42CrMo	850	—	油	560	水、油	1 080	930	12	217
12CrMoV	970	—	空	750	空	440	225	22	241
12Cr1MoV	970	—	空	750	空	490	245	22	179
38CrMoAl	940	—	水、油	640	水、油	980 ^① 930 ^①	835 ^① 785 ^①	12 ^① 14 ^①	229 229
50CrVA	860	—	油	500	水、油	1 275	1 130	10	255
20CrMn	850	—	油	200	水、空	930	735	10	187
20CrMnSi	880 ^②	—	油	480	水、油	785	635	12	207
30CrMnSi	880 ^②	—	油	520	水、油	1 080 ^① 980 ^①	885 ^① 835 ^①	8 ^① 10 ^①	229 229
35CrMnSiA	880 ^②	—	油	230	水、空	1 620	—	9	229
20CrMnTi	880 ^②	870	油	200	水、空	1 080	835	10	217
30CrMnTi	880 ^②	850	油	200	水、空	1 470	—	9	229
12CrNi2	860	780	水、油	200	水、空	785	590	12	207
12CrNi3	860	780	油	200	水、空	930	685	11	217
12CrNi4	860	780	油	200	水、空	1 080	835	10	269
40CrNiMoA	850	—	油	600	水、油	980	835	12	269
45CrNiMoVA	860	—	油	460	油	1 470	1 325	7	269

注：1. 表中所列热处理温度允许调整范围：淬火 $\pm 20^{\circ}$ C，低温回火 $\pm 30^{\circ}$ C，高温回火 $\pm 50^{\circ}$ C。

2. 硼钢在淬火前可先正火，铬锰钛钢第一次淬火可用正火代替。

3. 对壁厚不大于 5 mm 的钢管不做布氏硬度试验。

① 可按其中一种数据交货。

② 于 280~320 $^{\circ}$ C 等温淬火。

3.1.2 输送流体用无缝钢管

缝钢管尺寸规格相同,见表 14.5-39、表 14.5-40、

输送流体用无缝钢管的尺寸规格与结构用无 其力学性能见表 14.5-42。

表 14.5-42 输送流体用无缝钢管牌号及力学性能 (摘自 GB/T 8163—1999)

牌 号	σ_b /MPa	σ_s /MPa		δ_5 /%
		壁厚 ≤ 15 mm	壁厚 > 15 mm	
10	335~475	≥ 205	≥ 195	≥ 24
20	390~530	≥ 245	≥ 235	≥ 20
09MnV	430~610	≥ 295	≥ 285	≥ 22
Q345	490~665	≥ 325	≥ 315	≥ 21

注: 1. 牌号的化学成分应符合 GB/T 699 和 GB/T 1591 的规定。

2. 热轧(挤压、扩)钢管以热轧或热处理状态交货,冷拔(轧)钢管以热处理状态交货。

3. 钢管应每根进行水压试验,最高压力不大于 19 MPa,试验压力为 $p = \frac{2SR}{D}$ 式中 p 为试验压力(MPa); S 为钢管公称壁厚(mm); D 为钢管标称外径(mm), R 为规定屈服强度的 60% (MPa)。在试验压力下,应保证耐压时间不小于 5s,且不得出现漏水和渗漏现象。

4. 对于外径大于 22 mm,壁厚与外径比值小于或等于 10%的钢管应进行压扁试验,按 GB/T 8163 规定压扁检验后,试样应无裂缝或裂口。

3.1.3 液压和气动缸筒用精密内径无缝钢管 (表 14.5-43)

表 14.5-43 液压和气动缸筒用精密内径无缝钢管尺寸规格 (摘自 GB/T 8713—1988)

(mm)

内径	壁 厚											
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	5.0	6.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0
	外 径											
25	28	—	—	31	—	35	—	40	—	—	—	—
32	35	36	—	38	—	42	—	47	—	—	—	—
10	—	—	45	16	—	50	—	55	—	—	—	—
50	—	—	55	56	—	60	—	65	70	75	—	—
63	—	—	68	69	—	73	75	78	83	88	—	—
80	—	—	85	86	—	90	92	95	100	105	110	—
100	—	—	105	106	—	110	112	115	120	125	130	—
125	—	—	—	—	132	135	137	140	145	150	155	165
160	—	—	—	—	165	170	—	175	180	185	190	200
200	—	—	—	—	—	220	—	215	220	225	230	240

注: 1. 产品采用的钢号为 10、20、35、45 号,其化学成分和力学性能符合 GB/T 699—1999 规定。

2. 钢管的外径和内径尺寸应符合 GB/T 3639 的规定;本表所列为优先选用尺寸系列。

3. 钢管通常长度为 2~6 m,采用冷拔或冷轧无缝方法制造。

4. 标记示例:用 20 号钢制造的外径 54 mm、内径 50 mm,通常长度交货,内径公差 H8,内表面粗糙度为 d 级的冷轧无缝钢管,标记为 精轧管 20- $\phi 54 \times \phi 50$ H8, d—GB/T 8713—1988

3.1.4 结构用和流体输送用不锈钢无缝钢管 (表 14.5-44 ~ 表 14.5-46)

表 14.5-44 结构用和流体输送用不锈钢无缝钢管
(热轧、挤、扩) 外径和壁厚 (摘自 GB/T 14975—1994、GB/T 14976—1994) (mm)

外径 m	壁 厚																						
	4.5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	25	26	28	
68	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
70	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
73	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
76	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
80	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
83	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
89	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
95	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
102	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
108	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
114		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
121		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
127		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
133		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+												
140			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
146			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
152			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
159			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+										
168				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									
180					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									
194					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									
219					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
245							+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
273									+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
325										+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
351											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
377												+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
426													+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

注: 1. “+”表示具有的产品规格。

2. 热轧(挤、扩)钢管通常长度为2~12 m。

3. 对于GB/T 14976 流体输送用钢管没有壁厚19、20、22、24、25、26、28 mm的钢管。

4. 标记示例: 用00Cr17Ni14Mo2制造, 外径25 mm, 壁厚2 mm, 定尺长度6 000 mm 流体输送用钢管, 标记为

钢管 00Cr17Ni14Mo2-25×2×6 000—GB/T 14976—1994

续表 14.5-45

外 径	壁 厚																																						
	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	11	12	13	14	15						
73											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
75											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
76											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
80											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
83											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
85											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
89											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
90													+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
95													+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
100													+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
102															+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
108																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
114																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
127																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
133																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
140																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
146																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
159																+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

注：1. “+”表示具有产品规格。

2. GB/T 14975—1994 结构用不锈钢无缝钢管没有外径 6、7、8、9 mm；壁厚 0.5、0.6、0.8 mm 等规格。

3. 冷拔（轧）普通管长度为 2~8 m。

表 14.5.46 结构用和流体输送用不锈钢无缝钢管牌号及力学性能 (摘自 GB/T 14975—1994, GB/T 14976—1994)

组织类型	序号	牌号	推荐热处理制度	力学性能			密度/ kg·dm ⁻³
				σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	
				不小于			
奥氏体 型	1	0Cr18Ni9	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.93
	2	1Cr18Ni9*	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.90
	3	00Cr19Ni10	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	480	175	35	7.93
	4	0Cr18Ni10Ti	920 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.95
	5	0Cr18Ni11Nb	980 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	6	0Cr17Ni12Mo2	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	7	00Cr17Ni14Mo2	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	480	175	35	7.98
	8	0Cr18Ni12Mo2Ti	1 000 ~ 1 100℃, 急冷	530	205	35	8.00
	9	1Cr18Ni12Mo2Ti	1 000 ~ 1 100℃, 急冷	530	205	35	8.00
	10	0Cr18Ni12Mo3Ti	1 000 ~ 1 100℃, 急冷	530	205	35	8.10
	11	1Cr18Ni12Mo3Ti	1 000 ~ 1 100℃, 急冷	530	205	35	8.10
	12	1Cr18Ni9Ti	1 000 ~ 1 100℃, 急冷	520	205	35	7.90
	13	0Cr19Ni13Mo3	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	14	00Cr19Ni13Mo3	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	480	175	35	7.98
	15	0Cr23Ni13*	1 030 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	16	0Cr25Ni20*	1 030 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	17	0Cr18Ni12Mo2Cu2*	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
	18	00Cr18Ni14Mo2Cu2*	1 010 ~ 1 150℃, 急冷	520	205	35	7.98
铁素体 型 马氏体 型	19	0Cr13	780 ~ 830℃, 空冷或缓冷	370	180	22	7.70
	20	1Cr17**	780 ~ 850℃, 空冷或缓冷	410	245	20	7.70
	21	1Cr13**	800 ~ 900℃, 缓冷	410	205	20	7.70
	22	2Cr13**	800 ~ 900℃, 缓冷	470	215	19	7.70
奥氏体-铁素体 型	23	0Cr26Ni5Mo2*	≥950℃, 急冷	590	390	18	7.80

注: 1. 表中带“*”者为 GB/T 14976 的牌号, “**”者为 GB/T 14975 的牌号。其他牌号为 GB/T 14975 和 GB/T 14976 共有; 其化学成分按 GB/T 14975、GB/T 14976 规定。

2. 热挤压管抗拉强度允许降低 20 MPa。

3. 按需方要求, 在合同中注明, 可测定屈服强度。热处理状态纵向力学性能 (σ_b 、 δ_5) 应按本表规定。

4. GB/T 14976 钢管应逐根进行水压试验, GB/T 14975 钢管只在需方要求时才进行水压试验。试验压力按 GB/T 14976 进行。

5. 按需方要求, 奥氏体型和铁素体型冷拔(轧)钢管可以冷加工状态交货, 应在合同中注明。但弯曲度、力学性能、压扁试验可不作检验。

3.2 电焊钢管

3.2.1 直缝电焊钢管 (表 14.5-47~表 14.5-48)

表 14.5-47 直缝电焊钢管尺寸规格 (摘自 GB/T 13793—1992)

外径 /mm	壁 厚 /mm																	
	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0
钢管理论质量/kg·m ⁻¹																		
5	0.055	0.065	0.083	0.099														
8	0.092	0.109	0.142	0.173	0.201													
10	0.117	0.139	0.181	0.222	0.260													
12	0.142	0.169	0.221	0.271	0.320	0.366	0.388	0.410										
13		0.183	0.241	0.296	0.349	0.400	0.425	0.450										
14		0.198	0.260	0.321	0.379	0.435	0.462	0.489										
15		0.213	0.280	0.345	0.408	0.470	0.499	0.529										
16		0.228	0.300	0.370	0.438	0.504	0.536	0.568										
17		0.243	0.320	0.395	0.468	0.539	0.573	0.608										
18		0.257	0.339	0.419	0.497	0.573	0.610	0.647										
19		0.272	0.359	0.444	0.527	0.608	0.647	0.687										
20		0.287	0.379	0.469	0.556	0.642	0.684	0.726	0.808	0.888								
21			0.399	0.493	0.586	0.677	0.721	0.765	0.852	0.937								
22			0.418	0.518	0.616	0.711	0.758	0.805	0.897	0.986	1.074							
25			0.477	0.592	0.704	0.815	0.869	0.923	1.030	1.134	1.237	1.387						
28			0.537	0.666	0.793	0.918	0.980	1.042	1.163	1.282	1.400	1.572	1.740					
30			0.576	0.715	0.852	0.987	1.054	1.121	1.252	1.381	1.508	1.695	1.878	1.997				
32			0.764	0.911	1.056	1.128	1.199	1.341	1.480	1.617	1.819	2.016	2.145					
34			0.814	0.971	1.125	1.202	1.278	1.429	1.578	1.725	1.942	2.154	2.293					
37			0.888	1.059	1.229	1.313	1.397	1.562	1.726	1.888	2.127	2.361	2.515					
38			0.912	1.089	1.264	1.350	1.436	1.607	1.776	1.942	2.189	2.430	2.589	2.746	2.978			
40			0.962	1.148	1.333	1.424	1.515	1.696	1.874	2.051	2.312	2.569	2.737	2.904	3.150			
45				1.09	1.30	1.51	1.61	1.71	1.92	2.12	2.32	2.62	2.91	3.11	3.30	3.58	3.86	
46					1.33	1.54	1.65	1.75	1.96	2.17	2.38	2.68	2.98	3.18	3.38	3.66	3.95	
48					1.38	1.61	1.72	1.83	2.05	2.27	2.48	2.81	3.12	3.33	3.54	3.84	4.14	
50					1.44	1.68	1.79	1.91	2.14	2.37	2.59	2.93	3.26	3.48	3.69	4.01	4.33	
51					1.47	1.71	1.83	1.95	2.18	2.42	2.65	2.99	3.33	3.55	3.77	4.10	4.42	
53					1.53	1.78	1.90	2.03	2.27	2.52	2.76	3.11	3.47	3.70	3.93	4.27	4.61	
54					1.56	1.82	1.94	2.07	2.32	2.56	2.81	3.17	3.54	3.77	4.01	4.36	4.93	
60					1.74	2.02	2.16	2.30	2.58	2.86	3.14	3.54	3.95	4.22	4.48	4.88	5.27	
63.5					1.84	2.14	2.29	2.44	2.74	3.03	3.33	3.76	4.19	4.48	4.76	5.18	5.59	
65							2.35	2.50	2.81	3.11	3.41	3.85	4.29	4.59	4.88	5.31	5.73	
70							2.37	2.70	3.03	3.35	3.68	4.16	4.64	4.96	5.27	5.74	6.20	
76							2.76	2.94	3.29	3.65	4.00	4.53	5.05	5.40	5.74	6.26	6.77	
80							2.90	3.09	3.47	3.85	4.22	4.78	5.33	5.70	6.06	6.60	7.14	
83							3.01	3.21	3.60	3.99	4.38	4.96	5.54	5.92	6.30	6.86	7.42	7.79
89							3.24	3.45	3.87	4.29	4.71	5.33	5.95	6.36	6.77	7.38	7.98	8.38
95							3.46	3.69	4.14	4.59	5.03	5.70	6.37	6.81	7.24	7.90	8.55	8.98
101.6							3.70	3.95	4.43	4.91	5.39	6.11	6.82	7.29	7.76	8.47	9.16	9.63
102							3.72	3.96	4.45	4.93	5.41	6.13	6.85	7.32	7.80	8.50	9.20	9.67

续表 14.5-47

外径 /mm	壁 厚 /mm																			
	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.4	5.6	6.0	6.5	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	12.7
钢管理论质量/kg·m ⁻¹																				
108	7.77	8.27	9.02	9.76	10.26	10.75	11.49	12.22	12.70											
114	8.21	8.74	9.54	10.33	10.85	11.37	12.15	12.93	13.44	14.46	14.97									
114.3	8.23	8.77	9.56	10.35	10.88	11.40	12.18	12.96	13.48	14.50	15.01									
121	8.73	9.30	10.14	10.98	11.54	12.10	12.93	13.75	14.30	15.39	15.94									
127	9.17	9.77	10.66	11.54	12.13	12.72	13.59	14.46	15.04	16.19	16.76	17.90								
133			11.18	12.11	12.72	13.34	14.26	15.17	15.78	16.99	17.59	18.79								
139.3			11.72	12.70	13.35	13.99	14.96	15.92	16.56	17.83	18.46	19.72								
140			11.78	12.76	13.42	14.07	15.04	16.00	16.65	17.92	18.56	19.83								
152			12.82	13.80	14.60	15.31	16.37	17.42	18.13	19.52	20.22	21.60								
159				15.3	16.0	17.1	18.3	19.0	20.5	21.2	22.6	24.4	26.2							
165.1				15.9	16.7	17.8	19.0	19.7	21.3	22.0	23.5	25.4	27.3							
168.3				16.2	17.0	18.2	19.4	20.1	21.7	22.5	24.0	25.9	27.8							
177.8				17.1	18.0	19.2	20.5	21.3	23.0	23.8	25.4	27.5	29.5	33.5						
180				17.4	18.2	19.5	20.7	21.6	23.3	24.1	25.7	27.8	29.9	33.9						
193.7				18.7	19.6	21.0	22.4	23.3	25.1	26.0	27.8	30.0	32.2	36.6						
203						22.0	23.5	24.4	26.3	27.3	29.1	31.5	33.8	38.5						
219.1						23.8	25.4	26.4	28.5	29.5	31.5	34.1	36.6	41.6	46.6					
244.5						26.6	28.4	29.5	31.8	33.0	35.3	38.1	41.0	46.7	52.3					
267								32.3	34.8	36.1	38.6	41.8	44.9	51.1	57.3	63.4				
273								33.0	35.6	36.9	39.5	42.7	48.9	52.3	58.6	64.9				
298.5										40.4	43.3	46.8	50.3	57.3	54.3	71.1	78.0			
323.9										44.0	47.0	50.9	54.7	62.3	69.9	77.4	84.9			
325											47.2	51.1	54.9	62.5	70.1	77.7	85.2			
351											51.0	55.2	59.4	67.7	75.9	84.1	92.2			
355.6											51.7	56.0	60.2	68.6	76.9	85.2	93.5	101.7		
368											53.6	57.9	62.3	71.0	79.7	88.3	96.8	105.3		
377											54.9	59.4	63.9	72.8	81.7	90.5	99.28	108.0		
402											58.6	63.4	68.2	77.7	87.2	96.7	106.1	115.4		
406.4											59.2	64.1	68.9	78.6	88.2	97.8	107.3	116.7	123.3	
419											61.1	66.1	71.1	81.1	91.0	100.9	110.7	120.4	127.2	
426											62.1	67.2	72.3	82.5	92.5	102.6	112.6	122.5	129.4	
457											66.7	72.2	77.7	88.5	99.4	110.2	121.0	131.7	139.1	
478											69.8	75.6	81.3	92.7	104.1	115.4	126.7	137.7	145.7	
486											70.1	75.9	81.6	93.1	104.5	115.9	127.2	138.5	146.3	
508											74.3	80.4	85.5	98.6	110.7	122.8	134.8	146.8	155.1	

注：1. 通常长度：外径小于或等于 30 mm，长度 2~6 m；外径大于 30~70 mm，长度 2~8 m；外径大于 70 mm，长度 2~10 m。

2. 外径不大于 16 mm 的钢管，应为实用性笔直；外径大于 16 mm 钢管，弯曲度小于或等于 1.5 mm/m。

3. 钢管外径小于或等于 152 mm，其圆度不大于外径允许公差的 75%；外径大于 152 mm，其圆度不大于外径允许公差。

4. 钢管按制造精度分为外径精度 D_1 （高精度）、 D_2 （较高精度）、 D_3 （普通精度）；壁厚精度 S_1 （高精度）、 S_2 （较高精度）、 S_3 （普通精度）。精度应在合同中注明，未注明按普通精度执行。

5. 标记示例：用 10 号钢制造的外径 70 mm，壁厚 3.0 mm 的钢管。

精度为 D_2 、 S_3 ，（普通精度代号可省略标记）长度为 1 450 mm 倍尺（BC）的软态焊管（HG），标记为

HG-R-10-70 D_2 × 3.0 × 1450BC—GB/T 13793—1992

表 14.5-48 直缝电焊钢管牌号和力学性能 (摘自 GB/T 13793—1992)

牌 号	R		DY	
	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_5 /%	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_5 /%
08F、08、10F、10	315	22	375	13
15F、15	355	20	400	11
20	390	19	440	9
Q195	315	22	335	14
Q215-A、B	335	22	355	12
Q235-A、B	375	20	390	9

注：1. 外径不大于 219.1 mm 的钢管应承受外径压缩 1/3 的压扁试验。

2. 外径小于 50 mm 的钢管可用弯曲试验代替注 1 规定的压扁试验。冷弯试验时不带填充物，弯曲半径等于钢管公称外径的 6 倍，弯曲角度为 90°，焊缝位于弯曲方向的侧面。

3. 根据需方要求，并经双方协议，外径不大于 219.1 mm 的钢管可承受将外径扩大 6% 的扩口试验。扩口锥度为 30°、45°、60°中的一种。

4. 根据需方要求，并在合同中注明，钢管可按下列试验压力进行液压试验。液压试验也可采用涡流探伤代替。

钢管外径 ≤ 219.1 mm，试验压力 = 5.8 MPa；

钢管外径 > 219.1 mm，试验压力 = 2.9 MPa

5. 钢管以不热处理状态交货，按需方要求也可经热处理交货。

6. 钢管采用的牌号其化学成分应符合相应标准规定。

3.2.2 低压流体输送用焊接钢管和镀锌焊接钢管 (表 14.5-49)

表 14.5-49 低压流体输送用焊接钢管和镀锌焊接钢管尺寸规格

(摘自 GB/T 3092—1993、GB/T 3091—1993)

公称口径		外径 公称尺寸/mm	普通钢管		加厚钢管	
mm	in		壁 厚 公称尺寸/mm	理论质量(密度 7.85)/ kg·m ⁻¹	壁 厚 公称尺寸/mm	理论质量(密度 7.85)/ kg·m ⁻¹
6	1/8	10.0	2.00	0.39	2.50	0.46
8	1/4	13.5	2.25	0.62	2.75	0.73
10	3/8	17.0	2.25	0.82	2.75	0.97
15	1/2	21.3	2.75	1.26	3.25	1.45
20	3/4	26.8	2.75	1.63	3.50	2.01
25	1	33.5	3.25	2.42	4.00	2.91
32	1 1/4	42.3	3.25	3.13	4.00	3.78
40	1 1/2	48.0	3.50	3.84	4.25	4.58
50	2	60.0	3.50	4.88	4.50	6.16
65	2 1/2	75.5	3.75	6.64	4.50	7.88
80	3	88.5	4.00	8.34	4.75	9.81
100	4	114.0	4.00	10.85	5.00	13.44

续表 14.5-49

公称口径		外径	普通钢管		加厚钢管	
mm	in	公称尺寸/mm	壁厚 公称尺寸/mm	理论质量(密度 7.85)/ kg·m ⁻¹	壁厚 公称尺寸/mm	理论质量(密度 7.85)/ kg·m ⁻¹
125	5	140.0	4.50	15.04	5.50	18.24
150	6	165.0	4.50	17.81	5.50	21.63

- 注：1. 低压流体输送用焊接管按壁厚分为普通钢管、加厚钢管两种；按管端形式分为不带螺纹钢管（光管）、带螺纹钢管两种（GB/T 3092—1993）。
2. 低压流体输送用镀锌焊接钢管按壁厚分为普通镀锌钢管、加厚镀锌钢管两种，按管端形式分为不带螺纹镀锌钢管、带螺纹镀锌钢管两种（GB/T 3091—1993）。
3. 本表规定的钢管用于输送水、煤气、空气、油及取暖蒸汽等一般较低压力流体和其他用途等。
4. 表中的公称口径系近似内径的名义尺寸，它不表示公称外径减去两个公称壁厚所得的内径。
5. 钢管的通常长度为4~10 m，钢管按定尺、倍尺长度供应时，允许偏差为+20 mm。
6. 表中所列尺寸及理论质量均指黑管，钢管镀锌后的理论质量比黑管增加3%~6%。
7. 钢管牌号为Q195、Q215、Q215A和Q235A，也可采用焊接性好的其他软钢制造，钢号由供方确定。
8. 钢管采用炉焊和电焊方法制造，镀锌采用热浸镀锌法。
9. 钢管以不带螺纹的管端交货，按需方要求，公称口径大于10 mm的钢管可带螺纹交货。
10. 公称口径≤50 mm的钢管应进行冷弯试验，不带填充物，弯曲角度为90°，黑管弯曲半径等于钢管公称外径的6倍，镀锌管应等于外径的8倍，试验结果，试样上不应有裂缝及锌层剥落现象。
11. 钢管应进行水压试验，普通钢管试验水压为2.5 MPa，加厚钢管为3.0 MPa。
12. 钢管 σ_b 不小于295 MPa， δ_5 不小于15%。

3.2.3 流体输送用不锈钢焊接钢管（表 14.5-50~表 14.5-51）

表 14.5-50 流体输送用不锈钢焊接钢管牌号及力学性能（摘自 GB/T 12771—1991）

牌 号	热处理制度（推荐）		屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 /%	
			≥		35	25 [Ⓐ]
1Cr18Ni9	固 溶 处 理	1 010~1 180℃ 快冷	210	520			35	25^{Ⓐ}
0Cr19Ni9		1 010~1 150℃ 快冷	210	520		
00Cr19Ni11		1 010~1 150℃ 快冷	180	480		
0Cr25Ni20		1 030~1 180℃ 快冷	210	520		
0Cr17Ni12Mo2		1 010~1 150℃ 快冷	210	520		
00Cr17Ni14Mo2		1 010~1 150℃ 快冷	180	480		
0Cr18Ni11Ti		920~1 150℃ 快冷	210	520		
(1Cr18Ni9Ti)		1 000~1 080℃ 快冷	210	520		
0Cr18Ni11Nb		980~1 150℃ 快冷	210	520		
00Cr17	退 火 处 理	780~950℃ 快冷或缓冷	180	360	20	—
00Cr18Mo2		800~1 050℃ 快冷	240	410		
0Cr13		750℃ 快冷或 800~900℃ 缓冷	210	410		

注：① 非热处理状态交货的钢管。

屈服强度在需方要求时，并在合同中注明才给予保证。

续表 14.5-51

外径	壁 厚																														
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.6	4.0	4.2	4.6	4.8	5.0	5.5	6.0	8.0	10	12	14		
(57.1)						×	×	×	×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
(60.3)						×	×	×	×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
63							×	×	×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
71								×	×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
(76.2)								×	×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
80									×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
90									×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗																
100									×	×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
110										×	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
125											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
(140)											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
160												⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
180													⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
200														⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
220															⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
250																⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
280																	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
320																	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	
360																											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
400																											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
450																											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
500																											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
550																											⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

注：1. () —不推荐使用；×—采用冷轧板（带）制造；○—采用热轧板（带）制造；⊗—采用冷轧板（带）或热轧板（带）制造。

2. 钢管通常长度为 2~8 m。

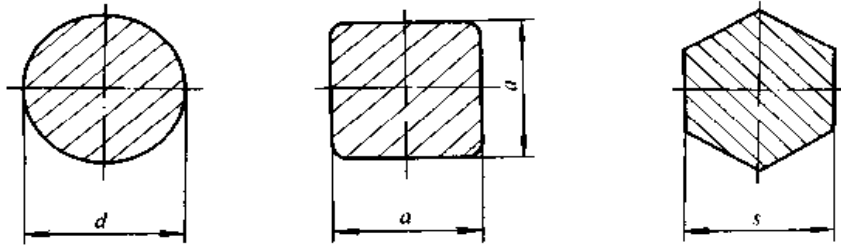
3. 钢管外径允许偏差分为普通级与较高级，其偏差值可参见 GB/T 12771—1991。

4. 标记示例：用 0Cr19Ni9 制造并冷拔（轧）加工，以热处理状态交货的外径为 25 mm，壁厚为 1.2 mm，长度为 6 000 mm，尺寸精度为普通级的钢管，标记为 0Cr19Ni9 25×1.2×6000-L·R—GB/T 12771—1991。

4 钢丝

4.1 冷拉圆钢丝、方钢丝和六角钢丝 (表 14.5-52)

表 14.5-52 冷拉圆钢丝、方钢丝、六角钢丝尺寸规格 (摘自 GB/T 342—1997)



公称尺寸 /mm	圆形		方形		六角形	
	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹
0.050	0.002 0	0.016				
0.055	0.002 4	0.019				
0.063	0.003 1	0.024				
0.070	0.003 8	0.030				
0.080	0.005 0	0.039				
0.090	0.006 4	0.050				
0.10	0.007 9	0.062				
0.11	0.009 5	0.075				
0.12	0.011 3	0.089				
0.14	0.015 4	0.121				
0.16	0.020 1	0.158				
0.18	0.025 4	0.199				
0.20	0.031 4	0.246				
0.22	0.038 0	0.298				
0.25	0.049 1	0.385				
0.28	0.061 6	0.484				

续表 14.5-52

公称尺寸/ mm	圆形		方形		六角形	
	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹
0.30*	0.070 7	0.555				
0.32	0.080 4	0.631				
0.35	0.096	0.754				
0.40	0.126	0.989				
0.45	0.159	1.248				
0.50	0.196	1.539	0.250	1.962		
0.55	0.238	1.868	0.302	2.371		
0.60*	0.283	2.22	0.360	2.826		
0.63	0.312	2.447	0.397	3.116		
0.70	0.385	3.021	0.490	3.846		
0.80	0.503	3.948	0.640	5.024		
0.90	0.636	4.993	0.810	6.358		
1.00	0.785	6.162	1.000	7.850		
1.10	0.950	7.458	1.210	9.498		
1.20	1.131	8.878	1.440	11.30		
1.40	1.539	12.08	1.960	15.39		
1.60	2.011	15.79	2.560	20.10	2.217	17.40
1.80	2.545	19.98	3.240	25.43	2.806	22.03
2.00	3.142	24.66	4.000	31.40	3.464	27.20
2.20	3.801	29.84	4.840	37.99	4.192	32.91
2.50	4.909	38.54	6.250	49.06	5.413	42.49
2.80	6.158	48.34	7.840	61.54	6.790	53.30
3.00*	7.069	55.49	9.000	70.65	7.795	61.19

续表 14.5-52

公称尺寸/ mm	圆形		方形		六角形	
	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹	截面面积/ mm ²	理论质量/ g·m ⁻¹
3.20	8.042	63.13	10.24	80.38	8.869	69.62
3.50	9.621	75.52	12.25	96.16	10.61	83.29
4.00	12.57	98.67	16.00	125.6	13.86	108.8
4.50	15.90	124.8	20.25	159.0	17.54	137.7
5.00	19.64	154.2	25.00	196.2	21.65	170.0
5.50	23.76	186.5	30.25	237.5	26.20	205.7
6.00*	28.27	221.9	36.00	282.6	31.18	244.8
6.30	31.17	244.7	39.69	311.6	34.38	269.9
7.00	38.48	302.1	49.00	384.6	42.44	333.2
8.00	50.27	394.6	64.00	502.4	55.43	435.1
9.00	63.62	499.4	81.00	635.8	70.15	550.7
10.0	78.54	616.5	100.00	785.0	86.61	679.9
11.0	95.03	746.0				
12.0	113.1	887.8				
14.0	153.9	1 208.1				
16.0	201.1	1 578.6				

- 注：1. 本表理论质量按密度 7.85 g/cm^3 计算的，对于特殊合金丝，应采用相应牌号的密度计算理论质量。
 2. 表内公称尺寸一栏，对于圆钢丝表示直径，对于方钢丝表示边长，对于六角钢丝表示对边的距离。
 3. 本表钢丝直径系列采用 R20 优先数系，其中“*”符号系列补充的 R40 优先数系中的优先数系。
 4. 直条钢丝通常长度为 2 000~4 000 mm，允许供应长度不小于 1 500 mm 的短尺钢丝，但不得超过该批质量的 15%。
 5. 直条钢丝按定尺、倍尺交货时，其长度允许偏差为 $^{+50}$ mm。
 6. GB/T 342—1997 代替 GB 342—82、GB 3204—82、GB 3205—82。
 7. 标记示例：用 45 钢制造，尺寸允许偏差为 11 级，直径为 5 mm 的软状态冷拉优质碳素结构钢圆钢丝，其标记为

圆钢丝 $\frac{11-5-GB/T 342-1997}{45-R-GB/T 3206-1982}$

4.2 一般用途低碳钢丝 (表 14.5-53)

表 14.5-53 一般用途低碳钢丝力学性能 (摘自 GB/T 343—1994)

公称直径/ mm	抗拉强度/MPa					180°弯曲试验/ 次		伸长率/(%) (标距 100 mm)	
	冷拉普通 钢丝	制钉用 钢丝	建筑用 钢丝	退火钢丝	镀锌钢丝	冷拉普通 用钢丝	建筑用 钢丝	建筑用 钢丝	镀锌钢丝
≤0.30	≤980	—	—	295~540	295~540	—	—	—	≥10
>0.30~0.80	≤980	—	—				—	—	
>0.80~1.20	≤980	880~1 320	—			≥6	—	—	≥12
>1.20~1.80	≤1 060	785~1 220	—				—	—	
>1.80~2.50	≤1 010	735~1 170	—			≥4	—	—	
>2.50~3.50	≤960	685~1 120	≥550				—	—	
>3.50~5.00	≤890	590~1 030	≥550			—	≥4	≥4	≥2
>5.00~6.00	≤790	540~930	≥550			—	—	—	—
>6.00	≤690	—	—	—	—	—	—		

注：1. 本表适用于冷拉普通用钢丝、制钉用钢丝、建筑用钢丝、退火钢丝、镀锌钢丝。

2. 对于直径≤0.80 mm 的冷拉普通钢丝，用打结拉伸试验代替弯曲试验，打结钢丝进行拉伸试验时所能承受的拉力不低于不打结破断拉力的 50%。

4.3 碳素弹簧钢丝 (表 14.5-54)

表 14.5-54 碳素弹簧钢丝尺寸规格 (摘自 GB/T 4357—1989)

直径/ mm	抗拉强度 σ_b /MPa			直径/ mm	抗拉强度 σ_b /MPa		
	B 级	C 级	D 级		B 级	C 级	D 级
0.08	2 400~2 800	2 740~3 140	2 840~3 240	0.32	1 960~2 350	2 250~2 650	2 600~2 990
0.09	2 350~2 750	2 690~3 090	2 840~3 240	0.35	1 960~2 350	2 350~2 650	2 600~2 990
0.10	2 300~2 700	2 650~3 040	2 790~3 190	0.40	1 910~2 300	2 250~2 650	2 600~2 990
0.12	2 250~2 650	2 600~2 990	2 740~3 140	0.45	1 860~2 260	2 200~2 600	2 550~2 940
0.14	2 200~2 600	2 550~2 940	2 740~3 140	0.50	1 860~2 260	2 200~2 600	2 550~2 940
0.16	2 150~2 550	2 500~2 890	2 690~3 090	0.55	1 810~2 210	2 150~2 550	2 500~2 890
0.18	2 150~2 550	2 450~2 840	2 690~3 090	0.60	1 760~2 160	2 110~2 500	2 450~2 840
0.20	2 150~2 550	2 400~2 790	2 690~3 090	0.63	1 760~2 160	2 110~2 500	2 450~2 840
0.22	2 100~2 500	2 350~2 750	2 690~3 090	0.70	1 710~2 110	2 060~2 450	2 450~2 840
0.25	2 050~2 450	2 300~2 700	2 640~3 040	0.80	1 710~2 060	2 040~2 400	2 400~2 800
0.28	2 010~2 400	2 300~2 700	2 640~3 040	0.90	1 710~2 060	2 010~2 350	2 350~2 750
0.30	2 010~2 400	2 300~2 700	2 640~3 040	1.00	1 660~2 010	1 960~2 300	2 300~2 690

续表 14.5-54

直径/ mm	抗拉强度 σ_b /MPa			直径/ mm	抗拉强度 σ_b /MPa		
	B级	C级	D级		B级	C级	D级
1.20	1 620~1 960	1 910~2 250	2 250~2 550	4.50	1 320~1 570	1 520~1 760	1 620~1 860
1.40	1 620~1 910	1 860~2 210	2 150~2 450	5.00	1 320~1 570	1 470~1 710	1 570~1 810
1.60	1 570~1 860	1 810~2 160	2 110~2 400	5.50	1 270~1 520	1 470~1 710	1 570~1 810
1.80	1 520~1 810	1 760~2 110	2 010~2 300	6.00	1 220~1 470	1 420~1 660	1 520~1 760
2.00	1 470~1 760	1 710~2 010	1 910~2 200	6.30	1 220~1 470	1 420~1 610	
2.20	1 420~1 710	1 660~1 960	1 810~2 110	7.00	1 170~1 420	1 370~1 570	
2.50	1 420~1 710	1 660~1 960	1 760~2 060	8.00	1 170~1 420	1 370~1 570	
2.80	1 370~1 670	1 620~1 910	1 710~2 010	9.00	1 130~1 320	1 320~1 520	
3.00	1 370~1 670	1 570~1 860	1 710~1 960	10.00	1 130~1 320	1 320~1 520	
3.20	1 320~1 620	1 570~1 810	1 660~1 910	11.00	1 080~1 270	1 270~1 470	
3.50	1 320~1 620	1 570~1 810	1 660~1 910	12.00	1 080~1 270	1 270~1 470	
4.00	1 320~1 620	1 520~1 760	1 620~1 860	13.00	1 030~1 220	1 220~1 420	

- 注：1. 钢丝按抗拉强度分为B级—用于低应力弹簧；C级—用于中等应力弹簧；D级—用于高应力弹簧。
 2. 钢丝直径按 GB/T 342—1997 冷拉圆钢丝尺寸规定（允许偏差按 h11 级）。
 3. 钢丝采用 GB/T 4354 和 GB/T 1298 中规定的牌号制造。

4.4 合金结构钢丝（表 14.5-55~表 14.5-57）

表 14.5-55 合金结构钢丝分类及规格（摘自 GB/T 3079—1993）

分类及代号	I类：特殊用途钢丝，II类：一般用途钢丝 交货状态：冷拉—L，退火—T 类别及交货状态应在合同中注明，否则按II类、冷拉交货
公称尺寸规定	直径不大于10 mm冷拉圆钢丝，2~8 mm冷拉方钢丝和六角钢丝，尺寸规格符合 GB/T 342—1997的规定（见表 14.5-52）
公称尺寸允许偏差	直径、边长、对边距离的允许偏差按 GB/T 342—1997 h11 级的规定

- 注：1. 成盘供应钢丝，公称尺寸 ≤ 3 mm，盘质量 ≥ 10 kg；公称尺寸 > 3 mm，盘质量大于等于15 kg；马氏体及半马氏体钢丝，盘质量 ≥ 10 kg。
 2. 标记示例：用40Cr制造、尺寸允许偏差11级、直径5.00 mm，退火状态的II类钢丝，标记为

冷拉圆钢丝 $\frac{h11-5.00-GB/T 342-1997}{40Cr-T-II-GB/T 3079-1993}$

表 14.5-56 合金结构钢丝牌号及力学性能 (摘自 GB/T 3079—1993)

牌 号	I 类				II 类	
	冷拉状态		退火状态		冷拉状态	退火状态
	公称尺寸/mm		公称尺寸/mm		抗拉强度 σ_b /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa
	<5	≥ 5	<5	≥ 5		
	抗拉强度 σ_b /MPa	布氏硬度 HBS	抗拉强度 σ_b /MPa	布氏硬度 HBS	\leq	\leq
15CrA 38CrA 40CrA 12CrNi3A 20CrNi3A 30CrMnSiA	$\leq 1\ 080$	≤ 302	≤ 785	≤ 229	1 080	930
30CrNi3A 30CrMnMoTiA	$\leq 1\ 080$	≤ 302	≤ 835	≤ 241		
12Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA 25Cr2Ni4WA 30SiMn2MoVA 30CrMnSiNi2A 30CrNi2MoVA 35CrMnSiA 38CrMoAlA 40CrNiMoA 50CrVA	—	—	≤ 930	≤ 269		

注：本表未列出牌号的力学性能按供需双方协议规定执行。

表 14.5-57 合金结构钢丝 (I类热处理) 力学性能 (摘自 GB/T 3079—1993)

牌 号	推荐热处理制度					力学性能 \geq			
	淬火			回火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服点 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	收缩率 ψ /%
	温度/℃		冷却剂	温度/℃	冷却剂				
	第一次淬火	第二次淬火							
12CrNi3A	860	780~810	油	150~170	空	980	685	11	55
						885	635	12	55
12Cr2Ni4A	780~810	—	油	150~170	空	1 030	785	12	55
15CrA	860	780~810	油	150~170	空	590	390	15	45
18Cr2Ni4WA	950	860~870	空	525~575	空	1 030	785	12	50
	950	850~860	空	150~170	空	1 130	835	11	45
20CrNi3A	820~840	—	油或水	400~500	油或水	980	835	10	55
30CrMnSiA	870~890	—	油	510~570	油	1 080	835	10	45
30CrMnSiNi2A	890~900	—	油	200~300	空	1 570		9	45

续表 14.5-57

牌 号	推荐热处理制度					力学性能 \geq			
	淬火			回火		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服点 σ_s /MPa	伸长率 δ_5 /%	收缩率 ψ /%
	温度/℃		冷却剂	温度/℃	冷却剂				
	第一次淬火	第二次淬火							
38CrMoAlA	930~950	—	油或 温水	600~670	油或水	930	785	15	50
						980	835	15	50
38CrA	860	—	油	500~590	油或水	885	785	12	50
						930	785	12	50
40CrNiMoA	850	—	油 油	550~650	水或空	1 080	930	12	50
	840~860			550~650		980	835	12	55
50CrVA	860	—	油	460~520	油	1 275	1 080	10	45
				400~500		1 275	1 080	10	45
40Cr (A)	850 ± 20	—	油	500 ± 50	水或油	930	—	9	—
35CrMnSiA	在温度为 280~310℃ 的硝酸盐混合液中自 880℃ 开始等温淬火					1 620	—	9	—
30CrNi3A	820 ± 20	—	油	530 ± 50	水或油	980	—	9	—
25Cr2Ni4WA	850 ± 20	—	油	560 ± 50	油	1 080	—	11	—
30CrMnMoTiA	870 ± 20	—	油	200 ± 20	—	1 520	—	9	—
30SiMn2MoVA	870 ± 20	—	油	650 ± 50	空或油	885	—	10 (δ_{10})	—
30CrNi2MoVA	860 ± 20	—	油	680 ± 50	水或油	885	—	10 (δ_{10})	—

注：1. 公称尺寸不小于 2.00 mm 的 I 类钢丝试样淬火、回火后的力学性能符合本表规定。

2. 尺寸小于 2.00 mm 钢丝的力学性能由供需双方协定。

3. 尺寸小于 5.00 mm 的钢丝，只检验抗拉强度和伸长率。

第 6 章 高温合金和耐蚀合金

1 高温合金

铸造高温合金性能见表 14.6-1~表 14.6-3.

其应用见表 14.6-4.

1.1 铸造高温合金

表 14.6-1 铸造高温合金耐腐蚀性能

类型	牌 号		试验条件	试验温度/ ℃	试验时间/ h	失重/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	
	新牌号	旧牌号					
时效硬化型镍基铸造合金	K405	K5	铸 态 ^①	900	100	0.978	
			NaCl 总量为 30 mg/m^3	900℃ 渗铝 2h + 1 000℃ 扩散 2h	1 000	100	0.003 0
				950℃ 渗铝 2h + 1 000℃ 扩散 2h			0.002 2
	K406	K6	精铸试样, 10^5 柴油 ($S \approx 0.1\%$), 燃气成分 (体积分数): CO_2 7.7% ~ 11.8%, O_2 5.7% ~ 9.7%, SO_2 2.0×10^{-5}	850	100	0.013 1	
					300	0.006 8	
					400	0.005 9	
					500	0.005 8	
	K409	K9	盐的质量分数: 未涂层 $\begin{cases} 1.00 \times 10^{-4} \\ 1.50 \times 10^{-4} \\ 1.75 \times 10^{-4} \end{cases}$ Al-Si 涂层 1.75×10^{-4} 铸态 $\begin{cases} 0.60 \times 10^{-4} \\ 0.76 \times 10^{-4} \end{cases}$ 空气: 燃油 = 38:1	900	25	2.71 5.70 7.94	
					25	0.12	
					950	50	0.627
					900	50	0.404
					空气: 燃油 = 38:1		
K418	K18	燃气成分 (mg/m^3) 硫化氢: 有机硫 = 74.9:0.74, 燃气速度 9.3 m/s	794	2 260	0.020 2		
			900	25	3.33		
K438	K38	盐成分 (质量分数): 75% Na_2SO_4 + 25% NaCl	750	4	19.9		
			800		26		
			850		23.5		
			900		13.5		
			950		3		

注: 本表数据供参考之用。

① 试验按 Q16S365—1983《高温燃气腐蚀试验方法》进行。

表 14.6-2 铸造高温合金牌号及抗氧化性能

类型	牌 号		试验条件	试验温度/ ℃	保温时间/ h	氧化增重/ $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	备 注	
	新牌号	旧牌号						
时效硬化型铁基铸造合金	K211	K11	空气	900	100	0.050		
				1 000		0.075		
				1 100		0.21		
	K213	K13	未涂层 渗 Cr-Al 渗 Cr 镀 Ni+ 渗 Cr-Al 镀 Ni+ 渗 Cr	850	100	10.19~11.64		
						0.51~0.90		
						0.29~0.40		
						0.12~0.40		
						0.19~0.26		
	K214	K14	基材 固体渗铝 真空蒸镀、扩散渗铝	900	100	0.169		
						0.056 5		
						0.027 0		
			基材 固体渗铝	1 000	100	0.316		
						0.038		
	K232	K32	空气 (精铸试样)	800 900 1 000 1 100	100	0.016 4		
						0.068 6		
0.214 9								
0.919 9								
时效硬化型镍基铸造合金	K401	K1	空 气	950	100 1 000	0.06 0.009 5		
	K403	K3	铸态、静态氧化 热处理, 静态氧化 热处理加渗铝高温盐雾	1 000	100	0.037		
						0.040		
						0.037		
	K405	K5	空 气	950 1 000 1 100	100	0.04		
						0.04		
						0.14		
	K406	K6	空气, 精铸试样 980、5h, 空冷	1 000	100	0.327		
	K409	K9	空 气	900	100	0.03	铝-硅 涂层	0.005
				1 000	100	0.04		0.02
1 100				50	0.26	0.069		
1 000								
K412	K12	空 气				完全抗氧化级		

续表 14.6-2

类型	牌 号		试验条件	试验温度/ ℃	保温时间/ h	氧化增重/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	备 注			
	新牌号	旧牌号								
时效硬化型镍基铸造合金	K417	K17	基 材	800	100	0.13	—			
				900		1.45				
				1 000		1.70			渗铝	0.27
				1 050		2.08				0.74
				1 100		1.84~21.00				1.74
	K417G	K17G	铸 态	850	100	1.246	—			
			料浆渗铝			0.309				
			铸 态	900	100	1.240				
			料浆渗铝			0.633				
			铸 态	1 000	100	3.260				
			料浆渗铝			0.746				
	粉末渗铝	0.880								
	K418	K18	空气, 基材	1 050	100	0.036~0.045	—			
			气体渗铝	1 050		0.025~0.030				
			复合渗铝	1 050		0.017~0.026				
	K419	K19	空气, 基材 渗铝	950	—	—	氧化速度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	0.05		
			基材 渗铝	1 000	—	—		0.10		
			渗铝 渗铝	1 050 1 100	—	—		0.027 0.063		
	K438	K38	空 气	850	100	0.033 2	—			
					200	0.023 9				
				900	100	0.078				
200					0.056 5					
1 000				100	0.259					
1 100				100	0.438					
K640 ^①	K40	铸态, 空气: 燃油 = 18:1	—	—	—	—				

注: 本表数据供参考用, 本表所列牌号的化学成分参见 GB/T 14992—1994。

① 时效硬化型钴基铸造合金。

表 14.6-3 铸造高温合金物理性能

弹性模量 E/MPa	牌 号	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1 000℃
	K211	—	—	180	—	—	—	—	130	90	—	—
	K213	182	—	—	—	—	150	143	138	128	—	—
	K214	184.4	—	—	—	—	—	—	—	141.2	129.7	—
	K232	196	—	—	—	174	166	161	153	144	131	—
	K401	190	—	—	—	—	—	—	138 (750℃)	136.5 (850℃)	115 (950℃)	—
	K403	216.37	213.33	209.4	204.66	198.76	192.53	186.3	177.5	168	155.86	139.93
	K405	207	204	198	194	190	185	181	171	164	153	—
	K406	207	—	—	—	—	—	173	165	159	148	—
	K412	195	—	—	—	—	—	147	140	130	110	—
	K417	224	—	—	—	—	—	191	181	175	166	158
	K417G	218	208	203	197	187	182	174	166	156	144	—
	K418	216	—	—	—	—	188	183	175	169	159	147
	K419	245	243	238	233	226	221	212	202	196	182.4	—
	438	211	—	—	—	—	184	176	168	158	144	126
K640	228.89	—	—	—	198.26 (426℃)	—	179.8 (650℃)	169 (760℃)	162 (816℃)	—	—	
热导率 $\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	牌 号	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1 000℃	
	K211	12.14	13.82	15.91	18.00	20.10	22.61	23.86	25.96	28.47	—	
	K213	10.89	12.14	13.40	14.65	15.91	17.58	18.84	20.52	—	—	
	K214	9.63	11.72	13.39	15.49	17.58	19.67	21.77	23.44	25.53	—	
	K232	10.89	12.56	13.40	14.24	15.91	16.75	18.42	20.53	22.61	—	
	K403	14.28	14.53	17.12	18.25	19.72	20.89	22.27	23.53	24.83	—	
	K405	11.72	12.98	14.65	15.91	17.17	18.84	20.10	21.35	23.03	23.87 (950℃)	
	K406	13.82	15.07	18.00	19.26	19.68	20.93	22.61	24.28	25.54	—	
	K409	—	10.30	11.56	12.64	13.90	15.91	18.63	24.45	25.04	29.14	
	K412	10.47	11.72	13.40	15.07	17.17	18.84	20.90	23.86	26.80	—	
	K417	10.89 (131.6℃)	—	—	14.24 (418.9℃)	19.26 (660.7℃)	20.52 (675.2℃)	25.96 (759.8℃)	36.43 (906℃)	36.01 (1 076℃)	41.45 (1 109℃)	
	K417G	—	13.86	14.40	15.28	16.83	18.80	21.35	23.86	24.91	25.25	
	K418	10.05	11.72	12.98	14.65	16.33	18.42	20.52	22.61	24.28	—	
	K419	10.05 (150℃)	10.89	13.40	15.49	17.17	19.26	20.93	22.61	24.70	26.80	
	K438	—	11.85	14.03	15.91	17.67	20.39	23.15	26.63	30.10	—	
K640	13.40	15.32	16.83	17.67	18.97	19.97	24.03	25.04	28.89	—		

表 14.6-3

线膨胀系数 $\alpha / 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	牌 号	20~100℃	20~200℃	20~300℃	20~400℃	20~500℃	20~600℃	20~700℃	20~800℃	20~900℃	20~1 000℃	20~1 100℃	
	K211	13.19	13.85	14.56	14.89	15.34	15.68	16.07	16.38	16.68	—	—	
	K213	12.36	13.98	15.22	15.32	15.97	16.35	17.16	18.61	—	—	—	
	K214	13.2	13.8	14.0	14.5	14.7	14.9	15.0	15.3	16.7	17.6 (20~950℃)	—	
	K232	14.8	14.6	14.7	15.0	15.4	15.7	16.1	16.5	—	—	—	
	K401 ^①	10.9	12.9	13.7	16.3	17.7	19.4	21.4	22.4	24.3	—	—	
	K403	11.3	12.3	12.3	12.6	12.9	13.0	13.4	13.8	14.3	15.1	—	
	K405	11.6	12.2	12.6	12.9	13.2	13.4	13.8	14.3	15.0	16.0	—	
	K406	11.82	12.44	12.94	13.3	13.59	13.93	14.27	14.82	15.48	—	—	
	K409	12.16	12.3	12.6	12.95	13.25	13.65	14.05	14.58	15.25	—	—	
	K412 ^②	11.3	12.2	13.1	13.7	14.4	15.1	17.4	19.5	22.1	25.4	—	
	K417	—	13.2 (20~200.5℃)	13.5 (20~311℃)	13.5 (20~469℃)	13.9 (20~633℃)	14.2 (20~679℃)	14.4 (20~711℃)	14.7 (20~759℃)	15.7 (20~868℃)	15.9 (20~900℃)	17.3 (20~1 000℃)	—
	K417G	10.7	11.9	12.9	13.5	14.0	14.2	14.5	14.3	15.2	—	—	
K418	12.6	12.7	12.9	12.9	13.4	13.7	14.2	14.7	15.5	16.5	—		
K419	12.36	12.44	12.67	12.82	13.06	13.23	13.86	14.04	14.61	15.49	—		
K438	9.78 (20~150℃)	10.7	12.6	14.2	14.6	15.0	15.4	15.6	16.1	16.6	—		
K640	—	—	13.9 (20~315℃)	14.3 (20~427℃)	14.6 (20~537℃)	14.7 (20~570℃)	15.0 (20~650℃)	15.6 (20~826℃)	15.9 (20~870℃)	—	—		

注：本表数据供参考用。

① 温度为：20~100℃、100~200℃、200~300℃、300~400℃、400~500℃、500~600℃、600~700℃、700~800℃、800~900℃、900~1 000℃。

表 14.6-4 铸造高温合金的应用

牌 号	应用举例	牌 号	应用举例
K211	适于制作 800℃ 以下工作的燃气涡轮导向叶片及其他高温零件	K409	用于制作工作温度 816 ~ 980℃ 的涡轮叶片
K213	主要用于制作 700℃ 以下工作的增压器涡轮和 750℃ 以下工作的燃气轮机涡轮叶片和导向叶片	K412	适于制作 900℃ 以下的燃气涡轮导向叶片及其他高温零件
		K417	用于制作 900℃ 工作的涡轮叶片, 寿命长
K214	主要用于制作 900℃ 以下工作的燃气涡轮发动机导向叶片	K417G	保持 K417 合金的特点, 在 850℃ 长期使用中不出现 σ 相, 适于制作 900℃ 以下, 长寿命燃气涡轮转子叶片导向叶片及其他高温用零件
K401	主要用于制作 900℃ 以下使用的铸造导向叶片		
K403	主要用于制作 900℃ 以下的涡轮叶片和 1 000℃ 的导向叶片	K418	用于制作 600 ~ 950℃ 的燃气涡轮导向叶片, 工作叶片和整铸涡轮
K405	适于制作 950℃ 以下的铸造涡轮叶片和空心涡轮叶片	K419	适于制作实体温度为 850 ~ 1 000℃ 的薄壁空心涡轮叶片
K406	用于制作 700 ~ 800℃ 的涡轮叶片、导向叶片及其他高温部件	K438	用于制作 700 ~ 900℃ 的涡轮叶片和导向叶片

1.2 变形高温合金

变形高温合金性能见表 14.6-5、表 14.6-6, 其应用见表 14.6-7。

表 14.6-5 变形高温合金牌号及抗氧化性能

类型	牌 号		试验条件	试验温度/ ℃	保温时间/ h	氧化增重/ $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	备 注	
	新牌号	旧牌号						
固溶强化型铁基变形合金	GH1015	GH15	空 气	900	100	0.092 9		
			1.5 mm 冷轧板	1 000		0.253 1		
			1 130 ~ 1 170℃ 空冷	1 100		0.528 0		
	GH1016	GH16	空 气	900	100	0.103 8		
			1.5 mm 冷轧板	1 000		0.164 1		
			(1 160 ± 10)℃ 空冷	1 100		0.553 5		
	GH1035	GH35	空 气	1 100 (Nb)	100	0.67		
				1 100 (Ti)		0.42		
	GH1040	GH40	空 气	650	100	0.001		
				700		0.003		
750				0.013				
800				0.06				
GH1131	GH131	空 气	900	100	0.131 0			
			950		0.156 0			
			1 000		0.186 3			
			1 100		0.446 5			
GH1140	GH140	空 气	700	100	0.014	晶间氧化 深度/ mm	0.006	
			800		0.028		0.007	
			900		0.139		0.016	
			1 000		0.270		0.048	
			1 100		0.523		0.120	

续表 14.6-5

类型	牌 号		试验条件	试验温度/ ℃	保温时间/ h	氧化增重/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	备 注		
	新牌号	旧牌号							
时效硬化型铁基变形合金	GH2018	GH18	空 气	800	100	0.078 7	—		
				900		0.290 5			
				1 000		0.373 8			
				1 100		0.655 5			
	GH2036	GH36	空 气	800	100	1.25	—		
				900		1.97			
	GH2038	GH38A	—	—	—	—	—	—	
	GH2130	GH130	空 气	800	100	0.094	—		
				900		0.115 9			
				1 000		0.319 0			
1 100				1.125					
GH2132	GH132	空 气	650	100	0.004 17	200 h	300 h		
			750		0.032 5			0.002 76	0.002 34
			850		0.116 3			0.072 16	0.083 22
					0.126 3			0.096 72	
GH2135	GH135	空 气	700	100	0.019	—			
			800		0.042				
			900		0.095				
GH2136	GH136	空 气	700	100	0.043 4~0.013 6	—			
			800		0.260 3~0.320 3				
			900		0.258 9~0.307 4				
GH2302	GH302	空 气 φ22~32 mm 棒材 1 180℃ 2 h 空冷 1 050℃ 4 h 空冷 800℃ 16 h 空冷	600	100	0.007 2	渗铝试样 增重/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	—		
			700		0.014 3			—	
			800		0.054 1			0.018 2	
			900		0.116 9			0.043 6	
			1 000		0.442 6			0.176 3	
			1 100		1.206 6			—	
GH3030	GH30	空 气	900	100	0.053 5	—			
			1 000		0.156 0				
			1 100		0.390 5				
			1 200		0.581 0				
GH3039	GH39	空 气	1 000	100	0.222 0~0.262 4	—			
			1 100		0.562 4~0.612 9				
			1 200		1.038 8~1.083 2				
GH3044	GH44	空 气	900	100	0.097 1	—			
			1 000		0.205 0				
			1 100		0.432 0				
			1 200		0.788 0				
GH3128	GH128	空 气	900	100	0.054 8	—			
			1 000		0.236 1				
			1 100		0.269 1				
固溶强化型镍基变形合金	GH3030	GH30	空 气	900	100	0.053 5	—		
				1 000		0.156 0			
				1 100		0.390 5			
				1 200		0.581 0			
GH3039	GH39	空 气	1 000	100	0.222 0~0.262 4	—			
			1 100		0.562 4~0.612 9				
			1 200		1.038 8~1.083 2				
GH3044	GH44	空 气	900	100	0.097 1	—			
			1 000		0.205 0				
			1 100		0.432 0				
			1 200		0.788 0				
GH3128	GH128	空 气	900	100	0.054 8	—			
			1 000		0.236 1				
			1 100		0.269 1				

续表 14.6-5

类型	牌 号		试验条件	试验温度/ ℃	保温时间/ h	氧化增重/ $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	备 注
	新牌号	旧牌号					
时效硬化型镍基变形合金	GH4033	GH33	空 气	800	100	0.038 7	
				900		0.068	
	GH4037	GH37	空 气	900	100	0.071	
				1 000		0.265	
	GH4043	GH43	空 气	900	100	0.085	
				1 000		0.271	
	GH4049	GH49	空 气	1 100	100	0.805	
950				0.65			
1 000				0.80			
GH4133	GH33A	空 气	1 100	100	1.070		
			800		0.020 5		
GH4169	GH169	空气, 1.5 mm 冷轧板, 950℃, 10 min 空冷, 720℃ 8 h, 以 50℃/h 炉冷到 620℃, 8 h 空冷	800	100	0.012 9		
			800		200		0.017 6
GH4169	GH169	空气, 1.5 mm 冷轧板, 950℃, 10 min 空冷, 720℃ 8 h, 以 50℃/h 炉冷到 620℃, 8 h 空冷	600	100	0.027 7		
			700		0.035 1		
			800		0.096 1		
			1 000		0.162 0		

注: 本表数据供参考之用, 本表牌号的化学成分参见 GB/T 14992—1994。

表 14.6-6 变形高温合金物理性能

	牌 号	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1 000℃
		弹性模量 $E/$ (10^3 MPa)	GH1015	204	—	—	—	184	176	168	160	151	143	132
	GH1016	175	—	—	—	—	133	—	131	113.6	102.8	—
	GH1035	203.2	—	—	—	—	—	—	162	152.6	145	—
	GH1040	196	—	—	170	160	150	140	125	110	—	—
	GH1131	224	—	205	192	185	180	177	180	179	176	169
	HG1140	198	193.5	187.5	183	177	169	163	154	147.5	140	130
	GH2018	190	—	—	—	162	—	—	145	139	130	—
	GH2036	207	—	—	183.4	174	164.9	156	147.45	143.5	—	—
	GH2038	188	—	—	—	—	153	140	129	—	—	—
	GH2130	200	—	—	—	—	—	160	154	140	122	—
	GH2132	201.7	196.5	191	183.5	175	166.5	160.5	152	142	—	—
	GH2135	204.2	200	193	186.5	179.6	172.5	168	159.5	150.5	137	—
	GH2136	201	—	—	—	—	—	166.4	158.6	149.8	—	—
	GH2302	199	—	—	—	179	—	166	159	152	139	—
	GH3030	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GH3039	208	—	—	—	—	184	176	164	155	—	—
	GH3044	153.3	—	—	—	—	—	125.7	119.9	116	112	109.5
	GH3128	212	—	—	—	—	—	191	178	165	155	147
	GH4033	225	220	215	209	203	196	189	180	171	—	—
	GH4037	230	—	—	—	—	—	189.8	177.4	170.4	159.9	—
	GH4043	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	GH4049	229	—	—	—	—	—	—	192	182	172	—
	GH4133	227.5	—	—	—	206.8	—	194.2	186.4	179.4	167	—
	GH4169	210	205	200	193	187	180	173	168	—	—	—

续表 14.6-6

	牌 号	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	20~	
		100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃	
线膨胀系数 $\alpha / 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	GH1015	14.36	14.73	15.18	15.50	15.73	15.93	16.37	16.72	16.98	17.17	—	
	GH1016	14.28	14.88	15.01	15.39	15.64	15.91	16.26	16.55	16.85	16.88	—	
	GH1035	13.7	14.8	15.7	16.6	17.5	18.3	19.2	20.0	20.4	—	—	
			(100~ 200℃)	(200~ 300℃)	(300~ 400℃)	(400~ 500℃)	(500~ 600℃)	(600~ 700℃)	(700~ 800℃)	(800~ 900℃)			
	GH1040	14.40	15.5	16.1	16.5	17.0	17.4	17.8	18.2	18.5	—	—	
	GH1131	14.72	14.13	14.89	14.77	15.74	16.20	16.97	17.26	17.59	18.08	18.70	
	GH1140	12.7	13.8	14.3	14.6	15.1	15.4	15.3	16.3	16.7	17.5	—	
	GH2018	14.6	14.7	14.9	15.2	15.5	15.6	15.3	16.0	16.7	—	—	
	GH2036	12.23	17.98	19.16	20.66	21.44	22.49	—	—	—	—	—	
	GH2038	15.7	16.0	16.6	17.0	17.5	18.0	18.3	19.1	—	—	—	
	GH2130	13.25	14.04	14.1	14.65	14.94	15.52	16.07	17.05	19.18	20.13	—	
	GH2132	16.5	16.1	16.7	16.7	17.1	17.4	18.2	19.2	—	—	—	
	GH2135	16.0	15.2	15.5	15.7	15.9	16.2	16.5	17.6	—	—	—	
	GH2136	13.4	14.7	14.8	16.07	16.37	16.5	17.07	17.8	19.27	—	—	
	GH2302	12.7	13.5	14.6	15.1	15.5	15.7	16.2	16.5	18.3	19.2	—	
	GH3030	12.8	13.5	14.3	15.0	15.5	16.1	17.0	17.5	18.0	—	—	
	GH3039	12.9	13.5	13.8	14.0	14.4	14.9	15.4	15.9	16.3	16.7	—	
	GH3044	12.25	12.35	12.85	13.10	13.31	13.50	14.30	14.9	15.6	—	—	
	GH3128	11.25	11.86	12.68	12.80	12.37	13.68	14.46	15.19	15.66	16.29	—	
	GH4033	9.17	13.15	14.41	15.48	16.13	17.00	17.76	18.89	19.63	—	—	
	GH4037	11.9	12.3	13.5	14.4	14.6	15.1	15.6	15.9	—	—	—	
	GH4043	12.3	12.3	12.8	13.0	13.3	13.9	14.4	14.9	16.4	—	—	
	GH4049	12.36	12.63	13.16	13.54	13.85	14.15	14.61	15.24	16.33	—	—	
GH4133	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
GH4169	13.2	13.3	13.8	14.0	14.6	15.0	15.8	17.0	18.4	18.7	—		
热导率 $\lambda / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	牌 号	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃	800℃	900℃	1000℃		
	GH1015	11.72	13.40	15.49	17.17	18.84	20.93	23.03	25.12	—	—	—	
	GH1016	12.14	13.40	14.65	15.91	17.58	18.84	20.52	21.77	—	—	—	
	GH1035	12.56	14.24	16.33	17.58	18.84	20.10	22.19	24.70	27.21	—	—	
	GH1040	13.40	15.07	16.75	18.42	20.93	23.03	24.70	—	—	—	—	
	GH1131	10.47	12.14	13.82	16.33	18.00	19.26	20.93	22.61	24.70	—	—	
	GH1140	15.07	16.75	18.00	19.26	20.93	22.19	23.45	25.12	26.38	—	—	
	GH2018	11.72	13.40	15.07	16.33	17.58	19.68	21.35	23.03	25.12	—	—	
	GH2036	17.17	18.42	19.68	21.35	23.03	24.70	25.96	27.21	29.31	—	—	
	GH2038	10.33	17.58	18.84	20.52	22.61	23.86	25.12	26.80	28.47	—	—	
	GH2130	12.14	13.82	16.33	16.33	17.58	19.26	20.93	22.61	24.28	—	—	
	GH2132	13.40	14.03	16.12	17.38	18.63	20.10	21.35	22.61	23.86	25.33	—	
	GH2135	10.89	12.98	14.65	16.33	18.00	19.68	21.77	23.03	—	—	—	
	GH2136	13.82	15.49	17.58	19.26	20.52	21.77	23.03	24.70	26.38	—	—	
	GH2302	12.56	14.65	16.33	18.42	20.10	22.19	24.28	25.96	28.05	—	—	
	GH3030	14.65	16.75	18.42	20.52	22.61	24.70	26.30	28.89	—	—	—	
	GH3039	15.49	16.75	18.42	19.68	20.93	22.61	23.86	25.12	26.30	27.21	—	
	GH3044	11.72	12.98	14.24	15.91	17.17	18.42	19.68	21.77	24.70	—	—	
	GH3128	11.30	12.56	14.24	15.49	16.75	18.42	19.68	21.35	23.03	—	—	
	GH4033	11.72	13.40	15.07	17.17	18.84	20.98	23.03	24.70	—	—	—	
	GH4037	7.95	9.21	10.89	12.56	13.32	15.49	17.17	20.10	22.19	—	—	
	GH4043	11.30	12.98	14.65	15.91	18.34	20.52	21.77	24.28	26.38	—	—	
	GH4049	10.47	12.14	14.24	16.33	18.00	20.10	22.19	24.28	26.80	—	—	
GH4138	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
GH4169	14.65	15.91	17.58	18.84	20.10	21.77	23.03	24.28	25.96	27.63	—		

注：本表数据供参考之用。

表 14.6-7 变形高温合金的应用

牌 号	应 用 举 例	牌 号	应 用 举 例
GH1015	主要用于工作温度为900℃的燃气涡轮发动机火焰筒等部件,以板材供货	GH2136	用于制作涡轮盘及其他高温部件
GH1016	用于工作温度低于900℃的燃气轮机加力燃烧室和承力件,以板材供货	GH2302	用于制作700~750℃长期使用的高温叶片及在850℃短期使用的高温部件
GH1131	用于制作航空、航天、燃气轮机及其他工业用的承力部件,可在900℃以下长期使用,1000℃以下短期工作	GH3030	主要用于制作700~800℃的燃烧室及其他高温部件
GH1140	适于制作800~850℃以下工作的燃气涡轮发动机燃烧室和加工燃烧室零部件,以板材供应	GH3039	用于制作850℃以下的燃气涡轮发动机的火焰筒及加力燃烧室材料
GH2036	用于制作600~650℃的涡轮盘、紧固件和承力环,柴油机、汽轮机的增压涡轮叶片和其他高温部件	GH3044	用于900℃的燃气涡轮发动机火焰筒及加力燃烧室材料
GH2130	用于制作800℃的涡轮叶片,经过细化晶粒工艺后,可作500~700℃的高屈服、高疲劳性能盘件及长寿命的转子叶片	GH3128	主要用于制作燃气轮机的火焰筒、加力燃烧室及其他高温部件,长期工作温度可达950℃
GH2132	用于制作550~650℃的涡轮盘、环形件及其他高温部件,适于制铸件,以棒材、锻件、管材、板材、丝材供货	GH4033	适于制作700℃的涡轮叶片、涡轮盘等部件,主要以棒材供货
GH2135	用于制作700℃涡轮盘和其他高温部件,常以棒材、板材供货	GH4037	用于制作800℃的涡轮叶片,常以棒材供应
		GH4169	可在低温-183~700℃温度范围内使用,以板、棒、丝、带和饼材供货

1.3 高温合金材料

1.3.1 铸造高温合金母合金 (表 14.6-8、表 14.6-9)

表 14.6-8 铸造高温合金母合金牌号及力学性能 (摘自 YB/T 5248—1993)

牌 号	试样状态	拉 伸 性 能 \geq					持 久 性 能 \geq			
		试验温度 /℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ / %	ψ / %	试验温度/ ℃	应 力/ MPa	时间/h	δ /%
K211	900℃ 5 h, 空冷	—	—	—	—	—	800	140 或 120	(100) (200)	—
K213	1100℃ 4 h, 空冷	700 或 750	640 600	— —	6.0 4.0	10.0 8.0	700 或 750	500 380	40 80	—
K214	1100℃ 5 h, 空冷	—	—	—	—	—	850	250	60	—

续表 14.6-8

牌 号	试样状态	拉 伸 性 能 \geq					持 久 性 能 \geq			
		试验温度/ ℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ / %	ψ / %	试验温度/ ℃	应 力/ MPa	时 间/h	δ /%
K232	1 100℃ 3~5 h, 空冷; 800℃ 16 h, 空冷	20	700	—	4.0	6.0	750	400	50	—
K273	铸 态	650	500	—	5.0	—	650	430	80	—
K401	1 120℃ 10 h, 空冷						850	250	60	—
K403	(1 210 ± 10)℃ 4 h, 空冷或铸态	800	800	—	2.0	3.0	750 975	660 200	50 40	—
K405	铸 态	900	650	—	6.0	8.0	750 900 或 950	700 或 720 320 220 或 240	45 23 80 80 23	—
K406	(980 ± 10)℃ 5 h, 空冷	800	680	—	4.0	8.0	850	250 或 280	100 50	—
K409	(1 080 ± 10)℃ 4 h, 空冷; (900 ± 10)℃ 10 h, 空冷	—	—	—	—	—	760 980	600 206	23 30	—
K412	1 150℃ 7 h, 空冷	—	—	—	—	—	800	250	40	—
K417	铸 态	900	650	—	6.0	8.0	900 或 950	320 240	70 40	— —
K417G							750	700	30	2.5
K418	铸 态	20 或 800	770 770	700 —	3.0 4.0	— 6.0	750 或 800	620 500	40 45	(3.0) (3.0)
K419	铸 态	—	—	—	—	—	750 950	700 260	45 80	— —
K438	1 120℃ 2 h, 空冷; 800℃ 24 h, 空冷	800	800	—	3.0	3.0	815 850	430 370	70 70	— —
K640	铸 态	—	—	—	—	—	816	211	15	6.0

- 注: 1. 表中带有“或”的条件是选择的条件, 即检验时可任选一组。
 2. 表中括号中的数值作为积累数据, 不作判废依据。
 3. K405 合金每 10 炉选一炉做持久性能拉断试验, 并测出 δ 和 ψ 值列入质量证明书中, 不作为判废依据, 900℃ 拉伸性能作为工艺性能项目, 每 10 炉抽检一炉, 结果列入质量证明书, 不做判废依据, 用对返料熔炼的合金, 900℃ 拉伸性能可按 σ_b 不小于 650 MPa, δ 不小于 4%, ψ 不小于 6% 指标检验。
 4. K409 合金要求室温硬度 HRC = 34~44。
 5. K417 合金 900℃ (或 950℃) 持久性能每 10 炉抽一炉拉断, 并测出持久伸长率和断面收缩率, 列入质量证明书中, 750℃ 持久性能列入质量证明书, 均不作判废依据。
 6. K418 合金持久伸长率每 10 炉抽查一炉, 结果列入质量证明书, 不作判废依据。
 7. K640 合金要求室温硬度 HRC 不大于 34。
 8. 铸造高温合金母合金适于制造航空及其他工业用的涡轮叶片、导向叶片及其他高温部件。
 9. 母合金铸成圆棒, 尺寸由供需双方协定。

表 14.6-9 铸造高温合金母合金的应用 (摘自 YB/T 5248—1993)

母合金牌号		主要用途
新牌号	旧牌号	
K211	K11	800℃ 下导向叶片
K213	K13	800℃ 下柴油机增压涡轮
K214	K14	900℃ 下导向叶片
K232	K32	800℃ 下柴油机增压涡轮
K273	—	650℃ 下柴油机增压涡轮
K401	K1	900℃ 下导向叶片
K403	K3	1 000℃ 下导向叶片、950℃ 下涡轮叶片
K405	K5	950℃ 下涡轮叶片
K406	K6	850℃ 下导向叶片和涡轮叶片
K409	K9	850~900℃ 下的导向叶片
K412	K12	800℃ 下导向叶片
K417	K17	950℃ 下空心涡轮叶片和导向叶片
K417G	K17G	950℃ 下空心涡轮叶片和导向叶片
K418	K18	850℃ 下涡轮叶片、900℃ 下导向叶片
K419	K19	1 000℃ 下涡轮叶片和导向叶片
K438	K38	850℃ 下涡轮叶片和导向叶片及耐腐蚀部件
K640	K40	800℃ 下的导向叶片

1.3.2 普通承力件用高温合金热轧和锻制棒材 (表 14.6-10)

表 14.6-10 普通承力件用高温合金热轧和锻制棒材牌号及力学性能 (摘自 YB/T5245—1993)

牌 号		热处理制度	室 温 性 能 \geq					高 温 瞬 时 拉 伸 性 能 \geq				高 温 持 久 强 度			
新牌号	旧牌号		屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	伸 长 率 δ_5 / %	断 面 收 缩 率 ψ / %	冲 击 韧 度 a_{KV} (J·cm ⁻²)	硬 度 HBS (压痕直径) / mm	试 验 温 度 / °C	抗 拉 强 度 σ_b / MPa	伸 长 率 δ_5 / %	断 面 收 缩 率 ψ / %	试 验 温 度 / °C	应 力 / MPa	时 间 / h
GH1015	GH15	(1 140~1 170)℃ 空冷		680	35	40		700	400	30	35				
								900	180	40	45	900	50	≥ 100	
GH1131	GH131	(1 160±10)℃ 空冷	350	750	32	实测		1 000	110	50	实测				
GH1140	GH140	(1 080±10)℃ 空冷		630	40	45		800	250	40	50				
GH2036	GH36	固溶:(1 140±5)℃,直径小于 45 mm 保温 80 min, 直径不小于 45 mm 保温 105 min, 流动水冷却 时效: 放在低于 670℃ 炉中, 到温后, 保温 12~14 h, 再升至 770~800℃, 保温 12~14 h, 空冷	600	850	15	20	35	3.45~3.65				650	350	≥ 100	

续表 14.6-10

牌 号		热处理制度	室 温 性 能 \geq					高温瞬时拉伸性能 \geq				高温持久强度			
新牌号	旧牌号		屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	伸长率 δ_5 / %	断面收缩率 ψ / %	冲击韧度 a_{KV} / (J· cm ⁻²)	硬度 HBS (压痕 直径)/ mm	试验温度/ ℃	抗拉强度 σ_b / MPa	伸长率 δ_5 / %	断面收缩率 ψ / %	试验温度/ ℃	应力/ MPa	时间 t/ h
GH2038	GH38A	(1 180 ± 10)℃ 2 h, 空冷或水冷 (760 ± 10)℃ 16 ~ 25 h, 空冷	450	800	15	15	30	3.5~ 3.9	800	300	20	20	800	选择	实测
GH2132	GH132	980 ~ 1 000℃ 1 ~ 2 h, 油冷 700 ~ 720℃ 12 ~ 16 h, 空冷		950	20	40		3.4~ 3.8	550	800	16	28	550	600	≥ 100
									650	750	15	20	650	400	≥ 100
GH2135	GH135	(1 080 ± 10)℃ 8 h, 空冷 + (830 ± 10)℃ 8 h, 空冷 + (700 ± 10)℃ 16 h, 空冷						3.25~ 3.65	700	800	15	20	700	440 (420)	≥ 60 (80)
GH3039	GH39	1 050 ~ 1 080℃ 空 冷		750	40				800	250	40	实测			
GH4033	GH33	> $\phi 55$ mm: (1 080 ± 10)℃ 8 h, 空冷 + (750 ± 10)℃ 16 h, 空冷	600	900	13	16	30	3.4~ 3.80					750	300	≥ 100
		< $\phi 20$ mm 及扁 材: (1 080 ± 10)℃ 8 h, 空冷 + (700 ± 10)℃ 16 h, 空冷						3.45~ 3.80	700	700	15	20	700	440 420	≥ 60 (80 \geq)

注: 本表棒材用于制造航空、航天、燃气轮机及其他工业用的一般承力部件(涡轮叶片除外), 使用温度为 550 ~ 1 000℃。

1.3.3 转动部件用高温合金热轧棒材 (表 14.6-11)

表 14.6-11 转动部件用高温合金热轧棒材牌号及力学性能 (摘自 GB/T 14993—1994)

合金牌号		热处理制度	高温瞬时拉伸性能				高温持久性能			室温硬度 HBS (压痕 直径)/ mm	备 注
新牌号	旧牌号		试验 温度/ ℃	抗拉 强度 σ_b / MPa	伸长 率 δ_5 / %	断面 收缩 率 ψ / %	试验 温度/ ℃	应力/ MPa	时间 t / h \geq		
GH2130	GH130	(1 180 ± 10)℃ 2 h, 空冷	800	680	3	8	850 (800)	200 (250)	40 (100)	3.30~3.70	正常用途
		(1 050 ± 10)℃ 4 h, 空冷 (800 ± 10)℃ 16 h, 空冷	800	680	4.5	8	850 (800)	200 (250)	50 (100)		限于直径32 mm航 天专用材
GH2302	GH302	(1 130 ± 10)℃ 2 h, 空冷 (1 050 ± 10)℃ 4 h, 空冷 (800 ± 10)℃ 16 h, 空冷	800	680	4.5	8	850 (800)	200 (250)	50 (100)	3.30~3.70	
GH4033	GH33	(1 080 ± 10)℃ 8 h, 空冷 (700 ± 10)℃ 16 h, 空冷	700	700	15	20	700	440 (420)	60 (80)	3.45~3.80	直径 45~55 mm 棒材 HB: 3.40~ 3.80
GH4037	GH37	(1 180 ± 10)℃ 2 h, 空冷 (1 050 ± 10)℃ 4 h, 空冷 (800 ± 10)℃ 16 h, 空冷	800	680	5.0	8.0	850 (800)	200 (250)	50 (100)	3.30~3.70	每 5~30 炉取一 个持久试样,按括号 内条件值拉断,实测 δ 和 ψ
GH4043	GH43	(1 170 ± 10)℃ 5 h, 空冷 (1 070 ± 10)℃ 8 h, 空冷 (800 ± 10)℃ 16 h, 空冷	800	700	6	10	800	280 (250)	50 (100)	3.30~3.70	同上
GH4049	GH49	(1 200 ± 10)℃ 2 h, 空冷 (1 050 ± 10)℃ 4 h, 空冷 (850 ± 10)℃ 8 h, 空冷	900	580	7	11	900	250 (220)	40 (80)	3.20~3.50	每 10~20 炉取一 个持久试样,按括号 内条件值拉断,如 200 h 没拉断,则一 次加工至 250 MPa 拉断,实测 δ 和 ψ

注: 1. 当 GH4037 (GH37) 合金第一次固溶处理温度采用 (1 170 ± 10)℃ 时, 应在合金牌号后面加“S”以示区别, 即“GH4037—S” (GH37—S)

2. 正常供应热轧棒材的直径为 20~55 mm, 直径小于 20 mm 或大于 55 mm 棒材性能由供需双方协商确定。

3. 棒材用于制造航空、航天、燃气轮机及其他工业用涡轮叶片等高温转动承力部件, 使用温度为 700~900℃。

1.3.4 高温合金冷拉棒材 (表 14.6-12)

表 14.6-12 高温合金冷拉棒材牌号及力学性能 (摘自 GB/T 14994—1994)

合金牌号		热处理制度	瞬时拉伸性能 \geq					室温冲击初度 $a_{KU}/(J \cdot cm^{-2})$	室温硬度 HBS (d)(压痕直径)/mm	高温持久性能 \geq			
新牌号	旧牌号		试验温度/ $^{\circ}C$	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	伸长率 $\delta_5/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$			试验温度/ $^{\circ}C$	应力/ MPa	时间 t/h	伸长率 $\delta_5/\%$
GH1040	GH140	1 200 $^{\circ}C$ 1 h, 空冷 + 700 $^{\circ}C$ 16 h 空冷	800	300	—	—	—	—	—	—	—	—	
GH2036	GH36	1 140 $^{\circ}C$ 1 h 20 min 流动水 + 670 $^{\circ}C$ 12 ~ 14 h 再升温至 770 ~ 800 $^{\circ}C$ 10 ~ 12 h 空冷	室温	850	600	15	20	35	3.45/3.65	650	350 (380)	100 (35)	—
GH2132	GH132	980 ~ 1 000 $^{\circ}C$ 1 ~ 2 h 油冷 + 700 ~ 720 $^{\circ}C$ 16 h 空冷	室温	920	600	15	20	—	3.30/3.85	650	460 (400)	23 (100)	5 (3)
GH3030	GH30	980 ~ 1 000 $^{\circ}C$ 水冷或空冷	室温	700	—	30	—	—	—	—	—	—	—
GH4033	GH33	(1 080 \pm 10) $^{\circ}C$ 8 h 空冷 + (700 \pm 10) $^{\circ}C$ 16 h 空冷	700	700	—	15	20	—	—	700	440 (420)	60 (80)	—

注: 1. 本表棒材用于制造航空及其他工业用的紧固件等零件。

2. GH2132 合金高温持久试验拉至 23 h 试样不断, 则可增加应力继续拉断为止。增加应力为 350 MPa; 如果试样断裂时间小于 48 h, δ_5 应不小于 5%, 如果断裂时间大于 48 h, δ_5 应不小于 3%。

1.3.5 高温合金热轧钢板 (表 14.6-13)

表 14.6-13 高温合金热轧钢板牌号、尺寸规格及力学性能 (摘自 GB/T 14995—1994)

牌 号		检 验 试 样 状 态	试验温度/ $^{\circ}C$	瞬时拉伸性能		
新牌号	旧牌号			抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta_5/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$
GH1035	GH35	交货状态 (1 100 ~ 1 140 $^{\circ}C$ 固溶处理, 空冷)	20	600	35	实测
			700	350	35	实测
GH1131	GH131	交货状态 (1 130 ~ 1 170 $^{\circ}C$ 固溶处理, 空冷)	20	750	34	实测
			900	180	40	实测
			1 000	110	43	实测
GH1140	GH140	交货状态 (1 050 ~ 1 090 $^{\circ}C$ 固溶处理, 空冷)	20	650	40	45
			800	250	40	50

续表 14.6-13

牌 号		检 验 试 样 状 态	试验温度 /℃	瞬时拉伸性能		
新牌号	旧牌号			抗拉强度	伸长率	断面收缩率
				σ_b / MPa	δ_5 / %	ψ / %
GH2018	GH18	交货状态(1 100~1 150℃固溶处理,空冷)+(800±10)℃ 16 h,空冷	20	950	15	实测
			800	440	15	实测
GH2132	GH132	交货状态(980~1 000℃固溶处理,空冷)+700~720℃(12~16)h,空冷	20	900	20	实测
			650	750	15	实测
			550	800	16	实测
GH2302	GH302	交货状态(1 100~1 130℃固溶处理,空冷)	20	700	30	实测
			800	550	6	实测
GH3030	GH30	交货状态(980~1 020℃固溶处理,空冷)	20	700	30	实测
			700	300	30	实测
GH3039	GH39	交货状态(1 050~1 090℃固溶处理,空冷)	20	750	40	45
			800	250	40	50
GH3044	GH44	交货状态(1 120~1 160℃固溶处理,空冷)	20	750	40	实测
			900	190	30	实测
GH3128	GH128	交货状态(1 140~1 180℃固溶处理,空冷)	20	750	40	实测
			950	180	40	实测

注:1. 需方有特殊要求作高温持久性能试验时,其要求由供需双方协定。

2. 钢板厚度为4~14 mm,尺寸规格按 GB/T 709 的规定。

3. 交货状态下的板材,每米长度平面度不大于10 mm。

4. 钢板用于航空、航天、燃气轮机及其他工业用的高温承力部件,使用温度为600~950℃。

1.3.6 高温合金冷轧薄板(表 14.6-14、表 14.6-15)

表 14.6-14 高温合金冷轧薄板尺寸规格(摘自 GB/T 14996—1994) (mm)

厚 度	宽 度	长 度
0.5~<0.8	600~1 000	1 200~2 100
0.8~<1.8	600~1 000	1 200~2 100
1.8~<3.0	600~1 000	1 200~2 100
3.0~4.0	600~1 000	900~1 600

注:1. 厚度、宽度、长度的允许偏差应符合 GB/T 708 的规定(厚度允许偏差按 B 组)。

2. 厚度为0.5~<0.8 mm 薄板仅适用于 GH1035、GH1140、GH2132、GH3030、GH3039 的合金。

3. 厚度为0.5~<0.8 mm 板材,每米长度上平面度不大于15 mm,厚度为0.8~4.0 mm 板材,每米长度上平面度不大于10 mm。

表 14.6-15 高温合金冷轧薄板牌号及力学性能(摘自 GB/T 14996—1994)

牌 号		检 验 试 样 状 态	瞬 时 拉 伸 性 能 \geq			高 温 持 久 性 能			
新 牌 号	旧 牌 号		试 验 温 度 / ℃	抗 拉 强 度 σ_b /MPa	伸 长 率 δ_5 / %	试 验 温 度 / ℃	应 力 σ / MPa	断 裂 时 间 t /h \geq	伸 长 率 δ_5 / %
GH1035	GH35	交货状态(1 100~1 140℃ 固溶处理,空冷)	20	600	35	—	—	—	—
			700	350	35				
GH1131	GH131	交货状态(1 130~1 170℃ 固溶处理,空冷)	20	750	34	—	—	—	—
			900	180	40				
			1 000	110	43				
GH1140	GH140	交货状态(1 050~1 090℃ 固溶处理,空冷)	20	650	40	—	—	—	—
			800	230	40				
GH2018	GH18	交货状态(1 100~1 150℃ 固溶处理,空冷)+(800± 10)℃ 16 h,空冷	20	950	15	—	—	—	—
			800	440	15				
GH2132	GH132	交货状态(980~1 000℃ 固溶处理,空冷)+700~ 720℃ 12~16 h,空冷	20	900	20	650	400	100	实测
			650	750	15				
			550	800	16				
GH2302	GH302	交货状态(1 100~1 300℃ 固溶处理,空冷)	20	700	30	—	—	—	—
			800	550	6					800	220	100	实测
GH3030	GH30	交货状态(980~1 020℃ 固溶处理,空冷)	20	700	30	—	—	—	—
			700	300	30				
GH3039	GH39	交货状态(1 050~1 090℃ 固溶处理,空冷)	20	750	40	—	—	—	—
			800	250	40				
GH3044	GH44	交货状态(1 120~1 160℃ 固溶处理,空冷)	20	750	40	—	—	—	—
			900	200	30				
GH3128	GH128	交货状态(1 140~1 180℃ 固溶处理,空冷)	20	750	40	950	55	板厚 > 1.2 mm 23 板厚 ≤ 1.2 mm 20	—
			950	180	40					950	40	100	实测

注:1. 厚度小于 0.8 mm 的板材性能,按实测,结果供参考。

2. GH1131 的 1 000℃ 瞬时拉伸性能只适用于厚度不小于 2 mm 的板材。

3. GH3128 合金的持久强度指标系厚度不小于 1.5 mm 的板材。当板厚小于 1.5 mm 而不小于 1.2 mm 时,断裂时间应不小于 80 h;不大于 1.0 mm 时,断裂时间不小于 70 h。

4. 表中所列 GH2132、GH2302、GH3128 牌号以外其他牌号的持久性能,由供需双方协商确定。

1.3.7 一般用途高温合金管(表 14.6-16、表 14.6-17)

表 14.6-16 一般用途高温合金管尺寸规格(摘自 GB/T 15062—1994) (mm)

外 径	壁 厚											
	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
4	✓	✓	✓									
5~7	✓	✓	✓	✓								
8		✓	✓	✓	✓							
9			✓	✓	✓							
10~15			✓	✓	✓	✓						
16~20				✓	✓	✓	✓					
21~30				✓	✓	✓	✓	✓				
31~40					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
41~57					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

注:1. 管材通常长度:壁厚 0.5~1.0 mm 者,长度为 0.5~6 m;壁厚大于 1.0 mm 者,长度为 0.5~5 m。

2. 管材圆度不大于外径公差,壁厚不均匀度不超过壁厚公差。弯曲度不大于 2 mm/m。

表 14.6-17 一般用途高温合金管牌号及力学性能(摘自 GB/T 15062—1994)

合金牌号		热处理状态	试验温度/ ℃	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ (%) \geq
新牌号	旧牌号				
GH1140	GH140	1 050~1 080℃, 水冷	室 温	600	35
GH3030	GH30	980~1 020℃, 水冷	室 温	600	35
GH3039	GH39	1 050~1 080℃, 水冷	室 温	650	35

注:1. 按需方要求可进行力学性能试验,但应在合同中注明。

2. 管材适用于高温下承力不大的管件。

1.3.8 高温合金锻制圆饼(表 14.6-18)

表 14.6-18 高温合金锻制圆饼牌号及力学性能(摘自 GB/T 14997—1994)

合金牌号		热处理	瞬时拉伸性能 \geq					室温冲击 韧度 a_{KU} / $J \cdot cm^{-2}$	室温硬 度 HBS 压痕 直径 d/mm	高温持久性能 \geq		
新牌号	旧牌号		试验 温度/ ℃	抗拉 强度 σ_b / MPa	屈服 强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	伸长率 δ_5 / %	断面收 缩率 ψ / %			试验 温度/ ℃	应力/ MPa	时间 t/h	伸长率 $\delta_5$/ %
GH2036	GH36	1 140℃ 或 1 130℃ 保温 1 h 20 min, 水冷 + (650~670℃ 保温 14~16 h), 然后升温 至 770~800℃, 保温 14~20 h, 空冷	室温	850	600	15	≥ 20	30	3.45~ 3.65	650	380 (350)	35 (100)
GH2132	GH132	980~1 000℃ 保温 1~2 h, 油冷 + (700 ~720℃ 保温 12~ 16 h, 空冷)	室温	950	630	20	≥ 40	30	3.4~ 3.8	650	400	100
			650	750	15	≥ 20						

续表 14.6-18

合金牌号		热处理	瞬时拉伸性能 \geq					室温冲击初度 $a_{KU}/J \cdot cm^{-2}$	室温硬度 HBS 压痕直径 d/mm	高温持久性能 \geq			
新牌号	旧牌号		试验温度/ $^{\circ}C$	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	伸长率 $\delta_5/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$			试验温度/ $^{\circ}C$	应力/ MPa	时间 t/h	伸长率 $\delta_5/\%$
GH2135	GH135	1 140 $^{\circ}C$ 保温 4 h, 空冷 + (830 $^{\circ}C$ 保温 8 h) + (650 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷)	室温	900 820*	600 600	13 10	16 13	≥ 30	3.4~ 3.8	750	(300) 350	(100) 50	
GH2136	GH136	980 $^{\circ}C$ 保温 1 h, 油冷 720 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷	室温	950	700	15	20	≥ 30	3.2~ 3.8	650 700	400 (350)	100 (100)	
GH4033	GH33	1 080 $^{\circ}C$ 保温 8 h, 空冷 + (750 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷)	室温	900 820*	600 600	13 10	16 13	≥ 30	3.4~ 3.8	750	300 (350)	100 (50)	
GH4133	GH32A	1 000 $^{\circ}C$ 保温 8 h, 空冷 + (750 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷)	室温	1 080	750	16	18	≥ 40	3.2~ 3.6	750	300 (350)	100 (50)	

注:1. 圆饼适于制造航空及其他工业用涡轮盘等模锻件。

2. 对于 GH2036、GH2135、GH2136、GH4033、GH4133 合金,当持久性能不合格时,可按本表括号内数据重新试验,试样数量不加倍。再次不合格,则以括号内数据按复验规定处理。

3. 如因熔铸锻造工艺不当导致力学性能试验不合格,可在圆饼上取弦向试样检验,对于 GH4033、GH2135 合金室温拉伸按“*”的数据,其他合金性能与熔铸试样要求相同,或用圆饼改锻成熔铸试样检验,其结果按不带“*”的数据规定。

1.3.9 高温合金环件毛坯(表 14.6-19)

表 14.6-19 高温合金环件毛坯牌号及力学性能(摘自 GB/T 14998—1994)

牌 号		热处理	瞬时拉伸性能 \geq					室温冲击初度 $a_{KU}/J \cdot cm^2$	室温硬度 HBS 压痕直径 d/mm	高温持久性能 \geq			
新牌号	旧牌号		试验温度/ $^{\circ}C$	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	伸长率 $\delta_5/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$			试验温度/ $^{\circ}C$	应力/ MPa	时间 t/h	伸长率 $\delta_5/\%$
GH1140	GH140	1 080 $^{\circ}C$ 空冷	室温	630	—	40	45	—	—	—	—	—	
			800	250	—	40	50						
GH2036	GH36	1 140 $^{\circ}C$ 或 1 130 $^{\circ}C$ * 保温 1 h 20 min, 水冷; 650~670 $^{\circ}C$ 保温 14~16 h 升温至 700~800 $^{\circ}C$ 保温 14~20 h, 空冷	室温	850	600	15	20	≥ 30	3.45~ 3.65	650	380 (350)	35 (100)	

续表 14.6-19

牌 号		热处理	瞬时拉伸性能 \geq					室温冲击初度 $a_{KU}/J \cdot cm^2$	室温硬度 HBS 压痕直径 d/mm	高温持久性能 \geq		
新牌号	旧牌号		试验温度/ $^{\circ}C$	抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/MPa$	伸长率 $\delta_5/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$			试验温度/ $^{\circ}C$	应力/ MPa	时间 t/h
GH2132	GH132	980~990 $^{\circ}C$ 保温 1~2 h, 油冷; 710~720 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷	室温	950	630	20	30	≥ 30	3.4~3.8	650	400	100
			650	750	—	15	—	—	—			
GH2135	GH135	1140 $^{\circ}C$ 保温 4 h, 空冷; 830 $^{\circ}C$ 保温 8 h, 空冷; 650 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷	室温	900 820*	600 600	13 10	16 13	≥ 30	3.4~3.8	750	350 (300)	50 (100)
GH3030	GH30	980~1 020 $^{\circ}C$, 空冷	室温 700	650	—	30 30	—	—	—	—	—	—
GH4033	GH33	1080 $^{\circ}C$ 保温 8 h, 空冷; 750 $^{\circ}C$ 保温 16 h, 空冷	室温	900 820*	600 600	13 10	16 13	≥ 30 ≥ 30	3.4~3.8	750	350 (300)	50 (100)

注: 1. 环坯的尺寸及质量范围为: 外径 200~600 mm; 内径 50~40 mm; 高度 60~250 mm。质量 180 kg 以下, 超出以上规定范围的环坯, 由双方协议。

2. GH4033、GH2135 合金的力学性能如因锻造工艺不当, 造成熔检试样晶粒粗大或锻裂导致不合格时, 可剖环坯检验, 其室温拉伸性能按表中带“*”号的数据, 其他性能与熔检料的要求相同(表列性能数据是按从热处理后的熔检试样上切取的试样测定的)。

3. 对于 GH4033、GH2036、GH2135 合金持久性能不合格时, 可按括号内数据重新进行试验, 试样数量不加倍, 再次不合格, 则以括号内数据按复验规定处理。

4. GH2036 带*的 1 130 $^{\circ}C$ 固溶温度仅适用于电炉+电渣工艺生产的产品。

1.3.10 冷墩用高温合金冷拉丝(表 14.6-20、表 14.6-21)

表 14.6-20 冷墩用高温合金丝(固溶状态)牌号及力学性能(摘自 YB/T 5249—1993)

牌 号		交货状态的热处理	室温硬度		室温拉伸性能	
新牌号	旧牌号		HBS d/mm	HV	σ/MPa	$\delta_5/\%$
GH3030	GH30	980~1 020 $^{\circ}C$, 水(空)冷			≤ 800	≥ 30
GH2036	GH36	(1 140 ± 10) $^{\circ}C$, 水冷	≥ 3.7	273		
GH2132	GH132	980~1 000 $^{\circ}C$, 水(油)冷	≥ 4.25	194		
GH1140	GH140	1 050~1 080 $^{\circ}C$, 空冷			≤ 750	≥ 40

表 14.6-21 冷墩用高温合金冷拉丝(时效处理)牌号及力学性能(摘自 YB/T 5249—1993)

牌 号		热处理	瞬时拉伸性能 \geq					室温硬度		高温持久性能			
新牌号	旧牌号		温度/ ℃	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %	ψ / %	HBS d/mm	HV	温度/ ℃	应力 σ /MPa	时间 t/h	δ_5 / %
GH2036	GH36	交货状态 650~670℃ 14~16 h 再升温至 770~800℃ 10~12 h 空冷	室温	850	600	15	20	3.45~ 3.65	217~ 281	650	350	≥ 100	—
GH2132	GH132	交货状态 700~720℃ 16 h 空冷	室温	920	600	15	20	3.30~ 3.85	260~ 360	650	460	≥ 23	≥ 5
				(950)		(18)	(40)	3.30~ 3.85	260~ 360	650	(400)	(100)	—

注:1. 高温性能试验试样在半成品坯料上切取,由供方保证,需方不作检验。

2. 成品丝材室温 $\sigma_{0.2}$ 供方可不作,但供方应保证符合本表规定。

3. GH2132 性能在需方要求时,可按括号内指标,但应在合同中注明。

2 耐蚀合金

2.1 变形耐蚀合金 (表 14.6-22)

表 14.6-22 变形耐蚀合金牌号、特性及应用 (摘自 GB/T 15007—1994)

合金牌号	主要特性	应用举例
NS111	抗氧化性介质腐蚀, 高温下抗渗碳性良好	热交换器及蒸汽发生器管, 合成纤维的加热管
NS112	抗氧化性介质腐蚀, 抗高温渗碳, 热强度高	合成纤维工程中的加热管、炉管及耐热构件等
NS113	耐高温高压水的应力腐蚀及荷性介质应力腐蚀	核电站的蒸汽发生器管
NS131	在含卤素离子氧化-还原复合介质中耐点腐蚀	湿法冶金、制盐、造纸及合成纤维管工业的含氟离子环境
NS141	耐氧化-还原介质腐蚀及氯化物介质的应力腐蚀	硫酸及含有多种金属离子和卤族离子的硫酸装置
NS142	耐氧化物应力腐蚀及氧化-还原性复合介质腐蚀	热交换器及冷凝器、含多种离子的硫酸环境
NS143	耐氧化-还原性复合介质腐蚀	硫酸环境及含有卤族离子及金属离子的硫酸溶液中应用, 如湿法冶金及硫酸工业装置

续表 14.6-22

合金牌号	主要特性	应用举例
NS311	抗强氧化性介质及含氟离子高温硝酸腐蚀, 无磁	高温硝酸环境及强腐蚀条件下的无磁构件
NS312	耐高温氧化物介质腐蚀	热处理及化学加工工业装置
NS313	抗强氧化性介质腐蚀, 高温强度高	强腐蚀性核工程废物烧结处理炉
NS314	耐强氧化性介质及高温硝酸、氢氟酸混合介质腐蚀	核工业中靶件及元件的溶解器
NS315	抗氯化物及高温高压水应力腐蚀, 耐强氧化性介质及 HNO_3 - HF 混合腐蚀	核电站热交换器、蒸发器管、核工程化工后处理耐蚀构件
NS321	耐强还原性介质腐蚀	热浓盐酸及氯化氢气体装置及部件
NS322	耐强还原性介质腐蚀, 改善抗晶间腐蚀性	盐酸及中等浓度硫酸环境 (特别是高温下) 的装置
NS331	耐高湿氟化氢、氯化氢气体及氟气腐蚀易成形焊接	化工、核能及有色冶金中高温氟化氢炉管及容器
NS332	耐含氟离子的氧化-还原介质腐蚀, 耐点腐蚀	湿氯、亚硫酸、次氯酸、硫酸、盐酸及氯化物溶液装置
NS333	耐卤族及其化合物腐蚀	强腐蚀性氧化-还原复合介质及高温海水中应用装置
NS334	耐氧化性氯化物水溶液及湿氯、次氯酸盐腐蚀	强腐蚀性氧化-还原复合介质及高温海水中的焊接构件
NS335	耐含氟离子的氧化-还原复合腐蚀, 组织热稳定性好	湿氯、次氯酸、硫酸、盐酸、混合酸、氯化物装置、焊后直接应用
NS336	耐氧化-还原复合介质、耐海水腐蚀且热强度高	化学加工工业中苛刻腐蚀环境或海洋环境
NS337	焊接材料, 焊接覆盖面大, 耐苛刻环境腐蚀	多种高铬钼镍基合金的焊接及与不锈钢的焊接
NS341	耐含氟、氟离子的酸性介质的冲刷冷凝腐蚀	化工及湿法冶金冷凝器和炉管、容器
NS411	抗强氧化性介质腐蚀, 可沉淀硬化, 耐腐蚀冲击	硝酸等氧化性酸中工作的球阀及承载构件

注: 本表牌号的化学成分参见 GB/T 15007—1994。

2.2 耐蚀合金材料

2.2.1 耐蚀合金棒 (表 14.6-23)

表 14.6-23 耐蚀合金棒牌号及力学性能 (摘自 GB/T 15008—1994)

合金牌号	推荐的固溶处理温度/℃	拉 力 试 验			冲击试验	硬度试验 HRC
		抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ /%	冲击初度 A_K /J	
NS111	1 000~1 060	515	205	30		
NS112	1 100~1 170	450	170	30		
NS113	1 000~1 050	515	205	30		
NS131	1 155~1 200	590	240	30		
NS141	1 000~1 050	540	215	35		
NS142	1 000~1 050	590	240	30		
NS143	1 000~1 050	540	215	35		
NS311	1 050~1 100	570	245	40		
NS312	1 000~1 050	550	240	30		
NS313	1 100~1 150	550	195	30		
NS314	1 080~1 120	520	195	35		
NS315	1 000~1 050	550	240	30		
NS321	1 140~1 190	690	310	40		
NS322	1 040~1 090	760	350	40		
NS331	1 050~1 100	540	195	35		
NS332	1 160~1 210	735	295	30		
NS333	1 160~1 210	690	315	30		
NS334	1 150~1 200	690	285	40		
NS335	1 050~1 100	690	275	40		
NS336	1 100~1 150	690	275	30		
NS341	1 050~1 100	590	195	40		
NS411	1 080~1 100, 水冷 750~780×8 h, 空冷 620~650×8 h, 空冷	910	690	20	80	32

注: 1. 耐蚀合金棒分为热轧和锻制棒材两种, 热轧棒材尺寸规格按 GB/T 702 热轧圆钢和方钢规定, 其尺寸允许偏差及弯曲度应符合 2 组有关规定。锻制棒材尺寸规格应符合 GB/T 908 锻制圆钢和方钢规定。

2. 本表数据适用于尺寸不大于 80 mm 的棒材, 尺寸大于 80 mm 棒材允许改轧 (锻) 成 80 mm 后取样检验。数据按本表规定。

3. 棒材尺寸不大于 16 mm 者, 可不进行冲击功检验。

2.2.2 耐蚀合金热轧板 (表 14.6-24)

表 14.6-24 耐蚀合金热轧板牌号及力学性能 (摘自 GB/T 15009—1994)

合金牌号	推荐固溶处理温度/ ℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%
		≥		
NS111	1 000~1 060	520	205	30
NS112	1 100~1 170	450	170	30
NS131	1 160~1 210	590	240	30
NS141	1 000~1 050	540	215	35
NS142	1 020~1 070	585	240	30
NS311	1 050~1 100	570	245	40
NS312	1 000~1 050	550	240	30
NS313	1 100~1 160	550	195	30
NS314	1 080~1 130	520	195	35
NS321	1 140~1 190	690	310	40
NS322	1 040~1 090	760	350	40
NS331	1 050~1 100	540	195	35
NS333	1 160~1 210	690	315	30
NS334	1 150~1 200	690	285	40
NS335	1 050~1 100	690	275	40
NS336	1 100~1 150	690	275	30

注: 1. 热轧板材厚度大于 4 mm, 尺寸规格按 GB/T 709 热轧钢板和钢带的规定。

2. 板材每米长度平面度不大于 8 mm, 但抗拉强度大于 685 MPa 的板材每米长度平面度可不大于 14 mm。

3. 屈服强度在需方要求时进行测定, 并应在合同中注明。

2.2.3 耐蚀合金冷轧薄板 (表 14.6-25)

表 14.6-25 耐蚀合金冷轧薄板牌号及力学性能 (摘自 GB/T 15010—1994)

合金牌号	推荐固溶处理温度/ ℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
		≥		
NS111	1 000~1 060	520	205	30
NS112	1 100~1 170	450	170	30
NS131	1 160~1 210	590	240	30
NS141	1 000~1 050	540	215	35
NS142	1 020~1 070	585	240	30
NS311	1 050~1 100	570	245	40

续表 14.6-25

合金牌号	推荐固溶处理温度/ t	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
		\geq		
NS312	1 000~1 050	550	240	30
NS313	1 100~1 160	550	195	30
NS314	1 080~1 130	520	195	35
NS321	1 140~1 190	690	310	40
NS322	1 040~1 090	760	350	40
NS331	1 050~1 100	540	195	35
NS333	1 160~1 210	690	285	40
NS334	1 150~1 200	690	315	30
NS335	1 050~1 100	690	275	40
NS336	1 100~1 150	690	275	30

注：1. 板材厚度为 0.8~4 mm，尺寸规格按 GB/T 708 冷轧钢板和钢带的规定。

2. 板材每米长度镰刀弯不大于 4 mm；每米长度平面度不大于 10 mm，但 σ_b 大于 685 MPa 的板材，每米长度平面度可不大于 15 mm。

3. 屈服强度值在需方要求时才测定，并应在合同中注明。

2.2.4 耐蚀合金冷轧带（表 14.6-26）

表 14.6-26 耐蚀合金冷轧带牌号及力学性能（摘自 GB/T 15012—1994）

合金牌号	状态	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	硬 度
		\geq			
NS111 NS112	退火	520	205	30	—
NS142	退火	585	240	30	$\leq 95\text{HRB}$
NS311	固溶	570	245	45	—
	1/2H	805	—	10	—
NS312 NS315	退火	505	240	30	—
	1/4H	—	—	—	88~94HRB
	1/2H	—	—	—	93~98HRB
	3/4H	—	—	—	97HRB~25HRC
NS321	退火	795	345	45	100HRB ^T
NS322	退火	760	350	40	100HRB ^T
NS333	固溶	690	315	30	—
NS336	退火	830	415	30	—
	固溶	690	275	30	—

注：1. 屈服强度值在需方要求时才测定（在合同中注明）。

2. 屈服强度要求不适于厚度小于 0.50 mm 的带材。

3. 厚度小于 0.25 mm 的带材不作拉力试验，但应提供硬度数据。

① 硬度值仅供参考。

2.2.5 耐蚀合金冷轧无缝管 (表 14.6-27、表 14.6-28)

表 14.6-27 耐蚀合金冷轧无缝管直径及壁厚 (摘自 GB/T 15011—1994) (mm)

直径	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	27	
壁厚	0.5~2.5	0.5~3.0	0.5~3.0	0.5~3.0	0.5~3.5	0.5~3.5	0.5~4.0	0.5~4.0	0.5~4.0	0.5~4.5	0.5~5.0	0.5~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	
直径	28	30	32	34	35	36	38	40	42	45	48	50	51	53	54	56	57	60
壁厚	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0

注: 1. 壁厚尺寸系列: 0.5、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.5、1.6、2.0、2.2、2.5、2.8、3.0、3.2、3.5、4.0、4.5、5.0 mm。

2. 管材通常长度 (不定尺): 壁厚 0.5~0.8 mm 者, 为 0.5~6 m, 壁厚大于 0.8 mm 者, 为 1.0~5 m。

3. 外径允许偏差: 外径 10 mm: ±0.15 mm; 外径 >10~30 mm: ±0.20 mm; >30~60 mm: ±0.30 mm。
壁厚允许偏差: 壁厚 0.5~1.0 mm: ±0.12 mm; 壁厚 >1.0~3.0 mm: ±13%; 壁厚 >3.0 mm: ±10%。

4. 管材不圆度不大于外径公差, 壁厚不均匀度不大于壁厚公差。管材弯曲度不大于 2 mm/m。

表 14.6-28 耐蚀合金冷轧无缝管牌号及力学性能 (摘自 GB/T 15011—1994)

牌 号	试验温度	力学性能 ≥		
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%
NS111	室温	520	205	30
NS112	室温	450	170	30
NS113	室温	515	205	30
NS141	室温	540	215	35
NS311	室温	570	245	40
NS312	室温	550	240	30
NS315	室温	550	240	30
NS331	室温	540	195	35

注: 1. 屈服强度值 $\sigma_{0.2}$ 仅当需方要求时, 才进行测定。

2. 管材以固溶处理后酸洗状态交货。

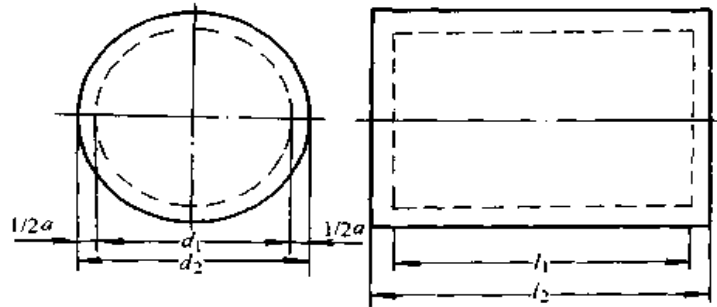
2.2.6 耐蚀合金锻件 (表 14.6-29~表 14.6-32)

表 14.6-29 耐蚀合金锻件牌号及力学性能 (摘自 YB/T 5264—1993)

合金牌号	推荐热处理温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
		≥		
NS111	1 000~1 060	515	205	30
NS112	1 100~1 170	450	170	30
NS131	1 150~1 200	590	240	30
NS335	1 020~1 120	650	240	40

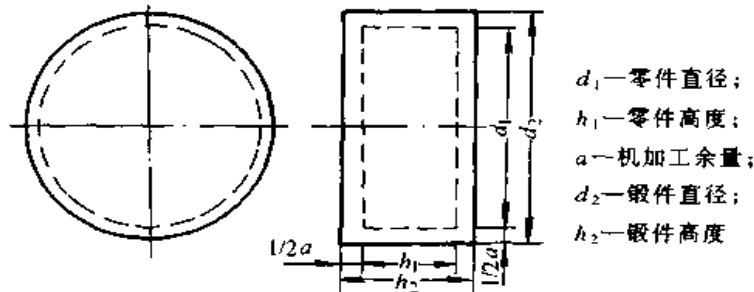
注: 锻件分为轴类、饼类和环形类三种。

表 14.6-30 耐蚀合金轴类锻件尺寸规格 (摘自 YB/T 5264—1993) (mm)



零件直径 (或边长)	零件长度 ≤ 3 500				零件长度 > 3 500			
	直径 (或边长)		长 度		直径 (或边长)		长 度	
	余量 a	偏差	余量 a	偏差	余量 a	偏差	余量 a	偏差
100 ~ 125	10	± 2	16	+ 14 - 11	13	± 4	21	+ 18 - 21
> 125 ~ 160	12	± 3	18	+ 14 - 11	25	± 5	22	+ 20 - 13
> 160 ~ 200	14	± 4	20	± 14	18	± 6	25	+ 22 - 14
> 200 ~ 250	17	± 5	23	± 16	21	± 7	27	+ 24 - 16
> 250 ~ 315	21	± 6	26	± 18	24	± 8	30	+ 27 - 18
> 315 ~ 400	26	± 7	30	± 21	29	± 9	35	+ 31 - 20

表 14.6-31 耐蚀合金饼类锻件尺寸规格 (摘自 YB/T 5264—1993) (mm)

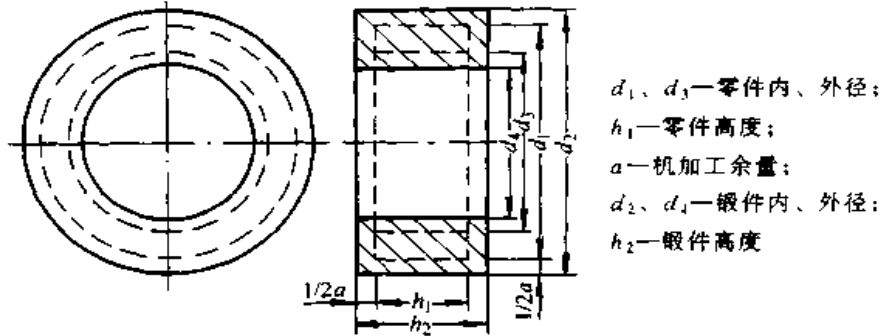


续表 14.6-31

零件直径 d_1		零件高度 h_1																	
		≤ 40		$>40 \sim 65$		$>65 \sim 100$		$>100 \sim 160$		$>160 \sim 200$		$>200 \sim 250$		$>250 \sim 315$		$>315 \sim 400$		$>400 \sim 500$	
		加工余量 a 与允许偏差																	
		d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1	d_1	h_1
65~100	余量	6	6	6	6	7	7												
	偏差	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2	± 2												
$>100 \sim 160$	余量	7	6	7	6	8	7	8	8										
	偏差	± 2	± 2	± 2	± 2	± 3	± 2	± 3	± 3										
$>160 \sim 200$	余量	8	6	8	7	8	8	9	9	10	10								
	偏差	± 3	± 2	± 3	± 2	± 3	± 3	± 3	± 3	± 4	± 4								
$>200 \sim 250$	余量	9	7	9	7	9	8	10	9	11	10	12	12						
	偏差	± 3	± 2	± 3	± 2	± 3	± 3	± 4	± 3	± 4	± 4	± 5	± 5						
$>250 \sim 315$	余量	10	8	10	8	10	9	11	10	12	11	13	12	14	14				
	偏差	± 4	± 3	± 4	± 3	± 4	± 3	± 4	± 4	± 5	± 4	± 5	± 5	± 6	± 6				
$>315 \sim 400$	余量	12	9	12	9	12	10	13	11	14	12	15	13	16	15	18	18		
	偏差	± 5	± 3	± 5	± 3	± 5	± 4	± 5	± 4	± 6	± 5	± 6	± 5	± 7	± 6	± 8	± 8		
$>400 \sim 500$	余量			14	10	14	11	15	12	16	14	17	15	18	17	20	19	23	23
	偏差			± 6	± 4	± 6	± 4	± 6	± 5	± 7	± 6	± 7	± 6	± 8	± 7	± 9	± 8	± 10	± 10
$>500 \sim 630$	余量					18	14	19	15	20	16	21	17	22	19	23	22	26	25
	偏差					± 8	± 6	± 8	± 6	± 9	± 7	± 9	± 7	± 9	± 8	± 10	± 9	± 11	± 11
$>630 \sim 800$	余量							23	19	24	20	25	21	26	23	29	26	30	29
	偏差							± 10	± 8	± 11	± 9	± 11	± 9	± 11	± 10	± 11	± 10	± 12	± 12
$>800 \sim 1\ 000$	余量									28	24	29	25	30	27	33	30	34	33
	偏差									± 13	± 11	± 13	± 11	± 13	± 12	± 13	± 12	± 13	± 13

注：阶梯黑线以上的规格应尽量避免使用。

表 14.6-32 耐蚀合金环形类锻件尺寸规格 (摘自 YB/T 5264—1993) (mm)



d_1 、 d_3 —零件内、外径;
 h_1 —零件高度;
 a —机加工余量;
 d_2 、 d_4 —锻件内、外径;
 h_2 —锻件高度

零件直径 d_1		零件高度 h_1																	
		≤ 40		>40 ~65		>65 ~100		>100 ~160		>160 ~200		>200 ~250		>250 ~315		>315 ~400		>400 ~500	
		加工余量 a 与允许偏差																	
		$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1	$d_1 d_2$	h_1
65~100	余量	7	6	7	6	8	7												
	偏差	± 2	± 2	± 2	± 2	± 3	± 2												
>100~160	余量	8	6	8	6	9	7	10	8										
	偏差	± 3	± 2	± 3	± 2	± 3	± 2	± 4	± 3										
>160~200	余量	9	6	9	6	10	7	11	8	12	10								
	偏差	± 3	± 2	± 3	± 2	± 4	± 2	± 4	± 3	± 5	± 4								
>200~250	余量	10	6	11	6	11	7	12	8	13	10	14	12						
	偏差	± 4	± 2	± 4	± 2	± 4	± 2	± 5	± 3	± 5	± 4	± 6	± 5						
>250~315	余量	11	6	12	7	13	7	14	8	15	10	16	12	17	14				
	偏差	± 4	± 2	± 5	± 2	± 5	± 2	± 6	± 3	± 6	± 4	± 7	± 5	± 7	± 6				
>315~400	余量	13	8	14	8	15	9	16	10	17	11	18	13	19	15	21	18		
	偏差	± 5	± 3	± 6	± 3	± 6	± 3	± 7	± 4	± 7	± 4	± 8	± 5	± 8	± 6	± 9	± 8		
>400~500	余量	16	9	17	10	18	11	19	12	20	13	21	14	22	16	24	19	26	23
	偏差	± 7	± 3	± 7	± 4	± 8	± 4	± 8	± 5	± 8	± 5	± 9	± 6	± 9	± 7	± 10	± 8	± 11	± 10
>500~630	余量			20	12	21	13	22	14	23	15	24	16	26	18	27	21	29	24
	偏差			± 8	± 5	± 9	± 5	± 9	± 6	± 10	± 8	± 10	± 7	± 11	± 7	± 12	± 9	± 13	± 10
>630~800	余量					24	15	25	16	26	17	27	18	29	20	30	23	32	26
	偏差					± 10	± 6	± 10	± 7	± 11	± 9	± 11	± 8	± 12	± 8	± 13	± 10	± 14	± 11
>800~1 000	余量					27	17	28	18	29	19	30	20	32	22	33	25	35	28
	偏差					± 11	± 7	± 11	± 8	± 12	± 10	± 12	± 9	± 13	± 9	± 14	± 11	± 15	± 12

注：阶梯黑线以上的规格应尽量避免使用。

第 7 章 粉末冶金材料

1 粉末冶金材料分类、特性及应用

粉末冶金材料按用途分类，一般可分为机械零件用材料、工具材料、高温材料、电工材料及磁性材料等粉末冶金材料。

机械零件用粉末冶金材料一般分为减摩材料、结构材料、多孔材料、密封材料及摩擦材料等，其主要性能特点及应用举例如下：

粉末冶金减摩材料的承载能力（ pv 值）高，摩擦系数低，具有良好的自润滑性能，耐高温性能及耐磨性能均佳，摩擦时不伤对偶，噪声较低；主要应用于制作铜基、铁基含油轴承；含高石墨及二硫化钼的铁基、铜基轴承；金属塑料制品及铜铅双金属制品等。

粉末冶金结构材料具有高强度、高硬度和韧性好等特点，并具有良好的耐腐蚀性能及密封性能、较高的耐磨性。主要应用于制作钢、不锈钢、铁、铜基的各种承受载荷的零件，如传动齿轮、汽车及冰箱压缩机的零件等。

粉末冶金多孔材料的综合性能优良，对于孔隙的形态、大小、分布及孔隙度均可控制，还可根据要求设计多孔材料，使其具有耐热、耐腐

蚀、导电、催化、灭菌等特殊功能。主要应用于制作铁基、铜基、镍基、不锈钢基、钛基等过滤元件；减振、消音制件；催化、止火、电极、热交换及人造骨等的制品。

粉末冶金摩擦材料具有摩擦系数高，耐短时高温，导热性好，能量载荷（摩擦功与摩擦功率的乘积）高，耐磨，抗卡且不伤对偶。主要用于制作铁基、铜基、半金属及碳基的离合器片及刹车带、刹车片等。

粉末冶金密封材料具有良好的密封性能，动密封材料耐磨性好，本身不渗漏；静密封材料质较软，易和对偶相贴，本身也不渗漏。用于热力管路上热胀冷缩球形补偿器的密封件，泵用的硬质合金或精细陶瓷密封环以及多孔铁浸沥青的管路密封垫等。

粉末冶金工具材料主要包括刀具、模具、凿岩及金刚石工具材料等。粉末冶金高温材料包括难熔金属及其化合物基合金材料、弥散强化材料及精细陶瓷材料。粉末冶金电工材料包括触头材料、集电材料及电热材料。粉末冶金磁性材料包括纯铁、铁硅、铁铝硅、铁镍磁极铁心等软磁材料和铁氧体、铝镍钴、钕铁硼磁极等硬磁材料。

2 粉末冶金减摩材料（表 14.7-1、表 14.7-2）

表 14.7-1 粉末冶金减摩材料牌号、化学成分及性能（摘自 GB/T 2688—1981）

牌 号	类 别	主要合金	化学成分（质量分数）/%								物理—力学性能			含油密度/ $g \cdot cm^{-3}$
			Fe	C 化合	C 总	Cu	Sn	Zn	Pb	其他	含油率/%	径向压溃强度/ MPa	表面硬度 HBS	
FZ1160	1	铁	余	<0.25	<0.5	—	—	—	—	<3	≥ 18	196	30~70	5.7~6.2
FZ1165											≥ 12	245	40~80	>6.2~6.6
FZ1260	2	铁-碳	余	0.25~ 0.60	<1.0	—	—	—	—	<3	≥ 18	245	50~100	5.7~6.2
FZ1265											≥ 12	294	60~110	6.2~6.6
FZ1360	3	铁-碳-铜	余	0.25~ 0.60	<1.0	2~5	—	—	—	<3	≥ 18	343	60~110	5.7~6.2
FZ1365											≥ 12	392	70~120	>6.2~6.6
FZ1460	4	铁-铜	余	—	—	18~	—	—	—	<3	≥ 18	245	50~100	5.8~6.3
FZ1465						≥ 12					343	60~110	>6.3~6.7	

续表 14.7-1

牌 号	类 别	主要合金	化学成分 (质量分数) /%							物理-力学性能			含油密度 g·cm ⁻³	
			Fe	C 化合	C 总	Cu	Sn	Zn	Pb	其他	含油率/%	径向承压强度/ MPa		表面硬度 HBS
FZ2170	钢	铜-锡- 锌-铅	<0.5	—	0.5~ 2.0	余	5~7	5~7	2~4	<1.5	≥18	147	20~50	6.6~7.2
FZ2175											≥12	196	30~60	>7.2~7.8
FZ2265	基	铜-锡	<0.5	—	0.5~ 2.0	余	8~11	—	—	<1.0	≥18	147	25~55	6.2~6.8
FZ2270											≥12	196	35~65	>6.8~7.4
FZ2365	3	铜-锡-铅	<0.5	—	0.5~ 2.0	余	6~10	<1	3~5	<1.0	≥18	147	20~50	6.3~6.9

- 注：1. 铁基各类轴承的化学成分中允许有<1%的硫。
 2. 化合碳含量允许用金相法评定。
 3. 铜基各类轴承化学成分中的总碳是指游离石墨。
 4. 在同一个试件上三点硬度值的波动范围不许超过15个布氏硬度单位。
 5. 本表牌号用于粉末冶金滑动轴承。

表 14.7-2 粉末冶金减摩材料的特性及应用

类 别	特 点	应 用 举 例	
铁	铁	质软, 易跑合, 摩擦系数小, 不易拉伤对偶件表面; 抗咬粘性好; 工作表面孔隙不易堵塞, 润滑良好, 工作过程中应补充润滑油。切削性能良好, 强度低	适用于单位压力小 (<98 MPa) 速度偏高 (v 可达 1 m/s 左右), 轴衬 (未热处理) 等部位。如磨粉机轴套, 履带车行走轮衬套, 牙轮钻衬套等
	铁-碳	硬度可在较大范围内调整, 强度高, 当碳的质量分数为 1.5% 左右时, 强度为最高; 抗压能力大; 游离石墨起固体润滑剂作用, 低速轻载, 自润滑时, 石墨量应多; 重载或中速、低速, 自润滑时, 石墨量应适中; 石墨含量少者使用中应补加润滑剂	适用于制作机床油泵衬套、内燃机凸轮轴衬套、柴油机摆臂衬套、拖拉机偏心衬套等
铜 基	具有良好的导热性和抗咬合性, 不易拉伤对偶件表面, 耐腐蚀性好, 不导磁, 线胀系数大, 强度低, 抗负载能力差, 成本高	适用于单位压力小, 线速度较高, 腐蚀条件下工作的零件, 如电唱机、电风扇、纺机、汽车发动机轴承	

3 粉末冶金摩擦材料

3.1 粉末冶金铁基和铜基干式摩擦材料 (表 14.7-3、表 14.7-4)

3.2 粉末冶金铜基湿式摩擦材料 (表 14.7-5)

表 14.7.3 铜基干式摩擦材料牌号、组成、性能及应用 (摘自 JB/T 3063—1996)

牌号	质量分数/%								平均 动摩擦 系数 μ_d >	静摩擦 系数 μ_s >	磨 损 率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{J}^{-1}$ <	密 度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	表 观 硬 度 HBS	横 向 断 裂 强 度/ MPa >	主 要 适 用 范 围
	铜	铁	锡	锌	铅	石墨	二氧 化硅	硫酸 钡								其他
F1106G	68	8	5	—	—	10	4	5	—	0.15		5.5~6.5	25~50		干式离合及制 动器
F1107G	64	8	7	—	8	8	5	—	—			5.5~6.2	20~50	40	拖拉机、冲压及 工程机械等干式离 合器
F1108G	72	5	10	—	3	2	8	—	—	0.20	0.45	5.5~6.2	25~55		DLM2型、DLM4 型等系列机床、动 力头的干式电离合 合器和制动器
F1109G	63~67	9~10	7~9	—	3~5	7~9	2~5	—	3			5.6~6.5	20~50	60	用于 DLMK 型系 列机床、动力头的 干式电离合器和 制动器
F1110G	70~80	—	6~8	3.5~5	2~3	3~4	3~5	—	2	0.25	0.40	6.0~6.8	35~65		锻压机床、剪切 机、工程机械干式 离合器

表 14.7.4 铁基干式摩擦材料牌号、组成、性能及应用 (摘自 JB/T 3063—1996)

牌号	质量分数/%										平均 动摩擦 系数 μ_d	静摩擦 系数 μ_s	磨损率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{J}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	表面 硬度 HHS	横向断 裂强度/ MPa	主要适用范围
	铁	铜	锡	铅	石墨	二氧化 硅	三氧 化二 铝	二硫 化钨	碳化 硅	铸石								其他
F1001G	65~75	2~5	—	2~10	10~15	0.5~3	—	—	2~4	—	—	0~3		4.2~5.3	30~60		载重汽车 和矿山重型 车辆的制动 带
F1002G	73	10	—	8	6	—	3	—	—	—	—	—	0.25	5.0~5.6	40~70		拖拉机、 工程机械等 干式离合器 片和刹车片
F1003G	69	1.5	1	8	16	1	—	—	—	—	3.5		5.0×10^{-7}	4.8~5.5	35~55	>50	工程机械 干式离合器 如挖掘机、 吊车等
F1004G	65~70	—	3~5	2~4	13~17	—	—	—	3~5	3~4	—	—		4.7~5.2	60~90		合金钢为 对偶的飞机 制动片
F1005G	65~70	1~5	2~4	2~4	—	4~6	—	—	—	—	—	—	0.35	5.0~5.5	40~60		重型淬火 吊车、绳索 起重吊等

注：1. 本表产品适于制造离合器和制动器之用。

2. 牌号标记示例：

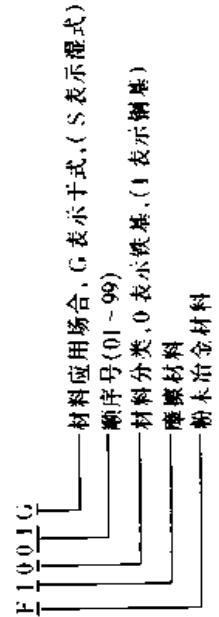


表 14.7-5 铜基湿式摩擦材料牌号、组成、性能及应用 (摘自 JB/T 3063—1996)

牌号	质量分数/%							平均动摩擦系数 μ_d	静摩擦系数 μ_s	磨损失率/ cm^3/J^1	能量载荷/许用值/ cm	密度 g/cm^3	表面硬度 HBS	横向断裂强度/ MPa	主要适用范围
	铜	铁	锡	锌	铅	石墨	二氧化硅									其他
F1111S	69	6	8	—	8	6	3	—				5.8~6.4	20~50	>60	船用齿轮箱系列 离合器、拖拉机主 离合器、载重汽车 及工程机械等湿式 离合器
F1112S	75	8	3	—	5	5	4	—	0.04~0.05	2.0×10^{-6}		5.5~6.4	30~60	>50	中等载荷(载重汽 车、工程机械)的液 力变速箱离合器
F1113S	73	8	8.5		4	4	2.5					5.8~6.4	20~50	>80	飞翼离合器
F1114S	72~76	3~6	7~10		5~7	6~8	1~2		0.03~0.05		8 500	≥ 6.7	≥ 40		转向离合器
F1115S	67~71	7~9	7~9	—	9~11	5~7	—	—	0.12~ 0.17						喷镀工艺,用于 调速离合器
F1116S	63~67	9~10	7~9	—	3~5	7~9	2~5	3		2.5×10^{-6}		5.0~6.2	20~50	>60	喷镀工艺,用于 船用齿轮箱系列高 离合器、拖拉机主离 合器、载重汽车及 工程机械等湿式离 合器
F1117S	70~75	4~7	3~5	—	2~5	5~8	2~3		0.05~0.08			5.5~6.5	40~60		重载荷液力机械 变速箱离合器
F1118S	68~74	—	2~4	4.5~ 7.5	2~4	13.5~ 16.5	2~4	—			32 000	4.7~5.1	14~20	>30	工程机械重载荷 传动件,如主离合 器、动力换挡变速 箱等

4 粉末冶金结构材料

4.1 粉末冶金铁基结构材料 (表 14.7-6、表 14.7-7)

表 14.7-6 粉末冶金铁基结构材料分类、牌号、化学成分、性能及应用 (摘自 GB/T 14667.1-1993)

类别	牌号	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ \geq	质量分数/%				力学性能 \geq							表面 硬度 HRS	主要特点与应用举例		
			Fe	C _总	Cu	Mo	其他	σ_{\perp} / MPa	δ (%)	a_K / $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_{0.1}$ / MPa	E/ MPa			σ_{\perp} / MPa	
烧结 铁	F0001J	6.4	余量	≤ 0.1	—	—	≤ 1.5	其他	100	3.0	4.9	68.6	49	78 400	78.4	40	塑性、韧性、焊接性与导电性较好, 适于制造受力极低、要求翻铸或焊接以及要求导磁的零件, 如垫片、尺框、接铁、磁筒、极靴等
	F0002J	6.8	余量	≤ 0.1	—	—	≤ 1.5	其他	150	5.0	9.8	98	78.4	88 200	98	50	
	F0003J	7.2	余量	≤ 0.1	—	—	≤ 1.5	其他	200	7.0	19.6	137.2	98	98 000	117.6	60	
烧结 碳钢	F0101J	6.2	余量	$> 0.1 \sim 0.4$	—	—	≤ 1.5	其他	100	1.5	4.9	68.6	49	78 400	98	50	塑性、韧性、焊接性较好, 可进行渗碳淬火处理, 适于制造受力较小, 要求翻铸或焊接零件以及要求渗碳淬火零件, 如端盖、滑块、钢令、底座等
	F0102J	6.4	余量	$> 0.1 \sim 0.4$	—	—	≤ 1.5	其他	150	2.0	9.8	98	78.4	83 300	117.6	60	
	F0103J	6.8	余量	$> 0.1 \sim 0.4$	—	—	≤ 1.5	其他	200	3.0	14.7	137.2	98	88 200	147	70	
	F0111J	6.2	余量	$> 0.4 \sim 0.7$	—	—	≤ 1.5	其他	150	1.0	4.9	98	78.4	83 300	117.6	60	
	F0112J	6.4	余量	$> 0.4 \sim 0.7$	—	—	≤ 1.5	其他	200	1.5	4.9	137.2	98	88 200	147	70	
	F0113J	6.8	余量	$> 0.4 \sim 0.7$	—	—	≤ 1.5	其他	250	2.0	9.8	176.4	137.2	98 000	196	80	
	F0121J	6.2	余量	$> 0.7 \sim 1.0$	—	—	≤ 1.5	其他	200	0.5	2.94	137.2	98	88 200	147	70	
	F0122J	6.4	余量	$> 0.7 \sim 1.0$	—	—	≤ 1.5	其他	250	0.5	4.9	176.4	137.2	93 100	196	80	
	F0123J	6.8	余量	$> 0.7 \sim 1.0$	—	—	≤ 1.5	其他	300	1.0	4.9	215.6	171.4	102 900	245	90	

续表 14.7-6

类别	牌号	密度/ g·cm ⁻³ ≥	质量分数/%					力学性能 ≥							表面 硬度 HRS	主要特点与应用举例
			Fe	C _总	Cu	Mo	其他	σ_b / MPa	δ (%)	a_K / J·cm ²	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\sigma_{0.1}$ / MPa	E/ MPa	σ_{bc} / MPa		
烧结 铜 钢	F0201J	6.2	余	0.5~0.8	2~4	—	≤1.5	250	0.5	2.94	196	137.2	93 100	196	90	强度与硬度高、耐磨性好，抗大气氧化性较好，可进行热处理，适于制造受力较大或耐磨的零件，如链轮、齿轮、推杆体、锁紧螺母、摆线转子等
	F0202J	6.4	量	0.5~0.8	2~4	—	≤1.5	350	0.5	4.9	245	171.4	107 800	294	100	
	F0203J	6.8	量	0.5~0.8	2~4	—	≤1.5	500	0.5	4.9	343	245	122 500	392	110	
烧结 铜 钼 钢	F0211J	6.4	余	0.4~0.7	2~4	0.5~1.0	≤1.5	400	0.5	4.9	294	196	112 700	343	120	强度与硬度高，耐磨性好，渗透性好，热稳定性好，高温回火脆性低，适于制造受力高、要求耐磨或要求调质处理零件，如滚子、提火链块、螺旋螺母、活塞环、锁紧块、齿轮等
	F0212J	6.8	量	0.4~0.7	2~4	0.5~1.0	≤1.5	550	0.5	4.9	392	294	127 400	441	130	

注：牌号示例说明：

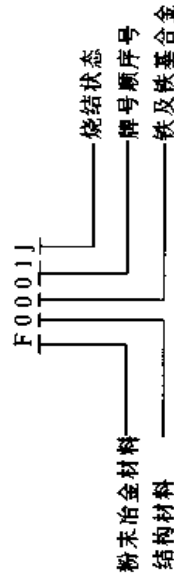


表 14.7-7 粉末冶金铁基结构材料性能参考数值 (摘自 GB/T 14667.1—1993)

牌 号	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	规定比例极限 $\sigma_{0.01}/\text{MPa}$	正弹性模量 E/GPa	剩余变形为 0.1% 的 压缩强度 $\sigma_{0.1}/\text{MPa}$
	\geq			
F0001J	70	50	78	80
F0002J	100	80	88	100
F0003J	135	100	98	120
F0101J	70	50	78	100
F0102J	100	80	83	120
F0103J	135	100	88	145
F0111J	100	80	83	120
F0112J	135	100	88	145
F0113J	180	135	98	190
F0121J	135	100	88	145
F0122J	180	135	93	190
F0123J	220	180	103	245
F0201J	190	135	93	190
F0202J	245	180	107	295
F0203J	345	245	122	390
F0211J	295	190	112	345
F0212J	390	295	127	440

注：本表为 GB/T 14667.1—1993 粉末冶金铁基结构材料的附录（参考件）。

4.2 热处理状态粉末冶金铁基结构材料 (表 14.7-8)

表 14.7-8 热处理状态粉末冶金铁基结构材料类别、化学成分及力学性能

类 别	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ \geq	质量分数/%					力学性能 \geq		
		Fe	C _{化合}	Cu	Mo	其他	σ_b/MPa	$a_K/\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	HRA
烧结低碳钢	6.5	余量	>0.1—0.4	—	—	≤ 2.0	(400)	30	50
	6.8	余量	>0.1—0.4	—	—	≤ 2.0	450	30	55
烧结中碳钢	6.5	余量	>0.4—0.7	—	—	≤ 2.0	450	30	45
	6.8	余量	>0.4—0.7	—	—	≤ 2.0	500	50	50
烧结高碳钢	6.5	余量	>0.7—1.0	—	—	≤ 2.0	500	30	50
	6.8	余量	>0.7—1.0	—	—	≤ 2.0	550	50	55
烧结铜钢	6.5	余量	>0.5—0.8	2—4	—	≤ 2.0	550	30	55
	6.8	余量	>0.5—0.8	2—4	—	≤ 2.0	650	50	60
烧结铜钨钢	6.5	余量	>0.5—0.8	2—4	0.5—1.0	≤ 2.0	550	30	55
	6.8	余量	>0.5—0.8	2—4	0.5—1.0	≤ 2.0	700	50	65

注：1. 化合碳量允许用金相法评定。

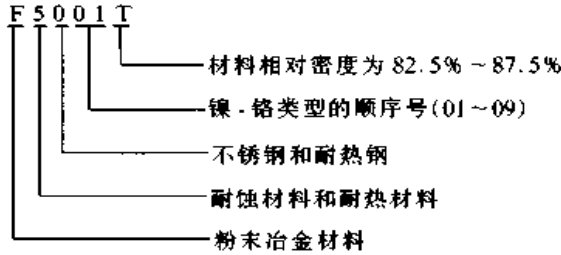
2. 化合碳量低于 0.4% 采用渗碳淬火。

4.3 烧结奥氏体不锈钢结构零件材料 (表 14.7-9)

表 14.7-9 烧结奥氏体不锈钢结构零件牌号、化学成分及性能 (摘自 GB/T 13827—1992)

牌 号	类 别	质量分数/%								性 能		
		Fe	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	C _{残余}	其他元素	密度/ g·cm ⁻³	抗拉强度/ MPa	硬度 HBS
F5001T	镍-铬	余量	8.0~	17.0~	—	≤2.0	≤1.5	≤0.08	≤3.0	6.4	230	68
F5001U		量	11.0	19.0						6.8	310	80
F5011T	镍-铬-钼	余量	10.0~	16.0~	1.8~2.5	≤2.0	≤1.5	≤0.08	≤3.0	6.4	230	68
F5011U		量	14.0	18.0						6.8	295	75

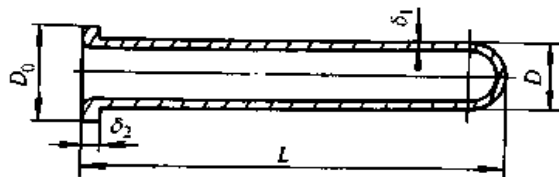
- 注：1. 产品采用镍-铬、镍-铬-钼两类不锈钢粉末通过成型和烧结而成。
 2. 烧结结构零件不同部位的密度差应不大于 0.3 g/cm³。
 3. 牌号标记说明：



5 粉末冶金多孔材料

5.1 烧结钛过滤元件 (表 14.7-10 ~ 表 14.7-17)

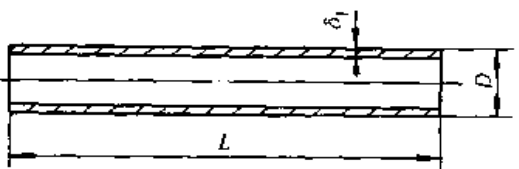
表 14.7-10 烧结钛过滤元件 (A1 型) 规格 (摘自 GB/T 6887—1986) (mm)



型 号	直 径 D		长 度 L		壁 厚 δ_1	法 兰 直 径 D_0		法 兰 厚 度 δ_2
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	
Al-50-300	50	±3	300	±5	2~3	70	±2	5~7
Al-60-350	60		350			80		
Al-90-800	90	±5	800	±10	3~5	110	±5	7~12

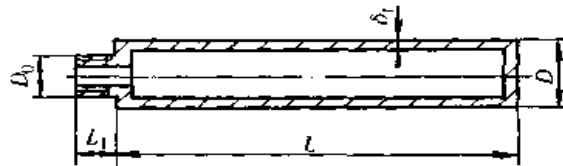
注：烧结钛过滤元件用于气体和液体的净化与分离等。

表 14.7-11 烧结钛过滤元件 (A2 型) 规格 (摘自 GB/T 6887—1986) (mm)



型 号	直 径 D		长 度 L		壁厚 δ_1
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差	
A2-20-100	20	± 2	100	± 3	1.5
A2-20-200			200		
A2-20-300			300		
A2-20-400			400		

表 14.7-12 烧结钛过滤元件 (A3 型) 规格 (摘自 GB/T 6887—1986) (mm)



型 号	直 径 D		长 度 L		壁 厚 δ_1	管 接 头	
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		螺纹尺寸 D_0	长度 L_1
A3-40-100	40	± 2	100	0 -5	0.8~1.2 2~3	M20×1.5	27
A3-50-200			50					$\pm 2$	200
A3-50-300	300						
A3-50-400	400						
A3-50-500	500						
A3-60-300	60	± 3	300	0 -5 -10			
A3-60-400			400				
A3-60-600			600				
A3-60-800			800				

注：壁厚 0.8~1.2 mm 是粉轧板卷焊管元件，壁厚 2~3 mm 是等静压管元件。

表 14.7-13 烧结钛过滤元件 (A4 型) 规格 (摘自 GB/T 6887—1986) (mm)



型 号	直 径 D		长 度 L		壁 厚 δ_1	法 兰 直 径 D_0		法 兰 厚 度 δ_2
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	
A4-90-800	90	± 5	800	± 10	3~5	110	± 5	7~12
A4-120-800	120					140		

注：管状元件分为 A1、A2、A3、A4 共 4 种型号，其型号含义：

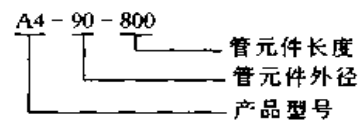
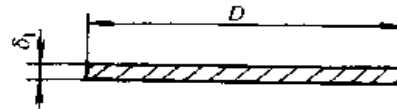


表 14.7-14 烧结钛过滤元件 (B1 型) 规格 (摘自 GB/T 6887—1986) (mm)



型 号	直 径 D		厚 度 δ_1		型 号	直 径 D		厚 度 δ_1	
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差
B1-20-1	20	± 0.5	1	± 0.1	B1-200-2	200	± 3	2	± 0.2
B1-30-1	30				B1-200-4			4	± 0.4
B1-40-1.2	40		1.2	± 0.12	B1-250-2	250		2	± 0.2
B1-50-1.2	50	B1-250-4			4		± 0.4		
B1-60-1.5	60	± 1	1.5	± 0.15	B1-300-3	300	± 5	3	± 0.3
B1-80-1.5	80				B1-300-4			4	± 0.4
B1-100-2	100	± 2	2	± 0.2	B1-350-4	350				4	$\pm 0.4$
B1-100-3			3	± 0.3	B1-400-4	400			
B1-150-2	150		2	± 0.2	B1-450-5	450	5	± 0.5	
B1-150-3		3	± 0.3						

表 14.7-15 烧结钛板材和带材规格 (摘自 GB/T 6887—1986) (mm)

	宽 度		长 度		厚 度	
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差
板	200	0 -5	200~1 000	± 5	0.7, 0.8, 0.9, 1.0	± 0.1
					1.2, 1.5, 1.7, 2.0	± 0.15
材	300	0 -10	300~1 000	± 10	1.2, 1.5, 1.7, 2.0	± 0.15
					2.5, 3.0	± 0.25
	450	0 -15	450~800	± 15	2.0, 2.5	± 0.2
					3.0, 4.0	± 0.3
带	宽 度		厚 度			
	公 称 尺 寸	允 许 偏 差	公 称 尺 寸	允 许 偏 差		
材	200	0 -5	0.8, 0.9, 1.0	± 0.1		
			1.2, 1.5	± 0.15		

表 14.7-16 烧结钛过滤元件及材料室温性能 (摘自 GB/T 6887—1986)

牌 号	开孔孔隙度 (%) \geq	气泡试验最大 孔径/ μm \geq	相对透气系数/ ($10^{-4} \cdot \text{Lcm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) \geq	渗透系数/ 10^{-12}m^2 \geq	抗拉强度/MPa \geq
F2300G-160	25	160	7	3.2	19
F2300G-100	30	100	5.5	2.2	29
F2300G-60	30	60	4	1.4	29
F2300G-30	30	30	2	0.5	39
F2300G-15	30	15	0.1	0.04	49

注：1. 渗透性是在 6 000 Pa 压力以下测定的。

2. 相对透气系数试验用试样厚度为 1~2 mm。

3. 管状元件不进行拉力试验。

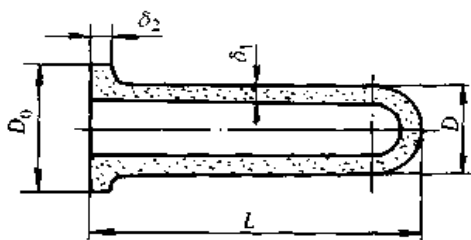
4. 元件及材料产品的化学成分，除氧允许不超过 1.0% (体积分数) 以外，其余应按 GB/T 2524—1981 海绵钛中 MHTi-4 或 NHTi-4 的规定。

表 14.7-17 烧结钛管状元件水压试验性能 (摘自 GB/T 6887—1986)

直 径/mm	壁 厚/mm	内压破坏压力/MPa \geq	直 径/mm	壁 厚/mm	内压破坏压力/MPa \geq
20	1.5	2	60	0.8~1.2	0.6
40	0.8~1.2	1	60	2~3	1
50	0.8~1.2	0.8	90	3~5	0.6
50	2~3	1	120	3~5	0.6

5.2 烧结镍过滤元件 (表 14.7-18~表 14.7-22)

表 14.7-18 烧结镍过滤元件 (Al 型) 规格 (摘自 GB/T 6888—1986) (mm)

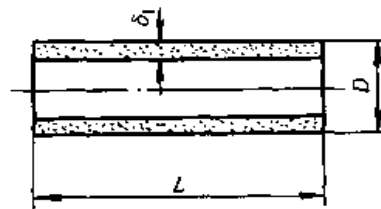


型 号	直 径 D		长 度 L		壁 厚 δ_1	法兰直径 D_0		法兰厚度 δ_2
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	
Al-6-10	6	± 1.0	10	± 1	1.0~1.5	10	± 0.1	1~2
Al-6-15			15					

续表 14.7-18

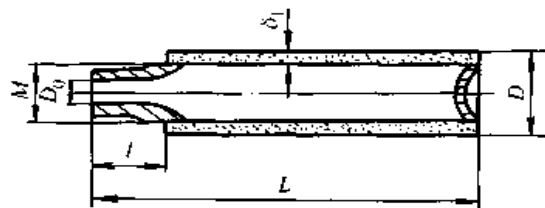
型号	直径 D		长度 L		壁厚 δ_1	法兰直径 D_n		法兰厚度 δ_2		
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差			
Al-10-20	10	± 0.5	20	± 1	1~3	15	± 0.5	1~3		
Al-10-30			30							
Al-10-40			40							
Al-10-50			50							
Al-20-30	20	± 0.5	30	± 1		1~3	28	± 0.5	1~3	
Al-20-50			50							
Al-20-100			100							± 2
Al-20-200			200							+3
Al-30-50	30	± 1.0	50	± 1		2~3	38	± 1.0	2~4	
Al-30-100			100							± 2
Al-30-200			200							± 3
Al-30-300			300							
Al-50-150	50	± 1.5	150	± 3	2~3		62	± 1.5	3~5	
Al-50-300			300							
Al-50-400			400							± 4
Al-50-500			500							

表 14.7-19 烧结镍过滤元件 (A2 型) 规格 (摘自 GB/T 6888—1986) (mm)



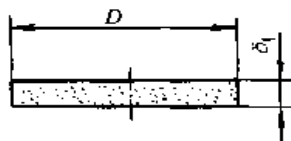
型号	直径 D		长度 L		壁厚 δ_1	型号	直径 D		长度 L		壁厚 δ_1
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差			公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差	
A2-6-10	6	± 0.1	10	± 1	1.0~	A2-20-100	20	± 0.5	100	± 2	1~3
A2-6-15			15		1.5	A2-20-200			200	± 3	
A2-10-20	10	± 0.5	20	± 1	1~3	30	± 1.0	50	± 1		
A2-10-30			30					± 2			
A2-10-40			40					± 3			
A2-10-50			50								
A2-20-30	20	± 0.5	30	± 1		2~3	50	± 1.5	150	± 2	
A2-20-50			50						300		

表 14.7-20 烧结镍过滤元件 (A3 型) 规格 (摘自 GB/T 6888—1986) (mm)



型 号	直 径 D		长 度 L		壁 厚 δ_1	螺 纹 接 头			
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		M	D_0	l	
A3-30-30	30	± 1	30	± 1	0.8~2.0	M18×1.5	13	27	
A3-30-50			50						
A3-30-100			100	± 2					
A3-30-200			200						
A3-30-300			300						
A3-40-50	40	± 1	50	± 1		M20×1.5	20		
A3-40-100			100						
A3-40-200			200	± 3					
A3-40-300			300						
A3-40-400			400						± 4
A3-50-150	50	± 1	150	± 3		M33×1.5	25		32
A3-50-300			300						
A3-50-400			400	± 4					
A3-50-500			500						

表 14.7-21 烧结镍过滤元件 (B1 型) 规格 (摘自 GB/T 6888—1986) (mm)



型 号	直 径 D		厚 度 δ_1		型 号	直 径 D		厚 度 δ_1			
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		
B1-3-0.5	3	± 0.1	0.5	± 0.1	B1-30-1	30	± 0.5	1	± 0.2		
B1-3-1			1		B1-30-2			2			
B1-3-2			2		B1-30-3			3			
B1-5-1	5	± 0.1	1		B1-50-2	50	± 1.0	2			
B1-5-2			2		B1-50-3			3			
B1-5-3			3								
B1-10-1	10	± 0.2	1		B1-80-2	80	± 1.5	2		± 0.3	
B1-10-2			2		B1-80-3			3			
B1-10-3			3		B1-100-2			2			
B1-20-1	20	± 0.5	1		B1-100-3	100	± 2.0	3			
B1-20-2			2		B1-150-2			2			± 0.4
B1-20-3			3		B1-150-3			3			
					B1-200-3	200	± 2.5				

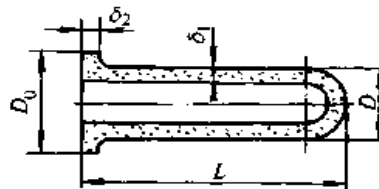
表 14.7-22 烧结镍过滤元件室温性能 (摘自 GB/T 6888—1986)

牌 号	气泡试验最大孔径/ μm	相对透气系数/ $10^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	渗透系数/ m^2 \geq	管状元件内压 破坏压力/MPa \geq	壁 厚/ mm
F2400G3	3	1.5×10^{-5}	6.88×10^{-15}	2	1.0~1.5
F2400G5	5	5.0×10^{-5}	2.29×10^{-14}		
F2400G10	10	1.0×10^{-4}	6.11×10^{-14}		
F2400G15	15	5.0×10^{-4}	3.06×10^{-13}		
F2400G30	30	1.3×10^{-3}	9.93×10^{-13}	1.5	2.0~2.5
F2400G45	45	3.0×10^{-3}	2.29×10^{-12}		
F2400G60	60	5.7×10^{-3}	4.36×10^{-12}		
F2400G70	70	8.0×10^{-3}	7.34×10^{-12}		
F2400G90	90	1.4×10^{-2}	1.28×10^{-11}	1	2.5~3.0
F2400G100	100	2.0×10^{-2}	1.83×10^{-11}		

- 注：1. 由球形粉末制取的过滤元件，其气泡试验最大孔径 d 与过滤法检测的所谓绝对过滤精度 d_1 间的关系，推荐采用经验系数： $d/d_1 \approx 2.5$ 。
2. 渗透性的测试条件：介质为空气，其粘度为 $1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ；压差为 6 kPa 以下。
3. F2400G 的化学成分应符合 GB/T 5235—1985 加工镍及镍合金中 NY2 的规定。

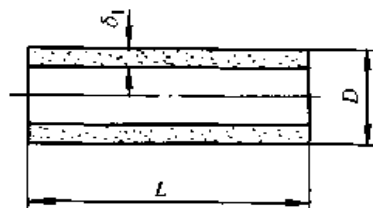
5.3 烧结镍铜合金过滤元件 (表 14.7-23~表 14.7-26)

表 14.7-23 烧结镍铜合金过滤元件 (A1 型) 规格 (摘自 GB/T 6889—1986) (mm)



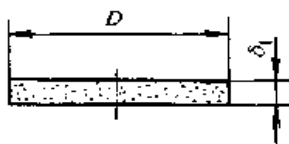
型 号	直 径 D		长 度 L		壁 厚 δ_1	法兰直径 D_0		法兰厚度 δ_2
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	
A1-6-10	6	± 0.1	10	± 1	1.0~1.5	10	± 0.1	1~2
A1-6-15			15					
A1-10-20			20					
A1-10-30	10	± 0.5	30	± 1	1~3	15	± 0.5	1~3
A1-10-40			40					
A1-10-50			50					
A1-20-30			30					
A1-20-50	20	± 0.5	50	± 2	1~3	28	± 0.5	1~3
A1-20-100			100					
A1-20-200			200					
A1-30-50	30	± 1.0	50	± 1	1~3	38	± 1.0	2~4
A1-30-100			100					
A1-30-200			200					
A1-30-300			300					
A1-50-150	50	± 1.5	150	± 3	2~3	62	± 1.5	3~5
A1-50-300			300					
A1-50-400			400					
A1-50-500			500					

表 14.7-24 烧结镍铜合金过滤元件 (A2 型) 规格 (摘自 GB/T 6889—1986) (mm)



型 号	直 径 D		长 度 L		壁厚 δ_1	型 号	直 径 D		长 度 L		壁厚 δ_1	
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差			公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		
A2-6-10	6	± 0.1	10	± 1	1.0~1.5	A2-20-100	20	± 0.5	100	± 2	1~3	
A2-6-15			15			200			± 3			
A2-10-20	10	± 0.5	20	± 1	1~3	A2-30-50	30	± 1.0	50	± 1		
A2-10-30			30			100			± 2			
A2-10-40			40			200			± 3			
A2-10-50			50									
A2-20-30	20	± 0.5	30	± 1	1~3	A2-50-150	50	± 1.5	150	± 3		2~3
A2-20-50			50			300						

表 14.7-25 烧结镍铜合金过滤元件 (B1 型) 规格 (摘自 GB/T 6889—1986) (mm)



型 号	直 径 D		厚 度 δ_1		型 号	直 径 D		厚 度 δ_1	
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差
B1-3-0.5	3	± 0.1	0.5	± 0.1	B1-30-1	30	± 0.5	1	± 0.2
B1-3-1			1		B1-30-2			2	
B1-3-2			2		B1-30-3			3	
B1-5-1	5	± 0.1	1	± 0.1	B1-50-2	50	± 1.0	2	± 0.3
B1-5-2			2		B1-50-3			3	
B1-5-3			3		B1-80-2			2	
B1-10-1	10	± 0.2	1	± 0.1	B1-80-3	80	± 1.5	3	± 0.3
B1-10-2			2		B1-100-2			2	
B1-10-3			3		B1-100-3			3	
B1-20-1	20	± 0.5	1	± 0.1	B1-150-2	150	± 2.0	2	± 0.4
B1-20-2			2		B1-150-3			3	
B1-20-3			3		B1-200-3			3	

表 14.7-26 烧结镍铜合金过滤元件室温性能 (摘自 GB/T 6889—1986)

牌 号	气泡试验 最大孔径/ μm	相对透气系数/ $10^{-1} \cdot L \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ≥	渗透系数/ m^2 ≥	管状元件内压 破坏压力/MPa ≥	壁 厚/ mm
F2401G3	3	1.5×10^{-5}	6.88×10^{-15}	2.5	1.0~1.5
F2401G5	5	5.0×10^{-5}	2.29×10^{-14}		
F2401G10	10	1.0×10^{-4}	6.11×10^{-14}		1.5~2.0
F2401G15	15	5.0×10^{-4}	3.06×10^{-13}		
F2401G30	30	1.6×10^{-3}	1.22×10^{-12}	2	2.0~2.5
F2401G45	45	3.0×10^{-3}	2.29×10^{-12}		
F2401G60	60	6.0×10^{-3}	4.58×10^{-12}		
F2401G70	70	8.0×10^{-3}	7.34×10^{-12}	1.5	2.5~3.0
F2401G90	90	1.4×10^{-2}	1.28×10^{-11}		
F2401G100	100	2.0×10^{-2}	1.83×10^{-11}		

注：1. 由球形粉末制取的过滤元件，其气泡试验最大孔径 d 与过滤法检测的所谓绝对过滤精度 d_1 间关系，推荐采用经验系数： $d/d_1 \approx 2.5$ 。

2. 渗透性的测试条件：介质为空气，其黏度为 $1.83 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ ；压差为 6 kPa 以下。

3. F2401G 化学成分应符合 GB/T 5235—1985 加工镍及镍合金中 NiCu28-2.5-1.5 的规定。

5.4 烧结锡青铜过滤元件 (表 14.7-27、表 14.7-28)

表 14.7-27 烧结锡青铜过滤元件牌号及性能 (摘自 JB/T 8395—1996)

材料牌号	允 许 范 围					推 荐 值	
	密 度/ $g \cdot cm^{-3}$	过滤精度/ μm	气泡试验 最大孔径/ μm	渗透性/ pm^2	抗剪强度/ MPa	渗透性/ pm^2	抗剪强度/ MPa
FQG200	5.0~6.5	≤200	≤571	≥210	≥20	≥250	≥30
FQG150	5.0~6.5	≤150	≤428	≥160	≥30	≥200	≥40
FQG100	5.0~6.5	≤100	≤285	≥110	≥40	≥140	≥60
FQG080	5.0~6.5	≤080	≤228	≥70	≥55	≥90	≥80
FQG060	5.0~6.5	≤060	≤171	≥45	≥65	≥60	≥90
FQG045	5.0~6.5	≤045	≤128	≥25	≥75	≥40	≥90
FQG020	5.0~6.5	≤020	≤57	≥6	≥85	≥10	≥110
FQG008	5.0~6.5	≤008	≤22	≥1.2	≥95	≥2	≥130

注：1. 产品为锡青铜球形粉末松装烧结制造的过滤元件及消音元件。

2. 元件的几何尺寸精度按图样要求。

3. 表中推荐值为 DIN30910 (2) 典型值，不作为法定保证值，可推荐为我国优等品指标。

4. 牌号标记说明：

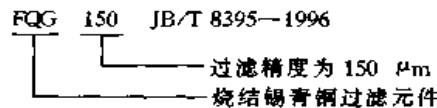


表 14.7-28 锡青铜球形粉末的化学成分 (质量分数) (摘自 JB/T 8395—1996) (%)

成分代号	铜	锡	锌	其他
A Cu/Sn 90/10	余量	9~11	—	<2.0
B Cu/Sn/Zn 89/8/3	余量	7~9	2~4	<2.0

注：成分 B 为我国目前常用材料配方。

第 8 章 有色金属及其合金

1 铝及铝合金

1.1 变形铝及铝合金

1.1.1 变形铝及铝合金牌号 (表 14.8-1)

表 14.8-1 变形铝及铝合金牌号 (摘自 GB/T 3190—1996)

新牌号 (GB/T 3190—1996)	旧牌号 (GB/T 3190—1982)	新牌号 (GB/T 3190—1996)	旧牌号 (GB/T 3190—1982)	新牌号 (GB/T 3190—1996)	旧牌号 (GB/T 3190—1982)
1A99	原 LG5	2B12	原 LY9	3003	
1A97	原 LG4	2A13	原 LY13	3103	
1A95		2A14	原 LD10	3004	
1A93	原 LG3	2A16	原 LY16	3005	
1A90	原 LG2	2B16	曾用 LY16-1	3105	
1A85	原 LG1	2A17	原 LY17	4A01	原 LT1
1 080		2A20	曾用 LY20	4A11	原 LD11
1 080A		2A21	曾用 214	4A13	原 LT13
1 070		2A25	曾用 225	4A17	原 LT17
1 070A	代 L1	2A49	曾用 149	4004	
1 370		2A50	原 LD5	4032	
1 060	代 L2	2B50	原 LD6	4043	
1 050		2A70	原 LD7	4043A	
1 050A	代 L3	2B70	曾用 LD7-1	4047	
1A50	原 LB2	2A80	原 LD8	4047A	
1 350		2A90	原 LD9	5A01	曾用 2101, LF15
1 145		2 004		5A02	原 LF2
1 035	代 L4	2 011		5A03	原 LF3
1A30	原 L4-1	2 014		5A05	原 LF5
1 100	代 L5-1	2 014A		5B05	原 LF10
1 200	代 L5	2 214		5A06	原 LF6
1 235		2017		5B06	原 LF14
2A01	原 LY1	2 017A		5A12	原 LF12
2A02	原 LY2	2 117		5A13	原 LF13
2A04	原 LY4	2 218		5A30	曾用 2 103, LF16
2A06	原 LY6	2 618		5A33	原 LF33
2A10	原 LY10	2 219	曾用 LY19, 147	5A41	原 LT41
2A11	原 LY11	2 024		5A43	原 LF43
2B11	原 LY8	2 124		5A66	原 LT66
2A12	原 LY12	3A21	原 LF21	5 005	

续表 14.8-1

新牌号 (GB/T 3190—1996)	旧牌号 (GB/T 3190—1982)	新牌号 (GB/T 3190—1996)	旧牌号 (GB/T 3190—1982)	新牌号 (GB/T 3190—1996)	旧牌号 (GB/T 3190—1982)
5 019		6B02	原 LD2-1	7A09	原 LC9
5 050		6A51	曾用 651	7A10	原 LC10
5 251		6101		7A15	曾用 LC15、157
5 052		6101A		7A19	曾用 919、LC19
5 154		6005		7A31	曾用 183-1
5 154A		6005A		7A33	曾用 LB733
5 454		6351		7A52	曾用 LCS2、S210
5 554		6060		7 003	原 LC12
5 754		6061	原 LD30	7005	
5 056	原 LF5-1	6063	原 LD31	7020	
5 356		6063A		7022	
5 456		6070	原 LD2-2	7050	
5 082		6181		7075	
5 182		6082		7475	
5 083	原 LF4	7A01	原 LB1	8A06	原 L6
5 183		7A03	原 LC3	8011	曾用 LT98
5 086		7A04	原 LC4	8090	
6A02	原 LD2	7A05	曾用 705		

注：1. 本表新牌号为 GB/T 3190—1996 “变形铝及铝合金牌号及化学成分” 所规定的牌号；各牌号的化学成分参见 GB/T 3190—1996。

2. 本表中的“原”是指化学成分与新牌号等同，且都符合 GB 3190—1982 规定的旧牌号；“代”是指与新牌号的化学成分相近似，且符合 GB/T 3190—1982 规定的旧牌号；“曾用”是指已经鉴定，在国内工业生产中曾经用过的牌号，但没有收入 GB/T 3190—1982 中。

1.1.2 变形铝及铝合金特性及应用 (表 14.8-2)

表 14.8-2 铝及铝合金加工产品特性及应用

类别	新牌号	旧牌号	特 性	应 用 举 例	产品种类
工业用 高纯铝	1A85、1A90 1A93、1A97 1A99	LG1、LG2、 LG3、LG4 LG5	工业高纯铝，相当于原苏联 牌号 AB2、AB1、AB0、AB00、 AB000	主要用于生产各种电解电 容器用箔材、抗酸容器等。 产品有板、带、箔、管等	板、带、 箔、管
工业用 纯 铝	1 060、1 050A、 1 035、8A06	L2、L3 L4、L6	工业纯铝都具有塑性高、耐 蚀、导电性和导热性好的特点。 但强度低，不能通过热处理强 化，切削性不好，可接受接触 焊、气焊	多利用其优点制造一些具 有特定性能的结构件，如铝 箔制成垫片及电容器、电子 管隔离网、电线、电缆的防 护套、网、线芯及飞机通风 系统零件及装饰件	板、箔、 管、线、 棒
	1A30	L4-1	特性与上类似，但其 Fe 和 Si 杂质含量控制严格，工艺及热 处理条件特殊	主要用于航天工业和兵器 工业纯铝膜片等处的板材	板、带、 箔、
	1100	L5-1	强度较低，但延展性、成型 性、焊接性和耐蚀性优良	主要生产板材、带材，适 于制作各种深冲压制品	板、带

续表 14.8-2

类别	新牌号	旧牌号	特 性	应 用 举 例	产品种类
包覆铝	7A01 1A50	LB1 LB2	是硬铝合金和超硬铝合金的包铝板合金	7A01用于超硬铝合金板材包覆, 1A50用于硬铝合金板材包覆	包覆板
防 锈 铝	5A02	LF2	为铝镁系防锈铝, 强度、塑性、耐蚀性高, 具有较高的抗疲劳强度、热处理不可强化, 可用接触焊、氢原子焊, 焊接性、良好冷作硬化态下可切削加工, 退火态下切削性不良, 可抛光	油介质中工作的结构件及导管、中等载荷的零件装饰件、焊条、铆钉等	板、箔、管、棒、型、线、锻件
	5A03	LF3	铝镁系防锈铝性能与5A02相似, 但焊接性优于5A02, 可气焊、氩弧焊、点焊、滚焊	液体介质中工作的中等负载零件、焊件、冷冲件	板、棒、型、管
	5A05	LF5	铝镁系防锈铝, 抗腐蚀性高, 强度与5A03类似, 不能热处理强化, 退火状态塑性好, 半冷作硬化状态可进行切削加工, 可进行氢原子焊、点焊、气焊、氩弧焊	5A05多用于在液体环境中工作的零件, 如管道、容器等, 5B05多用作连接铝合金、镁合金的铆钉、铆钉应退火并进行阳极化处理	板、棒、管 线材
	5B05	LF10			
	5A06	LF6	铝镁系防锈铝, 强度较高, 耐腐性较高, 退火及挤压状态下塑性良好, 切削性良好, 可氩弧焊、气焊、点焊	焊接容器, 受力零件, 航空工业的骨架及零件、飞机蒙皮	板、棒、管、型、锻件、模锻
	5A12	LF12	镁含量高, 强度较好, 挤压状态塑性尚可	多用航天工业及无线电工业用各种板材、棒材及型材	厚板、型、棒
	5B06、5A13、 5A33	LF14、 LF13、 LF33	镁含量高, 且加入适量的Ti、Be、Zr等元素, 使合金焊接性较高	多用于制造各种焊条的合金	线、棒
	5A43	LF43	系铝、镁、锰合金, 成本低, 塑性好	多用于民用制品, 如铝制餐具、用具	板
	3A21	LF21	铝锰系合金, 强度低, 退火状态塑性高, 冷作硬化状态塑性低耐蚀性好, 焊接性较好, 不可热处理强化, 是一种应用最为广泛的防锈铝	用在液体或气体介质中工作的低载荷零件, 如油箱、导管及各种异形容器	板、带、箔
	5083、 5056	LF4、 LF5-1	铝镁系高镁合金, 由美国5083和5056合金成型引进, 在不可热处理合金中具有强度良好、耐蚀性、切削性良好, 阳极化处理外观美丽, 且电焊性好	广泛用于船舶、汽车、飞机、导弹等方面, 民用多用来生产自行车、挡泥板, 5056也制成管件制车架等结构件	板、带、管

续表 14.8-2

类别	新牌号	旧牌号	特 性	应用 举 例	产品种类
硬 铝	2A01	LY1	强度低, 塑性高, 耐蚀性低, 点焊焊接良好, 切削性尚可, 工艺性能良好, 在制作铆钉时应先进行阳极氧化处理	是主要的铆接材料, 用来制造工作温度小于100℃的中等强度的结构用铆钉	线材
	2A02	LY2	具有高强度, 及较高的热强性可热处理强化, 耐蚀性尚可, 有应力腐蚀破坏倾向, 切削性较好, 多在人工时效状态下使用	是一种主要承载结构材料及高温(200~300℃)工作条件下的叶轮及锻件	棒、带、 冲压 叶片
	2A04	LY4	抗剪强度和耐热性较高, 在退火及刚淬火(4~6h内)塑性良好, 淬火及冷作硬化后切削性尚好, 耐蚀性不良, 需进行阳极氧化, 是一种主要铆钉合金	用于制造125~250℃工作条件下的铆钉	线材
	2B11 2B12	LY8 LY9	抗剪强度中等, 退火及刚淬火状态下塑性尚好, 可热处理强化, 抗剪强度较高, 其他性能与2B11类似	用作中等强度铆钉, 但必须在淬火后2h内使用, 用作高强度铆钉制造, 必须在淬火后20分钟内使用	线材
	2A10	LY10	抗剪强度较高, 焊接性一般, 用气焊、氩弧焊有裂纹倾向, 但点焊焊接性良好, 耐蚀性与2A01、2A11相似, 用作铆钉不受热处理后的时间限制, 是其优越之处, 但需要阳极氧化处理, 并用重铬酸钾填充	用作工作温度低于100℃的要求较高强度的铆钉, 可替代2A01、2B12、2A11、2A12等合金	线材
	2A11	LY11	一般称为标准硬铝, 中等强度, 点焊焊接性良好, 以其作焊料进行气焊及氩弧焊时有裂纹倾向, 可热处理强化, 在淬火和自然时效状态下使用, 耐蚀性不高, 多采用包铝、阳极化和涂漆以作表面防护, 退火态切削性不好, 淬火时尚好	用作中等强度的零件, 空气螺旋桨叶片, 螺栓铆钉等, 用作铆钉应在淬火后2h内使用	板、棒、 管、型、 锻件
	2A12	LY12	高强度硬铝, 点焊焊接性良好, 氩弧焊及气焊有裂纹倾向, 退火状态切削性尚可, 可热处理强化, 耐蚀性差, 常用包铝, 阳极氧化及涂漆提高耐蚀性	用来制造高负荷零件, 其工作温度在150℃以下的飞机骨架、框隔、翼梁、翼肋、蒙皮等	板、棒、 管、型、 箔、线
	2A06	LY6	高强度硬铝, 点焊焊接性与2A12相似, 氩弧焊较2A12好, 耐蚀性与2A12相同, 加热至250℃以下其晶间腐蚀倾向较2A12小, 可进行淬火和时效处理, 其压力加工、切削性与2A12相同	可作为150~250℃工作条件下的结构板材, 但对于淬火自然时效后冷作硬化的板材, 不宜在高温长期加热条件下使用	板材

续表 14.8-2

类别	新牌号	旧牌号	特 性	应 用 举 例	产品种类
硬 铝	2A16	LY16	属耐热硬铝, 即在高温下有较高的蠕变强度, 合金在热态下有较高的塑性, 无挤压效应, 切削性良好, 可热处理强化, 焊接性能良好, 可进行点焊、滚焊和氩弧焊, 但焊缝腐蚀稳定性较差, 为防腐, 应采用阳极氧化处理	用于在高温下 (250 ~ 350℃) 工作的零件, 如压缩机叶片圆盘及焊接件, 如容器	板、棒、型、锻件
	2A17	LY17	成分与性能和 2A16 相近, 但 2A17 在常温和 225℃ 下的持久强度超过 2A16, 但在 225 ~ 300℃ 时低于 2A16, 且 2A17 不可焊接	用于 20 ~ 300℃ 要求有高强度的锻件和冲压件	板、棒、锻件
锻 铝	6A02	LD2	具有中等强度, 退火和热态下有高的可塑性, 淬火自然时效后塑性尚好, 且这种状态下的耐蚀性可与 5A02、3A21 相比, 人工时效状态合金具有晶间腐蚀倾向, 可切削性淬火后尚好, 退火后不好, 合金可点焊、氩原子焊、气焊尚好	制造承受中等载荷、要求有高塑性和高耐蚀性, 且形状复杂的锻件和模锻件, 如发动机曲轴箱、直升飞机桨叶	板、棒、管、型、锻件
	6B02	LD2-1	系 Al-Mg-Si 系合金, 与 6A02 相比其晶间腐蚀倾向要小	多用于电子工业装箱板及各种壳体等	板、带
	6070	LD2-2	系 Al-Mg-Si 系合金, 是由美国的 6 070 合金转化而来, 其耐蚀性很好, 焊接性能良好	可用于制造大型焊接结构件及高级跳水板等	板、型材
	2A50	LD5	热态下塑性较高, 易于锻造、冲压。强度较高, 在淬火及人工时效时与硬铝相近, 工艺性能较好, 但有挤压效应, 因此纵横向性能差别较大, 耐蚀性较好, 但有晶间腐蚀倾向, 切削性良好, 接触焊、滚焊良好, 但电弧焊、气焊性能不佳	用于制造要求中等强度, 且形状复杂的锻件和冲击件	棒、锻件
	2B50	LD6	性能, 成分与 2A50 相近, 可互换通用, 但热态下其可塑性优于 2A50	制造形状复杂的锻件	锻件

续表 14.8-2

类别	新牌号	旧牌号	特 性	应 用 举 例	产品种类
锻 铝	2A70	LD7	热态下具有高的可塑性, 无挤压效应, 可热处理强化, 成分与 2A80 相近, 但组织较 2A80 要细, 热强性及工艺性能比 2A80 稍好, 属耐热锻铝, 其耐蚀性、可切削性尚好, 接触焊、滚焊性能良好, 电弧焊及气焊性能不佳	用于制造高温环境下工作的锻件, 如内燃机活塞及一些复杂件如叶轮、板材可用制造高温下的焊接冲压结构件	板、棒、锻件、模锻件
	2A80	LD8	热态下可塑性较低, 可进行热处理强化, 高温强度高, 属耐热锻铝, 无挤压效应, 焊接性与 2A70 相同, 耐蚀性、可切削性尚好, 有应力腐蚀倾向	用途与 2A70 相近	棒、锻件、模锻件
	2A90	LD9	有较好的热强性, 热态下可塑性尚好, 可热处理强化, 耐蚀性、焊接性和切削性与 2A70 相近, 是一种较早应用的耐热锻铝	用途与 2A70、2A80 相近, 且逐渐被 2A70、2A80 所代替	棒、锻件、模锻件
	2A14	LD10	与 2A50 相比, 含铜量较高, 因此强度较高, 热强性较好, 热态下可塑性尚好, 可切削性良好, 接触焊、滚焊性能良好, 电弧焊和气焊性能不佳, 耐蚀性不高, 人工时效状态时有晶间腐蚀倾向, 可热处理强化, 有挤压效应, 因此纵横向性能有所差别	用于制造承受高载荷和形状简单的锻件	棒、锻件、模锻件
	4A11	LD11	属 Al-Cu-Mg-Si 系合金, 是由前苏联 AK9 合金转化而来, 可锻、可铸, 热强性好, 热膨胀系数小, 抗磨性能好	主要用于制造蒸汽机活塞及汽缸材料	棒、锻件
	6061 6063	LD30 LD31	属 Al-Mg-Si 系合金, 相当美国的 6061 和 6063 合金, 具有中等的强度, 其焊接性优良, 耐蚀性及冷加工性好, 是一种使用范围广, 很有前途的合金	广泛应用于建筑业门窗、台架等结构件及医疗办公、车辆、船舶、机械等方面	型、板、带、管

续表 14.8-2

类别	新牌号	旧牌号	特 性	应 用 举 例	产品种类
超 硬 铝	7A03	LC3	铆钉合金, 淬火人工时效状态可以铆接, 可热处理强化, 抗剪强度较高, 耐腐蚀性和可切削性能尚好, 铆钉铆接时, 不受热处理后时间限制	用作承力结构铆钉, 工作温度在 125℃ 以下, 可作 2A10 铆钉合金代用品	线材
	7A04	LC4	系高强度合金, 在刚淬火及退火状态下塑性尚可, 可热处理强化, 通常在淬火人工时效状态下使用, 这时得到的强度较一般硬铝高很多, 但塑性较低, 合金点焊焊接性良好, 气焊不良, 热处理后可切削性良好, 但退火后的可切削性不佳	用于制造主要承力结构件, 如飞机上的大梁、桁条、加强框、蒙皮、翼肋、接头、起落架等	板、棒、管、型、锻件
	7A09	LC9	属高强度铝合金, 在退火和刚淬火状态下的塑性稍低于同样状态的 2A12, 稍优于 7A04, 板材的静疲劳、缺口敏感, 应力腐蚀性能优于 7A04	制造飞机蒙皮等结构件和主要受力零件	板、棒、管、型
	7A10	LC10	是 Al-Cu-Mg-Zn 系合金	主要生产板材、管材和锻件等, 用于纺织工业及防弹材料	板、管、锻件
	7 003	LC12	属于 Al-Cu-Mg-Zn 系合金, 由日本的 7 003 合金转化而来, 综合力学性能较好, 耐腐蚀性好	主要用来制作型材、生产自行车的车圈	型材
特 殊 铝	4A01	LT1	属铝硅合金, 抗蚀性高, 压力加工性良好, 但机械强度差	多用于制作焊条、焊棒	线材
	4A13 4A17	LT13 LT17	是 Al-Si 系合金	主要用于钎接板、带材的包覆板, 或直接生产板、带、箔和焊线等	板、带、箔、焊线
	5A41	LT41	特殊的高镁合金, 其抗冲击性强	多用于制作飞机座仓防弹板	板
	5A66	LT66	高纯铝镁合金, 相当于 5A02 其杂质含量要求严格控制	多用于生产高级饰品, 如笔套、标牌等	板、带

注: 本表新牌号系 GB/T 3190—1996 变形铝及铝合金牌号; 旧牌号系 GB/T 3190—1982 规定的牌号。

1.2 铸造铝合金 (表 14.8-3~表 14.8-7)

表 14.8-3 铸造铝合金力学性能 (摘自 GB/T1173—1995)

合金 牌号	合金 代号	铸造 方法	合金 状态	抗拉	伸长	布氏	合金 牌号	合金 代号	铸造 方法	合金 状态	抗拉	伸长	布氏
				强度 σ_b /MPa	率 δ_5 (%)	硬度 HBS					强度 σ_b /MPa	率 δ_5 (%)	硬度 HBS
ZAlSi7Mg	ZL101	S,R,J,K	F	155	2	50	ZAlSi7Cu4	ZL107	SB	F	165	2	65
		S,R,J,K	T2	135	2	45			SB	T6	245	2	90
		JB	T4	185	4	50			J	F	195	2	70
		S,R,K	T4	175	4	50			J	T6	275	2.5	100
		J,JB	T5	205	2	60	ZAlSi2Cu2Mg1	ZL108	J	T1	195	—	85
		S,R,K	T5	195	2	60			J	T6	255	—	90
		SB, RB, KB	T5	195	2	60	ZAlSi2Cu1Mg1Ni1	ZL109	J	T1	195	0.5	90
		SB, RB, KB	T6	225	1	70			J	T6	245	—	100
		SB, RB, KB	T7	195	2	60							
		SB, RB, KB	T8	155	3	55							
ZAlSi7MgA	ZL101A	S,R,K	T4	195	5	60	ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	S	F	125	—	80
		J,JB	T4	225	5	60			J	F	155	—	80
		S,R,K	T5	235	4	70			S	T1	145	—	80
		SB, RB, KB	T5	235	4	70			J	T1	165	—	90
		JB, J	T5	265	4	70	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	J	F	205	1.5	80
		SB, RB, KB	T6	275	2	80			SB	T6	255	1.5	90
ZAlSi12	ZL102	JB, J	T6	295	3	80	J, JB	T6	315	2	100		
		SB, JB, RB, KB	F	145	4	50	ZAlSi7Mg1A	ZL114A	SB	T5	290	2	85
		J	F	155	2	50			J, JB	T5	310	3	90
		SB, JB, RB, KB	T2	135	4	50							
J	T2	145	3	50									
ZAlSi9Mg	ZL104	S, J, R, K	F	145	2	50	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	S	T4	225	4	70
		J	T1	195	1.5	65			J	T4	275	6	80
		SB, RB, KB	T6	225	2	70			S	T5	275	3.5	90
		J, JB	T6	235	2	70			J	T5	315	5	100
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	S, J, R, K	T1	155	0.5	65	ZAlSi8MgBe	ZL116	S	T4	255	4	70
		S, R, K	T5	195	1	70			J	T4	275	6	80
		J	T5	235	0.5	70			S	T5	295	2	85
		S, R, K	T6	225	0.5	70			J	T5	335	4	90
		S, J, R, K	T7	175	1	65							
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	SB, R, K	T5	275	1	80	ZAlCu5Mn	ZL201	S, J, R, K	T4	295	8	70
		J, JB	T5	295	2	80			S, J, R, K	T5	335	4	90
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	SB	F	175	1	70	S	T7	315	2	80		
		JB	T1	195	1.5	70	ZAlCu5MnA	ZL201A	S, J, R, K	T5	390	8	100
		SB	T5	235	2	60							
		JB	T5	255	2	70	ZAlCu4	ZL203	S, R, K	T4	195	6	60
		SB	T6	245	1	80			J	T4	205	6	60
		JB	T6	265	2	70			S, R, K	T5	215	3	70
		SB	T7	225	2	60			J	T5	225	3	70
		J	T7	245	2	60	ZAlCu5MnCdA	ZL204A	S	T5	440	4	100

续表 14.8-3

合金 牌号	合金 代号	铸造 方法	合金 状态	抗拉 强度 σ_b /MPa	伸长 率 δ_5 (%)	布氏 硬度 HBS	合金 牌号	合金 代号	铸造 方法	合金 状态	抗拉 强度 σ_b /MPa	伸长 率 δ_5 (%)	布氏 硬度 HBS
				\geq							\geq		
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	S	T5	440	7	100	ZAlMg5Si1	ZL303	S,J,R,K	F	145	1	55
		S	T6	470	3	120	ZAlMg8Zn1	ZL305	S	T4	290	8	90
		S	T7	460	2	110							
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	S	T1	165	—	75	ZAlZn11Si7	ZL401	S,R,K	T1	195	2	80
		J	T1	175	—	75			J	T1	245	1.5	90
ZAlMg10	ZL301	S,J,R	T4	280	10	60	ZAlZn6Mg	ZL402	J	T1	235	4	70
									S	T1	215	4	65

注：铸造方法代号：S—砂型铸造；J—金属型铸造；R—熔模铸造；K—壳型铸造；B—变质处理；

合金状态代号：F—铸态；T1—人工时效；T2—退火；T4—固溶处理加自然时效；T5—固溶处理加不完全人工时效；T6—固溶处理加稳定化处理；T8—固溶处理加软化处理。

表 14.8-4 铸造铝合金高温力学性能

合金 代号	铸造方法 及热处理 种类	高温短时强度/MPa						持久强度/MPa (100 h)			蠕变强度/MPa (300℃, 100 h)	
		100℃	150℃	175℃	200℃	250℃	300℃	200℃	250℃	300℃	总变形	残余变形
ZL101	S, T4	180	160	—	160	150	—	—	—	—	—	—
	S, T5	—	—	—	140	110	90	60	45	28	—	12
ZL102	S, T2	—	—	—	150	130	80	70	40	28	—	12
ZL104	S, T6	220	190	180	160	110	100	80	50	25	10	—
ZL105	S, T5	260	250	—	220	180	130	80	46	24	15	—
	S, T6	—	—	—	180	150	110	90	60	35	—	24
ZL201	S, T4	—	—	270	270	180	140	—	110	65	40	—
	S, T5	—	—	280	280	200	150	150	115	65	40	—
ZL203	S, T4	250	240	—	210	150	—	—	—	—	—	—
ZL301	S, T4	—	—	—	220	150	90	80	40	15	—	10
ZL401	S, T1	170	—	—	120	—	40	—	50	35	—	—

注：本表数值供参考用。

表 14.8-5 铸造铝合金低温力学性能

合金代号	状 态	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率 (%)	冲击初度/ $J \cdot cm^{-2}$
ZL101	T5	-70	189	133	3.7	4.0
		-196	223	157	2.8	3.6
	T6	-70	231	215	1.3	2.4
		-196	257	231	0.9	2.3

续表 14.8-5

合金代号	状 态	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率 (%)	冲击韧度/ $J \cdot cm^{-2}$
ZL102	铸态	-40	190	—	9	6.0
		-70	200	—	8	5.0
ZL104	T6	-40	280	—	3.5	2.5
		-70	290	—	2.8	2.5
		-196	330	—	2.5	2.5
ZL201	T4	-40	280	—	6.5	—
		-70	280	—	6.5	—
ZL301	T4	-70	298	212	7.7	7.0
		-196	247	233	1.2	2.3
ZL402	自然时效	-70	270	—	5	—

注：本表数值供参考用。

表 14.8-6 铸造铝合金热处理工艺规范 (摘自 GB/T 1173—1995)

合金牌号	合金代号	合金状态	固溶处理		时 效	
			温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/h
ZAlSi7MgA	ZL101A	T4	535 ± 5	6~12	室温 再 155 ± 5	不少于 8 2~12
		T5	535 ± 5	6~12		
		T6	535 ± 5	6~12			室温 再 180 ± 5	不少于 8 3~8
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	T5	525 ± 5	4~12	160 ± 5	3~5
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	T5	535 ± 5	10~14	室温 再 160 ± 5	不少于 8 4~8
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	T4	540 ± 5	10~12	150 ± 5	3~5
		T5	540 ± 5	10~12		
ZAlSi8MgBe	ZL116	T4	535 ± 5	10~14	175 ± 5	6
		T5	535 ± 5	10~14		
ZAlCu5MnA	ZL201A	T5	535 ± 5	7~9	160 ± 5	6~9
再 545 ± 5	7~9					
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	T5	530 ± 5	9	175 ± 5	3~5
再 540 ± 5	9					
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	T5	538 ± 5	10~18	155 ± 5	8~10
		T6	538 ± 5	10~18	175 ± 5	4~5
		T7	538 ± 5	10~18	190 ± 5	2~4
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	T1			200 ± 5	5~10
ZAlMg8Zn1	ZL305	T4	435 ± 5	8~10		
			再 490 ± 5	6~8		

注：1. 本表为 GB/T 1173—1995 标准附录。

2. 固溶处理时，装炉温度一般在 300℃ 以下，升至固溶温度的升温速度以 100℃/h 为宜。

表 14.8-7 铸造铝合金的特性及应用

组别	合金代号	铸造方法	主要特性	用途举例
铝 硅 合 金	ZL101	砂型、金属型、壳型和熔模铸造	系铝硅镁系列三元合金，特别是：①铸造性能良好，其流动性高，无热裂倾向、线收缩小、气密性高，但稍有产生集中缩孔和气孔的倾向；②有相当高的耐蚀性，在这方面与 ZL102 相近；③可经热处理强化，同时合金淬火后有自然时效能力，因而具有较高的强度和塑性；④易于焊接，可切削加工性中等；⑤耐热性不高；⑥铸件可经变质处理或不经变质处理	适于铸造形状复杂、承受中等载荷的零件，也可用于要求高的气密性、耐蚀性和焊接性能良好的零件，但工作温度不得超过 200℃，如水泵及传动装置壳体、水冷发动机汽缸体、抽水机壳体、仪表外壳、汽化器等
	ZL101A		成分、性能和 ZL101 基本相同，但其杂质含量低，且加入少量 Ti 以细化晶粒，故其力学性能比 ZL101 有较大程度的提高	同上，主要用于铸造高强度铝合金铸件
	ZL102	砂型、金属型、壳型和熔模铸造	系典型的铝硅二元合金，是应用最早的一种普通硅铝明合金，其特性是：①铸造性能和 ZL101 一样好，但在铸件的断面厚大处容易产生集中缩孔，吸气倾向也较大；②耐蚀性高，能经受得住湿的大气、海水、二氧化碳、浓硝酸、氨、硫、过氧化氢的腐蚀作用；③不能热处理强化，力学性能不高，但随铸件壁厚增加，强度降低的程度小；④焊接性能良好，但可切削性差，耐热性不高；⑤需经变质处理	常在铸态或退火状态下使用，适于铸造形状复杂、承受较低载荷的薄壁铸件，以及要求耐腐蚀和气密性高、工作温度 ≤ 200℃ 的零件，如仪表壳体、机器罩、盖子、船舶零件等
	ZL104	砂型、金属型、壳型和熔模铸造	系铝硅镁锰系列四元合金，特性是：①铸造性能良好，流动性高、无热裂倾向、气密性良好、线收缩小，但吸气倾向大，易于形成针孔；②可经热处理强化，室温力学性能良好，但高温性能较差（只能在 ≤ 200℃ 下使用）；③耐蚀性能好（类似于 ZL102，但较 ZL102 低）；④可切削加工性和焊接性一般；⑤铸件需经变质处理	适于铸造形状复杂、薄壁、耐腐蚀和承受较高静载荷和冲击载荷的大型铸件，如水冷式发动机的曲轴箱、滑块和汽缸盖、汽缸体以及其他重要零件，但不宜用于工作温度超过 200℃ 的场所
	ZL105	砂型、金属型、壳型和熔模铸造	系铝硅铜镁系列四元合金，特性是：①铸造性能良好，流动性高、收缩率较低、吸气倾向小、气密性良好、热裂倾向小；②熔炼工艺简单，不需采用变质处理和压力下结晶等工艺措施；③可热处理强化，室温强度较高，但塑性、韧性较低；④高温力学性能良好；⑤焊接性和可切削加工性良好；⑥耐蚀性尚可	适于铸造形状复杂、承受较高静载荷的零件，以及要求焊接性能良好、气密性高或工作温度在 225℃ 以下的零件，如水冷发动机的汽缸体、汽缸头、汽缸盖、空冷发动机头和发动机曲轴箱等 ZL105 合金在航空工业中应用相当广泛
	ZL105A		特性和 ZL105 合金基本相同，但其杂质 Fe 的含量较少，且加入少量 Ti 细化晶粒，属于优质合金，故其强度高于 ZL105 合金	同上，主要用于铸造高强度铝合金铸件

续表 14.8-7

组别	合金代号	铸造方法	主要特性	用途举例
铝 硅 合 金	ZL106	砂型、 金属型 铸造	系铝硅铜镁锰多元合金，特性是：①铸造性能良好，流动性大，气密性高，无热裂倾向，线收缩小，产生缩孔及气孔的倾向也较小；②可经热处理强化，室温下具有较高的力学性能，高温性能也较好；③焊接和可切削加工性能良好；④耐腐蚀性能接近于 ZL101 合金	适于铸造形状复杂、承受高静载荷的零件，也可用于要求气密性高或工作温度在 225℃ 以下的零件，如泵体、水冷发动机汽缸头等
	ZL107	砂型、 金属型 铸造	系铝硅铜三元合金，铸造流动性和抗热裂倾向均较 ZL101、102、104 差，但比铝-铜、铝-镁合金要好得多；吸气倾向较 ZL101 及 102 小，可热处理强化，在 20~250℃ 的温度范围内力学性能较 ZL104 高；可切削加工性良好，耐蚀性不高；铸件需要进行变质处理（砂型）	用于铸造形状复杂、壁厚不均、承受较高载荷的零件，如机架、柴油发动机的附件、气化器零件，电气设备外壳等
	ZL108	金属 型铸造	系铝硅铜镁锰多元合金，是我国目前常用的一种活塞铝合金，其特性是：①密度小，热胀系数低、热导率高、耐热性能好，但可切削加工性较差；②铸造性能良好，流动性高，无热裂倾向，气密性高，线收缩小，但易于形成集中缩孔，且有较大的吸气倾向；③可经热处理强化，室温和高温力学性能都较高；④在熔炼中需要进行变质处理。一般在硬模中（金属模）铸造，可以得到尺寸精确的零件，节省了加工时间，也是其一大优点	主要用于铸造汽车、拖拉机的发动机活塞和其他在 250℃ 以下高温中工作的零件，当要求热胀系数小、强度高、耐磨性高时，也可以采用这种合金
	ZL109	金属 型铸造	系加有部分镍的铝硅铜镁多元合金，和 ZL108 一样，也是一种常用的活塞铝合金，其性能和 ZL108 相似。加镍的目的在于提高其高温性能，但实际上效果并不显著，放在这种合金中的含镍量有降低和取消的倾向	同 ZL108 合金
	ZL111	砂型、 金属型 铸造	系铝硅铜镁锰钛多元合金，其特性是：①铸造性能良好，流动性好、充型能力优良，一般无热裂倾向、线收缩小、气密性高，可经受住高压气体和液体的作用；②在熔炼中需进行变质处理，可经热处理强化，在铸态或热处理后的力学性能是铝-硅系合金中最好的，可和高强铸铝合金 ZL201 相媲美，且高温性能也较好；③可切削加工性和焊接性良好；④耐蚀性较差	适于铸造形状复杂、承受高载荷、气密性要求高的大型铸件，以及在高压气体或液体下长期工作的大型铸件，如转子发动机的缸体、缸盖、水泵叶轮和军事工业中的大型壳体等重要机件

续表 14.8-7

组别	合金代号	铸造方法	主要特性	用途举例
铝 硅 合 金	ZL114A	砂型、 金属型 铸造	这是成分、性能和 ZL101A 优质合金相近似的铝硅镁系铝合金，由于杂质含量少，含镁量较 ZL101A 高，且加入少量的铍以消除杂质 Fe 的有害作用，故在保持 ZL101A 优良的铸造性能和耐蚀性的同时，显著地提高了合金的强度	这种合金是铝硅系合金中强度最高的品种之一，主要用于铸造形状复杂、高强度铝合金铸件，由于铍较昂贵，同时合金的热处理温度要求控制较严、热处理时间较长等原因，应用受到一定限制
	ZL115	砂型、 金属型 铸造	系加有少量铈的铝硅镁锌多元合金。在合金中添加少量的铈，目的是用其作为共晶硅的长效变质剂，以提高合金在热处理后的力学性能；成分中的锌也可起到辅助强化作用。因而，这种合金的特性是：在具有铝硅镁系合金优良的铸造性能和耐蚀性的同时，兼有高的强度和塑性，是铝-硅合金中高强度品种之一	主要用于铸造形状复杂、高强度铝合金铸件以及耐腐蚀的零件 这种合金在熔炼中不需再经变质处理
	ZL116	砂型、 金属型 铸造	系铝硅镁铍多元合金，这种合金的特点是：杂质中允许较多的 Fe 含量和含有少量的 Be；Be 的作用是与 Fe 形成化合物，使粗大针状的含 Fe 相变成团状，同时 Be 还有促进时效强化的作用，故加铍后显著提高了合金的力学性能，使其成为铝-硅合金中高强度品种之一。加 Be 还提高耐蚀性。由于合金的含硅量较高，有利于获得致密的铸件	适用于制造承受高液压的油壳泵体等发动机附件，以及其他外形复杂、要求高强度、高耐蚀性的机件。 因 Be 的价格甚贵，且有毒，所以这种合金在使用上受到一定限制
	ZL201	砂型、 金属型、 壳型和 熔模铸 造	系加有少量锰、钛元素的铝-铜合金，其特性是：①铸造性能不好，流动性差，形成热裂和缩孔的倾向大、线收缩大、气密性低，但吸气倾向小；②可热处理强化，经热处理后，合金具有很高的强度和良好的塑性、韧性，同时耐热性高（在强高和耐热性两方面，ZL201 是铸造铝合金中最好的合金）；③焊接性能和可切削加工性能良好；④耐腐蚀性能差	适于铸造工作温度为 175~300℃ 或室温下承受高载荷、形状不太复杂的零件，也可用于低温下（-70℃）承受高载荷的零件，是用途较广的一种铝合金
	ZL201A		成分、性能和 ZL201 基本相同，但其杂质含量控制较严，属于优质合金，力学性能高于 ZL201 合金	同上，主要用于要求高强度铝合金铸件的场所

续表 14.8-7

组别	合金代号	铸造方法	主要特性	用途举例
铝 铜 合 金	ZL202	砂型、 金属型 铸造	这是一种典型的铝-铜二元合金,特性是:①铸造性能不好,流动性、收缩和气密性等均为一般,但较 ZL203 要好,热裂倾向大、吸气倾向小;②热处理强化效果差,合金的强度低、塑性及韧性差,并随铸件壁厚的增加而明显降低;③熔炼工艺简单,不需要进行变质处理;④有优良的可切削加工性和焊接性,耐腐蚀性差,密度大;⑤耐热性较好	用于铸造小型、低载荷的零件,亦可用来铸造在较高工作温度($\leq 250^{\circ}\text{C}$)下工作的零件,如小型内燃发动机的活塞和气缸头等。此合金由于密度大、强度低、脆性高,已为其他合金所取代,现在用得很少
	ZL203	砂型、 金属型、 壳型和 熔模铸 造	这也是一种典型的铝-铜二元合金(含铜量比 ZL202 低),其特性是:①铸造性能差,流动性低、形成热裂和缩松倾向大、线收缩大、气密性一般,但吸气倾向小;②经淬火处理后,有较高的强度和好的塑性,铸件经淬火后有自然时效倾向;③熔炼工艺简单,不需要进行变质处理;④可切削加工性和焊接性良好;⑤耐蚀性差(特别是在人工时效状态下的铸件);⑥耐热性不高	适于铸造形状简单、承受中等静负荷或冲击载荷、工作温度不超过 200°C 并要求可切削加工性能良好的小型零件,如曲轴箱、支架、飞轮盖等
	ZL204A	砂型 铸造	这是加入少量 Cd、Ti 元素的铝-铜合金,通过添加少量 Cd 以加速合金的人工时效,加少量 Ti 以细化晶粒,并降低合金中有害杂质的含量,选择合适的热处理工艺而获得 σ_b 达 437 N/mm^2 的高强度耐热铸铝合金。这种合金属于固溶体合金,结晶间隔较宽,铸造工艺较差,一般用于砂型铸造,不适于金属型铸造	这类高强度、耐热铸铝合金的力学性能达到了常用锻铝合金的力学性能水平,它们的优质铸件可以代替一般的铝合金锻件。作为受力构件,在航空和航天工业中获得了广泛的应用
	ZL205Z	砂型 铸造	性能同上。这是在 ZL201 的基础上加入了 Cd、V、Zr、B 等微量元素而发展起来的, σ_b 达 437 N/mm^2 以上的高强度耐热铸铝合金。微量 V、B、Zr 等元素能进一步提高合金的热强性, Cd 能改善合金的人工时效效果,显著提高合金的力学性能。合金的耐热性高于 ZL204A	同 ZL204A 合金
铝 稀 土 金 属 合 金	ZL207A	砂型 及金属 型铸造	系 Al-RE (富铈混合稀土金属) 为基的铸造铝合金。这种合金除含有较高的 RE 以外,还含有 Cu、Si、Mn、Ni、Mg、Zr 等元素,其特性是:①耐热性好,可在高温下长期使用,工作温度可达 400°C ;②铸造性能良好,结晶温度范围只有 30°C 左右,充型能力良好,且形成针孔的倾向较小,铸件的气密性高,不易产生热裂和疏松;③缺点是室温力学性能较低,成分复杂	可用于铸造形状复杂、受力不大、在高温下长期工作的铸件

续表 14.8-7

组别	合金代号	铸造方法	主要特性	用途举例
铝 镁 合 金	ZL301	砂型、 金属型 和熔模 铸造	系典型的铝-镁二元合金，其特性是：①在海水大气等介质中有很高的耐蚀性，在这方面是铸造铝合金中最好的；②铸造性能差，流动性和产生气孔、形成热裂的倾向一般，易于产生显微疏松，气密性低，收缩率低，吸气倾向大；③可热处理强化，铸件在淬火状态下使用，具有高的强度和良好的塑性、韧性，但具有自然时效倾向。在长期使用过程中，塑性明显下降、变脆，并出现应力腐蚀倾向；④耐热性不高；⑤可切削加工性良好，可以达到很高的表面粗糙度。表面经抛光后，能长期保持原来的光泽；⑥焊接性较差；⑦熔炼中容易氧化，且熔铸工艺较复杂、废品率高	适于铸造承受高静载荷和冲击载荷、暴露在大气或海水等腐蚀介质中、工作温度不超过 200℃、形状简单的大、中、小型零件，如雷达底座、水上飞机和船舶配件（发动机机匣、起落架零件、船用舷窗等）以及其他装饰用零部件等
	ZL303	砂型、 金属型、 壳型和 熔模铸 造	这是添加 1%（质量分数，后同）左右 Si 和少量 Mn 的含 Mg 量为 5% 左右的铝-镁-硅系合金，其特性是：①耐蚀性能高，并类似、接近 ZL301 合金；②铸造性能尚可，流动性一般，有氧化、吸气、形成缩孔的倾向（但比 ZL301 好），收缩率大，气密性一般，形成热裂的倾向比 ZL301 小；③在铸态下具有一定的力学性能，但不能经热处理明显强化；④高温性能较 ZL301 高；⑤可切削性和抛光性与 ZL301 一样好，而焊接性则较 ZL301 有明显改善；⑥生产工艺简单，但熔炼中容易氧化和吸气	适于铸造同腐蚀介质接触和在较高温度（≤220℃）下工作、承受中等载荷的船舶、航空及内燃机车零件，如海轮配件、各种壳体、气冷发动机汽缸头，以及其他装饰性零部件等
	ZL305	砂型 铸造	这是加有少量 Be、Ti 元素的铝-镁-锌系合金，是 ZL301 的改型合金，由于 ZL301 有自然时效倾向、力学性能稳定性差和有应力腐蚀倾向，故应用受到很大限制。针对 ZL301 合金的这一缺点，降低其 Mg 含量，并加入 Zn 及少量 Ti，从而提高了合金的自然时效稳定性和抗应力腐蚀能力。合金中加入微量 Be，可防止在熔炼和铸造过程中的氧化现象。合金的其他性能均与 ZL301 相近	用途和 ZL301 基本相同，但工作温度不宜超过 100℃。因为这种合金在人工时效温度超过 150℃ 时，大量强化相析出，抗拉强度虽有提高，但塑性下降很大，应力腐蚀现象也同时加剧

续表 14.8-7

组别	合金代号	铸造方法	主要特性	用途举例
铝 锌 合 金	ZL401	砂型、金属型、壳型和熔模铸造	系铝锌硅镁四元合金，俗称锌硅铝明，其特性是：①铸造性能良好，流动性好，产生缩孔和形成热裂的倾向小，线收缩小，但有较大的吸气倾向；②在熔炼中需进行变质处理；③它的主要优点在于铸态下具有自然时效能力，因而即可获得高的强度，不必进行热处理；④耐热性低，耐蚀性一般，密度大；⑤焊接和可切削加工性能好；⑥价格便宜	适于铸造大型、复杂和承受高的静载荷而又不便进行热处理的零件，但工作温度不得超过200℃，如汽车零件，医疗器械、仪器零件、日用品等。因密度大，在某些场合下限制了它的应用
	ZL402	砂型和金属型铸造	这是含有少量Cr和Ti的铝-锌-镁系合金，其特性是：①铸造性能尚好，流动性和气密性良好，缩松和热裂倾向都不大；②在铸态经时效后即可获得较高的力学性能，在-70℃的低温下仍能保持良好的力学性能，但高温性能低（工作温度≤150℃）；③有良好的耐蚀性和抗应力腐蚀性能，在这方面超过铝铜合金而接近于铝硅合金；④可切削加工性良好，焊接性一般；⑤铸件经人工时效后尺寸稳定；⑥密度较大	适于铸造承受高的静载荷和冲击载荷而又不便于进行热处理的零件，亦可用于要求同腐蚀介质接触和尺寸稳定性高的零件，如高速旋转的整铸叶轮、飞行起落架、空气压缩机活塞、精密仪表零件等。因密度大，也限制了它的应用

2 铜及铜合金

2.1 加工铜及铜合金（表 14.8-8~14.8-9）

表 14.8-8 加工铜及铜合金低温力学性能

牌 号	试样状态	试验温度/℃	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%	a_k /J·cm ⁻²
T2		+15	273	—	13.3	71.5	77.178
		-80	360		22.9	65.3	85.220
		-180	405		30.7	67.9	89.240
T3	600℃退火	+20	216	59	48	76	
		-10	220	61	40	78	
		-40	232	64	47	77	
		-80	268	69	47	74	
		-120	284	74	45	70	
		-180	402	78	38	77	

续表 14.8-8

牌 号	试样状态	试验温度/℃	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	δ /%	ψ /%	α_k /J·cm ⁻²
T4		+20	225	87	30	70	175.540
		-183	245	186	31		
		-196	372		41	72	207.90
		-253	392		48	74	211.824
H62	软 的	+20	397	137	51.3	75.5	
		-78	421		53	74.6	
		-183	522		55.3	71	
H68	550℃ 退火 2 h	+20	392	155	50.4	72	
		-78	420	300	49.8	76.6	
		-183	524	392	50.8	70.7	
HPb59-1	500℃ 退火 2 h	+20	362	141	50.2	62.5	
		-78	374		49.8	64	
		-183	475		50.8	62	
HFe59-1-1	软 的	+20	431	169	34.2	42.3	118.660
		-78	476	199	33.2	42	118.660
		-183	561	245	36	40.3	103.950
		-196	575	252	34.7	38	101.989
	拉 制	温室	605	557	12	36	
		-40	649	560	14	38	
QA19-4	锻 制	温室	612	329	45	47	
		-183	773	583	38	42	
QSn6.5-0.4		+17	617		12	61	
		-196	823		29	54	
		-253	931		29	51	
QA15		+17	412		61	74	
		-196	568		84	76	
		-253	637		83	72	
QA17	退 火	+20	529	182	26	29	
		-10	529	184	33	30	
		-40	539	185	35	36	
		-80	566	186	31	30	

注：本表资料根据1998年版《重型机械标准》第二卷

表 14.8-9 加工铜及铜合金牌号、特性及应用

组别	代号	特性	应用举例
加工铜	T1 T2	有良好的导电、导热、耐蚀和加工性能,含降低导电、导热性的杂质较少,可以焊接和钎焊,但微量的氧易引起“氢病”,因此不宜在高于370℃环境中加工(如退火焊接等)和使用	常用作导电、导热、耐蚀器材,如电线、电缆、蒸发器、贮藏器等
	T3	与T1、T2相比,含降低导电、导热的杂质多,含氧量更高,更易引起“氢病”,不能在高温还原性环境中应用、加工	仅用作一般钢材,如电气开关、垫、钉、油管及其他管道
	TU1、TU2	纯度高,导电、导热性极好,几乎无“氢病”,加工性能和焊接、耐蚀、耐寒性均好	多用作电真空仪器仪表器材
	TP1 TP2	焊接、冷弯性能好,可在还原性环境中加工、使用,但不宜在氧化环境中加工、使用,TP1的导电、导热性比TP2好	主要以管材供应,偶尔也有以棒、板、带、线供应,多用来制造各种输送管、冷凝管、蒸发器、热交换器等
	TAg0.1	具有很好的耐蚀性、电接触性和耐蚀性,银的作用可提高再结晶温度和蠕变强度,在实际应用中,多以冷作硬化方式提高强度	用作耐热、耐磨导电器材,如:导线、通信线、电机整流子片、发电机转子导体、电子管材料等
普通黄铜	H96	强度低(但比紫铜高)、导热、导电性好,在大气及淡水耐蚀性好、塑性好,易于冷、热压力加工,易于焊接及锻造和镀锡,无应力腐蚀破裂倾向	一般用途的导管、冷凝管、散热管(片)及导电片等
	H90	和H96性能类似,强度稍高,可镀金属及涂敷珐琅	各种给排水管、双金属片及奖章、艺术品等
	H85	强度较高,塑性良好,适合冷、热加工,焊接性及耐蚀性良好	冷凝和散热用管、蛇形管、虹吸管、冷却设备制件
	H80	和H85性能类似,强度较高,塑性也较好,耐蚀性较高	薄壁管、皱纹管及造纸网及房屋建筑用品
	H70	塑性优良,强度较高,切削加工性好,焊接、耐蚀性好	热变换器、造纸用管,机械、电子用零件
	H68 H68A	性能与H70极相似,但冷作时有“季裂”倾向,是黄铜中用途最广泛的一种 H68A是H68中加微量砷,以提高耐蚀性	复杂的冷冲件和深冲件,如波纹管
	H65	性能介于H68与H63之间,有良好的力学性能,能承受冷、热加工	用于制作小五金、日用品、螺钉等制件
	H63 H62	有良好的力学性能,热态下塑性良好,切削性良好,焊接性、耐蚀性良好,价格便宜	各种深引伸和弯折的受力件,如销钉、螺母、气压表弹簧、散热件、环形件
H59	强度、硬度高而塑性差,可良好承受热压加工、耐蚀性一般,价格最低	用于一般机制零件、焊接件、及热加工件	

续表 14.8-9

组别	代 号	特 性	应用举例
铅 黄 铜	HPb63-3	切削加工性能优良, 有高的减摩性能, 不可热态加工, 其他性能与 HPb59-1 相似	钟表结构件及汽车拖拉机零件
	HPb63-0.1 HPb63-0.8	切削加工性略差, 其他性能与 HPb63-3 相同	结构零件
	HPb60-1	切削加工性好, 强度高, 其他性能与 HP59-1 相似	高强度的结构零件
	HPb59-1	是一种广泛应用的铅黄铜, 具有良好的力学性能, 且切削加工性好, 可承受冷热压力加工, 可钎焊和焊接, 对一般性腐蚀有较好的稳定性, 但有腐蚀开裂倾向	适用于切削加工及冲压加工的各种结构零件, 如垫片、衬套等
锡 黄 铜	HSn70-1	在大气、蒸气、海水和油类里有高的耐腐蚀性, 有良好的力学性能, 在冷、热态下压力加工性良好, 可切削性尚好, 可焊接易钎焊, 但有腐蚀开裂倾向	多用于舰船上的耐蚀零件及与蒸气、油类等介质接触的零件及导管
	HSn62-1	力学性能及切削性能良好, 只宜热态下压力加工, 在海水中耐蚀性高, 可焊接和钎焊, 但有腐蚀开裂倾向	与海水接触的船舶零件或其他零件
	HSn60-1	性能与 HSn62-1 相似	多以线材供应, 用作船舶焊接用焊条
	HSn90-1	性能与 H90 普通黄铜相似, 但具有高的耐蚀性和减摩性, 是唯一可用作减磨合金使用的锡青铜	用作耐蚀减磨零件如衬套等
铝 黄 铜	HA177-2	强度高、硬度高, 塑性良好, 可在冷、热态下进行压力加工, 海水中耐蚀性良好, 但有腐蚀开裂倾向, 是一典型的铝黄铜	船舶等用作冷凝管及其他耐蚀零件
	HA167-2.5	耐磨性好, 对海水耐蚀性尚好, 可在冷、热态下承受压力加工, 对腐蚀开裂敏感, 钎焊性不好	海轮抗蚀零件
	HA160-1-1	强度高, 可在热态下承受压力加工, 冷态下塑性略差, 在大气、淡水、海水中耐蚀性好, 腐蚀开裂敏感	用作各种耐蚀结构零件, 如齿轮、轴、料套等
	HA159-3-2	强度高、耐蚀性非常好, 在热态下压力加工性好, 腐蚀敏感性较小	船舶业及发动机和其他常温下工作的高强度耐蚀件
	HA166-6-3-2	具有高强度、硬度及耐磨性, 耐蚀性良好, 但塑性较差, 有腐蚀开裂倾向。多用作耐磨合金	大型蜗杆及重载工作条件下的螺母, 可代替 QAl10-4-4

续表 14.8-9

组别	代号	特 性	应用举例
锰 黄 铜	HMn57-3-1	强度、硬度高, 但塑性差, 只宜在热态下进行压力加工, 在大气、海水及蒸汽中耐蚀性好于普通黄铜, 但有腐蚀开裂倾向	耐腐蚀的结构零件
	HMn58-2	力学性能良好, 热态下压力加工性好, 冷态下压力加工性尚可, 导电、导热性低, 在海水、蒸汽、氯化物中耐蚀性好, 但有腐蚀开裂倾向, 是一种应用较广的黄铜	耐腐蚀的重要零件及弱电工业用零件
	HMn55-3-1	性能相似于 HMn57-3-1	耐腐蚀结构件
铁 黄 铜	HFe59-1-1	强度高、韧性好, 热态下塑性良好, 减摩性能良好, 在大气、海水中耐蚀性高, 但有腐蚀开裂倾向	用来制造腐蚀状态下摩擦工作的结构零件
	HFe58-1-1	强度、硬度高, 塑性差, 只宜在热态下进行压力加工, 切削性好, 耐蚀性尚好, 但有腐蚀开裂倾向	高强度耐蚀零件
硅 黄 铜	HSi80-3	力学性能良好, 切削性良好, 冷、热态下压力加工性好, 易焊接和钎焊, 耐磨性尚好, 导电、导热性低, 耐蚀性高, 且无腐蚀开裂倾向	船舶用零件、蒸汽及水管及管配件
镍 黄 铜	HNi65-5	力学性能良好, 冷态及热态下压力加工性均很好, 有高的耐蚀性和减摩性, 导电、导热性低, 价格较贵	压力表管、造纸网、船用冷凝管
锡 青 铜	QSn4-3	高的耐磨性、弹性, 抗磁性良好, 冷态、热态加工性能良好, 切削性、焊接性好, 大气、淡水、海水中耐蚀性好	化工设备的耐蚀件、耐磨件、弹簧及各种弹性元件、抗磁元件
	QSn4-4-2.5 QSn4-4-4	高的耐磨性、良好的切削性、焊接性, 大气、淡水中耐蚀良好, 压力加工只应在冷态时进行, 因含铅, 热加工有热脆	主要用来制造摩擦条件下工作的轴承、轴套、衬套及圆盘等, QSn4-4-4 是一种热强性良好的锡青铜
	QSn6.5-0.1	具有高的强度、弹性、耐磨性和抗磁性, 冷态、热态下压力加工性良好, 切削性、焊接性好, 大气及淡水中耐蚀	制作精密仪器中的耐磨件和抗磁件、弹簧及需导电性良好的弹性接触片
	QSn6.5-0.4	性能与 QSn6.5-0.1 类似, 因含磷量较 QSn6.5-0.1 要高, 所以抗疲劳强度、弹性、耐磨性均较好, 但只适合冷加工	除用作弹簧及耐磨件外, 主要用于制造造纸工业用的耐磨铜网
	QSn7-0.2	强度高, 弹性、耐磨性好, 焊接性好, 可切削加工, 在大气、淡水和海水中耐蚀性好, 可热加工	制作中等负荷、中等滑动速度下承受摩擦的零件, 如轴承、轴套、蜗轮、抗磨圆垫及各种簧片
	QSn4-0.3	具有高的力学性能、耐蚀性和弹性, 可在冷态及热态下承受压力加工	多用制作各种压力计用管材

续表 14.8-9

组别	代 号	特 性	应用举例
铝 青 铜	QA15 QA17	有较高强度、弹性和耐磨性，可很好在冷态及热态下承受压力加工，不易钎焊，不能淬火、回火强化 QA17 强度高于 QA15	制作弹簧及其他耐蚀元件，如蜗轮等，也可作为 QSn6.5-0.4、QSn4-3 和 QSn4-4 的代用品
	QA19-2	具有高强度，热态、冷态下压力加工性良好，不易钎焊，大气、淡水、海水中耐腐蚀性良好	高强度耐蚀零件，以及 250℃ 下蒸汽中工作的管件及零件
	QA110-3-1.5	具有高的强度及耐磨性，淬火、回火后，可提高强度、硬度，可切削加工，不易钎焊，热态下压力加工性良好，有较高抗氧化性和耐蚀性	制作高温条件下的耐磨件和标准件，可代替高锡青铜制作重要机件，如齿轮、轴承、飞轮等
	QA110-4-4 QA111-6-6	具有高强度，高温力学性能良好（400℃ 以下），具有良好的减摩性，可热处理强化，可切削加工，可热态下压力加工，不易钎焊，抗蚀性良好	制作高强的耐磨零件和高温条件下工件，如轴衬、轴套、法兰盘、齿轮及其他重要耐蚀零件、耐磨零件 QA111-6-6 工作温度可提高至 500℃
铍 青 铜	QBe2	是一种理化综合性能优良的合金，热处理后具有高的强度、硬度、弹性、耐磨性、耐热性及疲劳极限，同时还具有高导电性、导热性和耐寒性，无磁性，易于焊接，且耐蚀性良好	制作各种精密弹性元件、耐磨件及苛刻条件下工作的轴承、衬套
	QBe1.7 QBe1.9	与 QBe2 性能相近，但在弹性、迟滞性、疲劳强度、弹性稳定性、性能对时效温度敏感性及价格等方面优于 QBe2	可代替 QBe2
	QBe1.9-0.1	因加有 Mg，因此细化晶粒，提高了合金的力学性能及时效后的弹性极限和力学性能稳定性	可代替 QBe1.9
硅 青 铜	QSi3-3	强度高、耐磨性极好，经热处理后强度和硬度可大幅度提高，切削性、焊接性良好，耐蚀性良好	用于工作温度 300℃ 以下，工作条件较差或腐蚀性介质中的零件制造
	QSi3-1	强度高，弹性、耐磨性、塑性均好，可在冷、热态下压力加工，可与异类合金良好焊接，对大气、淡水、海水、氯化物及强碱的作用非常稳定，不能热处理强化	用于制造腐蚀介质中工作的弹性元件，以及蜗轮、蜗杆、轴套和焊接构件
	QSi3.5-3-1.5	性能与 QSi3-1 相似，但耐热性较好	多用于制造高温环境工作的轴套、轴衬
锰 青 铜	QMn5	具有高的强度、硬度和良好的塑性，热态、冷态压力加工性良好，耐蚀性好，400℃ 以下力学性能不变	用于制造各种高温耐蚀零件，如管接头、阀门等
	QMn1.5 QMn2	与 QMn5 相比强度、硬度稍下降塑性略升	除 QMn5 的用途外，还可制造电气仪表零件

续表 14.8-9

组别	代号	特性	应用举例
铜 青铜	QCd1	具有良好的导电性、导热性、耐磨性、减摩性、耐腐蚀性,及压力加工性,多用于冷作硬化提高强度	用于工作温度在250℃以下的导电导热件,如电机整流子片、电车触线、电焊机电极及喷气技术中
镁 青铜	QMg0.8	铜-镁合金在实际使用中Mg含量多小于1%,可提高铜的高温抗氧化性,多采用冷作硬化提高强度	多用于导电线芯
铬 青 铜	QCr0.5	具有较高的强度和硬度,较好的导电性、导热性、耐磨性、减摩性,冷态、热态压力加工性良好,焊接性好,可时效硬化处理,缺点是对缺口敏感性较强	用于制造各种在高温下工作,要求有高强度、高硬度、导电性和导热性的零件,也可以双金属形式用于刹车元件
	QCr0.5-0.2-0.1	性能与QCr0.5相似,但耐热性、耐蚀较高,缺口敏感性较低	主要用来制造点焊、滚焊用的电极
	QCr0.6-0.4-0.05	较QCr0.5相比,强度、硬度和耐热性、导电性都有改善	可代替QCr0.5
锆 青 铜	QZr0.2	导电性极好,可在冷、热态压力加工,可时效处理	用作电阻焊材料及要求高强度、高导电率的电极
	QZr0.4	较QZr0.2相比,强度、耐热性更高,但导电率略有下降	可代替QZr0.2
普 通 白 铜	B0.6	电工白铜,温差电动势小,最大工作温度为100℃	多用于特殊温差电偶的补偿导线
	B5	结构白铜,强度、耐蚀性较铜高	船舶用耐蚀零件制造
	B19	结构白铜,力学性能很好,耐蚀性很好,冷、热态压力加工性良好,切削性不好	用于制造在腐蚀性环境中工作的精密仪表零件、金属网、化工机械零件以及医疗器具
	B25	结构白铜,力学性能、耐蚀性高,冷、热态压力加工性良好,其主要性能较B19、B5要好	用于制造在腐蚀环境工作的零件及在高温、高压下工作的金属管和冷凝管
锰 白 铜	BM3-12	电工白铜,电阻率高,电阻温度系数低,电阻稳定性高,对铜的热电动势小	广泛用于制造工作温度在100℃以下电阻仪器及精密电工测量仪器
	BM40-1.5	电工白铜,具有高热电动势、高的电阻率,耐热性和耐蚀性好,且力学性能高	是制造工作温度在900℃以下的热电偶的良好材料,及500℃以下的加热器和变阻器
	MB43-0.5	电工白铜,具有高的电阻率和低的电阻温度系数,最大的温差电动势,良好的力学性能及耐热性、耐蚀性	工作温度在600℃以下的热电仪器,高温测量中的补偿导线
锌 白 铜	BZn15-20	结构白铜,强度高、耐蚀性及可塑性好,冷、热态均可压力加工,切削性差,焊接性差,民间俗称“德银”	用于潮湿、腐蚀环境中工作的零件及仪表零件、医疗器具、电讯零件、艺术品、弹簧管等
	BZn15-21-1.8 BZn15-24-1.5	含铅结构白铜,性能与BZn15-20相近,但切削性好,只能于冷态压力加工	钟表工业中零件

组别	代号	特 性	应用举例
铝 白 铜	BA113-3	结构白铜、高的强度及耐腐蚀性和弹性，低温力学性能很好，且可以热处理	用于制造高强度、耐蚀零件
	BA16-1.5	结构白铜、具有高的强度及弹性，可以热处理	用于制造各种重要用途的扁弹簧
铁 白 铜	BFe30-1-1	结构白铜、力学性能良好，耐蚀性好，切削性差	造船业中在高温、高压、高速条件下工作的冷凝器和恒温器
	BFe10 1-1	结构白铜，强度、硬度较 BFe30-1-1 低，塑性较其高	可代替 BFe30-1-1

2.2 铸造铜合金 (表 14.8-10~表 14.8-12)

表 14.8-10 铸造铜合金牌号及力学性能 (摘自 GB/T 1176—1987)

合金牌号	铸造方法	抗拉强度	屈服强度	伸长率	布氏硬度
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 %	
ZCuSn3Zn8Pb6Ni1	S	175	—	8	590
	J	215	—	10	685
ZCuSn3Zn11Pb4	S	175	—	8	590
	J	215	—	10	590
ZCuSn5Pb5Zn5	S、J	200	90	13	590*
	Li、La	250	100*	13	635*
ZCuSn10	S	220	130	3	785*
	J	310	170*	2	885*
	Li	330	170*	4	885*
	La	360	170	6	885*
ZCuSn10Pb5	S	195	—	10	685
	J	245	—	10	685
ZCuSn10Zn2	S	240	120	12	685*
	J	245	140*	6	785*
	Li、La	270	140*	7	785*
ZCuPb10Sn10	S	180	80	7	635*
	J	220	140	5	685*
	Li、La	220	110*	6	685*
ZCuPB15Sn8	S	170	80	5	590*
	J	200	100	6	635*
	Li、La	220	100	8	635*
ZCuPb17Sn4Zn4	S	150	—	5	540
	J	175	—	7	590

续表 14.8-10

合金牌号	铸造方法	抗拉强度	屈服强度	伸长率	布氏硬度
		σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	HB
ZCuPb20Sn5	S	150	60	5	440*
	J	150	70*	6	540*
	La	180	80*	7	540*
ZCuPb30	J	—	—	—	245
ZCuAl8Mn13Fe3	S	600	270*	15	1 570
	J	650	280*	10	1 665
ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	S	645	280	20	1 570
	J	670	310*	18	1 665
ZCuAl9Mn2	S	390	—	20	835
	J	440	—	20	930
ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	S	630	250	16	1 570
ZCuAl10Fe3	S	490	180	13	980*
	J	540	200	15	1 080*
	Li、La	540	200	15	1 080*
ZCuAl10Fe3Mn2	S	490	—	15	1 080
	J	540	—	20	1 175
ZCuZn38	S	295	—	30	590
	J	295	—	30	685
ZCuZn25Al6Fe3Mn3	S	725	380	10	1 570*
	J	740	400	7	1 665*
	Li、La	740	400	7	1 665*
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	S	600	300	18	1 175*
	J	600	300	18	1 275*
	Li、La	600	300	18	1 275*
ZCuZn31Al2	S	295	—	12	785
	J	390	—	15	885
ZCuZn35Al2Mn2Fe2	S	450	170	20	980*
	J	475	200	18	1 080*
	Li、La	475	200	18	1 080*
ZCuZn38Mn2Pb2	S	245	—	10	685
	J	345	—	18	785
ZCuZn40Mn2	S	345	—	20	785
	J	390	—	25	885
ZCuZn40Mn3Fe1	S	440	—	18	980
	J	490	—	15	1 080
ZCuZn33Pb2	S	180	70*	12	490*
ZCuZn40Pb2	S	220	—	15	785*
	J	280	120*	20	885*
ZCuZn16Si4	S	345	—	15	885
	J	390	—	20	980

注：1. 有“*”符号的数据为参考值。

2. 布氏硬度试验力的单位为 N。

3. 铸造方法代号：S—砂型铸造；J—金属型铸造；La—连续铸造；Li—离心铸造

表 14.8-11 铸造铜合金物理性能和工艺性能参考数值

合金牌号	密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	线胀系数 $\alpha / 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	热导率 $\lambda / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	电阻率 $\rho / 10^{-6} \cdot \Omega \cdot \text{m}$	比热容 $c / \text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	摩擦系数		耐蚀性质		熔点 $t / ^\circ\text{C}$	铸造温度/ $^\circ\text{C}$		流动性 螺旋长度/cm	线收率 缩率/%	焊接性			可切削 加工性 /% (以HPb 63-3为 100%)
						有润 滑剂	无润 滑剂	在10% 硫酸中	在海 水中		加热	浇注			气焊	电焊	钎焊	
ZCuSn3Zn8Pb6Ni1 (ZQSn3-7-5-1)	8.8	20.7	62.80	0.0923	0.365	0.013	0.16	—	—	1022	1200~ 1250	1150~ 1200	40~55	1.45	差	差	满意	80
ZCuSn3Zn11Pb4 (ZQSn3-12-5)	8.6	17.1	56.52	0.075	0.360	0.01	0.158	—	—	998	1200~ 1250	1150~ 1180	50~65	1.60	差	满意	良好	80
ZCuSn5Pb5Zn5 (ZQSn5-5-5)	8.7	19.1	93.78	0.080	0.377	0.185 ~ 0.190	0.16	4.9	0.67	975	1188~ 1220	1150~ 1200	40	1.60	差	差	满意	90
ZCuSn10Pb1 (ZQSn10-1)	8.76	18.5	36.43~ 48.99	0.213	0.396	0.008	0.10	—	—	934	1100~ 1150	980~ 1050	50	1.44	满意	满意	良好	40
ZCuSn10Zn2 (ZQSn10-2)	8.6	18.2	49.40	0.160	0.373	0.006 ~ 0.008	0.16	0.14	0.92	1015	1200~ 1250	1150~ 1200	21~35	1.45~ 1.51	满意	满意	良好	55
ZCuPb10Sn10 (ZQPb10-10)	8.9	19.2	45.22	—	—	0.0045	0.10	—	—	925	—	1000~ 1100	—	1.57	—	—	—	—
ZCuPb15Sn8 (ZQPb12-8)	9.1	17.1	41.87	—	—	0.005	0.10	—	—	940	1200 ~ 1250	1150~ 1200	45	1.40	差	满意	良好	80
ZCuPb17Sn4Zn4 (ZQPb17-4-4)	9.2	—	60.71	—	—	0.01	0.16	—	—	960	1180~ 1220	1150~ 1200	25	—	差	差	良好	90
ZCuPb20Sn5 (ZQPb25-5)	9.4	18.0	58.62	—	—	0.004	0.14	—	—	940	1200~ 1250	1150~ 1200	40	1.50	差	满意	不好	95

续表 14.8-11

合金牌号	密度 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	线胀系数 α / $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$	热导率 λ / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	电阻率 ρ / $10^{-6}\cdot\Omega\cdot\text{m}$	比热容 c / $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	摩擦系数		耐蚀性质 量损失/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$		熔点/ $^{\circ}\text{C}$	铸造温度/ $^{\circ}\text{C}$		流动性 螺旋长 度/ cm	线收 缩率 /%	焊接性			可切削 加工性 /% (以HPb 63-3为 100%)
						有润 滑剂	无润 滑剂	在10% 硫酸中	在海 水中		加热	浇注			气焊	电焊	钎焊	
ZCuPb30 (ZQPb30)	9.4	18.4	142.35	0.10	—	0.008	0.18	—	—	990	1 200~ 1 250	1 150~ 1 200	35	1.60				80
ZCuAl8Mn13Fe3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	良好	尚可	—	
ZCuAl8Mn13Fe3Ni2 (ZQAl12-8-3-2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	良好	尚可	—	
ZCuAl9Mn2 (ZQAl9-2)	7.6	17.0~ 20.1	71.18	0.11	0.435	0.006	0.18	0.25	0.25	1 060	1 200~ 1 250	1 100~ 1 180	48	1.7	良好	尚可	25	
ZCuAl9Fe4Ni4Mn2 (ZQAl9-4-4-2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	良好	良好	—	
ZCuAl10Fe3 (ZQAl9-4)	7.5	18.1	58.62	0.124~ 0.152	0.419	0.004	0.16	0.4	0.25	1 040	1 200~ 1 250	1 100~ 1 180	85	1.8~ 2.4	良好	尚可	20	
ZCuAl10Fe3Mn2 (ZQAl10-3-1.5)	7.5	16	41.87	0.125	0.419	0.012	0.21	0.20~ 0.25	0.25	1 045	1 200~ 1 250	1 100~ 1 180	70	1.8~ 2.4	良好	尚可	25	
ZCuZn38 (ZH62)	8.43	20.6	108.86	0.071	0.307	0.012	0.39	1.46	0.61	905	—	1 060~ 1 100	65	1.77	良好	良好	40	
ZCuZn25Al6Fe3Mn3 (ZHA66-6-3-2)	8.5	19.8	49.82	—	—	—	—	—	—	900	1 080~ 1 120	1 000~ 1 050	47	1.8	良好	良好	25	
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	良好	良好	—	

续表 14.8-11

合金牌号	密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (10 ³ kg/m ³)	线胀系数 $\alpha / (10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率 $\lambda / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	电阻率 $\rho / 10^{-6} \cdot \Omega \cdot \text{m}$	比热容 $c / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	摩擦系数		耐蚀性质 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$		熔点 $^{\circ}\text{C}$	铸造温度/ $^{\circ}\text{C}$		流动性 螺旋长度/cm	线收缩率 /%	焊接性			可切削 加工性 /% (以 H1Pb 63-3 为 100%)
						有润 滑剂	无润 滑剂	在 10% 硫酸中	在海 水中		加热	浇注			气焊	电焊	钎焊	
ZCuZn31Al2 (ZHA167-2.5)	8.5	—	113.04	—	—	—	—	—	—	995	1 080 ~ 1 120	1 000 ~ 1 050	57	1.25		良好	不好	30
ZCuZn35Al2Mn2Fe1 (ZHF59-1-1)	8.5	22.0	100.91	0.093	—	0.012	0.39	1.77	0.22	890	1 050 ~ 1 100	950 ~ 1 000	83	2.23	良好	良好	25	
ZCuZn38Mn2Pb2 (ZHM58-2-2)	8.5	20.6	71.18	0.118	0.419	0.016	0.24	0.05g/ (m ² ·h)	—	900	1 050 ~ 1 100	980 ~ 1 000	83	2.1	—	—	—	35
ZCuZn40Mn2 (ZHM58-2)	8.5	21.2	70.34	0.108	0.377	0.012	0.32	1.59	0.40	880	1 040 ~ 1 080	980 ~ 1 000	83	1.45	—	—	—	22
ZCuZn40Mn3Fe1 (ZHM55-3-1)	8.5	19.1	51.08	—	0.373	0.036	0.36	0.04g (m ² ·h)	—	930	1 060 ~ 1 100	980 ~ 1 050	70	1.5	良好	良好	良好	25
ZCuZn40Pb2 (ZHP159-1)	8.5	20.1	108.86	0.068	0.502	0.013	0.17	1.42	0.35	900	1 050 ~ 1 100	1 000 ~ 1 050	60	1.5 ~ 2.0	良好	良好	良好	80
ZCuZn16Si4 (ZHS180-3)	8.2	18.8 ~ 20.8	83.74	0.28	0.404	0.01	0.19	0.01	0.19	890	1 100 ~ 1 180	980 ~ 1 060	60	1.6 ~ 1.7	良好	良好	良好	30

表 14.8-12 铸造铜合金特性及应用

牌 号	特 性	应 用 举 例
ZCuSn3Zn8Pb6Ni1	耐腐蚀性、耐磨性、气密性、铸造性能均较好，且易加工	在各种液体燃料及海水、淡水或蒸汽中工作的零件，压力小于 2.5 MPa 的阀门和管配件
ZCuSn3Zn11Pb4	铸造性、耐蚀性好，易加工	海水、淡水、蒸汽中工作的零件，及压力小于 2.5 MPa 的管配件
ZCuSn5Pb5Zn5	耐磨性、耐蚀性好，铸造性和气密性较好，易加工	在重载荷、中速工作条件下的耐磨、耐蚀件，如轴瓦、衬套、活塞、蜗轮等
ZCuSn10P1	硬度高、耐磨性极好，铸造性和加工性较好，耐蚀性在大气和淡水中较好	用重载荷（20 MPa 以下）和高滑动速度（8 m/s）以下工作条件的零件，如齿轮轴瓦、蜗轮等
ZCuSn10Pb5	耐腐蚀、耐磨性较好	用于耐腐蚀、耐酸的零件制造，及破碎机的衬套、轴瓦
ZCuSn10Zn2	耐磨性、铸造性、耐蚀性、气密性及切削加工性好，铸件致密性高	中、重载荷及低滑速工作条件下的重要管配件，如阀泵体、旋塞、叶轮、蜗轮、齿轮等
ZCuPb10Sn10	耐磨性、润滑性、耐蚀性能良好，多用于双金属材料	滑动轴承、轴衬等，载荷峰值小于 60 MPa 的受冲击零件、内燃机双金属轴瓦、活塞销套等
ZCuPb15Sn8	滑动性及自润滑性良好，切削加工性好，铸造性能差、耐蚀性好	冷轧机的冷却管、轴承冲击载荷小于 50 MPa 的耐冲击件、耐酸配件、内燃机的双金属轴承、活塞销套
ZCuPb17Sn4Zn4	耐磨性、自润滑性、切削性好，铸造性能差	高滑动速度的轴承及耐磨件
ZCuPb20Sn5	自润滑性很好，切削性好，铸造性能差，耐酸腐，多适合于双金属材料	滑动速度中、高的破碎机、水泵、冷轧机轴承，载荷小于 40 MPa 的零件，载荷小于 70 MPa 的内燃机活塞销套耐蚀零件，双金属零件等
ZCuPb30	自润滑性良好，切削性较好，铸造性差	制造耐磨零件、高滑动速度的双金属轴瓦
ZCuAl8MnBFe3	强度、硬度高，耐磨性、耐蚀性、铸造性好，致密性高	重型机械用轴套、高强度、耐压零件及工作温度小于 400℃ 的耐磨零件，如衬套、阀体泵体等
ZCuAl8Mn13Fe3Ni2	综合力学性能良好，组织致密，气密性好，铸造性好，腐蚀疲劳强度高，大气、海水中耐蚀性高	要求有高强度、耐腐蚀的重要零件，如螺旋桨、高压阀体、泵体，及耐压、耐磨零件如：蜗轮、衬套
ZCuAl9Mn2	综合力学性能良好，耐磨性、气密性好，铸造性能好，组织致密	耐蚀、耐磨零件，如衬套、蜗轮及气密性要求高的铸件等

续表 14.8-12

牌 号	特 性	应 用 举 例
ZCuAl9Fe4Ni4Mn2	综合力学性能高, 耐磨性好, 腐蚀疲劳强度高, 铸造性能好, 可以热处理	要求强度高、耐蚀性好的重要零件, 是制造船舶螺旋桨的重要材料, 可用做工作温度小于 400℃ 的耐磨零件, 如轴承、蜗轮、阀体、齿轮、轴套等
ZCuAl10Fe3	力学性能高, 耐磨、耐蚀性好	用于要求高强度、耐磨、耐蚀零件及 250℃ 以下工作条件的管配件, 如轴套、蜗轮等
ZCuAl10Fe3Mn2	力学性能、耐磨性高, 高温下耐蚀及抗氧化性能好	用于制造高强度、耐磨耐蚀零件, 如齿轮、轴承等
ZCuZn38	力学性能高, 铸造性能优良, 切削性好, 耐蚀性好, 但有应力腐蚀开裂倾向	一般结构件及耐蚀件如阀座、支架、法兰等
ZCuZn25Al6Fe3Mn3	力学性能高, 铸造性能好, 耐蚀性好, 但有应力腐蚀开裂倾向	一般高强度、耐磨零件如螺母、螺杆、滑块、蜗轮、耐磨板等
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	力学性能高、铸造性能良好, 耐蚀性较好	制造高强度、耐蚀零件
ZCuZn31Al2	铸造性能良好, 切削加工性好, 耐蚀性较好	制造耐蚀件及压铸件
ZCuZn35Al2Mn2Fe2	力学性能高, 铸造性能、切削性能好, 耐蚀性好	管配件、一般耐磨件
ZCuZn38Mn2Pb2	力学性能高, 耐蚀、耐磨性好, 切削性能良好	一般用途结构件及结构简单铸件, 如套筒、衬套滑块等
ZCuZn40Mn2	力学性能高、铸造性能及耐蚀性好	在各种液体燃料及一般腐蚀性介质中工作的零件, 如阀体、阀杆、泵体等
ZCuZn40Mn3Fe1	力学性能高, 铸造性能及切削加工性好, 耐蚀性较好, 有应力腐蚀开裂倾向	300℃ 以下工作的管配件, 如阀体、管接头等及船舶螺旋桨等
ZCuZn33Pb2	力学性能良好, 铸造性能良好, 一般结构材料	各行业通用构件及煤气、给水设备的壳体
ZCuZn40Pb2	铸造性能、耐磨性、切削加工性、耐蚀性良好, 有应力腐蚀开裂倾向	一般用途的耐蚀、耐磨零件, 如齿轮、轴套等
ZCuZn16Si4	力学性能高, 铸造性、耐蚀性、气密性均好, 铸件组织致密	一般腐蚀介质的管配件, 如水泵、叶轮、旋塞及 50℃ 以下 4.5 MPa 蒸汽中工作的铸件

2.3 铸造轴承合金 (表 14.8-13)

表 14.8-13 铸造轴承合金牌号及力学性能 (摘自 GB/T 1174—1992)

种类	合金牌号		铸造方法	力学性能 \geq		
	新牌号	旧牌号		抗拉强度 σ_b MPa	伸长率 δ_5 (%)	布氏硬度 HBS
锡基	ZSnSb12Pb10Cu4	ZChSnSb12-4-10	J	—	—	29
	ZSnSb12Cu6Cd1	—		—	—	34
	ZSnSb11Cu6	ZChSnSb11-6		—	—	27
	ZSnSb8Cu4	ZChSnSb8-4		—	—	24
	ZSnSb4Cu4	ZChSnSb4-4		—	—	20
铅基	ZPbSb16Sn16Cu2	ZChPbSb16-16-2	J	—	—	30
	ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	ZChPbSb15-5-3		—	—	32
	ZPbSb15Sn10	ZChPbSb15-10		—	—	24
	ZPbSb15Sn5	ZChPbSb15-5		—	—	20
	ZPbSb10Sn6	ZChPbSb10-6		—	—	18
铜基	ZCuSn5Pb5Zn5	—	S、J、	200	13	60*
			L	250	13	65*
	ZCuSn10P1	—	S	200	3	80*
			J	310	2	90*
			L	330	4	90*
	ZCuPb10Sn10	—	S	180	7	65
			J	220	5	70
			L	220	6	70
	ZCuPb15Sn8	—	S	170	5	60*
			J	200	6	65*
L			220	8	65*	
ZCuPb20Sn5	—	S	150	5	45*	
		J	150	6	55*	
ZCuPb30	—	J	—	—	25*	
ZCuAl10Fe3	—	S	490	13	100*	
		J、L	540	15	110*	
铝基	ZAlSn6Cu1Ni1	—	S	110	10	35*
			J	130	15	40*

注：1. 硬度值中有*号者为参考数值。

2. 铸造方法代号表示涵义：J—金属型铸造；S—砂型铸造；L—离心铸造。

表 14.8-14 铸造轴承合金特性及应用

组别	合金代号	主要特征	用途举例
锡基轴承合金	ZSnSb12Pb10Cu4	为含锡量最低的锡基轴承合金,其特点是:性软而韧、耐压、硬度较高,因含铅、浇注性能较其他锡基轴承合金差,热强性也较低,但价格比其他锡基轴承合金较低	适于浇注一般中速、中等载荷发动机的轴承,但不适用于高温部分
	ZSnSb11Cu6	这是机械工业中应用较广的一种锡基轴承合金。其组成成分的特点是:锡含量较低,铜、锑含量较高。其性能特点是:有一定的韧性、硬度适中(27HB)、抗压强度高、可塑性好,所以它的减摩性和抗磨性均较好,其冲击韧性虽比 ZSnSb8Cu4、ZSnSb4Cu4 锡基轴承合金差,但比铅基轴承合金高。此外,还有优良的导热性和耐腐蚀性、流动性能好,膨胀系数比其他巴氏合金都小。缺点是:疲劳强度较低,故不能用于浇铸层很薄和承受较大振动载荷的轴承。此外,工作温度不能高于 110℃,使用寿命较短	适于浇注重载、高速、工作温度低于 110℃ 的重要轴承,如:1471 kW 以上的高速蒸汽机、367.75 kW 的涡轮增压机和涡轮泵、882.6 kW 以上的快速行程柴油机、750 kW 以上的电动机、500 kW 以上发电机,高转速的机床主轴的轴承和轴瓦
	ZSnSb8Cu4	除韧性比 ZSnSb11Cu6 较好,强度及硬度比 ZSnSb11Cu6 较低之外,其他性能与 ZSnSb11Cu6 近似,但因含锡量高,价格较 ZSnSb11Cu6 更贵	适于浇注工作温度在 100℃ 以下的一般载荷压力大的大型机器轴承及轴衬、高速重载汽车发动机薄壁双金属轴承
	ZSnSb4Cu4	这种合金的韧性是巴氏合金中最高的,强度及硬度比 ZSnSb11Cu6 略低,其他性能与 ZSnSb11Cu6 近似,但价格也最贵	用于要求韧性较大和浇注层厚度较薄的重载高速轴承,如:内燃机、涡轮机、特别是航空和汽车发动机的高速轴承及轴衬
铅基轴承合金	ZPbSb16Sn16Cu2	这种合金和 ZSnSb11Cu6 相比,它的摩擦系数较大,硬度相同,抗压强度高,在耐磨性和使用寿命方面也不低,尤其是价格便宜得多;但其缺点是冲击韧性低,在室温下是比较脆的。当轴承经受冲击负荷的作用时,易形成裂缝和剥落;当轴承经受静负荷的作用时,工作情况比较好	适用于工作温度 < 120℃ 的条件下承受无显著冲击载荷、重载高速的轴承,如:汽车拖拉机的曲柄轴承和 882.6 kW 以内的蒸汽或水力涡轮机、750 kW 以内的电动机、500 kW 以内的发电机、367.75 kW 以内的压缩机以及轧钢机等轴承
	ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	这种合金的含锡量比 ZPbSb16Sn16Cu2 约低 2/3,但因加有 Cd(镉)和 As(砷),它们之间的性能却无多大差别。它是 ZPbSb16Sn16Cu2 很好的代用材料	用以代替 ZPbSb16Sn16Cu2 浇注汽车拖拉机发动机的轴承,以及船舶机械、100~250 kW 电动机、抽水机、球磨机和金属切削机床齿轮箱轴承
	ZPbSb15Sn10	这种合金的冲韧性比 ZPbSb16Sn16Cu2 高,它的摩擦系数虽然较大,但因其具有良好的磨合性和可塑性,所以仍然得到广泛的应用。合金经热处理(退火)后,塑性、韧性、强度和减摩性能均大大提高,而硬度则有所下降,故一般在浇注后均进行热处理,以改善其性能	用于浇注承受中等压力、中速和冲击载荷机械的轴承,如汽车、拖拉机发动机的曲轴轴承和连杆轴承。此外,也适用于高温轴承

续表 14.8-14

组别	合金代号	主要特征	用途举例
铅基轴承合金	ZPbSb15Sn5	这是一种性能较好的铅基低锡轴承合金,和锡基轴承合金 ZSnSb11Cu6 相比,耐压强度相同,塑性和导热率较差,在高温高压和中等冲击负荷的情况下,它的使用性能比锡基轴承合金差;但在温度不超过 80~100℃ 和冲击载荷较低条件下,这种合金完全可以适用,其使用寿命并不低于锡基轴承合金 ZSnSb11Cu6	可用于低速、轻压力条件下工作的机械轴承。一般多用于浇铸矿山水泵轴承,也可用于汽轮机、中等功率电动机、拖拉机发动机、空压机等轴承和轴衬
	ZPbSb10Sn6	这种合金是锡基轴承合金 ZSnSb4Cu4 理想的代用材料,其主要特点是:①强度与弹性模数的比值 σ_s/E 较大,抗疲劳剥落的能力较强;②由于铅的弹性模数较小,硬度较低,因而具有较好的顺应性和嵌藏性;③铅有自然润滑性能,并有较好的油膜吸附能力,故有较好的抗咬合性能;④铅和钢的摩擦系数较小,硬度低,对轴颈的磨损小;⑤软硬适中,韧性好,装配时容易刮削加工,使用中容易磨合;⑥原材料成本低廉,制造工艺简单,浇铸质量容易保证。缺点是耐腐蚀性和合金本身的耐磨性不如锡基轴承合金	可代替 ZSnSb4Cu4 用于浇注工作层厚度不大于 0.5 mm、工作温度不超过 120℃ 的条件下,承受中等载荷或高速轻载荷的机械轴承。如:汽车汽油发动机、高速转子发动机、空压机、制冷机、高压油泵等主机轴承,也可用于金属切削机床、通风机、真空泵、离心泵、蒸汽泵、水力透平机和一般农机上的轴承

注:铝基轴承合金 ZAlSnbCu1Ni1 适用于高速重载荷的轴承;铜基轴承合金的应用可参考变形铜合金和铸造铜合金相应牌号(见表 14.8-9 和表 14.8-12)。

第 9 章 有色金属型材

1 棒材

1.1 铜及铜合金拉制棒 (表 14.9-1 ~ 表 14.9-3)

表 14.9-1 铜及铜合金拉制棒牌号、状态及直径规格 (摘自 GB/T 4423—1992)

牌 号	状 态	直径/mm	牌 号	状 态	直径/mm	牌 号	状 态	直径/mm
T2、T3、TP2、 H96、TU1、TU2	硬(Y) 软(M)	5~80	HFe59-1-1、 HFe58-1-1、 HSn62-1、 HMn58-2	硬(Y)	5~60	QCd1	硬(Y) 硬(M)	5~60
H80、H65	硬(Y) 硬(M)	5~40				QCz0.5	硬(Y) 软(M)	5~40
H68	半硬(Y ₂) 软(M)	5~80 13~35	QSn6.5-0.1、 QSn6.5-0.4、 QSn4-3、QSi3-1、 QSn4-0.3、 QAl9-2、QAl9-4、 QAl10-3-1.5	硬(Y)	5~40	BZn15-20	硬(Y) 软(M)	5~40
H62、HPb59-1	半硬(Y ₂)	5~80				BZn15-24-1.5	特硬(T) 硬(Y) 软(M)	5~18
H63、HPb63-0.1	半硬(Y ₂)	5~40				BFe30-1-1	硬(Y) 软(M)	16~50
HPb63-3	硬(Y)	5~30	QSn7-0.2	硬(Y) 特硬(T)	5~40			
	半硬(Y ₂)	5~60					BMn40-1.5	硬(Y)	7~40

注：1. 方棒、六角棒直径系指为内切圆直径或两平行面之间的距离。

2. GB/T 4423—1992 代替 GB/T 4423~4426—1984 和 GB/T 4429~4433—1984。

3. 标记示例：圆棒直径“φ”，方棒内切圆直径“C”，六角棒内切圆直径“S”表示。

用 HSn62-1 拉制、普通级、内切圆直径为 30 mm 六角棒，标记为

棒 HSn62-1 Y S30 GB/T 4423—1992

表 14.9-2 铜及铜合金拉制棒材优先直径 (摘自 GB/T 4423—1992)

直径/mm	优 先 尺 寸/mm	直径/mm	优 先 尺 寸/mm
5~6	5, 5.5, 6	>18~30	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
>6~10	6, 5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10	>30~50	32, 34, 35, 36, 38, 40, 42, 44, 45, 46, 48, 50
>10~15	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	>50~80	52, 54, 55, 56, 58, 60, 65, 70, 75, 80

表 14.9-3 铜及铜合金拉制棒材力学性能(摘自 GB/T 4423—1992)

牌号	状态	直径或对边距离/ mm	抗拉强度		伸长率 \geq		硬度 HBS	牌号	状态	直径或对边距离/ mm	抗拉强度		伸长率 \geq		硬度 HBS
			σ_b /MPa	δ_5 /%	δ_5 /%	σ_b /MPa					δ_5 /%	δ_5 /%			
T2 T3	硬(Y)	5~40	275	5	10	—	HMn58-2	硬(Y)	5~12	440	20	24	—		
		>40~60	245	8	12				>12~40	410	20	24			
		>60~80	210	13	16				>40~60	390	25	29			
TU1, TU2, TP2	硬(Y)	5~80	—	—	—	—	HFe58-1-1	硬(Y)	5~40	440	10	—	—		
		>40~60	—	—	—				>40~60	390	12	—			
H96	硬(Y)	5~40	265	4	—	—	HFe59-1-1	硬(Y)	5~12	490	15	17	—		
		>40~60	245	6	—				>12~40	440	17	19			
		>60~80	205	10	—				>40~60	410	20	22			
	软(M)	5~80	200	35	—	—	QA19-2	硬(Y)	5~40	540	13	16	—		
H80	硬(Y)	5~40	390	—	—	—	QA19-4	硬(Y)	5~40	580	12	13	—		
		软(M)	5~40	275	45				—	—	QA110-3 -1.5	硬(Y)		5~40	630	6	8	—
H68	半硬 (Y ₂)	5~12	370	15	18	—	QSi3-1	硬(Y)	5~12	490	10	13	—		
		>12~40	315	25	30				>12~40	470	15	19			
		>40~80	295	30	34				—	—	—	—		—	
H65	硬(Y)	5~40	390	—	—	—	QSn6.5-0.1 QSn6.5-0.4	硬(Y)	5~12	470	11	13	—		
		软(M)	5~40	295	40				—	—	—	>12~25		440	13	15
H62	半硬 (Y ₂)	5~40	370	15	18	—	QSn7-0.2	硬(Y)	5~40	440	15	19	130~ 200		
		>40~80	335	20	24				—	—	—	—		—	—
HPb59-1	半硬 (Y ₂)	5~20	420	10	12	—	QSn4-0.3	硬(Y)	5~12	410	8	10	—		
		>20~40	390	12	14				>12~25	390	10	13			
		>40~80	370	16	19				>25~40	355	12	15			
HPb63-0.1 H63	半硬 (Y ₂)	5~20	370	15	18	—	QSn4-3	硬(Y)	5~12	430	10	14	—		
		>20~40	340	18	21				>12~25	370	15	21			
HPb63-3	硬(Y)	5~15	490	3	4	—	—	—	>12~25	335	16	23	—		
		>15~20	450	8	9				>25~35	315	16	23			
		>20~30	410	10	12				>35~40	315	16	23			
HSn62-1	硬(Y)	5~20	390	10	12	—	QCr0.5	硬(Y)	5~60	370	4	—	≥100		
		>20~60	360	14	16				—	—	—	—		—	
H63	半硬 (Y ₂)	5~60	370	4	—	—	QCd1	硬(Y)	5~60	215	35	—	≤75		
		>20~60	360	14	16				—	—	—	—		—	
H63	半硬 (Y ₂)	5~40	390	15	17	—	—	—	5~40	390	5	—	—		
		>40~60	360	20	23				—	—	—	5~40		230	38

续表 14.9-3

牌号	状态	直径或对边距离/mm	抗拉强度		伸长率 \geq		硬度 HBS	牌号	状态	直径或对边距离/mm	抗拉强度		伸长率 \geq		硬度 HBS
			σ_b /MPa	δ_m /%	δ_5 /%	σ_b /MPa					δ_m /%	δ_5 /%			
BZn15-20	硬(Y)	5~12	440	5	—	—	BZn15-24 -1.5	软(M)	5~18	295	—	30	—		
		>12~25	390	7	—										
		>25~40	345	12	—										
	软(M)	5~40	295	30	—		BF30-1 -1	硬(Y)	16~50	490	—	—	—		
软(M)	16~50	345	—	25	—										
BZn15-24 -1.5	特硬(T)	5~18	590	—	3	—	BMn40 -1.5	硬(Y)	7~20	540	5	—	—		
		硬(Y)	>20~30	490	7				—						
	>30~40		440	10	—										

注：1. 直径小于10 mm的棒材不做硬度试验。

2. 伸长率指标若同时有 δ_m 和 δ_5 者，仲裁时以 δ_m 为准。

3. 棒材的质量分数（化学成分）应符合GB/T 5231~5234相应牌号的规定。

1.2 铜及铜合金挤制棒（表 14.9-4~表 14.9-8）

表 14.9-4 铜及铜合金挤制棒牌号、状态及规格（摘自GB/T 13808—1992）

牌 号	状态	直径/mm		牌 号	状态	直径/mm	
		圆棒	方、六角棒			圆棒	方、六角棒
T2、T3	R	30~120	30~120	QSi-1-3	R	20~100	—
TU1、TU2、TP2、H80、H68、H59	R	15~120	16~120	QCd1	R	20~120	—
H96、H62、HP659-1、HSn62-1、HSn70-1、HMn58-2、HFe59-1-1、HFe58-1-1、HAl60-1-1、HAl77-2	R	10~160	10~120	QSi3-1	R	20~160	—
				QSi3-5-3-1.5、BF30-1-1、BA113-3、BMn40-1.5	R	40~120	—
				QSn7-0.2、QSn4-3	R	40~120	40~120
HMn55-3-1、HMn57-3-1、HAl66-6-3-2、HAl67-2-5	R	10~160	10~120	QSn6.5-0.1、QSn6.4-0.4	R	30~120	30~120
				QCt0.5	R	18~160	—
QAl9-2、QAl9-4、QAl10-3-1.5、QAl10-4-4、QAl11-6-6、HS180-3、HNi56-3	R	10~160	—	BZn15-20	R	25~120	—

注：1. 方棒、六角棒直径系指内切圆直径或两平行面之间的距离。

2. 化学成分应符合GB/T 5231、GB/T 5232、GB/T 5233、GB/T 5234相应牌号规定。

3. GB/T 13808—1992代替GB4423~4426—84、GB4429~4433—84。

4. 棒材不定尺长度 l ：直径10~50 mm， l 为1~5 m；直径大于50~75 mm， l 为0.5~5 m；直径大于75 mm， l 为0.5~4 m。定尺或倍尺应在不定尺长度内，并应在合同中注明，否则按不定尺供货。

表 14.9-5 普通黄铜、铅黄铜棒直径 (摘自 GB/T 13808—1992)

直径/mm	优选尺寸/mm	直径/mm	优选尺寸/mm
10	10	>50~80	52,54,55,56,58,60,65,70,75,80
>10~18	11,12,13,14,15,16,17,18	>80~120	80,90,95,100,105,110,115,120
>18~30	19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30	>120~160	130,140,150,160
>30~50	32,34,35,36,38,40,42,44,45,46,48,50		

表 14.9-6 铝青铜、硅青铜、铬青铜直径 (摘自 GB/T 13808—1992)

直径/mm	优选尺寸/mm	直径/mm	优选尺寸/mm
10	10	>50~80	52,54,55,56,58,60,65,70,75,80
>10~18	10,11,12,13,14,15,16,17,18	>80~120	85,90,95,100,105,110,115,120
>18~30	19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30	>120~160	130,140,150,160
>30~50	32,34,35,36,38,40,42,44,45,46,48,50	>160~180	170,180

表 14.9-7 白铜棒直径 (摘自 GB/T 13808—1992)

直径/mm	优选尺寸/mm	直径/mm	优选尺寸/mm
25~30	25,26,27,28,29,30	>50~80	52,54,55,56,58,60,65,70,75,80
>30~50	32,34,35,36,38,40,42,44,45,46,48,50	>80~120	85,90,95,100,105,110,115,120

表 14.9-8 铜及铜合金挤制棒力学性能 (摘自 GB/T 13808—1992)

牌 号	状 态	直 径/mm	抗拉强度		伸长率		布氏硬 度 HBS	牌 号	状 态	直 径/mm	抗拉强度		伸长率		布氏硬 度 HBS
			σ_b /MPa	$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$	σ_b /MPa					$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$			
T2, T3	R	30~120	186	30	40	—	HSn70-1	R	10~75	245	40	—	—	—	
TU1, TU2, TP2	R	16~120	—	—	—	—	HMn58-2	R	>75~160	—	—	—	—	—	
H96	R	16~80	196	30	—	—	HMn55-3-1	R	10~120	395	25	29	—	—	
H80	R	>80~120	—	—	—	—	HMn57-3-1	R	>120~160	—	—	—	—	—	
H68	R	16~120	—	—	—	—	HFe58-1-1	R	10~75	490	15	—	—	—	
H68	R	>80~120	295	40	45	—	HFe59-1-1	R	>75~160	—	—	—	—	—	
H62	R	10~160	295	30	35	—	HA160-1-1	R	10~120	295	20	—	—	—	
H59	R	16~120	—	—	—	—	HA160-1-1	R	>120~160	—	—	—	—	—	
HPb59-1	R	10~160	365	18	21	—	HA160-1-1	R	10~120	430	28	31	—	—	
HSn62-1	R	10~120	365	20	22	—	HA160-1-1	R	>120~160	—	—	—	—	—	
	R	>120~160	—	—	—	—			>120~160	—	—	—	—	—	

续表 14.9-8

牌 号	状 态	直 径/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸 长 率		布 氏 硬 度 HBS	牌 号	状 态	直 径/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸 长 率		布 氏 硬 度 HBS
				$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$						$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$	
HA166-6 -3-2	R	10~75	>35	7	—	—	QA111-6-6	R	>50~160	—	—	—	—
		>75~160	—	—	—	—	QSi1-3	R	20~80	490	10	—	—
HA167-2.5	R	10~75	395	15	—	—	QSi3-1	R	>80~100	—	—	—	—
		>75~160	—	—	—	—			20~100	345	20	23	—
HA177-2	R	10~75	245	40	—	—	QSi-3-1.5	R	>100~160	—	—	—	—
		>75~160	—	—	—	—			40~120	—	—	—	—
HNi56-3	R	10~75	440	25	—	—	QSn4-3	R	40~120	275	25	30	—
		>75~160	—	—	—	—	30~40	355	50	55	—		
HSi80-3	R	10~75	295	25	—	—	QSn6.5-0.1	R	>40~100	345	55	60	—
		>75~160	—	—	—	—	QSn6.5-0.4		>100~120	305	58	—	—
QA19-2	R	10~45	490	15	18	—	QSn7-0.2	R	40~120	355	55	64	≥ 70
		>45~120	470	20	24	—	QCd1	R	20~120	196	35	—	≤ 75
		>120~160	—	—	—	—	QCr0.5	R	18~160	—	—	—	—
QA19-4	R	10~120	540	15	17	110~190	BZn15-20	R	25~80	295	30	—	—
		>120~160	450	12	13	110~190			>80~120	—	—	—	—
QA110-3 -1.5	R	10~16	610	8	9	130~190	BFe30-1-1	R	40~80	345	25	—	—
		>16~160	590	12	13	130~190	BFe30-1-1	R	>80~120	—	—	—	—
QA110-4-4	R	10~29	690	4	5	170~240	BA13-3	R	40~80	685	6	—	—
		>29~120	655	5	6	170~240			>80~120	—	—	—	—
		>120~160	590	5	6	170~240			—	—	—	—	
QA111-6 -6	R	10~28	690	4	—	—	BMn40-1.5	R	40~80	345	25	—	—
		>28~50	635	5	—	—			>80~120	—	—	—	—

- 注：1. 伸长率指标同时有 δ_{10} 和 δ_5 者，仲裁时以 δ_{10} 为准。
 2. 直径小于 16 mm 棒材不做布氏硬度试验。
 3. 直径大于 50 mm 的 QA110-3-1.5 棒材，当伸长率 δ_{10} 不小于 15% 时， σ_b 可不小于 540 MPa。
 4. 直径 10~120 mm 的 HFe59-1-1 和 HA160-1-1 棒材，当 σ_b 和 δ_{10} 数值之和不小于 460 时，其伸长率 δ_{10} 分别允许降至 20% 和 15%。

1.3 铜及铜合金矩形棒 (表 14.9-9、表 14.9-10)

表 14.9-9 铜及铜合金矩形棒牌号、状态及规格 (摘自 GB/T 13809—1992)

牌 号	制 造 方 法	状 态	规 格 (a/mm) × (b/mm)
T2	拉 制	软 (M)、硬 (Y)	(3~75) × (4~80)
	挤 制	热 挤 (R)	(20~80) × (30~120)

续表 14.9-9

牌 号	制造方法	状 态	规格 (a/mm) × (b/mm)
H62	拉制	半硬 (Y ₂)	(3~75) × (4~80)
	挤制	热挤 (R)	(5~40) × (8~50)
HPb59-1	拉制	半硬 (Y ₂)	(3~75) × (4~80)
	挤制	热挤 (R)	(5~40) × (8~50)
HPb63-3	拉制	半硬 (Y ₂)	(3~75) × (4~80)

注: 1. 规格中 a 系指棒材厚度、b 系指棒材宽度。

2. 矩形棒宽厚比: $a \leq 10 \text{ mm}$, $b/a \leq 2$; $a > (10 \sim 20) \text{ mm}$, $b/a \leq 3$; $a > 20 \text{ mm}$, $b/a \leq 3.5$ 。

表 14.9-10 铜及铜合金矩形棒材力学性能 (摘自 GB/T 13809—1992)

牌 号	状 态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率		牌 号	状 态	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率	
			$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$				$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$
			\geq				\geq		
T2	软(M)	196	30	36	HPb59-1	半硬(Y ₂)	390	10	12
	硬(Y)	245	6	9			375	15	18
	热挤(R)	186	30	40			340	15	17
H62	半硬(Y ₂)	335	15	17	HPb63-3	半硬(Y ₂)	380	12	14
		335	20	23			365	16	19
	热挤(R)	295	30	35					

注: 1. 伸长率指标仲裁时, 以 δ_{10} 为准。

2. 棒材的化学成分应符合 GB/T 5231、GB/T 5232 的规定。

1.4 铝及铝合金挤压棒材(表 14.9-11~表 14.9-14)

表 14.9-11 铝及铝合金挤压棒材牌号、状态及规格 (摘自 GB/T 3191—1998)

牌 号	供应状态	规 格/mm			
		圆棒直径		方棒、六角棒内切圆直径	
		普通棒材	高强度棒材	普通棒材	高强度棒材
1070A, 1060, 1050A, 1035, 1200, 8A06, 5A02, 5A03, 5A05, 5A06, 5A12, 3A21, 5052, 5083, 3003	H112 F 0	5~600	—	5~200	—
2A70, 2A80, 2A90, 4A11, 2A02, 2A06, 2A16	H112, F	5~600	—	5~200	—
	T6	5~150	—	5~120	—
7A04, 7A09, 6A02, 2A50, 2A14	H112, F	5~600	20~160	5~200	20~100
	T6	5~150	20~120	5~120	20~100
2A11, 2A12	H112, F	5~600	20~160	5~200	20~100
	T4	5~150	20~120	5~120	20~100

续表 14.9-11

牌 号	供应状态	规 格/mm			
		圆棒直径		方棒、六角棒内切圆直径	
		普通棒材	高强度棒材	普通棒材	高强度棒材
2A13	H112, F	5~600	—	5~200	—
	T4	5~150	—	5~120	—
6063	T5, T6	5~25	—	5~25	—
	F	5~600	—	5~200	—
6061	H112, F	5~600	—	5~200	—
	T6	5~150	—	5~120	—
	T4				

注：1. 棒材的化学成分应符合 GB/T 3190—1996《变形铝及铝合金化学成分》相应牌号的规定。

2. GB/T 3191—1998 铝及铝合金挤压棒材代替 GB/T 3191—82、GB/T 3192—82 及 GB/T 10572—89。

3. 标记示例：用 2A12 合金制造的 T4 状态、直径 30 mm 的 B 级圆棒，标记为：

棒 2A12-T4 B 级 ϕ 30 GB/T 3191—1998。

表 14.9-12 铝及铝合金棒材室温纵向力学性能 (摘自 GB/T 3191—1998)

牌 号	供应状态	试样状态	棒材直径 (方棒、六角棒内 切圆直径) /mm	抗拉强度	规定非比例	伸长率
				σ_b /MPa	伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	
				≥		
1060	0	0	≤150	60~95	15	22
	H112	H112		60	15	22
1070A	H112	H112		55	15	—
1050A				65	20	—
1200				75	20	—
1035, 8A06				0, H112	0, H112	≤120	—	25
3003	0	0		95~130	35	22
	H112	H112		90	30	22
3A21	0	0		≤165	—	20
5A02				≤225	—	10
5A03				175	80	13
5A05				265	120	15
5A06				315	155	15
5A12				370	185	15
5052	H112	H112		175	70	—
	0	0		175~245	70	20

续表 14.9-12

牌 号	供应状态	试样状态	棒材直径 (方棒、六角棒内 切圆直径) /mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%
					\geq	
2A11	H112	T42	≤ 150	370	215	12
2A12			≤ 22	390	255	12
			$> 22 \sim 150$	420	275	10
2A13	T4	T4	≤ 22	315	—	4
			$> 22 \sim 150$	345	—	4
6061	H112, T6	T62, T6	≤ 150	260	240	9
	T4	T4		180	110	14
6063	T6	T6	≤ 25	205	170	9
	T5	T5	≤ 12.5	150	110	7
			$> 12.5 \sim 25.0$	145	105	7
7A04, 7A09	H112	T62	≤ 22	490	370	7
	T6	T6	$> 22 \sim 150$	530	400	6
2A02	H112	T62	≤ 150	430	275	10
2A16			355	235	8	
2A06			≤ 22	430	285	10
2A06	T6	T6	$> 22 \sim 100$	440	295	9
			$> 100 \sim 150$	430	285	10
			295	—	12	
6A02			≤ 150	355	—	12
2A50			355	—	8	
2A70, 2A80, 2A90			≤ 22	440	—	10
2A14	$> 22 \sim 150$	450	—	10		

注：1. 直径大于 150 mm 棒材及表中未列合金棒材附实测结果。

2. 要求退火交货的非热处理强化铝合金棒材，若热挤压状态性能符合退火状态的性能，可不进行退火。

表 14.9-13 高强度铝合金棒材室温纵向力学性能 (GB/T 3191—1998)

牌 号	供应状态	试样状态	棒材直径 (方棒、六角棒内 切圆直径) /mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%
					不小于	
2A11	H112, T4	T42, T4	20~120	390	245	8
2A12			20~120	440	305	8
6A02	H112, T6	T62, T6	20~120	305	—	8
2A50			20~120	380	—	10
2A14			20~120	460	—	8
			20~100	550	450	6
7A04, 7A09		$> 100 \sim 120$	530	430	6	

表 14.9-14 铝合金挤压棒材高温持久纵向力学性能 (摘自 GB/T 3191—1998)

牌 号	温度/℃	应力/MPa	保持时间/h
2A02	270±3	64	100
		78	50
2A16	300±3	69	100

注: 2A02 合金棒材, 应力在 78 MPa、50 h 不合格时, 则以 64 MPa、100 h 试验结果为最终依据。

2 管材

2.1 一般用途加工铜及铜合金无缝圆管 (表 14.9-15~表 14.9-17)

表 14.9-15 黄铜薄壁无缝管尺寸规格 (摘自 GB/T 16866—1997)

公称外径/mm	公称壁厚/mm	公称外径/mm	公称壁厚/mm	公称壁厚系列/mm
3, 3.2	0.15~0.60	18.5	0.35~0.90	0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90
3.5	0.15~0.70	20	0.45~0.90	
4.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.5	0.15~0.90	22	0.50~0.90	
12, 12.6	0.20~0.90	24, 25.2, 26, 27.5	0.60~0.90	
14, 15.6, 16, 16.5	0.30~0.90	28	0.70~0.90	
18	0.35~0.90	30	0.80, 0.90	

注: 黄铜薄壁无缝管供应长度为 1 000~4 000 mm。

表 14.9-16 挤制铜及铜合金无缝管尺寸规格 (摘自 GB/T 16866—1997)

公称外径/mm	公称壁厚/mm	公称外径/mm	公称壁厚/mm	公称壁厚系列/mm
20, 21, 22	1.5~3.0, 4.0	105, 110	10~30	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.5, 9.0, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5, 40, 42.5, 45, 50
23, 24, 25, 26	1.5~4.0	115, 120	10~37.5	
27, 28, 29	2.5~6.0	125, 130	10~35	
30, 32	2.5~6.0	135, 140	10~37.5	
34, 35, 36	3.0~6.0	145, 150	10~35	
38, 40, 42, 44	3.0, 4.0, 5.0~10	155, 160	10~42.5	
45, (46), (48)	3.0~4.0, 5.0~10	165, 170	10~42.5	
50, (52), (54), 55	3.0~4.0, 5.0~7.5, 10~17.5	175, 180	10~45	
(56), (58), 60	4.0~5.0, 7.5, 10~17.5	185, 190, 195, 200	10~45	
(62), (64), 65, 68, 70	4.0, 5.0, 7.5~20	(205), 210, (215), 220	10~42.5	
(72), 74, 75, (78), 80	4.0, 5.0, 7.5~25	(225), 230, (235), 240, (245), 250	10~15, 20, 25~50	
85, 90	7.5, 10~30	(255), 260, (265), 270, (275), 280	10~15, 20, 25, 30	
95, 100	7.5, 10~30	290, 300	20, 25, 30	

注: 1. 标称外径加括号 () 的为不推荐采用的规格。

2. 挤制管材外形尺寸范围: 纯铜管, 外径 30~300 mm, 壁厚 5.0~30 mm;

黄铜管, 外径 21~280 mm, 壁厚 1.5~42.5 mm;

铝青铜管, 外径 20~250 mm, 壁厚 3~50 mm。

表 14.9-17 拉制铜及铜合金无缝管尺寸规格 (摘自 GB/T 16866—1997)

公称外径/mm	公称壁厚/mm	标称壁厚系列/mm
3, 4, 5, 6, 7	0.5~1.5	0.5, 0.75, 1.0,
8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	0.5~3.5	(1.25), 1.5, 2.0,
16, 17, 18, 19, 20	0.5~4.5	2.5, 3.0, 3.5, 4.0,
21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, (29), 30	1.0~5.0	4.5, 5.0, 6.0, 7.0,
31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, (39), 40	1.0~5.0	8.0, (9.0), 10.0
(41), 42, (43), (44), 45, (46), (47), 48, (49), 50	1.0, 1.5~6.0	
(52), 54, 55, (56), 58, 60	1.0, 1.5~6.0	
(62), (64), 65, (66), 68, 70	2.0~10.0	
(72), (74), 75, 76, (78), 80	2.0~10.0	
(82), (84), 85, 86, (88), 90, (92), (94), 96, (98), 100	2.0~10.0	
105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150	2.0~10.0	
155, 160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, 200	3.0~10.0	
210, 220, 230, 240, 250	3.0~7.0	
260, 270, 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360	3.5~5.0	

注: 1. 壁厚 1.25 mm 的只供应拉制锌白铜管。

2. 标称尺寸加括号 () 者, 表示不推荐采用规格。

3. 拉制管材外形尺寸范围:

纯铜管: 外径 3~360 mm, 壁厚 0.5~10 mm (1.25 mm 除外);

黄铜管: 外径 3~200 mm, 壁厚 0.5~10 mm (1.25 mm 除外);

锌白铜管: 外径 4~40 mm, 壁厚 0.5~4.0 mm。

2.2 铜及铜合金拉制管 (表 14.9-18)

表 14.9-18 铜及铜合金拉制管牌号、规格及力学性能 (摘自 GB/T 1527—1997)

牌 号	状 态	室温纵向力学性能 \geq				规 格	
		公称外径/ mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率		标称外径/ mm	壁厚/ mm
				$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$		
T2, T3, TP1, TP2, TU1, TU2	硬 (Y)	≤ 100	3.5	—	—	3~360	0.5~10
		$> 100 \sim 360$	295	—	—		
	半硬 (Y ₂)	≤ 100	235~345	—	—	3~100	0.5~10
H96	软 (M)	3~360	205	35	40	3~360	0.5~10
	硬 (Y)	3~200	295	—	—	3~200	0.15~10
H68	软 (M)	3~200	205	35	42	3~200	0.15~10
	硬 (Y)	3.2~30	390	—	—	3.2~30	0.15~0.90
	半硬 (Y ₂)	3~60	345	30	34	3~60	0.15~10
	软 (M)	3~60	295	38	43	3~60	0.15~10

续表 14.9-18

牌 号	状 态	室温纵向力学性能 \geq				规 格	
		公称外径/ mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率		公称外径/ mm	壁厚/ mm
				$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$		
H62	硬 (Y)	3.2~30	390	—	—	3.2~30	0.15~0.90
	半硬 (Y ₂)	3~200	335	30	34	3~200	0.15~10
	软 (M)	3~200	295	38	43	3~200	0.15~10
HSn70-1	半硬 (Y ₂)	3~60	345	30	34	3~60	0.5~10
	软 (M)	3~60	295	38	43	3~60	0.5~10
HSn62-1	半硬 (Y ₂)	3~60	335	30	—	3~60	0.5~10
	软 (M)	3~60	295	35	—	3~60	0.5~10
BZn15-20	硬 (Y)	4~40	490	3	—	4~40	0.5~4.0
	半硬 (Y ₂)	4~40	390	15	—	4~40	0.5~4.0
	软 (M)	4~40	295	30	—	4~40	0.5~4.0

- 注：1. 纯铜、黄铜、锌白铜拉制圆管适用于各工业部门，GB/T 1527—1997 铜及铜合金拉制管代替 GB/T 1527—1987、GB/T 1529—1987、GB/T 8006—1987、GB/T 8007—1987。
2. 圆管的化学成分符合 GB/T 5231、GB/T 5232、GB/T 5234 标准中相应牌号的规定。
3. 管材的尺寸及其允许偏差应符合 GB/T 16866 一般用途加工铜及铜合金无缝圆管尺寸及允许偏差的规定。
4. TU1、TU2 管材无力学性能要求。
5. 管材壁厚不大于 2.5 mm 的 BZn15-20 软管在扩口率为 20% 时应不产生裂纹；管材内径为 5~15 mm 者，顶心锥度为 30°，管材内径大于 15 mm 者，顶心锥度为 60°。需方在合同中注明，方进行扩口试验。
6. T2、T3 管材退火后作压扁试验，压扁后内壁距离等于壁厚。半硬管和硬管退火温度 550~650℃，时间为 1~2 h。供方可不进行此项试验，但必须保证。
7. TP1、TP2 软管或硬管在氢气中退火后作压扁试验，压扁后内壁距离等于壁厚，退火温度为 750~800℃，时间为 40 min，供方可不进行此次试验，但必须保证。
8. 壁厚不大于 2.5 mm 的 HSn62-1 和 HSn70-1 管材进行压扁试验时，软管压扁后内壁距离等于壁厚，半硬管压扁后内壁距离等于 3 倍壁厚。压扁试验后不应有内吸可见裂纹或裂口。
9. HSn62-1、HSn70-1 的半硬管和 H62、H68、BZn15-20 的半硬、硬态管材，应进行消除内应力退火。需方有特殊要求并在合同中注明，可进行内应力检验。
10. 管材可按 GB/T 1527—1997 规定方法进行液压试验。供方可不进行液压试验，但必须保证。
11. 标记示例：用 H62 制造、硬状态、外径 20 mm、壁厚 0.5 mm 圆管，标记为：管 H62Y ϕ 20×0.5 GB/T 1527—1997。

2.3 铜及铜合金挤制管 (表 14.9-19、表 14.9-20)

表 14.9-19 铜及铜合金挤制管牌号、状态及规格 (摘自 GB/T 1528—1997)

牌 号	状 态	规 格	
		外径/mm	壁厚/mm
T2、T3、TP2、TU1、TU2	挤制 (R)	30~300	5~30
H96、H62、HPb59-1、HFe59-1-1		21~280	1.5~42.5
QA19-2、QA19-4、QA110-3-1.5、QA110-4-4		20~250	3~50

- 注：1. 管材化学成分应符合 GB/T 5231、GB/T 5232、GB/T 5233 标准中相应牌号的规定。
2. 管材的尺寸及尺寸允许偏差应符合 GB/T 16866—1997 一般用途的加工铜及铜合金无缝圆形管材尺寸规格的规定。
3. 标记示例：用 T2 制造、挤制状态、外径为 80 mm、壁厚 9.0 mm 的圆管，标记为
管 T2R ϕ 80×9.0 GB/T 1528—1997
4. GB/T 1528—1997 代替 GB1528—87、GB1530—87、GB8889—1988。

表 14.9-20 铜及铜合金挤制管室温纵向力学性能 (摘自 GB/T 1528—1997)

牌 号	状 态	壁 厚/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸 长 率		布氏硬度 HB
				$\delta_{10}/\%$	$\delta_5/\%$	
				不小于		
T2、T3、TP2	R	5~30	186	35	42	—
H96	R	1.5~42.5	186	35	42	—
H62	R	1.5~42.5	295	38	43	—
HPb59—1	R	1.5~42.5	390	20	24	—
HFe59—1—1	R	1.5~42.5	430	28	31	—
QA19—2	R	3~50	470	15	—	—
QA19—4	R	3~50	490	15	17	110~190
QA110—3—1.5	R	<20	590	12	14	140~200
		≥ 20	540	13	15	135~200
QA110—4—4	R	3~50	635	5	6	170~230

- 注：1. 仲裁时，伸长率指标以 δ_{10} 为准。
 2. 布氏硬度试验应在合同中注明，方予进行。
 3. TU1、TU2 管材无力学性能要求的规定。
 4. 外径大于 200 mm 的 QA19—2、QA19—4、QA110—3—1.5、QA110—4—4 管材一般不作拉伸试验，但供方必须保证。

2.4 热交换器用铜合金无缝管 (表 14.9-21、表 14.9-22)

表 14.9-21 热交换器用铜合金无缝管 (摘自 GB/T 8890—1998)

外径/mm	壁 厚/mm							
	0.75	1.0	1.25	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
10	○	○	—	—	—	—	—	—
11	○	○	—	—	—	—	—	—
12	○	○	—	—	—	—	—	—
14	○	○	○	○	○	○	—	—
15	○	○	○	○	○	○	○	—
16	○	○	○	○	○	○	○	○
18	○	○	○	○	○	○	○	○
19	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○	○	○
21	○	○	○	○	○	○	○	○
22	○	○	○	○	○	○	○	○
23	○	○	○	○	○	○	○	○
24	○	○	○	○	○	○	○	○
25	○	○	○	○	○	○	○	○
26	—	○	○	○	○	○	○	○
28	—	○	○	○	○	○	○	○
30	—	○	○	○	○	○	○	○
32	—	○	○	○	○	○	○	○
35	—	○	○	○	○	○	○	○
38	—	—	—	○	○	○	○	○
40	—	—	—	○	○	○	○	○
42	—	—	—	○	○	○	○	○
45	—	—	—	○	○	○	○	○

- 注：1. “○”表示有产品，“—”表示无产品。
 2. 管材长度 ≤ 9 m，普通级允许偏差 $^{+10}_{-10}$ mm，较高级 $^{+5}_{-5}$ mm；管线长度 $> 9 \sim 18$ m，普通级允许偏差 $^{+10}_{-10}$ mm，较高级 $^{+10}_{-10}$ mm。
 3. 壁厚 0.75 mm 黄铜管最大外径为 20 mm。
 4. 产品适用于船舶和电力等工业部门热交换器及冷凝器用。

表 14.9-22 热交换器用铜合金无缝管力学性能 (摘自 GB/T 8890—1998)

牌 号	状 态	尺寸范围 直径×壁厚 /mm	抗拉强度	伸长率	牌 号	状 态	尺寸范围 直径×壁厚 /mm	抗拉强度	伸长率
			σ_b /MPa	δ_{10} /%				σ_b /MPa	δ_{10} /%
BFe30-1-1	M(软)	(10~35)× (0.75~3.0)	370	25	HSn70-1	M	(10~45) — (0.75~3.5)	295	38
	Y ₂ (半硬)		490	6		Y ₂		320	35
BFe10-1-1	M	(10~45)× (0.75~3.5)	300	25	H68A	M	(10~45) — (0.75~3.5)	295	38
	Y ₂		345	8		Y ₂		320	35
AAI77-2	M	(10~45)× (0.75~3.5)	345	45	H85A	M	(10~45) — (0.75~3.5)	245	25
	Y ₂		370	40		Y ₂		295	20

注: 1. 本表性能只适用于外径 10~35 mm, 外径大于 35 mm 黄铜管性能由双方协定。

2. 管材扩口试验冲头锥度 60°, BFe10-1-1 管材扩口率为 15%, 其他牌号管材扩口率均为 25%。

3. 管材不圆度不应超出外径允差, 精度级别应在合同中注明, 未注明者按普通级供应。

4. 管材弯曲度 (\leq) Y₂: 5 mm/(1 000~2 000) mm, 8 mm/(>2 000~2 500) mm, 12 mm/(>2 500~3 000) mm, 12 mm/任意 3 000 mm。

M: 8 mm/(1 000~2 000) mm, 13 mm/(>2 000~2 500) mm, 19 mm/(>2 500~3 000) mm, 19 mm/任意 3 000 mm。

5. 管材液压试验压力: BFe30-1-1、AAI77-2 压力为 6.86 MPa, 其余牌号管材压力为 4.96 MPa, 持续时间均为 10 s。

6. 管材化学成分应符合 GB/T 5232、GB5234 相应牌号规定。

7. 标记示例: 用 H68A 制作, Y₂ 较高精度、外径 25 mm, 壁厚 1.0 mm, 长度 8 500 mm 管材, 标记为管 H68AY₂ 较高 $\phi 25 \times 1.0 \times 8 500$ GB/T 8890—1998

2.5 铜及铜合金毛细管 (表 14.9-23~表 14.9-27)

表 14.9-23 铜及铜合金毛细管牌号、化学成分、状态及规格 (摘自 GB/T 1531—1994)

牌 号		化学成分	供应状态	规格
T2, TP1, TP2, H68, H62		按 GB/T 5231 ~GB/T 5234 中 相应牌号规定	硬 Y、半硬 Y ₂ 、软 M	外径 $\phi = \phi 0.5 \sim 3.0$ mm 内径 $\phi = \phi 0.3 \sim 2.5$ mm
H96, QSn4-0.3, QSn6.5-0.1, BZn15-20			硬 Y、软 M	
产品分级	高级	适用于家用电冰箱、电冰柜、高精度仪表等工业部门用铜毛细管		
	较高级	适用于较高精度的仪器、仪表和电子等工业部门之用		
	普通级	适用于一般精度仪器、仪表和电子等工业部门之用		

注: 标记示例: 用 T2 制造、硬状态、高级、外径 2 mm、内径 0.7 mm 的毛细管, 标记为管 T2Y 高 2×0.7 GB/T 1531—1994

表 14.9-24 铜毛细管高级管材尺寸规格 (摘自 GB/T 1531—1994) (mm)

外 径	内 径								
	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	1.0
1.70	—	○	○	○	—	—	—	—	—
1.80	○	○	○	○	○	—	—	—	—
1.85	—	○	○	○	○	—	—	—	—
1.90	—	○	○	○	○	○	—	—	—

续表 14.9-24

外 径	内 径								
	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	1.0
2.00	—	○	○	○	○	○	—	—	—
2.05	—	—	—	—	—	—	○	○	—
2.20	—	—	—	—	—	—	—	—	○

注：1. “○”表示有产品。“—”表示无产品。成卷供应管材其长度不小于3 m，长度由双方协议。
 2. 直条供应管材长度为0.15~3.5 m，长度0.15~0.60 m，长度允许偏差+2.0 mm；长度>0.60~1.80 m，允许偏差+3.5 mm；长度>1.80~3.50 m，允许偏差+7.0 mm。

表 14.9-25 铜及铜合金毛细管（普通级和较高级）尺寸规格（摘自 GB/T 1531—1994）

(mm)

外径	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0
内径	0.3	0.4	0.5	0.4 0.6	0.4 0.8	0.4 1.0	0.4 1.2	0.5 1.3	0.4 1.4	0.5 1.5	0.4 1.6	0.4 1.8	0.4 1.8	0.6 2.0	0.7 2.1	0.8 2.1	1.0 2.3	1.2 2.5

注：1. 内径尺寸系列：0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.4、1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1、2.2、2.3、2.4、2.5 mm。
 2. 外径1.0，内径0.7；外径1.2，内径0.9；外径1.4，内径1.1；外径1.5，内径1.2；外径1.6，内径0.5、1.3；外径1.7，内径0.6、1.4；外径1.8，内径0.5、0.7、1.5；外径2.0，内径0.5、0.7、0.9、1.7；外径2.2，内径0.5、0.7、0.9、1.1；外径2.4，内径0.7、0.9、1.1、1.3；外径2.5，内径0.8、1.0、1.2、1.4；外径2.6，内径0.9、1.1、1.3、1.5；外径2.8，内径1.1、1.3、1.5、1.7；外径3.0，内径1.3、1.5、1.7、1.9无产品（单位为mm）。

表 14.9-26 铜及铜合金毛细管室温纵向力学性能（摘自 GB/T 1531—1994）

牌 号	状态	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_{10} /%	牌 号	状态	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_{10} /%
T2、TP1、TP2	M	≥ 205	≥ 35	H62、H68	M	≥ 295	≥ 35
	Y2	245~370	—		Y2	≥ 345	≥ 30
	Y	≥ 345	—		Y	≥ 390	—
H96	M	≥ 205	≥ 35	QSn4-0.3	M	≥ 325	≥ 30
	Y	≥ 295	—	QSn6.5-0.1 BZn15-20	Y	≥ 490	—

注：外径与内径之差小于0.30 mm的毛细管不作拉力试验。有特殊要求者，由供需双方协商解决。

表 14.9-27 铜及铜合金毛细管气密性试验压力（GB/T 1531—1994）

外径与内径之差/mm (2倍壁厚)	气体压力/MPa			持续时间/s
	高级	较高级	普通级	
0.20~0.50	—	2.9	2.0	30~60
>0.5~0.70	—	3.9	2.9	
>0.70~1.00	6.9	5.9	4.9	
>1.00~1.80	7.8	7.8	6.9	

注：1. 普通管和较高级管材应进行通气性试验，内孔应畅通；高级管材应进行出口压力试验或流量试验，压力差值或流量值由供需双方协商。
 2. 管材按本表压力值进行试验时，管材不变形不漏气。

2.6 铝及铝合金管材 (表 14.9-28~表 14.9-32)

铝及铝合金管材的正截面形状如图 14.9-1~图 14.9-4。

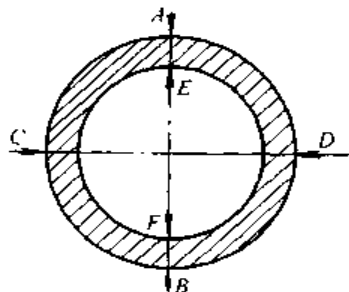


图 14.9-1 圆管

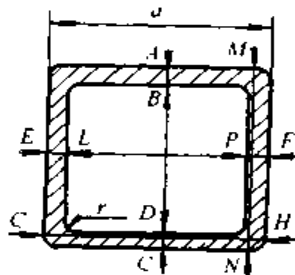


图 14.9-2 方形管

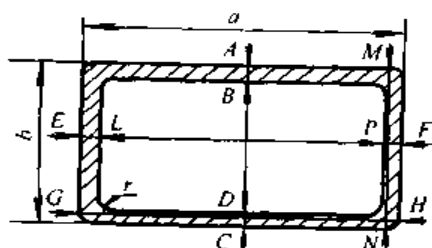


图 14.9-3 矩形管

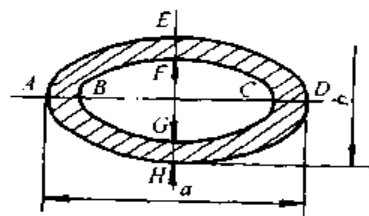


图 14.9-4 椭圆管

表 14.9-28 铝及铝合金挤压圆管尺寸规格 (摘自 GB/T 4436—1995) (mm)

外径	25	28	30	32	34	36	38	40	42	45	48	50	52	55	58	60	62	65	70	
壁厚	5	5, 6	5 ~ 8	5 ~ 8	5 ~ 10	5 ~ 10	5 ~ 10	5 ~ 12.5	5 ~ 12.5	5 ~ 15	5 ~ 15	5 ~ 15	5 ~ 15	5 ~ 15	5 ~ 15	5 ~ 17.5	5 ~ 17.5	5 ~ 20	5 ~ 20	
外径	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	
壁厚	5 ~ 22.5	5 ~ 22.5	5 ~ 25	5 ~ 25	5 ~ 27.5	5 ~ 30	5 ~ 32.5	5 ~ 32.5	5 ~ 32.5	7.5 ~ 32.5	7.5 ~ 32.5	7.5 ~ 32.5	10 ~ 32.5	10 ~ 32.5	10 ~ 32.5	10 ~ 35	10 ~ 35	10 ~ 40	10 ~ 40	
外径	170	175	180	185		210	215	220	225	230	235	240	245	250	260	270	280			
	190	195	200	205		290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400			
壁厚	10~40							15~50												
壁厚尺寸系列	5, 6, 7, 7.5, 8, 9, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 37.5, 40, 42.5, 45, 47.5, 50。外径 85~130 壁厚无 6, 7, 8, 9																			

表 14.9-29 铝及铝合金冷拉、冷轧圆管尺寸规格 (摘自 GB/T 4436—1995) (mm)

外径	6	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24	25	26	28	30	32	34	35
壁厚	0.5, 0.75, 1.00	0.5 ~ 2.0	0.5 ~ 2.5	0.5 ~ 3.0	0.5 ~ 3.0	0.5 ~ 3.0	0.5 ~ 3.5	0.5 ~ 3.5	0.5 ~ 4.0	0.5 ~ 5.0	0.5 ~ 5.0	0.5 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0
外径	36	38	40	42	45	48	50	52	55	58	60	65	70	75	80	85	90	95
壁厚	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	0.75 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	2.0 ~ 5.0	2.0 ~ 5.0	2.0 ~ 5.0	2.0 ~ 5.0
外径	100	105	110	115	120	壁厚尺寸系列												
壁厚	2.5 ~ 5.0	2.5 ~ 5.0	2.5 ~ 5.0	3.0 ~ 5.0	3.5 ~ 5.0	0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0												

表 14.9-30 铝及铝合金冷拉正方形管材尺寸规格 (摘自 GB/T 4436—1995) (mm)

公称边长 <i>a</i>	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32	36	40	42	45	50	55	60	65	70
壁厚	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 2.0	1.0 ~ 2.0	1.0 ~ 2.5	1.0 ~ 2.5	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0	1.5 ~ 4.5	1.5 ~ 4.5	1.5 ~ 4.5	1.5 ~ 4.5	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0	1.5 ~ 5.0
壁厚尺寸系列	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.5, 5.0																		

表 14.9-31 铝及铝合金冷拉矩形管尺寸规格 (摘自 GB/T 4436—1995) (mm)

公称边长 <i>a</i> × <i>b</i>	14 × 10	16 × 12	18 × 10	18 × 14	20 × 12	22 × 14	25 × 15	28 × 16	28 × 22	32 × 18
壁厚	1.0~2.0	1.0~2.0	1.0~2.0	1.0~2.5	1.0~2.5	1.0~2.5	1.0~3.0	1.0~3.0	1.0~4.0	1.0~4.0
公称边长 <i>a</i> × <i>b</i>	32 × 25	36 × 20	36 × 28	40 × 25	40 × 30	45 × 30	50 × 30	55 × 40	60 × 40	70 × 50
壁厚	1.0~5.0	1.0~5.0	1.0~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0	1.5~5.0

注: 壁厚尺寸系列: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0 mm。

表 14.9-32 铝及铝合金冷拉椭圆形管尺寸规格 (摘自 GB/T 4436—1995) (mm)

长轴 <i>a</i>	短轴 <i>b</i>	壁 厚	长轴 <i>a</i>	短轴 <i>b</i>	壁 厚
27.0	11.5	1.0	67.5	28.5	2.0
33.5	14.5	1.0	74.0	31.5	1.5
40.5	17.0	1.0	74.0	31.5	2.0
40.5	17.0	1.5	81.0	34.0	2.0
47.0	20.0	1.0	81.0	34.0	2.5
47.0	20.0	1.5	87.5	37.0	2.0
54.0	23.0	1.5	87.5	40.0	2.5
54.0	23.0	2.0	94.5	40.0	2.5
60.5	25.5	1.5	101.0	43.0	2.5
60.5	25.5	2.0	108.0	45.5	2.5
67.5	28.5	1.5	114.5	48.5	2.5

3 板材

3.1 黄铜板 (表 14.9-33、表 14.9-34)

表 14.9-33 黄铜板牌号及规格 (摘自 GB/T 2041—1989)

合金牌号	供应状态	厚度/mm	宽度/mm	合金牌号	供应状态	厚度/mm	宽度/mm
H59、H62、 HPb59-1、 HSn62-1	热轧 (R)	4.0~60.0	200~3 000	H59、H62、H65、 H68、H80、H90、 H96、HMn58-2、 HPb59-1、 HSn62-1	软 (M) 硬 (Y)	0.2~10.0	200~3 000
H65、H68、H80、 H90、H96、 HMn58-2			200~600	H62、H65、H68、 H90、HMn58-2、 HPb59-1、 H62、H68	半硬 (Y ₂) 特硬 (T)		

- 注: 1. 宽度不小于 1 100 mm 的冷轧板, 最大供应长度为 3 000 mm。
 2. 供应状态应在合同中注明, 否则按硬态供货。
 3. 化学成分应符合 GB/T 5232 的规定。
 4. 标记示例: 用 H62 制成、硬态、软高级、厚度 1.5 mm、宽度 600 mm、长度 1 200 mm 的黄铜板, 标记为板 H62Y 较高级 1.5×600×1 200 GB/T 2041—1989

表 14.9-34 黄铜板的力学性能及杯突深度 (摘自 GB/T 2041—1989)

合金牌号	状态	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_{10} /% \geq	厚度/mm				
				0.20~0.29	>0.29~0.40	>0.40~0.60	>0.60~1.10	>1.10~1.50
				杯突深度/mm (冲头半径为 10) \geq				
H59	热轧 (R)	294	25	—	—	—	—	—
H62		294	30	—	—	—	—	—
H65		—	—	—	—	—	—	—
H68		294	40	—	—	—	—	—
H80		—	—	—	—	—	—	—
H90		—	—	—	—	—	—	—
H96		—	—	—	—	—	—	—
HPb59-1		372	18	—	—	—	—	—
HMn58-2		—	—	—	—	—	—	—
HSn62-1	343	20	—	—	—	—	—	
H59	软 (M)	294	25	—	—	—	—	—
H62		294	40	7.5	9.5	9.5	10.0	10.5
H65		294	40	7.5	9.5	9.5	10.0	10.5
H68		294	40	9.0	10.0	10.0	11.5	12.0
H80		265	50	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
H90		245	35	7.5	8.0	9.0	10.0	10.5
H96		216	33	7.9	8.0	8.0	9.0	10.0

续表 14.9-34

合金牌号	状态	抗拉强度 σ_b /MPa \geq	伸长率 δ_{10} /% \geq	厚度/mm				
				0.20~0.29	>0.29~0.40	>0.40~0.60	>0.60~1.10	>1.10~1.50
				杯突深度/mm (冲头半径为10)				
HPb59-1 HMn58-2 HSn62-1		343 382 294	25 30 35	—	—	—	—	—
H62	半硬 (Y ₂)	243~460	20	5.5~7.5	7.0~9.0	7.0~9.5	8.0~10.0	8.5~11.0
H65		343~460	25	5.5~7.5	7.0~9.5	7.5~9.5	8.0~10.0	8.5~11.0
H68		343~441	25	7.0~9.0	8.0~10.0	9.0~11.0	9.5~11.5	10.0~12.5
H90		333~441	7	—	—	—	—	—
HPb59-1 HMn58-2		392~490 441~610	12 25	—	—	—	—	—
H59	硬 (Y)	412	5	—	—	—	—	—
H62		412	10	5.0~8.0	7.0~9.0	7.0~9.0	7.5~9.5	—
H65		412	10	4.0~7.0	6.0~8.0	6.0~8.0	6.5~8.5	—
H68		392	13	5.0~8.0	7.0~9.0	7.0~9.0	7.5~9.5	—
H80		392	2	—	—	—	—	—
H90		392	3	—	—	—	—	—
H96		323	3	—	—	—	—	—
HMn58-2		588	3	—	—	—	—	—
HSn62-1		392	5	—	—	—	—	—
HPb59-1		441	5	—	—	—	—	—
H62	特硬	588	2.5	—	—	—	—	—
H68	(T)	490	3	—	—	—	—	—

注：1. 厚度不小于0.5 mm的板材，拉伸试验，应符合本表规定，厚度小于0.5 mm的板材，不作拉伸试验，特殊要求者，可由供方提供实测数据。厚度不小于15 mm的热轧板不作拉伸试验。

2. 板材杯突实验需在合同中注明才予进行。

3.2 铝青铜板 (表 14.9-35)

表 14.9-35 铝青铜板牌号、尺寸规格及力学性能 (摘自 GB/T 2043—1989)

牌 号	状态	抗拉强度	伸长率	厚度	宽度	长度	牌 号	状态	抗拉强度	伸长率	厚度	宽度	长度
		σ_b /MPa	δ_{10} /%						σ_b /MPa	δ_{10} /%			
		\geq (范围值除外)		mm					\geq (范围值除外)		mm		
QA15	M	274	33	0.4~	100~	500~	QA15	Y	588	2.5	12.0	1 000	2 000
QA19-2		441	18				QA17		637	5			
QA17	Y ₂	588~	10	12.0	1 000	2 000	QA19-2	Y	588	5	12.0	1 000	2 000
		735					QA19-4		588	—			

注：1. 板材化学成分应符合 GB/T 5233 的规定。

2. 铝青铜板适用于机器制造及仪表行业制作弹簧零件。

3. 标记示例：用 QA19-2 制造、软状态、较高级、厚度 2.0 mm、宽度 600 mm、长度 1 200 mm 的板材，标记为

板 QA19-2 M 较高 2.0×600×1 200 GB/T 2043—1989

3.3 锡青铜板 (表 14.9-36、表 14.9-37)

表 14.9-36 锡青铜板牌号及尺寸规格 (摘自 GB/T 2048—1989) (mm)

牌 号	状 态	厚 度	宽 度	长 度
QSn6.5-0.1	热轧 (R)	9~50	300~500	1 000~2 000
	半硬 (Y ₂)	0.2~12.0	150~600	≥500
QSn6.5-0.1 QSn6.5-0.4 QSn4-3, QSn4-0.3	软 (M) 硬 (Y) 特硬 (T)	0.2~12.0	150~600	≥500

注: 1. 本表各牌号的化学成分应符合 GB/T 5233 的规定。

2. 锡青铜板适用于机器制造及仪表行业制造弹性元件及其他制品。

3. 标记示例: 用 QSn6.5-0.1 制造、硬态、较高级、厚度 0.5 mm、宽度 500 mm、长度 1 500 mm 的板材, 标记为

板 QSn6.5-0.1Y 较高 0.5×500×1 500 GB/T 2048—1989

表 14.9-37 锡青铜板力学性能 (摘自 GB/T 2048—1989)

牌 号	状态	抗拉强度	伸长率	牌 号	状态	抗拉强度	伸长率
		σ_b /MPa	δ_{10} /%			σ_b /MPa	δ_{10} /%
QSn6.5-0.1	R	290	38	QSn6.5-0.1, QSn6.5-0.4	Y	490~687	5
QSn6.5-0.1, QSn6.5-0.4 QSn4-3, QSn4-0.3	M	294	40	QSn4-3, QSn4-0.3			3
QSn6.5-0.1	Y ₂	440~569	8	QSn6.5-0.1, QSn6.5-0.4 QSn4-3, QSn4-0.3	T	637	1

注: 本表适用于 0.5~14 mm 的板材。

3.4 铝白铜板 (表 14.9-38)

表 14.9-38 铝白铜板牌号、尺寸规格及力学性能 (摘自 GB/T 2051—1989)

合金牌号	供应状态	抗拉强度	伸长率	厚 度	宽 度	长 度
		σ_b /MPa	δ_{10} /%			
BA16-1.5 BA13-3	硬 (Y)	539	3	0.5~12.0	100~600	800~1 500
	热处理态 CS	637	5			

注: 1. 产品适于制作各种高强度零件及重要用途的弹簧。

2. 铝白铜板牌号的化学成分应符合 GB/T 5234—1985 的规定。

3. 标记示例: 用 BA16-1.5 制作、硬状态、厚度 5.5 mm、宽度 400 mm 的板材, 标记为

板 BA16-1.5 Y 5.5×400 GB/T 2051—1989

3.5 锌白铜板 (表 14.9-39)

表 14.9-39 锌白铜板牌号尺寸规格及力学性能 (摘自 GB/T 2053—1989)

牌 号	状 态	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_{10} /%	厚 度	宽 度
		\geq (范围值除外)		/mm	
BZn15-20	M	343	35	0.5~10.0	100~600
	Y ₂	441~568	5		
	Y	539~686	2		
	T	637	1		

注: 1. 产品适于仪器、仪表中制作弹性元件及其他工业中的制品之用。
2. 牌号的化学成分应符合 GB/T 5234—1985 的规定。

3.6 铝及铝合金板、带材 (表 14.9-40~表 14.9-42)

表 14.9-40 铝及铝合金板、带材厚度及其允许偏差 (摘自 GB/T 3194—1998) (mm)

厚 度	规定的宽度							
	≤ 1000		$> 1000 \sim 1500$		$> 1500 \sim 2000$		$> 2000 \sim 2500$	
	厚度允许偏差							
	板材	带材	板材	带材	板材	带材	板材	带材
$> 0.20 \sim 0.40$	± 0.05	± 0.05	± 0.06	± 0.06	—	—	—	—
$> 0.40 \sim 0.63$	-0.10	± 0.05	-0.14	± 0.08	-0.18	± 0.09	-0.24	± 0.12
$> 0.63 \sim 0.80$	-0.12	± 0.06	-0.14	± 0.08	-0.18	± 0.10	-0.26	± 0.13
$> 0.80 \sim 1.00$	-0.15	± 0.08	-0.17	± 0.09	-0.20	± 0.11	-0.29	± 0.15
$> 1.00 \sim 1.20$	-0.15	± 0.08	-0.17	± 0.10	-0.22	± 0.12	-0.29	± 0.15
$> 1.20 \sim 1.60$	-0.20	± 0.10	-0.25	± 0.13	± 0.27	± 0.14	-0.29	± 0.15
$> 1.60 \sim 2.00$	-0.20	± 0.10	-0.26	± 0.13	-0.28	± 0.15	-0.30	± 0.18
$> 2.00 \sim 2.50$	-0.25	± 0.13	-0.29	± 0.15	-0.30	± 0.16	-0.32	± 0.18
$> 2.50 \sim 3.20$	-0.30	± 0.15	-0.34	± 0.17	-0.35	± 0.18	-0.36	± 0.23
$> 3.20 \sim 4.00$	-0.30	± 0.15	-0.36	± 0.20	-0.37	± 0.23	-0.38	± 0.25
$> 4.00 \sim 5.00$	+0.10	± 0.23	+0.10	± 0.25	+0.10	± 0.28	+0.10	± 0.30
	-0.35		-0.37		-0.42		-0.45	
$> 5.00 \sim 6.30$	+0.10	± 0.25	+0.10	± 0.28	+0.10	± 0.33	+0.10	± 0.38
	-0.40		-0.42		-0.42		-0.45	
$> 6.30 \sim 8.00$	+0.10	± 0.30	+0.10	± 0.36	+0.10	± 0.38	+0.10	± 0.46
	-0.45		-0.47		-0.50		-0.60	
$> 8.00 \sim 10.00$	+0.10	± 0.38	+0.10	± 0.43	+0.10	± 0.51	+0.10	± 0.58
	-0.50		-0.50		-0.50		-0.60	
$> 10.00 \sim 16.00$	± 0.50		± 0.50		± 1.0		± 1.5	
$> 16.00 \sim 25.00$	± 0.75		± 0.75		± 1.5		± 2.0	
$> 25.00 \sim 40.00$	± 1.0		± 1.0		± 1.5		± 2.0	
$> 40.00 \sim 60.00$	± 1.5		± 1.5		± 2.0		± 3.0	
$> 60.00 \sim 80.00$	± 3.0		± 3.0		± 3.5		± 4.0	
$> 80.00 \sim 100.00$	± 3.5		± 3.5		± 5.0		± 5.5	
$> 100.00 \sim 160.00$	—		± 4.0		± 5.5		± 6.0	

铝及铝合金普通级板、带材厚度允许偏差

5A03、5A05、5A06、5083、5086、5A41 等含镁量平均值 $\geq 3\%$ 的铝镁合金, 普通级板、带厚度 ≥ 4.00 mm 时, 允许偏差为其公称厚度的 $\pm 5\%$

续表 14.9-40

	厚 度	规定的宽度							
		≤1 000	>1 000~ 1 200	>1 200~ 1 400	>1 400~ 1 500	>1 500~ 1 800	>1 800~ 2 000	>2 000~ 2 200	>2 200~ 2 500
		厚度允许偏差							
航空 工业用 铝合金 高级 板带材 厚度允 许偏差	>0.20~0.63	±0.040	—	—	—	—	—	—	—
	>0.63~0.80	±0.040	±0.040	±0.06	±0.06	±0.08	—	—	—
	>0.80~1.00	±0.040	±0.040	±0.06	±0.08	±0.08	±0.09	±0.10	—
	>1.00~1.20	±0.050	±0.050	±0.06	±0.08	±0.08	±0.10	±0.10	—
	>1.20~1.60	±0.050	±0.050	0.08	±0.08	±0.08	±0.10	±0.10	—
	>1.60~2.00	±0.050	±0.050	±0.08	±0.09	±0.09	±0.10	±0.10	—
	>2.00~2.50	±0.065	±0.065	±0.09	±0.11	±0.11	±0.12	±0.12	—
	>2.50~3.20	±0.09	±0.09	±0.10	±0.12	±0.12	±0.12	±0.12	—
	>3.20~4.00	±0.11	±0.11	±0.12	±0.17	±0.18	—	—	—
	>4.00~5.00	±0.15	±0.18	±0.18	±0.23	±0.23	—	—	—
	>5.00~6.30	±0.24	—	—	—	—	—	—	—
	>6.30~10.00	—	—	—	—	—	—	—	—
	>10.00~16.00	—	—	—	—	±0.72	±0.72	±0.86	±0.86
	>16.00~25.00	—	—	—	—	±0.94	±0.94	±1.10	±1.10
	>25.00~40.00	—	—	—	—	±1.20	±1.20	±1.40	±1.40
	>40.00~60.00	±1.40	±1.40	±1.40	±1.40	±1.60	±1.90	±1.90	±1.90
	>60.00~80.00	±2.00	±2.00	±2.00	±2.00	±2.10	±2.10	±2.80	±2.80
>80.00~100.00	±2.60	±2.60	±2.60	±2.60	±2.95	±2.95	±3.40	±3.40	
>100.00~160.00	—	±3.40	±3.40	±3.40	±3.80	±3.80	±4.30	±4.30	
	厚 度	规定的宽度							
		≤1 000	>1 000~1 500	>1 500~2 000	>2 000~2 500				
		厚度允许偏差							
非航 空工业 用铝合 金高精 级板带 材厚度 允许偏 差	>0.20~0.40	±0.025	±0.040	—	—				
	>0.40~0.63	±0.040	±0.050	±0.05	±0.09				
	>0.63~0.80	±0.045	±0.060	±0.08	±0.10				
	>0.80~1.00	±0.050	±0.08	±0.09	±0.11				
	>1.00~1.20	±0.06	±0.08	±0.10	±0.14				
	>1.20~1.60	±0.08	±0.09	±0.13	—				
	>1.60~2.00	±0.08	±0.10	—	—				
	>2.00~2.50	±0.08	±0.10	—	—				
	>2.50~3.20	±0.10	±0.13	—	—				
	>3.20~4.00	±0.14	±0.17	—	—				
	>4.00~5.00	±0.18	±0.23	—	—				
	>5.00~6.30	±0.23	—	—	—				
	>6.30~10.00	—	—	—	—				
	>10.00~16.00	—	—	±0.69	±0.81				
>16.00~25.00	—	—	±0.94	±1.10					
>25.00~40.00	—	—	±1.20	±1.40					

续表 14.9-40

非航空工业用铝合金高精级板带材厚度允许偏差	厚度	规定的宽度			
		≤1 000	>1 000~1 500	>1 500~2 000	>2 000~2 500
		厚度允许偏差			
	>40.00~60.00	±1.40	±1.40	±1.55	±1.80
	>60.00~80.00	±1.90	±1.90	±2.15	±2.55
	>80.00~100.00	±2.55	±2.55	±2.90	±3.20
	>100.00~160.00	—	±3.30	±3.70	±4.20

- 注：1. GB/T 3194—1998 将产品分为板材、带材、大规格板（宽度大于1 500 mm或长度大于4 000 mm），变断面板（厚度沿板材方向均匀变化的板）。
2. 尺寸分级：非航空工业用板材厚度、航空工业用板材厚度、宽度、长度、平面度等项目分为普通级和高精级；对角线、侧边弯曲度只有高精级；带材只有厚度、宽度指标分普通级与高精级，变断面板材不分级。
3. 航空工业用高精级板材的合金牌号为：2014、2024、201、2A14、2A12、2A11、7075、7A04、7A09等。
4. 普通级板带厚度允许偏差，如果对于非对称偏差的板材，需要对称偏差时，由双方协商采用相应带材的偏差。
5. 航空工业用和非航空工业用高精级板、带材厚度允许偏差采用单向偏差“+”或“-”时，其值为表中数值的2倍；表中未规定部分的偏差按本表普通级的相应规定。
6. 厚度大于40 mm普通级板材，在用整个铸块轧制后，不切头尾，整块交货。
7. 变断面板材公称长度以薄端、厚端的公称厚度和平均楔形度计算。

表 14.9-41 铝及铝合金板带材长度、宽度允许偏差及形状公差（摘自 GB/T 3194—1998）
(mm)

普通级 板材长度 允许偏差	公称厚度	长度允许偏差		公称厚度	长度允许偏差				
	≤4.50	+25 -5	>10.0~40.0		±40				
>4.50~10.00	±25	变断面板≤5.0（厚端）		+50 0					
高精级 板材长度 允许偏差	厚度	规定的长度							
		≤1 000	>1 000 ~2 000	>2 000 ~3 000	>3 000 ~4 000	>4 000 ~5 000	>5 000 ~7 500	>7 500 ~10 000	>10 000 ~12 500
	长度允许偏差								
	>0.20~2.00	±2	±2.5	±3	±3	±3.5	±4.5	±5	±6
	>2.00~4.50	±3	±3	±4	±4	±5	±6	±7	±8
>4.50~160.00	+6	+7	+8	+9	+10	+12	+14	+16	
普通级 板材宽度 允许偏差	厚度	宽度			允许偏差				
	≤4.5	≤1 000			+5 -3				
		>1 000~2 000			+10 -5				
		>2 000~2 400			±10				

续表 14.9-41

普通级 板材宽度 允许偏差	厚 度	宽 度				允许偏差		
	≤4.5	切边				+30 -10		
		不切边	5A03, 5A05, 5A06, 5083 等含镁量平均值大于 或等于 3% 的铝镁合金以及 7A09, 7A04, 7075				+150 0	
			其他合金及纯铝				+120 0	
高精级 板材宽度 允许偏差	厚 度	规定的宽度						
		≤250	>250~500	>500~1000	>1000~2000	>2000~2500		
	宽度允许偏差							
	>0.20~3.20	±1.5	±2	±2.5	±3	±4		
	>3.20~4.50	±2	±2.5	±3	±3.5	±4.5		
>4.50~12.50	+6	+7	+8	+9	+11			
>12.50~160.00	+6			+7	+8			
普通级 带材宽度 允许偏差	厚 度	规定的宽度						
		≤500	>500~750	>750~1000	>1000~1500	>1500~2000	>2000~2500	
	宽度允许偏差							
	>0.20~1.60	±1.5	±2	±2	±3	—	—	
	>1.60~2.00	±2	±2.5	±2.5	±3	—	—	
>2.00~4.50	—	—	—	—	—	—		
>4.50~6.50	—	—	±7	±10	—	—		
高精级 带材宽度 允许偏差	厚 度	规定的宽度						
		≤500	>150~250	>250~500	>500~750	>750~1000	>1000~1500	>1500~2000	>2000~2500
	宽度允许偏差							
	>0.20~2.00	±0.25	±0.5	±1	±1	±1	±1.5	±2.5
>2.00~4.50	—	—	—	—	—	—	—	—
>4.50~6.50	—	—	—	—	±2	±3	±4	—
高精级 板材对角 线允许偏 差	长 度	宽 度 W						
		≤1000			>1000			
	对角线允许偏差 不大于							
	≤3500	$0.8 \times \frac{W}{100}$			$0.7 \times \frac{W}{100}$			
>3500	$1.2 \times \frac{W}{100}$			$1.0 \times \frac{W}{100}$				
注: 如果宽度 W 不是 100 mm 的整倍数, 则表中 $\frac{W}{100}$ 用不小于 $\frac{W}{100}$ 的最小整数代替。例如: 如果宽度为 750 mm, 长度为 2800 mm, 则对角线允许偏差为 $0.8 \times 8 \text{ mm} = 6.4 \text{ mm}$ 。如果所得结果不是整数 (mm), 则应把结果值化成相邻较小的整数 (mm)。								
高精级 板材侧边 弯曲度	规定的厚度	规定的宽度	规定的长度					
			≤1000	>1000~2000	>2000~3000	>3000~4000	>4000~5000	>5000
	侧边弯曲度 不大于							
	>0.20~3.20	400~900 >900	1 0.5	2.5 1.5	5 3	9 5	14 8	20 12
>3.20~6.50	>400	0.5	1.5	3	5	8	12	
>6.50~160.00	>400	0.5	2	3.5	6	10	14	

续表 14.9-41

高精级 带材侧边 弯曲度	厚 度		规定的宽度							
			25~50	>50~100	>100~250	>250				
	>0.20~2.00	侧边弯曲度			不大于					
		15	10	6	5					
普通级 板材平面 度	合 金	厚 度	下列宽度板材上的平面度 ≤							
			≤1 200		>1 200~1 500		>1 500~1 800		>1 800~2 400	
			端头部位	其他部位	端头部位	其他部位	端头部位	其他部位	端头部位	其他部位
	含镁量 平均值 大于3% 的高 镁合 金	>0.50~4.50	30	22	35	22	40	22	45	22
		>4.50~10.00	35	30	40	30	45	30	50	30
	可热处 理强化 的合金	>0.50~4.50	20	14	25	14	30	14	35	14
		>4.50~10.00	35	20	40	20	45	20	50	20
	除高镁 合金、 可热处 理强化 合金其 他合金	>0.20~1.60	10	7	15	7	18	7	20	7
		>1.60~4.50	15	10	18	10	20	10	22	10
		>4.50~10.00	30	15	35	15	40	15	45	15
所有 合金	>10.00~20.00	8 mm/m		8 mm/m		10 mm/m		8 mm/m		
	>20.00~80.00	6 mm/m		6 mm/m		8 mm/m		6 mm/m		
	>80.00~160.00	8 mm/m		8 mm/m		8 mm/m		6 mm/m		
端头部位指沿板材长度方向上两端 300 mm 范围内所包含的板面，如下图中的 A 部位所示。若板材为正方形时，端头部位为靠边缘四周 300 mm 所包含的正方形圈的板面。										
			A				A			

高精级 板材平面 度(厚度≤ 6.5 mm)	合 金 (包括包铝合金)	规定的厚度	中间浪或边缘浪的纵向或横向中心距 ^①				
			≤500	>500~1 000	>1 000~1 500	>1 500~2 000	>2 000
			偏差 ^② ≤				
1×××系, 8×× ×系, 除 3004 外的 3×××系及 5005, 5050	>0.50~1.60	2	4	6	8	10	
	>1.60~6.50	3	5	8	10	13	
3004, 5052, 5A02, 5 × 54, 5083, 5086, 5456 等镁的质量分 数大于 3% 的铝镁合 金, 钎焊板和所有的 可热处理强化合金	>0.50~1.60	4	6	9	11	14	
	>1.60~6.50	5	7	10	12	15	

- 注：1. 对宽度≤4.5 mm 径盐浴炉热处理的板材，对长度>4 000 mm 大规格板，其宽度允许偏差为^③mm。
2. 本表中未规定部分的带材，用“—”表示者，供方一般不切边供货，如用户要求切边时，供需双方协商。
3. 板材长度和宽度，每批允许有不超过 10% 的短尺板材（航空工业用板除外）。短尺板材的长或宽度不应小于其公称尺寸的 90%，H112 以及 F 状态板材不应小于 80%。
4. 变断面切边板材宽度允许偏差为^④mm，不切边板材宽度允许偏差为^③mm。
5. 侧边弯曲度定义：板材在公称长度上（带材在任意 2 000 mm 内），其中一侧边与一直线的最大允许偏差：
- ① 中间浪或边缘浪的中心距为任一方向上两波峰之间的距离。
 - ② 如果只有一个纵向（或）横向中间浪或边缘浪，那么，也适用于薄板的整个长度或宽度。
 - ③ 不适用于 O、F、Hx8 以及较硬状态板材。
 - ④ 不适用于端头或边角的卷起部分。

表 14.9-42 铝合金板材理论重量 (摘自 GB/T 3194—1998)

7A04 合金板材				各种牌号板材的密度换算系数	
公称厚度/mm	理论质量/kg·m ⁻²	公称厚度/mm	理论质量/kg·m ⁻²	牌 号	密度换算系数
0.2	0.570	10	28.500	1×××系	0.951
0.3	0.855	12	34.200	2A14、2014、2A11	0.982
0.4	1.140	14	39.900	2A06	0.969
0.5	1.425	15	42.750	2A12、2024	0.975
0.6	1.710	16	45.600	2A16	0.996
0.7	1.995	18	51.300	2017	0.979
0.8	2.280	20	57.000	3A21、3003	0.958
0.9	2.565	22	62.700	3004	0.954
1.0	2.850	25	71.250	5A02、5A43、 5052、5A66	0.940
1.2	3.420	30	85.500	5083、5A03	0.987
1.5	4.275	35	99.750	5A05	0.930
1.8	5.130	40	114.000	5A06、5A41	0.926
2.0	5.700	50	142.500	5005	0.947
2.3	6.555	60	171.000	5086、5456、5254	0.933
2.5	7.125	70	199.500	5050、5454、5554	0.944
2.8	7.980	80	228.000	6A02	0.947
3.0	8.550	90	256.500	7A04、7A09、7075	1.000
3.5	9.975	100	285.000	8A06	0.951
4.0	11.400	110	313.500	LT62	0.951
5.0	14.250	120	342.000	LF11	0.930
6.0	17.100	130	370.500		
7.0	19.950	140	399.000		
8.0	22.800	150	427.500		
9.0	25.650	160	456.000		

注：其他牌号铝及铝合金板材理论质量 (kg/m²) 等于本表中 7A04 合金板材理论质量乘以本表中的相应牌号密度换算系数。表中未列出的牌号其密度换算系数由供需双方协定，并在合同中注明。

3.7 铝及铝合金轧制板材 (表 14.9-43~表 14.9-47)

表 14.9-43 铝及铝合金轧制板材牌号、状态及厚度尺寸 (摘自 GB/T 3880—1997)

牌 号	供 应 状 态	厚 度/mm	牌 号	供 应 状 态	厚 度/mm
1A97、1A93、 1A90、1A85	F、H112	>4.5~150.0	5005	O	>0.5~10.0
1070、1070A、 1060、1050、 1050A、1100、 1145、1200、 3003、3004	O	>0.2~10.0		H12、H32、H14、 H34、H16、H36、 H18、H38	>0.5~4.5
	H12、H22、H14、 H24、H16、H26、H18	>0.2~4.5		F、H112	>4.5~150.0
	F、H112	>4.5~150.0	5A03	O、H14、H24、H34	>0.5~4.5
	O	>0.2~10.0		F、H112	>4.5~150.0
3A21、8A06	H14、H24、H18	>0.2~4.5	5083、5A05、 5A06、5086	O	>0.5~4.5
	F、H112	>4.5~150.0		F、H112	>4.5~150.0
5052	O	>0.5~10.0	6A02、2A14、 2014	O、T4、T6	>0.5~10.0
	H12、H22、H32、 H14、H24、H34、 H16、H26、H36、 H18、H38	>0.5~4.5		F、H112	>4.5~150.0
	F、H112	>4.5~150.0	2A11、2A12、 2017、2024	O、T4、T3	>0.5~10.0
	O	>0.5~10.0		F、H112	>4.5~150.0
5A02	H14、H24、H34、H18	>0.5~4.5	7A09、7A04、 7075	O、T6	>0.5~10.0
	F、H112	>4.5~150.0		F、H112	>4.5~150.0
	O	>0.5~10.0			

表 14.9-44 铝及铝合金轧制板材厚度对应的宽度及长度规格 (摘自 GB/T 3880—1997)

(mm)

厚 度	宽 度	长 度	厚 度	宽 度	长 度
>0.2~0.8	1 000~1 500	1 000~10 000	>4.5~8.0	1 000~1 800	1 000~10 000
>0.8~1.2	1 000~2 000		>8.0~150.0	1 000~2 400	
>1.2~4.5	1 000~2 400				

注：1. 1070、1070A、1060、1050、1050A、1100、1145、1200、3003、3004、3A21、8A06 可供应宽度小于 400 mm 的板材，但尺寸偏差按 400 mm 宽度的板材检查，当供应宽度为大于 400 mm 至 1 000 mm 时，其尺寸偏差按 1 000 mm 宽度的板材检查；可供应长度小于 1 000 mm 的板材，其尺寸偏差按长度为 1 000 mm 的板材检查。

2. 厚度小于等于 0.7 mm 经盐浴炉生产的退火板材，只能供应宽度小于或等于 1 200 mm、长度小于或等于 4 000 mm 的板材。

3. 标记示例：用 2A12 合金制造的、T4 状态、厚度为 2.0 mm、宽度为 1 200 mm、长度为 4 000 mm 的定尺板材，标记为

板 2A12-T4 2.0×1 200×4 000 GB/T 3880—1997

对于不定尺板材，只注厚度，不注宽和长度尺寸。

4. 板材厚度、宽度、长度平面度等外形尺寸允许偏差应符合 GB/T 3194 中普通级板材规定。

5. GB/T 3880—1997 代替 GB3880—1983、GB3193—1982、GB10568—1989、GB10569—1989。

表 14.9-45 包覆板材的包覆层材料牌号及轧制后的包覆层厚度 (摘自 GB/T 3880—1997)

包铝分类	基体合金牌号	包覆材料牌号	板材状态	板材厚度/mm	每面包覆厚度占板材总厚度的百分比/% \geq
正常包铝	2A11、2017、2A12、2024	1A50	O、T3、T4	0.5~1.6	4
				>1.6~10.0	2
	7A04、7A09、7075	7A01	O、T6	0.5~1.6	4
				>1.6~10.0	2
工艺包铝	2A11、2014、2A12、2024、2A14、2017、5A06	1A50	O、T3、T4、T6	0.5~4.5	≤ 1.5
			F、H112	>4.5~150.0	
	7A04、7A09、7075	7A01	O、T6	0.5~4.5	≤ 1.5
			F、H112	>4.5~150.0	

注：1. 2A11、2A12、2017、2024、7A04、7A09、7075 合金厚度 ≤ 10.0 mm 的非 H112、非 F 状态板材一般采用正常包铝，若要求工艺包铝时，必须在合同中注明。

2. 包覆板材双面包覆。

表 14.9-46 铝及铝合金轧制板材牌号及室温力学性能 (摘自 GB/T 3880—1997)

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
1A97	—	H112	H112	>4.5~80.0	附实测值			
1A93		F	—	>4.5~150.0	—			
1A90 1A85	—	H112	H112	>4.5~12.5	≥ 60	—	—	≥ 21
				>12.5~20.0	≥ 60		≥ 19	—
				>20.0~80.0	附实测值			
		F	—	>4.5~150.0	—			
1070 1070A 1060	—	O	O	>0.2~0.3	55~95	—	—	≥ 15
				>0.3~0.5			—	≥ 20
				>0.5~0.8			—	≥ 25
				>0.8~1.3			≥ 15	≥ 30
				>1.3~10.0			—	≥ 35
				>0.2~0.3			70~110	—	—	$\geq 2$
		>0.3~0.5	—	≥ 3				
		>0.5~0.8	—	≥ 4				
		>0.8~1.3	≥ 55	≥ 6				
		>1.3~2.9	—	≥ 8				
		>2.9~4.5	—	≥ 9				
		H12 H22	H12 H22	>0.2~0.3	85~120	—	—	≥ 1
				>0.3~0.5			—	≥ 2
				>0.5~0.8			—	≥ 3
				>0.8~1.3			≥ 65	≥ 4
				>1.3~2.9			—	≥ 5
				>2.9~4.5			—	≥ 6
		H14 H24	H14 H24	>0.2~0.3	85~120	—	—	≥ 1
>0.3~0.5	—			≥ 2				
>0.5~0.8	—			≥ 3				
>0.8~1.3	≥ 65			≥ 4				
>1.3~2.9	—			≥ 5				
>2.9~4.5	—			≥ 6				

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
1070 1070A 1060	—	H16 H26	H16 H26	>0.2~0.5	100~135	— ≥75	—	≥1
				>0.5~0.8			—	≥2
				>0.8~1.3			—	≥3
				>1.3~4.5			—	≥4
		H18	H18	>0.2~0.5	≥120	—	—	≥1
				>0.5~0.8			—	≥2
				>0.8~1.3			—	≥3
				>1.3~4.5			—	≥4
		H112	H112	>4.5~6.5	≥75	≥35	—	≥13
				>6.5~12.5	≥70	≥35	—	≥15
				>12.5~25.0	≥60	≥25	≥20	—
				>25.0~80.0	≥55	≥15	≥25	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
		1050 1050A 1145	—	O	O	>0.2~0.5	60~100	— ≥20	—	≥15
>0.5~0.8	—					≥20		
>0.8~1.3	—					≥25		
>1.3~6.5	—					≥30		
>6.5~10.0	—					≥28		
H12 H22	H12 H22			>0.2~0.3	80~120	— ≥65	—	≥2
				>0.3~0.5			—	≥3
				>0.5~0.8			—	≥4
				>0.8~1.3			—	≥6
				>1.3~2.9			—	≥8
				>2.9~4.5			—	≥9
H14 H24	H14 H24			>0.2~0.3	95~125	— ≥75	—	≥1
				>0.3~0.5			—	≥2
				>0.5~0.8			—	≥3
				>0.8~1.3			—	≥4
				>1.3~2.9			—	≥5
				>2.9~4.5			—	≥6
H16 H26	H16 H26			>0.2~0.5	120~145	— ≥85	—	≥1
				>0.5~0.8			—	≥2
				>0.8~1.3			—	≥3
				>1.3~4.5			—	≥4

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%		
							5D	50 mm	
1050 1050A 1145	—	H18	H18	>0.2~0.5	≥ 125	—	—	≥ 1	
				>0.5~0.8			—	≥ 2	
				>0.8~1.3			—	≥ 3	
				>1.3~4.5			—	≥ 4	
		H112	H112	>4.5~6.5	≥ 85	≥ 45	—	≥ 10	
				>6.5~12.5	≥ 80	≥ 45	—	≥ 10	
				>12.5~25.0	≥ 70	≥ 35	≥ 16	—	
				>25.0~80.0	≥ 65	≥ 20	≥ 22	—	
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—	
		1100 1200	—	O	O	>0.2~0.5	75~110	—	—	$\geq 15$
>0.5~0.8	—					≥ 20			
>0.8~1.3	≥ 25					—			≥ 25
>1.3~6.5						—			≥ 30
>6.5~10.0						—			≥ 28
H12 H22	H12 H22			>0.2~0.3	95~125	—	—	≥ 2	
				>0.3~0.5			—	≥ 3	
				>0.5~0.8			—	≥ 4	
				>0.8~1.3			≥ 75	—	≥ 6
				>1.3~2.9				—	≥ 8
				>2.9~4.5				—	≥ 9
H14 H24	H14 H24			>0.2~0.3	120~145	—	—	≥ 1	
				>0.3~0.5			—	≥ 2	
				>0.5~0.8			—	≥ 3	
				>0.8~1.3			≥ 95	—	≥ 4
				>1.3~2.9				—	≥ 5
				>2.9~4.5				—	≥ 6
H16 H26	H16 H26			>0.2~0.5	130~165	—	—	≥ 1	
				>0.5~0.8			—	≥ 2	
				>0.8~1.3			≥ 120	—	≥ 3
				>1.3~4.5				—	≥ 4
H18	H18			>0.2~0.5	≥ 155	—	—	≥ 1	
				>0.5~0.8			—	≥ 2	
				>0.8~1.3			—	≥ 3	
		>1.3~4.5	—	≥ 4					

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%			
							SD	50 mm		
1100 1200	—	H112	H112	>4.5~6.5	≥ 95	≥ 50	—	≥ 9		
				>6.5~12.5	≥ 90		—	≥ 9		
				>12.5~50.0	≥ 85	≥ 35	≥ 14	—		
				>50.0~80.0	≥ 80	≥ 25	≥ 20	—		
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
2017	正常包铝 或 工艺包铝	O	O	0.5~10.0	≤ 215	≤ 110	—	≥ 12		
		O	T42	0.5~1.6	≥ 355	≥ 195	—	≥ 15		
				>1.6~2.9			—	≥ 17		
				>2.9~6.5			—	≥ 15		
				>6.5~10.0			≥ 185	≥ 12		
		T3	T3	0.5~1.6	≥ 375	≥ 215	—	≥ 15		
				>1.6~2.9				≥ 17		
				>2.9~10.0				≥ 15		
		T4	T4	0.5~1.6	≥ 355	≥ 195	—	≥ 15		
				>1.6~2.9				≥ 17		
				>2.9~10.0				≥ 15		
		H112	T42	>4.5~6.5	≥ 355	≥ 195	—	≥ 15		
				>6.5~12.5		≥ 185		≥ 12		
				>12.5~25.0		≥ 185		≥ 12		
				>25.0~40.0		≥ 330		≥ 195	≥ 8	
				>40.0~70.0		≥ 310		≥ 195	≥ 6	
				>70.0~80.0		≥ 285		≥ 195	≥ 4	
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
		2A11	正常包铝 或 工艺包铝	O	O	0.5~2.9	≤ 225	—	—	≥ 12
						>2.9~10.0	≤ 235			
T42	0.5~2.9				≥ 350	≥ 185	—			≥ 15
	>2.9~10.0			≥ 355	≥ 195	—	≥ 15			
T3	T3			0.5~1.6	≥ 375	≥ 215	—	≥ 15		
				>1.6~2.9				≥ 17		
				>2.9~10.0				≥ 15		
T4	T4			0.5~2.9	≥ 360	≥ 185	—	≥ 15		
				>2.9~10.0	≥ 370	≥ 195				
H112	T42			>4.5~10.0	≥ 355	≥ 195	—	≥ 15		
				>10.0~12.5	≥ 370	≥ 215		≥ 11		
				>12.5~25.0	≥ 370	≥ 215		≥ 11		
				>25.0~40.0	≥ 330	≥ 195		≥ 8		
				>40.0~70.0	≥ 310	≥ 195		≥ 6		
				>70.0~80.0	≥ 285	≥ 195		≥ 4		
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—				

续表 14.9.46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
2014	工艺包铝	O	O	0.5~10.0	≤ 205	≤ 95	—	≥ 16
			T62	0.5	≥ 425	≥ 370	—	≥ 7
				>0.5~1.0	≥ 435	≥ 380	—	≥ 7
				>1.0~10.0	≥ 440	≥ 395	—	≥ 8
		T6	T6	0.5	≥ 425	≥ 370	—	≥ 7
				>0.5~1.0	≥ 435	≥ 380	—	≥ 7
				>1.0~10.0	≥ 440	≥ 395	—	≥ 8
		H112	T62	>4.5~12.5	≥ 440	≥ 395	—	≥ 8
				>12.5~25.0	≥ 460	≥ 405	≥ 5	—
				>25.0~40.0	≥ 460	≥ 405	≥ 3	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
2A14	工艺包铝	O	O	0.5~10.0	≤ 245	—	—	≥ 10
		T6	T6	0.5~10.0	≥ 430	≥ 340	—	≥ 5
		H112	T62	>4.5~12.5	≥ 430	≥ 340	—	≥ 5
				>12.5~40.0	≥ 430	≥ 340	≥ 5	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
2024	正常包铝 或 工艺包铝	O	O	0.5~1.6	≤ 205	≤ 95	—	≥ 12
				1.6~10.0	≤ 220	≤ 95	—	≥ 12
			T42	0.5~1.6	≥ 395	≥ 235	—	≥ 15
				>1.6~6.5	≥ 415	≥ 250	—	≥ 15
		T3	T3	>6.5~10.0	≥ 415	≥ 250	—	≥ 12
				0.5~1.6	≥ 405	≥ 270	—	≥ 15
		T4	T4	1.6~10.0	≥ 420	≥ 275	—	≥ 15
				0.5~1.6	≥ 400	≥ 245	—	≥ 15
		H112	T42	1.6~10.0	≥ 420	≥ 260	—	≥ 15
				>4.5~6.5	≥ 415	≥ 250	—	≥ 15
				>6.5~12.5	≥ 415	≥ 250	—	≥ 12
				>12.5~25.0	≥ 420	≥ 260	≥ 7	—
				>25.0~40.0	≥ 415	≥ 260	≥ 6	—
				>40.0~50.0	≥ 415	≥ 260	≥ 5	—
		F	—	>50.0~80.0	≥ 400	≥ 260	≥ 3	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%		
							5D	50 mm	
2A12	正常包铝 或 工艺包铝	O	O	0.5~4.5	≤ 215	—	—	≥ 14	
				>4.5~10.0	≤ 235		—	≥ 12	
			T42	0.5~2.9	≥ 390		≥ 245	—	≥ 15
				>2.9~10.0	≥ 410		≥ 265	—	≥ 12
		T3	T3	0.5~1.6	≥ 405	≥ 270	—	≥ 15	
				1.6~10.0	≥ 420	≥ 275	—	≥ 15	
		T4	T4	0.5~2.9	≥ 405	≥ 270	—	≥ 13	
				>2.9~4.5	≥ 425	≥ 275	—	≥ 12	
				>4.5~10.0	≥ 425	≥ 275	—	≥ 12	
		H112	T42	>4.5~10.0	≥ 410	≥ 265	—	≥ 12	
				>10.0~12.5	≥ 420	≥ 275	—	≥ 7	
				>12.5~25.0	≥ 420	≥ 275	≥ 7	—	
				>25.0~40.0	≥ 390	≥ 255	≥ 5	—	
				>40.0~70.0	≥ 370	≥ 245	≥ 4	—	
>70.0~80.0	≥ 345			≥ 245	≥ 3	—			
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—			
3003	—	O	O	>0.2~0.5	95~130	≥ 35	—	≥ 20	
				>0.5~1.3			—	≥ 22	
				>1.3~6.5			—	≥ 25	
				>6.5~10.0			—	≥ 23	
		H12 H22	H12 H22	>0.2~0.5	120~160	≥ 85	—	≥ 3	
				>0.5~0.8			—	≥ 3	
				>0.8~1.3			—	≥ 4	
				>1.3~4.5			—	≥ 6	
		H14 H24	H14 H24	>0.2~0.5	140~180	≥ 115	—	≥ 1	
				>0.5~0.8			—	≥ 2	
				>0.8~1.3			—	≥ 3	
				>1.3~2.9			—	≥ 5	
				>2.9~4.5			—	≥ 5	
		H16 H26	H16 H26	>0.2~0.5	165~205	≥ 145	—	≥ 1	
				>0.5~0.8			—	≥ 2	
				>0.8~1.3			—	≥ 3	
				>1.3~4.5			—	≥ 4	

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p.0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
3003	—	H18	H18	>0.2~0.5	≥ 185	≥ 165	—	≥ 1
				>0.5~0.8			—	≥ 2
				>0.8~1.3			—	≥ 3
				>1.3~4.5			—	≥ 4
		H112	H112	>4.5~12.5	≥ 115	≥ 70	—	≥ 8
				>12.5~50.0	≥ 105	≥ 40	≥ 12	—
				>50.0~80.0	≥ 100	≥ 40	≥ 18	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
3A21	—	O	O	>0.2~0.8	100~150	—	—	≥ 19
				>0.8~4.5			—	≥ 23
				>4.5~10.0			—	≥ 21
		H14 H24	H14 H24	>0.2~0.8	145~215	—	—	≥ 6
				>0.8~1.3			—	≥ 6
				>1.3~4.5			—	≥ 6
		H18	H18	>0.2~0.5	≥ 185	—	—	≥ 1
				>0.5~0.8			—	≥ 2
				>0.8~1.3			—	≥ 3
				>1.3~4.5			—	≥ 4
		H112	H112	>4.5~10.0	≥ 110	—	—	≥ 16
				>10.0~12.5	≥ 120		—	≥ 16
				>12.5~25.0	≥ 120		≥ 16	—
				>25.0~80.0	≥ 110		≥ 16	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
3004	—	O	O	>0.2~0.5	150~200	≥ 60	—	≥ 9
				>0.5~0.8			—	≥ 12
				0.8~1.3			—	≥ 15
				>1.3~6.5			—	≥ 18
				>6.5~10.0			—	≥ 16
		H12 H22	H12 H22	>0.5~0.8	190~240	≥ 145	—	≥ 1
				>0.8~1.3			—	≥ 3
				>1.3~4.5			—	≥ 5
		H14 H24	H14 H24	>0.2~0.5	220~265	≥ 170	—	≥ 1
				>0.5~0.8			—	≥ 2

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
3004	—	H14 H24	H14 H24	>0.8~1.3	220~265	≥ 170	—	≥ 3
				>1.3~4.5			—	≥ 4
		H16 H26	H16	>0.2~0.5	240~285	≥ 190	—	≥ 1
				>0.5~0.8			—	≥ 2
			H26	>0.8~1.3			—	≥ 3
				>1.3~4.5			—	≥ 4
		H18	H18	>0.2~0.3	≥ 260	≥ 215	—	≤ 1
				>0.3~0.8			—	≤ 1
				>0.8~1.3			—	≥ 2
				>1.3~4.5			—	≥ 4
		H112	H112	>4.5~12.5	≥ 160	≥ 60	—	≥ 7
				>12.5~40.0			6	—
				>40.0~80.0			6	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5A02	—	O	O	>0.5~1.0	165~225	—	—	≥ 17
				>1.0~10.0			—	≥ 19
		H14 H24 H34	H14 H24 H34	>0.5~1.0	≥ 235	—	—	≥ 4
				>1.0~4.5			—	≥ 6
		H18	H18	>0.5~1.0	≥ 265	—	—	≥ 3
				>1.0~4.5			—	≥ 4
		H112	H112	>4.5~12.5	≥ 175	—	—	≥ 7
				>12.5~25.0	≥ 175	—	≥ 7	—
				>25.0~80.0	≥ 155	—	≥ 6	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5A03	—	O	O	0.5~4.5	≥ 195	≥ 100	—	≥ 16
		H14 H24 H34	H14 H24 H34	>0.5~4.5	≥ 225	≥ 195	—	≥ 8
				>4.5~10.0	≥ 185	≥ 80	—	≥ 16
		H112	H112	>10.0~12.5	≥ 175	≥ 70	—	≥ 13
				>12.5~25.0	≥ 175	≥ 70	≥ 13	—
				>25.0~50.0	≥ 165	≥ 60	≥ 12	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 σ_{pb2} /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
5A05	—	O	O	0.5~4.5	≥ 275	≥ 145	—	≥ 16
		H112	H112	>4.5~10.0	≥ 275	≥ 125	—	≥ 16
				>10.0~12.5	≥ 265	≥ 115	—	≥ 14
				>12.5~25.0	≥ 265	≥ 115	≥ 14	—
				>25.0~50.0	≥ 255	≥ 105	≥ 13	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
5A06	T.艺包铝	O	O	0.5~4.5	≥ 315	≥ 155	—	≥ 16
		H112	H112	>4.5~10.0	≥ 315	≥ 155	—	≥ 16
				>10.0~12.5	≥ 305	≥ 145	—	≥ 12
				>12.5~25.0	≥ 305	≥ 145	≥ 12	—
				>25.0~50.0	≥ 295	≥ 135	≥ 6	—
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
5052	—	O	O	>0.5~0.8	170~215	≥ 65	—	≥ 15
				>0.8~1.3			—	≥ 17
				>1.3~6.5			—	≥ 19
				>6.5~10.0			—	≥ 18
		H12 H22 H32	H12 H22 H32	>0.5~1.3	215~265	≥ 160	—	≥ 5
				>1.3~4.5			—	≥ 7
		H14 H24 H34	H14 H24 H34	>0.5~0.8	235~285	≥ 180	—	≥ 3
				>0.8~1.3			—	≥ 4
				>1.3~4.5			—	≥ 6
		H16 H26 H36	H16 H26 H36	0.5~0.8	255~305	≥ 200	—	≥ 3
				>0.8~4.5			—	≥ 4
		H18 H38	H18 H38	0.5~0.8	≥ 270	≥ 220	—	≥ 3
				>0.8~4.5			—	≥ 4
		H112	H112	>4.5~6.5	≥ 195	≥ 110	—	≥ 9
				>6.5~12.5	≥ 195	≥ 110	—	≥ 7
>12.5~40.0	≥ 175			≥ 65	≥ 10	—		
>40.0~80.0	≥ 175			≥ 65	≥ 14	—		
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%		
							5D	50 mm	
5005	—	O	O	0.5~0.8	105~145	≥ 35	—	≥ 16	
				>0.8~1.3			—	≥ 19	
				>1.3~6.5			—	≥ 21	
				>6.5~10.0			—	≥ 22	
		H12	H12	H32	H12	125~165	≥ 95	—	≥ 3
					H12			—	≥ 4
					H32			—	≥ 7
		H14	H14	H34	H14	145~185	≥ 115	—	≥ 2
					H14			—	≥ 2
					H34			—	≥ 3
		H16	H16	H36	H16	165~205	≥ 135	—	≥ 1
					H16			—	≥ 2
					H36			—	≥ 3
		H18	H18	H38	H18	≥ 185	—	—	≥ 1
					H18			—	≥ 2
					H38			—	≥ 3
		H112	H112	—	>4.5~12.5	≥ 115	—	—	≥ 8
					>12.5~40.0	≥ 105		≥ 10	—
					>40.0~80.0	≥ 100		≥ 16	—
		F	—	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5083	—	O	O	0.5~4.5	275~350	125~200	—	≥ 16	
				>4.5~6.5	≥ 275	≥ 125	—	≥ 11	
		H112	H112	>6.5~12.5	≥ 275	≥ 125	—	≥ 12	
				>12.5~40.0	≥ 275	≥ 125	≥ 10	—	
				>40.0~50.0	≥ 270	≥ 115	≥ 10	—	
		F	—	—	>4.5~150.0	—	—	—	—
5086	—	O	O	0.5~1.3	240~305	≥ 95	—	≥ 16	
				>1.3~4.5			—	≥ 18	
		H112	H112	>4.5~12.5	≥ 250	≥ 125	—	≥ 8	
				>12.5~40.0	≥ 240	≥ 105	≥ 9	—	
				>40.0~50.0	≥ 235	≥ 95	≥ 12	—	
		F	—	—	>4.5~150.0	—	—	—	—

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
6A02	—	O	O	0.5~4.5	≤ 145	—	—	≥ 21
				>4.5~10.0			—	≥ 16
			T62	>0.5~4.5	≥ 295	—	—	≥ 11
				>4.5~10.0			—	≥ 8
		T4	T4	0.5~0.8	≥ 195	—	—	≤ 19
				>0.8~2.9			—	≥ 21
				>2.9~4.5			—	≤ 19
				>4.5~10.0			—	≥ 17
		T6	T6	0.5~4.5	≥ 295	—	—	≥ 11
				>4.5~10.0			—	≥ 8
		H112	T62	>4.5~12.5	≥ 295	—	—	≥ 8
				>12.5~25.0	≥ 295		≥ 7	—
				>25.0~40.0	≥ 285		≥ 6	—
				>40.0~80.0	≥ 275		≥ 6	—
			T42	>4.5~12.5	≥ 175	—	—	≥ 17
				>12.5~25.0	≥ 175		≥ 14	—
				>25.0~40.0	≥ 165		≥ 12	—
>40.0~80.0	≥ 165			≥ 10	—			
F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
7A04 7A09	正常包 铝或工 艺包铝	O	O	0.5~10.0	≤ 245	—	—	≥ 11
			T62	0.5~2.9	≥ 470	≥ 390	—	≥ 7
		>2.9~10.0		≥ 490	≥ 410	—	≥ 7	
		T6	T6	0.5~2.9	≥ 480	≥ 400	—	≥ 7
				>2.9~10.0	≥ 490	≥ 410	—	≥ 7
		H112	T62	>4.5~10.0	≥ 490	≥ 410	—	≥ 7
				>10.0~12.5	≥ 490	≥ 410	—	≥ 4
				>12.5~25.0	≥ 490		≥ 4	—
				>25.0~40.0	≥ 490		≥ 3	—
		F	—	>4.5~150.0	—		—	—

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_t /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%			
							5D	50 mm		
7075	正常包 铝或工 艺包铝	O	O	0.5~1.6	≤ 250	≤ 140	—	≥ 10		
				1.6~10.0	≤ 270	≤ 145	—	≥ 10		
			T62	T62	0.5~1.0	≥ 485	≥ 415	—	≥ 7	
					>1.0~1.6	≥ 495	≥ 425	—	≥ 8	
					>1.6~4.5	≥ 505	≥ 435	—	≥ 8	
					>4.5~6.5	≥ 515	≥ 440	—	≥ 8	
					>6.5~10.0	≥ 515	≥ 445	—	≥ 9	
					—	—	—	—	—	
		T6	T6	0.5~1.0	≥ 485	≥ 415	—	≥ 7		
				>1.0~1.6	≥ 495	≥ 425	—	≥ 8		
				>1.6~6.5	≥ 505	≥ 435	—	≥ 8		
				>6.5~10.0	≥ 515	≥ 445	—	≥ 9		
		H112	T62	>4.5~6.5	≥ 515	≥ 440	—	≥ 8		
				>6.5~12.5	≥ 515	≥ 445	—	≥ 9		
				>12.5~25.0	≥ 540	≥ 470	≥ 6	—		
				>25.0~40.0	≥ 530	≥ 460	≥ 5	—		
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	—		
		8A06	—	O	O	>0.2~0.3	≤ 110	—	—	≥ 16
						>0.3~0.5			—	≥ 21
						>0.5~0.8			—	≥ 26
>0.8~10.0	—					≥ 30				
H14	H14			>0.2~0.3	≥ 100	—	—	≥ 1		
				>0.3~0.5			—	≥ 3		
				>0.5~0.8			—	≥ 4		
H24	H24			>0.8~1.0	≥ 100	—	—	≥ 5		
				>1.0~4.5			—	≥ 6		
H18	H18			>0.2~0.3	≥ 135	—	—	≥ 1		
				>0.3~0.8			—	≥ 2		
				>0.8~4.5			—	≥ 3		

续表 14.9-46

牌号	包铝分类	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	规定非比例 伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ /MPa	伸长率/%	
							5D	50 mm
8A06	—	H112	H112	>4.5~10.0	≥ 70	—	—	≥ 19
				>10.0~12.5	≥ 80		—	≥ 19
				>12.5~25.0	≥ 80		≥ 19	—
				>25.0~80.0	≥ 65		≥ 16	—
		F	—	>4.5~150.0	—	—	—	

- 注：1. 抗拉强度上限值及规定非比例伸长应力极限值对 H22、H24、H26 状态的材料不适用。
2. $1 \times \times \times$ 系板材供方一般不作规定非比例伸长应力，需方要求时，必须在合同中注明。
3. 当厚度为 40~80 mm 时，供方不做力学性能试验，但应保证符合本表的要求。
4. 厚度大于 40 mm 的 2A14、2014、7A04、7A09、7075 合金板材和厚度大于 50 mm 的 5A03、5A05、5A06、5083、5086 合金板材以及厚度大于 80 mm 的所有板材供方不做力学性能试验，当需方要求提供力学性能时，供方只附中心层试样的实测结果。
5. $2 \times \times \times$ 系、 $6 \times \times \times$ 系、 $7 \times \times \times$ 系合金以 H112 状态供应时，如合同中不加注明，只提供试样 T42 或 T62 状态力学性能。
6. 厚度小于 10 mm 并以 O 状态供货的板材一般不做 T42 或 T62 状态性能，用户需要时必须在合同中注明，其 T42 或 T62 状态试样的力学性能应符合本表的规定；若用户需要厚度大于 10 mm 的 O 状态板材时，供方可以提供，但性能附实测结果。
7. 板材牌号的化学成分符合 GB/T 3190 的规定。
8. 供货状态及试样状态代号含义参见 GB/T 6475—1996 的规定。

表 14.9-47 铝及铝合金轧制板的室温高向性能（摘自 GB/T 3880—1997）

合金牌号	供货状态	试样状态	厚度/mm	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率/%
					5D
2A11、2017	H112	T42	35~80	≥ 295	≥ 4
2A12、2024	H112	T42	35~80	≥ 345	≥ 3
7A04、7A09、7075	H112	T62	35~40	≥ 390	≥ 2

注：当需方有要求并在合同中注明时，才提供高向性能。

第 10 章 复 合 材 料

1 复合材料分类

按用途可将复合材料分为结构复合材料（用于工程结构）及功能复合材料（电、光、声、热

等特殊性能要求）；按结构形式可将复合材料分为层合结构复合材料和缠绕结构复合材料；按组成体可对复合材料进行分类，见表 14.10-1。

表 14.10-1 复合材料分类

增强体 基体		金属	无机非金属					有机非金属			
			陶 瓷		碳 素		玻 璃		高聚物纤维	橡胶粒	木材
			纤维	粒料	纤维	粒料	纤维	粒料			
金 属		金属基复合材料	金属基超硬合金		碳纤维增强金属						
无机非 金属	陶瓷	陶瓷基复合材料	增强陶瓷		增强陶瓷						
	玻璃	金属网嵌玻璃	陶瓷增强玻璃								
	水泥	钢筋水泥	增强水泥		增强水泥		玻纤增强水泥				
	碳素			碳纤增强碳复合材料							
有机非 金属	木材						塑料合板	橡胶合板			
	塑料	金属丝增强塑料	陶瓷纤维增强塑料		碳纤维增强塑料		玻纤增强塑料		高聚物纤维增强塑料	高聚物合金	纤维板
	橡胶	金属丝增强橡胶	陶瓷纤维增强橡胶		碳纤碳黑增强橡胶		玻纤增强橡胶		高聚物纤维增强橡胶	高聚物合金	

2 金属基复合材料

2.1 层压金属复合材料

2.1.1 不锈钢复合钢板和钢带（表 14.10-2～表 14.10-6）

表 14.10-2 不锈钢复合钢板和钢带分类、代号及应用（摘自 GB/T 8165—1997）

级 别	代 号			应用条件	应用举例
	爆炸法	轧制法	爆炸轧制法		
I 级	BI	RI	BR I	适用于不允许有未结合区存在的、加工时要求严格的结构件上	制造石油、化工、轻工、海水、淡化、核工业等各类压力容器、贮罐等结构件
II 级	BII	RII	BR II	适用于可允许有少量未结合区存在的结构件上	
III 级	BIII	RIII	BR III	适用于复层材料只作为耐腐蚀层来使用的一般结构件上	

表 14.10-3 不锈钢复合钢板和钢带力学性能 (摘自 GB/T 8165—1997)

级 别	界面抗剪强度 $\tau_b/\text{MPa} \geq$	屈服点 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta/\%$	冲击功 A_{KV}/J
I 级 II 级	210	不小于基层钢 板标准值 ⁱ	不小于基层钢 板标准下限值, 且不大于上限值 35 MPa^j	不小于基层钢 板标准值 ^j	应符合基层钢 板的规定 ^j
III 级	200				

① 复合钢板和钢带的屈服点下限值亦可按下式计算:

$$\sigma_s = \frac{t_1 \sigma_{s1} + t_2 \sigma_{s2}}{t_1 + t_2}$$

式中: σ_{s1} —复层钢板的屈服点下限值 (MPa);

σ_{s2} —基层钢板的屈服点下限值 (MPa);

t_1 —复层钢板的厚度 (mm);

t_2 —基层钢板的厚度 (mm)。

② 复合钢板和钢带的抗拉强度下限值亦可按下式计算:

$$\sigma_b = \frac{t_1 \sigma_{b1} + t_2 \sigma_{b2}}{t_1 + t_2}$$

式中: σ_{b1} —复层钢板的抗拉强度下限值 (MPa);

σ_{b2} —基层钢板的抗拉强度下限值 (MPa);

t_1 —复层钢板的厚度 (mm);

t_2 —基层钢板的厚度 (mm)。

③ 当复层伸长率标准值小于基层标准值、复合钢板伸长率小于基层、但又不小于复层标准值时, 允许割去复层仅对基层进行拉伸试验, 其伸长率应不小于基层标准值。

④ 复合钢板复层不做冲击功试验。

表 14.10-4 不锈钢复合钢板和钢带弯曲性能 (摘自 GB/T 8165—1997)

厚度/ mm	试样宽度/ mm	弯曲角度	弯心直径 d		试验结果	
			内 弯	外 弯	内 弯	外 弯
≤ 25	$b = 2a$	180°	$a < 20 \text{ mm}$ $d = 2a$ $a \geq 20 \text{ mm}$ $d = 3a$	$a < 20 \text{ mm}$ $d = 2a$ $a \geq 20 \text{ mm}$ $d = 3a$	在弯曲部分的外侧不得产生裂 纹; 复合界面不允许分层	
> 25	$b = 2a$	180°	加工基层厚度至 25 mm, 弯心直径 按基层钢板标准	加工基层厚度至 25 mm, 弯心直径 按基层钢板标准		

注: a 为复合钢板总厚度。

表 14.10-5 不锈钢复合钢板和钢带复层及基层材料标准牌号及结合率 (摘自 GB/T 8165—1997)

复层 及基 层材 料标 准及 典型 牌号	复 层 材 料		基 层 材 料		复层 及基 层间 面积 结合 率	界面结 合级别	类别	结合率 /%	未复合状态
	标准	GB/T 3280 GB/T 4237	标准	GB/T 3274, GB/T 713 GB/T 3531, GB/T 6654 YB/T 40, YB/T 41					
典型 牌号	0Cr13, 0Cr13Al	典型 牌号	Q235-A	I 级	BI BRI RI	100	不允许有未结合区 存在		
	0Cr17, 0Cr17Ti	典型 牌号	Q235-B						
	0Cr18Ni9	20							
	0Cr18Ni10Ti	20R							
	00Cr19Ni10	20g							
	0Cr17Ni12Mo2	16MnR							
	00Cr17Ni14Mo2	15CrMoR							
00Cr18Ni5Mo3Si2			II 级	BII BRII RII	≥ 99	单个未结合区长度 不大于 50 mm, 面积不 大于 20 cm^2			
			III 级	BIII BRIII RIII	≥ 95	单个未结合区长度 不大于 75 mm, 面积不 大于 45 cm^2			

表 14.10-6 不锈钢复合钢板钢带尺寸规格 (摘自 GB/T 8165—1997)

尺寸规格	复合钢板厚度不小于 8 mm, 复合钢带厚度 4 mm~8 mm。 复合钢板宽度 1 450 mm~3 000 mm, 复合钢带的宽度 1 000 mm~1 400 mm。 复合钢板和钢带长度 4 000 mm~10 000 mm。 复层厚度 0.5 mm~14 mm, 通常为 2 mm~3 mm。也可根据需方需要, 由供需双方协商确定 基层最小厚度: 复合钢板总厚度 > 8 mm 时, 基层最小厚度为 6 mm, 复合钢带的基层最小厚度由供需双方协议									
厚度允许偏差/mm	复层厚度允许偏差				复合钢板钢带总厚度允许偏差					
	I 级、II 级		III 级		复合钢板总厚度/mm		允许偏差/%			
					钢带	钢板	I 级、II 级	III 级		
					4~8	—	+10 -8	±9		
	不大于复层公称尺寸的 ±9%, 且不大于 1 mm		不大于复层公称尺寸的 ±10%, 且不大于 1 mm		—	≥8~15	+9 -7	±8		
					—	16~25	+8 -6	±7		
					—	26~30	+7 -5	±6		
				—	31~60	+6 -4	±5			
				—	>60	协商	协商			
宽度允许偏差/mm	公称厚度/mm	宽度 < 1 450	宽度 ≥ 1 450			复合钢板总厚度/mm	在规定宽度内允许的平面度			
			I 级	II 级	III 级		1 000~1 450	>1 450~1 800	>1 800	
	4~8	按 GB/T 709	+6 0	+10 0	+15 0		4~8	8	9	10
	>8~25		+20 0	+25 0	+30 0		>8~25	10	14	15
≥26		+25 0	+30 0	+35 0	≥26	8	12	14		

2.1.2 不锈钢复合冷轧薄钢板和钢带 (表 14.10-7~表 14.10-10)

表 14.10-7 不锈钢复合冷轧薄钢板和钢带表面加工和质量分类 (摘自 GB/T 17102—1997)

表面加工	表面加工等级	表面加工要求
	2	冷轧后进行热处理、酸洗或类似的处理
	2R	冷轧后进行热处理、酸洗或类似处理加工, 最后经冷轧获得适当光洁度
表面组别	组别	表面质量特征
	I 级表面	钢板两面允许有深度不大于钢板厚度公差之半, 且不使钢板小于允许最小厚度的一般的轻微麻点、轻微划伤、凹坑和辊印 钢板反面超出上述范围的缺陷允许用砂轮清除, 清除深度不得大于钢板厚度公差
	II 级表面	钢板表面允许有深度不大于钢板厚度公差之半, 且不使钢板小于允许最小厚度的下列缺陷。正面: 一般的轻微麻点、轻微划伤、凹坑和辊印。反面: 一般的轻微麻点、局部的深麻点、轻微划伤、压痕和凹坑 钢板两面超出上述范围的缺陷允许用砂轮清除, 清除深度正面不得大于钢板复层厚度之半, 反面不得大于钢板公差

注: 产品拉延级别应符合 GB/T 5213《深冲压用冷轧薄钢板和钢带》中的 F 级规定。

表 14.10-8 不锈钢复合钢冷轧钢板和钢带牌号及化学成分 (摘自 GB/T 17102—1997)

复层和基 层牌号	复层材料			基层材料			
	标准号	典型钢号		标准号	典型钢号		
	GB/T 4237	0Cr13Al、0Cr17、0Cr18Ni9		GB/T 5213	08Al、10Al		
基层牌号 化学成分	牌 号	化学成分 (质量分数) /%					
		C	Si	Mn	P	S	Al
	08Al	≤0.08	≤0.06	≤0.40	≤0.030	≤0.030	0.02~0.07
10Al	≤0.10	≤0.06	≤0.40	≤0.030	≤0.030	0.02~0.07	

表 14.10-9 不锈钢复合钢冷轧薄钢板和钢带的性能 (摘自 GB/T 17102—1997)

力学性能	基层钢号	屈服强度 σ_s /MPa ≤	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_{111} /%			
				复层为奥氏体不锈钢	复层为铁素体不锈钢		
		08Al	350	345~490	28	18	
	10Al	360	365~510	27	17		
冷弯性能	厚度 /mm	试样宽度 b /mm	弯曲角度	弯心直径 d	内弯、外弯试验结果		
	0.8~3	10	180°	2a	不得有分层、裂纹、折断		
杯突值/ mm	厚 度	冲压深度 ≥		杯突值/ mm	厚 度	冲压深度 ≥	
		08Al	10Al			08Al	10Al
	0.8	9.3	8.3		1.2	10	—
	1.0	9.6	8.6		1.5	10.3	—
				2.0	11.0	—	

注：1. 复、基层间面积结合率各不小于 99%。

2. 08Al 或 10Al 为基层时，杯突值双方协议进行试验，其他牌号不进行杯突值试验。

3. 基层选用其他牌号时，板和带的力学性能符合基层材料相应标准规定。

表 14.10-10 不锈钢复合钢冷轧薄钢板和钢带尺寸规格 (摘自 GB/T 17102—1997)

厚度规格	复合板 总厚度	复层厚度/mm 不小于				表示法		
		对称型 A、B 面	减薄非对称型		加厚非对称型		对称型	非对称型
			A 面	B 面	A 面	B 面		
0.8	0.09	0.09	0.06	0.18	0.09	总厚度/mm (复×2+基) 例： 3.0(0.25×2+2.5)	总厚度/mm (A面复层+ B面复层+基层) 例： 1.5(0.2+0.13+1.17)	
1.5	0.13	0.13	0.08	0.20	0.13			
2.0	0.18	0.18	0.10	0.18	0.18			
2.5	0.22	0.22	0.12	0.22	0.22			
3.0	0.25	0.25	0.15	0.25	0.25			

续表 14.10-10

厚度允许偏差	公称厚度/mm	复层厚度允许偏差	复合钢板厚度允许偏差/mm	
			A级精度	B级精度
	0.8~1.0	不大于复层公称尺寸的±10%	±0.07	±0.08
	1.2		±0.08	±0.10
	1.5		±0.10	±0.12
	2.0		±0.12	±0.14
	2.5		±0.13	±0.16
	3.0		±0.15	±0.17
宽度及宽度允许偏差	宽度 900~1 200 mm 宽度允许偏差符合 GB/T 708 规定		平面度	每米长度上的平面度不大于 10 mm
			质量	按理论质量交货,基层和复层单位质量应分别符合 GB/T 708 和 GB/T 4229 的规定
长度及长度允许偏差	薄板长度 2 000 mm 或其他定尺,也可成卷交货;成卷交货的钢带内径应在合同中注明。长度允许偏差应符合 GB/T 708 规定		应用	产品适于轻工机械、食品、炊具、建筑、装饰、焊管、铁道客车、医药卫生、环保等设备制造之用

2.1.3 钛-钢复合板 (表 14.10-11~表 14.10-15)

表 14.10-11 钛-钢复合板分类及代号 (摘自 GB/T 8547—1987)

生产种类		代号	用途分类
爆炸钛-钢复合板	0类	B0	0类:用于过渡接头、法兰等的高结合强度,且不允许不结合区存在的复合板 1类:将钛材作为强度设计的或特殊用途的复合板,如管板等 2类:将钛材作为耐蚀设计,而不考虑其强度的复合板,如筒体等
	1类	B1	
	2类	B2	
爆炸-轧制钛-钢复合板	1类	BR1	
	2类	BR2	

注:爆炸钛-钢复合板以“爆”字汉语拼音字头“B”表示;爆炸-轧制钛-钢复合板以“爆”和“热”字汉语拼音字头“BR”表示。

表 14.10-12 钛-钢复合板厚度、宽度及允许偏差 (摘自 GB/T 8547—1987) (mm)

复合板厚度	复合板厚度允许偏差	复合板宽度(或直径)及允许偏差		
		宽度≤1 100	宽度>1 100~1 600	宽度>1 600~2 200
6~18	±0.8	+15 0	+15 0	+35 0
19~28	±1.0	+50 0	+50 0	+50 0
29~46	±1.2	+50 0	+50 0	+50 0
47~64	±1.5	+50 0	+50 0	+50 0

表 14.10-13 钛-钢复合板长度尺寸及允许偏差 (摘自 GB/T 8547—1987) (mm)

复合板厚度	复合板长度及允许偏差			
	长度≤1 100	长度>1 100~1 600	长度>1 600~2 800	长度>2 800~4 500
8~18	+15 0	+15 0	+25 0	协商
19~64	+50 0	+50 0	+50 0	协商

表 14.10-14 钛-钢复合板平面度 (摘自 GB/T 8547—1987)

复合板分类	0类、1类		2类
	厚度小于或等于 30 mm	厚度大于 30 mm	
复合板平面度/(mm·m ⁻¹)	≤8	≤6	≤15

表 14.10-15 钛-钢复合板力学性能 (摘自 GB/T 8547—1987)

拉伸试验		剪切试验		弯曲试验	
抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	抗剪强度 τ /MPa		弯曲角 α	弯曲直径 D /mm
		0类复合板	其他类复合板		
$> \sigma_b$	大于基材 或复材标准 中较低一方 的规定值	≥196	≥138	内弯 180°, 外弯由复材 标准决定	内弯时按基材标准规定不 够 2 倍时取 2 倍 外弯时为复合板厚度的 3 倍

注: 1. 当用户要求时, 供方可以做基材的拉伸试验, 其抗拉强度应达到基材相应标准的要求。

2. 爆炸-轧制复合板的伸长率可以由供需双方协商确定。

3. 复合板的抗拉强度理论下限标准值 σ_b 下式计算:

$$\sigma_b = \frac{t_1 \sigma_1 + t_2 \sigma_2}{t_1 + t_2}$$

式中: σ_1 —基材抗拉强度下限标准值 (MPa);

σ_2 —复材抗拉强度下限标准值 (MPa);

t_1 —基材厚度 (mm);

t_2 —复材厚度 (mm);

2.1.4 钛-不锈钢复合板 (表 14.10-16~表 14.10-19)

表 14.10-16 钛-不锈钢复合板代号及用途 (摘自 GB/T 8546—1987)

种类	代号	用途分类
0类	B0	用于过渡接头、法兰等高结合强度, 不允许不结合区存在的某些特殊用途
1类	B1	钛材参与强度设计的复合板, 或复合板需进行严格加工的构件。如管板等
2类	B2	钛材作为耐蚀设计, 不参与强度设计的复合板。如筒体等

注: 爆炸钛-不锈钢以“爆”字汉语拼音“B”表示。

表 14.10-17 钛-不锈钢复合板厚度、宽度 (或直径) 尺寸及允许偏差

(摘自 GB/T 8546—1987)

(mm)

复合板厚度	复合板厚度允许偏差	复合板宽度 (或直径) 及允许偏差		
		≤1 100	>1 100~1 600	>1 600~2 200
8~18	±0.8	+10 0	+15 0	+20 0
19~28	±1.0	+50 0	+50 0	+50 0
29~46	±1.2	+50 0	+50 0	+50 0
47~64	±1.5	+50 0	+50 0	+50 0

表 14.10-18 钛-不锈钢复合板长度尺寸及允许偏差 (摘自 GB/T 8546—1987) (mm)

复合板厚度	复合板长度及允许偏差			
	≤1 100	>1 100~1 600	>1 600~2 800	>2 800
8~18	+15 0	+20 0	+30 0	协商
19~64	+50 0	+50 0	+50 0	协商

表 14.10-19 钛-不锈钢复合板力学性能 (摘自 GB/T 8546—1987)

拉伸试验		剪切试验	分离试验	弯曲试验 ²	
抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	抗剪强度 τ /MPa	分离强度 σ_s /MPa	弯曲角 α	弯心直径 D/mm
$>\sigma_b$ ^①	大于基材或 复材标准中较 低一方的规定 值	0类≥197	≥274	内弯 180°, 外弯由复材的 标准确定	内弯时按基材标 准, 不够2倍时取2 倍; 外弯时为复合 板厚度的3倍
		1类≥138	—		
		2类≥138	—		

① 复合板的抗拉强度理论下限标准值 σ_b 按表 14.10-15 注 3 的公式计算。

② 在弯曲部分的外侧不允许产生裂纹, 复合界面不允许分层。

2.1.5 铜-钢复合板 (表 14.10-20、表 14.10-21)

表 14.10-20 铜-钢复合钢板尺寸及允许偏差 (摘自 GB/T 13238—1991)

总厚度		复层厚度		长度/mm		宽度/mm	
公称尺寸/mm	允许偏差	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差
8~30	+12% -8%	2~6	±10%	≥1 000	+25 -10	≥1 000	+20 -10

注: 1. 复合板的长度和宽度按 50 mm 的倍数进级, 定尺板尺寸由供需双方协商。

2. 复层厚度应在合同中注明, 经需方同意, 复层厚度超过正偏差亦可交货。

3. 复合板的平面度每米不大于 12 mm。

表 14.10-21 铜-钢复合板牌号、力学性能及应用 (摘自 GB/T 13238—1991)

复层材料		基层材料		抗拉强度 σ_b 计算公式	应用
牌号	化学成分规定	牌 号	化学成分规定		
Tu1	GB/T 5231	Q235	GB/T 700	$\sigma_b = \frac{t_1\sigma_1 + t_2\sigma_2}{t_1 + t_2}$ (MPa) σ_1, σ_2 —基材、复材抗 拉强度下限值 (MPa) t_1, t_2 —基材、复材厚 度, (mm)	适用于化工、 石油、制药、制 盐等工业制造耐 腐蚀的压力容器 及真空设备
T2		20g、16Mng	GB/T 713		
B30	GB/T 5234	20R、16MnR	GB/T 6654		
		Q345	GB/T 1591		
		20	GB/T 699		

注: 1. 复合板伸长率 δ_5 (%) 应不小于基材标准的规定值。

2. 复合板的抗剪强度 τ_b 不小于 100 MPa。

3. 复层和基层材料牌号应在合同中注明。

2.2 纤维增强金属基复合材料

2.2.1 碳(石墨)纤维增强铝复合材料(表14.10-22)

表14.10-22 碳纤维增强铝复合材料力学性能及应用

性能	纤维	基体	纤维含量/%	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
	石墨纤维 GT50	201AL	30	2.39	630	160
石墨纤维 GGY70	201AL	34	2.39	665	210	
石墨纤维 GGY70	201AL	30	2.44	560	160	
高模量沥青纤维 GEMpitch	6061AL	41	2.44	630	329	

特点及应用 具有很高的比强度及比模量, 良好的高温性能和导热性、低的热膨胀系数及良好的尺寸稳定性。与高强铝合金、钛合金、高强钢相比, 其比强度约高一倍, 比模量约高三倍, 适于制作构件质量小、刚性好的构件, 壁厚最小的要求结构稳定的构件; 高温性能好及尺寸稳定性好、精度要求高的构件

2.2.2 碳纤维增强铅复合材料(表14.10-23)

表14.10-23 碳纤维增强铅及铅合金复合材料力学性能及应用

材料名称	C/Pb	C/Pb-Sn	C/Pb-Sn-Sb
抗拉强度/MPa	33.44	67.86	74.92

特点及应用 碳纤维强度比铅及铅合金高近百倍, 碳纤维增强铅及铅合金复合材料具有消声、耐腐蚀、耐磨、较高的强度和刚度, 适于制作承受高负荷的自润滑轴承、薄板构件用来降低飞机、农机具、工业设备和船舶等的噪声, 如装在农用拖拉机驾驶室中, 可使噪声下降17分贝

2.2.3 碳纤维增强铜复合材料(表14.10-24)

表14.10-24 碳纤维增强铜复合材料摩擦性能及应用

材料	纤维位向	线速度/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	磨损速率/ $\text{cm}/\text{km}\times 10^4$	平均摩擦系数	电刷温度/ $^{\circ}\text{C}$
		T300/Cu-1% Sn A类复合丝	I II I I	54 54 60 120	0.52 2.47 0.55 0.08	0.06 0.14 0.39 0.16	————
T300/Cu-1% Sn B类复合丝	I I	60 120	1.44 0.94	0.16 0.18	241 282
T300/Cu-10% Sn B类复合丝	I I	60 120	3.36 2.99	0.22 0.19	223 274
HM3000/Cu-1% Sn A类复合丝	I II	54 54	2.85 38.27	0.36 0.41	200 232
HM3000/Cu-3% Sn A类复合丝	I I I	54 60 120	1.62 2.08 1.09	0.23 0.29 0.16	164 170 201
HM3000/Cu-4% Sn A类复合丝	I I I	54 60 120	4.79 3.95 1.34	0.19 0.37 0.19	194 217 258

续表 14.10-24

	材 料	纤维位向	线速度/ (mm·s ⁻¹)	磨损速率/ cm/km × 10 ⁻⁴	平均摩 擦系数	电刷温度/℃
摩 擦 性 能	HM3000/Cu-4% Sn B类复合丝	I	60	6.08	0.30	217
		I	120	1.72	0.15	258
	HM3000/Cu-8% Sn	I	54	2.46	0.33	114
		I	30	2.79	0.36	155
		I	60	1.73	0.23	102
		I	120	1.19	0.11	126
		I	180	0.75	0.13	140
I	235	2.08	0.21	265		
特点及 应用	具有高强度、摩擦系数小、磨损率低、可通过工作电流大、接触电压降小等优异性能，适于用作低电压、大电流电机及特殊电机的电刷材料、耐磨材料及电子材料。目前，作为耐磨材料和电机电刷材料已有较多的试验研究					

注：1. A类指纤维束中95%已浸渍好，表面金属连接；B类指浸渍不完全，但表面涂层连接。

2. 纤维位向：I—纤维轴与滑动面垂直；II—纤维轴与滑动面平行；但与滑动方向垂直；III—纤维轴与滑动面、滑动方向均平行。

2.2.4 颗粒增强金属复合材料 (表 14.10-25、 表 14.10-26)

表 14.10-25 铸造铜-石墨复合材料力学性能及应用

力学性能	密度/g·cm ⁻³	抗拉强度/MPa	硬度 HBS	伸长率/%	线膨胀系数/10 ⁻⁵ ·K ⁻¹
	6.723	285	70	6.0	2.73
特点及 应用	将石墨粒子均匀分散于铜合金中，制成铸造铜-石墨复合材料，具有优异的摩擦性能，不论有无润滑条件，均具有较低的摩擦系数，且具有较好的振动衰减性能。其力学性能随着石墨粒子的加入量增加而有所降低，当石墨粒子数量达到15%（质量）时，强度仍为285 MPa。是一种优良的自润滑材料，可用于作轴瓦和耐磨损零件				

表 14.10-26 铸造石墨铝合金复合材料物理力学性能及应用

物理力学性能	石墨体积分 数/%	密度/ g·cm ⁻³	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	压缩强度/ MPa	硬 度 HBS	油介质 摩擦系数
	5	2.63	180	3.9	350	64	0.008
	10	2.52	150	3.0	300	59	0.01
特点及 应用	用铸造法弥散石墨于铝或铝合金中的复合材料具有优良的自润滑性和减振性。可用于汽车发动机汽缸、轴承及各种耐磨和减振件。石墨含量越高，强度随之有所降低；石墨体积分小于10%时，耐磨性提高，超过10%时，随石墨含量增加耐磨性不再提高，甚至有所降低。石墨粒子经包覆后，在润滑条件下，复合材料耐磨性提高，无润滑条件下则相反。减振性能随石墨含量增加，衰减率也提高						

3 塑料基复合材料

3.1 玻璃纤维增强塑料

3.1.1 玻璃纤维增强热固性塑料 (表 14.10-27)

表 14.10-27 玻璃纤维增强热固性塑料的性能

性能	环氧树脂						酚醛树脂		
	双酚 A 型环氧		酚醛环氧		脂环族	脂肪族	高强玻纤	改性酚醛开刀丝玻纤	层压板
	玻纤	层压板	玻纤、填料	层压板	层压板	层压板			
成型收缩率/%	0.1~0.8	—	0.4~0.8	—	—	—	0.1~0.4	—	—
抗拉强度/MPa	35~138	220~412	34~86	216~284	196~235	332	48~124	78~102	196
断后伸长率/%	4	—	—	—	—	—	0.2	—	—
抗压强度/MPa	124~276	201~492	165~330	—	220~274	155	110~248	100~115	—
抗弯强度/MPa	55~206	112~442	69~150	370	294~392	339	84~413	170~215	245
缺口冲击韧度/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	0.63~21	196~274 (无缺口)	0.63~1.1	—	137~167 (无缺口)	306 (无缺口)	1~18	98~180 (无缺口)	210 (无缺口)
拉伸弹性模量/GPa	20.6	—	14.5	—	—	—	13~22.7	—	—
弯曲模量/GPa	13.8~31	—	9.6~19.2	—	24.5	—	7.9~22.7	—	—
硬度洛氏、布氏、 巴柯尔	100~112 HRM	—	70~74 巴柯尔	—	—	23.6HBS	—	—	30HBS
线膨胀系数/ 10^{-5}K^{-1}	1.1~5	—	1.8~4.3	—	—	—	—	—	—
热变形温度/ $^{\circ}\text{C}$ (1.82 MPa)	107~260	—	154~230	—	—	—	176~315	≥ 250 (马丁温度)	—
热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.17~0.42	—	0.35	—	—	—	—	—	—
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.6~2	—	1.6~2.05	1.6~1.7	1.6~1.7	—	1.44~1.56	1.6~1.72	1.60~1.70
24 h 吸水率/% (饱和)	0.04~0.2	—	0.04~0.29	0.93	—	—	0.20	0.05~0.15	—
介电强度/ $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$	9.8~15.7	—	12.8~17.7	—	—	—	—	—	11.8~27.6
特点及应用	环氧树脂	良好的电绝缘性和粘结性能,较高的机械强度和耐热性,耐一般酸、碱及有机溶剂,耐霉菌,成型收缩率小,体积收缩率1%~5%,加入固化剂后一般需加压加热成型,亦可在接触压力下常温固化。用于制作高强度制品、电绝缘件、电机护环、汽车零件、容器、风扇叶片、螺旋桨、泵、阀、船舶零部件、衬里等							
	酚醛树脂	优良的耐酸性、耐烧蚀性、电绝缘性、耐硫化氢、油、水、汽油、苯能承受较大负荷,尺寸稳定、加热成型。硬脆、价廉。适于耐腐蚀件、泵、阀、管道、风机、管配件、酚醛层压板、绝缘结构件、轴瓦、导向轮、电讯仪表中的绝缘配件。耐烧蚀材料、开关等电器零件							

续表 14.10-27

性能	酚 醚 树 脂		聚酰亚胺	不饱和聚酯树脂					糠酮树脂
	层压板	模压件 开刀丝 玻纤	体积分 50%玻纤	短切玻纤	玻璃布	SMC ^①	BMC ^②	玻纤	层压板
成型收缩率/%	—	—	0.20	0.1~0.2	0.02~ 0.2	0.05~ 0.40	0.05~ 0.40	0.1~1.0	—
抗拉强度/MPa	282~ 317	76~198	44	20.7~ 68.9	207~344	48~172	20.7~ 68.9	27.6~65	209
断后伸长率/%	—	—	—	<1	1~2	3	—	—	—
抗压强度/MPa	—	104~ 142	23	138~207	172~344	103~206	96~206	103~248	350
抗弯强度/MPa	430	114~ 190	147	48~138	276~344	68.9~ 248	110~165	58.6~ 179	147
缺口冲击韧度/kJ·m ⁻²	83.6	70~191	12.3	3.2~3.4	10~63	14.7~ 46.2	4.2~ 27.3	1.5~ 33.6	186 (无缺口)
拉伸弹性模量/GPa	—	—	—	6.9~17	10~31	4.6~ 17.2	10~17.2	13.8~ 19.3	—
弯曲模量/GPa	—	—	13.6	6.9~ 11.8	6.9~ 20.6	6.9~15	—	13.8	—
硬度(洛氏、巴柯尔)	—	巴柯尔 56~59	118HRM	巴柯尔 50~80	巴柯尔 60~80	巴柯尔 50~70	巴柯尔 50~65	—	95HRE
线膨胀系数/10 ⁻⁵ K ⁻¹	—	—	1.3	2~3.3	1.5~3	1.4~2	—	1.5~3.3	—
热变形温度/℃(1.82 MPa)	>250	>250	309	>204	>204	190~260	160~204	204~260	>300 (马丁耐热)
热导率/W·(m·K) ⁻¹	—	—	0.36	—	—	—	0.75~ 0.92	0.63~ 1.05	—
密度/g·cm ⁻³	1.78	1.52	1.60~ 1.70	1.65~ 2.32	1.50~ 2.10	1.65~ 2.60	1.72~2.1	2.0~2.3	1.70
24 h 吸水率/% (饱和)	0.04	0.04	0.70	0.06~ 0.28	0.05~ 0.5	0.10~ 0.25	0.10~ 0.45	0.03~ 0.50	0.10
介电强度/kV·mm ⁻¹	—	—	17.6	13.6~ 16.5	13.8~ 19.7	15~ 19.7	11.8~ 15.4	9.8~ 20.9	17.5

特点及 应用	酚醚树脂	耐腐蚀性好,耐热性能良好,粘结性能和耐磨性能很好,可作砂轮粘结剂,也可作为耐蚀、耐高温,电绝缘和耐烧蚀材料等
	聚酰亚胺	耐高温老化、耐辐射,在300℃尚能保持一定的机械强度,耐热性最好的一种热固性材料。可作C级绝缘材料,高温电机中的槽楔、仪表骨架、高温电气开关等
	不饱和聚酯树脂	良好的电绝缘性,耐腐蚀性,韧性和透明性,可在接触压力下常温固化,工艺简便,成型收缩率较大,体积收缩率6%~10%,价格较低。适于制作波形瓦、浴缸、槽车、贮槽、容器、船艇、电气设备、飞机零部件、雷达罩、管道、冷水塔、净水槽等
	糠酮树脂	优异的耐腐蚀性、耐多种强酸、碱、盐及有机溶剂(除强氧化性酸外),耐热性和电绝缘性良好,质脆、价低。制作化工设备中的耐腐蚀件、高温绝缘件

①片状模塑料。

②团状模塑料。

3.1.2 玻璃纤维增强热塑性塑料 (表 14.10-28 ~ 表 14.10-30)

表 14.10-28 不同含量玻璃纤维增强热塑性塑料的性能

材 料	ABS		聚甲基		聚四氟乙烯	聚碳酸酯			聚酯胺				
	20%	20%	均聚	共聚		10%	30%	30%~35%	30%~33%	20%+20% 碳 纤	尼龙 ₆	尼龙 ₆₆	尼龙 ₁₀₁₀
					玻纤含量 (体积分数)								
成型收缩率/%	0.2	0.9~1.2	0.4~1.8	25%	25%	0.1~0.2	0.3~0.5	0.2~0.6	0.25~0.35	28%			
抗拉强度/MPa	72~90	59~62	127	13.8~18.6	65	131	165 ^① 110 ^②	193 ^① 152 ^②	238	58			
断后伸长率/%	3	6~7	2~3	200~300	5~7	2~5	—	3~4 ^① 5~7 ^②	3~4	—			
抗压强度/MPa	96	124	117	6.9~9.6	93	124~138	131~158 165 ^①	154 165~276 ^①	—	137			
抗弯强度/MPa	96~120	103	193	13.8	103~110	158~172	227 ^① 145 ^②	282 ^① 172 ^②	343	202			
缺口冲击韧度/kJ·m ⁻²	2.3~2.9	1.7~2.1	2.1~3.8	5.7	2.5~5.5	3.6~6.3	4.6~7.1 ^① 7.8 ^②	4.2~4.6	3.78	81.8 (无缺口)			
拉伸弹性模量/GPa	5.1~6.1	6.9	8.6~9.6	1.4~1.6	3.4~4	8.6~9.6	10 ^① 5.5 ^②	9 ^①	—	7.7			
压缩模量/GPa	5.5	—	—	—	3.6	8.96	—	—	—	—			
弯曲模量/GPa	4.5~5.5	5	7.6	1.62	3.4	7.6	9.6 ^① 5.5 ^②	9~10 ^① 5.5 ^②	19.6	4.1			
硬 度	85~98HRM 107HRR	90HRM	79HRM	60~70 (HS)	75HRM 118HRR	92HRM 119HRR	96HRM ^① 78HRR ^②	101HRR 109HRR ^①	—	11.48HB			
线膨胀系数/(10 ⁻⁵ ·K ⁻¹)	2.1	3.8~8.1	2~4.4	7.7~10	3.2~3.8	2.2~2.3	1.6~8	1.5~5.4	2.07	—			
热变形温度/℃ (1.82 MPa)	99	157	163	—	138~142	146~149	200~215	254 ^①	260	—			马丁温度 176
热导率/W·(m·K) ⁻¹	—	—	—	0.34~0.42	0.20~0.22	0.20~0.32	0.24~0.48	0.21~0.49	—	—			
密度/g·cm ⁻³	1.18~1.22	1.54~1.56	1.55~1.61	2.2~2.3	1.27~1.28	1.4~1.43	1.35~1.42	1.15~1.40	1.40	1.19			
24 h 吸水率/% (饱和)	0.18~0.20	0.25	0.22~0.29	—	0.12~0.15	0.08~0.14	1.1~1.2	0.7~1.1	0.50	—			
介电强度/kV·mm ⁻¹	18	193	18.9~22.9	12.6	20.9	18.5~18.7	15.8~17.7	14.2~19.7	—	—			

续表 14.10-28

材 料	聚酰胺		聚对苯二甲酸丁二醇酯 (PBT)	聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)	聚酰胺亚胺	聚酰胺亚胺	聚醚醚酮 (PEEK)	高密度聚乙烯	
	尼龙 _{6,10}	尼龙 _{6,12}							
	玻纤含量 (体积分数)								
成型收缩率/%	33%	30%~35%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%
抗拉强度/MPa	170	0.2~0.5 152 ⁰ 138 ⁰	0.2~0.8 96~131	0.2~0.9 145~158	0.2~0.4 96~179	0.2~0.4 172~196	0.2~0.4 162	0.2~0.6 62	0.2~0.6 62
断后伸长率/%	—	4	2~4	2~7	1.5~3	2~5	3	1.5~2.5	1.5~2.5
抗压强度/MPa	145	152 ⁰	124~162	172	141~165	162~165	154	34~41	34~41
抗弯强度/MPa	234	220 241 ⁰	156~200	214~230	145~273	227~255	227~289	55~65	55~65
缺口冲击初度/kJ·m ²	11.7	—	1.9~3.4	3.4~4.2	1.9~5.0	3.6~4.2	4.2~5.4	2.3~3.1	2.3~3.1
拉伸弹性模量/GPa	6	8.3 ⁰ 6.2 ⁰	8.96~10	8.96~9.9	12~13	9~11	8.6~11	5.5~6.2	5.5~6.2
压缩模量/GPa	—	—	—	—	—	3.79	9.6	4.8~5.5	4.8~5.5
弯曲模量/GPa	4.1	7.6 ⁰ 6.2 ⁰	5.9~8.3	8.6~10	9.6~13.8	8.3~8.6	—	—	—
硬度 (洛氏, 肖氏)	10.65HB	93HRM	90HRM	90~10HRM0	118~119HRR	125HRM 123HRR	—	75~90HRR	75~90HRR
线膨胀系数/10 ⁻⁵ K ⁻¹	—	—	2.5	2.5~3	2.1	2~2.1	1.5~2.2	4.8	4.8
热变形温度/℃ (1.82 MPa)	马丁温度 195	199~218 ⁰	196~218	216~224	211~227	208~215	288~315	121	121
热导率/W·(m·K) ⁻¹	—	0.43	0.29	0.25~0.29	—	0.68	0.2	0.36~0.46	0.36~0.46
密度/g·cm ⁻³	1.30	1.30~1.38	1.48~1.53	1.56~1.67	1.58~1.68	1.61	1.49~1.51	1.18~1.28	1.18~1.28
24 h 吸水率/% (饱和)	—	0.20	0.06~0.08	0.05	0.05	—	0.18~0.20	0.02~0.06	0.02~0.06
介电强度/kV·mm ⁻¹	—	1.85	0.3	—	—	0.24	0.11~0.12	—	—
	—	20.5	15.8~21.7	16.9~25.6	22.5~23.6	33.1	19.5~24.8	19.7~21.7	19.7~21.7

续表 14.10.28

材 料	玻纤含量 (体积分数)										
	聚苯醚和改性聚苯醚	聚苯硫醚 (PPS)	聚丙烯均聚	聚氯乙烯	聚苯乙烯均聚耐热共聚物	丙烯腈苯乙烯共聚物 (SAN)	聚砜	改性聚砜	聚砜		
	30%	40%	40%	15%	20%	20%	20%	20%长玻纤	30%	30%	
成型收缩率/%	0.1~0.4	0.2~0.4	0.3~0.5	0.1	0.1~0.3	0.3~0.4	0.1~0.3	0.1~0.3	0.1~0.3	0.1~0.3	0.2~0.5
抗拉强度/MPa	103~127	120~158	58~103	62	68.9~82.7	68.9~96	107~124	100	103~131	103~131	170~138
断后伸长率/%	2~5	0.9~4	1.5~4	2.3	1.3	1.4~3.5	1.2~1.8	1.5	1.9~3	1.9~3	2~3.5
抗压强度/MPa	123	145~179	61~68	62	110~117	—	117~145	131	—	—	134~165
抗弯强度/MPa	145~158	156~220	72~152	93	96~124	112~151	138~156	138	138~176	138~176	169~190
冲击初度(缺口)/kJ·m ⁻²	3.6~4.8	2.3~3.2	2.9~4.2	2.1	1.9~5.3	4.4~5.5	2.1~6.3	2.3	2.1~4.2	2.1~4.2	2.5~3.6
拉伸弹性模量/GPa	6.9~8.9	7.6	7.6~10	6	6.2~8.3	5.8~6.2	6.3~11.8	9.3	5.7~6.89	5.7~6.89	5.9
弯曲模量/GPa	7.6~7.9	11.7~12.4	6.5~6.9	5.2	6.5~7.5	5.5~7.2	6.9~8.8	7.2	8.86	8.86	5.9~6.2
硬度 (洛氏、肖氏)	115~116HRK	123HRK	102~111HRK	118HRK	80~95HRM 119HRK	—	89~100HRM 122HRK	90~100HRM	80~85HRM	80~85HRM	98~99HRM
线膨胀系数/10 ⁻⁶ K ⁻¹	1.4~2.5	2.2	2.7~3.2	—	3.96~4.0	2	2.34~4.14	2.5	4.8~5.4	4.8~5.4	2.3~3.2
热变形温度/℃ (1.82 MPa)	135~158	252~263	149~165	68	93~104	110~119	99~110	177	160~167	160~167	209~218
热导率/W·(m·K) ⁻¹	0.15~0.17	0.29~0.45	0.35~0.37	—	0.25	—	0.28	—	—	—	—
密度/g/cm ³	1.27~1.36	1.6~1.67	1.22~1.23	1.54	1.2	1.21~1.22	1.20~1.22	1.46	1.52	1.52	1.51
24 h 吸水率/% (饱和)	0.06	0.02~0.05	0.05~0.06	0.01	0.07~0.10	0.1	0.1~0.2	0.3	0.10~0.20	0.10~0.20	0.15~0.40
介电强度/kV·mm ⁻¹	—	—	0.09~0.10	—	0.3	—	0.7	—	0.43	0.43	1.65~2.1
	21.7~24.8	14.2~17.7	19.7~20.1	23.6~31.5	16.7	—	19.7	—	15.7	15.7	14.8~19.7

① 干燥状态。

② 50%相对湿度。

表 14.10-29 玻璃纤维增强热塑性塑料的特点及应用

材料名称	玻璃纤维含量/%	特点	应用举例
聚丙烯	20~30	<p>玻纤增强热塑性塑料的物理力学性能均有明显提高。尼龙用玻纤增强后,吸湿性下降较多,耐热性、弹性模量和抗弯强度均相应递增。聚丙烯密度低、价低、耐腐蚀性优良,但耐热性较差,冲击韧度随温度下降而迅速减小,耐热性明显提高,可在100~120℃使用,在零度以下冷冻几小时后,冲击韧度保持93%以上,线膨胀系数降低很多。PET和PBT具有优良的耐热性、耐焊性、耐腐蚀性、较高强度、优异电绝缘性。在高温湿环境下依然具有稳定的电绝缘性。</p> <p>热塑性塑料玻纤增强后,不但提高力学性能,对缺口敏感性有改善,热变形温度上升较多,尺寸稳定性增加,线膨胀系数和吸水率均下降,并能抑制应力开裂。热塑性塑料须经活化处理才能与表面处理后的玻纤复合</p>	汽车挡泥板、汽车发动机叶片、空调机叶片、阀门、泵、管道、管配件、清洗机、搅拌器、板框压滤机板、槽、塔、坐椅、蓄电池瓶壳等
尼龙6	30~50 玻璃微珠+玻纤		电动工具外壳、凸轮、泵叶轮、齿轮、联轴、汽车进气管、轴承架、衬套、阀座、涡轮、杠杆、电绝缘零件、保险盒等
尼龙66	玻璃纤维		轴瓦、套筒、旋苗、齿轮、低摩擦材料、机电结构材料、叶轮、轴、凸轮等
聚碳酸酯	30		水表、水量计、手柄、照相盒、电子机电通讯仪器、仪表中插线板、接插件、齿轮、涡轮、接线盒、线圈骨架、耐热精密零件、刷架、集电环、绝缘块、电磁阀壳、轴套、阀件、螺母等
聚对苯二甲酸丁二醇酯和乙二醇酯(PBT、PET)	20~30		电位器电容器等零件、继电器骨架、电机汽车结构件、连接器、冷却线圈、离心泵壳体、叶轮、液下泵、废液处理装置、齿轮、插座、电子电器骨架、保险丝盒、煤气阀、纺织机零件等
苯乙烯-丁二烯-丙烯腈三元共聚物	20		叶轮、电机外壳、汽车零部件、电气零件、纺织机零件、仪表盘、过滤器零件、灯罩、放映机盒、电视机外壳等
苯乙烯-丙烯腈共聚物	20		无线电旋钮、上下托架、管子接头、卷轴等
乙烯-四氟乙烯共聚物	25		密封圈、阀门零件等
聚苯醚	20~30		管配件、空调机叶片、推进器、计算机和电子设备零件、外壳等
聚苯硫醚	30~40		阀门、离心泵、油泵齿轮、化工耐腐蚀零件、开关等

注:玻纤含量均指体积分数(%)。

表 14.10-30 常用热塑性塑料的耐腐蚀性能

塑 料	非极性 有机溶 剂	盐 类	碱	非氧化 性 酸	氧化 性 酸	塑 料	非极性 有机溶 剂	盐 类	碱	非氧化 性 酸	氧化 性 酸
ABC	2	1	1	1	2	聚苯硫醚	1	1	1	1	1
聚乙烯	3	1	1	1	2	尼龙	1	1	2	3	
聚丙烯	3	1	1	1	2	苯乙烯-丁二烯共聚物	3	1	1	1	3
聚苯乙烯	3	1	1	1	3	苯乙烯-丙烯腈共聚物	3	1	3	1	3
聚氯乙烯	2	1	1	1	2	聚对苯二甲酸乙二醇酯	3	1	3	1	3
聚三氟氯乙烯	1	1	1	1	1	聚对苯二甲酸丁二醇酯	3	1	3	1	3
聚四氟乙烯	1	1	1	1	1						

注：1. 表中数字“1”—耐蚀性好，“2”—耐蚀性尚可，“3”—不耐腐蚀性。

2. 玻纤增强热塑性塑料的耐腐蚀性能主要取决于塑料。

3.2 碳纤维增强塑料

3.2.1 碳纤维增强热固性塑料 (表 14.10-31~表 14.10-33)

表 14.10-31 碳纤维增强热固性塑料单向层压板性能

性 能	T300/3231 ^①	T300/4211 ^②	T300/5222 ^③	T300/QY8911 ^④	T300/5405 ^⑤
纵向抗拉强度/MPa	1 750	1 396	1 490	1 548	1 727
纵向拉伸弹性模量/GPa	134	126	135	135	115
泊松比	0.29	0.33	0.30	0.33	0.29
横向抗拉强度/MPa	49.3	33.9	40.7	55.5	75.5
横向拉伸弹性模量/GPa	8.9	8.0	9.4	8.8	8.6
纵向抗压强度/MPa	1 030	1 029	1 210	1 226	1 104
纵向压缩模量/GPa	130	116	134	125.6	125.5
横向抗压强度/MPa	138	166.6	197.0	218	174
横向压缩模量/GPa	9.5	7.8	10.8	10.7	8.1
纵横抗剪强度/MPa	106	65.5	92.3	89.9	135
纵横切变模量/GPa	4.7	3.7	5.0	4.5	4.4
密度/g·cm ⁻³		1.56	1.61	1.61	
玻璃化转变温度/℃		154~170	230	268~276	210

① 纤维体积分数 $\varphi_f = (65 \pm 3)\%$ ，环氧体系，空隙率 $< 2\%$ 。

② $\varphi_f = (60 \pm 3)\%$ ，环氧体系，空隙率 $< 2\%$ 。

③ $\varphi_f = (60 \pm 5)\%$ ，双马来酰亚胺体系，空隙率 $< 2\%$ 。

④ $\varphi_f = (65 \pm 3)\%$ ，双马来酰亚胺体系，空隙率 $< 2\%$ 。

表 14.10-32 碳纤维增强热固性塑料单向层压板高温、低温力学性能

品 种	T300/4211(环氧)		T300/5222(环氧)		T300/QY8911(双马来)		T300/5405(双马来)	
	-60	125	-55	130	130	150	-55	130
试验温度/℃	-60	125	-55	130	130	150	-55	130
纵向抗拉强度/MPa	1 310	—	1 220	1 424	1 579	1 448	—	—
纵向拉伸弹性模量/GPa	131	135	134	136	128	128	—	—
横向抗拉强度/MPa	34.1	19	29.0	14.5	51	45	—	47.0
横向拉伸弹性模量/GPa	10.2	5.9	10.4	7.8	9.2	8.2	—	6.2
纵横抗剪强度/MPa	78.3	44.3	112.6	70.5	80.8	74.0	—	107
纵横切变模量/GPa	4.7	2.1	5.6	3.9	4.0	3.5	—	3.2
抗弯强度/MPa	—	—	—	—	—	1 725	—	1 276
弯曲模量/MPa	—	—	—	—	—	136	—	118
层间抗剪强度/MPa	—	—	—	—	—	77	120	63
纤维体积分数 φ_f /%	62±2		65±3		60±5		65±3	
空隙率/%	<2		<2		<2		<2	

表 14.10-33 碳纤维增强热固性塑料的特点及应用

特 点	应用部门	用途举例
碳纤维增强热固性塑料具有很好的力学性能,包括较高的高温和低温力学性能,抗疲劳及耐腐蚀性能均好,并且具有高的比强度和比模量,同时,可以通过设计和加工的措施,可获得材料多项特殊性能,以满足不同的应用要求,在机械工业、航空航天及其他工业中都得到了应用	汽车工业	螺旋桨轴、弹簧、底盘、车轮,发动机零件,如活塞、连杆、操纵杆等
	纺织机械	综框、传箭带、梭子等
	电子器械	雷达设备、复印机、电子计算机、工业机器人等
	化工机械	导管、油罐、泵、搅拌器、叶片等
	医疗器械	X射线床和暗盒、骨夹板、关节、轮椅、单架等
	体育器械	高尔夫球棒、球头、钓竿、羽毛球拍、网球拍、小船、游艇、赛车、自行车等
	航空航天	飞机方向舵、升降舵、口盖、机翼、尾翼、机身、发动机零件等;人造卫星、火箭、飞船等
	其他	石油井架、建筑物、桥、铁塔、高速离心机转子、飞轮、烟草制造机板簧等

3.2.2 碳纤维增强热塑性塑料 (表 14.10-34~表 14.10-37)

表 14.10-34 碳纤维增强热塑性树脂的性能

性 能	聚 枫		线 型 聚 酯		乙 烯-四 氟 乙 烯 共 聚 物	
	纯树脂	碳纤维 30%	纯树脂	碳纤维 30%	纯树脂	碳纤维 30%
密度/g·cm ⁻³	1.24	1.37	1.32	1.47	1.70	1.73
24 h 吸水率/%	0.20	0.15	0.03	0.04	0.02	0.018
(饱和)	0.60	0.38	—	0.23	—	—

续表 14.10-34

性能	聚 枫		线 型 聚 酯		乙 烯-四 氟 乙 烯 共 聚 物	
	纯树脂	碳纤维 30%	纯树脂	碳纤维 30%	纯树脂	碳纤维 30%
加工收缩率/%	0.7~0.8	0.1~0.2	1.7~2.3	0.1~0.2	15~2.0	0.15~0.25
抗拉强度/MPa	71	161	56	140	45	105
断后伸长率/%	20~100	2~3	10	2~3	150	2~3
抗弯强度/MPa	108	224	91	203	70	140
弯曲模量/GPa	2.7	14.3	2.4	14	1.4	11.6
抗剪强度/MPa	63	66	49	56	42	49
冲击韧度(悬臂梁)/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)						
缺口	2.5	2.5	0.63	2.5	未断	8.4~16.5
无缺口	126	12.6~14.7	52.5	8.4~10.5	未断	21
热变形温度/ $^{\circ}\text{C}$ (1.85 MPa)	174	185	68	221	74	241
线膨胀系数/ 10^{-5}K^{-1}	5.6	1.08	9.5	0.9	7.6	1.4
热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.26	0.79	0.15	0.94	0.23	0.81
表面电阻率/ Ω	10^5	1~3	10^{15}	2~3	5×10^{14}	3~5

表 14.10-35 碳纤维增强聚苯硫醚 (PPS) 的性能

性能	PPS	PAS-1 ^①	PAS-2 ^②	PPS/AS4 ^③	PAS-1/AS4	PAS-2/AS4
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.36	1.36	1.40	1.61	1.60	1.60
抗拉强度/MPa	83.8	94.2	100.5	1 836	1 573	1 490
拉伸弹性模量/GPa	—	—	—	134.4	124	131.7
抗弯强度/MPa	164.9	162.2	178	1 906	1 372	1 670
弯曲模量/GPa	4.1	3.9	3.2	117.8	111.6	111.0
断后伸长率/%	2.5	4.0	8.0	1.2	1.1	1.1
压缩强度/MPa	—	—	—	942.5	—	901
短梁抗剪强度/MPa	—	—	—	69.3	90.1	78.3
纤维含量(体积分数)/%	—	—	—	60.5	59.1	53
空隙含量(体积分数)/%	—	—	—	0.5	0.2	0.3
氧指数	44	—	46	—	—	—
$T_g/^{\circ}\text{C}$	85	145	215	—	—	—
$T_m/^{\circ}\text{C}$	285	340	—	—	—	—

①PAS-1—改性 PPS。

②PAS-2—改性 PPS。

③AS4—碳纤维。

表 14.10-36 碳纤维增强尼龙 66 塑料的性能

性能	纯尼龙 66	纤维增强尼龙 66 (质量分数)			
		碳纤维 20%	碳纤维 30%	碳纤维 40%	碳纤维 20% 玻纤 20%
密度 / (g·cm ⁻³)	1.14	1.23	1.28	1.34	1.40
24 h 吸水率 / %	1.60	0.6	0.5	0.4	0.5
(饱和)	—	2.7	2.4	2.1	—
3 mm 厚成型收缩率 / %	1.5	0.2~0.3	0.15~0.25	0.15~0.25	0.25~0.35
抗拉强度 / MPa	83	196	245	280	238
断后伸长率 / %	10	3~4	3~4	3~4	3~4
抗弯强度 / MPa	105	294	357	420	343
弯曲模量 / GPa	2.8	16.8	20.3	23.8	19.6
抗剪强度 / MPa	67	84	91	98	91
冲击韧度 / kJ·m ⁻²					
缺口悬臂梁	1.89	2.31	3.15	3.36	3.78
无缺口悬臂梁	—	—	25.2	23.3	33.6
热变形温度 / °C					
(1.85 MPa)	66	257	257	260	260
线膨胀系数 / 10 ⁻⁵ K ⁻¹	8.1	2.52	1.89	1.44	2.07
热导率 / W·(m ⁻¹ ·K) ⁻¹	0.25	0.79	1.01	1.23	0.92
表面电阻率 / Ω	10 ¹⁵	20~30	3~5	1~3	—

表 14.10-37 碳纤维增强热塑性塑料的特点及应用

特点	应用举例
<p>韧性好、损伤容限大，耐环境性能优异，对水、光、溶剂和化学药品均有很好的抗耐性，耐高温性能好。（长期工作温度一般可达 150℃ 以上），预浸料贮存期长，工艺简单、效率高，成型后的制品可采用热加工方法修整，装配自由度大，废料可回收，在各个工业部门有广泛的应用前景</p>	<p>用于制造轴承、轴承保持架、活塞环、调速器、复印机零件、齿轮、化工设备、电子电器工业中的继电器零件、印制电路板、赛车、网球拍、高尔夫球棒、钓鱼杆、撑杆跳高杆、医用 X 射线设备、纺织机械中的剑杆、连杆、推杆、梭子等；航空航天工业中做结构材料之用，如制作机身、机翼、尾翼、舱内材料、人造卫星支架、导弹弹翼、航天机构件等</p>

3.3 石棉纤维增强塑料 (表 14.10-38)

表 14.10-38 石棉纤维增强塑料性能及应用

性能	石棉纤维增强尼龙	石棉纤维增强聚丙烯	聚丙烯	石棉纤维增强酚醛树脂	应用
密度 / g·cm ⁻³	1.3	1.0~1.3	0.902~0.906	1.45~2.0	<p>石棉纤维增强塑料具有良好的化学稳定性及电性能，可用于汽车制动件、阀门、导管、管配件、垫圈、化工耐腐蚀零部件、隔热和电绝缘件、导弹火箭耐热件、环氧玻璃钢管道内衬。石棉纤维与剑麻纤维混杂增强酚醛树脂制品，有汽车加热器导管、风扇护罩和仪表构件。应注意石棉纤维对人体有害</p>
抗拉强度 / MPa	124	34~38	30~38	31~52	
断后伸长率 / %	1	3~20	200~300	0.1~0.5	
拉伸弹性模量 / GPa	7.6	2.7~5.5	1.1~1.5	6.9~20.7	
冲击韧度(缺口) / kJ·m ⁻²	1.89	0.42~3	1.05~3.15	0.55~7.4	
抗弯强度 / MPa	165	—	41~55	48~96	
弯曲模量 / GPa	—	0.86~1.0	1.17~1.45	6.9~15	
热变形温度 / °C					
(1.82 MPa)	226	54~93	57~63	149~260	
24 h 吸水率 / %	1.5	0.02~0.03	0.03~0.04	0.12	

3.4 混杂纤维增强塑料 (表 14.10-39~表 14.10-42)

表 14.10-39 以 4211 环氧体系为基体的混杂纤维增强塑料性能

性 能	层 板 编 号						
	4-C/K-2	4-C/K-3	4-C/K-4	4-C/G-1	4-C/G-2	4-C/G-3	4-C/G-4
铺层方式	$[0^{\circ}_{2c}/0^{\circ}_{6k}]$	$[0^{\circ}_{3c}/0^{\circ}_{5k}]$	$[0^{\circ}_{4c}/0^{\circ}_{4k}]$	$[0^{\circ}_{c}/0^{\circ}_{7g}]$	$[0^{\circ}_{2c}/0^{\circ}_{6c}]$	$[0^{\circ}_{3c}/0^{\circ}_{5c}]$	$[0^{\circ}_{4c}/0^{\circ}_{4c}]$
混杂比/%	16.4	20.1	37.0	7.0	15.0	24.9	39.8
纵向抗拉强度/MPa	754	747	1 010	524	679	720	762
纵向拉伸弹性模量/GPa	77.8	65.7	76.2	47.5	58.0	61.5	65.9
泊松比	0.37	0.36	0.36	—	—	—	—
横向抗拉强度/MPa	—	—	25	—	—	—	—
横向拉伸弹性模量/GPa	—	—	11.5	—	—	—	—
纵向抗压强度/MPa	393	415	561	620	670	690	686
纵向压缩模量/GPa	77.8	64.6	76.1	49.6	58.0	61.9	65.9
横向抗压强度/MPa	—	—	37	—	—	—	121
横向压缩模量/GPa	—	—	5.6	—	—	—	14.0
抗弯强度/MPa	863	848	1 118	1 058	1 169	1 140	1 130
弯曲模量/GPa	56.3	64.3	72.5	42.9	61.5	68.1	77.1
层间抗剪强度/MPa	—	—	74	—	—	—	79
纵横抗剪强度/MPa	—	—	72	—	—	—	61
纵横切变模量/GPa	—	—	3.9	—	—	—	5.5

注:层板编号说明:4—4211 树脂体系;G—玻璃纤维;C—碳纤维 T-300;K—芳纶纤维(Kerlar-49)。

表 14.10-40 碳纤、玻纤、B 纤和芳纶纤维混杂纤维增强塑料性能

材 料	混杂结构	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	拉伸弹性 模量(纵向)/ GPa	压缩模量 (纵向)/ GPa	拉伸弹性模 量(横向)/ GPa	压缩模量 (横向)/ GPa
S-GL/T300	$(0^{\circ}_4/\pm 45^{\circ}_2)_s$	975	644	44.8	39.3	21.4	22.7
T300/B	$(0^{\circ}_4/\pm 45^{\circ})_s$	1 085	542	147	117	30.3	17.9
B/T-300/T-300	$(0^{\circ}_3/\pm 45^{\circ})_s$	856	654	152	24.1	57.9	15.1
S-GL/B	$(0^{\circ}_5/\pm 45^{\circ})_s$	1 665	517	49.6	48.9	29.6	23.4
K-49/T-300/K-49	$(0^{\circ}_2/\pm 90^{\circ})_s$	496	175	48.2	39.3	27.6	20.7
T-300/HMS	$(0^{\circ}_4/\pm 45^{\circ}_3)_s$	633	545	74.4	71.7	24.8	21.4
HTS/B	$(0^{\circ}_5/\pm 45^{\circ})_s$	799	625	74.4	88.2	24.8	17.2
S-GL/HMS	$(0^{\circ}_4/\pm 45^{\circ})_s$	751	399	19.3	36.5	7.6	18.6

表 14.10-41 以 QY8911 双马来体系为基体的混杂纤维增强塑料性能

性能	板层编号						
	Q-C/G-4	Q-C/G-5	Q-C/G-6	Q-C/G-7	Q-C/G-8	Q-C/K-1	Q-C/K-2
铺层方式	$[0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{20}]_s$	$[0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{30}]_s$	$[(0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{30})_s]$	$[0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{20}/]$ $[0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{30}/0^{\circ}_{40}]_s$	$[0^{\circ}_{30}/0^{\circ}_{20}/]$ $[0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{30}]_s$	$[0^{\circ}_{30}/0^{\circ}_{30}]_s$	$[(0^{\circ}_{40}/0^{\circ}_{30})_s]$
混杂比/%	67.6	51.1	51.1	51.1	51.1	38.0	38.0
纵向抗拉强度/MPa	945	982	1 047	1 204	1 248	725	739
纵向拉伸弹性模量/GPa	113.0	91.0	83.5	95.9	85.7	85.0	80.8
泊松比	0.33	0.38	0.35	0.35	0.32	—	0.40
横向抗拉强度/MPa	—	—	59	—	—	—	—
横向拉伸弹性模量/GPa	—	—	11.0	—	—	—	—
纵向抗压强度/MPa	1 048	836	950	887	852	—	—
纵向压缩模量/GPa	105.0	78.7	96.9	81.8	78.4	—	—
横向抗压强度/MPa	160	—	169	—	191	—	—
横向压缩模量/GPa	14.5	—	16.6	—	13.8	—	—
抗弯强度/MPa	2 354	1 754	1 976	1 982	1 943	—	—
弯曲模量/GPa	134.8	—	108.5	100.6	78.7	—	—
层间抗剪强度/MPa	97	—	101	92	88	—	—
纵横抗剪强度/MPa	—	—	89	—	—	—	—
纵横切变模量/GPa	—	—	4.6	—	—	—	—

注:编号说明 Q—QY8911 双马来树脂体系;C—碳纤维 T-300;G—玻璃纤维;K—芳纶纤维(Kevlar-49)。

表 14.10-42 混杂纤维增强塑料特点及应用

特点	应用举例
混杂纤维增强塑料是由两种或两种以上的纤维,匹配协调增强一种基体的塑料,因此,具有优异的综合性能,如提高冲击韧度、冲击强度、疲劳强度;调节混杂比,可以得到不同要求的热膨胀系数(包括为零)的材料,也可以得到设计要求的性能,以满足不同的技术要求及用途,降低成本、综合经济效益好	由于价格较高,目前主要在航空航天工业及体育用品中应用,如直升机旋翼、垂尾,战斗机机翼等,体育用品中的网球拍、羽毛球拍、棒球棒、高尔夫球杆、滑雪板、标枪、人体材料如关节、骨骼、齿根、假肢等, X 射线床、底片暗盒等,随着价格的降低,应用将不断扩大

4 塑料-金属基多层复合材料

塑料-金属基多层复合材料以钢板为基体,多孔青铜为中间层、塑料为表层而构成。此类多层复合材料既具有金属的力学性能,又具有塑料表面的优良摩擦性能。钢背与塑料之间以多孔性青铜为媒介,从而使界面结合可靠,结合强度高于喷涂和胶接。HBH46001—1987 塑料-青铜-钢

背三层复合自润滑板材,作为无油润滑、边界润滑及水润滑条件下的卷制轴承、轴瓦、止推垫片、滑块、机床导轨、闸门滑道、球座及关节轴承垫层等滑动摩擦副之用。塑料-金属基多层复合材料的种类及应用见表 14.10-43 塑料-青铜-钢背三层复合板材规格及性能见表 14.10-43~表 14.10-45。

表 14.10-43 塑料-金属基多层复合材料的种类及应用

类型	名称	用途
I	改性聚四氟乙烯-青铜-钢背三层复合材料	特别适用于无油润滑条件
II	改性聚甲醛-青铜-钢背三层复合材料	特别适用于边界润滑及干润滑
III	填充增强酚醛-青铜-钢背三层复合材料	特别适用于水润滑条件

表 14.10-44 塑料-青铜-钢背三层复合板材规格

(mm)

品种	厚度		公称宽度	标称长度
	公称厚度	公差		
I、II	1.0	0.05	120	500
	1.5			
	2.0	0.06		
	2.5	0.07		
III	20			
	40			

注：1. 特殊规格可由供需双方商定。

2. I型材料作为机床导轨板，经过磨削加工其公差为0.01 mm。

表 14.10-45 塑料-青铜-钢背三层复合板材性能

压缩永久变形	品种	试样厚度/mm	压力/MPa	压缩永久变形量/mm	
	I	2.5	280	≤ 0.08	
	II		无油坑	140	≤ 0.04
			有油坑		≤ 0.05
	III	20	250	≤ 0.10	
磨痕宽度和摩擦系数	品种	润滑条件	磨痕宽度/mm	摩擦系数	
	I	干摩擦	≤ 6.0	≤ 0.20	
		油润滑	≤ 4.5	≤ 0.08	
	II	干摩擦	≤ 5.5	≤ 0.50	
		脂润滑		≤ 0.10	
	III	水润滑	≤ 2.5	≤ 0.12	
线膨胀系数和导热系数	品种	导热系数/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	线膨胀系数/ K^{-1}		
		\geq	温度范围	数值	
	I	2.3	20~180℃	$\leq 30 \times 10^{-6}$	
II	1.7	0~80℃	$\leq 70 \times 10^{-6}$		

第 11 章 非金属材料

1 塑料及塑料制品

1.1 常用塑料种类、性能及应用 (表 14.11-1~表 14.11-3)

表 14.11-1 常用塑料品种、特性及应用

名 称	特 性	应 用 举 例
硬质聚氯乙烯 (PVC)	机械强度较高, 化学稳定性及介电性能优良, 耐油和抗老化性也较好, 易熔接及粘合, 价格较低。缺点是使用温度低 (在 60℃ 以下), 线膨胀系数大, 成型加工性不良	制品有管、棒、板、焊条及管件, 除作日常生活用品外, 主要用作耐磨蚀的结构材料或设备衬里材料 (代有色金属、不锈钢和橡胶) 及电气绝缘材料
软质聚氯乙烯 (PVC)	抗拉强度、抗弯强度及冲击韧度均较硬质聚氯乙烯低, 但破裂延伸率较高。质柔软、耐摩擦、挠曲, 弹性良好, 象橡胶, 吸水性低, 易加工成型, 有良好的耐寒性和电气性能, 化学稳定性强, 能制各种鲜艳而透明的制品, 缺点是使用温度低, 在 -15~55℃	通常制成管、棒、薄板、薄膜、耐寒管、耐酸碱软管等半成品, 供作绝缘包皮、套管、耐腐蚀材料, 包装材料和日常生活用品
聚乙烯 (PE)	具有优良的介电性能、耐冲击、耐水性好, 化学稳定性高, 使用温度可达 80~100℃, 摩擦性能和耐寒性好。缺点是机械强度不高, 质较软, 成型收缩率大	用作一般电缆的包皮, 耐腐蚀的管道、阀、泵的结构零件, 亦可喷涂于金属表面, 作为耐磨、减磨及防腐蚀涂层
有机玻璃 (聚甲基丙烯酸甲酯) (PMMA)	具有极好的透光性, 可透过 92% 以上的太阳光, 紫外线光达 73.5%; 机械强度较高, 有一定耐热耐寒性, 耐腐蚀、绝缘性能良好, 尺寸稳定, 易于成型, 质较脆, 易溶于有机溶剂中, 表面硬度不够, 易擦毛	可作要求有一定强度的透明结构零件, 如油杯、车灯、仪表零件, 光学镜片; 装饰件, 光学纤维等
聚丙烯 (PP)	是最轻的塑料之一, 其屈服、拉伸和压缩强度和硬度均优于低压聚乙烯, 有很突出的刚性, 高温 (90℃) 抗应力松弛性能良好, 耐热性能较好, 可在 100℃ 以上使用, 如无外力 150℃ 也不变形, 除浓硫酸、浓硝酸外, 在许多介质中很稳定, 低分子量的脂肪烃、芳香烃、氯化烃, 对它有软化和溶胀作用, 几乎不吸水, 高频电性能不好, 成型容易, 但收缩率大, 低温呈脆性, 耐磨性不高	作一般结构零件, 作耐腐蚀化工设备和受热的电气绝缘零件, 如泵叶轮、汽车零件、化工容器、管道、涂层、蓄电池匣

续表 14.11.1

名 称	特 性	应 用 举 例	
聚苯乙烯 (PS)	有较高的韧性和抗冲击强度;耐酸、耐碱性能好,不耐有机溶剂,电气性能优良,透光性好,着色性佳,并易成型	作一般结构零件和透明结构零件以及仪表零件,油浸式多点切换开关、电池外壳、透明零件	
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS)	具有良好的综合性能,即高的冲击韧度和良好的力学性能,优良的耐热、耐油性能和化学稳定性,尺寸稳定、易机械加工,表面还可镀金属,电性能良好	作一般结构或耐磨受力传动零件和耐腐蚀设备,用 ABS 制成泡沫夹层板可做小轿车身	
聚砜 (PSU)	有很高的力学性能、绝缘性能及化学稳定性,并且在 $-100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 以下能长期使用,在高温下能保持常温下所具有的各种力学性能和硬度,蠕变值很小,用 F-4 填充后,可作摩擦零件	适于高温下工作的耐磨受力传动零件,如汽车分速器盖、齿轮以及电绝缘零件等	
聚酰胺 (尼龙) (PA)	尼龙 66	疲劳强度和刚性较高,耐热性较好,摩擦系数低,耐磨性好,但吸湿性大,尺寸稳定性不够	适用于中等载荷、使用温度 $\leq 100 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 、无润滑或少润滑条件下工作的耐磨受力传动零件
	尼龙 6	疲劳强度、刚性、耐热性稍不及尼龙 66,但弹性好,有较好的消振,降低噪声能力。其余同尼龙 66	在轻负荷、中等温度(最高 $80 \sim 100^{\circ}\text{C}$)、无润滑或少润滑、要求噪声低的条件下工作的耐磨受力传动零件
	尼龙 610	强度、刚性、耐热性略低于尼龙 66,但吸湿性较小,耐磨性好	同尼龙 6,宜作要求比较精密的齿轮,用于湿度波动较大的条件下工作的零件
	尼龙 1010	强度、刚性、耐热性均与尼龙 6 和 610 相似,吸湿性低于尼龙 610,成型工艺性较好,耐磨性亦好	轻载荷、温度不高、湿度变化较大的条件下无润滑或少润滑的情况下工作的零件
	单体浇铸尼龙 (MC 尼龙)	强度、耐疲劳性、耐热性、刚性均优于尼龙 6 及尼龙 66,吸湿性低于尼龙 6 及尼龙 66,耐磨性好,能直接在模型中聚合成型,宜浇铸大型零件	在较高载荷、较高的使用温度(最高使用温度小于 120°C)无润滑或少润滑的条件下工作的零件

续表 14.11-1

名 称	特 性	应 用 举 例
聚甲醛 (POM)	抗拉强度、冲击韧度、刚性、疲劳强度、抗蠕变性能都很高, 尺寸稳定性好, 吸水性小、摩擦系数小, 有很好的耐化学药品能力, 性能不亚于尼龙, 但价格较低, 缺点是加热易分解, 成型比尼龙困难	可用作轴承、齿轮、凸轮、阀门、管道螺帽、泵叶轮、车身底盘的小部件、汽车仪表盘、汽化器、箱体、容器、杆件以及喷雾器的各种代铜零件
聚碳酸酯 (PC)	具有突出的冲击韧度和抗蠕变性能, 有很高的耐热性, 耐寒性也很好, 脆化温度达 -100°C , 抗弯抗拉强度与尼龙等相当, 并有较高的延伸率和弹性模数, 但疲劳强度小于尼龙 66, 吸水性较低, 收缩率小, 尺寸稳定性好, 耐雾性与尼龙相当, 并有一定的抗腐蚀能力。缺点是成型条件要求较高	可用作各种齿轮、蜗轮、齿条、凸轮、轴承、心轴、滑轮、传送链、螺帽、垫圈、泵叶轮、灯罩、容器、外壳、盖板等
氟化聚醚 (聚氟醚) (CPE)	具有独特的耐腐蚀性能, 仅次于聚四氟乙烯, 可与聚三氟乙烯相比, 能耐各种酸碱和有机溶剂, 在高温下不耐浓硝酸, 浓双氧水和湿氯气等, 可在 120°C 下长期使用, 强度、刚性比尼龙、聚甲醛等低, 耐磨性略优于尼龙, 吸水性小, 成品收缩率小, 尺寸稳定, 成品精度高, 可用火焰喷镀法涂于金属表面	作耐腐蚀设备与零件, 作为在腐蚀介质中使用的低速或高速、低速、低负荷的精密耐磨受力传动零件, 如泵、阀、轴承、密封圈、化工管道涂层、窥镜等
聚酚氧 (苯氧树脂)	具有良好的力学性能, 高的刚性、硬度和韧性。冲击强度可与聚碳酸酯相比, 抗蠕变性能与大多数热塑性塑料相比属于优等, 吸水性小, 尺寸稳定, 成型精度高, 一般推荐的最高使用温度为 77°C	适用于精密的、形状复杂的耐磨受力传动零件, 仪表、计算机等零件, 涂料及胶粘剂
线型聚酯 (聚对苯二甲酸乙二醇酯) (PETP)	具有很高的力学性能, 抗拉强度超过聚甲醛, 抗蠕变性能、刚性和硬度都胜过多种工程塑料, 吸水性小, 线胀系数小, 尺寸稳定性高, 热力学性能和冲击性能很差, 耐磨性同于聚甲醛和尼龙, 增强的线型聚酯其性能相当于热固性塑料	作耐磨受力传动零件, 特别是与有机溶剂接触的上述零件, 增强的聚酯可以代替玻纤填充的酚醛、环氧等热固性塑料
聚苯醚 (PPO), 改性聚苯醚 (MPPO)	在高温下有良好的力学性能, 特别是抗张强度和蠕变性能极好, 有较高的耐热性 (长期使用温度为 $-127 \sim +120^{\circ}\text{C}$), 成型收缩率低尺寸稳定性能, 耐高浓度的无机酸、有机酸、盐的水溶液、碱及水蒸气, 但溶于氯化烃和芳香烃中, 在丙酮、苯甲醇、石油中龟裂和膨胀	适于作在高温工作下的耐磨受力传动零件, 和耐腐蚀的化工设备与零件, 如泵叶轮、阀门、管道等, 还可以代替不锈钢作外科医疗器械

续表 14.11-1

名 称	特 性	应 用 举 例
聚四氟乙烯 (PTFE、F-4)	具有优异的化学稳定性, 与强酸、强碱或强氧化剂均不起作用, 有很高的耐热性、耐寒性, 使用温度 -180°C ~ 250°C , 摩擦系数很低, 是极好的自润滑材料。缺点是力学性能较低, 刚性差有冷流动性, 热导率低, 热膨胀大, 耐磨性不高(可加入填充剂, 适当改善), 需采用预压烧结的方法, 成型加工费用较高	主要用作耐化学腐蚀、耐高温的密封元件, 如填料、衬垫、胀圈、阀座、阀片, 也用作输送腐蚀介质的高温管道, 耐腐蚀衬里、容器以及轴承、导轨、无油润滑活塞环、密封圈等; 其分散液可以作涂层及浸渍多孔制品
填充聚四氟乙烯 (PTFE)	用玻璃纤维粉末、二硫化钼、石墨、氧化铜、硫化钨、青铜粉、铅粉等填充的聚四氟乙烯, 在承载能力、刚性、PV 极限值等方面都有不同的提高	用于高温或腐蚀性介质中工作的摩擦零件如活塞环等
聚三氟氯乙烯 (PCTFE、F-3)	耐热性、电性能和化学稳定性仅次于 F-4, 在 180°C 的酸、碱和盐的溶液中亦不溶胀或侵蚀, 机械强度、抗蠕变性能、硬度都比 F-4 好些, 长期使用温度为 $-195\sim 190^{\circ}\text{C}$ 之间, 但要求长期保持弹性时, 则最高使用温度为 120°C , 涂层与金属有一定的附着力, 其表面坚韧、耐磨, 有较高的强度	作耐腐蚀的设备与零件, 悬浮液涂于金属表面可作防腐、电绝缘防潮等涂层
聚全氟乙烯丙烯 (FEP、F-46)	力学、电性能和化学稳定性基本与 F-4 相同, 但突出的优点是冲击韧度高, 即使带缺口的试样也冲不断, 能在 -85°C ~ 205°C 温度范围内长期使用	同 F-4, 用于制作要求大批量生产或外形复杂的零件, 并用注射成型代替 F-4 的冷压烧结成型
酚醛树脂 (PF)	力学性能很高, 刚性大, 冷流性小, 耐热性很高(100°C 以上), 在水润滑下摩擦系数极低(0.01~0.03), PV 值很高, 有良好的电性能和抵抗酸碱侵蚀的能力, 不易因温度和湿度的变化而变形, 成型简便, 价格低廉。缺点是性质较脆、色调有限、耐光性差, 耐电弧性较小, 不耐强氧化性酸的腐蚀	常用的为层压酚醛塑料和粉末状压塑料, 有板材、管材及棒材等。可用作农用潜水电泵的密封件和轴承、轴瓦、带轮、齿轮、制动装置和离合装置的零件、摩擦轮及电器绝缘零件等
聚酰亚胺 (PI)	能耐高温、高强度, 可在 260°C 温度下长期使用, 耐磨性能好, 且在高温和真空下稳定, 挥发物少, 电性能、耐辐射性能好, 不溶于有机溶剂和不受酸的侵蚀, 但在强碱、沸水、蒸汽持续作用下会破坏, 主要缺点是质脆, 对缺口敏感, 不宜在室外长期使用	适用于高温、高真空条件下作减磨、自润滑零件, 高温电动机, 电器零件
环氧树脂 (EP)	具有较高的强度, 良好的化学稳定性和电绝缘性能, 成型收缩率小, 成型简便	制造金属拉伸模、压形模、铸造模, 各种结构零件以及用来修补金属零件及铸件

表 14.11-2 各种零件推荐选用的塑料品种

用 途	要 求	应 用 举 例	材 料
一般结构零件	强度和耐热性无特殊要求, 一般用来代替钢材或其他材料, 但由于批量大、要求有较高的生产率, 成本低, 有时对外观有一定要求	汽车调节器盖及喇叭后罩壳、电动机罩壳、各种仪表罩壳、盖板、手轮、手柄、油管、管接头、紧固件等	低压聚乙烯、聚氯乙烯、改性聚苯乙烯 (203A, 204)、ABS、聚丙烯等, 这些材料只承受较低的载荷, 当受力小时, 大约在 60 ~ 80℃ 范围内使用
	同上, 并要求有一定的强度	罩壳、支架、盖板、紧固件等	聚甲醛、尼龙 1010
透明结构零件	除上述要求外, 必须具有良好的透明度	透明罩壳、汽车用各类灯罩、油标、油杯、视镜、光学镜片、信号灯、防爆灯、防护玻璃以及透明管道等	改性有机玻璃 (372)、改性聚苯乙烯 (204)、聚碳酸酯
耐磨受力传动零件	要求有较高的强度、刚性、韧性、耐磨性、耐疲劳性, 并有较高的热变形温度、尺寸稳定	轴承、齿轮、齿条、蜗轮、凸轮、辘子、联轴器等	尼龙、MC 尼龙、聚甲醛、聚碳酸酯、聚酰氧、氯化聚醚、线型聚酯等。这类塑料的拉伸强度都在 58.8 kPa 以上, 使用温度可达 80 ~ 120℃
减磨自润滑零件	对机械强度要求往往不高, 但运动速度较高, 故要求具有低的摩擦系数, 优异的耐磨性和自润滑性	活塞环、机械动密封圈、填料、轴承等	聚四氟乙烯、填充的聚四氟乙烯、聚四氟乙烯填充的聚甲醛、聚全氟乙丙烯 (F-46) 等, 在小载荷、低速时可采用低压聚乙烯
耐高温结构零件	除耐磨受力传动零件和减磨自润滑零件要求外, 还必须具有较高的热变型温度及高温抗蠕变性	高温工作的结构传动零件如汽车分速器盖、轴承、齿轮、活塞环、密封圈、阀门、阀杆、螺母等	聚砜、聚苯醚、氟塑料 (F-4, F-46)、聚酰亚胺、聚苯硫醚, 以及各种玻璃纤维增强塑料等, 这些材料都可在 150℃ 以上使用
耐腐蚀设备与零件	对酸、碱和有机溶剂等化学药品具有良好的抗腐蚀能力, 还具有一定的机械强度	化工容器、管道、阀门、泵、风机、叶轮、搅拌器以及它们的涂层或衬里等	聚四氟乙烯、聚全氟乙丙烯、聚三氟氯乙烯 F-3、氯化聚醚、聚氯乙烯、低压聚乙烯、聚丙烯、酚醛塑料等

表 14.11-3 常用工程塑料的物理、力学性能

塑料名称	代号	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	吸水率/ %	抗拉 强度/ MPa	拉伸 模量/ GPa	断 后 伸长率/ %	抗压 强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	悬臂梁、缺 口冲击强度/ $J \cdot m^{-1}$	硬度 洛氏/邵氏 ² /布氏 HR/HS/HB	成型收 缩率/ %	无负 荷最 高使 用温 度/ $^{\circ}C$	连续 耐 热 温 度/ $^{\circ}C$
聚氯乙烯,硬 质	PVC	1.30~1.58	0.07~ 0.4	45~50	3.3	20~40	—	80~90	筒支梁,无缺 口 30~40 kJ/m^2	14~17HB	0.1~0.5	66~79	—
聚氯乙烯,软 质	PVC	1.16~1.35	0.5~ 1.0	10~25	—	100~ 450	—	—	—	50~75HSA	1~5	60~79	—
聚乙烯(高密 度)	HDPE	0.941~ 0.965	<0.01	21~38	0.4~ 1.03	20~ 100 (断裂)	18.6~ 24.5	—	80~1067	60~70HSD	1.5~4.0	79~121	85
聚乙烯(低密 度)	LDPE	0.91~ 0.925	<0.01	3.9~ 15.7	0.12~ 0.24	90~800	—	—	853.4	41~50HSD 10HRR	1.2~4.0	82~100	—
聚乙烯,超高 分子量	UNMWPE	0.94	<0.01	30~34	0.68~ 0.95	400~ 480	—	35~37	筒支梁,无缺 口 190~200 kJ/m^2 未断	50HRR	4.0	—	—
聚甲基丙烯 酸甲酯(有机玻 璃)	PMMA	1.17~ 1.20	0.20~ 0.40	50~77	2.4~ 3.5	2~7	—	84~120	14.7	10~18HB	0.2~0.6	65~95	—
聚丙烯	PP	0.90~0.91	0.03~ 0.04	35~40	1.1~ 1.6	200	—	42~56	10~100	50~102HRR	1.0~2.5	88~116	—
聚苯乙烯	PS	1.04~1.10	0.03~ 0.30	50~60	2.8~ 4.2	1.0~ 3.7	—	69~80	10~80	65~80HRM	0.2~0.7	60~79	—
甲基丙烯酸 甲酯-丁二烯-苯 乙烯	MBS	1.09~1.10	—	42~55 (屈服)	2.2~ 2.7	12~18 (断裂)	—	—	50~150	100~120HRR	—	—	—

续表 14.11-3

塑料名称	代号	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	吸水率/ %	抗拉 强度/ MPa	拉伸 模量/ GPa	断后 伸长率/ %	抗压 强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	悬臂梁、缺 口冲击强度/ $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$	硬度 洛氏/邵氏 ^② /布氏 HR/HBS/HB	成型收 缩率/ %	无负荷 最高使 用温度/ $^{\circ}\text{C}$	连续 耐热 温度/ $^{\circ}\text{C}$
丙烯腈-丁二 烯-苯乙烯	ABS	1.03~1.06	0.20~ 0.25	21~63	1.8~ 2.9	23~60	18~70	62~97 (1.8~3.0 GPa) ^①	123~454	62~121HRR	0.3~0.6	66~99	130~ 190
聚砜	PSU	1.24~1.61	0.3	66~68	2.5~ 4.5	2~5 50~ 100	276	99~106 (2.7~5.2 GPa) ^①	34.7~64.1	69~74HRM	0.4~0.7	149	—
聚酰胺(尼 龙)-6	PA-6	1.13~1.15	1.9~ 2.0	54~78	—	150~ 250	60~ 90	70~100	53.3~64	85~114HRR	—	82~121	—
聚酰胺(尼 龙)-66	PA-66	1.14~1.15	1.5	57~83	—	40~ 270	90~ 120	60~110	43~64	100~118HRR	1.5~2.2	82~149	—
聚酰胺(尼 龙)-610	PA-610	1.07~1.09	0.5	47~60	—	100~ 240	70~ 90	70~100	筒支梁,有 缺口 3.5~ 5.5 kJ/m ²	90~130HRR	1.5~2.0	—	—
聚酰胺(尼 龙)-1 010	PA-1 010	1.04~1.07	0.39	52~55	1.6	100~ 250	65	82~89 (1.8 GPa) ^①	筒支梁,有缺 口 4~5 kJ/m ²	71HB	1~2.5	—	—
聚酰胺(尼 龙)-铸型	PA-MC	1.10	0.6~ 1.2	77~92	2.4~ 3.6	20~30	—	120~150	筒支梁,无 缺口,500~ 600 kJ/m ²	14~21HB	径向3~ 4纵向 7~12	—	—
聚甲醛(均 聚)	POM	1.42~1.43	0.20~ 0.27	58~70	2.9~ 3.1	15~75	122	98 (2.9 GPa) ^①	64~123	118~120HRK 80~94HRM	2.0~2.5	91	121
聚甲醛(共 聚)	POM	1.41~1.43	0.22~ 0.29	62~68	2.8	40~75	113	91~92 (2.6 GPa) ^①	53~85	120HRK 78~84HRM	2.0~3.0	100	80

续表 14.11-3

塑料名称	代号	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	吸水率/ %	抗拉 强度/ MPa	拉伸 模量/ GPa	断 后 伸 长 率/ %	抗压 强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	悬臂梁、缺 口冲击强度/ $J \cdot m^{-1}$	硬度 洛氏/邵氏 ^a /布氏 HR/HS/HB	成型收 缩率/ %	无负荷 最高使 用温度/ $^{\circ}C$	连续 耐热 温度/ $^{\circ}C$
聚碳酸酯	PC	1.18~1.20	0.2~ 0.3	60~88	2.5~ 3.0	80~95	—	94~130	640~830	68~86HRM	0.5~0.8	121	120
聚氯醚		1.40	0.01	42~56	1.1	60~ 130	66~ 76	54~78	筒支梁,无缺 口 >40 kJ/m ²	100HRM	0.4~0.6	—	—
聚酚氧		1.17~1.18	0.13	55~70	2.4~ 2.7	50~ 100	—	83~110 (2.3~2.8 GPa) ^b	80~127	118~123HRR	0.3~0.4	—	65~80
聚对苯二甲 酸乙二(醇)酯	PETP	1.37~1.38	0.08~ 0.09	57	2.8~ 2.9	50~ 300	—	84~117	0.4	68~98HRM	—	79	—
聚对苯二甲 酸丁二(醇)酯	PBTP	1.30~1.55	0.03~ 0.09	52.5~ 65	2.6	—	—	83~103 (2.2 GPa) ^b	35.4	118HRR	1.5~2.5	138	—
聚四氟乙烯	PTFE	2.1~2.2	0.01~ 0.02	14~25	0.4	250~ 500	—	18~20	107~160	50~65HSD	1~5 (横压)	288	—
聚三氟氯乙 烯	PCTFE	2.1~2.2	0.02	31~42	1.1~ 2.1	50~ 190	—	52~65	192	74HSD	1~2.5	177~199	—
聚全氟乙烯 丙烯	FEP	2.1~2.2	0.01	19~22	0.35	250~ 330	—	—	—	60~65HSD	2~5	204	—
聚苯醚	PPO	1.06~1.36	0.06~ 0.12	48~66	2.3~ 2.6	35~60	69~ 113	57~97	214~374	115~120HRR 93HRM	0.5~0.8	79~ 104	60~ 121

续表 14.11-3

塑料名称	代号	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	吸水率/ %	抗拉 强度/ MPa	拉伸 模量/ GPa	断 后 伸 长 率/ %	抗压 强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	悬臂梁、缺 口冲击强度/ $J \cdot m^{-1}$	硬 度 洛氏/邵氏 ^② /布氏 HR/HS/HB	成型收 缩率/ %	无 负 荷 最 高 使 用 温 度/ $^{\circ}C$	连 续 耐 热 温 度/ $^{\circ}C$
聚砜亚胺(均 苯型)	PI	1.42~1.43	0.2~0.3	94.5	—	6~8	>276	117 (3.2 GPa) ^①	—	92~102HRM	—	260	60~88
聚砜亚胺(醚 肝型)		1.36~1.38	0.3	120	—	6~10	>230	200~210 (3.3 GPa) ^①	—	—	0.5~1.0	—	—
聚砜亚胺(聚 醚型)		1.27	0.25	105~ 140 97	3.0	60	140	152 (3.3 GPa) ^①	53.4~64.1	109~ 110HRM	0.5~0.7	170	—
聚砜亚胺(聚 酰胺型)		1.42	0.33 (饱和)	152	4.5	7.6	221	189~241 (5.03 GPa) ^①	144	86HRE	0.6~1.0	—	—
酚醛(木粉)	PF	1.37~1.46	0.3~ 1.2	35~ 62	5.5~ 11.7	0.4~ 0.8	172~ 214	48~97	10.7~32.0	100~115HRM	0.4~0.9	149~177	—
环氧树脂(玻 纤)	EP	1.6~2.0	0.04~ 0.20	35~ 137	20.7	4	124~ 276	55~207	16.0~53.4	100~112HRM	0.1~0.8	149~260	—

注:本表数值供参考用。

①弯曲模量。

②按 GB/T 2411“塑料邵氏硬度试验方法”,塑料的邵氏硬度用 H_s 或 H_h 表示,此处为与洛氏及布氏硬度的写法一致,特用 HSA 及 HSD 表示。

1.2 塑料棒材

1.2.1 聚四氟乙烯棒材 (表 14.11-4)

表 14.11-4 聚四氟乙烯棒材尺寸规格及性能 (摘自 QB/T3626—1999) (mm)

直径	直径允许偏差	长度	长度允许偏差	直径	直径允许偏差	长度	长度允许偏差
1.0~3.0	+0.4 0	≥100	±5	55.0, 60.0, 65.0, 70.0, 75.0, 80.0, 85.0, 90.0, 95.0, 100.0	+3.0 -0.5	≥100	±5
4.0~16.0	±0.5			110.0, 120.0, 130.0, 140.0, 150.0, 160.0, 170.0, 180.0, 190.0, 200.0	+6.0 -0.5			100
18.0, 20.0, 22.0, 24.0, 26.0, 28.0, 30.0, 32.0, 34.0, 36.0, 38.0, 40.0	+1.0 -0.5	220.0, 240.0, 260.0, 280.0, 300.0, 350.0, 400.0, 450.0		+10.0 0.5			
42.0, 44.0, 46.0, 48.0, 50.0	+1.5 -0.5						
性能及 应用	产品用于各种腐蚀性介质中工作的衬垫、密封件和润滑材料以及在各种频率下的电绝缘零件。分为 SFB-1(直径≤16 mm)和 SFB-2(直径≥18 mm)两类。SFB-1 的密度为 2.10~2.30 g/cm ³ , 拉伸强度为 ≥14.0 MPa, 断裂伸长率≥140%。SFB-2 的密度为 2.10~2.30						

注: 1. 特殊规格经供需双方协商确定。

2. 标记示例: 直径为 50 mm, 长度为 100 mm 的聚四氟乙烯棒材, 标记为
乙烯棒 SFB-2-50×100 QB/T3626—1999

1.2.2 热固性树脂层压棒 (表 14.11-5)

表 14.11-5 热固性树脂层压棒的型号、性能及应用 (摘自 GB/T 5133—1985)

名称	型号	直径 范围/ mm	密度/ (g·cm ⁻³) 最小	抗弯 强度/ MPa 最小	抗压 强度/ MPa 最小	平行层向 击穿电压/ kV 最小	吸水性/% (最大)				应用举例
							直径/mm				
							6	13	25	25~51	
酚醛 布棒	3722	6~100	1.28	110.3	131	—	2.5	2.0	2.0	1.5	机械用 (粗布)
酚醛 布棒	3723	6~100	1.26	89.6	137.9	10	1.7	1.3	1.0	1.2	机械及电气用 (粗布)
酚醛 布棒	3724	5~100	1.28	110.3	131	—	2.0	1.5	1.2	1.2	机械用 (细布)、 可以精密加工
酚醛 布棒	3725	5~100	1.26	82.7	137.9	10	1.4	1.1	1.0	1.1	机械及电气用 (细布)、 可精密加工
环氧玻 璃布棒	3841	6~50	1.70	241.3	241.3	15	0.75	0.5	0.5	0.5	在干燥及潮湿条件下, 机械强度、介电 强度高

注: 1. 层压棒为以棉布或玻璃布为底材, 分别浸以酚醛树脂、环氧树脂, 热模压成形长度 450~1250 mm 的圆棒。

2. 本表的物理力学性能数值适用于直径范围为 6~51 mm、抗弯强度适用于最大直径为 25 mm。

3. 标记示例: 直径 20 mm、长度 450 mm、型号为 3722 的层压棒, 标记为
棒 3722 φ20×450, GB/T 5133—1985

1.3 塑料板材

1.3.1 硬聚氯乙烯板材 (表 14.11-6、表 14.11-7)

表 14.11-6 硬聚氯乙烯板材尺寸规格 (摘自 GB/T 13520—1992)

公称厚度/mm	2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、10.0、12.0、14.0、15.0、16.0、18.0、20.0、22.0、25.0、28.0、30.0、32.0、35.0、38.0、40.0		
厚度偏差/mm	±0.20、±0.23、±0.25、±0.28、±0.30、0.33、±0.35、±0.38、±0.40、±0.43、±0.45、±0.48、±0.50、±0.53、±0.60、±0.70、±0.80、±0.85、±0.90、±1.00、±1.10、±1.20、±1.35、±1.50、±1.60、±1.70、±1.85、±2.00、±2.10		
宽度/mm	≥700	长度/mm	≥1600
宽度偏差/%	+0.5 0	长度偏差/%	+1.0 0

注：生产厂可以自行规定长、宽规格，每种厚度的板材，允许有两种长、宽规格，但公差应符合本表规定。

表 14.11-7 硬聚氯乙烯板材性能 (摘自 GB/T 13520—1992)

名 称	指 标	名 称	指 标
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.30~1.50	透光率 (%) $d\leq 3\text{ mm}$	≥80.0
拉伸强度 (纵、横) /MPa	≥52.0	$3\text{ mm}<d\leq 6\text{ mm}$	≥75.0
缺口纵、横冲击强度/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	≥5.0	腐蚀度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	
落球冲击强度	不破裂	35% 盐酸溶液 (质量分数)	-2.0~+2.0
维卡软化点/℃ 装饰用板材	≥75.0	30% 硫酸溶液 (质量分数)	-1.0~+1.0
工业用板材	≥80.0	40% 硝酸溶液 (质量分数)	-1.0~+1.0
加热尺寸变化率/% 纵	-5.0~+5.0	40% 氢氧化钠溶液 (质量分数)	-1.0~+1.0
横	-3.0~+3.0		

1.3.2 硬质聚氯乙烯层压板材 (表 14.11-8、表 14.11-9)

表 14.11-8 硬质聚氯乙烯层压板材规格 (摘自 GB/T 4454—1996)

尺寸规格	项 目	公称尺寸/mm	极限偏差/%	极限偏差/mm
	厚度 d	$2\leq d<20$	±10	—
		$20\leq d\leq 50$	±7	—
	宽度 b	$b\geq 700$	— —	+15 0
长度 l	$l\geq 1600$	— —	+15 0	

续表 14.11-8

	项 目	要 求		
		优等品	一等品	合格品
外观质 量要求	色差	无	不明显	轻微
	斑点	不允许	不明显	轻微
	凹凸	无	不明显	轻微
	板边	四边应成直线, 四角应成直角, 板边偏离真正直角边的距离在距角顶 1 m 处不得超过 8 mm	四边应成直线, 四角应成直角, 板边偏离真正直角边的距离在距角顶 1 m 处不得超过 10 mm	
	边陷	板材边缘不得有深度大于 3 mm 的缺口	板材边缘不得有深度大于 5 mm 的缺口	
	不平整	不允许		
	裂纹	不允许		
	气泡	不允许		
	杂质和黑点	无明显杂质及分散不良的辅料		

注: 1. 产品以聚氯乙烯树脂为主要原料, 加入稳定剂和其他助剂, 经压延成薄片, 再经层压而制成板材。

2. 标记示例: 厚度 15 mm, 宽度 800 mm, 长度 2 000 mm 的 B 类硬质聚氯乙烯层压板材, 标记为

聚氯乙烯板 B 15 × 800 × 2 000 GB/T 4454—1996

表 14.11-9 硬质聚氯乙烯层压板材性能及应用 (摘自 GB/T 4454—1996)

项 目	指 标	
	A 类	B 类
相对密度	1.38~1.60	
抗拉强度(纵、横) /MPa	≥49.0	≥45.0
缺口, 平面、侧面冲击初度 /kJ·m ⁻²	≥3.2	≥3.0
热变形温度 /℃	≥73.0	≥65.0
纵、横向加热尺寸变化率 /%	±3.0	
整体性	无裂缝	
燃烧性能	I 难燃, 离火即熄	
腐蚀度 / g·m ⁻² 60℃ ± 2℃ 5 h	40% 氢氧化钠溶液(质量分数)	±1.0
	40% 硝酸溶液(质量分数)	±1.0
	30% 硫酸溶液(质量分数)	±1.0
	35% 盐酸溶液(质量分数)	±2.0
	10% 氯化钠溶液(质量分数)	±1.5
	水	±1.5
应用说明	A 类为工业用, 主要适于化工耐腐蚀结构材料, 也可作为其他工业用材料	B 类为普通用, 主要适于作台面、装饰材料等民用产品, 不适于作食品容器材料

1.3.3 改性聚丙烯层压板材 (表 14.11-10、表 14.11-11)

表 14.11-10 改性聚丙烯层压板材规格 (摘自 GB/T 12024—1989) (mm)

公称厚度		宽度		长度		公称厚度		宽度		长度		公称厚度		宽度		长度	
尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差	尺寸	偏差
2.00	±0.30	≥800	+15 0	≥1800	0	7.00	±0.70	≥800	+15 0	≥1800	0	20.00	±1.50	≥800	+15 0	≥1800	0
2.50	±0.30					7.50	±0.75					22.00	±1.60				
3.00	±0.30					8.00	±0.80					25.00	±1.80				
3.50	±0.30					8.50	±0.85					28.00	±2.00				
4.00	±0.40					10.00	±1.00					30.00	±2.00				
4.50	±0.45					12.00	±1.00					32.00	±2.10				
5.00	±0.50					14.00	±1.10					35.00	±2.10				
5.50	±0.55					15.00	±1.20					38.00	±2.30				
6.00	±0.60					16.00	±1.30					40.00	±2.40				
6.50	±0.65					18.00	±1.40										

表 14.11-11 改性聚丙烯层压板材性能 (摘自 GB/T 12024—1989)

项 目	指 标		项 目	指 标	
	一等品	合格品		一等品	合格品
密度/g·cm ⁻³	1.0~1.2	1.2~1.4	维卡软化点 (9.8 N 负荷) /℃	≥140	
抗拉强度/MPa	纵向	≥25	整体性试验 (168±2)℃	不裂开、无分层、不起泡	
	横向	≥20			
缺口冲击强度/ kJ·m ⁻²	纵向	≥7	(60±2)℃时腐蚀度/ g·m ⁻² 60℃±2℃, 5 h	40% NaOH 溶液 ^①	±2.0 ±2.0
	横向	≥4		40% HNO ₃ 溶液 ^①	±2.0 ±3.0
抗弯强度/MPa	纵向	≥44		30% H ₂ SO ₄ 溶液 ^①	±2.0 ±2.0
	横向	≥34		35% HCl 溶液 ^①	±3.0 ±4.0
加热(140±2)℃时 尺寸变化率/%	纵向	±4			
	横向	±4			

注：公称厚度大于 20 mm 的板材，不考核加热尺寸变化率。

①为质量浓度。

1.3.4 酚醛层压布板 (表 14.11-12~表 14.11-14)

表 14.11-12 酚醛层压布板规格 (摘自 JB/T 8149.3—1995) (mm)

公称厚度	偏 差				公称厚度	偏 差			
	PFCC1	PFCC2	PFCC3	PFCC4		PFCC1	PFCC2	PFCC3	PFCC4
0.4	—	—	±0.12	—	12.0	+1.40	±0.70	+1.28	±0.64
0.5	—	—	±0.13	±0.13	14.0	+1.56	±0.78	+1.40	±0.70
0.6	—	—	±0.14	±0.14	16.0	+1.70	±0.85	+1.52	±0.76
0.8	±0.19	±0.19	±0.15	±0.15	20.0	+1.90	±0.95	+1.74	±0.87
1.0	±0.20	±0.20	±0.16	±0.16	25.0	+2.20	±1.10	+2.04	±1.02
1.2	±0.22	±0.22	±0.17	±0.17	30.0	+2.44	±1.22	+2.24	±1.12
1.6	±0.24	±0.24	±0.19	±0.19	35.0	+2.63	±1.34	+2.48	±1.24
2.0	±0.26	±0.26	±0.21	±0.21	40.0	+2.90	±1.45	+2.70	±1.35
2.5	±0.29	±0.29	±0.24	±0.24	45.0	+3.10	±1.55	+2.90	±1.45
3.0	±0.31	±0.31	±0.26	±0.26	50.0	+3.30	±1.65	+3.10	±1.55
4.0	±0.36	±0.36	±0.32	±0.32	60.0	+3.70	—	+3.50	—
5.0	±0.42	±0.42	±0.36	±0.36	70.0	+4.00	—	+3.80	—
6.0	+0.92	±0.46	+0.80	±0.40	80.0	+4.40	—	+4.20	—
8.0	+1.10	±0.55	+0.98	±0.49	90.0	+4.70	—	+4.50	—
10.0	+1.26	±0.63	+1.12	±0.56	100.0	+5.00	—	+4.80	—

注：1. 非公称厚度可由供需双方协商制造，其偏差采用下一个较大公称厚度的偏差值。

2. 板的宽度和长度 450~1 000 mm，其允许偏差为 ±15 mm；宽度和长度 > 1 000~2 600 mm，其允许偏差为 ±25 mm。

3. 标记示例：厚度为 6 mm，宽度为 500 mm，长度为 1 000 mm 的 PFCC3 酚醛层压布板，标记为

层压布板 PECC3-6×500×1000 JB/T 8149.3—1995

表 14.11-13 酚醛层压布板性能 (摘自 JB/T 8149.3—1995)

指标名称	单位	受试板材最大或最小公称厚度/mm	型 号			
			PFCC1	PFCC2	PFCC3	PFCC4
垂直层向抗弯强度(最小)	MPa	最小 15	100	90	110	100
冲击韧度(缺口试样,平行板层试验)(最小)简支梁(charpy)法	kJ/m ²	最小 5	8.8	7.8	7.0	6.0
平行层向耐电压于 90 ± 2℃ 变压器油中 1 min(最小)	kV	最小 3	—	15	—	20
浸水后绝缘电阻(最小)	MΩ	最大 3	—	1 × 10 ⁴	—	1 > 10 ⁴
应用说明	棉布浸以酚醛树脂,经热压而成的布板,表面平滑,无气泡、裂纹、擦伤		机械用(粗布),力学性能好	机械和电气用(粗布)	机械用(细布),适于作小零件	机械和电气用(细布),适于作小零部件

表 14.11-14 酚醛层压布板吸水性 (摘自 JB/T 8149.3—1995)

厚度/mm	吸水量/mg ≤				厚度/mm	吸水量/mg ≤			
	PFCC1	PFCC2	PFCC3	PFCC4		PFCC1	PFCC2	PFCC3	PFCC4
0.4	—	—	186	125	5	275	175	275	175
0.5	—	—	190	127	6	284	182	284	182
0.6	—	—	194	129	8	301	195	301	195
0.8	201	133	201	133	10	319	209	319	209
1.0	206	136	206	136	12	336	223	336	223
1.2	211	139	211	139	14	354	236	354	236
1.6	220	145	220	145	16	371	250	371	250
2.0	229	151	229	151	20	406	277	406	277
2.5	239	157	239	157	25	450	311	450	311
3	249	162	249	162	单面加工至 22.5	540	373	540	373
4	262	169	262	169					

注:表中的厚度系指厚度实测平均值。若试样厚度实测平均值在表中所列两个厚度之间,吸水性指标值吸水量应由内插法求得。若厚度实测平均值小于 0.4 mm,应采用 0.4 mm 的吸水性指标值。若公称厚度为 25 mm,而厚度实测平均值超过 25 mm,应采用 25 mm 的指标值。

1.3.5 浇铸型工业有机玻璃板材 (表 14.11-15)

表 14.11-15 工业有机玻璃板材规格及性能 (摘自 GB/T 7134—1996)

规格尺寸/mm	厚 度	幅面尺寸范围	厚 度	幅面尺寸范围
		1.0、1.5	(200 × 200) ~ (900 × 1 000)	7.0 ~ 10.0	(400 × 500) ~ (1 500 × 1 700)
2.0		(300 × 300) ~ (1 000 × 1 300)	12.0 ~ 25.0	(400 × 500) ~ (900 × 1 300)
3.0 ~ 6.0		(400 × 500) ~ (1 500 × 1 700)	30.0 ~ 45.0	(400 × 500) ~ (800 × 1 200)

续表 14.11-15

厚度及偏差 /mm	厚 度	公 差			厚 度	公 差		
		优等品	一等品	合格品		优等品	一等品	合格品
	1.0	±0.2	±0.2	±0.4	5.0	±0.5	±0.5	±0.8
	1.5	±0.2	±0.2	±0.4	6.0	±0.6	±0.6	±0.9
	2.0	±0.4	±0.4	±0.6	7.0	±0.6	±0.6	±0.9
	3.0	±0.4	±0.4	±0.6	8.0	±0.7	±0.7	±1.0
	4.0	±0.5	±0.5	±0.8	9.0	±0.7	±0.7	±1.0
	10.0	±1.0	±1.0	±1.0	20.0	±2.0	±2.0	±2.0
	12.0	±1.2	±1.2	±1.2	25.0	±2.2	±2.5	±2.5
	14.0	±1.4	±1.4	±1.4	30.0	±2.7	±3.0	±3.0
	15.0	±1.5	±1.5	±1.5	35.0	±3.0	±3.5	±3.5
	16.0	±1.6	±1.6	±1.6	40.0	±3.5	±4.0	±4.0
	18.0	±1.8	±1.8	±1.8	45.0	±4.0	±4.5	±4.5

性能	指 标 名 称		指 标				
			无 色			有 色	
			优等品	一等品	合格品	一等品	合格品
	洛氏硬度(M标尺)	≥	94	90	88	78	78
	冲击韧度/(kJ·m ⁻²)	≥	17	17	16	14	14
	抗拉强度/MPa	≥	70	63	61	54	54
	断裂伸长率(%)	≥	4	3	2	—	—
	热变形温度 /℃ ≥	厚度 3~4 mm	78	76	75	—	—
		厚度 5~10 mm	82	80	78	—	—
		厚度大于 10 mm	84	84	78	—	—
	维卡软化温度/℃ (厚度 5~10 mm)	≥	89	84	79	—	—
	抗溶剂银纹性		浸泡 4 h 无银纹出现			—	—
	透光率/% ≥	厚度不大于 15 mm	91	91	91	—	—
		厚度大于 15 mm	90	90	90	—	—

注：1. 标记示例：厚度 20 mm，宽度 800 mm，长度 1 000 mm 有机玻璃板材，标记为
玻璃板 20×800×1 000 GB/T 7134—1996

2. GB/T 7134 规定有机玻璃棒材由板材经机械加工制成，其物理力学性能指标与板材相同：棒直径 5~16 mm，长度 300~1 300 mm；直径 18~40 mm，长度 200~600 mm。棒直径 5~15 mm，允许偏差为 ±0.5 mm，直径 16~40 mm，允许偏差为 ±0.8 mm。

1.3.6 聚四氟乙烯板材 (表 14.11-16、表 14.11-17)

表 14.11-16 聚四氟乙烯板材尺寸规格 (摘自 QB/T3625—1999) (mm)

厚度	宽度	长度	厚度	宽度	长度	厚度	宽度	长度	厚度	宽度	长度
0.5	60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 600, 1 000, 1 200, 1 500	≥500	1.5	60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 600, 1 000, 1 200, 1 500	≥300	2.0	120	120	16.17,	120	120
0.6							160	160	18.19,		
0.7							200	200	20.22,		
0.8							250	250	24.26,		
0.9							300	300	28.30,		
1.0	32.34,	300		300	36.38,						
1.0	120	120		2.5	120	120	160	160	40.45,	400	400
	160	160			200	200	50.55,	450	450		
	200	200			250	250	60.65,				
	250	250			3.0		70.75				
1.2	60, 90, 120, 150, 200, 250, 300, 600, 1 000, 1 500	≥500	2.0	60, 90, 120, 150, 200, 250, 300	≥500	4.0				80	300	300
						5.0					
						6.0	120	120			
						7.0	160	160			
						8.0	200	200			
	9.0	300	300	85	300	300					
	10.0	300	300	90	400	400					
	11.0	400	400	95	450	450					
	12.0	450	450	100							
	13.0										
14.0											
15.0											

注：厚度 0.8、1.0、1.2、1.5 mm 的圆形板材直径为 100、120、140、160、180、200、250 mm。

表 14.11-17 聚四氟乙烯板材牌号、性能及应用 (摘自 QB/T3625—1999)

项 目	单 位	牌 号 及 指 标		
		SFB-1	SFB-2	SFB-3
密度	g/cm ³	2.10~2.30	2.10~2.30	2.10~2.30
抗拉强度≥	MPa	14.7	14.7	29.4
断裂伸长率≥	%	150	150	30
耐电压	kV/mm	10	—	—
应用说明		主要作电器绝缘之用	主要作腐蚀介质中的衬垫、密封件及润滑材料之用	主要作腐蚀介质中的隔膜与视镜之用

注：标记示例：厚度 15 mm，宽度 250 mm，长度 400 mm 的 SFB-2 聚四氟乙烯板材，标记为 乙烯板 SFB-2-15×250×400 QB/T3625—1999

1.4 塑料管材

1.4.1 流体输送用软聚氯乙烯管 (表 14.11-18、表 14.11-19)

表 14.11-18 软聚氯乙烯管尺寸规格 (摘自 GB/T 13527.1—1992)

内 径 d				使用 压力/ MPa	内 径 d				使用 压力/ MPa
公称内径/mm	极限偏 差/mm	公称壁 厚/mm	极限偏 差/%		公称内径/mm	极限偏 差/mm	公称壁 厚/mm	极限偏 差/%	
3.0,4.0,5.0,6.0,7.0	±0.3	1.0	±30	0.25	25.0	±0.5	3.0	±15	0.2
8.0,9.0,10.0,12.0		1.5	±25		32.0	3.0			
14.0,16.0,20.0	±0.5	2.0	±20	0.2	40.0	±0.7	3.5		
					50.0	4.0			

注: 1. 软管适用于输送某些流体 (在常温下)

2. 软管长度不小于 10 m。

3. 软管名称用代号“LS”, 规格用 $d \times \delta$ 表示。

4. 标记示例: 内径 5 mm, 壁厚 1.0 mm, 长度 1 000 mm 的软聚氯乙烯管, 标记为
管 LS-5 \times 1 \times 1000 GB/T 13527.1—1992

表 14.11-19 软聚氯乙烯管性能 (摘自 GB/T 13527.1—1992)

项 目		指 标		项 目		指 标		
抗拉强度/MPa		≥14		浸渍试验 (溶质含 量为质量 分数)	H ₂ O	吸水率 (抽出率) /%		
断裂伸长率/%		≥200				≤0.5		
热老化 性能	抗拉强度变化率(V_1)/%	-20 ≤ V_1 ≤ 20				(40 ± 1)% NaCl 溶液	质量 变化率 W_t /%	-0.5~0.5
	断裂伸长变化率(V_2)/%	-20 ≤ V_2 ≤ 20						
水压试验		不破裂		(30 ± 1)% H ₂ SO ₄ 溶液				
耐寒试验, -10 ± 2℃		无裂痕和破碎现象		(40 ± 1)% NaOH 溶液				
				(40 ± 1)% HNO ₃ 溶液				

1.4.2 硬聚氯乙烯(PVC-U)管材(表 14.11-20、表 14.11-21)

表 14.11-20 硬聚氯乙烯(PVC-U)管材公称外径和平均
外径极限偏差 (摘自 GB/T 13020—1991)

公称外径 d_c	平均外径 极限偏差 $d_m - d_c$	公称外径 d_c	平均外径 极限偏差 $d_m - d_c$	公称外径 d_c	平均外径 极限偏差 $d_m - d_c$	公称外径 d_c	平均外径 极限偏差 $d_m - d_c$
2.5	+0.3	25	+0.3	160	+0.5	500	+1.5
3	+0.3	32	+0.3	180	+0.6	560	+1.7
4	+0.3	40	+0.3	200	+0.6	630	+1.9
5	+0.3	50	+0.3	225	+0.7	710	+2.2
6	+0.3	63	+0.3	250	+0.8	800	+2.4
8	+0.3	75	+0.3	280	+0.9	900	+2.7
10	+0.3	90	+0.3	315	+1.0	1 000	+3.0
12	+0.3	110	+0.4	355	+1.1		
16	+0.3	125	+0.4	400	+1.2		
20	+0.3	140	+0.5	450	+1.4		

注: d_m —平均外径; d_c —公称外径。

表 14.11-21 硬聚氯乙烯 (PVC-U) 管任何部位外径极限偏差 (摘自 GB/T 13020—1991)
(mm)

公称外径 d_n	任何部位外 径极限偏差 $d_s - d_n$	公称外径 d_n	任何部位外 径极限偏差 $d_s - d_n$	公称外径 d_n	任何部位外 径极限偏差 $d_s - d_n$	公称外径 d_n	任何部位外 径极限偏差 $d_s - d_n$
2.5	+0.5	25	+0.5	150	+2.0	500	+6.0
3	+0.5	32	+0.5	180	+2.2	560	+6.8
4	+0.5	40	+0.5	200	+2.4	630	+7.6
5	+0.5	50	+0.6	225	+2.7	710	+8.6
6	+0.5	63	+0.8	250	+3.0	800	+9.6
8	+0.5	75	+0.9	280	+3.4	900	+10.8
10	+0.5	90	+1.1	315	+3.8	1000	+12.0
12	+0.5	110	+1.4	355	+4.3		
16	+0.5	125	+1.5	400	+4.8		
20	+0.5	140	+1.7	450	+5.4		

注: d_s —任何部位外径。

1.4.3 化工用硬聚氯乙烯 (PVC-U) 管材 (表 14.11-22、表 14.11-23)

表 14.11-22 化工用硬聚氯乙烯管材性能及应用 (摘自 GB/T 4219—1996)

指标名称	指标数值	工作压力	应用
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	≤ 1.55	按工作压力 (MP) 分为 PN0.4、 PN0.6 PN0.8 PN1.0 PN1.6 适用温度为 20℃ 以下, 当 使用温度 t 不 同时, 与公称 压力相对应的 系数 K: $t/℃$ K 0~25 1 >25~35 0.8 >35~45 0.63	产品适于输送温度在 45℃ 以下的某些腐蚀性化学流体, 也可输送非饮用水等压力流体。但不宜于输送下列流体 (质量分数): 乙酸 (冰)、乙酸酐 (100%)、丙酮 (100%)、丙烯醇 (96%) 氨水 (100%)、戊乙酸 (100%)、苯胺 (100%)、苯胺 (SAT. SOL)、盐酸化苯胺 (SAT. SOL)、苯甲醛 (0.1%)、苯 (100%)、苯甲酸 (SAT. SOL)、溴水 (100%)、乙酸丁酯 (100%)、丁基苯酚 (100%)、丁酸 (98%)、氢氟酸 (气) (100%)、乳酸 (10%~90%)、甲基丙烯酸甲酯 (100%)、硝酸 (50%~98%)、发烟硫酸 (10% SO_3)、高氯酸 (70%)、汽油 (链/苯) (80/20)、苯酚 (90%)、苯肼 (100%)、二硫化碳 (100%)、四氯化碳 (100%)、氯气 (干) (100%)、液氯 (SAT. SOL)、氟磺酸 (100%)、甲酚 (SAT. SOL)、甲基苯甲酸 (SAT. SOL)、巴豆醛 (100%)、环己醇 (100%)、环己酮 (100%) 二氯乙烷 (100%)、二氯甲烷 (100%)、乙醚 (100%)、乙酸乙酯 (100%)、丙烯酸乙酯 (100%)、糖醇树脂 (100%)、氢氟酸 (40%)、氢氟酸 (60%)、盐酸苯肼 (97%)、氯化磷 (三价) (100%)、吡啶 (100%)、二氧化硫 (100%)、硫酸 (96%)、甲苯 (100%)、二氯乙烯 (100%)、乙酸乙烯 (100%)、混合二甲苯 (100%)、乙醛 (40%)、乙醛 (100%)。 注: Sat. sol—在 20℃ 制备的饱和水溶液
腐蚀度/ $g \cdot m^{-2}$ (盐酸、硝酸、 硫酸、氢氧化钠 60℃ ± 2℃, 5 h)	≤ 1.50		
维卡软化温度/ ℃	≥ 80		
液压试验 试验温度 (20 ± 2)℃, 环向应力 42 MPa, 1 h)	不破裂, 不渗漏		
纵向回缩率/ %	≤ 5		
丙酮浸泡	无脱层, 无碎裂		
扁平 (在 23℃ ± 2℃, 压至外径 1/2 时)	无裂纹, 无破裂		
屈服强度/MPa	≥ 45		

表 14.11-23 化工用硬聚氯乙烯管材规格 (摘自 GB/T 4219—1996) (mm)

公称 外径 d_c	平均 外径 极限 偏差	任何 部位 外径 极限 偏差	公称压力/MPa									
			PN0.4		PN0.6		PN0.8		PN1.0		PN1.6	
			管 系 列									
			S-16.0		S-10.5		S-8.0		S-6.3		S-4.0	
			壁 厚 e									
公称值	极限偏差	公称值	极限偏差	公称值	极限偏差	公称值	极限偏差	公称值	极限偏差			
20	+0.3 0	0.5	—	—	—	—	2.0	+0.4 0	2.3	+0.5 0		
25	+0.3 0	0.5	—	—	—	—	2.0	+0.4 0	2.8	+0.5 0		
32	+0.3 0	0.5	—	—	2.0	+0.4 0	2.4	+0.5 0	3.6	+0.6 0		
40	+0.3 0	0.5	2.0	+0.4 0	2.0	+0.4 0	2.4	+0.5 0	3.0	+0.5 0		
50	+0.3 0	0.6	2.0	+0.4 0	2.4	+0.5 0	3.0	+0.5 0	3.7	+0.5 0		
63	+0.3 0	0.8	2.0	+0.4 0	3.0	+0.5 0	3.8	+0.6 0	4.7	+0.7 0		
75	+0.3 0	0.9	2.3	+0.5 0	3.6	+0.6 0	4.5	+0.7 0	5.5	+0.8 0		
90	+0.3 0	1.1	2.8	+0.5 0	4.3	+0.7 0	5.4	+0.8 0	6.6	+0.9 0		
110	+0.4 0	1.4	3.4	+0.6 0	5.3	+0.8 0	6.6	+0.9 0	8.1	+1.1 0		
125	+0.4 0	1.5	3.9	+0.6 0	6.0	+0.8 0	7.4	+1.0 0	9.2	+1.2 0		
140	+0.5 0	1.7	4.3	+0.7 0	6.7	+0.9 0	8.3	+1.1 0	10.3	+1.3 0		
160	+0.5 0	2.0	4.9	+0.7 0	7.7	+1.0 0	9.5	+1.2 0	11.8	+1.4 0		
180	+0.6 0	2.2	5.5	+0.8 0	8.6	+1.1 0	10.7	+1.3 0	13.3	+1.6 0		
200	+0.6 0	2.4	6.2	+0.9 0	9.6	+1.2 0	11.9	+1.4 0	14.7	+1.7 0		
225	+0.7 0	2.7	6.9	+0.9 0	10.8	+1.3 0	13.4	+1.6 0	16.6	+1.9 0		
250	+0.8 0	3.0	7.7	+1.0 0	11.9	+1.4 0	14.8	+1.7 0	18.4	+2.1 0		
280	+0.9 0	3.4	8.6	+1.1 0	13.4	+1.6 0	16.6	+1.9 0	20.6	+2.3 0		

标称 外径 d_n	平均 外径 极限 偏差	任何 部位 外径 极限 偏差	标称压力/MPa									
			PN0.4		PN0.6		PN0.8		PN1.0		PN1.6	
			管 系 列									
			S-16.0		S-10.5		S-8.0		S-6.3		S-4.0	
			壁 厚									
公称值 极限偏差		公称值 极限偏差		公称值 极限偏差		公称值 极限偏差		公称值 极限偏差				
315	+1.0 0	3.8	9.7 +1.2 0	15.0 +1.7 0	18.7 +2.1 0	23.2 +2.6 0	—					
355	+1.1 0	4.3	10.9 +1.3 0	16.9 +1.9 0	21.1 +2.4 0	26.1 +2.9 0	—					
400	+1.2 0	4.8	12.3 +1.5 0	19.1 +2.2 0	23.7 +2.6 0	29.4 +3.2 0	—					
450	+1.4 0	5.4	13.8 +1.6 0	21.5 +2.4 0	26.7 +2.9 0	—		—				
500	+1.5 0	6.0	15.3 +1.8 0	23.9 +2.6 0	29.6 +3.2 0	—		—				
560	+1.7 0	6.8	17.2 +2.0 0	26.7 +2.9 0	—		—		—			
630	+1.9 0	7.6	19.3 +2.2 0	30.0 +3.2 0	—		—		—			
710	+2.2 0	8.6	21.8 +2.4 0	—		—		—		—		

注：1. 壁厚是以20℃环（诱导）应力 σ_c 为6.3 MPa确定，管系列S由 σ_c/ρ 得出。

2. 如需其他规格和壁厚的管材，可按GB/T 10798—1989选取，其外径与壁厚偏差按GB/T 13020—1991选定。

3. 对 e/d_n 的比值小于0.035的管材，不考核任何部位外径极限偏差。

1.4.4 浇铸型工业有机玻璃管材（表14.11-24）

表 14.11-24 工业有机玻璃管材规格及性能（摘自GB/T 7134—1996）

规格尺寸/ mm	外 径	壁 厚	长 度	外 径	壁 厚	长 度
	20.0	2~5	300~1 300	11.0~200.0	5~15	300~1 300
	25.0~60.0	3~5	300~1 300	250.0~500.0	8~15	500~2 000
	65.0~100.0	4~10	300~1 300			

续表 14.11-24

	管材壁厚	允许偏差		管材壁厚	允许偏差	
		一等品	合格品		一等品	合格品
壁厚及其 允许偏差/ mm	2.0	±0.4	±0.6	9.0	±0.8	±1.0
	3.0	±0.5	±0.7	10.0	±1.0	±1.2
	4.0	±0.8	±0.8	11.0	±1.1	±1.3
	5.0	±0.6	±0.8	12.0	±1.2	±1.4
	6.0	±0.7	±0.9	13.0	+1.3	+1.5
	7.0	±0.7	±0.9	14.0	±1.4	±1.6
	8.0	±0.8	±1.0	15.0	±1.5	±1.7
	外径及其 允许偏差/ mm	外 径	允许偏差	外 径	允许偏差	外 径	允许偏差
20		±1.0	75	±1.5	160	±2.0
25		±1.0	80	±1.5	170	±2.0
30		±1.0	85	±1.5	180	±2.0
35		±1.2	90	±1.5	190	±2.0
40		±1.2	95	±1.5	200	±2.0
45		±1.2	100	±1.5	250	±2.5
50		±1.2	110	±1.8	300	±3.0
55		±1.5	120	±1.8	400	±4.0
60		±1.5	130	±1.8	500	±5.0
65		±1.5	140	±1.8		
70		±1.5	150	±1.8		
性能	指 标 名 称			指 标		
				一等品	合格品	
	抗拉强度/MPa (外径不小于 200 mm) \geq			53	53	
	抗溶剂银纹性			浸泡 1 h 无银纹出现	浸泡 1 h 无银纹出现	
透光率/% \geq (凸面入射)	外径不大于 200 mm		90	89		
	外径大于 200 mm		89	88		

注：外径 40 mm，壁厚 5 mm，长度 1 000 mm 的有机玻璃管材，标记为
玻璃管 $\phi 40 \times 5 \times 1\ 000$ GB/T 7134—1996

1.4.5 尼龙管材 (表 14.11-25)

表 14.11-25 尼龙管材规格

(外径/mm) × (壁厚/mm)	公差/mm		长 度 /mm	(外径/mm) × (壁厚/mm)	公差/mm		长 度 /mm
	外 径	壁 厚			外 径	壁 厚	
4 × 1	± 0.10	± 0.10	协议	12 × 1	± 0.10	± 0.10	协议
6 × 1				12 × 2			
8 × 1				14 × 2			
8 × 2	± 0.5	± 0.15		16 × 2	± 0.15	± 0.15	
9 × 2				18 × 2			
10 × 1	± 0.10	± 0.10		20 × 2			

应用 主要用作机床输油管 (代替铜管), 也可输送弱酸、弱碱及一般腐蚀性介质; 但不宜与酚类、强酸、强碱及低分子有机酸接触。可用管件连接, 也可用粘接剂粘接; 其弯曲可用弯卡弯成 90°, 也可用热空气或热油加热至 120℃ 弯成任意弧度。使用温度为 -60 ~ +80℃, 使用压力为 9.8 ~ 14.7 MPa

注: 1. 尼龙管材的牌号为 1010, 其性能参见表 14.11-3。

2. 标记示例: 外径 20 mm, 壁厚 2 mm, 长度 1 000 mm 的尼龙 1010 管材标记为
尼龙 1010 管 $\phi 20 \times 2 \times 1000$ JB/ZQ4196—1998

2 橡胶及橡胶制品

2.1 橡胶的种类、特性及应用 (表 14.11-26、表 14.11-27)

表 14.11-26 常用橡胶种类、性能及应用

物 理 力 学 性 能		橡 胶 种 类				
		天然橡胶	丁苯橡胶	丁腈橡胶	丁基橡胶	氟丁橡胶
生 胶 性 能	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.9 ~ 0.95	0.92 ~ 0.94	0.96 ~ 1.20	0.91 ~ 0.93	1.15 ~ 1.3
	门尼粘度/ $\text{ML}_1, 100^\circ\text{C}$	90 ~ 150	30 ~ 135	30 ~ 100	45 ~ 75	45 ~ 120
	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot \text{K})^{-1}$	1.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	2.7×10^{-5}	1.9×10^{-5}
	体积膨胀率/ K^{-1}	6.7×10^{-4}	7.6×10^{-4}	6.0×10^{-4}	5.7×10^{-4}	6.1×10^{-4}
	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$	2.18	1.90	—	1.94	2.18
未 补 强 硫 化 胶 性 能	扯断强度/MPa	17 ~ 29	2 ~ 3	2 ~ 4	14 ~ 21	15 ~ 20
	100℃ 扯断强度保持率/%	65	33	25 ~ 33	40	40
	扯断伸长率/%	650 ~ 900	500 ~ 800	300 ~ 800	650 ~ 850	800 ~ 1 000
	回弹性	优	良	良	次	优
	200% 定伸 24 h 后永久变形/%	3 ~ 5	5 ~ 10	6.5	2	18
	脆性温度/℃	-55 ~ -60	-45	-11 ~ 19	-48 ~ -51	-35 ~ 39

续表 14.11-26

物理力学性能		橡 胶 种 类					
		天然橡胶	丁苯橡胶	丁腈橡胶	丁基橡胶	氯丁橡胶	
补 强 硫 化 胶 性 能	扯断强度/MPa	25~35	15~20	15~30	17~21	25~27	
	扯断伸长率/%	650~900	500~800	300~800	650~800	800~1000	
	200%定伸 24 h 后永久变形	8~12	10~15	6	11	7.5	
	压缩永久变形/%	良	良	良	优	良	
	100%定伸强度/kPa	—	700~900	—	—	—	
	最高使用温度/℃	120	120	170	170	150	
	常用时温度上限/℃	70~80	80~100	120	150	120	
	脆性温度/℃	-50~-70	-30~-60	-10~-20	-30~-35	-35~-42	
	抗撕裂性	优	良	良	良	良~优	
	耐磨性	优	优	优	可~良	良~优	
	回弹性	优	良	良	次	良	
	耐屈挠性	优	良	良	优	良~优	
	耐冲击性	优	优	可	良	良	
	耐燃性	劣	劣	劣~可	劣	良~优	
	气密性	良	良	良~优	优	良~优	
	耐老化性	良	良	可~良	优	优	
	应 用 举 例	天然橡胶	制作轮胎、胶鞋、胶管、胶带、电线电缆的绝缘层和护套及其他通用橡胶制品				
		丁苯橡胶	性能与天然橡胶相近，制作轮胎、胶板、胶管、胶鞋及其他橡胶制品				
		丁腈橡胶	耐油性优秀，耐热性高于天然橡胶，制作耐油胶管、密封件、油槽衬里、耐热运输带				
丁基橡胶		气密性好，耐腐蚀性强，制作内胎、水胎、气球、电线电缆绝缘层，化工设备衬里、防震制品、耐热运输带、耐热耐老化的胶布制品					
氯丁橡胶		耐油、耐溶剂、耐老化性均好，气密性亦好，用于重型电缆护套、耐油耐蚀胶管、胶带、化工衬里、耐燃采矿橡胶运输带、电缆包皮、密封圈、垫、粘胶剂，用途很广泛					

表 14.11-27 橡胶在各种介质中的耐腐蚀性

橡 胶 品 种	丁苯橡胶	丁腈橡胶	丁基橡胶	氯丁橡胶	乙丙橡胶	聚丙烯酸酯橡胶	聚氨脂橡胶	硅橡胶	氟橡胶	聚硫橡胶
发烟硝酸	×	×	×	×	卅	卅	×	×	△	×
浓硝酸	×	×	×	×	卅	卅	×	×	△	×
浓硫酸	×	×	×	×	卅	卅	×	×	○	×
浓盐酸	×	×	△	△	卅	卅	卅	△	△	×
浓磷酸	○	×	○	△	卅	卅	卅	○	△	×
浓醋酸	△	×	○	×	卅	卅	卅	○	×	×
浓氢氧化钠	○	○	△	○	☆	卅	卅	○	△	卅
无水氨	△	△	○	△	☆	卅	卅	○	△	卅
稀硝酸	×	×	×	×	卅	卅	卅	△	○	×
稀硫酸	△	△	○	△	卅	卅	卅	△	△	×
稀盐酸	×	×	△	○	卅	卅	卅	△	△	△

续表 14.11-27

橡胶品种	丁苯橡胶	丁腈橡胶	丁基橡胶	氯丁橡胶	乙丙橡胶	聚丙烯酸酯橡胶	聚氨酯橡胶	硅橡胶	氟橡胶	聚硫橡胶
稀醋酸	△	∨	○	>	≡	≡	≡	△	△	·
稀氢氧化钠	○	○	△	○	≡	≡	≡	○	△	·
氨水	△	△	○	△	≡	≡	≡	○	·	·
苯	·	∨	∨	∨	∨	·	·	·	○	○
汽油	∨	○	∨	○	∨	○	○	·	○	○
石油	∨	△	·	∨	≡	≡	≡	∨	○	○
四氯化碳	·	○	·	·	≡	≡	≡	·	○	·
二硫化碳	·	○	·	·	≡	≡	≡	·	○	·
乙醇	○	○	○	○	○	·	·	○	○	∨
丙酮	△	∨	△	∨	≡	≡	≡	∨	·	△
甲酚	○	·	△	△	≡	≡	≡	△	△	≡
乙醛	·	∨	○	∨	≡	≡	≡	·	·	≡
乙苯	·	∨	∨	∨	·	·	·	·	·	○
丙烯腈	·	∨	∨	△	≡	≡	≡	·	·	△
丁醇	☆	☆	☆	☆	☆	☆	∨	☆	☆	☆
丁二烯	·	≡	≡	≡	≡	≡	≡	·	·	·
苯乙烯	·	∨	∨	·	≡	≡	≡	·	·	△
醋酸乙酯	·	·	○	∨	○	·	△	∨	·	△
醚	·	·	△	·	△	·	·	·	·	·

注：○—可用，寿命较长；△—可用，寿命一般；∨—可作代用材料，寿命较短；>—不可用；☆—在任何浓度均可用；≡—不推荐。

2.2 橡胶管

2.2.1 输水通用橡胶软管（表 14.11-28）

表 14.11-28 输水通用橡胶软管规格（摘自 HG2184—1991）

型号	工作压力/ MPa ≤	内径 /mm	用途	内径及允许偏差/mm		胶层厚度/mm	
				公称尺寸	允许偏差	内胶层	外胶层
1 型 (低压型) a 级 b 级 c 级	0.3 0.5 0.7	≤100	适用于输送 60℃ 以下的生 活用水、工业 用水的橡胶软 管，不适用于 输送饮用水	10	±0.75	1.8	1.0
				12.5			
				16			
2 型 (中压型) d	1.0	≈50		20	±1.25	2.0	1.0
				25			
				31.5			
3 型 (高压型) e	≤2.5	≤25	40	±1.50	2.3	1.2	
			50				
			63				
			80	±2.00	2.5	1.5	
			100				

注：标记示例：胶管内径 40 mm，长度 1 000 mm，低压型，工作压力 ≤0.5 MPa 的输水胶管，标记为 胶管 1-b-40 × 1 000 HG2184—1991

2.2.2 压缩空气用橡胶软管 (表 14.11-29~表 14.11-32)

表 14.11-29 压缩空气用橡胶软管型号、级别及应用 (摘自 GB/T 1186—1992)

型 号	1 型			2 型			3 型	
	a	b	c	c	d	e	c	e
最大工作压力/MPa	0.6	0.8	1.0	1.0	1.6	2.5	1.0	2.5
工作温度/℃	-20 ~ +45							
用 途	适用于输送工业压缩空气			适用于输送采矿和建筑工程压缩空气			适用于输送采矿 (不包括煤矿) 和建筑工程用压缩空气并具有良好的耐油性	

表 14.11-30 压缩空气用橡胶软管尺寸规格 (摘自 GB/T 1186—1992) (mm)

1 型		2 型、3 型		
公称内径	公差	公称内径	公差	外胶层最低厚度
5	±0.5	12.5	±0.75	1.5
6.3	±0.75	16		
8		20		
12.5		25		
16		31.5	±1.25	
20	40			
25	±1.25	50	±1.5	2.0
31.5		63		
40	±1.5	80	±2	
50		100		

注: 1. 在特殊要求其他尺寸时, 由供需双方协商解决。对表中范围的非表中所规定的产品尺寸应从 GB/T 321—1980 中 R20 系列选取, 公差按下一相邻的较大尺寸公差规定; 对大于或小于表中范围的产品尺寸应从 GB/T 321—1980 中 R10 系列选取, 公差应符合 GB/T 9575—1988 规定。

2. 适用于 2 型 c 级、2 型 d 级、3 型 c 级软管。

表 14.11-31 压缩空气用橡胶软管耐压性能 (摘自 GB/T 1186—1992)

软 管 型 号	1 型 a、b、c 级	2 型 c 级 3 型 c 级	2 型 d 级	2 型 e 级 3 型 e 级
	设计工作压力/MPa	0.6、0.8、1.0	1.0	1.6	2.5
试验压力/MPa	1.2、1.6、2.0	2.5	4.0	6.3
最小爆破压力/MPa	2.4、3.2、4.0	5.0	8.0	12.5
试验压力下	直径变化率/%	—	±10	±10
	长度变化率/%	—	±8	±8

表 14.11-32 压缩空气用橡胶软管性能指标 (摘自 GB/T 1186—1992)

性能	形号	指 标		性能	指 标	
		内胶层	外胶层		内胶层	外胶层
抗拉强度/MPa \geq	1型 2型,3型	5.0 7.0	6.0 10.0	热空气老化1型 70℃ × 72 h 2型,3型 70℃ × 168 h 抗拉强度变化率/% 扯断伸长率变化率/%	± 25 -30 ~ +10	± 25 -30 ~ 10
扯断伸长率/% \geq	1型 2型,3型	200 250	250 300	耐液体性能(70 ± 1)℃ (72.5 $\frac{g}{g}$) b 体积变化率 ΔV /%	0 ~ 15 30	— 75
各层间粘附强度/ kN/m \geq	1型 2型,3型	1.5 2.0		2型(1号标准油) 3型(3号标准油)	(浸油后不得出现龟裂)	

注: 标记示例 公称内径 25 mm, 长度 1 000 mm, 1 型, b 级精度的空气压缩机用橡胶软管, 标记为
空气胶管 25 × 1 000-1-b GB/T 1186—1992

2.2.3 氧气橡胶软管 (表 14.11-33)

表 14.11-33 氧气橡胶软管尺寸规格 (摘自 GB/T 2550—1992) (mm)

公称尺寸及允许偏差			胶层厚度 \geq	
公称内径	内径允许偏差	长度允许偏差	内胶层	外胶层
6.3	± 0.55	软管全长的 1%	1.5	1.2
8.0	± 0.60			
10.0	± 0.60			
12.5	± 0.65			

- 注: 1. 产品适用于 -20 ~ 45℃ 环境下焊接和切割输送氧气。
2. 软管耐压性能: 工作压力 2 MPa, 试验压力 4 MPa, 最小爆破压力 6 MPa。
3. 软管长度由供需双方协定。

2.2.4 乙炔橡胶软管 (表 14.11-34)

表 14.11-34 乙炔橡胶软管规格尺寸及公差 (摘自 GB/T 2551—1992) (mm)

标称尺寸及允差			胶层厚度 \geq	
公称内径	内径允差	长度允差	内胶层	外胶层
6.3	± 0.55	软管全长的 1%	1.5	1.2
8.0	± 0.60			
10.0	± 0.60			

- 注: 1. 产品适于 -20 ~ 45℃ 环境中焊接和切割输送乙炔。
2. 产品耐压性能: 工作压力 0.3 MPa, 试验压力 0.6 MPa, 最小爆破压力 0.9 MPa。
3. 软管长度由供需双方协定。

2.2.5 织物增强液压橡胶软管 (表 14.11-35~表 14.11-37)

表 14.11-35 织物增强液压橡胶管规格 (摘自 GB/T 15329—1994) (mm)

公称内径	内径		软管外径								软管弯曲半径				管壁厚度公差
	各型		1 型		2 型		3 型		4 型		1 型	2 型	3 型	4 型	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	≤				
5	4.5	5.4	10.3	11.9	11.0	12.6	11.9	13.5	12.0	13.6	50	35	80	40	0.8
6.3	6.1	6.9	11.9	13.5	12.6	14.2	13.5	15.1	13.6	15.2	65	40	80	45	
8	7.7	8.5	13.5	15.1	14.1	15.7	16.7	18.3	16.2	17.8	80	50	100	55	
10	9.3	10.1	15.1	16.7	15.7	17.3	18.3	19.8	17.7	19.3	80	60	100	70	1.0
12.5	12.3	13.5	19.0	20.6	18.7	20.7	23.0	24.6	20.7	22.7	100	70	125	85	
16	15.4	16.7	22.2	23.8	22.9	24.9	26.2	27.8	24.9	26.9	125	90	140	105	
19	18.6	19.8	—	—	26.0	28.0	31.0	32.5	28.0	30.0	—	110	150	130	1.3
25	25.0	26.4	—	—	32.9	35.9	36.9	39.3	34.4	37.4	—	150	205	150	
31.5	31.3	33.0	—	—	—	—	42.9	46.0	37.4	41.0	—	—	255	190	
38	37.1	39.1	—	—	—	—	—	—	47.6	51.6	—	—	—	240	1.3
51	49.8	51.8	—	—	—	—	—	—	60.3	64.3	—	—	—	300	
60	58.8	61.2	—	—	—	—	—	—	70.0	74.0	—	—	—	400	
80	78.8	81.2	—	—	—	—	—	—	91.5	96.5	—	—	—	500	
100	98.6	101.4	—	—	—	—	—	—	113.5	118.5	—	—	—	600	

注: 1. 产品适用于普通液压流体, 如矿物油、溶性油、油水乳浊液、乙二醇水溶液和水, 在 $-40 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内工作; 但在工作温度高于 93°C 时会降低软管的使用寿命。软管不适用于蓖麻油和酯基流体。

2. 软管结构: 由耐油、耐水的合成橡胶内胶层, 一层或多层纤维线增强层和耐油耐天候的外胶层构成。其中 1 型和 2 型软管采用一层纤维线编织层, 3 型采用两层纤维编织层, 4 型采用一层或两层纤维线编织层。

3. 软管长度偏差 $\pm 1\%$ 或者 $\pm 3\text{ mm}$, 取其最大值。一般供应长度: 13 mm 以上的软管不得少于一批总长的 65% ; $7.5 \sim 13\text{ mm}$ 不得多于总长的 35% ; $1 \sim 7.5\text{ m}$ (不含 7.5 m) 不得多于总长的 10% 。不允许有小于 1 m 长度的软管。

4. 标记示例: 织物液压软管, 1 型, 内径 16 mm , 标记为
织物液压软管 1—16 GB/T 15329—1994

表 14.11-36 织物液压软管工作压力 (摘自 GB/T 15329—1994)

标称内径/mm	工作压力/MPa				标称内径/mm	工作压力/MPa			
	1 型	2 型	3 型	4 型		1 型	2 型	3 型	4 型
5	3.4	8.0	10.3	16.0	25	—	4.0	3.9	5.5
6.3	2.8	7.5	8.6	14.5	31.5	—	—	2.6	4.5
8	2.8	6.8	8.3	13.0	38	—	—	—	4.0
10	2.8	6.3	7.8	11.0	51	—	—	—	3.3
12.5	2.8	5.8	6.9	9.3	60	—	—	—	2.5
16	2.4	5.0	6.0	8.0	80	—	—	—	1.8
19	—	4.5	5.2	7.0	100	—	—	—	1.0

注: 1. 软管试验压力与工作压力比为 $2:1$; 最小爆破压力与工作压力比为 $4:1$ 。

2. 软管在工作压力下的长度变化不得超过 $-4\% \sim +2\%$ 。

3. 软管脉冲试验条件: 对于 2、3、4 型, 内径 $\leq 25\text{ mm}$, 试验压力与设计工作压力比为 1.33 , 试验温度 $93 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 脉冲次数 $\geq 200\ 000$; 对于 3、4 型软管, 内径 $\geq 31.5\text{ mm}$, 试验压力与设计工作压力比为 1 , 温度为 $93 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 脉冲次数 $200\ 000$; 软管组合件不得出现泄漏或其他异常现象。1 型不进行此项试验。

表 14.11-37 织物液压软管性能 (GB/T 15329—1994)

项 目	指 标
低温屈挠性能 (-40 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 恢复至室温后进行耐压试验	不泄漏 不龟裂
耐油性, 3号标准油, (100 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, 72 $\frac{1}{2}$ h, 内、外胶层体积变化	无收缩, 膨胀不大于 100%
耐臭氧性能 (40 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, (50 ± 5)MPa, (50 ± 5) $\times 10^{-8}$ (体积分数), 72 $\frac{1}{2}$ h	放大 2 倍观察外胶, 不出现龟裂或劣化
粘合强度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 内胶层和增强层, 增强层和增强层, 增强层和外胶层	≥ 1.4
泄漏试验	不得泄漏和损坏

2.2.6 钢丝增强液压橡胶软管 (表 14.11-38、表 14.11-39)

表 14.11-38 钢丝增强液压橡胶软管尺寸规格 (摘自 GB/T 3683—1992) (mm)

标称内径	软管型号		1 型				1T 型				2 型、3 型				2T、3T 型			
	内径		增强层外径		成品软管外径		成品软管外径	外胶层厚度			增强层外径		成品软管外径		成品软管外径	外胶层厚度		
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最大值	最小值	最大值		
5	4.5	5.4	8.9	10.1	11.9	13.5	12.5	0.76	1.52	10.6	11.7	15.1	16.7	14.1	0.76	1.52		
6.3	6.1	6.9	10.6	11.7	15.1	16.7	14.1	0.76	1.52	12.1	13.3	16.7	18.3	15.7	0.76	1.52		
8	7.7	8.5	12.1	13.3	16.7	18.3	15.7	0.76	1.52	13.7	14.9	18.3	19.8	17.3	0.76	1.52		
10	9.3	10.1	14.5	15.7	19.1	20.6	18.1	0.76	1.52	16.1	17.3	20.6	22.2	19.7	0.76	1.52		
10.3	9.9	11.1	15.3	16.4	19.8	21.4	18.9	0.76	1.52	—	—	—	—	—	—	—		
12.5	12.3	13.5	17.5	19.1	22.2	23.8	21.5	0.76	1.52	19.0	20.6	23.8	25.4	23.1	0.76	1.52		
16	15.4	16.7	20.6	22.2	25.4	27.0	24.7	0.76	1.52	22.2	23.8	27.0	28.6	26.3	0.76	1.52		
19	18.6	19.8	24.6	26.2	29.4	31.0	28.6	0.76	1.52	26.2	27.8	31.0	32.5	30.2	0.76	1.52		
22	21.8	23.0	27.8	29.1	32.5	34.1	31.8	0.76	1.52	29.4	31.0	34.1	35.7	33.4	0.76	1.52		
25	25.0	26.4	32.5	34.1	36.9	39.3	36.6	0.76	1.52	34.1	35.7	38.5	40.9	38.9	1.07	2.16		
31.5	31.3	33.0	39.3	41.7	44.5	47.6	44.8	1.02	2.03	43.3	45.6	49.2	52.4	49.6	1.27	2.54		
38	37.7	39.3	45.6	48.0	50.8	54.0	52.0	1.27	1.54	49.6	52.0	55.6	58.7	56.0	1.27	2.54		
51	50.4	52.0	57.8	61.9	65.1	68.3	65.9	1.27	1.54	62.3	64.7	68.3	71.4	68.6	1.27	2.54		

注: 1. 表中的尺寸与 GB/T 9575 中规定的公称内径及允许范围不同, 但符合美国汽车工程师协会标准 (SAE) 所规定的尺寸, 后者现广泛用于世界各国。

2. 产品适用于普通液体 (如矿物油、可溶性油、油水乳浊液、乙二醇水溶液及水等), 工作温度范围为 $-40 \sim 100^{\circ}\text{C}$; 但不适于蓖麻油基和脂基液体。

3. 型号结构: 1 型: 一层钢丝编织; 2 型: 二层钢丝编织; 3 型: 二层钢丝缠绕加一层钢丝编织的液压橡胶软管。1T 型、2T 型和 3T 型软管增强层结构分别与 1 型、2 型和 3 型相同, 但在组装管接头时不切除或部分切除外胶层。所有型号的软管均由耐液体的合成橡胶内胶层、一层或多层钢丝增强层及耐候性能优良的合成橡胶外胶层组成, 外胶层外也可增添织物辅助层加固。

4. 标记示例: 内径 16 mm, 长度 1 000 mm, 一层钢丝编织液压胶管, 标记为

胶管 1-16 \times 1000 GB/T 3683—1992

表 14.11-39 钢丝增强液压橡胶软管技术性能 (摘自 GB/T 3683—1992)

内径 mm	设计工作压力/MPa		在 \leq 工作压力下的 最小弯曲半径/mm \geq	其他技术要求
	1型、1T型	2型、3型、 2T型、3T型		
5	21.0	35.0	90	(1) 在设计工作压力下软管的长度变化不得超过 $\begin{pmatrix} +2 \\ -4 \end{pmatrix}\%$ (2) 在 $-40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 下, 应不泄漏; 恢复至室温后进行耐压试验应不产生龟裂 (3) 软管的内、外胶料试样, 浸入3号油中, 在 $100 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 下经 (70 ± 2) h, 内、外胶层体积变化率应为 $0 \sim 100\%$ (4) 软管的内脉层与增强层、外胶层与增强层的粘附强度不小于 2.5 kN/m (5) 耐臭氧性能 [$(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(50 \pm 5) \times 10^{-4}$, (70 ± 2) h] 放大2倍不出现龟裂 (6) 软管不允许有气泡、裂口、海绵、脱层、裸露钢丝等异常现象
6.3	20.0	35.0	100	
8	17.5	32.0	115	
10	16.0	28.0	130	
10.3	16.0	—	140	
12.5	14.0	25.0	180	
16	10.5	20.0	205	
19	9.0	16.0	240	
22	8.0	14.0	280	
25	7.0	14.0	300	
31.5	4.4	11.0	420	
38	3.5	9.0	500	
51	2.6	8.0	630	

注: 各型号软管的试验压力与设计工作压力比为2; 最小爆破压力与设计工作压力比为4。

2.3 工业用橡胶板 (表 14.11-40)

表 14.11-40 工业用橡胶板规格及性能 (摘自 GB/T 5574—1994)

厚度/mm		宽度/mm		厚度/mm		宽度/mm	
公称尺寸	偏差	公称尺寸	偏差	公称尺寸	偏差	公称尺寸	偏差
0.5	± 0.1	500~2 000	± 20	8.0	± 0.8	500~2 000	± 20
1.0	± 0.2			10	± 1.0		
1.5, 2.0, 2.5	± 0.3			12	± 1.2		
3.0	± 0.4			14	± 1.4		
4.0, 5.0	± 0.5			16, 18, 20, 22,	± 1.5		
6.0	± 0.6			25, 30, 40, 50			

技术
条件

(1) 耐油性分为

A类: 不耐油; B类: 中等耐油; (体积变化率 ΔV , $+40\% \sim +90\%$); C类: 耐油 (体积变化率 ΔV , $-5\% \sim +40\%$)。试验条件: 100°C , 3号标准油中浸泡72h后, 测体积变化率;

(2) 拉伸性能 抗拉强度(MPa)分为

1型 ≥ 3 ; 2型 ≥ 4 ; 3型 ≥ 5 ; 4型 ≥ 7 ; 5型 ≥ 10 ; 6型 ≥ 14 ; 7型 ≥ 17

(3) 扯断伸长率(%)分为

1级 ≥ 100 , 2级 ≥ 150 , 3级 ≥ 200 , 4级 ≥ 250 , 5级 ≥ 300 , 6级 ≥ 350 , 7级 ≥ 400 , 8级 ≥ 500 , 9级 ≥ 600

(4) 公称硬度按国际橡胶硬度(或邵尔A硬度)分为

H3:30, H4:40, H5:50, H6:60, H7:70, H8:80 公称硬度偏差为 ± 5

(5) 耐热空气老化性能(Ar)分为

Ar1: $70^{\circ}\text{C} \times 72 \text{ h}$, $K_1 \leq 25\%$, $K_2 \leq 35\%$ Ar2: $100^{\circ}\text{C} \times 72 \text{ h}$, $K_1 \leq 20\%$, $K_2 \leq 50\%$

注: 1. 按用户要求, 可提供下列附加性能, 其具体指标由双方协定: ①耐热性能 Hr, 规定试验温度 Hr1— 100°C ; Hr2— 125°C ; Hr3— 150°C ; 试验周期为168h。②耐低温性能 Tb, 规定脆性试验温度为: Tb1— -20°C ; Tb2— -40°C 。③压缩永久变形 C_v, 试验条件为 $70^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$ 。④耐臭氧老化性能 Or, 试验条件: 臭氧浓度 50 MPa (50×10^{-8}), $40^{\circ}\text{C} \times 96 \text{ h}$ 。

2. 板长度由供需双方协定。

3. 标记示例: 抗拉强度5MPa, 扯断伸长率400%, 标称硬度60 IRHD, 耐热 100°C 的不耐油橡胶板, 标记为工业胶板 A3-7H6Hr1 GB/T 5574—1994。

3 石棉制品

3.1 石棉性能及应用 (表 14.11-41)

表 14.11-41 石棉的性能及应用

性能		温石棉	青石棉	性能		温石棉	青石棉
密度/(g·cm ⁻³)		2.2~2.4	3.2~3.3	使用温度/℃		400	200
硬度(莫氏)		2.5~4.0	4.0	最高使用温度/℃		600~800	—
纤维外形		白色有光泽	深青色光泽小	800℃灼烧减量(%)		13~15	3~4
柔顺性		柔软	柔软	吸湿率(%)		1~3	1~3
强韧性		强	稍强	耐酸性		弱	强
比热容		0.2	0.2	耐碱性		强	弱
热导率/W·(m·K) ⁻¹		0.251 2	—	抗拉强度/MPa		3 000	3 300
熔点/℃		1 200~1 600	900~1 150	作为绝缘材料		适宜	较差
特性及应用	温石棉	质软,有弹性,熔化温度高,耐热性好,耐酸性较差。主要用于纺织、保温制品和复合材料、隔音材料					
	青石棉	质硬,强度高,耐酸性好,能防辐射,溶化温度低。主要用于水泥石棉管道、防辐射及过滤材料等					

3.2 石棉板 (表 14.11-42、表 14.11-43)

表 14.11-42 石棉板尺寸规格

厚度/mm	1.6 (1/16")	3.2 (1/8")	4.8 (3/16")	6.4 (1/4")	8.0 (5/16")	9.6 (3/8")	11.2 (7/16")	12.7 (1/2")	14.3 (9/16")	15.9 (5/8")
宽度/mm	1 000									
长度/mm	1 000 及 2 000									
1 m ² 质量/kg	1.85	3.70	5.55	7.40	9.25	11.10	12.95	14.80	16.65	18.50

注:石棉板一般规格为 1 000 mm×1 000 mm,厚度 1.0~20 mm。

表 14.11-43 石棉板性能

指标	形状	裂口凹凸	皱纹	外来杂质 (杂质总面积/m ²)	抗拉强度/ MPa 纵向 ^①
一等品	正方形直角,四边整齐	不允许有	厚度 6 mm 以上的允许有,但面积不应超过总面积的 10%	≤26 m ²	≥13.4
二等品	允许四边有不大于 1 cm 的偏差,允许不齐整	允许有不大于 5 cm 的裂口,厚度在 6 mm 以上,容许有凹凸二处,但总面积不超过 15 cm ²	厚度 6 mm 以上的允许有,但面积不应超过总面积的 20%	≤4 cm ²	≥11.6

注:含水率≤3%,灼热减量 18%,1 mm 厚的石棉板 1 m² 质量为 1.3 kg。

① 厚度 6 mm 以上的,不试验纵向抗拉强度。

3.3 石棉橡胶板 (表 14.11-44、表 14.11-45)

表 14.11-44 石棉橡胶板尺寸规格 (摘自 GB/T 3985—1995) (mm)

厚度	允许偏差	同一张板上, 相距 500 的任意两点厚度允许偏差 \leq	长度	宽度	长、宽度允许偏差 (%)
0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 2.5, 3.0 3.0 以上	± 0.10 ± 0.15 ± 0.20 ± 0.25	0.10 0.15 0.20 0.22	500, 620, 1 000 1 260, 1 350, 1 500, 4 000	500, 620, 1 200, 1 260, 1 500	± 5

表 14.11-45 石棉橡胶板牌号及性能 (摘自 GB/T 3985—1995)

指标名称	牌 号		
	XB 450	XB 350	XB 200
抗拉强度/MPa \geq	19.0	12.0	6.0
压缩率/%	12 \pm 5	12 \pm 5	12 \pm 5
回弹率/% \geq	45	40	35
老化系数 \geq	0.9	0.9	0.9
烧失量/% \leq	28	30	30
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.6~2.0	1.6~2.0	1.6~2.0
柔软性	无裂纹	无裂纹	无裂纹
应力松弛率/% \leq	50	50	50
蒸汽密封性	温度为 440~450℃ 压力为 11~12 MPa 保持 30 min, 无穿孔	温度为 340~350℃ 压力为 7~8 MPa 保持 30 min, 无穿孔	温度为 200~220℃ 压力为 2~3 MPa 保持 30 min, 无穿孔
应用条件	温度为 450℃、压力为 6 MPa 以下的水、水蒸气等介质的设备、管道法兰连接处的密封衬垫材料	温度为 350℃、压力为 4 MPa 以下的水、水蒸气等介质的设备、管道法兰连接处所用的密封衬垫材料	温度为 200℃、压力为 1.5 MPa 以下的水、水蒸气介质的设备、管道法兰连接处所用的密封衬垫材料

注: 厚度大于 3.0 mm 者不做抗拉强度试验; 厚度 2.5 mm 以上者 (包括 2.5 mm) 不作柔软性试验。

3.4 耐酸石棉橡胶板 (表 14.11-46)

表 14.11-46 耐酸石棉橡胶板规格及性能 (摘自 JC555—1994)

尺寸规格/mm	厚度	厚度偏差	同一张上相距 500 mm 任意两点的厚度差	长度	宽度	长、宽度允许偏差/%
		1.0 1.5 2.0 2.5 3.0, 3.5	± 0.10 ± 0.15 ± 0.20 ± 0.25 ± 0.30	0.10 0.15 0.20 0.20 0.20	500 1 000 1 260 1 350 1 500	500 1 000 1 260 1 350 1 500	$\pm 5$
物理性能	指标名称			技术指标		
	横向抗拉强度/MPa, \geq			优等品	一等品	合格品
				14.0	11.0	8.0
	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			1.7~2.1		
	压缩率/%			12 \pm 5		
	回弹率/% \geq			40		
柔软性			无裂纹			

续表 14.11-46

	指标名称		技术指标		
			优等品	一等品	合格品
耐酸性	硫酸 $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 18 \text{ mol/L}$, 室温, 48 h	外观	不起泡、无裂纹		
		增重率/ $\%$ \leq	30	40	50
	盐酸 $c(\text{HCl}) = 12 \text{ mol/L}$, 室温, 48 h	外观	不起泡、无裂纹		
		增重率/ $\%$ \leq	25	35	45
	硝酸 $c(\text{HNO}_3) = 1.67 \text{ mol/L}$, 室温, 48 h	外观	不起泡、无裂纹		
		增重率/ $\%$ \leq	20	30	40

- 注: 1. 厚度大于 3.0 mm 者不做抗拉强度试验。
 2. 厚度大于等于 2.5 mm 者不做柔软性试验。
 3. 其他性能要求可由供需双方商定。
 4. 耐酸石棉橡胶板产品代号为“NS”, 适用于温度 200℃, 压力 2.5 MPa 以下的酸类介质的设备及管道密封衬垫用。
 5. 标记示例: 耐酸石棉橡胶板长度 1 000 mm, 宽度 1 000 mm, 厚度 2.5 mm, 优等品, 标记为 NS-1000×1000×2.5-优等品 JC555—1994

3.5 耐油石棉橡胶板 (表 14.11-47)

表 14.11-47 耐油石棉橡胶板规格、性能及应用 (摘自 GB/T 539—1995)

厚度及 偏差/ mm	厚度	厚度允许偏差	同一张上相距 500 的任意两点厚度允许偏差 \leq				
	0.4; 0.5; 0.6; 0.8; 0.9; 1.2	± 0.10	0.10				
	1.5; 2.0	± 0.15	0.15				
	2.5; 3.0	± 0.20	0.20				
长度、宽 度及偏差/ mm	长 度		宽 度		长、宽允许偏差/ $\%$		
	550, 620, 1 000, 1 260, 1 350, 1 500		550, 620, 1 200, 1 260, 1 500		± 5		
性能	项 目			NY408	NY250	NY150	HNY300
	耐 油 性	温度 $150 \pm 2^\circ\text{C}$, 在 20 号航空润滑油中浸泡 5 h 后取出, 在 $15 \sim 30^\circ\text{C}$ 下放置 30 min	横向拉伸强度/MPa \geq	26.0	9.0	8.0	10.8
			吸油率/ $\%$ \leq	9	23	23	23
			浸油增厚率/ $\%$ \leq	15	20	—	15
			浸油外观变化	—			不允许起泡
	耐 油 性	温度 $15 \sim 30^\circ\text{C}$, 在 75 号航空汽油或 3 号喷气燃料中浸泡 5 h 后取出, 放置 5 min	横向拉伸强度/MPa \geq	14.7	7.0	6.0	7.9
			吸油率/ $\%$ \leq	15	22	22	22
			浸油增厚率/ $\%$ \leq	20	25	—	25
			柔软性	—			无裂纹
	柔软性			无裂纹			
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			1.6—2.0				

续表 14.11-47

项 目		NY408	NY250	NY150	HNY300	
性能	压缩率/%	12 ± 5				
	回弹率/%	≥ 50	45	35	50	
	油密封性	温度 15~30℃, 介质为 75 号航空汽油或 3 号喷气燃料	压力为 12 MPa	压力为 10 MPa	压力为 8 MPa	压力为 15 MPa
			完全密封			
	腐蚀性	对硬铝板, 低碳素钢板			—	无腐蚀
	横向拉伸强度/MPa	≥	—	11.0	9.0	12.7
	压力松弛率 (%)	≤	45		—	45
应用说明	一般工业用耐油石棉橡胶板代号为 NY。 航空用耐油石棉橡胶板代号为 HNY。 标记代号 NY150 表示一般工业用石棉橡胶板通用 最高温度为 150℃	最高温度 400℃, 最大压力 4 MPa, 作热油、石油裂化、 煤蒸馏设备及管道法兰连接 处密封	最高温度 250℃, 最大压力 2.5 MPa, 作炼油设备及管 道法兰连接处的密封	最高温度 150℃, 最大压力 1.5 MPa, 作炼油设备、管道及汽 车、拖拉机、柴油机的输油管道接 合处之密封	最高温度 300℃, 作航空燃 油、石油基润滑油及 冷气系统密封	

注: 厚度大于 3.0 mm 板材不做拉伸试验; 厚度大于等于 2.5 mm 板材不做柔性试验。

3.6 工业机械用石棉摩擦片 (表 14.11-48、表 14.11-49)

表 14.11-48 工业机械用石棉摩擦片分类、用途及规格 (摘自 GB/T 11834—1989)

分类、代号及用途	分 类				代号					
	类别	特性	材 料	用 途						
1 类	软质	普通编织制品	普通编织制品	制动片 制动带	ZP1 ZD1					
					2 类	半硬质	软质模压制品	软质模压制品	制动片 制动带	ZP2 ZD2
										3 类	硬质	特殊加工编织制品	1 号	制动片 制动带	ZP3-1 ZD3-1
模压制品 半模压制品 半金属模压制品	2 号	制动片	ZP3-2							
			3 号	离合器片	LP3-3					
制动片 (带) 尺寸 及极限偏 差/mm	基本尺寸		极 限 偏 差							
	宽度	≤30	±1.0	1 类, 2 类, 3 类 1 号		±0.5				
		>30~60	±1.0			±0.6				
		>60~100	±1.5			±0.8				
		>100~200	±2.0			±1.0				
		>200	±2.5			±1.2				
	厚度	≤6.3	±0.3			±0.2				
>6.3~10.0		±0.5			±0.25					
>10.0		±0.6			±0.3					

续表 14.11-48

离合器片 尺寸及极 限偏差/ mm	外径基本尺寸	外径极限偏差	内径极限偏差	厚度基本尺寸	厚度极限偏差	每片厚薄差
	≤100	0 -0.8	+0.8 0	≤6.3	±0.15	≤0.15
	>100~250	0 -1.0	+1.0 0	>6.3~10.0	±0.20	≤0.20
	>250~400	0 -1.5	+1.5 0			
>400	0 -2.0	+2.0 0	>10.0	±0.25	≤0.25	

注：1. 摩擦片基本尺寸由需方确定；制动带和制动片基本尺寸用宽度和厚度表示；离合器片基本尺寸用外径、内径和厚度表示；异形摩擦片基本尺寸由供需双方协定。

2. 本产品适于工业机械用石棉制动器衬片（带）和干式石棉离合器面片，也适用于农业机械用干式石棉摩擦片。

3. 标记示例：宽100 mm，厚4 mm半硬质制动带，标记为

ZD2-100×4 GB/T 11834-1989

表 14.11-49 工业机械用石棉摩擦片性能（摘自 GB/T 11834-1989）

	分 类	试验机圆盘摩擦面温度/℃			
		100	150	200	250
摩擦 系数 μ	1类	0.30~0.60	0.25~0.60	—	—
	2类	0.30~0.60	0.25~0.60	0.20~0.60	—
	3类1号	0.30~0.60	0.25~0.60	0.20~0.60	—
	3类2号	0.30~0.60	0.30~0.60	0.20~0.60	0.15~0.60
	3类3号	0.25~0.60	0.20~0.60	0.15~0.60	—
指定 摩擦系 数的允 许偏差 $\Delta\mu$	分 类	试验机圆盘摩擦面温度/℃			
		100	150	200	250
	1类	±0.10	—	—	—
	2类	±0.10	±0.12	—	—
	3类1号	±0.08	±0.10	—	—
	3类2号	±0.08	±0.10	±0.12	—
3类3号	±0.08	±0.10	—	—	
磨损率 V / (10^{-7} cm ³ · N ⁻¹ ·m ⁻¹)	分 类	试验机圆盘摩擦面温度/℃			
		100	150	200	250
	1类	≤1.00	≤2.00	—	—
	2类	≤0.50	≤0.75	≤1.00	—
	3类1号	≤0.50	≤0.75	≤1.00	—
	3类2号	≤0.50	≤0.75	≤1.00	≤2.00
3类3号	≤0.50	≤0.75	≤1.00	—	
弯曲性能	3类3号制品：抗弯强度 $\sigma_b \geq 24.5$ MPa，最大应变 $\epsilon \geq 6.0 \times 10^{-3}$				

注：1. 1类制品应按 GB/T 11834-1989 柔软性能实验方法和指标进行柔软性试验。

2. 用户对厚度不大于6.3 mm的3类1号制品有柔软性能要求，亦可按注1的要求执行。

4 云母制品

4.1 云母制品分类、特点及应用 (表 14.11-50)

表 14.11-50 云母制品分类、特点及应用

类 型	组 成	特 点	应用范围	
I 云母板	塑型云母板	系用胶粘漆粘贴云母片经烘焙压制而成	常温下是固体硬质材料, 加热到一定温度后具有可塑性, 能塑制成所需形状的制品, 在烘焙成型、冷却后不再变形	适于塑制绝缘管、环及其他形状的绝缘零件。含胶量少的塑型云母板, 适于温升较高或转速较高的电机作绝缘零件
	柔软云母板	采用胶粘漆粘贴云母片或粉云母纸, 单面或双面补强经烘焙或烘焙压制而成	常态时具有高度的柔软性, 并可弯曲而不破裂。保持柔软性的持续时间是: 出厂 90 d 以上	适于作电机槽绝缘及匝间绝缘
	衬垫云母板	系用胶粘漆粘贴云母片, 经烘焙压制而成	为硬质的板状绝缘材料, 含胶量多, 密度较小, 厚度公差大	适于作电机电器中垫圈、垫板及其他绝缘衬垫
	换向器云母板 (又称整流子云母板)	系用胶粘漆粘贴云母片或粉云母纸, 经烘焙压制、加工而成	具有较高的机械强度。和其它云母板相比, 所含胶粘漆最少, 为密度高、厚度均匀、质地极为密实的硬质云母板	适于制作直流电机换向器铜片间的绝缘层
II 云母箔 (为厚度小于 0.3 mm 的板状材料)	系用胶粘漆将薄云母片或粉云母纸, 粘合在单面补强材料上, 经烘焙、或烘焙压制而成	在一定的温度下具有可塑性能塑制成型和便于加工, 冷却后能保持加工成型后的固定形状	适于作电机、电器卷烘式绝缘零件, 如筒(管)、槽衬和磁极绝缘	
III 云母带	系用胶粘漆将薄云母片或粉云母纸, 粘合在单面或双面补强材料上, 经烘焙 (或不经烘焙) 而成的带状云母绝缘物	常态时具有柔软性, 并有一定的抗拉强度, 在以手工或机械方法包绕到线圈上时, 不会断裂	适于作电机线圈绝缘	
IV 云母玻璃	系用云母粉与低熔点硼铅玻璃粉混合后, 经热熔模压成型的硬质板状材料	耐热性和耐电弧性好, 但加工较困难, 一般采用高速钢或砂轮刀具进行加工	主要用作高压电器耐弧、耐高温绝缘材料	

4.2 云母板 (表 14.11-51~表 14.11-53)

表 14.11-51 塑性云母板的型号及应用 (摘自 JB/T 7099—1993)

产品型号	粘 胶 剂	使 用 范 围
5230	醇酸胶粘漆	适用于工作温度 130℃ 的各种电机电器用绝缘管、环及其他零件
5231	紫胶胶粘漆	
5235	醇酸胶粘漆	
5236	紫胶胶粘漆	
5250	有机硅胶粘漆	适用于工作温度 180℃ 的各种电机电器用绝缘管、环及其他零件

表 14.11-52 塑性云母板尺寸规格 (摘自 JB/T 7099—1993) (mm)

型 号	公称厚度	偏 差		长度和宽度			型 号	公称厚度	偏 差		长度和宽度		
		中值与公称厚度的偏差	个别值与公称厚度的最大偏差	长度	宽度	偏差			中值与公称厚度的偏差	个别值与公称厚度的最大偏差	长度	宽度	偏差
全部型号 (5230, 5231, 5235, 5236, 5250)	0.15	±0.05	±0.10	800~1000	400~600	±5%	全部型号 (5230, 5231, 5235, 5236, 5250)	0.50	±0.07	±0.16	800~1000	400~600	±5%
	0.20							±0.08	±0.18				
	0.25	±0.09	±0.20										
	0.30	±0.11	±0.22										
	0.40	±0.14	±0.28										
	0.40	±0.06	±0.12					1.00	±0.18	±0.32			

注: 塑性云母板应边缘整齐、胶粘剂分布均匀, 不允许有外来杂质、分层和剥片云母间漏洞的现象。

表 14.11-53 塑性云母板的技术指标 (摘自 JB/T 7099—1993)

项 目	指 标		
	5230, 5231	5235, 5236	5250
胶粘剂含量/%	15~25	8~15	15~25
介电强度/MV·m ⁻¹			
0.15~0.25 mm	≥35		
0.30~0.50 mm	≥30		
0.60~1.20 mm	≥25		
可 塑 性	在(110±5)℃的条件下可塑制成管		在(130±5)℃的条件下可塑制成管

4.3 云母带 (表 14.11-54~表 14.11-56)

表 14.11-54 醇酸玻璃和有机硅玻璃云母带型号、组成及应用

产品型号	名 称	组 成 成 分			应用范围	标准编号
		基 材	胶 粘 剂	补 强 材 料		
5434	醇酸玻璃云母带	剥片云母	醇酸胶粘漆	双面无碱玻璃布和云母带用纸	工作温度 130℃ 的电机、电器绝缘	JB/T 6488.1—1992
5450 5450-1	有机硅玻璃云母带	剥片云母 云母纸	有机硅胶粘漆	双面无碱玻璃布	工作温度 180℃ 的电机、电器绝缘	JB/T 6488.2—1992

表 14.11-55 醇酸玻璃和有机硅玻璃云母带尺寸规格
(摘自 JB/T 6488.1—1992、JB/T 6488.2—1992)

型 号	公称厚度/ mm	偏 差/mm		宽度/mm	边缘弯曲度/ mm 不超过	每卷(或盘) 长度/m 不短于
		中值与公称 厚度的偏差	个别值与公称厚 度的最大偏差			
5434	0.10	±0.02	±0.04	15±1、20±1、 25±2、30±2、 35±2	2	5
	0.13	+0.03 -0.02	±0.06			
	0.16	+0.03 -0.02	±0.07			
5450	0.10	±0.02	±0.04	15±1、20±1、 25±2、30±2、 35±2	2	5
	0.13	+0.03 -0.02	±0.06			
	0.16	+0.03 -0.02	±0.07			
5450-1	0.14	±0.02	±0.03			
	0.17	+0.03 -0.02	±0.04			

注：1. 云母带不允许有外来杂质。

2. 云母带可自由地从盘上绕下。胶粘剂应分布均匀，不允许有粘连、分层、剥片云母脱落或云母纸断裂、玻璃布抽丝和管芯松动的现象。补强材料折皱不允许超过厚度个别值的允许偏差。

表 14.11-56 醇酸玻璃和有机硅玻璃云母带技术指标
(摘自 JB/T 6488.1—1992、JB/T 6488.2—1992)

型 号	云母含量 ^① / %	胶粘剂含量 ^② / %	挥发物含量 ^② / %	介电强度 ^① (MV·m ⁻¹)	抗拉强度 10 ⁻¹ N·mm ⁻¹	柔软性/mm
5434	≥45	15~30	≤4.0	≥16	≥80	供需双方商定
5450	≥40	15~30	≤2.0	≥16	≥80	供需双方商定
5450-1	≥37	20~40	≤2.0			

① 在介电强度试验中，所测击穿电压值在 0.6~0.9 kV 的不允许超过一个。

② 质量分数。

5 先进陶瓷

5.1 先进陶瓷分类

陶瓷分为传统陶瓷和先进陶瓷两类。传统陶瓷是采用天然矿物原料，由注浆和可塑成型，经高温（一般低于 1350℃）烧制而成。广义而言，各种陶瓷器具、玻璃、水泥及耐火材料均属于传统陶瓷；先进陶瓷采用人工精制成原料，选用科学的成型方法和烧结工艺，获得具有要求特性

的无机非金属材料。这类材料比传统陶瓷的性能更为优良，其化学成分和显微结构与传统陶瓷均不相同，因此，先进陶瓷具有优良的力学性能、热性能、化学性能以及光、电、磁性能；先进陶瓷的某些品种还具有很重要的生物体特性。先进陶瓷的名称尚未统一，国外称之为精细陶瓷、精密陶瓷、高级陶瓷、近代陶瓷、技术陶瓷等；国内称之为新型陶瓷、特种陶瓷、工业陶瓷、高性能陶瓷等。

先进陶瓷一般分为结构陶瓷和功能陶瓷两大

类。结构陶瓷分为氧化物陶瓷和非氧化物陶瓷；氧化物陶瓷包括氧化铝陶瓷、氧化锆陶瓷、氧化铍陶瓷、氧化镁陶瓷、氧化锡陶瓷、二氧化硅陶瓷、莫来石陶瓷等；非氧化物陶瓷包括氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷、硅化物陶瓷、氟化物陶瓷等。

功能陶瓷分为：电功能陶瓷（包括绝缘陶瓷、介电陶瓷、铁电陶瓷、压电陶瓷、半导体陶瓷、快离子导体陶瓷）、磁功能陶瓷（包括软磁铁氧体、硬磁铁氧体、记忆用铁氧体）、光功能

陶瓷（包括透明氧化铝陶瓷、透明氧化镁陶瓷、透明氧化铍陶瓷、PLZT透明铁电陶瓷）、生物及化学功能陶瓷（包括湿敏陶瓷、气敏陶瓷、载体用陶瓷、催化用陶瓷、生物陶瓷）等四种。

5.2 结构陶瓷

5.2.1 常用结构陶瓷品种、特性及应用（表 14.11-57）

表 14.11-57 常用结构陶瓷品种、特性及应用

品种	特 性	应 用
氧化铝陶瓷	具有耐高温、高强度、耐磨、耐腐蚀性能、良好的抗氧化性、电绝缘性。真空气密性及透微波特性。一般按 Al_2O_3 含量的增加，其耐高温、力学性能、耐蚀性能均相应提高。氧化铝瓷硬度很高（低于金刚石、碳化硼、立方氮化硼、碳化硅、居第五位）。耐酸碱和其他腐蚀介质，高温下抗氧化性好。脆性大，不能承受冲击负荷，抗热震性差。微晶刚玉瓷和氧化铝金属瓷是新型氧化铝瓷，其性能比氧化铝瓷有明显提高。在下列情况下适用的最高温度： 空气—1 980℃，真空—1 800℃，还原气氛—1 925℃	制作高温器皿、电绝缘、电真空器件、磨料、高速切削工具，如熔融金属液坩埚、高温容器、测温热电偶的绝缘套管、内燃机火花塞、电子管外壳、电子管内的绝缘零件、微波功率输出窗口等。微晶刚玉瓷和氧化铝金属瓷可用作金属切削工具、耐磨性能高的零件，如金属拉丝模、石油化工用泵及农用泵的密封环、纺织机高速导纱等
氧化锆陶瓷	密度大，硬度较高，抗弯强度和断裂韧性在各种陶瓷中为最高，酸性，在氧化气氛中，加入 CaO 、 MgO 稳定剂，在 2 400℃ 是稳定的，是一种具有优良综合性能的结构陶瓷	用于制作耐磨、耐蚀零部件，如化工用泥浆泵密封件、叶片及泵体，矿业用轴承，拉管模和拉丝模模具，刀具、喷嘴、隔热件、火箭和喷气发动机的耐磨耐腐蚀件，原子反应堆的高温结构材料。在绝热内燃机中，相变增韧氧化锆瓷用于制作轴承、进排气阀座、活塞顶、汽缸内衬，气门导管、挺杆、凸轮、活塞环等。喷涂于高温合金涡轮叶片，可提高工作温度 50~200℃；完全稳定氧化锆用于制作绝热件如绝热纤维及毛毡等
氧化镁陶瓷	碱性、抗热冲击性差，质脆，在高温时易被还原，在氧化气氛中可使用温度应低于 2 300℃，对碱性金属熔渣有较好的抗侵蚀能力，在空气中，氧化镁瓷极易水化而生成 $Mg(OH)_2$ ，在潮湿空气中水化加剧。高温下具有良好的电绝缘性能	适用于高温电绝缘材料；利用抗碱性好的特性，用于熔炼贵金属、放射性金属铀、钍及其合金的坩埚，浇注铁及其合金的真空熔融用坩埚以及高温热电偶保护管、高温炉的炉衬等

续表 14.11-57

品种	特 性	应 用
氧化铍陶瓷	导热性良好、高温绝缘性好，高温蒸汽压和蒸发速度较低，在真空或惰性气体中长期使用温度可达1800℃，在氧化气氛中，1800℃时有明显的蒸发，当有水蒸汽存在时，1500℃就挥发很快。还有良好的防核性能及耐碱性高。但机械强度较低，高温时机械强度降低较慢，1000℃时为248.5 MPa	适用于作散热器、高温绝缘材料、冶炼稀有金属及高纯金属铍、钨、钼的坩埚、原子反应堆中的中子减速剂和防辐射材料
莫来石陶瓷	具有良好的抗蠕变性、低热导率和高温强度高，高纯莫来石瓷韧度差，不宜用于高温结构材料，但氧化铝增韧莫来石（ZTM），或引入SiC颗粒，晶须构成复相陶瓷，其强度和韧性明显提高，是一种近年来新发展的高温结构陶瓷	高纯莫来石正被开发用于夹具或辊道窑中辊棒材料以及高温（>1000℃）氧化气氛中长的喷嘴、炉管或热电偶保护管。ZTM具有高的强度和韧性、用作刀具材料、绝热发动机的零部件，电绝缘管、高温炉衬、高压开关、碳膜电阻的基体等
二氧化硅（石英）陶瓷	二氧化硅陶瓷包括沸石、水晶、二氧化硅玻璃、光通讯玻璃纤维等品种。二氧化硅玻璃具有优异的化学稳定性，热膨胀系数极小，热震性优良，透明性很好，紫外线和红外线的透过率高，电绝缘性好，使用温度较高。水晶的纯度高，化学稳定性好，几乎不溶于除氢氟酸以外的其他酸，压电性和光学性能优良	二氧化硅玻璃在许多工业部门中获得应用，熔融石英用于制作器具匣钵材料。水晶用于光学材料和装饰材料，制作振荡电路的振荡元件，在电视机、计算机、录像机中也广泛应用
氮化铝陶瓷（AlN）	氮化铝是难烧结的物质，具有高导热性、电绝缘性。其理论密度为3.261 g/cm ³ ，实际制品的密度与烧结添加剂种类和数量有关	用于换向组件基板：在各种工作机械、机器人、遥控机械中使用的大功率、大电流换向组件；超高频功率增幅器基板，点火器基板，大规模集成电路封装材料及绝缘热板材料。用于耐热材料，制作坩埚、保护管及烧结用的器具，高温热机中耐蚀部件，非氧化气氛下的耐火材料骨料，还可用作赛隆瓷、碳化硅瓷烧结用添加物，红外与雷达透过材料以及AlN-BN系统可机加工陶瓷等
氮化硅陶瓷	具有良好的耐磨性及自润滑性，高硬度，耐腐蚀、耐高温，抗热震性和耐热疲劳性能均优良，耐各种无机酸（甚至沸腾的盐酸、硝酸、硫酸、磷酸、王水，但不包括氢氟酸），30%的烧碱液及其他碱液的腐蚀，能抗熔融铝、铅、锌、金银、黄铜、镍等金属溶体的侵蚀，有良好的电绝缘性和耐辐照性能。不同工艺制备的氮化硅瓷性能不同	反应烧结氮化硅适于制作形状复杂、尺寸精确的零件，如农用潜水泵、船用泵、盐酸泵、氟气压缩泵中的端面密封环，炼铝测温用的热电偶套管，铁、锌熔体的流量计零件，化工用球阀的阀芯，炼油厂提升装置中的滑阀；热压烧结氮化硅性能优于反应烧结氮化硅，但只能制造形状简单制品，如转子发动机中的刮片，高温轴承、金属切削刀具等
赛隆陶瓷（sialon）	sialon瓷属于氮化硅固溶体，一般分为β-sialon、α-sialon、σ-sialon和sialon多型体四种类型，前三种可依次简写为β'、α'和σ'。β'是β-Si ₃ N ₄ 形成的固溶体，具有较高的强度，添加氧化钇的无压烧结β-sialon（牌号为SYALON），室温强度为1000 MPa，1300℃高温时强度仍保持700 MPa。α'的特点是硬度较高，抗热震性较好，抗氧化性和β'相当，σ'的抗氧化性能优良，sialon多型体具有优良的韧性和高强度，β'+α、β'+σ'、α'为主的α'+β等复相陶瓷的性能可满足不同的要求	应用于金属材料的切削刀具，多用于铸铁和镍基合金的机加工。用于冷态或热态金属挤压模的内衬；可用制作汽车零部件、如针形阀、挺柱的填片；制作车辆底盘上的定位销，日操作5×10 ⁶ 次，使用一年基本不磨损；可与许多金属材料配对，组成摩擦副

品种	特 性	应 用
氮化硼陶瓷	导热性良好, 高压下合成的立方晶系具有与金刚石相同的硬度, 具有较好的耐高温性能和绝缘性, 性能稳定, 加工性良好,	用于高温润滑剂、高温电绝缘材料、核反应堆的结构材料、高温金属冶炼坩埚、耐热材料; 用作散热片和导热材料, 在中性或还原气氛中的使用温度可达 2 800℃; 制作发动机部件、钢坯连铸结晶器的分离环等
碳化硅陶瓷	强度高、硬度高, 导电性能优良, 热稳定性和抗氧化性能均优, 具有很好的高温强度, 热传导性好, 耐磨、耐蚀、抗蠕变性能好, 适用最高温度: 空气 1 400~1 500℃, 短时 1 600℃; 不活泼气氛中 2 300℃, NH ₃ 中, 小于 1 400℃	制作高温强度高的零件 (火箭尾喷嘴, 浇注金属用喷嘴、热电偶套管, 炉管等); 热传导能力高的零件 (高温下的热交换器零件、核燃料的包封材料等); 耐磨耐蚀良好的零件 (各种泵的密封圈, 陶瓷轴承, 金属材料的切削工具等。是国内外应用较多的基本密封材料)
碳化钛陶瓷	强度和硬度高, 导热性较好, 熔点高, 抗热震性好, 化学稳定性好, 不水解, 高温抗氧化性能仅低于碳化硅, 常温下不与酸起反应, 但在硝酸和氢氟酸的混合酸中能溶解, 在 1 000℃ 的氮气中能形成氮化物, 在氧化气氛中的使用温度可达 1 400℃	是硬质合金的重要原料, 用于制作耐磨材料、切削刀具材料、机械零件等, 还可制作熔炼锡、铅、镉、锌等金属的坩埚、透明碳化钛瓷是优良的光学材料。用作涡轮机叶片材料可在 1 400℃ 高温下使用
碳化硼陶瓷	高硬度、高强度, 硬度仅低于金刚石; 耐磨效率可达到金刚石的 60%~70%, 大于 SiC 的 50%, 是刚玉耐磨能力的 1~2 倍, 耐酸耐碱性能高, 热膨胀系数小, 能吸收热中子, 但抗冲击性能差。高温强度大, 在 1 000℃ 高温时急剧氧化	用于制作磨料、切削刀具、耐磨零件、喷嘴、轴承、车轴等, 还用于制造高温热交换器、核反应堆的控制剂、化学器皿以及熔融金属的坩埚等
碳化锆陶瓷	熔点高, 硬度高, 易氧化	用于金属陶瓷材料
碳化钨陶瓷	硬度高、强度高、易氧化、熔点高, 不适于作高温材料	主要用于作刀具材料
硼化物陶瓷	硼化物陶瓷的熔点高, 难挥发, 硬度高, 导电性及导热性均优良, 热膨胀系数大, 但高温抗蚀性、抗氧化性较差, 但硼化钛和硼化铬在这方面的性能较好。硼化物在真空中稳定, 在高温下也不易与碳、氮发生反应, Mg、Cu、Zn、Al、Fe 等的熔体对 TiB ₂ 、ZrB ₂ 、CrB ₂ 等是不润湿的。Cr-B 系陶瓷材料对强酸有良好的耐蚀性	利用硼化物陶瓷硬度高, 熔点高的性质, 用于制作高温轴承、耐磨材料及工具材料。利用 TiB ₂ 和 CrB ₂ 等的高温抗蚀性、抗氧化性优良的特性, 用于制作熔融非铁系金属的器具、内燃机喷嘴、高温器件及电触点材料。利用在真空中的高温稳定性, 制作高温真空器件的材料。电子放射系数大的硼化物瓷用于制作高温电极材料。硼化锆瓷是硼化物陶瓷中常用的品种, 多用于制作高温热电偶保护套管、发热元件、冶炼金属的坩埚和铸模, 在 1 250℃ 长时抗氧化, 用于制作高温电极

续表 14.11-57

品种	特 性	应 用
硅化物陶瓷	常用的硅化物陶瓷有二硅化钼 (MoSi ₂) 和硅化硼 (B ₄ Si) 瓷。二硅化钼瓷熔点高, 较高的导热系数, 高温抗氧化性能优良 (温度在 1700℃ 以下), 熔于硝酸与氢氟酸的混合液中及熔融的碱中。硅化硼的硬度高, 抗氧化性良好	MoSi ₂ 用于制作高温发热元件及高温热电偶, 冶炼金属钠、锂、铅、铋、锡的坩埚、原子反应堆装置的热交换器、超高速飞机、火箭、导弹上的某些高温抗氧化零部件, B ₄ Si 用于原子反应堆的减速材料及石墨涂层等

5.2.2 氧化物陶瓷性能 (表 14.11-58 ~ 表 14.11-64)

表 14.11-58 四方氧化锆陶瓷和日本“TZ”二氧化锆陶瓷的性能

材 料		抗弯强度 / MPa			断裂韧性 / MPa·m ^{1/2}	硬度 (HV) / GPa		密度 / g·cm ⁻³	弹性模量 / GPa	抗热冲击性 / °C	热导率 / W·(m·K) ⁻¹		线膨胀系数 / 10 ⁻⁶ ·K ⁻¹ / 200℃
		室温	800℃	1000℃		室温	1000℃				室温	800℃	
TZ-3Y	烧结	1200	350	—	7	12.8	4.0	6.05	205	250	2.93	2.93	10
	热等静压	1700	—	350	7	13.3	4.0	6.07	205	250	2.93	2.93	10
日本特殊陶瓷“TZ”二氧化锆陶瓷	UTZ-10	750	—	—	破坏韧性 2.3	3.78	—	5.8	230	230	2.51	—	10.2
	UTZ-20 ^①	1400	—	—	4.0	3.87	—	4.9	320	260	9.21	—	9.6
	UTZ-30	1000	—	—	4.3	3.78	—	5.9	240	300	2.09	—	11.4

① UTZ-20 是 ZrO₂-Al₂O₃ 陶瓷。

表 14.11-59 不同方法制造的氧化镁陶瓷性能

方 法	煅烧温度 / °C	线收缩 / %	体积密度 / g·cm ⁻³	气孔率 / %	晶粒平均直径 / μm
由氢氧化镁制得的 MgO	1350	15.7	2.42	31.6	2.0
	1450	22.4	3.24	4.2	8.0
	1600	24.2	3.30	2.8	22.0
由硝酸镁制得的 MgO	1350	1.1	1.84	48.2	1
	1450	10.1	2.46	30.5	5
	1600	15.1	2.86	20.1	10
由碱式碳酸镁制得的 MgO	1350	12.6	1.72	50.8	1.5
	1450	10.1	2.29	35.8	6.0
	1600	15.2	2.45	31.8	7.5
由氯化镁制得的 MgO	1350	1.1	1.83	48.5	1.0
	1450	7.3	2.18	28.8	4.0
	1600	12.5	2.64	26.2	6.0
氧化镁陶瓷性能	熔点: 2800℃; 理论密度: 3.58 g/cm ³ ; 介电系数: 9.1 高温下比体积电阻: 35 Ω/mm, 最高使用温度: 2200℃				

表 14.11-60 氧化铝陶瓷的常用配方

原料质量分数 (%)	刚玉-莫来石										刚玉瓷 (75%氧化铝)										92瓷	95瓷 (I)	95瓷 (II)	97瓷	99瓷 (I)	99瓷 (II)	99瓷 (III)	99瓷 (IV)
	GB-1	III-3	CP-1	CP-2	75料 A	组料	A ₅	A ₆	1	2	3	4	A ₅	A ₆	65	70	70	70	70	70								
1 420℃烧氧化铝	35.2	36	67	68	65	65	65	70	65	65	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	93.78	93.5	97	99	99	99	99	99
高岭土	24.8	24	24	20	25.5	20																						
粘土																					1.67	1.95	1					0.75
方解石	28	24																										
碳酸钡	2	3	2	3	3	3	3	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5									
碳酸钾	8	10	4	5	4																	0.3						
膨润土	2																											
萤石		3	2	2	2	2																						
菱镁矿			3	2	2																							
生滑石					2.5	3	2	5	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5									
氧化镁																												
菱镁矿																												
烧石英																					1.29	1.28						0.13
碳酸钙																					3	3.26	3.25					
氧化铜																						0.5	0.5	0.1				
氧化钇																								0.25	0.3			
氧化钨																								0.25	0.3			
烧滑石																												
CaO·MgO																												
MgO·Al ₂ O ₃																												
烧成温度/℃	1 350 ± 20	1 350 ± 20	1 420 ± 10	1 420 ± 10	1 410 ± 10	1 430 ± 20															1 650	1 680	1 700	1 710	1 710			1 816

表 14.11-62 二氧化硅玻璃的性能

玻璃种类 (代号)	线膨胀系数/ $10^{-6} \cdot K^{-1}$ (0~300℃)	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	弹性模量/ GPa	泊松比	体积固有阻抗/ $\Omega \cdot cm(25^\circ C)$	介电常数(ϵ) (1 MHz, 20℃)/ $F \cdot m^{-1}$	折射率
石英玻璃 (7940)	0.55	2.20	740	0.16	1×10^{17}	3.8	1.459
含氯化钛 石英玻璃 (7971)	0.05	2.21	690	0.17	1×10^{20}	4.0	1.484
高硅氧玻璃 (7913)	0.75	2.18	691	0.19	1×10^{17}	3.8	1.458

表 14.11-63 莫来石陶瓷和刚玉-莫来石陶瓷的化学组成

名称	莫来石瓷		刚玉-莫来石瓷		名称	莫来石瓷		刚玉-莫来石瓷	
牌号	75瓷		85瓷		牌号	75瓷		85瓷	
SiO ₂	25.54	14.25	11.01		R ₂ O	1.03	0.53	0.47	
Al ₂ O ₃	53.44	73.83	72.43		BaO	5.98	3.13	2.62	
TiO ₂	0.30	0.25	0.20		B ₂ O ₃	—	—	2.38	
F ₂ O ₃	0.20	0.38	0.35		SrO	1.36	—	—	
CaO	1.92	1.85	1.89		CaF ₂	—	—	1.98	
MgO	—	0.65	1.39						

表 14.11-64 莫来石陶瓷的性能

晶系	介电常数 ϵ / $F \cdot m^{-1}$	电阻率 ρ / ($\Omega \cdot cm$)(20℃)	莫氏硬度	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	折射率		熔点/ ℃	热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ (1 000℃)
					N _g	N _p		
斜方	7	$\sim 10^{18}$	6~7	3.23	1.654	1.642	1 810	3.98

5.2.3 氮化物陶瓷性能 (表 14.11-65~表 14.11-69)

表 14.11-65 氮化硅陶瓷的性能

性能	反应烧结氮化硅	热压氮化硅	常压烧结氮化硅	重烧结氮化硅
体积密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.55~2.73	3.17~3.40	3.20	3.20~3.26
显气孔率/%	10~20	<0.1	0.01	<0.2
抗弯强度/MPa	250~340	750~1 200	828	600~670
抗拉强度/MPa	120	—	400	225
抗压强度/MPa	1 200	3 600	>3 500	2 400
抗冲击强度/ $(N \cdot cm) \cdot cm^{-2}$	150~200	40~524	—	61~65

续表 14.11-65

性能	反应烧结氮化硅	热压氮化硅	常压烧结氮化硅	重烧结氮化硅
硬度(HR)/GPa	80~85	91~93	91~92	90~92
弹性模量/GPa	160	300	300	271~286
断裂韧性/MPa·m ^{1/2}	2.85	5.5~6.0	5	7.4
韦伯系数	12~16	13	15	28
线膨胀系数/10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	2.7(0~1400℃)	2.95~3.5 (0~1400℃)	3.2(0~1000℃)	3.55~3.6 (0~1400℃)
热导率/W·(m·K) ⁻¹	8~12	25	—	—

表 14.11-66 氮化硅陶瓷与其他材质密封件的寿命比较

泵类别	工作介质	密封材料		连续使用情况
		静环	动环	
离心泵	氨水	不锈钢 氮化硅	聚四氟乙烯 聚四氟乙烯	60天, 静环磨损 133天, 动环磨损
船用泵	含砂的咸淡水	氧化铝 氮化硅	石墨 氮化硅	30~60天, 动环磨损 180天, 情况良好
潜水泵	含砂0.05~0.1%淡水	铸锡青铜 不锈钢	不锈钢 氮化硅	42天, 静环磨损 350天, 泄漏量<0.1 mL/h
化工泵	盐酸或三氯化铁	耐酸陶瓷 氮化硅	石墨 石墨	45天, 静环磨损 180天, 情况良好

表 14.11-67 氮化铝陶瓷的性能

特性	普通烧结		热压烧结	
	AlN	AlN-Y ₂ O ₃	AlN	AlN-Y ₂ O ₃
密度/g·cm ⁻³	2.61~2.93	3.26~3.50	~3.20	3.26~3.50
气孔率/%	10~20	~0	2	~0
颜色	灰白色	黑色	黑灰色	黑色
抗折强度/MPa	100~300	450~650	300~400	500~900
硬度(HR)/GPa		12~16	12	12~16
弹性模量/GPa		310	351	279
线膨胀系数/10 ⁻⁶ ·K ⁻¹ (25~1000℃)	5.70		5.64	4.90
热导率/W·(m·K) ⁻¹				
200℃			29.31	
800℃			20.93	
机械加工性	良	良	良	良
抗氧化性	劣	优	良	优

表 14.11-68 六方晶体氮化硼的性能

制取方法	成型压力/MPa	烧结温度/℃	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	抗弯强度/MPa
热压法	2 000~3 500	1 600~1 900	1.80~2.19	60~80
冷压烧结法	5 000~40 000	1 800~2 100	0.93~1.52	30

表 14.11-69 赛隆陶瓷的性能

性 能	理论密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	体积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	显气孔率/ %	抗弯强度/ MPa	显微硬度/ GPa
参 数	3.05~3.13	2.9	<5	400~450 (四点抗弯)	13~15
性 能	破裂表面能/ $\text{J}\cdot(\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	弹性模量/ GPa	泊松比 (20℃)	线膨胀系数/ $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$ (20~1 000℃)	热扩散系数/ $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (300℃)
参 数	40.6	200~280	2.288	2.4~3.2	0.019 5

5.2.4 碳化物陶瓷性能 (表 14.11-70、表 14.11-71)

表 14.11-70 各种碳化物的性能

物 质	晶 系	熔点/ ℃	硬 度		密 度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	电阻率/ $\Omega\cdot\text{cm}$	线膨胀系数/ 10^{-6}K^{-1}
			莫 氏	显微硬度/ MPa				
B_4C	六方	2 450	9.3	28 000	2.51	29、38、31	0.3~0.8	4.5
TiC	立方	3 160	8~9	24 700	4.94	17.17	1.05×10^{-4}	4.12
ZrC	立方	3 570	8~9	26 000	6.44	20.52	70×10^{-6}	3.74
HfC	立方	3 887			12.2		1.95×10^{-4} (2 900℃)	
ThC	立方	2 625			10.65			
VC	立方	2 830	9~10	28 000	5.81		1.56×10^{-4}	
NbC	立方	3 500	9~10	24 700	7.85	14.20	7.4×10^{-5}	
WC	立方	2 865	9	25 000	15.50		1.2×10^{-5}	
W_2C	立方	2 860	9~10	30 000	17.20		8×10^{-5}	
Cr_3C_2	六方	1 890		13 000	6.88			6.0
SiC (β)	立方	2 100 (相变)	9.2	25 500	3.21	41.87	107~200	4.35
SiC (α)	六方				3.208			4.7
TaC	立方	3 877	9	18 000	14.53	22.19	30×10^{-6}	8.2

表 14.11-71 碳化物陶瓷的性能

化合物	晶体结构	点阵常数/ (10^{-10} m)	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	热容/ $\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ (20℃)	熔点/ ℃	线膨胀系数/ $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$ (20~1000℃)	热导率/ (20℃) $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比电阻/ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	电阻温度系数 ($+a_p$)/ $10^3\cdot\text{K}^{-1}$	显微硬度/ MPa	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	
TiC	面心立方 NaCl型	4.320	4.93	33.66	3 147	7.74	2.43×10^7	52.5	1.16	30 000	46.0	138.0	
ZrC		4.685	6.9	61.13	3 530	6.74	2.05×10^7	50.0	0.95	29 300	35.5	167.0	
HfC		4.64	12.6	—	3 890	5.60	6.28×10^6	45.0	1.42	29 100	35.9		
VC		4.160	5.36	33.37	2 810	3.2	2.47×10^7	65	—	20 900	43.0	62	
NbC		4.461	7.56	37.35	3 480	6.5	1.42×10^7	51.1	0.86	19 600	34.5	—	
TaC		4.455	14.3	36.80	3 880	8.3	2.22×10^7	42.1	1.07	16 000	29.1	—	
Cr ₃ C ₂		菱面体		6.68	99.98	1 895	11.77	1.93×10^7	75.0	2.33	13 500	38.8	—
Mo ₂ C ₂		六方		9.18	—	2 410	7.8	6.7×10^6	71.0	3.78	15 000	54.4	
WC		六方		15.55	35.71	2 720	3.84	2.93×10^7	19.2	0.495	17 800	71.0	56
B ₄ C		斜方六面体		2.51	2.51	2 450	4.5	8.37×10^6 ~ 2.93×10^7			50 000		196
SiC	α ,六方 β ,立方		3.21	0.95	2 600 (分解)	4.7							
						4.35	4.19×10^7			33 400		225	

5.2.5 硼化物陶瓷性能 (表 14.11-72)

表 14.11-72 各种硼化物陶瓷性能

物质	晶系	熔点/ ℃	硬 度		密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$			电阻率/ $\Omega\cdot\text{cm}$ $\times 10^{-6}$	线膨胀系数/ $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$
			莫氏	显微硬度/ MPa		23℃	200℃	500℃		
TiB ₂	六方	2 980		34 000	4.52	24.28		41.87	(12~28.4)	8.1(25~2 000℃)
ZrB ₂	六方	3 040		22 000	6.09		23.02		(9.2~38.8)	5.5(20~1 000℃)
HfB ₂	六方	3 060			11.2	10.84	~25.12		(100~104)	5.3(20~1 000℃)
TaB ₂	六方	3 000		17 000	12.6				(68~86.5)	
MoB ₂	六方	2 100		12 800	7.8	(25℃)	13.75		(22.5~45)	
CrB ₂	六方	2 760		17 000	5.6	20.62			21	4.6
NbB ₂	六方					16.75			(28.4~65.5)	
MoB	正方	2 180	8	15 700	8.8				(40~50)	
NbB	斜方	>2 900	8		7.2				32	
UB ₂	六方	2 100	8~9	16 000	5.1				35	
WB	正方	2 860			16					
Mo ₂ B	正方	2 000	8~9	16 000	9.3				40	
ThB ₂	立方	>2 100			8.5					

5.2.6 硅化物陶瓷性能 (表 14.11-73)

表 14.11-73 硅化物陶瓷性能

化合物	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	热容/ $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ (20 $^{\circ}\text{C}$)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	线膨胀系数/ $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$ (20~1000 $^{\circ}\text{C}$)	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ (20 $^{\circ}\text{C}$)	比电阻/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	电阻温 度系数/ $10^3\cdot\text{K}^{-1}$	显微硬 度/ MPa	弹性模量/ 10^7GPa	抗压 强度/ MPa
TiSi ₂	4.35	27.76	1540	—	—	16.9	6.3	8900	264	—
ZrSi ₂	4.88	—	1700	—	—	75.8	1.30	10600	268	—
HfSi ₂	7.2	—	1750	—	—	—	—	9300	—	—
VSi ₂	4.42	—	1660	—	—	66.5	3.52	9600	—	—
NbSi ₂	5.45	—	2150	—	—	50.4	—	10500	—	—
TaSi ₂	8.83	—	2200	—	—	46.1	3.32	14000	—	—
CrSi ₂	4.40	52.92	1500	—	6280.2	9.4	2.93	11300	—	—
MnSi ₂	6.30	58.53	2030	5.1	29307.6	21.6	6.38	12000	430	1139

5.3 功能陶瓷(表 14.11-74)

表 14.11-74 功能陶瓷分类、品种及应用

分类	系列	材料品种	应用
电功能陶瓷	绝缘陶瓷	镁质瓷、氧化铝瓷、莫来石瓷、改性碳化硅陶瓷、氮化硅瓷、氮化铝瓷、硼酸铅玻璃瓷、硼酸锡钡瓷、氧化铍瓷、氮化硼瓷	集成电路基片、封装陶瓷、高频绝缘瓷、电真空器件、加热器底板、热电偶绝缘瓷件
	介电陶瓷	TiO ₂ 、La ₂ Ti ₂ O ₇ 、Ba ₂ Ti ₆ O ₂₀	陶瓷电容器、微波陶瓷
	铁电陶瓷	BaTiO ₃ 、SrTiO ₃	陶瓷电容器
	压电陶瓷	PZT、PT、LNN、(PbBa)NaNb ₃ O ₁₅	超声换能器、谐振器、滤波器、压电点火、压电电动机、微位移器
半导体陶瓷		NTC (Mn、Co、Ni、LaCrO ₃ 、ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ 、SiC)	温度传感器、温度补偿器
		PTC (Ba-Sr-Pb)TiO ₃	温度补偿器、自控加热元件
		CTR (V ₂ O ₅)	热传感元件、防火灾传感器
		ZnO 压敏电阻	浪涌电流吸收器、噪声消除、避雷器
		SiC 发热体	电炉、小型电热器
		半导体 BaTiO ₃ 、SrTiO ₃	晶界层电容器
快离子导体陶瓷	β -Al ₂ O ₃ 、SrTiO ₃	钠硫电池固体电解质、氧传感器陶瓷	

续表 14.11-74

分 类	系 列	材 料 品 种	应 用
磁功能 陶瓷	软磁铁氧体	Mn-Zn、Cu-Zn、Ni-Zn、Cu-Zn-Mg	记录磁头、温度传感器、电视机、收录机、通讯机、磁芯、计算机电源、磁头、电波吸收体
	硬磁铁氧体	Ba、Sr 铁氧体	铁氧体磁石
	记忆用铁氧体	Li、Mn、Ni、Mg、Zn 与 Fe 形成的尖晶石形铁氧体	计算机磁芯
光功能 陶瓷	透明氧化铝瓷		高压钠灯
	透明氧化镁瓷		照明或特殊灯管、红外输出窗材料
	透明氧化铍瓷		激光元件
	透明氧化钇瓷		激光元件
	透明氧化钪瓷		激光元件
	PLZT 透明铁电瓷		光存储元件、视频显示和存储系统、光开关、光阀
生物及 化学功能 陶瓷	湿敏陶瓷	MgCr ₂ O ₄ -TiO ₂ 、TiO ₂ -V ₂ O ₅ 、ZnO-Cr ₂ O ₃ (LiZnVO ₄)、Fe ₃ O ₄ 、NiFe ₂ O ₄	工业湿度检测、烹饪控制元件
	气敏陶瓷	SnO ₂ 、 α -Fe ₂ O ₃ 、ZrO ₂ 、TiO ₂ 、CoO-MgO、ZnO、WO ₃	汽车传感器、锅炉燃烧控制、气体漏泄报警、各类气体探测
	载体用陶瓷	堇青石瓷、Al ₂ O ₃ 、SiO ₂ -Al ₂ O ₃	汽车尾气催化载体、化工用催化载体、酵素固定载体
	催化用陶瓷	沸石、过渡金属氧化物	接触分解反应催化、排气净化催化等
	生物陶瓷	Al ₂ O ₃ 、氢氧化磷灰石	人造牙齿、关节骨等

6 玻璃制品

6.1 普通平板玻璃 (表 14.11-75)

表 14.11-75 普通平板玻璃规格 (摘自 GB/T 4870—1985)

(长度/mm) × (宽度/mm)	厚度/mm	(长度/in) × (宽度/in)	(长度/mm) × (宽度/mm)	厚度/mm	(长度/in) × (宽度/in)	应用
900 × 600	2,3	36 × 24	1 300 × 1 000	3,4,5	52 × 40	具有良好的透光性, 紫外线及红外线透过性能较好。隔音、隔热较佳, 用于建筑采光、窗用玻璃、制镜等
1 000 × 600	2,3	40 × 24	1 300 × 1 200	4,5	52 × 48	
1 000 × 800	3,4	40 × 32	1 350 × 900	5,6	54 × 36	
1 000 × 900	2,3,4	40 × 36	1 400 × 1 000	3,5	56 × 40	
1 100 × 600	2,3	44 × 24	1 500 × 750	3,4,5	60 × 30	
1 100 × 900	3	44 × 36	1 500 × 900	3,4,5,6	60 × 36	
1 100 × 1 000	3	44 × 40	1 500 × 1 000	3,4,5,6	60 × 40	
1 150 × 950	3	46 × 38	1 500 × 1 200	4,5,6	60 × 48	
1 200 × 500	2,3	48 × 20	1 800 × 900	4,5,6	72 × 36	
1 200 × 600	2,3,5	48 × 24	1 800 × 1 000	4,5,6	72 × 40	
1 200 × 700	2,3	48 × 28	1 800 × 1 200	4,5,6	72 × 48	
1 200 × 800	2,3,4	48 × 32	1 800 × 1 350	5,6	72 × 54	
1 200 × 900	2,3,4,5	48 × 36	2 000 × 1 200	5,6	80 × 48	
1 200 × 1 000	3,4,5,6	48 × 40	2 000 × 1 300	5,6	80 × 52	
1 250 × 1 000	3,4,5	50 × 40	2 000 × 1 500	5,6	80 × 60	
1 300 × 900	3,4,5	52 × 36	2 400 × 1 200	5,6	96 × 48	

注: 1. 玻璃应成矩形。

2. 按外观质量分为特选品、一等品、二等品。

3. 弯曲度不大于 0.3%。

4. 厚度 (2 ± 0.15) mm, 透光率不小于 88%; 厚度 (3 ± 0.2) mm, (4 ± 0.2) mm 透光率不小于 86%; 厚度 (5 ± 0.25) mm, (6 ± 0.3) mm 透光率不小于 82%。

6.2 浮法玻璃 (表 14.11-76)

表 14.11-76 浮法玻璃尺寸规格 (摘自 GB/T 11614—1999)

(mm)

厚度及其允许偏差		可见光透射比/%	长度和宽度尺寸允许偏差		厚度及其允许偏差		可见光透射比/%	长度和宽度尺寸允许偏差	
厚度	允许偏差		< 3 000	3 000 ~ 5 000	厚度	允许偏差		< 3 000	3 000 ~ 5 000
2	± 0.2	89	± 2	—	8	± 0.3	82	+ 2	+ 3
3		88			10		81	- 3	- 4
4		87			12	78	± 3	± 4	
5		86	15	76					
6		84	19	72	± 5	± 5			

注: 1. 浮法玻璃按用途分为制镜级、汽车级和建筑级三种, 性能优于普通平板玻璃。

2. 同一片玻璃厚薄差: 厚度 2 mm、3 mm 为 0.2 mm; 厚度 4 mm、5 mm、6 mm、8 mm、10 mm 为 0.3 mm。

3. 汽车级浮法玻璃厚度 2、3、4、5、6 mm 为主, 制镜级浮法玻璃以 2、3、5、6 mm 为主。

4. 浮法玻璃弯曲度不超过 0.2%。

5. 建筑级、制镜级和汽车级浮法玻璃的外观质量参见 GB/T 11614—1999。

6. 浮法玻璃应为正方形或长方形。其对角线差应不大于对角线平均长度的 0.2%。

6.3 钢化玻璃

钢化玻璃具有普通平板玻璃的透明度，并具有很高的热稳定性、耐冲击性和强度高的特点。适于做长期振动冲击的汽车、火车、船舶等的门窗玻璃及挡风玻璃，也可用于建筑、工业部门的观察玻璃及保护玻璃等。按形状分为平面及曲面钢化玻璃两种；按用途可分为建筑用钢化玻璃及

建筑以外用钢化玻璃两种。平面钢化玻璃的长度、宽度由供需双方商定。一边长度大于 3 000 mm 的玻璃以及异型制品的尺寸偏差由供需双方商定。曲面钢化玻璃的形状和边长的允许偏差、吻合度均由双方商定。平面和曲面钢化玻璃的厚度允许偏差应符合表 14.11-77 的规定。

表 14.11-77 钢化玻璃长度及厚度允许偏差 (摘自 GB/T 9963—1998) (mm)

玻璃厚度	平面钢化玻璃长度 L 及允许偏差			平面和曲面钢化玻璃厚度允许偏差
	$L \leq 1\,000$	$1\,000 < L \leq 2\,000$	$2\,000 < L \leq 3\,000$	
4, 5, 6	+1 -2	±3	±4	±0.3
8, 10	+2 -3			±0.6
12		±0.8		
15	±4	±4		
19	±5	±5	±6	±1.2

- 注：1. 孔径一般不小于玻璃的厚度，孔径 4~50 mm，允许偏差为 ±1.0 mm；孔径 51~100 mm，允许偏差 ±2.0 mm；孔径 >100 mm，允许偏差双方商定。
 2. 平型钢化玻璃弯曲度，弓形时不超过 0.5%，波形时不超过 0.3%。
 3. 抗冲击性、碎片状态、霰弹袋冲击性能、透射比、抗风压性能的要求均按 GB/T 9963—1998 的有关规定。
 4. 钢化玻璃的外观质量要求按 GB/T 9963—1998 的规定。

6.4 防火玻璃 (表 14.11-78)

表 14.11-78 A 类防火玻璃尺寸规格 (摘自 GB/T 15763—1995) (mm)

玻璃总厚度	允许偏差	长度或宽度		玻璃总厚度	允许偏差	长度或宽度	
		≤1 200	>1 200~2 400			≤1 200	>1 200~2 400
≥5~<11	±1	±2	±3	≥17~24	±1.3	±4	±5
≥11~<17	±1	±3	±4	>24	±1.5	±5	±6

- 注：1. 防火玻璃分为 A 类和 B 类；A 类用于建筑部门，按耐火性能分为甲、乙、丙级。B 类专用于船舶防火玻璃，包括舷窗防火和矩形窗防火玻璃。外表面玻璃板为钢化安全玻璃，内表面玻璃板材料类型可任选择。B 类的尺寸规格和性能参见 GB15763—1995 的有关规定。
 2. A 类防火玻璃的耐火性能：甲级 ≥72 min；乙级 ≥54 min；丙级 ≥36 min。
 3. A 类防火玻璃的弯曲度不可超过 0.3%。

6.5 中空玻璃 (表 14.11-79、表 14.11-80)

表 14.11-79 中空玻璃尺寸规格 (摘自 GB/T 11944—1989) (mm)

规格及偏差	原片玻璃厚度	空气层厚度	方形尺寸	矩形尺寸	长度及允许偏差	厚度及允许偏差		对角线长度及允许偏差					
						玻璃厚	公称厚度						
3	6, 9, 12	1 200 × 1 200	1 200 × 1 500	1 200 × 1 500	< 1000 ± 2.0	≤ 6	< 18 ± 1.0	< 1 000 ± 4					
									1 300 × 1 300	1 300 × 1 500 1 300 × 1 800 1 300 × 2 000	1 000 ~ 2 000 ± 2.5	18 ~ 25 ± 1.5	
													1 500 × 1 500
									1 800 × 1 800	1 800 × 2 400 2 000 × 2 500 2 200 × 2 600	注: 公称厚度为两片玻璃的公称厚度与间隔框厚度之和		

注: 中空玻璃由两片无机玻璃片经有机密封制成, 用于隔离流体、噪声, 且要求透光的部位。

表 14.11-80 常用装饰玻璃规格 (摘自 GB/T 11944—1989) (mm)

	压花玻璃	彩色玻璃	磨砂玻璃		
I 类	600 × 900 × 3 900 × 900 × 3 900 × 750 × 3 800 × 700 × 3 800 × 600 × 3 600 × 400 × 3	不透明	厚 5~6 长 150~1 000 宽 150~800	单面、双面	2 000 × 1 800 × 3 (5.6)
				研磨片	200 × 1 800 × 3
II 类	600 × 900 × 5	透明	400 × 500 × (2~4)	喷砂片	2 000 × 1 000 × 6

6.6 夹层玻璃 (表 14.11-81)

表 14.11-81 夹层玻璃分类及尺寸规格 (摘自 GB/T 9962—1999)

分类特性	按形状分类 为平面夹层玻璃和曲面夹层玻璃	按抗冲击性和抗穿透性分类为 I 类和 II 类	分类	标记	特性
			I	L ₁	平面夹层玻璃及曲面夹层玻璃必须符合抗冲击性的规定
II	L ₂	由 2 块玻璃组成, 其总厚度不超过 16 mm 的平面夹层玻璃, 应符合抗冲击及抗穿透性的规定			

续表 14.11-81

尺寸允许偏差/mm	原片玻璃的总厚度 δ	长度或宽度		尺寸允许偏差/mm	原片玻璃的总厚度 δ	长度或宽度	
		$L \leq 1\ 200$	$1\ 200 < L \leq 2\ 400$			$L \leq 1\ 200$	$1\ 200 < L \leq 2\ 400$
	$5 \leq \delta < 7$	+2	—		$11 \leq \delta < 17$	+3	+4
		-1				-2	-2
	$7 \leq \delta < 11$	+2	+3		$17 \leq \delta < 24$	+4	+5
		-1	-1			-3	-3

注：1. 一边长度超过 2 400 mm 的制品、多层制品（由 3 块以上原片玻璃组成的夹层制品），原片玻璃的总厚度超过 24 mm 的制品、使用钢化玻璃作原片玻璃的制品及其他特殊形状的制品，其尺寸允许偏差由供需双方商定。

2. 平面夹层玻璃厚度允许偏差是原片玻璃厚度允许的偏差之和。但是对于多层制品，当原片玻璃总厚度超过 24 mm 及使用钢化玻璃作为原片时，其厚度允许偏差由供需双方商定。

3. 曲面夹层玻璃的长度、宽度用厚度的允许偏差和弯曲误差由供需双方商定。

4. 夹层玻璃用于建筑、机车车辆及船舶的门、窗等。

参 考 文 献

- 1 机械工程手册编辑委员会. 机械工程手册工程材料卷, 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 2 中国第一汽车集团公司编写组编. 机械工程材料手册金属材料. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 3 方昆凡, 黄英主编. 机械工程材料实用手册. 沈阳: 东北大学出版社, 1995
- 4 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册. 北京: 中国标准出版社, 1988
- 5 《合金钢钢种手册》编写组. 合金钢钢种手册(1~5 册). 北京: 冶金工业出版社, 1983
- 6 《功能材料及应用手册》编写组. 功能材料及应用手册. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 7 邓召义编. 新编世界钢铁牌号手册. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 8 林慧国编. 袖珍世界钢号手册. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 9 东北大学《机械零件设计手册》编写组. 机械零件设计手册. 第 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 10 李智诚等主编. 世界有色金属牌号手册. 北京: 中国物资出版社, 1992
- 11 钦征骑主编. 新型陶瓷材料手册. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996
- 12 中国第一汽车集团编写组编. 机械工程材料手册非金属材料. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 13 李顺林主编. 复合材料工作手册. 北京: 航空工业出版社, 1988
- 14 张清主编. 金属的磨损与金属耐磨材料手册. 北京: 冶金工业出版社, 1991
- 15 区英鸿主编. 塑料手册. 北京: 兵器工业出版社, 1991
- 16 A. S. M. Metals Handbook. 10th Edition Vol. 1, Materials (U.S.A): ASM Press, 1990
- 17 C. W. Briggs. Steel Castings Handbook. 4th ed. Steel Founders society of America, 1970
- 18 日本金属学会编. 金属便覽. 改訂 4 版. 東京: 丸善株式会社, 1982
- 19 日本鉄鋼協会. 鉄鋼便覽(第 1 卷). 改訂 3 版. 東京: 丸善株式会社, 1981

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

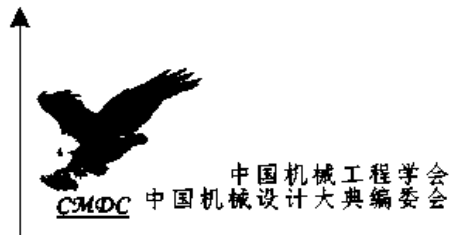
第
15
篇

机械零部件结构设计

主 编 陈 键

编 写 陈 键 刘 临
崔 兴 山 史 铁 军

审 稿 朱 孝 录



第 1 章 概 论

1 机械零部件结构设计内容和实例

1.1 结构设计内容

(1) 明确结构设计要求

根据工作原理方案,明确结构的主要要求和限制条件。主要有:与产品功能有关的载荷、速度和加速度,以及单位时间的物料通过量等参数;与费用有关的允许制造成本、工具费等;与制造有关的工厂生产条件、制造工艺条件等;与运输有关的运输方式、道路宽窄等;与使用有关的占地面积限制、使用地点条件等;与人机学有关的操纵、调整、控制、修理等要求,以及噪声、安全、外观、色彩等要求。

(2) 确定主要结构形式和尺寸

零部件的主要结构形式和尺寸,就是实现产品功能中起主要作用的结构,即主功能载体,如机床的主轴、内燃机的曲轴、减速器的齿轮直径等。

(3) 确定次要结构形式和尺寸

零部件的次要结构形式和尺寸是相对主要结构形式和尺寸而言,也即辅功能载体,如轴的支撑、密封、润滑等。其中应尽可能采用标准件、通用件等。

(4) 进行各部分的细节设计

待主、辅功能载体确定后,应遵循结构设计的基本原则,进行精确的详细设计。

(5) 评价和初定结构方案

利用评价方法从众多结构方案中筛选出满足功能要求、结构简单、成本低廉、便于加工、易于维护、外形美观的较优方案。主要评价方法有:技术-经济评价法、模糊评价法和评分法等。

(6) 完善和改进结构方案

对选择出的结构方案进行完善,消除评价中发现的缺陷和薄弱环节,仔细对照各种要求及限制条件,进行反复修改。

(7) 绘制总体结构方案图

绘制全部生产用图纸,及制备技术文件。

1.2 结构设计实例

以直角阀门为例简要说明结构设计的内容和过程。

图 15.1-1 为直角阀门结构示意图。

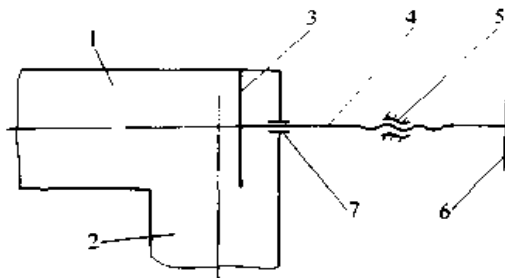


图 15.1-1 直角阀门结构示意图

1—水平管 2—垂直管 3—阀瓣 4—螺旋阀杆
5—螺母 6—手轮 7—密封

(1) 确定直角阀的主体结构和尺寸

由通过阀体的流量、管内压强和其他有关条件确定水平、垂直管直径、壁厚,以及阀瓣的厚度和相对位置(具体计算可参阅有关书籍)。图 15.1-2 为直角阀的主体结构草图。

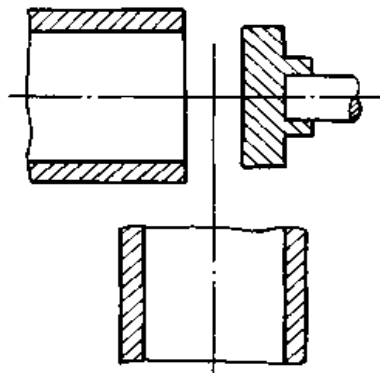


图 15.1-2 直角阀主体结构

(2) 确定阀瓣与阀杆的联结结构

阀杆的尺寸因其受力复杂较难确定。阀门关闭时,属于细长杆失稳问题;半关闭状态要考虑流体的非对称冲击和涡流问题;阀门的驱动方式不同所产生不同的附加载荷问题等。简便起见也

可采用经验法确定。

阀瓣与阀杆的联结方式,为装拆便利,易于维修,设计了三种可拆卸的刚性联结方式(见图15.1-3所示)。

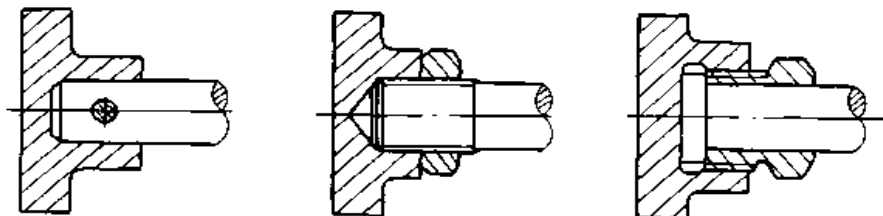


图 15.1-3 拆卸的刚性联结方式

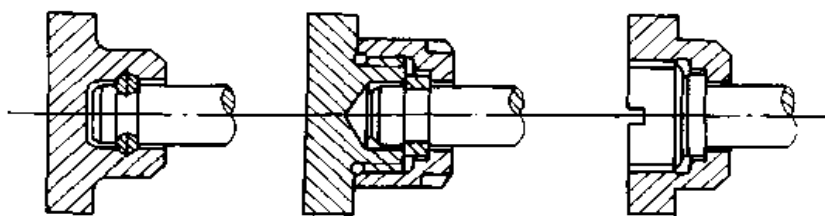


图 15.1-4 可转动联结方式

(3) 确定阀杆与阀体的密封结构

阀杆与阀体的密封结构与阀杆的线速度密切相关,即由阀门的开启频率确定。

接触式的密封结构适于低开启频率的阀门(见图15.1-5所示),非接触式的密封结构适于高开启频率的阀门(见图15.1-6所示)。图15.1-7所示为最终采用的结构形式。

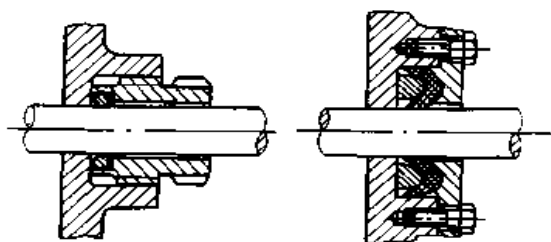


图 15.1-5 接触式的密封结构

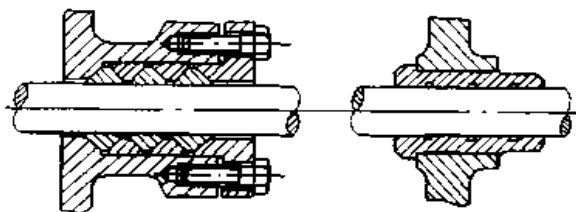


图 15.1-6 非接触式的密封结构

固定式的联结方式,难以保证良好的密封性能。因此将联结方式设计成阀瓣与阀杆之间可相对转动方式,减少了阀瓣的磨损和抖动(见图15.1-4所示)。保证阀门的使用性能。

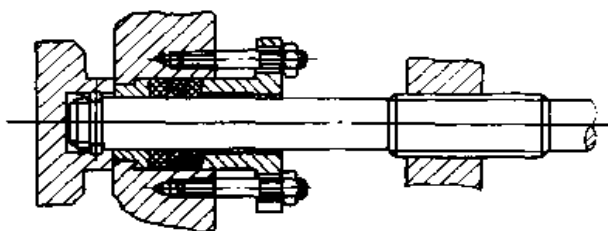


图 15.1-7 阀杆局部结构

(4) 确定驱动结构

驱动结构采用较为简单的手动螺旋结构(见图15.1-8所示)。

图15.1-8a所示结构适于阀瓣与阀杆可相对转动的结构,该结构不宜采用电动驱动方式。图15.1-8b所示结构是驱动螺母旋转,没有轴向移动,易于采用电动驱动方式。

(5) 确定阀体结构

设计阀体结构应考虑整体的密闭性和阀体内部零件可拆装性,因此采用了法兰结构,见图15.1-9所示。

以上只对直角阀门的主要结构做了简要的设计说明。

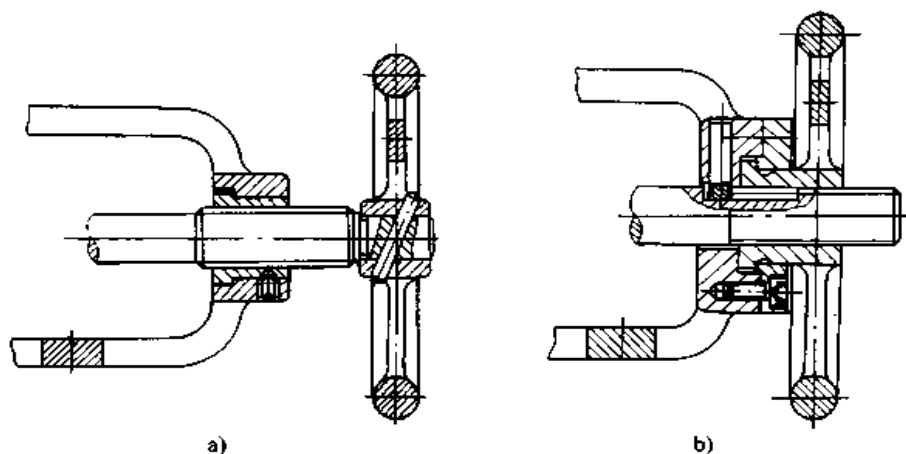


图 15.1-8 手动螺旋结构驱动结构
a) 旋转蜗杆结构 b) 旋转螺母结构

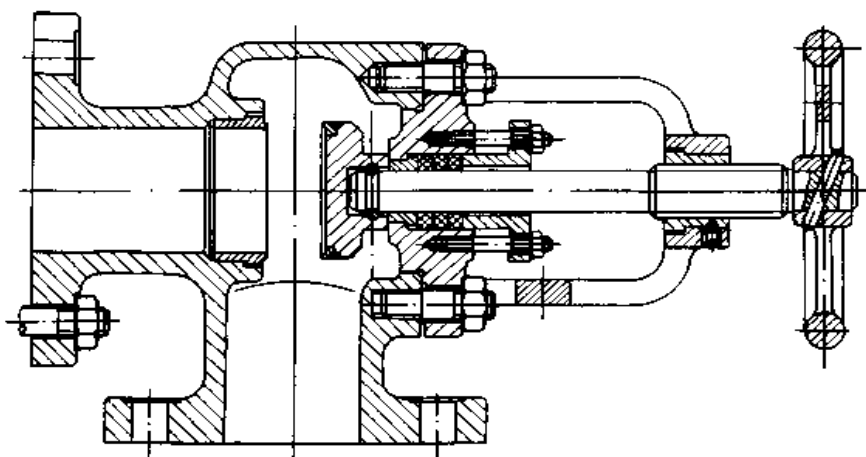


图 15.1-9 阀体结构

2 机械零部件结构设计基本要求

结构设计不但要使零部件的形状和尺寸满足原理方案的要求,它还必须解决与零部件结构有关的力学、工艺、材料、装配、使用、美观、成本、安全和环保等一系列的问题。只有深入了解诸问题对零部件结构的影响和限制,才能设计出合理的结构形式。

机械零件结构设计过程中,要充分考虑以下各方面的基本要求。

(1) 功能要求

功能分为主功能和辅功能,先确定零部件主功能结构方案,再确定完成辅功能的结构方案。

(2) 使用要求

零部件的结构受力合理、刚度足够、磨损

小、耐腐蚀。

(3) 加工工艺性要求

便于加工,加工量少,加工成本低。

(4) 装配工艺性要求

便于装配定位,易于装配操作。

(5) 维修工艺性要求

易于维护和修理,维修工作量少。

(6) 运输要求

结构便于吊装,利于普通交通工具运输。

(7) 人机学要求

结构美观,符合宜人性能要求,操作舒适安全。

(8) 环保要求

可回收再利用,减少对环境的危害。

(9) 经济性要求

降低各项成本。

3 机械零部件结构方案的评价

3.1 技术性和经济方法

评价机械零部件结构的优劣，可从它的技术性和经济性两方面加以评价。

技术评价从对结构的基本要求出发，制定若干评价项目，通常为 10~15 项。采用评分的方法，对每一评价项目给予不同的分数，共分为五等：很好（接近理想程度）—4 分，好—3 分，一般—2 分，较差—1 分，差—0 分。技术评价用技术价值 x 表示，由下式求得

$$x = \frac{\sum P}{\sum P_{max}}$$

式中 x ——技术价值；
 $\sum P$ ——评定总分数；
 $\sum P_{max}$ ——满分总分数。

一般认为 x 值在 0.8 以上是很好的方案，在 0.6 以下不符合要求。

经济评价只计算产品成本中占主要作用的制造费用。经济评价用经济价值 y 表示，由下式求得

$$y = \frac{H_i}{H} = \frac{0.7H_p}{H}$$

式中 y ——经济价值；
 H ——实际制造费用；
 H_i ——理想制造费用；
 H_p ——允许制造费用。

最终技术经济的综合评价，用技术经济对比图表示，如图 15.1-10 所示。图中任何一点 S_i 代表一种设计方案的技术价值和经济价值。 S 点

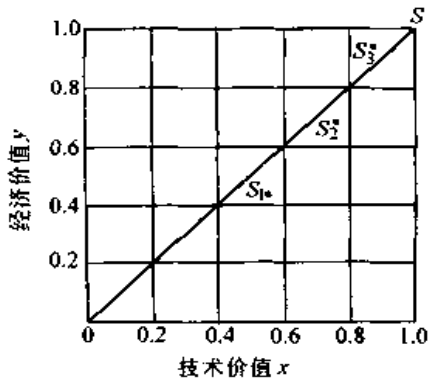


图 15.1-10 技术经济对比图

是理想的设计方案， $x=1, y=1$ 。OS 线上各点是技术与经济价值相等的设计方案。显然，靠近 OS 线的点，其设计方案较为理想。例如图 15.1-10 所示，方案 S_2 比 S_1 好， S_3 比 S_2 好。

3.2 评价举例

图 15.1-11 为带传动装置的两方案。

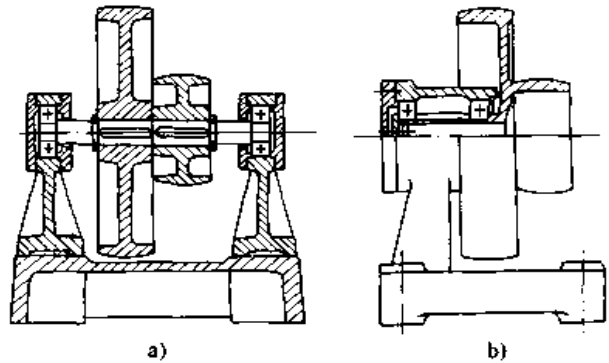


图 15.1-11 带传动装置的两方案
 a) 方案 1 b) 方案 2

设计要求：带轮转速 750 r/min，传动功率 150 kW，带轮直径为 250 mm 和 150 mm，每月产量 100 台，允许制造费用为 120 元/台。希望传动带便于更换，工作时不需维护。

技术评价从五个方面分为 12 个项目进行评价，方案 1 和方案 2 评价对比的结果见表 15.1-1 所列。

表 15.1-1 带传动装置的技术评价

技术性能	序号	评价项目	方案 1	方案 2	理想方案
零件个数	1	简单 (构件数 13:7)	2	3	4
	2	简单 (小零件数 24:11)	2	3	4
几何性能	3	占用面积	2	3	4
	4	不变形的紧固面 (底板)	2	3	4
	5	同心度(支架)	2	3	4
机械性能	6	轴承承载能力	4	3	4
	7	重量	2	3	4

续表 15.1-1

技术性能	序号	评价项目	方案 1	方案 2	理想方案
制造性能	8	切削量	3	4	4
	9	加工方便	2	3	4
	10	装配方便	2	3	
使用性能	11	带的更换	2	4	4
	12	润滑加油方便	3	3	4
总分			28	38	48
技术评价 $x = \frac{\sum P}{\sum P_{\max}}$			0.58	0.79	1.00

表 15.1-2 为传动装置两种方案的经济评价对比结果。

图 15.1-12 所示为两方案的技术经济对比图，由图可看出方案 2 的点更接近 S 点，所以其综合技术经济效果比较好。

表 15.1-2 传动装置的经济评价

	方案 1	方案 2
允许制造费用 [H]	120	120
理想制造费用 $H_i = 0.7H_p$	84	84
实际制造费用 H	170	112
经济评价价值 y	0.494	0.75

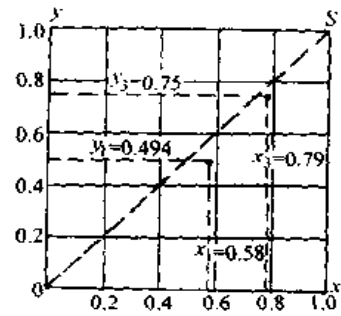


图 15.1-12 两种传动方案技术经济对比图

第 2 章 满足功能要求的结构设计

实现机械零件功能的结构方案是多种多样的。其中功能面和自由度分析法是机械零部件结构设计中常用的方法。

1 利用功能面的结构设计

1.1 功能面

机械零件结构设计就是将原理设计具体化，即构造一个能够满足功能要求的三维实体零部件，构造零件三维实体，必先根据原理方案规定各功能面，由功能面构造零件，零件再组成机器。

功能面是机械中相邻零件的作用表面，例如齿轮间的啮合面、轮毂与轴的配合表面、V带传动的V带与轮槽的作用表面、轴承的内圈与轴

的配合表面等。

现以设计一个简单有支承功能的零件结构，说明由功能面构造零件结构。为了将系统1支承在系统2上，要设计一个零件，该零件可将系统1上的力传递给系统2，如图15.2-1a所示。

首先引入功能面，系统1与支承零件的作用面Ⅰ，以及系统2与支承零件的作用面Ⅱ，功能面Ⅰ、Ⅱ可根据系统力的方向设计成平面或曲面，如图15.2-1b所示。其次为功能面设置零件的其他边界，最后由一个三维实体将功能面和其他边界联接起来，如图15.2-1c所示。图15.2-1d所示为利用两个支承将两个功能面联接起来。图15.2-1e、f所示为用几个零件完成同一任务。由此可见实现同一功能，可由一个零件单独实现或几个零件共同实现。

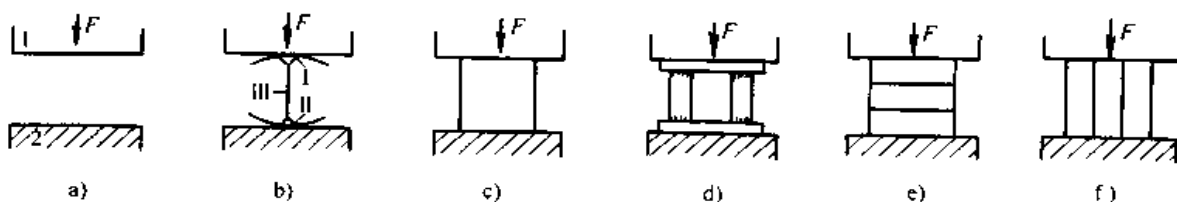


图 15.2-1 支承零件的结构设计

a) 需要支承的零件 b) 功能面分析 c) 结构 1 d) 结构 2 e) 结构 3 f) 结构 4

1.2 功能面参数变换

功能面是构成零件的基本单元，功能面可用形状、尺寸、数量、位置、排列顺序和联接等参数来描述，改变功能面的参数可获得多种零件结构和组合变化。

(1) 形状变化

功能面的形状有：平面、柱面、球面、环面、椭圆面、双曲面、抛物面、渐开面、摆线曲面、螺旋面等。除根据功能要求确定功能面形状外，还应考虑加工等因素。随着CAD和CAM技术的发展，为设计人员提供了更为广泛的选择空间。例如蜗杆传动中，蜗杆的齿面由凸面齿廓改为凹面齿廓。

(2) 尺寸变化

尺寸变化是指零件功能面的大小、功能面间的距离变化等。改变尺寸可以获得不同的结构变化，如V带的截面型号、套筒滚子链的型号等，前者是改变零件功能面尺寸，后者是改变零件功能面尺寸和功能面间的距离。

(3) 数量变化

三维实体零件由表面包围而成，零件表面数量不同，形成不同的零件结构，由此可改变零件的工作性能。如增加齿轮齿数，可提高齿轮传动的平稳性；增加花键的齿数，可提高花键承载能力。再如图15.2-2所示，通过改变螺钉头的作用面的数量，得到多种螺钉头的结构，可适用于不同工作场合的需要。



图 15.2-2 螺钉头作用面数量改变

改变零件的功能面，还可通过增加或减少零件的个数来达到，如改变轴承中滚动体的个数、联接中螺栓的个数、齿轮的齿数、键的个数和内燃机中气缸的个数（图 15.2-3）：

(4) 位置变化

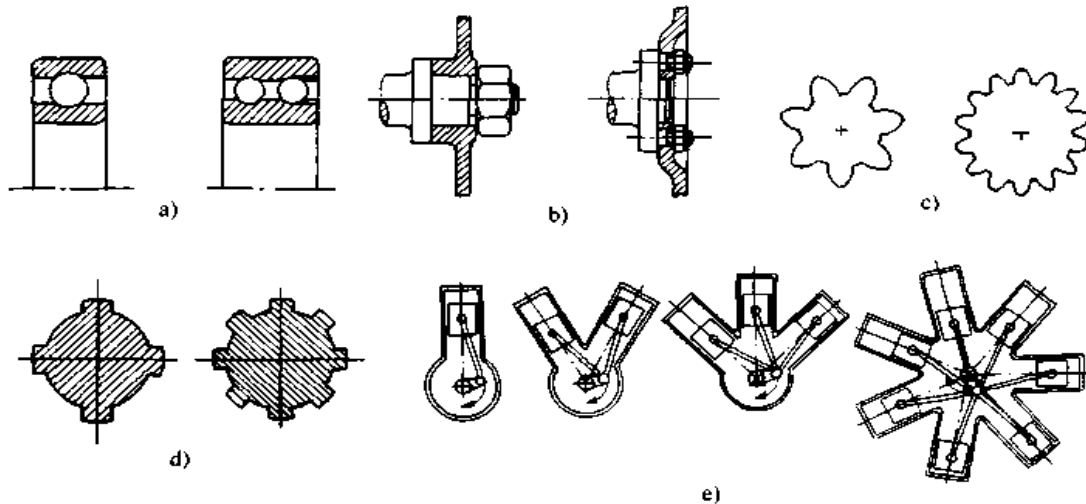


图 15.2-3 零件功能面的数量变化

a) 轴承 b) 螺栓 c) 齿轮 d) 键 e) 气缸

进行功能面的位置变化，首先可将零件想象成没有厚度的薄片，通过功能面反转的方法获得新的结构形式，如图 15.2-4 所示。

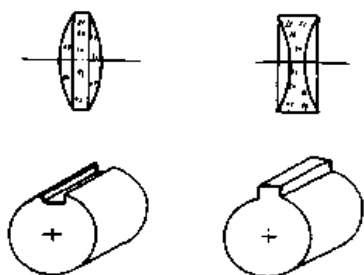


图 15.2-4 零件功能面的位置变化

如图 15.2-5a 所示的 V 型导轨，利用功能面反转法获得如图 15.2-5b 所示结构形式，从而改善了 V 型导轨的润滑条件。

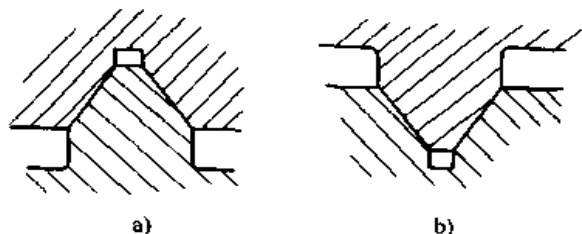


图 15.2-5 V 型导轨的功能面的位置变化

a) 不合理 b) 合理

改变零件在整个部件中的位置，同样可获得多种不同的功能面位置结构，如图 15.2-6 所示。



图 15.2-6 零件在部件中的位置变化

如图 15.2-7 所示有中间齿轮的传动机构，中间轮处于不同的位置时，中间轴所受的横向力是不同的，通过位置调整可使中间轴受力更加合理。图中 φ 为三轮间夹角， P 为中间轮受到的圆周力， R 为中间轮受到的合力。

(5) 顺序或排列变化

当零件的界面形状不同时，改变零件界面的包围顺序，可改变零件的结构形式。如图 15.2-8 所示，将功能面 1 和功能面 2 互换。

如图 15.2-9 所示，外螺纹变为内螺纹、外齿改为内齿，就是将由外向里功能面变为由里向外功能面。

同样改变零件在部件中的排列顺序，也可以起到功能面重排的目的。如图 15.2-10 所示，打字机由 4 个主要零件组成，改变 4 个零件的排列顺序，可得到多种打字机的结构方案。

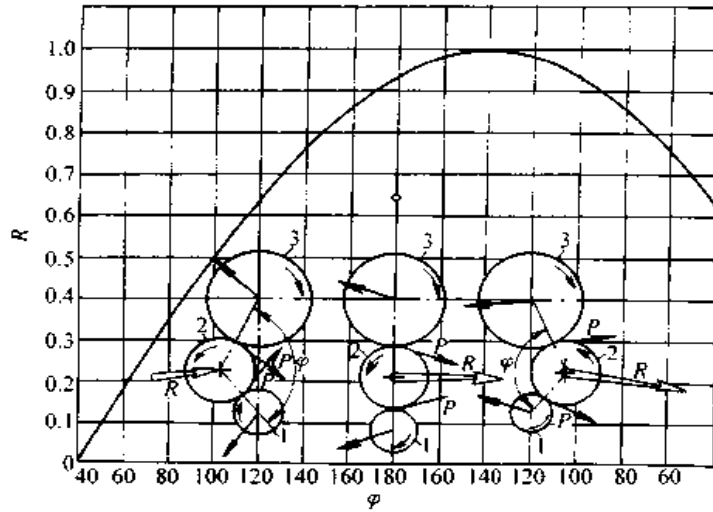


图 15.2-7 中间齿轮的位置变化

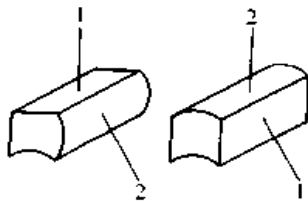


图 15.2-8 改变零件功能面的顺序

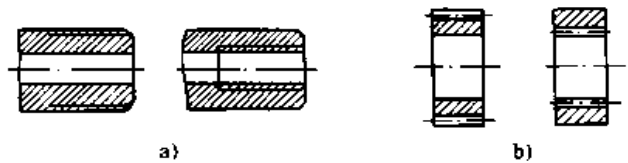


图 15.2-9 改变螺纹和齿面的顺序
a) 改变螺纹顺序 b) 改变轮齿顺序

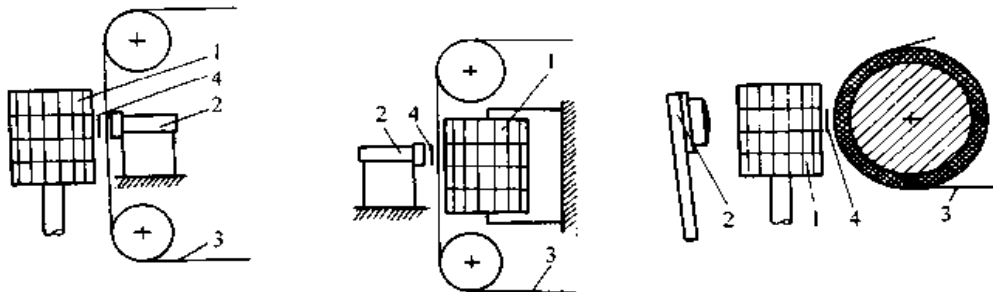


图 15.2-10 改变打字机零件的排列
1—压力锤 2—打印头 3—色带 4—纸

图 15.2-11 所示为圆锥齿轮减速器的结构方案，通过改变滚动轴承与圆锥齿轮的排列顺序，得到了 9 种结构方案，以上方案还须考虑其他影响因素和限制条件。

(6) 联接变化

同一个零件中往往有两个以上的功能面，功能面之间需要联接，理论上可以采用能够想到的所有联接结构形式，如图 15.2-12 所示两个例子。图 15.2-12a 为三个圆柱面的不同的联接结构，图 15.2-12b 为四个平面的联接结构，这两

个联接的共同特点：不论联接结构如何变化，功能面的空间排列和位置始终保持不变。

液压控制箱中的管路结构设计，适于采用联接变化法，如图 15.2-13 所示，先引入功能面，即管路的联接出口 1、2、3 和 4，再通过不同的联接组合得到不同的联接方式。

齿轮结构设计若也采用此法，功能面为齿廓表面和轮毂孔与轴的配合表面，则不同的联接形式可获得齿轮轴、实心式齿轮、腹板式齿轮和轮缘式齿轮等结构。

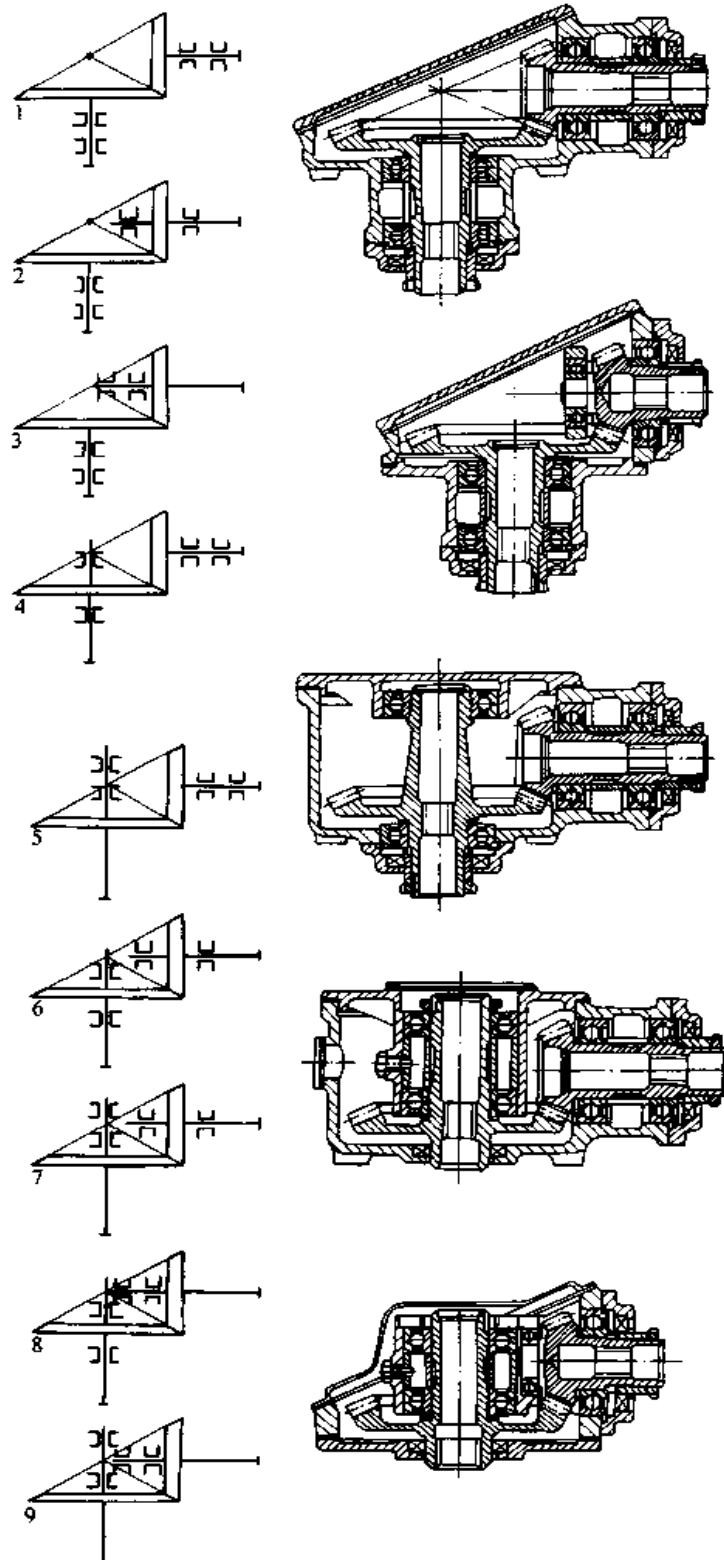


图 15.2-11 改变圆锥齿轮减速器的排列

如图 15.2-14 所示，三个不在同一水平面的三个圆柱功能面组成的叉形联接，图 15.2-14a 为功能面的空间顺序和位置，图 15.2-14b 为三个功能面的联接原理方案，图 15.2-14c 为根据原理方案设计的结构图。

上述功能面参数的变化都应以满足功能为基础，不论参数如何变化，零件或部件的功能不能改变。

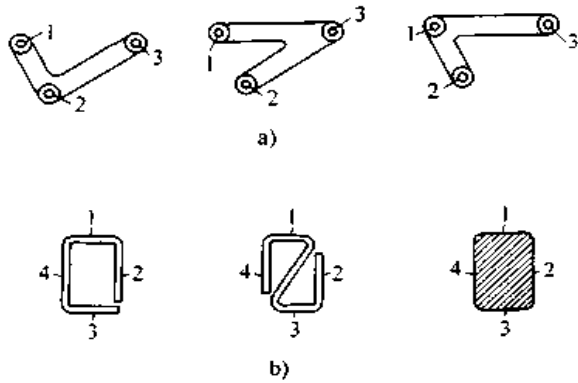


图 15.2-12 不同的联接结构

a) 三个圆柱面的联接 b) 四个平面的联接

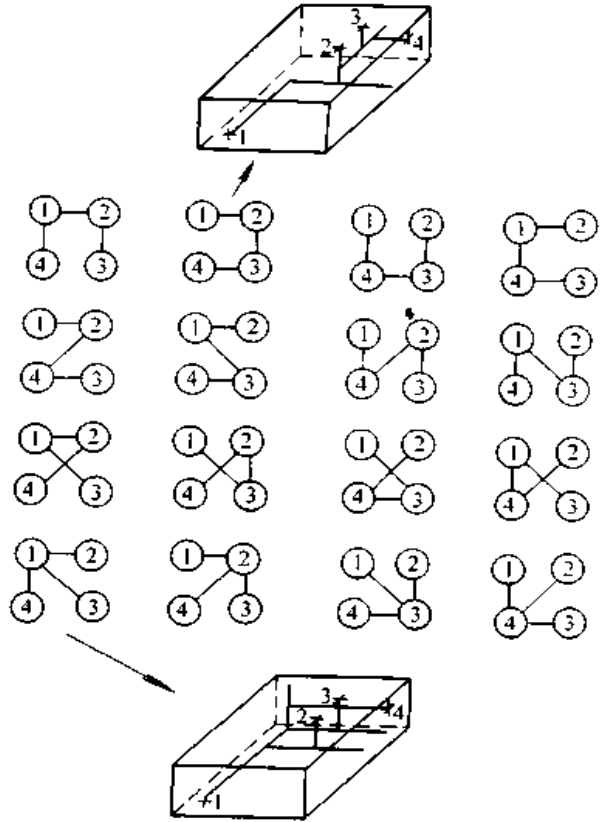


图 15.2-13 液压控制箱管路的联接变化

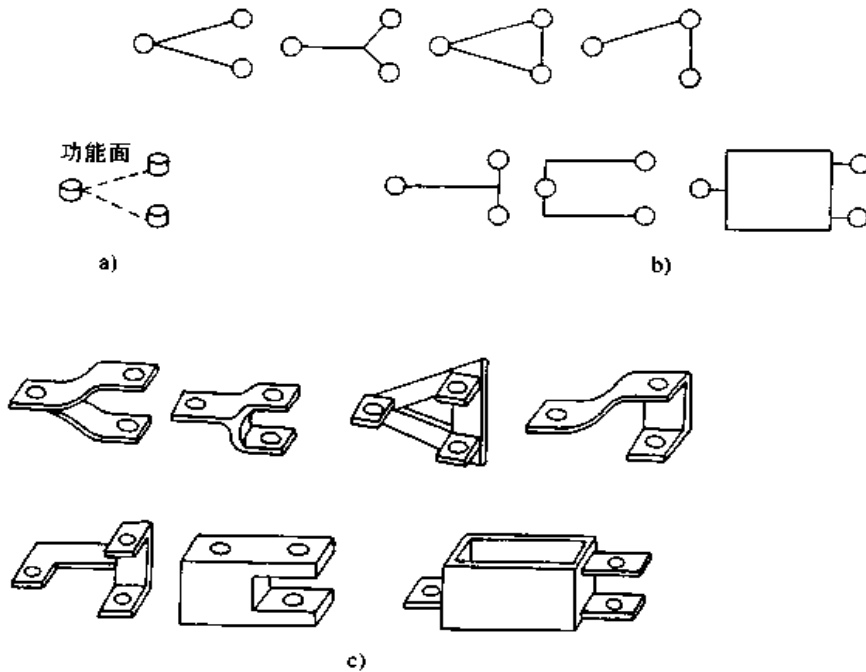


图 15.2-14 叉形联接的变化

a) 功能面 b) 原理方案 c) 结构形式

2 利用自由度分析法的零件结构设计

2.1 零件自由度

一个零件在空间有六个自由度，即三个方向的移动和三个方向转动，如图 15.2-15a 所示。为便于描述一个物体或零件的自由度，将其约束和自由方向用简图表示，如图 15.2-15b 所示。空心坐标轴代表有该轴的轴向移动自由度，半黑空心坐标轴代表有该轴单方向移动自由度，全黑空心坐标轴代表无该轴向移动自由度，坐标端部

圆圈空心或全黑代表有无该轴转动自由度。

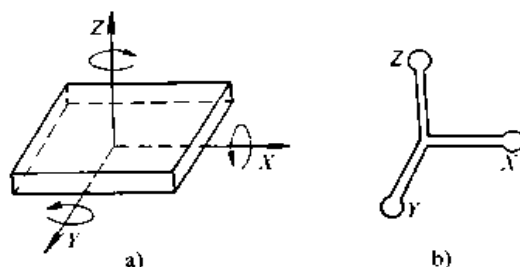


图 15.2-15 零件自由度

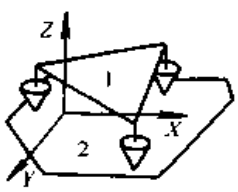
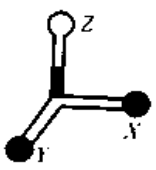
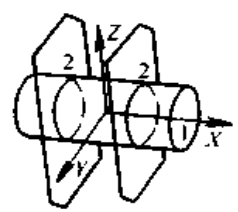
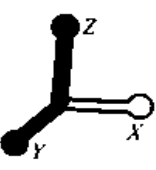
a) 六个自由度 b) 六个自由度简图

表 15.2-1 为常见零件的联接及其约束情况。

表 15.2-1 常见零件的联接及其约束

序号	联接形式简图	联接情况	零件 1 自由度简图	简单说明
1		一点联接		零件 1 与零件 2 在一点相切，零件 1 有： 2+0.5 个移动自由度 3 个转动自由度
2		线联接		零件 1 与零件 2 沿一条直线接触，零件 1 有： 2+0.5 个移动自由度 2 个转动自由度
3		环形线联接		零件 1 与零件 2 沿一个环形线接触，零件 1 有： 1 个移动自由度 3 个转动自由度
4		球窝联接		零件 1 与零件 2 有一个球形表面联接，零件 1 有： 3 个转动自由度

续表 15.2-1

序号	联接形式简图	联接情况	零件 1 自由度简图	简单说明
5		三点支承联接		零件 1 与零件 2 有三个点接触, 零件 1 有: 2+0.5 个移动自由度 1 个转动自由度
6		双面联接		零件 1 与零件 2 有二个环形线相接触, 零件 1 有: 1 个移动自由度 1 个转动自由度

2.2 应用举例

2.2.1 联轴器结构设计

联轴器的结构设计主要功能是将两根轴联接起来。但联接的轴由于载荷、加工与安装精度、工作条件等因素的影响, 造成轴向、径向和角度的偏移, 无法保证两轴完全对中。通常联轴器由左右两半组成, 采用自由度分析法, 联轴器两部分使用不同的基本联接形式, 可获得所需要方向的自由度, 就形成了不同补偿性能的联轴器。

图 15.2-16 所示为一种凸缘联轴器, 接触面 A 可视为三点支承, 相当于表 15.2-1 的结构 5, 止口面 B 相当于表 15.2-1 的结构 3。这两个结构结合在一起, 两半联轴器相对只剩下沿联轴器轴的转动和移动两个自由度。移动自由度靠螺栓结构限制, 转动自由度由螺栓预紧产生摩擦力限制, 因此该种联轴器无法补偿轴的各方向的偏差, 它为一种刚性联轴器。

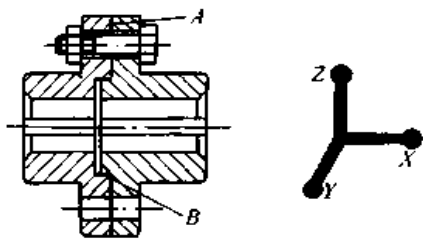


图 15.2-16 凸缘联轴器

图 15.2-17 为十字滑块联轴器。接触面 A、B 可视为三点支承, 相当于表 15.2-1 的结构 5,

这两个结构结合在一起, 联轴器 1、3 部分间只剩下两个移动自由度, 由此可见十字滑块联轴器可以补偿轴的径向偏差。

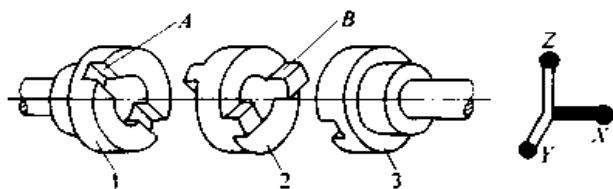


图 15.2-17 十字滑块联轴器

2.2.2 轴承组合结构设计

对于转轴的支承结构, 按轴的自由度分析, 只保留轴沿轴的轴线方向转动的自由度, 其他方向均要约束。

图 15.2-18、图 15.2-19 为几种轴承的组合结构。其中图 15.2-18a 为滑动轴承的支承结构。轴上两个轴承支承, 形成支承面 A, 相当于表 15.2-1 的结构 6; 轴上还有两个轴肩, 形成支承面 B, 相当于表 15.2-1 的结构 1。以上结构组合, 轴只有一个绕转轴轴线转动的自由度, 而沿转轴轴线的两个方向, 轴都不能移动, 如图 15.2-18c。图 15.2-18b 为相同支承结构的滚动轴承组合图, 同样由支承面 A 和 B 形成了一端固定一端游动的轴系。

图 15.2-19 为两端固定的轴承组合结构, 与图 15.2-18 所示结构的区别在于接触面 B 分别设置在两个轴承上。

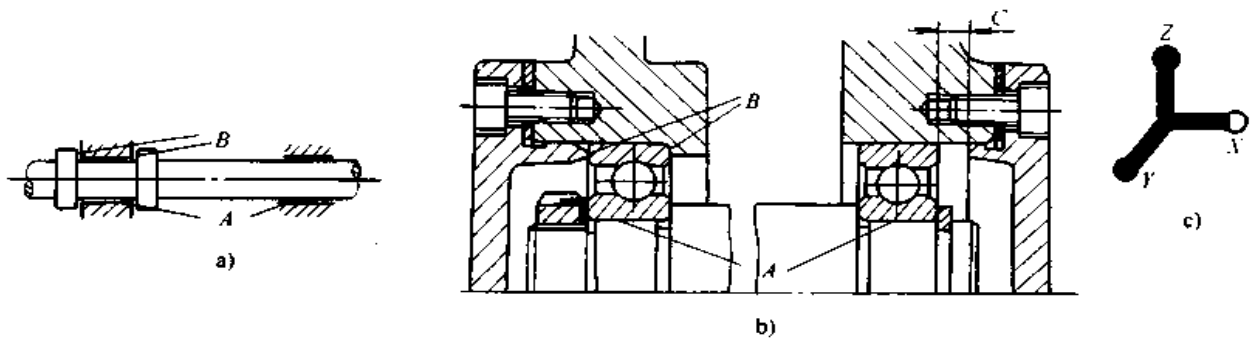


图 15.2-18 轴承组合结构一
a) 滑动轴承 b) 滚动轴承 c) 自由度图

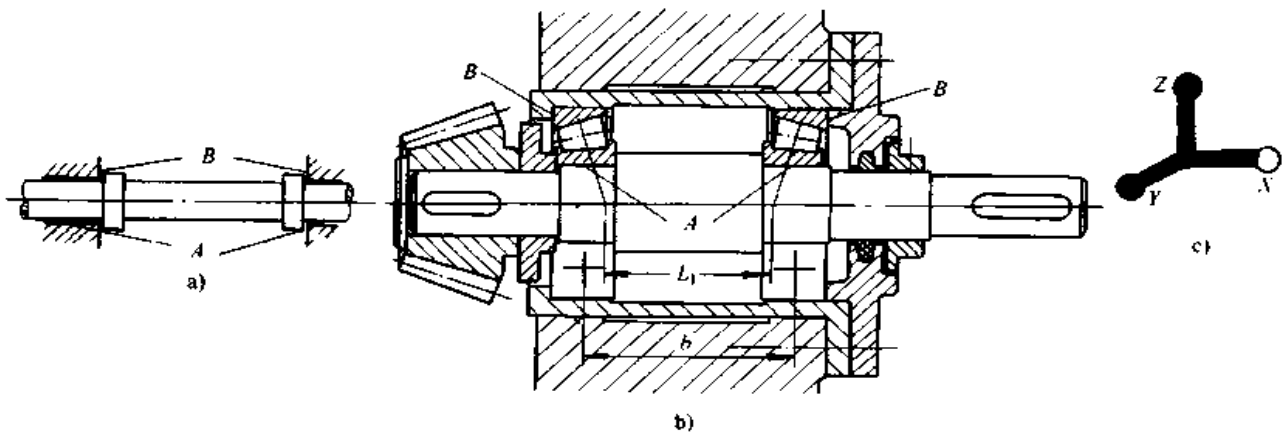


图 15.2-19 轴承组合结构二
a) 滑动轴承 b) 滚动轴承 c) 自由度图

以上两种轴承的组合结构，虽同样可以满足轴的温度补偿性能不同，第一种结构较好，而第二种需要辅助结构才能保证温度补偿性能。

第3章 满足工作能力要求的结构设计

为避免机器及其零部件的失效，应使零件具有足够的工作能力。工作能力，即零件不发生失效时的安全工作限度。随机械零件的失效形式不同、工作能力计算准则主要有如下几个方面：强度、刚度、耐磨性、耐腐蚀性和稳定性等。

按计算准则设计机械零件称为理论设计，虽然理论设计可以保证机械零部件不发生失效，但很难使零件材料得到有效的利用，机械零部件的承载能力得到充分的发挥，因此为使设计的机械零部件结构达到最优，理论设计的同时还必须遵循合理结构设计的原则。

1 提高强度的结构设计

强度是机器中各零部件承受载荷的能力，它

与零件受到载荷和零件的承受能力有关。

1.1 降低零件载荷或应力的最大值

机械零件的工作载荷大小通常由工作状态确定，但仍可从改变零部件结构，达到减小载荷和应力的最大值，提高零件强度的目的。

1.1.1 螺纹零件

螺纹联接中，若减小螺栓刚度 C_b 或增大被联接件刚度 C_m 都可以达到减小螺栓总拉力 Q 的最大值（减小应力幅 σ_s ）的目的。图 15.3-1a、b、c 所示为单独降低螺栓刚度、单独增大被联接件刚度和把这两种措施与增大预紧力同时并用，螺栓总拉力 Q 减小的情况。图中 Q 为螺栓总拉力， Q_p 为预紧力， Q'_p 为残余预紧力， F 为

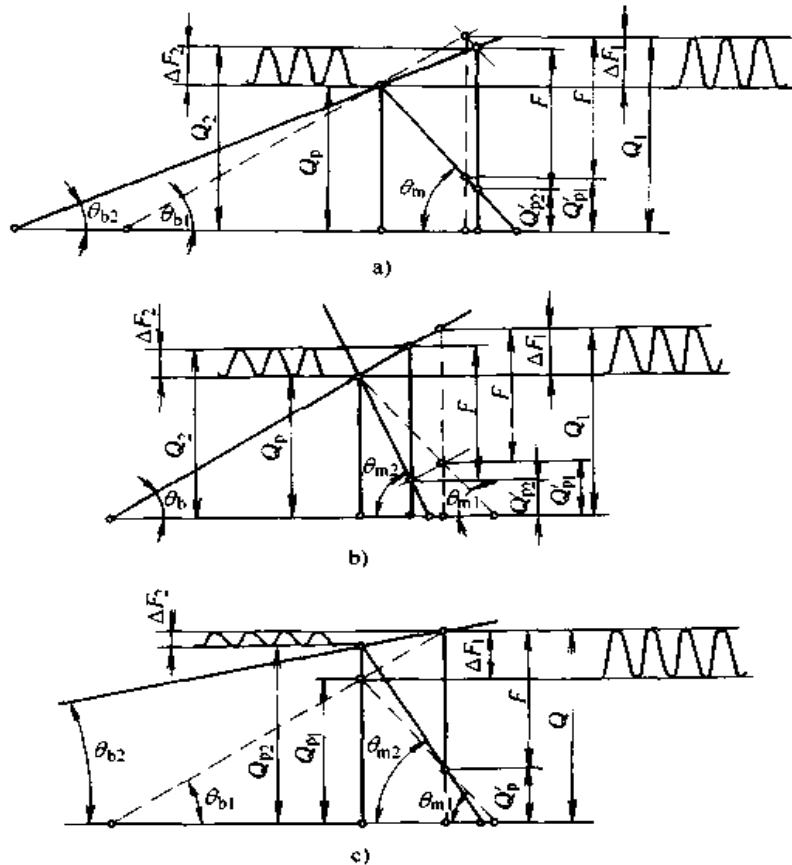


图 15.3-1 降低螺栓载荷

a) 降低螺栓刚度 b) 增大被联接件刚度 c) 同时采用三种措施

工作载荷， C_b 为联结件刚度 ($\tan\theta_b = C_b$)， C_m 为被联结件刚度 ($\tan\theta_m = C_m$)。

为减小螺栓刚度，可适当增加螺栓的长度，

或采用腰状杆螺栓或空心螺栓，也可在螺母下面安装弹性元件，如图 15.3-2 所示。

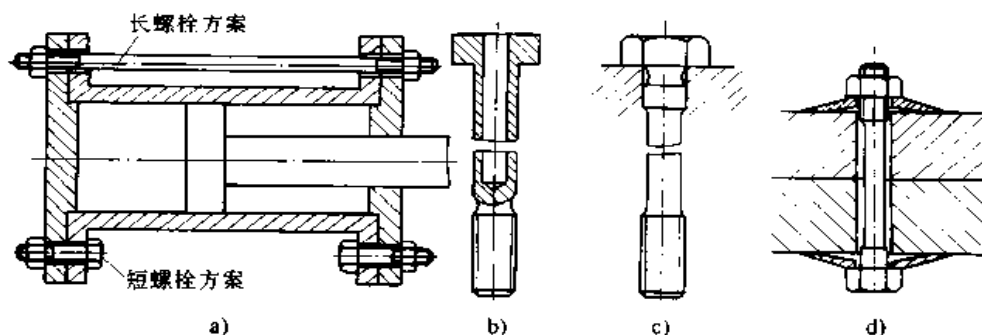


图 15.3-2 减小螺栓刚度的结构

a) 长螺栓 b) 空心螺栓 c) 腰状杆螺 d) 弹性元件

为了增大被联接件刚度，可不用垫片或采用刚度较大的垫片。图 15.3-3 为汽缸的密封结构，图 15.3-3b 的密封方式比图 15.3-3a 更为合理。

清理滚筒等通常将支点向里移动一段距离，如图 15.3-5 所示。

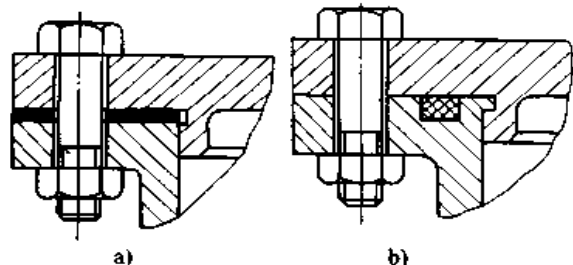


图 15.3-3 汽缸密封方式

a) 弹性垫片密封 b) O形密封圈密封

1.1.2 支撑零件

合理安排支撑点与载荷的相对位置，可降低零件内应力的数值，如图 15.3-4 所示为在均布载荷作用下的简支梁，若如图 15.3-4b 所示将两支点各向里移动 $0.2l$ ，则最大弯矩仅为图 15.3-4a 的 20%。所以，龙门吊车、锅炉筒体和铸件

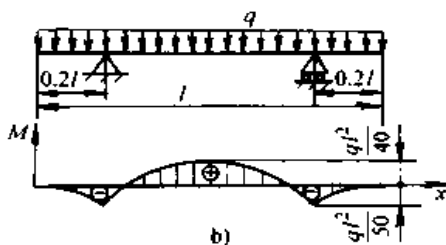
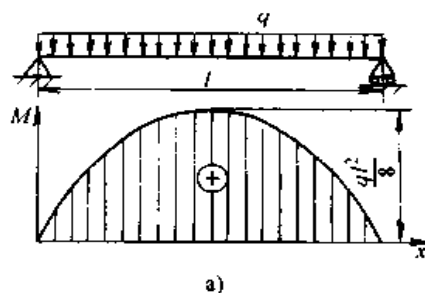


图 15.3-4 简支梁的支点方案
a) 不合理结构 b) 合理结构

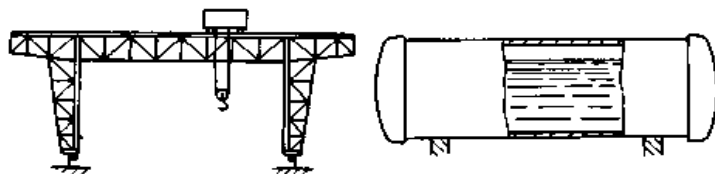


图 15.3-5 龙门吊车和锅炉筒体

其次，合理布置集中载荷与支点的相对位置，也同样可以降低最大弯矩的数值，图 15.3-6 为铣床的齿轮轴，把齿轮紧靠轴承安装，使齿轮

作用在轴上的集中力紧靠支点，轴上的最大弯矩只是集中力在跨度中点的 56%。

此外，结构允许的条件下，应尽可能的把集

中力改为分散力或均布载荷。如图 15.3-7 所示吊车，将其支撑梁中点的集中力，分成两个集中力，则简支梁的最大弯矩将减少 50%，用 5 t 的吊车可吊起 10 t 的重物。

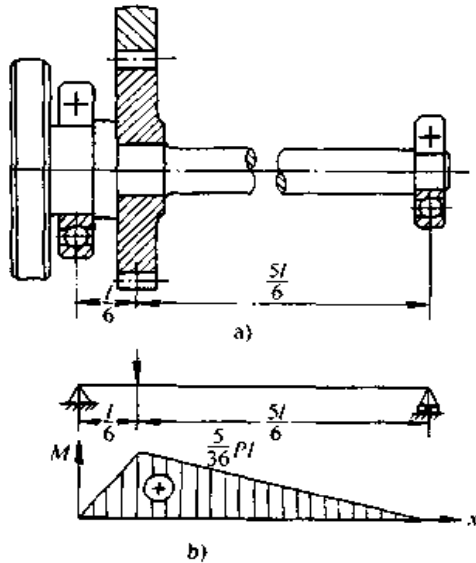


图 15.3-6 铣床轴的合理结构
a) 铣床轴的结构 b) 铣床轴弯矩图

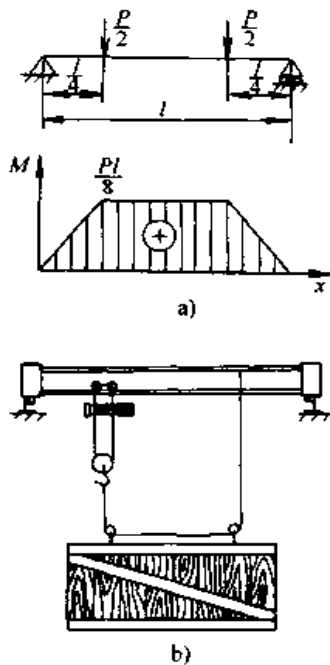


图 15.3-7 吊车的合理结构
a) 吊车梁弯矩图 b) 吊车梁受力结构

对于悬臂支撑，应合理地设计支点跨距 L 和伸出长度 l 之间的比值，如图 15.3-8 所示， L/l 的比值不同时，支反力 N 与外载荷 P 的比

值也将随之变化，从图中可见 L/l 的合理范围是 1.5~2.5，在此范围轴的最大弯曲应力较小，两支反力的数值相差不大，便于轴承的选择。

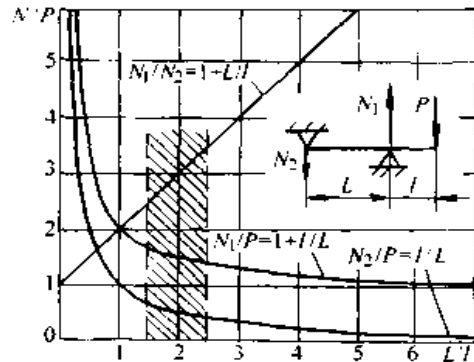


图 15.3-8 L/l 与支反力的关系

因此悬臂的伸出长度应尽可能的减小，如图 15.3-9 所示为不同伸出长度结构。如结构允许应尽量避免悬臂结构。

梁受弯矩时，采用合理的截面形状，同样可以减小梁的最大弯矩和最大弯曲应力。梁的弯曲强度可写成：

$$M_{\max} \leq \sigma_p W$$

可见梁能承受的最大弯矩 M_{\max} 与抗弯截面模量 W 成正比，抗弯截面模量 W 越大，对梁的弯曲强度越有利。另一方面梁的材料的使用量和自重，则与梁的截面积 F 成正比，截面积越小材料成本越低，越轻便。因此合理的截面形状应是截面形状 F 较小而抗弯截面模量 W 较大，可用抗弯截面模量 W 与截面的比值衡量截面形状的合理性和经济性，比值越大越好，如表 15.3-1 所示工字钢或槽钢比矩形截面合理，矩形截面比圆形截面合理。

表 15.3-1 常用截面对比

截面形状	矩形	圆形	槽钢	工字钢
W/F	$0.167h$	$0.125d$	$(0.27 \sim 0.31)h$	$(0.27 \sim 0.31)h$

使截面形状更加合理的同时，还应讨论材料的特性，对于塑性材料，抗拉强度等于抗压强度，截面形状宜采用对称形状，如圆形、矩形和工字型等；而对于抗压强度大于抗拉强度的脆性材料，宜采用非对称截面形状，中性轴偏于受拉一侧，如图 15.3-10 所示。

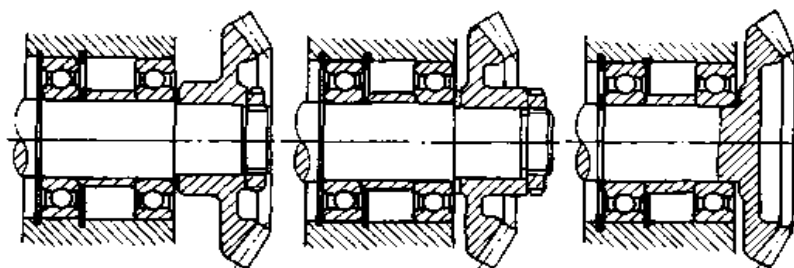


图 15.3-9 减小悬臂结构

以上两种方法都可使截面的最大拉应力和压应力同时接近许用应力。

以上都是对静载弯曲强度问题采取的措施。

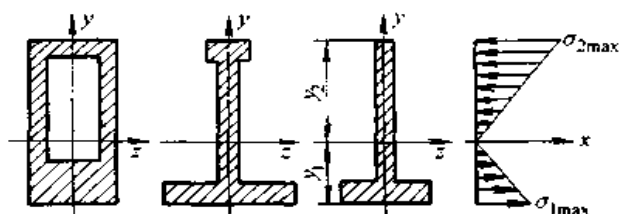


图 15.3-10 非对称截面

1.2 力流最短

所谓力流就是力的传递路径，如图 15.3-11 所示，从零件的受力点到最后的受载零件，力依

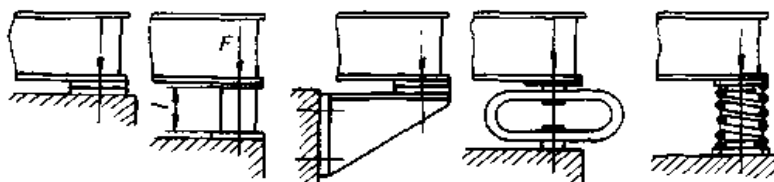


图 15.3-11 力流不同结构

次传递、力经过的零件越少，刚度越大，力的传递路线越直，附加弯矩越小。因此力流要尽可能地短，并接近为直线。

图 15.3-12 的三种结构所受的最大应力相等，但截面尺寸相差较大。图 15.3-13 是几个典型的力流合理和不合理结构。

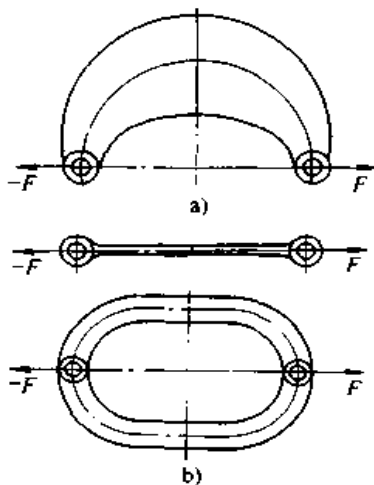


图 15.3-12 力流的不同形状
a) 不合理结构 b) 合理结构

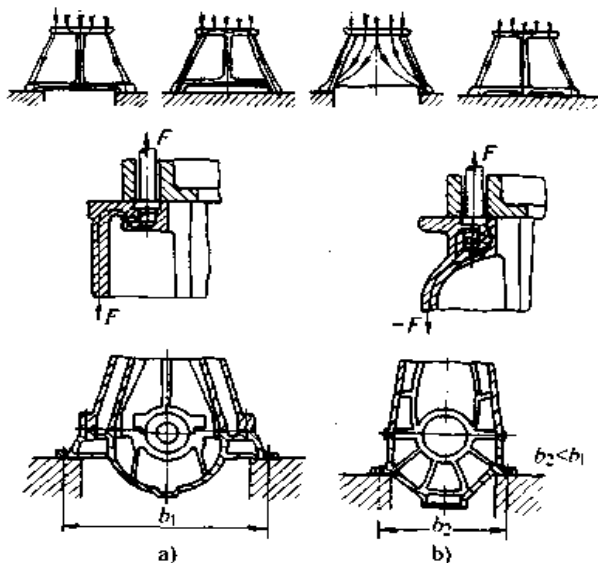


图 15.3-13 不同结构对比
a) 不合理结构 b) 合理结构

1.3 减小应力集中

机械零件多在变应力下工作，因此机械零件的疲劳强度比静强度重要的多。而影响疲劳强度

的主要因素之一是零件的应力集中。在实际的零件结构中，为了某些功能的需要，带有孔、环槽、键槽、螺纹和轴肩等缺口结构，造成零件的截面尺寸突然发生变化，在缺口处应力集中加剧。图 15.3-14 所示为几种不同的缺口形状的板

或轴受拉时产生的应力集中对比，截面尺寸变化越剧烈，应力集中越严重。因此合理地设计缺口结构，对提高零件疲劳强度是极为重要的。在零件结构允许的情况下，尽可能地减缓零件截面尺寸变化是主要措施之一。

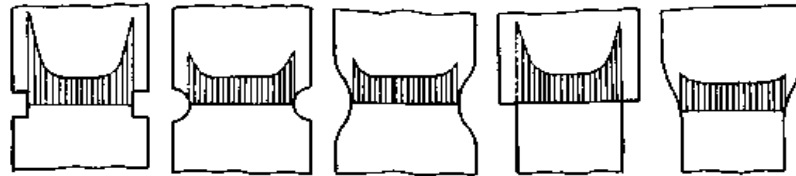


图 15.3-14 不同缺口形状

1.3.1 轴

对于受弯矩和转矩的轴，在截面的形状和尺寸有局部变化处，将产生弯曲应力和剪切应力集

中现象，如图 15.3-15 所示。其大小取决于缺口处的形状尺寸和应力形式。表 15.3-2 给出了常见的几种缺口形状的应力集中系数值。

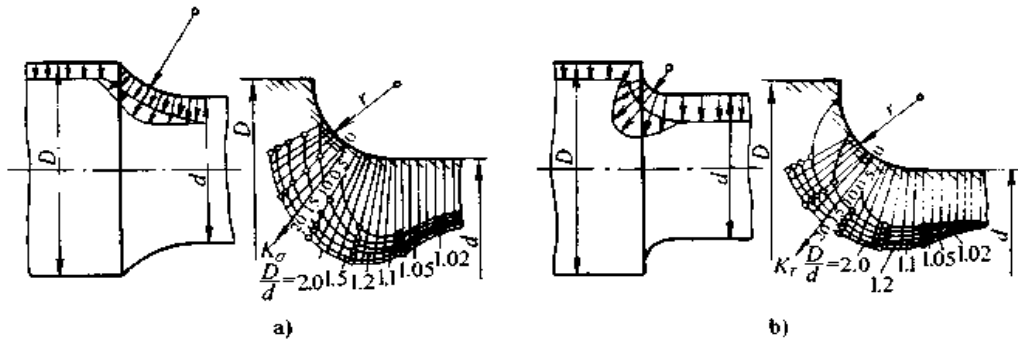


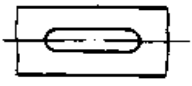


图 15.3-15 轴的应力集中

a) 弯曲应力集中 b) 剪应力集中

表 15.3-2 弯曲应力集中系数 K_σ 和剪切应力集中系数 K_τ 的值

应力集中源	r/d	t/r	σ_b/MPa	K_σ	K_τ
	0.02	1	500~1 200	1.45~1.60	1.35~1.40
	0.05	1		1.60~1.90	1.45~1.55
	0.02	2		1.80~2.15	1.60~1.70
	0.05	2		1.75~2.20	1.60~1.75
	0.02	1	500~1 200	2.05~2.5	1.6~2.2
	0.05	1		1.82~2.25	
	0.02	2		2.25~2.70	
	0.05	2		2.05~2.50	
	≤ 0.1	—	500~1 200	2.0~2.3	1.75~2.0
	> 0.15	—		1.8~2.1	

续表 15.3-2

应力集中源	r/d	t/r	σ_1/MPa	K_σ	K_f
	—	—	500	1.8	1.4
			700	1.9	1.7
			1 500	2.3	2.2
	—	—	500	1.45	2.25~1.43
			700	1.60	2.45~1.49
			1 200	1.75	2.80~1.60
	—	—	500	1.80	—
			700	2.20	
			1 200	2.90	

减少轴肩处的应力集中，可采用如下圆角过渡形式，如图 15.3-16 所示。用尽可能大的圆角或直线组成，如图 15.3-16a；将圆角按椭圆曲线制成，如图 15.3-16b；用若干个圆弧组成，如图

15.3-16c、d；大过渡圆角可采用内凹圆角结构形式如图 15.3-16e、f；靠近圆角处加卸荷槽，可以更有效地降低应力集中系数。

轴上的平键键槽用盘铣刀加工，比用指形铣

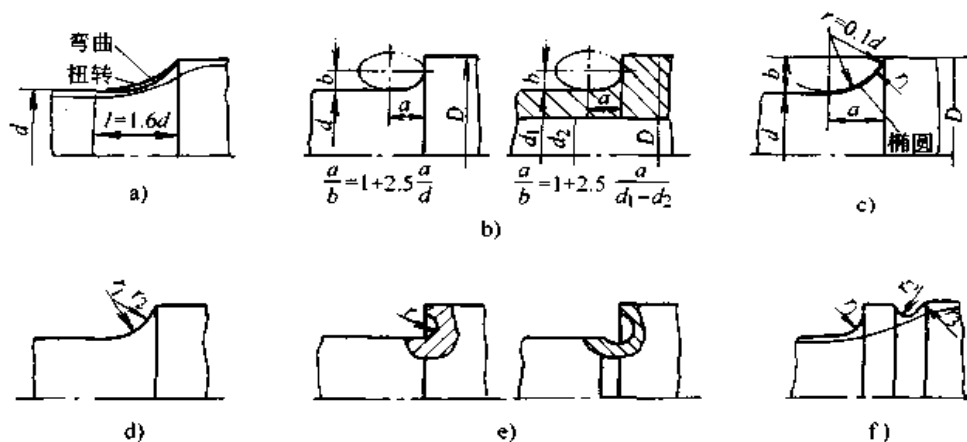


图 15.3-16 不同的圆角过渡形式

a) 大圆角 b) 椭圆曲线圆角 c) 等径圆角 d) 变径圆角 e) 内凹圆角 f) 加卸载槽

刀加工的键槽应力集中系数要小 20% 左右，如图 15.3-17 所示。

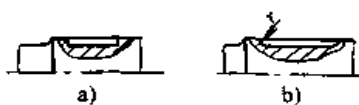


图 15.3-17 键槽结构对比

a) 不合理 b) 合理

轴毂过盈配合联接中，由于轴比毂长。轴在毂外部分阻碍轴在毂内部分的压缩，使径向压力沿接触长度分布不均（如图 15.3-18 所示），并引起轴的应力集中。

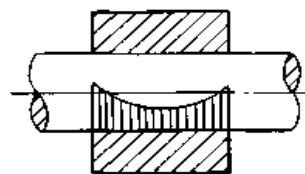


图 15.3-18 轴毂过盈联接的压力分布

图 15.3-19 为几种降低应力集中的结构措施，使非配合部分的轴径小于配合的轴径，如图 15.3-19a，通常 $d/d' \geq 1.05$ 、 $r \geq (0.1 \sim 0.2)$ ；在被包容件上加卸载槽，如图 15.3-19b；在包容件上加工出卸载槽，如图 15.3-19c。

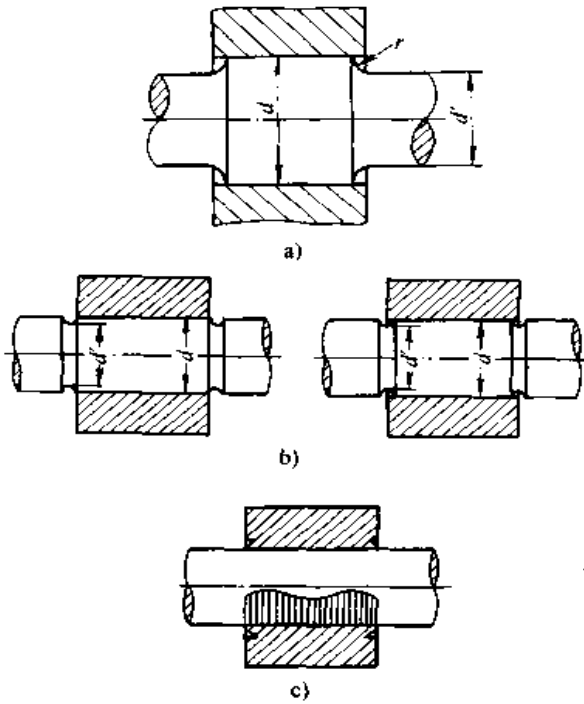


图 15.3-19 过盈联接的合理结构

a) 阶梯轴 b) 轴上卸载槽 c) 毂上卸载槽

1.3.2 螺栓零件

螺栓上应力集中最严重的部位是螺纹牙底

部、螺纹收尾部分、螺栓头和螺杆的交接处、螺栓杆上横截面有明显变化处，如图 15.3-20 所示螺栓的应力分布。其中螺母与螺栓的交接处的应力集中，通过改变螺母的刚度的方法解决，在前面一节中已讨论过。下面介绍几种降低螺栓头和螺杆的交接处、螺纹收尾部分的应力集中的合理结构（图 15.3-21）。在螺栓头与螺杆之间，采用大圆角过渡，如图 15.3-21a；采用卸载槽，如图 15.3-21b；采用卸载过渡结构，如图 15.3-21c；螺纹收尾部设置退刀槽，如图 15.3-21d。

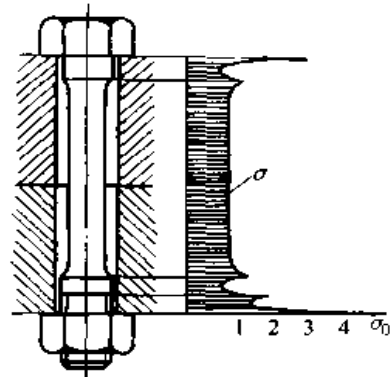


图 15.3-20 螺栓应力分布

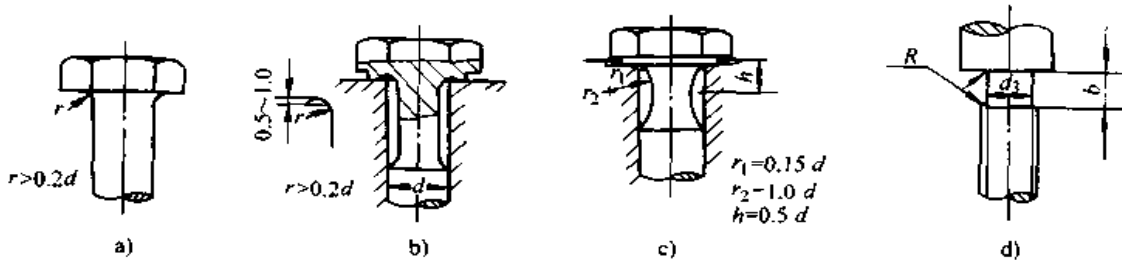


图 15.3-21 减小应力集中措施

a) 大圆角 b) 卸载槽 c) 卸载槽过渡结构 d) 退刀槽

1.4 载荷均匀分布

载荷均匀地分布在零件结构上，可有效地减少零件上载荷的最大值，提高零件的承载能力。如前面讨论的将简支梁上的集中力分成几个小的集中力或分布力系，是经常采用的机械零件受力结构。但有时零件即使承受分布力，由于零件受力区域的刚度或弹性变形不同，造成载荷集中现象，零件强度也将随之降低。载荷均布是理想状态，在实际工程中较难实现，但可通过一些有效的结构设计，使零件上的载荷趋于均布。

1.4.1 螺纹联接零件

螺栓联接承载后，载荷是通过螺栓和螺母的螺纹牙面接触来传递的，由于螺栓和螺母的刚度和变形性质不同，所以旋合各圈螺纹牙的载荷分布是不均匀的，如图 15.3-22 所示。

由图 15.3-22 可见，第一圈的螺纹变形最大，显然螺纹牙受载也以此圈为最大，约占全部载荷的 30% 以上。以后各圈递减，到第 8~10 圈以后螺纹牙几乎不受力。所以采用厚螺母、过多增加旋合圈数对提高联接强度的作用不大。

使螺纹牙受力尽量均匀的常用方法有：

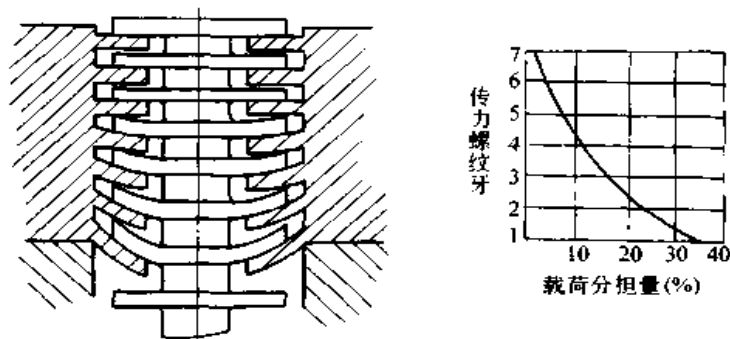


图 15.3-22 螺栓和螺母的螺纹牙受力和变形示意图

(1) 悬置螺母

采用悬置螺母，如图 15.3-23a，螺母的旋合部分全部受拉，其变形性质与螺栓相同，从而可减小二者的螺距变化差，使螺纹牙的载荷分布趋于均匀。

(2) 环槽螺母

图 15.3-23b 所示为环槽螺母结构，这种结构可使螺母内缘下端局部受拉，其作用和悬置螺母相似，但载荷均布效果不及前者。

(3) 内斜螺母

图 15.3-23c 所示为内斜螺母结构。螺母下端

受力较大的几圈螺纹处制成 $10^\circ \sim 15^\circ$ 斜角，使螺纹牙的受力面由上而下逐渐外移，刚度逐渐变小，螺栓旋合段下部螺纹牙的载荷分布趋于均匀。

(4) 环槽与内斜组合结构螺母

图 15.3-23d 所示为组合结构螺母，这种结构较为复杂，只用于某些重要或大型的联接上。

(5) 钢丝螺套

用菱形截面的钢丝套绕成的类似于螺旋弹簧的钢丝螺套旋入螺纹孔中，如图 15.3-24 所示，因它具有一定的弹性，可减轻螺纹牙受力不均和起到减振作用。

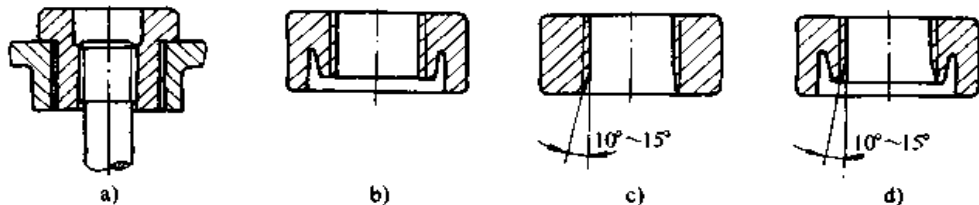


图 15.3-23 均载螺母结构

a) 悬置螺母 b) 环槽螺母 c) 内斜螺母 d) 组合螺母结构

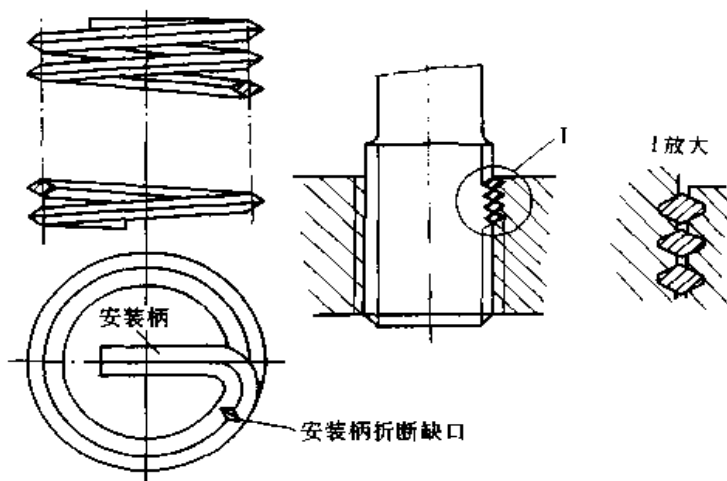


图 15.3-24 钢丝螺套

1.4.2 螺栓组联接

螺栓组联接结构设计中, 要力求各螺栓和联接结合面间受力均匀。因此联接结合面一般设计成简单的几何形状, 如圆形、环形、矩形、框形和三角形等。如此便于加工, 便于对称布置螺栓, 使螺栓组的对称中心和联接结合面的形心重合, 从而保证联接结合面受力较均匀, 如图 15.3-25 所示。对于铰制孔螺栓联接, 不要在平行于工作载荷的方向上成排地布置八个以上的螺栓, 以免工作不均匀。当螺栓组承受弯矩或扭矩时, 应使螺栓的位置尽可能的靠近联接结合面的边缘, 以减少螺栓受力, 如图 15.3-26 所示。

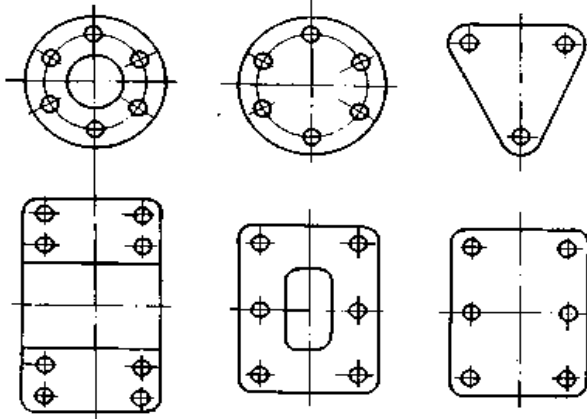


图 15.3-25 结合面常见形状

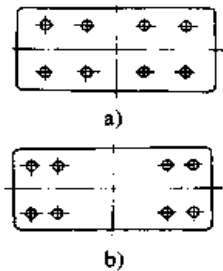


图 15.3-26 螺栓组受弯矩和扭矩时的布置

a) 不合理 b) 合理

1.4.3 齿轮零件

当齿轮相对于轴承布置不对称时, 齿轮受载后轴会产生弯曲变形, 两齿轮随之偏斜, 使得齿面上的载荷沿接触线分布不均匀, 造成载荷集中。轴因扭转作用而发生的扭转变形, 同样会产生载荷沿齿宽分布不均匀。靠近转矩输入一端, 轮齿上的载荷最大。为了减少载荷集中, 应将轮齿布置在远离转矩输入端。如图 15.3-27 所示。

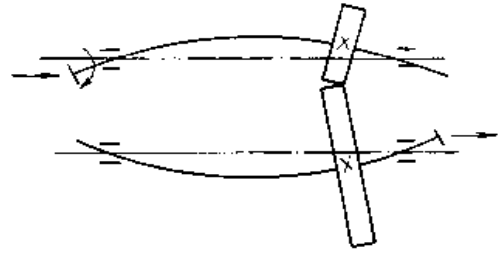


图 15.3-27 齿轮布置在远离转矩输入端

为了改善载荷沿接触线分布的不均匀程度, 可以增大轴、轴承和支座的刚度, 对称布置轴承, 以及适当的限制轮齿的宽度和减小轮齿局部刚度等措施。同时应尽量避免齿轮悬臂布置。除此之外, 可将轮齿修整成鼓形齿, 如图 15.3-28 所示, 当轴产生变形时, 鼓形齿面的偏载现象将大为改善。

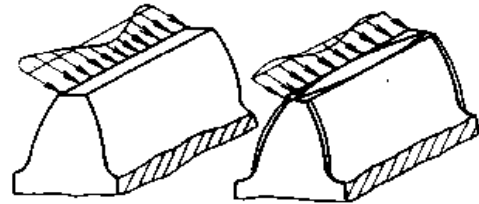


图 15.3-28 鼓形齿与载荷分布

齿轮的周向固定方式不同, 由于小齿轮的扭转变形, 也是造成齿向载荷分布不均的原因之一。图 15.3-29 所示为不同的周向联接结构的齿

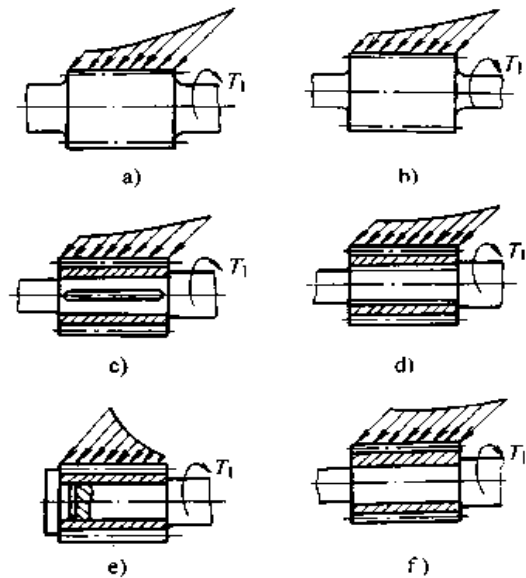


图 15.3-29 不同齿轮周向联接结构的载荷分布

a) 粗轴 b) 细轴 c) 平键 d) 花键
e) 端键 f) 静压

向载荷分布图。图 15.3-29e 所示的端键联接结构载荷分布最不均匀, 图 15.3-29f 所示的过盈联接结构载荷分布最均匀, 当齿宽系数 $\psi_d \approx 2$ 时, 两种联接结构的分布载荷最大值相差可到两倍。

图 15.3-30 所示为几种典型的行星齿轮的支撑结构, 通过改变其支撑刚度的方法, 改善行星齿轮的载荷分布状况。

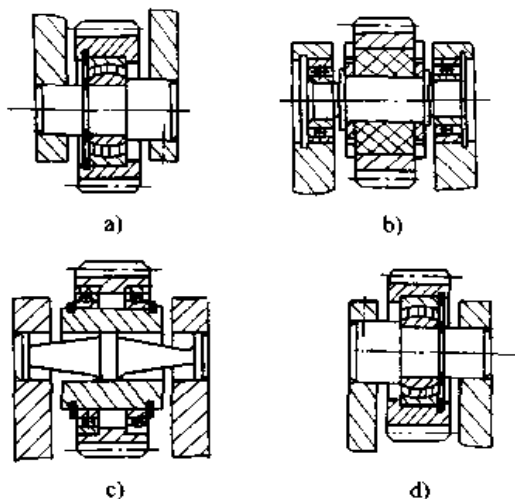


图 15.3-30 行星齿轮的均载结构
a) 双列向心球面滚子轴承 b) 橡胶套支撑
c) 弹性轴支撑 d) 浮动套油膜支撑

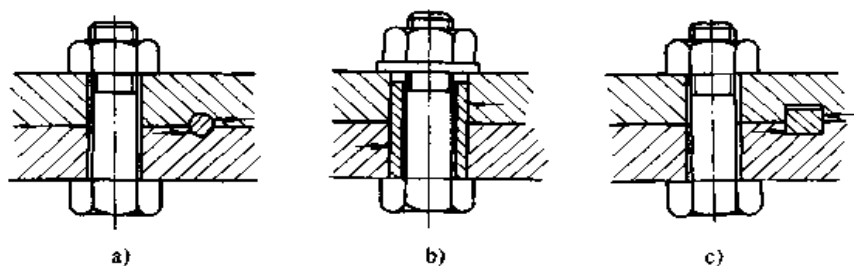


图 15.3-31 减载装置
a) 减载销 b) 减载套 c) 减载键

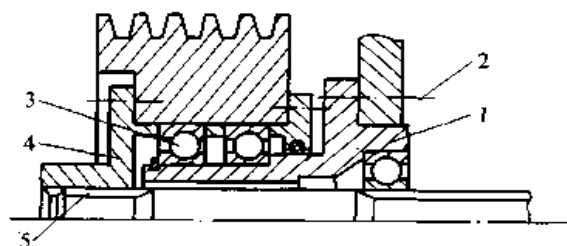


图 15.3-32 卸荷 V 带
1—滚动轴承 2—轴承座 3—螺钉
4—法兰盘 5—花键联接

1.5 载荷分担

由一个零件承受的载荷, 通过结构的合理设计, 分给两个或更多的零件承担, 是减小零件工作载荷有效措施。

1.5.1 螺栓减荷结构

采用普通螺栓联接承受横向载荷时, 具有结构简单、装配方便等优点, 但必须施加很大的预紧力, 导致螺栓组结构尺寸过大。采用由其他零件分担载荷的方法, 可以避免上述缺点, 具体结构是采用减荷装置, 即在联接结构上增设减载零件, 如图 15.3-31 所示。

1.5.2 卸荷带轮

卸荷带轮结构是通过巧妙的结构设计, 将零件上的有害载荷, 传递给承载能力较大的零件, 减轻某些重要零件工作载荷。如图 15.3-32 所示的带轮常用于机床传动箱外的三角带传动, 带轮上所受的压轴力及转矩由箱体和轴分担。压轴力通过轴承 1、轴承座 2 及螺栓 3 传给箱体; 转矩通过法兰盘 4 及花键 5 传给轴。因此轴只承受转矩不受弯矩, 减小了轴的弯曲变形, 提高了回转精度。

1.5.3 组合弹簧

当载荷很大时, 安装弹簧的空间尺寸又较小, 或者加工时为避免使用直径较大的弹簧, 常

将两个或两个以上的弹簧的直径不同的弹簧同心套在一起, 作为一个整体使用。图 15.3-33 所示的组合弹簧就是采用了分担载荷的方法。为了避免工作时各层之间互相嵌入而卡死, 应使各相邻层间的弹簧旋向相反。

1.5.4 双平键

当传递转矩很大时, 采用单个平键强度不够, 通常采用双平键共同承担载荷, 为保证受力的对称和两键均匀受载, 两键应布置在同一轴段

上相隔 180° 的位置, 如图 15.3-34b 所示。并且键与键槽都必须保证有较高的加工精度。

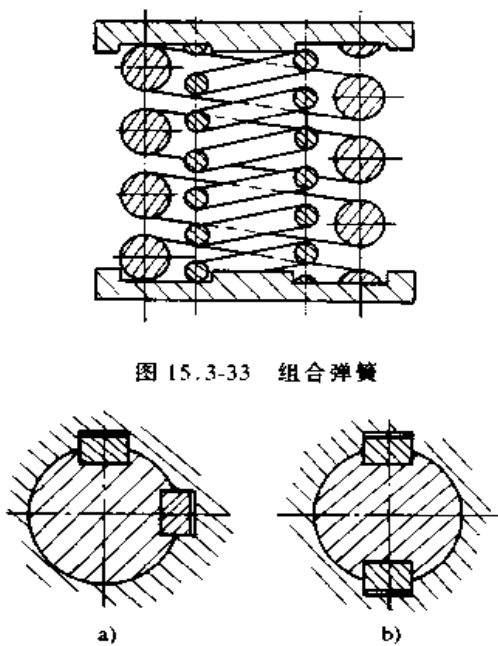


图 15.3-33 组合弹簧

图 15.3-34 双平键
a) 不合理 b) 合理

1.6 等强度

对于受横向载荷的等截面梁, 各截面的抗弯截面模量相等, 但梁的各个截面上弯矩是不同的, 因此应力随之不同。如果按梁所受最大应力进行强度计算, 弯矩较小的截面的应力值与许用应力值相差较多, 材料没有充分利用, 造成浪费。为了节约材料, 减轻重量, 将梁随弯矩的变化趋势作成变截面梁, 即弯矩较大处采用大截面, 而弯矩较小处采用小截面, 使变截面梁各截面应力

相等, 且都等于许用应力, 这就是等强度梁。

工程中的等强度梁如汽车用的叠板弹簧、阶梯轴和厂房建筑中的“鱼腹梁”如图 15.3-35。

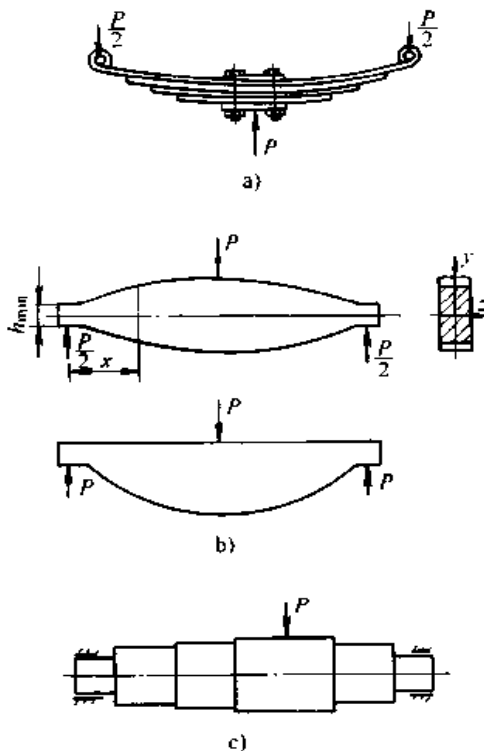


图 15.3-35 等强度梁

a) 叠板弹簧 b) 鱼腹梁 c) 阶梯轴

按等强度设计梁的截面形状时, 应考虑剪切强度的影响。对于弯矩值为零的截面, 要按其承受的剪切力设计截面尺寸, 如图 15.3-36 所示。如果完全按等强度设计, 会造成零件结构形状非常复杂, 不便于加工制造, 通常设计成等强度的相似结构, 如阶梯轴。

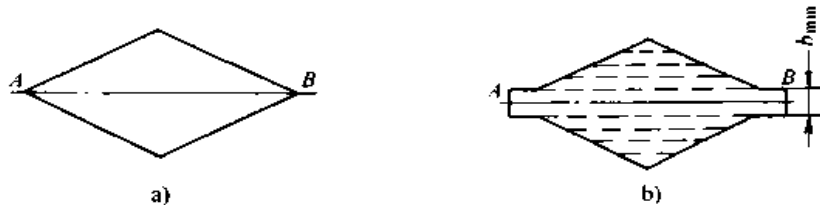


图 15.3-36 考虑剪切强度的等强度梁

a) 不合理 b) 合理

2 提高刚度的结构设计

刚度是零件、部件或机器在外载荷的作用下

抵抗位置变化及形状变化的能力。零件刚度分为整体变形刚度和表面接触刚度两种。前者指零件整体在载荷的作用下发生的伸长、缩短、弯曲和

扭转等的弹性变形；后者是指因两零件接触表面上的微观凸峰，在外载荷作用下发生变形所导致的两零件相对位置的变化。

机器设备的工作能力和质量在许多情况下取决于各部件和零件的刚度。轴的弯曲刚度不足以及齿轮的弯曲和扭转刚度不足时，都会造成齿轮齿向载荷分布不均，如图 15.3-37a 所示；当轴弯曲时，轴颈会发生偏斜，如采用滑动轴承支承，

轴瓦将发生不均匀磨损、发热和胶合现象；如采用调心能力较低的滚动轴承支承，会使轴承寿命降低，如图 15.3-37b 所示为了保证机床的加工精度，被加工的零件和加工零件都必须有一定的刚度，被加工零件的变形（如夹持变形和进刀变形）和机床零件（如主轴、刀架等）的变形都会引起制造误差，如图 15.3-38 所示。发动机的凸轮轴变形过大会引起振动，扰乱阀门的正常启闭。

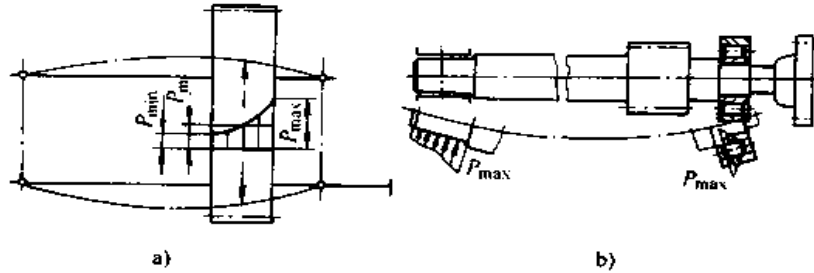


图 15.3-37 零件变形时的载荷分布

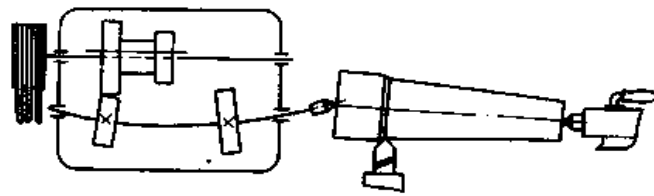


图 15.3-38 机床变形

零件的整体刚度计算可利用材料力学公式计算零件的弹性变形量：等截面拉杆的伸长量、集中力位于梁的中点和分布力系的挠度、圆形传动轴的转角。计算公式分别如式 (15.3-1) 所示。

$$\Delta l = \frac{PL}{EF} \quad f = -\frac{PL^3}{48EJ} \quad (15.3-1)$$

$$f = -\frac{qL^4}{384EJ} \quad \varphi = \frac{M_n L}{GJ_p}$$

- 式中 Δl ——杆的伸长量；
 f ——梁的最大挠度；
 φ ——传动轴转角；
 P ——杆受拉力或梁的横向集中力；
 L ——杆和传动轴的长度、梁的跨距；
 E ——材料的弹性模量；
 G ——材料的剪切弹性模量；
 F ——杆的截面积；
 J ——梁的惯性矩；
 J_p ——传动轴的极惯性矩。

由上述计算公式可知零件的弹性变形与零件承受的载荷大小、载荷形式、材料、支点的跨

距、截面尺寸和形状等因素有关。

影响零件刚度的材料因素是弹性模量，材料的弹性模量愈大，零件的刚度愈大，常用材料的弹性模量见表 15.3-3 所列。可见同类金属材料弹性模量相差不大，因此以改变材料的 E （或 G ）来提高零件的刚度是不起作用的。

表 15.3-3 金属的弹性模量 (MPa)

金属材料	弹性模量 E	切变模量 G
钢	$(200 \sim 220) \times 10^3$	81×10^3
铸 钢	$(175 \sim 216) \times 10^3$	$(70 \sim 84) \times 10^3$
铸 铁	$(115 \sim 160) \times 10^3$	45×10^3
青 铜	$(105 \sim 115) \times 10^3$	$(40 \sim 42) \times 10^3$
硬铝合金	71×10^3	27×10^3

通常采用如下方法提高零件的刚度。

(1) 改善零件结构形式减小弯矩数值

弯矩是引起弯曲变形的主要原因，减小弯矩数值也就是提高弯曲刚度。如前所述的卸荷皮带

轮结构，带轮的压轴力由箱体承担，传动轴只承受转矩，不会产生弯曲变形。

设计时尽量使受力点靠近支点，如铸件进行人工时效时，图 15.3-39b) 的方式堆放比图 15.3-39a) 更合理，铸件内的弯矩较小，变形也就小。

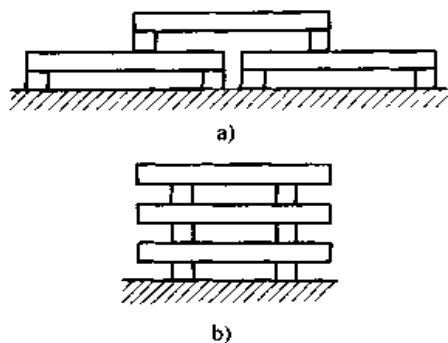


图 15.3-39 铸件堆放结构对比
a) 不合理 b) 合理

又如结构允许的条件下，悬臂布置的齿轮和带轮应尽可能的靠近轴承支点（图 15.3-40），尽量减小悬臂 a 及 b 的数值，从而减小了齿轮和带轮对传动轴弯曲变形的影响。

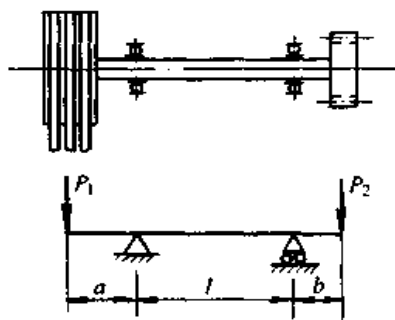


图 15.3-40 悬臂支承结构

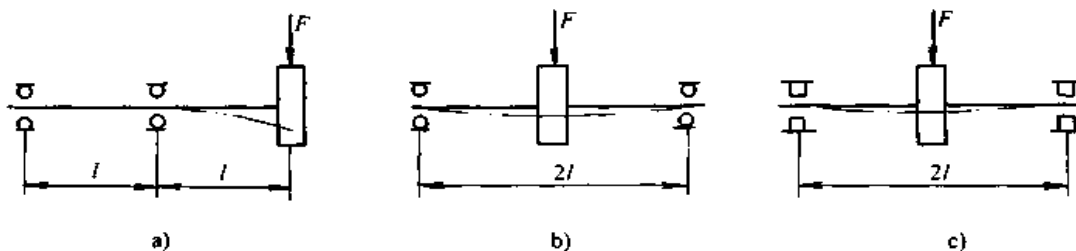


图 15.3-42 悬臂和双支点支承方式
a) 悬臂结构 b) 球轴承简支结构 c) 滚子轴承固支结构

巧妙地安排各载荷方向，使之对零件的影响可以相互抵消，也是结构布局合理的原则之一。如车床主轴的受力形式，如图 15.3-41 所示， P 为切削力， Q 为传动力，图 15.3-41a) 布局形式，前轴承 B 受力较大，但轴上两载荷对轴端产生的弯曲变形可相互抵消一部分，所以主轴外伸端的变形较小。对于轴承刚度好，而精度要求高的车床应采用这种布局形式。图 15.3-41b) 外伸轴端弯曲变形影响叠加，刚度较差，但轴承 B 受力较小，适于轴承刚度较差，精度要求不高的车床。

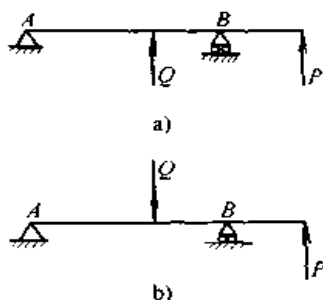


图 15.3-41 不同的车床主轴布局
a) 刚度较高 b) 刚度较低

把集中力分成为几个小的集中力或改为分布力，也可以取得减小弯矩提高弯曲强度的效果，由式 (15.3-1) 可知，将集中力 P 以分布载荷 ($qL = P$) 代之，简支梁的最大挠度仅为集中力作用时的 62.5%。

(2) 支承方式和位置

在支承设计中尽量避免采用悬臂方式。图 15.3-42a 为悬臂结构，图 15.3-42b 为球轴承支承结构，图 15.3-42c 为滚子轴承固支结构，这三种支承结构形式的最大弯矩之比为 4:2:1，最大挠度之比为 16:4:1，由此可见支承方式不同，刚度差异较大。

由式(15.3-1)可知,简支梁的挠度与支点跨距的三次方(集中力)或四次方(分布力)成正比,所以减小支点间的跨距能有效地提高梁的刚度,工程上对镗刀的外伸长度有一定的规定,以保证镗孔的精度要求,如图15.3-43a所示,在跨度不能缩短的情况下,可考虑增加支承或增加约束的方法提高梁的刚度,在刀杆端部加装尾架,如图15.3-43b所示,以提高镗刀杆的刚度,车削细长工件时,还可加中心架或跟刀架支承,减小变形量,如图15.3-44所示。

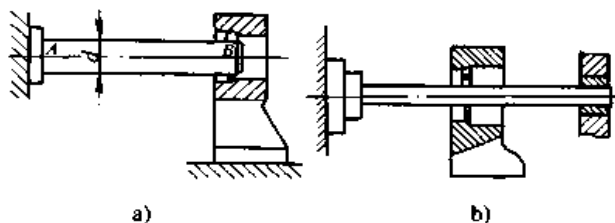


图 15.3-43 镗刀支承结构对比
a) 原结构 b) 改进结构

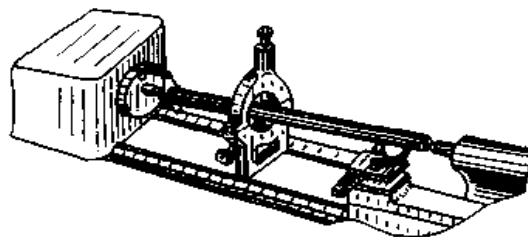


图 15.3-44 中心架支承结构

对较长的传动轴可采用三支承,或用长轴承或双排轴承,达到增加约束减小弯曲变形的目的。

(3) 合理的截面形状

选择合理的截面形状,就是在条件许可的情况下增大杆的截面积 F 、梁的惯性矩 J 和传动轴的极惯性矩 J_p 。当截面面积相同时,中空截面比实心截面惯性矩和极惯性矩大,表 15.3-4 列举了几种实心截面与空心截面惯性矩的对比:工字型、槽形、T字形都比矩形截面有更大的惯性矩和极惯性矩(见表 15.3-5 所列)。所以吊车大梁一般采用工字型或箱形截面来提高刚度。

表 15.3-4 不同空心截面形状惯性矩对比

序号	截面形状	抗弯惯性矩 (相对值)	抗扭惯性矩 (相对值)	序号	截面形状	抗弯惯性矩 (相对值)	抗扭惯性矩 (相对值)
1		1	1	5		1.04	0.88
2		3.03	2.89	6		4.13	0.43
3		5.04	5.37	7		3.45	1.27
4		—	0.07	8		7.35	0.82

(4) 加强肋和割板

采用加强肋或割板可提高零件或机架的刚度，设计加强肋应遵守下列原则：

承载的加强肋应在受压的状态工作，避免受拉情况，如图 15.3-45 所示，图 15.3-45b 中肋板

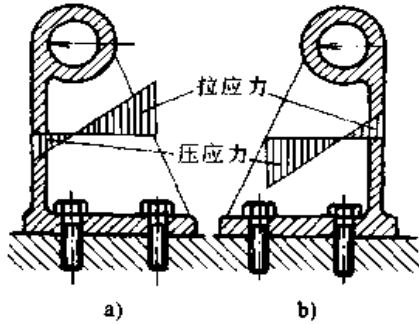


图 15.3-45 铸铁支架比较
a) 不合理 b) 合理

侧受较大的压应力，符合铸铁等脆性材料的特性，此结构较为合理。

三角肋必须沿至外力的作用点处，如图 15.3-46b) 所示。图 15.3-46a) 两种肋板结构，不但对支承没有加强作用，反而会降低梁的强度和刚度，因在某些截面上抗弯截面模量低于无肋板值，只有图 15.3-46b) 的肋板结构对强度和刚度才均得到加强。

加强肋的高度不易过低，否则会削弱截面的弯曲强度和刚度。如图 15.3-47 所示，随加强肋的增高，截面的抗弯截面模量 W 和惯性矩 J 也随之增大，因此高肋板比低肋板有更高的强度和刚度。

为了加强空心截面铸件的刚度，常采用在空心结构内部加不同形式的割板，表 15.3-6 为四种有割板截面的弯曲刚度和扭转刚度的比较。

表 15.3-5 常用几种截面形状对比

截 面		弯 曲			扭 转			
形 状	面积/ cm ²	许用弯矩/ (N·m)	相对强度	相对刚度	许用扭矩/ (N·m)	相对强度	单位长度许用 扭矩/(N·m)	相对刚度
	29.0	$4.83\sigma_{wp}$	1.0	1.0	$0.27\tau_{Tp}$	1.0	$6.6G\varphi_{0p}$	1.0
	28.3	$5.82\sigma_{wp}$	1.2	1.15	$11.6\tau_{Tp}$	43	$58G\varphi_{0p}$	8.8
	29.5	$6.63\sigma_{wp}$	1.4	1.6	$10.4\tau_{Tp}$	38.5	$207G\varphi_{0p}$	31.4
	29.5	$9.0\sigma_{wp}$	1.8	2.0	$1.2\tau_{Tp}$	4.5	$12.6G\varphi_{0p}$	1.9

注： σ_{wp} 为许用弯曲应力； τ_{Tp} 为许用扭转切应力； G 为切变模量； φ_{0p} 为单位长度许用扭转角。

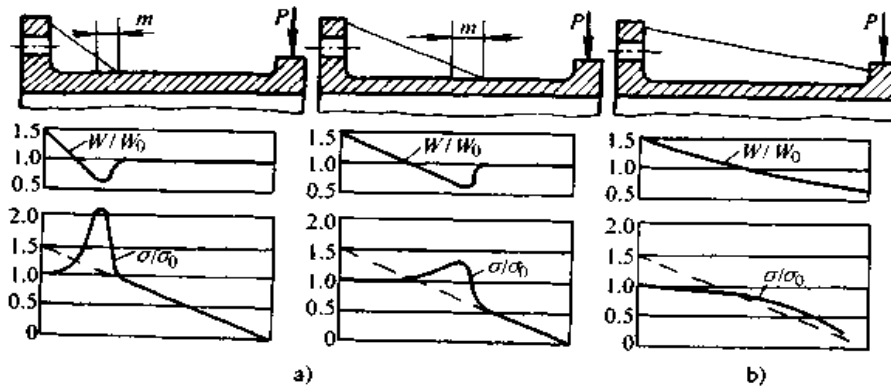


图 15.3-46 三角肋对零件强度的影响

a) 不合理 b) 合理

W —有肋板抗弯截面模量 W_0 —无肋板抗弯截面模量

σ —有肋板弯曲应力 σ_0 —无肋板弯曲应力

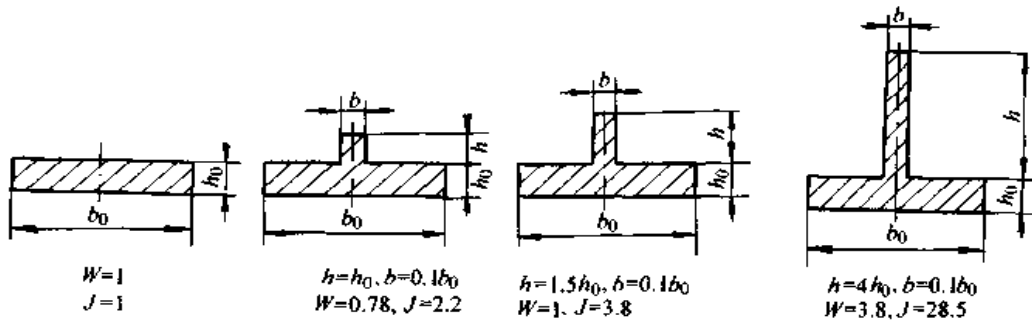


图 15.3-47 加强肋高度强度与刚度的影响

表 15.3-6 不同剖板截面的刚度对比

号码	形状	相对弯曲刚度 C_b	相对扭转刚度 C_T	相对质量 R	$\frac{C_b}{R}$	$\frac{C_T}{R}$	号码	形状	相对弯曲刚度 C_b	相对扭转刚度 C_T	相对质量 R	$\frac{C_b}{R}$	$\frac{C_T}{R}$
1 (基型)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4		1.17	2.16	1.38	0.85	1.56
2a		1.10	1.63	1.10	1.00	1.48	5		1.78	3.69	1.49	1.20	2.47
2b		1.09	1.39	1.05	1.04	1.32	6		1.55	2.94	1.26	1.23	2.34
3		1.08	2.04	1.14	0.95	1.79							

3 提高耐磨性的结构设计

在相互摩擦下工作的零件，其结果将造成能

量的损耗、效率降低、温度升高、表面磨损。过度磨损会使机器丧失应有的精度，产生振动和噪音，缩短使用寿命。在全部失效零件中，因磨损

而失效的零件约占80%。影响磨损的因素很多,比较复杂,通常用条件性计算,如限制工作表面的压强、限制滑动速度和限制工作表面摩擦功耗等、摩擦副材料的选择、润滑剂和润滑方式的选择等方面。

(1) 改变摩擦方式

摩擦按运动方式可分为滑动摩擦和滚动摩擦,如果按摩擦副间有无润滑剂,摩擦又可分为干摩擦、边界润滑和液体润滑等。不同的摩擦形式,对零件的磨损是不同的,设计时要根据实际情况选择。

螺旋传动中,分为滑动螺旋、滚动螺旋和静压螺旋。滑动螺旋中,螺杆与螺母螺纹副之间是滑动摩擦,其主要失效形式是螺纹副的过度磨损,提高螺纹副的耐磨性。改滑动摩擦为滚动摩擦是减缓磨损主要的措施之一。图15.3-48所示为一种滚珠螺旋。滚珠螺旋传动就是在具有螺旋槽的螺杆和螺母之间,连续填充滚珠作为滚动体的螺旋传动。改变摩擦形式后,其摩擦阻力减小、效率比滑动螺旋传动高2~4倍。

图15.3-49为静压螺旋的结构示意图:在静压螺旋中,螺杆仍为梯形螺纹的普通螺杆,但在

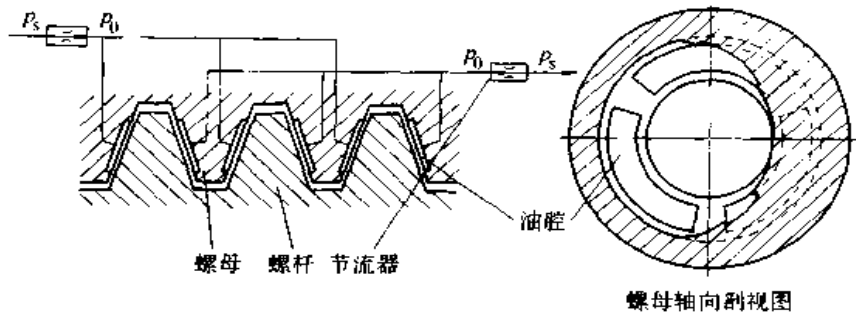


图15.3-48 滚珠螺旋的工作原理
1—齿轮 2—滚道 3—键 4—滚珠
5—螺杆 6—螺母 7—支架

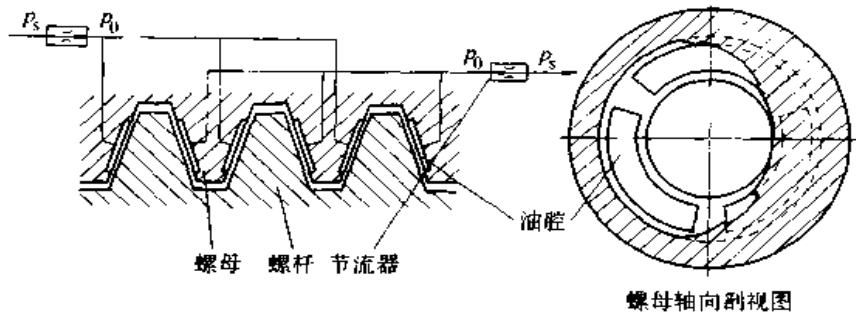


图15.3-49 静压螺旋结构示意图

滚动螺旋和静压螺旋虽降低了螺旋的磨损,提高了传动效率,但缺点是结构复杂,成本较高。

链传动中,链与链轮在啮合时,摩擦磨损严重,采用的套筒滚子链的结构,就是利用了滚动摩擦方式来降低磨损,提高链条和链轮的耐磨性和寿命。图15.3-50为滚子链结构图。

(2) 磨损均匀

磨损均匀在某种程度上就是减缓磨损,以此提高零件的耐磨性。均匀磨损可从以下方面入手。

螺母每圈螺纹牙两个侧面的中径处,各开三四个油腔,压力油通过节流器进入油腔,产生一定的空腔压力。螺杆未受载时,螺杆的螺纹牙位于螺母的螺纹牙的中间部位,处于平衡状态。当螺杆受轴向载荷时,螺杆沿载荷方向产生位移,螺纹牙一侧间隙减少,另一侧间隙增大;由于节流器的调节作用,使间隙小一侧油腔压力增高;而另一侧油腔压力降低。于是两侧油腔变形成了压力差,从而螺杆处于新的平衡状态。

1) 压强均匀 作用在摩擦表面上的载荷愈大,磨损愈严重,使载荷均匀地分布在整個摩擦表面上,单位面积上的载荷就会减小。前述的螺栓联接中,通过改变螺母和螺杆的刚度,使载荷在螺纹牙上分布均匀;也可修整摩擦表面,避免载荷集中和局部的严重磨损,齿轮的齿长修形、滚动轴承的滚子修形和道轨滚子修形等方法,都可避免加工和安装误差、受载变形引起的偏载和局部的剧烈磨损,轮齿和滚子做成鼓形,中间较两端凸起(0.01~0.02)mm就会产生较好的均载效果;此外应使载荷与摩擦工作表面对称、减

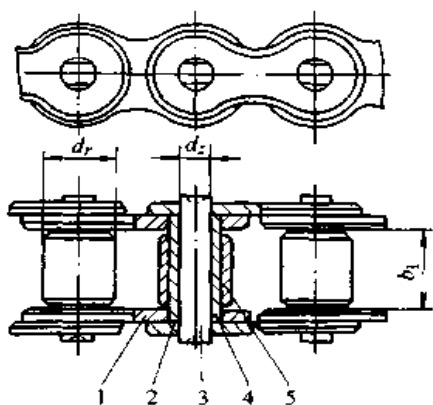


图 15.3-50 滚子链结构

1—内链板 2—外链板 3—销轴 4—套筒 5—滚子

少使压强不均的载荷出现（如倾覆力矩）、摩擦表面尽量小。

2) 速度均匀 在同一摩擦表面上, 相对滑动速度要尽量一致。避免由于速度不同, 造成同一摩擦表面磨损快慢不一, 引起载荷集中, 加剧磨损。在止推滑动轴承的结构设计中, 就利用了这一原则。止推滑动轴承的相对摩擦表面的边缘线速度最大, 越向中心相对滑动速度越小, 中心速度为零, 引起边缘摩擦表面快速磨损, 摩擦表面中部凸起, 有效承载面积减小, 单位面积上的载荷加大, 磨损加剧。为改善磨损状况止推滑动轴承做成空心式、单环和多环结构, 如表 15.3.7 所示。

表 15.3-7 止推滑动轴承的结构与尺寸

空心式	单环式	多环式
<p>d_2 由轴的结构设计拟定 $d_1 = (0.4 \sim 0.6)d_2$ 若结构上无限制, 应取 $d_1 = 0.5d_2$</p>	<p>d_1, d_2 由轴的结构设计拟定</p>	<p>d 由轴的结构设计拟定 $d_2 = (1.2 \sim 1.6)d, d_1 = 1.1d$ $h = (0.12 \sim 0.15)d, h_0 = (2 \sim 3)h$</p>

3) 防止阶梯磨损 相互运动的摩擦表面, 因尺寸不同, 有可能一部分的表面不参加磨损, 因此不磨损与磨损之间形成台阶, 称为阶梯磨损, 造成零件表面磨损不均匀, 由此降低零件的工作寿命。如图 15.3-51 所示, 运动件与支承件的尺寸不同, 则运动件或支承件有一部分不磨损而生成阶梯磨损。合理地设计运动件的行程终端位置, 可避免阶梯磨损的产生。

图 15.3-52 所示, 轴肩与轴瓦端面很难保证尺寸的一致性, 将较软的一侧设计成全磨损, (如图 15.3-52b), 较硬的一侧由于磨损量较小, 所以阶梯磨损不明显。当轴肩与轴瓦的硬度比较接近时, 则将容易修复或更换的零件, 设计成阶

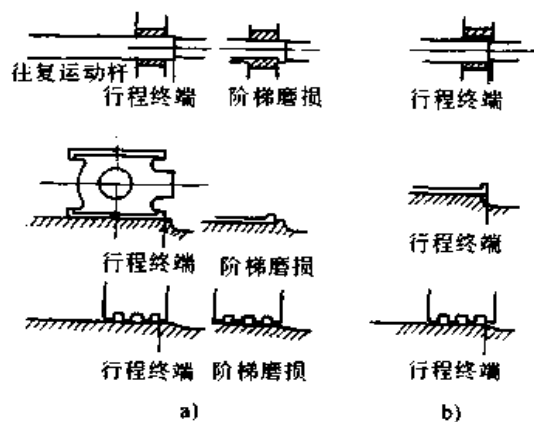


图 15.3-51 运动行程终端对比

a) 不合理 b) 合理

梯磨损, 保护维修难的零件。图 15.3-53 所示, 由于轴肩比轴瓦难于修复, 所以将轴瓦的尺寸设计成大于轴肩的高度。



图 15.3-52 全磨损轴瓦结构
a) 不合理 b) 合理



图 15.3-53 阶梯磨损轴瓦结构
a) 不合理 b) 合理

(3) 材料分体结构

耐磨和减磨性能好的材料, 通常价格昂贵,

如铜合金、白合金等材料。为了避免使零件的成本过高和防止零件的局部磨损造成整个零件的报废。采用在零件的摩擦表面局部使用耐磨材料, 而零件的大部分基体使用廉价材料 (如铸铁或钢材)。

蜗杆传动效率低、发热大、磨损严重, 因此为提高蜗杆传动的耐磨性, 蜗杆材料一般选用热处理性能好的碳钢或合金钢, 而蜗轮常采用各种铜合金, 为节省材料, 蜗轮采用如图 15.3-54 所示的组合式结构。图 15.3-54a 所示为齿圈式, 由青铜齿圈及铸铁轮芯所组成。齿圈与轮心多用 H7/r6 配合, 并加装 4~6 个紧定螺钉, 以增强联接的可靠性; 图 15.3-54b 所示为螺栓联接式, 联接螺栓可用普通螺栓或铰制孔螺栓, 适用于尺寸较大或容易磨损的蜗轮; 图 15.3-54c 所示为拼铸式, 青铜齿圈浇注在铸铁轮芯上, 适于批量生产的蜗轮。

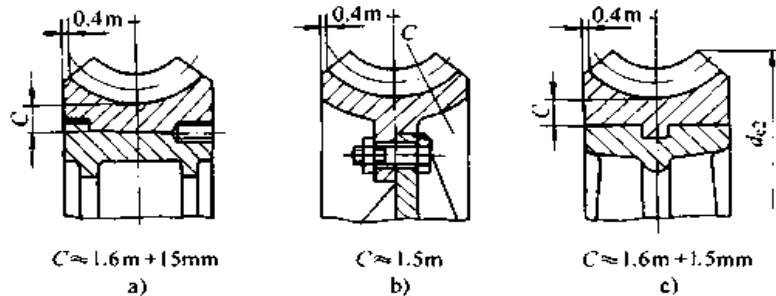


图 15.3-54 组合蜗轮结构

a) 齿圈式 b) 螺栓联接式 c) 拼铸式

图 15.3-55 所示为滑动轴承的结构, 将参加摩擦的局部制成轴瓦, 其他部分为壳体。图 15.3-56 所示为轴瓦与壳体的固定结构。为进一步提高的强度和工艺性, 节省减磨材料, 常将轴瓦做成双金属, 以钢、铸铁或青铜做瓦背, 其上浇注一层减磨材料, 称为轴承衬, 图 15.3-57 所示为瓦背与轴承衬的联接结构。

在带传动中, V 带的结构也采用了材料分体结构, V 带的内部用强度高的材料, 而参与摩擦的表面用另一种耐磨的材料, 如图 15.3-58 所示。

如上所述相对摩擦的两个零件, 设计时首先考虑尺寸大、价格高的零件不发生磨损失效, 如设备的主轴、发动机的曲轴和蜗杆等。而尺寸小、价格低的零件应考虑磨损后应便于更换和维

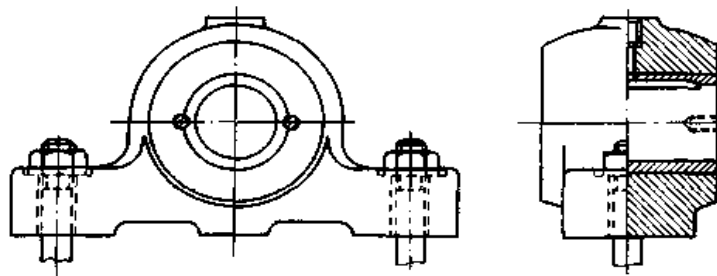


图 15.3-55 滑动轴承结构

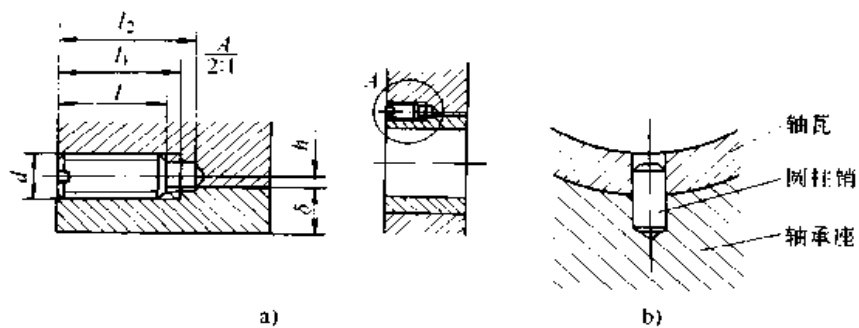


图 15.3-56 轴瓦的固定结构
a) 用紧钉螺钉 b) 用销钉

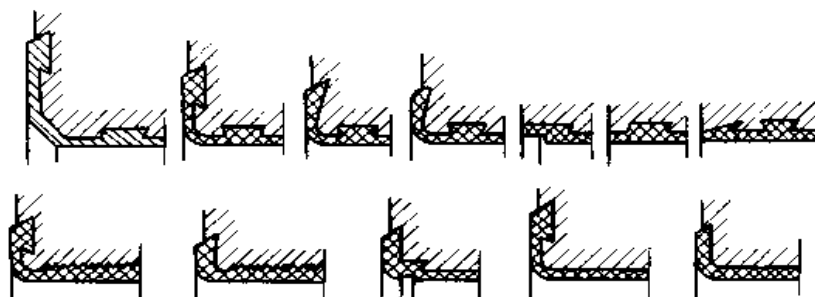


图 15.3-57 瓦背与轴承衬结构

修，如轴瓦、制动瓦块或瓦块表面的耐磨材料、制动器的摩擦片等，图 15.3-59 所示为一种可拆卸式的制动瓦结构。

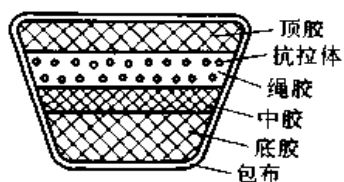


图 15.3-58 V带的结构

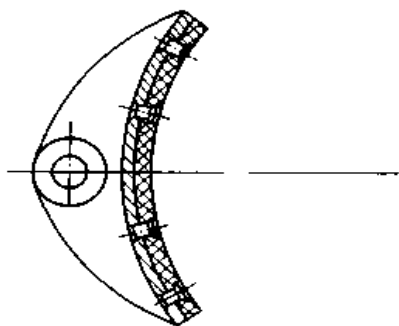


图 15.3-59 可拆卸式的制动瓦

(4) 磨损补偿结构(螺旋、滚动、滑动轴承)

磨损是不可避免的，对于精度要求高的设备，必须考虑设计磨损间隙补偿结构。

螺旋螺纹副间一般总存在间隙，磨损后间隙加大，当螺杆反向运动时就要产生空程。所以某些精密螺旋，应采取消除间隙措施。剖分螺母结构能在径向和轴向调整间隙，如图 15.3-60 所示。

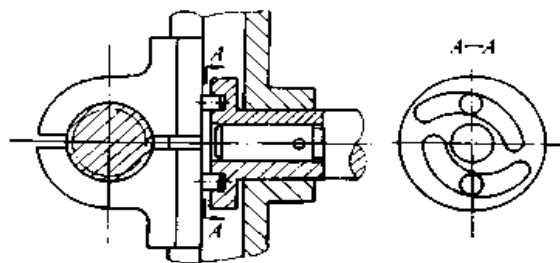


图 15.3-60 剖分螺母

图 15.3-61a、b 分别为用圆螺母定期调节轴向间隙和用弹簧张紧而自动消除间隙的螺母结构。

为了保证机器的运转精度，调整滑动轴承的间隙是非常重要的手段。如图 15.3-62 所示为剖分式滑动轴承，通过更换两半瓦间的垫片厚度的方法，调节轴瓦的距离；

图 15.3-63 为整体间隙调节轴承，利用锥面调节轴承间隙。

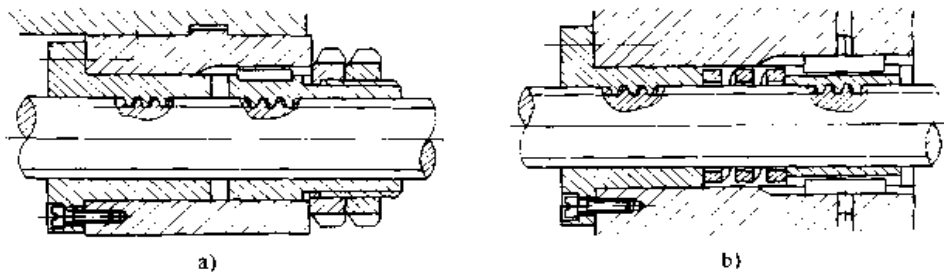


图 15.3-61 可轴向消除间隙的螺母
a) 圆螺母调节间隙 b) 弹簧调节间隙

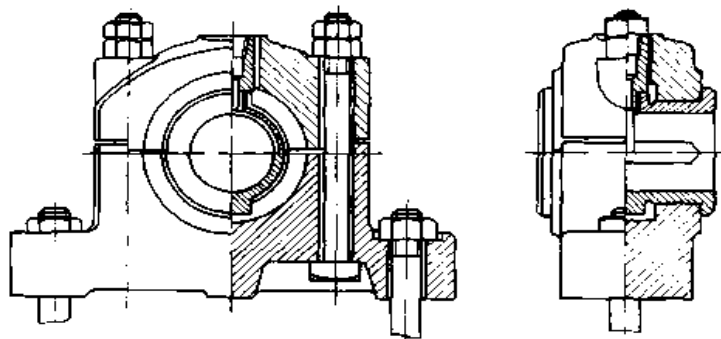


图 15.3-62 剖分滑动轴承结构

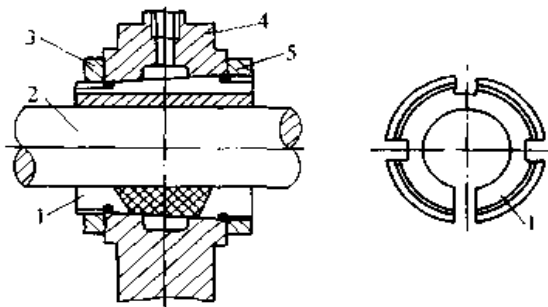


图 15.3-63 整体调隙滑动轴承
1—轴瓦 2—轴 3、5—螺母 4—轴承座

滚动轴承的游隙调整称为预紧，预紧可以提高滚动轴承的旋转精度，增强轴承刚度，减小轴的振动。图 15.3-64 所示为在一个支点上安装成对角接触轴承的预紧方法。

图 15.3-65、66 所示为采用不同套筒长度和弹簧的预紧方法。

此外，还有通过给机器加保护罩，可以减小机器及零部件受外界干扰，减缓磨损的产生。尤其是在灰尘较严重的工作环境。如给带传动加保护罩、采用闭式齿轮传动等。还有增加零件磨损裕度以及合理地设计润滑结构等措施。

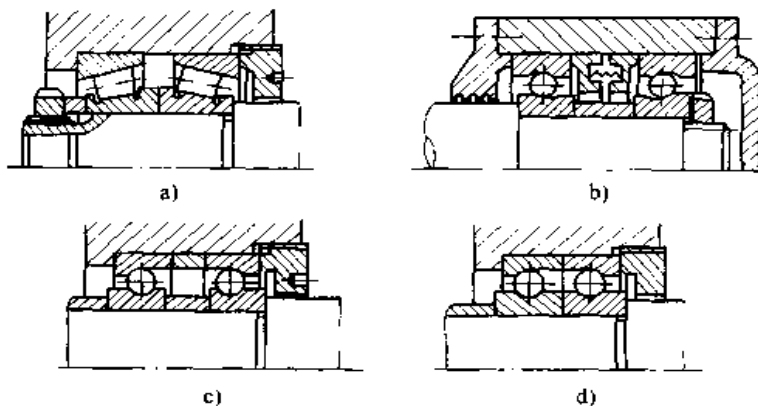


图 15.3-64 一个支点安装成对向心推力轴承的预紧

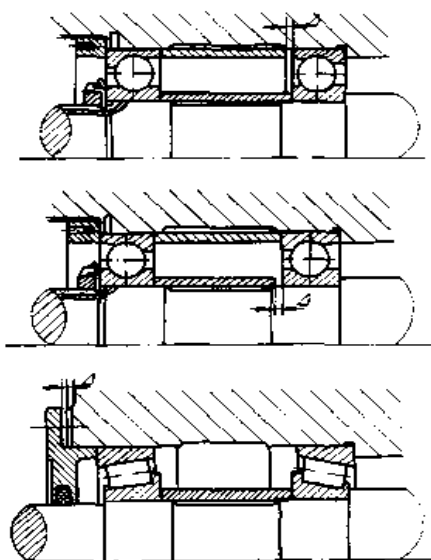


图 15.3-65 采用不同长度套筒的预紧

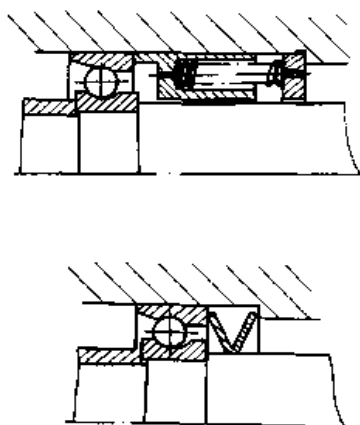


图 15.3-66 利用弹簧预紧

4 防腐蚀的结构设计

腐蚀是金属与周围介质之间发生的化学过程。在大气中，金属零件会生锈，化工厂的设备零件、管道、容器、海船的船体等将由于各种溶液及气体的作用而损坏。

造成零件腐蚀的主要因素有：零件材料的热力不稳定性，热力不稳定性愈高，愈易出现腐蚀，铝、钛、铁等金属热力不稳定性高，镍、钼、钨等金属热力不稳定性较高，铜、银热力稳定性中等；铂热力稳定性高；金具有完全热力稳定。零件周围的环境介质，介质可以是空气、水蒸汽、碱的水溶液、气体和非水溶液等，介质不

同，腐蚀的机理不同，防范的措施不同。可将腐蚀分为：大气腐蚀、液体腐蚀、地下腐蚀、应力腐蚀和生物腐蚀等。由于腐蚀的原因较复杂，防腐蚀的方法也很多，如在零件的表面采用电镀、喷涂、上漆、渗透、滚压和化学转化等工艺方法，覆一层对金属呈惰性的非金属材料或覆一层在一定的介质中具有较低的腐蚀速度的金属，起到保护零件的基体作用；使零件处于钝化状态，即在零件的表面形成很薄的氧化层；制造合金时可利用钝化性能，在基体金属中加入易钝化金属，如不锈钢就是加入了铬和镍；改变环境介质的性能，即降低氧化物的浓度、在介质中加入抑制剂（缓蚀剂）；改变被保护零件的电势，对材料阴极化或阳极化。

本节通过结构的合理设计，介绍减缓腐蚀的几种措施。

(1) 防止沉积区和沉积缝

腐蚀溶液的运送管道和储藏容器，结构设计时要保证其中的腐蚀溶液能够排放干净，避免结构使腐蚀溶液沉积，容器的底部应倾斜，液体排放口放在容器的最低处，如图 15.3-67 所示。

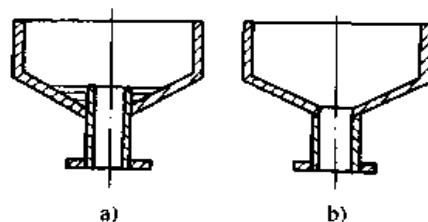


图 15.3-67 容器结构

a) 不合理 b) 合理

零件的结构间隙内会产生严重的间隙腐蚀，零件的间隙内由于金属浓度不同，可使不锈钢或铝合金等材料的钝性消失，防腐性大大降低。防止间隙腐蚀的措施有：设备中不出现搭接缝隙，如图 15.3-68a 所示；如缝隙避免不了，要设法填补，如图 15.3-68b 和图 15.3-69 所示采用聚合物材料填充缝隙。除此以外加装保护盖也是有效的方法，如图 15.3-70a 所示螺钉的头部的坑凹处极易腐蚀破坏，图 15.3-70b 将螺钉倒置安装和图 15.3-70c 加装塑料保护套，都是有效的防腐措施；选择不易产生缝隙腐蚀的材料组合。

(2) 防止接触腐蚀

如果在联接处采用了不同类的金属，在它们中间必须引入绝缘衬垫或油漆颜料涂层（如图

15.3-71所示), 否则在两金属的接触表面会产生接触腐蚀。

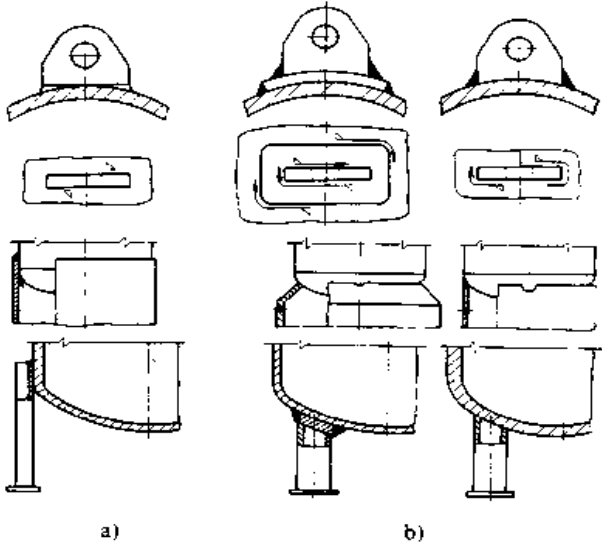


图 15.3-68 避免间隙结构
a) 不合理 b) 合理



图 15.3-69 填充间隙结构

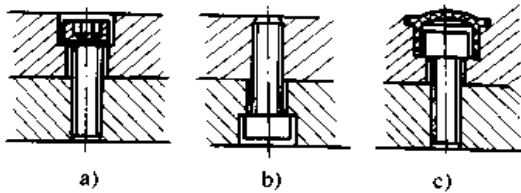


图 15.3-70 螺钉防腐结构
a) 不合理 b) 合理 c) 合理

(3) 便于更换腐蚀零件

零件的腐蚀失效有时很难避免, 将易腐蚀损坏的零件及时更换, 在某种程度上是最经济方便的。因此结构设计时, 应使零件具有良好的可更

换性。如图 15.3-72 所示钢管与铜管的联接, 为防止两种材料的管路直接联接而产生接触腐蚀, 在管路中加一段容易定期更换的管, 并把管路直径加大, 留出腐蚀裕量。

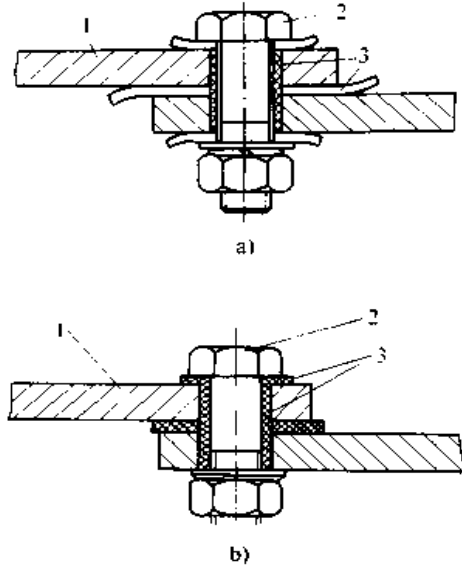


图 15.3-71 联接绝缘结构
a) 绝缘片过大不合理 b) 绝缘结构合理
1—金属被联结件 2—金属联结件 3—绝缘材料

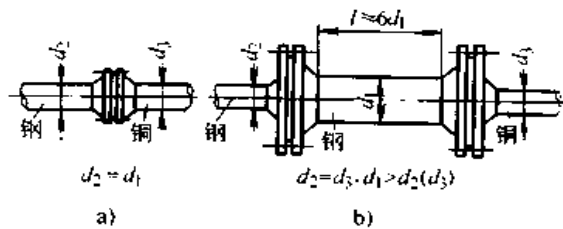


图 15.3-72 易更换结构
a) 不合理 b) 合理

零件防腐方法的选择要根据经济分析来进行。有时更换一个有腐蚀而报废的零件, 要比一开始就采用防腐蚀材料便宜。反之, 在另外一些情况下, 为了更换受腐蚀的零件或设备而停产的费用, 要高于采用特殊材料和结构的费用。

第 4 章 满足工艺要求的结构设计

1 铸件结构设计

铸件结构设计除要保证其工作性能和机械性能以外，特别要考虑铸造工艺和铸造性能的要求。此外还必须考虑不同铸造方法对铸造结构的不同要求。

1.1 简化铸造工艺

铸件结构在满足使用功能的前提下，应尽量简化铸造工艺环节，降低成本，提高质量。

(1) 合理分型面

减少分型面数量、分型面力求简单，尽量呈平面，可降低造型时耗和提高铸造精度，见表 15.4-1 表示。

(2) 合理型芯

造型中应避免不必要的型芯和活块，见表 15.4-2 所示。

(3) 利于起模

凡是垂直于分型面的不加工表面，应有结构斜度，这样起模省力，并可提高铸件的尺寸精度，见表 15.4-3 所示。

(4) 型芯稳定和排气通畅

型芯在铸件中定位支承要可靠，并便于排气，不能产生偏芯、气孔等缺陷。当起支承作用的芯头面数量不够时，可用型芯撑辅助支承，见表 15.4-4 所示。

(5) 易于清砂

通常在铸造结构上设计适当数量和大小的人工孔，一方面为了便于固定型芯和排气，另一方面便于落砂清理，见表 15.4-5 所示。

表 15.4-1 合理的分型面



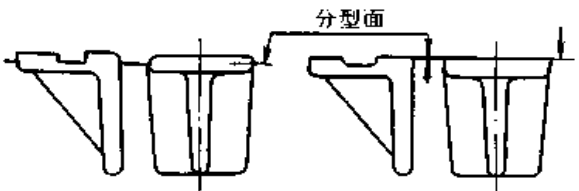
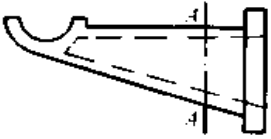
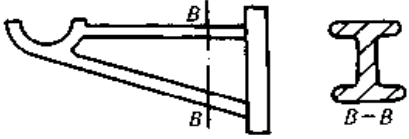
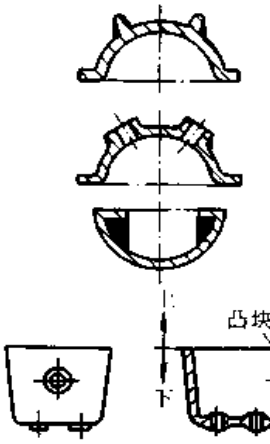
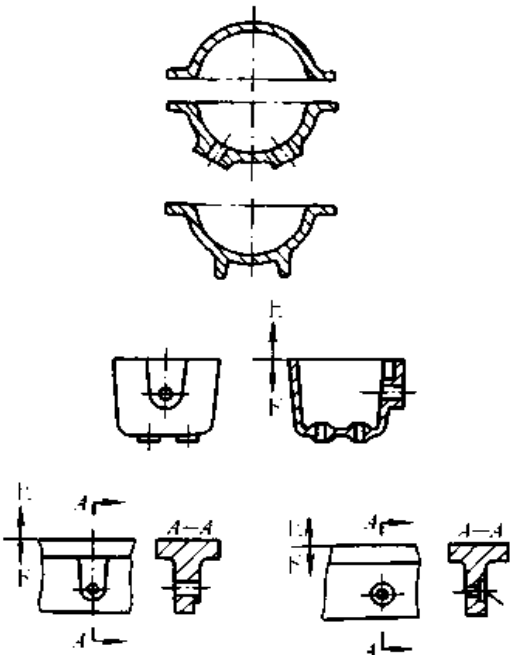
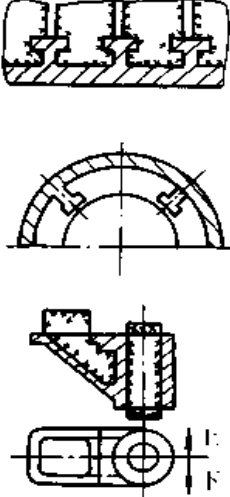
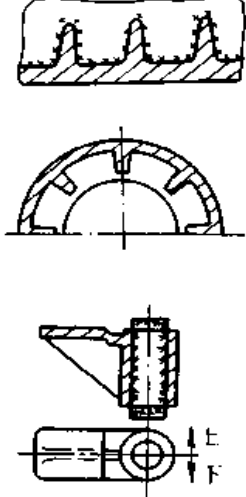
图 例	说 明
 <p>不合理 合理</p>	结构改进后为一个分型面，简化了造型
 <p>不合理 合理</p>	结构改进后使分型面简化在同一平面上
 <p>不合理 合理</p>	结构改进后分型面为平面

表 15.4-2 合理的型芯

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>悬臂支架改为工字梁后，铸型省去了型芯</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后结构省去活块</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>简化型芯结构</p>

续表 15.4-2

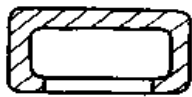
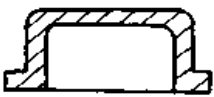
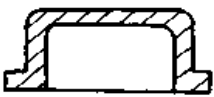

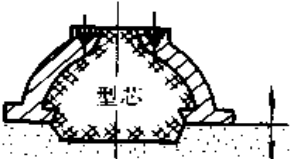
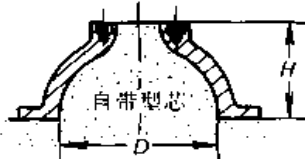
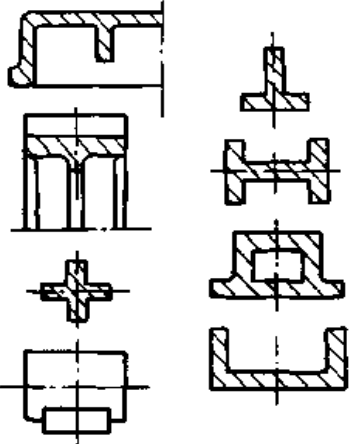
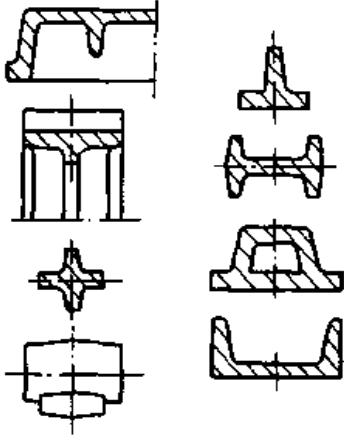
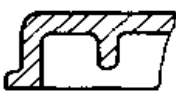
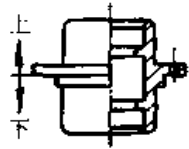
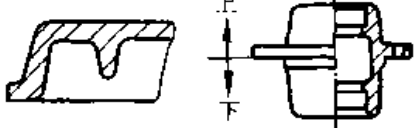
图	例	说 明
  <p>不合理</p>	  <p>合 理</p>	<p>省去了型芯</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	<p>自带型芯取代型芯</p>

表 15.4-3 利于起模

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	<p>结构斜度举例</p>
  <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	<p>改进后在内外型增加了结构斜度</p>

续表 15.4-3

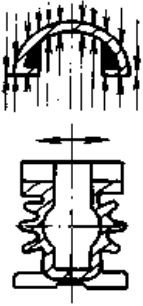
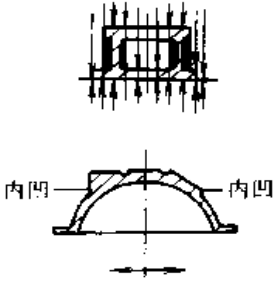
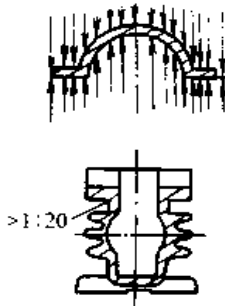
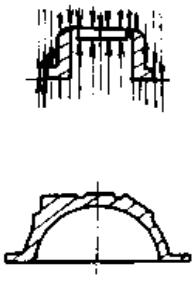
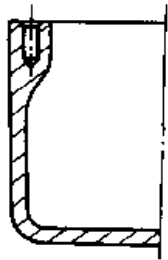
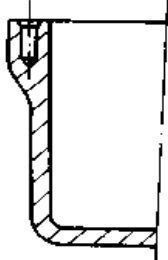
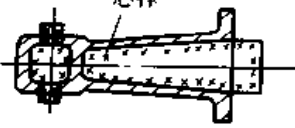
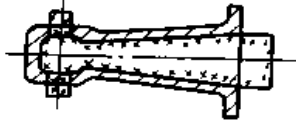

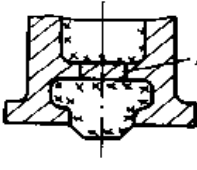
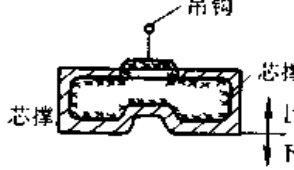
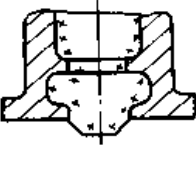
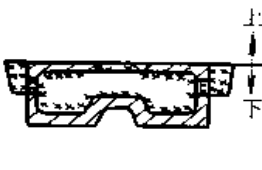
图		例		说 明
				改进后消除了内凹结构，便于直接起模
不合理		合理		
				改进后消除了内切结构，便于直接起模
不合理		合理		

表 15.4.4 型芯稳定排气通畅

图		例		说 明
				改进后型芯支承可靠，利于出气
不合理				
				改进结构，省了芯撑；改进结构，省了芯撑和吊芯
不合理		合理		

续表 15.4-4


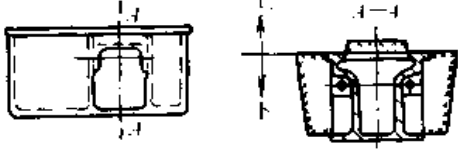
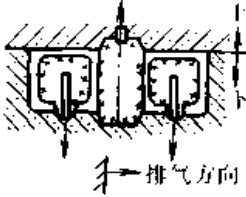
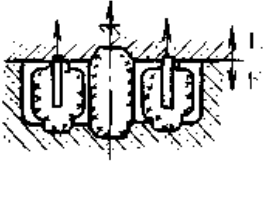
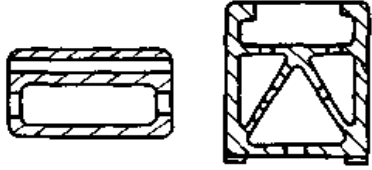
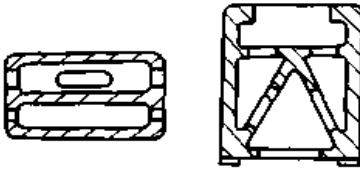
图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后型 芯操作方便
 <p>排气方向 不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后型 芯支承可靠 和便于排气

表 15.4-5 易于清砂

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后增加了工艺 孔、便于出砂

1.2 提高铸造性能

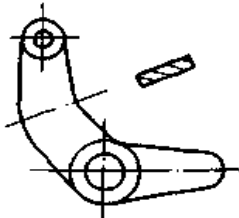
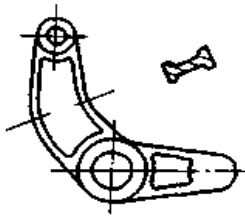
(1) 合理的壁厚

铸件的壁厚取决于铸造材料的流动性和铸造方法。设计时铸件壁厚应尽可能地小，这样既节省材料，又可避免因壁厚造成气泡停留、导致铸

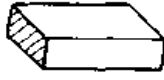

造缺陷。但壁厚过小，也易于产生浇注不足、冷隔缺陷。

为了充分发挥材料的性能，防止铸造缺陷，应根据载荷的性能和大小，选择合理的截面形状，如丁字形、工字形、槽形或箱形结构，并在薄弱的部分设计加强肋，见表 15.4-6 所示

表 15.4-6 合理壁厚

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后用工字型结 构代替实体结构

续表 15.4-6

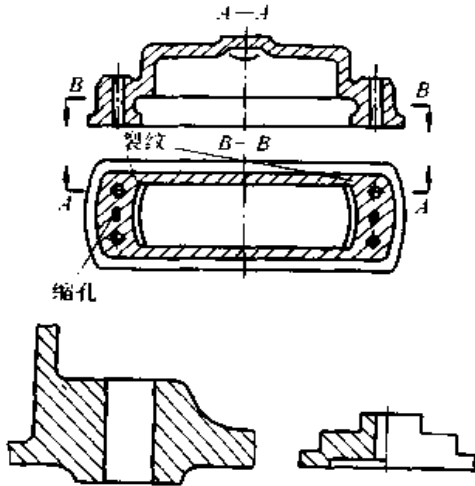
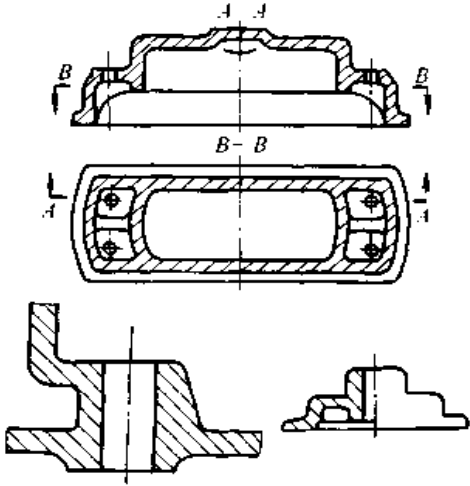
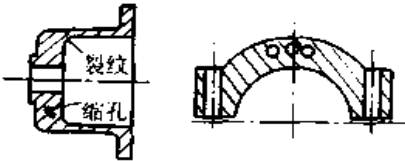
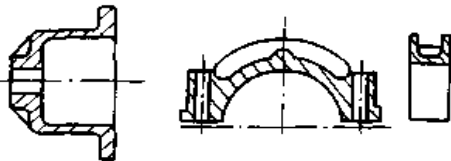
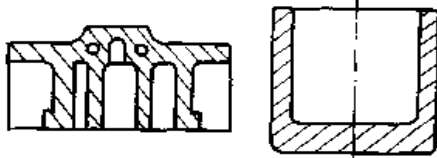
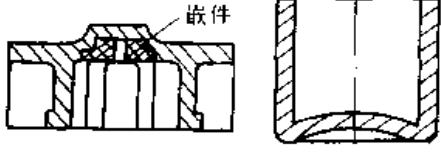
图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后采用薄壁带加强肋结构代替实体结构

(2) 壁厚均匀

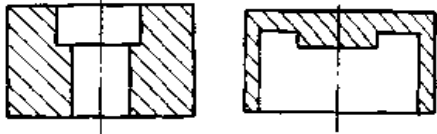
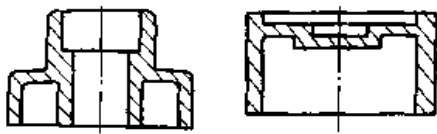
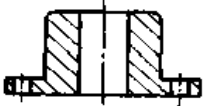
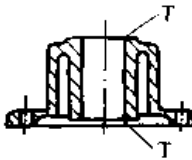
铸件的壁厚不同，冷却速率不一致，容易产生热应力，出现裂纹和变形。另外如壁厚相差过

大，材料在局部过分集中，壁厚处会形成缩孔、疏松等缺陷。如果壁厚均匀上述缺陷可以防止，见表 15.4-7 所示。

表 15.4-7 壁厚均匀

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后壁厚均匀，避免了薄壁与厚壁的连接裂纹和厚壁的缩孔
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后由加强肋代替厚壁，壁厚均匀
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后利用嵌件使壁厚均匀；改进后壁厚均匀

续表 15.4-7

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后外形减小，壁厚均匀；改进后外形不变，壁厚均匀
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后壁厚均匀，增加配合凸台 T

(3) 连接平滑

铸件的连接或转角处，最易出现金属的堆积和内应力，可以采用如下措施防止缺陷的出现。

在铸件结构中设置结构圆角，不但可以防止由金属的局部堆积而产生的缩孔和疏松缺陷。同时也减少了由于结构尺寸突变产生的应力集中的影响，对提高铸件强度有利，见表 15.4-8 所示。

在铸件结构中避免交叉和锐角连接，可以减小热节，避免疏松和缩孔等铸造缺陷，铸件的肋

连接应尽量避免交叉，可采用交错或环状连接，见表 15.4-9 所示。

在铸件结构中厚壁与薄壁的连接要逐步过渡，虽难以做到壁厚均匀一致，但应避免壁厚的突变，以减小应力集中，防止产生裂纹，见表 15.4-10 所示。

(4) 收缩自由

由于铸件壁厚不同，收缩的速率不一致，造成铸件的某些局部收缩受阻，在铸件内产生内应力

表 15.4-8 结构圆角

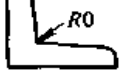
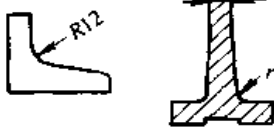
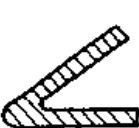
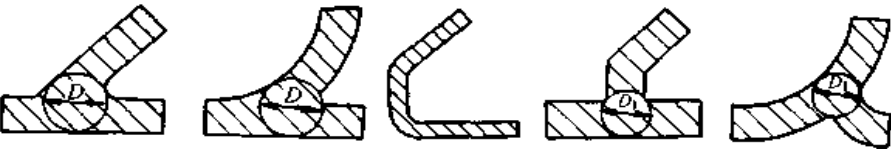
图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后增加 L 形、T 形连接处结构圆角，避免出现裂纹

表 15.4-9 避免交叉和锐角连接

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后避免锐角连接

续表 15.4-9

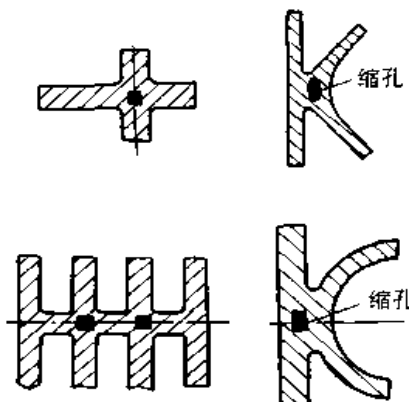
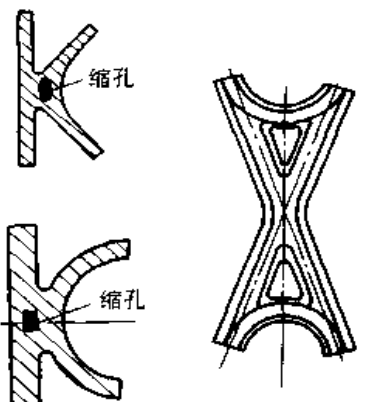
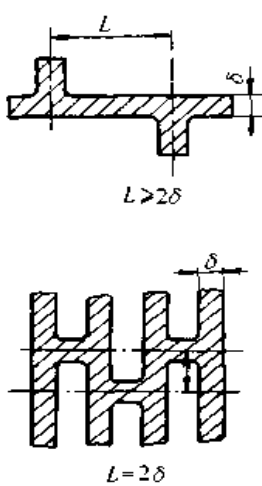
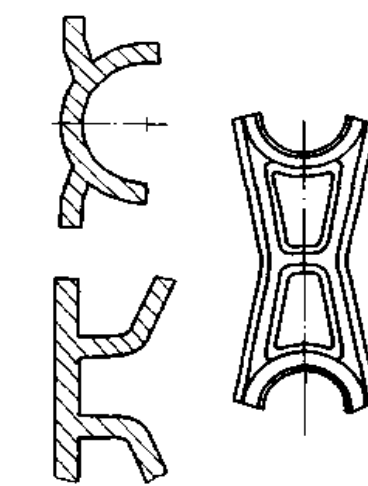
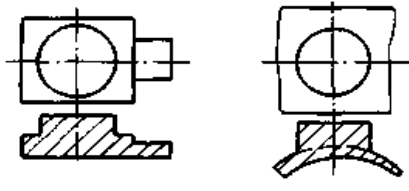
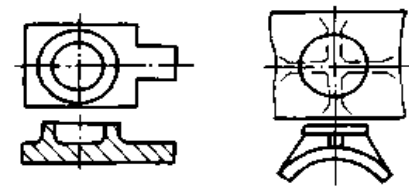
图	例	说 明
		
		<p>改进后由交错连接代替交叉连接</p>

表 15.4-10 厚壁与薄壁的过渡连接

图	例	说 明
		<p>改进后薄厚壁之间过渡平缓</p>

和变形，当内应力大于材料的强度限时，铸件会产生裂纹。因此在设计铸件时，应尽量使其能够自由的收缩，以防止产生裂纹，见表 15.4-11 所示。

(5) 流动畅通

保证铁水畅通的流到铸件的每一处，防止浇注不足等缺陷。具体措施有：

1) 避免过大的水平面，过大的水平面不利于金属的填充，同时平面型腔受液体长时间烘烤，易产生夹沙。此外，大的水平面也不利于气体和非金属夹杂物的排除。因此，铸件结构应尽量避免大的水平面，见表 15.4-12 所示。

2) 按铸件的凝固顺序设计壁厚。铸件壁薄，

在浇注过程中硬化快，因此铸件壁厚自上而下应逐渐减小，见表 15.4-13 所示。

3) 铸件的内壁应小于外壁。对于结构比较复杂的铸件结构，内壁散热条件较差，外壁冷却后，内壁收缩受阻，容易产生裂纹或内应力，见表 15.4-14 所示。

表 15.4-11 收缩自由

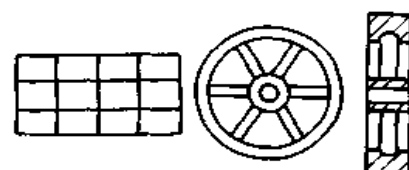
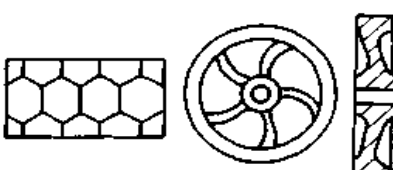


图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不 合 理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后采用蜂窝状加强肋，避免直长肋，以减小刚度；改进后斜弯辐条有收缩余量</p>
 <p style="text-align: center;">不 合 理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后采用交错加强肋，以减小刚度；改进后切断加强肋，以减小刚度</p>

表 15.4-12 避免过大的水平面

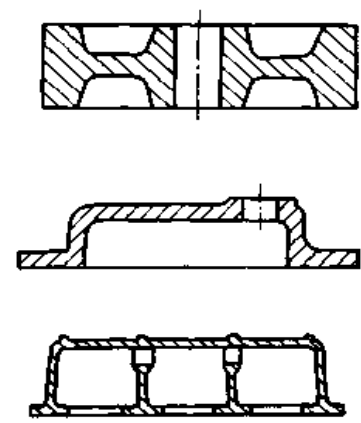
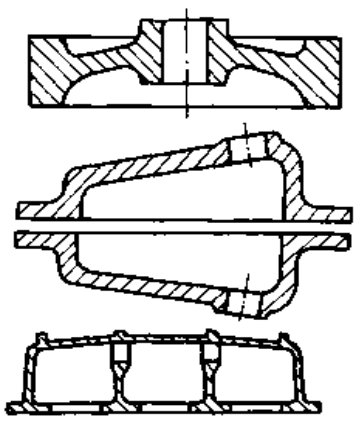
图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不 合 理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后取消大的水平铸造平面，设计为可借重力的斜面</p>

表 15.4-13 按铸件的凝固顺序设计壁厚

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	<p>改进后壁厚沿流道方向自上而下逐渐变薄；改进后壁厚沿流道方向自上而下逐渐变薄</p>

表 15.4-14 铸件的内壁应小于外壁

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	<p>改进后内壁小于外壁</p>

1.3 受力合理

铸件结构也应满足于强度和刚度的要求。尽量降低构件所受载荷或应力的最大值，减少应力集中的影响等。此外，铸件结构还必须考虑：

(1) 优先受压

铸铁材料的抗压强度高于其抗拉强度，因此，应尽量避免铸件在高应力区受拉，见表 15.4-15 所示。

(2) 局部加强

铸件中壳体和薄壁结构居多，当外载荷为集中力时，应在力的作用点处，加强结构，防止壳体承受过大的弯曲应力（表 15.4-16）。

表 15.4-15 优先受压

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	<p>改为内凸结构，减少拉应力；改进后加强肋受压应力</p>

续表 15.4-15

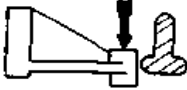

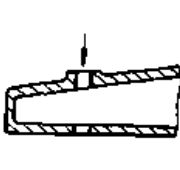
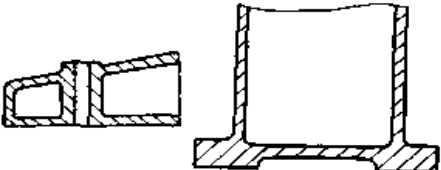
图	例	说 明
		改进后加强肋受压应力

表 15.4-16 局部加强

图	例	说 明
		改进后支承可靠；改进后箱壁支承可靠

1.4 便于切削加工

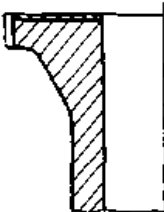
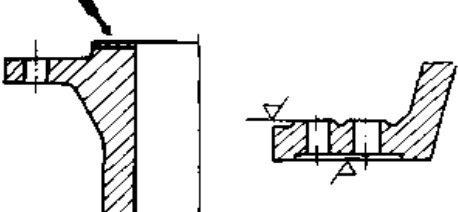
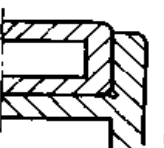

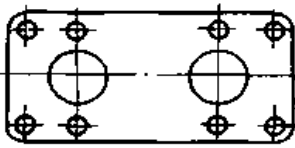
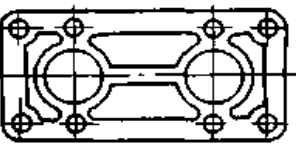
铸件结构是否合理，决定了切削加工的难易程度和加工成本。因此，为保证后续切削加工的

方便，应考虑以下几方面：

(1) 减小切削加工量

减小切削加工量不但可以提高加工效率、减少成本，而且可以减少加工累计误差(表 15.4-17)。

表 15.4-17 减小切削加工量

图	例	说 明
		改进后铸出凸台，减少加工面积
		改进后为环形接触，加工面减少；改进后台阶表面，加工面减少
		改进后为空心结构，加工面减少







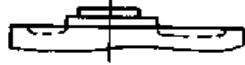
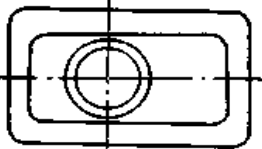
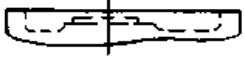
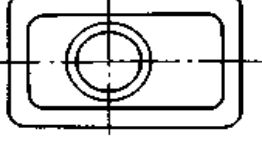
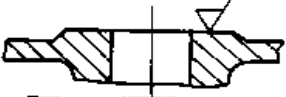
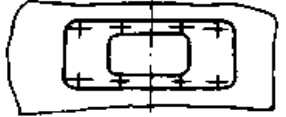
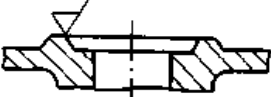

(2) 留加工余量和减少加工难度

铸件结构应考虑结构发生变形、加工误差等对加工余量的影响，保证加工余量足够。另外应避免加工表面低于非加工表面或加工表面中设计凸台，以利于切削加工的进行(表 15.4-18 所示)。

(3) 钻孔面垂直

为保证钻头的刚度和耐用度，以及钻孔的精度，应避免钻头轴线与孔的端面不垂直，否则会产生钻头单面切削，造成钻孔的偏斜，见表 15.4-19 所示。

表 15.4-18 留加工余量和减少加工难度

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后设置了加强肋，减少变形，保证加工余量；改进后增大加工余量 (δ—加工误差)</p>
  <p style="text-align: center;">不合理</p>	  <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后加工表面高于非加工表面，降低加工难度</p>
  <p style="text-align: center;">不合理</p>	  <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后取消了加工表面中的凸台，降低加工难度</p>
  <p style="text-align: center;">不合理</p>	  <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后加工表面宽度一致，提高了每次走刀的加工效率</p>

续表 15.4-18

图 例	说 明
	<p>改进后加工难度降低；改进后加工表面位于同一平面，加工难度降低，并减少了走刀次数</p>

表 15.4-19 钻孔面垂直

图 例	说 明
	<p>改进后钻头轴线与孔的端面垂直，保证了钻孔精度</p>
	<p>改进后钻头轴线与孔的端面垂直，保证了钻孔精度</p>
	<p>改进后钻头轴线与孔的端面垂直，保证了钻孔精度</p>

1.5 不同铸造方法对铸造结构元素的具体尺寸要求

为了保证铸件的质量和简化铸造工艺，对铸件的壁厚、加强筋、圆角、壁的连接等铸件的结构元素都有一定的尺寸要求。但不同的铸造方

法，这些要求各不相同。

(1) 最小壁厚

砂型铸造最小允许壁厚见表 15.4-20 所列。金属型铸造最小壁厚（见表 15.4-21 所列）。压力铸造最小壁厚见表 15.4-22 所列。熔模铸造最小壁厚见表 15.4-23 所列。

表 15.4-20 砂型铸造最小允许壁厚

(mm)

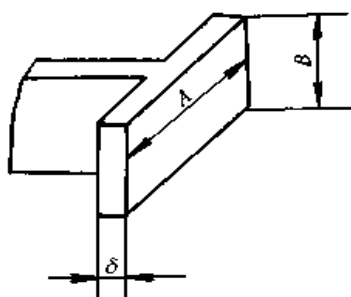
铸 造 合 金		铸 件 平 均 轮 廓 尺 寸					
		< 200	200 ~ 400	400 ~ 800	800 ~ 1250	1250 ~ 2000	> 2000
铸 铁	灰铸铁	4~6	5~8	6~10	7~12	8~16	10~20
	球墨铸铁	5~7	6~10	8~12	10~14	—	—
	可锻铸铁	3~5	4~6	5~8	—	—	—
铸 钢	碳素钢	5~6	6~8	8~10	10~12	12~16	16~20
	低合金结构钢	6~8	8~10	10~12	12~16	16~20	20~25
	高锰钢	8~10	10~12	12~16	16~20	20~25	—
	不锈钢	8~10	10~12	12~16	16~20	20~25	—
	耐热钢	8~10	10~12	12~16	16~20	20~25	—
铸 造 铜 合 金	锡青铜	3~5	5~7	6~8	—	—	—
	无锡青铜	≥6	≥8	—	—	—	—
	黄铜	≥6	≥8	—	—	—	—
	特殊黄铜	≥4	≥6	—	—	—	—
铸造铝合金		3~5	5~6	6~8	8~12	—	—
铸造镁合金		4~6	5~7	—	—	—	—
铸造锌合金		≥3	≥4	—	—	—	—

表 15.4-21 金属型铸造最小壁厚

(mm)

铸件尺寸	铸 钢	灰 铸 铁	可 锻 铸 铁	铝 合 金	镁 合 金	铜 合 金
< 70 × 70	5	4	2.5~3.5	2~3	—	3
70 × 70 ~ 150 × 150	—	5	3.5~4.5	4	2.5	4~5
> 150 × 150	10	6	—	5	—	6~8

表 15.4-22 压力铸造最小壁厚



续表 15.4-22

壁厚处的面积 $A \times B / \text{cm}^2$	锌合金		铝合金		镁合金		铜合金	
	壁厚 δ / mm							
	最小	正常	最小	正常	最小	正常	最小	正常
≤ 25	0.5	1.5	0.3	2.0	0.8	2	0.8	1.5
$> 25 \sim 100$	1.0	1.8	1.2	2.5	1.2	2.5	1.5	2.0
$> 100 \sim 500$	1.5	2.2	1.8	3.0	1.8	3	2.0	2.5
≥ 500	2.0	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.0

表 15.4-23 熔模铸造最小壁厚 (mm)

铸件外形平均轮廓尺寸		< 25	25~50	50~100	100~200	200~250	> 250~350
壁厚	一般	1.5~2	2~2.5	2.5~4.0	3.0~5.0	3.5~6.0	5.0~7.0
	最小	1	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0

(2) 最大临界壁厚 应避免采用厚大实心截面。表 15.4-24 列出了砂壁厚过大，铸造缺陷增加，承载能力降低，型铸件的最大临界壁厚。

表 15.4-24 常用材料砂型铸件最大临界壁厚 (mm)

合金种类		铸件质量 / kg		
		0.1~2.5	2.5~10	> 10
灰铸铁	HT150	8~10	10~15	20~25
	HT200、HT250	12~15	12~15	12~18
	HT300	12~18	15~18	< 25
	HT350	15~20	15~20	≤ 25
可锻铸铁	KT300-6	6~10	10~12	—
	KT330-8			
	KT350-10	6~10	10~12	—
	KT370-12			
球墨铸铁	QT400-17	10	15~20	50
	QT420-10			
	QT500-5	14~18	18~20	60
	QT600-3			
碳素铸钢	ZG200-400	15	25	—
	ZG230-450			
	ZG270-500	18	20	—
	ZG310-570			
ZG340-640				
铝合金		6~10	6~12	10~14
镁合金		10~14	12~18	—
锡青铜		—	6~8	—

(3) 内壁厚

当铸件结构比较复杂时，内壁散热条件较差，冷却速度较慢，易产生内应力和变形。为保证内外壁的冷却速率基本一致，内壁要比外壁厚。内外壁的相对值见表 15.4-25。

(4) 加强肋

加强肋的相关尺寸设计见表 15.4-26。

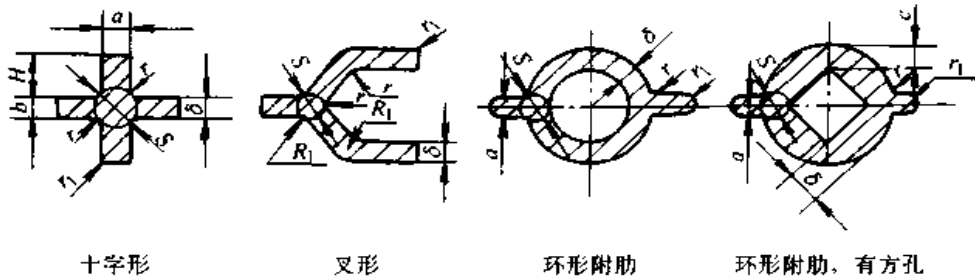
表 15.4-25 内外壁的相对值

合金种类	铸件内壁比外壁厚度减少的相对值/%
铸铁件	10~20
铸钢件	20~30
铸铝件	10~20
铸铜件	15~20

表 15.4-26 加强肋

中 部 的 肋		两 边 的 肋	
	$H \leq 5\delta$ $a = 0.8\delta$ (若是铸件内部的肋, 则 $a \approx 0.6\delta$) $R = 1.3\delta$ $r = 0.5\delta$		$H \leq 5\delta$ $a = \delta$ $R = 1.25\delta$ $r = 0.3\delta$ $r_1 = 0.25\delta$

带有肋的截面的铸件尺寸比例



十字形

叉形

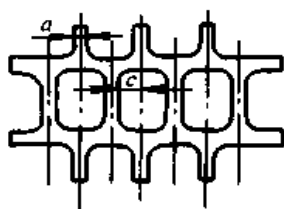
环形附肋

环形附肋, 有方孔

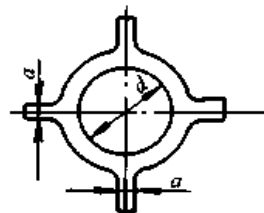
(δ 的 倍 数)

断 面	H	a	b	c	R_1	r	r_1	S
十字形	3	0.6	0.6	—	—	0.3	0.25	1.25
叉 形	—	—	—	—	1.5	0.5	0.25	1.25
环形附肋	—	0.8	—	—	—	0.5	0.25	1.25
环形附肋, 有方孔	—	1.0	—	0.5	—	0.25	0.25	1.25

肋 的 布 置

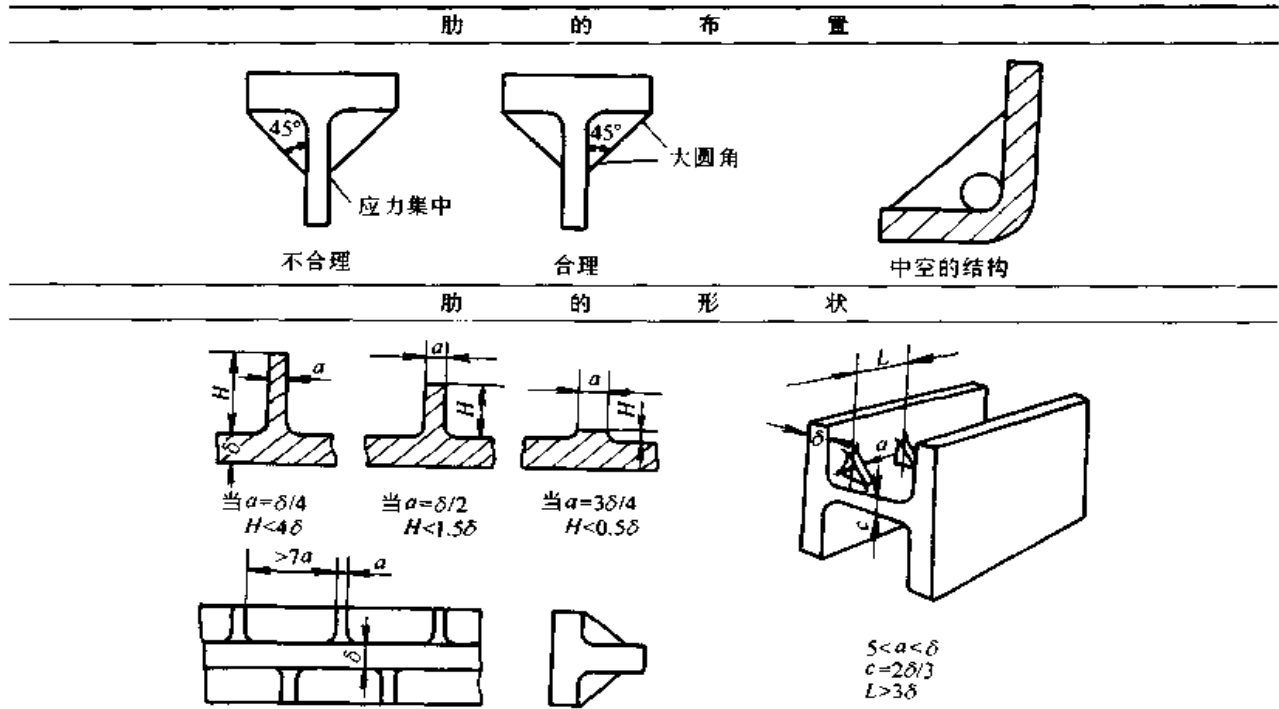


中小铸件用
 $c=2a$



大铸件用
 $d=4a$

续表 15.4-26



说明 a 、 b —肋厚度 δ —壁厚

- (5) 连接
 - 两壁的连接设计见表 15.4-27。
 - 三壁的连接设计见表 15.4-28 所示。
 - 壁的过渡设计见表 15.4-29 所示。
 - 壁厚的过渡设计见表 15.4-30 所示。
- (6) 圆角与结构斜度

- 铸造内圆角设计见表 15.4-31 所示。
- 铸造外圆角设计见表 15.4-32 所示。
- 结构斜度设计见表 15.4-33 所示。

- (7) 凸台
 - 孔边凸台设计见表 15.4-34 所示。
 - 凸座设计见表 15.4-35 所示。

表 15.4-27 两壁的连接设计

连接形式	两壁厚度比及尺寸关系	连接形式	两壁厚度比及尺寸关系
<p>$\alpha = 75^\circ \sim 105^\circ$</p>	$\delta_1 = \delta_2$ $r = (0.3 \sim 0.5)\delta_1$ $R = \delta_1 + r$	<p>$\alpha > 105^\circ$</p>	$\delta_1 = \delta_2$ $r = (0.3 \sim 0.5)\delta_1$ $R = \delta_1 + r$
<p>$\alpha < 75^\circ$</p>		$\delta_1 = (1.1 \sim 2)\delta_2$ $r = (0.15 \sim 0.25)(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_1 + r$	<p>$\alpha = 75^\circ \sim 105^\circ$</p>	$\delta_1 = (1.1 \sim 2)\delta_2$ $r = (0.15 \sim 0.25)(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_1 + r$

续表 15.4-27

连接形式	两壁厚度比及尺寸关系	连接形式	两壁厚度比及尺寸关系
			$\delta_1 > 2\delta_2$ $\delta r = (0.15 \sim 0.25)$ $(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_2 + r$ $h = \delta_1 - \delta_2$ $l \geq 4h$
	$\delta_1 = (1.1 \sim 2)\delta_2$ $r = (0.15 \sim 0.25)$ $(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_1 + r$		$\delta_1 > 2\delta_2$ $t = 2\delta_2$ $r_1 = (0.15 \sim 0.25)$ $(\delta_1 + t)$ $r_2 = (0.15 \sim 0.25)$ $(\delta_2 + t)$ $R_1 = \delta_1 + r_1$ $R_2 = t + r_2$ $h = t - \delta_2$ $l \geq 4h$
	$\delta_1 > 2\delta_2$ $r = (0.15 \sim 0.25)$ $(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_1 + r$ $h = \delta_1 - \delta_2$ $l \geq 4h$		$\delta_1 > 2\delta_2$ $r = (0.15 \sim 0.25)$ $(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_1 + r$ $h = \delta_1 - \delta_2$ $l \geq 4h$

表 15.4-28 三壁的连接设计

连接形式	三壁厚度比及尺寸关系	连接形式	三壁厚度比及尺寸关系
	$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ $r = (0.3 \sim 0.5)\delta_1$ $R = \delta_1 + r$		$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ $r = (0.3 \sim 0.5)\delta_1$ $R = \delta_1 + r$

续表 15.4-28

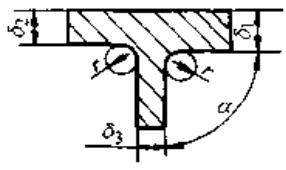
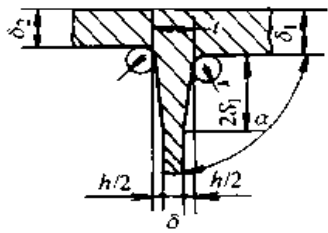
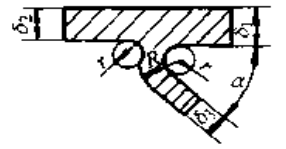
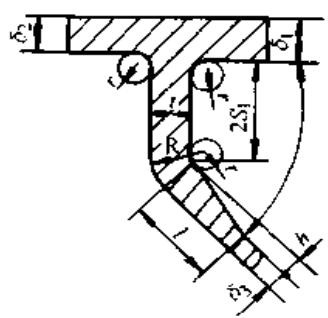
连接形式	三壁厚度比及尺寸关系	连接形式	三壁厚度比及尺寸关系
 <p>$\alpha = 75^\circ \sim 105^\circ$</p>	$\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$ $\delta_1 = (1.1 \sim 2)\delta_3$ $r = (0.15 \sim 0.25)(\delta_1 + \delta_2)$ $R = \delta_3 + r$	 <p>$\alpha = 75^\circ \sim 105^\circ$</p>	$\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$ $\delta_1 > 2\delta_3$ $r = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$ $r = (0.15 \sim 0.25)(\delta_1 + \delta_2)$ $R = r + r$ $h = r - \delta_3$ $l \geq 4h$ 当 $r \geq 2\delta_3$ 时, 才采用楔形过渡壁形式, 在 $r < 2\delta_3$ 范围内, r 可直接与 δ_3 连接
 <p>$\alpha < 75^\circ$</p>		 <p>$\alpha < 75^\circ$</p>	

表 15.4-29 连接法兰的过渡设计

(mm)

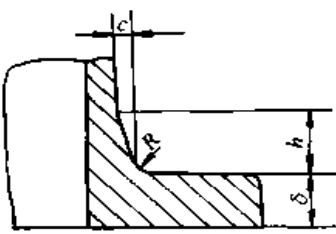
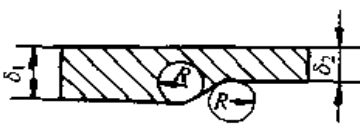
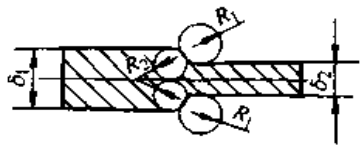

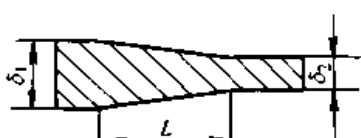
	法兰的壁厚 δ	c	h	R	法兰的壁厚 δ	c	h	R
	10~15	3	15	5	>45~50	10	50	10
>15~20	4	20	5	>50~55	11	55	10	
>20~25	5	25	5	>55~60	12	60	15	
>25~30	6	30	8	>60~65	13	65	15	
>30~35	7	35	8	>65~70	14	70	15	
>35~40	8	40	10	>70~75	15	75	15	
>40~45	9	45	10					

表 15.4-30 壁厚的过渡设计

过渡形式	壁厚比及尺寸关系	过渡形式	壁厚比及尺寸关系
	$\frac{\delta_1}{\delta_2} \leq 2$ $R = (0.15 \sim 0.25) \cdot (\delta_1 + \delta_2)$		$\frac{\delta_1}{\delta_2} \leq 2$ $R_1 = (0.15 \sim 0.25) \cdot (\delta_1 + \delta_2)$ $R_2 = \frac{\delta_1}{4}$

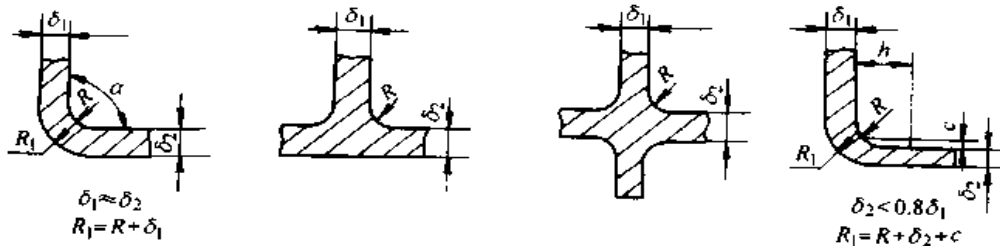
续表 15.4-30

过渡形式	壁厚比及尺寸关系	过渡形式	壁厚比及尺寸关系
	$\frac{\delta_1}{\delta_2} > 2$ $h = \delta_1 - \delta_2$ $L = 4h$		$\frac{\delta_1}{\delta_2} > 2$ $L \geq 3(\delta_1 - \delta_2)$

注：圆角 R 值算出后按 2、3、5、8、10、12、15 mm 圆整

表 15.4-31 铸造内圆角 (摘自 JB/ZQ4255—1997)

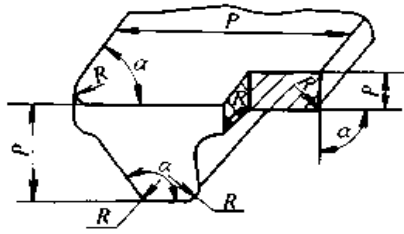
(mm)



$\frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$	R 值											
	内圆角 α											
	< 50°		51°~75°		76°~105°		106°~135°		136°~165°		> 165°	
	钢	铁	钢	铁	钢	铁	钢	铁	钢	铁	钢	铁
≤ 8	4	4	4	4	6	4	8	6	16	10	20	16
9~12	4	4	4	4	6	6	10	8	16	12	25	20
13~16	4	4	6	4	8	6	12	10	20	16	30	25
17~20	6	4	8	6	10	8	16	12	25	20	40	30
21~27	6	6	10	8	12	10	20	16	30	25	50	40
28~35	8	6	12	10	16	12	25	20	40	30	60	50
36~45	10	8	16	12	20	16	30	25	50	40	80	60
46~60	12	10	20	16	25	20	35	30	60	50	100	80
61~80	16	12	25	20	30	25	40	35	80	60	120	100
81~110	20	16	25	20	35	30	50	40	100	80	160	120
111~150	20	16	30	25	40	35	60	50	100	80	160	120
151~200	25	20	40	30	50	40	80	60	120	100	200	160
201~250	30	25	50	40	60	50	100	80	160	120	250	200
251~300	40	30	60	50	80	60	120	100	200	160	300	250
> 300	50	40	80	60	100	80	160	120	250	200	400	300
c 和 h 值	δ_2/δ_1		< 0.4				0.5~0.65				0.66~0.8	
	c		$\approx 0.7(\delta_1 - \delta_2)$				$\approx 0.8(\delta_1 - \delta_2)$				$\approx \delta_1 - \delta_2$	
	h		钢 $\approx 8c$				铁 $\approx 9c$					

表 15.4-32 铸造外圆角 (摘自 JB/ZQ4256—1997) (mm)

表面最小边尺寸 P	R 值					
	外 圆 角 α					
	$\leq 50^\circ$	$51 \sim 75^\circ$	$76 \sim 105^\circ$	$106 \sim 135^\circ$	$136 \sim 165^\circ$	$> 165^\circ$
≤ 25	2	2	2	4	6	8
25~60	2	4	4	6	10	16
60~160	4	4	6	8	16	25
160~250	4	6	8	12	20	30
250~400	6	8	10	16	25	40
400~600	6	8	12	20	30	50
600~1000	8	12	16	25	40	60
1000~1600	10	16	20	30	50	80
1600~2500	12	20	25	40	60	100
> 2500	16	25	30	50	80	120



注：1. P 为表面的最小边尺寸。

2. 如一铸件按表 15.4-32 可选出许多不同的圆角“ R ”时，应尽量减少或只取一适当的“ R ”值以求统一。

表 15.4-33 结构斜度

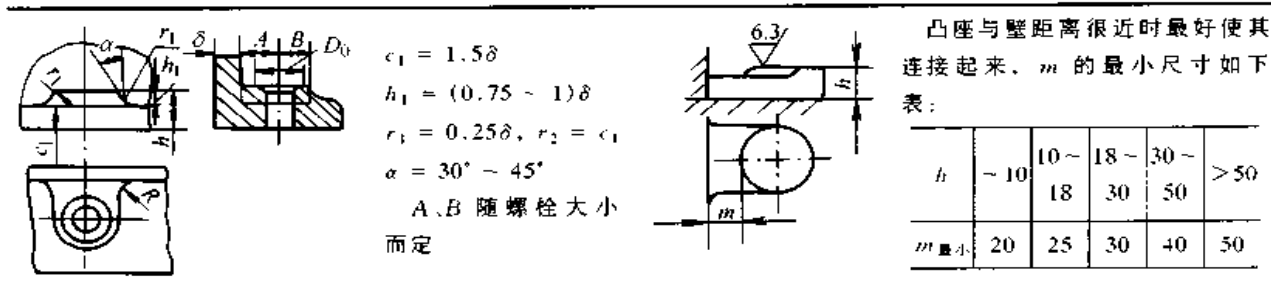
斜度 $a:h$	角度 β	使用范围
1:5	$11^\circ 30'$	$h < 25\text{mm}$ 的钢和铁铸件
1:10 1:20	$5^\circ 30'$ 3°	h 在 $25 \sim 500\text{mm}$ 的钢和铁铸件
1:50	1°	$h > 500\text{mm}$ 时的钢和铁铸件
1:100	$30'$	有色金属铸件

注：当设计不同壁厚铸件时（参见表中图），在转折点处的斜度最大还可增大到 $30' \sim 45'$ 。

表 15.4-34 孔边凸台设计

铸孔边		$r = 0.25\delta$ $R = 0.75\delta$
缘凸台		$h = 2\delta$ $b = 1.5\delta$
壁中窗口凸边		$r = 0.25\delta$

表 15.4-35 凸座设计 (mm)



(8) 铸孔 压铸最小铸孔见表 15.4-37 所示。其他铸造方法最小铸孔见表 15.4-38 所示。

表 15.4-36 砂型铸造最小铸孔 (mm)

材 质	孔的深度	最 小 孔 径																
		加工	不加工	加工	不加工	加工	不加工	加工	不加工	加工	不加工	加工	不加工	加工	不加工	加工	不加工	
碳钢与一般合金钢	≤100	75	55	75	55	90	70	100	80	120	100	140	120	160	140	180	160	
	101~200	75	55	90	70	100	80	110	90	140	120	160	140	180	160	210	190	
	201~400	105	80	115	90	125	100	135	110	165	140	195	170	215	190	255	230	
	401~600	125	100	135	110	145	120	165	140	195	170	225	200	255	230	295	270	
	601~1000	150	120	160	130	180	150	200	170	230	200	260	230	300	270	340	310	
高锰钢	孔壁厚度	< 50				51~100				≥101								
	最小孔径	20				30				40								
灰铸铁	大量生产：12~15，成批生产：15~30，小批、单件生产：30~50																	

注：1. 不透圆孔最小容许铸造孔直径应比表中值大 20%，矩形或方形孔其短边要大于表中值的 20%，而不透矩形或方形孔则要大 10%。
 2. 难加工的金属，如高锰钢铸件等的孔应尽量铸出，而其中需要加工的孔，常用镶铸碳素钢的方法，待铸出后，再在镶铸的碳素钢部分进行加工。

表 15.4-37 压铸最小铸孔

合 金	最小孔径 d/mm		深度为孔径 d 的倍数			
	经济上合理的	技术上可能的	不通孔		通 孔	
			d > 5	d < 5	d > 5	d < 5
锌合金	1.5	0.8	6d	4d	12d	8d
铝合金	2.5	2.0	4d	3d	8d	6d
镁合金	2.0	1.5	5d	4d	10d	8d
铜合金	4.0	2.5	3d	2d	5d	3d

表 15.4-38 其他铸造方法最小铸孔

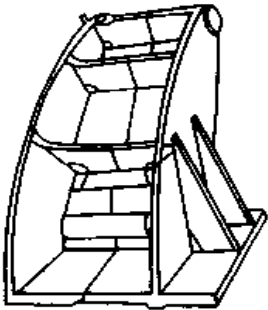
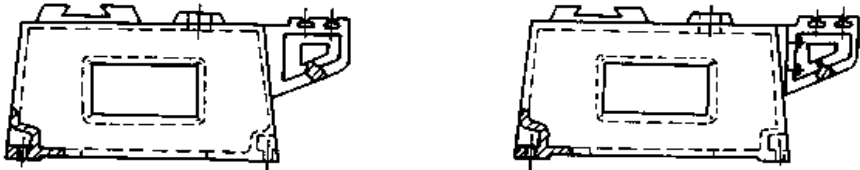
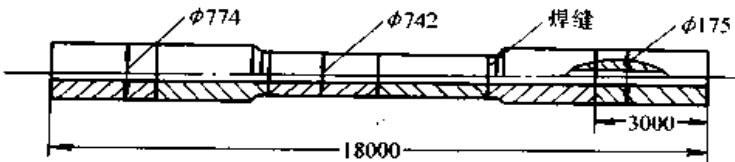
铸 造 方 法	合 金 种 类	最小孔径/mm	孔的深度为孔径 d 的倍数	
			不通孔	通 孔
砂型及壳型铸造	黑色金属及有色金属	8~10	5d	10d
金属型铸造	有色	5	4d	8d
熔模铸造	有色金属	2	1d	2d
	黑色金属	2.5	1d	2d

1.6 组合铸件结构

当铸件较大或形状复杂时，通常将铸件设计

成几个小铸件，粗加工后，再用焊接、螺栓等方法联接起来（见表 15.4-39 所示）。

表 15.4-39 组合铸件结构

图 例	说 明
	<p>铸件分为两部分铸造，再焊接</p>
	<p>改进后，铸件结构大为简化</p>
	<p>改进后，特长铸件分段铸造，内孔加工后，再焊接为整体</p>

2 焊接件结构设计

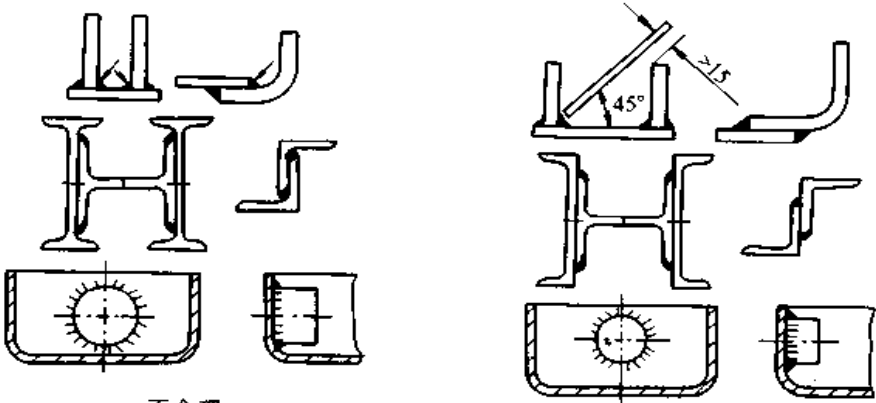
材料、工艺和结构是决定焊接质量的三大要素。材料主要根据可焊性选择；工艺包括前后处理和焊接工艺；结构影响焊缝的应力状态和大小，以及是否利于焊接工艺的实施。

2.1 便于焊接实施

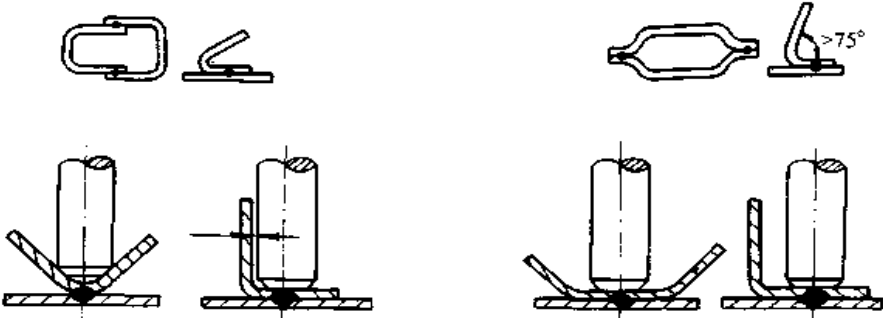

(1) 足够的焊接空间

不论何种焊接方式都需要一定的施焊空间，如果焊接结构提供焊缝的空间较小，会使焊接无法进行（表 15.4-40 所示）。

表 15.4-40 足够的焊接空间

图 例	说 明
	<p>改进后，焊接空间增大</p>

续表 15.4.40

图	例	说 明
 <p data-bbox="389 682 470 714">不合理</p> <p data-bbox="893 682 974 714">合理</p>		改进后, 焊接空间增大
 <p data-bbox="389 1081 470 1113">不合理</p> <p data-bbox="893 1081 974 1113">合理</p>		改进后, A 处焊接空间开放, 便于施焊

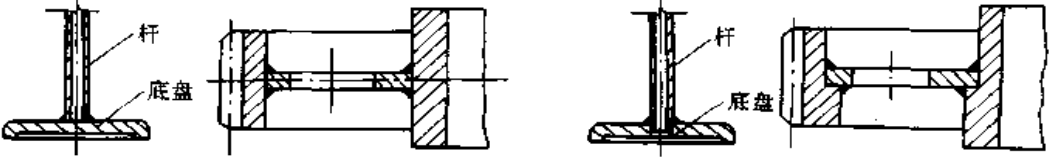
(2) 合理的焊缝位置

焊缝与焊枪的相对位置, 分为平焊、立焊和仰焊。平焊施焊便利, 质量容易保证; 立焊和仰焊操作相对较难, 应尽量避免。

(3) 焊件可靠定位

焊件在焊接前如能可靠的定位, 不但可以节省焊接时间, 而且可以提高焊接质量 (见表 15.4-41 所示)。

表 15.4-41 焊件可靠定位


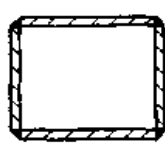
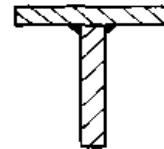
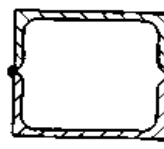
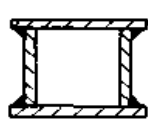
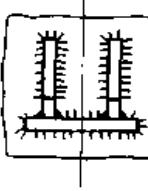
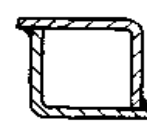
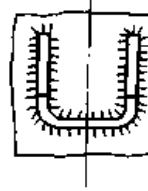
图	例	说 明
 <p data-bbox="406 1690 487 1722">不合理</p> <p data-bbox="974 1690 1055 1722">合理</p>		改进后, 定位孔定位, 保证了杆与底盘的垂直; 改进后, 轮辐增加了定位面

(4) 减少焊缝数量

如果结构需要的焊缝较多, 造成焊接量大, 不但工时长, 而且过热区大, 结构内产生的内

应力和热变形大, 增加了后续结构校正的工作量。因此尽量减少焊缝数量 (表 15.4-42 所示)。

表 15.4-42 减少焊缝数量

图		例		说 明
				改进后, 由单层平板代替多层薄板焊接; 改进后, 由型钢代替拼板焊接
				

2.2 减少内应力和热变形


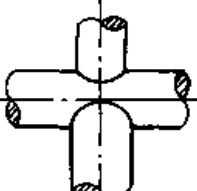

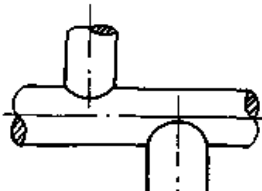
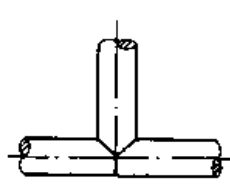
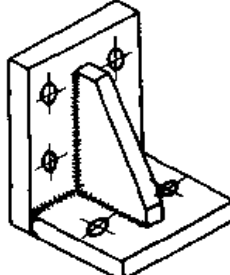
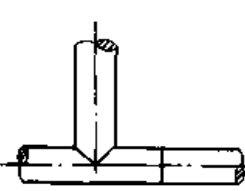
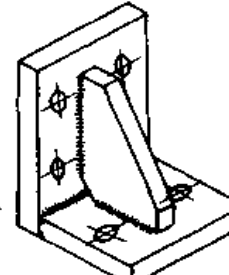
焊接是局部加热的工艺过程, 焊件因温度升高而膨胀, 因冷却而收缩。由于结构的限制不可能自由地膨胀和收缩, 在焊件内就会产生内应力和变形, 当内应力过大时, 焊件产生裂纹, 造成潜在的危险或导致结构报废; 如焊接变形超过允

许范围, 需要花费较多的时间校正和修整。从结构设计出发减少内应力和热变形的措施如下:

(1) 避免焊缝过密和交叉

焊缝彼此交叉或相对集中, 会造成铸件局部多次过热, 材料承载能力下降。焊缝刚性也会加大, 铸件变形加剧。结构设计应避免焊缝重叠(表 15.4-43 所示)。

表 15.4-43 避免焊缝过密和交叉

图		例		说 明
				改进后, 利用附加结构, 避免焊缝过密; 改进后, 焊缝错开, 避免焊缝过密
				改进后, 两两焊接, 避免焊缝交叉; 改进后, 切取筋板的内角, 避免焊缝交叉

(2) 焊缝对称布置

焊缝对称布置可减小焊缝冷却收缩引起的变形 (表 15.4-44 所示)。

(3) 减少焊接区域的刚度

减少焊接区域的刚度, 即降低焊缝冷却收缩时的阻力 (见表 15.4-45 所示)。

表 15.4-44 焊缝对称布置

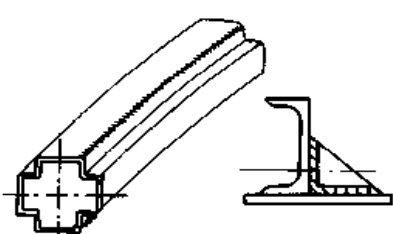
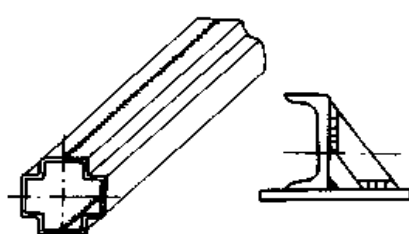
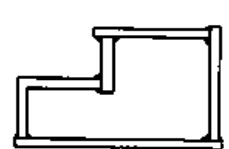
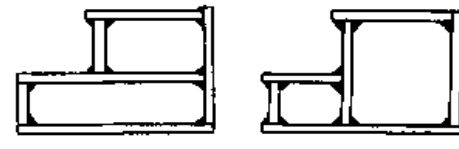
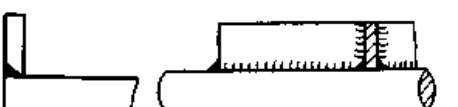
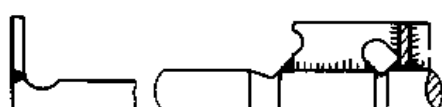
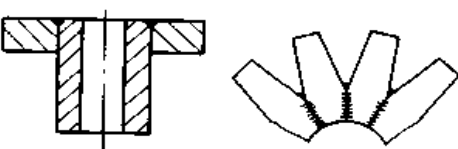

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	改进后, 薄壁对称焊接, 变形减少; 改进后加强筋接近对称焊接
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	改进后, 焊缝对称布置, 整体变形减少

表 15.4-45 减少焊接区域的刚度

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	改进后, 厚板上开槽, 刚性减小; 改进后, 结构上的环槽增加了零件柔性
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	改进后, 环上开槽, 零件柔性增加; 改进后, 结构柔性增加

2.3 焊缝受力合理

(1) 焊缝远离应力集中处

焊缝及其周围区域受变应力时的疲劳强度相

对较低, 因此应尽量将焊缝设置于应力水平较低的区域。在几何形状尺寸突变处, 结构受力后会产生较为严重的应力集中。采用过渡结构, 使形状和尺寸变化尽量平缓, 并使焊缝远离应力集

中区，可提高焊缝的承载能力（见表 15.4-46 所示）。

(2) 避免锐角焊接

锐角处焊接定位困难，并极易熔化，焊接质量不易保证。锐角处焊缝的应力集中较为严重，

尽可能避免此种焊接结构（见表 15.4-47 所示）。

(3) 减小焊缝载荷

提高焊接件承载能力，首先焊缝的受力要合理，即尽量地减少焊缝的受载水平和避免焊缝承受剪力（见表 15.4-48 所示）。



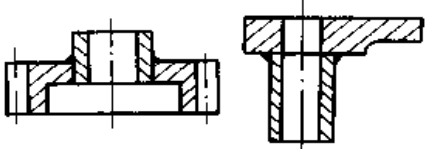
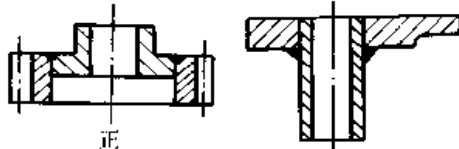
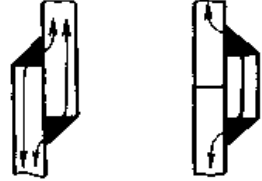
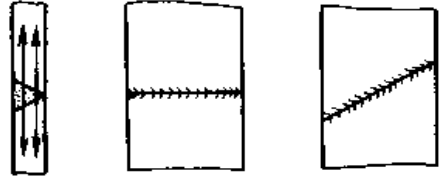
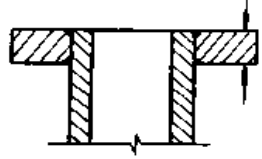
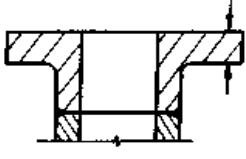
表 15.4-46 焊缝远离应力集中处

图 例		说 明
<p>不合理 合理</p>	改进后，增加了过渡结构，焊缝避开形状尺寸突变处	
<p>不合理 合 理 对接接头 丁字接头 角接头</p>	改进后，焊缝避开应力集中较严重的封头处；不同厚板的过渡结构	
<p>不合理 合 理</p>	改进后，几何形状变化平缓，焊缝应力状态较好	

表 15.4-47 避免锐角焊接

图 例		说 明
<p>不合理 合 理</p>	改进后，焊接角度变缓；改进后，三角筋板去掉尖角	
	三角筋板结构举例	

表 15.4-48 减小焊缝载荷

图	例	说 明
		改进后, 焊缝避开集中载荷
		改进后, 焊缝远离回转中心, 焊缝载荷减小; 改进后, 套管插进孔板, 焊缝载荷减小
		改进后, 焊缝采用对接形式, 避免焊缝受剪力
		改进后, 法兰采用翻边结构, 避免焊缝受剪力

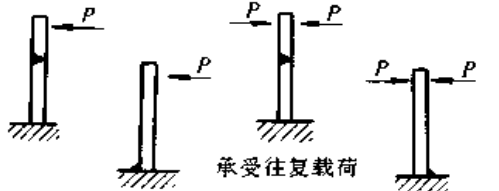
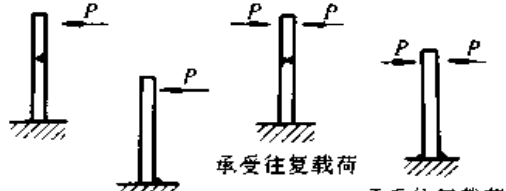
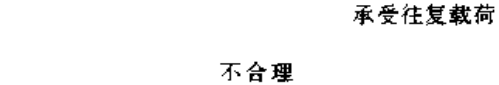
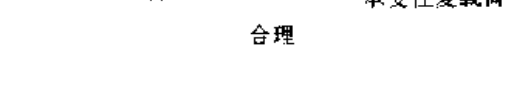
(4) 避免未焊部位受拉

承受弯曲应力的焊缝, 应将焊缝安置在作用

力的一侧, 避免未焊的部位处于受拉状态, 见表

15.4-49 所示。

表 15.4-49 避免未焊部位受拉

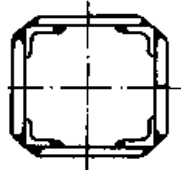
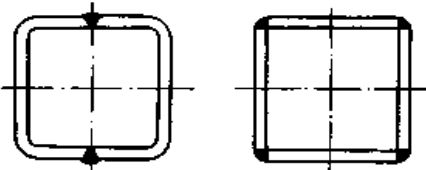
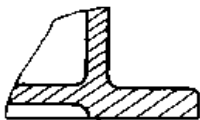
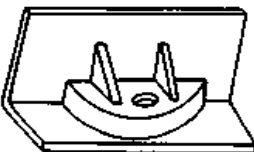
图	例	说 明
		改进后, 承受单方向弯曲的焊缝, 未焊侧受压; 承受双向弯曲的焊缝, 可采用双面焊
		

2.4 避免不合理的模仿结构

焊接结构不可简单模仿其他工艺结构, 如铸

造结构、铆接结构等。要充分考虑焊接结构自身的特点, 确定结构形式 (见表 15.4-50 所示)。

表 15.4-50 避免不合理的模仿结构

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进前、模仿铆接搭接形式，有焊缝多、费材料、受力不合理等缺点。改进后，焊缝结构较为合理</p>
 <p>铸造结构</p>	 <p>焊接结构</p>	<p>机座底脚部分改用焊接结构后，采用双层结构和增加筋板，就是充分考虑了焊接钢板的刚度不足的特点</p>

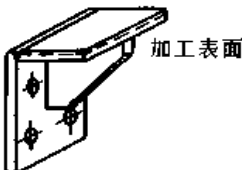
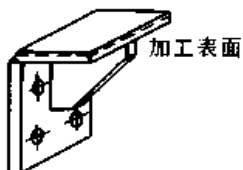
2.5 便于切削加工

焊缝的布置要考虑对后续切削加工的影响。

(1) 避免焊缝在加工面上

焊缝如布置在加工表面上有以下缺点：若焊缝退火不当，致使焊缝与加工表面硬度不一；切削后焊缝高度降低，其强度削弱；焊缝内部如有缺陷，将影响加工表面质量，见 15.4-51 所示。

表 15.4-51 避免焊缝在加工面上

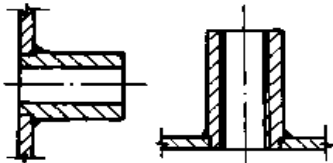
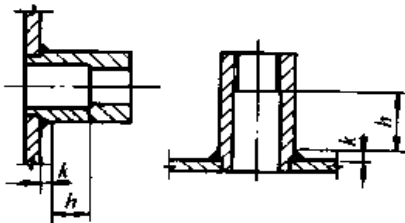
图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后，加工表面不放置焊缝</p>

(2) 焊缝远离已加工面

焊接过程中部分区域过热，热变形会对加工表面产生不利影响。因此焊缝尽量远离已加工

表面和已加工螺纹部分。另外采用焊接后加工，也是避免焊接热变形影响的方法之一，见 15.4-52 所示。

表 15.4-52 焊缝远离已加工面

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后，焊缝远离已加工表面螺纹，$h \geq 3k$ ($h \geq 5k$) (h 为焊缝与加工表面(加工螺纹部分)的距离，k 为焊缝的高度)</p>

3 切削件结构设计

切削零件结构首先要满足使用要求，达到所需要的形状、尺寸和精度。其次还应考虑生产工艺、生产批量、生产条件、生产成本和生产各环节对零件结构的影响。设计切削零件结构应考虑以下几方面的问题。

3.1 保证加工质量

(1) 合理选择基准

基准分零件设计图纸上的设计基准和零件加工与装配过程中使用的工艺基准。将设计基准和工艺基准统一是保证零件加工精度的方法之一。基准统一，可避免零件尺寸换算，及换算带来的误差，保证零件的加工精度（见表15.4-53）。

(2) 减少工件安装次数

减少工件在加工过程中的安装次数，一次安装加工尽可能多的表面，可提高各表面的相对位置精度（见表15.4-54）。

(3) 刚度足够

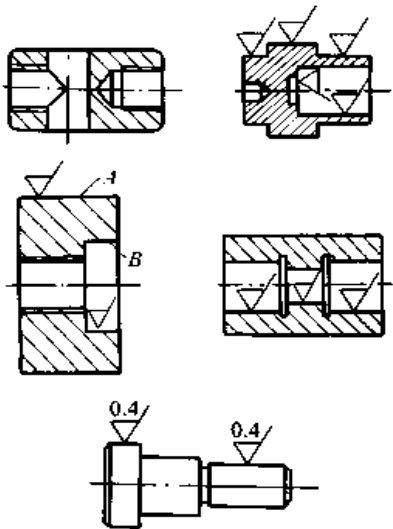
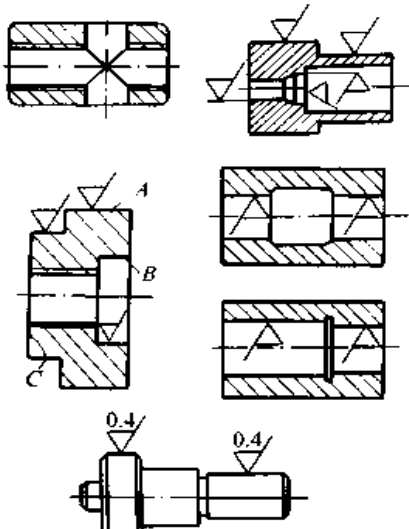
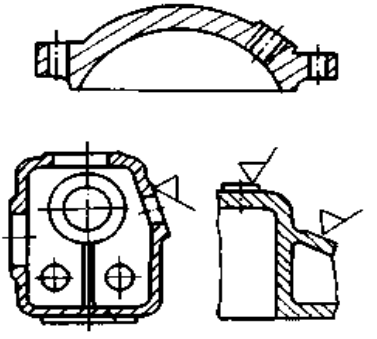
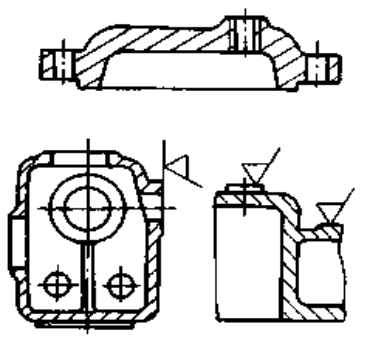
表 15.4-53 合理选择基准

图	例	说 明
<p>不合理</p> <p>合理</p>	<p>改进后，设计基准和工艺基准统一到A面，平面1、2精度可降低，便于安装和测量。</p>	
<p>不合理</p> <p>合理</p>	<p>改进后，键杆支承吊架装在箱体下表面与装配基准重合，尺寸H要求降低。</p>	

表 15.4-54 减少工件安装次数

图	例	说 明
<p>不合理</p> <p>合理</p>	<p>改进后，孔端面与底脚凸台一次加工完成。</p>	

续表 15.4-54

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理 合 理</p>	 <p style="text-align: center;">不合理 合 理</p>	<p>改进后，装夹一次，加工多个表面</p>
 <p style="text-align: center;">不合理 合 理</p>	 <p style="text-align: center;">不合理 合 理</p>	<p>改进后，用平面代替斜面，减少装夹次数</p>

零件结构在加工过程中应保持足够的刚度，不致由于切削力造成零件变形，影响加工精度（见表 15.4-55）。

(4) 避免切削振动和冲击

加工过程中刀具切削连续，对工件的冲击振动较小，易保证加工精度和表面质量。如果结构设计得不合理，切削过程出现中断，不但刀具寿命降低，而且影响加工质量（见表 15.4-56）。

表 15.4-55 刚度足够

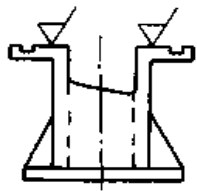
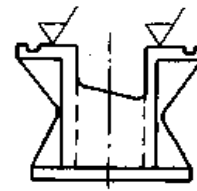
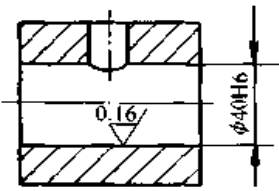
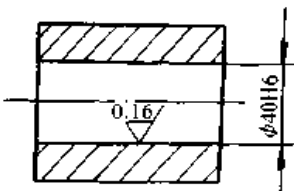
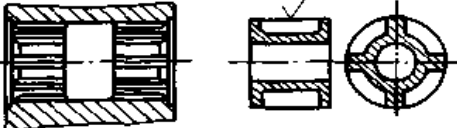
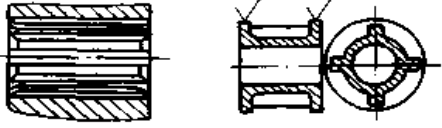
图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，车床导轨带有加强筋，加工时避免产生挠曲现象</p>

表 15.4-56 避免切削振动和冲击

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	改进后, 去掉锥孔上的通孔, 使切削表面连续
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	改进后, 花键孔连续, 使切削表面连续; 改进后, 肋板高度降低, 使切削表面连续

3.2 便于加工

是否易于加工是衡量零件加工工艺性好坏的重要标志之一。为便于加工, 零件结构应满足如下基本要求:

(1) 使用简单结构形状

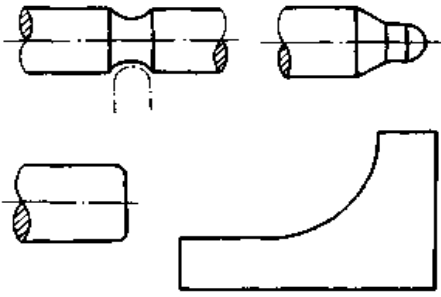
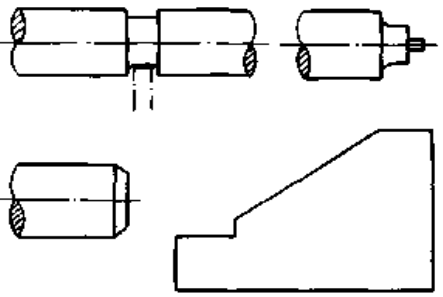
零件结构在满足使用要求的前提下, 尽可能地结构简单。避免采用必须由复杂设备才能加工

的结构或形状, 以降低加工成本和提高加工效率。通常曲面、球面和锥面尽可能不要采用, 优选圆柱面和平面组成零件的结构形式(见表 15.4-57)。

(2) 避免复杂内表面的加工

当两个轴孔零件相配合时, 通常将必要的复杂结构设计在轴上。因为, 轴类零件的加工比孔的加工容易(见表 15.4-58)。

表 15.4-57 使用简单结构形状

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	改进后, 采用简单的表面

(3) 统一零件尺寸使用标准刀量具

零件中有许多结构元素, 如螺纹孔、键槽、倒角、圆角等。为减少换刀次数、简化刀具规格、缩短加工时间, 应尽量减少零件中结构元素的规格和种类。另外, 结构元素的尺寸与形状要与标准刀量具相一致(见表 15.4-59)。

(4) 便于装夹

零件在加工时必须可靠、准确的装夹在机床上, 因此零件上要有夹持结构。为保证加工过程中零件不晃动, 夹持力要足够, 因此零件的夹持结构应有足够大的尺寸和刚度(见表 15.4-60)。

表 15.4-58 避免复杂内表面的加工

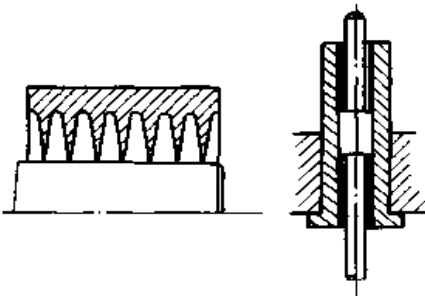
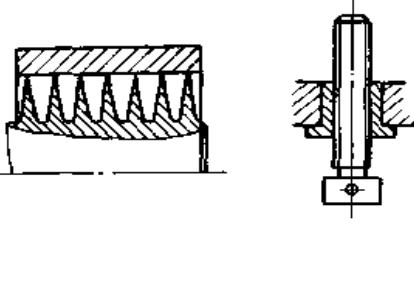
图	例	说 明
 <p data-bbox="396 688 472 716">不合理</p>	 <p data-bbox="906 688 982 716">合理</p>	<p data-bbox="1208 449 1438 653">改进后，将复杂结构设计在轴上，加工更便利；改进后，将长螺母改为长螺杆，功能没变，但加工更便利</p>

表 15.4-59 统一零件尺寸使用标准刀量具

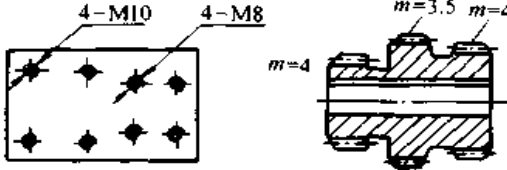
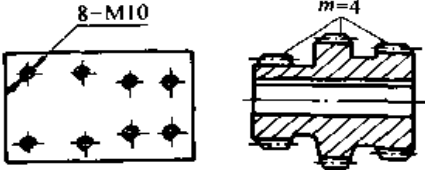
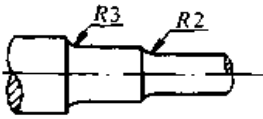
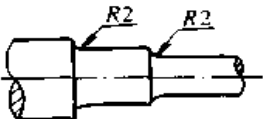
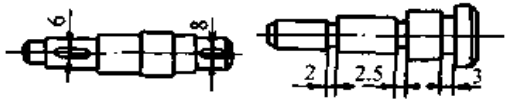
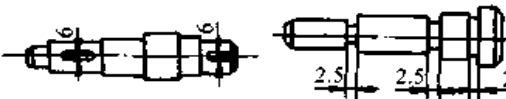


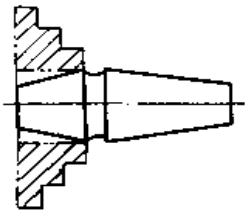
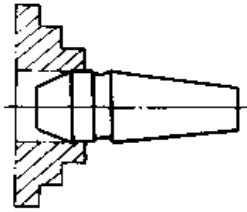
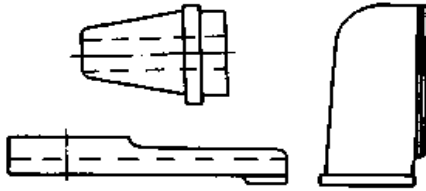
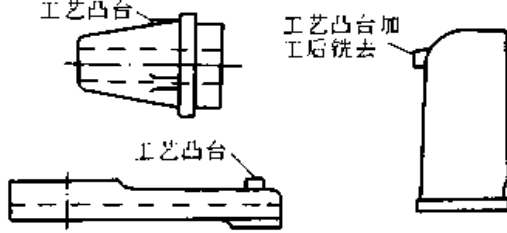
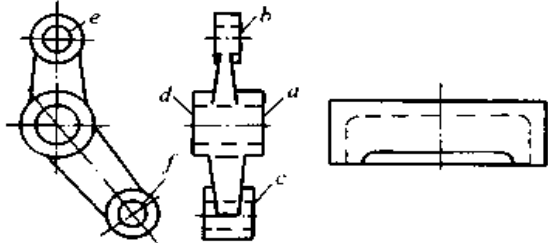
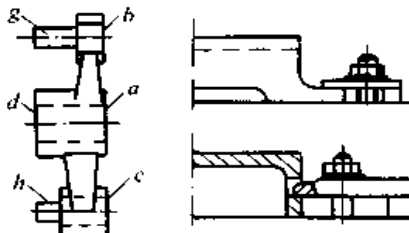
图	例	说 明
 <p data-bbox="418 1150 495 1178">不合理</p>	 <p data-bbox="987 1150 1063 1178">合理</p>	<p data-bbox="1305 940 1438 1178">改进后，减少了底板螺钉孔的种类；改进后，统一了多联齿轮的模数</p>
 <p data-bbox="418 1381 495 1409">不合理</p>	 <p data-bbox="987 1381 1063 1409">合理</p>	<p data-bbox="1305 1276 1438 1381">改进后，统一了圆角半径</p>
 <p data-bbox="418 1617 495 1644">不合理</p>	 <p data-bbox="987 1617 1063 1644">合理</p>	<p data-bbox="1305 1478 1438 1644">改进后，统一了键槽宽度；改进后，统一了沉割槽尺寸</p>
 <p data-bbox="418 1835 495 1862">不合理</p>	 <p data-bbox="987 1835 1063 1862">合理</p>	<p data-bbox="1305 1738 1438 1835">改进后，统一了凸台的高度</p>

表 15.4-60 便于装夹

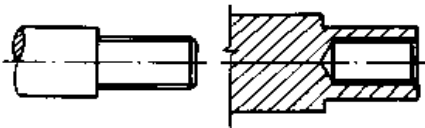
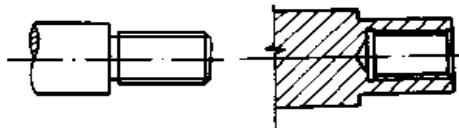
图	例	说 明
 <p data-bbox="402 548 483 573">不合理</p>	 <p data-bbox="959 548 1040 573">合 理</p>	<p data-bbox="1289 380 1414 516">改进后，圆柱面代替圆锥面，易于定位</p>
 <p data-bbox="402 873 483 898">不合理</p>	 <p data-bbox="959 884 1040 909">合 理</p>	<p data-bbox="1289 695 1414 831">改进后，增加了安装凸台，便于定位</p>
 <p data-bbox="402 1314 483 1339">不合理</p>	 <p data-bbox="959 1304 1040 1329">合 理</p>	<p data-bbox="1289 947 1414 1367">改进后，平面 a、b 和 c 位于同一平面，增加了 g、h 安装凸台（钻孔 e、f 时脱落）；改进后，箱体增加了安装凸缘和安装孔</p>

(5) 便于退刀

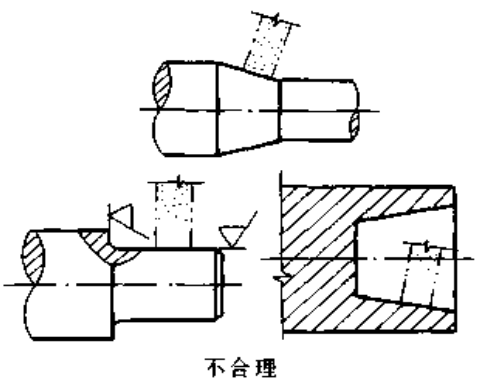
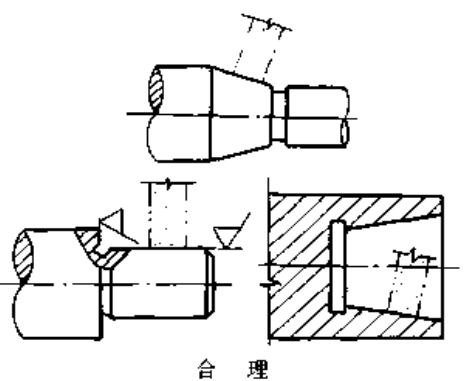
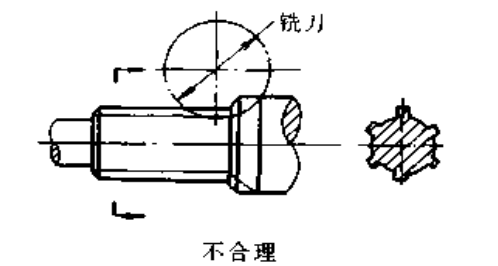
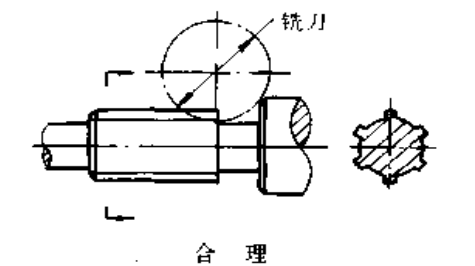
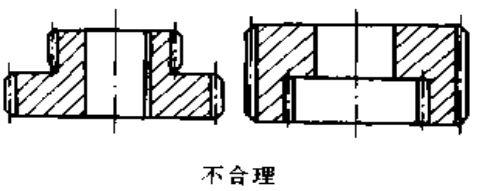
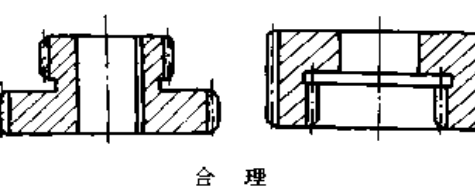
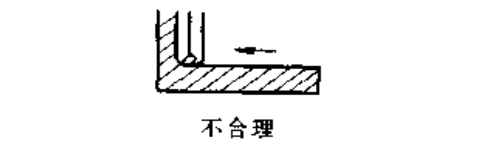
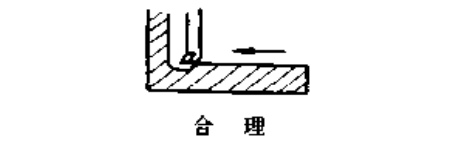
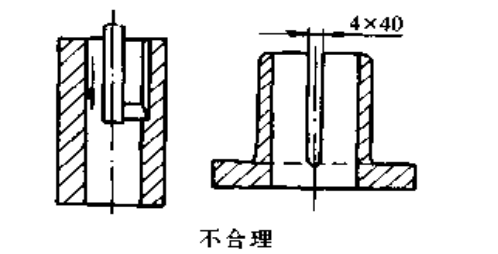
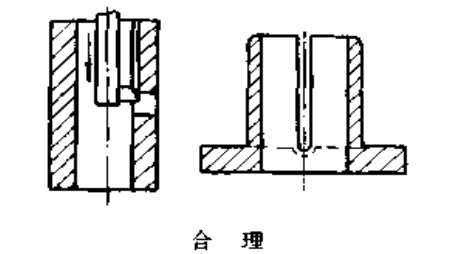
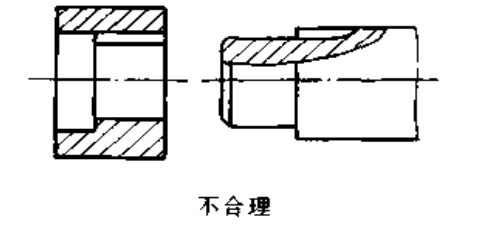
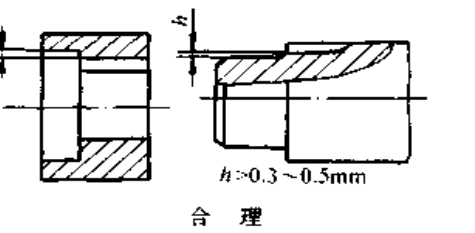
当切削刀具完成一次加工后，要求刀具能迅

速安全离开工件，避免刀具在切削行程终点长时间停留及刀具和工件发生碰撞（见表 15.4-61）

表 15.4-61 便于退刀

图	例	说 明
 <p data-bbox="378 1818 459 1843">不合理</p>	 <p data-bbox="886 1818 967 1843">合 理</p>	<p data-bbox="1192 1682 1414 1818">改进后，设计了外螺纹退刀槽；改进后，设计了内螺纹退刀槽</p>

续表 15.4-61

图	例	说明
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后, 设计了砂轮越程槽</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后, 留出刀具铣削花键的进退空间</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后, 设计了插齿退刀槽</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后, 设计了刨刀让刀槽</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后, 设计了刨刀让刀孔; 改进后, 法兰设计了半圆孔, 便于铣刀进退</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合理</p>	<p>改进后, 沟槽表面与其他加工表面不重合, 便于刀进退</p>

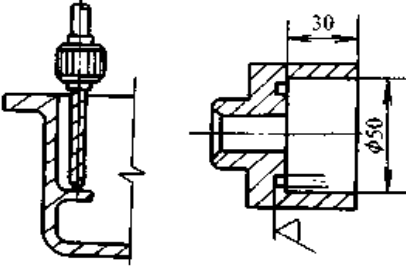
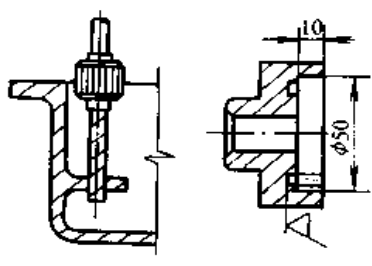
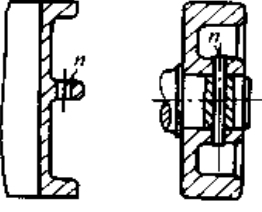
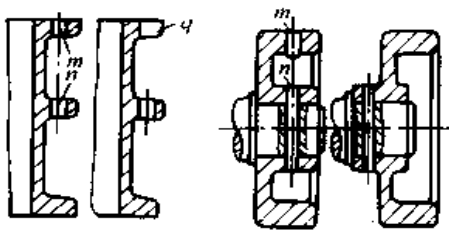
(6) 便于刀具引入

设计零件结构要考虑采用标准刀具加工的可

能性，尽量防止零件中有妨碍标准刀具运动的结

构，减少使用特殊刀具加工（见表15.4-62）。

表 15.4-62 便于刀具引入

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	<p>改进后，孔远离侧壁，不需要专用钻头；改进后，刀具易于接近凹槽加工面，不需要专用刀具</p>
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	<p>改进后，设计了工艺孔或工艺槽，刀具易于接近钻孔面；改进后，设计了工艺孔或凸缘结构，刀具易于接近钻孔面</p>

3.3 提高加工效率

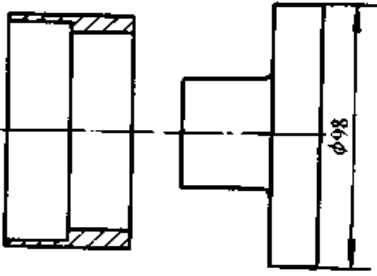
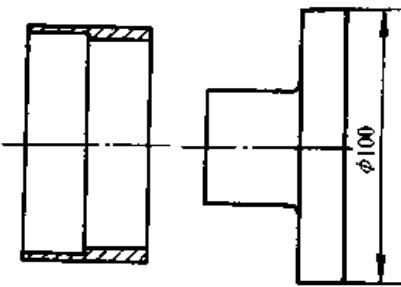
减少切削加工量和加工面积，不但可缩短加工时间，提高加工效率，也可节省原材料，降低加工成本。基本方法如下：

(1) 合理选择毛坯

合理地选择毛坯尺寸和形状，使毛坯的形状和尺寸接近零件的成型形状和尺寸，并尽可能减小毛坯的尺寸（见表15.4-63）。

(2) 减少加工面积

表 15.4-63 合理选择毛坯

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	<p>改进后，在满足使用功能的前提下，将右部壁厚减小，可直接采用管材毛坯；改进后，可用$\phi 100$的圆钢毛坯加工而成，毛坯尺寸减小，加工量随之减小</p>

减少加工面积的同时要考虑零件的刚度和使用要求，不可为减少加工面积而降低零件的支

刚度。另外，应尽可能减少精加工的面积（见表15.4-64）。

表 15.4-64 减少加工面积

图	例	说 明
		<p>改进后，加工表面适中，刚性良好；改进后，精车面积减少</p>
不合理	合理	

(3) 采用组合部件

将复杂的零件结构，改为多个简单的零件组合，也是减小切削加工量，降低加工难度的有效方法（见表 15.4-65）。

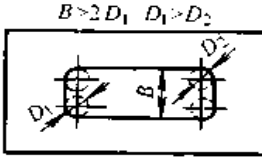
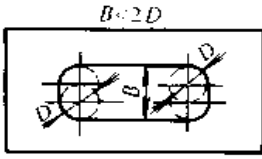
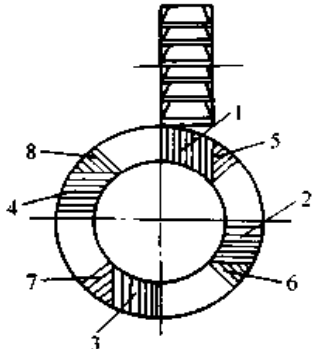
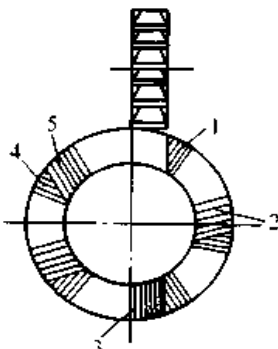


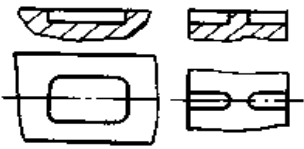
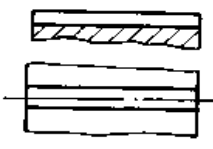
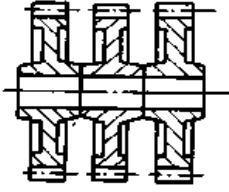
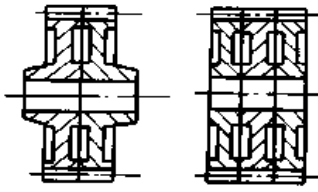
(4) 减少走刀次数和行程

零件结构设计合理，可有效的减少加工过程中刀具的行走次数和行程（见表 15.4-66）。

表 15.4-65 采用组合部件

图	例	说 明
		<p>改进后，零件结构简单化，加工难度和加工量均减少</p>
不合理	合理	
		<p>改进后，内孔加工难度降低；改进后，球面加工难度降低</p>
不合理	合理	

表 15.4-66 减少走刀次数和行程

图	例	说 明
		<p>改进后, 矩形槽四圆角半径应等于铣刀半径, 并且圆角要与槽宽对应, 不可太小</p>
		<p>改进后, 牙嵌离合器设计为奇数齿, 很明显奇数齿比偶数齿加工省时, 走刀次数减少</p>
		<p>改进后, 各轴段长度相等或互为整数倍, 采用多刀加工, 刀具行程缩短</p>
		<p>改进后, 通槽代替封闭槽, 走刀次数和刀具减少</p>
		<p>改进后, 减少了齿轮切削行程</p>

3.4 切削件结构设计中的常用标准

在零件结构设计中采用标准化, 可保证零件的高质量和良好的加工工艺性, 最大限度减少零

件的规格和尺寸数量:

零件结构设计的常用标准参见第 13 篇第 6 章设计要素部分。

4 压力加工件结构设计

压力加工主要分为锻造和冲压，锻造又分为自由锻造、模型锻造、胎膜锻造和特种锻造，机械设备中的重要零件常采用锻造毛坯。下面给出自由锻造、模型锻造和冲压几种工艺方法对零件结构设计的要求。

4.1 自由锻造件结构设计

自由锻造是将金属放在锻锤或压力机的上下抵铁之间直接成型，广泛应用于小批量多品种的生产。但由于加工工艺所限，自由锻件的尺寸很难保证精确，加工余量较大，并且零件的形状不能过于复杂。因此，自由锻造件的结构应以简化零件形状为主要设计原则。

4.1.1 简化自由锻件形状

自由锻件应首选对称、平直的结构，外形应为平面和圆柱面组成。尽量避免结构上出现复杂的曲面或曲线，如椭圆形、工字型截面等：

(1) 避免锥体和楔形

自由锻造锥体和楔形需要使用特殊形状的垫铁，加工较为困难，不易保证加工质量，在零件结构中尽量避免。如必须锥体结构，可采用先保留圆柱形加工余量，再后续切削加工的方法，获得最后的锥体形状（见表 15.4-67）：

(2) 避免复杂相贯线

自由锻造无法锻造两个形体之间的交接线。因此，两个圆柱体之间、圆柱体与立方体之间的相贯线和过渡线应避免（见表 15.4-68）。

(3) 避免加强肋

表 15.4-67 避免锥体和楔形

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	改进后，由圆柱体和平面代替锥体和楔面
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	改进后，将锥体和斜度锻造为圆柱体和平面，后续切除双点画线部分

表 15.4-68 避免复杂相贯线

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	改进后，零件形体之间的交接简化

自由锻件上不允许有加强肋。如果必须设置加强肋，也可采用先在零件上留出余量，再后续加工的方法获得（见表 15.4-69）。

(4) 避免凸台结构

自由锻件上的凸台是无法锻造成形的。通常

用凹坑或平直结构代替，尤其是叉形结构内的凸台应尽量避免（见表 15.4-70）。

(5) 采用组合结构

采用组合结构是简化零件结构的有效方法，在自由锻造结构中普遍采用，见表 15.4-71。

4.1.2 常见自由锻件结构

表 15.4-72 为自由锻造结构分类。

4.1.3 自由锻件结构参数尺寸限制

自由锻造由于其工艺条件的限制，对锻造件

的最大和最小尺寸有所限制。采用标准或规范尺寸设计可有效地保证结构的合理性和可锻性。

自由锻件的台阶和凹挡应满足表 15.4-73 ~

表 15.4-75 的要求。

表 15.4-69 避免加强筋

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	<p>改进后，结构中去掉了加强肋结构；改进后，结构中去掉了工字梁结构</p>

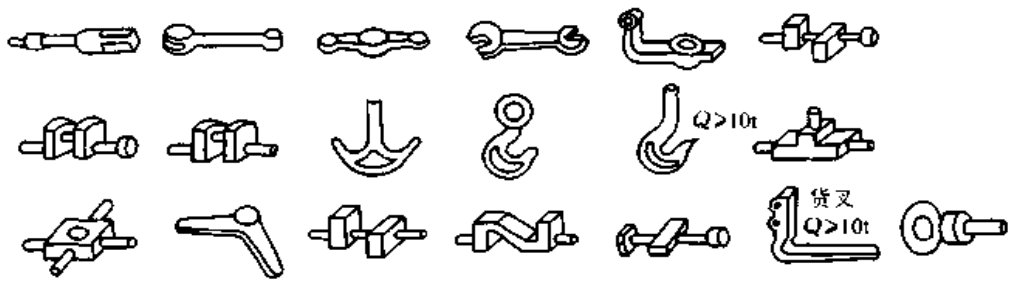
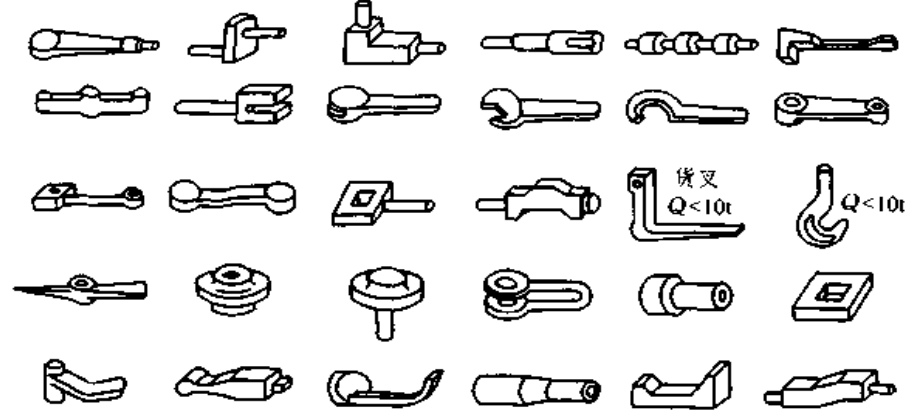
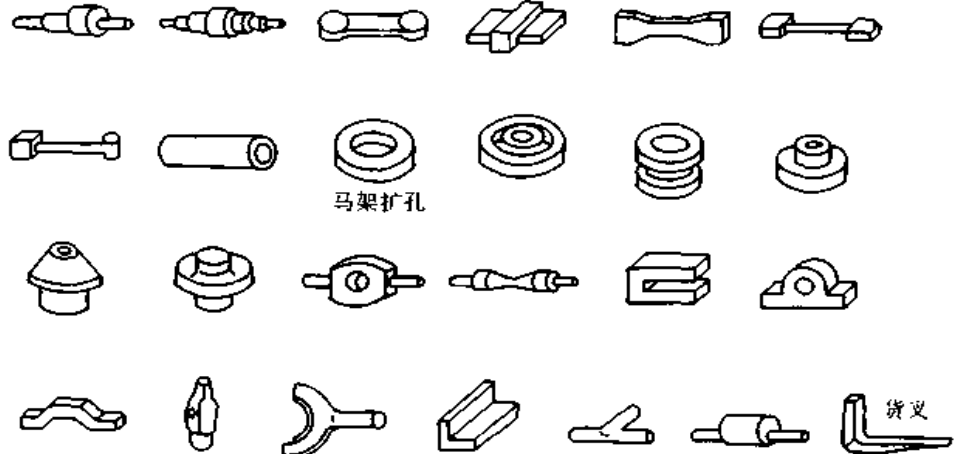
表 15.4-70 避免凸台结构

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	<p>改进后，用凹坑或平直结构代替凸台</p>

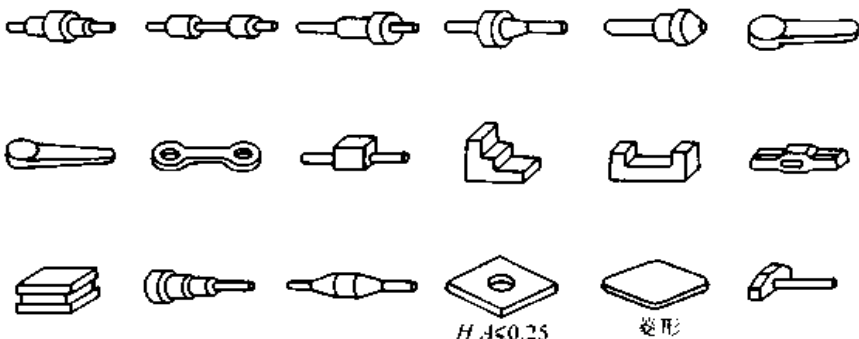
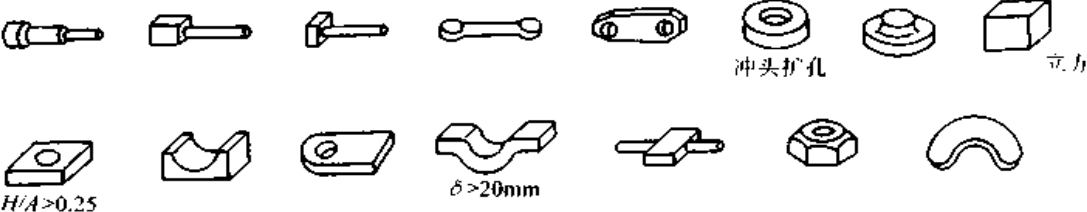

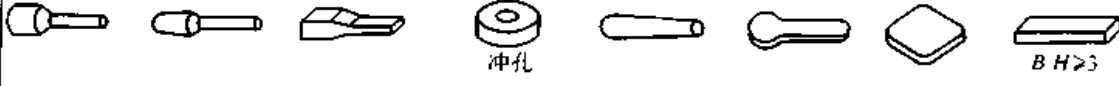
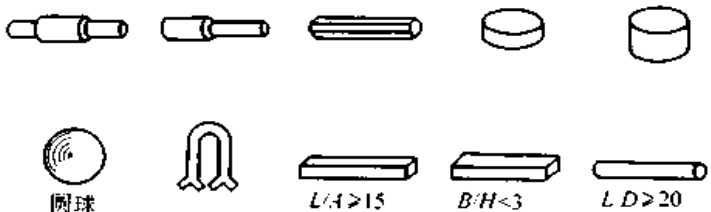

表 15.4-71 采用组合结构

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	<p>各部分尺寸有悬殊变化的零件结构、叉形结构和细长杆结构都应避免整体锻造，常采用螺纹联结、焊接等组合结构代替</p>

表 15.4-72 常见自由锻件结构

类别	锻件形状示例
1	 <p>Category 1 shows various free-forging parts such as shafts, pins, and hooks. Some parts are labeled with load capacity: $Q > 10t$ and $Q > 10t$ 货叉.</p>
2	 <p>Category 2 shows various free-forging parts including pins, bolts, and hooks. Some parts are labeled with load capacity: $Q < 10t$ 货叉 and $Q < 10t$.</p>
3	 <p>Category 3 shows various free-forging parts including bolts, nuts, and washers. One part is labeled 马架扩孔 (Horse frame hole expansion).</p>

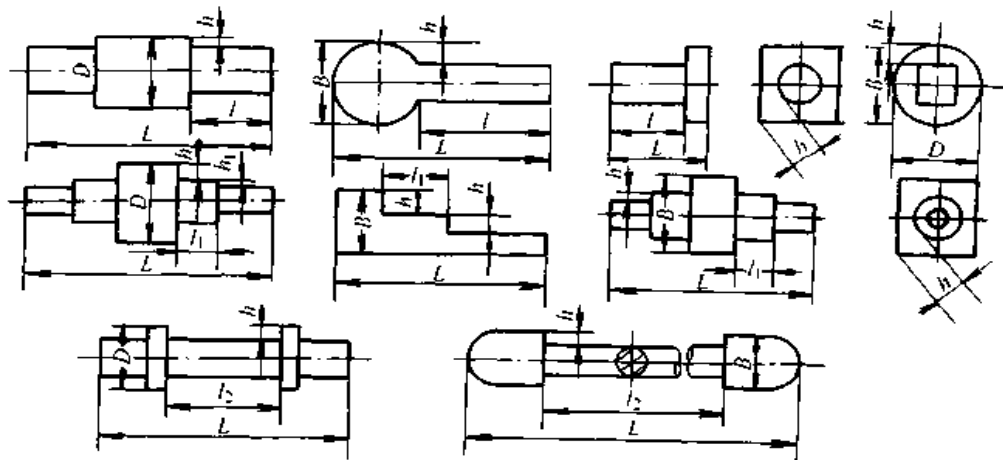
续表 15.4-72

类别	锻件形状示例
4	 <p style="text-align: center;">$H/A < 0.25$ 菱形</p>
5	 <p style="text-align: center;">冲头扩孔 立方</p> <p style="text-align: center;">$H/A > 0.25$ $\delta > 20\text{mm}$</p>
6	 <p style="text-align: center;">扁方 $\delta < 20\text{mm}$</p>
7	 <p style="text-align: center;">冲孔 $B/H > 3$</p>
8	 <p style="text-align: center;">圆球</p> <p style="text-align: center;">$L/A > 15$ $B/H < 3$ $L/D > 20$</p>
9	 <p style="text-align: center;">$L/D < 20$ $L/A < 15$</p>

注：1. 表中符号 Q —起重量， H —高度， A —正方形的边长， δ —厚度， L —长度， D —外径， B —宽度。
 2. 本表适于在锤上用自由锻（或局部采用胎模锻）方法生产的一般用途的钢质锻件。
 3. 表中锻件的复杂程度由 1 类向 9 类递减。

表 15.4-73 锻件台阶和凹挡的锻出条件

(mm)



台阶高度 h	锻件长度 L	相邻台阶的直径 D 或高度 B									
		65 以下	66 ~ 80	81 ~ 100	101 ~ 125	126 ~ 160	161 ~ 200	201 ~ 250	251 ~ 320	321 ~ 400	
		锻出台阶及凹挡的最小长度									
5 ~ 8	250 以下	70	80	90	100	120					
	251 ~ 400	90	100	120	140	160					
	401 ~ 600	120	140	160	180	210	240				
	601 ~ 1000	160	180	210	240	270	300				
	1001 ~ 1600	210	240	270	300	330	360				
	1601 ~ 2500		300	330	360	400	440				
	2501 ~ 4000			400	440	480	520				
	4001 ~ 6000				520	560	600				
9 ~ 14	250 以下	50	55	60	70	80	90				
	251 ~ 400	60	70	80	90	100	110	120	140		
	401 ~ 600	80	90	100	110	120	140	160	180		
	601 ~ 1000	100	110	120	140	160	180	210	240		
	1001 ~ 1600		140	160	180	210	240	270	300		
	1601 ~ 2500			210	240	270	300	330	360		
	2501 ~ 4000				300	330	360	400			
	4001 ~ 6000					400	440	480			
15 ~ 23	250 以下		40	45	50	60	70				
	251 ~ 400		50	60	70	80	90	100	110	120	
	401 ~ 600		70	80	90	100	110	120	140	160	
	601 ~ 1000		90	100	110	120	140	160	180	210	
	1001 ~ 1600			120	140	160	180	210	240	270	
	1601 ~ 2500				180	210	240	270	300	330	
	2501 ~ 4000					270	300	330	360		
	4001 ~ 6000						360	400			

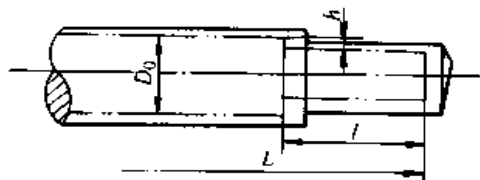
续表 15.4-73

台阶高度 h	锻件长度 L	相邻台阶的直径 D 或高度 B								
		65 以下	66~80	81~100	101~125	126~160	161~200	201~250	251~320	321~400
		锻出台阶及凹挡的最小长度								
24~36	250 以下			45	50	55	60			
	251~400			55	60	70	80	90	100	120
	401~600			70	80	90	100	110	120	140
	601~1000			90	100	110	120	140	160	180
	1001~1600			110	120	140	160	180	210	240
	1601~2500				160	180	210	240	270	300
	2501~4000					240	270	300	330	
37~55	250 以下					50	55			
	251~400					60	70	80	90	100
	401~600					80	90	100	110	120
	601~1000					100	110	120	140	160
	1001~1600					120	140	160	180	210
	1601~2500					160	180	210	240	270
	2501~4000					210	240	270	300	
56~75	250 以下					45	50			
	251~400					55	60	70		
	401~600					70	80	90	100	110
	601~1000					90	100	110	120	140
	1001~1600					110	120	140	160	180
	1601~2500					140	160	180	210	240
	2501~4000					180	210	240	270	
4001~6000						270	300			

- 注：1. 当台阶的长度 l 等于或大于表中所列数值时，则端部之台阶亦能锻出。
 2. 当台阶的长度 l_1 等于或大于 $0.8L$ 时，则中部之台阶亦能锻出。
 3. 当凹挡的长度 l_2 等于或大于 $1.5L$ 时，则两台阶之间的凹挡亦能锻出。
 4. 如台阶或凹挡有一个不需要锻出时，则其近邻之台阶及凹挡按其总高度 $h+h_1$ 来计算。
 5. 对于外形特别复杂的锻件，其台阶与凹挡是否锻出，由锻件设计者视具体情况确定。

表 15.4-74 台阶轴的最小锻出高度

(mm)



续表 15.4-74

锻件长度 L	相邻台阶的直径 D_0							
	≤ 200	201~300	301~450	451~600	601~800	801~1000	1001~1250	1251~1600
	锻出台阶的最小高度 h							
≤ 2500		20	20	20	25			
2501~4000	20	20	20	25	30	35		
4001~6500	20	20	25	25	35	40	45	55
6501~10000	20	20	25	30	35	45	50	60
10001~15000		25	30	35	40	50	60	70

表 15.4-75 台阶轴的最小锻出长度 (mm)

锻出台阶高度 h	锻件长度 L	相邻台阶的直径 D_0							
		≤ 200	201~300	301~450	451~600	601~800	801~1000	1001~1250	1251~1600
		锻出台阶的最小长度 l							
≤ 40	≤ 2500		250	300	350				
	2501~4000	250	300	350	400	450	550		
	4001~6500	300	350	400	450	500	600	750	900
	6501~10000	350	400	450	500	550	650	800	1000
	10001~15000	450	500	550	600	650	750	900	1100
> 40	≤ 2500		200	250	300	350	450		
	2501~4000	200	250	300	350	400	500	600	
	4001~6500	250	300	350	400	450	550	700	850
	6501~10000	300	350	400	450	500	600	750	950
	10001~15000	400	450	500	550	600	700	850	1050

对于用圆钢锤扁或扁钢辗成圆柱形的端部结构尺寸见表 15.4-76、表 15.4-77 所示。

自由锻件端部和中间法兰结构尺寸见表

15.4-78、表 15.4-79 所示。

自由锻件的孔的结构类型见图 15.4-1 所示。

所允许的最小冲孔直径如表 15.4-80 所示。

表 15.4-76 圆钢锤扁端部尺寸 (mm)

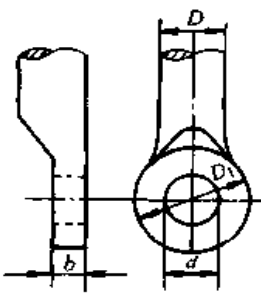
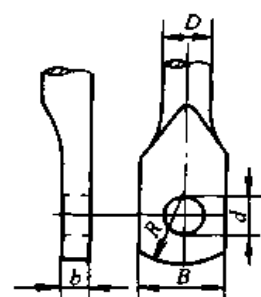
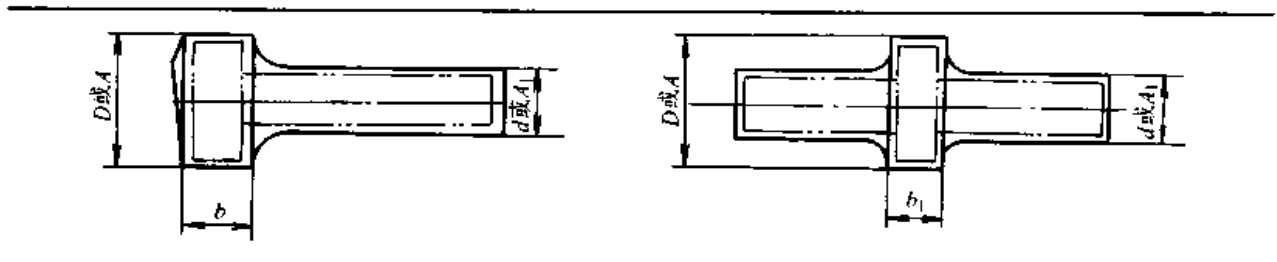
I 型	I 型				II 型	II 型				
	D	D_1	b	d 不大于		D	B	b	d 不大于	R
	8	20	5	10		8	15	3	8	15
	10	25	6	13		10	20	4	10	15
	12	30	6	25		12	22	5	12	25
	16	35	10	18		14	26	6	13	25
	18	40	10	20		16	28	7	14	25

表 15.4-77 扁钢辗成圆柱形的端部尺寸 (mm)

	d	c	b
	8	3~4	20~25
	10	4~5	25~30
	12	4~6	25~35
	16	6~8	25~45
>16	$\frac{1}{4}\pi d^2 < 0.7bc$		

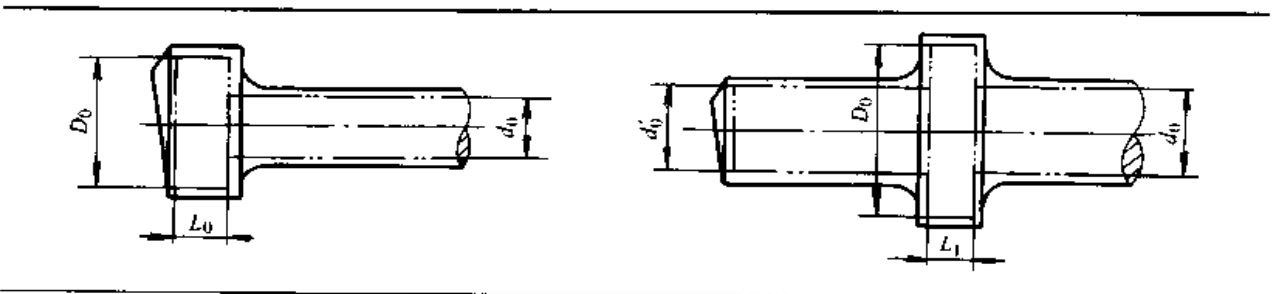
表 15.4-78 锤锻件法兰的最小锻出厚度 (mm)



与法兰相邻部分的直径 d 或边长 A_1	法兰直径 D 或边长 A															
	< 50		50~80		80~120		120~160		160~200		200~250		250~315		315~400	
	锻件法兰的最小锻出厚度 b, b_1															
	b	b_1	b	b_1	b	b_1	b	b_1	b	b_1	b	b_1	b	b_1	b	b_1
< 40	25	15	30	22	40	30	55	42								
40~50			26	20	36	28	50	39	65	51						
50~65			23	18	32	25	45	36	60	48	85	65				
65~80					28	22	40	33	55	45	80	60	110	80		
80~100					23	18	35	30	50	42	75	55	105	75	135	100
100~120							30	26	45	38	65	50	95	70	125	95
120~160									40	33	60	45	85	65	115	90
160~200											50	38	75	58	105	80
200~250													65	50	95	70
250~315															85	60

注：1. 中间法兰按法兰直径 D 或边长 A 与相邻的较小直径 d 或边长 A_1 来确定其最小锻出厚度 b_1 。
 2. 法兰按台阶轴类锻件加放余量后，其厚度值如小于表列数值，则可增大至表列数值后再锻出。

表 15.4-79 水压机锻件法兰的最小锻出长度 (mm)



续表 15.4-79

与法兰相邻部分的直径 d_0 或 d'_0	法 兰 直 径 D_0										
	≤ 200	201~250	251~320	321~400	401~500	501~630	631~800	801~1000	1001~1250	1251~1600	1601~2000
	锻件法兰的最小锻出厚度 L_0 、 L_1										
	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1	L_0/L_1
≤ 160	50/50	70/60	90/70	120/90	140/110	200/150					
161~200		60/50	80/60	110/80	130/100	180/140	260/200				
201~250			70/50	100/70	120/90	160/130	240/180	320/260			
251~320				90/60	110/80	150/120	220/160	300/240	420/300		
321~400					100/70	140/110	210/150	280/220	400/280	550/400	
401~500					90/60	120/100	190/140	260/200	380/260	500/360	650/500
501~630						100/90	170/120	240/180	340/240	480/330	610/480
631~800							140/100	220/160	300/220	440/300	570/440
801~1000								170/120	280/200	400/280	520/400
1001~1250									220/180	350/250	440/350
1251~1600										260/220	400/320

注：表中数值分子为端部法兰的最小锻出长度 L_0 ；分母为中间法兰的最小锻出长度 L_1 。

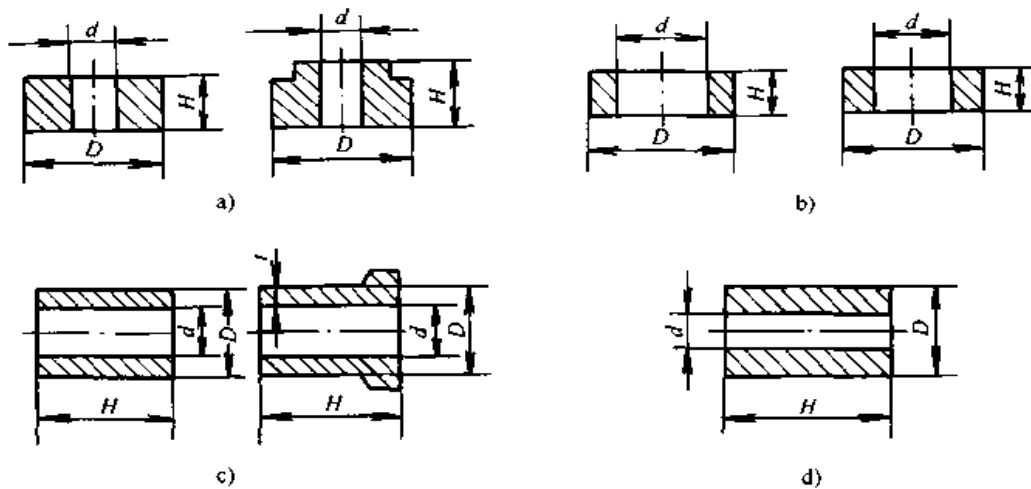


图 15.4.1 自由锻件的孔的结构类型

- a) 盘件： $H \leq D$ ， $d \leq 0.5D$ b) 环件： $H \leq D$ ， $d \geq 0.5D$
 c) 短套筒件： $H = (1 \sim 2)D$ ， $d > 0.5D$ d) 长套筒件 $H > 1.5D$ ， $d < 0.5D$

表 15.4-80 允许的最小冲孔直径

锻锤吨位/kN(t)	2.5 (0.25)	5 (0.50)	7.5 (0.75)	10 (1.0)	20 (2.0)	30 (3.0)	50 (5.0)
最小冲孔直径/mm	30	40	50	50~60	60~70	70~80	80~90

4.2 模锻件结构设计

模锻是在高强度金属锻模上预先制出与锻件形状一致的模膛，金属在模膛内受压发生塑性变形。塑性变形过程中金属坯料充满模膛，因此模锻最终可获得与模膛形状相符的锻件。与自由锻造相比模锻有生产效率高、尺寸精确、加工余量小和零件结构形状复杂等特点，适用于批量生产。

4.2.1 合理的模锻件结构

(1) 合理分模面位置

分模面是上下模在锻件上的分界面。设计模锻件结构时就要考虑分模面的设置位置。分模面

在很大程度上决定了模锻的难易程度和质量。确定分模面时应考虑以下几个方面：

1) 易起模和成形 为保证模锻件能够顺利地从模膛中取出，以及便于金属充满模膛、要求上下模膛的深度尽量的小，宽度尽量大。模锻件的结构要便于找到这样的分模面位置（见表 15.4-81）。

2) 防止错模 为了能够及时的发现错模，上下模膛的外形要保持一致（见表 15.4-82）。

(2) 拔模斜度

在起模方向设计适当的拔模斜度结构，有利于起模（见表 15.4-83）。

表 15.4-81 易起模和成形

图	例	说 明
		改进后，模锻件厚度减小，便于分模面的设置

表 15.4-82 防止错模

图	例	说 明
		模锻件的外形设计要便于分模面的选取，保证上下模膛在分模面上外形相同

表 15.4-83 拔模斜度

图	例	说 明
		改进后，内外表面设计了拔模斜度，并且缩短了孔的深度

(3) 简化零件外形

为便于制模，应尽量简化模锻件的外形，以便可选取简单的分模面（见表 15.4-84）。

4.2.2 模锻件结构分类

模锻件的结构与模锻工艺紧密相关，表 15.4-85

列出了采用不同模锻工艺的锻件结构分类。

4.2.3 模锻件结构元素设计

(1) 圆角设计

模锻件的所有转弯处都必须用外圆角或内圆角连接，圆角的大小是根据锻件各部分的高度和

宽度的比值选取, 见表 15.4-86 所示。圆角最后取标准系列值: 1、1.5、2、2.5、3、4、5、6、

8、10、12、15、20、25 和 30 mm, 以便于制模和检验。

表 15.4-84 简化零件外形

图	例	说 明
		改进后, 采用一平面代替复杂的平面, 降低了锻造难度

表 15.4-85 横锻件结构分类

类别	组别	锻 件 简 图	基本工序	类别	组别	锻 件 简 图	基本工序
盘 类	简单形状		微粗 (压扁) 终锻	轴 类	直轴类		拔长、滚挤、(预锻)、终锻
	较复杂形状				弯曲轴		拔长、滚挤、弯曲、(预锻)、终锻
	复杂形状				枝芽类		拔长、滚挤、成形、(预锻)、终锻
					叉 类		拔长、滚挤、预锻、终锻

表 15.4-86 横锻件圆角半径

	$\frac{H}{B}$	r	R
	≤ 2	$0.05H + 0.5$	$2.5r + 0.5$
	$> 2-4$	$0.06H + 0.5$	$3.0r + 0.5$
	> 4	$0.07H + 0.5$	$3.5r + 0.5$

(2) 模锻斜度设计

为便于锻件成形后起模，在模锻件起模方向的侧壁都应设计模锻斜度。模锻斜度与模锻工艺和锻件的几何形状有关，具体取值见表 15.4-

87、表 15.4-88 所示。为便于采用标准刀具，应按下列值选取：0°15′、0°30′、1°00′、1°30′、3°00′、5°00′、7°00′、10°00′、12°00′。

(3) 加强肋的设计

表 15.4-87 锤上模锻件外模锻斜度 α 值

	$\frac{L}{B}$	$\frac{H}{B}$				
		≤ 1	$> 1-3$	$> 3-4.5$	$> 4.5-6.5$	> 6.5
	≤ 1.5	5°00′	7°00′	10°00′	12°00′	15°00′
	> 1.5	5°00′	5°00′	7°00′	10°00′	12°00′

注：1. 内模锻斜度 β 的确定，可按表中数值增大 2°~3° (15°除外)。

2. 对于热模锻压力机或螺旋压力机上模锻件，如模具采用顶料机构，其内、外模锻斜度均可减小 2°~3° (15°除外)；如无顶料机构，则按表中数值确定。

表 15.4-88 平锻件的模锻斜度

凹模内成形模锻斜度				
	Δ	≤ 10	$> 10-20$	$> 20-30$
	β	5°~7°	7°~10°	10°~12°
	α	3°~5°	3°~5°	3°~5°
凸模内成形模锻斜度				
	$\frac{H}{d}$	≤ 1	$> 1-3$	$> 3-5$
	α	0°15′	0°30′	1°00′
内孔模锻斜度				
	$\frac{H}{d_n}$	≤ 1	$> 1-3$	$> 3-5$
	r	0°30′	0°30′~1°00′	1°30′

如图 15.4-2 所示有较好工艺性的加强肋的结构尺寸比例, 如表 15.4-89 所示加强肋之间的极限值。

(4) 幅板设计

幅板用于连接加强肋或其他凸起部分, 形状呈薄板状, 为便于金属流动, 制定了锻件最小幅

板厚度, 见表 15.4-90 所示。

(5) 冲连皮与压凹设计

模锻的最小内孔直径为 25 mm, 如采用锤或压力机锻造工艺无法锻造出通孔, 要在孔内保留一层冲连皮。如图 15.4-3 和表 15.4-91 所示冲连皮与压凹的适用范围和设计尺寸。

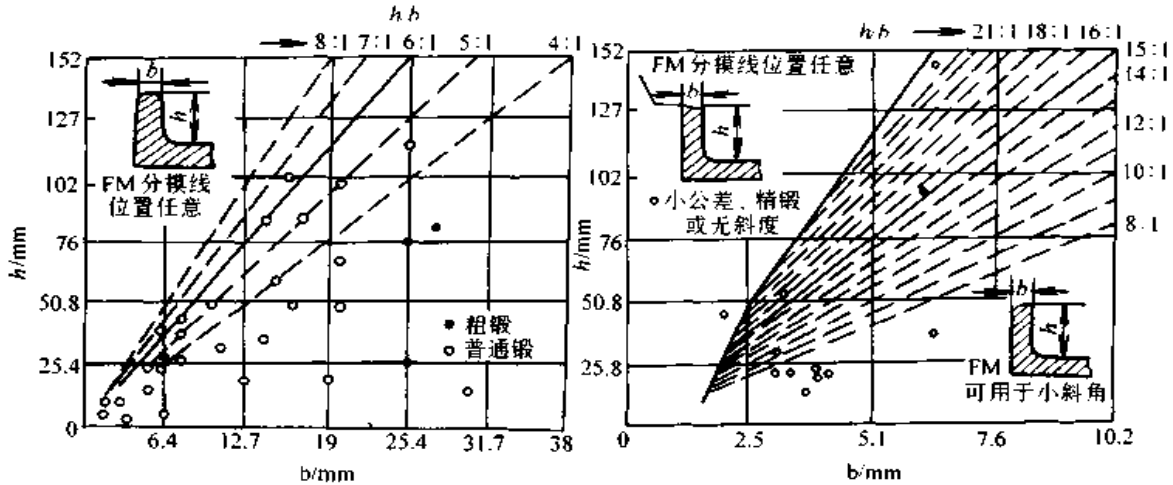
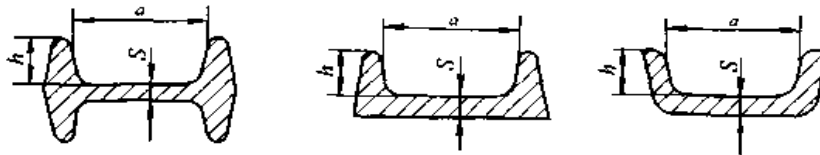


图 15.4-2 有较好工艺性的加强肋的结构尺寸比例

a) 适于铝合金、钢、钛合金 b) 适于投影面积在 0.26 m² 以下的无斜度中小型锻件

表 15.4-89 加强肋间距的极限值

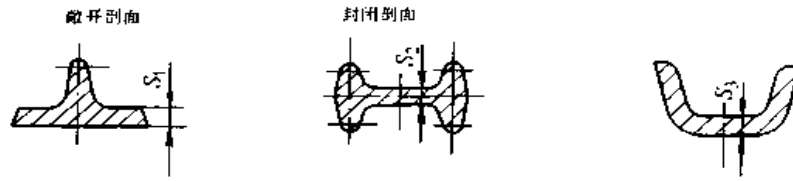
(mm)



肋高 <i>h</i>	钢及合金钢、钛合金		铝 合 金		镁 合 金	
	<i>a</i> _{min}	<i>a</i> _{max}	<i>a</i> _{min}	<i>a</i> _{max}	<i>a</i> _{min}	<i>a</i> _{max}
< 5	10	30S	10	35S	10	30S
6~10	12	30S	10	35S	12	30S
11~16	20	30S	15	35S	20	30S
17~25	30	25S	20	30S	30	25S
26~35	45	25S	35	30S	50	25S
36~50	60	20S	50	25S	70	20S
51~70	80	20S	65	25S	100	20S
71~100	—	—	80	25S	—	—

表 15.4-90 锻件最小幅板厚度

(mm)



模锻件在分模面上的投影面积/cm ²	钢与合金钢 钛合金		铝 合 金		镁 合 金			
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	MB2		MB15	
					S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
≤25	1.5	2	1.5	2	1.5	2	1.5	2
>25~50	2	3	2	2.5	2	2.5	2	3
>50~100	3	4	3	3	2.5	3	3	4
>100~200	4	5	4	4	3	4	4	5
>200~400	5	6	5	6	4	5	5	6
>400~800	6	8	6	8	6	6	6	6
>800~1000	8	10	8	8	8	8	8	10
>1000~1250	10	12	8	10	8	10	—	—
>1250~1600	12	14	9	11	—	—	—	—
>1600~2000	14	16	10	12	—	—	—	—
>2000~2500	16	18	11	14	—	—	—	—
>2500~3150	18	20	12	16	—	—	—	—
>3150~4000	20	22	13	18	—	—	—	—
>4000~5000	22	24	14	18	—	—	—	—
>5000~6300	—	—	15	20	—	—	—	—

注：当锻造热强钢时腹板厚度应按钢增加 30%。

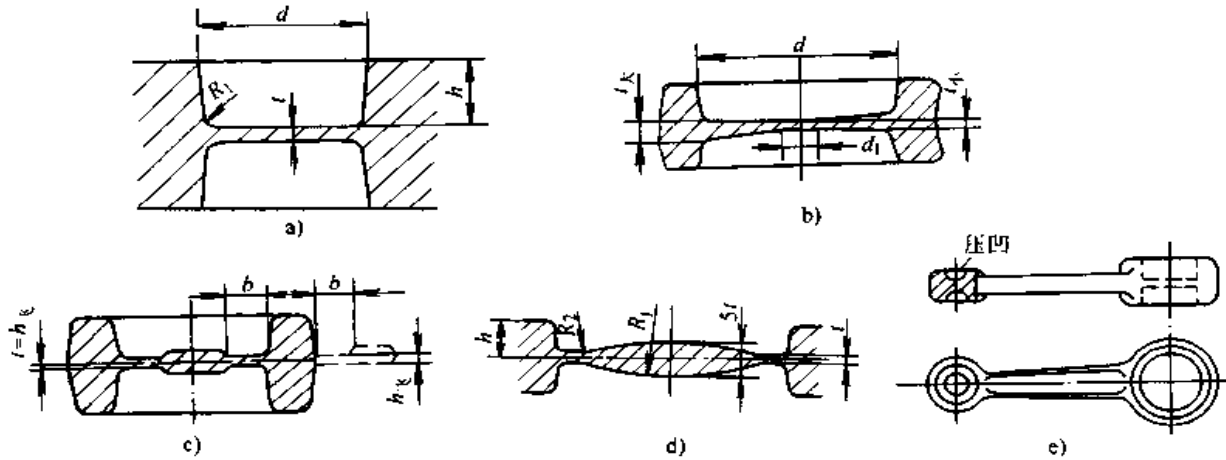


图 15.4-3 冲连皮与压凹

a) 平地连皮 b) 斜连皮 c) 带仓连皮 d) 拱底连皮 e) 压凹

表 15.4.91 冲连皮与压凹的适用范围和设计尺寸

类别	适用范围	尺寸参数
平底连皮	最为常用	$t = 0.45 \sqrt{d - 0.25h} - 5 + 0.6 \sqrt{h}$ $R_1 = R + 0.4h + 2$ R_1 ——内圆角半径
斜底连皮	常用于 $d > 2.5h$ 或 $d > 60\text{mm}$ 的预锻模膛	$t_{\text{大}} = 1.35t, t_{\text{小}} = 0.65t$ $d_1 = (0.25 \sim 0.30)d$ t ——平底连皮的计算值
带仓连皮	用于预锻时采用斜底连皮的终锻模膛	厚度 t 和宽度 b 分别与终锻模膛的飞边桥部高度 h 和桥部宽度 b 相同
拱底连皮	用于内孔很大且高度很小的锻件 ($d > 15h$)	$t = 0.4 \sqrt{d}$ R_1 ——由作图决定, $R_2 = 5h$
压 凹	适于内孔小于 25mm 为促使金属充满型槽的锻件	孔底以球面为主

4.3 冷冲压件结构设计

冲压是将金属板料利用压力机的冲压作用成形的工艺方法。这种加工方法通常是在冷态下进行的，所以又称为冷冲压。冲压件是由金属板料在冲压外力作用下产生分离和变形获得的。由分离工序得到的工件称为冲裁件；变形工序又分为弯曲和拉伸，分别得到弯曲件和拉伸件。冲压件的结构设计，要充分考虑冲压工艺的要求和特点，以减少材料的消耗、延长模具寿命、提高生产效率、降低成本和保证冲压件质量。

4.3.1 合理的冲压件结构和形状

(1) 充分利用金属板料

分离工艺是通过落料、冲孔和剪切工序获得平板冲裁件。落料是被分离的部分是工件，周边是废料；冲孔是被分离的部分是废料，周边是工件；剪切是使金属平板按不封闭轮廓分离的工序。以上三种工序方法，在加工成品的同时都会

产生废料。因此要充分利用金属板料，合理地设计冲压件形状（见表 15.4.92 所示）。

(2) 简化形状

冲裁件的形状要尽量简单。几何形状越简单，冲压下料越方便。尽量用直线代替曲线、圆形代替椭圆或高阶曲线、规则图形代替不规则图形。

弯曲件同样要简化结构，为使工件变形时受力均匀，尽量采用对称形状，以保证工件的质量和模具的使用寿命。

拉伸件是利用凸模把板料压入凹模，使坯料直径缩小，得到中空零件。形状复杂就难于拉伸，因此尽量将零件设计成圆桶形和具有对称结构，避免复杂的箱形、曲线形和非对称结构。（见表 15.4.93 所示）。

(3) 避免细长结构

冲裁件结构中尽量避免狭长的开口和细长的壁，这样会使模具制造困难，寿命降低（见表 15.4.94 所示）。

表 15.4.92 充分利用金属板料

图 例	说 明
<p style="text-align: center;">不 合 理 合 理</p>	改进后，提高了金属板料的利用率

续表 15.4-92

图 例	说 明
<p>不合理 合 理</p>	改进后, 在满足使用要求的前提下, 在大的工件中取小工件

表 15.4-93 简化形状和结构

图 例	说 明
<p>不合理 合 理</p>	改进后, 工件的形状明显简化
<p>不合理 合 理</p>	改进后, 工件形状对称, 弯曲尺寸易保证

表 15.4-94 避免细长结构

图 例	说 明
<p>不合理 合 理</p>	改进后, 将局部细长结构加大尺寸

(4) 采用圆角结构

不论是冲裁件、弯曲件, 还是拉伸件的交接和弯角处, 都应采用合理的圆角结构。圆角过小或直接采用尖角结构, 都会影响模具的使用寿命, 增大零件形状过渡处的应力集中 (见表

15.4-95 所示)。

(5) 避免深筒结构

对于拉伸件各部分尺寸不要过度悬殊, 如果拉伸直径与坯料直径的比值过小 (即拉伸系数过小), 则坯料被拉入凹模越困难, 从底部到过渡

边缘部分的应力也越大，当超过金属抗拉强度限，底部会被拉穿。

拉伸系数小，一次无法拉伸成形，需进行多次拉伸，中间要对工件退火处理，消除由变形产

生的硬化现象。

为便于拉伸成形，简化拉伸工艺，降低成本，应尽量避免深度过大和凸缘过宽的中空零件（见表 15.4-96 所示）。

表 15.4-95 采用圆角结构

图	例	说 明
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	改进后，冲裁件的交接处采用圆角结构。圆角 R 的取值与板材、板厚和交角 α 有关
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	改进后，增大了弯曲半径，避免弯曲处产生裂纹和皱折
<p>不合理</p>	<p>合理</p>	改进后，简化了卷边的弯曲形状，卷边半径大于 1.5 倍的壁厚，便于加工

表 15.4-96 避免深筒结构

图	例	说 明
<p>$h=1.5d$ 不合理</p>	<p>$h'=d$ 合理</p>	改进后，深度不大，只需一两次拉伸就可成形

4.3.2 冲压工艺与冲压件结构

下面列出了采用分离与变形工艺中的不同工

序方法，可获得的冲压件的基本结构形式（见表 15.4-97、表 15.4-98）。

表 15.4-97 分离工艺与冲压件基本结构

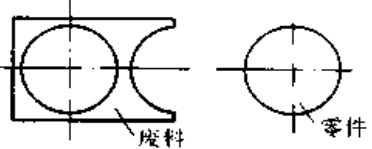
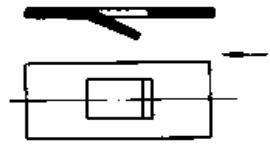
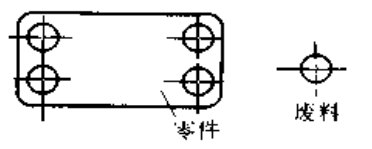
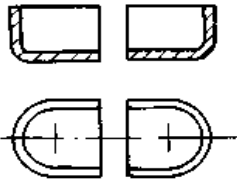
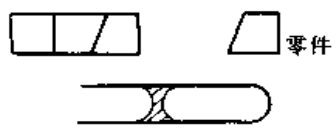

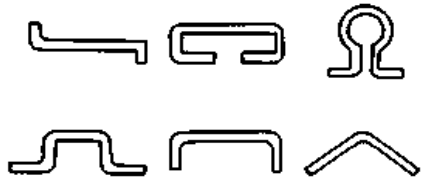

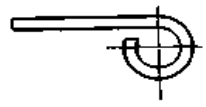
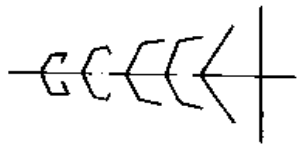




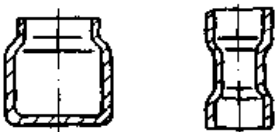

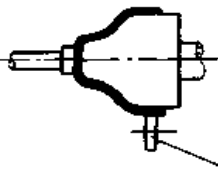
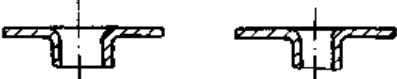

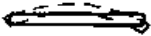
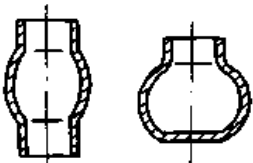
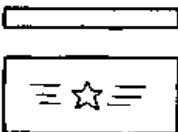
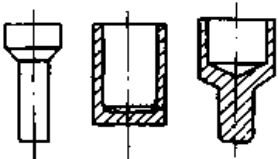

工序名称	简 图	特点及应用范围	工序名称	简 图	特点及应用范围
落料		用冲模沿封闭轮廓线冲切板料, 冲下部分为工件 用于冲压各种形状的平板零件	切口		用冲模在坯料上部分切开, 切口部分发生弯曲 用于加工需要开出切口的零件
冲孔		用冲模沿封闭轮廓线冲切板料, 冲下部分是废料 用于冲压各种形状的平板零件	剖切		用冲模将已经冲压的半成品切开成两个或数个零件 多用于不对称零件的成双(或成组)冲压成形之后
切断		用剪刀或冲模沿不封闭线切断 用于加工形状简单的平板零件	切边		用冲模将工件的边缘部分切掉 多用于将已成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状

表 15.4-98 变形工艺与冲压件基本结构

工序名称	简 图	特点及应用范围	工序名称	简 图	特点及应用范围
弯曲		把坯料沿直线弯成一定角度或形状	拉弯		在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形 多用于板料厚度较小、曲率半径很大或精度要求较高的曲面零件
卷圆		把板料冲弯成圆形 用于加工铰链、圆筒类零件	滚弯		通过一系列轧辊把平板坯料逐步弯曲成一定形状、尺寸的制作 用于加工复杂的特殊形状断面工件

续表 15.4-98

工序名称	简图	特点及应用范围	工序名称	简图	特点及应用范围
扭曲		把平板坯料的一部分相对于另一部分扭转一个角度	卷边		把空心件边缘翻卷成一定形状
拉深		把平板坯料冲压成各种形状空心制件,壁厚基本不变,多用于加工圆筒形或其他各类形状的空心零件	扩口		把空心件的口部扩大,常用于管形件
			缩口		把空心件的口部缩小
变薄拉深		把空心制件拉延成侧壁较底部为薄的制件	旋压		利用赶棒或滚轮使旋转的坯料沿靠模逐步成形,用以加工各种曲线构成的旋转体零件
翻孔(孔翻边)		把制件上的孔冲压成竖立的边缘			整形		把半成品制件压制成所要求的形状和尺寸,用于已成形件减小圆角半径或提高尺寸精度
翻边(外缘翻边)		把制件的局部边缘冲压成竖立边缘	校平				将制件压平,用于校正制件的平面度
胀形		把空心件的一部分冲压成径向扩张凸起的制件,多用以加工各种空间曲凸肚状零件	压印		在制件上压出文字或花纹,用于标牌、证章、日用品等的压制
			冷挤压		利用挤压模具使毛坯沿模具孔或模具的间隙挤出成形,得到一定形状、尺寸的制件
起伏		在制件上冲压成局部凸起(凹陷)的肋条、图案或文字,多用以压制加强肋或有关标志			

4.3.3 冲压件结构元素设计

(1) 冲裁件结构元素设计

圆角、槽和壁的设计见表 15.4-99 所示；

孔的设计见表 15.4-100、表 15.4-101 所示；

表 15.4-99 圆角、槽和壁的界限值

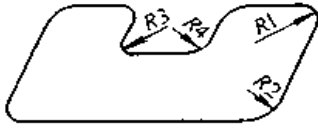
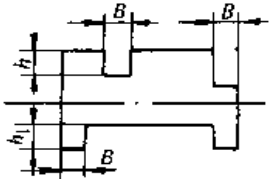
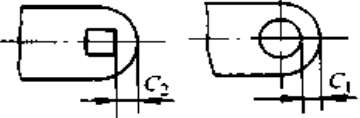
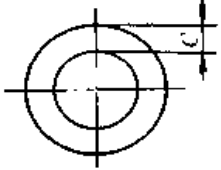
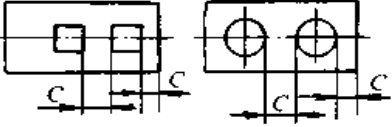
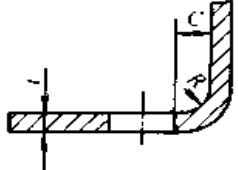
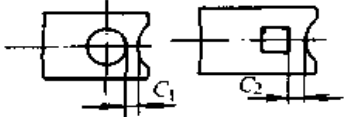
材 料 钢： $\sigma_b > 882 \text{ MPa}$ $\sigma_b = 490 \sim 882 \text{ MPa}$ $\sigma_b < 490 \text{ MPa}$ 黄铜、铜、铝、锌	 <p>板厚为 t</p>		 <p>板厚为 t</p>	
	$\alpha < 90^\circ$	$\alpha \geq 90^\circ$	B	h
	R_1, R_3	R_2, R_4		
	1.1t	0.8t	1.9t	1.6t
0.9t	0.6t	1.7t	1.4t	
0.7t	0.4t	1.5t	1.2t	
0.5t	0.2t	1.3t	1.0t	

表 15.4-100 冲裁的最小孔径

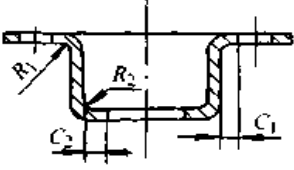
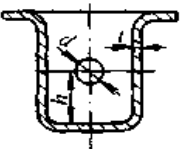
材 料	圆孔直径	方孔边长	长方孔	长圆孔	材 料	圆孔直径	方孔边长	长方孔	长圆孔
			短边(径)长					短边(径)长	
钢： $\sigma_b > 686 \text{ MPa}$	1.5t	1.3t	1.2t	1.1t	黄铜、铜	0.9t	0.8t	0.7t	0.6t
$\sigma_b = 490 \sim 686 \text{ MPa}$	1.3t	1.2t	1.0t	0.9t	铝、锌	0.8t	0.7t	0.6t	0.5t
$\sigma_b < 490 \text{ MPa}$	1.0t	0.9t	0.8t	0.7t	胶木、胶布板	0.7t	0.6t	0.5t	0.4t
					纸板	0.6t	0.5t	0.4t	0.3t

注： t 为材料厚度。

表 15.4-101 冲裁件孔位置的尺寸界限

简 图	最小距离 (t 为材料厚度)	简 图	最小距离 (t 为材料厚度)
	$C_1 \geq 1.2t$ $C_2 \geq 1.3t$		$C \geq 1.5t$
	$C \geq t$		$C \geq R + 0.5t$ 冲孔后弯曲时： $C \geq R + 1.5t$
	$C_1 \geq 0.7t$ $C_2 \geq 0.8t$		

续表 15.4-101

简 图	最小距离 (t 为材料厚度)	简 图	最小距离 (t 为材料厚度)
	$C_1 \geq R_1 + 0.5t$ $C_2 \geq R_2 + 0.5t$		$h > 2d + t$

(2) 弯曲件结构元素设计

各类弯曲半径设计见表 15.4-102~105。

表 15.4-102 弯曲最小半径

材 料	退火、正火状态		硬化状态		材 料	退火、正火状态		硬化状态		
	弯 曲 线 方 向					弯 曲 线 方 向				
	与轧制 方向垂直	与轧制 方向平行	与轧制 方向垂直	与轧制 方向平行		与轧制 方向垂直	与轧制 方向平行	与轧制 方向垂直	与轧制 方向平行	
05, 08F	0	0.2t	0.2t	0.5t	LY9, LY12(软)	0.5t	1.0t	1.5t	2.5t	
08, 10, Q195, Q215	0	0.4t	0.4t	0.8t	LY12, LC9	2.0t	3.0t	3.0t	4.0t	
					T1, T2, T3	0	0.2t	1.0t	2.0t	
15, 20, Q235	0.1t	0.5t	0.5t	1.0t	H68	0	0.5t	2.0t	12t	
25, 30, Q255	0.2t	0.6t	0.6t	1.2t	MB1	室 温	7t	9t	13t	18t
35, 40	0.3t	0.8t	0.8t	1.5t		300℃	2t	3t	—	—
45, 50	0.5t	1.0t	1.0t	1.7t	MB8	室 温	5t	8t	10t	15t
55, 60	0.7t	1.3t	1.3t	2.0t		300℃	2t	3t	—	—
T10, T10A	1.2t	2.6t	2.0t	3.0t	TA2	室 温	3t	5t	—	—
L4	0	0.2t	0.3t	0.8t		200~370℃	0.5t	1.0t		

注：1. t 为材料厚度 (mm)。

2. 弯曲线方向与轧制方向呈 45° 时，取中间值。

3. 本表适用于弯曲角 $\alpha \geq 90^\circ$ ，材料厚度 10 mm 以下，切口面状态良好的情况。

4. 当 $90^\circ > \alpha > 60^\circ$ 时，表值乘系数 1.1~1.3，当 $60^\circ > \alpha > 45^\circ$ 时乘系数 1.3~1.5。

表 15.4-103 管子弯曲最小半径

(mm)

铝 管			紫铜与黄铜管			硬聚氯乙烯管			焊接钢管			无 缝 钢 管					
管径	壁厚	弯曲 半径	管径	壁厚	弯曲 半径	管径	壁厚	弯曲 半径	管径	壁厚	弯曲 半径	管径	壁厚	弯曲 半径	管径	壁厚	弯曲 半径
D	t	R	D	t	R	D	t	R	D	t	R	D	t	R	D	t	R
6	1	10	5	1	10	12.5	2.25	30	13.5		80	6	1	15	57	3.5	110
8	1	15	6	1	10	15	2.25	45	17		100	8	1	15	57	4	150
10	1	15	7	1	15	25	2	60	21.25	2.75	130	10	1.5	20	76	4	180
12	1	20	8	1	15	25	2	80	26.75	2.75	160	12	1.5	25	89	4	220
14	1	20	10	1	15	32	3	110	33.5	3.25	200	14	1.5	30	108	4	270

续表 15.4-103

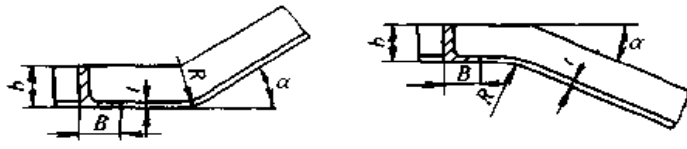
铝 管			紫铜与黄铜管			硬聚氯乙烯管			焊接钢管			无 缝 钢 管					
管径	壁厚	弯曲半径	管径	壁厚	弯曲半径	管径	壁厚	弯曲半径	管径	壁厚	弯曲半径	管径	壁厚	弯曲半径	管径	壁厚	弯曲半径
D	t	R	D	t	R	D	t	R	D	t	R	D	t	R	D	t	R
16	1.5	30	12	1	20	40	3.5	150	42.25	3.25	250	14	3	18	133	4	340
20	1.5	30	14	1	20	51	4	180	48	3.5	290	16	1.5	30	159	4.5	450
25	1.5	50	15	1	30	65	4.5	240	60	3.5	360	18	1.5	40	159	6	420
30	1.5	60	16	1.5	30	76	5	330	75.5	3.75	450	18	3	28	194	6	500
40	1.5	80	18	1.5	30	90	6	400	88.5	4	530	20	1.5	40	219	6	500
50	2	100	20	1.5	30	114	7	500	114	4	680	22	3	50	245	6	600
60	2	125	24	1.5	40	140	8	600				25	3	50	273	8	700
			25	1.5	40	166	8	800				32	3	60	325	8	800
			28	1.5	50							32	3.5	60	371	10	900
			35	1.5	60							38	3	80	426	10	1000
			45	1.5	80							38	3.5	70			
			55	2	100							45	3.5	90			
												45.5	3	100			

表 15.4-104 圆钢弯曲的推荐尺寸

(mm)

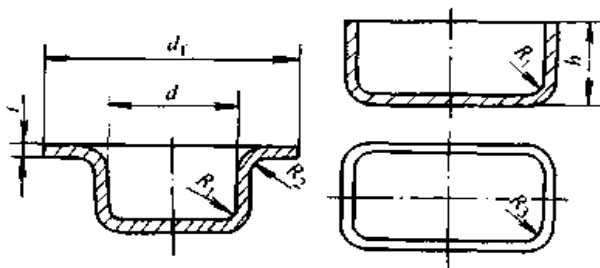
弯曲种类	简 图	推荐尺寸											
		d	6	8	10	12	14	16	18	20	25	28	30
圆钢弯曲		$r(\text{最小})$	4	6	8	10	12	15					
		$r(\text{一般})$	= d										
圆钢弯小钩		$\alpha = 45^\circ \text{ 或 } 75^\circ \quad l = 3d$ $D = 2d$; 其尺寸最好从下列尺寸系列中选择: 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 28, 32, 36, 40 mm											
圆钢弯钩环		d	D		c (小于)		R	l					
		6	8~14		6		5~8	14~26					
		8	10~18		6		5~10	27~36					
		10	10~20		8		5~10	30~40					
		12	12~24		10		5~12	36~48					
		14	12~28		12		8~15	40~56					
		16	16~32		16		8~15	48~64					
		18	18~36		20		10~20	54~72					
		直径 D 由下列尺寸系列中选择: 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 28, 32, 36 mm											
		半径 R 在 5, 8, 10, 12, 15, 20 mm 各数值选择, 应略等于 $D/2$											

表 15.4-105 角钢弯曲半径推荐值 (mm)

简 图	弯 曲 角 α		
	7°~30°	40°~60°	70°~90°
	$R = 150$	$R = 100$	$R = 50$
	$R = 50$	$R = 30$	$R = 15$

(3) 拉伸件结构元素设计

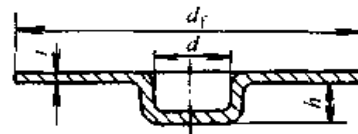
拉伸件的圆角半径见图 15.4-4 所示。



应取 $R_1 > t$, $R_2 > 2t$, $R_3 > 3t$ 最好 $R_1 = (3 \sim 5)t$, $R_2 = (5 \sim 10)t$

图 15.4-4 圆角半径

拉伸件的凸缘宽度见图 15.4-5 所示。



$$d + 12t \leq d_1 \leq d + 25t$$

图 15.4-5 凸缘宽度

拉伸件的翻边尺寸, 见表 15.4-106 所示。

拉伸件加强肋的形状和尺寸见表 15.4-107 所示。

拉伸件的凸部高度尺寸见表 15.4-108 所示。
拉伸件加强窝、角部加强肋的形状和尺寸见表 15.4-109、表 15.4-110。

拉伸件的卷边直径见表 15.4-111 所示。

表 15.4-106 内孔一次翻边的参考尺寸

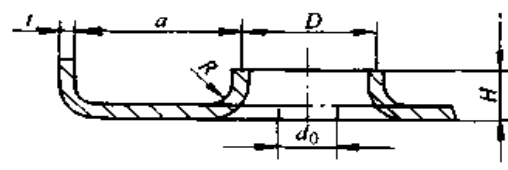
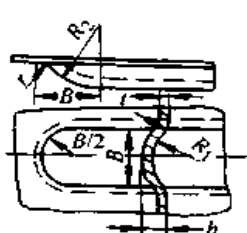
	翻边直径 D	由结构给定
	圆角半径 R	$R \geq 1 + 1.5t$
	翻边系数 K	软钢 $K \geq 0.70$ 黄铜 H62 ($t = 0.5 \sim 6$) $K \geq 0.68$ 铝 ($t = 0.5 \sim 5$) $K \geq 0.70$
	翻边高度 H	$H = \frac{D}{2}(1 - K) + 0.43R + 0.72t$
	翻边孔至外缘的距离 a	$a > (7 \sim 8)t$

表 15.4-107 加强肋的形状、尺寸及间距 (mm)

半圆形肋		尺 寸	h	B	r	R ₁	R ₂
		最小允许尺寸	2t	7t	t	3t	5t
		一般尺寸	3t	10t	2t	4t	6t

续表 15.4-107

梯形肋		尺寸	h	B	r	r_1	R_2
		最小允许尺寸	$2t$	$20t$	t	$4t$	$24t$
		一般尺寸	$3t$	$30t$	$2t$	$5t$	$32t$
加强肋之间及加强肋与边缘之间适宜距离		$l \geq 3B$ $k \geq (3-5)t$					

注： t 为材料厚度。

表 15.4-108 凸部高度

	$h = (0.25 \sim 0.35)t$ (超出这个范围时、凸部容易脱落)
--	---

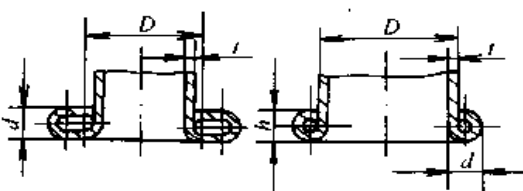
表 15.4-109 加强窝的间距及距边缘的距离 (mm)

	D	L	l	D	L	l
	6.5	10	6	24	34	20
	8.5	13	7.5	31	44	26
	10.5	15	9	36	51	30
	13	18	11	43	60	35
	15	22	13	48	68	40
	18	26	16	55	78	45

表 15.4-110 角部加强肋形状尺寸 (mm)

<p>A 型</p>		<p>B 型</p>					
L	型式	R_1	R_2	R_3	H	M (参考)	肋间距
12.5	A	6	9	5	3	18	65
20	A	8	16	7	5	29	75
30	B	9	22	8	7	38	90

表 15.4-111 卷边最小直径 (mm)

	工件直径	材料厚度 t				
	D	0.3	0.5	0.8	1.0	2.0
	≤ 50	2.5	3.0	—	—	—
	50 ~ 100	3.0	4.0	5.0	—	—
	100 ~ 200	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
	> 200	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0

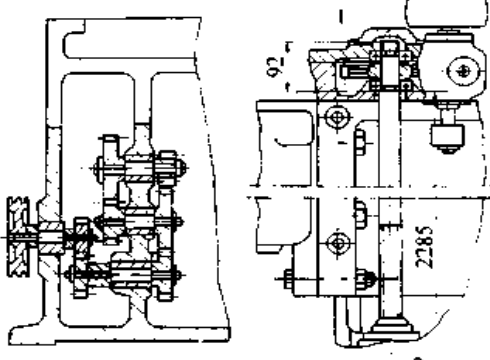
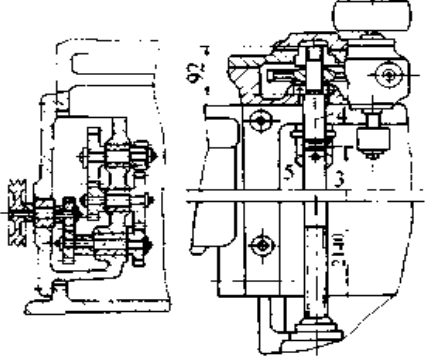
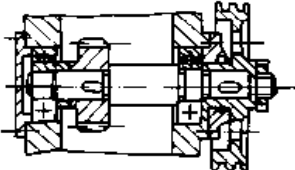
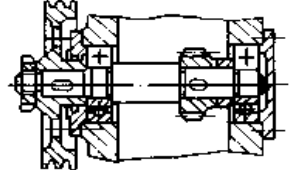
5 便于装配和维修的机械结构设计

装配分为两类：手工和自动装配。一般机械产品通常采用手工装配。而对于批量大、操作固定、动作简单的装配可采用自动装配，但自动装配对零件的精度要求较高。由于自动装配要采用专用的设备和工艺方法，因此对零件的结构有特殊的要求。

(1) 采用装配单元

机械能否组织若干独立的装配单元，是衡量其零件结构装配工艺性好坏的重要标志。因为机械如能划分为若干套件、组件和部件，进行独立装配，就可组织水平流水装配，使装配工作专业化，有利于装配质量的提高，缩短整个装配工作周期，提高装配生产效率（见表 15.4-112 所示）。

表 15.4-112 采用装配单元

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合理</p>	改进后，变速箱和床身一分为二，变速箱作为独立的装配单元，可以单独装配、调整和试验；改进后，轴被分为 3、4 两段，由联轴器 5 联结，箱体 1 成为独立的装配单元
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合理</p>	改进前，齿轮大于轴承孔，需在箱内安装。改进后，减小了齿轮直径，轴上零件成为独立的装配单元

如果在加工条件许可的情况下，将多个相关的零件直接加工成一个整体，同样可以达到组成装配单元的装配效果（见表 15.4-113 所示）

(2) 便于装配操作

装配机械首先要将零件组装成套件、组件或

部件，然后进行总装，最后还要调整、检测和试车。如果发现精度不够、运转性能不好、可动零件的配合不符合要求等问题，则要拆卸有关零件，经过修配、再加工或更换零件，重新进行装配。

1) 便于装配到位 任何零件在整个机械中都有自己唯一的位置, 因此每一零件都应有可靠的定位面; 零件结构要便于零件移动到定位位置, 不应有妨碍零件运动的结构形状和过定位; 零件结构上要设计导向结构, 使零件能够快速顺

利的定位 (见表 15.4-114 所示)。

2) 便于装配调整 机械在工作过程中由于零件受热膨胀或磨损, 造成零件间的相对位置精度发生变化, 这时需要重新调整 (见表 15.4-115 所示)。

表 15.4-113 一体化零件结构

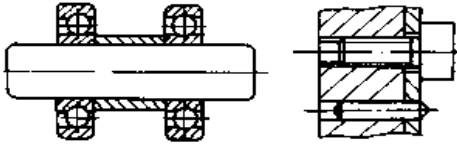
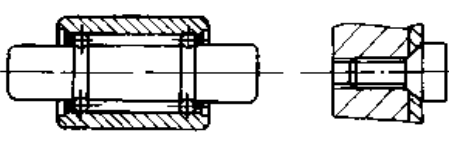
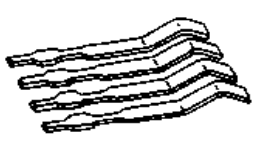

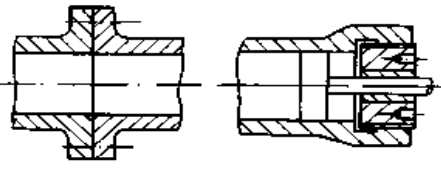
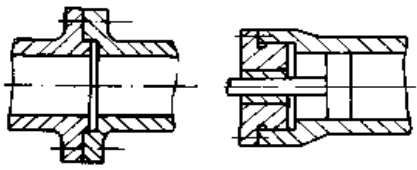
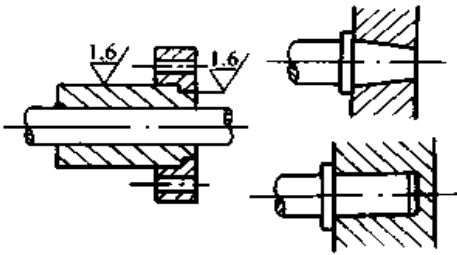
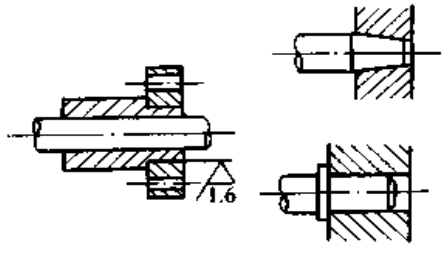
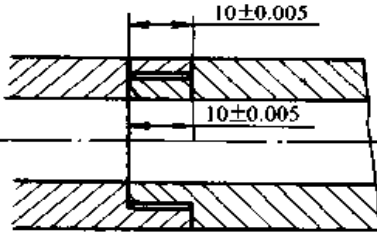
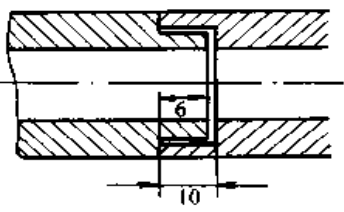
图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后, 两个滚动轴承和轴做成一体, 节省了套筒和内圈, 适于大批量生产; 改进后, 将螺栓和销钉合二为一
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后, 电器插头一体化

表 15.4-114 便于装配到位

图	例	说 明
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后, 两零件增加了定位止口; 由于螺纹联接有间隙, 不能保证端盖孔与油缸孔的同轴度, 改进后, 增加了定位面
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	改进后, 避免了过定位, 使零件定位准确
 <p>不合理</p>	 <p>合 理</p>	

续表 15.4-114

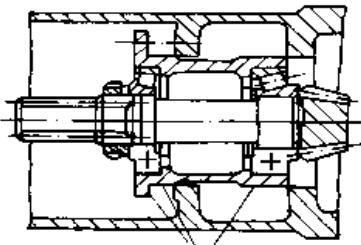
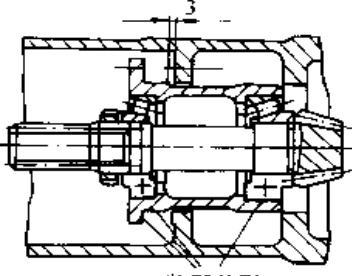
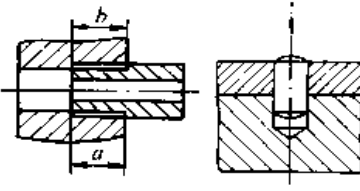
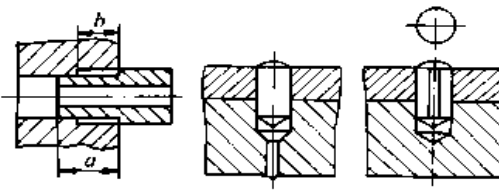
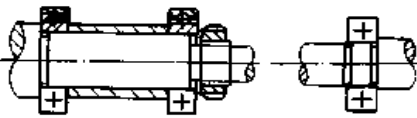
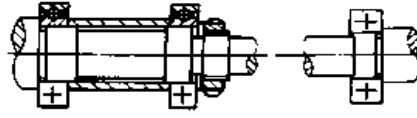
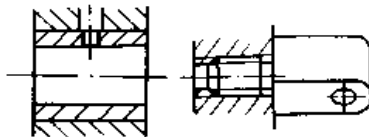
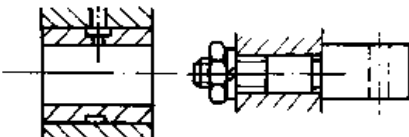
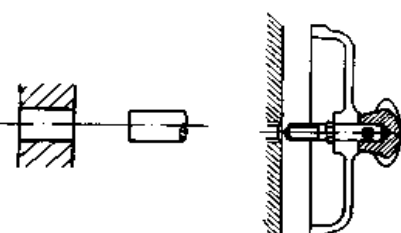
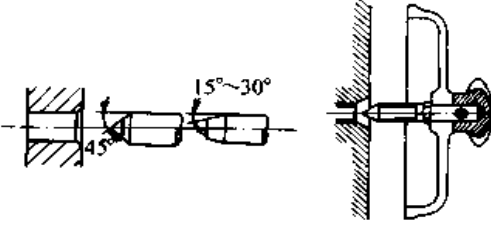
图	例	说 明
 <p data-bbox="397 598 495 672">装配基面 不合理</p>	 <p data-bbox="941 598 1039 672">装配基面 合 理</p>	<p data-bbox="1250 388 1429 598">改进前，两配合面要同时装入，装配困难。改进后，两配合面先里后外装入，工艺性好。</p>
 <p data-bbox="397 987 479 1018">不合理</p>	 <p data-bbox="933 987 1015 1018">合 理</p>	<p data-bbox="1250 703 1429 1050">改进前，$a = b$ 两配合面要同时装入，装配困难；改进后，$b < a$，工艺性好；改进前，销与轴形成封闭腔，装配不便；改进后，增加了空气逸出口。</p>
 <p data-bbox="397 1228 479 1260">不合理</p>	 <p data-bbox="933 1228 1015 1260">合 理</p>	<p data-bbox="1250 1102 1429 1249">改进后，减小了配合长度，增加了过渡轴肩，便于装拆。</p>
 <p data-bbox="397 1470 479 1501">不合理</p>	 <p data-bbox="933 1470 1015 1501">合 理</p>	<p data-bbox="1250 1323 1429 1501">改进后，设计了环槽结构，便于油孔找正定位；改进后，零件便于找正定位。</p>
 <p data-bbox="397 1816 479 1848">不合理</p>	 <p data-bbox="933 1816 1015 1848">合 理</p>	<p data-bbox="1250 1585 1429 1837">改进后，配合件增加了倒角，便于装配导向，装配更方便；改进后，设计了引导锥形头和锥形孔，装配方便。</p>

表 15.4-115 便于装配调整

图	例	说 明
		<p>改进前, 采用调整垫片和垫圈调整轴承游隙, 调整不方便 改进后, 用调整盖, 只要调整螺钉即可</p>
不合理	合 理	
		<p>改进前, 车床溜板采用调整垫片, 无论装配时还是使用过程中, 都可方便调整</p>
不合理	合 理	

(3) 便于拆卸和维修

机械在装配不合适时要拆卸, 在检修时也要拆卸 (见表 15.4-116 所示)

(4) 便于装配自动化

零部件的自动装配工艺性是影响装配自动化

的重要因素

1) 便于运送 实现自动装配要求零部件在自动给料的过程中能够自动定向, 自动上料和隔料, 以及防止缠料和出料时堵塞等 (见表 15.4-117 所示)。

表 15.4-116 便于拆卸和维修

图	例	说 明
		<p>改进后, 箱壁上打 2~4 个工艺孔, 轴承外圈拆卸方便</p>
不合理	合 理	
		<p>改进后, 轴承盖设计了工艺螺纹孔, 可避免非正常拆卸</p>
不合理	合 理	

续表 15.4-116

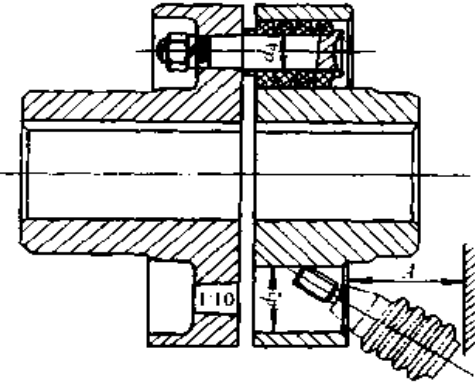

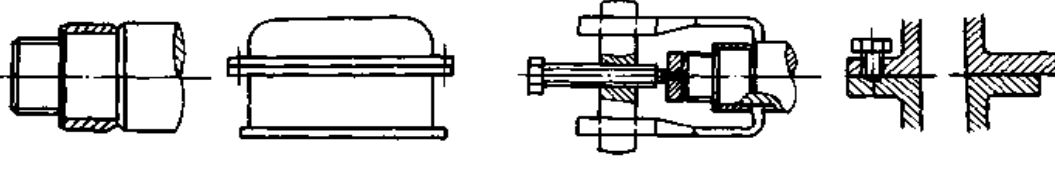
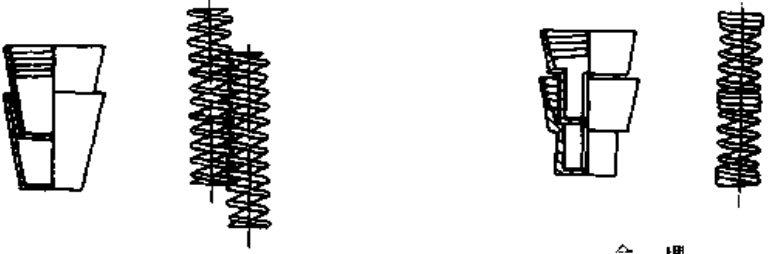
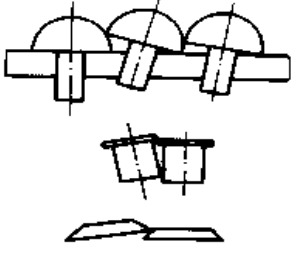
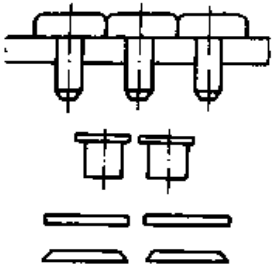
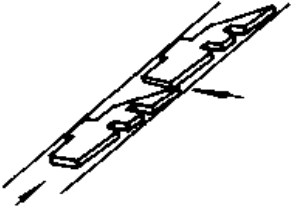
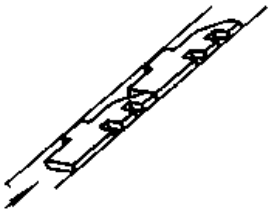
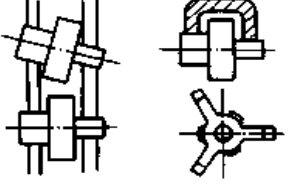
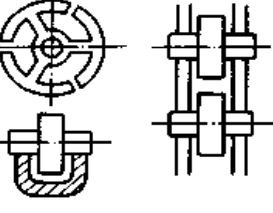
图 例	说 明
	<p>弹性柱销联轴器的柱销，在不移动其他零件的条件下，应能自由拆卸。尺寸A视拆装柱销而定</p>
	<p>改进后，增大了扳手空间，便于拆装</p>
	<p>改进后，在件底部留有坡度，便于拆卸</p>
	<p>改进后，结构上设计便于拆卸的钩槽；改进后，结构上设计起盖螺钉或拆卸受力点</p>

表 15.4-117 便于运送

图 例	说 明
	<p>改进后，将相同的内外锥度表面替换成内外形状不同的零件，避免相互卡死；改进后，防止弹簧相互缠绕</p>

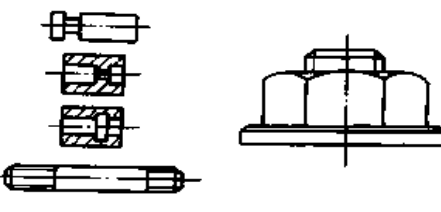
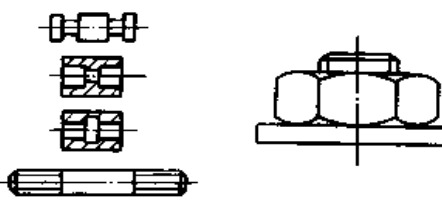
续表 15.4-117

图 例	说 明
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>不合理</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>合 理</p> </div> </div>	<p>改进后，增大了零件的接触角度，防止错位</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>不合理</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>合 理</p> </div> </div>	<p>改进后，增大了零件的接触面积，防止错位</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>不合理</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>合 理</p> </div> </div>	<p>改进后，零件的直线滚动性能改善，有利于自动输送</p>

2) 便于方位识别 对机器人来说零件的方位识别是一个复杂的模式识别问题。因此零件的结构要便于机器人的方位识别，在零件结构上预先设计识别特征，能够实现自动定向（见表 15.4-118 所示）。

3) 便于抓取 便于机器人或专用工具自动抓取是零件自动装配工艺的重要指标。零件结构要留有抓取部位，形状宜为抓取可靠的圆柱面或平直面，抓取过程中保证不破坏工作表面（见表 15.4-119 所示）。

表 15.4-118 便于方位识别

图 例	说 明
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>不合理</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>合 理</p> </div> </div>	<p>改进后，采用了不用方向判断的对称结构</p>

续表 15.4-118

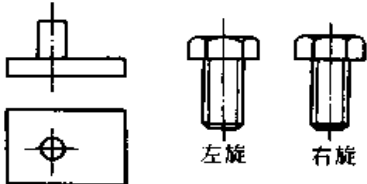
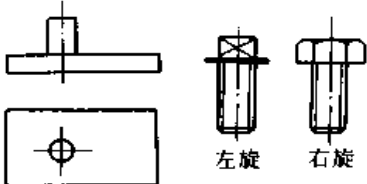
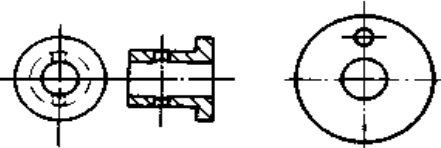
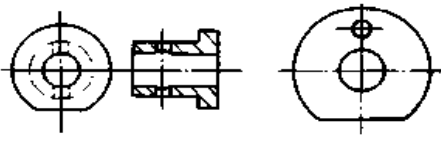
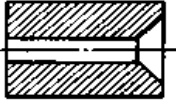
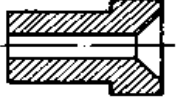
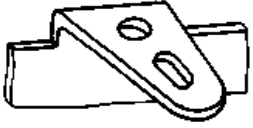

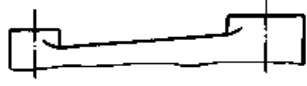



图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，合理地扩大了不对称部分，有利于自动给料；左右螺旋形状变化细微不易识别，改进后，螺钉头几何特征明显</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，于孔的垂直方向设计了一平台，可保证孔的定位方向；改进后，偏心孔的位置便于识别</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，内孔的方向便于识别</p>

表 15.4-119 便于抓取

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，零件结构设计成便于抓取的平直面</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，零件结构留有可抓取的部位</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，零件结构留有可抓取的部位，避免损坏工作表面；改进后，螺钉头的结构便于抓取</p>

4) 简化运动形式 自动装配操作是由机器人或机械手完成一系列的动作组合，动作越少、越简单，装配越容易，机器人或机械手系统也不

致过分复杂。因此要尽量从结构上考虑简化装配操作的可能性（见表 15.4-120 所示）。

表 15.4-120 简化运动形式

图 例	说 明
	<p>改进后, 设计为开口槽, 弹簧装配操作简化; 改进后, 密封盖过盈联结代替螺纹联结, 装配操作简化</p>
	<p>改进后, 零件单向运动代替复杂运动, 装配操作简化</p>

6 热处理件结构设计

热处理是通过加热、保温和冷却的操作方法, 使材料的组织发生变化, 以获得所需要机械性能的一种加工方法。零件在较高的温度下快速冷却, 常会引起零件变形, 及产生很大的内应力。如果零件的结构设计的不合理, 变形和内应力会很严重, 以致使零件报废。

热处理件结构设计的主要要求如下:

(1) 壁厚均匀

厚薄悬殊的零件, 在热处理快速冷却时, 由于零件各部分冷却收缩速率不一致, 造成零件变形, 甚至开裂。为了避免这种变形或开裂, 可采取开工艺孔、加厚零件太薄的部分、合理安排孔的位置和变不通孔为通孔的方法 (见表 15.4-121 所示)。

表 15.4-121 壁厚均匀

图 例	说 明
	<p>改进后, 较厚结构处增加了工艺孔, 零件厚度均匀; 改进后, 通孔结构, 零件厚度均匀</p>

续表 15.4-121

图	例	说明
		<p>改变了孔的位置和数量，零件厚度均匀；避免危险尺寸或太薄的边缘。薄边不可避免时，应热处理后加工</p>
		<p>孔与零件边缘，及孔与孔相距太近，热处理变形很大。应保证一定的距离，前者小于1.5倍的孔径，后者大于1倍的孔径</p>

(2) 避免尖角结构

零件的尺寸形状突然变化处是热处理内应力最为集中的地方，往往成为裂纹的起点。因此，将零件中带有尖角、棱角的部分，尽量加工成圆角、倒角以免出现裂纹（见表 15.4-122 所示）。

(3) 采用封闭、对称结构

开口或非对称零件结构，热处理加热后骤冷时，零件各部分收缩速率也不一致，因此易产生变形（见表 15.4-123 所示）。

(4) 组合结构

零件的形状愈复杂，热处理变形和裂纹就愈难于控制。在可能的条件下，可采用组合结构或拼装结构（见表 15.4-124 所示）。

表 15.4-122 避免尖角结构

图	例	说明
		<p>改进后，零件的交接处设计成较大的圆角或倒角，并有(5~8)mm不能淬硬</p>
		<p>为避免锐边尖角热处理时不融化或过热，在槽或孔应有(2~3)mm的倒角；改进后截面过渡设计成圆角或圆锥，零件形状变化平缓</p>

表 15.4-123 采用封闭、对称结构

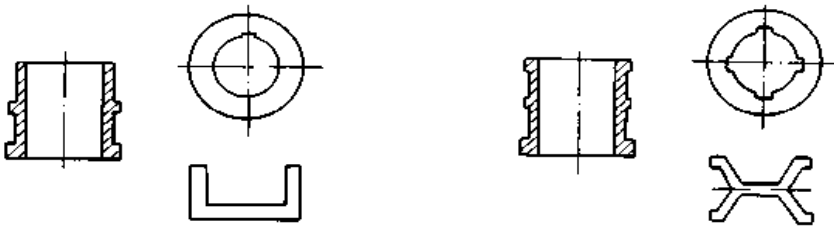
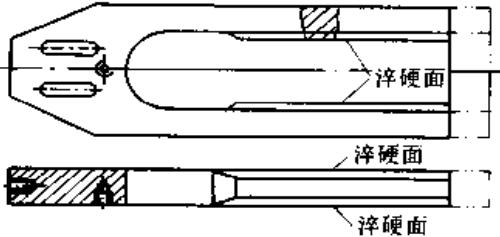

图 例	说 明
 <p data-bbox="381 552 461 577">不合理</p> <p data-bbox="891 552 971 577">合 理</p>	<p>一端有凸缘的薄壁套类零件渗碳后会变形喇叭口，改为对称结构变形减小；零件结构尽量采用对称结构，以减小变形</p>
	<p>开口形零件淬火变形很大，可在机械加工后，开口处做成封闭结构（保留一小部分材料或用铜焊联结），热处理后再切开</p>
 <p data-bbox="381 999 461 1024">不合理</p> <p data-bbox="891 999 971 1024">合 理</p>	<p>改进后，加上了横梁，增加了刚度，热处理变形减少</p>

表 15.4-124 组合结构

图 例	说 明
	<p>原为整体结构的顶尖，整体淬火，常出现裂纹。改进后，采用组合结构，顶尖用 W18CrV 钢，尾部用 45 钢，用过盈联结。既解决开裂，又节省价昂的钢材</p>

第5章 满足材料要求的结构设计

零件的结构形式受材料的限制。不同的材料，其性能特点各异，加工工艺也不同。在零件设计中要充分考虑材料及对应加工工艺的特点。

1 塑料件结构设计

塑料按其热性能可分为热塑性塑料和热固性塑料两类。前一类塑料的高分子具有线型和支链结构，加热时能软化流动或融化，冷却后定性，且这一过程可重复，但加热温度不得超过该塑料的分解温度。后一类塑料的高分子在加工后，由于形成体型结构，制品定性后，再加热也不软化或融化，温度太高时该塑料发生焦化分解，所以不能回收重复加工。按其应用又可分为通用塑料、工程塑料和功能塑料。其中工程塑料具有较高强度、刚度和韧性，能耐高温、耐辐照、耐腐蚀，在机械设备和工程结构中广泛使用。

根据塑料中高分子聚合物的状态不同，塑料成型加工方法可分为三种：①处于玻璃态的塑料，可以用车、铣、钻、刨等机械加工方法和电镀、喷涂等表面处理方法；②当塑料处于高弹状态时，可采用热压、弯曲、真空成型等加工方法；③把塑料加热到黏流态，可以进行注射成型、挤出成型、压制成型等加工。

不论是热塑性塑料还是热固性塑料，其成型都是在流动状态下进行的。首先加热塑料使其处于塑化和流动状态，然后利用外力将熔融塑料填充到模具内，经一定的时间冷却固化成型，最后开模取出成型零件。由此可见塑料的成型工艺与金属铸造工艺有许多相同之处，铸件的结构设计原则可利用到塑料件的结构设计中。但塑料与金属的物理性能有诸多不同，在结构设计过程不能简单的从金属件的结构设计原理出发，必须对各类塑料的性能有全面的了解，才能避免不合理的设计。

(1) 壁厚均匀

塑料与金属材料相比，其强度性能比较薄弱，要提高塑料件的机械强度和刚度，塑料件必须具有一定的壁厚。壁厚的设计要依据零件的使

用功能、塑料种类，以及成型条件等因素有关；但如果壁厚过厚，塑料在模具内冷却和固化时间过长，易产生质量缺陷，如凹陷、空洞气泡、缺料、翘曲和缩痕等。塑料件的壁厚也不可过薄，一方面零件的强度和刚度不宜满足，影响使用；另一方面熔融物料在模腔内的流动阻力增大，难于成型。

各种成型塑料都有一定的壁厚范围，常见塑料件的壁厚范围可按表 15.1-1 选取。

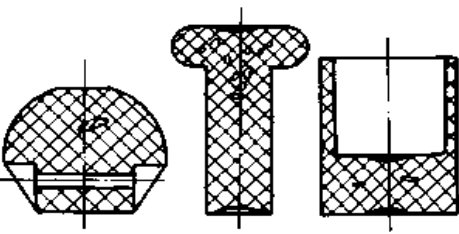
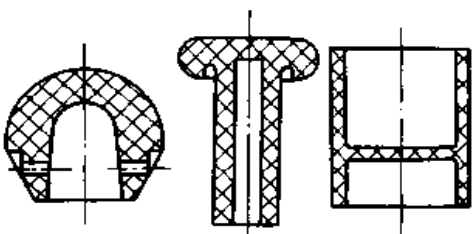
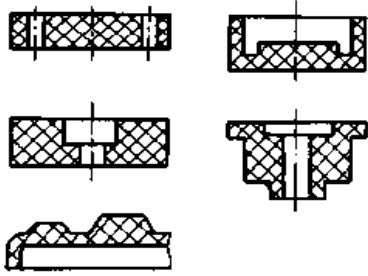
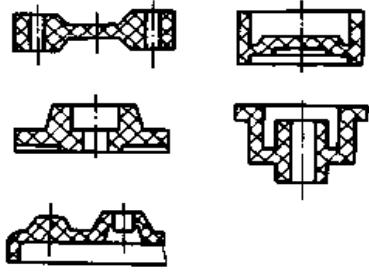
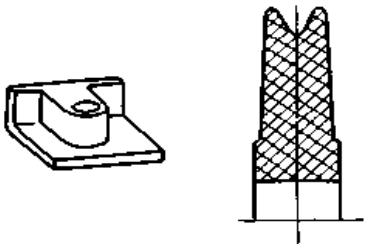
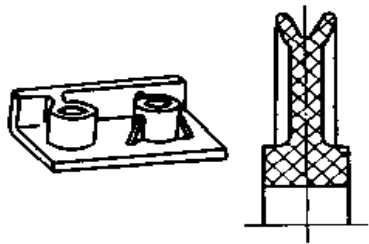
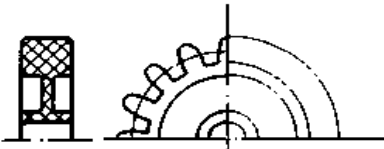
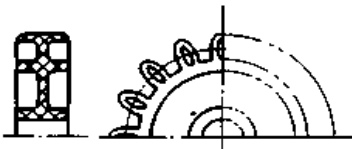


表 15.5-1 常见塑料件的壁厚范围

塑 料		塑件壁厚范围/mm
热固性塑料	醛酚塑料——木粉填充	1.5~2.5
	布屑填充	1.5~9.5
	氨基塑料——纤维填充	0.9~5.0
	布屑填充	1.5~5.0
热塑性塑料	聚 乙 烯	0.9~4.0
	聚 丙 烯	0.6~3.5
	聚 酰 胺	0.6~3.0
	聚 甲 醛	1.5~5.0
	聚苯乙烯	1.0~4.0
	聚甲基丙烯酸甲酯	1.5~5.0
	硬质聚氯乙烯	1.5~5.0
	聚碳酸酯	1.5~5.0
	醋酸纤维素塑料	1.0~4.0
	ABS 塑料	1.5~4.5

塑料件成型后发生翘曲和开裂，另一主要原因 是由于塑料在模具内冷却不均匀，从而产生内应力。造成冷却不均匀的主要是材料分布不均匀、散热条件不一致和结构不对称造成的，其中塑料件壁厚过于悬殊是造成缺陷的主要原因。

为避免上述缺陷的发生，塑料件的壁厚要尽可能的均匀，材料不可过分堆积（见表 15.5-2 所示）。

表 15.5-2 壁厚均匀

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，塑料件内部避免产生空洞和凹陷等质量缺陷</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，避免材料过分堆积</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后的加强肋结构避免了由于材料堆积造成的缺陷，提高了承载能力；改进后的传动轮避免了材料堆积现象</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，齿轮采用空心结构，避免了材料堆积现象</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，壁厚过渡均匀，可减轻由于冷却不均造成的翘曲现象</p>

(2) 便于脱模

塑料件在模腔内冷却收缩，有可能包裹住模腔内的凸起部分，造成脱模困难和脱模过程中损伤塑料件表面。因此，塑料件在脱模方向应具有足够的斜度。

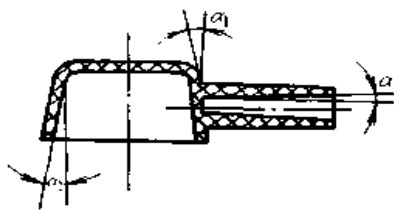
一般脱模斜度可按表 15.5-3 推荐的数值范围选取。除此之外，硬塑料比软塑料脱模斜度大；形状复杂、厚度大的脱模斜度大；内孔比外缘的脱模斜度大。

塑料件如有隐藏结构，无法直接脱模。同时还必须采用模芯和分离模具才能造型，制造成本增大，成品率较低。所以塑料件中应避免隐藏结构，以便于脱模（见表 15.5-4 所示）。

(3) 避免应力集中

塑料件的结构尺寸如有突然变化，也会产生严重的应力集中现象，削弱零件的疲劳强度和减少使用寿命。结构尽量过渡平缓连续，内外表面

表 15.5-3 各种常用塑料件的脱模斜度推荐值



塑料件种类	脱模斜度 α
热固性塑料压塑成型	$1^{\circ} \sim 1^{\circ}30'$
热固性塑料注射成型	$20' \sim 1^{\circ}$
聚乙烯、聚丙烯、软聚氯乙烯	$30' \sim 1^{\circ}$
ABS、改性聚苯乙烯、尼龙、聚甲醛、氯化聚醚、聚苯醚	$40' \sim 1^{\circ}30'$
聚碳酸酯、聚砜、硬聚氯乙烯	$50' \sim 1^{\circ}30'$
透明聚苯乙烯、改性有机玻璃	$1^{\circ} \sim 2^{\circ}$

表 15.5-4 避免隐藏结构

图 例	说 明
	改进后，避免了隐藏结构，简化了模具结构；改进后，取消了螺纹退刀槽，避免了隐藏结构
	改进后，搭钩结构避免了隐藏结构，脱落便利；改进后，取消了与脱模方向垂直的孔，以便于脱模
	改进后，螺纹牙沿脱模方向切除一部分，便于脱模；改进后，螺纹牙的终点远离剖面，便于脱模

的交界处，都应采用圆角或倒角过渡。不仅有利于消除塑料件内的应力集中，也有利于熔融塑料在模具内的流动和塑料件的脱模，并可改善壁厚的均匀程度（见表 15.5-5 所示）。

(4) 塑料件主要结构元素设计

1) 加强肋 由于塑料件的强度不高，通常设计加强肋以提高塑料件的强度和刚度。但如果加强肋设计得不合理，反而会降低塑料件的性能。因此设计加强肋应注意以下几个方面：

① 加强肋的壁厚应小于塑料件的壁厚，以免产生翘曲等质量缺陷（见表 15.5-6 所示）。

② 加强肋的高度不宜过大，造成肋部受力破损。

③ 同时采用多条加强肋时，相互要错开，

以免局部材料堆积，造成冷却不均、塑料件产生翘曲和开裂（见表 15.5-6 所示）。

④ 塑料平板上设置加强肋，应在其对应的开槽，以防止塑料件表面塌陷（见表 15.5-6 所示）。

2) 镶嵌金属件 塑料件内经常镶嵌金属，以弥补塑料件本身的性能缺陷。为达到预期目的，必须要防止金属嵌入后，不致影响塑料件的质量和应有的强度。结构设计中应注意的事项，见表 15.5-7 所示。

3) 凹凸纹 用手操作的塑料件，如手柄、旋钮和盖之类的零件，为便于施力，其周围可设计成凹凸纹结构。凹凸纹设计参考尺寸见表 15.5-8 所示。

表 15.5-5 避免应力集中

图 例	说 明
<p>不合理</p> <p>合理</p>	<p>改进后，采用圆角过渡；改进后，无法采用圆角过渡的直线导轨，利用卸载槽减低应力集中</p>
	<p>改进后，螺纹牙采用圆形或梯形，螺纹末端圆角过渡，可提高螺纹强度</p>

表 15.5-6 加强肋设计

图 例	说 明
<p>不合理</p> <p>合理</p>	<p>改进后，加强肋厚小于壁厚，避免结构翘曲</p>

续表 15.5-6



图 例	说 明
	改进后, 加强肋避免了交叉结构, 壁厚均匀
	改进后, 加强肋对面开槽, 避免结构倒塌

表 15.5-7 镶嵌金属件

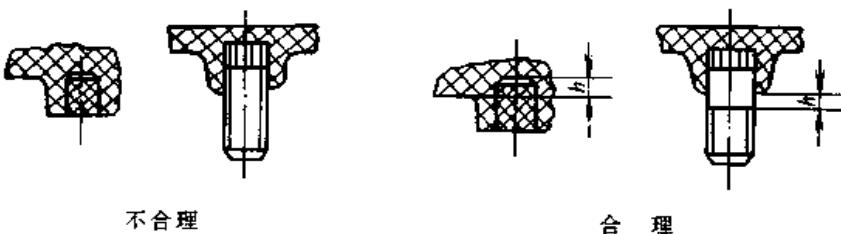

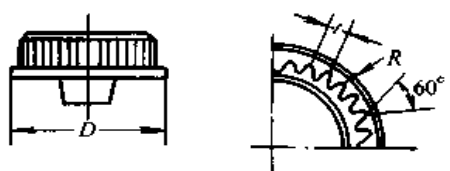
图 例	说 明
	改进后, 嵌件埋入深度大于凸起高度, 以保证足够的强度; 另嵌件周围圆角过渡, 避免应力集中 改进后, 外螺纹嵌件无螺纹部分与模具配合, 防止熔融塑料渗入模内
	改进后, 内螺纹嵌件的高度低于模腔高度, 防止损坏模具和嵌件 改进后, 内整体嵌件配合牢固。另嵌件高度不应超过其直径的两倍, 以防溢料

表 15.5-8 塑料件周边凸凹纹尺寸

	凹 凸 纹 尺 寸	
	塑件直径/mm	t	$R$
≤ 18	1.2~1.5	0.2~0.3
18~50	1.5~2.5	0.3~0.5
50~80	2.5~3.5	0.5~0.7
>80~120	3.5~4.5	0.7~1.0

2 陶瓷件结构设计

陶瓷也称为无机非金属材料, 陶瓷的硬度大、抗压强度高、耐高温、耐腐蚀、不溶于水、经久耐用等优点, 广泛应用于各行业。在受到冲击载荷时, 易发生脆裂, 并在不发生明显变形的

情况下即产生破坏。它的抗拉、抗弯、抗剪的能力较差。陶瓷的脆性限制了它的使用范围。

陶瓷的加工工艺大致可分为四部分: 坯料制作、坯料成型、窑炉烧结、后续加工。坯料的成型通常采用模具方法, 具体可分为: 将配料制成可塑性的泥团, 然后施加外力, 在模具上成型的

可塑成型法；将坯料制成泥浆，注入模腔内成型的注浆成型法；将干粉坯料放在模腔内加压成型的干压成型法。选择成型方法，与陶瓷件的材质、形状、用途和要求有关。

陶瓷件的结构设计不但要考虑陶瓷材料所特有的特性，而且还要考虑加工工艺对结构的影响。

不论采用何种加工方法，塑料件的成型都要采用模具方法。因此塑料件的结构要有利于简化模具结构和便于脱模。有关结构可参见金属铸件和塑料件。

烧制定型是陶瓷件的重要成型手段，为防止在高温下产生变形和其他烧制缺陷，陶瓷件坯料的壁厚要均匀，在较大的平面和刚度减弱的地方要考虑设置加强肋。

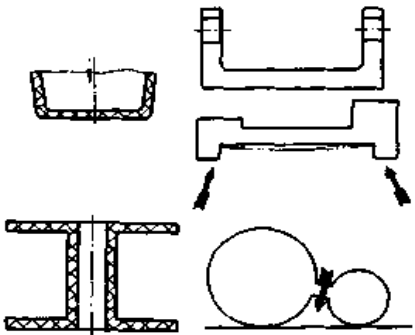
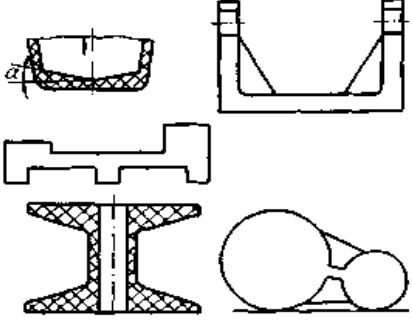
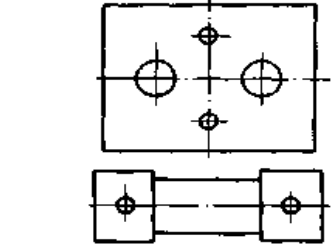
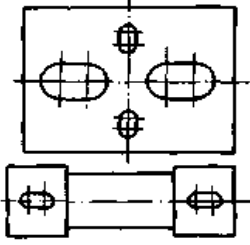
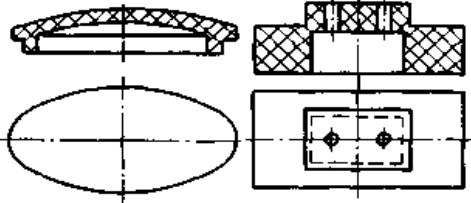
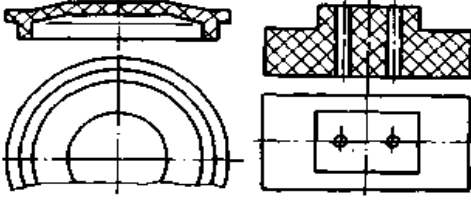
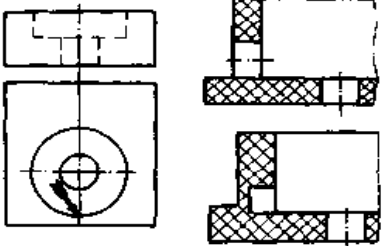
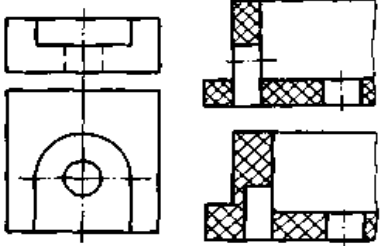
陶瓷件的结构受载状态，要充分考虑到陶瓷材料抗压优于抗拉的特性，结构优先受压。另外结构中避免尺寸形状过渡突然，为避免产生严重的应力集中现象，尺寸形状过渡要尽量平缓。

压制成型工艺陶瓷件结构设计示例见表15.5-9所示。

表 15.5-9 瓷件结构设计示例

图 例	说 明
	<p>壁厚过薄压制成型易产生裂纹和变形，因此要保证一定壁厚和孔间距</p>
	<p>改进后，尖锐棱边采用圆角或倒角过渡，便于压制成型粉末移动，避免应力集中</p>
	<p>改进后，内孔设置一定锥度便于脱模；台阶厚度增加，可提高其强度和耐用性；倒角末端设计平台，可消除冲模的尖锐末端</p>
	<p>改进后，各部分壁厚均匀，避免烧制变形和裂纹</p>

续表 15.5-9

图	例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，大平面作成一定锥度或增设加强肋，避免底部塌陷</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>陶瓷件弹性变形很小，改进后，采用长圆孔结构，便于装配</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，简化了结构形式，便于模具加工</p>
 <p style="text-align: center;">不合理</p>	 <p style="text-align: center;">合 理</p>	<p>改进后，由封闭孔变为开孔，便于模具制造</p>

3 粉末冶金件结构设计

粉末冶金件的原材料主要为金属粉末，再混合一定量的非金属粉末或其他粉末材料，可获得特殊性能的材料。将粉末原料经成型、烧结和后

续加工等工艺，最终获得成型的零件。成型和烧结属基本加工工序。

粉末冶金件的结构要便于模具的加工和制造，以及便于压制成型，结构形状不宜复杂。尽量避免脱模困难的结构。另外粉末冶金件的结构

元素均应按工艺特点选取尺寸。




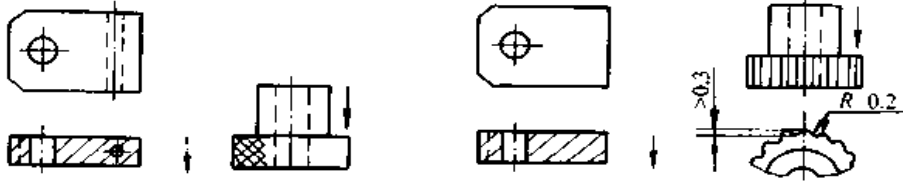
(1) 避免隐藏结构

与压制方向不一致螺纹、横孔、环槽、倒锥度、交叉孔和菱形花纹等结构，都无法直接压制

成型，应尽量避免。如果结构必须，可采用后续加工的方法获得，也可将结构设计成与压制方向一致（见表 15.5-10 所示）。

(2) 壁厚均匀，避免锐角过渡

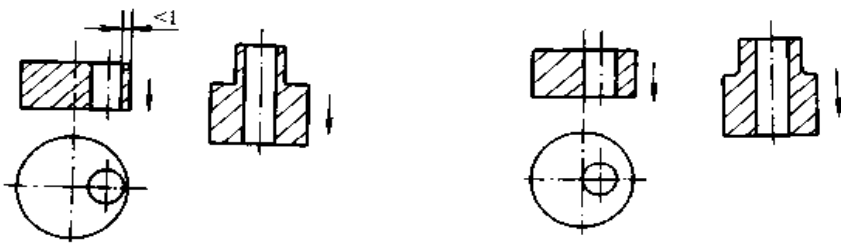
表 15.5-10 避免隐藏结构

图	例	说 明
	不合理 合 理	改进后，内外螺纹结构待烧制完成后采用切削加工完成
	不合理 合 理	改进后，横孔与环槽待烧制完成后采用切削加工完成；退刀槽可设计成与压制方向一致的凹槽
	不合理 合 理	改进后，油槽待烧制完成后采用切削加工完成；倒锥度待烧制完成后采用切削加工完成
	不合理 合 理	改进后，取消了无法压制的交叉孔，交叉孔可在烧制完成后采用切削加工完成；取消了无法压制的菱形花纹，用与压制方向一致的平行花纹代替

结构壁厚不均匀，会引起粉末在模具内的流动性不一致。壁薄的地方，粉末不宜填充密实，造成压坯密度不均匀，经烧制后易发生变形。因此，例如偏心孔和阶梯轴的壁厚尽可能相差不

大；为便于粉末的流动，减小应力集中现象，提高制坯的质量，以及延长模具的使用寿命。应尽量避免面与面成尖角相交，采用过渡平缓的圆角结构（见表 15.5-11 所示）。

表 15.5-11 壁厚均匀，避免锐角过渡

图	例	说 明
	不合理 合 理	改进后，结构的厚度差减小，有利于粉末填充、压制和脱模，减少烧制变形

续表 15.5-11

图	例	说明
		改进后, 圆角过渡, 有利于粉末流动、压制均匀

(3) 便于脱模

压制方向上, 粉末冶金件结构应设计脱模斜度(见表 15.5-12 所示)。

(4) 避免尖角锐边

零件的尖角锐边在压制时易相互碰撞而损坏, 降低模具寿命(见表 15.5-13 所示)。

表 15.5-12 脱模斜度

图	例	说明
		改进后, 内孔带脱模锥度, 便于脱模; 中部台阶移向一端, 反向部位设计脱模斜度(≈5°)

表 15.5-13 避免尖角锐边

图	例	说明
		改进后, 球面带平台, 避免锐边; 改进后, 倒角带凸台, 避免锐边

(5) 粉末冶金件的结构元素设计

粉末冶金件的尺寸范围, 见表 15.5-14 所示。

粉末冶金件的最小壁厚, 见表 15.5-15 所示。

粉末冶金过滤材料粉末分级元件壁厚推荐值, 见表 15.5-16 所示。

凸台、沉孔和凹槽结构设计, 见图 15.5-1 所示。台阶、法兰和长套筒的设计, 见图 15.5-2 所示。

狭窄部位尺寸设计, 见图 15.5-3 所示。

表 15.5-14 粉末冶金件的尺寸范围

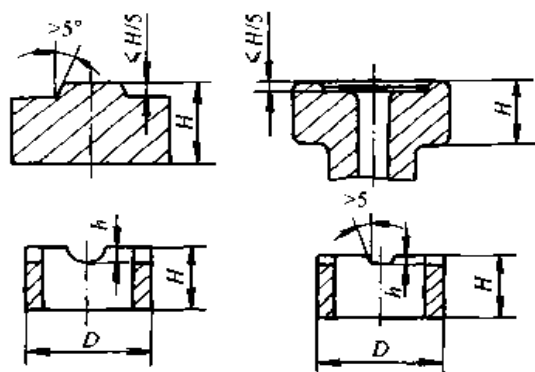
材料	最大横截面积/ cm ²	高度/mm		宽度/mm	
		最大	最小	最大	最小
铁基	40	40	3	120	5
铜基	50	50	3	120	5

表 15.5-15 粉末冶金件的最小壁厚 (mm)

最大外径	最小壁厚	最大外径	最小壁厚
10	0.80	40	1.75
20	1.00	50	2.15
30	1.50	60	2.50

表 15.5-16 粉末冶金过滤材料粉末分级元件壁厚推荐值

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
筛号目	- 18 + 30	- 30 + 60	- 40 + 55	- 55 + 75	- 75 + 100	- 100 + 120	- 120 + 150	- 150 + 200	- 200 + 250	- 250 + 300	- 300	- 300	300	- 300
粒级/ μm	1000~ 630	630~ 450	450~ 315	315~ 200	200~ 154	154~ 125	125~ 100	100~ 76	76~ 61	61~ 45	45~ 25	25~ 18	18~ 12	12~6
平均粒级/ μm	815	540	382	258	177	140	113	88	69	53	35	22	15	9
元件推荐 壁厚/mm	5	4	3.5	3	2.5	2.5	2	2	1.5 ~2	1.5 ~2	1~ 1.5	1~ 1.5	1~ 1.5	1~ 1.5



当 $H/D < 1$ 时, 圆槽深 $h < \frac{1}{3}H$, 梯形槽深 $h < \frac{1}{5}H$

图 15.5-1 凸台、沉孔和凹槽结构设计

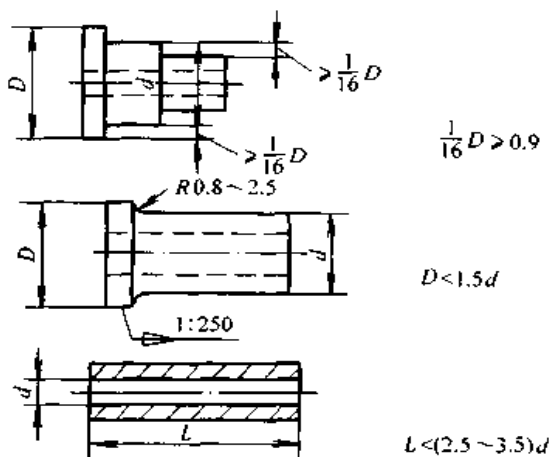


图 15.5-2 台阶、法兰和长套筒结构设计

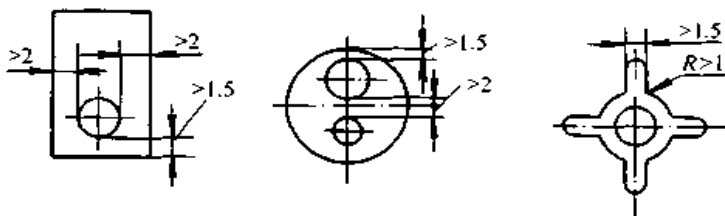


图 15.5-3 狭窄部位尺寸设计

第 6 章 满足人机学要求的结构设计

机械零部件不仅要满足功能等方面的要求,还要考虑人的生理和心理需求。如箱体和壳体零部件,结构形态优美协调、色彩搭配合理可使人赏心悦目、心情舒畅;旋钮、操作手柄等零件,结构造型合理,操作就会舒适、安全、省力和高效。

本章从产品造型的基本美学原理、色彩搭配和宜人性几个方面给出机械零部件的结构设计。

I 造型设计

用于产品形态设计主要包括比例、均衡和稳

定等问题。遵循美学原则去创造产品,可塑造出美的艺术形象。

1.1 比例

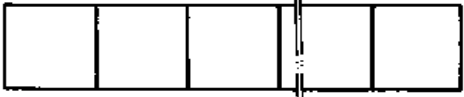
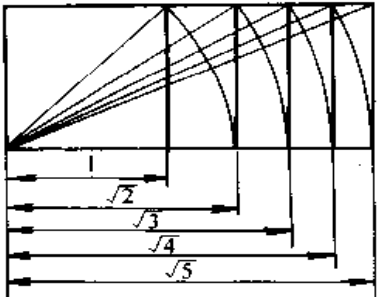
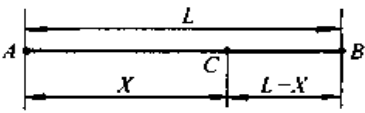
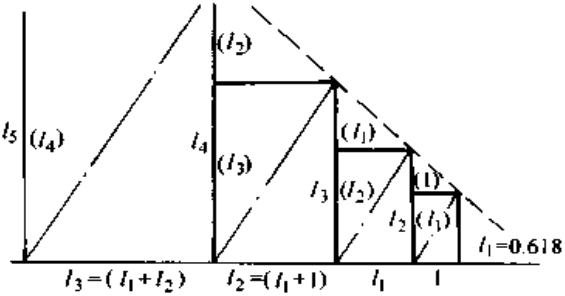
工业产品造型的比例是指产品的整体与局部、局部与局部之间的比例关系。采用适当的比例关系,能使人在视觉上获得美的感受。

1.1.1 常用比例 (见表 15.6-1 所示)

1.1.2 比例应用

在机械设计中采用黄金分割比例确定各部分

表 15.6-1 常用比例

名称	比例关系	图 示
整数比例	以具有特定外形的正方形为基本单元派生的比例 $1:1, 1:2, 1:3, \dots$	
均方根比例	以正方形一边与其对角线所形成的矩形比例关系为基础,逐渐以其新生矩形的对角线与正方形一边所形成的比例 $1:\sqrt{2}, 1:\sqrt{3}, 1:\sqrt{4} \dots$	
黄金分割比例	把一段线分成两分,分割后的长段长度与原长相比等于分割后的短段长度与长段长度相比: $X:L = (L-X):X = 0.618$	
相加级数比例	数列中,前两项之和等于紧邻后一项的数值,构成的比例(又称斐波那齐级数): $1:2:3:5:8 \dots$	

的尺寸,可以较好地保持局部与整体结构之间的匀称关系。如图 15.6-1 所示设备的尺寸确定:首先选择主要尺寸 M_0 为基本尺寸,然后利用黄金分割比例确定其他尺寸,保证设备的整体和局部都有相同的比例关系。

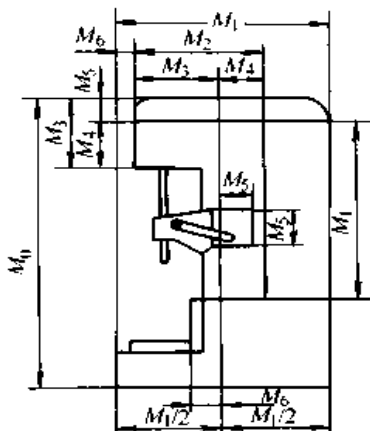


图 15.6-1 立式铣床的尺寸比例

$$M_1/M_0 = M_2/M_1 = M_3/M_2 = M_4/M_3 = M_5/M_4 = M_6/M_5 = 0.618$$

产品各相临或相包含的几何图形,如果它们的对角线平行或垂直,它们的形状也就具有相同的比例关系,如图 15.6.2 所示。

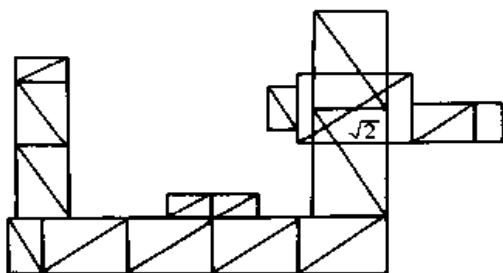


图 15.6-2 有相同比例的矩形

有些产品因为功能的需要,需将同一整体进行分割划分,可采用相同比例的重复分割或变比例的渐变分割,使划分效果具有一定的秩序感和韵律感,加强条理性。如图 15.6-3 所示一电器的面板,整个面板的比例是以面板上的 2/3 处所构成的矩形,进行分割的。

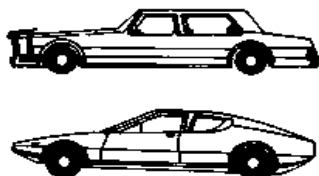


图 15.6-5 不完全对称

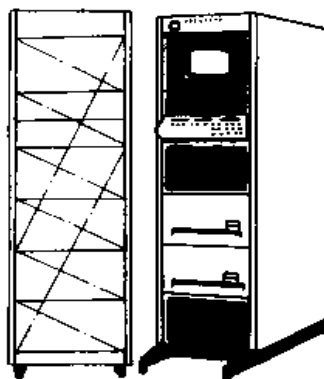


图 15.6-3 等比例分割

1.2 均衡

均衡是指组成产品的各部分形体或体量之间前后、左右相对平衡的关系。体量是指形体各部分的体积在视觉上造成的重量感觉。产品体量平衡与安定会给人以舒适的感觉,也是衡量产品造型美的重要标志。

对称的造型最易获得体量的平衡,视觉上产生强烈的静态美、条理美,并有庄重、严肃的心理感觉。

对称均衡的形式主要有:

- 1) 完全镜面对称 如图 15.6-4 所示;

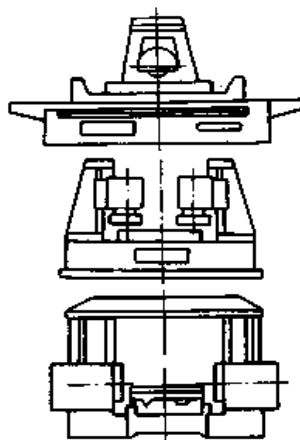


图 15.6-4 完全对称

- 2) 不完全对称 在某一方向采用对称结构,另一方向采用非对称结构,如图 15.6-5 所示;



3) 左右体量力矩相等 如图 15.6-6 所示。

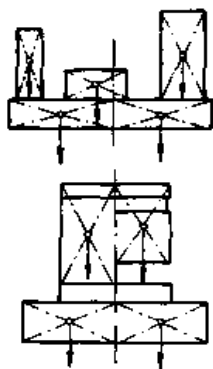


图 15.6-6 左右体量力矩相等

产品上的装饰、色彩、材质肌理等造型因素也会对均衡感造成影响。如图 15.6-7a 所示, 该车床外形对称。但增加车床表面装饰后, 如图 15.6-7b, 均衡感被破坏。通过扩大尾部形体, 如图 15.6-7c, 或在尾部加装标志, 如图 15.6-7d, 就可获得整体的均衡感。

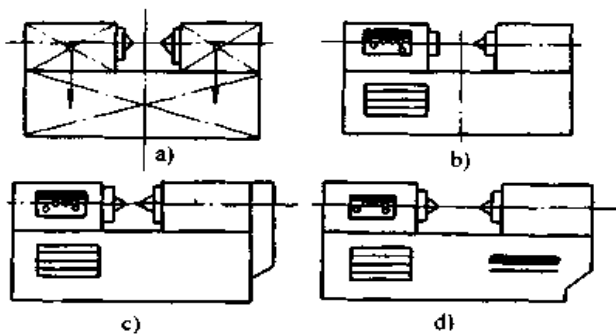


图 15.6-7 均衡感的调整

a) 外形均衡 b) 不均衡 c) 扩大形体 d) 加装饰

1.3 稳定

稳定是指组成产品的各部分上下之间的轻重关系。按静力学原理, 物体不失去重心的基本条件重心必须在物体的支承面内, 重心越低, 越靠近支承面的中心部分稳定性越大, 产品的稳定性表现为符合静力学原理的“实际稳定”和满足形体体量关系的“视觉稳定”。

产品造型设计中, 可采用如下方法获得稳定感。

1) 梯形造型 如图 15.6-8 所示。

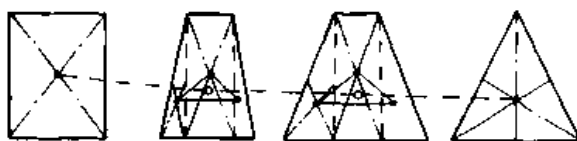


图 15.6-8 梯形造型

2) 附加结构支承机构 如图 15.6-9 所示。

3) 利用色彩对比 加强设备基础的色彩浓度如图 15.6-10 所示。

4) 利用材料的质感和表面装饰 产品上部光洁、明亮, 下部粗糙、暗淡, 呈稳定感。采用面板、标牌、标志、装饰线条, 也可加强产品下部的重量感, 增加稳定度, 如图 15.6-11 所示。

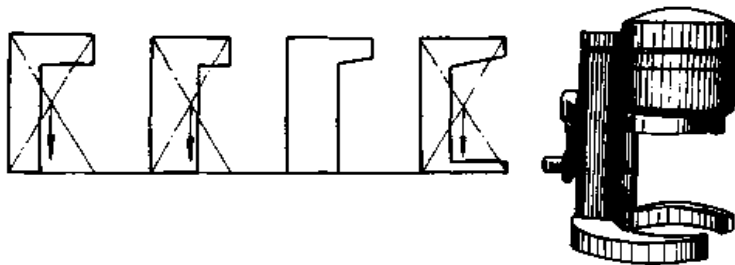


图 15.6-9 附加结构支承机构



图 15.6-10 色彩对比

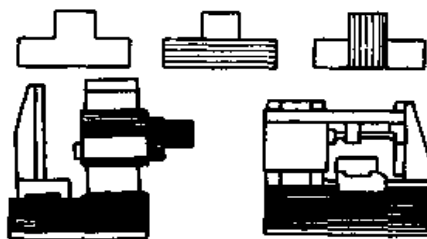


图 15.6-11 质感和表面装饰

1.4 统一与变化

产品的各组成部分，由于不同的功能、材料、工艺，造成产品整体形象的不一致，显得零乱无序。应设法减弱各部分之间的差异，增强共性，获得产品形象的整体一致性。但只有统一而没有变化的造型又会产生单调和呆板的效果。为了使产品具有生动活泼的美感，就必须在统一中加以变化。具体做法如下：

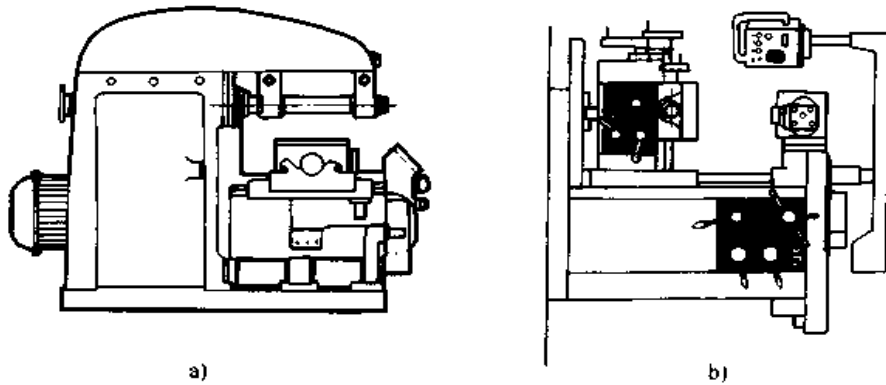


图 15.6-12 线形风格的统一

a) 曲线风格 b) 直线风格

产品造型轮廓线形基调确定后，各分部的线形要与主调有一定的差异，使产品形象生动富于变化。如图 15.6-13 所示。

3) 各局部关系的统一和变化 产品是由若干个局部所组成，各局部又因完成同一功能组成一有机的整体。利用“形”、“色”、“质”实现产品各局部的分割、联系、呼应和过渡。图 15.6-14 所示为普通万能精密车床，一条横贯整个设备的淡色护板，起到了上下分割和首尾联系的作用，使机床显得美观大方。图 15.6-15 所示为小轿车的前脸与尾部采用相似的线型和形状，使前后造型呼应，增强了前后联系。图 15.6-16 所示为轧钢检测仪，其测量头的截面形状和尺寸逐渐变化，过渡自然、协调，获得统一和变化的造型效果。

4) 韵律的统一和变化 韵律是指某些造型要素，如形状、色彩、质感等，进行重复的变化、有秩序的变化，形成一种有条理、有秩序、有重复、有变化的连续性的形式美。图 15.6-17 所示为一套测试装置，由电器柜、主测试台、试件保持柜三部分组成，其高低、大小和形状均有

1) 尺寸比率的统一 同一产品的总体与部分、部分与部分之间，尽量采用相同或相似的比例关系，以加强各部分之间的相互联系和共性。

2) 线形风格的统一和变化 产品的总体轮廓线形与各组成部分的轮廓线应大体一致，确定线形的主调，如直线型或曲线型。如图 15.6-12a 所示，卧式铣床的造型轮廓以曲线为主调。而功能和布局相类似的铣床，如图 15.6-12b 所示则以直线作为造型的主调，后者更显得刚直、挺拔。

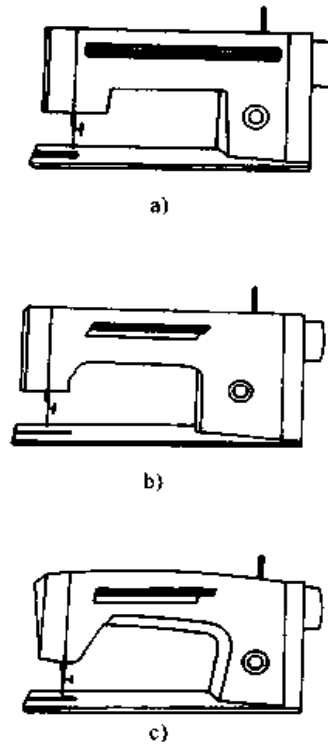


图 15.6-13 线形风格的变化

a) 线形单调 b) 圆弧衬托 c) 圆弧和直线衬托

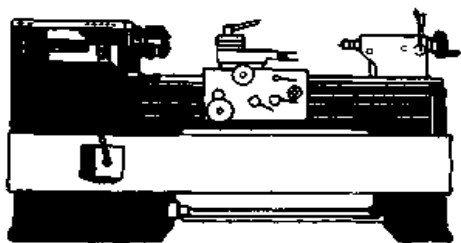


图 15.6-14 分割与联系

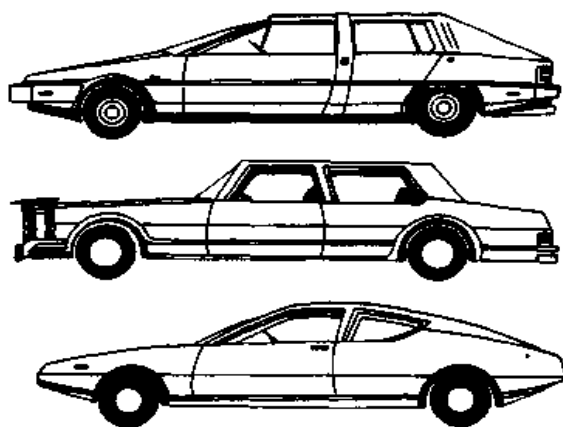


图 15.6-15 前后呼应

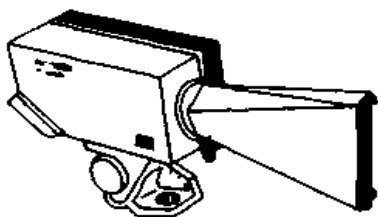


图 15.6-16 逐渐过渡

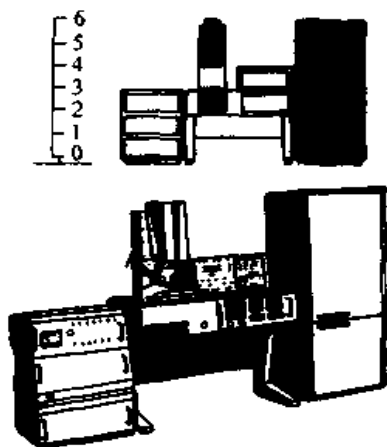


图 15.6-17 韵律的统一

差异。为了获得统一完整的感觉得，在高度方向上取6个相等的尺寸间隔，采用了重复变化的手

法，划分各局部，从而加强了各部分的内在联系，达到了协调统一的整体效果。图 15.6-18 所示为电器装置的通风孔，应用不同的节奏变化，得到不同形式的造型。图 15.6-19 所示为仪器的面板造型，旋钮排列疏密有致，形成节奏变化；旋钮有大有小，重复中有变化，配置大方，统一协调，变化自然。

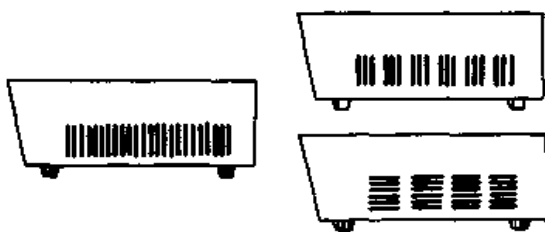


图 15.6-18 不同韵律变化



图 15.6-19 韵律变化

2 色彩设计

色彩设计的目的是使产品色彩分布均匀协调，使产品显得新颖、悦目，增添人的视觉和心理美感，减轻人在工作中的疲劳及减少事故的发生。色彩设计受到人的审美观、好恶心理，以及产品的功能、材料、工艺和使用环境等因素的限制。色彩设计的基本原则概括如下几方面。

2.1 色彩设计应考虑人的心理感受

不同年龄、性别的人产生的色彩心理和情绪不相同，如表 15.6-2~表 15.6-5 所示。因此色彩设计要充分考虑产品的使用对象，选择给使用者带来愉快、刺激和美的色彩。

表 15.6-2 色彩的抽象联想

观察者 颜色	青年 (男)	青年 (女)	老年 (男)	老年 (女)
白	纯洁、神圣	清楚、纯洁	洁白、纯真	洁白、神秘
灰	忧郁、绝望	忧郁、郁闷	荒废、平凡	沉默、死亡
黑	死亡、刚健	悲哀、坚定	生命、严肃	忧郁、冷淡
红	热情、革命	热情、危险	热烈、卑俗	热烈、幼稚

续表 15.6-2

观察者 颜色	青年 (男)	青年 (女)	老年 (男)	老年 (女)
橙	焦躁、可爱	下流、温情	甜美、明朗	欢喜、华美
茶	幽雅、古朴	幽雅、沉静	幽雅、坚实	古朴、朴直
黄	明快、活泼	明快、希望	光明、明快	光明、明朗
黄青	青春、和平	青春、新鲜	新鲜、跳动	新鲜、希望
绿	永恒、新鲜	和平、理想	深远、和平	希望、公平
青	无限、理想	永恒、理智	冷淡、薄情	平静、悠久
紫	高贵、古朴	幽雅、高贵	古朴、优美	高贵、消极

表 15.6-3 色彩的具体联想

观察者 颜色	小学生 (男)	小学生 (女)	青年 (男)	青年 (女)
白	雪、白纸	雪、白兔	雪、白云	雪、砂糖
灰	鼠	阴暗的天空	混凝土	阴暗的天 空、冬天 的天气
黑	炭、夜	头发、炭	夜、洋伞	墨、西服
红	苹果、太阳	郁金香、 洋服	红旗、血	口红、红靴
橙	桔、柿	桔、胡萝卜	桔樽、果汁	桔、砖
茶	土、树干	土、巧克力	皮箱、土	栗、靴
黄	香蕉、 向日葵	菜花、 蒲公英	月亮、 鸡雏	柠檬、月
黄绿	草、竹	草、叶	嫩草、春天	嫩叶
绿	树叶、山	草、草坪	树叶、蚊帐	草、毛衣
青	天空、海	天空、水	海、秋天 的天空	海、湖
紫	葡萄	葡萄、桔梗	裙子	茄子、紫藤

表 15.6-4 色彩的感觉

感觉	色 相	明 度	纯 度
冷 暖	青、青绿、青紫 红、橙、黄	—	—
进 退	暖色 冷色	高明度 低明度	高纯度 低纯度
胀 缩	暖色 冷色	高明度 低明度	—

续表 15.6-4

感觉	色 相	明 度	纯 度
软 硬	—	高明度 低明度	中纯度 高纯度、低纯度
华丽 质朴	红、紫红、绿 黄绿、黄、橙、青紫	高明度 低明度	高纯度 低纯度
轻 重	冷色 暖色	高明度 低明度	—

表 15.6-5 各种色彩的心理和生理作用

颜 色	引起心理、生理作用和感觉的联想												
	兴 奋	忧 郁	安 慰	热 情	爽 快	轻 松	沉 重	遥 远	接 近	温 暖	寒 冷	突 出	安 静
红	○			○					○	○		○	
橙	○			○					○	○		○	
橙黄	○			○					○	○		○	
黄	○			○					○	○		○	
黄绿				○					○	○		○	
绿			○		○			○	○	○		○	
绿蓝					○			○	○	○		○	
天蓝					○			○	○	○		○	
浅蓝			○		○			○	○	○		○	
蓝					○			○	○	○		○	
紫		○			○			○	○	○		○	
紫红	○				○			○	○	○		○	
白					○			○	○	○		○	
浅灰					○			○	○	○		○	
深灰		○			○			○	○	○		○	
黑		○			○			○	○	○		○	

2.2 色彩设计应考虑不同民族、地区的爱好

民族、地区不同，对色彩有不同的要求，如表 15.6-6~表 15.6-11 所示，设计时作为选择颜色的参考，使产品的颜色为某民族、地区的使用者所喜爱。

表 15.6-6 我国各民族对颜色的好恶

民 族	喜 爱	忌用或其他
汉 族	红、金	黑白多用于丧事
蒙 族	桔黄、蓝、绿、紫红	黑、白

续表 15.6-6

民 族	喜 爱	忌用或其他
回 族	黑、白、蓝、绿、红	丧享用白色
藏 族	白色为尊贵色, 黑、桔黄、红紫、深褐	黄、朱红
苗 族	青、深蓝、墨绿、黑、褐	黄
维吾尔族	红绿、粉红、紫红、玫瑰红、紫红、青、白	
朝 鲜 族	白、粉红、粉绿、浅黄	

续表 15.6-6

民 族	喜 爱	忌用或其他
彝 族	红、黄、蓝、黑	白
壮 族	天蓝	
满 族	黄、紫、红、蓝	
京 族	白、棕	
泰 族	白	
黎 族	红、褐、深蓝、黑	
高山族	红	

表 15.6-7 亚洲地区对颜色的好恶

国 家	爱好色及其取义	禁忌用色及其原因
緬 甸	鲜明色彩, 如番红、黄等明度9的 Y1、G1、B1、R1、YR1、明度8的 G1、BP4、P1、Y1, 明度4的 BP4、R1, 茶色	
斯里兰卡	红色、绿色	
泰 国	鲜艳的色彩。白色用于婚礼。红、白、蓝为国家颜色。黄色标志王室, 民间禁用	黑色为丧哀色
日 本	金色、银色、白色、紫色, 以示华丽名贵	
马来西亚	金色表示长寿, 绿色为宗教色, 黄色为王室用色	印度族禁用绿色, 商业用此色不禁
新 加 坡	红色、红和金、红和白表示繁荣、幸福, B1、BP4、P1、YG4、Y1、G1 的浅色、白色, 3级明度以下的茶色、深蓝、青紫色, R1、四级明度的纯色。GB4、YG4、P1、明度10级的 G1 和 R1 等色	忌用黄色
印度尼西亚	纯红、纯黄、纯绿和明度9的白和水色、淡黄色, 明度8的粉红、粉绿、浅黄色	
菲 律 宾	白、深黑、藏青, 明亮的红、黄, 明度6的品红等色	
伊 朗	明度8的和明度9的鲜红、粉红, Y1 和 B1、水色、BP4 和白, 明度6的鲜红、R1、G1、藏青和茶色	
印 度	绿色、桔色、红色表示生命、活力、朝气、热烈; 蓝色表示真实; 金黄色表示光辉、壮丽; 绿色表示和平、希望; 紫色表示心境宁静	紫色使人感到悲哀
香港地区	鲜艳色彩、浅的 P1 (紫色)	蓝色是避用色
伊 拉 克	绿色代表伊斯兰教, 客运行业用红色, 警备车用灰色、国旗用橄榄绿色; 明亮的白色、水色、淡黄、粉红和明度4的茶色和绿色, 明度2的深蓝色、茶色, 均为朴素的配色	黑色用于丧事, 丧服用乌黑色, 商业上避用橄榄绿
巴基斯坦	流行鲜明色彩, 国旗为翡翠绿、桔红也较为流行	黄为宗教禁忌色, 因为婆罗门教僧侣的服饰如此
叙 利 亚	最喜欢青蓝色, 其次是红、绿色	黄色为伊斯兰教的嫌恶色, 以其象征死亡
土 耳 其	流行绯红色和白色, 绿色为宗教所喜, 鲜艳的颜色也较流行	
塞浦路斯	其中希腊人喜欢蓝色和白色的配色, 土耳其人喜欢绿色	

表 15.6-8 非洲地区对颜色的好恶

国 家	爱好色及其取义	禁忌用色及其原因
埃 及	绿色为国家用色	蓝色象征恶魔
摩洛哥	比一般伊斯兰国家爱好稍暗的颜色	
突 尼 斯	伊斯兰教喜绿、白、红色、犹太人喜欢白色	
东非地区	喜白、粉红、水色、红、浓黄、天蓝、茶黑	
西非地区	明度9的红、绿、蓝、明度2的茶色，明度1的藏青以及黑色	
南非地区	喜爱红、白、水色、藏青的配色	

表 15.6-9 拉丁美洲地区对颜色的好恶

国 家	爱好色及其取义	禁忌用色及其原因
巴 西		紫色表示伤，黄色表示失望，紫加黄表示恶兆不祥。暗茶色象征将遭不测
古 巴	一般居民喜欢鲜明色彩。其色彩的喜恶情况与美国相似	
厄瓜多尔	在凉爽的高原地区喜欢暗色，炎热的沿海流行白色、明朗的色调，农民爱好鲜明色彩	
巴拉圭	爱好明朗色。国内三大党的象征色中红为共和联盟，深蓝为自由党，绿色为二月党，因此用此三色要谨慎	
秘 鲁	紫色用于十月宗教仪式	
委内瑞拉	红、绿、茶色、白、黑分别表示五大政党，一般少用。黄色象征医药卫生，医疗用黄色	

表 15.6-10 美洲地区对颜色的好恶

国 家	爱好色及其取义	禁忌用色及其原因
美 国	对色彩无特殊爱恶，红色表示干净，绿色表示庄重	
加 拿 大	除部落中的教徒外，对色彩无特殊好恶	

表 15.6-11 欧洲地区对颜色的好恶

国 家	爱好色及其取义	禁忌用色及其原因
奥 地 利	绿色广为流行	
保加利亚	衣著多用鲜艳的的绿色和茶色	不喜用鲜明的色彩
芬 兰	无特殊爱好	即使政治性色彩，也可用于商业
法 国	男孩穿蓝色，少女穿粉红。粉红、柠檬黄、水色、浅绿、草绿色、浅红、浅蓝、白色、银色均为常用色	
英 国	喜用蓝色、金黄色。各种颜色降低明度、略升纯度即为常用色。上流阶层喜用白色、银色；平民则喜用浅茶色、褐色	红色表示不干净
比利时	与法国相似，男孩用蓝色，少女用粉红色	

续表 15.6-11

国 家	爱好色及其取义	禁忌用色及其原因
联邦德国	南方流行鲜艳色彩, 多用黄、黑、蓝、桃红, 黄色被称为金色, 喜用“金”和黑的配色	
荷 兰	橙和蓝为国家代表色。市场喜用橙、蓝、黄金色、浅茶色、褐色等颜色	
爱尔兰	绿色最盛行, 青色也可, 尤爱鲜明的色彩	
挪 威	最盛行鲜明色彩, 其中红、黄、蓝三色尤为人所喜用	
瑞 典	蓝、黄色代表国家, 也用于商业。蓝色代表男性, 其他无特殊好恶	
瑞 士	流行原色和浓淡相间的重色。黑色汽车受人欢迎。红、白为国旗色, 流行于社会。农民喜用文静明朗的色彩, 白、红、绿等鲜艳色彩及浅黄、桃红、紫色也多采用	黑色为丧服色, 不用于其他场合
葡 萄 牙	红、绿为国旗色, 蓝与白表示庄严。其余无特殊禁好	
意 大 利	多用浓红、绿、茶色、蓝、黑	
北欧地区	喜用白色、红色、绿色、蓝色等鲜艳颜色	
南欧地区	喜用地中海的海水颜色和明亮鲜艳的颜色	

2.3 色彩设计应考虑产品功能和形态的要求

每一件产品都有基础色调, 使产品具有整体统一的视觉效果。产品的基础色调的选择要依据产品的功能和形态等条件而定。

机座或大型的基础结构, 为表现出其稳重坚固的效果。一般情况下, 不宜用太淡的颜色, 略带中性灰的颜色, 同时可采用多色配置。这样既不会使产品太暗淡, 又能达到生动和谐的效果。

零件的内表面应涂以淡色调, 以方便装配、检修和调整。护板、检查孔的内表面宜用较为鲜艳的颜色, 以便打开时能明显地加以区别。有时利用材料本身的质感也可达到理想的视觉效果。

2.4 色彩设计应考虑产品使用环境的要求

产品所处的环境也是确定产品基础色调的主要依据。

一般对于工作气氛平静的固定设备, 宜采用纯度低明度高, 较为鲜艳的冷或暖色, 不宜大面积地采用强烈的刺激和兴奋的色彩。可利用面板色、警惕色增强颜色的对比。

工作于整洁和宁静环境的设备, 如医疗卫生设备, 宜采用淡雅而高洁的高明度的冷色调色, 奶白、淡蓝、淡绿色等。

对于工作在室外的汽车, 宜采用较为醒目、明亮、艳丽的高明亮度和高纯度的颜色, 或采用对比强烈的复色颜色, 同时为加强动感, 添加色带, 以便人们辨认, 减少交通事故, 增加美感。

产品的颜色还要与环境温度相适应。如电风扇用于炎热的夏日, 宜采用冷色调, 产生凉爽的感觉。处于寒冷环境的产品, 应以暖色调为主, 使人心理上产生温暖的感觉。

2.5 色彩设计应考虑对比色的要求

对于产品的操作件、指示件和标志等重点要突出的零部件, 应当采用与基色对比度较高的颜色, 一方面增加色彩的活跃感, 另一方面便于引起人们的注意。

2.6 色彩设计应考虑色彩数量的要求

同一个产品上, 颜色数量不易过多。小型的产品一个颜色即可, 对比色靠黑白比例调节。大型设备可采用两个色彩。特大型设备可用三个色彩。

2.7 色彩设计应考虑颜色分界的要求

利用产品结构的自然分界线或几何的棱边划分颜色的区域。例如在部件之间结合处、可拆的盖板、罩壳等处划分色彩区域。尽量地避免在同一平面内配置多种色彩。这样色彩自然分界视觉上合乎逻辑,涂饰方便、经济合理,还可强化结构几何棱边的效果。

2.8 色彩设计应考虑色质并重的要求

涂料装饰是产品获得外观色彩的常用方法。然而如果能充分和巧妙地利用材料固有的本色,或经过加工获得特殊的材质效果和色彩感觉,既可起到丰富颜色变化的目的,又能显示高超的工艺水准。

2.9 色彩设计应考虑时代的要求

随着时代的前进,人们的审美观点会随时发生变化。色彩设计具有很强的时代特征,应随时关注“流行色”的发展趋势,根据色彩风格、审美观和新型涂料的变化,为产品设计符合时代潮流的配色方案。

3 宜人性设计

宜人性设计是在产品的结构尺寸的确定过程中,充分考虑人的心理和生理特点,使人在生产中舒适、宜人、安全和高效。

3.1 宜人性原则

产品造型设计中的宜人性主要表现为:产品操作空间的宜人性;产品自身的宜人性和工作环境的宜人性。下面列出了与零部件结构设计有关的宜人性原则。

3.1.1 与人体有关的设计

对工作空间和工作设备的设计应考虑到工作过程中对人身尺寸所产生的约束条件。工作空间适合于操作者。

1) 工作高度应适合于操作者的身体尺寸及所要完成的工作类型。座位、工作面和(或)工作台应设计成获得所期望的身体姿势,即身体躯干挺直、身体重量能适当地得到支承,两肘置于身体两侧,前臂接近呈水平。

2) 座位装置应适合于人的解剖生理特点。

3) 应为身体的活动,特别是头、手臂、腿和足活动提供足够的空间。

4) 各种操作器应布置在人的功能可及的范围内。

5) 把手和手柄应适合手的功能解剖学要求。

3.1.2 有关身体姿势、肌理和身体动作的设计

工作设计应避免肌肉、关节、韧带以及呼吸和循环系统不必要的和过度的应变,力的要求应在生理上所期望的范围内。身体动作应遵循自然节奏。身体姿势,力的使用以及身体的动作互相协调。

(1) 身体姿势

1) 操作者应能交替采用坐姿势和立姿势;如果必须两者择一,则通常坐姿优于立姿;然而工作过程也可能要求立姿。

2) 如果必须施用较大肌力,那么应该通过采取合适的身体姿势和提供适当的身体支承。

3) 身体姿势不应由于长时间的静态肌肉紧张而引起疲劳,应该可以变换身体姿势。

(2) 肌力

1) 力的要求应与操作者的体力相一致。

2) 所波及的肌肉群必须在肌力上能满足力的要求。如果力的要求过大,那么应在工作系统中引入辅助能源。

3) 应该避免同一肌肉保持长时间静态紧张。

(3) 身体动作

1) 应在身体动作间保持良好的平衡,最好能选择长时间固定不变的动作。

2) 动作的幅度、强度、速度和节拍应互相协调。

3) 对精度要求较高的动作不应使用很大的肌力。

4) 如适当的话,可设置引导装置以便于动作的实施和明确它的先后顺序。

3.1.3 有关信号、显示器和控制器设计

(1) 信号与显示器

信号与显示器应以适合人的感受特性的方式选择、设计和配置。尤其应注意下列各点:

1) 信号和显示器的种类和数量应符合信息的特性。

2) 当显示器数量很多时,为了能清楚地识别信息,应以能够清晰、迅速地获得可靠的方位来配置它们。对它们的排列可以根据工艺流程或

使用特定信息的重要性和频率确定。这种排列还可依据过程的机能、测定种类划分为若干部分。

3) 信号的显示器的种类和设计应保证清晰易辨。这对危险信号尤其重要。应考虑例如强度、形状、大小、对比度、显著性和信噪比等。

4) 信号显示的变化速率和方向应与主信息来源变化的速率和方向相一致。

5) 在以观察和监视为主的长时间工作中, 应通过信号和显示器的设计和布置来避免过载和负载不足的影响。

(2) 控制器

控制器的选择、设计和配置应与人体操作部分的特性(特别是动作)相适应。应该考虑到技能、准确性、速度和力的要求, 特别应注意下列各点:

1) 控制器的类型、设计和配置应适合于控制任务。应考虑到人的各项特性, 包括学会的和本能的动作。

2) 控制器的行程和操作阻力应根据控制任务和生物力学及人体测量数据选择。

3) 控制动作、设备的应答和显示信息应相互适应和协调。

4) 各种控制器的功能应易辨认, 避免混淆。

5) 在控制器数量很多的地方, 应能确保安全、明确、迅速地操作来配置它们。其配置方法与信号的配置相同, 可以根据控制器在过程中的功能和使用的顺序等将它们分成若干部分。

6) 关键的控制器应有防止误动作的保护装置。

3.2 人体数据

与人的操作和使用有关的机械零部件的结构形态设计, 必须考虑其形状尺寸等方面要符合正常人体各部分的结构尺寸, 关节所能达到的空间范围、肌力大小等等。如机床的床身结构设计, 就与操作人员的操作部位的高度、更换刀具的位置及姿势, 维护保养方便与否等人体结构尺寸有关。因此了解和掌握人体的结构尺寸, 对合理的设计零部件结构尺寸有重要的意义。下面列出了人体主要人体尺寸。

3.2.1 人体尺寸

(1) 人体静态尺寸

表 15.6-12~表 15.6-15 和图 15.6-20~23 摘录了 GB/T 10000-1988 我国成年人人体标准的部分数据。

由于我国地域辽阔, 不同地区的人体尺寸差异较大, 表 15.6-16 提供了不同地区成年人主要尺寸的均值和标准差。

表 15.6-17 提供了部分国家成年人身高尺寸。

表 15.6-18 提供了由身高计算正常人体的各部位尺寸的经验公式。

(2) 人体动态尺寸

人体动态尺寸在 GB/T 10000-1988 的数据的基础上分析、编选了几种作业姿势的人体尺寸。表 15.6-19 提供了人体各部位的角度活动范围。

表 15.6-12 人体主要尺寸 (mm)

测量项目	男 (16~60岁)								女 (18~55岁)							
	1	5	10	50	90	95	99	1	5	10	50	90	95	99		
1.1 身高	1 543	1 583	1 604	1 678	1 754	1 775	1 814	1 449	1 484	1 503	1 570	1 640	1 659	1 697		
1.2 体重/kg	44	48	50	59	71	75	83	39	42	44	52	63	66	74		
1.3 上臂长	279	289	294	313	333	338	349	252	262	267	284	303	308	319		
1.4 前臂长	206	216	220	237	253	258	268	185	193	198	213	229	234	242		
1.5 大腿长	413	428	436	465	496	505	523	387	402	410	438	467	476	494		
1.6 小腿长	324	338	344	369	396	403	419	300	313	319	344	307	376	390		

表 15.6-13 立姿人体尺寸 (mm)

测量项目	男 (18~60岁)							女 (18~55岁)						
	1	5	10	50	90	95	99	1	5	10	50	90	95	99
2.1 眼高	1 436	1 474	1 495	1 568	1 643	1 664	1 705	1 337	1 371	1 388	1 454	1 522	1 541	1 579
2.2 肩高	1 244	1 281	1 299	1 367	1 435	1 455	1 494	1 166	1 195	1 211	1 271	1 333	1 350	1 385
2.3 肘高	925	954	968	1 024	1 079	1 096	1 128	873	899	913	960	1 009	1 023	1 050
2.4 手功能高	656	680	693	741	787	801	828	630	650	662	704	746	757	778
2.5 会阴高	701	728	741	790	840	856	887	648	673	686	732	779	792	819
2.6 胫骨点高	394	409	417	444	472	481	498	363	377	384	410	437	444	459

表 15.6-14 坐姿人体尺寸 (mm)

测量项目	男 (18~60岁)							女 (18~55岁)						
	1	5	10	50	90	95	99	1	5	10	50	90	95	99
3.1 坐高	836	858	870	908	947	958	979	789	809	819	855	891	901	920
3.2 坐姿颈椎点高	599	615	624	657	691	701	719	563	579	587	617	648	657	675
3.3 坐姿眼高	729	749	761	798	836	847	868	678	695	704	739	773	783	803
3.4 坐姿肩高	539	557	566	598	631	641	659	504	518	526	556	585	594	609
3.5 坐姿肘高	214	228	235	263	291	298	321	201	215	223	251	277	284	299
3.6 坐姿大腿厚	103	112	116	130	146	151	160	107	113	117	130	146	151	160
3.7 坐姿膝高	441	456	464	493	523	532	549	410	424	431	458	485	493	507
3.8 小腿加足高	372	383	389	413	439	448	463	331	342	350	382	399	405	417
3.9 坐深	407	421	429	457	486	494	510	388	401	408	433	461	469	485
3.10 臀膝距	499	515	524	554	585	595	613	481	495	502	529	561	570	587
3.11 坐姿下肢长	892	921	937	992	1 046	1 063	1 096	826	851	865	912	960	975	1 005

表 15.6-15 人体水平尺寸 (mm)

测量项目	男 (16~60岁)							女 (18~55岁)						
	1	5	10	50	90	95	99	1	5	10	50	90	95	99
4.1 胸宽	242	253	259	280	307	315	331	219	233	239	260	289	299	319
4.2 胸厚	176	186	191	212	237	245	261	159	170	176	199	230	239	260
4.3 肩宽	330	344	351	375	397	403	415	304	320	328	351	371	377	387
4.4 最大肩宽	383	398	405	431	460	469	486	347	363	371	397	428	438	458
4.5 臀宽	273	282	288	306	327	334	346	275	290	296	317	340	346	360
4.6 坐姿臀宽	284	295	300	321	347	355	369	295	310	318	344	374	382	400
4.7 坐姿两肘间宽	353	371	381	422	473	489	518	326	348	360	404	460	478	509
4.8 胸围	762	791	806	867	944	970	1 018	717	745	760	825	919	949	1 005
4.9 腰围	620	650	665	735	859	895	960	622	659	680	772	904	950	1 025
4.10 臀围	780	805	820	875	948	970	1 009	795	824	840	900	975	1 000	1 044

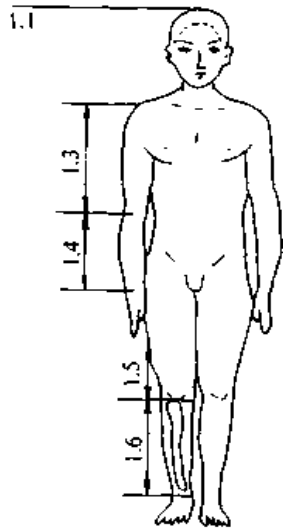


图 15.6-20 正常人体尺寸

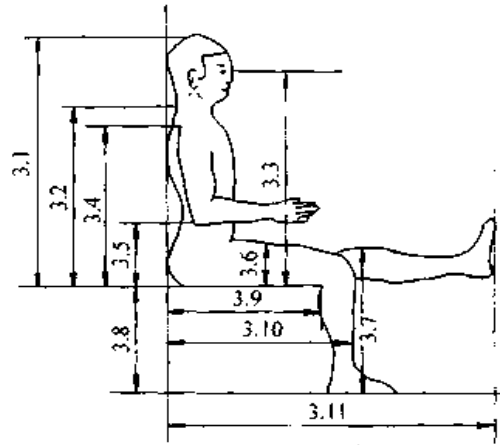


图 15.6-22 坐姿人体尺寸

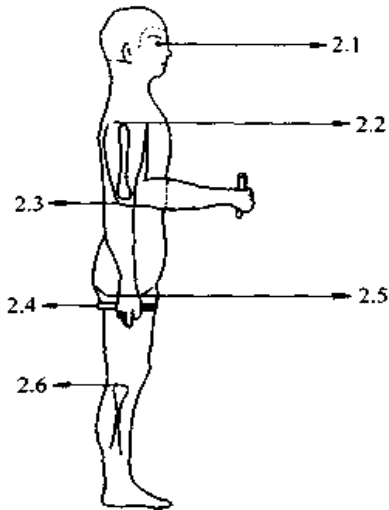


图 15.6-21 立姿人体尺寸

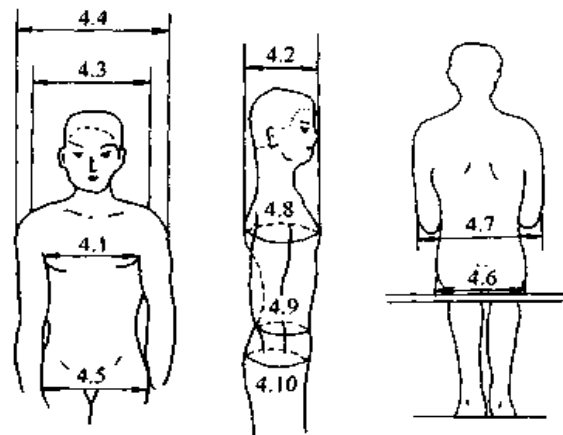


图 15.6-23 人体水平尺寸

表 15.6-16 六个区域的人体身高、胸围、体重的均值 M 及标准差 S_D

项 目	东北、华北区		西北区		东南区		华中区		华南区		西南区		
	均值 M	标准差 S_D	均值 M	标准差 S_D	均值 M	标准差 S_D	均值 M	标准差 S_D	均值 M	标准差 S_D	均值 M	标准差 S_D	
男 (18-60岁)	身高/mm	1 693	56.6	1 684	53.7	1 686	55.2	1 669	56.3	1 650	57.1	1 647	56.7
	胸围/mm	888	55.5	880	51.5	865	52.0	853	49.2	851	48.9	855	48.3
	体重/kg	64	8.2	60	7.6	59	7.7	57	6.9	56	6.9	55	6.8
女 (18-55岁)	身高/mm	1 586	51.8	1 575	51.9	1 573	50.8	1 560	50.7	1 549	49.7	1 546	53.9
	胸围/mm	848	66.4	837	55.9	831	59.8	820	55.8	819	57.6	809	58.8
	体重/kg	55	7.7	52	7.1	51	7.2	50	6.8	49	6.5	50	6.9

表 15.6-17 部分国家成年人的身高尺寸

(mm)

国 别	性别	M	S _D	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	99%
日 本	男	1 651	52	1 529	1 584	1 607	1 624	1 638	1 651	1 664	1 678	1 695	1 718	1 773
	女	1 544	50	1 429	1 481	1 502	1 518	1 532	1 544	1 556	1 570	1 586	1 607	1 659
美 国	男	1 755	72	1 587	1 662	1 694	1 717	1 737	1 755	1 773	1 793	1 816	1 848	1 923
	女	1 618	62	1 474	1 539	1 566	1 585	1 602	1 618	1 634	1 651	1 670	1 697	1 762
法 国	男	1 690	61	1 548	1 612	1 639	1 658	1 675	1 690	1 705	1 722	1 741	1 768	1 832
	女	1 590	45	1 485	1 532	1 552	1 566	1 579	1 590	1 601	1 614	1 628	1 648	1 695
意 大 利	男	1 680	66	1 526	1 596	1 625	1 645	1 663	1 680	1 696	1 715	1 735	1 764	1 834
	女	1 560	71	1 394	1 469	1 500	1 522	1 542	1 560	1 578	1 598	1 620	1 651	1 726
英 国	男	1 780	61	1 638	1 702	1 729	1 748	1 765	1 780	1 795	1 812	1 831	1 858	1 922
西 班 牙	男	1 690	61	1 548	1 612	1 639	1 658	1 675	1 690	1 705	1 722	1 741	1 768	1 832
非 洲	男	1 680	77	1 501	1 581	1 615	1 639	1 661	1 680	1 699	1 721	1 745	1 779	1 859
	女	1 570	45	1 465	1 512	1 532	1 546	1 559	1 570	1 581	1 594	1 608	1 628	1 675
马来西亚	男	1 540	66	1 386	1 456	1 485	1 505	1 523	1 540	1 556	1 575	1 595	1 624	1 694
	女	1 440	51	1 321	1 375	1 397	1 413	1 427	1 440	1 453	1 467	1 485	1 505	1 559
越 南	女	1 460	51	1 341	1 395	1 417	1 433	1 447	1 460	1 473	1 487	1 503	1 525	1 579
柬 埔 寨	女	1 490	51	1 371	1 426	1 447	1 463	1 477	1 490	1 503	1 517	1 533	1 555	1 609
墨西哥印第安人	男	1 580	45	1 475	1 522	1 542	1 556	1 569	1 580	1 591	1 604	1 618	1 638	1 685

表 15.6-18 人体各部位尺寸与身高的比例

代号	名 称	立 姿			
		男		女	
		亚洲人	欧美人	亚洲人	欧美人
1	眼 高	0.933H	0.937h	0.933H	0.937h
2	肩 高	0.844H	0.833h	0.844H	0.833h
3	肘 高	0.600H	0.625h	0.600H	0.625h
4	脐 高	0.600H	0.625h	0.600H	0.625h
5	臀 高	0.467H	0.458h	0.467H	0.458h
6	膝 高	0.267H	0.313h	0.267H	0.313h
7	腕-腕距	0.800H	0.813h	0.800H	0.813h
8	肩-肩距	0.222H	0.250h	0.213H	0.200h
9	胸 深	0.178H	0.167h	0.133~0.177H	0.125~0.166h
10	前臂长(包括手)	0.267H	0.250h	0.267H	0.250h
11	肩-指距	0.467H	0.438h	0.467H	0.438h
12	双手展宽	1.000H	1.000h	1.000H	1.000h
13	手举起最高点	1.278H	1.250h	1.278H	1.250h

续表 15.6-18

代号	名称	坐姿			
		男		女	
		亚洲人	欧美人	亚洲人	欧美人
14	坐高	0.222H	0.250h	0.222H	0.250h
15	头顶-座距	0.533H	0.531h	0.533H	0.531h
16	眼-坐距	0.467H	0.458h	0.467H	0.458h
17	膝高	0.267H	0.292h	0.267H	0.292h
18	头顶高	0.733H	0.781h	0.733H	0.781h
19	眼高	0.700H	0.708h	0.700H	0.708h
20	肩高	0.567H	0.583h	0.567H	0.583h
21	肘高	0.356H	0.406h	0.356H	0.406h
22	腿高	0.300H	0.333h	0.300H	0.333h
23	坐深	0.267H	0.275h	0.267H	0.275h

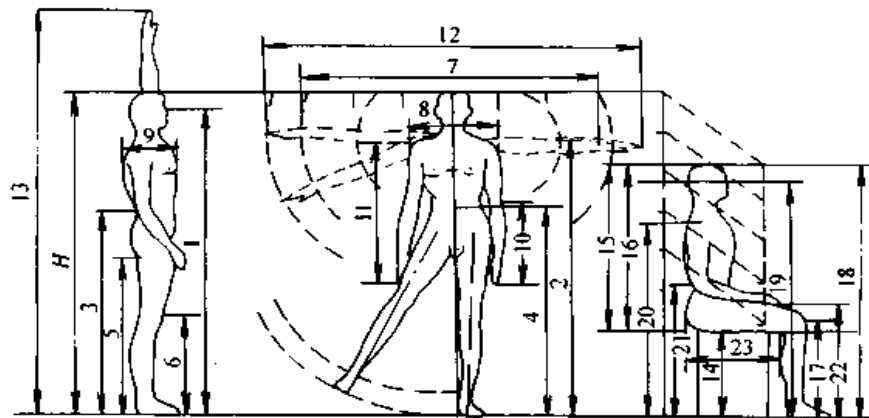


表 15.6-19 人体各部位的角度活动范围

身体部位	移动关节	动作方向	动作角度	
			编号	/(°)
头	脊柱	向右转	1	55
		向左转	2	55
		屈曲	3	40
		极度伸展	4	50
		向一侧弯曲	5	40
		向另一侧弯曲	6	40
肩胛骨	脊柱	向右转	7	40
		向左转	8	40
臂	肩关节	外展	9	90
		抬高	10	40
		屈曲	11	90

续表 15.6-19

身体部位	移动关节	动作方向	动作角度	
			编号	∠ (°)
臂	肩关节	向前抬高	12	90
		极度伸展	13	45
		内收	14	140
		极度伸展	15	40
		外展旋转		
		(外观)	16	90
		(内观)	17	90
手	腕 (枢轴关节)	背屈曲	18	65
		掌屈曲	19	75
		内收	20	30
		外展	21	15
		掌心朝上	22	90
		掌心朝下	23	80
腿	髌关节	内收	24	40
		外展	25	45
		屈曲	26	120
		极度伸展	27	45
		屈曲时回转 (外观)	28	30
		屈曲时回转 (内观)	29	35
小腿 足	膝关节 踝关节	屈曲	30	135
		内收	31	45
		外展	32	50

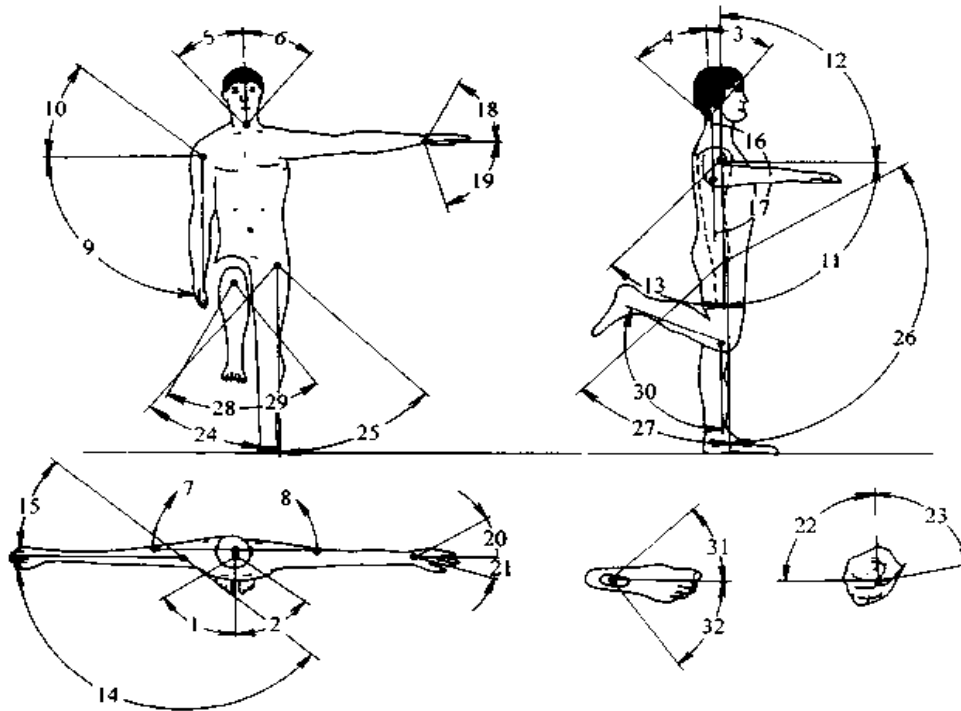


图 15.6-24 提供了人体各种作业姿势活动能及的距离范围。该图的数据是以我国成年男子第 95 百分位身高 (1 775 mm) 为基准。图中虚线

表示最佳范围；点划线为躯干不动最大能及范围；实线为躯干活动最大能及范围。为便于操作，避免疲劳，操纵装置应位于点划线范围以内。

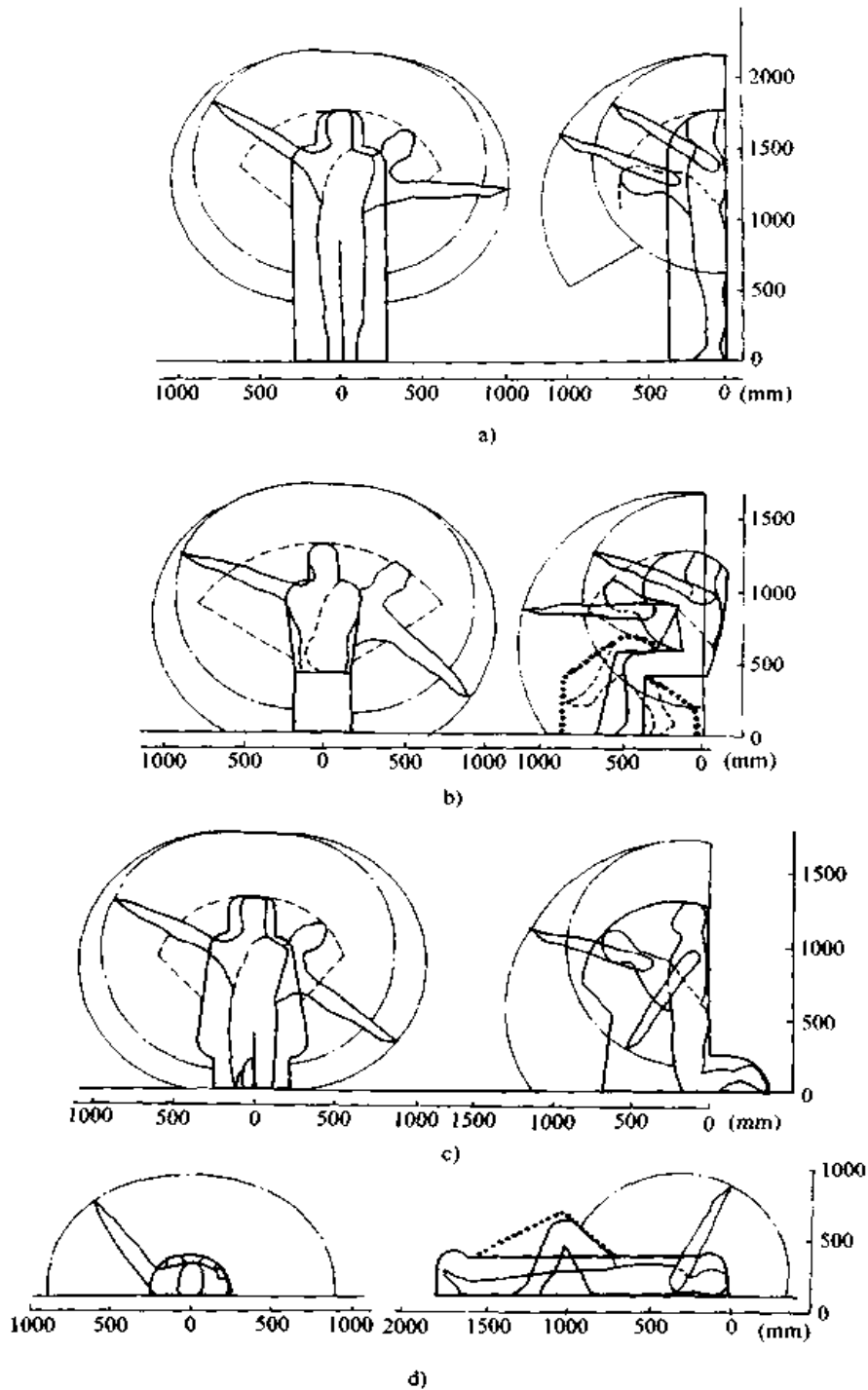


图 15.6-24 人体各种作业姿势活动能及的距离范围
a) 立姿 b) 坐姿 c) 跪姿 d) 卧姿

3.2.2 人体操纵力

施加最佳操纵力大小是确定操纵零件尺寸的主要依据之一。表 15.6-20 为中等体力的 20~30 岁青年男女身体主要部位肌肉所产生的力。

表 15.6-20 身体主要部位肌肉所产生的力

肌肉的部位		力的大小	
		男	女
手臂肌肉	左	370	300
	右	390	320
肱二头肌	左	280	130
	右	290	130
手臂弯曲时肌肉	左	280	200
	右	290	210
手臂伸直时肌肉	左	210	170
	右	230	180
拇指肌肉	左	100	80
	右	120	90
背部肌肉 (躯干屈伸的肌肉)		1200	710

图 15.6-25 为人立姿时, 手臂在不同角度位置、不同方向上的拉力和推力。

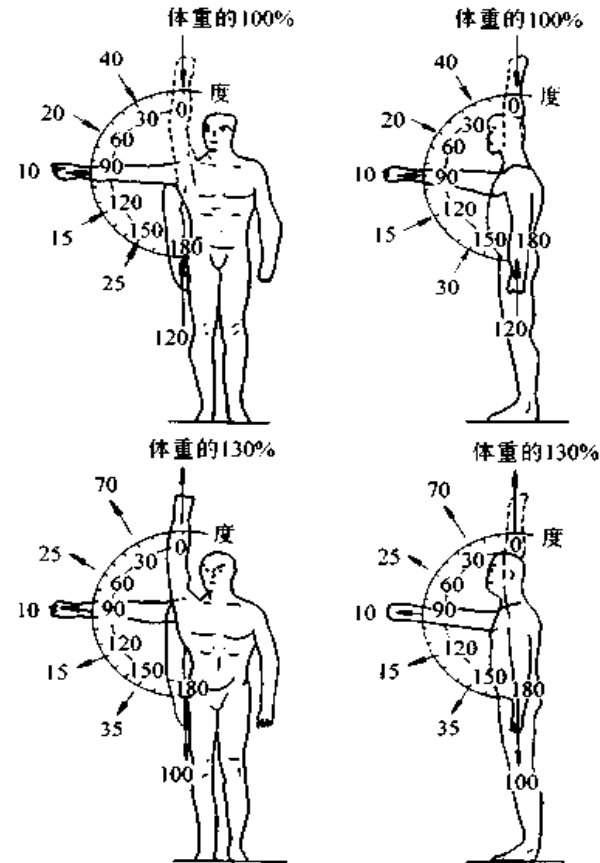


图 15.6-25 立姿直臂时的拉力和推力分布

图 15.6-26 为人立姿时, 弯臂在不同角度位置上的力量分布。

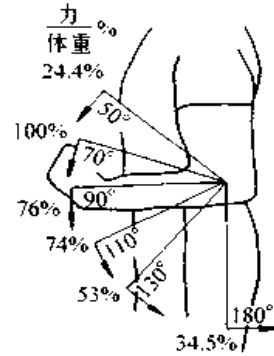


图 15.6-26 立姿弯臂时的力量分布

表 15.6-21 为人坐姿时, 手臂在不同角度位置和方向上的力量分布。

图 15.6-27 为人在不同体位下的足蹬力分布。

表 15.6-21 坐姿时手臂在不同角度位置和方向上的力量分布 (N)

手臂的角度 / (°)	拉 力		推 力	
	左手	右手	左手	右手
	向 后	向 前	向 前	向 后
180 (向前平伸臂)	225.4	235.2	186.2	225.4
150	186.2	245	137.2	186.2
120	156.8	186.2	117.6	156.8
90 (垂臂)	147	166.6	98	156.8
60	107.8	117.6	98	156.8
	向 上	向 下	向 下	向 上
180	39.2	58.8	58.8	78.1
150	68.6	78.4	78.4	88.2
120	78.4	107.8	98	117.6
90	78.4	88.2	98	117.6
60	68.6	88.2	78.4	88.2

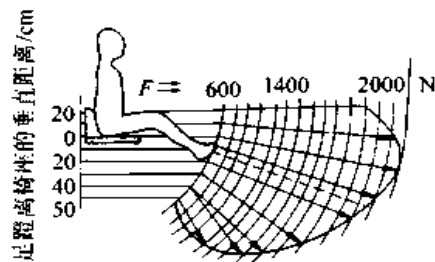


图 15.6-27 人在不同体位下的足蹬力分布

以上各图表中的力量大小都与持续时间有关。随力的作用时间的延长，力的大小将很快衰减。如拉力从最大值衰减到 1/4 时，只需 4 秒。




仪表是将机器的信息传递给操纵者，使之做出正确的判断和决策，进行合理操作的显示装置。

3.3 仪表显示结构设计

3.3.1 显示仪表的结构类型

显示仪表分为两大类：刻度指针式和数字式。表 15.6-22 为两类仪表结构的特性比较：

表 15.6-22 两类仪表结构的特性比较

类型 特征	刻度指针式仪表		数字式显示仪表
	指针运动式	指针固定式	
示意图			
数量信息	中 指针运动时读数困难	中 刻度移动时读数困难	好 读出精确数值，省时，出错极少
质量信息	好 容易确定指针位置，不再读出数字和刻度，可很快发现指针的变动	差 不读出数字和刻度，难以得知变化的方向和大小	差 必须读出数值；难以得知变化
调整	好 指针运动与调节运动有简单而直接的联系；指针变化便于监控	中 调节运动方向不明显；指示的变化不便于监控；快速调节时不可读	好 数字调节监测的精确；很少象活动指针那样与调节运动有直接联系；快速调节时不可读
跟踪控制	好 能很快确定指针位置，并进行监控，与调节运动的关系最简单	中 指针无变化有利于监控，与调节活动的关系不明显	差 无清楚的指针位置变化来支持监控
一般情况	占地面积较大；照明面在控制台上，刻度的长短有限，尤其是在使用多指针仪表时（差）	占地面积小，只有很小一段可以看见并照明；使用刻度带时，刻度可长一些	占地最小，照明面积最小；刻度的长短只受字符转鼓的限制（如计数器）

3.3.2 刻度指针式仪表结构元素设计

(1) 刻度盘形状和尺寸

刻度盘的形状不同，测量值的认读效果明显不同。表 15.6-23 为常见的表盘形状的认读准确度比较。

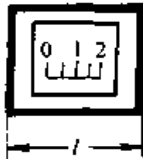
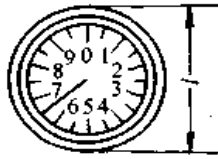
仪表刻度盘过大或过小都将影响认读的准确性。大量实验证明，使观察者的视角为 2.5°~5° 时的刻度盘直径为最佳。表 15.6-24 为圆形刻度盘的最小直径与标记数量和观察距离的关系。

(2) 刻度

刻度盘上刻度线之间的距离、刻度的长度、宽度和间距应根据人眼的最小分辨能力确定。

如图 15.6-28 所示为观察距离为 610 mm 时，普通刻度标记的设计尺寸。

表 15.6-23 常见的表盘形状的认读准确度比较

名称	形状	最大尺寸 l/mm	读数错误率/%
开窗式		177.8	0.5
圆形		177.8	10.9

续表 15.6-23

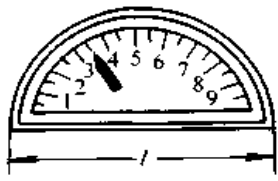

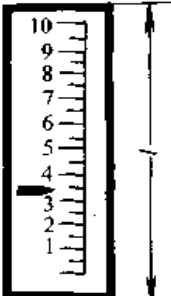
名称	形状	最大尺寸 l/mm	读数错 误率/%
半圆形		110.0	16.6
水平直线形		55.0	27.5
垂直直线形		423	35.5

表 15.6-25 所示为不同观察距离的刻度标记和字符高度。

机床仪表刻度标记的规定见表 15.6-26 所示。

(3) 指针

指针的形状要简洁、明快，有明显的指示性，可提高认读的速度和准确性。

图 15.6-29 为常见的指针形状。指针的设计应注意：为便于认读，指针的宽度不得小于最小刻度标记的宽度；为减少投影误差，指针与表面的间隙尽可能小；对于不遮挡标记的指针，针尖距刻度 2 mm 左右，对于遮挡标记的指针，针尖不应超过大刻度标记。

表 15.6-24 圆形刻度盘的最小直径与标记数量和观察距离的关系

刻度标记数量	刻度盘的最小直径/mm	
	观察距离为 50 cm	观察距离为 90 cm
38	25.4	25.4
50	25.4	32.5
70	25.4	45.5
100	36.4	64.3
150	54.4	98.0
200	72.8	129.6
300	109.0	196.0

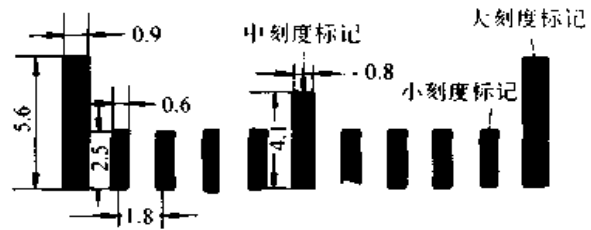


图 15.6-28 普通刻度标记的设计尺寸 (单位: mm)

表 15.6-25 观察距离与刻度标记高度的关系

观察距离 L/m	刻度标记高度/mm			字符高度/ mm
	长刻度线	中刻度线	短刻度线	
<0.5	4.4	4.0	2.3	2.3
0.5~0.9	10.0	7.0	4.3	4.3
0.9~1.8	19.5	14.0	8.5	8.5
1.8~3.6	39.2	28.0	17.0	17.0
3.6~6.0	65.8	46.8	27.0	27.0

表 15.6-26 机床仪表刻度标记长度

刻度标记 标记长度	刻度间距 b/mm													
	≤ 1		$> 1 \sim 2$		$> 2 \sim 3$			$> 3 \sim 5$			> 5			
l	2	3	2	3	4	3	4	6	4	6	8	6	8	10
l_1	3	4	3	4	6	4	6	8	6	8	10	8	10	14
l_2	4	6	4	6	8	6	8	10	8	10	12	10	12	18

续表 15.6-26

刻度标记	刻度间距 b/mm				
	≤ 1	$>1-2$	$>2-3$	$>3-5$	>5
标记长度					
刻度形式					l : 短刻度标记 l_1 : 中刻度标记 l_2 : 长刻度标记

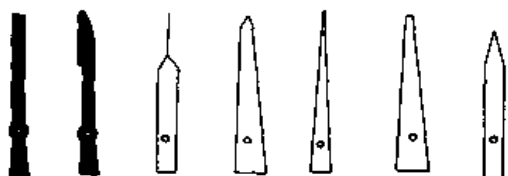


图 15.6-29 常见的指针形状

指针零点位置对认读也有很大影响,如表 15.6-27 所示不同仪表的零点位置确定。表 15.6-28 为多个仪表的指针零点排列形式。

表 15.6-27 指针零点位置

仪表种类	指针零位	优点
指针不动仪表 面运动	时钟 12 点位置	
追踪用仪表	时钟 9 点或 12 点位置	易于作精细的调整
读数用圆形仪表	时钟 12 点位置 或视需要安排	指针可多转
警戒用仪表	时钟 12 点位置 或其附近 (警戒区)	危险区和安全区处于零点两侧

3.3.3 刻度指针式仪表设计举例

如表 15.6-29 所示为刻度指针式仪表设计图例。

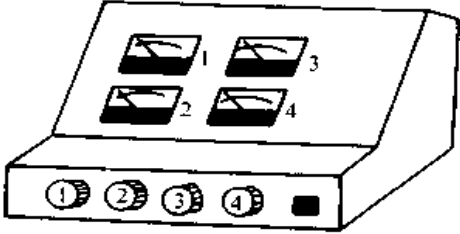
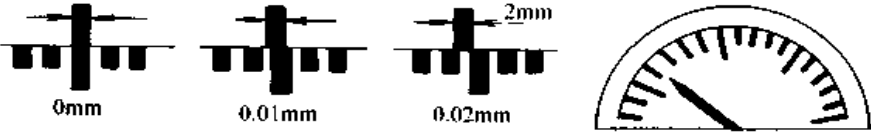
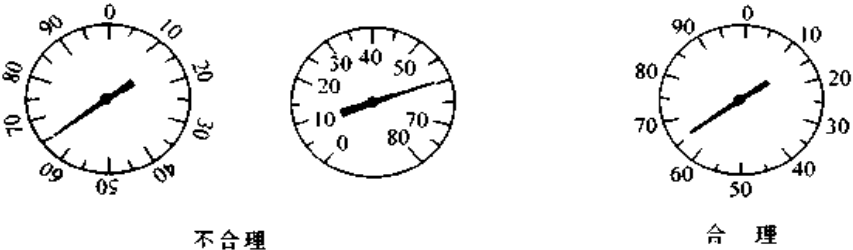
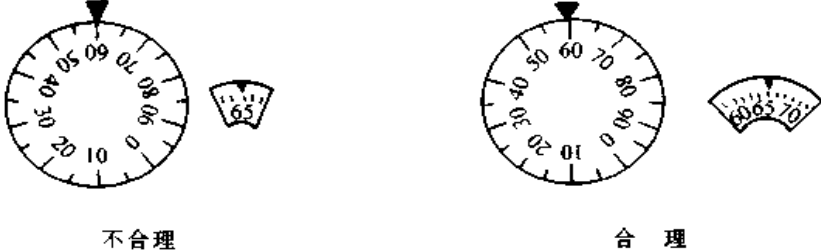
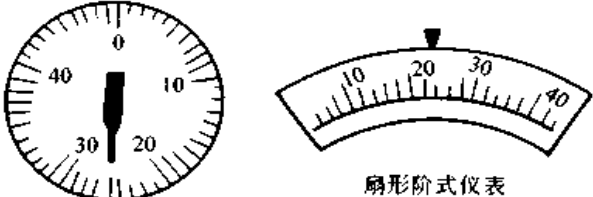
表 15.6-28 指针零点排列形式

排列状况	图 示	仪表零点方位排列形式
多个仪表 水平排列		所有仪表零点方位水平按一直线形式排列,便于快速认读和校正
多个仪表 垂直排列		所有仪表零点方位垂直按一直线形式排列,便于快速认读和校正
多个仪表 按矩阵形排列		所有仪表零点方位水平分排接直线形式排列,便于快速认读和校正
单个仪表	要求高质量认读	仪表零点标志的最优位置是在最左边的一点上
	眼在垂直运动状态下方便认读	仪表零点标志的最优位置是在最上边的一点上

表 15.6-29 刻度指针式仪表设计图例

图 例	说 明
<p style="text-align: center;">不合理</p>	<p>改进后,仪表与控制旋钮对应排列,关系明确便于操作</p>
<p style="text-align: center;">合理</p>	

续表 15.6-29

图 例	说 明
	<p>旋钮自左向右排列方式较好</p>
	<p>对于运动的刻度盘或瞬间读数, 应采用宽刻度标记, 以提高认读的速度和准确性</p>
	<p>为防止指针遮挡标数, 数码应放在刻度标记外侧。改进数码方向, 便于认读</p>
	<p>指针在仪表外侧, 数码应放在刻度标记内侧。改进数码方向, 便于认读; 开窗式仪表应能显示指示数码及两侧相邻的两个数码, 以便看清运动方向和趋势</p>
	<p>为防止读数方向错误, 可将刻度标记的长度随数码的增大而逐渐加长</p>

3.4 操纵装置结构设计

操纵装置是将人的信息输送给机器, 用以调整、改变机器状态的装置。

3.4.1 操纵装置类型

表 15.6-30 为各类操纵装置的形态和适用性。












3.4.2 旋钮设计

表 15.6-31 为各类旋钮形态和适用性。












旋钮尺寸大小应根据使用手指和手的部位而定。表 15.6-32 所示为旋钮的具体尺寸。

表 15.6-30 各类操纵装置的形态和适用性

(□—极适用 ○—适用 △—不适用)

调节的运动	调节部件举例		手握类 脚踏类	在下述各种情况下的适用性											
				两个 工位	多于 两个 工位	无级 调节	调节件 保持在 某工位	某一工 位的快 速调整	某一工 位的准 确调整	占地 少	单 手 同 时 调 节 若 干 部 件	位置 可见	位置 可及	阻止 意识 调节	无 调节 部 件 可 固 定
转动	曲柄		抓、握	○	○	□	□	○	○	△	△	○	○	△	○
	手轮		抓、握	○	□	□	□	○	□	△	△	△	△	△	□
	旋塞		抓	□	□	□	□	○	□	○	△	□	○	○	○
	旋钮		抓	□	□	□	△	○	□	□	△	○	△	○	△
	钥匙		抓	□	○	△	□	○	○	○	△	□	○	○	△
摆动	开关杆		抓	□	□	○	○	□	○	△	△	□	□	△	△
	调节杆		握	□	□	□	□	□	○	△	△	□	□	△	○
	杠杆电键		手触, 抓	□	△	△	○	□	△	○	□	△	○	△	△
	拨动式开关		手触, 抓	□	○	△	△	□	□	□	□	□	□	△	△
摆动式开关		手触	□	△	△	△	□	□	□	□	○	○	△	△	
脚踏		全脚踏上	□	○	□	□	□	□	○	△	△	△	△	△	○

续表 15.6-30

调节的运动	调节部件举例		手握类 脚踏类	在下述各种情况下的适用性											
				两个 工位	多于 两个 工位	无级 调节	调节件 保持在 某工位	某一工 位的快 速调整	某一工 位的准 确调整	占地 少	单手同 时调节 若干部 件	位置 可见	位置 可及	阻止无 意识调 节	无调节 部件可 固定
按 压	钢丝脱扣器		手触	□	△	○	○	△	△	□	△	△	△	□	△
	按钮		手触 脚掌或 脚跟上	□	△	△	△	□	□	□	□	○	○	△	△
	按键		手触 脚掌或 脚跟上	□	△	△	□	□	□	□	□	△	△	△	△
	键盘		手触	□	△	△	□	□	□	□	□	△	△	△	△
滑 动	手闸		手触 抓、握	□	□	□	□	□	○	△	○	□	□	△	○
	指拨滑坑, 形状决定		手触 抓	□	□	□	□	□	○	○	○	□	□	△	△
	指拨滑块, 摩擦决定		手触	□	△	△	△	○	○	□	△	□	△	○	△
牵 拉	拉环		握	□	○	○	□	□	○	△	△	□	△	△	□
	拉手		握	□	○	○	○	○	○	○	△	□	○	○	○
	拉圈		手触 抓	□	○	○	□	○	○	○	△	□	○	○	△
	钮		抓	□	○	○	○	○	○	○	△	□	○	○	△

注：在适用判断中凡列为“不适用”或“适用”的调节部件，若具有适当的结构设计时，这些调节部件可视为“适用”或“很适用”。在“阻止无意识调节”项下尤为如此。但只有当不可能使用其他调节部件时才可以这样做。

在判断有关“一个工位的快速调节”时，考虑了接触时间。

表 15.6-31 各类旋钮形态和适用性

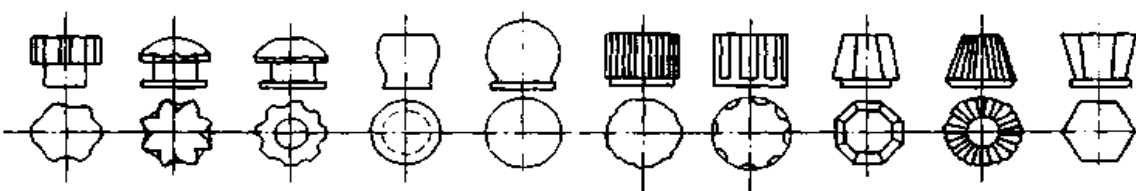
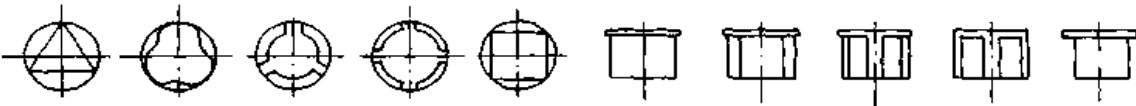
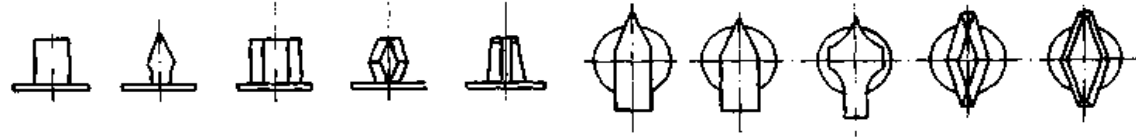
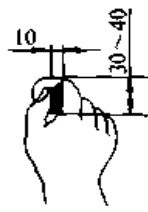
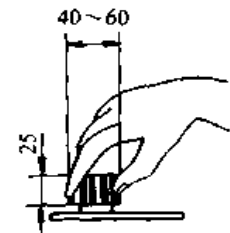
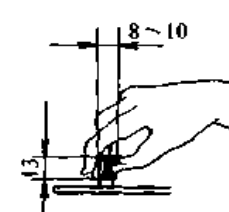
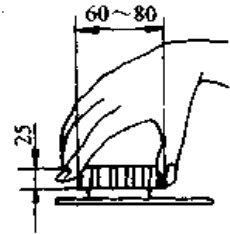
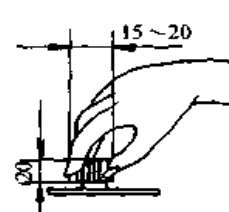
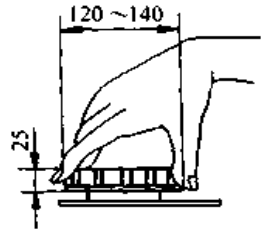
各类旋钮形态	适用性
	适用于 360° 以上旋转操作
	适用于 小于 360° 的旋转操作
	适用于 定位指示 调节

表 15.6-32 旋钮的具体尺寸和说明

旋钮的具体尺寸	说 明	旋钮的具体尺寸	说 明
	操纵力 5~10 N		操纵力 2.5~25 N
	操纵力 1.5~100 N		操纵力最 佳 5~20 N, 最大 51 N
	操纵力 2~20 N		操纵力最 佳 30~51 N, 最大 102 N

续表 15.6-32

旋钮的具体尺寸	说 明	旋钮的具体尺寸	说 明
<p>如旋钮直径为76.2mm 其厚度应在6.4mm以上</p> <p>旋钮面间的距离在19.2mm以上</p> <p>应在12.7mm以上</p> <p>应在15.5mm以上</p>	<p>控制面板尺寸有限时,可采用多层旋钮,中层为 38~64 mm</p>	<p>25°~45°</p> <p>最大25 最小16</p>	带凸棱的指示旋钮
<p>无意接触 直径太大</p> <p>无意接触 长度太大</p> <p>无意接触 厚度太薄</p> <p>无意接触 直径差别太小</p>	<p>对于多层旋钮如果旋钮直径太大、高度太长、厚度太薄和直径差别太小,都会造成旋钮间的相互干扰</p>	<p>最大20 最小10</p> <p>最小25 最佳40 最大70</p>	

3.4.3 手轮、曲柄设计

图 15.6-30 为几种手轮和曲柄的结构。手轮和曲柄的主要结构尺寸为旋转半径。由于工作用途不同,旋转半径大小有很大的差别。表 15.6-33 为手轮和曲柄不同应用特点的旋转半径。

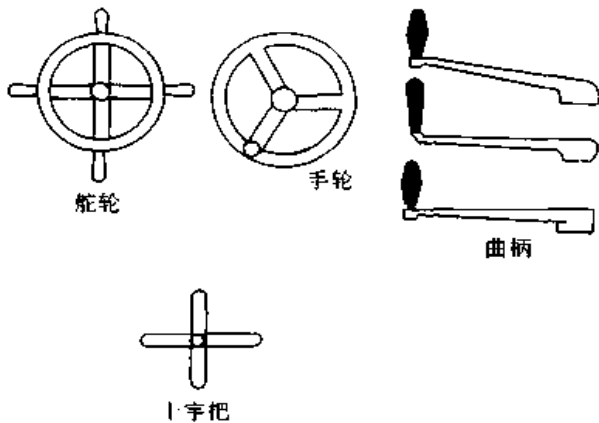


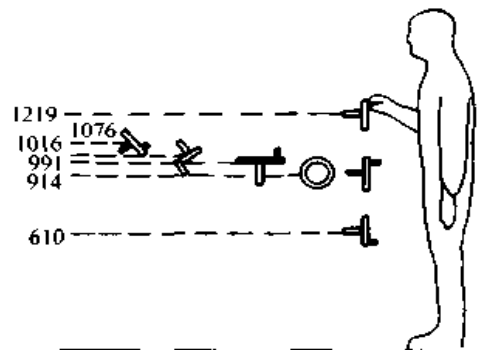
图 15.6-30 手轮和曲柄结构

除此以外,为了提高操纵效率,手轮和曲柄的旋转半径与空间的安装位置也有密切的关系。表 15.6-34 为手轮和曲柄的适合的安装位置和旋转半径大小。

表 15.6-33 手轮和曲柄的旋转半径

手轮及曲柄	应用特点	建议采用的 R 值/mm
	一般转动多圈	20~51
	快速转动	28~32
	调节指针到指定刻度	60~65
	追踪调节用	51~76

表 15.6-34 手轮和曲柄的适合的安装位置和旋转半径大小



续表 15.6-34

安装高度/mm	安装位置/°	手轮或摇把	操纵扭力/ $N \cdot m$		
			0	4.6	10
			旋转半径/mm		
610	0	手轮	38~76	127	203
910	0	手轮	38~102	127~203	203
	侧向	手轮	38~76	127	127
990	0	摇把	38~114	114~191	114~191
	90	手轮	38~127	127~203	203
1020	90	摇把	64~114	114~191	114~191
	-45	手轮	38~76	76~203	127~203
1070	-45	摇把	64~191	114~191	114~191
	45	手轮	38~114	127	127~203
480	45	摇把	64~114	64~114	114
	0	手轮	38~76	102~203	127~203
	0	摇把	64~114	114	114~191

3.4.4 操纵杆设计


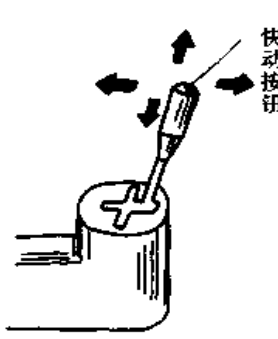
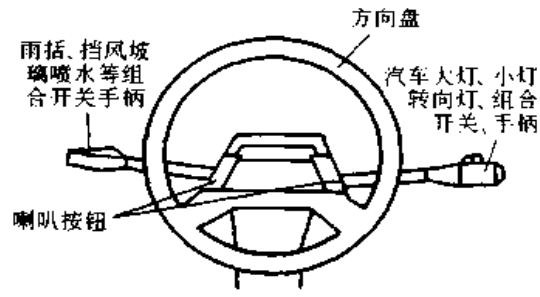
表 15.6-35 为几种操纵杆的结构形式。

操纵杆的主要结构有手柄的形状尺寸和杆长。以上的设计要保证手握舒适，施力方便，不产生滑动，同时还能控制它的动作。

手柄的形状和尺寸应充分考虑手的肌肉特点，为减少操作时疲劳程度，要保证掌心与手柄间留有一定的间隙。图 15.6-31a、b 和 c 三种形状的手柄适用于较长时间的操作；图 15.6-31d、e 和 f 三种形状的手柄适用于瞬时操作或受力不大的操作。表 15.6-36、表 15.6-37 为手柄的具体设计尺寸。

操纵杆的长度主要根据操纵频率的高低确定，如表 15.6-38 所示。

表 15.6-35 几种操纵杆的结构形式

飞机复合操纵杆	机床多功能复合手柄	汽车方向盘及组合开关
 <p>1、2、3、4 和 5 为各种开关</p>		

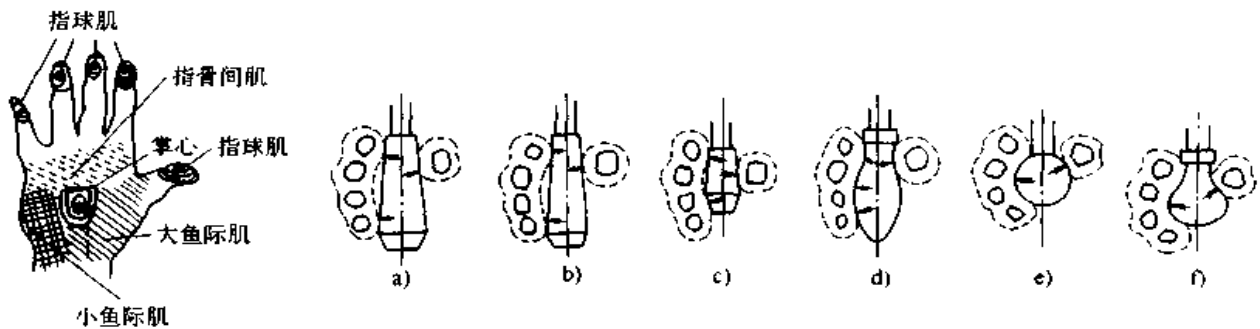


图 15.6-31 手柄的形状与手的生理特点

表 15.6-36 转动手柄的推荐尺寸

(mm)

材料: 35, 增强酚醛塑料或尼龙6 		d_1		L	D	D_1	d_2	L_1	L_2	R
		公称尺寸	偏差 (D6)							
6	+0.080	50	16	12	8	25	40	20		
8	+0.100	65	18	14	10	32	50	25		
10		80	22	16	12	40	60	28		
12	+0.120	90	25	18	14	45	70	32		
16		100	30	22	18	50	80	40		

表 15.6-37 操纵杆执握柄的尺寸

操纵杆	型式	建议采用的尺寸/mm
	一般	22~32 (不小于 7.5)
	球形	30~32
	扁平形	S 不小于 5

表 15.6-38 最大转动频率与操纵杆的关系

最大转动频率/ $m \cdot \min^{-1}$	操纵杆长度/mm
26	30
27	40
27.5	60
25.5	100
23.5	140
18.5	240
14	580

3.4.5 按钮与按键结构设计

按钮有单工位和双工位之分, 可以用手指或手掌按压。按钮的形状通常为圆形和矩形, 用食指按压的圆形直径为 8~18 mm, 拇指按压的圆形直径为 25~30 mm, 手掌按压的圆形直径为 30~50 mm; 矩形按钮边长为 10 mm×10 mm, 10 mm×15 mm 或 15 mm×20 mm, 按钮应高出盘面 5~12 mm, 行程为 3~6 mm, 按钮间距一般为 12.5~25 mm, 最小不得小于 6 mm。

按键的尺寸应按手指的尺寸和指端弧形设计, 如表 15.6-39 所示;

3.4.6 脚踏板和脚踏钮设计

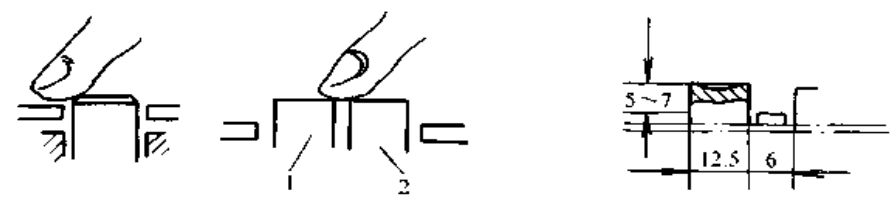
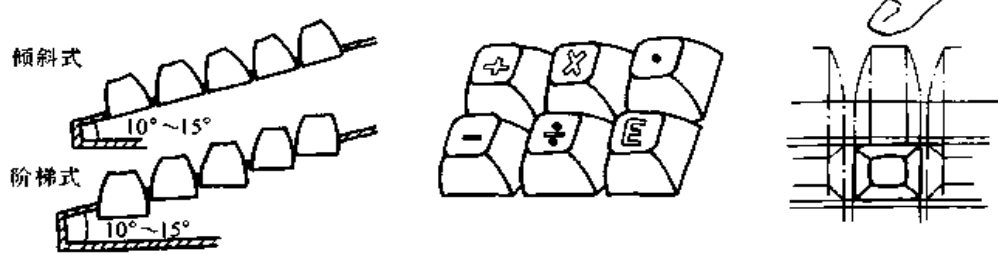
脚踏板和脚踏钮是用脚操纵的装置。脚踏板分为往复式、回转式和直动式, 回转式又分单曲柄和双曲柄, 如图 15.6-32 所示。

脚踏板的结构形式与操纵方式、操纵力和操纵频率有关, 如表 15.6-40、41 所示。

表 15.6-39 按键的形状尺寸设计

图 例	说 明
<p>不合理</p>	外凸弧形按键, 手感较差, 只适用于小负荷低频率场合。改进后, 端面形状为中凹
<p>合理</p>	

续表 15.6-39

图 例	说 明
 <p style="text-align: center;">不合理 合 理</p>	<p>为便于感觉位置和防止按错，按键应凸出板面一定高度和按键间应有一定距离</p>
	<p>对于多键组合，应保证手触面之间有一定的距离，纵向多采用阶梯式排列</p>

脚踏板多采用矩形或椭圆形平面板，而脚踏钮有矩形也有圆形，如图 15.6-33、15.6-34 所示脚踏板和脚踏钮的设计尺寸。

脚踏板和脚踏钮的操作空间对脚的施力和操纵效率影响较大，因此施力和被施力对象间的相互位置要合理。图 15.6-35、15.6-36 所示为坐姿和立姿时的脚踏板和脚踏钮的空间位置，阴影为工作区域。

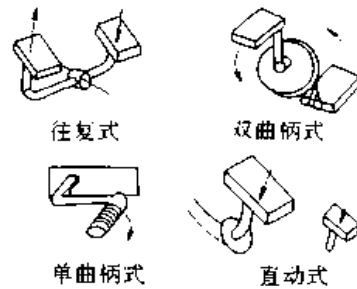


图 15.6-32 脚踏板的结构形式

表 15.6-40 脚踏板与操作方式


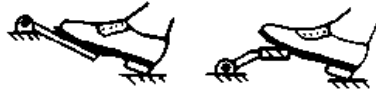

操纵方式	示意图	操纵特征
整个脚踏		操纵力较大（大于 50 N）、操纵频率较低，适用于紧急制动器的踏板
脚掌踏		操纵力在 50 N 左右，操纵频率较高，适用于启动、机床刹车的脚踏板
脚掌或脚跟踏		操纵力小于 50 N，操纵迅速，可连续操纵，适用于动作频繁的踏钮

表 15.6-41 脚踏板操纵效率比较

脚踏板型式					
编号	1	2	3	4	5
每分钟脚踏次数	187	178	176	140	171
效率比较	每踏一次所用时间最短	每踏一次比 1 号多用 5% 的时间	每踏一次比 1 号多用 6% 的时间	每踏一次比 1 号多用 34% 的时间	每踏一次比 1 号多用 9% 的时间

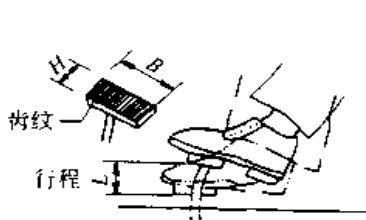


图 15.6-33 脚踏板的尺寸
 $B = 75 \sim 300 \text{ mm}$;
 $H = 25 \sim 90 \text{ mm}$;
 $L = 60 \sim 100 \text{ mm}$

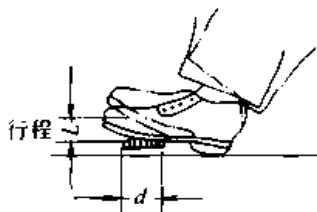


图 15.6-34 脚踏钮的尺寸
 $d = 50 \sim 80 \text{ mm}$;
 $L = 12 \sim 60 \text{ mm}$

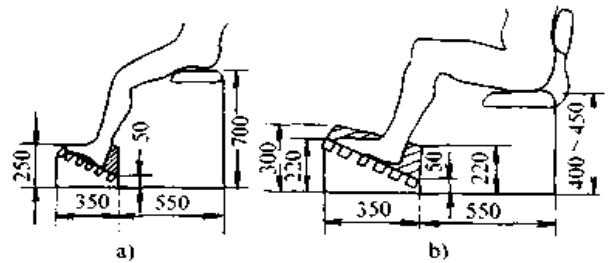


图 15.6-35 坐姿空间位置
 a) 脚踏钮 b) 脚踏板

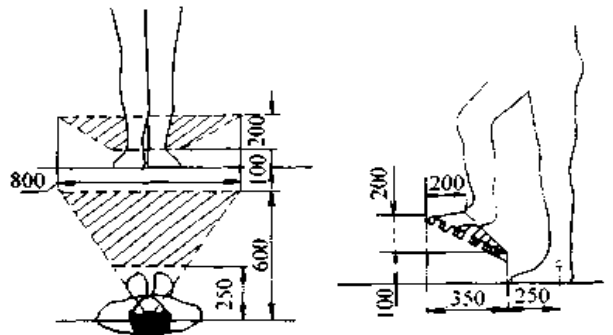


图 15.6-36 立姿空间位置

参 考 文 献

- 1 吴宗泽等编. 机械结构设计. 北京: 机械工业出版社. 1995
- 2 吴宗泽等编. 机械设计禁忌 500 例. 北京: 机械工业出版社. 1997
- 3 杨文彬著. 机械结构设计准则及实例. 北京: 机械工业出版社. 1997
- 4 钟毅芳等编. 机械设计. 武汉: 华中理工大学. 1999
- 5 吴宗泽等编. 高等机械设计. 北京: 清华大学出版社. 1991
- 6 吴柏枝著. 机械设计程序与结构. 北京: 科学出版社. 1995
- 7 [俄]K.H. 扎布隆斯基著. 机械零件. 余梦生等译. 北京: 高等教育出版社. 1992
- 8 高敏等编. 工业艺术造型设计. 北京: 机械工业出版社. 1992
- 9 濮良贵等编. 机械设计. 第六版. 北京: 高等教育出版社. 1996
- 10 丁玉兰等编. 人机工程. 北京: 北京理工大学出版社. 1991

- 11 蔡兰等编. 机械零件工艺性手册. 北京: 机械工业出版社. 1995
- 12 张宝刚编. 工业产品造型设计. 北京: 兵器工业出版社. 1994
- 13 谢庆森等编. 工业造型设计. 天津: 天津大学出版社. 1994
- 14 王玉林等编. 产品造型设计材料与工艺. 天津: 天津大学出版社. 1994
- 15 郭青山等编. 人机工程设计. 天津: 天津大学出版社. 1994
- 16 程能林等编. 产品造型材料与工艺. 北京: 北京理工大学出版社. 1991
- 17 [德]R. 柯勒著. 机械设计方法学. 党志梁等译. 北京: 科学出版社. 1990
- 18 刘鸿文等编. 材料力学. 北京: 人民出版社. 1979
- 19 邓文英等编. 金属工艺学. 北京: 人民教育出版社. 1981

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
16
篇

机械零部件失效分析

主 编 钱友荣

编 写 钱友荣 朱孝录

审 稿 钟秉林



中国机械工程学会
中国机械设计大典编委会

第1章 机械零部件失效分析的步骤和方法

1 失效分析与机械设计的关系

机械产品丧失其规定功能的事件称为机械产品失效。失效常发生在产品使用过程中，也发生在试运转过程中，甚至可能发生在使用前的存放过程中。以同类产品使用寿命期内失效事件总数为基数的统计数据表明，寿命早期的失效率较高，晚期的失效率也较高，而中期很长时间的失效率较低，典型的失效率曲线呈浴盆状曲线。机械产品的早期失效案例尤其值得重视，它们常常暴露出设计和制造工艺中各种欠缺和不当，及时的失效分析有利于改进和提高产品品质。晚期失效案例反映出机械产品耗损期的诸多病端，失效分析有利于提高产品的使用寿命。

针对机械产品失效案例进行的技术和管理活动称为失效分析。失效分析的主要内容是查明失效的具体原因（失效诊断）和提出预防或补救措施（失效对策）。失效分析的主要目标是防止同类失效事件再次发生和提高产品品质。

机械产品的恶性失效事故造成重大经济损失，甚至人员伤亡，例如飞机坠毁，大型机组毁坏，大型压力容器爆炸。这种特重大事故发生后，通常开展大规模调查活动，如果确认或怀疑事故由机械零部件失效而造成，就会进行一系列失效分析活动，包括各种试验和研究工作。由于领导部门重视，投入较大，研究工作深入，常能达到预期目标。

中、小型失效事件或事故，也应该进行相应的失效分析活动。而各设计单位和制造厂家对于所发生失效事件的重视程度有很大差异。有一些厂家极重视其产品的失效案例，买回典型的失效零部件，认真分析研究。许多设计师经常调查所设计机械设备使用中失效情况，作为改善设计的重要依据。“失败乃成功之母”，概略地说明了失效分析与机械设计间的关系。

2 机械产品失效的分类

机械产品失效分类有两种主要系统：按照失

效类型分类；按照失效原因分类。

机械产品失效类型有五大类：变形，断裂，腐蚀，磨损和老化。还可以进一步细分为更多的类型，断裂失效可分为塑性断裂，脆性断裂，环境促进断裂和高温断裂。还有一些复合的失效类型，例如微动磨蚀疲劳是磨损、化学腐蚀和疲劳断裂的综合。

机械产品失效原因分为四大类：设计不当，制造工艺不当，材料冶金缺陷，使用操作失误。每一类中有其具体原因，例如制造工艺不当可能涉及切削加工、热处理、电镀或装配的具体工艺。确定失效原因是一项复杂的工作，涉及的学科门类宽广；当机械设备毁坏严重时，查找证据困难；失效原因认定涉及到事故责任单位和人员，经常发生争议和互相推诿。失效分析是依据试验结果和证据作出结论，失效分析工作者必须坚持客观性和公正性。

上述四类失效原因也可归为两类。前三类原因都与机械产品品质有关，由机械设计和制造单位负责，简称为机械失效。操作原因造成的失效，一般与产品品质无直接因果关系，由产品的使用单位负责。

对于各类机械产品的失效原因，有关领导部门或研究单位会发布一定时期内各类原因的统计数据，可供参考。例如美国空军发布的一项3824次飞机失效事件统计表明，操作原因占41%，机械失效约占43%，气象原因约占3%，不明原因占13%。

3 失效分析的步骤

失效分析的实施步骤旨在保证这项活动的顺利进行和完成。下面推荐通用的失效分析实施步骤，可供参考。由于每个失效事件的重要程度和规模大小不同，对失效分析的要求和步骤也会有所不同。

3.1 收集背景资料和侦查失效现场

失效现场必须注意保护，等待有关人员进行

侦查。失效现场的一切证据应该维持原状，完整无缺和真实不伪。这是保证失效分析顺利进行的先决条件。对于公路和铁路事故，由于要求保持交通顺畅而采取一些变通措施，但是保护失效现场的原则仍需执行。

侦查失效现场采用目视检查、照相、录像、测量、绘图和文字描述等方法。初步检查失效零部件的外观特征，注意其附近的碎片、残留物和可疑痕迹。

收集背景资料是指机械设备的服役历史，不正常工况、设计资料，制造工艺记录和检验记录等。也要收集该类设备的有关标准。

在现场侦查的基础上，挑选和收集供进一步检查和试验用的实物和试样。

3.2 失效零部件的初步检查

初步检查是现场侦查的继续和深化，目标是确定肇事零件和初步判断失效类型。并且据此确定下一步的试验项目和整个活动的计划。

当整台机械设备遭到损坏时，可能有多个零部件严重变形、断裂或磨损。其中的多数零件属于被动破坏件，必须找到哪一个或几个零件是肇事事件。肇事事件一般是首先损坏件。

初步检查依循两条途径：一方面根据机械设备工作原理进行推理分析；另一方面对失效零部件进行细致的目视检查，筛选和缩小对肇事事件的怀疑范围。

3.3 实验室试验工作

在初步检查的基础上，根据失效案例的重要性和复杂程度，确定实验室试验项目。试验用的试件和样品主要取自失效零件、碎片和其他残留物。可供选取的试验项目如下。

1) 无损探伤，用于检查零件表面和内部的裂纹和缺陷。常用的无损探伤方法有 X 光法、磁粉法、荧光法、超声波法等，它们有各自的适用范围。

2) 力学性能试验，包括拉伸试验、室温和低温冲击试验、疲劳试验、断裂韧性试验等。

3) 化学分析，用于检验零件材料和环境介质的化学成分。

4) 金相试验，用于检验零件材料的显微组织和缺陷。

5) 断口试验，包括宏观断口观察和电子显微镜断口观察两个方面。

6) 腐蚀零件和磨损零件的扫描电子显微镜表面观察。

7) 核算失效零部件的载荷和应力，进行实验应力分析，测定宏观残余应力。

3.4 确定失效类型和失效原因

这是失效分析的核心环节和基本目的。首先确定失效类型，对于查找失效原因有指导作用。如果确定某个零件属于疲劳断裂，并且找到了裂纹起源位置，那么就有利于查找具体的失效原因：零件该部位的细节设计有否不当；有无制造工艺缺陷或材质缺陷；零部件或系统有无振动等。

无论确定失效类型，还是确定失效原因，都要有试验和检查所获取的数据、资料和照片作为证据。重大案例的失效原因常非单一因素造成，而是多种因素综合作用的结果，但是应该力争分清主次。也存在一些疑难案例，查不清确切的失效原因，例如严重毁损的机组中找不到肇事零部件；或者目前的检测技术和认识水平尚达不到预定目标。

3.5 完成失效分析报告

报告中列出和分析全部重要证据，作出规范化的结论，相应地指出预防同类零件失效的措施和对失效零部件的补救措施。

4 失效分析的试验方法

在本章 3.3 中已列出可能采用的试验项目，本节仅介绍常用于失效分析的几项专门试验方法。

4.1 裂纹观察

在已经发现裂纹的情况下，应对裂纹进行宏观观察和金相观察。宏观观察的目标是查明首先形成的裂纹，裂纹走向和裂源位置。金相观察的目标是查明裂纹属于穿晶裂纹或沿晶裂纹，以及裂纹与其他显微组织的关系。

当失效零件上存在许多条裂纹或裂成多块碎片时，重要的任务是查明哪一条裂纹首先形成，并确定裂纹走向和找出裂源位置。判断时依据丁

形法和分枝法两条原则(图16.1-1)。对于呈T形分布的两条裂纹,必定是T形顶边裂纹先形成,应当优先追踪,即向裂纹两头追查是否有更先形成的裂纹,直至追踪到裂源位置。对于分枝裂纹,必定是主干裂纹先形成,然后形成分枝。沿着主干裂纹无分枝的方向查找裂纹的起始点。存在较严重腐蚀和氧化迹象的裂纹,被优先怀疑为先形成裂纹。将这种裂纹打开和获得断口,依据断口上腐蚀色泽深浅,更有助于判断该裂纹是否首先形成。

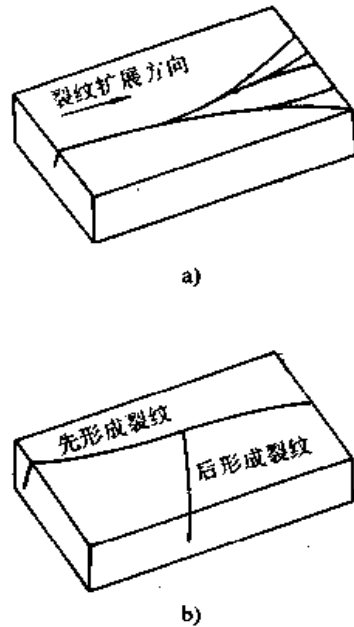


图 16.1-1 裂纹形成次序判断法
a) 分枝法 b) T形法

裂纹金相观察需要先制备金相试样。一般取细小裂纹或裂纹尖端部位,垂直于裂纹面切取试样,抛光,浸蚀显示晶界或显微组织。在光学显微镜下观察裂纹途径与晶粒的关系,沿晶界途径者为沿晶裂纹(图16.1-2);穿越晶粒内部者为穿晶裂纹(图16.1-3);或者穿晶和沿晶混合型裂纹。普通的疲劳断裂和塑性断裂均以穿晶裂纹为主。当观察到较多的沿晶裂纹时,一般都存在某种特殊因素,例如环境、高温或材料脆化等因素。

裂纹金相观察时,也要注意微观裂纹途径与夹杂物或显微组织间的关系。

4.2 宏观断口观察

断裂形成的表面称为断口。如果零件上的裂

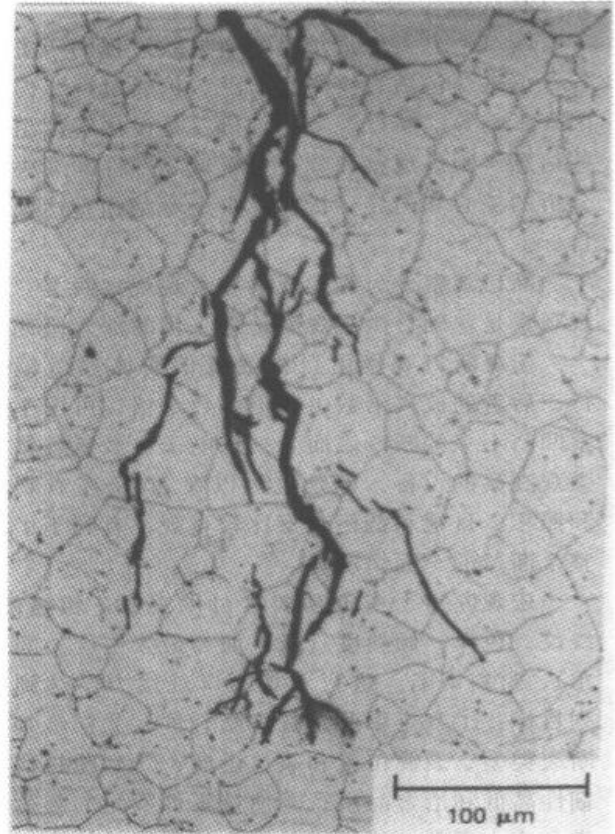


图 16.1-2 穿晶裂纹金相照片 200×
(316 不锈钢热浓氯化物中应力腐蚀)

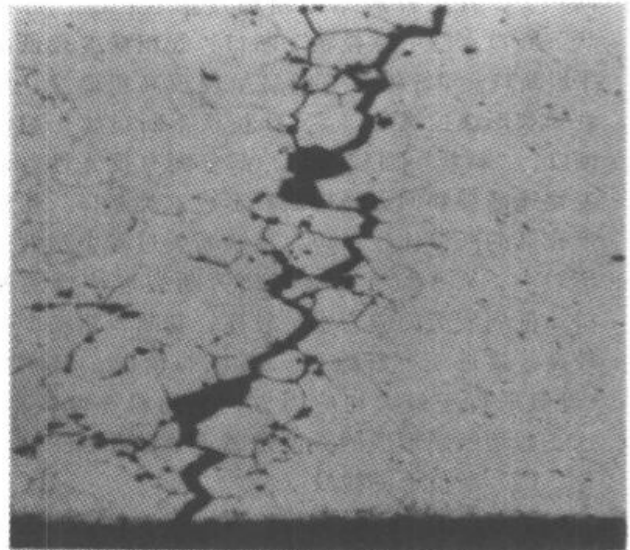


图 16.1-3 沿晶裂纹金相照片 100×
(82℃, 70×10^{-6} 氯化物溶液中应力腐蚀)

纹尚未造成整体断开，则可以人为地打开裂纹，获得断口。

断口上忠实地记录着断裂失效过程的历史和各种信息，包括裂纹的起始点、扩展过程、内外因素影响等。断口观察和分析就是设法解读出这些信息。断口观察和分析是机械零部件断裂失效分析的核心和向导，指引着少走弯路和直达预定目标。

断口观察分为宏观观察和微观观察两类。宏观观察是基础；微观观察是进一步的深入研究。

宏观断口观察由目视或低倍实体显微镜进行，后者的放大倍数由数倍到数十倍，可用于观察凹凸不平的断口表面。扫描电子显微镜虽然是微观观察的设备，但是也可以在20倍左右观察和照相。目视和低倍观察比较直观，有利于了解整个断口的全面情况。

宏观断口上有五项要素可供观察：粗糙度、线纹、色泽、倾斜度（断口面与最大主应力间夹角）、材料缺陷。进行宏观断口观察力争达到下列目标：①判定哪些是首先断裂件；②初步判定断裂类型、裂源位置和裂纹走向；③判断材料的韧性高低和冶金品质；④估计零件所受的载荷种类和应力高低；⑤提供关于失效原因的线索。

(1) 断口粗糙度

断口粗糙度反映断裂过程中材料塑性变形的程度。在正断口（断口面垂直于最大主应力方向）上，有三种典型的粗糙度形貌：①“纤维状”断口；②“颗粒状”断口；③粗糙度较低的平坦断口。“纤维状”断口呈现较高粗糙度，塑性断裂形成这类断口。“颗粒状”断口属于脆性断口，“颗粒”面较平坦，部分面有反光性。低温快速断裂和回火脆性断裂形成这类断口。粗糙度较低的断口比较平坦，反映断裂过程中塑性变形较小，某些脆性断裂和疲劳断裂形成这类断口。低周疲劳的应力水平较高，其断口粗糙度也较高，接近于“纤维状”断口的情况。斜断口（近似平行于最大切应力方向）的粗糙度较低，这是剪切断裂形成的，但是属于塑性断裂。

(2) 断口上的线纹

断口上的线纹是裂纹扩展过程中形成的，分为两类：①垂直于裂纹扩展方向的线纹，主要指疲劳弧线；②代表裂纹扩展方向的线纹，即放射纹和人字纹。

疲劳弧线又称海滩花样（图16.1-4），是疲劳断裂的一种宏观断口特征，由零件载荷谱变化而形成。每条弧线代表某时刻裂纹前沿线的位置，并且垂直于裂纹扩展方向。在疲劳裂纹扩展试验中发现，施加一次较大过载会造成裂纹扩展受阻滞，并在宏观断口上留下一条线纹（图16.1-5）。

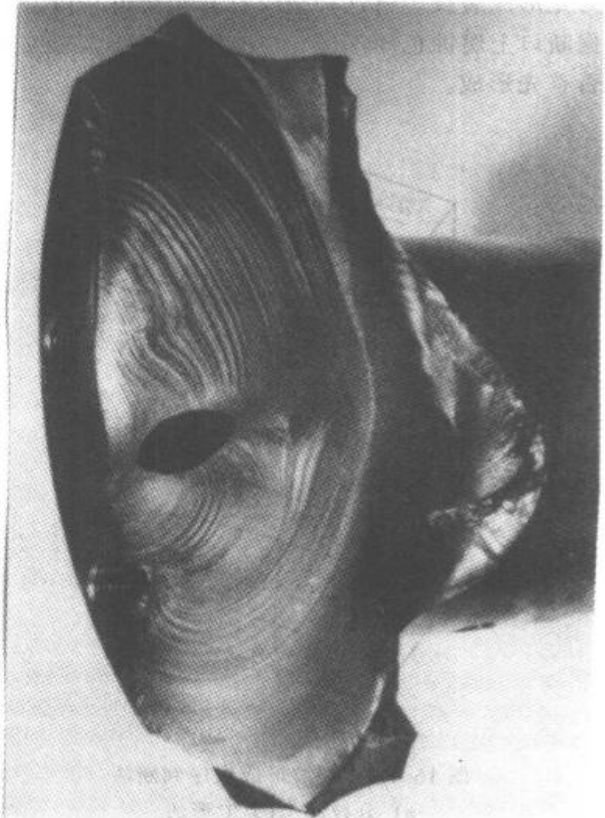


图 16.1-4 中碳钢曲轴疲劳断口上的疲劳弧线，疲劳源区位于左边中部，疲劳扩展区较大

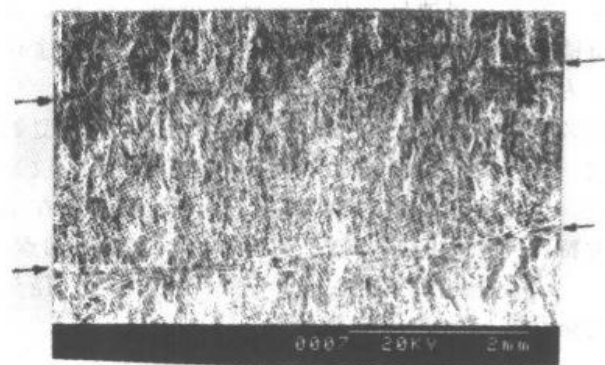


图 16.1-5 硬铝合金疲劳试验断口，两次拉伸过载形成两条疲劳弧线

放射纹是从裂源附近放射出的一组线纹，也称放射花样。它是由于相邻区裂纹面处在不同水平上而形成的撕裂带。裂纹扩展越快，放射线纹越清晰明显。脆性断口上常有明显的放射纹；疲劳断口和塑性断口也可能有较短的放射纹。

当零件厚度较小和裂纹高速扩展时，宏观断

口上常呈现人字纹花样，大量人字形线纹有规律地排列成行（图 16.1-6）。钢板零件冷脆断裂和压力容器爆炸时，常形成这类线纹。实际上人字纹是放射纹的变种，两者形成原因相同。顺着人字形头部方向可以追溯裂纹源位置，逆向为裂纹扩展的宏观方向。

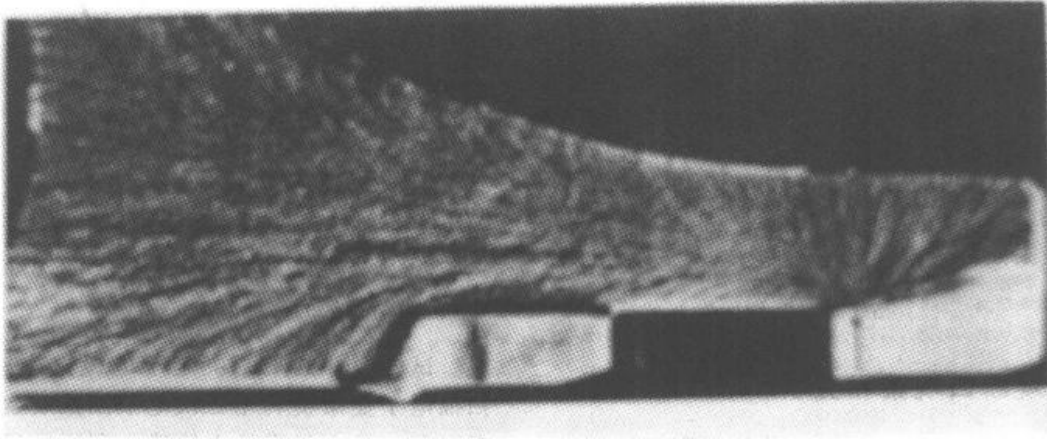


图 16.1-6 真空熔炼 4335 钢（屈服强度 1 310 MPa）零件脆性断口上的人字纹花样，裂源位于卡槽的尖拐角部位（箭头所示），人字纹指向裂源

（3）断口色泽

塑性断口较粗糙而色泽较暗，常呈暗灰色；脆性断口常呈浅灰色。

断口的特殊色彩由高温氧化形成，据此可以初步判断零件断裂时的温度。

如果局部断口的腐蚀色远深于其他部分，说明它是陈旧裂纹，形成在先，或者形成于制造过程中，有可能是零件失效原因之一。

（4）断口面的倾斜度

断口面倾斜度分为两类：正断口与零件的最大主应力方向相垂直；斜断口又称剪切唇口，呈近似 45° 倾角，平行于最大切应力方向。斜断口属于剪切断裂；正断口是拉应力导致的断口。

脆性断口基本上为正断口，其剪切唇口很小。塑性断口常有正断口和剪切唇口两部分。剪切唇口位于零件边缘，是最后断裂部位，可以反向推断断裂起源位置。剪切唇口区侧边常有缩颈现象。

断口上剪切唇口区的宽度代表材料的断裂韧性的 高低，中低强度钢常形成较宽的剪切唇口，超高强度钢形成较窄的剪切唇口。

另一种塑性断口是单一的剪切断口，无正断口。

在失效分析的初步检查阶段，要判断首先断裂件。如果发现有脆性特征的断口，该零件应作为优先怀疑对象；其他属于塑性断口的零件常常是被动破坏件。如果发现有疲劳特征的断口，更应作为优先怀疑对象，进一步仔细检查。

图 16.1-7 是典型的塑性断口和疲劳断口示意图，表示出宏观断口上的各区域和线纹，点影区域代表“纤维状”断口，表面粗糙度较高。光滑圆试件拉伸的塑性断裂，起始于中心区，为“纤维状”断口，断口面垂直于拉应力方向，断口可能不存在或存在粗放射线纹；周边为剪切唇口区。疲劳断口分为疲劳源区（箭头所示）、疲劳扩展区（具有海滩花样）和瞬时断裂区（“纤维状”）三部分。扩展区和瞬断区均可能存在或不存在放射线纹，瞬断区最边缘处也可能存在剪切唇口。

（5）断口显现冶金缺陷

在冶金生产中，经常采用打断口的方法来显现各类冶金缺陷。

在机械零件失效分析中，有时也会遇到这种缺陷显示。例如，疲劳或脆性断裂起源于大块夹杂、铸造缺陷和焊接缺陷，会显示在宏观断口上。小的缺陷和夹杂，只能显示在微观断口上。

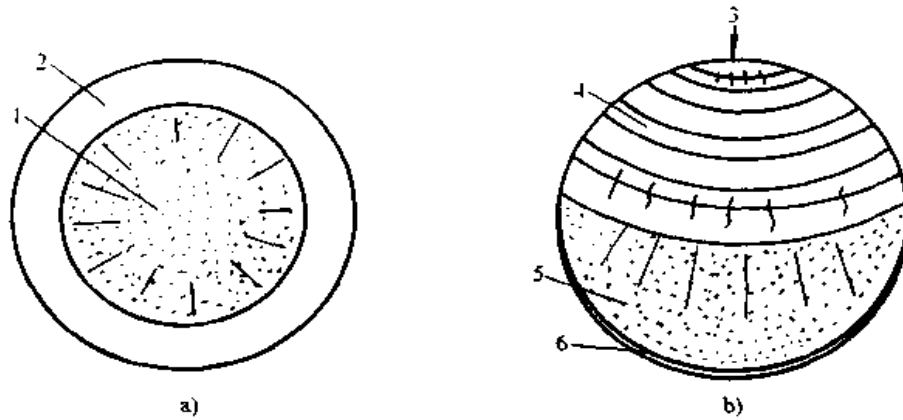


图 16.1-7 宏观断口示意图

a) 拉伸塑性断裂 b) 疲劳断裂

1—“纤维状”断口区 2—剪切唇口区 3—疲劳源区 4—疲劳扩展区

5—瞬时断裂区中的“纤维状”区 6—瞬时断裂区的剪切唇口区

4.3 微观断口观察和分析

光学显微镜的景深很短，即使观察粗糙度较低的疲劳断口，所获得图像也极其模糊，而且放大倍数有限（一般低于 800 倍），因此它很少用于微观断口观察。

微观断口观察通常使用电子显微镜，包括透射电子显微镜（TEM）和扫描电子显微镜（SEM）。电子显微镜具有长景深、高分辨率和高放大倍数的优点，适用于观察凹凸不平的断口表面，有利于分辨断口的细节。

普通的透射电子显微镜的分辨率可达 1 nm，放大倍数约为 2 000 ~ 30 000 或更高。不能直接观察断口，而是观察断口的复型。常采用二级复型法，第一级塑料复型由醋酸纤维素纸按压断口而获得；将一级塑料复型置于真空镀膜机中进行碳沉积，溶去塑料复型，获得二级碳复型。透射电子显微镜观察碳复型显示的微观断口形貌，分辨率可达 15 nm，图像清晰。另一个优点是在零件断口上复型，不需切割破坏零件。透射电子显微镜的应用有两方面限制：不能进行较低放大倍数（低于 2 000 或 1 000）的观察；复型观察部位很难与实际零件断口部位一一对应。

最广泛应用的是扫描电子显微镜，用于直接观察试样上的断口形貌，以及磨损和腐蚀表面形

貌。试样尺寸的限制决定于电镜试样室的规格。扫描电子显微镜利用二次电子图像观察断口的微观形貌，具有很强的立体感。利用标尺移动，能确定观察点在断口上的具体部位，例如裂源区、源区附近、距源区一定距离的扩展区。常用放大倍数为 20 ~ 10 000 倍，很少采用更高的放大倍数，因为扫描电镜的分辨率低于透射电镜。对断口上的同一视野，可以从低倍到高倍作连续观察和照相，把宏观和微观观察联系起来。

扫描电子显微镜常配有能谱分析仪，可用于定性和定量分析断口微区和第二相粒子的化学成分。

通过微观断口观察和分析，获得各种证据和典型照片，一般都能较准确地确定断裂类型，指出可能的失效原因，有时还能给出关于疲劳裂纹扩展速率和断裂历史的定量描述，对失效分析的成功起到重要作用。

微观观察用的断口试样，事先应妥善保护，防止擦碰、手摸和腐蚀。观察前，试样经过清洗，常用方法是超声波清洗和塑料复型去除脏物；遭受严重腐蚀或氧化的断口，需要进行化学清洗。

在失效分析报告中，常选用几张微观照片来说明结论性意见。必须注意，所选照片应具有代表性，还要注明照片取自断口的哪个部位。

第2章 机械零部件各种失效类型的特征

机械零部件的失效类型可以分类如下：①变形失效；②塑性断裂；③脆性断裂；④腐蚀失效；⑤环境促进断裂；⑥磨损失效；⑦高温失效；⑧老化。各类失效均有其产生条件、特征和判断依据。

1 变形失效

变形失效是指零部件产生不正常的变形，导致不能承受其载荷、不能执行其功能或干扰其他零件正常工作。

不正常变形主要指塑性变形。偶尔也有过量弹性变形的情况；高温下也可能形成蠕变变形。

变形失效是自证明的，零部件产生尺寸改变或形状改变。但是，失效分析人员面对的是复杂的变形失效情况。例如汽车发动机阀杆的弯曲变形，直接原因是活塞撞击阀头。但是其具体原因可能有下列几种：不良润滑；阀弹簧腐蚀弱化和断裂；弹簧强度不足；发动机多次超过极限转速造成簧圈间撞击而随后疲劳断裂。只有仔细地考虑全部证据，才能找到真实的失效原因。

变形失效的常见原因有三方面：过载，材料和制造工艺的技术要求错误或实际执行错误。

每种机械设备和结构都有其极限载荷，被认定为安全和可靠的界限。外界载荷超过这个极限值，即为过载。过载时常导致某些零件变形或断裂失效。

极限载荷的计算是设计的重要环节。设计中出现重大失误或使用中操作不当，都可能产生零部件过载和变形失效。

细长杆件和薄壁零件承受轴向压缩载荷时，有失稳现象。压缩载荷超过失稳的极限载荷，零件产生弹性弯曲或塑性弯曲变形。薄壁工字梁和薄壁管零件承受弯曲加载时，设计中经常忽视对承受压应力一侧进行失稳极限应力的考虑，导致使用中产生变形失效。

薄壁压力容器能承受较高的内压作用。如果出现反常的工况，内部形成负压，即使很低的负压，也可能产生压力容器压塌。这也是在压缩应

力下失稳变形失效。

材料和制造工艺不当也是零部件使用中变形失效的重要原因。这主要一是设计人员选择材料错误，或者对制造工艺未提出正确的技术要求。二是制造过程中或修理更换零件未满足设计的技术要求。

材料选择错误或材料误用的事件时有发生，而更多的是热处理技术条件的制定和执行不当。应该淬火和回火处理获得较高强度的钢材，未经热处理，或者采用了错误的热处理制度和方法，这是最常见的早期失效原因。例如航空用压紧卡子，由高碳钢经淬火和回火制成，正常硬度为46HRC，显微组织应为回火马氏体；失效件较软(28HRC)，显微组织为铁素体、粗珠光体和回火马氏体混合组织，使用中不能起到压紧作用。这是由于热处理操作中零件或堆装放而造成的淬火不充分。

2 塑性断裂和脆性断裂

断裂失效分为三大类：①单次加载造成的断裂，即塑性断裂和脆性断裂；②循环加载造成的断裂，即疲劳断裂，其断裂过程与载荷循环次数有关；③环境促进断裂，例如应力腐蚀断裂，其断裂过程与载荷和环境共同作用时间有关。

2.1 塑性断裂的基本特征

塑性断裂又称韧性断裂，应力水平高于屈服应力，达到材料的强度极限而发生断裂。断裂前产生明显的宏观塑性变形，局部截面（或厚度）缩小而形成缩颈现象。这种宏观塑性变形在断裂前即可观察到，它能起到失效预警的作用；并且塑性断裂不形成爆破碎片伤人，因而它对整台机器和周围环境的危害性比脆性断裂事件小一些。

机械工程使用的多数金属材料均具有一定的塑性。光滑圆柱试件拉伸试验时，先在局部区域产生缩颈现象，然后在缩颈部位断裂，形成杯锥状断口外貌（图16.2-1a）。对缩颈区截面上塑性应力分布的研究表明，截面中心的应力水平最高，

并且存在三轴拉伸应力状态。因此中心首先开裂，裂纹由中心向边缘扩展。在截面中部区域（即杯底或锥顶）形成正断口，垂直于拉应力方向，宏观上为“纤维状”断口，当裂纹扩展较快时在断口上有放射纹。裂纹最后扩展到边缘区域，材料处于平面应力状态，发生剪切断裂，形成剪切唇

口（即锥边）。剪切造成的断口表面比较平坦。

薄板试件拉伸试验时，边缘和中心均处于平面应力状态，不利于形成正断口，在缩颈后形成单一的剪切断裂外貌。对于某些变形铝合金和冷作硬化钢材，其抗剪强度相对偏低，拉伸时易形成这种单一的剪切断口。

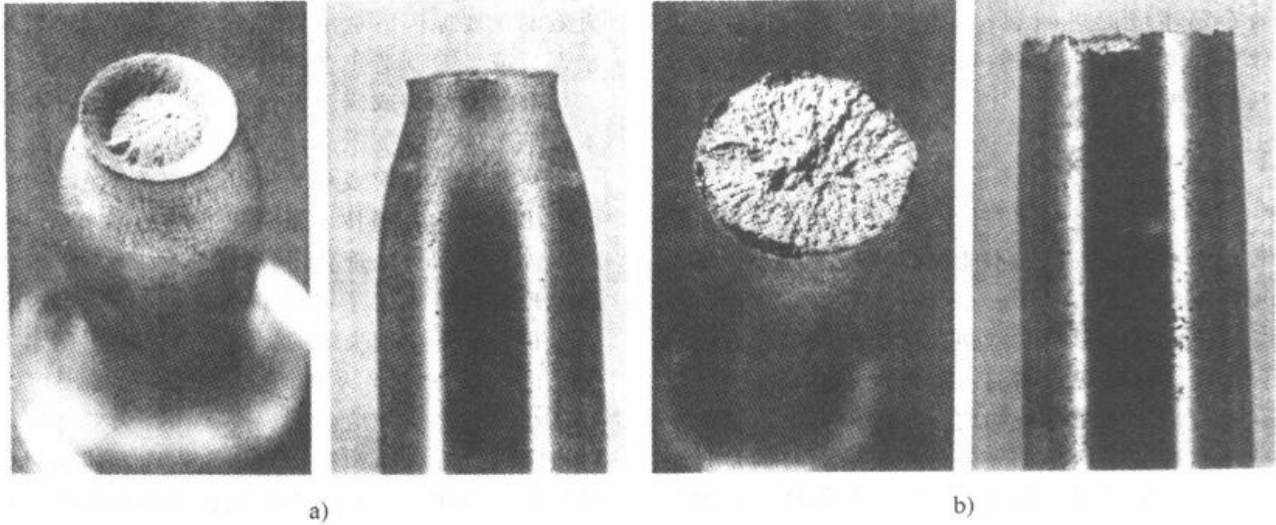


图 16.2-1 拉伸断裂的外貌
a) 塑性断裂 b) 脆性断裂

塑性断口的微观形貌为普遍的大面积的韧窝。“纤维状”断口区和剪切断口区两者的宏观外貌虽然不同，但是它们的微观形貌均为韧窝。前者以等轴形韧窝为主，后者较多为拉长形韧

窝。在扫描电子显微镜下，放大 300~1 000 倍，即可观察到韧窝形貌（图 16.2-2）；更高的放大倍数有利于观察细节，例如韧窝中的残留粒子和韧窝边沿的滑移痕迹（图 16.2-3）。

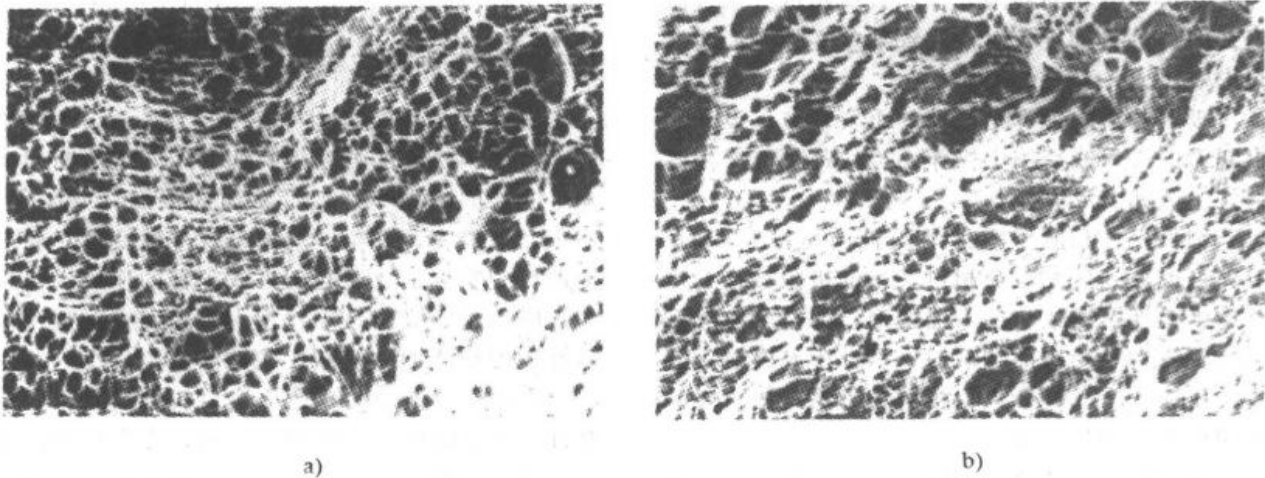


图 16.2-2 塑性杯锥断口的韧窝形貌（SEM）
a) 中心部位 b) 剪切唇口部位，650×

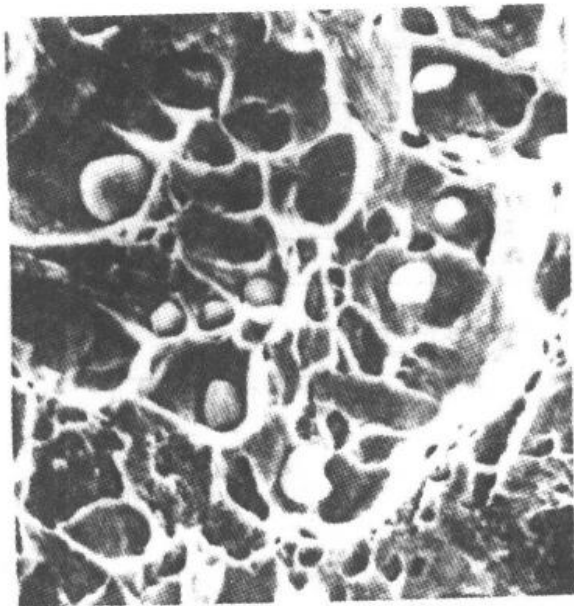


图 16.2-3 韧窝形貌 (可见硫化物夹杂),
SEM, 5 000 ×

韧窝的形成与材料中的夹杂物 (和大尺寸第二相) 有关。纯金属中杂质含量极微, 塑性极高, 拉伸形成缩颈, 缩到极细小直径, 形成针尖形断裂。在针尖断口上观察不到韧窝, 或者只有 1~2 个韧窝。商业用钢和合金均含有少量杂质元素, 它们却能形成数目巨大的夹杂物, 影响韧窝形成的夹杂物的尺寸较大 (约 $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$), 例如钢材中的 MnS 、 $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{S}$ 和碳化物等, 硬铝合金中的含硅、铁的金属间化合物等。在用扫描电子显微镜观察韧窝形貌时, 可以利用配套的波谱仪分析其中夹杂物粒子的成分。

韧窝形成机理是微孔形核、长大和相互联结。首先, 夹杂物粒子附近的塑性应力集中导致粒子-基体界面分离或粒子断裂, 形成微孔; 随后微孔附近基体进一步塑性变形 (滑移), 微孔长大; 最后微孔互相联结, 形成韧窝形貌。

判断零件是否属于塑性断裂, 首先以其宏观特征作为依据。塑性断裂的宏观特征是缩颈现象、“纤维状”断口和较多的剪切唇口, 它们都是宏观塑性变形的标志。

塑性断裂的微观断口特征是普遍的大面积的韧窝形貌。利用韧窝形貌来判断断裂性质时, 必须十分谨慎。韧窝形貌只是微区塑性变形的标志, 不能代表宏观上属于脆性或塑性断裂。仅当在断口的各区域大量视野中普遍地观察到大面积

韧窝时, 才能判断为塑性断裂。即使如此, 也要参考宏观外貌特征。疲劳断口和脆性断口上也常观察到韧窝形貌, 但是它们不具有普遍性, 也不是这两类断口的典型微观形貌。

在失效分析中, 塑性断裂主要指过载断裂, 即载荷过高, 零件所承受的应力水平超过了材料的强度极限。过载断裂的原因有三方面: ①设计和制造中的严重失误, 如材料选择错误, 对载荷估计错误, 该进行的热处理被遗忘等; ②在设计和制造大体正常的情况下, 过载断裂常常与使用操作不当有关; ③由其他相关零件先期失效而被诱发产生本零件的过载断裂, 本零件属于被动破坏件, 应该优先查明先期失效零件的原因。

2.2 韧性脆性转变

低碳和中碳钢具有良好的塑性和韧性, 但是在低温下呈现脆性断裂。缺口和冲击加载两因素能促进这种低温脆性断裂。

著名的早期低温脆断案例是发生在 1945~1953 年的美国 250 艘焊接油轮损坏和 19 艘折断事故。油轮由低碳钢板焊接制成, 这是首次大批将铆接工艺改为焊接工艺。收集的基本证据如下: ①所有事故都发生在冬季, 静海 19 艘船钢板温度平均 -3°C , 北海 90 艘船 5°C ; ②脆性裂纹扩展速度 $1\,500 \sim 2\,000 \text{ m/s}$, 达到 0.38 倍声速; ③断口面垂直于板面, 宏观断口呈“颗粒状” (微观为解理形貌), 有指向裂源的人字纹; ④断口附近塑性变形小, 板厚减薄不超过 3%; ⑤裂源位置是结构上的缺口, 焊接缺口 (鱼鳞, 未焊透) 和缺陷 (热影响区, 气割边缘); ⑥折断的甲板应力约为 70 MPa , 仅为材料屈服强度的四分之一; ⑦失效油轮的就航时间短。1953 年的失效分析结论是两条: 设计不完备, 工作不良; 钢材的低温缺口脆性。对此, 在冶金、焊接和设计方面做出相应的改进。例如, 在冶金方面, 限 (制) 碳增锰 (含量); 加铝固 (定) 氮, 减小晶粒度等, 有效地降低了钢材的韧脆转变温度, 有利于防止冷脆断裂。

一般使用缺口试件冲击试验来显示钢的韧性脆性转变。在不同温度下试验, 测定断裂过程吸收的能量 (冲击功), 代表钢材的韧性 (图 16.2-4)。图中分成三区, 上平台部分为塑性断裂区, 断口呈“纤维状”; 下平台部分为脆性断裂区,

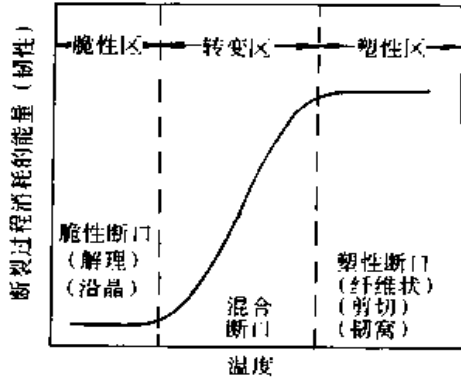


图 16.2-4 温度对金属材料韧性影响示意图

断口呈“颗粒状”；中间斜线部分为混合断裂区。在斜线上取某一点，作为韧性脆性转变温度 T_T 。研究上常以“纤维状”和“颗粒状”断口各占 50% 作为标准，所确定的韧脆转变温度称为 FATT。工程上常以冲击功值为标准，例如以夏氏 V 形缺口试样冲击功 $CVN = 20J$ 或 $27J$ 作为标准，所确定的韧脆转变温度分别称为 T_{TV20J} 和 T_{TV27J} 。零件的工作温度高于韧脆转变温度时，一般不发生低温脆断。图 16.2-5 是一种低碳钢的夏氏冲击试验结果，其 $FATT = 25^\circ C$ ， $T_{TV27J} = -30^\circ C$ 。

中、低碳钢低温脆断的微观断口形貌为解理断裂（图 16.2-6）。解理断裂是沿着特定的晶体学平面的穿晶断裂，断裂过程需要的能量较低。

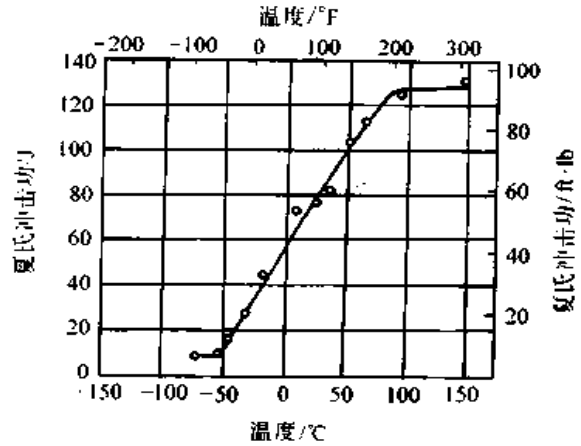


图 16.2-5 一种低碳钢的夏氏 V 形缺口冲击功-温度关系

在体心立方、密排六方、离子键和共价键晶体中都可观察到解理断裂；铝、铜和奥氏体不锈钢具有面心立方的晶体结构，一般不发生解理断裂。低碳钢具有体心立方晶体结构，主解理面为 $\{100\}$ 晶面族。多晶体每个晶粒的解理面位向不同，图 16.2-6b 是图 16.2-6a 的放大，可见到数个晶粒的不同位向的解理小面。解理裂纹由晶粒 A 越过晶界进入晶粒 B 时形成解理台阶，在晶粒 B 中形成河流花样，它是低温脆断的特征形貌之一，并且指出了微区裂纹的扩展方向。

低温脆性断裂的另一种微观形貌是沿晶脆性

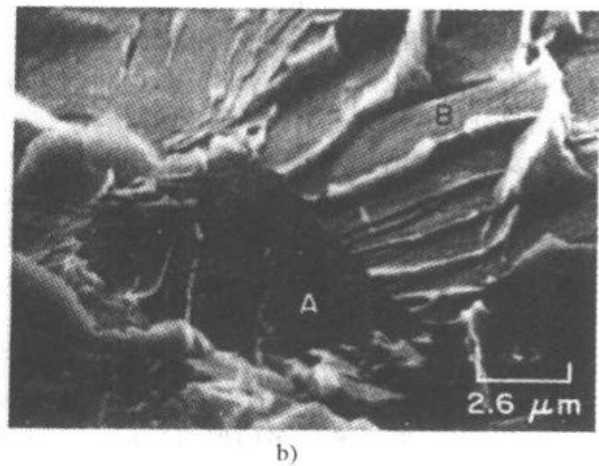
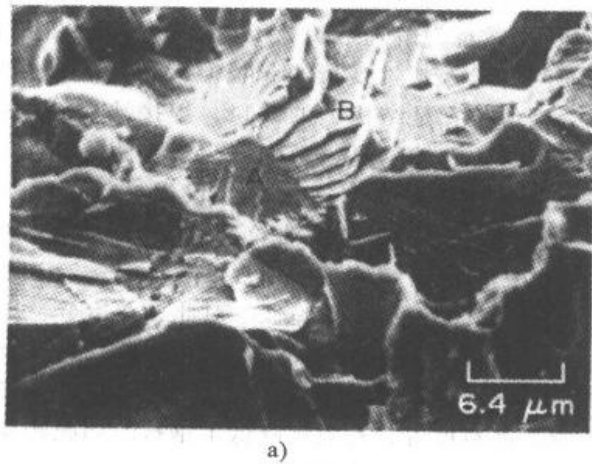


图 16.2-6 热轧碳钢在 $-196^\circ C$ 缺口冲击断裂的解理断裂形貌 (SEM)

a) $1500\times$ b) $3900\times$

断裂，显示为平坦晶界面的颗粒形貌。

以上是指中低强度钢的情况。对于高强度 ($\sigma_b > 690 \text{ MPa}$) 钢，其韧性脆性转变曲线较平

坦，上平台韧性值较低，上平台韧性高低是更重要的问题。其低温脆断的微观断口形貌一般不是典型的晶体学解理。

2.3 脆性断裂的基本特征和分类

图 16.2-1b 表示光滑试件拉伸脆性断裂的外貌特征，没有缩颈，没有或只有很少剪切断裂形成的唇口，有明显的由台阶或撕裂棱构成的放射线纹（或人字纹），断口面垂直于拉应力，断口粗糙度较小。图 16.2-1b 与图 16.2-1a 的对比，显示出脆性断裂的巨大差异。这些断口外貌特征是判断脆性断裂的基本依据，它是各类脆性断裂的共同特征。

塑性是材料的一项基本性能，它受到内部和外部因素的影响。内部因素指材料的化学成分、晶体结构、冶金品质和显微组织，相同化学成分的钢，其冶金缺陷可能严重或轻微，经过不同热处理可能达到不同显微组织，由此可能导致脆性或塑性断裂两种不同类型。外部因素指试验温度、加载速度（应变速率）、应力状态和环境四个方面。低温导致中低强度钢脆性断裂，高温下的变形和断裂另有特点。冲击加载和爆炸加载（极高应变速率）常常导致材料脆化（有例外情况）。应力状态指拉应力和压应力，脆断是由拉应力导致材料分离。三轴拉应力状态是最“硬”的应力状态，塑性变形困难，材料塑性降低，有利于发生脆性断裂。三轴拉伸加载试验的设备和试件都很复杂，实践中由缺口试件拉伸来代替。由弹性力学知，缺口试件拉伸时，缺口尖端有应力集中，不仅拉应力水平激增，而且尖端附近形成横向拉伸应力，会形成三轴拉伸应力状态。在厚试样尖缺口附近，这种三轴拉伸应力状态尤其明显，在断裂力学中也称为平面应变状态。低碳钢光滑圆柱试样，拉伸试验显示为典型的塑性断裂特征，塑性极高；但是，如果试件具有环形尖缺口，则拉伸试验显示为明显的脆性断裂特征，无缩颈，全部正断口，无剪切唇口，塑性极低。这是由三轴拉伸应力状态导致脆化的例子。

依据脆化的主要原因，脆性断裂可分为五类：①低温脆性断裂；②高速加载断裂和爆炸断裂；③裂纹体脆性断裂和缺口（或缺陷）导致的脆性断裂；④材料脆化造成的断裂；⑤环境脆性断裂。这种分类突显出造成脆断的主要原因，实际失效案例中要确定脆断的主因（类型），也要确定其他脆化因素的影响。各类脆性断裂具有某些共同特征，也有其各自的具体特征。

判断低温脆性断裂，有下列特征：

- 1) 脆性断裂外貌，即无缩颈、正断口（无剪切唇口）；应力水平低于屈服应力。
- 2) 裂纹扩展速度极高，导致宏观断口上明显的人字纹（或放射纹）。
- 3) 宏观断口呈“颗粒状”，微观断口形貌为较多的解理和河流花样，属于穿晶脆性断裂。
- 4) 零件的工作温度低于韧脆转变温度，失效案例常发生在冬季和寒冷地区。
- 5) 裂纹源区都存在某种缺口因素（构造缺口、工艺缺口和缺陷），也常常存在冲击加载的诱发因素。

冲击加载的高应变速率促使钢的韧性脆性转变温度升高，断裂能量-试验温度曲线右移（图 16.2-7）。缺口造成的三轴拉伸应力状态也起到与高应变速率相同的作用，促使钢的韧性脆性转变温度升高。例如，某种低碳钢光滑试件静拉伸时，半“纤维状”半脆性断口所表示的韧性脆性转变温度约为 -35°C ，零塑性（全脆性）温度为 -130°C ；当夏氏 V 形冲击试验时，转变温度和零塑性温度分别为 25°C 和 -55°C 。即缺口和冲击加载的共同作用，使钢的韧脆转变温度增高约 60°C 。

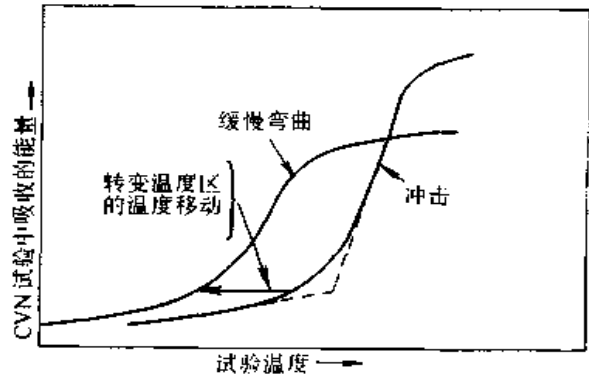


图 16.2-7 冲击弯曲和缓慢弯曲的断裂能量-试验温度曲线

中低强度钢具有显著的应变速率敏感性，高应变速率限制了材料的塑性变形，易导致脆断。压力容器和锅炉爆炸造成高速加载，零件裂成数大块和许多碎片，由高速扩展而形成的宏观断口上的人字纹（或放射纹）极其明显，微观断口的解理形貌也较普遍。虽然其脆断特征很明确，但是还必须进一步查明爆炸的起因，一方面是否有超装、过热等非正常工作历史，另一方面查明裂

纹源区的性质, 是否存在预裂纹(应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹或工艺裂纹), 是否存在缺口和缺陷, 是否存在外伤。

裂纹体低应力脆性断裂是指零件或试件存在预裂纹的情况, 采用断裂力学方法来处理。高强度钢和合金的断裂韧性较低, 很短的预裂纹就可能导导致低应力脆性断裂。表 16.2-1 中列出高强度钢、超高强度钢和超硬铝(7A04-T6)的屈服强度和平面应变断裂韧性(K_{Ic}), a_c 是快速扩展的临界裂纹尺寸, 取设计应力等于 50% 屈服应力而计算获得。表中还给出低碳钢的数据作为参考, 在正常条件下其临界裂纹尺寸很长。对于高强度、超高强度钢和铝合金的裂纹体脆性断裂的零件, 其宏观断口显示出脆性断裂的基本特征, 断口粗糙度也较低。但是其微观断口形貌为大量韧窝, 脆性仅表现在韧窝较浅; 在钢的断口上有时观察到准解理形貌, 也是脆性的表现; 不存在解理形貌, 个别视野观察到的解理形貌是由钢和合金中脆性第二相和夹杂物断裂形成的, 与基体金属无关。失效分析时, 首先测量裂纹尺寸, 利用资料中的性能数据或者从失效零件上截取试件进行性能试验, 估算确定这种尺寸的裂纹是否足以导致低应力脆断; 然后查明预裂纹的类型和形成原因。虽然这种预裂纹很小, 但是它却起决定作用。如果是使用中形成的疲劳裂纹或应力腐蚀裂纹, 则整个失效类型应归为疲劳断裂或应力腐蚀断裂。预裂纹也可能是制造过程中形成的工艺裂纹或类裂纹, 如淬火裂纹、磨削裂纹等, 检验工序中漏检, 不合格零件投入使用。类裂纹是指起到裂纹作用(隔离金属材料)的工艺缺陷和冶金缺陷, 一般是线状缺陷或密集缺陷呈线状分布, 例如锻造折叠、钢材中白点缺陷等。

表 16.2-1 钢和铝合金的屈服强度和断裂韧性

材料种类	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$K_{Ic}/\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	a_c/mm
30CrMnSiNi2A (淬火和低温回火)	1600	80	1.2
30CrMnSiNi2A (淬火和高温回火)	1000	108	5.3
低碳钢	240	160	200
超硬铝 7A04-T6	500	24	1.1

2.4 材料脆化

铸铁和多数铸铝合金的塑性很低, 不用于承力零构件。它们的光滑试件拉伸即呈现脆性断裂外貌; 但是其宏观断口粗糙度较高, 是由铸造缺陷和粗大晶粒所造成。

结构用钢材一般具有较高的塑性和韧性, 但是某些热处理或热过程能使钢材脆化, 导致脆断。钢材脆化的种类较多, 并随钢材成分和性能而有所不同: ①低碳钢的时效脆性和应变时效脆性; ②低合金钢的 400~500℃ 回火脆性; ③高强度合金钢的回火马氏体脆性; ④钢的过热; ⑤焊后去应力退火脆性; ⑥铁素体不锈钢的 400~500℃ 脆性; ⑦奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢高温(560~980℃)长时间保持形成的 σ 相脆性。

低碳钢(含碳 0.04%~0.12%) 在 560~700℃ 加热和快速冷却后, 在室温(或稍高温度)下会缓慢地发生时效反应。过饱和固溶于铁素体中的碳沉淀在位错处, 使钢的强度增高和塑性降低, 称为时效脆化。少量冷变形加速这种时效反应。

400~500℃ 回火脆性又称为第二类回火脆性, 是在(375~575)℃(尤其 400~500℃)温度范围内保持或者在更高温度加热后慢冷通过该温度范围时造成的。例如 600℃ 高温回火后空冷, 会导致回火脆性。含锰少于 0.3% 的碳钢不产生回火脆性; 含锰、铬、镍的合金钢易产生回火脆性; 铬镍钢中加钼能抑制回火脆性。回火脆化钢的塑性并不降低, 室温缺口冲击试验也常常不能检测出来。检测回火脆化钢的方法是在不同温度下缺口冲击试验, 获得冲击功(或冲击韧性)-试验温度曲线, 由此确定其韧性脆性转变温度。回火脆化钢的韧脆转变温度比正常钢的高出很多, 例如高出 100~300℃。回火脆性断裂的宏观断口呈“颗粒状”, 微观形貌为脆性沿晶断裂。回火脆性的机理是杂质元素铋、磷、锡、砷等偏聚在原奥氏体晶粒边界上, 弱化和脆化晶界。使用俄歇谱仪测定晶粒表面二三个原子层厚度内成分, 发现铋、磷等杂质的含量比钢中含量增高几十倍或一百倍以上, 证明了回火脆性的机理。商业用钢中总会含有这类微量(如 100×10^{-6})杂质元素, 在 400~500℃ 温度保持过程偏聚于晶界, 锰、铬、镍元素能促进这种偏聚。

把钢重新加热到 600℃ 以上，再快速冷却到 300℃ 以下，就可以基本上消除这种回火脆性，因而也称为可逆回火脆性。

回火马氏体脆性又称为第一类或不可逆回火脆性，超高强度低合金钢淬火和低温（200～370℃）回火而形成。进行室温冲击试验即可加以检测，冲击韧性极低，形成沿晶脆性断裂。其机理尚不够清晰，渗碳体小片沉淀在原始奥氏体晶界是重要因素，铋、磷等微量杂质元素也有一定的影响。

钢材过热是加热到约 1 300℃ 高温和缓慢冷却而形成。常常发生在锻造温度过高和变形较小的情况下。过热钢材在高于韧性脆性温度的条件下，断裂途径为沿原始奥氏体晶界，冲击韧性也降低。钢中 MnS 在高温溶入奥氏体中，冷却过程中沉淀在晶界面上，导致沿晶韧窝断裂。扫描电子显微镜在较低放大倍数下即可观察到断口的沿晶断裂形貌，晶粒很粗大。较高放大倍数下观察到晶界表面的浅韧窝形貌，韧窝以沉淀晶界的 MnS 等夹杂物为核心。这是晶界沉淀造成的晶界弱化和沿晶韧窝断口，它不同于回火脆化钢的沿晶脆性断口。

2.5 环境促进脆性

环境促进脆性是指环境作用造成材料脆化，及环境和应力作用造成脆性断裂。脆化环境分为四类：①特定的弱腐蚀性环境，导致应力腐蚀断裂；②内部或外部氢环境，导致氢脆和氢损伤；③液体金属环境，导致材料脆化；④中子辐照，导致材料脆化。

内部氢环境指钢中有较高的氢含量。钢材中的氢含量与冶金过程有关；零件中的氢含量也与制造过程有关。外部氢环境指零件工作环境的氢和硫化氢。

氢进入钢中，首先是在熔炼过程中，未烘干的原料中含有水分。氢在纯铁中的平衡溶解度，熔化状态下高于 27×10^{-6} ；室温下仅为 0.04×10^{-6} 。熔化时钢中的高氢含量，在凝固和冷却过程中可能保持下来，即氢过饱和固溶在钢材中。钢材中的高氢含量（ $5 \sim 10 \times 10^{-6}$ 或更高）可能导致氢损伤，或以后造成氢脆断裂。

钢材中的氢损伤有两类：白点和氢蚀，都属于严重的冶金缺陷。使得钢材的拉伸塑性和冲击

韧性显著降低（表 16.2-2）。白点是由冷却过程中内应力造成的圆斑形内裂纹缺陷。氢蚀是由于钢中氢与渗碳体发生化学反应，生成甲烷气而导致晶界气泡（或裂纹）。

表 16.2-2 白点缺陷对 40CrNiMoA 钢
（调质状态）力学性能的影响

缺陷情况	σ_t /MPa	δ /%	a_K /J·cm ⁻²
正常钢材	>1 000	>10	>80
带白点钢材	60~600	0.4~1.6	34~53

在零件制造过程中氢进入发生在下列工序：电镀、酸洗、保护气氛（含氢）热处理、焊接。

电镀和酸洗是氢进入钢中的重要环节。电镀过程中在被镀零件（阴极）上发生析氢反应，酸洗过程的电化学反应也形成氢。原子氢具有极高活性，首先吸附于零件表面，随着进入表层和内部，导致放置期间或使用中氢脆断裂。

高强度钢对这两道工序要特别审慎，工序后常要进行除氢处理，例如 180～200℃、8～24h。某些钢种甚至禁用电镀或酸洗工序，或者改进酸洗溶液。

氢脆断裂有三个必要的前提条件：

1) 钢中含氢量较高或零件工作在氢环境中。钢中含氢量由定氢试验测定，并查明何种制造工序造成氢进入。

2) 承受拉应力和长时间保持。拉应力可以是外应力，或者残余应力。氢脆断裂属于滞后断裂，需要一段时间。实验室中测定氢脆倾向，采用恒载保持长时间（如 100 h），或进行慢应变速率（如 10^{-5} /s 或更低）拉伸。普通拉伸试验和冲击试验显现不出氢脆的影响。

3) 材料对氢脆敏感。钢对氢脆的敏感性随屈服强度水平增加而增高。超高强度的氢脆倾向最高，较低的内氢含量或在氢和硫化氢气氛中工作就有可能发生氢脆断裂。中高强度钢在较高氢含量或硫化氢水溶液中可能发生。中、低强度钢一般只发生氢蚀损伤，仅在高温（高于 200℃）和高压氢环境才可能发生氢脆断裂。除钢外，某些钛合金也具有氢脆倾向。

判断零件失效是否属于氢脆断裂，首先要核实是否满足上述三个前提条件，然后进行断口和裂纹观察。宏观断口外貌符合脆性断裂的基本特征；微观断口形貌有明显的脆性沿晶断裂，也可

以为沿晶和穿晶混合断口形貌。氢脆断裂与应力腐蚀断裂的形貌特征很相近，前者裂纹常为单一的、无分枝，断口上无二次裂纹，断口腐蚀产物少；后者常为带分枝裂纹，微观断口上可见到较多的沿晶二次裂纹，腐蚀产物较多。

液体金属脆性是指正常塑性的金属材料由于覆盖表面的液体金属而被脆化（延伸率降低），以及随后承受拉伸应力时产生脆性断裂。可能导致钢、铝合金和钛合金脆化的液态金属见表16.2-3。

表 16.2-3 液体金属脆化的匹配关系

材料种类	液 体 金 属												
	Hg	Ga	Na	In	Li	Sn	Bi	Cd	Pb	Zn	Te	Sn	Cu
钢	×	×		×	×	×		×	×	×	×	×	×
铝合金	×	×		×		×	×		×	×			
钛合金	×							×					

在机械设备使用和制造过程中发生的液体金属脆性失效案例有下列几方面：

- 1) 易切削钢中含有碲和铅等元素，含铅钢齿轮在感应加热时于铅夹杂处形成裂纹。
- 2) 镀锌的钢和钛合金零件在较高温度服役时由熔化的镉造成裂纹。

3) 钢制真空罐由于采用钢密封而在焙烤服役中形成裂纹。

4) 核反应堆中的锆管由于液态或固态镉而形成裂纹。

5) 由于电镀和沾涂镉、锌和锡造成钢的脆性。图16.2-8是4140低合金钢（44HRC）镀锌

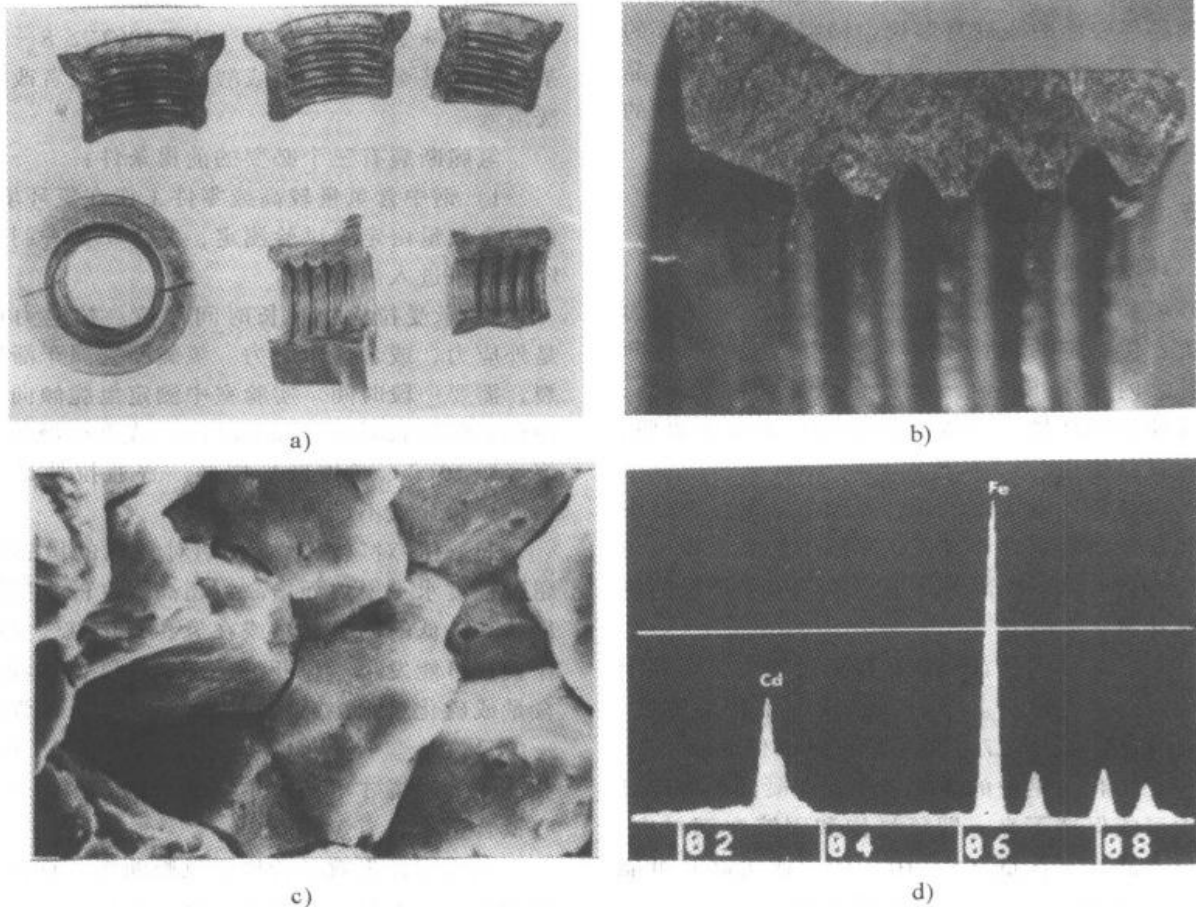


图 16.2-8 低合金钢螺母使用中液体镉脆断裂
 a) 螺母裂成几块 b) 宏观断口呈氧化色 c) 沿晶断裂形貌 (SEM)
 d) 能谱分析显示断口表面覆盖薄镉层

螺母在服役中发生液体锡脆断裂的案例。螺母用于夹紧管道，管道输送从压气机来的热空气(500℃)。断口表面呈紫、蓝和金黄色(图16.2-8b)，显示其工作温度已达到锡的熔点。扫描电镜下呈脆性沿晶断口形貌(图16.2-8c)。能谱分析仪测定，断口表面覆盖薄层锡(图16.2-8d)。因此，确定为液体锡脆断裂。

由于液体金属脆化导致灾难性案例甚多。1975年英国发生一起化工厂爆炸事故。原因是滴落锌接触到直径200mm的316L不锈钢管，液体金属诱发形成脆性裂纹；由锡和锡诱发超高强度钢前起落架支承构件的脆断。以及由接触镀锡弹簧片而诱发高强度钢压气机盘的脆断。其共同点是失效零部件接触表16.2-3中所列的某种低熔点金属，或带有它们镀层；并且工作温度达到该金属的熔点。纯锌、铅、锡、锡的熔点分别为420℃、327℃、321℃、232℃，都是熔点较低金属。商业用金属和合金常具有更低的熔点。

试验表明，低合金高强度钢镀锡件在(260~322℃)易发生锡脆断裂。达到熔融锡状态者属于液体金属诱发脆化。确实有一部分镀锡件始终处在固态锡层状态，温度低于锡层熔点，这种锡脆断裂应归属于固体金属诱发脆性(SMIE)。

液体金属脆化的裂纹扩展有两种情况，一种是裂纹快速扩展，例如速度达到10~100cm/s，属于突发性破坏；另一种是滞后破坏，裂纹逐渐地扩展到临界尺寸才发生最终断裂，甚至也有先期液体金属脆性裂纹和后期疲劳裂纹的案例。

液体金属脆性断裂的微观断口形貌的特征常为沿晶脆性断裂，或者为穿晶脆性断裂。断口上常可检测到存在某种如表16.2-3所示的低熔点金属元素。

受中子辐照后材料强度增高、塑性和韧性降低的现象称为中子辐照脆化。关于脆化的原因，一般认为是中子辐照造成材料内部空位缺陷。

核反应容器用钢的中子辐照脆化，尤其表现为韧性脆性转变温度升高。转变温度升高约170~200℃，取决于中子流量、频率和辐照温度；也取决于钢材的成分和显微组织。高强度钢的零塑性转变温度原本低于低强度钢，因而对辐照脆化的敏感性较小。具有低零塑性转变温度、细晶粒显微组织和较高位错密度的钢，常对中子辐照脆化有较大抗力。辐照脆化使钢更倾向于沿

晶断裂。热处理也影响钢的辐照脆化敏感性，显微组织为回火马氏体时，脆化敏感性较低；为回火贝氏体和铁素体时，脆化敏感性较高。限制钢中铜和磷元素含量及进行真空除气处理，有利于减小脆化敏感性。

3 疲劳断裂

机械零件经受多次循环应力和应变，局部产生渐进性永久变化，导致裂纹或完全断裂，称为疲劳失效(疲劳断裂)。

疲劳断裂是由循环应力(或应变)造成的。只有承受循环载荷的零件，才会发生疲劳破坏。如果循环载荷不存在或者很小，则零件不会发生疲劳断裂。

局部性和渐进性是疲劳损伤和失效的两个特点。疲劳损伤通常发生在零件的局部区域，损伤逐渐积累、裂纹形成和逐渐扩展；在完全断裂前，整个零件在宏观上仍处于弹性变形阶段。因此，疲劳失效常常没有明显的预兆，而是突发性的破坏。

对各种机械破坏事故的统计表明，疲劳破坏(包含腐蚀疲劳、高温疲劳、热疲劳、接触疲劳和微动磨蚀疲劳等特种疲劳在内)常常占首位，约50%~90%。三类机械和结构对于疲劳破坏比较敏感：①运输机械，尤其是高速运动的运输机械，包括飞机、汽车和摩托车等；②焊接构件，尤其是大型焊接构件，包括船舰、近海钻井平台、压力容器、吊车和桥梁等；③动力机械，包括各种高速转动的气轮机、涡轮发动机和汽车发动机等，例如它们的转子、曲轴、连杆、叶片、螺钉和齿轮等。疲劳破坏事故的大量出现与高速机械和大型焊接结构的广泛使用密切相关。

3.1 疲劳裂纹形成和扩展的规律

疲劳断裂过程可分为四个阶段：循环变形损伤；疲劳裂纹形成；疲劳裂纹扩展；最终断裂。

在循环损伤阶段中，尚未形成裂纹，局部区域材料经受微观塑性变形，其位错亚结构和性能发生变化。

疲劳裂纹形成常定义为可检测的宏观裂纹；

疲劳裂纹扩展是从初始裂纹 a_0 生长到临界裂纹 a_c 的阶段。这个阶段受裂纹尖端应力强度因子幅 ΔK 的控制，可用断裂力学方法来处理。

最终断裂发生在裂纹达到临界尺寸的时候, 裂纹尖端最大应力强度因子达到材料的断裂韧性; 或者零件剩余截面的应力水平达到材料的强度。这个阶段只需一次或少数几次循环即可完成, 属于瞬时断裂, 其寿命可以忽略不计。

疲劳寿命(以应力或应变循环次数计)由两部分组成:

$$N_f = N_i + N_p \quad (16.2-1)$$

式中 N_i ——疲劳裂纹形成寿命, 即从开始循环变形损伤累积直到形成尺寸 a_0 的裂纹为止的循环次数;

N_p ——裂纹从 a_0 扩展到临界尺寸 a_c 的循环次数。

在有些研究中, 用显微镜(或电镜)观察到微观裂纹(约 $10 \mu\text{m}$)作为裂纹形核寿命, 随后从微观裂纹长大到宏观裂纹(约 0.8 mm)称为短裂纹扩展, 其规律有别于长裂纹扩展规律。

对于含有宏观裂纹的零件, $N_i = N_p$ 。

对于无裂纹的零件, 裂纹形成寿命常常占据疲劳总寿命的主要部分。统计表明, N_i/N_f 比值在 $0.5 \sim 0.95$ 范围内或更高。该比值随应力水平、应力集中系数和材料强度水平而变化, 也与 a_0 的定义尺寸有很大关系。高周疲劳的应力水平较低, N_i/N_f 比值较高; 低周疲劳的应力水平较高, 该比值减小。应力集中导致裂纹形成加速, 该比值减小。高强度钢光滑试件在较低应力水平(略高于疲劳极限)下试验时, $N_i \geq 10^6$ 次循环, 其 N_i/N_f 比值超过 0.95 , 即疲劳裂纹形成寿命占据总寿命的绝大部分。低强度钢的 N_i/N_f 比值减小。Manson 以 $a_0 = 0.33 \text{ mm}$ 为标准, 试验获得疲劳裂纹形成寿命与总寿命间关系如下:

$$N_i/N_f = 1 - 4N_i^{-0.4} \quad (16.2-2)$$

由于疲劳裂纹形成寿命占据总寿命的相当大部分, 疲劳失效分析时尤其注意观察疲劳源区断口情况。

(1) 疲劳裂纹形成的宏观位置

在均质的金属材料中, 疲劳裂纹通常萌生在试样(或零件)的自由表面上(包括外表面和内表面), 有四方面的原因: ①试件表面存在缺口和微缺口, 缺口造成应力集中, 缺口根部应力最大, 常常成为裂纹萌生位置。微缺口是指加工刀

痕和机械损伤, 也产生应力集中。在疲劳失效分析中, 如果发现疲劳源区有表面粗糙度超标啃刀现象, 或损伤, 不可轻易放过。②承受弯曲或扭转加载的构件, 最大应力点在外表面; 承受内压的压力容器, 最大应力点在内表面。③自由表面的晶粒受晶粒的约束较少, 有利位向的晶粒优先产生滑移变形, 由此萌生裂纹。④腐蚀因素和摩擦因素作用于构件表面。其中第三条更为基本。

在高周疲劳试验中发现, 疲劳损伤仅限于试件表面, 远离表层的金属材料不受循环应力的损伤。从疲劳折断的大试件中心切取试件, 其性能仍代表原始材料的性能。

因此, 疲劳问题首先是表面问题: 要注意表面缺口部位, 要注意表面粗糙度和表面状态。表面强化处理, 例如喷丸、氮化和高频淬火, 都能显著地提高零件(作为整体)的疲劳强度。相反地, 表面软化现象, 例如钢的脱碳和磨削烧伤, 则会降低疲劳强度。

疲劳裂纹有时也萌生在构件的次表层或内部。裂纹萌生于次表层主要是零件经过表面强化处理的情况, 例如表层经过喷丸处理, 造成残余压应力, 疲劳强度提高; 但是次表层由于残余拉应力而成为裂纹起源处。裂纹萌生于零件内部, 常常是该处存在大夹杂物的缘故。

疲劳裂纹萌生的宏观位置有时还与零件表面的各种损伤和缺陷有关, 包括机械损伤、腐蚀坑、微动磨蚀损伤、焊接缺陷、铸造缺陷等。

(2) 疲劳裂纹形核的微观机理

经过精细抛光的疲劳试件表面, 利用显微镜(和电镜)观察裂纹形核的过程。微裂纹形核有三种机理(位置): 表面晶粒的粗滑移带中; 夹杂物(或第二相)粒子界面处; 晶界(或孪晶界)处。

疲劳加载的应力水平一般低于材料的屈服强度, 试件和零件整体上不产生塑性变形。但是, 在微观上, 表面的某些晶粒具有有利于滑移的晶体学位向, 它们会产生滑移(塑性变形)。在循环应力多次作用下, 滑移反复发生, 并且集中在少数滑移带中和产生“挤出”现象(微缺口), 形成粗滑移带。当粗滑移带损伤严重后, 就产生形核微裂纹。这种粗滑移带裂纹形核经常发生在低强度钢、低强度合金和纯钢疲劳的情况。

高强度钢和高强度铝合金疲劳裂纹形核常常

与夹杂物粒子有关。钢中的各种氧化物夹杂，如角形 Al_2O_3 、球形铝酸钙和 $MnO-SiO_2$ 系夹杂等；高强度铝合金中的含铁或硅的夹杂相，这些粒子都可能是疲劳裂纹形核的位置。因此，提高钢和铝合金的纯度，一般能提高疲劳强度。尺寸大于 $5-10 \mu m$ 的夹杂，才成为疲劳裂纹形核源，小夹杂的影响较小。裂纹形核的机理有三种：夹杂物与基体间界面首先裂开；脆性夹杂物自身解理断裂，随后微裂纹扩展进入基体金属中；夹杂物附近基体强烈滑移和产生形核微裂纹。

晶界疲劳裂纹形核发生在几种特殊情况下：循环应变水平较高；材料晶粒粗大；材料的晶界被弱化，例如同火脆性钢材和存在晶界无沉淀区的合金。腐蚀性环境的疲劳和高温疲劳-蠕变交互作用，也倾向于晶界裂纹形核。

(3) 疲劳裂纹扩展规律和剩余寿命估算

疲劳裂纹扩展分为 I、II 两个阶段。随后的第 III 阶段为瞬时断裂。

微裂纹形核于粗滑移带或晶界后，开始 I 阶段扩展，裂纹走向平行于最大切应力方向，即与主应力成约 45° 。这个阶段仅有 $2-5$ 个晶粒。在通常的细晶粒材料情况下，其尺寸仅为几十至几百微米，属于显微短裂纹范围。高强度材料疲劳破坏时，甚至观察不到明显的 I 阶段扩展。在特殊的粗大晶粒材料的情况下，才有较大尺寸的 I 阶段扩展区。短裂纹扩展的规律明显地不同于宏观裂纹扩展规律，其裂纹扩展速率不仅受控于裂纹尖端应力强度因子幅，而且也受控于循环应力水平和应力集中系数。I 阶段扩展区尺寸虽小，但是其裂纹扩展速率极低，例如 $da/dN < 3 \times 10^{-7} mm$ ，因而 I 阶段扩展寿命也可能占据总寿命的相当大部分。

II 阶段扩展区是宏观断口上疲劳扩展区的主体，符合于宏观裂纹扩展规律和机理，断口面垂直于主拉应力方向。裂纹扩展速率与裂纹尖端应力强度因子幅 ΔK 相关；在恒应力幅加载条件下，裂纹扩展速率 da/dN 随裂纹长度加长而增大。在中等 ΔK 区，扩展速率大约在 $2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-3} mm/循环$ 的范围内，并可表示为 Paris 关系：

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (16.2-3)$$

式中 da/dN ——疲劳裂纹扩展速率；

ΔK ——应力强度因子幅值；

C ——系数，由实验数据拟合得到；

m ——指数，由实验数据拟合得到

对于大多数钢和合金， m 值在 $2-4$ 范围内。低韧性材料的 m 值可能很大。

钢的显微组织对于中等 ΔK 区的扩展速率影响较小。低碳钢和低合金结构钢（包括焊缝金属和热影响区金属在内）的扩展速率数据分布在一个窄分散带内，其 Paris 关系为：

$$\text{平均线} \quad da/dN = 4.35 \times 10^{-12} \Delta K^{3.07}$$

$$\text{下线} \quad da/dN = 2.37 \times 10^{-12} \Delta K^{3.07}$$

$$\text{上线} \quad da/dN = 8.07 \times 10^{-12} \Delta K^{3.07}$$

(16.2-4)

式中， da/dN 单位为 $m/循环$ ； ΔK 单位为 $MPa \sqrt{m}$ 。

在疲劳失效分析中，如果发现疲劳裂纹而没有最终断裂，可以利用 Paris 关系近似地估计零件的剩余寿命：

$$\begin{aligned} N_p &= \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{da/dN} = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C \Delta K^m} \\ &= \frac{2}{(m-2)CY^m \Delta \sigma^m} \left[\frac{1}{a_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(m-2)/2}} \right] \end{aligned} \quad (16.2-5)$$

式中取 $\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ ，并假设几何修正系数 Y 在积分限内为常数，例如对于半圆形裂纹 $Y = 2/\pi$ ； $\Delta \sigma$ 为循环应力幅； a 为裂纹长度； a_0 为初始裂纹长度，由测量得到； a_c 为最终断裂前的裂纹长度，可由零件材料的断裂韧性和承受的最大应力计算获得： $a_c = (K_{Ic}/Y\sigma_{max})^2/\pi$ ；如果零件已完全断裂，可从断口上测量获得 a_c 尺寸； C 和 m 是材料常数，并且 $m \neq 2$ 。每种材料由裂纹扩展试验的数据拟合得到 Paris 关系中的系数 C 和指数 m 。当缺乏该常数时，对于普通钢制零件，可近似利用式 (16.2-4) 中数值来估算剩余寿命。

(4) 扩展区断口上的疲劳条带

疲劳条带又称疲劳辉纹，是疲劳断裂的特征性微观断口形貌。在电镜下观察疲劳断口，放大倍数从 $500-20000$ 倍，经常可以观察到疲劳条带形貌（图 16.2-9）。如果失效零件断口上观察到疲劳条带形貌，即可判断为疲劳失效；其他种类的断裂均不可能在断口上观察到疲劳条带。

在各种金属材料的疲劳断口上，都曾观察到

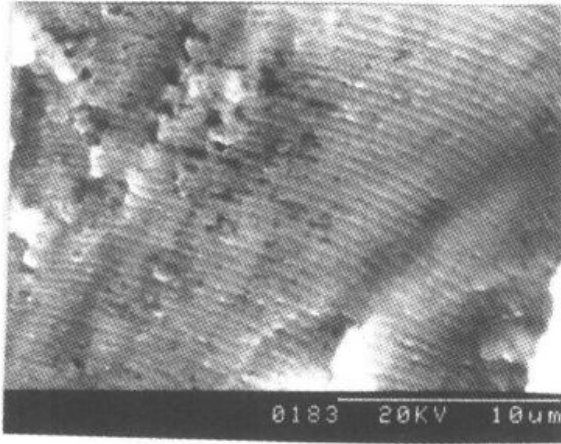


图 16.2-9 疲劳条带形貌 (硬铝合金)

疲劳条带, 尽管其形式和规模上有很大差异。面心立方晶体的金属和合金, 例如铝合金、奥氏体不锈钢、镍基和铁基高温合金, 易形成规则的疲劳条带, 其疲劳扩展区断口上普遍地形成大量疲劳条带。结构钢为体心立方 (或正方) 晶体结构, 其层错能高和易交滑移, 因而高强度钢倾向于形成不规则状的疲劳条带。超高强度钢的疲劳条带更不规则, 更不易观察到, 常常观察多个视野才能找到确切的疲劳条带形貌。但是低强度钢疲劳断口上常能观察到大量的规则疲劳条带。脆性合金和铸态合金也不易观察到疲劳条带。在尼龙和有机玻璃等非金属材料的疲劳断口上, 存在清晰的疲劳条带形貌。

应力状态和应力强度因子幅值影响疲劳条带的形成。疲劳裂纹扩展 I 阶段为剪切型裂纹, 形成的疲劳条带较少, 同时形成沿晶断裂、韧窝、滑移等形貌。扩展 II 阶段为张开型裂纹, 裂尖处于平面应变状态, 易于形成疲劳条带, 其中的中等 ΔK 区的主要微观断裂机理为疲劳条带机理。高 ΔK 区和低 ΔK 区也可能形成疲劳条带, 同时还形成其他更具特征性的微观形貌, 高 ΔK 区断口上常常是较多的韧窝与疲劳条带并存; 低 ΔK 区形成较多的沿晶小面或穿晶小面形貌, 这是因为裂纹尖端循环塑性区极小 (三、四个晶粒尺寸) 而导致裂纹扩展受到晶体各向异性强烈影响的缘故。

疲劳条带的定义特征如下: ①疲劳条带是一族大体上彼此平行的条纹, 并与裂纹局部扩展方向相垂直; ②代表每次应力循环中裂纹前沿的位置, 每一条疲劳条带仅对应于一次应力循环;

③条带间距 S 随裂尖应力强度因子幅 ΔK 增高而增大; ④一般集成“条带片”, 在同一片内的条带连续和近似等长, 条带片之间为撕裂棱线; ⑤两匹配断口上形貌基本上相对应。实际上, 只有规则疲劳条带才能符合上述五条特征, 不规则疲劳条带则畸变很大。

程序加载疲劳试验证实, 每一条疲劳条带对应于一次应力循环, 条带间距 S 随 ΔK 值而增大; 但是在单次过载或循环过载后的低应力循环阶段可能不形成疲劳条带。

在用疲劳条带间距进行定量分析时要注意, 条带间距 S 不能等同于裂纹扩展速率 da/dN , 前者为微观断口形貌参量, 后者为宏观力学参量, 裂纹的宏观和微观扩展速率和方向不可能完全相同。中等 ΔK 区扩展属于连续扩展机理, 其宏观参量 da/dN 数据比较接近于疲劳条带间距; 低 ΔK 区属于不连续扩展机理, 其 da/dN 值远小于偶见的疲劳条带间距。高 ΔK 区 da/dN 值则远大于条带间距。

Bates 等对一些合金钢、钛合金和铝合金疲劳条带间距统计后得到经验公式:

$$S = 6(\Delta K/E)^2 \quad (16.2-6)$$

式中 S ——条带间距;

ΔK ——裂尖应力强度因子幅;

E ——弹性模量。

这个公式比较粗略, 但是对于疲劳失效分析有一定的实用价值。定点观察失效零件断口上某几点 (确定的裂纹尺寸 a) 的条带间距统计值 S , 代入上式, 就可近似估计零件的实际应力幅 $\Delta\sigma$ 。

3.2 疲劳失效分析的目标和方法

机械零部件疲劳失效分析, 可能达到下列目标:

1) 首先进行疲劳定性分析, 即确定属于疲劳失效, 而不是其他类型的失效。

2) 确定疲劳裂纹源的数量和位置, 确定裂纹的宏观走向。

3) 估计载荷类型和应力水平。载荷类型是指弯曲、扭转、拉伸等载荷, 弯曲又有单向弯曲、双向弯曲和旋转弯曲。应力水平首先指区分高周次和低周次疲劳, 也许还可作出定量估计。

4) 查找与特种疲劳 (腐蚀疲劳、高温疲劳、微动磨蚀疲劳和接触疲劳等) 有关的证据。

5) 查找疲劳失效的具体原因, 包括设计、制造工艺、材质和使用操作方面的具体原因。

6) 提出预防疲劳失效的方向或具体措施。一般情况下, 可以参照现有成熟的提高疲劳强度的方法, 提出改进措施, 预防疲劳失效的重复发生。常常涉及改进零件的细节设计, 这是根本性的措施, 对于预防疲劳破坏非常有效。更换材料和改进制造工艺有时也能起到较好的作用。采用局部表面强化处理是一种比较简便的解决方法。

疲劳失效分析方法, 是指零件工作条件和应力分析; 断裂部位和宏观断口分析以及微观断口分析。此外, 视需要情况进行其他试验和分析工作。宏观断口分析是极重要的环节, 往往不受重视。通过宏观分析, 有经验的人员常能对疲劳失效做出准确的定性判断, 并且能对疲劳裂纹源、载荷类型、应力水平和失效原因提供许多有益的线索。

疲劳失效的定性判断: ①失效零件承受足够大的循环应力(或应变), 并且足够多次循环; ②宏观断口上观察到多条明确的疲劳弧线。③微观断口上观察到多处明确的疲劳条带形貌。第一条为必要条件, 但非充分条件; 后两条只要满足一条就是充分条件, 但非必要条件。断口上未观察到疲劳弧线和疲劳条带, 不能由此判定不属于疲劳失效。例如, 大气中恒幅加载可能不形成疲劳弧线; 超高强度钢疲劳常常不易观察到疲劳条带。尽管存在这种例外情况, 后两条仍然是疲劳失效定性判断的有力证据, 在失效分析中广泛使用。

疲劳破坏是由循环应力或应变造成的。如果机械零件不承受循环载荷, 或者循环载荷很小, 就不会发生疲劳破坏。只有承受循环载荷的机械零件, 才会发生疲劳破坏。对于这类承受循环载荷的失效零件, 一般应该计算或估计它们在正常服役条件下失效部位的应力水平; 还要调查服役过程中的异常工况, 例如超载或超速运行的情况。

有些机械零件, 例如叶轮机叶片和轴系中的传动轴等, 在正常工作时不承受循环载荷, 或者循环载荷很小, 但是, 一旦产生共振, 则承受显著的循环载荷。振动频率很高时, 在短时间内即可达到很高的循环周次, 并导致疲劳失效。共振疲劳失效常常属于高周疲劳; 特殊的颤振可能产生很高的循环应力, 导致低周疲劳。在发生这种振动疲劳失效的情况下, 必须研究机械的何种工况、何种转速造成振动, 研究失效零件与周围零

部件的相关性, 找到振动的来源和消除振动的方法。振动疲劳失效是机械零件疲劳失效中的重要类型, 在机械设计和使用中往往对此疏于考虑。例如薄壁锥齿轮发生反常的疲劳破坏, 疲劳裂纹起源于齿槽底部(而不是通常的齿根疲劳裂纹), 这是在特定的机械工况(转速)下由轴向力诱发的共振疲劳失效情况。

疲劳宏观断口(图 16.2-10)上分成三区: 疲劳源区, 疲劳扩展区, 最终断裂区(又称瞬时断裂区)。疲劳源区表明裂纹起源位置, 其尺寸范围无明确定义, 它与扩展区之间常无明确的界限。应力较低常形成单个疲劳源, 高应力和高应力集中有时导致多个疲劳源。疲劳扩展区和瞬时断裂区之间一般有明显的边界, 两者断口宏观外貌和微观形貌均有区别。瞬断区宏观断口较粗糙, 呈纤维状; 微观形貌有大量韧窝。疲劳扩展区宏观断口较平坦, 常常存在疲劳弧线(海滩花样); 特征性微观形貌为疲劳条带。在瞬断区的相反方向, 容易找到疲劳源区。根据瞬断区面积的大小, 可以估计零件承受应力水平的高低

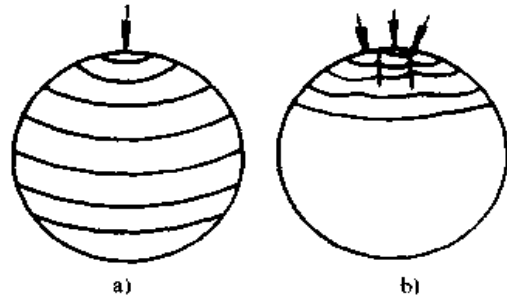


图 16.2-10 疲劳宏观断口示意图

a) 单疲劳源 b) 多疲劳源

低周疲劳和高周疲劳的区分是指达到疲劳破坏的循环次数低或高, 一般以 $10^4 \sim 10^5$ 次循环为分界。高周疲劳的应力水平较低, 低于疲劳极限时原则上不发生疲劳破坏, 但在实际使用中仍可能发生; 高于疲劳极限(但远低于屈服强度)的循环应力作用下造成高周疲劳破坏。低周疲劳的循环应力水平接近或略高于屈服强度。

高速运转系统中的许多零件, 如曲轴、传动轴、传动齿轮和弹簧等零件, 承受应力循环次数与机械转速有关, 其设计应力较低, 以期达到高疲劳寿命或无限寿命。这类零件在服役中易发生高周疲劳破坏。

高压容器稳定工作状态承受恒定载荷, 在维

修或工况变动时才有载荷变动,循环次数较低。高速转动盘件也是在启动、停车和工况变动时才有载荷变动,易发生低周疲劳。

高周疲劳和低周疲劳的宏观断口有明显差异。高周疲劳的应力水平较低,瞬断区面积较小;扩展区断口粗糙度较低;疲劳源区附近断口尤其平坦(当循环应力中存在压应力成分时)。扩展区前期断口上的疲劳条带间距很小,常常放大5 000~10 000倍或更高时,才能观察到疲劳条带形貌。

低周疲劳的应力水平高,常形成多个疲劳源,甚至在源区侧表面也存在若干条平行于主断口面的微裂纹。瞬断区面积较大,边缘常有剪切唇口。扩展区和源区附近的断口粗糙区略高;扩展区断口上的疲劳条带间距较大(放大1 000倍左右即可观察到),并且存在较多的初窝形貌。

载荷类型和零件形状影响疲劳裂纹形成位置和宏观断口外貌。圆截面零件承受拉拉或拉压疲劳时,裂纹随机形成于边缘某一薄弱部位;矩形截面零件的疲劳裂纹易形成于边角部位。承受弯曲载荷时,零件截面上存在应力梯度,疲劳裂纹形成于承受最高拉应力的边角部位;承受双向弯曲时,零件上下两边缘均承受最高拉应力,常先后形成两个裂纹源,随后形成两个疲劳扩展区,而使瞬断区位于零件中部。

3.3 设计、制造工艺和材质对疲劳失效的影响

零部件设计对疲劳强度和寿命产生很大的影响,最重要的因素是应力集中。疲劳裂纹通常形成在导致应力集中的表面不连续性部位,即截面变化部位(台阶和肩部),孔边,螺纹根部,键槽根部。应力局部增高由应力集中系数 k_t 代表。实际零件表面不连续性部位的 k_t 值,常常可以参照各种应力集中系数手册中的标准数据而获得;必要时,进行弹性力学有限元计算,或者进行光弹试验而获得。

在截面变化部位,增大过渡圆角半径有利于提高零件的疲劳强度。由于过渡圆角半径过小而导致的疲劳失效情况中,一部分是设计错误;另一部分是设计正确,切削加工错误。

设计中还要注意,在截面变化部位不设置焊缝或钎接缝。例如设计带法兰盘的轴,如果将轴

和法兰盘两者焊接而成,焊缝和热影响区是薄弱部位,它与应力集中部位重叠在一起,疲劳裂纹必定形成于该部位,并且疲劳寿命极低。较合理的设计是法兰盘带一段轴与另一段轴焊接,焊缝远离截面变化部位,即两个薄弱部位分散开。

应力集中的有害影响,可以利用诱发应力加以限制和缩小。诱发应力是指在零件上可能发生疲劳破坏的应力集中部位的表面层造成残余压应力,它能起到降低平均应力的作用,从而显著提高零件使用中的疲劳寿命。造成这种诱发应力的方法有三类:表面层塑性变形,表面热处理,过载验证试验(或运转)。对零件的缺口部位施加喷丸处理,对螺纹部位施加滚压变形,均属于表面塑性变形,诱发形成表层残余压应力,同时表层材料强度也增高。此法对于预防高周疲劳破坏很有效。

结构钢零件进行表面淬火,表层形成马氏体组织,其比热容高于基体钢材,由此造成表层残余压应力和较高强度。渗氮处理也产生类似的效果。

塑性较低的钢材,例如淬火和低温回火状态的钢材,对应力集中的敏感性较高;塑性较高的钢材,例如正火状态钢材,对应力集中的敏感性较低。铸钢零件自身含有许多应力集中源(铸造缺陷),因此对外部应力集中部位的敏感性也较低。

钢零件表面粗糙度影响疲劳寿命,图16.2-11是各种表面粗糙度的疲劳寿命系数 K_r ,它是

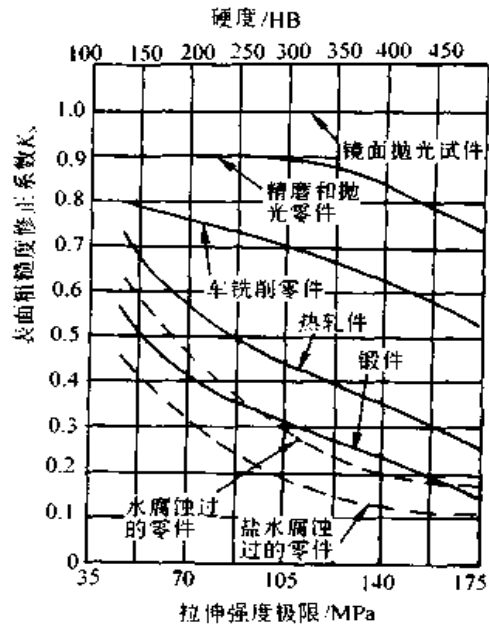


图 16.2-11 钢零件疲劳寿命的粗糙度系数

精抛光表面的试件的疲劳寿命为基数绘制的。切削加工的零件寿命比精磨零件寿命降低10%~30%，高强度钢受表面粗糙度影响较大。锻坯状态的疲劳寿命与经受过腐蚀的零件相当。

零件疲劳裂纹起源处表面粗糙度不合格、严重啃刀或磨削烧伤等，是失效原因之一，对高强度钢零件尤其如此。

钢件电镀可能有损于疲劳强度。铬为硬镀层材料，钢件镀铬后，在铬镀层内存在拉伸残余应力，循环加载时镀层首先开裂，造成应力集中源，然后裂纹进入基体材料中。如果镀铬前零件经过喷丸处理，则铬层中裂纹不易发展进入基体中。

在高周疲劳情况下，钢的疲劳强度随拉伸强度而增高。热处理和显微组织对疲劳强度产生重大影响。回火马氏体具有最佳抗疲劳性能。混合组织的疲劳抗力常常较低，残余奥氏体和自由铁素体等软区可能成为裂纹形成位置，偏聚的碳化物和粗大珠光体也可能形成裂纹。

3.4 特种疲劳的特征和判断

(1) 腐蚀疲劳

腐蚀疲劳是循环应力（和应变）与腐蚀性环境共同作用下裂纹形成、扩展和最终断裂。循环应力与腐蚀性环境的交互作用，加速腐蚀反应，加速疲劳裂纹形成和扩展。腐蚀疲劳的S-N曲线远低于大气疲劳的S-N曲线（图16.2-12）。

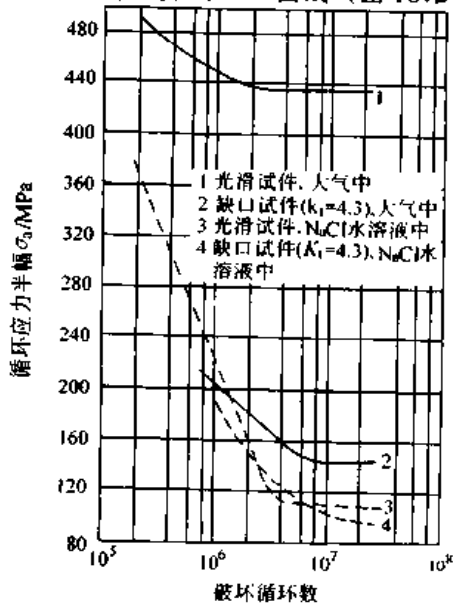


图 16.2-12 $w(Cr) = 13.7\%$ 马氏体不锈钢在大气中和盐水中疲劳试验的 S-N 曲线

腐蚀介质作用下，试件表面形成许多点蚀坑，起到缺口应力集中的效果，由此形成裂纹。腐蚀疲劳不仅与应力循环次数相关，而且与时间相关，因此循环频率和保持时间将影响疲劳寿命的高低。

图 16.2-13 是低碳钢锅炉管上腐蚀疲劳裂纹的金相照片，试样经硝酸溶液浸蚀，显示出腐蚀疲劳裂纹的某些特征：裂纹起源于点蚀坑（一般尺寸较大，呈半球形）；裂纹内充满腐蚀产物；主裂纹旁有平行于主裂纹的次裂纹，也起源于点蚀坑。

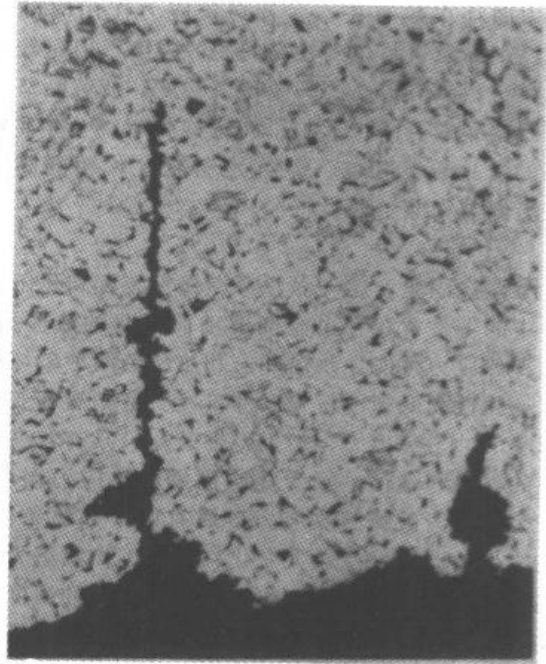


图 16.2-13 低碳钢锅炉管腐蚀疲劳裂纹的金相照片 250×

腐蚀疲劳失效的定性判断，除一般的疲劳特征外，还必须查明存在何种腐蚀性环境，并参照前述特征加以判断。微观观察前，断口应经过仔细清洗，除去表面的腐蚀产物。一般能观察到较多的沿晶断裂形貌，并带有二次沿晶裂纹；有时也能观察到“脆性”疲劳条带形貌，即条带较平坦和不完整。腐蚀疲劳断裂与应力腐蚀断裂两者较难区分，裂纹和断口比较相似，因为腐蚀疲劳断口有时也观察不到疲劳条带。两者的区别首先在于应力性质不同，应力腐蚀断裂由长时间拉应力作用而形成，腐蚀疲劳由循环应力作用而形成；腐蚀疲劳源区为较大尺寸的点蚀坑；应力腐蚀裂纹形成较多分枝。

(2) 高温疲劳

疲劳失效可能发生在高温。当温度不太高时,蠕变的影响不显著,这种高温疲劳断裂保持室温疲劳断裂的特征性外貌和微观断口形貌。温度增高促使拉伸强度和疲劳强度同步降低。当温度更高时,蠕变现象严重地影响高温疲劳,即蠕变-疲劳交互作用。蠕变是高温下受恒应力长时间作用产生永久变形,随后裂纹形成、扩展和最终断裂,蠕变断裂又称高温持久断裂。单纯的高温疲劳(无蠕变影响)基本上符合室温疲劳的规律和特征,与高温持久断裂有很大区别。前者与应力循环次数有关,后者与拉应力作用时间有关。细晶粒材料达到较高的疲劳强度,但是较粗晶粒材料具有较高的高温持久强度。疲劳断口上常观察到疲劳条带形貌;高温持久断口上存在较多的沿晶断裂形貌。蠕变-疲劳交互作用的高温疲劳断裂常兼备两者特征。

(3) 热疲劳

蒸汽涡轮、燃气涡轮、燃烧室装置和化工设备中的零件常存在由温度波动而引起的热应力。这种热应力可能导致热冲击和热疲劳两种破坏形式。脆性和低塑性材料零件,经受急剧温度变化引起的冲击热应力,产生脆性破坏。具有较高塑性的材料和零件,经受多次温度和热应力循环,产生热疲劳破坏。热应力形成有两个必要条件:①零件的温度发生较大变化,例如工作状态为高温,停车状态为低温;或者指不同工况的温度变动。②这种温度变化形成的热胀冷缩受到外界或内部的约束作用。外界约束是指其他零件的约束,例如热管受到刚性固定,薄壁筒受到端头安装边的约束。当零件存在温度梯度时,其内部各区域间的相互约束即为内约束。

热疲劳断裂的基本特征类似于高温低周疲劳,区别在于后者是由于机械的循环应变造成,前者是由于温度循环造成。由于循环应力较高和高温环境,疲劳裂纹源常有多个,主裂纹附近有平行的次裂纹;扩展区和源区较粗糙;瞬断区较大,边缘有剪切唇口;在无明显蠕变影响的温度下,微观断口形貌为疲劳条带和大量切窝;在蠕变影响的高温下,有较多的沿晶断裂形貌。高温氧化物覆盖在断口面上,微观形貌呈花朵状,并不能代表热疲劳的本质。经过仔细的清洗,才能观察到真正的断口形貌。

(4) 接触疲劳

接触疲劳是一种特殊的疲劳破坏,两个零件在高接触压力下相对滚动(或滚动加滑动)时,会形成裂纹和表面剥蚀坑。滚动轴承和齿轮常发生接触疲劳破坏。

将接触疲劳归入磨损失效类中,因为它常与其他磨损损伤共存,并且受到表面物理化学特性和润滑特性的影响。而现在倾向于将接触疲劳归入特种疲劳失效类中,它符合于疲劳的本质和相同的影响因素。降低接触应力水平,降低钢中夹杂物含量,提高钢材表面和次表层强度,这些因素均能使零件的接触疲劳寿命提高。

滚轮承受高接触压力时,接触宽度(面积)小,单位接触压力较高,可能导致局部塑性变形。零件表面下的应力分布,在纯滚动条件下,承载表面下区域主要处于三轴不均匀压缩应力状态,对疲劳裂纹形成起作用的是循环切应力。最大切应力方向接近于与表面呈 45° ,最高切应力点位于表面下约 $0.786a$ 距离处。 a 为接触宽度之半,其值与最高单位接触压力 p_0 、滚轮半径 R_0 和弹性模量 E 有关: $2a = 3.6 p_0 R_0 / E$ 。在滑动和滚动并存的条件下,附加摩擦作用和热作用,改变了接触应力分布,最高切应力点更加靠近表面。接触疲劳裂纹可能形成于表面或紧靠表面。图16.2-14a)是渗碳钢接触疲劳的表面形貌,底部已形成一个小剥蚀坑,呈贝壳形(V形),顶端指出转动方向;还显示出由断续分布的裂纹所围绕的大区域,随后将会形成一个大剥蚀坑。图16.2-14b)是接触疲劳裂纹的截面金相观察,主裂纹A形成于表面,从左向右倾斜扩展,B为一条较长的次裂纹,两裂纹围绕的小块材料即将脱落而形成剥蚀坑。右边另一条小次裂纹如果扩展并与主裂纹交汇,将使剥蚀坑进一步扩大。

4 腐蚀失效和应力腐蚀断裂

4.1 腐蚀失效

腐蚀是金属材料与环境介质之间发生有害的化学作用或电化学反应,使得材料性能退化和零件表面受损。腐蚀损伤可直接造成零件使用失效;也可能导致其他类型的破坏,例如由表面点蚀坑导致疲劳断裂。

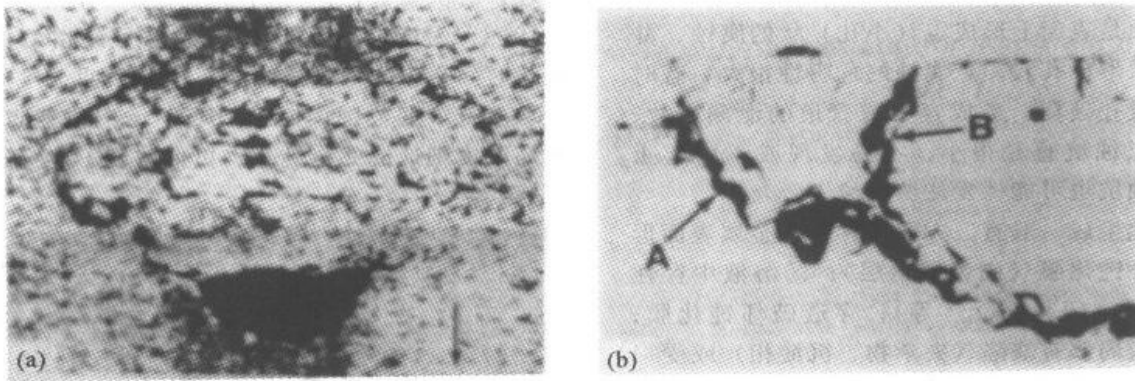


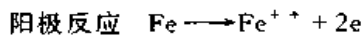
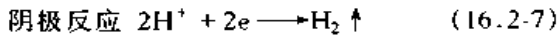
图 16.2-14 渗碳钢接触疲劳形成剥蚀坑 (箭头表示转动方向)

a) 接触表面形貌 (小剥蚀坑和断续裂纹围绕的大区域) 55×

b) 接触疲劳裂纹的截面金相观察 (小剥蚀坑即将形成) 380×

化学作用 (反应) 主要指氧化, 金属材料在高温下才发生强烈的氧化。室温和略高温下, 金属材料在干燥大气中的氧化不造成显著的腐蚀损伤。

电化学反应造成的腐蚀, 即电化学腐蚀。例如铁在稀无机酸溶液中的主要电化学反应为:



电化学反应有三个必要条件: 两个电极, 相互连接 (接触), 浸在电介质中。机械零部件发生腐蚀时, 电介质可能是各种酸、碱、盐的水溶液, 甚至是极低浓度的水溶液和潮湿大气。两个电极指两种材料的两个零件, 也可以指同一零件上的两个区域、两种相或两种成分。凡具有较负电位的材料、区域、相或成分, 均成为阳极, 发生溶解反应, 即遭受腐蚀。

电化学腐蚀分成均匀腐蚀和局部腐蚀两大类。均匀腐蚀是指整个表面上几乎以相同速度进行腐蚀。局部腐蚀的破坏主要集中于局部区域, 例如某些点、晶粒边界附近或缝隙部位等; 由于其他大部分表面几乎未遭破坏, 有时肉眼不易觉察而造成更大的危害。

(1) 均匀腐蚀

在大气条件下 (含氧, $\text{pH} = 7$), 绝大多数金属材料均发生如同式 (16.2-7) 那样的电化学反应, 且为放热反应。因此, 从热力学观点, 腐蚀是一种自发过程。但是, 不同的金属材料, 处在不同的环境介质中, 其腐蚀类型和腐蚀速率有很大差异。

不同金属有不同的电极电位 (以氢电极电位为零的相对值), 铁的标准电极电位为 -0.43V 。依照电极电位高低排列的各种金属的电化学次序, 代表不稳定性的次序。具有较负电极电位的金属易遭电化学腐蚀。例如海洋环境中的轮船挂一块锌板, 其电极电位低于铁, 成为牺牲阳极, 而保护低碳钢板船壳免遭腐蚀。

实际材料的抗腐蚀能力还决定于表面腐蚀产物 (氧化膜) 是否具有保护性。普通碳钢和低合金结构钢的氧化膜不稳定, 易受浸蚀破坏。不锈钢中含铬 12% 以上, 或 17% 以上, 形成稳定的铬的氧化膜, 厚约 10 nm, 起到钝化作用, 抗腐蚀性提高。各种不同化学成分和不同显微组织的钢材, 其抗腐性能也有差异。

按照腐蚀环境, 碳钢和低合金结构钢的腐蚀可分为: 大气腐蚀 (工业大气、海洋大气), 海水腐蚀, 流动水腐蚀, 土壤腐蚀, H_2S 环境的腐蚀, 各种酸性和碱溶液中腐蚀。

钢在盐酸、硝酸和硫酸中的腐蚀速率均随酸浓度增高而增高, 这是水溶液中氢离子的影响, 即式 (16.2-7) 中 H^+ 供应更多使阴极反应速率增高, 导致阳极溶解加速。硝酸和硫酸浓度分别高于 35% 和 55% 时, 形成起钝化作用的氧化膜 (不完全稳定), 反而使腐蚀速率递减。但是即使 70% 浓度的浓硫酸, 其腐蚀速率仍然很高, 每年 1.3 mm。盛装硝酸的容器, 不能采用碳钢或低合金钢, 常用奥氏体不锈钢、防锈铝合金或工业纯钛制成。

环境温度升高, 使得腐蚀速率显著地增高。

(2) 点蚀

点蚀是表面上形成点(小孔)状的腐蚀,并向内扩展形成孔穴。点蚀的危害性很大,有时造成穿透孔破坏,造成容器或管道的泄漏事故;表面的点蚀坑直径很小,不易发现或不引起重视。点蚀坑也可能诱发疲劳裂纹。

点蚀生成一般有三方面条件:①金属表面形成保护性钝化膜(或者镀铬层);②溶液中存在活性离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 等),穿透破坏钝化膜;③钝化膜局部有缺陷(夹杂物、沉淀相)或受损伤(裂口、擦伤),而使该金属处于活化状态。

碳钢和低合金钢在稀酸溶液中的腐蚀速率很高,普遍腐蚀严重;在中性或某些碱性溶液中,存在中等防护性的氧化膜,普遍腐蚀速率较低,但是点蚀速率可能高出普遍腐蚀速率10倍以上,甚至数百倍。不锈钢常形成保护性良好的钝化膜,能抵抗多种溶液中普遍腐蚀,因此,它们的点蚀和晶间腐蚀失效也就更显凸出来。

点蚀坑生成后,其局部环境中浓集有氢离子和氯离子等,表面膜也不稳定。如果溶液发生对流作用,局部环境又恢复到平均浓度,点蚀坑表面膜也恢复到非活化状态。如果溶液无流动,则有利于点蚀继续生长。

点蚀沿孔深方向生长的过程,表现为浓差电池作用。腐蚀产物覆盖,溶液流动受阻,孔内缺乏氧的供应,并积累较高浓度 H^+ ,溶液pH值降低而成为酸性溶液,孔底部金属不再形成钝化膜。这种浓差电池中,零件表面为阴极,孔底部金属为阳极,加速溶解。微区酸度测定表明,在碱性溶液(pH9.5)中,低碳钢点蚀孔底溶液(pH5.5)呈酸性;在中性溶液中,高强度钢点蚀孔底溶液pH3.8。

碳钢和低合金钢点蚀有两方面原因:腐蚀产物沉积造成局部浓差电池;溶液中存在卤化物。零件表面点蚀坑外貌有两类:①整个表面广泛分布的点蚀坑,混合成片,点蚀的生长就是变更点蚀部位,其结果是表面变粗糙和零件厚度均匀减薄;②少数点蚀坑沿深度方向快速生长,大部分表面为轻微腐蚀。

不锈钢点蚀的主要原因是接触含卤离子(尤其氯离子)溶液或湿气。图16.2-15表示不锈钢饮水箱底深点蚀坑的截面形状。其形成原因是使

用过强的次氯酸盐消毒剂(有效氯含量达到 375×10^{-6} ,为规定浓度的3倍);并且残留液保存较长时间,未立即刷洗水箱。试验表明,次氯酸盐在一定浓度范围内时,造成不锈钢快速点蚀;更高浓度则造成完全钝化,更低浓度不能穿透钝化膜。

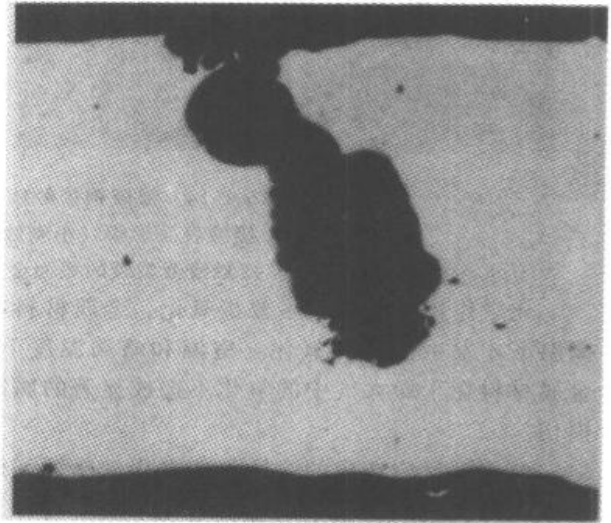


图16.2-15 321奥氏体不锈钢点蚀坑
截面金相照片(未经浸蚀) 95×

(3) 晶间腐蚀

晶间腐蚀是沿着晶粒边界或晶界附近发生的腐蚀。这是晶界上的沉淀相或其邻近区域的择优溶解现象。晶间腐蚀发生于表面后,沿晶界(或邻近区域)向内生长。受腐蚀晶界无规律地分布和连接,并造成部分晶粒脱落。奥氏体不锈钢和铝合金存在较多的晶间腐蚀失效。

18-8类奥氏体不锈钢含有约18%或更高的铬和0.06%~0.08%碳。常以焊接结构的形式用作化工装置和各种容器。这类不锈钢常在1050℃左右进行固溶处理,大部分碳固溶入奥氏体中;随后快速冷却到室温,仍保持过饱和固溶状态。如果在400~850℃再加热一段时间,就会在晶界沉淀断续的或连续的 Cr_{23}C_6 或 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ 碳化物相,并且碳化物相邻近形成贫铬区,例如铬含量低于8%。在600~700℃温度范围内再加热,保持很短时间就能完成碳化物晶界沉淀反应,这个温度范围(或者整个400~850℃范围)称为敏化温度。这种贫铬区的腐蚀抗力与低碳钢相差不多,钝化膜不稳定,易成为阳极溶解的通道。这是晶间腐蚀的基本原因。图

16.2-16 为 18-8 奥氏体不锈钢敏化处理后晶界的示意图。

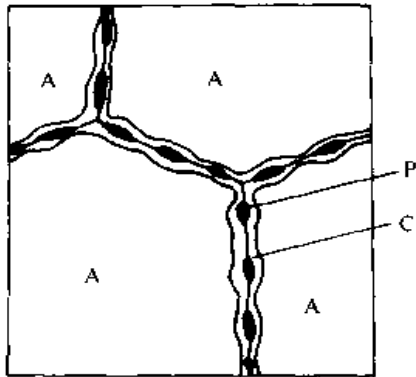


图 16.2-16 敏化的 18-8 不锈钢晶界示意图
C—晶界贫铬区 P— $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 相沉淀
A—奥氏体晶粒

不锈钢零部件晶间腐蚀失效有两种原因。一种情况是工作温度处于敏化温度范围内，使用过程中材料发生敏化，随后晶间腐蚀。另一种更常见的情况是制造过程中（焊接和去应力处理中）材料已发生敏化，使用中产生晶间腐蚀。焊接热影响区温度与敏化温度可能相当，晶间腐蚀发生在焊缝与母材界面附近，形成狭缝状腐蚀区，称为刀口腐蚀。晶间腐蚀也可能发生在焊缝上或热影响区中。

生产中采用多种试验方法，鉴别不锈钢的晶间腐蚀倾向性，以及它是否已经敏化，例如在沸腾硫酸铜-硫酸溶液中保持 24 h。

为了预防奥氏体不锈钢晶间腐蚀，常用方法如下：①进行 1050℃ 固溶处理，然后快速冷却；②改用含钛或铌的不锈钢 1Cr18Ni9Ti 或 1Cr18Ni12Nb，并在焊接后进行 840~900℃ 稳定化处理，使碳固定在 TiC 和 NbC 碳化物中；③改用超低碳不锈钢，含碳量低于 0.03%，焊接时采用超低碳焊丝。

(4) 缝隙腐蚀

缝隙腐蚀是指狭缝和间隙内部或近旁发生的腐蚀。零件表面存在有缝隙或异物接触造成缝隙，其尺寸一般为 0.025~0.1mm。例如两个连接零件之间，或者零件与覆盖物之间，如果有水溶液进入，就可能发生缝隙腐蚀。含 Cl^- 的溶液尤其腐蚀严重。

缝隙腐蚀是由浓差电池作用造成的。缝隙处溶液供氧不足， H^+ 和 Cl^- 浓度增高，金属表面

钝化膜不易形成，阳极溶解加速。

4.2 应力腐蚀断裂

应力腐蚀断裂又称应力腐蚀开裂，简称应力腐蚀，是材料受拉应力和特定腐蚀环境共同作用而发生的破坏。金属材料是主要对象，但工程陶瓷和高聚物材料的应力腐蚀已日益多见。

(1) 应力腐蚀的条件

发生应力腐蚀必须具备三个条件：拉应力；腐蚀性环境；材料对该环境敏感。

应力腐蚀通常是在较低应力下发生的，应力水平低于（甚致远低于）材料的屈服强度。像疲劳断裂和脆性断裂那样，应力腐蚀裂纹容易形成在应力集中部位，裂纹面大体上垂直于主拉应力方向，失效零部件无宏观塑性变形特征。

应力来源于两方面：零件工作中所承受的外加应力和热应力；零件制造过程中造成的残余应力。残余应力是保留在零件中的内应力，是一种自平衡应力。如果失效零件是非承力件，或仅承受极小外力作用，或者是在机械使用前的放置过程中就发生应力腐蚀，则残余应力更是主要的应力来源。在这种情况下，必需追查残余应力形成在制造过程的那个环节；必要时应对零件进行宏观残余应力测定试验，确认失效部位拉应力的存在和数值。焊接过程形成相当大的内应力，焊后去应力退火如果不当，部件中会保留较高的残余应力。各种热处理过程中由于不均匀冷却和不同步相变，也可能形成残余应力。成形工序和矫直工序也形成残余应力。磨削不当也会造成表面拉应力。

应力腐蚀一般发生在较温和的腐蚀环境下，这种环境不致于发生明显的普遍腐蚀。并且，不是所有腐蚀性环境下都会发生应力腐蚀；一种材料仅对某几种特定的环境具有应力腐蚀敏感性，甚至仅在特定浓度和特定温度下才发生。即发生应力腐蚀的环境与材料间有一定的匹配关系。腐蚀疲劳受循环应力和腐蚀环境共同作用，任何对材料具有腐蚀性的环境，都会导致疲劳强度降低，不要求环境-材料匹配关系。从实践和研究结果积累了许多关于导致应力腐蚀的环境-材料匹配关系，但是不存在普遍的规律。造成应力腐蚀的环境-材料组合关系如下：

1) 碳钢-NaOH 和 KOH 溶液 ($>100^\circ C$)，硝酸盐溶液 ($>100^\circ C$)，碳酸盐溶液 ($100^\circ C$)，

CO-CO₂-H₂O 气体, 液氨:

2) 高强度低合金钢-含微量氟离子的近中性水溶液, H₂S 溶液。

3) 奥氏体不锈钢-浓热氯化物水溶液, 含微量氯化物的水溶液, 含氧水, 连多硫酸。

4) 高强度铝合金-含微量氯化物的水溶液, 潮湿大气, 发烟硝酸 (>100℃)。

5) 黄铜-含氧的铵盐和氨的水溶液。

应力腐蚀一般不发生于纯金属(个别例外), 只发生于各种合金中, 合金的成分和显微组织显著地影响应力腐蚀敏感性。高强度钢和高强度铝合金中, 高屈服强度常常对应于高的应力腐蚀倾向, 但是显微组织改变是最基本的原因。

(2) 应力腐蚀机理

应力腐蚀是与时间相关的滞后破坏, 总寿命时间由裂纹形成孕育期和裂纹扩展时间两部分组成。裂纹形成于应力集中部位, 存在有利溶液浓度的部位, 保护膜较薄或破损部位。预先存在的工艺裂纹、表面缺陷和点蚀坑等促使孕育期大大缩短。应力腐蚀裂纹扩展也是与时间相关的过程。具有极高应力腐蚀敏感性的超硬铝合金, 裂纹扩展速度接近 10^{-2} mm/s, 通过改变热处理制度和成分可降低到 10^{-5} mm/s 以下, 普通硬铝合金的裂纹扩展速度更低 2~3 个数量级。相反地, 铝合金在汞中发生液体金属脆性断裂, 裂纹扩展速度高达 500 mm/s, 属于快速脆性断裂。尽管应力腐蚀裂纹扩展速度远低于脆性断裂速度, 但是却远高于均匀腐蚀和点蚀的速度, 因为应力腐蚀受拉应力作用和腐蚀沿窄缝向内部生长。

关于应力腐蚀裂纹形成和扩展的机理, 已有多种解释, 每种机理都有其实验证据和适用的材料-环境组合。现简述敏化奥氏体不锈钢的阳极溶解机理和高强度钢的阴极氢脆机理。阳极溶解机理解释了敏化不锈钢的晶间腐蚀, 同样可用于解释在微量氯化物水溶液中的沿晶应力腐蚀。晶界上 (Cr, Fe)₂₃C₆ 碳化物附近形成几乎连续的贫铬区, 具有较负的电极电位, 成为预先存在的、易于阳极溶解的活化通道, 裂纹沿晶界形成和扩展。在拉应力作用下, 腐蚀裂纹虽然沿晶界曲折扩展, 但是主裂纹面大体上垂直于拉应力方向。在主裂纹旁边, 也形成一些沿晶枝裂纹, 但是不会像晶间腐蚀那样横向沿晶腐蚀发展宽广。

高强度低合金钢有氢脆倾向, 见本章 2.5

节。腐蚀电化学反应的阴极反应产生氢(式(16.2-7)), 并且初生的原子氢具有极高的活性, 吸附于裂纹尖端表面或进入裂尖区金属中, 由氢脆而导致应力腐蚀裂纹扩展。这种应力腐蚀裂纹不能混同于氢脆断裂, 因为它存在腐蚀, 形成腐蚀产物, 氢也是由电化学反应而形成。

(3) 低碳钢和低合金钢的碱脆和硝脆破坏

钢的碱脆破坏属于应力腐蚀, 曾造成很多蒸汽锅炉爆炸事故, 还有蒸汽管道和碱液槽的泄漏事故。

低碳钢和低合金钢的碱脆破坏发生在浓度较高的热碱液环境中。NaOH 浓度通常为 15%~30%, 更高的浓度引起更高的碱脆敏感性, 但是也曾发现 5% 低浓度的碱脆破坏。温度通常为 150~300℃, 很少低于 90℃。造成破坏所需的碱浓度随着温度降低而增高。

在酸性溶液中钢易受腐蚀, 因此蒸汽锅炉中常加入少量 NaOH, 使溶液 pH 值略提高, 以防腐蚀。这种极低浓度碱液本不会导致碱脆破坏, 必须有碱液被浓缩的过程。在锅炉的局部地区, 例如铆接或焊接接缝处, 有小缝隙和空穴, 局部区域碱液浓缩, 出现了“碱隐藏”, 碱中还含有 SiO₂ 杂质。由此使局部碱液达到前述的敏感浓度值, 裂纹正是形成于这种溶液浓集的部位。焊接(或铆接)造成的残余应力, 对碱脆破坏的发生起重要作用。焊后整体或局部进行 650℃ 退火, 有利于消除残余应力; 进行喷丸处理造成表面残余压应力; 水处理和加缓蚀剂也是可行的预防措施。

碱脆破坏一般为阳极溶解机理, 晶界成为优先腐蚀的通道, 裂纹主要沿晶界扩展。

硝脆破坏是钢在硝酸盐溶液中发生的应力腐蚀, 常常发生在化肥和硝酸盐生产装置和贮罐中。硝酸盐包括 NH₄NO₃、Ca(NO₃)₂、LiNO₃、KNO₃ 和 NaNO₃。一般情况下, 酸性较强的溶液具有较强的应力腐蚀敏感性, 即发生应力腐蚀的门槛应力较低, 或相同应力作用下达到开裂所需时间较短。硝酸盐溶液浓度增高和温度增高, 都使应力腐蚀加速, 沸点附近的硝酸盐溶液具有极高的应力腐蚀敏感性。在沸腾的上述硝酸盐溶液中, 低碳钢和低合金钢的应力腐蚀临界应力仅为 69 MPa。钢中含碳量在 0.02%~0.18% 范围内易发生硝酸盐应力腐蚀, 裂纹常沿晶界扩展。

(4) 应力腐蚀失效的判定

首先从产生应力腐蚀的三个必要条件来判定。必须有足够大的拉应力长时间作用；对于残余应力，要证明其确实存在和查明来源。零件的失效部位必须长时间存在腐蚀性环境，介质的成分、浓度和温度足以导致材料发生应力腐蚀。为此可进行关于应力和环境的调查和试验。

进行裂纹金相观察和断口观察，有助于应力腐蚀失效的判定。应力腐蚀破坏具有脆性断裂的基本宏观特征。进行裂纹金相观察，主裂纹面大体上垂直于拉应力方向，但是裂纹比较曲折，分枝裂纹较多。大多数环境-材料组合条件下，以沿晶裂纹为主，如低碳钢在碱和硝酸盐溶液中、高强度低合金钢、高强度铝合金、奥氏体不锈钢在微量氯化物水溶液中的应力腐蚀（图 16.1-3）。但是也有以穿晶裂纹为主的情况，如奥氏体不锈钢在热浓氯化物溶液中应力腐蚀（图 16.1-2）。沿晶应力腐蚀的断口形貌呈岩石状（即晶粒颗粒状），颗粒间有较多的二次沿晶裂纹（图 16.2-17）。未

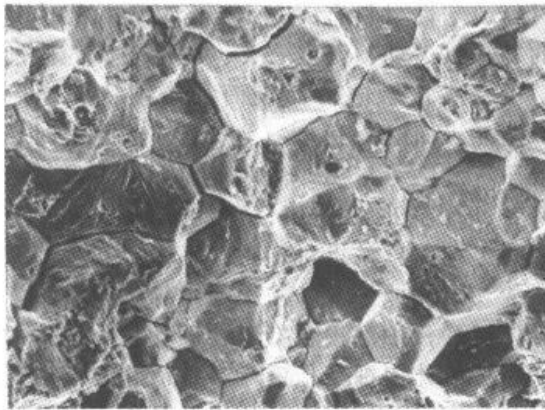


图 16.2-17 30CrMnSiA 钢应力腐蚀的沿晶断口形貌，1200×

清洗前，断口上覆盖大量腐蚀产物；清洗后仍有部分保留在断口上。利用能谱仪，可定性或定量分析腐蚀产物的化学成分。

5 磨损失效

受到外物机械作用，零件表面材料被转移而造成损伤，称为磨损。零件磨损严重和丧失功能即为磨损失效。磨损常与两个零件相互接触和运动有关，与摩擦和润滑有关。另一类外物作用是液体冲刷。

除严重擦伤导致突然咬死的情况外，机械零件

磨损损伤和功能退化通常是一种渐进的过程。选择更换磨损零件的时刻，常要兼顾各种价格因素。

所有承受滑动和滚动接触的零件都产生程度不同的磨损。且磨损程度和失效判据可能差异很大。从机理上分类，磨损有三种主要类型：粘着磨损、磨料磨损和浸蚀磨损。此外，表面疲劳、微动磨损和气蚀也是具有特色的形式，但它们同时受几种机理的混合作用，不作为磨损的基础类型。

5.1 粘着磨损

粘着磨损是由于粘附作用使两摩擦表面的材料迁移而引起的机械磨损。经济合作和发展组织(OECD)定义为：在相对运动时由于固态焊合而使金属从一个表面转移到另一个表面上的磨损称为粘附磨损。

零件表面不会完全光滑，总存在各种形状的宏观和微观的凹凸不平。当两零件相接触和承受法向载荷时，表面上的鼓凸点首先接触和产生弹性和塑性变形，直到实际接触面积能够承受所加载荷为止。因此，两表面间会局部发生粘附结合。这种结合强度可能高于两种零件材料中较弱者的强度。当两零件表面相对运动时，该较弱材料被剪断，材料被转移到另一接触表面上。在随后的多次相互作用中，这些被转移的材料有可能再转移到原来的零件表面上，但却是粘附在不同的部位；另一种可能是转移材料被彻底分离，成为不规则形状的磨损碎屑颗粒。最严重的情况是咬死，摩擦表面严重粘着而使相对运动停止，常导致事故。

粘着磨损的体积损失正比于法向载荷和滑动距离，反比于较弱表面的硬度或屈服强度。理论研究中用下列公式描述粘着磨损现象：

$$V_{ad} = \frac{kSL}{3H} \quad \text{或} \quad V = \frac{kSL}{H}$$

式中 V —— 磨损伤痕体积；

S —— 滑动距离；

H —— 凹坑屈服强度（硬度）；

k —— 磨损系数，代表较软材料表面接触区中发生断裂的概率， k 值大体在 $10^{-3} \sim 10^{-8}$ 范围内。例如，低碳钢-低碳钢摩擦副， $k = 7 \times 10^{-3}$ ；工具钢-淬硬钢， $k = 1.3 \times 10^{-4}$ 。这是裸露金属间干滑动的

实验数据,并为小试样和一定的试验条件。实际的零件会更复杂。当有氧化膜、吸附膜和润滑剂影响时,系数 k 改变,或采用更复杂的公式。

5.2 磨料磨损

磨料磨损是由硬颗粒或硬突起引起零件表面破坏、分离出磨屑或形成划伤的磨损。经济合作和发展组织将磨料磨损分为摩擦磨料磨损和磨料侵蚀两类。后者是含硬颗粒流体几乎平行于固体表面相对运动而产生的磨损,它也可归入磨料侵蚀磨损类中。前者是普通的磨料磨损。

磨料磨损的原因是硬颗粒或硬突起沿零件表面滑动,包括:①松散的硬颗粒陷在两个相对运动的零件表面之间;②硬颗粒被固定(嵌入或粘附)在一个表面上,对另一个零件表面造成磨料磨损;③一个表面上有硬突起,磨损另一表面。前两种的硬颗粒可能是外来物,也可能是由粘着磨损和磨料磨损形成的碎屑。后两种属于二体磨料磨损,第一种属于三体磨料磨损。三体磨料磨损时,磨粒多数时间处于滚动状态,磨损速率较低;二体磨料磨损的磨损速率较高。

磨料磨损是磨粒(或突起物)对零件表面起切削作用。磨粒硬度高于被磨表面,两者在载荷下相对滑动时,磨粒移动或切除表面上的材料,在表面上留下犁沟、划痕和擦痕等形貌。

硬颗粒划过较软表面,形成典型的犁沟,沟内材料未被切除,而是塑性流动(变形)而移向沟边沿。另一种情况是形成犁沟的同时,切除沟内材料,在移动硬颗粒的前方形成切削屑片。也可能移向沟边沿的材料随即或经磨粒多次作用后裂成碎屑。

磨料磨损可分类为:凿切磨料磨损、高应力(或研磨)磨料磨损、低应力(或擦痕)磨料磨损。凿切磨损中,从表面去除大颗粒,表面上留下深沟或深坑,比较类似于机械加工车间的磨削加工。高应力磨料磨损的表面有各种不同程度的擦伤,它可具有塑性流动特征,也可具有脆性成分断裂的特征;并且常伴随着磨粒自身的断裂(由于高应力作用);磨损屑片可能是反复塑性变形而疲劳断裂形成,也可能是切屑。当载荷足够低的时候,发生低应力(擦伤)磨料磨损,磨损

表面有细而浅的擦痕,磨粒自身并不断裂;这种情况类似于机械加工车间的抛光加工。

矿石破碎机械和球磨机等的零件,直接接触岩石、矿石等硬物,磨料磨损是决定其使用寿命的主要因素。许多其他类型机器的零件,正常使用情况不应接触磨粒,但有时也发生磨料磨损失效,其磨粒可能来源于外界,如开敞式润滑系统中润滑油带有磨粒;粘附磨损的磨屑,高温条件下摩擦形成的金属氧化物磨屑可能很硬。

5.3 侵蚀磨损

含有硬颗粒的流体相对于固体表面运动,使固体表面受到冲蚀作用而产生的磨损,称为侵蚀磨损。下列两术语是它的特殊形式:磨料侵蚀是含硬颗粒的流体几乎平行于固体表面相对运动而产生磨蚀,也可归入磨料磨损类中;冲击侵蚀是硬颗粒的相对运动几乎垂直于固体表面而产生的侵蚀磨损。

侵蚀磨损的机理有多种,与固体表面属于脆性材料或塑性材料有关,也与含硬颗粒流体对表面的冲击(运动)角度有关。脆性表面的侵蚀磨损是承受高接触应力而表面加工硬化和随后开裂;塑性表面受大角度(大于 45°)冲击时,先形成压坑和边缘挤出,然后形成分层,最后由低周疲劳断裂而形成碎屑;塑性表面小角度冲击时,除上述压坑挤出机理外,更多由切削和犁耕而形成切屑片或多次冲击去除边缘堆积材料。

广泛的侵蚀磨损包括不含硬颗粒的流体的侵蚀作用。流体侵蚀是指液流、气流和含液珠气流的作用而产生的磨损。气体侵蚀是由于气蚀状态液体对固体表面相对运动而产生的破坏。腐蚀磨损是氧化或电化学腐蚀加速的磨损,形成的腐蚀产物松散而易冲蚀去除,氧化物脆性易裂,常提高侵蚀磨损速率;但是也有例外情况,腐蚀产物提高了表面抵抗侵蚀磨损的能力。

5.4 微动磨损和微动磨蚀疲劳

微动磨损是两接触表面在一定法向力下低幅振荡而产生磨损。起始于自然粘着,振动和低幅振荡是基本诱因。由于常伴随有化学腐蚀(氧化),微动磨损也称为微动磨蚀。微动磨损不同于其他的磨损形式,它所产生的大部分磨屑保留在微动磨损部位。

微动磨损常发生在机械的各种连接固定部位。由于振动的原因，原本相互固定的紧密接触表面间产生微小的相对运动，导致微动磨损。但是也有例外，如轴承的滚珠与滚道间接触，摆动轴承匹配表面间接触。

微动磨损可能形成疲劳裂纹，承受高应力的机械零件常由此导致疲劳断裂。

微动磨损过程分为三个阶段：初始粘着，振荡和伴随形成氧化物碎屑，在接触区中疲劳和磨损。

(1) 初始粘着

在微动磨损的早期就发现金属间接触，匹配表面上凹凸不平点间形成结合而造成磨损表面粘着。当微动磨损振幅较大时，在一次振幅中就可能发生数次粘着点形成和撕毁的过程。振幅小到 $0.025\ \mu\text{m}$ 时仍发现有微动磨损现象。当相对运动极小时，振动能量可由表面凹凸不平点的弹性变形所吸收，不发生微动磨损。金属间粘附的必要条件是表面膜被破坏。如果微动磨损副由两种不同金属材料制成，则软金属可能产生大量变形，而硬金属却完整无损。相同的两种硬金属间造成较低的粘着磨损系数；两种软金属间造成较高的粘着磨损系数。

(2) 产生磨屑

钢铁材料微动磨损，产生大量褐红色氧化物颗粒。例如低碳钢大气中微动磨损产生的磨屑，大部分为 $2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，呈褐红色，具有高磨粒性。某些有色金属微动磨损产生的磨屑，多数是未氧化的，且颗粒尺寸较大。工具钢和铬等硬材料中，初始磨屑颗粒很细，存在较多氧化物。在惰性和保护气氛中微动磨损，只产生少量磨屑，但表面损伤很广。

如果微动磨损副中的一方为软金属，硬氧化物碎屑可能嵌入较软金属中而降低磨损速率。因此，微动磨损中形成的氧化物碎屑粘着于表面时能降低磨损速率；保持松散状态时能增高磨损速率。

(3) 疲劳和磨损

在微动磨损条件下，远低于疲劳极限的低应力即可导致疲劳裂纹形成。在微动磨损区形成疲劳裂纹，主要取决于表面区中的应力状态，尤其取决于叠加于循环应力上的各种应力。裂纹扩展方向也与接触应力分布有关，垂直于微动磨损区

中的最大主应力方向。因此，基于裂纹形成的疲劳强度，随接触压力增加而线性地增加。

微动磨损的特有现象是有些疲劳裂纹可能不扩展，因为接触应力的作用范围仅限于微动磨损表面下很浅的区域。对于承受应力的轴类零件和连接部位，由微动磨损形成裂纹和最终疲劳断裂是常见的失效类型，对这类零件施加某种表面处理（喷丸和表面滚压等），造成有利的表层残余压应力，阻止或停止裂纹扩展，是极重要的预防措施。消除或减小零件的振动，有效的润滑，或在两表面间设置隔离层（例如钛合金零件表面镀层），也是预防微动磨损的重要措施。

5.5 磨损失效分析的方法

对一个磨损失效事件进行准确分析，至少从三个方面的来源收集证据：磨损表面，磨损碎屑，工作环境。

(1) 观察检查磨损表面

磨损表面的损伤程度轻重不同，从抛光到磨去大量材料，差异悬殊。目视检查配合测量零件重量和尺寸，确定损伤程度和去除材料的数量。

观察磨损表面使用显微镜，现在尤其使用扫描电子显微镜。从磨损部位切取观察用试样；对于大型零部件，可以制备复型试样，除本篇第1章中提到的塑料复型外，还采用某种材料铸造硬复型。硬复型不仅可用于显微形貌观察，还可用于表面粗糙度测量。

扫描电子显微镜用于观察表面损伤的低倍外貌和高倍形貌，还可进行必要的微区化学成分分析。依据损伤的形貌，确定损伤类型：擦伤、划伤、犁沟、微动磨损剥蚀坑、剥落、腐蚀坑；确定损伤的分布和线状损伤的方向；确定表面膜脱落和粘着特征；确定是否有冷作硬化表面层；是否有某种显微组织受到择优侵蚀；是否有磨粒嵌入零件表面。

依据观察提供的证据，有利于进一步确定磨损的类型：粘附磨损、磨料磨损、侵蚀磨损、微动磨损、接触疲劳（表面疲劳）、腐蚀磨损。

(2) 磨损零件工作环境调查和成分分析

环境条件对于磨损表面去除材料的机理和速率都产生重大影响，应考虑到环境条件的各个细节。矿石破碎机零件的工作环境是矿石，它是磨料磨损的磨粒，当矿石来源和成分变动时，会造

成零件表面的不同磨损速率。当怀疑环境介质具有腐蚀性时，也应对环境介质进行成分分析。零件工作中有润滑环境时，要考虑润滑剂是否有效，实际使用的润滑剂是否与设计符合，使用中是否更换过润滑剂，服役历史中是否出现过干摩擦等异常情况。

(3) 磨损碎屑的观察和分析

在磨损表面之间，在磨损零件边缘，寻找磨

屑；磨屑也可能嵌入表面中，也可能悬浮在润滑剂中。为了确定磨粒或磨屑的尺寸和各尺寸段所占重量百分数，施行尺寸筛选是非常有帮助的，例如用铁谱法获得按尺寸分布颗粒载片，用双色显微镜观察其尺寸、形状和颜色，用扫描电子显微镜观察形貌和成分分析，对于阐明磨损机理和原因，提供重要的证据和线索。

第3章 轴的失效分析

1 概述

机器中的轴，通常用来支承旋转的零件，并传递动力和运动。从形状上来看，轴可分为直轴、曲轴和软轴三大类。软轴能把回转运动灵活地传递到任何位置，主要用于仪器设备中。曲轴在动力机器中用得较多。在一般机器中用得最多的是直轴。直轴可以承受弯矩和扭矩的作用，有时还有拉压载荷作用在轴上，因此，对于旋转的轴，在绝大多数情况下，轴上的应力是变化的（交变应力），这就容易引发轴的疲劳失效。轴的

旋转运动通常都受轴承（滑动轴承或滚动轴承）的约束。如果用的是滑动轴承，轴的轴颈部可能出现过度磨损。

在轴的设计中，都进行过较详细的设计计算和结构设计，保证轴有足够的强度和刚度。但在实际使用中，由于种种原因，轴的失效仍经常可见。轴常见的失效形式有以下几种：①弯曲疲劳；②扭转疲劳；③复合（弯曲和扭转）疲劳；④脆性断裂；⑤塑性断裂；⑥永久变形；⑦磨损；⑧腐蚀。

引起轴失效的可能原因见表 16.3-1 所列

表 16.3-1 引起轴失效的可能原因

主要原因	具体表现
设计不当	对载荷估计不足，计算有误；结构设计不合理，应力集中过大（如过渡圆角太小、轴截面突变、键槽、过盈配合不合理等）；未考虑共振等因素
材料有问题	材料错号；冶金有缺陷（夹杂、偏析等）；化学成分和力学性能不符合规定；有氢脆、冷脆等不良性能
热加工有误	锻造毛坯有缺陷（如锻造比不足，有折叠现象等）；热处理工艺不当，金相组织不符合要求；有淬火裂纹和表面脱碳等
冷加工有误	过渡圆角尺寸不到位；表面粗糙度过大；过盈配合处尺寸超差；存在磨削裂纹；装配不当，有硬碰伤等
维护使用不当	超载、超速使用；环境条件过分恶劣；润滑不当；未定期检查修理等

2 轴上的应力和断裂特征

了解轴上的应力对轴的失效分析十分重要。作用在轴上的不同载荷，可以使轴受拉伸、压缩、扭转、弯曲，或者其中几个的复合作用（如弯扭复合作用等），轴上由此产生不同的应力和应力分布。在不同的应力作用下，对于不同性质（塑性或脆性）的材料，其失效特征也不同。表 16.3-2 列出了轴受拉、压和扭转时某分离体上二维的应力（忽略第三维应力）及其分布情况；同时也表示出塑性材料和脆性材料在过载断裂时的断裂特征。

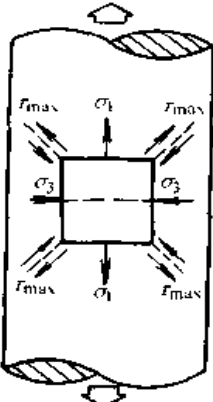
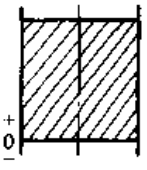
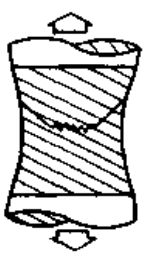

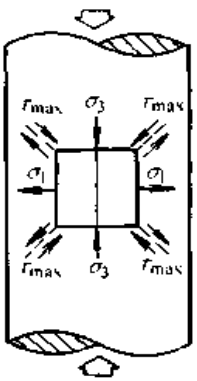
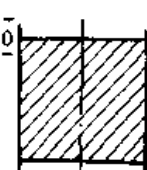
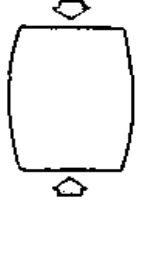
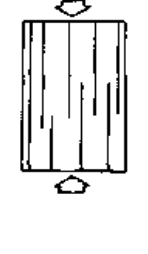
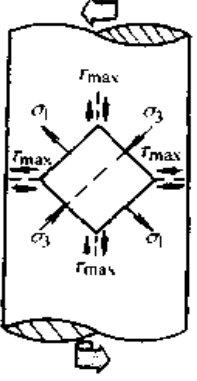
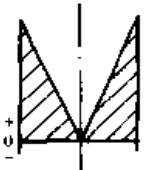
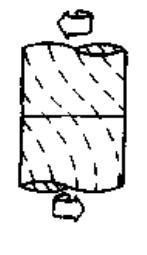
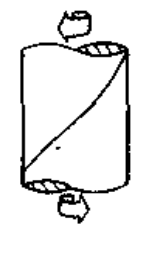
3 轴的失效形式

常见的轴的失效形式有疲劳断裂、磨损、脆性断裂、塑性断裂、永久变形和腐蚀等。

(1) 轴的疲劳断裂

轴的疲劳断裂是轴的主要失效形式。轴的某截面在循环应力（交变应力）作用下形成的断口称疲劳断口。当应力的循环次数 $N > 10^4 \sim 10^5$ 时，称为高周疲劳；而当 $N < 10^4 \sim 10^5$ 时，称为低周疲劳。在机器中，最常见的是高周疲劳。轴的高周疲劳典型断口，按断裂发展过程可分为三个区域，即疲劳核心区（疲劳源）、疲劳裂纹扩

表 16.3-2 轴上的应力和断裂特征

受载种类	应力种类和方向	应力分布	断裂特征		说 明
			塑性材料	脆性材料	
拉 伸					<p>拉伸应力 σ_1 为轴向，压缩应力 σ_3 为横向，最大切应力 τ_{max} 与轴线成 45°。应力分布在全轴上。对塑性材料，断裂时有缩颈，近表面有与轴线成 45° 的剪切唇。而对于脆性材料，其断裂面大致垂直于拉伸应力 σ_1。</p>
压 缩					<p>其应力 (σ_1、σ_3 和 τ_{max}) 和应力方向正好同上述拉伸相反。对塑性材料，过载时将产生相当的塑性变形 (腰鼓形)，但不断裂。而对于脆性材料，如果不被压弯，其断裂面将平行于轴线。</p>
扭 转					<p>将上述拉伸状态的应力转 45° 就是轴受扭转时的应力状态，但应力分布同拉伸状态不同：表面应力最大，轴心应力为零。对于塑性材料，在断裂前将产生可观的扭转塑性变形，但不改变轴的形状，因此不易观察到。对于脆性材料，其断裂面同轴线成 45°。</p>
弯 曲	<p>当轴受弯矩作用时，其受拉侧的应力状态同上述拉伸时应力相同，而受压侧的应力同上述压缩时的应力状态相同，其中性层上的应力为零。</p>				

展区和瞬时破断区，如图 16.3-1 所示。

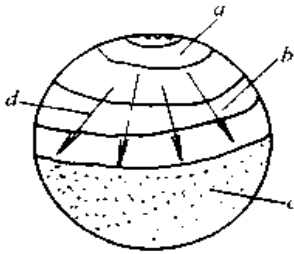


图 16.3-1 轴的高周疲劳断口
a—疲劳源区 b—疲劳裂纹扩展区
c—瞬时破断区 d—裂纹扩展方向

轴在交变应力作用下，就可能在应力最大、强度最低的区域出现疲劳核心（疲劳源）。对于受弯曲、扭转作用的轴，最大应力通常在轴的表面上，因此表面上的键槽、定位孔、台肩、加工刀痕和碰撞硬伤等，都会产生较大的应力集中，从而形成疲劳源。如果冶金质量有问题，如有偏析、夹杂物和空洞等，也可能在轴的内部形成疲劳源。在一个疲劳断口上可以出现一个或数个疲劳源，这取决于该断口的应力大小和应力集中的情况。从宏观上看（肉眼或放大镜观察），疲劳源区显得比较光亮，这是产生疲劳裂纹后，在交变应力作用下裂纹面反复摩擦的结果。可按此特

点判断疲劳源。

在轴的某处形成疲劳源后，在一定条件下，疲劳裂纹就会不断地向前扩展，从而在断口中形成疲劳裂纹扩展区。此扩展区最常见的特征是在断口上呈现贝壳状（或海滩状）的条纹。此条纹是疲劳裂纹从疲劳源处开始不断向前推进留下的痕迹。条纹成弧线状，凹向即为疲劳源方向。如果轴表面有较大的应力集中（如退刀槽等），则接近表面的疲劳裂纹的扩展速度可能大于轴心部的速度。这时，就可能出现凸向的疲劳裂纹扩展条纹。

这些条纹，在低应力高周疲劳失效的断口上，呈现得比较明显；而在高应力低周疲劳的断口上就不易观察到这种贝壳状的条纹线。

当疲劳裂纹扩展到某一临界尺寸，轴的断面已不能承受给定载荷时，轴将瞬间断裂，这就在断口上留下了瞬时破断区（静断区）；此区的断口显得高低不平，非常粗糙，并且没有任何摩擦的痕迹。这在断口中是很易区别。

以上是轴的疲劳断口所具有的典型形貌。由于轴受载大小和性质不同，轴的材料和结构不同，轴的疲劳断口的形貌也将会有所差别。表 16.3-3 列出了不同载荷类型、不同应力集中、不同名义应力情况下，轴的疲劳断口情况。

表 16.3-3 载荷类型、应力集中、名义应力对疲劳断裂的影响

名义应力 应力集中		高			低		
		无	中等	严重	无	中等	严重
载 荷 类 型	拉-拉 或 拉-压						
	单 向 弯 曲						

名义应力		高			低		
载荷类型	双向弯曲						
	旋转弯曲						

旋转弯曲疲劳是轴的常见失效形式之一。旋转弯曲时，轴表面上任意点的应力总是作对称循环变化，因此轴圆周表面上就可能出现多个疲劳源、应力集中越严重，这种现象越明显，如图 16.3-2 所示。图中的阴影区是最后的静断区。

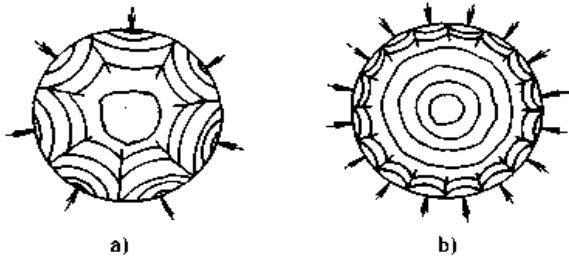


图 16.3-2 旋转弯曲疲劳裂纹的扩展
a) 中等应力集中 b) 严重应力集中

旋转弯曲疲劳断口的另一个特点是“偏转现象”。即旋转弯曲疲劳的最终断裂区虽然在疲劳源的对面，但总是相对于轴逆向偏转 θ 角（一般 $\theta \approx 15^\circ$ ），如图 16.3-3 所示。因此，从疲劳源与最终断裂区的位置不难判断轴的旋转方向。

轴还可能发生扭转疲劳失效。不管是单向扭转疲劳还是双向扭转疲劳，其疲劳裂纹都首先发生在轴的表面上。在双向交变扭转时，轴可能发生的各种疲劳裂纹形态如图 16.3-4 所示。由最大切应力引起的疲劳裂纹，可能平行也可能垂直于轴心线（图 16.3-4a 和 b）；由正应力引起的疲劳裂纹与轴心线成 45° （图 16.3-4c）；在正应力

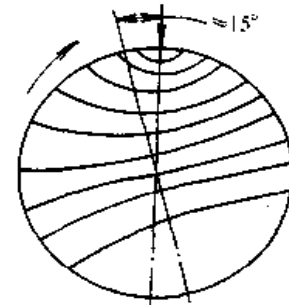


图 16.3-3 旋转弯曲的“偏转现象”

和切应力共同作用下可能出现混合型裂纹，如图 16.3-4d 所示。此外，轴上如有应力集中，轴上扭转疲劳裂纹还可能出现一些变异的形态，如锯齿状、台阶状等。

图 16.3-5 是轴扭转疲劳的典型例子：此轴的材质为美国 4340 钢，硬度为 $30 \sim 30.5\text{HRC}$ ；这是一根驱动轴，承受周期性的载荷和经常的过载。轴上设有一扭剪槽，当驱动轴突然受过载作用时，扭剪槽处将断裂，这样就能保护其他机件不损坏。图中扭剪槽表面和内部的原始裂纹与轴线大致成 45° 夹角，这是扭转疲劳的典型特征。

(2) 轴的磨损

轴的磨损往往发生在轴和其他零件的配合面上，不但运动副（如滑动轴承）的配合面会发生磨损，而且非运动副（如花键、静配合面等）的配合面也可能发生轴的磨损。

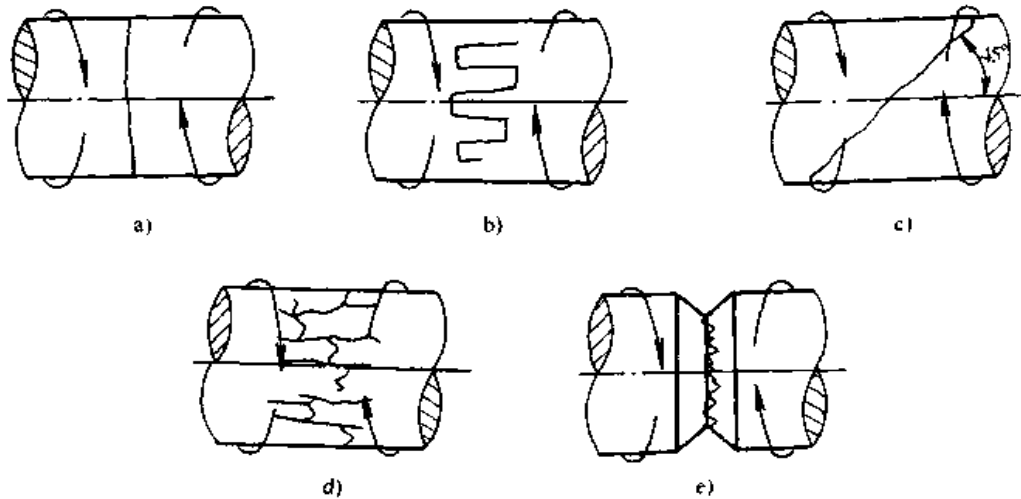


图 16.3-4 交变扭转载荷引起的疲劳裂纹形态

a) 横向切应力裂纹 b) 纵向切应力裂纹
c) 正应力裂纹 d) 正应力和切应力混合裂纹 e) 锯齿形裂纹

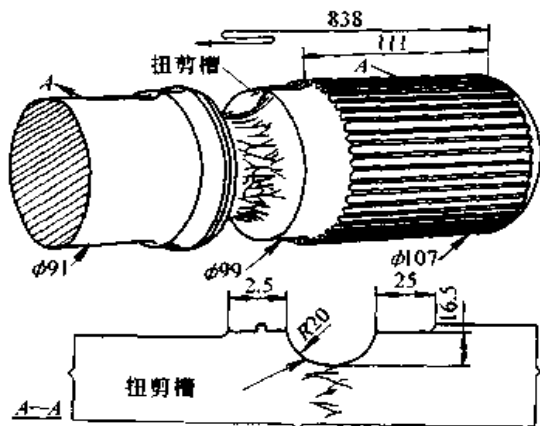


图 16.3-5 驱动轴的扭转疲劳

当运动副中存在砂粒、灰尘等硬质颗粒或润滑油不清洁时，就会出现磨损速度很快的磨料磨损。当运动副的油膜厚度不足，金属与金属直接接触，而相对滑动速度又较快时，就会出现黏附磨损。当轴和其他零件之间有间隙或配合不够紧密时，两接触面在一定法向力作用下作相对低幅振荡，就会出现微动磨损。配合有间隙的花键轴最易出现这种微动磨损。

(3) 轴的脆性断裂

轴发生脆性断裂时，轴上的应力并不高，从强度计算来看是很安全的，但却发生断裂。脆性断裂是突然发生的，其裂纹的扩展速度可达 1 830 m/s，甚至更高。因此，轴断裂之前总的宏观变形量极小，很难使人觉察，其危险性也在于

此。轴的脆性断裂一般在较低的温度下发生，因此常称作低温脆性断裂。脆性断裂通常出现在体心立方和密排六方的金属材料中；高强度钢和低强度钢都可能发生脆性断裂。

脆性断裂断口的特征详见本篇第 2 章。

(4) 轴的塑性断裂

用塑性金属材料制造的轴，当承受过载时，在断裂前会产生可观的塑性变形。对于受拉或受压的轴，此塑性变形可以一眼看出，但对于受扭转的轴，此塑性变形不易发现。塑性断裂轴的断口特征，同轴的形状、所受应力的种类、受载大小和温度高低有关。轴材料的塑性随着金属强度的增加、工作温度的降低、以及轴上存在缺口、圆角、孔、环槽等而降低。轴的塑性断裂通常发生在意外受过载的情况，或者发生在材料牌号和热处理有误的情况。

塑性断裂断口的特征形貌见本篇第 2 章。

(5) 轴的永久变形

当轴上的应力超过材料屈服强度时，轴将发生不可恢复的永久变形而失效。这时轴并没有断裂，而仅仅是失去了原来正确的几何形状。这种情况大多发生在短时过载的意外工况中。采用强度高的材料和正确的热处理工艺，可以提高材料的屈服强度，从而避免轴的永久变形失效。

轴的蠕变也是一种永久变形失效。当工作温度增高时，轴材料的屈服强度将降低，这就有可能使轴上的应力超过屈服强度，使轴逐渐产生永

久变形——蠕变。任何一种受载状态（如拉伸、扭转、压缩和弯曲等）都有可能出现这种永久变形。蠕变经过一段时间后，可能以蠕变断裂而结束。许多在高温下工作（如汽轮机、喷气飞机的引擎等）的轴，其工作能力往往受蠕变变形量的限制。

除了以上几种轴的失效形式外，如果轴在有腐蚀介质的环境中运转，还可能出现腐蚀失效。轴表面遭受腐蚀后，使光滑的表面上出现晶间腐蚀、点腐蚀或其他形式的腐蚀裂纹，从而引发轴的腐蚀疲劳，大大降低了轴的强度和寿命。

4 疲劳失效中的局部应力作用

在分析轴的疲劳失效时，可以发现大部分的

初始疲劳裂纹发生在有应力集中的区域（如轴的环槽、轴肩、螺纹、油孔等处）；即轴某部位的局部应力对疲劳失效有重大的影响。图 16.3-6 表示轴肩不同过渡圆角造成的不同应力集中。图中的应力流线的密集程度表示应力集中的大小。

图 16.3-7 表示不同相对轴径和过渡圆角引起的相对应力大小。很显然，过渡圆角越大，其局部应力越小。

图 16.3-8 表示不同宽度的轴环对应力流的影响，可以看出窄的轴环要比宽的轴环应力集中小。

图 16.3-9 表示轴上不同切槽对应力流的影响，尖锐的切槽对轴的疲劳强度极为不利。

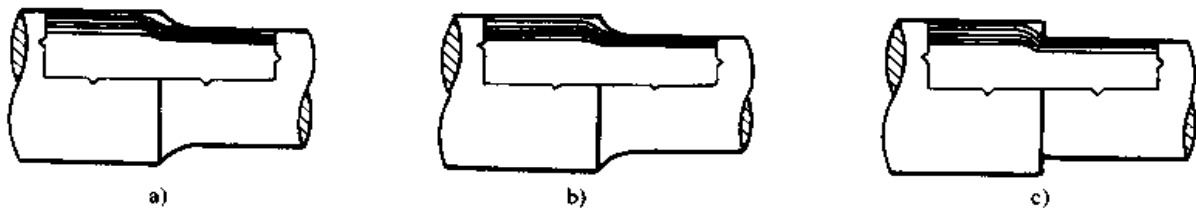


图 16.3-6 不同轴肩过渡的应力流
a) 大圆角 b) 小圆角 c) 直角

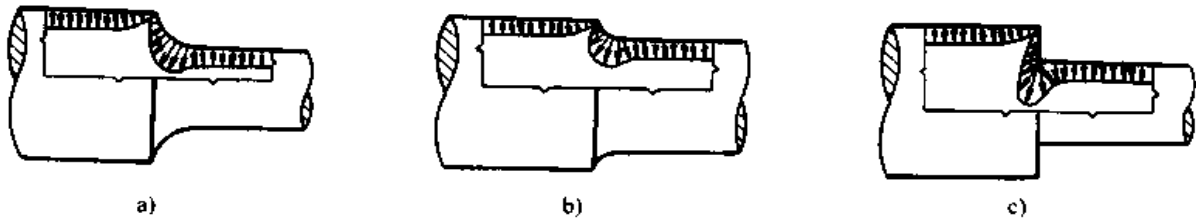


图 16.3-7 不同轴径和过渡圆角的局部应力
a) 大圆角 b) 小圆角 c) 直角

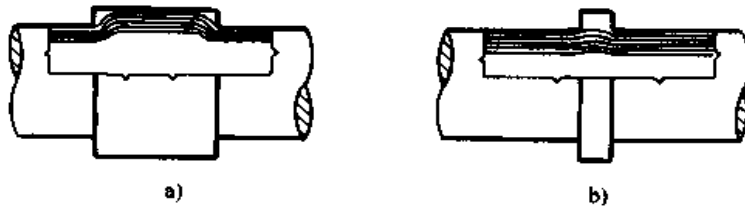


图 16.3-8 轴环宽度对应力流的影响

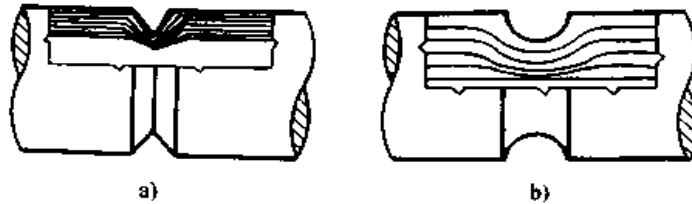


图 16.3-9 轴上不同切槽对应力流的影响
a) 锐角切槽 b) 圆弧切槽

轴上另一种产生大局部应力（应力集中）的结构是纵向切槽，如平键槽、花键槽等在扭矩的作用下，这些键槽的底部因局部应力过大而产生裂纹，裂纹不断扩展使键槽完全破坏。图 16.3-10a 是平键槽根部产生裂纹的破坏情况。有时，键槽底部的裂纹沿圆周扩展，出现一种剥离型的破坏形式，如图 16.3-10b 所示。

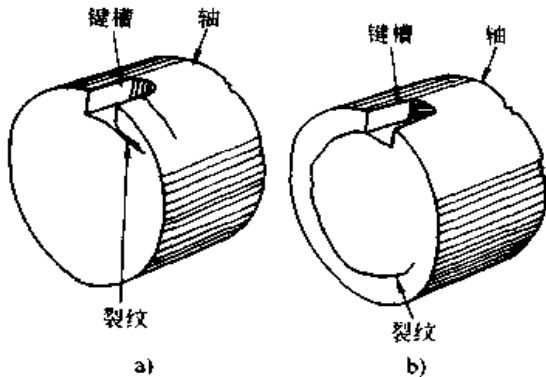


图 16.3-10 键槽的破坏形式

图 16.3-11 是用应力流线表示的平键和花键的应力场。图 16.3-11a 所示的平键槽底部左边是圆角联接，此处未产生裂纹；而右边是尖角联接，此处产生了裂纹，此裂纹沿垂直于主应力方向发展。花键槽底部裂纹的产生和扩展也类似，如图 16.3-11b 所示。

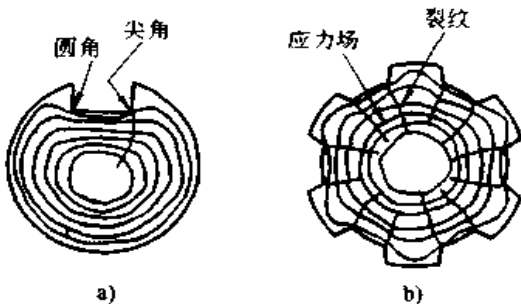


图 16.3-11 平键和花键的应力场和裂纹
a) 平键 b) 花键

这说明轴的结构设计不合理，局部应力（应力集中）过大是轴疲劳失效的重要原因之一。

5 轴的失效分析实例

(1) 轴失效情况

某厂高速线材轧机的辊轴简图如图 16.3-12

所示。轧辊上承受轧制力 $F = 230 \text{ kN}$ 和轧制力矩 $T = 13 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。此辊轴由两个油膜轴承支承，属于悬臂工作状态。辊轴材料为 20CrMnTi，要求整轴渗碳淬火处理（轴两端头除外），表面硬度为 57~61HRC，有效渗碳层深度为 1.1~1.5 mm。此辊轴在生产中曾发生多次断裂失效，其中一根轴仅使用 3 个月即断裂。其断口在轴肩有凹切槽的过渡圆角处，如图 16.3-12 和图 16.3-13 所示。



图 16.3-12 辊轴简图和断裂处

(2) 断口宏观观察

在图 16.3-12 和图 16.3-13 上画出了辊轴断裂的位置和断口的侧面形状（皿形断口）。这是由于过渡圆角处应力集中大，疲劳裂纹在圆角处萌生并沿着与主应力正交方向扩展的结果。图 16.3-14 是断口的正视图。由于有较大的应力集中，因此疲劳源发生在轴的表面上（不止一个疲劳源）。此后，疲劳裂纹逐步向轴心扩展（形成扩展区），并呈凹向推进的形状（试与图 16.3-1 比较）。最后，轴发生瞬间断裂形成静断区。从图 16.3-14 可见，其静断区较小，表明轴的设计安全系数较大。

(3) 辊轴表面硬度测定

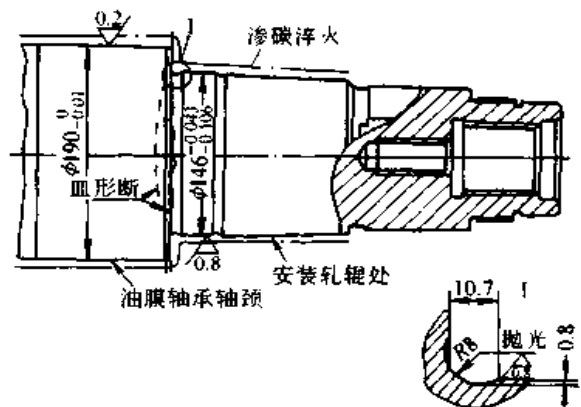


图 16.3-13 辊轴结构和断裂处

用硬度计测量辊轴的表面硬度，其结果仅为 170~220HBS，离图样要求硬度 57~61HRC 相

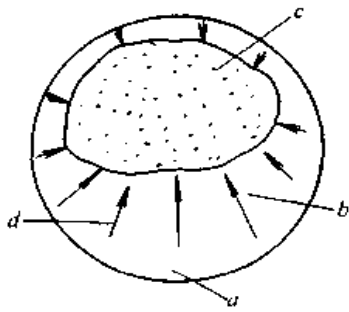


图 16.3-14 辊轴的疲劳断口
a—疲劳源 b—裂纹扩展区
c—静断区 d—裂纹扩展方向

差甚远，表明此辊轴的热处理工艺存在较大问题。

(4) 轴的断裂处过渡圆角加工质量的检查

设计图样对过渡圆角尺寸和加工质量要求见图 16.3-13，此要求甚高。但实际使用的轴离此要求甚远，经仔细检查，存在以下问题：

1) R8 的圆弧不连续，它由两段圆弧组成，如图 16.3-15 所示。这就加大了圆角处的应力集中。

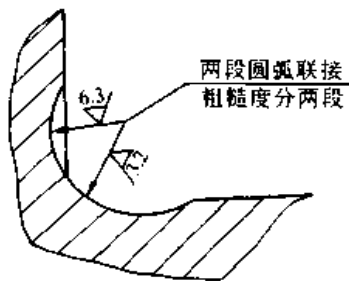


图 16.3-15 实际的过渡圆角

2) 两段圆弧的表面粗糙度不同，并且很粗糙 ($Ra = 3.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$)，如图 16.3-15 所示。在过渡圆角处还存在肉眼可见的明显加工刀纹（按要求，圆角处经抛光， $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ ，应该基本上看不见加工纹理），降低了轴的疲劳强度。

(5) 轴断口处材料的金相检验

在靠近轴的断口处，切下一片金属试样，作金相组织检查，结果发现以下质量问题：

1) 轴表面有渗碳层，但数根轴的渗碳层深差别较大 ($1.2 \sim 1.7 \text{ mm}$)，说明渗碳工艺不稳定。

2) 在轴表面未看到有马氏体组织，因此可以断定，此轴虽经渗碳但未作淬火处理。其结果是轴表面不可能存在有利的残余压应力，严重地降低了轴的强度。

3) 轴的材料中存在较严重的铁素体和珠光体带状组织，这是由于锻造工艺不合理（锻造比不足）造成的。带状组织造成材料力学性能各向异性，并使钢的横向塑性的韧性降低，加工时易形成粗糙的表面。

4) 在金相组织中能观察到明显的网状渗碳体，它破坏了金属的连续性，在渗碳体和基体的交界处容易萌生疲劳裂纹，从而引发轴的疲劳断裂。

5) 据硬度测定，辊轴的心部硬度很低，仅为 $120 \sim 140\text{HBS}$ ，降低了轴的强度。

(6) 轴的疲劳强度系数计算

根据已知条件计算合格（质量符合图样要求）和不合格（断轴）轴的疲劳强度安全系数 S ，其结果：

合格轴 $S = 6.41$ ；不合格轴 $S = 0.86$

两者有如此大的差别是由于两者应力集中、表面强化（渗碳淬火）和表面粗糙度上的不同所形成的。

(7) 结论和建议

1) 根据辊轴的断口形貌特征，可以判定此辊轴为疲劳断裂失效。

2) 轴的机械加工质量和热处理质量均未达到设计图纸上规定的要求。

3) 建议在重新制造辊轴时，应科学地制定热加工工艺（锻造和热处理）和冷加工工艺，并在加工过程中予以严格的控制和检验。其中以控制表面渗碳淬火质量（表面硬度、心部硬度和金相组织）和表面粗糙度最为重要。

第4章 齿轮的失效分析

1 齿轮的损伤和失效形式

齿轮的失效可分为轮体失效和轮齿失效两大类。由于轮体失效在一般的情况下很少出现，因此齿轮的失效通常是指轮齿失效。轮齿失效，就是齿轮在运转过程中，由于某种原因，使轮齿在尺寸、形状或材料性能上发生改变而不能正常地完成规定的任务。齿轮在运转中，轮齿有多种损伤和失效形式。在 GB/T 3481—1997《齿轮轮齿磨损和损伤术语》(idt ISO 10825: 1995)中，将轮齿的损伤和失效分成6类和多种具体形式(如下所列)，并给出了相应的术语和定义。

1) 齿面耗损的迹象：①滑动磨损：跑合磨损(中等磨损、磨光)、磨料磨损、过度磨损、中等擦伤、严重擦伤、干涉磨损；②腐蚀：化学腐蚀、微动腐蚀、鳞蚀；③过热；④侵蚀：气蚀、冲蚀；⑤电蚀。

2) 胶合。

3) 永久变形：压痕、塑性变形(滚压塑变、锤击塑变)、起皱、起脊、飞边。

4) 齿面疲劳：点蚀(初期点蚀、扩展性点蚀、微点蚀)、片蚀、剥落、表层压碎。

5) 裂缝和裂纹：淬火裂纹、疲劳裂纹。

6) 轮齿折断：过载折断(脆性断裂、韧性断裂、半脆性断裂)、轮齿剪断、抹断、疲劳折断(弯曲疲劳、齿端折断)。

以上的轮齿损伤和失效形式有些是在齿轮加工过程中产生的，如淬火裂纹和磨削裂纹等；有些是最终失效(如断齿)，这种失效一旦发生，齿轮只能停止运转，这种齿轮的失效极易判断。而另一些属于过程失效(如过度磨损、起皱、点蚀、剥落等)，这种失效是由齿面的损伤逐步发展的结果，它有一个发展的过程，因此要判定过程失效必须有规定的失效判据才行。这种失效判据通常由各行业制定的标准或规范来规定。

在 GB/T 3480—1997 (eqv ISO 6336: 1996)《渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法》中，规定了齿轮接触疲劳强度试验时试验齿轮的失效判据如下：

对于非硬化齿轮，其大小齿轮点蚀面积占全部工作齿面的2%，或对单齿占4%。

对于硬化齿轮，其大小齿轮点蚀面积占全部工作齿面的0.5%，或者对单齿占4%。

2 轮齿损伤和失效的形貌

(1) 磨料磨损和过度磨损失效

在动力齿轮传动中，齿面的磨损通常是不可避免的，但是如果齿面出现磨料磨损和过度磨损就不正常了。

磨料磨损是指由于悬浮或混在润滑剂中的坚硬微粒(如金属碎屑、锈蚀物、砂粒、研磨粉等)在齿面啮合相对运动中，使齿面材料移失或错位。有时齿面上嵌入坚硬微粒，也会造成磨料磨损。磨料磨损的结果是使轮齿失去渐开线齿形而失效(见图16.4-1)。由于存在坚硬的微粒，因此齿面上常常出现径向划痕。

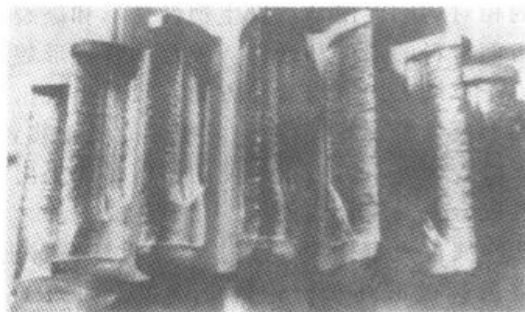


图 16.4-1 齿轮的磨料磨损

轮齿过度磨损的形貌类似于磨料磨损，齿面上的材料也大量移失，并且速度很快，齿轮因而失效(图16.4-2)。

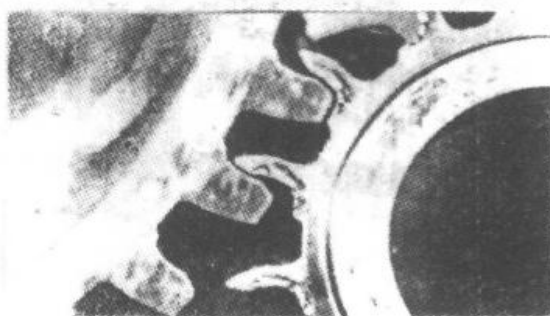


图 16.4-2 齿轮的过度磨损

轮齿的干涉磨损是由于一个齿轮齿顶或另一个齿轮齿根的材料过多引起的(当载荷过大、轮齿变形剧增也可能引起轮齿的干涉磨损),其结果是刮去和磨去两齿轮轮齿齿顶和齿根的材料,使齿根部挖出沟槽,齿顶部滚圆,如图16.4-3所示

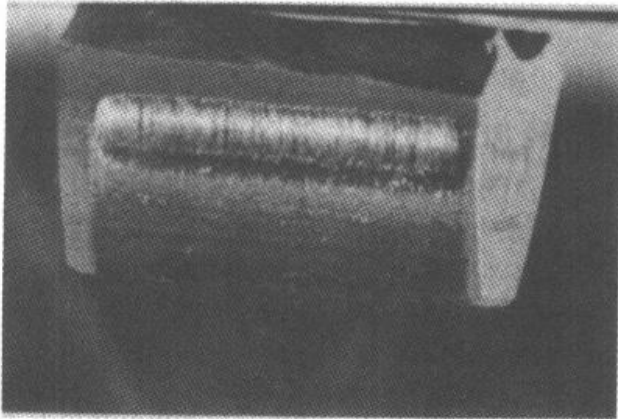


图 16.4-3 齿轮的干涉磨损

(2) 胶合失效

轮齿的胶合是由于齿面上不平的峰谷在接触时产生局部高压,使其熔焊在一起,而后随着齿面的相对运动促使结点发生塑性变形和破裂,导致齿面材料的损失和迁移。胶合的特征形貌是在垂直于节线方向(与滑动方向一致)出现不同程度的划痕(胶合线)。在一般用途的齿轮装置中,轻微的胶合并不影响正常使用,但是如果出现破坏性胶合——胶合线较深,几乎连成一片,齿面上的金属被大量撕脱,工作节线明显暴露出来,正常齿廓被破坏,齿轮就失效了,如图16.4-4所示。

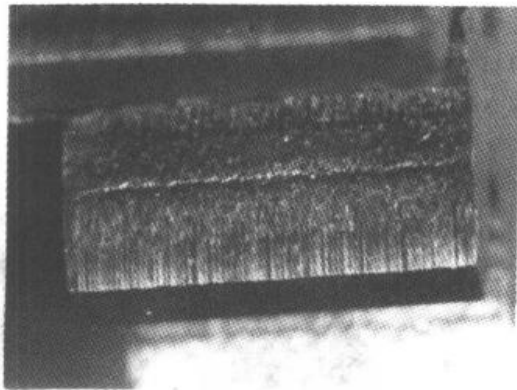


图 16.4-4 齿轮齿面破坏性胶合

(3) 齿面疲劳失效

齿轮在运转过程中,受到周期性变化的接触应力的作用,当接触应力超过一定值时,就会在齿面上产生微小的疲劳裂纹。此疲劳裂纹不断扩展、延伸,最终使小块金属脱落,形成不同形状的小凹坑。齿面金属材料移失并出现凹坑是齿面疲劳损伤的特征形貌。

根据凹坑形状和起因不同,齿面疲劳有点蚀、片蚀、剥落和表层压碎几种损伤和失效形式。

1) 扩展性点蚀 在一般的齿轮传动装置中,齿面上出现不扩展的初期点蚀,并不影响齿轮的使用;但是,如果齿面出现扩展性点蚀(破坏性点蚀),破坏了齿面的正确形状,齿轮将很快失效。扩展性点蚀一般首先出现在靠近节线的下齿面上(图16.4-5),点蚀坑较大、较深,并有不断扩展的趋势;有时虽然会有一些间断的抑制,但随后又进一步扩展,直至连成一片,最后导致齿轮失效。

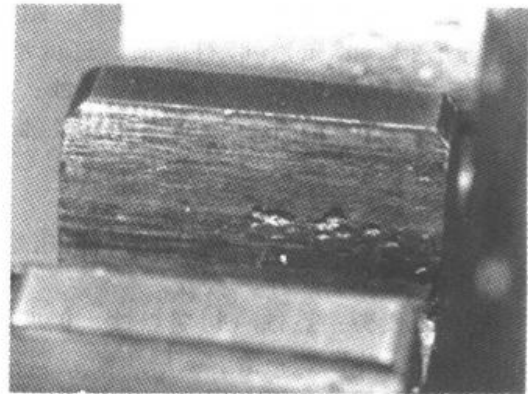


图 16.4-5 齿面扩展性点蚀

2) 片蚀和剥落 片蚀的特征是齿面材料有较大面积的薄碎片脱落,使齿面出现似倒三角形的深度大致相同的浅坑(图16.4-6)。

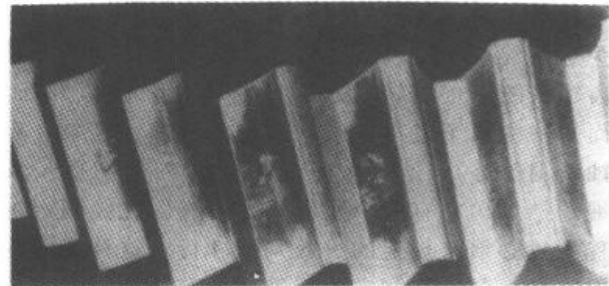


图 16.4-6 齿面的片蚀

剥落特别用来表示脱落的碎片厚于齿面硬化层,且形状不规则的类似于片蚀的损伤,如图16.4-7所示。

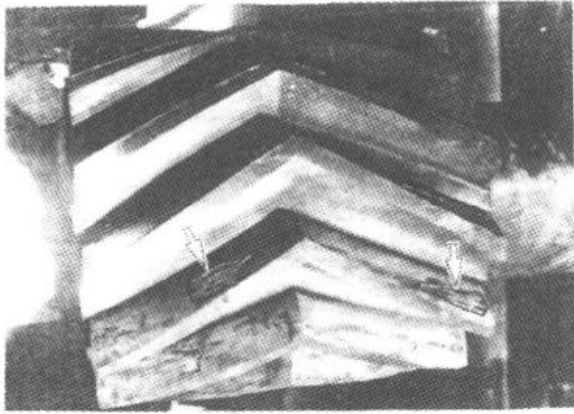


图 16.4-7 人字齿轮齿面的剥落

片蚀和剥落的主裂纹通常发生在与齿面平行的次表层；随着裂纹的扩展，裂纹上部的金属就会碎裂脱落，形成蚀坑，如图 16.4-8 所示。

3) 表层压碎 表层压碎常发生在齿面硬化的齿轮上，其裂纹通常在表层与心部的过渡区扩展，致使大块表层材料碎片脱落。这是一种严重的剥落形式。图 16.4-9 是软氮化齿轮的表层压碎形貌。



图 16.4-8 齿面小块金属脱落

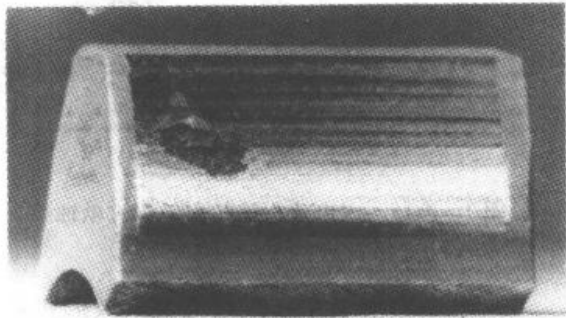


图 16.4-9 齿面表层压碎

扩展性点蚀、片蚀、剥落和表层压碎都会破坏正常的齿面形状，从而使齿轮失效。

(4) 轮齿折断

轮齿折断是一种危险性很大的最终失效形式，它可以细分为以下几种：

1) 过载折断 轮齿受到一次或很少几次严重过载时，就可能发生过载折断。过载折断的断口一般都在齿根部位。断口比较平直，并且具有很粗糙的特征。图 16.4-10 是右齿面因一次严重过载造成轮齿折断（剪断）的形貌。

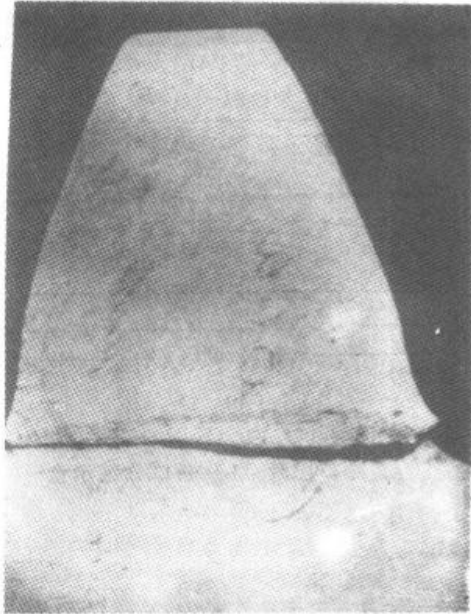


图 16.4-10 轮齿过载折断

2) 疲劳折断 轮齿经高循环次数载荷的作用，在齿根产生疲劳裂纹，导致轮齿疲劳折断。疲劳折断的断口分为疲劳断口面和最终（静断）断口面两个不同区域。在疲劳区内看不到塑性变形的痕迹，断口较平滑，无光泽；而最终断口面的形貌与过载折断的相似。图 16.4-11 是轮齿疲劳折断的典型形貌。从齿轮端面观察，轮齿疲劳折断的齿根断裂线比过载折断的弯曲。图 16.4-12 所示齿轮的右侧断齿是疲劳折断，而左侧断齿是过载（冲击）折断，两者齿根的断裂纹有明显的不同。

对于斜齿轮或严重偏载直齿轮，疲劳折断可能发生在端部。图 16.4-13 所示的齿轮，由于严重偏载造成齿端折断；在偏载区齿面上还有破坏性点蚀和剥落。

3) 随机折断 轮齿的折断通常发生在齿根部位，但是某些偶然因素，例如齿面点蚀、剥落等产生的应力集中和材料的缺陷等，就可能造成

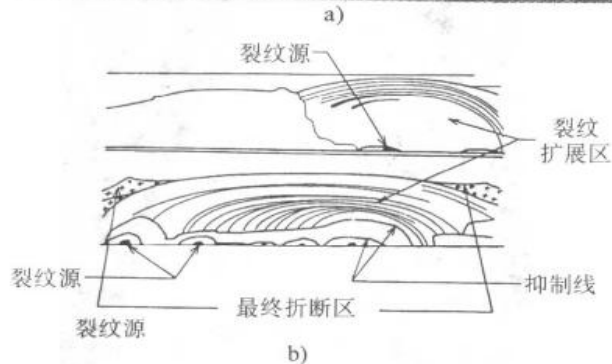
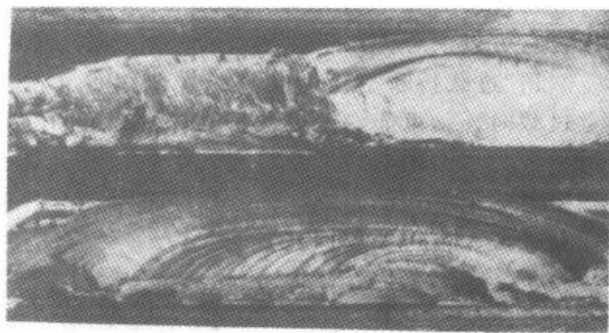


图 16.4-11 两个轮齿的疲劳折断
a) 断口照片 b) 断口分区示意

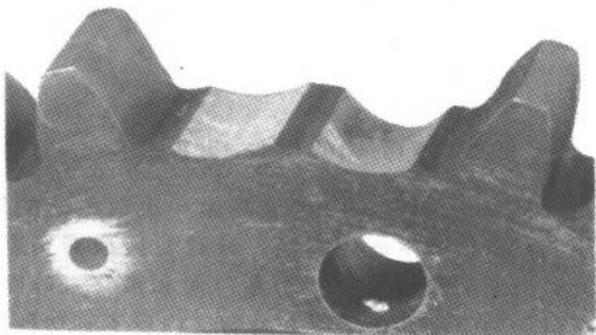


图 16.4-12 轮齿的疲劳折断和过载折断

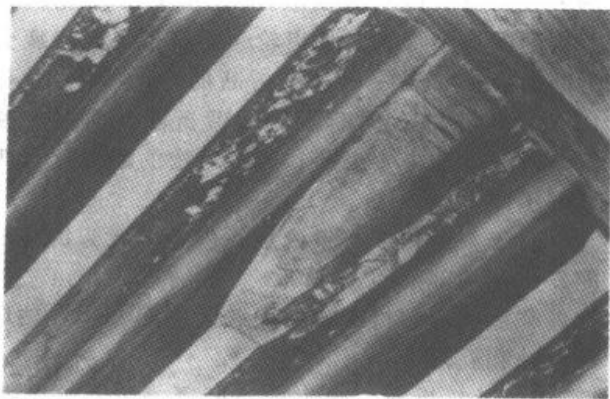


图 16.4-13 齿端折断
非齿根部位（如齿腰、齿顶等）的断裂。这就是

轮齿的随机折断（随机断裂）。图 16.4-14 是 40Cr 钢软氮化齿轮因节线附近出现点蚀而引起的随机断齿。随机断齿的断口形貌与一般疲劳断齿相似。

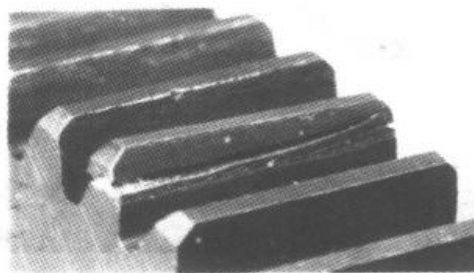


图 16.4-14 轮齿随机折断

(5) 电蚀失效

由于某种原因，两齿轮啮合齿面之间出现一定的电位差，齿面间就会放射出电弧或电火花，使齿面上形成许多边缘光滑的小坑——电蚀坑。如在电子显微镜下观察电蚀的齿面，可以看到电蚀坑中有金属熔化的痕迹。电蚀坑形成的机理类似于电火花加工。当电蚀现象严重时，齿面会出现条状电蚀带，齿面损坏很快，齿轮随之失效^[10]。这种电蚀现象往往在大功率高速齿轮箱的齿轮传动中可以看到。图 16.4-15 是由大电流引起严重电蚀的齿面形貌。

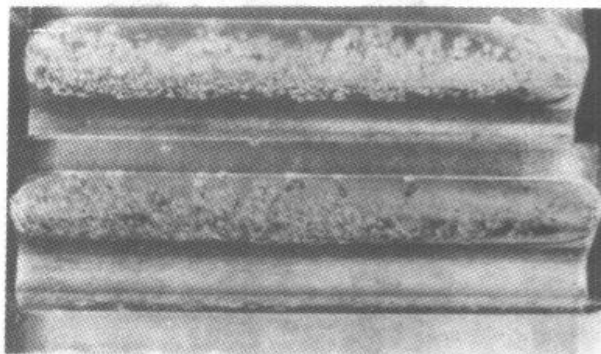


图 16.4-15 大电流引起的齿面严重电蚀

(6) 其他的最终失效

在齿轮失效分析中，上述几种失效形式是较常见的。其他的一些轮齿失效形式如轮齿塑性变形、腐蚀等，一旦发生也可能造成最终失效。

3 诱发轮齿损伤和失效的主要原因

由于齿轮工况不同，材质各异，环境条件也有差别，因此产生上述轮齿主要失效形式的诱因往往

很复杂，但从以下几方面进行分析、查找。

(1) 设计方面的失误

1) 对作用在轮齿上的载荷估计不足 轮齿上所受的载荷一般可分为三部分，即

- ①名义载荷，可视为齿轮传递的名义功率。
- ②外部动载荷，它取决于原动机、从动机的特性、轴和联轴器系统的质量、刚度以及运行状态。
- ③内部动载荷，这是由于齿轮本身制造误差、轮齿刚度等因素产生的载荷。

精确确定轮齿上的载荷非常困难，较好的办法是进行实测或对传动系统进行全面分析。但是，这种复杂的方法不是处处可以采用的，因此在齿轮设计中，对载荷估计不足是常见的。

2) 齿轮装置结构设计不合理 例如轴承安装方式或安装位置不合适，轴或齿轮箱的刚度太差，密封不可靠等，都可能使轮齿失效。

3) 确定齿轮参数不合适 例如齿轮的模数、齿宽系数、侧隙、顶隙、齿根圆角的形状、齿廓修缘、齿向修形等确定得不合适，从而影响齿轮的寿命。

4) 材料选用不合适 齿轮的材料种类、牌号应根据齿轮的具体使用条件来选定；特别是大小齿轮不同材料的匹配，否则容易引起齿轮失效。

5) 润滑系统设计有误 齿轮装置的润滑方法、润滑油性能和油量等处理不好，会使齿面产生胶合、过热和过度磨损等失效。

(2) 材料和热加工方面的失误

齿轮材料化学成分和力学性能不合格，内部有缺陷等是诱发齿轮失效的重要原因之一。齿轮材料的热加工是指毛坯的锻造和齿轮的热处理。

其常见的失误有：金相组织不良，齿面或齿心硬度不合适，硬化层深度不适当，表面有脱碳和晶界氧化现象，残余应力不良，有热处理裂纹等。

(3) 机械加工方面的失误

1) 轮齿的尺寸、形状不良 齿根圆角、齿顶齿端倒角加工不良；齿厚、齿廓修缘、齿向修形不到位等。

2) 轮齿加工精度不足 齿向误差太大会引起齿向偏载；齿距偏差、齿形误差会引起齿高方向接触不良；而齿面粗糙度过大易引发点蚀或胶合失效。

(4) 装配方面的失误

轮齿接触检查不严、轴承间隙未调整好；齿轮啮合间隙太小又未发现；装配时的故障排除不彻底等。

(5) 使用和维护方面的失误

超载、超速使用；润滑油不足、错号或老化；不进行定期检查和检修；对异常情况（如振动、噪声增加、漏油等）未及时处理等。

在齿轮失效分析中，应根据具体的失效形式和现场调查、检测的结果来查明齿轮失效的直接原因，对影响轮齿失效的因素进行全面的分析和衡量，并作科学、缜密的推断，提出相应的改进措施。

4 齿轮失效分析实例

(1) 齿轮的失效情况

某钢厂高速线材轧机的过桥齿轮，在安装使用15天后，出现三个轮齿在同一端局部断裂。齿轮的形状、结构和尺寸如图16.4-16所示。齿

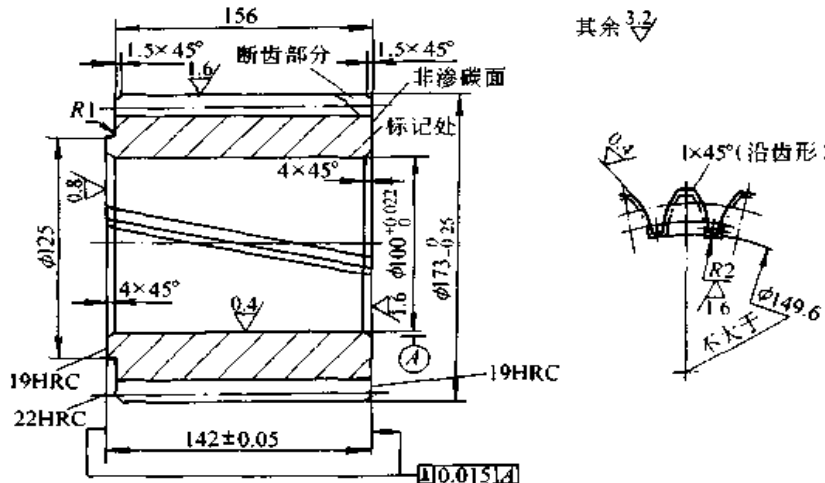


图 16.4-16 过桥齿轮的结构与尺寸

轮的参数列于表 16.4-1。齿轮的材料为 20CrMnTi。图样上要求齿部渗碳淬火，渗层深 0.8~1.2 mm，齿面硬度 58~62HRC，轮齿心部硬度大于 33HRC，齿轮转速 $n = 844 \text{ r/min}$ ，转矩 $T = 6257 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。齿轮采用油膜轴承支承。

表 16.4-1 齿轮参数

法面模数	m_n	5mm
齿数	z	31
齿形角	α_n	20°
法面齿顶高系数	h_{an}	1
分度圆上螺旋角	β	15°
旋向		右
分度圆直径	d	155mm
法面变位系数	x_n	+0.27
精度等级(GB/T 10095-1988)		5KL
配对齿轮齿数		31

失效齿轮上有三个齿均在一端断裂（或有破坏性裂纹），轮齿的断裂部位和形貌如图 16.4-16、图 16.4-17 所示。断裂面自齿根部斜向齿顶发展，断裂长度约占全齿长的 1/9。轮齿的断齿一端齿面有明显的偏载磨损痕迹（图 16.4-17）。断齿形貌具有典型的斜齿轮断齿特征。



图 16.4-17 断齿部位和轮齿损伤

仔细观察断齿的断口，未发现有疲劳断口的特征，可初步判定属于一次性断裂。

(2) 材料的化学成分测定

齿轮材料化学成分测定的数据如表 16.4-2

表 16.4-2 齿轮材料的化学成分（质量分数）（%）

化学元素	C	Si	Mn	P	S	C	Ti
实测	0.2	0.28	0.88	0.019	0.020	1.07	0.078
标准	0.17~0.24	0.20~0.40	0.80~1.10	≤0.035	≤0.035	1.00~1.30	0.06~0.12

所列。根据表 16.4-2 的数据，可以认为齿轮材料的化学成分符合 20CrMnTi 牌号的标准。

(3) 轮齿材料的金相检验

在齿轮轮齿的断口附近，用线切割的方法切下一片试样，如图 16.4-18 所示。对轮齿 a 、 b 、 c 、 d 四个区作金相检验，其结果如下：

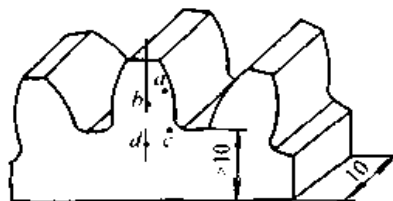


图 16.4-18 轮齿上四个金相检验区

1) 渗碳层深度 = 共析层 (0.9mm) + 过渡层 (0.30~0.35mm) = 1.20~1.25mm。有效渗碳层的深度为共析层深度加 1/2 过渡层深度，即有效渗碳层深度 = 共析层 (0.9mm) + 1/2 过渡层 (0.30~0.35mm) = 1.05~1.175mm。

2) a 区的金相组织为：细小回火马氏体 + 回火屈氏体 + 粒状碳化物。按照 JB/T 6141.3—1992 的规定，其马氏体可评为 1~2 级； c 区的金相组织为：回火马氏体 + 回火屈氏体 + 回火索氏体。其马氏体可评为 3~4 级，比 a 区稍差，但 a 、 c 区的马氏体均高于 5 级，因此齿轮近齿面材料的金相组织是合格的。

3) 根据 JB/T 6141.3—1992 的规定，齿轮渗碳淬火后齿心部的金相组织应为低碳马氏体和一定数量的游离铁素体。但齿轮试样的心部 (b 区和 d 区) 组织为回火屈氏体和回火索氏体， d 区还有魏氏组织存在，并有大量的游离铁素体，未见有低碳马氏体。因此齿轮轮齿的心部组织不符合 JB/T 6141.3—1992 的要求。

(4) 轮齿硬度测定

利用轮齿金相分析用的试样，在轮齿的横截面内，用维氏硬度计在齿顶、齿腰和齿根部位测定多点的硬度值，测量结果见图 16.4-19。在图 16.4-20 中绘出了齿根部位的硬度变化曲线。从图 16.4-19 和图 16.4-20 中可以看出轮齿心部的硬度很低 (234~251HV，相当于 22~24HRC)，这是很不正常的。图样上要求轮齿心部硬度 $\geq 33\text{HRC}$ ，实测值离要求值相差甚远。此外，还用洛氏硬度计测齿轮齿顶硬度和端面硬度，其值标注在图 16.4-16 上。齿顶硬度（可大致代表齿

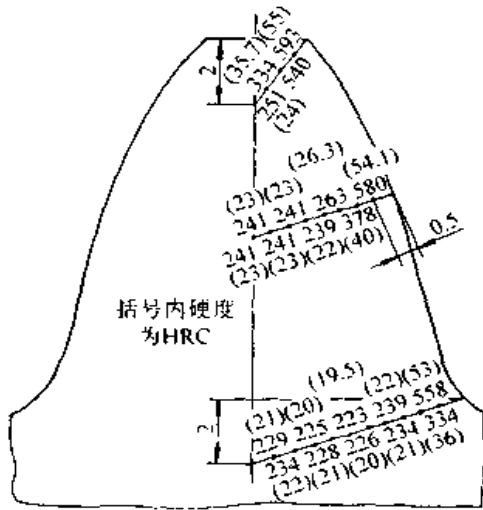


图 16.4-19 轮齿硬度 (HV) 测定结果

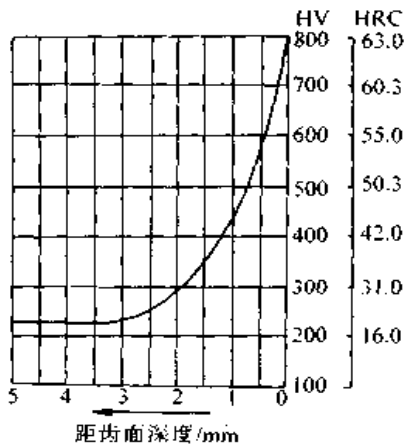


图 16.4-20 轮齿根部硬度变化曲线

面硬度) 基本符合要求, 但端面硬度偏低。

(5) 齿根底槽形状检查

设计图样(图 16.4-16)规定, 齿轮的齿根底槽采用全圆弧形。这是为了减轻硬齿面齿轮根部的应力集中而采取的有效措施。同时由于齿根不磨齿, 能完全保持渗碳淬火后的残余压应力, 这对轮齿的抗弯曲强度非常有利。但是, 观察失效齿轮可见:

1) 齿根没有采用全圆弧底槽, 而是采用普通齿轮的底槽, 此底槽不符合图样要求。

2) 齿根底槽经磨削加工, 渗碳淬火后表面的残余压应力可能已不复存在, 这对轮齿的抗弯强度极为不利。

(6) 轮齿失效原因分析

根据以上宏观观察和微观检验的结果, 轧机齿轮失效的原因主要有以下几方面:

1) 轮齿心部的硬度太低 根据实测, 轮齿心部的硬度只有 22~24HRC, 远低于国内外推荐的数值, 见表 16.4-3

表 16.4-3 渗碳淬火齿轮心部

硬度推荐值 (HRC)							
德国 本茨 公司	日本 丰田 公司	意大利 菲亚特	美国 Allis Chalmers	日本 大型重载 齿轮	我国 汽车 行业	我国 大型 重载 齿轮	JB/T 6144.2 —1992
36.5	45	33.4~ 40	32~ 40	30~ 40	$m \leq 8$, 33~48 $m > 8$, 29~45	30~ 40	30~ 46

注: 表中 m —— 齿轮模数, mm

轮齿心部硬度不足必然降低齿轮的弯曲强度、齿轮许用弯曲应力 σ_s 与轮齿心部硬度 (HV) 之间的关系可用式 $\sigma_s = 0.75HV$ 来表示。以此式来衡量失效齿轮的弯曲强度, 即当心部硬度为 230HV 时, $\sigma_s = 0.75 \times 230 = 172.5 \text{ N/mm}^2$ 。当心部硬度符合图样规定 $\geq 33\text{HRC}$ (相当于 312HV) 时, $\sigma_s \geq 0.75 \times 312 = 234 \text{ N/mm}^2$ 。两者相差 26% 以上。因此, 轮齿的心部硬度不足是齿轮失效的重要原因之一。

2) 轮齿心部金相组织不符合要求 JB/T 6141.3—1992 规定, 渗碳淬火齿轮的心部组织应为低碳马氏体加上一些游离铁素体。但失效齿轮的轮齿齿根部无明显的低碳马氏体组织, 而存在魏氏体组织和大量游离铁素体。属于不合格的心部组织, 降低了轮齿的弯曲强度。魏氏体组织的存在, 降低了钢的冲击韧性和断面收缩率, 使轮齿变脆, 易于断裂。

3) 齿根底槽形状和加工工艺不符合设计图样要求 设计图样规定, 齿轮齿根采用全圆弧轮齿底槽, 这可以减轻硬齿面齿轮根部的应力集中, 提高轮齿的弯曲强度。但实际齿轮没有采用全圆弧底槽, 而采用普通齿轮底槽, 从而降低了轮齿的弯曲强度。加工工艺要求齿根底部不磨削, 保持渗碳淬火的原始状态, 以便保持淬火后产生的对弯曲强度极为有利的残余压应力。但是, 实际齿轮的齿槽底部同齿面一样都作了磨削, 使有利的残余应力全部消失, 甚至会出现有害的拉应力, 大大降低了轮齿的弯曲强度。具有不磨齿槽底部的齿轮, 其寿命比磨削过渡曲线的

齿轮大1~1.5倍。因此,齿根底槽形状和加工工艺的不合理,降低了轮齿的弯曲强度,使轮齿易于断裂。

4) 齿轮有较大的偏载 据现场了解,发生断齿事故的这对过桥齿轮有较严重的齿向偏载现象,从图16.4-17看到明显的偏载磨损痕迹(箭头所指处)。产生偏载的原因,一是齿轮存在较大的齿向误差;二是机体上齿轮轴孔的平行度存在问题。据测试,齿轮的齿向误差符合图样精度要求。因此机体孔(油膜轴承孔)的位置误差和安装误差可能是造成齿轮偏载的主要原因。鉴于硬齿面齿轮对偏载的高度敏感性,和三个轮齿都在同一端断裂的事实,可以认为齿轮的偏载是轮齿断裂的重要原因之一。

5) 可能存在过载 据断口观察,轮齿破坏无明显的疲劳特征,属于大应力破坏,轮齿断裂面起始源处于高应力区。这说明不排除由于过载

轧制引起轮齿折断的可能性。

(7) 结论

1) 齿轮检测结论 ①根据轮齿断口形貌(无疲劳特征)可以判定轮齿属于相对的高应力断裂。②齿轮材料的化学成分符合20CrMnTi的标准要求。③轮齿齿面的金相组织符合JB/T 6141.3—1992的规定。④轮齿齿面硬度符合图样的要求。⑤轮齿心部的硬度不符合图样要求,也不符合JB/T 6141.3—1992的规定。⑥轮齿心部的金相组织不符合JB/T 6141.3—1992的规定,属于不合格金相组织。⑦齿根底槽的形状不符合图样要求的全圆弧齿槽的规定。⑧齿根底槽加工工艺有误差;本应不磨削,但实际齿轮作了磨削。⑨齿轮传动有较大的偏载。⑩在生产中,可能有过载轧制。

2) 轮齿断裂分析结论 齿轮轮齿的断裂是以上⑤~⑩诸因素综合影响的结果。

第5章 滚动轴承的失效分析

1 滚动轴承的失效和失效形式

滚动轴承由于某种原因丧失其规定的功能，轴承就失效了。轴承失效可分两大类：其一是运动失效；其二是精度失效。前者指轴承无法正常运转的失效，如断裂、剥落等；后者指轴承虽然还能继续运转，但已丧失了规定的精度，轴承只能报废。

由于滚动轴承的结构和工作条件的不同，因此轴承的失效形式也多种多样，以下是常见的失效形式。

(1) 接触疲劳失效

在滚动轴承转动时，其内外圈滚道和滚动体都在交变接触应力的条件下工作，经过一定应力循环次数后，轴承零件表面就可能出现金属疲劳现象，而使轴承失效。

滚动轴承的接触疲劳失效（损伤）与齿轮的相似，也有点蚀与剥落之分。点蚀是常见的早期失效形式之一，它是由于表面出现麻点而失效。点蚀有进展性的和非进展性的两种。前者通常不影响使用，但如果运转一段时间后，由于某种原因，使点蚀坑不断扩展，也可形成进展性点蚀。这时表面会出现大面积的微剥落，最后使轴承失效。

剥落是滚动轴承最常见的失效形式，它先是在次表面产生疲劳裂纹，然后扩展至表面，使金属成片状脱落。剥落可以发生在内外圈滚道和滚动体上。轴承产生剥落的原因很多，图 16.5-1



图 16.5-1 轴承内圈大端滚道表面剥落

所示是由于轴承几何轴线不对中，导致局部应力增加而使轴承失效。

图 16.5-2 所示是由于表面损伤出现凸出点，引起局部应力集中而发生的表面剥落



图 16.5-2 局部应力集中而发生的剥落

(2) 塑性变形失效

滚动轴承受过载或冲击载荷的作用，很可能使内外圈与滚动体的接触处产生塑性变形——压痕。压痕的出现，会使轴承的振动和噪声增大，温度升高，磨损加剧，运转精度降低，从而使轴承失效。图 16.5-3 所示是由于多次冲击载荷使轴承内圈产生的压痕。此外，在不正常的外力作用下，轴承零件还可能出现变形失效。例如在内外圈滚道或滚动体表面沿滚动方向出现严重的金属塑性流动现象。不正确的安装，也会使轴承零件产生塑性变形失效。

(3) 磨损失效

滚动轴承的磨损，按其形成机理可分为五种：

1) 磨料磨损 这是由于外界硬质颗粒或碎裂的金属进入轴承滚道引起的磨损。其磨损表面有被磨粒摩擦留下的细槽痕迹，或因压溃而出现的麻点。

2) 粘附磨损 粘附磨损的表面（如滚道、滚动体表面）通常都能看到金属粘着的痕迹。品质优良的轴承，产生粘附磨损的主要原因很可能是润滑存在问题。在轴承的运行过程中，粘附磨损通常都是突然发生的，因此严重的粘附磨损（胶合和咬死）具有很大的危害性。

3) 腐蚀磨损 轴承摩擦表面同周围介质发

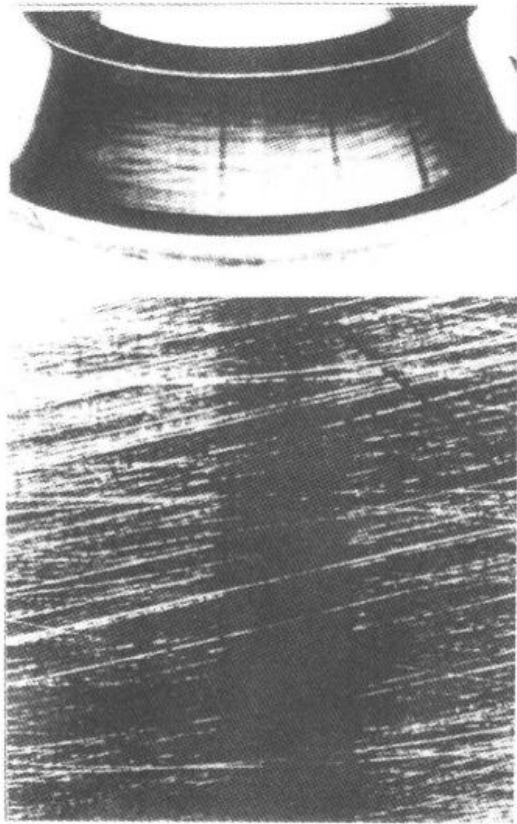


图 16.5-3 轴承内圈表面的压痕

生化学或电化学反应而引起的摩擦现象称为腐蚀磨损。在潮湿环境中工作的轴承，或水进入轴承中，就可能出现氧化磨损，如图 16.5-4 所示。腐蚀磨损进一步发展，会引发表面局部剥落

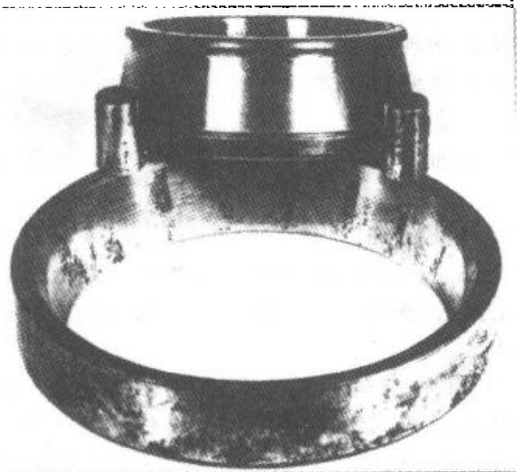


图 16.5-4 初期氧化腐蚀磨损

4) 微动磨损 滚动轴承零件之间如果存在长期的振幅很小的相对运动，其接触部位就会出现微动磨损。如图 16.5-5 所示，就是在运输途

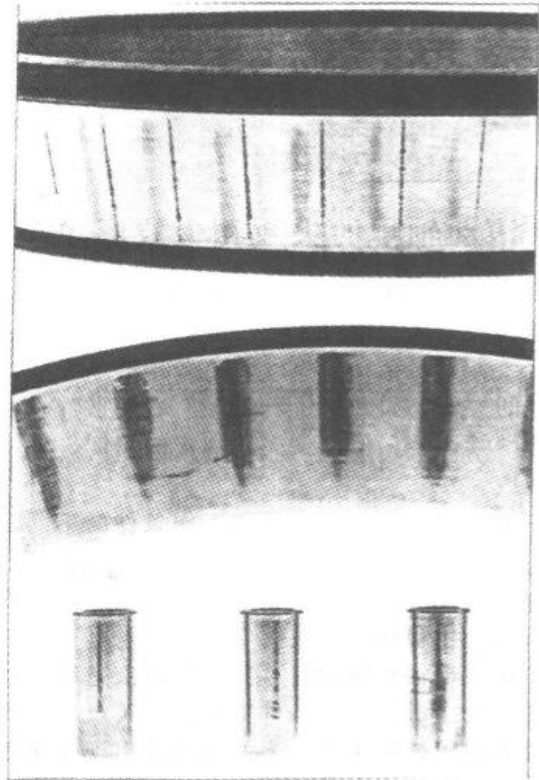


图 16.5-5 微动磨损

中，轴承滚子与滚道作轴向摩擦而产生的微动磨损——凹痕。这种磨损的最显著特征是接触表面会出现红褐色的 Fe_2O_3 或黑色的 Fe_3O_4 磨粒和细小凹痕。

图 16.5-6 所示的汽车前轮球轴承的微动磨损也发生在汽车的运输过程中。这时汽车并没有开动，轴承是静止的，但由运输中的振摆，使轴承滚道出现微动磨损和小点蚀。

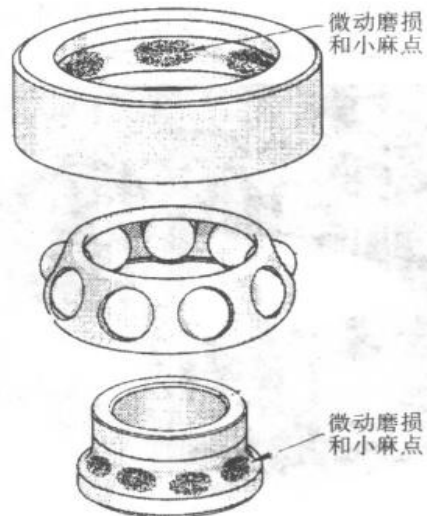


图 16.5-6 汽车前轮轴承的微动磨损

(4) 断裂失效

1) 过载断裂 由于外加载荷过大而引发轴承零件断裂的失效形式。其断口具有一次性断裂断口的特征。

2) 疲劳断裂 由交变应力产生的轴承零件断裂失效形式。其断口具有疲劳断口的特征。

3) 缺陷断裂 如果轴承零件的材料存在内在质量问题(如夹杂物、裂纹和热处理缺陷等),就可能出现这种缺陷断裂。

(5) 电蚀失效

当电流通过滚动轴承时,在一定的条件下,电流就可能击穿轴承相对运动零件之间的油膜,产生电火花,从而造成表面熔融——电蚀。电蚀可在表面上留下小凹坑或有规则的条形坑,如图16.5-7所示。在显微镜下,可以观察到金属熔化的痕迹——云形花纹。

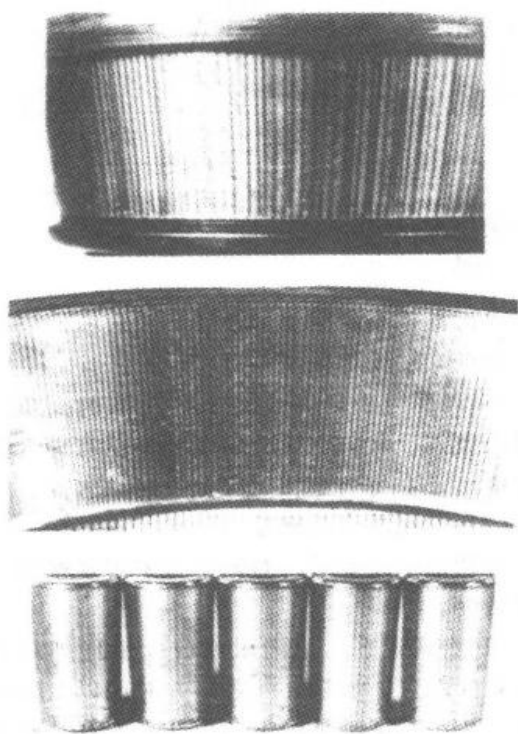


图 16.5-7 轴承零件表面的电蚀条纹

在某些潮湿的环境下,会有一些杂散的电流通过滚动轴承,从而引发电解(类似于阳极浸蚀),使轴承零件产生麻点和浸蚀,如图16.5-8所示。

(6) 游隙变化失效

滚动轴承对游隙有较严格的要求,否则达不到规定的运转精度和寿命。在实际使用中,如果

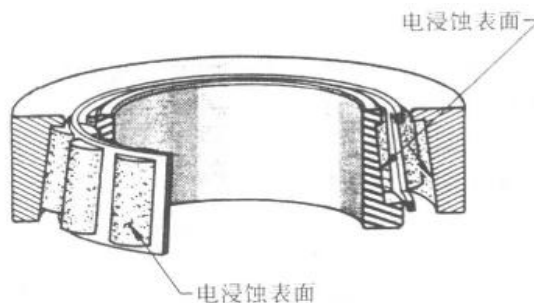


图 16.5-8 轴承零件表面的电浸蚀

温度有较大变化,金属膨胀不均,或由于金属组织不稳定而使轴承零件尺寸变化,都可能引起轴承游隙增大或减小(甚至咬死),从而使轴承失效。

以上是滚动轴承的主要失效形式。实际滚动轴承的失效往往不是单纯的某一种失效形式,而是某几种失效形式的复合或转化。如点蚀和腐蚀都可引发剥落失效,磨损可引起游隙变化失效等等。因此,在作失效分析时,要对失效的滚动轴承作全面仔细的观察和分析。

2 滚动轴承失效分析的方法

一个滚动轴承失效了,通常可根据上述各种失效形式的特征,从外观上就可以判定具体的失效形式;但要确定诱发轴承失效的确凿原因就不容易了。例如,轴承内圈断裂失效是非常容易直观判定的,但是由于引起内圈断裂的因素很多,如配合太紧、装配面形状误差太大、轴承座变形、微动磨损、过载、有外伤、有内在裂纹和缺陷、装配时遭锤击、材质有问题等,使得确定失效的确凿原因非常困难。

(1) 了解轴承的工作条件

在作滚动轴承失效分析时,首先要了解轴承的工作条件:

1) 安装部位和安装情况 从轴承的安装部位,可以得知轴承在机器中所起具体作用,以及与其他零部件之间的关系。轴承的失效往往是其他零件影响的结果,如轴的弯曲变形、箱体刚度不足、齿轮的损伤等都可能引起轴承失效。此外,轴承的不正确安装,如强力安装、安装游隙太小、内外圈的配合不合理等,也都可能引发轴承失效。

轴承部件的制造精度和安装位置是否正常,可以根据轴承滚道中的滚迹位置来判断,如图

16.5-9所示。图16.5-9a表示外圈固定，内圈旋转的轴承，在单向径向载荷作用下，其内圈和外圈滚道上正常的滚迹位置。图16.5-9b表示内圈固定，外圈旋转的轴承，在单向径向载荷作用下，其内圈和外圈滚道上正常的滚迹位置。图16.5-9c表示轴承在单向轴向载荷作用下，其外

圈、内圈和钢球上的正常滚迹位置；图16.5-9d表示轴承在单向径向载荷作用下，轴承内圈歪斜或者外圈不正时，其外圈和内圈滚道中不正常的滚迹位置。因此，在轴承失效分析时，可以根据轴承滚迹的位置来判断轴承部件的加工精度和安装情况。

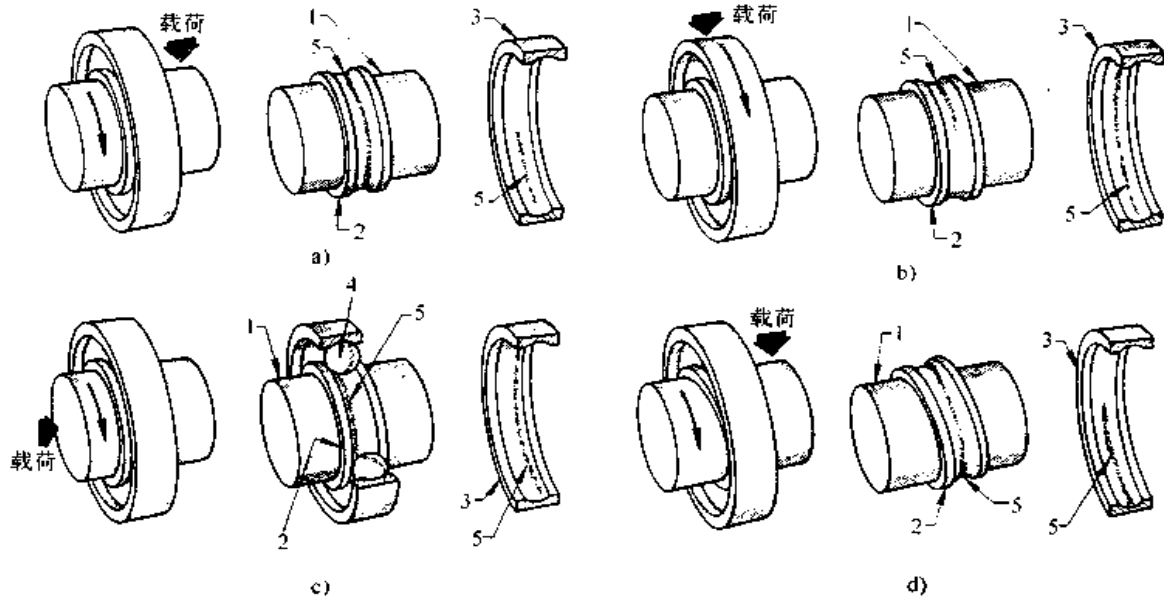


图16.5-9 滚动轴承中的滚迹

1—轴 2—内圈 3—外圈 4—钢球 5—滚迹

2) 载荷情况 主要是了解轴承上所承受载荷的大小和方向是否与设计者规定的一致。由于滚动轴承的寿命 L 与轴承载荷 P 有如下的关系

$$L \propto \left(\frac{1}{P}\right)^{\epsilon}$$

对于球轴承，指数 $\epsilon = 3$ ，如果载荷 P 增加一倍 ($2P$)，则轴承的寿命 L 将减少 88%。由此可见载荷对轴承寿命的影响。另外，不同类型的轴承，对承受载荷的方向也有一定的要求。

3) 转速情况 每一种滚动轴承，都有规定的极限转速，如果轴承的转速超过此极限转速，将影响轴承的寿命，易造成早期失效。

4) 润滑情况 滚动轴承的润滑包括润滑方法、润滑剂和密封。正常的润滑要求有合理的润滑方法、性能良好的润滑剂和可靠的密封。轴承的磨损失效、点蚀失效等与润滑失误有关。

5) 温度情况 普通的滚动轴承在温度低于 120°C 条件下运转才能达到额定寿命。如果温度过高，不但会使轴承的显微组织发生变化，硬度

降低，而且也会使轴承的尺寸不稳定，润滑剂的性能降低，从而使轴承失效。

6) 周围介质情况 轴承对周围的介质，如潮湿的空气、酸碱物质、粉尘和其他有害气体等非常敏感，容易引起轴承磨损、腐蚀失效。

(2) 宏观观察与测量

滚动轴承失效后，对轴承作宏观观察和几何尺寸测量。

1) 宏观观察 用肉眼或放大镜仔细观察轴承失效的部位、形貌、颜色，并对照以上介绍的特征，初步判定轴承的失效形式。宏观观察的最好记录方法是要用具有近摄功能的相机拍照。

2) 几何尺寸测量 失效的滚动轴承，其几何尺寸往往会发生变化。从轴承尺寸的变化可以推断轴承的安装配合情况、实际的工作温度和金属组织的稳定性等。

(3) 材料内在质量检查

制造滚动轴承的材料一般都采用专门的优质钢材，如电炉精炼的优质轴承合金钢，或电渣重

熔钢等。轴承零件的热处理工艺控制也相当严格。一些名牌轴承的零件材料的内在质量通常是有保证的，但也不排除某一环节上出问题。为了探明轴承失效的原因，进行材料内在质量检查是必要的。其检查项目有：材料的化学成分、显微组织、非金属夹杂物和硬度等。此外，如有必要还要检查零件表面是否有软点和贫碳层；测量表面层的残余应力等。

(4) 失效表面和断口的微观观察

利用显微镜和扫描电镜等先进仪器，对轴承失效表面和断口的微观形貌进行观察，不但可以进一步确认轴承的失效形式，而且还可能查清引起失效的直接原因。微观观察在轴承的失效分析工作中是非常重要的环节。

(5) 综合分析结论

通过以上各方面的工作，就掌握了轴承失效的全面资料，再经过综合分析和推断，就可以最后确定轴承的失效形式，找到引发轴承失效的主要原因和影响因素，从而使失效分析有了正确的结论。根据分析的结果，还可以提出防止轴承失效的具体措施，避免同类失效的再次发生。

3 滚动轴承失效分析实例

(1) 滚动轴承的失效情况

精轧机主传动增速箱的机构简图如图 16.5-10 所示。由图可见，大、中、小三个齿轮轴系都由滚动轴承支承。其中圆柱滚子轴承承受径向负荷，而球轴承仅承受轴向负荷。因此，中、小齿轮轴上的深沟球轴承，其外径小于箱体轴承孔直径，即外圈外表面与箱体轴承孔不接触，无径向约束。

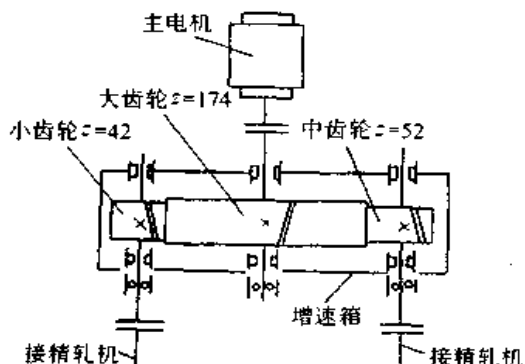


图 16.5-10 增速箱机构简图

主电机采用交流变频调速电动机，功率为

6 000 kW，转速为 850~1 570 r/min，额定转速为 1 130 r/min。中、小齿轮额定转速分别为 3 781 r/min 和 4 681 r/min，齿轮分度圆线速度达 84.2 m/s，是典型的高速齿轮传动。

增速箱投入生产后，齿轮齿面出现点蚀损伤现象，但未作处理。在运转一年多时间后，增速箱的滚动轴承严重损坏，增速箱失效。

拆开增速箱检查，发现：

1) 中齿轮（齿数 $z = 52$ ）轴的三个滚动轴承（轴承内径均为 140mm）已严重损坏；深沟球轴承外圈断裂成 5 块（1~5）如图 16.5-11 所示，保持架断裂，钢球严重塑性变形；轴的输出侧圆柱滚子轴承外圈磨损、保持架断裂，滚子塑性变形；轴的非输出侧滚子轴承外圈局部剥落；增速箱的其他滚动轴承未损坏。

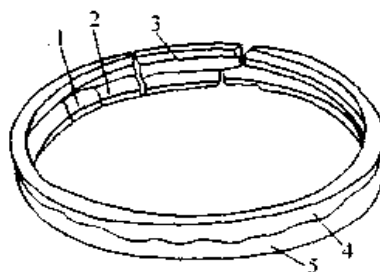


图 16.5-11 深沟球轴承外圈断裂

2) 大、中、小三个齿轮的齿面均出现了较大的点蚀坑和剥落坑，其中尤以中齿轮（ $z = 52$ ）为最严重，不仅有大的剥落坑，而且齿端还产生相当严重的塑性变形，齿轮的精度已降低很多。

(2) 球轴承外圈断裂的观察

对球轴承外圈断口（图 16.5-11）作宏观观察，可看到三种不同的断口：疲劳断口、瞬断断口和磨平的断口。从碎裂的外圈中取有代表性的一块如图 16.5-12 所示（即图 16.5-11 中的碎块 3）。将此碎块置于电子显微镜下观察各断口，根据断口的形貌特征可以判定：



图 16.5-12 深沟球轴承外圈碎块

a—疲劳断口 b—瞬断断口
c—磨平断口 d—滚道面

a——疲劳断口 从电镜照片中可看到该断口的疲劳条纹和疲劳裂纹张合作用使断口磨平的部分。

b——瞬断断口 断口无宏观塑性变形，属于穿晶断裂、具有准解理断裂的特征。

c——磨平的断口 断口已磨平，无其他特征。此断口也可能是早期的疲劳断口。

此外，在轴承滚道表面 *d* (图 16.5-12) 上，可以观察到连成片的点蚀和剥落坑。由此可推断，轴承外圈碎裂前，滚道上已发生点蚀和剥落。

(3) 球轴承外圈材料化学成分化验

深沟球轴承是美国某轴承厂的产品，其外圈的化学成分化验结果列于表 16.5-1。表中还列出了我国高碳铬轴承钢 GCr15 的标准成分，两者比较可以确定轴承外圈的材料是 GCr15，相当于美国的 SAE52100 钢。材料的成分属正常情况。

表 16.5-1 球轴承外圈材料的化学成分 (质量分数) (%)

成分	C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu
试样实测	1.04	0.31	0.23	1.43	0.011	0.018	0.12	0.22
GCr15	0.95 ~ 1.05	0.25 ~ 0.45	0.15 ~ 0.35	1.40 ~ 1.65	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.30	≤ 0.25

(4) 球轴承外圈硬度和金相组织检验

测量球轴承外圈的硬度并检验金相组织，结果如下：

1) 轴承外圈的硬度为 59.3~61.5HRC，比普通要求的硬度 61~65HRC 稍低。

2) 外圈材料中存在硫化物 (MnS) 夹杂 (1.5 级) 和氧化物夹杂 (1 级)。其非金属夹杂物级别应小于 3 级。

3) 外圈材料的金相组织为隐晶马氏体 + 碳化物颗粒，按 JB/T 1255—1991 标准可评为二级，符合小于 5 级的要求。

(5) 大、中齿轮传动动载荷计算

由实际观察可知，中齿轮 ($z = 52$) 的齿面损伤最严重。在这种情况下，计算大、中齿轮传动的齿轮动载荷 (动载系数)，就有重要的实际意义。

齿轮的原始精度等级为美国的 Q12 (AGMA2000-A88)，相当于 ISO 1328 的 5 级。由于

大、中齿轮齿面出现点蚀、剥落和塑性变形等损伤，估计齿轮精度降低到 AGMA Q10 级 (相当于 ISO 7 级)；以此为前题，采用 ISO 6336 的动载荷计算的一般方法，计算得：

ISO 5 级精度时的动载系数 $K_v = 1.07$ ；

ISO 7 级精度时的动载系数 $K_v = 1.55$ ；

可见由于齿轮精度的降低，使齿轮的动载荷增加了 45%；这对轴承的寿命会有不利的影响。

(6) 球轴承的寿命计算

承受载荷的滚动轴承都有一定的寿命，不能无限期地工作，因此计算增速箱滚动轴承的使用寿命是必要的。对遭到严重破坏的中齿轮轴深沟球轴承进行寿命计算，以确定轴承的寿命是否足够。

此轴承仅受中齿轮轴向力 F_a 的作用，如图 16.5-13 所示。根据齿轮受力分析知 $F_a = 6\ 630\text{ N}$ 。轴承的寿命按通用的方法 (ISO 281: 1990 的方法) 计算。计算得可靠度为 90% 时的寿命 $L_h = 2\ 151\text{ h}$ ；可靠度为 95% (对生产线上的增速器是必要的) 时的寿命 $L_h = 1\ 334\text{ h}$ 。按照高线厂提供的实际生产作业率数据，增速器轴承的受载工作时间约为 2 923 h。此值已超过了 2 151 h 和 1 334 h，可见轴承的寿命是不能满足连续生产要求的。

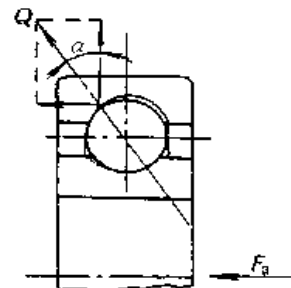


图 16.5-13 深沟球轴承受轴向力作用

(7) 球轴承外圈受力和应力的有限元法计算

中齿轮轴球轴承只承受纯轴向力 F_a 的作用 (图 16.5-13)， $F_a = 6\ 630\text{ N}$ 。此 F_a 力由 14 个钢球承受，再计及接触角 $\alpha = 15^\circ$ 和负荷系数 $f_T = 1.1$ ，则每个钢球上的力 $Q = 2\ 000\text{ N}$ (图 16.5-13)。

由于轴承外圈无径向约束，因此 14 个钢球的 Q 力有使圆形的外圈撑成 14 边形的趋势，外圈上将产生拉应力，这一现象是一般轴承没有的。

这一趋势使得轴承外圈的应力变得复杂起来。轴承外圈任一点上将会有三个方向的应力 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 。在轴承运转过程中, 这些应力值都在不断变化, 极易造成外圈的疲劳破坏。采用有限元法可以算得 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 值。计算结果表明, 某些特定点的最大应力(脉动)可达 329 N/mm^2 , 并且呈现复杂的应力状态。如果再计及钢球同外圈滚道的接触应力和由点蚀而产生的应力集中, 其应力可以达到更大值。

(8) 滚动轴承失效的综合分析

1) 滚动轴承外圈的断裂是轴承失效的肇事件。轴承外圈的点蚀是由于轴承寿命不足造成的。滚道的点蚀发生在外圈断裂之前。点蚀的裂纹, 使外圈滚道产生很大的应力集中, 在交变应力作用下, 外圈就很容易形成宏观裂纹而断裂。

2) 滚动轴承外圈的材料为 GCr15 轴承钢, 其化学成分属正常范围。轴承外圈的毛坯制造和热处理工艺也属正常状态。不足之处是材料中的碳化物成带状分布, 使淬火回火后硬度不均匀; 材料中存在的氧化物夹杂, 使易于在其周围产生拉应力。

3) 在增速箱的高速齿轮传动中, 采用滚动轴承的合理性是值得商榷的。从深沟球轴承的寿命计算中可知, 可靠度为 90% 时的寿命为 2 151 h; 可靠度为 95% 时的寿命仅为 1 334 h。即使按现厂作业率不高的情况, 滚动轴承也只能使用不到一年的时间, 显然这是不合理的。许多资料指出, 对于连续工作 24h 的机器, 轴承预期寿命荐用值: 对一般可靠度, $L_h = 50\ 000 \sim 60\ 000 \text{ h}$; 对高可靠度, $L_h > 100\ 000 \text{ h}$ 。而增速箱的轴承寿命离荐用值甚远。这也是为什么高速齿轮传动中通常不采用滚动轴承而采用滑动轴承的原因之一。

4) 增速箱齿轮齿面的损伤使动载荷增大。此附加的动载荷不可避免地要传递给滚动轴承, 同时也是增速箱振动的重要激励因素, 它会影响到轴承的寿命。从理论上还很难确定齿轮动载荷同轴承载荷之间的数量关系, 但它对轴承寿命的影响可从以下的简单计算中看出。

假设由于齿轮动载荷的增加使轴承载荷 P 增加 20% (即 $1.2P$)。代入滚动轴承的基本额定寿命计算式 $L_h = 10^6 (C/P)^{\epsilon} / 60n$ (式中, n —轴承转速 r/min ; C —轴承的基本额定动载荷; ϵ —指数, 对球轴承 $\epsilon=3$)。在其他条件不变时, $L_h = 0.58L_{h0}$ 。即轴承的寿命降低了 42%。由此可见轴承的寿命对齿轮的动载荷是很敏感的。

5) 增速箱中的中、小齿轮轴上的深沟球轴承的外圈不作径向约束, 其目的是为了避开轴的三支点静不定问题, 但其不利的一面是使轴承外圈的应力复杂化。特别是增加了外圈圆周方向的交变应力 σ_x , 使外圈易于疲劳断裂。

(9) 结论和建议

1) 增速箱中齿轮 ($z=52$) 轴上深沟球轴承外圈的疲劳断裂是造成轴承破坏, 增速箱失效的直接原因。

2) 诱发滚动轴承外圈疲劳断裂的主要因素有: ①滚动轴承的设计寿命不足, 导致轴承外圈过早地出现点蚀和剥落。②增速箱齿轮齿面的严重损伤(点蚀、剥落和塑性变形), 破坏了齿轮的精度, 加大了齿轮的动载荷, 降低了滚动轴承的寿命。③深沟球轴承外圈不作径向约束, 使外圈受复杂的变应力作用, 极易疲劳损坏。

3) 轴承外圈的化学成分、金相组织等均属正常状态, 硬度也基本符合要求。虽然材料中存在硫化物夹杂和氧化物夹杂对外圈的疲劳强度有些影响, 但在数量上都在规定范围以内。因此, 总的来说, 可以排除轴承外圈失效是由材料质量和热处理不好引起的可能性。

4) 滚动轴承的失效主要是由于增速箱设计上存在一些缺陷造成的, 因此为了防止同类事故的再次发生, 应对增速箱的设计作进一步的审核和研究。例如, 研究轴承外圈加径向约束的可能性; 研究提高轴承设计寿命的可能性(甚至改用液体动压滑动轴承); 增强齿轮传动的强度, 防止齿面过早损伤等。总之, 要从改进增速箱设计这个根本环节着手, 才能防止滚动轴承失效事故的发生。

第6章 机械紧固件的失效分析

机械紧固件系统的基本功能是传递载荷。设计或选用紧固件,要满足强度(静载、冲击和疲劳强度)和腐蚀抗力的要求,还要考虑高温或低温工作的可靠性,良好的维修性、较低的材料和制造成本。

机械紧固件包括螺纹紧固件(螺栓、螺钉和螺母)、铆钉和销子。

1 螺纹紧固件的疲劳失效

装配中,螺栓(或螺钉)由拧紧力矩而承受预加拉伸力,螺母螺纹承受切应力。如果使用中外加拉伸载荷超过预紧拉伸力,螺栓承受的拉伸力就逐渐增高。如果外加载荷为循环载荷,则会造成疲劳破坏。

螺栓(和螺钉)疲劳失效的最常见位置有两处(图16.6-1):螺栓头与杆交接部位;螺纹牙底,尤其是进入螺母中最后一牙螺纹的牙底。这两种位置均为应力集中部位。应力流线图直观地

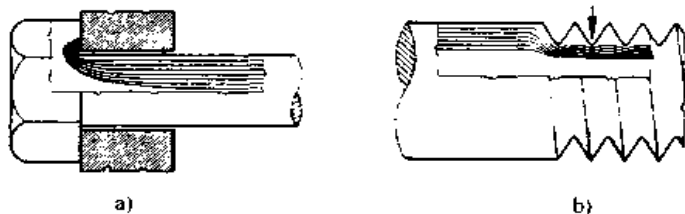


图 16.6-2 螺栓的应力流线图
a) 头和杆部位 b) 螺纹部位

如果螺栓和螺母两者的螺纹完全匹配,并且承载后不产生弹性变形,那么拧紧力矩所加拉伸载荷将会均匀地分布在工作段的每一牙螺纹上。大量生产的螺栓和螺母尺寸都有一定公差范围,其螺纹不可能完全匹配;螺栓受拉伸力后会发生弹性伸长。因此,螺纹工作段内承载不均匀,进入螺母内最后一牙螺纹常承受较大载荷,其牙底易形成疲劳裂纹。为促进各螺纹牙上的载荷分布比较均匀和减少失效机会,可以考虑螺栓采用高强度材料,而螺母采用高塑性材料,后者的屈服变形导致载荷较均匀地分布在全部工作段螺纹上。

拧紧度不当,可能造成螺钉失效。高夹紧

表示零件截面变化部位的应力集中现象,用一组平行线代表应力流线,线间距反比于应力值,流线密集处即为应力集中部位:螺栓承受拉伸载荷,与座板相接的螺栓头根部(头-杆交接处)为高应力区(图16.6-2a);螺纹牙底(图16.6-2b中箭头所示)也为应力流线密集处,其左边的最后一牙螺纹牙底的流线尤其密集,疲劳裂纹易形成于该部位。

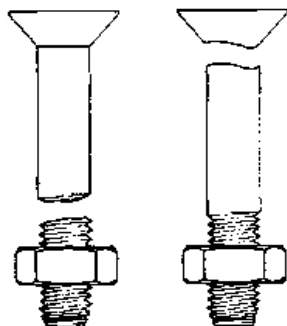


图 16.6-1 螺栓易疲劳断裂部位

力可得到较刚性的联接,由此而提高其疲劳寿命。例如一辆运煤拖车车轮螺栓断裂,从宏观断面观察,断在工作段最后一牙的螺纹部位,裂纹起源于截面上相对的两边牙底,断口上疲劳扩展区均有海滩花样,最终断裂区位于中间。结论为双向弯曲疲劳。金相观察表明,靠近断裂螺纹的另一牙螺纹牙底也存在疲劳微裂纹。光谱分析确定螺栓为含钼的合金钢,热处理硬度为32HRC。每轮10个螺栓,全部有疲劳裂纹或完全断裂,因此认为主要原因是拧紧力矩不适当(不足)和不均匀。当拧紧力矩不足时,车轮每次转动过程中都会与螺栓间有少量运动,造成螺栓双向弯曲

疲劳。一旦每个螺栓形成疲劳裂纹，该螺栓即松动，其他螺栓上的应力增高，相继发生疲劳，直到10个螺栓全部失效。为了防止类似事故再次发生，制定补救措施如下：采用气紧扳手拧紧螺母，拧紧力矩为610~678 N·m；定期维修时检查拧紧力矩是否正常和均匀。

螺纹施加冷滚压变形，使牙底表面层造成残余压应力，能有效地提高螺纹部位疲劳寿命。

承受拉伸载荷时，螺栓（螺钉）的头-杆交接部位是另一处发生疲劳断裂的位置。常采用各种技术措施来防止头-杆交接部位的疲劳失效。一般用冷顶镦或热顶镦法制成头部（决定于螺栓尺寸和材料），它优于切削法获得头部，不仅降低制造成本，而且头-杆交接部位的晶粒流线连续而不被切断，有利于减少应力集中。但是热镦头应该仔细控制温度，不产生过热（晶粒长大）。头-杆交接的过渡圆角应尽可能加大，以减小应力集中；

但是又要保证螺栓头具有足够的支承面积，设计中要考虑上述两因素，达到最优化、必要时，头-杆交接圆角处也可以施加喷丸或冷变形加工，形成表层残余压应力。选用较高抗拉强度和疲劳强度的钢材是防止螺栓疲劳失效的重要措施。

以螺钉头-杆交接处疲劳断裂为例：传动轴系统的2个螺钉、3个支承帽和1个万向联接座发生断裂，送交实验室确定失效原因和顺序：发生上述失效前，车辆仅运行9 022 km。从宏观断口观察，两个螺钉断口上均有海滩花样，属于疲劳断裂。支承帽和联接座均无疲劳证据，仅有脆性现象。由此判定，螺钉为首先破坏件。这两个螺钉的宏观断口外貌有所差异，第一个螺钉为单疲劳源，疲劳弧线比较对称于疲劳源点、瞬断区面积小，因此认为其名义应力低，为首先破坏件（图16.6-3a和c）。第二个螺钉的宏观断口上（图16.6-3b和d），有两个相对的疲劳源，两个

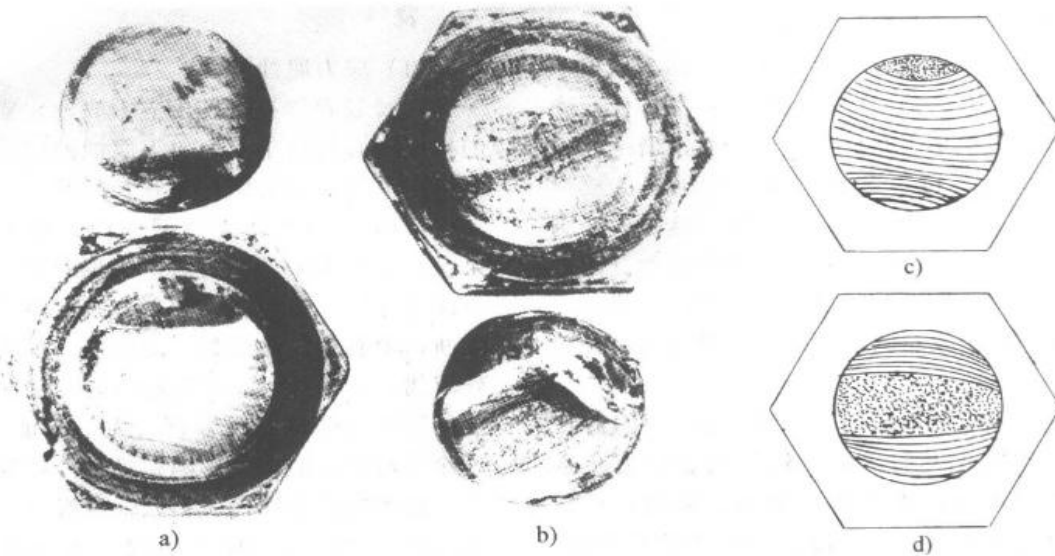


图 16.6-3 中碳钢螺钉在头-杆交接处疲劳断裂的宏观断口，4×
a) 首先破坏的螺钉，低名义应力疲劳 b) 第二个螺钉，高应力疲劳
c) 宏观断口 a 的示意图 d) 宏观断口 b 的示意图

尺寸和形状相近的疲劳扩展区（有海滩花样），中部瞬断区宽度略小于螺栓直径之半，属于双向（可逆）弯曲的高应力疲劳，是紧随第一个螺钉之后发生疲劳破坏。化学分析和硬度试验确定，支承帽为1144钢，硬度55HRC；联接座为8620钢，硬度62~63HRC，经过渗碳和淬火处理；螺钉材料为1035中碳钢，硬度36HRC，抗拉强

度855 MPa，其光滑试件疲劳极限近似为427 MPa。失效分析结论：①螺钉属于工作应力下的疲劳断裂，支承帽和万向联接座有脆性现象。②螺钉材料的抗拉强度和疲劳极限不能满足使用要求，建议改用5140合金钢。③失效顺序如下：第一个螺钉首先疲劳失效，相继第二个螺钉疲劳失效，然后两个支承帽过载和断裂，联接座过

载, 联接座和另两个支承帽失效。

2 螺纹紧固件的腐蚀

电化学腐蚀的常见电解质是水和潮湿大气, 水中总会含有少量矿物质和氧气。温度也是腐蚀反应的重要因素, 因为在低于 5℃ 的温度下, 反应很缓慢。

紧固件的主要腐蚀形式为大气腐蚀、液体浸渍腐蚀、缝隙腐蚀和电偶腐蚀。

碳钢和低合金钢的大气腐蚀速率随各地大气成分和温度而在很大范围内变化。工业大气和海洋大气, 含有硫化物和氯化物等, 造成较高的腐蚀速率。

浸渍腐蚀的液体主要是新鲜水和盐水。后者具有更强的腐蚀性, 氯离子的存在破坏金属的保护膜和腐蚀产物。零件上最严重腐蚀的部位是浸渍线附近和液体溅落区, 该区表面交替经历干环境和湿环境, 并且溶液中含富氧。相反地, 全浸渍在溶液中的区域却腐蚀较轻。

螺纹联接构件最容易遭受缝隙腐蚀。依据联接松紧度, 存在两种缝隙腐蚀形式: ①构件存在沟和开口, 集积尘土和保存湿气, 腐蚀增强; ②属于正常的紧联接, 由于氧浓差电池而造成腐蚀, 构件的富氧区为阴极, 缺氧区(缝隙内)为阳极而遭受腐蚀。结构钢对后一种形式的缝隙腐蚀不甚敏感, 不锈钢和其他在富氧溶液中形成保护性钝化膜的金属材料, 对于后一种缝隙腐蚀比较敏感。

两种不同电极电位的金属相接触, 并且存在电解液, 就形成电偶, 电位较负的金属发生腐蚀。用结构钢紧固件联接铜合金, 钢的电位较负, 易遭受电偶腐蚀。在设计螺纹联接构件时, 必须考虑到防止电偶腐蚀, 紧固件和被联接零件选用同类金属材料。如果必须选用不同类材料, 则应采用下列防护方法: 涂漆; 紧固件镀一层高电极电位金属或用非导体隔离; 防止湿气进入电偶。

碳钢表面的氧化膜结构疏松, 易脆裂, 不能防止湿气和氧透过而继续腐蚀; 有些低合金钢的表面氧化膜具有一定的保护性。因此, 碳钢和低合金结构钢紧固件常带有保护性金属涂覆层, 目的是提高腐蚀抗力。最普通的金属覆层是锌、镉和铝, 使用较少的有锡、铅、铜、镍和铬。

锌是最广泛用作预防紧固件腐蚀的覆层材料。最常用的方法是热镀锌, 其次是电镀锌。热镀锌时, 紧固件浸渍在熔融锌槽中, 锌覆层厚约 0.056 mm。在电化学意义上, 锌覆层是牺牲阳极, 锌覆层的腐蚀寿命正比于锌的总量; 紧固件电镀锌层厚度小于 0.025 mm, 仅用于不严重的腐蚀环境中, 因为最厚的电镀锌层的腐蚀寿命仅为热镀锌层寿命的一半。

紧固件也常采用电镀镉。镉覆层的腐蚀寿命也正比于镉层厚度。在海洋大气环境中, 镉覆层的腐蚀寿命高于锌覆层。电镀镉的紧固件可用于联接铝合金零件, 镉与铝的电极电位比较接近。

热沾铝覆层能使紧固件达到最高的抗大气腐蚀能力; 在海水浸渍和较高温度条件下, 也具有较高的抗蚀性。铝覆层易发生点蚀, 而不像镉和锌覆层那样发生均匀腐蚀。

3 螺纹紧固件的应力腐蚀和氢脆断裂

(1) 应力腐蚀断裂

螺纹紧固件有时发生应力腐蚀。紧固件承受的拉应力必须高于发生应力腐蚀的门槛应力, 并在特定的腐蚀环境中保持较长时间。

12% Cr 马氏体不锈钢螺栓, 用于锅炉供水泵, 在使用不太长时间后即发生断裂。裂纹形成在螺纹牙底, 金相观察为带分枝的沿晶裂纹, 微观断口形貌为沿晶断裂。螺纹上发现黏附的铜色残留物, 它来源于装配时用的防松动涂层。该涂层是铜屑与硅树脂混合物。为了验证(或排除)该涂层对螺栓断裂的影响, 进行专项加速腐蚀试验。四个螺栓分别代表不同强度级别(硬度 41~42HRC 和 20~22HRC)和是否有涂层。螺栓装在静加载试验装置上, 加拧紧力矩使螺栓受拉力达到 90% 屈服强度; 周期性地在 3.5% NaCl 水溶液中浸渍(10 min 浸渍, 50 min 空气干燥), 每天 8 h, 每周 5 天。经 3 个月后, 41~42HRC 的带涂层螺栓完全断裂。另 3 个螺栓未发生任何裂纹, 其中 20~22HRC 带涂层螺栓形成严重点蚀; 而两种硬度的无涂层螺栓仅形成局部点蚀。试验证明, 含铜的混合物涂层对高强度(高硬度) 12Cr 不锈钢(在腐蚀介质中)有损伤影响。失效分析的结论: ①属于沿晶应力腐蚀断裂; ②含铜的混合物涂层在腐蚀介质中与螺栓建

立电化学电池，造成沟状裂缝和点蚀坑作为断裂源。螺栓不承受循环加载，不可能发生疲劳和腐蚀疲劳破坏。改正措施如下：对螺栓的热处理硬度要求从(35~45)HRC降低到18~24HRC；采用石油胶状物作为防松动润滑剂，代替含铜的混合物。

螺栓承受的拉应力如果高于应力腐蚀的门槛应力，可以采用诱发压应力来降低紧固件表面的应力水平。螺纹部位进行冷滚压，杆部进行喷丸处理，诱发表面残余压应力，有利于预防螺栓应力腐蚀。但是，如果随后进行热处理，或者紧固件加载高于屈服应力，或者腐蚀去除掉表层金属，那么原有的表面残余压应力会减小或消失。

(2) 氢脆断裂

许多螺纹紧固件经过镀镉或镀锌以预防腐蚀。在电镀过程中及其前面的酸洗过程中，都生成新生态的氢，氢原子吸附于紧固件表面，并扩散进入到承受高度三轴应力状态的区域（各种缺口和拐角部位）。8735和8740等低合金高强度钢的抗拉强度高达1240~1380MPa，强度越高的紧固件，对氢脆越敏感。

图16.6-4a是固定机翼的8740钢螺母的氢脆裂纹外观。这是酸洗和电镀过程造成零件被充氢，之后未经除氢处理；承受拉伸应力后，经过一段孕育期，即形成裂纹，并随时间而裂纹向截面内部扩展。图16.6-4b为其宏观断口形貌，螺纹第四牙处氢脆断口比较平坦，上边缘的倾斜断口是人工打开裂纹时瞬时撕裂的断口。氢脆断口的微观形貌以沿晶断裂为主，断口面上无腐蚀产物，图16.6-4c的形貌取自图16.6-4b所示方框中的某一点。

预防这类螺纹紧固件氢脆断裂的主要方法，是在酸洗和镀镉后立即进行去氢处理（烘烤）。例如在205℃保持30min到24h，保持时间应该足够长，这与紧固件尺寸有关。

氢脆断裂是一种与时间相关的滞后破坏。充氢的高强度钢螺栓，在普通的拉伸试验中显示不出氢的影响。常用的显示氢脆的试验方法是加载到足够的拉应力（例如90%屈服应力），并保持较长时间；以及采用慢应变速率（例如 $10^{-5}/s$ 或更低的应变速率）拉伸方法。类似于应力腐蚀，氢脆断裂也存在一个门槛应力，低于该应力值即不会发生氢致滞后破坏。

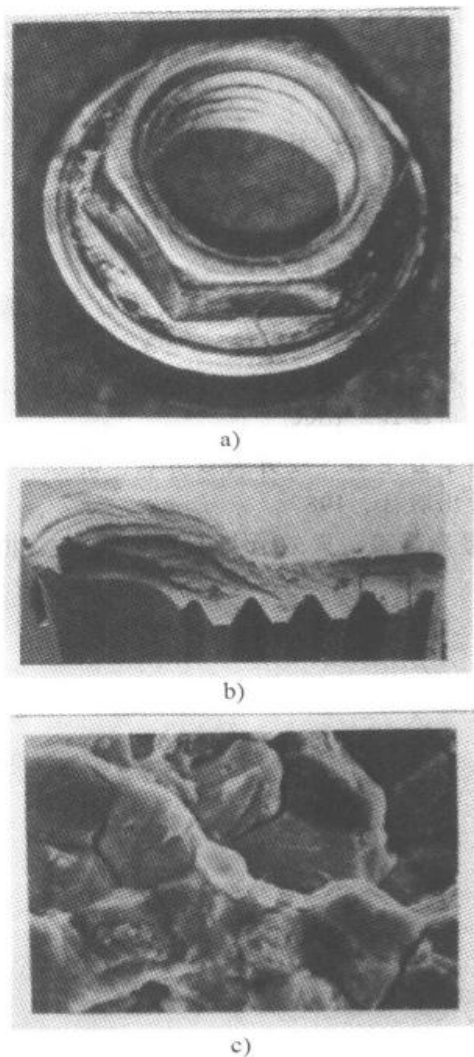


图16.6-4 超高强度钢镀镉螺母的氢脆断裂

a) 外观，5× b) 宏观断口，9×

c) 扫描电镜下的沿晶断裂形貌，3600×

例如，8735钢螺栓，酸洗和镀镉后未经去氢处理，拧紧加载一周后，发生氢脆断裂，裂纹起源于螺纹牙底。其余未裂螺栓送实验室进行试验，部分螺栓附加去氢处理205℃24h，部分保留未去氢状态。进行拉伸试验，去氢和未去氢两种状态螺栓缺口抗拉伸强度分别为1448MPa和1510MPa，水平相当，显示不出氢的影响。然后进行长时间静加载，显示出两者的明显差异。去氢处理后的螺栓，在拉应力517MPa下保持11598h，未发生断裂，即无氢脆倾向。未经去氢处理的螺栓，在拉应力517MPa下保持1.1~5.6h，发生氢脆断裂；但是在拉应力为345MPa下保持67h，未发生断裂。由此认为，未经去氢

处理的螺栓具有极高的氢脆敏感性；氢脆断裂的 门槛应力值在 345 MPa 和 517 MPa 之间。

参 考 文 献

- 1 材料学会主编. 失效分析的思路与诊断. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 2 胡世炎主编. 机械失效分析手册. 成都: 四川科学技术出版社, 1989
- 3 涂铭旌等编著. 机械零件失效分析与预防. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 4 陈南平编. 机械零件失效分析. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 5 材料学会主编. 疲劳失效分析. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 6 何德芳等编. 失效分析与故障预防. 北京: 冶金工业出版社, 1990
- 7 American Society for Metals. Metals Handbook (Ninth Edition) Volume 11 Failure Analysis and Prevention. Metals Park, OH10, 1986
- 8 朱孝录. 机械零件失效分析. 机械工人 (冷加工). 1999, No. 1~6
- 9 潘紫微、朱孝录. 齿轮齿面电蚀失效分析. 机械传动. V01. 21, No. 3, 1997
- 10 朱孝录. 齿轮轮齿的随机断裂现象. 机械传动. V01. 23, No. 1, 1999

中国机械设计大典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
17
篇

可靠性设计

主 编 孙志礼

编 写 孙志礼

审 稿 朱孝录



中国机械工程学会
中国机械设计大典编委会

第 1 章 可靠性设计基础

可靠性设计是以实现产品的可靠性为目的的设计技术。它包括为实现产品的可靠性所必要的设计和全部计划项目,并使产品的可靠性得以保持的一系列设计程序。可靠性设计包括的内容非常广泛,它贯穿于产品的整个寿命周期。这里主要介绍机械产品可靠性设计中的一些专有技术。

1 可靠性的概念

可靠性即产品在规定条件下和规定时间区间内,完成规定功能的能力。

按产品可靠性的形成可分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性是通过设计、制造赋予产品的;而使用可靠性既受设计、制造的影响,又

受使用条件的影响。一般使用可靠性低于固有可靠性。

2 可靠性中常用的概率分布

在可靠性技术中主要的也是基础的工作就是对试验数据进行统计处理,判定分布类型,估计分布参数以获得寿命、应力、强度等所服从的分布,为产品可靠性的定量计算奠定基础。可靠性中常用的概率分布如表 17.1-1 所示,其中常用的分布函数表(二项分布、正态分布、 χ^2 分布、 t 分布、 F 分布)和 Γ 函数表如表 17.1-2 ~ 表 17.1-7 所示,供设计时查用。

表 17.1-1 可靠性中常用的概率分布

名称记号	概率密度	均值 $E(X)$	方差 $D(X)$	图形
二项分布 $B(n, p)$	$P_B(X=x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$ $x=0, 1, 2, \dots, n$ $0 < p < 1, p+q=1, n \text{ 为}$ 正整数	np	npq	
泊松分布 $P(\lambda)$	$P_P(X=x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda}$ $x=0, 1, 2, \dots$ $\lambda > 0$	λ	λ	
均匀分布 $u(a, b)$	$f_u(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > b \end{cases}$ $-\infty < a < b < \infty$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$	

续表 17.1-1

名称记号	概率密度	均值 $E(X)$	方差 $D(X)$	图形
正态分布 (高斯分布) $N(\mu, \sigma^2)$	$f_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$	μ	σ^2	
对数正态分布 $\ln(\mu, \sigma^2)$ 或 $\lg(\mu, \sigma^2)$	$f_{\ln}(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ 或 $f_{\lg}(x) = \frac{\lg e}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ $x > 0$	$e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$ 或 $10^{\mu + \frac{\sigma^2}{2} \lg 10}$	$e^{2\mu + \sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$ 或 $10^{2\mu + \sigma^2 \lg 10} \times (10^{\frac{\sigma^2}{2} \lg 10} - 1)$	
威布尔分布 $W(k, a, b)$	$f_W(x) = \frac{k}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^k}$ $x \geq a$, 形状参数 $k > 0$ 尺度参数 $b > 0$, 位置参数 a	$b\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) + a$	$b^k \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$	
指数分布 $e(\lambda)$	$f_e(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ $x \geq 0, \lambda > 0$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$	
瑞利分布 $R(\mu)$	$f_R(x) = \frac{x}{\mu^2} e^{-\frac{x^2}{2\mu^2}}$ $x \geq 0, \mu > 0$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \mu$	$\frac{(4-\pi)}{2} \mu^2$	
β 分布 (贝塔分布) $\beta(a, \beta)$	$f_\beta(x) = \frac{x^{a-1}(1-x)^{\beta-1}}{\beta(a, \beta)}$ $0 < x < 1$ 贝塔函数 $\beta(a, \beta) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(\beta)}{\Gamma(a+\beta)}$ $a > 0, \beta > 0$	$\frac{a}{a+\beta}$	$\frac{a\beta}{(a+\beta+1)(a+\beta)^2}$	

续表 17.1-1

名称记号	概 率 密 度	均 值 $E(X)$	方 差 $D(X)$	图 形
Γ 分布 (伽马分布) $\Gamma(\alpha, \beta)$	$f_{\Gamma}(x) = \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}$ $x > 0$	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$	
最大 I 型 极值分布 (贡贝尔 分布) $M(\sigma, \mu)$	$f_M(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$	$\mu + \gamma\sigma$ 欧拉常数 $\gamma \approx 0.5772$	$\frac{\pi^2}{6} \sigma^2$	
最小 I 型 极值分布 (贡贝尔 分布) $m(\sigma, \mu)$	$f_m(x) = \frac{1}{\sigma} e^{\frac{x-\mu}{\sigma}} e^{-e^{\frac{x-\mu}{\sigma}}}$ $-\infty < x < \infty$ $-\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$	$\mu - \gamma\sigma$ 欧拉常数 $\gamma \approx 0.5772$	$\frac{\pi^2}{6} \sigma^2$	
χ^2 分布 $\chi^2(\nu)$	$f_{\chi^2}(x) = \frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma(\frac{\nu}{2})} x^{\frac{\nu}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}$ $x > 0$ 自由度 ν 为正整数	ν	2ν	
t 分布 (学生分布) $t(\nu)$	$f_t(x) = \frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\sqrt{\pi\nu} \Gamma(\frac{\nu}{2})} \times$ $\left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}$ 自由度 ν 为正整数	$0 (\nu > 1)$	$\frac{\nu}{\nu-2}$ $(\nu > 2)$	
F 分布 $F(\nu_1, \nu_2)$	$f_F(x) = \frac{x^{\frac{\nu_1}{2}-1}}{\beta(\frac{\nu_1}{2}, \frac{\nu_2}{2})} \times$ $\left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{\frac{\nu_1}{2}} \left(1 + \frac{\nu_1 x}{\nu_2}\right)^{-\frac{\nu_1+\nu_2}{2}}$ $x \geq 0$ - 贝塔函数 $\beta(\frac{\nu_1}{2}, \frac{\nu_2}{2})$ 自由度 ν_1, ν_2 为正整数	$\frac{\nu_2}{\nu_2-2}$ $(\nu_2 > 2)$	$\frac{2\nu_2^2(\nu_1+\nu_2-2)}{\nu_1(\nu_2-2)^2(\nu_2-4)}$ $(\nu_2 > 4)$	

注: 1. $\binom{n}{x} = \frac{n!}{(n-x)! x!}$
 2. $\Gamma(\cdot)$ —— Γ 函数, 数值查表 17.1-7。

表 17.1-2 二项分布表

$$\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$$

$n \setminus k \setminus p$	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	$p \setminus k$	n
5	5			0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 01	0.000 32	0.002 43	0.010 24	0.031 25	5
	4	0.000 00	0.000 00	0.000 01	0.000 06	0.000 19	0.000 46	0.006 72	0.030 78	0.087 04	0.187 50	4
	3	0.000 01	0.000 08	0.000 60	0.001 97	0.004 53	0.008 56	0.057 92	0.163 08	0.317 44	0.500 00	3
	2	0.000 98	0.003 84	0.014 76	0.031 87	0.054 36	0.081 46	0.262 72	0.471 78	0.663 04	0.812 50	2
	1	0.049 01	0.096 08	0.184 63	0.266 10	0.340 92	0.409 51	0.672 32	0.831 93	0.922 24	0.968 75	1
10	10							0.000 01	0.000 10	0.000 98		10
	9						0.000 00	0.000 14	0.001 68	0.010 74		9
	8					0.000 00	0.000 08	0.001 59	0.012 29	0.054 69		8
	7			0.000 00	0.000 00	0.000 01	0.000 86	0.010 59	0.054 76	0.174 83		7
	6			0.000 00	0.000 01	0.000 04	0.000 15	0.006 37	0.047 35	0.166 24	0.376 95	6
	5		0.000 00	0.000 02	0.000 15	0.000 59	0.001 63	0.032 79	0.150 27	0.366 90	0.623 05	5
	4	0.000 00	0.000 03	0.000 44	0.002 03	0.005 80	0.012 80	0.120 87	0.350 39	0.617 72	0.828 13	4
	3	0.000 11	0.000 86	0.006 21	0.018 84	0.040 08	0.070 19	0.322 20	0.617 22	0.832 71	0.945 31	3
	2	0.004 27	0.016 18	0.058 15	0.117 59	0.187 88	0.263 90	0.624 19	0.850 69	0.953 64	0.989 26	2
	1	0.095 62	0.182 93	0.335 17	0.461 33	0.565 61	0.651 32	0.892 63	0.971 75	0.993 95	0.999 02	1
15	15								0.000 00	0.000 03		15
	14							0.000 00	0.000 03	0.000 49		14
	13							0.000 01	0.000 23	0.003 69		13
	12						0.000 00	0.000 09	0.001 93	0.017 58		12
	11						0.000 01	0.000 67	0.009 35	0.059 23		11
	10						0.000 11	0.003 65	0.033 83	0.150 88		10
	9				0.000 00	0.000 00	0.000 79	0.015 24	0.095 05	0.303 62		9
	8			0.000 00	0.000 01	0.000 03	0.004 24	0.050 01	0.213 10	0.500 00		8
	7			0.000 00	0.000 01	0.000 06	0.000 31	0.018 06	0.131 14	0.390 19	0.696 38	7
	6		0.000 00	0.000 01	0.000 15	0.000 70	0.002 25	0.061 05	0.278 33	0.596 78	0.849 12	6
	5	0.000 00	0.000 01	0.000 22	0.001 40	0.004 97	0.012 72	0.164 23	0.484 51	0.782 72	0.940 77	5
	4	0.000 01	0.000 18	0.002 45	0.010 36	0.027 31	0.055 56	0.351 84	0.703 13	0.909 50	0.982 42	4
	3	0.000 42	0.003 04	0.020 29	0.057 13	0.112 97	0.184 06	0.601 98	0.873 17	0.972 89	0.996 31	3
	2	0.009 63	0.035 34	0.119 11	0.226 24	0.340 27	0.450 96	0.832 87	0.964 73	0.994 83	0.999 51	2
	1	0.139 94	0.261 43	0.457 91	0.604 71	0.713 70	0.794 11	0.964 82	0.995 25	0.999 53	0.999 97	1
20	20									0.000 00		20
	19								0.000 00	0.000 02		19
	18								0.000 01	0.000 20		18
	17							0.000 00	0.000 05	0.001 20		17
	16							0.000 01	0.000 32	0.005 91		16
	15								0.000 04	0.001 61	0.020 69	15
	14						0.000 00	0.000 26	0.006 47	0.067 66		14
	13						0.000 02	0.001 28	0.021 03	0.131 59		13
	12						0.000 10	0.005 14	0.056 58	0.251 72		12
	11					0.000 00	0.000 56	0.017 14	0.127 52	0.411 90		11
	10				0.000 00	0.000 01	0.002 59	0.047 96	0.244 66	0.588 10		10
	9			0.000 00	0.000 01	0.000 06	0.009 98	0.113 38	0.404 40	0.748 28		9
	8		0.000 00	0.000 01	0.000 09	0.000 42	0.032 14	0.227 73	0.584 11	0.868 41		8
	7		0.000 01	0.000 11	0.000 64	0.002 39	0.088 69	0.391 99	0.749 99	0.942 34		7
	6		0.000 00	0.000 10	0.000 87	0.003 80	0.011 25	0.195 70	0.583 03	0.874 40	0.979 31	6
	5	0.000 00	0.000 04	0.000 96	0.005 63	0.018 34	0.043 17	0.370 35	0.762 49	0.949 05	0.994 09	5
	4	0.000 04	0.000 60	0.007 41	0.028 97	0.070 62	0.132 95	0.588 55	0.892 91	0.984 04	0.998 71	4
	3	0.001 00	0.007 07	0.043 86	0.114 97	0.212 05	0.323 07	0.793 02	0.964 52	0.996 39	0.999 80	3
	2	0.016 86	0.059 90	0.189 66	0.339 55	0.483 14	0.608 25	0.930 32	0.992 36	0.999 48	0.999 93	2
	1	0.182 09	0.332 39	0.558 00	0.709 89	0.811 31	0.878 42	0.958 47	0.999 20	0.999 96	1.000 00	1

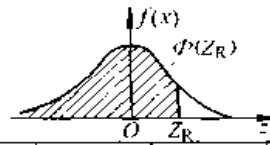
续表 17.1-2

$$\sum_{x=k}^n \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

$n \setminus k$	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	$k \setminus n$	n
25											25	25
24										0.000 00	24	24
23										0.000 01	23	23
22									0.000 00	0.000 08	22	22
21									0.000 01	0.000 46	21	21
20									0.000 05	0.002 04	20	20
19								0.000 00	0.000 28	0.007 32	19	19
18								0.000 02	0.001 21	0.021 64	18	18
17								0.000 10	0.004 33	0.053 88	17	17
16							0.000 00	0.000 45	0.013 17	0.114 76	16	16
15							0.000 01	0.001 78	0.034 39	0.212 18	15	15
14							0.000 08	0.005 99	0.077 80	0.345 02	14	14
13							0.000 37	0.017 47	0.153 77	0.500 00	13	25
12						0.000 00	0.001 54	0.044 25	0.267 72	0.654 98	12	12
11					0.000 00	0.000 01	0.005 56	0.097 80	0.414 23	0.787 82	11	11
10				0.000 00	0.000 01	0.000 08	0.017 33	0.189 44	0.575 38	0.885 24	10	10
9				0.000 01	0.000 08	0.000 46	0.046 77	0.323 07	0.726 47	0.946 12	9	9
8			0.000 00	0.000 07	0.000 52	0.002 26	0.109 12	0.488 15	0.846 45	0.978 36	8	8
7		0.000 00	0.000 04	0.000 51	0.002 77	0.009 48	0.219 96	0.659 35	0.926 43	0.992 48	7	7
6		0.000 01	0.000 38	0.003 06	0.012 29	0.033 40	0.383 31	0.806 51	0.970 64	0.997 96	6	6
5	0.000 00	0.000 12	0.002 78	0.015 05	0.045 14	0.097 99	0.579 33	0.909 53	0.990 53	0.999 54	5	5
4	0.000 11	0.001 45	0.016 52	0.059 76	0.135 09	0.236 41	0.766 01	0.966 76	0.997 63	0.999 92	4	4
3	0.001 95	0.013 24	0.076 48	0.187 11	0.323 17	0.462 91	0.901 77	0.991 04	0.999 57	0.999 99	3	3
2	0.025 76	0.083 65	0.264 19	0.447 34	0.605 28	0.728 79	0.972 61	0.998 43	0.999 95	1.000 00	2	2
1	0.222 18	0.396 54	0.639 60	0.787 09	0.875 64	0.928 21	0.996 22	0.999 87	1.000 00	1.000 00	1	1
30											30	30
29											29	29
28											28	28
27										0.000 00	27	30
26										0.000 03	26	26
25									0.000 00	0.000 16	25	25
24									0.000 01	0.000 72	24	24
23									0.000 05	0.002 61	23	23
22								0.000 00	0.000 22	0.008 06	22	22
21								0.000 01	0.000 86	0.021 39	21	21
20								0.000 04	0.002 85	0.049 37	20	20
19								0.000 16	0.008 30	0.100 24	19	19
18							0.000 00	0.000 63	0.021 24	0.180 80	18	18
17							0.000 01	0.002 12	0.048 11	0.292 33	17	17
16							0.000 05	0.006 37	0.097 06	0.427 77	16	16
15							0.000 23	0.016 94	0.175 37	0.572 23	15	15
14							0.000 90	0.040 05	0.285 50	0.707 67	14	30
13						0.000 00	0.003 11	0.084 47	0.421 53	0.819 20	13	13
12					0.000 00	0.000 02	0.009 49	0.159 32	0.568 91	0.899 76	12	12
11				0.000 00	0.000 01	0.000 09	0.025 62	0.269 63	0.708 53	0.950 63	11	11
10				0.000 01	0.000 07	0.006 45	0.061 09	0.411 19	0.823 71	0.978 01	10	10
9			0.000 00	0.000 05	0.000 41	0.002 02	0.123 65	0.563 48	0.905 99	0.991 94	9	9
8			0.000 02	0.000 30	0.001 97	0.007 78	0.239 21	0.718 62	0.956 48	0.997 39	8	8
7		0.000 00	0.000 15	0.001 67	0.008 25	0.025 83	0.393 03	0.840 48	0.982 82	0.999 28	7	7
6	0.000 00	0.000 03	0.001 06	0.007 95	0.029 29	0.073 19	0.572 49	0.923 41	0.994 34	0.999 84	6	6
5	0.000 01	0.000 30	0.006 32	0.031 54	0.087 36	0.175 49	0.544 77	0.969 85	0.998 49	0.999 97	5	5
4	0.000 22	0.002 89	0.030 59	0.102 62	0.215 79	0.352 56	0.877 29	0.990 68	0.999 69	1.000 00	4	4
3	0.003 32	0.021 72	0.116 90	0.267 60	0.434 60	0.588 65	0.955 82	0.997 80	0.999 95	1.000 00	3	3
2	0.038 15	0.120 55	0.338 82	0.544 53	0.704 21	0.816 30	0.939 48	0.999 69	1.000 00	1.000 00	2	2
1	0.200 30	0.454 52	0.706 14	0.843 74	0.918 03	0.957 61	0.993 78	1.000 00	1.000 00	1.000 00	1	1

续表 17.1-3

$$R = \Phi(Z_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_R} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (Z_R \geq 0)$$

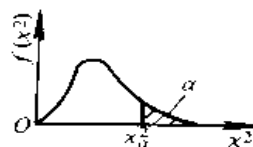


Z_R	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.500 0	0.504 0	0.508 0	0.512 0	0.516 0	0.519 9	0.523 9	0.527 9	0.531 9	0.535 9
0.1	0.539 8	0.543 8	0.547 8	0.551 7	0.555 7	0.559 6	0.563 6	0.567 5	0.571 4	0.575 3
0.2	0.579 3	0.583 2	0.587 1	0.591 0	0.594 8	0.598 7	0.602 6	0.606 4	0.610 3	0.614 1
0.3	0.617 9	0.621 7	0.625 5	0.629 3	0.633 1	0.636 8	0.640 6	0.644 3	0.648 0	0.651 7
0.4	0.655 4	0.659 1	0.662 8	0.666 4	0.670 0	0.673 6	0.677 2	0.680 8	0.684 4	0.687 9
0.5	0.691 5	0.695 0	0.698 5	0.701 9	0.705 4	0.708 8	0.712 3	0.715 7	0.719 0	0.722 4
0.6	0.725 7	0.729 1	0.732 4	0.735 7	0.738 9	0.742 2	0.745 4	0.748 6	0.751 7	0.754 9
0.7	0.758 0	0.761 1	0.764 2	0.767 3	0.770 3	0.773 4	0.776 4	0.779 4	0.782 3	0.785 2
0.8	0.788 1	0.791 0	0.793 9	0.796 7	0.799 5	0.802 3	0.805 1	0.807 8	0.810 6	0.813 3
0.9	0.815 9	0.818 6	0.821 2	0.823 8	0.826 4	0.828 9	0.831 5	0.834 0	0.836 5	0.838 9
1.0	0.841 3	0.843 8	0.846 1	0.848 5	0.850 8	0.853 1	0.855 4	0.857 7	0.859 9	0.862 1
1.1	0.864 3	0.866 5	0.868 6	0.870 8	0.872 9	0.874 9	0.877 0	0.879 0	0.881 0	0.883 0
1.2	0.884 9	0.886 9	0.888 8	0.890 7	0.892 5	0.894 4	0.896 2	0.898 0	0.899 7	0.901 47
1.3	0.903 20	0.904 90	0.906 58	0.908 24	0.909 88	0.911 49	0.913 09	0.914 66	0.916 21	0.917 74
1.4	0.919 24	0.920 73	0.922 20	0.923 64	0.925 07	0.926 47	0.927 85	0.929 22	0.930 56	0.931 89
1.5	0.933 19	0.934 48	0.935 74	0.936 99	0.938 22	0.939 43	0.940 62	0.941 79	0.942 95	0.944 08
1.6	0.945 20	0.946 30	0.947 38	0.948 45	0.949 50	0.950 53	0.951 54	0.952 54	0.953 52	0.954 49
1.7	0.955 43	0.956 37	0.957 28	0.958 18	0.959 07	0.959 94	0.960 80	0.961 64	0.962 46	0.963 27
1.8	0.964 07	0.964 85	0.965 62	0.966 38	0.967 12	0.967 84	0.968 56	0.969 26	0.969 95	0.970 62
1.9	0.971 28	0.971 93	0.972 57	0.973 20	0.973 81	0.974 41	0.975 00	0.975 58	0.976 15	0.976 70
2.0	0.977 25	0.977 78	0.978 31	0.978 82	0.979 32	0.979 82	0.980 30	0.980 77	0.981 24	0.981 69
2.1	0.982 14	0.982 57	0.983 00	0.983 41	0.983 82	0.984 22	0.984 61	0.985 00	0.985 37	0.985 74
2.2	0.986 10	0.986 45	0.986 79	0.987 13	0.987 45	0.987 78	0.988 09	0.988 40	0.988 70	0.988 99
2.3	0.989 28	0.989 56	0.989 83	0.9200 97	0.9203 58	0.9206 13	0.9208 63	0.9211 06	0.9213 44	0.9215 76
2.4	0.9218 02	0.9220 24	0.9222 40	0.9224 51	0.9226 56	0.9228 57	0.9230 53	0.9232 44	0.9234 31	0.9236 13
2.5	0.9237 90	0.9239 63	0.9241 32	0.9242 97	0.9244 57	0.9246 14	0.9247 66	0.9249 15	0.9250 60	0.9252 01
2.6	0.9253 39	0.9254 73	0.9256 04	0.9257 31	0.9258 55	0.9259 75	0.9260 93	0.9262 07	0.9263 19	0.9264 27
2.7	0.9265 33	0.9266 36	0.9267 36	0.9268 33	0.9269 28	0.9270 20	0.9271 10	0.9271 97	0.9272 82	0.9273 65
2.8	0.9274 45	0.9275 23	0.9275 99	0.9276 73	0.9277 44	0.9278 14	0.9278 82	0.9279 48	0.9280 12	0.9280 74
2.9	0.9281 34	0.9281 93	0.9282 50	0.9283 05	0.9283 59	0.9284 11	0.9284 62	0.9285 11	0.9285 59	0.9286 05
3.0	0.9286 50	0.9286 94	0.9287 36	0.9287 77	0.9288 17	0.9288 56	0.9288 93	0.9289 30	0.9289 65	0.9289 99
3.1	0.9303 24	0.9306 46	0.9309 57	0.9312 60	0.9315 53	0.9318 36	0.9321 12	0.9323 78	0.9326 36	0.9328 86
3.2	0.9331 29	0.9333 63	0.9335 90	0.9338 10	0.9340 24	0.9342 30	0.9344 29	0.9346 23	0.9348 10	0.9349 91
3.3	0.9351 66	0.9353 35	0.9354 99	0.9356 58	0.9358 11	0.9359 59	0.9351 03	0.9362 42	0.9363 76	0.9365 05
3.4	0.9366 31	0.9367 52	0.9368 69	0.9369 82	0.9370 91	0.9371 97	0.9372 99	0.9373 98	0.9374 93	0.9375 85
3.5	0.9376 74	0.9377 59	0.9378 42	0.9379 22	0.9379 91	0.9380 74	0.9381 46	0.9382 15	0.9382 82	0.9383 47
3.6	0.9384 09	0.9384 69	0.9385 27	0.9385 83	0.9386 37	0.9386 89	0.9387 39	0.9387 87	0.9388 34	0.9388 79
3.7	0.9389 22	0.9389 64	0.9400 39	0.9404 26	0.9407 99	0.9411 58	0.9415 04	0.9418 38	0.9421 59	0.9424 68
3.8	0.9427 65	0.9430 52	0.9433 27	0.9435 93	0.9438 48	0.9440 94	0.9443 31	0.9445 58	0.9447 77	0.9449 88
3.9	0.9451 90	0.9453 85	0.9455 73	0.9457 53	0.9459 26	0.9460 92	0.9462 53	0.9464 06	0.9465 54	0.9466 96
4.0	0.9468 33	0.9469 64	0.9470 90	0.9472 11	0.9473 27	0.9474 39	0.9475 46	0.9476 49	0.9477 48	0.9478 43
4.1	0.9479 34	0.9480 22	0.9481 06	0.9481 86	0.9482 63	0.9483 38	0.9484 09	0.9484 77	0.9485 42	0.9486 05
4.2	0.9486 65	0.9487 23	0.9487 78	0.9488 32	0.9488 82	0.9489 31	0.9489 78	0.9502 26	0.9506 55	0.9510 66
4.3	0.9514 60	0.9518 37	0.9521 99	0.9525 45	0.9528 76	0.9531 93	0.9534 97	0.9537 88	0.9540 66	0.9543 32
4.4	0.9545 87	0.9548 31	0.9550 65	0.9552 88	0.9555 02	0.9557 06	0.9559 02	0.9560 89	0.9562 68	0.9564 39
4.5	0.9566 02	0.9567 59	0.9569 08	0.9570 51	0.9571 87	0.9573 18	0.9574 42	0.9575 61	0.9576 75	0.9577 84
4.6	0.9578 88	0.9579 87	0.9580 81	0.9581 72	0.9582 58	0.9583 40	0.9584 19	0.9584 94	0.9585 66	0.9586 34
4.7	0.9586 99	0.9587 61	0.9588 21	0.9588 77	0.9589 31	0.9589 83	0.9603 20	0.9607 89	0.9612 35	0.9616 61
4.8	0.9620 67	0.9624 53	0.9628 22	0.9631 73	0.9635 08	0.9638 27	0.9641 31	0.9644 20	0.9646 96	0.9649 58
4.9	0.9652 08	0.9654 46	0.9656 73	0.9658 89	0.9660 94	0.9662 89	0.9664 75	0.9666 52	0.9668 21	0.9669 81

注 1. 0.930=0.999 0, 其余类似; 2. 0.031=0.000 1, 其余类似。

表 17.1-4 χ^2 分布表

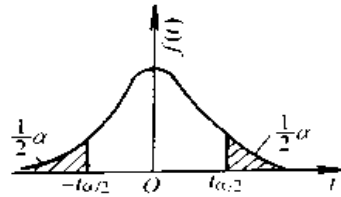
$$P(\chi^2 \geq \chi_{\alpha}^2) = \alpha$$



α	0.995	0.99	0.98	0.80	0.70	0.30	0.20	0.10	0.05	0.01
1	0.000 16	0.003 93	0.015 8	0.064 2	0.148	1.074	1.642	2.706	3.841	6.635
2	0.020 1	0.102 6	0.211	0.446	0.713	2.408	3.219	4.605	5.991	9.210
3	0.115	0.352	0.584	1.005	0.424	3.665	4.642	6.251	7.815	11.341
4	0.297	0.711	1.064	1.649	2.195	4.878	5.989	7.779	9.488	13.277
5	0.554	1.145	1.610	2.343	3.000	6.064	7.289	9.236	11.070	15.086
6	0.872	1.635	2.204	3.070	3.828	7.231	8.558	10.645	12.592	16.812
7	1.239	2.167	2.833	3.822	4.671	8.383	9.803	12.017	14.067	18.475
8	1.646	2.733	3.490	4.594	5.527	9.524	11.030	13.362	15.507	20.090
9	2.088	3.325	4.168	5.380	6.393	10.656	12.242	14.684	16.919	21.666
10	2.558	3.940	4.865	6.179	7.267	11.781	13.442	15.987	18.307	23.209
11	3.053	4.575	5.578	6.980	8.148	12.899	14.631	17.275	19.675	24.725
12	3.571	5.226	6.304	7.807	9.034	14.011	15.812	18.549	21.026	26.217
13	4.107	5.892	7.042	8.634	9.926	15.119	16.985	19.812	22.362	27.688
14	4.660	6.571	7.790	9.467	10.821	16.222	18.151	21.064	23.685	29.141
15	5.229	7.261	8.547	10.307	11.721	17.322	19.311	22.307	24.996	30.578
16	5.812	7.962	9.312	11.152	12.624	18.418	20.465	23.542	26.296	32.000
17	6.408	8.672	10.085	12.002	13.531	19.511	21.615	24.769	27.587	33.409
18	7.015	9.390	10.865	12.857	14.440	20.601	22.760	25.989	28.869	34.805
19	7.633	10.117	11.651	13.716	15.352	21.689	23.900	27.204	30.144	36.191
20	8.260	10.851	12.443	14.578	16.266	22.775	25.038	28.412	31.410	37.566
21	8.897	11.591	13.240	15.445	17.182	23.858	26.171	29.615	32.671	38.932
22	9.542	12.338	14.042	16.314	18.101	24.939	27.301	30.813	33.924	40.289
23	10.196	13.091	14.848	17.187	19.021	26.018	28.429	32.007	35.172	41.638
24	10.856	13.848	15.659	18.062	19.943	27.096	29.558	33.196	36.415	42.980
25	11.524	14.611	16.473	18.940	20.867	28.172	30.675	34.382	37.652	44.314
26	12.198	15.379	17.292	19.820	21.792	29.246	31.795	35.566	38.885	45.642
27	12.879	16.151	18.114	20.703	22.719	30.319	32.912	36.741	40.113	46.933
28	13.565	16.928	18.939	21.588	23.647	31.391	34.027	37.916	41.337	48.278
29	14.257	17.708	19.768	22.475	24.577	32.461	35.139	39.087	42.557	49.588
30	14.954	18.493	20.599	23.364	25.508	33.530	36.250	40.256	43.773	50.892
40	22.164	26.509	29.051	32.352	34.876	44.163	37.263	51.805	55.758	63.691
60	37.485	43.188	46.459	50.647	53.815	65.225	38.969	74.397	79.082	88.379
80	53.540	60.391	64.278	69.213	72.920	86.122	90.403	96.578	101.879	112.329
100	70.065	77.929	82.358	87.950	92.137	106.908	111.667	118.498	123.342	135.807
200	156.432	168.279	174.835	183.006	189.052	209.997	216.618	226.021	233.994	249.445

表 17.1-5 t 分布的双侧分位数 ($t_{\frac{\alpha}{2}}$) 表

$$P(|t| > t_{\frac{\alpha}{2}}) = \alpha$$



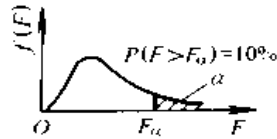
() 中 α 值是单侧分位数 (t_{α})

α ν	0.9 (0.45)	0.8 (0.4)	0.7 (0.35)	0.6 (0.3)	0.5 (0.25)	0.4 (0.2)	0.3 (1.15)	0.2 (0.1)	0.1 (0.05)	0.05 (0.12)	0.02 (0.01)	0.01 (0.005)	0.001 (0.0005)	α ν
1	0.158	0.325	0.510	0.727	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619	1
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598	2
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978	1.250	1.633	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924	3
4	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610	4
5	0.132	0.267	0.408	0.559	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859	5
6	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959	6
7	0.130	0.268	0.402	0.540	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405	7
8	0.130	0.262	0.399	0.546	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041	8
9	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.833	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781	9
10	0.129	0.260	0.397	0.542	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587	10
11	0.129	0.260	0.396	0.540	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437	11
12	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.631	3.055	4.318	12
13	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221	13
14	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140	14
15	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.161	2.602	2.947	4.073	15
16	0.128	0.258	0.392	0.535	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015	16
17	0.128	0.257	0.392	0.534	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965	17
18	0.127	0.257	0.392	0.534	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922	18
19	0.127	0.257	0.391	0.533	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.833	19
20	0.127	0.257	0.391	0.533	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850	20
21	0.127	0.257	0.391	0.532	0.636	0.859	1.063	1.323	1.721	2.030	2.518	2.831	3.819	21
22	0.127	0.256	0.390	0.532	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792	22
23	0.127	0.256	0.390	0.532	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767	23
24	0.127	0.256	0.390	0.531	0.685	0.857	1.059	1.313	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745	24
25	0.127	0.256	0.390	0.531	0.681	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725	25
26	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707	26
27	0.127	0.256	0.389	0.531	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690	27
28	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674	28
29	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659	29
30	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.354	1.055	0.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646	30
40	0.126	0.255	0.388	0.529	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551	40
60	0.126	0.254	0.387	0.527	0.670	0.848	1.046	1.293	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460	60
120	0.126	0.254	0.386	0.526	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373	120
∞	0.126	0.253	0.385	0.524	0.674	0.842	1.036	1.232	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291	∞

($\alpha = 0.10$)

表 17.1-6 F 分布表

$P(F > F_{\alpha}) = \alpha$

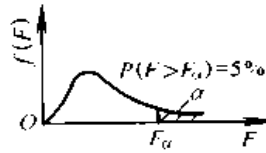


$\nu_1 \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	120	∞
1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	61.22	61.74	62.26	62.79	63.06	63.33
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.42	9.44	9.46	9.47	9.48	9.49
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.20	5.18	5.17	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.87	3.84	3.82	3.79	3.78	3.76
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.24	3.21	3.17	3.14	3.12	3.13
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.87	2.84	2.80	2.76	2.74	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.63	2.59	2.56	2.51	2.49	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.46	2.42	2.38	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.34	2.30	2.25	2.21	2.18	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.24	2.20	2.16	2.11	2.08	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.17	2.12	2.08	2.03	2.00	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.10	2.06	2.01	1.96	1.93	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.05	2.01	1.96	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.78	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.01	1.96	1.91	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	1.97	1.92	1.87	1.82	1.79	1.76
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.94	1.89	1.84	1.78	1.75	1.72
17	3.03	2.65	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.91	1.86	1.81	1.75	1.72	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.89	1.84	1.78	1.72	1.69	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.86	1.81	1.76	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.84	1.79	1.74	1.68	1.64	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.83	1.78	1.72	1.66	1.62	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.81	1.76	1.70	1.64	1.60	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.80	1.74	1.69	1.62	1.59	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.78	1.73	1.67	1.61	1.57	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.77	1.72	1.66	1.59	1.56	1.52
26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.76	1.71	1.65	1.58	1.54	1.50
27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.75	1.70	1.64	1.57	1.53	1.49
28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.74	1.69	1.63	1.56	1.52	1.48
29	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.73	1.68	1.62	1.55	1.51	1.47
30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.72	1.67	1.61	1.54	1.50	1.46
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.66	1.61	1.54	1.47	1.42	1.38
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.60	1.54	1.48	1.40	1.35	1.29
120	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.55	1.48	1.41	1.32	1.26	1.19
∞	2.71	2.30	2.08	1.94	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.49	1.42	1.34	1.24	1.17	1.00

($\alpha = 0.05$)

续表 17.1-6

$$P(F > F_{\alpha}) = \alpha$$

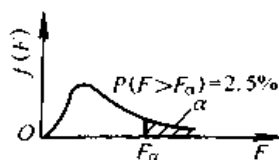


$\nu_1 \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	246	248	250	252	253	254
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.70	8.66	8.62	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.86	5.80	5.75	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.62	4.56	4.50	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.94	3.87	3.81	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.65	3.51	3.44	3.38	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.64	3.22	3.15	3.08	3.00	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.01	2.94	2.86	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.84	2.77	2.70	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.72	2.65	2.57	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.62	2.54	2.47	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.53	2.46	2.38	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.46	2.39	2.31	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.40	2.33	2.25	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.35	2.28	2.19	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.31	2.23	2.15	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.27	2.19	2.11	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.23	2.16	2.07	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.20	2.12	2.04	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.18	2.10	2.01	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.15	2.07	1.98	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.13	2.05	1.96	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.11	2.03	1.94	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.09	2.01	1.92	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.07	1.99	1.90	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.06	1.97	1.88	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.04	1.96	1.87	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.03	1.94	1.85	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.01	1.93	1.84	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	1.92	1.84	1.74	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.84	1.75	1.65	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.75	1.66	1.55	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.67	1.57	1.46	1.32	1.22	1.00

($\alpha = 0.025$)

续表 17.1-6

$$P(F > F_{\alpha}) = \alpha$$

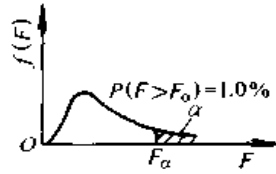


$\nu_1 \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	120	∞
1	648	800	864	900	922	937	948	957	963	969	985	993	1001	1010	1014	1018
2	38.5	39.0	39.2	39.2	39.3	39.3	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.5	39.5	39.5	39.5
3	17.4	16.0	15.4	15.1	14.9	14.7	14.4	14.5	14.5	14.4	14.3	14.2	14.1	14.0	13.9	13.9
4	12.2	10.6	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.66	8.56	8.46	8.36	8.31	8.26
5	10.0	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.43	6.33	6.23	6.12	6.07	6.02
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.27	5.17	5.07	4.96	4.90	4.85
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.57	4.47	4.36	4.25	4.20	4.14
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.10	4.00	3.89	3.78	3.73	3.67
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.77	3.67	3.56	3.45	3.39	3.33
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.52	3.42	3.31	3.20	3.14	3.08
11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.33	3.23	3.12	3.00	2.94	2.88
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.18	3.07	2.96	2.85	2.79	2.72
13	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.05	2.95	2.84	2.72	2.66	2.60
14	6.30	4.86	4.24	3.89	3.66	3.50	3.38	3.29	3.21	3.15	2.95	2.84	2.73	2.61	2.55	2.49
15	6.20	4.76	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.86	2.76	2.64	2.52	2.46	2.40
16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.50	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.79	2.68	2.57	2.45	2.38	2.32
17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.96	2.72	2.62	2.50	2.38	2.32	2.25
18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.10	3.01	2.93	2.87	2.67	2.56	2.44	2.32	2.26	2.19
19	5.92	4.51	3.90	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.62	2.51	2.39	2.27	2.20	2.13
20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.57	2.46	2.35	2.22	2.16	2.09
21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.80	2.73	2.53	2.42	2.31	2.18	2.11	2.04
22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.70	2.50	2.39	2.27	2.14	2.08	2.00
23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.90	2.81	2.73	2.67	2.47	2.36	2.24	2.11	2.04	1.97
24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.44	2.33	2.21	2.08	2.01	1.94
25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.88	2.61	2.41	2.30	2.18	2.05	1.98	1.91
26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.85	2.59	2.39	2.28	2.16	2.03	1.95	1.88
27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.83	2.57	2.36	2.25	2.13	2.00	1.93	1.85
28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.81	2.55	2.34	2.23	2.11	1.98	1.91	1.83
29	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.32	2.21	2.09	1.96	1.89	1.81
30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.31	2.20	2.07	1.94	1.87	1.79
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.18	2.07	1.94	1.80	1.72	1.64
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.06	1.94	1.82	1.67	1.58	1.48
120	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	1.94	1.82	1.69	1.53	1.43	1.31
∞	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.83	1.71	1.57	1.39	1.27	1.00

($\alpha=0.01$)

续表 17.1-6

$P(F > F_\alpha) = \alpha$

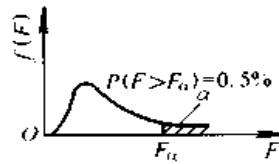


$\nu_1 \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	120	∞
1	4.052	5.000	5.403	5.625	5.764	5.859	5.928	5.982	6.002	6.056	6.157	6.209	6.261	6.313	6.339	6.366
2	98.5	99.0	99.2	99.2	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5	99.5
3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	26.9	26.7	26.5	26.3	26.2	26.1
4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5	14.2	14.0	13.8	13.7	13.6	13.5
5	16.3	13.3	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.72	9.55	9.38	9.20	9.11	9.08
6	13.7	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.56	7.40	7.23	7.06	6.97	6.88
7	12.2	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.31	6.16	5.99	5.82	5.74	5.65
8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.52	5.36	5.20	5.03	4.95	4.86
9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	4.96	4.81	4.65	4.48	4.40	4.31
10	10.0	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.56	4.41	4.25	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.25	4.10	3.94	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.01	3.86	3.70	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.82	3.66	3.51	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.66	3.51	3.35	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.52	3.37	3.21	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.41	3.26	3.10	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.31	3.16	3.00	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.23	3.08	2.92	2.75	2.66	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.15	3.00	2.84	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.09	2.94	2.78	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.03	2.88	2.72	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	2.98	2.83	2.67	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.21	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	2.93	2.78	2.62	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	2.89	2.74	2.58	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.85	2.70	2.54	2.36	2.27	2.17
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.82	2.66	2.50	2.33	2.23	2.13
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.78	2.63	2.47	2.29	2.20	2.10
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.75	2.60	2.44	2.26	2.17	2.06
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.73	2.57	2.41	2.23	2.14	2.03
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.70	2.55	2.39	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.52	2.37	2.20	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.35	2.20	2.03	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.19	2.03	1.86	1.66	1.53	1.38
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.04	1.88	1.70	1.47	1.32	1.00

($\alpha = 0.005$)

续表 17.1-6

$$P(F > F_{\alpha}) = \alpha$$



$\nu_1 \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	120	∞
1	16.211	20.000	21.615	22.500	23.056	23.437	23.715	23.925	24.091	24.224	24.630	24.836	25.044	25.253	25.359	25.465
2	1.98	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	2.00
3	55.6	49.8	47.5	46.2	45.4	44.8	44.4	44.1	43.9	43.7	43.1	42.8	42.5	42.2	42.0	41.8
4	31.3	26.3	24.3	23.2	22.5	22.0	21.6	21.4	21.1	21.0	20.4	20.2	19.9	19.6	19.5	19.3
5	22.8	18.3	16.5	15.6	14.9	14.5	14.2	14.0	13.8	13.6	13.1	12.9	12.7	12.4	12.3	12.1
6	18.6	14.5	12.9	12.0	11.5	11.1	10.8	10.6	10.4	10.2	9.81	9.59	9.36	9.12	9.00	8.88
7	16.2	12.4	10.9	10.0	9.52	9.16	8.89	8.68	8.51	8.38	7.97	7.75	7.53	7.31	7.19	7.08
8	14.7	11.0	9.60	8.81	8.30	7.95	7.69	7.50	7.34	7.21	6.81	6.61	6.40	6.18	6.06	5.95
9	13.6	10.1	8.72	7.96	7.47	7.13	6.88	6.69	6.54	6.42	6.03	5.83	5.62	5.41	5.30	5.19
10	12.8	9.43	8.08	7.34	6.87	6.54	6.30	6.12	5.97	5.85	5.47	5.27	5.07	4.86	4.75	4.64
11	12.2	8.91	7.60	6.88	6.42	6.10	5.86	5.68	5.54	5.42	5.05	4.86	4.65	4.44	4.34	4.23
12	11.8	8.51	7.23	6.52	6.07	5.76	5.52	5.35	5.20	5.09	4.73	4.53	4.34	4.12	4.01	3.90
13	11.4	8.19	6.93	6.23	5.79	5.48	5.25	5.08	4.94	4.82	4.46	4.27	4.07	3.87	3.76	3.65
14	11.1	7.92	6.68	6.00	5.56	5.26	5.03	4.86	4.72	4.60	4.25	4.06	3.86	3.66	3.55	3.44
15	10.8	7.70	6.48	5.80	5.37	5.07	4.85	4.67	4.54	4.42	4.07	3.88	3.69	3.48	3.37	3.26
16	10.6	7.51	6.30	5.64	5.21	4.91	4.69	4.52	4.38	4.27	3.92	3.73	3.54	3.33	3.22	3.11
17	10.4	7.35	6.16	5.50	5.07	4.78	4.56	4.39	4.25	4.14	3.79	3.61	3.41	3.21	3.10	2.98
18	10.2	7.21	6.03	5.37	4.96	4.66	4.44	4.28	4.14	4.03	3.68	3.50	3.30	3.10	2.99	2.87
19	10.1	7.09	5.92	5.27	4.85	4.56	4.34	4.18	4.04	3.93	3.59	3.40	3.21	3.00	2.89	2.78
20	9.94	6.99	5.82	5.17	4.76	4.47	4.26	4.09	3.96	3.85	3.50	3.32	3.12	2.92	2.81	2.69
21	9.83	6.89	5.73	5.09	4.68	4.39	4.18	4.01	3.88	3.77	3.43	3.24	3.05	2.84	2.73	2.61
22	9.73	6.81	5.65	5.02	4.61	4.32	4.11	3.94	3.81	3.70	3.36	3.18	2.98	2.77	2.66	2.55
23	9.63	6.73	5.58	4.95	4.54	4.26	4.05	3.88	3.75	3.64	3.30	3.12	2.92	2.71	2.60	2.48
24	9.55	6.66	5.52	4.89	4.49	4.20	3.99	3.83	3.69	3.59	3.25	3.06	2.87	2.66	2.55	2.43
25	9.48	6.60	5.46	4.84	4.43	4.15	3.94	3.78	3.64	3.54	3.20	3.01	2.82	2.61	2.50	2.38
26	9.41	6.54	5.41	4.79	4.38	4.10	3.89	3.73	3.60	3.49	3.15	2.97	2.77	2.56	2.45	2.33
27	9.34	6.49	5.36	4.74	4.34	4.06	3.85	3.69	3.56	3.45	3.11	2.93	2.73	2.52	2.41	2.29
28	9.28	6.44	5.32	4.70	4.30	4.02	3.81	3.65	3.52	3.41	3.07	2.89	2.69	2.48	2.37	2.25
29	9.23	6.40	5.28	4.66	4.26	3.98	3.77	3.61	3.48	3.38	3.04	2.86	2.66	2.45	2.33	2.21
30	9.18	6.35	5.24	4.62	4.23	3.95	3.74	3.58	3.45	3.34	3.01	2.82	2.63	2.42	2.30	2.18
40	8.83	6.07	4.98	4.37	3.99	3.71	3.51	3.35	3.22	3.12	2.78	2.60	2.40	2.18	2.06	1.93
60	8.49	5.80	4.73	4.14	3.76	3.49	3.29	3.32	3.01	2.90	2.57	2.39	2.19	1.96	1.83	1.69
120	8.18	5.54	4.50	3.92	3.55	3.28	3.09	2.93	2.81	2.71	2.37	2.19	1.98	1.75	1.61	1.43
∞	7.88	5.30	4.28	3.72	3.35	3.09	3.90	2.74	2.62	2.52	2.19	2.00	1.79	1.53	1.36	1.00

表 17.1-7 Γ 函数表

x	$\Gamma(x)$									
	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.00	1.000 0	0.999 4	0.998 8	0.998 3	0.997 7	0.997 1	0.996 6	0.996 0	0.995 4	0.994 9
1.01	0.994 3	0.993 8	0.993 2	0.992 7	0.992 1	0.991 6	0.991 0	0.990 5	0.989 9	0.989 4
1.02	0.988 8	0.988 3	0.987 8	0.987 2	0.986 7	0.986 2	0.985 6	0.985 1	0.984 6	0.984 1
1.03	0.983 5	0.983 0	0.982 5	0.982 0	0.981 5	0.981 0	0.980 5	0.980 0	0.979 4	0.978 9
1.04	0.978 4	0.977 9	0.977 4	0.976 9	0.976 4	0.975 9	0.975 5	0.975 0	0.974 5	0.974 0
1.05	0.973 5	0.973 0	0.972 5	0.972 1	0.971 6	0.971 1	0.970 6	0.970 2	0.969 7	0.969 2
1.06	0.968 7	0.968 3	0.967 8	0.967 3	0.966 9	0.966 4	0.966 0	0.965 5	0.965 1	0.964 6
1.07	0.961 2	0.963 7	0.963 3	0.962 8	0.962 4	0.961 9	0.961 5	0.961 0	0.960 6	0.960 2
1.08	0.959 7	0.959 3	0.958 9	0.958 4	0.958 0	0.957 6	0.957 1	0.956 7	0.956 3	0.955 9
1.09	0.955 5	0.955 0	0.954 6	0.954 2	0.953 8	0.953 4	0.953 0	0.952 6	0.952 2	0.951 3
1.10	0.951 4	0.950 9	0.950 5	0.950 1	0.949 8	0.949 4	0.949 0	0.948 6	0.948 2	0.947 8
1.11	0.947 4	0.947 0	0.946 6	0.946 2	0.945 9	0.945 5	0.945 1	0.944 7	0.944 3	0.944 0
1.12	0.943 6	0.943 2	0.942 8	0.942 5	0.942 1	0.941 7	0.941 4	0.941 0	0.940 7	0.940 3
1.13	0.939 9	0.939 6	0.939 2	0.938 9	0.938 5	0.938 2	0.937 8	0.937 5	0.937 1	0.936 8
1.14	0.936 4	0.936 1	0.935 7	0.935 4	0.935 0	0.934 7	0.934 4	0.934 0	0.933 7	0.933 4
1.15	0.933 0	0.932 7	0.932 4	0.932 1	0.931 7	0.931 4	0.931 1	0.930 8	0.930 4	0.930 1
1.16	0.929 8	0.929 5	0.929 2	0.928 9	0.928 5	0.928 2	0.927 9	0.927 6	0.927 3	0.927 0
1.17	0.926 7	0.926 4	0.926 1	0.925 8	0.925 5	0.925 2	0.924 9	0.924 6	0.924 3	0.924 0
1.18	0.923 7	0.923 4	0.923 1	0.922 9	0.922 3	0.922 3	0.922 0	0.921 7	0.921 4	0.921 2
1.19	0.920 9	0.920 6	0.920 3	0.920 1	0.919 8	0.919 5	0.919 2	0.919 0	0.918 7	0.918 4
1.20	0.918 2	0.917 9	0.917 6	0.917 4	0.917 1	0.916 9	0.916 6	0.916 3	0.916 1	0.915 8
1.21	0.915 6	0.915 3	0.915 1	0.914 8	0.914 6	0.914 3	0.914 1	0.913 8	0.913 6	0.913 3
1.22	0.913 1	0.912 9	0.912 6	0.912 4	0.912 2	0.911 9	0.911 7	0.911 4	0.911 2	0.911 0
1.23	0.910 8	0.910 5	0.910 3	0.910 1	0.909 8	0.909 6	0.909 4	0.909 2	0.909 0	0.908 7
1.24	0.908 5	0.908 3	0.908 1	0.907 9	0.907 7	0.907 4	0.907 2	0.907 0	0.906 8	0.906 6
1.25	0.906 4	0.906 2	0.906 0	0.905 8	0.905 6	0.905 4	0.905 2	0.905 0	0.904 8	0.904 6
1.26	0.904 4	0.904 2	0.904 0	0.903 8	0.903 6	0.903 4	0.903 2	0.903 1	0.902 9	0.902 7
1.27	0.902 5	0.902 3	0.902 1	0.902 0	0.901 8	0.901 6	0.901 4	0.901 2	0.901 1	0.900 9
1.28	0.900 7	0.900 5	0.900 4	0.900 2	0.900 0	0.899 9	0.899 7	0.899 5	0.899 4	0.899 2
1.29	0.899 0	0.898 9	0.898 7	0.898 6	0.898 4	0.898 2	0.898 1	0.897 9	0.897 8	0.897 6
1.30	0.897 5	0.897 3	0.897 2	0.897 0	0.896 9	0.896 7	0.896 5	0.896 4	0.896 3	0.896 1
1.31	0.896 0	0.895 9	0.895 7	0.895 6	0.895 4	0.895 3	0.895 2	0.895 0	0.894 9	0.894 8
1.32	0.894 6	0.894 5	0.894 4	0.894 3	0.894 1	0.894 0	0.893 9	0.893 7	0.893 6	0.893 5
1.33	0.893 4	0.893 3	0.893 1	0.893 0	0.892 9	0.892 8	0.892 7	0.892 6	0.892 4	0.892 3
1.34	0.892 2	0.892 1	0.892 0	0.891 9	0.891 8	0.891 7	0.891 6	0.891 5	0.891 4	0.891 2
1.35	0.891 2	0.891 1	0.891 0	0.890 9	0.890 8	0.890 7	0.890 6	0.890 5	0.890 4	0.890 3
1.36	0.890 2	0.890 1	0.890 0	0.889 9	0.889 8	0.889 7	0.889 7	0.889 6	0.889 5	0.889 4
1.37	0.889 3	0.889 2	0.889 2	0.889 1	0.889 0	0.888 9	0.888 8	0.888 8	0.888 7	0.888 6
1.38	0.888 5	0.888 5	0.888 4	0.888 3	0.888 3	0.888 2	0.888 1	0.888 0	0.888 0	0.887 9
1.39	0.887 9	0.887 8	0.887 7	0.887 7	0.887 6	0.887 5	0.887 5	0.887 4	0.887 4	0.887 3
1.40	0.887 3	0.887 2	0.887 2	0.887 1	0.887 1	0.887 0	0.887 0	0.886 9	0.886 9	0.886 8
1.41	0.886 8	0.886 7	0.886 7	0.886 6	0.886 6	0.886 5	0.886 5	0.886 5	0.886 4	0.886 4
1.42	0.886 4	0.886 3	0.886 3	0.886 3	0.886 2	0.886 2	0.886 2	0.886 1	0.886 1	0.886 1
1.43	0.886 0	0.886 0	0.886 0	0.886 0	0.885 9	0.885 9	0.885 9	0.885 9	0.885 8	0.885 8
1.44	0.885 8	0.885 8	0.885 8	0.885 8	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7
1.45	0.885 7	0.885 7	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6
1.46	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 6
1.47	0.885 6	0.885 6	0.885 6	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7	0.885 7
1.48	0.885 7	0.885 8	0.885 8	0.885 8	0.885 8	0.885 8	0.885 9	0.885 9	0.885 9	0.885 9
1.49	0.885 9	0.886 0	0.886 0	0.886 0	0.886 0	0.886 1	0.886 1	0.886 1	0.886 2	0.886 2

续表 17.1-7

x	$\Gamma(x)$									
	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
1.50	0.886 2	0.886 3	0.886 3	0.886 3	0.886 4	0.886 4	0.886 4	0.886 5	0.886 5	0.886 6
1.51	0.886 6	0.886 6	0.886 7	0.886 7	0.886 8	0.886 8	0.886 9	0.886 9	0.886 9	0.887 0
1.52	0.887 0	0.887 1	0.887 1	0.887 2	0.887 2	0.887 3	0.887 3	0.887 4	0.887 5	0.887 5
1.53	0.887 6	0.887 6	0.887 7	0.887 7	0.887 8	0.887 9	0.887 9	0.888 0	0.888 0	0.888 1
1.54	0.888 2	0.888 2	0.888 3	0.888 4	0.888 4	0.888 5	0.888 6	0.888 7	0.888 7	0.888 8
1.55	0.888 9	0.888 9	0.889 0	0.889 1	0.889 2	0.889 2	0.889 3	0.889 4	0.889 5	0.889 6
1.56	0.889 6	0.889 7	0.889 8	0.889 9	0.890 0	0.890 1	0.890 1	0.890 2	0.890 3	0.890 4
1.57	0.890 5	0.890 6	0.890 7	0.890 8	0.890 9	0.890 9	0.891 0	0.891 1	0.891 2	0.891 3
1.58	0.891 4	0.891 5	0.891 6	0.891 7	0.891 8	0.891 9	0.892 0	0.892 1	0.892 2	0.892 3
1.59	0.892 4	0.892 5	0.892 6	0.892 7	0.892 9	0.893 0	0.893 1	0.893 2	0.893 3	0.893 4
1.60	0.893 5	0.893 6	0.893 7	0.893 9	0.894 0	0.894 1	0.894 2	0.894 3	0.894 4	0.894 6
1.61	0.894 7	0.894 8	0.894 9	0.895 0	0.895 2	0.895 3	0.895 4	0.895 5	0.895 7	0.895 8
1.62	0.895 9	0.896 1	0.896 2	0.896 3	0.896 4	0.896 6	0.896 7	0.896 8	0.897 0	0.897 1
1.63	0.897 2	0.897 4	0.897 5	0.897 7	0.897 8	0.897 9	0.898 1	0.898 2	0.898 4	0.898 5
1.64	0.898 6	0.898 8	0.898 9	0.899 1	0.899 2	0.899 4	0.899 5	0.899 7	0.899 8	0.900 0
1.65	0.900 1	0.900 3	0.900 4	0.900 6	0.900 7	0.900 9	0.901 0	0.901 2	0.901 4	0.901 5
1.66	0.901 7	0.901 8	0.902 0	0.902 1	0.902 3	0.902 5	0.902 6	0.902 8	0.903 0	0.903 1
1.67	0.903 3	0.903 5	0.903 6	0.903 8	0.904 0	0.904 1	0.904 3	0.904 5	0.904 7	0.904 8
1.68	0.905 0	0.905 2	0.905 4	0.905 5	0.905 7	0.905 9	0.906 1	0.906 2	0.906 4	0.906 6
1.69	0.906 8	0.907 0	0.907 1	0.907 3	0.907 5	0.907 7	0.907 9	0.908 1	0.908 3	0.908 4
1.70	0.908 6	0.908 8	0.909 0	0.909 2	0.909 4	0.909 6	0.909 8	0.910 0	0.910 2	0.910 4
1.71	0.910 6	0.910 8	0.911 0	0.911 2	0.911 4	0.911 6	0.911 8	0.912 0	0.912 2	0.912 4
1.72	0.912 6	0.912 8	0.913 0	0.913 2	0.913 4	0.913 6	0.913 8	0.914 0	0.914 2	0.914 5
1.73	0.914 7	0.914 9	0.915 1	0.915 3	0.915 5	0.915 7	0.916 0	0.916 2	0.916 4	0.916 6
1.74	0.916 8	0.917 0	0.917 3	0.917 5	0.917 7	0.917 9	0.918 2	0.918 4	0.918 6	0.918 8
1.75	0.919 1	0.919 3	0.919 5	0.919 7	0.920 0	0.920 2	0.920 4	0.920 7	0.920 9	0.921 1
1.76	0.921 4	0.921 6	0.921 8	0.922 1	0.922 3	0.922 6	0.922 8	0.923 0	0.923 3	0.923 5
1.77	0.923 8	0.924 0	0.924 2	0.924 5	0.924 7	0.925 0	0.925 2	0.925 5	0.925 7	0.926 0
1.78	0.926 2	0.926 5	0.926 7	0.927 0	0.927 2	0.927 5	0.927 7	0.928 0	0.928 3	0.928 5
1.79	0.928 8	0.929 0	0.929 3	0.929 5	0.929 8	0.930 1	0.930 3	0.930 6	0.930 9	0.931 1
1.80	0.931 4	0.931 6	0.931 9	0.932 2	0.932 5	0.932 7	0.933 0	0.933 3	0.933 5	0.933 8
1.81	0.934 1	0.934 3	0.934 6	0.934 9	0.935 2	0.935 5	0.935 7	0.936 0	0.936 3	0.936 6
1.82	0.936 8	0.937 1	0.937 4	0.937 7	0.938 0	0.938 3	0.938 5	0.938 8	0.939 1	0.939 4
1.83	0.939 7	0.940 0	0.940 3	0.940 6	0.940 8	0.941 1	0.941 4	0.941 7	0.942 0	0.942 3
1.84	0.942 6	0.942 9	0.943 2	0.943 5	0.943 8	0.944 1	0.944 4	0.944 7	0.945 0	0.945 3
1.85	0.945 6	0.945 9	0.946 2	0.946 5	0.946 8	0.947 1	0.947 4	0.947 8	0.948 1	0.948 4
1.86	0.948 7	0.949 0	0.949 3	0.949 6	0.949 9	0.950 3	0.950 6	0.950 9	0.951 2	0.951 5
1.87	0.951 8	0.952 2	0.952 5	0.952 8	0.953 1	0.953 4	0.953 8	0.954 1	0.954 4	0.954 7
1.88	0.955 1	0.955 4	0.955 7	0.956 1	0.956 4	0.956 7	0.957 0	0.957 4	0.957 7	0.958 0
1.89	0.958 4	0.958 7	0.959 1	0.959 4	0.959 7	0.960 4	0.960 4	0.960 7	0.961 1	0.961 4
1.90	0.961 8	0.962 1	0.962 5	0.962 8	0.963 1	0.963 5	0.963 8	0.964 2	0.964 5	0.964 9
1.91	0.965 2	0.965 6	0.965 9	0.966 3	0.966 6	0.967 0	0.967 3	0.967 7	0.968 1	0.968 4
1.92	0.968 8	0.969 1	0.969 5	0.969 9	0.970 2	0.970 6	0.970 9	0.971 3	0.971 7	0.972 0
1.93	0.972 4	0.972 8	0.973 1	0.973 5	0.973 9	0.974 2	0.974 6	0.975 0	0.975 4	0.975 7
1.94	0.976 1	0.976 5	0.976 8	0.977 2	0.977 6	0.978 0	0.978 4	0.978 7	0.979 1	0.979 5
1.95	0.979 9	0.980 3	0.980 6	0.981 0	0.981 4	0.981 8	0.982 2	0.982 6	0.983 0	0.983 4
1.96	0.983 7	0.984 1	0.984 5	0.984 9	0.985 3	0.985 7	0.986 1	0.986 5	0.986 9	0.987 3
1.97	0.987 7	0.988 1	0.988 5	0.988 9	0.989 3	0.989 7	0.990 1	0.990 5	0.990 9	0.991 3
1.98	0.991 7	0.992 1	0.992 5	0.992 9	0.993 3	0.993 8	0.994 2	0.994 6	0.995 0	0.995 4
1.99	0.995 8	0.996 2	0.996 6	0.997 1	0.997 5	0.997 9	0.998 3	0.998 7	0.999 2	0.999 6

对 $x < 1$ 或 $x > 2$ 的伽马函数值, 可以利用下式算出:

$$\Gamma(x) = \frac{\Gamma(x+1)}{x}, \Gamma(x) = (x-1)\Gamma(x-1)$$

例 (1) $\Gamma(0.8) = \frac{\Gamma(1.8)}{0.8} = \frac{0.9314}{0.8} = 1.164$

(2) $\Gamma(2.5) = 1.5 \times \Gamma(1.5) = 1.5 \times 0.8862 = 1.329$

3 可靠性特征量

度量产品可靠性的各种量统称为可靠性特征量。常用的可靠性特征量有可靠度、累积失效概率（或不可靠度）、平均寿命、可靠寿命、失效率等。

3.1 可靠度

可靠度是产品在规定条件下和规定时间区间内，完成规定功能的概率，记为 R 或 $R(t)$ 。

如果用随机变量 T 表示产品从开始工作到发生失效或故障的时间，其概率密度为 $f(t)$ ，如图 17.1-1 所示，则该产品在某一指定时刻 t 的可靠度

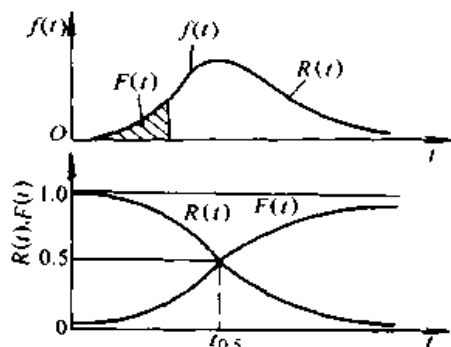


图 17.1-1 概率密度与可靠度、不可靠度曲线

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (17.1-1)$$

对于不可修复产品，可靠度的观测值是指直到规定的时间区间终了为止，能完成规定功能的产品数与在该区间开始时投入工作的产品数之比，即

$$\hat{R}(t) = \frac{N_s(t)}{N} = 1 - \frac{N_f(t)}{N} \quad (17.1-2)$$

式中 N ——开始投入工作的产品数；

$N_s(t)$ ——到时刻 t 完成规定功能的产品数；

$N_f(t)$ ——到时刻 t 未完成规定功能的产品数。

对于可修复产品，可靠度观测值是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间的次数与观测时间内无故障工作的总次数之比，即

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N} \quad (17.1-3)$$

式中 N ——观测时间内无故障工作的总次数，
每个产品的最后一次无工作时间，
若未超过规定的时间则不予计入；
 $N_s(t)$ ——无故障工作时间达到或超过规定时间的次数。

3.2 累积失效概率

累积失效概率是产品在规定条件下和规定时间内未完成规定功能（即发生失效）的概率，也称为不可靠度，记为 F 或 $F(t)$ 。

因为完成规定功能与未完成规定功能是两个对立事件，故按概率的互补定理有

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T \leq t) \quad (17.1-4)$$

如图 17.1-1 所示。累积失效概率的观测值为

$$\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) \quad (17.1-5)$$

3.3 平均寿命

平均寿命是寿命的平均值。对不可修复产品指失效前平均工作时间，一般记为 MTTF；对可修复产品则指平均无故障工作时间，一般记为 MTBF。它们都表示无故障工作时间 T 的数学期望 $E(T)$ ，或简记为 \bar{t} 。

若已知 T 的概率密度 $f(t)$ ，则

$$\bar{t} = E(T) = \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (17.1-6)$$

对于完全样本，即所有样品都观测到发生失效或故障时，平均寿命的观测值是指它们的算术平均值，即

$$\hat{\bar{t}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (17.1-7)$$

3.4 可靠寿命和中位寿命

可靠寿命是指定的可靠度所对应的时间，记为 $t(R)$ 。一般可靠度随着工作时间 t 的增大而下降，给定不同的 R 则有不同的 $t(R)$ ，即

$$t(R) = R^{-1}(R) \quad (17.1-8)$$

式中 R^{-1} —— R 的反函数，即由 $R(t) = R$ 反求 t 。

可靠寿命的观测值是能完成规定功能的产品的比例恰好等于给定可靠度 R 时所对应的时间。

当指定 $R = 0.5$ ，即 $R(t) = 0.5$ 时的寿命称为中位寿命，记为 \bar{t} 或 $t(0.5)$ 。

3.5 失效率和失效率曲线

3.5.1 失效率

失效率是工作到某时刻尚未失效的产品，在该时刻后单位时间内发生失效的概率。记为 λ 或 $\lambda(t)$ 。

若已知随机变量 T 的概率密度 $f(t)$ 、分布函数 $F(t)$ ，则

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (17.1-9)$$

失效率反映了 t 时刻产品失效的速率，也称为瞬时失效率。

失效率的观测值是在某时刻后单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比，即

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_1(t)}{N_2(t)\Delta t} \quad (17.1-10)$$

失效率的单位用单位时间的百分数表示。

3.5.2 失效率曲线

失效率曲线反映了产品总体整个寿命期失效率的情况。图 17.1-2 为失效率曲线的典型情况，有时形象地称为浴盆曲线。失效率随时间的变化可分为三部分：

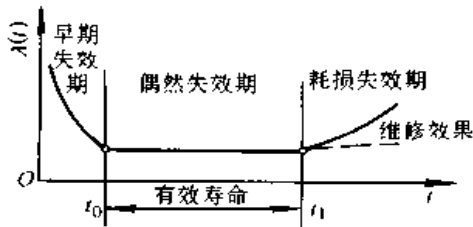


图 17.1-2 典型失效率曲线

(1) 早期失效期

失效率曲线为递减型。产品投入使用的早期，失效率较高而下降很快。早期失效主要由于设计、制造、贮存、运输等形成的缺陷，以及调试、跑合、起动不当等人为因素所造成。当经过这些先天不良的失效后，运转将逐渐正常，失效率趋于稳定，到 t_0 时失效率曲线已开始变平， t_0 以前称为早期失效期。针对早期失效期的失效原因，应尽量设法避免这些失效，争取失效率低且 t_0 短。

(2) 偶然失效期

失效率曲线为恒定型，即 t_0 到 t_1 间的失效率近似为常数。失效主要是由非预期的过载、误操作、意外的天灾以及一些尚不清楚的偶然因素所造成。由于失效原因多属偶然，故称为偶然失效期。偶然失效期是能有效工作的时间，这段时间称为有效寿命。

(3) 耗损失效期

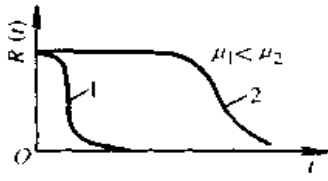
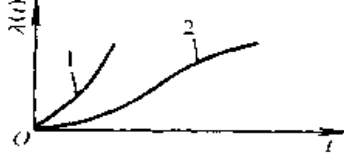
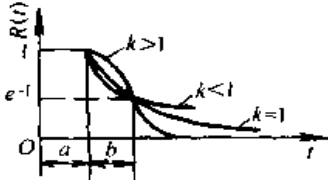
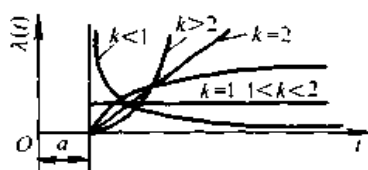
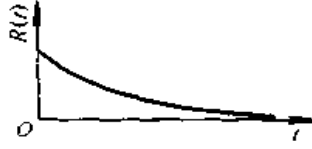
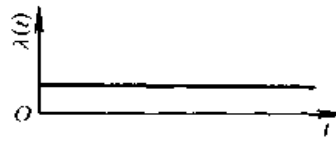
失效率是递增型。在 t_1 以后失效率上升较快，这是由于产品已经老化、疲劳、磨损、蠕变、腐蚀等耗损的原因所引起的，故称为耗损失效期。针对耗损失效的原因，应注意检查、监控、预测耗损开始的时间，提前维修，使失效率不上升，如图 17.1-2 中虚线所示，以延长有效寿命。当然，若修复需花费很大费用而寿命延长不多，则不如报废更为经济。

几种常用寿命分布的可靠度 $R(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$ 如表 17.1-8 所示。

表 17.1-8 几种常用寿命分布的 $R(t)$ 和 $\lambda(t)$

名称	可靠度	失效率
正态分布	$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_t^2}} dt$	$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_t^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_t^2}} dt}$

续表 17.1-8

名 称	可 靠 度	失 效 率
对数正态分布	$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma_{\ln t} t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma_{\ln t}^2}} dt$ 	$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma_{\ln t}^2}}}{t \int_t^{\infty} \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma_{\ln t}^2}} dt}$ 
威布尔分布	$R(t) = e^{-\left(\frac{t-a}{b}\right)^k}$ 	$\lambda(t) = \frac{k}{b} \left(\frac{t-a}{b}\right)^{k-1}$ 
指数分布	$R(t) = e^{-\lambda t}$ 	$\lambda(t) = \lambda = \frac{1}{t}$ 

3.6 可靠性特征量之间的关系

可靠性特征量中 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 是 4 个基本函数，只要知道其中的一个，则所有的特征量均可求得。特征量之间的关系见表

17.1-9。

此外，还有维修性特征量和可用性特征量，它们分别描述可修复产品的维修性的高低和能正常工作水平的高低。使用时可查阅有关设计手册。

表 17.1-9 可靠性特征量之间的关系

特征量	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	—	$1 - F(t)$	$\int_t^{\infty} f(t) dt$	$e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$F(t)$	$1 - R(t)$	—	$\int_0^t f(t) dt$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$f(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{dF(t)}{dt}$	—	$\lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
$\lambda(t)$	$-\frac{d}{dt} \ln R(t)$	$\frac{1}{1 - F(t)} \frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$	—

第 2 章 可靠性试验数据的处理方法

1 分布类型的假设检验

分布类型的判断原则上分理论法和统计法两种。理论法是根据失效机理制定的数学模型或某种分布的性质推导出来的。例如，失效率为常数的寿命分布为指数分布；失效率由“最弱”环节决定的寿命分布为极值分布；受很多独立随机因素和的影响，且任一种因素不起决定性作用，则这种分布为正态分布等。统计法是根据大量试验数据统计求得的。很多同类性能在以往大量试验的基础上已经验证了其分布。例如，几何尺寸、材料强度、硬度等多服从正态分布；金属的疲劳寿命则服从对数正态分布或威布尔分布。下面仅介绍统计法。对分布不明的情况应做大样本的试验以判定分布类型；对已有经验参考的，则可做较小样本的试验，假设其分布类型再进行相应的拟合性检验。下面给出通用的 χ^2 检验法和 K-S

检验法。

1.1 χ^2 检验法

χ^2 检验法一般只用于大样本。 χ^2 检验法是计算理论频数与实际频数间的差异，将检验统计量 χ^2 的观测值与临界值 $\chi^2_\alpha(\nu)$ 比较。满足下列条件，接受原假设；否则，拒绝原假设。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\nu_i - np_i)^2}{np_i} \leq \chi^2_\alpha(k - m - 1) \quad (17.2-1)$$

- 式中 n —— 样本大小；
 k —— 分组数，按样本大小宜取 $k = 7 \sim 14$ ；
 ν_i —— 第 i 组的实际频数， $\nu_i \geq 5$ ；
 p_i —— 第 i 组的理论频率（概率）；
 m —— 未知参数的数目；
 α —— 显著性水平；
 $\chi^2_\alpha(\cdot)$ —— 临界值，查表 17.1-4。

例 1 220 个某产品的失效时间记录列于表 17.2-1 中，试检验该产品的寿命是否服从指数分布。

表 17.2-1 某产品失效时间的数据记录

时间/h	0~100	>100 ~200	>200 ~300	>300 ~400	>400 ~500	>500 ~600	>600 ~700	>700 ~800	>800 ~900
失效数 r_i	39	50	35	32	28	18	12	4	2

解 假设该产品的寿命服从指数分布，参数 λ 未知。取组中值作为该组时间的代表值 t_i ，则 λ 的点估计

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_i r_i = \frac{1}{220} (50 \times 39 + 150 \times 50 + \dots + 850 \times 2) = 293 \text{ h}$$

$$\hat{\lambda} = 1/\hat{t} = \frac{1}{293} \text{ 1/h}$$

$$\text{假设 } H_0: F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{293}}$$

为了使用 χ^2 检验法，首先按规定分组。由于每组中实际频数不宜少于 5，故将前 7 段时间各作为一组，最后两段时间合为一组。总计组数 $k = 8$ ，正好在 7~14 范围内。其他计算见表 17.2-2。

表 17.2-2 例 1 的计算过程

组号 i	$\nu_i = r_i$	$p_i = (1 - e^{-\frac{t_i}{293}}) - (1 - e^{-\frac{t_{i-1}}{293}})$	$np_i = 220 p_i$	$\nu_i - np_i$	$(\nu_i - np_i)^2$	$\frac{(\nu_i - np_i)^2}{np_i}$
1	39	0.282 7	62.194	-23.194	537.962	8.650
2	50	0.205 5	45.210	4.790	22.944	0.507
3	35	0.146 1	32.140	2.860	8.180	0.254
4	32	0.103 9	22.858	9.142	83.576	3.656
5	28	0.073 8	16.236	11.764	138.392	8.524
6	18	0.052 5	11.550	6.450	41.603	3.602
7	12	0.037 3	8.206	3.794	14.394	1.754
8	6	0.091 7	20.174	-14.174	200.90	9.958
Σ						36.905

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\nu_i - n p_i)^2}{n p_i} = 36.905$$

取显著性水平 $\alpha = 0.10$, 由 $\nu = k - m - 1 = 8 - 1 - 1 = 6$, 查表 17.1-4 得

$$\chi_{\alpha}^2(\nu) = \chi_{0.10}^2(6) = 10.64$$

由于 $\chi^2 > \chi_{0.10}^2(6)$, 故拒绝原假设, 即不能认为该产品的寿命服从指数分布。

1.2 K-S 检验法

K-S 检验法 (又称 d 检验法) 比 χ^2 检验法精确, 而且还适用于小样本的情况。但是, K-S 检验法要求所检验的分布中不含未知参数。当指定分布中含有未知参数时, 对某些分布应该用专门的临界值表。

K-S 检验法是将 n 个试验数据按由小到大的次序排列, 根据假设的分布, 计算每个数据对应的 $F_0(x_i)$, 将其与经验分布函数 $F_n(x_i)$ 作比

较。其中, 差值的最大绝对值即为检验统计量 D_n 的观测值。将 D_n 与临界值 $D_{n,\alpha}$ 比较, 满足下列条件, 接受原假设; 否则, 拒绝原假设:

$$D_n = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F_0(x)| = \max |d_i| \leq D_{n,\alpha} \quad (17.2-2)$$

式中 $F_0(x)$ ——原假设的分布函数;

$F_n(x)$ ——经验分布函数;

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1 \\ \frac{i}{n}, & x_j < x \leq x_{j+1}, x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_r \\ 1, & x > x_n \end{cases} \quad (17.2-3)$$

$$d_i = \max |F_0(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F_0(x_i)| \quad (17.2-4)$$

$D_{n,\alpha}$ ——临界值, 查表 17.2-3:

表 17.2-3 K-S 检验临界值表

$n \backslash \alpha$	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	$n \backslash \alpha$	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
1	0.900 00	0.950 00	0.975 00	0.990 00	0.995 00	31	0.187 32	0.214 12	0.237 88	0.265 96	0.285 30
2	0.683 77	0.776 39	0.841 89	0.900 00	0.929 29	32	0.184 45	0.210 85	0.234 24	0.261 89	0.280 94
3	0.564 81	0.636 04	0.707 60	0.784 56	0.829 00	33	0.181 71	0.207 71	0.230 76	0.258 01	0.276 77
4	0.492 65	0.565 22	0.623 94	0.688 87	0.734 24	34	0.179 09	0.204 72	0.227 43	0.254 29	0.272 79
5	0.446 98	0.509 45	0.563 28	0.627 18	0.668 53	35	0.176 59	0.201 85	0.224 25	0.250 73	0.268 97
6	0.410 37	0.467 99	0.519 26	0.577 41	0.616 61	36	0.174 18	0.199 10	0.221 19	0.247 32	0.265 32
7	0.381 48	0.436 07	0.483 42	0.538 44	0.575 81	37	0.171 88	0.196 46	0.218 26	0.244 04	0.261 80
8	0.358 31	0.409 62	0.454 27	0.506 54	0.541 79	38	0.169 66	0.193 92	0.215 44	0.240 89	0.258 43
9	0.339 10	0.387 46	0.430 01	0.479 60	0.513 32	39	0.167 53	0.191 48	0.212 73	0.237 86	0.255 18
10	0.322 60	0.368 66	0.409 25	0.456 62	0.488 93	40	0.165 47	0.189 13	0.210 12	0.234 94	0.252 05
11	0.308 29	0.352 42	0.391 22	0.436 70	0.467 70	41	0.163 49	0.186 87	0.207 60	0.232 12	0.249 04
12	0.295 77	0.338 15	0.375 43	0.419 18	0.449 05	42	0.161 58	0.184 68	0.205 17	0.229 41	0.246 13
13	0.284 70	0.325 49	0.361 43	0.403 62	0.432 47	43	0.159 74	0.182 57	0.202 83	0.226 79	0.243 32
14	0.274 81	0.314 17	0.348 90	0.389 70	0.417 62	44	0.157 96	0.180 53	0.200 56	0.224 26	0.240 60
15	0.265 88	0.303 97	0.337 60	0.377 13	0.404 20	45	0.156 23	0.178 56	0.198 37	0.221 81	0.237 98
16	0.257 78	0.294 72	0.327 33	0.365 71	0.392 01	46	0.154 57	0.176 65	0.196 25	0.219 44	0.235 44
17	0.250 39	0.286 27	0.317 96	0.355 28	0.380 86	47	0.152 95	0.174 81	0.194 20	0.217 15	0.232 98
18	0.243 60	0.278 51	0.309 36	0.345 69	0.370 62	48	0.151 39	0.173 02	0.192 21	0.214 93	0.230 59
19	0.237 35	0.271 36	0.301 43	0.336 85	0.361 17	49	0.149 87	0.171 28	0.190 28	0.212 77	0.228 28
20	0.231 56	0.264 73	0.294 08	0.328 66	0.352 41	50	0.148 40	0.169 59	0.188 41	0.210 68	0.226 04
21	0.226 17	0.258 58	0.287 24	0.321 04	0.344 27	55	0.141 64	0.161 86	0.179 81	0.201 07	0.215 74
22	0.221 15	0.252 83	0.280 87	0.313 94	0.336 66	60	0.135 73	0.155 11	0.172 31	0.192 67	0.206 73
23	0.216 45	0.244 46	0.274 90	0.307 28	0.329 54	65	0.130 52	0.149 13	0.165 67	0.185 25	0.198 77
24	0.212 05	0.242 42	0.269 31	0.301 04	0.322 86	70	0.125 86	0.143 81	0.159 75	0.178 63	0.191 67
25	0.207 90	0.237 68	0.264 04	0.295 16	0.316 57	75	0.121 67	0.139 01	0.154 42	0.172 68	0.185 28
26	0.203 99	0.233 20	0.259 07	0.289 62	0.310 64	80	0.117 87	0.134 67	0.149 60	0.167 28	0.179 49
27	0.200 30	0.228 98	0.254 38	0.284 38	0.305 02	85	0.114 42	0.130 72	0.145 20	0.162 36	0.174 21
28	0.196 80	0.224 97	0.249 93	0.279 42	0.299 71	90	0.111 25	0.127 09	0.141 17	0.157 86	0.169 38
29	0.193 48	0.221 17	0.245 71	0.274 71	0.294 66	95	0.108 33	0.123 75	0.137 46	0.153 71	0.164 93
30	0.190 32	0.217 56	0.241 70	0.270 23	0.289 87	100	0.105 63	0.120 67	0.134 03	0.149 87	0.160 81

例 2 某合金 9 个试件测得的强度极限为 453、436、429、419、405、416、432、423、440 MPa。试检验该合金的强度极限是否服从均值 $\mu = 428$ MPa, 标准差 $\sigma = 15$ MPa 的正态分布。

解 令该合金的强度极限 $\sigma_b = X$, 将数据按

由小到大次序排列。假设 X 服从正态分布, 分布函数

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-428)^2}{2 \cdot 15^2}} dx = \Phi\left(\frac{x-428}{15}\right)$$

式中的 $\Phi(\cdot)$ 查表 17.1-3。计算结果见表 17.2-4。

表 17.2-4 例 2 的计算过程

序号 i	x_i	$F(x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - 428}{15}\right)$	$\frac{i-1}{n}$	$\frac{i}{n}$	d_i
1	405	0.063 01	0	0.111	0.063 01
2	416	0.211 9	0.111	0.222	0.100 9
3	419	0.274 3	0.222	0.333	0.058 7
4	423	0.370 7	0.333	0.444	0.073 3
5	429	0.527 9	0.444	0.556	0.083 9
6	432	0.606 4	0.556	0.667	0.060 6
7	436	0.701 9	0.667	0.778	0.076 1
8	440	0.788 1	0.778	0.889	0.100 9
9	453	0.952 54	0.889	1.000	0.063 54

由表 17.2-4 中计算结果知, D_n 的观测值按式 17.2-2

$$D_n = \max |d_i| = 0.100 9$$

取显著性水平 $\alpha = 0.10$, 由表 17.2-3 查得 $D_{n,\alpha} = 0.387 46$ 。由于 $D_n < D_{n,\alpha}$, 故接受原假设, 即认为该合金的强度极限服从 $\mu = 428$ MPa, $\sigma = 15$ MPa 的正态分布。

2 指数分布的分析法

2.1 指数分布的拟合性检验

计算检验统计量

$$\chi^2 = 2 \sum_{k=1}^d \ln \frac{t_{\Sigma}}{T_k} \quad (17.2-5)$$

式中 t_{Σ} ——总累积试验时间;

T_k ——第 k ($k = 1, 2, \dots, r$) 次失效时的累积试验时间;

$$d = \begin{cases} r-1, & \text{定数截尾或定时截尾 } t_r = t_0 \\ r, & \text{定时截尾 } t_r < t_0; \end{cases}$$

t_0 ——指定的定时截尾时间;

t_r ——指定的定数截尾时间。

满足下列条件则接受指数分布的假设, 否则拒绝指数分布的假设。

$$\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2d) \leq \chi^2 \leq \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2d)$$

(17.2-6)

式中 α ——显著性水平;

$\chi_{\alpha}^2(2d)$ ——自由度为 $2d$ 的 χ^2 分位数, 查表 17.1-4。

总累积试验时间 t_{Σ} 是所有投入试验的试样 (包括失效的、中止的、截尾未失效的) 试验到规定时间的试验时间总和。当开始投入 n 个试样同时试验, 试验中有 b 个中止, 中止时间为 τ_j ($j = 1, 2, \dots, b$), 有 r 个失效, 失效时间为 t_i ($i = 1, 2, \dots, r$), 规定试验到 t_0 停止试验, 则试验总累积时间为

无替换:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^b \tau_j + (n - r - b)t_0 \quad (17.2-7)$$

有替换:

$$t_{\Sigma} = \sum_{j=1}^b \tau_j + (n - b)t_0 \quad (17.2-8)$$

式中 t_0 ——定时截尾时是规定的截尾时间, 定数截尾时是规定第 r 个失效的时间;

b ——中途中止试验的试样个数, 无中止试样时 $b = 0$ 。

第 k 次失效时的累积试验时间为
无替换:

$$T_k = \sum_{i=1}^k t_i + \sum_{j=1}^{n-k} \tau_j + (n-k-b_k)t_k \quad (17.2-9)$$

有替换:

$$T_k = \sum_{j=1}^{n-k} \tau_j + (n-b_k)t_k \quad (17.2-10)$$

式中 t_k ——第 k ($k=1, 2, \dots, r$) 个失效的时间;

b_k ——第 k 个失效前中止试验的试样个数, 无中止试样时 $b_k=0$ 。

例 3 抽取某产品 10 个进行寿命试验, 失效 5 个即停止试验。试验结果为 76、143、152、275、326 h。检验该产品寿命是否服从指数分布。

解 假设该产品的寿命服从指数分布。这是无替换定数截尾、无中止的寿命试验。由式 (17.2-7) 得总累积试验时间 t_{Σ} 为

$$\begin{aligned} t_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^5 t_i + (n-r)t_r \\ &= 76 + 143 + 152 + 275 + 326 + (10-5) \times 326 \\ &= 2\ 602 \text{ h} \end{aligned}$$

由式 (17.2-9) 得第 k 次失效时的累积失效时间 T_k 为

$$\begin{aligned} T_1 &= t_1 + (n-1)t_1 = 76 + (10-1) \times 76 = 760 \text{ h} \\ T_2 &= t_1 + t_2 + (n-2)t_2 = 76 + 143 + (10-2) \times 143 \\ &= 1\ 363 \text{ h} \\ T_3 &= t_1 + t_2 + t_3 + (n-3)t_3 \\ &= 76 + 143 + 152 + (10-3) \times 152 = 1\ 435 \text{ h} \\ T_4 &= t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + (n-4)t_4 \end{aligned}$$

$= 76 + 143 + 152 + 275 + (10-4) \times 275 = 2\ 296 \text{ h}$
由式 (17.2-5), 本例 $d=r-1=5-1=4$, 故

$$\begin{aligned} \chi^2 &= 2 \sum_{k=1}^d \ln \left(\frac{t_{\Sigma}}{T_k} \right) \\ &= 2 \left(\ln \frac{2\ 602}{760} + \ln \frac{2\ 602}{1\ 363} + \ln \frac{2\ 602}{1\ 435} + \ln \frac{2\ 602}{2\ 296} \right) \\ &= 5.195 \end{aligned}$$

取显著性水平 $\alpha=0.10$, 由表 17.1-4 查得

$$\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2d) = \chi_{0.95}^2(8) = 2.73$$

$$\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2d) = \chi_{0.05}^2(8) = 15.51$$

满足 $2.73 \leq \chi^2 \leq 15.51$, 故接受原假设, 认为该产品的寿命服从指数分布。

2.2 指数分布的参数估计和可靠度估计

指数分布参数 λ 的点估计

$$\hat{\lambda} = 1/\bar{t} \quad (17.2-11)$$

式中的 \bar{t} 为样本均值, n 个个体的全数试验

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (17.2-12)$$

截尾试验

$$\bar{t} = \frac{t_{\Sigma}}{r} \quad (17.2-13)$$

式中 t_{Σ} ——总试验累积时间, 由式 (17.2-7) 或式 (17.2-8) 确定;

r ——观测的失效数。当 $r=0$ 进行 λ 的点估计时建议取 $r = \frac{1}{3}$ 。

指数分布参数的区间估计, 截尾寿命试验 (全数试验可用无替换定数截尾) \bar{t} 的区间估计用表 17.2-5 中公式计算。

表 17.2-5 指数分布平均寿命的区间估计

区间估计种类	定时截尾	定数截尾
单侧置信下限 \bar{t}_L	$\frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r+2)}$	$\frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}$
双侧置信下限 \bar{t}_L	$\frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r+2)}$	$\frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}$
双侧置信上限 \bar{t}_U	$\frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}$	$\frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}$

注: 1. α ——显著性水平;

2. r ——失效数;

3. $\chi^2(*)$ —— χ^2 分布的分位数, 查表 17.1-4。

参数 λ 的区间估计, 先由表 17.2-5 计算平均寿命的置信限, 再按下式计算 λ 的置信限。

λ 的置信下限

$$\lambda_L = 1/\bar{t}_L \quad (17.2-14)$$

λ 的置信上限

$$\lambda_U = 1/\bar{t}_U \quad (17.2-15)$$

可靠度的点估计

$$\hat{R}(t) = e^{-\hat{\lambda}t} \quad (17.2-16)$$

可靠度的置信下限

$$R_L(t) = e^{-\lambda_U t} \quad (17.2-17)$$

例 4 某产品的寿命服从指数分布。抽取 11 个进行寿命试验, 在试验到 500 h 时中止 1 个, 600 h 时中止 1 个, 900 h 时失效 1 个, 其他试样达到 1 000 h 均未失效即停止试验。求平均寿命、失效率及工作到 100 h 可靠度点估计; 若要求置信水平 $\gamma = 1 - \alpha = 90\%$, 求平均寿命的单侧置信下限、失效率的单侧置信上限及工作到 100 h 可靠度的单侧置信下限。

解 这是 $n = 11$, 失效数 $r = 1$, 中止数 $b = 2$, 截尾时间 $t_0 = 1 000$ h 的无替换定时截尾寿命试验。由式 (17.2-7), 总累积试验时间

$$t_2 = t_1 + \tau_1 + \tau_2 + (n - r - b) t_0 = 900 + 500 + 600 + (11 - 1 - 2) \times 1 000 = 10 000 \text{ h}$$

由式 (17.2-13), 平均寿命的点估计

$$\bar{t} = \frac{t_2}{r} = \frac{10 000}{1} = 10 000 \text{ h}$$

由式 (17.2-11), 失效率的点估计

$$\hat{\lambda} = 1/\bar{t} = 1/10 000 \text{ 1/h}$$

由式 (17.2-16), $t = 100$ h 时可靠度的点估计

$$\hat{R}(100) = e^{-\hat{\lambda}t} = e^{-\frac{100}{10 000}} = 0.990 05$$

用表 17.2-5 中的公式, 由表 17.1-4 查得 $\chi_{0.01}^2(2r + 2) = \chi_{0.01}^2(4) = 7.78$, 故平均寿命的单侧置信下限

$$\bar{t}_L = \frac{2t_2}{\chi_{0.01}^2(2r + 2)} = \frac{2 \times 10 000}{7.78} = 2 570.7 \text{ h}$$

由式 (17.2-15), 失效率的单侧置信上限

$$\lambda_U = \frac{1}{\bar{t}_L} = \frac{1}{2 570.7} = 3.89 \times 10^{-4} \text{ 1/h}$$

由式 (17.2-17), $t = 100$ h 时可靠度的单侧置信下限

$$R_L(100) = e^{-\lambda_U t} = e^{-\frac{100}{2 570.7}} = 0.961 85$$

3 正态及对数正态分布的分析法

若随机变量 $Y \sim \ln(\mu, \sigma^2)$, 则

$$X = \ln Y \sim N(\mu, \sigma^2);$$

故取

$$x = \ln y \quad (17.2-18)$$

则对正态分布的所有分析方法都可用于对数正态分布。但要注意, 进行对数正态分布的分析时必须将其数据按式 (17.2-18) 取成对数。

3.1 正态及对数正态分布的拟合性检验

对于样本容量不大, 分布参数 μ, σ 未知时, 若用参数的点估计 \bar{x}, s_x (见式 (17.2-22)、式 (17.2-23)) 代替, 则假设

$$F_0(x; \bar{x}, s_x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}s_x} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s_x^2}} dx \quad (17.2-19)$$

与 K-S 检验法类似, 满足下列条件则接受原假设, 否则拒绝原假设。

$$\begin{aligned} \hat{D}_n &= \sup_{-\infty < x < \infty} |F_0(x; \bar{x}, s_x) - F_n(x)| \\ &= \max |d_i| \leq \hat{D}_{n,\alpha} \end{aligned} \quad (17.2-20)$$

式中 $F_n(x)$ ——经验分布函数, 同式 (17.2-3);

$$d_i = \max \left\{ F_0(x; \bar{x}, s_x) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F_0(x; \bar{x}, s_x) \right\}; \quad (17.2-21)$$

$\hat{D}_{n,\alpha}$ ——临界值, 查表 17.2-6。

表 17.2-6 \hat{D}_n 的临界值 $\hat{D}_{n,\alpha}$ (正态分布)

$n \backslash \alpha$	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
4	0.300	0.319	0.352	0.381	0.417
5	0.285	0.299	0.315	0.337	0.405
6	0.265	0.277	0.294	0.319	0.364
7	0.247	0.258	0.276	0.300	0.348
8	0.233	0.244	0.261	0.285	0.331

续表 17.2-6

$n \backslash \alpha$	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
9	0.223	0.233	0.249	0.271	0.311
10	0.215	0.224	0.239	0.258	0.294
11	0.206	0.217	0.230	0.249	0.284
12	0.199	0.212	0.223	0.242	0.275
13	0.190	0.202	0.214	0.234	0.268
14	0.183	0.194	0.207	0.227	0.261
15	0.177	0.187	0.201	0.220	0.257
16	0.173	0.182	0.195	0.213	0.250
17	0.169	0.177	0.189	0.206	0.245
18	0.166	0.173	0.184	0.200	0.239
19	0.163	0.169	0.179	0.195	0.235
20	0.160	0.166	0.174	0.190	0.231
25	0.142	0.147	0.158	0.173	0.200
30	0.131	0.136	0.144	0.161	0.187
>30	$\frac{0.736}{\sqrt{n}}$	$\frac{0.768}{\sqrt{n}}$	$\frac{0.805}{\sqrt{n}}$	$\frac{0.886}{\sqrt{n}}$	$\frac{1.031}{\sqrt{n}}$

例5 对某钢材进行静强度试验, 9个试件的强度极限按由小到大次序分别为 625、650、656、659、661、662、663、668、672 MPa。检验该钢材强度极限是否服从正态分布。

解 假设该钢材的强度极限服从正态分布。由于分布参数未知, 故先进行估计。由式(17.2-22)、(17.2-23)得

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{9} (625 + 650 + \dots + 672) = 657.3 \text{ MPa}$$

$$s_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} = \left\{ \frac{1}{9-1} [(625 - 657.3)^2 + (650 - 657.3)^2 + \dots + (672 - 657.3)^2] \right\}^{1/2}$$

$$= 13.69 \text{ MPa}$$

假设

$$F_0(x; \bar{x}, s_x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{13.69 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-657.3)^2}{2 \times 13.69^2}} dx$$

列表计算 \hat{d}_i , 见表 17.2-7。Φ(·) 查表 17.1-3。

由表 17.2-7 的计算结果知, \hat{D}_n 的观测值按式(17.2-20)知

$$\hat{D}_n = \max |d_i| = 0.24188$$

取显著性水平 $\alpha = 0.10$, 由表 17.2-6 查得 $\hat{D}_{n,\alpha} = 0.249$ 。因为 $\hat{D}_n < \hat{D}_{n,\alpha}$, 故接受原假设, 即认为该钢材强度极限服从正态分布。

表 17.2-7 例5的计算过程

序号 i	x_i/MPa	$F_0(x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - 657.3}{13.69}\right)$	$\frac{i-1}{9}$	$\frac{i}{9}$	\hat{d}_i
1	625	0.009 137	0.00	0.111 11	0.101 97
2	650	0.298 1	0.111 11	0.222 22	0.186 99
3	656	0.464 1	0.222 22	0.333 33	0.241 88
4	659	0.547 8	0.333 33	0.444 44	0.214 47
5	661	0.606 4	0.444 44	0.555 56	0.161 96
6	662	0.633 1	0.555 56	0.666 67	0.077 54
7	663	0.662 8	0.666 67	0.777 78	0.114 98
8	668	0.782 3	0.777 78	0.888 89	0.106 59
9	672	0.857 7	0.888 89	1.00	0.142 30

3.2 正态及对数正态分布完全样本的参数估计

正态分布均值的点估计

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (17.2-22)$$

标准差的点估计

$$\hat{\sigma} = s_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17.2-23)$$

均值 μ 的双侧置信区间估计。置信下限 μ_L 和上限 μ_U 分别为

$$\mu_L = \bar{x}_L = \bar{x} - \frac{s_x}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu) \quad (17.2-24)$$

$$\mu_U = \bar{x}_U = \bar{x} + \frac{s_x}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu) \quad (17.2-25)$$

均值 μ 的单侧置信下限为

$$\mu_L = \bar{x}_L = \bar{x} - \frac{s_x}{\sqrt{n}} t_{\alpha}(\nu) \quad (17.2-26)$$

式中 α ——显著性水平, $1 - \alpha$ 为置信水平;
 n ——样本大小;
 ν ——自由度。当标准差 σ 已知, s_x 用 σ 代替, 则 $\nu = \infty$; 当标准差为点估计 s_x , 则 $\nu = n - 1$;

$t_{\alpha}(\nu)$ —— t 分布的分位数, 查表 17.1-5。

标准差 σ 的双侧置信区间估计。置信下限 σ_L 和上限 σ_U 分别为

$$\sigma_L = s_{xL} = \left[\frac{n-1}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} s_x \quad (17.2-27)$$

$$\sigma_U = s_{xU} = \left[\frac{n-1}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} s_x \quad (17.2-28)$$

标准差 σ 的单侧置信上限

$$\sigma_U = s_{xU} = \left[\frac{n-1}{\chi_{1-\alpha}^2(\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} s_x \quad (17.2-29)$$

式中 n ——样本大小;
 ν ——自由度: 当均值 μ 已知, $\nu = n$;
 当 μ 未知, $\nu = n - 1$;
 α ——显著性水平, $1 - \alpha$ 为置信水平;
 $\chi_{\alpha}^2(\nu)$ —— χ^2 分布的分位数, 查表 17.1-4;

3.3 正态及对数正态分布截尾寿命试验的参数估计

3.3.1 极大似然估计

当样本较大时, 正态分布均值和标准差的极大似然估计是具有良好性质的估计量。从寿命服从正态分布的总体中抽取 n 个试样进行定时截尾寿命试验, 试验到 x_0 时结束, 共失效 r 个, 失效时间为

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_r \leq x_0$$

则寿命的均值 μ 和标准差 σ 的极大似然估计分别为

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \bar{x}_r + \frac{s_r^2 - s_r^2}{d} \quad (17.2-30)$$

$$\hat{\sigma} = s_x = \frac{d}{g\left(D, \frac{r}{n}\right)} \quad (17.2-31)$$

式中 $\bar{x}_r = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_i$;
 $s_r^2 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x}_r)^2$;
 $d = x_0 - \bar{x}_r$;
 $D = \frac{d^2}{d^2 + s_r^2}$;
 $g\left(D, \frac{r}{n}\right)$ ——查表 17.2-8。

表 17.2-8 极大似然估计用表 (正态分布、对数正态分布) $g\left(D, \frac{r}{n}\right)$

r/n D	0.01	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.99
0.01	0.088 890	0.093 283	0.095 016	0.096 172	0.097 068	0.097 816	0.098 465	0.099 043	0.099 569	0.100 053	0.100 460
0.02	0.119 803	0.128 283	0.131 704	0.134 006	0.135 809	0.137 323	0.138 646	0.139 833	0.140 916	0.141 919	0.142 766
0.03	0.141 461	0.153 823	0.158 899	0.162 346	0.165 065	0.167 361	0.169 377	0.171 194	0.172 861	0.174 410	0.175 721
0.04	0.158 428	0.174 515	0.181 220	0.185 809	0.189 451	0.192 542	0.195 270	0.197 737	0.200 009	0.202 128	0.203 929
0.05	0.172 457	0.192 133	0.200 447	0.206 176	0.210 748	0.214 648	0.218 103	0.221 240	0.224 139	0.226 852	0.229 165
0.06	0.184 441	0.207 584	0.217 489	0.224 359	0.229 869	0.234 588	0.238 786	0.242 612	0.246 159	0.249 489	0.252 337
0.07	0.194 905	0.221 409	0.232 886	0.240 896	0.247 351	0.252 903	0.257 859	0.262 391	0.266 607	0.270 577	0.273 982
0.08	0.204 192	0.233 957	0.246 989	0.256 138	0.263 545	0.269 941	0.275 671	0.280 928	0.285 833	0.290 466	0.294 451
0.09	0.212 524	0.245 464	0.260 039	0.270 328	0.278 695	0.285 946	0.292 464	0.298 465	0.304 080	0.309 399	0.313 986

续表 17.2-8

r/n D	0.01	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.99
0.10	0.220 083	0.256 112	0.272 214	0.283 642	0.292 974	0.301 093	0.308 415	0.315 177	0.321 523	0.227 552	0.332 765
0.11	0.226 995	0.266 030	0.283 645	0.296 213	0.306 519	0.315 516	0.323 657	0.331 198	0.338 296	0.345 059	0.350 921
0.12	0.233 342	0.275 319	0.294 435	0.308 144	0.319 430	0.329 317	0.338 292	0.346 631	0.354 503	0.362 023	0.368 559
0.13	0.239 218	0.284 062	0.304 666	0.319 516	0.331 789	0.342 578	0.352 403	0.361 557	0.370 224	0.378 528	0.385 763
0.14	0.244 675	0.292 320	0.314 404	0.330 395	0.343 663	0.355 365	0.366 054	0.376 043	0.385 528	0.394 640	0.402 600
0.15	0.249 766	0.300 153	0.323 702	0.340 836	0.355 105	0.367 732	0.379 301	0.390 144	0.400 469	0.410 415	0.419 127
0.16	0.254 529	0.307 598	0.332 606	0.350 884	0.366 161	0.379 724	0.392 189	0.403 906	0.415 093	0.425 900	0.435 392
0.17	0.259 006	0.314 701	0.341 151	0.360 576	0.376 869	0.391 380	0.404 757	0.417 367	0.429 440	0.441 136	0.461 435
0.18	0.263 221	0.321 489	0.349 375	0.369 945	0.387 261	0.402 732	0.417 037	0.430 560	0.443 544	0.456 157	0.467 293
0.19	0.267 195	0.327 987	0.357 303	0.379 020	0.397 366	0.413 809	0.429 058	0.443 514	0.457 433	0.470 993	0.482 996
0.20	0.270 961	0.334 228	0.364 959	0.387 825	0.407 207	0.424 635	0.440 844	0.456 254	0.471 134	0.485 670	0.498 573
0.21	0.274 523	0.340 223	0.372 365	0.396 380	0.416 808	0.435 232	0.452 417	0.468 803	0.484 670	0.500 213	0.514 048
0.22	0.277 929	0.345 996	0.379 539	0.404 705	0.426 184	0.445 617	0.463 797	0.481 180	0.498 060	0.514 643	0.529 443
0.23	0.281 157	0.351 566	0.386 498	0.412 816	0.435 355	0.455 809	0.475 000	0.493 402	0.511 323	0.528 979	0.544 780
0.24	0.284 238	0.356 937	0.393 256	0.420 728	0.444 334	0.465 822	0.486 041	0.505 485	0.524 475	0.543 238	0.560 078
0.25	0.287 176	0.362 134	0.399 827	0.428 454	0.453 135	0.475 669	0.496 935	0.517 444	0.537 531	0.557 438	0.575 354
0.26	0.289 986	0.367 159	0.406 222	0.436 006	0.461 770	0.485 363	0.507 693	0.529 291	0.550 506	0.571 593	0.590 625
0.27	0.292 682	0.372 029	0.412 453	0.443 395	0.470 248	0.494 914	0.518 327	0.541 038	0.563 412	0.585 715	0.605 907
0.28	0.295 262	0.376 751	0.418 528	0.450 631	0.478 581	0.504 332	0.528 848	0.552 696	0.576 260	0.599 821	0.621 214
0.29	0.297 734	0.381 334	0.424 456	0.457 721	0.486 777	0.513 627	0.539 264	0.564 276	0.589 062	0.613 922	0.636 562
0.30	0.300 118	0.385 787	0.430 247	0.464 675	0.494 844	0.522 807	0.549 584	0.575 785	0.601 828	0.628 029	0.651 965
0.31	0.302 401	0.390 113	0.435 906	0.471 499	0.502 790	0.531 879	0.559 817	0.587 234	0.614 568	0.642 155	0.667 435
0.32	0.304 609	0.394 321	0.441 440	0.478 201	0.510 622	0.540 851	0.569 969	0.598 630	0.627 291	0.656 310	0.682 987
0.33	0.306 728	0.398 421	0.446 857	0.484 787	0.518 345	0.549 729	0.580 048	0.609 981	0.640 006	0.670 504	0.698 634
0.34	0.308 773	0.402 410	0.452 161	0.491 262	0.525 966	0.558 518	0.590 060	0.621 293	0.652 721	0.684 749	0.714 388
0.35	0.310 750	0.406 301	0.457 358	0.497 632	0.533 490	0.567 226	0.600 012	0.632 575	0.665 445	0.699 055	0.730 262
0.36	0.312 652	0.410 097	0.462 453	0.503 902	0.540 922	0.575 856	0.609 908	0.643 832	0.678 186	0.713 431	0.746 271
0.37	0.314 500	0.413 801	0.467 450	0.510 076	0.548 267	0.584 414	0.619 754	0.655 071	0.690 950	0.727 888	0.726 426
0.38	0.316 279	0.417 416	0.472 353	0.516 159	0.555 529	0.592 905	0.629 556	0.666 297	0.703 746	0.742 436	0.778 742
0.39	0.318 004	0.420 950	0.477 167	0.522 155	0.562 713	0.601 332	0.639 318	0.677 517	0.716 581	0.757 084	0.795 232
0.40	0.319 675	0.424 401	0.481 896	0.528 066	0.569 821	0.609 701	0.649 045	0.688 735	0.729 462	0.771 842	0.811 910
0.41	0.321 297	0.427 776	0.486 541	0.533 898	0.576 859	0.618 014	0.658 740	0.699 958	0.742 396	0.786 721	0.828 789
0.42	0.322 866	0.431 079	0.491 108	0.539 653	0.583 828	0.626 274	0.668 409	0.711 190	0.755 390	0.801 731	0.845 886
0.43	0.324 393	0.434 310	0.495 599	0.545 334	0.590 733	0.634 487	0.678 056	0.722 436	0.768 451	0.816 881	0.863 214
0.44	0.325 872	0.437 474	0.500 017	0.550 944	0.597 575	0.642 655	0.687 683	0.733 702	0.781 587	0.832 183	0.880 790
0.45	0.327 304	0.440 573	0.504 364	0.556 486	0.604 359	0.650 781	0.697 259	0.744 992	0.794 804	0.847 647	0.898 630
0.46	0.328 701	0.443 609	0.508 643	0.561 962	0.611 087	0.658 867	0.706 895	0.756 312	0.808 109	0.863 284	0.916 751
0.47	0.330 057	0.446 585	0.512 857	0.567 376	0.617 761	0.666 918	0.716 488	0.767 665	0.821 509	0.879 106	0.935 171
0.48	0.331 379	0.449 502	0.517 007	0.572 728	0.624 383	0.674 935	0.726 075	0.779 057	0.835 012	0.895 124	0.953 909
0.49	0.332 660	0.452 363	0.521 097	0.578 022	0.630 956	0.682 921	0.735 661	0.790 492	0.848 625	0.911 350	0.972 984
0.50	0.333 907	0.455 171	0.525 127	0.583 259	0.637 483	0.690 879	0.745 249	0.801 975	0.862 355	0.927 798	0.992 418
0.51	0.335 126	0.457 925	0.529 100	0.588 442	0.643 965	0.698 811	0.754 842	0.813 511	0.876 210	0.944 479	1.012 231
0.52	0.336 312	0.460 630	0.533 018	0.593 572	0.650 404	0.706 719	0.764 442	0.825 104	0.899 198	0.961 408	1.032 447
0.53	0.337 469	0.463 285	0.536 882	0.598 651	0.656 802	0.714 606	0.774 053	0.836 758	0.904 326	0.978 598	1.053 086
0.54	0.338 592	0.465 894	0.540 694	0.603 680	0.663 161	0.722 473	0.783 679	0.848 480	0.918 602	0.996 065	1.074 191
0.55	0.339 695	0.468 456	0.544 456	0.608 662	0.669 482	0.730 323	0.793 324	0.860 272	0.933 036	1.013 825	1.095 773
0.56	0.340 763	0.470 975	0.548 169	0.613 598	0.675 768	0.738 158	0.802 983	0.872 141	0.947 636	1.031 894	1.117 867

续表 17.2-8

r/n D	0.01	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.99
0.57	0.341 811	0.473 450	0.551 835	0.618 489	0.682 020	0.745 979	0.812 667	0.884 091	0.962 410	1.050 289	1.140 507
0.58	0.342 832	0.475 883	0.555 455	0.623 336	0.688 238	0.753 790	0.822 377	0.896 127	0.977 369	1.069 027	1.163 726
0.59	0.343 831	0.478 278	0.559 030	0.628 142	0.694 426	0.761 590	0.832 115	0.903 253	0.902 520	1.088 130	1.187 562
0.60	0.344 803	0.480 631	0.562 561	0.632 907	0.700 584	0.769 384	0.841 884	0.920 476	1.007 875	1.107 617	1.212 056
0.61	0.345 741	0.482 950	0.566 050	0.637 633	0.706 714	0.777 171	0.851 687	0.932 799	1.023 445	1.127 510	1.237 251
0.62	0.346 672	0.485 229	0.569 498	0.642 320	0.712 816	0.784 954	0.861 527	0.945 230	1.039 239	1.147 833	1.263 194
0.63	0.347 582	0.487 471	0.572 906	0.646 970	0.718 893	0.792 734	0.871 407	0.957 772	1.055 270	1.168 610	1.289 936
0.64	0.348 472	0.489 686	0.576 275	0.651 584	0.724 944	0.800 514	0.881 329	0.970 432	1.071 548	1.189 866	1.317 533
0.65	0.349 361	0.491 856	0.579 606	0.656 164	0.730 973	0.808 294	0.891 296	0.983 216	1.088 091	1.211 632	1.346 049
0.66	0.350 196	0.493 994	0.582 900	0.660 709	0.736 979	0.816 077	0.901 311	0.996 129	1.104 903	1.233 935	1.375 548
0.67	0.351 030	0.496 106	0.586 158	0.665 221	0.742 964	0.823 864	0.911 378	1.009 177	1.122 005	1.256 811	1.406 107
0.68	0.351 851	0.498 185	0.589 381	0.669 700	0.748 929	0.831 657	0.921 498	1.022 367	1.139 409	1.280 293	1.437 805
0.69	0.352 651	0.500 233	0.592 569	0.674 149	0.754 874	0.839 457	0.931 676	1.035 705	1.157 128	1.304 421	1.470 732
0.70	0.353 437	0.502 251	0.595 724	0.678 567	0.760 802	0.847 265	0.941 913	1.049 200	1.175 185	1.329 233	1.504 991
0.71	0.354 203	0.504 239	0.598 846	0.682 956	0.766 713	0.855 084	0.952 214	1.062 857	1.193 591	1.354 775	1.540 689
0.72	0.354 954	0.506 200	0.601 936	0.687 316	0.772 607	0.862 915	0.962 581	1.076 682	1.212 367	1.381 097	1.577 953
0.73	0.355 692	0.508 134	0.604 995	0.691 647	0.778 486	0.870 759	0.973 017	1.090 684	1.231 530	1.408 244	1.616 924
0.74	0.356 417	0.510 039	0.608 024	0.695 952	0.784 351	0.878 617	0.983 526	1.104 872	1.251 105	1.436 281	1.657 757
0.75	0.357 127	0.511 919	0.611 023	0.700 230	0.790 202	0.886 492	0.994 110	1.119 251	1.271 110	1.465 267	1.700 632
0.76	0.357 823	0.513 776	0.613 992	0.704 482	0.796 041	0.894 385	1.004 774	1.133 836	1.291 568	1.495 273	1.745 749
0.77	0.358 506	0.515 606	0.616 933	0.708 709	0.801 869	0.902 296	1.015 521	1.148 629	1.312 507	1.526 369	1.793 342
0.78	0.359 175	0.517 410	0.619 847	0.712 912	0.807 685	0.910 229	1.026 354	1.163 643	0.333 952	0.558 645	1.843 674
0.79	0.359 837	0.519 193	0.622 733	0.717 091	0.813 491	0.918 184	1.037 276	1.178 886	1.355 932	1.592 187	1.897 053
0.80	0.360 478	0.520 952	0.625 592	0.721 246	0.819 288	0.926 163	1.048 293	1.194 371	1.378 478	1.627 102	1.953 839
0.81	0.361 112	0.522 688	0.628 425	0.725 378	0.825 077	0.934 167	1.059 407	1.210 108	1.401 625	1.663 501	2.014 447
0.82	0.361 740	0.524 400	0.631 233	0.729 489	0.830 857	0.942 197	1.070 622	1.226 107	1.425 404	1.701 509	2.079 374
0.83	0.362 346	0.526 092	0.634 015	0.733 578	0.836 631	0.950 256	1.081 944	1.242 382	1.449 858	1.741 274	2.149 209
0.84	0.362 946	0.527 764	0.636 773	0.737 646	0.842 399	0.958 345	1.093 373	1.258 944	1.475 025	1.782 952	2.224 653
0.85	0.363 539	0.529 412	0.639 507	0.741 693	0.848 161	0.966 465	1.104 918	1.275 806	1.500 956	1.826 725	2.306 572
0.86	0.364 118	0.531 044	0.642 217	0.745 721	0.853 918	0.974 618	1.116 581	1.292 983	1.527 696	1.872 804	2.396 015
0.87	0.364 690	0.532 651	0.644 905	0.749 729	0.859 671	0.982 806	1.128 367	1.310 492	1.555 299	1.921 419	2.494 298
0.88	0.365 248	0.534 242	0.647 569	0.753 717	0.865 420	0.991 030	1.140 282	1.328 346	1.583 825	1.972 845	2.603 073
0.89	0.365 799	0.535 813	0.650 211	0.757 688	0.871 167	0.999 291	1.152 328	1.346 564	1.613 338	2.027 394	2.724 479
0.90	0.366 343	0.537 366	0.652 832	0.761 640	0.876 912	1.007 592	1.164 513	1.365 162	1.643 909	2.085 430	2.861 294
0.91	0.366 874	0.538 900	0.655 431	0.765 575	0.882 656	1.015 934	1.176 841	1.384 166	1.675 614	2.147 378	3.017 258
0.92	0.367 398	0.540 416	0.658 009	0.769 492	0.888 399	1.024 319	1.189 318	1.403 579	1.708 542	2.213 745	3.197 522
0.93	0.367 914	0.541 916	0.660 566	0.773 393	0.894 141	1.032 747	1.201 949	1.423 439	1.742 783	2.285 122	3.409 401
0.94	0.368 417	0.543 395	0.663 103	0.777 277	0.899 884	1.041 223	1.214 742	1.443 764	1.778 444	2.362 240	3.663 765
0.95	0.368 920	0.544 860	0.665 621	0.781 145	0.905 629	1.049 746	1.227 701	1.464 581	1.815 648	2.445 959	3.977 564
0.96	0.369 408	0.546 309	0.668 119	0.784 998	0.911 375	1.058 319	1.240 833	1.485 911	1.854 517	2.537 354	4.379 018
0.97	0.369 891	0.547 741	0.670 597	0.788 835	0.917 124	1.066 944	1.254 148	1.507 789	1.895 204	2.637 754	4.919 685
0.98	0.370 365	0.549 155	0.673 057	0.792 658	0.922 876	1.075 622	1.267 648	1.530 241	1.937 877	2.748 837	5.707 102
0.99	0.370 834	0.550 553	0.675 498	0.796 466	0.928 632	1.084 355	1.281 343	1.553 302	1.982 722	2.872 751	7.018 785

3.3.2 最佳线性无偏估计

寿命服从正态分布时, 均值 μ 和标准差 σ 的最佳线性无偏估计分别为

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \sum_{j=1}^r D'(n, r, j) x_j \quad (17.2-32)$$

$$\hat{\sigma} = s_x = \sum_{j=1}^r C'(n, r, j) x_j \quad (17.2-33)$$

式中 n —— 样本大小;
 r —— 截尾失效数;
 j —— 寿命由小到大排列的序号;
 x_j —— 第 j 个寿命值;
 $D'(n, r, j)$ —— μ 的最佳线性无偏估计系数, 查表 17.2-9;
 $C'(n, r, j)$ —— σ 的最佳线性无偏估计系数, 查表 17.2-9。

3.3.3 简单线性无偏估计

寿命服从正态分布时, 均值 μ 和标准差 σ 的简单线性无偏估计分别为

$$\hat{\mu} = \bar{x} = x_r - E(Y_{r,n}) \hat{\sigma} \quad (17.2-34)$$

$$\hat{\sigma} = s_x = \frac{1}{nk_{r,n}} (rx_r - \sum_{j=1}^r x_j) \quad (17.2-35)$$

式中 n —— 样本大小;
 r —— 截尾失效数;
 x_j —— 第 j 个寿命值;
 $nk_{r,n}$ —— 系数, 查表 17.2-10;
 $E(Y_{r,n})$ —— 系数, 查表 17.2-10。

3.4 正态及对数正态分布可靠寿命和可靠度的估计

寿命服从正态分布时, 指定可靠度 R , 可靠寿命的点估计

$$\hat{x}(R) = \bar{x} - Z_R s_x \quad (17.2-36)$$

式中 Z_R —— 按指定的可靠度 R 查表 17.2-11、表 17.1-3。

指定寿命 x 时, 可靠度 R 的点估计

$$\hat{R}(x) = \Phi(Z_R) \quad (17.2-37)$$

式中 $Z_R = \frac{\bar{x} - x}{s_x}$;
 $\Phi(\cdot)$ —— 正态分布函数, 按 Z_R 查表 17.2-11、表 17.1-3。

指定可靠度 R_L 时, 可靠寿命的置信下限

$$x_L(R) = \bar{x} - Z_{Ry} s_x \quad (17.2-38)$$

式中 Z_{Ry} —— 单侧置信限系数, 按指定的可靠度和置信水平查表 17.2-12, 也可按下式求近似值:

$$Z_{Ry} = \frac{Z_R + Z_y \left[\frac{1}{n} \left(1 - \frac{Z_y^2}{2n-2} \right) + \frac{Z_R^2}{2n-2} \right]^{\frac{1}{2}}}{1 - \frac{Z_y^2}{2n-2}} \quad (17.2-39)$$

式中 Z_R —— 按指定可靠度 R 查表 17.2-11、表 17.1-3;
 Z_y —— 按指定置信水平 y 查表 17.2-13;
 n —— 样本大小, 本式用于 $n \geq 5$ 。

指定寿命 x_L 时的可靠度置信下限, 按指定置信水平 y 和下式求得的 Z_{Ry} 查表 17.2-12。

$$Z_{Ry} = \frac{\bar{x} - x_L}{s_x} \quad (17.2-40)$$

也可按下式求可靠度置信下限的近似值

$$R_L = \Phi(Z_{RL}) \quad (17.2-41)$$

$$Z_{RL} \approx Z_{Ry} - Z_y \left(\frac{1}{n} + \frac{Z_{Ry}^2}{2n-2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17.2-42)$$

式中 Z_{Ry} —— 按式 (17.2-40) 求;
 Z_y —— 按指定置信水平 y 查表 17.2-13;
 n —— 样本大小, 本式用于 $n \geq 5$ 。

应该指出, 这里的 x 并不限于寿命, 也可以是服从正态分布的其他特性值, 例如材料的机械强度等。

表 17.2-9 最佳线性无偏估计表 (正态分布、对数正态分布)

n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$	n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$
2	2	1	-0.886 2	0.500 0	7	3	1	-0.868 2	-0.347 4
2	2	2	0.886 2	0.500 0	7	3	2	-0.326 9	-0.013 5
3	2	1	-1.181 6	0.000 0	7	3	3	1.195 1	1.360 9
3	2	2	1.181 6	1.000 0	7	4	1	-0.584 8	-0.073 6
3	3	1	-0.590 8	0.333 3	7	4	2	-0.242 8	0.067 7
3	3	2	0.000 0	0.333 3	7	4	3	-0.071 7	0.137 5
3	3	3	0.590 8	0.333 3	7	4	4	0.899 4	0.868 6
4	2	1	-1.365 4	-0.405 6	7	5	1	-0.437 0	0.046 5
4	2	2	1.365 4	1.405 6	7	5	2	-0.194 3	0.107 2
4	3	1	-0.697 1	0.116 1	7	5	3	-0.071 8	0.137 5
4	3	2	-0.126 8	0.240 8	7	5	4	0.031 2	0.162 6
4	3	3	0.823 9	0.643 1	7	5	5	0.670 9	0.546 2
4	4	1	-0.453 9	0.250 0	7	6	1	-0.344 0	0.108 8
4	4	2	-0.110 2	0.250 0	7	6	2	-0.161 0	0.129 5
4	4	3	0.110 2	0.250 0	7	6	3	-0.068 1	0.140 0
4	4	4	0.453 9	0.250 0	7	6	4	0.011 4	0.148 7
5	2	1	-1.497 1	-0.741 1	7	6	5	0.090 1	0.157 1
5	2	2	1.497 1	1.741 1	7	6	6	0.471 6	0.315 9
5	3	1	-0.789 6	-0.063 8	7	7	1	-0.277 8	0.142 9
5	3	2	-0.212 1	0.149 8	7	7	2	-0.135 1	0.142 9
5	3	3	0.981 7	0.914 0	7	7	3	-0.062 5	0.142 9
5	4	1	-0.511 7	0.125 2	7	7	4	0.000 0	0.142 9
5	4	2	-0.166 8	0.183 0	7	7	5	0.062 5	0.142 9
5	4	3	0.027 4	0.214 7	7	7	6	0.135 1	0.142 9
5	4	4	0.651 1	0.477 1	7	7	7	0.277 8	0.142 9
5	5	1	-0.372 4	0.200 0	8	2	1	-1.750 2	-1.491 5
5	5	2	-0.135 2	0.200 0	8	2	2	1.750 2	2.491 5
5	5	3	0.000 0	0.200 0	8	3	1	-0.904 5	-0.463 2
5	5	4	0.135 2	0.200 0	8	3	2	-0.369 0	-0.085 5
5	5	5	0.372 4	0.200 0	8	3	3	1.273 5	1.548 7
6	2	1	-1.598 8	-1.026 1	8	4	1	-0.611 0	-0.154 9
6	2	2	1.598 8	2.026 1	8	4	2	-0.270 7	0.017 6
6	3	1	-0.824 4	-0.215 9	8	4	3	-0.106 1	0.100 1
6	3	2	-0.276 0	0.064 9	8	4	4	0.987 8	1.037 2
6	3	3	1.100 4	1.151 1	8	5	1	-0.458 6	-0.016 7
6	4	1	-0.552 8	0.018 5	8	5	2	-0.215 6	0.067 7
6	4	2	-0.209 1	0.122 6	8	5	3	-0.097 0	0.108 4
6	4	3	-0.029 0	0.176 1	8	5	4	0.000 2	0.141 3
6	4	4	0.790 9	0.682 8	8	5	5	0.770 9	0.699 3
6	5	1	-0.409 7	0.118 3	8	6	1	-0.363 8	0.056 9
6	5	2	-0.168 5	0.151 0	8	6	2	-0.178 8	0.096 2
6	5	3	-0.040 6	0.168 0	8	6	3	-0.088 1	0.115 3
6	5	4	0.074 0	0.182 8	8	6	4	-0.013 2	0.130 9
6	5	5	0.544 8	0.379 9	8	6	5	0.057 0	0.145 1
6	6	1	-0.317 5	0.166 7	8	6	6	0.586 8	0.455 5
6	6	2	-0.138 6	0.166 7	8	7	1	-0.297 8	0.099 7
6	6	3	-0.043 2	0.166 7	8	7	2	-0.151 5	0.113 9
6	6	4	0.043 2	0.166 7	8	7	3	-0.079 6	0.120 8
6	6	5	0.138 6	0.166 7	8	7	4	-0.020 0	0.126 5
6	6	6	0.315 7	0.166 7	8	7	5	0.036 4	0.131 8
7	2	1	-1.681 2	-1.273 3	8	7	6	0.095 1	0.137 0
7	2	2	1.681 2	2.273 3	8	7	7	0.417 5	0.270 4
					8	8	1	-0.247 6	0.125 0
					8	8	2	-0.129 4	0.125 0
					8	8	3	-0.071 3	0.125 0
					8	8	4	-0.023 0	0.125 0

续表 17.2-9

n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$	n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$
8	8	5	0.023 0	0.125 0	10	5	1	-0.491 9	-0.124 0
8	8	6	0.071 3	0.125 0	10	5	2	-0.249 1	-0.001 6
8	8	7	0.129 4	0.125 0	10	5	3	-0.136 2	0.054 9
8	8	8	0.247 6	0.125 0	10	5	4	-0.047 2	0.099 0
					10	5	5	0.924 3	0.971 8
9	2	1	-1.809 2	-1.686 8	10	6	1	-0.393 0	-0.031 6
9	2	2	1.809 2	2.686 8	10	6	2	-0.206 3	0.038 3
					10	6	3	-0.119 2	0.070 7
9	3	1	-0.935 5	-0.566 4	10	6	4	-0.050 1	0.096 2
9	3	2	-0.404 7	-0.152 1	10	6	5	0.011 1	0.118 5
9	3	3	1.340 2	1.718 5	10	6	6	0.757 6	0.707 8
9	4	1	-0.633 0	-0.227 2	10	7	1	-0.325 2	0.024 4
9	4	2	-0.294 4	-0.028 4	10	7	2	-0.175 8	0.063 6
9	4	3	-0.134 8	0.064 4	10	7	3	-0.105 8	0.081 8
9	4	4	1.062 2	1.191 2	10	7	4	-0.050 2	0.096 2
					10	7	5	-0.000 6	0.108 9
9	5	1	-0.476 6	-0.073 1	10	7	6	0.046 9	0.120 7
9	5	2	-0.233 5	0.031 6	10	7	7	0.610 7	0.504 5
9	5	3	-0.118 1	0.080 9					
9	5	4	-0.025 6	0.119 9					
9	5	5	0.853 7	0.840 8					
					10	8	1	-0.275 3	0.060 5
9	6	1	-0.379 7	0.010 4	10	8	2	-0.152 3	0.080 4
9	6	2	-0.193 6	0.066 0	10	8	3	-0.094 7	0.089 8
9	6	3	-0.104 8	0.092 3	10	8	4	-0.048 8	0.097 2
9	6	4	-0.033 3	0.113 3	10	8	5	-0.007 7	0.103 7
9	6	5	0.031 7	0.132 0	10	8	6	0.031 9	0.109 9
9	6	6	0.679 7	0.586 0	10	8	7	0.072 2	0.116 1
					10	8	8	0.474 6	0.342 4
9	7	1	-0.312 9	0.060 2	10	9	1	-0.234 6	0.084 3
9	7	2	-0.164 7	0.087 6	10	9	2	-0.133 4	0.092 1
9	7	3	-0.093 8	0.100 6	10	9	3	-0.085 1	0.095 7
9	7	4	-0.036 4	0.111 0	10	9	4	-0.046 5	0.098 6
9	7	5	0.016 0	0.120 4	10	9	5	-0.011 9	0.101 1
9	7	6	0.067 8	0.129 4	10	9	6	0.021 5	0.103 6
9	7	7	0.523 9	0.390 9	10	9	7	0.055 9	0.106 6
					10	9	8	0.093 7	0.108 5
					10	9	9	0.342 3	0.210 1
9	8	1	-0.263 3	0.091 5					
9	8	2	-0.142 1	0.101 8					
9	8	3	-0.084 1	0.106 7	10	10	1	-0.204 4	0.100 0
9	8	4	-0.037 0	0.110 6	10	10	2	-0.117 2	0.100 0
9	8	5	0.006 2	0.114 2	10	10	3	-0.076 3	0.100 0
9	8	6	0.049 2	0.117 7	10	10	4	-0.043 6	0.100 0
9	8	7	0.095 4	0.121 2	10	10	5	-0.014 2	0.100 0
9	8	8	0.375 7	0.236 5	10	10	6	0.014 2	0.100 0
					10	10	7	0.043 6	0.100 0
					10	10	8	0.076 3	0.100 0
					10	10	9	0.117 2	0.100 0
					10	10	10	0.204 4	0.100 0
9	9	1	-0.223 7	0.111 1	11	2	1	-1.906 5	-2.024 5
9	9	2	-0.123 3	0.111 1	11	2	2	1.906 5	3.024 5
9	9	3	-0.075 1	0.111 1					
9	9	4	-0.036 0	0.111 1					
9	9	5	0.000 0	0.111 1					
9	9	6	0.036 0	0.111 1					
9	9	7	0.075 1	0.111 1					
9	9	8	0.123 3	0.111 1	11	3	1	-0.986 2	-0.744 5
9	9	9	0.223 7	0.111 1	11	3	2	-0.463 6	-0.271 2
					11	3	3	1.449 2	2.015 7
10	2	1	-1.860 8	-0.863 4	11	4	1	-0.668 7	-0.351 6
10	2	2	1.860 8	2.863 4	11	4	2	-0.333 2	-0.110 4
					11	4	3	-0.180 7	-0.001 6
10	3	1	-0.962 5	-0.659 6	11	4	4	1.182 5	1.463 6
10	3	2	-0.435 7	-0.213 8					
10	3	3	1.398 1	1.873 4					
					11	5	1	-0.505 5	-0.170 2
10	4	1	-0.652 0	-0.292 3	11	5	2	-0.262 7	-0.032 3
10	4	2	-0.315 0	-0.070 9	11	5	3	-0.151 9	0.030 3
10	4	3	-0.159 3	0.030 5	11	5	4	-0.065 7	0.078 6
10	4	4	1.126 3	1.332 7	11	5	5	0.985 7	1.093 7

续表 17.2-9

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
11	6	1	-0.404 5	-0.069 8	12	4	1	-0.683 6	-0.405 9
11	6	2	-0.217 5	+0.012 8	12	4	2	-0.349 3	-0.147 2
11	6	3	-0.131 7	0.050 4	12	4	3	-0.199 6	-0.032 1
11	6	4	-0.064 7	0.079 7	12	4	4	1.232 4	1.585 2
11	6	5	-0.006 1	0.104 9					
11	6	6	0.824 6	0.822 0					
					12	5	1	-0.517 1	-0.212 5
					12	5	2	-0.274 9	-0.058 9
11	7	1	-0.335 7	-0.008 2	12	5	3	-0.165 9	+0.007 0
11	7	2	-0.185 4	0.041 5	12	5	4	-0.082 0	0.050 9
11	7	3	-0.116 3	0.064 2	12	5	5	1.039 9	1.207 5
11	7	4	-0.062 1	0.082 0					
11	7	5	-0.0146	0.097 4					
11	7	6	0.029 9	0.111 6	12	6	1	-0.414 6	-0.104 8
11	7	7	0.684 2	0.611 6	12	6	2	-0.227 4	0.010 9
					12	6	3	-0.142 8	0.031 3
					12	6	4	-0.077 4	0.063 7
11	8	1	-0.285 2	0.032 0	12	6	5	-0.021 0	0.091 5
11	8	2	-0.161 0	0.060 9	12	6	6	0.383 3	0.929 2
11	8	3	-0.103 8	0.074 1					
11	8	4	-0.058 9	0.084 5					
11	8	5	-0.019 4	0.093 5	12	7	1	-0.344 8	-0.038 2
11	8	6	0.017 8	0.102 0	12	7	2	-0.193 9	+0.021 0
11	8	7	0.054 5	0.110 1	12	7	3	-0.122 5	-0.047 7
11	8	8	0.556 2	0.443 0	12	7	4	-0.074 6	0.068 4
					12	7	5	-0.026 7	0.086 1
					12	7	6	0.015 5	0.102 2
					12	7	7	0.747 9	0.712 8
11	9	1	-0.246 3	0.059 2					
11	9	2	-0.141 7	0.074 4					
11	9	3	-0.093 4	0.081 4	12	8	1	-0.293 7	0.005 7
11	9	4	-0.055 5	0.086 9	12	8	2	-0.168 6	0.042 8
11	9	5	-0.022 0	0.091 7	12	8	3	-0.111 9	0.059 5
11	9	6	0.009 5	0.096 2	12	8	4	-0.067 8	0.072 4
11	9	7	0.040 9	0.100 5	12	8	5	-0.029 6	0.083 6
11	9	8	0.073 6	0.104 9	12	8	6	0.005 8	0.093 8
11	9	9	0.434 9	0.304 7	12	8	7	0.040 0	0.103 6
					12	8	8	0.625 9	0.538 6
11	10	1	-0.214 9	0.078 1					
11	10	2	-0.125 6	0.084 1					
11	10	3	-0.084 3	0.086 9	12	9	1	-0.254 5	0.036 0
11	10	4	-0.051 9	0.089 1	12	9	2	-0.148 7	0.058 1
11	10	5	-0.023 3	0.091 0	12	9	3	-0.100 7	0.068 2
11	10	6	0.003 8	0.092 8	12	9	4	-0.063 3	0.075 9
11	10	7	0.030 9	0.094 5	12	9	5	-0.030 8	0.082 7
11	10	8	0.059 3	0.096 3	12	9	6	-0.000 7	0.088 8
11	10	9	0.091 1	0.098 2	12	9	7	0.028 6	0.094 8
11	10	10	0.314 9	0.189 1	12	9	8	0.058 2	0.100 6
					12	9	9	0.511 9	0.395 0
11	11	1	-0.188 3	0.090 9					
11	11	2	-0.111 5	0.090 9	12	10	1	-0.223 2	0.057 4
11	11	3	-0.076 0	0.090 9	12	10	2	-0.132 4	0.069 3
11	11	4	-0.048 1	0.090 9	12	10	3	-0.091 1	0.074 7
11	11	5	-0.023 4	0.090 9	12	10	4	-0.059 0	0.078 9
11	11	6	0.000 0	0.090 9	12	10	5	-0.031 0	0.082 5
11	11	7	0.023 4	0.090 9	12	10	6	-0.005 0	0.085 9
11	11	8	0.048 1	0.090 9	12	10	7	0.020 3	0.089 1
11	11	9	0.076 0	0.090 9	12	10	8	0.046 1	0.092 3
11	11	10	0.111 5	0.090 9	12	10	9	0.073 3	0.095 6
11	11	11	0.188 3	0.090 9	12	10	10	0.402 0	0.274 5
12	2	1	-1.947 4	-2.172 8	12	11	1	-0.197 2	0.072 6
12	2	2	1.947 4	3.172 8	12	11	2	-0.118 5	0.077 5
					12	11	3	-0.082 7	0.079 6
					12	11	4	-0.054 8	0.081 3
12	3	1	-1.007 5	-0.822 5	12	11	5	-0.030 5	0.082 8
12	3	2	-0.487 4	-0.324 9	12	11	6	-0.007 9	0.084 2
12	3	3	1.494 8	2.147 4	12	11	7	+0.014 2	0.085 5

续表 17.2-9

n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$	n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$
12	11	8	+0.036 7	0.086 8	13	9	3	-0.107 1	0.055 7
12	11	9	0.060 8	0.088 2	13	9	4	-0.070 3	0.065 5
12	11	10	0.088 1	0.089 6	13	9	5	-0.038 6	0.073 9
12	11	11	0.291 9	0.171 9	13	9	6	-0.009 5	0.081 6
					13	9	7	0.018 2	0.088 8
12	12	1	-0.174 8	0.083 3	13	9	8	0.045 6	0.095 8
12	12	2	-0.106 1	0.083 3	13	9	9	0.578 1	0.481 3
12	12	3	-0.074 9	0.083 3					
12	12	4	-0.050 6	0.083 3	13	10	1	-0.230 1	0.038 0
12	12	5	-0.029 4	0.083 3	13	10	2	-0.138 2	0.055 5
12	12	6	-0.009 7	0.083 3	13	10	3	-0.097 0	0.063 3
12	12	7	0.009 7	0.083 3	13	10	4	-0.065 3	0.069 3
12	12	8	0.029 4	0.083 3	13	10	5	-0.037 9	0.074 5
12	12	9	0.050 6	0.083 3	13	10	6	-0.012 8	0.079 2
12	12	10	0.074 9	0.083 3	13	10	7	+0.011 3	0.083 6
12	12	11	0.106 1	0.083 3	13	10	8	+0.035 2	0.088 0
12	12	12	0.174 8	0.083 3	13	10	9	0.059 8	0.092 4
					13	10	10	0.475 0	0.356 4
13	2	1	-1.984 5	-2.310 1	13	11	1	-0.204 8	0.055 2
13	2	2	1.984 5	3.310 1	13	11	2	-0.124 3	0.064 8
					13	11	3	-0.088 4	0.069 1
13	3	1	-1.026 6	-0.894 6	13	11	4	-0.060 7	0.072 4
13	3	2	-0.509 4	-0.375 3	13	11	5	-0.036 8	0.075 2
13	3	3	1.536 0	2.269 9	13	11	6	-0.014 8	0.077 8
					13	11	7	0.006 3	0.080 3
13	4	1	-0.696 9	-0.456 1	13	11	8	0.027 3	0.082 7
13	4	2	-0.363 8	-0.181 7	13	11	9	0.049 0	0.085 2
13	4	3	-0.216 5	-0.061 0	13	11	10	0.072 3	0.087 7
13	4	4	1.277 3	1.698 8	13	11	11	0.374 3	0.249 7
13	5	1	-0.527 6	-0.251 6	13	12	1	-0.182 4	0.067 9
13	5	2	-0.285 9	-0.087 6	13	12	2	-0.112 2	0.071 8
13	5	3	-0.178 5	-0.015 1	13	12	3	-0.080 6	0.073 5
13	5	4	-0.096 4	0.040 0	13	12	4	-0.056 3	0.074 9
13	5	5	1.088 4	1.314 3	13	12	5	-0.035 3	0.076 1
					13	12	6	-0.016 0	0.077 1
13	6	1	-0.423 6	-0.137 1	13	12	7	+0.002 6	0.078 1
13	6	2	-0.236 3	-0.033 0	13	12	8	0.021 2	0.079 2
13	6	3	-0.152 8	0.013 2	13	12	9	0.040 4	0.080 2
13	6	4	-0.088 8	0.048 4	13	12	10	0.061 2	0.081 3
13	6	5	-0.034 1	0.078 4	13	12	11	0.085 0	0.082 4
13	6	6	0.935 5	1.030 1	13	12	12	0.272 4	0.157 6
13	7	1	-0.352 8	-0.065 9	13	13	1	-0.163 2	0.076 9
13	7	2	-0.201 5	0.002 0	13	13	2	-0.101 3	0.076 9
13	7	3	-0.133 9	0.032 2	13	13	3	-0.073 5	0.076 9
13	7	4	-0.081 9	0.055 3	13	13	4	-0.052 0	0.076 9
13	7	5	-0.037 4	0.075 0	13	13	5	-0.033 5	0.076 9
13	7	6	0.003 2	0.092 8	13	13	6	-0.016 4	0.076 9
13	7	7	0.804 2	0.808 5	13	13	7	0.000 0	0.076 9
					13	13	8	0.016 4	0.076 9
13	8	1	-0.301 1	-0.018 5	13	13	9	0.033 5	0.076 9
13	8	2	-0.175 4	0.025 9	13	13	10	0.052 0	0.076 9
13	8	3	-0.119 1	0.045 7	13	13	11	0.073 5	0.076 9
13	8	4	-0.075 8	0.061 0	13	13	12	0.101 3	0.076 9
13	8	5	-0.038 6	0.074 0	13	13	13	0.163 2	0.076 9
13	8	6	-0.004 6	0.085 7					
13	8	7	0.027 8	0.096 8	14	2	1	-2.018 2	-2.437 8
13	8	8	0.686 7	0.629 4	14	2	2	2.108 2	3.437 8
13	9	1	-0.261 6	0.014 4	14	3	1	-1.044 1	-0.961 6
13	9	2	-0.1549	0.043 0	14	3	2	-0.529 3	-0.422 8
					14	3	3	1.573 4	2.384 3

续表 17.2-9

n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$	n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$
14	4	1	-0.709 1	-0.502 7	14	11	5	-0.042 3	0.068 0
14	4	2	-0.377 1	-0.214 2	14	11	6	-0.020 9	0.071 7
14	4	3	-0.231 8	-0.088 2	14	11	7	-0.000 6	0.075 2
14	4	4	1.318 0	1.805 4	14	11	8	0.019 2	0.078 5
					14	11	9	0.039 3	0.081 9
					14	11	10	0.060 1	0.085 2
14	5	1	-0.537 2	-0.287 9	14	11	11	0.443 8	0.324 7
14	5	2	-0.295 9	-0.112 7					
14	5	3	-0.189 8	-0.036 0	14	12	1	-0.188 5	0.053 0
14	5	4	-0.109 4	0.021 8	14	12	2	-0.117 1	0.060 9
14	5	5	1.132 2	1.414 8	14	12	3	-0.085 4	0.064 3
					14	12	4	-0.061 2	0.067 0
14	6	1	-0.431 7	-0.167 0	14	12	5	-0.040 4	0.069 2
14	6	2	-0.244 4	-0.053 7	14	12	6	-0.021 5	0.071 3
14	6	3	-0.161 8	-0.004 0	14	12	7	-0.003 6	0.073 2
14	6	4	-0.099 0	0.033 8	14	12	8	0.014 0	0.075 1
14	6	5	-0.045 7	0.065 5	14	12	9	0.031 9	0.077 0
14	6	6	-0.982 5	1.125 5	14	12	10	0.050 5	0.078 9
					14	12	11	0.070 7	0.080 9
					14	12	12	0.350 6	0.229 1
14	7	1	-0.359 9	-0.091 5					
14	7	2	-0.208 4	-0.015 8	14	13	1	-0.169 8	0.063 7
14	7	3	-0.141 4	0.017 5	14	13	2	-0.106 5	0.066 9
14	7	4	-0.090 3	0.042 9	14	13	3	-0.078 4	0.068 3
14	7	5	-0.046 9	0.064 3	14	13	4	-0.056 8	0.069 4
14	7	6	-0.007 7	0.083 5	14	13	5	-0.038 4	0.070 4
14	7	7	0.854 6	0.899 2	14	13	6	-0.021 6	0.071 2
					14	13	7	-0.005 6	0.072 1
14	8	1	-0.307 7	-0.041 1	14	13	8	0.010 0	0.072 8
14	8	2	-0.181 5	0.010 2	14	13	9	0.025 9	0.073 6
14	8	3	-0.125 6	0.032 8	14	13	10	0.042 6	0.074 5
14	8	4	-0.082 9	0.050 0	14	13	11	0.060 9	0.075 3
14	8	5	-0.044 6	0.064 6	14	13	12	0.082 0	0.076 2
14	8	6	-0.013 7	0.077 7	14	13	13	0.225 6	0.145 5
14	8	7	0.017 2	0.089 9					
14	8	8	0.740 7	0.715 9	14	14	1	-0.153 2	0.071 4
					14	14	2	-0.096 8	0.071 4
14	9	1	-0.267 8	0.005 7	14	14	3	-0.071 7	0.071 4
14	9	2	-0.160 4	0.028 8	14	14	4	-0.052 6	0.071 4
14	9	3	-0.112 9	0.044 0	14	14	5	-0.036 2	0.071 4
14	9	4	-0.076 5	0.055 7	14	14	6	-0.021 2	0.071 4
14	9	5	-0.045 5	0.065 5	14	14	7	-0.007 0	0.071 4
14	9	6	-0.017 4	0.074 4	14	14	8	0.007 0	0.071 4
14	9	7	0.009 2	0.082 8	14	14	9	0.021 2	0.071 4
14	9	8	0.035 0	0.090 8	14	14	10	0.036 2	0.071 4
14	9	9	0.636 3	0.563 7	14	14	11	0.052 6	0.071 4
					14	14	12	0.071 7	0.071 4
14	10	1	-0.236 1	0.019 9	14	14	13	0.096 8	0.071 4
14	10	2	-0.143 4	0.042 6	14	14	14	0.153 2	0.071 4
14	10	3	-0.102 3	0.052 6					
14	10	4	-0.070 9	0.060 2	15	2	1	-2.049 3	-2.557 4
14	10	5	-0.044 0	0.066 7	15	2	2	2.049 3	3.557 4
14	10	6	-0.019 6	0.072 6					
14	10	7	0.003 5	0.078 2	15	3	1	-1.060 1	-1.024 2
14	10	8	0.026 0	0.083 5	15	3	2	-0.547 7	-0.467 6
14	10	9	0.048 7	0.088 7	15	3	3	1.607 7	2.491 8
14	10	10	0.538 2	0.435 0					
					15	4	1	-0.720 1	-0.546 2
14	11	1	-0.210 2	0.038 8	15	4	2	-0.389 2	-0.244 8
14	11	2	-0.129 2	0.052 9	15	4	3	-0.245 8	-0.114 8
14	11	3	-0.093 3	0.059 2	15	4	4	1.355 2	1.905 8
14	11	4	-0.065 8	0.063 9					

续表 17.2-9

n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$	n	r	j	$C'(n, r, j)$	$D'(n, r, j)$
15	5	1	-0.545 9	-0.321 7	15	11	10	0.050 2	0.082 4
15	5	2	-0.305 0	-0.136 4	15	11	11	0.504 2	0.396 9
15	5	3	-0.200 2	-0.056 0					
15	5	4	-0.121 1	0.004 3					
15	5	5	1.172 2	1.509 7	15	12	1	-0.193 7	0.039 0
					15	12	2	-0.121 4	0.050 6
15	6	1	-0.439 0	-0.195 0	15	12	3	-0.089 7	0.055 6
15	6	2	-0.251 8	-0.073 2	15	12	4	-0.065 5	0.059 5
15	6	3	-0.170 0	-0.020 3	15	12	5	-0.045 0	0.062 8
15	6	4	-0.108 2	-0.019 6	15	12	6	-0.026 5	0.065 7
15	6	5	-0.056 2	0.053 1	15	12	7	-0.009 1	0.068 5
15	6	6	1.025 2	1.215 7	15	12	8	0.007 8	0.071 1
					15	12	9	0.024 6	0.073 7
					15	12	10	0.041 7	0.076 3
15	7	1	-0.366 4	-0.115 5	15	12	11	0.059 8	0.079 0
15	7	2	-0.214 6	-0.032 6	15	12	12	0.416 9	0.298 2
15	7	3	-0.148 2	0.003 6					
15	7	4	-0.097 9	0.030 9	15	13	1	-0.175 2	0.050 8
15	7	5	-0.055 5	0.053 9	15	13	2	-0.110 8	0.057 4
15	7	6	-0.017 4	0.074 3	15	13	3	-0.082 5	0.060 2
15	7	7	0.900 1	0.985 4	15	13	4	-0.061 0	0.062 4
					15	13	5	-0.042 7	0.064 2
					15	13	6	-0.026 2	0.065 9
15	8	1	-0.313 6	-0.062 1	15	13	7	-0.010 6	0.067 5
15	8	2	-0.187 0	-0.004 6	15	13	8	0.004 4	0.069 0
15	8	3	-0.131 5	0.020 5	15	13	9	0.019 5	0.070 4
15	8	4	-0.089 4	0.039 5	15	13	10	0.034 9	0.071 9
15	8	5	-0.053 8	0.055 5	15	13	11	0.051 2	0.073 5
15	8	6	-0.021 9	0.069 8	15	13	12	0.069 0	0.075 1
15	8	7	0.007 9	0.083 0	15	13	13	0.330 0	0.211 6
15	8	8	0.789 2	0.798 3					
15	9	1	-0.273 3	-0.024 4	15	14	1	-0.159 0	0.059 9
15	9	2	-0.165 4	0.015 5	15	14	2	-0.101 3	0.062 7
15	9	3	-0.118 1	0.033 0	15	14	3	-0.076 0	0.063 9
15	9	4	-0.082 2	0.046 2	15	14	4	-0.056 8	0.064 8
15	9	5	-0.051 8	0.057 4	15	14	5	-0.040 4	0.065 5
15	9	6	-0.024 4	0.067 4	15	14	6	-0.025 6	0.066 2
15	9	7	0.001 2	0.078 7	15	14	7	-0.011 6	0.066 9
15	9	8	0.025 8	0.085 6	15	14	8	0.001 9	0.067 5
15	9	9	0.688 2	0.642 5	15	14	9	0.015 4	0.068 2
					15	14	10	0.029 3	0.068 8
					15	14	11	0.044 0	0.069 5
15	10	1	-0.241 4	0.003 0	15	14	12	0.060 2	0.070 2
15	10	2	-0.148 1	0.030 5	15	14	13	0.079 1	0.070 9
15	10	3	-0.107 1	0.042 5	15	14	14	0.240 9	0.135 1
15	10	4	-0.076 0	0.051 6					
15	10	5	-0.049 6	0.059 3					
15	10	6	-0.025 8	0.066 3					
15	10	7	-0.003 5	0.072 7	15	15	1	-0.144 4	0.066 7
15	10	8	0.018 0	0.078 9	15	15	2	-0.092 7	0.066 7
15	10	9	0.039 3	0.084 9	15	15	3	-0.069 9	0.066 7
15	10	10	0.594 0	0.510 4	15	15	4	-0.052 6	0.066 7
					15	15	5	-0.037 9	0.066 7
					15	15	6	-0.024 7	0.066 7
15	11	1	-0.215 4	0.023 4	15	15	7	-0.012 2	0.066 7
15	11	2	-0.133 6	0.041 8	15	15	8	0.000 0	0.066 7
15	11	3	-0.097 7	0.049 8	15	15	9	0.012 2	0.066 7
15	11	4	-0.070 5	0.056 0	15	15	10	0.024 7	0.066 7
15	11	5	-0.047 3	0.061 1	15	15	11	0.037 9	0.066 7
15	11	6	-0.026 4	0.065 8	15	15	12	0.052 6	0.066 7
15	11	7	-0.006 8	0.070 1	15	15	13	0.069 9	0.066 7
15	11	8	0.012 2	0.074 3	15	15	14	0.092 7	0.066 7
15	11	9	0.031 0	0.078 4	15	15	15	0.144 4	0.066 7

表 17.2-10 简单线性无偏估计表 (正态分布、对数正态分布)

n	r	$E(Y_{r:n})$	$nk_{r:n}$	n	r	$E(Y_{r:n})$	$nk_{r:n}$
20	4	-0.921 0	1.643 1	45	35	1.083 8	45.894 1
	8	-0.314 9	4.906 5		5	-1.271 7	1.912 7
	12	0.187 0	9.669 4		10	-0.797 9	5.137 1
	16	0.745 4	17.253 1		15	-0.459 1	9.174 3
22	5	-0.815 3	2.279 6	50	20	-0.167 1	14.128 4
	10	-0.169 9	6.715 8		25	0.111 1	20.247 0
	15	0.405 6	13.638 1		30	0.398 3	28.010 8
	20	1.188 2	27.132 7		35	0.723 8	38.451 1
24	5	-0.876 8	2.223 9	55	40	1.155 8	54.501 2
	10	-0.261 6	6.445 2		5	-1.331 1	1.872 0
	15	-0.261 6	12.724 4		10	-0.873 2	4.985 8
	20	0.876 8	23.267 6		15	-0.550 8	8.825 5
26	5	-0.931 7	2.176 0	60	20	-0.278 1	13.449 0
	10	-0.341 0	6.223 0		25	-0.025 0	19.013 5
	15	0.143 9	12.032 7		30	0.226 5	25.806 3
	20	0.667 9	20.986 2		35	0.493 5	34.360 7
28	5	-0.981 2	2.134 3	65	40	0.802 3	45.807 7
	10	-0.411 0	6.036 2		45	1.218 5	63.357 7
	15	0.044 4	11.485 7		5	-1.375 4	1.700 8
	20	0.509 8	19.420 5		10	-0.940 2	4.663 3
30	25	1.137 0	33.346 2	70	15	-0.630 1	8.354 6
	5	-1.026 1	2.097 4		20	-0.371 5	12.738 4
	10	-0.473 3	5.876 5		25	-0.136 7	17.898 9
	15	-0.041 5	11.039 0		30	0.091 0	24.046 1
35	20	0.382 4	18.256 4	75	35	0.323 2	31.480 5
	25	0.894 4	29.587 5		40	0.575 8	40.840 3
	5	-1.123 0	2.021 3		45	0.871 6	53.289 4
	10	-0.604 3	5.560 2		50	1.267 9	72.061 2
40	15	-0.215 1	10.204 9	80	5	-1.422 3	1.656 3
	20	0.142 8	16.288 4		10	-0.997 0	4.550 1
	25	0.520 8	24.623 5		15	-0.698 6	8.104 9
	30	0.997 9	37.573 1		20	-0.452 3	12.276 9
40	5	-1.203 3	1.961 4	85	25	-0.230 8	17.143 8
	10	-0.709 9	5.323 2		30	-0.020 9	22.808 2
	15	-0.349 8	9.617 0		35	0.188 1	29.496 0
	20	-0.031 2	15.025 8		40	0.406 6	37.586 0
	25	0.284 2	21.969 5		45	0.645 9	47.650 1
	30	0.631 8	31.375 2		50	0.931 9	61.113 6
				55	1.318 5	76.403 5	

表 17.2-11 Z_R 与可靠度 R 的关系 $R = \Phi(Z_R)$ (正态分布)

R	0.9 ¹⁰	0.9 ²⁰	0.9 ³⁰	0.9 ⁴⁰	0.9 ⁵⁰	0.9 ⁶⁰	0.9 ⁷⁰	0.9 ⁸⁰	0.9 ⁹⁰	0.9 ¹⁰⁰
Z_R	1.282	2.326	3.090	3.719	4.625	4.753	5.199	5.612	5.997	6.36
R	0.9 ¹¹⁰	0.9 ¹²⁰	0.9 ¹³⁰	0.9 ¹⁴⁰	0.9 ¹⁵⁰	0.9 ¹⁶⁰	0.9 ¹⁷⁰	0.9 ¹⁸⁰	0.9 ¹⁹⁰	0.9 ²⁰⁰
Z_R	6.70	7.03	7.34	7.65	7.94	8.22	8.49	8.75	9.01	9.26

注: 0.9¹⁰⁰ = 0.999 90, 其他类似。

表 17.2-12 单侧置信限系数 $Z_{R\gamma}$ (正态分布完全样本)

n	R_L	置信水平 $\gamma=90\%$				置信水平 $\gamma=95\%$			
		0.900	0.950	0.990	0.999	0.900	0.950	0.990	0.999
2		10.252 71	13.089 74	18.500 08	24.581 59	20.581 47	26.259 67	37.093 58	49.275 62
3		4.258 16	5.311 48	7.340 44	9.651 17	6.155 28	7.655 90	10.552 73	13.857 07
4		3.187 84	3.956 57	5.438 23	7.129 31	4.161 93	5.143 87	7.042 36	9.214 18
5		2.742 35	3.399 83	4.665 98	6.111 30	3.406 63	4.202 68	5.741 08	7.501 89
6		2.493 69	3.091 88	4.242 53	5.555 51	3.006 26	3.707 68	5.061 99	6.611 78
7		2.332 65	2.893 80	3.972 02	6.201 71	2.755 43	3.399 47	4.641 72	6.062 66
8		2.218 59	2.754 28	3.782 55	4.954 60	2.581 91	3.187 29	4.353 86	5.687 53
9		2.132 87	2.649 90	3.641 44	4.771 03	2.453 76	3.031 24	4.143 02	5.413 40
10		2.065 67	2.568 37	3.531 66	4.628 50	2.354 64	2.910 96	3.981 12	5.203 30
11		2.011 29	2.502 62	3.443 42	4.514 15	2.275 31	2.814 99	3.852 34	5.036 46
12		1.966 20	2.448 25	3.370 67	4.420 03	2.210 13	2.736 34	3.747 08	4.900 31
13		1.928 08	2.402 40	3.309 48	4.348 55	2.155 44	2.670 50	3.659 20	4.786 78
14		1.895 34	2.363 11	3.257 16	4.273 47	2.108 77	2.614 43	3.584 51	4.690 41
15		1.866 84	2.328 98	3.211 82	4.215 02	2.068 37	2.566 00	3.520 13	4.607 43
16		1.841 77	2.299 00	3.172 06	4.163 83	2.033 00	2.523 66	3.463 94	4.535 09
17		1.819 49	2.272 40	3.136 85	4.118 55	2.001 71	2.486 26	3.414 40	4.471 36
18		1.799 54	2.248 62	3.105 42	4.078 15	1.973 80	2.452 95	3.370 33	4.414 71
19		1.781 54	2.227 20	3.077 14	4.041 84	1.948 70	2.423 04	3.330 82	4.363 96
20		1.765 21	2.207 78	3.051 54	4.008 99	1.925 99	2.396 00	3.295 16	4.318 19
21		1.750 29	2.190 07	3.028 23	3.979 09	1.905 32	2.371 42	3.262 77	4.276 65
22		1.736 62	2.173 85	3.006 39	3.951 75	1.886 41	2.348 96	3.233 20	4.238 75
23		1.724 01	2.158 91	2.987 27	3.926 62	1.869 02	2.328 32	3.206 07	4.204 00
24		1.712 35	2.145 10	2.969 15	3.903 43	1.852 97	2.309 29	3.181 08	4.171 99
25		1.701 52	2.132 29	2.952 36	3.881 94	1.838 10	2.291 67	3.157 96	4.142 40
26		1.691 44	2.120 37	2.936 75	3.861 97	1.824 27	2.275 30	3.136 49	4.114 95
27		1.682 01	2.109 24	2.922 18	3.843 35	1.811 37	2.260 05	3.116 50	4.089 39
28		1.673 18	2.098 81	2.908 54	3.825 93	1.799 30	2.245 78	3.097 82	4.065 52
29		1.664 88	2.089 03	2.895 75	3.809 60	1.787 98	2.232 41	3.080 33	4.043 18
30		1.657 06	2.079 82	2.883 72	3.794 25	1.777 33	2.219 84	3.063 90	4.022 20
31		1.649 69	2.071 13	3.872 39	3.779 78	1.767 29	2.208 00	3.048 44	4.002 46
32		1.642 71	2.062 92	2.861 68	3.766 12	1.757 81	2.196 82	3.033 84	3.983 84
33		1.636 10	2.055 14	2.851 54	3.753 19	1.748 84	2.186 25	3.020 05	3.966 24
34		1.629 83	2.047 76	2.841 93	3.740 94	1.740 33	2.176 23	3.006 99	3.949 59
35		1.623 86	2.040 75	2.832 80	3.729 31	1.732 25	2.166 72	2.994 59	3.933 78
36		1.618 18	2.034 07	2.824 12	3.718 24	1.724 56	2.157 68	2.982 81	3.918 77
37		1.612 76	2.027 71	2.815 84	3.707 70	1.717 24	2.149 06	2.971 60	3.904 48
38		1.607 58	2.021 64	2.807 94	3.697 65	1.710 25	2.140 85	2.960 90	3.890 87
39		1.602 63	2.015 83	2.800 40	3.688 05	1.703 57	2.133 00	2.950 70	3.877 87
40		1.597 89	2.010 27	2.793 18	3.678 86	1.697 18	2.125 49	2.940 94	3.865 45
41		1.593 35	2.004 94	2.786 27	3.670 06	1.691 06	2.118 31	2.931 60	3.853 57
42		1.588 99	1.999 33	2.779 64	3.661 63	1.685 19	2.111 42	2.922 66	3.842 18
43		1.584 80	1.994 93	2.773 27	3.653 54	1.679 55	2.104 81	2.914 07	3.831 26
44		1.580 77	1.990 21	2.767 16	3.645 76	1.674 14	2.098 46	2.905 83	3.820 78
45		1.576 89	1.985 67	2.761 27	3.638 28	1.668 93	2.092 35	2.897 91	3.810 71
46		1.573 16	1.981 30	2.755 61	3.631 08	1.663 91	2.086 48	2.890 29	3.801 01
47		1.569 55	1.977 08	2.750 15	3.624 15	1.659 08	2.080 81	2.882 94	3.791 68
48		1.566 07	1.973 02	2.744 88	3.617 46	1.654 41	2.075 35	2.875 87	3.782 69
49		1.562 71	1.969 09	2.739 80	3.611 00	1.649 91	2.070 08	2.869 04	3.774 01
50		1.559 47	1.965 29	2.734 89	3.604 77	1.645 56	2.064 99	2.862 45	3.765 64
60		1.532 03	1.933 27	2.693 52	3.552 28	1.608 91	2.022 16	2.807 05	3.695 33
80		1.494 74	1.889 88	2.637 65	3.481 52	1.559 37	1.964 44	2.732 65	3.601 06
120		1.452 22	1.840 59	2.574 45	3.401 66	1.503 24	1.899 29	2.649 03	3.495 37
240		1.399 33	1.779 56	2.496 58	3.303 55	1.433 94	1.819 24	2.546 82	3.366 55
∞		1.281 55	1.644 85	2.326 35	3.090 23	1.281 55	1.644 85	2.326 35	3.090 23

表 17.2-13 不同置信水平 γ 的 Z_γ

γ	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	0.950	0.990	0.995 0	0.999 0
Z_γ	0.000	0.253 4	0.524 4	0.841 6	1.282 0	1.645 0	2.326 0	2.576 0	3.090 0

例 6 某钢材强度极限服从正态分布, 11 个试件测得的强度极限为 608, 622, 630, 638, 642, 648, 652, 660, 666, 673, 688 MPa。求均值和标准差的点估计和置信水平 $\gamma = 80\%$ 的双侧置信限, 失效概率为 0.10 时强度极限的点估计和置信水平为 90% 的单侧置信下限。

解 本例为完全样本试验。均值 μ 的点估计, 按式 (17.2-22)

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ &= \frac{1}{11} (608 + 622 + \dots + 688) = 647.91 \text{ MPa}\end{aligned}$$

标准差 σ 的点估计, 按式 (17.2-23)

$$\begin{aligned}\hat{\sigma} &= s_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left\{ \frac{1}{11-1} \left[(608 - 647.91)^2 + (622 - 647.91)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \dots + (688 - 647.91)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = 23.33 \text{ MPa}\end{aligned}$$

均值的双侧置信限, 按式 (17.2-24)、(17.2-25), 并由表 17.1-5 查得 $t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu) = t_{0.1}(10) = 1.372$, 故得

$$\begin{aligned}\bar{x}_L &= \bar{x} - \frac{s_x}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu) \\ &= 647.91 - \frac{23.33}{\sqrt{11}} \times 1.372 = 638.26 \text{ MPa} \\ \bar{x}_U &= \bar{x} + \frac{s_x}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu) \\ &= 647.91 + \frac{23.33}{\sqrt{11}} \times 1.372 = 657.56 \text{ MPa}\end{aligned}$$

标准差的双侧置信限, 按式 (17.2-27)、(17.2-28), 并由表 17.1-4 查得 $\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(\nu) = \chi_{0.1}^2(10) = 15.987$, $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(\nu) = \chi_{0.9}^2(10) = 4.865$, 故得

$$\begin{aligned}s_{xL} &= \left[\frac{n-1}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} s_x = \left(\frac{11-1}{15.987} \right)^{\frac{1}{2}} \times 23.33 = 18.45 \text{ MPa} \\ s_{xU} &= \left[\frac{n-1}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} s_x \\ &= \left(\frac{11-1}{4.865} \right)^{\frac{1}{2}} \times 23.33 = 33.45 \text{ MPa}\end{aligned}$$

失效概率 $F = 0.10$ 的强度极限, 可借用可靠寿命与可靠度的关系式。这时相当于 $R = 1 - F = 0.90$ 时的强度极限。点估计可用式 (17.2-36) 来求, 并由 $R = 0.90$ 查表 17.2-11 得 $Z_R = 1.28$, 故

$$\begin{aligned}\hat{x}_F &= \bar{x} - Z_R s_x \\ &= 647.91 - 1.28 \times 23.33 = 618.05 \text{ MPa}\end{aligned}$$

失效概率 $F = 0.10$, 置信水平 $\gamma = 90\%$ 强度极限的单侧置信下限可用式 (17.2-38) 来求, 并由 $R = 1 - F = 0.90$ 查表 17.2-12 得 $Z_{R\gamma} = 2.011 29$, 故

$$\begin{aligned}x_{FL} &= x_L(R) = \bar{x} - Z_{R\gamma} s_x \\ &= 647.91 - 2.011 29 \times 23.33 = 600.99 \text{ MPa}\end{aligned}$$

例 7 某金属材料在某应力水平用 10 个试件做弯曲疲劳试验, 其中 8 个试件失效的循环次数分别为 125 000、132 000、135 000、138 000、141 000、145 000、148 000、152 000 次, 其他 2 个试件超过 152 000 次未失效就停止了试验。已知该金属材料的疲劳寿命服从对数正态分布。试用极大似然估计法估计分布参数以及可靠度 R 为 0.90 时的寿命点估计。

解 这是定数截尾试验, 先求出式 (17.2-30)、(17.2-31) 中所需的各值。

$$\begin{aligned}\bar{x}_r &= \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r x_i = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln N_i \\ &= \frac{1}{8} (\ln 125 000 + \ln 132 000 + \dots + \ln 152 000) \\ &= 11.844\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s_r^2 &= \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x}_r)^2 \\ &= \frac{1}{8} [(\ln 125 000 - 11.844)^2 + (\ln 132 000 \\ &\quad - 11.844)^2 + \dots + (\ln 152 000 - 11.844)^2] \\ &= 0.029\end{aligned}$$

$$d = x_0 - x_r = \ln 152 000 - 11.844 = 0.088$$

$$D = \frac{d^2}{d^2 + s_r^2} = \frac{0.088}{0.088 + 0.029} = 0.211$$

由表 (17.2-8), 按 $\frac{r}{n} = \frac{8}{10} = 0.8$ 查得 $g(D, \frac{r}{n}) = 0.481 57$, 代入式 (17.2-30)、式

(17.2-31)得

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{x} = \bar{x}_r + \frac{s_x^2 - s_r^2}{d} \\ &= 11.844 + \frac{0.183^2 - 0.029}{0.088} = 11.895 \\ \hat{\sigma} &= s_x = \frac{d}{g\left(D, \frac{r}{n}\right)} = \frac{0.088}{0.48157} = 0.183 \end{aligned}$$

求可靠寿命先用式(17.2-36),并按 $R = 0.90$ 由表 17.2-11 查得 $Z_R = 1.28$, 故得

$$\hat{x}(0.90) = \bar{x} - Z_R s_x = 11.895 - 1.28 \times 0.183 = 11.66$$

再按式(17.2-18)进行反变换得

$$\hat{N}(0.90) = e^{\hat{x}(0.90)} = e^{11.66} = 115\,844 \text{ 次}$$

例8 数据同例 17.2-7。试用最佳线性无偏估计法求分布参数。

解 按式(17.2-32)、式(17.2-33)、列表计算,见表 17.2-14。表中系数 $D'(10.8, j)$ 、 $C'(10.8, j)$ 的数值由表 17.2-9 中查得。

表 17.2-14 例8的计算过程

j	N_j	$x_j = \ln N_j$	$D'(10.8, j)$	$D'(10.8, j)x_j$	$C'(10.8, j)$	$C'(10.8, j)x_j$
1	125 000	11.736	0.060 5	0.710 0	-0.275 3	-3.230 9
2	132 000	11.791	0.080 4	0.948 0	-0.152 3	-1.795 8
3	135 000	11.813	0.089 8	1.060 8	-0.094 7	-1.118 7
4	138 000	11.835	0.097 2	1.150 4	-0.048 8	-0.577 5
5	141 000	11.857	0.103 7	1.229 6	-0.007 7	-0.091 3
6	145 000	11.884	0.109 9	1.306 1	0.031 9	0.379 1
7	148 000	11.905	0.116 1	1.382 2	0.072 2	0.859 5
8	152 000	11.932	0.342 4	4.085 5	0.474 6	5.662 9

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \hat{x} = \sum_{j=1}^r D'(10.8, j)x_j \\ &= 0.710\,0 + 0.948\,0 + \dots + 4.085\,5 \\ &= 11.872\,6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma} &= s_x = \sum_{j=1}^r C'(10.8, j)x_j \\ &= (-3.230\,9) + (-1.795\,8) + \dots + 5.662\,9 \\ &= 0.087\,3 \end{aligned}$$

满足下式条件,则接受两参数威布尔分布的假设;否则拒绝两参数威布尔分布的假设。

$$F_{1-\frac{\alpha}{2}}[2(r-r_0-1), 2r_0] \leq W \leq F_{\frac{\alpha}{2}}[2(r-r_0-1), 2r_0] \quad (17.2-44)$$

式中 α ——显著性水平;

$F(\nu_1, \nu_2)$ ——自由度为 ν_1, ν_2 的 F 分布的分位数,查表 17.1-6。 $F_{1-\alpha}(\nu_1, \nu_2) =$

$$\frac{1}{F_{\alpha}(\nu_1, \nu_2)}$$

若拒绝了两参数威布尔分布,仍有可能是三参数威布尔分布。对三参数威布尔分布,仍可用式 17.2-44 检验,但此时应先估计出位置参数 a ,将式中的 t_i 换成 $\tau_i = t_i - a$ 即可。

例9 抽取某产品 15 个进行寿命试验,其寿命由小到大为 8 300、15 800、22 200、27 500、31 200、37 600、45 000、46 800、53 600、61 000、68 100、72 800、85 000、95 500、124 500 h。检验该产品寿命是否服从威布尔分布。

解 假设该产品寿命服从两参数威布尔分布,用式(17.2-43)计算统计量的观测值,先列表计算式中的 l_i ,见表 17.2-15。表中 $E(Z_i)$ 值查表 17.2-20。

4 威布尔分布的分析法

4.1 威布尔分布的拟合性检验

样本大小为 n , 截尾寿命试验得 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$ 。检验统计量观测值

$$W = \frac{r_0 \sum_{i=r_0+1}^{r-1} l_i}{(r-r_0-1) \sum_{i=1}^{r_0} l_i} \quad (17.2-43)$$

式中 $r_0 = \left[\frac{r}{2} \right]$, 即取括号内整数部分;

$$l_i = \frac{\ln t_{i+1} - \ln t_i}{E(Z_{i+1}) - E(Z_i)}, i = 1, 2, \dots, r-1;$$

$E(Z_i)$ ——查表 17.2-19、表 17.2-20 中的 $E(Z_{r,n})$, $i = 1, 2, \dots, r-1$ 。

表 17.2-15 例 9 的计算过程

i	r_i	$\ln r_i$	$\ln r_{i+1} - \ln r_i$	$E(Z_i)$	$E(Z_{i+1}) - E(Z_i)$	$l_i = \frac{\ln r_{i+1} - \ln r_i}{E(Z_{i+1}) - E(Z_i)}$
1	8 300	9.024	0.644	-3.285 3	1.034 9	0.622 3
2	15 800	9.668	0.340	-2.250 4	0.537 1	0.633 0
3	22 200	10.008	0.214	-1.713 3	0.372 9	0.573 9
4	27 500	10.222	0.126	-1.340 4	0.292 6	0.430 6
5	31 200	10.348	0.187	-1.047 8	0.245 9	0.760 5
6	37 600	10.535	0.179	-0.801 9	0.216 7	0.826 0
7	45 000	10.714	0.040	-0.585 2	0.197 9	0.202 1
8	46 800	10.754	0.135	-0.387 3	0.186 3	0.724 6
9	53 600	10.889	0.130	-0.201 0	0.180 4	0.720 6
10	61 000	11.019	0.110	-0.020 6	0.180 1	0.610 8
11	68 100	11.129	0.138	0.159 5	0.186 3	0.740 7
12	78 200	11.267	0.083	0.345 8	0.202 7	0.409 5
13	85 000	11.350	0.117	0.548 5	0.239 9	0.487 7
14	95 500	11.467	0.265	0.788 4	0.344 3	0.769 7
15	124 500	11.732		1.132 7		

按式(17.2-43),式中 $r_0 = \left[\frac{r}{2} \right] = \left[\frac{15}{2} \right] = 7$,得

$$W = \frac{7 \sum_{i=8}^{14} l_i}{7 \sum_{i=1}^7 l_i} = \frac{0.724 6 + 0.720 6 + \dots + 0.769 7}{0.622 3 + 0.633 0 + \dots + 0.202 1} = 1.102 6$$

取显著性水平 $\alpha = 0.10$. 查表 17.1-6 得

$$F_{\frac{\alpha}{2}}[2(r-r_0-1), 2r_0] = F_{0.05}(14, 14) = 2.48$$

$$F_{1-\frac{\alpha}{2}}[2(r-r_0-1), 2r_0] = F_{0.95}(14, 14)$$

$$= \frac{1}{F_{0.05}(14, 14)} = 0.403 2$$

由于 $0.403 2 < W < 2.48$, 满足式 (17.2-44) 的条件, 故接受该产品的寿命服从两参数威布尔分布的假设。

4.2 威布尔分布的参数估计

4.2.1 矩法估计

威布尔分布参数的矩法估计较为简单, 但结果不如极大似然估计。矩法估计是先求样本的均值、标准差和偏态系数, 再利用现成的数表即可

方便地进行参数的点估计。对样本大小为 n 的完全样本, 则

样本均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (17.2-45)$$

样本标准差:

$$s_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17.2-46)$$

样本偏态系数:

$$k_k = \frac{n}{(n-1)(n-2)s_x^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (17.2-47)$$

根据 k_k 值由表 17.2-16 查得形状参数 k 的点估计 \hat{k} , 同时可查得系数 k_a 、 k_b , 故尺度参数 b 的点估计:

$$\hat{b} = \frac{s_x}{k_b} \quad (17.2-48)$$

位置参数 a 的点估计:

$$\hat{a} = \begin{cases} \bar{x} - \hat{b} k_a, & \text{若 } \bar{x} - \hat{b} k_a \leq \min \{x_i\} \\ \min \{x_i\}, & \text{若 } \bar{x} - \hat{b} k_a > \min \{x_i\} \end{cases} \quad (17.2-49)$$

若位置参数 a 已知 (例如两参数威布尔分布 $a=0$), 则求

$$k_c = \frac{s_x}{x-a} \quad (17.2-50)$$

根据 k_c 值由表 17.2-16 查得形状参数 k 的点估计 \hat{k} , 同时查得 k_b , 再由式 (17.2-48) 求尺度参数 b 的点估计 \hat{b} 。

4.2.2 极大似然估计

两参数威布尔分布的极大似然估计, 对截尾寿命试验, 若样本大小为 n , 截尾时间为 x_0 , 失效数为 r (对完全样本只需取 $r=n$), $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_r \leq x_0$, 则

$$\frac{\sum_{i=1}^r x_i^k \ln x_i + (n-r)x_0^k \ln x_0}{\sum_{i=1}^r x_i^k + (n-r)x_0^k} - \frac{1}{k} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln x_i \quad (17.2-51)$$

$$b = \left\{ \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r x_i^k + (n-r)x_0^k \right] \right\}^{\frac{1}{k}} \quad (17.2-52)$$

用迭代法解超越方程 (17.2-51), 求得 k 后代入式 (17.2-52) 求得 b , 即为形状参数 k 和尺度参数 b 的点估计 \hat{k} 和 \hat{b} 。

4.2.3 最佳线性无偏估计和简单线性无偏估计

利用相应的数表可很方便地求得精度较高的两参数威布尔分布的最佳线性无偏估计和简单线性无偏估计。这时应先做如下变换:

原分布函数

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^k} \quad (17.2-53)$$

令

$$\begin{aligned} x = \ln t, \text{ 即 } t = e^x \\ \sigma = \frac{1}{k}, \text{ 即 } k = \frac{1}{\sigma} \\ \mu = \ln b, \text{ 即 } b = e^\mu \end{aligned}$$

则原分布函数变为

$$F(x) = 1 - e^{-e^{\frac{x-\mu}{\sigma}}} \quad (17.2-54)$$

式中, 参数 μ 和 σ 的最佳线性无偏估计

$$\hat{\mu} = \sum_{j=1}^r D(n, r, j) x_j \quad (17.2-55)$$

$$\hat{\sigma} = \sum_{j=1}^r C(n, r, j) x_j \quad (17.2-56)$$

式中 n —— 样本大小;
 r —— 截尾失效数;
 j —— 寿命由小到大的排列序号;
 x_j —— 第 j 个对数寿命值;

$D(n, r, j)$ —— μ 的最佳线性无偏估计系数, 查表 17.2-17;

$C(n, r, j)$ —— σ 的最佳线性无偏估计系数, 查表 17.2-17;

当 $n \geq 26$ 时, μ 和 σ 用简单线性无偏估计。 μ 和 σ 的简单线性无偏估计为

$$\hat{\mu} = x_{r,n} - E(Z_{r,n})\hat{\sigma} \quad (17.2-57)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{nk_{r,n}} \left[(2s-r)x_{r,n} - \sum_{j=1}^s x_j + \sum_{j=s+1}^r x_j \right] \quad (17.2-58)$$

式中 n, r, j, x_j 同式 (17.2-55);
 $s, nk_{r,n}, E(Z_{r,n})$ —— 查表 17.2-18;
 形状参数 k 的无偏点估计为

$$\hat{k} = \frac{g_{r,n}}{\sigma} \quad (17.2-59)$$

式中 $g_{r,n}$ —— 修偏系数, 查表 17.2-18、表 17.2-19。
 尺度参数的点估计为

$$\hat{b} = e^{\hat{\mu}} \quad (17.2-60)$$

4.3 威布尔分布的可靠度和可靠寿命估计

指定寿命 t 时可靠度的点估计

$$\hat{R}(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t-\hat{a}}{\hat{b}}\right)^{\hat{k}}}, & \text{当 } t \geq \hat{a} \\ 1, & \text{当 } t < \hat{a} \end{cases} \quad (17.2-61)$$

指定可靠度 R 时可靠寿命的点估计

$$\hat{t}(R) = \hat{a} + \hat{b} \left(\ln \frac{1}{R} \right)^{\frac{1}{\hat{k}}} \quad (17.2-62)$$

指定置信水平 γ 、可靠度的置信下限 R_L , 对于全数试验的两参数威布尔分布, 可按可靠度的极大似然点估计 \hat{R} 查表 17.2-20、表 17.2-21; 对于截尾寿命试验, 其可靠度置信下限可查表 17.2-22~表 17.2-24。

可靠寿命的单侧置信下限

$$t_L(R) = e^{\hat{\mu} - \frac{\hat{\sigma}(B_{\gamma,n} + V_{R\gamma})}{2 - k_{r,n}}} \quad (17.2-63)$$

式中 $g_{r,n}, B_{\gamma,n}, V_{R\gamma}$ —— 查表 17.2-19。

表 17.2-16 威布尔分布形状参数和各参数点估计系数

\hat{k}	k_v	k_b	k_n	k_c	\hat{k}	k_L	k_L	k_s	k_s
0.20	190.1	109.1	120.0	15.84	4.00	-0.087	0.254	0.906	0.280
0.30	28.33	30.10	9.261	5.408	4.10	-0.107	0.249	0.908	0.274
0.40	11.35	10.45	3.323	3.141	4.20	-0.126	0.244	0.909	0.268
0.50	6.619	4.472	2.000	2.236	4.30	-0.144	0.239	0.910	0.263
0.60	4.593	2.645	1.505	1.758	4.40	-0.161	0.234	0.911	0.257
0.70	3.498	1.851	0.266	1.462	4.50	-0.178	0.230	0.913	0.252
0.80	2.815	1.428	1.133	1.260	4.60	-0.195	0.225	0.914	0.247
0.90	2.345	1.199	1.073	1.113	4.70	-0.210	0.221	0.915	0.242
1.00	2.000	1.000	1.000	1.000	4.80	-0.225	0.217	0.916	0.238
1.10	1.734	0.878	0.965	0.910	4.90	-0.240	0.214	0.917	0.233
1.20	1.521	0.787	0.940	0.837	5.00	-0.254	0.210	0.918	0.229
1.30	1.346	0.716	0.923	0.776	5.10	-0.268	0.207	0.919	0.225
1.40	1.198	0.660	0.911	0.724	5.20	-0.281	0.203	0.920	0.221
1.50	1.072	0.613	0.903	0.679	5.30	-0.294	0.199	0.921	0.217
1.60	0.962	0.574	0.897	0.640	5.40	-0.306	0.197	0.922	0.213
1.70	0.865	0.540	0.892	0.605	5.50	-0.318	0.194	0.923	0.210
1.80	0.779	0.511	0.889	0.575	5.60	-0.330	0.190	0.924	0.206
1.90	0.701	0.486	0.888	0.547	5.70	-0.341	0.187	0.925	0.203
2.00	0.631	0.463	0.886	0.523	5.80	-0.352	0.184	0.926	0.200
2.10	0.567	0.443	0.886	0.500	5.90	-0.363	0.181	0.927	0.197
2.20	0.509	0.425	0.886	0.480	6.00	-0.373	0.180	0.928	0.194
2.30	0.455	0.408	0.886	0.461	6.10	-0.383	0.177	0.928	0.191
2.40	0.405	0.393	0.886	0.444	6.20	-0.393	0.175	0.929	0.188
2.50	0.358	0.380	0.887	0.428	6.30	-0.403	0.173	0.930	0.185
2.60	0.315	0.367	0.888	0.413	6.40	-0.412	0.170	0.931	0.183
2.70	0.275	0.355	0.889	0.399	6.50	-0.421	0.168	0.932	0.180
2.80	0.237	0.344	0.890	0.387	6.60	-0.430	0.166	0.932	0.177
2.90	0.202	0.333	0.891	0.375	6.70	-0.439	0.163	0.933	0.175
3.00	0.168	0.325	0.893	0.363	6.80	-0.447	0.161	0.934	0.173
3.10	0.136	0.413	0.895	0.353	6.90	-0.455	0.159	0.935	0.170
3.20	0.106	0.307	0.896	0.343	7.00	-0.463	0.157	0.935	0.168
3.30	0.078	0.298	0.897	0.333	7.50	-0.500	0.147	0.939	0.158
3.40	0.051	0.292	0.898	0.325	8.00	-0.534	0.140	0.942	0.148
3.50	0.025	0.290	0.898	0.316	8.50	-0.564	0.131	0.945	0.140
3.60	0.001	0.277	0.899	0.308	9.00	-0.591	0.126	0.947	0.133
3.70	-0.023	0.276	0.901	0.301	9.50	-0.615	0.120	0.949	0.126
3.80	-0.045	0.265	0.904	0.294	10.00	-0.638	0.114	0.951	0.120
3.90	-0.067	0.260	0.905	0.287					

表 17.2-17 最佳线性无偏估计系数表 (威布尔分布)

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
2	2	1	-0.721 3	0.083 6	7	4	3	-0.210 2	0.007 1
2	2	2	0.721 3	0.916 4	7	4	4	0.780 2	1.247 5
3	2	1	-0.822 1	-0.377 7	7	5	1	-0.211 0	-0.039 3
3	2	2	0.822 1	1.377 7	7	5	2	-0.206 5	-0.004 4
3	3	1	-0.374 7	0.088 0	7	5	3	-0.169 1	0.045 8
3	3	2	-0.255 8	0.255 7	7	5	4	-0.099 2	0.113 4
3	3	3	0.630 5	0.656 3	7	5	5	0.085 8	0.884 4
4	2	1	-0.869 0	-0.706 3	7	6	1	-0.158 7	0.013 7
4	2	2	0.869 0	1.706 3	7	6	2	-0.160 9	0.041 8
4	3	1	-0.414 4	-0.080 1	7	6	3	-0.139 6	0.075 7
4	3	2	-0.325 9	0.060 4	7	6	4	-0.095 1	0.117 6
4	3	3	0.740 3	1.019 7	7	6	5	-0.017 6	0.172 1
4	4	1	-0.248 8	0.071 4	7	6	6	0.571 9	0.579 1
4	4	2	-0.223 9	0.153 7	7	7	1	-0.120 1	0.041 8
4	4	3	-0.085 9	0.263 9	7	7	2	-0.125 9	0.067 3
4	4	4	0.558 6	0.511 0	7	7	3	-0.114 9	0.093 7
5	2	1	-0.896 3	-0.959 9	7	7	4	-0.087 3	0.123 2
5	2	2	0.896 3	1.959 9	7	7	5	-0.036 2	0.158 6
5	3	1	-0.434 3	-0.210 1	7	7	6	0.060 7	0.206 3
5	3	2	-0.364 2	-0.086 0	7	7	7	0.423 7	0.309 0
5	3	3	0.798 6	1.296 1	8	2	1	-0.936 1	-1.486 9
5	4	1	-0.273 0	-0.015 4	8	2	2	0.936 1	2.486 9
5	4	2	-0.249 9	0.052 0	8	3	1	-0.461 0	-0.479 4
5	4	3	-0.149 1	0.152 1	8	3	2	-0.418 0	-0.384 8
5	4	4	0.672 1	0.811 3	8	3	3	0.879 0	1.864 2
5	5	1	-0.184 5	0.058 4	8	4	1	-0.299 8	-0.197 7
5	5	2	-0.181 7	0.108 8	8	4	2	-0.283 7	-0.150 2
5	5	3	-0.130 5	0.167 6	8	4	3	-0.227 5	-0.068 5
5	5	4	-0.006 5	0.246 3	8	4	4	0.810 9	1.416 4
5	5	5	0.503 1	0.418 9	8	5	1	-0.217 2	-0.078 1
6	2	1	-0.914 1	-0.165 6	8	5	2	-0.212 8	-0.047 4
6	2	2	0.914 1	2.165 6	8	5	3	-0.180 3	-0.000 1
6	3	1	-0.446 6	-0.315 4	8	5	4	-0.122 5	0.063 7
6	3	2	-0.388 6	-0.203 4	8	5	5	0.732 8	1.061 9
6	3	3	0.835 3	1.518 8	8	6	1	-0.166 1	-0.0172
6	4	1	-0.285 9	-0.086 5	8	6	2	-0.167 5	0.006 5
6	4	2	-0.265 5	-0.028 1	8	6	3	-0.148 3	0.038 0
6	4	3	-0.185 9	0.064 9	8	6	4	-0.110 5	0.078 0
6	4	4	0.737 2	1.049 6	8	6	5	-0.050 0	0.129 2
6	5	1	-0.201 5	0.005 7	8	6	6	0.642 4	0.765 5
6	5	2	-0.197 3	0.046 6	8	7	1	-0.130 3	0.016 8
6	5	3	-0.153 6	0.100 2	8	7	2	-0.134 8	0.037 6
6	5	4	-0.064 6	0.172 3	8	7	3	-0.123 8	0.061 2
6	5	5	0.617 0	0.675 2	8	7	4	-0.099 1	0.088 8
6	6	1	-0.145 8	0.048 9	8	7	5	-0.0571	0.122 5
6	6	2	-0.145 9	0.083 5	8	7	6	0.010 9	0.165 5
6	6	3	-0.126 7	0.121 1	8	7	7	0.534 3	0.507 6
6	6	4	-0.073 2	0.165 6	8	8	1	-0.101 9	0.0365
6	6	5	0.036 0	0.225 5	8	8	2	-0.108 1	0.056 1
6	6	6	0.459 3	0.355 4	8	8	3	-0.102 7	0.075 9
7	2	1	-0.926 7	-1.338 3	8	8	4	-0.087 2	0.097 1
7	2	2	0.926 7	2.338 3	8	8	5	-0.058 9	0.121 2
7	3	1	-0.455 0	-0.403 6	8	8	6	-0.011 1	0.150 2
7	3	2	-0.405 6	-0.301 2	8	8	7	0.075 8	0.189 4
7	3	3	0.860 5	1.704 8	8	8	8	0.394 2	0.273 5
7	4	1	-0.294 0	-0.146 3	9	2	1	-0.943 4	-1.617 3
7	4	2	-0.276 0	-0.094 1	9	2	2	0.943 4	2.617 3
					9	3	1	-0.465 6	-0.545 8

续表 17.2-17

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
9	3	2	-0.427 5	-0.457 7	10	6	3	-0.159 6	-0.022 6
9	3	3	0.893 2	2.003 5	10	6	4	-0.130 8	0.014 1
9	4	1	-0.304 0	-0.242 7	10	6	5	-0.088 3	0.060 2
9	4	2	-0.289 5	-0.199 0	10	6	6	0.729 0	1.068 0
9	4	3	-0.240 5	-0.121 9	10	7	1	-0.140 6	-0.026 1
9	4	4	0.834 0	1.563 6	10	7	2	-0.143 7	-0.010 9
9	5	1	-0.221 7	-0.112 3	10	7	3	-0.134 0	0.009 5
9	5	2	-0.217 4	-0.084 7	10	7	4	-0.114 3	0.034 8
9	5	3	-0.188 7	-0.039 8	10	7	5	-0.083 8	0.065 9
9	5	4	-0.139 4	0.020 6	10	7	6	-0.040 2	0.104 1
9	5	5	0.767 3	1.216 1	10	7	7	0.656 5	0.822 7
9	6	1	-0.171 2	-0.044 6	10	8	1	-0.115 3	0.000 6
9	6	2	-0.172 0	-0.023 9	10	8	2	-0.119 8	0.014 3
9	6	3	-0.154 7	0.005 7	10	8	3	-0.114 2	0.030 5
9	6	4	-0.122 0	0.044 0	10	8	4	-0.100 6	0.049 3
9	6	5	-0.072 1	0.092 5	10	8	5	-0.078 5	0.071 4
9	6	6	0.692 0	0.926 4	10	8	6	-0.046 0	0.097 9
9	7	1	-0.136 4	-0.005 8	10	8	7	0.000 9	0.130 7
9	7	2	-0.140 0	0.011 8	10	8	8	0.573 5	0.605 4
9	7	3	-0.129 7	0.033 6	10	9	1	-0.095 3	0.017 8
9	7	4	-0.107 6	0.060 0	10	9	2	-0.100 5	0.030 9
9	7	5	-0.072 3	0.092 2	10	9	3	-0.097 8	0.044 6
9	7	6	-0.019 4	0.132 5	10	9	4	-0.088 6	0.059 6
9	7	7	0.605 5	0.675 7	10	9	5	-0.072 7	0.076 3
9	8	1	-0.110 2	0.017 8	10	9	6	-0.048 6	0.095 7
9	8	2	-0.115 4	0.034 0	10	9	7	-0.012 9	0.118 8
9	8	3	-0.109 7	0.051 6	10	9	8	0.041 5	0.148 1
9	8	4	-0.095 0	0.071 4	10	9	8	0.474 9	0.408 2
9	8	5	-0.070 0	0.094 3	10	10	1	-0.077 9	0.028 9
9	8	6	-0.031 2	0.121 8	10	10	2	-0.083 6	0.041 7
9	8	7	0.029 2	0.156 9	10	10	3	-0.082 8	0.054 2
9	8	8	0.502 4	0.452 3	10	10	4	-0.077 0	0.067 0
9	9	1	-0.088 4	0.032 3	10	10	5	-0.066 1	0.080 6
9	9	2	-0.094 4	0.048 0	10	10	6	-0.048 7	0.095 6
9	9	3	-0.092 0	0.063 4	10	10	7	-0.022 2	0.112 9
9	9	4	-0.082 7	0.079 6	10	10	8	0.019 2	0.133 8
9	9	5	-0.065 6	0.097 2	10	10	9	0.091 2	0.162 3
9	9	6	-0.038 0	0.117 4	10	10	10	0.347 8	0.222 9
9	9	7	0.006 5	0.141 8	11	2	1	-0.953 8	1.837 7
9	9	8	0.085 2	0.174 9	11	2	2	0.953 8	2.837 7
9	9	9	0.369 2	0.245 5	11	3	1	-0.472 2	-0.657 8
10	2	1	-0.949 1	-1.733 3	11	3	2	-0.441 2	-0.580 2
10	2	2	0.949 1	2.733 3	11	3	3	0.913 4	2.237 9
10	3	1	-0.469 3	-0.604 7	11	4	1	-0.309 9	-0.318 6
10	3	2	-0.435 1	-0.522 3	11	4	2	-0.297 9	-0.280 6
10	3	3	0.904 4	2.127 0	11	4	3	-0.258 8	-0.211 3
10	4	1	-0.307 3	-0.282 7	11	4	4	0.866 5	1.810 5
10	4	2	-0.294 1	-0.242 1	11	5	1	-0.227 7	-0.169 9
10	4	3	-0.250 6	-0.169 1	11	5	2	-0.223 9	-0.146 7
10	4	4	0.852 0	1.693 8	11	5	3	-0.200 6	-0.106 1
10	5	1	-0.225 1	-0.142 6	11	5	4	-0.162 5	-0.051 4
10	5	2	-0.221 0	-0.117 5	11	5	5	0.814 7	1.474 1
10	5	3	-0.195 3	-0.074 8	11	6	1	-0.177 7	-0.091 0
10	5	4	-0.152 3	-0.017 4	11	6	2	-0.178 0	-0.074 5
10	5	5	0.793 7	1.352 3	11	6	3	-0.163 6	-0.047 7
10	6	1	-0.174 8	-0.069 0	11	6	4	-0.137 9	-0.012 6
10	6	2	-0.175 4	-0.050 6	11	6	5	-0.100 7	0.031 4
					11	6	6	0.757 8	1.194 4

续表 17.2-17

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
11	7	1	-0.143 7	-0.044 5	12	5	4	-0.170 7	-0.082 0
11	7	2	-0.146 4	-0.031 1	12	5	5	0.831 7	1.584 2
11	7	3	-0.137 4	-0.011 8	12	6	1	-0.179 9	-0.111 0
11	7	4	-0.119 5	0.012 6	12	6	2	-0.180 1	-0.095 9
11	7	5	-0.092 7	0.042 4	12	6	3	-0.166 8	-0.070 4
11	7	6	-0.055 6	0.078 8	12	6	4	-0.143 6	-0.036 6
11	7	7	0.695 2	0.953 5	12	6	5	-0.110 6	0.005 5
11	8	1	-0.118 9	-0.015 0	12	6	6	0.781 0	1.308 5
11	8	2	-0.122 8	-0.003 2	12	7	1	-0.146 1	-0.061 2
11	8	3	-0.117 5	0.011 8	12	7	2	-0.148 5	-0.049 2
11	8	4	-0.104 9	0.029 8	12	7	3	-0.140 1	-0.030 9
11	8	5	-0.085 3	0.051 2	12	7	4	-0.123 8	-0.007 5
11	8	6	-0.057 3	0.076 8	12	7	5	-0.099 9	0.021 3
11	8	7	-0.018 7	0.107 8	12	7	6	-0.067 5	0.056 1
11	8	8	0.625 4	0.740 7	12	7	7	0.725 9	1.071 3
11	9	1	-0.099 6	0.004 4	12	8	1	-0.121 6	-0.029 3
11	9	2	-0.104 3	0.015 4	12	8	2	-0.125 1	-0.019 0
11	9	3	-0.101 4	0.028 0	12	8	3	-0.120 0	-0.004 9
11	9	4	-0.092 7	0.042 1	12	8	4	-0.108 5	0.012 5
11	9	5	-0.078 2	0.058 3	12	8	5	-0.090 7	0.033 2
11	9	6	-0.057 0	0.077 1	12	8	6	-0.066 1	0.057 9
11	9	7	-0.027 2	0.099 3	12	8	7	-0.033 3	0.087 5
11	9	8	0.014 9	0.126 6	12	8	8	0.665 3	0.862 2
11	9	9	0.545 6	0.548 8	12	9	1	0.102 7	-0.008 1
11	10	1	-0.083 8	0.017 4	12	9	2	-0.107 0	0.001 5
11	10	2	-0.088 9	0.028 2	12	9	3	-0.104 0	0.013 1
11	10	3	-0.087 7	0.039 3	12	9	4	-0.095 9	0.026 6
11	10	4	-0.081 9	0.051 1	12	9	5	-0.082 6	0.042 3
11	10	5	-0.071 4	0.064 0	12	9	6	-0.063 8	0.060 5
11	10	6	-0.055 4	0.078 4	12	9	7	-0.038 2	0.082 0
11	10	7	-0.032 5	0.095 0	12	9	8	-0.003 7	0.107 8
11	10	8	0.000 6	0.114 8	12	9	9	0.597 8	0.674 2
11	10	9	0.050 0	0.139 8	12	10	1	-0.087 5	0.006 6
11	10	10	0.450 9	0.372 1	12	10	2	-0.092 1	0.015 8
11	11	1	-0.069 6	0.026 2	12	10	3	-0.090 8	0.025 9
11	11	2	-0.074 8	0.036 9	12	10	4	-0.085 1	0.037 0
11	11	3	-0.075 0	0.047 2	12	10	5	-0.075 3	0.049 4
11	11	4	-0.071 4	0.057 6	12	10	6	-0.060 8	0.063 4
11	11	5	-0.064 1	0.068 5	12	10	7	-0.040 8	0.079 5
11	11	6	-0.052 5	0.080 2	12	10	8	-0.013 3	0.098 5
11	11	7	-0.035 3	0.093 2	12	10	9	0.024 8	0.121 7
11	11	8	-0.010 0	0.108 2	12	10	10	0.520 9	0.502 2
11	11	9	0.028 6	0.126 5	12	11	1	-0.074 6	0.016 8
11	11	10	0.094 9	0.151 4	12	11	2	-0.079 4	0.025 9
11	11	11	0.329 2	0.204 1	12	11	3	-0.079 3	0.035 1
12	2	1	-0.957 7	-1.932 7	12	11	4	-0.075 5	0.044 6
12	2	2	0.957 7	2.932 7	12	11	5	-0.068 3	0.054 9
12	3	1	-0.474 6	-0.706 0	12	11	6	-0.057 3	0.066 2
12	3	2	-0.446 3	-0.632 6	12	11	7	-0.041 7	0.078 7
12	3	3	0.920 9	2.338 5	12	11	8	-0.020 0	0.093 2
12	4	1	-0.312 0	-0.351 2	12	11	9	0.010 6	0.110 4
12	4	2	-0.300 9	0.315 5	12	11	10	0.055 9	0.132 0
12	4	3	-0.265 4	-0.249 4	12	11	11	0.429 7	0.342 1
12	4	4	0.878 4	1.916 1	12	12	1	-0.062 9	0.023 9
12	5	1	-0.229 8	-0.194 7	12	12	2	-0.067 7	0.033 0
12	5	2	-0.226 2	-0.173 2	12	12	3	-0.068 4	0.041 6
12	5	3	-0.205 0	-0.134 3	12	12	4	-0.066 1	0.050 3
					12	12	5	-0.061 1	0.059 3

续表 17.2-17

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
12	12	6	-0.053 1	0.068 7	13	10	7	-0.047 5	0.065 7
12	12	7	-0.041 3	0.079 0	13	10	8	-0.023 9	0.084 0
12	12	8	-0.024 5	0.090 5	13	10	9	0.007 3	0.105 9
12	12	9	-0.000 5	0.103 7	13	10	10	0.573 3	0.619 0
12	12	10	0.035 7	0.119 8	13	11	1	-0.077 9	0.007 9
12	12	11	0.097 1	0.141 8	13	11	2	-0.082 3	0.015 7
12	12	12	0.312 8	0.188 4	13	11	3	-0.082 0	0.024 1
13	2	1	-0.961 0	-2.019 7	13	11	4	-0.078 3	0.033 0
13	2	2	0.961 0	3.019 7	13	11	5	-0.071 4	0.042 9
13	3	1	-0.476 7	-0.750 1	13	11	6	-0.061 2	0.053 8
13	3	2	-0.450 5	-0.680 4	13	11	7	-0.047 1	0.066 1
13	3	3	0.927 2	2.430 5	13	11	8	-0.028 2	0.080 1
13	4	1	-0.313 8	-0.381 1	13	11	9	-0.002 7	0.096 6
13	4	2	-0.303 5	-0.347 3	13	11	10	0.032 1	0.116 6
13	4	3	-0.271 0	-0.284 2	13	11	11	0.498 9	0.463 2
13	4	4	0.888 3	2.012 6	13	12	1	-0.067 3	0.016 1
13	5	1	-0.231 6	-0.217 3	13	12	2	-0.071 7	0.023 9
13	5	2	-0.228 2	-0.197 2	13	12	3	-0.072 1	0.031 6
13	5	3	-0.208 7	-0.160 0	13	12	4	-0.069 7	0.039 6
13	5	4	-0.177 5	-0.109 9	13	12	5	-0.064 7	0.048 0
13	5	5	0.845 9	1.684 5	13	12	6	-0.056 9	0.057 1
13	6	1	-0.181 7	-0.129 3	13	12	7	-0.045 9	0.067 0
13	6	2	-0.181 8	-0.115 4	13	12	8	-0.030 7	0.078 1
13	6	3	-0.169 6	-0.091 0	13	12	9	0.010 2	0.090 8
13	6	4	-0.148 3	-0.058 5	13	12	10	0.018 3	0.106 0
13	6	5	-0.118 7	-0.018 1	13	12	11	0.060 1	0.124 9
13	6	6	0.800 1	1.412 4	13	12	12	0.410 9	0.316 7
13	7	1	-0.148 1	-0.076 5	13	13	1	-0.057 3	0.022 0
13	7	2	-0.150 1	-0.065 7	13	13	2	-0.061 7	0.029 8
13	7	3	-0.142 3	-0.048 3	13	13	3	-0.062 7	0.037 2
13	7	4	-0.127 4	-0.025 6	13	13	4	-0.061 4	0.044 5
13	7	5	-0.105 8	0.002 2	13	13	5	-0.057 9	0.052 0
13	7	6	-0.077 0	0.035 5	13	13	6	-0.052 1	0.059 9
13	7	7	0.750 7	1.178 5	13	13	7	-0.043 7	0.068 3
13	8	1	-0.123 7	-0.042 5	13	13	8	-0.032 0	0.077 4
13	8	2	-0.126 9	-0.033 3	13	13	9	-0.015 8	0.087 5
13	8	3	-0.122 0	-0.020 0	13	13	10	0.007 0	0.099 3
13	8	4	-0.111 3	-0.003 2	13	13	11	0.041 0	0.113 8
13	8	5	-0.095 2	0.016 9	13	13	12	0.098 3	0.133 4
13	8	6	-0.073 3	0.040 7	13	13	13	0.298 4	0.174 9
13	8	7	-0.044 7	0.069 0	14	2	1	-0.963 8	2.100 0
13	8	8	0.697 2	0.972 4	14	2	2	0.963 8	3.100 0
13	9	1	-0.105 1	-0.019 5	14	3	1	-0.478 4	-0.790 8
13	9	2	-0.108 9	-0.011 2	14	3	2	-0.454 2	-0.724 4
13	9	3	-0.106 1	-0.000 3	14	3	3	0.932 6	2.515 2
13	9	4	-0.098 4	0.012 7	14	4	1	-0.315 3	-0.408 6
13	9	5	-0.086 3	0.027 9	14	4	2	-0.305 7	-0.376 6
13	9	6	-0.069 3	0.045 6	14	4	3	-0.275 7	-0.316 1
13	9	7	-0.046 8	0.066 4	14	4	4	0.896 7	2.101 2
13	9	8	-0.017 5	0.091 0	14	5	1	-0.233 1	-0.238 2
13	9	9	0.638 5	0.787 5	14	5	2	-0.229 8	-0.219 3
13	10	1	-0.090 2	-0.003 5	14	5	3	-0.211 8	-0.183 6
13	10	2	0.094 5	0.004 5	14	5	4	-0.183 2	-0.135 5
13	10	3	-0.093 1	0.013 8	14	5	5	0.857 8	1.776 7
13	10	4	-0.087 6	0.024 3	14	6	1	-0.183 2	-0.146 2
13	10	5	-0.078 5	0.036 3	14	6	2	-0.183 3	-0.133 3
13	10	6	-0.065 3	0.050 0	14	6	3	-0.171 9	-0.109 9
					14	6	4	-0.152 3	-0.078 5

续表 17.2-17

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
14	6	5	-0.125 4	-0.039 7	14	12	11	0.037 5	0.111 5
14	6	6	0.816 1	1.507 7	14	12	12	0.479 2	0.430 0
14	7	1	-0.149 7	-0.090 7	14	13	1	-0.061 2	0.015 4
14	7	2	-0.151 5	-0.080 8	14	13	2	-0.065 3	0.022 2
14	7	3	-0.144 2	-0.064 1	14	13	3	-0.066 1	0.028 8
14	7	4	-0.130 4	-0.042 2	14	13	4	-0.064 6	0.035 6
14	7	5	-0.110 7	-0.015 4	14	13	5	-0.061 0	0.0426
14	7	6	-0.084 8	0.016 7	14	13	6	-0.055 3	0.050 1
14	7	7	0.771 4	1.276 7	14	13	7	-0.047 3	0.058 1
14	8	1	-0.125 4	-0.054 7	14	13	8	-0.036 4	0.067 0
14	8	2	-0.128 3	-0.046 4	14	13	9	-0.021 9	0.076 9
14	8	3	-0.123 7	-0.033 7	14	13	10	-0.002 5	0.088 2
14	8	4	-0.113 8	-0.017 6	14	13	11	0.024 3	0.101 6
14	8	5	-0.099 0	0.001 9	14	13	12	0.063 0	0.118 5
14	8	6	-0.079 2	0.025 0	14	13	13	0.394 1	0.295 0
14	8	7	-0.053 8	0.052 2	14	14	1	-0.052 6	0.020 3
14	8	8	0.723 3	1.073 3	14	14	2	-0.056 7	0.027 1
14	9	1	-0.107 0	-0.030 2	14	14	3	-0.057 8	0.033 5
14	9	2	-0.110 5	-0.022 8	14	14	4	-0.057 1	0.039 8
14	9	3	-0.107 8	-0.012 5	14	14	5	-0.054 6	0.046 3
14	9	4	-0.100 6	-0.000 0	14	14	6	-0.050 4	0.052 9
14	9	5	-0.089 3	0.014 7	14	14	7	-0.044 3	0.059 9
14	9	6	-0.073 9	0.032 0	14	14	8	-0.035 8	0.067 3
14	9	7	-0.053 9	0.052 1	14	14	9	-0.024 3	0.075 5
14	9	8	-0.028 3	0.075 6	14	14	10	-0.008 7	0.084 6
14	9	9	0.671 3	0.891 0	14	14	11	0.013 0	0.095 2
14	10	1	-0.092 3	-0.012 9	14	14	12	0.045 1	0.108 2
14	10	2	-0.0963	-0.005 9	14	14	13	0.098 8	0.126 0
14	10	3	-0.094 8	0.002 7	14	14	14	0.285 3	0.163 3
14	10	4	-0.089 6	0.012 9	15	2	1	-0.966 3	-2.174 5
14	10	5	-0.081 1	0.024 5	15	2	2	0.966 3	3.174 5
14	10	6	-0.069 0	0.037 8	15	3	1	-0.479 9	-0.828 5
14	10	7	-0.053 0	0.053 1	15	3	2	-0.457 3	-0.765 1
14	10	8	-0.032 4	0.070 9	15	3	3	0.937 2	2.593 6
14	10	9	-0.005 9	0.091 7	15	4	1	-0.316 6	-0.434 1
14	10	10	0.614 4	0.725 2	15	4	2	-0.307 6	-0.403 6
14	11	1	-0.080 3	-0.000 4	15	4	3	-0.279 8	-0.345 5
14	11	2	-0.084 4	0.006 4	15	4	4	0.904 0	2.183 2
14	11	3	-0.084 0	0.014 0	15	5	1	-0.234 3	-0.257 6
14	11	4	-0.080 3	0.022 5	15	5	2	-0.231 2	-0.239 8
14	11	5	-0.073 8	0.032 0	15	5	3	-0.214 4	-0.205 4
14	11	6	-0.064 3	0.042 7	15	5	4	-0.188 0	-0.159 1
14	11	7	-0.051 5	0.054 7	15	5	5	0.868 0	1.861 8
14	11	8	-0.034 8	0.068 4	15	6	1	-0.184 5	-0.161 8
14	11	9	-0.013 0	0.084 2	15	6	2	-0.184 5	-0.149 9
14	11	10	0.015 4	0.103 1	15	6	3	-0.173 8	-0.127 3
14	11	11	0.551 2	0.572 5	15	6	4	-0.155 8	-0.097 0
14	12	1	-0.070 1	0.008 7	15	6	5	-0.131 1	-0.059 7
14	12	2	-0.074 3	0.015 4	15	6	6	0.829 6	1.595 7
14	12	3	-0.074 6	0.022 5	15	7	1	-0.151 0	-0.103 8
14	12	4	-0.072 1	0.029 9	15	7	2	-0.152 7	-0.094 8
14	12	5	-0.067 2	0.038 0	15	7	3	-0.145 8	-0.078 7
14	12	6	-0.059 8	0.046 7	15	7	4	-0.133 0	-0.057 6
14	12	7	-0.049 6	0.056 4	15	7	5	-0.114 9	-0.031 6
14	12	8	-0.036 1	0.067 2	15	7	6	-0.091 4	-0.000 7
14	12	9	-0.018 2	0.079 6	15	7	7	0.788 8	1.367 2
14	12	10	0.005 4	0.094 1	15	8	1	-0.126 9	-0.066 0
14	12	11			15	8	2	-0.129 5	-0.058 5

续表 17.2-17

n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$	n	r	j	$C(n, r, j)$	$D(n, r, j)$
15	8	3	-0.125 2	-0.046 4	15	12	10	-0.004 6	0.083 4
15	8	4	-0.115 9	-0.030 8	15	12	11	0.021 6	0.099 8
15	8	5	-0.102 2	-0.011 8	15	12	12	0.531 2	0.532 7
15	8	6	-0.084 2	0.010 5	15	13	1	-0.063 7	0.009 2
15	8	7	-0.061 3	0.036 7	15	13	2	-0.067 6	0.015 0
15	8	8	0.745 2	1.166 3	15	13	3	-0.068 2	0.021 0
15	9	1	-0.108 5	-0.040 1	15	13	4	-0.066 7	0.027 4
15	9	2	-0.111 8	-0.033 5	15	13	5	-0.063 1	0.034 1
15	9	3	-0.109 1	-0.023 8	15	13	6	-0.057 7	0.041 3
15	9	4	-0.102 4	-0.011 7	15	13	7	-0.050 1	0.049 1
15	9	5	-0.091 9	0.002 7	15	13	8	-0.040 1	0.057 8
15	9	6	-0.077 8	0.019 5	15	13	9	-0.027 1	0.067 5
15	9	7	-0.059 7	0.038 9	15	13	10	-0.010 3	0.078 4
15	9	8	-0.037 1	0.061 6	15	13	11	0.011 8	0.091 3
15	9	9	0.698 4	0.986 3	15	13	12	0.041 5	0.106 7
15	10	1	-0.094 0	-0.021 7	15	13	13	0.461 3	0.401 4
15	10	2	-0.097 7	-0.015 5	15	14	1	-0.056 0	0.014 8
15	10	3	-0.096 2	-0.007 4	15	14	2	-0.059 9	0.020 7
15	10	4	-0.096 3	0.002 4	15	14	3	-0.060 9	0.026 4
15	10	5	-0.083 3	0.013 7	15	14	4	-0.060 0	0.032 2
15	10	6	-0.072 2	0.026 7	15	14	5	-0.057 4	0.038 2
15	10	7	-0.057 7	0.041 6	15	14	6	-0.053 2	0.044 5
15	10	8	-0.039 3	0.058 8	15	14	7	-0.047 2	0.051 2
15	10	9	-0.016 2	0.078 7	15	14	8	-0.039 1	0.058 5
15	10	10	0.647 8	0.822 8	15	14	9	-0.028 5	0.066 4
15	11	1	-0.082 2	-0.008 3	15	14	10	-0.014 6	0.075 3
15	11	2	-0.086 0	-0.002 3	15	14	11	-0.003 8	0.085 4
15	11	3	-0.085 5	0.004 8	15	14	12	0.028 9	0.097 5
15	11	4	-0.082 0	0.012 9	15	14	13	0.065 1	0.112 6
15	11	5	-0.075 8	0.022 1	15	14	14	0.378 8	0.276 1
15	11	6	-0.067 0	0.032 5	15	15	1	-0.048 6	0.018 9
15	11	7	-0.055 3	0.044 2	15	15	2	-0.052 3	0.024 9
15	11	8	-0.040 3	0.057 6	15	15	3	-0.053 6	0.030 5
15	11	9	-0.021 3	0.073 0	15	15	4	-0.053 3	0.036 0
15	11	10	0.002 9	0.090 9	15	15	5	-0.051 5	0.041 5
15	11	11	0.592 6	0.672 5	15	15	6	-0.048 4	0.047 2
15	12	1	-0.072 3	0.001 7	15	15	7	-0.043 8	0.053 1
15	12	2	-0.076 2	0.007 6	15	15	8	-0.037 5	0.059 4
15	12	3	-0.076 3	0.014 0	15	15	9	-0.029 0	0.066 1
15	12	4	-0.073 9	0.021 1	15	15	10	-0.017 8	0.073 5
15	12	5	-0.069 2	0.028 8	15	15	11	-0.002 8	0.081 8
15	12	6	-0.062 2	0.037 3	15	15	12	0.017 9	0.091 4
15	12	7	-0.052 8	0.046 8	15	15	13	0.048 3	0.103 2
15	12	8	-0.040 5	0.057 4	15	15	14	0.098 8	0.119 3
15	12	9	-0.024 8	0.069 5	15	15	15	0.273 6	0.153 2

表 17.2-18 简单线性无偏估计表 (威布尔分布)

n	r	s	$E(Z_{r:n})$	$nk_{r:n}$	$k_{r:n}$	n	r	s	$E(Z_{r:n})$	$nk_{r:n}$	$k_{r:n}$	
26	5	5	-1.668 7	4.211 8	0.759 2	50	5	5	-2.364 3	4.105 0	0.755 7	
	10	10	-0.798 9	10.092 1	0.900 0		10	10	-1.562 1	9.502 7	0.895 2	
	15	15	-0.216 4	17.029 2	0.939 8		15	15	-1.076 9	15.256 6	0.934 7	
	20	20	0.310 3	25.990 2	0.959 3		20	20	-0.710 5	21.455 3	0.953 1	
	25	24	1.013 0	37.302 2	0.967 5		25	25	-0.401 8	28.230 0	0.964 2	
	26	24	1.299 3	37.776 7	0.968 7		30	30	-0.121 6	35.787 8	0.971 5	
30	5	5	-1.823 7	4.181 0	0.761 2	55	35	35	0.150 3	44.489 7	0.976 3	
	10	10	-0.974 6	9.912 8	0.899 2		40	40	0.436 0	55.071 0	0.980 1	
	15	15	-0.425 3	16.444 5	0.938 2		45	45	0.779 4	69.532 6	0.982 6	
	20	20	0.036 4	24.280 0	0.957 1		50	50	0.779 4	71.236 1	0.983 6	
	25	25	0.512 3	34.778 4	0.967 9		55	5	5	-2.463 5	4.095 0	0.755 7
	30	27	0.744 4	41.758 9	0.972 9		10	10	-1.667 1	9.452 1	0.895 9	
35	5	5	-1.988 7	4.153 2	0.759 1	60	15	15	-1.188 9	15.121 4	0.934 1	
	10	10	-1.157 4	9.757 9	0.897 6		20	20	-0.831 2	21.170 7	0.952 4	
	15	15	-0.634 1	15.974 0	0.936 5		25	25	-0.533 8	27.695 0	0.963 6	
	20	20	-0.214 7	23.080 1	0.956 1		30	30	-0.269 1	34.834 7	0.971 0	
	25	25	0.174 5	31.640 0	0.966 6		35	35	-0.019 7	42.811 9	0.976 0	
	30	30	0.600 5	43.179 3	0.973 7		40	40	0.229 0	52.014 1	0.978 4	
40	35	32	0.815 2	50.730 8	0.977 2	60	45	45	0.495 7	63.231 2	0.982 3	
	5	5	-2.130 2	4.132 9	0.756 5		50	50	0.822 2	78.616 4	0.984 5	
	10	10	-1.311 5	9.648 1	0.896 4		55	50	0.822 2	80.263 2	0.985 4	
	15	15	-0.805 2	15.657 5	0.935 7		5	5	-2.553 8	4.086 7	0.753 5	
	20	20	-0.410 6	22.337 0	0.954 6		10	10	-1.762 1	9.410 7	0.894 5	
	25	25	-0.062 1	29.993 6	0.965 6		15	15	-1.289 5	15.012 7	0.934 3	
45	30	30	0.280 6	39.249 5	0.973 0	60	20	20	-0.938 5	20.945 9	0.952 6	
	35	35	0.671 2	51.792 3	0.977 6		25	25	-0.649 7	27.282 3	0.963 4	
	40	36	0.766 1	56.492 3	0.979 8		30	30	-0.395 9	34.123 3	0.970 6	
	5	5	-2.254 1	4.117 3	0.757 5		35	35	-0.161 5	41.018 3	0.975 7	
	10	10	-1.444 7	9.566 2	0.896 2		40	40	0.065 1	50.004 1	0.979 3	
	15	15	-0.950 5	15.429 2	0.935 0		45	45	0.295 8	59.694 3	0.982 1	
45	20	20	-0.572 3	21.827 7	0.953 9	60	50	50	0.547 4	71.532 3	0.984 3	
	25	25	-0.247 8	28.953 6	0.965 2		55	54	0.783 3	84.029 2	0.985 7	
	30	30	0.055 6	37.141 1	0.972 2		60	54	0.783 3	85.985 2	0.986 6	
	35	35	0.365 5	47.069 5	0.977 3							
	40	40	0.729 8	60.584 9	0.980 7							
	45	41	0.819 5	65.498 2	0.982 4							

表 17.2-19 最佳线性无偏估计和置信下限系数 (威布尔分布)

n	r	E(Z _{r:n})	g _{r:n}	B _{r:n}	V _{0.90,r}			V _{0.95,r}			V _{0.99,r}		
					0.60	0.90	0.95	0.60	0.90	0.95	0.60	0.90	0.95
2	1	-1.270 4											
	2	0.115 9	0.288 2	0.064 3									
3	1	-1.675 8											
	2	-0.459 4	0.181 6	0.468 2									
	3	0.403 6	0.655 3	-0.024 8	4.06	8.99	13.16	5.33	11.85	17.21	8.19	18.15	26.71
4	1	-1.963 5											
	2	-0.812 8	0.133 0	0.772 0									
	3	-0.106 1	0.607 8	0.118 0	3.96	9.03	13.07	5.30	12.17	17.55	8.38	19.38	27.97
	4	0.573 5	0.774 7	-0.034 7	3.45	6.47	8.39	4.51	8.40	10.88	6.91	12.79	16.62
5	1	-2.186 7											
	2	-1.070 9	0.105 0	1.011 6									
	3	-0.425 6	0.583 2	0.235 4	3.87	8.78	12.58	5.27	12.07	17.36	8.48	19.73	28.71
	4	0.106 9	0.746 2	0.038 6	3.44	6.49	8.48	4.56	8.56	11.14	7.09	13.31	17.41
	5	0.690 2	0.833 4	-0.034 0	3.20	5.48	6.73	4.17	7.06	8.68	6.39	10.75	13.23
6	1	-2.369 0											
	2	-1.275 0	0.086 7	-1.208 2									
	3	-0.662 7	0.567 9	0.333 2	3.74	8.24	11.74	5.15	11.53	16.66	8.39	19.28	28.02
	4	-0.188 4	0.730 3	0.102 0	3.41	6.33	8.18	4.55	8.47	10.95	7.16	13.49	17.54
	5	0.254 5	0.813 9	0.010 5	3.21	5.42	6.73	4.21	7.08	8.82	6.52	10.96	13.67
	6	0.777 3	0.868 0	-0.031 4	3.04	4.86	5.83	3.97	6.27	7.53	6.08	9.49	11.41
7	1	-2.523 1											
	2	-1.444 1	0.073 9	1.374 6									
	3	-0.852 5	0.557 4	0.416 7	3.60	7.80	11.12	5.04	11.20	16.07	8.37	19.27	27.76
	4	-0.409 7	0.719 8	0.157 0	3.33	6.16	7.89	4.49	8.39	10.80	7.14	13.53	17.47
	5	-0.022 4	0.822 4	0.050 4	3.15	5.36	6.68	4.18	7.12	8.84	6.51	11.20	13.91
	6	0.365 3	0.853 7	-0.001 5	3.01	4.86	5.82	3.96	6.33	7.61	6.14	9.75	11.74
	7	0.846 0	0.890 4	-0.028 6	2.90	4.46	5.25	3.79	5.76	6.73	5.82	8.75	10.20
8	1	-2.656 7											
	2	-1.588 4	0.064 4	1.518 6									
	3	-1.011 1	0.549 7	0.489 2	3.48	7.51	10.67	4.95	11.02	16.76	8.27	19.24	27.28
	4	-0.588 2	0.712 4	0.205 1	3.27	5.96	7.79	4.44	8.19	10.74	7.12	13.42	17.64
	5	-0.231 2	0.791 6	0.085 9	3.12	5.28	6.50	4.18	7.07	8.78	6.55	11.12	13.92
	6	0.102 9	0.845 0	0.026 0	3.02	4.83	5.83	3.99	6.35	7.67	6.17	9.82	11.87
	7	0.452 8	0.879 8	-0.007 2	2.93	4.49	5.31	3.83	5.83	6.91	5.90	8.92	10.52
	8	0.902 1	0.907 1	-0.026 1	2.83	4.21	4.90	3.71	5.44	6.29	5.09	8.27	9.52
9	1	-2.77 44											
	2	-1.714 4	0.057 0	1.645 3									
	3	-1.147 5	0.543 9	0.553 3	3.40	7.14	10.21	4.85	10.71	15.33	8.17	19.00	27.91
	4	-0.738 3	0.706 8	0.247 8	3.21	5.77	7.39	4.40	8.02	10.40	7.10	13.28	17.57
	5	-0.400 5	0.788 9	0.117 7	3.08	5.13	6.34	4.13	6.90	8.59	6.53	10.98	13.78
	6	-0.095 8	0.838 8	0.050 8	2.99	4.74	5.67	3.98	6.27	7.51	6.20	9.82	11.78
	7	0.202 7	0.872 9	0.012 8	2.91	4.48	5.28	3.85	5.86	6.91	5.95	9.06	10.66
	8	0.524 4	0.898 2	-0.010 0	2.84	4.26	4.95	3.73	5.53	6.39	5.74	8.44	9.75
	9	0.949 3	0.919 1	-0.023 9	2.78	4.04	4.66	3.63	5.32	6.00	5.59	7.90	9.04

续表 17.2-19

n	r	E(Z _{r,n})	g _{r,n}	B _{r,n}	V _{0.90,r}			V _{0.95,r}			V _{0.99,r}		
					0.60	0.90	0.95	0.60	0.90	0.95	0.60	0.90	0.95
10	1	-2.879 8											
	2	-1.826 2	0.051 1	1.758 5									
	3	-1.267 2	0.539 3	0.610 5	3.27	6.75	9.36	4.70	10.24	14.50	8.10	18.61	27.05
	4	-0.868 1	0.702 5	0.286 1	3.13	5.56	7.17	4.29	7.81	10.12	7.00	13.12	17.17
	5	-0.543 6	0.784 5	0.146 3	3.02	5.00	6.13	4.07	6.87	8.39	6.47	11.05	13.70
	6	-0.257 4	0.834 2	0.073 4	2.94	4.67	5.59	3.93	6.24	7.50	6.15	9.81	11.86
	7	0.012 0	0.867 9	0.031 3	2.88	4.41	5.18	3.80	5.79	6.83	5.92	8.99	10.66
	8	0.283 7	0.892 5	0.005 3	2.83	4.22	4.91	3.72	5.52	6.40	5.75	8.49	9.88
	9	0.584 6	0.911 9	-0.011 4	2.77	4.03	4.63	3.64	5.23	6.01	5.60	7.97	9.17
	10	0.989 9	0.928 4	-0.022 0	2.72	3.86	4.41	3.56	4.98	5.67	5.48	7.57	8.57
11	1	-2.975 1											
	2	-1.926 7	0.046 4	1.860 6									
	3	-1.373 9	0.535 5	0.662 2	3.17	6.41	9.11	4.59	9.89	14.11	7.98	18.19	26.45
	4	-0.982 5	0.699 0	0.320 8	3.06	5.46	7.04	4.24	7.71	10.03	6.96	13.02	17.25
	5	-0.667 8	0.781 0	0.172 2	2.98	4.90	6.07	4.03	6.72	8.34	6.44	10.99	13.66
	6	-0.394 6	0.830 6	0.094 1	2.91	4.58	5.52	3.90	6.16	7.42	6.13	9.79	11.86
	7	-0.143 2	0.864 1	0.048 2	2.86	4.36	4.16	3.79	5.79	6.83	5.92	9.03	10.72
	8	0.100 7	0.888 3	0.019 5	2.80	4.15	4.87	3.70	5.46	6.38	5.74	8.43	9.86
	9	0.352 3	0.907 1	0.000 6	2.76	4.01	4.63	3.63	5.23	6.04	5.61	8.02	9.24
	10	0.636 2	0.922 3	-0.012 0	2.71	3.87	4.44	3.56	5.03	5.75	5.49	7.67	8.73
	11	1.025 2	0.935 8	-0.020 3	2.67	3.76	4.26	3.50	4.85	5.49	5.38	7.36	8.31
12	1	-3.062 1											
	2	-2.018 0	0.042 5	1.953 6									
	3	-1.470 3	0.532 4	0.709 4	3.08	6.00	8.40	4.50	9.41	13.40	7.88	17.59	25.73
	4	-1.084 9	0.696 1	0.352 4	3.00	5.17	6.60	4.18	7.42	9.56	6.87	12.72	16.60
	5	-0.777 7	0.778 2	0.196 0	2.93	4.72	5.79	3.99	6.54	8.08	6.41	10.68	13.37
	6	-0.514 0	0.827 7	0.113 0	2.88	4.41	5.31	3.86	5.97	7.22	6.12	9.61	11.60
	7	-0.275 2	0.861 0	0.063 9	2.82	4.21	4.98	3.76	5.63	6.66	5.89	8.85	10.55
	8	-0.048 9	0.885 1	0.032 7	2.78	4.06	4.75	3.68	5.36	6.27	5.73	8.34	9.75
	9	0.175 6	0.903 5	0.011 9	2.74	3.94	4.53	3.62	5.16	5.95	5.60	7.98	9.18
	10	0.411 2	0.918 2	-0.002 3	2.70	3.87	4.37	3.55	4.99	5.67	5.50	7.66	8.68
	11	0.681 2	0.930 6	-0.012 1	2.67	3.72	4.23	3.51	4.84	5.47	5.41	7.37	8.31
	12	1.056 5	0.941 8	-0.018 9	2.63	3.62	4.07	3.46	4.68	5.26	5.32	7.09	7.96
13	1	-3.142 2											
	2	-2.101 6	0.039 1	2.039 0									
	3	-1.558 1	0.529 9	0.752 7	3.04	5.88	8.16	4.47	9.23	13.11	7.89	17.58	25.37
	4	-1.177 6	0.693 7	0.381 5	2.98	5.10	6.45	4.18	7.38	9.47	6.94	12.81	16.56
	5	-0.876 3	0.775 9	0.217 9	2.92	4.71	5.75	3.98	6.57	8.04	6.43	10.89	13.47
	6	-0.619 9	0.825 4	0.130 5	2.86	4.43	5.30	3.86	6.03	7.24	6.14	9.71	11.72
	7	-0.390 4	0.858 6	0.078 4	2.82	4.23	4.96	3.75	5.65	6.68	5.92	8.97	10.61
	8	-0.176 4	0.882 5	0.044 9	2.78	4.06	4.73	3.69	5.40	6.29	5.75	8.46	9.88
	9	0.030 8	0.900 7	0.022 5	2.75	3.94	4.55	3.63	5.17	6.00	5.64	8.02	9.27
	10	0.239 9	0.915 2	0.006 9	2.72	3.83	4.37	3.58	5.01	5.70	5.54	7.72	8.80
	11	0.462 6	0.927 1	-0.004 2	2.69	3.74	4.23	3.53	4.87	5.50	5.44	7.46	8.42
	12	0.720 9	0.936 3	-0.012 1	2.65	3.65	4.09	3.48	4.73	5.30	5.37	7.21	8.03
	13	1.084 5	0.946 8	-0.017 6	2.62	3.57	3.97	3.43	4.61	5.12	5.28	6.99	7.75

续表 17.2-19

n	r	E(Z _{r,n})	h _{r,n}	B _{r,n}	V _{0.90,r}			V _{0.95,r}			V _{0.99,r}		
					0.60	0.90	0.95	0.60	0.90	0.95	0.60	0.90	0.95
14	1	-3.215 3											
	2	-2.178 8	0.036 3	2.117 9									
	3	-1.638 7	0.527 7	0.792 7	2.95	5.56	7.63	4.36	8.84	12.73	7.76	17.23	25.09
	4	-1.262 6	0.691 7	0.408 4	2.92	4.93	6.17	4.09	7.18	9.10	6.83	12.48	16.19
	5	-0.965 9	0.773 9	0.238 2	2.86	4.58	5.54	3.93	6.38	7.82	6.38	10.64	13.22
	6	-0.715 2	0.823 7	0.146 7	2.82	4.33	5.12	3.81	5.91	7.07	6.07	9.59	11.55
	7	0.492 8	0.856 5	0.091 8	2.78	4.15	4.82	3.72	5.58	6.53	5.86	8.88	10.47
	8	-0.287 9	0.880 4	0.056 4	2.74	4.03	4.61	3.66	5.35	6.16	5.72	8.40	9.71
	9	-0.092 8	0.898 5	0.032 4	2.71	3.90	4.45	3.59	5.14	5.88	5.59	8.00	9.17
	10	0.099 4	0.912 8	0.015 6	2.70	3.78	4.30	3.56	4.98	5.65	5.52	7.71	8.72
	11	0.296 1	0.924 4	0.003 4	2.67	3.71	4.20	3.51	4.86	5.48	5.44	7.46	8.42
	12	0.508 0	0.934 3	-0.005 4	2.65	3.64	4.09	3.47	4.73	5.31	5.36	7.25	8.11
	13	0.756 4	0.942 9	-0.011 9	2.62	3.55	3.98	3.44	4.61	5.14	5.30	7.03	7.82
	14	1.109 7	0.951 1	-0.016 5	2.60	3.46	3.85	3.41	4.48	4.97	5.24	6.81	7.49
15	1	-3.285 3											
	2	-2.250 4	0.033 8	2.191 2									
	3	-1.713 3	0.525 8	0.829 9	2.91	5.39	7.23	4.35	8.75	12.22	7.82	17.15	24.54
	4	-1.340 4	0.689 9	0.433 4	2.89	4.78	5.95	4.07	7.00	8.90	6.82	12.41	15.96
	5	-1.047 8	0.772 2	0.257 0	2.85	4.43	5.36	3.92	6.25	7.64	6.36	10.56	12.94
	6	-0.801 9	0.821 7	0.161 8	2.81	4.22	4.97	3.80	5.79	6.91	6.09	9.45	11.38
	7	-0.585 2	0.854 8	0.104 4	2.78	4.08	4.72	3.73	5.50	6.41	5.90	8.81	10.31
	8	-0.387 3	0.878 6	0.067 1	2.74	3.95	4.57	3.66	5.29	6.10	5.73	8.36	9.64
	9	-0.201 0	0.896 6	0.041 7	2.72	3.85	4.40	3.60	5.11	5.81	5.62	8.00	9.11
	10	-0.020 6	0.910 6	0.023 7	2.69	3.76	4.26	3.56	4.96	5.61	5.54	7.71	8.72
	11	0.159 5	0.922 3	0.010 7	2.67	3.69	4.15	3.52	4.84	5.43	5.46	7.48	8.37
	12	0.345 8	0.931 9	0.001 0	2.64	3.62	4.08	3.48	4.73	5.31	5.39	7.29	8.17
	13	0.548 5	0.940 2	-0.006 2	2.63	3.55	3.98	3.45	4.63	5.17	5.33	7.09	7.89
	14	0.788 4	0.947 6	-0.011 6	2.60	3.49	3.89	3.41	4.53	5.02	5.26	6.92	7.63
	15	1.132 7	0.954 7	-0.015 6	2.58	3.41	3.77	3.39	4.43	4.88	5.21	6.70	7.37

表 17.2-20 R(t)的 90% 下置信限(威布尔分布)

R̂(t)	n											
	8	10	12	15	18	20	25	30	40	50	75	100
0.50	0.316	0.336	0.348	0.365	0.378	0.385	0.396	0.404	0.418	0.426	0.438	0.447
0.52	0.332	0.352	0.365	0.382	0.396	0.403	0.415	0.423	0.437	0.445	0.457	0.467
0.54	0.348	0.369	0.382	0.400	0.414	0.421	0.433	0.442	0.456	0.464	0.477	0.486
0.56	0.364	0.385	0.399	0.418	0.432	0.439	0.452	0.461	0.476	0.484	0.497	0.506
0.58	0.380	0.401	0.417	0.436	0.450	0.457	0.471	0.481	0.486	0.504	0.517	0.526
0.60	0.397	0.419	0.435	0.455	0.469	0.477	0.490	0.500	0.515	0.524	0.537	0.546
0.62	0.414	0.437	0.453	0.473	0.488	0.496	0.510	0.520	0.535	0.544	0.557	0.567
0.64	0.432	0.455	0.472	0.492	0.507	0.516	0.529	0.540	0.555	0.564	0.577	0.587
0.66	0.450	0.474	0.491	0.512	0.526	0.535	0.549	0.560	0.575	0.584	0.598	0.607
0.68	0.468	0.493	0.511	0.532	0.546	0.555	0.569	0.580	0.596	0.605	0.618	0.628
0.70	0.486	0.512	0.530	0.552	0.566	0.575	0.589	0.601	0.616	0.626	0.639	0.649
0.72	0.504	0.532	0.550	0.573	0.586	0.596	0.610	0.622	0.637	0.646	0.660	0.670

续表 17.2-20

$\hat{R}(t)$	"											
	8	10	12	15	18	20	25	30	40	50	75	100
0.74	0.524	0.552	0.571	0.593	0.607	0.617	0.631	0.643	0.658	0.668	0.681	0.691
0.76	0.544	0.573	0.592	0.615	0.628	0.638	0.653	0.665	0.680	0.690	0.702	0.712
0.78	0.566	0.595	0.613	0.637	0.651	0.660	0.675	0.687	0.702	0.711	0.724	0.734
0.80	0.588	0.618	0.635	0.660	0.674	0.683	0.698	0.709	0.724	0.733	0.746	0.755
0.82	0.611	0.641	0.659	0.683	0.697	0.706	0.721	0.732	0.746	0.756	0.768	0.777
0.84	0.636	0.666	0.683	0.707	0.722	0.730	0.745	0.755	0.769	0.778	0.790	0.799
0.86	0.662	0.692	0.709	0.732	0.747	0.755	0.769	0.780	0.793	0.802	0.813	0.821
0.88	0.689	0.719	0.736	0.759	0.773	0.781	0.795	0.805	0.818	0.825	0.837	0.844
0.90	0.719	0.748	0.765	0.787	0.800	0.808	0.821	0.831	0.843	0.851	0.861	0.868
0.92	0.751	0.780	0.796	0.817	0.829	0.837	0.849	0.859	0.869	0.876	0.885	0.892
0.94	0.787	0.815	0.831	0.849	0.861	0.867	0.879	0.887	0.897	0.903	0.911	0.916
0.96	0.829	0.855	0.870	0.887	0.896	0.901	0.911	0.918	0.926	0.931	0.937	0.942
0.98	0.885	0.906	0.917	0.930	0.937	0.941	0.948	0.953	0.959	0.962	0.966	0.969

表 17.2-21 $R(t)$ 的 95% 下置信限 (威布尔分布)

$\hat{R}(t)$	"											
	8	10	12	15	18	20	25	30	40	50	75	100
0.50			0.308	0.329	0.343	0.353	0.366	0.379	0.394	0.404	0.420	0.432
0.52		0.308	0.325	0.346	0.361	0.371	0.384	0.398	0.413	0.423	0.439	0.452
0.54	0.300	0.323	0.341	0.363	0.378	0.389	0.402	0.416	0.432	0.442	0.459	0.471
0.56	0.316	0.339	0.358	0.381	0.396	0.407	0.421	0.435	0.451	0.461	0.478	0.491
0.58	0.331	0.355	0.376	0.398	0.414	0.425	0.440	0.454	0.471	0.481	0.498	0.510
0.60	0.347	0.372	0.393	0.416	0.432	0.443	0.459	0.473	0.490	0.500	0.517	0.530
0.62	0.363	0.389	0.411	0.434	0.450	0.462	0.478	0.493	0.510	0.519	0.537	0.551
0.64	0.380	0.406	0.428	0.452	0.469	0.480	0.497	0.512	0.530	0.539	0.558	0.571
0.66	0.396	0.424	0.445	0.471	0.488	0.499	0.517	0.532	0.550	0.559	0.579	0.592
0.68	0.414	0.443	0.464	0.490	0.507	0.519	0.536	0.552	0.570	0.580	0.599	0.612
0.70	0.432	0.461	0.483	0.510	0.527	0.538	0.557	0.573	0.591	0.601	0.620	0.633
0.72	0.450	0.481	0.502	0.530	0.547	0.559	0.577	0.594	0.612	0.622	0.642	0.654
0.74	0.469	0.500	0.523	0.550	0.568	0.580	0.598	0.616	0.633	0.644	0.663	0.675
0.76	0.489	0.520	0.544	0.572	0.590	0.602	0.620	0.638	0.654	0.666	0.684	0.697
0.78	0.509	0.542	0.567	0.594	0.612	0.625	0.643	0.661	0.676	0.688	0.707	0.719
0.80	0.529	0.564	0.590	0.617	0.636	0.648	0.666	0.683	0.700	0.711	0.729	0.741
0.82	0.552	0.587	0.614	0.641	0.660	0.672	0.689	0.706	0.724	0.734	0.752	0.763
0.84	0.576	0.611	0.638	0.667	0.685	0.697	0.714	0.730	0.748	0.758	0.775	0.786
0.86	0.602	0.638	0.664	0.693	0.710	0.723	0.740	0.755	0.772	0.783	0.799	0.809
0.88	0.629	0.666	0.692	0.721	0.737	0.750	0.767	0.781	0.798	0.808	0.823	0.833
0.90	0.661	0.696	0.722	0.751	0.766	0.780	0.795	0.809	0.824	0.834	0.848	0.857
0.92	0.695	0.729	0.755	0.782	0.798	0.811	0.825	0.838	0.853	0.862	0.874	0.882
0.94	0.735	0.767	0.792	0.817	0.832	0.845	0.858	0.869	0.882	0.890	0.901	0.908
0.96	0.782	0.812	0.835	0.857	0.872	0.882	0.893	0.903	0.915	0.921	0.930	0.935
0.98	0.844	0.869	0.890	0.907	0.918	0.926	0.935	0.943	0.950	0.955	0.962	0.965

表 17.2-22 $R(t)$ 的 90% 下置信限 (威布尔分布)

$\hat{R}(t)$	$\frac{r}{n} = 0.75$					$\frac{r}{n} = 0.50$				
	n40	60	80	100	120	40	60	80	100	120
0.70	0.623	0.638	0.641	0.650	0.654	0.616	0.639	0.644	0.652	0.655
0.72	0.641	0.657	0.661	0.669	0.673	0.635	0.658	0.663	0.672	0.674
0.74	0.659	0.676	0.681	0.690	0.693	0.653	0.677	0.683	0.691	0.694
0.76	0.678	0.696	0.702	0.710	0.713	0.674	0.696	0.703	0.711	0.714
0.78	0.698	0.716	0.723	0.731	0.734	0.694	0.716	0.723	0.732	0.734
0.80	0.718	0.737	0.744	0.752	0.755	0.715	0.736	0.744	0.752	0.755
0.82	0.739	0.758	0.766	0.774	0.776	0.737	0.757	0.765	0.773	0.776
0.84	0.761	0.780	0.789	0.796	0.798	0.759	0.779	0.787	0.795	0.797
0.86	0.783	0.802	0.810	0.818	0.821	0.783	0.801	0.810	0.817	0.819
0.88	0.807	0.826	0.833	0.841	0.843	0.807	0.824	0.832	0.839	0.842
0.90	0.832	0.850	0.857	0.864	0.866	0.832	0.847	0.855	0.862	0.864
0.92	0.858	0.875	0.882	0.888	0.890	0.858	0.872	0.879	0.886	0.888
0.94	0.886	0.901	0.907	0.913	0.914	0.886	0.898	0.904	0.910	0.912
0.95	0.901	0.915	0.920	0.925	0.927	0.901	0.911	0.917	0.922	0.924
0.96	0.917	0.929	0.934	0.939	0.940	0.917	0.925	0.930	0.935	0.937
0.97	0.938	0.943	0.947	0.952	0.953	0.933	0.940	0.944	0.949	0.951
0.98	0.951	0.959	0.963	0.966	0.967	0.951	0.956	0.959	0.964	0.965
0.99	0.971	0.976	0.979	0.981	0.982	0.971	0.974	0.977	0.979	0.980
0.992 5	0.977	0.981	0.984	0.986	0.986	0.977	0.979	0.982	0.984	0.985
0.995	0.983	0.987	0.989	0.990	0.990	0.983	0.985	0.987	0.988	0.989
0.996	0.986	0.989	0.990	0.992	0.992	0.986	0.987	0.989	0.990	0.991
0.997	0.989	0.992	0.993	0.994	0.994	0.989	0.989	0.991	0.992	0.993
0.998	0.992	0.994	0.995	0.995	0.996	0.992	0.992	0.994	0.995	0.995
0.998 5	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
0.999	0.994	0.996	0.997	0.998	0.998	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997

表 17.2-23 $R(t)$ 的 95% 下置信限 (威布尔分布)

$\hat{R}(t)$	$\frac{r}{n} = 0.75$					$\frac{r}{n} = 0.50$				
	n40	60	80	100	120	40	60	80	100	120
0.70	0.594	0.626	0.624	0.625	0.643	0.600	0.623	0.628	0.639	0.646
0.72	0.613	0.644	0.643	0.647	0.662	0.614	0.641	0.647	0.659	0.664
0.74	0.632	0.662	0.664	0.669	0.681	0.632	0.660	0.667	0.678	0.683
0.76	0.651	0.680	0.684	0.691	0.701	0.651	0.679	0.686	0.698	0.702
0.78	0.671	0.699	0.705	0.713	0.722	0.671	0.699	0.707	0.719	0.722
0.80	0.692	0.719	0.726	0.736	0.743	0.691	0.719	0.727	0.741	0.742
0.82	0.714	0.740	0.748	0.759	0.764	0.712	0.740	0.749	0.761	0.762
0.84	0.737	0.761	0.771	0.782	0.786	0.734	0.761	0.771	0.782	0.784
0.86	0.760	0.784	0.795	0.806	0.809	0.757	0.784	0.793	0.805	0.806
0.88	0.785	0.808	0.819	0.830	0.832	0.781	0.807	0.817	0.827	0.829
0.90	0.811	0.833	0.844	0.854	0.856	0.807	0.831	0.841	0.851	0.852
0.92	0.839	0.860	0.870	0.879	0.881	0.834	0.857	0.866	0.876	0.877
0.94	0.869	0.888	0.897	0.904	0.906	0.863	0.883	0.892	0.902	0.903
0.95	0.885	0.903	0.911	0.917	0.920	0.878	0.879	0.906	0.915	0.917

续表 17.2-23

$\hat{R}(t)$	$\frac{r}{n} = 0.75$					$\frac{r}{n} = 0.50$				
	n40	60	80	100	120	40	60	80	100	120
0.96	0.902	0.919	0.926	0.932	0.933	0.894	0.913	0.920	0.929	0.931
0.97	0.920	0.935	0.941	0.946	0.948	0.913	0.929	0.936	0.946	0.947
0.98	0.940	0.953	0.957	0.962	0.963	0.933	0.947	0.952	0.960	0.951
0.99	0.964	0.972	0.976	0.978	0.979	0.957	0.968	0.971	0.975	0.977
0.992 5	0.970	0.978	0.981	0.983	0.984	0.965	0.974	0.977	0.980	0.981
0.995	0.978	0.984	0.986	0.988	0.988	0.973	0.980	0.983	0.985	0.986
0.996	0.981	0.986	0.988	0.990	0.990	0.976	0.983	0.985	0.988	0.989
0.997	0.985	0.989	0.991	0.992	0.992	0.980	0.986	0.988	0.990	0.991
0.998	0.988	0.992	0.993	0.994	0.995	0.985	0.990	0.992	0.993	0.994
0.998 5	0.991	0.994	0.995	0.996	0.996	0.987	0.992	0.993	0.994	0.995
0.999	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.990	0.994	0.995	0.996	0.996

表 17.2-24 $R(t)$ 的 99% 下置信限 (威布尔分布)

$\hat{R}(t)$	$\frac{r}{n} = 0.75$					$\frac{r}{n} = 0.50$				
	n40	60	80	100	120	40	60	80	100	120
0.70	0.555	0.585	0.601	0.618	0.623	0.566	0.590	0.609	0.613	0.615
0.72	0.574	0.603	0.620	0.636	0.641	0.582	0.607	0.626	0.633	0.636
0.74	0.592	0.622	0.638	0.655	0.661	0.599	0.624	0.643	0.652	0.656
0.76	0.612	0.642	0.658	0.674	0.680	0.617	0.643	0.661	0.672	0.677
0.78	0.632	0.662	0.678	0.694	0.701	0.636	0.662	0.679	0.693	0.698
0.80	0.652	0.684	0.699	0.715	0.721	0.655	0.681	0.698	0.714	0.720
0.82	0.674	0.705	0.720	0.736	0.743	0.675	0.702	0.718	0.735	0.742
0.84	0.697	0.728	0.743	0.759	0.765	0.696	0.723	0.739	0.758	0.765
0.86	0.722	0.752	0.766	0.782	0.788	0.718	0.746	0.761	0.780	0.788
0.88	0.747	0.777	0.791	0.806	0.812	0.742	0.770	0.784	0.804	0.812
0.90	0.775	0.804	0.816	0.831	0.837	0.768	0.796	0.809	0.829	0.836
0.92	0.805	0.832	0.844	0.858	0.863	0.795	0.823	0.836	0.854	0.861
0.94	0.838	0.863	0.873	0.886	0.890	0.826	0.853	0.865	0.881	0.886
0.95	0.855	0.879	0.889	0.901	0.905	0.843	0.869	0.881	0.895	0.899
0.96	0.874	0.896	0.906	0.916	0.920	0.861	0.886	0.897	0.910	0.914
0.97	0.895	0.915	0.923	0.933	0.936	0.881	0.905	0.915	0.927	0.934
0.98	0.918	0.936	0.943	0.951	0.954	0.904	0.926	0.935	0.945	0.949
0.99	0.947	0.960	0.966	0.971	0.973	0.931	0.953	0.959	0.965	0.967
0.992 5	0.956	0.968	0.973	0.977	0.978	0.943	0.960	0.966	0.971	0.974
0.995	0.966	0.975	0.980	0.984	0.984	0.954	0.969	0.977	0.978	0.982
0.996	0.970	0.979	0.983	0.986	0.987	0.959	0.973	0.978	0.981	0.985
0.997	0.975	0.983	0.986	0.989	0.989	0.966	0.977	0.982	0.985	0.988
0.998	0.981	0.987	0.990	0.992	0.992	0.974	0.982	0.986	0.988	0.991
0.998 5	0.984	0.990	0.982	0.993	0.994	0.978	0.975	0.988	0.991	0.993
0.999	0.987	0.992	0.994	0.995	0.996	0.983	0.988	0.991	0.993	0.994

例 10 某金属材料的疲劳寿命服从威布尔分布, 15 个试件的疲劳寿命分别为 28 300、35 800、42 200、47 500、51 200、57 600、65 000、66 800、73 600、81 000、88 000、98 200、105 000、115 500、144 500 次。估计分布参数、 $N=4 \times 10^4$ 次的可靠度及 $R=0.90$ 的可靠寿命。

解 用矩法估计分布参数。按式 (17.2-45) 一式 (17.2-47) 求样本均值、样本标准差和样本形态系数

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \\ &= \frac{1}{15} (28\,300 + 35\,800 + \cdots + 144\,500) \\ &= 73\,346.67 \text{ 次}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s_N &= \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left\{ \frac{1}{15-1} \left[(28\,300 - 73\,346.67)^2 + (35\,800 - 73\,346.67)^2 + \cdots + (144\,500 - 73\,346.67)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= 32\,360.42 \text{ 次}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k_k &= \frac{n}{(n-1)(n-2)s_N^3} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^3 \\ &= \frac{15}{14 \times 13 \times 32\,360.42^3} \left[(28\,300 - 73\,346.67)^3 + (35\,800 - 73\,346.67)^3 + \cdots + (144\,500 - 73\,346.67)^3 \right] = 0.603\,46\end{aligned}$$

按 k_k 由表 17.2-16 查得 $\hat{k} = 2.04$, $k_b = 0.454\,4$, $k_a = 0.886$ 。按式 (17.2-48), 尺度参数 b 的点估计

$$\hat{b} = \frac{s_N}{k_b} = \frac{32\,360.42}{0.454\,4} = 71\,215.71 \text{ 次}$$

按式 (17.2-49), 位置参数

$$\begin{aligned}\hat{a} &= \bar{N} - \hat{b}k_a = 73\,346.67 - 71\,215.71 \times 0.886 \\ &= 10\,249.55 \text{ 次}\end{aligned}$$

因 $10\,249.55 < N_1 = 28\,300$, 故位置参数 a 的点估计

$$\hat{a} = 10\,249.55 \text{ 次}$$

按式 (17.2-61), $N=4 \times 10^4$ 时可靠度的点估计

$$\hat{R}(4 \times 10^4) = e^{-\frac{10^4 - 10\,249.55}{71\,215.71} \cdot 2.04} = 0.844\,9$$

按式 (17.2-62), $R=0.90$ 时可靠寿命的点估计

$$\begin{aligned}\hat{N}(0.90) &= \hat{a} + \hat{b} \left(\ln \frac{1}{R} \right)^{\frac{1}{\hat{k}}} \\ &= 10\,249.55 + 71\,215.71 \left(\ln \frac{1}{0.90} \right)^{\frac{1}{2.04}} \\ &= 33\,881.32 \text{ 次}\end{aligned}$$

例 11 某产品寿命服从两参数威布尔分布, 抽取 30 件做寿命试验, 当失效 15 件停止试验, 失效时间分别为 1 230、2 100、2 750、3 300、3 800、4 250、4 750、5 300、5 600、6 000、6 600、7 000、7 600、7 950、8 400 h; 求 $R=0.90$ 的可靠寿命点估计。

解 首先估计分布参数。因样本大小 $n > 26$, 故用简单线性无偏估计法。将失效时间取对数, 并由小到大为 7.115、7.650、7.919、8.102、8.243、8.355、8.466、8.575、8.631、8.700、8.795、8.854、8.936、8.981、9.036; 按式 (17.2-57)、式 (17.2-58), 式中系数查表 17.2-18, $n=30$, $r=15$, 则 $s=15$, $E(Z_{r,n}) = -0.425\,3$, $nk_{r,n} = 16.444\,5$, 故

$$\begin{aligned}\hat{\sigma} &= \frac{1}{nk_{r,n}} \left[(2s-r)x_{r,n} - \sum_{j=1}^r x_j + \sum_{j=r+1}^n x_j \right] \\ &= \frac{1}{16.444\,5} \left[(2 \times 15 - 15) \times 9.036 - (7.115 + 7.650 + \cdots + 9.036) + 0 \right] = 0.558\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= x_{r,n} - E(Z_{r,n})\hat{\sigma} \\ &= 9.036 + 0.425\,3 \times 0.558 = 9.273\end{aligned}$$

按式 (17.2-59)、(17.2-60), 式中 $g_{r,n}$ 查表 17.2-18 得 $g_{r,n} = 0.938\,2$, 故

$$\hat{k} = \frac{g_{r,n}}{\hat{\sigma}} = \frac{0.938\,2}{0.558} = 1.68$$

$$\hat{b} = e^{\hat{\mu}} = e^{9.273} = 10\,646.64 \text{ h}$$

按式 (17.2-62), 式中 $\hat{a} = 0$, 故 $R=0.90$ 时可靠寿命的点估计

$$\begin{aligned}\hat{t}(0.90) &= \hat{b} \left(\ln \frac{1}{R} \right)^{\frac{1}{\hat{k}}} \\ &= 10\,646.64 \left(\ln \frac{1}{0.90} \right)^{\frac{1}{1.68}} = 2\,789.16 \text{ h}\end{aligned}$$

第 3 章 概率机械设计

概率机械设计（即通常所说的机械可靠性设计）是机械可靠性设计的重要组成部分，是应用概率统计理论与传统机械设计理论相结合进行机械零件或构件设计的一种先进的设计方法。它使设计更符合实际，并且定量地给出机械零件或构件不失效的可靠性指标——可靠度。

概率机械设计的基础是可靠的统计试验数据，需要知道有关设计变量的概率分布。对于一般的机械设计可选用有关参考资料中的统计数据，采用本章推荐的近似处理方法。

1 应力-强度模型求可靠度的方法

1.1 应力-强度模型

图 17.3-1 为应力和强度的干涉情况。图中横坐标表示应力或强度，纵坐标表示应力或强度的概率密度。 $f_1(x_1)$ 表示应力概率密度， $f_s(x_s)$ 表示强度概率密度。由于应力和强度量纲相同，所以为说明问题方便，将其绘在同一坐标中。图中斜线部分为应力和强度发生干涉的区域，表示强度可能小于应力。根据干涉情况计算可靠度的模型称为应力-强度干涉模型，简称应力-强度模型。

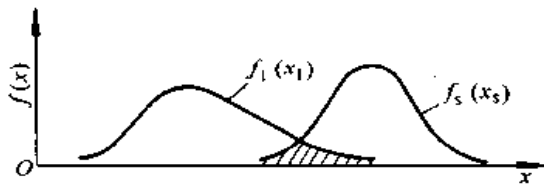


图 17.3-1 应力和强度干涉情况

应力-强度模型认为强度 x_s 大于应力 x_1 就不会发生失效，可靠度即为零件不发生失效的概率，故可靠度

$$R = P(x_s > x_1) = P(x_s - x_1 > 0) = P\left(\frac{x_s}{x_1} > 1\right) \quad (17.3-1)$$

式中，应力 x_1 和强度 x_s 均应理解为随机变量。顺便指出，为了方便，下面将随机变量和它的取

值在可按内容判断不致误解时均用同一个符号。

1.2 应力-强度模型求可靠度的一般公式

根据应力分布函数和强度分布函数计算方便与否可选择下面二式之一计算可靠度。

$$\begin{aligned} R &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{x_1} f_1(x_1) dx_1 \right] f_s(x_s) dx_s \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} F_1(x) f_s(x) dx \end{aligned} \quad (17.3-2)$$

$$\begin{aligned} R &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{x_1}^{\infty} f_s(x_s) dx_s \right] f_1(x_1) dx_1 \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} F_s(x) f_1(x) dx \end{aligned} \quad (17.3-3)$$

式中 $F_1(x)$ ——应力分布函数；

$F_s(x)$ ——强度分布函数。

几种典型的应力、强度分布，按式(17.3-2)或式(17.3-3)得到的可靠度计算的结论式列于表 17.3-1 中。

例 1 某静定梁受最大弯矩 M 服从指数分布，最大弯矩均值 $\bar{M} = 8\,000$ Nm。临界极限弯矩 M_F 服从正态分布，均值 $\bar{M}_F = 20\,000$ Nm，标准差 $s_{MF} = 2\,000$ Nm。求梁不失效的可靠度。

解 假设梁的最大弯矩大于梁的临界极限弯矩时梁发生失效，故梁不失效的判据为 $M < M_F$ 。

按表 17.3-1 中序号 5，其中 $\lambda_1 = \frac{1}{\bar{M}} = \frac{1}{8\,000}$ $1/\text{Nm}$ ， $\bar{x}_s = \bar{M}_F = 20\,000$ Nm， $s_s = s_{MF} = 2\,000$ Nm，代入得

$$\begin{aligned} R &= 1 - e^{-\frac{1}{2}(2\bar{x}_s\lambda_1 - \lambda_1^2 s_s^2)} \\ &= 1 - e^{-\frac{1}{2}\left(2 \times 20\,000 \times \frac{1}{8\,000} - \frac{2\,000^2}{8\,000^2}\right)} = 0.915\,3 \end{aligned}$$

例 2 某钢制拉杆，承受的工作应力 $x_1 = \sigma_1 \sim N(400, 40^2)$ MPa，屈服强度 $x_s = \sigma_s \sim N(510, 36^2)$ MPa，求不发生屈服失效的可靠度。

解 按表 17.3-1 中序号 1 知

$$Z_R = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{(s_2^2 + s_1^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{510 - 400}{(36^2 + 40^2)^{\frac{1}{2}}} = 2.044$$

查表 17.1-3 得可靠度

$$R = \Phi(Z_R) = \Phi(2.044) = 0.97952$$

表 17.3-1 几种典型应力、强度分布求可靠度的公式

序号	应力	强度	可靠度公式
1	正态 $N(\bar{x}_1, s_1^2)$	正态 $N(\bar{x}_2, s_2^2)$	$R = 1 - \Phi(Z_R) = \Phi(Z_R)$ $Z_R = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{(s_2^2 + s_1^2)^{\frac{1}{2}}}$ Z_R 称为联结系数
2	对数正态 $\ln(\mu_1, \sigma_1^2)$	对数正态 $\ln(\mu_2, \sigma_2^2)$	$R = 1 - \Phi(Z_R) = \Phi(Z_R)$ $Z_R = \frac{\mu_2 - \mu_1}{(\sigma_2^2 + \sigma_1^2)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{\ln \bar{x}_2 - \ln \bar{x}_1}{(V_{x_2}^2 + V_{x_1}^2)^{\frac{1}{2}}}$
3	指数 $e(\lambda_1)$	指数 $e(\lambda_2)$	$R = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$
4	正态 $N(\bar{x}_1, s_1^2)$	指数 $e(\lambda_2)$	$R \approx e^{-\frac{1}{2}(2\bar{x}_1)^2 - \lambda_2^2 s_1^2}$
5	指数 $e(\lambda_1)$	正态 $N(\bar{x}_2, s_2^2)$	$R \approx 1 - e^{-\frac{1}{2}(2\bar{x}_2 - \lambda_1)^2 - s_2^2}$
6	指数 $e(\lambda_1)$	Γ $\Gamma(\alpha, \beta_2)$	$R = 1 - \left(\frac{\beta_2}{\beta_2 + \lambda_1}\right)^\alpha$
7	Γ $\Gamma(\alpha_1, \beta_1)$	指数 $e(\lambda_2)$	$R = \left(\frac{\beta_1}{\beta_1 + \lambda_2}\right)^{\alpha_1}$
8	Γ $\Gamma(\alpha_1, \beta_1)$	正态 $N(\bar{x}_2, s_2^2)$	$R = 1 - (1 + \bar{x}_2 \beta_1 - s_2^2 \beta_1^2) e^{\frac{1}{2}(\bar{x}_2^2 \beta_1^2 - 2\bar{x}_2 \beta_1)}$
9	瑞利 $R(\mu_1)$	正态 $N(\bar{x}_2, s_2^2)$	$R = 1 - \frac{\mu_1}{(\mu_1^2 + s_2^2)^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{x}_2^2}{\mu_1^2 + s_2^2}\right)}$

注：Φ(·)为标准正态分布函数，查表 17.1-3。

1.3 数值积分法求可靠度

有些应力和强度的分布用式 (17.3-2) 或 (17.3-3) 难以积分，没有像表 17.3-1 中给出的结论式可用。这时可用数值积分进行计算，例如用辛普生公式或高斯公式等。这些数值积分都有现成的源程序，使用时可查阅。

由于常用分布的变量取值为 0~∞ 或 -∞~∞，故在进行数值积分时应取使被积函数的值接近于零的积分限，以使积分的模型误差尽量小。

例 3 某构件应力服从正态分布， $\bar{x}_1 = 100$

MPa， $s_1 = 10$ MPa；强度服从威布尔分布， $k = 3$ ， $a = 50$ MPa， $b = 200$ MPa。求可靠度。

解 威布尔分布的分布函数

$$F_s(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^k} = 1 - e^{-\left(\frac{x-50}{200}\right)^3}, \quad x \geq 50$$

将上式代入式 (17.3-3) 中得

$$\begin{aligned} R &= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} F_s(x) f_1(x) dx \\ &= 1 - \int_{50}^{\infty} [1 - e^{-\left(\frac{x-50}{200}\right)^3}] \cdot \frac{1}{10\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-100)^2}{2 \cdot 10^2}} dx \\ &= \Phi\left(\frac{50-100}{10}\right) + \int_{50}^{\infty} \frac{1}{10\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-50}{200}\right)^3} \cdot \frac{(x-100)^2}{200} dx \\ &\approx \int_{50}^{\infty} \frac{1}{10\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-50}{200}\right)^3} - \frac{(x-100)^2}{200} dx \end{aligned}$$

取积分上限为 $\bar{x}_1 + 5s_{x1} = 150 \text{ MPa}$ ，用变步长辛普生求积公式，允许误差 $\epsilon = 10^{-4}$ ，在计算机上运算得可靠度

$$R = 0.98272$$

1.4 极限状态法求可靠度

应力-强度模型认为 $x_2 - x_1 > 0$ 就不会失效， $x_2 - x_1 < 0$ 发生失效，而 $x_2 - x_1 = 0$ 表示达到极限状态。将其称为极限状态方程。通常， x_1 和 x_2 都是一些基本变量的函数，因此极限状态方程往往是由两个以上的基本变量组成。本节的方法可用于极限状态方程中有多个正态变量的情况。若极限状态方程中有非正态分布的随机变量，则可用等效的概念将其转换为一个等效的正态变量。因此，本方法是一种适用性较广的方法。但是，本方法常需迭代求解，所以计算比较麻烦，可利用计算机求解。

1.4.1 多个独立正态变量的情况

设零件或构件的极限状态方程

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (17.3-4)$$

式中， x_1, x_2, \dots, x_n 是相互独立的正态变量。方程 (17.3-4) 可能是线性的，也可能是非线性的。当式 (17.3-4) 是线性方程时，所求得的可靠度是精确的，否则是近似的。

方程式 (17.3-4) 表示坐标系 $O - x_1 x_2 \dots x_n$ 中的一个面，该面将 n 维空间分为失效区和不失效区。

引入一组标准化正态变量，即

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{s_{xi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17.3-5)$$

则在标准正态空间坐标系 $O - z_1 z_2 \dots z_n$ 中原点 O 到极限状态面的最短距离 \overline{OP} (图 17.3-2 所示为三个正态变量的情况)，也就是 P 点沿其在极限状态曲面的切平面的法线方向至原点 O 的长度，就是联结系数 Z_R (见表 17.3-1 中序号 1)。按 Z_R 即可由正态分布表查得相应的累积失效概率 F 或可靠度 R 。 P 点称为设计验算点，该点的坐标为

$$z_i = Z_R \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17.3-6)$$

式中 α_i —— 向量 \overrightarrow{OP} 中单位向量 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 中的第 i 个分量；

Z_R 和 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 可由下面的 $n+1$ 个方程用迭代法求解。

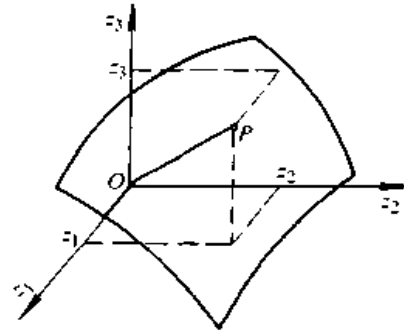


图 17.3-2 三个正态变量的验算点

$$\begin{cases} \alpha_i = - \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right)_{z_{R\alpha}}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right)_{z_{R\alpha}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ g(z_R \alpha_1, z_R \alpha_2, \dots, z_R \alpha_n) = 0 \end{cases} \quad (17.3-7)$$

式中 $\left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right)_{z_{R\alpha}}$ —— 函数 $g(z_1, z_2, \dots, z_n)$ 对 z_i 的偏导数在 P 点的取值。

若式 (17.3-4) 的极限状态方程为线性函数，即

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (17.3-8)$$

式中， a_i 均为常数，则联结系数

$$Z_R = \frac{a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + \dots + a_n \bar{x}_n}{(a_1^2 s_{x1}^2 + a_2^2 s_{x2}^2 + \dots + a_n^2 s_{xn}^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17.3-9)$$

例 4 受静载荷的钢梁，已知受最大弯矩 $M \sim N(13\,000, 910^2) \text{ Nm}$ ，抗弯截面系数 $W \sim N(54\,720, 2\,740^2) \text{ mm}^2$ ，钢梁的屈服强度 $\sigma_s \sim N(380, 30.4^2) \text{ MPa}$ 。求不屈服失效的可靠度。

解 本例的极限状态方程为非线性函数

$$g(\sigma_s, M, W) = \sigma_s W - M = 0 \quad (a)$$

由式 (17.3-5) 将基本变量标准化

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{\sigma_s - \bar{\sigma}_s}{s_{\sigma_s}} & \sigma_s &= \bar{\sigma}_s + z_1 s_{\sigma_s} = 380 + 30.4 z_1 \\ z_2 &= \frac{M - \bar{M}}{s_M} & M &= \bar{M} + z_2 s_M = 13\,000\,000 + 910\,000 z_2 \\ z_3 &= \frac{W - \bar{W}}{s_W} & W &= \bar{W} + z_3 s_W = 54\,720 + 2\,740 z_3 \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

将式(b)代入式(a)中得

$$1\,663\,488 z_1 + 83\,296 z_1 z_3 - 910\,000 z_2 + 1\,041\,200 z_3 + 7\,793\,600 = 0 \quad (c)$$

按式(17.3-7)、式(17.3-6)及式(c)得

$$\left. \begin{aligned} Z_R &= \frac{-7\,793\,600}{1\,663\,488 \alpha_1 + 83\,296 Z_R \alpha_1 \alpha_3 - 910\,000 \alpha_2 + 1\,041\,200 \alpha_3} \\ \alpha_1 &= \frac{1}{K} (1\,663\,488 + 83\,296 Z_R \alpha_3) \\ \alpha_2 &= \frac{1}{K} \times 910\,000 \\ \alpha_3 &= \frac{-1}{K} (83\,296 Z_R \alpha_1 + 1\,041\,200) \end{aligned} \right\} \quad (d)$$

式(d)中的 K 按下式确定

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1 \quad (e)$$

由式(d)求得第一次迭代结果 $Z_R, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 。再将此结果代入式(d)中迭代求解，直到前后两次迭代值误差很小为止。迭代结果列于表 17.3-2 中。

经四次迭代求得：

$Z_R = 3.7941$ ，设计验算点 $P = (z_1, z_2, z_3) = Z_R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (-2.982, 1.768, -1.540)$ 。将其换算成原坐标系中的变量，则 $P = (\sigma_s, M, W) = (289.35, 14\,608\,880, 50\,500.4)$ 。

查表 17.1-3 得可靠度

$$R = \Phi(Z_R) = \Phi(3.7941) = 0.99992$$

一般，在选择初始值 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n)$ 时应考虑正负号。当相应的基本变量是荷载变量时建议用正号；当基本变量是强度或几何尺寸变量（如 E, I ）时建议用负号。

1.4.2 非正态变量的情况

表 17.3-2 例 4 的迭代结果

变量	初始值	迭代次数				
		1	2	3	4	5
Z_R	3	4.4666	3.3868	3.7961	3.7941	
α_1	-0.5	-0.7666	-0.784	-0.787	-0.786	
α_2	0.5	0.453	0.478	0.466	0.466	
α_3	-0.5	-0.456	-0.397	-0.405	-0.406	

对于非正态变量的情况，可以将其在设计验算点处变换成等效正态变量，然后用前节方法求联结系数 Z_R 和可靠度 R 。

将非正态变量转化为等效正态变量的条件是：

1) 在设计验算点 x_i^* 处，等效正态变量 x_i' 的分布函数值 $F_{x_i'}(x_i^*)$ 与原变量 x_i 的分布函数值 $F_{x_i}(x_i^*)$ 相等，即

$$F_{x_i'}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \bar{x}_i'}{s_{x_i'}}\right) \quad (17.3-10)$$

2) 在设计验算点 x_i^* 处，等效正态变量 x_i' 的概率密度值 $f_{x_i'}(x_i^*)$ 与原变量 x_i 的概率密度值 $f_{x_i}(x_i^*)$ 相等，即

$$f_{x_i'}(x_i^*) = \frac{1}{s_{x_i'}} \phi\left(\frac{x_i^* - \bar{x}_i'}{s_{x_i'}}\right) \quad (17.3-11)$$

由式(17.3-10)、式(17.3-11)可得等效正态变量的均值和标准差

$$s_{x_i'} = \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_{x_i}(x_i^*)\}]}{f_{x_i}(x_i^*)} \quad (17.3-12)$$

$$\bar{x}_i' = x_i^* - \Phi^{-1}\{F_{x_i}(x_i^*)\} s_{x_i'} \quad (17.3-13)$$

其中

$$x_i^* = F_{x_i}^{-1}[\Phi(Z_R \alpha_i)] \quad (17.3-14)$$

式中 $\phi(*)$ ——标准正态分布的概率密度。

由于 \bar{x}_i' 和 S_{x_i}' 是按设计验算点 x_i^* 计算的, 所以在按式 (17.3-7) 迭代前, 先由式 (17.3-12)、式 (17.3-13) 计算出 \bar{x}_i' 和 S_{x_i}' , 然后用 x_i' 进行迭代。

例5 某零件受应力 $x_1 \sim \ln(4.5, 0.1^2)$ MPa, 强度 $x_2 \sim W(3, 40, 200)$ MPa, 求不失效的可靠度。

解 由于应力和强度都不服从正态分布, 故先求等效正态变量的均值和标准差。

应力的等效正态变量的标准差, 按式 (17.3-12)

$$s_{x_1}' = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_{x_1}(x_1^*)]\}}{f_{x_1}(x_1^*)} = \frac{\phi\left(\frac{\ln x_1^* - \mu_1}{\sigma_1}\right)}{f_{x_1}(x_1^*)} \quad (a)$$

$$= \sigma_1 x_1^* = 0.1 x_1^*$$

应力的等效正态变量的均值, 按式 (17.3-13)

$$\bar{x}_1' = x_1^* - \Phi^{-1}[F_{x_1}(x_1^*)] s_{x_1}'$$

$$= x_1^* - \left(\frac{\ln x_1^* - \mu_1}{\sigma_1}\right) \sigma_1 x_1^* = x_1^* (5.5 - \ln x_1^*) \quad (b)$$

应力的设计验算点值, 按式 (17.3-14)

$$x_1^* = F_{x_1}^{-1}[\Phi(Z_R \alpha_1)] = e^{\mu_1 + Z_R \sigma_1 \alpha_1}$$

$$= e^{4.5 + 0.1 Z_R \alpha_1} \quad (c)$$

强度的等效正态变量的标准差, 按式 (17.3-12)

$$S_{x_2}' = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_{x_2}(x_2^*)]\}}{f_{x_2}(x_2^*)} \quad (d)$$

强度的等效正态变量的均值, 按式 (17.3-13)

$$\bar{x}_2' = x_2^* - \Phi^{-1}[F_{x_2}(x_2^*)] s_{x_2}' \quad (e)$$

强度的设计验算点值, 按式 (17.3-14)

$$x_2^* = F_{x_2}^{-1}[\Phi(Z_R \alpha_2)]$$

$$= 40 + 200 \{-\ln[1 - \Phi(Z_R \alpha_2)]\}^{\frac{1}{3}} \quad (f)$$

极限状态方程

$$g(x_2', x_1') = x_2' - x_1' = 0 \quad (g)$$

由式 (17.3-5) 将等效正态变量标准化

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{x_2' - \bar{x}_2'}{s_{x_2}'} & x_2' &= \bar{x}_2' + z_1 s_{x_2}' \\ z_2 &= \frac{x_1' - \bar{x}_1'}{s_{x_1}'} & x_1' &= \bar{x}_1' + z_2 s_{x_1}' \end{aligned} \right\} \quad (h)$$

将式 (h) 代入式 (g) 中得

$$\bar{x}_2' + z_1 s_{x_2}' - \bar{x}_1' - z_2 s_{x_1}' = 0 \quad (i)$$

按式 (17.3-7)、(17.3-6) (求 z_R 也可直接按式 (17.3-9))

$$\left. \begin{aligned} Z_R &= \frac{\bar{x}_2' - \bar{x}_1'}{(s_{x_2}'^2 + s_{x_1}'^2)^{\frac{1}{2}}} \\ \alpha_1 &= \frac{-S_{x_2}'}{(s_{x_2}'^2 + s_{x_1}'^2)^{\frac{1}{2}}} \\ \alpha_2 &= \frac{-S_{x_1}'}{(s_{x_2}'^2 + s_{x_1}'^2)^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \right\} \quad (j)$$

取初值 $Z_R = 3, \alpha_1 = -0.5, \alpha_2 = 0.5$, 则设计验算点 P 的坐标值 $P = (z_1, z_2) = Z_R(\alpha_1, \alpha_2) = (-1.5, 1.5)$ 。代入式 (a) ~ (j) 依次迭代计算, 结果列在表 17.3-3 中。

经三次迭代得 $Z_R = 1.872$, 与第二次迭代结果非常接近, 故取 $Z_R = 1.872$ 。查表 17.1-3 得可靠度

$$R = \Phi(Z_R) = \Phi(1.872) = 0.96939$$

表 17.3-3 例5的迭代结果

变 量	初始值	迭 代 次 数			
		1	2	3	4
\bar{x}_2'		218.873	216.900	217.126	
s_{x_2}'		66.574	68.237	68.239	
\bar{x}_1'		89.100	88.551	88.642	
s_{x_1}'		7.748	7.427	7.475	
Z_R	3	1.936	1.870	1.872	
α_1	-0.5	-0.9933	-0.9941	-0.9941	
α_2	0.5	0.1156	0.1082	0.1089	

2 可靠度的近似算法

对不很精确的概率机械设计,通常不考虑随机变量的实际分布而假定服从正态分布或对数正态分布。利用正态分布进行可靠度的计算。

2.1 可靠安全系数

定义可靠安全系数 n_R 为强度均值 \bar{x}_s 与应力均值 \bar{x}_l 之比,即

$$n_R = \frac{\bar{x}_s}{\bar{x}_l} \quad (17.3-15)$$

当应力和强度都服从正态分布时,联结系数 Z_R 与可靠安全系数 n_R 的关系为

$$Z_R = \frac{\bar{x}_s - \bar{x}_l}{(s_x^2 + s_l^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{n_R - 1}{(n_R^2 V_x^2 + V_l^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17.3-16)$$

$$n_R = \frac{1 + Z_R (V_x^2 + V_l^2 - Z_R^2 V_x^2 V_l^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - Z_R^2 V_x^2} \quad (17.3-17)$$

当应力和强度都服从对数正态分布时,联结系数 Z_R 与可靠安全系数 n_R 的关系

$$Z_R = \frac{\mu_s - \mu_l}{(\sigma_s^2 + \sigma_l^2)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{\ln n_R}{(V_x^2 + V_l^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (17.3-18)$$

$$n_R = e^{Z_R (V_x^2 + V_l^2)^{\frac{1}{2}}} = e^{Z_R V_n} \quad (17.3-19)$$

当安全系数 $(n = \frac{x_s}{x_l})$ 服从正态分布时,联结系数 Z_R 与可靠安全系数 n_R 的关系

$$Z_R \approx \frac{n_R - 1}{n_R V_n} \quad (17.3-20)$$

$$n_R = \frac{1}{1 - Z_R V_n} \quad (17.3-21)$$

例6 已知应力的变异系数 $V_x = 0.08$, 强度的变异系数 $V_s = 0.05$, 要求可靠度 $R = 0.99$, 分别按应力和强度都服从正态分布、对数正态分布以及安全系数服从正态分布求所需的可靠安全系数 n_R 。

解 先由表 17.2-11 查得 $R = 0.99$ 时, $Z_R = 2.33$ 。

应力和强度都服从正态分布时,按式

(17.3-17) 得

$$n_R = \frac{1 + Z_R (V_x^2 + V_s^2 - Z_R^2 V_x^2 V_s^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - Z_R^2 V_x^2} = \frac{1 + 2.33 (0.08^2 + 0.05^2 - 2.33^2 \times 0.08^2 \times 0.05^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - 2.33^2 \times 0.05^2} = 1.236$$

应力和强度都服从对数正态分布时,按式 (17.3-19),先算出 $V_n = (0.08^2 + 0.05^2)^{\frac{1}{2}} = 0.094$, 则

$$n_R = e^{Z_R V_n} = e^{2.33 \times 0.094} = 1.245$$

安全系数服从正态分布时,按式 (17.3-21) 得

$$n_R = \frac{1}{1 - Z_R V_n} = \frac{1}{1 - 2.33 \times 0.094} = 1.28$$

从上例的计算结果可看出,安全系数服从正态分布时所需的可靠安全系数 n_R 最大。

2.2 随机变量函数的均值和标准差的近似计算

除根据实际零件或构件直接试验获得数据估计应力和强度的分布外,一般都是利用随机变量的函数关系得到函数(即应力、强度)的分布。通过已知随机变量的分布求其函数的分布往往很难,故通常只求其均值和标准差的近似值。已知随机变量的均值和标准差,求其函数的均值和标准差的近似方法如下。

2.2.1 泰勒展开法

设 n 维随机变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (17.3-22)$$

函数的均值

$$\begin{aligned} \bar{y} &\approx f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} \right)_0 s_{x_i}^2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right)_0 \rho_{ij} s_{x_i} s_{x_j} \\ &\approx f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \end{aligned} \quad (17.3-23)$$

函数的标准差

$$\begin{aligned} s_y &\approx \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_0^2 s_{x_i}^2 + 2 \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_0 \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)_0 \rho_{ij} s_{x_i} s_{x_j} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (17.3-24)$$

式中 角标“0”——表示求导后自变量取均值；
 ρ_{ij} —— x_i 与 x_j 的相关系数。

$$\rho_{ij} = \frac{E[(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)]}{[E(x_i - \bar{x}_i)^2 E(x_j - \bar{x}_j)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (17.3-25)$$

式中 $E(X)$ ——随机变量 X 的数学期望。
 在工程计算中，大部分情况为了简化计算常假定变量之间相互独立而取 $\rho_{ij} = 0$ 。

2.2.2 变异系数法

对于单项式（没有加减运算的式子）的函数，式（17.3-22）的具体形式为

$$y = a \sum_{i=1}^n x_i^{m_i} \quad (17.3-26)$$

式中 a, m_i ——任意常数。
 函数的均值

$$\bar{y} \approx a \sum_{i=1}^n \bar{x}_i^{m_i} \quad (17.3-27)$$

函数的变异系数

$$V_y \approx \left(\sum_{i=1}^n m_i^2 V_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n m_i m_j \rho_{ij} V_{x_i} V_{x_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-28)$$

函数的标准差

$$s_y = \bar{y} V_y \quad (17.3-29)$$

2.2.3 基本函数法

本方法是将常用的函数作为基本函数，用本节 2.2.1 的泰勒展开法求出其均值和标准差的结论式列于表 17.3-4 中，应用时可查阅。对于较复杂的函数一般可化为这些基本函数的形式，但是在把复杂函数化成基本函数时，应避免基本函数中变量的相关，亦即保证基本函数中变量之间是相互独立的。

表 17.3-4 基本函数形式和近似结论式

序号	函数形式	均值 \bar{y}	标准差 s_y
1	$y = ax$	$a\bar{x}$	as_x
2	$y = a \pm x$	$a \pm \bar{x}$	s_x
3	$y = x^m$	\bar{x}^m$	|m| \bar{x}^{m-1} s_x$
4	$y = x_1 \pm x_2$	$\bar{x}_1 \pm \bar{x}_2$	$(s_{x_1}^2 + s_{x_2}^2 \pm 2\rho_{12}s_{x_1}s_{x_2})^{\frac{1}{2}}$
5	$y = x_1 x_2$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 + \rho_{12}s_{x_1}s_{x_2}$	$(\bar{x}_1^2 s_{x_1}^2 + \bar{x}_2^2 s_{x_2}^2 + 2\rho_{12}\bar{x}_1\bar{x}_2 s_{x_1}s_{x_2})^{\frac{1}{2}}$
6	$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2} + \frac{\bar{x}_1 s_{x_1}}{\bar{x}_2^2} \left(\frac{s_{x_2}}{\bar{x}_2} - \frac{\rho_{12}s_{x_1}}{\bar{x}_1} \right) \approx \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2}$	$\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2} \left(\frac{s_{x_1}^2}{\bar{x}_1^2} + \frac{s_{x_2}^2}{\bar{x}_2^2} - 2\rho_{12} \frac{s_{x_1}s_{x_2}}{\bar{x}_1\bar{x}_2} \right)^{\frac{1}{2}}$

3 概率机械设计所需的部分数据和资料

3.1 几何尺寸

机械应力一般是载荷和几何尺寸的函数，故应力的随机性不仅取决于载荷的随机性，也取决于几何尺寸的随机性。由于加工不能保证几何尺寸绝对准确，而只能将其限制在允许的公差范围内，故几何尺寸也是一个随机变量。表 17.3-5 列出了不同加工方法时尺寸的误差，可作为设计时的参考。必要时可从承担加工的工厂索取具体数据。一般认为尺寸服从正态分布。当误差对称于公称尺寸为 Δx 时，可取公称尺寸为均值 \bar{x} ，按“3s”原则取 $\frac{\Delta x}{3}$ 为标准差；当误差不对称于公称尺寸时，可根据公称尺寸和误差先求出最大值和最小值，然后取

$$\bar{x} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (17.3-30)$$

$$s_x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{6} \quad (17.3-31)$$

一般，对有较严公差限制的尺寸误差，对应力数值的影响甚微，常可假定为确定量而使计算大为简便。

3.2 材料的强度特性

试验表明，一些金属材料的强度特性基本可用正态分布描述。表 17.3-6 为金属材料强度等特性的变导系数。如不做具体试验而利用手册或产品目录的数据时，目前我国钢材的抗拉强度和屈服强度数据多数是只保证 90% 不小于的下限值。若按表 17.3-6 取变异系数，则抗拉强度均值荐用

$$\bar{\sigma}_b = 1.07\sigma_b \quad (17.3-32)$$

表 17.3-5 不同加工方法的尺寸误差 (mm)

加工方法	误差 (±)		加工方法	误差 (±)	
	一般	可达		一般	可达
火焰切割	1.5	0.5	锯	0.50	0.125
冲压	0.25	0.025	车	0.125	0.025
拉拔	0.25	0.05	刨	0.25	0.025
冷轧	0.25	0.025	铣	0.125	0.025
挤压	0.5	0.05	滚切	0.125	0.025
金属模铸	0.75	0.25	拉	0.125	0.0125
压铸	0.25	0.05	磨	0.025	0.005
蜡模铸	—	0.05	研磨	0.005	0.0012
烧结金属	1.25	0.05	钻孔	0.25	0.05
烧结陶瓷	0.75	0.50	铰孔	0.05	0.0125

表 17.3-6 金属材料强度等特性的变异系数

材料强度	变异系数 V	材料特性	变异系数 V
金属材料的抗拉强度	0.05	金属材料的断裂韧性	0.07
金属材料的屈服强度	0.07	钢的弹性模量	0.03
钢材的疲劳强度	0.08	铸铁的弹性模量	0.04
零件的疲劳强度	0.10~0.15	铝合金的弹性模量	0.03
焊接构件强度	0.10~0.15	钛合金的弹性模量	0.09

屈服强度均值荐用

$$\bar{\sigma}_s = 1.1\sigma_s \quad (17.3-33)$$

式中, σ_b 和 σ_s 是从手册或产品目录中查得的下限值。

如果从手册或产品目录等文献中查得的强度数据的条件不明确, 则荐用作为均值。

表 17.3-7 为我国某厂生产的几种不同钢材统计得的同炉钢的静强度数据。

表 17.3-8 列出了几种国产钢铁的疲劳极限。

疲劳强度试验比静强度麻烦得多, 具体试验和统计方法可参考有关文献。初步设计或近似设计计算时荐用

$$\bar{\sigma}_1 = \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)\bar{\sigma}_b \quad (17.3-34)$$

式中 $\bar{\sigma}_b$ ——所用钢铁抗拉强度的均值, 可按式 (17.3-32) 取值, 最好做试验估计;

$\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$ ——抗弯疲劳极限与抗拉强度极限的比值。

可按表 17.3-9 和 17.3-10 选取。

拉压、剪切疲劳强度与弯曲疲劳强度也基本成正比关系, 其比值可参考表 17.3-11 选取。

应该注意, 不同工厂的生产条件和技术水平不同, 不同国家的情况更不一样, 因此不应盲目搬用。设计重要的、对强度要求很严的产品宜直接做具体试验, 统计得所需的均值、标准差等数据。若不做具体试验而参考类似产品的有关数据时应慎重考虑。

表 17.3-7 几种国产钢材静强度的统计数据

材 质	抗拉强度			屈服强度		
	$\bar{\sigma}_b$ /MPa	s_{σ_b} /MPa	V_{σ_b}	$\bar{\sigma}_s$ /MPa	s_{σ_s} /MPa	V_{σ_s}
钢 35 热轧, $\phi 12 \sim 180$ mm, 860℃ 空冷	603	24.5	0.041	379	19.0	0.05
钢 45 热轧, $\phi 8 \sim 250$ mm, 860℃ 空冷	676	23.5	0.035	408	15.7	0.039
钢 38CrMoAl 热轧, $\phi 9 \sim 220$ mm, 950℃ 淬火, 620~640℃ 回火	1064	47.9	0.045	952	56.3	0.059

续表 17.3-7

材 质	抗拉强度			屈服强度		
	$\bar{\sigma}_b/\text{MPa}$	s_{σ_b}/MPa	V_{σ_b}	$\bar{\sigma}_s/\text{MPa}$	s_{σ_s}/MPa	V_{σ_s}
钢 9CrNiMo 热轧, $\phi 20 \sim 200$ mm, 860℃ 油淬, 600℃ 空冷	1 113	35.9	0.032	1 012	43.8	0.043
钢 60Si2Mn 热轧, 860℃ 油淬, 470℃ 水冷	1 510	56.5	0.037	1 369	59.5	0.046
钢 18CrNiWA 热轧, $\phi 12 \sim 165$ mm, 950℃ 油淬, 170 ~ 200℃ 空冷	1 328	56.8	0.043	1 034	58.8	0.057
钢 20CrNi2MoA 热轧, $\phi 40 \sim 130$ mm, 890℃ 油淬, 170 ~ 200℃ 空冷	1 264	139.2	0.110	1 055	128.4	0.122
钢 30CrNi2MoA 热轧, $\phi 12 \sim 120$ mm, 860 ~ 890℃ 油淬, 650 ~ 680℃ 空冷	1 098	80.9	0.074	1 027	79.7	0.078
钢 30CrMn2SiA 热轧, $\phi 8 \sim 200$ mm, 890℃ 油淬, 510 ~ 540℃ 油回	1 184	47.0	0.040	1 098	51.0	0.046
钢 40CrNiMoA 热轧, $\phi 20 \sim 200$ mm, 850℃ 淬火, 600℃ 回火	1 088	41.8	0.039	989	44.6	0.045
钢 45CrNiMoVA 热轧, $\phi 28 \sim 220$ mm, 860℃ 淬火, 440℃ 回火	1 563	31.9	0.020	1 496	36.2	0.024

表 17.3-8 几种国产钢铁的疲劳极限

材 质	光滑试件			缺口试件 $\alpha_n = 2$		
	$\bar{\sigma}_{-1}/\text{MPa}$	$s_{\sigma_{-1}}/\text{MPa}$	$V_{\sigma_{-1}}$	$\bar{\sigma}_{-1c}/\text{MPa}$	$s_{\sigma_{-1c}}/\text{MPa}$	$V_{\sigma_{-1c}}$
钢 Q235-A 热轧 110HBS	213.1	8.105	0.038	132.4	4.386	0.033
钢 20 正火 124HBS	250.1 (喇叭形)	5.085	0.02	146.8	5.098	0.035
钢 35 正火 164HBS	228.3	2.070	0.009	161.1	3.377	0.021
钢 45 正火 175HBS	249.3	5.307	0.021	161.0	7.711	0.048
钢 45 调质 216HBS	388.3 (喇叭形)	9.666	0.025	211.7	9.212	0.044
钢 45 电渣熔铸 调质 319HBS	432.9	14.320	0.033	281.7	10.400	0.037
钢 Q345 热轧 169HBS	280.8	8.443	0.030	169.9	3.854	0.023
钢 35CrMo 调质 280HBS	431.5	13.869	0.032	248.4	10.891	0.044
钢 40Cr 调质 268HBS	421.7	10.337	0.025	239.2	12.192	0.051
钢 40MnB 调质 288HBS	436.2	19.806	0.045	279.7	10.607	0.038
钢 42CrMo 调质 341HBS	503.9	12.367	0.025	313.1	7.158	0.023
钢 50CrV 淬火、中温回火 48.36HBS	746.5	32.003	0.043	477.7	16.511	0.035
钢 60Si2Mn 淬火、中温回火 397HBS	563.6	23.936	0.042	389.0	8.007	0.021
钢 65Mn 淬火、中温回火 45.76HRC	708.2	31.527	0.045	483.3	16.506	0.034
钢 1Cr13 调质 222HBS	374.2	12.993	0.035	221.6	9.664	0.044
钢 2Cr13 调质 222HBS	374.0	13.803	0.037	208.7	10.533	0.051
球铁 QT400-18 退火 149HBS 楔形试样	202.5	7.479	0.037	158.8	4.773	0.030
球铁 QT400-18 退火 156HBS 梅花试样	233.9	6.757	0.029	164.8	7.379	0.045
球铁 QT600-3 正火 273HBS 楔形试样	290.0	5.821	0.020	169.5	9.330	0.055
球铁 QT600-3 正火 243HBS 梅花试样	251.1	9.664	0.038	154.2	7.803	0.051

表 17.3-9 钢铁的 $\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$ 荐用值

材 质	$\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$	材 质	$\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$
锻钢 (正火或调质)	0.45	铁素体球墨铸铁	0.48
铸钢或淬火钢	0.40	球光体球墨铸铁	0.33
灰铸铁	0.40		

表 17.3-10 各种材质的 $\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$ 数值

材 质	$\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$	材 质	$\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_b}\right)$
商业纯铁	0.57	蒙乃尔合金 (Monel Cu-Ni) (退火)	0.44
铸铁	0.41	蒙乃尔合金 (Monel Cu-Ni) (冷拔)	0.42
球墨铸铁	0.33	镍合金 (Nimonic 80)	0.31
低碳钢 ($w(C) = 0.15\%$) (退火)	0.55	纯铝 (退火)	0.30
中碳钢 ($w(C) = 0.36\%$) (退火)	0.46	纯铝 (冷作)	0.34
中碳钢 ($w(C) = 0.36\%$) (淬火, 回火)	0.46	铝-7% 镁合金 (退火)	0.39
高碳钢 ($w(C) = 0.75\%$) (退火)	0.38	铝-7% 镁合金 (冷作)	0.43
高碳钢 ($w(C) = 0.75\%$) (淬火, 回火)	0.41	杜拉明铝合金 (Duralumin 2034) (退火)	0.48
2.5% Ni 钢 (淬火, 回火)	0.59	杜拉明铝合金 (Duralumin 2024) (溶液处理, 时效)	0.29
Cr-Mo 钢 (淬火, 回火)	0.49	铝-锌-镁合金 (7075) (溶液处理, 时效)	0.27
Ni-Cr-Mo 钢 (淬火, 回火)	0.40	纯镁 (挤压)	0.31
18Cr-8Ni 不锈钢 (冷拔)	0.58	镁-铝-锌合金 (热处理)	0.40
12% 锰钢 (淬火)	0.41	镁-锌合金 (热处理)	0.36
纯铜 (退火)	0.29	商业纯钛 (轧制)	0.59
黄铜 60Cu-40Zn (退火)	0.37	钛-4 铝-2.5 锡合金 (热处理)	0.57
黄铜 70Cu-30Zn (退火)	0.31	钛-6 铝-4 钒合金 (热处理)	0.53
黄铜 90Cu-10Zn (冷拔)	0.29	钛-4 锰-4 铝合金 (热处理)	0.58
磷青铜 (退火)	0.31	纯铅 (退火)	0.15
铝青铜 (9.5% Al) (退火)	0.35	有机玻璃 (聚甲基丙烯酸甲酯)	0.35

注: 应力循环次数, 钢 10^7 次, 非铁金属 10^8 次。

表 17.3-11 拉压 σ_{-1} 、剪切 τ_{-1} 与弯曲 σ_{-1} 的比值

项 目	钢	铸 铁	铝合金和镁合金
σ_{-1}/σ_{-1}	0.85	0.9	1
τ_{-1}/σ_{-1}	0.57	0.8	0.55 (锻), 0.85 (铸)

4 静强度的概率设计

不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力。当应力循环次数小于 10^3 次时也近似作为静应力处理。静强度不够而引起的失效形式主要是整体破断或过大的残余变形, 前者是应力超过强度极限, 后者是应力超过屈服极限所致。

4.1 计算系数

进行零件或构件的概率设计计算时,有些随机因素尚未查明或尚难查明。例如,试验模拟的近似性,计算简化假定的近似性,数据引用的近似性,生产使用情况的估计,人的素质等所引起的随机差异等都难以明确定量。针对这些难以定量或数据暂缺的情况,建议在计算载荷或应力时乘一个计算系数 K ,其数值可参考各类机械设备的专业数据。例如,载荷系数、工况系数、经验安全系数等资料判断估计。例如,取计算系数均值 $\bar{K}=1.0\sim 1.5$ 以上,变异系数 $V_K=0\sim 1.5$ 。当计算模型正确,但某些变异系数缺乏,可取 $\bar{K}=1$, $V_K>0$;当所有数据都来自与设计条件相同的试验,或者计算中所取数据偏于保守,则可取 $\bar{K}=1$, $V_K=0$ 。应该知道,这个系数沿袭了常规设计的处理方法。在取数据时注意已经由直接或间接试验定量考虑过的部分勿再计入,因此这个系数一般应小于常规设计时的取值。随着各随机因素统计定量的不断完善,计算精度的不断提高,系数 \bar{K} 逐渐趋于 1 而 V_K 逐渐趋于 0。

4.2 正态分布的设计法

当应力和强度的分布及分布参数已知时,就可用本章 1 和 2 节中的方法验算可靠度。

对不很复杂的情况,若应力和强度均服从正态分布或对数正态分布以及安全系数服从正态分布的情况,就可用 2.1 节中的方法,按指定的可靠度先求得可靠安全系数,再按强度条件

$$\bar{x}_1 \leq \frac{\bar{x}_2}{n_R} \quad (17.3-35)$$

就可进行设计计算。这和常规设计计算的形式是一致的,只需注意要用均值进行计算。关于设计式中各参数的随机性由可靠安全系数来考虑。

一般,对可靠度要求不高(例如 $R \leq 0.90$)、变异系数不大(例如 $V_{x_1} \leq 0.05$, $V_{x_2} \leq 0.05$)的情况,应力和强度均服从正态分布、均服从对数正态分布以及安全系数服从正态分布这三种计算结果很近似,而安全系数服从正态分布的计算结果略趋保守。因此,当应力和强度的分布不很明确时,为了安全及计算简便,荐用安全系数服从正态分布的计算法。

例 7 某转轴受很大的瞬时尖峰载荷,危险

截面受最大弯矩 $\bar{M} = 1.5 \times 10^8 \text{ Nmm}$, $V_M = 0.05$; 最大转矩 $\bar{T} = 1.2 \times 10^8 \text{ Nmm}$, $V_T = 0.05$ 。轴所用钢材的屈服极限 $\sigma_s = 1\ 038 \text{ MPa}$, $V_{\sigma_s} = 0.039\ 2$ 。要求不发生屈服失效的可靠度 $R \geq 0.999$, 求所需的直径。

解 工作应力按第四强度理论计算

$$\sigma = (\sigma_M^2 + 3\tau_T^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0.1d^3} \left(M^2 + \frac{3}{4} T^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

由于 M 和 T 是由同一力源产生,为正相关 $\rho_{MT} = 1$, 故 M 和 T 可以合并为一个变量

$$\frac{T}{M} = \frac{\bar{T}}{\bar{M}} = \frac{1.2 \times 10^8}{1.5 \times 10^8} = 0.8, \text{ 即 } T = 0.8M$$

代入上式,并考虑计算系数 K , 则工作应力可简化为

$$\sigma = \frac{12.166KM}{d^3}$$

上式即为应力函数,取计算系数 $\bar{K} = 1$, $V_K = 0$; 直径的变异系数取 $V_d = 0.001$ 。

按式 (17.3-28) 求应力的变异系数,各变量相互独立 $\rho_{ij} = 0$, 故

$$V_{\sigma} = (V_K^2 + V_M^2 + 3^2 V_d^2)^{\frac{1}{2}} \\ = (0 + 0.05^2 + 9 \times 0.001^2)^{\frac{1}{2}} \approx 0.05$$

按要求的可靠度 $R = 0.999$, 查表 17.2-11 得 $Z_R = 3.09$ 。设安全系数服从正态分布,所需可靠安全系数由式 (17.3-21) 计算,式中

$$V_{n_R} = (V_{\sigma}^2 + V_{\sigma_s}^2)^{\frac{1}{2}} = (0.05^2 + 0.039\ 2^2)^{\frac{1}{2}} \\ = 0.063\ 5$$

$$\text{则 } n_R = \frac{1}{1 - Z_R V_{n_R}} = \frac{1}{1 - 3.09 \times 0.063\ 5} \\ = 1.244$$

强度条件按式 (17.3-35)

$$\frac{12.166\bar{K}\bar{M}}{d^3} \leq \frac{\bar{\sigma}_s}{n_R}$$

可解得

$$\bar{d} \geq \left(\frac{12.166\bar{K}\bar{M}n_R}{\bar{\sigma}_s} \right)^{\frac{1}{3}} \\ = \left(\frac{12.166 \times 1 \times 1.5 \times 10^8 \times 1.244}{1\ 038} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ mm} \\ = 129.8 \text{ mm}$$

$\Delta d = 3s_d = 3V_d\bar{d} = 3 \times 0.001 \times 129.8 \text{ mm} = 0.389 \text{ mm}$
适当圆整,取 $d = (130 \pm 0.39) \text{ mm}$ 。

显然,这样求得的直径只满足静强度要求,

关于疲劳强度还应另行验算。

例8 某紧螺栓联接预紧时受预紧力 $Q_p \sim N$ (22 000, 1 980²) N, 工作时受轴向拉力 $F \sim N$ (52 500, 5 200²) N。螺栓的相对刚度 $C \sim N$ (0.3, 0.024²)。螺栓材料的屈服极限 $\sigma_s \sim N$ (640, 45²) MPa。要求不发生屈服失效的可靠度 $R = 0.999$, 求所需的螺栓直径。

解 螺栓所受的总拉力

$$Q = Q_p + CF$$

按式(17.3-23), 螺栓所受总拉力的均值

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \bar{Q}_p + \bar{C}\bar{F} \\ &= 22\,000\text{ N} + 0.3 \times 52\,500\text{ N} = 37\,750\text{ N} \end{aligned}$$

按式(17.3-24), 各变量相互独立 $\rho_{ij} = 0$, 标准差

$$\begin{aligned} s_Q &= (s_{Q_p}^2 + \bar{F}^2 s_C^2 + \bar{C}^2 s_F^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= (1\,980^2 + 52\,500^2 \times 0.024^2 + 0.3^2 \times 5\,200^2)^{\frac{1}{2}}\text{ N} \\ &= 2\,818.08\text{ N} \end{aligned}$$

螺栓所受的工作应力 (考虑计算系数 K)

$$\sigma = \frac{4 \times 1.3 K Q}{\pi d_1^2}$$

取计算系数 $\bar{K} = 1.1$, $V_K = 0.05$; 螺栓小径 d_1 的变异系数 $V_{d_1} = 0.001$ 。按式(17.3-28)求应力的变异系数, 各变量相互独立 $\rho_{ij} = 0$, 故

$$\begin{aligned} V_\sigma &= (V_K^2 + V_Q^2 + 2^2 V_{d_1}^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[0.05^2 + \left(\frac{2\,818.08}{37\,750} \right)^2 + 4 \times 0.001^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.09 \end{aligned}$$

按要求的可靠度 $R = 0.999$, 查表 17.2-11 得 $Z_R = 3.09$ 。屈服极限的变异系数

$$V_{\sigma_s} = \frac{s_{\sigma_s}}{\sigma_s} = \frac{45}{640} = 0.07$$

设应力服从正态分布, 按式(17.3-17)得所需可靠安全系数

$$\begin{aligned} n_R &= \frac{1 + Z_R (V_\sigma^2 + V_{\sigma_s}^2 - Z_R^2 V_\sigma^2 V_{\sigma_s}^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - Z_R^2 V_\sigma^2} \\ &= \frac{1 + 3.09 (0.09^2 + 0.07^2 - 3.09^2 \times 0.09^2 \times 0.07^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - 3.09^2 \times 0.07^2} \\ &= 1.413 \end{aligned}$$

强度条件按式(17.3-35)

$$\frac{4 \times 1.3 \bar{K} \bar{Q}}{\pi d_1^2} \leq \frac{\bar{\sigma}_s}{n_R}$$

可解得

$$\begin{aligned} d_1 &\geq \left(\frac{4 \times 1.3 \bar{K} \bar{Q} n_R}{\pi \sigma_s} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \left(\frac{4 \times 1.3 \times 1.1 \times 37\,750 \times 1.413}{\pi \times 640} \right)^{\frac{1}{2}}\text{ mm} \\ &= 12.319\text{ mm} \end{aligned}$$

查螺栓标准得

公称直径 $d = 16\text{ mm}$, 小径 $d_1 = 13.835\text{ mm}$

5 疲劳强度的概率设计

零件的疲劳强度与很多因素有关, 计算比较麻烦, 因此疲劳强度设计常以验算为主。通常可先按静强度设计定出具体尺寸、结构和加工情况后, 再验算疲劳可靠度或预计可靠寿命。

5.1 变应力和变载荷的类型

应力和载荷的变化规律基本上是类似的, 广义的应力就包括载荷, 故载荷不再叙述。

应力随时间变化的记录称为应力时间历程, 按其变化规律可分为三种类型, 如图 17.3-3 所示。其中, 图 a 为稳定变应力, 每一周期的应力变化幅度均保持为常数; 图 b 为规律性不稳定变应力, 其应力幅度也随时间变化, 但在经过一定的时间(一个大周期)后, 又重复原来的变化; 图 c 为随机不稳定变应力, 其变化无明显的规律性。严格地讲, 任何零件所受的变应力都属于随机不稳定变应力。但为了研究和应用的方便, 常近似假定为或简化为规律性不稳定变应力和稳定变应力。本节只介绍受稳定变应力时零件疲劳强度的概率设计。

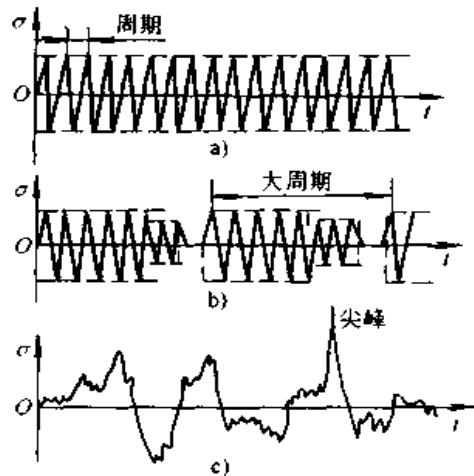


图 17.3-3 应力时间历程的类型

应力的随机性按其在设计中的影响可分为两种：一种是产品本身所受应力历程的随机性，它是反映产品本身所受应力随时间的随机变化；另一种是同样产品间的变异，它是反映同样产品在同样工作条件下，由于受一些随机因素的影响而实际引起的应力并不一致。例如，同样类型的一批汽车，在相同的载荷、道路等情况下对其后轴进行应力实测，各车本身应力随机的变化记录就反映了应力随时间变化的历程；若从各个记录中找出各自的最大应力，一般这些最大应力的不一致就反映了同样产品间的变异。实践表明，它们的应力历程各不相同，但经统计处理后可发现各个应力历程的分布规律是一致的，而分布参数并不一致。分布参数间的变异也可统计整理得出其分布规律。一般应力历程常用 β 分布等来描述，而分布参数的随机性则常用正态分布来描述。这里应注意，应力历程的变异是导致产品疲劳失效的根源，而同样产品间应力的变异则是疲劳强度概率设计的基础。

5.2 零件的疲劳强度

零件或构件的疲劳强度由于受结构、尺寸、表面等情况的影响，往往比标准光滑试件试验得到的材料疲劳强度低。用具体零件做相应载荷的疲劳试验，直接获得零件的疲劳强度是最符合实际情况的。然而通常难以办到。一般是利用相应的系数对材料的疲劳强度进行适当地修正作为零件的疲劳强度。下面仅介绍受对称循环变应力的情况供设计时参考。

如图 17.3-4 所示的 S-N 曲线是用常规疲劳试验方法获得的，可近似看作失效概率为 50%。由图 17.3-4 知，疲劳强度随着应力循环次数 N 的增加而减小。零件的 σ_{-1cN} 与材料的 σ_{-1N} 之差距则随着应力循环次数 N 的减小而减小。当 S-N 曲线开始接近水平时，其循环次数记为 N_∞ ，并规定应力循环次数 $N = 10^3$ 时记为 N_0 。

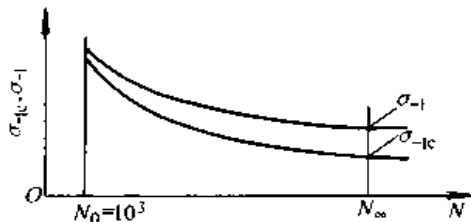


图 17.3-4 零件和材料的 S-N 曲线

当 $N \geq N_\infty$ 时，零件的疲劳强度记为 σ_{-1c}

$$\sigma_{-1c} = \frac{\sigma_{-1} \beta_q}{K_{\alpha c}} \quad (17.3-36)$$

式中 σ_{-1} ——标准光滑试件的疲劳强度；

β_q ——强化系数；

$K_{\alpha c}$ ——综合修正系数。

$$K_{\alpha c} = \frac{K_\sigma}{\epsilon_\sigma} + \frac{1}{\beta} - 1 \quad (17.3-37)$$

式中 K_σ ——有效应力集中系数；

ϵ_σ ——尺寸系数；

β ——表面系数。

当 $N \geq N_\infty$ 时零件疲劳强度的均值

$$\bar{\sigma}_{-1c} = \frac{\bar{\sigma}_{-1} \bar{\beta}_q}{\bar{K}_{\alpha c}} \quad (17.3-38)$$

式中

$$\bar{K}_{\alpha c} = \frac{\bar{K}_\sigma}{\bar{\epsilon}_\sigma} + \frac{1}{\bar{\beta}} - 1 \quad (17.3-39)$$

这里 $\bar{\sigma}_{-1}$ 的数值最好用升降法试验获得，否则可用本章 3.2 节推荐的方法。其他各修正系数的均值，若缺乏专门的数据可暂取常规设计的数据作为均值。

当 $N \geq N_\infty$ 时零件疲劳强度的标准差

$$s_{\sigma_{-1c}} = \bar{\sigma}_{-1c} V_{\sigma_{-1c}} \quad (17.3-40)$$

式中 $V_{\sigma_{-1c}}$ ——零件疲劳强度的变异系数。

$$V_{\sigma_{-1c}} = (V_{\sigma_{-1}}^2 + V_{\beta_q}^2 + V_{K_{\alpha c}}^2 + V_{\sigma_{-1}} V_{K_{\alpha c}} + V_{\beta_q} V_{K_{\alpha c}})^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-41)$$

这里的各个 V 为相应于其角标的变异系数。现分别介绍如下。

标准光滑试件疲劳强度的变异系数

$$V_{\sigma_{-1}} = (V_{\sigma_{-1}}^2 + V_{\sigma_{-1}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-42)$$

式中 $V_{\sigma_{-1}}$ ——考虑同炉材质疲劳强度差异的变异系数；

$V_{\sigma_{-1}}$ ——考虑不同炉材质疲劳强度差异的变异系数。

$V_{\sigma_{-1}}$ 由同炉材质直接试验统计得到，例如表 17.3-8 中的数据即由同炉材质试验得到的。

$V_{\sigma_{-1}}$ 由同牌号不同炉材料试验统计得到。例如， $\bar{\sigma}_{-1i}$ 表示第 i 炉金属 σ_{-1} 的均值，则由 n 炉试验数据统计得

$$\bar{\sigma}_{-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{\sigma}_{-1i} \quad (17.3-43)$$

$$s_{\bar{\sigma}_{-1}} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{\sigma}_{-1i} - \bar{\sigma}_{-1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-44)$$

$$V_{\bar{\sigma}_{-1}} = \frac{s_{\bar{\sigma}_{-1}}}{\bar{\sigma}_{-1}} \quad (17.3-45)$$

如果没有各炉材料 $\bar{\sigma}_{-1i}$ 的数据,考虑疲劳强度与抗拉强度极限几乎成正比关系,可近似取 $V_{\bar{\sigma}_{-1}} \approx V_{\sigma_b}$ 。 V_{σ_b} 可由表 17.3-6 选取。

对常用钢制零件的体积强度,如未做专门试验,可参考表 17.3-12 选取 $V_{\sigma_{-1}}$ 。

表 17.3-12 钢材疲劳强度的 $V_{\sigma_{-1}}$

生产水平	单件生产	批量生产	大量生产
高	0.10	0.09	0.08
中	0.11	0.10	0.09
低	0.12	0.11	0.10

- 注: 1. 正火、调质当硬度差范围 > 40HBS, 增大 10%; > 80HBS 增大 25%;
 2. 整体淬火不脱碳增大 10%, 可能脱碳增大 25%;
 3. 渗碳不脱碳增大 25%, 可能脱碳增大 40%;
 4. 高频淬火有监控增大 25%, 无监控增大 40%;
 5. 氰化增大 25%。

强化系数的变异系数 V_{β_1} , 当用喷丸、辊压等强化措施, 效果稳定, 则取 $V_{\beta_1} = 0.05$; 效果不稳定, 则取 $V_{\beta_1} = 0.12$; 若未强化, 则取 $V_{\beta_1} = 0$ 。

综合修正系数的变异系数可近似取

$$V_{K_{\sigma}} \approx V_{\sigma_b} \quad (17.3-46)$$

V_{σ_b} 是理论应力集中系数 α_s 的变异系数。理论应力集中系数仅决定于几何形状和受载类型。典型的形状及受载情况多数能用公式给出其函数关系。例如图 17.3-5 的情况时:

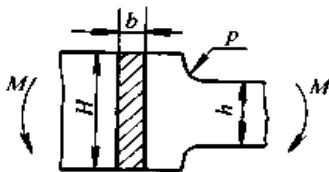


图 17.3-5 受弯变截面的板

$$\alpha_s = 1 + \left[\frac{\left(\frac{H}{h} - 1\right)h}{9.6\left(1.12\frac{H}{h} - 1\right)} \right]^{0.85} \cdot \frac{1}{\rho^{0.85}} \quad (17.3-47)$$

当式中 H 、 h 、 ρ 的均值及标准差已知时, 即可用泰勒展开法求出 $\bar{\alpha}_s$ 、 s_{α_s} 、 V_{α_s} 。

当 $N = N_0$ 时, 零件的疲劳强度

$$\sigma_{-1(N_0)} = \frac{\sigma_{-1(N_0)}}{K_{\sigma(N_0)}} \quad (17.3-48)$$

式中 $\sigma_{-1(N_0)}$ —— $N = N_0$ 时材料的疲劳强度;

$K_{\sigma(N_0)}$ —— $N = N_0$ 时的有效应力集中系数;

$N = N_0$ 时零件疲劳强度的均值

$$\bar{\sigma}_{-1(N_0)} = \frac{\bar{\sigma}_{-1(N_0)}}{\bar{K}_{\sigma(N_0)}} \quad (17.3-49)$$

$$\bar{K}_{\sigma(N_0)} = (\bar{K}_{\sigma} - 1)q_{N_0} + 1 \quad (17.3-50)$$

式中 \bar{K}_{σ} —— $N \geq N_{sc}$ 时有效应力集中系数的均值;

q_{N_0} —— $N = N_0$ 时的修正系数, 查图 17.3-6。

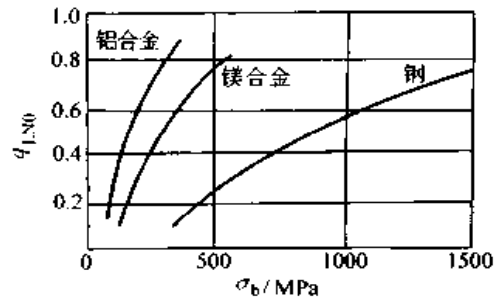


图 17.3-6 N_0 时的修正系数

$N = N_0$ 时零件疲劳强度的标准差和变异系数

$$s_{\sigma_{-1(N_0)}} = \bar{\sigma}_{-1(N_0)} V_{\sigma_{-1(N_0)}} \quad (17.3-51)$$

$$V_{\sigma_{-1(N_0)}} = \left(V_{\sigma_{-1(N_0)}}^2 + V_{K_{\sigma(N_0)}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-52)$$

也可近似取 $V_{\sigma_{-1(N_0)}} \approx V_{\sigma_b}$, $V_{K_{\sigma(N_0)}} \approx V_{K_{\sigma}} \approx (0.3 \sim 0.5) V_{\rho}$ 。

5.3 按 P-S-N 线图验算疲劳强度可靠度

图 17.3-7 为 P-S-N 线图。图中每根曲线都表示有相同的失效概率 P 。当应力为确定量或应力的变异不大而假定为确定量时, 就可按 P-S-N 线图进行可靠度验算。如果工作应力为对称循环, 当要求的寿命为 N 时, 则由应力 σ 和寿命

N 在图上描出一点。这点落在失效概率为 P 的 P - S - N 曲线上, 则可靠度 $R = 1 - P$ 。

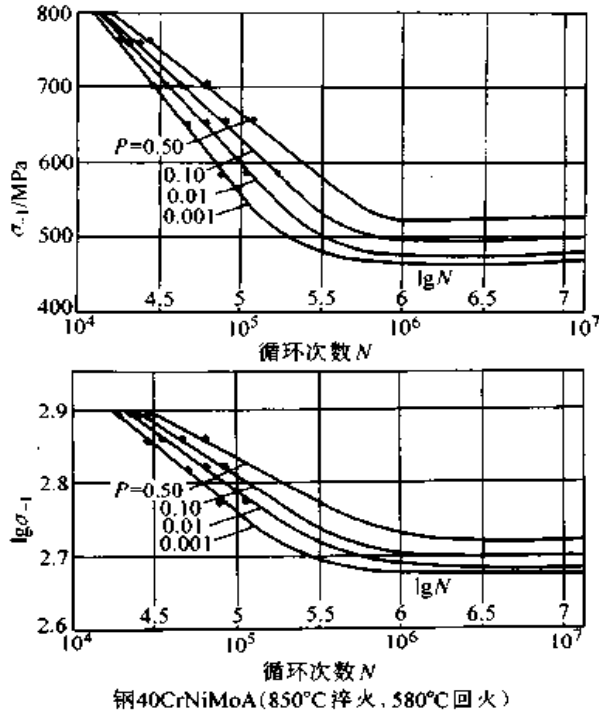


图 17.3-7 按 P - S - N 线图估算可靠度

P - S - N 线图最好通过试验绘成。一般, 曲线的左支在四五个应力水平用成组试验法进行寿命试验, 然后统计处理求出每一应力水平下的寿命分布; 曲线的右支在指定的 N (一般略大于 N_∞) 处用升降法进行疲劳强度试验, 然后求出其均值和标准差

$$\bar{\sigma}_{-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{-1i} \quad (17.3-53)$$

$$s_{\sigma_{-1}} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{-1i} - \bar{\sigma}_{-1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-54)$$

若因经济等原因不做具体的试验, 可按下述步骤绘制近似的 P - S - N 曲线。

1) 绘制标准光滑试件的均值 S - N 曲线。根据不同的重要程度和经济条件, 可用标准光滑试件按成组试验法和升降法绘制较精的 P - S - N 曲线, 把它作为均值 S - N 曲线。对不很重要的情况或近似计算, 也可参考有关文献中同样材料的数据绘制近似的均值 S - N 曲线, 如图 17.3-8 中的 b - a - c 即为标准光滑试件的近似均值 S - N 曲线。对于常用的钢铁可近似取 $N_\infty = (1 \sim 10) 10^6$, 无把握时可取 $N_\infty = 10^6$; $\bar{\sigma}_{-1}$ 可近似按表 17.3-

9、表 17.3-10 等由 $\bar{\sigma}_b$ 估算。 $N_0 = 10^3$ 时的疲劳强度均值 $\bar{\sigma}_{-1N_0} = (0.6 \sim 1.0) \bar{\sigma}_b$, 建议一般钢取 $\bar{\sigma}_{-1N_0} = 0.85 \bar{\sigma}_b$, 淬火钢取 $\bar{\sigma}_{-1N_0} = 0.65 \bar{\sigma}_b$, 灰铸铁、铁素体球墨铸铁取 $\bar{\sigma}_{-1N_0} = \bar{\sigma}_b$, 珠光体球墨铸铁取 $\bar{\sigma}_{-1N_0} = 0.7 \bar{\sigma}_b$ 。如图 17.3-8 那样, 横坐标取为 $\lg N$, 这时均值 S - N 曲线近似为一直线, 故在半对数坐标纸上描得 a 、 b 两点, 即可用直线绘得近似的均值 S - N 曲线。其实, 如将纵坐标也取成对数, 即 $\lg \sigma$, 则在双对数坐标纸上均值 S - N 曲线也近似为直线。对一定的 $\bar{\sigma}_{-1}$ 和 $\bar{\sigma}_{-1N_0}$ 值, 按双对数坐标为直线估得的 $\bar{\sigma}_{-1cN}$ 偏于保守或认为偏于安全。

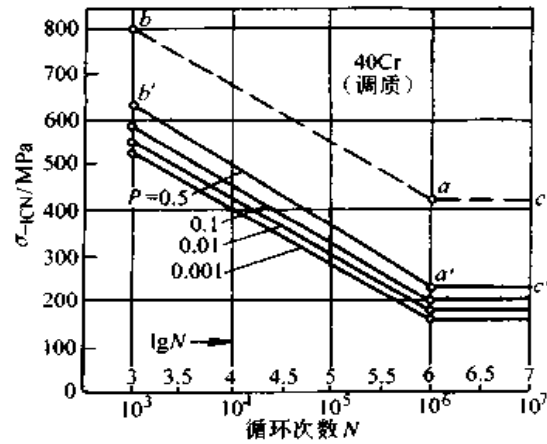


图 17.3-8 近似的 P - S - N 曲线

2) 绘制零件的均值 S - N 曲线。将标准光滑试件的均值 S - N 曲线针对具体的应力集中、绝对尺寸和表面情况进行适当的修正, 即可绘得零件的均值 S - N 曲线。对近似的均值 S - N 曲线 (如图 17.3-8 中的 b - a - c), 可将 $\bar{\sigma}_{-1}$ 和 $\bar{\sigma}_{-1N_0}$ 按 5.2 节的修正方法求得 $\bar{\sigma}_{-1c}$ 和 $\bar{\sigma}_{-1cN_0}$, 即可用直线绘得零件的近似均值 S - N 曲线 (如图 17.3-8 中的 b' - a' - c')。

3) 绘制零件的 P - S - N 曲线。对零件的均值 S - N 曲线按本章 5.2 节的方法, 就 N_∞ 和 N_0 分别求出疲劳强度的标准差 $S_{\sigma_{-1c}}$ 和 $S_{\sigma_{-1cN_0}}$, 则 N_∞ 和 N_0 时不同失效概率 P 的疲劳强度

$$(\sigma_{-1c})_P = \bar{\sigma}_{-1c} + Z_P S_{\sigma_{-1c}} \quad (17.3-55)$$

$$(\sigma_{-1cN_0})_P = \bar{\sigma}_{-1cN_0} + Z_P S_{\sigma_{-1cN_0}} \quad (17.3-56)$$

式中 Z_P ——按失效概率查表 17.1-3。

将求得的各 $(\sigma_{-1c})_P$ 和 $(\sigma_{-1cN_0})_P$ 在图上描

点，并对相同失效概率的点用直线相连，即得零件的 P - S - N 线图。图 17.3-8 绘出了零件的近似 P - S - N 曲线。

5.4 按 $3s$ - S - N 线图验算疲劳强度可靠度

图 17.3-9 为 $3s$ - S - N 线图。图中实线为疲劳强度均值的 S - N 曲线，虚线为 $-3s$ 的 S - N 曲线。 $3s$ - S - N 线图的绘制方法与 P - S - N 线图类似， $-3s$ 线相当于失效概率 $P = 0.00135 \approx 0.001$ 线。因此， $3s$ - S - N 线图与 P - S - N 线图几乎是重合的。图 17.3-9 即为由成组试验法和升降试验法统计处理后绘出的 $3s$ - S - N 线图。图 17.3-10 为近似的 $3s$ - S - N 线图。

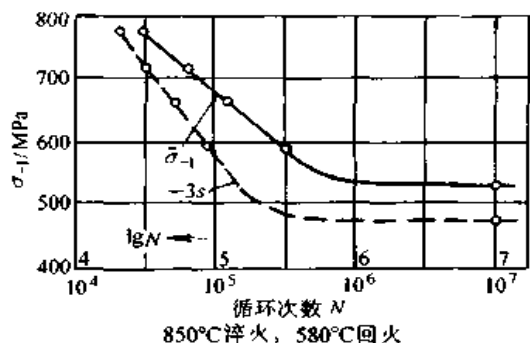


图 17.3-9 40CrNiMoA 钢的 $3s$ - S - N 线图

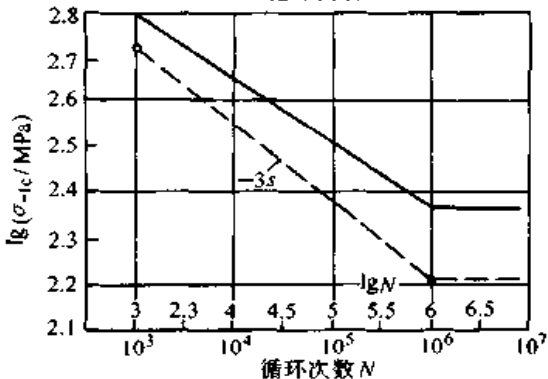
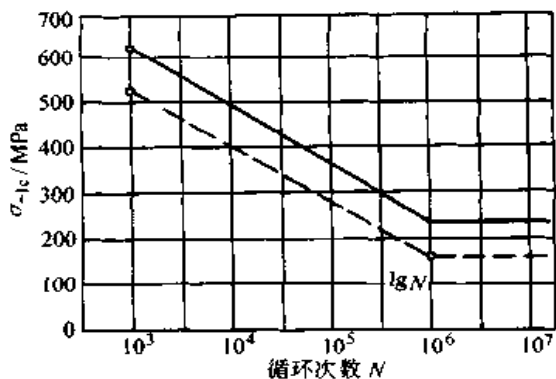


图 17.3-10 40Cr 钢心轴的近似 $3s$ - S - N 线图

按 $3s$ - S - N 线图进行疲劳强度的可靠度计算时，如图 17.3-11 所示，对有限寿命的疲劳强度可靠度计算，应在指定应力循环次数 N 处取疲劳强度的均值和标准差。例如图 17.3-11 中 a 点的纵坐标为 $\bar{\sigma}_{-1cN}$ ， a 点和 b 点纵坐标差的 $1/3$ 为 $s_{\sigma_{-1cN}}$ 。对无限寿命的疲劳强度的可靠度计算则按 N_{∞} 右边水平线部分取均值 $\bar{\sigma}_{-1c}$ 和标准差 $s_{\sigma_{-1c}}$ 。

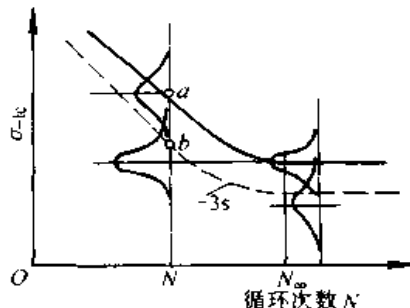


图 17.3-11 按 $3s$ - S - N 线图的计算

应该注意，若代表疲劳强度的纵轴取为对数坐标，则应将图 17.3-11 中读出的数值取反对数后再取疲劳强度的均值和标准差。

为使用方便，将 $3s$ - S - N 线图用经验公式来表示。按双对数坐标上的 $3s$ - S - N 近似直线，寿命为 N 的零件疲劳强度均值

$$\bar{\sigma}_{-1cN} = \bar{\sigma}_{-1c} K_N \quad (17.3-57)$$

式中 K_N ——均值线的寿命系数

$$K_N = \left(\frac{N_{\infty}}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (17.3-58)$$

式中 N ——指定的应力循环次数，当 $N \geq N_{\infty}$ ，取 $N = N_{\infty}$ ；当 $N \leq N_0$ ，取 $N = N_0$ 。

m ——均值线的试验指数。

$$m = \frac{\lg N_{\infty} - \lg N_0}{\lg \bar{\sigma}_{-1cN_0} - \lg \bar{\sigma}_{-1c}} \quad (17.3-59)$$

寿命为 N 时零件疲劳强度的标准差

$$s_{\sigma_{-1cN}} = \frac{\bar{\sigma}_{-1cN} - (\sigma_{-1cN})_{-3s}}{3} \quad (17.3-60)$$

式中 $(\sigma_{-1cN})_{-3s}$ ——指定寿命 N 时 $-3s$ 线上疲劳强度。

$$(\sigma_{-1cN})_{-3s} = (1 - 3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c} (K_N)_{-3s} \quad (17.3-61)$$

式中 $(K_N)_{-3s}$ —— $-3s$ 线上的寿命系数。

$$(K_N)_{3s} = \left(\frac{N_\infty}{N} \right)^{\frac{1}{m-3s}} \quad (17.3-62)$$

式中 $m-3s$ —— $-3s$ 线上的试验指数。

$$m-3s = \frac{\lg N_\infty - \lg N_0}{\lg(1-3V_{\sigma_{-1cN}}) \bar{\sigma}_{-1cN} - \lg(1-3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c}} \quad (17.3-63)$$

当疲劳强度的均值和标准差求得后，若再按载荷和几何尺寸等求得工作应力的均值和标准差，即可用本章第 1 节的方法验算零件的疲劳强度可靠度。

5.5 按 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 线图验算疲劳强度可靠度

图 17.3-12 是 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 的线图。图中实线为 $\sigma_m-\sigma_a$ 曲线的均值，虚线与均值曲线间隔为 3 倍的标准差，即 $-3s$ 线。当已有所设计零件的相应 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 线图时，则强度的均值和标准差即可直接从图 17.3-12 上量取，若工作中应力循环特性 r 为常量，可按工作应力 $\bar{\sigma}_{ml}$ 和 $\bar{\sigma}_{al}$ 在图 17.3-12 中描得一点 A，过原点 O 和该点引一直线 \overline{OA} ，应力和强度均按 \overline{OA} 线方向的向量和计算；类似，若工作中平均应力 σ_{ml} 为常量，可按 σ_{ml} 在图上引垂线 $\overline{BB'}$ ，计算时按工作应力幅、强度数据 $\bar{\sigma}_a$ 和 s_{σ_a} 都在 $\overline{BB'}$ 线上量取；若工作中最小应力 σ_{min} 为常量，可按 σ_{min} 在图 17.3-12 上引 45° 斜线 $\overline{CC'}$ ，应力和强度均按在 $\overline{CC'}$ 方向的向量和计算。

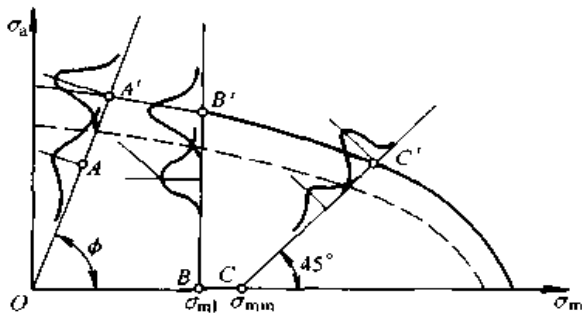


图 17.3-12 按 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 的计算

图 17.3-13 为某零件的 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 线图，对最常用的 r 为常量的情况，工作应力的均值

$$\bar{\sigma}_\phi = (\bar{\sigma}_{ml}^2 + \bar{\sigma}_{al}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-64)$$

式中 $\bar{\sigma}_{ml}$ —— 工作应力的平均应力均值；

$\bar{\sigma}_{al}$ —— 工作应力的应力幅均值。

工作应力的标准差

$$s_{\sigma_\phi} = (s_{\sigma_{ml}}^2 + s_{\sigma_{al}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (17.3-65)$$

式中 $s_{\sigma_{ml}}$ —— 工作应力的平均应力标准差；

$s_{\sigma_{al}}$ —— 工作应力的应力幅标准差。

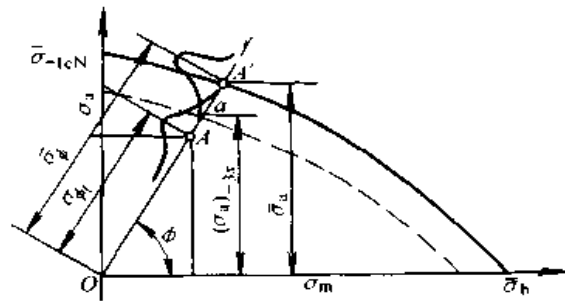


图 17.3-13 某零件的 $3s-\sigma_m-\sigma_a$ 线图

疲劳强度可直接从图 17.3-13 上量得，即 $\bar{\sigma}_\phi = \overline{OA'}$ ， $S_{\sigma_\phi} = \frac{aA'}{3}$ 。疲劳强度也可按近似的经验公式来求。这时常假设 $\sigma_m-\sigma_a$ 曲线为折线，如图 17.3-14 所示。通常应先求出疲劳强度的 $\bar{\sigma}_a$ 和 $(\sigma_a)_{-3s}$ ，则疲劳强度的均值和标准差

$$\bar{\sigma}_\phi = \frac{\bar{\sigma}_a}{\sin \phi} \quad (17.3-66)$$

$$s_{\sigma_\phi} = \frac{\bar{\sigma}_a - (\sigma_a)_{-3s}}{3 \sin \phi} \quad (17.3-67)$$

$$\phi = \arctan \frac{\bar{\sigma}_{al}}{\sigma_{ml}} \quad (17.3-68)$$

$$\bar{\sigma}_a = \frac{\bar{\sigma}_{-1c}}{1 + \psi_\sigma \cot \phi} \quad (17.3-69)$$

$$\psi_\sigma = \frac{2\bar{\sigma}_{-1c} - \bar{\sigma}_{oc}}{\sigma_{oc}} \quad (17.3-70)$$

$$(\sigma_a)_{-3s} = \frac{(1-3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c}}{1 + (\psi_\sigma)_{-3s} \cot \phi} \quad (17.3-71)$$

$$(\psi_\sigma)_{-3s} = \frac{2(1-3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c} - (1-3V_{\sigma_{oc}}) \bar{\sigma}_{oc}}{(1-3V_{\sigma_{oc}}) \bar{\sigma}_{oc}} \quad (17.3-72)$$

求得 $\bar{\sigma}_\phi$ 和 s_{σ_ϕ} 后，当工作应力已知，按式 (17.3-64)、(17.3-65) 就可求得 $\bar{\sigma}_{ml}$ 和 $s_{\sigma_{ml}}$ ，然后按本章第 1 节的方法验算零件的疲劳强度可靠度。

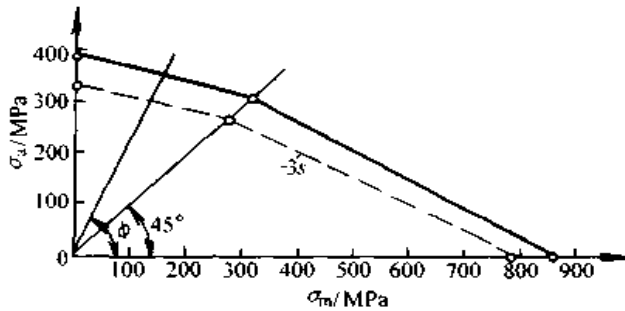


图 17.3-14 近似的 3s-σ_m-σ_e 线图

5.6 按等效应力验算疲劳强度可靠度

当应力循环特性 r 为常量时，非对称循环的变应力可近似化为疲劳等效的对称循环变应力。这时强度的均值即为 $\bar{\sigma}_{-1c}$ ，变异系数为 $V_{\sigma_{-1c}}$ ，应力的均值为等效应力的均值

$$\bar{\sigma}_e = \bar{\sigma}_{al} + \psi_e \bar{\sigma}_{mi} \quad (17.3-73)$$

式中 ψ_e ——折算等效系数。当 $\phi \geq 45^\circ$ 时

$$\psi_e = \frac{2\bar{\sigma}_{-1c} - \bar{\sigma}_e}{\bar{\sigma}_e} \approx \frac{K_N (2\bar{\sigma}_{-1} - \bar{\sigma}_0)}{K_D \sigma_0} \quad (17.3-74)$$

这里的 $K_D = \frac{\bar{K}_\sigma}{\beta_q}$ (见本章 5.2 节)。

应力的变异系数为等效应力的变异系数

$$V_{\sigma_e} = V_{\sigma_{al}} = V_{\sigma_r} \quad (17.3-75)$$

5.7 受复合应力时疲劳强度可靠度的验算

受复合应力时，可根据相应的强度理论求适当的计算应力。受非对称循环变应力时仍可用等效应力的概念。例如，轴的危险截面上同时受有非对称循环的正应力 σ_r 和剪应力 τ_r ，则

$$\sigma_{al} = \frac{1-r_\sigma}{2} \sigma_r, \quad \sigma_{mi} = \frac{1+r_\sigma}{2} \sigma_r, \quad \sigma_e = \sigma_{al} + \psi_e \sigma_{mi};$$

$$\tau_{al} = \frac{1-r_\tau}{2} \tau_r, \quad \tau_{mi} = \frac{1+r_\tau}{2} \tau_r, \quad \tau_e = \tau_{al} + \psi_\tau \tau_{mi}$$

若按第四强度理论，则计算应力

$$\sigma_1 = (\sigma_e^2 + 3\tau_e^2)^{\frac{1}{2}}$$

这时，强度仍用对称循环的疲劳强度 σ_{-1c} 。计算方法同前。

5.8 疲劳强度可靠度计算的应用举例

例 9 某回转心轴用 40Cr 制造，调质后抗拉强度极限 $\bar{\sigma}_b = 939.6$ MPa，危险截面为变断面，

圆角过渡， $D = 120$ mm， $d = 100$ mm， $\rho = (10 \pm 2)$ mm，精车，受弯矩 $M = 30\,000$ Nm。验算 $N = 10^5$ 时不疲劳失效的可靠度。

解 1) 绘制零件的近似 P-S-N 曲线

取 $N_\infty = 10^6$ ， $N_0 = 10^3$ ， $\bar{\sigma}_{-1} = 0.45 \bar{\sigma}_b = 422.82$ MPa， $\sigma_{-1N_0} = 0.85 \bar{\sigma}_b = 798.66$ MPa。在图 17.3-8 上描点连接成光滑试件的近似均值 S-N 曲线，如图 17.3-8 中虚线 b-a-c。

取一般常规设计修正系数作为均值， $\bar{K}_\sigma = 1.53$ ， $\bar{\epsilon}_\sigma = 0.92$ ， $\bar{\beta} = 0.92$ ， $\bar{\beta}_q = 1$ 。按式 (17.3-39)，综合修正系数均值

$$\bar{K}_{\sigma c} = \frac{\bar{K}_\sigma}{\bar{\epsilon}_\sigma} + \frac{1}{\bar{\beta}} - 1 = \frac{1.53}{0.92} + \frac{1}{0.92} - 1 = 1.75$$

按式 (17.3-38)， N_∞ 时零件疲劳强度均值

$$\bar{\sigma}_{-1c} = \frac{\bar{\sigma}_{-1} \bar{\beta}_q}{\bar{K}_{\sigma c}} = \frac{422.8 \times 1}{1.75} \text{ MPa} = 241.6 \text{ MPa}$$

由图 17.3-6 查得 $q_{N_0} = 0.52$ ，按式 (17.3-50)， N_0 时的有效应力集中系数均值

$$\bar{K}_{\sigma N_0} = (\bar{K}_\sigma - 1) q_{N_0} + 1 = (1.53 - 1) \times 0.52 + 1 = 1.276$$

按式 (17.3-49)， N_0 时零件疲劳强度均值

$$\bar{\sigma}_{-1cN_0} = \frac{\bar{\sigma}_{-1N_0}}{\bar{K}_{\sigma N_0}} = \frac{798.66}{1.276} \text{ MPa} = 625.91 \text{ MPa}$$

在图 17.3-8 上描点连接成零件的近似均值 S-N 曲线，即图 17.3-8 中 $P = 0.50$ 的曲线。

取 $V_{\sigma_{-1}} = 0.10$ ， $V_{\beta_q} = 0$ ， $V_{K_\sigma} = 0.025$ ，按式 (17.3-41)， N_∞ 时零件疲劳强度的变异系数

$$\begin{aligned} V_{\sigma_{-1c}} &= (V_{\sigma_{-1}}^2 + V_{\beta_q}^2 + V_{K_\sigma}^2 + V_{\sigma_{-1}} V_{K_\sigma} + V_{\beta_q} V_{K_\sigma})^{\frac{1}{2}} \\ &= (0.10^2 + 0 + 0.025^2 + 0.10 \times 0.025 + 0)^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.115 \end{aligned}$$

按式 (17.3-40)， N_∞ 时零件疲劳强度的标准差

$$s_{\sigma_{-1c}} = \bar{\sigma}_{-1c} V_{\sigma_{-1c}} = 241.6 \times 0.115 \text{ MPa} = 27.79 \text{ MPa}$$

指定 $P = 0.10, 0.01, 0.001$ ，由表 17.1-3 查得相应的 $Z_P = -1.282, -2.326, -3.090$ 。按式 (17.3-55)， N_∞ 时不同失效概率 P 时零件的疲劳强度

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1c})_{0.10} &= \bar{\sigma}_{-1c} + Z_{0.10} s_{\sigma_{-1c}} \\ &= 241.6 \text{ MPa} - 1.282 \times 27.79 \text{ MPa} = 205.98 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1c})_{0.01} &= \bar{\sigma}_{-1c} + Z_{0.01} s_{\sigma_{-1c}} \\ &= 241.6 \text{ MPa} - 2.326 \times 27.79 \text{ MPa} = 176.97 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1c})_{0.001} &= \bar{\sigma}_{-1c} + Z_{0.001} s_{\sigma_{-1c}} \\ &= 241.6 \text{ MPa} - 3.090 \times 27.79 \text{ MPa} \\ &= 155.74 \text{ MPa} \end{aligned}$$

取 $V_{\sigma_{-1cN_0}} \approx V_{\sigma_{-1c}} = 0.05$, $V_{K_{\sigma_{-1cN_0}}} \approx V_{K_{\sigma_{-1c}}} = 0.025$ 。按式 (17.3-52), N_0 时零件疲劳强度的变异系数

$$\begin{aligned} V_{\sigma_{-1cN_0}} &= (V_{\sigma_{-1cN_0}}^2 + V_{K_{\sigma_{-1cN_0}}}^2)^{\frac{1}{2}} = (0.05^2 + 0.025^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.056 \end{aligned}$$

按式 (17.3-51), N_0 时零件疲劳强度的标准差

$$\begin{aligned} S_{\sigma_{-1cN_0}} &= \bar{\sigma}_{-1cN_0} V_{\sigma_{-1cN_0}} = 625.91 \times 0.056 \text{ MPa} \\ &= 35.05 \text{ MPa} \end{aligned}$$

按式 (17.3-56), N_0 时不同失效概率 P 时零件的疲劳强度

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1cN_0})_{0.10} &= \bar{\sigma}_{-1cN_0} + Z_{0.10} s_{\sigma_{-1cN_0}} \\ &= 625.91 \text{ MPa} - 1.282 \times 35.05 \text{ MPa} \\ &= 580.98 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1cN_0})_{0.01} &= \bar{\sigma}_{-1cN_0} + Z_{0.01} s_{\sigma_{-1cN_0}} \\ &= 625.91 \text{ MPa} - 2.326 \times 35.05 \text{ MPa} \\ &= 544.38 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1cN_0})_{0.001} &= \bar{\sigma}_{-1cN_0} + Z_{0.001} s_{\sigma_{-1cN_0}} \\ &= 625.91 \text{ MPa} - 3.090 \times 35.05 \text{ MPa} \\ &= 517.61 \text{ MPa} \end{aligned}$$

用这些值在图 17.3-8 上描点, 并将相同 P 的点用直线相连得近似 P - S - N 曲线, 即图 17.3-8。

2) 验算零件不疲劳失效的可靠度

求工作应力, 按材料力学公式

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 \times 30\,000 \times 10^3}{\pi \times 100^3} \text{ MPa} = 305.58 \text{ MPa}$$

由指定的 $N = 10^5$, 即 $\lg N = 5$, 以及工作应力 $\sigma = 305.58$ 在图 17.3-8 中描点。由图知, 此点约在 $P = 0.01$ 的 S - N 线上, 故不疲劳失效的可靠度

$$R = 1 - P = 1 - 0.01 = 0.99$$

例 10 数据同例 9。若危险截面的弯应力 $\sigma \sim N(300, 21^2)$ MPa, 求 $N = 10^5$ 时疲劳强度的可靠度。

解 由例 9 得 $N_{\infty} = 10^6$ 时 $\bar{\sigma}_{-1c} = 241.6$ MPa, $s_{\sigma_{-1c}} = 27.79$ MPa, $V_{\sigma_{-1c}} = 0.115$; $N_0 = 10^3$ 时, $\bar{\sigma}_{-1cN_0} = 625.91$ MPa, $s_{\sigma_{-1cN_0}} = 35.05$ MPa, $V_{\sigma_{-1cN_0}} = 0.056$ 。该零件的 $3s$ - S - N 线图类似图 17.3-10。现按双对数坐标的经验公式求 $\bar{\sigma}_{-1cN}$ 和 $s_{\sigma_{-1cN}}$ 。

均值线的试验指数, 按式 (17.3-59)

$$\begin{aligned} m &= \frac{\lg N_{\infty} - \lg N_0}{\lg \bar{\sigma}_{-1cN_0} - \lg \bar{\sigma}_{-1c}} = \frac{\lg 10^6 - \lg 10^3}{\lg 625.91 - \lg 241.6} \\ &= 7.257 \end{aligned}$$

均值线的寿命系数, 按式 (17.3-58)

$$K_N = \left(\frac{N_{\infty}}{N} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{10^6}{10^5} \right)^{\frac{1}{7.257}} = 1.373$$

$N = 10^5$ 时疲劳强度的均值, 按式 (17.3-57)

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{-1cN} &= \bar{\sigma}_{-1c} K_N = 241.6 \times 1.373 = 331.72 \text{ N/mm}^2 \\ &- 3s \text{ 线的试验指数, 按式 (17.3-63)} \end{aligned}$$

$$m_{-3s} =$$

$$\begin{aligned} &\frac{\lg N_{\infty} - \lg N_0}{\lg (1 - 3V_{\sigma_{-1cN_0}}) \bar{\sigma}_{-1cN_0} - \lg (1 - 3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c}} \\ &= \frac{\lg 10^6 - \lg 10^3}{\lg (1 - 3 \times 0.056) \times 625.91 - \lg (1 - 3 \times 0.115) \times 241.6} \\ &= 5.799 \end{aligned}$$

$-3s$ 线的寿命系数, 按式 (17.3-62)

$$(K_N)_{-3s} = \left(\frac{N_{\infty}}{N} \right)^{\frac{1}{m_{-3s}}} = \left(\frac{10^6}{10^5} \right)^{\frac{1}{5.799}} = 1.487$$

$N = 10^5$ 时 $-3s$ 线上疲劳强度, 按式 (17.3-

61)

$$\begin{aligned} (\sigma_{-1cN})_{-3s} &= (1 - 3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c} (K_N)_{-3s} \\ &= (1 - 3 \times 0.115) \times 241.6 \times 1.487 \text{ MPa} \\ &= 235.31 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$N = 10^5$ 时疲劳强度的标准差, 按式 (17.3-60)

$$\begin{aligned} s_{\sigma_{-1cN}} &= \frac{\bar{\sigma}_{-1cN} - (\sigma_{-1cN})_{-3s}}{3} = \frac{331.72 - 235.31}{3} \text{ MPa} \\ &= 32.14 \text{ MPa} \end{aligned}$$

设强度也服从正态分布, 按表 17.3-1

$$\begin{aligned} Z_R &= \frac{\bar{\sigma}_{-1cN} - \sigma}{(s_{\sigma_{-1cN}}^2 + s_{\sigma}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{331.72 - 300}{(32.14^2 + 21^2)^{\frac{1}{2}}} \\ &= 0.8262 \end{aligned}$$

由 $Z_R = 0.8262$ 查表 17.1-3 得

$$R = \Phi(Z_R) = \Phi(0.8262) = 0.7955$$

5.9 疲劳寿命的可靠性预计

在一定的应力水平, 疲劳寿命服从某种分布。金属的疲劳寿命一般服从对数正态分布, 也有服从威布尔分布。由于对数正态分布可利用正态分布分析的各种方法, 使用较为方便。下面均按寿命服从对数正态分布来预计可靠寿命。

5.9.1 应力为确定量的可靠寿命

当应力为确定量或应力的变异系数不大而假定为确定量时，可直接利用 P-S-N 线图或 3s-S-N 线图。

利用 P-S-N 线图时（图 17.3-15），过该图纵轴指定的应力水平作水平线与指定的失效概率 P 的 S-N 曲线相交，该交点的横坐标就是相应失效概率的寿命或可靠度 R = 1 - P 的可靠寿命。

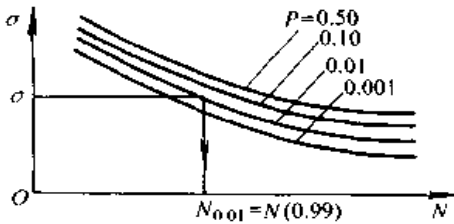


图 17.3-15 用 P-S-N 线图预计可靠寿命

利用 3s-S-N 线图时，可靠度为 R 的可靠寿命

$$N(R) = 10^{\bar{L} - Z_R s_L} \quad (17.3-76)$$

式中 Z_R —— 联结系数，按指定的 R 查表 17.2-11 或表 17.1-3；

\bar{L} —— 对数寿命的均值；

s_L —— 对数寿命的标准差。

求 \bar{L} 和 s_L 时（图 17.3-16），过该图纵轴指定的应力水平作水平线，可在该水平线上直接读得对数寿命的均值 \bar{L} 和标准差 s_L 。若没有相应的 3s-S-N 线图，可按双对数坐标为直线的经验公式求出。在应力水平 σ 时

$$\bar{L} = \lg N_\infty - m (\lg \sigma - \lg \bar{\sigma}_{-1c}) \quad (17.3-77)$$

$$L_{-3s} = \lg N_\infty - m_{-3s} [\lg \sigma - \lg (1 - 3V_{\sigma_{-1c}}) \bar{\sigma}_{-1c}] \quad (17.3-78)$$

$$s_L = \frac{\bar{L} - L_{-3s}}{3} \quad (17.3-79)$$

这里， m 和 m_{-3s} 分别用式（17.3-59）、（17.3-63）求得。

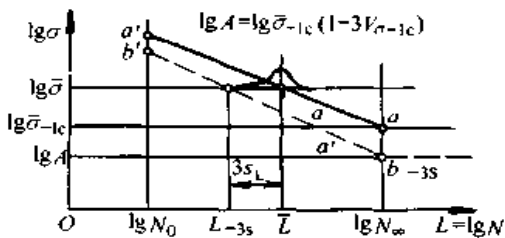


图 17.3-16 用 3s-S-N 线图预计可靠寿命

5.9.2 应力为随机变量的可靠寿命

应力为随机变量是更一般的情况，这时可靠寿命

$$N(R) = N_\infty \left(\frac{\bar{\sigma}_{-1c}}{n_R \sigma_1} \right)^m \quad (17.3-80)$$

式中 σ_1 —— 工作应力幅的均值。受非对称循环变应力时，取等效应力幅的均值；受复合应力时，取按强度理论算得的计算应力；

n_R —— 可靠安全系数，由式（17.3-17）、式（17.3-19）、式（17.3-21）确定。

求 n_R 时所需的 $V_{\sigma_{-1c}} = V_{\sigma_{-1cN}}$ 与寿命有关，按 3s-S-N 线图的经验公式求时，则

$$V_{\sigma_{-1cN}} = \frac{1}{3} \left[1 - (1 - 3V_{\sigma_{-1c}}) \left(\frac{N_\infty}{N} \right)^{\frac{1}{m-3s} - \frac{1}{m}} \right] \quad (17.3-81)$$

因此，计算可靠寿命时需迭代计算。式中的 m 和 m_{-3s} 分别由式（17.3-59）、式（17.3-63）确定。

若按式（17.3-80）求得的可靠寿命 $N(R) > N_\infty$ ，对于钢铁件可认为 $N(R) \rightarrow \infty$ 。

例 11 按例 10 的数据，求 $R = 0.95$ 时的可靠寿命。

解 当 $R = 0.95$ 时，查表 17.1-3 得 $Z_R = 1.645$ 。假定应力和强度均服从正态分布。 $V_d = V_\sigma = \frac{21}{300} = 0.07$ ，初取 $N = N_\infty$ ，则 $V_{\sigma_{-1cN}} = V_{\sigma_{-1c}} = 0.115$ 。若按式（17.3-17）

$$n_R = \frac{1 + Z_R (V_{\sigma_{-1cN}}^2 + V_d^2 - Z_R^2 V_{\sigma_{-1cN}}^2 V_d^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - Z_R^2 V_{\sigma_{-1cN}}^2} = \frac{1 + 1.645 (0.115^2 + 0.07^2 - 1.645^2 \times 0.115^2 \times 0.07^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - 1.645^2 \times 0.115^2} = 1.266$$

按式（17.3-80）

$$N(R) = N(0.95) = N_\infty \left(\frac{\bar{\sigma}_{-1c}}{n_R \sigma_1} \right)^m = 10^6 \times \left(\frac{241.6}{1.266 \times 300} \right)^{7.257} = 37\,524 \text{ 次}$$

$N(0.95) < N_\infty$ ，故 $V_{\sigma_{-1cN}}$ 应降低， $N(0.95)$ 会增大。再取 $N = 5 \times 10^4$ ，按式（17.3-81）

$$V_{\sigma_{-1cN}} = \frac{1}{3} \left[1 - (1 - 3V_{\sigma_{-1c}}) \left(\frac{N_\infty}{N} \right)^{\frac{1}{m-3s} - \frac{1}{m}} \right]$$

$$= \frac{1}{3} \left[1 - (1 - 3 \times 0.115) \left(\frac{10^6}{5 \times 10^4} \right)^{\frac{1}{5.799} - \frac{1}{7.257}} \right]$$

$$= 0.0911$$

$n_R =$

$$\frac{1 + 1.645 (0.0911^2 + 0.07^2 - 1.645^2 \times 0.0911^2 \times 0.07^2)^{\frac{1}{2}}}{1 - 1.645^2 \times 0.0911^2}$$

$$= 1.215$$

$$N(0.95) = 10^6 \left(\frac{241.6}{1.215 \times 300} \right)^{7.257} = 505\ 70 \text{ 次}$$

与估计的 N 基本一致。

6 断裂韧性的概率设计

零件在制造或使用过程中形成裂纹是难以避免的。有裂纹的零件不一定就不能工作，需要用断裂力学的方法来判断。与机械强度类似，在断裂判据中的变量也都是随机变量，因此宜用概率

设计。

6.1 静载抗断裂的可靠度

断裂力学计算带裂纹的零件承受静载荷时用断裂判据。对于张开型

$$K_I \leq K_{IC} \quad (17.3-82)$$

式中 K_I ——应力强度因子；

K_{IC} ——断裂韧性。

张开型应力强度因子可用下式计算

$$K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (17.3-83)$$

式中 σ ——工作应力；

a ——裂纹长度；

α ——修正系数，反映裂纹几何及受力条件，表 17.3-13 为几种简单情况的 α 值。

表 17.3-13 受拉应力的几个 α 值

类别	无限宽板斜透纹	无限宽板边透纹	无限体深埋圆片状纹
α	$\sin^2 \theta$	1.12	0.637
图形			

显然， σ 、 α 、 a 都是随机变量。为了简单，假定 α 为确定量。根据式 (17.3-82)，不发生断裂失效的可靠度

$$R = P(K_{IC} > K_I) \quad (17.3-84)$$

这里的 K_I 相当于应力-强度模型中的应力 x_1 ， K_{IC} 相当于强度 x_s ，如果了解了它们的分布类型和分布参数后，就可按本章 1.1~1.5 节的方法求可靠度，或与一般机械强度设计类似进行概率设计计算。

K_{IC} 的数据应由试验统计获得，也可由文献中查到参考数据，以此作为 \bar{K}_{IC} 。 \bar{K}_{IC} 的变动范围颇大，一般可暂按表 17.3-6 或表 17.3-14 选取变异系数。

例 12 受静载荷的矩形截面拉杆，材料为

32SiMnMoV 钢，920℃ 油淬，320℃ 回火， $\sigma_b = 1\ 950 \text{ MPa}$ ， $\sigma_s = 1\ 750 \text{ MPa}$ ， $K_{IC} = 1\ 840 \text{ MPa}$ ，最小截面尺寸宽 $W = (150 \pm 3) \text{ mm}$ ，厚 $B = (5 \pm 0.15) \text{ mm}$ ，板边透纹 $a = (0.5 \pm 0.1) \text{ mm}$ ，受拉力 $F = (1\ 000\ 000 \pm 100\ 000) \text{ N}$ ，如果 $V_{\sigma_s} = 0.07$ ， $V_{K_{IC}} = 0.10$ ，求不屈服失效和断裂失效的可靠度。

解 取计算系数 $\bar{K} = 1$ ， $V_K = 0$ 。

(1) 不屈服失效的可靠度

$$\text{工作应力 } \sigma = \frac{F}{WB}$$

载荷的均值和变异系数

$$\bar{F} = 1\ 000\ 000 \text{ N,}$$

$$V_F = \frac{100\ 000}{3 \times 1\ 000\ 000} = 0.033$$

表 17.3-14 断裂韧性的变异系数

材 料	钢	铝 合 金	钛 合 金	镍 合 金
$V_{K_{IC}}$	0.15 (0.02~0.19)	0.20 (0.02~0.422)	0.10 (0.014~0.101)	0.06 (0.049~0.061)

宽度的均值和变异系数

$$\bar{W} = 150 \text{ mm}, V_W = \frac{3}{3 \times 150} = 0.0067$$

厚度的均值和变异系数

$$\bar{B} = 5 \text{ mm}, V_B = \frac{0.15}{3 \times 5} = 0.01$$

工作应力的均值、变异系数及标准差分别为

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{F}}{WB} = \frac{1\,000\,000}{150 \times 5} \text{ MPa} = 1\,333.33 \text{ MPa}$$

$$V_{\sigma} = (V_F^2 + V_W^2 + V_B^2)^{\frac{1}{2}} = (0.033^2 + 0.0067^2 + 0.01^2)^{\frac{1}{2}} = 0.035$$

$$s_{\sigma} = \bar{\sigma} V_{\sigma} = 1\,333.33 \times 0.035 \text{ MPa} = 46.67 \text{ MPa}$$

强度的均值和标准差分别为

$$\bar{\sigma}_s = 1\,750 \text{ MPa}$$

$$s_{\sigma_s} = \bar{\sigma}_s V_{\sigma_s} = 1\,750 \times 0.07 \text{ MPa} = 122.5 \text{ MPa}$$

假设工作应力和屈服极限都服从正态分布，则联结系数

$$Z_R = \frac{\bar{\sigma}_s - \bar{\sigma}}{(s_{\sigma_s}^2 + s_{\sigma}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1\,750 - 1\,333.33}{(122.5^2 + 46.67^2)^{\frac{1}{2}}} = 3.179$$

查表 17.1-3 得不屈服失效的可靠度

$$R = \Phi(Z_R) = \Phi(3.179) = 0.99925$$

(2) 不断裂失效的可靠度

按式 (17.3-83) 求应力强度因子，因 $a \ll \bar{W}$ ，故由表 17.3-13 取 $\alpha = 1.12$ (假定为确定量)。裂纹长度的均值和变异系数

$$\bar{a} = 0.5 \text{ mm}, V_a = \frac{0.1}{3 \times 0.5} = 0.067$$

应力强度因子的均值、变异系数和标准差分别为

$$\bar{K}_I = \alpha \bar{\sigma} \sqrt{\pi a} = 1.12 \times 1\,333.33 \sqrt{\pi \times 0.5} = 1\,871.61 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$$

$$V_{K_I} = (V_{\sigma}^2 + \frac{1}{4} V_a^2)^{\frac{1}{2}} = (0.035^2 + \frac{1}{4} \times 0.067^2)^{\frac{1}{2}} = 0.0484$$

$$S_{K_I} = \bar{K}_I V_{K_I} = 1\,871.61 \times 0.0484$$

$$= 90.586 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$$

断裂韧性的均值和标准差分别为

$$\bar{K}_{IC} = 1\,840 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$$

$$S_{K_{IC}} = \bar{K}_{IC} V_{K_{IC}} = 1\,840 \times 0.1 = 184 \text{ N/mm}^{\frac{3}{2}}$$

假设应力强度因子和断裂韧性都服从正态分布，则联结系数

$$Z_R = \frac{\bar{K}_{IC} - \bar{K}_I}{(s_{K_{IC}}^2 + s_{K_I}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1\,840 - 1\,871.61}{(184^2 + 90.586^2)^{\frac{1}{2}}} = -0.154$$

查表 17.1-3 得不断裂失效的可靠度

$$\begin{aligned} R &= \Phi(Z_R) = \Phi(-0.154) \\ &= 1 - \Phi(0.154) \\ &= 0.43879 \end{aligned}$$

由此例可看出，虽然按屈服强度可认为可靠度很高，但按断裂韧性则可靠性很低，几乎不能用。显然，断裂失效的后果比屈服失效的后果要严重得多。一般，不断裂失效的可靠度宜高于不屈服失效的可靠度。因此，上例中的拉杆应改换材料或热处理。

6.2 变载抗断裂的可靠度

受反复变应力作用时，裂纹可能逐渐扩展而引起断裂失效。促进裂纹扩展的参数为应力强度因子幅度

$$\Delta K_I = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (17.3-85)$$

式中 $\Delta \sigma$ —— 应力变化幅度。

$$\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (17.3-86)$$

当应力强度因子幅度 ΔK_I 小于裂纹开始扩展的门槛值 ΔK_{th} 时，裂纹几乎不扩展。这时 ΔK_I 相当于应力-强度模型中的应力 σ_1 ， ΔK_{th} 相当于强度 σ_s ，故受变载裂纹不扩展的可靠度

$$R = P(\Delta K_{th} > \Delta K_I) \quad (17.3-87)$$

ΔK_{th} 值是根据试验求得的。当受对称循环变应力时，结构碳钢、低合金钢和镍基合金， $\Delta K_{th} = (5.52 \sim 6.82) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ ；高强度钢和铝合金， $\Delta K_{th} = (1.09 \sim 2.18) \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ 。概略计算时可暂假设 ΔK_{th} 服从正态分布，按“3 σ ”原则取其均值和标准差。重要的情况宜做具体试验

以确定 ΔK_{II} 的分布:

参 考 文 献

- 1 徐灏主编. 机械设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 2 蔡春源主编. 机械零件设计手册 (第三版). 北京: 冶金工业出版社, 1995
- 3 王超、王金等编著. 机械可靠性工程. 北京: 冶金工业出版社, 1992
- 4 徐灏编著. 机械强度的可靠性设计. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 5 [美] E.B 豪根. 机械概率设计. 北京: 机械工业出版社, 1985

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
18
篇

疲劳强度设计

主 编 王 德 俊

编 写 王 德 俊

审 稿 崔 雨 华



中国机械工程学会
中国机械设计大典编委会

第 1 章 概 论

1 疲劳的分类

况、疲劳有多种分类方法。常用的疲劳分类见表 18.1-1。

根据研究对象、载荷条件、环境和介质情

表 18.1-1 疲 劳 分 类

分类	名 称	特 征 说 明	举 例
按研究对象分	材料疲劳	通过标准试样研究材料的失效机理、化学成分和微观组织对疲劳强度的影响, 疲劳试验方法和数据处理方法, 材料的基本疲劳特性, 环境和工况的影响, 疲劳断口的宏观和微观形貌等	用国家规定的标准试样做的各种疲劳试验
	结构疲劳	以零部件、接头以至整机为研究对象, 研究其疲劳性能、抗疲劳设计方法、寿命估算方法、疲劳试验方法, 以及形状、尺寸、表面状态和工艺因素的影响, 提高其疲劳强度方法等	各种工程结构, 机械零部件等
按失效周次分	高周疲劳	材料或结构在低于其屈服强度的循环应力作用下, 经过 $10^4 \sim 10^5$ 次以上的循环产生的失效。高周疲劳一般应力较低, 材料处于弹性范围内, 其应力应变是成比例的, 也称应力疲劳, 它是机械中最常见的疲劳	弹簧、轴、螺栓等
	低周疲劳	材料或构件在接近或超过其屈服强度的循环应力作用下, 在低于 $10^4 \sim 10^5$ 次塑性应变循环产生的失效。由于其应力超过弹性极限, 产生较大塑性变形, 应力应变不成比例, 其主要参数是应变, 也常称为应变疲劳	高压容器, 汽轮机转子、飞机起落架等
按载荷条件分	随机疲劳	应力幅和频率都随时间变化的疲劳	如汽车底盘、半轴悬挂系统等零件
	冲击疲劳	小能量多次冲击引起的疲劳	内燃机阀杆等
	接触疲劳	零件接触表面在接触压力循环作用下出现麻点、剥落或表层压碎剥落, 从而造成零件失效的疲劳	如齿轮传动、滚动轴承、车轮等
	微动磨损疲劳	当两零件表面相接触, 并作小幅度的往复相对运动时, 在接触表面上产生的疲劳, 经过附着、氧化、疲劳三个阶段, 是机械过程和化学过程综合的结果	如铆钉联接件、螺栓联接件、紧配合件、销钉、花键、键联接等
	声疲劳	由气体动力噪声、结构噪声或电磁噪声等噪声使构件产生的疲劳。只有当作为激励力的噪声使构件产生的应力-应变响应足够大, 足以对结构材料造成疲劳损伤时才可能产生声疲劳	如火箭和飞机的涡轮发动机作为噪声源, 使飞行器和机翼表面产生高声压水平的噪声场, 足以对其结构的局部危险区造成声疲劳
按温度环境分	高温疲劳	在高温环境下零件承受循环载荷发生的疲劳。高温指约在 $0.5T_m$ 或再结晶温度以上, T_m 为以热力学温度表示的金属熔点。高温疲劳是疲劳与蠕变共同作用结果	如燃气轮机的叶片由机械振动发生的高温高周疲劳; 燃气轮机转子由装置的起停和停车而发生的高温低周疲劳等

续表 18.1-1

分类	名称	特征说明	举例
按 温 度 环 境 分	低温疲劳	在低于室温环境下零件承受循环应力作用发生的疲劳	寒冷地区露天机械结构产生的疲劳
	热疲劳	由温度循环变化而引起应变循环变化产生的疲劳	锅炉水冷壁管子因冷水分层现象使管子发生的疲劳
	腐蚀疲劳	在腐蚀介质(如酸、碱、海水、淡水、活性气体等)和循环载荷联合作用下产生的疲劳	如化工机械、石油机械某些零件,在酸、碱液体和气体中工作等

2 抗疲劳设计方法

抗疲劳设计方法有名义应力法、局部应力应变法、损伤容限设计法和概率疲劳设计法。

2.1 名义应力法

名义应力法是以材料的 $S-N$ 曲线为依据,以零构件的名义应力为设计参数,计入了有效应力集中系数 K_s 、零件尺寸系数 ϵ 、表面系数 β 和平均应力影响系数 ψ_s 等因素,得到零件的 $S-N$ 曲线,依此进行抗疲劳设计。

当 $S-N$ 曲线的纵轴 σ 和横轴 N 都取对数时,则成为如图 18.1-1 所示的以 P 为交点的两条直线段组成的折线。对于钢材,交点的 $N_0 = 10^7$ 左右。 N_0 称为循环基数。

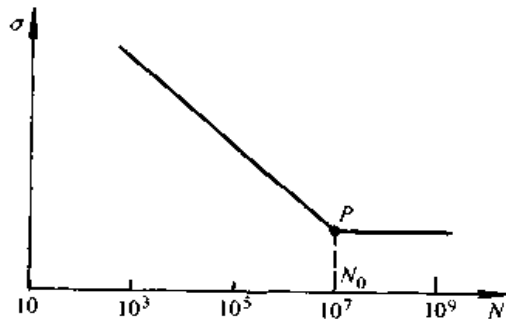


图 18.1-1 取对数坐标的 $\sigma-N$ 曲线

根据平行于横轴的直线进行设计称为无限寿命设计。根据左边斜线进行设计称为有限寿命设计。名义应力法通常也称为常规疲劳设计法或影

响系数法。

2.2 局部应力应变法

以零构件的应变集中处的局部应力、应变为基本设计参数的一种抗疲劳设计方法。其基本思路是:零构件的破坏都是从应变集中部位的最大应变集中处开始。应变集中处的塑性变形是疲劳裂纹形成和扩展的先决条件,因此应变集中处的局部最大应变决定了零构件的疲劳强度和寿命。对于同一种材料,只要其局部最大应力、应变相同,疲劳寿命就相同。

根据相同应变条件下损伤相等原则,可以用光滑试件的应变-寿命曲线估算零构件危险部位的损伤,从而得到零构件疲劳裂纹形成的寿命。

2.3 损伤容限设计法

这种设计方法允许零构件内存在有初始裂纹,应用断裂力学方法来估算其剩余寿命,并通过试验来检验,确保其在使用期内裂纹不致于扩展到引起破坏的程度,保证有裂纹零构件在服役期内的安全。

2.4 概率疲劳设计法

根据零构件的工作应力与疲劳强度相联系的统计方法而进行的抗疲劳设计方法,是概率统计方法与抗疲劳设计相结合的一种设计方法,也称疲劳可靠性设计。

第2章 疲劳载荷

1 概述

载荷可分为两大类，即静载荷和动载荷。动载荷又分为周期载荷、非周期载荷和冲击载荷。周期载荷和非周期载荷统称为疲劳载荷。

一般机器和零件承受的载荷，大都是一个连续的随机载荷。承受随机载荷的零件，在进行疲劳强度计算、寿命估算和疲劳试验之前，必须先确定其载荷谱。在机器工作时直接测得的载荷-时间历程称为工作谱或使用谱，由于随机载荷的不确定性，这种谱无法使用，必须对它进行处理。经过处理后的载荷-时间历程称为载荷谱，该载荷谱具有统计特性，它能本质地反映零件的载荷变化情况。将实测的载荷-时间历程处理成具有代表性的典型载荷谱的过程称为编谱，编谱的重要环

节是应用统计理论来处理所获得的实测子样。

统计处理分析随机载荷的方法主要有：循环计数法和功率谱法。循环计数法是从载荷-时间历程中确定出不同载荷参量值及其出现的次数。功率谱法是借助傅氏变换，将连续变化的随机载荷分解为无限多个具有各种频率的简单变化，得出其功率谱密度函数。

对于疲劳强度来说，最主要的是载荷幅值的变化情况，故广泛使用循环计数法。

2 循环应力和循环应变

2.1 循环应力

最简单的循环应力为恒幅循环应力：图 18.2-1 是四种不同的应力变化规律。

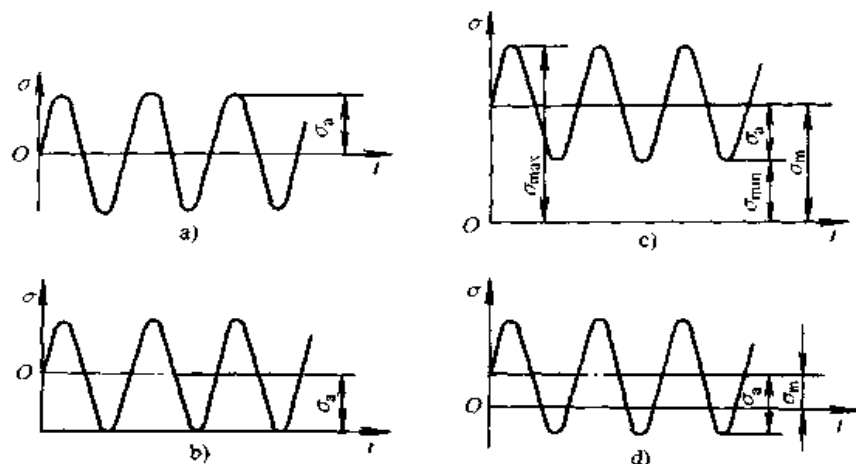


图 18.2-1 恒幅循环应力的种类

a) 对称拉压 b) 脉动拉伸 c) 波动拉伸 d) 波动拉压

图中 σ 为正应力， t 为时间。各应力分量为：
 σ_{\max} ——应力循环中具有最大代数值的应力；
 σ_{\min} ——应力循环中具有最小代数值的应力；
 σ_m ——应力循环中最大应力和最小应力的代数平均值； σ_a ——应力循环中最大应力和最小应力代数差的一半；规定拉应力为正，压应力为负。平均应力 σ_m 、应力幅 σ_a 、与最大应力 σ_{\max} 、

最小应力 σ_{\min} 之间有如下关系

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (18.2-1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (18.2-2)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (18.2-3)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (18.2-4)$$

应力每一周期性变化称为一个应力循环：定

义应力比 r 为

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (18.2-5)$$

对于对称循环, $r = -1$; 对于脉动循环, $r = 0$; 静应力可以看作应力幅为零的循环应力, 此时 $r = +1$ 。任何一个应力循环的应力比都可以在 $-1 \leq r \leq +1$ 范围内取值。

一种循环应力状态, 一般可用 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 σ_m 、 σ_a 和 r 五个参数中的任意两个来确定。如果作用的应力是切应力时, 各应力分量之间的关系有

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} \quad (18.2-6)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} \quad (18.2-7)$$

$$\tau_{\max} = \tau_m + \tau_a \quad (18.2-8)$$

$$\tau_{\min} = \tau_m - \tau_a \quad (18.2-9)$$

2.2 循环应变

由疲劳试验得到的应力-寿命曲线中, 当循环加载的应力水平较低时, 即疲劳的全过程中是弹性应变起主导作用, 这时的应力-寿命曲线 ($\sigma-N$) 能正确反映出应力与寿命之间的关系。但当应力水平较高时, 即塑性应变起主导作用, 则高应力水平部分达到屈服应力, 则应力-寿命曲线出现平坦部分, 见图 18.2-2a。此时的应力不能描述实际寿命的变化, 需要用应变 ϵ 来代替应力 σ , 即成为应变-寿命 ($\epsilon-N$) 曲线, 见图 18.2-2b。而把应变随时间的变化称为循环应变。与上述循环应力相同, 循环应变也有最大应变 ϵ_{\max} , 最小应变 ϵ_{\min} , 平均应变 ϵ_m , 应变幅 ϵ_a 和循环特性参数 r 。

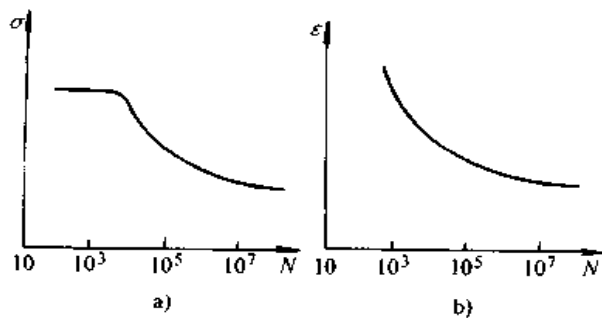


图 18.2-2 用 ϵ 代替 σ 的 S-N 曲线
a) $\sigma-N$ 曲线 b) $\epsilon-N$ 曲线

3 循环计数法

把一个随机的载荷-时间历程处理成一系列的全循环或半循环的过程称为循环计数法。将其分成两大类: 单参数计数法和双参数计数法。单参数计数法只记录载荷谱中的一个参量, 如峰值或范围, 不能给出载荷循环的全部信息。属于这种计数方法有: 峰值计数法, 穿级计数法和范围计数法等。双参数计数法可以记录载荷循环中的两个参量。由于载荷循环中只有两个独立参量, 因此双参数计数法可以记录载荷循环的全部信息, 是一种较好的计数方法。属于这种计数方法有: 范围对计数法, 跑道计数法和雨流计数法等。使用最广泛的是雨流计数法。该法在计数原则上有一定的力学依据, 并具有较高的正确性, 也易于实现自动化程序化。

雨流法的计数原理如下:

如图 18.2-3 所示。对一个实际的载荷时间历程, 取一垂直向下的纵坐标轴表示时间, 横坐标轴表示载荷。这样载荷时间历程形同一座宝塔, 雨点以峰值、谷值为起点向下流动, 根据雨点向下流动的迹线, 确定载荷循环, 这就是雨流法 (或称塔顶法) 名称的由来。其计数规则为

- 1) 雨流的起点依次在每个峰 (谷) 值的内侧开始。
- 2) 雨流在下一个峰 (谷) 值处落下, 直到对面有一个比开始时的峰 (谷) 值更大 (更小) 值为止。
- 3) 当雨流遇到来自上面屋顶流下的雨时就停止。
- 4) 取出所有的全循环, 并记下各自的振程。
- 5) 按正、负斜率取出所有的半循环, 并记下各自的振程。
- 6) 把取出的半循环按雨流法第二阶段计数法则处理并计数。

根据上述规则, 图 18.2-3 中的第 1 个雨流应从 O 点开始, 流到 a 点落下, 经 b 与 c 之间的 a' 点继续流到 c 点落下, 最后停止在比谷值 O 更小的谷值 d 的对应处。取出一个半循环 $O-a-a'-c$ 。第二个雨流从峰值 a 的内侧开始, 由 b 点落下, 由于峰值 c 比 a 大, 故雨流停止于 c 的对应处, 取出半循环 $a-b$ 。第三个雨流从 b 点开始流下, 由于遇到来自上面的雨流 $O-a-$

a' 、故止于 a' 点，取出半循环 $b-a'$ 。因 $b-a'$ 与 $a-b$ 构成闭合的应力-应变回线，则形成一个全循环 $a'-b-a$ 。依次处理，最后可以得到在图 18.2-3a 所示的载荷-时间历程中三个全循环：

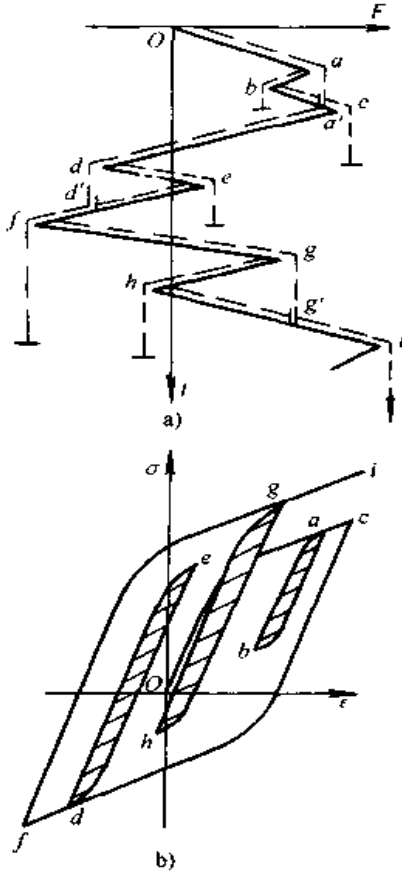


图 18.2-3 雨流法计数原理图

$a'-b-a, d'-c-d, g'-h-g$ 和三个半循环， $O-a-a'-c, c-d-d'-f, f-g-g'-i$ ：

图 18.2-3b 是该载荷历程作用下的材料应力-应变回线，可见与雨流法计数所得结果是一致的。

一个实际的载荷时间历程，经过雨流法计数并取出全循环之后，剩下的半循环构成了一个发散-收敛的载荷谱，按上述雨流法规则无法继续计数。如把它改造一下使之变一个收敛-发散谱后，就可继续用雨流法计数，这就是雨流法计数第二阶段。

图 18.2-4a 为一发散-收敛谱，从最高峰值 a_1 或最低谷值 b_1 处截成两段，使左段起点 b_n 和右段末点 a_n 相连接，构成如图 18.2-4b 那样的发散-收敛谱，则继续用雨流法计数直到完毕。

如果用双参数雨流法，其计数结果以矩阵形式给出最为方便和清楚。

表 18.2-1 示出了雨流法计数结果，表中峰值和谷值读数各分成 11 组，组距为 2。在组限一栏内只标明了下限 0、2、4、...、20。阵内的数值表示循环频数。例如，峰值（组中值）为 11，谷值（组中值）为 9 的载荷循环，共发生 45 次。方阵内同一条“左上右下”对角线上的数值代表具有相同幅值的循环频数；同一条“左下右上”对角线上的数值，则代表具有相同均值的循环频数。这样，从表中可清楚看出任一幅值和均值发生的频数。一般以幅值和均值作为两个参数，表 18.2-1 对此双参数提供了充分的统计资料。

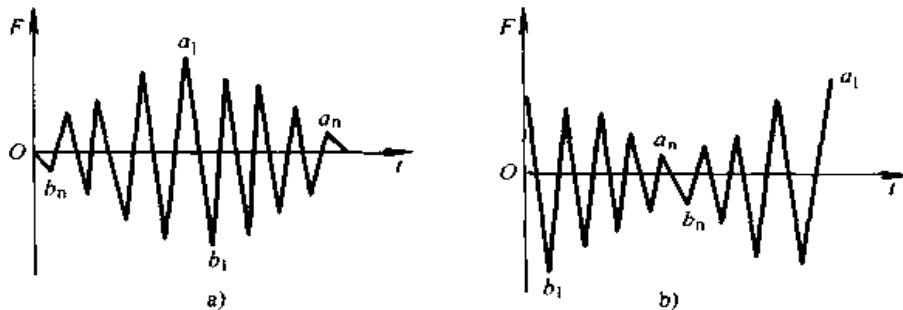


图 18.2-4 雨流法第二阶段计数原理图

4 载荷谱编制

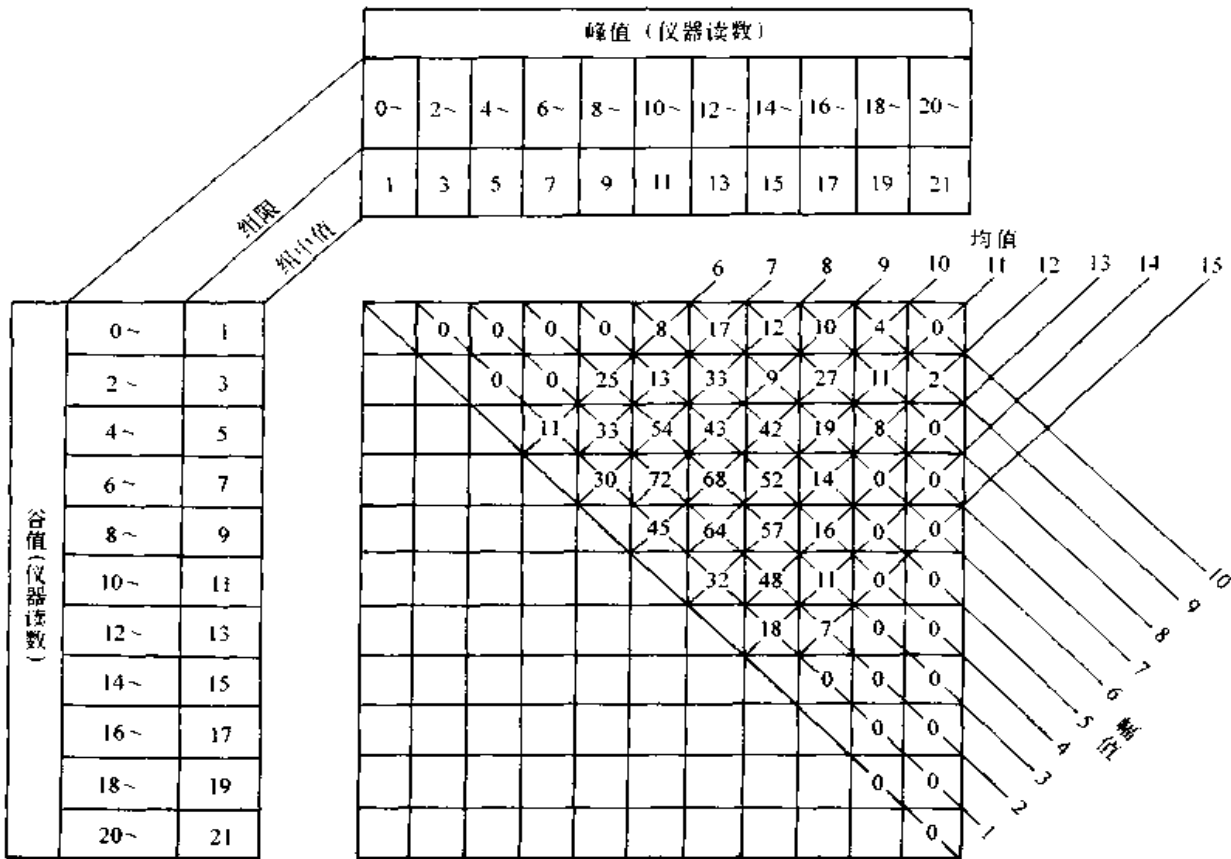
由实际的载荷-时间历程简化成典型载荷谱的过程，称为“载荷谱编制”。编谱时必须遵循损伤等效原则，即把一个连续的随机载荷对零件

所造成的损伤当量定量地反映出来。

由于载荷谱具有典型性、集中性和概括性的特点，因而成为疲劳试验的基础，也是疲劳寿命估算的依据。

载荷谱除以载荷-时间历程给出之外，机械

表 18.2-1 雨流法计算结果



中还常以力矩-时间历程, 转矩-时间历程等形式给出。

4.1 累积频数曲线

累积频数曲线也叫载荷累积频数图。根据疲劳载荷进行雨流法循环计数, 得到各级载荷出现的频数, 如果子样的数量足够大, 可以将统计结果以累积频数曲线表示出来, 如图 18.2-5 中的光滑曲线。

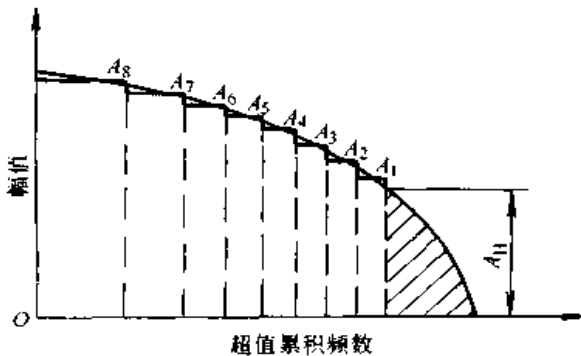


图 18.2-5 累积频数曲线

还可将载荷累积频数转化成概率密度函数, 其均值及标准差都可求出。根据概率密度函数可写出相应的概率分布函数。正态分布函数和威布尔分布函数最适合描述疲劳载荷数据。

正态频率分布函数形式为

$$f(A) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (18.2-10)$$

式中 A —— 幅值;

σ —— 母体标准离差;

μ —— 母体均值;

威布尔频率分布函数形式为

$$f(A) = \frac{b}{A_v - A_0} \left(\frac{A - A_0}{A_v - A_0} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{A - A_0}{A_v - A_0} \right)^b} \quad (18.2-11)$$

式中 A₀ —— 最小幅值;

A_v —— 特征参数;

b —— 形状参数。

实际工作中, 由于受测试时间及费用等限制, 一般情况下, 人们只能实测整个机械寿命中

很小一部分载荷-时间历程。在很小一部分时间内测得的载荷-时间历程难以保证能出现整个寿命中的最大载荷。建议定为最大载荷在每 10^6 次载荷循环中发生一次。而载荷幅值大于零的累积频数为 10^6 。

当零件的工况比较复杂,不能用一种典型工况表示时,需要分别求出各种单独典型工况单位时间的累积频数,再将各种典型工况的累积频数相加,得出单位时间内的总累积频数,并将其扩充为 10^6 次出现一次最大载荷的累积频数图。

4.2 载荷谱编制

编制载荷谱时,首先应确定一个包括所有状态的谱时间 T_s ,即所编制的典型谱代表多少工作小时。其次应根据产品实际使用或计划使用情况,给出各种载荷状态在整个寿命期内所占的比例。据此推知在谱时间 T_s 内幅值发生总频数。

在用雨流计数法处理载荷-时间历程过程中,没有考虑载荷的作用次序和载荷频率的影响。实际上加载次序、载荷级数多少、载荷块大小,以及出现次数较少的大载荷,对疲劳寿命都有影

响。为减小这些影响,常把简化后的程序载荷谱的周期取得短一些,即把程序块的容量减小,块数增加,总周期不变。这样处理能使实际寿命与估算的寿命差别减小。

采用 8 级载荷,可代表连续载荷谱,如图 18.2-5 所示。图中 A_1, A_2, \dots, A_8 及频数 n_1, n_2, \dots, n_8 是这样求得的,各级幅值与最大幅值之比依次为 0.125、0.275、0.425、0.575、0.725、0.85、0.95、1。若程序块的重复次数为 k ,总寿命为 N 次循环,则每个程序块的循环次数 n_i 应取为

$$n_i = \frac{N}{k} \quad (18.2-12)$$

为了减小加载次序对计算或试验结果的影响,必须使程序块多次重复,一般应在试样或零件寿命周期内重复 10~20 次。

用 8 级载荷可以组成各种加载程序,常用的加载顺序有 4 种,如图 18.2-6 所示。

试验结果表明:低-高加载试件寿命偏长;高-低加载试件寿命偏短,后 2 种加载方式接近随机加载情况。

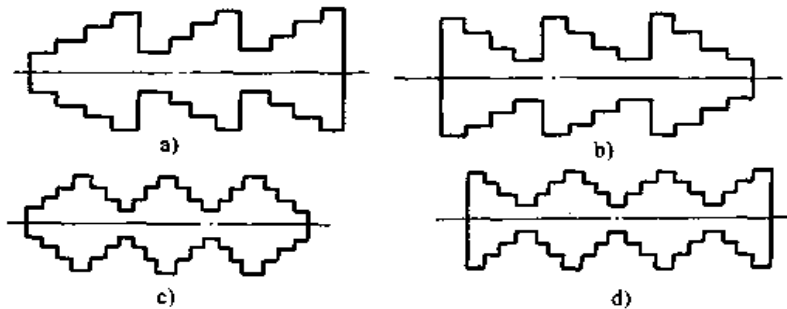


图 18.2-6 4 种不同加载次序

a) 低-高加载 b) 高-低加载 c) 低-高一低加载 d) 高一低-高加载

第3章 金属材料的疲劳极限和疲劳图

1 金属材料疲劳极限数据

1.1 基本概念

(1) 疲劳极限和条件疲劳极限

对于结构钢和钛合金等材料，试验得到的 S-N 曲线上有一平行于横坐标的水平区段，与此水平线段相应的最大应力 σ_{max} 称为该材料的疲劳极限，简称疲劳极限。

对于有色金属和在腐蚀疲劳条件下，在 S-N 曲线上没有水平区段，因此不存在疲劳极限。因此，在一般情况下，以 10^7 或 10^8 次循环失效时的最大应力 σ_{max} 作为条件疲劳极限。这时的失效循环数称为循环基数。

(2) p -S-N 曲线及寿命

用常规方法作出的 S-N 曲线，只能代表中值疲劳寿命与应力水平间的关系（即存活率 $p = 50\%$ ），要得到各种存活率下的疲劳寿命与应力

水平间的关系，则必须用 p -S-N 曲线。

在利用对数正态分布或威布尔分布求出不同应力水平下的 p -N 曲线以后，将不同存活率下的数据点分别相连，即可得出一族 S-N 曲线，其中的每条曲线，分别代表某一不同存活率下的应力-寿命关系。这种以应力为纵坐标，以存活率 p 的疲劳寿命为横坐标，所绘出的一族存活率-应力-寿命曲线，称为 p -S-N 曲线。

p -S-N 曲线的通用表达式为

$$\lg N_p = a_p + b_p \lg \bar{\sigma}$$

式中 N_p ——存活率为 p 时的疲劳寿命；

$\bar{\sigma}$ ——应力幅的均值，单位 MPa；

a_p 、 b_p ——与存活率有关的材料常数。

1.2 金属材料疲劳极限

表 18.3-1~表 18.3-3 是国产材料的疲劳极限。表 18.3-4 是铝合金材料疲劳极限。表 18.3-5~表 18.3-9 是 p -S-N 曲线的 a_p 和 b_p 值数据。

表 18.3-1 常用国产机械材料的旋转弯曲疲劳极限

序号	材料	热处理	抗拉强度 σ_b /MPa	疲劳极限 ($N = 10^7$)			疲劳比 f ($N = 10^7$)
				平均值 σ_{-1} /MPa	标准差 S_{-1} /MPa	变异系数 ν_{-1}	
1	Q235A	热轧	439	210	7.8	0.037	0.048
2	Q235A (F)	热轧	428	198	9.4	0.047	0.46
3	Q235B	热轧	441	250	3.9	0.016	0.57
4	20	正火	463	250	4.7	0.019	0.54
5	20g	热轧	432	209	2.6	0.012	0.48
6	20R	—	386	209	—	—	0.54
7	35	正火	593	261	4.1	0.016	0.44
8	45	正火	624	285.1	7.0	0.026	0.43
9	45	调质	710	388	10.1	0.026	0.53
10	45	电渣重熔	934	433	19.5	0.048	0.43
11	50	正火	661	278	10.3	0.037	0.42
12	55	调质	834	386	13.3	0.034	0.46

续表 18.3-1

序号	材 料	热 处 理	抗拉强度 σ_b /MPa	疲 劳 极 限 ($N = 10^7$)			疲 劳 比 f ($N = 10^7$)
				平均值 σ_{-1} / MPa	标准差 S_{-1} / MPa	变异系数 ν_{-1}	
13	70	淬火后中温回火	1 138	489	17.9	0.037	0.43
14	Q345	热轧	586	298.1	8.6	0.031	0.48
15	Q345g	热轧	507	271	—	—	0.53
16	20MnVB	碳氮共渗	1 210	809	0.6	0.001	0.67
17	25MnTiBRE	碳氮共渗	1 193	834	23.2	0.028	0.70
18	35Mn2	调质	937	520	—	—	0.55
19	40MnB	调质	970	436	19.5	0.045	0.45
20	40MnVB	调质	1 111	531	9.0	0.017	0.48
21	45Mn2	调质	952	485	8.0	0.016	0.51
22	12Cr2Ni4	调质	793	441	22.6	0.051	0.56
23	18CrNiW	调质	1 039	491	23.1	0.047	0.47
24	20Cr	渗碳	577	273	3.9	0.014	0.47
25	20CrMnTi	淬火后低温回火	1 416	566	37.4	0.066	0.40
26	20CrMnSi	调质	788	299	13.7	0.046	0.38
27	20Cr2Ni4A	淬火后低温回火	1 483	602	14.1	0.023	0.41
28	30CrMnTi	碳氮共渗	1 771	730	35.3	0.048	0.41
29	30CrMnSiA	调质	1 110	641	25.2	0.039	0.58
30	35CrMo	调质	924	431	13.3	0.031	0.47
31	40Cr	调质	940	422	10.1	0.024	0.45
32	40CrMnMo	调质	977	470	17.2	0.037	0.48
33	40CrMnSiMoVA	淬火后低温回火	1 843	677	—	—	0.37
34	40CrNiMo	调质	972	498	7.8	0.016	0.51
35	40CrNiMoA	调质	1 040	524	19.7	0.038	0.50
36	42CrMo	调质	1 134	504	12.5	0.025	0.44
37	16MnCr5	淬火后低温回火	1 373	592	10.9	0.018	0.43
38	20MnCr5	淬火后低温回火	1 482	634	8.0	0.013	0.43
39	25MnCr5	淬火后低温回火	1 587	509	37.4	0.074	0.32
40	28MnCr5	淬火后低温回火	1 307	479	21.1	0.044	0.37
41	50CrV	淬火后中温回火	1 586	747	32.0	0.043	0.47
42	55Si2Mn	淬火后中温回火	1 866	658	10.5	0.016	0.35
43	60Si2Mn	淬火后中温回火	1 625	660	24.2	0.043	0.41
44	65Mn	淬火后中温回火	1 687	708	31.1	0.044	0.42

续表 18.3-1

序号	材 料	热处理	抗拉强度 σ_b /MPa	疲劳极限 ($N = 10^7$)			疲劳比 f ($N = 10^7$)
				平均值 σ_{-1} / MPa	标准差 S_{-1} / MPa	变异系数 ν_{-1}	
45	0Cr17Ni4Cu4Nb	固溶时效	740	400	—	—	0.54
46	1Cr12Mo	调质	768	382	—	—	0.50
47	1Cr13	调质	721	374	12.5	0.033	0.52
48	2Cr13	调质	687.5	374	14.0	0.038	0.54
49	3Cr13	调质	842	370	12.5	0.034	0.44
50	4Cr5MoVSi	调质	1 496	730	—	—	0.49
51	7Cr7Mo3V2Si	调质	2 353	512	24.2	0.047	0.22
52	Cr12	淬火后低温回火	2 272	709	20.4	0.029	0.31
53	Cr12MoV	淬火后低温回火	2 059	633	—	—	0.31
54	ZG20SiMn	正火	515	226	7.5	0.033	0.44
55	ZG230-450	正火	543	207	9.4	0.045	0.38
56	ZG270-500	调质	823	272	5.5	0.020	0.33
57	ZG40Cr	调质	977	294	10.9	0.037	0.30
58	ZG340-640	调质	1 044	322	12.6	0.039	0.31
59	ZG0Cr13Ni6Mo	正火后两次回火	779	289	16.8	0.058	0.37
60	ZG1Cr13	退火后正火	789	328	14.8	0.045	0.42
61	QT400-15	退火	484	243	10.9	0.045	0.50
62	QT400-18	退火	453	219	7.4	0.034	0.48
63	QT500-7	退火	625	206	10.9	0.053	0.33
64	QT600-3	正火	809	271	7.4	0.027	0.33
65	QT700-2	正火	754	219	9.9	0.045	0.29
66	QT800-2	正火	842	352	10.1	0.029	0.42

注： S_{-1} 和 ν_{-1} 为对称循环下疲劳的标准差和变异系数。

表 18.3-2 某些国产机械材料的拉-压疲劳极限

序号	材 料	热处理	抗拉强度 σ_b /MPa	疲劳极限 ($N = 10^7$)			疲劳比 f ($N = 10^7$)
				平均值 σ_{-1} / MPa	标准差 S_{-1} / MPa	变异系数 ν_{-1}	
1	20	正火	464	241	7.8	0.032	0.52
2	45	调质	735	329 ¹⁾	18.7	0.057	0.45
3	Q345	热轧	586	327	14.0	0.043	0.56
4	09SiVL	热轧	529	284	13.3	0.047	0.54

续表 18.3-2

序号	材 料	热处理	抗拉强度 σ_b /MPa	疲劳极限 ($N=10^7$)			疲劳比 f ($N=10^7$)
				平均值 σ_{-1} / MPa	标准差 S_{-1} / MPa	变异系数 ν_{-1}	
5	12CrNi3	调质	833	363	14	0.039	0.44
6	25Cr2MoV	调质	1 090	335	—	—	0.31
7	35CrMo	调质	924	317	—	—	0.34
8	35VB	热轧	741	331	13.3	0.040	0.45
9	40CrMnSiMoVA	等温淬火	1 765	718	—	—	0.41
10	40CrNiMo	调质	972	389	15.6	0.040	0.40
11	45CrNiMoV	淬火后中温回火	1 553	486	17.2	0.035	0.31
12	55SiMnVB	淬火后中温回火	1 536	536	21.1	0.039	0.35
13	HT200	去应力退火	250	96.5	5.4	0.056	0.39
14	HT300	去应力退火	353	133.3	5.0	0.38	0.38
15	ZG310-570	调质	1 012	303	17.2	0.057	0.30

注：1. 应力比 $r=0.1$ 。

2. S_{-1} 和 ν_{-1} 为拉-压时对称循环疲劳的标准差。

表 18.3-3 调质结构钢的疲劳极限

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r$ /MPa	标准差 S_r /MPa	变异系数 $\nu = S_r / \sqrt{\bar{\sigma}_r}$
		r	a_σ				
45 (调质)	$\sigma_b = 833.6$ MPa $\sigma_s = 686.5$ MPa $\delta = 16.7\%$ 硬度 250~270HBS	-1	1.9	5×10^4	411.9	13.07	0.031 73
				10^5	343.2	9.807	0.028 58
				5×10^5	309.9	7.845	0.025 31
				10^6	294.2	7.845	0.026 67
				5×10^6	286.4	7.845	0.027 39
18Cr2Ni4WA [950℃正火, 860℃淬火, 540℃回火]	$\sigma_b = 1 145.5$ MPa $\delta = 18.6\%$	-1	2	10^5	463.9	22.23	0.047 92
				5×10^5	411.9	17.00	0.041 27
				10^6	384.4	15.69	0.040 82
				5×10^6	368.7	13.73	0.037 24
30CrMnSiA [890~989℃ 油淬火, 510~520℃ 回火]	$\sigma_b = 1 108.2 \sim$ $1 186.6$ MPa $\sigma_s = 1 088.6$ MPa $\delta = 15.3\% \sim 18.6\%$	-1	1	10^5	784.6	35.96	0.045 83
				5×10^5	676.7	19.61	0.028 98
				10^6	655.1	17.65	0.026 94
				5×10^6	639.4	17.00	0.026 59
				10^7	637.5	18.63	0.029 22

续表 18.3-3

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $\nu = S_r/\sqrt{\bar{\sigma}_r}$
		r	a_r				
30CrMnSiA 890~989℃ 油淬火, 510~520℃ 回火	$\sigma_b = 1\ 108.2 \sim$ $1\ 186.6\ \text{MPa}$ $\sigma_s = 1\ 088.6\ \text{MPa}$ $\delta = 15.3\% \sim 18.6\%$	-1	2	10^5	411.3	19.61	0.047 68
				5×10^5	379.5	14.71	0.038 76
				10^6	359.9	10.13	0.028 15
				5×10^6	356.0	10.13	0.028 46
				10^7	353.1	9.807	0.027 77
			3	10^5	308.9	14.71	0.047 62
				5×10^5	270.7	10.13	0.037 42
				10^6	250.1	9.807	0.039 21
				5×10^6	243.2	9.150	0.037 62
				10^7	241.3	9.150	0.037 92
			4	10^5	285.4	11.11	0.038 93
				5×10^5	245.2	9.807	0.035 00
		10^6		221.6	9.150	0.041 29	
		5×10^6		210.9	8.169	0.038 73	
		10^7		204.0	6.865	0.033 65	
		0.1	1	10^5	1 176.8	52.30	0.044 44
				5×10^5	1 108.2	42.49	0.038 34
				10^6	1 090.5	39.23	0.035 97
				5×10^6	1 088.6	39.55	0.036 33
				10^7	1 088.6	39.89	0.036 64
			3	10^5	455.0	29.42	0.064 66
				5×10^5	377.6	17.00	0.045 02
				10^6	347.2	14.39	0.041 45
				5×10^6	335.4	15.69	0.046 78
10^7	328.5			16.35	0.049 77		
0.5	3	10^5	676.7	35.96	0.053 14		
		5×10^5	642.4	31.06	0.048 35		
		10^6	612.0	27.46	0.044 87		
		5×10^6	609.0	24.84	0.040 79		
		10^7	608.0	24.84	0.040 86		

续表 18.3-3

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $\nu = S_r / \sqrt{\bar{\sigma}_r}$
		r	σ_r				
30CrMnSiNi2A (900℃ 淬火, 260℃ 回火)	$\sigma_b = 1\,422 \sim 1\,618 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 1\,109 \text{ MPa}$ $\delta = 12.5\% \sim 18.5\%$	-0.5	5	5×10^4	415.8	20.92	0.050 31
				10^5	343.2	13.73	0.040 01
				5×10^5	272.6	10.46	0.038 37
				10^6	251.1	9.150	0.036 44
				5×10^6	248.1	9.150	0.036 88
				10^7	245.2	9.807	0.040 00
		0.1	3	10^4	662.0	33.02	0.049 88
				5×10^4	539.4	26.80	0.049 68
				10^5	441.3	17.98	0.040 74
				5×10^5	415.8	16.67	0.040 09
				10^6	402.1	16.35	0.040 66
				5×10^6	392.3	15.69	0.039 99
		0.1	4	10^4	686.5	49.04	0.071 43
				5×10^4	510.0	29.42	0.057 69
				10^5	328.5	17.98	0.054 73
				5×10^5	241.3	9.150	0.037 92
		0.445	3	10^4	1 059.2	58.84	0.055 55
				5×10^4	858.1	34.32	0.040 00
				10^5	686.5	27.78	0.040 47
				5×10^5	583.5	20.59	0.035 29
				10^6	578.6	20.27	0.035 03
				5×10^6	572.7	19.29	0.033 68
		0.5	5	10^4	731.6	29.74	0.040 65
				10^5	624.7	26.16	0.041 88
				5×10^5	525.7	18.31	0.034 83
				10^6	517.8	17.33	0.033 47
				5×10^6	513.9	16.67	0.032 44
				10^7	510.0	16.35	0.032 06

续表 18.3-3

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $\nu = S_r / \sqrt{\bar{\sigma}_r}$			
		r	σ_r							
40CrNiMoA (850℃ 油淬火, 580℃ 回火)	$\sigma_b = 1\ 040 \sim 1\ 167\ \text{MPa}$ $\sigma_s = 917 \sim 1\ 126\ \text{MPa}$ $\delta = 15.6\% \sim 17\%$	- 1	1	5×10^4	760.0	44.13	0.058 07			
				10^5	666.9	37.59	0.056 37			
				5×10^5	590.4	26.16	0.044 31			
				10^6	559.0	20.92	0.037 42			
				5×10^6	539.4	20.92	0.038 78			
				10^7	523.7	19.61	0.037 45			
			2	10^5	392.3	25.17	0.064 16			
				5×10^5	333.4	14.05	0.042 14			
				10^6	318.7	11.44	0.035 90			
				5×10^6	310.9	10.46	0.033 64			
				10^7	307.9	9.807	0.031 85			
			3	10^5	294.2	15.03	0.051 09			
				5×10^5	245.2	9.807	0.040 00			
				10^6	217.7	8.169	0.037 52			
				5×10^6	210.9	6.865	0.032 55			
		0.1		1	5×10^4	1 259.2	60.15	0.047 77		
					10^5	1 211.2	45.77	0.037 79		
					5×10^5	1 157.2	42.49	0.036 72		
					10^6	1 110.2	39.89	0.035 93		
					5×10^6	1 066.0	38.25	0.035 88		
					10^7	1 029.7	32.69	0.031 75		
				3	5×10^4	490.4	22.88	0.046 66		
					10^5	384.4	17.65	0.045 92		
					5×10^5	326.6	11.44	0.035 03		
10^6	305.0				10.79	0.035 38				
5×10^6	292.2				10.79	0.036 93				
10^7	284.4				9.807	0.034 48				
42CrMnSiMoA (GC-4 电渣钢) { 920℃ 加热, 300℃ 等温, 空冷 }	$\sigma_b = 1\ 894\ \text{MPa}$ $\sigma_s = 1\ 388\ \text{MPa}$ $\delta = 13\%$				- 1	1	5×10^4	965.0	65.38	0.067 75
							10^5	874.8	49.69	0.056 80
							5×10^5	799.3	38.25	0.047 85
		10^6	761.0	29.42			0.038 66			
		5×10^6	735.5	26.80			0.036 44			

续表 18.3-3

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $\nu = S_r / \sqrt{\sigma_r}$	
		r	α_s					
42CrMnSiMoA (GC-4 电渣钢) 〔920℃ 加热, 300℃ 等温, 空冷〕	$\sigma_b = 1\ 894\ \text{MPa}$ $\sigma_s = 1\ 388\ \text{MPa}$ $\delta = 13\%$	-1	1	10^7	717.9	24.84	0.034 60	
			3	10^4	513.9	45.44	0.088 42	
				5×10^4	421.7	32.04	0.075 98	
				10^5	373.6	18.31	0.049 01	
				5×10^5	323.6	13.07	0.040 39	
				10^6	284.4	11.44	0.040 23	
				5×10^6	251.1	9.807	0.039 06	
				10^7	239.3	9.150	0.038 24	
			0.1	1	5×10^4	1 216.1	65.38	0.053 76
					10^5	1 118.0	52.30	0.046 78
		5×10^5			1 074.8	41.19	0.038 32	
		10^6			1 069.0	39.23	0.036 70	
		5×10^6			1 067.0	39.23	0.036 77	
		10^7			1 065.0	38.57	0.036 22	
		3		10^4	672.8	33.02	0.049 08	
				5×10^4	555.1	26.48	0.047 70	
				10^5	485.4	18.63	0.038 38	
				5×10^5	460.9	16.35	0.035 47	
			10^6	447.2	16.67	0.037 28		
			5×10^6	433.5	15.69	0.036 19		
	10^7	427.6	15.03	0.035 15				

注: S_r 为循环特性为 r 条件下疲劳的标准差。

表 18.3-4 铝合金的疲劳极限

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $\nu = S_r / \sqrt{\sigma_r}$	
		r	α_s					
2A12B (“B” 为预拉 伸加工硬化)	$\sigma_b = 455 \sim 480\ \text{MPa}$ $\sigma_s = 343 \sim 438\ \text{MPa}$ $\delta = 8\% \sim 19\%$	0.1	1	10^4	411.9	22.88	0.055 55	
				5×10^4	369.7	18.63	0.050 39	
				10^5	329.5	13.41	0.040 70	
				5×10^5	293.2	11.77	0.040 14	
				10^6	264.8	9.807	0.037 04	
				5×10^6	243.2	9.150	0.037 62	
				10^7	223.6	7.522	0.033 64	
				3	10^4	245.2	13.07	0.053 30

续表 18.3-4

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_L/\text{MPa}$	标准差 S_L/MPa	变异系数 $v = S_L / \sqrt{\bar{\sigma}_L}$	
		r	σ_r					
2A12B ("B" 为预拉) (伸加工硬化)	$\sigma_b = 455 \sim 480 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 343 \sim 438 \text{ MPa}$ $\delta = 8\% \sim 19\%$	0.1	3	5×10^4	191.2	9.150	0.047 86	
				10^5	161.8	7.522	0.046 49	
				5×10^5	134.4	5.227	0.038 89	
				10^6	114.7	4.246	0.037 02	
				5×10^6	106.9	3.923	0.036 70	
				10^7	103.0	3.599	0.034 94	
			5	10^4	194.2	9.150	0.047 12	
				5×10^4	148.1	6.541	0.044 17	
				10^5	120.6	4.904	0.040 66	
				5×10^5	99.05	3.923	0.039 61	
				10^6	87.28	3.266	0.037 42	
				5×10^6	84.34	3.266	0.038 72	
			0.5	1	5×10^4	459.0	21.58	0.047 02
					10^5	405.0	17.33	0.042 79
		5×10^5			360.9	15.03	0.041 65	
		10^6			347.2	13.73	0.039 54	
		5×10^6			328.5	12.09	0.036 80	
		10^7			319.7	11.77	0.036 82	
		3		10^4	343.2	16.35	0.047 64	
				5×10^4	268.7	11.77	0.043 80	
				10^5	211.8	8.826	0.041 67	
				5×10^5	169.7	6.541	0.038 54	
				10^6	151.0	5.227	0.034 62	
				5×10^6	145.1	5.227	0.036 02	
		5		10^4	299.1	14.71	0.049 18	
				5×10^4	222.6	10.46	0.046 99	
			10^5	161.8	6.541	0.040 43		
			5×10^5	129.4	5.227	0.040 39		
10^6	115.7		4.246	0.036 70				
5×10^6	109.8		3.923	0.035 73				
			10^7	104.0	2.941	0.028 28		

续表 18.3-4

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $\nu = S_r/\sqrt{\bar{\sigma}_r}$				
		r	α_s								
2A12B (“B”为预拉 伸加工硬化)	$\sigma_b = 455 \sim 480 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 343 \sim 438 \text{ MPa}$ $\delta = 8\% \sim 19\%$	-0.5	3	10^5	117.5	5.816	0.049 50				
				5×10^5	108.5	4.776	0.044 02				
				10^6	100.0	3.923	0.039 23				
				5×10^6	92.19	3.599	0.039 04				
				10^7	87.77	2.942	0.033 52				
2A12-T4	$\sigma_b = 407 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 270 \text{ MPa}$ $\delta = 13\%$	0.1	1.16	10^5	202.0	9.483	0.046 95				
				5×10^5	146.1	6.541	0.044 77				
				10^6	125.5	4.580	0.036 49				
				5×10^6	115.7	4.246	0.036 70				
				10^7	110.8	3.923	0.035 41				
	$\sigma_b = 457 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 336 \text{ MPa}$ $\delta = 18.7\%$	0.02	1	10^5	277.5	14.05	0.050 63				
				5×10^5	195.2	8.826	0.045 22				
				10^6	144.2	5.561	0.038 56				
				5×10^6	132.4	4.580	0.034 59				
				0.6	1	5×10^5	331.5	15.69	0.047 33		
10^6	309.9	12.43	0.040 11								
2A12-T6	$\sigma_b = 429 \sim 433 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 364 \sim 370 \text{ MPa}$ $\delta = 6.6\% \sim 7.8\%$	0.1	1	5×10^4	353.1	21.25	0.060 18				
				10^5	240.5	11.44	0.047 57				
				5×10^5	176.5	7.189	0.040 73				
				10^6	139.3	5.227	0.037 52				
				5×10^6	133.4	4.904	0.036 76				
				10^7	131.4	4.680	0.035 62				
				0.5	1	5×10^4	470.7	22.88	0.048 61		
		10^5	372.7			16.35	0.043 87				
		5×10^5	304.0			11.77	0.038 72				
		10^6	255.0			8.826	0.034 61				
		5×10^6	225.6			7.846	0.034 78				
		10^7	206.9			6.865	0.033 18				
		7A09	$\sigma_b = 647 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 603 \text{ MPa}$ $\delta = 17.2\%$			-1	1	5×10^4	303.0	14.05	0.046 37
								10^5	261.8	12.75	0.048 70
				5×10^5	220.7			8.826	0.039 99		
10^6	188.3			7.189	0.038 18						

续表 18.3-4

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $v = S_r / \bar{\sigma}_r$	
		r	α_0					
7A09	$\sigma_b = 647 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 603 \text{ MPa}$ $\delta = 17.2\%$	-1	1	5×10^6	170.6	6.208	0.036 39	
				10^7	161.8	5.561	0.034 37	
			2.4	5×10^4	187.3	8.826	0.047 12	
				10^5	154.0	6.541	0.042 47	
				5×10^5	131.4	5.227	0.039 78	
				10^6	113.8	4.246	0.037 31	
				5×10^6	98.07	3.599	0.036 70	
				10^7	93.17	3.266	0.035 05	
			0.1	1	10^5	269.7	13.41	0.049 72
					5×10^5	199.1	8.169	0.041 03
					10^6	161.8	5.561	0.034 37
					5×10^6	142.2	4.904	0.034 49
		3		10^5	124.5	5.884	0.047 26	
				5×10^5	93.17	4.246	0.045 57	
				10^6	76.49	2.942	0.038 46	
				5×10^6	70.61	2.618	0.037 08	
		5		10^7	66.69	2.285	0.034 26	
				5×10^4	115.7	6.865	0.059 33	
				10^5	81.40	4.246	0.052 16	
				5×10^5	63.75	2.618	0.041 07	
		0.5	1	10^6	57.86	2.285	0.039 49	
				5×10^6	54.92	1.961	0.035 71	
				10^7	52.96	1.795	0.033 89	
				10^5	431.5	26.16	0.060 63	
			3	5×10^5	262.8	13.41	0.051 03	
				10^6	228.5	10.79	0.047 22	
				5×10^6	204.0	7.846	0.038 46	
				10^7	186.3	5.884	0.031 58	
5	10^5		178.5	9.807	0.054 94			
	5×10^5		144.2	6.208	0.043 05			
	10^6		127.5	4.904	0.038 46			
	5×10^6		116.3	4.119	0.035 42			

续表 18.3-4

材 料	静强度指标	试验条件		寿命 N	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_r/\text{MPa}$	标准差 S_r/MPa	变异系数 $v = S_r / \sqrt{\bar{\sigma}_r}$	
		r	α_s					
7A09	$\sigma_b = 647 \text{ MPa}$ $\sigma_s = 603 \text{ MPa}$ $\delta = 17.2\%$	0.5	5	3	10^7	109.8	3.599	0.032 78
					5×10^4	166.7	8.169	0.049 00
					10^5	117.7	4.904	0.041 67
					5×10^5	92.19	3.599	0.039 04
					10^6	82.38	3.267	0.039 67
					5×10^6	78.46	2.618	0.033 37
			10^7	76.49	2.618	0.034 23		

表 18.3-5 常用国产机械材料旋转弯曲 p-S-N 曲线的 a_p 和 b_p 值

材 料	热处理	试样形式	σ_b/MPa	不同存活率下的 a_p, b_p					
				p/%	50	90	95	99	99.9
Q235A	热轧	漏斗形	455	a_p	41.178 2	39.186 0	38.619 9	37.559 9	36.371 3
				b_p	-14.674 5	-13.899 6	-13.679 3	-13.266 8	-12.804 6
Q235A (F)	热轧	漏斗形	428	a_p	28.739 4	24.720 9	25.750 0	27.360 6	28.401 5
				b_p	-9.860 4	-8.307 4	-8.746 7	-9.433 3	-9.876 9
Q235B	热轧	漏斗形	441	a_p	41.052 2	39.071 2	38.059 4	37.457 1	36.275 1
				b_p	-14.362 0	-13.604 5	-13.389 6	-12.987 3	-12.535 2
20	热轧	漏斗形	463	a_p	53.661 3	47.399 5	45.626 0	42.299 7	38.567 9
				b_p	-19.668 7	-17.191 6	-16.492 0	-15.174 9	-13.698 9
30	调质	圆柱形	808	a_p	31.889 0	32.791 0	33.046 0	33.534 0	34.071 0
				b_p	-9.965 0	-10.370 0	-10.485 0	-10.704 0	-10.945 0
35	正火	圆柱形	593	a_p	52.045 0	—	—	—	—
				b_p	-18.585 6	—	—	—	—
35	正火	漏斗形	593	a_p	56.900 6	53.232 4	52.197 1	50.249 5	48.062 2
				b_p	-20.477 4	-19.073 8	-18.678 5	-17.934 8	-17.099 5
45	正火	漏斗形	624	a_p	35.477 9	32.634 0	31.708 1	29.579 4	26.338 0
				b_p	-12.080 4	-10.991 5	-9.809 4	-8.547 9	-7.041 5
45	调质	漏斗形	735	a_p	35.477 9	32.634 0	31.708 1	29.579 4	26.338 0
				b_p	-12.080 4	-10.991 5	-9.809 4	-8.547 9	-7.041 5
45	电渣溶铸	圆柱形	934	a_p	33.367 1	36.416 3	—	—	—
				b_p	-10.467 3	-11.751 4	—	—	—
55	调质	圆柱形	834	a_p	36.593 0	35.256 5	34.878 1	34.167 1	—
				b_p	-11.801 0	-11.385 7	-11.268 1	-11.047 1	—

续表 18.3-5

材 料	热处理	试样形式	σ_b/MPa	不同存活率下的 a_p 、 b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
70	淬火后 中温回火	圆柱形	1 138	a_p	44.328 9	38.221 7	36.084 9	31.902 9	—
				b_p	-14.190 7	-12.029 9	-11.270 8	-9.783 3	—
Q345	热轧	漏斗形	586	a_p	37.796 3	33.223 5	31.928 5	29.502 0	26.779 1
				b_p	-12.739 5	-11.002 1	-10.510 0	-9.588 1	-8.553 6
40MnB	调质	圆柱形	970	a_p	26.113 0	25.271 7	25.888 9	28.539 1	34.052 9
				b_p	-7.687 9	-7.442 1	-7.689 3	-8.704 2	-10.782 0
40MnVB	调质	圆柱形	1 111	a_p	31.194 6	26.248 1	24.860 6	22.239 0	19.298 5
				b_p	-9.226 7	-7.514 6	-7.034 6	-6.127 3	-5.109 7
45Mn2	调质	圆柱形	952	a_p	44.062 2	35.672 6	33.420 6	28.521 7	23.450 2
				b_p	-14.131 0	-11.141 4	-10.339 4	-8.590 4	-6.782 5
YF45MnV	热轧	圆柱形	886	a_p	45.955 0	—	—	—	—
				b_p	-15.450 6	—	—	—	—
18Cr2Ni4W	调质	圆柱形	1 039	a_p	28.409 8	22.831 9	21.252 9	18.266 6	14.942 8
				b_p	-8.364 9	-6.438 7	-5.893 4	-4.861 7	-3.713 8
20Cr2Ni4A	淬火后 低温回火	圆柱形	1 483	a_p	39.933 1	38.380 0	37.941 8	37.117 9	36.191 5
				b_p	-12.122 5	-11.637 3	-11.500 4	-11.243 1	-10.953 6
20CrMnSi	调质	圆柱形	788	a_p	24.423 7	23.692 1	23.324 3	22.636 8	21.864 2
				b_p	-7.413 0	-6.997 8	-6.880 0	-6.659 9	-6.412 6
35CrMo	调质	圆柱形	924	a_p	29.232 2	23.544 4	21.933 5	18.913 6	15.524 8
				b_p	-8.807 2	-6.797 4	-6.228 2	-5.161 2	-3.963 8
40Cr	调质	圆柱形	940	a_p	23.945 4	23.743 7	23.689 4	28.583 5	23.462 7
				b_p	-6.877 5	-6.861 0	-6.857 3	-6.849 0	-6.838 9
40CrMoMo	调质	圆柱形	977	a_p	35.416 8	28.500 7	26.539 6	22.866 7	18.744 6
				b_p	-10.998 9	-8.546 5	-7.851 1	-6.548 7	-5.087 0
40CrNiMo	调质	圆柱形	972	a_p	32.637 6	27.387 1	25.900 5	23.111 6	19.982 6
				b_p	-9.842 4	-8.012 5	-7.494 6	-6.521 7	-5.431 9
42CrMo	调质	圆柱形	1 134	a_p	32.637 6	27.387 1	25.900 5	23.111 6	19.982 6
				b_p	-9.842 4	8.012 5	-7.494 6	-6.521 9	-5.431 9
50CrV	淬火后 中温回火	圆柱形	1 586	a_p	44.073 3	33.686 1	30.745 7	—	—
				b_p	-13.329 5	-9.786 0	-8.807 5	—	—
55Si2Mn	淬火后 中温回火	漏斗形	1 866	a_p	38.251 0	34.390 6	33.295 7	31.240 5	28.937 8
				b_p	-11.236 3	-9.975 0	-9.617 8	-8.947 3	-8.196 1

续表 18.3-5

材 料	热处理	试样形式	σ_1/MPa	不同存活率下的 a_p, b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
60Si2Mn	淬火后 中温回火	圆柱形	1 625	a_p	32.626 9	22.645 1	19.817 2	14.522 1	8.574 5
				b_p	-9.795 3	-6.306 7	-5.318 4	-3.467 8	-1.389 2
65Mn	淬火后 中温回火	圆柱形	1 687	a_p	51.001 8	31.485 9	31.403 4	—	—
				b_p	-15.635 6	-9.065 0	-9.050 1	—	—
16MnCr5	淬火后 低温回火	圆柱形	1 373	a_p	36.929 9	35.756 8	35.424 2	34.802 1	34.101 1
				b_p	-11.091 0	-10.759 4	-10.665 4	-10.489 6	-10.291 3
20MnCr5	淬火后 低温回火	圆柱形	1 482	a_p	34.892 5	31.334 7	30.327 2	28.435 7	26.316 5
				b_p	-10.265 0	-9.080 0	-8.744 4	-8.114 4	-7.408 5
25MnCr5	淬火后 低温回火	圆柱形	1 587	a_p	31.831 5	—	—	—	—
				b_p	-9.672 6	—	—	—	—
28MnCr5	淬火后 低温回火	漏斗形	1 307	a_p	32.100 9	29.778 3	—	—	—
				b_p	-9.759 8	-9.039 1	—	—	—
1Cr13	调质	圆柱形	721	a_p	36.534 8	32.781 4	31.718 5	29.724 7	—
				b_p	-11.765 9	-10.401 0	-10.014 6	-9.290 5	—
2Cr13	调质	圆柱形	687.5	a_p	34.594 1	—	—	—	—
				b_p	-11.093 9	—	—	—	—
7Cr7Mo2V2Si	调质	圆柱形	2 353	a_p	51.711 5	—	—	—	—
				b_p	-16.446 9	—	—	—	—
Cr12	淬火后 低温回火	圆柱形	2 272	a_p	47.151 0	44.351 0	43.562 4	42.071 3	40.404 5
				b_p	-14.345 6	-13.658 1	-13.465 0	-13.098 5	-12.689 4
ZG1Cr13	退火后 正火	圆柱形	789	a_p	31.503 8	29.369 9	28.766 5	27.632 8	26.360 1
				b_p	-9.938 7	-9.209 7	-9.003 5	-8.616 2	-8.181 3
ZG20SiMn	正火	漏斗形	515	a_p	33.238 6	31.344 4	30.809 1	29.802 0	28.673 8
				b_p	-11.275 9	-10.617 4	-10.431 3	-10.081 1	-9.689 0
ZG230-450	正火	漏斗形	543	a_p	29.780 2	28.173 9	27.719 1	26.865 6	25.908 8
				b_p	-9.961 8	-9.385 0	-9.221 7	-8.915 2	-8.571 7
ZG270-500	调质	圆柱形	823	a_p	28.009 8	26.908 0	26.619 1	25.972 6	29.395 8
				b_p	-8.762 7	-8.410 2	-8.319 3	-8.107 8	-7.928 8
ZG40Cr	调质	圆柱形	977	a_p	23.929 4	22.610 4	22.064 9	21.533 9	20.658 0
				b_p	-7.029 7	-6.657 6	-6.485 7	-6.353 6	-6.097 1
ZG340-640	调质	圆柱形	1 044	a_p	23.229 3	25.200 8	25.735 4	26.861 0	28.028 6
				b_p	-6.788 9	-7.650 4	-7.885 2	-8.373 1	-8.883 7

续表 18.3-5

材 料	热处理	试样形式	σ_b/MPa	不同存活率下的 a_p 、 b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
QT400-15	退火	圆柱形	484	a_p	35.396 3	34.020 3	33.630 2	32.897 4	32.078 0
				b_p	-11.920 9	-11.457 6	-11.326 4	-11.080 0	-10.804 5
QT400-18 (梅花试样)	退火	圆柱形	472	a_p	27.520 6	27.397 9	27.363 0	27.297 8	27.224 7
				b_p	-8.688 0	-8.914 8	-8.927 6	-8.953 0	-8.980 8
QT400-18 (楔形试块)	退火	圆柱形	433	a_p	25.991 4	23.937 8	23.356 6	22.265 4	21.041 7
				b_p	-8.444 5	-7.706 3	-7.497 4	-7.105 1	-6.665 2
QT500-7	退火	圆柱形	625	a_p	34.475 6	31.645 9	30.778 2	29.247 9	27.518 6
				b_p	-11.766 2	-10.743 1	-10.426 2	-9.871 5	-9.244 5
QT600-3 (梅花试样)	正火	圆柱形	759	a_p	28.851 5	23.516 7	22.573 6	21.792 1	21.692 1
				b_p	-9.410 6	-7.382 6	-7.026 6	-6.737 6	-6.707 2
QT600-3 (楔形试块)	正火	圆柱形	858	a_p	23.897 1	21.239 4	21.582 5	22.527 5	23.358 9
				b_p	-7.372 4	-6.426 6	-6.577 6	-6.968 8	-7.306 9
QT700-2	正火	圆柱形	754	a_p	27.932 3	27.173 6	26.960 8	26.560 4	26.111 6
				b_p	-9.041 5	-8.851 0	-8.797 9	-8.697 7	-8.585 5
QT800-2	正火	圆柱形	842	a_p	52.701 2	45.333 3	44.056 1	42.916 6	—
				b_p	-18.137 3	-15.447 2	-14.979 5	-14.558 9	—

表 18.3-6 常用国产机械材料轴向加载 p - S - N 曲线的 a_p 和 b_p 值

材 料	热处理	试样形式	σ_b/MPa	不同存活率下的 a_p 、 b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
20	正火	漏斗形 圆试样	464	a_p	26.155 6	24.520 9	24.057 7	—	—
				b_p	-8.457 7	-7.843 8	-7.669 8	—	—
45	调质	漏斗形 圆试样	735	a_p	26.590 3	20.406 6	—	—	—
				b_p	-8.131 7	-5.875 2	—	—	—
12CrNi3	调质	漏斗形 圆试样	833	a_p	21.714 8	13.593 6	11.291 9	—	—
				b_p	-6.182 5	-3.241 9	-2.408 5	—	—
Q345	热轧	漏斗形 圆试样	586	a_p	47.627 1	32.393 3	—	—	—
				b_p	-16.399 6	-10.559 8	—	—	—
35VB	热轧	圆锥 试样	741	a_p	25.755 2	20.907 2	19.520 6	16.929 7	—
				b_p	-7.711 5	-5.940 1	-5.433 5	-4.486 8	—
40CrNiMo	调质	圆柱试样	972	a_p	39.201 9	39.553 6	39.655 3	39.841 3	40.048 2
				b_p	-12.649 2	-12.896 4	-12.967 2	-13.098 3	-13.244 6

续表 18.3-6

材 料	热处理	试样形式	σ_b /MPa	不同存活率下的 a_p, b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
45CrNiMoV	淬火后 中温回火	漏斗形 圆试样	1 553	a_p	32.366 5	27.358 2	25.925 3	23.249 7	20.277 4
				b_p	-9.590 7	-7.925 9	-7.449 6	-6.560 3	-5.572 3
55SiMnVB	淬火后 中温回火	漏斗形 板试样	1 536	a_p	28.758 0	22.303 7	20.613 5	17.510 7	14.036 8
				b_p	-8.322 4	-6.171 1	-5.609 3	-4.578 5	-3.424 1
HT200	去应力 退火	圆柱试样	250	a_p	30.348 9	—	—	—	—
				b_p	-12.196 2	—	—	—	—
HT300	去应力 退火	圆柱试样	353	a_p	37.114 1	—	—	—	—
				b_p	-14.577 5	—	—	—	—
LF10MnSiTi	冷拔后 时效处理	圆柱试样	861	a_p	111.242 5	101.529 2	97.330 1	95.001 3	87.887 5
				b_p	-36.849 8	-33.574 5	-32.141 5	-31.389 4	-28.975 0
ZG310-570	调质	圆柱试样	1 012	a_p	24.932 3	—	—	—	—
				b_p	-7.509 4	—	—	—	—

表 18.3-7 常用国产机械材料缺口试样 (缺口半径 $R = 0.75\text{mm}$)
旋转弯曲 p - S - N 曲线的 a_p 和 b_p 值

材 料	热处理	σ_b /MPa	a_s	不同存活率下的 a_p, b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
Q235A	热轧	439	2.0	a_p	22.634 2	21.485 7	21.160 2	20.550 5	19.866 2
				b_p	-7.438 2	-6.965 2	-6.831 1	-6.580 0	-6.298 2
Q235A (F)	热轧	428	2.0	a_p	20.117 9	19.403 0	19.200 5	18.820 6	18.391 8
				b_p	-6.365 1	-6.131 1	-6.064 9	-5.940 6	-5.800 0
Q235B	热轧	441	2.0	a_p	22.010 0	21.090 0	20.830 0	20.360 0	19.790 0
				b_p	-6.997 0	-6.650 0	-6.559 0	-6.389 0	-6.177 0
20	正火	463	2.0	a_p	21.717 9	21.158 0	20.927 2	20.443 7	19.928 5
				b_p	-6.994 7	-6.795 1	-6.706 0	-6.514 0	-6.305 0
35	正火	593	2.0	a_p	21.719 2	19.980 7	20.053 2	20.604 4	21.571 1
				b_p	-6.975 5	-6.275 7	-6.314 7	-6.563 5	-6.991 5
45	正火	624	2.0	a_p	21.961 3	19.980 7	20.053 2	20.604 4	21.571 1
				b_p	-6.975 5	-6.275 7	-6.314 7	-6.563 5	-6.991 5
45	调质	735	2.0	a_p	21.965 5	19.047 6	18.222 5	—	—
				b_p	-6.862 2	-5.725 9	-5.404 6	—	—
45	电渣熔铸	934	2.0	a_p	22.248 3	21.446 4	21.219 4	20.793 5	20.315 8
				b_p	-6.695 3	-6.424 5	-6.347 9	-6.204 2	-6.042 7

续表 18.3-7

材 料	热处理	σ_1/MPa	a_r	不同存活率下的 a_p, b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
50	正火	661	2.0	a_p	21.760 8	19.691 6	19.288 3	18.529 1	17.678 2
				b_p	-6.749 7	-5.982 8	-5.838 8	-5.567 7	-5.264 0
55	调质	834	2.0	a_p	22.909 5	20.545 5	20.108 4	19.662 4	19.563 6
				b_p	-7.126 2	-6.240 2	-6.076 0	-5.912 9	-5.881 2
Q345	热轧	586	2.0	a_p	24.058 9	21.707 0	21.041 1	19.792 1	18.390 4
				b_p	-7.805 6	-6.870 1	-6.605 2	-6.108 4	-5.550 8
40MnB	调质	970	2.0	a_p	24.292 4	22.390 2	21.959 5	21.539 1	21.344 8
				b_p	-7.498 6	-6.774 8	-6.643 3	-6.506 8	-6.467 8
18Cr2Ni4W	调质	1 039	2.0	a_p	27.417 4	25.201 4	24.573 9	23.395 8	22.074 6
				b_p	-8.582 4	-7.767 4	-7.536 8	-7.103 6	-6.617 8
20Cr2Ni4A	淬火后 低温回火	1 483	1.89	a_p	24.989 0	23.692 1	23.324 3	22.636 8	21.864 2
				b_p	-7.413 0	-6.997 8	-6.880 0	-6.659 9	-6.412 6
20CrMnSi	调质	788	2.0	a_p	31.392 8	30.973 9	30.854 0	30.631 2	29.070 7
				b_p	-10.241 2	-10.150 7	-10.124 6	-10.076 4	-9.497 6
35CrMo	调质	924	2.0	a_p	18.875 9	16.389 7	14.916 0	—	—
				b_p	-5.465 7	-4.537 8	-3.964 8	—	—
40Cr	调质	940	2.0	a_p	23.839 9	19.984 8	19.902 1	20.571 7	—
				b_p	-7.330 1	-5.922 0	-5.923 8	-6.254 3	—
40CrMnMo	调质	977	2.0	a_p	22.333 3	18.927 9	17.963 9	16.163 2	14.108 0
				b_p	-6.796 4	-5.538 5	-5.182 4	-4.517 7	-3.757 7
40CrNiMo	调质	972	2.0	a_p	24.494 1	20.880 9	20.381 2	18.827 1	17.391 8
				b_p	-7.385 3	-6.058 4	-5.781 6	-5.302 2	-4.773 1
42CrMo	调质	1 134	2.0	a_p	25.515 5	22.325 1	21.997 0	21.878 7	22.155 2
				b_p	-7.898 9	-6.702 9	-6.581 4	-6.541 7	-6.652 1
50CrV	淬火后 中温回火	1 586	2.0	a_p	35.690 5	33.943 0	33.448 1	32.519 8	31.478 1
				b_p	-11.606 9	-10.950 4	-10.763 6	-10.415 0	-10.023 5
55Si2Mn	淬火后 中温回火	1 866	1.89	a_p	34.810 6	31.798 2	30.944 4	29.343 0	—
				b_p	-10.733 9	-9.715 6	-9.426 9	-8.885 5	—
60Si2Mn	淬火后 中温回火	1 625	1.89	a_p	38.326 5	—	—	—	—
				b_p	-12.550 1	—	—	—	—
65Mn	淬火后 中温回火	1 687	2.0	a_p	34.962 3	31.348 3	30.325 0	28.405 2	26.251 6
				b_p	-10.942 1	-9.672 5	-9.312 6	-8.637 4	-7.879 7

续表 18.3-7

材 料	热处理	σ_b /MPa	a_σ	不同存活率下的 a_p 、 b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
16MnCr5	淬火后 低温回火	1 373	1.89	a_p	25.2408	23.964 8	23.604 6	22.927 4	22.166 1
				b_p	-7.596 2	-7.173 1	-7.053 7	-6.829 2	-6.576 7
20MnCr5	淬火后 低温回火	1 482	1.89	a_p	23.331 5	20.864 3	20.165 5	18.847 1	17.382 9
				b_p	-6.803 0	-5.949 2	-5.707 4	-5.245 2	-4.744 3
1Cr13	调质	721	2.0	a_p	21.186 3	19.957 5	19.606 5	18.956 8	18.224 4
				b_p	-6.483 0	-6.020 5	-5.889 3	-5.643 7	-5.367 7
2Cr13	调质	687.5	2.0	a_p	24.742 7	19.393 8	—	—	—
				b_p	-7.912 9	-5.820 6	—	—	—
ZG1Cr13	退火后 正火	789	2.0	a_p	21.479 4	19.824 6	19.355 0	18.475 7	17.489 3
				b_p	-6.532 2	-5.942 6	-5.775 1	-5.461 9	-5.110 5
ZG20SiMn	正火	515	2.0	a_p	22.114 4	21.637 9	21.502 2	21.249 1	20.966 1
				b_p	-7.137 8	-6.958 8	-6.907 8	-6.812 8	-6.706 5
ZG230-450	正火	543	2.0	a_p	19.140 0	18.320 0	-18.090 0	17.660 0	—
				b_p	-5.840 0	-5.560 0	-5.480 0	-5.340 0	—
ZG40Cr	调质	977	2.0	a_p	33.146 0	30.837 7	30.167 7	28.992 6	27.579 4
				b_p	-10.971 3	-10.161 1	-9.925 2	-9.515 2	-9.017 4
QT400-18 (梅花试样)	退火	472	2.0	a_p	29.191 3	28.019 0	27.687 1	27.064 4	26.365 7
				b_p	-10.048 1	-9.606 6	-9.481 7	-9.247 1	-8.984 1
QT400-18 (楔形试块)	退火	432	2.0	a_p	26.530 4	23.349 3	22.450 7	20.762 2	18.867 7
				b_p	-8.973 2	-7.706 7	-7.348 0	-6.675 4	-5.920 7
QT600-3 (梅花试块)	正火	760	2.0	a_p	21.731 7	19.228 0	19.106 7	19.052 7	19.077 4
				b_p	-6.969 3	-5.965 8	-5.925 2	-5.918 6	-5.942 0
QT600-3 (楔形试块)	正火	858	2.0	a_p	22.675 0	18.859 8	18.274 3	17.785 7	17.708 1
				b_p	-7.266 5	-5.764 8	-5.533 1	-5.341 3	-5.312 8
QT700-2	正火	754	2.0	a_p	19.480 1	19.119 6	19.017 0	18.825 5	18.611 1
				b_p	-6.110 8	-6.041 3	-6.021 4	-5.984 5	-5.943 2
QT800-2	正火	842	2.0	a_p	22.587 6	21.800 4	21.670 0	—	—
				b_p	-7.204 3	-6.951 3	-6.917 3	—	—

表 18.3-8 不同锐度缺口试样 p - S - N 曲线中的常数 a_p 和 b_p 值

材 料	热处理	缺口半径 R/mm	a_p	不同存活率 p 下的 a_p 或 b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
Q235A	轧态	0.25	3.26	a_p	18.445 0	16.382 8	15.798 7	14.703 3	13.474 1
				b_p	-5.745 5	-4.883 5	-4.639 3	-4.181 5	-3.667 6
		0.50	2.47	a_p	21.098 6	20.032 2	19.730 7	19.164 3	18.528 8
				b_p	-6.789 9	-6.364 2	-6.243 8	-6.017 7	-5.764 0
		0.75	2.06	a_p	23.030 8	22.801 3	22.736 5	22.614 1	22.477 2
				b_p	-7.554 4	-7.503 0	-7.488 5	-7.461 0	-7.430 3
		1.5	1.65	a_p	22.694 9	21.282 7	20.882 7	20.132 6	19.290 8
				b_p	-7.347 3	-6.811 2	-6.659 3	-6.374 5	-6.054 9
		3.0	1.38	a_p	24.443 1	23.642 7	23.415 7	22.990 1	22.514 3
				b_p	-7.890 4	-7.586 8	-7.500 7	-7.339 2	-7.158 8
		6.0	1.19	a_p	29.910 4	27.337 4	26.609 1	25.242 6	23.708 3
				b_p	-10.014 0	-9.018 1	-8.736 2	-8.207 3	-7.613 4
Q345	轧态	0.25	3.26	a_p	17.628 5	17.039 4	16.872 5	16.559 4	16.208 5
				b_p	-5.239 2	-5.015 1	-4.951 6	-4.832 5	-4.699 0
		0.50	2.47	a_p	20.335 8	19.557 1	19.336 5	18.922 8	18.458 7
				b_p	-6.337 8	-6.037 3	-5.952 1	-5.792 4	-5.613 3
		0.75	2.06	a_p	21.903 3	20.442 6	20.029 7	19.253 7	18.383 3
				b_p	-6.927 1	-6.359 7	-6.199 4	-5.898 0	5.559 9
		1.5	1.65	a_p	27.570 2	24.567 9	23.717 8	22.123 7	20.334 2
				b_p	-9.074 2	-7.888 1	-7.552 2	-6.922 5	-6.215 5
		3.0	1.38	a_p	27.803 7	24.802 6	23.952 5	22.358 4	20.570 4
				b_p	-8.918 1	-7.773 6	-7.449 4	-6.841 5	-6.159 6
		6.0	1.19	a_p	33.304 1	31.158 4	30.550 8	29.411 0	28.133 2
				b_p	-10.956 8	-10.193 0	-9.976 7	-9.571 0	-9.116 2
35	正火	0.25	3.26	a_p	18.680 9	17.736 7	17.469 1	16.967 9	16.405 0
				b_p	-5.765 4	-5.395 0	-5.290 1	-5.093 5	-4.872 7
		0.50	2.47	a_p	20.998 3	21.092 1	21.119 2	21.169 2	21.225 5
				b_p	-6.671 6	-6.743 6	-6.764 2	-6.802 5	-6.845 6
		0.75	2.06	a_p	23.137 4	22.669 1	22.537 1	22.288 4	22.009 6
				b_p	-7.559 7	-7.415 4	-7.374 8	-7.298 2	-7.212 4
		1.5	1.65	a_p	25.878 4	25.815 2	25.796 7	25.763 1	25.724 9
				b_p	-8.532 5	-8.556 9	-8.563 5	-8.576 4	-8.590 7
		3.0	1.38	a_p	29.203 3	25.824 7	24.866 5	23.071 8	21.058 1

续表 18.3-8

材 料	热处理	缺口半径 R/mm	a_0	不同存活率 p 下的 a_p 或 b_p							
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9		
35	正火	3.0	1.38	b_p	-9.657 1	-8.330 0	-7.953 6	-7.248 7	-6.457 7		
				a_p	35.736 6	33.231 2	32.521 0	31.191 1	29.697 1		
		6.0	1.19	b_p	-12.101 8	-11.149 6	-10.879 7	-10.374 3	-9.806 5		
45	正火	0.25	3.26	a_p	20.655 0	19.911 3	19.700 6	19.306 1	18.862 8		
				b_p	-6.549 1	-6.283 4	-6.208 1	-6.067 2	-5.908 8		
		0.50	2.47	a_p	21.315 5	21.016 0	20.931 5	20.772 0	20.593 7		
				b_p	-6.837 7	-6.739 9	-6.712 4	-6.660 4	-6.602 2		
		0.75	2.06	a_p	23.367 2	21.845 8	21.415 2	20.606 8	19.700 1		
				b_p	-7.625 3	-7.024 7	-6.854 7	-6.535 6	-6.177 7		
		1.5	1.65	a_p	29.213 3	27.889 0	27.514 1	26.811 3	26.023 0		
				b_p	-9.723 2	-9.224 9	-9.083 8	-8.819 4	-8.522 9		
		3.0	1.38	a_p	27.200 8	24.266 8	23.434 9	21.877 2	20.126 7		
				b_p	-8.812 5	-7.686 5	-7.367 2	-6.769 4	-6.097 5		
		6.0	1.19	a_p	36.860 2	34.473 7	33.797 5	32.529 1	31.104 1		
				b_p	12.514 3	-11.612 0	-11.356 4	-10.876 8	-10.338 0		
		45	调质	0.25	3.26	a_p	15.240 4	14.637 9	14.467 3	14.147 3	13.788 2
						b_p	-4.192 0	-3.964 7	-3.900 3	-3.779 6	-3.644 1
0.50	2.47			a_p	22.105 4	19.964 6	19.358 4	18.221 2	16.945 4		
				b_p	-6.827 9	-6.027 5	-5.800 9	-5.375 7	-4.898 7		
1.0	1.87			a_p	24.959 9	23.480 1	23.061 1	22.275 1	21.393 2		
				b_p	-7.793 3	-7.257 0	-7.105 1	-6.820 2	-6.500 6		
3.0	1.38			a_p	30.216 6	25.439 5	24.086 9	21.549 2	18.702 3		
				b_p	-9.487 2	-7.761 6	-7.273 0	-6.356 3	-5.327 9		
15	1.08			a_p	24.396 4	22.760 7	22.297 6	21.428 7	20.453 9		
				b_p	-7.171 2	-6.627 7	-6.473 8	-6.185 1	-5.861 2		
75	1.02			a_p	29.841 4	28.741 0	28.429 4	27.844 9	27.189 1		
				b_p	-9.119 3	-8.677 0	-8.671 1	-8.485 6	-8.277 5		
光滑 试样	1			a_p	37.710 9	37.461 6	37.390 4	37.258 4	37.108 8		
				b_p	-12.189 3	-12.114 3	-12.092 9	-12.053 6	-12.010 7		
40Cr	调质	0.25	3.26	a_p	19.874 8	18.643 5	18.294 9	17.640 7	16.907 2		
				b_p	-5.922 8	-5.458 3	-5.326 8	-5.080 0	-4.803 2		
		0.50	2.47	a_p	22.163 6	20.623 2	20.187 0	19.368 3	18.450 4		
				b_p	-6.787 2	-6.205 2	-6.040 4	-5.731 1	-5.384 3		

续表 18.3-8

材 料	热处理	缺口半径 R/mm	α_s	不同存活率 p 下的 a_p 或 b_p					
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9
40Cr	调质	0.75	2.06	a_p	26.836 9	24.851 7	24.289 6	23.235 4	22.052 4
				b_p	-8.473 3	-7.740 0	-7.532 3	-7.142 9	-6.705 9
		1.5	1.65	a_p	24.988 0	23.690 6	23.326 0	22.637 4	21.861 5
				b_p	-7.492 1	-7.053 9	-6.930 8	-6.698 1	-6.435 8
		3.0	1.38	a_p	28.221 8	24.451 6	23.387 6	21.384 3	19.138 4
				b_p	-8.516 5	-7.169 5	-6.789 4	-6.073 6	-5.271 2
6.0	1.19	a_p	25.932 1	22.520 7	21.555 6	19.742 6	17.714 3		
		b_p	-7.602 1	-6.421 4	-6.087 4	-5.459 9	-4.758 0		
60Si2Mn	淬火后 中温回火	0.25	2.97	a_p	20.915 6	16.060 6	14.684 0	12.107 0	9.213 5
				b_p	-6.251 7	-4.400 9	-3.876 1	-2.893 7	-1.790 7
		0.50	2.20	a_p	27.639 8	25.130 4	24.418 7	23.083 9	21.588 6
				b_p	-8.516 1	-7.643 1	-7.395 5	-6.931 1	-6.410 9
		0.75	1.90	a_p	26.621 9	19.903 5	18.001 6	14.428 6	10.423 1
				b_p	-8.128 0	-5.699 4	-5.011 9	-3.720 2	-2.272 3
		1.50	1.55	a_p	21.414 3	20.776 1	20.594 2	20.258 7	19.878 7
				b_p	-5.906 4	-5.731 8	-5.681 9	-5.590 4	-5.486 5
		3.0	1.31	a_p	29.164 5	18.305 3	15.236 5	9.457 2	—
				b_p	-8.485 9	-4.757 0	-3.703 3	-1.718 7	—
		6.0	1.6	a_p	28.879 7	24.199 1	22.861 5	20.378 0	17.580 1
				b_p	-8.306 2	-6.765 6	-6.325 1	-5.507 7	-4.586 6
40CrNiMo	调质	0.25	2.97	a_p	16.526 1	13.836 6	13.075 1	11.646 4	10.043 6
				b_p	-4.607 9	-3.594 4	-3.307 5	-2.769 1	-2.165 1
		0.50	2.20	a_p	26.688 0	24.795 7	24.259 9	23.254 8	22.127 1
				b_p	-8.225 5	-7.567 3	-7.381 0	-7.031 3	-6.639 1
		1.0	1.75	a_p	21.674 6	20.209 5	19.794 6	19.016 4	18.143 2
				b_p	-6.237 0	-5.732 3	-5.589 5	-5.321 4	-5.020 7
		3.0	1.31	a_p	25.556 6	24.424 0	24.103 3	23.501 7	22.826 8
				b_p	-7.490 5	-7.124 8	-7.021 3	-6.827 0	-6.609 1
		15	1.07	a_p	28.977 6	24.003 5	22.595 1	19.952 8	16.988 5
				b_p	-8.558 9	-6.836 4	-6.348 6	-5.433 6	-4.407 0
		75	1.02	a_p	21.451 6	15.807 0	14.208 7	11.210 3	7.846 5
				b_p	-5.886 1	-3.926 3	-3.371 4	-2.330 3	-1.162 4
		光滑试样	1	a_p	16.767 1	15.790 7	15.514 2	14.995 5	14.413 5
				b_p	-4.750 7	-4.395 2	-4.294 5	-4.150 7	-3.898 6

表 18.3-9 不同终加工方法试样 p - S - N 曲线的 a_p 或 b_p 值

材 料	热处理	σ_b /MPa	终加工方法	不同存活率 p 下的 a_p 或 b_p								
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9			
Q235A	轧态	463	抛光	a_p	25.350 2	23.631 7	23.145 1	22.232 2	21.208 1			
				b_p	-7.965 1	-7.315 3	-7.131 3	-6.786 2	-6.398 9			
			磨光	a_p	24.039 8	20.541 0	19.550 3	17.691 7	15.606 6			
				b_p	-7.444 9	-6.092 6	-5.709 7	-4.991 3	-4.185 4			
			精车	a_p	27.278 8	20.606 3	18.716 9	15.172 4	11.196 0			
				b_p	-8.918 7	-6.305 1	-5.565 0	-4.176 7	-2.619 1			
			粗车	a_p	30.199 2	31.155 2	31.425 9	31.933 6	32.503 3			
				b_p	-10.170 2	-10.633 8	-10.765 0	-11.011 3	-11.287 5			
			锻造	a_p	24.978 8	23.299 7	22.824 3	21.932 3	20.931 7			
				b_p	-8.125 5	-7.534 8	-7.367 5	-7.053 7	-6.701 6			
			Q345	轧态	562	锻造	a_p	20.656	22.001	22.382	23.096	23.898
							b_p	-6.277	-6.967	-7.163	-7.529	-7.940
粗车	a_p	36.020 0				28.875 6	27.373 3	25.119 2	26.121 9			
	b_p	-12.557 7				-9.778 8	-9.201 9	-8.336 5	-8.807 7			
精车	a_p	44.110				21.433	—	—	—			
	b_p	-15.540				-6.536	—	—	—			
35	正火	584	粗车	a_p	43.790	38.825	—	—	—			
				b_p	-15.489	-13.578	—	—	—			
			精车	a_p	45.359	38.432	36.472	32.792	—			
				b_p	-16.018	-13.321	-12.558	-11.125	—			
			磨光	a_p	53.932	—	—	—	—			
				b_p	-19.347	—	—	—	—			
			抛光	a_p	58.518	54.631	56.501	64.215	75.422			
				b_p	-21.168	19.826	-20.643	-23.787	-28.348			
45	正火	612	粗车	a_p	46.675 6	41.410 3	41.294 2	41.249 5	41.471 1			
				b_p	-16.781 8	-14.709 1	-14.672 7	-14.672 7	-14.781 8			
			精车	a_p	48.059	46.564	47.320	49.182	51.452			
				b_p	-17.121	-16.593	-16.991	-17.684	-18.623			
			磨光	a_p	58.829 0	48.303 6	46.739 6	46.423 8	48.288 5			
				b_p	-21.438 9	-17.335 4	-16.737 1	-16.656 9	-17.450 1			
			抛光	a_p	65.747 2	49.699 3	46.986 8	45.438 0	47.000 1			
				b_p	-23.920 6	-17.658 7	-16.608 4	-16.034 8	-16.693 4			
			45	调质	783	抛光	a_p	40.681 7	38.614 5	38.029 1	36.931 0	35.699 1

续表 18.3-9

材 料	热处理	σ_h/MPa	终加工 方法	不同存活率 p 下的 a_p 或 b_p								
				$p/\%$	50	90	95	99	99.9			
45	调质	783	抛光	b_p	-13.288 4	-12.602 4	-12.408 2	-12.043 8	-11.635 1			
				a_p	41.012 4	34.265 6	32.355 3	28.771 4	24.750 7			
			磨光	b_p	-13.421 2	-10.992 6	-10.304 9	-9.014 8	-7.567 5			
				a_p	31.569 2	28.238 4	27.295 3	25.525 9	23.541 0			
			精车	b_p	-9.952 1	-8.823 2	-8.503 6	-7.903 0	-7.231 2			
				a_p	31.500 9	35.031 0	36.030 6	37.905 8	40.009 5			
			粗车	b_p	-10.040 4	-11.430 5	-11.824 1	-12.562 6	-13.391 0			
				a_p	16.484 8	14.864 1	14.405 2	13.544 2	12.578 4			
			锻造	b_p	-4.524 6	-3.943 9	-3.779 5	-3.471 1	-3.125 1			
				a_p	32.095 3	33.454 4	33.839 3	34.561 3	35.371 3			
			40CrNiMo	调质	940	抛光	b_p	-9.852 1	-10.397 3	-10.551 7	-10.841 3	-11.166 2
							a_p	30.386 3	28.781 0	28.328 6	27.475 4	26.518 5
磨光	b_p	-9.184 8				-8.646 8	-8.495 2	-8.209 1	-7.888 4			
	a_p	31.511 4				29.484 0	28.909 9	27.832 8	26.624 6			
精车	b_p	-9.664 9				-8.963 4	-8.764 7	-8.392 1	-7.974 0			
	a_p	30.963 7				35.496 7	36.780 2	39.187 9	41.889 3			
粗车	b_p	-9.574 3				-11.315 1	-11.808 0	-12.732 6	-13.770 0			
	a_p	20.934 9				18.288 3	17.538 9	16.133 0	14.555 7			
锻造	b_p	-6.057 2				-5.099 1	-4.827 8	-4.318 9	-3.747 9			
	a_p	—				15.307 7	15.168 9	—	—			
40Cr	调质	858				锻造	b_p	—	-3.988 0	-3.957	—	—
							a_p	—	—	26.805	29.720	32.992
			粗车	b_p	—	—	-8.287	-9.456	-10.768			
				a_p	—	35.927	39.079	45.665	—			
			磨光	b_p	—	-11.374	-12.575	-15.068	—			
				a_p	—	—	—	—	—			
60Si2Mn	淬火后 中温回火	1 370	锻造	a_p	15.318	15.428	15.654	—	—			
				b_p	-3.781	-3.992	-4.095	—	—			
			粗车	a_p	19.872	—	—	—	—			
				b_p	-5.386	—	—	—	—			
			精车	a_p	26.999	25.219	24.965	24.894	25.255			
				b_p	-7.816	-7.278	-7.211	-7.224	-7.390			
			磨光	a_p	31.786	16.523	—	—	—			
				b_p	-9.295	-4.056	—	—	—			
			抛光	a_p	35.592	28.110	26.556	24.992	—			
				b_p	-10.687	-8.145	-7.620	-7.101	-			

1.3 疲劳极限的经验公式

当缺乏疲劳极限的数值时,采用经验公式估算。

(1) 对于结构钢的对称循环应力的疲劳极限

拉压 $\sigma_{-1l} = 0.23(\sigma_s + \sigma_b)$

弯曲 $\sigma_{-1} = 0.27(\sigma_s + \sigma_b)$

扭转 $\tau_{-1} = 0.15(\tau_s + \tau_b)$

(2) 对于结构钢的脉动循环应力的疲劳极限

拉压 $\sigma_{0l} = 1.42\sigma_{-1}$

弯曲 $\sigma_0 = 1.33\sigma_{-1}$

扭转 $\tau_0 = 1.50\tau_{-1}$

(3) 对于铸铁的疲劳极限

拉压 $\sigma_{-1l} = 0.4\sigma_b$ $\sigma_{0l} = 1.42\sigma_{-1l}$

弯曲 $\sigma_{-1} = 0.45\sigma_b$ $\sigma_0 = 1.33\sigma_{-1}$

扭转 $\tau_{-1} = 0.36\sigma_b$ $\tau_0 = 1.35\tau_{-1}$

(4) 对于球墨铸铁的疲劳极限

$$\tau_{-1} = 0.26\sigma_b$$

(5) 对于铝合金的疲劳极限

$$\sigma_{-1l} = \sigma_b/6 + 75$$

$$\sigma_{-1} = \sigma_b/6 + 75$$

$$\sigma_{0l} = 1.5\sigma_{-1l}$$

(6) 对于青铜的弯曲疲劳极限

$$\sigma_{-1} = 0.21\sigma_b$$

2 金属材料的 S-N 曲线

2.1 S-N 曲线 (图 18.3-1~图 18.3-47)

钢材的图注中 δ 表示板材厚度, ϕ 表示棒材的直径。铝合金尾部字母 B 表示预拉伸加工硬化; T4 表示固溶热处理后自然时效; T6 表示固溶热处理后人工时效。

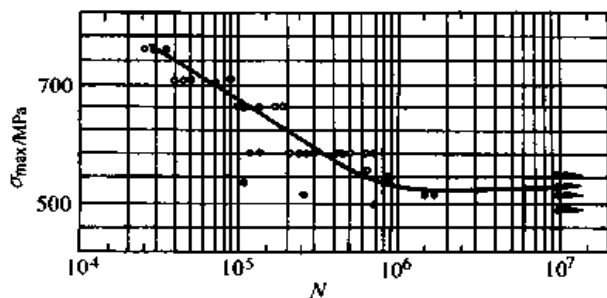


图 18.3-1 40CrNiMoA 钢棒材光滑试样的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 30$ mm)

热处理: 850℃ 油淬火, 580℃ 回火

材料 $\sigma_b = 1\ 039$ MPa

悬臂旋转弯曲, $r = -1$

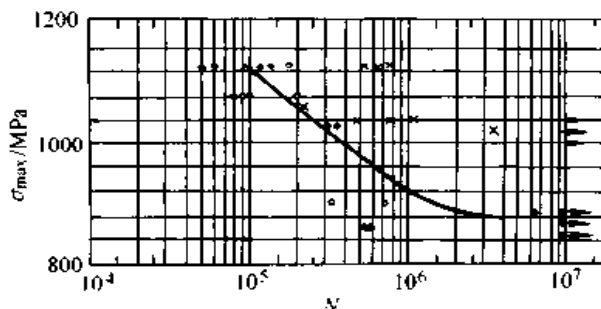


图 18.3-2 40CrNiMoA 钢棒材光滑试样的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 180$ mm)

热处理: 850℃ 油淬火, 570℃ 回火

材料 纵向 $\sigma_b = 1\ 167$ MPa, 横向 $\sigma_b = 1\ 172$ MPa

轴向加载试验, $r = 0.1$

“x” — 纵向, “o” — 横向

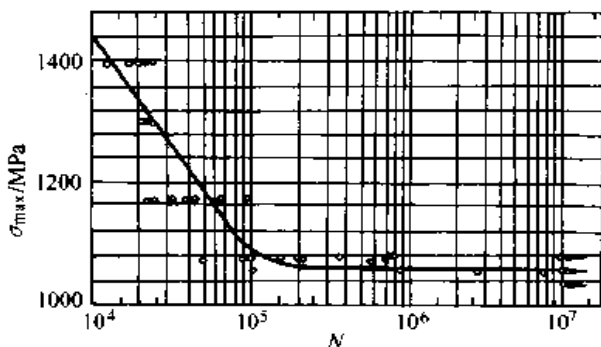


图 18.3-3 40CrMnSiMoA 钢棒材光滑试样的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 42$ mm)

热处理: 920℃ 加热, 300℃ 等温, 空冷

材料 $\sigma_b = 1\ 893$ MPa

轴向加载, $r = 0.1$

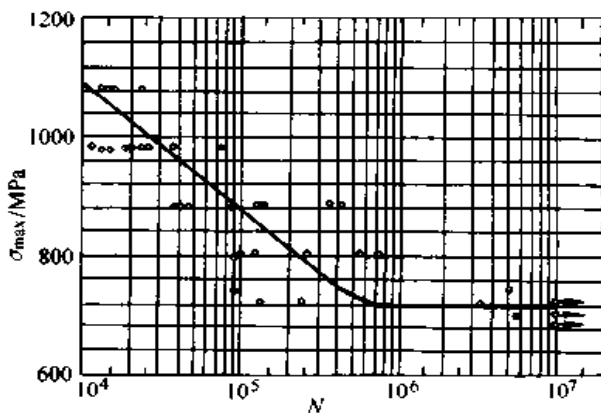


图 18.3-4 40CrMnSiMoA 钢棒材光滑试样的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 42$ mm)

热处理: 920℃ 加热, 300℃ 等温, 空冷

材料 $\sigma_b = 1\ 893$ MPa

轴向加载试验, $r = -1$

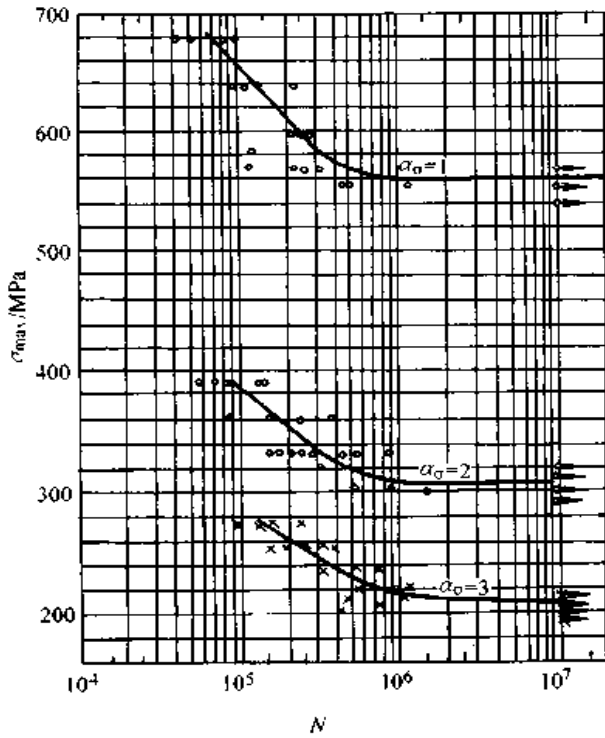


图 18.3-5 40CrNiMoA 钢棒材的 S-N 曲线
(棒材 $\phi 22$ mm)

热处理: 850℃ 油淬火, 580℃ 回火
材料 $\sigma_b = 1\ 049$ MPa
试样: 光滑 ($\alpha_s = 1$) 和缺口 ($\alpha_s = 2, 3$)
试样旋转弯曲试验, $r = -1$

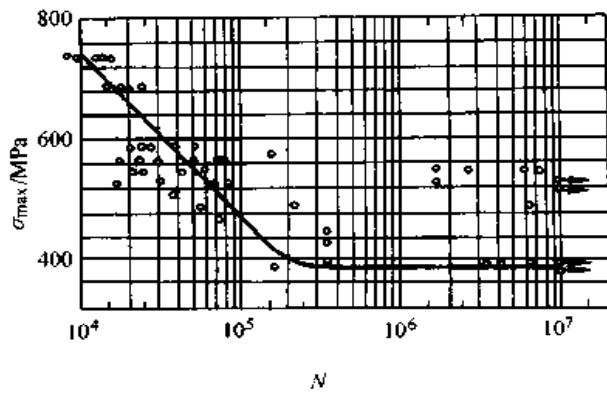


图 18.3-6 40CrMnSiMoA 钢棒材缺口试样 ($\alpha_s = 3$)
的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 42$ mm)

热处理: 920℃ 加热, 180℃ 等温, 260℃ 回火
材料 $\sigma_b = 1\ 971$ MPa
轴向加载试验, $r = 0.1$

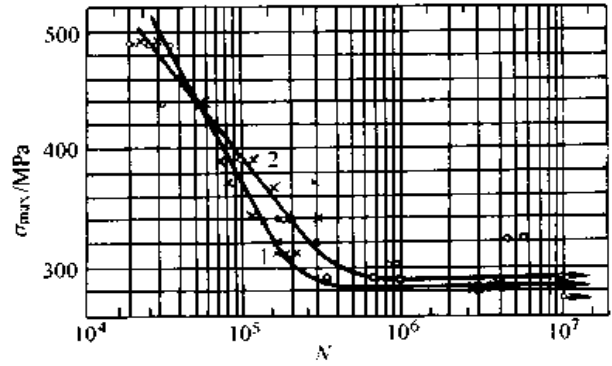


图 18.3-7 40CrNiMoA 钢棒材缺口试样 ($\alpha_s = 3$)
的 S-N 曲线

热处理: 850℃ 油淬火, 570℃ 回火
材料 纵向 $\sigma_b = 1\ 167$ MPa, 横向 $\sigma_b = 1\ 172$ MPa
轴向加载试验, $r = 0.1$
曲线 1—纵向 曲线 2—横向

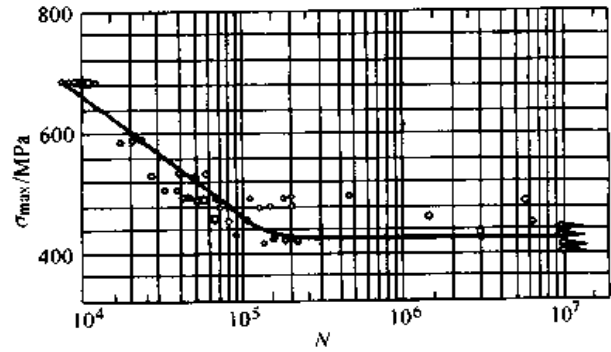


图 18.3-8 40CrMnSiMoA 钢棒材缺口试样 ($\alpha_s = 3$)
的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 42$ mm)

热处理: 920℃ 加热, 300℃ 等温, 空冷
材料 $\sigma_b = 1\ 893$ MPa
轴向加载, $r = 0.1$

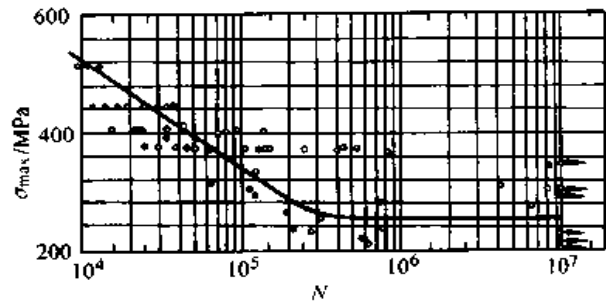


图 18.3-9 40CrMnSiMoA 钢缺口试样 ($\alpha_s = 3$)
S-N 曲线 (棒材 $\phi 42$ mm)

热处理: 920℃ 加热, 300℃ 等温, 空冷
材料 $\sigma_b = 1\ 893$ MPa
轴向加载, $r = -1$

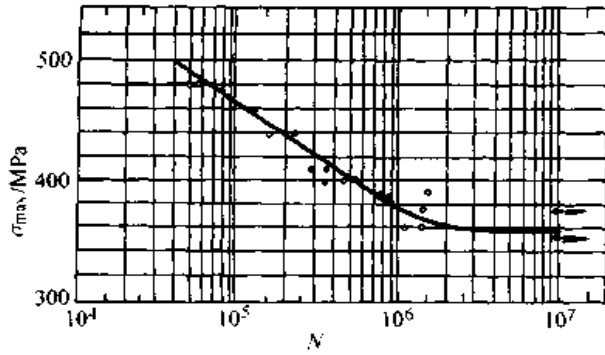


图 18.3-10 18Cr2Ni4WA 钢棒材缺口试样 ($\sigma_n = 2$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 18$ mm)
 热处理: 950℃ 正火, 860℃ 淬火, 540℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 145$ MPa
 旋转变曲试验, $r = -1$

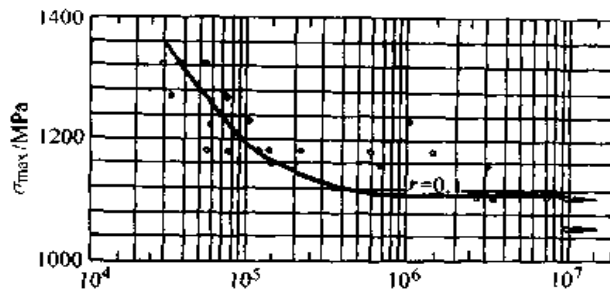


图 18.3-11 30CrMnSiNi2A 钢棒材光滑试样的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)
 热处理: 900℃ 淬火, 250℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 584$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1$

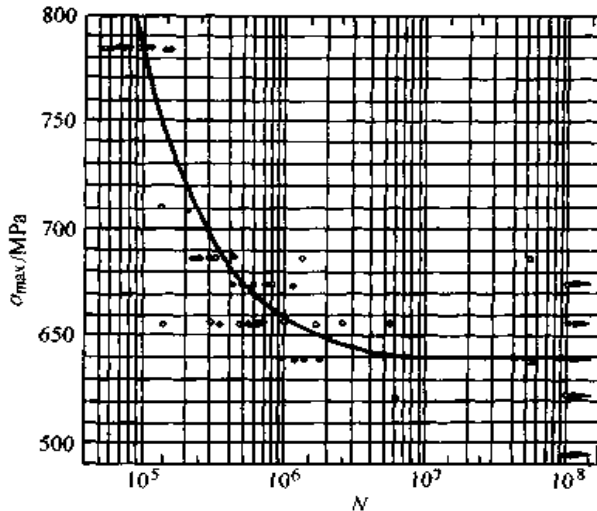


图 18.3-12 30CrMnSiA 钢锻件光滑试样的 S-N 曲线
 热处理: 900℃ 油淬火, 510℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 110$ MPa
 悬臂旋转变曲试验, $r = -1$

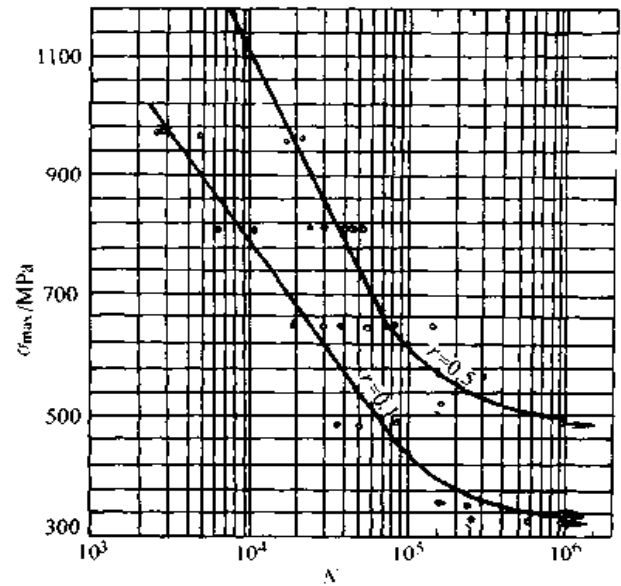


图 18.3-13 30CrMnSiNi2A 钢锻压板缺口试样 ($\sigma_n = 2.9$) 的 S-N 曲线
 热处理: 900℃ 淬火, 250℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 618$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

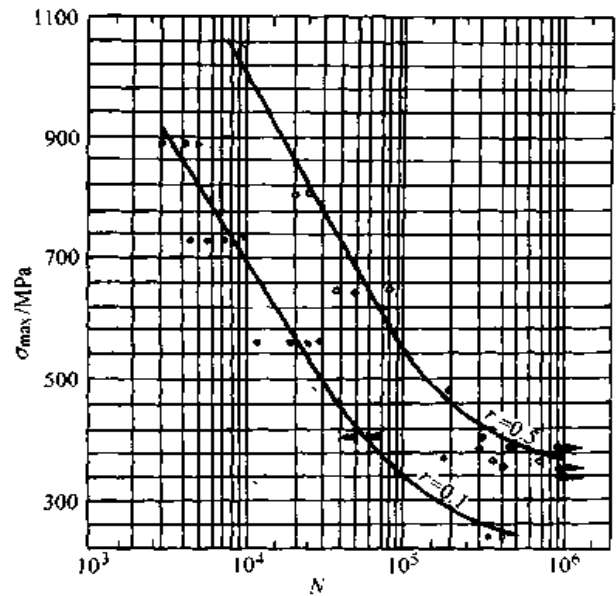


图 18.3-14 30CrMnSiNi2A 钢锻压板缺口试样 ($\sigma_n = 3.7$) 的 S-N 曲线
 热处理: 900℃ 淬火, 250℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 618$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

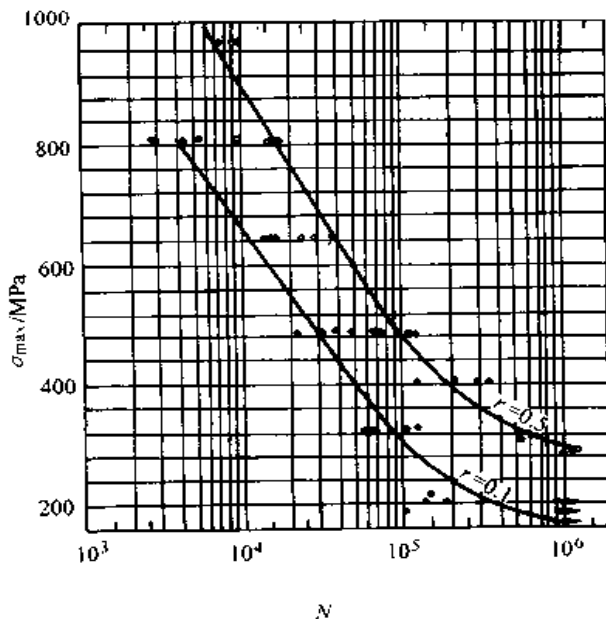


图 18.3-15 30CrMnSiNi2A 钢锻压板缺口试样 ($\sigma_a = 4.1$) 的 S-N 曲线
 热处理: 900℃ 淬火, 250℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 618\ \text{MPa}$
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

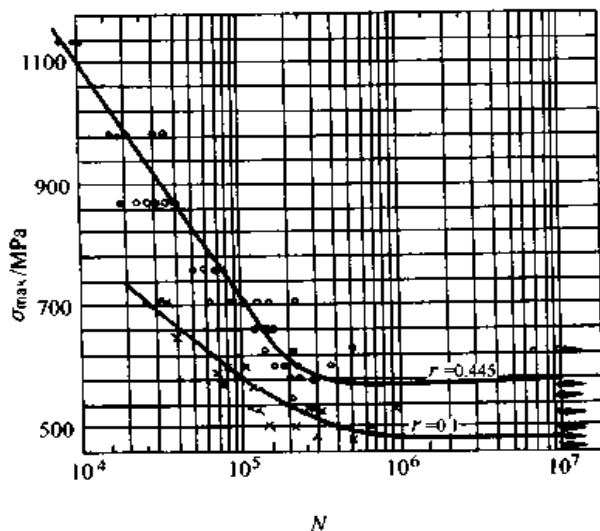


图 18.3-16 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样 ($\sigma_a = 3$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 25\ \text{mm}$)
 热处理: 900℃ 淬火, 260℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 569\ \text{MPa}$ ($r = 0.445$)
 $\sigma_b = 1\ 665\ \text{MPa}$ ($r = 0.1$)
 轴向加载, $r = 0.1, 0.445$

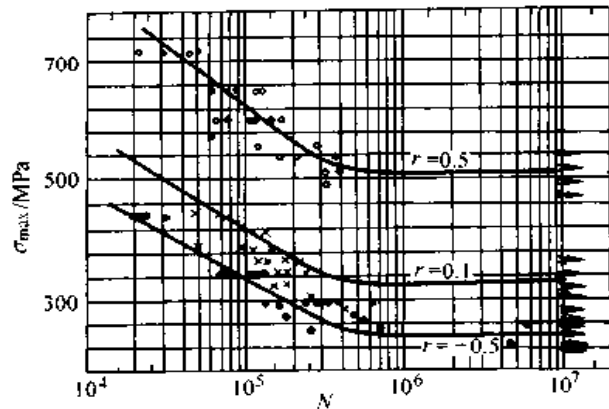


图 18.3-17 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样 ($\sigma_a = 5$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 25\ \text{mm}$)
 热处理: 900℃ 淬火, 260℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 569\ \text{MPa}$ ($r = 0.5, -0.5$)
 $\sigma_b = 1\ 665\ \text{MPa}$ ($r = 0.1$)
 轴向加载, $r = 0.5, 0.1, -0.5$

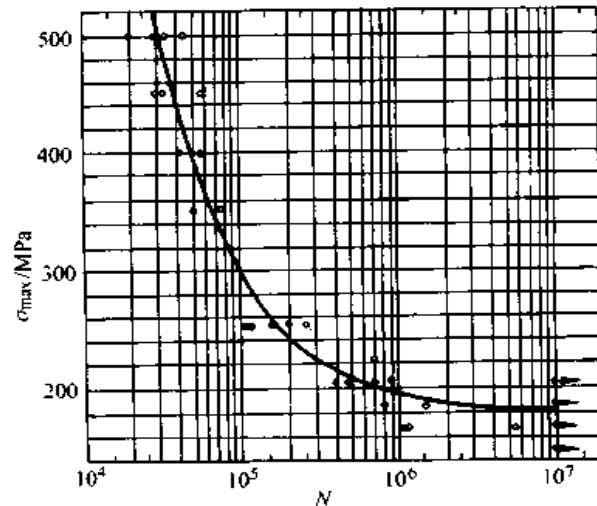


图 18.3-18 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样 ($\sigma_a = 3$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 55\ \text{mm}$)
 热处理: 900℃ 淬火, 250℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 755\ \text{MPa}$
 轴向加载, $r = 0.1$

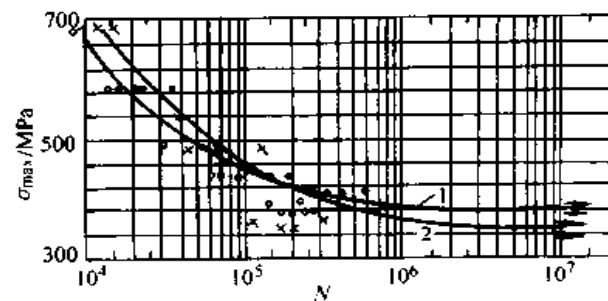


图 18.3-19 30CrMnSiNi2A 钢棒材缺口试样 ($\sigma_a = 3$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 30\ \text{mm}$)
 材料 $\sigma_b = 1\ 417\ \text{MPa}$ 1—热处理: 900℃ 淬火, 370℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1\ 550\ \text{MPa}$ 2—热处理: 900℃ 淬火, 320℃ 回火
 轴向加载, $r = 0.1$

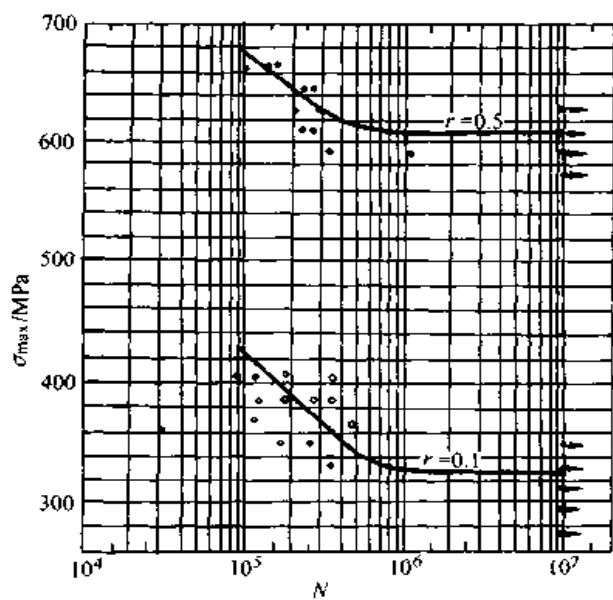


图 18.3-20 30CrMnSiA 钢棒材缺口试样 ($\sigma_r = 3$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 26$ mm)
 热处理: 890℃ 油淬火, 520℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1184$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

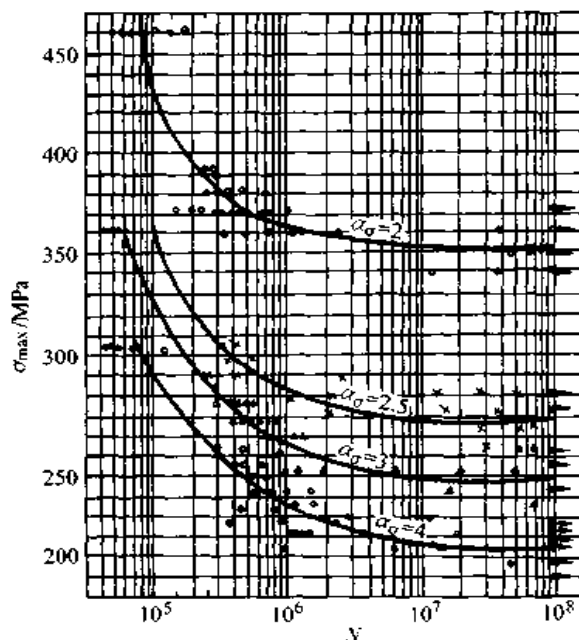


图 18.3-22 30CrMnSiA 钢锻件缺口试样 ($\sigma_r = 2, 2.5, 3, 4$) 的 S-N 曲线
 热处理: 900℃ 油淬火, 510℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 1110$ MPa
 悬臂旋转弯曲试验, $r = -1$

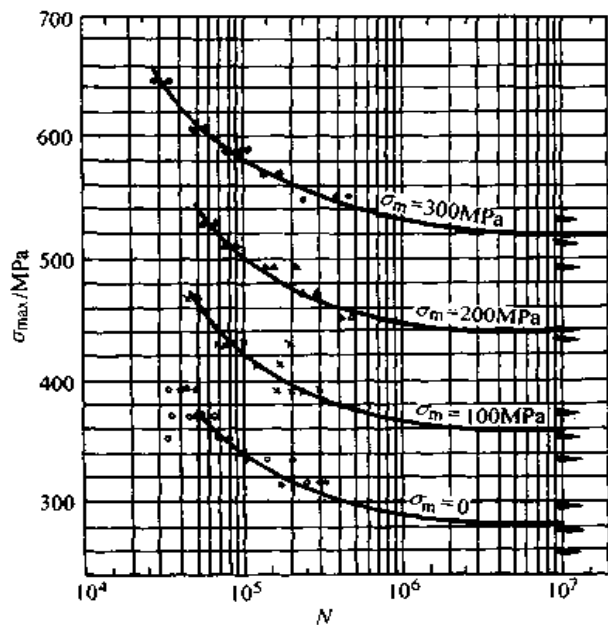


图 18.3-21 45 钢棒材缺口试样 ($\sigma_r = 2$) 的 S-N 曲线 (棒材 $\phi 26$ mm)
 热处理: 调质
 材料 $\sigma_b = 834$ MPa
 轴向加载, $\sigma_m = 0, 100, 200, 300$ MPa

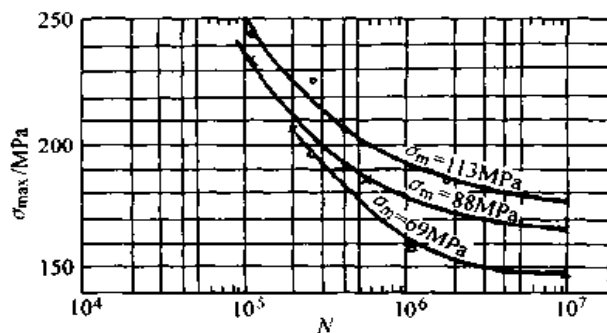


图 18.3-23 2A12-T4 铝合金板材光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 1$ mm)
 热处理: T4 状态
 材料 $\sigma_b = 451$ MPa
 轴向加载, $\sigma_m = 69, 88, 113$ MPa

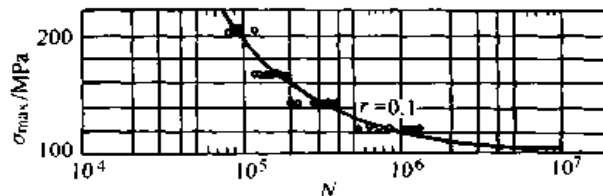


图 18.3-24 2A12-T4 阳极化铝合金板材光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5$ mm)
 热处理: T4 状态, 无色硬阳极化
 材料 $\sigma_b = 407$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1$

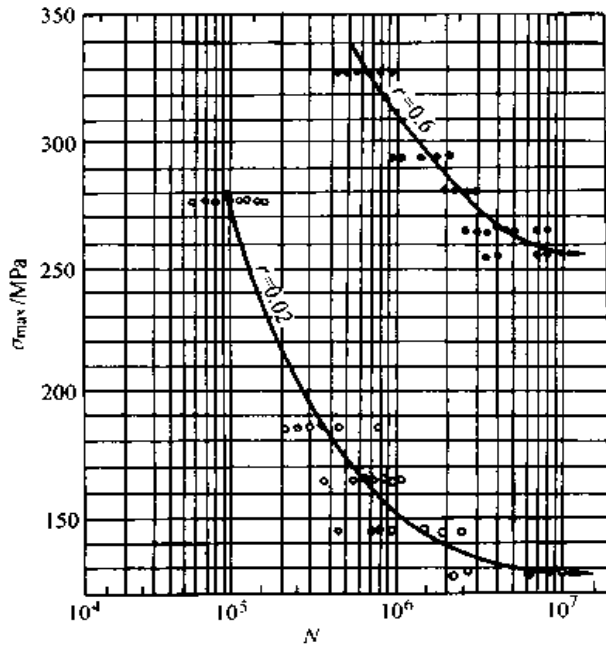


图 18.3-25 2A12-T4 铝合金板材光滑试样的

S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: 淬火、自然时效

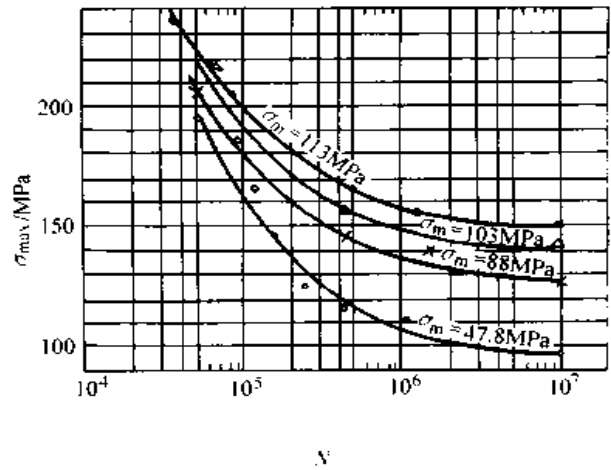
材料 $\sigma_b = 457 \text{ MPa}$ 轴向加载, $r = 0.02, 0.6$ 

图 18.3-27 2A12-T4 铝合金板材缺口试样

($a_n = 2.5$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 1 \text{ mm}$)

热处理: 淬火、自然时效

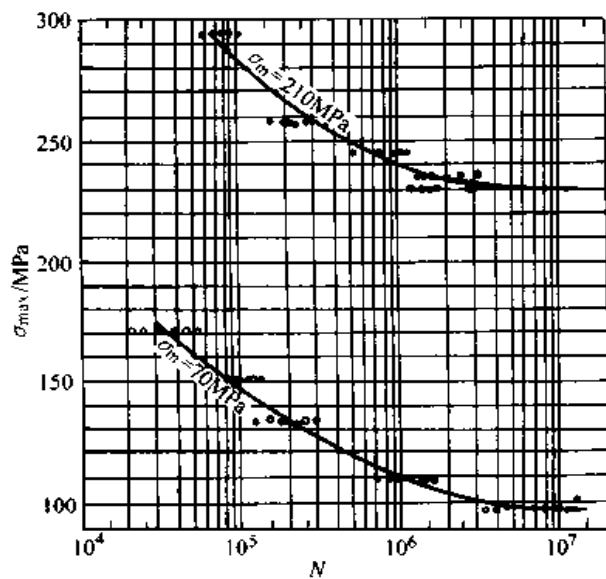
材料 $\sigma_b = 451 \text{ MPa}$ 轴向加载, $\sigma_m = 47.8, 88, 103, 113 \text{ MPa}$ 

图 18.3-26 2A12-T4 铝合金板材缺口试样

($a_n = 2$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: 淬火、自然时效

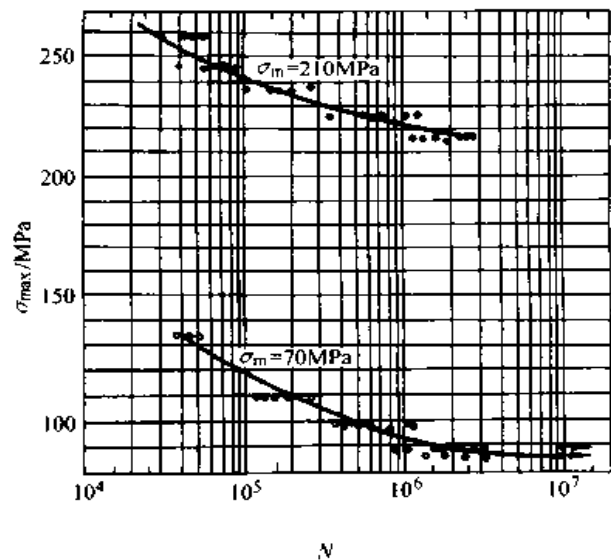
材料 $\sigma_b = 449 \text{ MPa}$ 轴向加载, $\sigma_m = 70, 210 \text{ MPa}$ 

图 18.3-28 2A12-T4 铝合金板材缺口试样

($a_n = 4$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: 淬火、自然时效

材料 $\sigma_b = 441 \text{ MPa}$ 轴向加载, $\sigma_m = 70, 210 \text{ MPa}$

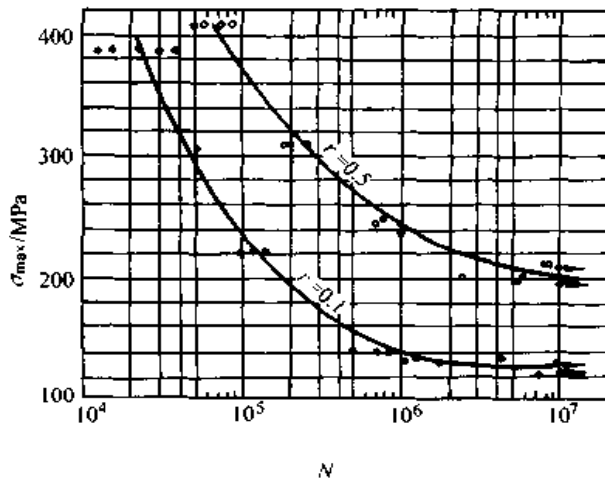


图 18.3-29 2A12-T6 铝合金板材光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: T6 状态
材料 $\sigma_b = 429 \text{ MPa}$
轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

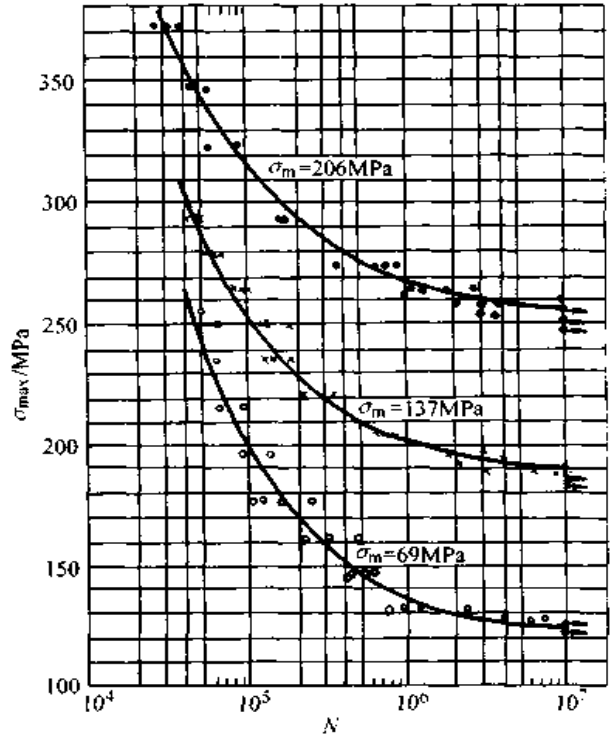


图 18.3-31 7A04 高强度铝合金板材光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: T6 状态
材料 $\sigma_b = 538 \text{ MPa}$
轴向加载, $\sigma_m = 69, 137, 206 \text{ MPa}$

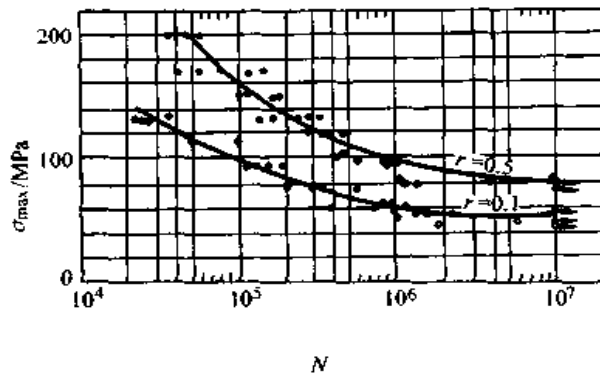


图 18.3-30 2A12-T6 铝合金板材缺口试样 ($\alpha_n = 3$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: T6 状态
材料 $\sigma_b = 429 \text{ MPa}$
轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

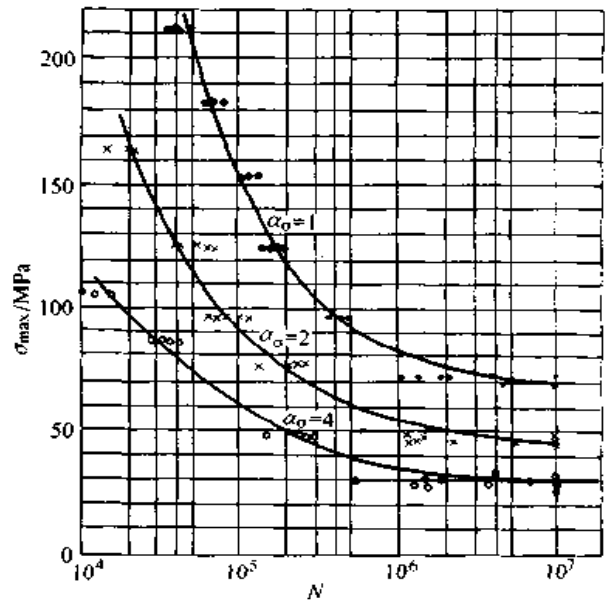


图 18.3-32 7A04 高强度铝合金板材试样 ($\alpha_n = 1, 2, 4$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)

热处理: T6 状态
材料 $\sigma_b = 553 \text{ MPa}$
轴向加载, $\sigma_m = 0$

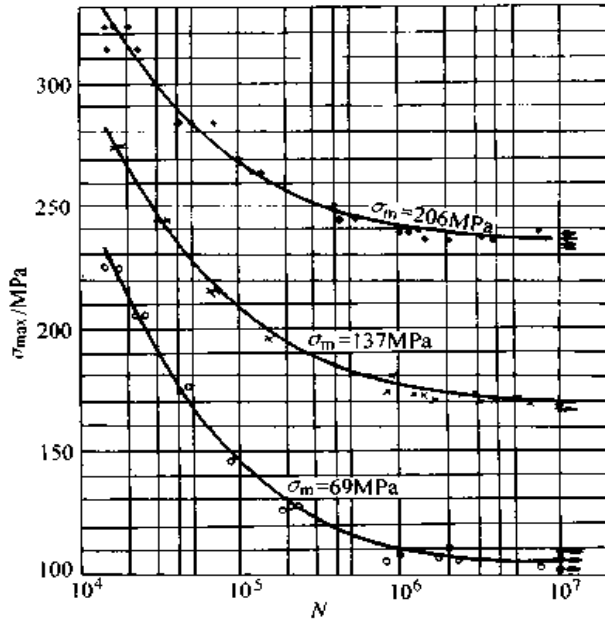


图 18.3-33 7A04 高强度铝合金板材缺口试样 ($\alpha_s = 2$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)
 热处理: T6 状态
 材料 $\sigma_b = 538 \text{ MPa}$
 轴向加载, $\sigma_m = 69, 137, 206 \text{ MPa}$

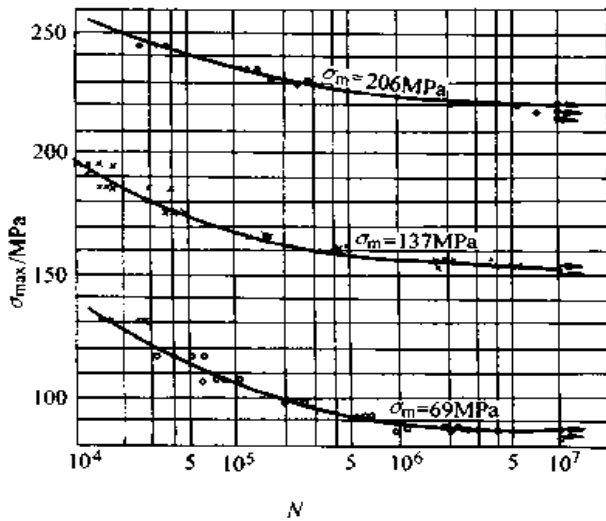


图 18.3-34 7A04 高强度铝合金板材缺口试样 ($\alpha_s = 4$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 2.5 \text{ mm}$)
 热处理: T6 状态
 材料 $\sigma_b = 538 \text{ MPa}$
 轴向加载, $\sigma_m = 69, 137, 206 \text{ MPa}$

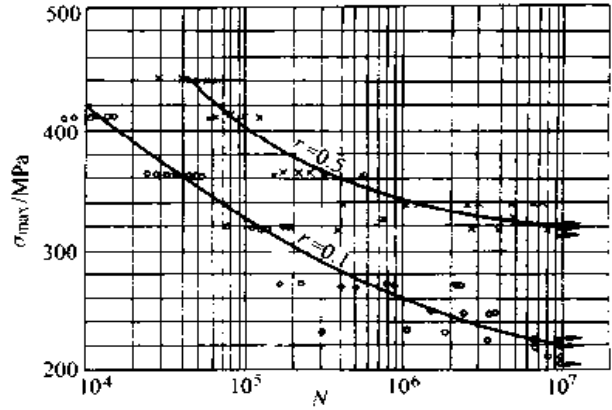


图 18.3-35 2A12B 铝合金预拉伸厚板光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 19 \text{ mm}$)
 热处理: T4 预拉伸
 材料 $\sigma_b = 455 \text{ MPa}$
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

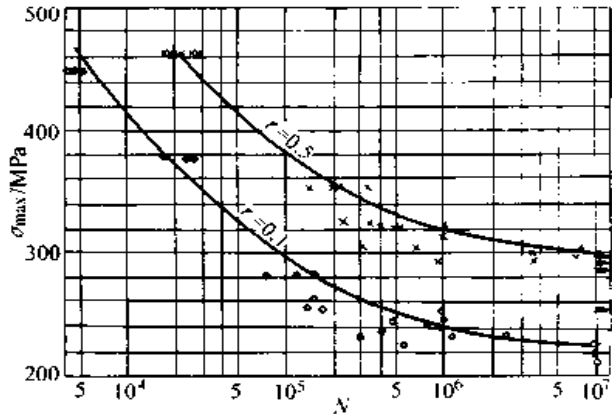


图 18.3-36 2A12B 铝合金预拉伸厚板光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 19 \text{ mm}$)
 热处理: 淬火自然时效, 预拉伸, 190°C 12 h 人工时效
 材料 $\sigma_b = 481 \text{ MPa}$
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

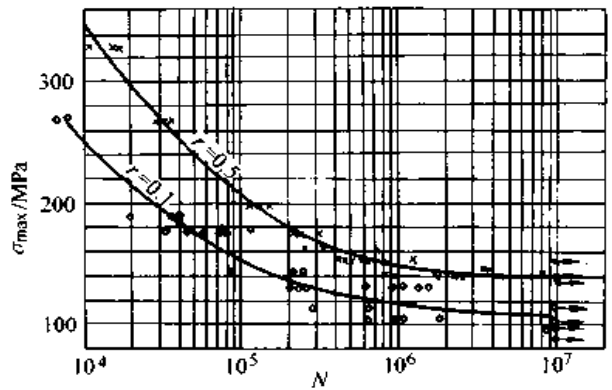


图 18.3-37 2A12B 铝合金预拉伸厚板缺口试样 ($\alpha_s = 2$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 19 \text{ mm}$)
 热处理: T4 预拉伸
 材料 $\sigma_b = 455 \text{ MPa}$
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

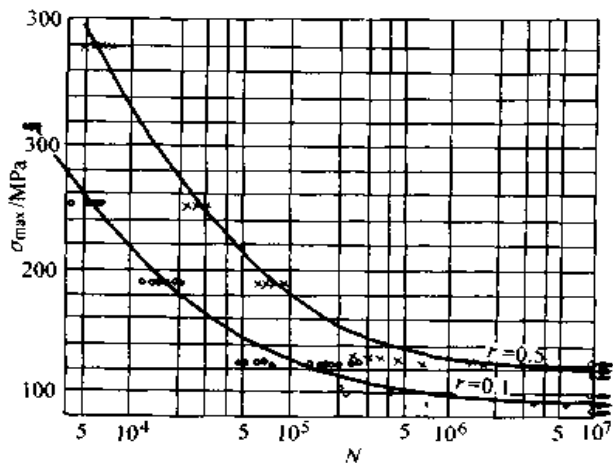


图 18.3-38 2A12B 铝合金预拉伸厚板缺口试样 ($a_0 = 3$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 19$ mm)
 热处理: 淬火自然时效, 预拉伸, 190℃ 12 h 人工时效
 材料 $\sigma_b = 481$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1, 0.3$

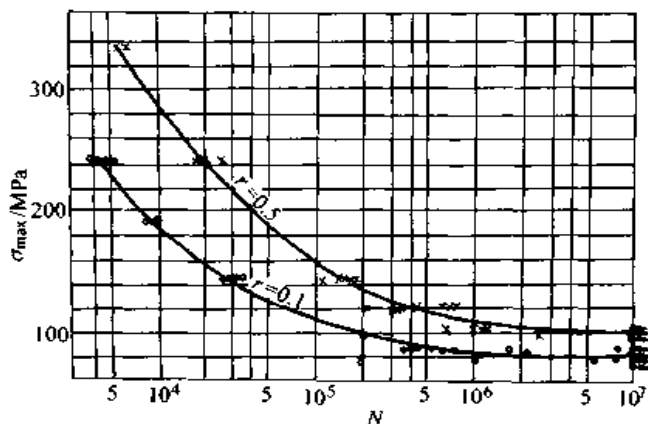


图 18.3-39 2A12B 铝合金预拉伸厚板缺口试样 ($a_0 = 5$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 19$ mm)
 热处理: T4 预拉伸
 材料 $\sigma_b = 455$ MPa
 轴向加载, $r = 0.1, 0.5$

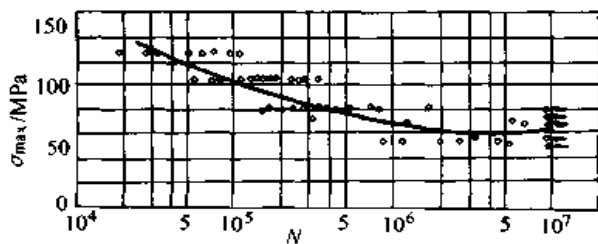


图 18.3-40 2A12B 铝合金预拉伸厚板缺口试样 ($a_0 = 5$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 19$ mm)
 热处理: T4 预拉伸
 材料 $\sigma_b = 455$ MPa
 轴向加载, $r = -0.5$

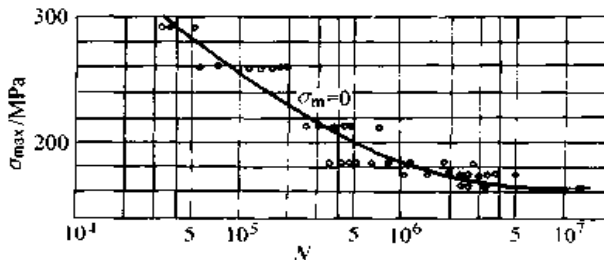


图 18.3-41 7A09 高强度铝合金棒材光滑试样的 S-N 曲线 ($\phi 25$ mm)
 热处理: T6 状态
 材料 $\sigma_b = 647$ MPa
 轴向加载, $\sigma_m = 0$

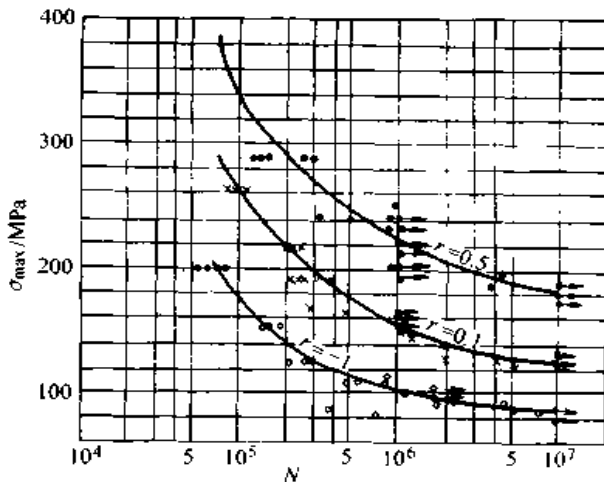


图 18.3-42 7A09 高强度铝合金过时效板材光滑试样的 S-N 曲线 ($\delta = 6$ mm)
 热处理: 460℃ 淬火, 110℃ 保温, 再 160℃ 保温
 材料 $\sigma_b = 498$ MPa
 轴向加载, $r = -1, 0.1, 0.5$

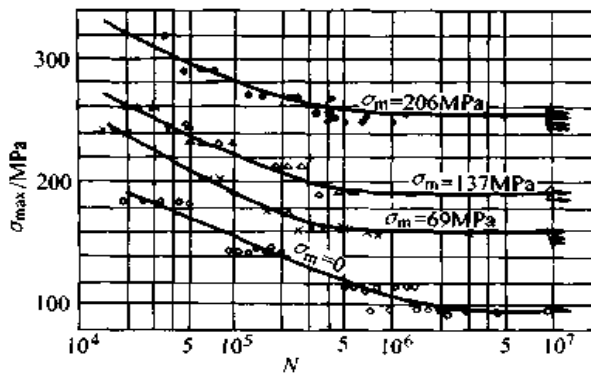


图 18.3-43 7A09 高强度铝合金棒材缺口试样 ($a_0 = 2.4$) 的 S-N 曲线 ($\phi 25$ mm)
 热处理: T6 状态
 材料 $\sigma_b = 647$ MPa
 轴向加载, $\sigma_m = 0, 69, 137, 206$ MPa

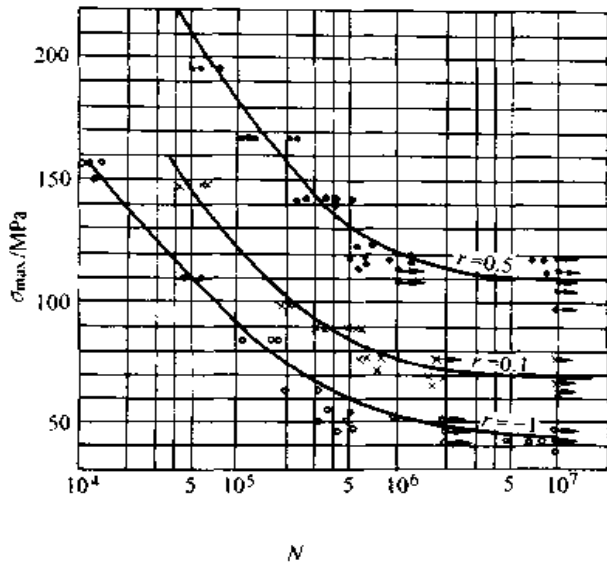


图 18.3-44 7A09 高强度铝合金过时效板材缺口试样 ($\alpha_s = 3$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 6 \text{ mm}$)
 热处理: 460℃ 淬火, 110℃ 保温, 再 160℃ 保温
 材料 $\sigma_b = 498 \text{ MPa}$
 轴向加载, $r = -1, 0.1, 0.5$

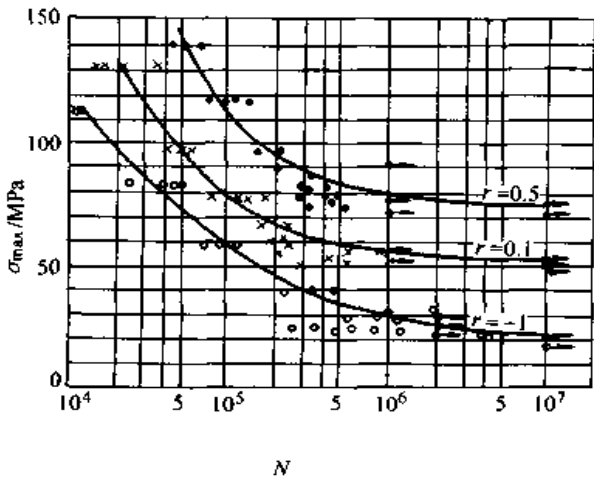


图 18.3-45 7A09 高强度铝合金过时效板材缺口试样 ($\alpha_s = 5$) 的 S-N 曲线 ($\delta = 6 \text{ mm}$)
 热处理: 460℃ 淬火, 110℃ 保温, 再 160℃ 保温
 材料 $\sigma_b = 498 \text{ MPa}$
 轴向加载, $r = -1, 0.1, 0.5$

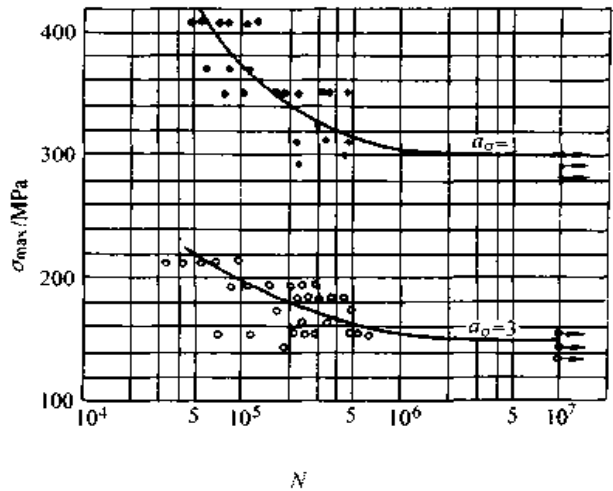


图 18.3-46 2A14 铝合金棒材缺口试样 ($\alpha_s = 1, 3$) 的 S-N 曲线 ($\phi 25 \text{ mm}$)
 热处理: T6 状态
 材料 $\sigma_b = 541 \text{ MPa}$
 轴向加载, $r = 0.1$

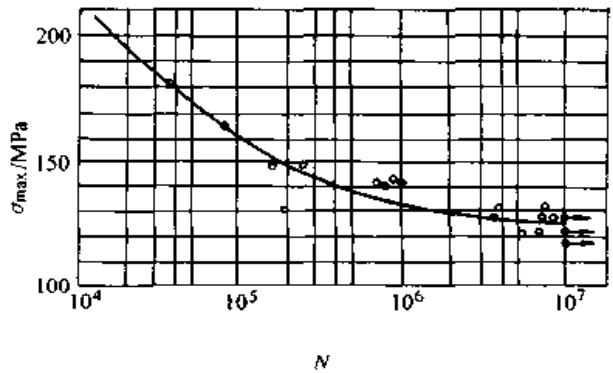


图 18.3-47 MB15 镁合金光滑试样的 S-N 曲线 ($\phi 20 \text{ mm}$)
 热处理: 热挤压, 人工时效
 材料 $\sigma_b = 330 \text{ MPa}$
 旋转弯曲试验, $r = -1$

2.2 p - S - N 曲线(图 18.3-48~图 18.3-67)

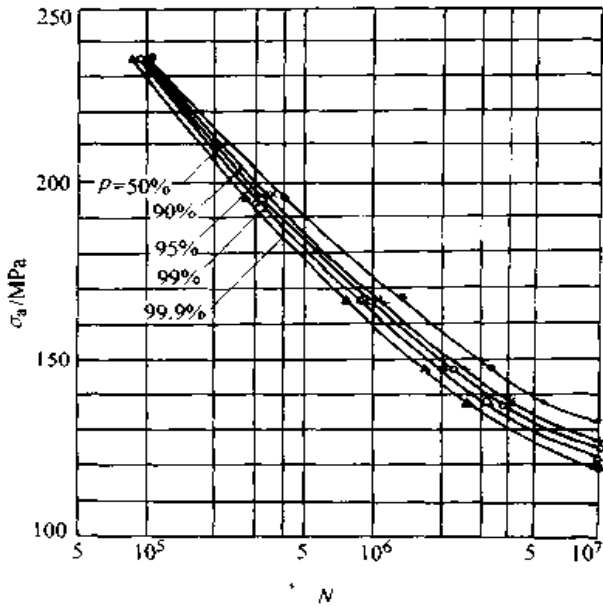


图 18.3-48 Q235A 钢光滑试样的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)

热处理: 热轧态
材料 $\sigma_b = 449$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

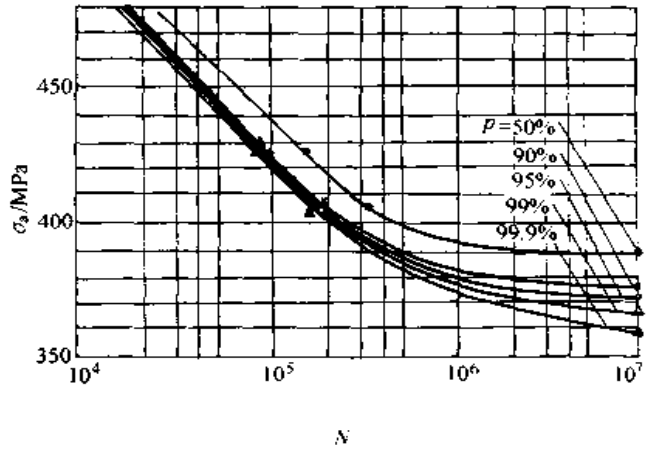


图 18.3-50 45 钢漏斗形试样的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)

热处理: 850℃ 水淬火, 560℃ 回火
材料 $\sigma_b = 710$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

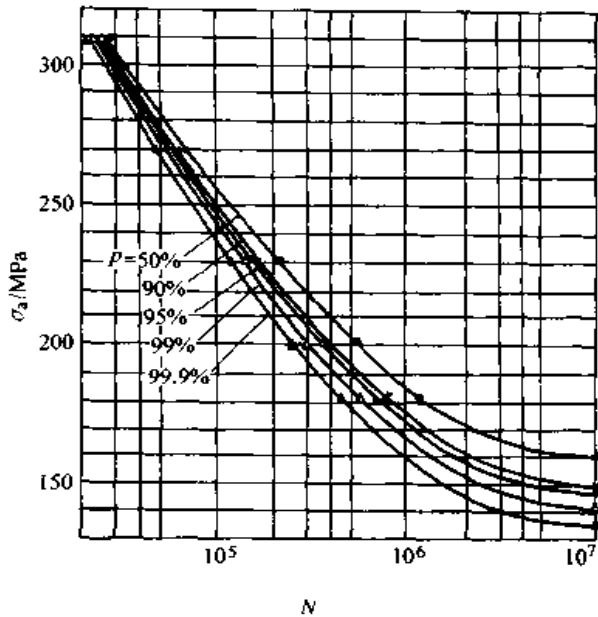


图 18.3-49 Q345 钢缺口试样 ($\alpha_s = 2$) 的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)

热处理: 热轧态
材料 $\sigma_b = 586$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

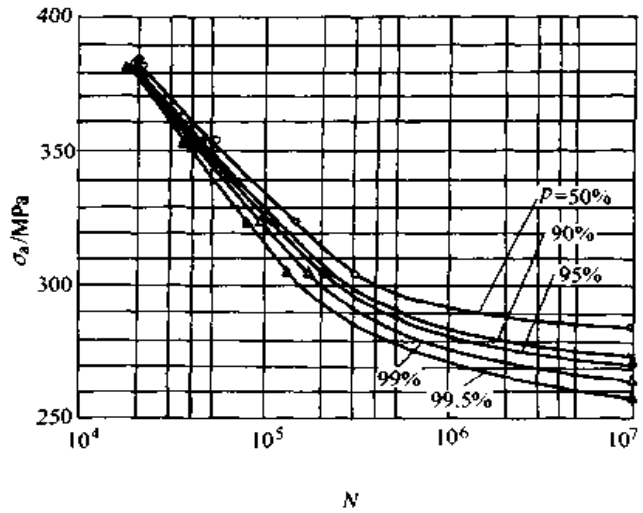


图 18.3-51 45 钢漏斗形试样的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)

热处理: 850℃ 正火
材料 $\sigma_b = 624$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

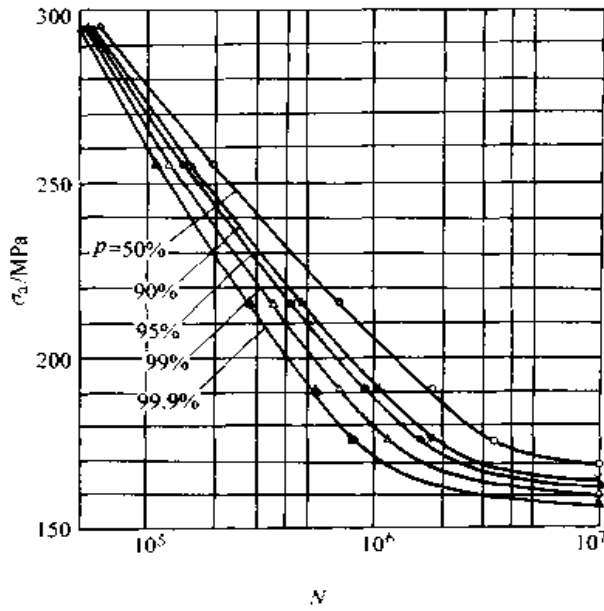


图 18.3-52 45 钢缺口试样 ($\alpha_e = 2$) 的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)
 热处理: 850℃ 正火
 材料 $\sigma_b = 624$ MPa
 旋转弯曲试验, $r = -1$

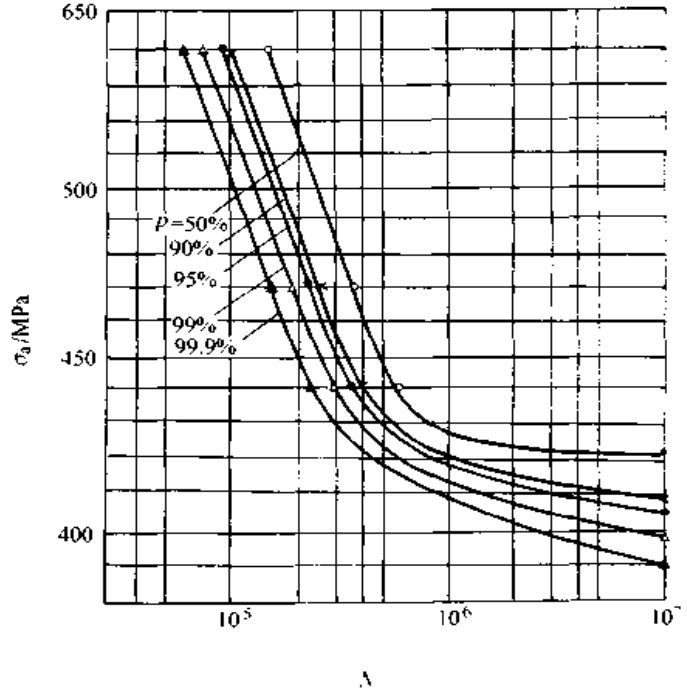


图 18.3-54 40Cr 钢光滑试样的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)
 热处理: 850℃ 油淬火, 560℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 934$ MPa
 旋转弯曲试验, $r = -1$

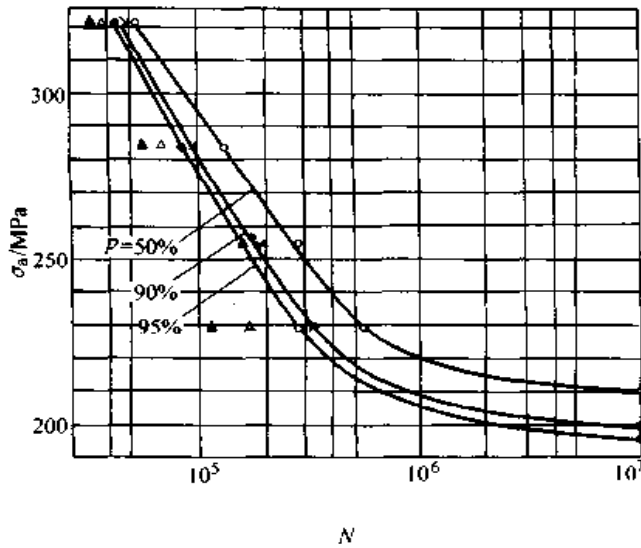


图 18.3-53 45 钢缺口试样 ($\alpha_e = 2$) 的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)
 热处理: 850℃ 水淬火, 560℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 710$ MPa
 旋转弯曲试验, $r = -1$

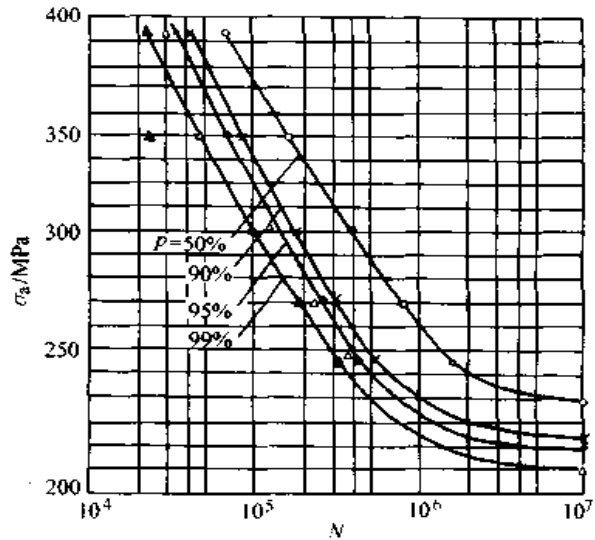


图 18.3-55 40Cr 钢缺口试样 ($\alpha_e = 2$) 的 p - S - N 曲线 (棒材 $\phi 25$ mm)
 热处理: 850℃ 油淬火, 560℃ 回火
 材料 $\sigma_b = 934$ MPa
 旋转弯曲试验, $r = -1$

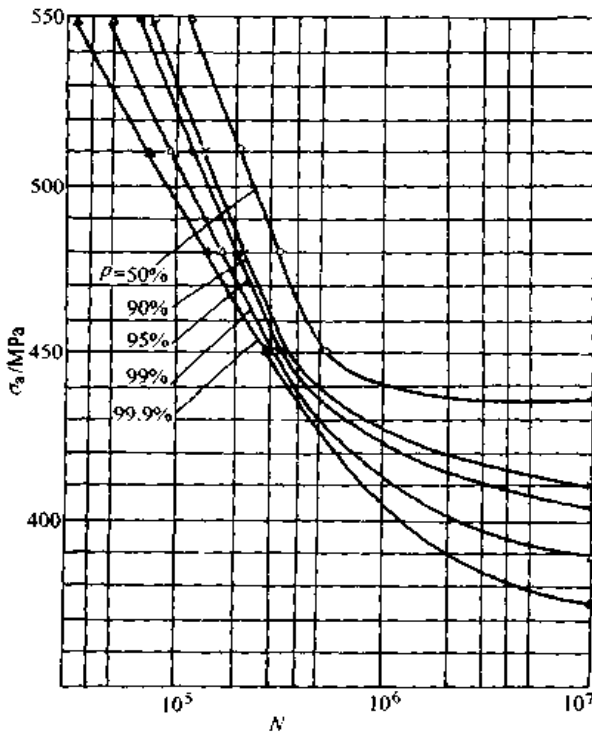


图 18.3-56 40MnB 钢光滑试样的 p - S - N 曲线
(棒材 $\phi 25$ mm)
热处理: 850℃ 油淬火, 500℃ 回火
材料 $\sigma_b = 970$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

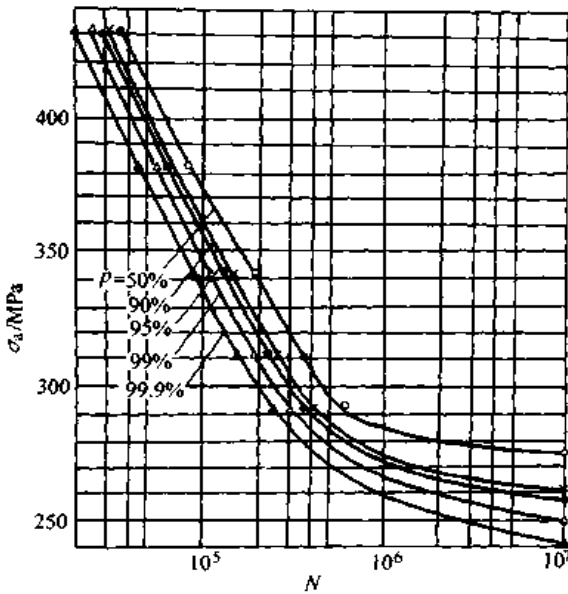


图 18.3-57 40MnB 钢缺口试样 ($\alpha_s = 2$) 的
 p - S - N 曲线(棒材 $\phi 25$ mm)
热处理: 850℃ 油淬火, 500℃ 回火
材料 $\sigma_b = 970$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

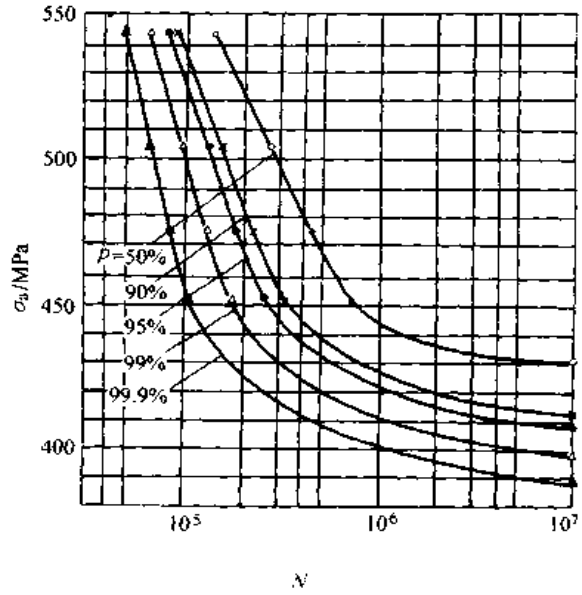


图 18.3-58 35CrMo 钢光滑试样的
 p - S - N 曲线(棒材 $\phi 20$ mm)
热处理: 850℃ 油淬火, 550℃ 回火
材料 $\sigma_b = 924$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

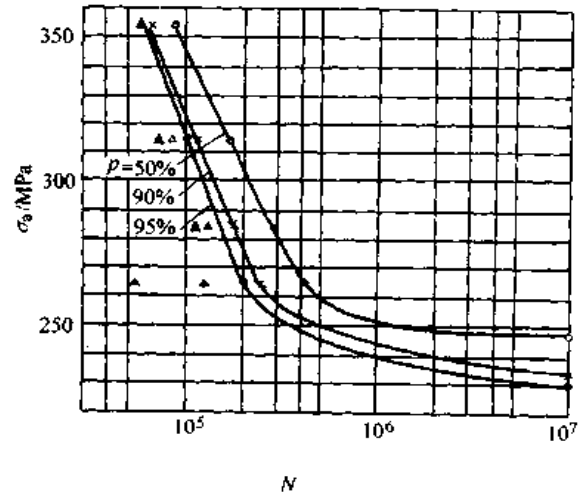


图 18.3-59 35CrMo 钢缺口试样 ($\alpha_s = 2$) 的
 p - S - N 曲线(棒材 $\phi 20$ mm)
热处理: 850℃ 油淬火, 550℃ 回火
材料 $\sigma_b = 924$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

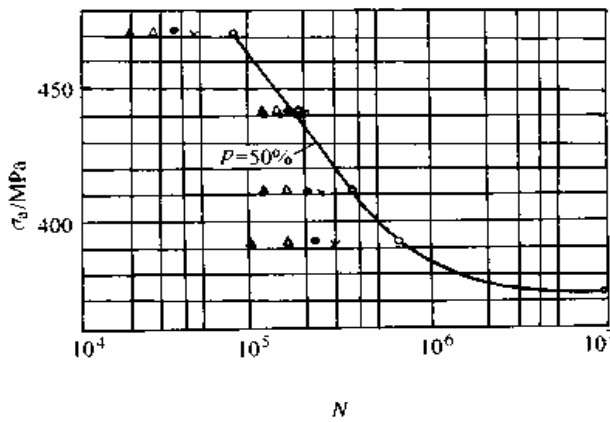


图 18.3-60 2Cr13 钢光滑试样的 p - S - N 曲线
(棒材 $\phi 22$ mm)

热处理: 1 000℃ 油淬火、700℃ 回火

材料 $\sigma_b = 773$ MPa

旋转弯曲试验, $r = -1$

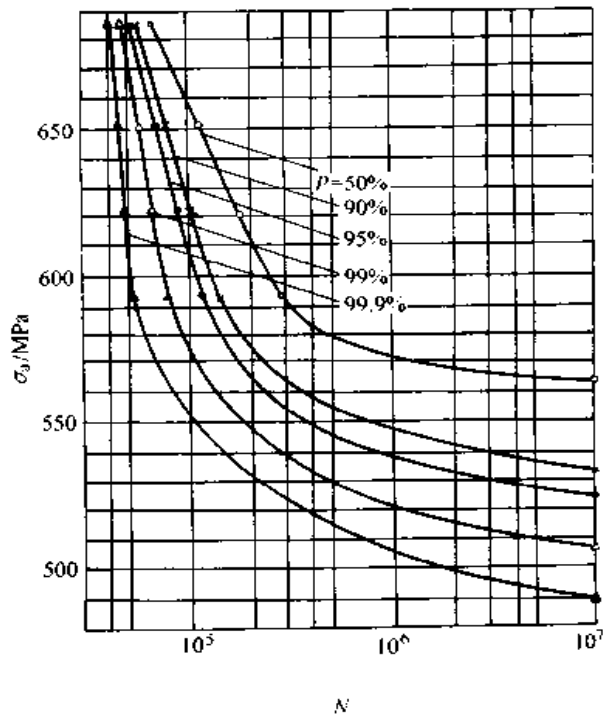


图 18.3-62 60Si2Mn 钢光滑试样的
 p - S - N 曲线(棒材 $\phi 25$ mm)

热处理: 870℃ 油淬火、460℃ 回火

材料 $\sigma_b = 1 391$ MPa

旋转弯曲试验, $r = -1$

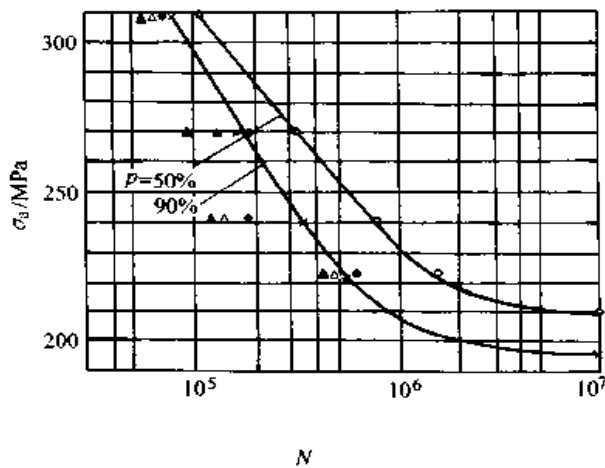


图 18.3-61 2Cr13 钢缺口试样的 ($\alpha_s = 2$)
的 p - S - N 曲线(棒材 $\phi 22$ mm)

热处理: 1 000℃ 油淬火、700℃ 回火

材料 $\sigma_b = 773$ MPa

旋转弯曲试验, $r = -1$

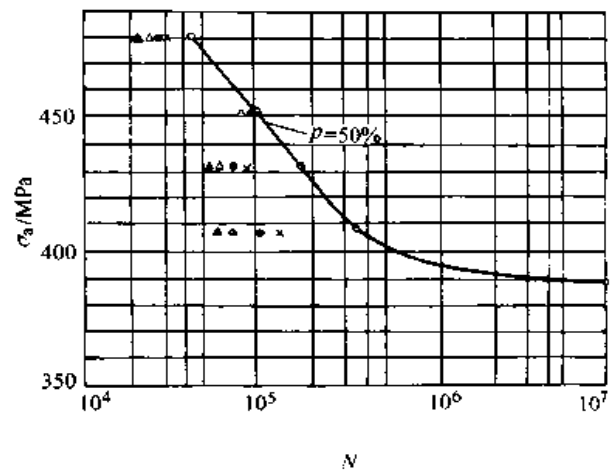


图 18.3-63 60Si2Mn 钢缺口试样 ($\alpha_s = 2$)
的 p - S - N 曲线(棒材 $\phi 25$ mm)

热处理: 870℃ 油淬火、460℃ 回火

材料 $\sigma_b = 1 391$ MPa

旋转弯曲试验, $r = -1$

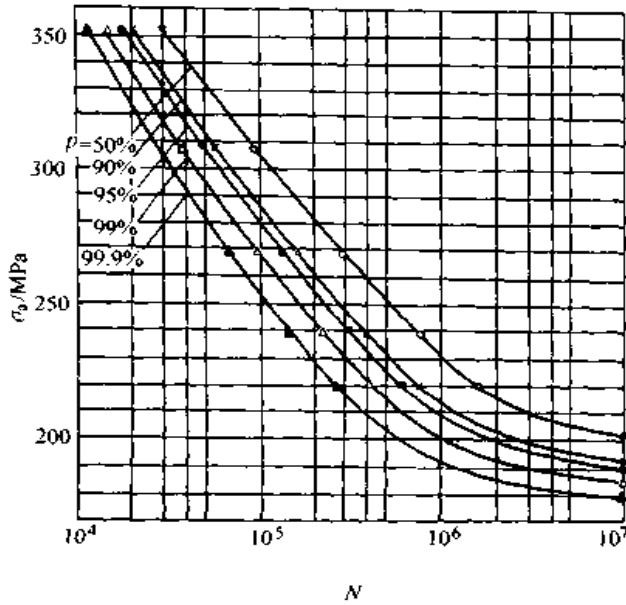


图 18.3-64 QT400-18 球铁光滑试样的 p - S - N 曲线(楔形试块)

热处理: 退火
材料 $\sigma_b = 433$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

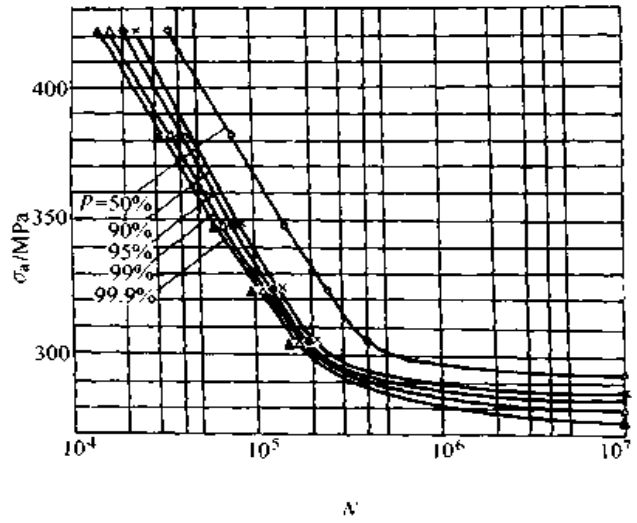


图 18.3-66 QT600-3 球铁光滑试样的 p - S - N 曲线(楔形试块)

热处理: 正火
材料 $\sigma_b = 858$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

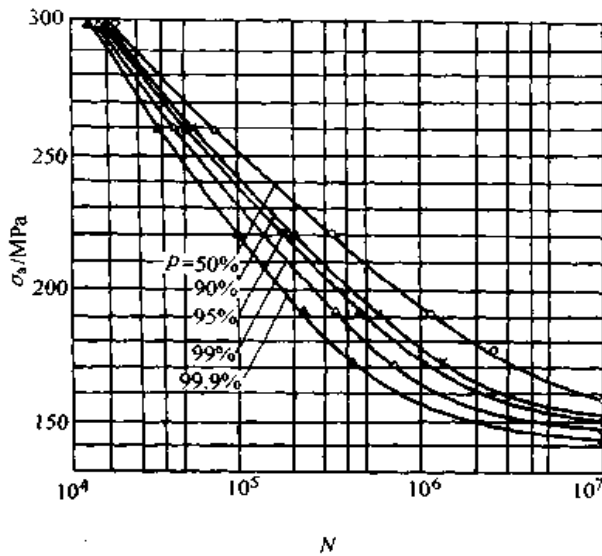


图 18.3-65 QT400-18 球铁缺口试样 ($\sigma_o = 2$) 的 p - S - N 曲线(楔形试块)

热处理: 退火
材料 $\sigma_b = 433$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

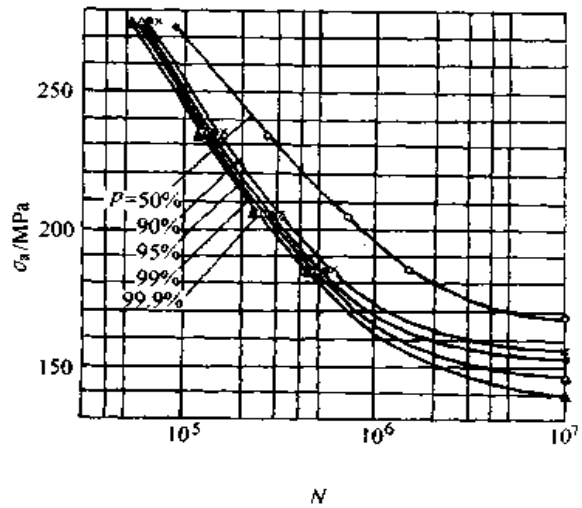


图 18.3-67 QT600-3 球铁缺口试样 ($\sigma_o = 2$) 的 p - S - N 曲线(楔形试块)

热处理: 正火
材料 $\sigma_b = 858$ MPa
旋转弯曲试验, $r = -1$

第 4 章 影响疲劳强度的因素

1 应力集中影响

1.1 理论应力集中系数

在零件的截面几何形状突然变化处（如轴肩圆角、沟槽、横孔等），局部应力远大于名义应力，这种现象称为应力集中。在材料的弹性范围内，最大局部应力 σ_{\max} 与名义应力 σ_n 的比值 α_σ ，称为理论应力集中系数，即

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (18.4-1)$$

式 (18.4-1) 所定义的理论应力集中系数 α_σ 是几何参数，仅由零件的几何形状决定。

对于扭转的理论应力集中系数，定义为

$$\alpha_\tau = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n} \quad (18.4-2)$$

假设材料是各向同性的且均匀的，在材料的弹性极限范围内，局部最大应力 σ_{\max} (τ_{\max}) 可以用弹性力学解析法、光弹法或有限元法求得，从而得到各种几何形状的试样在各种载荷下的理论应力集中系数。

常见的几何形状理论应力集中系数线图，见图 18.4-1 ~ 图 18.4-56。

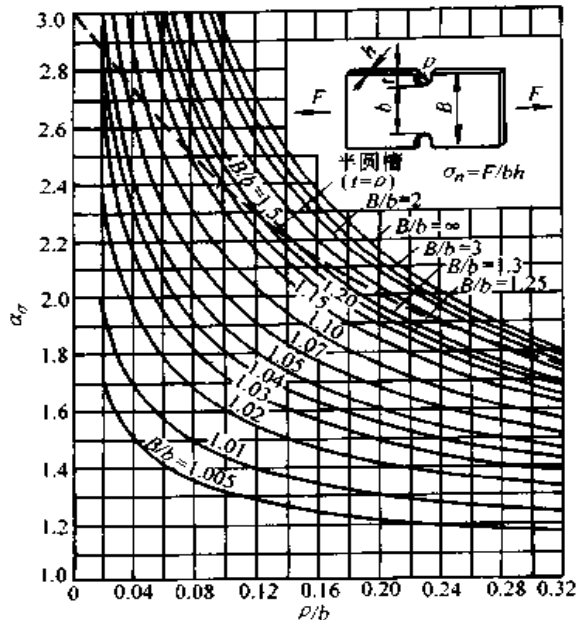


图 18.4-1 有两侧小圆弧槽的平板拉伸时的理论应力集中系数

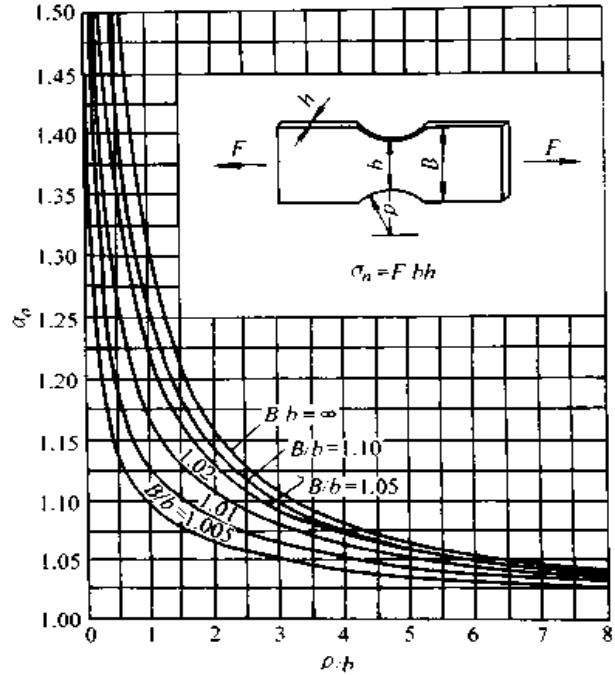


图 18.4-2 有两侧大圆弧槽的平板拉伸时的理论应力集中系数

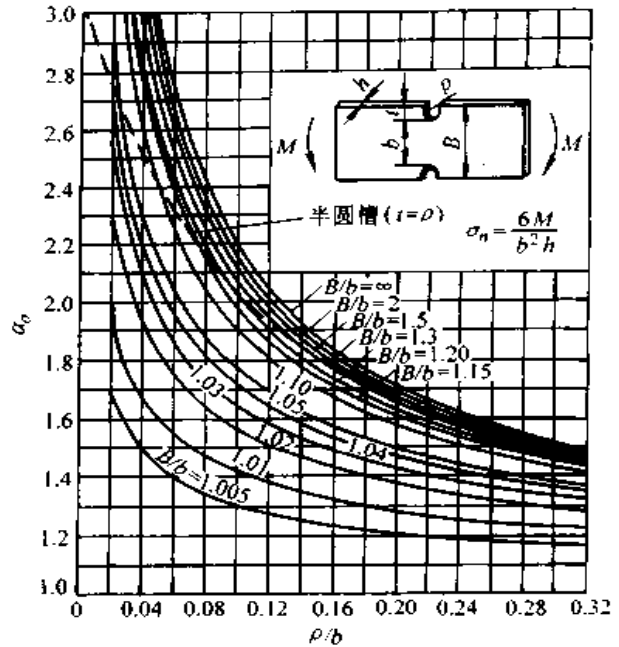


图 18.4-3 有两侧小圆弧槽的平板弯曲时的理论应力集中系数

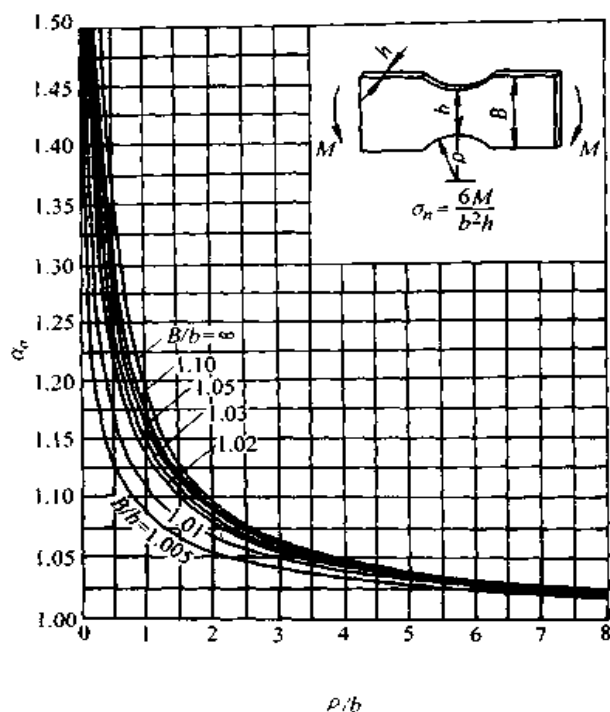


图 18.4.4 有两侧大圆弧槽的平板弯曲时的理论应力集中系数

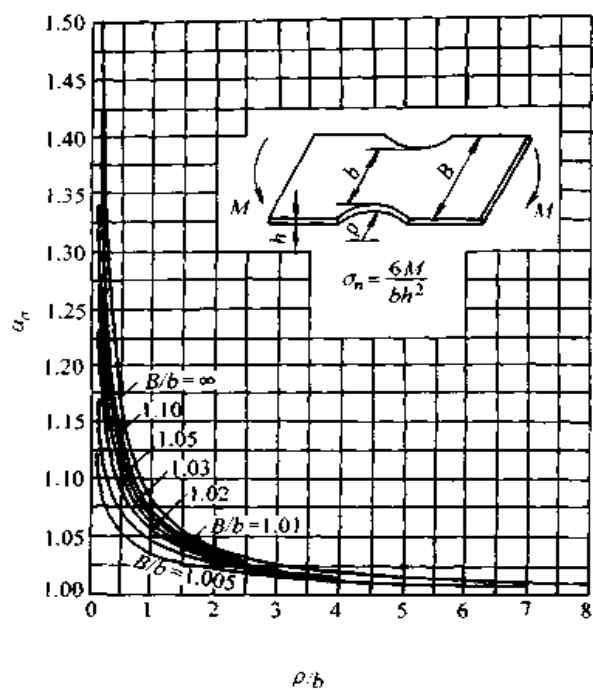


图 18.4.6 有两侧大圆弧槽的平板横向弯曲时的理论应力集中系数

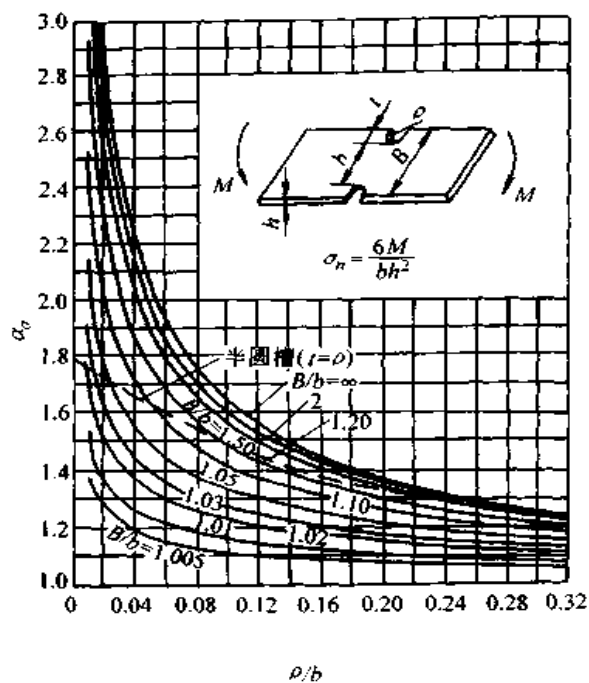


图 18.4.5 有两侧小圆弧槽的平板横向弯曲时的理论应力集中系数

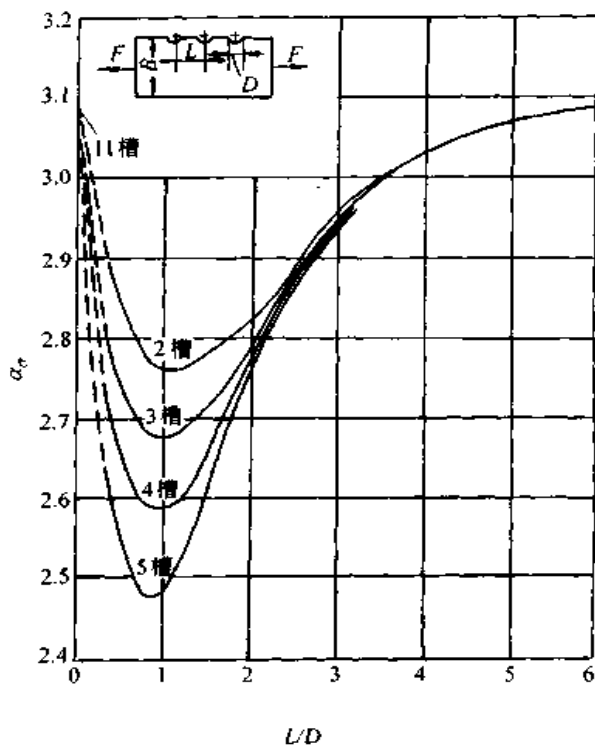


图 18.4.7 有单侧半圆槽的平板拉伸的理论应力集中系数

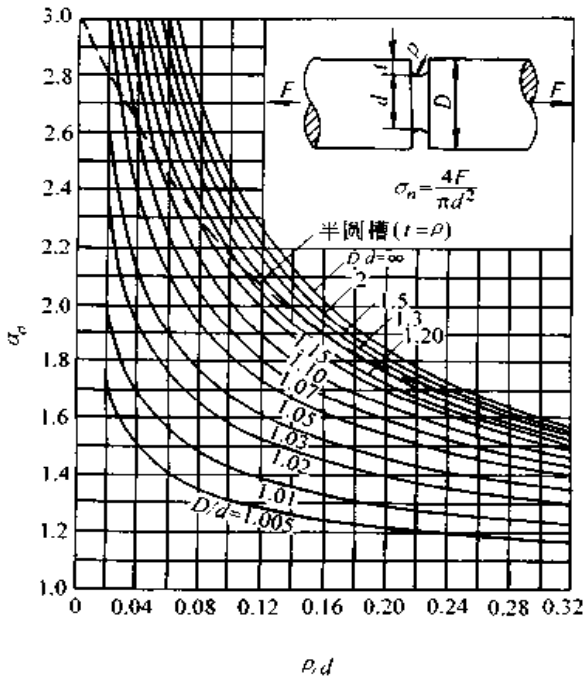


图 18.4-8 有小环形槽的轴拉伸时的理论应力集中系数

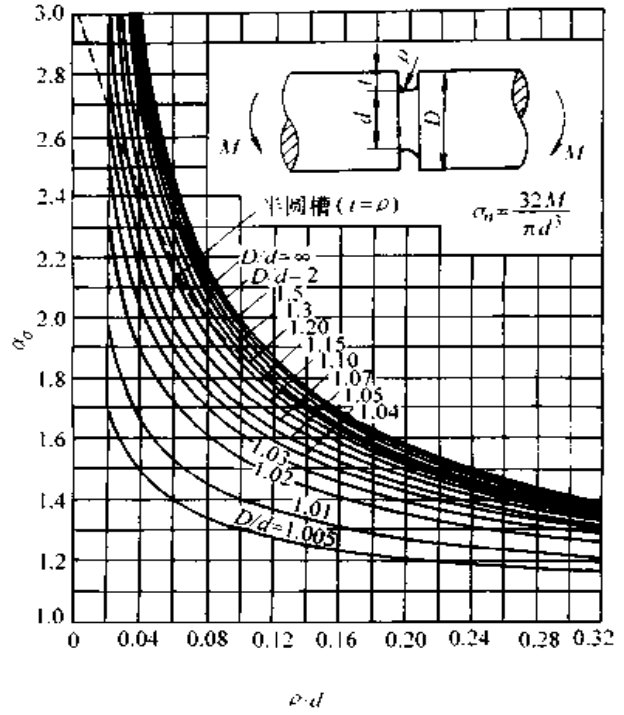


图 18.4-10 有小环形槽的轴弯曲时的理论应力集中系数

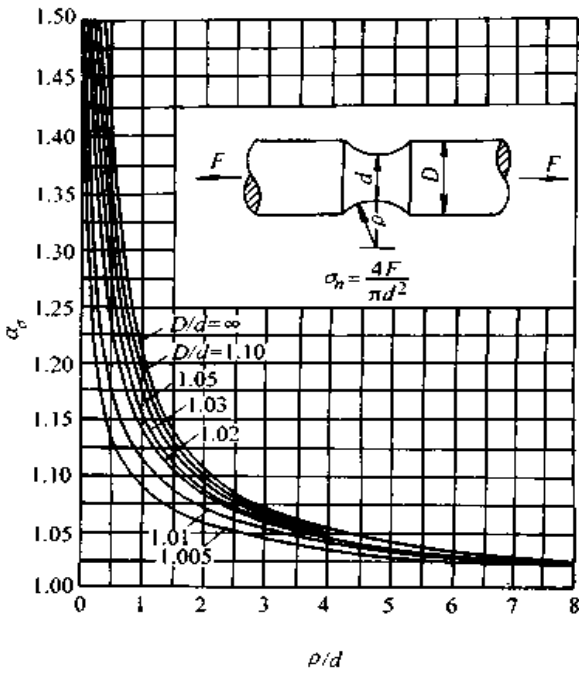


图 18.4-9 有大环形槽的轴拉伸时的理论应力集中系数

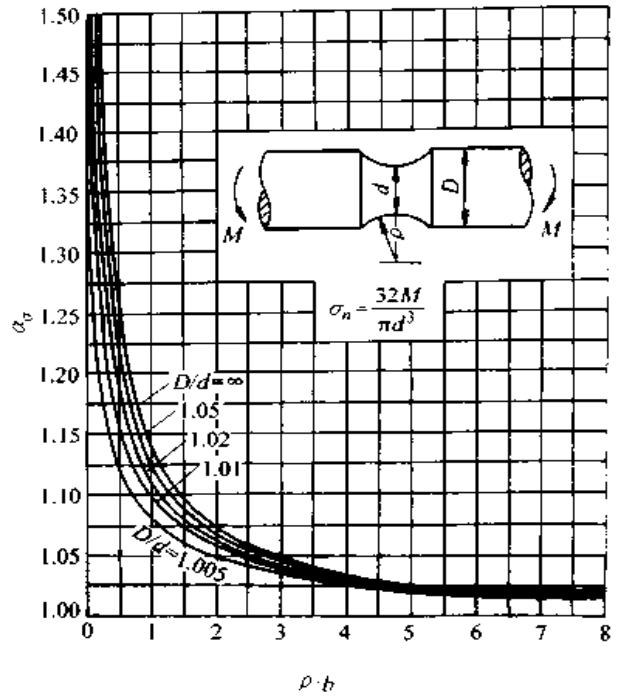


图 18.4-11 有大环形槽的轴弯曲时的理论应力集中系数

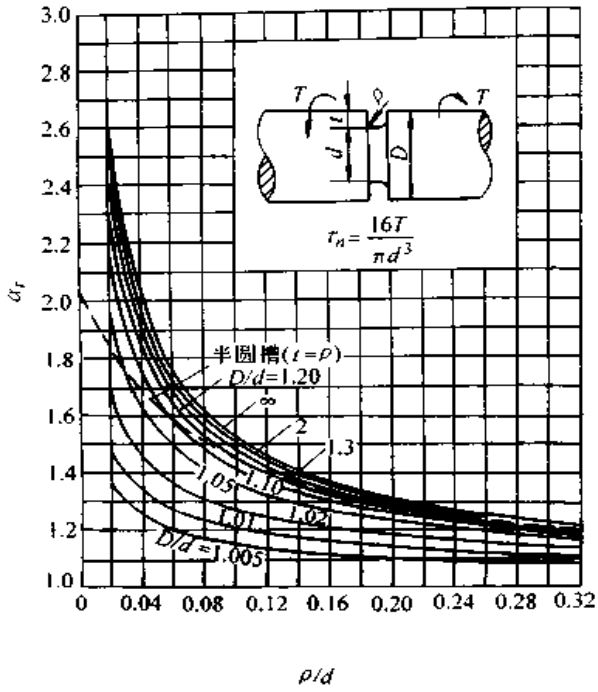


图 18.4-12 有小环形槽的轴扭转时的理论应力集中系数

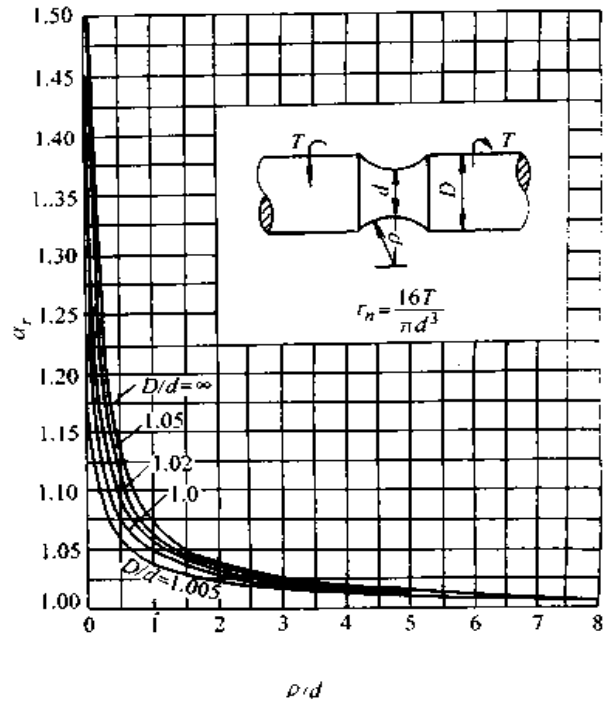


图 18.4-13 有大环形槽的轴扭转时的理论应力集中系数

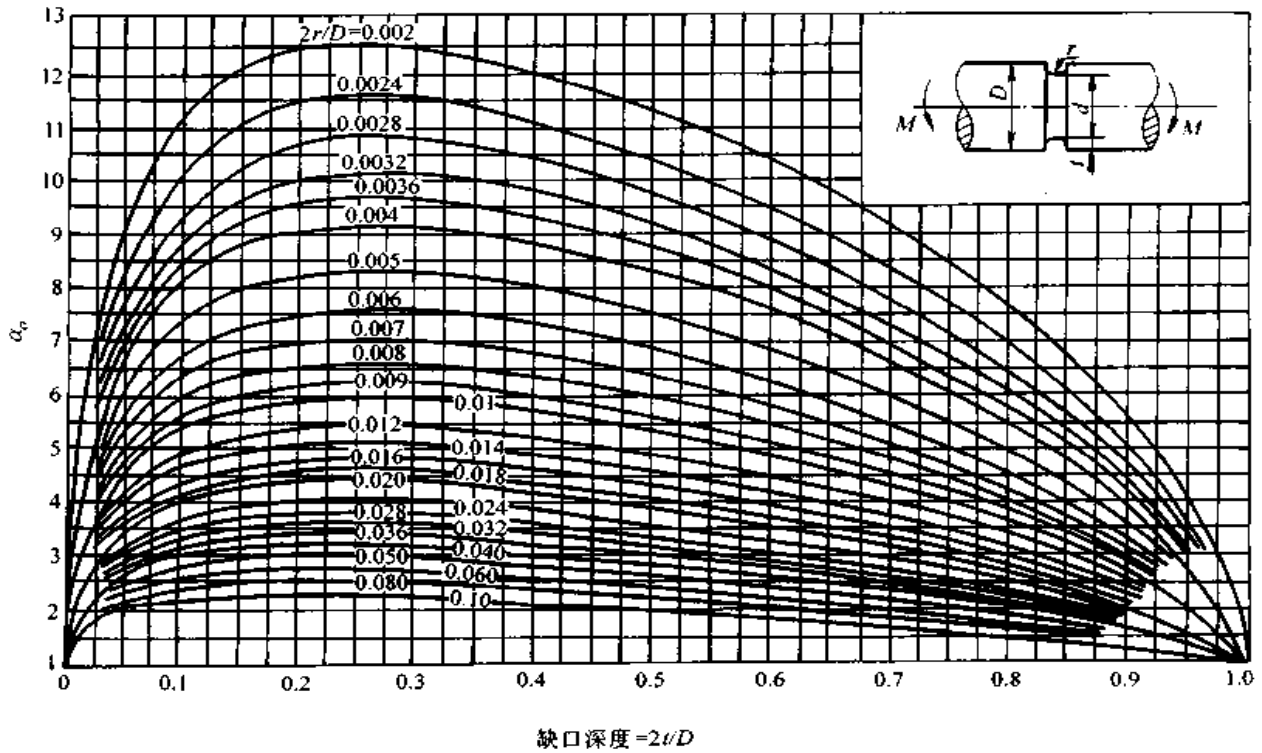


图 18.4-14 有小环形槽的轴弯曲时的理论应力集中系数

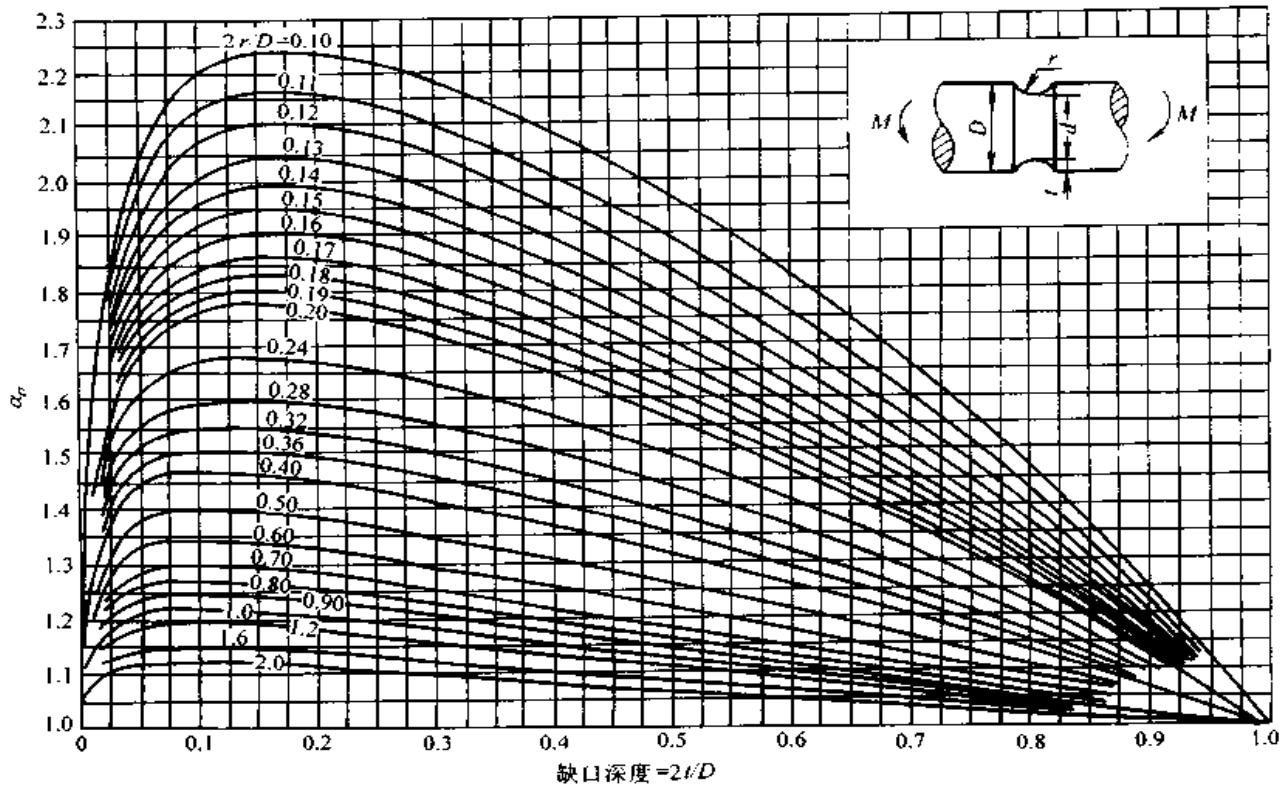


图 18.4.15 有大环形槽的轴弯曲时的理论应力集中系数

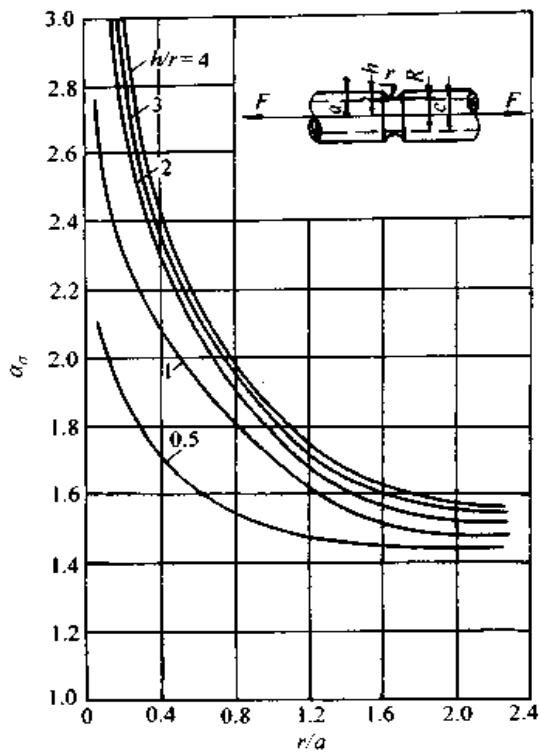


图 18.4.16 有环形槽的空心轴拉伸时的理论应力集中系数

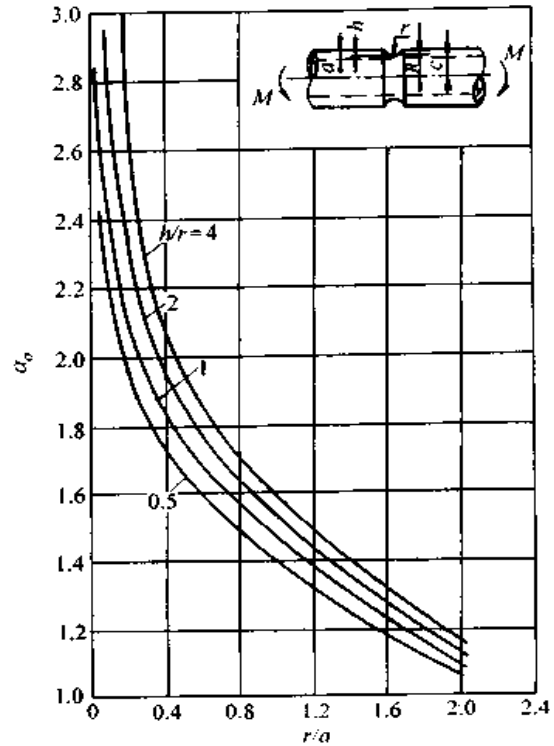


图 18.4.17 有环形槽的空心轴弯曲时的理论应力集中系数

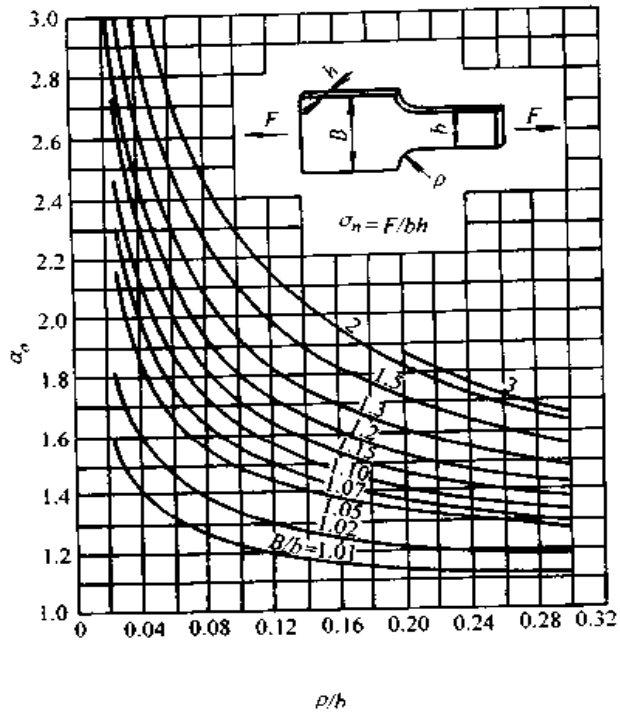


图 18.4-18 有肩板拉伸时的理论应力集中系数

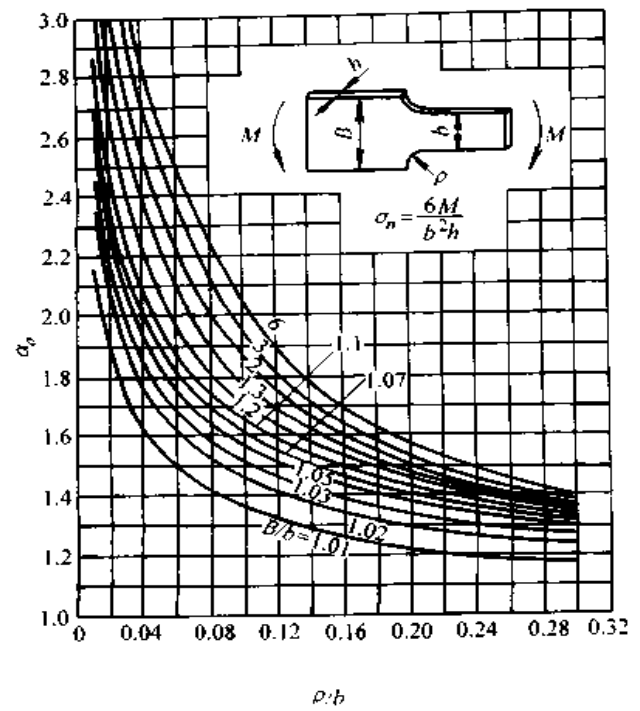


图 18.4-20 有肩板弯曲时的理论应力集中系数

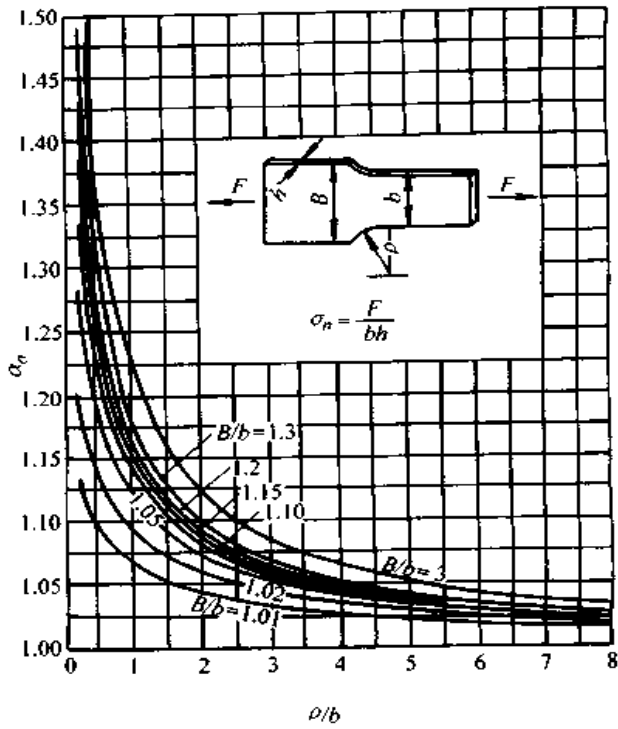


图 18.4-19 有肩板拉伸时的理论应力集中系数

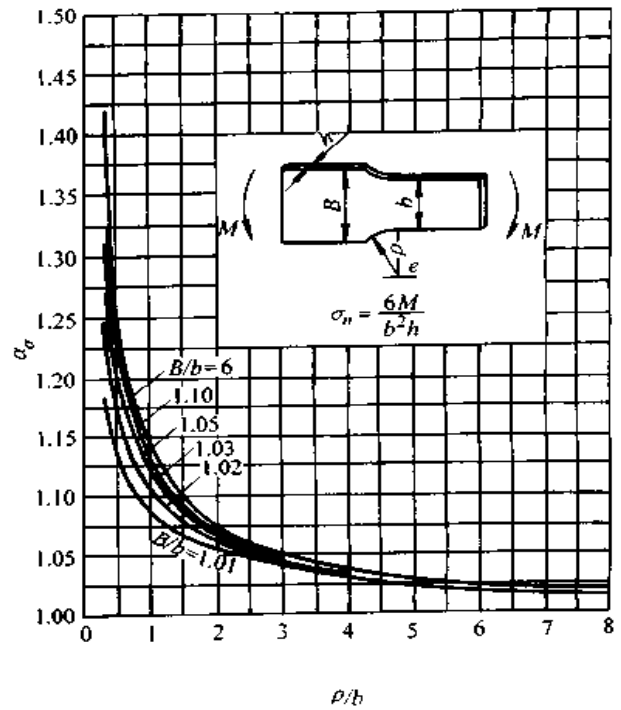


图 18.4-21 有肩板弯曲时的理论应力集中系数

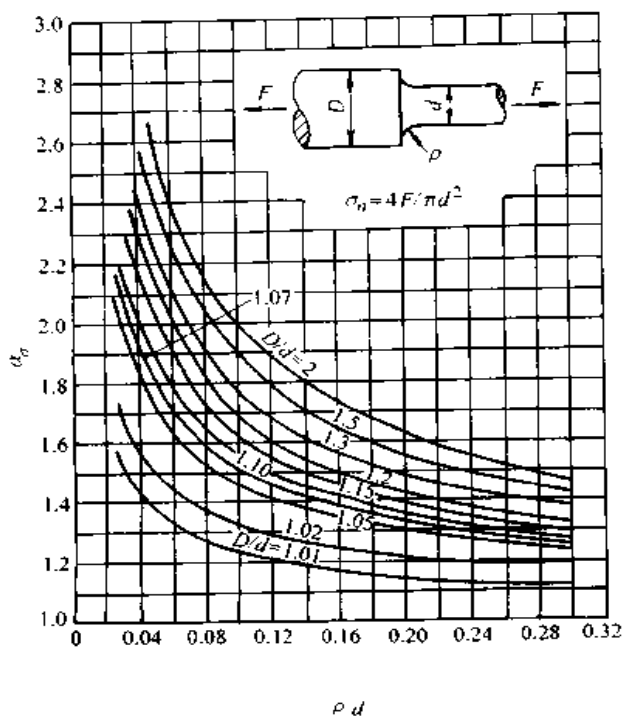


图 18.4-22 阶梯轴拉伸时的理论应力集中系数

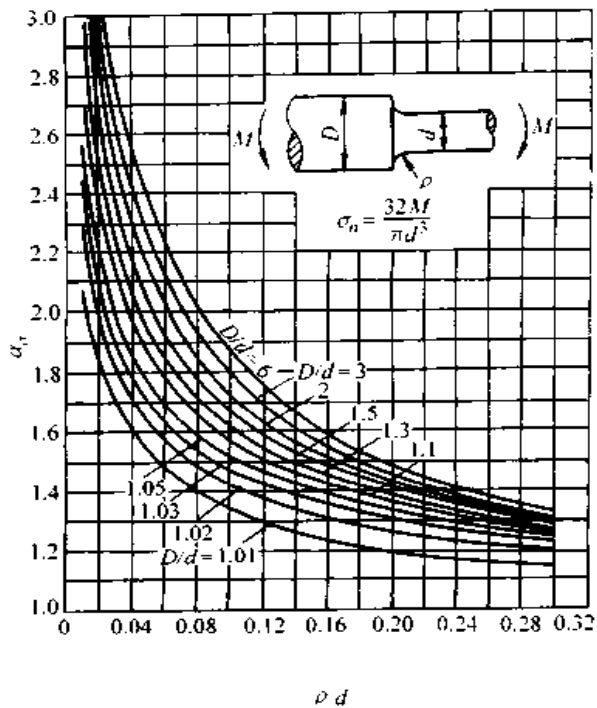


图 18.4-24 阶梯轴弯曲时的理论应力集中系数

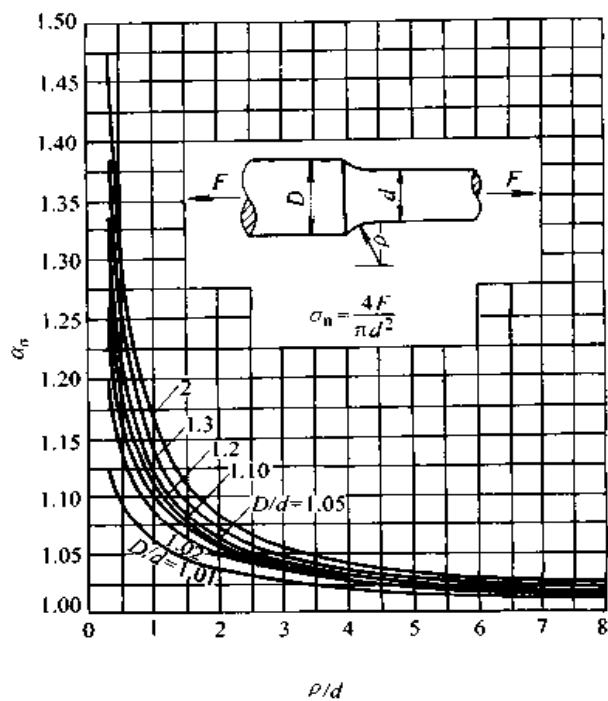


图 18.4-23 阶梯轴拉伸时的理论应力集中系数

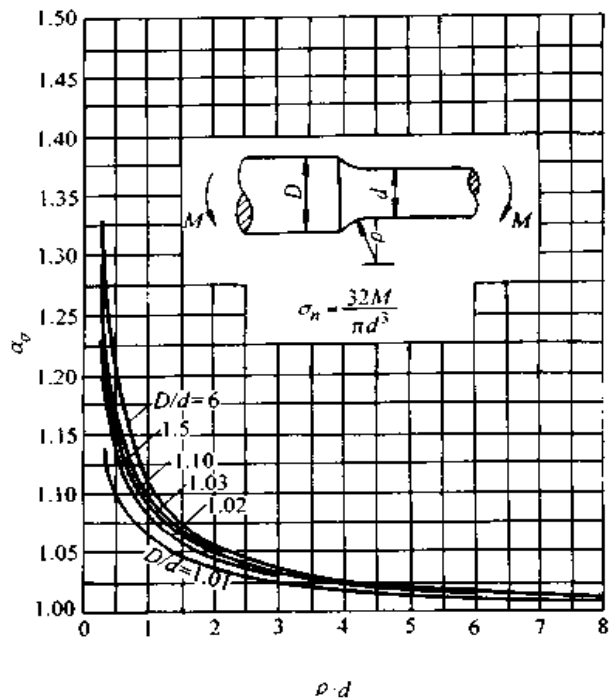


图 18.4-25 阶梯轴弯曲时的理论应力集中系数

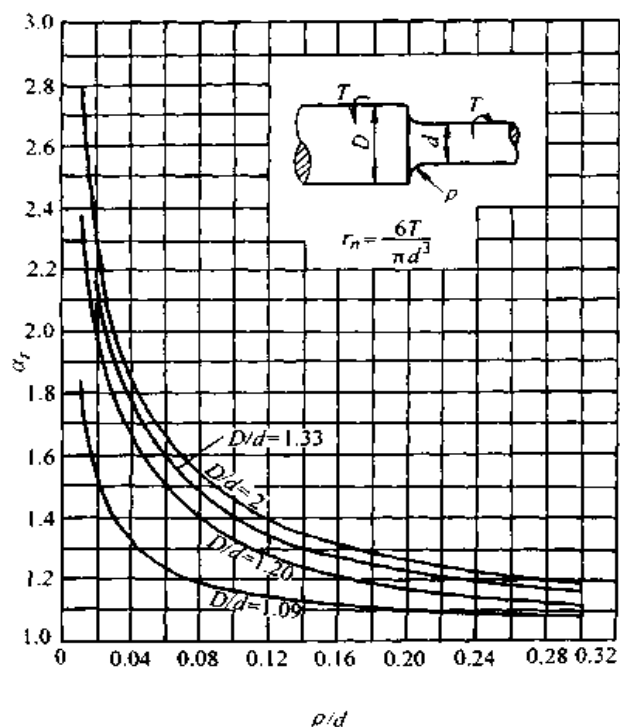


图 18.4-26 阶梯轴扭转时的理论应力集中系数

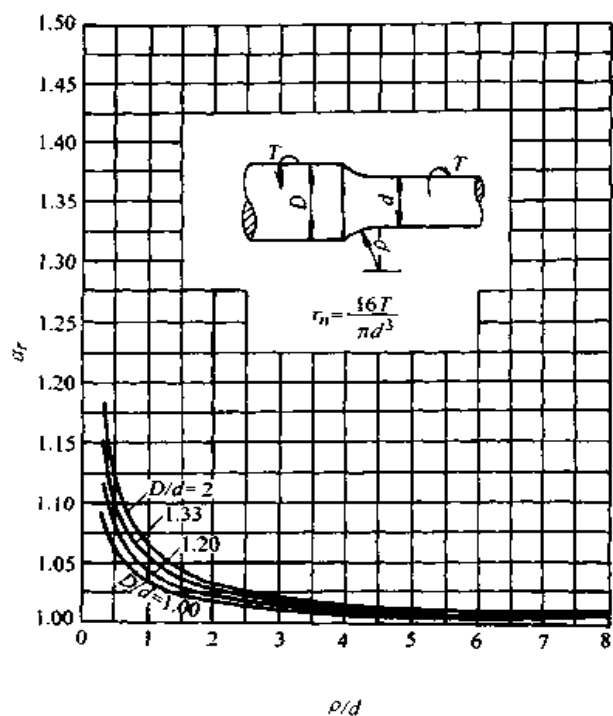


图 18.4-27 阶梯轴扭转时的理论应力集中系数

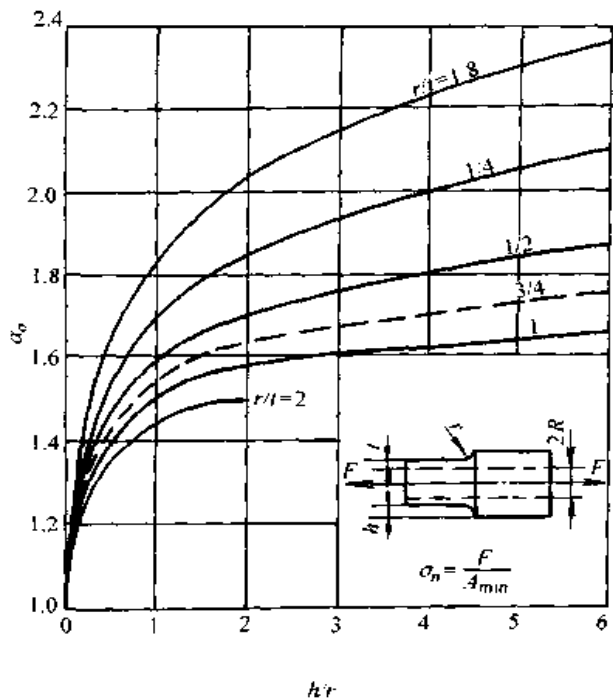


图 18.4-28 空心阶梯轴拉伸时的理论应力集中系数

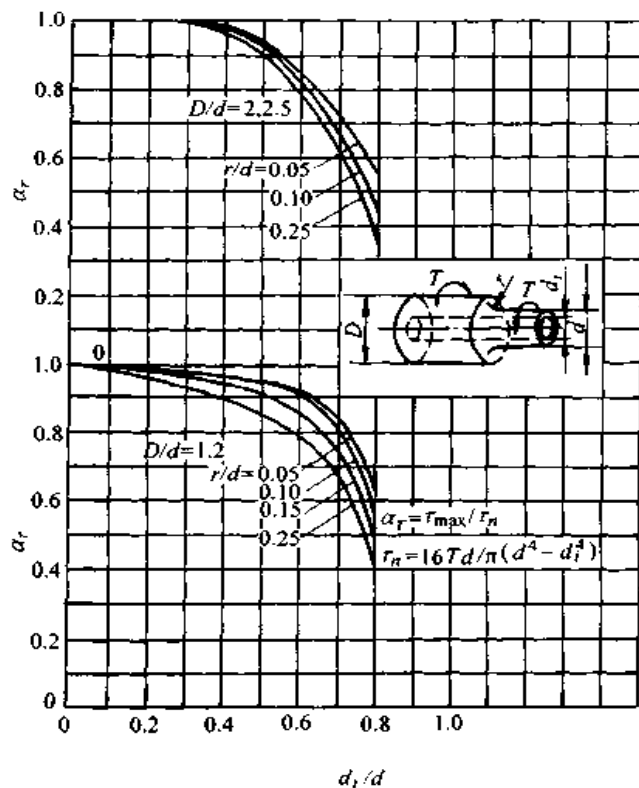


图 18.4-29 空心阶梯轴扭转时的理论应力集中系数

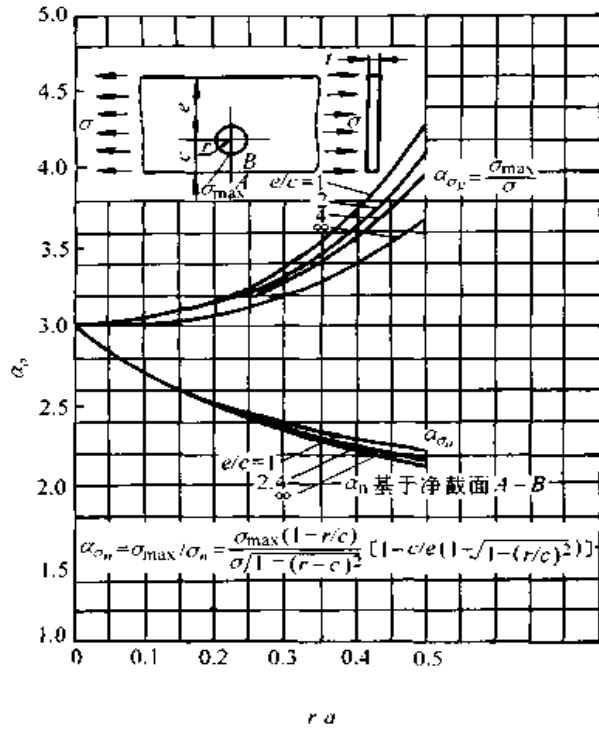


图 18.4-30 带偏心圆孔的受拉扁杆的理论应力集中系数

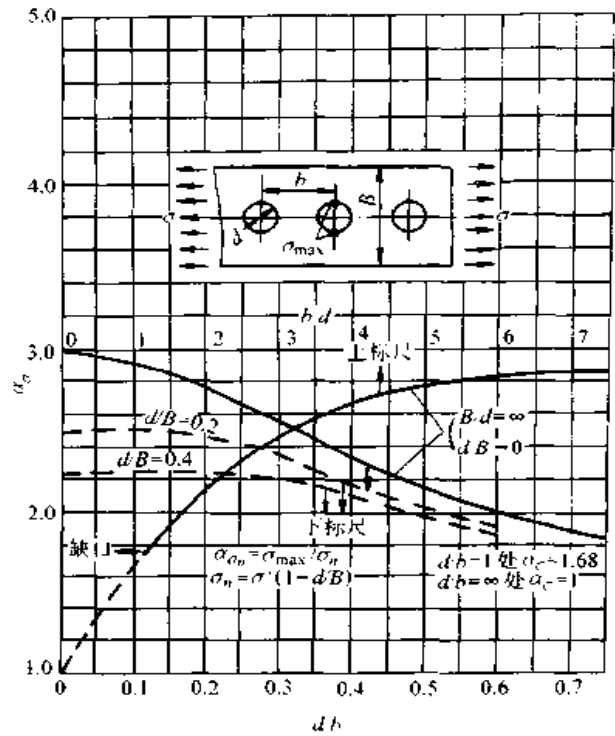


图 18.4-32 多孔受拉板（应力方向与孔的轴线平行）的理论应力集中系数

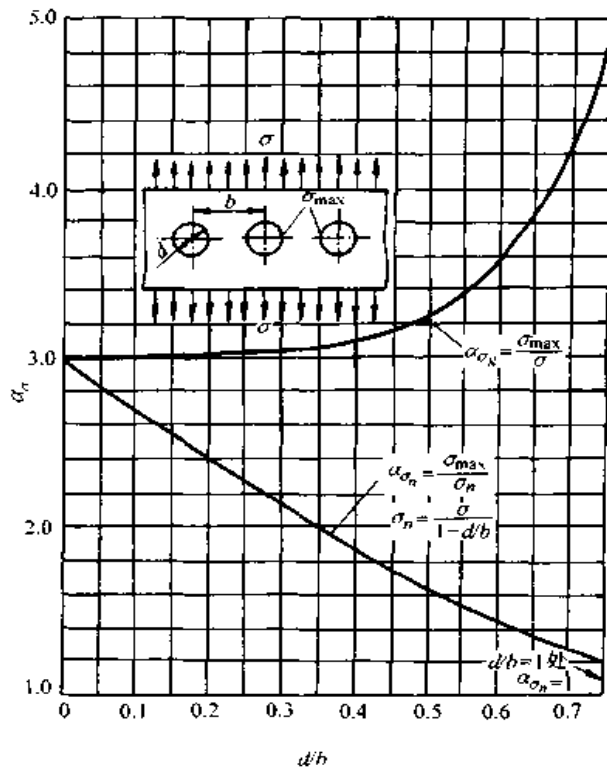


图 18.4-31 多孔受拉板（应力方向与孔的轴线垂直）的理论应力集中系数

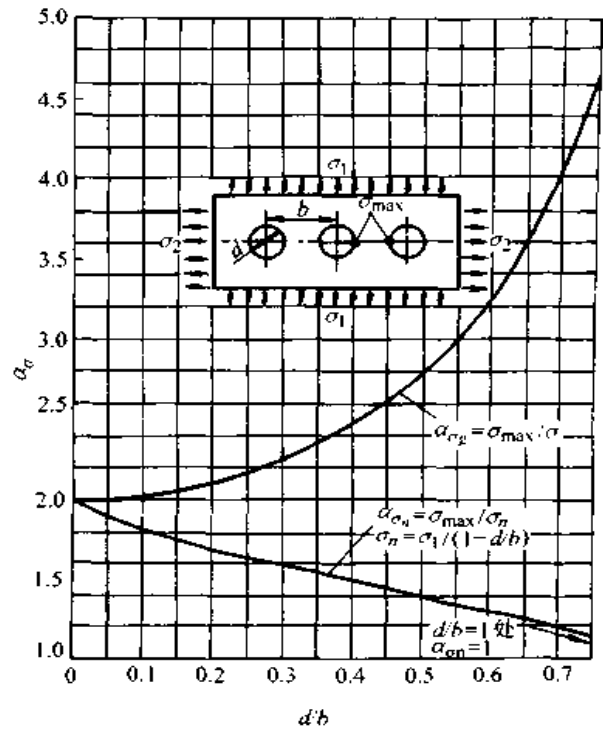


图 18.4-33 受双方拉伸的单排多孔板的理论应力集中系数

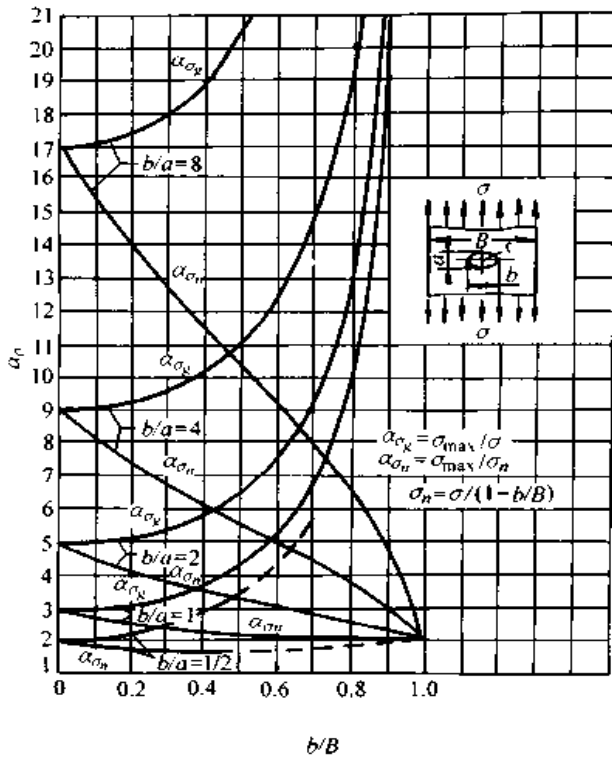


图 18.4-34 带椭圆孔的有限宽受拉板的理论应力集中系数

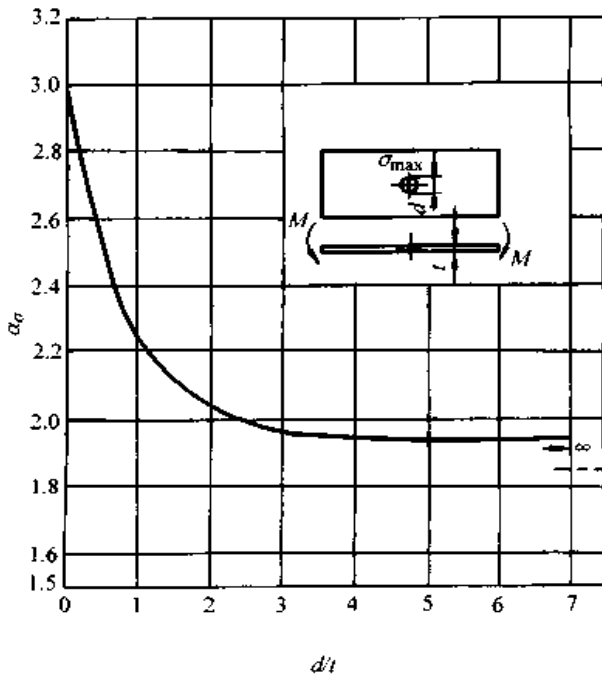


图 18.4-35 中央有孔的板弯曲的理论应力集中系数

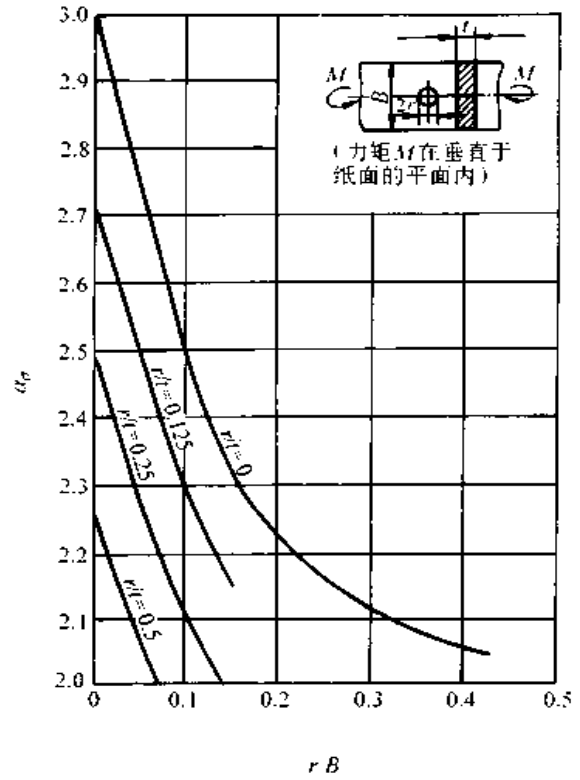


图 18.4-36 中央有孔的板弯曲的理论应力集中系数

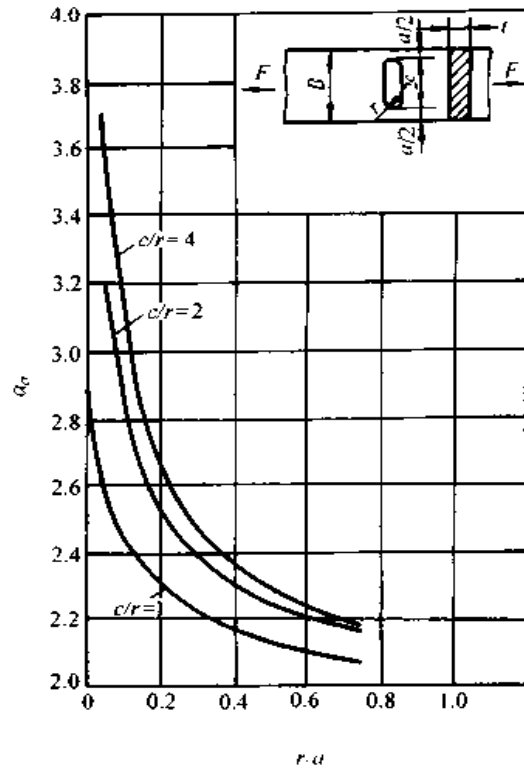


图 18.4-37 有长孔的板拉伸的理论应力集中系数

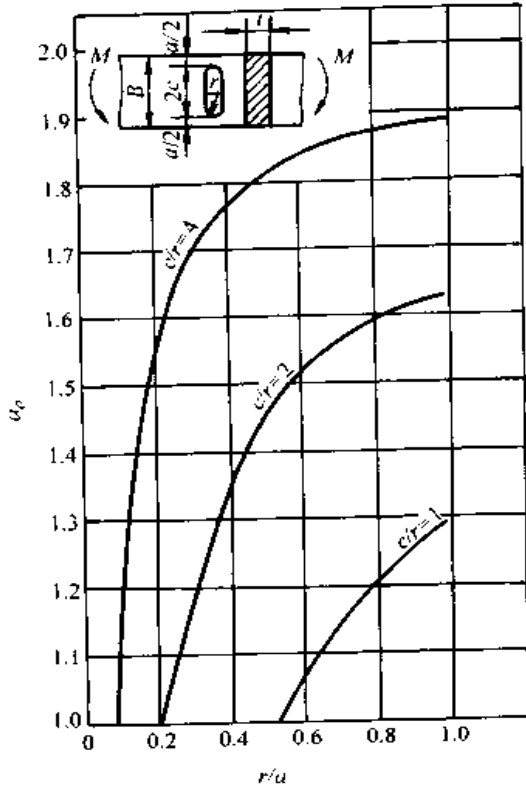


图 18.4-38 有长孔的板弯曲的理论应力集中系数

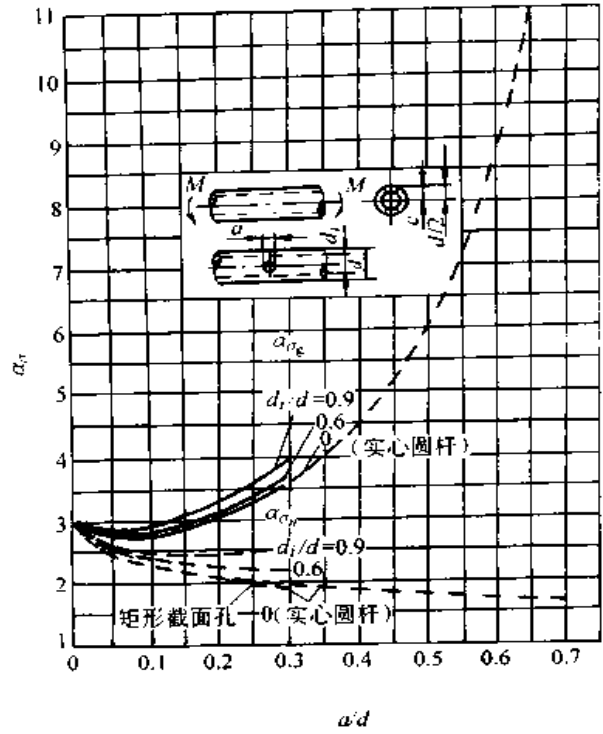


图 18.4-40 带通孔的受弯圆杆 (管) 的理论应力集中系数

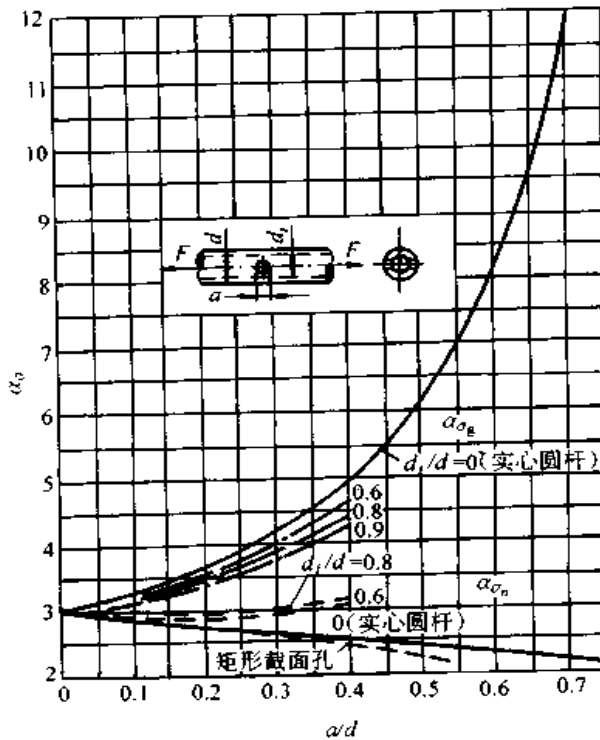


图 18.4-39 带通孔的受拉圆杆 (管) 的理论应力集中系数

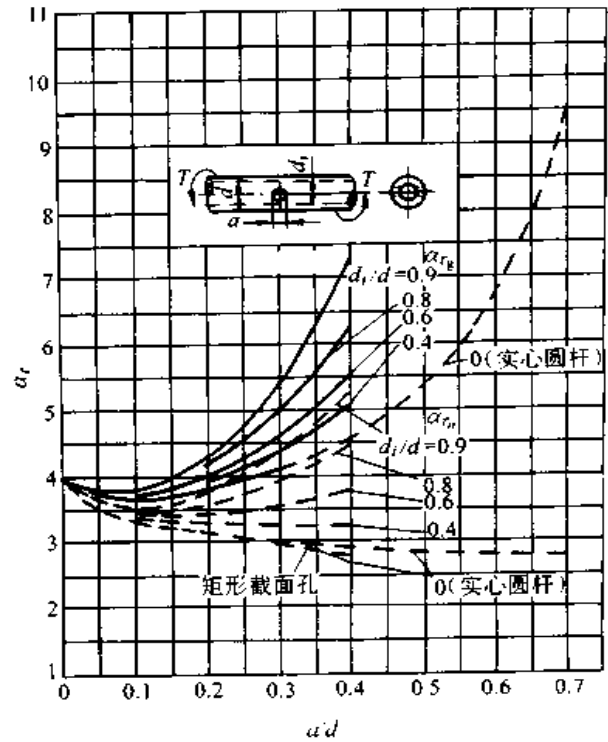


图 18.4-41 带通孔的受扭圆杆 (管) 的理论应力集中系数

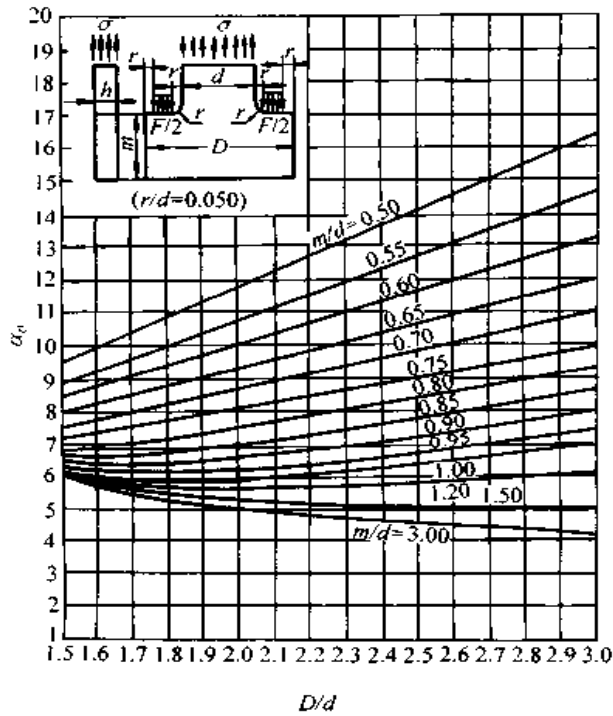


图 18.4-2 有肩板受均布力的理论应力集中系数

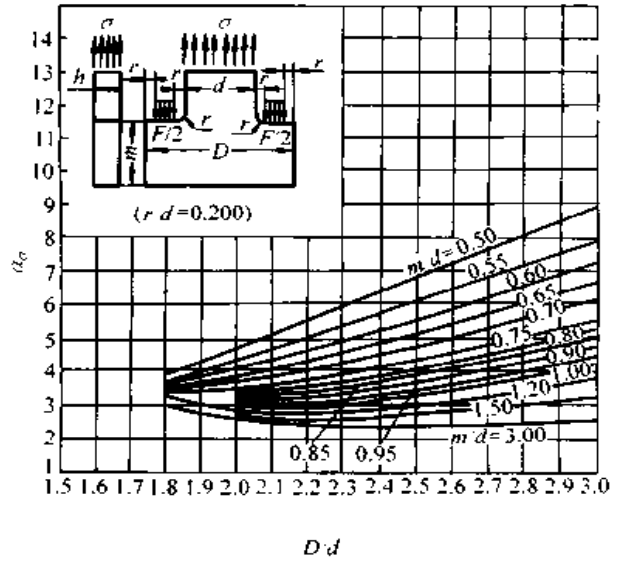


图 18.4-44 有肩板受均布力的理论应力集中系数

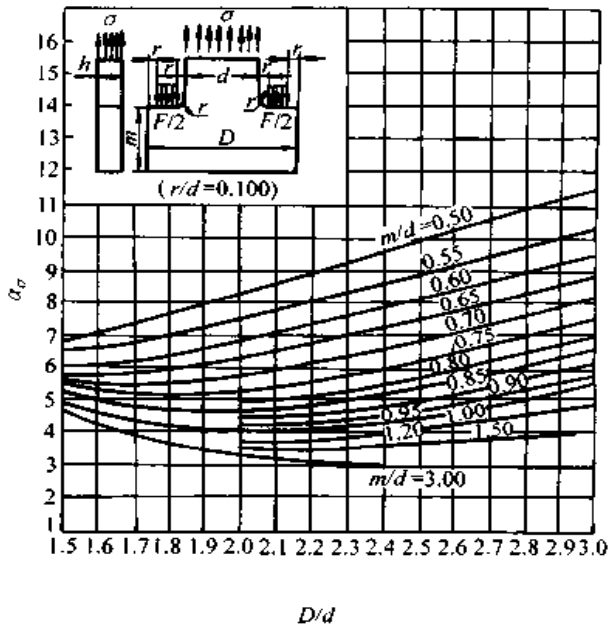


图 18.4-43 有肩板受均布力的理论应力集中系数

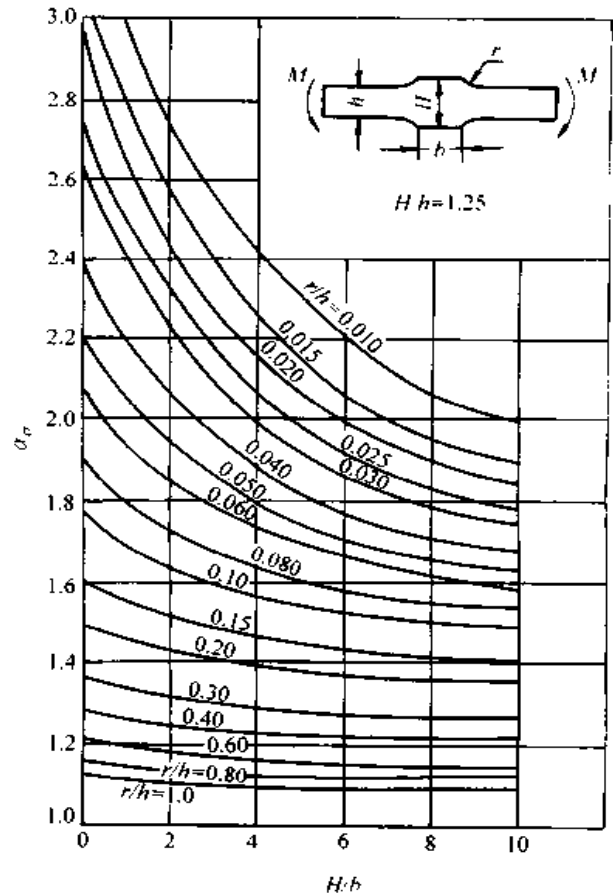


图 18.4-45 有凸台的板弯曲的理论应力集中系数

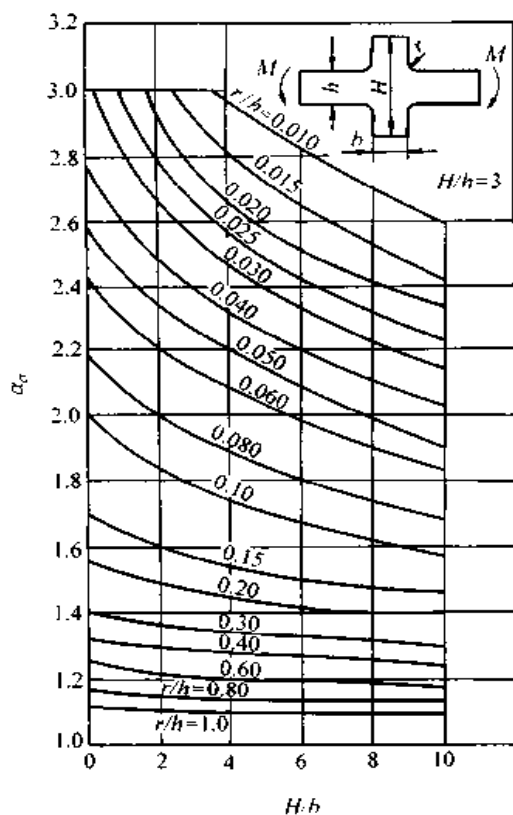


图 18.4-46 有凸台的板弯曲的理论应力集中系数

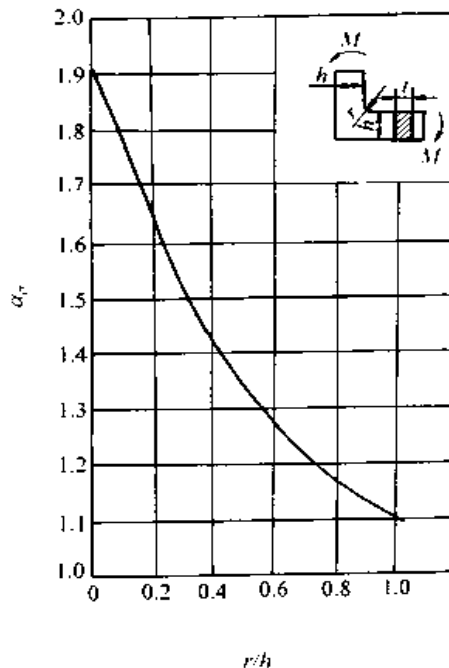


图 18.4-48 L形截面受弯矩的理论应力集中系数

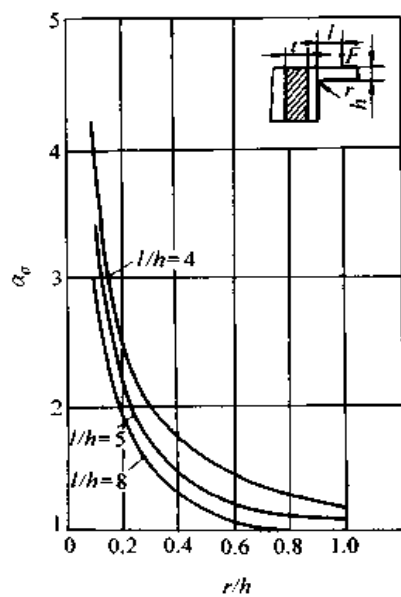


图 18.4-47 L形截面受集中力弯曲的理论应力集中系数

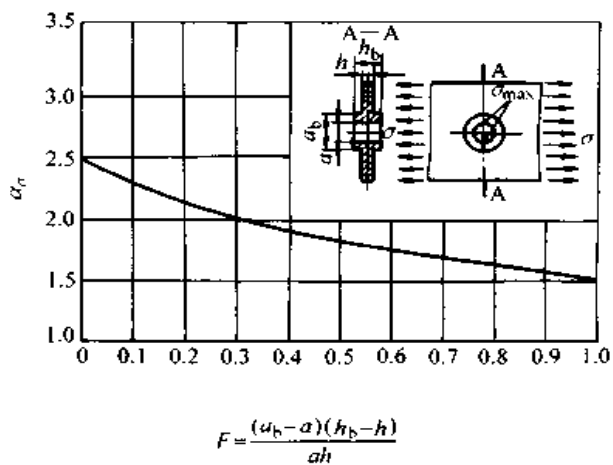


图 18.4-49 有凸台的板拉伸的理论应力集中系数

$$F = \frac{(a_b - a)(h_b - h)}{ah}$$

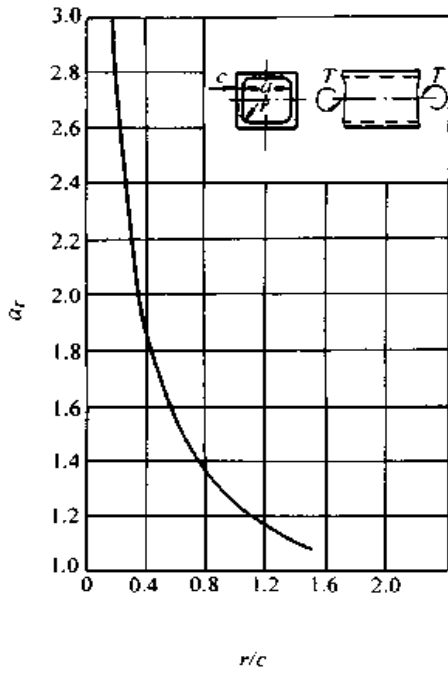


图 18.4-50 箱形截面杆扭转的理论应力集中系数

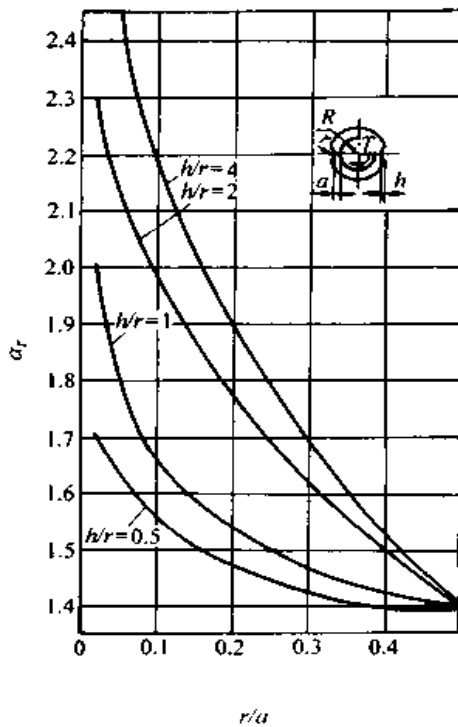


图 18.4-51 有两纵向圆槽的空心轴扭转的理论应力集中系数

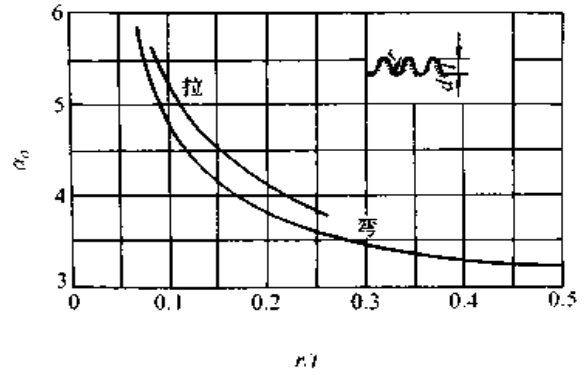


图 18.4-52 螺纹受拉伸或弯曲的理论应力集中系数

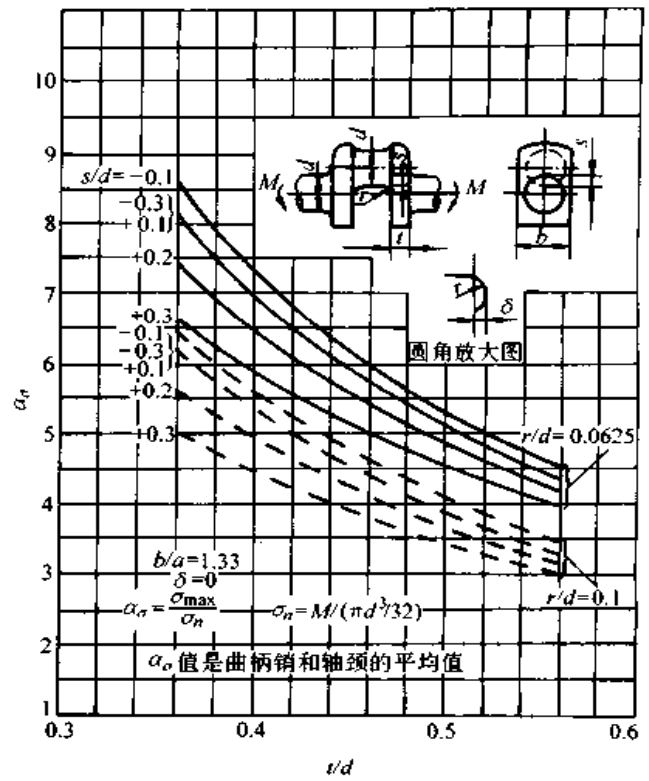


图 18.4-53 曲轴的弯曲的理论应力集中系数

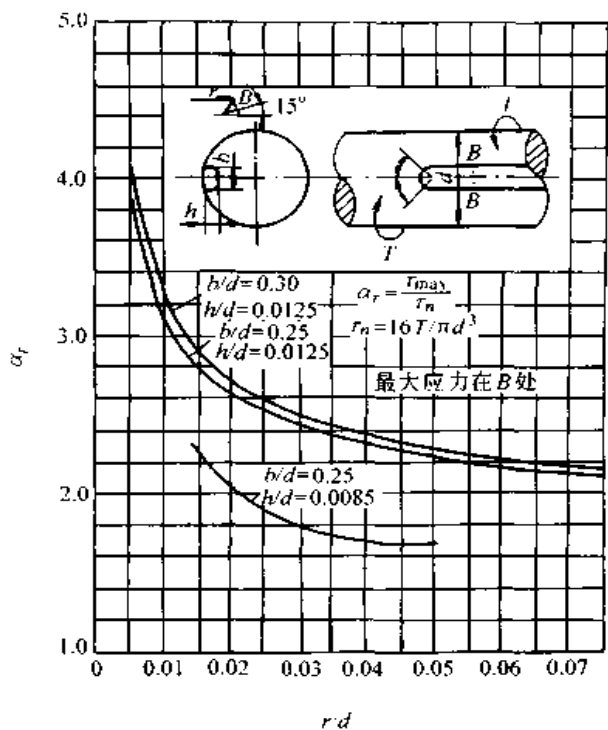


图 18.4-54 有端部半圆形键槽的受扭轴的理论应力集中系数

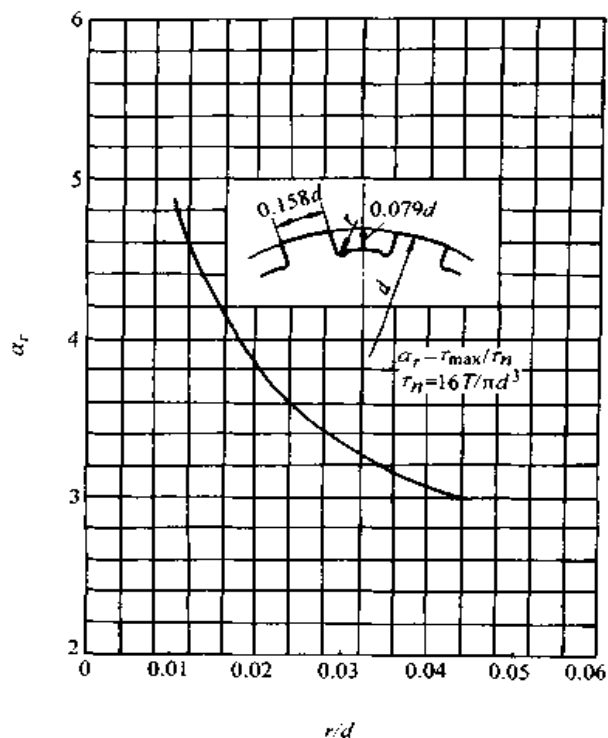


图 18.4-55 花键轴扭转的理论应力集中系数

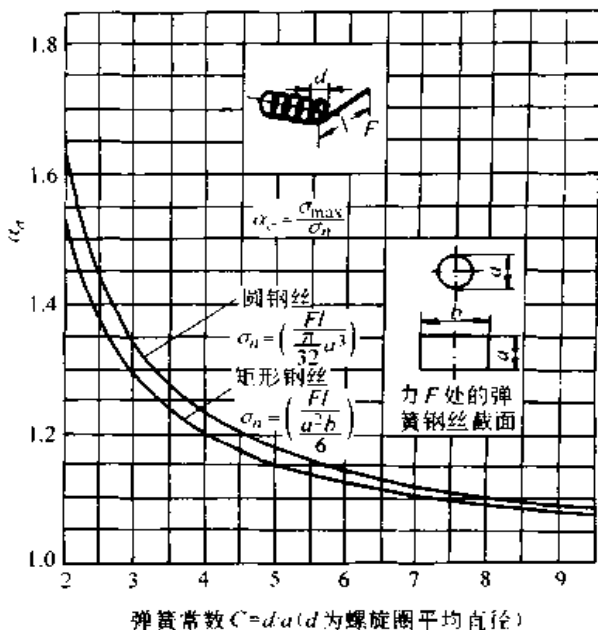


图 18.4-56 螺旋弹簧的扭转的理论应力集中系数

1.2 有效应力集中系数

理论应力集中系数的大小，不能作为由于存在局部峰值应力而使疲劳强度降低的标准。而真实材料的内部是存在着各种各样的缺陷和不同的晶粒分布情况的。同时在应力集中区的局部峰值应力常超过屈服点，使部分材料产生塑性变形，从而使应力重新分配。这就使得零件的疲劳强度不仅要由零件的几何形状所决定，而且还与零件的材料性质以及载荷类型等因素有关。

因此，在循环应力条件下，把实际衡量应力集中对疲劳强度影响的系数，称为有效应力集中系数 K_o 或 K_r 。在载荷条件和绝对尺寸相同时，循环应力下的有效应力集中系数，等于光滑试样与有效应力集中试样的疲劳极限之比，即

$$K_o = \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{-1})_K} \quad \text{或} \quad K_r = \frac{\tau_{-1}}{(\tau_{-1})_K} \quad (18.4-3)$$

式中 σ_{-1} 和 τ_{-1} ——光滑试样对称循环弯曲（或拉压）的疲劳极限和对称循环扭转的疲劳极限；

$(\sigma_{-1})_K$ 和 $(\tau_{-1})_K$ ——有应力集中试样对称循环弯曲（或拉压）的疲劳极

限和对称循环扭转的疲劳极限。

有效应力集中系数 K ，总是小于理论应力集中系数 α 。为了在数量上估计 K 与 α 之间的差别，引入材料对应力集中的敏性系数 q ，它们之间的关系为

$$\text{对弯曲或拉压: } q_\sigma = \frac{K_\sigma - 1}{\alpha_\sigma - 1}$$

$$\text{对扭转: } q_\tau = \frac{K_\tau - 1}{\alpha_\tau - 1}$$

或写成

$$\left. \begin{aligned} K_\sigma &= 1 + q_\sigma(\alpha_\sigma - 1) \\ K_\tau &= 1 + q_\tau(\alpha_\tau - 1) \end{aligned} \right\} \quad (18.4-4)$$

如 $q_\sigma = 0$ 和 $q_\tau = 0$ ，则 $K_\sigma = 1$ 和 $K_\tau = 1$ ，没有应力集中产生，即材料对应力集中不敏感。如 $q_\sigma = 1$ 和 $q_\tau = 1$ ，则 $K_\sigma = \alpha_\sigma$ 和 $K_\tau = \alpha_\tau$ ，即材料对应力集中十分敏感。 q 值一般在 0 与 1 之间，在实际应用中，常设 $q_\sigma = q_\tau = q$ 。

求有效应力集中系数有两种方法：一是直接用零部件在特定材料及形状下试验求得；另一种按照式 (18.4-4) 的关系，由零件的几何形状查得相应的理论应力集中系数 α ，当该材料与有关尺寸确定的敏性系数 q 已知时，即可求得有效应力集中系数。前者最能表征实际情况，所以在疲劳强度设计中，应尽可能建议采用。

钢材的敏性系数 q ，可查图 18.4-57。

某些典型的零件结构的有效应力集中系数如图 18.4-58~图 18.4-83 及表 18.4-1、表 18.4-2 所示。

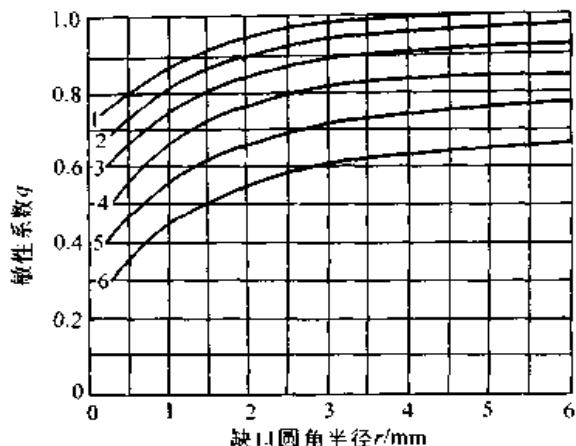


图 18.4-57 钢的应力集中敏性系数与材料的力学性能和缺口圆角半径的关系

- 1— $\sigma_b = 1\,300$ MPa 2— $\sigma_b = 1\,200$ MPa
- 3— $\sigma_b = 1\,000$ MPa 4— $\sigma_b = 800$ MPa
- 5— $\sigma_b = 600$ MPa 6— $\sigma_b = 400$ MPa

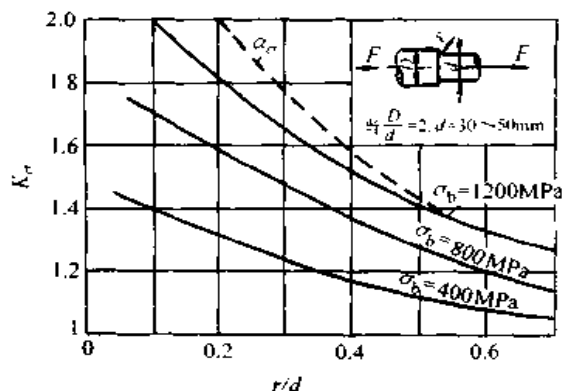


图 18.4-58 阶梯钢轴的对称拉压的有效应力集中系数 (实线)

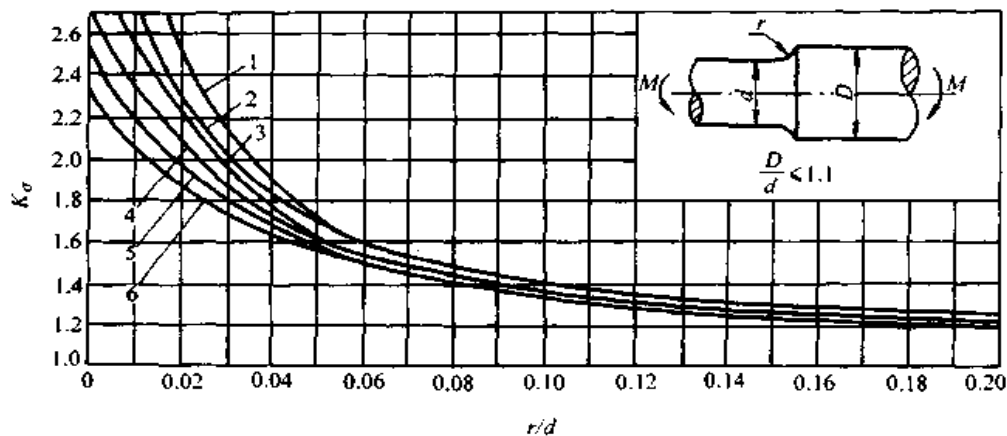


图 18.4-59 阶梯钢轴的弯曲的有效应力集中系数
 1— $\sigma_b \geq 1\,000$ MPa 2— $\sigma_b = 900$ MPa 3— $\sigma_b = 800$ MPa
 4— $\sigma_b = 700$ MPa 5— $\sigma_b = 600$ MPa 6— $\sigma_b \leq 500$ MPa

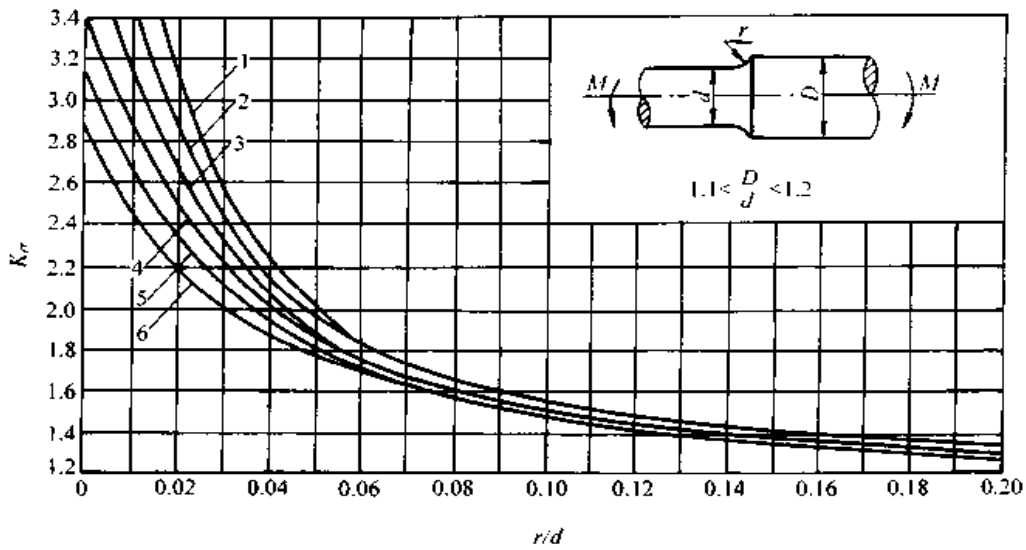


图 18.4.60 阶梯钢轴的弯曲的有效应力集中系数

1— $\sigma_s \geq 1\,000$ MPa 2— $\sigma_s = 900$ MPa 3— $\sigma_b = 800$ MPa
 4— $\sigma_b = 700$ MPa 5— $\sigma_s = 600$ MPa 6— $\sigma_b \leq 500$ MPa

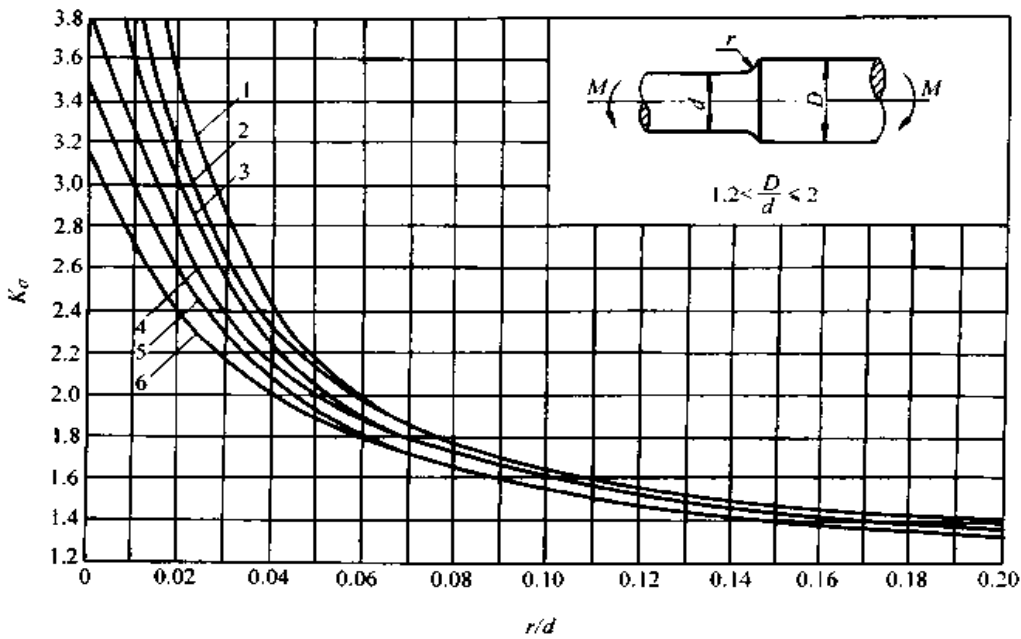


图 18.4.61 阶梯钢轴的弯曲的有效应力集中系数

1— $\sigma_b \geq 1\,000$ MPa 2— $\sigma_b = 900$ MPa 3— $\sigma_b = 800$ MPa
 4— $\sigma_b = 700$ MPa 5— $\sigma_b = 600$ MPa 6— $\sigma_b \leq 500$ MPa

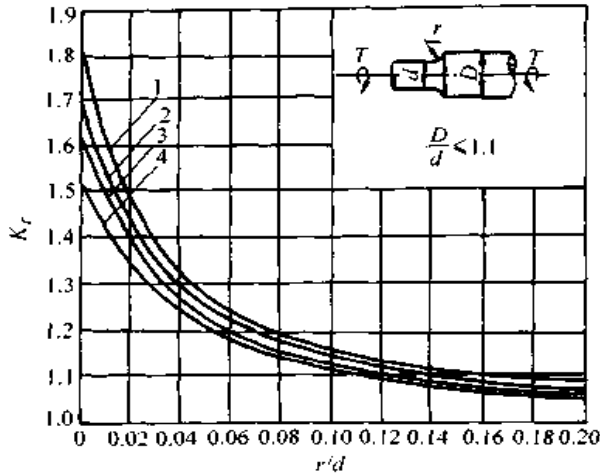


图 18.4-62 阶梯钢轴的扭转的有效应力集中系数
1— $\sigma_b \geq 1000$ MPa 2— $\sigma_b = 900$ MPa
3— $\sigma_b = 800$ MPa 4— $\sigma_b \leq 700$ MPa

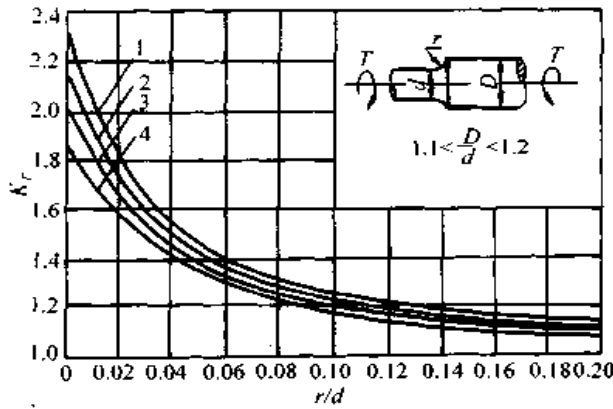


图 18.4-63 阶梯钢轴的扭转的有效应力集中系数
1— $\sigma_b \geq 1000$ MPa 2— $\sigma_b = 900$ MPa
3— $\sigma_b = 800$ MPa 4— $\sigma_b \leq 700$ MPa

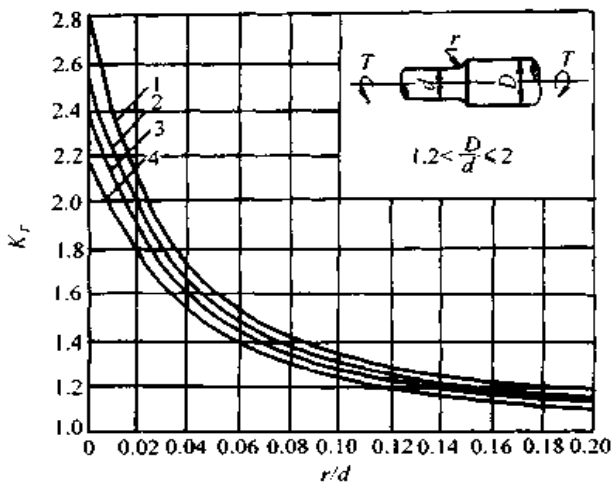


图 18.4-64 阶梯钢轴的扭转的有效应力集中系数
1— $\sigma_b \geq 1000$ MPa 2— $\sigma_b = 900$ MPa
3— $\sigma_b = 800$ MPa 4— $\sigma_b \leq 700$ MPa

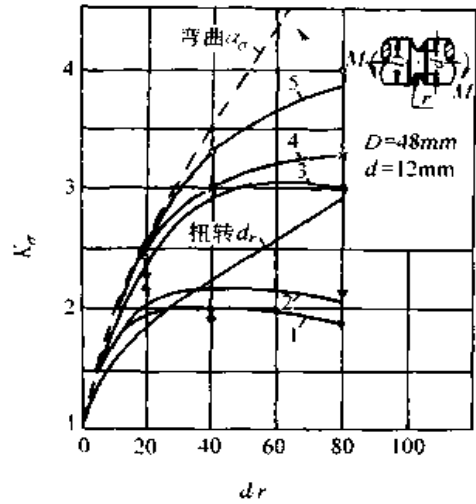


图 18.4-65 有环形深槽钢轴的旋转弯曲的
有效应力集中系数

(虚线为理论应力集中系数)

- 1— $w(C) = 0.25\%$
- 2— $w(C) = 0.38\%$
- 3— $w(C) = 0.75\%$
- 4—Ni-Cr 钢 5—Ni-Cr 钢

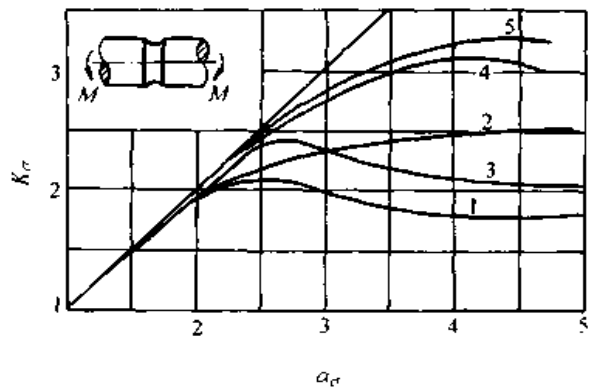


图 18.4-66 有环形槽钢轴的旋转弯曲的
有效应力集中系数

- 1— $w(C) = 0.22\%$
- 2— $w(C) = 0.25\%$
- 3— $w(C) = 0.38\%$
- 4— $w(C) = 0.76\%$
- 5— $w(Ni) = 2.8\%, w(Cr) = 0.7\%$

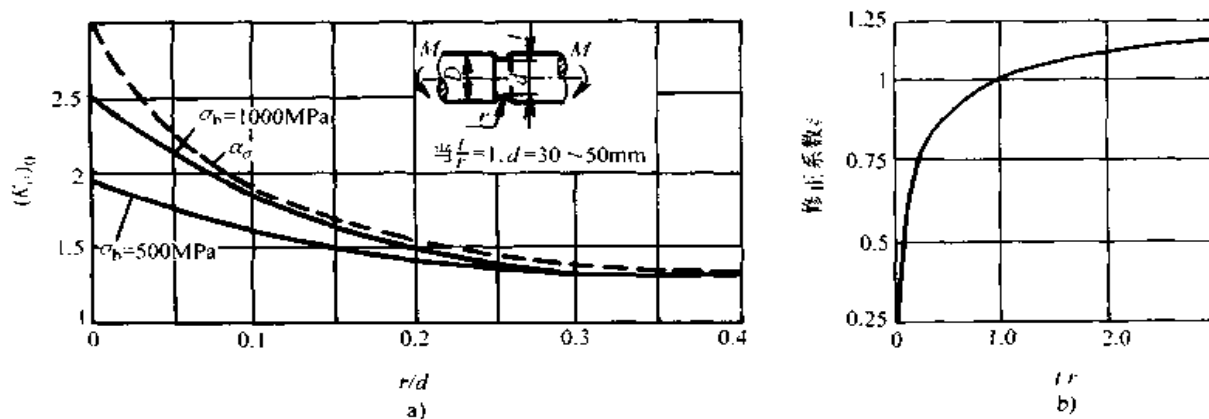


图 18.4-67 有环形槽钢轴的对称弯曲的有效应力集中系数

a) 有环形槽钢轴 (当 $\frac{t}{r} = 1$ 时) 的对称弯曲的有效应力集中系数 (虚线为理论应力集中系数)

当 $\frac{t}{r} \neq 1$ 时的有效应力集中系数的计算式为

$$K_\sigma = 1 + \epsilon[(K_\sigma)_0 - 1]$$

b) 有环形槽钢轴当 $\frac{D}{d} < 2$ 时的有效应力集中系数的修正系数 ϵ

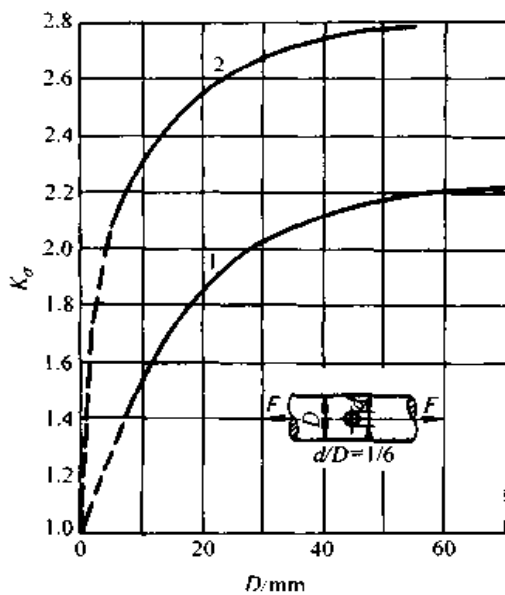


图 18.4-68 有横孔钢轴的拉压的有效应力集中系数

- 1— $w(C) = 0.07\%$ 低碳钢, $\sigma_b = 330 \text{ MPa}$
- 2—Ni-Cr-Mo 钢 [$w(CO) = 0.43\%$,
 $w(Ni) = 2.64\%$, $w(Cr) = 0.75\%$,
 $w(Mn) = 0.65\%$, $w(Mo) = 0.58\%$,
 $w(V) = 0.05\%$]

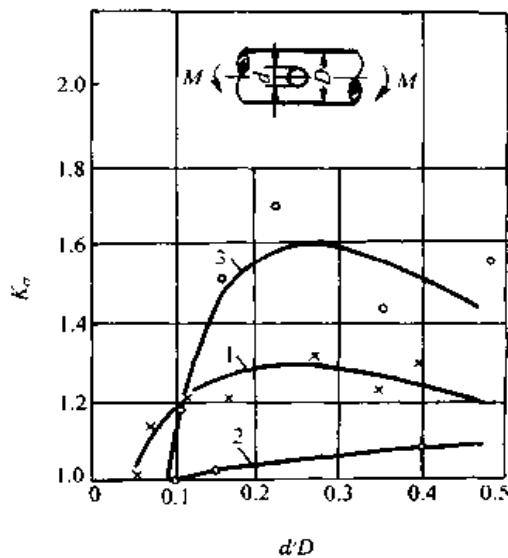


图 18.4-69 有横孔的空心铸铁圆棒的旋转弯曲的有效应力集中系数

- 1—球墨铸铁, $D = 23 \text{ mm}$
 - 2—孕育铸铁, $D = 12 \text{ mm}$
 - 3—孕育铸铁, $D = 23 \text{ mm}$
- (铁素体包围的片状石墨的铸铁称孕育铸铁)

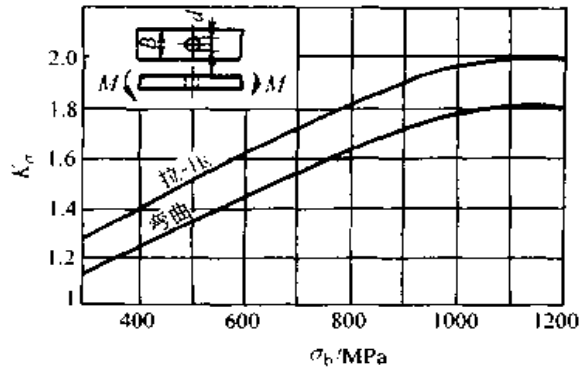


图 18.4.70 有孔钢板的有效应力集中系数

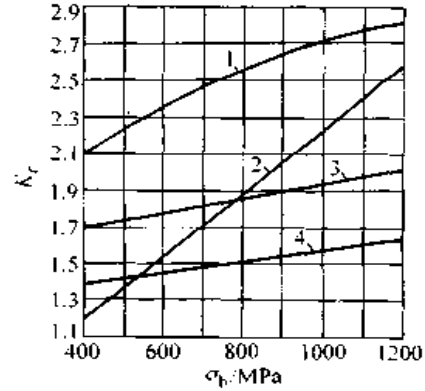


图 18.4.71 有键槽、横孔的钢轴扭转的有效应力集中系数

1—矩形花键 2—渐开线花键 3—键槽

4—横孔 $\frac{d}{D} = 0.05 \sim 0.25$

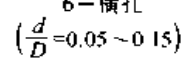
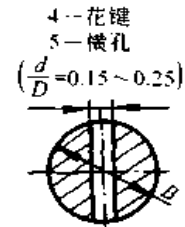
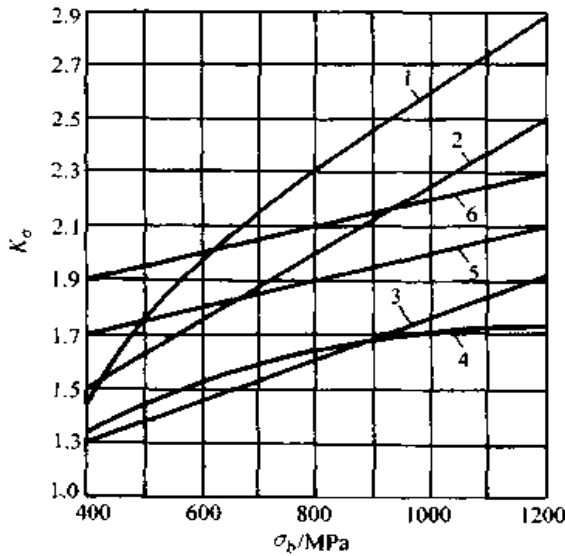
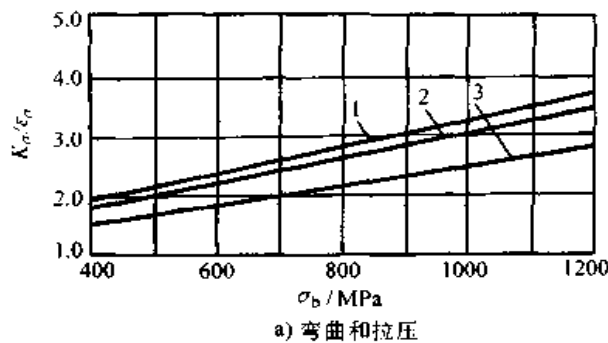
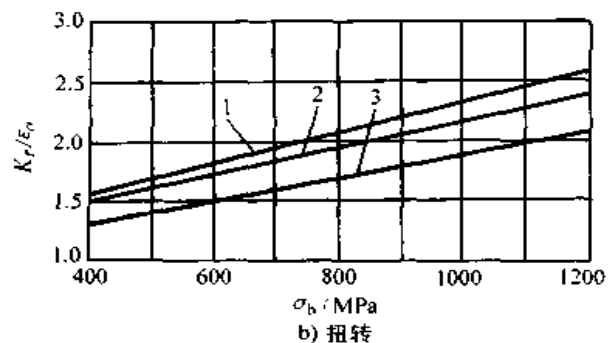


图 18.4.72 有螺纹、键槽、横孔的钢零件的弯曲（拉伸）的有效应力集中系数



a) 弯曲和拉压



b) 扭转

图 18.4.73 钢轴上配合件（间隙配合 $\frac{H7}{h6}$ ）的有效应力集中系数与尺寸系数的比值

1— $d \geq 100$ mm 2— $d = 50$ mm 3— $d \leq 30$ mm

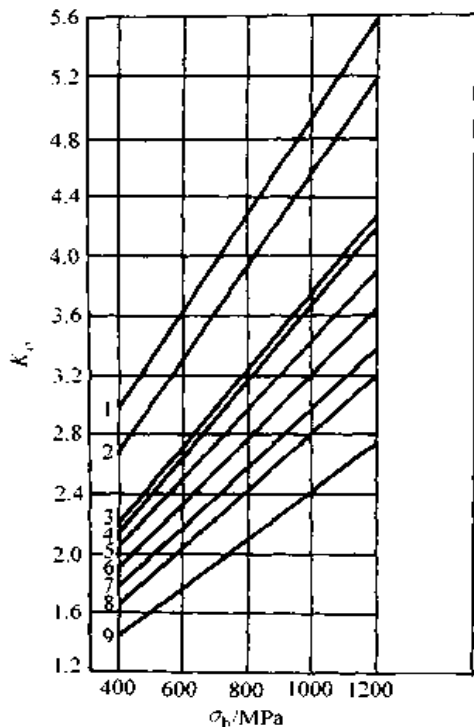


图 18.4-74 压力配合钢轴弯曲的有效应力集中系数

- 1—过盈配合 $\frac{H7}{s6}$, $d > 100$ mm
- 2—过盈配合 $\frac{H7}{s6}$, $d = 50$ mm
- 3—过盈配合 $\frac{H7}{s6}$, $d = 30$ mm
- 4—过盈配合 $\frac{H7}{r5}$, $d > 100$ mm
- 5—过盈配合 $\frac{H7}{r5}$, $d = 50$ mm
- 6—间隙配合 $\frac{H7}{h6}$, $d > 100$ mm
- 7—间隙配合 $\frac{H7}{h6}$, $d = 50$ mm
- 8—过盈配合 $\frac{H7}{r5}$, $d = 30$ mm
- 9—间隙配合 $\frac{H7}{h6}$, $d = 30$ mm

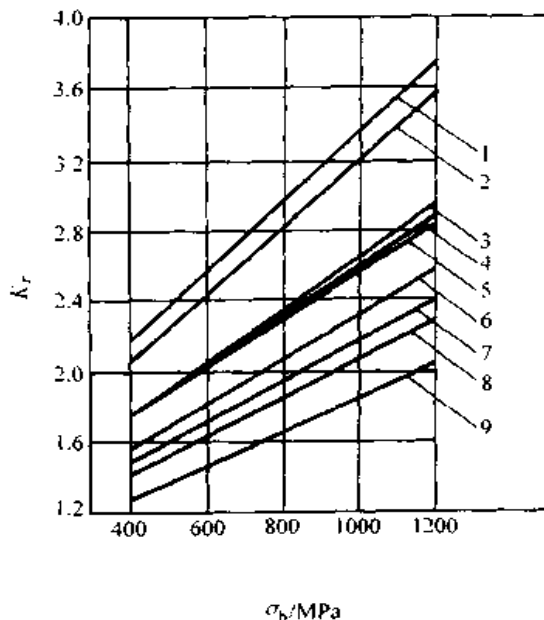
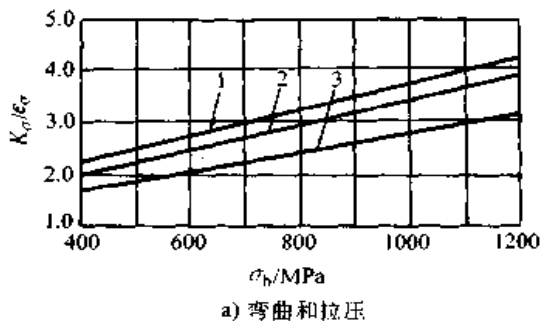
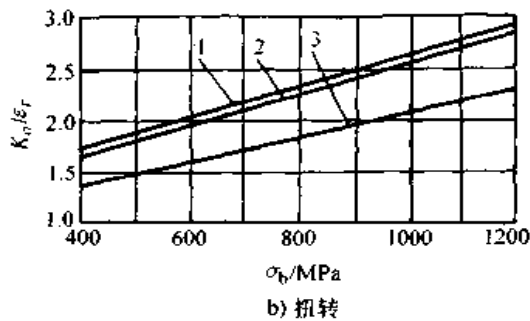


图 18.4-75 压力配合钢轴的扭转的有效应力集中系数

- 1—过盈配合 $\frac{H7}{s6}$, $d > 100$ mm
- 2—过盈配合 $\frac{H7}{s6}$, $d = 50$ mm
- 3—过盈配合 $\frac{H7}{s6}$, $d = 30$ mm
- 4—过盈配合 $\frac{H7}{r5}$, $d > 100$ mm
- 5—过盈配合 $\frac{H7}{r5}$, $d = 50$ mm
- 6—间隙配合 $\frac{H7}{h6}$, $d > 100$ mm
- 7—间隙配合 $\frac{H7}{h6}$, $d = 50$ mm
- 8—过盈配合 $\frac{H7}{r5}$, $d = 30$ mm
- 9—间隙配合 $\frac{H7}{h6}$, $d = 30$ mm



a) 弯曲和拉压



b) 扭转

图 18.4-76 钢轴上配合件 (过渡配合 $\frac{H7}{k6}$) 的有效应力集中系数与尺寸系数的比值

- 1— $d \geq 100$ mm
- 2— $d = 50$ mm
- 3— $d \leq 30$ mm

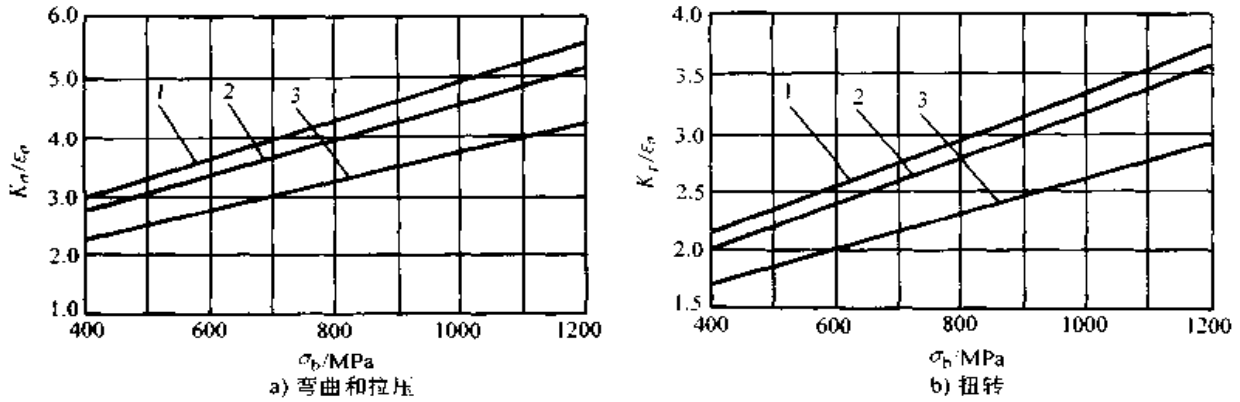


图 18.4-77 钢轴上配合件（过盈配合 $\frac{H7}{s6}$ ）的有效应力集中系数与尺寸系数的比值
 1— $d \geq 100$ mm 2— $d = 50$ mm 3— $d \leq 30$ mm

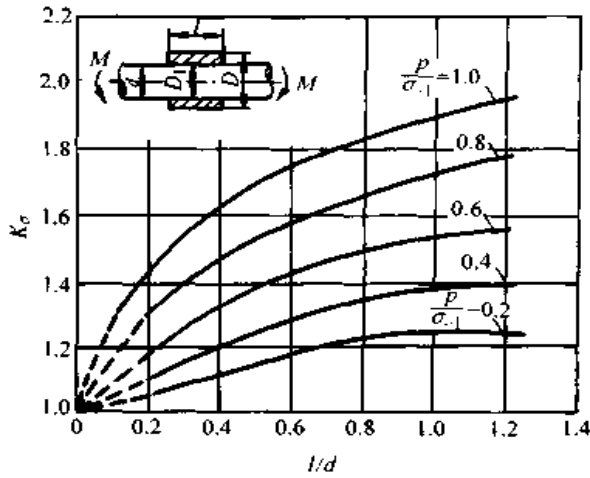


图 18.4-78 压入的过盈配合钢轴的弯曲的有效应力集中系数

$$p = \frac{E(d - D_1)(D^2 - d^2)}{2dD^2}$$

p —径向压力 (MPa) E —弹性模量 (MPa)
 D_1 —轴套的内径 (mm) D —轴套的外径 (mm)

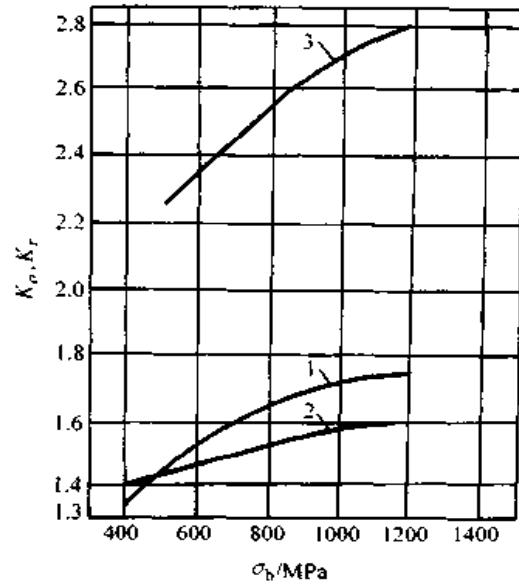


图 18.4-79 花键钢轴的有效应力集中系数
 1—渐开线花键轴，弯曲 2—渐开线花键轴，扭转 3—矩形花键轴，扭转

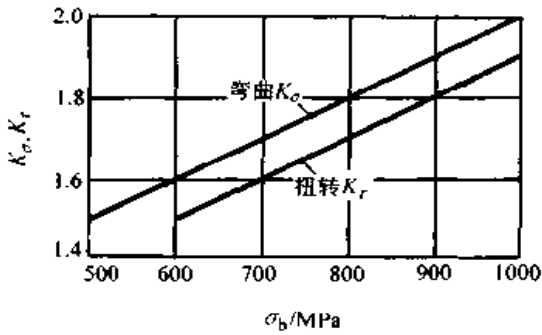


图 18.4-80 有单键或双键槽钢轴的有效应力集中系数

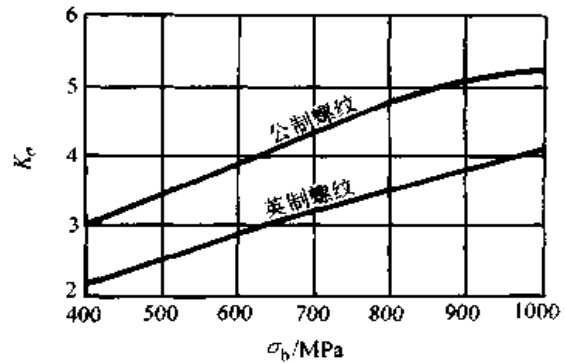


图 18.4-81 螺纹联接拉压的有效应力集中系数 (钢件)

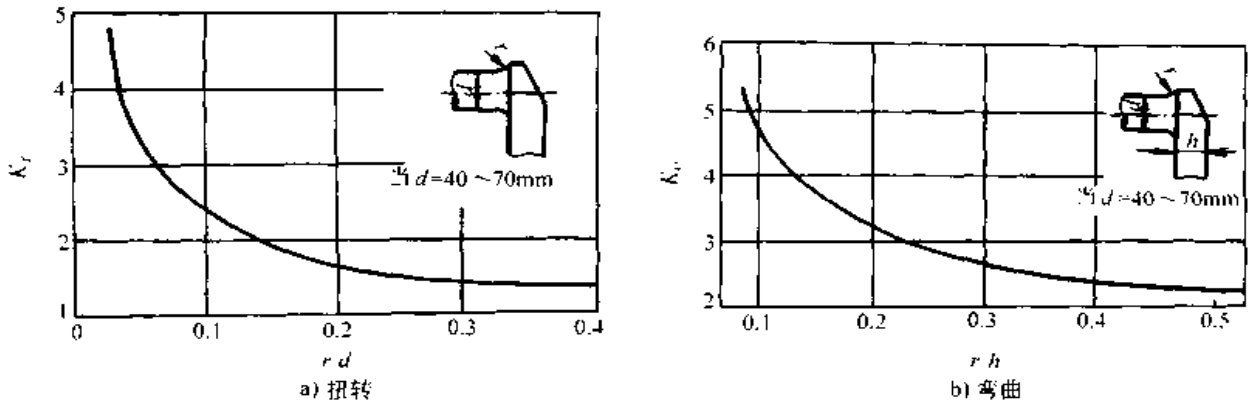


图 18.4-82 钢曲轴的有效应力集中系数

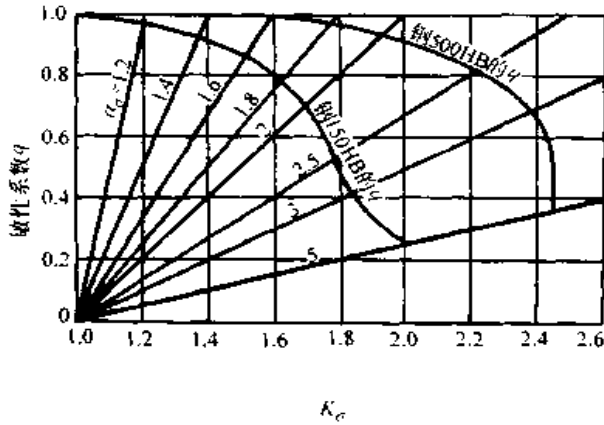


图 18.4-83 由理论应力集中系数及钢材的硬度确定
敏感性系数 q 或有效应力集中系数 K_e 。

表 18.4-1 螺纹联接中的有效应力集中系数

钢 号	光滑试 样的疲 劳极限 σ_{-1} MPa	螺纹的疲劳 极限		有效应力 集中系数 K_e	
		σ_{-1} /MPa		K_e	
		切削 螺纹	滚压 螺纹	切削 螺纹	滚压 螺纹
35	176	49	63	2.7	2.1
45	215	58	78	2.8	2.1
38CrA	294	73	98	3.0	2.3
30CrMnSiA	294	73	98	3.0	2.3
40CrNiMoA	431	93	122	3.5	2.6
18Cr2Ni4VA	441	98	127	3.4	2.6

注：上表适用于 $d \leq 16$ mm 的米制螺纹，对于大尺
寸的螺纹，应考虑尺寸系数。表中的疲劳极
限是拉压疲劳试验得到的数值。

表 18.4-2 有键槽钢轴的有效应力集中系数

钢轴型式	钢 种	力学性能		有效应力集中系数 K	
		σ_b /MPa	σ_{-1} /MPa	弯曲 K_e	扭转 K_t
3 个键槽 4.5 mm × 10 mm $d = 30$ mm	C	430	190	1.75	—
	3.5Ni	820	370	2.50	—
2 个键槽 4.5 mm × 10 mm $d = 30$ mm	C	430	190	—	2.40 ^①
	3.5Ni	820	370	—	4.35 ^①
2 个键槽 5 mm × 12 mm $d = 30$ mm	C	430	190	—	1.55
	C	560	240	—	1.75
	C	650	—	—	1.85
	C	880	—	—	2.25
	1.045	562	260	1.32	—
	1.25Ni	725	406	1.61	—

注：① 在装有配合件情况下试验

2 尺寸的影响

在疲劳试验机上试验所用的试样直径通常为6-10 mm,而一般零件的尺寸与试样有很大差别。

- 1) 尺寸增大时,材料的疲劳极限降低;
- 2) 强度高的合金钢比强度低的合金钢尺寸影响大;
- 3) 应力分布不均匀性增大时,尺寸影响大。

为在设计中计入这种影响,引入尺寸系数 ϵ 。

尺寸系数的定义为当应力集中情况相同时,尺寸为 d 的零件的疲劳极限与标准试样的疲劳极限之比值,即

$$\left. \begin{aligned} \text{弯曲时} \quad \epsilon_s &= \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}} \\ \text{扭转时} \quad \epsilon_\tau &= \frac{(\tau_{-1})_d}{\tau_{-1}} \end{aligned} \right\} \quad (18.4-5)$$

式中 $(\sigma_{-1})_d, (\tau_{-1})_d$ ——相应是尺寸为 d 的零

件对称循环弯曲疲劳极限和对称循环扭转疲劳极限;

σ_{-1}, τ_{-1} ——相应是标准直径试样的对称循环弯曲疲劳极限和对称循环扭转疲劳极限。

尺寸系数 ϵ 的数据很分散,对于重型及一般机械设计,推荐图18.4-84,这是锻钢的尺寸系数值;对于铸钢,图18.4-84的数据再降低5%~10%;对于制造质量控制严的锻钢件,尺寸系数可适当提高。对于低合金结构钢,建议用碳素钢这条曲线。

表18.4-3~表18.4-5分别给出钢试样的尺寸系数 ϵ 的统计参数,绝对尺寸影响系数 $\epsilon_s, \epsilon_\tau$ 和光滑钢轴和阶梯钢轴对称循环下的弯曲疲劳试验结果。

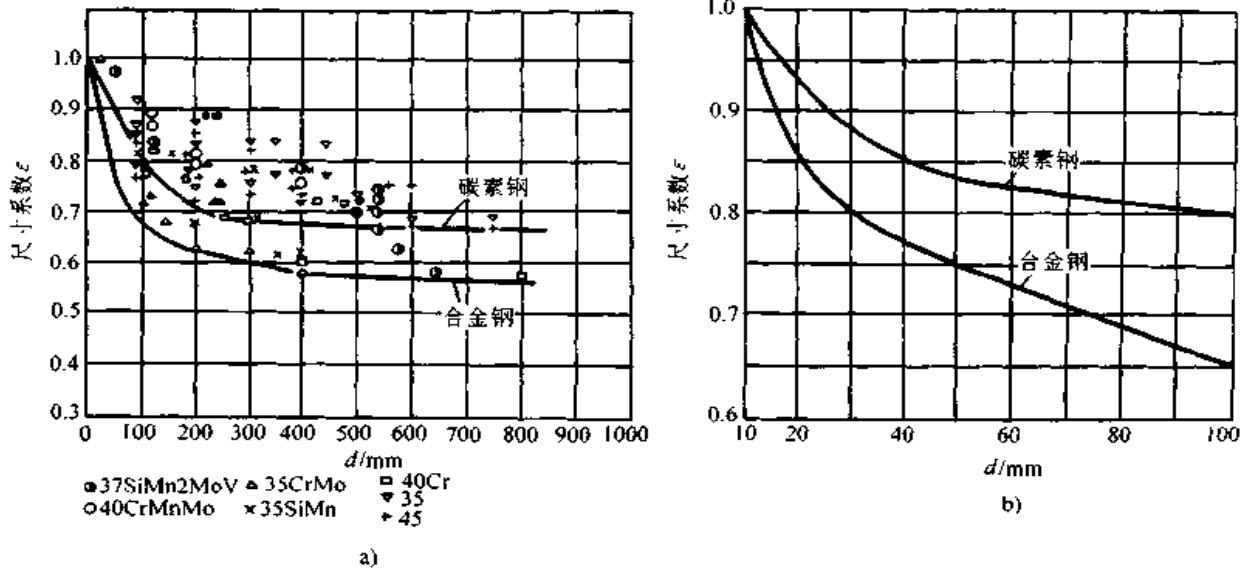


图 18.4-84 锻钢疲劳极限的尺寸系数 ϵ

表 18.4-3 钢试样的尺寸系数 ϵ 的统计参数

钢种	尺寸 d / mm	试样数 n	ϵ 的统计参数			钢种	尺寸 d / mm	试样数 n	ϵ 的统计参数		
			均值 $\bar{\epsilon}$	标准差 S_ϵ	变异系数 $\nu = S_\epsilon / \bar{\epsilon}$				均值 $\bar{\epsilon}$	标准差 S_ϵ	变异系数 $\nu = S_\epsilon / \bar{\epsilon}$
碳素钢	30~150	8	0.856 2	0.088 95	0.103 88	合金钢	30~150	11	0.79	0.069 0	0.087 34
	150~250	8	0.802 5	0.047 73	0.059 48		150~250	12	0.766 7	0.074 87	0.097 65
	250~350	9	0.791 1	0.034 44	0.043 53		250~350	5	0.678	0.068 34	0.100 79
	350 以上	14	0.73	0.041 88	0.057 37		350 以上	22	0.671 8	0.072 02	0.107 20

表 18.4-4 绝对尺寸影响系数 ϵ_d 、 ϵ_r

直径 d / mm		>20~30	>30~40	>40~50	>50~60	>60~70	>70~80	>80~100	>100~120	>120~150	>150~500
ϵ_s	碳钢	0.91	0.88	0.84	0.81	0.78	0.75	0.73	0.70	0.68	0.60
	合金钢	0.83	0.77	0.73	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60	0.54
ϵ_r	各种钢	0.89	0.81	0.78	0.76	0.74	0.73	0.72	0.70	0.68	0.60

表 18.4-5 光滑钢轴和阶梯钢轴对称循环下的弯曲疲劳试验结果

钢			d /mm	σ_{-1d} /MPa	σ_{-1L} /MPa	σ_s	K_s	q	ϵ_s	加载条件
牌号	σ_b /MPa	σ_{-1100} /MPa								
A 碳 钢										
Q235A	402	185	190	125	—	—	—	—	0.68	平面弯曲
22 g	445	205	20	185	—	—	—	—	—	弯曲, 试样静止
			200	165	—	—	—	—	—	
			150	137	—	—	—	—	0.67	
45	580	267	75	195	115	2.0	1.7	0.7	0.59	平面弯曲
45	584	269	42	245	120	2.4	—	—	0.91	弯曲, 试样静止
			180	200	130	2.4	1.5	0.4	0.74	
40	711	327	135	200	106	2.2	1.9	0.7	0.61	平面弯曲
			135	—	87	3.4	2.3	0.5	—	
45	700	322	135	191	110	2.2	1.7	0.6	0.59	平面弯曲
			135	—	76	3.4	2.5	0.6	—	
ZG270-500	485	155	200	75	—	—	—	—	0.48	弯曲, 试样静止
B 合 金 钢										
34CrNi3Mo	820	377	20	355	215	1.6	1.6	1.0	0.94	悬臂旋转弯曲
34CrNi3Mo	820	377	170	—	145	1.6	1.6	1.0	0.94	平面弯曲
	997	558	160	245	190	1.6	1.3	0.5	0.51	
	888	440	20	440	295	1.6	1.5	0.8	1.00	
15MnNi4Mo	888	440	170	255	185	1.6	1.4	0.7	0.63	平面弯曲
40Cr	910	311	65	345	235	1.8	1.5	0.6	0.86	
40CrNi	838	385	65	305	185	1.8	1.6	0.7	0.79	
40Cr	805	390	20	365	195	2.3	1.9	0.7	0.94	悬臂旋转弯曲
	805	390	160	330	175	2.4	1.9	0.6	0.85	弯曲, 试样静止
40CrNi	821	390	20	390	195	2.3	2.0	0.8	1.00	悬臂旋转弯曲
	821	390	160	335	165	2.4	2.0	0.7	0.88	弯曲, 试样静止

续表 18.4-5

钢			d/mm	σ_{-1d}/MPa	σ_{-1kd}/MPa	α_s	K_s	q	ε_s	加载条件
牌号	σ_b/MPa	$\sigma_{0.1mm}/\text{MPa}$								
B 合 金 钢										
34CrNiMo	810	373	135	290	152	2.2	1.9	0.8	0.73	平面弯曲
	810	373	135	—	88	3.4	3.3	1.0	—	
34CrNiMo	850	391	160	300	—	—	—	—	0.77	平面弯曲
25CrMoV	912	420	20	410	175	2.6	2.3	0.8	0.97	悬臂旋转弯曲
	912	420	160	310	125	2.6	2.2	0.8	0.74	平面弯曲
25CrNi3-MoVA	817	376	280	—	77	3.1	—	—	—	平面弯曲
	823	379	18	305	—	—	—	—	0.81	悬臂旋转弯曲

3 表面状况影响

3.1 表面加工状况

疲劳试验的标准试样表面都是经过磨光，而实际零件的表面加工方法则多种多样，表面加工粗糙相当于存在很多微缺口，在零件承受载荷时就产生应力集中。不管零件承受弯曲或扭转或二者联合作用的载荷，都是零件表面应力最大，所以疲劳源多从表面开始。因此表面质量不同，其抗疲劳强度也不同。粗糙表面导致疲劳强度降低。为了计入这一影响，在疲劳强度计算中引入了表面加工系数 β_1 ，其定义为

$$\beta_1 = \frac{(\sigma_{-1})_{\beta}}{\sigma_{-1}} \quad (18.4-6)$$

式中 $(\sigma_{-1})_{\beta}$ ——某种表面加工情况下试样的疲劳极限；

σ_{-1} ——磨光试样的疲劳极限。

图 18.4.85 为钢试样弯曲或拉压循环载荷时的表面加工系数。对于扭转疲劳，在缺乏试验数

据时，可取弯曲时的表面加工系数代之。

表 18.4.6 是表面加工系数的统计参数：

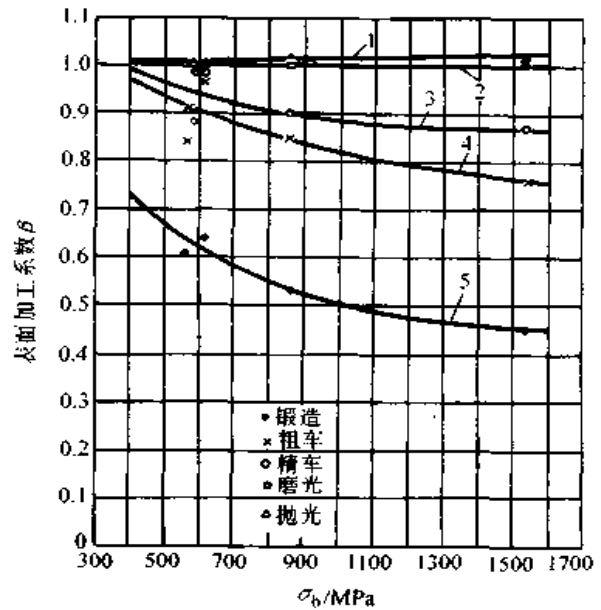


图 18.4.85 钢试样的表面加工系数 β

1—抛光 2—磨光 3—精车 4—粗车 5—锻造

表 18.4.6 表面加工系数的均值 $\bar{\beta}$ 及标准差 S_{β}

钢 种	锻 造		粗车 $Ra = 12.5\mu\text{m}$		精车 $Ra = 3.2\mu\text{m}$		磨削 $Ra = 0.4\mu\text{m}$		抛光 $Ra = 0.1\mu\text{m}$	
	$\bar{\beta}$	S_{β}	$\bar{\beta}$	S_{β}	$\bar{\beta}$	S_{β}	$\bar{\beta}$	S_{β}	$\bar{\beta}$	S_{β}
35	0.879 5	0.029 2	0.981 6	0.016 6	0.986 8	0.025 5	1	0.016 9	1.011 2	0.022 8
45	0.638 6	0.016 0	0.966 8	0.020 5	0.987 3	0.022 4	1	0.022 1	1.007 9	0.024 1
Q345	0.606 1	0.014 8	0.836 7	0.019 3	0.910 4	0.018 0	1	0.019 0	1.000 7	0.020 2
40Cr	0.535 3	0.020 9	0.847 9	0.050 5	0.901 1	0.035 5	1	0.049 9	1.021 0	0.040 1
60Si2Mn	0.456 0	0.017 3	0.762 2	0.030 7	0.866 1	0.034 6	1	0.035 3	1.014 3	0.033 1

3.2 表面腐蚀状况

腐蚀环境对材料疲劳极限的影响，用腐蚀系数 β_2 表示，即

$$\beta_2 = \frac{(\sigma_{-1})_c}{\sigma_{-1}} \quad (18.4-7)$$

式中 $(\sigma_{-1})_c$ —— 腐蚀环境中材料的疲劳极限；
 σ_{-1} —— 空气中光滑试样的疲劳极限。

图 18.4-86 为腐蚀环境对钢试样的旋转弯曲疲劳极限的腐蚀系数；图 18.4-87 为铸铁在淡水中的旋转弯曲的腐蚀系数。表 18.4-7 为 1Cr13 钢在各种腐蚀环境中的腐蚀系数。

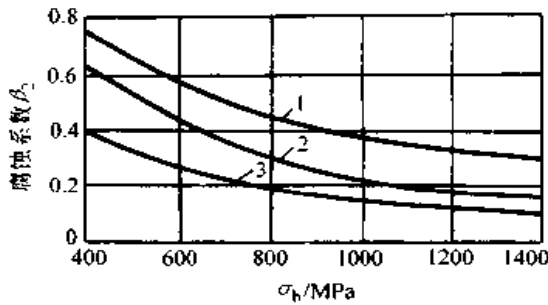


图 18.4-86 腐蚀环境对钢试样的旋转弯曲疲劳极限的影响系数

1—淡水中无应力集中 2—淡水中有应力集中，
 海水中无应力集中 3—海水中有应力集中

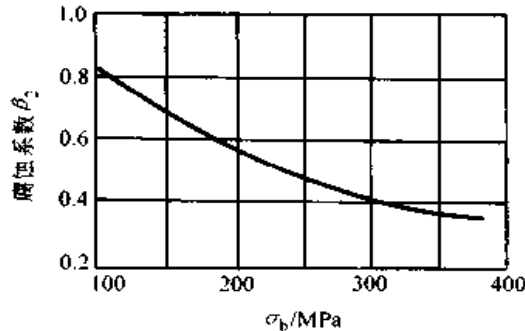


图 18.4-87 铸铁在淡水中的旋转弯曲的腐蚀系数

表 18.4-7 1Cr13 钢在各种腐蚀环境中的腐蚀系数

试验条件	试验温度 / t / °C	腐蚀系数 β_2
在蒸汽气氛中	—	0.54
在蒸汽和空气的密封容器中	75	0.84
在 0.1 MPa 的蒸汽中	100	0.89
在压力为 4.4 MPa 的蒸汽中	150	0.90
在压力为 11.3 MPa 的蒸汽中	180	0.89
在压力为 16.2 MPa 大气压的蒸汽中	370	0.89
在空气和湿蒸汽混合气体中	20	0.56

3.3 表面强化状况

由于机械零件的疲劳裂纹常开始于表层，所以强化表层是提高零件疲劳强度的有效方法。表面强化工艺可分为三类：①机械方法，如喷丸及辗压等；②化学方法，如渗碳及氮化等；③热处理，如高频、中频及工频电表层淬火，火焰淬火等。由此引入了表面强化系数 β_3 ，即

$$\beta_3 = \frac{(\sigma_{-1})_j}{\sigma_{-1}} \quad (18.4-8)$$

式中 $(\sigma_{-1})_j$ —— 经强化工艺试样的疲劳极限；
 σ_{-1} —— 未经强化工艺试样的疲劳极限。

各种强化工艺的强化系数 β_3 ，见表 18.4-8。

上述的表面加工系数 β_1 、表面腐蚀系数 β_2 和表面强化系数 β_3 ，总称为表面系数。在疲劳强度计算中，应根据具体情况选取相应的 β 值。例如，零件如只经过切削加工，则 $\beta = \beta_1$ ；如零件又经过强化，则 $\beta = \beta_3$ ；如零件在腐蚀介质中工作，则 $\beta = \beta_2$ ，不必将各 β 值相乘。

表 18.4-9~表 18.4-16 给出感应加热淬火、渗氮、渗碳、辗压等强化处理后的疲劳试验结果。

表 18.4-8 表面强化系数 β_3 荐用值

强化方法	心部强度 σ_b / MPa	钢试样的表面强化系数 β_3		
		光滑试样	有应力集中的试样	
			$K_s \leq 1.5$ 时	$K_s \geq 2.0$ 时
高频淬火	600~800	1.3~1.5	1.4~1.5	1.8~2.2
	800~1000	1.2~1.4	1.5~2.0	—

续表 18.4.8

强化方法	心部强度 σ_b / MPa	钢试样的表面强化系数 β_s		
		光滑试样	有应力集中的试样	
			$K_\sigma \leq 1.5$ 时	$K_\sigma \geq 2.0$ 时
氮化	900~1200	1.1~1.3	1.5~1.7	1.7~2.1
渗碳	400~600	1.8~2.0	3	—
	700~800	1.4~1.5	—	—
	1000~1200	1.2~1.3	2	—
辊压	600~1500	1.1~1.4	1.4~1.6	1.6~2.0
喷丸	600~1500	1.1~1.4	1.4~1.6	1.6~2.0
镀锌	—	0.5~0.7		
镀镍	—	0.5~0.9		
镀锌(热浸法)	—	0.6~0.95 (电镀法取 $\beta_s = 1.0$)		
镀铜	—	0.9		

表 18.4.9 感应淬火对圆柱钢试样对称弯曲疲劳极限的影响

表面硬度 HV	表面层厚度 t / mm	相对厚度 t/R	疲劳极限	
			MPa	%
250	—	—	380	100
650~800	1.5	0.1875	590	155
650~800	1.9	0.2375	598	157
650~850	3.3	0.4125	664	175

注：材料为 $w(\text{C}) = 0.46(\%)$ 碳钢， $d = 2R = 16 \text{ mm}$ ， $\sigma_b = 771 \text{ MPa}$ 。

表 18.4.10 感应淬火对 $w(\text{C}) = 0.4\%$ 碳钢光滑和缺口试样旋转弯曲疲劳极限的影响 (硬化层厚度 1.2 mm)

处理型式	试样型式	疲劳极限		处理型式	试样型式	疲劳极限	
		MPa	%			MPa	%
正火	光滑	245	100	正火	缺口, 1.2 mm 深	133	100
表面硬化	光滑	425	173	表面硬化	缺口, 1.2 mm 深, 硬化前加工	285	214
正火	缺口, 0.4 mm 深 ^①	148	100	表面硬化	缺口, 1.2 mm 深, 硬化后加工	302	227
表面硬化	缺口, 0.4 mm 深 ^①	422	282	正火	孔, $d = 3.6 \text{ mm}$	145	100
正火	缺口, 0.8 mm 深 ^①	143	100	表面硬化	孔, $d = 3.6 \text{ mm}$	245	169
表面硬化	缺口, 0.8 mm 深, 硬化前加工	375	262	正火	带压配轴套	142	100
表面硬化	缺口, 0.8 mm 深, 硬化后加工	382	269	表面硬化	带压配轴套	365	259

注：① 半径 0.3 mm 的 U 形缺口。

表 18.4-11 渗氮和渗碳的强化系数 β_3

表面处理	厚度 t/mm	硬度 HV	试样型式	试样直径/mm	β_3
渗氮	0.1~0.4	700~1 000	光滑	8~15	1.15~1.25
	0.1~0.4	700~1 000	光滑	30~40	1.10~1.15
	0.1~0.4	700~1 000	缺口	8~15	1.90~3.00
	0.1~0.4	700~1 000	缺口	30~40	1.30~2.00
渗碳	0.2~0.8	670~750	光滑	8~15	1.2~2.1
	0.2~0.8	670~750	光滑	30~40	1.1~1.5
	0.2~0.8	670~750	缺口	8~15	1.5~2.5
	0.2~0.8	670~750	缺口	30~40	1.2~2.5

表 18.4-12 氮化与未氮化的疲劳极限
(MPa)

材 料	未氮化		氮 化	
	光滑试样	缺口试样	光滑试样	缺口试样
普通铸铁	215	156	264	313
球墨铸铁	245	171	269	342
2Cr13	—	225	—	402

表 18.4-13 渗碳钢试样的旋转弯曲疲劳极限
(MPa)

材 料	光滑试样		缺口试样 ^① 处理后
	处理前	处理后	
$w(\text{C}) = 0.20\%$ 钢	195	415	260
$w(\text{C}) = 0.35\%$ 钢	220	470	370
Cr-Ni 钢	300	660	370

注：试样直径 $d = 10 \text{ mm}$ ，渗碳深度 $1.0 \sim 1.2 \text{ mm}$ ，渗碳温度 $1 050^\circ\text{C}$ 。

① 缺口半径 $R = 0.75 \text{ mm}$ 。

表 18.4-14 辊压对不同尺寸钢试样旋转
弯曲疲劳极限的影响

钢材硬度 HV	硬化层 相对厚度	直径/ mm	疲劳极限		硬度增量 HV
			MPa	%	
12CrN3A 315~325 FOCT	—	6.5	500	100	—
	—	35	430	100	—
	0.057	6.5	550	110	20
	0.057	35	480	112	65
	0.114	6.5	580	116	25
	0.114	35	500	116	95

续表 18.4-14

钢材硬度 HV	硬化层 相对厚度	直径/ mm	疲劳极限		硬度增量 HV
			MPa	%	
12CrN3A 315~325 FOCT	0.170	6.5	610	122	55
	0.170	35	530	123	95
37CrN3A 360~365 FOCT	—	6.5	640	100	—
	—	35	560	100	—
	0.057	6.5	700	109	20
	0.057	35	600	107	10
	0.114	6.5	720	112	50
	0.114	35	580	104	45
18CrNWA 325~370 FOCT	0.170	6.5	720	112	35
	0.170	35	650	116	70
	—	6.5	570	100	—
	—	35	480	100	—
	0.057	6.5	680	119	80
0.057	35	550	114	105	
	0.110	6.5	640	112	60
	0.170	6.5	670	117	75

表 18.4-15 42CrMo 钢辊压前后
的疲劳极限 ($N = 10^6$) (MPa)

静 强 度		疲劳极限 ($N = 10^6$)	
σ_s	σ_b	未辊压	辊压
853	963	618	689
880	1 044	591	698
982	1 145	532	731

表 18.4-16 各种组织的铸铁的辗压效果

组织状态	辗压力/ N	弯曲疲劳极限/MPa		提高率/ %
		辗压前	辗压后	
珠光体 + 片状石墨	353	115	139	20
铁素体 + 片状石墨	490	61	131	114
珠光体 + 球状石墨	1 804	193	468	142
铁素体 + 球状石墨	1 451	123	360	193

4 载荷状况

载荷状况影响包括载荷类型、载荷频率、载荷变化情况及平均应力等。

4.1 载荷类型影响

机械零件承受载荷类型有拉、压、弯、扭及上4种的组合作用。疲劳数据中多用旋转弯曲疲劳试验获得的。在缺少其它加载方式的试验数据时，用载荷系数 C_L 来修正。一般取拉、压的载荷系数 $C_L = 0.85$ ，扭转的载荷系数 $C_L = 0.58$ 。

对于重要的零构件，应该用相同载荷类型下试验得到的数据来进行计算或设计。

4.2 载荷频率影响

对于高周疲劳，在空气中，室温下进行试验，频率对疲劳极限影响很小。只有腐蚀环境或高温条件下试验时，频率对疲劳极限影响很大。图 18.4-88 是几种材料的频率和疲劳极限曲线。由图可见，当频率小于 1 000 Hz 时，疲劳极限随着频率的增加稍有增加，其后出现最大值。当频率再增加时，疲劳极限下降。

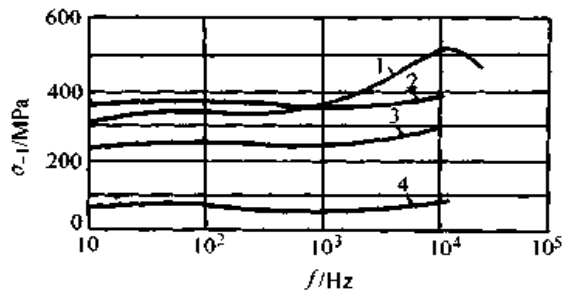


图 18.4-88 载荷频率对金属疲劳极限的影响
1— $w(C) = 0.86\%$ 碳素钢 2— $w(C) = 0.11\%$ 碳素钢 3—铜 4—铝

因此，在室温下工作的机械，一般不考虑频

率的影响。但是，在腐蚀及高温环境下工作的机械必须考虑频率的影响。

图 18.4-89 是 20Cr 钢的试验频率和腐蚀系数的关系曲线。

图 18.4-90 是铸钢 ZG20SiMn 和 ZG0Cr13-Ni4Mo 在淡水介质中腐蚀疲劳极限与试验频率的关系曲线。

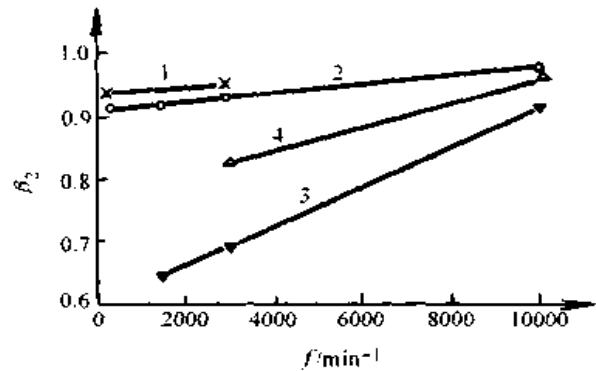


图 18.4-89 20Cr 钢试验频率对疲劳强度影响
1—在航空油中，试样磨光 2—在航空油加 2% 油酸中，试样磨光 3—在淡水加 2% 异戊醇中，试样磨光 4—在淡水加 2% 异戊醇中，试样车削

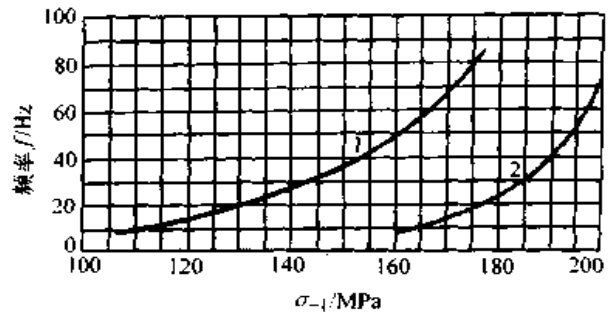


图 18.4-90 试验频率对铸钢在淡水介质的腐蚀疲劳强度的影响
1—铸造结构钢 ZG20SiMn
2—铸造不锈钢 ZG0Cr13Ni4Mo

4.3 载荷峰值影响

在随机载荷中的工作应力，有时偶然连续超过材料的疲劳极限，这种情况称为过载。少量次数的过载应力，可使材料应变强化和产生残余压应力，使疲劳极限提高，但循环次数超过一临界值后，因造成损伤而使疲劳极限明显降低。低于该临界值，则不造成疲劳损伤。

在低于材料疲劳极限某些应力水平运转一定

循环次数后, 可使疲劳极限明显提高, 这种现象称为低载锻炼。低载锻炼的效果, 决定于材料的机械性能、锻炼的应力水平和循环次数。应力越接近疲劳极限, 锻炼的效果越明显。

在随机载荷中, 每一应力循环的应力峰值和谷值是随机变化的, 这时不仅存在过载和低载应

力大小的影响, 而且受到加载顺序的影响。

4.4 平均应力影响

不同的平均应力可用应力比 R 反映出来。表 18.4-17 和表 18.4-18 是国产钢在不同应力比下的拉-压和扭转的疲劳极限。

表 18.4-17 7 种国产钢不同应力比下的拉-压疲劳极限 (MPa)

材 料	α_s	应力比 $r = -1$		应力比 $r = 0$		应力比 $r = 0.3$		应力比 $r = 1$	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
Q345 (热轧)	1	269	9.4	377	23.1	431	17.5	533	6.7
	2	169	5.7	327	7.6	421	11.4	734	15.3
	3	109	3.2	218	8.5	257	12.2	875	7.2
35 (正火)	1	177	9.4	291	11.2	388	7.5	606	10.0
	2	131	6.6	243	10.6	313	16.3	730	7.8
	3	96	4.8	192	5.9	252	12.7	839	15.5
45 (调质)	1	269	8.6	436	13.4	517	22.5	762	36.7
	2	173	7.1	334	12.3	418	19.7	922	32.8
	3	103	4.4	187	8.5	277	13.9	1 178	43.7
45 (正火)	1	219	8.9	346	9.2	346	23.3	577	24.8
	2	165	5.7	313	12.2	399	18.6	782	14.8
	3	121	4.1	208	8.2	274	5.0	871	10.3
40Cr (调质)	1	345	17.3	629	44.7	671	25.3	855	21.4
	2	257	8.5	431	18.0	555	21.2	1 209	34.6
	3	163	1.6	257	6.0	337	8.3	1 358	38.3
40CrNiMo (调质)	1	499	4.5	805	18.7	856	31.0	1 001	74.6
	2	276	4.8	490	20.7	599	14.6	1 139	26.4
	3	188	5.9	322	14.3	439	17.2	1 383	18.9
60Si2Mn (淬火后 中温回火)	1	487	26.3	749	33.8	1 118	29.0	1 442	31.4
	2	338	14.8	527	21.0	701	24.3	1 777	71.5
	3	215	10.4	356	20.7	468	33.0	2 041	70.5

表 18.4-18 两种国产钢不同应力比下的扭转疲劳极限 (MPa)

材 料	α_s	应力比 $r = -1$		应力比 $r = 0$		应力比 $r = 0.3$		应力比 $r = 1$	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
45 (正火)	1	233	5.6	450	18.7	—	—	317	7.1
	2	101	5.9	189	12.1	264	5.3	603	18.5
	3	119	5.1	177	6.9	239	6.7	556	10.7
40Cr (调质)	1	314	15.5	574	9.5	—	—	609	48.0
	2	141	3.4	235	6.9	319	10.0	794	42.0
	3	145	4.6	199	8.0	243	7.3	782	30.9

对于有平均应力时的载荷称不对称载荷, 其相应的应力称不对称循环应力。在进行强度计算时, 常将不对称循环应力折算成等效的对称循环

应力。等效应力幅 $\sigma_A = \sigma_s + \psi \sigma_m$, ψ 称不对称循环度系数或平均应力影响系数。

表 18.4-19 是 7 种国产材料的平均应力影响

系数。图 18.4-91 和图 18.4-92 是国产 45 钢和 40Cr 在 3 种应力集中系数下的疲劳极限线图（或称等寿命曲线图）。图 18.4-93 是不同应力集中系数对平均应力影响系数的影响曲线。应用图 18.4-93 曲线可查出不同应力集中下的 ψ_σ 值。在缺少数据情况下，用光滑试样的 ψ_σ 值来代替有应力集中条件下的 ψ_σ ，对于设计来说是偏于安全的。

其他加载情况和表面状态条件对 ψ_σ 值也有影响，见表 18.4-20 和表 18.4-21。

表 18.4-19 7 种国产钢的平均应力影响系数 (MPa)

材 料	热处理	α_σ	平均应力影响系数 ψ_σ		
			$r=0$	$r=0.3$	$r=1$
Q345	热轧	1	0.43	0.42	0.50
		2	0.04	0.08	0.23
		3	0.003	0.12	0.12
35	正火	1	0.22	0.17	0.29
		2	0.08	0.11	0.18
		3	0.014	0.048	0.11
45	正火	1	0.26	0.43	0.38
		2	0.06	0.10	0.21
		3	0.17	0.14	0.14
45	调质	1	0.23	0.26	0.35
		2	0.034	0.10	0.19
		3	0.10	0.034	0.09
40Cr	调质	1	0.10	0.25	0.40
		2	0.20	0.17	0.21
		3	0.27	0.21	0.12
40CrNiMo	调质	1	0.24	0.36	0.50
		2	0.12	0.17	0.24
		3	0.16	0.12	0.14
60Si2Mn	淬火后 中温回火	1	0.23	0.13	0.34
		2	0.28	0.20	0.19
		3	0.21	0.17	0.11

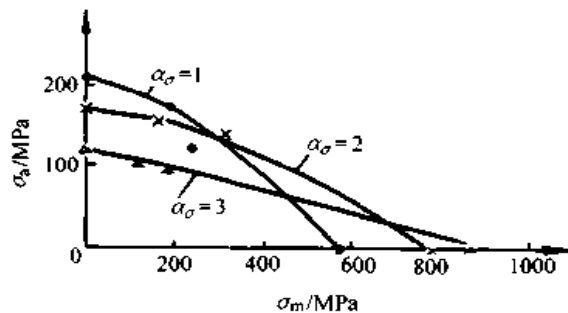


图 18.4-91 45 钢在不同应力集中系数下的疲劳极限线图 ($N = 10^7$)

45 钢经正火，其 $\sigma_b = 612$ MPa， $\sigma_s = 361$ MPa

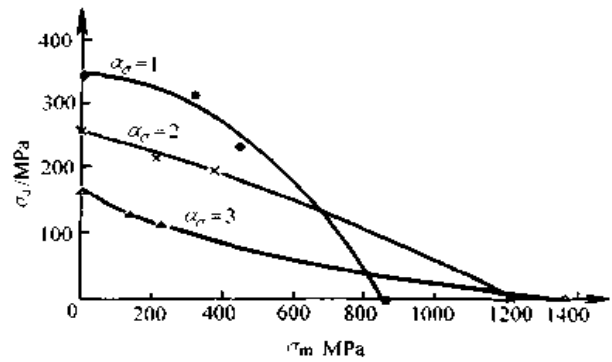


图 18.4-92 40Cr 在不同应力集中系数下的疲劳极限线图 ($N = 10^7$)

40Cr 经调质，其 $\sigma_b = 858$ MPa， $\sigma_s = 673$ MPa

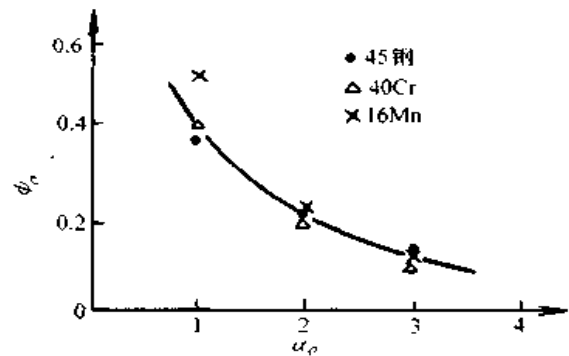


图 18.4-93 应力集中系数与平均应力影响系数 ψ_σ 的关系曲线

表 18.4-20 钢的系数 ψ_σ 和 ψ_τ

应力种类	系数	表面状态				
		抛光	磨削	车削	热轧	锻造
弯曲	ψ_σ	0.50	0.43	0.34	0.215	0.14
拉压	ψ_σ	0.41	0.36	0.30	0.18	0.10
扭转	ψ_τ	0.33	0.29	0.21	0.11	0.05

表 18.4-21 铸铁和铝合金的系数 ψ_σ 和 ψ_τ

材 料	ψ_σ			ψ_τ
	弯曲	拉压	扭转	
铸 铁	0.49	0.41	0.48	
铝 合 金	0.335	0.335	0.335	

第 5 章 常规疲劳强度设计

1 概述

试件和零件在高于 $10^4 \sim 10^5$ 次以上载荷循环而产生的疲劳，称为高周疲劳。对于高周疲劳通常采用常规疲劳强度设计方法。

常规疲劳强度设计是以名义应力为基本设计参数的抗疲劳设计方法，也称名义应力法。

它是假设零构件没有初始裂纹，应用标准试样试验得到的疲劳极限、S-N 曲线及疲劳极限图等，再考虑零构件由于尺寸、表面状态及几何形状引起的应力集中等影响因素而进行的疲劳强度设计。把 S-N 曲线用双对数坐标表示时，是由两根直线组成的折线。按水平线部分进行设计称无限寿命设计；按斜线部分进行设计称有限寿命设计。

无限寿命设计要求零构件在无限长的使用期间内不发生疲劳破坏。因此要将零构件的工作应力限制在它的疲劳极限以下，就可以得到零构件的寿命在理论上是无限的。用这种准则进行设计常造成零构件结构尺寸大，过于笨重。但对于长时间运转的零构件，仍是一个较好的设计准则。

有限寿命设计，也称安全寿命设计。它保证机器在一定使用期限内安全运行，所以它允许零构件的工作应力超过其疲劳极限。其基本依据是材料或零构件的 S-N 曲线的斜线部分。计算的重点是零构件的裂纹形成寿命。这种设计准则能

充分利用材料的承载能力，减小零构件的截面尺寸，减轻质量。对于如飞机、汽车等要求减轻质量、更新速度快的产品有重要意义

对于有限寿命设计来说，疲劳损伤累积理论是其重要依据。而对于无限寿命设计则主要是计算其安全系数。

2 安全系数

一般的疲劳强度计算中，许用安全系数推荐用表 18.5-1 的数值。

表 18.5-2 为初算时的安全系数荐用值。

表 18.5-3 为各类机械零部件的安全系数。

表中所用符号： $n_{1p} = \frac{\sigma_b}{\sigma_p}$ ； $n_{sp} = \frac{\sigma_s}{\sigma_p}$ ； $n_{-1p} =$

$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_p}$ ； $n_{0p} = \frac{\sigma_0}{\sigma_p}$ （其中， σ_b —材料的抗拉强度； σ_s —材料的屈服强度； σ_{-1} —对称循环疲劳极限； σ_0 —脉动循环疲劳极限；下角 p 为“许用”）。校核零件的疲劳强度，必须使它同时满足静强度要求。

表 18.5-1 许用安全系数

情 况	n_{-1p}
材料较均匀，载荷及应力较精确时	1.3
材料不够均匀，载荷及应力计算精度较差	1.5~1.8
材料均匀度很差，计算精度很差	1.8~2.5

表 18.5-2 安全系数荐用值（初算用）

材 料	静 载 荷		冲 击 载 荷		疲 劳 载 荷				
	n_{bp}	n_{sp}	n_{bp}	n_{sp}	n_{1p}		n_{-1p}		
					一般零件	重要零件	一般零件	重要零件	
铸 铁	3~4	—	10~15	—	8~10	12~15	—	—	
高强度钢	2~3	—	—	—	—	—	—	—	
结 构 钢	2.4~2.6	$\sigma_s/\sigma_b = 0.45 \sim 0.6$ ，计算精确	1.2~1.5	2.0~2.8	1.5~2.2	5.0	7	1.3	1.5
		$\sigma_s/\sigma_b = 0.6 \sim 0.8$ ，计算精度一般	1.4~1.8	2.5~4.0	2.0~2.8	5.5	8	1.5	1.8
		$\sigma_s/\sigma_b = 0.8 \sim 0.9$ ，计算不精确	1.7~2.2	3.5~5.0	2.5~3.5	6.0	10	1.8	2.5

注：① 重要零件是指在整个使用期内不希望破坏的零件。

表 18.5-3 各类机械零件的许用安全系数

机械种类	零部件名称	应力状态	材 料	安全系数	附 注
起重机械	主梁	弯	Q235A, Q345	$n_{sp} = 1.4 \sim 1.6$ $n_{1p} = 1.4 \sim 1.6$	运送液态金属的 起重机用 1.6 手动, $n_{sp} = 1.3$. 吊钢水包 $n_{sp} = 1.6$
	端梁	弯	Q235A, Q345	$n_{sp} = 2.4$	
	小车梁	弯	Q235A, Q345	$n_{sp} = 3 \sim 4$	
	卷筒轴	弯曲疲劳	45	$n_{sp} = 1.3 \sim 1.6$, $n_{1p} = 1.8$	
	减速机低速轴	弯扭疲劳	45	$n_{sp} = 1.6$, $n_{1p} = 1.8$	
	卷筒轴承侧法兰螺栓	拉伸疲劳	Q235A	$n_{sp} = 3, n_{0p} = 2.5$	
	吊钩钩体	拉、弯	20, 36Mn2Si	$n_{sp} = 1.6$	
	吊钩螺纹尾部	拉	20, 36Mn2Si	$n_{sp} = 5 \sim 7$	
	吊钩梁	弯	45	$n_{sp} = 3$	
	拉板	拉、挤压	Q345	$n_{sp} = 1.6$	
	吊钩滑轮轴	弯	45	$n_{sp} = 1.6$	
	小车轮轴	弯扭疲劳	45	$n_{sp} = 1.4$, $n_{1p} = 1.6$	
大车轮轴	弯扭疲劳	45	$n_{sp} = 1.4$, $n_{1p} = 1.6$		
矿山机械	矿井提升机卷筒	弯, 压	Q235A, Q345	$n_{sp} = 1.4 \sim 1.6$	
	矿井提升机主轴	弯扭疲劳	45	$n_{1p} = 1.2 \sim 1.5$	
	颚式破碎机机架	弯曲疲劳	ZG270-500	$n_{0p} = 1.5$	
	颚式破碎机传动轴	弯扭疲劳	45	$n_{1p} = 1.5$	
	颚式破碎机主轴	弯扭疲劳	45	$n_{1p} = 1.4$	
	圆锥破碎机传动轴	弯扭疲劳	45	$n_{1p} = 1.4$	
	圆锥破碎机主轴	弯扭疲劳	24CrMoV	$n_{1p} = 2$	
	圆锥破碎机液压缸体	内压	ZG270-500	$n_{sp} = 2 \sim 2.4$	
球磨机筒体	弯	Q235A, 20	$n_{sp} = 3.5 \sim 4$		
冶金机械	轧钢机机架 (初轧机)	弯、拉、拉伸疲劳	ZG270-500	$n_{0p} = 6 \sim 8$	$n_{0p} = 1.6$
	轧钢机机架 (板热轧机)	弯、拉、拉伸疲劳	ZG270-500	$n_{1p} = 7 \sim 10$	$n_{0p} = 1.7$ (厚板)
	轧钢机机架 (板冷轧机)	弯、拉	ZG270-500	$n_{1p} = 8 \sim 12$	考虑刚度
	轧钢机轧辊 (初轧机辊身)	弯扭疲劳	60CrMnMo, 60CrMo, 55CrMo	$n_{0p} = 6 \sim 8$	$n_{1p} = 1.8$
	轧钢机轧辊 (热轧板工作辊)	弯扭疲劳	HT250, 球铁	$n_{0p} = 6.5$	$n_{1p} = 1.5 \sim 2.5$
	冷轧薄板工作辊	弯扭疲劳	9Cr2	$n_{1p} = 1.1$	
	热轧板支承辊	弯曲疲劳	37SiMn2MoV, 8CrMoV, 40Mn2MoV	$n_{0p} = 6$	$n_{1p} = 1.2 \sim 2$

续表 18.5-3

机械种类	零部件名称	应力状态	材 料	安全系数	附 注
冶 金 机 械	冷轧板支承辊	弯曲疲劳	9Cr2, 9Cr2Mo	$n_{-1p} = 1.2$	
	轧钢机的机架辊	弯扭疲劳	45	$n_{1p} = 6$	$n_{-1p} = 1.8$
	轧钢机万向接轴	弯扭疲劳	45CrV	$n_{-p} = 3$	$n_{-1p} = 2.0$
	轧钢机万向接轴叉头	弯扭疲劳	45CrV	$n_{-p} = 2.6$	$n_{-1p} = 1.8$
	六连杆式热剪机的上剪股	弯曲疲劳	ZG35CrMo, 32SiMn2MoV	$n_{-p} = 2$	$n_{op} = 1.5$
	六连杆式热剪机的下剪股	弯曲疲劳	ZG35CrMo, 32SiMn2MoV	$n_{-p} = 3$	$n_{op} = 1.6$
	六连杆式热剪机的偏心轴	弯扭疲劳	40	$n_{-p} = 3$	$n_{-1p} = 2.0$
	六连杆式热剪机的连杆	拉压弯	40	$n_{-p} = 3$	
	六连杆式热剪机的传动轴	弯扭疲劳	35CrMo, 35SiMn2MoV	$n_{-p} = 3$	$n_{-1p} = 2.5$
	摆式飞剪机曲轴	弯扭疲劳	35SiMn2MoV	$n_{-1p} = 2$	
	辊式矫直机的工作辊辊身	弯扭疲劳	9Cr2, 60CrMoV	$n_{-p} = 4 \sim 12$	考虑刚度
	辊式矫直机的支承辊辊身	弯扭疲劳	9Cr2	$n_{-p} = 3 \sim 6$	考虑刚度
	辊式矫直机的支承辊辊颈	扭	9Cr2	$n_{-p} = 1.7$	
	辊式矫直机的支承辊小轴	弯	42MnMoV	$n_{-p} = 2$	
	辊式矫直机的机架(铸铁)	弯	HT250	$n_{bp} = 6$	
	辊式矫直机的机架(钢)	弯	Q235A	$n_{-p} = 3$	
	辊式矫直机的机架盖	弯	Q235A	$n_{bp} = 5$	
	辊式矫直机万向接轴	弯扭疲劳	35SiMn	$n_{-p} = 4 \sim 5$	$n_{-1p} = 1.6$
	辊式矫直机压下螺杆	扭、压	45, 35SiMn	$n_{-p} = 2.7$	
	辊式矫直机拉杆	拉	35SiMn	$n_{-p} = 3$	
高炉大钟拉杆	拉	20	$n_{-p} = 5$	考虑温度	
转炉托圈	弯	—	$n_{-p} = 8$	考虑温度	
转炉耳轴	弯	40Cr, 38SiMnV	$n_{-p} = 3$		
盛钢桶桶体	内压	Q235A	$n_{-p} = 2.5$	$n_{-1p} = 2$	
盛钢桶耳轴	弯	ZG270-500	$n_{-p} = 7$		
铁水车减速机轴	弯扭疲劳	—	$n_{-1p} = 2.3$		
锻 压 机 械	水压机立柱(光滑部分)	拉、弯	40, 45, 20MnV, 20SiMnMo	$n_{-p} = 1.7 \sim 2$	
	水压机立柱(螺纹部分)	拉、弯	40, 45, 20MnV, 20SiMnMo	$n_{-p} = 4 \sim 5$	$n_{-1p} = 1.5$
	水压机上横梁	弯	ZG270-500, Q235A	$n_{bp} = 6 \sim 8$	$n_{-1p} = 1.4 \sim 1.6$
	水压机活动横梁	弯	Q235A	$n_{bp} = 5 \sim 6$	
	水压机下横梁	弯	Q235A	$n_{bp} = 8 \sim 12$	

续表 18.5-3

机械种类	零部件名称	应力状态	材 料	安全系数	附 注
锻 压 机 械	水压机液压缸缸体	内压	35, 45, 20MnV, Q345 (12MnV)	$n_{sp} = 2 \sim 3$	有冲击时 $n_{sp} = 3 \sim 4$ $n_{bp} = 4 \sim 5$ $n_{sp} = 3 \sim 4.5$ $n_{sp} = 3 \sim 4.5$ $n_{sp} = 2.5$ $n_{sp} = 2.5$ $n_{sp} = 2.0$ $n_{bp} = 5$ $n_{sp} = 2.5$ $n_{-1p} = 1.6$
	水压机液压缸法兰	弯、压	35, 45, ZG35, 22MnMo	$n_{sp} = 2.2$	
	水压机液压缸柱塞	内压	45	$n_{sp} = 2.2$	
	水压机高压水罐	内压	20, 14CrMnMoV	$n_{sp} = 2$	
	水压机充水罐	内压	Q235A	$n_{sp} = 3$	
	挤压机柱子 (光滑部分)	拉、弯	18MnMoNb	$n_{sp} = 2$	
	挤压机柱子 (螺纹部分)	拉、弯	18MnMoNb	$n_{sp} = 4$	
	挤压机机架	弯	Q235A, ZG270-500	$n_{sp} = 3 \sim 6$	
	挤压机主缸缸体	内压	18MnMoNb	$n_{sp} = 2.5 \sim 3$	
	挤压机动梁回程缸缸体	内压	18MnMoNb	$n_{sp} = 3 \sim 4.5$	
	挤压机穿孔缸缸体	内压	35SiMn, 18MnMoNb	$n_{sp} = 3 \sim 4.5$	
	挤压机穿孔回程缸缸体	内压	45	$n_{sp} = 2.5$	
	挤压机剪刀缸缸体	内压	45	$n_{sp} = 2.5$	
	挤压机移动缸缸体	内压	45	$n_{sp} = 2.0$	
	精压机传动轴	弯扭疲劳	35SiMn2MoV	$n_{-1p} = 2$	
	锻锤机架	弯、拉伸疲劳	ZG270-500	$n_{bp} = 5$	
锻锤拉杆	拉	40Cr, 35CrMnV	$n_{sp} = 2.5$		
热模锻曲轴	弯扭疲劳	40CrNi, 35SiMn2MoV	$n_{-1p} = 1.6 \sim 2$		
橡胶塑料机械	橡胶塑料辊机辊筒	弯扭疲劳	HT200	$n_{-1p} = 2.5 \sim 3$	冷硬铸铁
	橡胶塑料辊机机架	弯	HT250, HT300	$n_{bp} = 12$	$n_{np} = 5$
	橡胶塑料辊机机架盖	弯	HT250	$n_{bp} = 10$	$n_{np} = 4.5$
	橡胶塑料挤出机螺杆	扭	38CrMoAl	$n_{sp} = 3$	
	橡胶塑料挤出机机筒		38CrMoAl	$n_{sp} = 3$	考虑结构要求
内 燃 机	内燃机曲轴主轴颈	扭转疲劳	{ QT600-3, 45, 40MnB	$n_{-1p}^t = 3 \sim 4$	汽车发动机
	内燃机曲轴主轴颈	扭转疲劳	{ 40Cr, 40, 45Mn2	$n_{-1p}^t = 4 \sim 5$	拖拉机发动机
	内燃机曲轴主轴颈	扭转疲劳	{ 30MnMoW, 30Mn2MoTiB	$n_{-1p}^t = 2 \sim 3$	高增压柴油机
	内燃机曲轴曲柄销	弯扭疲劳	40Mn2SiV	$n_{-1p} = 1.3 \sim 1.5$	汽车发动机
	内燃机曲轴曲柄销	弯扭疲劳	15SiMn3MoWVA	$n_{-1p} = 1.5 \sim 2$	拖拉机发动机
	内燃机曲轴曲柄销	弯扭疲劳	37SiMnMoWV	$n_{-1p} = 1.2 \sim 1.4$	高增压柴油机
	内燃机曲轴曲柄臂	弯扭疲劳		$n_{-1p} = 2 \sim 3$	汽车发动机
	内燃机曲轴曲柄臂	弯扭疲劳		$n_{-1p} = 3 \sim 3.5$	拖拉机发动机
内燃机曲轴曲柄臂	弯扭疲劳		$n_{-1p} = 1.3 \sim 2$	高增压柴油机	

续表 18.5-3

机械种类	零部件名称	应力状态	材 料	安全系数	附 注
内 燃 机	内燃机活塞销	弯、剪	20, 20Cr, 20Mn2, 18CrMnTi, 20SiMnVB	$n_{sp} = 2 \sim 2.2$	渗碳
	内燃机连杆小头	弯压疲劳	45	$n_{-1p} = 2.5 \sim 5$	汽车发动机
	内燃机连杆杆身	弯压疲劳	40Cr	$n_{-1p} = 2 \sim 2.5$	拖拉机发动机
	内燃机连杆杆身	弯压疲劳	35CrMo	$n_{-1p} = 2.5 \sim 3$	船用中、高速柴油机
	内燃机连杆杆身	弯压疲劳	40MnVB	$n_{-1p} = 2 \sim 3$	高速强载柴油机
	内燃机连杆大头	弯压疲劳		$n_{-1p} = 2.0$	汽车、拖拉机发动机
	内燃机连杆大头	弯压疲劳		$n_{-1p} = 1.5$	高速强载柴油机
	内燃机连杆螺栓	拉伸疲劳	45, 40Cr, 35CrMo, 40MnVB	$n_{-1p} = 1.5 \sim 2$	
	汽缸体紧螺栓	拉伸疲劳	40Cr, 40MnB, 35CrMo, 40CrMo	$n_{-1p} = 1.3 \sim 2$	
气 体 压 缩 机	气体压缩机曲轴	弯扭疲劳	45	$n_{-1p} = 2 \sim 2.5$	$n_{sp} = 3 \sim 6$
	气体压缩机曲柄臂	弯扭疲劳	45	$n_{-1p} = 1.5$	
	气体压缩机连杆	弯扭疲劳	30	$n_{sp} = 3$	
	气体压缩机活塞杆	弯扭疲劳	45	$n_{1p} = 10$	
	气体压缩机高压缸阀腔	内压	40	$n_{-1p} = 1.4 \sim 2$	
汽 车 拖 拉 机	汽车变速箱轴	弯扭疲劳	40Cr, 40MnB, 18CrMnTi	$n_{-1p} = 1.3$	曲轴、连杆的安全系数见内燃机
	汽车后桥半轴	弯扭疲劳	40MnB, 35CrMnSiA	$n_{-1p} = 2$	
	拖拉机变速箱轴	弯扭疲劳	40, 18CrMnTi	$n_{-1p} = 2$	
	拖拉机传动轴	弯扭疲劳	40	$n_{-1p} = 1.3$	
	拖拉机履带驱动轮轴	弯扭疲劳	40Cr	$n_{-1p} = 1.1$	
水 轮 机	水轮机转轮叶片	拉、弯	ZG20SiMn, ZG0Cr13Ni4Mo	$n_{sp} = 2.5$, $n_{-1p} = 2$	
	水轮机主轴轴身	拉、弯、扭	45, 20SiMn	$n_{sp} = 2.5 \sim 3$	
	水轮机主轴法兰	弯、压	45, 20SiMn	$n_{sp} = 1.8 \sim 2.3$	
	水轮机导叶体	弯、扭	ZG270-500, ZG20SiMn	$n_{sp} = 2$	
	水轮机导叶体轴颈	弯、扭	ZG270-500, ZG20SiMn	$n_{sp} = 1.8$	
	水轮机导叶臂	弯、扭	ZG270-500	$n_{sp} = 1.8$	
	水轮机导叶套筒	弯	HT200	$n_{1p} = 10$	
	水轮机接力器缸体	内压	HT200	$n_{1p} = 10$	
	水轮机接力器油缸法兰	弯、压	HT200	$n_{1p} = 5$	

续表 18.5-3

机械种类	零部件名称	应力状态	材 料	安全系数	附 注
水 轮 机	水轮机涡壳	内压	Q235A, Q345 (16Mn), Q390 (15MnV, 15MnTi)	$n_{sp} = 1.8 \sim 2$	混流式水轮机 n_{-1p} 的数值随使用 年限而定, 对于使 用年限较短时, 可 取 $n_{-1p} = 1.5 \sim 1.8$
	水轮机顶盖和支持盖	弯	HT200, HT300	$n_{1p} = 8.5 \sim 10$	
	水轮机顶盖和支持盖	弯	ZG270-500	$n_{sp} = 2$	
	水轮机导水机构盖板	弯、拉	Q235A	$n_{sp} = 2$	
	水轮机联结板	弯、拉	Q235A	$n_{sp} = 2$	
	水轮机旋管、导管体	拉	Q235A	$n_{sp} = 2.5$	
	水轮机耳柄	拉	35, 40Cr	$n_{sp} = 2.5$	
	水轮机转臂	弯、挤压	35	$n_{sp} = 2.5$	
	水轮机连杆	拉、压	ZG270-500	$n_{sp} = 2$	
	水轮机活塞销, 连杆销	弯	35	$n_{sp} = 2$	
	水轮机叶销	剪切	45	$n_{sp} = 2$	
	水轮机联轴螺栓	弯、拉	35, 40Cr	$n_{sp} = 2.5$	
	水轮机叶片螺栓	弯、拉	35, 40Cr	$n_{sp} = 2$	
	水轮机分半键, 导向键	剪切	Q235A, 35	$n_{sp} = 2$	
	水轮机叶片键, 卡环	剪切	45	$n_{sp} = 2$	

3 疲劳累积损伤理论

3.1 基本概念

当材料或零件承受高于疲劳极限的应力时, 每一循环都使材料产生一定量损伤, 这种损伤能够累积, 当损伤累积到临界值时将发生破坏, 这就是疲劳损伤累积理论。

所谓损伤就是材料或零构件中细微“结构”的变化, 在循环应力作用下, 形成微裂纹, 并成长和合并, 导致材料的变质和恶化。损伤累积的结果, 往往产生宏观裂纹, 导致最终破断。

疲劳累积损伤理论, 归纳起来可分三大类:

1) 线性疲劳累积损伤理论 材料在各个应力下的疲劳损伤是独立进行的, 并且总损伤可以线性地累加起来。其中最有代表性的是帕姆格伦-迈因纳 (Palmgren - Miner) 理论。简称迈因纳理论。

2) 非线性疲劳累积损伤理论 基于假定载荷历程和损伤之间存在着相互的作用, 即在各个

应力下产生的损伤与前面应力作用的量值和次数有关。这一理论的代表是科尔顿和多兰 (Corten & Dolan) 理论。

3) 其他的累积损伤理论 大都是从实验、观测和分析推导出来的损伤公式, 多属于经验和半经验公式。如莱维 (Levy)、科津 (Kozin) 等理论即是。

线性累积损伤理论, 特别是迈因纳理论, 形式简单、使用方便, 在工程中得到了广泛的应用。

3.2 线性疲劳累积损伤理论

线性累积损伤理论认为, 材料在各个应力下的疲劳损伤是独立进行的, 并且总损伤可以线性地累加起来。

图 18.5-1 为疲劳损伤线性累积示意图。图 18.5-1a 为变化的应力, 图 18.5-1b 为 S-N 曲线。

应力 σ_1 作用 n_1 次, 在该应力水平下材料达到破坏的总循环次数为 N_1 。设 D 为最终断裂时的损伤临界值, 根据线性疲劳累积损伤理论, 应力 σ_1 每作用一次对材料的损伤为 D/N_1 , 经 n_1

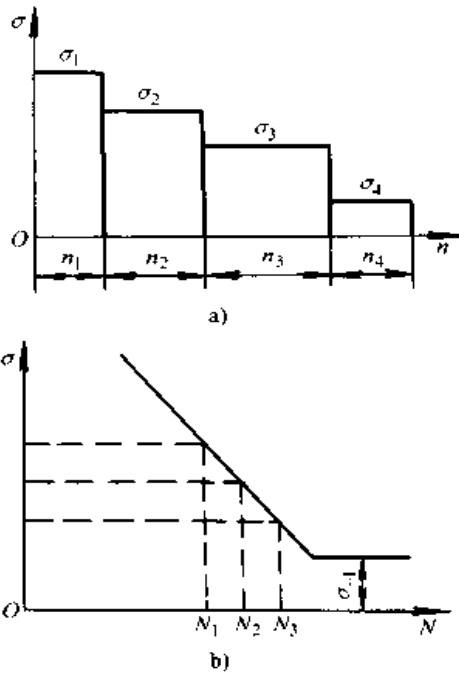


图 18.5-1 疲劳损伤线性累积示意图

次循环作用后， σ_1 对材料的总损伤为 $n_1 D/N_1$ 。同样可找出仅有 σ_2 作用时，材料发生破坏的应力循环数 N_2 ，应力 σ_2 每循环一次对材料的损伤为 D/N_2 ，经 n_2 次循环后， σ_2 对材料的总损伤应为 $n_2 D/N_2$ 。如此类推，应力 σ_3 ，循环作用 n_3 次，对材料造成的总损伤为 $n_3 D/N_3$ 。应力 σ_4 小于材料疲劳极限 σ_{-1} ，它可以作用无限次循环而不引起材料疲劳损伤，计算中可以不予考虑。

当各级应力对材料的损伤总和达到临界值 D 时，材料即发生破坏。用公式表示为

$$\frac{n_1 D}{N_1} + \frac{n_2 D}{N_2} + \frac{n_3 D}{N_3} = D$$

或写成
$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1$$

上面的关系式推广到更普遍的情况时，即有

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1$$

或写成
$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (18.5-1)$$

式 (18.5-1) 称为线性疲劳累积损伤方程式。迈因纳理论与试验结果并不完全相符合。这是因为疲劳损伤的累积不但决定于当前的应力状

况，而且还和过去作用的应力历史有关。即材料以前作用的应力历史，对以后应力作用下损伤有干涉效应。另外，加载顺序对损伤有明显影响。先作用高应力还是先作用低应力，所得结果不一样。因而使得式 (18.5-1) 的右边不等于 1，而等于某一数值 a 。数值 a 是在某一区间内变化。

a 值取 0.7 时，其寿命估算结果比迈因纳公式计算更安全，从总体上看其寿命估算精度也有提高。

3.3 相对迈因纳 (Miner) 法则

由于上述的迈因纳法则没有考虑载荷次序和残余应力的复杂非线性相互影响，因而分散性很大。其 a 值在 0.3~10 之间变化。而相对迈因纳法则一方面保留了迈因纳法则中第一个假设，即线性累积假设，另一方面又避开了累积损伤 $a = 1$ 的第二个假设。

相对迈因纳法则的数学表达式为

$$N_A = N_B \frac{\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B}{\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_A} \quad (18.5-2)$$

式中 N_A —— 载荷谱 A 作用下估算的疲劳裂纹形成寿命；
 N_B —— 载荷谱 B 作用下估算的疲劳裂纹形成寿命；

$\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_A$ —— 载荷谱 A 的计算累积损伤；
 $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$ —— 载荷谱 B 的计算累积损伤。

式 (18.5-2) 表明，只要两个谱的载荷历程相似，则两个谱的寿命之比等于它们的累积损伤之比的倒数。

使用相对迈因纳法则的关键是确定相似谱 B。其中有两点假设：①相似谱 B 的主要峰谷顺序应和计算谱 A 相近或相同（保证相似谱能模拟计算谱的载荷次序特征）；②相似谱 B 的主要峰谷大小和计算谱 A 成比例或近似成比例。比例因子最好接近 1，以便保证相似谱能够模拟计算谱在缺口根部造成的塑性变形。

用相对迈因纳法则计算和试验结果比较可见，能大幅度消除迈因纳法则计算数值引起的误差。提高其计算精度。

4 无限寿命设计

4.1 单向应力时无限寿命设计

零部件受单向循环应力，是指只承受单向正应力或单向切应力。例如，只承受单向拉压循环应力、弯曲循环应力或扭转循环应力。在单向循

环应力下工作的零部件很多，如高炉上料机的钢丝绳受单向波动拉伸应力，曲柄压力机的连杆受单向脉动应力。只承受弯曲力矩的心轴，转动时表面上各点的应力状态是对称循环弯曲应力等。

4.1.1 计算公式

表 18.5-4 中列出了不同受载情况下单向应力时安全系数的计算公式。

表 18.5-4 单向应力时安全系数计算式

受载情况	弯曲或拉压时的安全系数	扭转时的安全系数
恒幅对称循环	$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \frac{\epsilon \beta}{\epsilon \beta} \sigma_a}$	$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{K_\tau \frac{\epsilon \beta}{\epsilon \beta} \tau_a}$
恒幅不对称循环	$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \frac{\epsilon \beta}{\epsilon \beta} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m}$	$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{K_\tau \frac{\epsilon \beta}{\epsilon \beta} \tau_a + \psi_\tau \tau_m}$
变幅对称循环	$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_\sigma}{\epsilon \beta} \sqrt{\frac{N}{N_0}} \sum_i \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{dmax}} \right)^m \frac{n_i}{N} \cdot \sigma_{dmax}}$	$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\frac{K_\tau}{\epsilon \beta} \sqrt{\frac{N}{N_0}} \sum_i \left(\frac{\tau_i}{\tau_{dmax}} \right)^m \frac{n_i}{N} \cdot \tau_{dmax}}$
变幅不对称循环	$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sqrt{\frac{N}{N_0}} \sum_i \left(\frac{\sigma_{di}}{\sigma_{dmax}} \right)^m \frac{n_i}{N} \cdot \sigma_{dmax}}$	$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\sqrt{\frac{N}{N_0}} \sum_i \left(\frac{\tau_{di}}{\tau_{dmax}} \right)^m \frac{n_i}{N} \cdot \tau_{dmax}}$

表 18.5-4 计算公式中的符号为

- n_σ 、 n_τ —— 计算的安全系数；
- σ_{-1} 、 τ_{-1} —— 材料在对称循环下的疲劳极限，弯曲时为 σ_{-1} ，拉压时为 σ_{-1} ，扭转时为 τ_{-1} ；
- K_σ 、 K_τ —— 弯曲和扭转时的有效应力集中系数；
- ϵ —— 尺寸系数；
- β —— 表面系数；
- ψ_σ 、 ψ_τ —— 不对称循环度系数，一般计算式为 $\psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}$ ， $\psi_\tau = \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0}$ ；
- σ_0 、 τ_0 —— 弯曲和扭转时的脉动循环疲劳极限；
- σ_i 、 τ_i —— 作用试样上的第 i 个应力水平；
- n_i —— 第 i 个应力水平 σ_i 或 τ_i 作用时的循环数；

- σ_{dmax} 、 τ_{dmax} —— 载荷谱中的最大应力；
- N_0 —— 无限寿命的最小循环数，即循环基数；
- N —— 总寿命，即整个工作循环数；
- m —— 材料常数，即 S-N 曲线在对数坐标中的倾斜率的负值，即 $m = -\frac{\lg N_i}{\lg \sigma_i}$ ；
- N_i —— 在应力水平 σ_i 作用下，材料达到疲劳破坏的循环数；
- σ_{di} 、 τ_{di} —— 第 i 个当量应力，计算式为

$$\sigma_{di} = \left[\frac{K_\sigma}{\epsilon \beta} (\sigma_a)_d \right]$$

$$\tau_{di} = \left[\frac{K_\tau}{\epsilon \beta} (\tau_a)_d \right]$$

$$(\sigma_a)_d = \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m$$

$$(\tau_a)_d = \tau_a + \psi_\tau \tau_m$$

4.1.2 算例

图 18.5-2 所示的轴。载荷 F 为对称循环载荷， $F = 50\,000\text{ MPa}$ ，轴材料为 45 钢，调质。

表面加工方法为精车, 校核 A—A 截面的疲劳强度。

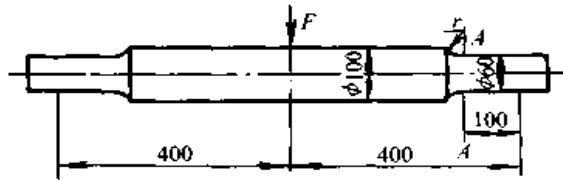


图 18.5-2 轴

解 1) 计算公式 因载荷是等幅对称循环, 故用公式

$$n_s = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \varepsilon \beta \sigma_a}$$

2) 求 σ_a 。该轴为简支梁, 故 A—A 截面的应力为

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \frac{M}{W} = \frac{16Fl}{\pi d^3} \\ &= \frac{16 \times 50\,000 \times 100}{\pi \times 60^3} = 117.9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3) 求 σ_{-1} 。查表 18.3-1, 材料 45 钢调质状态时, $\sigma_{-1} = 388 \text{ MPa}$, $\sigma_b = 710 \text{ MPa}$

4) 求 K_σ 。用式 (18.4-4), $K_\sigma = 1 + q(\alpha_\sigma - 1)$

查图 18.4-57, 当 $\sigma_b = 710 \text{ MPa}$, $r = 5 \text{ mm}$ 时, $q = 0.8$ 。

查图 18.4-24, 当 $\rho/d = 5/60 = 0.083$, $D/d = 100/60 = 1.67$ 时, $\alpha_\sigma = 1.78$, 得 $K_\sigma = 1.624$ 。

或从图 18.4-61 直接查得 $K_\sigma \approx 1.70$, 两者差异不大, 取 $K_\sigma = 1.7$ 。

5) 求 ε 。查图 18.4-84, 当 $d = 60 \text{ mm}$, 45 钢时

$$\varepsilon = 0.825$$

6) 求 β 。表面加工方法为精车, 故 $\beta = \beta_1$ 。

查图 18.4-85, 当 $\sigma_b = 710 \text{ MPa}$ 及精车时

$$\beta_1 = 0.92$$

7) 求 n_s

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \varepsilon \beta \sigma_a} = \frac{388}{1.7 \times 0.825 \times 0.92 \times 117.9} \\ &= 1.47 > n_p = 1.3 \end{aligned}$$

故该轴 A—A 截面的疲劳强度符合要求。

4.2 多向应力时无限寿命设计

在多向应力情况下, 把多向应力转化成单向

应力, 然后利用上述的单向应力设计方法进行设计。变形能强度理论及最大切应力理论是将多向应力状态与单向应力状态联系起来, 比较符合实际的理论。这里根据变形能强度理论, 把多向应力转化成单向当量应力, 其计算公式为

当量应力幅

$$\sigma_{da} = \frac{[(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a3} - \sigma_{a1})^2]^{1/2}}{\sqrt{2}} \quad (18.5-3)$$

当量平均应力

$$\sigma_{dm} = \frac{[(\sigma_{m1} - \sigma_{m2})^2 + (\sigma_{m2} - \sigma_{m3})^2 + (\sigma_{m3} - \sigma_{m1})^2]^{1/2}}{\sqrt{2}} \quad (18.5-4)$$

式中 σ_{a1} 、 σ_{a2} 、 σ_{a3} ——主应力幅;

σ_{m1} 、 σ_{m2} 、 σ_{m3} ——主应力幅方向的平均应力对于二向应力状态, 公式可简化为

$$\begin{aligned} \sigma_{da} &= (\sigma_{a1}^2 - \sigma_{a1}\sigma_{a2} + \sigma_{a2}^2)^{1/2} \\ \sigma_{dm} &= (\sigma_{m1}^2 - \sigma_{m1}\sigma_{m2} + \sigma_{m2}^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (18.5-5)$$

有了这两个当量应力后, 可以运用单向应力计算公式进行设计。

在二向应力状态时, 最常见的承受弯曲和扭转复合循环应力作用的传动轴和曲轴等的设计中, 常采用下面公式计算其安全系数, 即

$$n = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_\sigma}\right)^2 + \left(\frac{1}{n_\tau}\right)^2}} \quad (18.5-6)$$

这里的 n_σ 和 n_τ , 就是上述的单向弯曲和单向扭转状态下的安全系数 (参见表 18.5-4)。

5 有限寿命设计

5.1 安全系数计算公式

在有限寿命设计中, 多向应力状态的处理方法与无限寿命设计的方法是一样的, 将它转化为单向当量应力。

安全系数计算公式与无限寿命设计中的公式一样, 只是其中有些系数取值不一样。推荐的系数取值列于表 18.5-5 中。

5.2 寿命估算

在进行有限寿命设计时, 不但要计算零构件

表 18.5-5 系数取值

系 数	取 值
有效应力集中系数 $K_{\sigma r}$	$N \leq 10^3$ $K_{\sigma r} = 1.0$ $10^3 < N < 10^6$ $K_{\sigma r} = 1.0 + \frac{K_{\sigma} - 1.0}{3}(x - 3)$ $N \geq 10^6$ $K_{\sigma r} = K_{\sigma}$ x 为循环数的对数, 即 $x = \lg N_r$ K_{σ} 为无限寿命时的有效应力集中系数
尺寸系数 ϵ 表面加工系数 β 不对称循环度系数 ψ_{σ}, ψ_r	与无限寿命设计中相同

的工作安全系数, 还要计算零构件的疲劳寿命。常用的疲劳寿命计算公式列于表 18.5-6 中。

表 18.5-6 寿命估算方法

应力状态	方 法	内 容
恒 幅	简单估 算法	根据计算确定的零件危险点处应力幅 σ_s , 在零件的 S-N 曲线上确定对应的循环数, 就是所要求的寿命
变 幅	线性累 积损伤理 论的方法	$N = \frac{1}{\sum \frac{1}{N_i} \cdot \frac{n_i}{N}}$ n_i/N 可从载荷谱中求得, N_i 是对应于 σ_i 的循环次数, 可以从 S-N 曲线求得

5.3 随机疲劳寿命估算

承受随机载荷的零构件, 在进行疲劳强度和疲劳寿命计算之前, 必须先确定其载荷谱 (按第 2 章方法处理)。由于载荷谱编制中可以用程序谱给出, 也可用概率密度函数给, 其寿命计算公式也不相同。

5.3.1 程序谱的疲劳寿命计算

设程序谱的一个周期内含有 k 级应力水平 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$, 各级应力水平下的循环数, 分别为 n_1, n_2, \dots, n_k 。由考虑各种影响因素的 S-N 曲线或 P-S-N 曲线, 查得各级应力水平单

独作用时的破坏循环数 N_1, N_2, \dots, N_k 。用 T 表示周期总数, 当零件破坏时 (出现宏观裂纹), 则零件寿命为

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} \quad (18.5-7)$$

5.3.2 概率密度函数给出的连续谱寿命计算

设载荷幅值变化的概率密度函数为 $P(\sigma)$, T 为零件的寿命, 则

$$T = \frac{1}{\int_{\sigma_r}^{\sigma_{\max}} \frac{P(\sigma)}{C} \sigma^m d\sigma} \quad (18.5-8)$$

式中 σ_r ——零件材料的疲劳极限;

σ_{\max} ——载荷时间历程中最大的应力幅;

$P(\sigma)$ ——应力幅值频率密度函数 (如式 (18.2-10) 和式 (18.2-11));

m, C ——和材料有关的系数。

m 可由试件的疲劳试验确定。一般情况下, $m = 3 \sim 10$ 。当 m 已知时, 由 $\sigma_r^m N_i = C$ 即可求得 C 值, 则由式 (18.5-8) 可算得寿命 T 。若式 (18.5-8) 积分困难时, 可用数值计算方法解决。

5.4 算例

计算一起重机吊钩上端螺纹的疲劳寿命。已知螺纹为 M64 的标准螺纹, 螺纹材料是 20 钢锻造, 其力学性能为: $\sigma_b = 412 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 245.3 \text{ MPa}$ 。

解 1) 确定载荷 由于吊钩螺纹为松螺纹联接, 没有预紧力, 所以吊钩挂的重量就是螺纹所受之力。用统计的方法根据吊钩每天的吊重情况, 可确定螺纹上承受的名义应力及每一名义应力作用的次数, 见表 18.5-7 中的第一列及第二列。由统计表中可知, 吊钩每天工作的总循环数 $N = 144$ 次, 每一应力水平的循环数 n_i 由表中第一列可知, 则 n_i/N , 即各应力水平所占总循环数的百分数见表第二列。

2) 确定各系数 根据 20 钢锻造的 $\sigma_b = 412 \text{ MPa}$, 由表 18.4-2 得有效应力集中系数 $K_{\sigma} = 3.0$ (估值)

查图 18.4-84, 得 $\epsilon = 0.85$

查图 18.4-85, 得 $\beta = 0.88$ (螺纹为粗车表面)

由此得

$$\frac{K_{\sigma}}{\epsilon\beta} = \frac{3.0}{0.85 \times 0.88} = 4.0$$

螺栓的应力状态是脉动循环变幅应力，将名义应力乘以 $K_\sigma/\epsilon\beta = 4.0$ ，得表 18.5-7 中第四列的数据。

3) 确定疲劳极限 20 钢的疲劳极限由本篇第 3 章 1.3 中的经验式求得，即

对于对称拉压

$$\begin{aligned}\sigma_{-1} &= 0.23(\sigma_b + \sigma_s) \\ &= 0.23 \times (412 + 245.3) \\ &= 151.2 \text{ MPa}\end{aligned}$$

对于脉动拉压

$$\begin{aligned}\sigma_{0.1} &= 1.42 \times 151.2 \\ &= 214.5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

将表 18.5-7 中第四列数据与疲劳极限比较可知，表中大部分数值超过疲劳极限。因此，这个螺栓的应力变化情况属于有限寿命设计。

表 18.5-7 计算数据

每天工作的循环数	循环数占的百分数/%	名义应力/ MPa	当 $\frac{K_\sigma}{\epsilon\beta} = 4.0$ 时	
			σ_i /MPa	N_i
1	0.695	80.4	323.7	4×10^3
3	2.08	78.5	313.9	6×10^3
5	3.47	73.6	294.3	2.5×10^4
7	4.86	69.7	279.6	4×10^4
9	6.24	63.8	255.1	1×10^5
11	7.64	59.8	240.3	1.7×10^5
13	9.02	55.9	225.6	3.5×10^5
15	10.4	51.0	206.0	1.4×10^6
17	11.8	46.1	186.4	8×10^6
19	13.2	41.2	166.8	$> 10^7$
21	14.6	34.3	137.3	$> 10^7$
23	16.0	14.2	56.9	$> 10^7$

4) 确定 S-N 曲线 因没有 20 钢的 S-N 曲线，所以用近似法作 S-N 曲线。在双对数坐标纸上作两点：一点是 $N = 10^3$ ， $\sigma = 0.9\sigma_b = 0.9 \times 412 = 370.8 \text{ MPa}$ ；一点是 $N = 10^7$ ， $\sigma = 0.45\sigma_b =$

185.4 MPa 。连接该两点得一斜线，即为所求的 S-N 曲线，如图 18.5-3 所示。

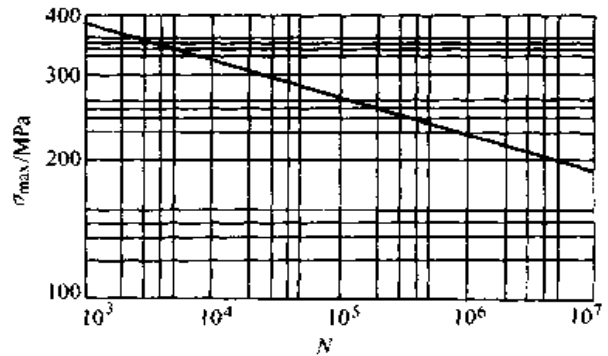


图 18.5-3 20 钢的 S-N 曲线

由图 18.5-3 的 S-N 曲线，查出在应力水平 σ_i 下到达破坏的循环数 N_i ，列于表 18.5-7 中的第五列。由该列的数值可看到，当 $\sigma_i < 186.4 \text{ MPa}$ 以后， $N_i > 10^7$ 。但由经验公式求得的 $\sigma_{0.1} = 214.5 \text{ MPa}$ ，大于 186.4 MPa ，说明两种假设的近似法之间有误差。本题按表 18.5-7 中数据计算偏于安全。

假设 $N_i \geq 10^7$ 时，不产生疲劳损伤，则总寿命为

$$\begin{aligned}N &= 1 / \left[\frac{0.00695}{4 \times 10^3} + \frac{0.0208}{6 \times 10^3} + \frac{0.0347}{2.5 \times 10^4} + \right. \\ &\quad \left. \frac{0.0486}{4 \times 10^4} + \frac{0.0624}{10^5} + \frac{0.0764}{1.7 \times 10^5} + \right. \\ &\quad \left. \frac{0.0902}{3.5 \times 10^5} + \frac{0.104}{1.4 \times 10^6} + \frac{0.118}{8 \times 10^6} \right] \\ &= 1.082 \times 10^5\end{aligned}$$

因每天工作循环数为 144，则工作天数为

$$\frac{1.082 \times 10^5}{144} = 752 \text{ 天}$$

如起重机每年工作 360 天，则工作年数为

$$\frac{752}{360} = 2.09 \text{ 年}$$

即该起重机吊钩的螺栓部分的寿命为 2.09 年，如这部分为吊钩的薄弱环节，为保证安全工作，每工作 2 年后，需要更新。

第6章 现代疲劳强度设计

1 概述

常规疲劳设计是以名义应力为基本设计参数，根据名义应力进行抗疲劳设计。而实际上决定零构件疲劳强度和寿命的是应变集中（或应力集中）处的最大局部应力和应变。因此，在低周疲劳研究和应变分析研究成果基础上，不同于常规疲劳设计的新的疲劳寿命估算方法——局部应力应变法，被称为现代疲劳设计方法。

它的设计思路是，零构件的疲劳破坏都是从应变集中部位的最大应变处起始，并且在裂纹萌生以前都要产生一定的局部塑性变形，局部塑性变形是疲劳裂纹萌生和扩展的先决条件。因此，决定零构件疲劳强度和寿命的是应变集中处的最大局部应力应变，只要最大局部应力应变相同，疲劳寿命就相同。因而有应力集中的零构件的疲劳寿命，可以使用局部应力应变相同的光滑试样的应变-寿命曲线进行计算，也可使用局部应力应变相同的光滑试样进行疲劳试验来模拟。

该方法有以下优点：

①应变是可以测量的，而且已被证明是一个与低周疲劳相关的极好参数，根据应变分析的方法，可将高、低周疲劳寿命的估算方法统一起来。

②使用这种方法时，只需知道应变集中部位的局部应力应变和基本的材料疲劳性能数据，就可以估算零件的裂纹形成寿命，避免了大量的结构疲劳试验。

③这种方法可以考虑载荷顺序对应力应变的影响，特别适用于随机载荷下的寿命估算。

④这种方法易于与计数法结合起来，可以利用计算机进行复杂的计算。

尽管局部应力应变法有许多优点，但并不能取代名义应力法。因为，

①这种方法只能用于有限寿命下的寿命估算，而不能用于无限寿命，当然也无法代替常规的无限寿命设计法。

②这种方法目前还不够完善，未考虑尺寸因素和表面情况的影响，对高周疲劳有较大误差。

③这种方法目前主要限于对单个零件进行分析，对于复杂的连接件，难于进行精确的应力应变分析，难于使用。

还应指出，用名义应力有限寿命设计法估算出的是零件总寿命，而局部应力应变法估算出的是裂纹形成寿命。这种方法常与断裂力学方法联合使用，用这种方法估算出裂纹形成寿命以后，再用断裂力学方法估算出裂纹扩展寿命，两阶段寿命之和即为零件的总寿命。

2 低周疲劳

2.1 低周疲劳曲线 ($\epsilon-N$ 曲线)

低周疲劳的应力水平较高，其峰值应力常高于材料的弹性极限，有明显宏观塑性变形，故低周疲劳又称为应变疲劳或塑性疲劳。

低周疲劳中的 $S-N$ 曲线，常以 $\epsilon-N$ 曲线形式给出。在 $\epsilon-N$ 曲线中， N 可以是循环数，也可以是“反向”数，在恒幅载荷中，反向数为循环数的两倍，所以有些资料中的横坐标用“ $2N$ ”作为计量单位。

图 18.6-1~图 18.6-17 是机械和航空行业中几种常用材料的应变-寿命曲线图。

2.2 循环应力-应变曲线

2.2.1 滞回线

试样一次拉伸试验的应力-应变曲线为 OA ，如图 18.6-18a 所示。若用相同的试样作压缩试验，则应力-应变曲线为 OB 。曲线 BOA 表示材料一次加载的应力-应变关系，称为单调应力-应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线。一般仅考虑 OA 段曲线。

将试样先拉伸，应力-应变曲线由 O 点到 A 点；然后进行压缩，应力-应变曲线由 A 点到 B 点；再进行拉伸，应力-应变曲线由 B 点回到 A 点，完成一个应力循环，如图 18.6-18b 所示。这种应力-应变循环曲线称为滞回线。滞回线不仅表示了应力的循环变化，还能反映每个循环中塑性应变的大小。

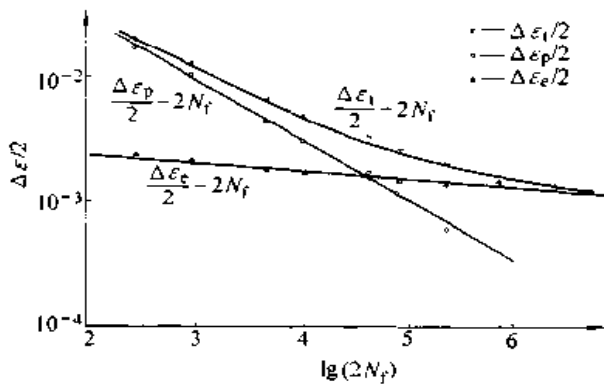


图 18.6-1 Q235A 钢的应变-寿命曲线

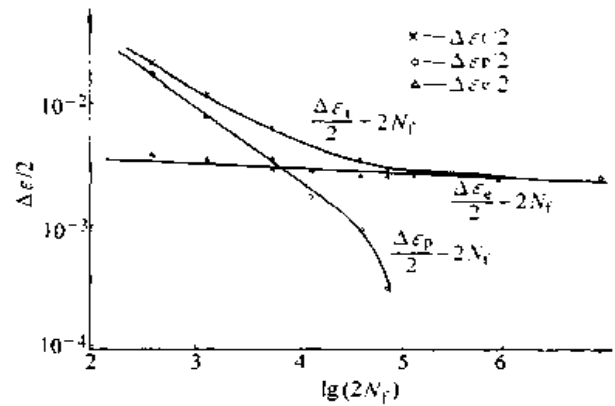


图 18.6-2 45 钢的应变-寿命曲线

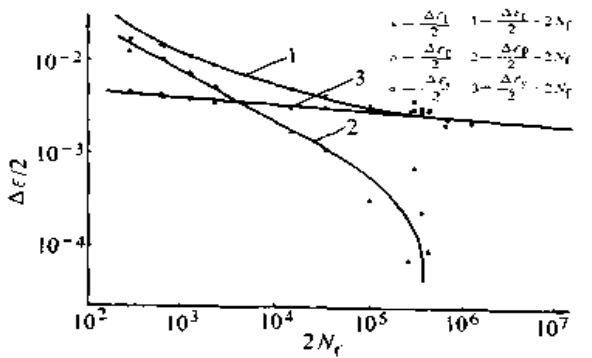


图 18.6-3 40Cr 钢的应变-寿命曲线

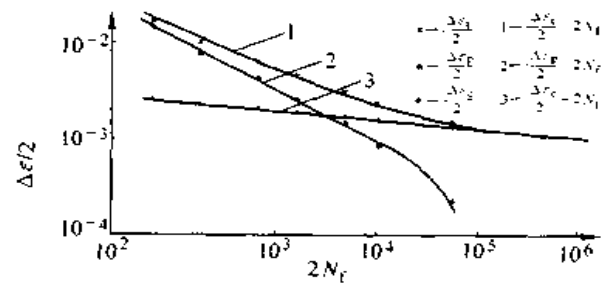


图 18.6-4 Q345 钢应变-寿命曲线

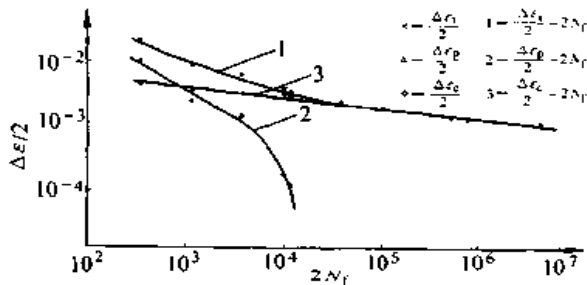


图 18.6-5 60Si2Mn 钢的应变-寿命曲线

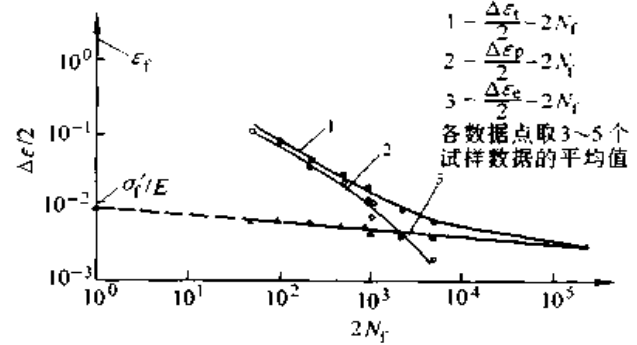


图 18.6-6 30CrMnSiA 钢的应变-寿命曲线

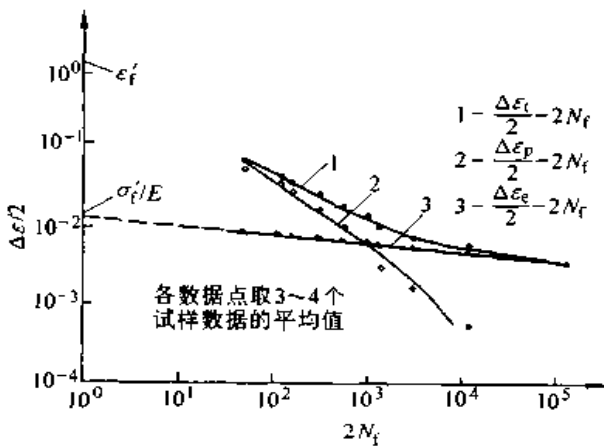


图 18.6-7 30CrMnSiNi2A 钢的应变-寿命曲线

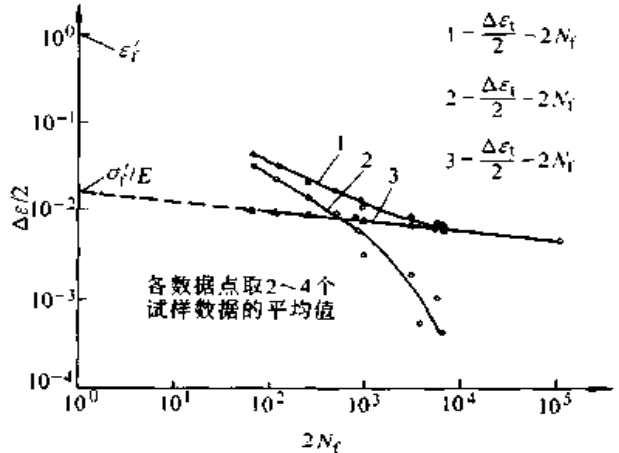


图 18.6-8 40CrMnSiMoVA 钢的应变-寿命曲线

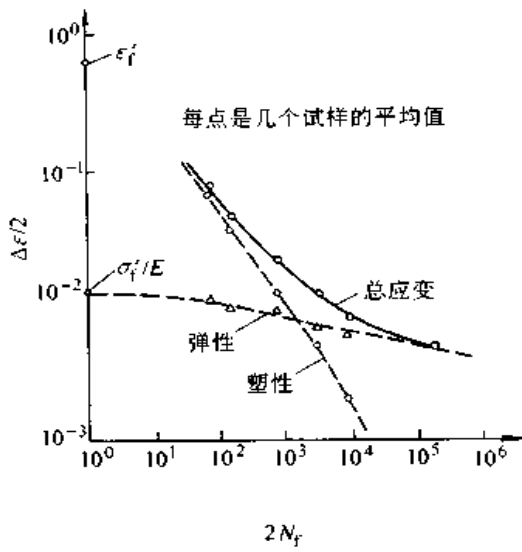


图 18.6-9 Ti-8Al-1Mo-1V 钛合金的应变-寿命曲线

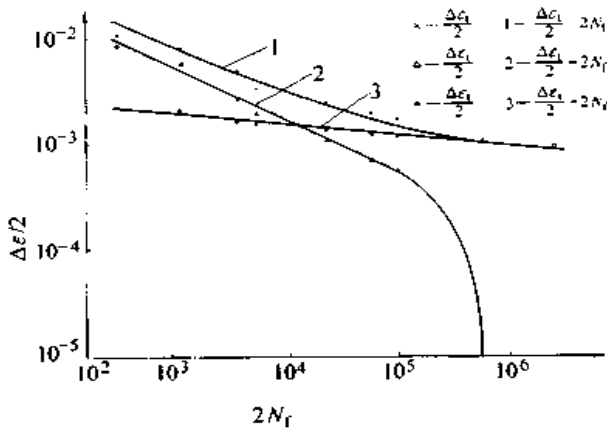


图 18.6-11 ZG270-500 铸钢的应变-寿命曲线

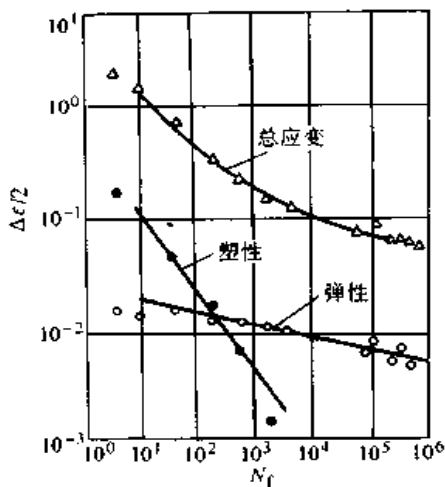


图 18.6-13 2014-T6 铝合金的应变-寿命曲线

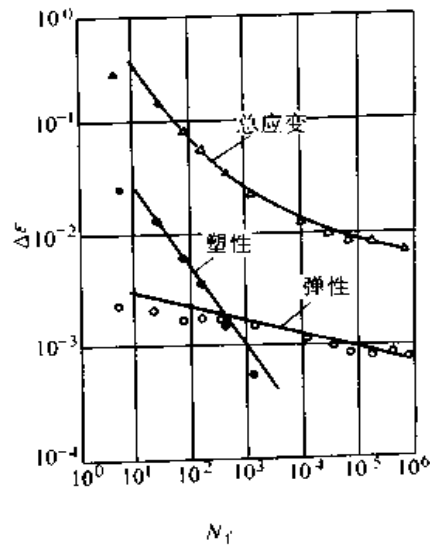


图 18.6-10 Ti-6Al-4V 钛合金的应变-寿命曲线

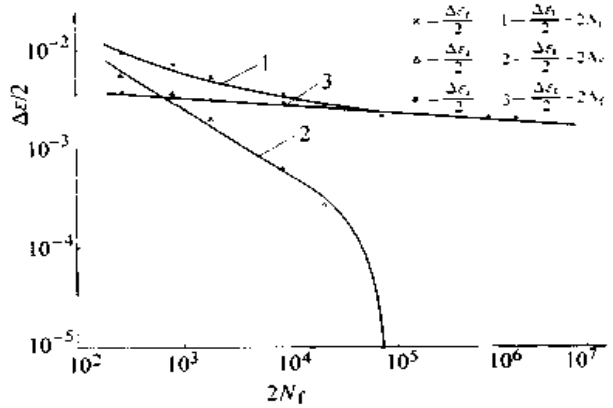


图 18.6-12 QT600-3 球铁 (铸件为 Y 型试块) 的应变-寿命曲线

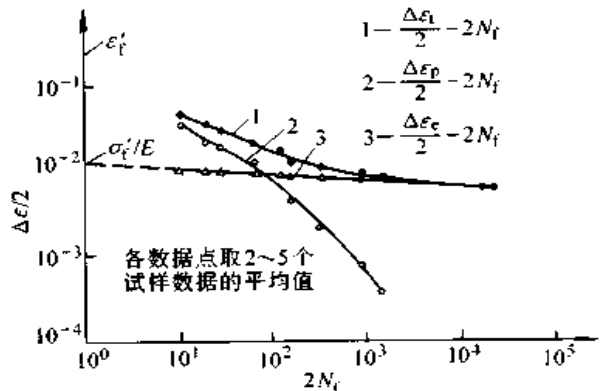


图 18.6-14 7A04-T6 铝合金的应变-寿命曲线

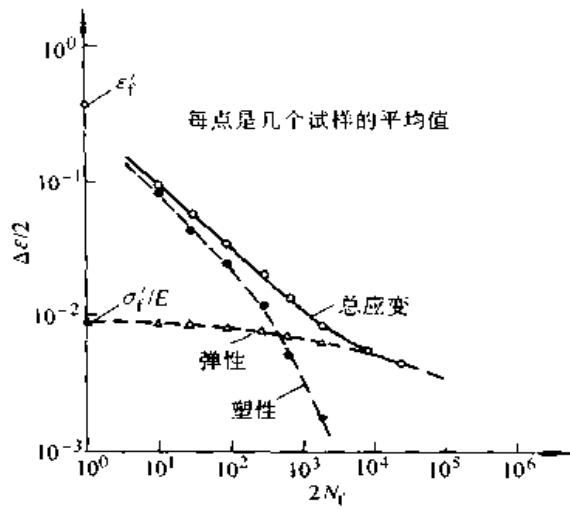


图 18.6-15 2024-T4 铝合金的应力-寿命曲线

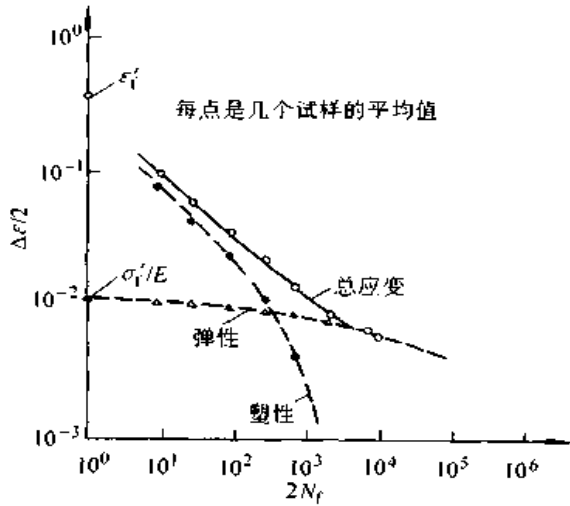


图 18.6-16 7075-T6 铝合金的应变-寿命曲线

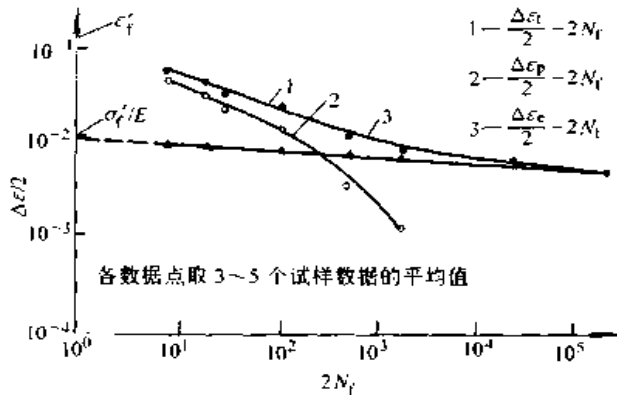


图 18.6-17 2A12-T4 铝合金（棒材）的应变-寿命曲线

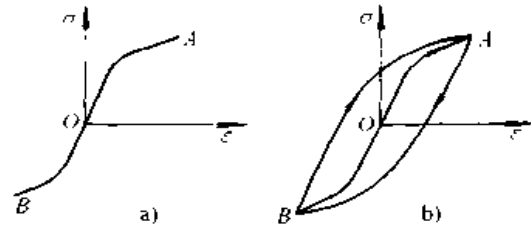


图 18.6-18 应力-应变曲线
a) 单调应力-应变曲线 b) 滞回线

2.2.2 循环硬化与循环软化

对于循环硬化的材料，其应变抗力随着循环数的增加而增大。因此，在恒应变幅度下，材料在每一循环中所需的应力将随循环数的增加而逐渐增大；或在恒应力幅度下，材料在每一循环中的应变幅度随循环数的增加而变小。

对于循环软化的材料，其应变抗力随着循环数的增加而变小。因此，在恒应变幅度下，材料在每一循环中所需的应力将随循环数的增加而逐渐变小；或在恒应力幅度下，材料在每一循环中的应变幅度随循环数的增加而变大。

材料是循环硬化还是循环软化，由材料的屈服比 σ_s/σ_b 而定。屈服比小于 0.7 时，材料产生循环硬化；屈服比大于 0.8 时，材料产生循环软化。所以，一般的退火材料产生循环硬化，冷加工的材料产生循环软化。

无论是循环硬化材料或循环软化材料，虽然在试验开始阶段所得的应力-应变滞回线并不闭合，但经过一定次数的循环后，滞回线接近于封闭环，即可得到稳定的滞回线。把应变幅控制在不同的水平上，可以得到一系列大小不同的稳定的滞回线，将这些滞回线的顶点连接起来，便得到如图 18.6-19 所示的曲线 OC，这曲线称为该金属材料的循环应力-应变 ($\sigma-\epsilon$) 曲线。

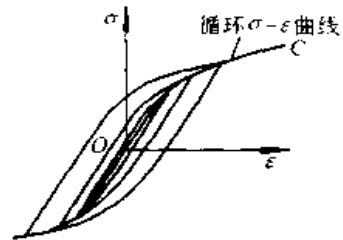


图 18.6-19 循环应力-应变曲线

2.2.3 循环应力-应变曲线

根据图 18.6-19 循环应力-应变曲线的作图法可知，曲线上的任一点实际上是一个滞回线的顶

点，其坐标为该滞回线的应力幅 σ_a 和应变幅 ϵ_a 。因此，循环应力-应变曲线可以用下式拟合，即

$$\epsilon_a = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (18.6-1)$$

或写成幅度的形式（应力幅度 $\Delta\sigma = 2\sigma_a$ ，应变幅度 $\Delta\epsilon = 2\epsilon_a$ ），即

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (18.6-2)$$

- 式中 ϵ_e ——应变幅的弹性分量；
 ϵ_p ——应变幅的塑性分量；
 ϵ_a ——总应变幅；
 K' ——循环强度系数；
 n' ——循环应变硬化指数。

图 18.6-20 ~ 图 18.6-36 给出机械和航空行业中几种常用材料的循环稳定和单调拉伸的应力-应变曲线。

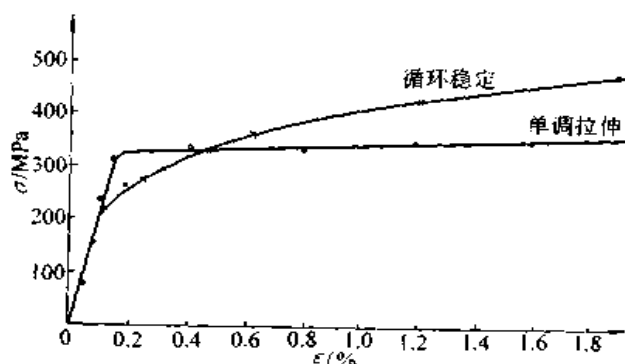


图 18.6-20 Q235A 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

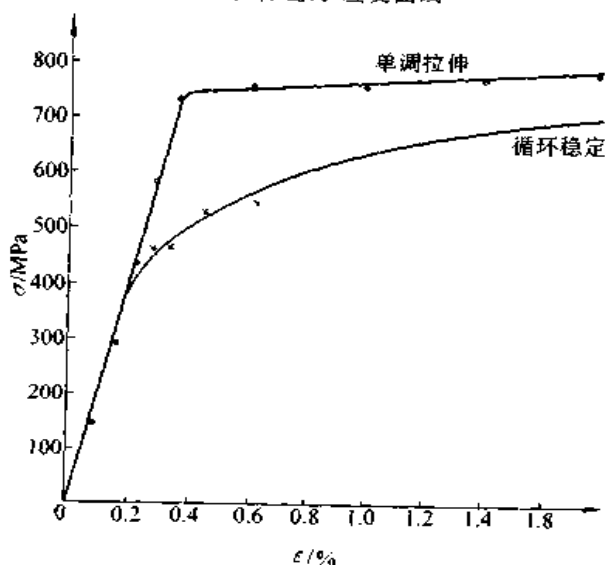


图 18.6-21 45 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

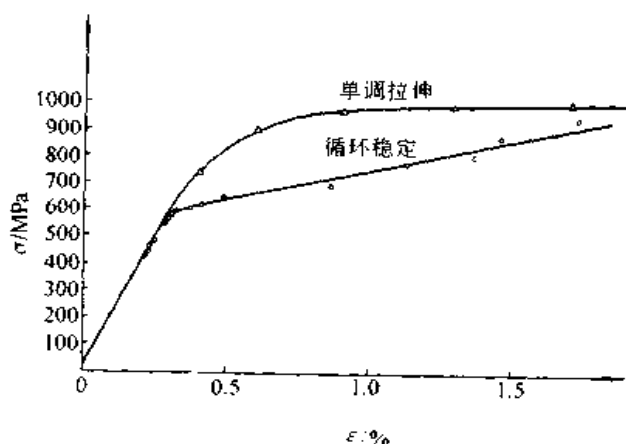


图 18.6-22 40Cr 钢循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

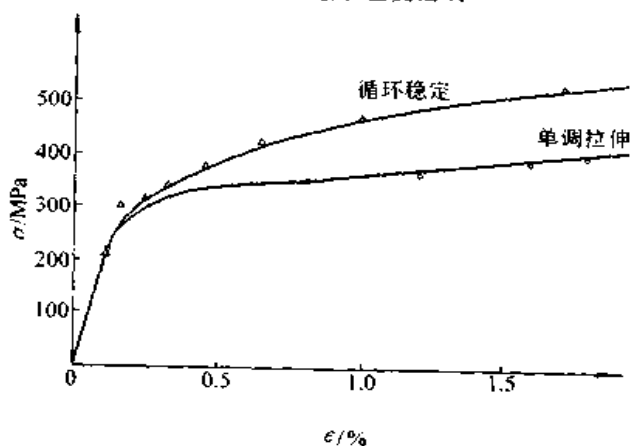


图 18.6-23 16Mn 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

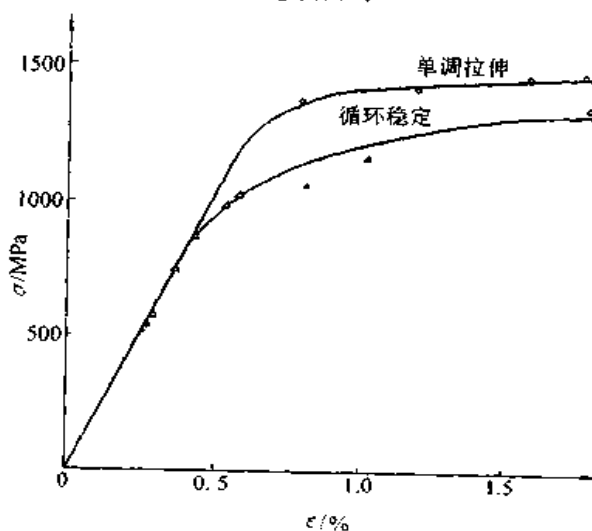


图 18.6-24 60Si2Mn 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

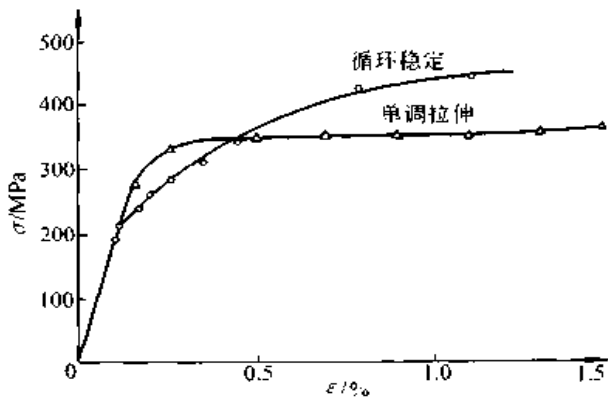


图 18.6-25 ZG270-500 铸钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

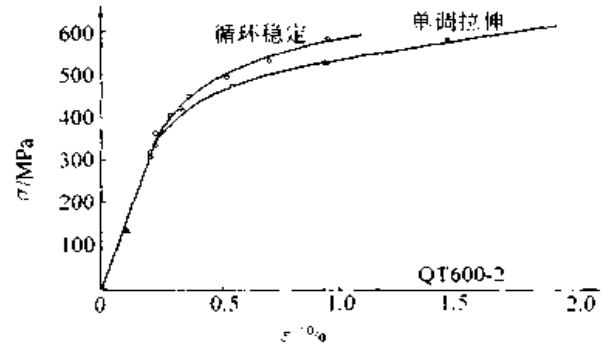


图 18.6-26 QT600-2 球铁 (铸件为 Y 型试块) 的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

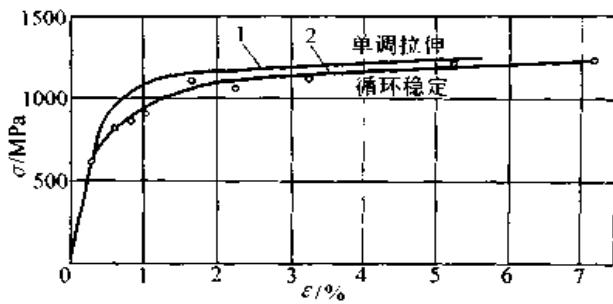


图 18.6-27 30CrMnSiA 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

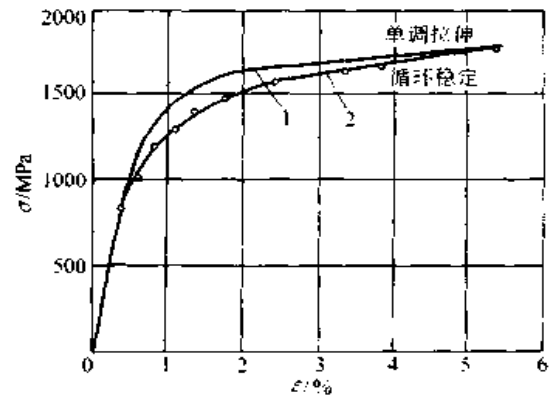


图 18.6-28 30CrMnSiNi2A 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

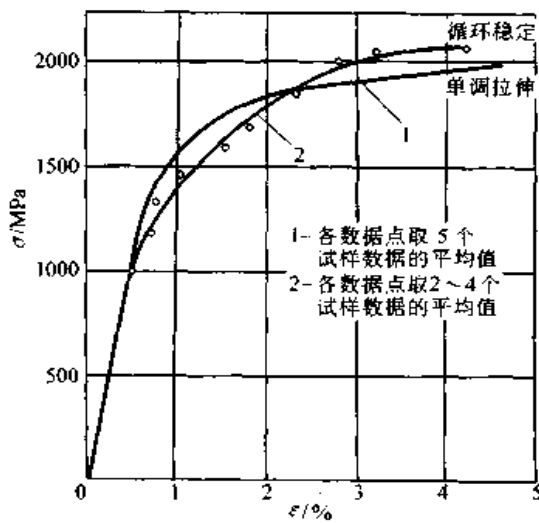


图 18.6-29 40CrMnSiMoVA 钢的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

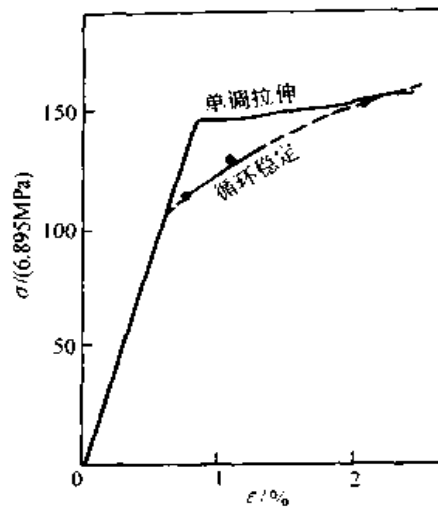


图 18.6-30 Ti-8Al-1Mo-1V 钛合金的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

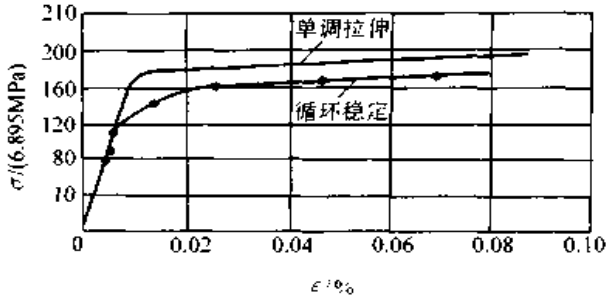


图 18.6-31 Ti-6Al-4V 钛合金的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

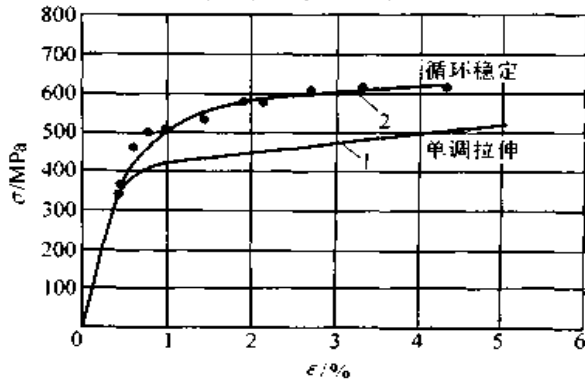


图 18.6-32 2A12-T4 铝合金（棒材）的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

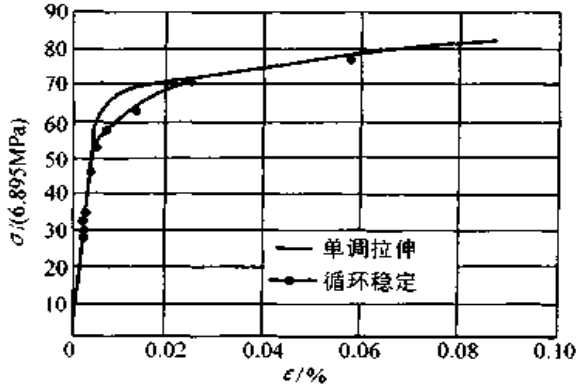


图 18.6-33 2014-T6 铝合金的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

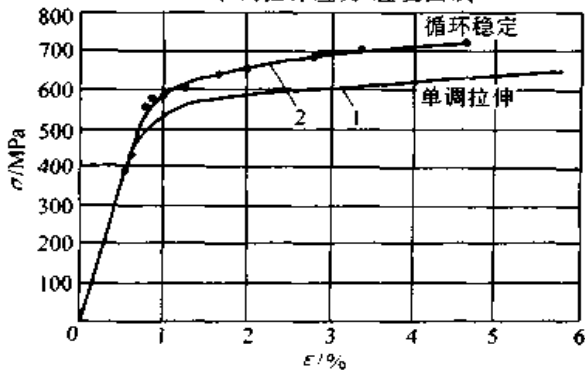


图 18.6-34 7A04-T6 铝合金的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

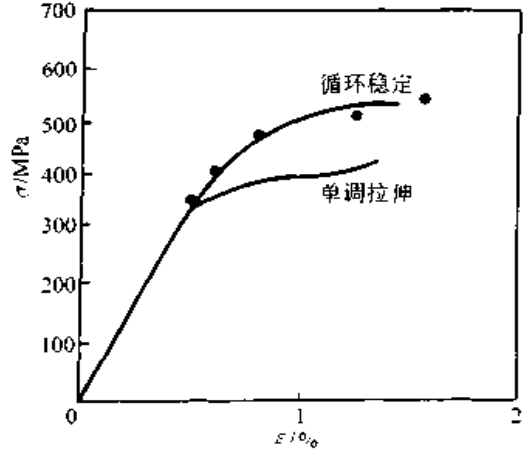


图 18.6-35 2024-T4 铝合金的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

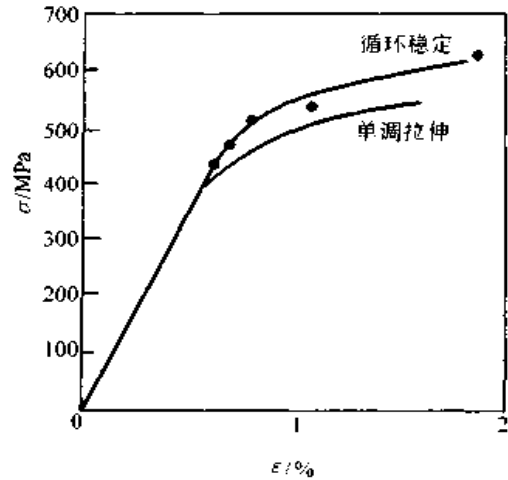


图 18.6-36 7075-T6 铝合金的循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

2.3 应变-寿命曲线的获得

2.3.1 曼森-科芬方程

准备一组材料和尺寸完全相同的试样，对每个试样施加不同的载荷，即试样产生不同的应变，疲劳循环次数由计数器自动记录，这样就得到一组应变和破坏循环数的记录数据。由于试验时控制总应变幅常常是比较方便的，所以得到的数据，一般是总应变幅与破坏循环数。图 18.6-1 ~ 图 18.6-17 就是对不同材料得出的总应变幅 $\epsilon_a (\Delta \epsilon / 2)$ 与破坏循环数 N 的曲线，即 $\epsilon-N$ 曲线。

每一个总应变值可分为弹性应变分量和塑性应变分量（图 18.6-37），假设在总应变幅为 0.6% 时的疲劳寿命为 10^4 次循环。根据实测可

知,总应变幅中三分之一为塑性应变幅,其余三分之二,即 0.4% 为弹性应变幅。反之,对同一种材料,只要循环弹性应变幅等于 0.4%,其寿命将是 10^4 次循环。同样,只要知道塑性应变幅为 0.2%,也可以推断它的寿命为 10^4 次循环。

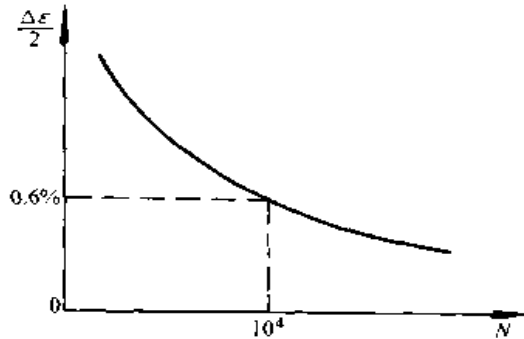


图 18.6-37 总应变幅-寿命曲线

指定一个弹性应变幅或塑性应变幅,就可以得到破坏循环数 N 。因此,在同一张总应变幅-寿命曲线图上,可以画出弹性应变-寿命曲线和塑性应变-寿命曲线。在双对数坐标图上,弹性应变-寿命曲线和塑性应变-寿命曲线都是一条近似直线,如图 18.6-38 所示。这两直线的交点 P ,称为过渡寿命点; P 点在横轴上的坐标 N_T ,称为过渡寿命,它是一试验常数。交点 P 表示低周疲劳与高周疲劳的分界点:在 P 点的右侧,弹性应变起主导作用,在 P 点的左侧,塑性应变起主导作用。或者说, P 点的右侧为高周疲劳区, P 点的左侧为低周疲劳区。当提高材料强度时, P 点左移,提高材料韧性时, P 点右移。

图 18.6-38 中塑性应变-寿命曲线 1 的方程,可以用幂指数函数形式表示为

$$\Delta\epsilon_p N^b = C_1 \quad (18.6-3)$$

弹性应变幅度 $\Delta\epsilon_e$ 和塑性应变幅度 $\Delta\epsilon_p$ 还可以写成一般常用的形式,即

$$\frac{\Delta\epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b$$

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N)^c$$

式中 σ'_f ——疲劳强度系数;

σ'_f/E ——循环数 $N = \frac{1}{2}$ 处直线 2 的纵坐标截距;

b ——疲劳强度指数,直线的斜率;

E ——材料的弹性模量;

ϵ'_f ——疲劳塑性系数, $N = \frac{1}{2}$ 处直线 1 的纵坐标截距;

c ——疲劳塑性指数;

总应变幅-寿命曲线 3 的数学表达式为

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c \quad (18.6-4)$$

这里 N 为反向次数,“ $2N$ ”在恒幅循环载荷中为循环次数。式 (18.6-4) 称为曼森-科芬方程。

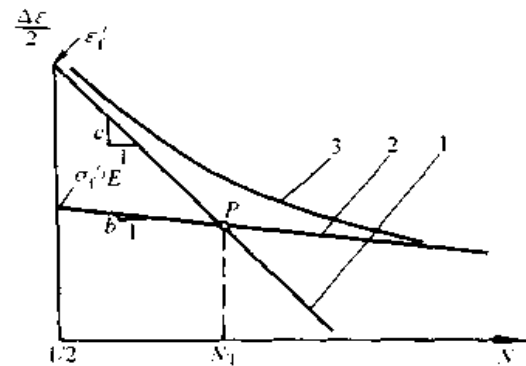


图 18.6-38 通用斜率法的应变-寿命曲线(双对数坐标)
1—塑性应变-寿命曲线 2—弹性应变-寿命曲线
3—总应变-寿命曲线

式 (18.6-2) 和式 (18.6-4) 中的 6 个参数: K' 、 n' 、 b 、 c 、 ϵ'_f 和 σ'_f , 是表征低周疲劳特性的主要参数。对于机械设计中几种常用钢材的 6 个参数见表 18.6-1。

表 18.6-1 低周疲劳性能参数

材 料	$K'/$ MPa	n'	b	c	ϵ'_f	$\sigma'_f/$ MPa
45 (正火)	1 153	0.179	-0.123	-0.526	0.465	1 115
40Cr	1 592	0.173	-0.120	-0.559	0.388	1 306
40CrNiMoA	1 439	0.152	-0.061	-0.643	0.463	898
Q345	1 045	0.151				
45 钢(调质)	1 324	0.160				
20 钢(热轧)	772	0.18	-0.12	-0.51	0.41	896

2.3.2 四点法求应变-寿命曲线

曼森指出,确定 $\Delta\epsilon_e-N$ 和 $\Delta\epsilon_p-N$ 两条直线只

要四个点。这四个点可以由单调拉伸试验数据获得，而不用去做疲劳试验。四个点为（见图 18.6-39）

P_1 —— 对应于 $\frac{1}{4}$ 次循环（即一次拉伸至破坏）的应变幅度的弹性分量为

$$\Delta\epsilon_e = 2.5(\sigma_1/E) \quad (18.6-5)$$

P_2 —— 对应于 10^5 次循环的应变幅度的弹性分量为

$$\Delta\epsilon_e = 0.90(\sigma_b/E) \quad (18.6-6)$$

连接 P_1 和 P_2 点，得 $\Delta\epsilon_e-N$ 曲线 2。这里 $\Delta\epsilon_e$ 为弹性应变幅度； N 为破断循环数； σ_1 为单调拉断时的真实应力； σ_b 为强度极限。

P_3 —— 对应于 10 次循环的应变幅度的塑性分量为

$$\Delta\epsilon_p = \frac{1}{4}\epsilon_1^{3/4} \quad (18.6-7)$$

P_4 —— 对应于 10^4 次循环的应变幅度的塑性分量为

$$\Delta\epsilon_p = \frac{0.0132 - \Delta\epsilon_e^*}{1.91} \quad (18.6-8)$$

连接 P_3 和 P_4 点，得 $\Delta\epsilon_p-N$ 曲线 1。这里 $\Delta\epsilon_e^*$ 为曲线 2 上 $N = 10^4$ 所对应的弹性应变幅度； ϵ_1 为单调拉断时的真实应变，用截面收缩率 ψ （以 % 计）近似求得

$$\epsilon_1 = \ln \frac{100}{100 - \psi} \quad (18.6-9)$$

用四点法求材料的应变-寿命曲线，适合于碳钢、合金钢、铝、钛等金属材料。

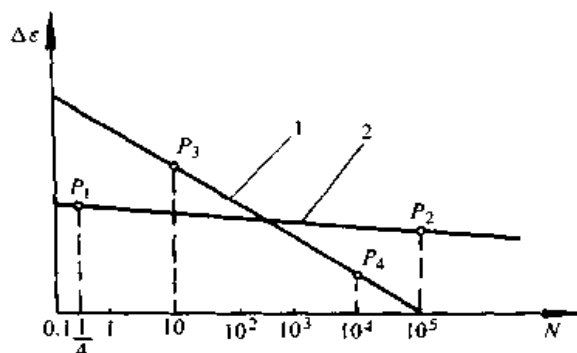


图 18.6-39 四点法求应变-寿命曲线

曼森对 29 种材料的疲劳试验结果进行了整理归纳，在双对数坐标平面上得出（参见图 18.6-39）塑性应变-寿命直线 1 的斜率为 -0.6 ，

弹性应变-寿命直线 2 的斜率为 -0.12 ，从而得到下面的关系式，即

$$\Delta\epsilon = 3.5 \frac{\sigma_b}{E} N^{-0.12} + \epsilon_1^{0.6} N^{-0.6} \quad (18.6-10)$$

由于斜率是根据 29 种材料归纳出来的，即这个斜率对多种材料通用，故本法称为通用斜率法。

2.4 低周疲劳寿命估算

估算低周疲劳寿命常用两种方法：①类似常规疲劳设计方法，即用 $\epsilon-N$ 曲线直接推算出寿命；②用局部应力-应变法估算裂纹形成寿命（见本章第 3 节）。

用应变-寿命 ($\epsilon-N$) 曲线直接推算出寿命时，关键是获得材料的 $\epsilon-N$ 曲线。这可以通过疲劳试验获得，如图 18.6-1~图 18.6-17；或用四点法求得弹性应变幅度-寿命 ($\Delta\epsilon_e-N$) 曲线和塑性应变幅度-寿命 ($\Delta\epsilon_p-N$) 曲线（见图 18.6-39），然后将弹性应变幅度与塑性应变幅度相加得总应变幅度，得出总应变幅度-寿命曲线。当应变比 $r = -1$ 时，得 ϵ_a-N 曲线。

在实际计算中，一般可按弹性理论求应力幅 σ_a ，然后假设以 σ_a 为理论弹性应力幅，近似用公式 $\sigma_a = \frac{1}{2} E \epsilon_a$ 计算 ϵ_a ，最后用 ϵ_a-N 曲线直接推算出疲劳寿命。

当给出材料低周疲劳的应力-寿命 (σ_a-N) 曲线时，也可以用弹性理论求得的 σ_a ，直接从 σ_a-N 曲线推算出疲劳寿命。

上述的寿命估算方法，是用材料力学或弹性理论的方法来计算零件和构件危险点的名义应力为出发点的，故称这种方法为名义应力法。而低周疲劳的应力-寿命曲线中的 σ_a 是真实应力幅，应变-寿命曲线中的 ϵ_a 是真实应变幅，所以名义应力法在低周疲劳寿命估算中，误差很大，只能用于粗略的寿命估算。对于较重要设备的寿命估算，建议用本章第 3 节的局部应力-应变法估算疲劳寿命。

表 18.6-2 和表 18.6-3 是国产常用的机械材料和航空材料的单调与循环应变特性数据，供寿命估算中应用。

表 18.6-2 某些国产机械材料的单调与循环应变特性

材 料	热处理	σ_b / MPa	$\sigma_s/\sigma_{1.1}$	K/K' (MPa/ MPa)	n/n'	ϵ_1/ϵ_i	σ_1/σ_i (MPa/ MPa)	b	c	E / MPa	循环硬化 (软化) 特性
Q235A	轧态	470.4	0.69	928.2/ 969.6	0.259 0/ 0.182 4	1.021 7/ 0.274 7	976.4/ 658.8	-0.070 9	-0.490 7	198 753.4	循环硬化
Q345	轧态	572.5	0.63	856.1/ 1 164.8	0.181 3/ 0.187 1	1.072 9/ 0.464 4	1 118.3/ 947.1	-0.094 3	-0.539 5	200 741	循环硬化
45	调质	897.7	0.91	928.7/ 1 112.5	0.036 9/ 0.115 8	0.839 3/ 1.504 8	1 511.7/ 1 041.4	-0.070 4	-0.733 8	193 500	循环软化
40Cr	调质	1 084.9	0.94	1 285.1/ 1 228.9	0.051 2/ 0.090 3	0.731 9/ 0.380 9	1 264.7/ 1 385.1	-0.078 9	-0.576 5	202 860	循环软化
60Si2Mn	淬火后	1 504.8	0.91	1 721.2/ 1 925.0	0.035 0/ 0.090 6	0.455 7/ 0.320 3	2 172.4/ 2 690.6	-0.113 0	-0.582 6	203 395	循环软化
	中温回火										
ZG270-500	正火	572.3	0.64	1 218.1/ 1 267.5	0.285 0/ 0.222 0	0.238 3/ 0.181 3	809.4/ 781.5	-0.098 8	-0.506 3	204 555.4	循环硬化
QT450-10 ^①	铸态	498.1	0.79	-/ 1 127.9	-/ 0.140 5	-/ 0.146 1	-/ 856.9	-0.102 7	-723 7	166 108.5	循环硬化
QT600-3 ^②	正火	748.4	0.61	1 439.9/ 1 039.8	0.199 6/ 0.116 5	0.076 0/ 0.372 5	856.5/ 885.2	-0.077 7	-0.710 4	154 000	循环硬化
QT600-3 ^①	正火	677.0	0.77	1 621.5/ 979.3	0.183 4/ 0.087 6	0.037 7/ 0.027 1	888.8/ 1 109.8	-0.105 6	-0.339 3	150 376.5	循环硬化
QT800-2 ^②	正火	913.0	0.64	1 777.3/ 1 437.7	0.203 4/ 0.147 0	0.045 5/ 0.168 4	946.8/ 1 067.4	-0.083 0	-0.579 2	160 500	循环硬化

① $\phi 30$ 棒料。

② Y 型试块。

表 18.6-3 某些国产航空材料的单调与循环应变特性

材 料	热处理	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	K/K' (MPa/ MPa)	n/n'	ϵ_1/ϵ_i (%/%)	σ_1/σ_i (MPa/ MPa)	b	c	E / MPa	是否 Masing 材料
30CrMnSiA	调质	1 177.0	1 104.5	1 475.76/ 1 771.93	0.063 0.127	77.27/ 161.15	1 795.07/ 1 755.94	-0.085 9	-0.771 2	203 004.9	是
30CrMnSi-Ni2A	等温淬火后回火	1 655.4	1 308.3	2 355.35/ 2 647.69	0.091 0.13	74 120.71	2 600.52/ 2 773.22	-0.102 6	-0.781 6	200 062.8	否
40CrMnSi-MoVA	等温淬火后回火	1 875.3	1 513.2	3 150.20/ 3 411.36	0.146 8 0.14	63.32 96.86	3 511.55/ 3 254.35	-0.105 4	-0.785 0	200 455.1	否
2A12-T4 (棒材)	T4	545.1	399.5	870.47/ 849.78	0.097 0.158	13.67 18	723.76/ 643.44	-0.062 7	-0.653 9	73 160.2	否
2A12-T4 (板材)	T4	475.6	331.5	545.17/ 645.79	0.088 9 0.066 9	30.19 16.50	618.04/ 670.21	-0.102 7	-0.511 4	71 022.3	—
7A04-T6	T6	613.9	570.8	775.05/ 949.61	0.063 0.08	18.00 24.52	710.62/ 884.69	-0.072 7	-0.776 1	72 571.8	是
7A09-T74	T74	560.2	518.2	724.64/ 905.87	0.071 0.101	28.34 77.08	748.47/ 807.80	-0.074 3	-0.935 1	72 179.5	—

3 局部应力应变法

3.1 预备知识

3.1.1 真实应力与真实应变

工程上常用材料的应力-应变曲线(图 18.6-40a),是由拉伸试验确定的,其名义应力 s 等于载荷 F 除以原始截面面积 A_0 ,其名义应变 e 为伸长量 ΔL 除以原始长度 L_0 (标距长度)(图 18.6-40b)。即

$$s = \frac{F}{A_0} \quad (18.6-11)$$

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

由于在拉伸过程中,试样的截面面积是变化的,直到拉断,则真实应力 σ 为

$$\sigma = F/A \quad (18.6-12)$$

式中 A ——颈缩处的横截面面积。

当试样拉伸至 L 长时,假设试样长度有一微小增量 dL ,则此时的应变增量为

$$de = \frac{dL}{L}$$

上式由 L_0 至 L 积分,得真实应变为

$$e = \ln \frac{L}{L_0} \quad (18.6-13)$$

真实应力、应变与名义应力、应变的关系为

$$\sigma = s(1 + e) \quad (18.6-14)$$

$$e = \ln(1 + e) \quad (18.6-15)$$

真实应变反映了物体变形的实际情况,也称为自然应变或对数应变;名义应变也称为工程应变。在大应变问题中,只有用真实应变才能得出合理的结果。

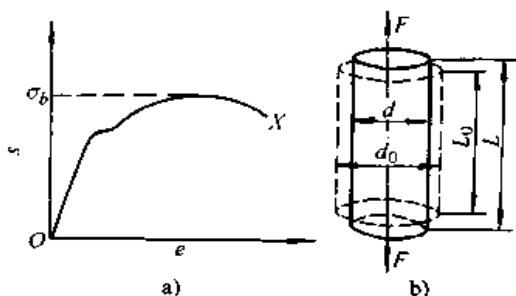


图 18.6-40 应力-应变曲线

3.1.2 玛辛特性

改变应力水平,可以得到不同应力水平下的

滞回线(参见图 18.6-19)。图 18.6-41a 为不同应力水平下的滞回线 ADA 、 BEB 、 CFC ,将坐标轴平移,使原点与各滞回线的最低点相重合,若滞回线的最高点的连线与其上行段迹线相吻合(见图 18.6-41b),则该材料具有玛辛特性,称为玛辛材料。

将材料的循环 $\sigma - \epsilon$ 曲线画于图 18.6-41b 上,可以看出,滞回线上行段迹线的纵坐标,为循环 $\sigma - \epsilon$ 曲线的纵坐标的两倍。

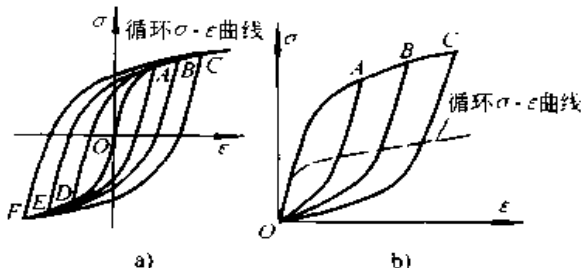


图 18.6-41 坐标平移后的滞回线

3.1.3 材料的记忆特性

图 18.6-42a 表示载荷-时间历程,图 18.6-42b 表示材料在该载荷-时间历程中的应力-应变响应。加载时由 1 到 2,相应的应力-应变响应由 A 到 B ;由 2 到 3 加反向载荷时,应力-应变曲线由 B 到 C ;再由 3 到 2' 加载时,应力-应变曲线由 C 到 B' , B' 和 B 重合。此后继续加载,则应力-应变曲线并不沿 CB' 曲线的延长线(图中虚线所示),而且急剧转弯沿原先 AB 曲线的延长线,似乎材料“记忆”了原先的路径,这就是材料的记忆特性。

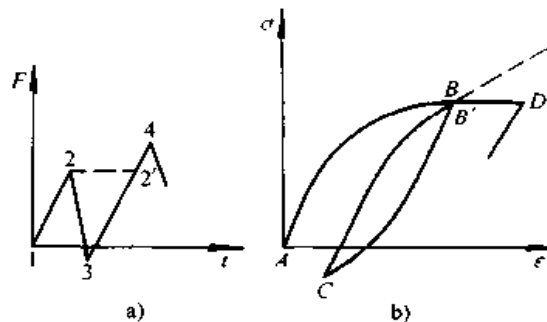


图 18.6-42 材料的记忆特性

3.1.4 载荷顺序效应

缺口零件在拉伸载荷作用下,缺口根部应力集中处材料发生屈服。卸载后因处于弹性状态的材料要恢复原来的状态,而已塑性变形的材料阻

止这种恢复行为，故两者相互挤压，使缺口根部产生残余压应力。如大载荷环后面紧接着出现小载荷环，则该小载荷环引起的应力将叠加在这个残余应力之上，因此该小载荷环造成的损伤受到前面大载荷环的影响，而且这种影响往往是很大的。图 18.6-43 所示的两种载荷-时间历程，除第一载荷环以外，二者都相同，只是第一个大载荷环的过载方向不同。图 18.6-43a 所示的大载荷环以压缩载荷结束，应力集中处产生残余拉应力 (+σ_m)。图 18.6-43b 所示的大载荷环以拉伸载荷结束，应力集中处产生残余压应力 (-σ_m)。由于两种载荷-时间历程所产生的残余应力不同，所以滞回线的形状不同，即载荷顺序对局部应力-应变是有影响的。

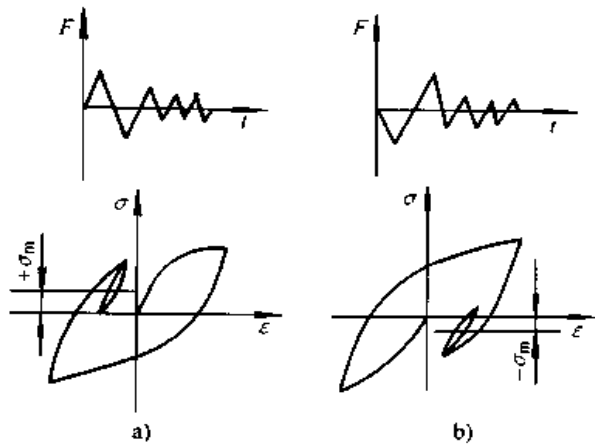


图 18.6-43 载荷顺序对滞回线影响

3.2 局部应力-应变分析

3.2.1 滞回线方程

局部应力-应变法认为，在疲劳强度问题中，材料的本构关系应由循环应力-应变曲线确定。材料的滞回线形状是通过循环应力-应变曲线来描述的。因此，循环 σ-ε 曲线在局部应力-应变法中具有特殊重要的位置。由式 (18.6-2) 给出循环应力-应变曲线用幅度表达的方程式

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}}$$

对于具有玛辛特性的材料，若使坐标原点与各应力水平下的滞回线最低点相重合，则滞回线的最高点的连线，与其上行段迹线相吻合 (图 18.6-41b)。许多试验表明，多数金属材料的滞回线，可以用放大一倍后的循环 σ-ε 曲线来近似

描述。这样，就可得出下面的滞回线方程式。即
加载时

$$\frac{\epsilon - \epsilon_r}{2} = \frac{\sigma - \sigma_r}{2E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_r}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (18.6-16)$$

卸载时

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon}{2} = \frac{\sigma_r - \sigma}{2E} + \left(\frac{\sigma_r - \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (18.6-17)$$

式中 ε_r、σ_r ——滞回线顶点的坐标。

3.2.2 诺伯法

确定局部应力-应变的方法有：电阻应变计测定法、光弹性法、脆性涂层法和云纹法等实验方法，以及用有限元法求数值解。弹塑性有限元法是计算局部应力-应变的较精确的方法，但由于计算工作量大，工程上倾向于采用简单的近似方法。例如诺伯法、线性应变法、修正的斯托威尔法和莫尔斯基等效能量法。其中，应用最多的是诺伯法。

诺伯提出的在弹塑性状态下的通用公式

$$\sigma_0^2 = K_\sigma K_\epsilon' \quad (18.6-18)$$

式中 α_σ ——理论应力集中系数；
K_σ' ——真实应力集中系数，K_σ' = σ/s；
K_ε' ——真实应变集中系数，K_ε' = ε/e；
s ——缺口件的名义应力；
e ——缺口件的名义应变；
σ ——缺口件的真实应力；
ε ——缺口件的真实应变。

通过式 (18.6-18)，就可以简单地把局部应力-应变与名义应力-应变联系起来。式 (18.6-18) 可写成下面形式，即

$$\sigma \epsilon = \alpha_\sigma^2 s e$$

一般情况下，名义应力和名义应变均在弹性范围内，即有 s = Ee。故有

$$\sigma \epsilon = \frac{(\alpha_\sigma s)^2}{E} \quad (18.6-19)$$

当名义应力确定以后，σϵ = (α_σs)²/E 是个常数，称为诺伯常数。于是式 (18.6-19) 可以写成 σϵ = C。这是一个双曲线方程，也称为诺伯双曲线。

如果已知 α_σ、s 和 E，再结合材料的 σ-ε 曲线，就可以算出相应的局部应力和应变，如图

18.6-44 所示。将式 (18.6-19) 改写成幅度形式

$$\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = \frac{\alpha_s^2 (\Delta s)^2}{E} \quad (18.6-20)$$

根据所给的载荷谱, 名义应力幅度 Δs 是知道的, 联立解式 (18.6-2) 和式 (18.6-20), 就可以求出 $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\epsilon$, 加上坐标原点的应力和应变值, 就是该点的局部真实应力和真实应变值。

例如, 图 18.6-44a 是用名义应力表示的加载历程, 图 18.6-44b 表示用诺伯法得到的零件危险点的局部应力-应变的情况。具体确定方法如下。

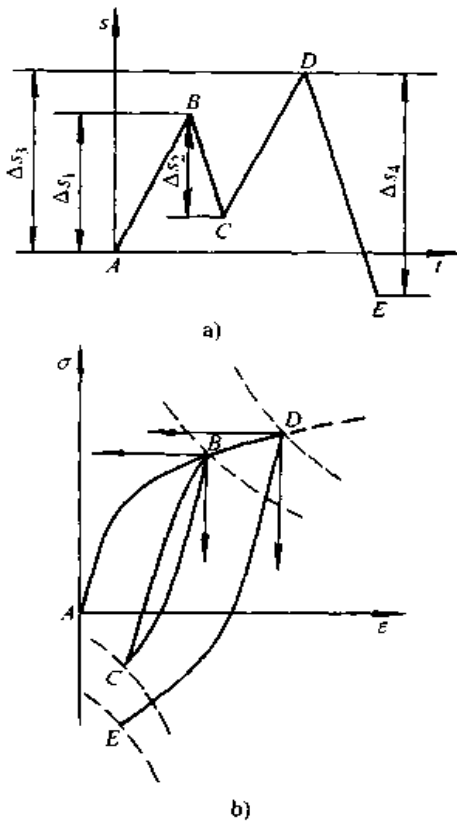


图 18.6-44 诺伯法确定局部应力-应变
a) 名义应力历程 b) 局部应力-应变的确定

1) B 点的确定 以 A 点作为坐标原点, 画出循环 σ - ϵ 曲线, 并用 AB 间的名义应力幅度 Δs_1 画出 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = (\alpha_s \Delta s_1)^2 / E$ 双曲线, 这两条曲线的交点 B 的纵坐标和横坐标, 就是加载到 B 点时的局部应力和局部应变值。

2) C 点的确定 以 B 点作为坐标原点, 向下画出滞回线 (两倍于循环 σ - ϵ 曲线), 并用 BC 间的名义应力幅度 Δs_2 画出 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = (\alpha_s \cdot \Delta s_2)^2 / E$ 双曲线, 这两条曲线的交点 C 的纵坐

标和横坐标, 即为从 B 点到 C 点的局部应力和应变幅度, 在卸载时为负。加上 B 点的局部应力和应变值后, 就得到加载到 C 点时的局部应力和应变值。

3) D 点的确定 从 C 点加载超过 B 点时要考虑“记忆特性”, 即从 C 点到 D 点可以看作从 A 点直接加载到 D 点, 故要以 A 点为坐标原点画出循环 σ - ϵ 曲线, 并画出 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = (\alpha_s \cdot \Delta s_3)^2 / E$ 双曲线, 两条曲线的交点 D 的纵坐标和横坐标, 即为加载到 D 点时的局部应力和应变值。

4) E 点的确定 以 D 点作为坐标原点, 向下画出滞回线, 并画出 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = (\alpha_s \Delta s_4)^2 / E$ 双曲线, 由这两条曲线的交点 E 的纵坐标和横坐标, 得到从 D 点到 E 点的局部应力和应变幅度, 在卸载时为负。加上 D 点的局部应力和应变值后, 就得到加载到 E 点时的局部应力和应变值。

按这个步骤对名义应力谱编制程序, 在计算机上进行计算。

诺伯公式高估了局部应力和应变。因此, 把公式中的理论应力集中系数 α_s 改为有效应力集中系数 K_s , 得诺伯修正公式

$$\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = \frac{K_s^2 (\Delta s)^2}{E} \quad (18.6-21)$$

3.3 裂纹形成寿命的估算

3.3.1 损伤计算

局部应力-应变法计算损伤的出发点是应变-寿命关系式 (18.6-4), 即

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\epsilon_c}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \\ &= \frac{\sigma_i'}{E} (2N)^b + \epsilon_i' (2N)^c \end{aligned}$$

或分开写成

$$\frac{\Delta\epsilon_c}{2} = \frac{\sigma_i'}{E} (2N)^b \quad (18.6-22)$$

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon_i' (2N)^c \quad (18.6-23)$$

ϵ - N 曲线是在对称循环条件下得出的。对于复杂载荷-时间历程作用下的疲劳问题, 平均应力的存在是不可避免的, 需要对上式进行修正。

当材料处于弹性范围时, 平均应力对疲劳寿命的影响很大。而当材料出现塑性变形后, 由于平均应力的松弛效应, 其影响就大大减弱了。所以通常只对 ϵ - N 曲线的弹性部分, 即式 (18.6-

22) 予以修正。一般应用的修正公式为

$$\sigma_r = \sigma_a \frac{\sigma'_i}{\sigma'_i - \sigma_m} \quad (18.6-24)$$

式中 σ_a ——应力幅;

σ_m ——平均应力;

σ_r ——等效应力幅。

修正后的应变-寿命关系为

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_i - \sigma_m}{E} (2N)^b \quad (18.6-25)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_i (2N)^{b'} \quad (18.6-26)$$

根据上述的寿命关系式, 即式(18.6-22)、式(18.6-23)和式(18.6-25), 采用不同的损伤参量, 可以得到不同的损伤公式。局部应力-应变法中常用的损伤公式有以下几种, 即

1) 兰德格拉夫损伤公式 R.W. 兰德格拉夫认为, 损伤由 $\Delta \epsilon_p$ 与 $\Delta \epsilon_e$ 的比值来控制。由式(18.6-22)和式(18.6-23)可推导出每个局部应变为 $\Delta \epsilon (= \epsilon_p + \epsilon_e)$ 的应变循环造成的损伤为

$$\frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\sigma'_i}{E \epsilon'_i} \cdot \frac{\Delta \epsilon_p}{\Delta \epsilon_e} \right)^{\frac{1}{(b'-c)}} \quad (18.6-27)$$

计入平均应力的影响, 修正后的损伤公式为

$$\frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\sigma'_i}{E \epsilon'_i} \cdot \frac{\Delta \epsilon_p}{\Delta \epsilon_e} \cdot \frac{\sigma'_i}{\sigma'_i - \sigma_m} \right)^{\frac{1}{(b'-c)}} \quad (18.6-28)$$

2) 道林损伤公式 N.E. 道林等人认为, 以过渡疲劳寿命 N_T 为界, 当 $\epsilon_p > \epsilon_e$ 时, 应该以塑性应变分量为损伤参量, 此时损伤公式为

$$\frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\epsilon'_i}{\epsilon_p} \right)^{\frac{1}{c'}} \quad (18.6-29)$$

当 $\epsilon_p < \epsilon_e$ 时, 应该以弹性应变分量为损伤参量, 损伤公式为

$$\frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\sigma'_i}{E \epsilon_e} \right)^{\frac{1}{b'}} \quad (18.6-30)$$

若考虑平均应力的影响进行修正, 则有

$$\frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\sigma'_i - \sigma_m}{E \epsilon_e} \right)^{\frac{1}{b'}} \quad (18.6-31)$$

3) 史密斯损伤公式 K.N. 史密斯等人为反映平均应力的影响, 对试验结果进行分析, 提出用 $\sigma_{\max} \Delta \epsilon$ 来计算损伤, 并推导出损伤公式

$$\sigma_{\max} \Delta \epsilon = \frac{2 \sigma'_i}{E} (2N)^{2b} + 2 \sigma'_i \epsilon'_i (2N)^{b+b'} \quad (18.6-32)$$

该方程要用数值方法求解。

根据不同的 $\Delta \epsilon_p / \Delta \epsilon_e$ 比值, 选用相应的损伤计算式。

3.3.2 估算裂纹形成寿命步骤

局部应力-应变法估算裂纹形成寿命的步骤:

1) 把载荷谱、材料性能常数和应力集中系数作为输入计算机的信息;

2) 对载荷-时间历程进行循环计数;

3) 根据载荷-时间历程确定名义应力和应变-时间历程;

4) 根据选定的损伤公式, 按循环计数的结果计算每一个载荷循环造成的损伤;

5) 对损伤进行累积计算, 即根据累积损伤公式算出裂纹形成寿命。

3.4 算例

在本例中, 采用雨流法计数, 用诺伯公式进行局部 σ - ϵ 分析, 用道林公式计算损伤。具体步骤如下。

首先将载荷-时间历程化为计算点上的名义应力-时间历程 (见图 18.6-45a), 并进行雨流计数, 得到 1-4-7、2-3-2' 和 5-6-5' 二个循环。然后根据材料的 σ - ϵ 曲线 (滞回线) 和零件的有效应力集中系数 K_s , 用诺伯法确定局部应力-应变响应。

循环 σ - ϵ 曲线的方程为

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (a)$$

根据倍增原理, 上升段的滞回线方程为

$$\frac{\epsilon - \epsilon_r}{2} = \frac{\sigma - \sigma_r}{2E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_r}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (b)$$

下降段的滞回线方程为

$$\frac{\epsilon_r - \epsilon}{2} = \frac{\sigma_r - \sigma}{2E} + \left(\frac{\sigma_r - \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (c)$$

式中 σ 、 ϵ ——局部应力、应变的流动值;

σ_r 、 ϵ_r ——前一峰值点的局部应力、应变值。

本例的材料是汽车用热轧低碳钢, 其化学成分为: $w(C) = 0.23\%$; $w(Mn) = 1.57\%$; $w(P) = 0.016\%$; $w(S) = 0.022\%$, $w(Si) = 0.01\%$; $w(Cu) = 0.22\%$ 。其强度极限 $\sigma_b = 540 - 565$ MPa, 屈服强度 $\sigma_s = 315 - 325$ MPa, 截面缩减率 $\psi = 64\% - 69\%$, 弹性模量 $E = 192\ 000$ MPa, $n' = 0.193$, $K' = 1\ 125.9$ MPa。

应用诺伯公式 (18.6-21):

$$\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = \frac{K_s^2 (\Delta s)^2}{E} \quad (d)$$

根据所计算的危险点处的几何形状和材料,查应力集中系数图得 $K_s = 2.60$ 。

根据图 18.6-45a 所示的名义应力-时间历程,即可逐个反复地进行局部应力-应变分析。

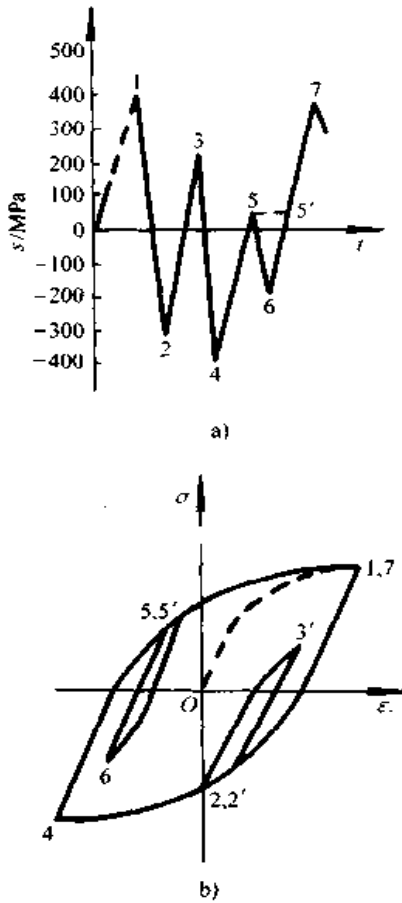


图 18.6-45 名义应力-时间历程及应力-应变响应

1) 从 0—1 加载时,由于是从零开始,循环 σ - ϵ 方程用式 (18.6-1)

$$\epsilon_a = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (e)$$

再与诺伯公式(d)联立求解。将 $E = 192\,000$ MPa, $K' = 1\,125.9$ MPa, $n' = 0.193$, $K_s = 2.6$ 代入,有

$$\left. \begin{aligned} \Delta\epsilon &= \frac{\Delta\sigma}{192\,000} + \left(\frac{\Delta\sigma}{1\,125.9}\right)^{\frac{1}{0.193}} \\ \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon &= \frac{2.6^2 \times \Delta s_{01}^2}{192\,000} \end{aligned} \right\}$$

此时, $\Delta s_{01} = 395.5$ MPa, 于是 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = 5.5$ 。解

联立方程得

$$\Delta\sigma = 458.3 \text{ MPa}, \Delta\epsilon = 0.012$$

即 1 点的局部应力和应变为

$$\sigma = 458.3 \text{ MPa}, \epsilon = 0.012$$

2) 从 1—2 卸载时,根据卸载滞回线计算,将有关数据代入式 (a) 和式 (d),有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\sigma}{2 \times 192\,000} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \times 1\,125.9}\right)^{\frac{1}{0.193}} \\ \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon &= \frac{2.6^2 \times \Delta s_{12}^2}{192\,000} \end{aligned} \right\}$$

此时, $\Delta s_{12} = 699.0$ MPa, 于是 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = 17.2$ 。解联立方程得

$$\Delta\sigma = 870 \text{ MPa}, \Delta\epsilon = 0.0198$$

2 点的局部应力和应变为

$$\sigma = 458.3 - 870 = -411.7 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = 0.012 - 0.0198 = -0.0078$$

3) 从 2—3 加载时,根据加载滞回线计算

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\sigma}{2 \times 192\,000} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \times 1\,125.9}\right)^{\frac{1}{0.193}} \\ \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon &= \frac{2.6^2 \times \Delta s_{23}^2}{192\,000} \end{aligned} \right\}$$

此时, $\Delta s_{23} = 521.1$ MPa, 于是 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = 9.56$ 。解联立方程得

$$\Delta\sigma = 780 \text{ MPa}, \Delta\epsilon = 0.0122$$

3 点的局部应力和应变为

$$\sigma = -411.7 + 780 = 368.3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = -0.0078 + 0.0122 = 0.0044$$

4) 在 3—4 的卸载过程中,由于从 3 卸载到 2' 时,形成了一个封闭的应力-应变滞回线,所以根据材料的记忆特性,计算 4 点的应力和应变时,应根据从 1 点出发的滞回线,并取应力幅度 Δs_{14} 进行计算

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta\epsilon}{2} &= \frac{\Delta\sigma}{2 \times 192\,000} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \times 1\,125.9}\right)^{\frac{1}{0.193}} \\ \Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon &= \frac{2.6^2 \times \Delta s_{14}^2}{192\,000} \end{aligned} \right\}$$

此时, $\Delta s_{14} = 790.7$ MPa, 得 $\Delta\sigma \cdot \Delta\epsilon = 22.0$ 。解联立方程得

$$\Delta\sigma = 910 \text{ MPa}, \Delta\epsilon = 0.024$$

4 点的局部应力和应变为

$$\sigma = 458.3 - 910 = -451.7 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = 0.012 - 0.024 = -0.012$$

5) 从 4—5 加载时,根据加载滞回线计算

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta \epsilon}{2} &= \frac{\Delta \sigma}{2 \times 192\,000} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2 \times 1\,125.9} \right)^{0.193} \\ \Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon &= \frac{2.6^2 \times \Delta s_{45}^2}{192\,000} \end{aligned} \right\}$$

此时, $\Delta s_{45} = 434.1 \text{ MPa}$, 得 $\Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon = 6.6$ 。解联立方程得

$$\Delta \sigma = 721 \text{ MPa}, \Delta \epsilon = 0.0092$$

5 点的局部应力和应变为

$$\sigma = -451.7 + 721 = 269.3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = -0.012 + 0.0092 = -0.0024$$

6) 从 5—6 卸载时, 根据卸载滞回线计算

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta \epsilon}{2} &= \frac{\Delta \sigma}{2 \times 192\,000} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2 \times 1\,125.9} \right)^{0.193} \\ \Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon &= \frac{2.6^2 \times \Delta s_{56}^2}{192\,000} \end{aligned} \right\}$$

此时, $\Delta s_{56} = 239.9 \text{ MPa}$, 得 $\Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon = 2.0$ 。解联立方程得

$$\Delta \sigma = 520 \text{ MPa}, \Delta \epsilon = 0.0038$$

6 点的局部应力和应变为

$$\sigma = 258.3 - 520 = -261.7 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = -0.0026 - 0.0038 = -0.0064$$

7) 从 6—7 加载时, 根据图 18.6-45b 所示, 7 点的应力和应变值与 1 点相同。得局部应力和应变为

$$\sigma = 458.3 \text{ MPa}, \epsilon = 0.012$$

有了局部应力-应变响应, 就可以进行损伤计算。损伤是根据每一应力-应变循环的幅值和均值, 用道林公式计算的。现将上面分析得到的三个应力-应变循环 2—3—2'、5—6—5' 和 1—4—7 中的应力幅值 σ_a 、应变幅值 ϵ_a 、平均应力 σ_m 、平均应变 ϵ_m 及弹性应变分量 ϵ_e 、塑性应变分量 ϵ_p 列入表 18.6-4。

表 18.6-4 三个应力-应变循环的应力和应变值

应力循环	σ_a / MPa	ϵ_a	σ_m / MPa	ϵ_m	ϵ_e	ϵ_p
2—3—2'	390	0.0061	-21.7	-0.0017	0.0020	0.0041
5—6—5'	265.5	0.002	3.8	-0.0044	0.0014	0.0006
1—4—7	455	0.0120	3.3	0	0.0024	0.0096

下面进行损伤计算, 即

对于 2—3—2' 循环, 由于 $\epsilon_p > \epsilon_e$, 故用 ϵ_p 计算损伤。由式 (18.6-29) 有

$$D_1 = \frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\epsilon_f'}{\epsilon_p} \right)^{\frac{1}{c}}$$

本例中, $\epsilon_f' = 0.26$, $c = -0.47$, 所以

$$D_1 = 2 \left(\frac{0.26}{0.0041} \right)^{-\frac{1}{0.47}} = 2.93 \times 10^{-4}$$

对于 5—6—5' 循环, 由于 $\epsilon_e > \epsilon_p$, 故用 ϵ_e 计算损伤。式 (18.6-31) 中的 $E\epsilon_e$ 以总应力幅 σ_a 代替, 有

$$D_2 = \frac{1}{N} = 2 \left(\frac{\sigma_f' - \sigma_m}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

本例中, $\sigma_f' = 935.9 \text{ MPa}$, $b = -0.095$, $\sigma_m = 3.8 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 265.5 \text{ MPa}$, $\epsilon_e = 0.0014$, $E = 192\,000 \text{ MPa}$ 。于是

$$D_2 = 2 \left(\frac{935.9 - 3.8}{265.5} \right)^{-\frac{1}{0.095}} = 3.63 \times 10^{-6}$$

对于 1—4—7 循环, 由于 $\epsilon_p > \epsilon_e$, 故用 ϵ_p 计算损伤

$$\begin{aligned} D_3 &= 2 \left(\frac{\epsilon_f'}{\epsilon_p} \right)^{\frac{1}{c}} = 2 \left(\frac{0.26}{0.0096} \right)^{-\frac{1}{0.47}} \\ &= 1.79 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

根据迈因纳定律求疲劳累积损伤, 得

$$\begin{aligned} D &= \sum_i D_i = D_1 + D_2 + D_3 \\ &= 2.93 \times 10^{-4} + 3.63 \times 10^{-6} + 1.79 \times 10^{-3} \\ &= 2.087 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

所以疲劳破坏时载荷循环块数 (即载荷-时间历程 1—7 的反向次数) B 为

$$B = \frac{1}{\sum_i D_i} = \frac{1}{2.087 \times 10^{-3}} = 479.2$$

若每个载荷块经历的时间为 h_0 , 则零件的疲劳寿命为

$$h = B \cdot h_0$$

上述计算均可由计算机完成。

局部应力-应变法是在应变分析和低周疲劳基础上发展起来的一种疲劳寿命估算方法。因此它特别适用于低周疲劳。将其应用于高周疲劳时, 由于它没有考虑高周疲劳中表面状态和尺寸的影响因素, 因此计算结果误差大, 需采用修正的方法以减小误差。

4 裂纹扩展寿命估算

有两种情况需计算裂纹扩展寿命, 一是零件

在加工制造过程中就已经存在缺陷或裂纹；另一是用局部应力应变法算出裂纹形成寿命之后。断裂力学是解决这一问题的基础，它对解决裂纹扩展问题，对合理估算裂纹扩展寿命提供了一条有效的途径。

4.1 应力强度因子

4.1.1 应力强度因子

实际零构件中的裂纹是各种各样的。按受力情况可以归纳成三类：Ⅰ型裂纹，又称张开型裂纹；Ⅱ型裂纹，又称滑开型或平面内剪切型裂纹；Ⅲ型裂纹，又称撕开型裂纹。见图 18.6-46 示。

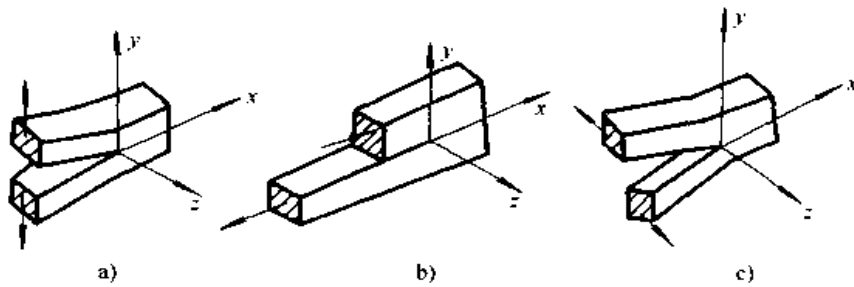


图 18.6-46 三种基本型裂纹

a) Ⅰ型—张开型 b) Ⅱ型—滑开型 c) Ⅲ型—撕开型

当一物体内部存在裂纹时，在裂纹尖端的应力理论上是无穷大的，因此无法再用理论应力集中系数 α_s 来表达，而应该用断裂力学中的应力场强度因子 K 来表达。 K 的大小能正确反映裂纹尖端附近区域内弹性应力场的强弱程度，可以用来作为判断裂纹是否扩展和是否发生失稳扩展的指标。

Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型裂纹的应力强度因子分别以 K_I 、 K_{II} 和 K_{III} 表示。其中用得最多是 K_I 。应力强度因子的一般表达式为

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (18.6-33)$$

式中 σ ——外加的名义应力 (MPa)；

α ——决定于裂纹体形状，裂纹形状、位置和加载方式系数，它可以是常数，也可以是 a 的函数；

a ——裂纹尺寸 (mm)，对内部裂纹和贯穿裂纹为裂纹长度之半，对表面裂纹为裂纹深度。

一些常见的裂纹形状的应力强度因子表达式可参阅有关应力强度因子手册。也可用有限元法或光弹性等试验方法测定。

4.1.2 断裂韧度

应力强度因子的临界值，即材料发生脆断时的应力强度因子，称为断裂韧度，用 K_{IC} 表示。Ⅰ型裂纹在平面应变条件下的应力强度因子临界

值称为平面应变断裂韧度，用 K_{IC} 表示。由于平面应变条件下应力状态是三向受拉，材料容易脆断，因此 K_{IC} 是代表材料断裂韧度的最低值，是反映材料韧度一个最重要指标。所以，在平面应变条件下的断裂判据为：

$$K_I = K_{IC} \quad (18.6-34)$$

因为 K_{IC} 是断裂韧度的最低值，用它建立的脆性断裂判据是偏于安全的。

实际工程中裂纹形式多种多样，受力条件可能很复杂，要求给出复合型判据。下面给出几种工程中适用又偏于安全的判据。

Ⅰ - Ⅱ型复合情况：

$$K_I + K_{II} = K_{IC} \quad (18.6-35)$$

在 $K_I > K_{II}$ 时偏于安全。

Ⅰ - Ⅲ型复合情况：

$$\sqrt{K_I^2 + \frac{K_{III}^2}{1-2\mu}} = K_{IC} \quad (18.6-36)$$

Ⅰ - Ⅱ - Ⅲ型复合情况：

$$\sqrt{(K_I + K_{II})^2 + \frac{K_{III}^2}{1-2\mu}} = K_{IC} \quad (18.6-37)$$

式中 μ 为泊松比。

平面应变断裂韧度可用试验方法测定。表 18.6-5 给出机械常用材料的 K_{IC} 值。

表 18.6-5 几种材料室温下的 K_{Ic} 值

材 料	热处理状态	强度指标 MPa		K_{Ic} MPa·m ^{1/2}	主要用途
		σ_s	σ_b		
40	860℃ 正火	294	549	70.7~71.9	轴、辮子、曲柄销、 活塞杆、连杆
	900℃ 淬火, 330℃ 回火	—	—	66.7	
	1 100℃ 淬火, 330℃ 回火	—	—	83.7	
45	840℃ 淬火, 550℃ 回火	513	803	96.8	轴、齿轮、链轮、键、 销
35CrMo	860℃ 淬火, 350℃ 回火	1 373	1 520	41.6	大截面齿轮、重载传 动轴
30Cr2MoV	940℃ 空冷, 680℃ 回火	549	686	140~155	大型汽轮机转子
34CrNi3Mo	860℃ 加热, 780℃ 淬火, 650℃ 回火 扩氢处理, 860℃ 淬火, 630℃ 回火	539	716	121~138	大型发电机转子
		780	961	149	
28CrNi3MoV	850℃ 淬火, 650℃ 回火	966	1 098	140.9	大型发电机转子
37SiMn2MoV	640~660℃ 退火, 870℃ 淬火, 680℃ 回火	588	736	137.4	精压机曲轴, 重要轴 类
14MnMoNbB	920℃ 淬火, 620℃ 回火	834	883	152~166	压力容器
14SiMnCrNiMoV	930℃ 淬火, 610℃ 回火	834	873	82.8~88.1	高压空气瓶
12CrNiMoV	930℃ 正火, 930℃ 淬火, 610℃ 回火	834	873	115.4	高压空气瓶
18MnMoNiCr	880℃ × 3 h, 空冷, 660℃ × 8 h, 空冷	490	—	276	厚壁压力容器
20SiMn2MoVA	900℃ 淬火, 250℃ 回火	1 216	1 481	113	石油钻机吊头
30SiMnCrMo	930℃ 淬火, 520℃ 回火	1 138~1 167	1 265~1 314	163~164	舰艇用钢板
30SiMnCrNiMo	860℃ 淬火, 400℃ 回火	1 402	—	93.0	舰艇用钢板
30CrMnSiA	880℃ 淬火, 500℃ 回火	1 079	1 152	98.9	高强度钢管
30CrMnSiMo	热轧态	1 177	1 373	148.8	高强度厚钢板
45Si2Mn	900℃ 淬火, 480℃ 回火	1 412	1 493	96.2	预应力钢筋
45MnSiV	900℃ 淬火, 440℃ 回火	1 471	1 648	83.7	预应力钢筋

续表 18.6-5

材 料	热处理状态	强度指标 MPa		K_{Jc} MPa·m ^{1/2}	主要用途
		σ_s	σ_b		
30CrMnSiNi	900℃ 淬火, 280℃ 回火	1 412	1 677	83.7	超高强度钢: 主要用作薄壁结构、飞行壳体、飞机起落架部件、紧固件、高压容器、扭力杆、装甲板、高强度螺栓、弹簧、冲头、模具等
30CrMnSiNi2	870℃ 淬火, 200℃ 回火	1 373~1 530	1 569~1 765	66.1	
	890℃ 淬火, 280℃ 回火	1 510	—	71.9	
	890℃ 淬火, 400℃ 回火	1 383	—	85.3	
30SiMnWMoV	调 质	1 608	1 814	84.7~96.1	
30Si2Mn2MoWV	950℃ 淬火, 250℃ 回火	≥1 470	≥1 860	≥110	
32SiMnMoV	920℃ 淬火, 250℃ 回火	1 608	1 922	75.7	
32Si2Mn2MoV	920℃ 淬火, 320℃ 回火	1 530~1 706	1 765~1 922	77.5~86.8	
33CrNi2MoV	870℃ 淬火, 550℃ 回火	1 324	1 471	139.5	
37Si2MnCrNiMoV	920℃ 淬火, 280℃ 回火	1 550~1 706	1 844~1 991	80.0	
37SiMnCrNiMoV	930℃ 淬火, 300℃ 回火	1 672	1 961	70.9	
	930℃ 淬火, 400℃ 回火	1 599	1 834	49.9	
	930℃ 淬火, 550℃ 回火	1 383	1 437	59.2	
40CrNiMoA	860℃ 淬火, 200℃ 回火	1 579	1 942	42.2		超高强度钢: 主要用作薄壁结构、飞行壳体、飞机起落架部件、紧固件、高压容器、扭力杆、装甲板、高强度螺栓、弹簧、冲头、模具等
	860℃ 淬火, 380℃ 回火	1 383	1 491	63.3	
	860℃ 淬火, 430℃ 回火	1 334	1 393	90.0	
	860℃ 淬火, 500℃ 回火	1 147	1 187	126.2	
	860℃ 淬火, 560℃ 回火	916	1 010	142.6	
40CrNi2Mo	850℃ 淬火, 220℃ 回火	1 550~1 608	1 883~2 020	54.9~71.9	
40SiMnCrMoV	920℃ 淬火, 200~300℃ 回火	1 422~1 510	1 893~1 922	63.0~71.3	
40SiMnCrNiMoV	890℃ 淬火, 260℃ 回火	1 630	1 910	80.6	
	890℃ 淬火, 600℃ 回火	1 402	1 515	94.0	
40SiMnCrNi2MoV	930℃ 淬火, 280℃ 回火	1 530~1 716	1 844~2 000	73.8~82.8	
45CrNiMoV	860℃ 淬火, 300℃ 回火	1 510~1 726	1 903~2 059	73.8~82.8	
4Cr5MoVSi	1 000~1 050℃ 淬火, 520~560℃ 回火三次	1 550~1 618	1 765~1 961	33.8	
6Cr4Mo3Ni2WV	1 120℃ 淬火, 560℃ 回火二次	—	2 452~2 648	25.4~40.3	
00N18Co8Mo5TiAl	815℃ 固溶处理 1 h, 空冷 480℃ 时效 3 h, 空冷	1 755	1 863	110~118	
GCr15	退火态	347	—	105	滚动轴承
15MnMoVCu	铸 钢	520	677	38.5~74.4	水轮机叶片
重轨钢	—	510~628	853~1 040	37.2~48.4	50 kg/m 重轨
稀土镁球铁	920℃ 淬火, 380℃ 回火	—	1 304	35.6~38.8	轴类

4.2 疲劳裂纹扩展速率

4.2.1 $\frac{da}{dN}$ - ΔK 关系曲线

疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 是应力强度因子范围 ΔK 的函数。试验得到的 $\frac{da}{dN}$ 与 ΔK 的关系曲线在双对数坐标上是一条 S 形曲线。这条 $(\frac{da}{dN})$ - ΔK 曲线可划分成三个区域：I 区、II 区和 III 区。

I 区为裂纹不扩展区，这时 $\Delta K < \Delta K_{th}$ ， ΔK_{th} 称为界限应力强度因子，又称门槛值。在空气介质中满足平面应变条件情况下，当 $\frac{da}{dN} = 10^{-8} \sim 10^{-7}$ mm 时，即认为 ΔK 值接近于 ΔK_{th} 。

表 18.6-6 给出各种材料的 ΔK_{th} 值

II 区为裂纹扩展区，该区是决定裂纹扩展寿命主要区。在此区域内， $\frac{da}{dN}$ 与 ΔK 曲线在双对数坐标上呈线性关系。其裂纹扩展速率可用帕里斯公式表示：

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (18.6-38)$$

式中 ΔK ——应力强度因子范围，

$$\Delta K = K_{max} - K_{min};$$

C 、 m ——材料常数， m 为直线的斜率；

III 区是裂纹快速扩展区，也称失稳扩展区。由于其扩展速率很高，因此该区的裂纹扩展寿命很短，故在计算疲劳裂纹扩展寿命时将其忽略。

式 (18.6-38) 中的 C 和 m 需用试验确定：表 18.6-7 给出一些材料的 C 和 m 值。

表 18.6-6 各种材料的疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 值

材 料	强度极限 σ_b /MPa	应力强度因子比 r	ΔK_{th} (裂纹长度为 0.5~5 mm) $MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$	材 料	强度极限 σ_b /MPa	应力强度因子比 r	ΔK_{th} (裂纹长度为 0.5~5 mm) $MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$
低碳钢	430	-1	6.36	铬镍铁合金 ($w(Ni) = 80\%$, $w(Cr) = 14\%$, $w(Fe) = 6\%$)	415	-1	6.39
		0.13	6.61			0	7.13
		0.35	5.15			0.57	4.71
		0.49	4.28			0.71	3.94
		0.64	3.19				
		0.75	3.85				
镍铬钢	919	-1	6.36	4.5% Cu- Al 合金	446	-1	2.09
			0			2.09	
			0.33			1.65	
			0.50			1.54	
马氏体时效钢	1 990	0.67	2.70			0.67	1.21
镍铬高强度钢	1 686	-1	1.76	低合金结构钢	830	-1	6.26
18/8 奥氏体 不锈钢	—	-1	6.05			0	6.57
		0	6.05			0.33	5.05
		0.33	5.92			0.50	4.40
		0.62	4.62			0.64	3.29
		0.74	4.06			0.75	2.20
铝	76	-1	1.02	铜	215	-1	2.67
		0	1.65			0	2.53
		0.33	1.43			0.33	1.76
		0.53	1.21			0.56	1.54
						0.80	1.32

续表 18.6-6

材 料	强度极限 σ_b/MPa	应力强度 因子比 r	ΔK_{th} (裂纹长度为 0.5-5 mm) $\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$	材 料	强度极限 σ_b/MPa	应力强度 因子比 r	ΔK_{th} (裂纹长度为 0.5-5 mm) $\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$
磷青铜	323	-1 0.33 0.50	3.75 4.06 3.19	钛 (工业纯)	539	0.62	2.20
	362	0.74	2.42				
黄 铜 (60/40)	323	-1	3.08	镍	431	-1	5.92
		0	3.50			0	7.91
		0.33	3.08			0.33	6.48
		0.51	2.64			0.57	5.15
		0.72	2.64			0.71	3.63

注：应力强度因子比 $r = K_{min}/K_{max}$ ，当不计裂纹闭合效应时，它等于应力比。

表 18.6-7 材料的裂纹扩展速度公式 [$da/dN = C(\Delta K)^m$]

材料名称	C	m	材料名称	C	m
软 钢	2.96×10^{-9}	3.3	34CrNi3MoV	2.10×10^{-9}	3.18
25	6.49×10^{-10}	3.6	14MnMoNbB	2.61×10^{-8}	2.5
30	9.30×10^{-11}	4.6	14MnMoVB	6.71×10^{-9}	3.0
40	1.04×10^{-9}	3.0	18MnMoNb	1.82×10^{-10}	3.8
40A	1.15×10^{-9}	3.58	20SiMn2MoV	2.92×10^{-8}	2.4
45	9.59×10^{-9}	2.75	30CrNiMnA	$(1.51 \sim 2.65) \times 10^{-8}$	2.5
15MnMoVCu	1.12×10^{-9}	3.6	14SiMnCrNiMoA	5.95×10^{-8}	2.44
22K	4.11×10^{-10}	4.05	30CrMnSiNi2MoA	1.74×10^{-8}	2.44
20g	1.25×10^{-8}	2.58	50Mn18Cr4WN	3.51×10^{-10}	3.7
铁素体珠光体钢	7.04×10^{-9}	3.0	GH36	1.78×10^{-8}	2.63
奥氏体钢	5.84×10^{-9}	3.25	马氏体钢	1.39×10^{-7}	2.25
1Cr13	1.14×10^{-7}	2.14	HY-130	5.01×10^{-8}	2.13
17CrMo1V	1.18×10^{-8}	2.58	HY-80	2.84×10^{-8}	2.54
34CrMo1A	5.67×10^{-9}	2.97	铝合金 7A09	2.16×10^{-8}	3.96
30Cr2MoV	5.69×10^{-10}	3.68	铝合金 2A14	2.35×10^{-7}	3.44
34CrNi3Mo	2.47×10^{-8}	2.5			

注：公式 $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ 中， ΔK 以 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 计， $\frac{da}{dN}$ 以 mm 计；如 $\frac{da}{dN}$ 以 m 计时，C 值应当乘上 10^{-3}

图 18.6-47 ~ 图 18.6-56 为 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线。其中图 18.6-53 ~ 图 18.6-55 为在腐蚀环境下的 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线。图 18.6-56 为在高温下的 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线。在腐蚀和高温下的 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线，受频率影响很大。

4.2.2 影响疲劳裂纹扩展速率的因素

(1) 平均应力影响

平均应力对疲劳裂纹扩展速率有很大影响，为了考虑平均应力的影响，福尔曼提出了如下修正公式：

$$\frac{da}{dN} = \frac{c(\Delta K)^m}{(1-r)K_C - \Delta K} \quad (18.6-39)$$

式中 K_C ——相应厚度下的断裂韧度；

c, m ——材料常数，由实验确定。

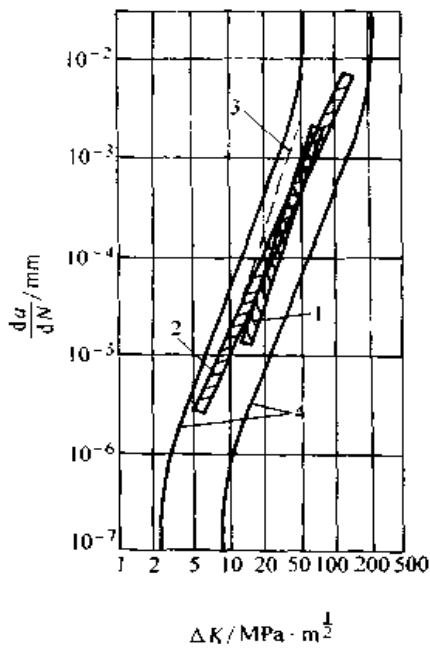


图 18.6-47 钢的疲劳裂纹扩展速率的离散带
1—铁素体珠光体钢 2—马氏体钢
3—奥氏体不锈钢 4—一般离散带

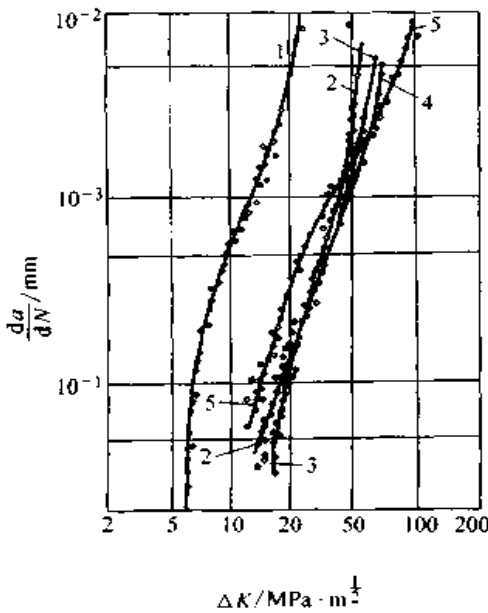


图 18.6-48 几种材料的裂纹扩展速率曲线
1—铝合金 2024-T4 (相当于中国的 2A12)
2—SS41 (相当于中国钢号 Q235A) 3—S45C
(相当于中国钢号 45) 4—HT-60 5—HT-80

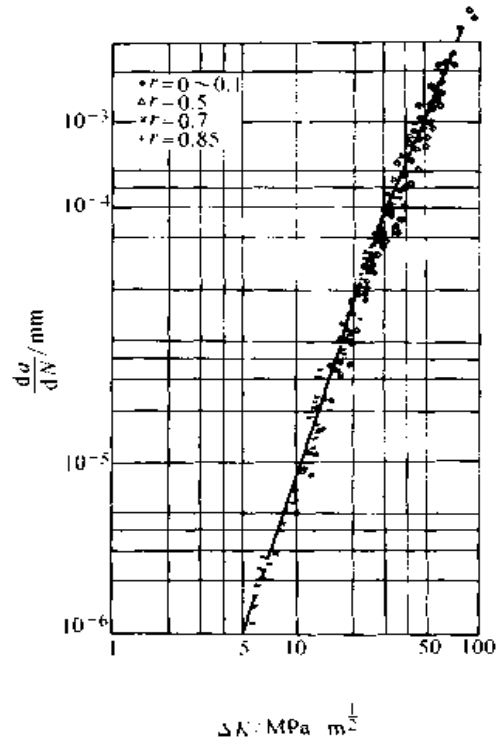


图 18.6-49 BS4360-50D 钢板的裂纹扩展速率曲线 (空气中, 轴向加载)
钢板厚 76 mm, 钢的成分: $w(C) = 0.18\%$,
 $w(Si) = 0.37\%$, $w(Mn) = 1.38\%$,
 $w(Nb) = 0.034\%$
力学性能: $\sigma_b = 545 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 360 \text{ MPa}$
室温下试验, 频率 $f = 1 \sim 10 \text{ Hz}$

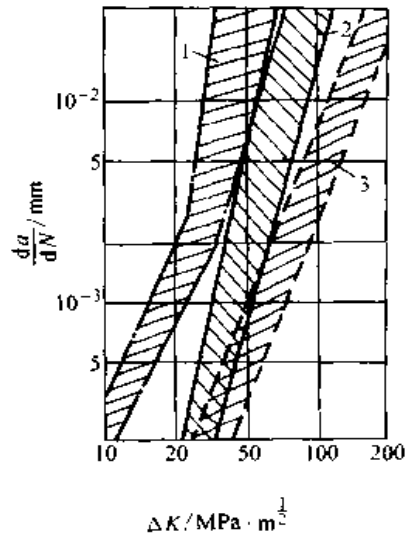


图 18.6-50 几种材料的裂纹扩展速率变化范围
1—硬铝合金 2—钛合金 3—碳钢、合金钢

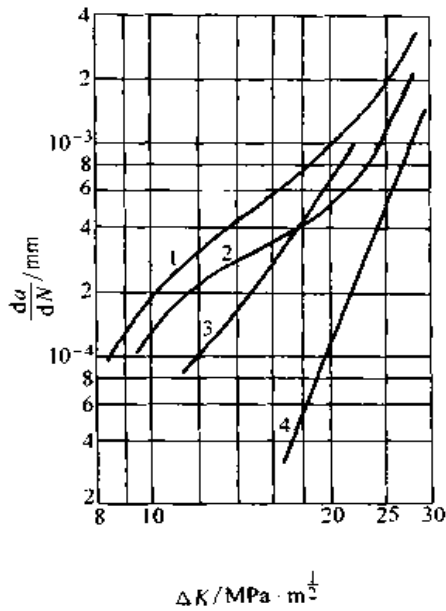


图 18.6-51 2024-T3 和 7075-T6 铝合金的裂纹扩展速率 (试验频率 $f = 20 \text{ Hz}$)
 1—7075-T6, 实验室空气 2—2024-T3, 实验室空气 3—7075-T6, 干空气
 4—2024-T3, 干空气

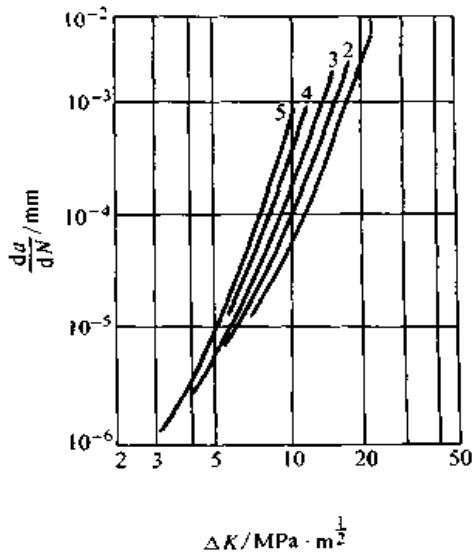


图 18.6-52 7075-T6 铝合金的裂纹扩展速率
 应力强度因子比值 $r = K_{\min}/K_{\max}$ 如下:
 1— $r = 0.103$ 2— $r = 0.231$ 3— $r = 0.333$
 4— $r = 0.455$ 5— $r = 0.524$

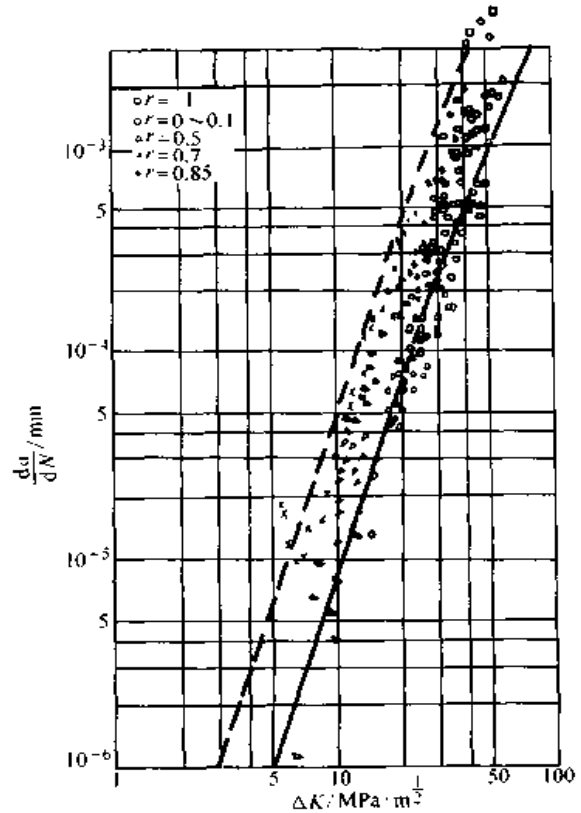


图 18.6-53 BS4360-50D 钢板的裂纹扩展速率 (海水中, 轴向加载)
 钢板厚 38 mm, 化学成分: $w(\text{C}) = 0.17\%$, $w(\text{Si}) = 0.35\%$, $w(\text{Mn}) = 1.35\%$, $w(\text{Nb}) = 0.03\%$
 力学性能: $\sigma_b = 538 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 370 \text{ MPa}$
 试验温度: $5 \sim 10^\circ\text{C}$ 试验频率: $f = 0.1 \text{ Hz}$

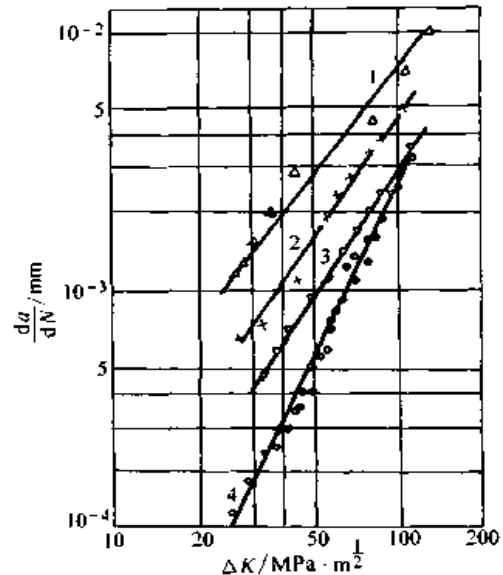


图 18.6-54 HY-130 海军合金钢在天然流动海水中的疲劳裂纹扩展速率
 1—海水 (-1050 mV), 频率 = 1 min^{-1}
 2—海水 (-1050 mV), 频率 = 10 min^{-1}
 3—海水 (-665 mV), 频率 = 10 min^{-1}
 4—实验室空气, 频率 = 30 min^{-1}

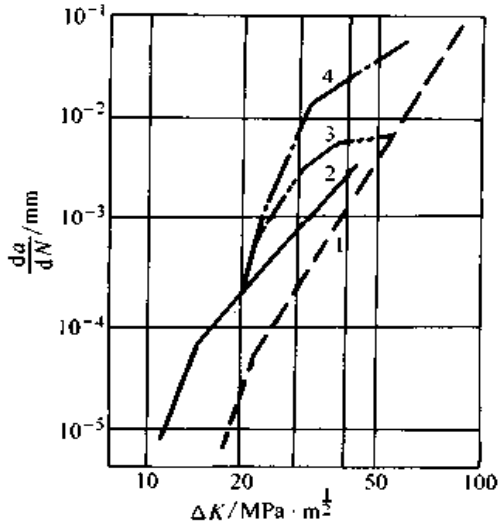


图 18.6.55 频率对 Ti-6Al-4V 钛合金的疲劳裂纹扩展影响 (在 3.5% NaCl 水液中)
1—空气 2—20~30 Hz 3—2 Hz 4—0.5 Hz

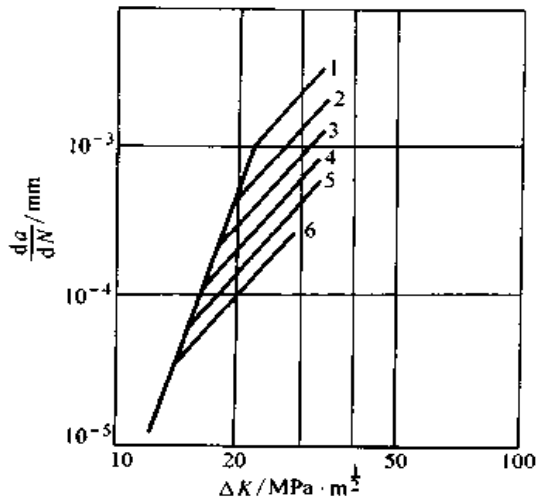


图 18.6.56 加载频率对 304 不锈钢高温 (538°C) 疲劳裂纹扩展速率的影响

1—频率 $f=0.08 \text{ min}^{-1}$ 2— $f=0.4 \text{ min}^{-1}$
3— $f=4 \text{ min}^{-1}$ 4— $f=40 \text{ min}^{-1}$
5— $f=400 \text{ min}^{-1}$ 6— $f=4000 \text{ min}^{-1}$

(2) 其他因素的影响

影响疲劳裂纹扩展速率的因素,除了载荷历史和平均应力之外,当温度不太高时,温度对 $\frac{da}{dN}$ 影响不大;但温度高时加速裂纹扩展。加载频率在空气中对 $\frac{da}{dN}$ 影响不大;但在腐蚀介质中有较大影响。

4.3 疲劳裂纹扩展寿命估算

估算机械零构件的疲劳裂纹扩展寿命时,必须知道:初始裂纹尺寸 a_0 ;临界裂纹尺寸 a_c ;零构件裂纹夹端的应力强度因子表达式;疲劳裂纹扩展速率表达式。

4.3.1 初始裂纹尺寸 a_0 的确定

初始裂纹的尺寸、形状、位置和取向,是指开始计算寿命时的零件中的最大原始缺陷的尺寸、形状、位置和方向,可用无损检测技术测量得到。

应重点分析最大应力区内的缺陷和裂纹。一般为了安全,假设关键零件的关键部位的裂纹面垂直于最大主拉应力方向,使其应力强度因子值,在整个裂纹扩展阶段中最大。

初始裂纹尺寸对零件裂纹扩展寿命有重要影响,故应慎重确定 a_0 值。

4.3.2 临界裂纹尺寸 a_c 的确定

确定临界裂纹尺寸 a_c 应遵循下列原则:

- 1) 零构件的净截面应力应小于或等于材料拉伸强度极限 σ_{bc} 。
- 2) 零构件的应力强度因子 K_I 应小于或等于材料的断裂韧性 K_{IC} (平面应变) 或 K_{IC} (平面应力)。

按上述条件确定的裂纹尺寸,取小值即为断裂时的临界裂纹尺寸 a_{cc} 。

4.3.3 裂纹扩展寿命的估算公式

(1) 等应力幅估算公式

1) 由帕里斯公式积分得疲劳裂纹扩展寿命的计算公式为

当 $m \neq 2$ 时:

$$N_p = \frac{1}{\left(1 - \frac{m}{2}\right) C_1 (\Delta\sigma)^m} (a_c^{1-\frac{m}{2}} - a_0^{1-\frac{m}{2}}) \quad (18.6-40)$$

当 $m = 2$ 时:

$$N_p = \frac{1}{C_1 (\Delta\sigma)^2} \ln \frac{a_c}{a_0} \quad (18.6-41)$$

式中 $C_1 = C a^m \pi^{m/2}$

C 、 m ——帕里斯公式中的常数,查表 18.6-7;

α ——应力强度因子中的参数,查应力强度因子手册;

a_0 ——初始裂纹尺寸；
 a_c ——临界裂纹尺寸；
 N_p ——从 a_0 到 a_c 的应力循环数。

2) 当考虑平均应力时, 则疲劳裂纹扩展寿命公式是福尔曼公积分所得

当 $m \neq 2$ 及 $m \neq 3$ 时:

$$N_p = \frac{2}{\pi C (\Delta\sigma)^2} \left\{ \frac{(\Delta K)_c}{m-2} \left[\frac{1}{(\Delta K)_0^{m-2}} - \frac{1}{(\Delta K)_c^{m-2}} \right] - \frac{1}{m-3} \left[\frac{1}{(\Delta K)_0^{m-3}} - \frac{1}{(\Delta K)_c^{m-3}} \right] \right\} \quad (18.6-42)$$

当 $m = 2$ 时:

$$N_p = \frac{2}{\pi C (\Delta\sigma)^2} \left[(\Delta K)_c \ln \frac{(\Delta K)_c}{(\Delta K)_0} + (\Delta K)_0 - (\Delta K)_c \right] \quad (18.6-43)$$

当 $m = 3$ 时:

$$N_p = \frac{2}{\pi C (\Delta\sigma)^2} \left\{ (\Delta K)_c \left[\frac{1}{(\Delta K)_0} - \frac{1}{(\Delta K)_c} \right] + \ln \frac{(\Delta K)_0}{(\Delta K)_c} \right\}$$

(2) 变应力幅寿命估算

当零构件承受变应力幅时, 如 $\pm\sigma_1$ 经 n_1 次循环, 再转 $\pm\sigma_2$ 经 n_2 次循环……, 则可由式 (18.6-38) 或式 (18.6-39) 分段积分求得。

4.4 算例

图 18.6-57a 为汽轮发电机转子中的裂纹示意图。转子材料为 34CrNi3Mo, 材料力学性能为: $\sigma_b = 686 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 549 \text{ MPa}$, $K_{IC} = 77.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。最危险的裂纹位置及尺寸为: $H = 350 \text{ mm}$, $2a_0 = 70 \text{ mm}$ (设为圆片状裂纹), 轴的转速为 $3\ 600 \text{ r/min}$, 求转子到断裂时的寿命。

解 1) 假设转子的横截面形状如图 18.6-57b 所示, 计算应力时作如下假设: ①转子的嵌线槽根部以外区域, 作片状结构处理, 以考虑离心力对中心部分影响。片状结构部分的密度, 按铜线密度 ρ_1 计算; ②从中心孔到线槽根部, 作为一个轴处理, 此轴受上述均匀外载荷和自身的离心力。

2) 均布外载荷 p 的计算 由于片状区的平均密度为 ρ_1 , 转子的角速度为 ω , 所以

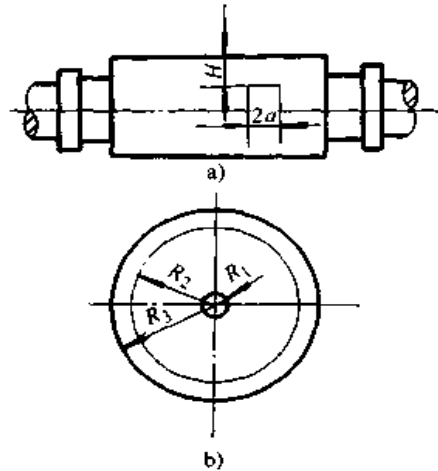


图 18.6-57 汽轮发电机转子中的裂纹示意图

$$pR_2 d\theta = \int_{R_2}^{R_3} \rho_1 r d\theta dr \omega^2 r$$

于是得

$$p = \frac{1}{3} \rho_1 \omega^2 (R_3^3 - R_2^3) / R_2$$

3) 周向应力的计算 设转子体的密度为 ρ , 泊松比为 ν 。

在半径为 R_2 的圆周上, 由于 p 的作用而引起的周向 (或称切向) 应力 σ'_i , 按厚壁圆筒公式计算, 即

$$\sigma'_i = \frac{\rho R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right)$$

由于转子本体 (片状区内) 的离心力引起的应力为

$$\sigma''_i = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left(R_2^2 + R_1^2 + \frac{R_1^2 R_2^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right)$$

则转子的总周向应力为

$$\sigma_i = \sigma'_i + \sigma''_i = \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 \left(R_2^2 + R_1^2 + \frac{R_1^2 R_2^2}{r^2} - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right) + \rho_1 \omega^2 \frac{(R_3^3 - R_2^3) R_2}{3(R_2^2 - R_1^2)} \times \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right)$$

式中, $V = \frac{\nu}{1 + \nu}$ (取 $\nu = 0.3$, $V = \frac{0.3}{1 + 0.3} = 0.429$)

在本例中的数据如下:

对于钢 $\rho = 77 \times 10^{-3} / 980 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4$

对于铜 $\rho_1 = 88.3 \times 10^{-3} / 980 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^4$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 3\ 600}{60} = 377/\text{s}$$

$R_1 = 5 \text{ cm}$, $R_2 = 28.3 \text{ cm}$, $R_3 = 42.6 \text{ cm}$

并令缺陷半径 $r = 42.6 - 35 = 7.6 \text{ cm}$

将上述数值代入式中,得缺陷处的周向应力为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{3 + 0.429}{8} \times (77 \times 10^{-3}/980) \times 377^2 \times \\ &\left(28.3^2 + 5^2 + \frac{5^2 \times 28.3^2}{7.6^2} - \frac{1 + 3 \times 0.3}{3 + 0.3} \times \right. \\ &\left. 7.6^2 \right) + (88.3 \times 10^{-3}/980) \times \\ &377^2 \frac{(42.6^3 - 28.3^3) \times 28.3}{3(28.3^2 - 5^2)} \left(1 + \frac{5^2}{7.6^2} \right) \\ &= 17\,700 \text{ N/cm}^2 \end{aligned}$$

或 $\sigma_1 = 177 \text{ MPa}$

4) 计算临界裂纹尺寸 由断裂力学可知,圆片形裂纹的应力强度因子为

$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a}$$

当 $K_I = K_{Ic}$ 时, $a = a_c$, 则临界裂纹尺寸为

$$\begin{aligned} a_c &= \frac{(K_{Ic} \pi / 2 \sigma)^2}{\pi} = \frac{(77.5 \pi / 2 \times 177)^2}{\pi} \\ &= 0.150\,57 \text{ m} \end{aligned}$$

或 $a_c \approx 151 \text{ mm}$

5) 寿命估算 转子的寿命为裂纹从 $a_0 =$

35 mm 扩展到 $a_c = 151 \text{ mm}$ 的寿命。

材料 34CrNi3Mo 的裂纹扩展速度公式 (18.6-38) 中的参数为

$$C = 0.004\,37 \times 10^{-9}, m = 2.5$$

考虑汽轮发电机转子在启动和停车时为脉动循环变应力, 即

$$\Delta \sigma = \sigma = 177 \text{ MPa}$$

$$C_1 = C a^m \pi^{m/2}$$

$$= 0.004\,37 \times 10^{-9} \times \left(\frac{2}{\pi} \right)^{2.5} (\pi)^{2.5 \times 2}$$

$$= 0.005\,9 \times 10^{-9}$$

则转子的寿命为

$$\begin{aligned} N_p &= \frac{\left[a_c \left(1 - \frac{m}{2} \right) - a_0 \left(1 - \frac{m}{2} \right) \right]}{\left(1 - \frac{m}{2} \right) C_1 (\Delta \sigma)^m} \\ &= \frac{1}{\left(1 - \frac{2.5}{2} \right) \times 0.005\,9 \times 10^{-9} \times 177^{2.5}} \\ &\quad \times \left[0.151 \left(1 - \frac{2.5}{2} \right) - 0.035 \left(1 - \frac{2.5}{2} \right) \right] \\ &= 1.151\,3 \times 10^6 \end{aligned}$$

这是转子到达破坏时的启动-停车次数。

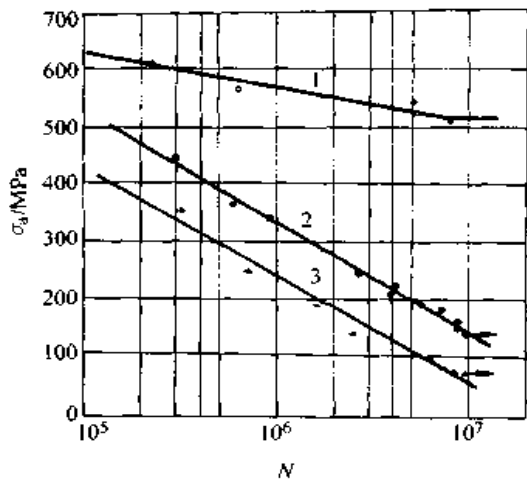


图 18.7-7 402 船用钢在室湿大气中，
24℃海水中和自来水中的 S-N 曲线
1—室温大气下 2—流动自来水中
3—天然海水（葫芦岛）中

402 船用钢 $\sigma_b = 936 \text{ MPa}$
热处理：860℃油淬，600℃油冷
光滑试样 ($\alpha_s = 1$)，旋转弯曲试验 ($r = -1$)
应力频率 $f = 3\ 000 \text{ min}^{-1}$

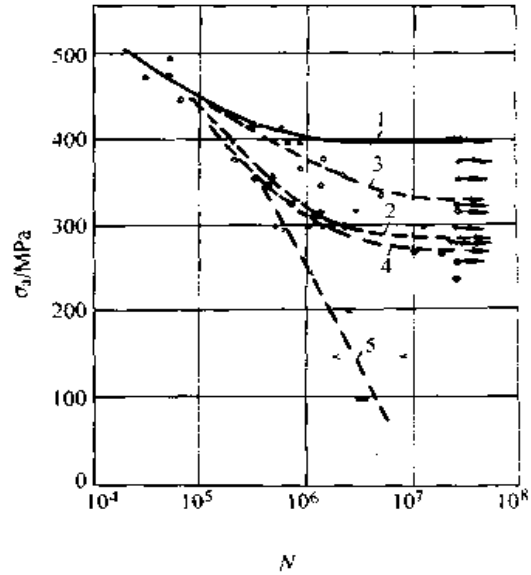


图 18.7-8 21/7 铬镍不锈钢的 S-N 曲线

1—空气中
2~5 都在 $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 水溶液中
2—电路切断
3—相对于溶液加上电位 0 mV
4—加上 50 mV
5—加上 200 mV

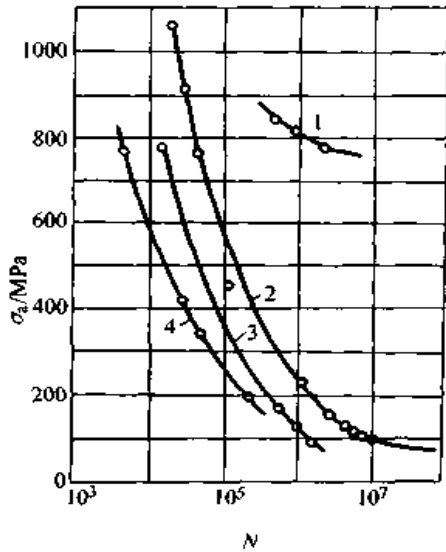


图 18.7-9 镍硅钢的腐蚀疲劳的 S-N 曲线

1—在空气中
2—淡水中， $f = 1\ 450 \text{ min}^{-1}$
3—淡水中， $f = 50 \text{ min}^{-1}$
4—淡水中， $f = 5 \sim 8 \text{ min}^{-1}$

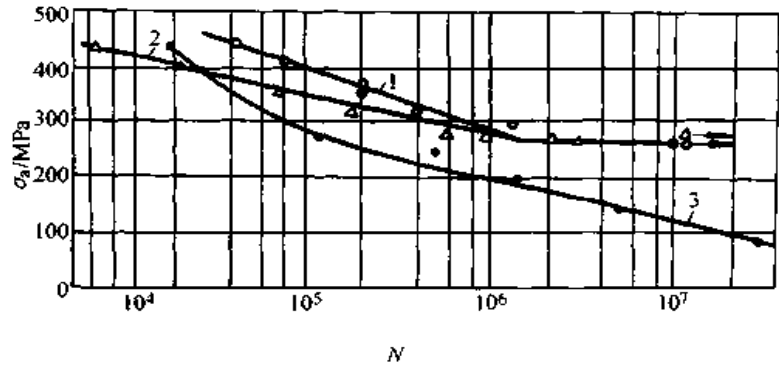


图 18.7-10 13Cr 不锈钢腐蚀疲劳的 S-N 曲线

1—在空气中 2—在蒸汽中
3—在蒸汽加 $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 的腐蚀环境

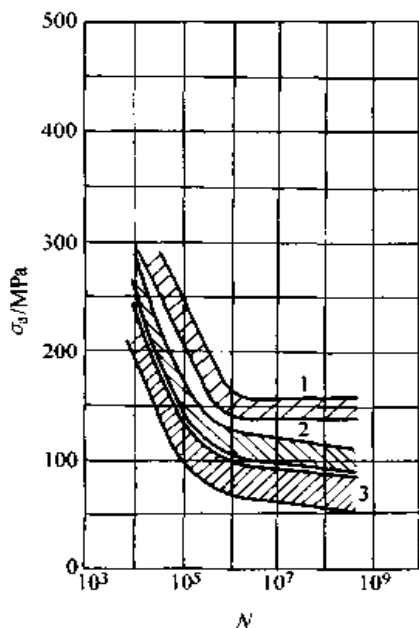


图 18.7-11 13Cr 不锈钢缺口试样的 S-N 曲线

1—空气中 2—蒸馏水中
3— $w(\text{NaCl}) = 1\%$ 水溶液中
13Cr 钢 力学性能: $\sigma_b = 760 \sim 830 \text{ MPa}$
 $\sigma_s = 610 \sim 650 \text{ MPa}$
旋转弯曲试验 ($r = -1$), $f = 50 \text{ Hz}$, 温度 23°C

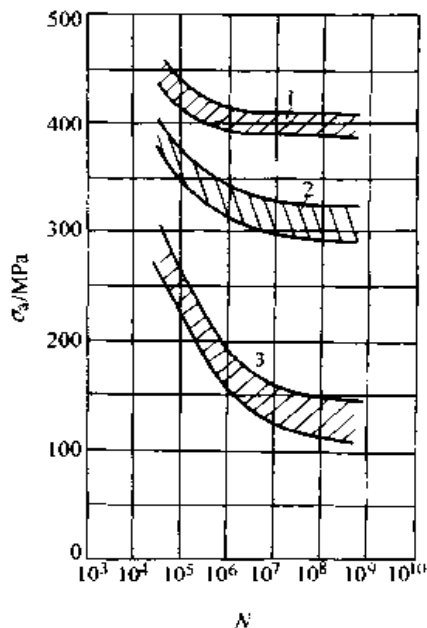


图 18.7-12 13Cr 不锈钢光滑试样的 S-N 曲线

1—空气中 2—蒸馏水中
3— $w(\text{NaCl}) = 1\%$ 水溶液中
13Cr 钢化学成分: $w(\text{Cr}) = 13\%$, $w(\text{C}) = 0.20\%$
 $\sigma_b = 760 \sim 830 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 610 \sim 650 \text{ MPa}$,
旋转弯曲试验 ($r = -1$), $f = 50 \text{ Hz}$, 温度 23°C

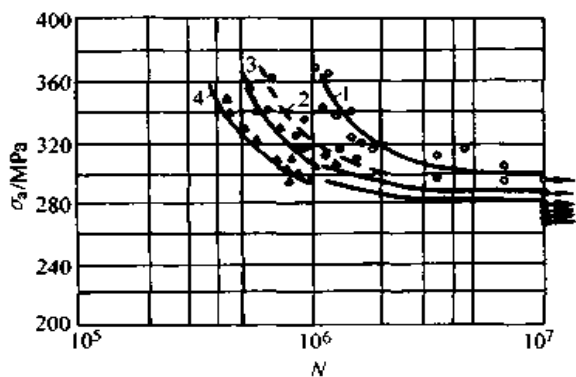


图 18.7-13 空气、氧和氮对低碳钢高周疲劳的 S-N 曲线的影响

1—干氮 2—湿氮 3—湿氧 4—干氧、空气
温度 25°C 时有疲劳极限 $\sigma_{-1} = 283 \text{ MPa}$

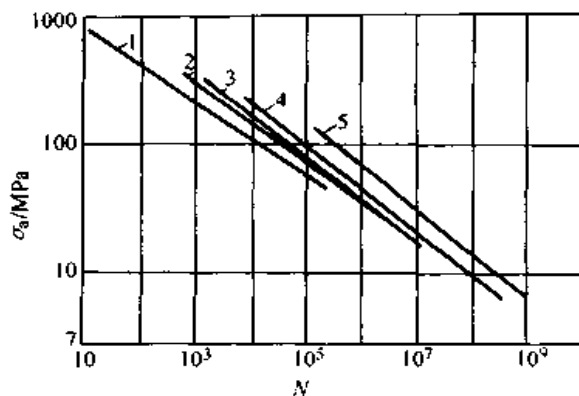


图 18.7-14 碳钢及低合金钢在淡水流中试验频率对疲劳强度的影响

1—频率 $f = 0.083 \text{ min}^{-1}$ 2—频率 $f = 10 \text{ min}^{-1}$
3—频率 $f = 50 \text{ min}^{-1}$ 4—频率 $f = 500 \text{ min}^{-1}$
5—频率 $f = 10\,000 \text{ min}^{-1}$

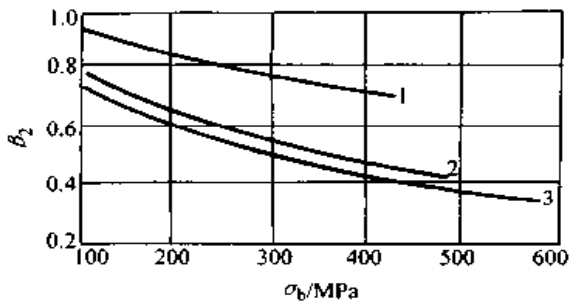


图 18.7-15 预腐蚀对铝合金疲劳极限的影响
1—10天 2—50天 3—100天
(天数—试验前将试样浸于淡水中的天数)
试验循环次数 10^7 ，旋转弯曲试验

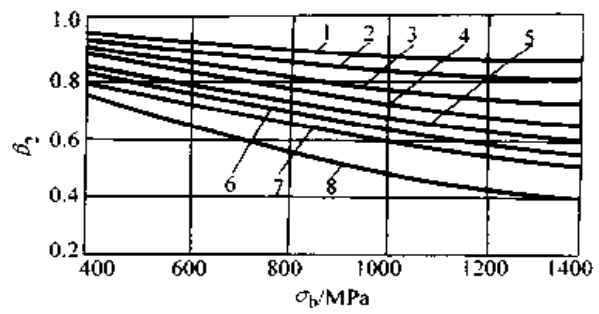


图 18.7-16 预腐蚀对钢试样疲劳极限的影响
1—1天 2—2天 3—4天 4—7天
5—10天 6—25天 7—50天 8—200天
(天数—试验前将试样浸于淡水中的天数)
试验循环次数 10^7 ，旋转弯曲试验

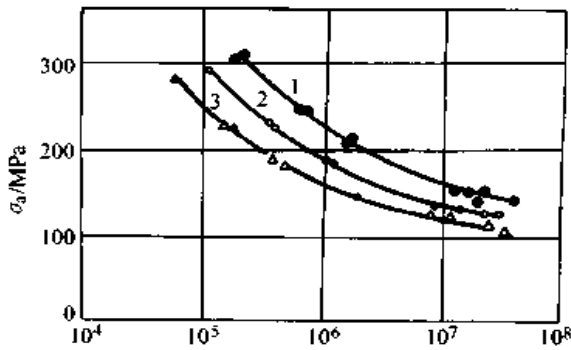


图 18.7-17 18Cr11Ni2Mo 不锈钢在
 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 5\%$ 水溶液中的 S-N 曲线
1—25℃ 2—50℃ 3—75℃
力学性能: $\sigma_s = 255 \text{ MPa}$
悬臂弯曲试验 ($r = -1$)
应力频率 $f = 1700 \text{ min}^{-1}$

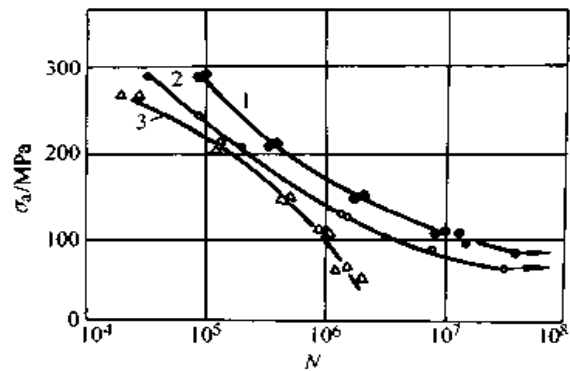


图 18.7-18 19Cr12Ni 不锈钢在
 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 5\%$ 水溶液中的 S-N 曲线
1—25℃ 2—50℃ 3—75℃
力学性能: $\sigma_s = 220.7 \text{ MPa}$
悬臂弯曲试验 ($r = -1$)
应力频率 $f = 1700 \text{ min}^{-1}$

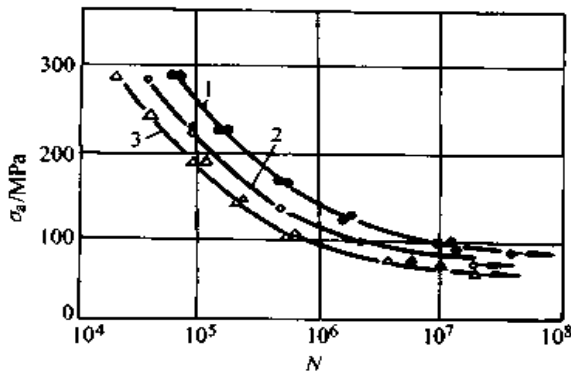


图 18.7-19 19Cr12Ni 不锈钢在
 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 5\%$ 水溶液中的 S-N 曲线
1—25℃ 2—50℃ 3—75℃
力学性能: $\sigma_s = 216 \text{ MPa}$
悬臂弯曲试验 ($r = -1$)，应力频率 $f = 1700 \text{ min}^{-1}$

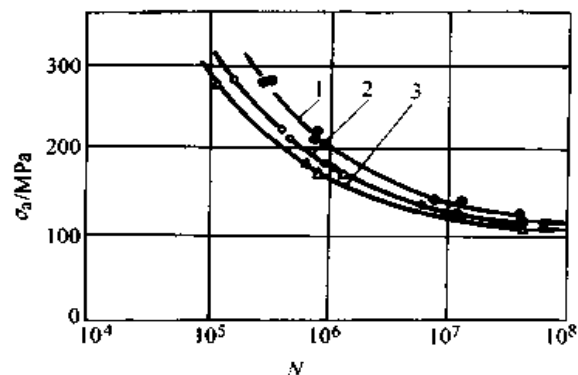


图 18.7-20 18Cr13Ni2Mo 不锈钢在
 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 5\%$ 水溶液中的 S-N 曲线
1—25℃ 2—50℃ 3—75℃
力学性能: $\sigma_s = 225.6 \text{ MPa}$
悬臂弯曲试验 ($r = -1$)，应力频率 $f = 1700 \text{ min}^{-1}$

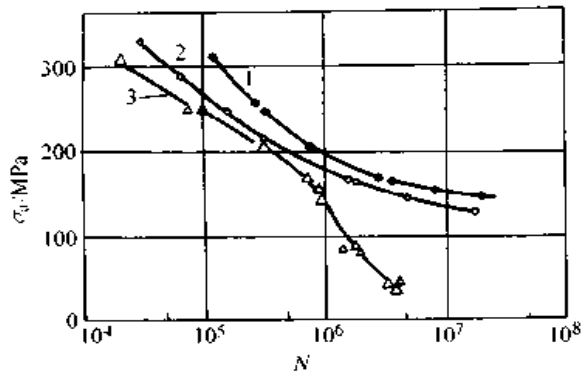


图 18.7-21 18Cr11Ni3Mo 不锈钢在 $w(\text{H}_2\text{SO}_4) = 5\%$ 水溶液中的 S-N 曲线
 1—25℃ 2—50℃ 3—75℃
 力学性能: $\sigma_s = 240.3 \text{ MPa}$
 悬臂弯曲试验 ($r = -1$)
 应力频率 $f = 1700 \text{ min}^{-1}$

表 18.7-1 某些国产钢种的腐蚀
 疲劳极限 $(\sigma_{-1})_d$

钢 种	抗拉强度 σ_b/MPa	试验频率 f/min^{-1}	腐蚀环境	试验循环次数 N	腐蚀疲劳极限 $(\sigma_{-1})_d/\text{MPa}$
40Cr	1 170	3 000	$w(\text{NaCl}) = 3\%$ 水溶液 自来水	10^7	130
				10^7	155
20CrMo	954	3 000	海 水 自来水	10^7	110
				10^7	150
ZG20SiMn	510	5 000	自来水滴 水浸水	10^7	175
				10^7	178
ZG0Cr13-Ni4Mo	784	5 000	自来水滴 水浸水	10^7	200
				10^7	218

表 18.7-2 蒸汽对钢试样腐蚀疲劳的影响

(试验循环次数 $N = 5 \times 10^7$ 次循环; 旋转弯曲; 应力频率 $f = 2200 \text{ min}^{-1}$)

材 料	σ_b/MPa	疲 劳 极 限 MPa				
		在空气中 σ_{-1}	在空气中喷蒸汽 $(\sigma_{-1})_d$	已知温度及蒸汽压力		
				100℃ 0 MPa	149℃ 0.41 MPa	371℃ 1.51 MPa
$w(\text{Ni}) = 3.5\%$ 钢	725	316	161	—	246	239
$w(\text{Ni}) = 3.5\%$ 钢	814	401	161	402	369	362
$w(\text{Ni}) = 3.5\%$ 钢, 镀铬	—	—	285	—	315	—
$w(\text{Cr}) = 12.5\%$ 不锈钢	696	416	223	369	377	369
氮化钢: $w(\text{C}) = 0.36\%$, $w(\text{Cr}) = 1.5\%$, $w(\text{Al}) = 1.2\%$	853	510	—	—	439	345
氮化钢: $w(\text{C}) = 0.36\%$, $w(\text{Cr}) = 1.5\%$, $w(\text{Al}) = 1.2\%$ 经氮化	—	625	500	—	478	402

表 18.7-3 钢的腐蚀疲劳试验数据

材 料	热处理	σ_b/MPa	试验方式	应力频率 f/min^{-1}	腐蚀环境	试验循环次数	σ_{-1}^2/MPa	$(\sigma_{-1})_d^2/\text{MPa}$	$\beta_2 = \frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}}$
软 钢 18/8Cr-Ni-W 钢	正火 退火		旋转 弯曲		淡水 滴注	10^8	268	32	0.12
							277	175	0.63
$w(\text{C}) = 0.21\%$ 碳钢	退火	500	旋转 弯曲 拉伸	1 300 1 500	海水	10^8	225	30	0.13
							142	39	0.27

续表 18.7-3

材 料	热处理	σ_w / MPa	试验 方式	应力频率 f/min^{-1}	腐蚀 环境	试验循 环次数	$\sigma_{-1}^{\text{I}} /$ MPa	$(\sigma_{-1})_{\text{cl}}^{\text{I}} /$ MPa	$\beta_2 = \frac{(\sigma_{-1})_{\text{cl}}^{\text{I}}}{\sigma_{-1}}$
$w(\text{Cr}) = 12.5\%$ 铬钢 18/8 不锈钢 $w(\text{Cr}) = 18.5\%$ 铬钢 $w(\text{C}) = 0.48\%$ 碳钢 镀 锡	退火	1 020	拉伸	360	淡水	2.5×10^7	257	126	0.49
		1 320					194	83	0.43
		790					246	194	0.79
		1 040					203	52	0.26
$w(\text{C}) = 0.35\%$ 碳钢		610	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	285	173	0.61
							74	0.26	
$w(\text{C}) = 0.50\%$ 碳钢		660	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	222	140	0.63
							77	0.35	
$w(\text{C}) = 0.50\%$ 碳钢	调质	910	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	424	178	0.42
							97	0.23	
合金钢[$w(\text{Cr}) = 0.8 \sim 1.1\%$, $w(\text{Mo}) = 0.15 \sim 0.25\%$]	调质	900	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	493	189	0.38
							99	0.20	
合金钢[$w(\text{C}) = 0.55 \sim 0.65\%$, $w(\text{Si}) = 1.8 \sim 2.2\%$]	正火	1 010	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	507	175	0.35
							104	0.20	
$w(\text{Cr}) = 5\%$ 铬钢	调质	910	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	520	371	0.71
							109	0.21	
熟铁		330	旋转 弯曲	1 750	盐水 ^① 盐水 ^②	10^7	215	137	0.64
							115	0.54	

注：① $w(\text{NaCl}) = 6.8\%$ 盐水溶液，试样整体浸入。
 ② $w(\text{NaCl}) = 6.8\%$ 盐水与饱和 H_2S ，试样整体浸入。
 ③ 在空气中的疲劳极限。
 ④ 在腐蚀环境中的疲劳极限。

表 18.7-4 有色金属的腐蚀疲劳试验数据

材 料	热 处 理	σ_b / MPa	试验方式	应力频率 f/min^{-1}	腐蚀环境	试验循 环次数	$\sigma_{-1}^{\text{I}} /$ MPa	$(\sigma_{-1})_{\text{cl}}^{\text{I}} /$ MPa	$\beta_2 = \frac{(\sigma_{-1})_{\text{cl}}^{\text{I}}}{\sigma_{-1}}$
铝	退火	75	旋转弯曲	1 450	淡水 ^① 含 盐量为海水的 1/3 的河水 ^②	2×10^7	37	—	—
	半硬化	96					44	15 ^②	0.41
							64	22 ^②	0.50
硬化	124	64					37 ^① 30 ^②	0.58 0.47	
硬 铝 (铝铜镁合金)	退火	206					107	52 ^① 45 ^②	0.49 0.42
	已热 处理	427					110	62 ^① 52 ^②	0.56 0.47

续表 18.7-4

材 料	热处 理	$\sigma_b /$ MPa	试验方式	应力频率 f / min^{-1}	腐蚀环境	试验循 环次数	$\sigma_{-1}^2 /$ MPa	$(\sigma_{-1})_d^1 /$ MPa	$\beta_2 =$ $\frac{(\sigma_{-1})_d}{\sigma_{-1}}$			
电解铜, 热轧	退火	193	旋转弯曲	1 450	淡水 ^① 含 盐量为海水 的 1/3 的河 水 ^②	2×10^7	62	— 64 ^②	— 1.03			
电解铜, 冷轧	回火	289					104	107 ^① 107 ^②	1.03 1.03			
铜镍合金 [$w(\text{Cu}) = 78\%$, $w(\text{Ni}) =$ 21%], 冷轧	退火	289					110	117 ^① 117 ^②	1.06 1.06			
	回火	379					160	147 ^① 160 ^②	0.92 1.00			
铜镍合金 [$w(\text{Cu}) =$ 48%, $w(\text{Ni}) = 48\%$], 冷轧		475					234	179 ^① 202 ^②	0.76 0.86			
铜镍合金 ($w(\text{Ni}) = 67\%$, $w(\text{Cu}) =$ 30%), 冷轧	退火	503					222	165 ^① 179 ^②	0.74 0.81			
	回火	779					325	190 ^① 215 ^②	0.58 0.66			
镍, 冷轧	退火	475					209	154 ^① 142 ^②	0.74 0.68			
	回火	806					319	184 ^① 165 ^②	0.58 0.52			
铜锌合金 ($w(\text{Cu}) = 62\%$, $w(\text{Zn}) =$ 37%), 冷拔	退火	324					137	— 117 ^②	— 0.85			
	回火	517					147	110 ^① 110 ^②	0.75 0.75			
硬铝 [$w(\text{Mg}) = 2.5\%$]	轧制	386					旋转弯曲 轴向加载	$w(\text{NaCl})$ = 3% 盐雾	5×10^7	126	46	0.37
		227								110	35	0.32
硬铝 [$w(\text{Te}) = 0.05\%$, $w(\text{Cu}) = 0.06\%$]										10^7	89	13	0.15
			75	13	0.17							
硬铝 [$w(\text{Sb}) = 1\%$]							3.7	2.4	0.65			
蓄电池铅							5.2	4.5	0.87			
AZG 镁铝锌			旋转弯曲	自来水	2×10^7	12	11	0.92				
AM537 镁铝锰		70				34	0.49					
AZ855 镁铝锌 ^①		70				44	0.63					
AM503 镁铝锰 ^②		131				48	0.37					
AZM 镁铝锰 ^③		49				17	0.35					
AZM 镁铝锰 ^④		136				11	0.08					

续表 18.7-4

材 料	热 处 理	$\sigma_b /$ MPa	试验方式	应力频率 f / min^{-1}	腐蚀环境	试验循 环次数	$\sigma_{-1}^2 /$ MPa	$(\sigma_{-1})_{cl}^3 /$ MPa	$\beta_2 =$ $\frac{(\sigma_{-1})_{cl}}{\sigma_{-1}}$
磷青铜 [$w(\text{Sn}) = 4.2\%$]	轧和拉 拔, 正火	379	旋转弯曲	1 450	3% 盐水	5×10^7	137	163	1.19
铝青铜 [$w(\text{Al}) = 9.8\%$, $w(\text{Zn}) = 1.4\%$]	挤压和 拉拔	489					200	135	0.68
耐蚀高强度铜合金 ^①	挤压和 拉拔	572					227	246	1.08
$w(\text{Al}) = 9.7\%$, $w(\text{Ni}) =$ 5.0% , $w(\text{Fe}) = 5.4\%$		710					310	201	0.65
铝青铜 [$w(\text{Al}) = 9.3\%$]	淬 火 淬 火、 热处理	203 448					157 136	120 107	0.76 0.79
铍青铜 [$w(\text{Be}) = 2.2\%$]	溶液处理 热处理	441 1 117			246 274	187 219	0.76 0.80		
铝-锌-镁合金 ^② DTD683 (7075)	溶液处理 热处理 时 效	255 427 379			$w(\text{NaCl})$ $= 3\%$ 盐溶 液, 液体薄膜	10^7	124	62	0.50
		172					69	0.40	
		151					69	0.46	
纯 铝					$w(\text{H}_2\text{SO}_4)$ $= 38\%$ 硫酸 滴流	4×10^7	2.6	—	—

- ① 淡水;
- ② 含盐量为海水的 1/3 的河水;
- ③ 在空气中的疲劳极限;
- ④ 在腐蚀环境中的疲劳极限;
- ⑤ 耐蚀高强度铜合金的化学成分: $w(\text{Al}) = 8.5\% \sim 10.5\%$, $w(\text{Fe}) = 4\% \sim 6\%$, $w(\text{Ni}) = 4\% \sim 6\%$, 其余铜;
- ⑥ DTD683 (7075), 相当于中国的铝合金号 7A09;
- ⑦ AZ855 镁合金的化学成分: $w(\text{Al}) = 8.0\%$, $w(\text{Zn}) = 0.4\%$, $w(\text{Mn}) = 0.3\%$;
- ⑧ AM503 镁合金的化学成分: $w(\text{Mn}) = 1.5\%$;
- ⑨ AZM 镁合金的化学成分: $w(\text{Al}) = 6.0\%$, $w(\text{Zn}) = 1.0\%$, $w(\text{Mn}) = 0.3\%$ 。

表 18.7-5 低碳钢 ($w(\text{C}) = 20\%$) 试样的旋转弯曲的腐蚀疲劳极限

试样直径/mm	在空气中的疲劳极限 σ_{-1} / MPa	浸在盐水中的腐蚀疲劳极限 ($N = 6 \times 10^7$) $(\sigma_{-1})_{cl} / \text{MPa}$
10	205	49
130	191	112

表 18.7-6 弯曲及拉压的疲劳极限

材 料	$\sigma_b /$ MPa	$(\sigma_{-1})_{cl} / \text{MPa}$ $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 盐溶液 喷雾中 ($N = 5 \times 10^7$, $f = 2 200 \text{ min}^{-1}$)			
		空气中的 疲劳极限 σ_{-1} / MPa		弯 曲	
		弯 曲	拉 压	弯 曲	拉 压
碳钢 ($w(\text{C}) = 0.48\%$)	975	386	237	43	37
不锈钢 [$w(\text{C}) = 0.12\%$, $w(\text{Cr}) = 14.7\%$]	619	380	339	139	169

续表 18.7-6

材 料	σ_b / MPa	空气中的 疲劳极限 σ_{-1} /MPa		$(\sigma_{-1})_d$ /MPa $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 盐溶液 喷雾中 ($N = 5 \times 10^7, f = 2\ 200\ \text{min}^{-1}$)	
		弯曲	拉压	弯 曲	拉 压
		奥氏体不锈钢 [$w(\text{C}) = 0.11\%$, $w(\text{Cr}) = 18.3\%$, $w(\text{Ni}) = 8.2\%$]	1 023	366	370	244	228
不锈钢 [$w(\text{C}) = 0.25\%$, $w(\text{Cr}) = 17\%$, $w(\text{Ni}) = 1.16\%$]	843	505	439	190	240
硬 铝	435	139	123	53	40

表 18.7-7 20Cr 钢的尺寸对腐蚀疲劳极限的影响

环 境	材料性能	试 样 直 径		
		$d = 16\ \text{mm}$	$d = 32\ \text{mm}$	$d = 40\ \text{mm}$
空 气 ($N = 5 \times 10^6$)	σ_{-1} /MPa	264	248	240
	β_2	1.0	1.0	1.0
	ϵ	1.0	0.937	0.907
机 油 ($N = 10^7$)	$(\sigma_{-1})_d$ /MPa	243	235	230
	β_2	0.92	0.95	0.96
	ϵ	1.0	0.964	0.945
淡 水 ($N = 2 \times 10^7$)	$(\sigma_{-1})_d$ /MPa	122	140	154
	β_2	0.462	0.565	0.64
	ϵ	1.0	1.14	1.26

注：悬臂式旋转弯曲试验，频率 $f = 2\ 000\ \text{min}^{-1}$ 。

表 18.7-8 腐蚀环境及应力集中同时作用的疲劳极限

材料及试验方式	试 样 d/mm	疲劳极限/MPa		有效应力集中系数		腐蚀 系数 β_2
		空气中 σ_{-1} 或 τ_{-1}	腐蚀环境中 $(\sigma_{-1})_d$ 或 $(\tau_{-1})_d$	空气中 K_σ 或 K_τ	腐蚀环境中 $K_{\sigma d}$ 或 $K_{\tau d}$	
20Cr 弯曲	光滑试样, $d = 8$	318	210	2.11	2.11	0.66
	缺口试样, $d = 14$	151	151			
20Cr 弯曲	光滑试样, $d = 20$	285	166	2.07	2.25	0.61
	缺口试样, $d = 20$	133	122			
40Cr (正火) 弯曲	光滑试样, $d = 8$	426	364	1.6	1.72	0.85
	缺口试样, $d = 8$	266	248			
铸铁 弯曲	光滑试样, $d = 20$	117	107	1.11	1.32	0.92
	缺口试样, $d = 20$	105	89			
镍铬钢 扭转 $\sigma_b = 784.6\ \text{MPa}$	光滑试样	302	223	—	—	0.74
	有肩试样	196	188	1.54	1.60	—
	有肩试样	192	205	1.57	1.47	—
	有孔试样	151	93	2.00	3.25	—

续表 18.7-8

材料及试验方式	试样 d/mm	疲劳极限/MPa		有效应力集中系数		腐蚀系数 β_c
		空气中 σ_{-1} 或 τ_{-1}	腐蚀环境中 $(\sigma_{-1})_d$ 或 $(\tau_{-1})_d$	空气中 K_σ 或 K_τ	腐蚀环境中 $K_{\sigma d}$ 或 $K_{\tau d}$	
镍铬钢 ^① 扭转 $\sigma_b = 1\ 108\ \text{MPa}$	光滑试样	384	223	—	—	0.58
	有肩试样	254	137	1.51	2.8	—
	有孔试样	205	137	1.87	2.8	—
镍铬钢 弯曲 $\sigma_b = 872.8\ \text{MPa}$	光滑试样	439	233	—	—	0.53
	有肩试样	247	130	1.78	3.37	—
	有孔试样	212	109	2.07	4.0	—
镍铬钢 弯曲 $\sigma_b = 1\ 079\ \text{MPa}$	光滑试样	617	89	—	—	0.145
	有肩试样	247	75	2.5	8.18	—
	有孔试样	212	61	2.9	10.0	—
灰铸铁 $\sigma_b = 274.6\ \text{MPa}$	光滑试样	120	97	—	—	0.8
	缺口试样	103	89	1.17	1.35	—
钢 弯曲 $\sigma_b = 539.4\ \text{MPa}$	光滑试样	370	199	—	—	0.54
	有肩试样	168	89	2.2	4.15	—
	有孔试样	171	123	2.16	3.0	—
钢 弯曲 $\sigma_b = 485.4\ \text{MPa}$	光滑试样	343	164	—	—	0.48
	有肩试样	164	96	2.08	3.57	—
	有孔试样	162	116	2.11	2.94	—
钢 弯曲 $\sigma_b = 627.6\ \text{MPa}$	光滑试样	374	130	—	—	0.35
	有肩试样	178	103	2.1	3.64	—
	有孔试样	182	109	2.05	3.41	—
钢 弯曲 $\sigma_b = 858.1\ \text{MPa}$	光滑试样	436	96	—	—	0.22
	有肩试样	205	75	2.12	5.77	—
	有孔试样	171	89	2.54	4.88	—

① 镍铬钢成分: $w(\text{C}) = 0.4\%$, $w(\text{Mn}) = 0.75\%$, $w(\text{Ni}) = 1.0\% \sim 1.5\%$, $w(\text{Cr}) = 0.45\% \sim 0.75\%$ 。

表 18.7-9 拉压脉动循环的疲劳极限

试样和试验条件	脉动循环疲劳极限/MPa	
	脉动拉伸	脉动压缩
经过磨削, 在大气中	1 177	1 618
有缺口(深 0.03 mm), 在大气中	931	1 500
经过磨削, 在淡水中	147	1 540

表 18.7-10 表面高频淬火对 45Cr 钢疲劳极限的影响

试样处理方法	疲劳极限 ($N = 10^7$)			
	在大气中		在 $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 的溶液中	
	MPa	%	MPa	%
正火(原始状态)	252	100	98	100
电解镀铬	199	79	85	87
同上, 预先经过高频淬火	339	134	294	300

表 18.7-11 镀层对试样的腐蚀疲劳极限的影响

材 料	腐蚀环境、试验循环数、试样、 应力频率 f/min^{-1} 、 d/mm	镀层金属	镀层厚度/ mm	腐蚀系数 β_c
钢: $w(\text{C}) = 0.36\%$, $w(\text{Si}) = 0.28\%$, $w(\text{Mn}) = 0.73\%$; 在 840~860℃ 下 正火	淡水, 光滑试样, $N = 10^7$, $f = 1450$, $d = 10$	Zn	0.030	0.94
钢: $w(\text{C}) = 0.37\%$, $w(\text{Mn}) = 0.74\%$, $w(\text{Cr}) = 0.61\%$, $w(\text{Si}) = 0.21\%$, $w(\text{Ni}) = 1.4\%$; 淬火回火 ($\sigma_b =$ 853.2 MPa)	淡水, 光滑试样, $N = 10^6$, $f = 1450$, $d = 9$	Zn	0.004 0	0.41
		Cd	0.002 5	0.25
		Pb	0.012 5	0.45
50 钢, 冷拔, $\sigma_b = 980.7$ MPa	$w(\text{NaCl}) = 3\%$ 溶液, 光滑试样, $N = 2 \times 10^7$, $f = 2200$, $d = 7$	Zn	0.014	0.87
		Cd	0.013	0.77
50 钢, 正火, $\sigma_b = 637.5$ MPa		Zn	0.014	0.90
Cd		0.013	0.84	
硬铝: $w(\text{Cu}) = 4\% \sim 4.5\%$, $w(\text{Mn}) = 0.64\%$, $w(\text{Mg}) = 0.63\%$, $w(\text{Fe}) = 0.84\%$, $w(\text{Si}) = 0.22\%$, $\sigma_b = 382.5$ MPa	$w(\text{NaCl}) = 3\%$ 溶液, 光滑试样, $N = 5 \times 10^7$, $f = 2000$, $d = 8$	Zn	—	0.71
		Zn + 合成 橡胶清漆	—	0.65
		Cd	—	<0.5

表 18.7-12 45 钢经表面强化后在 $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 溶液中的腐蚀疲劳极限

试样处理方式	疲 劳 极 限 ($N = 10^7$)			
	MPa		%	
	在大气中	在 $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 的溶液中	在大气中	在 $w(\text{NaCl}) = 3\%$ 的溶液中
磨 削	250	98	100	100
喷 丸	291	198	116	202
辊 压	276	247	111	252
高频淬火	191	351	187	358

表 18.7-13 表面处理对腐蚀疲劳极限的影响 (旋转弯曲试验)

材 料	σ_b/MPa	表面处理	保护层 厚度/ mm	应力 频率/ min^{-1}	腐蚀环境	试验循 环次数 N	疲劳极限 σ_{-1}/MPa		腐蚀疲劳极限 $(\sigma_{-1})_d/\text{MPa}$	
							未处理	处理	未处理	处理
钢: $w(\text{C}) = 0.5\%$	冷拉	1992			$w(\text{NaCl})$ $= 1\%$ 盐雾	2×10^7				
	正火	713	涂瓷漆	2200			337	317	48	144
	冷拉		电镀锌	0.048 3				344		317
	正火						227	234	55	151
	冷拉		表面锌化	0.127						
	正火							310		337
							200		206	

续表 18.7-13

材 料		σ_b / MPa	表面处理	保护层 厚度/ mm	应力 频率/ min^{-1}	腐蚀环境	试验循 环次数 N	疲劳极限 σ_{-1} /MPa		腐蚀疲劳极限 $(\sigma_{-1})_c$ /MPa		
								未处理	处理	未处理	处理	
钢: $w(\text{C}) = 0.5\%$	冷拉	0.014 2	电解镀锌					337		289		
	正火							220		206		
	冷拉	0.013 2	电解镀镉					317		234		
	正火							206		186		
	冷拉	0.012 7	电解镀镉 涂瓷漆					317		241		
	正火							220		186		
	冷拉	0.012 7	电解镀锌					289		206		
	正火							213		179		
冷拉		磷酸盐水 处 理 涂瓷漆					310		144			
正火							248		179			
冷拉	0.050 8	铝雾					351		275			
冷拉	0.050 8	铝雾涂 瓷 漆			淡水		351		331			
中碳钢	772	热 浸 低 焊 料 热 浸 敷 镉 层 电 镀 镍 电 镀 铬	0.010 2				10^8	193	227	96	813	
			0.020 3					滴流	200		151	
			0.203					137		137		
			0.203					200		200		
	818	表面辊压			淡水		227	255	89	131		
	表面辊压	0.508		淡水	2×10^8	255	317	<137	262			
氮化钢: $w(\text{Cr}) = 1.6\%$, $w(\text{Al}) = 0.9\%$, $w(\text{Mo}) = 0.3\%$		氮化			河水滴流	10^8	455	510	<69	344		
铬钒钢: $w(\text{C}) = 0.2\%$, $w(\text{Cr}) = 0.9\%$, $w(\text{V}) = 0.1\%$	1 698	氮化		1 450	自来水喷射	10^8		648		524		
钢: $w(\text{C}) = 0.47\%$	1 451	电镀锌 表面锌化 镀 锌 镀 镉			淡水	2×10^7	372		124	268 268 303 282		
钢: $w(\text{C}) = 0.38\%$		抛光镀锌 韧性镀锌	0.012 7				10^7	344		74	124	
			0.025 4								浸入油池中	137
			0.012 7								盐水 液态碳化 物浸湿	117
			0.025 4									124

续表 18.7-13

材 料	σ_b / MPa	表面处理	保护层 厚度/ mm	应力 频率/ min^{-1}	腐蚀环境	试验循 环次数 N	疲劳极限 σ_{-1} /MPa		腐蚀疲劳极限 $(\sigma_{-1})_c$ /MPa	
							未处理	处理	未处理	处理
钼钢: $w(\text{C}) = 0.20\%$, $w(\text{Ni}) = 1.65\% \sim 2\%$, $w(\text{Mo}) = 0.2\% \sim 0.3\%$		镀锌	0.127				324	248	137	213
钢: $w(\text{C}) = 0.4\%$, $w(\text{Cu}) = 0.2\%$		镀锌	0.058 4				248		67	151

1.4 腐蚀疲劳的寿命估算

腐蚀疲劳的 S-N 曲线没有水平部分, 所以腐蚀疲劳只有有限寿命设计。腐蚀疲劳的寿命估算方法有二, 即用 S-N 曲线的常规疲劳设计方法和用断裂力学的裂纹扩展理论估算寿命。由于在腐蚀环境和循环载荷复合作用下, 无裂纹寿命很短, 因此, 腐蚀疲劳的寿命, 主要是裂纹的扩展寿命。关于裂纹扩展寿命的估算, 参见本篇第 6 章。

腐蚀疲劳的 S-N 曲线, 其影响因素比空气中的多而且复杂。在空气中影响材料 S-N 曲线的主要因素, 有应力集中系数、尺寸系数和表面系数三种。在腐蚀疲劳中, 应力集中和表面粗糙度的影响要比空气中的严重, 而尺寸越小, 腐蚀疲劳强度降低越多, 这些都是在指定寿命(循环数)的基础上讲的, 可以参阅上面给出的腐蚀疲劳极限数据和 S-N 曲线。所以, 提高零件腐蚀疲劳强度的措施, 较有限的是进行表面强化工艺和镀或涂保护层。

此外, 试验频率和腐蚀环境的温度, 都对零件疲劳强度的影响也很显著。目前进行腐蚀疲劳试验的频率, 一般为 $1\ 500 \sim 3\ 000 \text{ min}^{-1}$, 太低的频率很少用, 主要考虑用低频率进行试验劳动量大。所以, 遇到有些文献中没有给定试验频率数据时, 可假设在上述的频率范围内。

假使腐蚀疲劳的 S-N 曲线, 是模拟零件实际使用条件进行试验得出的, 那末用这个 S-N 曲线可以直接估算而得到该零件的寿命。在一般情况下, S-N 曲线是用试样在同样腐蚀环境下得到的, 则在零件的寿命估算中, 需要考虑到由试

样到零件, 存在着应力集中、尺寸等的影响差异, 需要进行修正。

如只有在空气中的 S-N 曲线而需要进行腐蚀疲劳寿命估算, 或指定寿命下校核安全系数。这时, 可用本篇第 5 章高周疲劳的方法, 但此时应考虑腐蚀系数 β_2 。考虑的方法是, 没有进行强化工艺时, 不论表面粗糙度如何, 都用 $\beta = \beta_2$; 有强化时, 用强化或镀后试样在腐蚀环境中的腐蚀系数为表面系数 β , 不要将 β_1 、 β_2 、 β_3 相乘作为 β 。

2 热疲劳强度

2.1 热应力与热疲劳

产生热应力情况主要有两种: ①零件的热胀冷缩受到固持零件的外加约束而产生热应力; ②虽然没有外加约束, 但零件各部位温度不一致, 存在着温度梯度, 导致各部位热胀冷缩不一致而产生热应力。

当热应变超过弹性极限时, 热应力与热应变就不成线性关系, 此时求解热应力就要按弹塑性关系处理。

由于温度循环变化产生循环热应力所导致的材料或零件的疲劳称为热疲劳。例如热作模具、热轧机的轧辊, 热交换管子和锅炉管子等都能产生热疲劳裂纹。

影响热应力大小的因素有:

1) 热应力的大小与热胀系数成正比, 热胀系数越大, 热应力越大。所以在选材时要考虑热胀系数, 在进行机械零部件的配合和焊接时应考虑材料的匹配, 即不同材料热胀系数的差别不能

太大。例如，铁素体钢和奥氏体钢焊接在一起构成的管道容易破裂，就是因为两者的 α 值相差较大，因此所产生的热应力也较大，在多次循环作用下就会引起破坏。又如材料基体中若含有热胀系数不同的第二相，则在温度循环作用下，也会产生局部热应力而引起开裂。

2) 在相同的热应变条件下，材料的弹性模量越大，热应力就越大。

3) 温度循环变化越大，即上下限温差越大，则热应力就越大。

4) 材料的导热系数越低，则快速加热或冷却过程中，温度梯度越陡，热应力也越大。

2.2 热疲劳强度与寿命估算

2.2.1 最大温度-寿命曲线

对于一般选材及在提高热疲劳强度的材料工艺研究中，可采用 $T_{max}-N$ 曲线，这里 T_{max} 为一个循环的最大温度。图 18.7-22 为某些耐热材料的 $T_{max}-N$ 曲线，在 N 的对数坐标中为直线，可写出下面公式，即

$$T_{max} = A - n \cdot \lg N \quad (18.7-1)$$

式中， N 为到达破坏的循环数； n 和 A 为材料常数。常数 n 和 A 的取值见表 18.7-14。

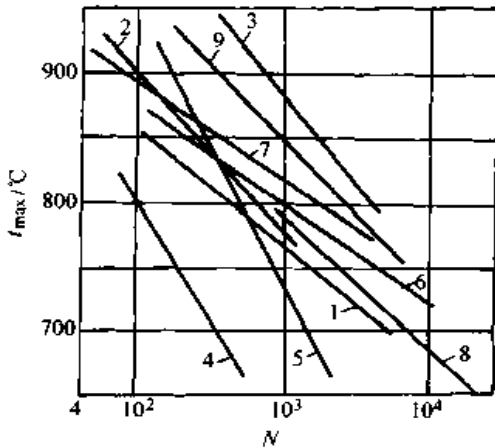


图 18.7-22 几种变形合金的热疲劳曲线
(图中 1~9 编号，对应于表 18.7-14 中材料的序号)

2.2.2 应变幅度-寿命曲线

对于零件寿命计算需定量给出应变幅度（或应力幅度）与寿命的关系，通常是 $\Delta\epsilon-N$ 曲线。在变温下获得的 $\Delta\epsilon-N$ 曲线称为热疲劳曲线，在双对数坐标中为直线形式。科芬-曼森提出的热疲劳公式为

表 18.7-14 式 (18.7-1) 中常数 A 和 n 值

序号	材 料	A	n
1	Nimonic75 (镍铬钛耐热合金)	1 400	235
2	Nimonic90 (镍铬钛耐热合金)	1 350	150
3	12Cr18Ni9Ti	1 320	250
4	CrNi56WMoCoAl	1 300	150
5	CrNi62WMoCoAl	1 130	100
6	S-816	1 110	109
7	CrNi77TiAlB	1 010	89
8	Inconel 550 (铬镍铁耐热合金)	1 000	73
9	CrNi70	935	71

$$\Delta\epsilon_p \cdot N^K = C \quad (18.7-2)$$

式中 $\Delta\epsilon_p$ —— 塑性应变幅度；

K 、 C —— 材料常数。

对于变温情况，应变的弹性部分必须考虑：

$$\Delta\epsilon \cdot N^K = C \quad (18.7-3)$$

式中 $\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p$ —— 总应变幅度；

K 、 C 表 18.7-15 和表 18.7-16。

表 18.7-15 式 (18.7-3) 中的常数 K 和 C 值

序号	材 料	$t_{max}/^{\circ}C$	K	C
1	CrNi77TiAlB	750	0.825	1 072
		800	0.918	1 096
		850	0.526	48
2	CrNi70WMoTiAl	800	0.875	1 175
		850	0.936	807
		900	1.68	8 260
3	CrNi60WTi	800	0.554	46
		900	0.874	129
4	CrNi62NbMoCoTiAl	800	0.468	56
5	37Cr12Ni8Mn8MoVNb	700	0.414	25.1
6	12Cr18Ni9Ti	700	0.56	57.5
		750	0.60	56.3
		800	0.82	162

对某些变形合金和钢进行了热疲劳试验，结果如图 18.7-23 所示。

几种铸造合金的热疲劳试验结果，如图 18.7-24 所示。

表 18.7-16 式 (18.7-3) 中的常数 K 和 C 值

序号	材 料	$t_{max}/^{\circ}C$	K	C
1	ЖС6У	850	0.247	11.6
		950	0.215	6.2
		950	0.148	4.5
		1 050	0.635	58
2	ЖС6У	1 050	0.688	82
3	ЖС6Ф	1 050	0.314	10.7
4	ВЖП112У	1 050	0.400	32.1
5	ВЖП112У	950	0.338	19.5
		1 050	0.125	2.9
		950	0.745	686
	ВЖП112У	950	0.625	123
			0.388	20.6
			0.723	170
6	CrNi62WMoCoAl	850	0.69	189
			0.878	475
		900	0.69	189
			0.878	475

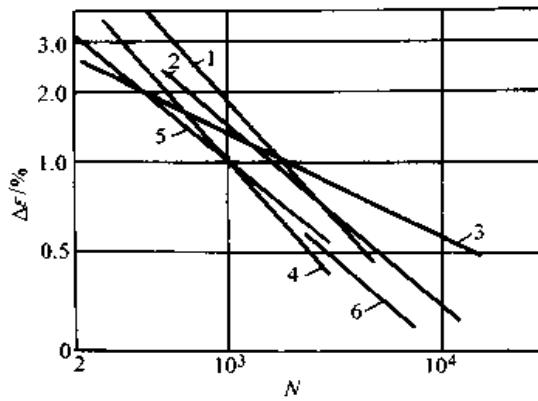


图 18.7-23 几种变形合金的热疲劳曲线 (图中 1~6 编号对应于表 18.7-15 中材料排列序号)

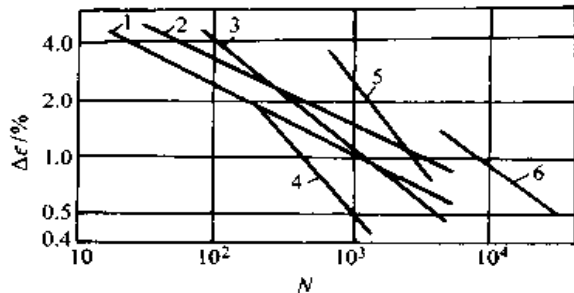


图 18.7-24 几种铸造合金的热疲劳曲线 (图中 1~6 编号对应于表 18.7-16 中材料排列序号)

上面的试验数据, 都是在 t_{max} 无保持时间下进行的, 而在实际的机器运转中, 要有不同的运转时间 (保持时间), 特别是民用机器启动一次运转的时间较长, 所以要研究带有保持时间情况下的寿命。由于在高温下保持时间内, 材料产生蠕变应变 (ϵ_c) 的累积损伤, 可用下式表示, 即

$$\Delta \epsilon_{p+c} \cdot N^{K_1} = C_1 \quad (18.7-4)$$

一种变形合金 CrNi77TiAlB 的试验结果如图 18.7-25 所示, 一种铸造合金 ЖС6К 的试验结果如图 18.7-26 所示。式 (18.7-4) 中的 K_1 和 C_1 常数列于表 18.7-17 中。

图 18.7-27 为三种合金钢的 $\Delta \epsilon_p-N$ 曲线。

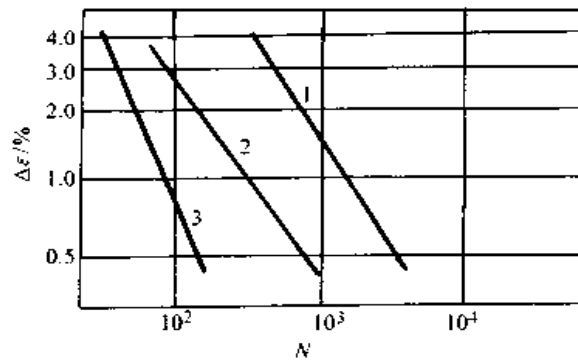


图 18.7-25 CrNi77TiAlB 合金的热疲劳曲线
1—保持时间 = 0 2—保持时间 = 1.5 s
3—保持时间 = 10.7 s

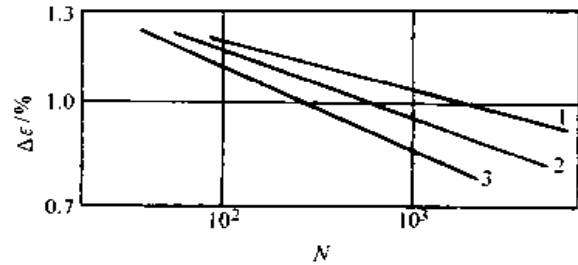


图 18.7-26 ЖС6К 合金的热疲劳曲线
1—保持时间 = 0 2—保持时间 = 1.5 s
3—保持时间 = 10.7 s

表 18.7-17 式 (18.7-4) 中的 K_1 和 C_1 值

材 料	$t_{max}/^{\circ}C$	保持时间 /s	K_1	C_1
CrNi77TiAlB	800	0	0.918	1 096
		1.5	0.725	76
		10.7	1.66	1 807
ЖС6К	900	0	0.077	1.75
		1.5	0.096	1.87
		10.7	0.117	1.94

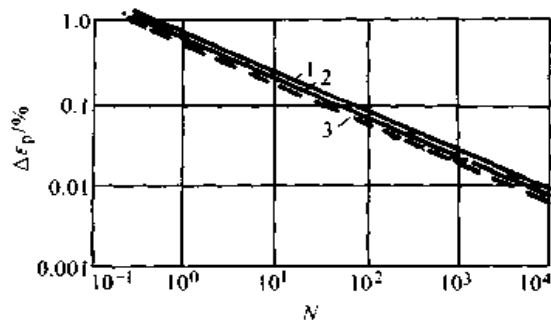


图 18.7-27 三种钢的塑性应变幅度与寿命的关系
1—18/8Cr-Ni 钢 2—w(Cr) = 13% 钢
3—Cr-Mo 钢

2.3 热疲劳强度设计要考虑的主要问题

热疲劳的寿命估算，可用应变-寿命曲线直接得出。但由于影响热疲劳强度的因素很多，而 $\Delta\epsilon-N$ 曲线可提供给设计应用很少，所以，在热疲劳强度设计中，首先要考虑下列问题：

1) 合理选用材料，线胀系数小，导热系数大的材料，对于降低热应力是有效的。而高温持久极限高、韧性好的材料，能提高热疲劳强度。

2) 注意结构设计中的问题；

① 结构要设计得富有伸缩性。

② 尽量避免有应力集中的结构。

③ 设计焊接结构时，要特别注意坡口形状和背面平整方法。

④ 焊接不同金属时，采用线胀系数差别小的金属。

3 低温疲劳强度

3.1 低温下金属的特性

在低温下，金属的强度提高而塑性则降低。因此，在低温下光滑试样的高周疲劳强度比室温下提高，而低周疲劳强度比室温下降。对于有缺口的试样，韧性和塑性降低得更多。由冲击试验测出的冲击能，在低温下有大幅度的降低。对于中、低强度钢，其冲击能量-温度曲线存在一个能量转变区，当试验温度低于转变区温度时，冲击能急剧下降。高强度钢同其他金属的能量曲线较为连续。断裂韧性 K_{IC} 和 K_{IC} 一般随温度的降低而降低。

缺口和裂纹对低温较为敏感，也就是说，断裂时的临界疲劳裂纹长度在低温下会急剧减小。

3.2 低温下材料的疲劳数据和图线

3.2.1 低温下材料的疲劳极限

表 18.7-18 和表 18.7-19 为低温下材料疲劳极限数据。表 18.7-20 是将各种材料在低温下的疲劳极限处理后得到的平均值，表中大多数的数据是在循环数 $N = 10^6$ 次循环下试验得到。

3.2.2 低温下的材料 S-N 曲线

图 18.7-28 为温度对铝合金及钢的疲劳极限的影响曲线。图 18.7-29 为 300 K (用符号○表示) 以及在 78 K (液态氮，用符号●表示) 和 4 K (液态氦，用符号△表示) 低温下 5 种材料测得的 S-N 曲线。

表 18.7-18 温度对钢静强度和疲劳极限的影响

钢 种	材料情况	试 样	+20℃			-75℃			-183℃		
			σ_b / MPa	σ_s / MPa	σ_{-1} / MPa	σ_b / MPa	σ_s / MPa	σ_{-1} / MPa	σ_b / MPa	σ_s / MPa	σ_{-1} / MPa
w(C) = 0.15% 碳钢	正火	光试样	430	315	221	543	437	—	778	718	495
	正火	缺口试样	589	374	166	698	542	210	749	749	294
	粗晶粒	光试样	357	155	166	435	277	—	666	647	—
	粗晶粒	缺口试样	469	221	140	506	357	191	605	605	240
Cr4Ni 钢	商品	光试样	761	585	388	888	680	416	1 106	944	549
	商品	缺口试样	1 022	773	241	1 161	1 011	248	1 106	1 106	274
GCr15 钢	淬火回火	光试样	—	—	828	—	—	818	—	—	—

表 18.7-19 材料的低温疲劳极限

材 料	试验循环数 N	疲 劳 极 限 σ_{-1}/MPa					
		20℃	-40℃	-78℃	-188℃	-253℃	-269℃
铜	10^6	98	—	—	142	235	255
黄 铜	5×10^7	171	181	—	—	—	—
铸 铁	5×10^7	58	73	—	—	—	—
秋 钢	10^7	181	—	250	559	—	—
碳 钢	10^7	225	—	284	612	—	—
镍铬钢	10^7	529	—	568	750	—	—
硬 铝	5×10^7	112	142	—	—	—	—
铝合金 2A14	10^7	98	—	—	166	304	—
铝合金 2A11	10^7	122	—	—	152	274	—
铝合金 7A09	10^7	83	—	—	137	235	—

表 18.7-20 低温下金属的疲劳极限比值

材 料	低温下的疲劳极限 室温下的疲劳极限 (平均值)			缺口试样低温下的疲劳极限 缺口试样室温下的疲劳极限 (平均值)		光试样的疲劳极限 光试样的强度极限 (平均值)			
	-40℃	-78℃	-186~-196℃	-78℃	-186~-196℃	室温	-40℃	-78℃	-186~-196℃
	碳 钢	1.20	1.30	2.57	1.10	1.47	0.43	0.47	0.45	0.67
合 金 钢	1.06	1.13	1.61	1.06	1.23	0.48	0.51	0.48	0.58
合金铸铁	—	1.22	—	1.05	—	0.27	—	0.27	—
不 锈 钢	1.15	1.21	1.54	—	—	0.52	0.50	0.57	0.59
铝 合 金	1.14	1.16	1.69	—	1.35	0.42	—	0.46	0.59
钛 合 金	—	1.11	1.40	1.22	1.41	0.70	—	0.63	0.54

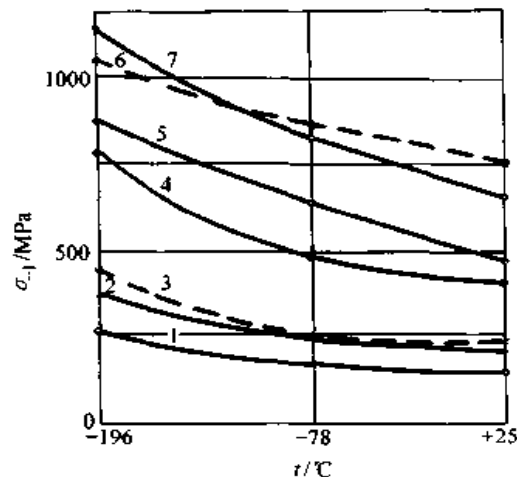


图 18.7-28 温度对铝合金及钢的疲劳极限的影响 ($N = 10^6$)

各合金及钢的化学成分(质量分数,%)如下: 1—铝合金(Mg1.0, Cu0.25, Si0.6, Cr0.25)
 2—铝合金(Mn0.6, Mg1.5, Cu4.5) 3—铝合金(Mg2.5, Cu1.6, Cr0.3, Zn5.6)
 4—合金钢(C0.3, Mn0.7, Ni3.5) 5—合金钢(C0.3, Mn0.8, Si0.3, Ni0.6, Cr0.53, Mo0.18)
 6—合金钢(C0.07, Cr17, Ni6.5, Ti0.37, Al0.12) 7—18/8奥氏体钢(Cr18, Ni8)

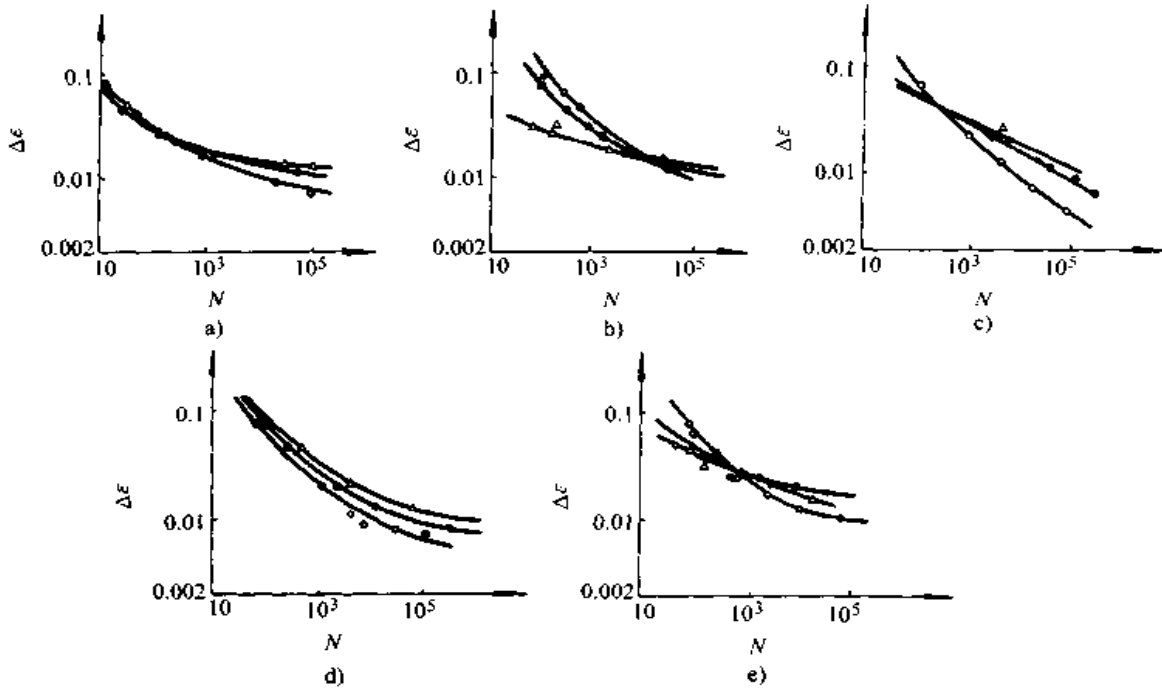


图 18.7-29 低温对低周疲劳的影响

试验温度 ○—300K (室温) ●—78K (液氮) △—4K (液氮)

a) 2014-T6 铝 b) 18Ni 马氏体时效钢 c) OFHC 铜

d) 康镍合金 718 ($w(\text{Ni}) = 80\%$, $w(\text{Cr}) = 14\%$, $w(\text{Fe}) = 6\%$) e) Ti-6Al-4V

3.3 低温对应力集中的影响

表 18.7-21 为材料在低温下有效应力集中系

表 18.7-21 材料在低温下的有效应力集中系数

材 料	有效应力集中系数 K_σ					
	试验循环数 $N = 10^4$		试验循环数 $N = 10^5$		试验循环数 $N = 10^7$	
	20℃	-196℃	20℃	-196℃	20℃	-196℃
碳钢 (500℃回火)	1.16	2.04	1.59	3.42	4.26	3.12
低合金钢	1.09	2.27	1.36	2.46	2.33	3.58
18/8 不锈钢	1.64	2.31	2.61	3.62	4.77	3.86
镍铬钢 (650℃回火)	1.09	1.93	1.55	3.0	3.68	5.76
镍铬钢 (440℃回火)	1.63	3.4	2.44	3.7	1.82	3.35
钛合金	1.51	1.73	1.55	1.7	2.68	2.5
铝合金 2A12	1.32	1.74	1.42	1.9	2.28	2.24
铝合金 7A09	1.55	2.0	1.51	2.17	2.0	2.78
镁合金	1.31	1.75	1.7	1.95	2.41	2.5

数。图 18.7-30 及图 18.7-31 为金属在低温下有效应力集中系数。图 18.7-32 为钢的光滑试样与缺口试样在低温和室温下疲劳极限均值的比值。

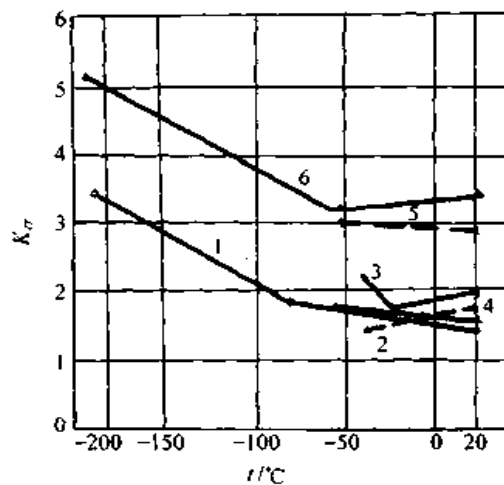


图 18.7-30 碳钢在低温下的有效应力集中系数

1—低碳钢 ($w(\text{C}) = 0.08\%$) 的拉压疲劳
 2—低碳钢 ($w(\text{C}) = 0.08\%$) 的旋转弯曲疲劳
 3—中碳钢 ($w(\text{C}) = 0.6\%$) 的旋转弯曲疲劳
 4—焊接结构轧材, $\sigma_b = 402 \text{ MPa}$, $\alpha_s = 2$, 钢的拉压疲劳
 5—焊接结构轧材, $\sigma_s = 4$ 加拉压疲劳
 6—焊接结构轧材, $\alpha_s = 5.6$ 加拉压疲劳

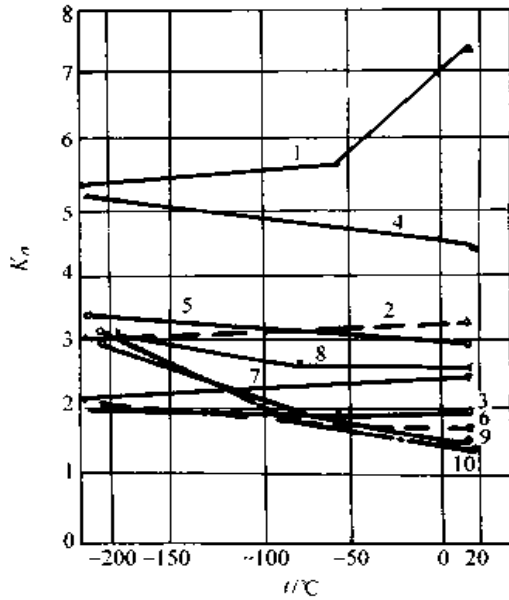


图 18.7-31 材料在低温下的有效应力集中系数
 1—耐腐蚀铝合金, $\alpha_s = 6$, 拉压疲劳
 2—耐腐蚀铝合金, $\alpha_s = 4$ 3—耐腐蚀铝合金, $\alpha_s = 2$
 4—镍钢 [$w(\text{Ni}) = 9\%$], $\alpha_s = 6$, 拉压疲劳
 5—镍钢 [$w(\text{Ni}) = 9\%$] $\alpha_s = 4$
 6—镍钢 [$w(\text{Ni}) = 9\%$] $\alpha_s = 2$
 7—不锈钢酸钢, 拉压疲劳 8—铬钢钢 [$w(\text{Cr}) = 0.83\%$, $w(\text{Mo}) = 0.22\%$], 拉压疲劳
 9—60 钢, 拉压疲劳 10—35 钢, 拉压疲劳
 -186~196°C

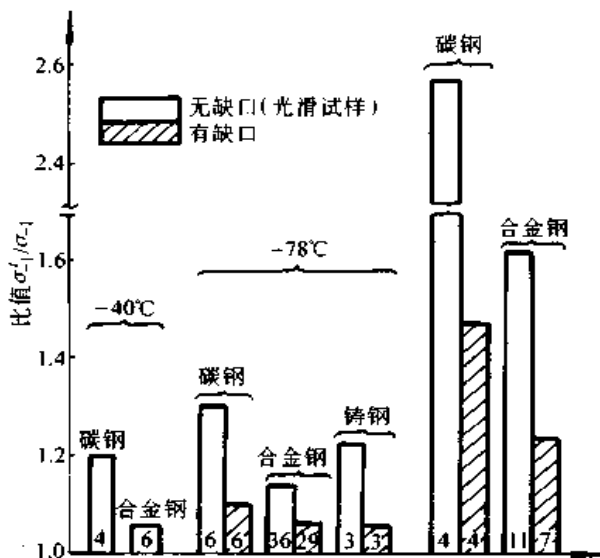


图 18.7-32 无缺口钢 (光滑试样) 和有缺口钢 (缺口试样) 在低温下的疲劳极限与在室温下的疲劳极限的均值之比
 (各纵行底部示出所用材料种类及数目)

3.4 低温疲劳强度计算

当温度低于有转折点的温度时, 解理断裂会导致疲劳裂纹扩展速度急剧加快。当断裂韧性在低温下大大降低时, 裂纹形成寿命可能占有几乎整个低温疲劳寿命。在低温疲劳强度的设计中, 一般用室温下疲劳强度设计方法和数据。但必须注意, 设计在低温下工作的零件, 应避免有尖锐的缺口、裂纹和表面划痕等缺陷, 对于短寿命零件, 更应避免。

4 高温疲劳强度

广义的高温疲劳是指高于常温的疲劳现象, 但由于有些零部件的工作温度虽高于室温, 但并不太高。其疲劳设计, 只要考虑温度对疲劳极限的影响, 仍用室温下的疲劳设计方法。只有当温度高于 $0.5T_m$ (T_m 为以热力学温度表示的熔点), 或在再结晶温度以上时, 出现了蠕变与机械疲劳复合的疲劳现象, 这时才称为高温疲劳。

4.1 高温对材料力学性能的影响

高温对材料的抗拉强度 σ_b 和屈服点 σ_s 的影响, 见图 18.7-33 和图 18.7-34。高温对材料疲劳极限的影响, 见图 18.7-35~图 18.7-41。

4.2 高温时材料 S-N 曲线

高温时材料的 S-N 曲线包括应力-寿命 ($\sigma-N$) 曲线和应变-寿命 ($\epsilon-N$) 曲线, 见图 18.7-42~图 18.7-53。

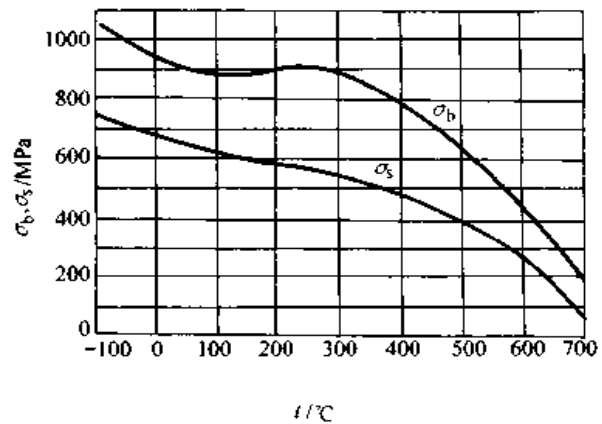


图 18.7-33 温度对钢 σ_b 和 σ_s 影响
 (50CrMo 钢, 600°C 回火)

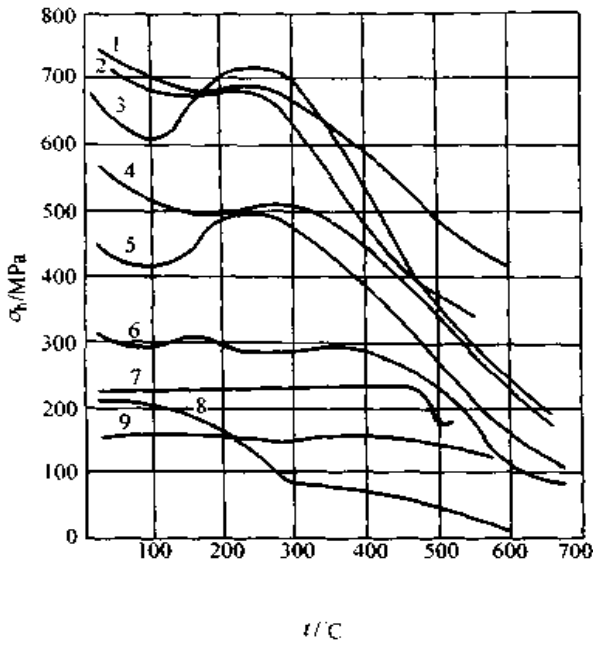


图 18.7-34 高温对材料 σ_b 的影响

- 1—钢 [w(C) = 0.4%, w(Cr) = 13%]
- 2—蒙乃尔合金 [w(Ni) = 68%, w(Cu) = 28%, w(Mn) = 1.5%, w(Fe) = 2.5%], 轧制
- 3—钢 [w(C) = 0.4%], 淬火 4—铸钢 [w(C) = 0.4%]
- 5—钢 [w(C) = 0.3%]
- 6—熟铁 7—可锻铸铁 8—黄铜 9—铸铁

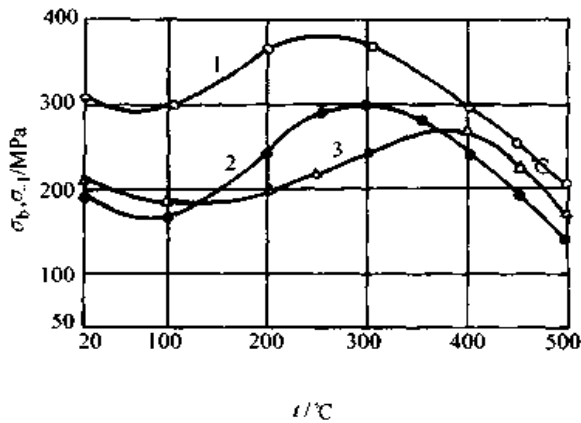


图 18.7-35 温度对 $w(C) = 0.17\%$ 碳钢疲劳强度的影响

- 1—抗拉强度 σ_b 2—弯曲疲劳极限, $f = 10$ Hz
- 3—弯曲疲劳极限, $f = 2\ 000$ Hz

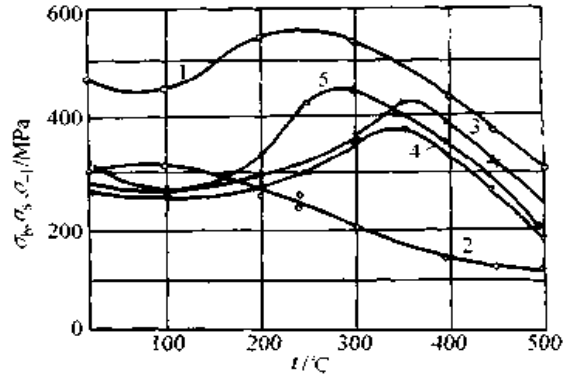


图 18.7-36 温度对 0.17% C 钢的静强度及疲劳强度的影响

- 1—抗拉强度 σ_b 2—屈服强度 (点) σ_s
- 3—在 33 Hz 下的旋转弯曲疲劳极限 ($N = 5 \times 10^5$)
- 4—在 33 Hz 下的旋转弯曲疲劳极限 ($N = 10^6$)
- 5—在 0.17 Hz 下的旋转弯曲疲劳极限 ($N = 5 \times 10^5$)

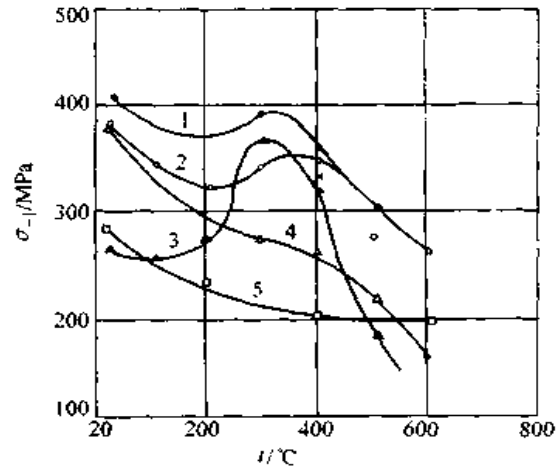


图 18.7-37 温度对材料疲劳极限影响
1—30CrMo 钢 2—30CrNiMo 钢
3—钢 [w(C) = 0.17] 4—1Cr13 钢
5—1Cr18Ni9Ti 钢

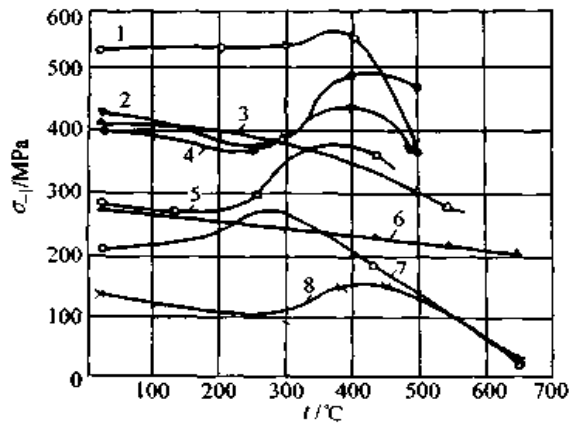


图 18.7-38 温度与旋转弯曲疲劳极限的关系

- 1—Ni-Cr 钢 2—Cr-Mo-V 钢 3—钢 [w(C) = 12%]
- 4—钢 [w(C) = 0.5%] 5—钢 [w(C) = 0.25%]
- 6—18Cr-8Ni 钢 7—钢 [w(C) = 0.17%] 8—铸铁

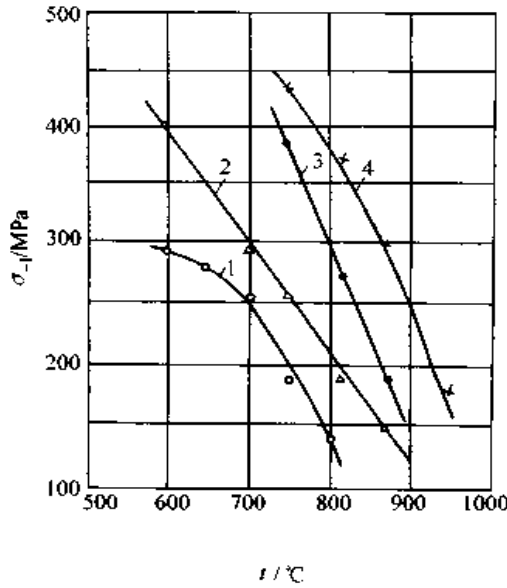


图 18.7-39 温度对尼莫尼克合金疲劳强度的影响
 1—尼莫尼克 80, 轴向对称循环应力, $N = 4 \times 10^7$
 2—尼莫尼克 90, 轴向对称循环应力, $N = 3.6 \times 10^7$
 3—尼莫尼克 90, 旋转弯曲应力, $N = 3.6 \times 10^7$
 4—尼莫尼克 100, 旋转弯曲应力, $N = 4.5 \times 10^7$

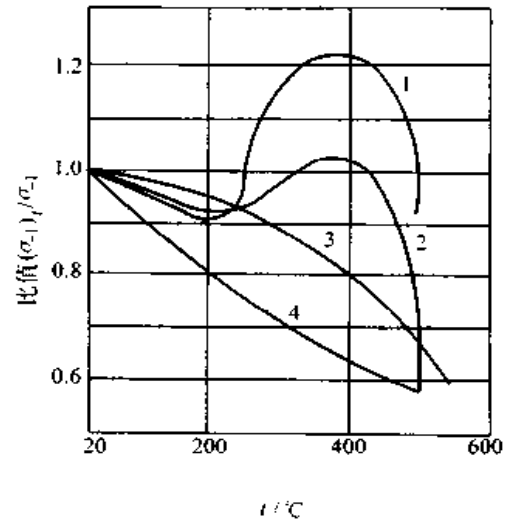


图 18.7-40 温度对材料疲劳极限的影响
 1—钢 [$w(C) = 0.48\%$] 2—Cr-Ni-Mo 钢
 3—钢 [$w(Cr) = 12\%$] 4—耐热钢
 σ_{-1} —室温下的疲劳极限
 $(\sigma_{-1})_t$ —温度 t 时的疲劳极限

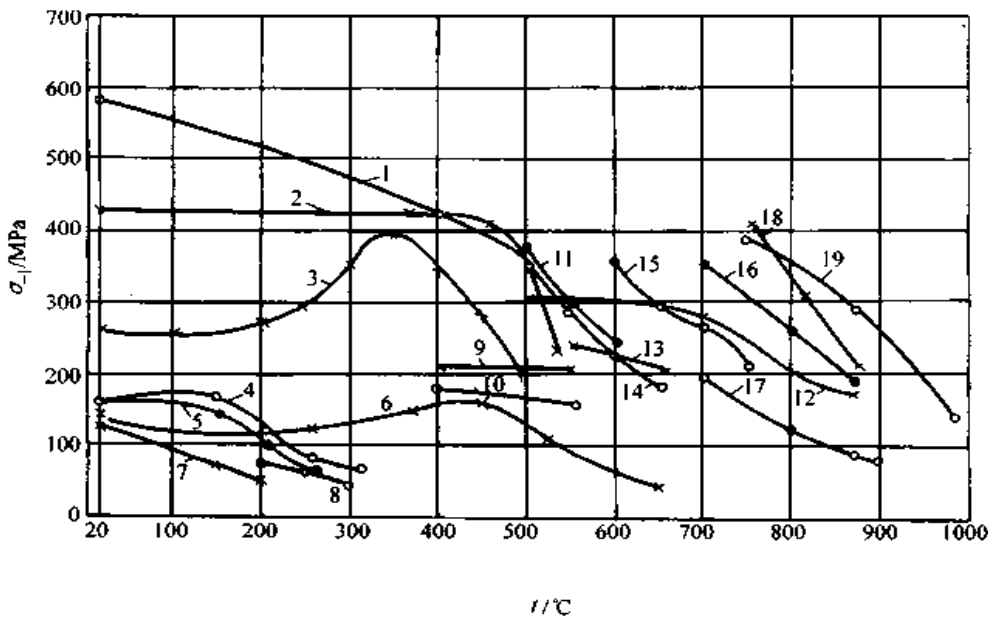


图 18.7-41 温度对金属材料的疲劳强度的影响
 各合金及其成分 (质量分数, %) 如下:
 1—钛合金 (含铝的钛合金) 2—Ni-Cr-Mo 钢 3—低碳钢 (C0.17) 4—铝铜合金 5—铝锌镁合金
 6—高强度铸铁 7—镁铝锌合金 8—镁铝钎合金 9—铜镍合金 (Ni30, Cr0.5, Al1.5, 其余 Cu)
 10—铜镍合金 (Ni30, Mn1, Fe1, 其余 Cu) 11—合金钢 (Cr2.7, Mo0.5, V0.75, W0.5)
 12—奥氏体镍铬钼钢 13—奥氏体钢 (Cr18.75, Ni12.0, Nb1.25) 14—合金钢 (Cr11.6, Mo0.6, V0.3, Nb0.25)
 15—奥氏体钢 (Cr13, Ni13, Co10), 16—钴合金 (Cr19, Ni12, Co45) 17—奥氏体钢 18—镍铬合金 (Cr15, Co20, Ti1.2, Al4.5, Mo5, 其余 Ni) 19—镍铬合金 (20Cr, Co18, Ti2.4, Al1.4, 其余 Ni)

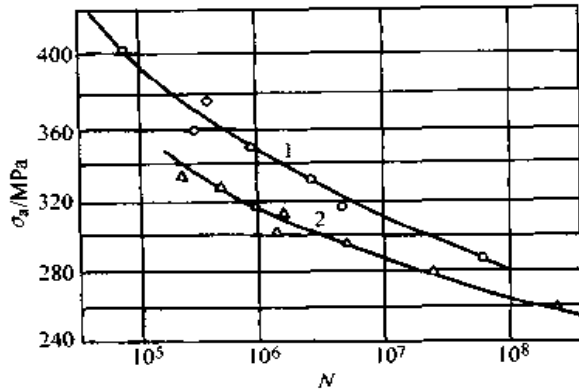


图 18.7-42 低碳钢在 400°C 时的 S-N 曲线
1—旋转弯曲疲劳 2—拉压疲劳

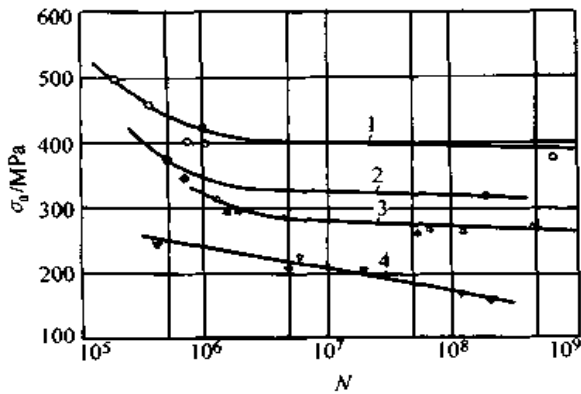


图 18.7-43 铁基合金 N-155 在高温下的
旋转弯曲 S-N 曲线

1—温度 $t = 20^\circ\text{C}$ 2—温度 $t = 650^\circ\text{C}$
3—温度 $t = 730^\circ\text{C}$ 4—温度 $t = 815^\circ\text{C}$
N-155 的合金成分 (质量分数, %): C0.08~0.16, Mn1.0~2.0, Si 小于 1, Cr20.0~22.5, Ni19.0~21.0, Co18.5~21.0, Mo2.50~3.50, W2.0~3.0, Nb0.75~1.25, N0.10~0.20

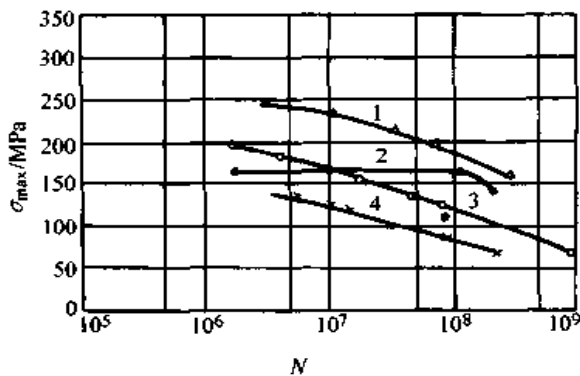


图 18.7-44 铁基合金 N-155 在 815°C 时的 S-N 曲线
1—应力比 $r = -0.242$ 2—应力比 $r = -1$
3—应力比 $r = 0.6$ 4—应力比 $r = 1$

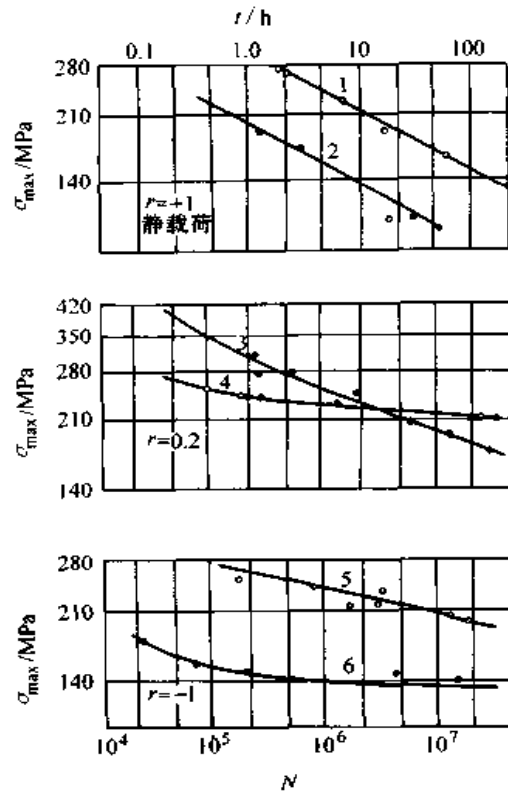


图 18.7-45 缺口对 S-816 合金在 900°C 时的 $\sigma-t$ 和 $\sigma-N$ 曲线

1— $r = +1, \alpha_s = 3.4$ 2— $r = +1, \alpha_s = 1$ (光滑试样)
3— $r = 0.2, \alpha_s = 1$ 4— $r = 0.2, \alpha_s = 3.4$ 5— $r = -1, \alpha_s = 1$
6— $r = -1, \alpha_s = 3.4$

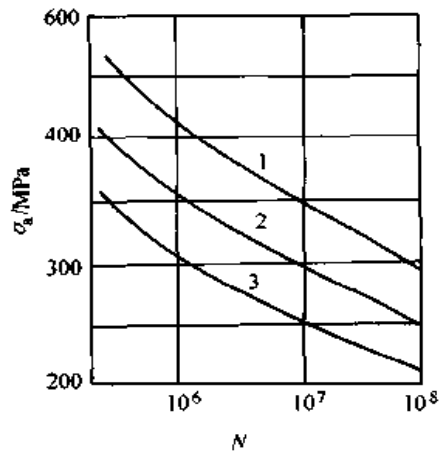


图 18.7-46 GH4037 合金的高温时的 S-N 曲线
1—700°C 2—800°C 3—850°C

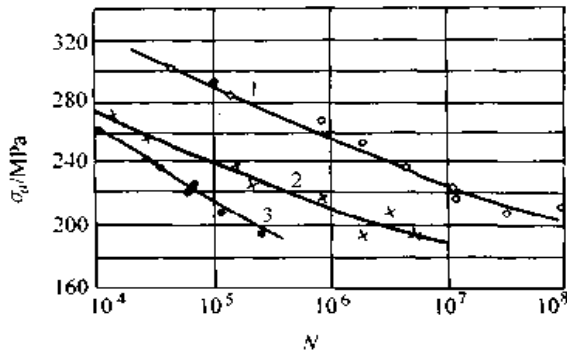


图 18.7-47 碳钢 [$w(C) = 0.17\%$] 在 450°C 时, 频率对拉压疲劳极限的影响
1—试验频率 $f = 2000 \text{ min}^{-1}$
2—试验频率 $f = 125 \text{ min}^{-1}$
3—试验频率 $f = 10 \text{ min}^{-1}$

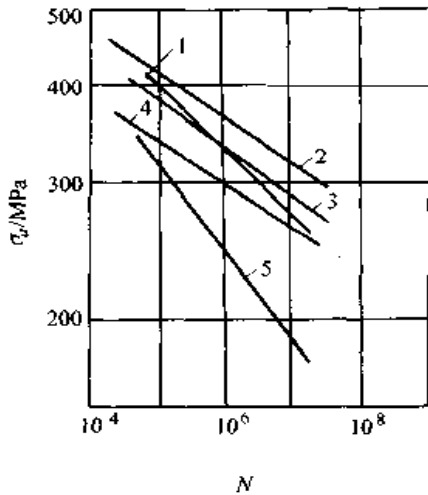


图 18.7-48 镍基高温合金在不同温度下的 S-N 曲线
1—600°C 2—800°C 3—900°C
4—950°C 5—1000°C
镍基高温合金化学成分 (质量分数, %):
Cr5, W5, Mo4, Co4.5, Al5.5,
Ti2.8, C0.15, B0.0

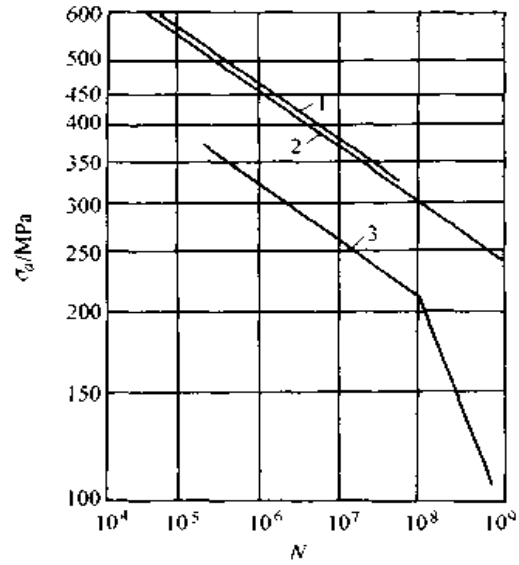


图 18.7-49 GH3032 合金在不同温度下的 S-N 曲线
1—20°C 2—700°C 3—800°C

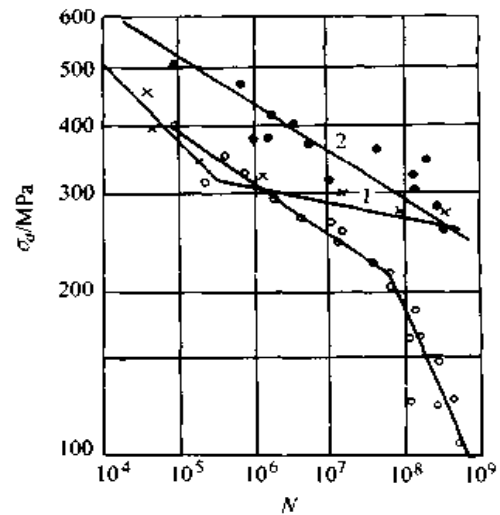


图 18.7-50 材料在高温下的 S-N 曲线
1—钛合金, $t = 200^\circ\text{C}$ 2—镍基合金,
 $t = 700^\circ\text{C}$ 3—镍基合金, $t = 800^\circ\text{C}$

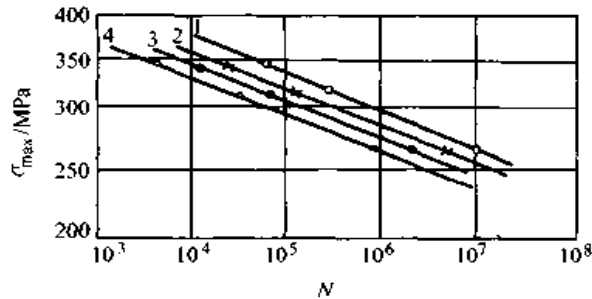


图 18.7-51 Cr2W9V 钢在 800°C 时的 p-S-N 曲线
1—存活率 $p = 50\%$ 2—存活率 $p = 68\%$ 3—存活率 $p = 95.4\%$ 4—存活率 $p = 99.7\%$

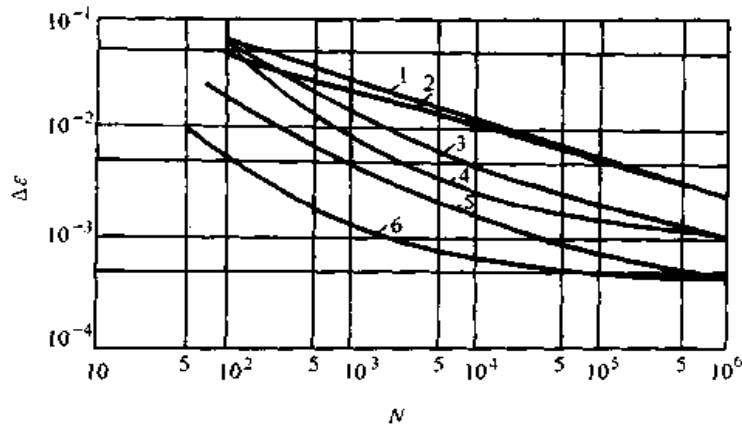


图 18.7-52 温度及频率对 304 奥氏体不锈钢低周疲劳 $\epsilon-N$ 曲线的影响

1— $f=10 \text{ min}^{-1}$, $t=430^\circ\text{C}$ 2— $f=10^{-3} \text{ min}^{-1}$, $t=430^\circ\text{C}$
 3— $f=10 \text{ min}^{-1}$, $t=650^\circ\text{C}$ 4— $f=10 \text{ min}^{-1}$, $t=816^\circ\text{C}$
 5— $f=10^{-3} \text{ min}^{-1}$, $t=650^\circ\text{C}$ 6— $f=10^{-3} \text{ min}^{-1}$, $t=816^\circ\text{C}$

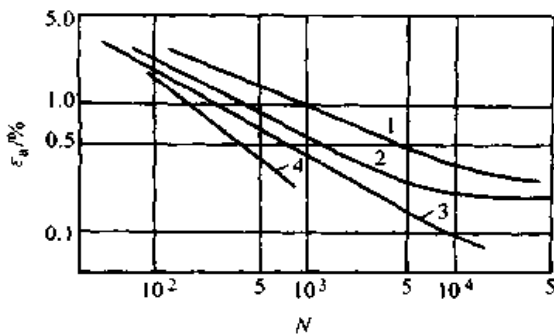


图 18.7-53 2.25Cr-1Mo 钢在高温对称弯曲时保持时间对 $\epsilon-N$ 曲线的影响

1—室温, 保持时间为 0, 经过时间 1 min
 2—温度 600°C , 保持时间为 0, 经过时间 1 min
 3—温度 600°C , 保持时间 30 min, 经过时间 31 min
 4—温度 600°C , 保持时间 300 min, 经过时间 301 min

4.3 影响金属高温疲劳性能的主要因素

4.3.1 材料因素

试验表明, 疲劳强度 (σ_{-1}) 与强度极限 (σ_b) 之间存在着一定的关系, 但是在不同的材料和不同的组织状态下, 这种关系可在很宽的范围内变化。材料的疲劳极限与强度极限的比值 σ_{-1}/σ_b , 称为疲劳比。对大多数材料, 疲劳比随温度的升高而增高。表 18.7-22 示出了不同材料在不同温度下的疲劳比。由此可见, 材料在不同温度下的疲劳极限和强度极限, 均需单独试验确定, 不宜借助疲劳比相互换算。

表 18.7-22 不同材料在不同温度下的疲劳比

材 料	试验温度/ $^\circ\text{C}$	σ_{-1}/MPa	σ_b/MPa	疲劳比
GH3032 型	20	330	1 190	0.28
	600	343	940	0.36
	700	285	770	0.37
	800	235	780	0.30
GH4033 型	20	370	1 020	0.36
	600	360	—	—
	700	390	810	0.48
	800	260	620	0.42
GH4037 型	20	370	1 040	0.36
	700	380	880	0.43
	800	360	750	0.48
	900	280	520	0.54
	—	—	—	—
尼莫尼克 80 (Nimonic80)	20	346	820	0.42
	600	299	580	0.52
	650	288	—	—
	700	263	360	0.73
	750	195	—	—
	800	142	200	0.71

4.3.2 温度因素

随着温度的升高, 疲劳强度一般有降低的趋

势，越接近熔点，降低趋势越明显。疲劳强度的降低是由于发生了再结晶、扩散和溶解等过程引起的。但也有某些过程能提高疲劳强度，如时效硬化和应变硬化。因此，有些材料在高温时的疲劳强度反而比室温时高，疲劳强度随温度的变化规律比较复杂。表 18.7-23 ~ 表 18.7-26 也是温度对疲劳强度的影响数据。

表 18.7-23 不同温度下材料的疲劳强度 (一)

钢的主要化学成分 (质量分数 (%))	疲劳极限 ($N = 10^8$ 次循环) σ_{-1}/MPa		
	20℃	70℃	100℃
	C0.6, Mn0.7	430	370
C0.24, Ni3.9, Cr1.0	490	430	—
C0.2, Ni4.7, Cr1.4, Mo0.6	570	—	450

表 18.7-24 不同温度下材料的疲劳强度 (二)

材料(成分 质量分数 (%))	旋转弯曲疲劳极限 ($N = 10^7$ 次循环) σ_{-1}/MPa					
	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃
灰铸铁 (C3.2, Si1.1)	90	90	90	105	110	95
镍铬钢 (Ni4.6, Cr1.6)	535	500	—	485	420	—
钢 (C0.35)	298	—	310	330	—	275
钢 (C0.60)	370	355	395	505	425	185
低合金钢 (C0.14, Mo0.5)	315	—	—	400	370	275

表 18.7-25 不同温度下材料的疲劳强度 (三)

铝 合 金	疲劳极限 (1.2×10^8 次循环) σ_{-1}/MPa				
	20℃	150℃	200℃	250℃	300℃
DTD683 (Zn5.5)	170	115	60	—	—
BSL65 (Cu4.5)	130	80	57	39	39
DTD324 (Si12)	127	85	60	39	29
DSL64 (Cu4.5)	125	90	62	54	39

表 18.7-26 叶片钢的疲劳极限 ($N = 10^7$ 次循环)

钢号	热处理	疲劳 极限 $\sigma_{-1}/$ MPa	20	200	300	400	500	550
			℃	℃	℃	℃	℃	℃
1Cr13	1 030 ~ 1 050℃ 油淬	光滑 试样	367	—	271	—	248	191
	680 ~ 700℃ 回火	缺口 试样	183	—	114	—	104	100
2Cr13	1 000 ~ 1 020℃ 油淬	光滑 试样	362	343	313	304	235	—
	700 ~ 720℃ 回火							

4.3.3 频率因素

高温疲劳的频率效应显著，主要是由于存在着蠕变作用的关系。频率低，应力作用的时间长，使蠕变的成分增加，裂纹扩展速度加快。此外，随频率的改变，断裂的特征也不同。频率较高时为穿晶断裂，较低时为沿晶断裂，中间则为混合断裂。图 18.7-54 示出了 A-286 合金的断口形态与频率的关系。图 18.7-55 示出了频率对 U-700 镍基高温合金疲劳寿命的影响。

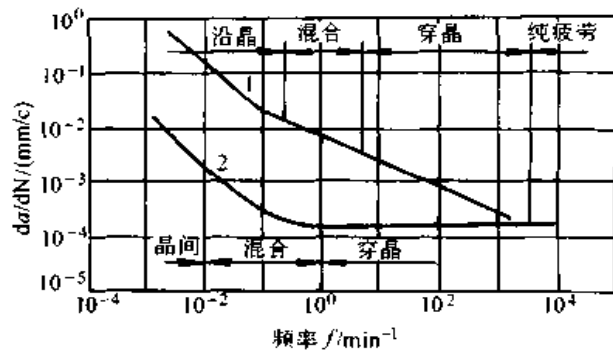


图 18.7-54 A-286 合金在 593℃ 时断口形貌与频率的关系

1—在空气中 2—在真空中

4.3.4 应力集中因素

在高温下缺口产生的应力集中，大多数情况下会导致疲劳强度降低。缺口越尖锐，应力集中越严重，疲劳强度降低越多。表 18.7-27 为缺口对疲劳强度的影响。

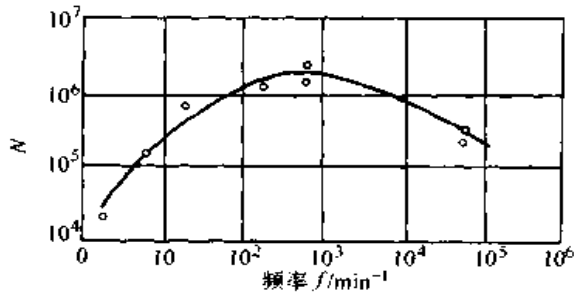


图 18.7-55 频率对 U-700 镍基合金在 760°C 时的疲劳寿命的影响

一般讲，在有缺口时，高温疲劳强度是降低的。但是当应力比 r 不同时，也会出现不同的结果。图 18.7-45 为 S-816 合金在 900°C 时的 S-N 曲线。当静载荷时 $r = +1$ ， $\alpha_0 = 3.4$ 的缺口试样在同一应力水平下的寿命大于光滑试样的。当 $r = 0.2$ ，即在蠕变和疲劳复合作用的情况下，在低寿命区，缺口试样的疲劳强度低于光滑试样；在高寿命区，缺口试样的疲劳强度高于光滑试样。当 $r = -1$ ，即在对称应力循环下，缺口试样的疲劳强度低于光滑试样。

表 18.7-27 缺口对疲劳强度的影响

材 料	温度 / °C	试验条件	疲劳极限 / MPa		理论应力集中系数 α_0	有效应力集中系数 K_0	敏性系数 q
			光滑试样	缺口试样			
GH4037 型	800	纯弯曲 180 kHz	350	250	2	1.40	0.4
	900	100 h	280	190	2	1.48	0.48
GH4033 型	20	纯弯曲	370	220	2	1.68	0.68
	600	180 kHz	360	240	2	1.50	0.50
	700	100 h	390	230	2	1.70	0.70
	800		260	230	2	1.13	0.13

图 18.7-56 为在旋转弯曲试验时，钢试样的应力集中敏性系数 q 随温度的变化曲线。图 18.7-57 为高温下碳钢的有效应力集中系数。

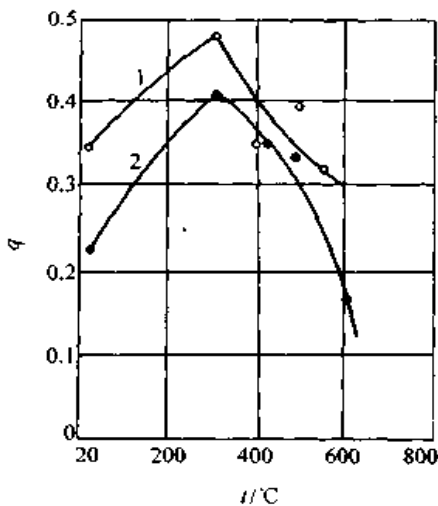


图 18.7-56 钢在高温下的应力集中敏性系数 q
1—1Cr13 钢 2—30CrMo 钢

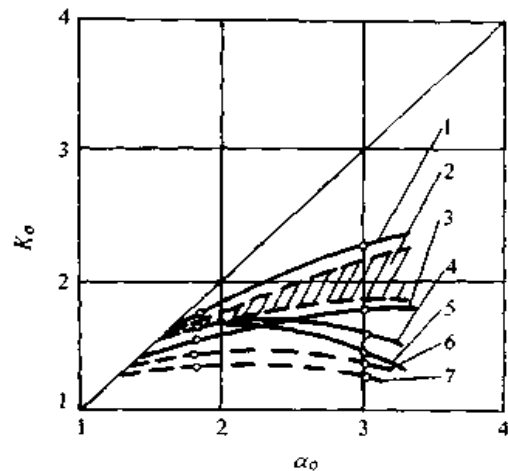


图 18.7-57 高温下碳钢的有效应力集中系数 K_0
1— $w(C) = 0.21\%$ 钢, $f = 2980 \text{ min}^{-1}$, $t = 300^\circ\text{C}$
2— $w(C) = 0.21\% \sim 0.72\%$ 钢, $f = 150 \text{ min}^{-1}$, $t = 20^\circ\text{C}$
3— $w(C) = 0.21\%$ 钢, $f = 2980 \text{ min}^{-1}$, $t = 500^\circ\text{C}$
4— $w(C) = 0.72\%$ 钢, $f = 2980 \text{ min}^{-1}$, $t = 500^\circ\text{C}$
5— $w(C) = 0.72\%$ 钢, $f = 2980 \text{ min}^{-1}$, $t = 575^\circ\text{C}$
6— $w(C) = 0.72\%$ 钢, $f = 150 \text{ min}^{-1}$, $t = 575^\circ\text{C}$
7— $w(C) = 0.21\%$ 钢, $f = 150 \text{ min}^{-1}$, $t = 500^\circ\text{C}$

4.3.5 表面状态因素

材料的疲劳强度与表面状态有很大关系。表面粗糙度增加，疲劳强度就降低。各种表面强化工艺，对高温下材料疲劳强度的影响，随着温度的升高而降低。表 18.7-28 为各种加工工艺对镍基合金 GH3032 (CrNi77TiAl) 试样疲劳寿命的影响。表 18.7-29 为表面喷丸对钴基合金缺口试样疲劳强度的影响，试样为边长 15.2 mm 的方形截面，材料为钴基合金 S-816，进行平面弯曲

疲劳试验，缺口为有 60° 的 V 形槽，槽深 1.9 mm，槽的根部圆角半径 0.76 mm；将试样先经磨削引入残余拉应力，再经喷丸引入残余压应力。由于槽部磨削引入残余拉应力，使有效应力集中系数 K_t 在室温下大于 α_s ；喷丸引入残余压应力，使 K_t 在室温下比 α_s 值小得多。但随着温度的升高，磨削的有害效应及喷丸的有利效应将逐渐消失。表 18.7-30 为残余压应力对铁基合金疲劳强度的有利影响。

表 18.7-28 各种加工工艺对镍基合金 GH3032 试样疲劳寿命的影响

加工工艺	硬层厚度/ μm	当 $\sigma_s = 412$ MPa 时，到达破坏的循环数			
		当 20℃ 时		当 700℃ 时	
		N/10 ⁶	寿命/%	N/10 ⁶	寿命/%
电抛光	—	4.85	—	13.4	—
精车	128	2.85	-41	9.01	-34
粗车	185	1.53	-68	5.35	-61
带电车削	91	2.27	-53	7.05	-48
新砂轮磨削	49	3.61	-25	11.7	-13
钝砂轮磨削	37	3.44	-29	10.4	-23
新刀车削后抛光	75	4.28	-11.6	10.0	-26
钝车车削后抛光	139	3.82	-21	8.55	-36
磨削后抛光	37	5.03	+3.7	12.6	-6
辊压	296	7.83	+61	14.3	+6.4
喷丸	189	17.8	+246	15.2	+12.6

注：电抛光试样的寿命设为 100%。

表 18.7-29 喷丸对钴基合金缺口试样疲劳强度的影响

加工工艺	有效应力集中系数 K_t ($\alpha_s = 2.7, N = 10^8$)		
	室 温	482~593℃	649℃
槽部磨削	4.6	2.9	2.4
喷丸	1.3	1.5	1.9

表 18.7-30 表面残余压应力对铁基合金疲劳性能的影响

铁基合金	试样类型	试验温度/℃	残余应力/ MPa	σ_{-1} /MPa ($N = 10^7$)		σ_{-1} 增加率/ %
				未喷丸	喷丸	
GH1140	板材 $\alpha_s = 1$	550	-1 100	350	460	31
GH2135	缺口 $\alpha_s = 2$	450	-950	175	275	57
GH2135	缺口 $\alpha_s = 2$	550	-950	240	300	25
GH2036	缺口 $\alpha_s = 2$	600	-1 400	≤200	300	≥28
GH2132	缺口 $\alpha_s = 2$	650	-1 600	230	255	30

4.3.6 平均应力因素

平均应力 σ_m 对材料疲劳强度的影响, 可用等寿命曲线来表示。在高温疲劳中, 随着温度的提高, 整个曲线向原点移动, 即蠕变强度及疲劳

强度都降低。图 18.7-58 为钴基合金 S-816 在室温 24℃ 及高温下的等寿命曲线, 实线为光滑试样, 虚线为缺口试样 ($\alpha_s = 3.4$)。图 18.7-59 为 N-155 合金的等寿命曲线。

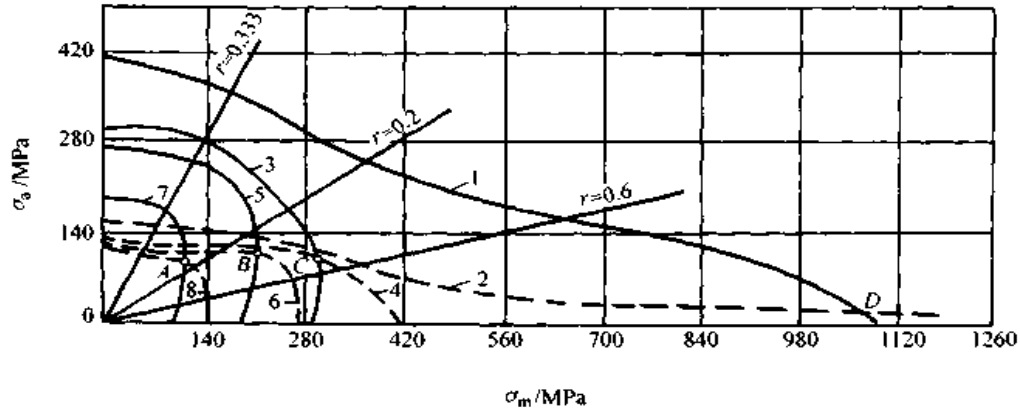


图 18.7-58 钴基合金 S-816, 在寿命 100 h 或 2.16×10^7 次循环下, 有平均拉应力时的等寿命曲线
 1—光滑试样, $t = 24^\circ\text{C}$ 2—缺口试样 ($\alpha_s = 3.4$), $t = 24^\circ\text{C}$ 3—光滑试样, $t = 732^\circ\text{C}$
 4—缺口试样 ($\alpha_s = 3.4$), $t = 732^\circ\text{C}$ 5—光滑试样, $t = 816^\circ\text{C}$ 6—缺口试样
 ($\alpha_s = 3.4$), $t = 816^\circ\text{C}$ 7—光滑试样, $t = 900^\circ\text{C}$ 8—缺口试样 ($\alpha_s = 3.4$), $t = 900^\circ\text{C}$
 A 点— 900°C , B 点— 816°C , C 点— 732°C , D 点— 24°C

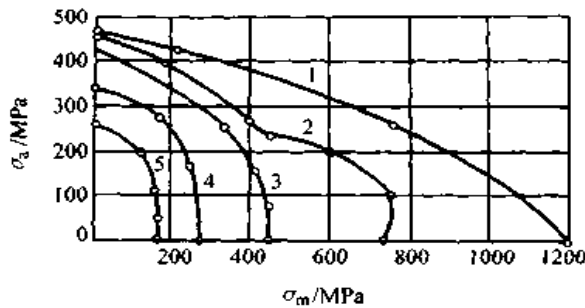


图 18.7-59 N-155 合金光滑试样在 150 h 寿命下有平均应力时的等寿命曲线
 1—室温 2— 538°C 3— 649°C
 4— 732°C 5— 816°C

4.4 高温下疲劳强度计算

高温下疲劳强度计算方法有两种:

①考虑高温及循环应力(应变)效应的静态算法。②考虑蠕变与疲劳复合作用的算法。

4.4.1 静态算法

静态算法是根据长期实践经验, 对高温下工作的零部件确定出其许用应力和安全系数。由机械零件的工作温度和受力情况, 求安全系数有三种情况, 即

1) 工作温度下以蠕变极限为基准的安全系数

$$n'_{iv} = \frac{\sigma'_t}{\sigma'_v} \quad (18.7-5)$$

2) 工作温度下以持久极限为基准的安全系数

$$n'_{rp} = \frac{\sigma'_r}{\sigma'_p} \quad (18.7-6)$$

3) 工作温度下以屈服强度为基准的安全系数

$$n'_{sp} = \frac{\sigma'_s}{\sigma'_p} \quad (18.7-7)$$

式中 σ'_p ——在温度 t 时的许用应力;

σ'_t ——蠕变极限, 其中 t 代表温度, ϵ 为单位小时的变形量, 例如, $\sigma'_{1, 10^5, 500} = 100 \text{ MPa}$, 表示材料在 500°C 温度下, 10^5 h 后变形量为 1% 的蠕变极限为 100 MPa;

σ'_r ——持久极限, 其中 t 代表温度, r 为时间。例如, $\sigma'_{1, 10^3, 700} = 300 \text{ MPa}$, 表示某材料在 700°C 、1 000 h 的持久极限为 300 MPa;

σ'_s ——工作温度下的屈服强度, 例如 $\sigma'_{500} = 300 \text{ MPa}$, 表示某材料在 500°C 时的屈服强度为 300 MPa。

由于 σ'_s 的测量比较困难, 可以用高温强度极限 σ'_b 与 σ'_s 之间的比例关系, 近似地算出 σ'_s 的

数值。对于碳钢有

- 在 300℃ 时, $\sigma'_s = 0.38\sigma'_b$;
- 在 350℃ 时, $\sigma'_s = 0.36\sigma'_b$;
- 在 400℃ 时, $\sigma'_s = 0.35\sigma'_b$;
- 在 450℃ 时, $\sigma'_s = 0.33\sigma'_b$;
- 在 500℃ 时, $\sigma'_s = 0.25\sigma'_b$ 。

对于合金钢, 这个比值比碳钢大, 在 500℃ 时, 钼钢的比值为 0.34, 镍钼钢的比值为 0.42。

轮机零部件的安全系数许用值, 见表 18.7-31。

汽轮机用钢的许用应力, 见表 18.7-32。

动力机械用铸钢的许用应力, 见表 18.7-33。

表 18.7-31 轮机零部件的安全系数许用值

零部件名称	应力状态	材 料	安全系数	零部件名称	应力状态	材 料	安全系数
轮机动叶片	拉、弯、扭疲劳	1Cr13, 2Cr13,	$n'_{sp} = 1.7 \sim 2.5$ (低温)	轮机焊接转子	周向应力	34CrMo, 34CrNi3Mo 25Cr1Mo1V	$n'_{sp} = 2.3$ (焊接处)
		15Cr11MoV	$n'_{sp} = 2, n'_{rp} = 2$ $n'_{rp} = 1.3$ (高温)				$n'_{sp} = 3$ (低温) $n'_{sp} = 2.2, n'_{rp} = 1.65$ $n'_{rp} = 1.25$ (高温)
轮机卫带、拉金	拉、弯	—	$n'_{sp} = 1.5 \sim 2.4$ (低温) $n'_{sp} = 2, n'_{rp} = 2$ $n'_{rp} = 1.3$ (高温)	轮机套装叶轮	周向应力	34CrMo, 34CrNi3Mo 25Cr1Mo1V	$n'_{sp} = 1.8$ (低温) $n'_{sp} = 1.8 \sim 2, n'_{rp} = 1.65$ $n'_{rp} = 1.25$ (高温)
轮机静叶片	弯、扭疲劳	20, 20CrMo, 15Cr1Mo1V, 12CrMnV, 1Cr13	$n'_{sp} = 3$ (低温)	轮机焊接隔板	弯	ZG20CrMo, ZG15Cr1Mo1V	$n'_{sp} = 1.65, n'_{rp} = 1.65$ $n'_{rp} = 1.25$ (高温)
			$n'_{sp} = 3, n'_{rp} = 2.3$ $n'_{rp} = 1.4$ (高温)	轮机机壳 (铸件)	内压	HT250, Q235A, 20, ZG20CrMo, ZG20CrMoV	$n'_{sp} = 1.5$ (低温)
轮机整体转子	周向应力	34CrMo, 34CrNi3Mo 25Cr1Mo1V	$n'_{sp} = 2.2$ (低温) $n'_{sp} = 2.2, n'_{rp} = 1.5$ $n'_{rp} = 1.0$ (高温)	轮机机壳 (锻件)			45, 35CrMoA, 25Cr2Mo1V	$n'_{sp} = 2, n'_{rp} = 2$ $n'_{rp} = 1.55$ (高温) $n'_{sp} = 1.65, n'_{rp} = 1.65$ $n'_{rp} = 1.25$ (高温)

注：“低温”是指低于蠕变温度；“高温”是指高于蠕变温度。下角 p 为“许用”。

表 18.7-32 汽轮机用钢的许用应力

钢 号	在不超过下列温度 (℃) 的许用应力 σ'_p /MPa													
	20	200	250	300	350	400	425	450	475	500	525	550	575	600
34CrMo	166	166	166	166	166	156	132	107	83	61				
1Cr13	117	107	103	98	88	83	76	76	67	60	50	37		17
2Cr13	137	127	117	115	112	107	103	95	83	63	44	23		
30Cr2MoV	215	215	215	205	196	181	171	161	127	88	52	30		
33Cr3MoWV	235	235	235	235	225	210	205	181	147	98	63			

表 18.7-33 动力机械用铸钢的许用应力

钢 号	应力种类	在不超过下列温度 (℃) 的许用应力 σ'_p /MPa								
		120	200	250	300	350	400	425	450	475
ZG230-450	拉伸	83	83	83	71	62	56	53	43	31
	弯曲	100	100	100	85	75	68	63	52	37
ZG270-500	拉伸	92	92	92	78	68	58	54	44	31
	弯曲	109	109	109	94	82	70	65	53	37

4.4.2 蠕变疲劳复合作用计算法

有些机器的零部件是在高温下受交变载荷的作用，如设备的经常起动和制动，高温压力容器的充气 and 放气等。对它们进行失效分析时，常常会涉及到蠕变和疲劳交互作用的问题，即同时会产生由于载荷保持不变引起的蠕变损伤和由于交变载荷引起的疲劳损伤。对于这类构件的寿命估算，常常需要考虑零部件所受的载荷、频率和温度等主要因素的影响，工程中应用的有线性累积损伤法、应变幅划分法和频率修正法。

(1) 线性累积损伤法

该方法是根据迈因纳 (Miner) 线性累积损伤理论导出的。假设零部件由于交变载荷引起的疲劳损伤 D_f 和由于载荷保持不变引起的蠕变损伤 D_c 的总和达到临界损伤值 D 时，就会发生失效，即

$$D_f + D_c = D \quad (18.7-8)$$

D_f 和 D_c 可以根据线性累积损伤公式计算，即

$$\left. \begin{aligned} D_f &= \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \\ D_c &= \sum_{i=1}^m \frac{t_i}{T_i} \end{aligned} \right\} \quad (18.7-9)$$

式中 n_i ——在应力为 σ_i 时的循环数；
 N_i ——在应力为 σ_i 时的疲劳失效寿命；
 t_i ——在应力为 σ_i 时的保持时间 (h)；
 T_i ——在应力为 σ_i 时的蠕变失效时间(h)。

因此，在设计中应使

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} + \sum_{i=1}^m \frac{t_i}{T_i} \leq D \quad (18.7-10)$$

临界损伤 D 值对于不同的材料和工作温度是不相同的，图 18.7-60 给出了两种不同材料的

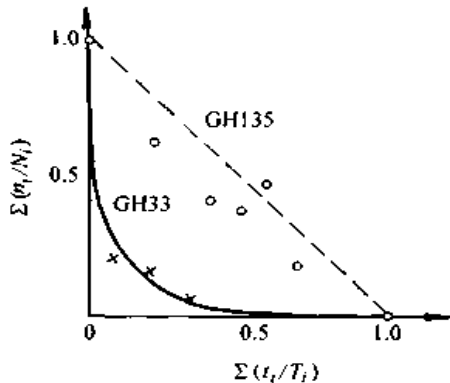


图 18.7-60 蠕变-疲劳复合作用的损伤曲线

蠕变-疲劳交互作用累积损伤的实验曲线。在工程中为计算方便，常取 $D = 1$ ，这对于大多数情况是偏于安全的。

(2) 应变幅划分法

该方法是由曼森 (Manson) 等人首先提出，认为蠕变-疲劳引起的失效与常温下低周疲劳失效有相类似处，可以用材料的应力-应变循环来估算寿命。并假设在蠕变温度下，零部件的寿命是受应力-应变循环中与时间无关的塑性应变和与时间有关的蠕变应变控制。因此，可对每一个应力-应变滞回环的应变进行划分，分别计算各部分所形成的损伤。

根据高温下可能出现的各种应力-应变循环特性，可以划分成以下四种基本类型，即

- 1) 拉伸为塑性应变，压缩为塑性应变，如图 18.7-61a 所示，总应变幅为 $\Delta\epsilon_{pp}$ 。
- 2) 拉伸为塑性应变，压缩为蠕变应变，如图 18.7-61b 所示，总应变幅为 $\Delta\epsilon_{pc}$ 。
- 3) 拉伸为蠕变应变，压缩为塑性应变，如图 18.7-61c 所示，总应变幅为 $\Delta\epsilon_{cp}$ 。
- 4) 拉伸为蠕变应变，压缩为蠕变应变，如图 18.7-61d 所示，总应变幅为 $\Delta\epsilon_{cc}$ 。

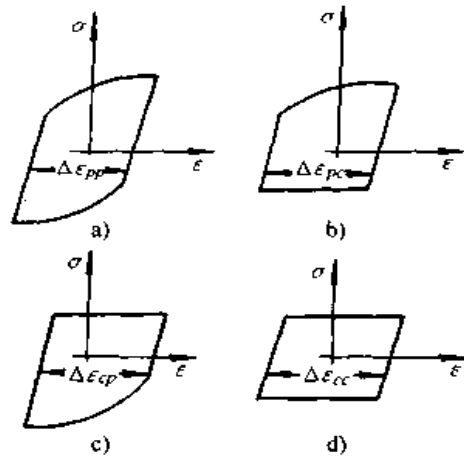


图 18.7-61 四种基本应力-应变循环

在每一种基本循环特性下引起的损伤，都符合科芬-曼森 (Coffin-Manson) 公式，可由试验得到

$$\left. \begin{aligned} \Delta\epsilon_{pp} N_{pp}^{\alpha_1} &= C_1 \\ \Delta\epsilon_{pc} N_{pc}^{\alpha_2} &= C_2 \\ \Delta\epsilon_{cp} N_{cp}^{\alpha_3} &= C_3 \\ \Delta\epsilon_{cc} N_{cc}^{\alpha_4} &= C_4 \end{aligned} \right\} \quad (18.7-11)$$

式中 N_{pp} 、 N_{pc} 、 N_{cp} 、 N_{cc} ——分别在应变幅为 $\Delta\epsilon_{pp}$ 、 $\Delta\epsilon_{pc}$ 、 $\Delta\epsilon_{cp}$ 和 $\Delta\epsilon_{cc}$ 下的失效寿命；

a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ——材料常数；

C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ——材料常数。

对于任意一个应力-应变滞回环，可以按上述四种基本循环进行划分，获得各应变幅分量，如图 18.7-62 所示的一个闭合的应力-应变滞回环，经划分后可得到

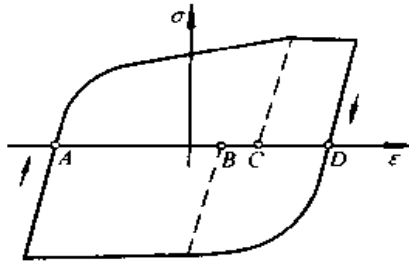


图 18.7-62 应变幅的划分

$$\Delta\epsilon_{pp} = DB, \Delta\epsilon_{cc} = CD, \Delta\epsilon_{pc} = AC - DB$$

在一个闭合的应力-应变滞回环中 $\Delta\epsilon_{pc}$ 和 $\Delta\epsilon_{cp}$ 不可能同时出现，若拉伸塑性应变大于压缩塑性应变时，仅有 $\Delta\epsilon_{pc}$ 应变幅分量；反之，仅有 $\Delta\epsilon_{cp}$ 应变幅分量。

根据应力-应变循环中的各应变幅分量和线性累积损伤假设，现有两种估算失效寿命 N_f 的方法，即

1) 方法之一

$$\frac{1}{N_f} = \frac{1}{N_{pp}} + \frac{1}{N_{pc}} + \frac{1}{N_{cp}} + \frac{1}{N_{cc}} \quad (18.7-12)$$

式中的 N_{pp} 、 N_{pc} 、 N_{cp} 和 N_{cc} 是分别根据已知的应力幅分量 $\Delta\epsilon_{pp}$ 、 $\Delta\epsilon_{pc}$ 、 $\Delta\epsilon_{cp}$ 和 $\Delta\epsilon_{cc}$ 由式 (18.7-11) 计算得到。

2) 方法之二

$$\frac{1}{N_f} = \frac{F_{pp}}{N_{pp}} + \frac{F_{pc}}{N_{pc}} + \frac{F_{cp}}{N_{cp}} + \frac{F_{cc}}{N_{cc}} \quad (18.7-13)$$

其中 $F_{pp} = \frac{\Delta\epsilon_{pp}}{\Delta\epsilon}$, $F_{pc} = \frac{\Delta\epsilon_{pc}}{\Delta\epsilon}$,

$F_{cp} = \frac{\Delta\epsilon_{cp}}{\Delta\epsilon}$, $F_{cc} = \frac{\Delta\epsilon_{cc}}{\Delta\epsilon}$

$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{pc} + \Delta\epsilon_{cp} + \Delta\epsilon_{cc}$

式中 F_{pp} 、 F_{pc} 、 F_{cp} 、 F_{cc} ——应变幅分数；
 $\Delta\epsilon$ ——总应变幅。

式 (18.7-13) 中的 N_{pp} 、 N_{pc} 、 N_{cp} 和 N_{cc} 是以 $\Delta\epsilon$ 作为应变幅值，代入式 (18.7-11) 分别计算后得到。

(3) 频率修正法

频率修正法是对室温下计算疲劳寿命的通用斜率方程用频率项进行修正，以适应高温下具有疲劳和蠕变交互作用的寿命计算。

对于循环中无保持时间的失效寿命 N_f 为

$$\Delta\epsilon = C_2 N_f^{-\beta} \nu^{(1-k)\beta} + \frac{AC_2^2}{E} N_f^{-\beta} \nu^{k_1 + (1-k_1)\beta} \quad (18.7-14)$$

式中 $\Delta\epsilon$ ——总应变幅；

E ——弹性模量；

ν ——频率；

A 、 C_2 、 n 、 β 、 k 、 k_1 ——常数。

对于循环中具有保持时间情况，需用失效总时间 t_f 表示寿命，若不考虑材料的循环应变硬化，即 $n=1$ 时， t_f 为

$$\Delta\epsilon = C_2 t_f^{-\beta} \tau^{k\beta} + \frac{AC_2^2}{E} t_f^{-\beta} \tau^{-(k_1-k\beta)} \quad (18.7-15)$$

$$\tau = \frac{1}{\nu}$$

各符号意义同式 (18.7-14)。

第 8 章 冲击与接触疲劳强度

1 冲击疲劳强度

冲击疲劳是指重复冲击载荷所引起的疲劳。当冲击次数 N 小于 500~1 000 次即破坏时，零件的断裂型式与一次冲击相同；当冲击次数 N 大于 10^5 次时破坏，零件断裂属于疲劳断裂，并具有典型的疲劳断口特征。

1.1 多次冲击能量-寿命 (A-N) 曲线

根据多次冲击试验可以作出冲击能量 A 和冲击破坏次数 N 的关系曲线(即 A-N 曲线)。也可作出冲击应力 σ 或应变 ϵ 与冲击次数 N 的关系曲线。

强度高、韧性低材料与韧性高、强度低材料两条 A-N 曲线有一交点。在交点左边较高能量时，韧性高强度低材料寿命长。在交点右边较低能量时，强度高韧性低材料寿命长。在这个交点上，表示多次冲击强度的主导因素在此发生转化。材料的多次冲击强度主要决定于强度。

图 18.8-1 为多次冲击弯曲的 A-N 曲线。图 18.8-2 为多次冲击拉伸的 A-N 曲线。

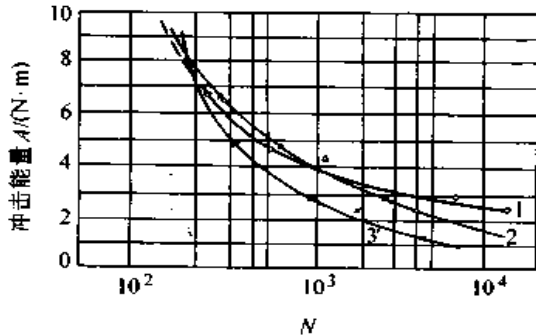


图 18.8-1 三种碳钢多次冲击弯曲试验的 A-N 曲线
1—45 钢,调质 2—78 钢,油淬火 3—25 钢,正火
缺口试样外径 $\phi 12\text{mm}$, 内径 $\phi 9\text{mm}$

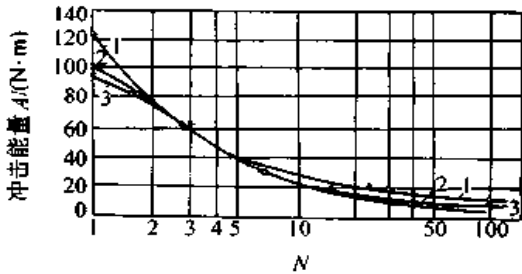


图 18.8-2 钢试样多次冲击拉伸试验的 A-N 曲线
1—20Cr 钢, 淬火 200℃回火 2—40Cr 钢淬火
600℃回火 3—40Cr 钢淬火 400℃回火
 $\phi 5\text{mm}$ 光滑试样

1.2 影响多次冲击强度因素

1.2.1 材料的强度和韧性

材料的多次冲击强度是以强度为主，并与韧性、塑性相配合，在强度和韧性、塑性最佳配合时，多次冲击强度出现高峰。随着冲击能量的降低，多次冲击强度高峰向高强度、低韧性塑性状态转移。从图 18.8-3 可见，在断裂次数仅数百

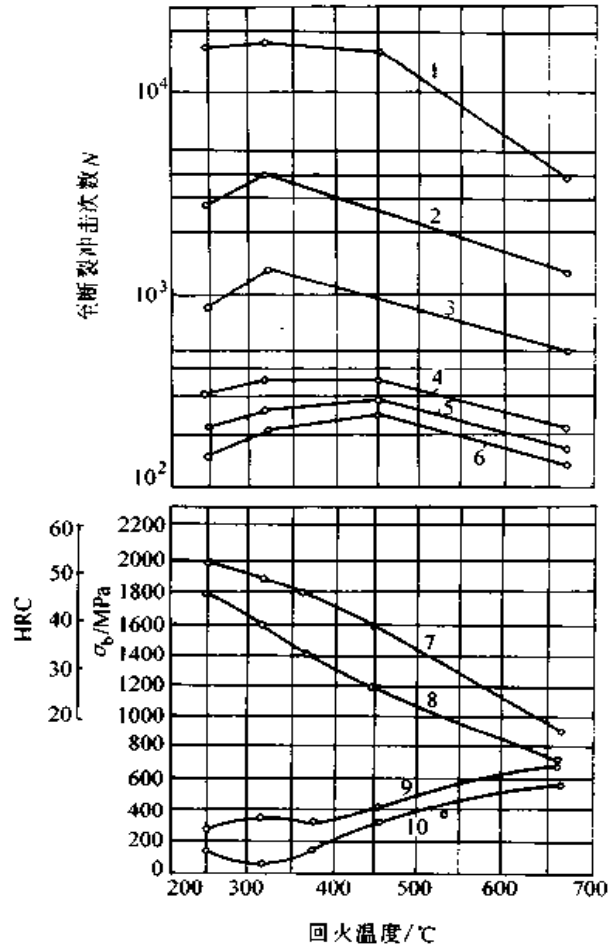


图 18.8-3 40 钢淬火不同温度回火时的静强度和多次冲击强度

- 1—冲击能量 $A = 1.3 \text{ J}$ 2— $A = 2.5 \text{ J}$
- 3— $A = 3.8 \text{ J}$ 4— $A = 5.8 \text{ J}$
- 5— $A = 7.3 \text{ J}$ 6— $A = 8.8 \text{ J}$
- 7—HRC 8— σ_b 9— δ 10— a_k

次的高能量下, 40 钢以淬火后 450℃ 回火为多次冲击强度最高; 当冲击能量降低, 断裂次数达数千次时, 则以 320℃ 回火的多次冲击强度最高。淬火高温回火 (即调质) 状态虽具有较高的冲击韧性, 但其多次冲击强度却是很低的。

韧性对多次冲击强度的影响程度, 与材料强度水平有关。在低强度水平时, 材料已有较大的韧性, 这时进一步增加韧性对多次冲击强度的作用甚小 (见图 18.8-4 及图 18.8-5, 此时直线的斜率小)。在高强度和超高强度水平时, 材料韧性一般较小, 这时适当增加韧性对提高多次冲击强度将起显著作用。

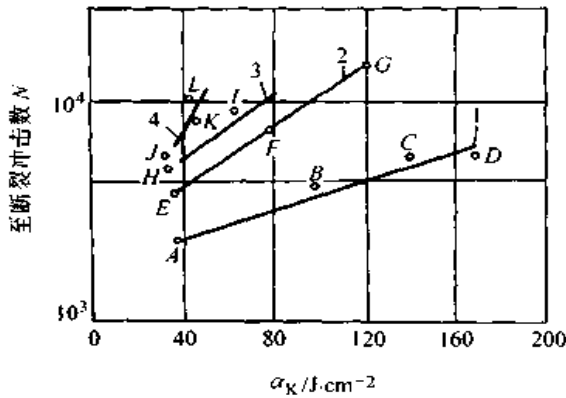


图 18.8-4 等强度下多次冲击强度与冲击韧性 α_K 的关系 (冲击能量 $A = 2.0 \text{ J}$)

- A—(T8, 515℃) B—(55, 525℃)
- C—(45, 485℃) D—(30, 458℃)
- E—(T8, 460℃) F—(55, 485℃)
- G—(45, 400℃) H—(T8, 420℃)
- I—(55, 415℃) J—(T8, 375℃)
- K—(55, 360℃) L—(30, 200℃)
- 1— $\sigma_b = 980 \text{ MPa}$ 2— $\sigma_b = 1275 \text{ MPa}$
- 3— $\sigma_b = 1471 \text{ MPa}$ 4— $\sigma_b = 1667 \text{ MPa}$

括号内的第一项为钢号, 第二项为回火温度

1.2.2 表面强化工艺

(1) 淬火和回火

对于低、中碳的碳素钢和合金结构钢经淬火、低、中温回火后, 具有较高的多次冲击强度。具有最佳综合力学性能的淬火 + 高温回火 (即调质), 虽然能承受一次冲击的强度很高, 但对小能量多次冲击的强度却很低, 即使在尖锐缺口情况下也是如此 (见图 18.8-6)。所以, 过高地追求冲击韧性 α_K , 不惜牺牲材料的强度, 致使

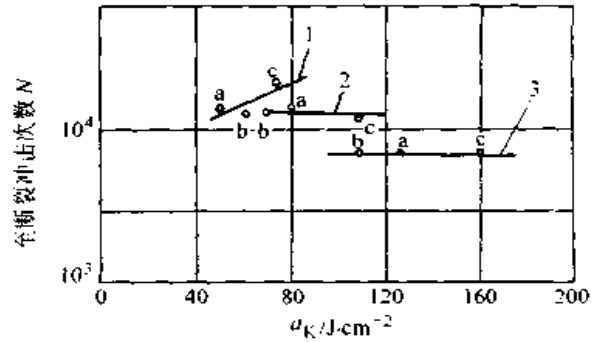


图 18.8-5 等强度下多次冲击强度与冲击韧性 α_K 的关系 (冲击能量 $A = 2.0 \text{ J}$)

- a—40 钢 b—40MnB c—40CrNiMoA
- 1— $\sigma_b = 980 \text{ MPa}$ 2— $\sigma_b = 1275 \text{ MPa}$
- 3— $\sigma_b = 1471 \text{ MPa}$

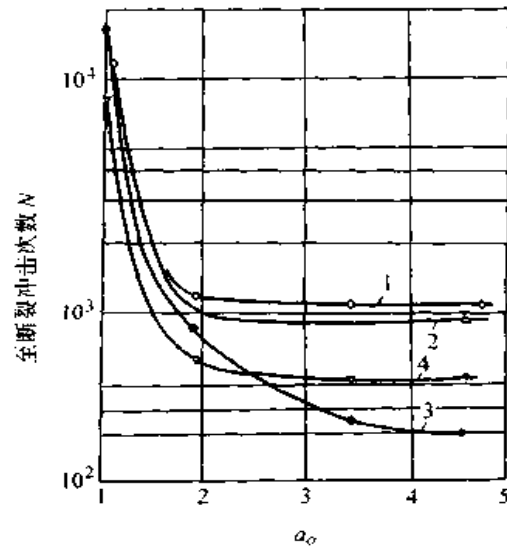


图 18.8-6 40MnB 钢淬火不同温度回火多次冲击强度与理论应力集中系数 α_s 的关系

- 1—200℃ 回火 2—320℃ 回火
- 3—400℃ 回火 4—500℃ 回火

零件粗大笨重, 实际上反可能降低了抵抗冲击载荷的能力, 使零件的寿命不长。

对于感应电表面淬火, 以 60 和 T8 钢为例, 经高频电表面淬火后, 其多种弯曲多次冲击弯曲疲劳强度随淬硬层厚度增加而增加, 到某一临界厚度时有一极大值, 淬硬层厚度继续增加多次冲击弯曲疲劳强度下降。

在断裂次数不超过 10^4 次的冲击能量下, 常见结构钢淬火以不同温度回火状态时的多次冲击强度, 其高低顺序见表 18.8-1。如进一步降低冲

表 18.8-1 常用结构钢淬火回火状态的多次冲击强度

钢种类别	低碳钢	中碳钢	中碳合金钢
钢号和热处理	15, 20, 25 淬火回火	30, 35, 40, 45, 50 淬火回火	30CrMnSiA, 40MnB, 40CrNiMoA 淬火回火
无缺口试样和 钝缺口试样 $\alpha_0 = 1 \sim 1.9$	低温回火或不回火 ↓ 中温回火 ↓ 高温回火	300~350℃ 中温回火 ↓ 400℃ 中温回火 ↓ 低温回火 ↓ 高温回火	低温回火 ↓ 中温回火 ↓ 高温回火
锐缺口试样 $\alpha_0 = 4.6$		320~400℃ 中温回火 ↓ 低温回火 ↓ 高温回火	320~400℃ 中温回火 ↓ 低温回火 ↓ 高温回火

注：1. 表中↓表示多次冲击强度从高到低的排列顺序。这是根据多冲弯曲试验结果归纳的大致范围。

2. 钢中含碳量较高时，回火温度偏上限；含碳量较低时，回火温度偏下限。

击能量，即断裂次数继续增大时，则相应的最佳多次冲击强度的回火温度，还要向低温方向移动。

(2) 渗碳

渗碳钢心部含碳量对多次冲击强度的影响，以 Cr-Mo 钢为例，当心部含碳量为 0.25% 左右时，渗碳钢的多次冲击弯曲强度最高，缺口敏感性最小（见图 18.8-7）。

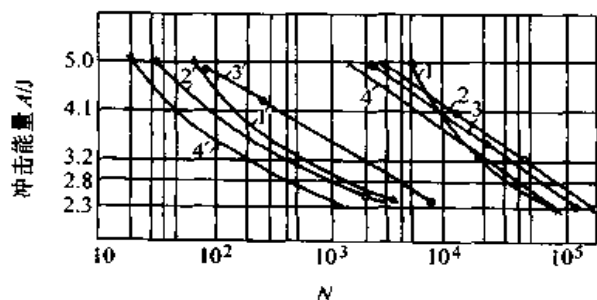


图 18.8-7 铬钼钢渗碳试样的 A-N 曲线

- 1—20CrMo, 光滑试样 2—30CrMo, 光滑试样
- 3—25CrMo, 光滑试样 4—35CrM, 光滑试样
- 1'—20CrMo, 缺口试样 2'—30CrMo, 缺口试样
- 3'—25CrMo, 缺口试样 4'—35CrMo, 缺口试样

表 18.8-2 20CrMo 钢表层碳浓度和表面硬度对多次冲击点接触应力的影响

渗碳层厚度/mm	1.8		2.0		2.3		2.5	
表面硬度 HRC	58~60	61~63	58~60	61~63	58~60	61~63	58~60	61~63
表层碳质量分数/(%)	0.7~0.9	0.9~1.1	0.7~0.9	0.9~1.1	0.7~0.9	0.9~1.1	0.7~0.9	0.9~1.1
开裂周次 N	8×10^3	2.8×10^2	2×10^4	1×10^3	7×10^4	3.3×10^3	1.53×10^5	1.5×10^4
N 低碳/N 高碳	28.5		20		21.2		10.4	
下凹深度/mm	0.365	—	0.298	0.125	0.249	0.162	0.235	0.140

渗碳层厚度和表面硬度对多次冲击接触强度的影响，用钢珠装在冲头上对 20CrMo 渗碳钢表面进行反复冲击试验。结果表明：渗碳层厚度由 1.8 mm 增加到 2.5 mm，压痕下凹显著减缓，开裂也大为推迟。又将渗碳表面层碳含量（质量分数）从 0.9%~1.1% 下降到 0.7%~0.9%，使表面硬度由 61~63HRC 下降到 58~60HRC，则在不同的渗碳层厚度下，多次冲击接触强度提高 10~30 倍（见表 18.8-2）。

渗碳钢表面硬度对多次冲击滚动接触疲劳强度的影响方面，以麻点剥落为损坏形式的渗碳件，适当提高其回火温度，使表面硬度由 61~63HRC 下降到 58~60HRC，将显著提高其滚动接触疲劳强度。

(3) 表面加工硬化

采用辊压和喷丸等表面强化工艺，可改善表面层的组织性能，造成表面残余压应力状态，从而能有效地提高材料的多次冲击疲劳强度（见图 18.8-8 和图 18.8-9）。对于高强度材料或经化学

热处理（如渗碳、碳氮共渗等）材料，表面冷加工硬化提高多次冲击疲劳强度的效果更为显著。表面强化应选择合理的工艺参数，以免强化不足或过量而使性能下降。对于高强度材料，需采用较大强化量的工艺，才能充分发挥其强度潜力。

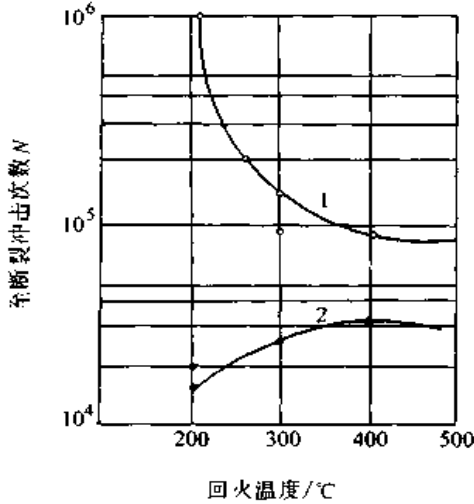


图 18.8-8 40Cr 钢不同回火温度下辊压对提高多次冲击寿命的影响
1—经辊压 2—未经辊压

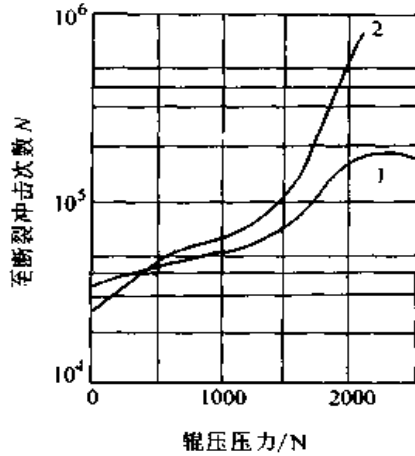


图 18.8-9 不同辊压压力对多次冲击寿命的影响
1—18CrNiW 钢淬火低温回火
2—18CrNiW 钢气体氮化，直接淬火

1.3 冲击疲劳强度计算

如何把多次冲击试验的数据，应用于实际的机械零件设计中，需要解决试样与实物的多次冲击强度的模拟问题。例如尺寸的大小，形状的改变，材料性能的变化等，在近似计算中，当冲击次数小于 100 次时，用一次冲击的方法计算强

度；当冲击次数大于 100 次时，用类似于疲劳的方法计算强度。

冲击疲劳强度最简单的设计计算方法是安全系数法。安全系数可用：以冲断能量为基准的；也可用以冲断循环数为基准的，即

$$n_A = \frac{A_C}{A}; \quad n_N = \frac{N_C}{N} \quad (18.8-1)$$

式中 A_C ——在某一寿命值下的冲断能量；
 A ——设计冲击能量；
 N_C ——在某一冲击能量下至冲断的次数（寿命）；
 N ——设计寿命。

对于一般用途的机械荐用： $n_A = 1.3 \sim 1.5$ ；
 $n_N = 2.0 \sim 10$ 。

2 接触疲劳强度

零件在循环接触应力作用下，产生局部永久性累积损伤，经过一定的循环次数后，接触表面发生麻点、浅层或深层剥落的过程，称为接触疲劳。齿轮、滚动轴承和凸轮是典型的接触疲劳失效零件。

2.1 接触疲劳失效机理

用圆柱体滚子在弹性体平面上滚动为例，弹性体内切应力 τ_{yx} 的变化如图 18.8-10 所示。图

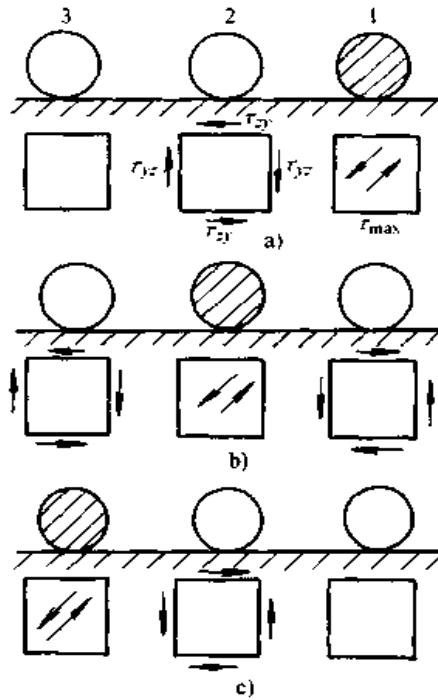


图 18.8-10 圆柱体滚子在平面上滚动时的切应力变化

18.8-10a 表示滚子在位置 1, 图 18.8-10b 表示滚子在位置 2, 图 18.8-10c 表示滚子在位置 3。有剖面线的滚子表示滚子的所在位置, 没有剖面线的滚子表示在该瞬间滚子不在这位置上。

图 18.8-10a 表示当滚子在位置 1 时, 在位置 1 的正下方, $\tau_{yz} = 0$; 但在左边位置 2 的下方 (例如, 位置 2 在位置 1 左边 $0.85b$ 处), 有切应力 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ 的最大值, 等于 $0.256\sigma_{zmax}$ (图 18.8-11), 并以 τ_0 表示。此时, 位置 3 下方的切应力很小, 可以不考虑。

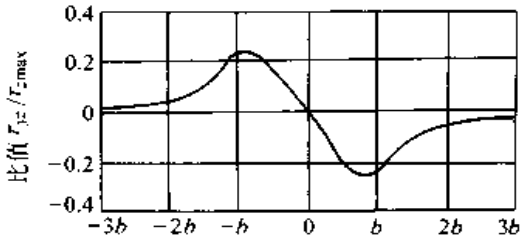


图 18.8-11 在表面下 $0.5b$ 处切应力 τ_{yz} 的变化曲线

图 18.8-10b 表示滚子在位置 2 时弹性体内切应力 τ_{yz} 的情况。这时, 在位置 2 的正下方, $\tau_{yz} = 0$; 在左边位置 3 及右边位置 1 的下方, $\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau_0$, 但切应力的方向相反。

图 18.8-10c 表示滚子在位置 3 时弹性体内切应力 τ_{yz} 的情况。这时, 在位置 3 的正下方, $\tau_{yz} = 0$; 在右边位置 2 的下方, $\tau_{yz} = \tau_{zy} = \tau_0$; 在位置 1 的下方, 切应力很小, 可以不考虑。

因此, 弹性体内最危险的切应力是离表面 $0.5b$ 处的 τ_{yz} , 其最大值为 $0.256\sigma_{zmax} = \tau_0$, 即应力幅为 $0.256\sigma_{zmax}$ 的对称循环切应力。

在切应力 τ_0 的循环作用下, 接触物体表面下形成平行于表面的裂纹, 裂纹在滚动方向平行于表面扩展, 再延伸到表面使之剥落。这种破坏的裂纹扩展速度较慢, 断口光滑。

2.2 接触应力

图 18.8-12 表示两物体相接触时采用的坐标系, 未加载时于 O 点接触。假设: ①两物体为完全弹性体, 并且各向同性; ②作用于物体上的载荷仅产生弹性变形并遵循虎克定理; ③两物体的接触区面积比物体的总面积小很多; ④压力垂直于接触表面, 即接触区中的摩擦力略去不计; ⑤表面光滑, 无承载油膜。

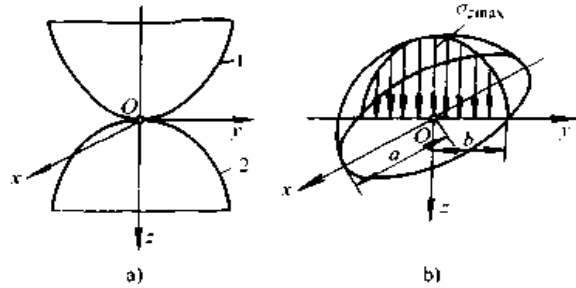


图 18.8-12 两物体的接触

在弹性体接触问题中, 原为点接触的两物体受压力后, 接触面的一般形状为椭圆, 其长半轴为 a , 短半轴为 b 。取椭圆的中心为原点 O , 压力分布为半椭球形, 在 O 点的最大名义接触应力以 σ_{zmax} 表示 (图 18.8-12b)。令半椭球体的体积等于总压力 F , 即得

$$\sigma_{zmax} = \frac{3F}{2\pi ab} \quad (18.8-2)$$

椭圆面积上的平均应力 σ_{zm} 为

$$\sigma_{zm} = \frac{F}{\pi ab}$$

由此可以看出, σ_{zmax} 为 σ_{zm} 的 1.5 倍。由弹性力学可得椭圆的长半轴 a 和短半轴 b 分别为

$$\left. \begin{aligned} a &= m \left[\frac{3\pi F(k_1 + k_2)}{4(A + B)} \right]^{1/3} \\ b &= n \left[\frac{3\pi F(k_1 + k_2)}{4(A + B)} \right]^{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (18.8-3)$$

式中的常数 A 和 B 都是正值。

设上边物体 1 的表面在接触点处的主曲率半径为 R_1 及 R_1' , 下边物体 2 的表面在接触点处的主曲率半径为 R_2 及 R_2' , 而 R_1 及 R_2 两曲率半径所在平面的夹角为 ψ , 则 A 和 B 决定于以下两个方程, 即

$$\left. \begin{aligned} A + B &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right) \\ B - A &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\psi \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (18.8-4)$$

而 m 及 n 是与比值 $(B - A)/(A + B)$ 有关的系数。引用符号

$$\cos\theta = \frac{B-A}{A+B}$$

则 m 及 n 与 θ 的关系列于表 18.8-3:

表 18.8-3 m 及 n 的数值

θ	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
m	2.73	2.14	1.75	1.49	1.28	1.13	1.00
n	0.49	0.57	0.64	0.72	0.80	0.89	1.00

$$k_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}, k_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \quad (18.8-5)$$

式中 ν_1 和 ν_2 ——物体 1 和物体 2 的泊松比;
 E_1 和 E_2 ——物体 1 和物体 2 的弹性模量;
 比值 a/b 越大, 接触面的椭圆越是长而窄。当 a/b 趋于无限大时, 就得到两个轴线平行的圆柱体相接触的情况。这时, 接触面是宽度为 $2b$ 的狭矩形, 而名义接触应力沿接触面宽度方向按半椭圆分布。令接触面的单位长度上的接触力为 F' , 则

$$F' = \frac{\pi b \sigma_{zmax}}{2}$$

从而得到最大名义接触应力

$$\sigma_{zmax} = \frac{2F'}{\pi b} \quad (18.8-6)$$

它等于平均应力 $F'/(2b)$ 的 $4/\pi$ 倍。对局部应变进行分析, 可得

$$b = \sqrt{\frac{4F'(k_1+k_2)R_1R_2}{R_1+R_2}} \quad (18.8-7)$$

及

$$\sigma_{zmax} = \sqrt{\frac{F'(R_1+R_2)}{\pi^2(k_1+k_2)R_1R_2}} \quad (18.8-8)$$

当两物体的材料相同, 即 $E_1 = E_2 = E$ 及 $\nu_1 = \nu_2 = \nu = 0.3$ 时, 得工程上常用的公式, 即

$$\left. \begin{aligned} b &= 1.52 \sqrt{\frac{F'R_1R_2}{E(R_1+R_2)}} \\ \sigma_{zmax} &= 0.418 \sqrt{\frac{FE(R_1+R_2)}{R_1R_2}} \end{aligned} \right\} \quad (18.8-9)$$

对于圆柱体与平面相接触的情况, 只须在上面的公式中, 令 $R_1 \rightarrow \infty$, 对于圆柱体与圆柱座相接触的情况, 只须在上面的公式中取 R_1 为负值。

用解析法可以推导出接触物体的切应力 τ_{yz} 的表达式。当轴线平行的两圆柱体相接触时, 在接触区表面下 $0.5b$ 处的平面上, 切应力 τ_{yz} 的变

化如图 18.8-11 所示。图中横坐标由 $-b$ 到 b 的区域为接触面的宽度, O 点为接触区的中心, 该点的压应力为最大应力 σ_{zmax} 。切应力的最大值在表面以下 $0.5b$ 处, 离中心点 O 的距离为 $0.85b$, 且 $+0.85b$ 处的 τ_{yz} 与 $-0.85b$ 处的 τ_{yz} 方向相反, 故此切应力为对称循环切应力。

2.3 影响接触疲劳强度的因素

(1) 滑动速度

图 18.8-13 表示滚子在弹性平面上滚动或滑动时, 弹性体内切应力的分布。由图可以看出, 纯滚动时, 最大切应力在表面; 滚动伴随滑动时, 与纯滚动相比, 最大切应力的位置离表面较近, 且应力更大。就是说, 如在接触疲劳中存在滑动, 将显著降低疲劳寿命。

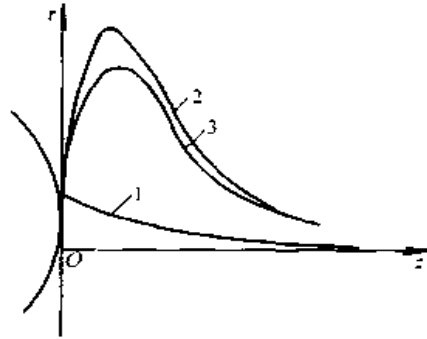


图 18.8-13 滚动或滑动时最大切应力的位置
 1—纯滑动 2—滚动伴随滑动 3—纯滚动

一般质量的钢材, 总存在非金属夹杂等缺陷, 加工后的零件表面, 总留有不同程度的刀痕、磨削痕、腐蚀或磨损造成的痕迹。因此, 以滚动为主的两接触件, 常以表层下某一深度处存在的缺陷作为裂纹源。对于以滑动为主的两接触件, 表面上的切削痕等缺陷是应力集中点, 成为接触疲劳裂纹源。裂纹从表面开始, 沿与滑动方向成 $20^\circ \sim 40^\circ$ 角向下扩展并分叉, 使表层剥落, 形成浅坑, 其断口粗糙。表面裂纹的形成比表面下的裂纹慢, 但裂纹扩展速度很快。

(2) 表面粗糙度

两接触物体表面的几何形态和性质称为表面形貌。经机械加工的零件, 表面上还是高低不平, 有峰和谷。

两物体在滚动和滑动过程中, 两表面上的峰和谷彼此之间产生嵌合、压碎、弹性应变和塑性

压扁等现象，使物体的表面层损伤，摩擦系数增大，表面发热，润滑变坏，影响两接触表面的接触疲劳特性。

由试验可知，以精车的表面粗糙度为基准，如将两钢制件接触表面的粗糙度降低到抛光的数值，则接触疲劳寿命可提高到精车寿命的 8 倍左右；此后，如再继续降低粗糙度，则对接触疲劳寿命的影响变小。

(3) 润滑油膜

若传动齿轮的两轮齿之间或滚动轴承的滚珠与座圈之间，能形成弹性流体动压润滑（简称弹流）油膜，则两接触面之间的最大单位压力将大大降低，使接触疲劳寿命显著增加。

求弹流最小油膜厚度的道森公式，写成有量纲形式为

$$h_0 = 2.65a^{0.54}(\eta_0 v)^{0.7} R^{0.43} E'^{0.03} F'^{-0.13} \tag{18.8-10}$$

式中 F' ——单位接触长度的载荷；

$$E' = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{-1}$$

ν_1, ν_2 ——分别为物体 1 和 2 材料的泊松比；

a ——润滑油黏度压力指数(见表 18.8-4)；

η_0 ——润滑油黏度；

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \text{——综合滚动速度；}$$

v_1, v_2 ——分别为物体 1 和 2 接触表面线速度；

R_1, R_2 ——分别为物体 1 和 2 接触表面的曲率半径；

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

表 18.8-4 精制矿物油的黏度压力指数 a ($\times 10^{-8} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)

温度 / ℃	环 烷 基			石 蜡 基		
	锭子油	轻机油	重机油	轻机油	重机油	气缸油
30	2.1	2.6	2.8	2.2	2.4	3.4
60	1.6	2.0	2.3	1.9	2.1	2.8
90	1.3	1.6	1.8	1.4	1.6	2.2

由式(18.8-10)即可求得最小油膜厚度 h_0 。

引入膜厚比 λ 为

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}$$

式中 R_{a1} 和 R_{a2} ——接触面 1 和 2 的峰谷值算术平均偏差。

当 $\lambda \geq 3$ 时为全弹流，当 $\lambda < 3$ 时为部分弹流。对于大多数工业传动内轮和滚动轴承，当 $\lambda > 1.5$ 时，就处于部分弹流状态；当 $\lambda > 3$ 时，疲劳寿命几乎与油膜厚度无关；当 $\lambda < 1.0$ 时，即进入边界润滑状态（图 18.8-14）。

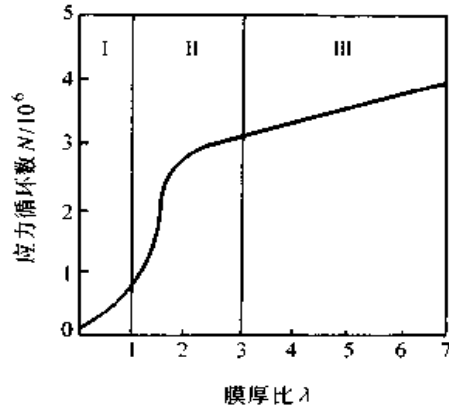


图 18.8-14 膜厚比 λ 与润滑状态

I——边界润滑区 II——部分弹流区 III——全膜弹流区

弹流油膜的建立使接触面之间的压力分布趋于和缓，峰值压力下降，从而减少了接触疲劳损伤，使接触疲劳寿命提高。进入部分弹流状态后，虽不是全膜，但基本上建立了承载油膜。图 18.8-15 表示膜厚比 λ 与接触疲劳损伤的关系。

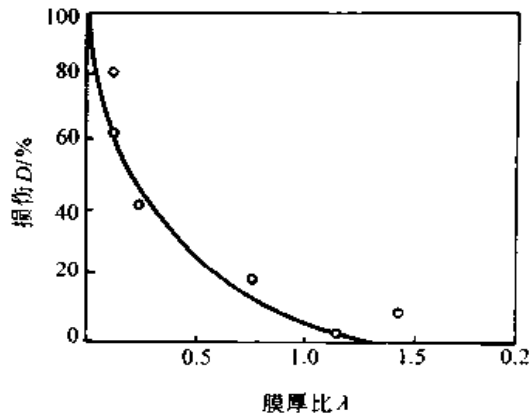


图 18.8-15 膜厚比 λ 与接触疲劳损伤的关系

(4) 润滑剂

润滑剂的腐蚀作用对接触疲劳的影响，要比黏度的影响大。润滑剂对金属会产生程度不同的腐蚀作用，使用不同的润滑剂，裂纹扩展速度相差可达 7 倍。

润滑油中的添加剂，对接触疲劳寿命的影响很复杂，有的提高，有的降低，有的无影响。含有氧和水分的添加剂，将急剧降低寿命；在裂纹尖端有腐蚀作用的添加剂，会降低寿命；能降低表面摩擦力的添加剂，可提高寿命。

(5) 非金属夹杂物

轴承钢中的非金属夹杂物，有脆性的（如氧化铝、硅酸盐、氮化物等）、塑性的（如硫化物）和球状的（如硅钙酸盐、铁锰酸盐）三类。脆性夹杂物的边缘部分，最易造成微裂纹，其中，以脆性的带有棱角的氧化物、硅酸盐夹杂物，对接触疲劳寿命降低最多。塑性的硫化物夹杂，易随基体的塑性变形协调，当硫化物夹杂把氧化物夹杂包住，形成共生夹杂物时，可以降低氧化物夹杂的坏作用。钢中适度的硫化物夹杂，能提高接触疲劳寿命。

(6) 硬度

1) 马氏体含碳量 承受接触载荷的零件，多采用高碳钢淬火或渗碳钢表面渗碳后淬火，使表层获得最佳硬度。对于轴承钢，在未溶碳化物状态相同的条件下，当马氏体含碳量（质量分数）在 0.4%~0.5% 左右时，接触疲劳寿命最高（见图 18.8-16）。

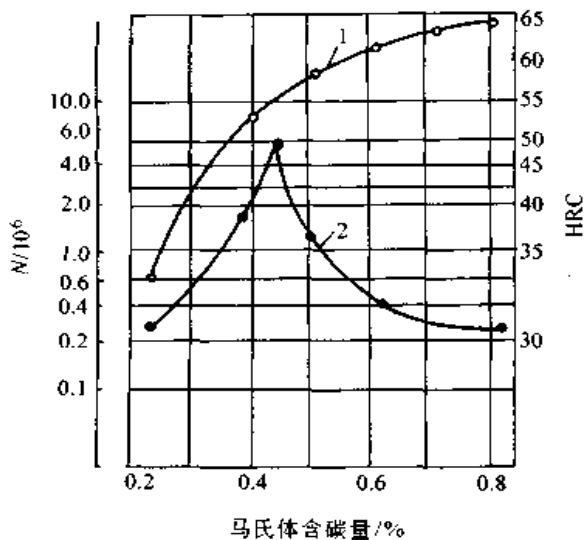


图 18.8-16 轴承钢中马氏体含碳量对接触疲劳寿命的影响
1—HRC 2—寿命

2) 马氏体和残余奥氏体的级别 渗碳钢淬火，因工艺不同可以得到不同级别的马氏体和残余奥氏体。如残余奥氏体越多，马氏体针越粗

大，则表层中的残余压应力和渗碳层强度就越低，易于产生微裂纹，降低接触疲劳寿命。

3) 在一定硬度范围内，接触疲劳强度随硬度升高而增大，但并不保持正比关系。轴承钢表面硬度为 62HRC 时，其寿命最长（见图 18.8-17）。

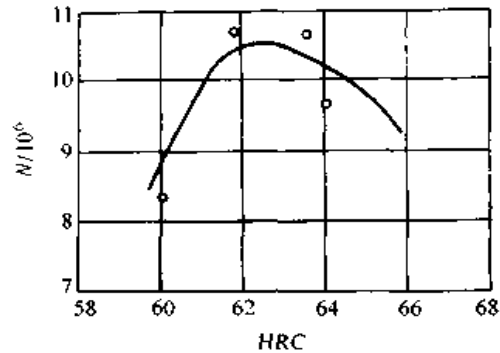


图 18.8-17 轴承钢表面硬度与寿命关系

表面脱碳降低表面硬度，又使表面易形成非马氏体组织，并改变表面残余应力分布形成残余拉应力，降低接触疲劳寿命。某些齿轮早期接触疲劳失效分析表明，当脱碳层厚度为 0.20 mm，表面含碳量（质量分数）为 0.3%~0.6%，70%~80% 疲劳裂纹是脱碳层内起源的。

渗碳件心部硬度太低，则表层硬度梯度太陡，易在过渡区内形成裂纹而产生深层剥落。实践表明，渗碳齿轮心部硬度以 35~40HRC 为宜。

2.4 接触疲劳强度计算

接触疲劳强度计算，也是以 S-N 曲线为依据的。但接触疲劳的 S-N 曲线与拉伸和弯曲疲劳的 S-N 曲线不同。对材料接触疲劳试验的基本要求是，应尽可能地将被试验的材料做成滚子形零件（试样），并接近实际使用条件。这些条件包括：试样的加载形式、润滑油的选择与供油方法、材料的化学成分及组织状态、试样的形状和试样的表面加工特性等。

接触疲劳的 S-N 曲线的纵坐标是最大名义接触应力 $\sigma_{r,max}$ 。 $\sigma_{r,max}$ 的计算不考虑应力集中和局部塑性变形后应力重新分配等因素，而按弹性理论的公式进行。在每个应力水平下，对成组试验法的数据进行统计，得到 $\sigma_{r,max}$ 的均值，根据各个应力水平下的 $\sigma_{r,max}$ 的均值画出 S-N 曲线。

对于在每个应力水平下，用一个试样的接触疲劳常规试验法，试样的数目不得少于 12 个，其

中在接触疲劳极限水平区段进行试验的试样数不得少于 3 个。

图 18.8-18 为 $w(C) = 0.34\%$ 碳钢、 $w(C) = 0.10\%$ 碳钢和硬铝用机油润滑进行接触疲劳试验得到的 $S-N$ 曲线。图 18.8-19 为 14CrMnSiNi2Mo 钢经碳氮共渗和渗碳后淬火试验得的 $S-N$ 曲线。表 18.8-5 为某些材料的接触疲劳极限。

接触疲劳极限的循环基数 N_0 ，以不产生大量

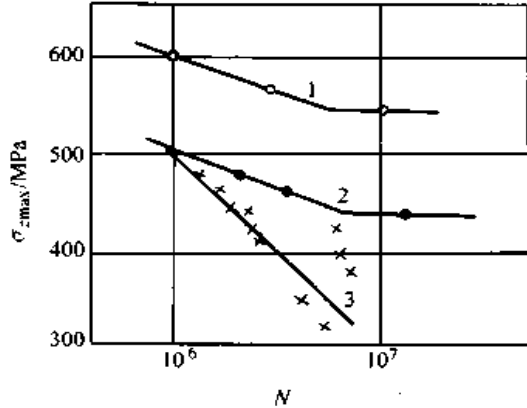


图 18.8-18 接触疲劳的 $S-N$ 曲线
1— $w(C) = 0.34\%$ 碳钢 2— $w(C) = 0.10\%$ 碳钢 3—硬铝

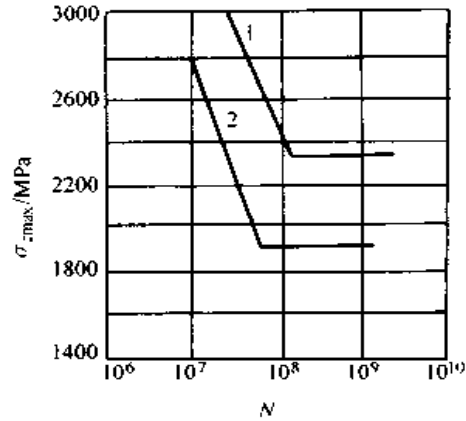


图 18.8-19 14CrMnSiNi2Mo 钢的接触疲劳 $S-N$ 曲线

1—碳氮共渗试样，渗层厚度为 0.66 mm

2—渗碳试样，渗层厚度为 0.76 mm

扩展性点蚀为依据。对于低碳钢， $N_0 = (2 \sim 4) \times 10^6$ ；调质钢为 $(10 \sim 20) \times 10^6$ ；铸铁为 $(2 \sim 6) \times 10^6$ ；青铜与铜合金为 $(3 \sim 12) \times 10^6$ 循环。当应力低于接触疲劳极限时，经过相当多循环后，也可能产生一些非扩展性的点蚀。

当由试验得出材料在某种具体接触情况下的 $S-N$ 曲线后，有关接触疲劳的强度计算和寿命计算，与高周疲劳计算相同。

表 18.8-5 某些材料的接触疲劳极限

材料及热处理	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	硬度 HB		接触疲劳极限 σ_{zmax} /MPa
				试验前	试验后	
St42 ^①	485	338	32	140	169	422
St50 ^②	568	358	28	159	191	481
St60	650	342	25	187	218	530
St70	806	364	18	230	271	647
Si-Mn 钢，调质	797	521	23	229	266	706
Si-Mn 钢，调质	867	555	21	255	292	770
Cr-Mn 钢，调质	—	—	—	345	—	1 040
Cr-Mn 钢，调质	1 149	1 065	15	347	363	1 040
轴承钢，不淬火	989	928	18	310	322	559
氮化钢，淬火	1 903	—	—	555	594	1 687
轴承钢，淬火	1 981	—	—	573	592	1 726
轴承钢，淬火	2 010	—	—	629	642	1 912
灰铸铁	—	—	—	156	169	275
灰铸铁	—	—	—	234	251	422

续表 18.8-5

材料及热处理	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	硬度 HB		接触疲劳极限 σ_{-1max} /MPa
				试验前	试验后	
特种铸铁	400	—	—	295	310	608
Stg38 ^②	431	256	37	130	142	422
Stg52 ^①	534	295	29	142	164	461
Stg60 ^③	637	333	20	185	211	618
铝青铜	490	177	15	130	150	412
铝青铜	686~736	226	30	200	227	549

①相当于甲类普通碳素钢 Q235A;

②相当于 Q275;

③相近于 ZG230-450;

④相近于 ZG270-500;

⑤相近于 ZG310-570。

参 考 文 献

- 徐灏主编. 机械设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1991
- 徐灏编著. 疲劳强度设计. 北京: 机械工业出版社, 1981
- 王德俊编著. 疲劳强度设计理论与方法. 沈阳: 东北工学院出版社, 1992
- 赵少汴、王忠保编著. 抗疲劳设计——方法与数据. 北京: 机械工业出版社, 1997

中 国 机 械 设 计 大 典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

第
19
篇

机械振动的控制与利用

主 编 唐恒龄

编 写 唐恒龄

审 稿 樊 鹏 韩 琪



中国机械工程学会
CMDC 中国机械设计大典编委会

第1章 消减振源

1 回转体的平衡

由于回转体（机器中的旋转零部件）的材质不均、毛坯缺陷、制造误差以及设计时存在的非对称几何形状等原因，使其质量在圆周方向不均匀，形成一定的偏心。当其旋转时就产生不平衡的离心惯性力，从而引起机械振动。回转体的平衡就是减小偏心，使其达到允许的平衡精度的一种工艺方法。

1.1 刚性回转体的平衡

1.1.1 回转体平衡时的力学条件

在离心惯性力系作用下，只产生可以忽略的微小变形的回转体，简称刚性回转体。如图 19.1-1 所示的刚性回转体，绕定轴 z 以等角速度 ω 转动，其上各质点的离心惯性力向任一坐标原点 O 简化，得一合力 R_0 和一合力偶 M_0 ，其大小为

$$R_0 = m r_c \omega^2 \quad (19.1-1)$$

$$M_0 = \omega^2 \sqrt{J_{xz}^2 + J_{yz}^2} \quad (19.1-2)$$

- 式中 m —— 回转体的质量；
 r_c —— 质心到 z 轴的距离；
 ω —— 回转体的角速度；
 J_{xz} —— 回转体对通过 O 点的 x 轴的离心转动惯量；
 J_{yz} —— 回转体对通过 O 点的 y 轴的离心转动惯量。

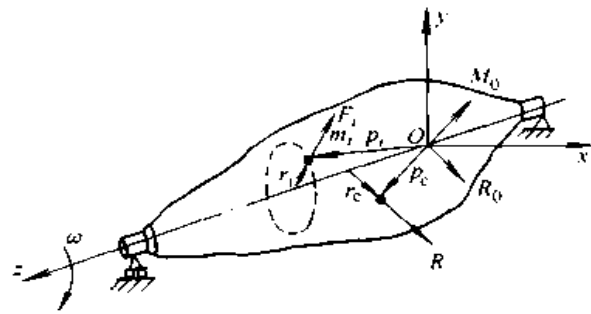


图 19.1-1 离心惯性力简化示意图

回转体旋转时，惯性力 R_0 和惯性力偶 M_0 的方向也随之变化。在这个交变惯性力系的作用下，回转体将产生振动。为了减小这个振动，必须使惯性力和惯性力偶得到平衡。平衡应满足的力学条件是

- 1) $R_0 = 0$ ，即 $r_c = 0$ ，则回转体的旋转轴 z 必通过质心 c 。
- 2) $M_0 = 0$ ，即 $J_{xz} = 0$ ， $J_{yz} = 0$ ，则 z 轴是回转体的主惯轴之一。

因此，回转体平衡的必要和充分条件是， z 轴是回转体的中心主惯轴之一。

根据回转体惯性力系简化的结果，不平衡分为如表 19.1-1 所示的四种类型。对各种类型采取相应的措施，使其达到或接近平衡的力学条件，这就是平衡的任务。

表 19.1-1 不平衡的类型

类型	示意图	转轴 z 与中心主惯轴的关系	惯性力系简化结果
静不平衡		平行	$R_0 \neq 0$ ，即 $r_c \neq 0$ ， R_0 通过质心 c ， $M_0 = 0$ ，即 $J_{xz} = 0$ ， $J_{yz} = 0$

续表 19.1-1

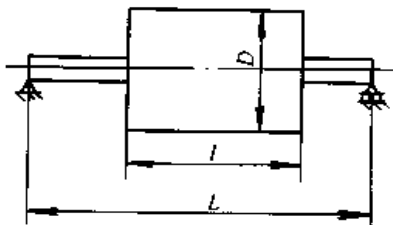
类型	示意图	转轴 z 与中心主惯轴的关系	惯性力系简化结果
准静不平衡		相交于某一点	$R_0 \neq 0$, 即 $r_c \neq 0$. R_0 不通过质心 c . $M_0 = 0$, 即 $J_{xz} = 0, J_{yx} = 0$
偶不平衡		相交于质心 c	$R_0 = 0$, 即 $r_c = 0$. $M_0 \neq 0$, 即 $J_{xz} \neq 0, J_{yz} \neq 0$
动不平衡		既不相交, 又不平行	$R_0 \neq 0$, 即 $r_c \neq 0$. $M_0 \neq 0$, 即 $J_{xz} \neq 0, J_{yz} \neq 0$

1.1.2 平衡工艺及平衡精度

在回转体平衡时, 由于 R_0 和 M_0 事先不知道, 不能根据表 19.1-1 分类进行平衡, 可根据表 19.1-2 所示的原则, 选择静平衡还是动平衡。

表 19.1-2 静平衡与动平衡的选择原则

平衡方法	D 、 L 、 l 之间的关系	工作转速
静平衡	$D \geq 5l$	任何转速
静平衡	$D \leq l; L \geq 2l$	任何转速
动平衡	$D \leq l$	$n > 1\,000$ r/min



为使回转体由不平衡到平衡, 通常在垂直于旋转轴线的校正面上进行。静平衡只需在一个校正面上进行, 动平衡需要在两个或多个校正面上

⊖ 加重、去重均指加、减质量。

进行。采用的方法是, ①加重[⊖], 在校正面上加一附加质量, 使其产生的不平衡量与原来的不平衡量抵消; ②去重, 在校正面上去掉已有的不平衡量; ③调整校正质量, 在回转体上预先设计好的调整结构中, 调整校正质量的大小和方位, 达到上述加重或去重的目的。

回转体经过平衡后, 不可能也没有必要把全部不平衡量去掉, 只要求平衡后, 其剩余不平衡量不超过工程要求的许用值, 这就是需要达到的平衡精度。根据国家标准, 刚性回转体的平衡精度等级见表 19.1-3。

当回转体的平衡等级确定后, 则可根据其最大的工作转速, 用式 (19.1-3) 计算出回转体的许用偏心距。

$$G = \frac{e\omega}{1\,000} \quad (19.1-3)$$

式中 $\omega = 2\pi n/60$ —— 回转体的最大角速度 (rad/s);

n —— 回转体的最大工作转速 (r/min);

G —— 平衡精度等级;

e —— 许用偏心距 (μm)。

根据许用偏心距, 按式 (19.1-4) 计算出许

表 19.1-3 各种典型刚性回转体的平衡等级与许用不平衡量

平衡精度等级 G	$e\omega$ / (mm/s)	典型刚性回转体举例
G4000	4 000	刚性安装的具有奇数气缸的低速 ^① 船用柴油机曲轴传动装置
G1600	1 600	刚性安装的大型二冲程发动机曲轴传动装置
G630	630	刚性安装的大型四冲程发动机曲轴传动装置；弹性安装的船用柴油机曲轴传动装置
G250	250	刚性安装的高速四缸柴油机曲轴传动装置
G100	100	六缸和六缸以上高速 ^① 柴油机曲轴传动装置；汽车、机车用发动机整机（汽油机或柴油机）
G40	40	汽车轮、轮缘、轮组、传动轴；弹性安装的六缸或六缸以上高速四冲程发动机（汽油机或柴油机）曲轴传动装置；汽车、机车用发动机曲轴传动装置
G16	16	特殊要求的传动轴（螺旋桨轴、万向联轴器轴）；破碎机械的零件；农业机械的零件；汽车和机车用发动机（汽油机或柴油机）部件；特殊要求的六缸或六缸以上发动机曲轴传动装置
G6.3	6.3	作业机械的零件；船用主汽轮机齿轮（商船用）；离心机鼓轮；风扇；装配好的航空燃气轮机；泵转子；机床和一般的机械零件；特殊要求的发动机部件；普通电机转子
G2.5	2.5	燃气轮机和汽轮机，包括船用主汽轮机（商船用）；刚性汽轮发电机转子；透平压缩机；机床传动装置；特殊要求的中型和大型电机转子；小型电机转子；透平驱动泵
G1	1	磁带记录仪和录音机的传动装置；磨床传动装置；特殊要求的小型电机转子
G0.4	0.4	精密磨床主轴，砂轮盘及电机转子；陀螺仪

① 低速柴油机的活塞速度小于 9 m/s，高速柴油机的活塞速度大于 9 m/s。

② 曲轴传动装置是包括曲轴、飞轮、离合器、带轮、减振器、连杆回转部分等的组件。

用不平衡量。

$$|U| = Me \quad (19.1-4)$$

式中 $|U|$ ——许用不平衡量 ($\text{kg}\cdot\mu\text{m}$)；

M ——回转体的总质量 (kg)；

e ——许用偏心距 (μm)；

若已知某回转体的总质量 $M = 5 \text{ kg}$ ，最大工作转速 $n = 3\,000 \text{ r/min}$ ，平衡精度等级为 G6.3，把 $G = 6.3$ ， $\omega = 2\pi n/60 = 314.1 \text{ rad/s}$ 代入式 (19.1-3) 和式 (19.1-4)，即可算出其许用偏心距 $e = 20 \mu\text{m}$ ，许用不平衡量 $|U| = 100 \text{ kg}\cdot\mu\text{m}$ 。

1.1.3 静平衡

把待平衡的回转体装在心轴上，或直接装在静平衡架（图 19.1-2 为一典型静平衡架的示意图）上，按以下步骤进行静平衡。

1) 确定静不平衡量的方向 使回转体在静平衡架上多次来回摆动，取摆动后停下次数最多的垂直向下的半径方向为静不平衡量的方向。

2) 确定静不平衡量的大小 转动回转体，使其静不平衡方向偏离垂线方向一个小于 90° 的角度 φ_m ，然后放手，令其在静平衡架上摆动，

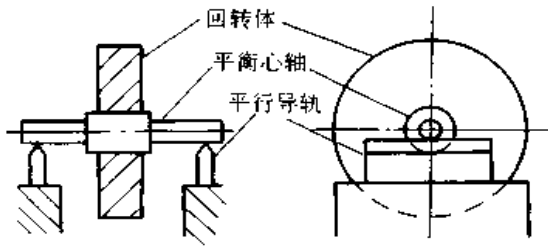


图 19.1-2 平行导轨或静平衡架

测出摆动的周期 T ，则不平衡量的大小为

$$|U| = \frac{16 \times 10^6 I}{g T^2} F_2\left(\sin \frac{\varphi_m}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \text{ kg} \cdot \mu\text{m} \quad (19.1-5)$$

式中 I ——回转体（包括平衡心轴）绕转动中心的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)；
 g ——重力加速度 (m/s^2)；
 T ——摆动周期 (s)；
 $F_2\left(\sin \frac{\varphi_m}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ ——第一类完全椭圆积分，查有关数学手册。

3) 在已知静不平衡量的方向和大小后，则在一个校正面上用加重、去重或调整校正质量的方法进行平衡，最后检验 $|U|$ 是否小于或等于其许用不平衡量。

求找静不平衡量的方向和大小有多种方法，使用平衡机则可一次找出。

1.1.4 动平衡

进行动平衡时，一般把回转体安装在动平衡机的弹性支承上，使回转体按一定转速转动起来，测量出支承的振幅或支反力，计算出在校正面上不平衡量的大小和方向，再针对它进行加重或去重，使这个不平衡量减少到要求的平衡精度，就能使整个回转体平衡。根据回转体的具体结构可以选测校正面的数量。

回转体不能上动平衡机或没有动平衡机而使用的方法，通常称为现场动平衡法。

1) 单平面法 适用于只需一个校正面的回转体，按以下步骤测算出校正面上不平衡量的大小和方向。

① 在某固定转速起动回转体，测量出支承的振幅 x 。

② 在校正面半径为 r 的任意位置上，安装一个质量 m ，在同一转速使回转体转动，测出支承的振幅 x_1 。

③ 将 m 转位 180° ，重新安装在校正面半径为 r 处，在同一转速使回转体转动，测出支承的振幅 x_2 。

④ 利用式 (19.1-6) 算出不平衡量的大小，利用式 (19.1-7) 算出不平衡量的方向， φ 角为不平衡量 U 与第一次加 m 所取方向之夹角。

$$U = mrx \sqrt{2/(x_1^2 + x_2^2 - 2x^2)} \quad (19.1-6)$$

$$\varphi = \arccos\left[\frac{(x_1^2 - x_2^2)/x}{\sqrt{8x_1^2 + 8x_2^2 - 16x^2}}\right] \quad (19.1-7)$$

2) 二平面法 适用于需要两个校正面的回转体，需要同时测出振幅和相位，得到用复数表示的振动量。按以下步骤测算出两个校正面上的不平衡量的大小和方向。

① 在某固定转速（最好是平衡转速）起动回转体，分别测出左右支承的振动量 X_L 和 X_R 。

② 在校正面 I 上的已知角位处加一试重，由于有试重的大小和方向，故表示为复数 U_1 ，在同一转速起动回转体，分别测出左右支承的振动量 X_{L1} 和 X_{R1} 。

③ 取下 U_1 ，在校正面 II 上加一 U_2 ，分别测出 X_{L2} 和 X_{R2} 。

④ 按式 (19.1-8) 算出 2 个校正面上的不平衡量的大小和方向。

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{l} U_1 \\ U_2 \end{array} \right\} &= \\ & \frac{\begin{bmatrix} U_1(X_{R2} - X_R) & U_1(X_L - X_{L2}) \\ U_2(X_R - X_{R1}) & U_2(X_{L1} - X_L) \end{bmatrix}}{(X_{L2} - X_L)(X_{R1} - X_R) - (X_{L1} - X_L)(X_{R2} - X_R)} \begin{Bmatrix} X_L \\ X_R \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (19.1-8)$$

1.2 柔性回转体的平衡

回转体不是绝对刚性而是弹性体，当其转速接近或高于一阶临界转速时，其自身的变形产生的不平衡惯性力，往往大于由偏心而引起的不平衡惯性力，即使按刚性回转体平衡好的回转体，也不能使用。因此，必须把回转体视为弹性体进行柔性平衡。

1.2.1 振型平衡法

在不平衡惯性力作用下，柔性回转体将产生由各阶振型叠加的弯曲振动。振型平衡法就是针对回转体的前几阶振型进行的平衡，为此要通过

运动方程求出其振型函数及各阶振型时振动量的大小。

图 19.1-3 为柔性回转体的动力分析简图, 从图可得其运动方程为

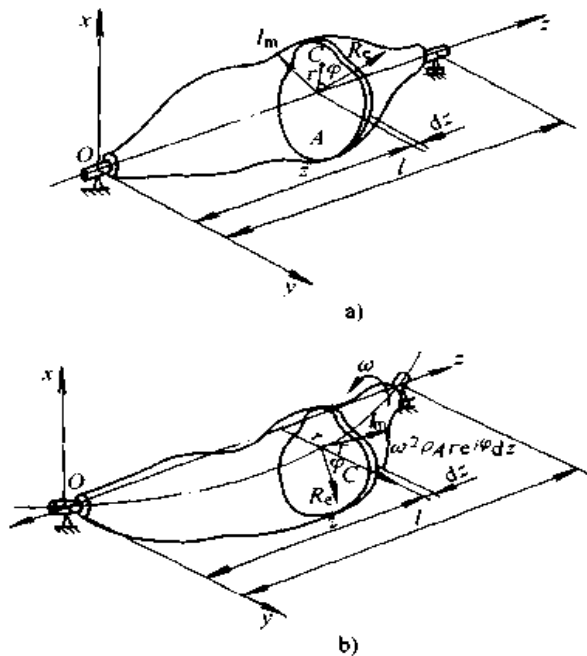


图 19.1-3 柔性回转体的动力分析简图

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[EI(z) \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \right] + \rho A(z) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \omega^2 \rho A(z) \tau(z) e^{i\varphi(z)} \cos \omega t \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[EI(z) \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right] + \rho A(z) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \omega^2 \rho A(z) \tau(z) e^{i\varphi(z)} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (19.1-9)$$

式中 $EI(z)$ ——柔性回转体的弯曲刚度函数 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^4$);

$\rho A(z)$ ——柔性回转体的线密度函数, 也即单位长度上的质量 (kg/m);

$\tau(z)$ ——质量偏心距函数 (m);

$\varphi(z)$ ——偏心距 $\tau(z)$ 的相位角, 也即 $\tau(z)$ 与复坐标系实轴 R_c 间的夹角 (rad);

ω ——回转体的角速度 (rad/s)。

先求出式 (19.1-9) 对应的齐次方程的各阶振型函数 $\phi_n(z)$, 并用振型函数表示等式右端的不平衡量的分布函数, 再代回式 (19.1-9) 求解, 得

$$\left. \begin{aligned} x(z, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{1 - \lambda_n^2} B_n e^{i\omega_n t} \phi_n(z) \cos \omega t \\ y(z, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{1 - \lambda_n^2} B_n e^{i\omega_n t} \phi_n(z) \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (19.1-10)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } r(z) &= \sqrt{x^2(z, t) + y^2(z, t)} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{1 - \lambda_n^2} B_n e^{i\omega_n t} \phi_n(z) \end{aligned} \quad (19.1-11)$$

式中 $\lambda_n = \frac{\omega}{\omega_n}$ ——频率比, ω_n 为第 n 阶固有频率;

$$B_n e^{i\omega_n t} = \frac{\int_0^l \rho A(z) \tau(z) e^{i\varphi(z)} \phi_n(z) dz}{\int_0^l \rho A(z) \phi_n^2(z) dz} \quad n = 1, 2, \dots, \infty \quad (19.1-12)$$

式中 l ——回转体总长度。

$r(z)$ 即为柔性回转体由各阶变形 r_n ($n = 1 \sim \infty$) 叠加而成的挠曲变形。理论上要消除其无穷阶变形才能使 $r(z) = 0$, 但只需针对其前面几阶变形进行平衡, 就可达到工程上的要求。有时不仅希望 $r(z)$ 很小, 还希望回转体的弯矩 $M(z)$ 或切力 $Q(z)$ 很小, 此时

$$M(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{1 - \lambda_n^2} B_n e^{i\omega_n t} EI(z) \frac{d^2 \phi_n(z)}{dz^2} \quad (19.1-13)$$

$$Q(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{1 - \lambda_n^2} B_n e^{i\omega_n t} \frac{d}{dz} \left[EI(z) \frac{d^2 \phi_n(z)}{dz^2} \right] \quad (19.1-14)$$

设已选取了 M 个校正面, 离坐标原点的距离分别为 $z_1, z_2, \dots, z_k, \dots, z_m$, 每个校正面上各自加上或减去一个不平衡量 $U_k e^{i\omega_k t}$, 由这些不平衡量产生的挠曲变形为

$$r(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^M \frac{\lambda_n^2}{1 - \lambda_n^2} C_n^k e^{i\omega_k t} \phi_n(z) \quad (19.1-15)$$

式中

$$C_n^k e^{i\omega_k t} = U_k e^{i\omega_k t} \phi_n(z_k) / \int_0^l \rho A(z) \phi_n^2(z) dz \quad (19.1-16)$$

令式 (19.1-15) 中由加重或去重产生的各阶变形, 与式 (19.1-11) 中待消除的各阶变形分别抵消, 即

$$\left(\sum_{k=1}^M \frac{\lambda_n^2}{1-\lambda_n^2} C_n^k e^{i\alpha_k} \phi_n(z) \right) \mp \frac{\lambda_n^2}{1-\lambda_n^2} B_n e^{i\alpha_n} \phi_n(z) = 0; \quad n=1, 2, \dots, \infty \quad (19.1-17)$$

式中，减号用于去重，加号用于加重，以下同。

无穷多个方程的方程组无法求解，只保留前面 M 个方程，式 (19.1-17) 简化为

$$\left(\sum_{k=1}^M C_n^k e^{i\alpha_k} \right) \mp B_n e^{i\alpha_n} = 0; \quad n=1, 2, \dots, M \quad (19.1-18)$$

把式 (19.1-12) 和式 (19.1-16) 代入上式得

$$\left(\sum_{k=1}^M U_k e^{i\alpha_k} \phi_n(z_k) \right) \mp \int_0^l \rho A(z) \tau(z) e^{i\varphi(z)} \phi_n(z) dz = 0 \quad n=1, 2, \dots, M \quad (19.1-19)$$

若能通过试验或预测的方法，得知回转体上的不平衡分布函数 $\rho A(z) \tau(z) e^{i\varphi(z)}$ ，则可求解出式 (19.1-19) 中的未知数 $U_1 e^{i\alpha_1}, U_2 e^{i\alpha_2}, \dots, U_M e^{i\alpha_M}$ ，此即所需的不平衡配重方案。

为了进一步减小高阶的剩余挠曲变形及满足低速时的刚性动平衡，也可选择 $M+2$ 个校正面。

1.2.2 影响系数法

适用于结构复杂的回转体，不适用于不能启停次数太多的大型机组。

在柔性回转体上设置 N 个校正面， M 个振动测量点，则其影响系数方程为

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1N} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{M1} & \alpha_{M2} & \dots & \alpha_{MN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_N \end{Bmatrix} \quad (19.1-20)$$

简写为 $\{x\} = [\alpha] \{U\} \quad (19.1-21)$

式中 x_1, x_2, \dots, x_M ——不加试重时，从各测量点测到的振动响应，包括振幅和相位，用复数表示；

U_1, U_2, \dots, U_N ——待求的各校正面上不平衡量的大小和方向；

$\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{MN}$ ——影响系数，由下式算出

$$\alpha_{jr} = \frac{x_{jr} - x_j}{U_r}, \quad r=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, M \quad (19.1-22)$$

式中 x_j ——不加试重时，从第 j 个测点测到的振动响应；

U_r ——在第 r 个校正面加的不平衡量 (试重)，包括质量大小和方位；

x_{jr} ——在第 r 个校正面上加上 U_r 后，在第 j 个测点测到的振动响应；

在同一转速下，启停回转体 $N+1$ 次，进行测试，即可得到全部影响系数，也即得到影响系数矩阵 $[\alpha]$ 。

若 $M=N$ ，且 $\det[\alpha] \neq 0$ ($[\alpha]$ 的行列式不等于零)，即可求出各校正面上的等校正不平衡量为

$$\{U\} = [\alpha]^{-1} \{x\} \quad (19.1-23)$$

针对这些不平衡量，采用加重或去重的方法，即可使回转体得到平衡。

若 $M > N$ ，不能使用式 (19.1-23)，则用最小二乘法，求出的 $\{U\}$ 为

$$\{U\} = -([\bar{\alpha}]^T [\alpha])^{-1} [\bar{\alpha}]^T \{x\} \quad (19.1-24)$$

式中 $[\bar{\alpha}]^T$ —— $[\alpha]$ 的共轭转置矩阵。

用式 (19.1-24) 算出的不平衡量，进行加重或去重不能消除全部振动，必有剩余，则剩余振动响应的计算公式为

$$\{R\} = \{x\} + [\alpha] \{U\} \quad (19.1-25)$$

若式 (19.1-24) 代入式 (19.1-25)， $\{R\}$ 较大达不到平衡精度，可通过增加校正面数或改变校正面的位置来解决。若 $\{R\}$ 中某些点过大，某些点过小，则用加权系数法，对需减小振动响应的点，用较大的加权系数，反之，用较小的加权系数。

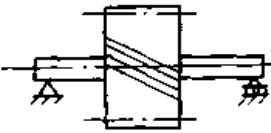
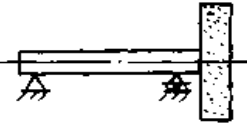

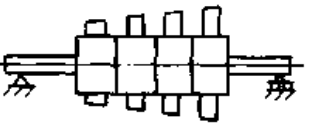
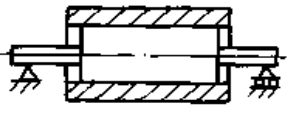
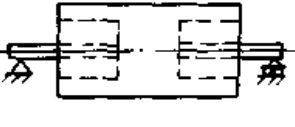
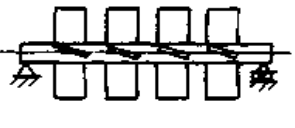
1.3 回转体的分类及其平衡方法

根据国际标准化组织标准 ISO 5406: 1980，将各种回转体分为如表 19.1-4 所示的五大类：对不同类型的回转体使用不同的平衡方法。

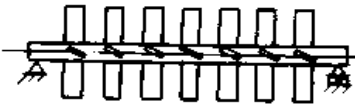
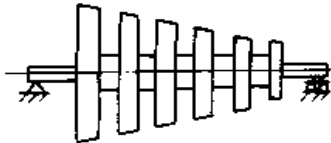
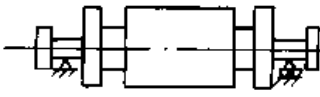

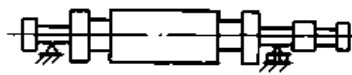
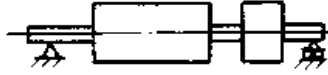
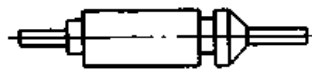
第 1 类属于刚性回转体，应使用刚性回转体的平衡方法。

第 2 类属于准刚性回转体，分别使用以下方法：对 2a 类，使用低速动平衡机在仅存的一个校正面上进行平衡；对 2b 类，使用低速动平衡机在已知的二个校正面上进行平衡；对 2c 类，先对每个零件作较精细的平衡或采用边装配边平衡的方法，最后使用低速动平衡机在组装件的两个校正面上进行平衡；对 2d 类，使用低速动平衡

表 19.1-4 回转体的分类表

回转体类别	说 明	举 例
1类 (刚性回转体)	不平衡量可在任选两平面上校正, 且校正后, 在最高工作转速下的任何转速, 其不平衡都不会有显著变化的回转体	 厚齿轮
2类 (准刚性回转体)	不能视为刚性, 但还可用刚性回转体平衡方法来平衡的回转体	
不平衡轴向分布为已知的回转体		
2a类	只有一个横向不平衡平面的回转体	 薄砂轮
2b类	有两个横向不平衡平面的回转体	 带皮带轮的砂轮
2c类	具有多个横向不平衡平面的回转体	 压缩机转子
2d类	不平衡量按轴向均匀分布或按线性变化的回转体	 印刷机滚筒
2e类	有相当长度的刚性质量安装在一根不平衡量可忽略的柔性轴上的回转体	 计算机存储磁鼓
不平衡轴向分布未知的回转体		
2f类	两端有两个校正面, 其最高转速远未达到二阶临界转速, 工作速度又不包括一阶临界转速, 且控制了初始不平衡量的对称回转体	 多级离心泵

续表 19.1-4

回转体类别	说 明	举 例
2g 类	两端有两个校正面，中央有一个校正面，其最高转速远未达到二阶临界转速，且控制了初始不平衡量的对称回转体	 <p>高速离心泵</p>
2h 类	控制着不平衡量，且与 2f 类用同样方法对待的不对称回转体	 <p>蒸汽透平转子</p>
3 类 (柔性回转体)	不能用刚性回转体平衡法而须用高速平衡法来平衡的回转体	
3a 类	对任一个不平衡分布主要只受一阶不平衡量影响的回转体	 <p>四级发电机转子</p>
3b 类	对任一个不平衡分布主要受一阶和二阶不平衡量影响的回转体	 <p>小型双级发电机转子</p>
3c 类	显著受一阶、二阶以上不平衡量影响的回转体	 <p>大型二级发电机转子</p>
4 类	属于 1、2 或 3 类但却带有一个或几个本身是柔性或柔性连接的零件的回转体	 <p>带离心开关的转子</p>
5 类	属于 3 类但因某种原因 (如经济性) 仅在一种工作转速下平衡的回转体	 <p>高速电机</p>

机在通过试验确定的二个最佳校正面上进行平衡；对 2e 类，使用低速动平衡机对其刚性质量部分进行平衡；对 2f 类，按各零件组装后的剩余不平衡量恰好处在同一相位上，对一阶临界转速最不利的情况，规定每个零件的剩余不平衡

量，先对每个零件进行平衡达到规定的允许值，再对组装后已知的二校正面上进行平衡；对 2g 类，允许比 2f 类大一倍的初始不平衡量，在低速动平衡机上，对三个校正面进行平衡；对 2h 类，按 2f 类回转体那样规定初始不平衡量的大

小，用低速动平衡机在任意给定的校正面上进行平衡。

第 3 类属于柔性回转体，选择适当数量的校正面，在高速动平衡机上，用振型平衡法或影响系数法进行平衡。

第 4 类属于第 1、2 或 3 类，但却带有一个或几个本身是柔性或柔性连接的零件的回转体。当其平衡状态随转速变化而变化时，应在回转体必须工作那个转速下进行平衡；当其平衡状态随转速变化而变化，但在某一转速后就保持不变时，应在高于此一转速的任何转速下进行平衡。

第 5 类属于第 3 类，但工作转速高于一阶或几阶临界转速，要求只在工作转速下进行平衡的回转体。应用高速动平衡机尽可能模仿工况进行平衡，保证在平衡转速下，其主要振型与工作条件下产生的振型是一致的。

1.4 柔性回转体不平衡状态的评定

经过平衡后的回转体，在现场运转时，应满足工作要求而平稳运转，为此其产生的振动应小于一定数据。由于回转体的现场振动，不仅与不平衡量有关还与回转体的结构尺寸、支承条件及环境条件有关。一般采用支承振动烈度；轴振动位移；支承动载力及剩余振型不平衡量四种方法来评定柔性回转体的不平衡状态，即平衡品质的评定。下面介绍二种在平衡机上的评定方法。

1.4.1 根据现场振动烈度评定

(1) 现场振动烈度的许用值

振动烈度是指回转体旋转过程中产生的振动速度的均方根值（即有效值）。根据工作要求，不同的回转体应有不同的振动烈度的许用值。表 19.1-5 为按 ISO 2372 对振动烈度的分类及其适用范围。

表中把各类机械分为四类，每类有 A~D 四等级振动烈度的许用值，A 级最高许用值最小。

第 I 类为小型机器，如 15 kW 以下的电动机；

第 II 类为中型机器，如（15~75 kW）的电动机或刚性安装在专用基础上的发动机和其他机器；

第 III 类为安装在刚度很大（在测振方向）的重型基础上的大型原动机和其他大型机器；

表 19.1-5 各类机器振动烈度的许用值

振动烈度 / (mm·s ⁻¹)	I 类	II 类	III 类	IV 类
0.28 以下	A	A	A	A
0.28~0.45				
0.45~0.71				
0.71~1.12	B	B	B	B
1.12~1.8				
1.8~2.8	C	C	C	C
2.8~4.5				
4.5~7.1				
7.1~11.2	D	D	D	D
11.2~18				
18~28				
28~45				
45~71				

第 IV 类为安装在刚度很小（在测振方向）的基础上的大型原动机和其他大型机器，如透平发电机组。

(2) 在平衡机上对振动烈度的评定

由于回转体在平衡机上的运行条件，与工作时的实际条件不同，故表 19.1-5 所列的许用振动烈度不能直接用在平衡机上，但可规定出一些修正系数，得到在平衡机上可使用的振动烈度评价 Y（见 ISO/DIS 5343），即

$$Y = C_0 C_1 C_2 C_3 X \quad (19.1-26)$$

式中 Y——在工作转速范围内，与转速同频分量的振动烈度，在平衡机上的许用值；

X——在工作转速范围内，产品规定的回转体在现场轴承外壳垂直和水平方向的振动烈度许用值，它包含了所有原因导致的振动。若产品未作规定，可参考表 19.1-5 中给定的值选取；

C₀——轴承处，与回转体转速同频分量的允许振动与总的允许振动的比；

C₁——轴承外壳处，回转体在平衡设备上的同频振动与在现场同频振动的比，用于平衡设备或回转体连

接系统不同于现场的情况；

C_2 ——当测量轴的振动时，在轴承内或轴承附近的同频振动与轴承外壳同频振动之比；

C_3 ——当测量轴的最大挠曲处的振动时，

轴的最大挠曲与轴承附近挠曲之比。

对于不同的机器，以上修正系数不同，应通过实验确定。表 19.1-6 给出了各类机器的修正系数范围以供参考。

表 19.1-6 平衡机上现场振动烈度许用值的修正系数

机器分类	典型机器举例	修正系数			
		C_0	C_1	C_2	C_3
I	增压器	1.0	0.6~1.6	1.0	采用： $C_3 > 1.0$ 不采用： $C_3 = 1.0$
	15 kW 以下的小电机	1.0		1.0	
II	造纸机器	0.7~1.0		2~6	
	15~75 kW 的中型电机	0.7~1.0		2~6	
	在专用基础上 300 kW 以下的电机	0.7~1.0		2~6	
	压缩机	0.7~1.0		2~6	
	小型涡轮机	1.0		2~6	
III	大型电动机	0.7~1.0		2~6	
	泵	0.7~1.0		2~5	
	双极发电机	0.8~1.0		2~6	
	涡轮机和多极发电机	0.9~1.0		2~6	
IV	汽轮机	1.0		2~5	
	双极发电机	0.8~1.0		2~6	
	涡轮机和多极发电机	0.9~1.0		2~6	

1.4.2 根据剩余不平衡量评定

把柔性回转体当作刚性回转体，用相应的平衡品质等级确定柔性回转体剩余不平衡量的许用值，对柔性回转体不平衡状态进行评定。

先求出柔性回转体平衡后，等效的各阶不平衡量为

$$U_{eq}^n = \left| \sum_{k=1}^M U_k e^{i\alpha_k} \phi_n(z_k) \right| \quad (19.1-27)$$

式中 U_{eq}^n ——柔性回转体等效的第 n 阶不平衡量；

$U_k e^{i\alpha_k}$ ——柔性回转体平衡后，在第 k 校正面上的剩余不平衡量；

$\phi_n(z_k)$ ——柔性回转体第 n 阶振型函数，在第 k 校正面上的值。

根据表 19.1-3 确定刚性回转体的剩余不平衡量的许用值，设其为 U_{max} 。则对表 19.1-4 列

出的各类柔性回转体，确定其等效的各阶剩余不平衡量的许用值，如下

1) 对 3a 类回转体，等效的第一阶不平衡量，要小于刚性回转体剩余不平衡量的 60%，即 $U_{eq}^1 \leq U_{max}$ ；若低速动平衡，则 $U_{eq}^1 \approx U_{max}$ 。

2) 对 3b 类回转体， $U_{eq}^1 \leq U_{max}$ ； $U_{eq}^2 \leq 0.6 U_{max}$ ；若低速动平衡， $U_{eq}^1 \approx U_{max}$ 。

3) 对 3c 类回转体，由于转速太高，允许的剩余不平衡量太小，目前还不能提出推荐值。

4) 对 4 类和 5 类回转体，参考 3 类回转体的规范，确定允许的剩余不平衡量。

2 往复机械惯性力的平衡

各类往复运动机械的主要振源是，曲柄连杆滑块机构产生的不平衡惯性力，一般在机械出品后难于消减，需要机械设计时，就有消减此振源的设计。

2.1 曲柄滑块机构的惯性力

曲柄滑块机构的惯性力包括：曲柄旋转运动产生的离心惯性力；滑块往复运动产生的往复惯性力以及连杆平面运动产生的惯性力。

为简化计算，通常按静力等效条件，把曲柄滑块机构（图 19.1-4）简化为图 19.1-5 所示的力学模型。其具体做法是将连杆质量 m_1 分为两部分：一部分质量等于 $\frac{l_B}{l} m_1$ ，随曲柄销作旋转运动；一部分质量等于 $\frac{l_A}{l} m_1$ ，随滑块作往复运动。图 19.1-5 所示的曲柄滑块机构以匀角速度 ω 旋转时，不平衡惯性力按以下公式计算。

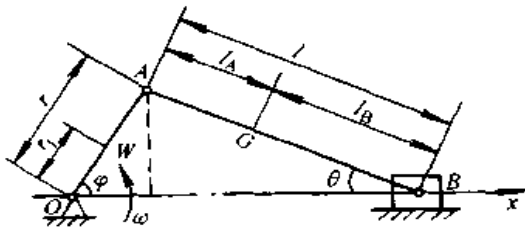


图 19.1-4 曲柄连杆滑块机构示意图

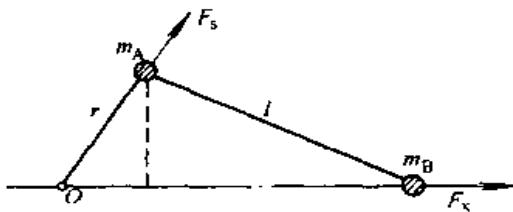


图 19.1-5 曲柄连杆滑块机构力学模型

1) 回转惯性力 $F_s = m_A r \omega^2$ (19.1-28)

2) 一次往复惯性力 $F_{x1} = m_B r \omega^2 \cos \omega t$ (19.1-29)

3) 二次往复惯性力 $F_{x2} = \frac{r}{l} m_p r \omega^2 \cos 2\omega t$ (19.1-30)

式中 $m_A = \frac{r_1}{r} m_r + \frac{l_B}{l} m_1$;

$m_B = m_p + \frac{l_A}{l} m_1$;

m_r —— 曲柄的质量；

m_1 —— 连杆的质量；

m_p —— 滑块的质量；

ω —— 曲柄旋转角速度；

l —— 连杆长度；

r —— 曲柄半径；

r_1 —— 曲柄重心距转轴中心 O 的距离；

l_A —— 连杆重心距曲柄销 A 的距离；

l_B —— 连杆重心距滑块销 B 的距离；

2.2 多缸发动机的惯性力系

多缸发动机可视为几个单缸发动机组合而成，其惯性力为各缸惯性力的矢量和。由于各缸惯性力不作用在同一平面内，故多缸发动机不仅有不平衡惯性力，还有不平衡惯性力偶。在表 19.1-7 中列出了常见的多缸发动机整机不平衡惯性力系。

表 19.1-7 多缸发动机的惯性力系

多缸发动机示意图				
曲柄排列角度示意图				
离心惯性力 ΣF_s	0	0	0	0

离心惯性力偶 $\sum M_0$	$m_A r b \omega^2$	0	$2\sqrt{2} m_A r b \omega^2$	0
一次往复惯性力 $\sum F_{x1}$	0	0	0	0
一次往复惯性力偶 $\sum M_{01}$	$m_B r b \omega^2 \cos \omega t$	0	$\sqrt{2} m_B (b+a) \omega^2 \times$ $\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$	0
二次往复惯性力 $\sum F_{x2}$	$\frac{2r}{l} m_B r \omega^2 \cos 2\omega t$	$\frac{4r}{l} m_B r \omega^2 \cos 2\omega t$	0	0
二次往复惯性力偶 $\sum M_{02}$	0	0	$\frac{2r}{l} m_B r b \omega^2 \cos 2\omega t$	0

表中 m_A 、 m_B 、 ω 、 r 和 l 见式 (19.1-30) 的说明; a 、 b ——气缸中心线节距, 见表中插图

从表 19.1-7 中, 得出以下结论:

1) 多缸发动机各曲柄均匀地排列在圆周上, 其旋转的离心惯性力 $\sum F_x = 0$, 及一次往复惯性力 $\sum F_{x1} = 0$ 。

2) 曲轴沿旋转轴系 z 的分布对称于过中点 O , 且垂直于旋转轴线的平面, 其旋转离心惯性力偶 $\sum M_0 = 0$, 及一次往复惯性力偶 $\sum M_{01} = 0$ 。

3) 若满足以下等式, 则二次往复惯性力 $\sum F_{x2} = 0$ 。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^N \cos 2\alpha_{1j} &= 0 \\ \sum_{j=1}^N \sin 2\alpha_{1j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (19.1-31)$$

式中 N ——汽缸数;

α_{1j} ——第 1 个曲柄与第 j 个曲柄的夹角。

4) 若满足以下等式, 则二次往复惯性力偶 $\sum M_{02} = 0$ 。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^N z_j \cos 2\alpha_{1j} &= 0 \\ \sum_{j=1}^N z_j \sin 2\alpha_{1j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (19.1-32)$$

式中 z_j ——第 j 个汽缸中心线到力系简化中心 O 的坐标 (有正负之分)。

合理布置多缸发动机各曲柄的位置, 可使其有关项的不平衡力和力偶消除。

2.3 曲柄滑块机构的平衡

在图 19.1-5 所示的曲柄滑块机构的力学模型中, 需要平衡由回转质量 m_A 产生的离心惯性

力 F_x , 以及由往复质量 m_B 产生的往复惯性力 F_x 。

2.3.1 离心惯性力的平衡

使用回转体加重、去重的方法对曲柄滑块机构的旋转惯性力 $F_x = m_A r \omega^2$ 进行平衡。如图 19.1-6 所示, 设计时, 在曲柄处 (m_A 的反面) 增加质量为 m_b 的平衡块, 令其质心距曲柄转动轴线的距离为 r_b , 使 $2m_b r_b = m_A r$, 则可抵消 F_x 。工艺处理时, 常使 m_b 稍重留给动平衡时去重。最后, 通过设计加重、工艺稍去重获得曲轴的动平衡。

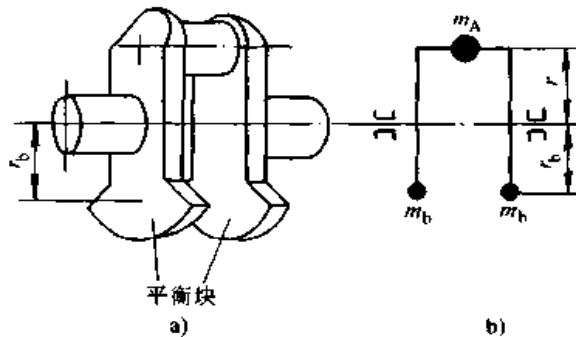


图 19.1-6 曲柄平衡示意图

2.3.2 往复惯性力的平衡

由往复质量 m_B 产生的往复惯性力 F_x , 常用的平衡方法有:

1) 半平衡法 如图 19.1-7 所示, 在曲柄销 A 的反面, 离轴心 r_d 处, 加一平衡质量 m_d , 令 $m_d r_d = \frac{1}{2} m_B r$, 则 m_d 产生的回转惯性力在 x

方向的分力 $F_{dx} = \frac{1}{2} m_B r \omega^2 \cos \omega t$, 从式 (19.1-29) 看出 $F_{dx} = \frac{1}{2} F_{x1}$, 即使一次往复惯性力 F_{x1} 减小了一半。但又在 y 方向增加了一个不平衡力 F_{dy} 。

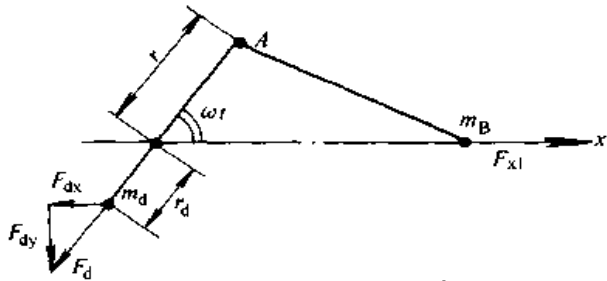


图 19.1-7 半平衡法原理图

2) 单轴平衡法 如图 19.1-8 所示, 在曲柄销的反面, 离轴心 r_d 处, 加一平衡质量 m_d , 又在通过齿轮 z_1 和 z_2 带动的另一轴的圆盘上, 加一平衡质量 m_d , 并使 $m_d = \frac{1}{2} m_B$, 则 m_d 产生的回转惯性力 F_c 在 x 方向的分力 $F_{cx} = \frac{1}{2} \times m_B r \omega^2 \cos \omega t$, 二者之和将一次往复惯性力 F_{x1} 在力系中完全消除, 且二者在 y 方向的分力相互抵消, 不再有不平衡力。但是由于各力不在同一线上, 将产生不平衡力偶 M_d , 为

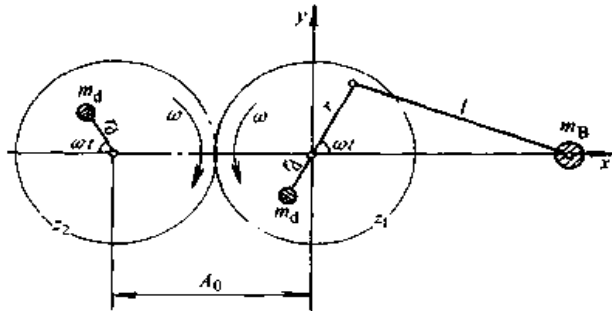


图 19.1-8 单轴平衡法原理图

$$M_d = \frac{1}{2} m_B r \omega^2 A_0 \sin \omega t \quad (19.1-33)$$

式中 A_0 ——两轴的中心距。

为减小 M_d , 应尽可能减小 A_0 。还可利用 M_d 消除连杆惯性力偶。

连杆的惯性力偶为

$$M = m_1 (\rho^2 - l_A l_B) \omega^2 \lambda (1 - \lambda^2) \sin \omega t / \sqrt{(1 - \lambda^2 \sin^2 \omega t)^3} \quad (19.1-34)$$

式中 $m_1, l_A, l_B, \omega, r, l$ 各符号的意义见式

(19.1-30);

$$\lambda = \frac{r}{l};$$

$\rho = I_G / m_1$ ——连杆的回转半径;

I_G ——连杆的转动惯量。

将式 (19.1-34) 展成傅氏级数, 且仅取第一阶谐量 M_1 , 得

$$M_1 = m_1 (\rho^2 - l_A l_B) \omega^2 \lambda C (1 - \lambda^2) \sin \omega t \quad (19.1-35)$$

式中 $C = (1 + 3\lambda^2/8 + 15\lambda^4/64 + 175\lambda^6/1024 + \dots)$

令式 (19.1-33) 等于式 (19.1-35), 即 $M_d = M_1$, 由单轴平衡产生的不平衡力偶 M_d 可消减连杆的惯性力偶, 由此得

$$A_0 = 2 m_1 (\rho^2 - l_A l_B) C / m_B r \quad (19.1-36)$$

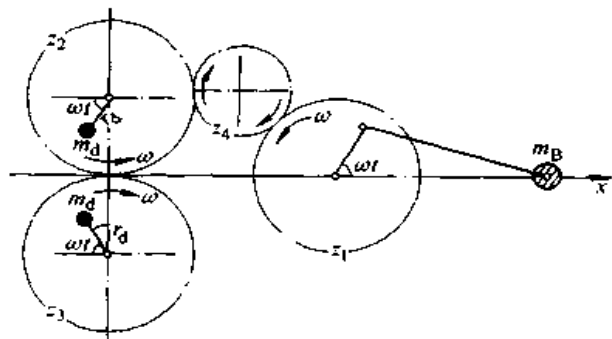
按式 (19.1-36) 确定两轴中心距 A_0 , 便可平衡连杆惯性力偶的一阶谐量 M_1 。

3) 双轴平衡法 使用图 19.1-9 所示的双轴平衡机构, 不仅可与单轴平衡机构一样消除一次往复惯性力 F_{x1} , 而且不再产生不平衡力偶 M_d 。

使用图 19.1-10 所示的双轴平衡机构, 由于两个平衡质量的转速比曲轴转速高一倍 ($r_c = r/2$), 并令 $m_c = \frac{r m_B}{4l}$, 则两质量产生的回转惯性力, 在 x 方向上的分力之和, 将完全抵消二次往复惯性力 F_{x2} , 在 y 方向的分力之和为零, 也不会产生不平衡力偶。

2.3.3 机构质心的调整

如图 19.1-11 所示, 在曲柄和连杆上, 分别增加平衡块 I 和 II, 调整二平衡块的大小和位置, 使整套曲柄滑块机构的质心位于固定轴心 O 上, 从而消除机构惯性力系的主矢, 不存在回转惯性力和往复惯性力, 只剩下惯性力偶。



19.1-9 双轴平衡法 (平衡一次往复惯性力) 原理图

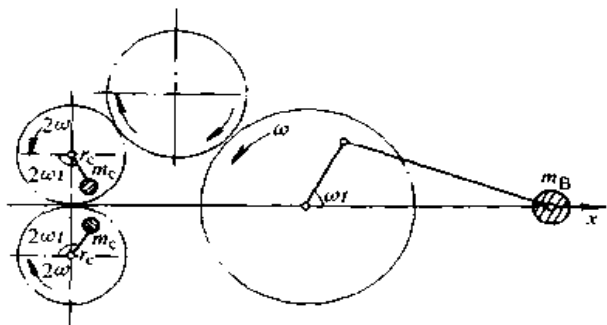


图 19.1-10 双轴平衡法（平衡二次往复惯性力）原理图

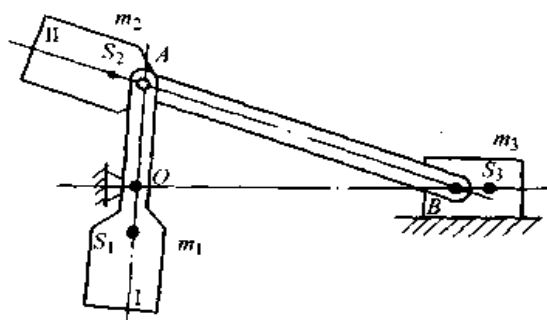


图 19.1-11 调整质心平衡法示意图

设曲柄增加平衡块 I 后的总质量为 m_1 ，质心位于 S_1 点。连杆增加平衡块 II 后的总质量为 m_2 ，质心位于 S_2 点。滑块的质点为 m_3 ，质心位于 S_3 点。如果满足以下条件：

$$\left. \begin{aligned} m_1 \overline{OS_1} &= (m_2 + m_3) \overline{OA} \\ m_2 \overline{AS_2} &= m_3 \overline{AB} \\ \overline{BS_3} &= 0 \end{aligned} \right\} (19.1-37)$$

则整套机构的质心将位于固定轴心 O 上，达到平衡回转和往复惯性力的目的。

这种结构在内燃机上难以实现，多适用于冲床、锯床上的曲柄滑块机构。

3 常用机械零部件的振动控制

机器由各机械零部件组成，各零件的振动都是整机的一个振源。以零聚整，化整为零。对各种零件振动的控制，与整机相似，都是通过改进设计、制造和使用条件，达到减小激振力、提高抗振能力、避免振动传递、降低振动响应的要求。但是，必须针对各种零部件的结构特征，工作环境，特别是引起振动的原因，采取相应的具体控制措施。

3.1 齿轮振动的控制

3.1.1 激起齿轮振动的原因

1) 轮齿啮合刚度的周期性变化 在啮合过程中，同时接触齿的对数，以及接触线在齿高的位置周期变化。引起轮齿啮合刚度的周期性变化，齿的弯曲变形随之变化，造成齿在进、出啮合时发生碰撞和冲击。在这个由齿轮内部产生的附加动载荷作用下，将使完全没有误差的齿轮也产生振动。

2) 齿轮制造和装配的误差 齿形误差和齿距误差使齿轮角速度变化，齿圈径向跳动导致齿轮齿距和齿侧间隙周期性变化。使齿轮超前或滞后旋转，产生角加速度和附加动载荷，从而激起齿轮振动。

3) 传动载荷的波动 原动机通过齿轮驱动工作机械，若原动机给齿轮的加载或工作机械给齿轮的负载有波动，都会从外部附加动载荷，激起齿轮振动。例如，具有中等冲击的单缸内燃机通过齿轮驱动具有较大冲击的矿石破碎机，对齿轮的附加动载荷，将比其内部动载荷大一倍以上。因此激起齿轮更大的振动。

3.1.2 齿轮振动的频率

从振源分析和图 19.1-12 轮齿上载荷变化的实例看出，齿轮每转过一转、转过一齿及每转过一齿的过程中，各振源都以其频率激起齿轮相应的振动。除传动载荷波动的频率外，齿轮主要按回转频率、啮合频率和固有频率振动。

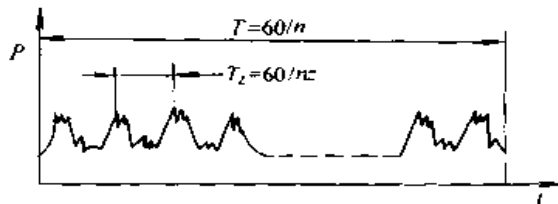


图 19.1-12 轮齿上载荷变化的曲线

1) 回转频率——每转过一转振动一次，设其每分钟转 n 转，则

$$f = \frac{n}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (19.1-38)$$

2) 啮合频率——每转过一齿振动一次，设其齿数为 z ，则

$$f = \frac{nz}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (19.1-39)$$

3) 固有频率——对于形状比较简单且直径大于厚度五倍的圆柱齿轮，可近似看作中心固定的自由圆板，从机械振动手册中直接查出。对形状复杂的齿轮，其固有频率目前尚无简便而又准确的计算式，常采用测试的方法确定。

3.1.3 减小齿轮振动的措施

1) 取重叠系数为整数，使啮合刚度变化最小，不能取整者取大，使啮合刚度的变化相对减小。使用变位齿，斜齿可使重叠系数变大又取整。

2) 采用非整数的传动比；齿顶齿根修缘；沿齿宽方向修成腰鼓形；合适的齿侧间隙、润滑方法和润滑剂。减小齿轮制造和装配误差对振动的影响。

3) 改进齿轮的结构形状和尺寸，以及支承的刚度和位置，以提高齿轮的动刚度。使用阻尼较大的材料制造齿轮；在齿轮端面上喷涂阻尼材料或开槽灌胶；在轮缘上压入阻尼环；在轮幅上装橡皮圈等，以增大齿轮的阻尼。提高齿轮的抗振、吸振能力。

4) 使用具有缓冲性能的联轴器，以隔离外界对齿轮的干扰。

5) 改变齿轮的转速、齿数及齿轮的结构形状和尺寸，使其回转频率、啮合频率及固有频率互不接近，以防止共振。

3.2 滚动轴承振动的控制

3.2.1 滚动轴承振动的分类

在表 19.1-8 中列出了根据振动产生原因分类的各种滚动轴承的振动。

表 19.1-8 滚动轴承振动的分类及产生原因

振动类型	产生振动的原因
滚动体通过振动	每一个滚动体通过径向载荷作用力下面时，轴心产生一次沿径向力方向的往复运动，激起的振动
轴承本质性振动	滚道与滚动体表面上的波纹，使二者接触弹性交替变化使套圈产生；圆环式弹性体固有振动；简化为轴承质量-弹簧系统中的质量的固有振动
轴承弹性引起的振动	由视为弹簧的轴承和视为质量的轴承支持物组成的质量-弹簧系统，受激后产生的振动

续表 19.1-8

振动类型	产生振动的原因	
与轴承制造质量有关的振动	加工面波纹引起的振动	轴承内、外圈滚道及滚动体表面上的波峰，在轴承运转时激起的振动
	保持架的振动	保持架不平衡引起的振动，以及保持架和滚动体之间的滑动摩擦诱发的自激振动
	滚动体引起的振动	滚动体直径误差，使其大小不等，在运转时将激起轴承振动
轴承使用不当引起的振动	表面缺陷引起的振动	滚道表面上的微小裂纹、点蚀、压痕、铁锈、剥落等缺陷，将产生周期冲击，激起的振动
	杂质引起的振动	轴承内部及润滑油中的杂质，引起轴承时有时无、大小不定的振动

3.2.2 滚动轴承振动的频率

1) 适用于各种轴承的振动频率

滚动体通过振动

$$f = \frac{zn}{120} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \quad (19.1-40)$$

滚动体表面波纹或缺陷引起的振动

$$f = \frac{n}{120} \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \phi\right) \quad (19.1-41)$$

外圈滚道表面波纹或缺陷引起的振动

$$f = \frac{zn}{120} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \phi\right) \quad (19.1-42)$$

内圈滚道表面波纹或缺陷引起的振动

$$f = \frac{zn}{120} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \phi\right) \quad (19.1-43)$$

保持架不平衡引起的振动

$$f = \frac{n}{120} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \phi\right) \quad (19.1-44)$$

式中 f ——振动频率 (Hz)；

z ——滚动体个数；

n ——轴转速 (r/min)；

D ——轴承节圆直径；

d ——滚动体直径；
 ϕ ——滚动体与滚道接触角。

(2) 根据轴承及其应用计算的振动频率

对套圈固有振动，需把轴承的内、外圈视为圆环型弹性体计算其固有频率，还需计算轴承简化为套圈是质量的振动系统的固有频率。

对轴承弹性引起的振动，需把轴承及被轴承支持的机械零部件简化为前者是弹簧，后者是质量的振动系统，计算系统的固有频率。

3.2.3 减小滚动轴承振动的措施

- 1) 提高滚动轴承的加工精度，减小形状误差及滚动表面的波纹，降低轴承内部激振力的作用。
- 2) 减小间隙，施加预紧力，减小滚动体通过及其它激振力的作用。
- 3) 使用良好的润滑油和润滑条件，争取在轮齿表面上形成油膜，减小摩擦，增加振动系统的阻尼。改善密封和清洗条件，减小外部激振力。

3.3 滑动轴承振动的控制

3.3.1 滑动轴承的振动

1) 干摩擦引起的振动 润滑条件不良，致使轴承与轴颈表面产生干摩擦，在一定条件下，使轴在旋转过程中发生微小往复回旋的瞬时抖动。即激起振幅与频率取决于干摩擦力和轴系刚度的轴承自激振动。

2) 油膜振荡引起的振动 滑动轴承的油膜具有较好的吸振能力，但是，在高速回转时，油膜振荡又会激起轴承的自激振动。

设轴的转动角速度为 ω ，轴系的一阶临界角速度（即一阶固有角频率）为 ω_{n1} ，油膜振荡（即轴承自激振动）的角频率为 ω_w 。当 ω 高到某一值时，轴心开始绕其平衡位置沿某种轨迹涡动，即形成油膜振荡，使轴系不稳定而产生频率为 ω_w 的自激振动。具体有以下几种。

当 $\omega < 2\omega_{n1}$ 时， $\omega_w \approx \frac{1}{2}\omega$ 。即产生频率为角速度一半、振幅较小的振动，常称为半频振荡或半速涡动。

当 $\omega \approx \omega_{n1}$ 时，或 $\omega \approx 2\omega_{n1}$ 时， $\omega_w = \omega$ 。即产生频率为 ω 、振幅较大的振动，常称为同步振荡。

当 $\omega > 2\omega_{n1}$ 时， $\omega_w \approx \omega_{n1}$ 。即产生频率不随 ω 变化只等于一阶临界转速 ω_{n1} 、振幅较大的振动，常称为共振振荡。

3) 高速静压气体轴承的振动 在一定条件下，高速气体轴承可能产生以下两种振动。

当回转体的角速度接近其临界角速度时，将产生同步涡动。图 19.1-13 所示的由气体静压轴承支持的回转体，其同步涡动的临界角速度（即固有频率）的计算公式为

$$\omega_{n1,2} = \left\{ \frac{1}{2}(\Omega_1 + \Omega_2) \mp \left[\frac{1}{4}(\Omega_2 - \Omega_1)^2 + \Omega_3^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (19.1-45)$$

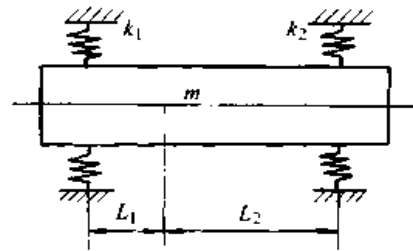


图 19.1-13 支承在弹性气膜上的回转体

式中 $\Omega_1 = \frac{k_1 + k_2}{m}$;
 $\Omega_2 = \frac{k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2}{I_t - I_p}$;
 $\Omega_3 = \frac{(k_2 L_2 - k_1 L_1)^2}{I_t - I_p}$;
 m ——回转体质量；
 I_t ——回转体横向转动惯量；
 I_p ——回转体极转动惯量。

当气容比 \bar{V}_c 满足式 (19.1-46) 所给出的条件时，高速气体静压轴承将出现气锤振动。

$$\bar{V}_c = \frac{z V_c}{\pi B D h_0} \geq 0.05 \quad (19.1-46)$$

式中 V_c ——供气腔、排气腔或稳气腔的容积；
 z ——气腔数；
 B ——轴承宽度；
 D ——轴承孔径；
 h_0 ——设计半径间隙。

3.3.2 减小滑动轴承振动的措施

- 1) 改善润滑，防止干摩擦的发生，并改善阻尼特性。
- 2) 调整工作速度，既不接近其临界转速，又不在油膜振荡速度区。
- 3) 改进轴承结构和工况（压强、宽径比、

间隙、偏心率和油粘度), 改善油膜特性, 扩大不产生油膜振荡的速度区。例如使用三油楔式、椭圆式结构比圆筒式结构的稳定区要大。

3.4 叶片振动的控制

3.4.1 叶片振动的原因

1) 结构因素的原因 由于喷嘴出口气流不均匀; 排气口处气流力较其他部位小, 以及圆周方向气流参数不均匀(由筋、肋阻止气流流动引起, 对圆周方向只有部分弧段进气的汽轮机更不均匀), 在叶片一转时, 作用其上的气流力时大时小的交替变化而激起振动。

2) 制造、安装误差的原因 喷嘴和叶片槽道的误差, 导致喷嘴和叶片的节距偏离设计值, 使各嘴的进出气角差异, 叶片所受之气流力不同而激起振动。

3.4.2 叶片的固有频率

1) 等截面叶片弯曲振动固有频率 $f(\text{Hz})$ 的

$$K_s = kl \frac{\alpha_s [\cosh(kl) \sin(kl) - \sinh(kl) \cos(kl)] - \frac{1}{kl} [1 + \cosh(kl) \cos(kl)]}{\frac{1}{kl} [\cosh(kl) \sin(kl) + \sinh(kl) \cos(kl)] - \alpha_s [1 - \cosh(kl) \cos(kl)]} \quad (19.1-51)$$

式中 K_s —— 叶片组刚性系数, $K_s =$

$$\frac{12H_s I_s l \cos^2 \beta}{t_s I} \frac{z_g - 1}{z_g};$$

α_s —— 围带质量与叶片质量比值,

$$\alpha_s = \frac{m_s}{m} = \frac{F_s t_s}{Fl};$$

β —— 叶片振动平面与叶轮平面所夹

$$\text{锐角, } \beta = \frac{2}{3} \beta_0 + \frac{1}{3} \beta_1;$$

β_0, β_1 —— 叶片底、顶部截面的 β 角;

H_s —— 围带与叶片联结牢固系数, 铆接 $H_s = 0.1 \sim 0.3$, 铆又焊接 $H_s = 0.6 \sim 1.0$; 自带围带(带冠) $H_s = 0$;

m_s, F_s, t_s, I_s —— 围带的一个节距的质量、横截面积、节距、横截面惯性矩。

2) 等截面叶片扭转振动固有频率 $f(\text{Hz})$ 的计算公式为

$$f = \frac{A}{4l} \sqrt{\frac{GI_t}{\rho I_p}} \quad (19.1-52)$$

式中 G —— 切变模量 (Pa);

ρ —— 材料密度 (kg/m^3);

计算公式为

$$f = \frac{(kl)^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}} \quad (19.1-47)$$

式中 l —— 叶片长 (m);

F —— 叶片横截面积 (m^2);

ρ —— 叶片材料密度 (kg/m^3);

E —— 弹性模量 (Pa);

I —— 截面惯性矩 (m^4);

kl —— 由不同的频率方程式求出如下:

叶根固定、叶顶自由叶片的频率方程为

$$\cos(kl) \cosh(kl) = -1 \quad (19.1-48)$$

kl 的前三阶值为: 1.875; 4.694; 7.855。

叶根、叶顶均固定叶片的频率方程为

$$\cos(kl) \cosh(kl) = 1 \quad (19.1-49)$$

kl 的前三阶值为: 4.730; 7.853; 10.996。

叶根固定、叶顶铰支叶片的频率方程为

$$\tan(kl) = \tanh(kl) \quad (19.1-50)$$

kl 的前三阶值为: 3.927; 7.069; 10.210。

围带叶片组的频率方程为

I_p —— 叶片截面对扭转轴的极惯性矩 (m^4);

I_t —— 叶片截面扭转常数, 对于圆截面为极惯性矩 (m^4);

l —— 叶片长 (m);

A —— 对自由叶片, $A = 2n - 1$; 对围带叶片, $A = n$, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

3) 变截面叶片弯曲振动固有频率的计算公式为

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 \rho F_0} \frac{\int_0^l qu(\zeta) d\zeta}{\int_0^l \frac{F(\zeta)}{F_0} u^2(\zeta) Y(l) d\zeta} \quad (19.1-53)$$

式中 q —— 作用在叶片单位长度上的惯性力;

F_0 —— 叶片底部面积;

$Y(l)$ —— 叶顶挠度值 (见图 19.1-14);

$F(\zeta)$ —— 叶片截面积函数;

ρ —— 材料密度;

$u(\zeta)$ —— 叶片相对挠度, $u(\zeta) = Y(\zeta)/Y(l)$ 。

由于叶片在旋转的回转体上振动时, 受离心力、切力、温度等的影响, 其实际固有频率 f_d

与以上计算值 f 有一定差异。对 f 进行修正即得 f_0 ，各项修正系数可从机械振动手册中查得。

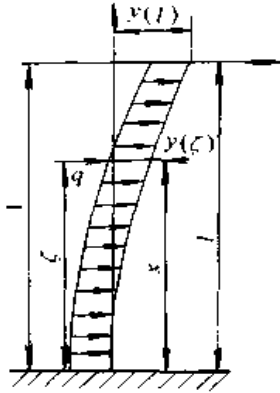


图 19.1-14 叶片弯曲振动变形

3.4.3 减小叶片振动的措施

1) 调整频率避免共振 通过改变叶片的截面积、改变叶片组围带、拉金的联结刚性、尺寸、截面形状及位置调整叶片的固有频率。通过改变静叶片、支柱的数目调整激振频率。

2) 减小激振力 适当减小静叶片出气边的厚度，以减小出口气流不均匀，令静叶片与动叶片的数目互为质数，并增加二者之间的轴向间隙；使喷嘴叶栅间距不等；将静叶沿圆周方向倾斜安装；支柱、抽气口、放气活门进行不对称布置，以减小圆周方向气流参数不均匀。

3) 增加阻尼 选用具有较高阻尼性能的材料（如 13 铬钢）制造叶片。采用带冠、松拉金等结构，既可把叶片联成组增加抗振能力，又能在振动中与叶片产生摩擦起阻尼作用。

3.5 液压系统振动的控制

液压系统主要由泵、阀和管道组成，分别根据其振动的原因，提出相应的控制措施。

3.5.1 液压泵振动的控制

液压泵的振动主要起源于，排出脉动的液流和吸液过程中产生空穴。

为减小排出液流的脉动，选用使流量平稳的多柱塞和奇数柱塞泵；减少困油影响的有困油塞的外啮合齿轮泵；平衡的叶片泵…等脉动小的泵。

为减少空穴现象，防止油量不足，油黏度过高，滤油器堵塞，吸油管直径过小长度过长，油中混入空气等吸油阻力过大的产生。

为减小电机对泵振动的影响，二者用挠性联轴节传递运动，并用隔振装置安装在一起。

3.5.2 阀件振动的控制

阀振动主要起源于，压力和流量急变产生冲击和空穴。

为减小换向阀在起停过程中管道内压力急剧变化，采用电液控制防止启闭过快，在换向阀前面设置前导节流阀，以及使用减慢换向过程的控制机构。

为减小节流阀压力差过大而产生的空穴现象，使用多级节流降低流速与压力降，在阀出口有防止空穴的结构。

3.5.3 管道振动的控制

管道振动主要起源于，管道截面积、转角的急变及由泵、阀引起的流量和压力的波动。

为减小管道中液流的流量和压力的波动，管道尽可能平直避免突粗、突细和陡弯，管道内壁光滑，系统内安装蓄能器、设置安全溢流阀，使用柔性管道。

为提高管道的抗振能力，改善管路支承提高其刚度，增加弹性接头防止管路共振，在支承点设隔振垫防止外界干扰。

4 机床切削振动的控制

金属切削机床都是通过刀具对工件施加切削力进行加工，使其形状尺寸和表面质量达到要求的。若切削过程中切削力不稳定而随时间周期变化，将引起机床刀具工件系统的振动，并在工件表面上残留振纹。使加工质量、切削效率以及机床、刀具的使用寿命降低。因此，消减交变切削力是机床设计、制造和使用的一个重要课题。

4.1 交变切削力的种类

1) 引起切削受迫振动的交变切削力 不连续的切削方式（如铣削、刨削、拉削、滚齿…）、工件表面的不连续、切削余量的不均匀、切屑形成的周期性以及机床空运转时已存在的振动，都将产生交变切削力使切削受迫振动。

2) 引起切削颤振（切削过程的自激振动）的交变切削力 引起再生效应的切削厚度变化、引起切入效应的进给速度变化、具有下降特性的切削速度变化、具有摩擦效应的刀具与工件、切屑之间的相对运动变化、刀具工作角度的变化，

以及机床结构各主振型相互影响的振型关联作用，都将产生引起切削颤振的交变切削力。

4.2 控制交变切削力的措施

1) 对引起受迫振动的交变切削力，在尽可能消减振源的前提下，减小切削用量以减小交变切削力的量。

2) 减小影响切削颤振的方向因素，如图 19.1-15 所示，设加工表面的法线方向为 x ，主振方向为 y ，切削力的方向为 F 。 x 与 F 的夹角为 β ， x 与 y 的夹角为 α ，由机床动力学知方向因素的数学表达式为

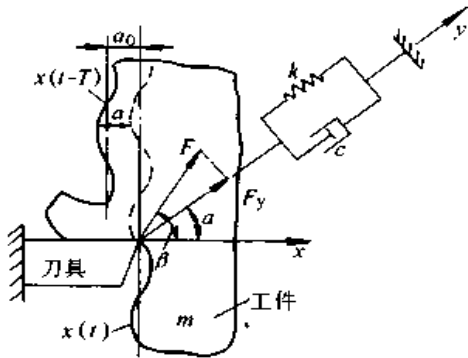


图 19.1-15 方向因素

$$u = \cos(\beta - \alpha) \cos \alpha \quad (19.1-54)$$

u 越小，切削过程越稳定，切削颤振产生的可能性越少。令 $u = 0$ ，求解式 (19.1-54)，得

$$\alpha_1 = 90^\circ, \alpha_2 = 90^\circ + \beta \quad (19.1-55)$$

当 $\alpha = 90^\circ$ 时，主振方向与加工表面法线方向（也即测量切削厚度的方向）垂直，即振动位移没有引起切削厚度的变化而产生再生效应的交变切削力。当 $\alpha = 90^\circ + \beta$ 时，主振方向与切削力

的方向垂直，振动位移与切削力互不影响。

相反， u 越大，切削颤振产生的可能性越大。令 $du/da = 0$ ，可求解出切削最不稳定的 α 值，即

$$\alpha_1 = \frac{\beta}{2}, \alpha_2 = 90^\circ + \frac{\beta}{2} \quad (19.1-56)$$

通过改进机床的结构及刀具与工件的相对位置改变 α 角，改变刀具几何角度及切削用量改变 β 角，争取达到式 (19.1-55) 所示的条件，而避免出现式 (19.1-56) 的情况。

3) 选择合适的切削参数，消减引起切削颤振的各种交变切削力。如增大刀具前角、提高切削速度、改善被加工材料的可加工性，以减小单位切削厚度变化所产生的切削力，从而减小切削厚度变化产生的交变切削力。又如根据主振方向选择合适的刀刃形状、采用较大的进给量，使刀具切削时遇到残留振纹的宽度最小，减小再生效应产生的交变切削力。又如避免使用切削力有下降特性的速度区（对塑性金属 30~70 m/min），防止切削速度变化产生交变切削力。

4) 对多齿刀具的切削，增加刀具齿数，采用不等齿距，以减小交变切削力。

5) 提高机床的动刚度，减小交变切削力的影响。通过选择构件的轮廓尺寸、截面形状、隔板、筋条、开口的布置，着重提高主振方向和薄弱环节的刚度，并减小构件的质量以减小其运动惯性力、提高其固有频率、频率比不在共振区。还充分利用接合面的摩擦阻尼、材料内阻尼，必要时附加高内阻材料，达到提高机床抗振能力的目的。

第 2 章 阻 尼 减 振

1 机械中的阻尼

在机械中增加阻尼，可通过以下各种途径来实现。

1.1 材料阻尼

从图 19.2-1 所示的固体材料应力-应变滞后回线看出，在一个应力循环中，加载期间外界对材料所作的功，大于卸载期间材料放出的能量，也即材料把一部分能量转换为热能而消耗能量。这种在交变力作用下，材料内部分子或金属晶粒间相互摩擦（简称材料内摩擦），而消耗振动能量的阻尼，称为材料阻尼。根据回线所包围的面积，可比较各种材料的阻尼性能，面积越大，阻尼越大。通常以材料损耗因子 β 值作为衡量阻尼的特征值， β 是材料受到振动激励时，损耗能量和振动能量的比值，表示材料吸收振动的能力， β 值越大，阻尼越大。各种常用材料在室温和声频范围的 β 值，见表 19.2-1。

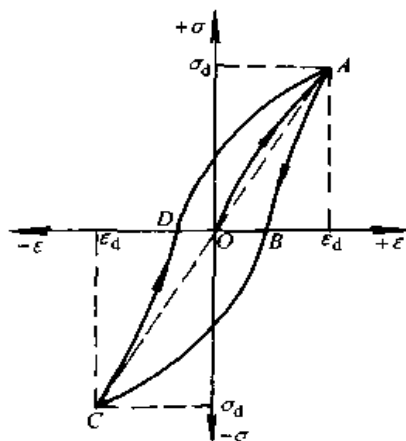


图 19.2-1 材料应力(σ)-应变(ϵ)滞后回线

对于兼有弹性和黏性的黏弹性阻尼材料，既要求有较高的以 β 值表示的阻尼性能，又要求具有合适的以弹性模量 E （或切变模量 G ）表示的力学性能。但是， β 和 E （或 G ）都受环境温度 T 和振动频率 f 的影响，需要综合考虑。从图 19.2-2 看出，在玻璃态区（低温时材料为

非晶固体），其储能切变模量 G' 很高而损耗因子 β 很低；在高弹态区（高温时材料是一种液体，也称橡胶态区）， G' 和 β 都很低；在玻璃化转变态区（材料兼有弹性体和液体的特性）， G' 逐渐下降，而 β 有一个最大值，材料具有最好的阻尼性能，又有较好的力学性能。

表 19.2-1 常用材料的损耗因子 β 值

材 料	损耗因子 β 值	材 料	损耗因子 β 值
钢、铁	0.000 1~0.000 6	混凝土	0.015~0.05
铜、锡	0.002	复合材料	0.2
铅	0.000 5~0.002	阻尼橡胶	0.1~5
铝、镁	0.000 1	有机玻璃	0.02~0.04
锌	0.000 3	层夹板	0.01~0.013
玻璃	0.000 6~0.002	砖	0.01~0.02
塑料	0.005	干砂	0.12~0.6
木纤维板	0.01~0.03	阻尼合金	0.05~0.2
软木塞	0.13~0.17	高分子聚合物	0.1~10

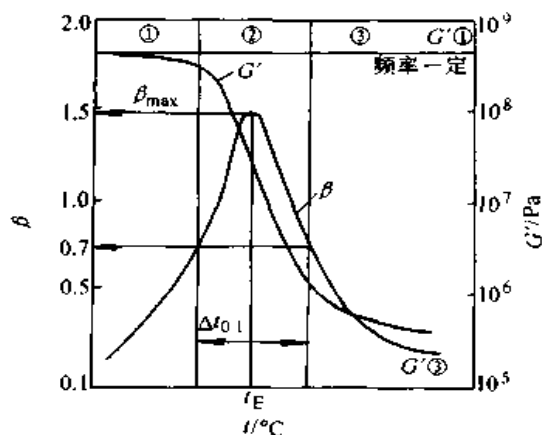


图 19.2-2 G' 与 β 随温度 t 变化的曲线

- ①玻璃态区 ②玻璃化转变态区
③高弹态区（橡胶态区）

不同材料在不同温度 t 和不同频率 f 条件下，有不同的弹性模量 E 和不同的损耗因子 β

值。对某种材料，可以通过试验得到不同 T 和 f 条件下，相应的各 E 和 β 值。为了把这四个参数的相互关系同时表达出来，就需要一个空间曲面，带来描述和使用的不便。

经过大量试验数据证明， t 和 f 虽是两个性质完全不同的物理量，但它们对 E 和 β 的影响，在一定意义上是等效的。在高温和低频，或低温和高频状态下，阻尼性能很低，即高温和低频等效，低温和高频等效。利用这个从试验得到的规律，可以把 T 和 f 的影响综合为一个参数，即折算频率 $f_R = f \cdot \alpha_T$ 来代替，通过试验得到温频折换系数 α_T 。这时就可以用两条平面曲线来代替上述的空间曲面，有了这两条曲线就可以从图上方便的找到，任何温度时任意频率下的 E 和 β 值。

图 19.2-3 为通过上述试验及作图方法得到的腈橡胶和 SNPE 聚合物的折算温度列算图。从图上左纵坐标频率值处画一水平线，并从顶横坐

标温度值处画一倾斜线，得此二线的交点；又从此交点处画一竖直线，最后从右纵坐标读出此竖直线分别与 E 曲线和 β 曲线的交点处的数值，即为该频率和温度下的弹性模量和损耗因子的数值。

根据材料的强度、质量和成本，选择阻尼性能好的材料来制造机械零件，是阻振的一个方法。一般高强度的金属，其阻尼性能很低，相反，阻尼性能好的金属，常常强度低而且是沉重和昂贵的。因此，应适当地配合各种金属做成机械零件；例如，铅在室温中能受力产生蠕变，具有很好的阻尼性能，但是，强度很低；把铅放在高强度金属的约束中，成为受振零件的一部分，既不降低零件的强度，又能发挥铅的阻尼作用。

发展阻尼合金、阻尼橡胶、高分子聚合物及其他有机材料，使其具有高的阻尼性能，又具有好的力学性能。

1.2 相对运动阻尼

振动体在相对运动中的库仑摩擦或黏性流体摩擦（简称外摩擦），以及磁滞阻尼力使振动的力学能转换为热能而产生的阻尼，称为相对运动阻尼。相对运动消耗的能量，占总阻尼消耗能量的 90% 左右，是阻振的主要手段。减小相对运动件的间隙、施加预载荷、降低接触面的粗糙度等，是常见的提高相对运动阻尼的方法。

颗粒之间的碰撞，也称颗粒摩擦阻尼是另一种相对运动阻尼的形式。例如：把松散的金属球放入振动体中、松散的颗粒放入镗杆，以及在非工作的封闭空间中保留砂心或充填物料，这些都是利用碰撞消耗能量而起阻尼作用的方法。

充分利用焊、铆、螺纹联接的边界摩擦是消耗振动能量的另一途径。调整联接点的数量和预紧力，以及联接面的粗糙度，使其在小振幅时，联接面紧贴在一起，相对运动阻尼为零，在大振幅时，联接面发生滑移而消耗能量。

1.3 结构阻尼

除材料阻尼和相对运动阻尼外，由振动体扩散、辐射而消耗振动的能量，产生的阻尼称为结构阻尼，有扩散性阻尼和接合面阻尼。

固体结构之间，以及结构的零件之间，以机械波的方式传递振动的能量，把振动体的能量传

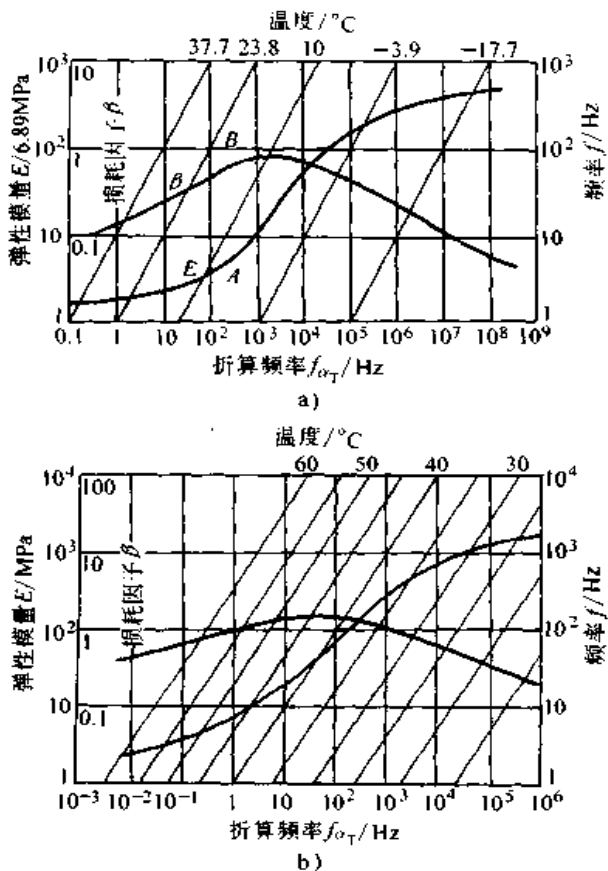


图 19.2-3 黏弹性材料折算温度列线图
a) 腈橡胶 b) SNPE 聚合物

输出去，是结构阻尼的一部分，属于扩散性阻尼。例如，悬臂梁端部的振动输出到其支承上；齿轮的振动通过轴、轴承输出到齿轮箱体上。当激励是瞬态，而且支承的体积又比振动体很大时，振动的能量将扩散出去，而不反回，因而振动被阻止。

以声辐射的方式，把振动体的能量向其周围介质传输出去，也是扩散性结构阻尼。零件辐射能量的大小视其形状、尺寸和振动频率而定。例如，平板传播横向波时，低于某一临界频率就不辐射能量，1cm 厚的钢板的临界频率为 1 000 Hz，超过这个频率，辐射的能量就随频率的增加而增加。

结构的形状和尺寸明显地影响着结构阻尼的大小。在图 19.2-4 中列出几种典型的阻尼性能

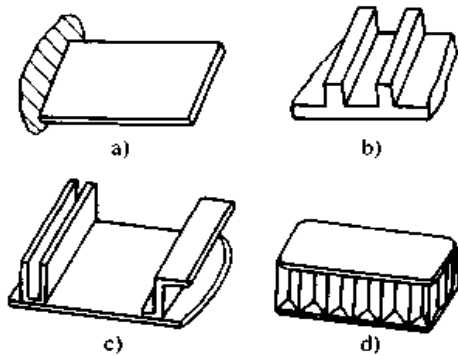


图 19.2-4 几种典型阻尼结构的外形
好的结构外形。a 为柔性的梁或板；b 为外表加肋的结构，适用于飞机的机壳、汽车的车身以及

金属建筑物的机架；c 为若干金属板组合的结构；d 为蜂窝形板和壳。它们共同的特点是增加扩散和辐射振动能量的面积，又增加结构的刚度和减小结构所占的空间，对 a 结构还注意从支承中扩散振动能量。

根据系统所需的阻尼量、机器允许的附加质量和空间位置，以及经济效益，选择合适的结构形状和尺寸。

机械振动中，在结构接合面之间，不产生引起干摩擦的相对运动时，由于接合面的有限接触点产生塑性变形，作用在接合面的交变力和接合面的交变位移具有非线性性质，形成与图 19.2-1 相似的封闭回线。即在一个振动周期中，输入能量大于输出能量，从而消耗振动能量，也是结构阻尼的一部分，也称为接合面阻尼。调整接合面上的预紧力、油膜及表面粗糙度等，改变接合面的接触状态，可以改变接合面阻尼的大小。

2 附加阻尼

2.1 附加阻尼的种类

2.1.1 附加阻尼层和装置

在振动体上，使用各种方式，附加一层或多层具有高内阻的黏弹性材料（如沥青基制成的胶泥减振剂、高分子聚合物和油漆腻子等），振动时使阻尼材料产生很大的变形，消耗振动的能量而不损坏。

如图 19.2-5 所示的典型附加阻尼层和装置。

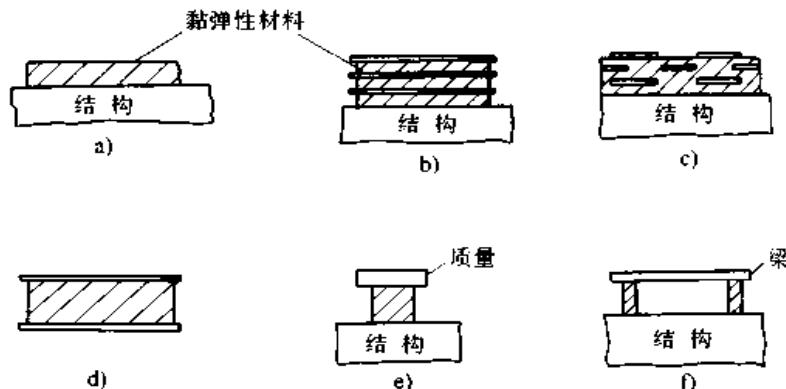


图 19.2-5 几种典型的附加阻尼层和装置

它们的共同优点是，不改变原设计的结构和刚度而提高其阻尼性能，分别具有各自的特点。图 19.2-5a 为自由阻尼层，也称非约束阻尼层，是

在振动体上直接喷涂一层黏弹性材料，方法简单、成本低，但阻尼性能较差；图 19.2-5b 为多层约束阻尼层，在自由阻尼层上再附加一层或多

层约束阻尼层，当振动体变形时，起约束作用的刚性材料不变形，从而增加阻尼材料的剪切变形，提高其阻尼性能；图 19.2-5c 为多层间格约束阻尼层，把起约束作用的刚性材料薄片，按一定间格排列在黏弹性材料中，其阻尼性能将更加提高；图 19.2-5d 为阻尼夹心镶板，安置在振动系统中，将使阻尼材料产生较大的变形，而发挥更好的消耗能量的阻尼作用；图 19.2-5e 为共振阻尼装置，相当于高阻尼的单自由度系统，附加在振动体上产生共振，使黏弹性材料产生更大的变形，发挥更好的阻尼作用；图 19.2-5f 为共振梁阻尼装置，不仅具有 19.2-5e 式装置的工作原理和作用，还具有更多的黏弹性材料，增加了阻尼效果。

2.1.2 多层薄板阻尼结构

在图 19.2-6 中，列出了多层薄板梁的阻尼结构的典型横截面，这种结构具有阻尼层的面积较大，阻振方向较多的优点。当梁振动产生变形时，夹在薄板中间的黏弹性材料，产生变形而起阻尼的作用。

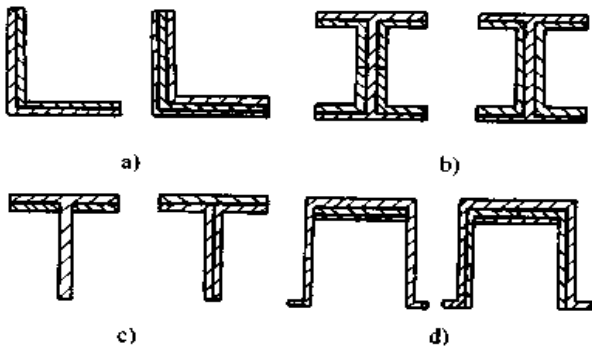


图 19.2-6 多层薄板梁的阻尼结构的横截面
a) 角截面 b) 工字形截面
c) T形截面 d) 帽、盖截面

2.1.3 阻尼插入结构

在图 19.2-7 中，列出了由外体-嵌入体-黏弹性材料组成的梁的典型横截面，这种阻尼材料未与振动体牢固粘合在一起的阻尼插入结构，具有良好阻尼性能，又因插入阻振结构中而不占空间位置。当梁振动产生变形时，嵌入体与外体之间的相对运动，使中间的阻尼材料产生变形，而消耗振动的能量。

2.2 附加阻尼层的设计与计算

设计附加阻尼层的结构，应根据结构的几何

尺寸、材料特性及减振要求，选择和确定阻尼层的材料、类型和厚度。这就需要计算附加阻尼层后的结构的损耗因子和各阶固有频率。

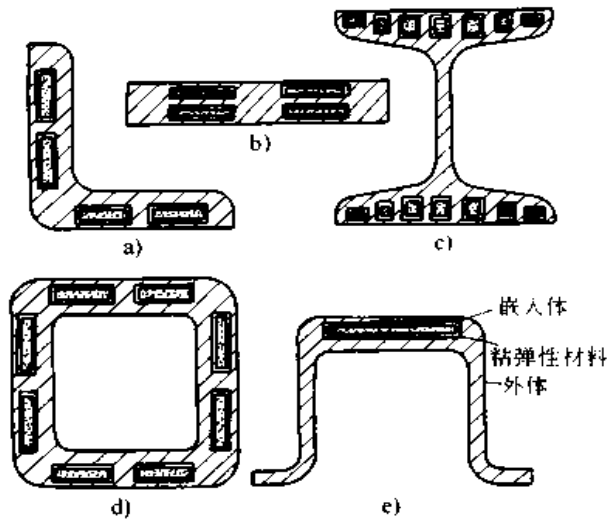


图 19.2-7 阻尼插入梁的阻尼结构的横截面
a) 角截面 b) 平杆截面 c) 工字形截面
d) 方形截面 e) 帽、盖截面

2.2.1 自由层阻尼梁的计算

图 19.2-8 为使用自由层阻尼的梁的结构简图，该结构的损耗因子和固有频率，不仅与阻尼材料的损耗因子和无阻尼梁的固有频率有关，还与阻尼材料与无阻尼梁的厚度比、弹性模量比及材料密度比有关。其计算公式为

$$\eta = \frac{\beta en}{1 + en} \cdot \frac{3 + 6n + 4n^2 + 2en^3 + e^2n^4}{1 + 2en(2 + 3n + 2n^2) + e^2n^4} \tag{19.2-1}$$

$$\left(\frac{f_r}{f_m}\right)^2 = \frac{1 + 2en(1 + 3n + 2n^2) + e^2n^4}{(1 + en)(1 + \mu n)} \tag{19.2-2}$$

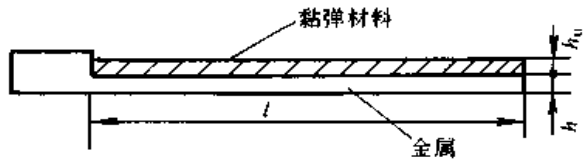


图 19.2-8 自由层阻尼梁结构简图

式中 η ——阻尼梁的损耗因子（若用半功率点确定阻尼比的方法，则 $\eta = \frac{\Delta f_r}{f_r}$ ， Δf_r 为 r 阶固有频率 f_r 的两半功率点的频率差）；

$n = \frac{h_v}{h}$ (h_v —— 阻尼材料的厚度, h —— 无阻尼梁的厚度);

$e = \frac{E_v}{E}$ (E_v —— 阻尼材料弹性模量的实部, E —— 无阻尼梁的弹性模量);

$\mu = \frac{\rho_v}{\rho}$ (ρ_v —— 阻尼材料的密度, ρ —— 无阻尼梁的质量密度);

β —— 阻尼材料的损耗因子;

f_r —— 阻尼梁的第 r 阶固有频率 (Hz);

f_m —— 无阻尼梁的第 m 阶固有频率 (Hz);

2.2.2 约束阻尼层的计算

1) 图 19.2-9 所示的两端简支的三层阻尼夹心梁的计算公式为 (若两端为其它支承, 只需改变公式中的振型参数 K_n)

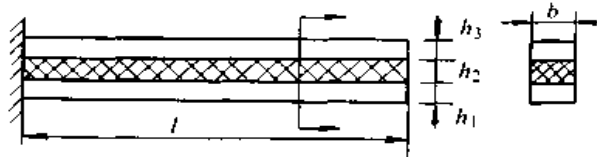


图 19.2-9 三层阻尼夹心梁

① 阻尼梁的损耗因子

$$\eta = \frac{\beta g Y}{1 + g(2 + Y) + g^2(1 + Y)(1 + \beta^2)} \quad (19.2-3)$$

其中 $g = \frac{G'b(1/E_1A_1 + 1/E_3A_3)}{h_2K_n^2}$

$$Y = \frac{E_1A_1E_3A_3d^2}{(E_1A_1 + E_3A_3)(E_1I_1 + E_3I_3)}$$

$$d = h_2 + \frac{1}{2}(h_1 + h_3), I_1 = \frac{bh_1^3}{12}, I_2 = \frac{bh_3^3}{12}$$

式中 β —— 阻尼材料的损耗因子;

G' —— 阻尼层的切变模量 (Pa);

E_1, E_3 —— 基层、约束层的弹性模量 (Pa);

A_1, A_3 —— 基层、约束层的横截面积 (m^2);

K_n —— 振型参数, 两端简支时, $K_n = \frac{n\pi}{l}$;

$n = 1, 2, 3, \dots$

g —— 剪切参数;

Y —— 几何参数。

② 阻尼梁的弯曲刚度

$$(EI)_{\text{总}} = (E_1I_1 + E_3I_3) \left[1 + \frac{gY + g^2Y(1 + \beta^2)}{1 + 2g + g^2(1 + \beta^2)} \right] \quad (19.2-4)$$

式中的符号代表的物理参数与式 (19.2-3) 相同。

③ 阻尼梁的固有角频率

$$\omega_n = K_n^2 \sqrt{\frac{(EI)_{\text{总}}}{\rho_A}} \quad (19.2-5)$$

式中 ρ_A —— 阻尼梁单位长度的质量 (kg/m); $K_n, (EI)_{\text{总}}$ —— 见式 (19.2-3)、式 (19.2-4);

2) 图 19.2-10 所示的四边简支的三层阻尼夹心板的计算公式为

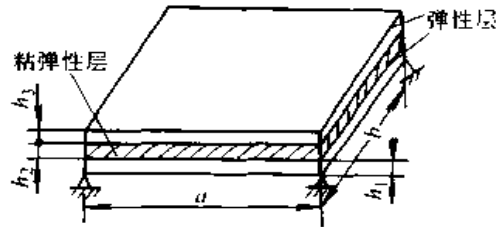


图 19.2-10 三层阻尼夹心板

损耗因子和弯曲刚度的计算公式为式 (19.2-3) 和式 (19.2-4), 但要更换其中的剪切参数 g 和几何参数 Y 为

$$g = \frac{r_2(r_1 + r_2)}{r_1 r_3 h_2^2}$$

$$Y = \frac{r_1 r_3 d^2}{(r_1 + r_3)(D_1 + D_3)}$$

式中 $r_1 = E_1 h_1 / (1 - \mu_1^2)$;

$r_2 = G' h_2$;

$r_3 = E_3 h_3 / (1 - \mu_3^2)$;

$D_1 = E_1 h_1^3 / 12 (1 - \mu_1^2)$;

$D_3 = E_3 h_3^3 / 12 (1 - \mu_3^2)$;

μ_1, μ_3 —— 基层、约束层的泊松比。

固有角频率为

$$\omega_{mn}^2 = \frac{(EI)_{\text{总}} K_{mn}^4}{\rho_A} \quad (\text{rad/s}) \quad (19.2-6)$$

式中 $K_{mn}^2 = (\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2$ $m, n = 1, 2, 3, \dots$

ρ_A —— 阻尼板单位面积的质量 (kg/m^2)。

2.2.3 阻尼层的设计

减振有效的阻尼层, 除了要求具有减振的损耗因子, 并适应工作温度和振动频率外, 还要求成本低, 效果大。

(1) 确定阻尼层的类型

对刚度较低、振动位移较大以及减振要求不十分严格的振动体，宜用减振效果较差的自由阻尼层。对刚度较高、振动位移很小以及减振要求较高的振动体，宜用减振效果较好的约束阻尼层。

(2) 布置阻尼层的位置

为获得较好的减振效果，宜把阻尼层布置在振动体上振动最强的部位。这些部位可以通过计算或用模型试验方法确定。

(3) 选择阻尼层材料

对自由阻尼层，由于厚度较大，减振要求较低，宜用价格低廉的阻尼材料，例如，以蛭石为填料的环氧树脂，以石棉绒为填料的沥青减振膏。对约束阻尼层，由于减振要求较高，宜用减振效果较好的阻尼材料，例如，厚度为 0.5 ~ 3 mm 的减振橡胶和塑料，厚度为 0.02 ~ 0.15 mm 的压敏胶薄膜。

根据阻尼层的工作温度、振动频率和损耗因子值 η ，从各种阻尼材料的折算温度列线图（见本章 1.1 节）中，选择最大损耗因子值 β_{max} 与 η 相近的那种材料，将得到减振性能最好的材料。

(4) 确定阻尼层的厚度

根据选定的阻尼层类型，布置阻尼层位置决定的面积以及阻尼层材料的性能，应用本章 2.2.2 节所述的阻尼层的计算公式，计算出满足阻尼结构损耗因子和固有频率的阻尼层的厚度。若确定的厚度小于此，则达不到减振要求，若大于此，则结构质量增加，成本提高。

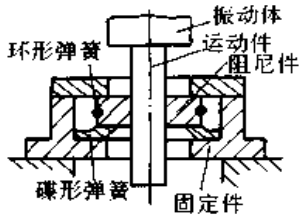
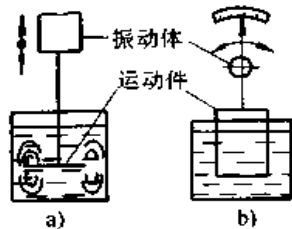
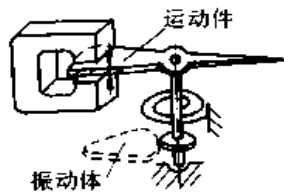
3 常用阻振装置

3.1 阻振器

阻振器与振动体相联，直接增加系统的阻尼，消耗振动体的能量。其工作原理及计算见表 19.2-2。从表中看出，振幅越大，频率越高，摩擦或电磁作用力（也即阻尼力）越大，每一振动周期内消耗的能量越大，减振效果越好。为此

- ① 提高阻振器的阻尼力；
- ② 把阻振器安装在与振动体相对运动最大的位置。
- ③ 阻振器的结构尺寸，应具有足够的散热能力。

表 19.2-2 阻振器的工作原理及计算

类型	工作原理	实例示意图	每振动周期内消耗的能量 ΔW
固体摩擦阻振器	振动时，运动件与阻尼件、阻尼件与固定件之间的摩擦力，消耗振动能量		$\Delta W = 4FA$ 式中 F —摩擦力 A —振幅
液体摩擦阻振器	振动时，运动件在阻尼液中形成旋涡（见图 a），或产生黏性摩擦力（见图 b），消耗振动能量		1) $\Delta W = \frac{8}{3} \gamma A^3 \omega^2$ (图 a) 2) $\Delta W = 0.4 \times 10^{-4} \pi \gamma \alpha A^2 \omega$ (图 b) 式中 ω —振动角频率 A —振幅 α —摩擦板面积 γ —阻尼液的运动黏性系数
电磁阻振器	运动件在磁场内振动，产生涡流，涡流在磁场作用下又产生与运动方向相反的作用力而阻止振动		$\Delta W = \pi C A^2 \omega$ 式中 A —振幅 ω —振动角频率 C —与磁场强度、活动板的面积和厚度有关的系数

3.2 固体摩擦减振器

用于消减扭转振动的固体摩擦减振器的典型结构简图, 见图 19.2-11。

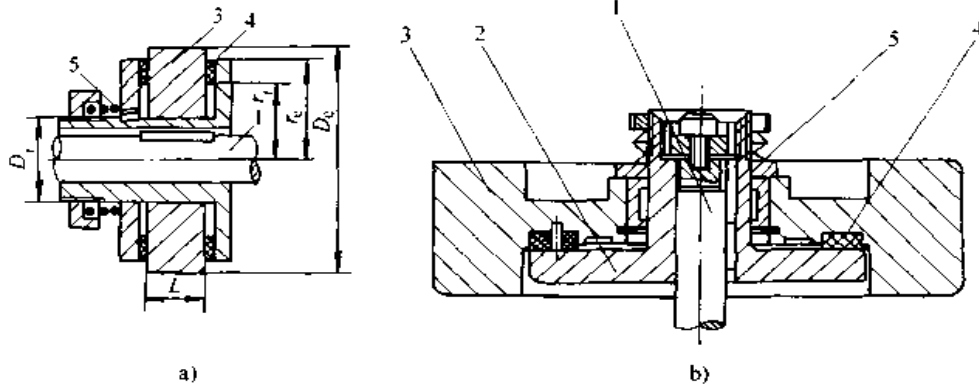


图 19.2-11 固体摩擦减振器结构简图

1—扭振轴 2—飞轮 3—摩擦盘 4—摩擦盘 5—弹簧

为获得最佳的减振效果, 应根据激振力矩和允许振幅的大小, 选取飞轮的最佳转动惯量和最佳摩擦力矩。若作用在扭振系统上的激振力矩为 $M_j \sin \omega t$, 安装减振器的允许振幅为 θ , 则按以下步骤计算减振器的各项参数。

(1) 计算飞轮的最佳转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

$$I = \frac{\pi^2 M_j}{4 \omega^2 \theta_p} \quad (19.2-7)$$

(2) 确定飞轮的几何尺寸

$$I = 98 \times \gamma \left(\frac{L}{D_c} \right) D_c^5 \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_c} \right) \right] \quad (19.2-8)$$

先根据减振器安装位置的要求, 选取 $\frac{D_i}{D_c}$ 和 $\frac{L}{D_c}$, 再根据飞轮材料的相对密度 γ 和由式 (19.2-7) 算出的 I , 按式 (19.2-8) 确定飞轮的几何尺寸。

(3) 计算最佳摩擦力矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)

$$M_{op} = 1.11 M_j \quad (19.2-9)$$

(4) 确定摩擦盘的尺寸和材料, 计算最佳弹簧压力 (N)

$$P_{op} = \frac{3}{4} \cdot \frac{M_{op}}{\mu} \cdot \frac{r_c^2 - r_i^2}{r_c^3 - r_i^3} \quad (19.2-10)$$

先根据结构要求及飞轮尺寸, 选取摩擦盘尺寸 r_c 、 r_i , 由选取的摩擦盘材料, 确定摩擦系数 μ , 再按式 (19.2-10) 计算 P_{op} 并确定弹簧的尺

寸。由于飞轮有较大的惯性, 不能随同轴系一起振动, 飞轮与毂盘之间的相对运动产生的摩擦力矩, 对扭振轴做功, 把振动能量转变成热能, 起到减振作用。

寸, 要求实际的弹簧压力在 P_{op} 的 $\pm 33\%$ 以内。

(5) 计算每一振动周期中, 减振器消耗能量的最大值 W_{max} (J) 及功率最大值 N_{max} (kW)

$$W_{max} = \frac{4}{\pi} I \omega^2 \theta_p^2 \quad (19.2-11)$$

$$N_{max} = \frac{1}{2\pi} \frac{\omega}{1000} W_{max} \quad (19.2-12)$$

二者分别用以确定减振器的减振效果和散热能力。

(6) 校核对其他阶次激振力矩 M_j' 的减振效果

$$\theta' = \frac{2\pi M_{op}^2}{I \omega^2 \sqrt{16 M_{op}^2 - \pi^2 M_j'^2}} \quad (19.2-13)$$

θ' 应小于振幅允许值 θ_p 。

3.3 液体摩擦减振器

图 19.2-12 为液体摩擦减振器的结构简图及其力学模型, 主要靠辅助质量 I_2 和振动物体 I_1 间相对运动产生的液体摩擦力减振。其次, 辅助质量的惯性力也起减振作用。

为使液体摩擦减振器, 在较宽的频域内, 具有良好的减振效果, 其最佳参数的计算公式为最佳阻尼比

$$\begin{aligned} (\zeta_2)_{op} &= \frac{(C_{02})_{op}}{2 I_2 \omega_{n1}} \\ &= \frac{1}{2 + \mu} \left[\sqrt{\frac{2 + \mu - 2\mu^2 \zeta_1}{2(1 + \mu)}} - \mu \zeta_1 \right] \end{aligned} \quad (19.2-14)$$

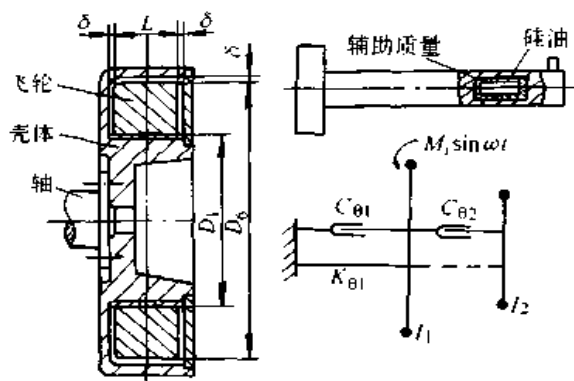


图 19.2-12 液体摩擦减振器结构简图及力学模型
最佳频率比

$$\lambda_{op}^2 = \left(\frac{\omega}{\omega_{n1}}\right)^2 = 4(\zeta_2)_{op} [\mu\zeta_1 + (1 + \mu)(\zeta_2)_{op}] \quad (19.2-15)$$

振幅放大系数

$$\frac{\theta_1}{\theta_{st}} = \frac{1}{1 - 4(1 + \mu)(\zeta_2)_{op}^2} \quad (19.2-16)$$

式中, $\mu = \frac{I_2}{I_1}$; $\omega_{n1} = \sqrt{\frac{k_{\theta 1}}{I_1}}$; $\zeta_1 = \frac{C_{\theta 1}}{2I_1\omega_{n1}}$;

$$\zeta_2 = \frac{C_{\theta 2}}{2I_2\omega_{n1}}; \theta_{st} = \frac{M_j}{k_{\theta 1}}$$

当主振系统的阻尼可忽略不计时, 即 $\zeta_1 = 0$, 以上三式变为

$$(\zeta_2)_{op} = \frac{1}{\sqrt{2(1 + \mu)(2 + \mu)}} \quad (19.2-17)$$

$$\lambda_{op} = \sqrt{\frac{2}{2 + \mu}} \quad (19.2-18)$$

$$\frac{\theta_1}{\theta_{st}} = \frac{2 + \mu}{\mu} \quad (19.2-19)$$

根据主振系统的 I_1 、 $k_{\theta 1}$ 、 $C_{\theta 1}$ 、激振力矩 M_j 和

允许振幅 θ_{pl} , 按式 (19.2-14) ~ 式 (19.2-19) 求出 I_2 和 ζ_2 , 再根据 I_2 和 ζ_2 对减振器进行结构设计和阻尼液的选取。必要时根据工作温度, 对减振器的散热面积进行校核。以 $\zeta_1 = 0$ 为例, 其具体设计步骤为:

- (1) 计算惯量比 μ 及飞轮转动惯量 I_2
根据式 (19.2-19)

$$\mu = \frac{2}{\theta_{pl} k_{\theta 1} / M_j - 1}$$

$$I_2 = \mu I_1 \quad \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

- (2) 确定飞轮尺寸

一般选取 $\frac{D_i}{D_e} = 0.5$, $\frac{L}{D_e} = 0.15$, 并把飞轮材料的相对密度 γ 和已算出的 I_2 , 代入式 (19.2-8), 算出飞轮的外径 D_e , 再算出内径 D_i 及宽度 L ;

- (3) 计算飞轮与减振器壳体的间隙 δ

$$\delta = 2.5 \left(1 + \sqrt{\frac{D_e}{2.5 D_i}}\right) \times 10^{-4} \quad (\text{m})$$

- (4) 计算最佳阻尼比 $(\zeta_2)_{op}$, 及阻尼系数 $C_{\theta 2}$
根据式 (19.2-17)

$$(\zeta_2)_{op} = \frac{1}{\sqrt{2(1 + \mu)(2 + \mu)}}$$

$$C_{\theta 2} = 2(\zeta_2)_{op} I_2 \omega_{n1}$$

根据 D_e 、 D_i 、 L 、 δ 及 $C_{\theta 2}$ 选取阻尼液的种类和黏度

- (5) 计算减振器的功率 N (W) 和散热面积 A (m^2), 一般要求 $N/A < 6\,500 \text{ W/m}^2$

$$N = \frac{\omega_{n1}^3}{2} \cdot \frac{\sqrt{1 + \mu}}{2 + \mu} \cdot I_2 \theta_{pl}^2$$

$$A = \pi(D_e + D_i) \left(L + \frac{D_e - D_i}{2} \right)$$

第3章 动力与冲击减振

把主振系统的振动能量转移到减振系统，或者说减振系统吸收主振系统的能量去自身振动，从而达到减振的目的。如果减振系统中有阻尼或非弹性碰撞，也将直接消耗主振系统的能量。

根据减振系统的质量（简称辅助质量）加到主振系统振动体（简称主质量）上的方式不同，减振器可分为：①辅助质量与主质量之间，只有弹性元件的无阻尼动力减振器；②两质量之间，既有阻尼元件又有弹性元件的有阻尼动力减振器；③两质量之间，没有弹性和阻尼元件相联，但是辅助质量能在主质量上产生摆动的摆式减振器；④辅助质量能在主质量上实现来回碰撞的冲

击减振器。

1 动力减振

1.1 动力调谐减振条件

图 19.3-1 为动力减振器的两个应用实例及其动力学模型。图中 m_1 和 k_1 分别为主振系统简化后的等效质量和刚度， m_2 、 k_2 和 c 分别为动力减振器的质量、刚度和阻尼系数。从图看出，简化为单自由度的主振系统，附加了动力减振器后，变为二自由度系统：根据其运动方程，可求得主质量和辅助质量振幅与静变位的比值为：

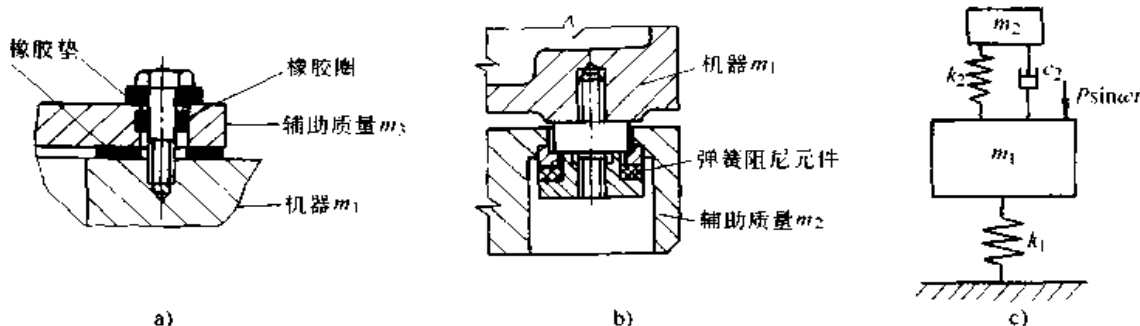


图 19.3-1 有阻尼动力减振器及其动力学模型

$$\left(\frac{A_1}{\delta_{st}}\right)^2 = \frac{(\alpha^2 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\alpha\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\lambda^2\alpha^2]^2 + (2\zeta\alpha\lambda)^2(1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2)^2} \quad (19.3-1)$$

$$\left(\frac{A_2}{\delta_{st}}\right)^2 = \frac{\alpha^4 + (2\zeta\alpha\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\lambda^2\alpha^2]^2 + (2\zeta\alpha\lambda)^2(1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2)^2} \quad (19.3-2)$$

式中 A_1 、 A_2 ——主质量、辅助质量的振幅；
 δ_{st} ——主系统在与激振力幅 P 相等的静力作用下产生的静变位，
 $\delta_{st} = \frac{P}{k_1}$ ；
 λ ——激振频率与主系统固有频率之比， $\lambda = \frac{\omega}{\omega_{n1}}$ ；
 α ——减振器与主系统固有频率之比， $\alpha = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}}$ ；
 ω_{n1} ——主系统的固有频率， $\omega_{n1} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$ ；

ω_{n2} ——减振器的固有频率， $\omega_{n2} = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}$ ；
 μ ——辅助质量与主质量之比， $\mu = \frac{m_2}{m_1}$ ；
 ζ ——减振器的阻尼比， $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k_2 m_2}}$ ；

在 $\alpha = 1$ ， $\mu = 1/20$ 时，式 (19.3-1) 中 A_1/δ_{st} 与 λ 、 ζ 的关系曲线见图 19.3-2。

改变减振器的各参数，使 $A_1 = 0$ ，即可达到消除主振系统振动的目的。从式 (19.3-1) 看出，令 $A_1 = 0$ 的条件，也即动力调谐减振的条件是

$$\zeta = 0, \alpha = \lambda \quad (19.3-3)$$

其物理意义是，动力减振器没有阻尼，动力减振器的固有频率等于激振频率，也即

$$c = 0, \frac{k_2}{m_2} = \omega^2 \quad (19.3.4)$$

将式 (19.3.3) 代入式 (19.3-2), 得

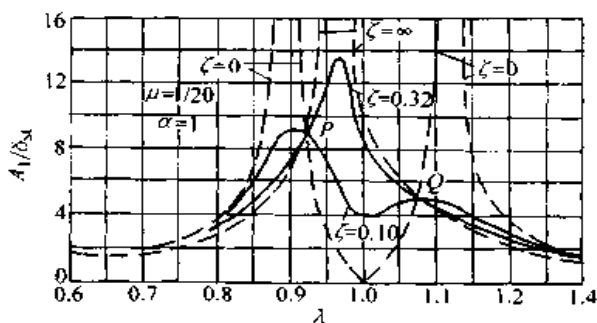
$$P = -k_2 A_2 \quad (19.3.5)$$


图 19.3-2 A_1/δ_n 与 λ, ζ 的关系曲线

当减振系统的结构参数满足动力调谐条件时，辅助质量对主质量的作用力 $k_2 x_2$ ($x_2 = A_2 \sin \omega t$)，正好与激振力 ($P \sin \omega t$) 大小相等、方向相反，从而消除了主振系统的振动。

1.2 无阻尼动力减振器

对没有阻尼的动力减振器， $\zeta = 0$ ，若令 $\alpha = \lambda$ ，从式 (19.3-3) 看出，即能使 $A_1 = 0$ ，消除主振系统的振动。但是，激振频率一旦偏离减振器的固有频率，从图 19.3-2 中的虚线看出， A_1 将急剧增大。无阻尼动力减振器仅适用于激振频率很稳定的情况。在设计时，应综合考虑以下问题来确定其结构参数。

1) 减振器应消除主振系统的共振，激振频率的变化，引起的振动大小不同，只有引起的共振才是最大的。即令减振系统的固有频率等于主振系统的固有频率，则 $\alpha = 1$ 。再根据动力调谐减振条件，令 $\lambda = \alpha = 1$ ，则 $A_1 = 0$ ，即能消除主振系统的共振。

2) 扩大减振器的减振频带，从图 19.3-2 中虚线看出，当 $\lambda = \alpha = 1$ ， $A_1 = 0$ 。虽控制了主振系统的共振，但在原共振点两侧的 λ_1 和 λ_2 处，又出现了两个新的共振点， λ_1 和 λ_2 分别为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1^2 &= 1 + \frac{\mu}{2} - \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}} \\ \lambda_2^2 &= 1 + \frac{\mu}{2} + \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}} \end{aligned} \right\} \quad (19.3-6)$$

对激振频率有波动的情况，应使 λ_1 和 λ_2 相

差较大，保证主振系统能够安全地运转在远离两个新共振点范围之内。从式 (19.3-6) 看出，质量比 μ 越大， λ_1 和 λ_2 两点相距越远。因此，对较稳定的振源， μ 可取小一些，一般 $\mu > 0.1$ ；对有多个激振频率的振源，不仅要求 μ 取大值，还应校核各激振力是否在 λ_1 和 λ_2 处引起共振。

在不增加减振器质量的前提下，增加减振器的数目，使各减振器的固有频率，稍有差异，可使减振频带有所扩大。使用非线性软弹簧的减振器，也可扩大减振频带。

3) 使减振器的振幅 A_2 能够满足结构要求，如果 A_2 过大，辅助质量占有的活动空间可能不够。从式 (19.3-5) 知，加大 k_2 就可减小 A_2 ，但为使 $\alpha = \lambda = 1$ ，又需保证 $k_2 m_1 / k_1 m_2 = 1$ ，因此，要调整 k_2 与 m_2 的比例，相应的增加 m_2 。

1.3 有阻尼动力减振器

在动力减振器中，加入适当的阻尼，除动力调谐减振外，还利用阻尼消耗振动的能量，而且使减振频带加宽，且有更广泛的适用范围。

1.3.1 结构参数的优化设计

有阻尼动力减振器 A_1/δ_n 随 λ 的变化曲线，见图 19.3-2。从图中看出，不同阻尼比 ζ 的所有曲线都经过 P、Q 两点，说明这两点的位置与 ζ 无关。为减振器的优化设计，提供了重要线索。

1) 为把减振频带扩大到整个频域，这就要求：第一，P、Q 两点的纵坐标相等，第二，P、Q 两点成为幅频响应曲线的最高点，如图 19.3-3 所示。根据这个要求推导出的最佳阻尼比 ζ_{op} 和最佳频率比 α_{op} 的计算公式为

$$\zeta_{op}^2 = \frac{3\mu}{8(1+\mu)^3} \quad (19.3-7)$$

$$\alpha_{op} = \frac{1}{1+\mu} \quad (19.3-8)$$

2) 为把主质量的振幅 A_1 成为优化目标，要求在最佳参数情况下，P、Q 两点的纵坐标值小到允许振幅 A_{p1} 之下。计算 P、Q 两点的纵坐标，其表达式为

$$\left(\frac{A_1}{\delta_{st}}\right)_P = \left(\frac{A_1}{\delta_{st}}\right)_Q = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (19.3-9)$$

$$\lambda_{P,Q}^2 = \left(\frac{\omega}{\omega_{n1}}\right)^2 = \frac{1}{1+\mu} \left(1 \mp \sqrt{\frac{2}{2+\mu}}\right) \quad (19.3-10)$$

根据以上各式即可优化设计有阻尼动力减振器。其设计步骤为：根据主振系统所受激振力的大小及允许振幅，用式 (19.3-9) 计算出质量比 μ ，从而得到减振器的质量 m_2 ；用式 (19.3-8) 求出最佳频率比 α_{op} ，根据 α_{op} 和 m_2 得减振器的固有频率 ω_{n2} 和刚度 k_2 ；用式 (19.3-7) 算出最佳阻尼比 ζ_{op} 及相应的阻尼系数 C 。

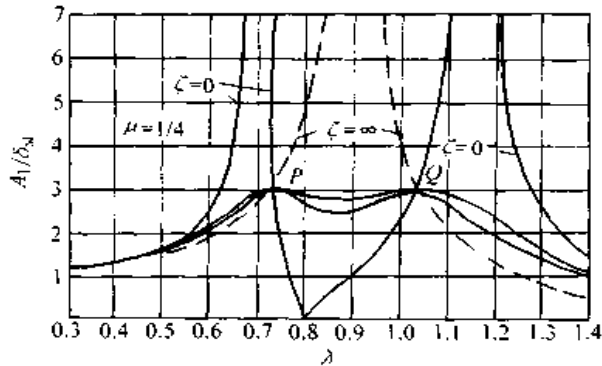


图 19.3-3 最佳参数情况下 A_1/δ_{n1} 与 λ 的关系曲线

1.3.2 主振系统的阻尼对动力减振的影响

在阻尼比 $\zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{m_1 k_1}}$ 不可忽略的主振系统上，安装有阻尼动力减振器，其动力学模型，见图 19.3-4。根据其运动方程仍可推导出与式 (19.3-1) 相似的 A_1/δ_{n1} 的数学表达式，但绘制出 A_1/δ_{n1} 与 λ 的关系曲线族，不再有图 19.3-2 所示的公共点 P、Q，很难使用解析法推导出最佳参数的解析式。在表 19.3-1 中，列出了用非线性数学规划方法得到的最佳频率比 α_{op} 、最佳阻尼比 ζ_{op} 以及相应的 A_1/δ_{n1} 值。

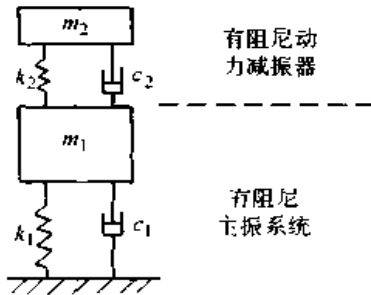


图 19.3-4 有阻尼动力减振器的数学模型

表 19.3-1 有阻尼动力减振器（主振系统有黏性阻尼）的最佳参数

$\mu = \frac{m_2}{m_1}$	$\zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{k_1 m_1}}$	$\alpha_{op} = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}}$	$\zeta_{op} = \frac{c_2}{2\sqrt{k_2 m_2}}$	A_1/δ_{n1}
0.01	0	0.990 1	0.061	14.18
	0.01	0.988 6	0.062	11.37
	0.02	0.986 9	0.064	9.46
	0.05	0.980 7	0.068	6.251
	0.10	0.966 3	0.073	3.967
0.10	0	0.909 1	0.185	4.589
	0.01	0.905 1	0.187	4.270
	0.02	0.900 9	0.188	3.991
	0.05	0.887 5	0.193	3.337
	0.10	0.861 9	0.199	2.622
1.0	0	0.499	0.448	1.746
	0.01	0.494	0.448	1.714
	0.02	0.484	0.449	1.683
	0.05	0.473	0.454	1.600
	0.10	0.466	0.455	1.482

从表 19.3-1 中的数据知，当主振系统的阻尼 c_1 增加时， α_{op} 稍有减小， ζ_{op} 稍有增加，主振系统的振幅 A_1 减小。特别是当质量比 μ 很小时，增加 c_1 ， A_1 减小得更明显。

1.3.3 激振型式和优化目标对动力减振的影响

本章 1.3.1 节介绍的动力减振器优化参数的数学表达式，是假设主质量直接受简谐激振外力，并以主质量的振幅与静变位的比值 A_1/δ_{n1} 为优化目标推导出来的。当激振型式和优化目标变化时，这些数学表达式将随之变化。表 19.3-2 中列出了动力减振器各种激振型式和优化目标的最佳参数的数学表达式。

表 19.3-2 各种激振型式和优化目标的动力减振器的最佳参数

激振型式	激振位置	优化目标	最佳频率比 α_{op}	最佳阻尼比 ζ_{op}^2	最佳目标值 A_{op}
$P e^{i\omega t}$	主质量	$k_1 x_1 / p$	$\frac{1}{1+\mu}$	$\frac{3\mu}{8(1+\mu)^2}$	$\sqrt{1+\frac{2}{\mu}}$
$\ddot{x}_0 e^{i\omega t}$	基座	\ddot{x}_1 / \ddot{x}_0			

续表 19.3.2

激振型式	激振位置	优化目标	最佳频率比 α_{op}	最佳阻尼比 ζ_r	最佳目标值 A_{op}
$Pe^{i\omega t}$	主质量	$m_1 \ddot{x}_1 / P$	$\frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$	$\frac{3\mu}{8\left(1+\frac{\mu}{2}\right)^3}$	$\sqrt{\frac{2}{\mu}} \frac{1}{\sqrt{1+\mu}}$
$b\omega^2 e^{i\omega t}$	基座	$m_1 \dot{x}_1 / b$			
$b\omega^2 e^{i\omega t}$	基座	$k_1 x_1 / b\omega^2$			
$Pe^{i\omega t}$	主质量	$k_1 \dot{x}_1 / p$	$\frac{\sqrt{1+\frac{\mu}{2}}}{1+\mu}$	$\frac{3\mu\left(1+\mu+\frac{5\mu^2}{24}\right)}{8(1+\mu)\left(1+\frac{\mu}{2}\right)^2}$	$\sqrt{\frac{2}{\mu}} \sqrt{\frac{1+\mu/2}{1+\mu}}$
$\ddot{x}_0 e^{i\omega t}$	基座	$\frac{x_0^2(x_1 - x_0)}{x_0}$	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{3\mu}{8(1+\mu)\left(1-\frac{\mu}{2}\right)^2}$	$\sqrt{\frac{2}{\mu}}(1+\mu)$

注：表中 μ ——质量比， $\mu = m_2/m_1$ ；
 P ——激振力幅值；
 x_0, \ddot{x}_0 ——基座位移、加速度的幅值；
 ω ——激振角频率；
 m_1, k_1 ——主振系统的质量和刚度；
 $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ ——主质量振动的位移、速度、加速度的幅值。

1.4 模态截断法在弹性体动力减振的应用

对弹性体进行动力减振，需要联立求解偏微分方程和常微分方程。为克服这个数学上的困难，可使用模态分析、模态截断和模态组合法。在一定条件下，使用这个方法得到的近似解，能满足工程设计的要求。以如图 19.3-5 所示的均直梁动力减振为例：

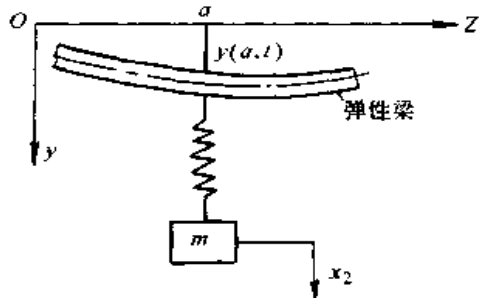


图 19.3-5 均直梁的动力减振

在已知均直梁的抗弯刚度 EI 、介质密度 ρ 、截面积 A 、长度 L 和边界条件时，用模态分析法求出梁的各阶振型特征值 β_i 、振型函数 $Y_i(x)$ 及固有频率

$$\omega_{ni} = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (19.3-11)$$

当梁受到横向分布力 $f(x, t)$ 作用时，其第 i

阶主坐标上的广义激振力为

$$Q_i(t) = \int_0^l f(x, t) Y_i(x) dx \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (19.3-12)$$

用模态截断和模态组合法，先截除 $i \geq 2$ 的一切振型，仅保留其一阶振型。此时，梁的主质量为 ρAL ，其上作用着一阶广义激振力

$$Q_1 = \int_0^l f(x) Y_1(x) dx \quad (19.3-13)$$

的单自由度系统。再在 $x = a$ 处，加上动力减振器，构成二自由度系统。列出其运动方程，并推导出均直梁任意截面第一振型振幅的近似解式为

$$Y(x, \lambda) = \frac{Q_1 Y_1(x)}{EI\beta_1^4 L} \left\{ \frac{\alpha^2 - \lambda^2}{\lambda^4 - \lambda^2 [1 + \alpha^2 + \mu\alpha^2 Y_1(a)] + \alpha^2} \right\} \quad (19.3-14)$$

式中 $\lambda^2 = \frac{\omega^2}{\omega_{n1}^2} = \frac{\omega^2 \rho A}{EI\beta_1^4}$

$$\alpha^2 = \frac{\omega_{n2}^2}{\omega_{n1}^2} = \frac{k\rho A}{mEI\beta_1^4}$$

$$\mu = \frac{m}{\rho AL}$$

若动力减振器有阻尼，则仿照本章 1.3.1 节的方法，以 $A = Y(x, \lambda) / Q_1 Y_1(x)$ 为优化目标，推导出与式 (19.3-7) ~ 式 (19.3-10) 相似的最佳参数的表达式为

$$\text{最佳阻尼比 } \zeta_{op} = \sqrt{\frac{3\mu Y_1^2(a)}{8[1 + \mu Y_1^2(a)]}} \quad (19.3-15)$$

$$\text{最佳频率比 } \alpha_{op} = \frac{1}{1 + \mu Y_1^2(a)} \quad (19.3-16)$$

P、Q 两点的纵横坐标

$$A_P = A_Q = \frac{2 + \mu Y_1^2(a)}{\mu Y_1^2(a)} \quad (19.3-17)$$

$$\lambda_{P,Q}^2 = \lambda_{op} \left[1 + \sqrt{\frac{\mu Y_1^2(a)}{2 + \mu Y_1^2(a)}} \right] \quad (19.3-18)$$

有了以上各式，即可按照本章 1.3.1 节所述的设计步骤，优化设计梁的动力减振器。这种模态截断法，不仅用于梁还可用于板、壳等弹性体的动力减振。如果弹性体的第二阶固有频率比第一阶固有频率大一倍，或者由于结构和荷载对称不出现二阶振动时，其第三阶比第一阶固有频率大一倍以上，上述模态截断法也能取得较精确的结果。

1.5 随机振动的动力减振

当主质量受的激振力是自噪声随机过程时，为抑制主振系统的随机响应，也可使用动力减振器。为提高减振效果，应使主质量位移 x_1 的方差 $\sigma_{x_1}^2$ 最小，即令

$$\frac{d\sigma_{x_1}^2}{da} = 0, \quad \frac{d\sigma_{x_1}^2}{d\zeta} = 0$$

由此推导出动力减振器的最佳参数为

$$\text{最佳阻尼比 } \zeta_{op} = \left[\frac{\mu(1 + 3\mu/4)}{4(1 + \mu)(1 + \mu/2)} \right]^{1/2} \quad (19.3-19)$$

$$\text{最佳频率比 } \alpha_{op} = \frac{1}{1 + \mu} (1 + \mu/2)^{1/2} \quad (19.3-20)$$

以及与 ζ_{op} 和 α_{op} 相对应的主质量最小位移方差为

$$(\sigma_{x_1}^2)_{\min} = \frac{2\pi S_0 \omega_{n1}}{k_1^2} \left[\frac{1 + 3\mu/4}{\mu(1 + \mu)} \right]^{1/2} \quad (19.3-21)$$

式中 μ ——质量比， $\mu = \frac{m_2}{m_1}$ ；

S_0 ——随机激励的频谱密度；

ω_{n1} ——主振系统的固有频率；

k_1 ——主振系统的刚度。

对比式 (19.3-19)、式 (19.3-20) 和式 (19.3-7)、式 (19.3-8)，即随机振动和简谐振动动力减振器的最佳参数相比，前者的最佳阻尼

比要小，最佳频率比要大。从式 (19.3-21) 看出，增加质量比 μ ，将使主质量最小位移方差 $(\sigma_{x_1}^2)_{\min}$ 减小，即提高减振效果。

对基座受随机激励的主振系统，按上述方法，并令 $\alpha = 1$ ，推导出的最佳阻尼和最小位移方差为

$$\zeta_{op} = \frac{\mu}{2} \quad (19.3-22)$$

$$(\sigma_{x_1}^2)_{\min} = \frac{2\pi S_0 \omega_{n1} (1 + \mu)}{\sqrt{\mu}} \quad (19.3-23)$$

2 摆式减振

2.1 摆式减振的原理

在产生扭转振动的旋转轴系中，安装离心摆，即摆式减振器，使其产生的惯性力矩与激振力矩相抵消，从而起减振作用。摆式减振器也是动力减振器的一种形式，根据动力调谐减振条件，只要减振器的固有频率等于激振频率，就能减小主振系统的振动。旋转轴系的激振频率和离心摆的固有频率都与旋转转速成正比，因此，摆式减振器在变速轴系的整个转速范围内，都有减振作用，是减小变速轴系扭转振动的最适用的一种减振装置。

图 19.3-6 为最简单的挂摆型摆式减振器及其动力学模型。

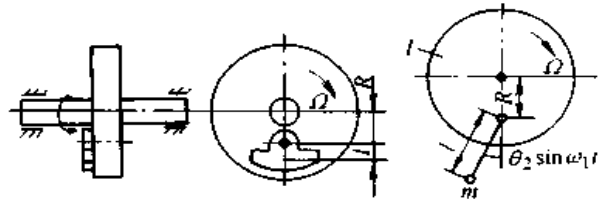


图 19.3-6 摆式减振器示意图及其动力学模型

根据动力学模型可列出摆的运动方程，从而求出摆的振幅 Θ_2 与旋转轴系扭转振幅 Θ_1 的关系式为

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \frac{l(\omega_n^2 - \omega^2)}{(R + l)\omega^2} \quad (19.3-24)$$

式中， $\omega_n = \Omega \sqrt{\frac{R}{l}}$ 为挂摆型摆式减振器的固有频率； ω 为扭转轴系的激振频率。

由式 (19.3-24) 看出，当 $\omega_n = \omega$ 时， $\Theta_1 = 0$ ，即消除了轴系的扭转振动。旋转轴系扭振激振频率 ω 通常为平均角速度 Ω 的 n 倍，即 $\omega = n\Omega$ ，

n 称为简谐次数。离心摆的固有频率 ω_n 也与平均旋转角速度 Ω 成正比, 即 $\omega_n = K\Omega$, 比例常数 K 称为调谐比, 对挂摆型的摆, $K = \sqrt{\frac{R}{l}}$ 。因此, 只要适当选择摆式减振器的几何参数 R 和 l , 使调谐比 K 等于简谐次数 n , 就能使 $\omega_n = \omega$, 则减振器在轴系整个工作速度范围内, 都能对 n 次激振起减振作用。

根据摆所产生的扭矩, 应与激振力矩 M 的大小相等、方向相反的原则, 决定摆的质量为

$$m = \frac{M}{\omega^2 l (R+l) \Theta_2} \quad (19.3-25)$$

式中, Θ_2 为摆的最大摆角, 一般应小于 30° , 如果计算出来的摆过重或体积过大, 不宜制成一个大摆时, 可用几个小摆来代替。

如果扭振轴系上还作用有其他次激振力矩, 则应按下式校核该力矩引起的振幅 Θ_1' 为

$$\Theta_1' = \frac{M'(K^2 - n'^2)}{m(R+l)^2 \omega'^2 K^2} \quad (19.3-26)$$

式中, M' 为 n' 次等效简谐激振力矩的幅值, ω' 为该力矩的角频率。

如果校核的 Θ_1' 大于 Θ_1 的允许值, 即不能满足设计要求时, 则应再设计一个摆, 用以减小

n' 次激振力矩 M' 引起的振动。

2.2 摆式减振器的设计步骤

在已知旋转轴系的角速度 Ω 、等效激振力矩 $M \sin \omega t$ 、振动简谐次数 n 、允许振幅 $[\Theta_1]$ 、摆的允许振幅 $[\Theta_2]$ 、其他次激振力矩 $M' \sin \omega' t$ 和简谐次数 n' 的情况下, 按以下步骤设计摆式减振器:

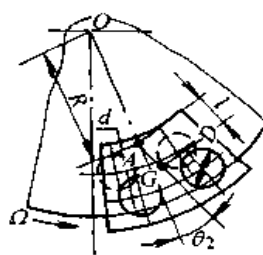
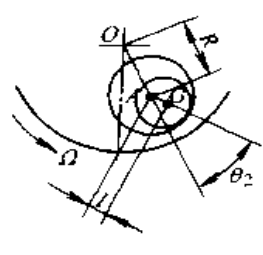
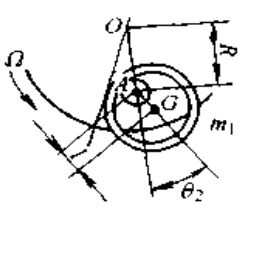
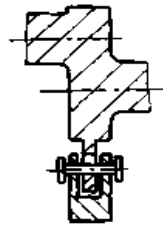
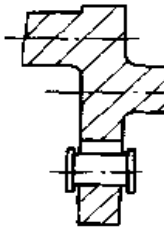
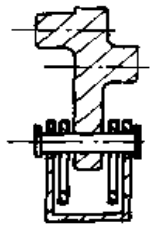
1) 令调谐比 $K = n$ 。

2) 根据空间尺寸选择摆的型式和悬挂点至回转中心的距离 R , 对挂摆型用 $n^2 = R/l$, 计算出摆的长度 l 。对其他型的摆式减振器, 可从表 19.3-3 中查出相应的调谐比 K 的计算公式, 令 $K = n$ 代入其中, 从而选择和计算滚子或环的尺寸及摆长 l 。

3) 令 $\Theta_2 = [\Theta_2]$, 代入式 (19.3-25), 算出摆的质量 m 。

4) 将 M' 、 n' 、 ω' 及已确定的 K 、 R 、 l 和 m 代入式 (19.3-26), 核算 Θ_1' 是否小于 $[\Theta_1]$ 。如果不能满足设计要求, 则再设计一个摆, 用以减小 n' 次激振力矩引起的振动。通常需要对所存在的几次危险的激振力矩, 分别设计不同参数的若干摆, 来减小系统的振动。

表 19.3-3 常用摆式减振器的结构参数

型式	挂摆型	滚摆型	环摆型
原理简图	 <p>$l = D - d$ G—重心</p>	 <p>d—滚子外径</p>	 <p>D—环的外径</p>
结构简图			

续表 19.3-3

型式	挂摆型	滚摆型	环摆型
调谐比 K	$K^2 = \frac{R}{l}$	$K^2 = \frac{R}{l \left[1 + \frac{4I_2}{md^2} \right]}$	$K^2 = \frac{R}{l \left[1 + \frac{4I_2}{mD^2} \right]}$
共振时摆 的振幅 Θ_2	$\Theta_2 = \frac{M}{m(R+l)\omega^2}$	$\Theta_2 = \frac{M}{\left[m(R+l) - \frac{2I_2}{d} \right] \omega^2}$	$\Theta_2 = \frac{M}{\left[m(R+l) + \frac{2I_2}{D} \right] \omega^2}$

注：表中 m —摆的质量(kg); I_2 —摆的转动惯量(kg·m²); M —激振力矩(N·m); ω —激振角频率(rad/s)

2.3 常用的摆式减振器

摆式减振器有挂摆、滚摆及环摆等多种型式。其结构参数见表 19.3-3。

3 冲击减振

在主振系统的振动体上，安装一个或几个自由运动的冲击块，令冲击块与振动体产生稳态的反复碰撞周期运动，则振动体的振动能量不断地转移到冲击块，或者说，辅助质量连续地吸收主质量的振动能量，达到减振的目的。另外，二者的非弹性碰撞也将耗散主质量的振动能量。这就是冲击减振的原理。

3.1 碰撞周期运动的稳定性

图 19.3-7 为撞杆冲击减振器的结构简图及

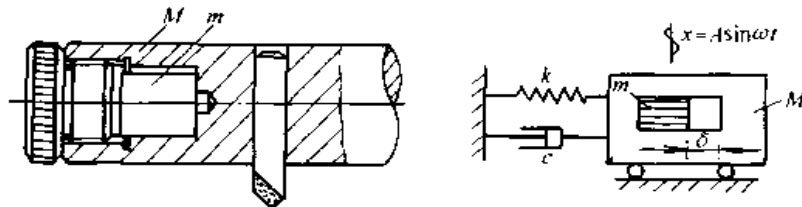


图 19.3-7 撞杆冲击减振器结构简图及其力学模型

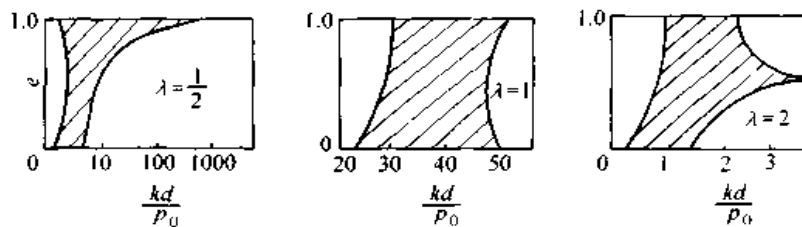


图 19.3-8 能产生稳态对称周期运动的参数域

到，激振频率等于主振系统固有频率，即 $\lambda = 1$ 时，对称周期运动稳定的参数域最大。当 $\lambda = 0.5$ 时，只有碰撞趋近完全弹性，即恢复系数 e

其动力学模型：从图中看到，在振动体 M 内部的冲击块 m ，能在间隙为 δ 的空间里左右来回的碰撞振动体。

如果碰撞不是稳态的，振动体的振动能量不能连续地转移出去，根本没有冲击减振的作用。因此，在什么条件下，能产生稳态的反复碰撞的周期运动，是设计冲击减振器的首要问题。

冲击块在每个循环中，分别与振动体左右碰撞一次，两次碰撞的时间间隔均为半个振动周期，称为对称周期运动。对其稳定性的研究表明，当系统受简谐激振时，若系统的参数满足一定条件，就能产生稳态的对称周期运动。

对质量比 $\mu = 0.05$ ，主振系统的阻尼比 $\zeta = 0.01$ 、频率比 λ 分别为 0.5、1.0 和 2.0 的冲击减振系统。图 19.3-8 中的阴影区，就是该系统能产生稳态对称周期运动的参数域。从图中看

接近 1，对称周期运动稳定的参数域才较大。当 $\lambda = 2.0$ 时，参数域很小。

对 $\mu = 0.1$ ， $\zeta = 0.05$ ， $e = 0.8$ 的系统，其

对称周期运动稳定的参数域、见图 19.3-9 中的阴影区。从图 19.3-9 看到，冲击块自由运动的间隙 δ 必须选在特定范围内，对称周期运动才能存在。

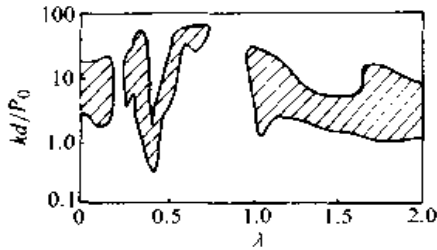


图 19.3-9 对称运动周期稳定的参数域

为使冲击减振系统能产生稳态的碰撞对称周期运动，可参考图 19.3-8 和图 19.3-9，选择系统的各参数。经研究表明，稳态的周期运动，除对称的外，还有一个循环中两次碰撞的时间间隔不相等的非对称周期运动以及每次循环碰撞三次的周期运动。

3.2 冲击减振的应用

由于碰撞时冲击减振系统的某些运动量发生突变，需应用非线性振动理论研究其相当复杂的运动规律。用数值计算和电子模拟技术及物理模型试验可得到对应用冲击减振有参考价值的定性结论。

3.2.1 简谐振动的冲击减振

当受简谐激励的主振系统使用冲击减振时，以下减振器的结构参数对减振效果有较大的影响，在设计减振器时应予注意。

1) 对激励频率稳定的主振系统，在保持冲击块的质量 m 不变时，增大恢复系数 e ，即使碰撞接近完全弹性碰撞，能提高反复碰撞周期运动的稳定，从而改善减振效果。

2) 对激励频率变化的主振系统，当其阻尼较弱时，恢复系数取较小值，当其阻尼较强时，恢复系数取较大值，能提高周期运动的稳定。

3) 把冲击减振系统的幅频特性曲线的峰值最小，作为优化目标，可求出最佳恢复系数 e_{op} 和最佳间隙值 δ_{op} 。图 19.3-10 为一计算实例，例中主振系统的阻尼比 $\zeta = 0.01$ ，对质量比 $\mu = 0.05, 0.1, 0.25$ 三种情况，计算得到 $e_{op} = 0.4$ ，以及如图 19.3-10 中 I、II、III 3 条曲线所示的

与其相对应的 $\delta_{op} = 45 p_0/k, 25 p_0/k, 11 p_0/k$ (p_0 ——激振力幅值， k ——主振系统刚度)。

4) 增加质量比 μ ，能提高减振效果，图 19.3-10 就是一个很好的证明。

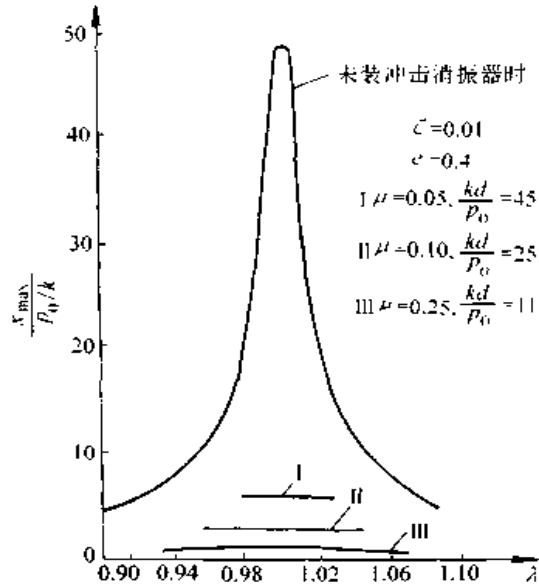


图 19.3-10 计算实例

5) 当主振系统阻尼很小、减振器的恢复系数又很大时，质量比 μ 和间隙 δ 对幅频特性的影响相互抵消。因此，只要保持 μ 和 δ 的乘积不变，减振效果都较好。图 19.3-10 中 I、II、III 3 条曲线在图上的位置很接近，三者的 $\mu\delta$ 值也几乎相等，就是一个实例。

3.2.2 随机振动的冲击减振

1) 冲击减振能减轻平稳随机振动，但减振效果不如减轻简谐振动的好的。

2) 根据冲击减振器安装处减振之前的振动位移，选择最佳间隙 δ_{op} ，若恢复系数 $e = 0.2 - 0.8$ ，安装处冲击减振之前的位移方差为 σ_x ，则 $\delta_{op} = 0.4 \sigma_x$ 。

3) 若主振系统的阻尼很弱，选择质量比 μ 达到 0.05，就能使 σ_x 减小 50%。

4) 如果冲击减振系统受高斯过程的激励，它的响应仍接近高斯过程。

3.2.3 多自由度系统的冲击减振

对抗剪高层建筑，可以简化为如图 19.3-11 所示的激振力 $p(t)$ 作用在顶层的链式多自由度系统，对其研究得以下定性结论。

1) 在相当宽的范围内改变质量比 μ 和间隙

δ ，都有稳态的对称周期运动，即冲击减振能起作用。

2) 当质量比 $\mu = 0.01$ 时，已有明显的减振效果。在特殊情况下， $\mu = 0.005$ 时，顶层位移振幅可减小 80%。

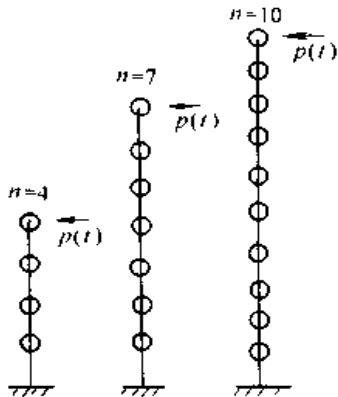


图 19.3-11 激振力作用在顶层的多自由度系统

3) 主振系统的柔度越高，振幅越大，冲击减振效果也越好。因此，减振器应安装在振型的腹点上，对图 19.3-11 所示的主振系统，应安装在顶端。

4) 若恢复系数 $e = 0.2 \sim 0.8$ ，则最佳间隙的经验公式为

$$\delta_{\text{opt}} = 0.6 x_{st} / \mu$$

式中， x_{st} 是主振系统减振器安装处，在与激振力幅相等的静力作用下产生的静变位。 μ 是质量比。

5) 多自由度系统各阶振型的冲击减振的效果不相等。

3.2.4 弹性体的冲击减振

1) 用本篇第 3 章 1.4 节所述的模态截断法，把弹性体简化为多自由度振动系统，得到其提高冲击减振的理论计算的结果与物理模型试验结果基本一致。

2) 减振器应安装在振幅最大的位置。例如，悬臂梁的自由端，平板自由边的中点。

3) 安装在悬臂梁自由端的减振器，其最佳

间隙应为基础位移的 $3/10$ 。

3.3 提高冲击减振效果的其他措施

1) 改变干摩擦力 为使主振系统的振幅减小，当激振频率等于主振系统的固有频率时，应增加冲击块与其滑行面的干摩擦力；当二频率不相等时，应减小干摩擦力。为加速主振系统瞬态振动的衰减，应增加干摩擦力。

2) 使用软特性弹簧 为扩大冲击减振系统产生稳态周期运动的参数域，应使用具有软特性的弹簧。

3) 使用两边恢复系数不等的结构 当激振频率大于主振系统固有频率时，使用冲击块两端碰撞恢复系数不等的结构，能扩大周期运动的参数域。

4) 使用多个自由质量的结构 增加冲击块的质量可提高减振效果，但增加冲击量而加大噪声。因此，使用如图 19.3-12 所示的多个自由质量的结构，既不加大噪声，又增加减振效果。

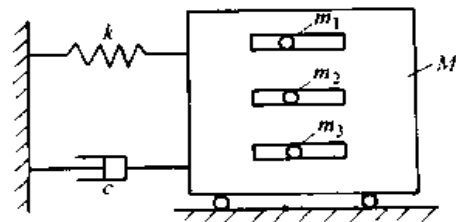


图 19.3-12 多个自由质量结构

5) 创造新型结构 创造新型冲击减振器是提高减振效果的重要措施。例如，对自由质量附加弹簧加以约束的结构，如图 19.3-13 所示，在一定条件下，具有较好的减振效果。

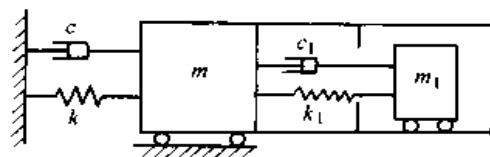


图 19.3-13 对自由质量弹簧附加约束结构

第 4 章 振动与冲击的隔离

采用振动隔离技术，控制振动的传递，是消减振动与冲击危害的重要途径之一。

1 简谐振动的隔离

为了减小设备振动传递到基础上的力，或者、为了减小基础振动传递到设备上的运动，用消耗和贮存振动能量的隔振装置，把设备和基础隔离开来。前者称为主动隔振，也称积极隔振（图 19.4-1a），后者称为被动隔振，也称消极隔振（图 19.4-1b）。

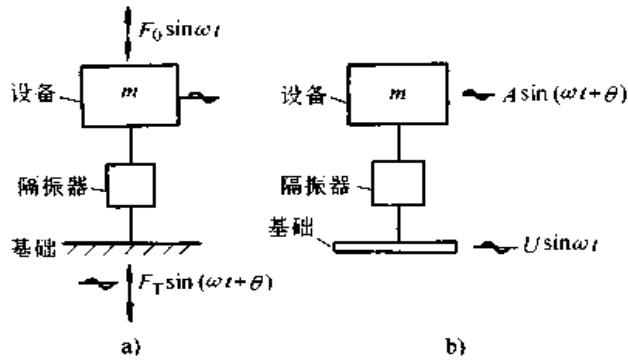


图 19.4-1 单自由度隔振系统

a) 主动隔振 b) 被动隔振

通常使用以下指标，评价隔振效果：

1) 振动传递率 在主动隔振系统里，振动传递率 η_A 为传到基础上的力 F_T 与激振力 F_0 之比，即 $\eta_A = F_T/F_0$ 。在被动隔振系统里，振动传递率 η_A 为传到设备的振幅 A 与基础振幅 U 之比，即 $\eta_A = A/U$ 。 η_A 表示经过隔振后力或振动量的减小程度， $\eta_A < 1$ ，才有隔振效果，而且， η_A 越小，隔振效果越好。 η_A 也称隔振系数，通过 η_A 还可算出隔振效率、隔振倍数和隔声系数。

2) 相对传递率 在被动隔振系统里，相对传递率 η_R 为设备相对于基础的位移 $\delta_0 = A - U$ 与基础位移幅值 U 之比，即 $\eta_R = \delta_0/U$ 。 δ_0 是隔振装置应具有的最小间隙。

3) 运动响应 在主动隔振系统里，运动响应为设备的振幅 A 与静变位 A_{st} 之比，即 $\beta = A/A_{st}$ ，由于 $A_{st} = F_0/k$ ，所以， $\beta = Ak/F_0$ 。 β 是隔振装置应具有的最小间隙。 β 也称动力放大系数。

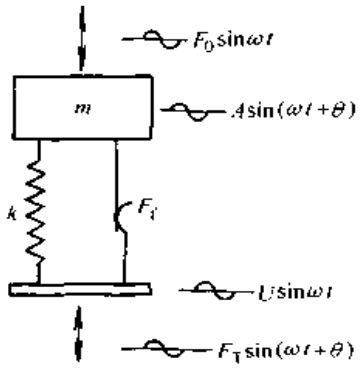
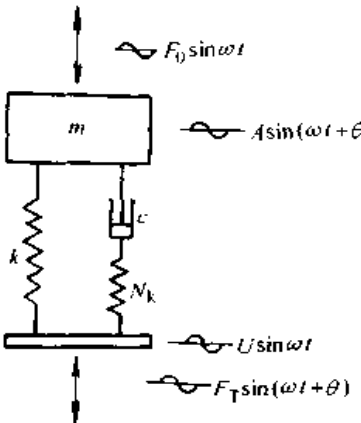
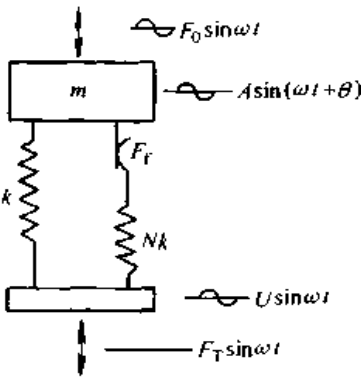
1.1 单自由度隔振系统

在表 19.4-1 中，列出了具有不同阻尼的四类单自由度隔振系统，每类系统里都包含主动和被动两种振动。

表 19.4-1 单自由度隔振系统的动力学模型及其计算公式

序号	阻尼形式	动力学模型	振动传递率 η_A ；相对传递率 η_R ；运动响应 β
1	刚性联接的黏性阻尼		$\eta_A = \frac{A}{U} = \frac{F_T}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$ $\eta_R = \frac{\delta_0}{U} = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$ $\beta = \frac{Ak}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$

续表 19.4-1

序号	阻尼形式	动力学模型	振动传递率 η_A ; 相对传递率 η_R ; 运动响应 β
2	刚性联接的库仑阻尼		$\eta_A = \frac{A}{U} = \frac{F_l}{F_0} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{4}{\pi} \eta\right)^2 \left(1 - \frac{2}{\lambda^2}\right)}}{1 - \lambda^2}$ $\eta_R = \frac{\delta_u}{U} = \frac{\sqrt{\lambda^4 - \left(\frac{4}{\pi} \eta\right)^2}}{1 - \lambda^2}$ $\beta = \frac{\Delta k}{F_0} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{4}{\pi} \zeta\right)^2}}{1 - \lambda^2}$
3	弹性联接的粘性阻尼		$\eta_A = \frac{A}{U} = \frac{F_l}{F_0}$ $= \frac{\sqrt{1 + 4 \left(\frac{N+1}{N}\right)^2 \zeta^2 \lambda^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \frac{4}{N^2} \zeta^2 \lambda^2 (N+1 - \lambda^2)^2}}$ $\eta_R = \frac{\delta_u}{U} = \frac{\sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{N^2} \zeta^2 \lambda^4}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \frac{4}{N^2} \zeta^2 \lambda^2 (N+1 - \lambda^2)^2}}$ $\beta = \frac{\Delta k}{F_0} = \frac{\sqrt{1 + \frac{4}{N^2} \zeta^2 \lambda^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \frac{4}{N^2} \zeta^2 \lambda^2 (N+1 - \lambda^2)^2}}$
4	弹性联接的库仑阻尼		$\eta_A = \frac{A}{U} = \frac{F_l}{F_0}$ $= \frac{\sqrt{\lambda^4 + \left(\frac{4}{\pi} \eta\right)^2 \left[\left(\frac{2+N}{N}\right)^2 - 2 \left(\frac{N+1}{N\lambda^2}\right) \right]}}{1 - \lambda^2}$ $\eta_R = \frac{\delta_u}{U} = \frac{\sqrt{\lambda^4 + \left(\frac{4}{\pi} \eta\right)^2 \left[\frac{2}{N} \lambda^2 - \left(\frac{N+2}{N}\right) \right]}}{1 - \lambda^2}$
说明	$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}; \lambda = \frac{\omega}{\omega_n}; \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}; \eta = \frac{F_l}{KU}; \zeta = \frac{F_l}{mU}, N - \text{附加弹簧刚度与主弹簧刚度的比值}$		

1.1.1 刚性联接的黏性阻尼隔振系统

将表 19.4-1 中序号 1 的计算公式, 表达为如图 19.4-2 ~ 图 19.4-4 所示的曲线族。由图可

知如下结论。

1) 当 $\lambda \ll 1$ 时, $\eta_A \approx 1$, 即当隔振器的固有频率 ω_n 远大于激振频率 ω 时, 没有隔振效果。

2) 当 $\lambda \approx 1$ 时, $\eta_A \gg 1, \eta_R \gg 1, \beta \gg 1$, 不但没有隔振效果, 反而把振动放大。增大阻尼可以减小机器在起动和停止过程中经过这个共振区的最大振幅。

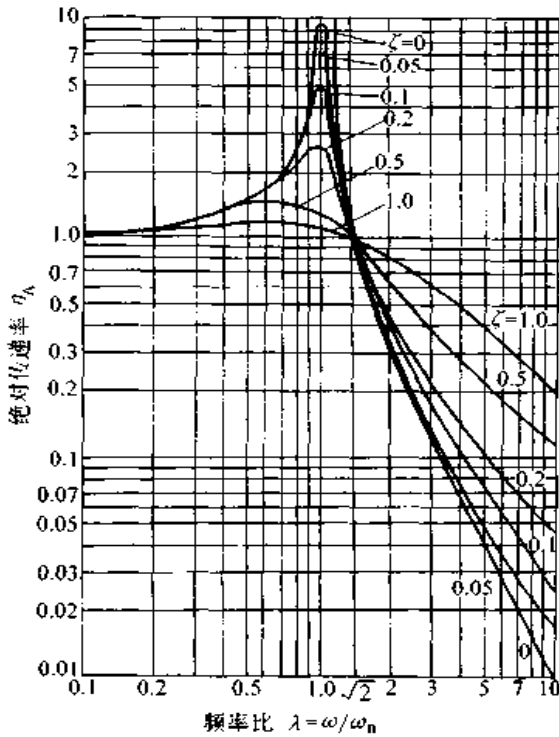


图 19.4-2 表 19.4-1 中序号 1 隔振系统的振动传递率

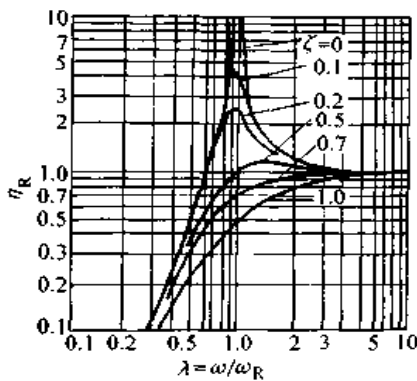


图 19.4-3 表 19.4-1 中序号 1 隔振系统的相对传递率

3) 当 $\lambda > \sqrt{2}$ 时, 无论阻尼大小, $\eta_A < 1$, 都有隔振效果, 而且随 λ 的增加, 隔振效果增加。实际应用中取 $\lambda = 2.5 \sim 5$, 此时已有 81% ~ 96% 的振动被隔除。增大阻尼, 使 η_R 和 β 减小, 但使 η_A 增加。为此, 在选择阻尼时, 应综合考虑共振区和隔振区两方面的要求。

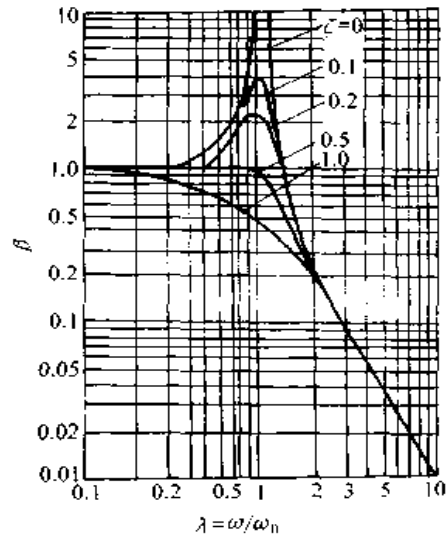


图 19.4-4 表 19.4-1 中序号 1 隔振系统的运动响应

1.1.2 刚性联接的库仑阻尼(干摩擦)隔振系统

从表 19.4-1 中序号 2 的公式可以看出如下结果。

1) 当频率比 λ 很低或干摩擦力 F_f 很高时, 振动传递率 η_A 接近于 1, 没有隔振效果。这是由于隔振器没有“松开”使基础与设备没有相对运动的缘故。当 $\lambda^2 < \frac{4}{\pi} \eta$ 时, η_R 是虚数, 因此, 使隔振器“松开”, 即设备与基础间有相对运动的频率比为

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{4}{\pi} \eta} \quad (19.4-1)$$

2) 当 $\lambda \approx 1$ 时, 传递率的计算公式分母为零, 若摩擦力小于一定数值, 系统共振传递率趋于无限大。为避免共振区的振动无限大, 其最小干摩擦力为

$$(F_f)_{\min} = \frac{1}{4} \pi k U \quad (19.4-2)$$

3) 当 F_f 具有最佳数值时, 隔振器在 $\lambda < \sqrt{2}$ 时不产生运动, 在 $\lambda > \sqrt{2}$ 时振动传递率小于 1, 由此得最佳摩擦力为

$$(F_f)_{\text{op}} = \frac{1}{2} \pi k U \quad (19.4-3)$$

4) 在高频区, 振动传递率与激振频率 ω 的平方成反比。当 $\eta > 2$, 且频率大于“松开”频率时, 振动传递率 $\eta_A \approx \frac{4 \eta \omega_n^2}{\pi \omega^2}$ 。

1.1.3 弹性联接的黏性阻尼隔振系统

弹性联接的黏性阻尼隔振系统（表 19.4-1 中序号 3）较之刚性联接的系统（表 19.4-1 中序号 1）隔离高频振动的能力强。随着附加弹簧刚度与主弹簧刚度的比值 N 的变化，振动传递率随之变化，经过计算得传递率峰值最小的最佳阻尼比为

对振动传递率

$$(\zeta_{op})_A = \frac{N}{4(N+1)} \sqrt{2(N+2)} \quad (19.4-4)$$

对相对传递率

$$(\zeta_{op})_R = \frac{N}{\sqrt{2(N+1)(N+2)}} \quad (19.4-5)$$

取最佳阻尼比，得最佳传递率为

$$(\eta_A)_{op} = (\eta_R)_{op} = 1 + \frac{2}{N} \quad (19.4-6)$$

1.1.4 弹性联接的库仑阻尼隔振系统

在隔振器中的库仑阻尼上联接一个弹簧，即表 19.4-1 中序号 4 所示的系统，能使库仑阻尼在一个振动周期中有时“松开”，有时“关闭”，从而提高隔振效果。经过分析计算得最佳库仑阻尼系数为

$$\eta_{op} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{N+1}{N+2}} \quad (19.4-7)$$

为避免共振时，传递的力为无限大，应使干摩擦力 $F_f > \frac{\pi}{4} F_0$

以上公式中的符号意义，见表 19.4-1。

$$\eta_A = \frac{F_T}{F_0} = \frac{A_1}{U} = \sqrt{\frac{(\mu\alpha^2)^2 + (2\zeta\mu\alpha^2\lambda)^2}{[\mu\alpha^2 - (1 + \mu + \mu\alpha^2)\lambda^2 + \mu\lambda^4]^2 + (2\zeta\lambda)^2[\mu\alpha^2 - (1 + \mu)\lambda^2]^2}} \quad (19.4-8)$$

式中 $\mu = \frac{m_2}{m_1}$; $\lambda = \frac{\omega}{\omega_{n1}}$; $\alpha = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}}$; $\omega_{n1} = \sqrt{k_1/m_1}$;

$$\omega_{n2} = \sqrt{k_2/m_2}; \zeta = \frac{C}{2\sqrt{k_2 m_2}}$$

根据结构的约束条件及以上计算公式，使用数值算法，求出两层隔振系统的最优结构参数，其方法为

1) 若根据结构要求，已确定质量比 μ 和固有频率比 α ，则按式 (19.4-8) 绘制不同阻尼比 ζ 所对应的传动传递率 η_A 的曲线族，曲线族有三个公共交点。顶峰通过最高公共交点的曲线所对应的阻尼比为最佳阻尼比 ζ_{op} ，选用 ζ_{op} 时，传递率的最大值 η_{Amax} ，为此曲线的峰值，无论激振频率 ω 如何改变， $\eta_A \leq \eta_{Amax}$ ，将获得最佳的隔振效果。

1.2 双层隔振系统

使用两层隔振系统，对振动进行两次隔离，可提高隔振效果。图 19.4-5 为典型的两层隔振系统，包括减小激振力 F_0 传到基础的力 F_T 的主动隔振和减小基础振源 U 传到被隔对象振幅 A_1 的被动隔振，二者的振动传递率为

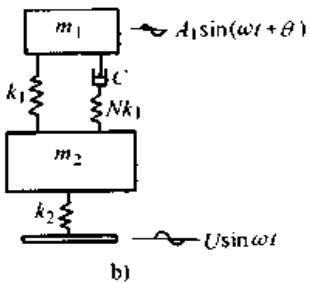
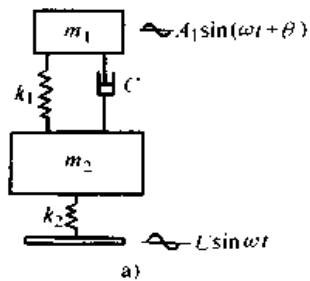


图 19.4-5 双层隔层系统

2) 若根据结构要求，事先只确定了质量比 μ ，则需计算出 α 和 ζ 的最佳值。其方法是，选用不同的固有频率比 α ，按 1) 所述的方法，求出各 α 值所对应的 ζ_{op} 和 η_{Amax} ，比较各 η_{Amax} 值，选择 η_{Amax} 为最小值时的 α 和 ζ ，即为获得最佳隔振效果的最佳固有频率比 α_{op} 和相应的最佳阻尼比 ζ_{op} 。

1.3 多自由度隔振系统

如果在设备的几个方向上都存在着激振力或激振力偶，或者基础有几个方向的干扰，则应在各个方向上都安装激振器，以隔除各个方向的振动，此时隔振设计应按多自由度系统进行。

图 19.4-6 为常见的在设备重心之下，在相

同平面上布置隔振器的系统。为了使被隔设备在加隔振器后,能保持其原来的工作位置,同时,为了使此6个自由度系统的运动方程都能解耦,以利于隔振计算,隔振器应对称于 xOz 平面和 yOz 平面进行布置。选取设备的重心为坐标的原点,在 x 、 y 和 z 方向上各隔振器到坐标原点的距离,分别为 a_1 、 b_1 和 h 。

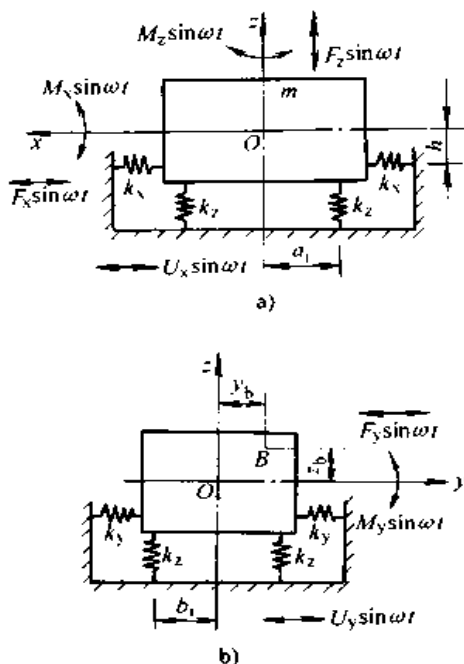


图 19.4-6 多自由度隔振系统

1.3.1 固有频率

在隔振设计中,要求多自由度隔振系统的各固有频率 ω_n 都低于激振频率 ω ,并能满足 $\lambda = \omega/\omega_n = 2.5 \sim 5.0$ 的要求。因此,应首先计算出系统的各固有频率。图 19.4-6 所示系统的各固有频率为

(1) 沿 z 轴的直线振动

$$\omega_z^2 = \frac{K_z}{m} \quad (19.4-9)$$

(2) 绕 z 轴的扭转振动

$$\omega_{\theta z}^2 = \frac{k_y \sum a_i^2 + k_x \sum b_i^2}{J_z} \quad (19.4-10)$$

(3) 平行于 xOz 平面的摇摆振动(沿 x 轴的直线运动与绕 y 轴的扭转振动的耦合)

$$\left. \begin{aligned} \omega_{11}^2 \\ \omega_{12}^2 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \left[(\omega_x^2 + \omega_{\theta y}^2) \mp \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_{\theta y}^2)^2 + 4\omega_x^4 h^2 m / J_y} \right] \quad (19.4-11)$$

(4) 平行于 yOz 平面的摇摆振动(沿 y 轴的直线运动与绕 x 轴的扭转振动的耦合)

$$\left. \begin{aligned} \omega_{21}^2 \\ \omega_{22}^2 \end{aligned} \right\} = \frac{1}{2} \left[(\omega_y^2 + \omega_{\theta x}^2) \mp \sqrt{(\omega_y^2 - \omega_{\theta x}^2)^2 + 4\omega_y^4 h^2 m / J_x} \right] \quad (19.4-12)$$

式中 $\omega_x^2 = K_x/m$; $\omega_y^2 = K_y/m$; $\omega_{\theta x}^2 = [k_z \sum b_i^2 + K_y h^2]/J_x$; $\omega_{\theta y}^2 = [k_z \sum a_i^2 + K_x h^2]/J_y$; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上单个隔振器的刚度; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上隔振器的总刚度; J_x 、 J_y 、 J_z 分别为刚体(被隔设备)对 x 、 y 、 z 坐标轴的转动惯量。

1.3.2 主动隔振

若在图 19.4-6 所示的刚体上,沿 x 、 y 、 z 轴分别作用着通过重心的激振力 $F_x \sin \omega t$ 、 $F_y \sin \omega t$ 、 $F_z \sin \omega t$ 以及绕 x 、 y 、 z 轴分别作用着激振力矩 $M_x \sin \omega t$ 、 $M_y \sin \omega t$ 、 $M_z \sin \omega t$,则系统将受迫产生振动。各隔振器的位移幅值乘以相应的刚度等于传递到基础上的力。在隔振设计时,应使传递到基础上的力小于激振力,从而达到主动隔振的目的。为此,按以下步骤进行计算。

(1) 求各方向的振幅

1) 沿 z 轴的直线振动振幅

$$A_z = \frac{F_z}{m(\omega_z^2 - \omega^2)} \quad (19.4-13)$$

2) 绕 z 轴的扭转振动振幅

$$\theta_z = \frac{M_z}{J_z(\omega_{\theta z}^2 - \omega^2)} \quad (19.4-14)$$

3) 平行于 xOz 平面的摇摆振动振幅

$$A_x = \frac{F_x J_y (\omega_{\theta y}^2 - \omega^2) - M_y K_x h}{m J_y (\omega_{11}^2 - \omega^2) (\omega_{12}^2 - \omega^2)} \quad (19.4-15)$$

$$\theta_y = \frac{M_y (\omega_x^2 - \omega^2) - F_x \omega_x^2 h}{J_y (\omega_{11}^2 - \omega^2) (\omega_{12}^2 - \omega^2)} \quad (19.4-16)$$

4) 平行于 yOz 平面的摇摆振动振幅

$$A_y = \frac{F_y J_x (\omega_{\theta x}^2 - \omega^2) - M_x K_y h}{m J_x (\omega_{21}^2 - \omega^2) (\omega_{22}^2 - \omega^2)} \quad (19.4-17)$$

$$\theta_x = \frac{M_x (\omega_y^2 - \omega^2) - F_y \omega_y^2 h}{J_x (\omega_{21}^2 - \omega^2) (\omega_{22}^2 - \omega^2)} \quad (19.4-18)$$

(2) 各方向上隔振器的最大变形量

$$\left. \begin{aligned} A_{gx} &= |A_x| + |\theta_y h| + |\theta_z b_{\max}| \\ A_{gy} &= |A_y| + |\theta_x h| + |\theta_z a_{\max}| \\ A_{gz} &= |A_z| + |\theta_x b_{\max}| + |\theta_y a_{\max}| \end{aligned} \right\} \quad (19.4-19)$$

式中 a_{\max} ——距 yOz 平面最远的隔振器的 x 坐

标;

b_{\max} ——距 xOz 平面最远的隔振器的 y 坐标;

(3) 通过隔振器传到基础的力幅

$$\left. \begin{aligned} F_{Tx} &= K_x A_{gx} \\ F_{Ty} &= K_y A_{gy} \\ F_{Tz} &= K_z A_{gz} \end{aligned} \right\} \quad (19.4-20)$$

根据允许传递到基础上的力幅,按式(19.4-20)计算出隔振器的刚度及安装位置。

1.3.3 被动隔振

若在图 19.4-6 所示的系统中,其基础受 $U_x \sin \omega t$ 或 $U_y \sin \omega t$ 的水平位移激励的作用,刚体将受迫振动。在隔振设计时,应使传递到刚体的振动小于基础的振动,从而达到被动隔振的目的。为此,按以下步骤进行计算。

(1) 受 $U_x \sin \omega t$ 作用产生的振动的振幅

$$A_x = \frac{\omega_x^2 J_y (\omega_{0x}^2 - \omega^2) + \omega_x^4 h^2 m}{J_y (\omega_{11}^2 - \omega^2) (\omega_{12}^2 - \omega^2)} U_x \quad (19.4-21)$$

$$\theta_y = \frac{K_x h \omega^2}{J_y (\omega_{11}^2 - \omega^2) (\omega_{12}^2 - \omega^2)} U_x \quad (19.4-22)$$

(2) 受 $U_y \sin \omega t$ 作用产生的振动的振幅

$$A_y = \frac{\omega_y^2 J_x (\omega_{0y}^2 - \omega^2) + \omega_y^4 h^2 m}{J_x (\omega_{11}^2 - \omega^2) (\omega_{12}^2 - \omega^2)} U_y \quad (19.4-23)$$

$$\theta_x = \frac{K_y h \omega^2}{J_x (\omega_{11}^2 - \omega^2) (\omega_{12}^2 - \omega^2)} U_y \quad (19.4-24)$$

(3) 刚体上任一点 (x_b, y_b, z_b) 在 x, y, z 方向上的最大振幅

$$\left. \begin{aligned} A_{xb} &= |A_x| + |\theta_y z_b| \\ A_{yb} &= |A_y| + |\theta_x z_b| \\ A_{zb} &= |\theta_x y_b| + |\theta_y x_b| \end{aligned} \right\} \quad (19.4-25)$$

根据允许传递到设备上的最大振幅,按式(19.4-25)计算出隔振器的刚度及安装位置。

2 随机振动的隔离

2.1 评价随机隔振效果的指标

从第 2 章第 1 节知,评价简谐振动隔振效果的指标是振动传递率,在其各计算公式中都有激励频率。由于随机振动含有各种激励频率分量,因此,不能使用振动传递率来评价其隔振效果。

由于随机过程的方差表示它围绕均值“振荡”的强度,而随机隔振的目的,就是抑制隔振体随机振动的强度,因此,就用隔振体的随机响

应方差作为评价其隔振效果的指标。按以下步骤计算随机响应方差。

1) 根据隔振系统的运动方程,推导出输出量(响应函数)对输入量(激励函数)的传递函数 $H(s)$,令 $s = i\omega$,得系统的频率响应函数 $H(\omega)$;

2) 若系统的随机激励是各态历经过程,其某一样本函数为 $f(t)$,则激励的自相关函数 $R_{ff}(\tau)$ 和自功率谱密度函数 $S_{ff}(\omega)$ 的计算公式分别为

$$R_{ff}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) f(t + \tau) dt \quad (19.4-26)$$

$$S_{ff}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ff}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (19.4-27)$$

3) 系统在 $f(t)$ 的作用下,对各态历经过程随机激励响应的自功率谱密度函数 $S_{xx}(\omega)$ 和零均值平稳随机过程的方差(响应的均方值) σ^2 的计算公式分别为

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{ff}(\omega) \quad (19.4-28)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (19.4-29)$$

对上式进行分析可知:

① 评价随机隔振效果的 σ^2 ,不仅与由系统结构参数决定的 $H(\omega)$ 有关,还与由随机激励决定的 $S_{ff}(\omega)$ 有关。因此,应该用相同激励引起的随机响应方差 σ^2 来比较不同随机隔振系统的性能。

② 由于随机激励的低频分量对响应方差的影响比高频分量要大,因此,为提高隔离随机振动的能力,不仅要尽量减小 $H(\omega)$ 值,而且要着重降低隔振系统的基频,使 σ^2 减得更小。

③ 由于过大的阻尼会使高频段的 $H(\omega)$ 值增加,而过小的阻尼又使中频段的 $H(\omega)$ 值增加。因此,隔振设计时,要求出不大不小的最佳阻尼。

例 计算图 19.4-7 所示的被动隔振系统的随机响应方差。

解: 1) 根据运动方程求系统的频率响应函数,其运动方程为

$$\ddot{\delta} + 2\zeta\omega_n \dot{\delta} + \omega_n^2 \delta = -\ddot{u}$$

$$\text{式中 } \delta = x - u, \omega_n^2 = \frac{k}{m}, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

对方程进行拉氏变换得

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \delta(s) = -\ddot{u}(s)$$

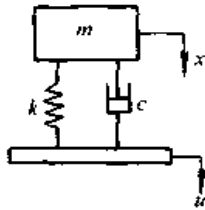


图 19.4-7 被动隔振系统

则系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{\delta(s)}{u(s)} = \frac{-1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

令 $s = i\omega$, 得相对位移 δ 对基础加速度 \ddot{u} 的频率响应函数为

$$H(\omega) = \frac{-1}{\omega_n^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega_n\omega}$$

2) 求随机激励的自功率谱密度函数, 设随机激励 \ddot{u} 是零均值白噪声, 则其自相关函数为

$$R_{\ddot{u}}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t)f(t+\tau)dt = s_0\delta(\tau)$$

将其代入式(19.4-27)得其自功率谱密度函数为

$$s_{\delta}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s_0\delta(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau = s_0$$

3) 求随机响应相对位移方差, 把 $H(\omega)$ 和 $s_{\delta}(\omega)$ 代入式(19.4-28)得随机响应的自功率谱密度函数为

$$s_{\delta\delta}(\omega) = \frac{s_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega_n^2\omega^2}$$

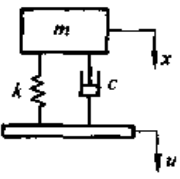
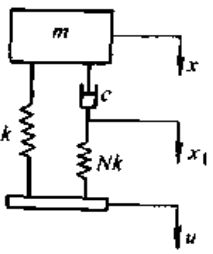
将其代入式(19.4-29)得随机响应相对位移方差为

$$\sigma_{\delta}^2 = \frac{\pi s_0}{2\zeta\omega_n^3}$$

2.2 单自由度随机隔振系统

在表 19.4-2 中列出了受白噪声激励的被动隔振系统的有关计算公式。

表 19.4-2 受白噪声激励的单自由度被动隔振系统

动力学模型	相对位移方差 σ_{δ}^2	隔振体加速度方差 $\sigma_{\ddot{x}}^2$	$\sigma_{\ddot{x}}^2$ 最小的最佳阻尼比	$\phi = \sigma_{\ddot{x}}^2 + \omega^2\sigma_{\delta}^2$ 最小的最佳阻尼比
	$\sigma_{\delta}^2 = \frac{\pi s_0}{2\zeta\omega_n^3}$	$\sigma_{\ddot{x}}^2 = \frac{\pi s_0\omega_n}{2\zeta}(1+4\zeta^2)$	$\zeta_{opt} = 0.5$	$\zeta_{opt}^* = \frac{\sqrt{\nu + \omega_n^4}}{2\omega_n^2}$
	$\sigma_{\delta}^2 = \frac{\pi s_0}{2\zeta\omega_n^3} \left[1 + \left(\frac{2\zeta}{N} \right)^2 \right]$	$\sigma_{\ddot{x}}^2 = \frac{\pi s_0\omega_n}{2\zeta} \times \left[1 + 4\zeta^2 \left(1 + \frac{1}{N} \right)^2 \right]$	$\zeta_{opt} = \frac{N}{2(1+N)}$	$\zeta_{opt}^* = \frac{\left(1 + \frac{\nu}{\omega_n^4} \right)^{1/2}}{2 \left[\left(1 + \frac{1}{N} \right)^2 + \frac{\nu}{\omega_n^4 N^2} \right]}$

说明 s_0 —基础加速度 \ddot{u} 的自功率谱密度函数; ν —权因子, 着重考虑 σ_{δ}^2 时 ν 取大值, 着重考虑 $\sigma_{\ddot{x}}^2$ 时 ν 取小

值; $\omega_n = \sqrt{k/m}$; $\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mk}}$; $\delta = x - u$

在随机隔振时, 一般要求隔振体的加速度方差 $\sigma_{\ddot{x}}^2$ 最小, 隔振体与基础的相对位移 δ 的方差不能小于允许值 $\sigma_{\delta 0}^2$ 。参照表 19.4-2, 按以下步骤进行计算。

1) 为使 $\sigma_{\ddot{x}}^2$ 最小, 选用表中的最佳阻尼比

ζ_{opt} 。

2) 为使 σ_{δ}^2 不小于允许值, 根据基础加速度 \ddot{u} 的自功率谱密度函数 s_0 和 $\sigma_{\delta 0}^2$, 用表中 σ_{δ}^2 的计算公式求出隔振系统的固有频率 ω_n 。

3) 根据隔振体的质量 m 和 c 算出的 ζ 和 ω_n ,

求出系统的刚度 $k = m\omega_n^2$, 和阻尼系数 $c = 2\zeta\sqrt{mk}$ 。

若要求同时考虑隔振体加速度方差 σ_v^2 和相对位移方差 σ_s^2 时, 则选用使综合指标 $\phi = \sigma_v^2 + \nu\sigma_s^2$ 最小的最佳阻尼比 ζ_{op}^* 。为此, 根据具体情况, 选用符合要求的权因子 ν , 并给参数 ω_n 和 N 定值, 按表 19.4-2 中的公式计算出 ζ_{op}^* 。

2.3 双层随机隔振系统

设图 19.4-8 所示的双层隔振系统的基础加速度 \ddot{u} 是自功率谱密度函数为 s_0 的白噪声, 则被隔振体 m_1 加速度的方差 σ_v^2 , 以及 m_1 与 m_2 的相对位移方差 σ_s^2 的计算公式为

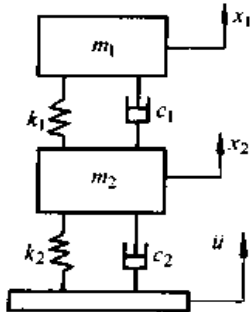


图 19.4-8 双层被动隔振系统

$$\sigma_v^2 = \pi\omega_1^4\omega_2s_0\frac{A}{C} \quad (19.4-30)$$

$$\sigma_s^2 = \pi\omega_2s_0\frac{B}{C} \quad (19.4-31)$$

式中 $A = \zeta_2\lambda(\mu + \lambda^2) + \zeta_1[\mu\lambda^2 + (1 + \mu)^2] + 4[\zeta_2^2\lambda + \zeta_1\zeta_2(\zeta_1\lambda + \zeta_2)(1 + \mu + \lambda^2) + \zeta_1^2\lambda^2(1 + \mu)] + 16\zeta_1^2\zeta_2^2\lambda(\zeta_1\lambda + \zeta_2)$

$$B = \zeta_2\lambda(\mu + \lambda^2) + \zeta_1[\mu\lambda^2 + (1 + \mu)^2] + 4\zeta_1\zeta_2 \left\{ \zeta_2(1 + \mu + \lambda^2) + \zeta_1\lambda \left[1 + \mu + \left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right)^2 \right] \right\}$$

$$C = 2\mu\omega_1\omega_2(\zeta_1\omega_2 + \zeta_2\omega_1)^2 + 2\zeta_1\zeta_2[\omega_2^2 - (1 + \mu)\omega_1^2]^2 + 8\zeta_1\zeta_2\omega_1\omega_2[\omega_1\omega_2(\zeta_2^2 + \zeta_1^2 + \mu\zeta_1^2) + \zeta_1\zeta_2(\omega_2^2 + \omega_1^2 + \mu\omega_1^2)]$$

$$\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}, \omega_2 = \sqrt{k_2/m_2},$$

$$\mu = m_1/m_2, \lambda = \omega_2/\omega_1,$$

$$\zeta_1 = c_1/2\sqrt{k_1m_1}, \zeta_2 = c_2/2\sqrt{k_2m_2}$$

根据 σ_v^2 和 σ_s^2 , 使用与单自由度随机隔振系统相同的方法, 进行隔振计算。由于计算公式中参数较多, 不能直接求出最佳参数的数学表达式, 因此, 要用数值算法进行随机隔振的分析与计算。

3 冲击隔离

当设备受到由碰撞、锻锤、震摇、跌落、爆炸等引起的冲击激励后, 其力、位移、速度和加速度将发生急剧变化, 可能使其工作失效甚至破坏, 冲击传到基础, 还可能损害周围的设备和建筑。为此, 进行冲击隔离。

3.1 冲击隔离原理

冲击隔离就是, 在比系统固有周期短得多的时间内, 进行冲击能量的释放、转换和传递的过程中, 通过冲击隔离器的变形, 把急剧输入系统的能量贮存起来, 再通过系统的自由振动用比固有周期多几倍的时间把能量平稳的释放出来。还利用冲击隔离器的阻尼, 消耗部分能量。使尖锐的冲击波以较缓和的形式作用在设备或基础上, 以减轻冲击的危害。

由于冲击含有零到无穷的频率分量, 因此, 不能使用对简谐振动有用的振动传递率来隔离计算。另外, 由于把冲击激励简化为矩形脉冲, 其自功率谱密度函数也是超越函数, 很难求得出冲击响应方差的解析式, 因此, 不能使用随机隔振的方法来解决冲击隔离问题。为此, 在本节里专题介绍冲击隔离。

冲击隔离同样分为主动和被动隔离, 以及单层和多层隔离。冲击激励函数一般分为阶跃型和脉冲型两大类, 通常用其峰值、持续时间和波形来表示。根据隔离系统在冲击作用下的运动规律进行隔离计算。

3.2 冲击的被动隔离

被动隔离用来减轻外部冲击引起的基础运动对机器设备的影响, 以减少设备中的应力与应变。冲击的被动隔离应满足以下要求, 即

1) 通过隔离器传递到受保护设备(或设备的某零部件)的最小振动量或最大力小于许用值, 确保被隔设备的安全运转。

2) 隔离器的最大变形量小于许用值, 使隔离器获得足够的工作空间。

3.2.1 单自由度冲击被动隔离系统

图 19.4-9 为单自由冲击被动隔离系统的力学模型, 根据被动隔离的要求, 需算出被隔体的最大加速度 \ddot{x}_m ; 被隔体与基础的相对位移, 即

隔离器的变形量最大值 δ_m 。其计算公式见表 19.4-3。

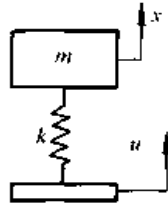


图 19.4-9 单自由度冲击被动隔离系统
对受速度阶跃 \dot{u}_m 激励的无阻尼非线性系统

的最大变形 δ_m 和最大加速度 \ddot{x}_m 的计算公式为

$$\delta_m = \frac{\dot{u}_m}{\omega_n} \sqrt{1 - \epsilon \left(\frac{\dot{u}_m}{\omega_n} \right)^2} \quad (19.4-32)$$

$$\ddot{x}_m = \dot{u}_m \omega_n \sqrt{1 + \frac{3}{2} \epsilon \left(\frac{\dot{u}_m}{\omega_n} \right)^2} \quad (19.4-33)$$

式中 ϵ 为非线性刚度的系数， ϵ 越大非线性越强，刚度为软特性 ϵ 为负，刚度为硬特性 ϵ 为正，由式中看出，若使用软特性的弹性元件会降低 \ddot{x}_m ，但使 δ_m 增加，宜综合考虑 \ddot{x}_m 和 δ_m 的数值，选取弹性元件的刚度及其特性。

表 19.4-3 无阻尼单自由度冲击被动隔离系统的计算公式

激励类型		最大变形 δ_m 和最大加速度 \ddot{x}_m
速度阶跃 \dot{u}_m 的激励		$\delta_m = \frac{\dot{u}_m}{\omega_n} \quad \ddot{x}_m = \dot{u}_m \omega_n$
峰值为 \dot{u}_m 的 加速度脉冲的激励	矩形脉冲	$\delta_m = \frac{\ddot{x}_m}{\omega_n^2} = \frac{2\dot{u}_m}{\omega_n^2} \quad (\omega_n \tau \geq \pi)$ $\delta_m = \frac{\ddot{x}_m}{\omega_n^2} = \frac{2\dot{u}_m}{\omega_n^2} \sin \frac{\omega_n \tau}{2} \quad (\omega_n \tau \leq \pi)$
	半正弦脉冲	$\delta_m = \frac{\ddot{x}_m}{\omega_n^2} = \frac{\dot{u}_m}{\omega_n^2} \frac{\omega_n \tau}{\pi} \sin \frac{2n\pi}{\omega_n \tau + \pi} \quad (\omega_n \tau \geq \pi)$ $\delta_m = \frac{\ddot{x}_m}{\omega_n^2} = \frac{\dot{u}_m}{\omega_n^2} \frac{2\pi \omega_n \tau}{\pi^2 - \omega_n^2 \tau^2} \cos \frac{\omega_n \tau}{2} \quad (\omega_n \tau \leq \pi)$
	正矢脉冲	$\delta_m = \frac{\ddot{x}_m}{\omega_n^2} = \frac{\dot{u}_m}{\omega_n^2} \frac{4\pi^2}{4\pi^2 - \omega_n^2 \tau^2} \sin \frac{\omega_n \tau}{2} \quad (\omega_n \tau \leq \pi)$

说明 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ —固有角频率， τ —脉冲的持续时间， n —正整数，取 n 值使相应正弦项在 $[0, \pi]$ 域内最大

3.2.2 二自由度冲击被动隔离系统

图 19.4-10 为二自由度冲击被动隔离系统的力学模型，根据隔离要求，需计算出隔离器的最大变形 δ_{1m} 和传递到被隔体的最大加速度 \ddot{x}_{2m} 或最大力 F_{2m} 。当系统受速度阶跃激励时的计算公式。见表 19.4-4。

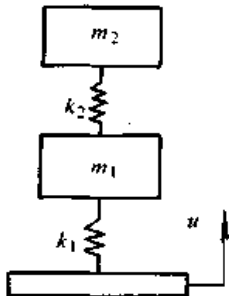


图 19.4-10 二自由度冲击被动隔离系统

冲击的被动隔离中，由于冲击直接作用在有弹性的隔离器上，可能使隔离器弹簧受冲压缩后，又产生回弹，使整个系统离开冲击作用点，

表 19.4-4 无阻尼二自由度冲击隔离系统受速度阶跃激励的计算

系统类型	计算公式
$m_1 \gg m_2$ 无弹性回跳	$\delta_{1m} = \frac{\dot{u}_m}{\omega_{n1}}$ $\ddot{x}_{2m} = \frac{\dot{u}_m \omega_{n2}}{1 - \lambda}$
$m_1 \gg m_2$ 弹性回跳	$\delta_{1m} = \frac{\dot{u}_m}{\omega_{n1}}$ $F_{2m} = \frac{k_2 \dot{u}_m}{\omega_{n2}(\lambda - 1)} \sin \frac{2n\pi}{\lambda + 1} \quad (0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_{n1}})$ $F_{2m} = \frac{2k_2 \dot{u}_m \cos \frac{\pi\lambda}{2}}{\omega_{n2}(1 - \lambda^2)} \quad (\frac{\pi}{\omega_{n1}} \leq t)$
m_1 与 m_2 有 相同数量级 无弹性回跳	$\delta_{1m} = \frac{\dot{u}_m}{\omega_{n1}} \frac{1 + \lambda(1 + a)}{\sqrt{(\lambda + 1)^2 + a\lambda^2}}$ $\ddot{x}_{2m} = \frac{\dot{u}_m \omega_{n2}}{\sqrt{(\lambda - 1)^2 + a\lambda^2}}$

说明 \dot{u}_m —速度阶跃量， $\omega_{n1} = \sqrt{k_1/m_1}$ ， $\omega_{n2} = \sqrt{k_2/m_2}$ ， $\lambda = \omega_{n2}/\omega_{n1}$ ， $a = m_2/m_1$ ，其它参数见图 19.4-10 及表 19.4-3 的说明

这叫做“弹性回跳”，如果不产生回弹，系统仍在冲击作用点振动，这叫做“无弹性回跳”。实际系统受冲击后，既非完全弹性回跳，也非完全无弹性回跳。而是介于二者之间。计算时，可按较近似的一种情况进行。

3.3 冲击的主动隔离

主动隔离用来减轻机器本身产生的冲击力对支承、基础、基础周围的设备与建筑物的影响，以减小支承或基础的应力与应变，减小通过基础传到周围的冲击波。冲击的主动隔离应满足以下要求，即

1) 通过隔离器传递到基础（或支承）的最大力小于许用值。

2) 隔离器的最大变形量小于应用值。

3.3.1 单自由度冲击主动隔离系统

图 19.4-11 为单自由度冲击主动隔离系统的力学模型。设其上的冲击力为 $F(t)$ ，冲击力作用时间为 τ ，则此力所产生的冲量为

$$I = \int_0^{\tau} F(t) dt \quad (19.4-34)$$

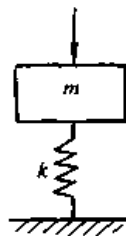


图 19.4-11 单自由度冲击主动隔离系统

根据主动隔离的要求，应算出隔离器的最大变形量 δ_m 和传递到基础的最大力 F_m ，其计算公式见表 19.4-5。

表 19.4-5 无阻尼单自由度冲击主动隔离系统的计算公式

力脉冲形状	最大变形量 δ_m 和最大力 F_m
$\tau < \frac{T}{3}$ 的脉冲	$\delta_m = \frac{I}{\omega_n m}, F_m = k\delta_m$
矩形脉冲	$\delta_m = \frac{2I}{k\tau} \quad (0 \leq t \leq \tau)$ $\delta_m = \frac{2I}{k\tau} \sin \frac{\omega_n \tau}{2} \quad (t \geq \tau)$ $F_m = k\delta_m$

续表 19.4-5

力脉冲形状	最大变形量 δ_m 和最大力 F_m
半正弦脉冲	$\delta_m = \frac{I\pi}{2m\omega_n(\omega_n\tau - \pi)} \sin \frac{2n\pi}{\omega_n\tau + \pi} \quad (0 \leq t \leq \tau)$ $\delta_m = \frac{I\pi^2}{m\omega_n(\pi^2 - \omega_n^2\tau^2)} \cos \frac{\omega_n\tau}{2} \quad (t \geq \tau)$ $F_m = k\delta_m$

说明 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ， I —冲量，按式 (19.4-34) 计算， τ —力脉冲作用时间， T —系统固有周期，其他参数见图 19.4-11 及表 19.4-3 的说明

3.3.2 二自由度冲击主动隔离系统

图 19.4-12 为二自由度冲击主动隔离系统的力学模型，设其上的冲击力为 $F(t)$ ，冲击力的作用时间为 τ ，则此力产生的冲量按式 (19.4-34) 计算。根据主动隔离的要求，应算出隔离器的最大变形 δ_{2m} 和传递到基础的最大力 F_{1m} 。由于 $F_{1m} = k_1\delta_{1m}$ ，故只需算出 δ_{1m} 即可。若把图 19.4-12 中的 m_1 和 k_1 视为另一层隔离装置，计算出 m_1 和 k_1 ，则得双层隔离的效果。

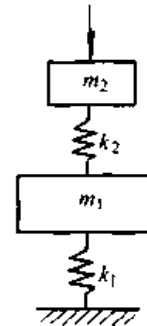


图 19.4-12 二自由度冲击主动隔离系统

当 $m_2 \ll m_1$ 时，此二自由度系统用两个单自由度系统来近似。其运动方程和最大变形量的计算公式见表 19.4-6。

当 $m_1 \approx m_2$ 时，运动相互耦合，隔离系统应按二自由度系统计算，对无阻尼系统，其运动方程为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_1 + \omega_{n1}^2 \delta_1 &= \frac{m_2}{m_1} \omega_{n2}^2 \delta_2 \\ \ddot{\delta}_2 + \omega_{n2}^2 \delta_2 &= -\ddot{\delta}_1 \end{aligned} \right\} \quad (19.4-35)$$

对于作用时间 τ 很小的力脉冲，冲击力对系统的作用可用阶跃量为 \dot{u}_m 的速度阶跃来近似。则方程 (19.4-35) 的初始条件为： $t=0, \delta_1 = \delta_2 = 0, \dot{\delta}_1 = 0, \dot{\delta}_2 = \dot{u}_m = I/m_2$ 。解方程 (19.4-35) 得

表 19.4-6 无阻尼二自由度冲击主动隔离系统 ($m_2 \ll m_1$) 的计算

计算内容	力脉冲形状	
	$\tau \leq \frac{T}{3}$ 的脉冲	半正弦形脉冲
m_2 的运动方程及初始条件	$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = 0$ $t = 0 \text{ 时, } x_2 = 0,$ $\dot{x}_2 = \frac{I}{m_2}$	$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = \frac{\pi I}{2\tau} \sin \frac{\pi}{\tau} t \quad (0 \leq t \leq \tau)$ $m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = 0 \quad (t \geq \tau)$ $t = 0 \text{ 时, } x_2 = \dot{x}_2 = 0$
隔离器的最大变形 δ_{2m}	$\delta_{2m} = \frac{I}{\omega_{n2} m_2}$	$\delta_{2m} = \frac{I/m_2 \omega_{n2} \sin \frac{2\eta\pi}{\omega_{n2}\tau - 1}}{\frac{\omega_{n2}\tau}{\pi} - 1} \quad (0 \leq t \leq \tau)$ $\delta_{2m} = \frac{I/m_2 \omega_{n2}}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}\tau}{\pi}\right)^2} \cos \frac{\omega_{n2}\tau}{2} \quad (t \geq \tau)$
m_1 的运动方程及初始条件	$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = k_2 \delta_2$ $t = 0 \text{ 时, } x_1 = \dot{x}_1 = 0$	$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 = k_2 \delta_2$ $t = 0 \text{ 时, } x_1 = \dot{x}_1 = 0$
基础或双层隔离器的最大变形 δ_{1m}	$\delta_{1m} = \frac{I}{\frac{m_1 \omega_{n1}}{\omega_{n2} - 1} \sin \frac{2\eta\pi}{\omega_{n2}} + 1}$	$\delta_{1m} = \left(\frac{I}{m_1 \omega_{n1}}\right) \left(\frac{\omega_{n1}\tau}{\pi}\right) \left[\frac{\frac{\pi}{\omega_{n1}\tau} - \cos \frac{\omega_{n1}\tau}{2}}{\left(\frac{\omega_{n1}\tau}{\pi}\right)^2 - 1} + \frac{\frac{\pi}{\omega_{n2}\tau} \cos \frac{\omega_{n1}\tau}{2}}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}\tau}{\pi}\right)^2} \right]$

说明 $\omega_{n1} = \sqrt{k_1/m_1}$, $\omega_{n2} = \sqrt{k_2/m_2}$, 其他符号与表 19.4-5 相同

隔离器的最大变形 δ_{2m} 和传递到基础上的最大力 F_{1m} 为

$$\delta_{2m} = \frac{I}{m_2 \omega_{n2}} \left[1 + \frac{\alpha}{(1+\lambda)^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (19.4-36)$$

$$F_{1m} = I \omega_{n1} [(1-\lambda)^2 + \alpha]^{-\frac{1}{2}} \quad (19.4-37)$$

式中 $\omega_{n1} = \sqrt{k_1/m_1}$, $\omega_{n2} = \sqrt{k_2/m_2}$,
 $\lambda = \omega_{n1}/\omega_{n2}$, $\alpha = m_2/m_1$ 。

3.4 阻尼对冲击隔离的影响

当考虑冲击隔离系统的阻尼时, 其计算比较复杂, 这里不介绍计算方法, 仅介绍根据计算得到的定性结论。

1) 在具有黏性阻尼的单自由度冲击隔离系统里, 当其受速度阶跃冲击阻尼比 $\zeta = 0 \sim 0.5$ 时, 通过隔离器传递的最大加速度 \ddot{x}_m , 都比无阻尼时要小, 对冲击隔离有利。当 $\zeta > 0.5$ 时, 随着 ζ 的增加, \ddot{x}_m 也越来越增加, 对冲击隔离有害。根据阻尼吸收冲击能量的大小及其它因素, 宜选用 $\zeta = 0.35$ 左右。若系统受脉冲激励, 增加阻尼会降低 \ddot{x}_m , 但在脉冲持续时间较长时,

阻尼的作用较小, 当 $\omega_n \tau < 1.5$ 时, 即在脉冲持续时间 τ 较短时, 宜选用 $\zeta = 0.26$ 左右。

2) 在具有黏性阻尼的二自由度冲击隔离系统里, 当 $\omega_{n2}/\omega_{n1} < 2$ 时, 增加阻尼可降低受速度阶跃传递的最大加速度 \ddot{x}_{2m} , 对冲击隔离有利。当 $\omega_{n2}/\omega_{n1} > 2$ 时, 增加阻尼, 则得相反的效果, 对冲击隔离有害。

综上所述, 阻尼对冲击隔离在一定条件下是有利的, 在另一条件下是有害的。因此, 在有利条件下, 忽略阻尼不予计算, 既简化了计算又得到一个安全的余地。而在有害条件下, 忽略阻尼不予计算, 则得到一个不安全的因素。

4 隔振设计及常用隔振器

4.1 隔振设计步骤

1) 确定被隔设备的基本参数 为进行隔振设计, 需要确定设备的尺寸、质量、质心和中心主惯轴的位置, 以及可能安装隔振器的位置。

2) 确定振源 通过计算、测量或统计资料

确定被隔设备可能产生或受到何种振动或冲击。若为简谐振动，则要确定振动量的大小、方向、频率或频谱；若为平稳随机过程，则要确定随机激励的时间样本函数及其自功率谱密度函数；若为冲击，则要确定冲击激励函数的峰值、持续时间及波形。

3) 确定隔振目标 根据被隔设备工作性能及环境的要求，确定设备允许的最大振动量或能承受的最大力的幅值。进而确定经隔振后应达到的简谐隔振的振动传递率、随机隔振的随机响应方差、冲击隔离的最大变形量和最大力。

4) 计算隔振系统的固有频率和阻尼比 对简谐隔振、随机隔振和冲击隔离，分别使用第 4 章 1、2 和 3 节的计算公式，算出隔振系统应有的固有频率和阻尼比。若一个计算公式中有两个或两个以上的未知数，则用数值计算法，预设一

个或一组数进行计算，再反过来经过验算确定最后数值。

5) 计算隔振器的刚度和阻尼系数 根据已知数据和算出的固有频率和阻尼比，计算出隔振器应具有刚度和阻尼系数。

6) 选择或设计隔振器 选择或自行设计一个能满足以上要求及安装条件的隔振器，并验算隔振器能承受的最大力及需要最小活动空间，最后得到一个既能获得隔振效果，又能正常工作的隔振器。

4.2 常用隔振器及隔振材料

在表 19.4-7 中列出了几种常用隔振器，供选择隔振器时参考使用，在表 19.4-8 中列出了决定隔振性能的隔振材料，供自行设计隔振装置时使用。

表 19.4-7 常用隔振器的类型和主要特性

序号	类型	代号	简图	主要特性
1	平板形	JP		额定载荷为 4.41 ~ 153.3 N，结构紧凑，联结方便。竖直方向的固有频率为 13.5 ~ 15 Hz，水平方向的固有频率为 30 ~ 35 Hz
2	碗形	JW		
3	加固形	JG		能承受高达 323.4 ~ 980 N 的载荷，当隔振器橡胶损坏时，能防止设备与基础脱开，因此可用于支承在水平、倾斜的竖直基础上的设备。其中 JF-A 形耐油，JF-B 形允许在润滑油、柴油和海水长期浸泡条件下工作，适用环境温度为 -5 ~ +70℃
4	封闭形	JF (JF-A) (JF-B)		

续表 19.4-7

序号	类型	代号	简图	主要特性
5	剪切形	JJQ		刚度小, 阻尼大, 支承稳定, 额定载荷为 98 ~ 1176 N
6	三向等刚度	JPQ		三个方向等刚度, 竖直方向固有频率为 7 ~ 12 Hz, 水平方向为 8 ~ 12.5 Hz, 额定载荷为 980 ~ 9800 N
7	支柱形	JZ		水平方向固有频率为 6 ~ 7 Hz, 竖向为 11 ~ 13 Hz, 大多用于水平方向的隔振
8	支脚形	JJ		结构简单、成本低, 额定载荷为 98 ~ 588 N
9	框架形	JK		额定载荷为 147 ~ 245.3 N, 用于无线电设备的整机振动与冲击的隔离
10	球形	JQ		水平和竖直方向固有频率相近, 平均为 11 ~ 12 Hz 应力分布均匀, 额定载荷为 19.6 ~ 78.5 N

续表 19.4-7

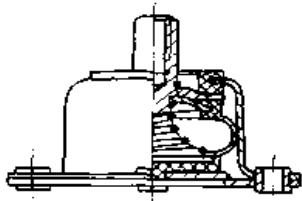
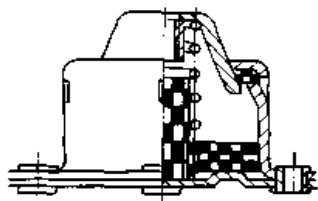
序号	类型	代号	简图	主要特性
11	空气阻尼	JQZ		可通过改变孔径来调节阻尼系数, 只能承受竖向载荷, 额定载荷为 3.92 ~ 147.15 N
12	金属网阻尼	JWL		性能稳定, 不会老化, 用于环境恶劣的场所, 能承受较大的线性过载, 额定载荷为 14.7 ~ 147.15 N

表 19.4-8 隔振材料的主要特性和应用范围

类型	主要特性	应用范围	注意事项
橡胶	承载能力低, 刚度大, 阻尼系数为 0.05 ~ 0.15, 耐温范围为 -50 ~ +70℃, 易于成形, 能自由的选取三个方向刚度	多用于高频隔振, 和金属弹簧配合使用效果好。可做成承压型或承剪型, 不宜受拉	承压型隔振器应保证橡胶能自由地向四周膨胀, 相对变形量应控制在 10% ~ 20%, 避免日晒和油、水侵蚀
金属弹簧	承载能力大, 刚度小变形量大, 阻尼系数为 0.005 左右, 水平刚度较竖直刚度小, 易晃动, 价廉	用于被动隔振和激振力大的主动隔振, 由于易晃动, 不宜用于精密设备的隔振	当需要较大阻尼时, 可增加阻尼器或与橡胶等阻尼较大的材料联合使用
钢丝绳	大幅振动时各股钢丝间发生摩擦, 能吸收较大的能量, 还能衰减隔振器本身的驻波效应	隔振效果较好, 特别适用于大幅振动的隔离, 对高、低频振动的隔离效果较差	由多股不锈钢丝缠绕而成, 根据需要可改变其直径、股数、长度、圈数和缠绕形成
空气弹簧	刚度由压缩空气的内能决定, 阻尼系数为 0.15 ~ 0.5, 使用寿命长, 还有隔声效果	用于车辆及特殊要求的精密设备的隔振。可制成具有任意非线性特性的隔振器	需有衡压空气源, 以保持压力稳定, 当环境温度超过 70℃ 时, 不宜采用
软木	承载能力小, 质轻, 有一定弹性, 阻尼系数为 0.02 ~ 0.12, 有蠕变效应	用于主动隔振, 或与橡胶、金属弹簧组合时作辅助隔振材料	应力控制在 98 kPa 左右, 防止软木向四周膨胀, 防止其吸水、吸油
泡沫橡胶	刚度小, 富有弹性, 承载能力小, 阻尼系数为 0.1 ~ 0.15, 性能不稳定, 易老化	用于小型仪器仪表的被动隔振	许用应力低, 相对变形控制在 20% ~ 35% 以内, 严禁日晒雨淋, 防止与酸、碱、油接触
泡沫塑料	刚度小, 承载能力低, 性能不稳定, 易老化	用于小型仪器仪表的被动隔振	工作应力控制在 19.6 kPa 左右
毛毡	阻尼大, 弹性小, 在干、湿反复作用下易丧失弹性, 阻尼系数为 0.06 左右	多用于冲击隔离	厚度一般取 (6.5 ~ 7.5) × 10 ⁻³ m, 工作环境要求温湿度变化较小
其他	木屑、玻璃纤维、细砂等形状不固定的隔振材料, 价廉, 隔振效果差	用于设备与地面间的隔振或冲击隔离, 一般作为辅助材料	使用时应放置在适当的容器或凹坑内

4.3 隔振器的选择与布置

4.3.1 隔振器的选用原则

隔振器的选择原则是，在隔振效率达到隔振设计要求的基础上，使隔振材料适宜，结构紧凑尺寸尽量小，形状合理符合安装要求，寿命长，成本低。具体注意以下问题。

- 1) 根据设计要求及隔振对象选用线性还是非线性，附加还是不附加阻尼的隔振器。
- 2) 根据隔振器的使用环境，选择隔振材料的类型。
- 3) 根据安装空间并考虑装拆方便，选择隔振器的形状。
- 4) 根据隔振器总刚度和总阻尼的要求，及被隔设备的外形尺寸、质心位置，确定隔振器的数量。

4.3.2 隔振器的布置与安装

为了提高隔振效果，隔振器的布置应减少各个自由度振动间的耦合，并使各个自由度的固有频率接近。图 19.4-13 为常见的布置形式，参看

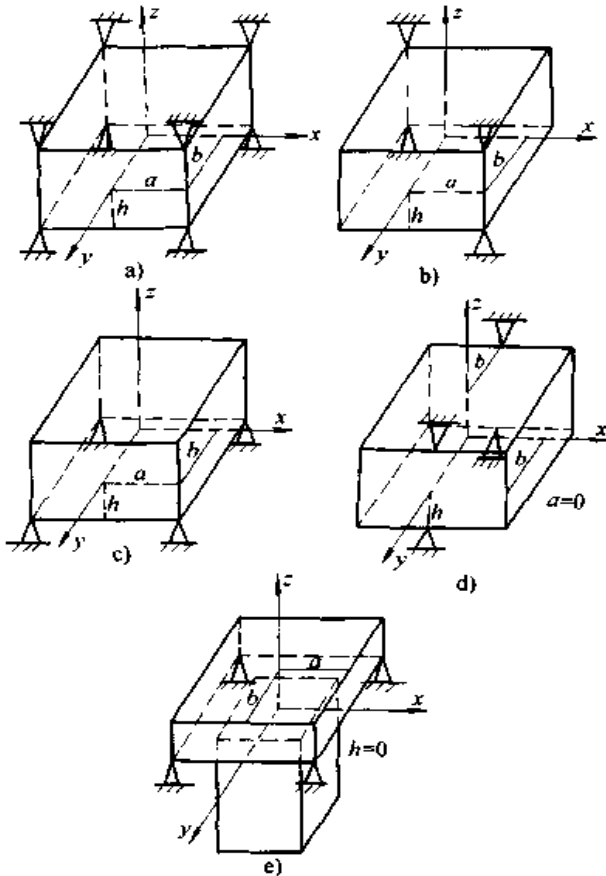


图 19.4-13 几种常用的隔振器的布置形式

图应注意以下布置中的问题。

- 1) 选用线性隔振器，且各个方向上的总刚度相等，即 $K_x = K_y = K_z$ 。
- 2) 隔振器尽可能安装在设备重心所在的平面内（图中 xOy 平面），即使 $h=0$ 。
- 3) 隔振器的布置对称于设备的重心。
- 4) 当设备从其平衡位置沿坐标轴平移一距离时，各隔振器对设备的作用合力应通过设备的重心，当设备绕某一坐标轴旋转时，各隔振器对设备的作用力的合成应为一力偶，力偶作用平面垂直于该坐标轴。

工程中常用支承式和悬挂式两种安装方法，见图 19.4-14。根据设备振动的方向，设备的特点，以及安装位置选择合理的安装。

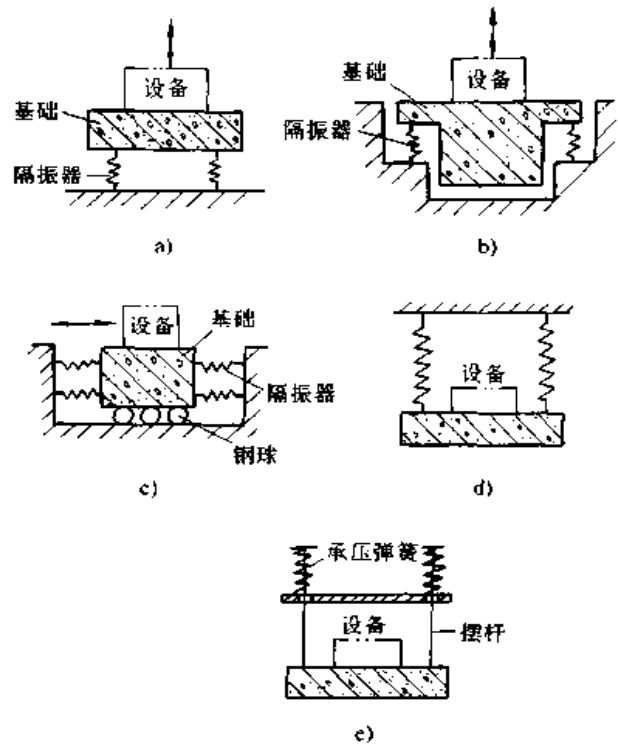


图 19.4-14 几种隔振器的安装简图

第5章 振动的主动控制

1 概述

以上各章介绍的振动控制技术，均属不需外界能源的“无源控制”，即被动控制。其结构简单，易于实现，经济性好，而且经过长期使用的不断改进，其使用可靠性好。但是，不能适应新技术发展的要求，不能有效地或根本不可能控制越来越需要控制的超低频振动、参数振动、环境变化的振动、高阶模态振动等，其使用范围受到局限。主动控制，又称“有源控制”。

1.1 主动控制的原理

振动的主动控制就是由振动系统外部输入能量，控制振动系统的参数（质量、刚度、阻尼），或控制激振力，或控制原有的、附加的减振隔振装置的参数，达到预定的控制目标。

图 19.5-1 为主动控制系统的方框图。其中

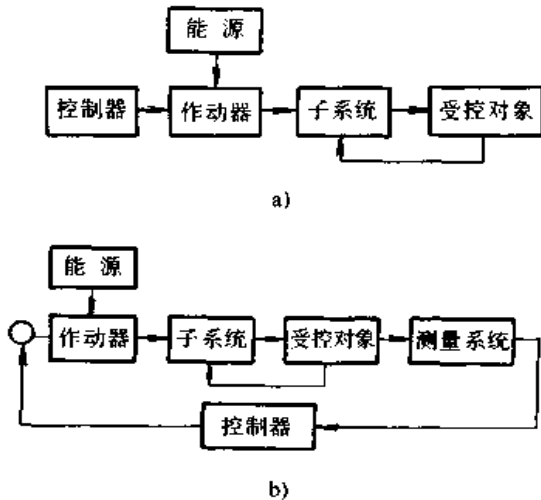


图 19.5-1 振动主动控制方框图

a) 开环控制 b) 闭环控制

a 图为开环控制，根据控制要求预先设计好的控制律由控制器发出指令，驱动作动器（也称作动机构）直接或通过子系统施加作用于受控对象，达到振动控制的目的。b 图为闭环控制。测量系统测出受控对象的振动信息，经适调放大后，传至控制器，控制器实现所需的控制律，发出驱动

作动器的指令。作动器通过附加子系统或直接施加作用于受控对象，达到振动控制的预定要求。

在被动控制的基础上，主动控制使用振动信号的测量、分析、反馈和跟踪等先进技术，进行参数识别、系统建模和闭环控制。利用材料压电、磁致伸缩、形状记忆及电流变流体等特性，得到结构紧凑、动作灵巧的各式作动器，还引用能跟随外部环境和功能要求的变化而改变自身的几何形状和固有特性的智能机构。采用自动控制中的最优控制、自适应控制、预测控制……等控制律，设计出控制器。从而使振动的主动控制成为由动力学、自动控制学、材料学、计算机及测试技术合为一体的高新技术。

由上看出，主动控制较之被动控制具有，控制精度高、控制频域宽、适应性强、使用范围广，以及对被控对象的结构改动不大等优越性；因而更能抑制低频、高阶的模态振动，更大的降低结构的动载荷和对外扰的响应，以及能实现在环境变化和结构参数变化的要求下，达到控制能量最小，控制时间最短和控制效果最好等预定的控制目标。当然，由于是新发展的技术，故还有：结构复杂、成本高、环节多可能失效以及具体实现所要求的条件多等问题需进一步研究解决。

1.2 振动主动控制的类型

根据不同的分类方法，主动控制的类型及各类的特点见表 19.5-1。

1.3 主动控制系统的组成

主动控制系统由以下环节配套组成。

1) 受控对象 产品、结构或系统的统称。可以是单自由度、多自由度系统以及无限多自由度的弹性体。

2) 作动器 产生控制力（或力矩）的机构。控制力可直接或通过附加子系统间接地作用在受控对象上。作动器有液动式、气动式、电动式、电磁式和压电式等各种类型，例如：①对液压或气动伺服阀，施加控制信号，令其改变进、出活

表 19.5-1 振动主动控制的类型和特点

类 型	特 点
按控制目的分类	动力响应主动控制 在特定的外扰作用下,受控制对象的动力响应达到预定要求。具体有:直接法,即以控制对象的动力响应为目标函数来设计控制律;间接法,即通过控制模态频率、阻尼或振型来达到动力响应的预定目标
	动稳定性主动控制 控制被控对象的各阶模态的稳定程度,使原来不稳定的模态变成稳定的模态,或使原来稳定的模态具有所要求的稳定裕度
按控制论原理分类	开环控制 对激振量与响应量的关系已知的受控对象,可使用如图 19.5-1a 所示的开环控制,又称程序控制。其优点是简单经济,控制系统稳定。由于控制律是预先设计好的,与受控对象的运动状态无关,因此,不适用于有外界干扰和参数不稳定的受控对象
	闭环控制 对外扰和参数变化或不确定的受控对象,可使用如图 19.5-1b 所示的闭环控制,也称反馈控制。利用受控对象的振动状态或闭环输出量作为反馈信号,进行实时的外加控制,前者称为状态反馈,后者称为输出反馈,得到相应的控制律
按控制量分类	激振力控制 对受控对象施加频率、幅值和相位可变化的控制力,以求抵消原激振力,使振动响应减小。适用于原有激振力不能改变或情况不明的场合
	受控对象参数控制 改变受控对象的质量、刚度或阻尼等参数,从而改变其动态性能以减小振动的响应,或提高其稳定性。也称主动结构参数修改

塞腔的液流或气流,从而推动活塞移动,产生控制力。②对恒定磁场中的动线圈通过交变电流,利用二者的相互作用产生电动控制力。③对绕于电磁铁上的线圈通过交变电流,产生电磁控制力作用于铁质材料的受控对象上。④对具有逆压电效应的压电材料,施加交变电压,从而产生机械应变得到控制力。

3) 测量系统 由传感器、适调器、放大器以及滤波器等组成的测量系统,把受控对象的运动状态转变为输送到控制器各环节的信息。常用的传感器有:压电式、压阻式加速度计;电磁式速度传感器,以及光电式、电位计式位移传感器等发电型和电参数变化型两大类。

4) 控制器 把测量系统输送来的振动信息(闭环)或把预先设计好的程序(开环)转变为驱动作动器的指令,亦即控制律的执行器。控制律可由模拟电路或模拟电子计算机实现模拟控制,或由数字计算机实现数字控制。

5) 能源 供给作动器工作的外界能量,有电源、气源、液压油源等。

6) 附加子系统 当作动器不能直接作用在受控对象时,就先施力或运动于附加子系统,再通过附加子系统的运动产生施加于受控对象的控制力。例如,抑制飞机机翼颤振的主动控制系统中,其控制面就是附加子系统。当然,附加者,不一定是必不可少的。

2 振动主动控制模型的建立

2.1 建模的意义

描述主动控制各环节及整个系统物理特性的物理模型和在物理模型基础上建立的数学模型,是分析、设计、监测、预报和控制实际系统的关键。振动主动控制的设计就先从建模开始,随后确定系统的设计要求,选择设计方法进行设计,通过仿真或模型试验来判别所设计的控制系统是否符合性能要求。因此,建模是整个控制设计的前提,又与设计方法对系统品质的评价模式密切相关。

主控系统的物理特性包括:受控对象及其他环节各机械结构的动力学特性;气、液作动器的流体力学特性;电、磁、光等各式传感器、作动

器及控制品的电学、光学特性。对机械振动的主动控制，其结构系统的动力学模型是建模的主题。

求解物理问题，必须建立数学模型。数学模型就是描述物理模型物理特性的数学表达式。同一物理模型可以有不同的数学模型，取决于建模的目的与手段。针对系统参数的特征，可建立线性或非线性的、定常或时变的、确定性或随机性的数学模型。从信号处理出发，可建立用微分方程描述的连续时间数学模型，或用差分方程描述的离散时间数学模型。由输入、输出关系可建立状态空间的数学模型或传递函数的数学模型。

2.2 结构系统的动力学模型

由若干零部件，通过各种联结方式组合成为一个结构系统。由于这些基本构件的形状、尺寸、材料、承载以及联结形式不同，其动力学特性也不同，建立的动力学模型也不同。结合建模的目的选用以下模型。

1) 集总参量模型 将结构系统简化成由若干个质量、弹簧和阻尼所组成的振动系统的模型。运动量只依赖于时间，而与空间无关，可用常微分方程来描述。其自由度是有限的，计算相对简单，但与实际系统相差较大。

2) 连续参量模型 由无数个质量通过弹性和阻尼联结成一个连续系统。运动量既与时间有关又与空间有关，必须用偏微分方程描述。这种模型具有无限个自由度，计算较困难，但较真实地描述了实际系统的动态性能。

3) 离散参量模型 常用有限元模型将无限个自由度的连续参量模型，离散为有限个自由度的系统。有限元素可以是杆、梁、板和壳单元。对于具有规则几何形状和简单边界条件的结构，如桥梁、水坝、楼板、平台等，可用有限条法来建立结构的离散参量模型。这种模型可以降低维数、减少方程数、矩阵带窄，从而减少计算工作量。

4) 子结构模型 先将大型复杂结构按总成、部件或制造单元划分成自由度较少的子结构，再用分析、试验和模态综合技术，建立起由各子结构组成并具有整体结构动态性能的子结构模型。可以分别用不同方法，在不同地点得到各子结构

的动态性能，而且某子结构重新修改后对整体结构的影响易于计算。这种模型适用于对大型复杂结构作精细分析时，求解成千上万个自由度特征值的问题。

5) 结构中界面的动力学模型 大多数界面为焊接、铆接、螺栓联接及各种运动副的机械式的固体与固体的联接界面，当考虑构件周围介质的作用时，还有机翼与气体、船舶与水的流-固耦合界面，以及电磁-弹性耦合界面等，参考有关文献予以建模、解模。

2.3 连续控制系统的数学模型

1) 状态空间模型 根据系统的微分方程推导出确定其内部关系的数学表达式，由状态方程和输出方程组成。

对非线性系统或环节，其状态方程和输出方程分别为

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t)]; \quad (19.5-1a)$$

$$y(t) = G[x(t), u(t)]; \quad (19.5-1b)$$

式中， $x(t)$ 为 n 维状态矢量， $u(t)$ 为 l 维控制（又称输入）矢量， $y(t)$ 为 m 维输出矢量， F 表示矢量函数关系， G 表示输出与输入及状态量之间的矢量函数关系。

对线性系统或环节，其状态方程和输出方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (19.5-2a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (19.5-2b)$$

式中 A —— $n \times n$ 阶系统矩阵；

B —— $n \times l$ 阶控制（或输入）矩阵；

C —— $m \times n$ 阶输出矩阵；

D —— $m \times l$ 阶传递矩阵，在很多情况下， $D=0$ 。

如果 A 、 B 、 C 、 D 与时间 t 有关，则为时变系统，否则为定常系统。

2) 输入-输出模型 确定系统输入-输出之间外部关系的数学表达式。

① 频域表达式，又称传递函数表达式。对式 (19.5-2) 进行 Laplace 变换，即可求得初始条件为零时的传递函数为

$$H(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (19.5-3)$$

式中 $H(s) = y(s)/u(s)$ ；

I 为单位矩阵。

$y(s)$ 和 $u(s)$ 分别为 $y(t)$ 和 $u(t)$ 的拉普拉斯变换。若对式 (19.5-2) 进行傅里叶变换, 或直接令式 (19.5-3) 中的 $s=j\omega$ (ω 为频率), 可得系统的频响函数为

$$H(\omega) = C(j\omega I - A)^{-1}B + D \quad (19.5-4)$$

②时域表达式, 又称脉冲响应函数表达式, 即以下卷积公式为

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau)u(\tau)d\tau \quad (19.5-5)$$

式中 $h(t)$ ——脉冲响应函数;
 $u(t)$ ——外部作用函数;
 $y(t)$ ——系统的响应。

2.4 离散控制系统的数学模型

离散控制又称采样控制、数字控制。其输入、输出信号总是以序列形式出现的, 即 $u(k)$ 、 $y(k)$, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。当给定输入和输出值序列的初值后, 就可用递推关系计算出所需的输出值, 很容易在数字计算机上实现。

(1) 状态空间模型

$$x(k+1) = A_T x(k) + B_T u(k) \quad (19.5-6a)$$

$$y(k) = C_T x(k) + D_T u(k) \quad (19.5-6b)$$

式中 $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $u(k)$ 分别为时间 $t=kT$ ($k=0, 1, 2, \dots$) 所确定的状态矢量、输出矢量、

控制矢量; T 为采样周期; A_T 、 B_T 、 C_T 、 D_T 分别为时间 $t=kT$ 所确定的矩阵。

(2) 输入-输出模型

①频域表达式

$$H(z) = C_T(zI - A_T)^{-1}B_T + D_T \quad (19.5-7)$$

式中 $H(z) = y(z)/u(z)$, $y(z)$ 、 $u(z)$ 分别为 $y(t)$ 、 $u(t)$ 的 z 变换, z 为移位算子 $z = e^{sT}$ 。

②时域表达式

$$y(k) = \sum_{l=0}^{k-1} h(l)u(k-l) \quad (19.5-8)$$

式中 $u(k)$ 为任意输入序列; $y(k)$ 为系统的输出; L 为权序列的长度或权系数个数, 也对应于 FIR 滤波器的阶数或系数的个数, 且 L 的大小决定该表达式的精度。

2.5 闭环控制系统的状态空间数学模型

由各环节组成的闭环控制系统, 用连续控制状态空间表达的数学模型, 见图 19.5-2 所示的方框图。从图知各环节的联接条件为

$$y_a = u_0, y_0 = u_s, y_s = u_c, y_c = -u_a$$

根据联接条件得整个系统的状态方程和输出方程分别为

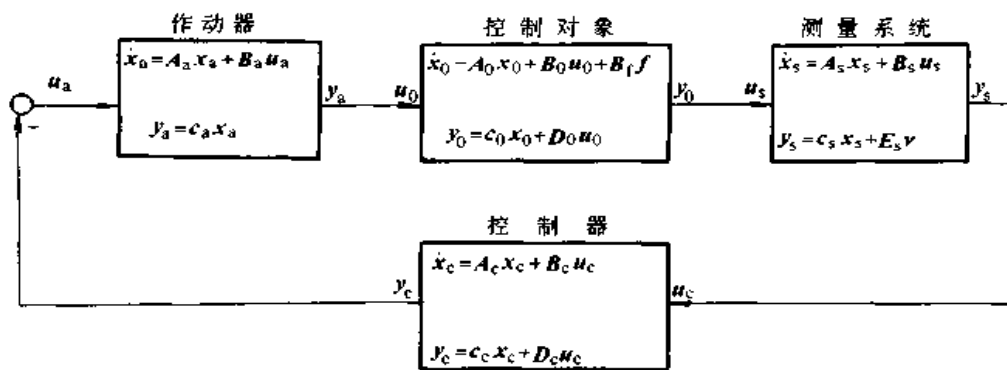


图 19.5-2 闭环控制系统的状态空间方框图

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_0 \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s & 0 & -B_s D_c C_s & -B_s C_c \\ B_0 C_a & A_0 & 0 & 0 \\ B_s D_0 C_a & B_s C_0 & A_s & 0 \\ 0 & 0 & B_c C_s & A_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_0 \\ x_s \\ x_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ B_f \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} f + \begin{Bmatrix} -B_s E_s \\ 0 \\ 0 \\ B_c E_s \end{Bmatrix} v \quad (19.5-9a)$$

$$\begin{Bmatrix} y_a \\ y_0 \\ y_s \\ y_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_a & 0 & 0 & 0 \\ D_0 C_a & C_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_s & 0 \\ 0 & 0 & D_c C_c & C_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_a \\ x_0 \\ x_s \\ x_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_s \\ D_c E_c \end{bmatrix} v \quad (19.5-9b)$$

式中 f 为控制对象的外扰输入, v 为测量系统的噪声干扰, x_a, x_0, x_s 及 x_c 分别为作动器、控制对象、测量系统及控制器的状态变量, y_a, y_0, y_s 及 y_c 分别为上述环节的输出量。

2.6 建模的准则与方法

模型实际上是系统本质特性的表示, 又是为应用目的而建立的。因此, 建模既要符合其应用目的, 又应表示出相应的系统本质特性。由于建模要为进一步决策提供依据, 所以建模准则可以表达为模型应该具有的应用性。

简言之, 模型的应用性, 即是模型的精度与应用目的相吻合, 而且求解模型应该是低成本的。为此, 在建模时应在精度与成本之间进行最佳选择。

建模的常用步骤为

1) 根据对系统的分析, 结合应用目的, 选择模型的结构, 从而确定模型参数的特征 (线性或非线性), 参量的形式 (集总、分布……, 或离散), 以及激励、外扰等模型的环境因素。

2) 由已有数据确定模型参量, 借助已知规律进行分析或试验确定模型的未知参量。

3) 通过试验, 包括计算机模拟, 对模型进行判断是否达到应用目的, 否则, 反复修改模型直到达到预定要求为止。

当然, 随着现代科技的发展, 将改进以上设计、试验和逐步修改的常用建模过程。

3 控制律的设计

为实现主动控制其核心问题是, 需要依据控制对象、控制环境和控制目标等因素, 选择设计方法基于控制理论, 设计出决定控制效果, 表达控制器输入与输出之间传递关系的控制律。

3.1 振动主动控制律设计方法的种类

控制律常用设计方法的种类及其特点见表 19.5-2。

表 19.5-2 控制律设计方法的种类

类型	特点
最优控制法	根据响应与控制两方面的要求, 定出优化目标函数。具体分为: ①确定性最优控制 可使输出响应跟踪预定的稳态和瞬态响应, 即跟踪性问题。或使输出的稳态和瞬态响应跟踪零, 即调节器问题。适用于模型和环境条件均已知的受控对象。②随机最优控制 可使控制总代价的数学期望达到最小, 适用于存在外界随机扰动和随机测量噪声的受控对象。③瞬时最优控制 可使控制的每一瞬时达到最优目标函数, 适用于不须预知外扰信息的受控对象
次最优控制法	仍用最优控制法的目标函数, 但只使用部分状态信息作反馈, 可得到与最优控制接近的控制效果。适用于无法得到其全部状态信息的受控对象
时域设计法	特征结构配置法 (极点配置法)
自适应控制法	把系统的特征值和特征向量控制到预定的数值上, 也即把极点配置到复平面预定的位置上, 使系统的动态性能最优。有基于状态反馈或输出反馈控制的鲁棒极点配置法
	适用于受控对象的模型、参数及环境条件变化较大的场合, 具体有: ①使受控对象和参考模型二者的输出之差最小的参考模型自适应控制。②使用符号跟踪器和符号参考模型的基于超稳定性的自适应控制。③在受控对象某些有特殊要求的位置上, 使控制力和外扰力产生的响应相对消的基于自适应滤波的前馈控制

续表 19.5-2

类 型	特 点
时域设计法	<p>预测控制法</p> <p>根据受控对象的历史信息和未来输入, 得到能够预测未来输出的预测模型。并在每一采样时刻, 优化反映受控对象性能的指标实现滚动优化。又通过反馈校正实现在线优化过程达到控制目标。在本时刻施加控制, 到下一时刻, 首先检测受控对象的实际输出, 并利用它对基于模型的预测进行修正, 然后进行新一轮的优化</p>
	<p>模态控制法</p> <p>把无限自由度系统(弹性体)的振动控制, 转化为在模态空间内少量几个模态的振动控制。具体有: ①模态耦合控制法 能用少量作动器控制较多的模态, 但计算量大且计算困难。②独立模态空间控制法 计算量小, 设计方便, 不会导致不稳定, 但需用较多的作动器, 还需使用模态观测器或模态滤波器估计出模态坐标及其导数。③分块独立模态空间控制法 对①、②法取长补短而得</p>
频域设计法	<p>根据系统的传递函数或传递函数矩阵模型, 亦即输入-输出模型在频域内设计控制律, 有根轨迹法、基于频率特性的设计法等。具体为, 根据系统各环节(测量系统、控制器、作动器、受控对象)的传递函数(幅、相频特性), 求出控制器的传递函数, 达到动力响应或动态稳定性的控制要求</p>
时域频域联合设计法	<p>首先使用时域设计法进行设计, 然后采用输出反馈控制律在一个频段范围内, 优选闭环系统的传递函数, 使时域和频域的控制律达到最佳拟合, 可同时实现时域和频域设计法的优点</p>
控制对象与器联合优化法	<p>对给定的受控对象设计控制律, 是以上各种设计方法都把控制对象的参数固定不动的重要缺陷。如果受控对象与控制器进行联合优化设计, 对受控对象作适当修改, 可导致整个闭环控制系统的性能有较大改善, 得到更加理想的控制系统。从而在达到控制性能要求的同时, 做到受控对象结构质量和控制能量都尽可能小</p>

3.2 控制律设计的几个重要问题

3.2.1 模型降阶

为减少设计计算、简化控制器结构及控制方

案的实现, 常用低阶模型来代替受控对象的原高阶模型, 称之为模型降阶, 特别对大型柔性结构的受控对象十分必要。模型降阶必须与控制律设计同时进行, 降阶有各种类型: 单输入-单输出或多输入-多输出的模型降阶; 频域或时域降阶; 按保留主要极点、保留传递函数特性不变或脉冲响应最佳近似准则的降阶。实现降阶有多种方法: 代价分析法、最优投影法、平衡降阶法、劳斯矩阵近似法等。

3.2.2 溢出

模型降阶后, 一些在设计控制律时未考虑的受控结构的模态(剩余模态), 将与控制器产生相互作用, 使剩余模态的稳定裕度变小, 甚至会使整个系统失稳, 这就是溢出。为减少或补偿因溢出带来的不利影响, 可使用以下措施。

- 1) 增加被动阻尼。
- 2) 布置作动器与传感器在剩余子系统的各模态节点处。
- 3) 采用作动器与传感器共点的直接速度反馈的模态控制。
- 4) 增加测量点以达到较完全的状态反馈。
- 5) 优化设计控制律时, 附加上使剩余子系统的各极点具有一定稳定度的约束条件。
- 6) 采用非线性控制。

3.2.3 鲁棒性 (Robustness)

由于控制律设计时未曾计及的系统的不确定性因素(系统建模误差、模型参数变化、制造公差及其他外来干扰等), 使实际系统的参数与设计系统的理想参数不完全相同。在这种情况下, 控制器的设计还应保证其性能指标达到设计要求, 这就是鲁棒性。具体有: ①稳定性鲁棒性, 即存在上述不确定性因素的情况下, 仍保持闭环系统的稳定性; ②响应鲁棒性, 即存在上述不确定性因素的情况下, 仍具有满意的响应性能指标。为使控制器具有相应的鲁棒性, 可以采用系统性能指标对不确定性因素不敏感的优化设计方法, 即使闭环系统的灵敏函数达到最小。或者在满足其它预定要求时, 兼顾鲁棒稳定性的条件。

3.2.4 时滞

由于振动信号从传感器到控制器, 又从控制器到作动器的传输时滞; 计算控制律引起的计算

时滞；作动器的时滞及建立控制所需的时间等，在控制系统中必然存在时滞，可能使系统阻尼变小，稳定性变差，直接影响控制系统的性能。可采用各种时滞补偿技术以消除时滞影响，例如，采用低通滤波器对测量信号进行滤波，消除时滞对高阶模态的影响；采用移相技术，消除由相位滞后引起位移、速度反馈力产生的负阻尼项；以及根据时滞特征，重新设计控制律等。

3.2.5 传感器、作动器的数目与位置

如果传感器与作动器的数目过多，将使控制系统的硬件成本、质量、控制能量和计算机机时增加，并使故障机会增多。另外，传感器与作动器的位置对主动控制的实现和控制效果有着重要的影响。因此，在满足控制性能指标的前提下，宜使二者的数目最少，位置最佳。可选用以下优化准则：最优控制代价最小准则、控制能量最小准则、性能指标的期望值最小准则、输出可调度准则等，确定传感器与作动器的最佳位置。

3.2.6 控制律的设计途径

对高阶受控对象设计出低阶控制器，有以下 3 种途径。

1) 先对高阶受控对象进行模型降阶，再针对降阶后的低阶受控对象设计出控制器。由于模型降阶是设计的第一步，其降阶误差将不断的传递到以后的设计过程中，必须用迭代法，从闭环系统中去推断设计的控制器是否达到预定要求。此途径设计出的控制器由于有剩余模态可能导致溢出，要有溢出抑制。

2) 对高阶受控对象设计出高阶控制器，再对高阶控制器进行降阶。要注意高阶控制器降阶后，仍能保证闭环系统的稳定性，并尽可能保证闭环系统的性能指标和传递函数的变化在允许的范围内。可使用代价分析法、平衡法、参数优化法等各种控制器的降阶方法。

3) 直接对高阶受控对象设计出低阶控制器。在控制器阶数固定的约束下，寻求控制器参数，使高阶对象和低阶控制器组成的闭环系统的性能指标达到最优，并保证闭环系统渐近稳定。

3.3 最优控制法

同时满足响应与控制两方面的设计要求，使其性能指标达到最优的控制，称为最优控制。当系统只存在确定性外扰时，为确定性最优控制，

当系统存在各种随机干扰与外扰时，为随机最优控制。

3.3.1 确定性最优控制

在受控系统的模型和环境条件均已知的情况下，对以线性状态方程表示的系统，进行目标函数为二次型的最优控制，就是基于线性二次型性能指标最小的确定性最优控制。这种控制方法综合考虑了状态偏移量和控制功率两方面的设计要求，获得最优的性能指标，有以下两方面的问题。

(1) 跟踪性问题

设受控系统为时变的线性系统，其状态方程和输出方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = A(t)x + B(t)u + d(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad (19.5-10)$$

$$y = C(t)x \quad (19.5-11)$$

式中 x 、 u 和 y 分别为状态矢量、控制矢量和输出矢量，它们都是时间的函数； $d(t)$ 为确定性外扰； $A(t)$ 、 $B(t)$ 和 $C(t)$ 分别为系统矩阵、控制（或输入）矩阵和输出矩阵。

其目标函数为

$$J = \frac{1}{2} [y(t_f) - \alpha]^T S_0 [y(t_f) - \alpha] + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{ [y - \beta(t)]^T Q_0(t) [y - \beta(t)] + u^T R(t) u \} dt \quad (19.5-12)$$

式中 α 、 $\beta(t)$ 分别为预定（希望的）稳态、瞬态响应； t_0 、 t_f 分别为控制开始、终止时间； S_0 、 $Q_0(t)$ 和 $R(t)$ 为相应维数的加权矩阵，一般为对角型，根据状态偏移量和控制功率的不同要求各异。

当强调状态矢量尽快地与希望值接近，而不顾控制能量消耗过大时，则把 $Q_0(t)$ 和 S_0 相对地取得较大，反之，把 $R(t)$ 相对地取得较大。另外，根据对各状态变量、控制变量的要求，取各加权矩阵本身各元素的大小。

使式 (19.5-12) 所示的目标函数 J 极小，又满足式 (19.5-10) 和式 (19.5-11)，推导出其最优控制为

$$u = -R^{-1} B^T p(t) x - R^{-1} B^T q(t) \quad (19.5-13)$$

式中的 $p(t)$ 和 $q(t)$ 分别由以下矩阵微分方程和矢量微分方程求出。

$$\begin{aligned} -\dot{p} &= pA + A^T p - pBR^{-1}B^T p + C^T Q_0 C, p(t_f) \\ &= C^T S_0 C \end{aligned} \quad (19.5-14)$$

$$-\dot{q} = pd + (A^T - pBR^{-1}B^T)q - C^T Q_0 \beta, q(t_f) = -C^T S_0 \alpha \quad (19.5-15)$$

通过以上方法求出的最优控制 u 能使输出响应跟踪 α 和 β ，这就是跟踪性问题。

(2) 调节器问题

如果式 (19.5-12) 中的 α 和 β 都是零矢量，且式 (19.5-10) 中的 $d=0$ ，则求得 u 使输出稳态和瞬态响应都跟踪零，即调节器问题

其状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (19.5-16)$$

其目标函数为

$$J = \int_0^\infty (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (19.5-17)$$

使 J 极小的最优控制为

$$u = -R^{-1}B^T p x \quad (19.5-18)$$

式中的 p 由如下的 Riccati 方程求出。

$$pA + A^T p - pBR^{-1}B^T p + Q = 0 \quad (19.5-19)$$

由式 (19.5-18) 确定的最优反馈控制能保证闭环系统总是稳定的，且具有 $\pm 60^\circ$ 的相位裕度与 $-6 \text{ dB} \sim +\infty \text{ dB}$ 的增益裕度，因此，这种最优控制律设计方法广泛用于动稳定性与动力响应的主动控制。

3.3.2 随机最优控制

当受控系统存在外界随机扰动和随机测量噪声时，也即式 (19.5-10) 中的 $d(t)$ 为随机外扰， x_0 为与 $d(t)$ 无关的 n 维矢量随机过程时，应使用随机最优控制。

(1) 跟踪性问题的观点算法

表达输入是白噪声 $w(t)$ ，输出是随机外扰 $d(t)$ 的成形滤波器的方程为

$$\dot{z} = A_f(t)z + w(t), z(t_0) = z_0 \quad (19.5-20a)$$

$$d(t) = C_f(t)z \quad (19.5-20b)$$

式中 z —— p 维成形滤波器的状态矢量；

$w(t)$ —— p 维白噪声。

把式 (19.5-10) 与式 (19.5-20) 合并成一个白噪声输入的系统，其方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c(t)x_c + B_c(t)u + W_c(t) \\ x_c(t_0) &= [x_0^T \quad z_0^T]^T \\ y &= [C(t) \quad 0] \begin{Bmatrix} x \\ z \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} (19.5-21)$$

式中

$$x_c = \begin{Bmatrix} x \\ z \end{Bmatrix}, A_c(t) = \begin{bmatrix} A(t) & C_f(t) \\ 0 & A_f(t) \end{bmatrix}$$

$$B_c(t) = \begin{bmatrix} B(t) \\ 0 \end{bmatrix}, W_c(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ W(t) \end{bmatrix}$$

其目标函数 J 为

$$J = E \left\{ \frac{1}{2} x^T(t_f) S x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [x^T Q(t)x + u^T R(t)u] dt \right\} \quad (19.5-22)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 为 \cdot 的平均值， $R(t)$ 为正定权矩阵， S 和 $Q(t)$ 为非负权矩阵，可表示为

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= C^T Q_0(t) C(t) \\ S &= C^T(t_f) S_0 C(t_f) \end{aligned} \right\} (19.5-23)$$

式中 S_0 为非负权矩阵， $Q_0(t)$ 为正定权矩阵。

使 J 极小，又满足式 (19.5-21) 的最优控制律为

$$u = -R^{-1}(t)B_c^T(t)p(t)x_c \quad (19.5-24)$$

式中 $p(t)$ 为 $n+p$ 阶黎卡提 (Riccati) 矩阵，由以下方程解出：

$$\begin{aligned} -\dot{p}(t) &= p(t)A_c(t) + A_c^T(t)p(t) - \\ & p(t)B_c(t)R^{-1}(t)B_c^T(t)p(t) + \\ & Q_c(t), p(t_f) = S_c \end{aligned} \quad (19.5-25)$$

式中

$$Q_c(t) = \begin{bmatrix} Q(t) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, S_c = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$p(t) = \begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) \\ p_{21}(t) & p_{22}(t) \end{bmatrix}$$

$p_{11}(t)$ 为 $n \times n$ 阶矩阵， $p_{22}(t)$ 为 $p \times p$ 阶矩阵，

$$p_{12}(t) = p_{21}^T(t)$$

式 (19.5-25) 可分解成如下 4 组方程：

$$\begin{aligned} -\dot{p}_{11}(t) &= p_{11}(t)A(t) + A^T(t)p_{11}(t) - \\ & p_{11}(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)p_{11}(t) + \\ & Q(t), p_{11}(t_f) = S \end{aligned} \quad (19.5-26a)$$

$$\begin{aligned} -\dot{p}_{12}(t) &= p_{11}(t)C_f(t) + A^T(t)p_{12}(t) + \\ & p_{12}(t)A_f(t) - p_{11}(t)B(t)R^{-1}(t) \cdot \\ & B^T(t)p_{12}(t), \\ p_{12}(t_f) &= 0 \end{aligned} \quad (19.5-26b)$$

$$p_{21}(t) = p_{12}^T(t) \quad (19.5-26c)$$

$$\begin{aligned} -\dot{p}_{22}(t) &= p_{21}(t)C_f(t) + p_{22}(t)A_f(t) + C_f^T(t) \\ & p_{12}(t) + A_f^T(t)p_{22}(t) - p_{21}(t)B(t) \cdot \\ & R^{-1}(t)B^T(t)p_{12}(t), p_{22}(t_f) = 0 \end{aligned} \quad (19.5-26d)$$

先由式 (19.5-26a) 解得 p_{11} ，接着由式 (19.5-26b) 解得 p_{12} ，式 (19.5-24) 或写成

$$u = -R^{-1}(t)B^T(t)p_{11}(t)x - R^{-1}(t)B^T(t)p_{12}(t)z \quad (19.5-27)$$

(2) 调节器问题与状态估计合算法

在确定性最优控制的调节器问题的基础上, 考虑输入噪声和测量噪声, 并引入卡尔曼(Kalman)滤波器(观测器), 此时系统的状态方程和测量方程分别为

$$\dot{x} = Ax + Bu + D\xi_1 \quad (19.5-28a)$$

$$z = Cx + F\xi_2 \quad (19.5-28b)$$

- 式中 D ——输入白噪声分布矩阵;
- ξ_1 ——具有谱密度(强度)阵为 V 的零均值高斯白噪声矢量;
- F ——测量噪声分布矩阵;
- ξ_2 ——具有谱密度阵为 V_m 的零均值高斯白噪声矢量。

其目标函数为

$$J = E \left\{ \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \right\} \quad (19.5-29)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 为 $\{\cdot\}$ 的平均值。

使 J 极小的最优控制律为

$$u = -R^{-1}B^T p \hat{x} \quad (19.5-30)$$

式中 p 由黎卡提方程式(19.5-19)求出, \hat{x} 为状态量 x 的估计值。利用系统的输入 $u(t)$ 与输出 $z(t)$ 通过卡尔曼滤波器得到 \hat{x} , 卡尔曼滤波器的状态空间方程为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + S(z - C\hat{x}) \quad (19.5-31)$$

式中 S 为卡尔曼滤波器的增益矩阵, 由下式求得。

$$S = p_1 C^T (FV_m F^T)^{-1} \quad (19.5-32)$$

式中 p_1 由以下黎卡提方程求得。

$$A p_1 + p_1 A^T + D V D^T - p_1 C^T (FV_m F^T)^{-1} C p_1 = 0 \quad (19.5-33)$$

(3) 递推方法

随机最优控制还可用递推方法实现, 此时把系统的状态方程和观测方程写成离散型用差分方程表示, 分别为

$$x(k+1) = \phi(k+1, k)x(k) + \theta(k+1, k)u(k) + \psi(k+1, k)\omega(k) \quad (19.5-34a)$$

$$y(k) = \eta(k)x(k) + v(k) \quad (19.5-34b)$$

- 式中 $x(k)$ —— n 维状态矢量;
- $u(k)$ —— m 维控制矢量;
- $y(k)$ —— r 维输出矢量;
- $\omega(k)$ —— p 维白噪声矢量, 代表随机激励;

$v(k)$ —— r 维测量噪声;

k ——离散时间;

$\omega(k)$ 和 $v(k)$ ——零均值正态白噪声;

ϕ, θ, ψ, η —— $n \times n, n \times m, n \times p, r \times n$ 矩阵;

随机最优控制的目标函数为

$$J = E \left\{ \sum_{k=1}^N x^T(k)A(k)x(k) + u^T(k-1)B(k-1) \cdot u(k-1) \right\} \quad (19.5-35)$$

式中 $E\{\cdot\}$ —— $\{\cdot\}$ 的平均值;

A ——对称非负定阵;

B ——正定阵。

初始状态 $x(0)$ 是不确定的, 一般设已知其数学期望和方差为

$$x_0 = E\{x(0)\}$$

$$S_0 = E\{[x(0) - x_0][x(0) - x_0]^T\}$$

当允许控制序列的集合限于测量的是线性函数时, 若控制矢量 $u^*(k) (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 使式(19.5-35)所示的 J 极小, 则称其为最优控制矢量。

若控制过程是线性的, 则把确定性最优控制和最优状态估计的解合在一起成为随机最优控制的解。

(1) 确定性最优控制

使式(19.5-35)所示的 J 极小, 又满足式(19.5-34)的最优控制为

$$u^*(k) = L(k)\hat{x}(k) \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (19.5-36)$$

式中 $\hat{x}(k)$ 为最优状态估计值, 用卡尔曼滤波器得到, 其算法见表 19.5-3; $L(k)$ 为按确定性最优控制得到的最优反馈增益矩阵, 由下面递推关系确定:

$$u(k+1) = M(k+1) + A(k+1)$$

$$L(k) = -[\theta^T(k+1, k)u(k+1)\theta(k+1, k) + B(k)]^{-1}\theta^T(k+1, k)u(k+1)\phi(k+1, k)$$

$$M(k) = \phi^T(k+1, k)u(k+1)\phi(k+1, k) + \phi^T(k+1, k)u(k+1)\theta(k+1, k)L(k)$$

(2) 最优状态估计

式(19.5-36)中的 $\hat{x}(k)$ 可用卡尔曼滤波公式计算, 作状态估计时, 可不考虑 $u(k)$ 的影响, 故在状态方程中予以去掉。卡尔曼滤波算法见表 19.5-3。

表 19.5-3 卡尔曼滤波算法

过程模型	$x(k) = \Phi(k, k-1)x(k-1) + \Psi(k, k-1)\omega(k-1)$
观测方程	$y(k) = \eta(k)x(k) + v(k)$
噪声统计特性	$E[\omega(k)] = 0, E[v(k)] = 0, E[x(0)\omega^T(k)] = 0$ $E[\omega(j)\omega^T(k)] = \delta_{jk}Q(k), E[\omega(j)v^T(k)] = 0$ $E[v(j)v^T(k)] = \delta_{jk}R(k), \text{对于一切 } k, j$ $E[x(0)] = x_0, E[x(0)v^T(k)] = 0$ $E[(x(0) - x_0)(x(0) - x_0)^T] = S_0$
滤波算法	$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + L(k)[y(k) - \eta(k)\hat{x}(k|k-1)]$
预测算法	$\hat{x}(k|k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{x}(k-1|k-1)$
滤波增益	$L(k) = S(k|k-1)\eta^T(k)[\eta(k)S(k|k-1)\eta^T(k) + R(k)]^{-1}$
滤波误差协方差	$S(k|k) = [I - L(k)\eta(k)]S(k|k-1)[I - L(k)\eta(k)]^T + L(k)R(k)L^T(k)$
预测误差协方差	$S(k|k-1) = \Phi(k, k-1)S(k-1|k-1)\Phi^T(k, k-1) + \Psi(k, k-1)Q(k-1)\Psi^T(k, k-1)$
初始条件	$\hat{x}(0|0) = \hat{x}_0, S(0|0) = S_0$

表中 $\hat{x}(k|k)$ 为第 k 时刻对状态 \hat{x} 的估计值; $\hat{x}(k|k-1)$ 为第 $k-1$ 时刻对状态 \hat{x} 的一步预报; $L(k)$ 为第 k 时刻对输出预报误差的加权修正; $S(k|k-1)$ 为 $\hat{x}(k|k-1)$ 的协方差矩阵; $S(k|k)$ 为 $\hat{x}(k|k)$ 的协方差矩阵

3.4 次最优控制法

由 3.3 节知, 采用最优控制律需要测得全部状态量作为反馈信息。对于具有 n 维状态量的受控对象就要求 n 个状态量可测, 当 n 很大时, 很难测得 n 个状态量。另外, 对状态量有不明物理含义的受控对象, 更是无法满足最优控制的要求。因此, 出现了只利用部分状态量 (通常是可测得的输出量) 作反馈, 而其控制效果与全状态反馈最优控制十分接近的次最优控制, 又称具有控制器结构约束的最优控制。

设系统的状态方程和输出方程分别为

$$\dot{x} = Ax + Bu, x(0) = x_0 \quad (19.5-37a)$$

$$y = Cx \quad (19.5-37b)$$

以输出反馈的次最优控制律为

$$u = -Ky = -KCx \quad (19.5-38)$$

使如下的二次型性能指标 J 达极小

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru) dt = x_0^T p x_0 \quad (19.5-39)$$

p 满足如下方程

$$p(A - BKC) + (A - BKC)^T p + Q + C^T K^T R K C = 0 \quad (19.5-40)$$

次最优控制律的设计就是, 求出输出反馈矩阵 K , 即使式 (19.5-39) 所示的 J 极小, 又满足式 (19.5-40) 的约束条件。这样直接求解 K 非常困难, 因此, 出现了一些非直接的解法:

(1) 莱文 (Levine) - 阿萨斯法

用 $x_0^T p x_0$ 的上限 (矩阵 p 的迹) T, p 为性能指标, 导出

$$K = R^{-1}(B^T p V C^T)(C V C^T)^{-1} \quad (19.5-41)$$

$$V(A - BKC)^T + (A - BKC)V + I = 0 \quad (19.5-42)$$

式 (19.5-40) ~ 式 (19.5-42) 构成一组迭代求解 K, p 与 V , 使 T, p 达到极小的非线性矩阵方程。在求解过程中可能迭代不收敛, 可用以下近似解法。

(2) 最小误差激励法

先用最优控制法求出常增益状态反馈矩阵 F^* , 记其状态量为 x^* 。在瞬时干扰作用下, 待

求的次最优控制的响应为 x 。根据称之为误差响应的 x 与 x^* 之差, 推导 K 使误差激励 $e(t) = (F^* - KC)x^*(t)$ 最小, 得

$$(A - BF^*)V + V(A - BF^*)^T + I = 0 \quad (19.5-43)$$

$$K = F^* VC^T (CVC)^{-1} \quad (19.5-44)$$

式 (19.5-43) 是李亚普诺夫方程, 可解出 V , 按式 (19.5-44) 即可直接求出 K 。

对多结构约束情况, 即

$$\left. \begin{aligned} y_j &= C_j x, j = 1, 2, \dots, p, C_j \in R^{q_j \times n} \\ u_j &= K_j^T y_j, j = 1, 2, \dots, p, K_j \in R^{m_j \times q_j} \\ F_j &= K_j^T C_j \end{aligned} \right\} \quad (19.5-45)$$

式中 y_j —— y 的第 j 个子矢量, 维数为 q_j ;

u_j —— u 的第 j 个分量。

控制中的各分量可用不同的输出量进行反馈。这时式 (19.5-44) 可写成

$$K_j = -(1/r_j) b_j^T p_j V C_j^T (C_j V C_j^T)^{-1}, j = 1, 2, \dots, p \quad (19.5-46)$$

式中 r_j —— 对角矩阵 R 的第 j 个元素;

b_j —— 矩阵 B 的第 j 个列矢量。

值得注意的是, 式 (19.5-43) 和式 (19.5-44) 并不保证闭环系统的稳定性。

(3) 最小范数法

待求的矩阵 K 使如下的目标函数 J 达到极小, 即

$$J = \|F - F^*\| = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n g_{ij}^2} \quad (19.5-47)$$

式中 $F = KC$;

F^* —— 由最优控制法求得的常增益反馈矩阵;

g_{ij} —— 矩阵 $G = F - F^*$ 的第 i 行 j 列元素。

可求得

$$K = F^* C^T (C C^T)^{-1} \quad (19.5-48)$$

对如式 (19.5-45) 所示的多结构约束情况, 为

$$K_j = F_j^* C_j^T (C_j C_j^T)^{-1}, j = 1, 2, \dots, p \quad (19.5-49)$$

3.5 特征结构配置法

振动系统特征方程的根, 就是特征值。特征值的实部其物理意义为系统的模态衰减系数, 不仅影响系统的动力响应, 还关系着系统的稳定性, 具有负实部特征值的系统是稳定的。特征值

的虚部为系统有阻尼的固有频率, 当其与外扰频率接近时, 就发生共振, 因此, 特征值的虚部与外扰频率接近的程度, 对动力响应有着重要的影响。

每个特征值对应着各自的特征矢量, 确定着相应的振动形态。因此, 系统的特征值和特征矢量, 直接影响着系统的动态性能包括动稳定性和动力响应。特征结构配置法, 就是设计出的控制律能直接使受控对象的特征值和特征矢量达到预定的要求, 从而获得希望的动态性能。由于特征值就是传递函数的极点, 改变极点在复平面上的位置就能改善系统的动态性能。因此, 这种方法也称极点配置法。

这种方法先把系统要求的动态性能表达成闭环特征值和特征矢量, 再匹配性能良好的闭环特征值和特征矢量, 形成较完善的特征结构, 最后求取反馈控制增益。可以用状态反馈或输出反馈控制, 这里仅介绍前者。

设受控对象的线性状态空间方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0 \quad (19.5-50)$$

其线性反馈控制为

$$u(t) = -Gx(t) \quad (19.5-51)$$

式中 $x(t) \in R^n$ —— 状态矢量;

$u(t) \in R^m$ —— 控制矢量。

假定全状态可测, 且 (A, B) 完全可控, 矩阵 B 的秩为 m 。

式 (19.5-51) 代入式 (19.5-50), 得闭环控制系统:

$$\dot{x}(t) = (A - BG)x(t) \quad (19.5-52)$$

对应的特征值问题为

$$(A - BG)\phi_i = \lambda_i \phi_i \quad (19.5-53a)$$

$$(A - BG)^T \psi_i = \lambda_i \psi_i \quad (19.5-53b)$$

式中 ϕ_i 和 ψ_i 分别为对应特征值 λ_i 的右、左特征矢量。它们进行归一化处理, 使得

$$\phi_i^H \phi_i = 1, \psi_i^T \phi_i = \delta_{ij} \quad (19.5-54)$$

式中 ϕ_i^H —— ϕ_i 的共轭转置;

δ_{ij} —— 狄拉克函数。

设计控制律的目的在于根据 A 、 B 和 λ 求取 G , 使其满足系统动态性能要求的特征值配置。由于对可控系统存在无穷多个反馈增益矩阵 G 能满足指定的特征值配置, 因此, 控制律的设计过程改为, 先配置能使闭环特征值对系统参数变化的鲁棒性好的优态特征矢量, 再求取 G , 故

也称为鲁棒特征结构配置法。具体按以下步骤进行。

(1) 引用李亚普诺夫 (Ляпунов) 方程

引入一组参数矢量 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^m$, 定义为

$$\mathbf{h}_i = \mathbf{G}\boldsymbol{\varphi}_i \quad (19.5-55)$$

式 (19.5-55) 代入式 (19.5-53a) 得

$$(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})\boldsymbol{\varphi}_i = \mathbf{B}\mathbf{h}_i \quad (19.5-56)$$

写成矩阵形式, 为

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\Phi}\mathbf{A} = \mathbf{B}\mathbf{H} \quad (19.5-57)$$

式中 $\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \dots, \boldsymbol{\varphi}_n]$;

$$\mathbf{A} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n];$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_n]。$$

此式为一广义的李亚普诺夫方程, 也称为西尔维斯特 (Sylvester) 方程。

引用李亚普诺夫方程所得的极点配置方案为: 根据给定的系统矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 及指定的特征值矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}$, 选取参数矩阵 \mathbf{H} , 从式 (19.5-57) 求取特征矢量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$, 则待求的增益矩阵 \mathbf{G} 由下式简单地求逆而得

$$\mathbf{G}\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{H} \quad (19.5-58)$$

此式就是式 (19.5-55) 的矩阵表达式, 正符合引入参数矢量的目的。

在选取 \mathbf{H} 时, 应使闭环特征矢量矩阵尽可能接近一预定的小条件数的矩阵 (又称优态矩阵), 以达到使闭环特征值对系统参数变化的鲁棒性好的要求。因此, 先选取一个希望的闭环特征矢量矩阵, 由式 (19.5-57) 计算出 \mathbf{H} , 再利用 \mathbf{H} 重解式 (19.5-57) 得最终的 $\boldsymbol{\Phi}$ 。

(2) 选取希望的特征矢量 $\boldsymbol{\varphi}_i^0$

1) 计算酉基矩阵 \mathbf{U}_i

为使所选的特征矢量位于 $(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B}$ 的 m 维列空间内, 必须先计算展成矩阵 $(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B}$ 列空间的酉基矩阵 \mathbf{U}_i , 可通过以下方法求得

①对 $(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B}$ 进行奇异值分解, 得到

$$(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B} = [\mathbf{U}_{1i} \mathbf{U}_{2i}] \begin{bmatrix} \sum_i 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1i}^H \\ \mathbf{V}_{2i}^H \end{bmatrix}$$

由此确定 $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_{1i}$ 。

②对 $(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B}$ 进行 QR 分解, 得到

$$(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B} = [\mathbf{Q}_{1i} \mathbf{Q}_{2i}] \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ 0 \end{bmatrix}$$

由此确定 $\mathbf{U}_i = \mathbf{Q}_{1i}$ 。

③计算 \mathbf{B} 的列空间的正交补 \mathbf{B}^\perp (即 $\mathbf{B}^\perp \mathbf{B} =$

$\mathbf{0}$), 并采用奇异值分解计算 $(\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B}$ 的列空间的正交补 $\mathbf{B}^\perp = (\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B}$, 得

$$\mathbf{B}^\perp = (\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I})^{-1}\mathbf{B} = [\mathbf{U}_{1i} \mathbf{U}_{2i}] \begin{bmatrix} \sum_i 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1i}^H \\ \mathbf{V}_{2i}^H \end{bmatrix}$$

由此确定 $\mathbf{U}_i = \mathbf{V}_{2i}$

2) 确定目标矢量 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_i$

由 n 个酉基矩阵组合成如下的全局矩阵 \mathbf{S} 为

$$\mathbf{S} = [\mathbf{U}_1 \mathbf{U}_2 \dots \mathbf{U}_n]$$

对 \mathbf{S} 进行奇异值分解, 得

$$\mathbf{S} = \hat{\mathbf{U}} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^H$$

式中 $\hat{\mathbf{U}}、\mathbf{V}$ ——分别为左、右奇异矢量矩阵;

$\boldsymbol{\Sigma}$ ——奇异值的对角矩阵。

从左奇异矩阵 $\hat{\mathbf{U}} = [\hat{\mathbf{u}}_1, \hat{\mathbf{u}}_2, \dots, \hat{\mathbf{u}}_n]$, 确定目标矢量 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_i = \hat{\mathbf{u}}_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。

3) 确定使配置误差最小的特征矢量 $\boldsymbol{\varphi}_k$

对目标矢量进行优化, 确定使特征矢量配置误差 $\|e_i\| = \|(\mathbf{I} - \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^H)\boldsymbol{\varphi}_k\|$ 最小的 $\boldsymbol{\varphi}_k$, 作为第 i 个目标特征矢量。

4) 选定希望的特征矢量 $\boldsymbol{\varphi}_i^0$

按最小二乘投影式计算出容许的特征矢量, 作为希望的特征矢量, 即

$$\boldsymbol{\varphi}_i^0 = \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^H \hat{\boldsymbol{\varphi}}_i$$

(3) 确定参数矩阵 \mathbf{H}

根据已知的 $\mathbf{A}、\mathbf{B}、\boldsymbol{\Lambda}$ 和步骤 (2) 选好的 $\boldsymbol{\varphi}_i^0$, 按下式计算 \mathbf{H} , 即

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}^+ (\mathbf{A}\boldsymbol{\Phi}^0 - \boldsymbol{\Phi}^0 \boldsymbol{\Lambda})$$

式中 \mathbf{B}^+ ——矩阵 \mathbf{B} 的伪逆, $\mathbf{B}^+ = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$;

$$\mathbf{B}^T;$$

$\boldsymbol{\Phi}^0$ ——希望的特征矢量矩阵, $\boldsymbol{\Phi}^0 = [\boldsymbol{\varphi}_1^0, \boldsymbol{\varphi}_2^0, \dots, \boldsymbol{\varphi}_n^0]$ 。

(4) 确定特征矢量矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$

把 $\mathbf{A}、\mathbf{B}、\boldsymbol{\Lambda}$ 和通过上述途径确定的 \mathbf{H} 代入式 (19.5-57), 解出 $\boldsymbol{\Phi}$, 得最终的特征矢量矩阵。

(5) 计算反馈增益矩阵 \mathbf{G}

把经过以上优选得到的 \mathbf{H} 和 $\boldsymbol{\Phi}$ 代入式 (19.5-58), 即得待求的 \mathbf{G} 。

在以上鲁棒特征结构配置过程中, 可能遇到在加入控制后系统的特征值变化显著, 但对应的特征矢量变化却不大的情况, 此时可将开环特征矢量作为希望的闭环特征矢量, 则以上第 2 步骤 (确定目标矢量 $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_i$) 改为计算开环系统的右特征

矢量。

3.6 模态控制法

把无限多自由度系统（弹性体）的振动控制，转化为有限几个模态的振动控制，称为模态控制法。

(1) 模态坐标变换

把系统在物理空间的运动方程变为模态空间的模态方程。对于无阻尼 n 个自由度系统，在有控制 u 而无外界激励时，其运动微分方程为

$$M\ddot{x} + Kx = u \quad (19.5-59)$$

式中 x, u —— 分别为 n 维位移矢量、控制矢量；

M, K —— 分别为系统的质量、刚度矩阵。

令 $x = \phi q$ ，并用 ϕ^T 前乘式 (19.5-59) 两端的各项得

$$\phi^T M \phi \ddot{q} + \phi^T K \phi q = \phi^T u = F \quad (19.5-60)$$

式中 q —— n 维模态坐标矢量；

ϕ —— 振型矩阵。

由于 $\phi^T M \phi = I$ ； $\phi^T K \phi = \Omega$ ， $\Omega = \text{diag}[\omega_i^2]$ ，则上式写成

$$\ddot{q} + \Omega q = F \quad (19.5-61)$$

其各分量 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的方程为

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = F_i \quad (19.5-62)$$

式 (19.5-62) 即为模态方程， F_i 为第 i 阶模态控制力，由式可见，开环系统的各阶模态是相互独立的。

(2) 耦合控制

设模态控制力为

$$F_i = - \sum_{j=1}^n (g_{ij} q_j + h_{ij} \dot{q}_j), i = 1, 2, \dots, n \quad (19.5-63)$$

则在控制情况下，闭环系统的方程为

$$\ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n h_{ij} \dot{q}_j + \sum_{j=1}^n (g_{ij} + \omega_i^2 \delta_{ij}) q_j = 0 \quad (19.5-64)$$

式中 g_{ij} 与 h_{ij} 分别为模态控制位移增益与速度增益； δ_{ij} 具有以下性质：

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$$

从式 (19.5-64) 可见，在式 (19.5-63) 所示的

F_i 控制下，闭环系统的各阶模态是相互不独立的，故称之为耦合控制。这时的实际控制 u 为

$$u = M\phi F = \sum_{i=1}^n M\phi_i F_i = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M\phi_i (g_{ij} q_j + h_{ij} \dot{q}_j) \quad (19.5-65)$$

式中 ϕ_i 为第 i 阶振型，即振型矩阵 ϕ 中的第 i 列。

(3) 非耦合控制

设模态控制力为

$$F_i = - g_i q_i - h_i \dot{q}_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (19.5-66)$$

则在控制情况下，闭环系统的方程为

$$\ddot{q}_i + h_i \dot{q}_i + (g_i + \omega_i^2) q_i = 0 \quad (19.5-67)$$

从式 (19.5-67) 可见，在式 (19.5-66) 所示的 F_i 控制下，闭环系统的各阶模态都是相互独立的，故称之为非耦合控制，又称独立模态空间控制。这时的实际控制 u 为

$$u = - \sum_{i=1}^n M\phi_i (g_i q_i + h_i \dot{q}_i) \quad (19.5-68)$$

图 19.5-3 为非耦合控制的方框图。由图可见，为实现非耦合控制，需经过以下 4 个环节：

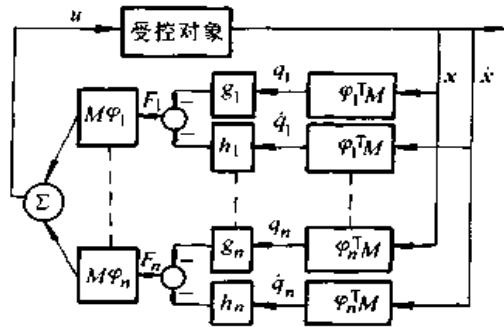


图 19.5-3 非耦合控制的方框图

1) 测量物理空间下的 n 自由度系统中 n 维位移矢量 x 和速度矢量 \dot{x} ；

2) 从 x 与 \dot{x} 中提取模态坐标 q_i 及其导数 \dot{q}_i ($i=1, 2, \dots, n$)，此环节称为“滤模态”，可使用模态观测器或模态滤波器估计出 q_i 及 \dot{q}_i ；

3) 按一定的控制律的设计方法（例如最优控制法，极点配置法），确定各阶模态控制位移增益 g_i 与速度增益 h_i ；

4) 由模态控制力转换成实际控制力。

对于耦合控制，同样需经过以上所述的 4 个环节。

(4) 两类模态控制比较

非耦合模态控制与耦合模态控制相比, 具有计算量小、设计方便、不会导致不稳定以及允许采用多种控制方案 (如非线性控制) 等优点, 其缺点是, 作动器数至少等于受控模态数, 要求较多的作动器。而耦合模态控制则利用模态间的有利耦合, 可采用少量作动器控制较多的模态。二者利弊相反, 于是出现了介于其中的兼有二者优点的分块独立模态空间控制。

4 振动主动控制在工程上的应用

采用主动控制技术, 使受控对象的动态性能 (包括动力响应和动态稳定性) 满足预定要求, 可以从控制振动的起源、控制振动的响应和控制振动的传播几方面进行。在工程上使用的主动控制措施有: 主动消减振源、主动阻振、主动吸振、主动隔振以及对受控对象进行结构修改等。

4.1 主动消减振源

把主动控制力 (或力矩) 作用于受控对象, 去抵消引起受控对象振动的振源或抵消振源引起受控对象的响应, 为主动消减振源。

4.1.1 谐波控制

从受控对象振动信号中提取振源的主要谐波分量, 对受控对象施加幅值和相位适当的谐波控制力, 抵消激振力的主要分量, 达到消减振源控制受控对象振动的目的。

直升机振源主要来自作用于旋翼桨叶上的交变气动载荷。若旋翼有 N 片桨叶, 转速为 ω , 则传递至桨毂的交变力及力矩的 N 阶谐波分量是振源的主要分量。用谐波分析仪从测得的振动信号中提取 $N\omega$ 的谐波分量, 在直升机的自动倾斜器不动环上施加一个每周 N 阶的高阶变距输入, 桨叶在旋转坐标中将获得每周 $N-1$ 、 N 、 $N+1$ 次高阶变距运动。适当地控制输入的幅值和相位, 就可降低桨叶上所产生的 $N-1$ 、 N 、 $N+1$ 阶交变载荷谐波分量, 达到减小机身振动的目的。

4.1.2 结构响应主动控制

控制器对传感器测得的受控对象的振动信号进行分析处理, 判别出作用于受控对象上激振力的幅值、相位和频率, 并发出控制信号, 通过作动器产生控制力作用于受控对象, 使受控对象的

某些受控点的响应与激振力在这些点上的响应相互抵消。

图 19.5-4 为结构响应主动控制示意图, 从图看到由质量 m 、阻尼 c 及刚度 k 组成的受控系统上作用有激振力 $P(t)$, 其运动方程为

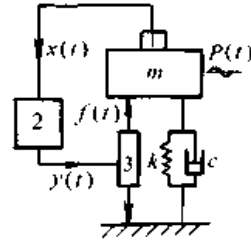


图 19.5-4 结构响应主动控制示意图

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad (19.5-69)$$

系统的幅频特性为

$$R_1(\omega) = \frac{x(\omega)}{P(\omega)} = \sqrt{\frac{1}{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (19.5-70)$$

$$R_1(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} R_1(\omega) = \frac{1}{k} \quad (19.5-71)$$

对其进行主动控制时, 由传感器 1 测得振动信号 $x(t)$, 经过控制器 2 进行分析处理发出反馈控制信号 $y(t)$, 输入作动器 3 产生控制力 $f(t)$, 其运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) + f(t) \quad (19.5-72)$$

若 $f(t) = -G(x + \epsilon\dot{x})$, 则系统的幅频特性为

$$R_2(\omega) = \frac{x(\omega)}{P(\omega)} = \sqrt{\frac{1}{(k + G - m\omega^2)^2 + \omega^2(c + G\epsilon)^2}} \quad (19.5-73)$$

$$R_2(0) = \frac{1}{k + G} \quad (19.5-74)$$

由上看出, 施加控制力 $f(t)$ 后, $R_2(\omega)$ 、 $R_2(0)$ 都比 $R_1(\omega)$ 、 $R_1(0)$ 小, 即减小了受控对象的振动。

若 $f(t) = -G \int_0^t x(\tau) d\tau$, 则系统的幅频特性为

$$R_3(\omega) = \frac{x(\omega)}{P(\omega)} = \sqrt{\frac{\omega^2}{\omega^2(k - m\omega^2)^2 + (G - c\omega^2)^2}} \quad (19.5-75)$$

$$R_3(0) = 0 \quad (19.5-76)$$

由上看出, 施加具有积分形式的 $f(t)$ 后, $R_3(0) = 0$, 即在超低频区内, 主动控制的效果更加有效。

在直升机上实现频域结构响应主动控制, 需经过以下过程: 测量机身响应、信号分析、参数估计、最优控制器设计、给出指令驱动串入旋翼载荷传递路径的作动器、产生作用于机身的控制力。其频域方程为

$$Y = TU + B \quad (19.5-77)$$

式中 Y ——测得的机身响应振幅矢量;

U ——控制力幅值矢量;

T ——控制力与机身间的频响函数矩阵;

B ——扰力引起的机身响应振幅矢量。

只要 T 矩阵是非奇异的, 用 N 个作动器控制 N 个机身位置的响应, 则可使 N 个机身位置的响应为零。为达到更高的要求, 其性能指标可写成

$$J = Y^T Q Y + U^T R U \quad (19.5-78)$$

式中 Q 、 R 为加权矩阵。

其最优问题的解为

$$U = -(T^T Q T + R)^{-1} T^T Q B \quad (19.5-79)$$

4.1.3 脉冲控制

检测受控对象预定的各控制点的振动量, 当检测值超过某一设定的门限值时, 控制脉冲发生, 从而抵消外扰响应, 使各控制点的响应保持在一定的门限值之内。这是一种不需对受控对象作全状态估计、节约能量、只有开与关两种状态的开环控制。

实现上述目标的最简单的控制方案是, 在选定的位置上安装脉冲发生器, 当受控对象的振动速度在这些位置上达到最大时, 发出一个与该振动速度方向相反的脉冲力, 即

$$P_i = \begin{cases} -c_i \text{Sgn}(v_i) |v_i|^n, & t_i < t \leq (t_i + T_{di}) \\ 0, & (t_i + T_{di}) < t < t_{i+1} \end{cases} \quad (19.5-80)$$

式中 c_i ——比例系数;

v_i ——受控对象检测点的振动速度;

n_i ——与速度规律有关的系数;

T_{di} ——脉冲持续时间;

4.2 主动阻振

对受控对象施加与其振动速度成正比的控制力, 作为阻尼力消耗振动能量, 达到减小振动的目的, 称为主动阻振。进行阻尼减振主动控制的作动器有各式阻尼器: 如电碰式、液压式、气动式等集中式阻尼器, 这类作动器需要有固定其位

置的基础; 还有压电式具有分布阻尼特性的阻尼器, 这类作动器质量轻、适用场合广、不需要固定其位置的基础, 日益引起人们对它的重视。

对多模态系统进行主动阻振, 其重要问题是需要确定主动模态阻尼与作动器控制力之间的关系。

在物理坐标下, n 个自由度系统的运动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f + u \quad (19.5-81)$$

式中 M 、 C 、 K ——分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵;

f ——外扰力矢量;

u ——控制力矢量。

若系统是比例黏性阻尼, 其实模态矩阵是 ϕ , 则令 $x = \phi q$, 并用 ϕ^T 前乘式 (19.5-81) 得

$$\overline{M}\ddot{q} + \overline{C}\dot{q} + \overline{K}q = \phi^T(f + u) \quad (19.5-82)$$

式中 $\overline{M} = \phi^T M \phi = \text{diag}[m_i]$;

$\overline{C} = \phi^T C \phi = \text{diag}[2\zeta_i m_i \omega_i]$;

$\overline{K} = \phi^T K \phi = \text{diag}[m_i \omega_i^2] (i = 1, 2, \dots, n)$;

m_i 、 ζ_i 、 ω_i 分别为第 i 阶模态质量、模态阻尼比、模态频率;

q 为 n 维模态坐标矢量。

若有 n_a 个作动器与速度传感器对位配置, 对 n_c 个模态阻尼进行控制, 则按以下方法确定阻尼控制力。

(1) 当采用非耦合的直接速度反馈控制时

$$u_a = -F\dot{x}_a \quad (19.5-83)$$

式中 $F = \text{diag}[d_i]$, $d_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n_a)$;

u_a 为 n_a 个作动器产生的控制力矢量;

\dot{x}_a 为 n_a 个速度传感器测得的速度矢量;

d_i 用优化方法确定, 即目标函数极小值

为

$$\min \sum_{i=1}^{n_a} d_i \quad (19.5-84)$$

约束条件为

$$1) \sum_{s=1}^{n_c} \varphi_{is}^2 d_i \geq 2\zeta_s m_s \omega_s (s = 1, 2, \dots, n_c)$$

$$2) d_i \geq 0$$

式中 φ_{is} ——振型矩阵中第 i 行第 s 列的元素;

m_s 、 ζ_s 、 ω_s ——分别为第 s 阶模态质量、模态阻尼比、模态频率。

(2) 当采用耦合速度反馈时, n_c 个受控模态的动力学方程为

$\overline{M}_c \ddot{q}_c + \overline{C}_c \dot{q}_c + \overline{K}_c q_c = \phi_c^T f + \phi_{ac}^T u_a$ (19.5-85)
 式中 $\overline{M}_c, \overline{C}_c, \overline{K}_c$ —— n_c 个受控模态的模态质量矩阵、模态阻尼矩阵、模态刚度矩阵；

q_c —— 受控模态坐标；
 ϕ_c^T —— ϕ^T 的前 n_c 行；
 ϕ_{ac}^T —— ϕ^T 的前 n_c 行、前 n_a 列组成的矩阵，若 $n_c = n_a$ ，则 ϕ_{ac} 为方阵。

设计控制律使阻尼力为
 $u_a = \phi_{ac}^{-1} D_c \dot{q}_c$ (19.5-86)

式中 $D_c = \text{diag} [2\zeta_j m_j \omega_j]$ ($j=1, 2, \dots, n_c$)；
 ζ_j 为第 j 个受控模态阻尼比。

由于 $\dot{x}_a = \phi_{ac} \dot{q}_c + \phi_{ac} \dot{q}_c$ (q_r 为 $n - n_c$ 阶剩余模态矢量)，在 q_r 较小时，可略去 q_r ，则

$$\dot{q}_c = \phi_{ac}^{-1} \dot{x}_a \quad (19.5-87)$$

式 (19.5-87) 代入式 (19.5-86) 得

$$u_a = \phi_{ac}^{-T} D_c \phi_{ac}^{-1} \dot{x}_a \quad (19.5-88)$$

该方法未考虑剩余模态的影响，设计出的控制系统有可能出现“溢出”而导致系统不稳定，可选用修正的独立模态空间控制法。

在主动阻振中常用的元件是压电晶体。将其粘贴在结构高应变区的位置上，利用其压电效应可作为传感器，测得引起结构应变的振动信息。利用其逆压电效应可作为作动器，对其施加控制信号，在交变电场作用下，产生与振动引起的变形反相的变形，能有效地抑制结构的振动。

图 19.5-5 为压电阻尼试验原理图，在悬臂

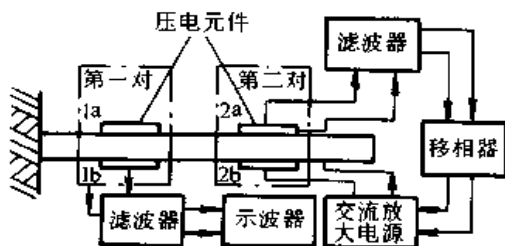


图 19.5-5 压电阻尼试验原理图

铝梁的上、下两侧分别粘贴有 1a、1b 和 2a、2b 两对压电薄膜。可通过以下 5 种途径使梁的模态阻尼比增加：① 1a 作为传感器，1b 作为作动器；② 2a 为传感器；2b 为作动器；③ 2a 为传感器，1b、2b 为作动器；④ 2a（或 2b）作传感器，1a、1b 作为作动器；⑤ 1a（或 1b）作传感器，2a、2b 作为作动器。

在梁受外部脉冲激励下，测得以上 5 种情况梁的首阶模态阻尼比随驱动电压变化的曲线，见图 19.5-6。由图看出如下几点。

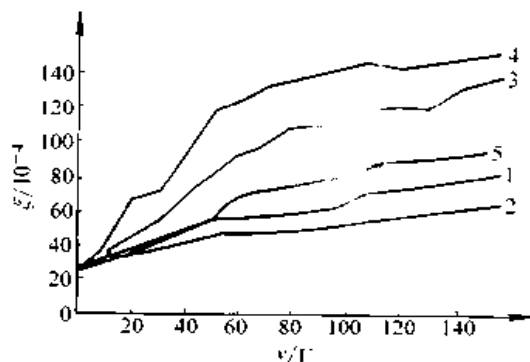


图 19.5-6 模态阻尼比随驱动电压的变化曲线

1) 压电晶体贴于梁后，梁的首阶模态阻尼比均增加，并且随着驱动电压的提高而增加。

2) 上下两侧驱动片同时作用（第 4、5 两种情况）及同侧两驱动片同时作用（第 3 种情况）时提高的模态阻尼比要大。

3) 驱动片在不同位置，所实现的模态阻尼比不同。在结构高应变区位置粘上的压电晶体作为作动器，效果要好。

4.3 主动吸振

控制力改变吸振器的惯性元件或弹性元件的特性，或直接驱动吸振器的振动体按一定规律运动，使受控对象的振动转移到吸振器上，达到减振的目的，称为主动吸振。主动吸振器有频率可调和非频率可调两类。频率可调式动力吸振器的固有频率能自动跟随外界激振频率的变化，始终处于调谐状态，从而使受控对象处于振动达到最小值的反共振状态。

4.3.1 转动惯量可调式动力吸振器

图 19.5-7 为转动惯量可调的倒立摆的示意图。其固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{ka^2}{ml^2} - \frac{g}{l}} \quad (19.5-89)$$

式中 m —— 滑动质量；

k —— 弹簧刚度；

g —— 重力加速度。

控制信号驱动步进电机转动，带动丝杠转动，滑动质量 m 的位置变化，从而使 m 绕 O 点的转动惯量发生变化。也即 l 变化使其固有频率

ω_n 变化，成为频率可调的摆式动力吸振器。

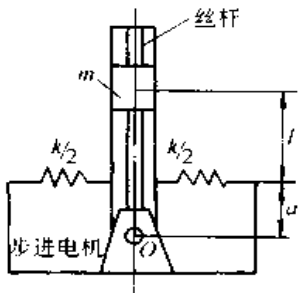


图 19.5-7 转动惯量可调式动力吸振器

图 19.5-8 为质量可调式动力吸振器的一种形式。控制信号指令作动器使附加质量 m_1 处于 1、2 两个位置，在 1 位置时其固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (19.5-90)$$

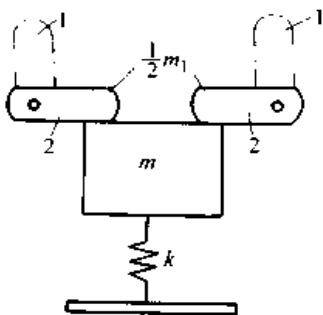


图 19.5-8 质量可调式动力吸振器

在 2 位置时其固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m + m_1}} \quad (19.5-91)$$

形成了频率可调式动力吸振器。

4.3.2 刚度可调式动力吸振器

为使动力吸振器成为频率可调式，除了上述调节其转动惯量或质量外，还可调节其刚度，具体有金属、电磁和空气等弹簧的刚度。

图 19.5-9 为两种弹性元件刚度可调式动力吸振器。其中图 19.5-9a 为由质量块、弹性梁和步进电机组成的动力吸振器。控制信号驱动步进电机转动，带动质量块在弹性梁上左、右移动，弹性梁起作用的长度在改变，动力吸振器的刚度变化，从而使其固有频率变化，图 19.5-9b 为由质量块、复合片弹簧、丝杠套筒及步进电机组成

的动力吸振器。控制信号驱动步进电机转动，带动丝杠套筒机构中的丝杠转动，套筒上、下运动，使片弹簧分开的程度改变就改变两端对中心点的刚度。这种片弹簧的最大刚度与最小刚度之比达 62，特别适用于控制旋转机械启动和停止时的振动。

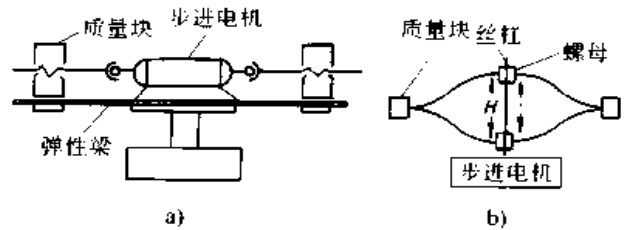


图 19.5-9 刚度可调式动力吸振器

图 19.5-10 为用于控制扭转振动的由定子与动子组成的电磁式动力吸振器。根据反应式步进电机能够产生反应力矩的原理，通过调节线圈中的激励电流，就可调节定子与动子之间的电磁力矩随二者相对转角而变的程度，也即电磁弹簧的刚度。实验表明，这种动力吸振器可在较宽的频域内获得较好减振效果，在受控对象固有频率附近，减振效果更好。

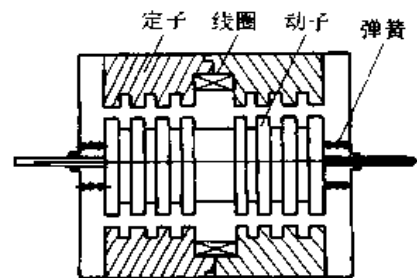


图 19.5-10 电磁式动力吸振器

图 19.5-11 为气液压力动力吸振器原理图。吸振器动力学模型的质量由双杠、活塞等零件组成，弹簧由支撑弹簧与气室所构成的空气弹簧并联而成。连通管沟道上、下油腔，当油腔中的压力升高时，气室中的压力也随之上升，气室容积减小，空气弹簧的刚度增大。通过调节向上、下油腔供油的液压系统的油压，就可调节空气弹簧的刚度。实验表明，这种动力吸振器在共振区减振达 86%，在高频区减振达 65%，适用于对中高频振动的控制。

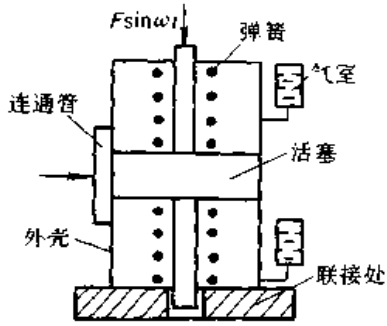


图 19.5-11 气液式动力吸振器

为使以上各种频率可调式动力吸振器具有最佳减振效果，应使其处于调谐状态。由机械振动学知，当动力吸振器处于调谐状态时，吸振器与受控对象二者质量块位移的相位差为 $\varphi = -\arctan(1/\eta)$ ， η 为吸振器的损耗因子。在主动控制过程中，随时检测 φ ，只要吸振器处于非调谐状态， φ 角就偏移，此时控制器发生指令，使吸振器的质量或刚度变化而处于调谐状态。

4.3.3 主动式有阻尼动力吸振器

图 19.5-12 为安装于高层建筑上的主动式有阻尼动力吸振器。其工作原理是，根据测量系统测得受控对象的振动信息，及设计好的控制律，在动力吸振器的质量块与受控对象之间施加控制力，吸振器的质量块将在控制力 $u(t)$ 、阻尼力 $c_2\dot{z}$ 和弹性力 k_2z 的作用下产生振动。这三个力同时反作用于受控对象，达到减振的目的。

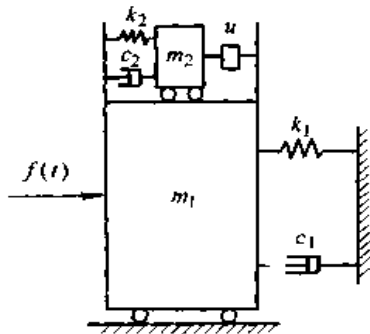


图 19.5-12 主动式有阻尼动力吸振器

由图 19.5-12 知，系统的运动方程为

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = c_2\dot{z} + k_2z + f(t) - u(t) \quad (19.5-92a)$$

$$m_2\ddot{z} + c_2\dot{z} + k_2z = u(t) - m_2\ddot{x}_1 \quad (19.5-92b)$$

式中 $z = x_2 - x_1$ 为 m_2 与 m_1 的相对位移。

设 $x = [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad \dot{z}]^T$ ，把式 (19.5-92) 改写为状态方程，得

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_1f \quad (19.5-93)$$

若状态量 x 可观测，则应用确定性最优控制律的设计方法，令其目标函数为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Qx + ru^2) dt \quad (19.5-94)$$

求取最优控制律 $u = -Fx$ ，使 J 极小。

4.4 主动隔振

在常规隔振的基础上并联主动控制的作动器，或者用作动器代替常规隔振装置的部分或全部元件的隔振，称为主动隔振。

4.4.1 全主动隔振

图 19.5-13 为单自由度系统全主动隔振系统的原理图，由图知，系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{u} + ku + f(t) \quad (19.5-95)$$

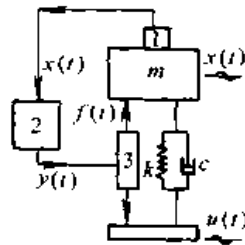


图 19.5-13 全主动隔振系统

式中 m, c, k —— 隔振对象的质量、阻尼、刚度；

u, f —— 基础激励、作动器的控制力。

对式 (19.5-92) 进行拉式变换，得

$$(ms^2 + cs + k)X(s) = (cs + k)u(s) + F(s) \quad (19.5-96)$$

(1) 保证主动隔振系统稳定应选的控制律

当 $F(s) = 0$ ，即未主动隔振时，由式 (19.5-96) 得

$$X_0(s) = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k}u(s) \quad (19.5-97)$$

当 $F(s) = -W(s)X(s)$ 时，由式 (19.5-96)

得

$$X(s) = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k + W(s)}u(s) \quad (19.5-98)$$

二式相比得

$$\frac{X(s)}{X_0(s)} = \frac{ms^2 + cs + k}{ms^2 + cs + k + W(s)} \quad (19.5-99)$$

令 $s = j\omega$ 得

$$\frac{X(\omega)}{X_0(\omega)} = \frac{k - m\omega^2 + jc\omega}{k - m\omega^2 + jc\omega + W(\omega)} \quad (19.5-100)$$

为使主动隔振系统稳定，必须选择 $W(s)$ ，令 $X(\omega)/X_0(\omega) < 1$ ， $\omega \in [\omega_1, \omega_2]$ ， ω_1, ω_2 为隔振系统的上、下限工作频率；

(2) 控制律的一般形式

如果选择 $W(s) = as^2 + bs - d$ ，则由式 (19.5-98) 得

$$X(s) = \frac{cs + k}{(m+a)s^2 + (c+b)s + (k-d)} u(s) \quad (19.5-101)$$

从式 (19.5-101) 看出，有 $W(s) = as^2 + bs - d$ 控制律的主动隔振系统具有以下特点：①在隔振弹簧的静变形仍是 mg/k 的条件下，使系统的实际质量由 m 增加到 $(m+a)$ ；刚度由 k 减小到 $(k-d)$ ；②产生与隔振对象绝对速度成正比的阻尼力，使系统的阻尼系数由 c 增加到 $(c+b)$ 。这些都有利于隔振效果。

(3) 主动反共振的控制律

如果选择 $W(s) = \omega_n^2/(s^2 + \omega_n^2)$ ，则由式 (19.5-100) 得

$$\frac{X(\omega)}{X_0(\omega)} = \frac{k - m\omega^2 + jc\omega}{k - m\omega^2 + jc\omega + \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2}}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_n} \left| \frac{X(\omega)}{X_0(\omega)} \right| = 0 \quad (19.5-102)$$

从式 (19.5-102) 看出，当激振频率 ω 等于固有频率 ω_n 时，系统对扰动的传递率为零，从而使该频率下的隔振效果十分显著，这就是主动反共振隔振。

4.4.2 半主动隔振

既不采用消耗能量大的、较复杂的全主动隔振装置，又争取具有全主动隔振相近的隔振效果的隔振，称为半主动隔振。通常采用控制能量小、可连续调节阻尼力的主动式阻尼器，进行半主动隔振。图 19.5-14 为其示意图。例如通过调节阻尼器油孔的大小来调节半主动隔振系统产生的阻尼力，使其尽可能接近全主动隔振系统产生的阻尼力，就能做到既省力又方便地实现与全主动隔振相接近的隔振效果。

设全主动隔振系统产生的阻尼力（称为理想

阻尼力）为

$$F_{des} = -c_1 \dot{x} \quad (19.5-103)$$

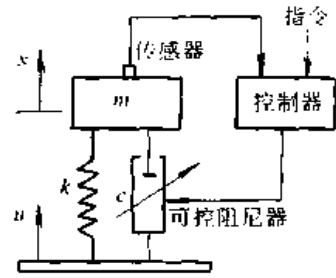


图 19.5-14 半主动隔振系统

而半主动隔振系统产生的阻尼力为

$$F_{act} = -c(\dot{x} - \dot{u}) \quad (19.5-104)$$

式中 c_1, c ——全、半主动隔振系统的阻尼系数；

\dot{x}, \dot{u} ——隔振对象、基础振动的绝对速度。

按以下原则调节 c 。

1) 如果 F_{des} 与 F_{act} 同号，则调节半主动隔振系统的阻尼系数 c ，使 $F_{act} = F_{des}$ ；

2) 如果 F_{des} 与 F_{act} 反号，则令 $F_{act} = 0$ 。

表达为数学语言为

$$\left. \begin{aligned} F_{act} = F_{des}, & \quad \dot{x}(\dot{x} - \dot{u}) \geq 0 \\ F_{act} = 0, & \quad \dot{x}(\dot{x} - \dot{u}) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (19.5-105)$$

按照式 (19.5-105) 的调节规律，可使半主动隔振的效果接近全主动隔振的效果。为实现此目标，必须对阻尼器进行连续调节。更简单的方法是不连续调节，只实行“开-关”控制，即

$$\left. \begin{aligned} F_{act} = -c(\dot{x} - \dot{u}), & \quad \dot{x}(\dot{x} - \dot{u}) \geq 0 \\ F_{act} = 0, & \quad \dot{x}(\dot{x} - \dot{u}) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (19.5-106)$$

图 19.5-15 为半主动隔振系统的控制逻辑。

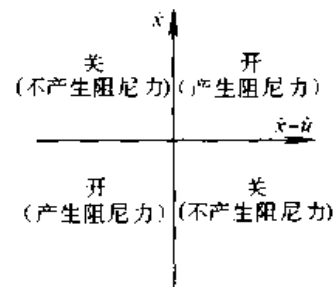


图 19.5-15 半主动隔振控制逻辑

试验表明，半主动隔振易于实现，控制能量小，隔振效果接近全主动隔振，正被推广应用。

4.4.3 主动隔振的作动器

实现主动隔振的作动器有很多类型，包括：电液伺服型、机电型、伺服气垫型、电磁型、磁悬浮型和电流变流体、磁致伸缩材料、压电材料型等。

图 19.5-16 为采用伺服气垫为作动器的隔振系统。从图看到，被隔对象 m 安装在气缸的活塞上，基础的振动 $u(t)$ 经过气体，传到 m 产生的振动为 $x(t)$ 。由于气体具有弹性和阻尼的作用，已隔离了一部分振动，再经过 $x(t)$ 与 $u(t)$ 之差 $\delta(t)$ ，驱动滑阀控制进出上、下气缸气体的流率，使活塞保持理想的平衡位置，进一步提高隔振效果。

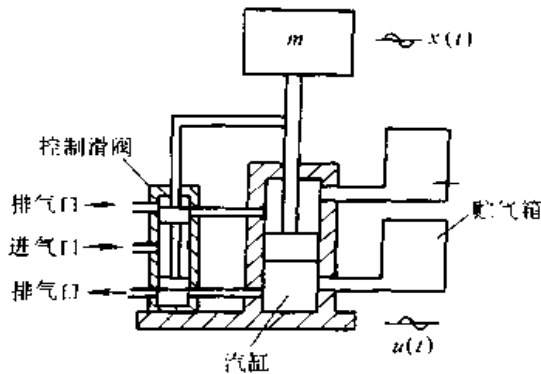


图 19.5-16 伺服气垫隔振系统示意图

根据振动原理及气体流量的公式，推导出图 19.5-16 所示系统的振动传递率为

$$\eta = \frac{x}{u} = \left\{ \frac{\left(\frac{G}{Nm\omega^3} - 2\zeta\lambda^2 \right)^2 + \left(1 + 2\zeta \frac{G}{Nm\omega^3} \right)^2 \lambda^2}{\left[\frac{G}{Nm\omega^3} - 2\zeta \left(1 - \frac{\lambda^2}{N} \right) \lambda^2 \right]^2 + \left[\left(1 + 2\zeta \frac{G}{Nm\omega^3} \right) \lambda - \frac{N+1}{N} \lambda^3 \right]^2} \right\}^{1/2} \quad (19.5-107)$$

式中 N 为容积比，贮气箱容积与气缸有效容积之比； λ 为频率比，激振频率与系统固有频率之比； ζ 为系统的阻尼比； G 为控制增益，单位相对位移流过滑阀气体质量的流率。

分别给定一些参数，选择另一些参数为变量，按式 (19.5-107) 绘制传递率的曲线法，就可得到各参数对传递率的影响，为选择使传递率最小的参数提供依据。

图 19.5-17 为电液伺服隔振系统示意图，从

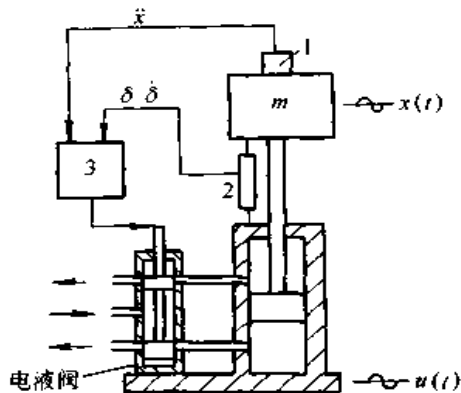


图 19.5-17 电液伺服隔振系统示意图

图看出，传感器 1 测量被隔对象 m 的振动加速度 \ddot{x} ，传感器 2 测量被隔对象与基础间的相对位移 δ 和相对速度 $\dot{\delta}$ ，这些振动信号输入控制器 3 中进行组性组合和放大（或经过其他控制律的处理）得反馈控制信号。反馈信号驱动电液阀，控

制进、出液压缸上、下腔油的流率，使活塞上、下移动，产生理想的控制力，减小基础振动引起被隔物体的振动。

根据油（通过活塞面积 A ）的流量 q 的简化连续性方程

$$q = A\dot{\delta} \quad (19.5-108)$$

和反馈信道方程

$$q = -(c_1\ddot{x} + c_2\dot{\delta} + c_3\delta) \quad (19.5-109)$$

推导出绝对位移 x 对基础位移 u 的传递率 η_x 和相对位移 δ 对基础位移 u 的传递率 η_δ ，分别为

$$\eta_x = \frac{x}{u} = \frac{(c_2 + A)s + c_3}{c_1s^2 + (c_2 + A)s + c_3} \quad (19.5-110a)$$

$$\eta_\delta = \frac{\delta}{u} = \frac{-c_1s^2}{c_1s^2 + (c_2 + A)s + c_3} \quad (19.5-110b)$$

如果在反馈控制信号中，再引入相对位移 δ 的积分，则反馈信道方程为

$$q = -(c_1\ddot{x} + c_2\dot{\delta} + c_3\delta) + c_4 \int_0^t \delta(\tau) d\tau \quad (19.5-111)$$

又推导出相应的传递率为

$$\eta_x = \frac{(c_2 + A)s^2 + c_3s + c_4}{c_1s^3 + (c_2 + A)s^2 + c_3s + c_4} \quad (19.5-112a)$$

$$\eta_\delta = \frac{-c_1s^3}{c_1s^3 + (c_2 + A)s^2 + c_3s + c_4} \quad (19.5-112b)$$

把 $s = j\omega$ 代入式 (19.5-110) 和式 (19.5-112)，得传递率的幅频响应特性，可以求出使传递率最小的 c_1, c_2, c_3 和 c_4 ，达到最佳隔振效果。

第6章 振动的利用

1 振动利用的工艺特性及应用范围

机械振动在一些生产过程中具有很多有益的用途,不仅可以完成很多工艺过程,而且能够提高生产效率。根据其应用的工艺特性,分类介绍如下。

(1) 输送给料类

振动使物料在工作体(槽体或管体)内,按指定方向作推移式或抛掷式运动,达到省时、省力的对物料进行输送,或边输送边加工的目的。若在封闭的工作体内进行输送,可以输送有害有毒及高温的物料,减少环境污染。常见的有:振动给料机、振动输送机、振动料斗、仓壁振动器等。

(2) 密实成型类

振动降低颗粒状物料的内摩擦,增加其“流动性”易于充填和密实。经实验证明,利用振动成型所需的压力,仅是一般成型所需压力的几十分之一,能提高密实成型的效率,还能改善成型的质量。常见的有:振动压路机、振动夯土机、振动铸造造型机以及混凝土预制件、耐火砖、石墨电极的振动成型机等。

(3) 筛选冷却类

振动使物料在工作体内作相对运动,产生一定的惯性力和碰撞力,使物料易于散开和脱离介质,能够提高筛分、选别、脱水、冷却和干燥等工艺过程的效率。常见的有:振动筛、振动摇床、振动脱水机、振动冷却机、振动干燥机以及重介质振动溜槽等。

(4) 磨碎清理类

振动加剧研磨介质(如磨料、钢球)和物料(或物件)之间的磨擦和冲击,使物料易于破碎和粉磨及物件的清理和光饰等。常见的有:振动球磨机、振动光饰机、振动除灰机及反复冲击铸件的落砂机。

(5) 振捣打击类

振动使贯入物附近的土壤、岩石或其他混合物的疏松、破碎,从而降低它们对贯入物的阻

力,可加快贯入速度提高贯入效率。常见的有:振捣器、振动凿岩机、振动钻探机以及振动沉、拔桩机等。

(6) 振动加工类

在加工过程中,使工具振动,把连续加工(能量均匀分布)变成脉冲式的断续加工(能量集中、瞬时高速),能减小加工所需的力,提高加工精度,延长工具寿命。常见的有:振动轧制、振动拉丝、振动压印、振动切割以及振动金属切削等。

(7) 测试监测类

由测试装置对振动物体(或机器)进行测试,获取振动信号,对信号加工与处理可以:①评价物件承受振动和冲击的能力,为物件动态优化设计提供依据;②分析产生振动的原因,采取控制振动的措施;③诊断故障的原因和部位,进行故障预报,有效地完成运行监测。常用的有:激振-测振系统、动力强度试验系统、参数识别系统以及运行机械振动监测系统。

(8) 其他

振动时效 对铸件或焊件进行激振,加快其形变晶粒的重新排列过程。缩短消除内应力所需的时间。

振动石油勘探 激振力作用在地面上,令其振动波向地下深处传播,对石油反射的振动波,进行放大、处理和分析,得到地下藏油的信息。

振动理疗 对人体病痛部位进行振动按摩,加强病痛部位的血液循环,促进康复。

2 常用振动机械的运动学参数

2.1 振动强度

$$K = \frac{A\omega^2}{g} = \frac{A}{g} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \quad (19.6-1)$$

式中 A ——振幅 (mm);

ω ——角频率 (rad/s);

g ——重力加速度 (mm/s²);

n ——转速 (r/min)。

由式(19.6-1)看出, K 为无量纲指数。当振幅越大, 频率越高(即振动加速度的最大值越大)、振动强度越大, 也即振动的作用越大。但是, 机器所受的动载荷也越大。因此, 要在低于许用值 $[K]=5\sim 10$ 的条件下, 选用较大的 K 值。对大多数振动输送机, 为满足输送量大、输送距离长且机器使用寿命较长的要求, 又不过分加强机器的强度和刚度, 宜选用 $K=4\sim 6$ 。对于振动给料机, 可选用 $K=10$ 。

对同一 K 值, A 与 ω 可在不同范围内变动, 随振动机械不同而异。对电磁式振动机械, 一般选用高频小幅: $n=1\ 500\sim 3\ 000\text{ r/min}$, $A=0.5\sim 3\text{ mm}$; 对惯性式振动机械, 一般选用中频中幅: $n=700\sim 1\ 800\text{ r/min}$, $A=1\sim 10\text{ mm}$; 对弹性连杆式振动机械, 一般选用低频大幅: $n=400\sim 1\ 000\text{ r/min}$, $A=3\sim 30\text{ mm}$ 。对振动细筛宜用小幅, 对振动粗筛宜用大幅。

2.2 滑行指数

直线运动正向滑行指数为

$$D_k = K \frac{\cos(\mu_0 - \delta)}{\sin(\mu_0 - \alpha_0)} \quad (19.6-2a)$$

直线运动反向滑行指数为

$$D_q = K \frac{\cos(\mu_0 + \delta)}{\sin(\mu_0 + \alpha_0)} \quad (19.6-2b)$$

式中 K ——振动强度, 见式(19.6-1);
 μ_0 ——静摩擦角, $\mu_0 = \arctan(f_0)$;
 f_0 ——物料与工作面之间的静摩擦系数;
 α_0 ——工作面安装倾角, 向下输送时取“+”号, 向上输送时, 取“-”号;
 δ ——振动方向与工作面之间的夹角。

对易碎、粉状或易产生噪声的物料, 宜用滑行状态, 要得到滑行状态, D_k 或 D_q 应大于1。对振动输送机宜用 $D_k=2\sim 3$, $D_q \leq 1$ 的仅有正向滑行的状态。对振动冷却机、低速振动筛和少数振动输送机, 宜用 $D_k > 1$, $D_q > 1$ 的正、反向滑行并存的运动状态。

2.3 抛掷指数

$$D = K \frac{\sin \delta}{\cos \alpha_0} \quad (19.6-3)$$

式中 K, δ, α_0 见式(19.6-2)。

输送坚硬、黏性、混合或难以处理的物料,

宜用抛掷运动状态, 为此 D 应大于1。对长距离大产量的振动输送机 $D=1.4\sim 2.5$; 对电磁振动给料机 $D=2.5\sim 3.3$; 筛选易筛物料 $D=2\sim 2.8$; 难筛物料 $D=3\sim 5$; 对一般物料 $D=2.5\sim 3.3$ 。

2.4 振动方向角

$$\delta = \arctan \frac{1-c}{(1+c)f_0} \quad (19.6-4)$$

式中 $c = \frac{D_q \sin(\mu_0 + \alpha_0)}{D_k \sin(\mu_0 - \alpha_0)}$;

$D_q, D_k, \mu_0, f_0, \alpha_0$ 见式(19.6-2)。

滑行运动时, 对密度大、粒度细易破碎的物料宜用较小的 δ ; 对水分多、黏性强、较坚硬的物料及筛分作业时宜用较大的 δ 。

抛掷运动时, 为提高输送速度, 对不同的安装倾角 α_0 有一个最佳振动方向角 δ 。因此, 应根据振动强度 K 和安装倾角 α_0 , 按图 19.6-1 选择 δ 。

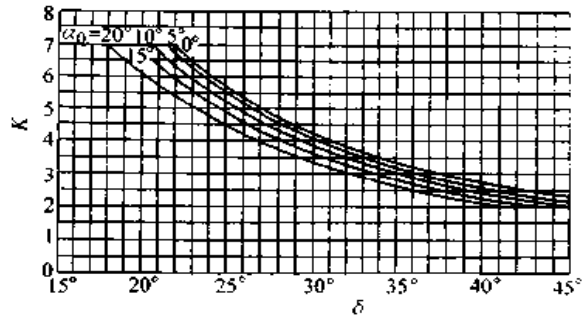


图 19.6-1 振动强度 K 、安装倾角 α_0 与最佳振动方向角 δ

2.5 安装倾角

长度较大的振动输送机安装倾角 $\alpha_0=0$ 。向上输送时, α_0 不能大于静摩擦角 μ_0 。一般 $\alpha_0 < 15^\circ\sim 17^\circ$, 对粒度较大或成球形易于向下滚动的物料 $\alpha_0 < 12^\circ$ 。

振动上送机和利用摩擦系数差异进行选分的振动分选机 $\alpha_0=4^\circ\sim 15^\circ$, 向下输送时, 为避免工作面过于磨损 $\alpha_0 < 15^\circ\sim 20^\circ$, 一般 $\alpha_0=10^\circ$ 。

2.6 输送速度

(1) 物料正向直线滑动的理论平均速度

$$V_k = A\omega \cos \delta (1 + f \tan \delta) \frac{P_{km}}{2\pi} \quad (19.6-5)$$

式中 A —— 振幅;
 ω —— 角频率;
 δ —— 振动方向角;
 f —— 物料与工作面的动摩擦系数;
 P_{km} —— 速度系数, 根据实际正向滑始角 φ'_k 及假想正向滑始角 φ_k , 从图 19.6-2 查出。 φ'_k 与 φ_k 的计算公式为

$$\varphi'_k = \arcsin\left(\frac{1}{D_k}\right) \quad (19.6-6a)$$

$$\varphi_k = \arcsin \frac{g \sin(\mu - \alpha_0)}{A \omega^2 \cos(\mu - \delta)} \quad (19.6-6b)$$

(2) 物料反向直线滑动的理论平均速度

$$V_{q_1} = -A \omega \cos \delta (1 - f \tan \delta) \frac{P_{qe}}{2\pi} \quad (19.6-7)$$

式中 A, ω, δ, f —— 见式(19.6-5);

P_{qe} —— 速度系数, 根据实际反向滑始角 φ'_q 与假想反向滑始角 φ_q , 从图 19.6-2 查出。 φ'_q 与 φ_q 的计算公式为

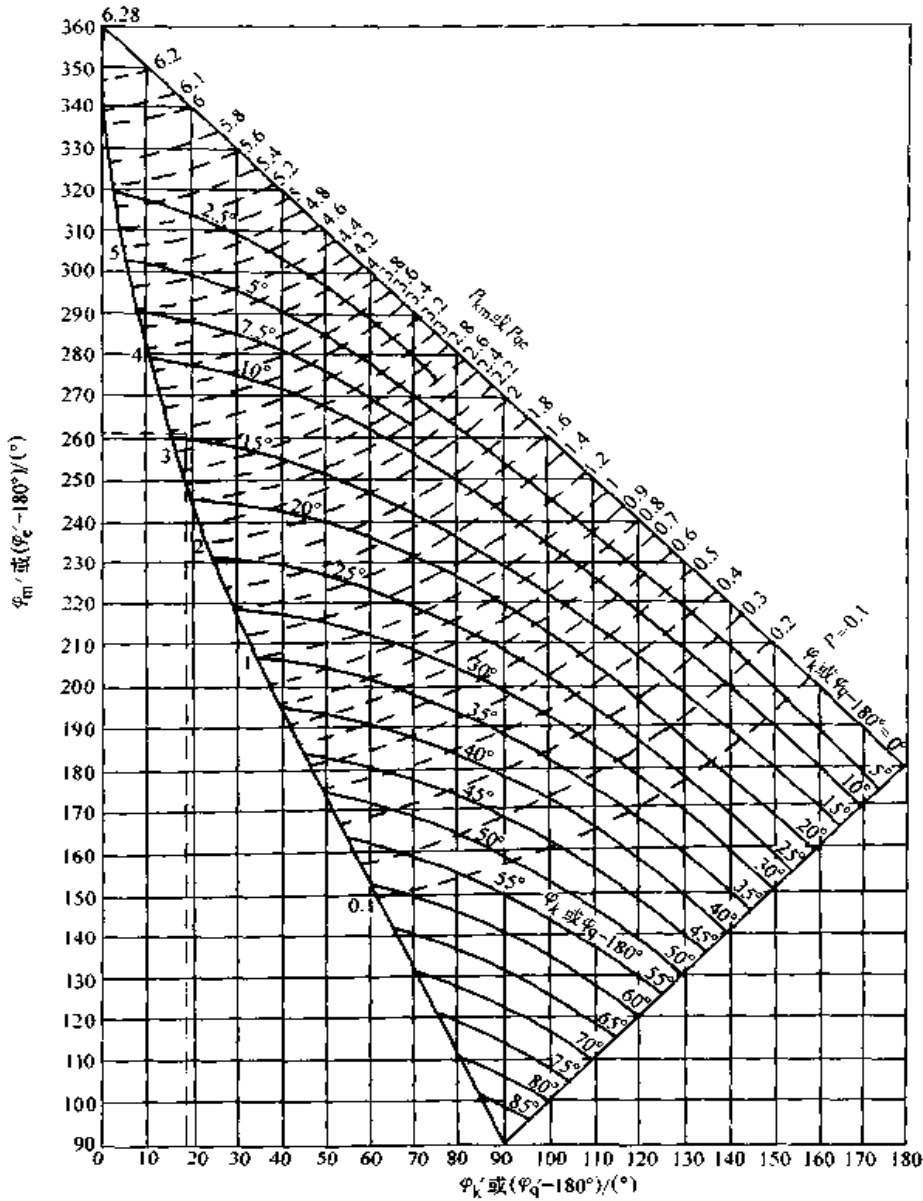


图 19.6-2 正(反)向实际滑始角 φ'_k (φ'_q) 与正(反)向滑止角 φ'_m (φ'_e) 及正(反)向假想滑始角 φ_k (φ_q) 和速度系数 P_{km} (P_{qe}) 的关系曲线

$$\varphi'_u = \arcsin\left(\frac{1}{D_u}\right) \quad (19.6-8a)$$

$$\varphi_u = \arcsin \frac{-g \sin(\mu + \alpha_0)}{A\omega^2 \cos(\mu + \delta)} \quad (19.6-8b)$$

式中 D_u ——见式 (19.7-2b);

A, ω, δ, g ——见式 (19.6-5);

$\mu = \arctan f$ ——动摩擦角。

(3) 正反向直线滑动共存时的理论平均速度

$$V = V_k + V_c \quad (19.6-9)$$

式中 V_k ——见式 (19.6-5);

V_c ——见式 (19.6-7);

(4) 物料抛掷的理论平均速度

$$V_d = A\omega \cos \delta \frac{\pi i_D^2}{D} (1 + \tan \alpha_0 \tan \delta) \quad (19.6-10)$$

式中 $A, \omega, \alpha_0, \delta$ ——见式(19.6-2)与式(19.6-5);

i_D ——抛离系数, 根据抛掷指数 D 从图 19.6-3 查出。

(5) 实际输送速度

当 $D \leq 1.75$ 时, 按式 (19.6-5) 算出 V_k ,

按下式算出滑行运动的实际输送速度为

$$V_{mk} = V_k \gamma_d \gamma_k \quad (19.6-11)$$

式中 γ_d, γ_k ——复合运动影响系数, 从表 19.6-1 查出。

表 19.6-1 复合运动影响系数

抛掷指数 D	≤ 1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3
抛掷运动影响系数 γ_d	1.0	1.1~1.3	1.2~1.4	1.3~1.5	—	—	—
滑行运动影响系数 γ_k	—	—	—	1.1~1.15	1.05~1.1	1.0~1.05	1.0

表 19.6-2 安装倾角修正系数

安装倾角 α_0	$-15^\circ \sim +5^\circ$	10°	15°
安装倾角修正系数 γ_a	1	1.2~1.3	1.25~1.6

表 19.6-3 物料影响系数

物料状况	块状物料	颗粒状物料	粉末状物料
物料影响系数 γ_m	0.8~0.9	0.9~1.0	0.6~0.7

表 19.6-4 料层厚度影响系数

物料层厚度	薄料层	中厚料层	厚料层
料层厚度影响系数 γ_h	0.9~1.0	0.8~0.9	0.7~0.8

表 19.6-5 物料松散密度

物料名称	无烟煤	焦炭	泥土、砂石	矿石	水泥	石灰石
松散密度 γ (t/m^3)	0.8~0.95	0.36~0.53	1.4~1.9	1.3~3.0	0.9~1.7	1.2~1.5

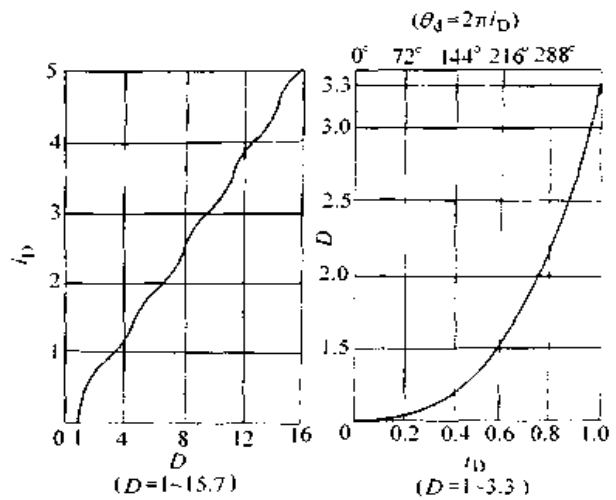


图 19.6-3 抛掷指数 D 与抛离系数 i_D

当 $D \geq 1.75$ 时, 按式 (19.6-10) 算出 V_d , 由下式算出抛掷运动的实际输送速度为

$$V_{md} = V_d \gamma_k \gamma_a \gamma_m \gamma_h \quad (19.6-12)$$

式中 γ_k ——滑行运动影响系数(见表 19.6-1);

γ_a ——安装倾角修正系数(见表 19.6-2);

γ_m ——物料影响系数(见表 19.6-3);

γ_h ——料层厚度影响系数(见表 19.6-4)。

2.7 生产率

振动输送机、振动给料机、振动冷却机、振动筛等振动机械的生产率为

$$Q = 3600 h B V_m \gamma \quad (t/h) \quad (19.6-13)$$

式中 h ——物料厚度 (m);

B ——工作面宽度 (m);

V_m ——实际输送速度 (m/s);

γ ——物料松散密度 (t/m^3) (见表 19.6-5)。

3 弹性连杆式振动机的动力特性

这类振动机由偏心轴和弹性连杆组成的激振器驱动工作体振动,进行物料的输送、筛分、选别和冷却等工作。有单质体、双质体、三质体;水平输送、垂直输送;线性、非线性等各种类型。

3.1 单质体弹性连杆式振动水平输送机

图 19.6-4 为单质体弹性连杆式振动机的结构简图及其力学模型。根据其力学模型可得其运动方程为

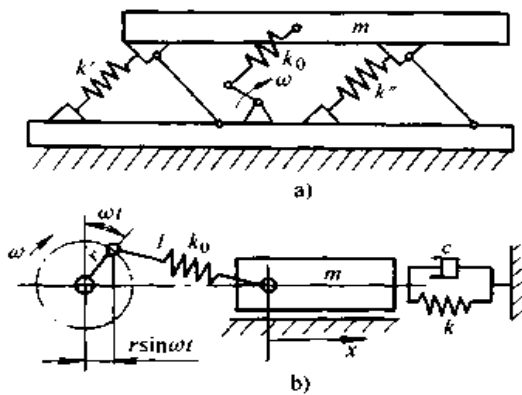


图 19.6-4 单质体弹性连杆式振动水平输送机
a) 结构简图 b) 力学模型

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + (k + k_0)x = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-14)$$

- 式中 m —— 质量;
 c —— 阻尼系数;
 k —— 主振弹簧刚度;
 k_0 —— 连杆弹簧刚度;
 r —— 偏心轴的偏心距;
 ω —— 激振频率。

求解运动方程,得

$$x = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (19.6-15)$$

$$A = \frac{k_0 r}{(k + k_0) \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}$$

- 式中 A —— 振幅;
 φ —— 相位角;
 λ —— 频率比, $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$, 一般取 $\lambda = 0.75 \sim 0.95$;

$$\omega_n \text{ —— 固有频率, } \omega_n = \sqrt{\frac{k + k_0}{m}};$$

$$\zeta \text{ —— 阻尼比, } \zeta = \frac{c}{2\sqrt{m(k + k_0)}}, \text{ 一般取 } \zeta = 0.03 \sim 0.07;$$

这类振动机,结构简单、动力不平衡、传给基础的动力较大。

3.2 弹性连杆式垂直螺旋振动输送机

这类振动机的结构简图,见图 19.6-5。为使物料沿螺旋槽体垂直上升,螺旋槽体除作垂直方向的直线振动外,还需作圆周方向的扭转振动。这个组合振动由弹性连杆激振器及沿圆周方向倾斜布置的主振弹簧和与主振弹簧垂直的导向杆产生。

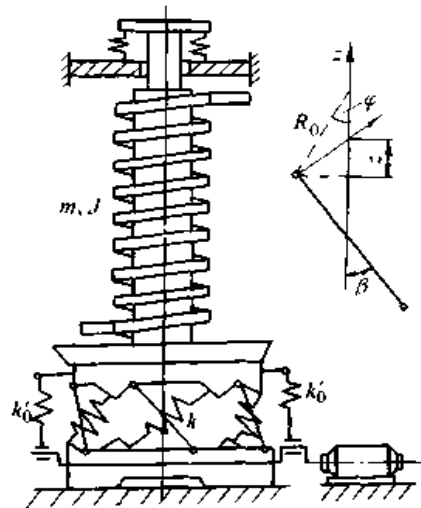


图 19.6-5 弹性连杆式垂直螺旋振动输送机
根据其动力学模型,可得其运动方程为

$$\left(m + \frac{J}{R_0^2 \tan^2 \beta}\right) \ddot{z} + \left(c_z + \frac{c_\psi}{R_0^2 \tan^2 \beta}\right) \dot{z} + \left(k_z + k_0 + \frac{k_\psi}{R_0^2 \tan^2 \beta}\right) z = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-16)$$

- 式中 z —— 垂直直线振动位移;
 ψ —— 扭转振动的角位移;
 m —— 螺旋槽体及输送物料的计算质量;
 J —— 螺旋槽体对其中心线 z 轴的转动惯量;
 c_z, c_ψ —— 垂直、圆周方向的阻尼系数;
 k_z, k_ψ —— 垂直、圆周方向的弹簧刚度;

k_0 —— 连杆弹簧刚度;
 R_0 —— 导向杆端点至 z 轴的距离;
 β —— 导向杆与 z 轴的夹角, $\beta = \arctan(z/R_0\psi)$ 。

求解运动方程得

$$z = A_z \sin(\omega t - \varphi) \quad (19.6-17)$$

$$A_z = \frac{k_0 r}{\left(k_z + k_0 + \frac{k_z}{R_0^2 \tan^2 \beta}\right) \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

$$\varphi_z = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}$$

式中 A_z —— 垂直振幅;

φ_z —— 相位角;

λ —— 频率比, $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$;

ω_n —— 固有频率 (见式 19.6-18);

ζ —— 阻尼比, 计算公式见式 (19.6-19)。

$$\omega_n = \left[\frac{k_z + (k_z + k_0) R_0^2 \tan^2 \beta}{J + m R_0^2 \tan^2 \beta} \right]^{1/2} \quad (19.6-18)$$

$$\zeta = \frac{c_\psi + c_z R_0^2 \tan^2 \beta}{2(J + m R_0^2 \tan^2 \beta) \omega_n} \quad (19.6-19)$$

扭转振动的振幅为

$$\theta_\psi = \frac{A_z}{R_0 \tan \beta}$$

螺旋槽体上离轴心线 z 半径为 R 的圆周上, 具有的切向振幅 A_ψ 和振动方向角 δ_R 分别为

$$A_\psi = R \theta_\psi \quad (19.6-20)$$

$$\delta_R = \arctan \left(\frac{A_z}{A_\psi} \right) = \arctan \left(\frac{R_0}{R} \tan \beta \right) \quad (19.6-21)$$

在螺旋槽体的外缘, 即 $R = R_0$ 的圆周上, 振动方向角 δ 等于导向杆与 z 轴的夹角 β 。如果 R 很小, 方向角很大, 物料上升很大, 旋转很小不能正常的沿螺旋槽向上输送。因此, 要选好 δ 角, 它与螺旋角 α 有关。一般有: 大型机, $\alpha = 3^\circ \sim 8^\circ, \delta = 25^\circ \sim 45^\circ$ 。小型机, $\alpha = 1^\circ \sim 6^\circ, \delta = 10^\circ \sim 25^\circ$ 。

3.3 双质体弹性连杆式振动机

图 19.6-6 为这类振动机的动力学模型, 根据图 19.6-6 得其运动方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_0 + k_1 + k_2) x_1 - (k_0 + k_2) x_2 = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-22)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (k_0 + k_2) x_2 - (k_0 + k_2) x_1 = -k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-23)$$

对二式联立求解得

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t - \varphi_1), x_2 = A_2 \sin(\omega t - \varphi_2) \quad (19.6-24)$$

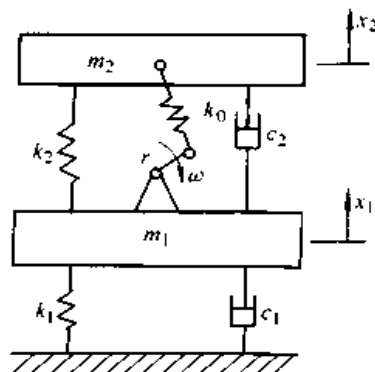


图 19.6-6 双质体弹性连杆式振动机

式中

$$A_1 = \frac{-m_2 \omega^2 k_0 r}{\sqrt{g^2 + h^2}}$$

$$A_2 = \frac{\sqrt{(k_1 - m_1 \omega^2)^2 + (c_1 \omega)^2}}{\sqrt{g^2 + h^2}} k_0 r$$

$$\varphi_1 = \arctan \frac{h}{g}$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{(m_1 \omega^2 - k_1) h - c_1 \omega g}{(m_1 \omega^2 - k_1) g + c_1 \omega h}$$

$$g = (k_1 - m_1 \omega^2)(k_0 + k_2 - m_2 \omega^2) - m_2(k_0 + k_2) \omega^2 - c_1 c_2 \omega^2$$

$$h = (k_0 + k_2 - m_2 \omega^2) c_1 \omega + (k_1 - m_1 \omega^2 - m_2 \omega^2) c_2 \omega$$

式 (19.6-22) 与式 (19.6-23) 方程组的近似解法为, 把方程组中的 k_1 归化到 m_1 中, 使 m_1 变为 m'_1 , 并略去 c_1 。先用 $\frac{m'_1}{m'_1 + m_2}$ 乘式 (19.6-22), 用 $\frac{m_2}{m'_1 + m_2}$ 乘式 (19.6-23) 后, 再令二式相减, 得

$$m \ddot{x} + c_2 \dot{x} + (k_0 + k_2) x = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-25)$$

式中 $m = \frac{m'_1 m_2}{m'_1 + m_2}$;

$$m'_1 = m_1 - \frac{k_1}{\omega^2};$$

$$x = x_1 - x_2$$

求解式 (19.6-23), 得

$$x = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (19.6-26)$$

$$A = \frac{k_0 r}{(k_0 + k_2) \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}$$

$$A_1 = \frac{m}{m_1} A, \quad A_2 = -\frac{m}{m_2} A$$

主振系统的固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k_0 + k_2}{m}}$ ；频率

比 $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n} = 0.75 \sim 0.9$ ；阻尼比 $\zeta = \frac{c_2}{2m\omega_n} = 0.05 \sim 0.07$ 。

隔振系统的固有频率 $\omega_g = \sqrt{\frac{k_1}{m_1 + m_2}}$ ；频率

比 $\lambda_g = \frac{\omega}{\omega_g} = 2.5 \sim 10$ 。

此类振动机有隔振性能，传给基础的动力较小， $\lambda, \zeta, \lambda_g$ 选用以上数据，具有较好的工作性能。

3.4 非线性弹性连杆式振动机

非线性弹性连杆振动机具有较稳定的振幅，可以采用更加接近共振的工作状态，频率比 λ 可增至 0.95。减小所需的激振力。对图 19.6-7 所示的带有间隙的主振弹簧的非线性振动机，还能使工作获得较大的冲击加速度，从而提高筛分的能力。

由间隙 e 产生的非线性阻尼力 $c(x, \dot{x})$ ，和非线性弹性力 $k(x)$ 为

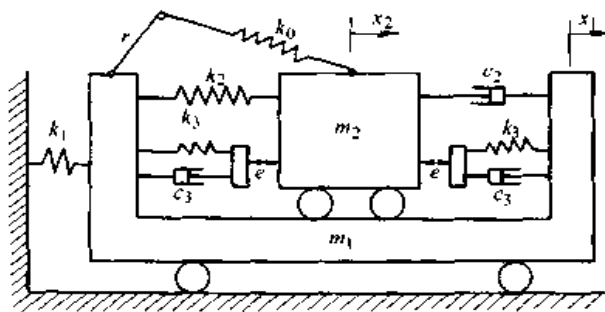


图 19.6-7 非线性双质体弹性连杆振动机

$$c(x, \dot{x}) = \begin{cases} 0, & -e \leq x \leq e \\ c_3 \dot{x}, & e \leq x \leq -e \end{cases} \quad (19.6-27)$$

$$k(x) = \begin{cases} 0, & -e \leq x \leq e \\ k_3(x - e), & e \leq x \\ k_3(x + e), & -e \geq x \end{cases} \quad (19.6-28)$$

式中 e ——间隙；

$$x = x_1 - x_2$$

振动机的运动方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_2 \dot{x} + (k_0 + k_2)x + k_1 x_1 + c(x, \dot{x}) + k(x) = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-29)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x} - (k_0 + k_2)x - c(x, \dot{x}) - k(x) = -k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-30)$$

令 $m'_1 = m_1 - k_1/\omega^2$ ，用 $m_2/(m'_1 + m_2)$ 乘式 (19.6-29)， $m'_1/(m'_1 + m_2)$ 乘式 (19.6-30) 再相减得

$$m \ddot{x} + c_2 \dot{x} + (k_0 + k_2)x + c(x, \dot{x}) + k(x) = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-31)$$

对此非线性方程用等效线性阻尼系数 c_e 和等效线性刚度进行线性化处理，得其近似计算公式为

$$m \ddot{x} + c_e \dot{x} + k_e x = k_0 r \sin \omega t \quad (19.6-32)$$

式中 $m = m'_1 m_2 / (m'_1 + m_2)$ ；

$$c_e = (0.1 \sim 0.14) m \omega;$$

$$k_e = k_0 + k_2 + k_3 \left[1 - \frac{5e}{4A} + \frac{e^5}{4A^5} \right];$$

求解方程得相对振幅 A 和相位角 φ 为

$$A = \frac{k_0 e}{k_e \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}$$

式中 λ ——频率比， $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ ；

$$\omega_n \text{ ——固有频率，} \omega_n = \sqrt{\frac{k_e}{m}};$$

$$\zeta \text{ ——阻尼比，} \zeta = \frac{c_e}{2m\omega_n};$$

质体 1、2 的绝对振幅为

$$A_1 = \frac{m}{m_1} A, \quad A_2 = -\frac{m}{m_2} A;$$

4 惯性振动机的动力特性

这类振动机由偏心质量旋转产生的离心惯性力驱动机体产生振动，进行筛分、脱水、给料、粉磨、落砂、振捣等工艺过程。结构简单激振力容易调整，传给基础的力较小，但安装偏心质量的轴和轴承所受的力较大。

4.1 单轴惯性振动机

4.1.1 激振力通过机体质心的单轴惯性振动机

图 19.6.8 为这类振动机的动力学模型。偏心距为 r 角速度为 ω 的偏心质量 m_0 产生的离心惯性力为 $m_0 r \omega^2$ ，在 x, y 方向的分力为

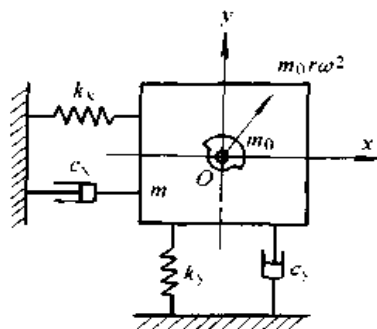


图 19.6.8 单轴惯性振动机 (激振力通过机体质心 O)

$$P_x = m_0 r \omega^2 \cos \omega t, P_y = m_0 r \omega^2 \sin \omega t$$

在 P_x, P_y 的作用下，机体将在 x, y 方向同时振动，其振动方程为

$$\begin{aligned} (m + m_0)\ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t \\ (m + m_0)\ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y &= m_0 r \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (19.6-33)$$

当隔振弹簧的刚度 $k_x = k_y$ 时，机体质心 O 的运动轨迹为圆， $k_x \neq k_y$ 时，机体质心 O 的运动轨迹为椭圆。一般用于非共振状态的振动机，其工作频率与固有频率之比选在 2.5~8 范围内，使其具有较好的隔振性能。

4.1.2 激振力不通过机体质心的单轴惯性振动机

如图 19.6-9 所示，偏心质量 m_0 的旋转中心

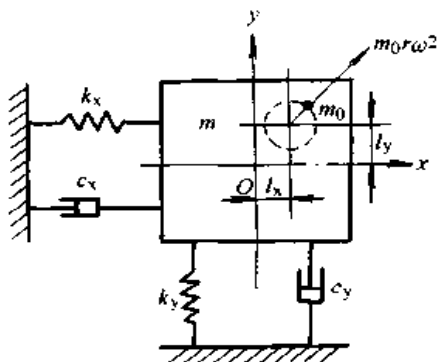


图 19.6-9 单轴惯性振动机 (激振力不通过机体质心 O) 与机体质心在 x, y 方向的距离，分别为 l_x 和 l_y 。此时机体不仅作 x, y 方向的振动，还在激振力矩的作用下，产生绕机体质心的摇摆振动。略去

弹性力与阻尼力的影响，其运动方程为

$$\begin{aligned} (m + m_0)\ddot{y} &= m_0 r \omega^2 \sin \omega t \\ (m + m_0)\ddot{x} &= m_0 r \omega^2 \cos \omega t \\ (J + J_0)\ddot{\varphi} &= m_0 r \omega^2 (l_{oy} \cos \omega t - l_{ox} \sin \omega t) \end{aligned} \quad (19.6-34)$$

式中 J, J_0 ——机体、偏心块对机体质心的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{mm}^2$)；

l_{oy}, l_{ox} ——偏心块回转轴心对机体质心的 y, x 坐标 (mm)；

由此得机体的直线振幅 A_x, A_y 及摆动振幅 Φ 为

$$\begin{aligned} A_x &= A_y = \frac{m_0 r}{m + m_0} \\ \Phi &= \frac{m_0 r}{J + J_0} \sqrt{l_{ox}^2 + l_{oy}^2} \end{aligned} \quad (19.6-35)$$

机体上任意一点 B (相对机体质心的 x, y 坐标 l_{Bx}, l_{By}) 的运动方程为

$$\begin{aligned} x_B &= \frac{m_0 r l_{ox}}{J + J_0} l_{By} \sin \omega t - \left(\frac{m_0 r}{m + m_0} + \frac{m_0 r l_{oy}}{J + J_0} l_{By} \right) \cos \omega t \\ y_B &= \frac{m_0 r l_{oy}}{J + J_0} l_{Bx} \cos \omega t - \left(\frac{m_0 r}{m + m_0} + \frac{m_0 r l_{ox}}{J + J_0} l_{Bx} \right) \sin \omega t \end{aligned} \quad (19.6-36)$$

由此可求出机体上任一点的运动轨迹，它们大都是椭圆。在机体质心 (即 $l_{By} = l_{Bx} = 0$ 处) 的运动轨迹是半径为 $m_0 r / (m + m_0)$ 的圆。

4.1.3 作空间运动的单轴惯性振动机

图 19.6-10 为作空间运动的单轴惯性振动机的示意图。在电机转轴的两端安装有两个偏心块，二偏心块在 z 轴方向的距离为 l_0 ，在 xoy 平面内的夹角为 γ ，上偏心块回转平面距机体质心 O 的距离为 l_1 。当电机转动时，将同时带动二偏心块转动，从而对机体质心 O 产生激振力和激振力矩，可简化为 4 个自由度的系统。不仅产生 x, y 方向的直线振动，而且产生绕 Oy 轴和绕 Ox 轴的摆动。此时机体的运动微分方程为

$$\begin{aligned} (m + m_0)\ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x &= 2 m_0 r \omega^2 \cos \frac{\gamma}{2} \sin \omega t \\ (m + m_0)\ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y &= 2 m_0 r \omega^2 \cos \frac{\gamma}{2} \cos \omega t \\ (J + J_0)\ddot{\varphi}_{oy} + c_{oy} \dot{\varphi}_{oy} + k_{oy} \varphi_{oy} &= 2 m_0 r \omega^2 \left[\left(l_1 + \frac{l_0}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \sin \omega t - \frac{l_0}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \cos \omega t \right] \\ (J + J_0)\ddot{\varphi}_{ox} + c_{ox} \dot{\varphi}_{ox} + k_{ox} \varphi_{ox} &= -2 m_0 r \omega^2 \left[\left(l_1 + \frac{l_0}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \cos \omega t - \frac{l_0}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \sin \omega t \right] \end{aligned} \quad (19.6-37)$$

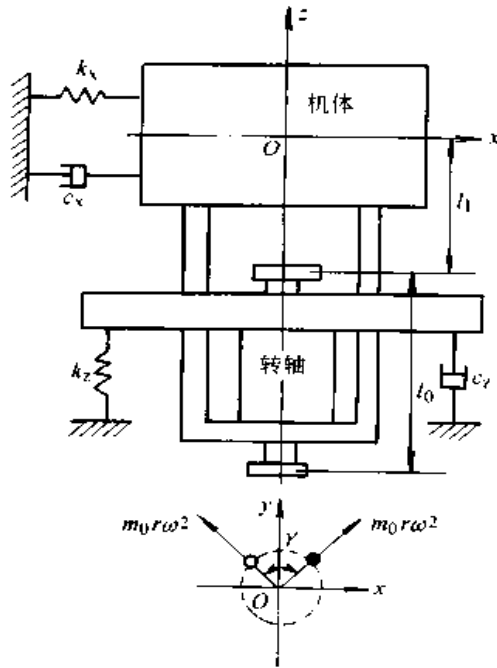


图 19.6-10 作空间运动的单轴惯性振动机

如果 $k_x \approx k_y, k_{oy} \approx k_{ox}, c_x \approx c_y, c_{oy} \approx c_{ox}$

则设 $L = \left[\left(l_1 + \frac{l_0}{2} \right)^2 \cos^2 \frac{\gamma}{2} + \frac{1}{4} l_0^2 \sin^2 \frac{\gamma}{2} \right]$,
求得机体重心的振幅 A 及机体对其质心的摆动幅角 θ 为

$$A = \frac{2 m_0 r \cos \frac{\gamma}{2}}{(m + m_0) \left(\frac{1}{\lambda_0^2} - 1 \right)} \quad (19.6-38)$$

$$\theta = \frac{2 m_0 r L}{(J + J_0) \left(\frac{1}{\lambda_{of}^2} - 1 \right)}$$

式中 m, m_0 —— 机体、偏心块的质量；

J, J_0 —— 机体、偏心块对机体质心的转动惯量；

r —— 偏心距；

λ_0 —— 频率比, $\lambda_0 = \frac{\omega}{\omega_0}$ ；

ω_0 —— 水平方向的固有频率, $\omega_0 =$

$$\sqrt{\frac{k_x}{m + m_0}};$$

λ_{of} —— 频率比, $\lambda_{of} = \frac{\omega}{\omega_{of}}$ ；

ω_{of} —— 摆动的固有频率, $\omega_{of} =$

$$\sqrt{\frac{k_{ox}}{J + J_0}}.$$

机体在此综合振动的作用下, 可完成振动光饰、振动旋回筛等工艺过程。

4.2 双轴惯性振动机

在两个转轴上各安装偏心块, 两轴与机体的安装位置不同, 可产生单向激振力或双向激振力。两转轴的两端各安装偏心块, 又可产生激振力和激振力矩。从而形成多种型式的双轴惯性振动机。

4.2.1 单向激振力双轴惯性振动机

只作直线振动的单向激振力双轴惯性振动机的力学模型, 见图 19.6-11。机体的运动方程为 $(m + m_0)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 r \omega^2 \sin \omega t$ (19.6-39) 其振幅为

$$A = \frac{m_0 r \omega^2}{k \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

式中 λ —— 频率比, $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ ；

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}};$$

$$\zeta —— 阻尼比, \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}.$$

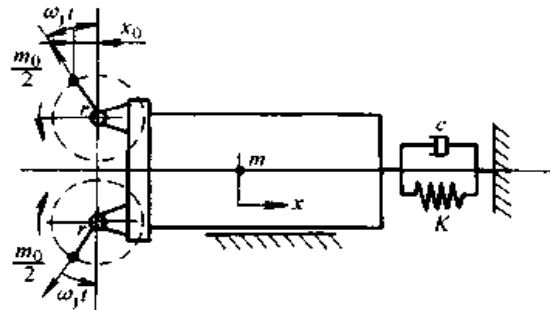


图 19.6-11 单向激振力双轴惯性振动机的力学模型

这类振动机适用于载荷变化不大的情况, 例如, 振动输送机、双轴惯性振动筛、振动沉拔桩机、振动落砂机、冲击式惯性振动机。

4.2.2 振动垂直输送机

图 19.6-12 为惯性式螺旋垂直振动输送机的示意图。为使散状物料沿螺旋槽上升, 不仅需要垂直方向的激振力, 而且还需有与激振力同频率同相位绕铅垂轴线的激振力偶。产生激振力与激振力偶的双轴惯性激振器有以下二类:

1) 双轴平行式 见图 19.6-13a, 各偏心质量均为 m_0 , 偏心距均为 r , 初相角分别为 φ_1 、

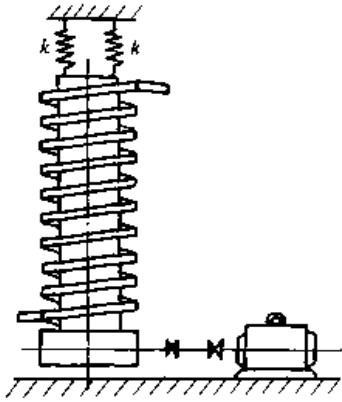


图 19.6-12 惯性式螺旋垂直振动输送机

φ_2, φ_3 和 φ_4 , 两轴同步反向旋转, 角速度为 ω 。为使惯性力沿铅垂轴和螺性力偶绕铅垂轴, 必须满足

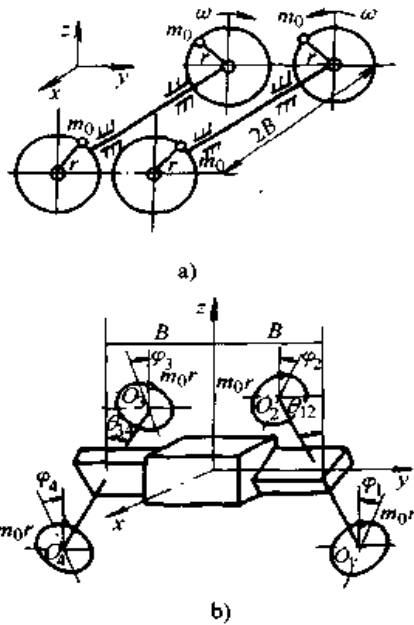


图 19.6-13 双轴平行式和双轴交错式惯性激振器

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= \pi - \varphi_1 \\ \varphi_4 &= \pi - \varphi_2 \end{aligned}$$

这时, 使机体作垂直振动的铅垂方向的激振力为

$$P_z = 4 m_0 r \omega^2 \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \quad (19.6-40)$$

使机体作扭转振动的绕铅垂轴的激振力偶矩为

$$M_z = 4 m_0 r \omega^2 B \cos\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \quad (19.6-41)$$

由式 (19.6-40) 和 (19.6-41) 知, 只要使

φ_1 和 φ_2 满足 $0 < \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} < \frac{\pi}{2}$, 或 $\pi < \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} < \frac{3}{2}\pi$, 就能使激振力和激振力偶矩同频率同相位。若使 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, 则 P_z 和 M_z 分别为

$$\begin{aligned} P_z &= 4 m_0 r \omega^2 \sin\varphi \cos\omega t \\ M_z &= 4 m_0 r \omega^2 B \cos\varphi \cos\omega t \end{aligned} \quad (19.6-42)$$

2) 双轴互错式 见图 19.6-13b, 这种激振器一般情况下力的分析较复杂。如果令 O_1O_2 轴和 O_3O_4 轴与铅垂线的夹角相等, 即 $\alpha_{12} = \alpha_{34} = \alpha$, 并使四偏心质量的初相角相等, 即 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi$, 则激振力 P_z 和激振力偶矩分别为

$$\begin{aligned} P_z &= 4 m_0 r \omega^2 \sin\alpha \cos(\omega t + \varphi) \\ M_z &= 4 m_0 r \omega^2 B \cos\alpha \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (19.6-43)$$

由式 (19.6-42) 和式 (19.6-43) 看出, 只要调整 φ 和 B 就改变双轴平行式的 P_z 和 M_z 的大小, 改变 φ, B 和 α 就改变双轴互错式的 P_z 和 M_z 的大小。

4.2.3 自同步惯性振动机

为使双轴式或多轴式的惯性振动机的激振器同步运转的方法有: 用速比为 1 的一对外啮合齿轮强制同步反向运转 (即强迫同步法); 用两台特性相近的电动机驱动, 满足一定条件下, 实现自动反向同步运转 (即自同步法)。

为了使振动机实现自同步运转, 必须满足自同步性条件, 为了使振动机获得所要求的运动轨迹, 还必须满足相应同步状态下的稳定性条件。

对于不同型式的惯性振动机, 其同步性条件和稳定性条件各异。图 19.6-14 为平面双轴对称安装的自同步振动机的力学模型。求解机体沿 x, y 方向和绕质心 O 的振动微分方程, 及轴 1、轴 2 的转动微分方程, 可推导出同步性条件为

$$|D| \geq 1$$

同步性指数 D 为

$$D = \frac{m_0^2 r^2 \omega^2 W}{\Delta M_g - \Delta M_f} \quad (19.6-44)$$

式中 m_0 —— 偏心质量;

r —— 偏心距;

ω —— 自同步角速度;

ΔM_g —— 两轴的电机转矩差;

ΔM_f —— 两轴的摩擦转矩差;

W —— 振动机稳定性指数, 见式 (19.6-45);

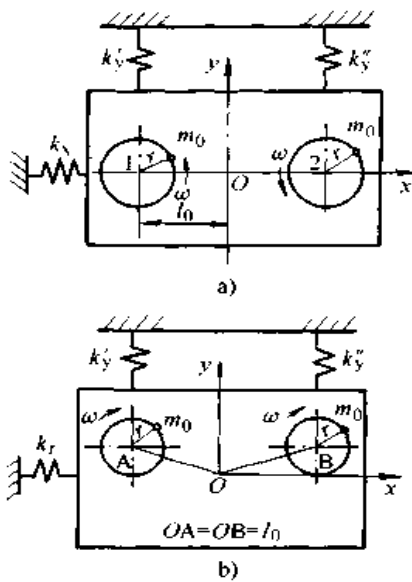


图 19.6-14 平面双轴对称安装的自同步振动机的力学模型

$$W = \frac{l_0^2}{J} \cos^2 \alpha_\varphi - \frac{\cos^2 \alpha_y}{m'_y} - \frac{\cos^2 \alpha_x}{m'_x} \quad (19.6-45)$$

式中 $J = J + \sum J_0 - k_\varphi / \omega^2$;
 $m'_y = m + \sum m_0 - k_y / \omega^2$;
 $m'_x = m + \sum m_0 - k_x / \omega^2$;
 $\alpha_\varphi = \arctan(-c_\varphi / J\omega)$;
 $\alpha_y = \arctan(-c_y / m'_y \omega)$;
 $\alpha_x = \arctan(-c_x / m'_x \omega)$;
 c_φ, c_x, c_y —— 绕质心、沿 x 方向、沿 y 方向的阻尼系数;
 k_φ, k_x, k_y —— 绕质心、沿 x 方向、沿 y 方向的刚度;

$J, \sum J_0$ —— 机体、偏心块的转动惯量。

稳定性条件为：要使机体及其质心作近似圆形的椭圆运动，需满足 $W > 0$ ；要使机体绕质心作扭摆振动，需满足 $W < 0$ 。

4.3 双质体惯性振动机

单质体惯性振动机没有隔振系统，为减小传给基础的动载荷，一般都在远超共振状态下工作，为使振动机能在近共振状态下工作，必须有隔振系统，成为双质体惯性振动机，如图 19.6-15 所示。根据其运动方程，用近似方法求解，可得二质体的相对振幅和相位差为

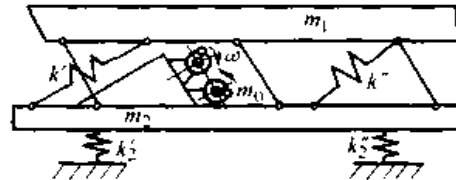


图 19.6-15 双质体近共振状态振动机

$$A = \frac{1}{m_2} \frac{\lambda^2}{1 - \lambda^2} \sum m_0 r \cos \varphi \quad (19.6-46)$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}$$

式中 λ —— 频率比， $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ ；

ζ —— 阻尼比， $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ ；

m —— 诱导质量， $m = \frac{m_1 m_2'}{m_1 + m_2'}$ ；

$m_2' = m_2 + \sum m_0 - k_2 / \omega^2$ ；

$\omega_n = \sqrt{k/m}$ —— 固有频率。

二质体的绝对振幅为

$$A_1 = \frac{\sum m_0 r}{m_1 + m_2} \frac{\sqrt{1 + 4\zeta^2 \lambda^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4\zeta^2 \lambda^2}} \quad (19.6-47)$$

$$A_2 = \frac{\sum m_0 r}{m_1 + m_2} \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{m_1}{m} \lambda^2\right)^2 + 4\zeta^2 \lambda^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4\zeta^2 \lambda^2}}$$

4.4 非线性惯性振动机

为使振动机具有更好的工艺性能、更小的消耗功率和更加稳定的运动过程，使用非线性惯性振动机。其动力学模型有硬特性、软特性及分段线性等非线性刚度参数和阻尼等参数。图 19.6-16 为分段线性的非线性惯性振动机的动力学模型，由图得其运动方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + c(x, \dot{x}) + k(x) + k_1 x_1 = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c(x, \dot{x}) - k(x) = m_0 r \omega^2 \sin \omega t \quad (19.6-48)$$

式中 $x = x_1 - x_2$;
 $\dot{x} = \dot{x}_1 - \dot{x}_2$;

$$c(x, \dot{x}) = \begin{cases} c\dot{x}, & -e \leq x \leq e \\ (c + c_2)\dot{x}, & -e \geq x \geq e \end{cases}$$

$$k(x) = \begin{cases} kx, & -e \leq x \leq e \\ kx + k_2(x - e), & x \geq e \\ kx - k_2(x + e), & x \leq -e \end{cases}$$

对非线性阻尼力 $c(x, \dot{x})$ 和非线性弹性恢复力 $k(x)$ ，用等效非线性阻尼系数 c_e 和等效非线性

性刚度 k_e 进行线性化。并将 $k_1 x_1$ 用 $-k_1/\omega^2$ 归化到 m_1 中去, 则式 (19.6-48) 变为

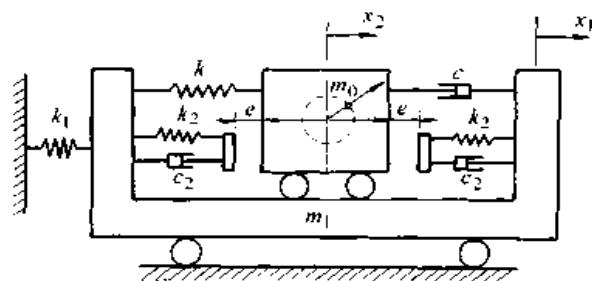


图 19.6-16 非线性惯性振动机

$$m_1' \ddot{x}_1 + c_e(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_e(x_1 - x_2) = 0 \quad (19.6-49)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_e(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_e(x_1 - x_2) = m_0 r \omega^2 \sin \omega t \quad (19.6-50)$$

联立求得二质体的绝对振幅为

$$A_1 = -\frac{m m_0 r}{m_1' m_2} \sqrt{\frac{k_e^2 + c_e^2 \omega^2}{(k_e - m \omega^2)^2 + c_e^2 \omega^2}}$$

$$A_2 = \frac{m m_0 r}{m_1' m_2} \sqrt{\frac{(k_e - m \omega^2)^2 + c_e^2 \omega^2}{(k_e - m \omega^2)^2 + c_e^2 \omega^2}}$$

式中 $m = \frac{m_1' m_2}{m_1' + m_2}$;

$$m_1' = m_1 - \frac{k_1}{\omega^2};$$

$$c_e = (0.1 \sim 0.14) m \omega;$$

$$k_e = k + k_2 \left[1 - \frac{5}{4} \frac{e}{A} + \frac{1}{4} \left(\frac{e}{A} \right)^5 \right];$$

$$\frac{e}{A} = 0.2 \sim 0.5.$$

用 $\frac{m_2}{m_1' + m_2}$, $\frac{m_1'}{m_1' + m_2}$ 分别乘式 (19.6-49)

和式 (19.6-50), 并引用 $x = x_1 - x_2$, $m = \frac{m_1' m_2}{m_1' + m_2}$, 再相减得

$$m \ddot{x} + c_e \dot{x} + k_e x = -\frac{m_0 m}{m_2} r \omega^2 \sin \omega t \quad (19.6-51)$$

求解上式得相对振幅为

$$A = -\frac{m_0 m r \omega^2}{m_2 \sqrt{(k_e - m \omega^2)^2 + c_e^2 \omega^2}}$$

5 其他类型振动机

5.1 电磁式振动机

由电磁激振器驱动的振动机, 其振动频率高、振幅和频率易于控制, 并可进行无级调节,

用途广泛。

图 19.6-17 为电磁激振力 $F(t)$ 作用下二质体振动机的力学模型, 其运动微分方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2) = F(t) \quad (19.6-52)$$

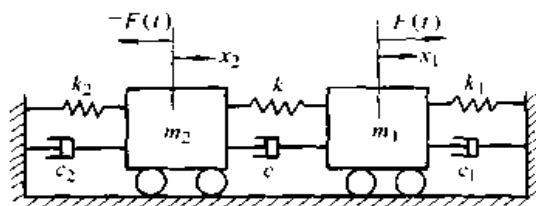


图 19.6-17 电磁式振动给料机的力学模型

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(x_1 - x_2) = -F(t) \quad (19.6-53)$$

在 $c_1 \approx c_2$ 时, 为简化计算, 将此联立方程变为

$$m_0 \ddot{x} + c_0 \dot{x} + kx = F(t) \quad (19.6-54)$$

式中 $x = x_1 - x_2$;

$$m_0 = \frac{m_1' m_2'}{m_1' + m_2'};$$

$$c_0 = c + \frac{c_1 m_2'}{m_1' + m_2'};$$

$$m_1' = m_1 - \frac{k_1}{\omega^2};$$

$$m_2' = m_2 - \frac{k_2}{\omega^2}.$$

不同激振方式有不同的激振力, 用傅里叶级数展开形式统一表示为

$$F(t) = F_0 + F_1 \sin \omega t + F_2 \sin 2\omega t \quad (19.6-55)$$

式中 F_0 ——平均电磁力;

F_1 ——一次谐波激振力的幅值;

F_2 ——二次谐波激振力的幅值。

用基本电磁力 F_a 与电磁式振动机的特征指数 a 来表示 $F(t)$, 则

$$F(t) = \left(\frac{1}{2} + a_0 \right) F_a + 2a F_a \sin \omega t + \frac{1}{2} F_a \sin 2\omega t \quad (19.6-56)$$

对交流激磁 $a = 0$; 半波整流激磁 $a = 1$; 半波加全波整流激磁 $a = 2$; 可控半波整流 $a = \cos \varphi$;

$$F_a = 80 B_{a0}^2 S, B_{a0} = \frac{\sqrt{2} \mu_1 \times 10^4}{W \omega S}, \varphi = \arctan \frac{L_0 \omega}{r_0}$$

式中 B_{a0} ——基本磁通密度;

S ——电磁铁一个磁极的截面积;

μ_1 ——交流电压的幅值;

W ——线圈匝数；

φ ——磁通密度落后于电压的相位角；

L_0 ——电路内的电感；

r_0 ——电路电阻。

式(19.6-56)代入式(19.6-54)，并求解可得

在 $(\frac{1}{2} + a_0)F_a$ 的作用下的相对静位移为

$$A_0 = \frac{F_a}{k} \left(\frac{1}{2} + a_0 \right) \quad (19.6-57)$$

在 $2aF_a \sin \omega t$ 作用下的一次谐波的相对振幅 A_1 及相位角 φ_1 为

$$A_1 = \frac{2aF_a}{k \sqrt{(1-\lambda_1^2)^2 + (2\zeta\lambda_1)^2}} \quad (19.6-58)$$

$$\varphi_1 = \arctan \frac{2\zeta\lambda_1}{1-\lambda_1^2}$$

式中 $\lambda_1 = \frac{\omega}{\omega_n}$ ； $\zeta = \frac{c_0}{2m_0\omega}$ ； $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_0}}$

在 $\frac{1}{2}F_a \sin 2\omega t$ 作用下的二次谐波的相对振幅 A_2 及相位角 φ_2 为

$$A_2 = \frac{F_a}{2k \sqrt{(1-\lambda_2^2)^2 + (2\zeta\lambda_2)^2}} \quad (19.6-59)$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{2\zeta\lambda_2}{1-\lambda_2^2}$$

式中， $\lambda_2 = \frac{2\omega}{\omega_n}$ 。

质体1和质体2的一次和二次谐波振幅为

$$(A_1)_1 = \frac{m_2}{m_1} A_1, \quad (A_2)_1 = \frac{m_2}{m_1} A_2$$

$$(A_1)_2 = -\frac{m_1}{m_2} A_1, \quad (A_2)_2 = -\frac{m_1}{m_2} A_2$$

例 对交流激磁 $a=0$ ，代入式(19.6-57)~式(19.6-59)得

$$A_0 = \frac{F_a}{2k}, \quad A_1 = 0,$$

$$A_2 = \frac{F_a}{2k \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}$$

对半波整流激磁 $a=1$ ，代入式(19.6-57)~式(19.6-59)得

$$A_0 = \frac{3F_a}{2k},$$

$$A_1 = \frac{2F_a}{k \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}},$$

$$A_2 = \frac{F_a}{2k \sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}}.$$

5.2 电动式振动机

电动式振动机的工作原理是，直流电输至励磁的固定线圈中，在中心磁极板的空气隙中形成一个强大的磁场。交流电输入与振动杆或振动机体连接的动圈中，电流与磁场（或永久性磁场）作用产生交变电动力使机体振动。电动力的计算公式为

$$F = 1.02 B l I_m \sin \omega t \quad (19.6-60)$$

式中 B ——磁感应强度；

l ——动圈绕线有效长度；

I_m ——通过动圈的电流幅值；

如果电动力 $F(t)$ 作用于单自由度系统的振动机，则系统的运动方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (19.6-61)$$

求解上式得机体的振幅和相位角为

$$A = \frac{1.02 B l I_m}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{c\omega}{k - m\omega^2}$$

电动式振动机的频率范围宽、波形失真小、振动较平稳、噪声小、调节电流就可调节振幅、调节方便。不仅用于振动机还用于振动试验台。

5.3 液压式振动机

用机械式或电磁式交变力驱动控制液压系统的液压阀，使活塞产生振动的液压式振动机具有以下优点：可产生很大的位移振幅；低频域内有较大的激振力；结构强度好；承受横向负荷的能力强；效率高；噪声小和运行可靠等。振动发生器的体积小，质量小。

液压式激振器及振动台有以下缺点：高频域内的性能不如电动式；波形的变化比电动式大；维护与管理较复杂等。虽然可以利用随机波进行激励，但其峰值等参数有所降低。

5.4 强声响式激振器

把试验物体放进能产生很强声压的混响室，或对准行波管声响发生器，在空气压力变化的作用下，可以全面地从各个方向对试验物体进行激振试验。而其他各类激振器只能从一个面或一个点传递一个方向的振动。这是其重要的特点。适

用于对飞行物体或其零件在强声环境下的动态性能进行测试研究。

5.5 气动式振动机

依靠阀片或阀杆的运动，或者依靠活塞自身

的运动使压缩空气交替地进出前后气缸使活塞往复运动，不断地打击冲击杆或冲击锤的气动式振动机，可以完成凿岩、破碎、清砂等工艺过程。

参考文献

- 1 屈维德，唐恒龄主编. 机械振动手册. 北京：机械工业出版社，2000
- 2 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册：基础理论卷. 北京：机械工业出版社，1996
- 3 徐灏主编. 机械设计手册：第1卷. 北京：机械工业出版社，2000
- 4 振动与冲击手册编辑委员会编著. 振动与冲击：第3卷工程应用. 北京：国防工业出版社，1992
- 5 (日) 振动工程大全编辑委员会编. 振动工程大全. 尹传声，黄怀德译. 北京：机械工业出版社，1986
- 6 Harris C. M. Crede C. E. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw-Hill Book Co., 1976
- 7 (美) 铁摩辛柯等著. 工程中的振动问题. 胡人礼译. 北京：人民铁道出版社，1978
- 8 实用振动工程编委会编. 实用振动工程：第2卷振动控制与设计. 北京：航空工业出版社，1997
- 9 顾仲权，马扣根，陈卫东著. 振动主动控制. 北京：国防工业出版社，1997
- 10 应怀樵主编. 现代振动与噪声技术：第1卷，第2卷. 北京：航空工业出版社，2000
- 11 丁文镜著. 减振理论. 北京：清华大学出版社，1988
- 12 闻邦椿，刘凤翹著. 振动机械的理论及应用. 北京：机械工业出版社，1982
- 13 赵长安主编. 控制系统设计手册：上册. 北京：国防工业出版社，1991
- 14 Mechanical Vibrations Theory and Applications. F. S. Tse, I. E. Morse, R. T. Hinkle, Allyn and Bacon, Inc. 1978

中国机械设计大典
CHINA MECHANICAL DESIGN CANON

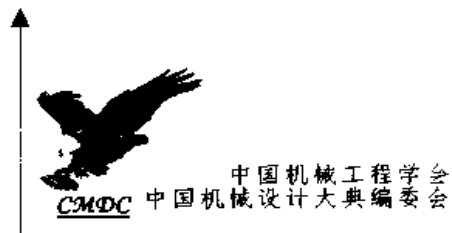
第
20
篇

摩擦学设计

主编 卜炎

编写 卜炎 董刚
陈树昌 潘凤章

审稿 王云飞



摩擦学 (Tribology) 是研究相对运动、相互作用表面间的摩擦行为对于机械及其系统的作用、接触表面及润滑介质的变化、失效预测及控制理论与实践的边缘学科。

摩擦学设计是指对摩擦学系统进行设计, 设计的目标是使摩擦副可靠地、经济地实现其运动并保证其功能。

保证最少摩擦功耗是摩擦学设计的第一个目标。减少摩擦功耗直接意味着节约能源。

摩擦学设计的第二个目标是降低材料消耗。材料消耗除制造产品的消耗外, 还包括配件的材料消耗、运转中润滑剂的消耗等。

摩擦学设计的第三个目标是提高机械装备的可靠性、工作效能和使用寿命。

摩擦学设计的内容主要包括:

(1) 摩擦副设计

在进行摩擦副设计时, 要选择摩擦副的类

别、形状、尺寸、材料、工艺与表面处理、润滑方式等。摩擦副零件原则上应尽可能运用标准化、系列化的商品。

(2) 润滑系统设计

润滑系统设计包括润滑剂选择、润滑剂循环系统设计、润滑剂冷却系统设计和润滑剂过滤系统设计。

(3) 状态监测及故障诊断系统设计

摩擦学系统需要监测的参数甚为广泛, 包括摩擦表面特性、摩擦副工作参数、摩擦副材料与润滑剂的摩擦学性能等。

摩擦学失效的最主要特征是磨损。磨损使摩擦副的尺寸关系改变, 摩擦表面几何与物理特性改变, 摩擦状况因磨屑混入而改变。除此之外, 摩擦还能导致振动、噪声、爬行、发热和变形等, 而使机械失效。

第1章 摩擦力与摩擦因数

两个相互接触的物体在切向外力作用下发生相对运动 (或具有相对运动趋势) 时, 在接触面间产生阻止切向运动的阻力, 这种现象称为摩擦, 该阻力即摩擦力。

可以从不同角度对摩擦分类, 各种类型摩擦见表 20.1-1。

表 20.1-1 摩擦类型

分类方法	摩擦类型
按摩擦副运动形式	滑动摩擦; 滚动摩擦
按摩擦副运动状态	静摩擦; 动摩擦
按摩擦副表面润滑状况	固体摩擦 (干摩擦); 边界摩擦; 混合摩擦; 流体摩擦

1 固体摩擦的摩擦力及其计算

1.1 摩擦力的性质

摩擦是两个接触固体在外载荷作用下所形成的真实接触区内作相对切向移动时发生的能量逸

散过程。它是固体切向移动过程中在真实接触面上很薄的表面层中发生的各种物理过程的总和。摩擦力是无势的, 其方向始终与移动方向相反。

两个接触固体的切向移动可以分为宏观移动和微观移动: 宏观移动称为滑动, 微观移动称为滑移或预位移。根据切向移动的状态, 摩擦力分为局部静摩擦力、静摩擦力和动摩擦力。预位移时的摩擦力与预位移量成正比, 称为局部静摩擦力, 而预位移量与切向外力成正比, 故在微观移动期间局部静摩擦力与切向外力成正比。预位移增大到某一极限值, 预位移转变为滑动, 称该极限值为极限预位移。对应极限预位移的摩擦力称为静摩擦力, 完全处于滑动状态时的摩擦力是动摩擦力。一般静摩擦力大于动摩擦力。

1.2 摩擦因数

将摩擦力与法向载荷之比定义为摩擦因数, 即

$$\mu = F_f / F_N \quad (20.1-1)$$

对应静摩擦力的为静摩擦因数 μ_s ;

对应动摩擦力的为动摩擦因数 μ_d ;

由此, 摩擦力的计算式为

$$F_{\mu} = \mu F_N \quad (20.1-2)$$

法向载荷是外载荷，式 (20.1-2) 描述了摩擦力与外载荷的关系。因此，摩擦力的计算实际就是摩擦因数的计算。

2 固体摩擦定律

2.1 古典摩擦定律

古典摩擦定律称为阿蒙顿-库仑定律，综述如下：

- 1) 摩擦力与法向载荷成正比；
- 2) 摩擦因数与(表观)接触面积无关；
- 3) 摩擦因数与滑动速度无关；
- 4) 静摩擦因数大于动摩擦因数。

这一古典法则中的摩擦力实为局部静摩擦力，它不完全正确，必须作如下修正：

1) 当法向载荷较大时，摩擦力与法向压力呈非线性关系，法向载荷愈大，摩擦力增加得愈快；

2) 有一定屈服点的材料(如金属)，其摩擦力才与(表观)接触面积无关。黏弹性材料的摩擦力与(表观)接触面积有关；

3) 精确测量，摩擦力与速度有关，金属与金属的摩擦力随速度的变化不大；

4) 黏弹性材料的静摩擦因数不大于动摩擦因数。

2.2 固体摩擦的现代理论

固体摩擦的现代理论认为摩擦具有二重性。摩擦力由两部分组成，即分子粘附部分和机械变形部分。分子粘附部分的摩擦力主要是切开粘附结点的切向力，机械变形部分的摩擦力主要是一个表面的轮廓峰在另一表面上的犁削力。若忽略两部分的相互影响，则摩擦力可表述为

$$F_{\mu} = F_{\mu n} + F_{\mu j} \quad (20.1-3)$$

式中 $F_{\mu n}$ ——摩擦力的分子粘附分量；

$F_{\mu j}$ ——摩擦力的机械变形分量。

因而，摩擦因数

$$\mu = (F_{\mu n} + F_{\mu j}) / F_N = \mu_n + \mu_j \quad (20.1-4)$$

2.2.1 粘附分量的摩擦因数计算

若真实接触面积为 A_r ，粘附结点的抗剪强度为 τ ，则摩擦力(切向阻力)的粘附分量为

$$F_{\mu n} = \tau A_r \quad (20.1-5)$$

一般金属滑动摩擦副粘附结点的抗剪强度为：

$$\tau = \tau_0 + \beta p \quad (20.1-6)$$

式中 τ_0 ——法向压力为零时的抗剪强度；

β ——压力因子；

p ——摩擦副中较弱金属的屈服压力；

各种金属的 τ_0 和 β 是常量(数)，见表 20.1-2。

就一定的表面形貌，真实接触面积 A_r 与法向载荷成正比，而与物体尺寸无关，故摩擦力的粘附分量与法向载荷大小成正比，而与表观接触面积无关。

表 20.1-2 几种金属的 τ_0 和 β 值

材料	τ_0 /MPa	β	材料	τ_0 /MPa	β
钨	17.7	0.250	银	63.7	0.090
铬	49.0	0.240	铝	29.4	0.043
铍	4.4	0.250	锌	78.5	0.020
铂	93.2	0.100	锡	12.3	0.012
铜	107.9	0.110	铅	8.8	0.014

接触区呈塑性流动的金属，有

$$A_r = F_N / p \quad (20.1-7)$$

于是粘附分量的摩擦因数为

$$\mu_n = \tau_0 / p + \beta \quad (20.1-8)$$

2.2.2 变形分量的摩擦因数计算

(1) 支承长度率曲线

表面粗糙度对摩擦有很大影响，仅用表面粗糙度评定参数 Ra 、 Rz 、 Ry 还不能完全反映这一影响，需要引入评定粗糙度的附加参数轮廓支承长度率 t_p 。沿粗糙表层的高度不同，轮廓支承长度率也不同，其表达式为

$$t_p = b(a/Ry)^{\zeta} \quad (20.1-9)$$

式中 b 、 ζ ——支承长度率的曲线参数；

a ——到轮廓峰顶线的距离。

各种加工方法加工的表面粗糙度该曲线参数近似值见表 20.1-3~表 20.1-5。

(2) 摩擦因数

滞后损失和轮廓峰相对压入深度是判别变形分量的主要参数。以半球形模拟轮廓峰的形状，变形分量的摩擦因数为

$$\mu_j = 0.55 K_s (h/r)^{1/2} \quad (\text{塑性接触}) \quad (20.1-10)$$

表 20.1-3 各种加工方法加工的钢件表面粗糙度和轮廓支承长度率曲线参数近似值

加工方法	Ra/μm	Ry/μm	r/μm	t _p = b (a/Ry) ²		加工方法	Ra/μm	Ry/μm	r/μm	t _s = b (a/Ry) ²	
				b	ξ					b	ξ
外圆磨削	1.25	9.37	8	0.6	2.00	端面铣削	5.0	37	420	0.40	2.2
	0.63	4.72	12	0.9	1.95		2.5	18	900	0.55	1.65
	0.32	2.4	20	1.27	1.90		1.25	9.37	1350	0.60	1.40
	0.16	1.2	30	2.00	1.90						
内圆磨削	2.5	18.75	5	0.65	2.0	抛光	0.63	4.72	230	2.0	1.7
	1.25	9.37	8	0.90	1.9		0.32	2.4	450	2.5	1.6
	0.63	4.72	13	1.10	1.85	0.16	1.2	670	3.5	1.5	
	0.32	2.4	18.5	1.35	1.75						
平面磨削	5.0	37.50	35	0.625	2.2	内孔研磨	0.16	0.84	30	2.5	1.5
	2.5	18.75	100	0.90	2.2		0.125	0.66	33	2.5	1.5
	1.25	9.37	180	0.95	1.85		0.10	0.54	36	2.4	1.4
	0.63	4.72	370	1.60	1.80		0.08	0.43	40	2.5	1.4
	0.32	2.4	550	2.3	1.65		0.063	0.33	45	2.5	1.4
车削	5.0	37.50	15	1.0	2.1		0.05	0.27	50	2.6	1.4
	2.5	18.75	20	1.40	1.95		0.04	0.21	55	2.6	1.3
	1.25	9.37	35	1.80	1.80		0.032	0.16	62	2.6	1.4
	0.63	4.72	55	2.00	1.60		0.025	0.13	70	2.6	1.3
圆柱表面研磨	0.16	1.20	30	2.50	1.5		0.02	0.10	75	3.3	1.2
	0.08	0.60	40	2.55	1.4	0.016	0.08	80	2.8	1.4	
	0.04	0.30	55	2.60	1.3	0.012	0.06	85	2.9	1.5	
平面研磨	0.16	1.20	300	2.4	1.6	金刚石光整加工	0.32	1.50	1 228	0.9	1.0
	0.08	0.60	500	3.0	1.4		0.25	1.32	1 300	2.1	1.2
	0.04	0.30	1 000	3.3	1.22		0.2	1.20	1 320	0.9	1.2
0.02	0.15	3 000	4.5	1.15	0.16		0.84	2 200	1.0	1.4	
珩磨	0.63	4.7	15	0.75	1.8		0.125	0.72	2 300	1.0	1.4
	0.32	2.4	20	1.0	1.75		0.10	0.60	2 400	1.1	1.5
	0.16	1.2	35	1.95	1.6		0.08	0.32	2 400	1.6	1.5
	0.08	0.6	70	2.5	1.5		0.063	0.24	2 600	2.0	1.0
							0.05	0.19	2 800	2.0	1.2
							0.04	0.22	3 100	2.5	1.5
						0.032	0.17	3 150	2.0	1.2	
						0.025	0.12	3 200	3.5	1.8	

表 20.1-4 各种加工方法加工的铸铁件表面粗糙度和轮廓支承长度率曲线参数近似值

加工方法	$Ra/\mu\text{m}$	$Ry/\mu\text{m}$	$r/\mu\text{m}$	$t_p = b(a/Ry)^5$		加工方法	$Ra/\mu\text{m}$	$Ry/\mu\text{m}$	$r/\mu\text{m}$	$t_p = b(a/Ry)^5$	
				b	ζ					b	ζ
外圆磨削	2.5	11.5	50	0.70	1.97	平面铣削	10	28.8	17	1.40	2.8
	1.25	7.2	85	1.20	1.95		5	23	20	1.60	2.6
	0.63	3.5	150	1.25	1.85		2.5	11.5	25	1.70	2.4
	0.32	1.8	190	1.55	1.75		1.25	7.2	50	2.10	2.15
内圆磨削	2.5	11.5	12	1.60	2.66	磨削	5	23	12	0.72	2.25
	1.25	7.4	16	1.75	2.45		2.5	11.5	13	1.00	2.2
	0.63	3.6	25	1.95	2.35		1.25	6.9	15	1.15	2.1
	0.32	1.7	45	2.10	2.2		0.63	3.8	20	1.75	2.05
端面铣削	5	23	40	0.425	2.0	平面研磨	0.16	0.98	15	2.00	1.3
	2.5	11.5	60	0.70	1.95		0.08	0.42	20	2.30	1.2
	1.25	6.9	90	0.75	1.8		0.04	0.23	40	2.40	1.1
							0.02	0.18	55	3.10	1.05
车削	10	48	25	1.10	1.9	刨削	10	47.5	18	0.75	2.2
	5	21.5	37	1.20	1.8		5	22.1	25	0.90	2.0
	2.5	11.5	60	1.45	1.7		2.5	11.5	100	1.20	1.95
	1.25	7.4	130	1.50	1.65		1.25	6.9	150	1.65	1.9

表 20.1-5 各种磨合表面的表面粗糙度和轮廓支承长度率曲线参数近似值

部件名称		$Ra/\mu\text{m}$	$Ry/\mu\text{m}$	$r/\mu\text{m}$	$t_p = b(a/Ry)^5$	
					b	ζ
与橡胶唇型密封圈接触的钢件表面		0.13	0.72	180	3.1	3.0
滑动轴承(轴颈材料为2Cr13)		0.15	0.84	58	1.8	2.0
铸铁活塞环		0.03	0.15	85	1.8	2.3
滑动轴承(轴套材料为含 MoS_2 的金属陶瓷)		0.09	5.40	77	3.5	1.8
机床摩擦离合器	外摩擦片	0.10	0.60	46	1.4	2.1
	内摩擦片	0.32	1.8	60	2.8	2.2
蒸汽锤导向架		0.67	3.6	19	1.0	1.2
多联齿轮的环槽		1.27	7.3	35	1.6	1.4
飞机制动器的制动盘、制动瓦	合金铸铁	0.65	4	76	1.0	2.1
	30CrMnSiA	0.78	5	82	1.0	2.2
汽缸套		0.04	1.2	1 000	—	1.0
活塞环		0.02	0.48	270	—	0.4
曲轴(主轴颈和连杆轴颈)		0.05	1.6	500	—	1.2
曲轴主轴承轴瓦		0.42	2.6	300	—	—

续表 20.1-5

部 件 名 称	Ra/μm	Ry/μm	r/μm	t _v = b(a/Ry) ²	
				b	ζ
活塞销	0.11	6.7	300	—	—
连杆小头轴套	0.112	7.0	250	—	—
活塞销孔	0.18	1.1	220	—	—
柴油机喷嘴	0.1	0.6	35	3.8	1.9

$$\mu_j = 0.42\alpha K_1 (h/r)^{1/2} \quad (\text{弹性接触}) \quad (20.1-11)$$

式中 α —— 单向拉伸试验中材料滞后损失因子，见表 20.1-6；

K_s、K₁ —— 塑性和弹性变形时与支承长度率曲线参数 ζ 有关的两个因子，见图 20.1-1；

h —— 压入深度；

r —— 轮廓峰半径。

表 20.1-6 材料单向拉伸滞后损失因子 α

材 料	α	材 料	α
钢、磷青铜	0.04	橡胶	0.09~0.13
硬铝	0.03	木材	0.20
淬硬钢	0.02	生皮革	0.06
塑料	0.08~0.12	去毛皮革	0.10

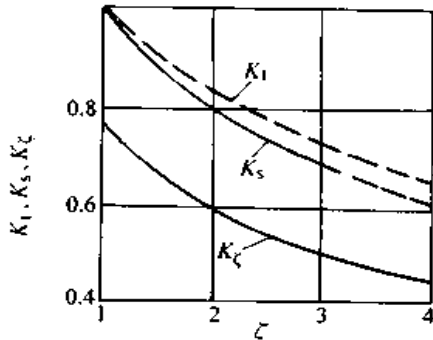


图 20.1-1 K_s、K₁、K_ζ 与 ζ 的关系曲线

3 滑动摩擦因数

由于无法用式 (20.1-8)、式 (20.1-10) 和

式 (20.1-11) 计算出工程上能用的摩擦因数数值，因此实用的滑动摩擦因数都靠试验得出。

在一般的压力和速度下，对确定的摩擦副环境，可以认为摩擦因数是常数。

摩擦因数受摩擦副材料、表面粗糙度、润滑状态、环境，压力与温度的影响很大。因此，摩擦因数试验值受试验环境与试验状况的影响也很大。

3.1 室温及大气中的摩擦因数

3.1.1 无润滑表面的滑动摩擦因数

纯净金属表面的摩擦因数相当大，而且，同类纯金属间的摩擦因数比异类纯金属间和同类合金间的摩擦因数大得多。大气环境下的金属表面有污染膜，它对摩擦因数有较大影响。表 20.1-7 是污染极少时金属间（包括合金）的静摩擦因数，表 20.1-8 是一般情况下常用材料间的摩擦因数。

通常，非金属材料不会形成表面氧化膜，只有吸附膜，它对摩擦因数的影响不如金属时大。

工程塑料是黏弹性体，它与钢相互摩擦时，摩擦因数随滑动速度和表面粗糙度变化的范围较宽。聚四氟乙烯的分子链较长，氟原子有效地遮蔽住碳原子，使分子间的内聚力降低，所以摩擦因数较低。

各种工程塑料间、工程塑料与钢间的摩擦因数见表 20.1-9。

非金属材料，银基、铜基、铁基自润滑材料，密封材料等的摩擦因数见表 20.1-10 ~ 表 20.1-14。

表 20.1-7 金属(包括合金)间的静摩擦因数

材料	钢	金	银	铝	铜	镍	铬	铁	钢	镁	钨	镍	铅	铂
μ _s	0.35~0.40	1.4	1.4	1.3	0.5	1.3	0.4	1.0	2.0	0.5	0.9	0.7	1.5	1.3

表 20.1-8 常用材料间的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数		摩擦副材料		摩擦因数		
I	II	μ_s	μ	I	II	μ_s	μ	
钢	钢	0.15	0.10	铝硅合金	酚醛层压布材	0.34		
	低碳钢	0.2			塑料	0.28		
	T8 钢	0.18			硬橡胶	0.25		
	铸铁	0.2~0.3	0.16~0.18		石板	0.26		
	黄铜	0.19		黄铜	T8 钢 (未淬火)	0.19		
	青铜	0.15~0.18			T8 钢 (淬火)	0.14		
	铝	0.17			黄铜	0.17		
	锡铋、铅铋轴承合金	0.2			钢	0.30		
	酚醛层压布材	0.22			硬橡胶	0.25		
	冰	0.027	0.014		石板	0.25		
粉末冶金材料	0.35~0.55	—	青铜	T8 钢	0.16			
皮革	0.30~0.50			黄铜	0.16			
硬木	0.20~0.35			青铜	0.15~0.20			
软木	0.30~0.50			钢	0.16			
毛毡	0.22			酚醛层压布材	0.23			
石棉基材料	0.25~0.40			塑料	0.21			
低碳钢	青铜	0.20		0.18	硬橡胶	0.36		
	铸铁	0.20		0.18	石板	0.33		
铸铁	铸铁	0.15		铝	T8 钢 (未淬火)	0.18		
	青铜	0.28			0.15~0.21	T8 钢 (淬火)	0.17	
	皮革	0.55	0.28		黄铜	0.27		
	橡胶	0.8			青铜	0.22		
钢	T8 钢	0.15			钢	0.30		
	钢	0.20			酚醛层压布材	0.26		

表 20.1-9 各种工程塑料间、工程塑料与钢间的摩擦因数

摩擦副材料 I	摩擦副材料 II				摩擦副材料 I	摩擦副材料 II			
	钢		工程塑料			钢		工程塑料	
	μ_s	μ	μ_s	μ		μ_s	μ	μ_s	μ
聚四氟乙烯	0.01	0.05	0.04	0.04	高密度聚乙烯	0.18	0.10	0.12	0.11
聚全氟乙丙烯	0.25	0.18	—	—	聚氯乙烯	0.45	0.40	0.50	0.40
聚偏二氯乙烯	0.33	0.25	—	—	聚偏二氯乙烯	0.68	0.45	0.90	0.52
聚三氟氯乙烯	0.45	0.33	0.43	0.32	聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.29	0.28	0.27	0.20
低密度聚乙烯	0.27	0.26	0.33	0.33	聚己二酸己二胺	0.37	0.34	0.42	0.35

续表 20.1-9

摩擦副材料 I	摩擦副材料 II				摩擦副材料 I	摩擦副材料 II			
	钢		工程塑料			钢		工程塑料	
	μ_s	μ	μ_s	μ		μ_s	μ	μ_s	μ
MoS ₂ 填充聚壬酸胺	—	0.57	—	—	聚碳酸酯	0.60	0.53	—	—
玻璃纤维填充聚壬酸胺	—	0.48	—	—	氟化聚醚	—	0.35	—	—
玻璃纤维填充聚癸二酰癸二酸胺	—	0.39	—	—	苯乙烯-丁二烯-丙烯晴共聚体	—	0.40	—	—
聚甲醛	0.14	0.13	—	—					

表 20.1-10 非金属材料间的摩擦因数

摩擦副材料		μ_s	μ	摩擦副材料		μ_s	μ	摩擦副材料		μ_s	μ
I	II			I	II			I	II		
砖	砖	0.6~0.7	—	棉织物	棉织物	—	0.44	黄铜	玻璃	—	0.25
石	金属	0.3~0.4	—	皮革	金属	0.4~0.6	—	淬硬钢	玻璃	—	0.7
石	土	0.3(0.5) ^①	—	尼龙	尼龙	0.15~0.25	—	淬硬钢	红宝石	—	0.25
土	土	0.25~1.0	—	皮革	木	0.4~0.5	0.03~0.05	淬硬钢	水晶	—	0.8
木	木	0.2(0.5) ^②	—	软木	松木	—	0.5	铁	冰	—	0.027
木	石	0.4	—	石墨	低碳钢	—	0.21	冰	冰	0.3~0.5	0.11 ^③ , 0.025 ^③
木	金属	0.2(0.6) ^①	—	玻璃	玻璃	—	0.7	麻绳	木	0.5~0.8	—
橡胶	橡胶	0.5	—	水晶	水晶	—	0.9				
毛织物	毛织物	—	0.44	红宝石	红宝石	—	0.16				

① 括号内为干时的值，括号外为湿时的值。② 为 -40 ~ -140℃ 下的值。③ 为 0℃ 左右的值。

表 20.1-11 银基自润滑复合材料的摩擦因数

材 料	成分的质量分数/ %	密度/kg·m ⁻³		硬 度 HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数			
		烧结前	烧结后			黏滑试验机		环块试验机	
						2A12		2A12	渗碳钢
						μ_s	μ		
Ag		9 800	9 600	25	386	0.66	0.63	—	0.58~0.65
Ag + WSe ₂	90 + 10	9 600	9 500	25	185	0.18	0.17	0.12~0.15	0.25~0.37
	80 + 20	9 500	9 400	22	110	0.16	0.16	0.12~0.14	0.25~0.26
	70 + 30	9 400	9 300	20	72	0.16	0.15	0.14~0.17	0.19~0.25
	60 + 40	9 200	9 100	19	45	0.15	0.14	0.15~0.17	0.33~0.38
Ag + MoS ₂	95 + 5	8 900	8 800	25	304	0.19	0.13	0.12~0.16	0.23~0.34
	90 + 10	8 600	8 500	24	229	0.13	0.14	0.10~0.13	0.17~0.23
	80 + 20	7 900	7 800	22	105	0.14	0.14	0.13~0.14	0.25~0.31
	70 + 30	7 300	7 200	20	67	0.14	0.13	0.13~0.14	0.22~0.25
	60 + 40	7 000	6 700	20	46	0.12	0.11	0.14~0.16	0.18~0.22

续表 20.1-11

材 料	成分的质量分数/ %	密度/kg·m ⁻³		硬 度 HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数				
		烧结前	烧结后			黏滑试验机		环块试验机		
						2A12		2A12		渗碳钢
						μ _s	μ	μ		
Ag + Cu + Zn	62 + 29 + 9	8 600	8 500	58	>386	0.57	0.55	—	0.48~0.49	
Ag + Cu + Zn + MoS ₂	58.9 + 27.6 + 8.5 + 5	8 100	7 800	50	287	0.38	0.33	0.15~0.20	0.21~0.34	
	55.8 + 26.1 + 8.1 + 10	7 900	7 700	45	216	0.32	0.30	0.11~0.16	0.21~0.29	
	52.7 + 24.6 + 7.7 + 15	7 600	7 400	42	194	0.27	0.24	0.14~0.16	0.13~0.20	

注：材料在 600℃ 下自由烧结；试验载荷 4.8 N；速度 8 m/min。

表 20.1-12 铜基自润滑复合材料的摩擦因数

材 料	成分的质量分数/ %	密度/kg·m ⁻³		硬 度 HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数				
		烧结前	烧结后			黏滑试验机		环块试验机		
						2A12		2A12		渗碳钢
						μ _s	μ	μ		
Cu		6 900	7 000	44	266	0.46	0.44	—	0.72~0.77	
Cu + WSe ₂	90 + 10	7 400	7 400	38	247	0.31	0.29	0.12~0.15	0.14~0.31	
	80 + 20	7 500	7 500	35	196	0.28	0.26	0.11~0.13	0.10~0.31	
	75 + 25	7 700	7 600	27	128	0.25	0.23	0.14~0.17	0.15~0.28	
	65 + 35	7 700	7 700	25	107	0.24	0.21	0.12~0.15	0.26~0.29	
	60 + 40	7 700	7 600	22	71	0.21	0.20	0.12~0.13	0.19~0.26	
Cu + MoS ₂	90 + 10	6 900	6 900	38	157	0.37	0.33	0.11~0.14	0.19~0.21	
	80 + 20	6 500	6 500	29	103	0.30	0.25	0.11~0.13	0.13~0.28	
	70 + 30	6 300	6 300	26	77	0.19	0.17	0.13~0.15	0.15~0.22	
Cu + 石墨	90 + 10	6 000	6 000	21	119	0.15	0.15	—	0.22~0.23	
	80 + 20	5 100	5 000	14	65	0.17	0.17	0.17~0.18	0.23~0.26	
	70 + 30	4 300	4 300	12	43	0.17	0.17	0.19~0.21	0.23~0.26	

注：材料在 600℃ 下自由烧结；试验载荷 4.8 N；速度 8 m/min。

表 20.1-13 铁基自润滑复合材料的摩擦因数

材 料	成分的质量分数/ %	密度/kg·m ⁻³		硬 度 HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数			
		烧结前	烧结后			黏滑试验机		环块试验机	
						2A12		2A12	
						μ _s	μ	μ	
Fe + 石墨	90 + 10	5 000	4 700	39~40	187	0.18	0.17	0.14~0.15	
	80 + 20	4 400	4 300	16~18	72	0.15	0.15	0.18~0.20	
	70 + 30	3 900	3 900	15~17	52	0.13	0.13	0.20~0.21	

注：材料在 600℃ 下自由烧结；试验载荷 4.8 N；速度 8 m/min。

表 20.1-14 密封材料的摩擦因数

密封材料		丹宁革	铬鞣革	氯丁橡胶	特殊橡胶	丹宁革	氯丁橡胶	特殊橡胶	氯丁橡胶
润滑剂	$v_{sl}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	46				100			
	添加剂	抗氧添加剂				—			
润滑剂 供给量	18℃	充分 0.09 不足 0.06	0.13 0.06	0.02 0.07	0.03 0.06	0.06 0.06	0.01 —	0.02 —	0.01 0.06
	100℃	充分 0.16 不足 0.08	— —	0.12 —	0.16 0.17	— —	— —	0.15 —	— —

碳-石墨容易吸附湿气，吸附湿气后摩擦因数明显降低，在干燥空气中摩擦因数较大，石墨甚至会因摩擦而燃烧。

宝石是各向异性材料，在不同方向上摩擦因数不等。

橡胶比较软，弹性大，摩擦因数随滑动速度而改变。滑动速度很低时，静摩擦因数低于动摩擦因数。

木材的纤维素极易吸收油和水等，因而摩擦因数较低。木材也是各向异性材料，在不同方向上的摩擦因数有较大差异。

3.1.2 润滑表面的摩擦因数

在摩擦表面上涂覆少量润滑油，则呈边界摩擦状态，这时，摩擦因数遵循下述一般规律变化：

1) 润滑表面的摩擦因数低于无润滑表面的摩擦因数；

2) 润滑油分子的极性越强、分子越长，则摩擦因数降低得越多。因此，通常脂油比矿物油更能降低摩擦因数；

3) 对同一种润滑油来说，一般无润滑时摩擦因数大的金属摩擦副，润滑时其摩擦因数亦大。

润滑表面的摩擦因数见表 20.1-15 和表 20.1-16。

表 20.1-15 不同润滑油下润滑表面的摩擦因数

润滑剂	静摩擦因数 μ_s		黏度 $\eta_{20}/\text{Pa}\cdot\text{s}$
	摩擦副材料		
	低碳钢-铸铁	低碳钢-铅青铜	
蓖麻籽油	0.183	0.159	0.75
橄榄油	0.119	0.196	0.082
菜籽油	0.119	0.136	0.09
鲸油	0.127	0.180	0.033
猪油	0.123	0.152	0.089
全损耗油	0.211	0.294	0.028
汽缸油	0.193	0.236	1.95
主轴油	0.183	0.262	0.055

表 20.1-16 各种材料润滑表面的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数		摩擦副材料		摩擦因数		摩擦副材料		摩擦因数						
		μ_s	μ			μ_s	μ			μ_s	μ					
钢	钢	0.10~0.12	0.05~0.10	石棉基材料 皮革 硬木 软木 毛毡 铜 铸铁	黑色 金属	0.08~0.12		T8 钢(不淬火)	0.03							
	低碳钢	0.1~0.2				0.12~0.15			黄铜	T8 钢(淬火)		0.02				
	T8 钢(不淬火)	0.03				0.12~0.16				黄铜		0.02				
	铸铁	0.05~0.15				0.15~0.25				青铜	青铜		0.04~0.10			
	黄铜	0.03				0.18			T8 钢(不淬火)		0.03					
	青铜	0.10~0.15	0.07			铜	T8 钢		0.18		铝	T8 钢(淬火)		0.02		
	铝	0.02				0.18			0.15~0.16			0.07~0.12		黄铜		0.02
	锡镉轴承合金	0.04				0.16			0.07~0.15		淬 火 钢	聚甲醛		0.016		
低碳 钢	铸铁	0.05~0.15		0.15		0.12		聚碳酸酯		0.03						
		0.07~0.15		0.5		0.5		聚酰胺		0.02						

3.2 高温下的摩擦因数

温度高时污染膜和吸附膜会松弛、蒸发或脱吸，所以摩擦因数通常随温度升高而增大。摩擦因数与温度的关系见表 20.1-17。

3.3 真空中的摩擦因数

在真空中，摩擦表面上氧化和吸附膜的生成速率低，粘结点散热缓慢，故摩擦因数大，真空度越高，摩擦因数越大。可以采用自润滑材料、

固体润滑剂或软金属膜来改善真空中材料间的摩擦特性。

碳氢化合物在真空中会气化，影响摩擦因数。根据有无碳氢化合物的残留气体，分为：“油真空”和“无油真空”。“无油真空”中滑动摩擦因数较大、易咬粘，磨损严重，同种纯金属表面在真空中滑动，摩擦因数随它们的硬度增加而下降。

表 20.1-18~表 20.1-21 是各种材料在真空中的摩擦因数。

表 20.1-17 不同温度下低碳钢间的摩擦因数

温度/℃		20	50	100	150	200	250	300	350
采用的 润滑剂	L-EQC15W/40	0.28	0.32	0.35	0.40	0.45	0.55	0.60	0.50
	蓖麻籽油	0.18	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
无润滑		0.55~0.60				1.20~1.30			

注：摩擦副材料为低碳钢对低碳钢。

表 20.1-18 不锈钢对不锈钢试件
在不同真空度中的摩擦因数

压力/Pa	1.01×10^5	1.01×10^5	5.33×10^{-3}	1.87×10^{-6}	1.07×10^{-6}
摩擦因数	0.47 ^①	0.82 ^②	1.22	2.74	2.94

① 开始运转时的值；② 运转 2h 后的值。

表 20.1-19 纯金属在真空中的摩擦因数

摩擦副材料	I	Cu	Ta	W	Cu	Ta	W
	II	Ni	Ni	Ni	Fe	Cu	Cu
压力	1.01×10^5	0.45	0.23	0.21	0.51	0.44	0.34
/Pa	1.33×10^{-3}	1.50	0.90	1.36	0.75	0.43	0.41

表 20.1-20 非金属材料在真空(压力 1.33×10^{-3} Pa)中的摩擦因数

摩擦副材料		温 度/℃				
I	II	-80	-60	-40	-20	0
聚乙烯	聚乙烯	0.33	0.40	0.38	0.42	0.53
聚四氟乙烯	聚四氟乙烯	0.2	0.2	0.7	0.11	0.1
聚三氟氯乙烯	聚三氟氯乙烯	0.3	0.31	0.35	0.41	0.48
聚甲基丙	聚甲基丙	0.45	0.45	0.46	0.48	0.54
烯酸甲酯	烯酸甲酯	0.45	0.45	0.46	0.48	0.54

表 20.1-21 各种不同金属(合金)在空气和真空中摩擦因数的比较

摩擦副材料		载荷/N	摩 擦 因 数					
			在 空 气 中			在 真 空 中 (0.267×10^{-3} Pa)		
			起动	10 min 后	60 min 后	起动	10 min 后	60 min 后
铝	铝	30	0.50	0.78	0.78	1.10	1.57	1.57
		62	0.57	0.59	0.59	0.61	0.75	0.59
铍青铜	铍青铜	32	0.46	0.57	0.58	0.71	0.87	1.10
		64	0.44	0.89	0.70	—	—	—

续表 20.1-21

摩擦副材料		载荷/N	摩擦因数					
			在空气中			在真空中 (0.267 × 10 ⁻³ Pa)		
I	II		起动	10 min后	60 min后	起动	10 min后	60 min后
黄铜	黄铜	32	0.31	0.31	—	0.43	0.50	0.70
		64	0.37	0.39	—	0.40	0.55	0.60
纯铜	纯铜	32	0.26	1.04	1.04	0.32	1.22	2.0
不锈钢	不锈钢	64	0.29	0.47	0.51	0.32	0.62	0.93
不锈钢	黄铜	32	0.29	0.39	0.40	0.38	0.39	0.34
不锈钢	铝	64	0.21	0.32	0.39	0.32	0.67	0.84
GCr15	纯铜	64	0.13	0.66	0.70	0.25	0.41	0.45
铍青铜	黄铜	64	0.28	0.34	0.38	0.49	0.62	0.90
铜	铜	64	0.26	0.44	0.39	0.43	0.43	0.31
镍	镍	32	0.33	0.33	0.30	—	—	—
银	银	64	—	—	—	0.28	0.41	0.39

3.4 低温下的摩擦因数

0—150℃下的摩擦称为低温摩擦。实际上低温摩擦多半是在低温液体（如液氮、液氦、液氢等）中的摩擦。低温液体的特点是黏度低和有腐蚀性，虽然在摩擦面上可以保持氧化膜，但膜易破裂，所以，低温下摩擦面易咬粘，磨损严

重。

液氮具有保护作用，在液氮中摩擦磨损是稳定的，且摩擦因数略有下降。

立方晶体金属的低温摩擦因数大于六方晶体金属。

表 20.1-22~表 20.1-25 是金属与塑料在低温下的摩擦因数。

表 20.1-22 在液氮介质中的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数 μ	摩擦副材料		摩擦因数 μ	摩擦副材料		摩擦因数 μ
I	II		I	II		I	II	
Al	Al	0.718	Al	30CrMoAlA (渗氮处理)	0.853	30CrMoAlA	30CrMoAlA	0.897
Ti	Ti	0.692	Ti		0.734	聚苯乙烯	45钢(热处理)	0.33~0.35
Nb	Nb	0.990	Nb		1.016	聚氯乙烯		0.20~0.22
Mo	Mo	0.831	Mo		0.879	酚醛层压布材		0.31~0.34
W	W	1.006	W		1.068	聚四氟乙烯		0.09~0.10
Fe	Fe	0.841	Fe		1.023	山毛榉木		0.32~0.38
Co	Co	0.512	Co		0.537	硬橡胶		0.30~0.48
Ni	Ni	0.879	Ni		1.037	石墨		0.68~0.72

表 20.1-23 在氮气中金属的摩擦因数

摩擦副材料		温 度/℃						摩擦副材料		温 度/℃					
		27		-193		-253				27		-193		-253	
I	II	μ_s	μ	μ_s	μ	μ_s	μ	I	II	μ_s	μ	μ_s	μ	μ_s	μ
Fe(99.9%)	Fe(99.9%)	1.09	0.92	1.04	0.90	—	—	Au(99.98%)	Al(99%)	1.42	1.22	0.50	1.16	—	—
Al(99%)	Al(99%)	1.62	1.43	1.60	1.41	—	—	Fe(99.9%)	Cu(99.95%)	1.99	1.80	2.03	1.80	—	—
Cu(99.95%)	Cu(99.95%)	1.76	1.56	1.70	1.45	1.66	1.42	Ni(99.95%)	Cu(99.95%)	2.34	2.13	2.35	2.12	—	—
Au(99.98%)	Au(99.98%)	1.88	1.60	1.77	1.60	2.03	1.79	Cu(99.95%)	Fe(99.9%)	0.43	0.43	0.40	0.40	—	—
Pt(99.98%)	Pt(99.98%)	1.92	1.70	1.93	1.68	—	—	Cu(99.95%)	Ni(99.95%)	0.85	0.85	0.85	0.85	—	—
Ni(99.95%)	Ni(99.95%)	2.11	1.78	2.00	1.68	2.02	1.68								

注：表中括号内的百分含量均为质量分数。

表 20.1-24 低温、真空下金属的摩擦因数

摩擦副材料		压力/ Pa	温度/ ℃	摩擦 因数	摩擦副材料		压力/ Pa	温度/ ℃	摩擦 因数
I	II				I	II			
Al	Al	1.33×10^{-8}	-268	2.2~2.4	Fe	Fe	1.33×10^{-8}	-268	1.1~1.2
		1.33×10^{-6}	-196	2.5~2.8			1.33×10^{-6}	-196	1.1~1.3
Cu	Cu	1.33×10^{-8}	-268	≥ 5	Zn	Zn	1.33×10^{-8}	27	1.5~1.8
		1.33×10^{-6}	-268	≥ 5			1.33×10^{-6}	-268	0.25~0.36
电解铜	电解铜	1.33×10^{-8}	-196~27	≥ 5	40Cr(碳氮共渗)	40Cr(碳氮共渗)	1.33×10^{-8}	-196	0.35~0.40
		1.33×10^{-8}	-200	3			1.33×10^{-6}	27	0.50~0.55
		1.33×10^{-8}	0	4					
Pb	Pb	1.33×10^{-8}	-268	≥ 6	ZG10Mn13	40Cr	6.67×10^{-5}	-190	0.4~0.5
		1.33×10^{-6}	-196~27	≥ 6			6.67×10^{-3}	20	0.6~0.7
							-190	0.95	

表 20.1-25 几种材料在低温液体介质中与不锈钢的摩擦因数

摩擦副材料	液体介质	
	液氮	液氢
石墨+金属氟化物	0.18	0.22
石墨+酚醛树脂	0.04	0.06
石墨(15%)+聚四氟乙烯(85%)	0.09	0.16
石墨(5%)+尼龙(95%)	0.06	0.15

注：表中百分数为质量分数。

4 滚动摩擦

两接触物体成点接触或线接触，接触处的速度大小和方向均相同的摩擦为滚动摩擦。物体作无滑动的滚动时，其阻力矩称为滚动摩擦力矩。

因定义不同，有滚动摩擦因数和滚动摩擦系数之分，见表 20.1-26。滚动摩擦系数值和滚动摩擦因数数值见表 20.1-27 和表 20.1-28。

表 20.1-29 是滚动轴承的摩擦因数。

表 20.1-26 滚动摩擦因数和滚动摩擦系数

名称	定义	量纲	摩擦角	特点	图示
滚动摩擦因数	$\mu_r = A / (F_N \Delta l) = F / F_N$ ，A—驱动力所作的功， $A = Fr \Delta \varphi$ ， $\Delta l = r \Delta \varphi$ —滚轮中心位移量	I	$\tan \rho_r = \mu_r$	在一定载荷条件下可与滑动摩擦因数作比较	
滚动摩擦系数	$\mu'_r = M / F_N$ ，M—阻力矩， $M = Fr$	m	$\tan \rho_r = \mu'_r / r$	摩擦系数定义与滑动摩擦因数相似； μ'_r 值随滚轮大小而改变	

表 20.1-27 滚动摩擦系数的典型数值 (mm)

滚 轮	滚 道	μ_r	滚 轮	滚 道	μ_r	滚 轮	滚 道	μ_r
铁梨木	柞木	0.5	钢	碎石路	1.2~5.0	充气轮胎	泥土路	1.0~1.5
榆木	柞木	0.8	钢	软土路	75~125	实心橡胶轮胎	优质路	10
钢	钢	0.2~0.4	充气轮胎	优质路	0.5~0.55	实心橡胶轮胎	泥土路	2.2~2.8
钢	木	1.5~2.5						

表 20.1-28 滚动摩擦因数的典型数值

滚动体	$\phi 1.5875$ mm 钢球							
滚道材料	淬硬钢	低碳钢	黄铜	铜	铝	锡	铅	玻璃
μ_g	0.000 02	0.000 04~0.000 10	0.000 045	0.000 12	0.001	0.001 2	0.001 4	0.000 014

表 20.1-29 滚动轴承的摩擦因数

轴 承 类 型		摩 擦 因 数 μ_g	轴 承 类 型		摩 擦 因 数 μ_g
深沟球轴承		0.001 5	滚针轴承		0.002 5
调心球轴承		0.001 0	调心滚子轴承		0.001 8
角接触球轴承	单列	0.002 0	圆锥滚子轴承		0.001 8
	双列	0.002 4	推力球轴承		0.001 3
	四点接触	0.002 4	推力圆柱滚子轴承		0.005 0
圆柱滚子轴承	有保持架	0.001 1	推力滚针轴承		0.005 0
	满滚子	0.002 0	推力调心滚子轴承		0.001 8

注：表中摩擦因数未计入密封件的摩擦；圆柱滚子和滚针轴承无轴向载荷。

5 摩擦角和摩擦锥

5.1 静摩擦角

要使受法向压力 F_N 的物体沿接触面滑动，必须施加切向外力 F ，且 F 只有达到某临界值时，物体才开始滑动，此临界值就是静摩擦力 $F_{\mu s}$ 。静摩擦力与法向压力之比就是静摩擦因数 μ_s 。

若法向压力 F_N 和切向外力 F 的合力与 F_N 构成的夹角 ρ 小于某临界角，物体就不会滑动，称该临界角为摩擦角。因此，摩擦角

$$\rho_s = \arctan \mu_s \quad (20.1-12)$$

5.2 静摩擦锥

若接触面的状况是没有方向性的，则式 (20.1-12) 对沿摩擦面的任意方向的外力都成立。所以， F_N 和 $F_{\mu s}$ 的合力形成一个以 $2\rho_s$ 为顶

角的圆锥（见图 20.1-2），称为静摩擦锥。如果 F_N 和 F 的合力位于摩擦锥内，物体就不会滑动。

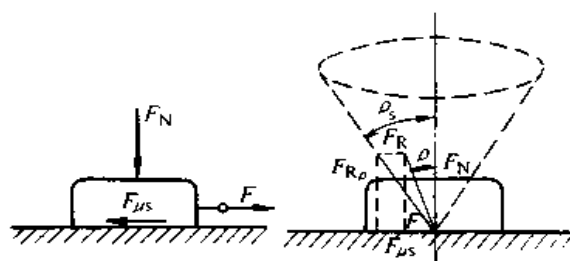


图 20.1-2 平面滑动摩擦与摩擦锥

5.3 动摩擦角与动摩擦锥

为使受法向压力的物体在平面上沿给定的方向作匀速运动必须克服的阻力称为动摩擦力 $F_{\mu s}$ ，它与法向压力之比称为动摩擦因数 μ 。

作用在物体上的法向压力和推动物体作匀速运动的切向外力之合力，与法向压力构成的夹角

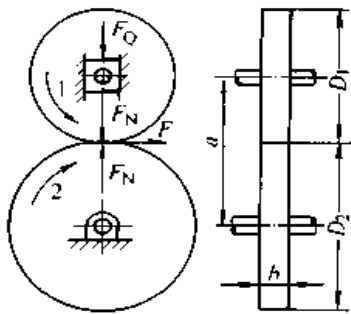
称为动摩擦角 ρ ，也可以得到以 2ρ 为顶角的动摩擦锥。

6 摩擦传动

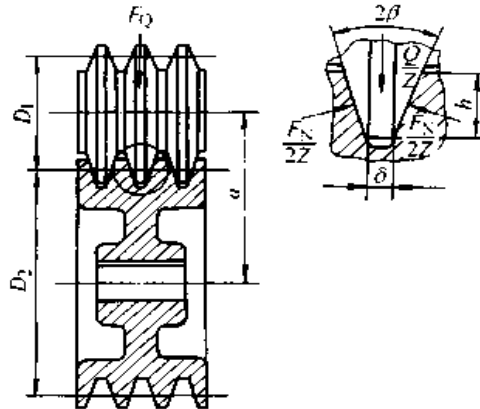
摩擦传动是利用摩擦力作为工作基础的典型机构，分为直接传动的摩擦轮传动和利用挠性件的带传动、绳传动等。

6.1 摩擦轮传动

圆柱平摩擦轮传动如图 20.1-3a，轮上圆周



a)



b)

图 20.1-3 摩擦轮传动

a) 圆柱平摩擦轮传动

b) 圆柱槽摩擦轮传动

采用圆柱槽摩擦轮传动(图 20.1-3b)可以在施加同样压力、同样材料摩擦轮的条件下，传递较大的功率。这时

$$P = \mu\pi DnF_Q / \sin\beta \quad (20.1-15)$$

式中 β ——槽摩擦轮的槽半角。

常用材料制成的摩擦轮传动的摩擦因数见表 20.1-30。

表 20.1-30 常用摩擦轮材料的摩擦因数

摩擦轮材料	工作条件	摩擦因数 μ
钢-钢	在油中	0.04~0.05
铸铁-铸铁		0.05~0.06
钢-钢	在空气中	0.15~0.20
铸铁-钢或铸铁		0.10~0.15
酚醛层压布材-钢(铸铁)		0.20~0.25
皮革-铸铁		0.20~0.35
纤维制品-钢(铸铁)		0.20~0.25
木材-铸铁		0.30~0.50
橡胶-钢(铸铁)		0.45~0.60
石棉基材料-钢(铸铁)	0.30~0.40	

力为摩擦力，接触面上的正压力为施加的压力 F_Q ，它们之间的关系为

$$F = \mu F_N = \mu F_Q \quad (20.1-13)$$

能传递的功率为

$$P = \mu\pi DnF_Q \quad (20.1-14)$$

式中 D ——某一摩擦轮的直径；

n ——该摩擦轮的转速。

由式(20.1-14)可以看出：圆柱平摩擦轮传动能传递的功率取决于施加的压力和两轮间的摩擦因数。

6.2 带传动

用一挠性带(钢带、橡胶带、编织带等)紧绕在两轮上，构成带传动。

若带的紧边拉力为 F_1 ，松边拉力为 F_2 ，带速为 v ，带对轮的包角为 α (见图 20.1-4)，单

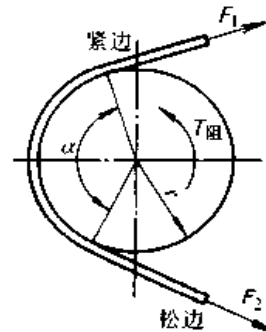


图 20.1-4 带与轮的摩擦

位长度带的质量(线质量)为 ρ_l ，则带在轮上滑动时其松、紧边拉力的关系为

$$F_1 - \rho_l v^2 = e^{\mu\alpha} (F_2 - \rho_l v^2) \quad (20.1-16)$$

式中 ρ_1 ——带的线质量；
 v ——带速；
 μ ——带与轮的摩擦因数；
 α ——带在轮上的包角。

带与轮的总静摩擦力

$$F_{\mu} = F_1 - F_2 = (F_1 - \rho_1 v^2)(e^{\mu\alpha} - 1)/e^{\mu\alpha} \quad (20.1-17)$$

与摩擦轮传动一样，为了提高传动功率，采用槽形的 V 带传动。

带与轮的接触形式不同（见图 20.1-4），摩擦力的 大小亦不同。若在式（20.1-16）和（20.1-17）中以有效摩擦因数 μ_{ef} 代替 μ ，则该两式可适用于各种带与轮的摩擦。平带与带轮 $\mu_{ef} = \mu$ ，V 带与带轮 $\mu_{ef} = \mu / [\sin(\varphi/2) + \mu \cos(\varphi/2)]$ ，显然，在相同的实际摩擦因数 μ 下，V 带与带轮的有效摩擦因数要大许多。

在带传动，带式输送机 and 带式制动器中都出现带与轮的摩擦。

常用传动带有橡胶带、棉织带、毛织带和皮革带，它们与带轮的摩擦因数见表 20.1-31。

表 20.1-31 传动带与带轮的摩擦因数

传动带品种	带轮材料				
	层压纸板	木材	塑料	钢	铸铁
植物鞣制皮革带	0.35	0.30	—	0.25	0.25
矿物鞣制皮革带	0.50	0.45	—	0.40	0.40

续表 20.1-31

传动带品种	带轮材料				
	层压纸板	木材	塑料	钢	铸铁
棉织带	0.28	0.25	—	0.22	0.22
缝合棉织带	0.25	0.23	—	0.20	0.20
毛织带	0.45	0.40	—	0.35	0.35
橡胶布带	0.35	0.32	0.30	0.36	0.36

皮革带与铸铁带轮的摩擦因数还可用下式计算

$$\mu = 0.54 - 7.11 / (25.4 + v) \quad (20.1-18)$$

式中 v ——带速 (m/s)。

6.3 绳与卷筒

绳绕在卷筒上，绳与卷筒间有摩擦力，故两端拉力不相等，两端拉力的关系为

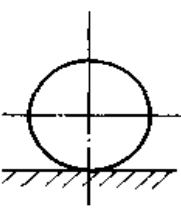
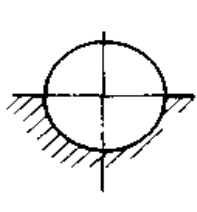
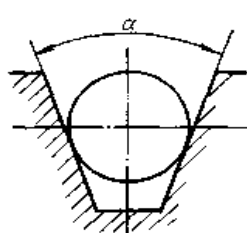
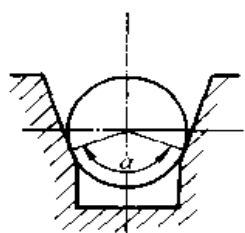
$$F_1 / F_2 = e^{\mu\alpha} \quad (20.1-19)$$

式中 μ ——绳与卷筒的摩擦因数；

α ——绳在卷筒上的包角。

绳与卷筒的接触形式不同，两端拉力的关系也不同，若把式（20.1-19）中的摩擦因数 μ ，视作有效摩擦因数 μ_{ef} ，则该式可用来计算任何接触形式之卷筒的拉力。不同接触形式下的有效摩擦因数见表 20.1-32。

表 20.1-32 绳与卷筒的有效摩擦因数

	平面	U 形	V 形	下切 V 形
沟槽形状				
有效摩擦因数 μ_{ef}	μ	$4\mu/\pi$	$\mu / [\sin(\alpha/2)]$	$4\mu [1 - \sin(\alpha/2)] / (\pi - \alpha - \sin\alpha)$

7 摩擦装置

利用摩擦力改变运动方向，加速或制动车辆

的装置，称为摩擦机构或摩擦装置。属于摩擦装置的有制动器、止动器、离合器、缓冲器、减振器和调速器等。

7.1 基本特性

7.1.1 接触种类

为了评价接触状况对温度场、材料的摩擦与磨损的影响，引入描述接触状况的特性数，将表

观滑动接触面积与元件参与摩擦的全部表面积之比称作重叠因子 K 。根据定义可知， K 是小于或等于 1 的数。

接触种类及其 K 值范围见表 20.1-33。

表 20.1-33 接触种类

接触表面	圆柱面和圆锥面		平面	
	外表面	内表面	圆环形端面	在圆盘上的角柱
示意图				
K	≤ 1	< 1	$= 1$	< 1
应用实例	闸带离合器、带式制动器、外抱块式制动器	圆锥离合器、锥盘式制动器、内张蹄式制动器	圆盘摩擦片离合器、全盘式制动器	圆盘摩擦块制动器、点盘式制动器

7.1.2 接触刚性

摩擦元件的接触刚性取决于摩擦表面的粗糙度和波度、摩擦材料在作用力方向上的柔性，以及摩擦材料支承结构的柔性。

不管哪种接触，摩擦元件在法向和切向的柔

性高，则摩擦因数大且稳定。柔性能保证在接触处实际载荷均匀分布，因而摩擦表面有较低的温度、温度梯度和热应力。通常，摩擦因数随温度上升而下降（见图 20.1-5），较低的接触温度意味着较大的摩擦因数。

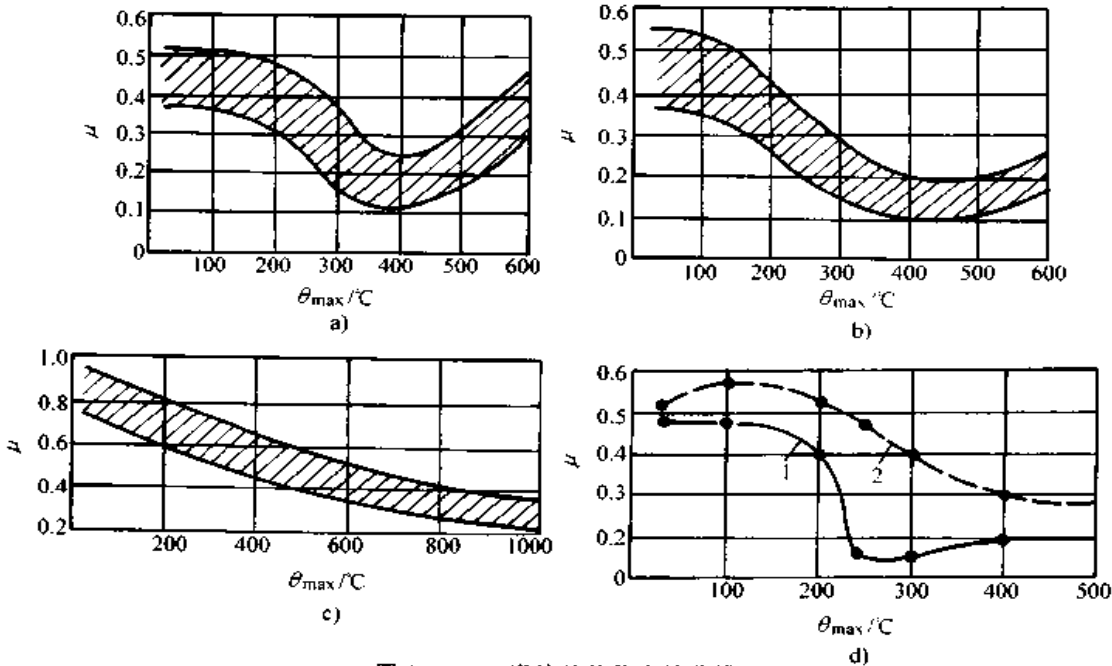


图 20.1-5 摩擦的热稳定性曲线

- a) 石棉-橡胶复合材料
- b) 石棉-酚醛树脂复合材料
- c) 粉末冶金材料
- d) 石棉-树脂复合材料 (1—未处理的 2—处理后的)

采用弹性衬垫（例如多孔橡胶）、增加独立作用元件数目和在结构件上开槽等，都能提高支承结构件的柔性。

摩擦力矩由零增加到 T_p 所需的时间称为摩擦机构的惯性时间。摩擦元件的柔度大能使摩擦装置的惯性时间下降，这对动态工作的离合器特别重要。摩擦元件在油中工作的摩擦装置，在摩擦表面制出沟槽或增加摩擦元件数目，能使惯性时间下降。沟槽可增进散热并易于排屑。

7.1.3 成膜介质对摩擦的影响

$K < 1$ 的摩擦装置，仍有部分摩擦表面与含气体、潮气和尘埃的环境介质接触，发生化学反应和吸附过程。摩擦引起的高温和高接触压力使这个过程变得强烈。例如，与含氢介质接触，钢中氢的含量急剧增长，性能发生变化，呈氢化磨损。

氮和二氧化碳对石棉-橡胶复合材料在钢上摩擦时的摩擦特性和耐磨性有良好的作用。氮对粉末冶金材料与铸铁组成的摩擦副有好的作用。

K 值大，不利于活性介质进入接触区，在原有表面膜消失后，极易发生咬粘或严重磨损。

7.1.4 滑动持续时间

用滑动持续时间 t_T 和表面传热系数 h 两个参数评价摩擦装置的运转状态并选择摩擦副。在 $h = 0.023 \sim 0.070 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 的正常状态，若傅里叶数 $F_0 \leq 10$ ($F_0 = at_T/b^2$ ， a 是热扩散率，

b 是摩擦元件散热方向的尺寸，故 F_0 是一量纲为 1 的数群)，计算温度时可忽略制动过程的传热影响。

滑动持续时间的分类见表 20.1-34。

表 20.1-34 滑动持续时间的分类

滑动特性	滑动持续时间 t_T/s	传热因素
短时滑动	< 60	可忽略
长时滑动	60 ~ 300	不可忽略
准稳定滑动	300 ~ 1 000	不可忽略
稳定滑动	> 1 000	不可忽略

7.1.5 工作状态

摩擦副的工作状态有干式和湿式两种：干式摩擦副，金属摩擦材料的摩擦因数约在 0.2 ~ 0.5 范围内。

为了加强散热，常将摩擦副浸入油中工作，成为湿式摩擦副。它的动、静摩擦因数相差较小，滑动速度可以较高。这时，需在摩擦面上开设沟槽，以阻止形成油膜（如果形成油膜摩擦因数将大大降低）。槽宽约为 0.65 ~ 1.50 mm，槽深约为 0.2 ~ 0.4 mm。

7.1.6 外部能量场对摩擦特性的影响

外部能量场对摩擦副摩擦特性的影响见表 20.1-35。

表 20.1-35 外部能量场对摩擦副工作状态的影响

能量场	作用	摩擦特性的最大变化	
		摩擦因数	磨损率
热场	加热或冷却环境介质	变化 2 ~ 3 倍	变化 5 ~ 10 倍
电场	电流通过摩擦副	变化 1 ~ 5 倍	增大到 5 ~ 10 倍
电磁场	在强磁场中摩擦	增大 40% ~ 50%	增大 40% ~ 50%
化学场	在摩擦元件体积中的放热和吸热反应	变化 15% ~ 20%	减少 1/2 ~ 1/3
核子场	摩擦表面经辐射处理	减少到 1% 以下	—

7.2 摩擦副的主要参数

摩擦副的主要参数见表 20.1-36。

7.2.1 滑动速度

在现代摩擦装置中，初始速度从每秒几厘米

到 50 m/s，甚至更高。分离时的滑动速度变化范围亦很大。滑动速度对功率、摩擦功和温度有实质性的影响，而温度与载荷决定了摩擦学特性。

表 20.1-36 摩擦副的主要参数

参 数	符 号	单 位
结合开始和终止时的速度	v_b, v_s	m/s
载荷	F	N
预期单位面积载荷	p	Pa
平均摩擦因数	μ_m	1
摩擦因数的稳定度	α_s	1
滑动持续时间	t_s	s
摩擦元件的体积温度	θ_v	℃
摩擦表面的平均温度	θ_m	℃
每小时的结合次数	n	1
驱动和被驱动部件的转动惯量	J	kg·m ²
热扩散率	a	m ² /s
平均摩擦功及其变化	W_m, τ_w	J
平均摩擦功率及其变化	P_m, τ_p	W
预期线磨损率	K_l	m/h

7.2.2 载荷

在给定的摩擦装置的全部尺寸后，可以计算单位面积上的载荷，在中等运转状态下，单位面积载荷应不大于表 20.1-39 中给出的值。而且，计算出的摩擦元件的体积温度和摩擦表面的平均温度也应与表 20.1-39 所给之值相适应。

摩擦副处于弹性或弹-塑性接触时，磨损寿命最长，设计者通常采用增加摩擦面积以减小载荷或采用有更高耐磨性材料的措施，以满足这样的条件。

7.2.3 摩擦因数

摩擦装置在摩擦表面上施加工作压力后，该装置应能提供足够的摩擦力，在结合过程中摩擦材料有稳定的摩擦因数值。摩擦因数值与载荷、温度、结构、表面粗糙度和材料有关。

通常金属对复合材料的摩擦副，取 $\mu = 0.28 \sim 0.30$ ；金属对粉末冶金材料的摩擦副，取 $\mu = 0.20 \sim 0.23$ ；金属对金属的摩擦副，取 $\mu = 0.15$

7.2.4 摩擦因数的稳定度

摩擦力矩随时间变化的曲线与横坐标（时间）所围面积用时间去得到有效摩擦力矩。把有效摩擦力矩 T_{ef} 和最大摩擦力矩 T_{max} 之比定义为摩擦因数的稳定度 α_s 。稳定度可以表征摩擦

装置的安全因数。

石棉基复合材料的摩擦元件： $\alpha_s = 0.9$ ；

粉末冶金复合材料的摩擦元件： $\alpha_s = 0.75 \sim 0.85$ ；

金属对金属的摩擦元件： $\alpha_s = 0.4 \sim 0.5$ 。

这表明：金属对金属的摩擦可能产生强烈的摩擦振动。

摩擦因数的稳定度是一个重要的参数，它随速度（温度）的上升而下降。稳定度下降将导致摩擦装置的能力减小。有时制动器在长期和重复制动时不能刹住车轮，就是因为这个缘故。

7.2.5 摩擦功

计算摩擦功不仅要考虑所有移动构件的质量，而且还要考虑转动构件的转动惯量。例如，铁路车辆制动器上能量的平衡方程为

$$W + W_b + W_a + W_r = E_k + E_p \tag{20.1-20}$$

$$E_p = J_{cap} (\omega_1^2 - \omega_0^2) / 2$$

式中 W ——制动器作的功；

W_b ——轴承中的摩擦功；

W_a ——克服空气阻力作的功；

W_r ——车轮在钢轨上打滑消耗的功；

E_k ——车辆移动的动能；

E_p ——换算到制动轴上的所有旋转质量的动能；

J_{cap} ——换算到制动轴上的所有旋转质量的转动惯量；

ω_1 ——制动前制动轴角速度；

ω_0 ——制动后制动轴角速度；

摩擦元件单位摩擦表面积或者单位体积的平均摩擦功率、摩擦功是评价摩擦装置设计中摩擦材料能力的特性指标。

7.3 摩擦材料的选取

摩擦装置不能采用温度升高后摩擦学特性会发生不可逆劣化（热衰退）的材料。通常，摩擦副两个摩擦元件不能都用散热差的材料制造，至少其中一个元件应采用金属、合金或石墨复合材料，以便散去摩擦区的热量。即便只有一个摩擦元件采用低散热性和高接触刚度材料制造，摩擦表面上也有可能出现高达 800~1 000℃ 的高温区。在高温区及其附近出现的磨损点内，低散热性摩

擦材料将破裂，而涂抹在金属的摩擦表面上。

摩擦元件交替在热和冷态下运转，热应力超过了机械应力。因此，应该选用能抵抗热疲劳的材料。这种材料的磨损度可用下述公式近似计算

$$K_1 = K\rho/H \quad (20.1-21)$$

式中 K_1 ——线磨损度 (m/m)；

K ——磨损因子；

ρ ——单位面积上的载荷 (MPa)；

H ——材料表面硬度 (HBS)；

摩擦材料的物理性能见表 20.1-37、表 20.1-38。

各种摩擦材料的使用范围见表 20.1-39。若摩擦副在该表推荐的参数内运转，则磨损因子 K 将在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 范围内。

表 20.1-37 金属摩擦材料的物理性能

材料名称	$\lambda/W \text{ (m}\cdot\text{°C)}^{-1}$	$c/J \text{ (kg}\cdot\text{°C)}^{-1}$	$\rho/g\cdot\text{cm}^{-3}$	$a/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10^{-6}$	$(\lambda c \rho)^{1/2} \times 10^{-3}$
铁基粉末冶金材料	34.3/30.4	500/610	5.5/6.0	12.4/0.82	307.1/333.6
钢基粉末冶金材料	29.4/34.3	—	5.6/6.3	—	—
30CrMnSiA	38.2/38.2	461/481	7.8	10.7/10.1	370.6/378.6
65Mn	45.1/28.4	451/500	7.8	12.8/7.0	398.3/332.8
10	58.1/48.1	461/590	7.8	16.1/10.4	457.1/470.5
45	48.1/41.2	471/520	7.8	13.0/10.1	420.4/408.8
12Cr18Ni9Ti	12.7/17.7	500/549	7.9	3.4/4.3	224.0/277.1
ZCuAl10Fe3Mn2	58.8/76.5	382/431	8.9	17.4/20.1	447.1/541.7
合金铸铁	50.0/46.1	500/590	7.1	14.1/11.0	421.3/439.4
灰铸铁	42.2/50.0	540	7.15	10.9/13.0	403.7/439.4
钛	7.8	559	4.5	0.33	140.1
铍	150.0/119.6	1902/2354	1.8	43.0/27.0	716.6/711.9
铬	66.7/39.2	451/500	7.2	20.0/12.5	465.4/375.7

注：1. 金属材料的物理性能受热处理和时效状态影响，故表中为近似值；

2. 分子为在 20°C 时的值，分母为在 300°C 时的值；

3. 粉末冶金材料的硬度为 61.2 ~ 96.9 HBS；铸铁的硬度为 163.2 ~ 224.4 HBS；钢的硬度为 204 ~ 224.4 HBS。

表 20.1-38 非金属摩擦材料的物理性能

材料名称	$\lambda/W \text{ (m}\cdot\text{°C)}^{-1}$	$c/J \text{ (kg}\cdot\text{°C)}^{-1}$	$\rho/g\cdot\text{cm}^{-3}$	$a/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10^{-6}$	$(\lambda c \rho)^{1/2} \times 10^{-3}$	
石棉基复合材料	橡胶胶粘剂	0.40~0.51	900~1 200	2.0~2.5	0.17~0.28	26.8~39.1
	复合胶粘剂	0.40~0.60	900~1 150	2.0~2.6	0.13~0.34	26.8~42.4
	树脂胶粘剂	0.75~0.80	960~1 000	2.3~2.5	0.30~0.35	40.7~44.7
弹性石棉复合材料	0.45~0.50	881~1 000	2.1	0.24~0.27	28.9~32.4	
纸板-乳胶复合材料	0.35	1 090	1.6	0.20	24.7	
酚醛层压纸板	0.35	1 050	2.0	0.17	27.1	
酚醛层压布板	0.45	1 220	2.0~2.1	0.18	33.1~34.0	
螺旋形卷绕材料	0.38	1 250~1 350	1.5~1.8	0.16~0.20	26.7~30.4	
碳-石墨	100~250	600~800	1.5~2.2	1.4~2.8	300.0~663.3	

表 20.1-39 各种摩擦材料的荐用范围

运转状态	摩擦副材料		工作压力/MPa ≤	应用温度范围		摩擦因数近似值 (用于计算)
	I	II		$\theta_A/^\circ\text{C}$	$\theta_V/^\circ\text{C}$	
轻载、无润滑	石棉橡胶复合材料、铜基或铝基粉末冶金材料、皮革、木材	钢	0.785 (0.98)	60~200	≤120	0.30~0.35
中载、无润滑	用络合物胶粘剂的石棉复合材料、铜基或铁基粉末冶金材料	钢或铸铁	1.47	≤400(450)	≤250	0.25~0.28
重载、无润滑	铁基粉末冶金材料、合成材料、碳纤维材料、石棉树脂复合材料	钢或铸铁	5.88	≤1200	≤600(800)	0.22~0.25
轻载、有润滑	铜基或铝基粉末冶金材料、石棉树脂复合材料	钢、青铜或钨	3.43	≤100(120)	≤100	≤0.12
中载、有润滑	铁基粉末冶金材料	钢、钛合金或铝	5.88~6.87	≤120(150)	≤100	≤0.1
重载、有润滑	钢、钛合金或铁基粉末冶金材料	钢	147	-60~50	-40~40	0.22~0.25

注：1. θ_A 是表面温度；2. θ_V 是体积温度；3. 括号内的数值为短期容许值。

7.4 摩擦热力学计算

在摩擦装置中，摩擦元件的表面温度是极重要的参数。滑动持续时间、滑动速度和摩擦功率及其变化规律是计算摩擦元件表面温度和推导摩擦热力学方程最重要的原始数据。图 20.1-6 给出摩擦功率、滑动速度和制动力矩常见的随时间的几种变化曲线。

摩擦元件温度和摩擦热力学的计算步骤及计算公式见表 20.1-40。

当 $n \geq 10$ 时，散热状态趋于稳定，摩擦元件体积温度的计算式可简化为

$$\theta_{V1} = \theta_{V0} + (10-45)kt_c a_{st} W / (m_1 c_1) \quad (20.1-22)$$

如果体积温度超过 500~600℃，则必须采用强制冷却。

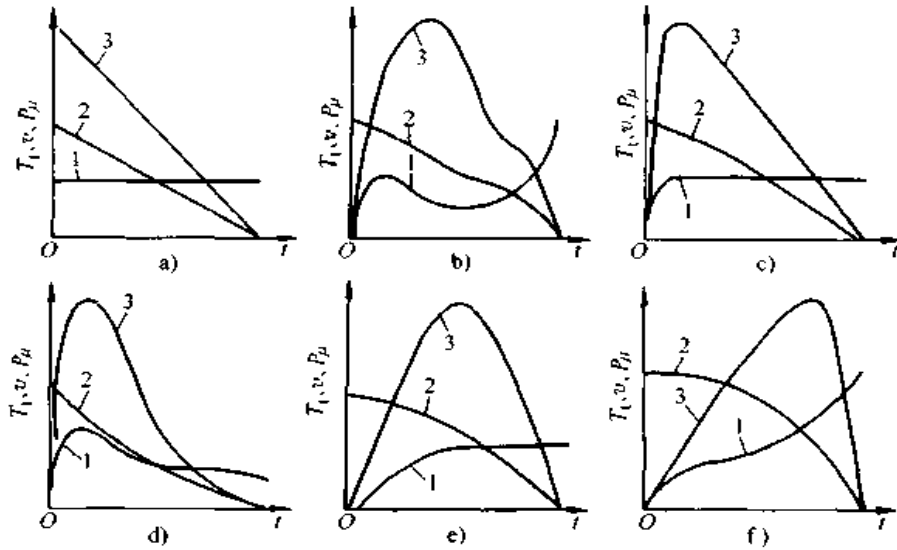


图 20.1-6 摩擦功率 P_f 、滑动速度 v 和制动力矩 T_f 随时间的几种变化曲线

1—制动力矩 T_f 2—滑动速度 v 3—摩擦功率 P_f

表 20.1-40 摩擦热力学计算及其公式

序号	计算项目	计算公式
1	在散热方向的有效尺寸	$b_{\text{ed}} = 1.73(a_1 t_1)^{1/2}$
2	傅里叶数	若 $b_1 < b_{\text{ed}}$ $F_{01} = a_1 t_1 / b_1^2$; 若 $b_1 \geq b_{\text{ed}}$ $F_{01} = 0.333$
3	有效体积系数	$\psi_{V1} = m_{\text{ed}} c_1 / (m_{\text{ed}} c_1 + 0.5 \sum m_{\text{add}} c_i)$
4	热流分配因子	α_{hf} 计算公式见表 20.1-41
5	平均体积温度	$\theta_{\text{vfm}} = 2\alpha_{\text{hf}} W / (3m_{\text{ed}} c_1)$
6	摩擦元件平均表面温度	$\theta_{\text{sr}} = \alpha_{\text{hf}} \psi_{V1} W(t) b_1 / (\lambda_1 t_1 A_r) \times (\tau_p / 3 + F_{01} \tau_w - 2\tau_p \sum / \pi^2)$, $\tau_p = P_p t_1 / E_K$, $\tau_w = W / E_K$; $\sum = \sum_{n=1}^{\infty} (1/n^2) \exp[-(\pi n^2)] (a_1 t_1 / b_1^2)$
7	闪温	$\theta = 1.73 E_K \tau_p d_r (a_2)^{1/2} / A_r t_1 [4\lambda_1 (a_2)^{1/2} + \lambda_2 (\pi d_r v_0)^{1/2}]$, $d_r = (8r_1 h_1 / \zeta)^{1/2} \times [F / (A_c b H)]^{1/2(2)}$; $A_r = \rho A / H_2$; $A = (F_{01} + 1/9)^{1/2}$; $v_1 = v_0 / (1 - \tau_w)^{1/2}$
8	摩擦表面的最高温度	$\theta_{\text{max}} = \theta_{\text{sr}} + \theta$
说明	a —热扩散率(m^2/s); ζ, b —较硬表面支承曲线参数; m_{ed} —有效吸热体积的质量(kg); m_{add} —附加有效体积的质量(kg); c —比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$]; λ —热导率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$]; E_K —一次制动中吸收的动能; r —表面轮廓峰的曲率半径(m); h —表面轮廓峰的最大高度(m); A_c —轮廓接触面积(m^2); H —表面硬度(HBS); v_0 —初始滑动速度(m/s)	

注: $i = 1, 2, 1$ 代表摩擦副中较硬的元件; 2 代表摩擦副中较软的元件。

表 20.1-41 热流分配因子 α_{hf} 的计算式

参数范围	计算公式
$K \approx 1, v \leq 3 \text{ m/s}, P_c \leq 0.4$, 两摩擦元件体积大致相等	$\alpha_{\text{hf}} = (\lambda_2 c_2 \rho_2)^{1/2} / [(\lambda_1 c_1 \rho_1)^{1/2} + (\lambda_2 c_2 \rho_2)^{1/2}]$
$0.6 < K < 1, v \geq 3 \text{ m/s}, P_c > 0.4$, 两摩擦元件体积可以有相当差异	$\alpha_{\text{hf}} = 1 / [1 + (b_1 c_1 / b_2 c_2) (a_1 / a_2)^{1/2}]$
$0.2 < K < 1, v \geq 3 \text{ m/s}, P_c > 0.4$, 两摩擦元件体积有相当大差异	$\alpha_{\text{hf}} = 1 / [1 + \lambda_1 a_2^{1/2} / (K \lambda_2 a_1^{1/2})]$, $b > b_{\text{ed}}$
$K \ll 1, v \geq 3 \text{ m/s}, P_c \geq 20$	$\alpha_{\text{hf}} = 4\lambda_1 / [4\lambda_1 + \lambda_2 (\pi P_c)^{1/2}]$

注: $P_c = v d_r / a$, $d_r = (8r_1 h_1 / \zeta_1)^{1/2} [F / (A_c b_1 H_1)]^{1/2(2)}$, 脚标 1 表示较硬元件。

7.5 摩擦离合器与制动器摩擦副的计算数据

各种摩擦离合器摩擦副的摩擦因数、许用压

力、许用温度见表 20.1-42, 单位摩擦面积适用的功率见表 20.1-43。

各种制动器摩擦副的摩擦因数、许用压力、许用 $p v$ 值和许用温度见表 20.1-44。

表 20.1-42 摩擦离合器摩擦副的摩擦因数、许用压力、许用温度

摩擦副材料		摩擦因数 μ		许用压力 p_v /MPa		许用温度 θ_1 /°C	
I	II	干式	湿式	干式	湿式	干式	湿式
淬火钢	淬火钢	0.15~0.20	0.05~0.10	0.2~0.4	0.6~1.0	<260	<120
铸铁	铸铁	0.15~0.25	0.06~0.12	0.2~0.4	0.6~1.0	<300	
铸铁	钢	0.15~0.20	0.05~0.10	0.2~0.4	0.6~1.0	<260	
青铜	青铜、铸铁、钢	0.15~0.20	0.06~0.12	0.2~0.4	0.6~1.0	<150	
铜基粉末冶金	铸铁、钢	0.25~0.35	0.08~0.10	1.0~2.0	1.5~2.5	<560	
铁基粉末冶金	铸铁、钢	0.3~0.4	0.10~0.12	1.5~2.5	2.0~3.0	<680	
石棉基摩擦材料	铸铁、钢	0.25~0.35	0.08~0.12	2.0~3.0	0.4~0.6	<260	
酚醛层压布材	铸铁、钢	—	0.10~0.12	—	0.4~0.6	<150	
皮革	铸铁、钢	0.3~0.4	0.12~0.15	0.07~0.15	0.15~0.28	<110	
软木	铸铁、钢	0.3~0.5	0.15~0.25	0.05~0.10	0.10~0.15	<110	

表 20.1-43 几种离合器的适用功率

离合器类型	涨圈离合器			闸带离合器			干式摩擦片离合器			湿式摩擦片离合器			圆锥离合器		
	重	中等	轻	重	中等	轻	重	中等	轻	重	中等	轻	重	中等	轻
适用功率/ W·m ⁻²	0.24	0.58	1.75	0.24	0.58	1.15	0.12	0.24	0.58	0.15	0.29	0.70	0.24	0.35	0.80

表 20.1-44 各种制动器摩擦副的摩擦因数、许用压力、许用 p_v 值和许用温度

摩擦副材料		I	铸铁	钢	青铜	石棉树脂	石棉橡胶	石棉铜丝	石棉浸油	石棉塑料
		II	钢	钢或铸铁	钢	钢	钢	钢	钢	钢
块式 制动器	停止式	p_p /MPa	2	2		0.6			0.6	0.6
		$(p_v)_p$ /MPa·m·s ⁻¹	5			5	5	5	5	5
	滑摩式	p_p /MPa	1.5	1.5		0.3			0.3	0.4
		$(p_v)_p$ /MPa·m·s ⁻¹	2.5			2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
带式 制动器	停止式	p_p /MPa	1.5	1.5		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
		$(p_v)_p$ /MPa·m·s ⁻¹	2.5			2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	滑摩式	p_p /MPa	1	1		0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
		$(p_v)_p$ /MPa·m·s ⁻¹	1.5			2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
盘式 制动器	干式	p_p /MPa	0.2~0.3	0.2~0.3	0.2~0.3	0.2~0.3			0.2~0.3	0.4~0.6
		$(p_v)_p$ /MPa·m·s ⁻¹					1.4	1.4	1.4	1.4
	湿式	p_p /MPa	0.6~0.8	0.6~0.8	0.6~0.8	0.6~0.8			0.6~0.8	1.0~1.2
		$(p_v)_p$ /MPa·m·s ⁻¹								
摩擦 因数	干式	μ	0.17~0.20	0.15~0.18	0.15~0.20	0.35~0.40	0.40~0.43	0.33~0.35	0.30~0.35	0.35~0.45
	湿式	μ	0.06~0.08	0.06~0.08	0.06~0.11	0.10~0.12	0.12~0.16	—	0.08~0.12	0.15~0.20
许用温度	θ /°C	260	260	150	250	250	—	250	—	

8 自锁机构

摩擦力更经常地表现为一种有害阻力，克服摩擦力所做的功为损耗功。令输出功率 P_Q 与输入功率 P_P 之比为效率 η ，则效率

$$\eta = P_Q/P_P = 1 - P_\mu/P_P \quad (20.1-23)$$

式中 P_μ ——克服摩擦力所做的损耗功率。
机构的效率不能小于零，也不能等于零，否则该机构无法运动。机构不能运动的现象称为自锁。

若一个机构的正行程效率大于零，而反行程效率小于零，这种在反行程时发生自锁现象的机构称为自锁机构。

8.1 斜面机构

斜面机构中的摩擦及自锁条件见表 20.1-45。

8.2 楔

楔联接中的摩擦及自锁条件见表 20.1-46，摩擦因数见表 20.1-47。

8.3 螺纹副

螺纹副中的摩擦和自锁条件见表 20.1-48。

表 20.1-45 斜面机构的摩擦和自锁条件

滑块类型	平面滑块		楔形滑块	
	等速上升	等速下降	等速上升	等速下降
力平衡图				
作用力	$F = F_Q \tan(\alpha + \rho)$	$F = F_Q \tan(\alpha - \rho)$	$F = F_Q \tan(\alpha + \rho')$	$F = F_Q \tan(\alpha - \rho')$
效率	$\eta = \tan \alpha / \tan(\alpha + \rho)$ 当 $\alpha = \pi/4 - \rho/2$ 时效率最高 $\eta_{max} = \tan(\pi/4 - \rho/2)$	$\eta = \tan(\alpha - \rho) / \tan \alpha$	$\eta = \tan \alpha / \tan(\alpha + \rho')$ 当 $\alpha = \pi/4 - \rho'/2$ 时效率最高 $\eta_{max} = \tan(\pi/4 - \rho'/2)$	$\eta = \tan(\alpha - \rho') / \tan \alpha$
自锁条件	$\alpha \geq \pi/2 - \rho$	$\alpha \leq \rho$	$\alpha \geq \pi/2 - \rho'$	$\alpha \leq \rho'$

表 20.1-46 楔的摩擦和自锁条件

楔的类型	楔联接	调整楔
力平衡图		

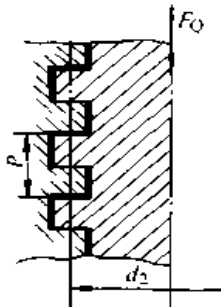
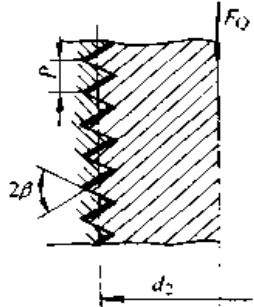
续表 20.1-46

楔的类型	楔 联 接	调 整 楔
楔紧力	$F = F_Q[\tan(\alpha_1 + \rho_1) + F_Q \tan(\alpha_2 + \rho_2)]$	$F = F_Q[\sin(\rho_2 + \rho_3 + \alpha) \cos \rho_1] / [\cos(\rho_1 + \rho_2 + \alpha) \cos \rho_3]$ 若 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$ $F = F_Q \tan(\alpha + 2\rho)$
松脱力	$F = F_Q[\tan(\alpha_1 - \rho_1) + F_Q \tan(\alpha_2 - \rho_2)]$	$F = F_Q[\sin(\alpha - \rho_2 - \rho_3) \cos \rho_1] / [\cos(\alpha - \rho_1 - \rho_2) \cos \rho_3]$ 若 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$ $F = F_Q \tan(\alpha - 2\rho)$
自锁条件	$\alpha_1 + \alpha_2 \leq \rho_1 + \rho_2$	$\alpha \leq \rho_2 + \rho_3$

表 20.1-47 楔联接的摩擦因数

材料和表面状况	钢-钢, 仔细加工、涂脂	钢-钢、刨削、涂脂	钢-钢、油润滑	钢-钢、无油或脂
摩擦因数 μ	0.04	0.07	0.15	0.20~0.22
摩擦角 ρ	2°17'	4°0'	8°32'	11°19'~12°24'

表 20.1-48 螺纹的摩擦和自锁条件

螺纹类型	矩 形 螺 纹	三 角 螺 纹
简 图		
旋紧力矩	$T = F_Q d_2 (P + \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 - P\mu)]$	$T = F_Q d_2 (P \cos \beta + \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 \cos \beta - P\mu)]$
松退力矩	$T = F_Q d_2 (P - \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 + P\mu)]$	$T = F_Q d_2 (P \cos \beta - \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 \cos \beta + P\mu)]$
自锁条件	$P \leq \pi d_2 \mu$	$P \leq \pi d_2 \mu / \cos \beta$
效率	$\eta = (P / \pi d_2) [\pi d_2 - P\mu] / (\pi d_2 \mu + P)$ 当 $P = \pi d_2 \mu$ 时, $\eta = (1 - \mu^2) / 2$	$\eta = (P / \pi d_2) [(\pi d_2 \cos \beta - P\mu) / (\pi d_2 \mu + P \cos \beta)]$ 当 $P = \pi d_2 \mu / \cos \beta$ 时, $\eta = (1 - \mu^2 / \cos^2 \beta) / 2$

9 机械零件中的摩擦阻力

9.1 (非流体润滑)滑动轴承的摩擦转矩

在滑动轴承中, 摩擦力构成摩擦转矩, 消耗

输入功率。摩擦转矩或摩擦功耗的大小是滑动轴承的一个重要性能指标。

9.1.1 径向轴承的摩擦转矩

轴瓦面上的载荷分布视轴颈与轴瓦接触情况而定: 间隙较大时理论上是线接触, 载荷为集中

载荷; 间隙很小时是面接触, 载荷为均布载荷。

表 20.1-49 给出径向轴承两种载荷分布下的摩擦转矩、功耗和摩擦圆半径。表中公式亦适用

于铰链。

9.1.2 止推轴承的摩擦转矩

止推轴承摩擦转矩和摩擦功耗见表 20.1-50。

表 20.1-49 径向滑动轴承中的摩擦

载荷类型	示意图	摩擦转矩	摩擦功耗	摩擦圆半径
集中载荷		$T = (F_Q d / 2) \times [\mu / (1 + \mu^2)^{1/2}]$	$P = F_Q \pi d n \times [\mu / (1 + \mu^2)^{1/2}]$	$r = (d / 2) \times [\mu / (1 + \mu^2)^{1/2}]$
均布载荷	未磨合轴承 	$T = (F_Q d / 2) (\pi \mu / 2)$	$P = F_Q \pi^2 d n \mu / 2$	$r = \pi d \mu / 4$
	磨合轴承 	$T = (F_Q d / 2) (4 \mu / \pi)$	$P = 4 F_Q d n \mu$	$r = 2 d \mu / \pi$

表 20.1-50 止推轴承的摩擦

类型	平面止推轴承	环形止推轴承	圆锥止推轴承	圆台止推轴承
示意图				
未磨合轴承	摩擦转矩 $T = d \mu F_Q / 3$	$T = [(D^3 - d^3) / (D^2 - d^2)] (\mu F_Q / 3)$	$T = (d / \sin \alpha) \mu F_Q / 3$	$T = [D^3 - d^3] / (D^2 - d^2) \times (1 / \sin \alpha) F_Q \mu / 3$
	摩擦功耗 $P = 2 \pi d n \mu F_Q / 3$	$P = 2 [(D^3 - d^3) / (D^2 - d^2)] \pi n \mu F_Q / 3$	$P = 2 (d / \sin \alpha) \times \pi n \mu F_Q / 3$	$P = 2 [(D^3 - d^3) / (D^2 - d^2)] \times (1 / \sin \alpha) \pi n \mu F_Q / 3$
磨合轴承	摩擦转矩 $T = d \mu F_Q / 4$	$T = (D + d) \mu F_Q / 4$	$T = (d / \sin \alpha) \mu F_Q / 4$	$T = (D + d) / (1 / \sin \alpha) \mu F_Q / 4$
	摩擦功耗 $P = \pi d n \mu F_Q / 2$	$P = (D + d) \pi n \mu F_Q / 2$	$P = (d / \sin \alpha) \pi n \mu F_Q / 2$	$P = (D + d) (1 / \sin \alpha) \pi n \mu F_Q / 2$

9.2 滚动轴承的摩擦转矩

滚动轴承中除滚动摩擦外，尚有滑动摩擦和润滑剂的流体动力损耗。

粗略计算时，若 $C/P = 10$ 、润滑良好、工作状态正常，摩擦转矩可按式估算

$$T = 0.5\mu Fd \quad (20.1-24)$$

式中 μ ——滚动轴承摩擦因数，见表 20.1-29；

F ——轴承载荷，对于向心轴承是径向载荷，对于推力轴承是轴向载荷；

d ——轴承内径。

摩擦转矩的精确计算如下：当轴承有良好的润滑油膜时，滚动轴承由流体动力损耗决定的摩擦转矩与载荷无关，与润滑剂的黏度、用量和轴承转速有关，其计算式为

$$T_0 = f_0(vn)^{2/3}d_m^3 \times 10^{-7}, vn \geq 2000$$

$$T_0 = 160f_0d_m^3 \times 10^{-7}, vn < 2000 \quad (20.1-25)$$

式中 f_0 ——与轴承类型有关的润滑系数，从表 20.1-51 中查取；

v ——工作温度下润滑油或润滑脂基础油的运动黏度 (mm^2/s)；

n ——转速 (r/min)；

d_m ——滚动体中心圆直径 mm ， $d_m \approx (d + D)/2$ ；

滚动和滑动摩擦决定的摩擦转矩随载荷变化，其计算式为

$$T_1 = f_1 F d_m^b \quad (20.1-26)$$

式中 f_1 ——与轴承类型有关的载荷系数，从表 20.1-52 中查取；

F ——决定轴承摩擦转矩的载荷，其计算式见表 20.1-52；

a 、 b ——与轴承类型有关的指数，其值见表 20.1-53。

表 20.1-51 润滑系数 f_0

轴 承 类 型	f_0			
	脂润滑 ^①	油雾润滑	油浴润滑	立轴油浴润滑、喷油润滑
深沟球轴承 单列	0.75~2.0 ^②	1.0	2.0	4.0
深沟球轴承 双列	3	2.0	4.0	8.0
调心球轴承	1.5~2 ^③	0.7~1.0 ^④	1.5~2.0 ^⑤	3.0~4.0 ^⑥
角接触球轴承 单列	2	1.7	3.3	6.6
角接触球轴承 双列，成对安装	4	3.4	6.5	13.0
角接触球轴承 4点接触	6	2.0	6.0	9.0
圆柱滚子轴承 系列 10,02,03,04	0.6	1.5	2.2	2.2 ^⑦
圆柱滚子轴承 有保持架 系列 22	0.8	2.1	3.0	3.0 ^⑧
圆柱滚子轴承 系列 23	1.0	2.8	4.0	4.0 ^⑨
满滚子 单列	5.0 ^⑩	—	5.0	—
满滚子 双列	10.0 ^⑪	—	10.0	—
滚针轴承	12.0	6.0	12.0	24.0
调心滚子轴承 系列 13	3.5	1.75	3.5	7.0
调心滚子轴承 系列 22	4.0	2.0	4.0	8.0
调心滚子轴承 系列 23、30	4.5	2.25	4.5	9.0
调心滚子轴承 系列 31	5.5	2.75	5.5	11.0
调心滚子轴承 系列 32	6.0	3.0	6.0	12.0
调心滚子轴承 系列 40	6.5	3.25	6.5	13.0
调心滚子轴承 系列 41	7.0	3.5	7.0	14.0

续表 20.1-51

轴 承 类 型	f_0			
	脂润滑 ^①	油雾润滑	油浴润滑	立轴油浴润滑、喷油润滑
圆锥滚子轴承 单列 成对安装	6.0	3.0	6.0	8.0~10.0 ^②
	12.0	6.0	12.0	16.0~20.0 ^②
推力球轴承	5.5	0.8	1.5	3.0
推力圆柱滚子轴承	9.0	—	3.5	7.0
推力滚针轴承	14	—	5.0	11.0
推力调心滚子轴承 系列	92E ^③	—	2.5	5.0
	92	—	3.7	7.4
	93E ^③	—	3.0	6.0
	93	—	4.5	9.0
推力调心滚子轴承 系列	94 ^⑤	—	3.3	6.6
	94	—	5.0	10.0

①适用于稳定状态，新脂或添脂后应采用 $(2\sim4)\times f_0$ 。②直径系列较轻的轴承取较小值，反之，取较大值。
③适用于喷油润滑，对于立轴油浴润滑加倍。④适用于低速，高速时加倍。⑤加强型设计，基本尺寸相同。

表 20.1-52 载荷系数 f_1 和载荷 F

轴 承 类 型	f_1	F ^①
深沟球轴承	$(0.0006\sim0.0009)(P_0/C_0)^{0.55\text{②}}$	$3F_s - 0.1F_r$
调心球轴承	$0.0003(P_0/C_0)^{0.40}$	$1.4Y_2F_s - 0.1F_r$
角接触球轴承 单列 双列，成对安装 4点接触	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	$F_s - 0.1F_r$
	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	$1.4F_s - 0.1F_r$
	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	$1.5F_s - 3.6F_r$
圆柱滚子轴承 有保持架 满滚子 单列 滚针轴承	系列 10	$F_r^{\frac{2}{3}}$
	系列 02	$F_r^{\frac{2}{3}}$
	系列 03	$F_r^{\frac{2}{3}}$
	系列 04, 22, 23	$F_r^{\frac{2}{3}}$
	单列	$F_r^{\frac{2}{3}}$
滚针轴承	0.002	F_r
调心滚子轴承 系列 13 系列 22 系列 23 系列 30, 41 系列 31 系列 32 系列 40	0.00022	$1.35Y_2F_s, F_r/F_s < Y_2$ $F_r[1+0.35(Y_2F_s/F_r)^3], F_r/F_s > Y_2$
	0.00015	
	0.00065	
	0.001	
	0.00035	
	0.00045	
	0.0008	

续表 20.1-52

轴承类型	f_1	F'
圆锥滚子轴承 单列	0.000 4	$2YF_r$
圆锥滚子轴承 成对安装	0.000 4	$1.2Y_2F_r$
推力球轴承	$0.000 8 (P_a/C_a)^{0.33}$	F_a
推力圆柱滚子轴承	0.001 5	F_a
推力滚针轴承	0.001 5	F_a
推力调心滚子轴承	系列 92E ¹	$F_a (F_{max} \leq 0.55F_a)$
	系列 92	$F_a (F_{max} \leq 0.55F_a)$
	系列 93E ¹	$F_a (F_{max} \leq 0.55F_a)$
	系列 93	$F_a (F_{max} \leq 0.55F_a)$
	系列 94E ¹	$F_a (F_{max} \leq 0.55F_a)$
	系列 94	$F_a (F_{max} \leq 0.55F_a)$

注：Y 和 Y₂ 是滚动轴承的计算因数。

① 若 $F < F_r$ 则取 $F = F_r$ ；② 直径系列较轻的轴承取较小值，反之，取较大值；③ 不受轴向力时按此式计算；④ 加强型设计，基本材料相同。

表 20.1-53 指数 a、b

轴承类型	指数	
	a	b
各类轴承 (除调心滚子轴承)	1.00	1.0
调心滚子轴承 系列	13	1.35
	22	1.35
	23	1.35
	30	1.50
	31, 32	1.50
	40, 41	1.50

除圆柱滚子轴承外，滚动轴承总的摩擦转矩为

$$T = T_0 + T_1 \quad (20.1-27)$$

圆柱滚子轴承承受径向载荷的同时还承受轴向载荷时，轴承的摩擦转矩将加大，增加的量与内、外圈挡边和滚子端面接触处的设计和润滑条件有关。当轴向载荷与径向载荷之比 (F_a/F_r)，对满滚子轴承不大于 0.5，双列满滚子轴承不大于 0.25，对带保持架的轴承不大于 0.4 时，摩擦转矩可按下式计算

$$T = T_0 + T_1 + T_2 \quad (20.1-28)$$

式中 T_2 是与轴向载荷有关的摩擦转矩分量，且

$$T_2 = f_2 F_a d_m \quad (20.1-29)$$

式中 f_2 ——与轴承设计和润滑有关的系数，

见表 20.1-54。

表 20.1-54 圆柱滚子轴承的系数 f_2

轴承类型	f_2	
	脂润滑	油润滑
带保持架轴承 改进设计	0.003	0.002
	0.009	0.006
满滚子轴承 单列	0.006	0.003
	0.015	0.009

接触式密封轴承中，密封引起的摩擦损失可能比轴承本身的大。两面密封轴承，密封引起的摩擦转矩可按下列经验公式计算

$$T_3 = [(d+D)/f_3]^2 + f_4 \quad (20.1-30)$$

对于密封球轴承，通常 $f_3 = 20$ ， $f_4 = 10$ ；单面密封轴承中密封的摩擦转矩取为 $T_3/2$ 。

9.3 齿轮传动的摩擦功耗

渐开线齿轮的啮合齿廓间既有滚动又有滑动。滚动摩擦损失通常很小，可以忽略不计，只考虑滑动摩擦引起的功率损失。

标准渐开线圆柱齿轮齿廓间的相对滑动速度为 (见图 20.1-7)

$$v_{ck} = (\omega_1 + \omega_2) PK \quad (20.1-30)$$

假设节点两侧的实际啮合线长度相等，即

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \epsilon \pi m \cos \alpha / 2 \quad (20.1-31)$$

以节点一侧啮合线中点啮合时的滑动速度为平均滑动速度，即取

$$PK = \epsilon \pi m \cos \alpha / 4 \quad (20.1-32)$$

则摩擦功耗为

$$P_f = \mu F_N (\omega_1 + \omega_2) \epsilon \pi m \cos \alpha / 4 \quad (20.1-33)$$

效率为

$$\eta = 1 - \epsilon \pi \mu (1/z_1 \pm 1/z_2) / 2 \quad (20.1-34)$$

式中 z_1, z_2 ——小、大齿轮齿数；

ϵ ——重合度。

“+”用于外啮合，“-”用于内啮合。齿轮齿条啮合时取 $z_2 = \infty$ 。

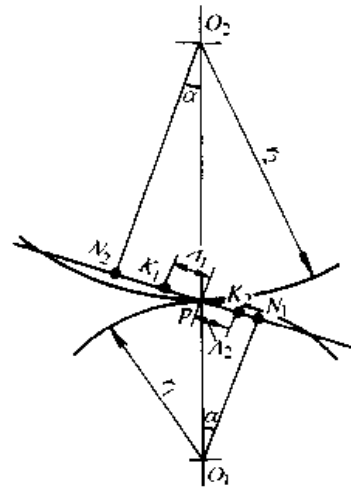


图 20.1-7 齿轮的啮合

9.4 车轮在钢轨(路面)上的摩擦力

车轮与钢轨的滑动摩擦力即车辆的牵引力 F_T ，而车轮与钢轨的滚动摩擦力是车辆的阻力

F_R 。环境和设计参数对牵引力和滚动阻力的影响见表 20.1-55。

表 20.1-55 各种因素对牵引力和滚动阻力的影响

车轮类型	载荷 F	速度	温度	水	车轮直径 D	车轮宽度 B	材料	配合表面	其他
钢轮箍	$F_R \propto F^{0.9}$ $F_T \propto F$	随着速度的增加 F_T 稍有减小，而 F_R 增加	影响不大，除非局部出现很高温度烧毁摩擦面上污染物	小雨对 F_T 有不利影响，大雨因其清洁作用而增大牵引力	$F_R \propto D^2$ $\gamma = 0.5 \sim 1.0$	影响甚小	影响甚小	清除轨道的污染物或撒砂子能增加牵引力	驱动转矩均匀时牵引力较大
充气橡胶轮胎	F_R 随载荷增加； $F_T \propto F$	拐弯时速度才有影响	橡胶的摩擦因数随温度升高而下降，每升高 15°C ，约降低 10%	F_T 降低较多	随 D 增大 F_R 减小而 F_T 增大	随 B 增大， F_R 稍降低，而 F_T 增加	橡胶成分比踏面的形式更重要	路面极为关键	在潮湿的路面上，磨光的踏面，牵引力只有磨光前的一半
实心轮胎	$F_R \propto F^{1/3}$ $F_T \propto F$	适宜速度 $v \leq 40$ km/h	随轮胎材料性质而变	F_T 降低很多	$F_R \propto D^{-0.6}$	$F_R \propto B^{-0.3}$	$F_R \propto E^{1/3}$ E 是弹性模量	只适用于光的路面	

第 2 章 磨损及其控制

如果摩擦是一种现象，那么磨损就是它的结果，但磨损与摩擦力、摩擦因数之间的关系却很复杂。

磨损是一个物体由于机械作用（间或伴有化学作用），即与另一个偶件（可以是固体、液体或气体）发生接触和相对运动，而造成的表面材料损失或材料转移。磨损和腐蚀都造成材料损失，它们之间既有区别又有联系。磨损是机械零件失效的主要原因之一。

从技术角度来看，磨损通常是不希望出现的，即它是消极的。但磨损也有可供利用的一面，例如磨削和研磨被认为是创造价值的工艺过程。

磨损是表层材料不断损伤的一个过程。

1 磨损过程

在一定的摩擦条件下，磨损过程分为三个阶段，即磨合阶段、稳定磨损阶段和剧烈磨损阶段。图 20.2-1 表示磨损量与工作时间的典型关系，它明显地显示出三个磨损阶段。

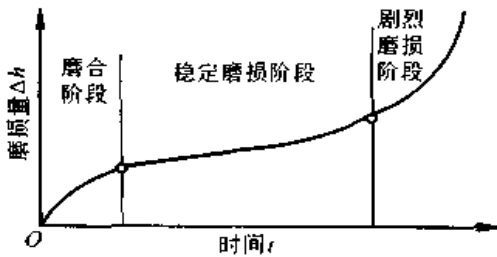


图 20.2-1 磨损量与工作时间的关系

磨合阶段是磨损的不稳定阶段，在整个工作时间内其比率很小。

稳定磨损阶段时间最长，其特征是磨损缓慢、磨损率稳定。

剧烈磨损阶段的特征是磨损率极高，产生异常噪声和振动，摩擦副温度迅速升高，很快导致零件失效。

1.1 磨合

磨合过程包括摩擦表面轮廓峰的形状变化和

材料表面层被加工硬化两个过程。磨合能使接触表面形成弹性接触的条件，而接触表面维持弹性接触状态才能提供稳定的摩擦力值并获得最小的磨损率。

1.1.1 稳定表面粗糙度

在磨合初期，只有很少的轮廓峰接触并发生摩擦，因此接触面上真实应力很大，使接触轮廓峰激烈破坏、压碎和塑性变形，原有的轮廓峰逐渐局部或全部消失，产生形状和尺寸均不同于原有轮廓峰的新轮廓峰，同时，新轮廓峰薄的表层被冷作硬化。

实验证实，各种摩擦副在不同条件下磨合之后，形成稳定的表面粗糙度。在以后的摩擦过程中，此粗糙度不会继续改变。磨合的重要规律之一，是稳定表面粗糙度与原始表面粗糙度无关，而取决于摩擦条件。图 20.2-2 表明了这一规律。

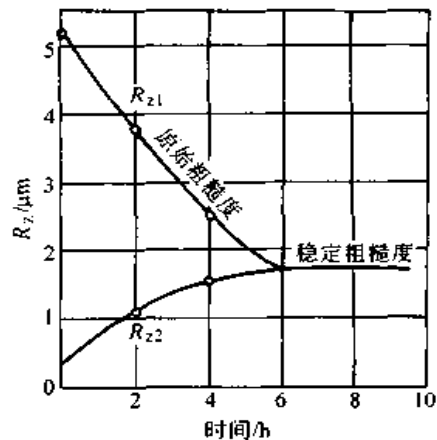


图 20.2-2 磨合中表面粗糙度的变化

摩擦副材料：45 钢、ZCuSn5Pb5Zn5；

$p = 3 \text{ MPa}$ ； $v = 5 \text{ m/s}$ ；边界润滑

磨合后的稳定表面粗糙度可能大于也可能小于原始表面粗糙度，是给定摩擦条件（材料、压力、温度、润滑剂与润滑条件等）下的最佳表面粗糙度，它能保证磨损率最低。

1.1.2 影响磨合效果的因素

影响磨合效果的主要因素是载荷、速度、材

料的物理力学性能和润滑剂。

载荷对磨合效果和磨合时间具有很大影响。在磨合一开始时，表层的塑性变形部分随载荷增加而增加，摩擦功和发热量亦增加。若单位面积载荷不超过某一临界值，接触为弹性接触，磨合表面的质量将会改善。单位面积载荷超过临界值后，接触转变为塑性接触，磨合后的稳定表面粗糙度劣化。临界单位面积载荷可按下式计算

$$p_{cr} = 5.4^{(2\zeta+1)/2} K_{\zeta} b / (2\pi^{1/2}) \times [R_{\zeta} / (rb^{1/\zeta})]^{-1} \cdot p_{ar} (p_{ar}/E_e)^{2\zeta} \quad (20.2-1)$$

式中 r —— 轮廓峰平均曲率半径；
 b, ζ —— 支承长度率的曲线参数，其值见表 20.1-3~表 20.1-5；
 K_{ζ} —— 决定于 ζ 的因数，见图 20.1-1；
 p_{ar} —— 平均应力；
 E_e —— 有效弹性模量， $E_e = E/(1-\nu^2)$ 。

不同材料的平均应力 p_{ar} 、有效弹性模量 E_e 、表面轮廓几何参数和载荷临界值 p_{cr} 见表 20.2-1。

表 20.2-1 材料的力学性能与表面粗糙度综合参数

材 料	p_{ar}/MPa	E_e/GPa	$R_{\zeta}/rb^{1/\zeta}$	p_{cr}/p_{ar}
黑色金属	1 960	218	10 ⁻¹ ~ 10 ⁻²	7.5×10 ⁻⁶ ~7.5×10 ⁻⁴
有色金属	785	109		3.0×10 ⁻⁶ ~3.0×10 ⁻⁴
塑 料	98	2.5		3.0×10 ⁻³ ~3.0×10 ⁻¹

润滑剂对磨合后表面粗糙度的变化有很大的影响，见表 20.2-2。

表 20.2-2 不同润滑剂对轴承磨合的影响

润 滑 剂	$Ra/\mu\text{m}$			
	青铜轴瓦		60 钢轴	
	磨合前	磨合后	磨合前	磨合后
液压油	0.93	0.88	0.72	0.51
工业用甘油	0.93	0.32	0.72	0.43
聚乙二醇	0.64	0.32	0.60	0.60

1.1.3 磨合与磨损寿命

不同的磨合规范将影响磨合时间、磨合磨损量和磨合后的磨损率（即磨损寿命）。实践证明：

良好的磨合能够使摩擦副的工作寿命提高 1~2 倍。

1.2 磨损类型

表面层有多种接触状态，在接触中发生多种多样的变化，导致磨损有多种类型，必须区别磨损类型才能控制磨损。

磨损类型按参与磨损的物质分为单相磨损和多相磨损；按相对运动形式分，有滚动磨损、滑动磨损、流体侵蚀和磨粒侵蚀等；按表面层的变形分为弹性接触中的磨损、塑性接触中的磨损和微切削中的磨损；按磨损机理分，有粘附磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损和腐蚀磨损等。

判断磨损机理的常用方法是观察磨损表面的外观。四种基本磨损机理之磨损，造成的表面损伤的典型特征见表 20.2-3。

表 20.2-3 磨损表面的外观

磨损机理	磨损表面的外观
粘附磨损	锥刺、鳞尾、麻点
磨粒磨损	擦伤、沟纹、条痕
疲劳磨损	裂纹、点蚀
腐蚀磨损	反应产物、麻点

另有一种磨损称为微动磨损，是由上述四种基本磨损机理汇合而成的。如果两接触表面宏观上是相对静止的，但彼此以小于 100 μm 的振幅作相对运动，则发生的磨损称为微动磨损。

在机械设备中微动磨损常发生在搭接接头、轴毂联接、金属间静密封、发动机机架和离合器等处。

微动磨损损伤的特征是出现疲劳裂纹和微动磨屑。由于微动磨损，零件疲劳强度可能降低 75%~86%。

磨损过程的主要特征是：相对运动的类型、相互作用的元素和主导磨损机理。把这三者结合起来就可以说明磨损类型。

同时，实际的磨损过程不可能仅是一种机理的磨损，而往往是多种机理磨损的混合。

表 20.2-4 按这三个特征列出一些磨损形式及其相应的磨损机理。

表 20.3-4 磨损形式及其磨损机理

相互作用元素	相对运动类型	磨损形式	各种磨损机理所占比例			
			粘附磨损	磨粒磨损	疲劳磨损	腐蚀磨损
固体对固体 (有或无润滑)	滑动	滑动磨损	25%	25%	25%	25%
	滚动	滚动磨损	12.5%	12.5%	12.5%	62.5%
	转动	自旋磨损	25%	25%	25%	25%
	撞击、冲击	冲击磨损	12.5%	12.5%	12.5%	62.5%
	振动	微动磨损	25%	25%	25%	25%
	凿削	凿削磨损	12.5%	12.5%	75%	0%
	刻划	划伤磨损	0%	0%	87.5%	12.5%
固体对固体加颗粒	滑动	磨粒滑动磨损	12.5%	12.5%	75%	0%
	滚动	磨粒滚动磨损	12.5%	12.5%	0%	75%
	碾磨	高应力碾碎性磨损	0%	12.5%	62.5%	25%
固体对液体加颗粒	流动	磨粒侵蚀	0%	12.5%	75%	12.5%
固体对气体加颗粒	平行喷射	磨粒侵蚀	0%	12.5%	75%	12.5%
	斜向喷射	磨粒侵蚀加冲击侵蚀	0%	12.5%	43.75%	43.75%
	垂直喷射	冲击侵蚀	0%	12.5%	12.5%	75%
固体对液体	撞击	液滴冲击侵蚀	0%	12.5%	0%	87.5%
		液体侵蚀	0%	12.5%	0%	87.5%
	流动	气蚀	0%	12.5%	0%	87.5%
固体对气体	流动	烧蚀				

1.3 磨损的度量与耐磨性的评价

由磨损引起的材料损失称为磨损量，可以用摩擦元件磨损表面的法向尺寸、体积和质量的变化来代表磨损量，以度量磨损。

磨损量与摩擦经过的时间之比，称为磨损率。根据磨损量的不同，分为线磨损率、体积磨损率和质量磨损率，常用的单位分别是 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、

mm^3/h 、 g/h 。磨损量与滑移距离、摩擦功等之比，称为磨损度，同样，磨损度有线磨损度、体积磨损度和质量磨损度之分。常用的单位分别为 mm/m 、 mm^3/m 、 g/m 、 $\text{mm}/(\text{N}\cdot\text{m})$ 、 $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 、 $\text{g}/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。

线磨损度 $K_h (= \Delta h/L)$ 大约从 $10^{-5} \sim 10^{-12} \text{m}/\text{m}$ 。可以根据线磨损度的大小，将机械零件的耐磨性分级，如表 20.2-5。

表 20.2-5 耐磨性等级

等级	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
$\lg K_{hmin}$	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
$\lg K_{hmax}$	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3
接触状态	弹性变形					弹塑性变形			微切削作用	

评价耐磨性的参数还有磨损量的倒数和磨损因数 K 。

令磨损量为 Δm ，则耐磨性

$$\varepsilon = 1/\Delta m \quad (20.2-2)$$

试样与标样耐磨性之比称为相对耐磨性，即

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{\text{试样}}/\varepsilon_{\text{标样}}$$

将单位摩擦功的体积磨损量称为能量磨损度，即

$$K_E = \Delta V / (LF_p)$$

它与摩擦因数的乘积称为磨损系数 K_μ ，故

$$K_\mu = K_E \mu = \Delta V / (LF_N)$$

磨损系数 K_μ 的单位是 m^2/N 。

将磨损系数 K_μ 与表面硬度的乘积定义为磨损因数 K ，即

$$K = K_\mu H \quad (20.2-3)$$

式中 H —— 表面硬度 (HBS)。

K 值是量纲为 1 的量，其数量级可以很灵敏地反映出摩擦副选材以及接触表面的粘附情况。

表 20.2-6 是将所有可行的材料和滑动条件分成少数几类而列出的粘附磨损材料损失时的磨损因数 K 值。

表 20.2-6 粘附磨损的 K 值 ($1/10^{-6}$)

条 件	同样金属	相容金属	部分相容金属	不相容金属	非金属与金属
洁净表面	1 500	500	100	15	1.7
润滑不良	300	100	20	3	1.7
润滑良好	30	10	2	0.3	1.7
润滑极好	1	0.3	0.1	0.03	0.33

注：本表数字不适用于贵金属、含软组元的合金、六方晶体金属。

表 20.2-6~表 20.2-9 中几个术语的说明如下：

1) 同样金属 同样元素组合、同样合金组合以及金属与以它为主要组元的合金的组合都属同样金属。同一种金属的两种不同合金的组合亦属同样金属；

2) 相容金属 由冶金上相容的金属所组成，如银与钯；

3) 部分相容金属 室温下只有有限固溶性(低于 1%)的金属，如银与铜、铝与锡；

4) 不相容金属 溶化时形成两相的金属，

如银与镍。

贵金属，如金、银、钯、铀、钒、钨、铪、铱、钼等的磨损因数值是表 20.2-6 中相应情况数值的 1/3。

六方晶体金属中的镉、锌，其磨损因数值可用表 20.2-6 中的数值；钴、镁、铌、钽、钨的磨损因数可按表 20.2-6 中的位置向右一栏取值；钛、锆、铪的磨损因数见表 20.2-7

表 20.2-7 钛、锆、铪的磨损因数 K 值 ($1/10^{-6}$)

条 件	无润滑	羟基润滑剂	极性润滑剂	其他润滑剂
同样金属	1 000	1 000	50	300
不同金属	500	100	25	100

当无润滑粘附磨损存在材料转移时的磨损因数见表 20.2-8。

表 20.2-8 金属间粘附磨损(有转移)的 K 值 ($1/10^{-4}$)

摩擦副材料		磨损因数	摩擦副材料		磨损因数
I	II	K	I	II	K
镉	镉	57	不锈钢	不锈钢	70
锌	锌	530	镉	低碳钢	0.3
银	银	40	铜	低碳钢	5
铜	铜	110	铂	低碳钢	5
铂	铂	130	低碳钢	铜	1.7
低碳钢	低碳钢	150	铂	银	0.3

微动磨损的磨损因数见表 20.2-9。

表 20.2-9 微动磨损的磨损因数 K 值 ($1/10^{-6}$)

条件	同样金属	相容金属	部分相容金属	不相容金属
润滑不良	300	100	20	3
润滑良好	30	10	2	0.3

由表中 K 值可以看出，润滑对降低磨损有显著作用。

因而，可以通过典型试件测出 K 值的数量级来判断摩擦副选材以及接触表面的粘着情况。

显然，当 K 值接近 10^{-3} 时，表明设计中磨损问题已成为一个重要的问题，甚至需要更换材料。

某些工作条件下一些摩擦副的磨损因数 K 值见表 20.2-10。

表 20.2-10 一些摩擦副的磨损因数 K 值

介质	摩擦条件	摩擦副材料		磨损因数 K	
		I	II		
空气	室温，洁净表面	铜	铜	10^{-2}	
		低碳钢	低碳钢	10^{-2}	
		不锈钢	不锈钢	10^{-2}	
		铜	低碳钢	10^{-3}	
	清洁表面 润滑不良表面 润滑良好表面	所有的金属		$10^{-3} \sim 10^{-4}$ $10^{-4} \sim 10^{-5}$ $10^{-6} \sim 10^{-7}$	
		磨粒磨损	钢		10^{-1}
			黄铜		10^{-2}
	各种金属			10^{-2}	
	二氧化碳	载荷 39.2 N, 速度 30 mm/s, 室温	黄铜	表面淬火钢	10^{-4}
			铜		10^{-6}
低碳钢			10^{-7}		
氮气	室温	黄铜	表面淬火钢	10^{-4}	
		铜		10^{-6}	
		低碳钢		10^{-6}	
真空	洁净面	不锈钢	不锈钢	10^{-3}	
	PbO 薄膜面			10^{-6}	
	Sn 薄膜面			10^{-7}	
	MoS ₂ 薄膜面			$10^{-9} \sim 10^{-10}$	

注：真空介质的试验条件为：载荷 9.8 N，速度 19.5 mm/s，真空度 (270~6.7) nPa，室温。

把耐磨性看作材料的固有性质，是一种误解，耐磨性应该是摩擦学系统的特性，不仅与材料有关，而与很多因素有关。

1.4 影响磨损的参数

影响磨损的参数很多，磨损控制过程的实质在于了解这些参数的影响，并且在设计中加以考虑。即使不了解它们的定量关系，掌握其定性的关系也是十分重要的。

在表 20.2-11 中列出对磨损较重要的设计参数，把这些参数分为 4 类：材料参数、工作参数、几何参数和环境参数。

改变这些参数值会使任何应用场合的磨损率（度）发生变化，而更加重要的是有些参数具有临界值，超越该值将引起磨损率（度）的突变，磨损过程将没有稳定磨损阶段，只有剧烈磨损阶段。

表 20.2-11 磨损过程的设计参数

材料参数	工作参数	几何参数	环境参数
成分	载荷	面积	润滑油量
组织	速度	形状	污染情况
弹性模量	滑动距离	尺寸	环境温度
硬度	滑动时间	表面粗糙度	环境气氛
润滑剂种类	循环次数	间隙	
润滑剂黏度	滑动扫掠比 ^①	对中	
	表面温度		
	润滑油膜厚度		

① 滑动扫掠比是指含有滑动成分的滚动接触中的相对速度。

1.4.1 载荷

影响磨损率（度）最主要的因素是载荷（法向压力），特别是粘附磨损。未磨合表面，磨损率（度）与法向压力呈非线性关系。表面没有波度、接触面小时，法向压力的影响较大，波度可显著降低法向压力的影响；磨合表面磨损度与法向压力成正比。

图 20.2-3 是一个圆销在一个环上摩擦测出的线磨损度随载荷变化的线图。圆销和环都由普通碳钢制造，呈退火状态。在磨损进入均衡的稳定磨损期，磨损量与滑移距离呈线性关系时，测量其线磨损度。这个磨损度曲线的特性是许多金属材料共有的。

在临界载荷 p_{1cp} 值之前，载荷较小时，磨损度较低，磨屑细小（约为 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ ），表面光滑，不出现损伤。

达到临界载荷 p_{1cp} 值后，磨损度将加大两个数量级以上，此刻磨屑变成肉眼可见的金属颗粒，表面出现严重划伤。

当载荷超过更高的某一临界值 p_{2cp} 后，磨损又转变为缓和的。

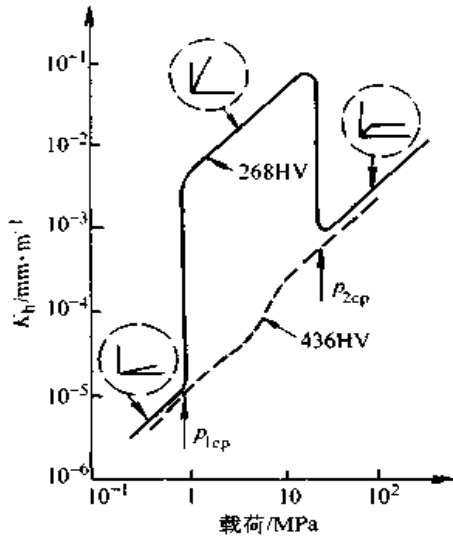


图 20.2-3 磨损度曲线

随着摩擦表面初始硬度增高， p_{1cp} 和 p_{2cp} 的差减小，当初始硬度达 436 HV，磨损度曲线变为近似直线。

1.4.2 速度

滑动速度决定着材料变形的速率，故无润滑摩擦副的磨损率（度）随速度的提高而增加，滑动速度也决定摩擦表面的发热量，影响表面温度。由于表面层温度的升高，将导致表层材料力学与摩擦性能的变化，同时也引起机械和化学结构的改变，使磨损率急剧增大。因此，应注意影响磨损度诸参数，如 m' 、 σ_0 、 μ 和 E 等与温度的关系。然而，在较高的速度下磨损率将降低。

滑动速度不仅影响磨损率，还会改变磨损类型，图 20.2-4 是在载荷一定而改变滑动速度时，钢对钢的磨损量变化曲线，并反映出磨损类型的转化。摩擦副最好在腐蚀（氧化）磨损率大于粘附磨损率的滑动速度下运转。

边界润滑摩擦副的磨损率（度）也常常随速度的提高而增加，直到边界膜因温升而失效后，磨损率急剧增大。如果随速度的提高，流体膜厚度增加，则磨损率反而降低；流体润滑摩擦副磨损率（度）非常低，只有温度达到使润滑膜失效后，磨损率才会急剧增大。

1.4.3 温度

温度的影响极为重要。对于无润滑摩擦副，温度达到临界温度后磨损率（度）将迅速增大；对于完全润滑膜摩擦副，温升会使润滑状态转变

为边界润滑，继续升高，能导致润滑失效而转为无润滑滑动。

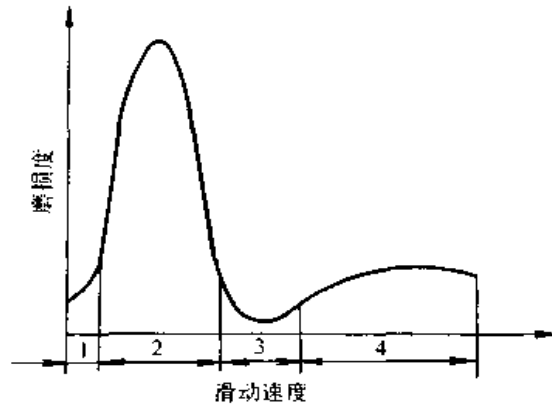


图 20.2-4 磨损量、磨损形式随速度的变化

1、3—氧化磨损 2、4—粘附磨损

1.4.4 弹性模量

它对材料的磨损率有显著影响，在同样的断裂强度条件下，材料的弹性模量大，磨损率亦大。有波度的粗糙表面，弹性模量对磨损率的影响最大。

1.4.5 摩擦疲劳曲线参数 σ_0 、 m' （强度特性）

σ_0 值是将摩擦疲劳曲线外推到循环次数 $N=1$ 而求得的，在某些情况下它的值接近 σ_b ； m' 是该曲线的幂指数。 σ_0 值越大材料强度越高， m' 越大，产生摩擦疲劳需要的循环次数越多。所以，两者数值的增大对提高磨损寿命总是有利的。

1.4.6 摩擦因数（摩擦特性）

线磨损度与摩擦因数呈指数关系，即 $K_h \propto \mu^m$ 。

1.4.7 表面粗糙度和波度

定义表面粗糙度的综合参数为

$$\Delta = R_y / (rb^{1/5}) \quad (20.2-4)$$

一般加工表面 Δ 值的变化范围达 4 个数量级，同时， Δ 对未磨合表面磨损度的影响比载荷略大，所以忽视表面粗糙度能使磨损度的计算值相差若干数量级。

波度的影响小于表面粗糙度，但在极端的情况下也能使磨损度变化两个数量级，因此，即使波度参数值不准确，也应考虑波度的影响。

摩擦表面几何形状对磨合表面的磨损度没有影响。

1.4.8 分子的相互作用

磨合表面的磨损度随摩擦表面的切向阻力而改变，而切向阻力取决于界面清洁程度、润滑剂的种类和介质气体的参数与清洁程度。

用摩擦参数 τ_0 来表征界面的摩擦条件。加润滑剂能减小 τ_0 ，因而能延长摩擦副的磨损寿命。各种材料的 τ_0 值见表 20.2-15。

2 有效控制磨损的设计方法

将各种影响磨损的参数分成 10 种设计时要考虑的磨损控制因素，它们是：

①材料选择；

- ②表面粗糙度；
- ③润滑剂选择；
- ④润滑油量和油膜厚度；
- ⑤压力/面积；
- ⑥表面结构形状；
- ⑦过滤、密封和污染控制；
- ⑧安装和对中；
- ⑨温度和冷却；
- ⑩运动和滑移距离的控制。

在表 20.2-12 中列出这些磨损控制因素适用的磨损形式。

表 20.2-12 磨损控制因素的相关性

摩擦磨损方式		材料选择	表面粗糙度	润滑剂选择	润滑油量油膜厚度	压力/面积	表面结构形状	污染控制	安装对中	温度控制	运动控制
粘附磨损	无润滑滑动	✓	✓	×	×	☑	☑	×	✓	✓	✓
	有润滑滑动	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	无润滑滚动	✓	✓	×	×	☑	☑	☑	☑	✓	✓
	有润滑滚动	✓	✓	✓	✓	☑	☑	✓	☑	✓	✓
磨粒磨损	冲击	✓	✓	☑	☑	✓	☑	☑	✓	☑	✓
	滚动	✓	✓	×	×	☑	✓	×	☑	☑	✓
	滑动	✓	☑	×	×	✓	✓	×	✓	✓	✓
	三体	✓	☑	×	×	✓	✓	×	☑	✓	✓
	流体	✓	☑	×	×	☑	✓	×	✓	✓	☑
流体侵蚀		✓	☑	×	×	☑	✓	✓	✓	☑	✓
气蚀		✓	✓	×	×	✓	☑	✓	✓	✓	✓

注：✓表示重要相关；☑表示不重要的相关；×表示不相关。

2.1 材料选择

材料的成分、性能和金相组织将决定材料在各种工况下的磨损率（度）。特别重要的材料性能是表面硬度、冲击韧度、韧性、弹性模量、耐腐蚀性和抗疲劳性。在不同的磨损类型中，这些性能的重要程度不同。对于所出现的磨损类型，选择合适的材料可能是有效控制磨损的最重要一步。

表面硬度是影响磨损率最重要的材料性能。为使磨损处于稳定磨损阶段，对粘附磨损、材料表面布氏硬度值（HBS）应该不小于单位面积法向载荷（以 MPa 为单位）的 30%；对三体磨粒

磨损，材料表面硬度应该不低于磨粒硬度的 80%；对疲劳磨损，材料表面硬度应为 62HRC。

2.1.1 主要发生粘附磨损时的材料选择

1) 避免使用金属配副，最好用陶瓷与陶瓷、塑料与塑料、陶瓷与金属、塑料与金属或塑料与陶瓷配副。

2) 使用金属配副时应优先采用密排六方晶体或体心立方晶体材料，避免采用面心立方晶体材料，特别不能采用奥氏体钢。

3) 最好采用非匀质组织的材料。

2.1.2 主要发生磨粒磨损时的材料选择

1) 根据磨粒硬度选择材料。

2) 如果磨粒硬度比所有能用的材料都高

25%以上,这时材料的韧性更起作用,因此,金属材料的磨损量反而比陶瓷材料小。尤其是当摩擦学负荷足够大,能使奥氏体向马氏体转化时,以奥氏体为基体的钢铁材料,其耐磨性特别好。

2.1.3 主要发生表面疲劳磨损时的材料选择

1) 硬度与韧性同样重要,故硬度与韧性有一个最佳搭配。

2) 采用匀质组织的材料比较合适,除非非匀质组织材料含有一个颗粒很细且分布均匀的硬相组织。

3) 最好通过表面处理技术使表面层产生残余压应力,如渗碳、渗氮、滚压、冷作硬化等。

2.1.4 主要发生腐蚀磨损时的材料选择

1) 只要没有导电性的要求,尽量采用陶瓷或塑料材料,避免采用金属材料。

2) 必须采用金属材料时,则应采用不锈钢或贵金属。

2.2 表面加工(表面粗糙度)

若是软材料和硬材料组成滑动摩擦副,如密封、电刷、滑动轴承、离合器和制动器,则表面粗糙度极其重要,硬材料上的轮廓峰将切削或擦伤软材料表面。如果软材料能粘附于硬材料表面并填满凹坑,则可以减轻磨损。

2.3 润滑

润滑的主要作用之一是减少磨损,因此选择合适的润滑剂是控制磨损的重要手段之一。润滑剂按一定的应用场合、一定的工况调配而成,它们含有能在这些工况下控制磨损的添加剂。

对控制磨损而言,润滑剂最重要的性能是油性(润滑性)和黏度。

润滑剂在润滑过程中本身会发生变化,如氧化和分解,它们的产物对磨损有影响。润滑剂的氧化物可能会提高润滑剂的承载能力,如果缺乏这样的氧化物,还必须作为添加剂加入。

但是,这些氧化物和添加剂也有不利影响,它们对金属产生腐蚀作用,而腐蚀又会形成磨粒,导致磨粒磨损。

2.4 表面结构形状

排除磨屑和使润滑剂分布到接触表面的结构措施,例如沟槽,对减少边界润滑摩擦副的磨损

有重要作用,沟槽边缘应当切成圆角或倒棱,以免刮掉润滑剂。然而,当磨损类型为塑性流动时,例如在制动器和离合器中,磨损会因沟槽边缘上形成唇口而加剧。

在流体侵蚀磨损时,将表面做成流线型,使流动方向平缓改变和避免尖锐边缘非常重要。

2.5 环境、过滤与密封

污染摩擦副的污染物包括尘埃、磨粒、水分、盐分、燃料、燃烧物、腐蚀产物、润滑剂的分解物和氧化物等。如能阻止这些污染物进入摩擦表面,机器零件的磨损通常不会成为大问题。过滤、密封和表面状态监测是控制污染的有效措施。采用这些措施后,系统将变得复杂,但所花的成本代价对减少磨损和维护费用来说是值得的。

2.6 表面温度和冷却能力

摩擦副的表面温度和冷却能力是进行系统耐磨损设计时非常重要的综合考虑因素。高的温度有下列不利于磨损的作用:

- 1) 温度升高,材料软化,导致磨损度提高;
- 2) 温度升高,加速材料表面氧化,使磨粒磨损加剧;
- 3) 温度升高,导致吸附膜脱吸或反应膜破裂,引起较快的粘附磨损;
- 4) 温度升高,润滑剂黏度下降,油膜承载能力降低,可能导致油膜破裂;
- 5) 温度升高,使各种形式的腐蚀磨损加速;
- 6) 温度升高,使润滑剂加速氧化,产生较多的氧化物,使腐蚀磨损加剧。

只要表面温度超过 150°C ,就应当考虑提高冷却能力的措施。提高冷却能力的措施有:

- ①增加润滑剂流量;
- ②设置润滑剂冷却装置;
- ③加大表面面积;
- ④加速零件周围的空气流动;
- ⑤改善表面热流路线;
- ⑥增加零件的质量;
- ⑦降低载荷或滑动速度;
- ⑧采用散热性好(热导率高、密度大、热容大)的材料;
- ⑨改用减摩性或传热性较好的润滑剂。

2.7 控制运动

磨损是相对运动的结果,应当尽量减少或消除相对运动,特别是对微动磨损。磨损通常与滑

动距离成正比，因此往往可用缩短滑动距离的方法来减少磨损。

3 磨损的预测

随着机械零件磨损，零件的尺寸逐渐变化，当磨损量累积到一定程度，机械零件尺寸的变化将导致机械性能的劣化而失效。所以，在稳定磨损阶段线磨损度的计算在预计机械零件的磨损寿命（特别是在设计阶段）上有重要意义。

各种机械零件磨损量的变化范围相当大。

(1) 磨损度计算的公式

磨损深度 h 可表述为

$$h = KF_N L / (A_a H) \quad (20.2-5)$$

式中 K —— 磨损因数；

F_N —— 法向载荷；

L —— 滑动行程；

A_a —— 表观接触面积；

H —— 摩擦表面的布氏硬度。

只要能给出磨损因数，就可以用式 (20.2-5) 估算摩擦副表面的磨损量。但目前还不能根据材料性能计算出磨损因数，需通过试验求得。

(2) 磨损度计算的理论公式

计算出磨损度即可通过磨损度的表达式转换成磨损量的计算式。线磨损度的理论计算公式见表 20.2-13。

表中各符号的意义及其取值如下：

表 20.2-13 线磨损度 K_h 的理论计算公式

接 触 表 面	计 算 公 式	应 用 实 例
粗糙、无波度、未磨合表面	$K_h = K_2 K_m \alpha_A p^{(1+\beta/5)} E^{(2\beta+1)} \Delta^2 (k\mu_n/\sigma_0)^m$	钟表支承、螺旋、销、滑键、导向柱、刀具、齿轮传动、凸轮、车轮与钢轨
粗糙、有波度、未磨合表面	$K_h = K_1 K_m \alpha_A p^{(1+\beta/5)} E^{(2\beta+4\beta/5)} \Delta^2 \times (H_b/R_b)^{(2\beta/5)} (k\mu_n/\sigma_0)^m$	机床导轨、盘式制动器和离合器
磨合表面	$K_h = 15^{2m/5} K_2 K_m \alpha_A p E^{(2m-1)} \tau_0^{m/2} \times (1/\alpha^{m/2}) (k\mu_n/\sigma_0)^m$	任何摩擦副
说明	$\beta = \zeta m' / (2\zeta + 1)$ ； Δ 为表面粗糙度的综合参数，见式 (20.2-4)，式中各参数值查表 20.1-3 ~ 表 20.1-5； α 为滞后损失因子，查表 20.1-6	

摩擦疲劳曲线参数 m' 和 σ_0 值见表 20.2-14；

$$K_1 = 0.2^{(m'/(2\zeta+1))} \times K_2 \quad (20.2-6)$$

$$K_2 = 2^{(1/(2\zeta))} \times 0.5^{(m'-1)/(2\zeta)} \times K_3 \quad (20.2-7)$$

K_3 是表面轮廓峰几何形状和高度决定的因数，通常 $K_3 = 2$ ；

$\alpha_A = A_r/A_a$ ，是真实接触面积与表观接触面积之比，称为覆盖因子；

K_m 是应用了疲劳损伤积累假说并考虑接触点载荷不稳定的统计关系而设的修正因子，其随 ζ 变化的值见图 20.2-5；

k 是接触应力状态因子，随材料性质而改变。应用不同的强度理论计算出的 k 值不相同。通常对薄片材料可取 $k \approx 5$ 、对高弹性材料可取 $k \approx 3$ ；

μ_n 是摩擦因数的粘附分量，其值见表 20.2-15；

H_b 、 R_b 是表面波度的波高和波峰出率半径；

p 是单位表观接触面积上的法向载荷。

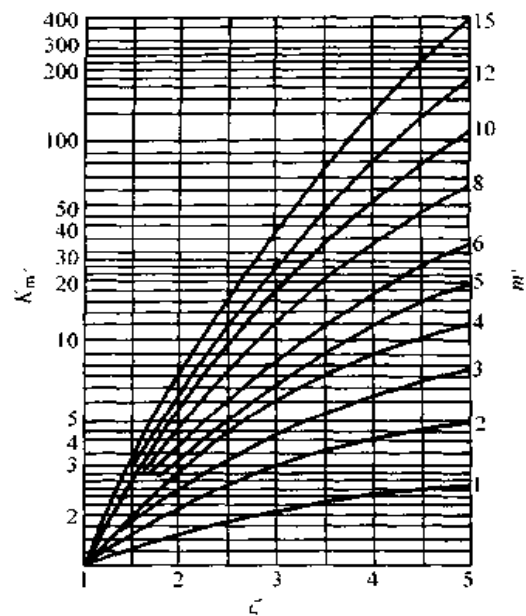


图 20.2-5 修正因子 K_m 的线图

表 20.2-14 材料的摩擦疲劳曲线参数 m' 和 σ_0

材 料	σ_0/MPa	m'	材 料	σ_0/MPa	m'	材 料	σ_0/MPa	m'		
丁二烯腈橡胶	轮胎踏面	157	3.4	聚四氟乙烯	62	5.0	橡胶	2.16	207	3.0
	密封填料	21	4.8	聚己内酰胺	618	2.5		E/MPa	2.75	143	3.4
聚甲醛	144	1.3	45 号钢	686	7.9	3.19		834	3.6	
聚碳酸酯	824	2.9	合金铸铁	647	4.1	试验条件: 在空气中、钢试件上、无润滑滑动				
无填料的环氧树脂	177	4.6	电刷石墨	270	6.7					

表 20.2-15 材料的摩擦参数 τ_0 和 μ_n

材料	硬度 HBS	μ_n	τ_0/MPa	材料	硬度 HBS	μ_n	τ_0/MPa	材料	硬度 HBS	μ_n	τ_0/MPa
金 属				锡	4.4	0.170	4.403	聚氯乙烯	120	0.091	3.648
铝	3.3	0.140	2.687	铜	0.8	0.200	1.049	聚己内酰胺	13.0	0.065	1.912
	2.8	0.155	—		0.6	0.250	—	聚酰胺	16.0	0.085	—
银	55	0.096	7.551	铋	27.0	0.127	7.159	聚甲基丙烯酸	16.0	0.220	—
铂	23	0.124	—	铌	7.7	0.175	4.452	聚四氟乙烯	3.10	0.028	3.344
铜	28.5	0.139	16.475	钼	110.0	0.105	18.338	聚乙烯	2.0	0.080	0.431
	40.0	0.125	17.652		186.0	0.095	27.361		2.6	0.090	1.275
	52.0	0.115	17.848		140.0	0.128	—		3.8	0.080	1.118
	85.0	0.100	16.671	铈	32.0	0.142	8.787	聚丙烯	3.7	0.380	0.108
钒	110.0	0.103	—	铈	105.0	0.095	—	钢			
镍	70.0	0.123	4.805	钴	74.0	0.121	—	30CrMnSiA	340	0.125	196.721
	105.0	0.130	14.416	钴	130.0	0.092	—	45 钢	270	0.119	199.958
	180.0	0.095	37.069		83.5	0.082	—		324	0.112	127.094
铬	200.0	0.095	—	锡	23.0	0.096	9.248	08Cr18Ni9Ti	159	0.15	31.185
	100.0	0.135	14.710	锌	33.0	0.088	—	40Cr	341	0.109	180.540
钨	78.0	0.115	23.732	镁	44.0	0.082	—	轴 承 合 金			
工业纯铁	70.0	0.139	—	钛	128.0	0.100	27.655	ZSnSb11Cu6	24	0.15	—
	130.0	0.097	—		190.0	0.085	—	ZPbSb15Sn10	25	0.102	—
	65.0	0.160	—	塑 料				铍青铜	150	0.095	—
钨	285.0	0.082	—	聚己内酰胺	7.5	0.088	—				

当研磨元件和被磨元件弹性模量不同，但差别不很大时，可用当量弹性模量

$$E_p = E_1 E_2 / (E_1 + E_2) \quad (20.2-8)$$

代入表 20.2-13 中的公式，把被磨元件的参数考虑入计算公式。

表面粗糙度参数也采用这样的当量值：

$$r_p = r_1 r_2 / (r_1 + r_2) \quad (20.2-9)$$

$$R_{yp} = R_{y1} + R_{y2} \quad (20.2-10)$$

$$\zeta_p = \zeta_1 + \zeta_2 \quad (20.2-11)$$

$$b_p = b_1 b_2 K' \cdot [R_{yp} / (R_{y1}^{\zeta_1} R_{y2}^{\zeta_2})] \quad (20.2-12)$$

$$\Delta_p = 1.6 (R_{y1} R_{y2})^{1/2} / [r_p (b_1 b_2)^{1/4}] \quad (20.2-13)$$

若摩擦副两表面的表面粗糙度参数 R_a 值之比大

于4, 则较光滑之表面的粗糙度可以忽略。

K' 值见图 20.2-6

上面给出的磨损度计算公式仅适用于无润滑摩擦和边界摩擦中的稳定运动

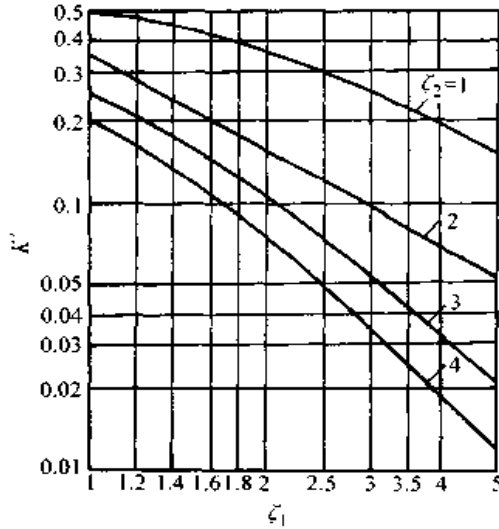


图 20.2-6 因子 K' 的线图

4 机械零件的磨损寿命预测

虽然表 20.2-13 给出了线磨损度的理论计算公式, 但是, 这些公式距实用还有一段距离。绝大多数机械零件的磨损寿命预测是依靠试验或经验数据, 或者是用经验公式计算。

4.1 轴瓦(套)的磨损寿命预测

处于无润滑、固体润滑、边界润滑和混合润滑状态下的轴瓦(套), 运转过程都会出现磨损, 然而其磨损情况十分复杂, 很难计算。因为在轴颈与轴瓦(套)间必定有间隙, 其初始接触区很小, 在载荷作用下, 随着不断磨损, 接触区不断增大, 接触压力逐渐减小。确定接触区的接触角计算十分复杂。

下面介绍以试验数据为基础的简化近似计算方法。

轴瓦(套)在运转中不断磨损, 内径不断增大, 轴颈的位置精度不断下降, 当内径增大到某一临界值, 轴颈完全丧失了其位置精度, 不能再继续运转。内径增大的最大允许量决定了最大允许磨损量。

内径增量与载荷 F 、轴颈转速 n 、轴瓦(套)

内径 D 和运转时间 t 成正比, 与轴瓦(套)宽度 B 成反比 (参见图 20.2-7), 其比例系数是磨损系数 K_{μ} , 与轴瓦(套)材料有关, 即内径增量

$$\Delta D = 60K_{\mu}Fnt/B \quad (20.2-14)$$

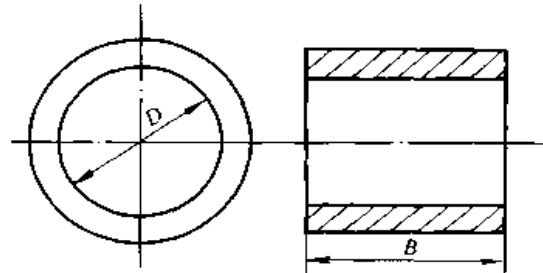


图 20.2-7 轴瓦(套)的计算参数示意图

式中 K_{μ} ——轴瓦(套)材料的磨损系数 (m^2/N), 见表 20.2-16;
 F ——轴瓦(套)上的载荷(N);
 n ——轴颈转速(r/min);
 t ——运转时间(h);
 B ——轴瓦(套)宽度(m)。

限定了允许的直径增量即可计算出轴瓦(套)的磨损寿命, 计算公式为

$$L_b = [\Delta D]B / (60K_{\mu}F \cdot n) \quad (20.2-15)$$

表 20.2-16 轴瓦(套)的磨损系数

材 料	磨损系数 $K_{\mu}/m^2 \cdot N^{-1}$	摩擦因数 μ
锡青铜	1.8×10^{-16}	0.05
铅青铜	3.6×10^{-16}	0.05
铝青铜	7.3×10^{-17}	0.07
铅锡合金	$> 1.2 \times 10^{-16}$	0.05
锡锡合金	$> 1.2 \times 10^{-16}$	0.05
铍青铜	3.0×10^{-17}	0.07
多孔青铜	$> 1.8 \times 10^{-16}$	0.10
多孔铁	$> 2.4 \times 10^{-16}$	0.12
工具钢	6.0×10^{-17}	0.1~0.2
碳石墨	7.3×10^{-17}	0.1~0.2
电极石墨	3.6×10^{-17}	0.2~0.4
增强聚四氟乙烯	$6.0 \times 10^{-15} \sim 1.2 \times 10^{-14}$	0.1
聚四氟乙烯织物	$6.0 \times 10^{-16} \sim 1.2 \times 10^{-15}$	0.02~

续表 20.2-16

材 料	磨损系数 $K_{\mu}/\text{m}^3 \cdot \text{N}^{-1}$	摩擦因数 μ
尼龙 66	2.4×10^{-13}	0.2~0.3
增强尼龙 66	1.8×10^{-14}	0.1~0.2
乙缩醛	2.4×10^{-12}	0.2
聚酰亚胺	3.6×10^{-13}	0.15~0.3
增强聚酰亚胺	4.8×10^{-14}	0.15~0.3
酚醛树脂板	1.2×10^{-15}	0.2~0.3
钢背聚四氟乙烯-青铜涂层	3.6×10^{-17}	0.1~0.2

注：金属轴瓦有润滑；非金属轴瓦无润滑。

4.2 滚动轴承的磨损寿命预测

滚动轴承的使用寿命应由两项指标来评价。一项是因接触疲劳磨损造成工作表面的损伤，一项是由其他磨损形式造成轴承间隙过大，以致轴承丧失正常工作性能。本节只介绍后者。

4.2.1 表面疲劳磨损计算

参见本书第 3 卷第 24 篇滚动轴承。

4.2.2 粘附磨损计算

根据试验值用下述公式计算滚动轴承滚道粘附磨损深度

$$h = 7.7 \times 10^6 K_V (60s_0 n L_h / 10^6)^m \quad (20.2-16)$$

式中 h —— 滚道磨损深度 (μm)；

K_V —— 体积磨损度 (cm^3/m)，试验所得体积磨损度 K_V 可按轴承外径和润滑油运动黏度与转速之乘积，从图 20.2-8 查出；

n —— 轴承转速 (r/min)；

L_h —— 滚动轴承寿命 (h)；

s_0 —— 滚动轴承的单位滑移距离 ($\text{m}/10^6 r$)，其近似值可根据轴承的 C/P 和几何参数 $D(1+10\sin\beta)$ 由图 20.2-9 查出。几何参数中的 β 是轴承标称接触角；

m —— 指数，通常 $m = 0.1 \sim 0.5$ ，影响 m 的因素还不太清楚。

4.2.3 磨粒磨损计算

滚动轴承中的磨粒磨损往往是由于润滑剂不清洁或密封不良引起的。改善润滑剂的过滤和密

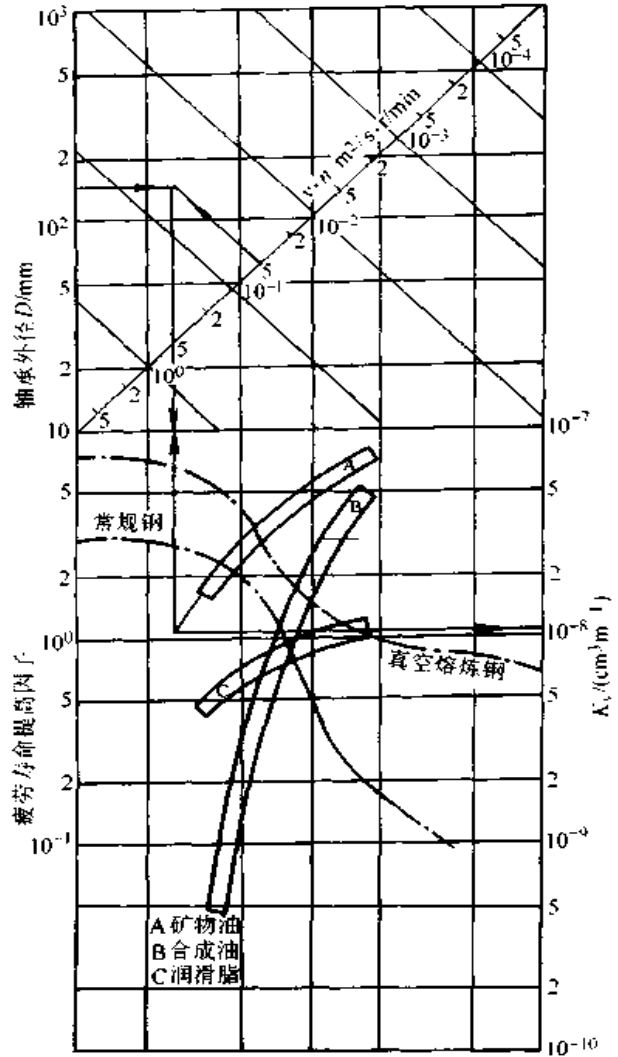


图 20.2-8 体积磨损度图表

封，可以防止滚动轴承过度的磨粒磨损，但有时更换新轴承更经济。

因为滚动体与滚道接触之各部分的滑移速度通常是不一样的，故磨粒磨损常常不均匀，这将导致固有的应力分布出现变化，降低疲劳寿命。

根据实验给出的各种工作状态下滚动轴承磨粒磨损的线磨损度 K_b 与运转时间的关系曲线见图 20.2-10。磨粒磨损深度

$$h = K_b e_0 / 2 \quad (20.2-17)$$

式中 e_0 —— 轴承系数。

按照滚动轴承的应用场合分为从 a 到 k 的 10 种工作状态，根据不同的工作状态和轴承运转时间，从图 20.2-10 中查出 K_b ，再根据轴承内径由图 20.2-11 查出 e_0 ，即可用式 (20.2-17) 计

算出磨损深度。

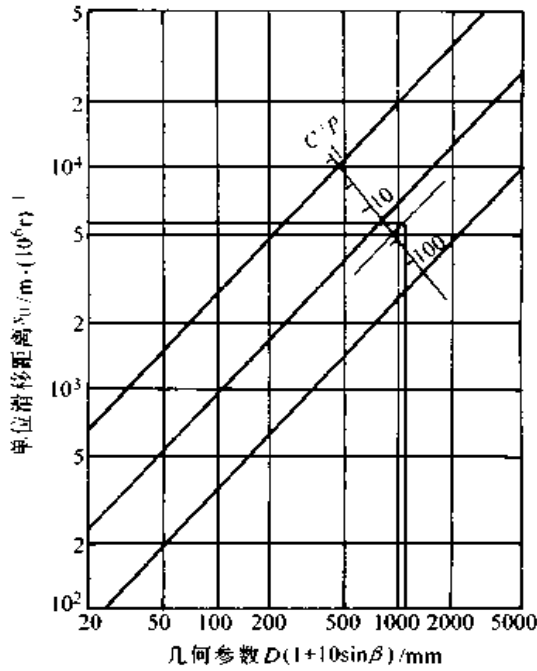


图 20.2-9 单位滑移距离 s_0 的近似值

各类机器中滚动轴承的工作状态见表 20.2-17。表中也给出了按规定的允许游隙增量计算得到的允许线磨损度 K_{hp} 。

根据允许游隙增量或 K_{hp} ，由图 20.2-10 可以查出轴承的磨损运转寿命

例 一普通齿轮减速器的高速轴采用两个 7314B 轴承支承，转速 $n = 1450 \text{ r/min}$ ，轴承径向载荷 $F_r = 5000 \text{ N}$ ，轴向载荷 $F_a = 1800 \text{ N}$ 。试计算内圈滚道在工作寿命期间的磨损深度。轴承与齿轮用同一种油 L-CKC 32 号油润滑。

解 1. 表面疲劳磨损寿命

查轴承手册，7314B 轴承 $C = 88000 \text{ N}$ ， $C_0 = 72800 \text{ N}$ ，轴承外径 $D = 150 \text{ mm}$ ； $e = 1.14$ ， $F_a/F_r = 1800/5000 = 0.36 < 1.14$ ，故 $X = 1.0$ ， $Y = 0$ 。

当量载荷 $P = 1.0 \times 5000 = 5000 \text{ N}$ ，

$$C/P = 88000/5000 = 17.6,$$

疲劳寿命（取载荷性质因子 $f_P = 1.2$ ）

$$L_h = 10^6 / (60n) [C / (f_P P)]^3 = 10^6 / (60 \times 1450) \times [88000 / (1.2 \times 5000)]^3 = 36264 \text{ h}.$$

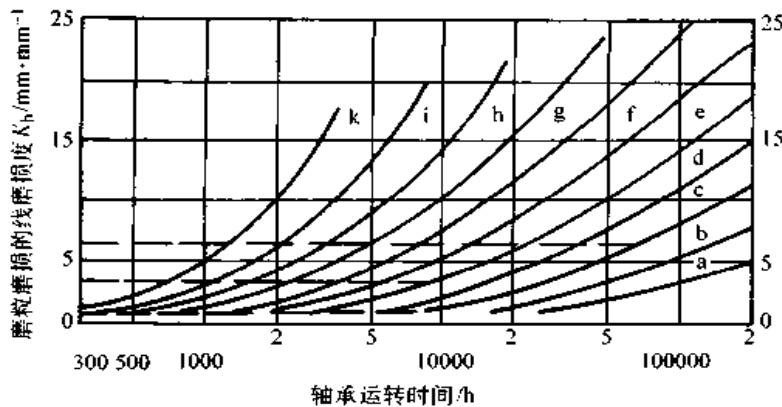


图 20.2-10 滚动轴承磨粒磨损的线磨损度曲线

2. 磨粒磨损寿命

由表 20.2-17 查出中型普通齿轮传动装置的工作状态为 d~e，取 d；允许的线磨损度 $K_{hp} = 3 \sim 8$ ，取 $K_{hp} = 5$ 。

由图 20.2-10，根据允许的线磨损度 $K_{hp} = 5$ ，工作状态为 d，查出轴承寿命为

$$L_h = 20000 \text{ h}$$

由图 20.2-11，根据轴承内径为 70 mm，查出轴承系数 e_0 为 $8 \mu\text{m}$ 。磨损深度为

$$h = K_{hp} e_0 / 2 = 5 \times 8 / 2 = 20 \mu\text{m}$$

3. 粘附磨损寿命

润滑油黏度

$$\nu = 32 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

故

$$\nu n = 32 \times 10^{-6} \times 1450 = 0.0464 \text{ m}^2 \cdot \text{r} / (\text{min} \cdot \text{s})$$

由图 20.2-8 查出 $K_r = 1.01 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{m}^3$

标称接触角 $\beta = 40^\circ$ ，几何参数为 $150(1 + 10\sin 40^\circ) = 1114 \text{ mm}$ ，由图 20.2-9 查出 $s_0 = 5500 \text{ m}/10^6 \text{ r}$ 。

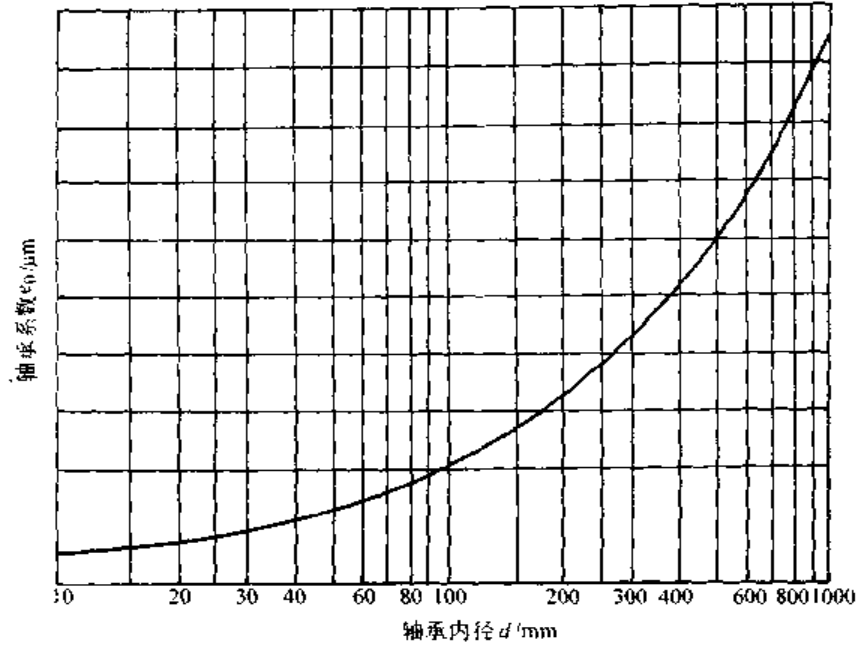


图 20.2-11 滚动轴承系数

表 20.2-17 滚动轴承的工作状态与允许的 K_{hp} 值

应用场合		K_{hp}	工作状态	备注	应用场合	K_{hp}	工作状态	备注	
齿轮传动装置	普通齿轮装置	小型	3~8	e~g	小值用于高速和斜齿轮、大值用于直齿轮	风扇	小型	5~8	f~h
		中型	3~8	d~e			中型	3~5	c~d
	大型	5~10	c~d	大型			3~5	d~f	
铁路车辆用齿轮装置	铁路车辆用齿轮装置	3~6	c~d	可以补偿磨损 小值用于要求转动平稳的场合	通用机械	离心泵	3~5	d~e	按速度取值
	轧辊用齿轮装置	6~12	c~d			印刷机械	3~4	a~b	
机动车辆	前轮	4~8	h~i	振动器滚子和振荡器		3~4	g~i		
	齿轮箱轴的传动	5~10 3~6	i~k i~k	振动混合机		3~4	g~i		
电机	家用电器用电动机	3~5	i~k	煤砖压力机		8~12	e~g		
	固定电动机	小型	3~5	e~g		大型机械搅拌机	8~15	g~h	
		中型	3~5	d~e		轧管机	12~18	f~g	
		大型	3~5	c~d		转炉转轴	12~18	f~g	
牵引电动机	4~6	d~e	镗床和铣床	0.5~1.5		a~b			
变速箱	牵引车辆	12~15	f~h	磨床、研磨和抛光机		~0.5	c~d		
	市内有轨电车	8~12	e~f	飞轮		3~8	d~f		
	铁路客车	8~12	c~d	轧机		6~10	e~f		
	货车	8~12	c~d	船用推力轴承		6~10	e~f		
	轿车	6~10	d~e	船用螺旋桨轴轴承		15~20	e~f		
通用机械	托辊	4~6	c~d	造纸机械		湿的部件	7~10	b~c	
	振动筛	4~6	e~f		干的部件	10~15	a~b		
	离心机	2~4	d~e		匀浆机	5~8	b~c		
	起重滑轮组	8~12	c~d		轮压机	4~8	a~b		
	带式输送机托辊	10~30	h~k		木工机械	切断机和刀轴	1.5~3	e~f	
	带式输送机滚筒	10~15	e~f	锯床		3~4	e~g		
	清理装置与浇注包	12~15	c~g	木材、塑料作业机械		3~5	e~f		
	破碎机	8~12	f~g	离心铸造机械		8~12	c~f		
				纺织机械		2~8	c~f		

取 $m = 0.25$ 。若允许的磨损深度与磨粒磨损相同, 即 $h_p = 20 \mu\text{m}$, 则粘附磨损寿命

$$L_h = [10^6 / (60 s_0 n)] [h / (7.7 \times 10^6) K_V]^{1/m} \\ = [10^6 / (60 \times 5\,500 \times 1\,450)] \\ \times [20 / (7.7 \times 10^6 \times 1.01 \times 10^{-8})]^{1/0.25} \\ = 9\,141\,000 \text{ h}$$

该轴承磨粒磨损寿命最短。

4.3 导轨的磨损寿命预测

4.3.1 滑动导轨

滑动导轨多数不是完全密封的, 不能彻底防止切屑和尘土的污染。同时, 工作台频繁停歇和换向, 润滑条件不良, 故多数滑动导轨处于混合摩擦状态。而且, 导轨各段使用程度不同, 因此

直线运动导轨的磨损率较高且不均匀。

表 20.2-18 给出在单件和小批生产条件下运转的机床, 其混合摩擦滑动导轨磨损率 K_i 和磨损系数 K_μ 的平均值。它们的定义是

$$K_i = h / t_c; K_\mu = h / (\rho l)$$

其中 K_i ——磨损率 ($\mu\text{m}/\text{h}$);

h ——导轨全长上的最大磨损深度 (μm);

t_c ——机床有效使用时间 (年);

K_μ ——磨损系数 [$\mu\text{m} / (\text{Pa} \cdot \text{km})$];

ρ ——导轨标称平均载荷 (Pa);

l ——工作台或滑板的总行程长度 (km)。

在大批量生产条件下, 车床床身导轨的磨损率是表 20.2-18 所给值的 2~3 倍。

表 20.2-18 机床床身导轨的磨损率和磨损系数

机床类型	导轨面	材料	硬度	表面污染情况	界面状态	$K_\mu / \mu\text{m}(\text{km} \cdot \text{Pa})^{-1}$	$K_i / \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$
车床	前棱形导轨面	HT200	180HBS	显著污染	封闭	$(2.65 \sim 3.87) \times 10^{-5}$	50
车床	后平导轨面	HT200	180HBS	中等污染	不封闭	$(5.10 \sim 7.14) \times 10^{-4}$	15
单柱坐标镗床	立柱平导轨面	HT300	200HBS	轻微污染	封闭	$(1.12 \sim 1.63) \times 10^{-5}$	0.7
车床	前棱形导轨面	HT250	50HRC	显著污染	封闭	1.43×10^{-5}	30
车床	后平导轨面	HT250	50HRC	中等污染	不封闭	$(2.55 \sim 3.67) \times 10^{-4}$	10
说明	1. 工作台材料 HT150 或 HT200, 未硬化处理; 2. 车床床身上回转半径 400 mm、滑板年总行程长度约 17.3 km (两班制运转); 3. 坐标镗床工作台尺寸 280 mm × 560 mm, 年总行程长度大约 1.1 km (两班制运转)						

根据导轨的磨损系数, 可以建立在混合润滑条件下由于磨粒磨损产生的磨损量的工程计算方法

$$h = K_\mu \sum_{i=1}^n K_i (\mu_i / \mu) l_i \rho_i \quad (20.2-18)$$

式中 i ——运转状态 (工作行程、空行程等) 的顺序号;

n ——运转状态的数目;

K_i ——在第 i 个运转状态下, 滑动导轨长度上实际最大磨损量与压力分布均匀、滑动距离始终等于工作台导轨长度时应有的磨损量之比, 即 $K_i = h_i / h_{i0}$;

μ_i ——在第 i 个运转状态下的摩擦因数;

μ ——无润滑时的摩擦因数;

l_i ——在第 i 个运转状态下的行程长度 (km);

ρ_i ——在第 i 个运转状态下的平均载荷 (Pa)。

4.3.2 滚动导轨

维护良好、没有滑动的滚动导轨, 其主要的磨损失效型式是表面疲劳磨损。校核疲劳磨损的公式为

$$L_h = N_s / (60 n N) \cdot (P_s / P)^3 \quad (20.2-19) \\ N = l / (2t)$$

式中 L_h ——导轨寿命 (h);

N_s ——基本循环次数, 通常取 $N_s = 10^7$;

n ——每分钟行程次数;

- N —— 一个行程中的接触次数；
- l —— 行程长度；
- t —— 滚动体节距；
- P_0 —— 在基本循环次数下导轨所能承受的载荷；
- P —— 滚动导轨的载荷。

当表面硬度为 60HRC 时，对滚动体是球的导轨

$$P_0 = [\sigma_0 / (2.127 \times 10^4)]^3 d^2 \quad (20.2-20)$$

对滚动体是滚子的导轨

$$P_0 = [\sigma_0 / (27 \times 10^4)]^2 dl_d \quad (20.2-21)$$

两式中 d —— 球或滚子的直径；

l_d —— 滚子长度。

对球

$$\sigma_0 = 3\,236 \sim 3\,432 \text{ MPa}$$

对滚子

$$\sigma_0 = 2\,256 \text{ MPa}$$

除了疲劳磨损外，滚动导轨还可能由于切屑或磨粒进入摩擦表面和滚子有滑动造成磨粒或粘附磨损失效。磨粒进入导轨破坏了导轨面与滚动体的正常接触，使滚动体卡住或产生滑动，在铸铁导轨面上造成划伤、擦伤或其他损伤。保持架有缺陷和采用滚针作滚动元件也会引起滚动体的滑动。这时，滚动导轨的磨损寿命将大大缩短。

装配误差将极大影响滚动导轨的工作特性。

4.4 齿轮传动的磨损控制

4.4.1 润滑状态

大多数齿轮在润滑下运转，由于运转条件不同，它们的润滑状态也不同。润滑状态对轮齿的磨损有重要影响。

齿轮传动随速度与载荷不同，有 3 种润滑状态，即边界润滑、混合润滑和流体膜润滑。3 个润滑状态区域的划分见图 20.2-12。

图中纵坐标载荷强度的定义是

$$p_k = F_t / (db) [(u \pm 1) / u] \quad (20.2-22)$$

式中 F_t —— 齿轮上的圆周力；

d —— 齿轮节圆直径；

b —— 齿轮宽度；

u —— 齿数比。

“-”号用于内啮合，“+”号用于外啮合。

在边界润滑区，接触区建立不起流体膜，表面和边界膜的性能决定着表面的摩擦与磨损。这

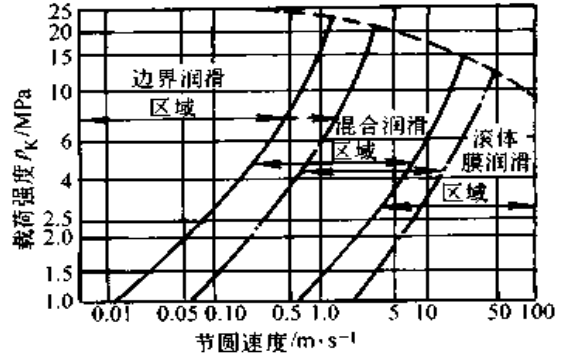


图 20.2-12 齿轮润滑区域图

时摩擦因数可能高达 0.15~0.20，如润滑良好、齿面光滑，摩擦因数可能为 0.06~0.10。

在流体膜润滑区，接触区建立起完整的弹性流体动力润滑膜，这种润滑状态下，磨损形式主要是接触疲劳磨损（剥蚀）。这时的摩擦因数最小，大约为 0.01~0.04。

混合润滑区，接触区局部形成流体膜，表面的摩擦和磨损是上述两种情况的混合，摩擦因数介于它们之间约为 0.03~0.07。

图中实线是处于最佳状态的值，点划线是标称值，顶部虚线表示轮齿载荷强度最高极限值。

4.4.2 轮齿胶合（粘附磨损）

轮齿胶合分为两类：一类是因温度过高使油膜破裂造成的热胶合。热胶合多半发生在高速齿轮传动中，如宇航设备、涡轮机齿轮等，这些齿轮传动处于流体膜润滑区；一类是因载荷过大使油膜破裂，出现金属直接接触造成的冷胶合。冷胶合主要发生在处于边界或混合润滑状态下的重载齿轮传动中。

(1) 热胶合

用计算轮齿表面温度控制热胶合，轮齿表面温度计算参见第 4 卷第 35 篇齿轮传动。

(2) 冷胶合

用控制最小油膜厚度的方法避免轮齿冷胶合，最小油膜厚度可用弹性流体动力润滑理论计算，避免冷胶合允许的最小油膜厚度值见表 20.2-19。

4.4.3 轮齿磨粒磨损

在开式齿轮传动中，磨损的主要形式是磨粒磨损。齿轮传动磨粒磨损的线磨损率 K_l 的计算公式为

表 20.2-19 允许最小油膜厚度 [用 $\nu_{100} = (10 \sim 13) \text{mm}^2/\text{s}$ 的油]

齿轮工作状况		$h_{\text{min}}/\mu\text{m}$							
温度 $\theta/^\circ\text{C}$	载荷 p/MPa	节圆圆周速度 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$							
		小型齿轮传动				大型齿轮传动			
		0.5	2.5	10	50	0.5	2.5	10	50
60	1.38	0.053	0.163	0.44	1.33	0.086	0.265	0.72	2.15
	4.14	0.045	0.141	0.38	1.15	0.073	0.229	0.62	1.87
	13.8	0.039	0.120	0.33	0.98	0.063	0.196	0.53	1.60
80	1.38	0.031	0.097	0.26	0.79	0.051	0.157	0.43	1.28
	4.14	0.027	0.084	0.23	0.69	0.044	0.136	0.37	1.11
	13.8	0.023	0.072	0.20	0.58	0.038	0.116	0.32	0.95
100	1.38	0.021	0.065	0.18	0.53	0.034	0.105	0.29	0.86
	4.14	0.018	0.056	0.15	0.46	0.029	0.092	0.25	0.75
	13.8	0.015	0.048	0.13	0.39	0.025	0.078	0.21	0.64

$$K_{H(2)} = 1.9\rho_v^{2/3}r_m^{1/2}\sigma_y^{5/2}Y_{H(2)}n_{1(2)}/(H_{1(2)}^{3/2}H_{2(1)}\delta_{s(2)}) \times \\ \{m_n(z_1+z_2)\sin\alpha_n/[\cos\beta(1-\cos^2\alpha_n\sin^2\beta)]\}^{1/2} \quad (20.2-23)$$

式中 K_H —— 齿轮磨粒磨损的线磨损率 ($\mu\text{m}/\text{h}$);
 ρ_v —— 磨粒在润滑油中的体积分数 (%);
 r_m —— 磨粒有效半径的平均值 (mm);
 σ_y —— 磨粒的破坏应力 (MPa);

Y_H —— 几何常数, 见表 20.2-20;

n_1 —— 小齿轮转速 (r/min);

δ_s —— 齿轮材料的伸长率 (%);

H —— 轮齿表面硬度 (HBS);

m_n —— 齿轮的法面模数 (mm);

z_1, z_2 —— 齿轮传动两齿轮的齿数;

α_n —— 齿轮法向压力角;

β —— 轮齿螺旋角。

脚标 1 代表小齿轮, 脚标 2 代表大齿轮。

表 20.2-20 齿轮几何常数 Y_H

计算零件		小 齿 轮	大 齿 轮
开式传动	大、小齿轮	$(r_1' r_2')^{1/2}(r_1' - r_2'u)/r_1'$	$(r_1' r_2')^{1/2}(r_1' - r_2'u)/(r_2'u)$
闭式传动	大齿轮	$(r_1' r_2')^{1/2}(r_1' - r_2'u)r_2u/[(r_1' + r_2'u)r_1']$	$(r_1' r_2')^{1/2}(r_1' - r_2'u)/(r_1' + r_2'u)$
	小齿轮	$(r_1' r_2')^{1/2}(r_1' - r_2'u)/(r_1' + r_2'u)$	$(r_1' r_2')^{1/2}(r_1' - r_2'u)r_1' / [(r_1' + r_2'u)r_2u]$

注: u 为齿数比; $r_1' = r_1/(r_1+r_2)$, $r_2' = r_2/(r_1+r_2)$, r_1, r_2 为两轮齿接触点的曲率半径。

从强度考虑, 硬齿面齿轮磨损量允许到齿厚的 5%, 软齿面齿轮在某些情况下磨损量允许达齿厚的 20%。从振动与噪声考虑, 低速齿轮磨损量允许达模数的 1/3, 当 $v = 20 \text{ m/s}$ 左右时, $m = 10 \text{ mm}$ 的齿轮磨损量允许达 0.11 mm, $v = 80 \text{ m/s}$ 时, 该齿轮允许磨损量仅为 0.05 mm。

4.5 传动链的磨损寿命预测

4.5.1 磨损率

在链节进入和离开链轮的时候, 铰链内有相对转动。以 v 表示相对滑动速度, p 表示铰链内的压力, 定义链的啮合系数为

$$K_A = \sum_{i=1}^k v_i \rho_i$$

对于无张紧链轮、两个链轮的传动

$$K_A = \pi n_1 (2F_c + F_t) / (L_p / z_p) \cdot (1 + z_1 / z_2) \quad (20.2-24)$$

- 式中 K_A ——啮合系数；
 n_1 ——小链轮转速；
 F_c ——链条上的惯性离心拉力；
 F_t ——链的工作拉力；
 L_p ——链节数；
 l ——套筒长度；
 z_p ——列数；
 z_1, z_2 ——小、大链轮齿数。

磨损率 K_t 与啮合系数 K_A 的关系受润滑状态的影响，根据试验室和现场数据；供油充分的链传动，其关系见图 20.2-13；运转期间不加油的链传动，其关系见图 20.2-14；每 8 h 加一次油的链传动，磨损率是图 20.2-14 中的 1/10。

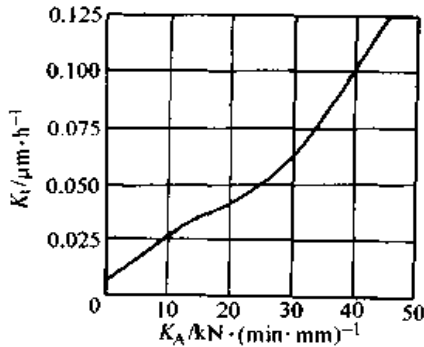


图 20.2-13 充分供油之链节的磨损率 K_t

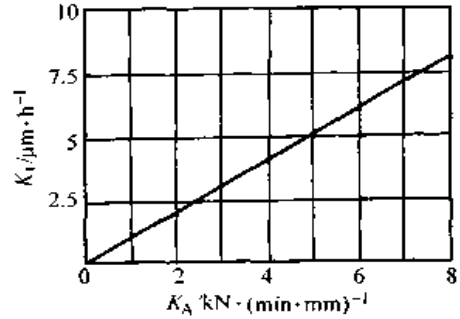


图 20.2-14 运转期间不供油之链节的磨损率 K_t

4.5.2 允许磨损量

每节链允许的磨损量 b_{pp} ，即链节允许伸长量 Δp_p ，见表 20.2-21。

4.5.3 磨损寿命

预期的磨损寿命为

$$L_h = \Delta p_p / K_t \quad (20.2-25)$$

例 一滚子链传动传递功率 5.5 kW，链节距 $p = 15.875 \text{ mm}$ ，小链轮齿数 $z_1 = 19$ ，大链轮齿数 $z_2 = 55$ ，小链轮转速 $n_1 = 600 \text{ r/min}$ ，单列链，链节数 $L_p = 80$ ，中心距可调，水平布置。试计算该链传动的磨损寿命。

解 计算链速

$$v = z_1 p n_1 = 19 \times 15.875 \times 10^{-3} \times 600 / 60 = 3.02 \text{ m/s}$$

工作拉力

$$F_t = p / v = 5500 / 3.02 \text{ N} = 1823 \text{ N}$$

采用 10 A 链，查链条规格：单排每米质量（线密度） $\rho_l = 1.0 \text{ kg/m}$ ；内链节外宽（套筒长度） $b_{2\text{max}} = 13.84 \text{ mm}$ 。

表 20.2-21 链节许用伸长量 Δp_p

<p>水平传动</p>		<p>垂直传动</p>
中心距可调或有张紧轮	中心距不可调	中心距不可调
$\Delta p_p = \min[2p/z_2, 0.03p]$	$\Delta p_p = 4ps^2/(3a^2)$	$\Delta p_p = p^2/(4a)$

注： p 为链节距。

惯性离心拉力

$$F_c = \rho_1 v^2 = 1.0 \times 3.02^2 \text{ N} = 9.10 \text{ N}$$

啮合系数

$$\begin{aligned} K_A &= \pi n_1 (2F_c + F_1) / (L_p / z_p) \cdot (1 + z_1 / z_2) \\ &= \pi \times 600 (2 \times 9.10 + 1823) / \\ &\quad (80 \times 13.84 \times 1) \cdot (1 + 19/55) \\ &\approx 4217 \text{ N}/(\text{min mm}) \end{aligned}$$

链节许用伸长量

$$\begin{aligned} \Delta p_p &= \min[2p/z_2, 0.03p] \\ &= \min[2 \times 15.875/55 \text{ mm}, 0.03 \times 15.875 \text{ mm}] \\ &= \min[0.577 \text{ mm}, 0.476 \text{ mm}] \end{aligned}$$

取 $\Delta p_p = 0.476 \text{ mm}$;

若运转期间不加油，查图 20.2-14，磨损率

$K_1 = 4.30 \mu\text{m}/\text{h}$ ，故预期磨损寿命

$$L_h = \Delta p_p / K_1 = 0.476 / 4.30 \times 10^{-3} \text{ h} = 111 \text{ h}$$

若每 8 h 加一次油，则预期磨损寿命为

$$L_h = \Delta p_p / K_1 = 0.476 / 0.43 \times 10^{-3} \text{ h} = 1107 \text{ h}$$

若充分供油润滑，查图 20.2-13，磨损率 $K_1 = 0.010 \mu\text{m}/\text{h}$ ，则预期磨损寿命为

$$L_h = \Delta p_p / K_1 = 0.476 / 0.010 \times 10^{-3} \text{ h} = 43273 \text{ h}$$

4.6 汽缸套与活塞环的磨损寿命预测

汽缸套与活塞环是内燃机、压缩机中最主要的摩擦副，也是最主要的磨损件。活塞在一个行程中速度是变化的，侧推力造成的对缸套壁的压力也是活塞位置的函数，摩擦表面的温度又沿缸套长度方向改变。因此，在一个行程中，油膜厚度和磨损量均是活塞位置的函数。这些关系曲线如图 20.2-15 所示，由图可见，在活塞的两个极限位置（上、下止点）附近，出现最不利的摩擦条件。

表 20.2-22 内燃机缸套孔的系数 K_H

机器类型	船用柴油机		柴油机			汽油机				
	$K_H/\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot 10^{-10}$									
	0.927~3.159	2.272~3.799	0.303	0.949~1.344	0.659~1.322	0.276	0.423	0.725	1.745	2.566
数据发表日期	1958	1977	1970	1953	1970	1974	1974	1970	1955	1968

于是，缸套壁上的磨损深度

$$h = K_H N \sum_{i=1}^m p_i \quad (20.2-28)$$

式中 m —— 活塞环的数目。

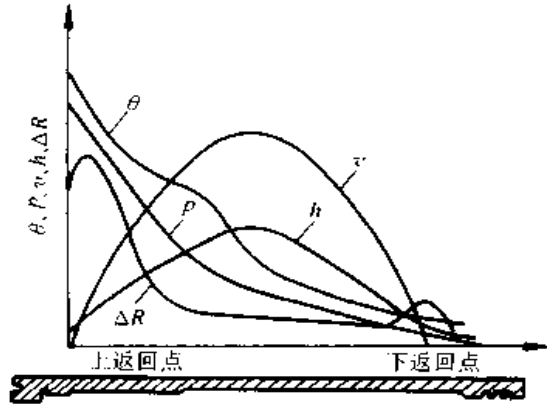


图 20.2-15 各物理量随缸套长度坐标的变化

θ —温度； p —侧推力； v —速度；
 h —油膜厚度； ΔR —磨损量

4.6.1 粘附磨损寿命预测

根据粘附磨损定律，磨损量与载荷和滑动距离成正比，而与摩擦副两表面中较软材料的硬度成反比。平均磨损深度

$$h = K/F_N/(3HA_s) \quad (20.2-26)$$

磨损因数 K 与摩擦材料性能及表面洁净度有关；

用循环次数 N 和冲程 s 表示滑动行程 l ，用 h_i 表示第 i 个活塞环在缸套壁上造成的磨损深度，对 4 冲程内燃机，有

$$h_i = 4KF_N s N / (3HA_s) \quad (20.2-27)$$

$p = F_N/A_s$ ，若 p_i 表示第 i 个活塞环对缸套壁的压力，4 冲程内燃机每个循环有 4 个冲程，因而有

$$p_i = (p_{\text{燃烧}} + p_{\text{排气}} + p_{\text{吸气}} + p_{\text{压缩}}),$$

令系数

$$K_H = 4Ks/(3H)$$

表 20.2-22 列出的 K_H 值是内燃机的实验数据，可以用来预测缸套孔的磨损。

计算时注意活塞环在活塞上的位置，缸套壁有些段只承受部分活塞环的摩擦与磨损。

计算程序如下：

1) 获取该发动机运转条件下燃烧室的 $p-\theta$

曲线:

2) 根据泄漏理论计算整个循环过程中, 活塞环间的压力分配;

3) 计算各个活塞环与缸套壁间的油膜厚度, 若膜厚低于油膜润滑最小油膜厚度的极限值, 则确定活塞环与缸套孔壁的接触区域;

4) 确定每个活塞环在燃烧、排气、吸气和压缩冲程中, 环与缸套壁间的接触压力及其沿缸壁的变化;

5) 计算大、小侧推力面上的侧推力, 并把它们转换成环-孔壁接触压力;

6) 求每个活塞环按 4) 和 5) 求出之值的总和;

7) 按活塞位置, 将每个环对缸套壁的压力分布曲线叠加起来;

8) 求大、小侧推力面上的磨损深度;

4.6.2 磨粒磨损寿命预测

活塞第一道气环靠近上止点的区域将有磨粒出现, 在那个区域磨损最严重。把每颗磨粒对缸套壁的损伤, 用统计方法累计起来。若磨粒均匀分布, 利用磨粒沉积在工作面上的效率关系式可求得磨粒数。于是, 得到缸套与活塞环的磨粒磨损计算式, 即

$$h_i = 0.0166 A g_i / j_i \quad (20.2-29)$$

其中 $i = 1, 2$, 1 代表第一道气环, 2 代表缸套, A 、 g_i 、 j_i 三个参数见表 20.2-23。

表 20.2-23 参数 A 、 g_i 、 j_i 的计算

发动机	参数	第一道气环	汽缸套
汽油机和柴油机	A	$\rho_m [1 - \exp(-0.0868 s r_{sr}/D)] (0.1 \sigma_y)^{2.5}$	
	j_i	$\delta_s H_1^{1.5} H_2^2 / (H_1 + H_2)$	$\sigma_y H_2^{2.5} H_1 / (H_1 + H_2)$
汽油机 柴油机	g_i	$q_1 (\alpha_n m_B / \rho_B + 1 / \rho_T) / (D h_K \tan \beta)$	$2 q_T (\alpha_n m_B / \rho_B + 1 / \rho_T) / (D_s \tan \beta)$
		$\alpha_n m_B q_1 / (D h_K \rho_B \tan \beta)$	$\alpha_n m_B q_T / (D_s \rho_B \tan \beta)$

说明: ρ_m —进入汽缸之空气中的粉尘质量浓度 (mg/m^3); s —冲程 (mm); D —缸径 (mm); r_{sr} —磨粒有效半径的平均值 (mm); σ_y —磨粒的破坏应力 (MPa); δ_s —活塞环或缸套材料的伸长率 (%); q_1 —燃料消耗量 (kg); α_n —空气过剩因数; m_B —燃烧 1 kg 燃料理论上所需空气的质量 (kg/kg); ρ_B —空气密度 (kg/m^3); ρ_T —燃料密度 (kg/m^3); h_K —活塞环高度 (mm); β —活塞环与缸套两摩擦面母线间的夹角

4.7 机械密封的磨损预测

与轴一起旋转的动环和与壳体联接的静环构成滑动摩擦副, 静环与动环的摩擦面是机械密封的磨损面。

4.7.1 磨损类型

在设计正确的机械密封中主要的磨损形式是粘附磨损。机械密封的寿命较短, 绝大多数情况是工作环境中的磨粒进入摩擦面造成磨粒磨损的结果。这种磨粒磨损属三体磨粒磨损。

腐蚀或腐蚀磨损也常碰到, 由于摩擦热, 摩擦表面有较高的温度, 会促进化学反应, 温度提高 10°C , 化学反应速度将提高 1 倍。

机械密封中偶尔可能出现疲劳磨损 (点蚀)。碳原子间结合能很高, 不可能出现晶粒生长或晶体缺陷迁移, 所以, 常用机械密封材料, 如碳石墨、碳化钨、增强聚四氟乙烯等, 是优良的抗疲

劳材料。

当主要密封面因受热、振动和磨损等而轴向移动时, 辅助密封面上会发生微动磨损。粘附磨损促进微动磨损, 减轻粘附磨损的措施均可缓和微动磨损。

4.7.2 磨损因数与极限 pv 值

限定机械密封环材料的允许磨损量和密封的工作寿命 (通常是 2 年), 即可确定允许的线磨损率 K_t ($= h/t$)。通过试验可以定出给定材料保证该线磨损率的极限 pv 值。

定义磨损因数为

$$K = hH / (t pv) \quad (20.2-30)$$

表 20.2-24 给出几种机械密封环材料的磨损因数的数量级。

导致线磨损率 $K_t = 0.000203 \text{ mm}/\text{h}$ 时的 pv 值作为机械密封的极限 pv 值。表 20.2-25 给出锡铋或铅铋轴承合金增强碳石墨与不同静环的

极限 p_v 值和磨损因数 K ，表 20.2-26 给出碳石墨 给出机械密封常用材料的极限 p_v 值。由表 20.2-27 可以看出，密封材料并不是愈硬愈耐磨
 墨动环的极限 p_v 值和磨损因数 K 。表 20.2-27

表 20.2-24 机械密封环材料磨损因数 K 的数量级

滑动材料	旋转	碳石墨 (填充树脂)	碳石墨 (填充树脂)	碳石墨 (填充锡铋、铅铋轴承合金)	碳石墨 (填充青铜)	碳化钨 (钴 6%)	碳化硅 (渗碳)
	固定	耐蚀高镍铸铁	陶瓷 (Al_2O_3 85%)		碳化钨 (钴 6%)		碳化硅 (渗碳)
磨损因数 K		10^{-6}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}

注：表中元素的百分含量皆指质量分数。

表 20.2-25 锡铋或铅铋轴承合金增强碳石墨与不同静环的极限 p_v 值和磨损因数

密封环材料	动环	填充锡铋或铅铋轴承合金的碳石墨		
	静环	镍护层	陶瓷 (Al_2O_3 85%)	碳化钨 (Co6%)
p_v 极限值 / $MPa \cdot m \cdot s^{-1}$		3.64	5.60	13.03
磨损因数 K		8.74×10^{-8}	5.68×10^{-8}	2.44×10^{-8}

注：表中元素的百分含量皆指质量分数。

表 20.2-26 碳石墨动环的极限 p_v 值与磨损因数 K

密封环材料				p_v 极限值 / $MPa \cdot m \cdot s^{-1}$	磨损因数 K	备注
动环		静环				
填充树脂的碳石墨	硬度/ HS	84	陶瓷 (Al_2O_3 85%)	5.08	7.41×10^{-8}	生产厂家不同
		90		3.37	1.21×10^{-7}	
		90		4.73	8.60×10^{-8}	
		95		3.94	1.05×10^{-7}	生产厂家不同
		95		3.94	1.05×10^{-7}	

注：表中元素的百分含量皆指质量分数。

表 20.2-27 机械密封常用材料的极限 p_v 值

不同材料摩擦副						
密封环材料				p_v 极限值/ $MPa \cdot m \cdot s^{-1}$	备注	
动环		静环				
材料	硬度 (HS)	材料	硬度			
碳石墨	60~105	镍护层	(131~183)HBS	3.503	比陶瓷更耐热冲击	
		陶瓷 (Al_2O_3 85%)	87HRC		不如镍护层耐热冲击，但耐蚀性好得多	
		陶瓷 (Al_2O_3 99%)	87HRC		耐蚀性优于 Al_2O_3 85% 的陶瓷	
		碳化钨 (Co6%)	92HRC	17.515	填充青铜的碳石墨极限 p_v 值为 14.73	
		碳化钨 (Ni6%)			可以镀镍改善耐蚀性	
		碳上渗碳化硅	90HR15T		良好的耐磨性。碳化硅层很薄。可以相互研磨	
		碳化硅	86~88HR45N		比碳化钨耐蚀性好，但耐热冲击性差	

续表 20.2-27

相 同 材 料 摩 擦 副			
密封环材料	硬 度		
碳石墨	(60~105) HS	1.751	pv 值低, 但能很好地防止表面气泡
陶瓷	87HRC	0.350	适宜用于密封染料
碳化钨	92HRC	4.204	采用更好的胶粘剂 pv 值可达 6.481
碳上渗碳化硅	90HR15T	17.515	极好的耐磨粒磨损性能、比碳化硅便宜
碳化硅	86~88HR45N		极好的耐磨粒磨损性能、良好的耐蚀性、中等的耐热冲击性
碳化硼	2 800 努氏硬度		极好的耐蚀性。价格昂贵

注: 表中元素的百分含量皆指质量分数。

4.8 刀具磨损寿命的预测

4.8.1 刀具的磨损部位

刀具的磨损出现在与刚切削好之表面摩擦的主后刀面以及与强烈变形的切屑摩擦的前刀面和

刀刃上: 主后刀面上的是带状磨损, 磨损带靠刀尖处形成刀尖磨损, 另一端形成缺口, 称为缺口状磨损。前刀面上是月牙洼状磨损; 副刀刃上是氧化磨损 (见图 20.2-16)。

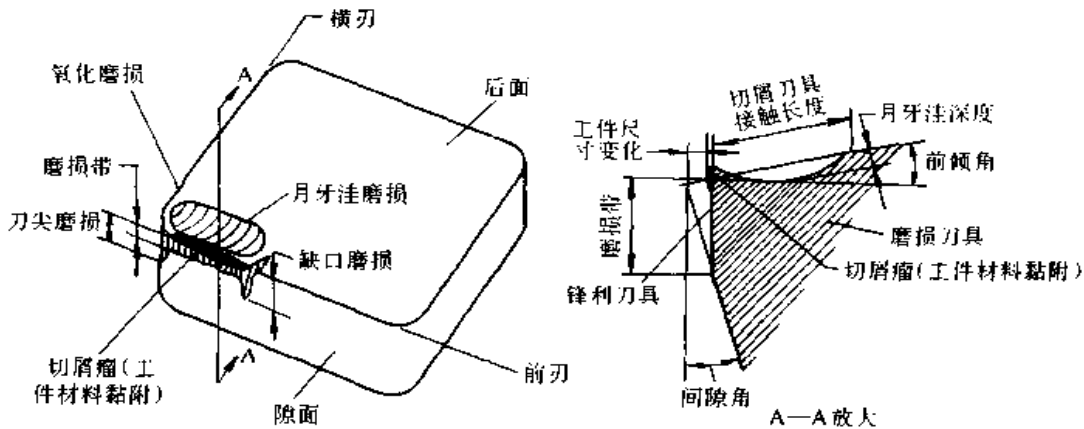


图 20.2-16 车刀 (镶硬质合金) 的典型磨损形式

刀具的各个磨损部位具有不同的磨损类型, 因为各个部位的温度、滑动速度和应力不相同。通常认为, 磨损带上是磨粒磨损, 月牙洼磨损是粘附磨损, 切削刃的磨损主要是热软化和显微剥落。

刀具磨损类型的多样性, 使得至今还没有形成预测磨损寿命的理论。再加上切削参数、冶金变化、机械缺陷、机床振动和环境条件的影响, 使刀具磨损和刀具寿命具有易变性, 因而也具有不可预测性。

预测刀具磨损寿命的唯一实用方法, 就是在

尽可能接近实际切削加工情况的切削加工条件下作一系列的切削加工试验。

4.8.2 刀具磨损寿命的数学模型

建立刀具寿命数学模型的目的是在试验的切削参数范围内, 用插值法计算刀具寿命。

由于刀具磨损的理论还不能建立能用于描述、测量和估算刀具磨损寿命的数学模型, 因此制定了一些经验方法。基本的刀具寿命的经验模型有:

1) 泰勒方程

$$\ln L = a_0 + a_1 \ln v$$

2) 广义泰勒方程

$$\ln L = a_0 + a_1 \ln v + a_2 \ln f + a_3 \ln d$$

3) 二次线性方程

$$\ln L = a_0 + a_1 \ln v + a_2 \ln f + a_3 \ln d + a_{11} (\ln v)^2 + a_{22} (\ln f)^2 + a_{33} (\ln d)^2 + a_{12} \ln v \ln f + a_{13} \ln v \ln d + a_{23} \ln f \ln d$$

4) 柯尼格-德皮罗方程

$$\ln L = a_0 + a_1 v^{a_2} + a_3 f^{a_4}$$

5) 高尔基方程

$$L = L_0 \exp \{ a_0 [1 - (1 - a_1 v/v_0)]^{1/2} \}$$

在这些方程中, L 、 v 、 f 、 d 分别为刀具寿命、切削速度、进刀量和工件直径; L_0 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_{11} 、 a_{22} 、 a_{33} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{23} 均为要通过试验确定的因子。

4.9 机动车辆轮胎踏面的磨损预测

机动车辆在良好路面上行驶时, 轮胎主要是因踏面磨损而报废。而且, 25%~40% 的交通事事故是因踏面磨损在潮湿的路面上失去稳定造成的。从交通事故相对指数与踏面花纹深度的关系曲线(图 20.2-17)可以看出踏面磨损与行车安全的重要关系。

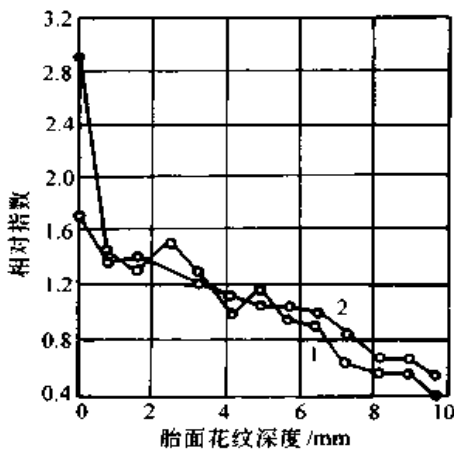


图 20.2-17 踏面花纹深度与交通事故相对指数
1—潮湿的沥青路面 2—干燥的沥青路面

4.9.1 踏面橡胶磨损机理

踏面磨损的主要原因是踏面花纹与路面的摩擦和表面橡胶疲劳。在行驶过程中, 踏面表层发生下述变化:

1) 温度升高 外摩擦和内摩擦(滞后损失)中能量的消散引起温度升高。它使表面层加速氧

化, 氧化后橡胶断裂强度下降, 弹性亦下降。

2) 疲劳 反复地变形使分子链断裂, 形成的原子团会与杂质发生反应, 改变橡胶的物理力学性能。橡胶结构上的缺陷构成应力集中源, 导致出现裂纹。

3) 撕裂 如果踏面与路面间的摩擦大, 或路面凸起的角度超过了临界值, 则滑移的可能性下降。当有切向位移时, 不滑移的表层可能因切应力超过橡胶强度而被撕开。路面凸起的反复作用导致磨损碎片脱落。

此外, 胎踏面与路面相互作用也能出现机械磨损, 在高的滑动速度和温度下出现磨粒磨损; 在 $v \geq 200$ km/h 和较高的温度下, 甚至可能出现烧蚀磨损。

影响踏面磨损的因素有: 橡胶的物理力学性能; 车辆的维修状态; 车辆类型和轴上的载荷; 驱动方式; 路面材料与状况; 踏面与路面接触中出现的切向力等。

4.9.2 磨损度计算

线磨损度的计算公式是

$$K_1 = 0.1 \Delta^{1/6} p_n^{2/3} \tau_m^{m'} s_m / [2\pi r_0 E_e^{2/3} \sigma_0^{m'} (m' + 1)]$$

$$p_n = p_w^{1/2} F_r^{1/2} / (2K_p B r_0^{1/2} a_2^{1/2} l^{1/2})$$

$$a_2 = 1 / [2\pi (r_0 r_c)^{1/2}]$$

$$l = 1 + [1 - 4a_1 p_w^2 / (a_2^2 F_r)]^{1/2}$$

式中 Δ ——路面几何形状综合参数,

$$\Delta = R_v / (rb^{1/3}), \text{见表 20.2-28;}$$

τ_m ——最大切应力;

s_m ——最大滑移量;

r_0 ——轮胎不受载时的半径, 见图 20.2-18;

E_e ——踏面材料的有效弹性模量;

σ_0 ——摩擦疲劳参数, 对常用的踏面橡胶, $\sigma_0 = 150 \sim 200$ MPa;

m' ——疲劳特性指数, 对橡胶踏面, $m' = 3 \sim 4$;

p_n ——踏面与路面接触面上的法向压力;

p_w ——内胎膨胀压力;

F_r ——轮胎径向载荷;

K_p ——踏面花纹密度因子, 见表 20.2-29;

B ——踏面宽度;

r_c ——路面横向曲率半径;
 α_1 ——常量, 对货车 $\alpha_1 \approx 22.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$,
 对客车 $\alpha_1 \approx 37.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$.

表 20.2-28 路面几何形状综合参数

路面	R_y/mm	r/mm	b	ζ	Δ
沥青	0.26	0.12	3.5	3.5	1.560
新铺混凝土	0.31	0.30	2.0	4.4	0.885
短期使用后的混凝土	0.43	0.20	5.0	3.9	1.420
旧混凝土	0.24	0.15	3.8	2.7	0.980

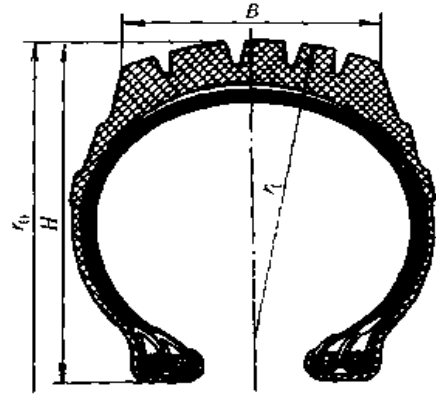


图 20.2-18 轮胎的截面图

表 20.2-29 踏面花纹及其密度因子

花纹类型	干线用花纹		非干线用花纹		通用花纹		冬季用花纹
	客车	货车	客车	货车	客车	货车	
示意图							
密度因子	0.65~0.80		0.55~0.60		0.40~0.50		0.55~0.60
应用场合	良好路面。提供足够粘附力并能保持平衡		硬路面		非干线路面		溜滑与结冰的路面

切应力 τ 随滑移量而改变, 图 20.2-19 是一典型的轮胎切应力随滑移量变化的曲线。滑移量的大小随行驶状态而改变。切应力对磨损影响很大, 在磨损计算中必须考虑, s_m 和 τ_m 值可根据不同行驶状况, 由实验确定。

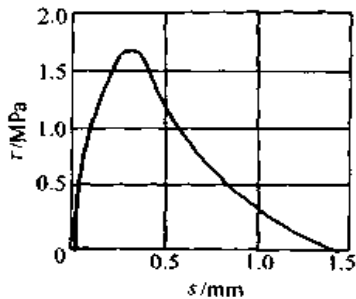


图 20.2-19 切应力随路面在路面上的滑移量的变化

4.10 联接的磨损

两固定接触表面间, 有微小振幅的相对运动时, 也会出现磨损, 称为微动磨损。由于大多数机械在储存、运输和操作中都会遇到振动, 因

此, 在过盈联接、轴毂联接和螺栓联接中, 微动磨损是常见的现象。

影响微动磨损的因素有: 振幅、频率、介质、湿度和载荷。在联接中往往振幅与载荷是相关的, 这时, 磨损量与法向载荷的关系见图 20.2-20。由图可见, 可以通过调整联接中的压力减少微动磨损量。

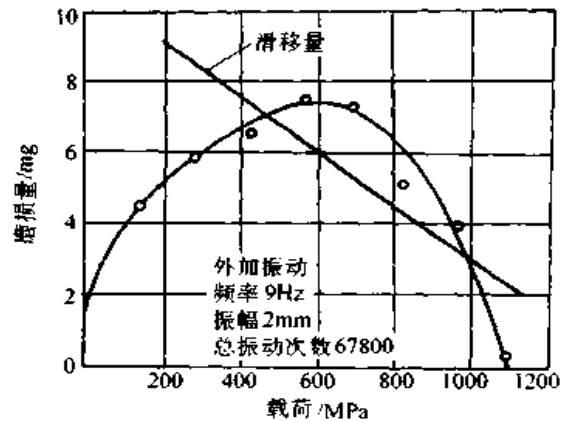


图 20.2-20 微动磨损与载荷的关系

4.11 各种机械零件的典型线磨损度(率)

在稳定磨损状态下,各种机械零件的典型线

磨损度见表20.2-30,质量磨损率见表20.2-31;根据各种零件允许的磨损量,可以计算出他们的预期磨损寿命。

表 20.2-30 机械零件的典型线磨损度

磨损零件名称		线磨损度 $K_h/m \cdot m^{-1}$	备注	磨损零件名称		线磨损度 $K_h/m \cdot m^{-1}$	备注	
气缸套		1.8×10^{-12} 2.5×10^{-12} $(1.5 \sim 5.6) \times 10^{-11}$	镀锡活塞环 镀铬活塞环 镀铁活塞环	制动器 摩擦元件	盘式 带式 蹄式	$8 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-10}$ $(2 \sim 8) \times 10^{-7}$ $2 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$		
活塞环	镀锡	2.5×10^{-11}	铸铁汽缸套	切削刀具	YT15		加工材料 40Cr 切削速度 150-230 m/min 切削速度 180 m/min	
	镀铬	2.5×10^{-12}			YT15	后面 前面		$1.1 \cdot 10^{-8}$ $2.2 \cdot 10^{-8}$
	铸铁	$(0.6 \sim 1.2) \times 10^{-11}$			YT30	后面 前面		5.5×10^{-7} $6.0 \cdot 10^{-7}$
汽车发动 机曲轴	连杆轴颈 主轴颈	$4 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-12}$ $1.6 \times 10^{-11} \sim$ 1.8×10^{-12}	锡铈轴承合金轴瓦				加工材料 Cr15Ni36W3TiAl 切削速度 4 m/min	
挖掘机	转台支承环		50Mn-GCr15	量规	硬质合金		1×10^{-10}	
	转台花键轴		40Cr-35Mn		碳素工具钢		$(1.3 \sim 2.9) \times 10^{-9}$	
	换向 机构	圆柱齿轮	1.5×10^{-11}	40Cr-45	联接、联轴器		$8 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$	微动磨损
		锥齿轮	6.3×10^{-12}	40-40Cr	轮胎路面		$(2 \sim 10) \times 10^{-8}$	在沥青路面上
		链轮	7.3×10^{-12}	45-45	橡胶密封件(无润滑)		$5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-8}$	与钢摩擦
	行走机构 牙嵌离合器		6.3×10^{-10}	45-45	混砂机的 旋转叶片	混砂	$(2.1 \sim 3.1) \times 10^{-8}$	
	铲斗齿		$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	45-45		混粘土	$(4 \sim 10) \times 10^{-8}$	
机床导轨		$2 \times 10^{-9} \sim 4 \times 10^{-10}$	铸铁-铸铁	飞机起 落架关 节轴承	锂基脂加铅 润滑 锂基脂润滑	1.3×10^{-10} 5.2×10^{-10}	30CrMnSiA 镁铝铁青铜	
牛头刨滑枕		2×10^{-11}	铸铁-铸铁	镗头滑动轴承		$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$		
在水中工作的 滚动轴承滚动体		$(0.7 \sim 2) \times 10^{-10}$	$\sigma_{max} < 1960 \text{ MPa}$	阻尼器的青铜套		2×10^{-11}		
		$(1.3 \sim 4.3) \times 10^{-9}$	$\sigma_{max} > 1960 \text{ MPa}$					

表 20.2-31 机械零件的典型质量磨损率

零件名称		材 料	磨 损 率 / $g \cdot h^{-1}$	零件名称		材 料	磨 损 率 / $g \cdot h^{-1}$		
锤式 破碎机	锤头	石灰石 物料	中锰钢 高锰钢	17.760 36.786	风 扇 磨煤机冲击板	高铬铸铁	43.5		
		破碎 板	高岭土 物料	中锰钢 高锰钢		884.3 1 425.0	ZGMn13 50Mn2	68.9 49.6	
	水泥球磨机筒体衬板			ZG1Cr13 MQTMn6 ZGMn13 MQTMn7 ZGMn13		0.017 6 0.075 0.286 0.084 7 0.141	翼式破碎机衬板	铬铝铸铁 高锰钢 40SiMnCrWMoVB	0.029 $g/kg^{\text{①}}$ 0.022 g/kg 0.022 g/kg

① 磨损量/破碎物料质量。

5 磨损零件的修复

磨损使机械零件的尺寸改变和表面质量劣化。因此，修复磨损零件就是使零件的尺寸恢复到原有值，并恢复其原有的表面质量。

修复的方法有：焊、补、喷、镀、镶、胀、缩和粘等。

5.1 修复工艺的选择

选择修复磨损零件的工艺时要考虑下述几个方面：

1) 修复工艺对零件材质的适应性。各种修复工艺对常用材料的适应性见表 20.2-32；

2) 修补层能达到的厚度必须大于磨损深度。各种修复工艺能达到的修补层厚度见表 20.2-33；

3) 修补层强度、修补层与零件基体材料的结合强度，以及修复工艺对零件基体材料强度的影响等，可参考表 20.2-33 选择修复工艺；

- 4) 磨损零件的结构；
- 5) 修补层的摩擦学性能；
- 6) 修复工艺对磨损零件非修复尺寸之精度的影响。

5.2 电镀

5.2.1 镀铬

镀铬是修复磨损零件最有效的方法之一。它不但能恢复零件原有的尺寸，而且还能改善零件表面的摩擦学性能。同时，铬与基体金属结合强度高，甚至超过自身结晶间的结合强度。

镀铬层的硬度可达 800~1200HV，在温度不超过 500℃ 时它几乎不受温度的影响。

镀铬层与钢的摩擦因数比钢对钢约低 50%，耐磨性高 2~50 倍，热导率约高 40%。镀铬层的物理性能见表 20.2-34。

镀铬层可分为平滑镀铬层和多孔镀铬层两种，它们的使用范围见表 20.2-35。

表 20.2-32 各种修复工艺对常用材料的适应性

修复工艺	镀铬	镀铁	气焊	焊条电弧堆焊	电弧堆焊	振动电弧堆焊	钎焊	金属喷涂	塑料粘补	利用塑性变形
材	低碳钢	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	中碳钢	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	高碳钢	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	
	合金钢	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
	不锈钢	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	
	灰铸铁	✓	✓		×		✓	✓	✓	
料	铜合金						✓	✓	✓	✓
	铝						×	✓	✓	✓

注：✓为适应，×为不适应。

表 20.2-33 各种修复工艺修补层能达到的厚度和力学性能

修复工艺	能达到的厚度/mm	抗拉强度/MPa	与 45 钢的结合强度/MPa	修复后疲劳强度降低率/%	硬 度
镀铬	0.01~0.2	390~590	295	25~30	600~1000HV
低温镀铁	0.2~2.0	—	440	25~30	45~65HRC
焊条电弧堆焊	0.1~10.0	295~440	295~440	36~40	210~420HBS
埋弧堆焊	0.5~10.0	345~490	345~490	36~40	170~200HBS
振动电弧堆焊	0.03~10.0	610	550	—	25~60HRC
银钎焊	0.02~5.0	390	390	—	—

续表 20.2-33

修复工艺	能达到的厚度/mm	抗拉强度/MPa	与45钢的结合强度/MPa	修复后疲劳强度降低率/%	硬度
铜钎焊	0.02~5.0	280	280	—	—
锰青铜钎焊	0.02~5.0	345~440	345~440	—	217HBS
金属喷涂	0.5~10.0	78~110	40~93	45~50	200~240HBS
环氧树脂粘补	0.2~10.0	—	20(10)~40(20) ^①	—	80~120HBS

注：① 括号外为热粘补的数值，括号内为冷粘补的数值。

表 20.2-34 铬镀层的物理性能

铬镀层的类别	无光泽铬镀层	光泽铬镀层	乳白色铬镀层
电镀工艺条件	低的电解液温度、较高的电流密度	中等的电解液温度和电流密度	较高的电解液温度、较低的电流密度
镀层的物理特性	硬度高、脆性大、结晶组织粗大、有稠密的网状裂纹、表面呈暗灰色	脆性小、结晶组织细、硬度较高(700HBS)、有网状裂纹、表面光亮	孔隙率小、脆性小、硬度低(400~700HBS)、能承受较大的变形、表面为烟雾状的乳白色、经抛光后可呈镜面般光泽

表 20.2-35 平滑和多孔铬镀层的适用范围

镀层类型	使用范围	实例
平滑铬镀层	修复过盈配合零件的尺寸；提高模具工作表面的光滑度，降低摩擦力；延长低应力磨损条件下零件的使用期限	锻模、冲压模；测量工具(塞规、量规、卡规)
多孔性铬镀层	修复大压力、高温、滑动速度高、供油不充分等条件下工作的零件；修复机床主轴、泵轴等零件	内燃机曲轴、汽缸套、排气阀杆、活塞销、活塞环、机床主轴、镗杆

5.2.2 电镀

采用化学镀镍，镍镀层是磷的质量分数为5%~15%的磷镍合金，镀层硬度可达600HV。镍镀层化学稳定性好、耐腐蚀，在海水、氨、染料和有机酸中很稳定。

5.2.3 刷镀

又名接触电镀。适宜用在特大、结构复杂的零件上修复磨损部位。镀层硬、针孔少。

刷镀设备简单，节约投资，适宜于现场修复。

5.3 金属喷涂

用金属喷涂枪，靠压缩空气将逐渐熔化的金属迅速地雾化，向零件磨损表面喷射，称为金属喷涂。连续不断地喷射、铺展和堆积下形成金属覆盖层。

对大型或复杂零件，用金属喷涂法修复磨损部位，省时省力，是一种很有效的修复工艺措施。各类轴、导轨、溜板都能用金属喷涂修复。

用作喷涂的材料可以是金属或非金属。基体材料也可以是金属或非金属。金属喷涂不受材料焊接性的限制。

被喷涂的表面必须先行清洁及毛糙处理，毛糙处理方法影响涂层抗剪强度(见表20.2-36)。

金属覆盖层的物理力学性能，以及它与基体材料的结合强度见表20.2-37、表20.2-38。

5.4 焊接

5.4.1 铸铁导轨的补焊修复

补焊时焊层与基体材料结合要牢，焊后要能用手刮削，而且不能使导轨变形。

(1) 焊条电弧焊

一般常用铸铁焊条的冷焊，或是镍铜合金焊条和奥氏体铁铜焊条的混合焊。

(2) 钎焊

由于铸铁里含有大量的游离碳，它将影响熔化后的钎料对基体材料的湿润性和流动性，妨碍

表 20.2-36 覆盖层的抗剪强度 (MPa)

喷涂材料		铝	青铜	锌	铜	黄铜	碳 钢			1Cr18Ni9
							10	45	80	
表面 毛糙 方法	喷黄砂	12.5	16.9	10.0	12.7	6.0	10.7	14.6	13.4	13.9
	喷硬砂	17.0	39.1	11.7	24.3	17.3	37.7	40.0	33.4	36.5
	车螺纹	25.7	42.0	15.7	28.7	29.7	49.6	69.0	36.6	66.2
	车槽滚压	29.3	59.1	22.1	38.4	39.4	91.3	93.1	65.0	109.7
	电拉毛	21.2	21.1	12.7	19.3	23.9	22.1	23.0	20.1	32.5

表 20.2-37 常用覆盖层材料的物理力学性能

覆盖层材料	铝	锡基轴承合金	青铜	1Cr18Ni9	不锈钢	合金钢	碳 素 钢			铝硅合金 (Si6%)	钼
							10	45	80		
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 410	6 670	7 460	6 930	6 730	6 780	6 670	6 780	6 360	—	—
ρ/ρ_0	94.1	86.6	89.0	88.9	88.7	86.6	86.7	88.1	82.5	—	—
硬 度	72HBS	58HBS	50HRB	78HRB	—	—	89HRB	90HRB	38HRC	—	—
屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	134	—	—	207	275	—	207	239	190	245	52
伸长率 $\delta/\%$	0.23	—	—	0.27	0.50	—	0.30	0.46	0.42	0.54	0.30

注：1. 表中元素的百分含量指质量分数；
2. ρ_0 为材料密度。

表 20.2-38 不同毛糙方法的结合强度 (MPa)

喷涂材料	碳钢, 10		不锈钢, 1Cr18Ni9		铝		铝硅合金	
	抗剪	抗拉	抗剪	抗拉	抗剪	抗拉	抗剪	抗拉
钢屑打毛	48.1	18.3	57.5	21.0	19.6	7.1	31.0	11.7
车槽滚压	100.6	31.6	129.4	41.8	31.0	14.7	54.2	20.1
喷钼	61.0	14.8	65.4	15.5	30.3	11.3	35.1	14.1
车螺纹加喷钼	110.8	21.0	141.2	21.0	38.2	16.6	56.2	21.4

钎焊。为此，应在钎焊前用快速无槽化学镀铜法，在要补焊的部位镀上厚约 0.02~0.05 mm 的铜层。可用的钎料有：铜合金、银合金、锡铋轴承合金和锡铋合金等。

几种导轨修复方法效果的比较见表 20.2-39。

5.4.2 钢制零件的补焊修复

补焊修复钢制零件要求补焊前后不经热处理就能恢复原有的力学性能。硬度要求为 35~62 HRC 的，可采用 50 CrVA 钢为芯材的高合金耐

磨焊条；硬度要求为 30~45 HRC 的，可采用 20 CrMo 钢焊条。

5.5 粘接

粘接法修复是将磨损零件的磨损面用切削方法去掉一层，然后用粘接法粘上一层，以恢复原有尺寸。根据材料不同，可采用 3 种不同的粘接方法。

(1) 热熔粘接法

主要用于热塑性塑料之间的粘接。将被粘接

表 20.2-39 几种导轨修复方法效果的比较

比较项目	修 复 方 法				
	焊条电弧堆焊	钎 焊	粘 补	金属喷涂	镶 嵌
工艺性	难掌握	按工艺难易顺序：铜焊、银焊、锡基轴承合金焊、锡铋合金焊	工艺简单	工艺复杂	工艺较简单
外观	颜色与导轨基本一致	除铜焊外，颜色与导轨基本一致	不太美观	用低碳钢丝颜色近似	颜色与导轨一致
结合强度	不脱落	不脱落	浅槽易脱落	不脱落	不脱落
使用温度	不限	铜焊最高，银焊达 200℃，锡基轴承合金和锡铋合金低于 200℃	无机粘接达 500℃，有机粘接低于 100℃	不限	不超过 100℃
硬度	与导轨材料基本一致	铜焊稍高，其他不超过 35 HBS	硬度低	与导轨材料基本一致	与导轨材料基本一致
焊层加工性	不易刮削	可刮削	可刮削	可刮削	可刮削
变形情况	变形不超过 0.03/1 000	锡铋合金钎焊不变形，其余有少量变形	不变形	可能有少量变形	不变形
使用范围	适用于修复重型导轨及润滑情况差的导轨	适用于修复润滑条件好的中、小型导轨、锡铋合金特别适宜于精密导轨	一、二级保养	最好不采用	尽量不采用
成本	成本较贵	银钎焊成本稍贵，其余低廉	低廉	较低廉	较低廉

件加热至熔融，然后叠合加压，直至冷却凝固。

(2) 溶剂粘接法

适用于非结晶性无定形的热塑性塑料的粘接，选用的溶剂宜有中等的挥发性。

(3) 胶粘剂粘接法

利用胶粘剂把两种材料粘接一起，并要有足

够的粘接力。可以将金属与金属、金属与非金属、非金属与非金属粘一起，使用广泛。

用于粘接承载零件和结构的胶粘剂称为结构胶粘剂。它们可以分为热塑性、弹性和热固性 3 种，目前常用的是它们的组合胶粘剂（参见第 3 卷第 22 篇）。

第3章 润滑与润滑设计

按传统的观点，在摩擦副两个摩擦表面间加入一种介质，将摩擦表面分隔开，避免或减少其直接接触，使摩擦副的摩擦因数降低，磨损减少，称此行为为润滑，这种介质为润滑剂。润滑的其他功能还有：冷却、密封、防锈和减振等。

在设备故障造成的经济损失中，润滑故障造成的损失约占 30.3%。

润滑设计的内容为：

(1) 根据摩擦副的性质和工作条件选用适当的润滑剂；

(2) 根据摩擦副的性质、工作条件和选用的润滑剂，确定正确的润滑方法，通过润滑计算，将润滑剂按一定的量合理地分布到各摩擦面间；

(3) 以摩擦副、润滑装置和润滑剂为对象，作好润滑管理。

1 润滑状态与润滑机理

润滑分为流体润滑和固体润滑。

1.1 固体润滑

固体润滑和干摩擦在摩擦的本质没有什么区别，只是固体润滑参与摩擦的表层固体材料是为防止两表面咬黏、降低摩擦因数、减少磨损特意置入的，称为固体润滑剂。固体润滑剂通常呈粉末或干膜状态。对固体润滑剂的要求是：

- 1) 使摩擦副具有低且稳定的摩擦因数；
- 2) 在规定的温度范围内具有化学稳定性，不会侵蚀和损伤摩擦副表面材料；
- 3) 能牢固地粘附在摩擦副表面上，不会因载荷的作用而被挤出两表面的接触区；
- 4) 有足够的耐磨性；
- 5) 无毒、经济、便于控制。

可作为固体润滑剂的材料有具有层状晶格的化合物、聚合物、金属和无机物，它们全都具有层状结构。例如石墨、二硫化钼和云母等，是由光滑的分子或原子片组成的层状结构，聚四氟乙烯等聚合物，是由长的平行直分子链组成的层状

结构。

这类材料在垂直于层的方向上耐压强度高，而在平行于层的方向抗剪强度低，故能减小摩擦因数。

固体润滑膜破坏的极限载荷主要决定于：润滑膜和基体材料的力学性质；润滑膜的厚度；接触表面的几何特性；表面温度和相对速度。材料的结构因素、变形速度和温度以及应力分布，对润滑材料的性质有较大影响。同样的润滑材料，由于变形条件改变，其破坏特性可能由脆性变为塑性。

在载荷作用下，用球形触头在有固体润滑膜的金属板上缓慢移动，测量其极限载荷。图 20.3-1 是在不同硬度基体材料上测出的极限载荷，图 20.3-2 是在不同润滑膜厚度上测出的极限载荷。

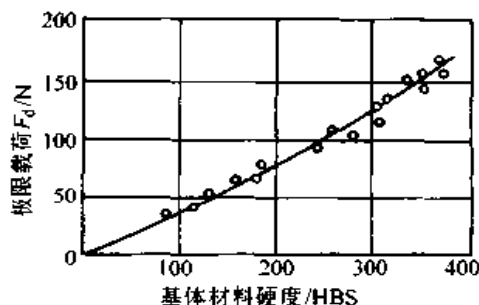


图 20.3-1 极限载荷与基体材料硬度的关系

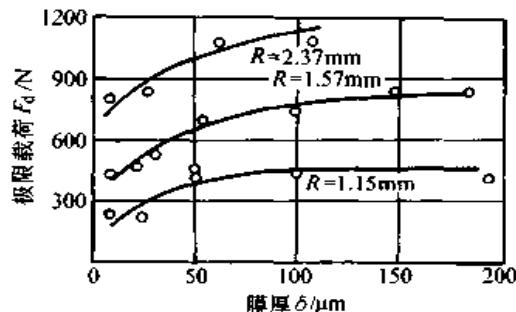


图 20.3-2 极限载荷与膜厚的关系

通过理论分析和试验得出，计算固体润滑膜承载能力的近似公式为

$$F_d = \bar{F}_d \sigma_y R^2$$

$$\bar{F}_d \approx 145 (\delta/R)^{0.3} (\sigma_y/E)^{0.45} (\tau_{sh}/\sigma_y)^{0.3} \quad (20.3-1)$$

式中 F_d —— 固体润滑膜的极限载荷；
 \bar{F}_d —— 极限载荷因数；
 σ_y —— 基体材料的抗压强度；
 R —— 触头半径；
 δ —— 润滑膜厚度；
 E —— 基体材料的弹性模量；
 τ_{sh} —— 固体润滑膜的抗剪强度。

用式 (20.3-1) 可以评价各个几何因素和强度因素对固体润滑膜承载能力的影响。

试验表明，固体润滑膜的承载能力随表面温度升高而下降。

使用固体润滑能够节约电力、石油产品和有色金属，避免漏油。固体润滑适用的场合为：

- 1) 高温高压，如挤压、冲压、拉制、轧制等；
 - 2) 低速，如机床导轨；
 - 3) 宽的温度范围；
 - 4) 高真空中运转的部件，可保证真空度；
 - 5) 强辐照中运转的部件，可减缓润滑剂的变质；
 - 6) 需要防腐蚀的场合，它与空气、溶剂、燃料、助燃剂等不起反应，可在酸、碱、海水等环境下工作；
 - 7) 有尘土的环境；
 - 8) 需严格避免油污的场合，如食品、纺织、造纸、医药、印刷等设备；
 - 9) 油脂易被冲刷流失的场合；
 - 10) 给油很不方便的地方。
- 固体润滑的摩擦因数通常比油、脂润滑时高，且无冷却作用，难以排出磨屑。

1.2 流体润滑

流体润滑有两种主要润滑状态，即流体膜润滑和边界润滑。兼有流体膜润滑和边界润滑的称为混合(流体)润滑。根据形成流体膜的方式不同，流体膜润滑又分为动力润滑和静力润滑。

随着润滑膜厚度的变化，润滑状态将发生转变。润滑膜厚度与表面轮廓算术平均偏差之和的比值，称作相对膜厚(量纲为 1 的膜厚)，即

$$\bar{h} = h / (Ra_1 + Ra_2) \quad (20.3-2)$$

它不但表征润滑状态，而且还与所润滑的零件的工作寿命有直接关系； \bar{h} 与润滑状态的关系见表 20.3-1。

表 20.3-1 流体润滑状态与相对膜厚

相对膜厚	\bar{h}			
	≤ 1	1~5	5~10	10~100
润滑状态	边界润滑	部分弹性流体动力润滑	完全弹性流体动力润滑	
		混合润滑	流体膜润滑	

摩擦副工作参数(如润滑剂黏度、相对速度、载荷等)改变将导致润滑膜厚度改变，因而导致润滑状态转变。摩擦副处于不同润滑状态的外在表现是摩擦因数数值不同。图 20.3-3 是摩擦因数 μ 随参数 $\eta v/F$ 的变化曲线，此图表明摩擦因数随润滑状态改变的变化特性。在边界润滑区，摩擦因数较大，且开始几乎不变，然后随 $\eta v/F$ 值增大而下降，转入混合润滑区。在混合润滑区(部分弹性流体动力润滑区)，摩擦因数继续随 $\eta v/F$ 值增大而线性下降，继又转而上升，在该润滑区有摩擦因数的最小值，当近似成为线性上升时，进入流体膜润滑(动力润滑)区。

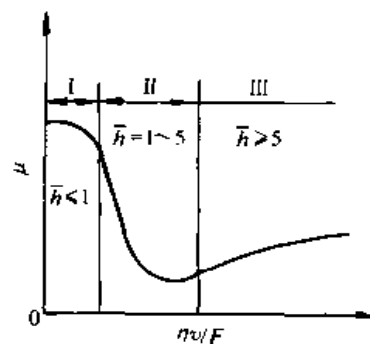


图 20.3-3 摩擦特性曲线

I — 边界润滑区；

II — 混合润滑区、部分弹性流体动力润滑区；

III — 完全弹性流体动力润滑区、流体动力润滑区

1.2.1 边界润滑

靠润滑剂中的有机极性化合物吸附在金属表面形成的吸附膜，或者与金属表面反应生成固体反应物润滑膜，从而起到润滑作用。这种润滑状态称为边界润滑，这种膜称为边界膜。润滑剂的

边界润滑性能称为润滑性或油性。

在边界润滑状态，相对运动两表面之间的摩擦、磨损不取决于润滑剂的黏度，而是取决于摩擦表面特性和润滑剂的润滑性。

(1) 边界润滑膜

1) 润滑剂分子

根据分子极性不同，可将分子分为4类，见表20.3-2。

矿物油主要是碳氢化合物类的烃，它们是非极性的，一般呈碳原子的长链加氢，或是环形链加某一侧碳的长链的形态(见图20.3-4)。

表 20.3-2 分子按极性的分类

符号	OO	PO	ON	PN
示意图				
极性	完全无极性	活性的正极性	活性的负极性	正负两个活性极性
举例	烃、四氯化碳、二硫化碳	氯、溴、碘	酯、醚、酮、苯的衍生物	乙醇、胺、酰胺、酸

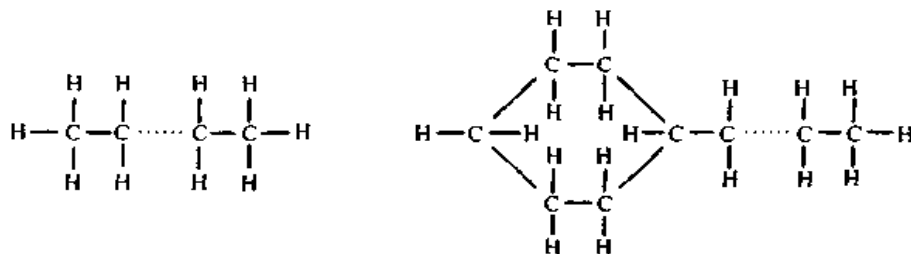


图 20.3-4 矿物油分子

植物油和动物油是多种物质的混合物，主要成分是脂肪酸和脂肪酸丙三酯。这些分子呈碳原子的长链形态，而在一端是羧基(COOH，见图20.3-5)。氧原子带负电，而氢原子若在负电子

附近可变成带正电的，又因为它很小，构成很活泼的正电核心，故羧基构成活性基团，成为极性分子。

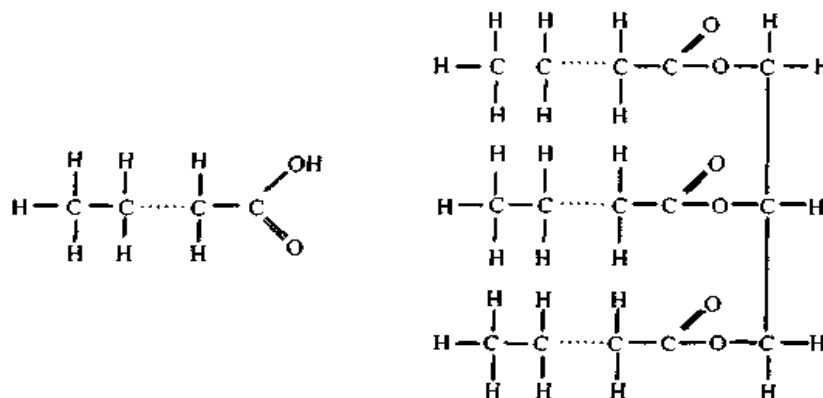


图 20.3-5 脂肪酸分子

2) 吸附力

金属表面具有相当大的表面能，它的表面分子与润滑剂分子间会产生吸附力。吸附力有原子间的主价键力和分子间的次价键力，次价键力包括范德华力和氢键。

极性分子间的范德华力主要是葛生力，它是极性分子的永久偶极矩间的静电相互作用力，其大小和偶极矩的相对取向有关，当取向一致时，两者相互作用势能最小。一般葛生力的能量在

12.5~21.0 kJ/mol。

氢原子在两个负电性原子间形成次价键就是氢键，它的能量约为 21.0~42.0 kJ/mol。

主价键力的能量更大，约为 42.0~420 kJ/mol。

3) 边界膜

按形成机理，边界膜分为吸附膜和反应膜。边界膜的分类及特性见表 20.3-3。

表 20.3-3 边界膜的类型及特性

边界膜类型	吸 附 膜	
	物理吸附膜	化学吸附膜
结合力	次价键	主价键
牢固性	低	中
是否可逆	可逆	部分可逆
模型图		
边界膜类型	反 应 膜	
结合力	化合键	
牢固性	高	
是否可逆	不可逆	
模型图		

吸附膜可以是单分子膜或是多分子膜。金属表面吸附一层分子后，形成表面能较低的新界面，再以较弱的吸附力吸附第二层分子，第二层分子的方向与第一层分子相反，余此类推，见图

20.3-6。由于奇数层分子的极性团朝着金属表面，比偶数层上的吸附强度高，故通常剪切发生在非极性团对着的结合面上。

(2) 有边界膜的金属表面的接触

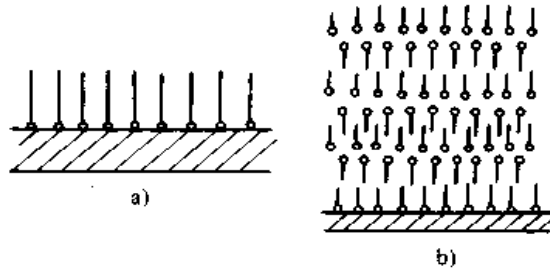


图 20.3-6 分子吸附膜
a) 单分子 b) 多分子

润滑油中一个分子的长度平均约为 0.002 μm，如果边界膜有 10 层分子，边界膜的厚度与表面粗糙度也不在同一数量级上，故边界膜不可能填平金属表面的轮廓峰谷。在法向载荷的作用下，少数处于接触的轮廓峰上压力很大，在压力超过边界膜强度时，轮廓峰刺入边界膜，形成金属表面的粘附结点（见图 20.3-7 中的 a 区）。在粘附结点附近和几乎接触的轮廓峰处，边界膜互相接触（见图 20.3-7 中的 b 区）。在轮廓峰谷形成微空腔，里面充满了润滑剂（见图 20.3-7 中的 c 区）。当两表面相对运动时，由于流体动力学作用，也有一定的承载能力。

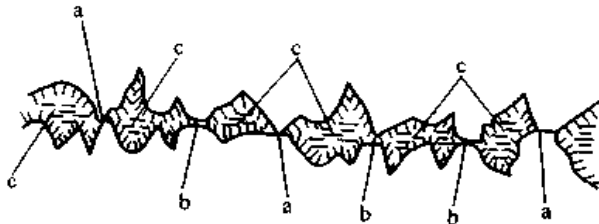


图 20.3-7 有边界膜金属表面的接触

由于边界膜的抗剪强度低，表面相对运动时很容易将边界膜剪切分离，所以这部分的摩擦阻力很低。

(3) 边界润滑的摩擦阻力

边界润滑状态下相对滑动的摩擦阻力包括剪切粘附结点的阻力、边界膜的摩擦阻力和微空腔内的流体阻力，即

$$F_f = A_m \tau_B + A_b \tau_c + (A - A_m - A_b) \tau \tag{20.3-3}$$

- 式中 A_m ——粘附结点的面积；
 τ_B ——粘附结点的抗剪强度；
 A_b ——边界膜的接触面积；
 τ_c ——边界膜的抗剪强度；
 A ——表观接触面积；

τ ——流体内摩擦阻力。

因为 τ 比 τ_B 、 τ_c 小得多，忽略后得

$$\left. \begin{aligned} F_f &= A_r [\gamma \tau_B + (1 - \gamma) \tau_c] \\ A_r &= A_m + A_b \\ \gamma &= A_m / A_r \end{aligned} \right\} \tag{20.3-4}$$

设流体动力学承担的法向载荷为 F_N ，则近似取实际接触面积

$$A_r = (F_N - F_{Nc}) / p$$

式中 p ——较软材料的屈服压力；

于是

$$\mu = [\gamma \tau_B + (1 - \gamma) \tau_c] / p \cdot (1 - F_{Nc} / F_N)$$

若忽略 F_{Nc} ，则

$$\mu = [\gamma \tau_B + (1 - \gamma) \tau_c] / p \tag{20.3-5}$$

若 p 低于边界膜的强度时，几乎全是边界膜接触， γ 值极小，这时

$$\mu = \tau_c / p$$

若 $\gamma \rightarrow 1$ ，则

$$\mu = \tau_B / p$$

接近无润滑时的数值。

(4) 影响边界膜润滑性能的因素

1) 温度

各种吸附膜的吸附强度随温度升高而下降，达到一定温度后，分子将失向、散乱，以至脱吸，丧失润滑性能。导致吸附膜脱吸的温度称为边界润滑膜的临界温度。

反应膜与此相反，它只能在一定的温度下形成，称该温度为反应温度。

图 20.3-8 表明温度对边界膜摩擦因数的影响。曲线 I 是采用含油性添加剂（摩擦改进剂）之润滑油的摩擦因数；曲线 II 是采用含极压添加剂（极压抗磨剂）之润滑油的摩擦因数；曲线 III 是采用既含油性添加剂又含极压添加剂之润滑油

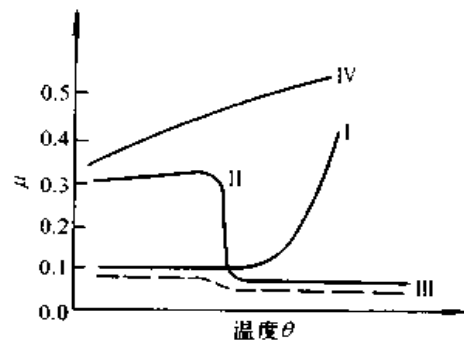


图 20.3-8 边界润滑的摩擦因数与温度的关系

的摩擦因数；曲线 IV 是采用纯矿物润滑油的情况，其摩擦因数最大。

若既含油性添加剂又含极压添加剂之润滑油的临界温度接近反应温度，则该润滑油能在很大温度范围内有较好的润滑性能。

2) 膜厚

吸附分子层数一定时，分子越长膜越厚，则摩擦因数越低。分子的长度决定于分子含碳原子数，含碳原子数越多，分子越长。图 20.3-9 为摩擦因数与碳原子数的关系。

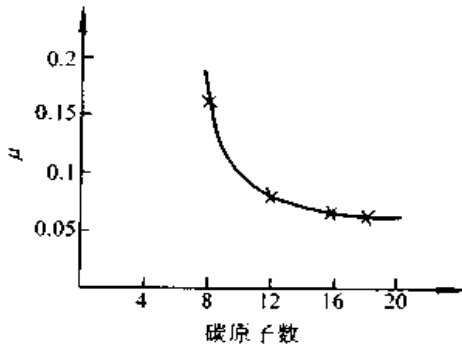


图 20.3-9 摩擦因数与碳原子数的关系
几种典型脂肪酸分子的长度列于表 20.3-4。

表 20.3-4 脂肪酸分子的长度 (nm)

名称	蓖麻油	甘油三蓖麻醇酸	油酸	软脂肪酸	硬脂肪酸
长度	0.55	0.52	1.08	2.14	2.38

吸附分子层数多（膜较厚），摩擦因数亦较小，3 层吸附膜的摩擦因数约为单分子层的 50%。分子层数超过 10 层之后，层数对摩擦因数的影响已不显著了（见图 20.3-10）。而且，吸附层数越多，吸附强度越低，脱吸所需能量越少。

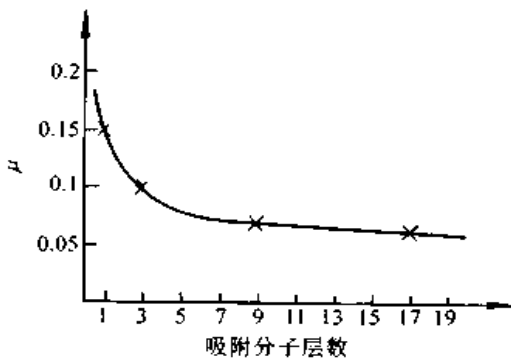


图 20.3-10 摩擦因数与吸附层数之关系

表 20.3-5 列出 TiO₂ 晶体吸附不同层数水分子后的脱吸能。

表 20.3-5 TiO₂ 晶体对水分子的脱吸能

层数	1	2	3	4	5
脱吸能/kJ·mol ⁻¹	27.4	5.77	1.88	0.335	0.126

3) 极性分子含量

各种极性分子在金属表面的吸附量都有一个最大值，称为饱和吸附量。达到饱和吸附量前，摩擦因数随极性分子含量的增加而下降，尔后，含量对摩擦因数的影响甚微。图 20.3-11 表明脂肪酸添加量对摩擦因数的影响。

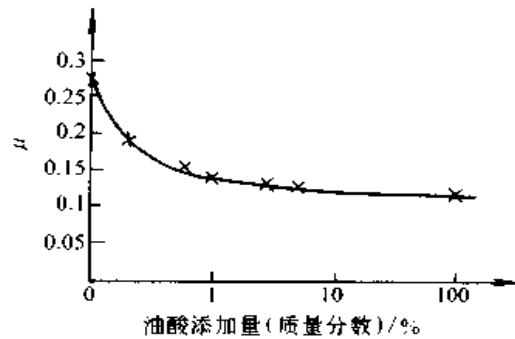


图 20.3-11 添加剂质量分数对摩擦因数的影响

但是，润滑剂酸值亦随含量增加而增大，且达到饱和吸附量后还继续增大。酸值增大，将加速润滑剂的氧化变质和金属表面的腐蚀，故添加剂的添加量不宜过量。

(5) 提高边界膜强度的方法

合理选择摩擦副材料和润滑剂、降低表面粗糙度，都能有效提高边界润滑膜的强度。但是，最简单、最有效的方法是在润滑剂中添加一定量的油性添加剂或（和）极压添加剂。加入少量添加剂以提高润滑油的各种性能的方法，是近年来广泛采用的技术。可以认为，现在已没有再使用纯矿物油作润滑剂了。

1.2.2 流体动力润滑

在一定条件下，靠摩擦面的运动，用黏性流体将两摩擦表面完全隔开，由流体流动产生的动压力平衡外载荷，将摩擦面间的固体外摩擦转变为流体的内摩擦，称为流体动力润滑。

由于两摩擦面不直接接触，表面相互滑动时只在流体分子间发生摩擦，因而流体动力润滑的

摩擦性质完全决定于流体的黏性，而与摩擦表面的材料无关。

用作润滑剂的黏性流体可以是液体，如水、润滑油，或是气体，如空气、氮、氢等，相应地称为液体动力润滑和气体动力润滑。

流体动力润滑的主要优点是：摩擦力小，磨损极少，可以缓和振动与冲击。流体动力润滑所涉及的问题主要有：根据摩擦表面几何形状、尺寸、间隙、流体黏度、运动速度和载荷等条件，运用黏性流体力学，分析流体动力润滑膜的压力分布、油膜厚度、流量、摩擦力、发热与温升等稳态性能，有些情况下还要分析流体动力润滑膜的刚度和阻尼特性（动态性能），正确设计与选用摩擦副和润滑剂，确保形成流体动力润滑。

(1) 雷诺方程及其应用

1) 雷诺方程

流体动力润滑理论的基本方程是润滑膜压力分布的微分方程，即雷诺方程。它是从黏性流体力学的基本方程—纳维-斯托克斯方程出发，作了一定假定简化后得出的。若假定是：

- ① 流体为牛顿流体；
- ② 润滑膜中流体的流动是层流；
- ③ 不考虑场力（如重力）的影响；

- ④ 略去惯性力的影响；
- ⑤ 认为润滑膜中的压力沿膜厚方向是不变的；

- ⑥ 认为流体和摩擦表面接触处没有滑移；
- ⑦ 不计摩擦表面曲率的影响。

则这样的雷诺方程为

$$\frac{\partial(\rho h^3/\eta \cdot \partial p/\partial x)/\partial x + \partial(\rho h^3/\eta \cdot \partial p/\partial z)/\partial z}{\partial z} = 6(u_1 - u_2)\partial(\rho h)/\partial x + 6\rho h\partial(u_1 + u_2)/\partial x + 12\partial(\rho h)/\partial t \quad (20.3-6)$$

式中符号的意义见图 20.3-12。

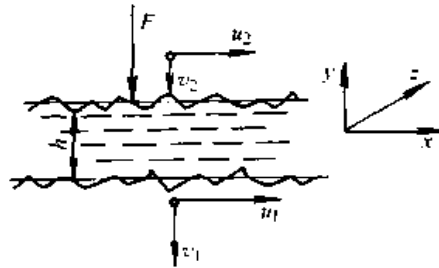


图 20.3-12 表面间流体的流动

2) 流体动压力的产生

由雷诺方程右边项可以分析出流体动力润滑膜产生压力的机理，列于表 20.3-6。

表 20.3-6 动力润滑油膜压力的产生

N ₀	1	2	3
产生机理	油楔效应	挤压膜效应	伸缩效应
简图			
表达式	$(u_1 - u_2)\rho\partial h/\partial x$	$\rho\partial h/\partial t$	$\rho h\partial(u_1 + u_2)/\partial x$
说明	表面距离沿滑动方向逐渐减小，为保持流动的连续性必须形成图示压力分布	两个正在靠近的表面间有流体就产生这种效应，它对短时间内的超载起到有效的软垫作用	表面速度变化使流量有变化的趋势，为保持流动的连续性必须形成图示压力分布

续表 20.3-6

No	4	5	6
产生机理	密度楔	黏度楔	膨胀作用
简图			
表达式	$(u_1 - u_2) h \frac{\partial \rho}{\partial x}$		$h \frac{\partial \rho}{\partial t}$
说明	为维持质量流的连续性, 必须产生压力抵消密度变化对流量的影响	润滑剂温度沿膜厚方向改变时膜厚上黏度有变化, 使流速分布改变。进、出口流速变化规律不同而产生压力	密度随时间变化则会发生体积膨胀, 产生压力, 使过量的润滑剂从侧面排出

其中 $N_{01, 2}$ 为主要的的作用, 其余为次要的作用。

3) 补充方程

求解流体润滑问题除雷诺方程外, 还需要补充下列一些方程:

①膜厚方程 它依摩擦表面的形状和相互关系而定, 例如对圆轴承, 该方程是

$$h = c (1 + \epsilon \cos \theta) \quad (20.3-7)$$

$$\epsilon = e/r$$

- 式中 h ——膜厚;
 c ——半径间隙;
 e ——轴颈偏心距;
 r ——轴颈半径;
 ϵ ——偏心率。

②状态方程 适用于气体润滑, 气体的状态方程是

$$p\rho^{-\gamma} = RT \quad (20.3-8)$$

式中 p ——气体压力;

- ρ ——气体密度;
 γ ——比热比;
 R ——气体常数;
 T ——热力学温度。

③能量方程 用能量方程描述润滑膜的温度场, 简化的能量方程:

$$\rho \frac{dE}{dt} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] - \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \eta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (20.3-9)$$

④黏温方程 黏度是流体润滑剂的重要性能之一, 流体的黏度随温度而变化, 描述这种变化的关系式称为黏温方程。对于矿物油, 常用的黏温方程列于表 20.3-7。

4) 雷诺方程的应用

针对具体润滑问题, 还可作些简化, 得到各种不同形式的雷诺方程, 它们各有一定的应用范围。各种形式雷诺方程的应用实例列于表 20.3-8。

表 20.3-7 常用的黏温方程

提出者	方程式	适用范围
Reynolds	$\eta = be^{-aT}$	形式简单, 易于计算, 但不精确。在 20~80℃ 范围内可以采用
Andrade-Eyring	$\eta = be^{a/T}$	通常适用于高温
Slotre	$\eta = a / (b + T)^c$	相当精确, 常用于分析计算

续表 20.3-7

提出者	方程式	适用范围
Vogel	$\eta = ae^{b/(T+c)}$	非常精确, 尤其适用于低温
Walther-ASTM	$\nu + a = bd^{1/T}$	常用于绘制黏温图

注: a 、 b 、 c 、 d 均为常量; T 为热力学温度 K; η 为动力黏度 Pa·s; ν 为运动黏度 mm^2/s 。

表 20.3-8 雷诺方程的应用实例

类别	实用实例	简图	雷诺方程
液	无— 限维 宽流 动 活塞环, $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ $u_1 = u, u_2 = 0$		$\frac{dp}{dx} = 6\eta u (h - h_m) / h^3$ $h = h_m$ 时, $dp/dx = 0$
	$B/D \geq 4$ 的径向轴承 $u_1 = R\omega_1, u_2 = r\omega_2$ 稳定载荷, $\frac{\partial h}{\partial t} = \omega_2 \frac{\partial h}{\partial \theta}$		$dp/d\theta = 6\eta(\omega_1 + \omega_2)(\epsilon \cos\theta - \cos\theta_m) / [\psi^2(1 + \epsilon \cos\theta)^3]$ $\theta = \theta_m$ 时, $dp/d\theta = 0$
体	无— 限维 窄流 动 $B/D \leq 1/4$ 的径向轴承 $u_1 = R\omega_1, u_2 = r\omega_2$ $\frac{\partial h}{\partial t} = \omega_2 \frac{\partial h}{\partial \theta}$		稳定载荷 $p = 3\eta(\omega_1 + \omega_2)(B^2/4 - z^2)\epsilon \sin\theta / [c^2(1 + \epsilon \cos\theta)^3]$
			循环载荷 $p = 3\eta(B^2/4 - z^2) / [c^2(1 + \epsilon \cos\theta)^3] \times [\epsilon(\omega_c - 2 \frac{d\phi}{dt}) \sin\theta - 2(\frac{d\epsilon}{dt}) \cos\theta]$ $\omega_c = \omega_1 + \omega_2 - \omega_L, \omega_L$ —载荷旋转角速度 ϕ —偏位角
滑	二 维 流 动 径向轴承 $u_1 = R\omega_1, u_2 = r\omega_2$ $\frac{\partial h}{\partial t} = \omega_2 \frac{\partial h}{\partial \theta}$		稳定载荷 $\frac{\partial}{\partial \theta} (\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta}) + \frac{D^3}{4} \frac{\partial}{\partial z} (\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z}) = 6(\omega_1 + \omega_2) R^2 \frac{\partial h}{\partial \theta}$
			循环载荷 $\frac{\partial}{\partial \theta} (\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta}) + \frac{D^3}{4} \frac{\partial}{\partial z} (\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z}) = -6R^2 \alpha(\omega_c - 2 \frac{d\phi}{dt}) \sin\theta + 12R^2 c (\frac{d\epsilon}{dt}) \cos\theta$
气	二 维 流 动 止推轴承 $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ $u_1 = r\omega_1, u_2 = r\omega_2$		$\frac{\partial}{\partial r} [(\frac{rh^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r})] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} [(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \theta})] = 6(\omega_1 - \omega_2) r \frac{\partial h}{\partial \theta}$
			径向轴承 $u_1 = R\omega_1, u_2 = r\omega_2$ $\frac{\partial h}{\partial t} = \omega_2 \frac{\partial h}{\partial \theta}$

续表 20.3-8

类别	实用实例	简图	雷诺方程
气体动力润滑	挤压膜轴承 $u_1 = u_2 = 0$		$\frac{\partial}{\partial x} [\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial z}] = 12 \eta \frac{\partial h}{\partial t}$
	止推轴承 $u_1 = r\omega_1, u_2 = r\omega_2$		$\frac{\partial}{\partial r} [(\rho h^3) \frac{\partial p}{\partial r}] + \frac{\rho h^3}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} [(\rho h^3) \frac{\partial p}{\partial \theta}] = 6 \eta (\omega_1 - \omega_2) \frac{\partial h}{\partial \theta}$

(2) 流体动力润滑的稳态性能参数

1) 承载能力

积分雷诺方程或者对雷诺方程进行数值计算, 可求得润滑膜中的压力分布。压力是位置的函数, 利用压力分布函数对整个润滑膜积分, 可得该润滑膜的承载能力。

载荷愈大, 润滑膜愈薄, 薄到 $\bar{h} < 5$ 后, 润滑状态发生转变。

2) 润滑剂流量

将速度方程沿膜厚积分得流量方程

$$\begin{aligned} q_x &= -h^3 / (12\eta) (\partial p / \partial x) + h(u_1 + u_2) / 2 \\ q_z &= -h^3 / (12\eta) (\partial p / \partial z) \end{aligned} \quad (20.3-10)$$

3) 摩擦力

依牛顿定律有

$$\tau_x = \eta (\partial u / \partial y) \quad \tau_y = \eta (\partial w / \partial y)$$

将其代入速度方程, 沿润滑膜边界面积分, 即可求出摩擦面上的摩擦力。

(3) 特征数和相似条件

1) 特征数

①雷诺数 Re 为惯性力项与黏性力项的比, 即

$$Re = -\rho u h / \eta$$

它是表征润滑膜中惯性力作用的特征数。式(20.3-6)给出的雷诺方程忽略了惯性力的作用, 所以只适用于小雷诺数的情况。高速时雷诺数增大, 应考虑惯性力的影响。雷诺数超过临界值后, 流动由层流转变为湍流, 给出的雷诺方程应予以修正。

湍流时承载能力和摩擦力均有明显增加。

②萨默菲尔德数 S 为黏性力项与压力项的比, 即

$$S = \eta m / [p (2c/d)^2] \quad (\text{圆柱面摩擦副})$$

$$S = \eta u / [pL (h/L^2)] \quad (\text{平面摩擦副})$$

它是表征黏性力项引起的动压效应, 表明承载能力的重要特征数。有时也用它的倒数, 即

$$C_F = p(2c/d)^2 / (\eta m) = p\psi^2 / (\eta m)$$

式中 ψ ——相对间隙 ($= 2c/d$)。

作为轴承的载荷特性数。

③压缩数 Λ 为可压缩流体润滑时黏性力项与压力项的比, 即

$$\Lambda = 6\eta m / [p_s (2c/d)^2] \quad (\text{圆柱面摩擦副})$$

$$\Lambda = 6\eta u / [p_s L (h/L)^2] \quad (\text{平面摩擦副})$$

它表征压缩性的影响。 Λ 较小时可忽略压缩性影响, 按液体动力润滑计算。

④挤压数 σ 为可压缩流体润滑时挤压力项与压力项的比, 即

$$\sigma = 12\eta f / [p_s L (h/L)^2]$$

f 为挤压频率。它表征润滑膜的挤压效应。当 $\sigma \geq 10$ 时应作为挤压膜支承。

⑤哈特曼数 M 润滑剂为磁流体时, 哈特曼数 M 为磁场作用的体积力项与黏性力项的比, 即

$$M = Bh (\gamma / \eta)^{1/2}$$

B 为磁感应强度, γ 为电导率。它表征磁场的作用。

⑥克努森数 K 是气体分子平均自由程与膜厚之比, 即

$$K = l_p / h$$

它表征平均自由程的影响。膜厚小于分子平均自由程的100倍时，应考虑边界面上气体的滑移。

2) 相似条件

进行模型试验应符合相似条件。流体动力润滑的相似条件包括几何相似、运动相似和动力相

似等，一些重要的特征数，如 S 、 Λ ，应取相同数值。

以滑动轴承为例，满足相似条件时各物理量的对应关系和相似因子见表 20.3-9。

表 20.3-9 滑动轴承的相似条件

项目	实物	模型	项目	实物	模型	项目	实物	模型	项目	实物	模型
直径	D	$\delta_1 D$	黏度	η	$\delta_2 \eta$	角速度	ω	$\delta_3 \omega$	摩擦力	F_v	$\delta_4 \delta_1 \delta_3 F_v$
宽度	B	$\delta_1 B$	压力	p	$\delta_2 p$	流体速度	v	$\delta_3 v$	摩擦因数	μ	$(\delta_1 / \delta_2) \mu$
间隙	h	$\delta_1 h$	环境压力	p_a	$\delta_2 p_a$	流体速度	w	$\delta_3 w$	摩擦转矩	T	$\delta_4 \delta_1^2 \delta_3 T$
密度	ρ	$\delta_1 \rho$	特征速度	u	$\delta_2 u$	载荷	F	$\delta_4 \delta_1^2 F$	流量	q	$\delta_4 \delta_1 \delta_3 q$

(4) 湍流动力润滑方程

用雷诺数 Re 判断流动是否进入湍流，表 20.3-10 列出滑动轴承的临界雷诺数值。

表 20.3-10 临界雷诺数的近似值

轴承类型	不完全湍流	完全湍流
径向轴承	$41.1 / \psi^{1/2}$	$(100 \sim 150) / \psi^{1/2}$
推力轴承	580~800	1 000~2 000

流动为湍流时，应对式 (20.3-6) 的雷诺方程进行修正，成为

$$\frac{\partial}{\partial x} [h^3 / (k_x \eta) \frac{\partial p}{\partial x}] / \partial x + \frac{\partial}{\partial z} [h^3 / (k_z \eta) \frac{\partial p}{\partial z}] / \partial z = 6(u_1 - u_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (20.3-11)$$

式中

$$k_x = 1 + 0.001 16 Re^{0.916}$$

$$k_z = 1 + 0.001 20 Re^{0.854}$$

(5) 流体动力润滑径向轴承的稳定性

在滑动轴承上旋转的轴可能出现振动，实践表明径向轴承对转子振动起主要作用，所以只讨论径向轴承的稳定性。

径向轴承油膜提高了系统的挠性并引入了阻尼。但有时油膜会激起振动，或不能限制外界所激起的振动。

转子振动现象比较复杂，其原因包括转子、轴承和轴承的支承结构。

1) 轴承振动的特性

当转速低于 2 倍（一阶）临界转速时，涡动频率稍低于轴转速的 1/2，称作半速涡动。当转

速超过 2 倍临界转速后，涡动频率与转速无关，始终约等于临界转速，称作共振振荡。油膜振荡频率与轴角速度的关系见图 20.3-13。

油膜振荡是自激振荡，振荡一旦发生，就在很宽的转速范围内存在。半速涡动振幅较小，共振振荡振幅大，将造成轴承损坏。

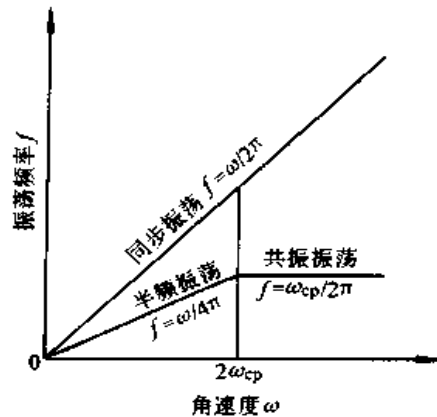


图 20.3-13 轴承振动的频率

轴承振动的特性列于表 20.3-11。

2) 消除油膜振荡的措施

采用稳定性好的轴承结构是最常用和最有效的消除油膜振荡措施。对给定结构的轴承，则可通过改变轴承载荷（压力）、间隙、润滑剂黏度和轴瓦宽度等参数，使萨默菲尔德数 S 增大或减小，使工况处于轴承的稳定工作区。

各种结构的动力润滑径向轴承的承载能力、稳定性及阻尼特性与圆形轴承的比较，见表 20.3-12。

表 20.3-11 轴承振动的特性

项目	引起振动的原因	角频率	发生振动的转速范围	维持振动的转速范围	涡动方向	轴线涡动轨迹	振幅	
振荡种类	半速涡动	油膜力	$\approx \omega/2$	$< 2\omega_{cp}$	$\omega_s \sim 2\omega_{cp}$	轴转向	封闭	较小
	共振振荡	油膜力	$\approx \omega_{cp}$	$\geq 2\omega_{cp}$	$\geq 2\omega_{cp}$	轴转向	发散	较大
	不平衡振动	机械力	ω	全部	全部	轴转向	封闭	变化的

注： ω_c 为失稳角频率。

表 20.3-12 各种动力润滑径向轴承的稳定性比较

轴承类型	圆轴承	多槽圆轴承	有抑制槽轴承	椭圆轴承	四油叶轴承	三油叶轴承	两油楔轴承	可倾瓦轴承
示意图								
相对承载能力	1	0.44	1	0.85	0.44	0.61	0.74	0.48
相对稳定性	1	1	1.52	1.97	2.58	3.18	4.24	5.30
相对刚度、阻尼	1	1	1	1.29	1.57	1.86	2.14	1.86
备注		适用于旋转载荷	适用于定向载荷	水平方向刚度和阻尼差			适用于单向旋转、定向载荷	动载荷可能造成支承点微动磨损

1.2.3 弹性流体动力润滑

普通流体动力润滑理论中，把摩擦表面视作刚体，并认为润滑剂黏度不随压力而改变。当两摩擦表面处于赫兹接触状态，接触压力很大时，摩擦表面产生不能忽略的局部变形，润滑剂亦出现有影响的黏度变化，如齿轮轮齿的啮合，滚动轴承中滚动体与滚道的接触以及凸轮与从动件的接触等。

高的接触压力使物体变形，线接触和点接触变成面接触。依靠润滑剂与摩擦表面的粘附作用，两接触物体滚动和（或）滑动时，将润滑剂带入它们之间的间隙，接触面上出现平行缝隙，并在除进油口外的接触面边缘上出现突起，阻碍润滑剂流出，从而形成很高的油膜压力（见图 20.3-14）。

弹性流体动力润滑理论研究在相互滚动或伴有滑动的滚动条件下，两弹性物体间的流体动力润滑膜的力学性质。把计算在油膜压力下摩擦表面变形的弹性方程、表述润滑剂黏度与压力之关系的黏压方程 [见式 (20.4-4)] 与流体动力润滑的有关方程结合起来，以求油膜压力分布、润滑膜厚度分布、摩擦力和温升等性能参数。

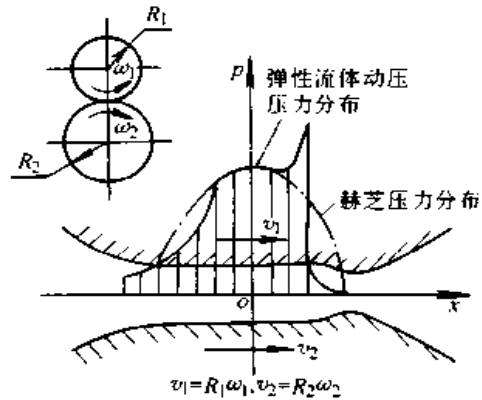


图 20.3-14 弹性流体动力润滑的压力分布

求解弹性流体动力润滑问题一般只能采用数值计算，要建立润滑膜中的压力分布和表面局部变形之间的相容。比较简单的迭代过程见图 20.3-15，先初定一初始膜厚分布函数，并把它引入与接触状况相适应的雷诺方程中，通过计算得出压力分布。再把这压力分布函数引入适当的弹性方程，求出各处的弹性变形量，获得新的膜厚分布。然后，用此分布去修正初始膜厚分布。重复上述过程，直至前后两个膜厚分布之差异降到允许值之下为止。

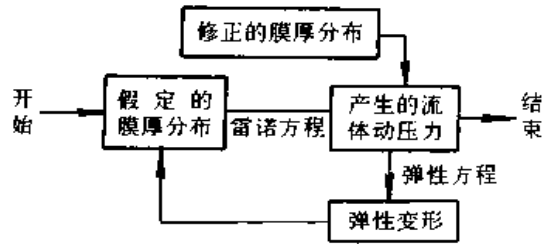


图 20.3-15 弹性流体动力润滑计算迭代过程

(1) 基本参数

在弹性流体动力润滑理论中有 3 个重要的设计参数，即

载荷参数 $\bar{F} = F_N / (E'R L)$ (线接触)
 $\bar{F} = F_N / (E'R_r^2)$ (点接触) (20.3-12)

速度参数 $\bar{u} = \eta_0 u / (E'R)$ (线接触)
 $\bar{u} = \eta_0 u / (E'R_r)$ (点接触) (20.3-13)

材料参数 $\bar{E} = \alpha E'$ (20.3-14)
 $E' = 2E_1 E_2 / [(1 - \nu_1^2) E_2 + (1 - \nu_2^2) E_1]$
 $R = R_1 R_2 / (R_2 \pm R_1)$
 $u = (u_1 + u_2) / 2$

式中 R ——当量曲率半径；
 R_1 、 R_2 ——摩擦副表面 1、2 的曲率半径；
 E' ——综合弹性模量；
 E_1 、 E_2 ——摩擦副表面 1、2 材料的弹性模量；

ν_1 、 ν_2 ——摩擦副表面 1、2 材料的泊松比；
 u ——平均（卷吸）速度；
 u_1 、 u_2 ——摩擦副表面 1、2 的运动速度；
 R_r ——运动方向有效半径；
 L ——接触线长度；
 η_0 ——常压下润滑剂黏度；
 α ——润滑剂压黏指数；

(2) 基本公式

弹性流体动力润滑的基本公式是最小油膜厚度计算公式。根据考虑的因素不同，有 4 种类型的计算公式。既不考虑弹性变形，也不考虑黏度随压力变化的基本公式称作 Martin 方程（线接触）和 К а л и ц а 方程（点接触）；不考虑弹性变形，但计入黏度变化的，称作 Blok 方程；计入弹性变形，但不考虑黏度变化的，称作 Herrebrugh 方程；弹性变形和黏度变化同时考虑的，有 Dowson 等方程。弹性流体动力润滑线接触最小油膜厚度计算公式见表 20.3-13，点接触最小油膜厚度计算公式见表 20.3-14。

由最小油膜厚度计算公式可知：

- 1) 载荷对油膜厚度的影响很小；
- 2) 速度对油膜厚度的影响较大；
- 3) 材料对油膜厚度的影响与速度相当，为了获得较厚的油膜，应选用压黏指数 α 大的润滑剂。

表 20.3-13 线接触最小油膜厚度计算公式

有量纲的表达式	量纲为 1 的表达式	备注
$h_m = 2.65 \alpha^{0.54} (\eta_0 u)^{0.7} R^{0.43} E'^{-0.03} (F_N/L)^{-0.13}$	$\bar{h}_m = 2.65 \bar{E}^{0.54} \bar{u}^{-0.7} \bar{F}^{-0.13}$	道森(D. Dowson)公式
$h_m = 1.95 (\alpha \eta_0 u)^{0.73} R^{0.36} E'^{0.09} (F_N/L)^{-0.09}$	$\bar{h}_m = 1.95 (\bar{E} \bar{u})^{0.73} \bar{F}^{-0.09}$	格鲁宾(A. Г р у б и н)公式
$h_m = 3K \alpha^n (\eta_0 u)^{-0.5n} R^{-n} (F_N/L)^{1-5n}$, $n = 2.5K - 3.6K + 1.9$ $K = \{ [g E'^{-0.5} (\eta_0 u)^{-0.5} R^{-0.5} (F_N/L)] \} / \{ [g \alpha (\eta_0 u)^{-0.5} R^{-0.5} (F_N/L)^{1.5}] \}$		张鹏顺公式

注：1. $\bar{h}_m = h_m / R$ —量纲为 1 的最小油膜厚度。2. $K > 1$ 时取 $K = 1$ ； $K < 5/9$ 时取 $K = 5/9$ 。

表 20.3-14 点接触最小油膜厚度计算公式

有量纲的表达式	量纲为 1 的表达式	备注
$h_m = 2.04 (\alpha \eta_0 u)^{0.74} R_r^{0.407} (F_N/E')^{-0.074} [1 + 2R_y / (3R_r)]^{-0.74}$	$\bar{h}_m = 2.04 (\bar{E} \bar{u})^{0.74} \bar{F}^{0.074} [1 + 2R_y / (3R_r)]^{-0.74}$	阿查德(J. Archard)公式
$h_m = 3.63 \alpha^{0.49} (\eta_0 u)^{0.68} E'^{-0.117} R_r^{0.466} F^{-0.073} (1 - e^{-0.68k})$	$\bar{h}_m = 3.63 \bar{E}^{0.49} \bar{u}^{0.68} \bar{F}^{0.073} (1 - e^{-0.68k})$	道森(D. Dowson)公式
$h_m = (2.63 - 0.98R_x/R_y) (\alpha \eta_0 u)^{0.75} R_r^{0.416} (F_N/E')^{-0.083}$	$\bar{h}_m = (2.63 - 0.98R_x/R_y) (\bar{E} \bar{u})^{0.75} \bar{F}^{-0.083}$	加拉霍夫(M. Г а л а х о в)公式

注：1. $\bar{h}_m = h_m / R_x$ —量纲为 1 的油膜厚度；2. $k = a/b$ ， a —横向半轴， b —运动方向半轴。

(3) 应用范围

令 $q_E = \bar{F}/u^{1/2} = F / [(E'R)^{1/2} (\eta_0 u)^{1/2} L]$ (20.3-15)

它不包含确定黏度变化的压黏指数 α ，称为弹性参数。令

$q_\alpha = \bar{E} \bar{F}^{3/2} / u^{1/2} = \alpha F^{3/2} / [RL^{3/2} (\eta_0 u)^{1/2}]$ (20.3-16)

它不含综合弹性模量 E' ，称为黏性参数。

以 q_E 为横坐标， q_α 为纵坐标可将弹性动力润滑分为 4 个区域，见图 20.3-16，各区适用的基本方程列于表 20.3-15。

1.2.4 流体静力润滑

流体静力润滑是将泵加压后的流体（或其他压力流体源），通过补偿元件，送入两摩擦表面之间，利用流体的静压力来平衡外载荷。

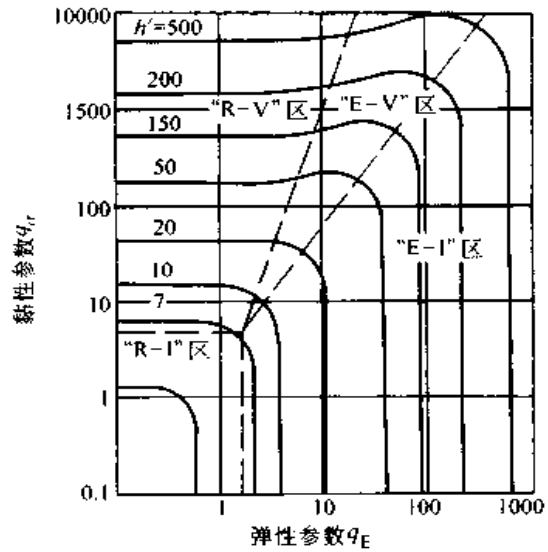


图 20.3-16 弹性动力润滑区域图

表 20.3-15 弹流公式的适用区域

区 域	R-I	R-V	E-V	E-I
膜厚公式	$\bar{H} = 4.9$	$\bar{H} = 1.66 q_\alpha^{2/3}$	$\bar{H} = 2.65 q_E^{0.06} q_\alpha^{0.54}$	$\bar{H} = 3.10 q_E^{0.8}$
公式名称	马丁(H. Martin)方程	布洛克(H. Blok)方程	道森(D. Dowson)方程	赫雷布拉夫(K. Herrebrugh)方程
说 明	刚性接触等黏度	刚性接触变黏度	弹性接触变黏度	弹性接触等黏度

注：量纲为 1 的膜厚参数 $\bar{H} = \bar{h}_m \bar{F} / u$ 。

两个静止的、平行的摩擦副表面间，能依靠流体静力润滑形成流体膜。它的承载能力基本不依赖于流体的黏度，也不依赖于两表面的相对运动，故能用极低黏度的润滑剂，使只有极低速度的摩擦副，具有很高的承载能力和很低的摩擦力。

(1) 基本方程

流体润滑的基本方程仍是雷诺方程，只是可以根据流体静力润滑的特点对方程作些简化。

对于等厚润滑膜（例如导轨和止推轴承），在转速不很高时，因为 h 是常量，忽略速度的影响 ($v=0$)，则雷诺方程简化为拉普拉斯方程

$\partial^2 p / \partial x^2 + \partial^2 p / \partial z^2 = 0$ (20.3-17)

(2) 补偿元件

1) 分类

补偿元件分恒流量元件和节流器两大类。节流器需要恒压力供油，故流体静力润滑分为恒压力供油和恒流量供油两种。

恒流量元件有定量泵和定量阀。

节流器有：管式节流器，其特性尺寸是管径

与管长；缝式节流器，其特性尺寸为缝宽、缝长和缝隙尺寸；孔式节流器，其特性尺寸为孔的面积 ($\pi d^2/4$ ，称小孔节流) 或孔与摩擦副间隙构成的环面 (πdh ，称环面节流)。

节流器的特性尺寸可以是固定的，也可以是可调的，还可以做成能随膜厚变化或油腔压力变化自动调整的，后者称为反馈式节流器。

2) 压力比

在设计状态下，节流器出口、进口压力之比称为压力之比，即

$\bar{p}_0 = p_0 / p_s$ (20.3-18)

式中 p_0 ——设计状态下节流器出口压力，即设计状态下的油腔压力；

p_s ——节流器进口压力，即供油压力。

它是流体静力润滑最重要的设计参数，对静压膜有很大影响。

3) 补偿性能

油腔压力决定油垫的承载能力，它与膜厚的关系表征支承刚度的大小及其变化情况，故油腔

压力与膜厚的关系反映补偿元件的补偿性能。 表 20.3-16。

几种补偿元件的油膜压力与膜厚的关系式见

表 20.3-16 几种补偿元件油膜压力与膜厚的关系式

补偿元件	小孔节流器	管式节流器	缝式节流器	定量阀
关系式	$\bar{p} = 2 / [1 + \{1 + 4a(1+a)(\eta_0/\eta)^2(\rho/\rho_0)\bar{h}^0\}^{1/2}]$	$\bar{p} = 1 / (1 + a\bar{h}^3)$		$\bar{p} = 1 / [(1+a)\bar{h}^3]$
说明	$\bar{p} = p/p_0$, p —油腔压力, p_0 —供油压力; $\bar{h} = h/h_0$, h —膜厚, 即间隙, h_0 —设计状态下膜厚; $a = (1 - \bar{p}_0) / \bar{p}_0$ —压力比因子, ρ_0, η_0 —设计状态下油腔内润滑油的密度与黏度			

缝式和管式节流器, $\bar{p}_0 = 0.5$ 时获得最大刚度; 小孔节流器, $\bar{p}_0 = 0.586$ 时刚度最大; 恒流量供油, 若 $\bar{p}_0 = 0.250$, 则在 $\bar{h} = h/h_0 = 1$ 时刚度和缝式与管式节流相同, 若 $\bar{p}_0 = 0.333$, 则在 $\bar{h} = 1$ 时刚度和小孔节流相同。图 20.3-17 给出 \bar{p}_0 为上述值时各种补偿元件形成的承载能力、流量和刚度与膜厚的关系曲线。

(3) 油垫

环境压力包围的、有供油孔的摩擦表面(通常供油孔设在静止的支承件上)称作油垫。为了提高流体静力润滑摩擦副的承载能力, 常在油垫上设置凹的油腔(图 20.3-18, a)、油腔的四周(未凹的表面)是封油面。一个油垫可以有 1 个以上的油腔。一个单油腔油垫不能承受倾覆力矩。

为了有高的运动的稳定性, 油垫内油的容积不宜过大, 因而油腔不宜过深。还可以用岛式油腔(见图 20.3-18b)代替全凹式油腔, 以减少油腔内油的容积。

(4) 功耗

流体静力润滑除摩擦功耗外还有提供压力油的泵功耗, 总的功耗是

$$P = P_\mu + P_p$$

摩擦功耗与泵功耗之比称为功耗比 G , 即

$$G = P_\mu / P_p \quad (20.3-19)$$

当摩擦副的设计间隙确定之后, 根据使总功耗最低的原则, 应使 $G = 1$ 来选择润滑剂黏度, 这时

$$\eta = \rho_s h_0^2 / u \cdot \sqrt{q_d / [a(a+1)A_\mu]} \quad (20.3-20)$$

$$a = (1 - \bar{p}_0) / \bar{p}_0$$

式中 u ——切向速度;

\bar{q}_d ——油垫流量因子;

a ——压力比因子;

A_μ ——摩擦面积, 低速时取 A_μ 为封油面积, 高速时再加上 20% ~ 25% 的油腔面积。

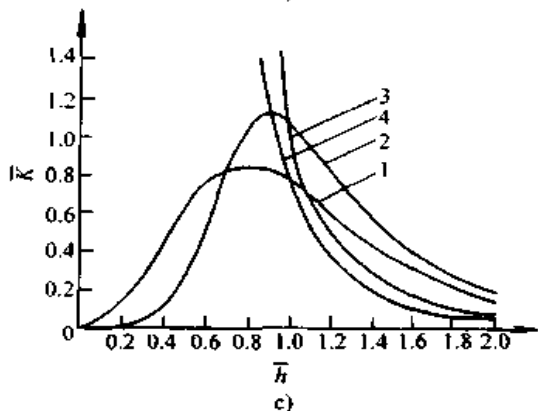
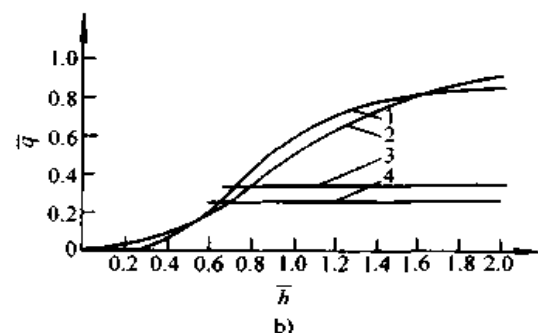
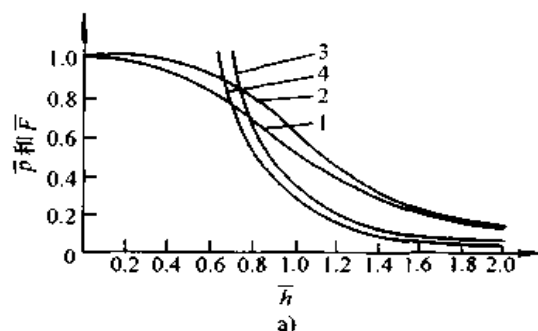


图 20.3-17 各种补偿元件形成的承载能力、流量和刚度与膜厚的关系曲线

a) 承载能力 b) 流量 c) 刚度

1—管式节流器, $\bar{p}_0 = 0.500$ 2—小孔节流器, $\bar{p}_0 = 0.586$
3—恒流量供油, $\bar{p}_0 = 0.333$ 4—恒流量供油, $\bar{p}_0 = 0.250$

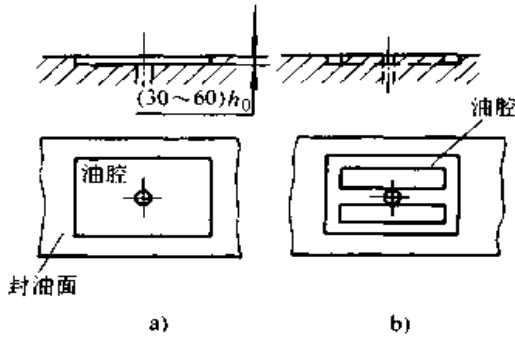


图 20.3-18 静力润滑油垫
a) 全凹式油腔 b) 岛式油腔
 h_0 —设计间隙

1.3 复(混)合润滑

由于工程表面都有一定的粗糙度和波度，当润滑膜的厚度较薄时，局部表面的轮廓峰可能穿透润滑膜而直接接触，形成干摩擦。在它们周围有一些表面处于边界膜接触，属于边界润滑。仍有一些区域处于流体膜润滑状态。这样的润滑状态称为混合润滑状态。

在润滑油或润滑脂中加入一定量的固体润滑剂，构成油-固复合润滑。

2 机械零件的流体膜润滑计算

2.1 滑动轴承的润滑计算

滑动轴承可以采用流体动力润滑，称为动压轴承，也可以采用流体静力润滑，称为静压轴承，或者同时采用两种润滑方式，称为动静压轴承。它们的计算方法参见第 3 卷第 25 篇，滑动轴承。

2.2 滚动轴承弹性流体动力润滑计算

一般滚动轴承处于混合润滑状态，但可以实现弹性流体动力润滑，在弹流润滑状态下的寿命比一般滚动轴承长数倍。

球轴承为点接触，滚子轴承为线接触。受载最大之滚动体的载荷为

$$F = F_r / [J_r(\epsilon) z \cos\beta] \quad (20.3-21)$$

式中 F_r ——滚动轴承的径向载荷；

$J_r(\epsilon)$ ——径向载荷分布积分；

z ——滚动体数目；

β ——接触角。

当量曲率半径为

$$R = D_b [1 \pm r] / 2 \quad (20.3-22)$$

$$r = (D_b / D_m) \cos\beta$$

式中 D_b ——滚动体直径；

D_m ——滚动轴承平均直径或滚动体中心所在圆直径。

式中 ‘+’ 号用于外圈，‘-’ 号用于内圈。平均速度为

$$u = \pi n D_m (1 - r^2) / 120 \quad (20.3-23)$$

式中 n ——内圈转速。

根据计算所得 F 、 R 、 u 、轴承材料的弹性模量与泊松比和润滑剂黏度，计算出弹性参数和黏性参数，按图 20.3-16，视其所在区域选定适用的公式，进行计算。

若向心轴承接触应力的最大值不超过 1.72 GPa，不考虑接触椭圆的影响，则可用下述简化公式计算球和滚子轴承的最小油膜厚度，计算误差不会超过 $\pm 10\%$ ：

$$h_{min} = KD(\alpha\eta_0 n)^{0.74} \quad (20.3-24)$$

式中 h_{min} ——最小油膜厚度(μm)；

K ——取决于轴承类型的常数，见表 20.3-17；

D ——轴承外径(m)；

α ——润滑剂的压黏指数，其值见表 20.4-3(m^2/N)；

η_0 ——润滑油在大气压下的黏度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)；

n ——轴承转速(r/s)。

表 20.3-17 滚动轴承的 K 值

轴承类型	K	
	内圈	外圈
球轴承	2.47×10^6	2.69×10^6
调心轴承和圆柱滚子轴承	2.39×10^6	2.57×10^6
圆锥滚子轴承和滚针轴承	2.29×10^6	2.42×10^6

2.3 齿轮传动的弹性流体动力润滑计算

一般齿轮传动处于混合润滑状态，但可以实现弹性流体动力润滑，较大型的蜗杆传动还可采用液体静力润滑。

图 20.3-19 表示一对渐开线齿轮的啮合，轮齿在 K 点啮合，设啮合点 K 与节点 P 的距离为 s ，则两个当量圆柱的半径分别为

$$R_1 = r_1 \sin \alpha + s$$

$$R_2 = r_2 \sin \alpha - s$$

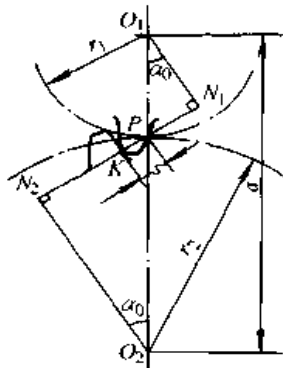


图 20.3-19 渐开线齿轮

这样，当量曲率半径为

$$R = (r_1 \sin \alpha + s)(r_2 \sin \alpha - s) / [(r_1 + r_2) \sin \alpha] \quad (20.3-25)$$

两齿面相对于啮合点 K 的速度分别为：

$$u_1 = \pi n_1 (r_1 \sin \alpha + s) / 30$$

$$u_2 = \pi n_2 (r_2 \sin \alpha - s) / 30$$

因而，两个当量圆柱在啮合点处的平均速度为

$$u = \pi n_2 [r_2 \sin \alpha + s(1 - i) / 2] / 30 \quad (20.3-26)$$

由于接触点不断变化，由式(20.3-25)、(20.3-26)可知，齿面曲率半径和切向速度随啮合点而不断变化，因而润滑膜厚亦不断变化。将式(20.3-25)、(20.3-26)代入道森公式，求得齿轮在啮合循环中油膜厚度的变化情况，见图 20.3-20。

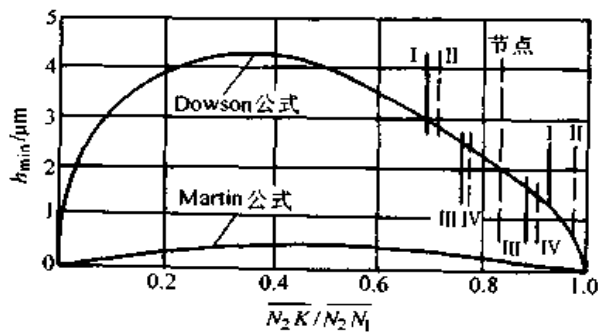


图 20.3-20 啮合循环中油膜厚度的变化

- I — $m = 5.08 \text{ mm} (\rho = 5/\text{in})$ 的 B.S.S. 规范齿形
- II — $m = 5.08 \text{ mm} (\rho = 5/\text{in})$ 的标准齿形
- III — $m = 2.54 \text{ mm} (\rho = 10/\text{in})$ 的 B.S.S. 规范齿形
- IV — $m = 2.54 \text{ mm} (\rho = 10/\text{in})$ 的标准齿形

计算结果表明：当齿轮传动比很大时，啮合循环中的最小油膜厚度约为节点啮合油膜厚度的

1/2，而当传动比接近 1 时，最小油膜厚度与节点啮合油膜厚度接近。因而，节点啮合油膜厚度具有一定的代表性，故齿轮传动润滑计算通常以节点啮合油膜厚度为依据。

齿轮传动一般为线接触，若不考虑接触线法向速度引起的挤压效应，在节点处用道森公式得到圆柱齿轮传动节点啮合最小油膜厚度公式为

$$h_{\min} = 4.38 \times 10^6 \alpha^{0.54} (d_1 \sin \alpha_n)^{1.13} (\eta_0 n_1)^{0.77} u / (u + 1)^{0.43} \times E'^{-0.037} [bd_1 \cos \alpha_n / (2T_1)]^{0.13} \cos^{-1.56} \beta \quad (20.3-27)$$

式中 h_{\min} ——节点处最小油膜厚度 (μm)；

d_1 ——小齿轮节圆直径 (m)；

α_n ——法向压力角；

n_1 ——小齿轮转速 (r/s)；

u ——齿数比；

b ——齿轮啮合宽度 (m)；

T_1 ——小齿轮转矩 (Nm)；

β ——轮齿螺旋角。

锥齿轮传动节点啮合最小油膜厚度公式为

$$h_{\min} = 4.38 \times 10^6 \alpha^{0.54} [(1 - \psi_R / 2) d_{e1} \sin \alpha_n]^{1.13} (\eta_0 n_1)^{0.7} \times E'^{-0.037} [bd_{e1} \cos \alpha_n / (2T_1)]^{0.13} \times [u^{0.335} / (u^2 + 1)^{1.06}] \times \cos^{-1.56} \beta_m \quad (20.3-28)$$

式中 ψ_R ——齿宽因子；

d_{e1} ——小齿轮大端节圆直径；

β_m ——齿宽中点轮齿螺旋角。

2.4 凸轮机构的弹性流体动力润滑计算

凸轮和其从动件是以滑动为主的点、线接触摩擦副，可以处于混合润滑或弹流润滑状态。凸轮机构的接触应力数值很高，例如内燃机用凸轮的最大接触应力一般在 0.7~1.4 GPa，大多数处于边界润滑或部分弹流润滑状态。但是，凸轮机构仍能实现完全的弹流润滑。弹流润滑油膜厚度计算应该作为精密、高速凸轮机构，凸轮和从动件磨损性能的参数和设计凸轮轮廓型线的依据。

在凸轮的工作循环中，接触处的曲率半径、速度和载荷都是变化的，因而油膜厚度也将相应地变化。在工程设计中，凸轮机构的弹流润滑计算可按准稳定状态处理。

图 20.3-21 是最普通的平底从动件凸轮机

构、它们之间的润滑属线接触弹流润滑问题。考虑到凸轮机构通常采用钢材制造和矿物油润滑，可对线接触弹流公式作进一步简化，取 α 和 E' 为常量，而且，单位宽度上的载荷 (F_N/L) 对油膜厚度影响很小，可以忽略不计。这样，平底从动件凸轮机构的最小油膜厚度计算公式简化为

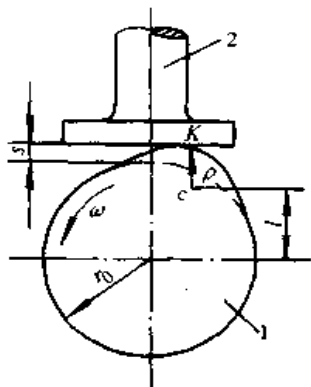


图 20.3-21 平底从动件凸轮机构

$$h_{min} = 16 (\gamma_0 \alpha R)^{1/2} \quad (20.3-29)$$

- 式中 h_{min} ——最小油膜厚度 (μm)；
 γ_0 ——大气压下润滑剂黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)；
 α ——接触表面平均速度 (m/s)；
 R ——当量曲率半径 (m)。

若平底从动件作平移运动，则其切向速度 u_2 为零，而凸轮的切向速度为

$$u_1 = \omega (r_0 + s) = \omega (l + \rho)$$

- 式中 ω ——凸轮旋转的角速度；
 r_0 ——凸轮基圆半径；

- s ——平底从动件的升程；
 ρ ——接触点处凸轮型线的曲率半径；
 l ——接触点处凸轮表面曲率中心到凸轮回转中心的垂直距离。

这样，形成流体动压效应的平均速度为

$$u = \omega [2\rho - (r_0 + s)] / 2$$

凸轮与从动件接触处的当量曲率半径 $R = \rho$ ；

将 u 和 R 代入式(20.3-29)，引入几何参数

$$N = \rho / (r_0 + s)$$

称其为凸轮机构弹流润滑特性数，则平底从动件凸轮机构间的最小油膜厚度简化计算式为

$$h_{min} = 16 (r_0 + s) (\omega \gamma_0 / 2)^{1/2} (12N^2 - N)^{1/2} \quad (20.3-30)$$

3 机械零件的润滑设计

3.1 滑动轴承的润滑设计

滑动轴承种类繁多，使用条件和重要程度均差异很大，润滑状态又有流体润滑、边界润滑、混合润滑和固体润滑多种类型，因此，各种滑动轴承对润滑剂的要求与设计原则亦不相同，作润滑设计时必须了解设计对象的工况参数与特征。

3.1.1 润滑剂的选择

(1) 润滑剂种类的选择

滑动轴承可以采用润滑油、脂、气体润滑剂和固体润滑剂，润滑剂种类的选择见表 20.3-18。

表 20.3-18 各种润滑剂在滑动轴承中的应用范围

润滑剂种类	应用范围	备注	
固体润滑剂	低速；环境温度超过液体润滑剂工作范围；对冷却作用无要求的场合	磨损不可避免，轴承寿命有限，摩擦损失较高	
润滑脂	速度不超过 1~2 m/s；环境不清洁；对冷却作用无要求的场合	速度高而环境不清洁时，宜用带精过滤器的循环润滑	
液体润滑剂	矿物油	各种载荷和速度，但对环境温度有限制	黏度范围广；某些添加剂有腐蚀作用
	合成油	各种载荷和速度，适宜较高或较低的环境温度和防火要求的场合	现有合成油的黏度范围有限；价格较高
	水或经处理的液体	要求防止油污染，如食品、纺织、药品等机械	要特别注意轴承材料的选择和设计
气体润滑剂	速度特别高；极端环境温度的场合。但承载能力低	加工精度要求较高；无油污染	

(2) 润滑油黏度的选择

为适应滑动轴承高转速、小间隙对润滑的要求，生产有主轴油（F组），它是以精制矿物油为基础油，加入抗氧、油性、抗磨、防锈和抗泡等添加剂制成的。这种油有FC、FD两个品种，前者是抗氧防锈型（R&O）油，后者是抗磨极压型（EP）油。滑动轴承也可以选用其它品种的油，例如汽轮机油、液压油、齿轮油等。低速、不重要、润滑油不回收的轴承也可用全损耗系统用油。流体动力润滑轴承、润滑油最重要的性质是黏度，其黏度的选择参见第3卷第25篇“滑动轴承”。

边界润滑和混合润滑滑动轴承，润滑剂最重要的性质是润滑性（油性），其次是黏度。间隙小、速度高、表面粗糙度参数值小者，选黏度低的油，选用时可参考表20.3-19。

选择润滑油时要考虑润滑油中添加剂对材料的腐蚀作用，各种金属轴瓦材料对润滑油添加剂的耐蚀性可参考表20.3-20。

表 20.3-19 边界润滑滑动轴承润滑油黏度的选择

轴颈 线速度 /m·s ⁻¹	适用润滑油黏度等级		
	轴 承 载 荷/MPa		
	<3	3~7.5	7.5~30
	工作温度 10~60℃		工作温度 20~80℃
<0.1	68、100	150	680、1 000
0.1~0.3	68	100、150	680
0.3~0.6	46、	100	460、320
0.6~1.2	68	68、100	150、220
1.2~2.0	46	68	—
2.0~5.0	32、46	—	—
5.0~9.0	15、22、32	—	—
>9.0	7、10	—	—

表 20.3-20 轴瓦用金属对添加剂的耐蚀性

轴瓦材料	铅锡合金	锡锡合金	铜铅合金 (无覆盖层)	铅青铜 (无覆盖层)	铜铅合金与铅青铜 (有覆盖层)	磷青铜	铅锡合金	银
最高工作温度/℃	130	130	170	180	170	220	170	180
极压添加剂	好	好	好	不好	好	含锌添加剂不好	好	不能用含硫添加剂
抗氧添加剂	好	好	好	好	好	好	好	好

(3) 润滑脂的选择

选择润滑脂的原则是：

- 1) 当轴承载荷大、轴颈转速低时，应选锥入度较小（号数大）的脂；
- 2) 润滑脂的滴点一般应高于工作温度 20~30℃；
- 3) 如在潮湿环境下运转，应选用钙基、石墨钙基或锂基润滑脂；如在环境温度较高的条件

下运转，应选用钙钠基脂或合成脂。

润滑脂的稠度按供脂方法参考表 20.3-21 选取。脂润滑滑动轴承的加脂周期参考表 20.3-22。

滑动轴承需要的供脂量可按下式计算

$$q = 40d \times 10^{-6} \quad (20.3-31)$$

式中 q —— 供脂量 (L/h)；

d —— 轴径 (m)。

表 20.3-21 滑动轴承润滑脂稠度的选择

供脂方法	空气压送	脂枪	压注脂杯	集中润滑			油池润滑
				阀分配系统	间接供脂系统	分支系统	
润滑脂稠度等级	0~2	~3	~5	~2	~1	~3	~6
锥入度 / (10mm) ⁻¹	385~295	>220	>130	>265	>310	>220	>85

表 20.3-22 脂润滑滑动轴承加脂周期

工作条件	偶尔工作 不重要 轴承		间断工作		连续工作			
					工作温度			
					<40℃		40~100℃	
	转速/ $r \cdot \min^{-1}$							
	<200	>200	<200	>200	<200	>200	<200	>200
加脂周期	5天1次	3天1次	2天1次	1天1次	每班1次		每班2次	

3.1.2 润滑方式

滑动轴承的润滑方式参见第3卷第25篇，滑动轴承。

3.1.3 供油槽

供油槽使轴承获得充分、均匀分布的润滑油。油槽不得有锐边，应圆滑过渡到轴瓦摩擦表面，以减小润滑油的流动阻力。

图 20.3-22 为各种类型滑动轴承供油槽的布

置。油槽一般开在轴瓦上，但也有开在轴颈上的。

图 20.3-23 是径向轴承常用油槽型式，a, b, c, d 用于轴瓦（套），e 用于轴颈。止推轴承油槽型式见图 20.3-24，a, b 用于止推瓦上，c 用于推力环上，图中箭头表示运动为单向或双向。油槽结构尺寸及与轴瓦直径的关系见表 20.3-23。

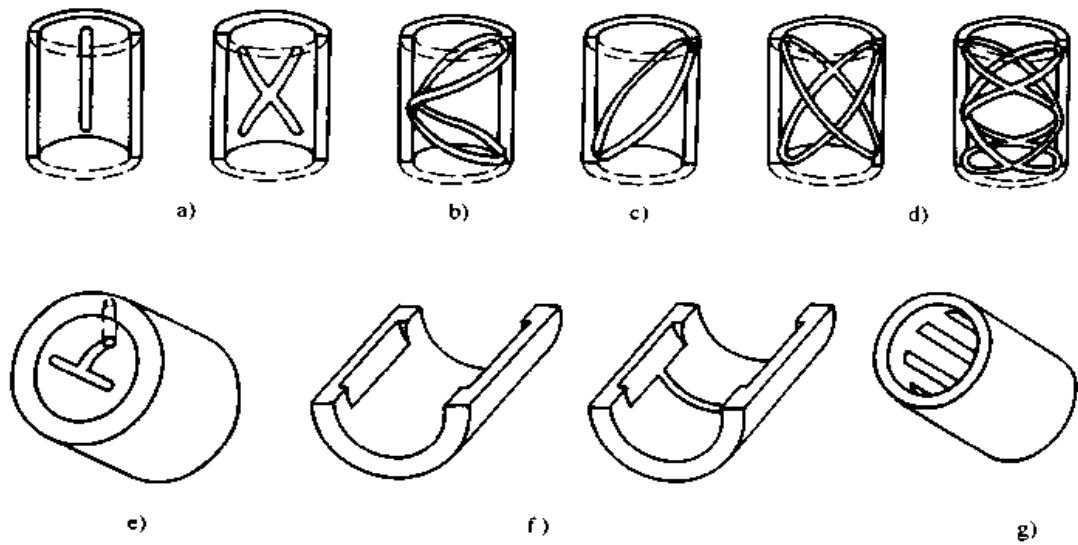


图 20.3-22 滑动轴承油槽的布置

- a) 通用式 b) 用于 1 kW 以下小电机 c) 要求润滑油供应到轴瓦端部 d) 用于脂润滑
- e) 用于大型低速轴承 f) 用于内燃机 g) 用于转速不高的脉动载荷轴承

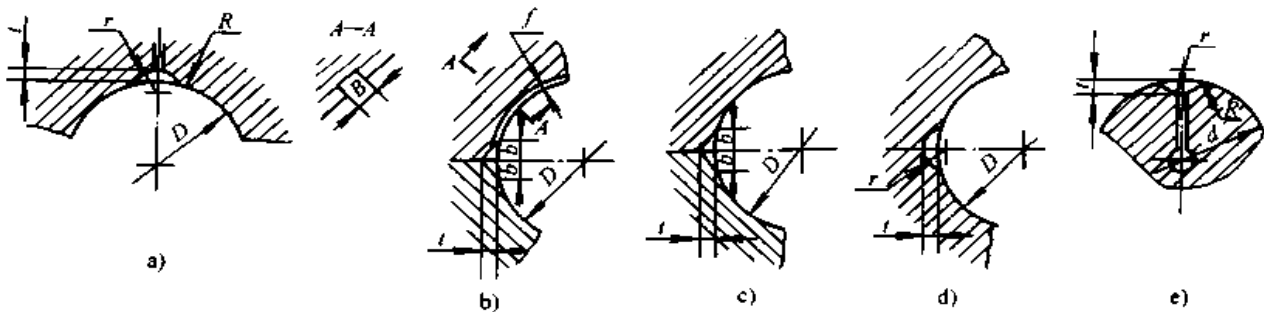


图 20.3-23 径向滑动轴承油槽型式

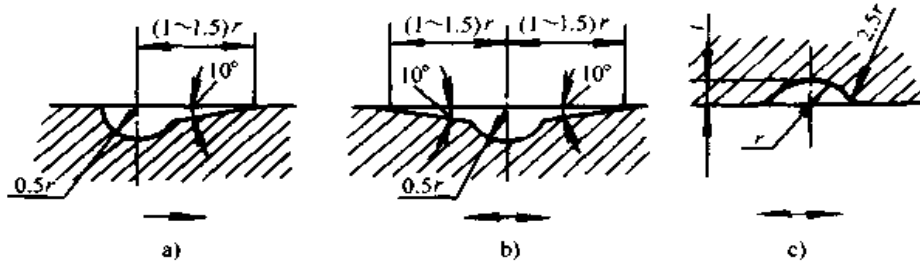


图 20.3-24 止推轴承油槽型式

表 20.3-23 油槽结构尺寸 (mm)

D(d)	~ 50			> 50 ~ 120			> 120		
t	0.8	1.0	1.6	2.0	2.5	3.0	40	5.0	6.0
r	1.0	1.6	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	12
R	1.0	1.6	6.0	10	16	20	25	32	40
B	—	—	5.0	8.0	10	12	16	20	25
f	—	—	1.6	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0	4.0
b	—	—	4.0	6.0	8.0	10	12	16	20

3.2 滑动导轨(普通导轨)的润滑设计

导轨润滑的作用除了降低摩擦、减少磨损

外, 还有避免爬行现象和防止污染导轨表面。

3.2.1 润滑剂与润滑方法

润滑剂与润滑方法见表 20.3-24。

3.2.2 润滑油的选择

由于导轨的工作条件通常是低速, 且作往复运动, 故往往处于混合润滑或边界润滑状态。根据导轨对润滑的要求, 生产具有良好防爬性、抗剪切能力和防锈性能的导轨油, 有 32、68、100 和 150 等 4 个黏度等级。一般不重要的导轨也用全损耗系统用油。

润滑油黏度可根据滑动速度和导轨宽度, 参考图 20.3-25 选取。图 20.3-26 是确定所需油量的线图。

表 20.3-24 导轨的润滑

润滑剂	润滑方法	应用
切削液	从切削区溅来	只适用于用油作切削液的机床
液压油	由液压系统供油	适用于有液压装置的机器, 如磨床。与液压装置用同一种油
全损耗系统用油	手加油、滴油、油雾润滑	速度较低、精度要求不高的导轨
导轨油	油绳、油轮、循环润滑	精度要求较高, 需避免爬行现象的导轨。注意排除空气, 避免污染
润滑脂	脂枪、脂杯, 供脂到短运动件的摩擦表面上	用于垂直导轨和低速运动导轨

根据使用经验, 机床导轨润滑油品种和黏度的选择可参考表 20.3-25。

3.2.3 提高导轨运动平稳性的措施

1) 改进加工工艺, 充分发挥其动压效应, 能大大提高滑动导轨的运动平稳性和耐磨寿命。

点(深)刮导轨是我国传统的导轨刮削工艺, 按每平方英寸多少个点, 并要保证一定深度

(例如 10 μm 或更深) 来加工与验收。

用宽(浅)刮工艺代替点(深)刮是一种提高导轨耐磨性的有效方法。它用在金属切削机床上, 可以相当有效地克服手感重、低速爬行和磨损快这三大缺点。

试验表明: 宽刮导轨的摩擦因数仅为点刮导轨的 10%~50% (见图 20.3-27); 在接触压力

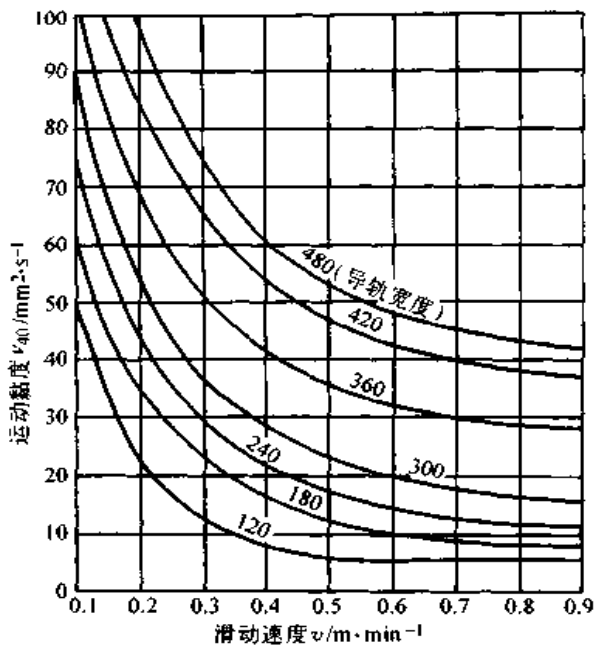


图 20.3-25 导轨润滑油黏度选用图

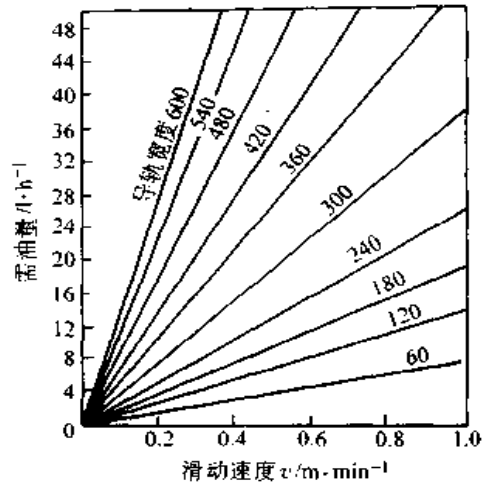


图 20.3-26 导轨润滑所需油量线图

$p = 0.0135 \text{ MPa}$ 条件下，宽刮导轨采用 L-AN10 润滑油滑鞍浮起量（表征油膜厚度），约为点刮导轨采用 L-CKB 150 齿轮油时的 2 倍；宽刮导轨的爬行临界速度比点刮导轨低，试验值列于表 20.3-26。宽刮工艺使用的刮刀刃口平宽，刮花浅，精刮时下刃仅 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 深，因而工效也高。

表 20.3-25 机床导轨润滑油品种和黏度的选择

机床类型	普通车床、铣床、钻床、拉床、滚齿机	万能磨床、外圆磨床、内圆磨床、齿轮磨床	镗床 镗铣床	大型车床	落地镗床	大型滚齿机	超重型 镗铣床
润滑油牌号	L-AN46、68	L-HM32、46	L-G68、 100、150	L-G68、 100	L-G100、 150	L-AN100	L-G150

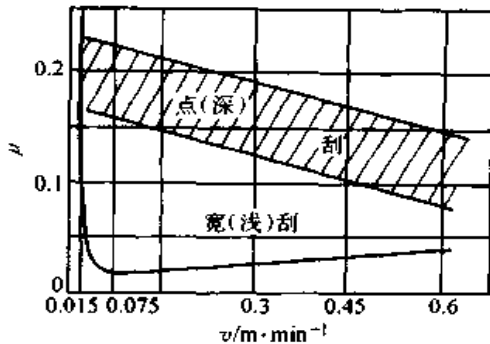


图 20.3-27 导轨两种刮削工艺的摩擦因数
润滑油：L-EQ40；载荷： $p = 0.0135 \text{ MPa}$

2) 摩擦副材料匹配得当亦能取得良好的防爬效果。抗粘附性能好的材料匹配有：铸铁对淬火钢、铸铁对塑料、钢对青铜等。尤其是聚四氟乙烯、渗入氟塑料的烧结青铜，摩擦因数极低，且动、静摩擦因数相差甚微，具有极好的防爬效果。

表 20.3-26 两种刮削工艺导轨的爬行临界速度 v_{cr} (m/min)

润滑油	载荷 p/MPa	宽(浅)刮导轨	点(深)刮导轨
无	0.013 5	0.113	0.625
	0.027 0	0.375	>0.800
L-AN 10	0.013 5	0.075	0.175
	0.027 0	0.113	0.375
L-AN 30	0.013 5	0.002 5	0.225
	0.027 0	0.073	0.375
L-ECC 10W/30	0.013 5	<0.000 03	0.625
	0.027 0	0.000 25	>0.800

3.3 滚动轴承的润滑设计

滚动轴承中除了滚动摩擦外，还有滑动摩

擦,如滚动体与保持架、保持架与内、外圈、滚动体与滚道挡边等。作润滑设计时必须考虑这些摩擦面的润滑问题。

3.3.1 润滑剂种类的选择

滚动轴承采用的润滑剂主要有润滑油和润滑脂,只有在极特殊的环境下,如超低温(-200℃以下)、高真空、高温(350℃以上),才使用固体润滑剂。

表 20.3-27 列出脂润滑或油润滑的适用条件。表 20.3-28 是常用机械设备建议选用的润滑

剂。

3.3.2 脂润滑

(1) 润滑脂的选择

选择滚动轴承润滑脂时要考虑的主要因素是:速度、载荷、温度、环境和供脂方法。可以参考表 20.3-29,根据速度、温度和环境选用滚动轴承润滑脂。

选择润滑脂时还需考虑供脂方法对脂稠度的限制。

表 20.3-27 滚动轴承脂润滑和油润滑的适用条件

工作条件	脂 润 滑	油 润 滑
温 度	一般用于 120℃ 以下。用特殊润滑脂或缩短换脂周期可达 220℃	一般用于 90℃ (油的体积温度) 或 200℃ (轴承温度) 以下。用合成润滑油可达 350℃
$dn/mm \cdot r \cdot min^{-1}$	到 0.18×10^6	到 0.3×10^6
载 荷	低到中等	低到高
轴承座设计	简单	需要较复杂的密封和供油装置
维 护	只要温度不高,无需经常注意	需经常注意
摩擦转矩	装填适当可能低于油润滑	具有吸油泵的循环润滑和油雾润滑最小
防止污染	正确的设计能防止污染物进入	循环系统中的过滤器能防止污染物进入

表 20.3-28 常用机械设备滚动轴承选用润滑剂的建议

机器种类	轴 承 参 数				选 用 润 滑 剂		换油周期 T/h	
	D/mm	$n/n_{极限}$	P/C	$\theta/^\circ C$	种类	油黏度/ $mm^2 \cdot s^{-1}$		
电 动 机	小型和中型	22~240	<0.8		50	钠脂	1 000~2 000	
	大 型	>240	<0.8	<0.1	50~80	锂脂	500~1 000	
	牵 引 用	62~240	0.8~1.0		80~120	钠、锂脂	10 000~25 000 km	
矿 车 轴 箱		62~240	<0.8	<0.1	50	钠脂	10 000~15 000 km	
搅 拌 机		>62	<0.8	<0.1	120	油	200	3 000~4 000
鼓 风 机	中等功率	62~240	<0.8	<0.1	50	锂脂		1 000~1 500
	大 功 率	>240	<0.8	<0.1	50	油	40~75	3 000~4 000
压 气 机		62~240	0.8~1.0	<0.1	50~80 80~120	钠、锂脂 油	40~75	500~1 000 3 000
离 心 机		62~240	0.8~1.0	<0.1	50	锂脂		500~1 000
绳 轮		>240	<0.8	<0.1	50	钠脂		2 000
输 送 机 辊 子		22~62	<0.8	<0.1	50	锂脂		5 000
		>62	<0.8	<0.1	50~80	钠脂		500~1 000

续表 20.3-28

机器种类	轴承参数				选用润滑剂		换油周期 T/h
	D/mm	n/n _{额定}	P/C	θ/℃	种类	油黏度/mm ² ·s ⁻¹	
粉碎机	>240	<0.8	<0.15	50	锂脂	40~75	1 000~1 500
球磨机	>240	0.8~1.0	<0.1	50~80	油		5 000
振动筛	62~240	0.8~1.0	<0.1	50~80	钠、锂脂		200~250
振动式碾压机	>62	<0.8	<0.1	80~120	锂脂		100~200
回转炉支承辊	<240	<0.8	<0.15	50	锂脂		1 500
	>240	0.8~1.0	<0.1	50	钠脂		1 500
机床	62~240	<0.8	<0.1	50	油	12~65	800~1 500
木工机械	铣床	22~62	<0.8	<0.1	50	钠、锂脂	150~200
	刨床	62~240	<0.8	<0.1	50	钠、锂脂	200~500
	排锯机	62~240	<0.8	<0.15	50~80	钠、锂脂	2 000~3 000

表 20.3-29 滚动轴承常用润滑脂适宜的速度、温度和环境

润滑脂品种	稠度等级	最高速度/极限速度	环境	工作温度/℃		基础油黏度 近似值/mm ² ·s ⁻¹	备注	
				最高	最低			
锂基脂	2	100	湿或干	100	-25	140	不宜用于 d > 65 mm 的轴承和在最高速度、最高温度下的主轴轴承	
		75		135				
	3	100		100			建议在有振动载荷、最高速度下使用	
		75		135				
极压锂基脂	1	75	湿或干	90	-15		300	推荐用于轧辊轴承和重载圆锥滚子轴承
	2	100		70	-5			
		75		90	-5			
钙基脂	1~3	50	湿或干	60	-10			有时加钙基脂 20% (质量分数)
极压钙基脂	1~2	50	湿或干	60	-5			
钠基脂	3	75~100	干	80	-30	550		合成酯基
膨润土基脂		50	湿或干	200	10	140		
		100		135	-30			
		100		120	-55			

(2) 润滑方法

滚动轴承通常在装配时在轴承内填入润滑脂以供润滑，还可以采用脂枪或压注脂杯进行手工加脂，或者采用集中供脂。

给滚动轴承填润滑脂时要注意以下几点：

1) 轴承里面要填满，如用多个轴承，它们之间的缝隙内也填满；

2) 对水平轴，外轴承盖的空隙应只填 1/2~3/4；

3) 对竖轴，上轴承盖填 1/2，下轴承盖填 3/4；

4) 在脏环境中工作的中、低速轴承把轴承和轴承盖都填满。

(3) 润滑脂补充周期

在正常的运转条件下，为补充润滑脂流失而加新脂的周期，可按轴承孔径 d 和转速 n 由图 20.3-28 确定。定期补充润滑脂的量可按式估算

$$q = 0.005DB \quad (20.3-32)$$

式中 q —— 润滑脂的补充量 (g)；

D —— 轴承外径 (mm)；

B —— 向心轴承宽度或推力轴承高度 (mm)。

(4) 润滑脂重填周期

运转时间达到润滑脂工作寿命之后，应清洗掉旧脂，重新填入新脂。图 20.3-29 给出确定重填润滑脂周期之线图。

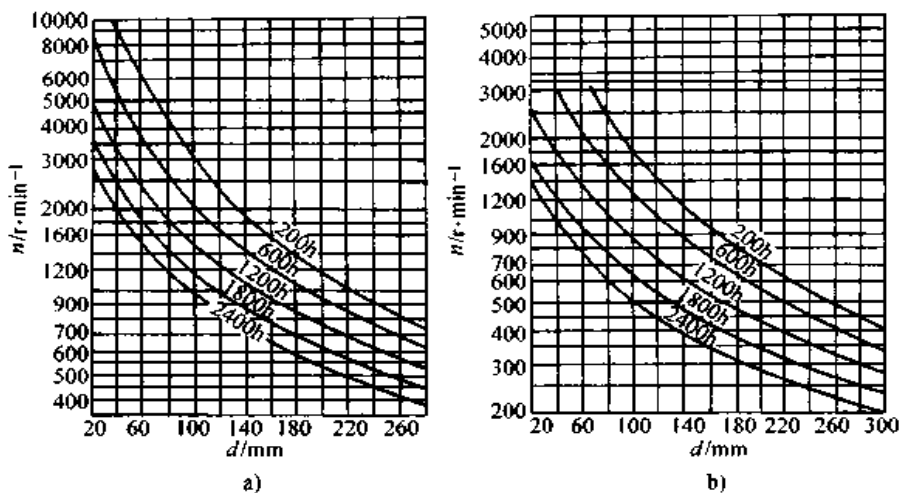


图 20.3-28 滚动轴承补充润滑脂的周期

a) 向心轴承(调心滚子轴承除外) b) 调心滚子轴承和推力轴承

3.3.3 油润滑

(1) 润滑油黏度的选取

根据轴承平均直径 d_m 、转速 n 、由图 20.3-30a 确定在工作温度下所需的润滑油黏度，再由图 20.3-30b 查得 40℃ 下该油的黏度，便可确定润滑油的黏度等级。

(2) 润滑方法

根据机器的结构、轴的位置（水平轴或竖轴）、轴承的配置、轴承转速、对润滑系统可靠性的要求、可维护性和检修周期等运转条件选择合适的润滑方法。适合于滚动轴承的油润滑方法见表 20.3-30。

3.4 齿轮、蜗杆传动的润滑设计

3.4.1 润滑方法的选择

齿轮传动适用的润滑方法与线速度有关，不同线速度下适用的润滑方法列于表 20.3-31。

(1) 油浴润滑

油浴润滑的油面高度十分重要，齿轮浸入油中的深度，最多为 3 倍齿高，最少为齿高的 1/2。

油池应有一定的储油深度，齿顶距油箱底面最少要有 50 mm。

(2) 喷油润滑

喷油润滑所需油量与齿轮传递功率成正比，每千瓦功率约需 $85 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 的油。所需喷油压力与线速度有关，可按表 20.3-32 确定。

开式齿轮传动采用喷油润滑时，通常采用间歇喷油，表 20.3-33 为推荐的喷射时间间隔和喷油量，喷油嘴布置见图 20.3-36。

3.4.2 润滑油选用

为保证齿轮传动正常运转，满足各种使用条件的要求，达到润滑齿轮的目的、特别为齿轮传动研制并生产了齿轮油。齿轮油分工业齿轮油和汽车齿轮油两大类，在工业齿轮油中又有 R&O 油、低 EP 油、高 EP 油、蜗杆传动油和开式齿轮油等。

(1) 润滑油品种的选择

闭式齿轮传动可以根据齿面最大接触应力按表 20.3-34 选择润滑油品种。

蜗杆传动尽量使用蜗杆传动专用油 L-CKE

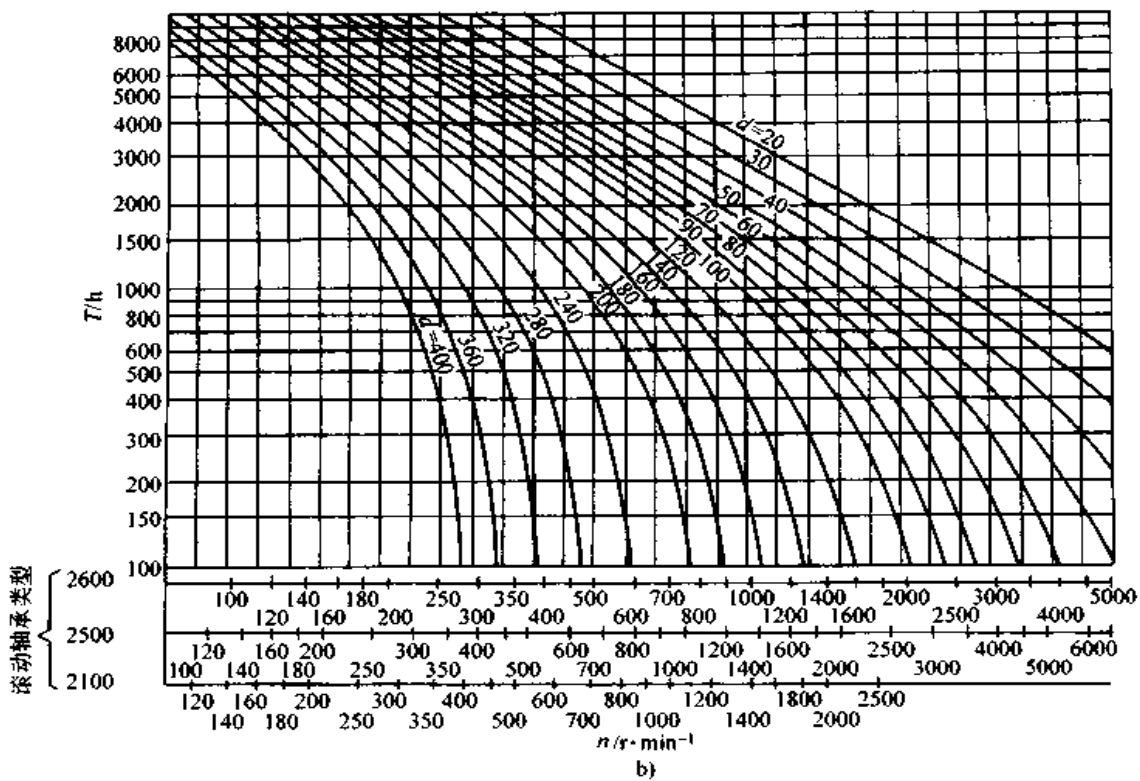
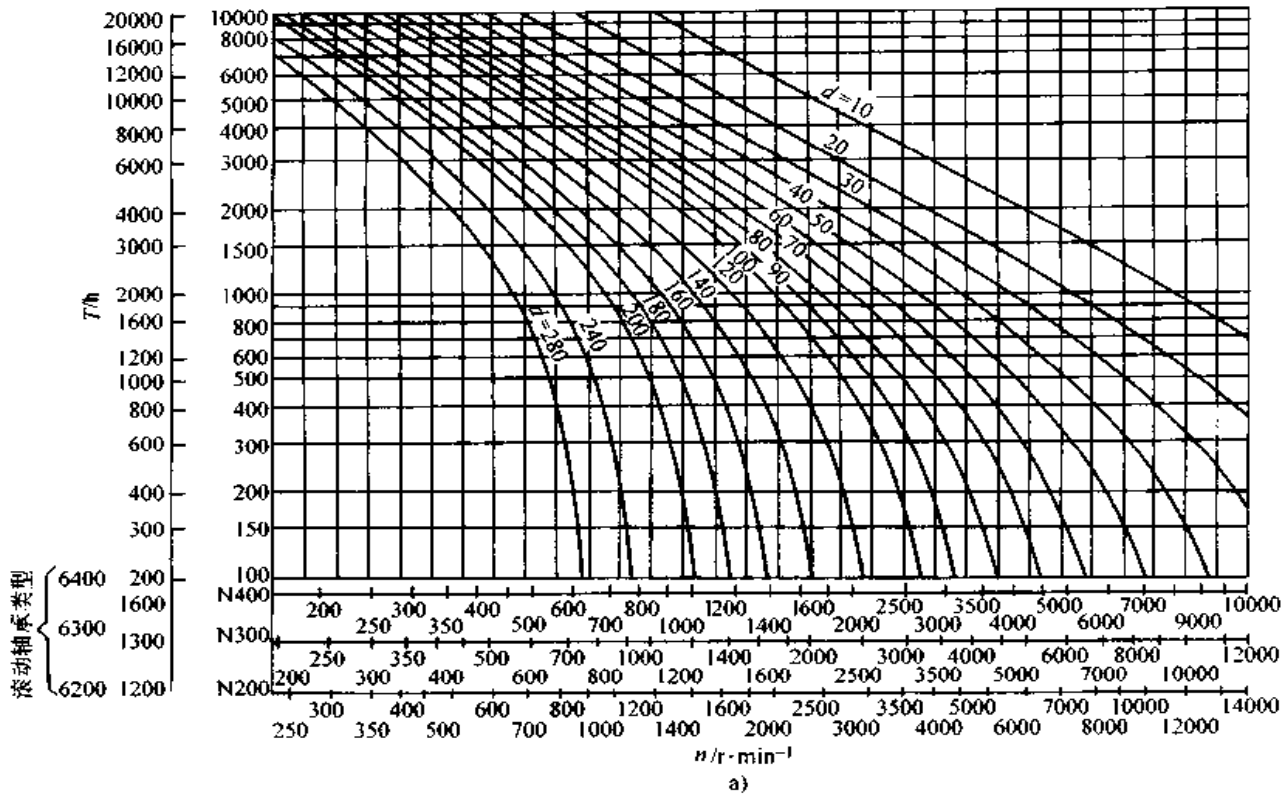


图 20.3-29 确定重填润滑脂周期的线图

a) 除调心滚子轴承外的向心轴承 b) 调心滚子轴承

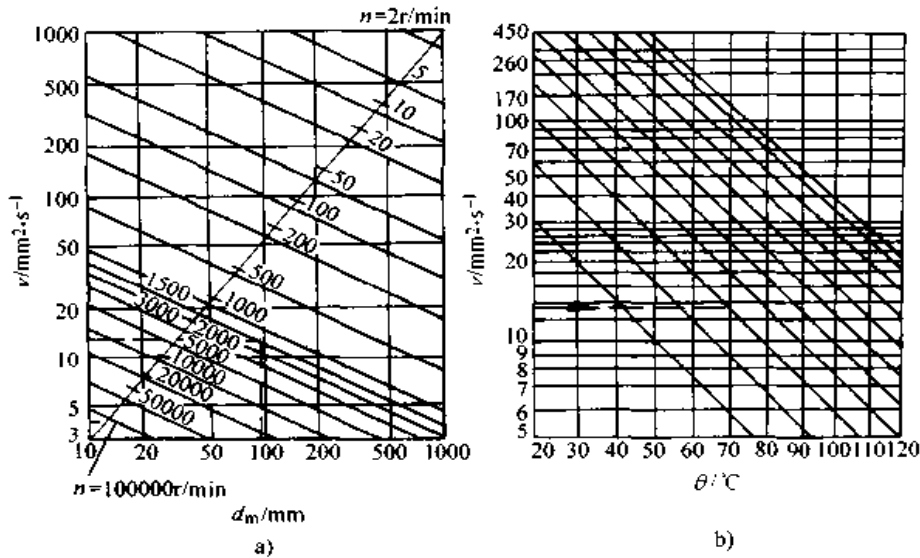


图 20.3-30 选取润滑油黏度的线图

表 20.3-30 滚动轴承的油润滑方法

润滑方法	适用条件	油面高度或油量	备注	图例
油绳	用于高速	水平轴油池可以在轴上面,也可以在轴下面;竖轴油池油面应低于轴承端面 and 密封件的密封间隙	用毛绳将油池中的油传送到带锥的套环上,再以雾状进入轴承。依据需要的流量选择油绳的截面积	图 20.3-31
油浴	通常用于低速,有时限制 dn 值为 $10^5 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$,但若搅油不成问题还可提高	滚动体下半部浸入油中,即油面到最低滚动体的中心。竖轴上用多列轴承时,油面到最下一列滚动体的中心		图 20.3-32
滴油	用于较高速度,油量必须严格控制的轴承	用油杯控制并调节油量。流量决定于具体应用,视轴承运转温度确定	成滴送下的油,落入轴承一侧的转动表面上,破碎成雾状,进入轴承	图 20.3-33
飞溅	通常用于滚动轴承和其它零件可用同一种油的场合,溅油零件转速不能过低	以轴承中不存油为适当,确定溅油零件的浸油深度	应有防止磨屑进入轴承的结构措施	图 20.3-34
甩油罩	主要用于转速 $8\,000 \sim 10\,000 \text{ r}/\text{min}$ 的竖轴轴承	油面低于轴承端面和密封件的密封间隙		图 20.3-35
油雾	无实际的 dn 值极限。多半用于 $5\,000 \text{ r}/\text{min}$ 以上的小轴承,但也可用于较低速度的场合	参考油值: $(0.1 \sim 0.3) id / 25.4 \text{ (mL/h)}$ (i —滚动体列数; d —轴承内径, mm)。有预紧载荷的轴承流量应增加 1 倍		

润滑方法	适用条件	油面高度或油量	备注	图例
循环	无实际的 dn 值极限。高速时通常用油雾	参考流量: $6BD$ (L/min) (B —轴承宽度, mm; D —轴承外径, mm)	油的流量一般应视运转温度确定	
油气	无实际的 dn 值极限。新的润滑方式, 用油省, 无污染, 可取代油雾润滑	用油量极少, 约为 $1\text{ cm}^3/\text{班}$		

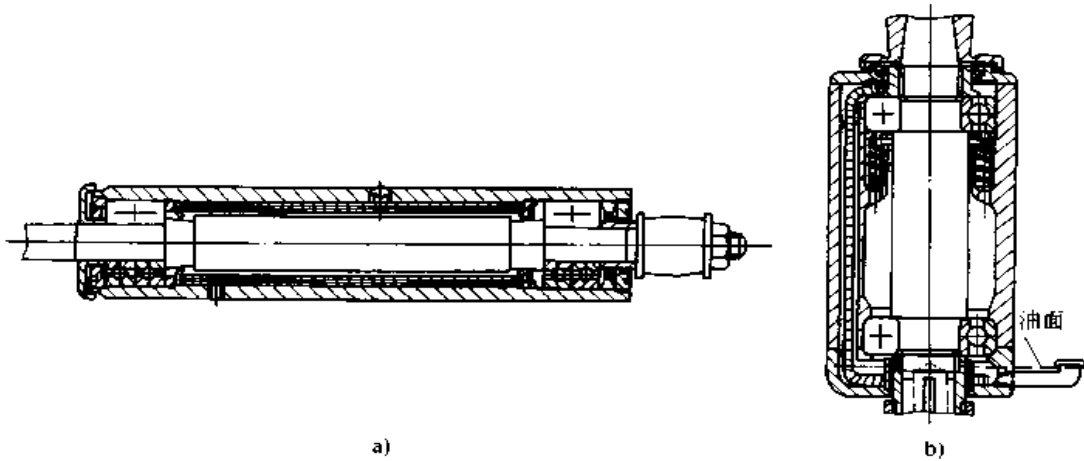


图 20.3-31 油绳润滑滚动轴承
a) 水平轴的油绳润滑 b) 竖轴的油绳润滑

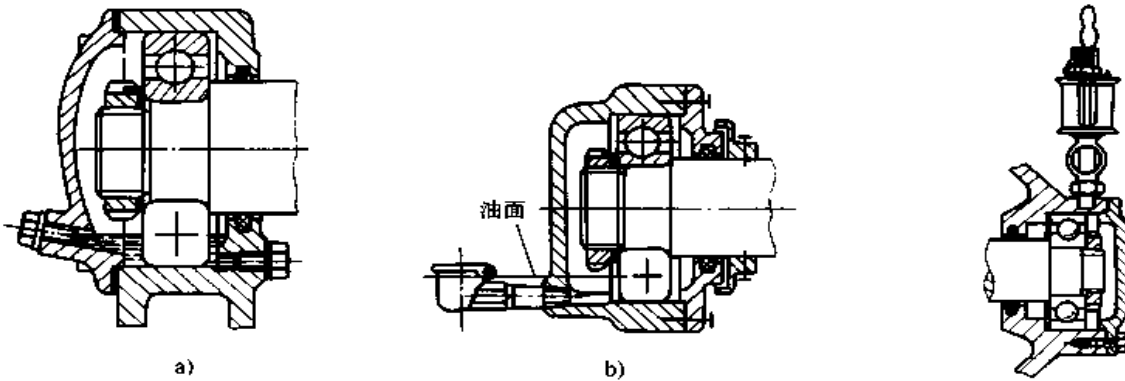


图 20.3-32 油浴润滑滚动轴承

图 20.3-33 滴油润滑滚动轴承

或 L-CKE/P, 该油最低黏度等级为 220, 若需要使用更低黏度的润滑油, 可选用工业齿轮油 L-CKC 或液压油 L-HM。

开式齿轮传动应选用开式齿轮油, 该油有普通开式齿轮油 L-CKM, 极压开式齿轮油 L-CKJ 和溶剂稀释型开式齿轮油 L-CKM。

准双曲面齿轮多用于汽车、拖拉机后桥, 它

们的润滑应采用汽车齿轮油。汽轮机齿轮箱的齿轮传动通常和汽轮机轴承都采用同一种油, 即汽轮机油润滑。

圆弧齿轮传动尽可能采用 EP 齿轮油。开式齿轮除可采用开式齿轮油外, 载荷不很大时也可采用全损耗系统用油润滑。

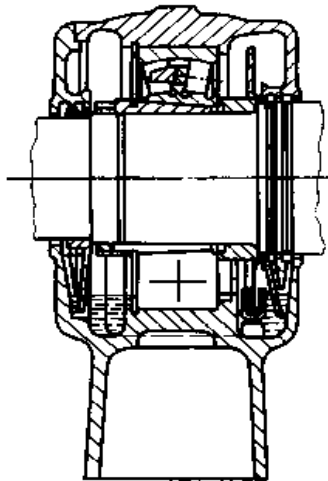


图 20.3-34 飞溅润滑滚动轴承

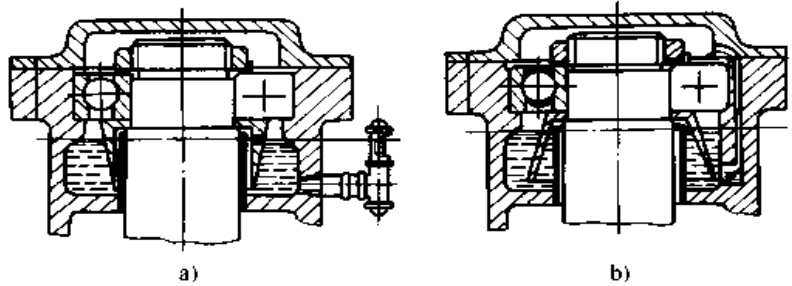


图 20.3-35 用甩油罩润滑的滚动轴承

表 20.3-31 齿轮线速度与润滑方法的关系

润滑方法	适用线速度/ $m \cdot s^{-1}$	
	齿轮传动	蜗杆传动
涂脂润滑	~ 2.0	~ 2.0
油浴润滑	$2.0 \sim 12$	$2.0 \sim 10$
循环喷油润滑	≥ 12	≥ 10

注：蜗杆传动线速度指蜗轮节圆线速度。

表 20.3-32 喷油压力

齿轮线速度/ $m \cdot s^{-1}$	10	25	50	100	150
喷油压力/kPa	10	100	140	180	210

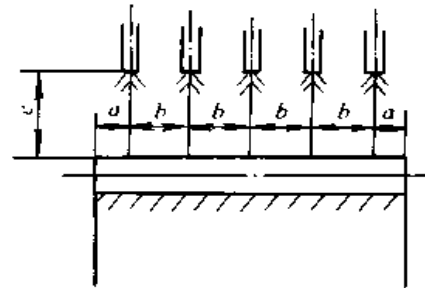


图 20.3-36 开式齿轮传动喷油嘴的布置
 $a = 50 \sim 65 \text{ mm}$ $b = 130 \sim 180 \text{ mm}$ $c = 150 \sim 200 \text{ mm}$

表 20.3-33 开式传动喷油间隔及喷油量的推荐值

喷油装置	喷油间隔/ h	齿轮直径/ mm	一次喷油量/ g				喷油装置	喷油间隔/ h	齿轮直径/ mm	一次喷油量/ g			
			齿宽/ mm							齿宽/ mm			
			~ 200	~ 400	~ 600	~ 800				~ 200	~ 400	~ 600	~ 800
自动喷油装置	0.25	300	6	9	11	14	手动喷油装置	1.0	300	23	34	45	57
		360	9	9	11	14			360	34	40	51	62
		420	9	11	14	17			420	40	45	57	68
		480	11	14	17	20			480	45	57	68	79
		550	14	17	20	23			550	57	68	79	90
	0.5	300	14	17	23	28		4.0	300	140	170	230	280
		360	17	20	26	31			360	170	200	255	310
		420	20	23	28	34			420	200	230	280	340
		480	23	28	34	40			480	230	280	340	400
		550	28	34	40	45			550	280	340	400	450

表 20.3-34 根据齿面最大接触应力选择齿轮润滑油品种

齿面最大接触应力/MPa		齿 轮 状 况	应用条件与实例	推荐的润滑油品种
< 350			运转平稳	L-CKB
轻载 齿轮	350 ~ 500	调质处理; 齿轮精度到 8 级; 每级齿数比 < 8; 最大滑动速度 与圆周速度之比 < 0.3	运转平稳, 有轻微冲击 有冲击载荷	L-CKB L-CKC
中载 齿轮	500 ~ 750	调质处理; 齿轮精度 ≥ 8 级; 最大滑动速度与圆周速度之比 > 0.3	矿井提升机、露天采掘机、 水泥磨、化工机械、水力电力、 冶金等机械的齿轮	L-CKC
	750 ~ 1 100	渗碳淬火, 齿面硬度为 58 ~ 62HRC		
重载 齿轮	> 1 100		冶金机械、轧钢机、井下采 掘机等高温、有冲击、有水部 位的齿轮	L-CKD

(2) 润滑油黏度的选择

1) 闭式齿轮传动 令应力系数

$$K_{\sigma} = \frac{F_t}{bd_1} \cdot \frac{u \pm 1}{u} \cdot Z_H^2 Z_{\epsilon}^2 \quad (20.3-33)$$

- 式中 F_t —— 齿轮圆周力;
 b —— 齿轮啮合宽度;
 d_1 —— 小齿轮节圆直径;
 u —— 传动的齿数比;
 Z_H —— 节点区域因子;
 Z_{ϵ} —— 重合度因子。

可以参考表 20.3-35, 根据应力系数与节圆线速度之比选出所需润滑油黏度, 或者按图 20.3-37 确定。

表 20.3-35 荐用黏度

$(K_{\sigma}/v) / \text{MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	运动黏度 $\nu_{40} / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
0.01 ~ 0.1	$324K_{\sigma}/v + 46$
0.1 ~ 1.0	$121K_{\sigma}/v + 74$
1.0 ~ 10	$40K_{\sigma}/v + 191$

2) 开式齿轮传动 开式齿轮传动选用的润滑油黏度一般比闭式的高, 可参考表 20.3-36。

3) 蜗杆传动 图 20.3-38 是蜗杆传动荐用的润滑油黏度, 按蜗轮节圆线速度选用。

3.5 链传动的润滑设计

润滑是延长传动链寿命最有效的方法。

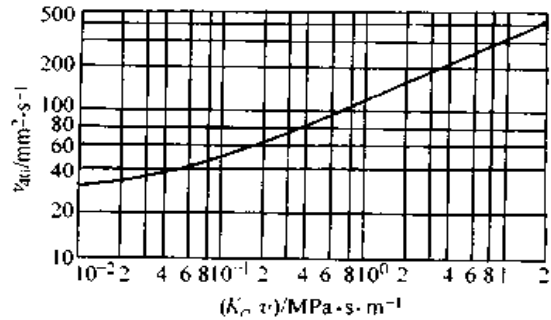


图 20.3-37 闭式齿轮荐用黏度

表 20.3-36 开式齿轮传动润滑油黏度荐用值 (mm²/s)

温度 / ℃	喷 油		滴油
	极压油	普通油	极压油
-10 ~ 15	—	200 ~ 650	—
5 ~ 35	100 ~ 120	650 ~ 2 000	100 ~ 120
25 ~ 50	180 ~ 200	650 ~ 2 000	180 ~ 200

3.5.1 润滑剂的选择

除了重型设备中的低速链传动有采用脂润滑的之外, 一般均选用油润滑。手工加油和滴油润滑通常采用全损耗系统用油, 飞溅与油浴润滑最好采用比全损耗系统用油品质好一点的油, 如液压油、齿轮油等。

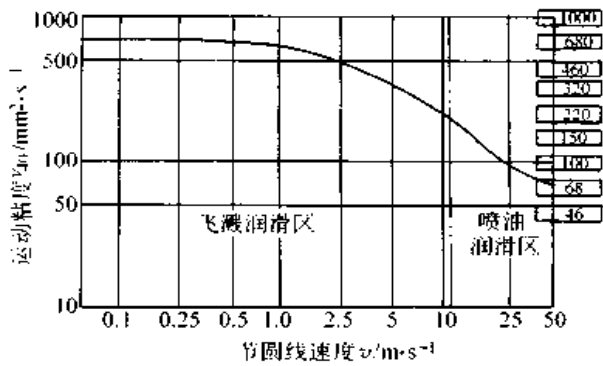


图 20.3-38 蜗杆传动用油黏度的选择

工作温度在 0℃ ~ 60℃ 之间，可参考表 20.3-37 按链速选择润滑油黏度，温度高时取大值，反之取小值。

表 20.3-37 链传动润滑油的选择

链速 $v / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	~ 2.5	> 2.5 ~ 5.0	> 5.0 ~ 8.5	> 8.5
适宜黏度 $\nu_{40} / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	61.2 ~ 165	41.4 ~ 74.8	28.8 ~ 74.8	19.8 ~ 35.2

表 20.3-38 链传动的润滑方法

润滑方法	油 量	Pn_1 限制值 / $\text{kW} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	速度限制值 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	示 意 图
手工加油润滑		$Pn_1 < 160$		
滴油润滑	5 ~ 20 滴/min	$Pn_1 > 160 \sim$	0 ~ 3	油滴在主动链轮进入侧内外链板间隙处
	> 20 滴/min	$P^{1.36} n_1 < 4\ 600$	3 ~ 7.5	
飞溅润滑	甩油环浸入油深 12 ~ 25 mm，链轮宽度小于 125 mm 用 1 个甩油环，超过 125 mm 用 2 个甩油环	$P^{1.36} n_1 > 4\ 600$ $Pn_1 < 15\ 000$	甩油环速度 > 3	油位
油浴润滑	链轮浸油深度 6 ~ 12 mm 或 1.5 倍链节距		< 10	
循环润滑	表 20.3-39	$Pn_1 > 15\ 000$	> 7.5	1—储油槽、2—泵。喷油嘴设在链的啮入处，喷油嘴数为链列数加 1

3.5.2 润滑方法的选择

选择润滑方法可参考表 20.3-38。

3.5.3 供油量

循环喷油润滑时，喷油嘴所需喷油量可根据链速和链节距按表 20.3-39 确定；其他润滑方法所需最少油量见表 20.3-40。

3.6 联轴器的润滑设计

除采用非金属弹性元件的挠性联轴器之外，挠性联轴器工作时都需要润滑。表 20.3-41 列出各种挠性联轴器适宜的润滑剂、润滑剂量及换润滑剂间隔时间。该时间是在轴相对位移控制在允许范围内时的值，若相对位移超差，则换油（脂）时间需要缩短。

如果采用密封式，密封座与密封件必须没有伤痕，密封面表面粗糙度 Ra 值应小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。

表 20.3-39 链传动循环润滑推荐的喷油嘴喷油量

链速/m·s ⁻¹		链节距/mm			
		≤19.05	25.4~31.75	38.1~44.45	≥50.8
喷油量 /L·min ⁻¹	7.5~13	1.0	1.5	2.0	2.5
	13~18	2.0	2.5	3.0	3.5
	18~24	3.0	3.5	4.0	4.5

表 20.3-40 链传动的最少供油量

功率/kW	40	75	110	150	190	220	300	370	450	520	600	670	750	1 120	1 500
最少油量/L·h ⁻¹	0.018	0.035	0.050	0.070	0.088	0.105	0.140	0.180	0.210	0.250	0.260	0.300	0.340	0.500	0.700

表 20.3-41 联轴器用润滑剂及其用量、换油时间

联轴器类型	最高圆周速度/m·s ⁻¹	能补偿轴相对位移的类别	润滑剂种类	润滑剂牌号	润滑剂用量	换润滑剂间隔时间/h	备注
齿式联轴器	~60	θ 、 δ 、 s	脂	0 或 1 号脂	装满联轴器	2 500~5 000	粘附性要好
	~60	θ 、 δ 、 s	油	L-CKC 32、46	装一半，使静止时不漏油	5 000	
	~150	θ 、 δ 、 s	油		足够的流量		沿轴向连续地通过联轴器。无密封
嵌合式联轴器	~150	s	油				
簧片联轴器	~30	θ 、 δ 、 s 、 φ	脂	1 号脂	装满联轴器	1 000	
蛇性弹簧联轴器	~60	θ 、 δ 、 s 、 φ	脂	2 或 3 号脂		5 000	
	~150	θ 、 δ 、 s 、 φ	油	L-CKC 32、46	足够的流量		沿轴向连续地通过联轴器。无密封
滑块联轴器	~30	θ 、 δ 、 s	脂	2 号脂	充满滑块的 空间	100	适宜用滚动轴承脂
	~30	θ 、 δ 、 s	油	L-CKC 46		1 000	有时采用浸满油的毡垫
链式联轴器	~12.5	θ 、 δ 、 s	脂	1 或 2 号脂	充满壳体	1 000	
	~12.5	θ 、 δ 、 s	油	L-CKC 32		500	
说明	θ —角位移； δ —径向位移； s —轴向位移； φ —转角						

为简化润滑装置，它和齿轮、轴承共用同一种润滑油。兼顾各个润滑部位，推荐用 L-FC10 或 15，所用润滑油的黏度最高不得超过 32 mm²/s。

3.7.2 摩擦片式离合器

参考表 20.3-42 选用润滑剂。

3.7.3 超越离合器

参考表 20.3-43 选用润滑剂。

3.8 钢丝绳的润滑设计

正确地润滑能帮助钢丝绳调整位置，使得在

密封件材料与润滑剂应能相容

加入的润滑剂量必须适当，密封座应设通气塞，使加润滑剂时能排出空气。

3.7 离合器的润滑设计

3.7.1 电磁离合器的润滑

润滑电磁离合器的油黏度不宜太高，否则会延缓脱开时间。这种离合器多半装在变速箱中，

经受弯曲的情况下，应力分布较均衡。与同样尺寸、同样结构，但不润滑的钢丝绳相比，其寿命延长 3 倍。

3.8.1 制造时的润滑

1) 绳芯 纤维绳芯在制造时就应涂好油，这比做好后浸油有效。

金属芯要与绳股一样润滑。

2) 绳股 绳股里有许多螺旋形的空隙，必须用润滑剂填满这些空隙以防止腐蚀。通常在围绕绳芯拧成股时加进润滑剂。

表 20.3-42 摩擦片式离合器用润滑剂

离合器类型		湿 式	干 式	
润滑剂	种类	油	油	脂
	牌号	L-FC46	L-FC100	4号钠基脂
说明		润滑油起润滑和冷却作用	用油(脂)枪加油(脂);只润滑引导摩擦片压紧和松开的离合器轴承	

3) 钢丝绳 股绳拧在一起成钢丝绳时,也有空隙,也必须填充润滑剂。润滑剂可以在拧绕

时加入,或者在拧好后将钢丝绳浸泡在油中。

制造时使用的润滑剂主要是润滑脂或溶剂稀释型开式齿轮油(L-CKM)。

3.8.2 使用中的润滑

尽管钢丝绳在制造时施加过润滑剂,在使用中仍需润滑,钢丝绳的工作性能与使用时的润滑好坏密切相关。

不同工作条件,钢丝绳损坏的主要原因就不同,因而对润滑的要求不同。几种典型用途对润滑的要求见表 20.3-44

表 20.3-43 超越离合器用润滑剂

离合器类型		滚柱式			楔块式	滚柱楔块组合式
		低速	中速	高速		
工作温度	> -10℃	L-FC 100	L-FC 40	L-FC 20	2号钠基脂	L-FD
	< -10℃	L-DRA 15				

表 20.3-44 钢丝绳在使用中的润滑

典型用途	主要损坏原因	润滑要求	润滑剂品种	润滑方法	加油间隔
在船舶、码头或污染的空气里工作的吊车、吊杆	腐蚀	很好地渗透到钢丝绳内部;有排出潮气的能力,防护内外腐蚀。能耐冲刷。有耐乳化能力	润滑脂,用溶剂稀释,以便留下一层(0.1mm)厚而软的润滑脂膜	人工或机械	一个月
矿山牵引、电铲、多斗挖掘机、抓斗、矿用卷扬机	磨损	好的抗磨性和粘附性。耐机械力磨损	较黏的 L-CKJ。含 MoS ₂ 或石墨的软润滑脂	人工或机械	一个月
吊车、抓斗、杆子吊绳、打桩机、打井机、钻井机	疲劳	很好地渗透到钢丝绳内部。好的润滑性能。耐甩掉的性能	L-CKH 100	机械	每天 10~20次
升降机吊挂、补偿和控制绳、摩擦纹盘上的提升绳	疲劳、腐蚀	不打滑的特性。很好地渗透到钢丝绳内部。有排出湿气的能力,防护内外腐蚀	通常用溶剂分散的防腐剂,使之留下一薄层半硬膜	人工	一个月
吊车和挖掘机的下垂绳、桅杆和烟囱拉绳	腐蚀	好的防腐能力。耐冲刷能力	较黏的 L-CKM	人工	6个月~2年

3.8.3 加油方法

最好是把润滑剂加在钢丝绳经过绳轮或卷筒时，靠近绳股有张开趋势的部位(见图 20.3-39)。润滑剂除手工加油外，可以用机械加油、滴油和喷油等方法，见图 20.3-40~图 20.3-42。

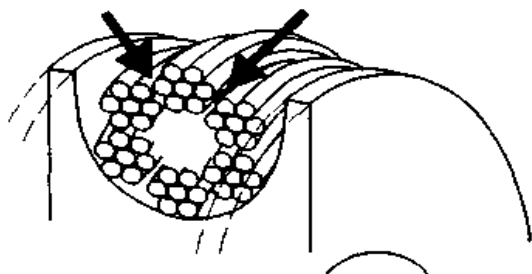


图 20.3-39 钢丝绳最佳加油部位示意图

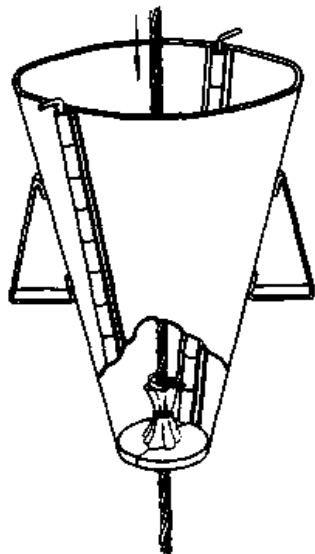


图 20.3-40 用油桶的机械加油

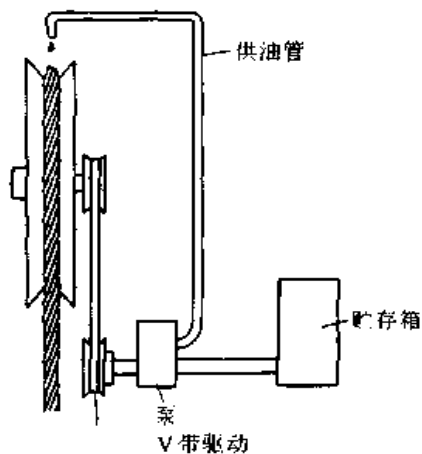


图 20.3-41 滴油润滑

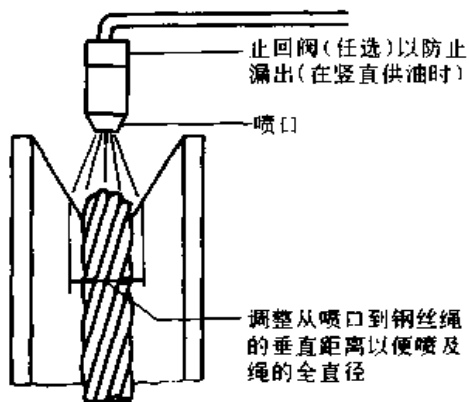


图 20.3-42 喷油润滑

第4章 润滑材料

凡能降低摩擦阻力的介质都可作为润滑材料。润滑材料又称润滑剂。

对润滑剂的基本要求是：

- 1) 适当的流动性或塑性，以便于形成润滑膜；
- 2) 一定程度的润滑性，以适应边界润滑的条件；
- 3) 本身纯净而不对环境构成污染；
- 4) 与摩擦表面有一定的贴附强度，保证润滑能力；
- 5) 有抗乳化能力，以免降低润滑效果；
- 6) 化学稳定性好，不致较快氧化变质；
- 7) 较低的挥发性，能维持稳定的黏度；
- 8) 抗水洗能力强，不致因水冲洗而脱离摩擦表面；
- 9) 能抵抗核辐射；
- 10) 抗泡沫性好，不让泡沫降低润滑性；
- 11) 不腐蚀金属表面；
- 12) 防锈性能好，能保护金属表面；
- 13) 较低的自燃性，不致引起火灾；

14) 有密封性，能防止杂质的侵入；

15) 无毒。

1 润滑材料的基本类型

润滑剂有液体、脂、气体和固体4种类型

液体润滑剂中应用最广泛的是矿物油，其他还有：动植物油，如茶油、菜籽油、蓖麻籽油、鲸油等；合成油，如羧酸酯、磷酸脂、合成烃、氟碳、氟氯碳、全氟醚、聚醇醚、烷基苯、硅酸酯、聚苯醚等；水基液体，如水、水乙二醇、乳化液等。

润滑脂有皂基脂、无机脂、烃基脂和有机脂。

任何气体都可作为气体润滑剂，通常用得最多的是空气，其余有氨、氮、氢等

可作为固体润滑剂的有：软金属，如Pb、Sn、Zn、Ag、Au等；金属化合物，如PbO、CaF₂、MoS₂等；无机物，如石墨、氯化硼等；有机物，如聚四氟乙烯、酚醛树脂等。

表20.4-1给出这4类润滑剂的主要性能。

表 20.4-1 润滑剂的主要性能

润滑剂性能	油	脂	固体	气体	润滑剂性能	油	脂	固体	气体
流体动力润滑性	极好	可以	无	好	对环境的污染	有	有	基本上无	无
边界润滑性	差~极好	好~极好	好~极好	差	工作温度范围	可以~极大	大	很大	极大
冷却性	很好	差	无	极好	挥发性	很高~低	低	低	很高
低摩擦性	可以~好	可以	差	极好	易燃性	很高~很低	低	低	视气体而定
向支承供给的简易性	好	可以	差	好	适应性	很低~中等	中等	极高	很高
在支承中的保持性	好	好	很好	很好	成本	低~高	相当高	相当高	空气很低
免受污染的密封性	差	很好	可以~好	很差	支承设计的复杂性	相当低	相当低	低~高	很高
对大气腐蚀的防护性	可以~极好	好~极好	差~可以	差	决定寿命的因素	变质和污染	变质	磨损	维持供气能力

2 润滑油和脂的流变学特性

2.1 黏度

润滑油黏度可定性定义为它的流动阻力，是流体内摩擦力的量度，是润滑油最重要的性能

之一。在流体润滑状态下，黏度与油膜厚度、摩擦阻力直接有关。

2.1.1 动力黏度

根据牛顿定律，层流流动的液体，其切应力（流动阻力）与速度梯度成正比，其比例系数称为动力黏度，简称黏度，即

$$\tau = \eta du/dy \quad (20.4-1)$$

式中 η ——黏度；

u ——流速；

y ——垂直流速方向的坐标；

凡是遵循牛顿定律的流体，称为牛顿流体。

由式(20.4-1)可知，黏度的量纲是 Pa·s。

2.1.2 运动黏度

动力黏度 η 与流体密度 ρ 之比为运动黏度 ν ，即

$$\nu = \eta/\rho \quad (20.4-2)$$

它的量纲是 m^2/s ，常用 mm^2/s 作为其单位。

工业润滑油黏度分类国家标准 (GB/T 3141—1994)，按 40℃ 时运动黏度分为 20 个黏度等级，并在润滑油编码中标出。

2.1.3 条件黏度

条件黏度是在一定条件下，用某种结构和规格的黏度计，通过测定润滑油穿过规定孔道的时间进行计量的黏度单位，有恩格尔度 (Degrees Engler)(°E)、赛氏通用秒 (Saybolt Universal Seconds)(SUS)(s)、雷氏 1 号秒 (Redwood No.1 Seconds)(s)。它们与运动黏度的换算可参照下列公式

$$\begin{aligned} \nu &= 0.260R_1 - 179/R_1 \quad (\text{当 } 34 < R_1 \leq 100) \\ \nu &= 0.247R_1 - 50/R_1 \quad (\text{当 } R_1 > 100) \\ \nu &= 2.46R_2 - 100/R_2 \quad (\text{当 } 32 < R_2 \leq 90) \\ \nu &= 2.45R_2 \quad (\text{当 } R_2 > 90) \end{aligned} \quad (20.4-3)$$

$$\nu = 0.226SUS - 195/SUS \quad (\text{当 } SUS < 100)$$

$$\nu = 0.220SUS - 135/SUS \quad (\text{当 } SUS > 100)$$

$$\nu = 8.0^\circ E - 8.64/^\circ E \quad (\text{当 } 1.35 < ^\circ E \leq 3.2)$$

$$\nu = 8.0^\circ E - 8.64/^\circ E \quad (\text{当 } 1.35 < ^\circ E \leq 3.2)$$

式中 ν ——运动黏度 (mm^2/s)；

R_1 ——雷氏 1 号 (s)；

R_2 ——雷氏 2 号 (s)；

SUS ——赛氏通用 (s)；

°E ——恩格尔度 (°E)。

2.2 黏度与温度的关系

润滑油黏度随温度升高而下降。几种润滑油的黏度-温度关系见图 20.4-1。

我国采用的评定黏温关系 (性能) 的指标有：

1) 黏度比 润滑油在 50℃ 下的运动黏度与 100℃ 下的运动黏度之比为该润滑油的黏度比，即

$$\text{黏度比} = \nu_{50}/\nu_{100}$$

黏度比只能评定成分相同、黏度等级相同之润滑油的黏温性能。

2) 黏温因数 润滑油在 0℃ 与 100℃ 时的运动黏度差与该油在 50℃ 时运动黏度之比为该润滑油的黏温因数，即

$$\text{黏温因数} = (\nu_0 - \nu_{100})/\nu_{50}$$

黏温因数只能评定黏度等级相同之润滑油的黏温性能。

3) 黏度指数 选一类黏度随温度变化最大的润滑油为低标准油，设其黏度指数为 0，再选一类黏度随温度变化最小的润滑油为高标准油，设其黏度指数为 100。

从两类标准油中各选出一种参考油，使两者在 100℃ 时的黏度与样品油相等，于是，样品油的黏度指数为

$$V.I. = (L - \nu) / (L - H)$$

L 、 H 、 ν 分别为低标准、高标准参考油和样品油在 50℃ 下的运动黏度。

黏度指数高表示油品的黏度随温度变化小，润滑油按黏度指数的分类见表 20.4-2。

表 20.4-2 润滑油按黏度指数的分类

类别	低黏度指数	中黏度指数	高黏度指数	很高黏度指数
黏度指数	< 35	35 ~ 80	80 ~ 110	> 110

2.3 黏度与压力的关系

润滑油黏度随压力升高而增大。黏度 η 与压力 p 的关系通常用巴勒斯 (C. Barus) 公式近似表达

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (20.4-4)$$

式中 η_0 ——大气压力下润滑油的黏度；

α ——压黏指数；

p ——润滑油的压力。

表 20.4-3 是几种润滑油的压黏指数。

表 20.4-3 几种润滑油在 40℃ 下的压黏指数 (nm^2/N)

油品	全损耗油	汽缸油	汽轮机油	汽油机油	蓖麻油
压黏指数	13.05	24.47	19.88	25.09	14.68

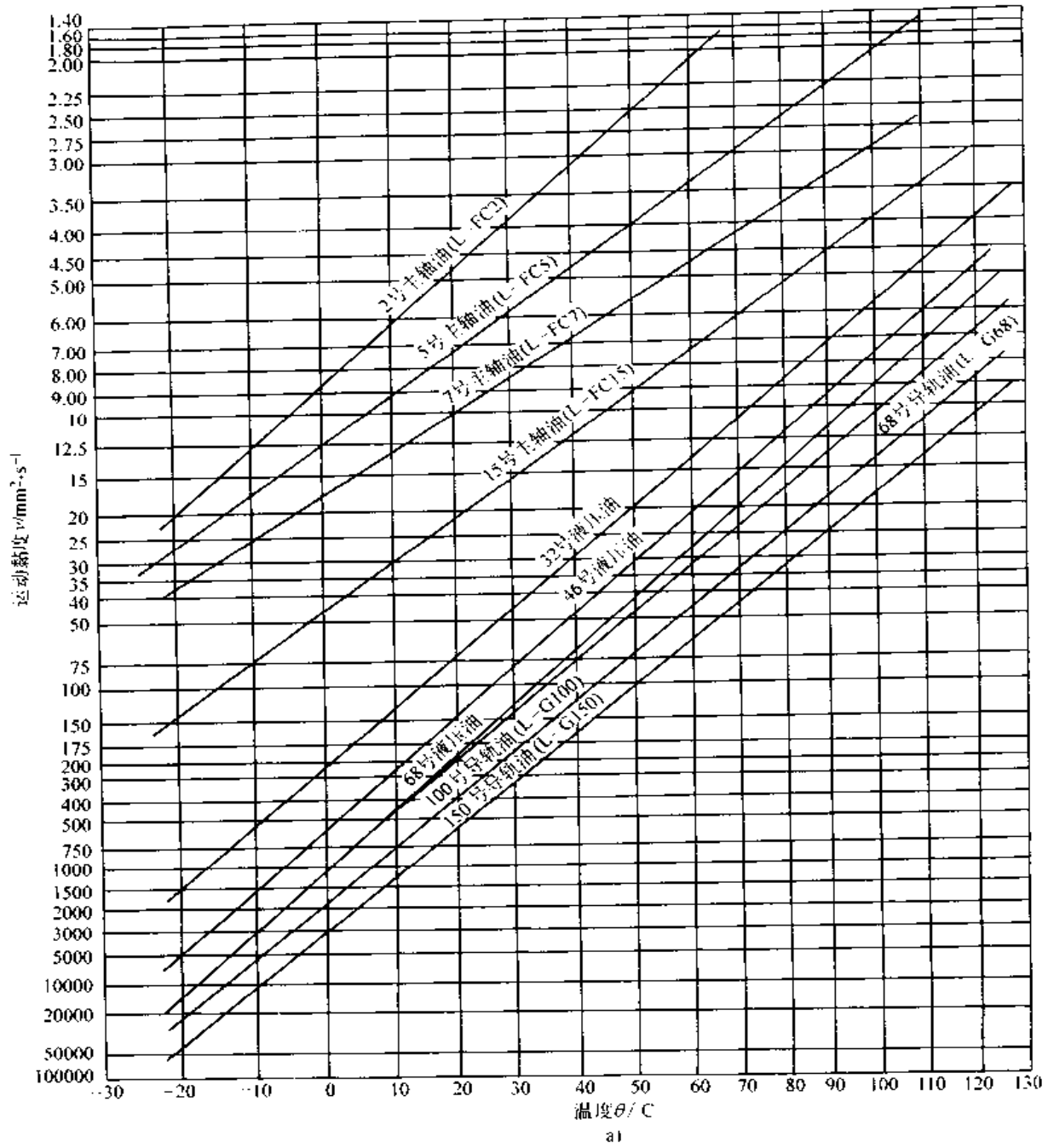


图 20.4-1 几种润滑油黏度-温度关系曲线

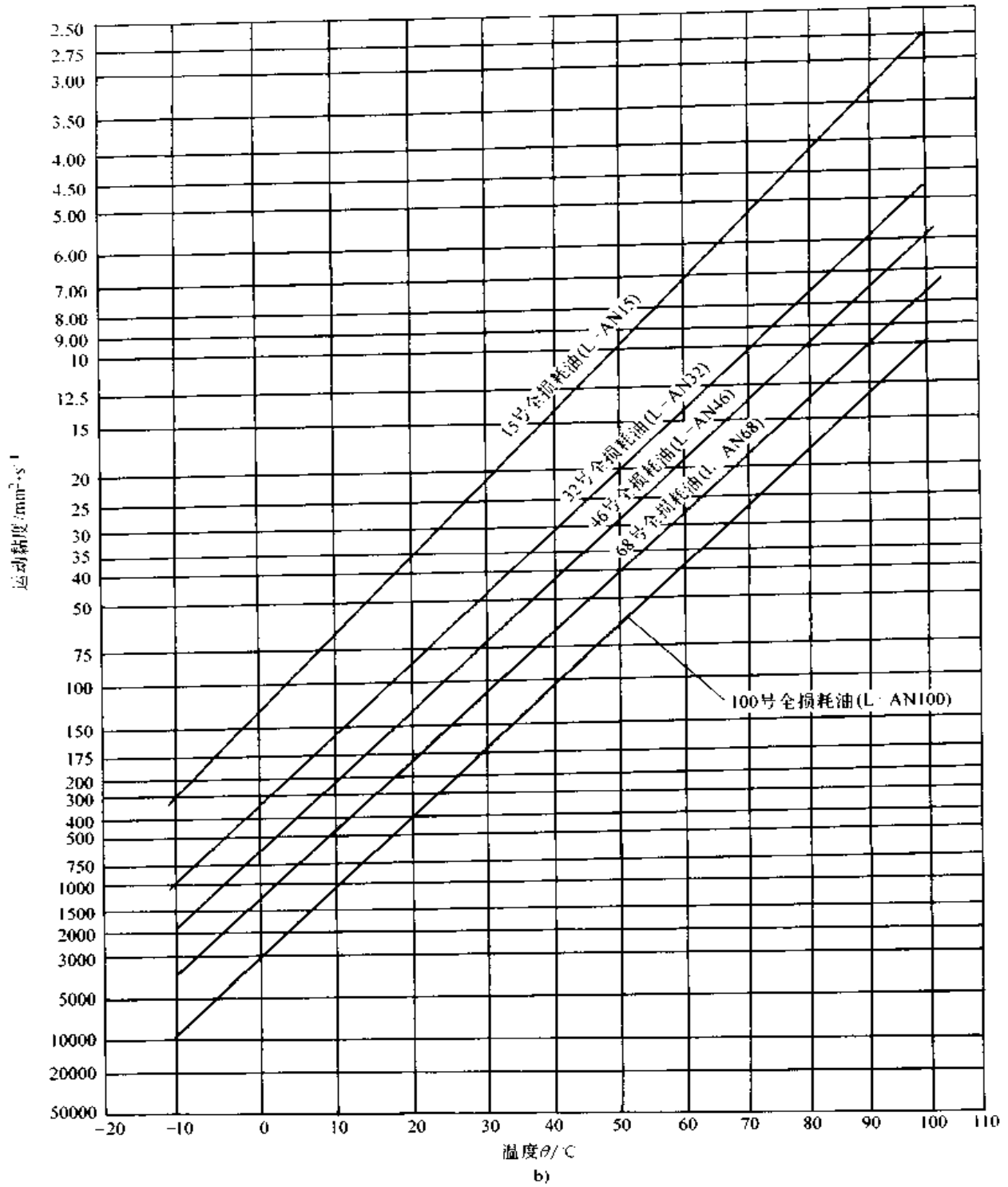


图 20.4-1 (续)

一般，只有当压力约超过 20 MPa 时黏度随压力的变化方明显，当压力高到 35 MPa 左右，矿物润滑油的黏度约为大气压力下的 2 倍。

2.4 黏度与压力和温度的综合关系

罗兰兹 (C. Roelands) 提出的黏度与压力和温度的综合关系式为

$$\eta = \eta_0 \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[(1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^2 \times ((\theta - 138)/(\theta_0 - 138))^{-5} - 1]\}$$

$$Z = \alpha / [5.1 \times 10^{-9} (\ln \eta_0 + 9.67)] \quad (20.4-5)$$

$$S = \delta(\theta_0 - 138) / (\ln \eta_0 + 9.67)$$

- 式中 θ_0 —— 环境温度或参考温度 (K);
 η_0 —— $p = 0$ 和温度为 θ_0 时的黏度 (Pa·s);
 θ —— 油温 (K);
 Z —— 罗兰兹压黏指数;
 S —— 罗兰兹温黏指数;
 α —— 压黏指数 (m^2/N);
 δ —— 温黏指数 ($1/^\circ C$).

2.5 黏度与切应变率的关系 (非牛顿特性)

黏度与切应变率成线性关系的流体称为牛顿流体，它的黏度在温度和压力一定时为常量。黏度与切应变率成非线性关系的流体为非牛顿流体，其黏度值不为常量，需引入表观黏度。表观黏度是在规定的切应变率下，切应力与切应变率之比。

非牛顿特性有塑性、触变性、伪塑性和膨胀性等 4 种，在润滑问题中较重要的是触变性和伪塑性。

各种非牛顿特性切应力于切应变率的关系曲线见图 20.4-2。

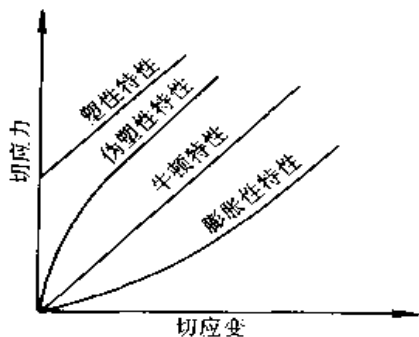


图 20.4-2 流体的非牛顿特性

2.5.1 塑性

流体需要克服很大的切应力方能开始流动或变形，然后，切应力就与切应变率成正比；具有这种特性的流体称为宾厄姆 (Bingham) 流体，其黏性流动规律为

$$\tau - \tau_0 = \eta' du/dy \quad (20.4-6)$$

式中 τ_0 —— 剪切屈服应力；

η' —— 塑性黏度；

2.5.2 触变性

流体受恒定的切向力后，表观黏度随时间增加而减小，降至某最低值，这种黏性逐渐损失的特性称为触变性。触变性通常是可逆的，当切向力消失后，经过充分的恢复时间，黏度将恢复到原来的数值。

2.5.3 伪塑性

随切应变率增加流体黏度下降的特性称为伪塑性。这时，切应力与切应变率之关系的表达式为

$$\tau = \eta' (du/dy)^n \quad n < 1 \quad (20.4-7)$$

大多数液体在高切应变率 (如 $10^6 \sim 10^8$ 1/s) 时黏度将降低而呈非牛顿性。润滑脂、高黏度油和含聚合物的油，则在较低的切应变率 (如 $10^2 \sim 10^6$ 1/s) 时就出现非牛顿性。

2.5.4 膨胀性

随切应变率增加流体黏度增加的特性称为膨胀性。这种流体在高切应变率下固化，如除去所施之力，流体又恢复原来的状态。这时，切应力与切应变率之关系的表达式仍为式 (20.4.7)，只是 $n > 1$ 。

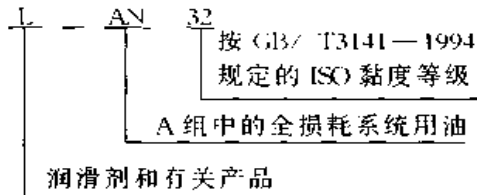
2.6 黏弹性

施以恒定的、极限值之下的切向力，仅产生恒定变形而不发生流动的特性称为弹性。施加之力的极限值称为弹性极限，力一旦超过此极限，流体将流动，弹性效应为黏性效应所掩盖。显示明显弹性特性的流体称为黏弹性流体。

3 润滑油

润滑剂及其相关产品是石油产品中的一大类，国家标准规定用符号 L 代表。L 类产品的分组见表 20.4-4。

润滑剂产品用编码符号表示，它包括类别、品种和数字三部分。例：



3.1 黏度分类

与 L 类产品有关的有 3 个黏度分类，即工业液体润滑剂的 ISO 黏度分类 (GB/T 3141)、内燃机油的 SAE 黏度分类和车辆齿轮油的 SAE 黏度分类。

表 20.4-4 润滑剂和有关产品 (L 类) 的分类方法总分组 (GB/T 7631.1—1987)

组别	应用场合	分组标准	组别	应用场合	分组标准	
A	全损耗系统	GB/T 7631.7—1995	P	风动工具	GB/T 7631.6—1989	
B	脱模		Q	热传导		
C	齿轮		R	暂时保护防腐蚀		
D	压缩机 (包括冷冻机和真空泵)		T	汽轮机		
E	内燃机		U	热处理		
F	主轴、轴承和有关离合器		N	用润滑脂场合		GB/T 7631.8—1990
G	导轨		Y	其他应用场合		
H	液压系统		Z	蒸汽汽缸		
M	金属加工		S	特殊润滑剂应用场合		
N	电器绝缘					

注：S 组包括合成润滑油、脂，但不包括 L 类中其他各组已经规定的合成润滑油、脂，也不包括固体润滑剂。

GB/T 3141 黏度等级的划分是以 40℃ 时运动黏度 (mm²/s) 为基础的。见表 20.4-5。

ISO 与 SAE 黏度等级的对照见表 20.4-6。

此外，根据润滑油的特性，将润滑油分为抗氧化防锈油 (R&O 油)、抗磨油 (AW 油) 和极压除油性外，润滑油的质量和性能大都可以用

3.2 主要质量指标

表 20.4-5 工业液体润滑剂的黏度分类以及与旧牌号的对照

黏度等级 GB/T341	中间点运动黏度(40℃)/ mm ² ·s ⁻¹	运动黏度范围(40℃)/ mm ² ·s ⁻¹	按 50℃ 运动黏度划分的 旧牌号	按 100℃ 运动黏度划分的 旧牌号	黏度等级 GB/T341	中间点运动黏度(40℃)/ mm ² ·s ⁻¹	运动黏度范围(40℃)/ mm ² ·s ⁻¹	按 50℃ 运动黏度划分的 旧牌号	按 100℃ 运动黏度划分的 旧牌号
2	2.2	1.98~2.42	2 ^F		100	100	90.0~110	60 ^F 、70 ^F	13 ^F
3	3.2	2.88~3.52			150	150	135~165	80 ^F 、90 ^F	19 ^F
5	4.6	4.14~5.06	4 ^F 、5 ^F		220	220	198~242	100 ^F 、150 ^F	19 ^F
7	6.8	6.12~7.48	5 ^F 、6 ^F		320	320	288~352	200 ^F	24 ^F
10	10	9.00~11.0	7 ^F 、10 ^F		460	460	414~506	250 ^F 、300 ^F	24 ^F
15	15	13.5~16.5	10 ^F		680	680	612~748	400 ^F	38 ^F
22	22	19.8~24.2			1 000	1 000	900~1 100	500 ^F	52 ^F
32	32	28.8~35.2	20 ^F	5 ^F 、6 ^F	1 500	1 500	1 350~1 650	600 ^F 、700 ^F	65 ^F
46	46	41.4~50.6	30 ^F		2 200	2 200	1 980~2 420		
68	68	61.2~74.8	40 ^F 、50 ^F	9 ^F	3 200	3 200	2 880~3 520		

理化指标来表示,下面举出一般常用的指标。

表 20.4-6 ISO 与 SAE 黏度等级的对照

工业液体润滑剂 ISO 黏度等级	内燃机油 SAE 黏度等级	车辆齿轮油 SAE 黏度等级
10	0W、5W	
15	0W、5W	
22	0W、5W	70W、75W
32	10W	70W、75W
46	15W、20W、20	70W、75W
68	15W、20W、20	80W
100	25W、30	85W
150	40	85W、90
220	50	90
320		90、140
460		140
680		140、250
1 000		250
1 500		250
2 200		250

注: W 表示冬季用油。

1) 黏度 这是润滑油最重要的一项指标,依据其运动黏度,将润滑油划分为 20 个黏度等级。为摩擦副选择润滑油时,黏度是首先要考虑的指标之一。

2) 黏度指数 油品的黏度指数越大,其黏温特性越好。

3) 氧化安定性 润滑油在使用中发生化学分解和变质的主要原因是氧化。润滑油组成中的基础油、添加剂在受到空气中的氧,摩擦状态下的温度和金属的作用,便会发生氧化连锁反应。润滑油中各种组份氧化变质的难易顺序如下:

石蜡烃 环烷烃 芳香烃 添加剂 沥青 不饱和烃
难—————→易

润滑油的氧化安定性用酸值到 2.0 mgKOH/g 的时间 (h) 来表示。

4) 热稳定性 油的温度升高到一定值,即使缺氧也会发生热分解,即热变质。热变质后,黏度发生变化、色泽变深,在高温情况下更会发生热解和聚合,最终生成沥青状高聚合物,导致润滑失效。

5) 残炭 油加热蒸发后生成的黑色残留物

称为残炭,用残留物占试油的质量分数表示其值。需要注意,残炭值高并不意味着积炭多。

6) 灰分 在规定条件下将试油燃烧到无炭时所留下的物质为灰分,用占试油的质量分数表征其多少。灰分与积炭有关,而且灰分多的润滑油将造成摩擦表面油膜不均匀,降低润滑性能。

7) 闪点与燃点 在规定条件下加热油品,当油蒸气与火焰接触时,发生闪火的最低温度称为闪点,闪火后持续燃烧 5 s 以上的最低温度称为燃点。润滑油的闪点至少要高于设备工作温度 20~30℃ 才能确保安全。闪点高低也反映油品蒸发量的大小。

8) 酸值 中和 1 g 油中的酸性组分所需氢氧化钾的量称为酸值,以 mgKOH/g 表示。润滑油在使用过程中会逐渐氧化,酸值逐渐增加,所以要定期化验使用着的润滑油的酸值,酸值增加是润滑油老化的标志。

9) 水分 水分使润滑油乳化变质,丧失润滑性能。水分一般不得超过 3%,极压齿轮油不宜超过 1%,汽轮机油宜控制在 0.2% 以下,液压油应控制在 0.1% 以下。

10) 倾点 油品在标准规定条件下冷却到能继续流动的最低温度称为倾点,以℃ 表示。在冬季,特别是在严寒地区室外作业的设备,倾点是一项重要指标。

3.3 常用润滑油的组成、性质和用途

从石油中制得的矿物润滑油是最大量应用的润滑油,他的特点是价格便宜,稳定性好,适用黏度宽。但是,在一些特殊情况下,矿物润滑油仍不能满足要求,这时便要使用合成润滑油,如硅油、有机酯等。

改善润滑油性能的最有效方法是加入各种添加剂。

近年来试验证实,把纳米颗粒加入润滑油中,如金刚石微粒,铜微粒,碳微粒等,能大大降低摩擦因数,减少磨损。

3.3.1 组成

常用矿物润滑油的组成见表 20.4-7。

3.3.2 矿物油与合成油

(1) 矿物油

根据矿物油的化学组成中所含量多的烃类族情况,矿物油的种类如下。

续表 20.4-7

润滑油品种	代号	组 成													
		精制矿物油	合成烃油	合成油	清净分散剂	抗氧抗腐剂	高温抗氧剂	金属减活剂	摩擦改进剂	极压抗磨剂	防锈剂	降凝剂	黏度指数改进剂	硅油抗泡剂	非硅抗泡剂
液压油	HL	✓				✓		✓	△		✓				✓
	HM	✓				✓		✓		✓	✓				✓
	HV	✓				✓		✓		✓	✓				✓
	HS		✓			✓		✓		✓	✓				✓
	HG	✓				✓		✓		✓	✓			✓	
导轨油	G	✓							✓	✓	✓		✓		

注：1. ✓表示要求的，△表示可有的；

2. 汽油机油和柴油机油中 15W 牌号用合成油作基础油。

1) 烷族矿物油 这类油含有较多的烧烃和环烷烃，石蜡的质量分数约为 10%，芳香烃和沥青含量不多。

2) 环烷族矿物油 这类油中环烷族含量超过 60%，是制造润滑油的宝贵原料。

3) 芳香族矿物油 这类油含有较多的芳香烃。

4) 烷和环烷族矿物油 这类油含有较多的烷烃和环烷烃，而芳香烃和沥青含量较少。

5) 环烷和芳香族矿物油 这类油含有多量的环烷烃和芳香烃，而石蜡含量不多，胶质和沥青含量高达 15~20%。

6) 烷、环烷和芳香族矿物油 这种油三种烃的含量相差不多，一般胶质和沥青含量达 10%，而固体石蜡含量在 0.5~1.0% 之间。

(2) 合成油

1) 有机酯类 它较矿物润滑油耐高温，也具有好的低温性能。一般用双酯，在较高温度场

合用多元酯或复酯。

2) 磷酸酯类 主要用于阻燃部位。由于热安定性差，只能用在温度 100℃ 以下的场合。它与塑料和橡胶起反应。

3) 硅油 它耐高温，具有化学稳定性、抗水性、无毒和绝缘性。根据使用要求可以制成各种黏度。用在钢-钢摩擦副时润滑性不好。

4) 聚乙二醇 这种油的特点是温度在 200℃ 以上时，会分解得很干净。在 400℃ 以上使用时不会生成任何沉积物。

可以把聚乙二醇制备成水溶性液体使用。

5) 氟和氯化物 这类合成油包括氯化联苯、氟碳、氯化硅油和氟化硅油，它们的特性是化学稳定性、阻燃性、热稳定性好，但润滑性差，价格也较贵。

表 20.4-8 列出各种合成润滑油的特性。

3.3.3 矿物润滑油的性质与用途

常用矿物润滑油的性质与用途见表 20.4-9。

表 20.4-8 几种合成润滑油的性质

性质	双酯	磷酸酯	甲基硅油	甲基硅油	聚乙二醇	氟联苯	聚苯醚	氟碳	矿物油
有氧最高温度/℃	210	120	180	250	200	145	320	300	150
无氧最高温度/℃	250	120	220	320	260	315	450	300	200
最低温度/℃	-35	-55	-50	-30	-20	-10	0	-50	0~50
倾点/℃	-73~39	-5~-1	-73~23	—	-23~57	—	-12~21	-60~25	—
闪点/℃	204~246	93~260	100~300	—	150~260	—	200~316	150~260	220
密度/g·cm ⁻³	0.91	1.12	0.97	1.06	1.02	1.42	1.19	1.95	0.88
黏度指数	145	0	200	175	160	-200~25	-60	-25	0~140
边界润滑性	好	很好	一般，但钢-钢差		很好		一般	很好	好

续表 20.4-8

性质	双酯	磷酸酯	甲基硅油	甲苯基硅油	聚乙二醇	氟联苯	聚苯醚	氟碳	矿物油
阻燃性	差	优	中~良	—	中	—	中	优	差
热稳定性	良	良	良	—	良	—	优	良	中
氧化安定性	良	中~良	优	—	差	—	优	优	中
水解安定性	中	差~中	优	—	优	—	优	良	良
挥发性	中	中	低	—	低	—	中	中	中
导热性	优	良	中	—	优	—	中		良
适宜橡胶	丁腈橡胶 硅橡胶	氯丁橡胶	氟橡胶	—	丁腈橡胶	氟橡胶	—	硅橡胶	丁腈橡胶
对塑料的作用	增塑	溶解	有浸出增塑作用		缓和	溶解	宜用 聚酰亚胺	热时软化	轻微
抗水性	好	一般	很好		好	优异	很好	优异	
对金属的腐蚀	对有色金属 轻微 腐蚀	有水时发 生腐蚀	不腐蚀			对铜合金 轻微腐蚀	不腐蚀	对铝、镁极 轻微腐蚀	不腐蚀
适用场合	高温	阻燃	高温和化学稳定		与水混溶 分解后 无渣	阻燃	高温	高温和 抗氧	—

表 20.4-9 常用矿物润滑油的性质及用途

润滑油		黏度 等级	黏度 指数	倾点/ ℃	闪点/ ℃	要求的性能	主要用途		
品种	分组								
全 损 耗 系 统 油	AN	5~150		< -5	>80~180	AN 油除降凝剂外不含任何添加剂	轻载荷、普通机械的全损耗润滑系统（包括一次润滑）、不适用于循环润滑系统		
	车轴 油	冬		< -40	145	未精制润滑油。低的凝点；较高的黏度指数；较少的水分和机械杂质	铁路机车、车辆的轴瓦、上下滑板及各部销轴、弹簧吊杆等的润滑		
		夏	30~40 66~81		< -10			150	
	仪表油	9~11		< -60	>125	良好的低温性能、油膜保持能力	各种仪器仪表		
工 业 齿 轮 油	CKB	100~320	>90	< -8		高的抗乳化性、抗腐蚀性、良好的黏温特性、极压抗磨性、润滑性、热氧化安定性、储存安定性、防锈性、抗泡性，以及与密封材料的适应性。CKC 的抗磨、极压性高于 CKB。CKD 的热氧化安定性较好。CKE/P 的性能与 CKE 相同，配方不同。CKH 为沥青型	正常油温下运转的轻载闭式齿轮		
	CKC	68~680					中等油温、无冲击的重载条件下运转的矿井、冶金和船舶海港等机械的齿轮传动装置		
	CKD	100~680					高温、有冲击重载荷下运转的轧钢、井下采掘等机械的齿轮传动		
	CKE	220~					< -6	蜗杆传动	
	CKE/P	1 000					< -6		
	CKH	68~320						>200	开式齿轮传动
	CKJ								
	CKM								

续表 20.4-9

润滑油品种	分组	黏度等级	黏度指数	倾点/ ℃	闪点/ ℃	要求的性能	主要用途
车辆齿轮油	CLC	80W/90	90	< -28	170	高的抗乳化性、抗腐蚀性、良好的黏温特性、极压抗磨性、润滑性、热氧化安定性、储存安定性、防锈性、抗泡性、以及与密封材料的适应性	手动变速器、曲线齿锥齿轮的驱动桥，如：解放 CA10B、CA30；黄河 JN150；跃进 NJ130
		85W/90		< -18	180		
		90		< -10	190		
	CLD	75W	90		150		手动变速器、曲线齿锥齿轮和使用条件不太苛刻的准双曲面齿轮的驱动桥，如：轿车；东风 EQ140；北京 BJ130、212
		80W/90		165			
		85W/90		180			
		90		180			
	CLE	85W/140			180		准双曲面齿轮及其他各种齿轮的驱动桥
		75W	报告	报告	150		
		80W/90			165		
85W/90		165					
90		180					
140	200						
冷冻机油	DRA	15~68		< -40	较高的黏度指数；倾点低、低温流动性好；闪点尽量高以减少蒸发量；对制冷剂化学安全性好；油中无硬蜡和水分	DRA 用于蒸发器工作温度高于 -40℃、制冷剂为氨或卤代烷的开启式或半封闭式普通制冷机	
	DRA/A	15~68		-40~-20			
	DRA/B	15~100		-45~-20			
	DRB/A	15~68		-49~-27		DRB 用于冰柜、冰箱的全封闭制冷压缩机	
	DRB/B	15~68		-51~-36			
空气压缩机油	DAA	32~150		< -9< -3	>175~>215	优良的高温抗氧化安定性；较高的闪点；良好的抗乳化性、抗腐蚀性、抗泡性	往复式空气压缩机油：DAA 用于轻载荷，DAB 用于中载荷，DAC 为合成油用于重载荷
	DAB	32~150		< -9< -3	>175~215		
	DAC	32~150		< -30			
	DAG	15~100	90	< -9	回转式空气压缩机油：DAG 用于轻载荷，DAH 用于中载荷，DAJ 用于重载荷		
	DAH	32, 46	90	< -9			
	DAJ	15, 32~100	90	< -40			
真空泵油	DVE	100		< -15	>206	添加剂不得影响油的真空性能；良好的抗乳化性、氧化安定性	用于真空度为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ kPa 的真空泵
汽油机油	QB	5W/20 10W/30 15W/30 20W/30		< -42 < -32 < -23 < -18	>170 >180 >180 >180	良好的黏温特性、热安定性、清净分散作用、润滑性、抗泡性、抗磨性；抗氧化能力强；腐蚀性小，并且有中和酸性物质的能力；优良的抑制生成和分散低温油泥的能力	适用于以老式解放牌汽车为代表的汽油发动机

续表 20.4-9

润滑油		黏度 等级	黏度 指数	倾点/ ℃	闪点/ ℃	要求的性能	主要用途	
品种	分组							
汽 油 机 油	EQC	5W/20		< -40	> 180	良好的黏温特性、热安定性、清净分散作用、润滑性、抗泡性、抗磨性；抗氧化能力强；腐蚀性小，并且有中和酸性物质的能力；优良的抑制生成和分散低温油泥的能力	适用于以东风牌汽车为代表的汽油发动机；以北京212吉普车为代表的中等负荷下工作的汽油机	
		5W/30		< -40	> 180			
		10W/30		< -32	> 200			
		15W/40		< -23	> 200			
		20W/40		< -18	> 200			
		20W/20		< -18	> 200			
		30		< -15	> 240			
		40		< -10	> 220			
	EQD	10W		< -30	> 200		适用于装有曲轴箱正压换气装置的汽油机。主要用于解放CA141、红旗等轿车发动机	
		5W/30		< -40	> 180			
		10W/30		< -30	> 205			
		10W/40		< -30	> 205			
		15W/40		< -23	> 210			
		20W/40		< -18	> 210			
		20/20W		< -18	> 210			
		30	75	< -15	> 210			
	40	80	< -10	> 220				
	EQE	5W/30		< -40	> 180		适用于装有废气循环装置和排气催化转化器的汽油机	
		10W/30		< -30	> 205			
		15W/40		< -23	> 210			
		20/20W		< -18	> 210			
		30	75	< -15	> 210			
		40	80	< -10	> 220			
	EQF	5W/30		< -40	> 180		适用于高级轿车的汽油发动机	
		10W/30		< -30	> 205			
		15W/40		< -23	> 210			
		30	75	< -15	> 210			
		40	80	< -10	> 220			
ERA	30	90	< -10	> 200	用于小型风冷二冲程汽油机	缓和条件下工作的		
ERB	30	90	< -15	> 100		缓和至中等条件下工作的		
ERC	30	90	< -25	> 80	用于苛刻条件下工作的小型至中型风冷二冲程汽油机			

续表 20.4-9

润滑油		黏度等级	黏度指数	倾点/ ℃	闪点/ ℃	要求的性能	主要用途
品种	分组						
柴 油 机 油	ECC	5W/30		< -40	>180	良好的黏温特性、热安定性、清净分散作用、润滑性、抗泡性、抗磨性；抗氧化能力强；腐蚀性小，并且有中和酸性物质的能力；优良的抑制生成和分散低温油泥的能力	适用于低增压柴油机 用于小型风冷二冲程汽油机
		10W/30		< -32	>205		
		15W/40		< -23	>210		
20W/40			< -20	>210			
20/20W			< -18	>205			
30			< -15	>210			
柴 油 机 油	ECD	10W		< -32	>200		适用于高转速、重负荷、大功率柴油机；中增压柴油机
		5W/30		< -40	>180		
		10W/30		< -32	>205		
		15W/30		< -23	>215		
		15W/40		< -23	>215		
		20W/40		< -18	>215		
柴 油 机 油	ECD/QE	20W/20		< -18	>215		适应各种柴油机、汽油机的润滑要求
		30		< -15	>220		
		40		< -10	>230		
主 轴 油	FC	2~100	报告	-18~-6	60~120	良好的浸润能力、流动能力和润滑能力。FC为R&O型油。FD为AW和EP型油	适用于滑动轴承或滚动轴承和有关离合器的压力、油浴和油雾润滑
	FD	2~100					不适用于离合器
导 轨 油	G	32~150	70	<-10<-5	>179~190	良好的防爬性、防锈性和抗剪切能力	横向或垂直的精密机床进给导轨的润滑
液 压 油	HL	15~100	95	-12~-6		良好的黏温特性、防锈性、抗氧化性、抗乳化性、抗磨性、抗泡性、抗剪切性、清净性；对密封材料的适应性；低温下的流动性、起动性和泵送性	低压液压系统。不适用于叶片泵
	HM	15~150	95	-18~-9	>165~195		低、中、高压液压系统
	HV	10~150	130	-39~-12	>100~180		环境温度变化较大、工作条件恶劣的低、中、高压液压系统
	HS	10~46	130	-45~-39	>100~160		用此油油泵低温起动性好
	HG	32~68	95	-6			液压和导轨合用的润滑系统
汽 轮 机 油	TSA	32~100	90	<-7	>180~195	良好的抗氧化安定性、抗乳化性和防锈性	用于汽轮机
	TGA	32~100	90				用于燃气轮机
蒸 汽 缸 油	Z	680 1 000 1 500		<15 <10 <10	>240 >290 >300	高黏度、高闪点；不适用于使用改性添加剂	主要使用在往复泵式蒸汽机

3.4 润滑油黏度的掺配

如果现有润滑油的黏度不能满足要求时，可選用一種黏度大於需要值，一種黏度小於需要值的兩種潤滑油摻配，以獲得需要的黏度。摻配時最好選用品種相同的潤滑油，如用不同品種的油，必須注意兩種油中的添加劑是否會發生化學反應。

表 20.4-10 潤滑油黏度摻配比例

K	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
$w_{甲}$	0.147	0.260	0.350	0.432	0.507	0.572	0.630	0.681	0.724	0.762	0.800	0.828	0.856	0.883	0.911

例 如用 L-AN15 和 L-AN 68 配成運動黏度為 50 的潤滑油，試計算摻配比例。

解 計算

$$K = (50 - 15) / (68 - 15) = 0.660$$

由表 20.4-9, $K = 0.660$, 查出 $w_{甲} = 0.861$ (用插入法), 即 L-AN68 應占 86.1%, L-AN15 應占 13.9%。

4 潤滑脂

4.1 潤滑脂的組成

潤滑脂的基本組分是基礎油、稠化劑和添加劑。

4.1.1 稠化劑

一般稠化劑的質量分數占 10% ~ 20%。它的主要作用是浮懸油，減小油的流動性，提高油與摩擦表面的附着力。

稠化劑的種類很多，採用不同的稠化劑，潤滑脂的性能也不同。稠化劑的分類見表 20.4-11。

表 20.4-11 稠化劑的種類

組別	名稱	構 成	
皂	單一皂基	鈣基	一種鹼金屬與脂肪酸反應生成
		鈉基	
		鋰基	
		鋁基	
		鉍基	
基	混合皂基	鈣鈉基	兩種鹼金屬與脂肪酸反應生成
		鈣鋁基	
		鉛鉍基	
		鋁鉍基	
复合皂基	复合钙基 复合铝基	皂基加复合剂制成	

摻配比例的近似計算式為：

$$K = (\nu - \nu_Z) / (\nu_{甲} - \nu_Z) \quad (20.4-8)$$

式中 ν —— 所需要的潤滑油黏度；

$\nu_{甲}$ —— 黏度大於需要值之潤滑油的黏度；

ν_Z —— 黏度小於需要值之潤滑油的黏度。

根據上式計算出來的 K 值，由表 20.4-10 查出甲油應占的比例 $w_{甲}$ 。

續表 20.4-11

組別	名稱	構 成
	烴基	用地蠟或石蠟作稠化劑
	無機基	用硅、石墨、膨潤土作稠化劑
	有機基	用銅苯二甲、阴丹士林作稠化劑

4.1.2 基礎油

在潤滑脂中基礎油的質量分數占 70% ~ 90%，潤滑脂的性能主要取決於基礎油的性質，特別是低溫流動性和高溫時的使用壽命與基礎油密切相關。

潤滑脂的基礎油有礦物油和合成油兩類。最常用的合成基礎油有：酯類油、磷酸酯、合成烴油、全氟碳、氟氯碳、全氟聚醚、聚醚、硅油和硅酸酯、聚苯醚等。

主要根據潤滑脂的用途和使用條件選擇基礎油。

4.1.3 添加劑

添加劑用以改善潤滑脂的使用性能和壽命，按其功能可以分為：結構改善劑、抗氧劑、極壓劑、防銹劑、抗水劑、增黏劑和填料。

添加劑含量很少，從百分之幾到百萬分之幾，但對潤滑脂性能的改善，作用巨大。

4.2 潤滑脂的主要性能

1) 稠度(錐入度) 潤滑脂在外力作用下抵抗變形的能力稱為稠度，表征稠度的指標是錐入度。用規定的圓錐體，放在 25℃ 的潤滑脂試樣上，經 5 s 後所沉入的深度(單位為 0.1 mm)即為該潤滑脂的錐入度。

2) 塑性強度 保持塑性的能力，也就是保持錐入度大小的能力，除用塑性計測量潤滑脂塑性強度外，也用潤滑脂在金屬表面上的保持能力

来测定。

3) 机械安定性 在机械切向力作用下脂的结构破坏后自动恢复原状的能力。

4) 胶体安定性 (析油率) 基础油和稠化剂保持不分离, 基础油不流失的能力。

5) 耐温性 在高、低温下保持润滑性能的能力。高温时不易氧化、熔融、漏失、蒸发、析油, 低温时黏度不太大, 则耐温性好。通常用滴点表征润滑脂的高温性能。

将润滑脂放在滴点计的脂杯中, 按规定的条件加热, 滴落下第一滴油时的温度称为滴点。

6) 抗水性 遇水后不乳化变质流失、稠度不下降的能力, 一般非皂基脂比皂基脂抗水性好。

7) 极压性 润滑脂膜承受载荷而不被挤出摩擦表面, 导致摩擦面缺少润滑脂的能力。

8) 抗腐蚀性 润滑脂对金属摩擦表面的腐蚀性。残留的游离酸、碱或活性硫少, 使用中氧化产生的有机酸少, 则腐蚀性小。

9) 缓蚀性 表示润滑脂能否适合于水污染的情况下工作, 在与金属接触中不发生锈蚀的能

力。

4.3 润滑脂的表观黏度

润滑脂为近似的塑性流体, 切应力要达到某一极限值时, 润滑脂才开始流动。润滑脂在切应力下开始流动时的黏度称为表观黏度, 它是衡量脂的‘泵送性’好坏的指标。

脂的表观黏度与切应变率有关, 表 20.4-12 列出润滑脂对应于切应变率的表观黏度:

表 20.4-12 润滑脂对应切应变率的表观黏度

切应变率/ s^{-1}	0.1	10.0	1 000.0	10 000.0	100 000.0
表观黏度/Pa·s	1 000	50	1.2	0.6	0.45

4.4 润滑脂的分类

我国等效采用 ISO 分类法, 制定了润滑脂分类的国家标准 (GB 7631.8—1990), 见表 20.4-13。润滑脂的稠度等级按锥入度大小划分, 从 000 级到 6 级, 共 9 个级别, 见表 20.4-14:

一种润滑脂的标记是由代号字母 X 与其它 4 个字母及稠度等级号联系起来标记的。

表 20.4-13 X 组 (用润滑脂场合) 的分类

代号 字母 I	总 用 途	使 用 要 求								
		操作温度范围				水 污 染 (抗 水 性)	字母 4	载 荷 EP	字母 S	稠 度 等 级
		最低温度 ^① /℃	字母 2	最高温度 ^② /℃	字母 3					
X		0	A	60	A	干燥环境, 不防锈	A	非极压型	A	000
		-20	B	90	B	干燥环境, 淡水存在下的防锈	B	极压型	B	00
		-30	C	120	C	干燥环境, 盐水存在下的防锈	C			0
		-40	D	140	D	静态潮湿环境, 不防锈	D			1
		< -40	E	160	E	静态潮湿环境, 淡水存在下的防锈	E			2
				180	F	静态潮湿环境, 盐水存在下的防锈	F			3
				> 180	G	水洗, 不防锈	G			4
						水洗, 淡水存在下的防锈	H			5
					水洗, 盐水存在下的防锈	I			6	

① 设备起动或运转时, 或者泵送润滑油时, 所经历的最低温度; ② 使用时被润滑部件的最高温度。

表 20.4-14 润滑脂的稠度等级和相应的锥入度范围

稠度等级	000	00	0	1	2	3	4	5	6
锥入度/(10 mm) ⁻¹	445~475	400~430	355~385	310~340	265~295	220~250	175~205	130~160	85~115

常用润滑脂的性质与用途见表 20.4-15。

4.5 常用润滑脂的性质与用途

表 20.4-15 常用润滑脂的性质与用途

名称		稠度等级	锥入度/(10 mm) ⁻¹	滴点/℃	组成	特性与用途
钠基润滑脂		2	265~295	140	动植物油钠皂稠化中等黏度矿物油而成	2、3号脂适用于工作温度不超过120℃, 4号脂适用于工作温度不超过135℃; 耐水性差
		3	220~250	140		
		4	175~205	150		
钙基润滑脂 GB 491—1987		1	310~340	75	动植物油与石灰制成的钙皂稠化中等黏度矿物油而成	耐水性好; 用于各种机械的轴承, 使用温度范围一般在-10~60℃, 转速在3000 r/min以内
		2	265~295	80		
		3	220~250	85		
		4	175~205	90		
		5	130~160	95		
钙钠基润滑脂		1	310~340		动植物油钙钠基混合皂稠化中等黏度矿物油而成	适用于湿度较大、温度较高工作条件下各润滑部位
		2	265~295			
石墨钙基润滑脂				80	动植物油钙皂稠化中等黏度矿物油, 再加入质量分数为10%鳞片状石墨制成	适用于工作温度60℃以下, 有压延性质、较粗糙、重载荷的部位
通用锂基润滑脂 GB 7324—1994		1	310~340	175	高级脂肪酸锂皂稠化中等黏度矿物油, 加入抗氧化剂制成	良好的抗水性、机械安定性、氧化安定性和防锈性, 适应-20~120℃内各种设备的滚动、滑动轴承
		2	265~295	175		
		3	220~250	180		
汽车通用锂基润滑脂			285~295	180		性能比通用锂基脂好。适用于-30~120℃内汽车各摩擦部位
钻具螺纹润滑脂		7409 ^②	85~95 ^①		专为油、气田钻井研制的保护钻杆螺纹的润滑脂	使用温度范围-15~200℃ 使用温度范围-40~205℃
		7409-1 ^②	340~385			
高温高速钻头脂			74~86 ^①	260	非皂稠化合成油制成	适用于60~120 r/min的钻头滑动轴承
通用润滑脂			62~72 ^①	200	酰胺钠盐稠化的润滑脂	用于标致、雪铁龙汽车; 可代替锂基脂
齿轮润滑脂	7408	0	445~475	160	非皂稠化合成油制成	000号半流体脂可用于节圆速度小于9 m/s的齿轮传动; 使用温度范围为-20~100℃
		00	400~430			
		000	355~385			
	7412	00	400~430	200		使用温度范围为-40~150℃; 可用于蜗杆减速箱
000		355~385				
高转速用润滑脂		7007 ^②	55~76 ^①	160	非皂稠化合成油制成	7007用于2000 r/min以下的磨床, 寿命3 a;
		7018 ^②	64~78 ^①	260		7018用于6000 r/min的磨床, 寿命1000 h

① 为1/4锥入度, 它与锥入度的换算关系为锥入度值 = (1/4锥入度值) × 3.75 + 24。

② 合成润滑脂代号, 70××为高低温脂, 74××为极压、抗磨脂。

5 添加剂

5.1 添加剂的作用与性能要求

5.1.1 作用

- 1) 提高润滑性和极压性，增加润滑油、脂在极端工作条件下有效润滑的能力；
- 2) 推迟润滑油、脂受周围环境影响的老化、变质，延长正常使用寿命；
- 3) 改善润滑油、脂的物理性能，如降低倾点、消除泡沫、提高黏度、改进黏温特性等；
- 4) 保护机件表面不受燃油侵蚀或其燃烧产物沾污。

5.1.2 性能要求

每种添加剂各有其特殊的作用，但需具备以下的共性才能加入油、脂中。

- 1) 在基础油中的溶解性。添加剂在工作温度范围内，在基础油中的溶解度必须稳定，溶解要迅速。

有些添加剂只要求有限溶解，如抗泡剂、黏度指数改进剂、防锈剂等；

- 2) 与水无反应，不溶解于水；
- 3) 低挥发性。添加剂挥发将使其浓度下降，效果降低；
- 4) 稳定性。在储存和使用期间，添加剂必须保持稳定。它应能抵抗水溶液的水解，并在高温下不分解；
- 5) 相容性。经常需要掺入两种以上的添加剂，它们应能相容，无可见的反应现象，并且能各自发挥自己的性能，不相互影响；
- 6) 颜色。添加剂应不改变基础油良好的外观色泽；
- 7) 气味。添加剂应不给润滑油、脂带来不愉快的异味。

5.2 类型与功能

添加剂的类型与功能见表 20.4-16。

表 20.4-16 添加剂的类型与功能

类型	名称	应用	功能
清净剂 分散剂	石油碳酸钙 合成磺酸钙 硫化聚异丁烯钡盐 烷基水杨酸盐 丁二酰亚胺	烷基酚盐一般在汽油机油中加 1.5%、在柴油机油中加 2.5%。磺酸盐的添加量为 2%~5%。硫化聚异丁烯钡盐添加量为 3%~5%。丁二烯亚胺既可用于汽油机油，也可用于增压柴油机油	中和作用、增溶作用、清净作用、分散作用。吸附在润滑油的氧化产物上使胶质沥青不沉淀，不形成积炭而悬浮在油中，同时中和其酸性，避免腐蚀金属
抗氧抗腐剂	硫磷烷基锌盐 硫磷短链基锌盐 硫磷长链基碱性锌盐 硫磷伯仲基锌盐 硫磷仲基锌盐	内燃机油中添加量为 0.25%~0.5%，极压齿轮油中添加量为 3%~6%，添加量以控制酸值不超过 0.1 mgKOH/g 为度	抗氧化作用、防腐蚀作用、极压作用、抗磨作用。有较大的酸值，能抑制氧化作用。能与金属表面起作用生成硫磷化金属薄膜
油性剂 摩擦改进剂	硫化鲸油 二羧酸 油酸乙二醇酯 硫化烯烃棉籽油 硫磷酸钼	硫化鲸油和硫化棉籽油在主轴油、导轨油中加 2%~5%。油酸类在液压油、汽轮机油中加 0.02%~0.2%	减摩作用。油性剂吸附在金属表面上，降低摩擦因数
极压抗磨剂	氯化石蜡 亚磷酸二丁酯 磷酸三甲酚酯 硫化异丁烯 二苄基二硫化物	主要用于各种极压油、脂，一般用量约为 2%~4%，高的可达 4%~7%。极压齿轮油用中等活性极压剂，内燃机油、液压油、汽轮机油用弱活性极压剂	极压剂在高温条件下分解出活性元素，与金属表面发生反应，形成低抗剪强度的金属化合物膜，提高润滑油的抗胶合能力，降低磨损

续表 20.4-16

类型	名称	应用	功能
抗氧化剂	2, 6-二叔丁基对甲酚 N-苯基- α 萘胺 苯三唑衍生物 噻二唑衍生物 4, 4-亚甲基双	用于内燃机油和抗磨液压油	抑制活性金属离子对润滑油氧化的催化作用, 抗氧化剂和金属离子形成配合物, 使金属处于钝化状态
黏度指数改进剂	聚乙烯基正丁基醚 聚甲基丙烯酸酯 聚异丁烯 乙丙共聚物 丙烯酸酯	配制冷启动性能好、黏温性能好、可四季通用、南北通用的内燃机油、齿轮油、液压油、主轴油等, 用量依要求和稠化能力而定, 通常为 3%~6%	加在润滑油中, 使温度升高时润滑剂黏度高于基础油黏度, 温度低时润滑剂黏度接近基础油黏度, 改善了黏温特性
防锈剂	石油磺酸钡 环烷酸锌 二壬基奈磺酸钡 苯并三氮唑 烯基丁二酸	石油磺酸钡的加入量为 2%~10%, 烯基丁二酸的加入量为 0.02%~0.1%。广泛用于各种润滑油、脂和防锈油、脂	防锈作用。与金属表面有很强的附着能力, 形成保护膜, 或者与金属表面起化合作用, 形成钝化膜, 防止金属与腐蚀介质接触
降凝剂	烷基奈 聚 α 烯烃 聚丙烯酸酯	用于内燃机油、汽轮机油、齿轮轴、液压油、冷冻机油等, 添加量为 0.1%~1%	降低凝点。吸附在析出的蜡晶体表面, 使蜡只能成为极微小的晶体, 不能交错地聚在一起, 从而改善了低温流动性
抗泡剂	甲基硅油 丙烯酸酯与醚共聚物	用于各种循环使用的润滑油, 添加量为百万分之几	消泡作用。降低表面张力, 防止形成稳定的泡沫

注: 表中百分含量皆为质量分数。

6 固体润滑剂和覆盖层

6.2 固体润滑剂的性能

6.1 固体润滑剂的类型

6.2.1 二硫化钼

二硫化钼的外观、结构和性能见表 20.4-18。

固体润滑剂的类型见表 20.4-17。

表 20.4-17 固体润滑剂的类型

类型	名称	最高使用温度/℃	特点	类型	名称	最高使用温度/℃	特点
层状固体	MoS ₂	350	1 150℃ 时在真空中分解	聚合物	聚氨酯	100	摩擦因数较高
	MoSe ₂		耐热能力高于 MoS ₂		聚酰亚胺	250	难加工
	WSe ₂	370			聚苯硫醚	350	最好用水润滑
	WS ₂	400	抗氧化能力高于 MoS ₂		聚四氟乙烯	275	摩擦因数低, 抗腐蚀性极强
	NbSe ₂	370	导电		聚全氟代乙丙烯	210	
	TaS ₂	550	电阻低		聚三氧氯乙烯	250	易加工
	酞菁染料	400	粘附性良好		聚酰胺	150	一般不耐磨
	石墨	500	在真空中无效		乙缩醛	130	
	低摩擦	氟化石墨			氮化物	BN	750	在 300℃ 以下无效

续表 20.4-17

类型	名称	最高使用温度/℃	特 点	类型	名称	最高使用温度/℃	特 点
软金属	铅	327	摩擦因数在 0.3 左右, 能在真空中使用	氟化物	CaF ₂	1 000	在 300℃ 以下无效
	金	1 048		氧化物	PbO/SiO ₂	750	在 250℃ 以下无效
	银	961			B ₂ O ₃ /PbS		
	锡	232		其他	MoS ₂	1 000	在 300℃ 以下无效
	铟	155					

注: 软金属的温度是金属的熔点。

表 20.4-18 MoS₂ 的基本特性

项 目	特 性	项 目	特 性
外观	黑灰色、无光泽、有滑腻感	与金属、橡胶反应	一般条件下与金属表面不产生化学反应, 也不侵蚀橡胶
分子结构与结晶结构	六方晶系的层状晶体结构, 容易劈开, 因为两个分子层间相邻面极易滑移	电阻率	$85.1 \times 10^{-3} \Omega m$
硬度	莫氏 1.0~1.5; 克氏 12~60	磁性	非磁性
熔点	高于 1 482℃	与金属的附着力和耐压力	和不洁净表面不易附着, 在洁净表面, 通过硫原子与金属直接结合, 结合力相当强
热稳定性	大气中可在 399℃ 以下短期使用, 在 349℃ 以下长期使用。快速氧化温度为 423℃, 氧化产物是 MoO ₃ 和 SO ₂ 。真空中在 1 093℃ 以下, 氢气中在 1 427℃ 以下, 低温在 -184℃ 或更低保持稳定	摩擦因数	0.03~0.2
		许用 pv	$3.5 \times 10^6 Pa \cdot m/s$
		密度	$4 700 \sim 4 800 kg/m^3$
		相对分子质量	160.08

6.2.2 石墨

石墨是最稳定且有明显层状结构的碳结晶体。晶体内的石墨层系由碳原子六角体形成, 同一平面层内相邻碳原子以强的共价键结合, 而层与层间的碳原子则以较弱的范德华力结合。在摩擦运动时, 石墨能沿着结晶层面滑移并定向, 且与钢、铬、橡胶等表面有良好的附着力, 因此是一种良好的润滑剂。

石墨在干燥时摩擦因数很高, 吸水后摩擦因数下降。石墨的吸附力较弱, 化学安定性很好。在 426℃ 以下可以长期使用, 540℃ 时只能短期使用。石墨润滑膜允许的 pv 值, 最高可达 700 kPa·m/s。石墨还具有高的导电性和导热性。

表 20.4-19 列出几种石墨分散润滑剂的应用。

6.2.3 聚四氟乙烯

聚四氟乙烯是一种热塑性材料, 耐化学腐蚀性极强, 对多数化学药剂和溶剂不起作用, 而介

电强度也很高。它又耐热, 能连续使用的温度范围在 -270~260℃ 之间, 间断使用温度可达 315℃。它不吸水且尺寸稳定。它的缺点是导热性差, 热膨胀率高。

表 20.4-19 几种石墨分散润滑剂的应用

载体	石墨的质量分数(%)	应 用
水	20~30	成膜润滑剂、工具润滑剂、橡胶润滑剂、导电涂膜
矿物油	10 35~40	成膜和工具润滑剂 金属成形润滑剂、抗擦伤润滑剂
蓖麻油	10	橡胶成膜润滑剂
异丙醇	10~20	干膜成膜润滑剂、抗擦伤和导电涂膜
石油醚	50	抗擦伤高温润滑剂
聚乙二醇	10~20	高温润滑剂

聚四氟乙烯与金属的摩擦因数低于已经应用的任何固体润滑剂。纯聚四氟乙烯耐磨性并不好,用软金属及其化合物、石棉纤维、碳纤维、玻璃纤维、石墨、二硫化钼等作填充剂增强后,其抗压强度、摩擦学性能均有较大提高。

表 20.4-20 列出几种用不同编织物增强的聚四氟乙烯润滑材料的摩擦学特性,表 20.4-21 列出几种含氟聚合物的摩擦学性能。

表 20.4-20 聚四氟乙烯编织润滑材料的摩擦学性能

填充物	填充量/(%)	摩擦因数	$(pv)_p/\text{kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
玻璃纤维	15	0.14	550
MoS ₂	5	0.14	600
渗铜铅粉	—	0.10~0.20	3 500

表 20.4-21 含氟聚合物润滑材料的摩擦学性能

聚合物	摩擦因数	最高使用温度/℃	特 性
PTFE	0.04~0.12	290	低抗磨性,难加工
填充 PTFE	0.1~0.6	290	抗磨性强,难加工
PTFCE	0.12~0.30	200	较易加工
PVE ₂ (填充)	—	150	抗磨,易加工
PVF ₂ (填充)/TFE	0.10~0.13	150	抗磨,易加工

6.2.4 聚酰胺

聚酰胺的物理力学性能见表 20.4-22、摩擦特性见表 20.4-23。

6.2.5 软金属

软金属具有抗剪强度低、导电和导热性强、抗辐射能力高等优越性能。可作为固体润滑剂使用的几种软金属的熔点和硬度见表 20.4-24。

表 20.4-22 聚酰胺的物理力学性能

项 目	尼龙 6	尼龙 66	尼龙 1010	项 目	尼龙 6	尼龙 66	尼龙 1010
密度/kg·m ⁻³	1 130	1 150	1 090~1 090	抗拉强度/MPa	68.6	73.5	49.0~53.8
熔点/℃	215	256	200~210	抗弯强度/MPa	68.6~98.0	98.0~107.9	68.6~80.4
吸水率/(%)	10.9	10.0	0.5~1.0	冲击韧性/N·m·m ⁻²	—	0.039~0.049	0.098
软化温度/℃	170	235	—	抗剪强度/MPa	—	31.7	—
热导率/J(m·℃) ⁻¹	0.21~0.34	0.26~0.34	—	屈服强度/MPa	—	58.6~81.3	58.6~81.3
脆化温度/℃	-20~-30	-25~-30	-40	伸长率/%	—	20	20
硬度/HBS	—	—	17.2	摩擦因数	—	0.2	—
电阻率/Ω·m	—	10 ¹² ~10 ¹³	—				

表 20.4-23 聚酰胺的摩擦特性

项 目	尼龙 6		尼龙 66		尼龙 1010	
	纯	增强	纯	增强	纯	增强
摩擦因数	0.2~0.3	0.2~0.4	0.10~0.28	0.2		
耐磨性	可以	好	差	可以		
最高工作温度/℃	100	150	130	200	110	200

表 20.4-24 软金属的熔点和硬度

金属名称	铯	铷	铅	锡	铊	铟	银	金	镉	铂
莫氏硬度	1.0	1.0	1.5	1.8	1.2	—	2.5	2.5	2.0	4.3
熔点/℃	30	155	327	232	300	704	961	1 063	321	1 748

软金属润滑主要用于真空和高温场合,通常膜厚为 0.25~1.0 μm,摩擦因数约为 0.3。薄膜

的寿命主要取决于膜与基体材料之间的黏附强度。

6.2.6 其他固体润滑剂

硼、聚酰亚胺等，它们的特性见表 20.4-25。

其他较新的固体润滑剂有：氟化石墨、氮化

表 20.4-25 几种固体润滑剂的特性

项 目	聚酰亚胺	聚对羟基苯甲酸	氟化石墨	氮化硼
密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 458		2 386~2 733	2 315
结晶构造	—	—	六方晶形	六方晶形
莫氏硬度	—	—	1~2	2
电阻率 / $\Omega\cdot\text{m}$	—		绝缘体	$< 10^{12}$
熔点 / $^{\circ}\text{C}$		500 (分解)	320~420 (分解)	3 100~3 300

7 气体润滑剂

常用的气体润滑剂有：空气、氢、氦、氮、氩、二氧化碳及水蒸汽等。

气体的黏度很低，如空气在常温下的黏度为 $17.5 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，只有润滑油的几万分之一，所以，摩擦因数极低，摩擦副温升也很低。气体能在很宽的温度范围内工作，所以气体润滑适宜高温或低温环境。气体化学稳定性好，无污染，抗原子辐射。

因为黏度低，所以气膜的承载能力和刚度较小，为了使气膜有一定的刚度，避免丧失稳定性，气膜应较薄，因而摩擦副的间隙也较小，摩擦副零件的加工精度要求较高，表面精度也要求高。

与润滑油不同，气体的黏度随温度升高而增大。几种常用作润滑剂的气体的黏度及其随温度的变化见图 20.4-3。

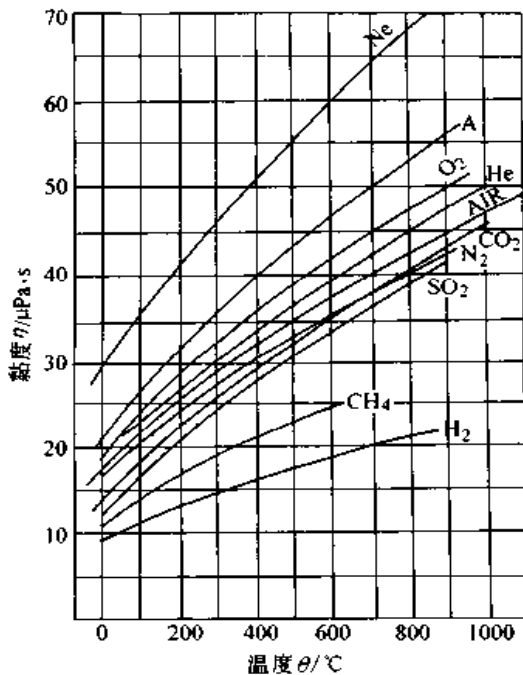


图 20.4-3 气体润滑剂的黏度

8 润滑剂的选择

速度和载荷是选择润滑剂类型的两个主要参数。图 20.4-4 给出对轴承而言各种润滑剂的速度和载荷极限。润滑剂的使用极限受轴承性能、寿命、温度等多种因素的影响，图中的极限是一般性的。对于液体润滑剂，基本性质是黏度，本图的极限以正确选择了黏度为前提。

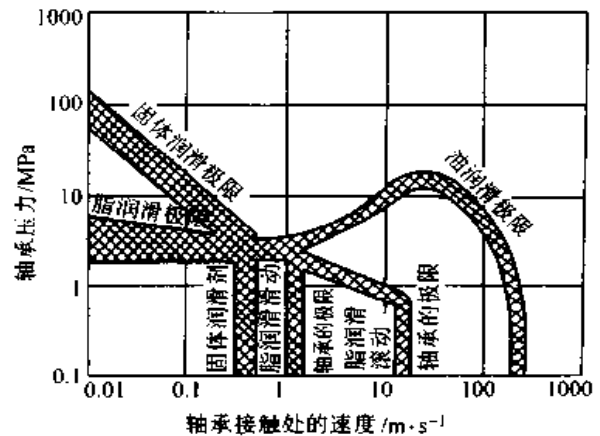


图 20.4-4 轴承用不同润滑剂时的速度与载荷极限

具体应用场合下的极限要依具体的支承元件和具体的润滑剂而定。例如，在图中，低速下润滑脂能承受的最大压力为 2 MPa，这是普通润滑脂的极限，当采用极压脂或 MoS_2 脂时，能承受的最大压力可达 6 MPa。同样，图中固体润滑剂的速度上限大约为 500 mm/s，但是，采用软金属作润滑剂时，由于它们有良好的导热性，故可在较高的速度下工作。

因此，只能把图 20.4-3 看做选择润滑剂的概括指导，不能做为实际的准则来用。

图 20.4-4 中未列出气体润滑剂的速度、载荷极限，一般地说，它适用于高速、轻载。

根据速度、载荷选择润滑剂类型的一般趋势

见图 20.4-5。

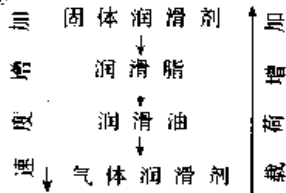


图 20.4-5 速度、载荷对选择润滑剂种类的影响

在真空条件下，蒸发这个因素可能完全超过速度、载荷的作用。在高真空度下只能采用固体润滑剂，因为它不蒸发。

在纺织品和食品生产中，为避免污染产品，可采用某些白色固体润滑剂。

不同的支承型式对润滑剂各种特性的要求不同，见表 20.4-26。

表 20.4-26 支承型式对润滑剂特性的要求

润滑剂特性	支 承 型 式					
	径向滑动轴承	滚动轴承	齿轮箱	开式齿轮传动、钢丝绳、链传动	钟表和仪表支承	铰链、滑块、弹键
边界润滑性	▲	▲▲	▲▲▲	▲▲▲	▲▲	▲
冷却能力	▲▲	▲▲	▲▲▲			
减摩能力	▲	▲▲	▲▲		▲▲	▲
黏附不流失性	▲	▲▲		▲▲	▲▲▲	▲
密封防污染能力		▲▲		▲		▲
使用温度范围	▲▲	▲▲	▲▲	▲		▲
防腐蚀性	▲	▲		▲▲		▲
抗挥发性	▲	▲		▲▲	▲▲	▲

注：▲愈多愈重要，无▲表示不重要。

9 润滑油、脂的更换周期

9.1 换油周期

各种润滑油和脂在机械设备中使用一定时间后均会产生物理和化学变化，使油品性能指标劣化，润滑性能下降。这时必须更换新油。造成润滑油性能劣化的主要原因有：

1) 水或冷却液进入润滑剂中产生乳化、水解、绝缘性能下降及油泥增多堵塞油路，腐蚀和锈蚀设备等现象，冬天易结冰，降低润滑性能；

2) 在高温工作环境下，润滑剂内添加剂消耗快，氧化和轻组分蒸发快，戊烷不溶物增加，将使磨损加剧、摩擦表面结胶等；

3) 在高速运转情况下，由于机械剪切、搅动的影响，润滑剂的稠化剂解聚，黏度指数下降，酸值增加，油膜被破坏，加快设备磨损；

4) 混入金属屑、尘埃等杂质，增加设备磨损；

5) 润滑剂氧化后的高分子混合物使润滑剂的黏度、酸值、机械杂质增加，增加设备磨损，产生结胶，阻塞滤油器；

6) 光电以及 γ 射线等的影响，使润滑剂黏度、酸值和机械杂质增加。

7) 润滑剂中可能生长微生物，使油发出异味，产生腐蚀性，使润滑油黏度改变，堵塞油路。润滑油中常见微生物及其特性见表 20.4-27。

表 20.4-27 润滑油中常见微生物及其特性

微生物	对酸碱的喜好	生长的产物	生长的类型
好氧菌	喜欢中性~碱性	完全氧化物(H_2O, CO_2)和某些酸类，有时产生氨	细胞分裂，团聚时生成胶状物，一般小于 $4 \mu m$
厌氧菌	喜欢中性~碱性	不完全氧化和还原产物(CH_4, H_2, H_2S)	细胞分裂，团聚时生成胶状物，一般小于 $4 \mu m$

续表 20.4-27

微生物	对酸碱的喜好	生长的产物	生长的类型
酵母	喜欢酸性	氧化物或不完全氧化物, pH值下降	细胞分裂, 团聚时生成胶状物, 约5~15 μm; 常在细菌污染后或细菌已被抑制时发生
霉菌	喜欢酸性	不完全氧化物(有机酸)	菌丝交织成可见的网状, 其他同酵母

因此, 当润滑油、脂的理化指标劣化到一定程度, 则必须更换成新油。

9.1.1 小型润滑系统的换油周期

储油量少于250 L之润滑系统属于小型润滑系统, 适宜从经验得出换油周期。用肉眼观察, 须报废的润滑油具有下列特征:

- 1) 颜色变深;
- 2) 流动困难;
- 3) 移动零件上留下褐色胶状物;
- 4) 出现沉积污垢或固体颗粒;
- 5) 金属表面出现腐蚀痕迹;
- 6) 散发出难闻的气味。

表 20.4-28 推荐的换油周期可供参考。

表 20.4-28 小型润滑系统的换油周期

润滑系统	油浴润滑系统		循环润滑系统	
	运转温度/℃	换油周期/年	运转温度/℃	换油周期/年
运转温度/℃	-70		-50	50~70 >70
换油周期/年	1		2~3	1 1.4

9.1.2 大型润滑系统的换油周期

储油量大于250 L之润滑系统应在润滑系统中设润滑油抽样点, 在系统运行中定期抽取润滑油样品检验。油品性能劣化程度超过了标准, 就应即时换油。对各种润滑油制定了换油指标的标准, 在表 20.4-29 中列出, 需要注意的是, 表 20.4-29 所列各项只要有一项达到换油指标就需更换新油。

表 20.4-29 换油指标

项 目	换 油 指 标								
	全损耗系统用油	车用汽油机油	车用柴油机油	拖拉机用柴油机油	车用齿轮油	液压油	汽轮机油	抗氨汽轮机油	工业汽轮机油
外观						不透明	不透明		
运动黏度变化率/%	±15	±25	+25, -15	+35, -15	+20, -10	±10	±20	±10	±10
闪点降低值/℃		<150~165					8	8	8
酸值/mgKOHg ⁻¹	>0.5	>2.0	>2.0	>2.0	>0.5	>0.3	>0.3	>0.2	>(0.2~0.3)
碱值/mgKOHg ⁻¹				<1.0					
色度增加量	3号					3号			
机械杂质/%	>0.2					>0.1	微量		
水分/%	>0.1	>0.2			>1.0	>0.1	微量	>0.1	>0.1
皮烧不溶物/%		>2.0			>2.0				
石油醚不溶物			>2.5						
苯不溶物			>1.5						
铜片腐蚀(100℃, 3h)						≥2级			
液相锈蚀							有锈		
破乳化时间/min							>60	>80	>60
铁含量/10 ⁻⁶	>100	>250	>400		>0.5				

注: 表中物质含量的百分数皆为质量分数。

9.2 换油步骤

因为油有黏性、油箱底部不平、各种附件上有许多缝隙，很难把废油及废油中的颗粒、水滴、乳化液和胶状物清除干净。要完全清除它们，必须拆卸润滑系统并清洗全部零件。这在经济上是不合理的，只有十分重要的润滑系统才采用拆卸清洗的方法。

换油可按下面的步骤进行。

1) 排油 打开全部排油旋塞，尽可能彻底地排干净废油。为使固体污染物、水分和沉积物少停留在油池底面，最好在润滑系统停止运转后立即排油。

表 20.4-30 冲洗后润滑系统中废油和污染物的残留量

充入冲洗油量	排油后系统中废油和污染物的残留量/%					
	40	20	10	5	2	1
储量的 25%	25	9	2.9	0.5	0.15	0.04
储量的 100%	16	4	1	0.25	0.04	0.01

典型的冲洗油是黏度比所有润滑油低的纯矿物油，可加入少量抗氧化剂以免储存期变质。残留的冲洗油会使新油黏度下降，并使添加剂的含量变小。

3) 拆卸 拆卸润滑系统要花费大量的劳动，应尽量避免。遇到下列情况必须部分或全部拆卸润滑系统：

- ① 在换油的同时要更换纸质或烧结滤芯；
- ② 由于更换了油的品种，必须更换与新品种油相容的密封和管路材料；
- ③ 要更换轴承或密封件；
- ④ 润滑油污染严重而润滑系统结构又不能排尽已污染的废油；
- ⑤ 发生了严重的微生物污染。

4) 清洗 在储量超过 1 000 L 的大型润滑系统中，发生严重污染或变质之后，最好采用毛刷和软管，利用工业洗涤剂或蒸汽清洗油池、储油箱。清洗时应堵住润滑系统与油池或油箱连通的管路。

清洗后重新注油之前，应把清洗液或水分清除干净。

需要时也可以用此法清洗润滑系统其余部分，如加热器。

5) 重新注油 旋紧所有的排油旋塞，严格

若润滑系统有加热器，应先启动加热器，使油温度升高并趁热排油。

可排除的废油的量占总储量的百分数取决于润滑系统的结构和润滑油的黏度，小型润滑系统约为 60%~90%，大型润滑系统约为 60%~98%。

2) 冲洗 排油之后，注入新油之前，用冲洗油冲洗润滑系统。使冲洗油充满润滑系统，启动油泵使冲洗油循环，然后排出。这将能排出更多的废油和污染物。对大型润滑系统可充入储量的 25% 的冲洗油进行循环，以节省冲洗油。

冲洗后润滑系统中废油和污染物的残留量见表 20.4-30。

防止注油时带入污染物。注油之前仔细清洗油桶、量杯、漏斗和注油口周围表面。在有灰尘的环境中，最好用液压泵把油从桶中泵入润滑系统，在注油口设置过滤网或纱布。重要的润滑系统，可配备封闭的注油小车。

注油时注意保证真正注满润滑系统，防止出现气塞。在任何情况下，启动润滑系统后的最初几分钟，应仔细观察油面指示器，看油面是否正常。

9.3 润滑油污染度

润滑系统内部生成的微粒污染物带有大量反映系统工作状态的信息，通过对油中微粒污染物的分析，可以为系统的磨损监测和故障诊断提供重要依据。

润滑油污染度是指单位容积油液中固体颗粒污染物的含量。可以用质量或颗粒数表示污染物的含量，其测定方法有称重法和颗粒计数法。

9.3.1 称重法

称重法是测定油中颗粒污染物的质量，测定值一般用 mg/L 表示。

ISO4405 规定，采用两片直径 47 mm，孔径 0.8 μm 的微孔滤片，烘干后分别用精密天平称重。将两片滤片重叠夹紧在滤片夹持器内，用真

空吸滤瓶过滤 100 mL 样油，然后再把滤片烘干，并分别称重，用下式计算样油中颗粒污染物的质量浓度 (mg/L)

$$\rho = (\Delta m_E - \Delta m_T) / V \times 1000 \quad (20.4-9)$$

式中 Δm_E ——过滤样油后上滤片的质量增量 (mg);

Δm_T ——过滤样油后下滤片的质量增量

(mg);

V ——样油容积 (mL);

称重时天平读数应精确到 0.05 mg。

9.3.2 颗粒计数法

颗粒计数法是测定样油单位容积中各种尺寸范围颗粒污染物的颗粒数 (即颗粒浓度)。目前通用的颗粒计数方法和仪器列于表 20.4-31。

表 20.4-31 颗粒计数方法和仪器

方法	原理	仪器	测量范围/ μm	实例
视场扫描	目测	光学显微镜	>5	
	自动扫描	图象分析仪	>1	Quantiment(英), TTMC(英)
		扫描电子显微镜	0.02~50	
液流扫描	遮光	遮光型自动颗粒计数器	1~9 000	HIAC/ROYCO (美)
	光漫射	激光型自动颗粒计数器	0.5~25	HIAC/ROYCO (美)
	电阻变化	电阻型自动颗粒计数器	1~100	Coulter (英)

9.3.3 污染度等级

我国已制定了油液污染度国家标准，等效采用 ISO 4406。用两个代号表示污染度等级，前面的代号代表 1 mL 油液中大于 5 μm 颗粒数的等级，后面的代号代表 1 mL 油液中大于 15 μm 颗粒数的等级。两个代号之间用一斜线分隔。例

如，污染度等级 20/17 表示每毫升油液中大于 5 μm 的颗粒数在 5 000~10 000 之间，大于 15 μm 的颗粒数在 640~1 300 之间。机床的静压润滑系统常限定污染度等级为 16/13，润滑系统限定为 17/14，汽轮发电机润滑系统限定为 14/11。

污染度国家标准见表 20.4-32

表 20.4-32 污染度国家标准

每毫升油液中的颗粒数	等级代号	每毫升油液中的颗粒数	等级代号	每毫升油液中的颗粒数	等级代号
$>5 \times 10^6$	30	$>2.5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$	19	$>2.5 \sim 5$	9
$>2.5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$	29	$>1.3 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^3$	18	$>1.3 \sim 2.5$	8
$>1.3 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$	28	$>0.64 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^3$	17	$>0.64 \sim 1.3$	7
$>0.64 \times 10^6 \sim 1.3 \times 10^6$	27	$>0.32 \times 10^3 \sim 0.64 \times 10^3$	16	$>0.32 \sim 0.64$	6
$>0.32 \times 10^6 \sim 0.64 \times 10^6$	26	$>0.16 \times 10^3 \sim 0.32 \times 10^3$	15	$>0.16 \sim 0.32$	5
$>0.16 \times 10^6 \sim 0.32 \times 10^6$	25	$>80 \sim 160$	14	$>0.08 \sim 0.16$	4
$>80 \times 10^3 \sim 160 \times 10^3$	24	$>40 \sim 80$	13	$>0.04 \sim 0.08$	3
$>40 \times 10^3 \sim 80 \times 10^3$	23	$>20 \sim 40$	12	$>0.02 \sim 0.04$	2
$>20 \times 10^3 \sim 40 \times 10^3$	22	$>10 \sim 20$	11	$>0.01 \sim 0.02$	1
$>10 \times 10^3 \sim 20 \times 10^3$	21	$>5 \sim 10$	10	≤ 0.01	0
$>5 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$	20				

10 润滑管理

润滑管理的目的是以对机械设备进行正确润滑为基础，预防设备运转性能下降和出现故障，

提高其生产率，发挥设备的应有功能与经济效益的管理活动。润滑管理的对象是含摩擦副的机械部件、润滑装置和润滑剂。

10.1 润滑管理的经济效益

10.2 润滑管理系统

良好的润滑管理可以获得显著的经济效益，润滑管理系统见图 20.4-6。表 20.4-33 是一个实例的统计数据：

表 20.4-33 润滑管理的经济效益

项 目	效率率	说 明
因磨损减少而节约的能源费用	5.5%	可以使消耗在摩擦上的能源减少 25%
减轻润滑作业劳动量而节约的工资费用	2.0%	因采用自动给油装置、集中给油装置以及换油方法的改进，节省了劳动
降低润滑剂消耗量而节约的费用	2.0%	因润滑设计的完善、润滑剂保管方法改进、品种统一、寿命提高而降低了润滑剂的消耗量
减少的维修费用	44.7%	因润滑管理完善使机械零件寿命延长，而减少了维修费用
减少因故障而停工所创造的价值	22.3%	因润滑改善而故障减少，故停产的机会也减少了
因运转率和效率提高而减少的设备投资	4.1%	机械的运转率提高，效能得到发挥，设备投资自然减少
因设备寿命提高而减少的设备投资	19.4%	设备使用年限增加，设备投资当然会减少

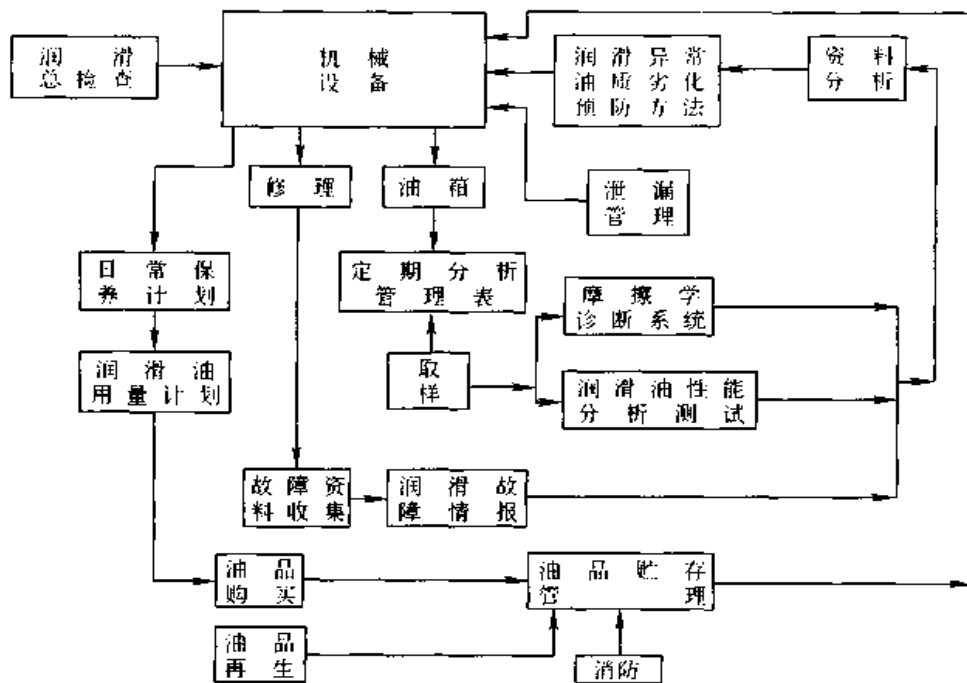


图 20.4-6 润滑管理系统图

10.3 润滑剂的购买、贮存、发放与防火

买、贮存和管理。

(1) 品种的核对

10.3.1 润滑剂的购买

拟定润滑剂使用计划，做到适时适量购买。通过润滑设计，尽量减少润滑剂品种，以便于购

润滑油品种繁多，更因采用各种添加剂而复杂化。采购时最好由买、卖双方会同采集试样，委托适当的检验机构进行检验判定。若无此条

件，可请供应商提供油品分析检验报告。

(2) 容量的核对

按 5℃ 标准状态进行容量核对。

1) 用尺测定法

此法通常用于测定陆地贮油槽、船舶、槽车等大容量润滑油。量尺时油槽应成水平位置，避免油面波动，最少测量 3 次取其平均值。

尺的准确性须经检查，操作须正确

2) 按密度和重量计算的方法

此法通常用于可测定重量的较小容量润滑油。

10.3.2 润滑剂的贮存

(1) 保管不良导致的污染

用桶、罐等容器保管润滑剂时，由于下列原因将导致新润滑剂被污染。

- 1) 桶盖未盖紧；
- 2) 存放环境内的灰尘；
- 3) 油桶立置，桶盖口的积水；
- 4) 未装满油桶中的空气；

(2) 保管要领

- 1) 将润滑油桶水平放置；
- 2) 油桶立放时应保持一定斜度；
- 3) 避免阳光直射油桶，最好存放在地下室或地下坑道中；
- 4) 油桶应装满安全容量，用完一桶再开新的一桶。
- 5) 润滑剂应分门别类存放。

10.3.3 润滑剂的发放

注意应发放的润滑剂的品种、牌号、数量，避免发错或品种混合。

发放润滑剂时应使用一次给油量的计量器，以免过量给油，造成浪费。

在取油口安置承受器，把泄漏的润滑油及时回收。

10.3.4 润滑剂的安全技术

贮存、发放、使用各种润滑油的过程中实际都蕴藏着一定的危险因素。为了避免可能出现的火险、爆炸，必须注意使用润滑油的安全技术。

(1) 潜在的危险因素

1) 可燃性

润滑油是可燃的，矿物润滑油虽然不是非常易燃物质，但可在空气中燃烧。润滑油具有挥发

性，他们以不同的速度蒸发并散发出蒸气。润滑油的各种蒸气大多比空气重，故能堆积在最低的位置，聚集到危险的浓度，一经点火就能爆炸。

2) 润滑剂蒸气与空气的混合

润滑油蒸气与空气的混合物，在温度与润滑油蒸气浓度合适的条件下，有自燃爆炸的可能。图 20.4-7 表示在大气压下润滑油蒸气与空气的混合物的自燃区域。

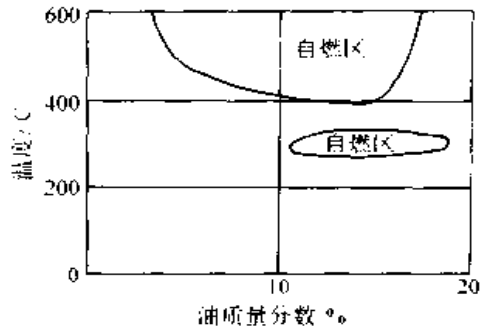


图 20.4-7 大气压下润滑油蒸气与空气的混合物的自燃区域

由图 20.4-7 可以看出：平衡的油气混合物不会自燃；油蒸气的质量分数不足 3.3% 或超过 19% 的混合物在图示温度范围内都不会自燃。

在发放、使用润滑油的过程内，与空气接触是不可避免的。图 20.4-7 显示，当打开箱盖新鲜空气进入箱内，混合物浓度下降，若温度合适就会引起自燃爆炸。

3) 火源

导致爆炸的火源很多，如静电、火花、电弧、火焰等。随意扔掉的未熄灭的烟头、火柴也是最常见的火源之一。

(2) 对潜在危险的控制方法

润滑油蒸气在空气中的浓度达到一定的量，并且，一般在一个相当窄的范围内才会引起爆炸，所以，控制润滑油的蒸发量是最好的安全技术。控制润滑油蒸发量的方法有：

- 1) 不用时立即将润滑油容器的盖子盖紧；
- 2) 使暴露的液面面积维持在最小；
- 3) 仔细操作，防止溅撒，以减少空气中润滑油蒸气的浓度。

有些润滑方法不可避免大的蒸发量，这时只能通过机械排气降低润滑油蒸气浓度。

第5章 润滑方法与润滑系统设计

向摩擦表面供给润滑剂的方法称为润滑方法。输送、分配、调节、冷却和净化润滑剂、指示、报警并监控其压力、流量与温度等参数和故障的整套装置为润滑系统。它对保证机器具有良好的润滑状况、工作性能和长的使用寿命起着重要的作用。

机械设备的润滑系统必须满足以下要求：

- 1) 保证均匀、连续地供给一定压力的润滑剂，润滑剂量可调并满足要求；
- 2) 运转可靠性高，无泄漏，能防止外界环境污染润滑剂；
- 3) 便于检查、调整、维修、更换润滑剂。结构简单，价格低；
- 4) 能使润滑剂温度适当，并保持在允许的范围內；
- 5) 能指示工作参数。

润滑系统设计的依据是：摩擦副的结构特点和运转条件、润滑剂的品种和润滑方法。

1 润滑方法及其选择

1.1 固体润滑方法

使用固体润滑剂的润滑方法就是在摩擦表面上形成涂层或覆盖层的方法。经常采用的方法有以下几种：

- 1) 直接使用固体润滑剂粉末；
- 2) 将固体润滑剂粉末分散于水、酒精、乙醇、丙酮等挥发性分散介质中，制成悬浮液使用；
- 3) 以固体润滑剂粉末为主体，以油、脂为载体，制成糊状、膏状润滑剂使用；
- 4) 将固体润滑剂粉末与胶黏剂混合后喷涂于摩擦表面，制成黏结型干膜润滑剂使用；
- 5) 用物理方法（离子镀、溅射、真空沉积、电泳、等离子喷涂等）使固体润滑剂在摩擦表面形成固体润滑膜；
- 6) 与有机材料（各种塑料）或无机材料（金属、陶瓷）制成复合材料使用。

1.1.1 固体润滑方法的特性与使用

(1) 粉末固体润滑剂的使用

粉末润滑省工、省时，使用方便，可以提高工效，延长零件寿命。

应用粉末润滑剂的主要缺点是不能维持长时间润滑，也不易补充，如果采用喷粉润滑会造成污染。

擦涂固体润滑剂粉末的表面最好进行预处理，如磷化、喷砂、喷丸、阳极氧化等，使表面轻微粗糙化，以便在微坑或凹陷处储存一定量的润滑粉末，延长擦涂膜的寿命。

粉末润滑可以用于小间隙配合零件的装配、螺纹联接、切削刀具、拉拔和热挤压加工的坯料等处。

(2) 固体润滑剂的悬浮液

将悬浮液刷涂或浸涂到工件表面，分散介质挥发后表面存留一层润滑剂薄膜。工件表面也可以进行磷化、喷砂等粗糙化处理，以提高润滑剂的附着力和粘附量。

除水以外，其他可采用的分散介质有污染，容易着火，成本亦高，使用受到限制。

(3) 干膜润滑剂

干膜润滑剂使用最早，应用极广。

干膜润滑在下列场合显示出优越性：

- 1) 润滑油、脂难以供给的场合；
 - 2) 长期搁置备用的设备，如飞机的弹射椅、枪炮的枪膛；
 - 3) 不能出现油、脂污染的设备，如照相机快门、光学仪器、电子显微镜等；
 - 4) 超高低温设备。零下深冷环境或高于200℃以上的温度下油、脂已不能工作；
 - 5) 辐照及真空环境下工作的设备；
 - 6) 在腐蚀环境下工作的设备，如长期在露天搁置的建筑设备、与海水盐雾接触的设备、某些化工生产设备；
 - 7) 在特定条件下，如超高真空、高温、氧化、腐蚀环境，需要防止相互粘接的摩擦副。
- 对于不同的使用目的和环境应选用不同的干

膜润滑剂。在高温环境下应选用无机盐（硅酸盐、磷酸盐、硼酸盐、钼酸盐）作粘接剂的干膜，或陶瓷膜。在腐蚀环境下应选用树脂作粘接剂的干膜。在底材材质不宜承受高温的场合，应该采用常温下固化的干膜。需与油、脂并用的场合，应选用耐油性好的干膜。有水蒸汽、潮湿环境下的设备，不应选用易溶于水的无机盐类干膜。在与有机溶剂接触场合下宜选用热固性的、耐溶剂性好的或无机盐类干膜。

使用干膜润滑剂时应注意以下几点。

- 1) 干膜应涂在摩擦偶件中表面硬度较高的零件上。
- 2) 在线、面接触的滑动面上，干膜应涂在面积较大的一方，当两面积之比在 1:5 以上时，在接触双方均需涂覆才有效。
- 3) 在使用过程中干膜润滑剂的性能会急剧下降，其使用寿命离散性较大，故最好与油脂并用。

(4) 高分子复合材料

高分子复合材料可以在无油润滑条件下使用，也可以用水作润滑剂。应用高分子复合材料时应十分注意其许用速度和载荷，否则材料将变软而不能正常工作。

复合材料不同于粉末、干膜、膏状润滑剂，它不仅作为润滑材料，也作结构材料，通常可作

齿轮、轴瓦（套）、活塞、密封件、导轨、滑块、保持架、闸瓦、摩擦片、万向节等。

(5) 金属基复合材料

以粉末冶金方法制造的复合材料具有良好的自润滑性，在有油或无油润滑的条件下均可使用。制作简单、成本较低、应用广泛，使用时应注意其许用载荷。

(6) 膏状润滑剂

这类润滑剂有二硫化钼油膏，齿轮、轮轨润滑成膜膏和白色润滑成膜膏等，其固体润滑剂的质量分数应在 20% ~ 30% 范围内；它们通常应用于露天工作的开式齿轮、立式安装的齿轮机构和不能采用润滑油润滑的设备中。

1.1.2 几种固体润滑剂的使用

(1) 用二硫化钼的润滑方法

1) 以粉末形式直接使用 以粉末形式直接涂抹在摩擦表面上，按表面粗糙度选择 MoS₂ 颗粒的尺寸，如粉末颗粒太小，则隔离两个表面的效果不佳，如颗粒太大，又难以进入摩擦副的间隙。

涂抹干粉所得干膜厚度一般小于 0.1 μm，且不均匀，故使用寿命较短，润滑效果较差。

2) 使用分散剂 用固体润滑材料的分散剂涂抹在摩擦表面上，较之干粉更便于形成均匀的干膜。MoS₂ 分散剂的特性见表 20.5-1。

表 20.5-1 MoS₂ 分散剂的特性

分散主体	载体	固体物质量分数	粒子规格	密度/ kg·m ⁻³	稀释剂	特 性	典 型 应 用
胶体 MoS ₂	矿物油	10%	最小	1 100	矿物油	低沉降率；能均匀应用固体物的细粒子	用于工业和车用极压齿轮油作添加剂；钻铰润滑剂
	聚乙二醇	10%	次小	1 070	聚乙二醇	残留少、抗高温、液体载体	用作极端温度下的润滑剂、如泥芯炉推车轴承
	异丙醇	20%	次小	950	工业酒精	载体迅速蒸发产生非树脂粘接干膜	过盈配合、旋合螺纹抗粘附涂层、轻载机构
	三氯乙烯	20%	次小	1 460	三氯乙烯	载体迅速蒸发	轻载装置
	矿油精	25%	次小	960		残留少，蒸发中等	高温润滑剂，用于传动链、旋窑车轮
	水	35%	次小	1 320	水	残留少，易蒸发	金属加工，如拉丝
MoS ₂	矿物油	65%	较大	1 800	矿物油		制特种脂
石墨+	矿物油	37%	较大	1 200		摩擦因数低，抗粘附	旋合螺纹抗粘附涂层

3) 粘接覆盖层 将 MoS_2 用粘接剂调配涂在摩擦表面上。它不但能涂在钢等金属表面, 也能涂在塑料、橡胶表面。基体材料愈硬, 覆盖层与基体材料粘接愈牢。涂在金属表面上时表面最适宜的粗糙度 R_a 在 $0.32 \mu\text{m} \sim 1.5 \mu\text{m}$ 之间。粘接前表面应除锈、清洗, 表 20.5-2 列出几种基体金属的净化处理方法。表 20.5-3 列出几种粘接 MoS_2 覆盖层之粘接剂及其特性。

4) 化学膜 在金属表面涂镀一层铜, 然后放在含硫的气氛中加热, 生成 MoS_2 膜。这种膜粘附最为牢固, 承载能力极高。

5) 浸渍和烧结零件 在用塑料或粉末冶金法制造齿轮、轴承、凸轮、密封环等零件时, 可以在粉状材料中混入 MoS_2 粉末。这样, 会在摩擦过程中连续向摩擦表面提供 MoS_2 膜。

6) 等离子溅射膜 利用等离子焰所产生的高温将丝状或粉状 MoS_2 熔化, 喷射到零件表面上, 形成类似电镀的膜。

等离子溅射 MoS_2 时基体温度应大于 70°C , 并不宜在铜、青铜、银等表面溅射。

(2) 用石墨的润滑方法

用石墨的润滑方法见表 20.5-4。

表 20.5-2 粘接前金属表面的净化处理

基体金属	净化处理方法	基体金属	净化处理方法
钢	磷化处理、喷砂处理	镉、锌	磷化处理
不锈钢、铬、镍	喷砂、液体珩磨或蒸汽处理	镁和镁合金	喷砂, 然后重铬酸盐处理
铝和铝合金	钝化处理	钛和钛合金	蒸汽或喷砂, 或用硝酸氢氟酸混合物侵蚀、
铜和铜合金	喷砂处理		有时采用氟磷酸盐处理

表 20.5-3 MoS_2 膜的粘接剂及其特性

种 类	丙烯酸类	纤维素	醇酸类	酚类	环素类	硅类	硅酸盐类	玻璃类
固化温度/ $^\circ\text{C}$	20	20	120	150	200	250	20	300-600
最高温度/ $^\circ\text{C}$	65	65	95	150	200	300	450	550
与基体的粘附力	还好	还好	好	好	极好	还好	还好	好
相对磨损寿命	7	25	1	75	18	7	50	50

注: 1. 固化速度为 1 h;

2. 丙烯酸类粘接剂可用于橡胶基体;

3. 纤维类粘接剂可用于木材、塑料基体。

表 20.5-4 石墨的润滑方法

名 称	方 法	应 用 举 例
石墨分散剂	将石墨分散在水、油或其它溶剂中	模具、铸型、螺纹联接、磨台、汇电排
粘接薄膜	用热固性树脂粘接	办公器具、橡胶和铝件
整体碳-石墨	用碳-石墨压制零件	碳刷、轴瓦
金属石墨	将石墨或碳-石墨零件浸渍全熔金属; 烧结	轴瓦

(3) 用聚四氟乙烯的润滑方法

1) 聚四氟乙烯片材 将聚四氟乙烯片材冲压成唇型密封圈、轴瓦、活塞环和垫片等。成功地应用于带式输送机、打字机、缝纫机、电唱机唱盘、水泵、纺织机械和农业机械等设备上。

2) 聚四氟乙烯涂层 可以用烧结法或粘接法形成聚四氟乙烯膜。用树脂粘接聚四氟乙

烯膜, 固化温度低于烧结膜, 并较烧结膜致密。这种方法可用于武器、齿轮、铰链、销轴、轴承、阀门和活塞环等处。

(4) 用软金属的润滑方法

可以通过真空沉降、化学镀涂和机械擦抹等方法获得软金属薄膜。薄膜的寿命主要取决于膜与基体材料之间的粘附强度。

1.2 油、脂润滑方法与润滑系统

杂程度、装置成本、可靠性、冷却与清洁摩擦副能力等方面有很大差别。润滑油、脂常用润滑方法及其特点见表 20.5-5。

1.2.1 油、脂润滑方法

用润滑油、脂的润滑方法有多种，它们在复杂程度、装置成本、可靠性、冷却与清洁摩擦副能力等方面有很大差别。这些润滑方法的经济性比较见表 20.5-6。

表 20.5-5 润滑油、脂常用润滑方法及其特点

编号	润滑方法	供油质量	可靠性	冷却能力	耗油量	装置复杂性	维护工作量	油的回收	低速限制	应用举例
1	手工加脂润滑	中	中	差	中	小	中	不能	无	低速轻载滚动轴承；重载高温滑动轴承、导轨
2	集中压力供脂润滑	好	好	差	中	大	小	不能	无	低速高温滚动轴承；重载高温滑动轴承、导轨；低速重载齿轮
3	手工加油润滑	差	差	差	多	低	大	不能	无	不要求起冷却作用的所有摩擦副
4	滴油润滑	中	中	差	多	中	中	不能	无	中等载荷速度的轴承、导轨、气缸、齿轮传动
5	油环、油盘润滑	好	好	中	少	中	小	能	有	中等载荷速度的轴承、齿轮传动
6	油绳、油垫润滑	中	中	差	中	中	中	不能	无	低速滚动轴承；一般滑动轴承、导轨
7	油浴、飞溅润滑	好	好	好	少	中	中	能	有	重要轴承、导轨、齿轮箱
8	油雾润滑	优	好	优	少	高	小	不能	无	高速滚动轴承、齿轮箱
9	油气润滑	优	好	极优	极少	高	一	无需	无	高速滚动轴承等
10	循环润滑	优	好	优	中	高	中	能	无	主要的高速轴承、齿轮箱、导轨

表 20.5-6 润滑油、脂润滑方法的经济性

润滑方法		初始成本	系统维修	初次装油、脂	随后的润滑成本	随后的劳动成本	备注
手工加脂润滑	不补充脂	很便宜	无	很便宜	无	无	润滑脂的寿命就是轴承寿命
	补充脂	便宜	便宜	便宜~中等	中等~大	大	定期检查很重要
集中压力供脂润滑		中等~大	中等	中等~大	中等	中等	需要技术较高的工人，成本随系统的复杂程度改变
油绳、油垫润滑		便宜	便宜	便宜	便宜	便宜	添油不频繁
滴油润滑		便宜	便宜	便宜	中等~大	中等	滴油装置需经常检查
油环、油盘润滑		便宜	无~便宜	便宜	便宜	便宜	无需经常照管
油浴、飞溅润滑		便宜	便宜	中等	便宜~中等	中等	必须注意油面高度
油雾润滑		中等~大	大	便宜	便宜	中等~大	需要提供压缩空气和技术较高的工人
循环润滑		大	大	大	便宜	中等	成本随系统复杂程度增加

1.2.2 润滑油、脂的润滑系统

润滑油、脂的润滑系统分为分散润滑系统和集中润滑系统两大类。集中润滑系统有全损耗系统、静压润滑系统和循环润滑系统。按供油方式全损耗集中润滑系统分为6种型式，即：节流式，利用流体阻力分配润滑剂；单线式，在间歇压力下通过一条主管路供给润滑剂；双线式，在压力作用下由一个换向阀交替变换的两条主管路和定量分配器供给润滑剂；多线式，由多头泵直接把润滑剂供给各润滑点；递进式，由压力操纵的分配器按预定递进程序将润滑剂供给各润滑点；油雾/油气式，由油雾/油气发生器供给悬浮于气流中的润滑油微粒。循环集中润滑系统只有前5种。

每种润滑系统又有手动、半自动和自动3种。上述各种型式的润滑系统还可以组合起来使用，称为组合式。

1.3 气体润滑方法

使用气体润滑剂的润滑方法有两种：一种靠自吸作用，从周围环境吸取气体进入摩擦副间隙；一种由气泵或气瓶向摩擦副提供压力气体。

1.4 润滑方法的选择

采用固体润滑剂时，根据润滑剂和基体材料的特性、被润滑零件的形状选择润滑方法。

采用润滑油、脂时，根据被润滑零件的运转条件和参数选择润滑方法，可参考表20.5-7。

表 20.5-7 根据机械零件及其运转条件的润滑方法选择

零件名称	运 转 条 件								
	高温	常温	低温	高速	中速	低速	尘土污物	潮气	真空
滚动轴承	1, 2, 8*, 10*	1, 2, 7, 8*, 10*, 4	4, 7, 8*, 10	4, 8*, 9, 10	1, 2, 4, 6, 8*, 10*	1*, 2, 4, 6, 7, 8, 10	1, 2*, 4, 10	1, 2*, 4	6
动压轴承	4, 8, 10*	1, 2, 4, 5, 6, 7, 10	4, 5, 6, 7, 10	4, 7, 8, 10	4, 5, 6, 7, 8, 10*	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10	1, 2*, 4, 10	1, 2, 3, 4*	1, 6
普通滑动轴承	1, 2*, 10*	1, 2*, 3, 4, 5, 6	1, 3, 4, 7	—	—	1, 2*, 3, 4, 6, 7, 8	1, 2*, 3, 4, 6	1, 2*	1*
滑块与导轨	2*, 7, 10*	1*, 2, 3, 4, 6, 10	1, 3, 4, 6, 7, 10	1, 2, 3, 4, 7, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10*	1, 2*, 3, 4, 6, 10	1, 2*, 3, 4	1, 2*, 3, 4, 10	1*, 6
螺旋	1, 2, 7, 10*	1*, 2, 3, 4, 6, 7, 10	1, 2, 7, 10	1, 2, 7, 8, 10	1, 2, 3, 4, 7, 8, 10	1, 2*, 3, 4, 7, 10	1, 2	1, 2*, 3, 4, 6, 10	1*, 2*, 6
齿轮	1, 2, 7, 10*	1, 2, 6, 8, 10*	1, 2, 3, 4, 7, 8, 10	3, 4, 8, 10*	1, 2, 3, 4, 7, 8, 10	1, 2, 3, 4, 6, 7, 10	1, 2, 10	1, 2, 3, 4, 10	1*, 2*

注：1. >150℃为高温；
 2. <-20℃为低温；
 3. 表中数字为可供选择的润滑方法编号(编号见表20.5-6),应优先选用带*的方法。

2 润滑脂润滑及其装置

润滑脂润滑属全损耗性润滑。

2.1 手加脂润滑与装置

2.1.1 油杯润滑

标准的脂用油杯是旋盖式。它是间歇供脂的装置，利用人工旋转杯盖以小的压力向间隙供

脂。正常运转时，每班应加脂两次，每次将杯盖向下旋1/4圈。

旋盖式油杯的结构和尺寸见表20.5-8。

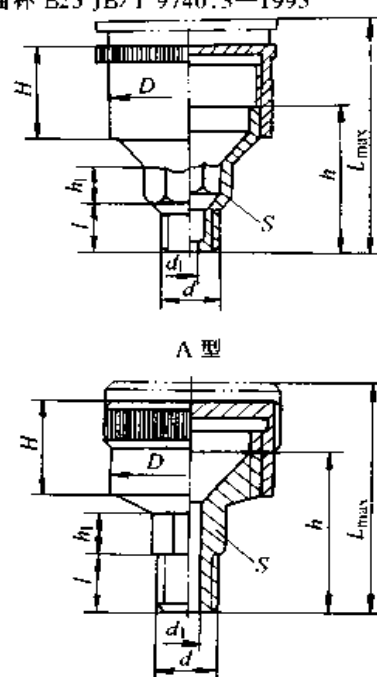
2.1.2 脂枪润滑

手加压注脂用油枪常用的有压杆式(见图20.5-1)和手推式(见图20.5-2)两种。标准油枪的储油量有100、200和400 cm³三种。每个润滑点都必须安装直通式或接头式压注油杯，它

们是与脂枪匹配的偶件。也有利用压缩空气的压力加脂的油枪。

压注式油杯的结构和基本尺寸见表 20.5-9 和表 20.5-10。

表 20.5-8 旋盖式压注油杯 (摘自 JB/T 9740.3—1995) (mm)

标记示例 最小容量 25 cm ³ B 型旋盖式油杯 油杯 B25 JB/T 9740.3—1995	最小容量/cm ³	d	l	H	h	h ₁	d ₁	D		L 最大	S	
								A 型	B 型		基本尺寸公差	
 <p>A 型</p> <p>B 型</p>	1.5	M8 × 1	8	14	22	7	3	16	18	33	10	h8
	3	M10 × 1		15	23			20	22	35		
	6	M14 × 1.5	12	17	26	10	5	26	28	40	13	
	12			20	30			32	34	47		
	18	M16 × 1.5	12	22	32	10	5	36	40	50	18	
	25			24	34			41	44	55		
	50	M16 × 1.5	12	30	44	10	5	51	54	70	21	
	100			38	52			68	68	85		
	200	M24 × 1.5	16	48	64	16	6	—	86	105	30	

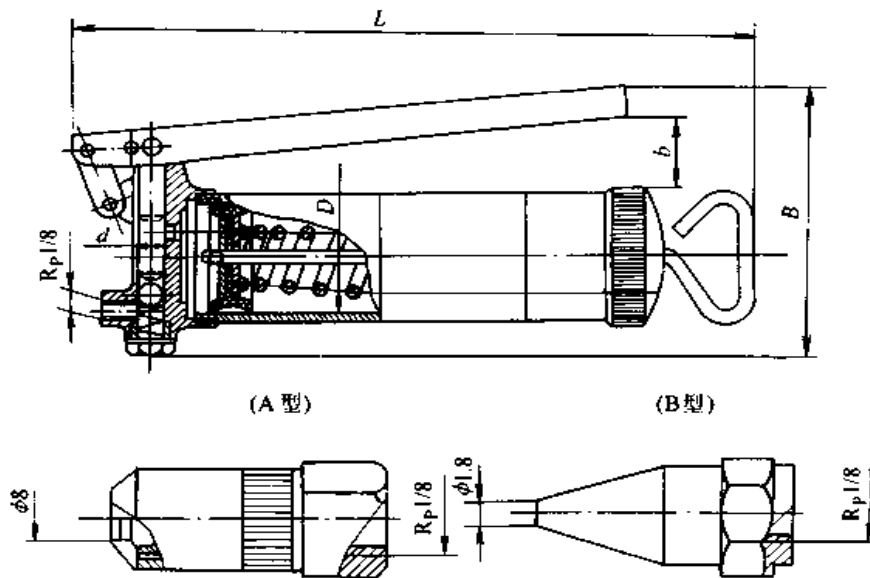


图 20.5-1 压杆式油枪基本型式与尺寸
标记示例：油枪 A200 JB/T 7942.1—1995

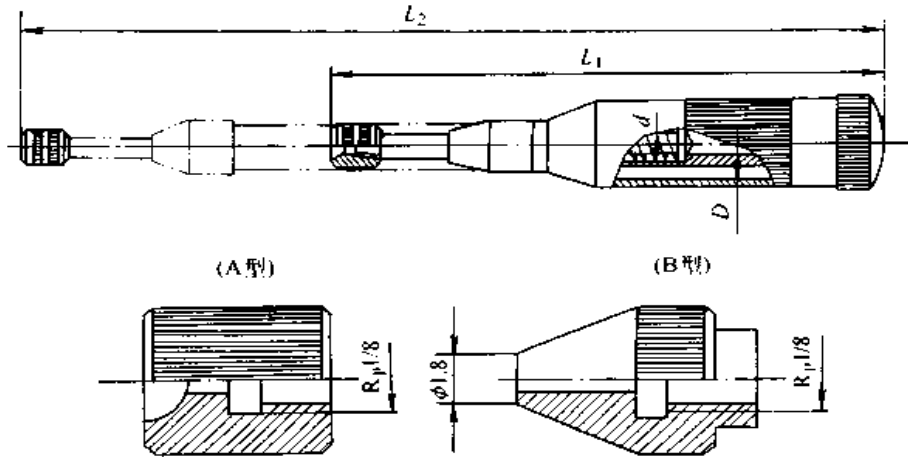


图 20.5-2 手推式油枪基本型式与尺寸

标记示例：油枪 B100 JB/T 7942.3—1995

表 20.5-9 直通式压注油杯 (摘自 JB/T 9740.1—1995)

(mm)

标记示例： 联接螺纹为 M6 直通式压注油杯 油杯 M6 JB/ T9740.1—1995			d	H	h	h_1	S		钢球 GB308—1989
					基本尺寸	公差			
	M6	13	8	6	8				
	M8	16	9	6.5	10	h8	3		
	M10 × 1	18	10	7	11				

表 20.5-10 接头式压注油杯 (摘自 JB/T 9740.2—1995)

(mm)

标记示例： 联接螺纹为 M8 × 1 90°接头式压注 油杯： 油杯 90°M8 × 1 JB/T 9740.2—1995			d	d_1	α	S		直通式压注油杯 (按 JB/T 9740.1 —1995)
					基本尺寸	公差		
	M6	3						
	M8 × 1	4	45° 90°	11	h8	M6		
	M10 × 1	5						

2.2 集中供脂系统

润滑脂俗称干油，故集中供脂系统又称干油集中润滑系统。该系统利用适当的泵压，定时、定量地发送润滑脂到设备的各个润滑点，保证各摩擦副维持可靠和足量的润滑，而能持久正常运行。用泵加压来自大型容器的润滑脂，使之通过输送管进入定量装置，定量、顺序地压送入润滑点，起润滑作用。因此，一般将泵安置在接近润滑点的适中位置。系统是封闭的，能防止润滑脂被污染。

2.2.1 集中供脂系统的类型

集中供脂系统的类型见表 20.5-11。

2.2.2 管路计算

脂在管路中流动的切应力 τ 的计算式为

$$\tau = \rho d / (4l) \quad (20.5-1)$$

式中 ρ ——泵压；

d ——管子内径；

l ——管子长度。

脂在管中的流量为：

$$q = \pi d^3 S / 42 \quad (20.5-2)$$

式中 S ——切应变率。

润滑脂切应变率与切应力的关系曲线通常应由制造厂提供，其典型形式见图 20.5-3。管路计算步骤见表 20.5-12。

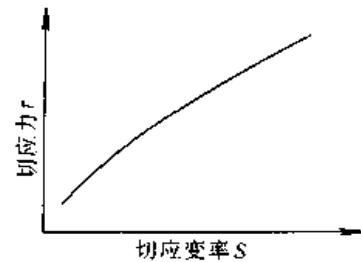


图 20.5-3 润滑脂切应力与切应变率典型关系曲线

表 20.5-11 集中供脂系统的类型

类型	简图	运 转	驱 动	润滑脂稠度等级	管路标准压力/MPa	调整与管长限度
直接供脂式	单独的活塞泵	由凸轮或斜圆盘使各活塞泵 P 顺序工作	电动机 机械 手动	000~2	0.7~2.0	在每个出口调整冲程； 9~15 m
直接供脂式	阀分配系统	利用阀把一个活塞泵的输出依次供给每条管路	电动机 机械 手动	000~3 000~2	0.7~2.0	由泵的速度控制输出量； 25~60 m
	分支系统	每个泵的输出由分配器分至各处	电动机 机械	000~3	0.7~2.8	在每个输出口调整或用分配阀组调整； 泵到分配阀 18~54 m； 分配阀到润滑点 6~9 m
间接供脂递进式	单线式	第一阀组按 1, 2, 3, …… 顺序输出。其中的一个阀使第二阀组工作。以后照此顺序工作	电动机 机械 手动	000~2	14.0~20.0	用不同容量的计量阀，否则靠循环时间调整； 干线 150 m；支线 6~9 m

续表 20.5-11

类型	简图	运 转	驱 动	润滑脂稠度等级	管路标准压力/MPa	调整与管长限度
间接供脂递进式 单线式反向		回动阀 R 每动作一次各阀依次工作	电动机 机械 手动	000-2	1.4~2.0	用不同容量的计量阀, 否则靠循环时间调整 干线 150 m 支线 6~9 m
间接供脂递进式 双线式		脂通过一条管路按顺序运送到占总数一半的出口。回动阀 R 随后动作, 消除该管路压力, 同时通过另一管路把脂送到其余出口	电动机 机械 手动	000-2	1.4~2.0	用不同容量的计量阀, 否则靠循环时间调整 干线 150 m 支线 6~9 m
间接供脂单线式		由泵上装置使管路交替加压、卸压。有两种系统: 利用管路压力使阀的活塞射出脂和利用弹簧力使阀的活塞射出脂	电动机 手动	000-1	~17.0 ~8.0	工作频率能调整。输出量由脂的特性决定; 120 m
间接供脂并列式 油或气调节单线式		泵使管路或阀工作, 用油压或气压操纵阀门	电动机	000-3	~40	用周期定序分配阀调整 600 m
间接供脂并列式 双线式		润滑脂压力在一条管路上同时操纵占总数一半的出口, R 阀反向, 把脂导向另一管路, 使其余一半出口工作	电动机 手动	000-2	~40.0	用周期定序分配阀调整 自动 120 m 手动 60 m

注: P—泵, R—回动阀。

2.2.3 干油站

干油罐、干油泵、驱动装置和阀组成干油站, 见图 20.5-4。

通常干油泵都用柱塞泵, 因为它密封性好, 工作压力较高。标准干油泵有手动和电动两种, 允许在 0~40℃ 的工作环境, 泵送 000~2 号润滑脂。手动干油泵适用于双线式干油集中润滑系统中, 通过给油器向各润滑点输送润滑脂, 能供给的润滑点数不超过 30, 润滑区间半径为 (2~15) m。电动干油泵有单线式和多线式之分, 直

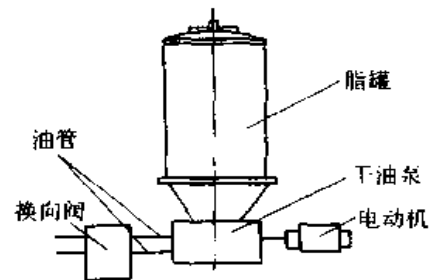


图 20.5-4 干油站示意图
接或通过片式给油器向各润滑点输送润滑脂。

干油泵的规格见表 20.5-13。

干油站有电动和气动两种。标准规定的电动干油站适用于重型、矿山设备干油集中润滑系统，使用 1、2 号润滑脂。该干油站系双线流出式结构，有两个出油口，一般是与双线给油器配

用。同时在管路末端安装压力操纵阀，控制干油站电磁换向阀的换向及停车。供给的润滑点可达数百个，润滑区间半径为 (50~120) m。

干油站的规格见表 20.5-14，尺寸见表 20.5-15。

表 20.5-12 管路计算步骤

已知	q, d, l	p, l, d	p, l, q
求	p	q	d
步骤	$S = 32 q / (\pi d^3)$ 根据 τ - S 图，由 S 查 τ $p = 4 \tau l / d$	$\tau = pd / (4l)$ 根据 τ - S 图，由 τ 查 S $q = \pi S d^3 / 32$	$S^{1/3} \tau = [q / (2\pi)]^{1/3} p / l$ 由 τ - S 图作 $S^{1/3} \tau$ - τ 图，由 $S^{1/3} \tau$ 查 τ $d = 4 \tau l / p$

表 20.5-13 干油泵的规格

驱动方式	手 动	电 动			
型 号	SGZ-8	DB-63	DDB-10	DDB-18	DDB-36
给脂量/L·min ⁻¹	0.008 ^①	0.063	26	46.8	93.6
工作压力/MPa	7	10			
贮油桶容积/L	3.5	8	7	23	
出油口数	—	1	10	18	36
电动机功率/kW	—	0.25	0.37	0.55	

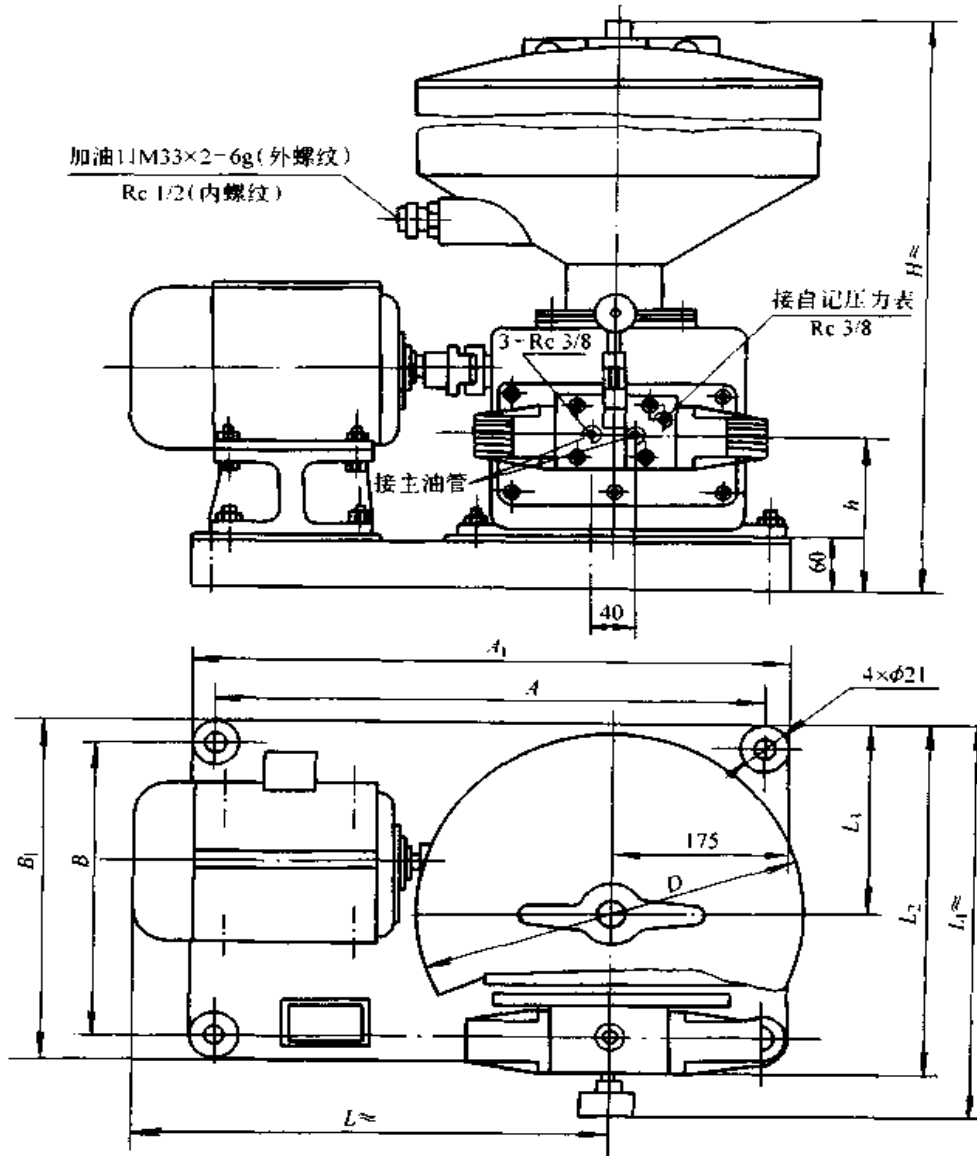
① SGZ-8 的供脂量单位为 L/循环。

表 20.5-14 干油站的规格

驱动方式		电 动			气 动
型 号		DXZ-100	DXZ-315	DXZ-630	FGZ-2000
干油泵	给脂量/L·min ⁻¹	0.100	0.315	0.630	0.5~2.0
	工作压力/MPa	10	10	10	10
贮油桶容积/L		50	75	120	150
电动机功率/kW		0.37	0.75	1.1	—

表 20.5-15 电动干油站的尺寸 (摘自 JB/T 2304—1978)

(mm)



型号	A	A ₁	B	B ₁	h	D	L _≈	L ₁ ≈	L ₂ ≈	L ₃	H _{max}	H _{min}
DXZ-100	460	510	300	350	151	408	406	414	368	200	1 300	925
DXZ-315	550	600	315	365	167		474	434	392	210	1 770	1 165
DXZ-630							508				489	1 820	1 215

3 全损耗润滑系统

凡润滑过一次的润滑油不加回收作第二次使用，让其流失，称为全损耗润滑。

3.1 手加油润滑与装置

手工加油润滑一般由操作工人定期用油壶或油枪向油孔、油杯加油，油通过油沟或油槽进入润滑部位，扩散至整个摩擦表面。这是最简单、

很普遍的润滑方法，但因油量不均匀、不易控制、不连续、无压力，故可靠性不高，只能用于低速、轻载和间歇工作的摩擦副。

油孔不能防止灰尘的侵入，只是在位置受限制、不便装油杯的地方使用，如缝纫机等。

油杯具有防护结构，可防止尘埃的侵入。它有带阀和不带阀的两种。表 20.5-16 是带阀的压配式压注油杯，表 20.5-17 是不带阀的弹簧盖油杯。

表 20.5-16 压配式压注油杯 (摘自 JB/T 9740.4—1995) (mm)

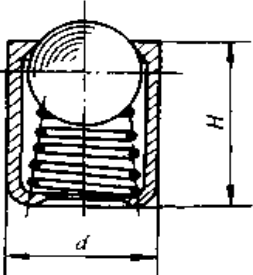
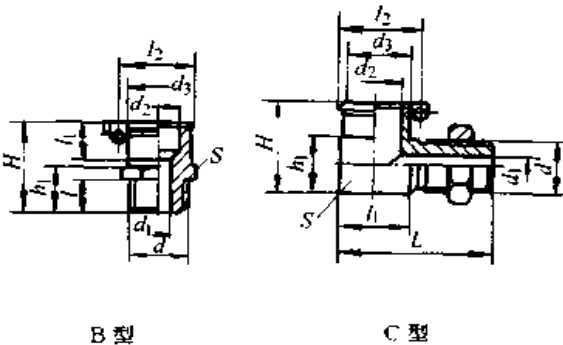
标记示例 $d = 8$ mm 压配式压注油杯： 油杯 8 JB/T 9740.5—1995		基本尺寸	6	8	10	16	25
		公差带	x7				
		H	6	10	12	20	30
		钢球 (GB/T308)	4	5	6	11	12

表 20.5-17 弹簧盖油杯 (摘自 JB/T 9740.5—1995) (mm)

标记示例 联接螺纹为 M10×1 C 型弹簧盖油杯： 油杯 CM10×1 JB/T 9740.5—1995		d	d ₁	d ₂	d ₃	H		h ₁		l	L	l ₁		S	
						B 型	C 型	B 型	C 型			B 型	C 型	B 型	C 型
		M6	3	6	10	18	9	6	25	8	12	15	10-0.25	13-0.25	
M8×1	4	8	12	24	12	8	28	10	14	17	13-0.25				
M10×1	5	8	12	24	12	8	30	10	16	17	13-0.25				
M12×1.5	6	10	14	26	14	10	34	12	19	19	16-0.25				
M16×1.5	8	12	18	28	30	14	37	12	23	23	21-0.35				

3.2 滴油润滑及其装置

油在重力作用下，通过一可控制的小孔，每隔一定时间，滴在摩擦副表面上，谓之滴油润滑。实现滴油润滑的装置为滴油油杯，它结构简单、价廉，但需定时添油。

改变小孔的流过面积可控制供油量，但供油量不随转速改变。因供油量少，故对摩擦副的清洁和冷却作用不明显。

滴油油杯的类型见表 20.5-18，针阀式注油杯规格见表 20.5-19。

表 20.5-18 滴油油杯的类型

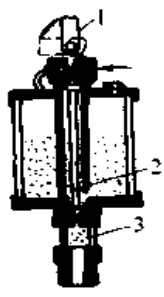
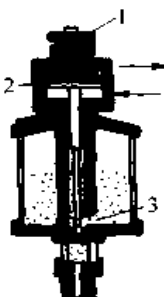
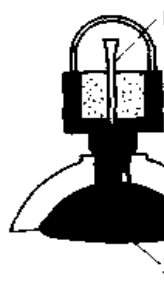

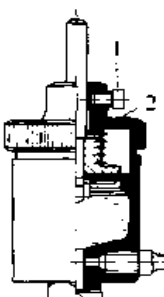
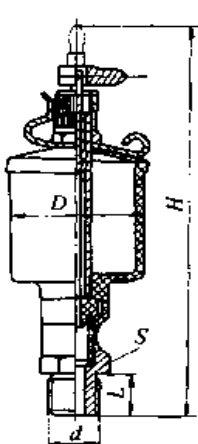
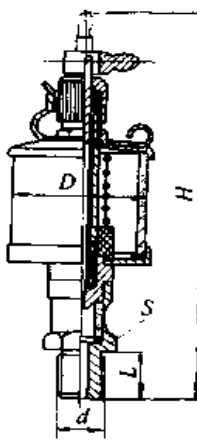
名称	针阀调节式	压力操纵式	跳针式	热胀式	活塞式
简图	 <p>1—开关 2—针阀 3—玻璃管</p>	 <p>1—调节螺母 2—活塞 3—针阀</p>	 <p>1—跳针 2—轴承 3—轴</p>	 <p>1—玻璃管</p>	 <p>1—固定螺钉 2—弹簧 3—压注孔 4—开缝式油门</p>
工作原理	调节针阀的位置控制滴油量。顶部开关控制针阀的启闭	调节针阀的位置控制滴油量。靠压缩空气操纵活塞启闭针阀	靠摩擦副的微振产生泵送作用，使油沿跳针流入摩擦副	摩擦副中的温度变化通过油杯的金属管传到油杯的上空腔，使其中的空气膨胀，压迫油流入摩擦副	靠弹簧压迫活塞使油杯中保持压力，自动均匀供油。用油门操纵启闭

表 20.5-19 针阀式注油杯规格 (摘自 JB/T 9740.6—1995)

标记示例 最小容积为 50 cm ³ B 型针阀式注油杯： 油杯 B50 JB/T 9740.6—1995	最小容量/cm ³	16	25	50	100	200	400
	d/mm	M10×1	M14×1.5			M16×1.5	
l/mm	12			14			
H/mm	105	115	130	140	170	190	
D/mm	32	36	45	55	70	85	
S/mm	13 ^{-0.27}	18 ^{-0.27}			21 ^{-0.35}		
螺母 GB 6172	M8×1		M10×1				



A 型



B 型

3.3 油绳和油垫润滑及其装置

油绳或油垫的一端(侧)浸入油池,另一端(侧)与摩擦副中运动表面直接接触,利用毛细作用使油进入摩擦副。它价格低廉,但供油量很有限,只能用于小型、轻载普通滑动轴承和滑动导轨。

根据油绳或油垫的位置,这种润滑装置分为上给式和下给式两种。图 20.5-5 为油绳和油垫润滑装置示意图。

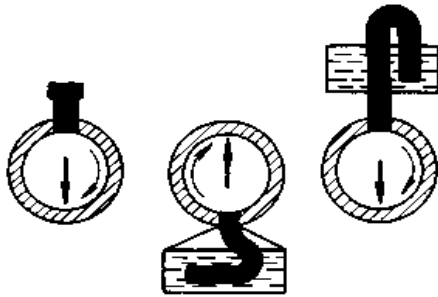


图 20.5-5 油绳和油垫润滑装置

油绳润滑装置的供油量与油的黏度、密度、油绳截面积、油绳材料等因素有关,图 20.5-6 是典型的毛毡油绳润滑的供油量曲线。

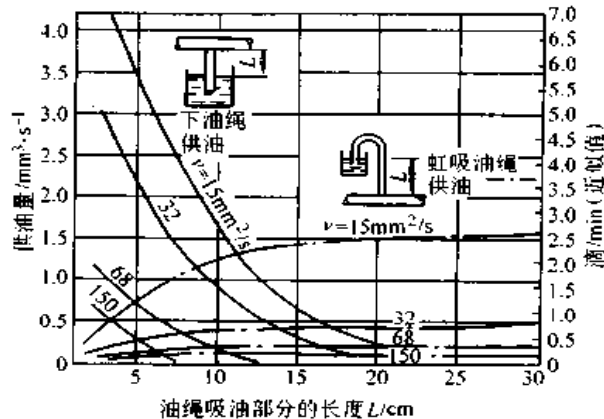


图 20.5-6 毛毡油绳的供油量

温度 21℃; 曲线上黏度为 ν_{oil} ; 毛毡密度 3 400 kg/m³

表 20.5-20 是不同材料油绳和油垫的润滑性能比较。表 20.5-21 是油绳式弹簧盖油杯规格尺寸。

表 20.5-20 各种材料油绳和油垫的润滑性能

材 料	升油高度	流量	储油量	作油垫的适合性
高密度毛毡	很好	最大	少	差(有磨光趋势)
低密度毛毡	尚好	中等	多	差(有磨光趋势)

续表 20.5-20

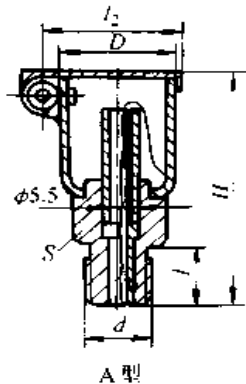
材 料	升油高度	流量	储油量	作油垫的适合性
刺 线	好	大	少	差
废毛线	差	小	中等	好(弹性优良)
棉 绳	尚好	中等	中等	差

- 注: 1. 高密度毛毡 $\rho = 3\ 400\ \text{kg/m}^3$;
- 2. 低密度毛毡 $\rho = 1\ 800 \sim 2\ 800\ \text{kg/m}^3$;
- 3. 废毛线的储油量等于其质量的 3 倍。

表 20.5-21 弹簧盖油杯(摘自 JB/T 7940.5—1995)
(mm)

标记示例

最小容量 3 cm³ A 型弹簧盖油杯;
油杯 A JB/T 9740.5—1995



最小容量/cm ³	d	H ≤	D ≤	l ₂ ≈	l	S
1	M8 × 1	38	16	21	10	10 _{-0.22}
2		40	18	23		
3	M10 × 1	42	20	25	10	11 _{-0.27}
6		45	25	30		
12	M14 × 1.5	55	30	36	12	18 _{-0.27}
18		60	32	38		
25		65	35	41		
50		68	45	51		

3.4 油雾润滑及其系统

将压缩空气或蒸汽管线的气体过滤后送入油雾发生器,使油雾化,然后经过喷雾嘴喷射到摩擦表面上进行润滑,称之为油雾润滑。

改变供给油雾发生器的气体压力,可以调节喷射到摩擦表面上的油量。用钢、铜或塑料管把油雾送入喷雾嘴,管中油雾的流速应在 6 m/s 以下,压差应在 2.5 ~ 5.0 kPa 之间,这样,油雾不致沉积在管壁上。

在润滑点，喷雾嘴使油雾节流，压力降至大气压力，而流速提高到40 m/s以上。这样，能使润滑剂沾湿摩擦表面，而空气则散入大气。喷雾嘴孔的尺寸控制喷出的油量。

3.4.1 油雾润滑的润滑单位

设计油雾润滑系统要确定润滑油和压缩空气

的需要量、管道和喷雾嘴尺寸，这些都含有“润滑单位”的实验公式进行计算。

各种被润滑零件的“润滑单位”(LU)的定额计算公式见表20.5-22。把所有零件的“润滑单位”定额加起来就是总“润滑单位”载荷量，用LUL表示。

表 20.5-22 润滑单位定额 (LU)

零件名称	计算公式	零件名称	计算公式	零件名称	计算公式
滚动轴承	$4dKi \times 10^{-2}$	齿轮副	$4b(d_1' + d_2') \times 10^{-4}$	滑块-导轨	$8lb \times 10^{-5}$
滚珠丝杠	$4d'[(i-1) + 10] \times 10^{-3}$	蜗杆副	$4b(d_1'b_1 + d_2'b_2) \times 10^{-4}$	滚子链	$d'pin^{1.5} \times 10^{-5}$
径向滑动轴承	$2KBd \times 10^{-4}$	齿轮-齿条	$12d_1'b \times 10^{-4}$	齿形链	$5d'hm^{1.5} \times 10^{-5}$
轮系	$4b(d_1' + d_2' + \dots + d_n') \times 10^{-4}$	凸轮	$2Db \times 10^{-4}$	输送链	$5b(25L + d) \times 10^{-4}$

说明 d—轴的直径(mm); d'—齿轮、链轮、滚珠丝杠的节圆直径(mm); i—列数; B—径向滑动轴承宽度(mm); b—齿轮宽度、蜗轮宽度、凸轮宽度、滑块支承宽度、链条宽度(mm); l—滑块支承长度(mm); p—链节距(mm); L—链条长度(mm); n—转速(r/s); K—轴承载荷因子,其值查表20.5-23

- 注: 1. 如齿轮要反向转动: 按表中公式计算后加倍。
- 2. 如齿轮副的齿数比大于2, 就取 $d_2 = 2d_1$ 。
- 3. 如链传动 $n < 3$ r/s, 则取 $n = 3$ r/s。

表 20.5-23 轴承载荷因子

轴承类型	球轴承	滚针轴承	圆柱滚子轴承	调心滚子轴承	圆锥滚子轴承	径向滑动轴承
	无预加载荷	1	1	1	2	1
有预加载荷	2	3	3	2	3	
$\frac{F}{Bd}$ /MPa	<0.7					1
	0.7~1.5					2
	1.5~3.0					4
	3.0~3.5					8

3.4.2 喷雾嘴尺寸

每个孔径一定的喷孔，其润滑单位定额可查图20.5-7。可根据被润滑零件润滑单位定额由该图确定喷雾嘴钻孔尺寸，当润滑单位定额处于两标准钻孔尺寸（钻头尺寸）之间时，选较大的钻孔尺寸，当润滑单位定额超过20时，可采用多孔喷雾嘴。

此外，一个喷雾嘴能润滑的区域有一限度，当零件尺寸超过这些极限尺寸时，则应采用多个较低润滑单位定额的喷雾嘴，喷雾嘴间保持适当距离。各种零件单个喷雾嘴能润滑的极限尺寸见表20.5-24。

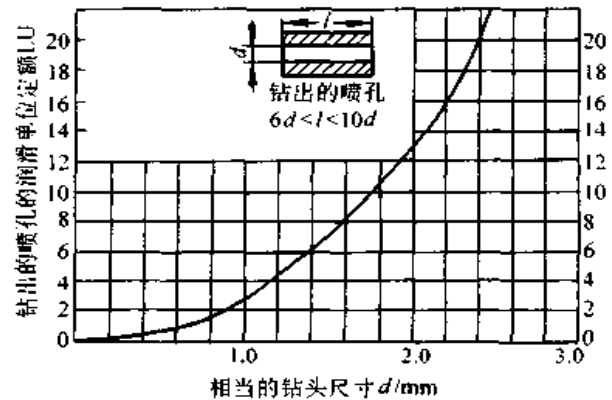


图 20.5-7 喷孔润滑单位定额

表 20.5-24 一个喷雾嘴能润滑的极限尺寸 (mm)

零件名称	滑块-导轨	轴承	链	其他零件
极限尺寸	$b = l = 150$	$B = 150$	$b = 12$	$b = 50$

3.4.3 配管尺寸

每段配管的载荷量为该段管道上安置的喷嘴润滑单位定额之和，用“NL”表示。根据其载荷量由表20.5-25查出所需管子尺寸。但查出的尺寸处于两标准尺寸之间时，选用尺寸较大的管子。

管路要避免突然的拐弯和下垂的弯管。

3.4.4 空气和油的消耗量

空气消耗量是油雾润滑系统总载荷量的函

数。油消耗量与空气中油的质量分数有关，通过油雾发生器加以调节。

空气体积消耗量（在1个大气压下）的计算

式是

$$q_v = 15 \times (NL) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (20.5-3)$$

油体积消耗量的计算式是

表 20.5-25 配管尺寸

载荷量 (NL)		10	15	30	50	75	100	200	300	500	650	1000
管径/ mm	钢管	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63
	钢管		6	8	10		15	20	25	32	40	50

$$q_v = 0.25 \times (LUL) \text{ mL/h} \quad (20.5-4)$$

3.4.5 油雾发生器与油雾润滑装置

典型油雾发生器见图 20.5-8。与分水滤气器、电磁阀、调压阀组成油雾润滑系统装置。

WHZ 和 WHZ3 油雾润滑装置的规格尺寸见表 20.5-26、表 20.5-27。油雾润滑装置油雾出口管径的载荷量由表 20.5-25 确定，选择油雾润滑装置时，一定不要使该值大于管路载荷量 (NL)。

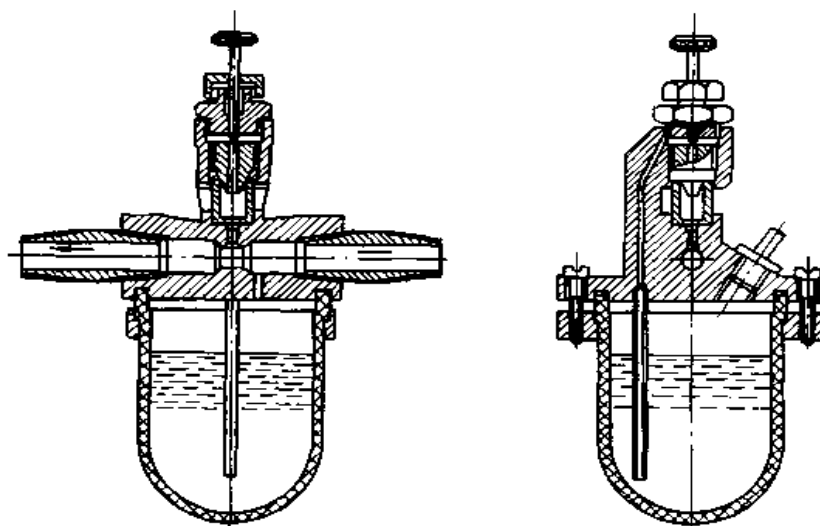


图 20.5-8 油雾发生器

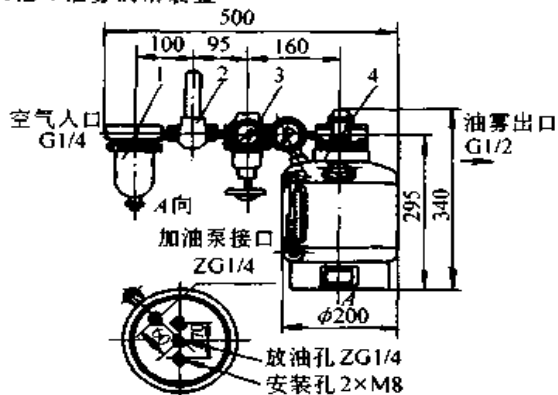
表 20.5-26 油雾润滑装置及其规格尺寸 (1)

型号	出口联接螺纹	空气压力 / MPa	空气针阀状态	空气消耗量 / kL·h ⁻¹
WHZ-4	G1/2	0.04		1.7
		0.04~0.06		1.7~2.0
		0.06~0.10		2.0~2.7
		0.10~0.13		2.7~3.3
		0.13~0.18		3.3~4.0
WHZ-12	G1	0.04	关闭	2.9
		0.04~0.06		2.9~4.3
		0.06~0.10		4.3~6.4
		0.10~0.16		6.4~8.5
		0.16~0.22		8.5~10.5
		0.22~0.28		10.5~12.8

标记示例

油雾量为 4 m³/h 的油雾润滑装置:

WHZ-4 油雾润滑装置



WHZ-4

- 1—分水滤气器 2—电磁阀
- 3—调压阀 4—油雾发生器

续表 20.5-26

<p>WHZ-12, WHZ-40</p>	型号	出口联接螺纹	空气压力/ MPa	空气针 阀状态	空气消耗 量/ kLh^{-1}
	WHZ-40	G2	0.04	开启 1/4圈	6.9
			0.06~0.07		8.0~9.4
			0.10~0.14		12.3~15.3
			0.17~0.22		16.5~20.5
			0.19~0.25		18~31
			0.19~0.30		18~41

表 20.5-27 油雾润滑装置及其规格尺寸 (2)

型号	油雾量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	油箱容积/ L	最高油温/ $^{\circ}\text{C}$	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	油雾标称 压力/ kPa	油雾质量 分数/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	工作压力 /MPa	质量/kg	外形尺寸/ $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$
WHZ3-C6Y	6	17	80	80	15.7	3~12	0.3	120	800×300×1100
WHZ3-C10Y	10								
WHZ3-C16Y	16								
WHZ3-C25Y	25								
WHZ3-C40Y	40								
WHZ3-C63Y	63								

注：1. WHZ3 系列产品使用介质为黏度等级不大于 460 的工业润滑油。

3.4.6 喷雾嘴安装

喷雾嘴端面要离开润滑表面 3~25 mm。在每个润滑点要有适当的通气孔，它们的直径至少应是与之对应的喷雾嘴孔径的 1.5 倍。若几个喷雾嘴共用一个通气孔，则孔的通过面积必须大于喷雾嘴通过面积之和的 2 倍。

喷雾嘴的合理安装位置见图 20.5-9。

3.5 油气润滑及其系统

油气润滑系统与油雾润滑系统类似，只是油气中油的颗粒尺寸比油雾中的大得多，并用油、气二相混合流发生装置取代油雾发生器。

为了使油气混合流中油颗粒均匀，需要流量极小的液压泵（大约 1 mL/h）。这是油气润滑系

统中的技术关键。

4 润滑油循环润滑

使用过一次的润滑油，利用一定方式回收，并使其重新进入摩擦副再次使用，称为循环润滑。

4.1 油浴和飞溅润滑及其系统

把摩擦副的接触部位直接浸在油池中，或者把机件浸入润滑油池，靠其运动把油带到接触部位，这样的润滑方法称为油浴润滑；靠浸入润滑油池的运动机件使油飞溅到摩擦表面上的润滑方法称为飞溅润滑。

采用飞溅和油浴润滑的典型设备是齿轮箱、

内燃机。大多数齿轮减速箱齿轮采用油浴润滑，而轴承采用飞溅润滑。

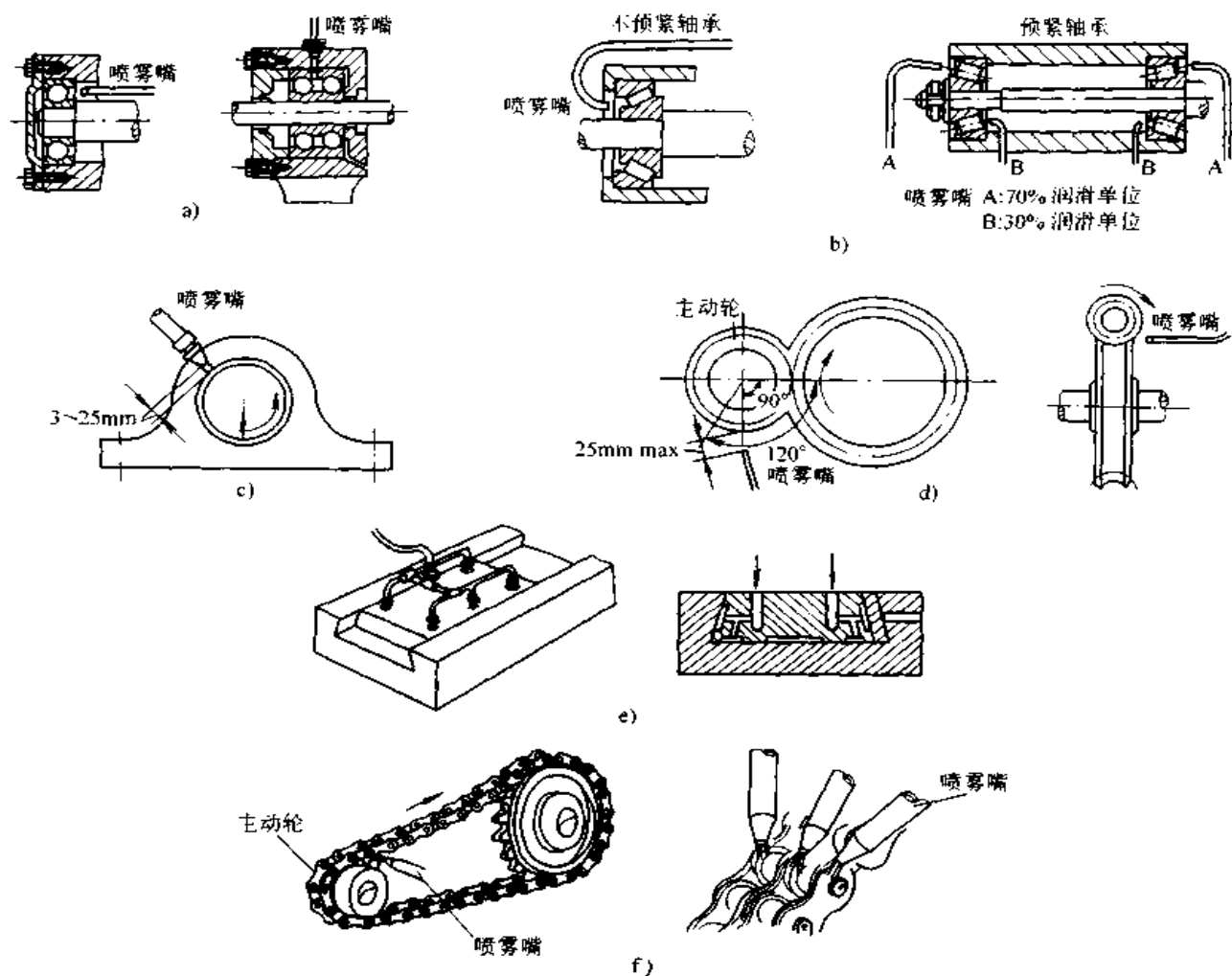


图 20.5-9 油雾润滑时喷嘴的合理位置

- a) 滚动轴承（圆锥滚子轴承除外） b) 圆锥滚子轴承 c) 径向滑动轴承
d) 齿轮和蜗杆传动 e) 滑块与导轨 f) 链传动

4.1.1 齿轮传动的油浴和飞溅润滑

除速度极低的齿轮传动外，采用油浴润滑的齿轮传动，必须用箱体把齿轮传动封闭起来。

(1) 齿轮的线速度限制

油浴润滑时，为了不使搅油损失过大，将齿轮最高线速度限制在 12.5 m/s。若安装护轮罩（图 20.5-10），罩上的小孔限制了供油，可以减轻搅动，因此可将齿轮线速度的限制提高到 25 m/s。

为使油能飞溅起来，靠飞溅润滑的轴承获得足够的润滑油，齿轮最低圆周速度限制见图 20.5-11。当齿轮线速度不够时，可在较高速度的轴上安装溅油轮。

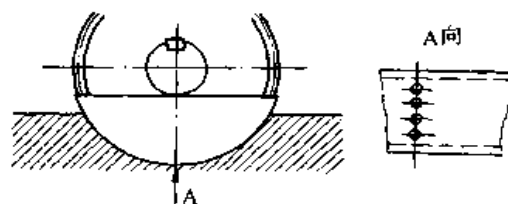


图 20.5-10 高速齿轮的护轮罩

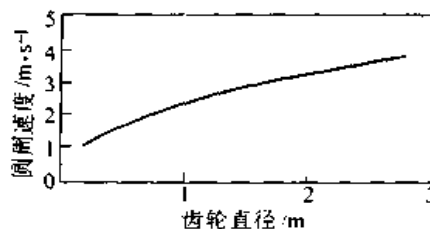


图 20.5-11 飞溅润滑齿轮最低线速度

(2) 齿轮浸油深度

浸油深度应以有足够的油供给润滑部位，同时又保持较低的搅油损失为准则。通常，圆柱齿轮浸入油中深度以 2 个齿高为好，可以在 0.5~3 个齿高范围内变动，锥齿轮以整个齿长浸入油中为宜。

4.1.2 蜗杆传动的油浴润滑

(1) 速度限制

和齿轮传动同样的原因，浸入油中的零件，其最高线速度限制在 10 m/s，否则应采用喷油润滑。

(2) 油面高度

蜗杆下置时蜗杆浸入油中，油面高度应略低于蜗杆中心线，轴上要装唇型密封圈，以防止漏泄。

蜗杆上置时蜗轮浸入油中，油面高度视蜗轮线速度而定，速度高则油面应低些，最高不超过蜗轮中心线，最低不低于蜗轮齿根圆。

4.1.3 油池容积

一般，按每千瓦传动功率需油 0.35~0.70 L 来计算油池容积，同时应该注意，浸入油池机件的顶部距油池底面的距离不得少于 50 mm。

4.2 油环、油盘润滑及其系统

靠随轴一起旋转的圆环或圆盘把润滑油从油池中带到摩擦表面上的润滑方法称为油环或油盘润滑。油环、油盘润滑主要用在电动机、机床及传动装置的轴承上，它们只适用于水平轴。

4.2.1 油环润滑系统

油环润滑装置结构简单，轴一转动就能向轴承自动供油，且供油量随轴转速增加而增加。

油环挂在轴上，上部与轴接触，环的下部浸在油池内（图 20.5-12）。由于摩擦力的作用，轴带动油环旋转，环把油带到轴上，流入轴承。

油环的截面形状可以是矩形、梯形和圆形（图 20.5-12）。矩形和梯形截面的油环带油效果较好，圆形油环带油效果较差。一个油环的供油量在 2~10 mL/min 范围内，随油黏度、工作温度和轴的转速而改变。

采用油环润滑时，轴的转速不得低于 100 r/min。油环尺寸的设计计算可按表 20.5-28 中公式进行。

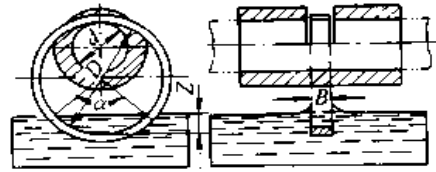
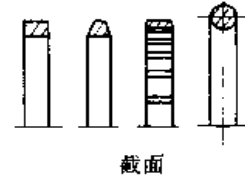


图 20.5-12 油环的截面形状及其安装

表 20.5-28 油环尺寸 (mm)

油环内径 D	油环宽度 B	沉入油池的深度 H		
		D		
		25~40	40~65	65~310
$1.5d + (10 \sim 15)$	$(0.1 \sim 0.3)d$	$D/4$	$D/5$	$D/6$

注： d 为轴的直径。

4.2.2 油盘润滑系统

油盘通常安装在轴承的侧面，固定在转动的轴上。在面对轴承的一侧有一凹槽，形成探向轴承的内表面（图 20.5-13），靠它带起润滑油，然后由于重力作用流入轴承顶部的油孔中。

油盘不会打滑，故适用于黏度较高、转速较低场合。转速高时，惯性离心力将抵消重力的影响，油无法流入轴承，故这种润滑法不适宜高速。

油盘尺寸由结构确定。

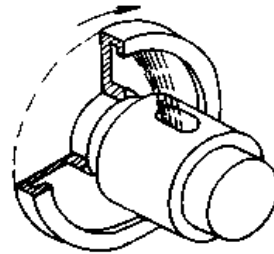


图 20.5-13 油盘润滑

4.3 压力循环润滑及其系统

用机械方法使润滑油循环流过摩擦点的润滑方法称为压力循环润滑。它需要一套使油循环流动的装置，即循环润滑系统，该系统分为有冷却装置和无冷却装置两种。

循环润滑系统基本上由油箱、泵、过滤器、冷却器、出口压力调节元件、油温控制元件、供

油管、一个或多个润滑点和回油管组成。

4.3.1 无冷却装置的循环润滑系统

用于小型或低速设备的润滑，主要是起润滑作用，润滑油带走的热量不多。该系统比较简单，输出油量较少。

几乎任何形式的泵，包括柱塞、齿轮、叶片、螺杆和离心泵，都可用于本系统，根据润滑油的流量和黏度选择泵的规格。

(1) 直接供油系统

系统把油直接泵送到润滑点（轴承、导轨等），通常采用柱塞泵，每个润滑点由单独的泵提供油量确定且可调节的润滑油。

直接供油系统（图 20.5-14）的典型应用场合有：造纸机械、大回转窑、压光机械等。

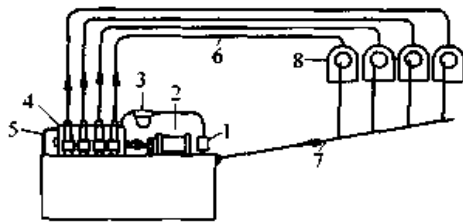


图 20.5-14 直接供油系统

- 1—吸油泵 2—电动机 3—滤油器
- 4—多柱塞泵 5—溢流管 6—供油管
- 7—回油管 8—润滑点

(2) 间接供油系统

系统把油泵入分配器，用独立的计量阀控制每一润滑点的供油量。系统供油可以是连续的，也可以是断续的。泵入每个润滑点的油量决定于每个计量阀的节流小孔的尺寸。一般地说，这种系统的供油量大于直接供油系统。

单管间接供油系统见图 20.5-15。

此系统典型的应用场合是：机床、制糖机械、齿轮箱、印刷机械等。

(3) 重力供油系统

采用高置油箱，利用润滑油的重力，通过油管把油送入润滑点，然后流回储油池。用泵把油从储油池抽至高置油箱以实现循环。

重力供油系统可以单独使用（图 20.5-16a）也可以和其他压力供油系统联合使用（图 20.5-16b），这时，重力供油系统起安全辅助作用。

此系统在动力源切断之后还可以维持一定时间的供油。

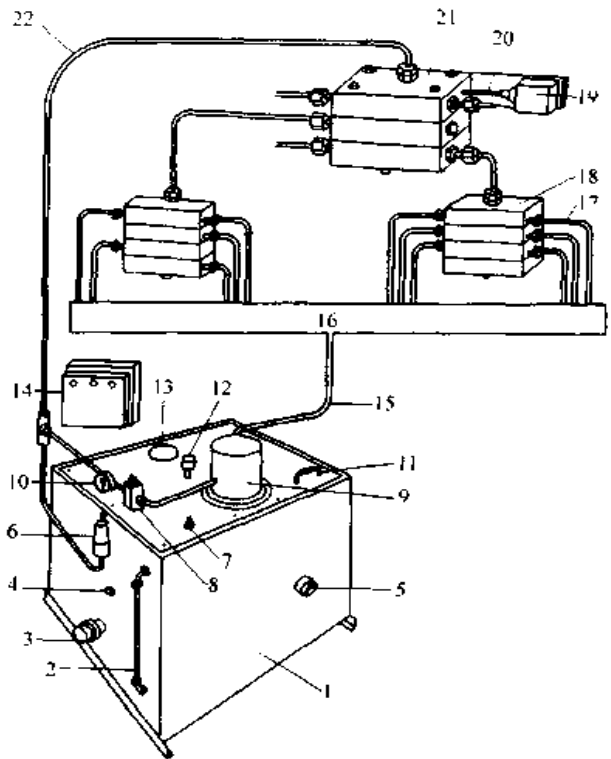


图 20.5-15 单管间接供油系统

- 1—油箱 2—油标 3—加热器 4—恒温器
- 5—温度表 6—安全阀 7—浮标开关
- 8—滤油器 9—润滑泵 10—压力表
- 11—油箱盖 12—通气孔 13—过滤器
- 14—控制盘 15—回油管 16—润滑点
- 17—供油管 18—分支分配器 19—微型开关
- 20—指示销 21—总分配器 22—输油管

4.3.2 带冷却装置的循环润滑系统

对大型或速度高的设备，特别是需要润滑剂从润滑点带走大量摩擦热的场合下，应采用这类系统。它供油量较大，既起润滑作用又起冷却作用。

在无冷却装置循环型润滑系统的基础上，再增设加热器、冷却器、压力表、减压阀、流量分配阀、水分离器和备用泵等，构成带冷却装置的循环型润滑系统，见图 20.5-17。

4.3.3 液压泵的选择

(1) 各类液压泵的比较

各类液压泵的比较见表 20.5-29。

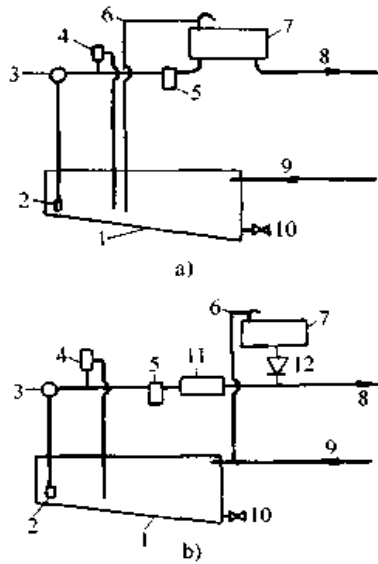


图 20.5-16 重力供油系统
 1—主储油箱 2—吸入口 3—泵
 4—安全阀 5—滤油器 6—溢流阀
 7—高置油箱 8—供油管 9—回油管
 10—泄油阀 11—冷却器 12—单向阀

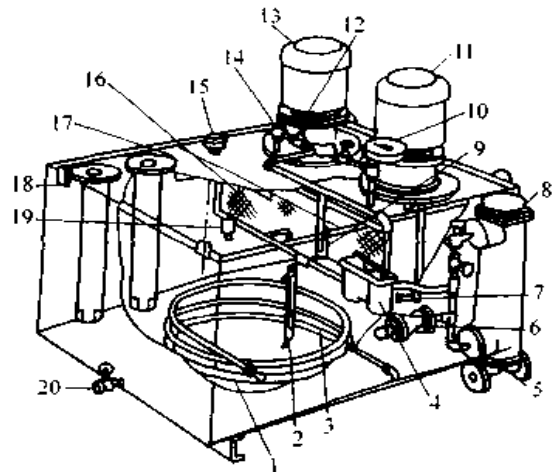

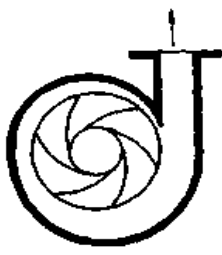
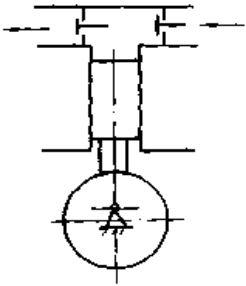


图 20.5-17 带冷却装置的循环型润滑系统
 1—加热管 2—油标 3—恒温器
 4—双联过滤器 5—冷却水接头 6—安全网
 7—电磁泄油塞 8—润滑油冷却器 9—吸入口
 10—压力表 11—备用润滑泵 12—截止阀
 13—主润滑泵 14—单向阀 15—加油接头
 16—挡油板和粗滤油网 17—油箱盖
 18—回油接头 19—通气孔 20—泄油阀

表 20.5.29 各类液压泵的比较

名称	齿 轮 泵	摆线齿轮泵	螺 杆 泵
示意图			
特 性	比较便宜、紧凑，易于设计。可输送污油。最大排量 0.025 m ³ /s；最大吸升高度 7.5 m	能低速下泵送高黏度油，也能在中温、中压下，泵送挥发性较高的低黏度油；最大吸升高度 7.5 m；最大排量 0.025 m ³ /s	噪声小、流量稳定、吸升高度大，是低黏度油的理想泵。可长期高速运转，动力消耗低。最大排量 0.076 m ³ /s；最大吸升高度 7.5 m

续表 20.5-29

名称	叶片泵	离心泵	径向柱塞泵
示意图			
特性	设计简单、结构紧凑，排出压力高，可用于高压液力装备；最大吸升高度 2.0 m；最大排量 0.01 m ³ /s	在中压下有高的排油量，可在极低排油量下运转，可泵污油；最大吸升高度 8.0 m；最大排量 0.15 m ³ /s	密封性好，容积效率高，排出压力高，流量脉动较大，外形尺寸也较大；最大吸升高度 1.5 m；最大排量 0.04 m ³ /s

(2) 影响液压泵选择的系统参数

1) 流量 所需液压泵总排量应等于下列各项的和：设备最大需要量；已知今后发展所需的增加量；用于补充由于长期运转后液压泵、密封、轴承等处的磨损增多消耗的额外油量（占 10%~25%）。它决定液压泵的大小，并由此计算出驱动功率。

2) 黏度 可能达到的最低黏度是考虑油泵间隙大小的因素；可能达到的最高黏度是考虑泵功率的因素。

3) 吸油特性 静态吸油高度与吸油管及管件中的损失之和，不能超过液压泵吸油能力。

4) 供油压力 所需液压泵总压力为润滑点所需压力，静压力，管道、管件、滤油器、冷却器等的压力损失之和。根据其值确定驱动液压泵用的功率。

5) 安全阀额定压力 当操作压力在 0~0.7 MPa 时，额定压力为泵压力加 0.07 MPa；当操作压力大于 0.7 MPa 时，额定压力为 1.1 倍的泵压力。安全阀的尺寸应保证在通过全部流量时其压力为 1.25 倍的额定压力。

驱动液压泵的功率等于液压泵总排量与液压泵总压力之乘积。

(3) 润滑系统液压泵的基本参数

JB/T 7943.1—1999 对润滑系统元件的压力、转速、流量等基本参数作了规定，表 20.5-30 中摘录了其中一部分。

4.3.4 滤油器的选择

滤油器是利用过滤介质分离悬浮在润滑油中

的污染微粒的装置。

表 20.5-30 润滑系统液压泵的压力、流量和转速^①

压力/MPa	0.1, 0.16, 0.25, 0.4, 0.63, 0.8, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0, 6.3, 8, 10
流量/L·min ⁻¹	0.5, 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4.0, 5.0, 6.3, 8.0, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125
转速/r·min ⁻¹	6.3, 10, 16, 25, 40, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 500

① 对往复式润滑泵为冲程频率。

(1) 对滤油器的要求

- 1) 过滤精度能满足系统对润滑油清洁程度的要求；
- 2) 润滑油通过滤油器时单位过滤面积通过的流量要大，压力损失要小；
- 3) 过滤介质在压力油作用下不变形破坏；
- 4) 能显示、监控过滤状态；
- 5) 容易清洗、维修和更换过滤介质；
- 6) 滤油器材料与润滑油相容；
- 7) 价格低、易于购置。

以能过滤杂质的最大颗粒度 d 为指标，滤油器的精度一般分为 4 级；粗滤油器， $d \geq 0.1$ mm；普通滤油器， $d = 0.01 \sim 0.1$ mm；精滤油器， $d = 0.001 \sim 0.005$ mm；特精滤油器， $d =$

0.000 5~0.001 mm;

(2) 滤油器的类型及其选择

按滤油器的结构分为沉淀式和直通式。按滤油介质材料分为表面型过滤器、深度型滤油器和磁性滤油器。

线隙式、片式、金属网式等属表面型滤油器；纸质滤芯式、烧结滤芯式、熔体滤芯式属深

度型滤油器；磁性滤芯式属磁性滤油器。

选择滤油器时，应考虑到所使用的润滑油品种是否与滤芯、壳体等材料相容，过滤的流量大小、润滑油的工作温度和工作压力大小，过滤精度的要求等。滤油器还需要有足够的纳污容量，以免频繁更换或清洗滤芯。

过滤材料的品种、类型和特点见表 20.5-31。

表 20.5-31 过滤材料的品种、类型和特点

滤芯种类	构造及规格	过滤精度/ μm	允许压力 损失/MPa	滤芯材料特性
金属网式滤布	74~200 μm 网孔的黄铜或不锈钢丝	80、 100、180	0.01	结构简单，通油能力大，压力损失小，易于清洗，过滤效果差，精度低
线隙式 滤芯	在多角形或圆形金属框架外缠绕直径为 0.4 mm 的铜丝或铝丝而成	80、100	≤ 0.02	结构简单，过滤效果好，通油能力大，压力损失小，精度低，不易清洗
		10、20	≤ 0.035	
纸质 滤芯	用厚 0.35~0.75 mm 的平纹或厚纹酚醛树脂或木浆微孔滤纸制成。3 层结构：外层用粗眼铜丝网，中层用滤纸，内层为金属丝网	10、20	0.08~0.2	过滤效果好，精度高，通油能力较大，抗腐蚀，容易更换，压力损失大，易阻塞，不能回收，无法清洗，需经常换滤芯
		30、50	≤ 0.035	
烧结式滤芯	用颗粒状青铜粉烧结成环、管、板、碟状滤芯。最好与其他滤芯合用	10~100	0.03~0.06	能在很高湿度下工作，强度高，耐冲击，抗腐蚀，性能稳定，容易制造，易堵塞，难清洗
磁性滤芯	设置高能永久磁铁。与其他滤芯合用效果更好			可吸除油中的黑色金属颗粒，过滤效果好
片式滤芯	铜片叠合而成，可旋转铜片进行清洗	80~200	0.03~0.07	强度高，通油能力大，精度低，易堵塞，价高，将逐渐淘汰
高分子材料滤芯	制成不同孔隙度的高分子微孔滤材	3~70	0.1~2	质量轻，精度高，流动阻力小，易清洗，寿命长，价廉
熔体滤芯	用不锈钢纤维烧结毡制成各种聚酯熔体滤芯	40	0.14~5	耐高温（300℃），耐高压（30 MPa），耐腐蚀，渗透性好，寿命长，可清洗，价贵

4.3.5 油量控制

(1) 供油量

润滑点需要的润滑油量应经润滑计算求得，无法作润滑计算的润滑点，可按表 20.5-32 中的公式估算。润滑系统的供油量必须大于各润滑点所需油量之和。

表 20.5-32 润滑点供油量估算式 (mL/h)

润滑零件	供油量估算式
滚动轴承	$0.003 \times d \times l$
滑动轴承	$0.0002 \times d \times B$
水平滑动导轨	$0.00005 \times b \times l$
垂直滑动导轨	$0.0001 \times b \times l$
滚动导轨	$0.0006 \times l \times l$
凸轮	$0.0003 \times D \times b$
齿轮传动	$0.0004 \times d' \times b$
链传动	$0.00008 \times L \times b$

注：符号的意义及单位见表 20.5-26。

(2) 油量控制器

1) 限量泵 见图 20.5-18，用调整螺母手动调节供油量，从油位显示窗显示油量。

2) 分配器 通过分配器中锐边小孔节流控制油量。标准分配器每循环每孔给油量见表 20.5-33。

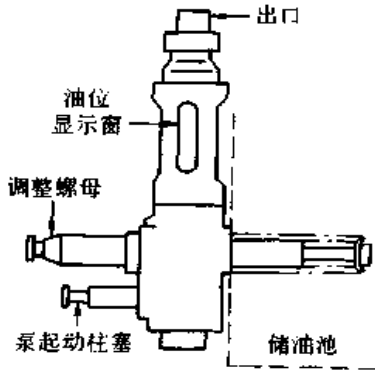


图 20.5-18 限量泵

表 20.5-33 分配器每循环每孔给油量

(摘自 JB/T 7943.1—1999) (mL)

0.1	0.16	0.25	0.4	0.63	1.0	1.25	1.6	2.0	
2.5	3.15	4.0	5.0	6.3	8.0	10	12.5	16	20

4.3.6 油箱设计

油箱 (图 20.5-19) 在润滑系统中除了储油外，还起着散热、分离油中气泡、沉淀固体杂质等作用。油箱中安装有许多辅件，如同油管、吸油管、挡板、堰板、通风器、泄油孔、油面指示器、防气泡隔网、加热器、冷却器、压力表等。

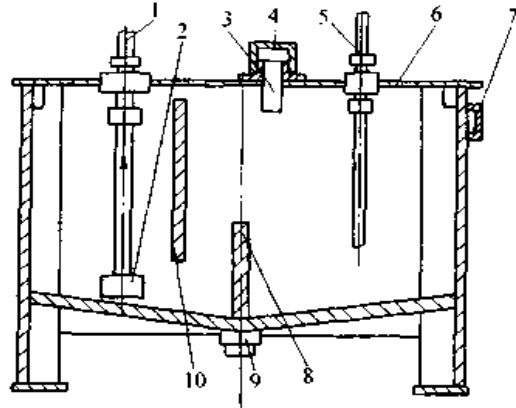


图 20.5-19 油箱

- 1—油箱体 2—清洗孔法兰 3—放油孔
- 4—油箱底 5—液位计 6—空气滤清器盖
- 7—回油口 8—滤气网 9—隔板
- 10—液压泵安装台 11—吸油口
- 12—网式滤油器

(1) 油箱容积

1) 从流量角度设计 油箱容积与系统的流量有关，油箱容积应是运转容量、回流容量、预备容积、空容积之和。预备容积等于油箱内各种装置的总体积；空容积是用于通风、容纳泡沫和热膨胀量的容积，它占油箱总容积的 10% ~ 20%；回流容量是系统停止使用时流回之油量；运转容量等于系统最大供油量乘以额定时间。

各类设备润滑系统的额定时间见表 20.5-34。

表 20.5-34 各类设备润滑系统的额定时间

(min)

设备名称	活塞式压缩机	液压系统	燃气轮机	航空燃气轮机	汽轮机	大型电动机	轧钢机	造纸机械	一般工业机械设备
额定时间	1~8	2~4	5	0.5	5~10	5~10	20~60	40~60	30~100

2) 从散热角度设计 无冷却装置的润滑系统主要依靠油箱的表面散热，确定油箱容积时需要考虑它的散热能力。计算出润滑油从摩擦副获

得的热量 Q 后，从热平衡角度计算油箱容积。这时，油箱散热面积 A 的计算式为

$$A = Q / (h\Delta\theta) \quad (20.5-5)$$

式中 h ——表面传热系数, 油箱周围通风很差时 $h = 8 \sim 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 、良好时 $h = 15 \sim 17.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 、强制通风时 $h = 20 \sim 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$;
 $\Delta\theta$ ——油温 (一般给定 55 C) 与周围环

境温度的温差;

设油箱长度为 L , 宽度为 aL , 高度为 bL , 则根据所需散热面积计算油箱容积的计算式为

$$L = [A / (1.5a + 1.8b + 1.8ab)]^{1/2} \quad (20.5-6)$$

标准油箱的容积应符合行业标准的规定, 见表 20.5-35。

表 20.5-35 JB/T 7943.1—1999 规定的油箱标称容积数列 (L)

—	—	—	—	—	—	0.4	—	0.63	—
1.0	—	1.6	—	2.5	—	4.0	—	6.3	—
10	—	16	—	25	—	40	—	6.3	—
100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000
10 000	12 500	16 000	20 000	25 000	31 500	40 000	50 000	63 000	80 000

(2) 辅件设计

1) 回油管 位置要靠近箱壁, 应插入最低油位以下, 避免回油飞溅产生气泡。

2) 吸油管 位置应远离回油管; 进油口可装在运转时油面高度 $2/3$ 以下。

3) 挡板 用挡板隔开吸油管与回油管, 上挡板用于隔开气泡及浮渣, 下挡板用于隔开沉渣。它们亦能提高油箱刚度。挡板的安排要防止形成阻塞或死角, 能分离出最清洁的油层, 考虑泄油与通风的便利。

4) 通气孔 用它平衡箱内外气压, 排出水汽及由于油变质而析出的酸性挥发物。油箱顶盖每 5 m^2 需设置一个通气孔, 通气孔应有过滤装置。

5) 泄油孔 应设在油箱的最低处, 油箱底

面最好有 $1:30$ 至 $1:10$ 的斜度。若不能实现, 则需采用抽油泵排油。泄油孔上部要有挡盖, 使底部油层先排出。

6) 加热器 在低温启动时降低油的黏度, 帮助油的循环, 有助于排除水分。

设计时需要注意: 残渣不得覆盖住管子; 对流作用不妨碍油的沉淀; 若出现漏油现象, 能自动切断加热装置。

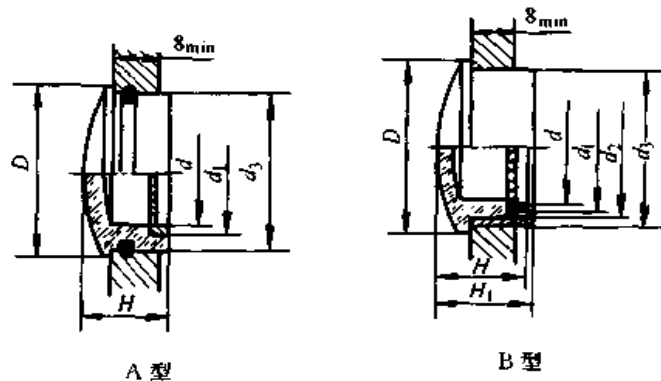
7) 油面指示器 用以标明油箱内的油面高度, 简称油标。国家标准规定的圆形油标型式与尺寸见表 20.5-36, 长形油标型式与尺寸见表 20.5-37, 可根据具体情况选用。

4.3.7 管子尺寸与管道压力降的计算

油路尽量成直线、以最少的接头输送。

表 20.5-36 圆形油标型式及尺寸 (mm)

压配式圆形油标 (JB/T 7941.1—1995)



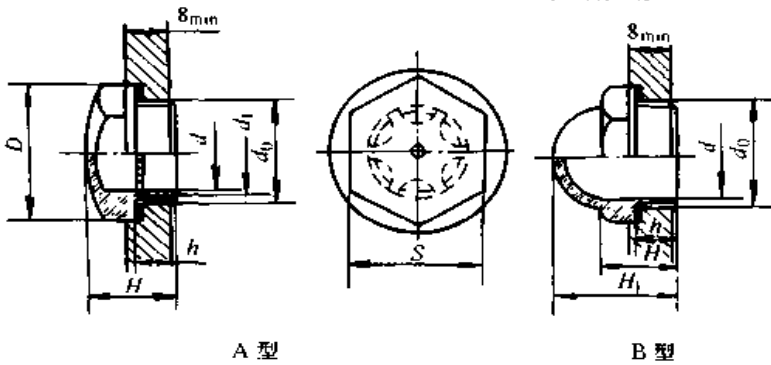
标记示例

视孔 $d = 32 \text{ mm}$ A 型压配式圆形油标
 油标 A32 JB/T 7941.1—1995

续表 20.5-36

d	D	d ₁		d ₂		d ₃		H	H ₁	密封圈 GB/T 3452.1—1992
		基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差			
12	22	12	d11	17	d11	20	d11	14	16	15 × 2.65
16	27	18		22		25				20 × 2.65
20	34	22		28		32		25 × 3.55		
25	40	28		34		38		31.5 × 3.55		
32	48	35		41		45		38.7 × 3.55		
40	58	45		51		55		48.7 × 3.55		
50	70	55		61		65				
63	85	70		76		80		22	24	

旋入式圆形油标 (JB/T 7941.2—1995)



标记示例

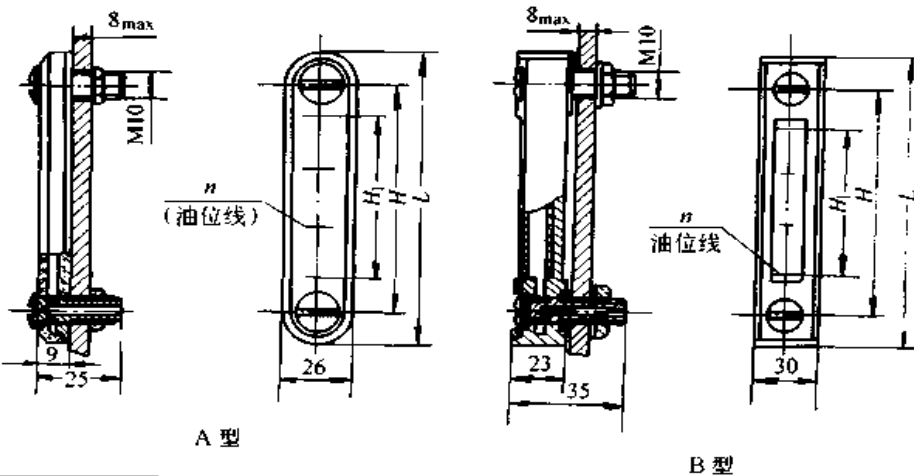
视孔 d = 32 mm, B型旋入式圆形油标:
油标 B32 JB/T 7941.2—1995

d	d ₀	D		d ₁		S		H	H ₁	h
		基本尺寸	公差	基本尺寸	公差	基本尺寸	公差			
10	M16 × 1.5	22	d11	12	d11	21	h8	15	22	8
20	M27 × 1.5	36		22		32		18	30	10
32	M42 × 1.5	52		35		46		22	40	12
50	M60 × 2	72		55		65		26	53	14

表 20.5-37 长形油标型式及尺寸

(mm)

长形油标 (JB/T 7941.3—1995)



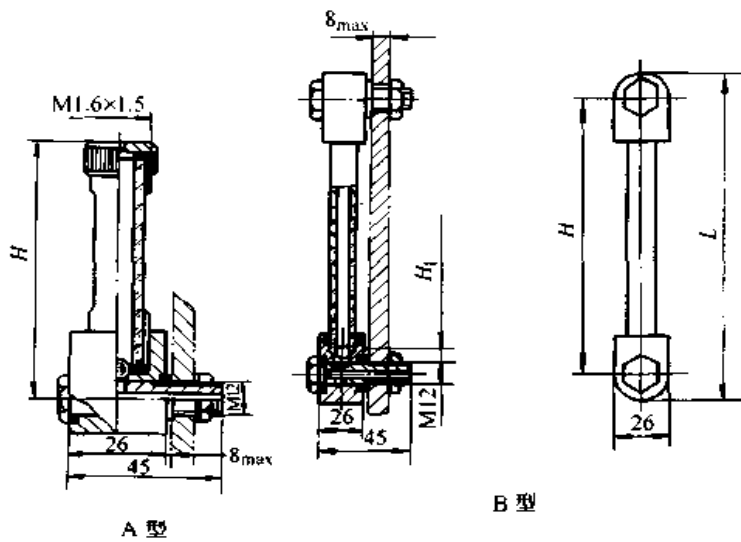
标记示例

油位视区 H = 160 mm
A型长形油标:
油标 A160
JB/T 7941.3—1995

续表 20.5-37

H			H ₁		L		n		O形密封圈 GB/T 3452.1—1992	六角螺母 GB/T 6172.1— 6172.2—2000	弹性垫圈 GB/T 861—1987
A型	B型	公差	A型	B型	A型	B型	A型	B型			
80		js 7	40		110		2		10 × 2.65	M10	10
100			60		130		3				
125			80		155		4				
160			120		190		6				
	250			210		280		8			

管状油标 (JB/T 7941.4—1995)



标记示例
油位视区 $H = 400 \text{ mm}$ A型管状油标:
油标 A400 GB 1162—1989

类型	H		H ₁	L	O形密封圈 GB/T 3452.1—1992	六角螺母 GB/T 6172.1— 6172.2—2000	弹性垫圈 GB/T 861—1987
	基本尺寸	公差					
A型	80, 100, 125, 160, 200						
B型	200	js7	175	226	11.8 × 2.65	M12	12
	250		225	276			
	320		295	346			
	400		375	426			
	500		475	526			
	630		605	656			
	800		775	826			
1 000	975	1 026					

(1) 管路直径

根据控制的管路流速确定管径。油泵吸油管流速控制为 1 m/s；供油管流速控制为 3 m/s；回油管流速控制为 0.3 m/s。管径计算式为

$$d = [4Q / (\pi v)]^{1/2} \quad (20.5-7)$$

式中 v 为管内流速。

(2) 供油管和吸油管的压力降

计算压力降时采用计算黏度，计算黏度的计算式为

$$\eta_c = X\eta \quad (20.5-8)$$

式中 η —— 油的实际黏度；

X —— 黏度修正因子，它与油的压力有关，见图 20.5-20。

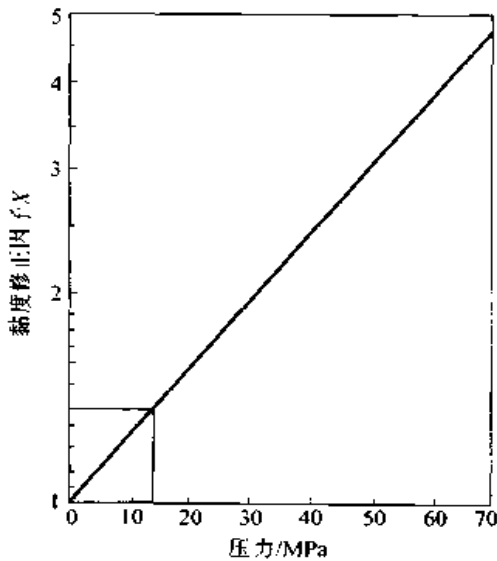


图 20.5-20 黏度修正因子 X 管内压力降 p_p 为

$$p_p = 32 \eta_c v l / d^2 \quad (20.5-9)$$

(3) 阀门接头及滤油器的压力降

阀门接头及滤油器压力降 p_c 的计算式为

$$p_c = K\rho v^2 \quad (20.5-10)$$

式中 ρ —— 润滑油密度；

K —— 压力损失因子，查表 20.5-38；

(4) 回油管路的压力降

回油管路压力降的计算与供油管路相同，只是需要把它转换成静水头形式，即

$$h = (p_p + \sum p_c) / (\rho g) \quad (20.5-11)$$

h 必须小于垂直落差。

5 稀油润滑装置

稀油润滑装置已经标准化。标称流量不超过 800 L/min 的，采用电加热，大于 800 L/min 的采用蒸汽加热。采用的液压泵有齿轮泵、摆线齿轮泵和螺杆泵三种。用温调阀或温调器调节温度。控制分 PLC 与继电器控制。

5.1 参数与尺寸


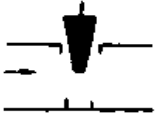


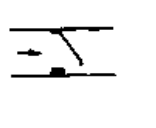

稀油润滑装置的标称压力为 0.5 MPa；适用润滑油黏度 22~460 mm²/s；润滑油工作温度为 40±5℃；过滤精度 0.08~0.13 mm；冷却器进水温度 ≤30℃、进水压力 0.4 MPa、进油温度 ≤50℃、油温降 ≥8℃；蒸汽温度 ≥133℃、压力为 0.3 MPa。装置的其他基本参数列于表 20.5-39，尺寸见表 20.5-40~表 20.5-42。

$q \geq 1\,000$ L/min 的装置，标准中只规定了型式和参数，具体结构根据用户要求进行设计。

表 20.5-38 压力损失因子 K

	扩大	缩小	节流	弯头	
管					
	1	0.5	$\approx (A/a)^2$ A —管子面积, a —孔口面积	2	
道	进口		出口		T形接头
	1	0.5	1	1	3.0
					0.5

续表 20.5-38

润 滑 阀 门	断 流			止 回		线 轴 式
	闸 阀	旋 塞 阀	针 阀	瓣 阀	球 阀	
						
	2	20	60	10	50 - 100	50 - 100

尽可能用制造厂的数据。如有疑问,用 $K = (\text{进口管截面积}/\text{阀门最小面积})^2$ 算出近似的损失因子

过滤网 近似损失因子 $K = (\text{管子截面积}/\text{过滤网的开口面积})^2$

滤油器 用制造厂的数据。如附有旁通安全阀,实际压力降可能是名义压力降的 2 - 3 倍

表 20.5-39 稀油润滑装置的参数 (摘自 JB/T 8522—1997)

标称流 量/ $L \cdot \text{min}^{-1}$	油箱 容积/ m^3	电动机		过滤能力/ $L \cdot \text{min}^{-1}$	换热 面积/ m^2	冷却水 管径/ mm	冷却水 耗量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	电加热 器功率/ kW	压力罐 容量/ m^3	蒸汽耗量/ $kg \cdot h^{-1}$	蒸汽管 通径/ mm	出油口 通径/ mm	回油口 通径/ mm	质量/ kg						
		极数	功率/ kW																	
6.3	0.25	4	0.75	110	1.3	15	0.6	3	—	—	—	15	32	375						
10														400						
16	0.5	4	1.1		3	25	1.5	6				—	—	—	25	50	500			
25																	530			
40	1.25	2:4:6	2.2		270	6	32	3.6				12	—	—	—	32	65	1 000		
63																		1 050		
100	2.5	4:6	4	680	13	50	6	18	—	—	—	50	80	1 650						
125														1 700						
160	4.0	5.5	15		7.5	24	—	—				—	65	125	2 050					
200	6.3	2:4:6	7.5		23	30	65	12				36	—	—	—	80	150	2 100		
250																		2 950		
315	10.0	2:6	11		37	55	—	—				—				—	—	80	200	3 000
400				3 800																
500	16.0	2:4:6	15	70	80	—	—	—	—	—	—	100				250	3 850			
630																	5 700			
800	31.5	2:4:6	18.5	2 300	90	80	38	48	—	—	—	100	250	5 750						
1 000														40.0	2:4:6	30	2 800	120	150	90
	37	4 200	113	—	4	120														
	45	6 800	160	—	5	260														
	55	9 000	200	—	6.3	310														
1 250	63.0	2:4:6	30	2 800	120	150	90	—				—	—	60	125	—				
1 600									45	6 800	160						—	5	260	
2 000	63.0	2:4:6	55	9 000	200	200	180	—	—	—	—	200	400	—						

注: 1. 过滤能力是在过滤精度 0.08 mm、润滑油黏度 460 mm^2/s 、滤油器压降 $\Delta p = 0.02$ MPa 条件下的过滤能力;
2. 冷却器的冷却水如采用江河水, 需经过滤沉淀。

表 20.5-40 稀油润滑装置 XYHZ6.3~XYHZ25 的尺寸 (图 20.5-21) (mm)

型号	L	B	H	L ₁	B ₁	H ₁	接口螺纹				DN	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈
							出油口	排油口	入水口	回油口								
XYHZ6.3 XYHZ10	1 160	810	1 060	950	650	660	G1/2				32	330	100	150	360	160	30	225
XYHZ16 XYHZ25	1 650	994	1 315	1 300	800	820	G1				50	650	75	200	300	200	60	240

表 20.5-41 稀油润滑装置 XYHZ40~XYHZ125 的尺寸 (图 20.5-22) (mm)

型号	L	B	H	L ₁	B ₁	H ₁	DN				L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	
							出油口	排油口	入水口	回油口										
XYHZ40 XYHZ63	2 000	1 350	1 530	1 700	1 200	950	32				65	730	130	360	450	900	80	400	450	450
XYHZ100 XYHZ125	2 820	1 660	1 820	2 500	1 400	1 000	50				80	800	200	500	700	600	120	400	300	1 100

型号	L ₁₁	φ	B ₂	B ₃	B ₄		B ₅	B ₆			B ₇	B ₈	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅		H ₆	H ₇	H ₈	
					A 进	B 进		螺	齿	摆						A 进	B 进				
XYHZ40 XYHZ63	1 580	15	126	290	230	1 070	130	750	720			310	1 080	530	800	132	420	780	213	800	250
XYHZ100 XYHZ125	2 400	22	100	210	125	1 230	170	820	720			360	1 300	630	850	820	380	760	290	630	350

注：1. 螺—用螺杆泵的装置、齿—用人字齿轮泵、斜齿轮泵的装置、摆—用摆线齿轮泵的装置；
 2. A 进—油温控制采用湿调阀装置的进水管 B₄ 尺寸、H₅ 尺寸、B 进—油温控制采用湿调器装置的进水管 B₄ 尺寸、H₅ 尺寸。

表 20.5-42 稀油润滑装置 XYHZ160~XYHZ800 的尺寸 (图 20.5-23) (mm)

型号	L	B	H	L ₁	B ₁	H ₁	DN				L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	
							出油口	排油口	入水口	回油口									
XYHZ160 XYHZ200	3 720	2 050	2 000	3 000	1 800	1 200	65				125	950	250	675	775	1 450	240	650	1 500
XYHZ250 XYHZ315	3 800	2 400	2 150	3 300	2 200	1 300	80	65	1 500	1 200	250	650	1 000	1 100	160	480	390		
XYHZ400 XYHZ500	4 330	2 400	2 510	3 800	2 290	1 550	100	80	200	1 000	400	750	1 100	920	140	450	450		
XYHZ630 XYHZ800	5 700	2 840	2 600	5 200	2 600	1 550	100	80	250	1 300	400	1 200	1 300	950	150	500	450		

续表 20.5-42

型号	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}	B_2	B_3	B_4		B_5	B_6		B_7	H_2	H_3	H_4	H_5		H_6	H_7	H_8
							A进	B进		螺	齿					A进	B进			
XYHZ160	500				150	150	25	950	200	950	1000	460	780	1050	290	930	930	670	930	350
XYHZ200																				
XYHZ250	390	780	390	390	150	170	500	1970	230	1180	1130	445	750	1150	240	630	1180	314	1200	400
XYHZ315																				
XYHZ400	450	1100	450	450	150	220	930	2000	200	1300	1300	210	840	1300	350	510	900	400	1280	390
XYHZ500																				
XYHZ630	450	1100	450	450	150	220	500	2370	230	1540	1400	600	820	1350	350	700	1400	405	1250	400
XYHZ800																				

注：1. 螺—用螺杆泵的装置、齿—用人字齿轮泵、斜齿轮泵的装置、摆—用摆线齿轮泵的装置；
 2. A进—油温控制采用温调阀装置的进水管 B_4 尺寸、 H_5 尺寸，B进—油温控制采用温调器装置的进水管 B_4 尺寸、 H_5 尺寸；
 3. 仅 XYHZ160~XYHZ500 六个规格有采用斜齿轮系的装置。

5.2 装置的型号与标记

装置的型号组成如下：

标记示例：

标称流量 1000 L/min、用温调阀调温，供油泵用螺杆泵，用 PLC 控制，带有压力罐的稀油润滑装置，其标记为：

XYHZ1000-ALPP JB/T 8522—1997

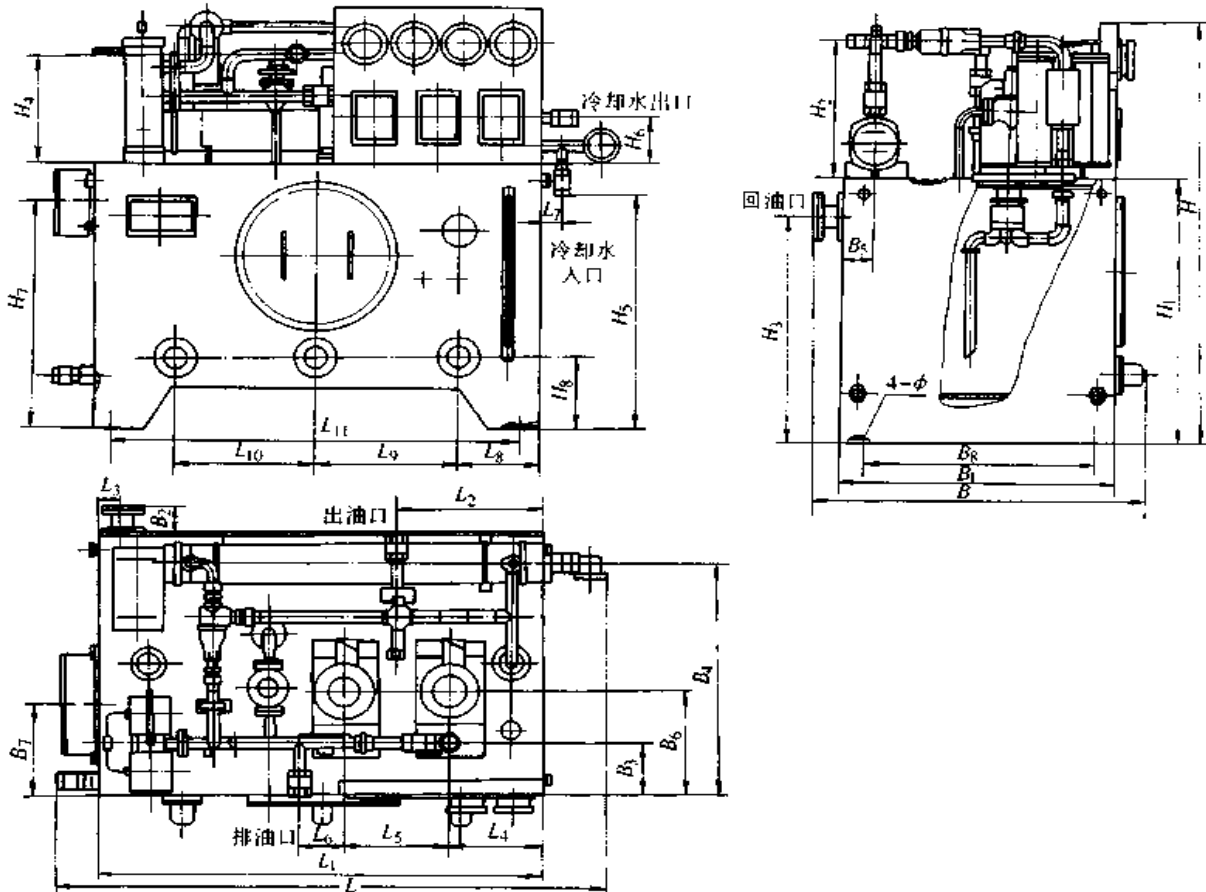
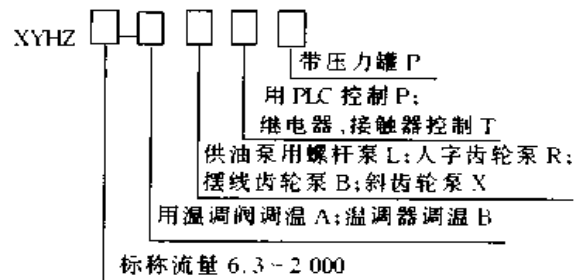


图 20.5-21 XYHZ6.3~XYHZ25 装置

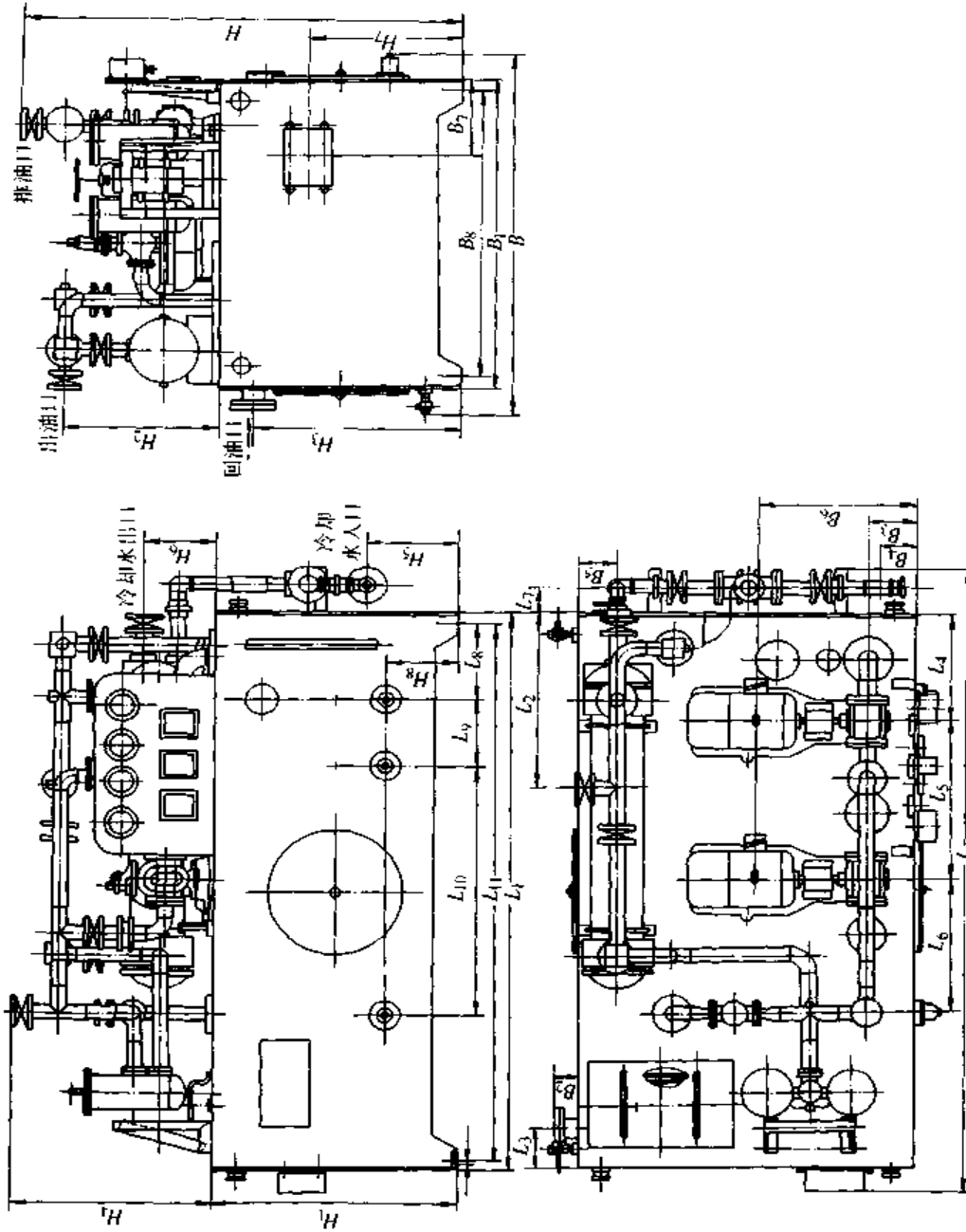


图 20.5-22 XYHZ40-XYHZ125 装置

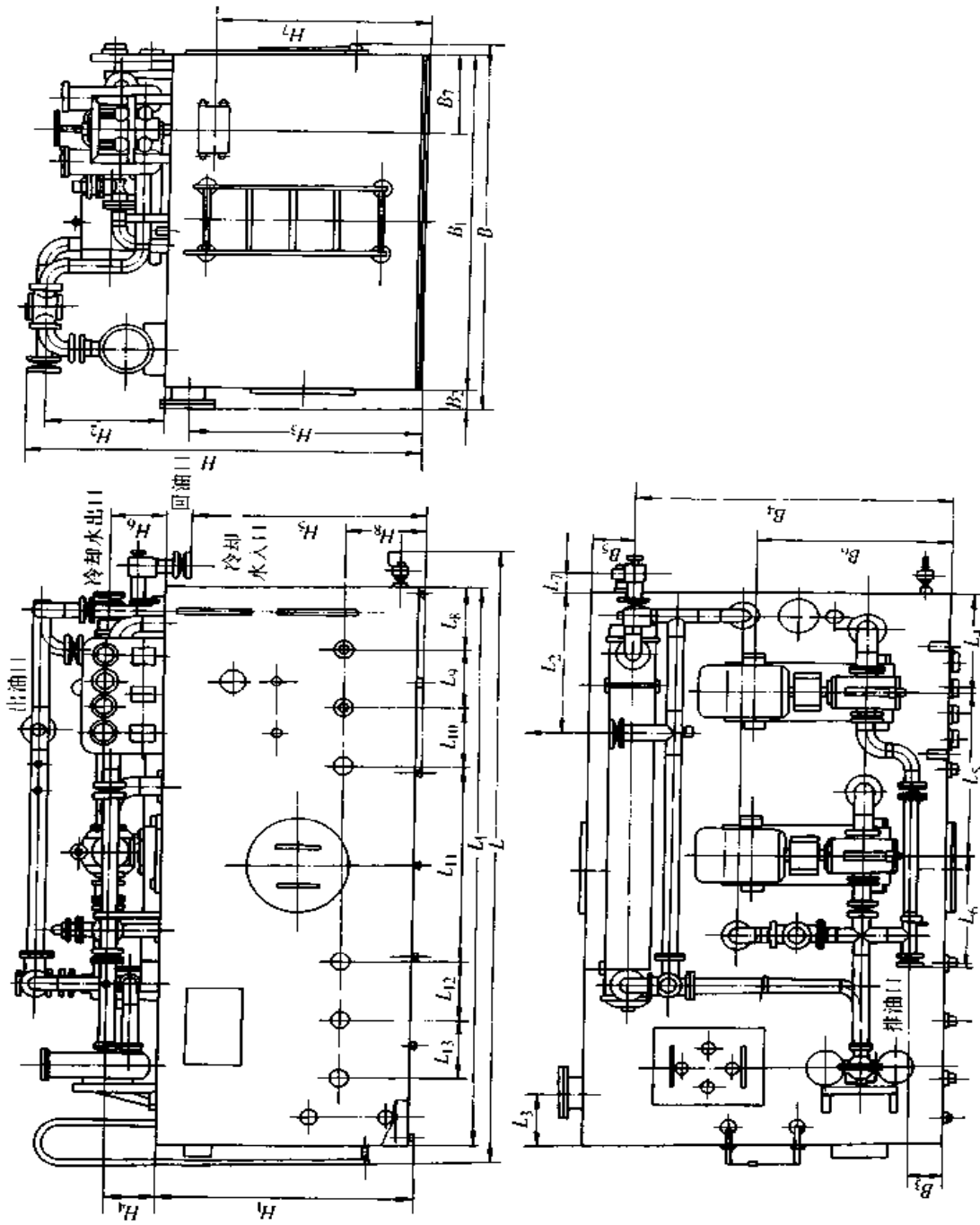


图 20.5.23 XYHZ160-XYHZ800 装置

第 6 章 摩擦副材料和表面技术

材料性能分为一般性能、特殊性能和摩擦学性能。一般性能是指在任何应用场合都需要考虑的性能，在具体应用场合需要特殊加以考虑的是特殊性能，在发生滚动或(和)滑动摩擦的应用场合需要考虑的特殊性能是摩擦学性能。

摩擦学性能并不是材料的固有特性，而是与使用条件和配副对象有关的系统参量。

在摩擦状态下工作的材料有摩擦材料和耐磨材料，它们都要求有一定的耐磨性。

有些摩擦副对摩擦因数有特定的要求，能适应这种要求的材料称为摩擦材料，它包括摩擦材料和减摩材料；有些摩擦副对表面耐磨性有特定的要求，能适应这种要求的材料称为耐磨材料。

通常，把利用摩擦作用将动能转化为热能通过吸收或其他方式散失以减少与其配副表面相对运动速度的一类专用材料称为摩擦材料，要求它工作时有足够大且稳定之摩擦因数。能把摩擦阻力尽可能减少的专用材料称为减摩材料，要求它工作时有较低摩擦因数。摩擦材料与减摩材料之间没有一个严格的界线，一般地说，在与铸铁或钢摩擦时，无润滑条件下的摩擦因数大于 0.20~0.25、润滑条件下摩擦因数大于 0.05 的材料，可以认为属于摩擦材料的范畴，摩擦因数小于该值的材料，则属减摩材料。

就具体用途来看：制动、摩擦传动、摩擦离合器等处需要摩擦材料；滑动轴承、导轨、衬套等处需要减摩材料。

摩擦磨损现象总是发生在表面层，因此采用合理有效的表面技术，提高表面的减摩性和耐磨性，可以显著地节约能源和材料。

1 减摩材料

对减摩材料的主要要求是保证摩擦副具备下列基本特性：最低的摩擦因数；最大的或指定的强度和刚度；最大的或指定的工作寿命和可靠度；良好的加工性；低的价格；便于装配与维护

在无润滑条件下运转的滑动摩擦副，材料是最主要的。这时，最适宜的材料是聚合物、碳-石墨、金属陶瓷和这些材料的混合物。

1.1 减摩材料的选择

1.1.1 运转条件的分析

运转条件包括载荷、速度、温度、供应与环境条件、允许精确度的极限、可靠度与寿命要求、预计的消耗率等。

(1) 载荷

载荷增大会引起摩擦力增大，因而温升增高。载荷增大还会使轻微磨损转化为严重磨损。

(2) 滑动速度

在大多数情况下，滑动速度对温升所起的作用比载荷更大些。在干摩擦情况下，滑动速度可能会导致磨损机理的改变，从而影响磨损结果。

(3) 温度

摩擦表面的运行温度对摩擦副有三个方面的影响：

- 1) 改变摩擦副材料的性能；
- 2) 影响表面膜的形成与强度；
- 3) 改变润滑剂的性能；
- (4) 摩擦时间

不同的材料匹配、摩擦时间对磨损特征的影响不同。

1.1.2 减摩材料的初步选取

了解减摩材料的基本特性是选择材料的基本要求与条件。表 20.6-1 列出非金属减摩材料的一般性能。表列材料广泛地应用于机器、机构和仪器仪表的摩擦零件，能在没有润滑的条件下运转。

1.1.3 摩擦副性能估计

以满足运转条件为前提，初步选定摩擦材料后，确定摩擦副设计方案和尺寸。然后根据摩擦零件的类型（齿轮、轴承、密封、电刷或导轨等）和它们的运转条件，进行强度和（或）刚度计算，再校核其摩擦与磨损。按摩擦与磨损的要求修正摩擦副尺寸后，再校核强度与刚度。两种方法交替进行。

表 20.6-1 非金属材料的一般性能

材料名称	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	最高工作 温度/℃	$(pv)_v$ / kPa·m·s ⁻¹	与钢的 摩擦因数	特 性	应用场合
热塑性聚合物		0.686~0.785	100~120	0.20~0.98	0.15~0.40	加工性好、 耐腐蚀、耐磨	轴承、齿轮、 凸轮等
热固性聚合物	0.785~0.981		250~300	1.96~4.90	0.10~0.40	耐热性高、 价格低	滑动轴承、滚 动轴承元件、结 构零件等
碳石墨	0.196~0.392	0.137~0.245	300~450	1.96~3.92	0.20~0.35	导热导电性 好、耐热、耐 腐蚀	密封件、水泵 和风动设备中的 轴套、飞机和化 工设备中的摩擦 零件
金属陶瓷	2.452~2.746		300~500	5.88	0.25~0.40	耐热性和导 热性好	在高温下工作 的摩擦零件
层压材料			300~350	17.6~35.30	0.10~0.15	承载能力高、 导热性好	重载滑动轴承

摩擦副尺寸中最重要的是间隙。应该注意要有最恰当的精度要求，精度过低，摩擦副性能下降，有因发热而被卡住的危险，精度过高，要增加生产成本。

1.1.4 摩擦材料的最终确定

在实验室内以标准的运转条件进行试验，可以获得材料的摩擦学性能，得到不同材料的比较评价。然而，按此评价选取材料还不能保证适宜

于真实的运转条件。为此，进行台架试验，试验应尽可能接近地模拟实际运行条件。根据台架试验判断是否能进行现场试验。

现场试验给出最终的结论：什么材料、什么型式的摩擦零件在新研制的设备中具有满意的性能。

1.1.5 减摩材料选择框图

减摩材料选择框图见图 20.6-1。

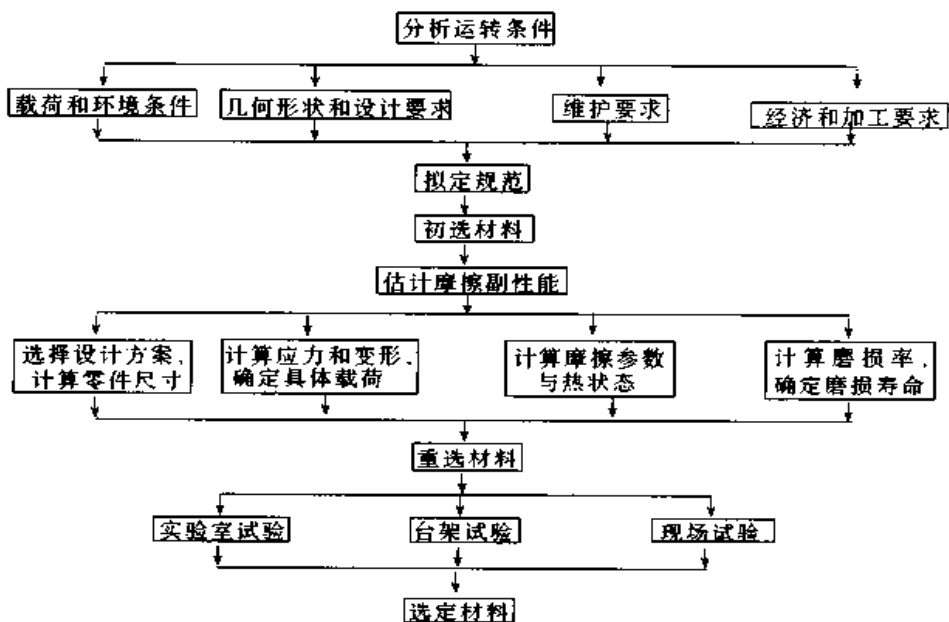


图 20.6-1 减摩材料选择框图

1.2 金属减摩材料

用于支承的最常用的金属减摩材料是锡、铅、铜、铝和锌的合金，钢与铸铁用得极少。

1.2.1 锡锑和铅锑轴承合金

最古老的轴瓦材料，是以锡和铅为基体的软

合金。这类合金硬度低（13~32HBS），且随温度增加硬度下降，熔点低（240~320℃），减摩性能极好，但疲劳强度低。

锡锑和铅锑轴承合金的成分见表20.6-2，其性能参见第3卷第25篇“滑动轴承”。

表 20.6-2 锡锑和铅锑轴承合金成分（摘自 GB/T 1174—1992） (%)

牌 号	w _{Sn}	w _{Pb}	w _{Sb}	w _{Cu}	w _{Al}	w _{Zn}	w _{Ni}	w _{Si}	w _{Fe}	w _{As}	w _P
ZSnSb12Pb10Cu4		9.0~11.0	11.0~13.0	2.5~5.0	—	0.01	0.01	—	0.1	0.1	0.08
ZSnSb12Cu6Cd1	其	0.15	10.0~13.0	4.5~6.8	1.1~1.6	0.05	0.05	0.3~0.6	0.1	0.4~0.7	—
ZSnSb11Cu6		0.35	10.0~12.0	5.5~6.5	—	0.01	0.01	—	0.1	0.1	0.03
ZSnSb8Cu4	余	0.35	7.0~8.0	3.0~4.0	—	0.005	0.005	—	0.1	0.1	0.03
ZSnSb4Cu4		0.35	4.0~5.0	4.0~5.0	—	0.01	0.01	—	—	0.1	0.08
ZPbSb16Sn16Cu2	15.0~17.0		15.0~17.0	1.5~2.0	—	0.15	—	—	0.1	0.3	0.1
ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	5.0~6.0	其	14.0~16.0	2.5~3.0	1.75~2.25	0.15	—	—	0.1	0.6~1.0	0.1
ZPbSb15Sn10	9.0~11.0		14.0~16.0	0.7	0.05	0.005	0.005	—	0.1	0.6	0.1
ZPbSb15Sn5	4.0~5.5	余	14.0~15.5	0.5~1.0		0.15	0.01	—	0.1	0.2	0.1
ZPbSb10Sn6	5.0~7.0		9.0~11.0	0.7	0.05	0.005	0.005	—	0.1	0.25	0.1

1.2.2 铜基轴承合金与轴承用铜合金

用作减摩材料的铜基合金主要是青铜和黄铜。制作轴瓦减摩层的青铜称为铜基轴承合金；有适当强度和硬度的青铜可以制作单层轴瓦或多层轴瓦的衬层，称为轴承用铸造铜合金。制造单层轴瓦用的黄铜称为轴承用锻造铜合金。

青铜分为高锡（w_{Sn} > 10%），低锡（w_{Sn} < 3%）两种。增加铅的质量分数，减少锡的质量

分数，甚至不用锡制成的青铜称为铅青铜。重载摩擦零件可选用铅青铜。

青铜的成分见表20.6-3，其性能参见第3卷第25篇。

铜锌合金称为黄铜，作为减摩材料，黄铜的应用不如青铜广泛。依据合金中所含成分不同，有硅黄铜、锰黄铜和铝铁黄铜等。

轴承用锻造铜合金的成分见表20.6-4。

表 20.6-3 铜基轴承合金和轴承用铜合金的成分（摘自 GB/T 1174—1992） (%)

牌 号	w _{Sn}	w _{Pb}	w _{Cu}	w _{Zn}	w _{Al}	w _{Si}	w _{Ni}	w _{Mn}	w _{Fe}	w _{As}	w _P	w _S		
ZCuSn5Pb5Zn5	4.0~6.0	4.0~6.0		4.0~6.0	0.01	0.25	2.5	—	0.01	0.30	—	0.05	0.10	
ZCuSn10P1	9.0~11.5	0.25	其	0.05	0.01	0.05	0.10	0.05	0.02	0.10	0.005	0.5~1.0	0.05	
ZCuPb10Sn10	9.0~11.0	8.0~11.0		2.0	0.01	0.5	2.0	0.2	0.01	0.25	0.005	—	0.05	0.10
ZCuPb15Sn8	7.0~9.0	13.0~17.0		2.0	0.01	0.5	2.0	0.2	0.01	0.25	—	—	0.10	0.10
ZCuPb20Sn5	4.0~6.0	18.0~23.0		2.0	0.01	0.75	2.5	0.2	0.01	0.25	—	—	0.10	0.10
ZCuPb30	1.0	27.0~33.0	余	—	0.01	0.2	—	0.3	0.02	0.5	0.005	0.10	0.08	—
ZCuAl10Fe3	0.3	0.2		0.4	8.5~11.0	—	3.0	1.0	0.20	2.0~4.0	—	—	—	—

续表 20.6-3

牌 号	w _{Sn}	w _{Pb}	w _{Cu}	w _{Zn}	w _{Al}	w _{Si}	w _{Ni}	w _{Mn}	w _S	w _P	w _{As}	w _P	w _S
CuPb9Sn5	4.0~6.0	8.0~10.0		2.0	0.01	0.5	2.0	0.2	0.01	0.25		0.10	0.10
CuPb10Sn10	9.0~11.0	8.0~11.0	其	2.0	0.01	0.5	2.0	0.2	0.01	0.25		0.05	0.10
CuPb15Sn8	7.0~9.0	13.0~17.0		2.0	0.01	0.5	2.0	0.2	0.01	0.25		0.10	0.10
CuPb20Sn5	4.0~6.0	18.0~23.0	余	2.0	0.01	0.75	2.5	0.2	0.01	0.25		0.10	0.10
CuAl10Fe5Ni5	0.20	0.10		0.5	8.0~11.0	—	3.5~6.5	3.0	0.10	3.5~5.5		—	—
CuSn8Pb2	6.0~9.0	0.5~4.0		3.0	0.01	0.25	2.5	—	0.01	0.20		0.05	0.10
CuSn10P	10.0~11.5	0.25	其	0.05	0.01	0.05	0.10	0.50	0.02	0.10		0.50~1.0	0.05
CuSn12Pb2	11.0~13.0	1.0~2.5		2.0	0.01	0.2	2.0	0.2	0.01	0.20		0.05~0.40	0.05
CuPb5Sn5Zn5	4.0~6.0	4.0~6.0	余	4.0~6.0	0.01	0.25	2.5	—	0.01	0.30		0.05	0.10
CuSn7Pb7Zn3	6.0~8.0	5.0~8.0		2.0~5.0	0.01	0.35	2.0	—	0.01	0.20		0.10	0.10

表 20.6-4 轴承用锻造铜合金的成分 (摘自 GB/T 10449—1989) (%)

牌 号	w _{Cu}	w _{Sn}	w _{Zn}	w _{Al}	w _{Ni}	w _P	w _S	w _{Mn}	w _{Pb}	w _P
CuSn8P	89.65~91.45	7.5~9.0	0.3	—	0.3	0.1	—	—	0.05	0.1~0.4
CuZn31Sn1	63.2~68.6	—	28.5~33.3	—	0.5	0.4	0.7~1.3	—	0.8	—
CuZn37Mn2Al2S	50.05~62.55	0.5	32.0~40.0	1.0~2.5	0.25	0.6	0.3~1.3	1.5~3.5	0.8	—
CuAl9Fe4Ni4	75.6~82.6	0.2	8.0~11.0	8.0~11.0	2.5~4.5	2.5~4.5	0.1	3.0	0.1	—

1.2.3 铝基轴承合金

铝基轴承合金有相当好的耐蚀性和较高的疲劳强度，摩擦性能也尚好。这些品质使铝基轴承合金在部分领域取代了较贵的锡基、铅基和铜基轴承合金。

铝基轴承合金可以制作单层轴瓦或其他摩擦零件，也可作为钢轴瓦的减摩层。

表 20.6-5 是铝基轴承合金的成分，其摩擦学性能参见第 3 卷第 25 篇“滑动轴承”。

表 20.6-5 铸造铝基轴承合金的化学成分 (摘自 GB/T 1174—1992) (%)

牌 号	w _{Sn}	w _{Cu}	w _{Al}	w _{Ni}	w _{Mn}	w _S	w _P	w _P
ZAlSn6Cu1Ni1	5.5~7.0	0.7~1.3	87.2~89.9	0.7~1.3	0.1	0.7	0.7	0.2

1.2.4 锌基合金

它是使用历史很长的一种减摩材料，但应用有限。锌基合金熔点低 (约 400℃)，受热软化的趋势大于青铜和铝基合金，所以磨合快。在有磨粒的情况下，锌基合金对配副轴颈的磨损较少。可以用铸造法或辗压法把锌基合金与钢制成复合材料。

锌基合金比青铜、铝基轴承合金强度高，塑性好，疲劳强度亦高。

1.2.5 铸铁

铸铁的减摩性能依石墨组分的结构而定，减摩铸铁应尽量不含游离铁素体和西门体。铸铁只适用于轻载、低速场合。

1.3 粉末冶金减摩材料

粉末冶金减摩材料主要制作含油轴承，其化学成分见表 20.6-6，其特点与应用见表 20.6-7，性能参见第 4 卷第 25 篇。

表 20.6-6 粉末冶金减摩材料的成分 (%)

类别	牌号	ω_{Fe}	$\omega_{C(化合)}$	$\omega_{C(总和)}$	ω_{Cu}	ω_{Ni}	ω_{Zn}	ω_{Pb}	其他
铁基	铁	FZ1160, 1165	余量	<0.25	<0.5	—	—	—	<3
	铁-碳	FZ1260, 1265	余量	0.25~0.60	<1.0	—	—	—	<3
	铁-碳-铜	FZ1360, 1365	余量	0.25~0.60	<1.0	2~5	—	—	<3
	铁-铜	FZ1460, 1465	余量	—	—	18~22	—	—	<3
铜基	铜-锡-锌-铅	FZ2170, 2175	<0.5	—	0.5~2.0	余量	5~7	5~7	2~4 <1.5
	铜-锡	FZ2265, 2270	<0.5	—	0.5~2.0	余量	8~11	—	<1.0
	铜-锡-铅	FZ2365	<0.5	—	0.5~2.0	余量	6~10	<1	3~5 <1.0

注：表中各元素的成分皆为质量分数。

表 20.6-7 粉末冶金减摩材料的特点与应用

类别	特点	应用实例
铁基	质软，易磨合，摩擦因数小，不易拉伤配副表面。抗咬粘性好。工作表面孔隙不易堵塞，润滑良好，但使用期间必须补充润滑油。切削性能好。强度低	磨粉机轴套、履带车行走轮衬套、牙轮钻衬套等
铁-碳	硬度可在较大范围上调整。强度高 ($\omega_{Fe} = 1.5\%$ 时强度最高)。游离石墨起固体润滑剂作用，低速、轻载，自润滑时石墨含量应多，低速、中载或重载、自润滑时石墨含量要适中，石墨含量少者使用期间应补充润滑油	机床液泵衬套、内燃机凸轮轴衬套、柴油机摆臂衬套、拖拉机偏心衬套等
铜基	导热性好。抗咬粘性好，不易拉伤配副表面。耐腐蚀性好。强度低。不导磁。线胀系数大。价格较高	电唱机、电风扇、纺机轴承、汽车发电机轴承等

1.4 聚合物减摩材料

这类材料广泛应用于摩擦副上，如齿轮、滚动轴承的保持架、轴瓦和导轨等。聚合物材料的

摩擦因数值和磨损量见表 20.6-8 ~ 表 20.6-10。应注意，同样的材料在不同的运转或试验条件下，摩擦因数和磨损量可能有显著差异。

表 20.6-8 几种聚合物材料的减摩性能 (聚合物与钢配副、无润滑)

聚合物材料	聚酰胺	聚甲醛	聚四氟乙烯	聚碳酸酯	聚氨酯	苯乙烯-丙烯酸酯共聚物	酚醛树脂 (模铸成型)
摩擦因数	μ_s	0.20~0.25	0.15	0.10	0.30	0.30	0.15~0.20
	μ	0.25~0.30	0.20	0.15	0.40	0.40	0.25
相对磨损	200	65	8	2 500	340	3 000	30

表 20.6-9 几种聚合物薄涂层的减摩性能 (载荷 4 MPa、速度 1 m/s、油润滑)

聚合物材料	聚酰胺	芳香聚酰胺	聚碳酸酯	环氧树脂	聚丙烯	氟塑料
摩擦因数	0.04~0.05	0.030	0.032	0.032	0.040	0.032

表 20.6-10 聚己内酰胺涂层厚度对减摩性能的影响

性能	涂 层 厚 度/mm				
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
最大法向载荷/MPa	7.35	13.73	11.77	9.32	6.86
摩擦因数	0.020	0.018	0.030	0.055	0.065
磨损度/ $\mu\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$	0.58	0.66	0.72	0.76	0.56

配副表面的材料对聚合物表面的磨损能产生显著的影响, 见表 20.6-11。

表 20.6-11 聚四氟乙烯与不同材料的相对磨损

配副材料	碳钢	铸铁	不锈钢	镀铬表面	铝合金
相对磨损	1	2	3	20	50

热塑性聚合物减摩材料的主要优点是: 很好的加工性、低的价格、优良的阻尼特性。可以用

模铸法、挤压成型法、离心浇注法、直接在模子内的单体阴离子聚合法、熔化聚合物形成减摩涂层的沉积法和弥散法, 生产热塑性聚合物的摩擦零件:

热固性聚合物比较耐高温, 制造它们时需要高的压力, 用喷射造型法。

几种常用聚合物减摩材料适宜的工作条件见表 20.6-12。

表 20.6-12 常用聚合物减摩材料适宜的工作条件

材料	常期工作温度/°C	短时工作温度/°C	特 性	应用场合
聚酰胺	-40~80	~120	能与钢配副, 不宜与非铁金属配副。可填充石墨、 MoS_2 、玻璃纤维以改善性能。可用矿物油、合成油、水润滑	能在无润滑下工作, 适宜于纺织、食品及家用机械
聚甲醛	~120	~140	加入质量分数 15%~20% 的聚四氟乙烯能使磨损率下降 67%~75%。刚度大、尺寸稳定、耐磨性好、不易老化。能耐有机溶剂、水、盐溶液、碱、有机酸溶液	适宜作无润滑轴承、齿轮、套筒、离合器等
聚碳酸酯	-253~135		加入 15%~20% 聚四氟乙烯能使磨损率下降 90%~97%。制品冲击韧度高、尺寸稳定、蠕变小, 但疲劳强度低, 耐水、无机酸溶液、盐溶液, 抗氧化、耐热	电子仪器、电器、仪器、计算机中的零件
芳香聚酰胺	50~200		可填充聚四氟乙烯、石墨增强, 耐磨性提高 10 倍。可用润滑油润滑。强度高, 耐热	滑动轴承、密封环、保持架、凸轮、小模数齿轮、阀等
聚丙烯酸酯	-100~180	~230	较耐热, 不导电, 耐离子辐射。可填充固体润滑剂以改善性能	光学仪器、医疗器械
聚四氟乙烯	-270~260		不受酸、碱、氧的影响。强度低, 加工性不好。可填充石墨、 MoS_2 、玻璃纤维和金属粉末以改善性能	自润滑轴承、活塞环、阀座、泵等

聚合物质轻，化学稳定性好，工艺性好。但尺寸稳定性特别是热稳定性不够好，强度较低。以纤维或颗粒填充聚合物制成复合材料，便可以

通过填充组元的选择得到既有聚合物优点又抑制其不足的新一代摩擦副材料。表 20.6-13 给出轴瓦用几种增强聚合物材料的参数：

表 20.6-13 几种轴瓦用增强聚合物材料的性能

材料 (聚合物 + 增强组元)	最大压力 / MPa	最高使用温度 / °C	线胀系数 / $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	热导率 / $\text{W} (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
尼龙, 聚缩醛	10	100	100	0.24
尼龙 + 石墨、 MoS_2 、玻璃、PTFE	15~20	150	60~100	0.24
PTFE + 玻璃、碳纤维、颗粒碳、云母、金属、青铜	2~7	250	60~100	0.25~0.5
酚醛、环氧树脂 + 石墨纤维织物、PTFE	30~50	175	10~80	0.4

1.5 金属塑料减摩材料

金属塑料减摩材料是综合粉末冶金和工程塑料各自优点制成的新型减摩材料，分两大类：整体金属塑料和复合金属塑料。

整体金属塑料是由粉末冶金多孔制品或金属纤维制品，经真空浸渍聚四氟乙烯分散液和其他固体润滑剂制成。青铜基整体金属塑料的性能见表 20.6-14。

复合金属塑料是以低碳钢板为基体，烧结球

形青铜粉末为中间层，用工程塑料及添加剂作填充物，用轧制法将塑料等填充物轧入中间层的孔隙内，形成表面减摩层，常用的工程塑料是聚四氟乙烯和聚甲醛。常用复合金属塑料的性能见表 20.6-15。

这种减摩材料可用作衬套、轴瓦、止推垫圈、球面座、压缩机活塞环、导向环、支承环、动密封环、滑板、机床横导轨、减振离合器片等。

表 20.6-14 整体金属塑料性能

牌号	成分 (质量分数) / (%)	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	硬度 (HBS)	摩擦因数	冲击韧度 / $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$	抗拉强度 / MPa	抗压强度 / MPa	压溃强度 / MPa	线胀系数 / $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
ZT-1	CuSn6Pb3Zn6:80; PbCO_3 :20; NH_4HCO_3 :3(另加); 浸人物: F-4:98; WS_2 :2	5.3~5.7	11~14	0.21	2.45~2.94	27.4~33.3	45.1	55.9~64.7	19.58
ZT-2	球形青铜(Sn:9%~10%):100 浸人物: F-4: 95; WS_2 : 5	5.3~5.7		0.15				176.4~196.0	17.3~17.5

表 20.6-15 复合金属塑料性能

牌号	成分	抗压强度 / MPa	线胀系数 / $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	热导率 / $\text{W}(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	摩擦因数	$(p\dot{v})_0 / \text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
FH-1	基板:磷青铜;中间层:球形青铜粉;浸人物:F-4 + 添加剂	205.8	17.6~18.4	0.35~0.67	≤ 0.13	1.96
GS-1	基板:08 钢;中间层:球形青铜粉;浸人物:F-4 + 添加剂	98	≤ 30	2.3	≤ 0.12	2.35

1.6 木基减摩材料

木基减摩材料主要用作轴瓦和导轨一类零

件。木材是多孔质结构，可用填充剂改善性能。填充聚合物将提高木材的尺寸稳定性和减少吸湿量，并提高强度。填充金属则能显著提高导热

性、降低摩擦因数和减少磨损。

填充溶于润滑油之聚乙烯的木基减摩材料，制成法兰式滑动轴承的轴瓦，用于带式输送机支

承辊子，在建筑工地、农田等灰尘极多的环境下工作，性能极好。

木基减摩材料的特性见表 20.6-16。

表 20.6-16 木基材料的物理力学性能

性能参数	木 材 填 充 剂 品 种				
	溶于润滑油之聚乙烯	合成粘接剂	溶于润滑油之硬脂酸脂	有机硅合成物	铜盐及其氧化物和甘油
密度/g·cm ⁻³	1.15~1.25	1.40~1.45	1.30~1.40	1.30~1.40	1.10~1.15
抗压强度(顺木纹)/MPa	1.1~1.2	1.3~1.5	1.4~1.6	1.2~1.5	1.0~1.1
硬度(端面)/HRS	10~11	24~25	16~18	16~18	10~11
耐热性/℃	180	200	180	220	180
自润滑摩擦因数	0.08~0.12	0.08~0.14	0.06~0.12	0.09~0.12	0.03~0.04
线磨损度	0.7×10 ⁻⁹	1.53×10 ⁻⁹	0.32×10 ⁻⁹	0.84×10 ⁻⁹	0.55×10 ⁻¹¹
最高工作温度/℃	90~100	150~160	130~140	200~210	80~90

1.7 碳石墨

碳石墨是由不同量的碳和石墨构成的，石墨含量越多，材料越软，摩擦因数越低。可在碳-石墨材料中加金属、聚四氟乙烯或二硫化铝组分，也可以浸渍液体润滑剂。

碳石墨材料力学性能低，只适用于轻载、低接触应力场合。它弹性模量低，加工性好，且愈磨损愈光滑。碳-石墨和碳氢化合物润滑剂有亲和力，又有自润滑性，故它适用于各种润滑状态，还适应水润滑，例如用它作压水反应堆水泵轴承，在 350℃ 下工作。

碳石墨的自润滑性取决于吸附的水气量。吸附在石墨表面的水气量受比值 p/p_0 的影响， p 是石墨表面水气的局部压力， p_0 是表面温度下的饱和蒸气压。载荷、滑动速度和环境温度的联合作用，将使 p/p_0 值降低到临界值以下，导致润滑失效。因而，一般的碳-石墨不宜用于高速、高温和缺乏水气的地方。

碳氢化合物蒸气将使 p/p_0 临界值下降约 3 个数量级。

2 摩擦材料

2.1 对摩擦材料性能的要求

2.1.1 摩擦耐热性

要求摩擦材料在摩擦部件整个工作温度范围

内保持摩擦因数值和一定的耐磨能力。一般摩擦部件对材料摩擦耐热性的要求见表 20.6-17。

表 20.6-17 对材料摩擦耐热性的要求 (℃)

载 荷 状 态		轻载荷	中等载荷	重载荷
保持使用性能的温度	短时	200	400	1100
	长时	120	250	400

2.1.2 摩擦因数

摩擦因数值应能足以保证必需的摩擦力，而且在运转期间保持稳定。

盘式、块式和带式制动器，无润滑摩擦（干式）的平均摩擦因数最好是 0.30~0.40，最小不得低于 0.22~0.25，有润滑摩擦（湿式）的摩擦因数不得低于 0.05。

摩擦因数的稳定性很重要。在整个使用期间，滑动速度和压力循环变化时，动摩擦因数的变化不应超过 ±20%。动、静摩擦因数之差也不应太大：动摩擦因数为 0.05~0.06 时，静摩擦因数不应大于 0.10~0.12；动摩擦因数为 0.08~0.10 时，静摩擦因数不应超过 0.20。

2.1.3 摩擦相容性

摩擦副两材料应不易发生粘附，粘附将损伤摩擦表面，影响摩擦因数的稳定性。

2.1.4 耐磨性

摩擦部件耐磨性水平根据零件结构、工作条件和机器的技术经济要求而定。对于式制动器，在轻载荷下制动 1000 次的线磨损量一般不应超

过 0.01 ~ 0.02 mm；中等载荷下制动 1000 次，线磨损量不应超过 0.04 mm；在重载荷下制动 1 次的线磨损量不应超过 0.007 ~ 0.01 mm。

2.1.5 磨合性

摩擦副工作表面有粗糙度和波度，初始接触是在个别点上接触。从个别点的接触到较大面积接触，这就是磨合的结果与目的，这个期间称为磨合期。磨合期短、磨合效果好，即是磨合性好。

制动器摩擦面的接触面积应不小于表观接触面积的 80%。

2.1.6 热物理性能

摩擦材料应具有足够的热疲劳强度，高的热导率，大的热容和尽可能小的线胀系数。

2.2 摩擦材料的类型与应用

表 20.6-18 列出主要摩擦材料的类型。

摩擦材料按最大压强、摩擦速度、衬里承受温度和配副面整体温度 4 个参数进行分级，见表 20.6-19。表 20.6-20 列出主要摩擦材料的性能及容许的工作条件。

2.2.1 非金属摩擦材料

(1) 石棉摩擦材料

石棉摩擦材料是树脂粘接型摩擦材料，其基本成分是石棉、粘接剂和用以调节摩擦性能的各种有机或无机填料。它具有高而稳定的摩擦因数，广泛应用于汽车、拖拉机、飞机、挖掘机等机器的制动器上。但它能承受的载荷不大，已不适应现代机器的新要求。现代机器的摩擦装置要在短期内吸收巨大的能量，因而摩擦表面温度可能高达 1 200℃，摩擦副的体积温度达 500 ~ 600℃。在这样的条件下，石棉摩擦材料中所含橡胶、聚甲醛和酚醛树脂等粘接剂将碳化，使石

表 20.6-18 摩擦材料类型与应用

类型	基体材料	成型方法
纤维摩擦材料	石棉纤维 石棉织物 棉织物 纸 有机物	浸渍树脂粘接剂，干燥后压制而成
金属、金属陶瓷摩擦材料	铁 铜 氯化硅 氧化铝 二硼化钛	铸成；金属或金属陶瓷粉末与摩擦改进剂混合后，经压制、烧结而成
碳基摩擦材料	石墨纤维织物 碳纤维织物	气相沉积碳

表 20.6-19 摩擦材料工作能力分级

材料等级	I	II	III	IV	V	VI
最大压强/MPa	1	2	3	4	7	7
最大摩擦速度/(m·s ⁻¹)	15	25	35	50	60	>60
衬里承受最高温度/℃	125	200	300	500	750	800
配副面最高温度/℃	200	400	600	800	1 000	2 000

棉摩擦材料丧失摩擦性能的稳定性，并迅速损坏。石棉摩擦材料的导热性低，更促成了这一过程。

由于石棉是公认的强致癌物质，许多国家已禁止生产、销售和使用石棉制品，包括石棉摩擦材料。

近年来用钛酸钾纤维、金属纤维代替石棉纤维制作摩擦材料，纤维的质量分数为 40%。还有用铁、陶瓷等颗粒制作树脂粘成型摩擦材料的。

粘接剂大都采用酚醛树脂，其质量分数约为 12% ~ 20%。

石棉制动带、制动片和离合器片的特性见表 20.6-21。

表 20.6-20 摩擦材料的性能及容许工作条件

摩擦材料	摩擦因数	能量磨损度/(mm ³ ·J ⁻¹)	最高温度/℃	最高工作温度/℃	工作压力/MPa	最大压力/MPa	
衬	绵织物	0.50	12.2 × 10 ⁻⁶	150	100	0.07 ~ 0.70	1.5
	石棉织物	0.45	9.2 × 10 ⁻⁶	250	125		2.1
里	石棉纤维	有挠性的	6.1 × 10 ⁻⁶	350	175		2.1
		半挠性的	3.0 × 10 ⁻⁶	400	200		2.8
		无挠性的	1.8 × 10 ⁻⁶	500	225		3.8

续表 20.6-20

摩擦材料		摩擦因数	能量磨损度/ mm^3J^{-1}	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	最高工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	工作压力/ MPa	最大压力/ MPa	
垫 块	石棉纤维	0.35	1.2×10^{-6}	650	300	0.35~1.75	5.5	
	粉末冶金	铁基	0.30	—	650	300	0.35~3.50	5.5
		铜基	0.30	—	650	300	0.35~3.50	5.5
	金属陶瓷	0.32	—	800	400	0.35~1.05	6.0	

表 20.6-21 石棉制动带、片和离合器片性能 (GB/T 11834—1989)

名称		离合器片		制动片			制动带		
代号		LP3-3	ZP3-2	ZP3-1	ZP2	ZP1	ZD1	ZD2	ZD3-1
材料		模压制品、半模压制品、半金属模压制品		特殊加工编织制品	软质模压制品	普通纺织制品	软质模压制品	特殊加工编织制品	
特性		硬质			半硬质	软质	半硬质	硬质	
摩擦因数	温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	0.25~0.60	0.30~0.60	0.30~0.60	0.30~0.60	0.30~0.60	0.30~0.60	0.30~0.60
		150	0.20~0.60	0.30~0.60	0.25~0.60	0.25~0.60	0.25~0.60	0.25~0.60	0.25~0.60
		200	0.15~0.60	0.20~0.60	0.20~0.60	0.20~0.60	—	0.20~0.60	0.20~0.60
		250	—	0.15~0.60	—	—	—	—	—
磨损度 $\mu/\text{cm}^3\text{J}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	≤ 0.050	≤ 0.050	≤ 0.050	≤ 0.050	≤ 0.100	≤ 0.050	≤ 0.050
		150	≤ 0.075	≤ 0.075	≤ 0.075	≤ 0.075	≤ 0.200	≤ 0.075	≤ 0.075
		200	≤ 0.100	≤ 0.100	≤ 0.100	≤ 0.100	—	≤ 0.100	≤ 0.100
		250	—	≤ 0.200	—	—	—	—	—
抗弯强度/ MPa		≥ 24.5							
最大应变/ $\mu\text{m}\cdot\text{mm}^{-1}$		≥ 6.0							

(2) 纸基摩擦材料

它也是树脂粘合型摩擦材料，主要在油介质中工作，摩擦因数稳定、磨损小，静、动摩擦因数很接近，约为 0.13~0.15。

(3) 有机摩擦材料

皮革、橡胶、木材等，主要用于小功率、低速机械的摩擦装置。

(4) 碳基摩擦材料

碳基摩擦材料属复合成型摩擦材料，是一种碳-碳复合材料，利用石墨或碳纤维织物为骨架，经气相沉积碳而成。它耐高温性能好，可达 2000 $^{\circ}\text{C}$ ，甚至更高，摩擦因数稳定，耐磨性好，成功应用在现代高速飞行器制动减速装置中。

2.2.2 金属摩擦材料

金属摩擦材料强度高，对水的侵入不敏感，

但摩擦因数不稳定，温度升高时摩擦因数迅速下降，在油中工作时摩擦因数过低。

(1) 粉末冶金摩擦材料

粉末冶金摩擦材料是金属烧结成型材料，具有高的耐热性（可达 680 $^{\circ}\text{C}$ ）、导热性、强度和良好的摩擦性能，广泛应用于重载工作机械，但在轻载荷条件下耐磨性不及石棉摩擦材料。

粉末冶金摩擦材料有铁基和铜基两种，铁基用于干式摩擦装置，铜基多用于湿式摩擦装置。表 20.6-22 列出粉末冶金摩擦材料的牌号和物理学性能。

粉末冶金摩擦材料的摩擦因数与载荷、滑动速度、温度、制动压力和制动初速度有关，它们的关系分别见图 20.6-2~图 20.6-6。图 20.6-7 是 FM-101 S 在不同离合次数下的磨损量。

表 20.6-22 粉末冶金摩擦材料物理力学性能

牌 号	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	硬度 (HBS)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	应 用
FM-101 S	5.8~6.4	20~60	>200	>30	船用齿轮箱、拖拉机、载货汽车、 工程机械等离合器
FM-102 S	5.5~6.4	30~60	>200	>30	中等载荷液力变速箱离合器
FM-103 G	5.5~6.4	25~50	>150	>30	干式离合器、制动器
FM-104 S	5.8~6.4	20~60	>200	>30	大型柴油机半干离合器
FM-105 G	5.5~6.2	15~55	>100	>20	拖拉机、齿轮箱、冲床、工程机械 等干式离合器
FM-106 G	5.5~6.2	25~65	>200	>30	各类机床用离合器
FM-201 G	5.0~5.5	45~75	>200	>50	载货汽车、矿山车辆等重型车辆制 动器
FM-202 G	5.0~5.6	40~80	>200	>50	脱粒机、齿轮箱、工程机械等干式 离合器片、制动片
FM-203 G	4.7~5.2	15~30	>100	10	汽车、拖拉机等干式离合器
FM-204 G	4.8~5.5	35~55	>150	>30	工程机械干式离合器
FM-205 G	4.7~5.2	60~90	>150	>30	与合金钢匹配的制动材料

注：1. 牌号中第 1 个数字 '1' 代表铜基粉末冶金，第 1 个数字 '2' 代表铁基粉末冶金。

2. 牌号中 S 表示湿式，G 表示干式。

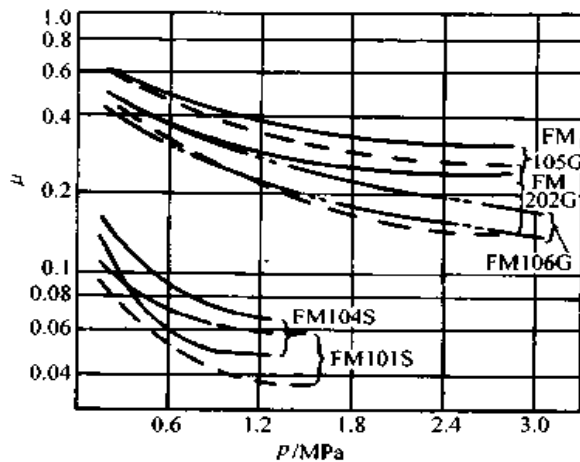


图 20.6-2 摩擦因数与载荷的关系曲线

试 验 条 件	牌 号	配副材料	滑动速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	FM-101 S	65Mn	8.35~11.7
	FM-104 S	65Mn	15.7
	FM-105 G	QT600-3	7.5
	FM-106 G	65Mn	7.5
	FM-202 G	QT600-3	7.5

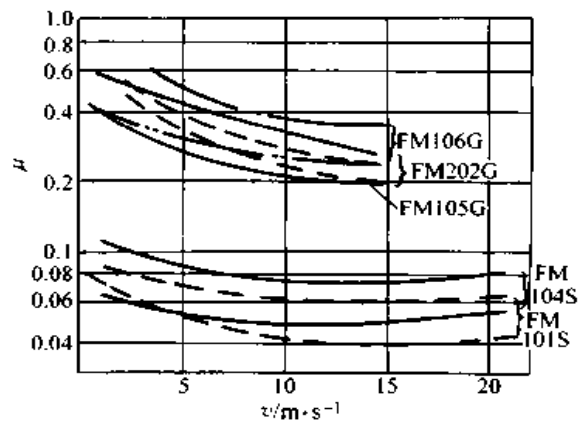


图 20.6-3 摩擦因数与滑动速度的关系曲线

试 验 条 件	牌 号	配副材料	载 荷/MPa
	FM-101 S	65Mn	0.776~1.55
	FM-104 S	65Mn	0.776~1.26
	FM-105 G	QT600-3	1.0
	FM-106 G	65Mn	1.0
	FM-202 G	QT600-3	1.0

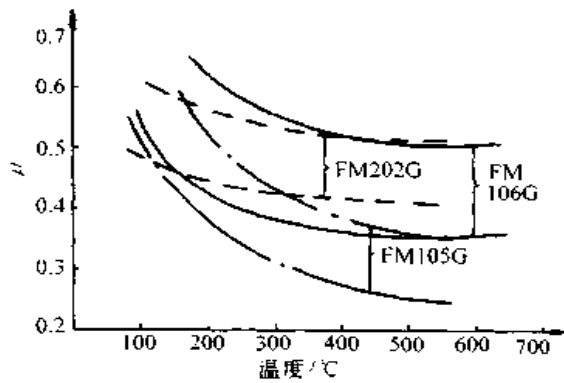


图 20.6-4 摩擦因数与温度的关系曲线

试验条件	牌号	配副材料	载荷/MPa
	FM-105 G	HT200	1.0
	FM-106 G	65Mn	1.0
	FM-202 G	HT200	1.0

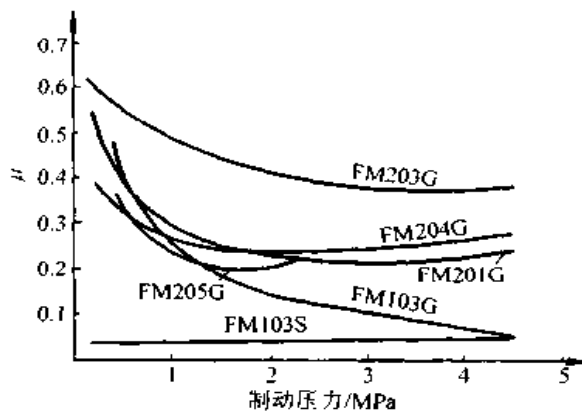


图 20.6-5 摩擦因数与制动压力的关系曲线

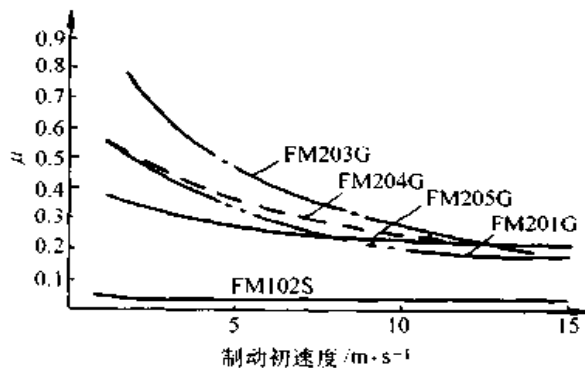


图 20.6-6 摩擦因数与制动初速度的关系曲线

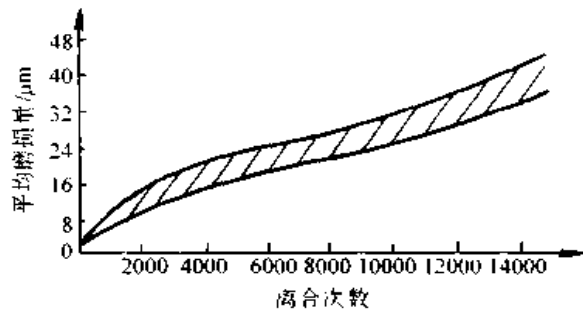


图 20.6-7 FM-101 S的磨损量

试验条件：功率 60~65 kW；接合频率 2~3 min⁻¹；
最大滑动速度 15.7 m/s；压力 1.4 MPa

(2) 铸铁

耐磨性及导热性较好，不易胶合，耐冲击性差，适于在油中，低速条件下工作；载荷不大时也用于干式摩擦装置；常用牌号为 HT200 等。

(3) 钢

耐磨性及导热性较好，适于在油中工作；常用的牌号为 10 钢、15 钢（渗碳淬火，表面硬度 56~62 HRC）；65 Mn（35~45 HRC）等。

(4) 青铜

耐磨性和导热性好，常用的有 CuSn5Pb5Zn5、CuSn10P1、CuAl10Fe3 等。

3 耐磨材料

耐磨材料是指专为提高各种机械装备耐磨性而发展的以及某些典型摩擦副最常用的材料。虽然作为各种结构材料使用的金属、合金、工程陶瓷、聚合物以及复合材料都具有一定的耐磨性，但不能视为耐磨材料。

3.1 耐磨材料的选用

选择材料对控制磨损起着重要的作用。耐磨性是选择耐磨材料时考虑的主要特性，若所选材料使摩擦副的磨损因数与摩擦因数的乘积 μk 达不到 10^{-3} 则需重选材料。但耐磨性不是唯一要考虑的因素，往往需要在力学-化学性能与耐磨性间作调和。一般地说，选择耐磨材料是在硬度与韧性间作调合。对制动材料，通常要作耐磨性与导热性的调和、耐磨性与摩擦阻性的调和等。

表 20.6-23 列出对耐磨材料的各种性能要求。必须了解哪些要求是最主要、必须优先考虑的。

表 20.6-23 对耐磨材料的性能要求

一般性能	抗拉或抗压强度、疲劳强度、断裂韧度、可塑性、耐腐蚀性、工艺性、价格、有效性、热性能、空间限制
特殊性能	硬度、弹性、导电性、光学特性、强度-质量比、耐撕裂性、耐火性、安全因数
摩擦学性能	摩擦相容性、运转极限、摩擦因数、磨损率

下述步骤供选用耐磨材料时参考。

- ①了解应用场合对材料一般和特殊性能的要求。
- ②了解这种场合常用材料的性能。
- ③将常用材料的性能与性能要求作比较。
- ④选择合适的材料品种。

- ⑤调和摩擦学性能。
- ⑥选择具体的材料。
- ⑦用台架或样机试验评价所选材料。

表 20.6-24 列出各类应用场合（不同的磨损类型）最常采用的材料品种：

材料选择过程中最关键的是预测材料组合在使用中发生擦伤、咬粘或其他损伤的趋势。虽然表 20.6-24 中所列材料是筛选过的，但仍需考虑其相容性。若采用润滑剂，则通常是相容的。但是，仍然需要选用无润滑时具有摩擦相容性的材料组合，否则，当载荷突然增加或润滑剂偶然消失能导致两接触表面的咬粘，并造成机器意外损坏。包含两滑动表面之系统对工况的变化是很敏感的，两种材料具有摩擦相容性能影响其敏感性。按一般规律来说，两种相同的材料不宜组成耐磨材料组合，但是高硬度材料（例如淬硬到 60HRC 以上的淬硬钢）例外。

表 20.6-24 耐磨材料的应用

耐磨材料		无润滑	有润滑	无润滑	有润滑	冲击	流体	滚动	滑动	三体	微粒	水滴	气
		滑动磨损	滑动磨损	滚动磨损	滚动磨损	磨损	侵蚀磨损	磨粒磨损	磨粒磨损	磨粒磨损	侵蚀	侵蚀	蚀
结构钢	表面处理	✓	✓					✓	✓	✓			
	表面硬化	✓				✓		✓	✓	✓	✓	✓	
	软涂层	✓	✓										
合金钢			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		
工具钢		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓
不锈钢	沉淀硬化			✓	✓		✓						
	马氏体		✓	✓	✓		✓		✓	✓			
灰铸铁		✓	✓	✓				✓	✓	✓			
白口铸铁		✓						✓	✓	✓			
高温合金	难熔金属	✓	✓			✓				✓			
	特种合金		✓	✓			✓					✓	✓
铜基合金	青铜		✓				✓						
	铍青铜		✓			✓							
锡基、铅基轴承合金			✓										
碳化物		✓		✓					✓	✓	✓	✓	
陶瓷		✓					✓		✓	✓	✓	✓	
热固性塑料		✓											
热塑性塑料		✓	✓										✓
合成橡胶			✓					✓	✓				✓
碳石墨		✓											✓

注：划✓者为该应用场合常用的材料。

在某一运转条件(载荷、压力、表面温度、环境等)下,这种材料组合是相容的,运转条件改变后,它可能就不相容了。因此,要注意运转条件的限制。

不同机制的磨损类型将影响具体材料的选择,表20.6-25列出几种磨损类型对材料的性能要求。必须注意,实际磨损常常是几种类型混合的磨损。

材料经不同表面技术处理,有不同的状态,如热处理状态、扩散处理(渗氮、渗碳等)状态、表面涂覆状态和标准状态(冷轧或热轧棒料、挤压成型材料、烧结成型材料、锻造棒料等),不同状态的性能也有不同之处。

表 20.6-25 磨损类型对耐磨材料的性能要求

磨损类型	要求的材料性能
磨粒磨损	表面硬度高于磨粒硬度,加工硬化因数低
粘附磨损	在配副材料中的溶解度低,在运转温度下不软化,表面能低
侵蚀磨损	硬度高(对小角度冲刷),热处理不影响耐蚀性,韧性好(对大角度冲刷)
接触疲劳磨损	既要硬度高又要韧性好,能抛光,不含硬的非金属杂质
腐蚀磨损	不作钝化处理能耐介质腐蚀
微动磨损	耐环境介质腐蚀,只产生软的腐蚀产物,在配副材料中的溶解度低,表面硬度高于磨粒硬度,加工硬化因数低
高温磨损	热硬度高,能形成硬的、韧性的玻璃状氧化物表面,在运转温度下不迅速氧化,热导率高
高速磨损	热导率高,耐热冲击,线胀系数小,熔点高
塑性磨损	弹性模量大,硬度高,屈服极限高,蠕变极限高

注:在某些耐蚀合金的钝化膜上磨粒磨损会促进腐蚀。

3.2 耐磨材料

3.2.1 钢

钢是机械结构件的主要用材。碳的质量分数大致相等时,基体显微组织不同的碳钢和低合金

钢,耐磨性顺序为:马氏体>贝氏体>珠光体>铁素体。

表20.6-26是几种耐磨钢的性能及其应用实例。

(1) 高锰钢

它的化学成分特点是高碳、高锰,成分变化较大。碳的质量分数高则耐磨性高,但韧性低。一般情况下,厚壁且结构复杂的零件,碳含量低些好;在接触应力低、磨粒较软的工况下工作的铸件,其碳含量应高些。

锰的质量分数的选择主要取决于碳的质量分数及铸件的使用条件,通常锰的质量分数与碳的制量分数之比应不小于9。

高锰钢铸件在受到冲击或压应力时,表面发生塑性变形,迅速产生加工硬化并诱发产生马氏体及 ϵ 相,从而形成硬而耐磨的表面层,表层硬度由200HBS提高到500HBS以上,硬化层深度可达10~20mm。

GB/T 5680—1985规定了4种牌号的高锰钢,即ZGMn13-1~4,它们锰的质量分数均为11.0~14.0,碳的平均质量分数依次为1.3、1.2、1.1和1.05。我国还生产一种改进型高锰钢,Mn6Mo,它适用于冲击不很大的粉煤设备和工程机械的耐磨件。

(2) 低合金耐磨钢

具有良好的耐磨性和韧性的综合性能,常用的合金元素为Cr、Mo、Si、Mn等,是一种价格便宜、便于加工处理的耐磨材料,也是表面处理(渗碳、渗氮、镀铬、表面淬火、等离子喷涂、磷化)、涂覆固体润滑剂或聚合物的优良基体材料。它与传统润滑剂相容。

钢中合金元素量影响其显微结构、硬度和韧性。低合金钢的使用温度通常在100~150℃以内。

低合金耐磨钢常用于:矿山机械,如索斗铲、矿石破碎机;农业机械,如犁铧、耙片、旋耕刀等;工程机械,如支重轮、导向轮、驱动轮、履带板等;也用于铁路的轨闸转辙器和车辆。

(3) 石墨钢

它是一种高碳铸钢,兼有铸钢、铸铁的综合性能。它在低应力磨粒磨损条件下,耐磨性比高锰钢好,且成本低,主要用于要求表面质量严格

表 20.6-26 几种耐磨钢的性能及其应用实例

钢材名称	钢号	$w_C/\%$	$w_{Mn}/\%$	$w_{Cr}/\%$	$w_{Ni}/\%$	其他	硬度	应用实例
低合金钢	20CrA	0.17~0.24	0.5~0.8	0.70~1.10	<0.25	—	179HBS	活塞、轴类
低合金中碳钢	38CrMoAl	0.35~0.42	0.3~0.6	1.35~1.65	—	w_{Mo} 0.15~0.40	340HBS	齿轮
低合金高碳钢	GCr15	0.9~1.1	0.4	1.30~1.60	—	—	62HRC	球轴承滚珠
高锰钢	ZGMn13	0.9~1.3	11~14	—	—	w_{Si} 0.3~0.8	180/220HBS	齿板、衬板
不锈钢	Cr18	0.85~0.95	≤ 0.8	17~19	—	w_{Ni} 1.0~1.3	>55HRC	耐蚀轴承
模具钢	Cr12MoV	1.45~1.70	0.35	11~12	<0.35	w_{Mo} 0.4~0.6	331/285HBS	模具
碳素工具钢	T8	0.6~0.8	<0.4	—	—	—	63.5HRC	普通刀具
高速工具钢	W18Cr4V	0.7~0.8	≤ 0.4	3.8~4.4	w_{W} 17~19	w_{Ni} 0.4	65/66HRC	切削刀具

的拉伸、弯曲、整形冲模，小型热轧辊、球磨机的衬板、磨球等。

(4) 不锈钢

用于高温和腐蚀环境（海水和浓试剂除外）且要求耐磨的地方。奥氏体不锈钢在无润滑摩擦时，极易产生擦伤或冷焊。故只能用沉淀硬化和马氏体不锈钢作耐磨材料。能通过热处理使这种不锈钢硬化，处理后的硬度和碳钢处理后接近，因而有与碳钢同级的耐磨性。然而，它们不如奥氏体不锈钢耐腐蚀。

马氏体不锈钢可用于在 315℃ 下运转的滚动轴承，在潮湿空气中工作的仪表轴承等。沉淀硬化不锈钢用于水泵轴、木材和食品加工的切削工具等。

(5) 工具钢

它的重要特性之一是高温硬度，能在切削产生的高温下保持硬度和切削刃口的锋利。工具钢中的碳化物比被加工金属中的碳化物硬，故刀具的磨损较小，其中的铬又使工具钢耐腐蚀，但耐腐蚀性不如不锈钢。

用工具钢制作球和座圈的滚动轴承能在 430℃ 的温度下运转，适用于喷气式飞机。具有较高断裂韧性的工具钢，因它既耐冲击又耐磨，且有大的强度-质量比，故广泛应用于飞机制造，制作起落架、液压件和关节轴承。

在工具钢表面涂覆一薄层碳化钛能显著提高切削刃的使用寿命。

3.2.2 难熔金属及特种合金

(1) 难熔金属

熔点高于铬的金属谓之难熔金属。大多数难

熔金属高温时在空气中会氧化，必须用涂层保护或在无氧的气氛中使用。

钽和钼多半用作复合材料的硬化剂或粘接剂。把钼喷涂在钢的表面可提高钢的耐磨性。

钨很硬且耐磨，用于打印机以抵抗油墨对机件的磨损。

钒、铍和铌常用来涂覆金属表面以提高其耐磨性，例如笔尖，因为它们价格昂贵，所以只用来涂覆小零件或零件的微小局部。

(2) 特种合金

它分为铁基、镍基和钴基三种，含有不同量的铬、钼、钨和铌。它们在高温下能抗氧化，在 1000℃ 时能保持结构强度。大多数特种合金用于制造喷气式飞机发动机、高温化工设备中的阀门、管道和法兰。

在液态金属循环系统和熔融盐的输送回路中，泵和其他零件常使用钴基特种合金。

普通镍基合金没有满意的耐磨性和相容性，但是，有一种镍基特种合金在高温下耐磨，称为摩擦合金。在高温下，它能构成硬的耐磨相，形成一层柔韧的、釉一样的氧化层，使摩擦因数下降，噪声减小，并耐磨损。

3.2.3 铜基合金

铜基合金导热性好，耐热性比钢好，并有优良的边界润滑性（特别是与钢配副）。青铜中锡的质量分数达 8% 以上时，会形成一种硬的金相组织，使青铜的耐磨性提高。铅的质量分数达到 10%，将会析出小球状游离铅（在铜锡基体中铅是不溶混的）。在摩擦过程中，游离铅会涂在摩擦表面上，形成固体润滑膜。铅也使青铜的屈服

点下降, 两摩擦表面更易吻合, 载荷分布在更大的表面积上。这有利于向流体动力润滑状态转变。青铜与钢相容, 抗擦伤和材料迁移能力强。

铝青铜的承载能力比锡青铜高, 但抗擦伤能力较弱, 工作温度可达 260 ℃。

铍青铜是高强度铜基合金, 加入质量分数 2% 的铍, 强度就接近钢的强度。导弹弹体的支承就采用铍青铜。

3.2.4 铸铁

冷却速度、碳的质量分数和合金成分将决定铸铁的显微组织。

(1) 冷硬铸铁

其铸造特点是: 要求高硬度、高耐磨性的工作表面通常采用金属型铸造, 其余部分仍采用砂型铸造。

冷硬铸铁用于制造要求高硬度、高抗压强度和耐磨性的工作表面, 同时需要有一定的强度和

韧性的零件, 如轧辊、车轮和犁镜等。冷硬铸铁有: 普通冷硬铸铁、镍铬钼冷硬铸铁、铬钼稀土冷硬铸铁、硼冷硬铸铁和稀土冷硬铸铁几种。GB1504—1991 规定了冷硬铸铁轧辊的化学成分。

(2) 白口铸铁

抗磨白口铸铁具有优良的抗磨粒磨损性能、适宜的综合力学性能及较好的工艺性能, 适于制造矿山、冶金、电力、建材和机械制造等设备中的易磨损零件。但它断裂韧度差, 不能用于受冲击或循环载荷的地方。

GB/T 8263—1987 规定了抗磨白口铸铁的化学成分, 见表 20.6-27。

在低碳、低硅条件下经强韧化处理, 获得强韧白口铸铁, 可显著提高普通白口铸铁的使用性能。

(3) 中锰球墨铸铁

表 20.6-27 抗磨白口铸铁的主要化学成分和硬度

类	级	牌 号	化 学 成 分 / %							硬 度 / HRC			
			w _C	w _{Si}	w _{Mn}	w _{Cr}	w _{Mo}	w _{Ni}	w _{Cu}	w _W	铸态	淬火态	
1	A	KmTBMn5W3	3.0~3.5	0.8~1.3	0.8~1.3						2.5~3.5	50~60	
2	A	KmTBW5Cr4	2.5~3.5	0.5~1.0	0.5~1.0	3.5~4.5					4.5~5.5	50~60	
3	A	KmTBNi4Cr2-DT	2.7~3.2	0.3~0.8	0.3~0.8	2.0~3.0	0~1.0	3.0~5.0					≥53
3	B	KmTBNi4Cr2-GT	3.2~3.6	0.3~0.8	0.3~0.8	2.0~3.0	0~1.0	3.0~5.0					≥55
3	C	KmTBCr9Ni5Si2	2.5~3.6	1.5~2.2	0.3~0.8	8.0~10.0	0~1.0	4.5~6.5					≥55
4	A	KmTBCr2Mo1Cu1	2.4~3.6	≤1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	0.5~1.0		0.8~1.2			50~56	≥56
4	B	KmTBCr15Mo2-DT	2.0~2.8	≤1.0	0.5~1.0	13.0~18.0	0.5~2.5	0~1.0	0~1.2			40~56	≥58
4	C	KmTBCr15Mo2-GT	2.8~3.5	≤1.0	0.5~1.0	13.0~18.0	0.5~3.0	0~1.0	0~1.2			50~58	≥58
4	D	KmTBCr20Mo2Cu1	2.0~3.0	≤1.0	0.5~1.0	18.0~22.0	1.5~2.5	0~1.5	0.8~1.2			50~58	≥58
4	E	KmTBCr26	2.3~3.0	≤1.0	0.5~1.0	23.0~28.0	0~1.0	0~1.5	0~2.0			50~58	≥55

注: 1. 牌号中 'DT' 和 'GT' 分别代表 '低碳' 和 '高碳';

2. 1A、2A、3A 和 3B 属铸态马氏体白口铸铁, 4B、4C、4D 和 4E 属高铬铸铁。

是锰的质量分数为 5.5%~9.0%, 硅质量分数 3.3%~5.0% 的球墨铸铁。常用以制造矿山、水泥、煤粉加工设备和农业机械的一些耐磨

零件。

中锰球墨铸铁的主要化学成分和力学性能见表 20.6-28。

表 20.6-28 中锰抗磨球墨铸铁 (GB/T 3180—1982)

牌 号	$w_{Mn}/\%$	抗弯强度 σ_{tb}/MPa		挠度 f/mm		冲击吸收功/ J	硬度 (HRC)
		砂型	金属型	砂型	金属型		
		试棒直径/ mm		支距/ mm			
		30	50	300	500		
		\geq					
MQTMn6	5.50—6.50	510	390	3.0	2.5	31	44
MQTMn7	>6.50—7.50	470	440	3.5	3.0	35	41
MQTMn8	>7.50—9.00	430	490	4.0	3.5	39	38

(4) 奥氏体-贝氏体球墨铸铁

等温淬火的奥氏体-贝氏体球墨铸铁在磨粒磨损条件下也能取得满意的使用效果。

3.2.5 聚合物

聚合物的特性是：与许多化学物质不起反应；不易擦伤配副表面；高温下有润滑能力；有自润滑性能和低的弹性模量。

聚合物在金属表面上无润滑地滑动摩擦时，磨损率较低。用聚合物制造齿轮、轴承、密封件时，制造费用亦较低。聚合物有三种：热塑性聚合物、热固性聚合物和弹性聚合物。

热塑性聚合物表面在摩擦中因摩擦热而温度升高，达到一定温度后将软化，软化后磨损率将显著增大。

温度较高、需要高弹性模量和高硬度时，采用热固性聚合物。聚酰亚胺是一种较好的热固性聚合物，能在较高的温度下保持结构刚度。其他热固性聚合物，如环氧树脂、酚醛树脂、硅有机脂等，多半作为玻璃纤维、棉织物、丙烯酸纤维编织物和金属屏蔽层压材的粘接剂。

橡胶作为耐磨粒磨损的材料，被广泛用来制造轮胎。弹性聚合物的特性是：弹性大，几乎不发生塑性变形；能耐腐蚀介质以接近垂直的喷射角冲刷表面的腐蚀磨损。但是，尖利的粗糙表面或颗粒能撕裂弹性体而导致磨损，或者局部反复变形导致疲劳磨损。

聚合物的热导率只有钢的 1%，故摩擦热的消散限制着它的摩擦速度。聚合物的尺寸稳定性差，线胀系数是钢的 10 倍，在确定摩擦副间隙时必须充分估计到这点。

可以用无机物、各种纤维和金属粉末等充填

强化聚合物，以改善其摩擦学性能、力学性能和热性能。

聚四氟乙烯是一种有优良自润滑性能和较高（与其他聚合物比较）热稳定性能的材料。它既可作为复合材料的表面层材料，又可作单一耐磨材料（需经强化）使用。聚四氟乙烯既可强化，也可用聚四氟乙烯纤维与玻璃纤维、棉纤维、合成纤维编织成织物，粘接在金属表面上。聚四氟乙烯与钢的相容性很好，可有一薄层聚四氟乙烯膜迁移到钢表面上，在聚四氟乙烯中加入铜或青铜，能增强这一作用。

3.2.6 碳化物和金属陶瓷

(1) 碳化物

能承受的温度超过高速工具钢，除钻石外，它是最耐磨的材料。故采用碳化物制作需要非常耐磨甚至不允许磨损的零件，如块规、耐磨板、切削工具、金属成型工具和冲裁工具等。还用碳化物制作需要高温硬度（超过 480℃）的零件。碳化物价格高，加工困难，非极端情况一般不采用它。

工业上用得最多的碳化物是碳化钨和碳化硅。用金属或陶瓷粘接剂，通过粉末冶金法生产这种材料。用作粘接剂的有钴、钨和铬等难熔金属。

刀具在切削过程中高温切屑从其前面滑过，由于高温固体溶解作用，将带走一薄层碳化物，前面被磨损，形成浅坑。在刀具表面涂覆溶解度低的碳化钛，可显著提高刀具的寿命。

选用碳化物材料时要注意下列问题：碳化物材料密度大制成的零件比较重；只能用磨削或钻石刀具加工，不能制成复杂的形状，虽然用在硬

模内烧结的方法可以制作复杂的零件，但硬模价格极昂贵；碳化物对缺口敏感，需要用填料改善性能；装配时要特别仔细，不能与粗糙表面接触；碳化物材料的线胀系数约为钢的 1/2，设计时必须注意不能让它在运转中出现张力。

(2) 金属陶瓷

特别耐高温氧化、耐强腐蚀，质地坚硬特别耐磨。但它比碳化物更易碎，对缺口更敏感。

作工业耐磨材料用的陶瓷有氮化硅、氧化铝、二硼化钛、二氧化钛和氧化铬等。

高炉中的支承或滑动表面，输送腐蚀性液体或泥浆的泵衬套，精密计量表的测量表面，高温

球和滚子轴承，拉丝模，挤压模，特种合金的热压模，感应加热模的导杆和密封环等必须采用陶瓷材料。要求质量轻、接触疲劳强度高的滚动轴承，火箭构架支承，常采用氮化硅材料。

3.2.7 碳石墨抗磨材料

碳石墨抗磨材料适合于制作机械密封的静环或动环、刮片、活塞环、导向环、密封胀圈和轴承等零件。

碳石墨抗磨材料根据原材料和制造工艺的不同进行分类，其类别、型号及技术性能见表 20.6-29。

表 20.6-29 碳石墨抗磨材料的型号及技术性能

类别	型号	硬度 /HS	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	开口气孔率/%	密度 /g·cm ⁻³	类别	型号	硬度 /HS	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	开口气孔率/%	密度 /g·cm ⁻³
电化石墨	M161	40	60	25	25	1.50	浸渍电石墨	M208F	65	120 000	45 000	3.0	1.80
	M204	40	75	30	18	1.70		M216F	48	100 000	43 000	2.5	1.84
	M208	45	70	30	15	1.70		M204H	60	130 000	50 000	1.0	1.85
	M233	55	100	40	10	1.80		M233H	70	160 000	55 000	2.0	1.80
	M238	35	60	30	20	1.70		M238H	40	80 000	40 000	2.0	1.85
	M252	30	40	20	25	1.55		M252H	45	80 000	40 000	3.0	1.75
	M276		60	25	20			M254H	40	75 000	35 000	2.0	1.80
	M277	40	40	20	22	1.60		M255H	40	80 000	35 000	2.0	1.80
浸渍电石墨	M278		50	20	20		M276H		100 000	50 000	4.0		
	M102F	50	100	40	3.0	1.80	电石墨	M277H	60	80 000	40 000	5.0	
	M106H	60	120	50		1.60		M278H		90 000	45 000	5.0	1.85
	M120H	60	100		2.0	1.65		M204K		140 000	40 000	4.0	
	M152JH	80	160	45		1.70		M238K	50	100 000	45 000	3.0	
	M159H	60	120			1.60		M252K	50	90 000	35 000	5.0	1.80
	M106K		160	55		1.60		M254K	40	80 000	40 000	3.0	1.70
	M120K	70	120	50	3.0	1.65		M255K	40	90 000	50 000	3.0	1.75
M159K		140	52		1.60	M276K			90 000	45 000	4.0		
浸渍电石墨	M201F	40	80 000	35 000	2.5	1.80	M277K	60	80 000	35 000	5.0	1.85	
	M202F	45	95 000	40 000	2.5	1.82	M278K		85 000	40 000	5.0		

4 表面处理技术和覆盖层

表面处理技术是利用各种物理的、化学的或机械的作用，使零件表面获得特殊的成分、组织

结构和摩擦学性能的技术，包括表面处理、表面加工、表面涂层和表面改性。

施加表面处理后的表层谓之表面处理层和覆盖层，表面覆盖层又有软覆盖层（或固体润滑

膜)和硬置换覆盖层之分。

1) 表面处理层 通过表面处理获得硬度较高的表面层,或者,在表面层形成耐磨的合金或化合物。

2) 软覆盖层(或固体润滑膜) 这类覆盖层提供防止两基体材料粘附的保护膜,因为覆盖层的抗剪强度低而获得低的摩擦因数。覆盖层易流动,使接触面分布更均匀,提高了承载能力和耐热性。

3) 硬置换覆盖层 不改变原有表面性质,但用另一表面取代原有表面。

4.1 表面处理技术

4.1.1 表面处理技术的类型

按施加表面技术后表面层的特性,表面处理分为使显微组织转变的和使成分改变的两种。使显微组织转变的处理又分为加热转变和加工转变两类。加热转变的加热方式有感应、火焰、激光和电子束等,加工转变的加工方式有喷丸、滚压、振动冲击、超声波强化和碾压等;使成分改变的又分为扩散和注入两类,注入有离子注入,扩

散包括渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硼和渗硫等。

根据处理时需要的温度分为高温表面处理和低温表面处理。

(1) 高温表面处理

在转变温度(约720℃)大多数铁和钢能吸收许多化学元素并在内部扩散,从而改变了零件表面的化学结构,构成新的合金。渗透深度是基体材料、渗入元素、时间和温度的函数。

属这种处理的有:渗碳、碳氮共渗、渗硼等。

(2) 低温表面处理

低温处理的温度约为370~540℃之间。属这种处理的有:渗氮、氮碳共渗、液体渗氮、渗硫、离子渗氮、液体碳氮共渗等。

4.1.2 表面处理的应用

表面处理应用的一般资料见表20.6-30。

表面淬火是最普通的用于钢材的表面处理方法,它是通过快速加热使钢的表面组织奥氏体化,然后立即快冷获得高硬度马氏体的强化工艺。表面淬火的加热方法有火焰加热、感应加热、电接触加热、电解加热、激光加热、电子束

表 20.6-30 表面处理应用的一般资料

材料	表面处理方法	处理温度/℃	特点	应用	备注	
钢	表面淬火(渗碳)	800~950	表面硬度高、心部韧性好	齿轮	渗碳是将碳扩散到基体的低碳钢中,可固体渗碳或液体渗碳	
	碳氮共渗	720~900	表面硬度高	纺织机械	用盐浴或气体法把碳、氮扩散入表面	
	渗氮	渗氮	500~540	抗粘附	齿轮	在充满氮气的炉内
		液体渗氮	540~570			在氰化物或氰化物-氯化物溶液内
	氮	液体氮碳共渗	540~600	耐磨、耐疲劳	保持架、齿轮、气缸、凸轮	在盐浴炉内,加入碳和氮,在溶液内通入空气,加速氮化
		硫氮碳共渗	540~600	抗粘附、耐磨、耐疲劳、减摩	液压泵、球轴承保持架	在盐浴炉中使碳、氮和硫共同渗入基体材料,硫加速氮化
铁	液体碳氮共渗	700~760	耐磨、抗粘附		在盐浴炉中高温下进行碳氮共渗,预先渗过碳的工件可在此温度进行处理	
	低温电解渗硫	180~200	抗粘附、处理时变形小	气缸套	经渗碳、淬硬后再在盐浴炉中渗硫	
	磷化	40~100	抗粘附、易磨合	内燃机摩擦零件	用化学或电化学处理产生的无机盐转化薄膜	
	渗硅	1 000	耐磨、耐蚀		氮气氛中渗硅	

续表 20.6-30

材料	表面处理方法	处理温度/℃	特点	应用	备注
黄铜 青铜	电解沉积	400	抗粘附、减摩	蜗轮、在海水中工作的轴	电解沉积铜、锡铋合金，随后在盐浴炉中作扩散处理
铝 青铜	电解沉积	400	适宜与不锈钢配副，抗粘附	泵轴、在海水中工作的轴	电解沉积后在盐浴炉中作扩散处理
铝 合金	电解沉积	200	适宜与铬、镍、钼配副，易磨合	活塞、衬套	
钛	电解沉积		抗粘附、减摩		电解沉积后扩散处理，渗入氧和氮
钼 钹	氟化物电解渗入		抗粘附、耐磨		在熔融氟化物电解溶液中硼和硅渗入钼，或钹渗入铜
铝钹	转化膜		耐磨、耐蚀		用化学或电化学法表面处理产生无机盐膜

加热等。激光加热表面淬火工艺简单、变形极小、淬火层组织细密、生产效率高、劳动条件好，表 20.6-31 是激光加热淬火层和普通加热（火焰或感应加热）淬火层耐磨性的比较。

表 20.6-31 激光加热淬火层和普通加热淬火层耐磨性的比较

钢种	磨损量/mm ³		
	激光加热淬火	普通加热淬火 低温回火	普通加热淬火 高温回火
45	0.105	1.161	2.232
T10	0.032	0.131	—
18CrNiWA	0.386	0.837	2.232
40CrNiMoA	0.064	0.082	1.047

各种材料适用的表面处理方法见表 20.6-32。

4.1.3 表面处理的效果

就提高表层硬度这一点，零件的机械加工也是一种表面处理，能使表层发生组织转变。其对表层的作用见表 20.6-33。

常用表面处理方法对表层性能的影响见表 20.6-34。

4.1.4 表面处理层允许的磨损极限

几种表面处理层允许的磨损深度见表 20.6-35。

表 20.6-32 各种材料适用的表面处理方法

材料品种	适用的表面处理方法
钢	离子渗氮、感应加热淬火、火焰加热淬火、液体渗氮
不锈钢	离子渗氮、扩散、液体渗氮
工具钢	渗硼、离子渗氮、扩散、液体渗氮
铝、铜	磷化
模具钢	渗硼、离子渗氮、液体渗氮
耐热钢	扩散
低碳钢	渗硼、渗碳、液体渗氮、碳氮共渗、液体碳氮共渗、磷化
镍钴基合金	渗硼、扩散
难熔金属	渗硼

4.2 表面覆盖层

将金属或其他软的、硬的化合物涂覆在基体材料上，形成表面覆盖层，能改变材料的表面性能，满足摩擦副的工作要求。涂覆技术基于下列 3 种物理现象：①碳金属链合的热解作用；②材料的蒸气沉积作用；③重离子轰击下固体的溅射。

表 20.6-33 机械加工的强化作用

处理方法	表面硬度提高/%	表面残余压应力/MPa	强化层深度/mm
切削	20~30	2.94~6.86	0.05~0.50
喷丸	20~40	3.92~7.85	0.4~1.0
滚子滚压	20~50	5.88~7.85	1.0~2.0
球滚压	20~50	5.88~7.85	0.3~5.0
振动冲击加工	20~40	2.94~7.88	0.1~0.7
滚筒抛光	10~15	0.98~1.96	0.05~0.30
超声波强化加工	50~90	7.85~9.81	0.1~0.9
金刚石碾压	30~60	2.94~6.86	0.01~0.20

表 20.6-34 常用表面处理方法的强化效果

表面处理方法	推荐材料	μ/μ_0	σ_K/σ_{K_0}	σ_V/σ_{V_0}
渗碳	碳钢、合金钢	0.8~1.0	2~3	1.0~1.5
渗氮	合金钢	0.8~1.0	2~4	1.0~1.5
碳氮共渗	调质钢、合金钢	0.7~0.8	2~5	1.5~2.0
液体碳氮共渗	调质钢、合金钢	0.7~0.8	2~5	1.5~2.0
渗硼	中碳钢、合金钢	—	2~5	—
硫氮碳共渗	碳钢、合金钢、不锈钢	0.5~0.6	2~5	4~5
渗硫	碳钢、铸铁	0.4~0.5	1.5~3.0	5~10
磷锡浴处理	钛合金	0.5~0.6	—	5~10

注： μ —摩擦因数； σ_K —疲劳载荷； σ_V —胶合载荷；脚标 0 表示处理前的性能。

表 20.6-37 硬覆盖层用金属与合金

材料	性能	用途
马氏体钢	中等的耐磨粒磨损性能。高的抗压强度	辊子类、轮类、履带、轮箍、离合器零件
钴基合金	高的耐磨粒磨损性能。在高温下有极高的硬度和耐蚀性、抗氧化	模具、阀门、铣刀、泵轴及轴套、凸轮及推杆
镍基合金	中等的耐磨粒磨损性能。高的抗冲击性能。优良的热硬性	
铬、钨	喷涂层较电镀层的性能好	活塞环、柱塞、汽缸套

表 20.6-38 软覆盖层材料

材料	性能	用途
锡、磷、铝青铜	良好的抗粘附能力。减摩性与作基体材料相同	
锡铋轴承合金	良好的抗粘附性、磨合性。摩擦因数低	

表 20.6-35 几种表面处理层允许的磨损深度

表面处理层类型	允许磨损深度/mm
高质量渗碳	2.5
气体渗氮	0.25
液体渗氮	—
液体碳氮共渗并淬火（浅的）	0.025
液体碳氮共渗并淬火（深的）	0.25

4.2.1 覆盖层材料

可形成覆盖层的硬质化合物见表 20.6-36，常作硬覆盖层的金属或合金见表 20.6-37，常作软覆盖层的材料见表 20.6-38。表 20.6-39 是硬质化合物的显微硬度。

表 20.6-36 形成薄覆盖层的硬质化合物

元素	碳化物	氮化物	氧化物	硼化物
Ti	TiC	TiN	TiO ₂	TiB ₂
Hf	HfC	HfN	HfO ₂	HfB ₂
Zr	ZrC	ZrN	ZrO ₂	ZrB ₂
Ta	TaC	TaN	Ta ₂ O ₅	TaB ₂
V	VC	VN	V ₂ O ₅	VB
Nb	NbC	NbN	—	NbB ₂
Cr	G ₂ C ₂ , G ₇ C ₃ , G ₂₃ C ₆	CrN	Cr ₂ O ₃	—
Si	SiC	Si ₃ N ₄	SiO ₂	—
W	WC, W ₂ C	—	—	WB
Mo	Mo ₂ C	—	—	MoB
Al	—	AlN	Al ₂ O ₃	—
Fe	—	Fe ₄ N	—	—

续表 20.6-38

材 料	性 能	用 途
铅、MoS ₂ 、WS ₂ 、 MoSe ₂ 、石墨	降低摩擦。片状固体，在 450℃ 以内有良好的边界润滑性、 高温润滑性	不能用流体润滑的阀 类、齿轮、轴承
聚四氟乙烯	喷在不锈钢或铝上，摩擦因数低。在 150℃ 以下有一定的 耐磨性。喷在阳极化铝上，是良好的润滑剂，耐磨。加在其 他树脂涂层中，摩擦因数低，适宜在轻载、水中运转	食品包装机械；纺织 机械；洗涤机械

表 20.6-39 硬质化合物覆盖层的显微硬度 (GPa)

元素	碳化物	氮化物	硼化物	元素	碳化物	氮化物	硼化物
B	37	—	—	Ta	18.0~24.5	12.2	24.5~29.1
Cr	16(Cr ₇ C ₃);13(Cr ₃ C ₂)	10.83	—	Ti	20~32	12~20	22~35
Hf	22.7~26.5	16.4	22.5~29.0	W	21~24(WC);14.5(W ₂ C)	—	24.0~26.6
Mo	18 (MoC)	—	23.5	V	24.6~31.5	15.2~19.0	20.7~28.0
Nb	24.0~28.5	13.96(NbN);17.2(Nb ₂ N)	21~24	Zr	23.6~26.0	11.5	22.5~26.0
Si	35	—	—				

4.2.2 涂覆方法

表面涂覆方法有热喷涂、气相沉积和电镀 3 种。

(1) 热喷涂

热喷涂是将喷涂材料熔融，通过高速气流、火焰流或等离子焰流使其雾化，喷射在基体表面上形成覆盖层。

它的特点是：涂层材料和基体材料非常广泛，金属及其合金、塑料、陶瓷及复合材料均

可；工艺灵活，施工对象不受限制，可任意指定喷涂表面；覆盖层厚度范围大；生产效率高；除火焰喷熔和等离子弧粉末堆焊外，基体材料受热程度低，温度较低。

热喷涂的主要缺点是只有与喷涂方向垂直的表面上涂层的密度和结合强度才最好，喷涂角度减小，涂层质量下降，喷涂角度小于 45° 已是不许可的了。

热喷涂的分类见表 20.6-40。

表 20.6-40 热喷涂的分类及其特性

分 类	气 喷 涂、喷 熔				电 喷 涂 和 粉 末 堆 焊				
	燃 烧 式				爆 炸	电 弧	线 爆	等 离 子	等 离 子 弧
	线材喷涂	棒材喷涂	粉末喷涂	粉末喷熔	喷 涂	喷 涂	喷 涂	喷 涂	粉末堆焊
工作气体	氧和燃料气体 (乙炔、氢)				氧和乙炔	—	—	氩、氮、氢	氩等
热源	燃烧火焰				爆炸燃烧火焰	电弧	电容放电	等离子焰	等离子弧
喷涂颗粒加速力源	压缩空气		燃烧火焰		热压力波	压缩空气	放电爆炸波	焰流	—
喷 涂 材 料 种 类	形 状	线材	棒材	粉 末		线 材			粉 末
	品 种	Al, Zn, Cu, Mo, Ni, 镍铬合金, 碳钢, 不锈钢, 黄铜, 青铜	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , ZrO ₂ , ZrSiO ₄ , MgZrO ₃	镍基、钴基和铁基自熔合金、铜基合金、Al ₂ O ₃	自熔合金、加有陶瓷材料的自熔合金	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , Ni, Cr-Cr ₃ C ₂ , Co-WC	Al, Zn, 碳钢, 不锈钢, 铝青铜	Mo, Ti, Ta, W, 碳钢, 不锈钢, 硬质合金	Ni, Mo, Ta, W, Al, 自熔合金, Ni-Al, Co-WC, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , 塑料	自熔合金、加有陶瓷材料的自熔合金

续表 20.6-40

分类	气喷涂、喷熔				电喷涂和粉末堆焊				
	燃烧式				爆炸	电弧	线爆	等离子	等离子弧
	线材喷涂	棒材喷涂	粉末喷涂	粉末喷熔	喷涂	喷涂	喷涂	喷涂	粉末堆焊
基材受热温度/℃	<250			1050	<250				
结合强度/MPa	>9.8	—	>6.86	—	16.66	>9.8	>19.6	>14.7	—
气孔率/%	5~20	—	5~20	0	<3	5~15	0.1~1.0	3~15	0

(2) 气相沉积

气相沉积依靠有机金属化合物的分解，环境与基体表面间热力学的势差或真空中蒸气的凝聚形成薄覆盖层。

它的特点是：可以准确控制覆盖层厚度和成分；可以形成复合（多层）覆盖层；利用真空蒸气凝聚形成覆盖层可在室温下进行；覆盖层薄，通常在 500 nm 以内。

分为物理气相沉积（PVD），化学气相沉积（CVD）和物理化学气相沉积（PCVD），后者实际上是前两种技术的综合。物理气相沉积包括离子溅射和离子镀。化学气相沉积镀层，比物理气相沉积镀层致密度高、内应力小、结合力强、均镀能力好。它的缺点是处理温度较高，基材的组织性能会受到影响，因此，需要进行后热处理，或是选用相变温度较高的基材。

目前应用最普遍的气相沉积镀层是工模具的 TiN 镀层。表 20.6-41 是 TiN 镀层对工模具寿命的影响。

气相沉积法的涂覆技术类型见表 20.6-42。

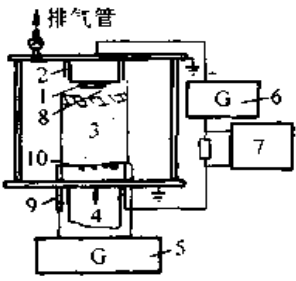
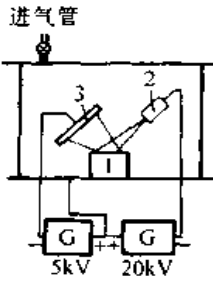
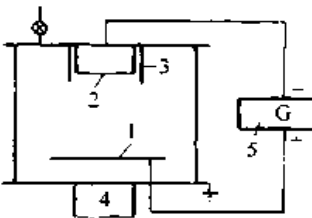
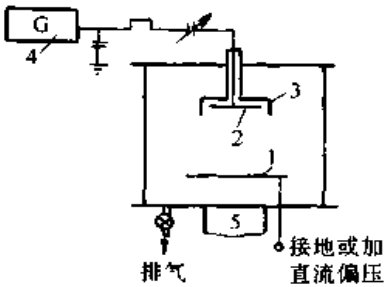
表 20.6-41 TiN 镀层对工模具寿命的影响

加工方法	工模具种类	材料	寿命增加倍数
切削	刀具	高速钢	3
切削	丝锥	工具钢	3
冲压	大变形冲头	工具钢	10
冲压	冲孔冲头	工具钢	2~10
模锻	修边冲头	工具钢	2~5
铸造	铸铝模	工具钢	5
铸造	塑料模具	工具钢	5

表 20.6-42 气相沉积法涂覆技术类型

涂覆方法	薄膜沉积法		电加速真空沉积法
	高温分解	化学蒸气沉积	物理蒸气沉积
系统示意图	<p>1—基材 2—射频线圈 3—基座 4—支架</p>	<p>1—化学蒸气沉积室 2—熔炉 3—冷凝室 4—真空泵 5—TiCl₄蒸发器 6—真空表</p>	<p>1—基材 2—探测器 3—靶 4—电子束 5—真空装置 6—进气管 7—加热器</p>
原理	<p>许多金属化合物受热极易分解，金属原子沉积于基体表面形成薄的金属覆盖层</p>	<p>使金属的卤化物在热的基体上分解，分解出的金属原子沉积在基体上形成薄的金属覆盖层。本系统需要：1. 加热基体的能源；2. 金属卤化物；3. 氢、氮与卤素形成酸，再用惰性气流清扫反应物</p>	<p>在真空中熔化涂覆材料，涂覆材料的蒸气凝聚在基体上形成薄的覆盖层。基体无需加热</p>

续表 20.6-42

涂覆方法	电 加 速 真 空 沉 积 法		
	离子电镀	用空心阴极发射枪涂覆	常规直流溅射
系统示意图	 <p>1—基材 2—接地屏蔽 3—等离子区 4—真空装置 5—丝极电源 6—高压电源 7—电流监控器 8—高压电流引线 9—蒸发器丝板 10—阴极暗室</p>	 <p>1—靶 2—空心阴极放电 3—加偏压的基材 4—5kV 5—20kV</p>	 <p>1—阳极 2—阴极 3—接地屏蔽 4—高压电源 5—真空装置</p>
原 理	<p>在真空中加热涂覆材料使之蒸发，再用离子增加涂覆材料的吸附。使熔化而得的蒸气流向保持高负电位的基体。调整系统的压力和沉积状态，在薄膜沉积过程中使辉光放电等离子体包住基体</p>	<p>在挖空的圆柱体内感应出辉光放电，合理调节压力使辉光充满挖空的区域。用凹形阴极发射枪熔化涂覆材料，形成一个凹坑，在坑的附近产生密集的金属离子。当把活性气体引入这样的系统气体分子被激活并离子化，利用低的偏压沉积出化合物膜</p>	<p>在阴极和阳极间加一直流高电压，在涂覆室内维持低的气压。从阴极发射出的电子把大气环境中的气体原子离子化。调整涂覆室压力和所加电压则能得到自维持的辉光放电。在辉光放电区域内产生的离子撞在阴极表面上，溅射出阴极特有的原子，这些原子在气体中扩散，沉积在对着阴极放置的基体上，形成薄膜</p>
涂覆方法	电 加 速 真 空 沉 积 法		
	射 频 溅 射	磁 控 溅 射	反 应 溅 射
系统示意图	 <p>1—基材 2—靶 3—屏蔽 4—真空装置 5—射频电源</p>		

续表 20.6-42

涂覆方法	电 加 速 真 空 沉 积 法		
	射 频 溅 射	磁 控 溅 射	反 应 溅 射
原 理	给靶子施加射频电源,使之在射频激发等离子体中溅射出涂覆材料,在有屏蔽阳极的射频溅射中,先给基体施加1~5 kV负电压进行净化。净化后施加射频电源,给靶子增加能量,开始沉积	在系统中施加磁场,并装置电子挡板以显著提高离子化效率。采用磁场使阴极离子轰击速率增加2个数量级(与直流溅射相比),因而溅射速率提高	将要涂覆的化合物离子化,并在溅射过程中引入反应气体到溅射系统,使化合物的合成与沉积同时发生。必须精确控制气体的成分,要满足化学计量学

(3) 电镀

电镀工艺成熟、应用极广,可以相当经济地给任何金属和非导电的基体材料镀上多种金属或合金镀层。镀层厚度易控制,厚度尚均匀。基体材料表面需作准备,但不加热,热变形小。氢会从电镀液中析出,使钢基体变脆,疲劳强度下降。另外,电镀废液会造成环境污染。

电镀有槽镀、刷镀和化学镀。

在槽镀的耐磨镀层中,镀硬Cr应用最广。由于硬Cr镀层硬度高(可达1 100 HV),强度大,摩擦因数低,使镀Cr层具有良好的抗粘附磨损和磨粒磨损性能。

在电镀液中加入适量的化合物细颗粒(颗粒尺寸 $< 5 \mu\text{m}$),使之与金属离子一起均匀地沉积,乃是复合镀。需要耐磨镀层可加入SiC、 Al_2O_3 、WC、 ZrO_2 等;需要减摩镀层可加入 MoS_2 、石墨等。复合镀层可以具有优良的摩擦学性能,是一个重要的发展方向。

刷镀用镀笔代替镀槽,设备简单,污染少,

因电流密度大而沉积速度快,结合强度高,多用于磨损件的修复。

化学镀工艺简单,均镀能力极好,任何复杂形状的零件都可得到均匀的镀层。其缺点是镀液温度较高,使用期短,成本较高。典型的化学镀层是Ni-P合金镀层。含P较多时镀层结构呈非晶态,适当的热处理可使之晶化,硬度和耐磨性均显著增加。表20.6-43给出Ni-P镀层与Cr镀层在同样条件下的磨损度。

表 20.6-43 Ni-P 镀层与 Cr 镀层的磨损度

镀 层	硬度 /HV	磨损度 / $10^{-3}\text{mm}^3\text{m}^{-1}$
Ni-12P 非晶化镀层	525	8
Ni-12P 晶化镀层	725	12
Cr 镀层	820	18

4.2.3 涂覆方法的选择

选择涂覆方法时要考虑的因素很多,表20.6-44列出选择热喷涂和电镀时的一般建议。

表 20.6-44 热喷涂和电镀覆盖层的选择

因 素	热 喷 涂			电 镀
	喷 涂	喷 熔	堆 焊	
可接近性	喷射角度与距离影响到应用范围,例如内孔直径与深度的相对尺寸		除了内孔使焊条及焊枪进入有困难外,一般无限制	除内孔及拐角由于需要插入电极外,一般无限制
变形	除预处理时喷砂造成磨损外,一般无限制	预处理时喷砂造成磨损;喷熔处理时可能引起变形	主要的限制是局部的大温度梯度	一般无限制
应用上的相容性	一般无限制	重要的是基体材料与覆盖层膨胀系数的相容性	重要的是基体材料与焊条的材料相容性和膨胀系数相容性	一般无限制

续表 20.6-44

因素	热 喷 涂			电 镀
	喷 涂	喷 熔	堆 焊	
对零件的影响	某些覆盖层能使基体金属的疲劳强度下降	硬的低延性的覆盖层在某些情况下能使基体金属的疲劳强度下降	基体金属的疲劳强度随堆焊层的材料与厚度不同而有所下降	覆盖层能使基体金属的疲劳强度下降; 必须消除高抗拉强度金属的氢脆
覆盖层的完整性	覆盖层与基体的结合仅靠机械的键合作用。在受冲击或集中载荷时, 棱角处易被削掉	覆盖层与基体的结合为冶金键合作用。低延性的覆盖层对冲击和大的集中载荷敏感	覆盖层与基体的结合是界面间合金化的键合, 覆盖层有较好的完整性	需注意棱角
加工	磨削加工是唯一的加工方法; 有些覆盖层能以‘涂覆态’使用	常用磨削加工, 但有些合金能用其他形式的机械加工		磨削加工是唯一的加工方法
经济性	对于大面积的较厚的覆盖层, 有经济上的吸引力	喷射和熔化的过程可能成为昂贵的工艺	单个零件堆焊经济性不好	薄覆盖层, 特别是小零件、小面积、大批量施工时, 经济性很好
表面质量	覆盖层特有的多孔性无法测量表面粗糙度。适当的表面粗糙度为 $Ra0.8 \mu m$	一般工程表面所要求的表面粗糙度		
适宜的厚度	最佳 0.20 ~ 0.25 mm; 最大 0.40 mm; 最小 0.08 mm。厚度由覆盖层材料和工作环境决定	最佳 0.50 ~ 0.75 mm; 最大 1.25 mm; 最小 0.25 mm	最佳 0.75 mm; 最大 1.25 mm; 最小 0.50 mm。一般无厚度限制, 在轻型机械上常用 1.25 mm	最佳 0.08 ~ 0.12 mm; 最大 0.25 mm; 最小 0.01 mm

第 7 章 状态监测系统

1 状态监测系统的作用

设备由于某种原因在运行过程中发生故障，或达不到预定功能，称为失效。找出失效的原因，提出预防失效的措施，称为失效分析。

能显示并提取设备运行状态的信息，以判断状态异常的部位，研究异常的类型和程度，确定采取何种措施能使设备安全运行，保证经济的维修，这样的监测系统称为状态监测系统，它是进行设备失效分析的基础。

由于采用状态监测系统，就能了解设备的运行状态，在设备发生故障前进行预防性维修，防止发生事故。

摩擦学系统是个时变系统，系统的整体和各个元素的特性都有显著的时间依赖性，所以，状态监测被认为是摩擦学系统固有的需要，机器中的状态监测系统是摩擦学系统的子系统。

2 状态监测方法

2.1 直观监测法

直观监测法是由检验人员直接目测或借助于测试设备观测设备状态，一般只限于监测静止部件或可目测的部件状态。

直观监测的方法参看表 20.7-1。

表 20.7-1 直观监测方法

直观监测	观测仪表	备注
内部暗处的照明	光学探头	简单价廉系统
改善接近程度	光学孔径仪	检验表面及小孔等
提高放大率	放大镜、低倍显微镜、光学孔径仪	对检验表面特别有效，多半有光学放大，有的包括图象电视传送
检验回转或往复运动部件	频闪观测仪	可直观检验运动件的转速、振动模式、裂缝与间隙扩展等

续表 20.7-1

直观监测	观测仪表	备注
显示小裂缝	着色渗透法	只适用于表面裂开者
利用辐射扩展视觉范围到可见谱以外	红外热像仪 X射线检验 γ射线检验	对检验热点和温度梯度有效 可检验部件内部状态 可检验空心部件
表面温度的观察能力	温度记录涂料	所选涂料应与所测温度匹配，应先了解有关温度数据
直接或通过显微镜观察表面特性	摄影术	
通过光学孔径仪观察表面特性	摄影术 录像磁带记录	使用电视，适合于光学孔径仪，但较贵
在使用中表面点蚀或其他损坏增加	表面印记 表面印模	方法简单。用有色墨水或打印膏刷在表面，并将纸贴在表面上以记录表面损伤。 方法简单。将表面用制模黏土埋包围，浇注固化树脂制成表面的反转的印模。另一方案是用溶剂使塑料板料软化，压在表面上
表面磨损的进展	参考刻痕	将表面冲击或加工出一个月牙坑，测量坑宽及斜底，可算出表面磨损量，还可照相

2.2 功能监测法

功能监测法主要是监测机器含摩擦副部件的工作状态，看其是否按预定的工作参数运行。测

量的参数必须准确，并与功能有关，可以直接了解机器的功能是否正常，可以直接显示某些突发性失效和机器的使用效率。

通常选择一些较为典型的工作状态进行监测，主要是测量能量与材料的输送以及转换情况，包括其输入、输出、输入输出比等。

表 20.7-2 列举出机器的功能监测实例，表 20.7-3 列举出部件的功能监测实例。

表 20.7-2 机器的功能监测实例

监测方法	典型例	备注
测量输出量及其变化	测量传送装置或泵系统的输出量	测量标准状态下的平均输出量，如发生波动，可指示其问题性质
测量输出量及其变化	注意机床在输出量允许范围内的精度，观察纺织机械所生产织物花样的变化，观察碎石机输出石块的尺寸分布	可由操作工人直接使用方便的监测方法。指示问题的存在，而对此说明的试验过程可指出问题的性质
测量机器输入量与输出量的关系	比较内燃机、发电机燃料消耗量与电功率输出 测量运输车辆单位燃料消耗量下的行驶距离	可指示问题的存在，而所使用的测量值常常已由其他目的的测量值得到
同时测量在许可工作状态下的两种输出量，并且比较它们之间的差别	泵的流量/压力升高的关系 热交换器的温差/流量关系 分离机的压力降/流量关系	这种监测方法可使机器（或工厂）的零件得到确定的变化关系，而与系统某个部分可能发生的其他变化无关

2.3 磨屑监测法

摩擦副因磨损而产生磨屑，依靠监测磨屑数量和特征，就可以获得部件磨损状态的信息，从而预告可能发生的磨损失效。

磨屑监测法有直接检测法、磨屑收集法、润滑油剂采样分析法和放射性同位素监测法。

表 20.7-3 部件的功能监测实例

部件名称	部件功能	功能监测方法
轴承	决定轴相对于其他零件的位置，且回转阻力矩最小	使用紧靠的传感器测量轴的位置，测量轴承温度检验由于故障而产生的摩擦热
摩擦部件(制动器、离合器)	提供有控制的较大摩擦力，且其磨损量最小并不过热	定期测量磨损，测量温度以检测是否过热
结构部件(壳体、容器、机架)	保持完整而无裂缝等发生	使用应变计、脆性涂料、声发射技术、磁涡流和液体渗透剂等方法检测裂缝
密封件(静、动)	防止泄漏	依靠气味、噪声、吸气、直观检验来检测泄漏
汽缸套	引导活塞，靠活塞环提供对气体的密封，且磨损量最小	使用磨损传感器检测磨损、检测温度。使用超声发射法检测漏气

2.3.1 直接检测法

使机器中的润滑油流经对磨屑出现敏感的温度传感器，检测润滑油中的磨屑数量，经信号处理显示出检测数据。

直接检测法可以采用下列传感器。

(1) 电感式磨屑传感器

磁路中气隙内铁磁性磨屑数量的变化，导致磁路磁阻改变和感应电压改变，此感应电压与气隙中金属颗粒数量成正比。测量感应电压，即可获得磨屑数量的信息。

这种检测方法的缺点是温度影响气隙的大小。

(2) 电容式磨屑传感器

这种电容式磨屑传感器通常有两个电容器，一个用于检测，一个用于补偿温度影响。金属磨屑由于重力及流动惯性（利用惯性离心力）沉积于检测用电容器板上，板之间出现金属颗粒，将使检测电容耦合改变。两个电容器的耦合差与电容器板上的磨屑数量成正比，利用桥式电路测量出两个电容器的耦合差，从而检测出磨屑数量。

(3) 导电过滤器

它有一个专用的筛网，用其测量导电的磨屑量并显示于仪表上，还可自动报警。它对出现正常磨屑不敏感，只有出现异常大的磨屑时才会动作。导电过滤器可以显示3个阶段，即积聚了磨屑10%、20%与超过20%。

导电过滤器应安装在润滑油路过滤器的上游。

(4) 光学磨屑传感器

润滑油中出现磨屑，以及由于油的化学/热老化，润滑油变得混浊，引起光减弱。光学磨屑传感器利用光的散射原理，通过混浊度的测量，检测出磨屑量。

传感器直接装在过滤器前的润滑油路上。此检测系统可在工作状态下自动、连续检测，并显示故障情况，不需要经常性维护。

炭颗粒、气泡和一些不透明杂质的出现，将影响磨屑量测量的准确度。

典型的光学磨屑传感器的技术参数为：工作温度 $<180^{\circ}\text{C}$ ；工作压力0.7 MPa；压力降35 kPa（流量为82 L/min时）；流量14~90 L/min。

2.3.2 磨屑收集法

(1) 磁塞检测

将磁塞装在润滑油路中，润滑油中的磨屑被吸在磁塞上。定期取下磁塞，用显微镜观察磨屑，分析磨屑的数量、尺寸和形状，以了解机器部件的磨损情况。对比不同时间分析磨屑获得的信息，或者与标准磨屑颗粒识别图比较，就可以估计出磨损的发展趋势。

图20.7-1是典型的磁塞及其在润滑油路中的安装图。将带有磁铁1的磁塞5推入孔中，依靠销4的作用，压住弹簧，顶开阀2。取出磁塞时弹簧压迫阀3，将润滑油路封闭。磁铁形状简单且表面光滑，易于去除吸附其上的磨屑。

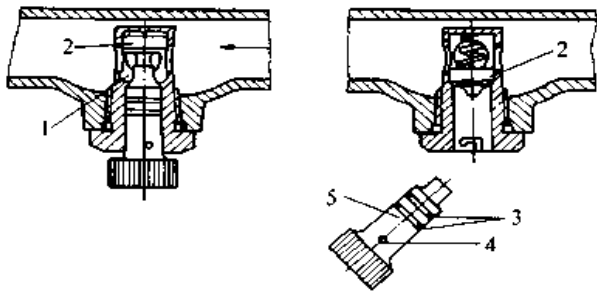


图 20.7-1 磁塞及其安装

1—磁塞磁铁 2—阀 3—O形密封圈 4—销 5—磁塞

磁塞结构简单，安装与取出方便，但只能检测黑色金属磨屑。磁塞适于在 200°C 以下工作，能收集尺寸 $50\ \mu\text{m}$ 以上的磨屑，取出磨屑的间隔时间一般低于200 h。

磁塞收集到的磨屑量与润滑油中磨屑量之间的关系，用此法难以确定，因此无法进行定量分析。在一个装拆周期内，先后收集的磨屑重叠积聚，不便于观察及分析，早期预报性较差。

(2) 滤油器检测

一种带压差发讯器的滤油器，当磨屑过多堆积而堵塞滤芯时，滤芯元件上下游之间的压差加大，当压差达到预示润滑系统中的油液污染度过高的预定值后，发讯器发出警告讯号，并停止机器设备的运行。

2.3.3 润滑剂采样分析法

这种方法包括两个步骤：采样和分析样品。

从机器中采集代表摩擦学系统工作状态的润滑剂或液压介质样品，最好是在机器运转中，假若停车后采集，应在停车后2 min内完成。取样量不得少于100 mL。按规定的取样程序进行处理并记录下列数据：机器或系统标记、采样日期、总运转时间、上次换油时间、上次更换滤芯时间、润滑剂和添加剂类型、分析和取样人员等。

在实验室或在线分析所采集的样品，以便确定其中所含有的磨屑与污染物数量、尺寸、表面形态与化学成分等。从而获得机器部件状态的信息。分析方法有下列几种。

(1) 原子发射光谱分析法

利用原子发射光谱仪根据各种物质的特征发射光谱分析油品。其优点是快速而精确，特别是在磨屑含量的质量分数低于 10^{-6} 时。但磨屑颗粒尺寸大于 $15\ \mu\text{m}$ 时，分析精度与检测效率明显下降。

光谱分析所需投资和使用费用较多，主要应用于飞机、铁道车辆、内燃机、发电机、冶金和石化工业的重要设备润滑状态的监测。

(2) 原子吸收光谱分析法

利用原子吸收光谱仪根据各种物质的基态原子能吸收相应的辐射能分析油品。此法可检测润滑剂及添加剂中的各种金属的含量，但一种光源只能测一种元素，不大方便。

(3) 颗粒计数法

颗粒计数法是测定样液单位容积中各种尺寸范围颗粒的数量（即颗粒浓度）。表 20.7-4 为目前通用的颗粒计数法和使用的仪器。

表 20.7-4 颗粒计数法和仪器

方法	原理	使用仪器	测量范围/ μm	备注
现场扫描	目测	光学显微镜	>5	
	自动扫描	图象分析仪	>1	Quantiment (英), TTMC (英)
		扫描电子显微镜	$0.02 \sim 50$	
液流扫描	遮光	遮光型自动颗粒计数器	$1 \sim 9\,000$	HIAC/ROYCO (美)
	光漫射	激光型自动颗粒计数器	$0.5 \sim 25$	HIAC/ROYCO (美)
	电阻变化	电阻型自动颗粒计数器	$1 \sim 100$	Coulter (英)

(4) 铁谱分析法

采集使用中的润滑油样，使其通过一个高梯度磁场，磁场使流过基片之油样中的磨屑和污染物颗粒，按尺寸分开沉积在基片上，谓之铁谱片。铁谱仪的示意图见图 20.7-2。

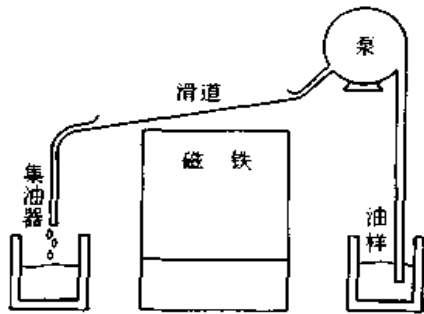


图 20.7-2 铁谱仪示意图

用同时使用红色反射光和绿色透射光的“双色显微镜”或扫描电子显微镜观察制成的铁谱片。于是，能对磨屑颗粒进行颗粒尺寸分布、金属种类、几何形状、晶体结构等分析，是比较完善的揭示磨损状态的方法。

铁谱分析法适用于尺寸 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ 的磨屑颗粒。铁谱分析监测方法的内容包括：磨屑的分离、磨屑颗粒尺寸分布、颗粒形态的观察与分析，数据综合与处理、最后作出磨损趋势的分析与判断。

铁谱仪的类型有：离线式铁谱仪、旋转式颗粒沉积仪、在线式铁谱仪。

2.3.4 放射性同位素监测法

放射性同位素监测法又称示踪原子监测法，是使用热中子或带电质子辐照活化零件，然后进行磨损监测。此法的优点是可在实物运行监测机器中的磨损情况，测量精度高，且可保持原有

的工作状态，安全可靠，但成本较贵。所采用的方法有以下 3 种。

(1) 薄层活化示差法

零件作局部活化，以检测该局部在磨损过程中辐射能量的改变来评定其磨损量，计算磨损率。零件活化层深度控制在 $20 \sim 25 \mu\text{m}$ ，可测出 $0.001 \mu\text{m}/\text{h}$ 的磨损率。零件放射性活度很低，常在 370 kBq 。

(2) 浓度法

零件被活化的局部，其示踪磨损颗粒随测量液（即润滑油）输送至流通室，在该室测量活化颗粒的浓度，由此监控零件的磨损。零件的放射性活度在 740 kBq 左右，测量精度 $1 \mu\text{g}/\text{L}$ 。

(3) 滤油器流通法

在浓度法的基础上增加一个滤油器测量室，流通油中的磨损颗粒数与滤油器中的磨损颗粒数之和为实际磨损颗粒数。此法的测量精度为 $0.0001 \mu\text{m}/\text{h}$ 。

2.4 振动监测法

由于摩擦学系统的故障往往表现为零件的振动，因而从振动的特性与量来识别故障模式是十分有效的方法。关于振动监测可参考第 2 卷第 19 篇‘机械振动的控制与利用’。

3 设备故障诊断

设备的工作状态有 3 种：正常状态、异常状态和故障状态。

当设备由于某种原因性能劣化，因劣化程度扩展而失常，继续发展到性能指标低于最低极限值时，发生故障。

设备故障诊断的任务是弄清设备状态, 确定设备故障发生的部位、性质、程度、类别、原因、故障发展的趋势及影响, 为故障的预测、控制、调整、维修和治理提供依据, 防止发生故障和事故。

按故障诊断的目的和要求不同, 故障诊断分为功能诊断和运行诊断、定期诊断和连续诊断、直接诊断和间接诊断、在线诊断和离线诊断。

参 考 文 献

- 1 Крагелъский И В. Трение и изнашивание смаза. Москва: Машиностроение, 1978
- 2 (英) 尼尔 M J. 摩擦学手册, 王自新等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 3 机械工程手册电机工程手册编辑委员会编. 机械工程手册(第二版)机械设计基础卷. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 4 Halling J. Principles of Tribology. McMillan Press Ltd, 1975
- 5 国家自然科学基金委员会, 机械学(自然科学学科发展战略调研报告), 北京: 科学出版社, 1994
- 6 温诗铸, 摩擦学原理. 北京: 清华大学出版社, 1990
- 7 (日)日本机械学会编. 机械技术手册(上). 机械工程手册电机工程手册编辑委员会译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 8 许镇宇编. 机械零件(第一版). 北京: 高等教育出版社, 1959
- 9 磨损失效分析案例编辑委员会编. 磨损失效分析案例汇集. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 10 Peterson M B, Winer W O. Wear control Handbook. New York: ASME, 1980
- 11 林子光等编. 齿轮传动的润滑. 北京: 机械工业出版社, 1980
- 12 中国机械工程学会, 第一机械工业部编. 机修手册 第2篇: 设备零件的修复和加工工艺. 北京: 机械工业出版社, 1979
- 13 韦福水等编. 热喷涂技术. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 14 卜炎主编. 机械传动装置设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 15 Lansdown A R. Lubrication a practical guide to lubricant selection. Oxford: Pergamon Press, 1982
- 16 Debruyne N A. Adhesions and Adhesives. New York: Elsevier Publishing Co., 1965
- 17 Hamrock B J, Dowson D. Ball Bearing lubrication: the Elastohydrodynamics of elliptical. A Wiley-Interscience publication John Wiley & Sons, 1981
- 18 Jackson A. Simplified EHL Calculations for bearings. Machine design Vol 52 1980, No 13
- 19 万长森编. 滚动轴承的分析方法. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 20 汪德涛编. 润滑技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 21 中国机械工程学会, 第一机械工业部编. 机修手册 第7篇: 设备的润滑. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 22 Houpert L. New Results of Traction force calculations in Elastohydrodynamic contacts. ASME Vol 107 1985 No 2
- 23 润滑工程编写组编. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 24 钱知勉编. 塑料性能应用手册. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1980
- 25 刘国均. 机械设备用油手册. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 26 颜志光, 杨正宇. 合成润滑剂. 北京: 中国石化出版社, 1996
- 27 Booser E R. CRC Handbook of Lubrication Vol II: Theory and Design. CRC Press, 1984
- 28 Перелъ Л Я. Подшипники качения справочник. Москва: Машиностроение, 1983
- 29 阮忠唐编. 机械无级变速器. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 30 Buckley D H. Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication. Amsterdam Oxford - New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981
- 31 (英) 摩尔 D F. 摩擦学原理和应用. 黄文治等译. 北京: 机械工业出版社, 1982

- 32 (前苏) 费尔多钦科 И. М. 现代摩擦材料. 徐润泽等译. 北京: 冶金工业出版社, 1983
- 33 Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. Москва: издательство в наука, 1974
- 34 欧风. 合理润滑技术手册. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 35 葛中民等. 耐磨损设计. 北京: 机械工业出版社, 1991. 机械设计丛书
- 36 Cameron A. Basic Lubrication Theory. Ellis Horwood, 1981
- 37 雷天觉主编. 液压工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 38 蔡春源主编. 机电液设计手册. 北京: 机械工业出版社, 沈阳: 东北大学出版社, 1997
- 39 汪 恺主编. 机械设计标准应用手册, 第2卷. 北京: 机械工业出版社, 1997