

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 机械制造基础

乔世民 主 编

刘 唯 副主编

乔世民 郁龙贵 刘 唯 编  
张 弦 吴锡其 沈永鹤

高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)。是为适应培养高等技术应用性专门人才需要,经结构优化、整合而成的一本强调应用基础知识的机械类专业基础课程教材。

本书以讲清概念、强调应用为教学目的,讲述机械制造中的基础知识。全书除绪论外,共11章,主要包括:工程材料、铸造、锻压、焊接、机械零件毛坯的选择、几何量公差、金属切削加工基础知识、机械零件表面加工、特种加工、机械加工工艺规程、先进制造技术。

本书适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校机械类或机电类各专业使用,也可供有关的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/乔世民主编. —北京:高等教育出版社, 2003.6

ISBN 7 - 04 - 012544 - 7

. 机... . 乔... . 机械制造 - 高等学校: 技术学校 - 教材 . TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 038077 号

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100011

电 话 010 - 82028899

经 销 新华书店北京发行所

印 刷

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 27.25

字 数 670 000

购书热线 010 - 64054588

免费咨询 800 - 810 - 0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

版 次 年 月第 版

印 次 年 月第 次印刷

定 价 31.10 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策 划	赵 亮
责任编辑	胡 纯
封面设计	于 涛
责任绘图	朱 静
版式设计	史新薇
责任校对	存 怡
责任印制	

# 出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

# 前 言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材。

随着高职高专教育的蓬勃发展和高职高专教学改革的不断深入,编写符合高职高专教育特色要求的教材,是促进高职高专教学改革、培养适应时代要求的高等技术应用性专门人才的一项重要工作。鉴于高职高专教育人才的培养模式和教学内容体系改革的要求,在吸取近年高职高专教学实践中成功经验的基础上,本着高职高专基础课程教材要体现以讲清概念、强化应用为教学目的的宗旨,本书对传统的“工程材料”、“热加工工艺基础”、“互换性与测量技术”、“机械加工工艺基础”等课程内容,进行分析取舍、结构优化,以毛坯成形工艺方法和机械零件表面加工工艺方法为主线,将机械制造过程中相关基础知识有机串联起来,又吸纳了现代制造体系中的“特种加工技术”和“先进制造技术”的相关内容,形成了新的教学内容体系。整合后的“机械制造基础”教材,各章既有相对独立性,又紧密联系、互相渗透,融为一体。

本书按 90 学时编写,内容丰富、涉及面广、适应性强。不同学校、不同专业使用本书时,可按具体教学需要进行调整或取舍。本书可供高职高专机械类或机电类各专业使用,也可作为相关工程技术人员的参考读物。

参加本书编写的有:乔世民(绪论、第 8 章、第 11 章)、郁龙贵(第 1 章 1.1~1.5)、刘唯(第 2 章、第 7 章)、张弦(第 1 章 1.6、第 3 章)、吴锡其(第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章)、沈永鹤(第 10 章)。乔世民教授任主编,刘唯副教授任副主编。全书由上海交通大学杨建国教授主审。

本书编写过程中,上海第二工业大学机电工程学院领导给予了大力支持,王文霞老师为文稿整理、编排做了大量工作。本书参考并引用了一些教材的内容和插图。在此一并表示感谢。

限于编者的水平,书中缺点、不妥之处在所难免,敬请有关专家、同行、读者不吝赐教。

编者  
2003.2

# 目 录

绪论 .....	1	1 6 1 粉末冶金材料 .....	78
第 1 章 工程材料 .....	3	1 6 2 陶瓷材料 .....	80
1.1 金属材料的力学性能 .....	3	1 6 3 塑料、橡胶材料 .....	82
1 1 1 强度 .....	3	1 6 4 复合材料 .....	86
1 1 2 塑性 .....	5	复习与思考题 .....	88
1 1 3 硬度 .....	5	第 2 章 铸造 .....	91
1 1 4 冲击韧度 .....	7	2.1 概述 .....	91
1 1 5 疲劳强度 .....	8	2.2 铸造工艺基础 .....	92
1.2 铁碳合金 .....	9	2 2 1 铸件的凝固 .....	92
1 2 1 金属的晶体结构与结晶 .....	9	2 2 2 合金的铸造性能 .....	98
1 2 2 合金的晶体结构 .....	13	2.3 铸造方法 .....	102
1 2 3 铁碳合金相图 .....	14	2 3 1 砂型铸造 .....	102
1 2 4 碳素钢、铸铁 .....	22	2 3 2 特种铸造 .....	104
1.3 钢的热处理 .....	32	2 3 3 铸造生产常见缺陷 .....	108
1 3 1 钢在加热时的组织转变 .....	32	2.4 铸造工艺设计 .....	111
1 3 2 钢在冷却时的组织转变 .....	34	2 4 1 浇注位置和分型面的选择 .....	111
1 3 3 钢的退火与正火 .....	37	2 4 2 确定铸造主要工艺参数 .....	115
1 3 4 钢的淬火 .....	39	2 4 3 确定浇注系统 .....	120
1 3 5 钢的回火 .....	41	2 4 4 绘制铸造工艺图 .....	120
1 3 6 钢的表面淬火 .....	42	2.5 铸件结构工艺性 .....	123
1 3 7 钢的化学热处理 .....	44	2 5 1 铸造性能对铸件结构的要求 .....	123
1 3 8 热处理的技术条件和结构		2 5 2 铸造工艺对铸件结构的要求 .....	127
工艺性 .....	46	2.6 常用铸造合金的生产 .....	129
1.4 合金钢 .....	48	2 6 1 铸铁件的生产 .....	129
1 4 1 合金钢的分类与编号 .....	48	2 6 2 铸钢件的生产 .....	131
1 4 2 合金元素在钢中的作用 .....	49	2 6 3 有色合金铸件的生产 .....	131
1 4 3 合金结构钢 .....	51	复习与思考题 .....	132
1 4 4 合金工具钢 .....	58	第 3 章 锻压 .....	135
1 4 5 特殊性能钢 .....	64	3.1 概述 .....	135
1.5 有色金属 .....	69	3 1 1 锻压生产的特点 .....	135
1 5 1 铝及铝合金 .....	69	3 1 2 锻压生产的适用范围 .....	135
1 5 2 铜及铜合金 .....	73	3 1 3 锻压生产的发展趋势 .....	136
1 5 3 钛及其合金 .....	74	3.2 锻压工艺基础 .....	136
1 5 4 滑动轴承合金 .....	76	3 2 1 金属的塑性变形 .....	136
1.6 其他材料 .....	78	3 2 2 变形后金属的组织 and 性能 .....	137

3 2 3 金属的锻造性能 .....	139	复习与思考题 .....	196
3.3 自由锻 .....	139	<b>第 5 章 机械零件毛坯的选择</b> .....	197
3 3 1 概述 .....	139	5.1 常见零件毛坯的分类与比较 .....	197
3 3 2 自由锻设备 .....	140	5.1.1 毛坯类型及制造方法的比较 .....	197
3 3 3 自由锻工序 .....	142	5.1.2 毛坯生产成本的比较 .....	199
3 3 4 自由锻件的分类和锻造过程 .....	144	5.2 毛坯选择的原则 .....	202
3.4 模锻 .....	146	5.2.1 满足材料的工艺性能要求 .....	202
3 4 1 锤上模锻 .....	147	5.2.2 满足零件的使用要求 .....	208
3 4 2 曲柄压力机上模锻 .....	148	5.2.3 满足降低生产成本的要求 .....	208
3 4 3 平锻机上模锻 .....	149	5.2.4 符合生产条件 .....	204
3 4 4 摩擦压力机上模锻 .....	150	5.3 典型零件毛坯的选择 .....	205
3 4 5 其他模锻设备 .....	151	5.3.1 轴杆类零件的毛坯选择 .....	205
3.5 板料冲压 .....	153	5.3.2 盘套类零件的毛坯选择 .....	206
3 5 1 概述 .....	153	5.3.3 箱体机架类零件的毛坯选择 .....	207
3 5 2 板料冲压的基本工序 .....	154	复习与思考题 .....	208
3.6 锻压件结构设计 .....	159	<b>第 6 章 几何量公差</b> .....	210
复习与思考题 .....	164	6.1 尺寸公差与配合 .....	210
<b>第 4 章 焊接</b> .....	165	6.1.1 极限与配合(GB 1800) .....	210
4.1 概述 .....	165	6.1.2 极限制与配合制 .....	214
4.2 手工电弧焊 .....	167	6.1.3 尺寸至 500 mm 孔、轴公差带	
4 2 1 焊接电弧 .....	167	与配合 .....	224
4 2 2 焊接接头 .....	169	6.1.4 配合的选用 .....	225
4 2 3 焊条 .....	170	6.2 形状与位置公差 .....	229
4 2 4 焊接接头的金属组织与性能 .....	172	6.2.1 概述 .....	229
4 2 5 焊接应力与变形 .....	174	6.2.2 形状公差与误差 .....	232
4.3 其他焊接方法 .....	174	6.2.3 位置公差与误差 .....	235
4 3 1 埋弧自动焊 .....	174	6.2.4 形位公差与尺寸公差的关系 .....	242
4 3 2 气体保护电弧焊 .....	176	6.2.5 形位公差的选用 .....	246
4 3 3 气焊和气割 .....	177	6.3 表面粗糙度 .....	248
4 3 4 电渣焊 .....	179	6.3.1 基本概念 .....	248
4 3 5 等离子弧焊 .....	181	6.3.2 表面粗糙度的评定 .....	249
4 3 6 压焊与钎焊 .....	181	6.3.3 表面粗糙度的参数值及其	
4.4 常用金属材料的焊接 .....	185	选用 .....	252
4 4 1 碳钢的焊接 .....	185	复习与思考题 .....	255
4 4 2 低合金结构钢的焊接 .....	185	<b>第 7 章 金属切削加工基础知识</b> .....	256
4 4 3 不锈钢的焊接 .....	187	7.1 加工质量 .....	256
4 4 4 铸铁的焊补 .....	187	7.1.1 加工精度 .....	256
4 4 5 非铁金属的焊接 .....	188	7.1.2 表面质量 .....	257
4.5 焊接结构工艺设计 .....	190	7.2 切削运动 .....	258
4 5 1 焊接结构生产工艺过程概述 .....	190	7.2.1 切削运动 .....	258
4 5 2 焊接结构工艺设计 .....	190	7.2.2 工件表面 .....	259
4 5 3 焊接结构工艺设计实例 .....	195		

7.2.3	切削用量 .....	259	7.10.4	切削液的选择 .....	291
7.3	刀具切削部分的几何角度 .....	260	复习与思考题 .....	292	
7.3.1	车刀的组成 .....	261	<b>第8章 机械零件表面加工 .....</b>	<b>298</b>	
7.3.2	刀具几何角度参考系 .....	261	8.1	金属切削机床的基础知识 .....	298
7.3.3	刀具标注角度 .....	263	8.1.1	机床的分类 .....	298
7.3.4	刀具工作角度 .....	264	8.1.2	机床型号的编制方法 .....	294
7.3.5	切削层参数 .....	265	8.1.3	零件表面的切削加工成形方法和 机床的运动 .....	298
7.4	刀具材料 .....	266	8.1.4	机床传动的 basic 组成和传动 原理图 .....	299
7.4.1	刀具材料应当具备的性能 .....	266	8.1.5	机床传动系统图和运动计算 .....	301
7.4.2	高速钢 .....	266	8.2	外圆表面加工 .....	308
7.4.3	硬质合金 .....	267	8.2.1	外圆表面的加工方法 .....	308
7.5	金属切削过程 .....	269	8.2.2	外圆表面的车削加工 .....	308
7.5.1	切屑的形成过程 .....	269	8.2.3	外圆表面的磨削加工 .....	313
7.5.2	第 I 变形区 .....	270	8.3	内圆表面加工 .....	320
7.5.3	第 II 变形区 .....	273	8.3.1	内圆表面的加工方法 .....	320
7.5.4	第 III 变形区 .....	274	8.3.2	钻削加工 .....	322
7.6	切削力 .....	275	8.3.3	镗削加工 .....	328
7.6.1	切削力的来源、合力及其分力 .....	275	8.3.4	拉削加工 .....	330
7.6.2	切削力的计算 .....	276	8.3.5	内圆表面磨削加工 .....	333
7.6.3	切削功率的计算 .....	277	8.4	平面加工 .....	335
7.6.4	影响切削力的主要因素 .....	277	8.4.1	平面加工方法 .....	335
7.7	切削热和切削温度 .....	279	8.4.2	刨削与插削加工 .....	336
7.7.1	切削热的产生和传出 .....	279	8.4.3	铣削加工 .....	339
7.7.2	切削温度的分布 .....	279	8.4.4	平面磨削加工 .....	348
7.7.3	影响切削温度的主要因素 .....	279	8.5	齿轮的齿形加工 .....	349
7.8	刀具磨损和刀具寿命 .....	280	8.5.1	圆柱齿轮齿形加工方法 .....	350
7.8.1	刀具的磨损形式 .....	281	8.5.2	滚齿加工 .....	351
7.8.2	刀具磨损的原因 .....	282	8.5.3	插齿加工 .....	354
7.8.3	刀具的磨损过程及磨钝标准 .....	282	8.5.4	齿形的其他加工方法 .....	357
7.8.4	刀具寿命 .....	283	8.5.5	齿形加工方案的选择 .....	359
7.9	工件材料的切削加工性 .....	284	复习与思考题 .....	359	
7.9.1	工件材料的切削加工性的 评定 .....	284	<b>第9章 特种加工 .....</b>	<b>362</b>	
7.9.2	影响材料切削加工性的主要 因素 .....	285	9.1	概述 .....	362
7.9.3	常用材料的切削加工性 .....	286	9.2	电火花加工 .....	363
7.9.4	改善工件材料切削加工性的 途径 .....	287	9.2.1	电火花加工原理 .....	363
7.10	金属切削条件的选择 .....	287	9.2.2	电火花加工设备 .....	366
7.10.1	刀具几何参数的选择 .....	287	9.2.3	电火花加工特点 .....	366
7.10.2	刀具寿命的选择 .....	289	9.2.4	电火花加工的应用 .....	367
7.10.3	切削用量的选择 .....	290	9.2.5	电火花线切割加工 .....	368



9.3 电解加工 .....	368	10.2 典型零件机械加工工艺流程 .....	394
9.3.1 电解加工原理 .....	368	10.2.1 轴类零件加工 .....	394
9.3.2 电解加工特点 .....	369	10.2.2 套类零件加工 .....	396
9.3.3 电解加工的应用 .....	369	10.2.3 箱类零件加工 .....	400
9.3.4 电解磨削 .....	370	复习与思考题 .....	404
9.4 超声波加工 .....	370	<b>第 11 章 先进制造技术 .....</b>	<b>405</b>
9.4.1 超声波加工原理 .....	370	11.1 数控加工技术 .....	405
9.4.2 超声波加工装置 .....	371	11.1.1 数字控制与数控机床的概念 ...	405
9.4.3 超声波加工特点 .....	371	11.1.2 数控机床的基本组成及工作	
9.5 激光加工 .....	372	原理 .....	405
9.5.1 激光加工原理 .....	372	11.1.3 数控机床的分类 .....	408
9.5.2 激光加工特点 .....	373	11.1.4 数控机床的特点及应用范围 ...	410
9.5.3 激光加工的应用 .....	373	11.2 快速成形技术 .....	411
9.6 电子束加工 .....	373	11.2.1 快速成形技术的概念 .....	411
9.6.1 电子束加工原理 .....	373	11.2.2 快速成形技术的工作原理 .....	412
9.6.2 电子束加工装置 .....	374	11.2.3 快速成形技术的工艺方法 .....	412
9.6.3 电子束加工特点 .....	375	11.2.4 快速成形技术的特点和用途 ...	413
9.6.4 电子束加工的应用 .....	375	11.3 超精密与纳米加工技术 .....	414
9.7 离子束加工 .....	376	11.3.1 超精密加工技术 .....	414
9.7.1 离子束加工原理 .....	376	11.3.2 纳米加工技术 .....	415
9.7.2 离子束加工特点 .....	376	11.4 工业机器人 .....	415
9.7.3 离子束加工的应用 .....	376	11.4.1 工业机器人的基本概念 .....	415
复习与思考题 .....	379	11.4.2 工业机器人的应用 .....	417
<b>第 10 章 机械加工工艺流程 .....</b>	<b>380</b>	11.5 柔性制造技术 .....	417
10.1 工艺过程与工艺规程 .....	380	11.5.1 柔性制造单元 .....	418
10.1.1 概述 .....	380	11.5.2 柔性制造系统 .....	418
10.1.2 机械加工工艺流程的组成 .....	380	11.5.3 计算机集成制造系统 .....	420
10.1.3 生产纲领与生产类型 .....	382	复习与思考题 .....	421
10.1.4 机械加工工艺流程制订 .....	383	<b>参考文献 .....</b>	<b>422</b>
10.1.5 零件的结构工艺性 .....	389		

# 绪 论

## 1. 机械制造的概念

用系统的观点分析,机械制造的概念是指将毛坯(或材料)和其他辅助材料作为原料,输入机械制造系统,经过存储、运输、加工、检验等环节,最后实现符合要求的零件或产品从系统输出。概括地讲,机械制造就是将原材料转变为成品的各种劳动总和。其过程大致包括以下阶段:

### (1) 技术准备阶段

某种零件或产品投产前,必须作各项技术准备工作,首先要制定工艺规程,这是指导各项技术操作的重要文件。此外,原材料供应,刀具、夹具、量具的配备,热处理设备和检测仪器的准备,都要在技术准备阶段安排就绪。

### (2) 毛坯制造阶段

毛坯可由不同的方法获得。常用获得毛坯的方法有:铸造、锻压、焊接和型材。具体应根据零件批量、尺寸、形状、性能要求等因素选用不同的毛坯成形方法。合理选择毛坯可提高生产率、降低成本。

### (3) 零件加工阶段

金属切削加工是目前各种零件的主要加工方法。通用的加工设备有:车床、铣床、钻床、刨床、镗床、磨床等,此外,还有专用机床、特种加工机床、数控机床等。采用哪种加工方法,选用哪种加工设备,要根据零件批量、精度、表面粗糙度和各种技术要求等诸多因素综合考虑,以达到既保证零件质量要求,又保证生产效率高、成本低。

### (4) 产品检验和装配

每个零件按其在机器中的作用不同,都有一定的精度、表面粗糙度和相关的技术要求,而零件在加工过程中,不可避免地会产生加工误差。因此,必须设定检验工序,以对加工过程产生的尺寸、几何形状误差等进行检验。此外,对于承受重载或高温、高压条件下工作的零件还应进行内部性能检验,如缺陷检验、力学性能或金相组织检验等。只有当质量检验全面合格后零件才能使用。

装配过程中必须严格遵守技术条件的规定,如零件的清洗、装配顺序、装配方法、工具使用、结合面修磨、润滑剂施加及运转跑合、油漆色泽和包装,都不能掉以轻心,只有这样才能生产出符合要求的合格产品。

## 2. 机械制造业在国民经济中的作用

机械制造业是所有与机械制造有关的企业机构的总体。机械制造业是国民经济的基础产业。在国民经济的各条战线上,乃至人民生活中广泛使用的大量机器设备、仪器、工具都是由机械制造业提供的。因此,机械制造业不仅对提高人民生活水平起着重要保障作用,而且对科学技术发展,尤其对现代高新技术的发展起着更为积极的推动作用。如果没有机械制造业提供质量优良、技术先进的技术装备,将直接影响工业、农业、交通、科研和国防各部门的生产技术和整体水平,进而影响一个国家的综合生产实力。“经济的竞争归根到底是制造技术和制造能力的竞

争”。可见,机械制造业的发展水平是衡量一个国家经济实力和科技水平的重要标志之一。

21世纪是综合国力竞争的年代,我国要实现四个现代化全面进入“小康”社会,就必须大力发展机械制造业及机械制造技术。

### 3. 本课程的性质和研究内容

“机械制造基础”是为适应高职高专教学改革需要而重新构建的一门课程。它是将“工程材料”、“热加工工艺基础”、“互换性与测量技术”、“机械加工工艺基础”等传统课程内容,经过分析取舍、结构优化、再吸纳了现代制造体系中的“特种加工技术”、“先进制造技术”的相关内容,整合而形成的一门强调机械制造应用基础知识的机械类课程。设置本课程的目的,不仅使学生在常用工程材料、毛坯与零件的成形方法、公差与配合、切削加工及拟订工艺规程的原则等方面获得必要的基础知识,更重要的是培养学生解决实际问题的能力。

本课程的实践性很强,学习本课程之前应具有一定的感性知识。因此,本课程应在“热加工实训”和“机加工实训”之后进行讲授。通过实训,学生初步熟悉了毛坯和零件的成形、切削的方法,常用设备和工具的基本原理和大致结构,并对毛坯或零件加工工艺过程有一定的了解。在此基础上学习本课程才能达到预期的教学目的。

本课程研究的内容是工程材料和机械加工过程中的基础知识。考虑到后续课程安排,教材内容处理上有所区别。“工程材料”部分以剖析铁碳合金的金相组织为基础,以介绍工程材料的性质和合理选材为重点。“铸造”、“锻压”、“焊接”各占有一定的篇幅,因为这方面知识是必不可少的,而且本课程前后均未安排与此有关的课程。“几何量公差”部分,介绍概念与选用。“机械零件毛坯的选择”、“金属切削加工基础知识”、“机械零件表面加工”和“机械加工工艺规程”部分,则着重在“机加工实训”的基础上,把感性知识上升到理论高度,进而归纳成系统性基础知识,为后续课程打好基础。而“特种加工”和“先进制造技术”部分,则着眼于拓宽知识面、提高人才培养的专业适应性。

### 4. 本课程的任务和要求

本课程的任务在于使学生获得机械制造过程中所必须具备的应用性基础知识和技能。学生学习本课程后,应熟悉各种工程材料性能,并具有合理选用所需材料的能力;初步掌握和选用毛坯或零件的成形方法及机械零件表面加工方法;具有选用公差配合的能力;了解工艺规程制定的原则及特种加工、先进制造技术的概念和应用场合。

本课程实践性强,涉及知识面广。学习本课程时,除要重视基本概念、基本知识外,一定要注意理论与实践的结合,只有在实践中加深对课程内容的理解,才能将所学的知识转为技术应用能力。

# 第1章 工程材料

各类机电产品,大多是由种类繁多、性能各异的工程材料通过加工制成的零件构成的。

工程材料分金属材料和非金属材料,其中金属材料是工程中应用最广泛的。本章主要介绍金属材料的力学性能、组织、热处理工艺等基本知识,以及常用金属材料和非金属材料的应用知识。

## 1.1 金属材料的力学性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中应具备的性能,它包括力学性能(强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等)、物理性能(密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性等)和化学性能(耐蚀性、抗氧化性等)。工艺性能是金属材料从冶炼到成品的生产过程中,适应各种加工工艺(如:冶炼、铸造、冷热压力加工、焊接、切削加工、热处理等)应具备的性能。

金属材料的力学性能是指金属材料在载荷作用时所表现的性能。这些性能是机械设计、材料选择、工艺评定及材料检验的主要依据。

### 1.1.1 强度

金属材料的强度、塑性一般可以通过金属拉伸试验来测定。

#### 1. 拉伸试样

拉伸试样的形状通常有圆柱形和板状两类。图 1.1.1a 所示为圆柱形拉伸试样。在圆柱形拉伸试样中  $d_0$  为试样直径,  $l_0$  为试样的标距长度,根据标距长度和直径之间的关系,试样可分为长试样( $l_0 = 10 d_0$ )和短试样( $l_0 = 5 d_0$ )。

#### 2. 拉伸曲线

试验时,将试样两端夹装在试验机的上下夹头上,随后缓慢地增加载荷,随着载荷的增加,试样逐步变形而伸长,直到被拉断为止。在试验过程中,试验机自动记录了每一瞬间载荷  $F$  和变形量  $l$ ,并给出了它们之间的关系曲线,故称为拉伸曲线(或拉伸图)。拉伸曲线反映了材料在拉伸过程中的弹性变形、塑性变形和直到拉断时的力学特性。

图 1.1.1b 为低碳钢的拉伸曲线。由图可见,低碳钢试样在拉伸过程中,可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

当载荷不超过  $F_p$  时,拉伸曲线  $Op$  为一直线,即试样的伸长量与载荷成正比地增加,如果卸除载荷,试样立即恢复到原来的尺寸,即试样处于弹性变形阶段。载荷在  $F_p - F_e$  间,试样的伸长量与载荷已不再成正比关系,但若卸除载荷,试样仍然恢复到原来的尺寸,故仍处于弹性变形阶段。

当载荷超过  $F_e$  后,试样将进一步伸长,但此时若卸除载荷,弹性变形消失,而有一部分变形

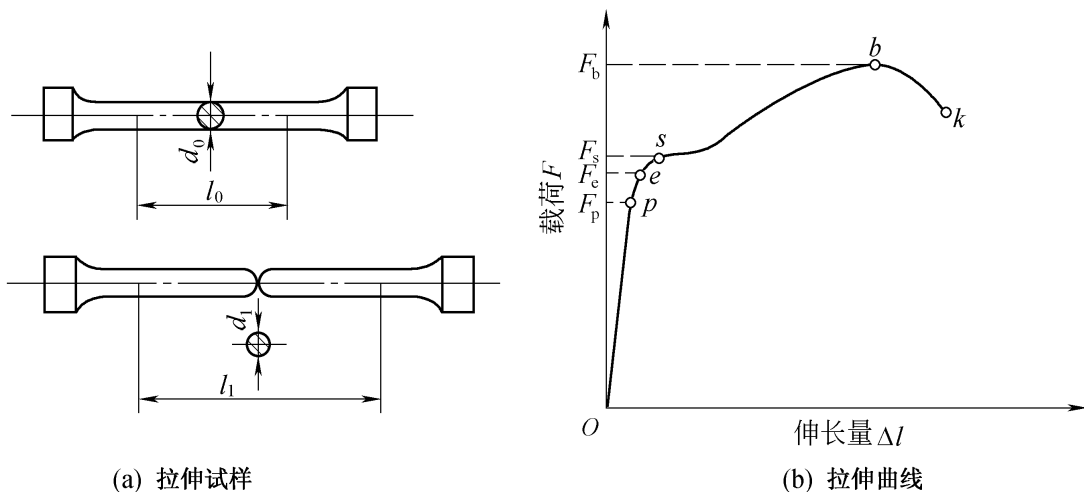


图 1.1.1 拉伸试样与拉伸曲线

却不能消失,即试样不能恢复到原来的长度,称为塑性变形或永久变形。

当载荷增加到  $F_s$  时,试样开始明显的塑性变形,在拉伸曲线上出现了水平的或锯齿形的线段,这种现象称为屈服。

当载荷继续增加到某一最大值  $F_b$  时,试样的局部截面缩小,产生了颈缩现象。由于试样局部截面的逐渐减少,故载荷也逐渐降低,当达到拉伸曲线上的  $k$  点时,试样就被拉断。

### 3. 强度

强度是指金属材料在载荷作用下,抵抗塑性变形和断裂的能力。

#### (1) 弹性极限

金属材料在载荷作用下产生弹性变形时所能承受的最大应力称为弹性极限,用符号  $\sigma_e$  表示:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中  $F_e$  —— 试样产生弹性变形时所承受的最大载荷;

$A_0$  —— 试样原始横截面积。

#### (2) 屈服强度

金属材料开始明显塑性变形时的最低应力称为屈服强度,用符号  $\sigma_s$  表示:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中  $F_s$  —— 试样屈服时的载荷;

$A_0$  —— 试样原始横截面积。

生产中使用的某些金属材料,在拉伸试验中不出现明显的屈服现象,无法确定其屈服点。所以国标中规定,以试样塑性变形量为试样标距长度的 0.2% 时,材料承受的应力称为“条件屈服强度”,并以符号  $\sigma_{0.2}$  表示。

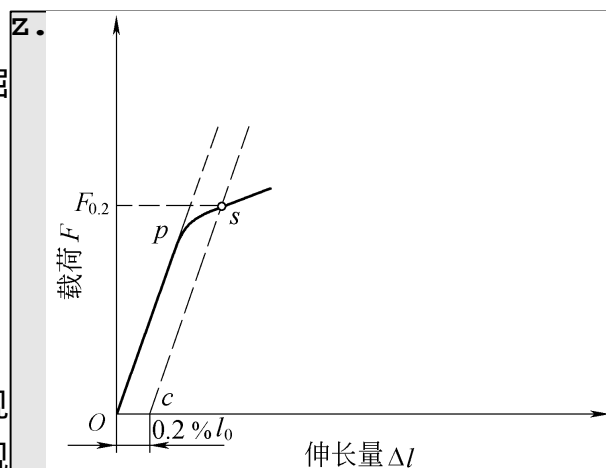


图 1.1.2 屈服强度测定

$\sigma_{0.2}$  的确定方法如图 1.1.2 所示:在拉伸曲线横坐标上截取  $c$  点,使  $Oc = 0.2\% l_0$ ,过  $c$  点作  $Op$  斜

线的平行线,交曲线于  $s$  点,则可找出相应的载荷  $F_{0.2}$ ,从而计算出  $\sigma_{0.2}$ 。

### (3) 抗拉强度(又称强度极限)

金属材料在断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度,用符号  $\sigma_b$  表示:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中  $F_b$  —— 试样在断裂前的最大载荷;

$A_0$  —— 试样原始横截面积。

脆性材料没有屈服现象,则用  $\sigma_b$  作为设计依据。

## 1.1.2 塑性

金属材料在载荷作用下,产生塑性变形而不破坏的能力称为塑性。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率。

### 1. 伸长率

试样拉断后,标距长度的增加量与原标距长度的百分比称为伸长率,用  $\delta$  表示:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中  $l_0$  —— 试样原标距长度, mm;

$l_1$  —— 试样拉断后标距长度, mm。

材料的伸长率随标距长度增加而减少。所以,同一材料短试样的伸长率  $\delta_5$  大于长试样的伸长率  $\delta_{10}$ 。

### 2. 断面收缩率

试样拉断后,标距横截面积的缩减量与原横截面积的百分比称为断面收缩率,用  $\psi$  表示:

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中  $A_0$  —— 试样原横截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_1$  —— 试样拉断后最小横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

$\delta$ 、 $\psi$  是衡量材料塑性变形能力大小的指标,  $\delta$ 、 $\psi$  大,表示材料塑性好,既保证压力加工的顺利进行,又保证机件工作时的安全可靠。

金属材料的塑性好坏,对零件的加工和使用都具有重要的实际意义。塑性好的材料不仅能顺利地进行锻造、轧制等成型工艺,而且在使用时万一超载,由于塑性变形,能避免突然断裂。

## 1.1.3 硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。它是指金属表面抵抗局部塑性变形或破坏的能力,是检验毛坯或成品件、热处理件的重要性能指标。目前生产上应用最广的静载荷压入法硬度试验有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

### 1. 布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1.1.3 所示。它是用一定直径的钢球或硬质合金球,以相应的试验

力压入试样表面 经规定的保持时间后 ,卸除试验力 ,用读数显微镜测量试样表面的压痕直径。布氏硬度值 HBS 或 HBW 是试验力  $F$  除以压痕球形表面积所得的商 ,即 :

$$\text{HBS(HBW)} = \frac{F}{A} = \frac{0.102 \times 2 F}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中  $F$ ——压入载荷 ,N ;

$A$ ——压痕表面积 , $\text{mm}^2$  ;

$d$ ——压痕直径 ,mm ;

$D$ ——淬火钢球(或硬质合金球)直径 ,mm。

布氏硬度值的单位为  $\text{kgf/mm}^2$  ,一般情况下可不标出 ;

压头为淬火钢球时 ,布氏硬度用符号 HBS 表示 ,适用于布氏硬度值在 450 以下的材料 ;压头为硬质合金球时 ,用 HBW 表示 ,适用于布氏硬度值在 650 以下的材料。符号 HBS 或 HBW 之前为硬度值 ,符号后面按以下顺序用数值表示试验条件 :

- 1) 球体直径 ;
- 2) 试验力 ;
- 3) 试验力保持时间(10 ~ 15 s 不标注)。

例如 :125 HBS10/1 000/30 表示用直径 10 mm 淬火钢球在  $1\ 000 \times 9.8\ \text{N}$  试验力作用下保持 30 s 测得的布氏硬度值为 125 ;500 HBW5/750 表示用直径 5 mm 硬质合金球在  $750 \times 9.8\ \text{N}$  试验力作用下保持 10 ~ 15 s 测得的布氏硬度值为 500。

布氏硬度试验是在布氏硬度试验机上进行。当  $F/D$  的比值保持一定时 ,能使同一材料所得的布氏硬度值相同 ,不同材料的硬度值可以比较。试验后用读数显微镜在两个垂直方向测出压痕直径 ,根据测得的  $d$  值查表求出布氏硬度值。

布氏硬度试验的优点是测出的硬度值准确可靠 ,因压痕面积大 ,能消除因组织不均匀引起的测量误差 ;布氏硬度值与抗拉强度之间有近似的正比关系 :  $\sigma_b = K \cdot \text{HBS(或 HBW)}$  (低碳钢  $K = 0.36$  ,合金调质钢  $K = 0.325$  ;灰铸铁  $K = 0.1$ )。

布氏硬度试验的缺点是 :当用淬火钢球时不能用来测量大于 450 HBS 的材料 ;用硬质合金球时 ,亦不宜超过 650 HBW ;压痕大 ,不适宜测量成品件硬度 ,也不宜测量薄件硬度 ;测量速度慢 ,测得压痕直径后还需计算或查表。

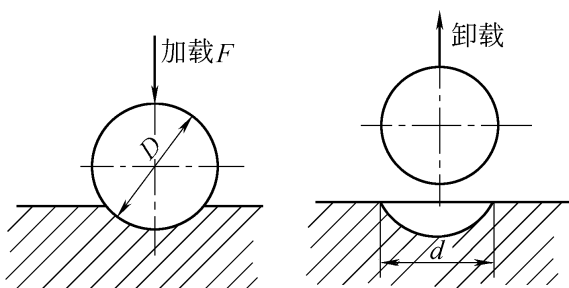


图 1.1.3 布氏硬度试验原理图

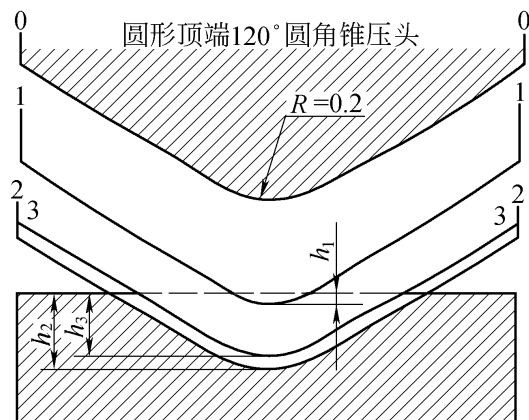


图 1.1.4 洛氏硬度试验原理图

## 2. 洛氏硬度

以顶角为  $120^\circ$  的金刚石圆锥体或一定直径的淬火钢球作压头,以规定的试验力使其压入试样表面,根据压痕的深度确定被测金属的硬度值。如图 1.1.4 所示当载荷和压头一定时,所测得的压痕深度  $h = h_2 - h_1$  愈大,表示材料硬度愈低,一般来说人们习惯数值越大硬度越高。为此,用一个常数  $K$ (对 HRC,  $K$  为 0.2; HRB,  $K$  为 0.26) 减去  $h$ ,并规定每 0.002 mm 深为一个硬度单位,因此,洛氏硬度计算公式是:

$$\text{HRC(HRA)} = 0.2 - h = 100 - \frac{h}{0.002}$$

$$\text{HRB} = 0.26 - h = 130 - \frac{h}{0.002}$$

根据所加的载荷和压头不同,洛氏硬度值有三种标度 HRA、HRB、HRC,常用 HRC,其有效值范围是 20 ~ 67 HRC。

洛氏硬度是在洛氏硬度试验机上进行的,其硬度值可直接从表盘上读出。洛氏硬度符号 HR 前面的数字为硬度值,后面的字母表示级数。如 60 HRC 表示 C 标尺测定的洛氏硬度值为 60。

洛氏硬度试验操作简便、迅速,效率高,可以测定软、硬金属的硬度;压痕小,可用于成品检验。但压痕小,测量组织不均匀的金属硬度时,重复性差,而且不同的硬度级别测得硬度值无法比较。

### 3. 维氏硬度

维氏硬度试验原理与布氏硬度相同,同样是根据压痕单位面积上所受的平均载荷计量硬度值,不同的是维氏硬度的压头采用金刚石制成的锥面夹角为  $136^\circ$  的正四棱锥体,如图 1.1.5 所示。

维氏硬度试验是在维氏硬度试验机上进行的。试验时,根据试样大小、厚薄选用  $(5 \sim 120) \times 9.8$  N 载荷压入试样表面,保持一定时间后去除载荷,用附在试验机上测微计测量压痕对角线长度  $d$ ,然后通过查表或根据下式计算维氏硬度值:

$$\text{HV} = \frac{F}{A} = \frac{1.8544 \times 0.102 \times F}{d^2}$$

式中  $A$ ——压痕的面积  $\text{mm}^2$ ;

$d$ ——压痕对角线的长度  $\text{mm}$ ;

$F$ ——试验载荷  $\text{N}$ 。

维氏硬度符号 HV 前是硬度值,符号 HV 后附以试验载荷。如 640 HV30/20 表示在  $30 \times 9.8$  N 作用下保持 20 s 后测得的维氏硬度值为 640。

维氏硬度的优点是试验时加载小,压痕深度浅,可测量零件表面淬硬层,测量对角线长度  $d$  误差小,其缺点是生产率比洛氏硬度试验低,不宜于成批生产检验。

### 1.1.4 冲击韧度

生产中许多机器零件,都是在冲击载荷(载荷以很快的速度作用于机件)下工作。试验表明,

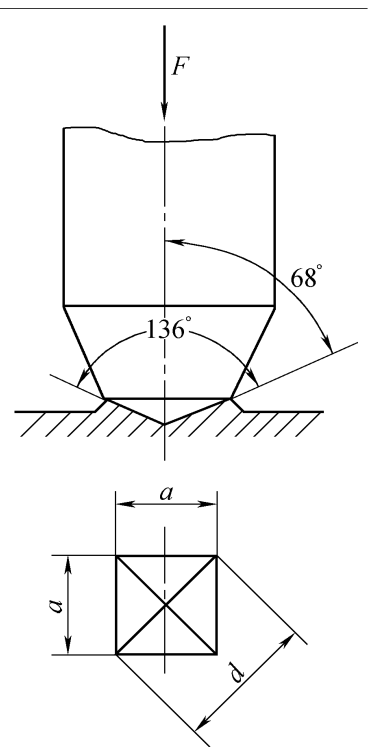


图 1.1.5 维氏硬度试验原理图



载荷速度增加,材料的塑性、韧性下降,脆性增加,易发生突然性破断。因此,使用的材料就不能用静载荷下的性能来衡量,而必须用抵抗冲击载荷的作用而不破坏的能力,即冲击韧度来衡量。

目前应用最普遍的是一次摆锤弯曲冲击试验。将标准试样放在冲击试验机的两支座上,使试样缺口背向摆锤冲击方向(图 1.1.6) 然后把质量为  $m$  的摆锤提升到  $h_1$  高度,摆锤由此高度下落时将试样冲断,并升到  $h_2$  高度。因此冲断试样所消耗的功为  $A_k = mg(h_1 - h_2)$ 。金属的冲击韧度  $a_k$  ( $J/cm^2$ ) 就是冲断试样时在缺口处单位面积所消耗的功,即:

$$a_k = \frac{A_k}{A}$$

式中  $a_k$  —— 冲击韧度  $J/cm^2$  ;

$A$  —— 试样缺口处原始截面积  $cm^2$  ;

$A_k$  —— 冲断试样所消耗的功  $J$ 。

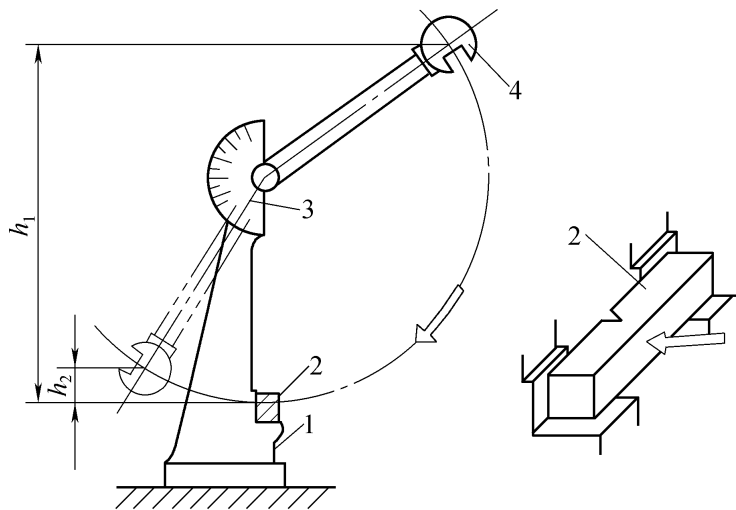


图 1.1.6 冲击试验原理

1— 支座 2— 试样 ;3— 指针 ;4— 摆锤

冲击吸收功  $A_k$  值可从试验机的刻度盘上直接读出。 $A_k$  值的大小,代表了材料的冲击韧度高。材料的冲击韧度值除了取决于材料本身之外,还与环境温度及缺口的状况密切相关。所以,冲击韧度除了用来表征材料的韧性大小外,还用来测量金属材料随环境温度下降由塑性状态变为脆性状态的冷脆转变温度,也用来考查材料对于缺口的敏感性。

### 1.1.5 疲劳强度

许多机械零件是在交变应力作用下工作的,如轴类、弹簧、齿轮、滚动轴承等。虽然零件所承受的交变应力数值小于材料的屈服强度,但在长时间运转后也会发生断裂,这种现象叫疲劳断裂。它与静载荷下的断裂不同,断裂前无明显塑性变形,因此,具有更大的危险性。

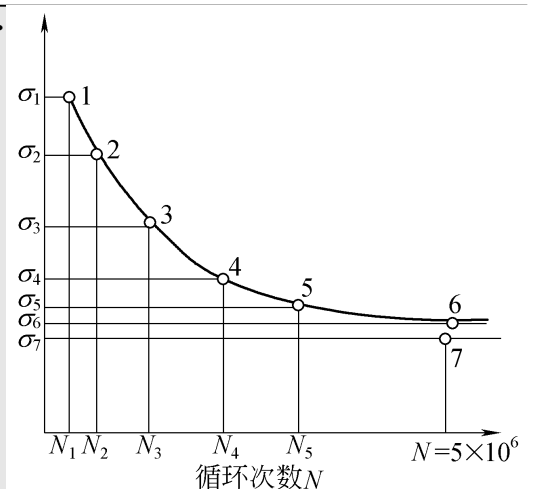


图 1.1.7 钢的疲劳曲线

交变应力大小和断裂循环次数之间的关系通常用疲劳曲线来描述(图 1.1.7)。疲劳曲线表

明,当应力低于某一值时,即使循环次数无穷多也不发生断裂,此应力值称为疲劳强度或疲劳极限。光滑试样的对称弯曲疲劳极限用  $\sigma_{-1}$  表示。在疲劳强度的测定中,不可能把循环次数作到无穷大,而是规定一定的循环次数作为基数。常用钢材的循环基数为  $10^7$  次,有色金属和某些超高强度钢的循环基数为  $10^8$  次。

疲劳破断常发生在金属材料最薄弱的部位,如热处理产生的氧化、脱碳、过热、裂纹;钢中的非金属夹杂物、试样表面有气孔、划痕等缺陷均会产生应力集中,使疲劳强度下降。为了提高疲劳强度,加工时要降低零件的表面粗糙度值和进行表面强化处理,如表面淬火、渗碳、氮化、喷丸等,使零件表层产生残余的压应力,以抵消零件工作时的一部分拉应力,从而使零件的疲劳强度提高。

## 1.2 铁碳合金

### 1.2.1 金属的晶体结构与结晶

#### 1. 晶体的基本概念

##### (1) 晶体

自然界中的固态物质,虽然外形各异、种类繁多,但都是由原子或分子堆积而成的。根据内部原子堆积的情况,通常可以分为晶体和非晶体两大类。晶体中的原子或分子,在三维空间中是按照一定的几何规则作周期性的重复排列;非晶体中的这些质点,则是杂乱无章地堆积在一起无规则可循。这就是晶体和非晶体的根本区别。

晶体有一定的熔点且性能呈各向异性,而非晶体与此相反。

在自然界中,除普通玻璃、松香、石蜡等少数物质以外,包括金属和合金在内的绝大多数固体都是晶体。

##### (2) 晶格、晶胞、晶格常数

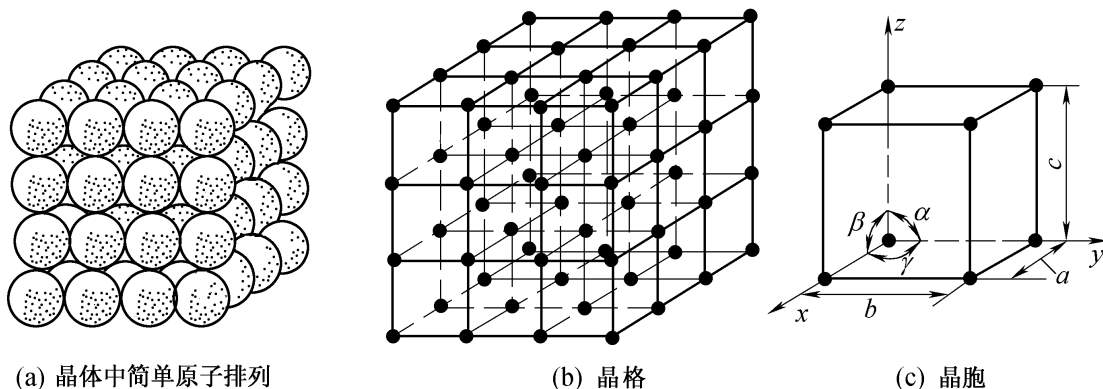


图 1.2.1 晶体结构示意图

为了清楚地表明原子在空间的排列规则,可以把原子看成是一个几何质点,把原子之间的相互联系与作用假想为几何直线,这样一来晶体结构就可以直接用几何学来讨论了。这种用于描述原子在晶体中排列规则的三维空间几何点阵称为晶格。图 1.2.1b 是简单立方晶格的示意图。晶体中原子排列规律是具有明显的周期性变化。因此在晶格中就存在一个能够代表晶格特征的

最小几何单元,称之为晶胞。图 1.2.1c 是一个简单立方晶格的晶胞示意图。晶胞在空间的重复排列就构成整个晶格。因此,晶胞的特征就可以反映出晶格和晶体的特征。在晶体学中,用来描述晶胞大小与形状的几何参数称为晶格常数。包括晶胞的三个棱边  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和三个棱边夹角、共六个参数。

## 2. 常见金属的晶体结构

### (1) 体心立方晶格

体心立方晶胞如图 1.2.2a 和 b 所示。在晶胞的八个角上各有一个金属原子,构成立方体。在立方体的中心还有一个原子,所以叫作体心立方晶格。属于这类晶格的金属有铬、钒、钨、钼和铁等。

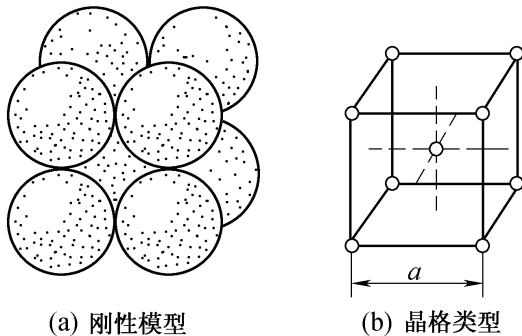


图 1.2.2 体心立方晶格

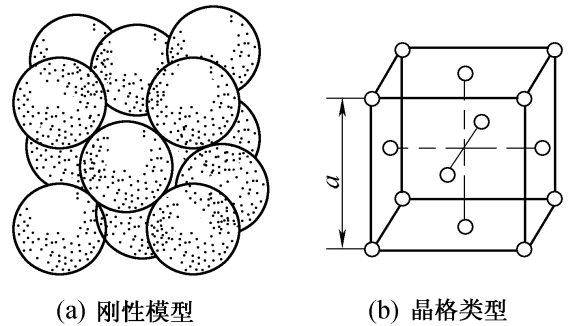


图 1.2.3 面心立方晶格

### (2) 面心立方晶格

面心立方晶格如图 1.2.3a 和 b 所示。在晶胞的八个角上各有一个原子,构成立方体。在立方体的六个面的中心各有一个原子,所以叫做面心立方晶格。属于这类晶格的金属有铝、铜、镍、铅和铁等。

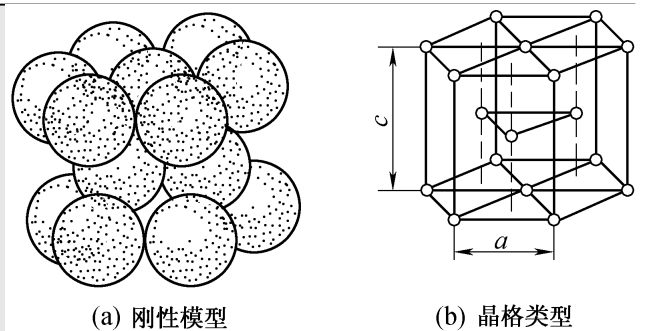


图 1.2.4 密排六方晶格

### (3) 密排六方晶格

密排六方晶格如图 1.2.4a 和 b 所示。在晶胞的十二个角上各有一个原子,构成六方柱体。上下底面中心各有一个原子。晶胞内部还有三个原子,所以叫做密排六方晶格。属于这类晶格的金属有铍、锌和钛等。

## 3. 金属的实际晶体结构

### (1) 单晶体与多晶体的概念

把晶体看成由原子按一定几何规律作周期性排列而成,即晶体内部的晶格位向是完全一致的。这种晶体称为单晶体,如图 1.2.5a 所示。在工业生产中,只有经过特殊制作才能获得单晶体,如半导体元件、磁性材料、高温合金材料等。而一般的金属材料,即使一块很小的金属中也含有许多颗粒状小晶体,每个小晶体内部的晶格位向是一致的,而每个小晶体彼此间位向却不同,这种外形不

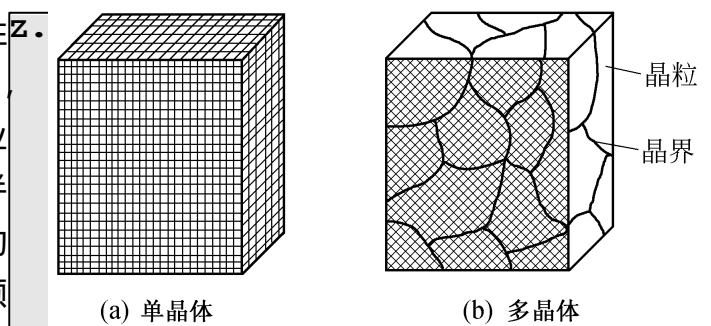


图 1.2.5 单晶体与多晶体示意图

规则的颗粒状小晶体通常称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。显然晶界处的原子排列为适应两晶粒间不同晶格位向的过渡,总是不规则的。这种实际上由多晶粒组成的晶体结构称为多晶体,如图 1.2.5b 所示。

单晶体在不同方向上的物理、化学和力学性能不相同,即为各向异性。而实际金属是多晶体结构,故宏观上看就显示出各向同性的性能。

## (2) 晶体中的缺陷

晶体中原子完全为规则排列时,称为理想晶体。实际上金属由于多种原因的影响,内部存在着大量的缺陷。晶体缺陷的存在对金属的性能有着很大的影响。这些晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三大类。

### 1) 点缺陷

最常见的点缺陷是空位和间隙原子,如图 1.2.6 所示。因为这些点缺陷的存在,会使其周围的晶格发生畸变,引起性能的变化。

晶体中晶格空位和间隙原子都处在不断地运动和变化之中,晶格空位和间隙原子的运动是金属中原子扩散的主要方式之一,这对热处理过程起着重要的作用。

### 2) 线缺陷

晶体中的线缺陷通常是各种类型的位错。所谓位错就是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了某种有规律的错排现象。这种错排有许多类型,其中比较简单的一种形式就是刃型位错,如图 1.2.7 所示。

位错密度愈大,塑性变形抗力愈大。因此,目前通过塑性变形,提高位错密度,是强化金属的有效途径之一。

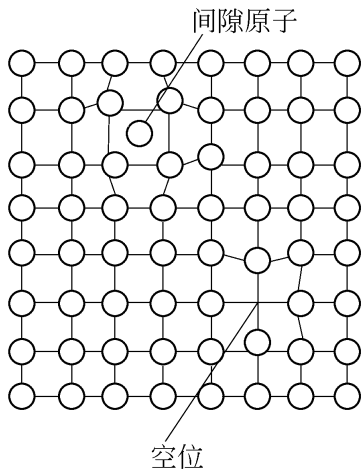


图 1.2.6 空位和间隙原子示意图

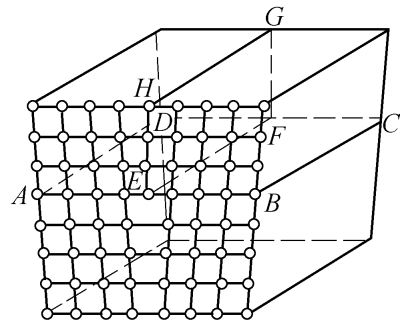


图 1.2.7 刃型位错立体模型

### 3) 面缺陷

晶界实际上是不同位向晶粒之间原子无规则排列的过渡层,如图 1.2.8 所示。实验证明,晶粒内部的晶格位向也不是完全一致的,每个晶粒皆是由许多位向差很小的小晶块互相镶嵌而成的,这些小晶块称为亚组织。亚组织之间的边界称为亚晶界。亚晶界实际上是由一系列刃型位错所形成的小角度晶界,如图 1.2.9 所示。晶界处表现出较高的强度和硬度。晶粒越细小,晶界越多,它对塑性变形的阻碍作用就越大,金属的强度、硬度越高。晶界还有耐蚀性低、熔点低、原子扩散速度较快的特点。

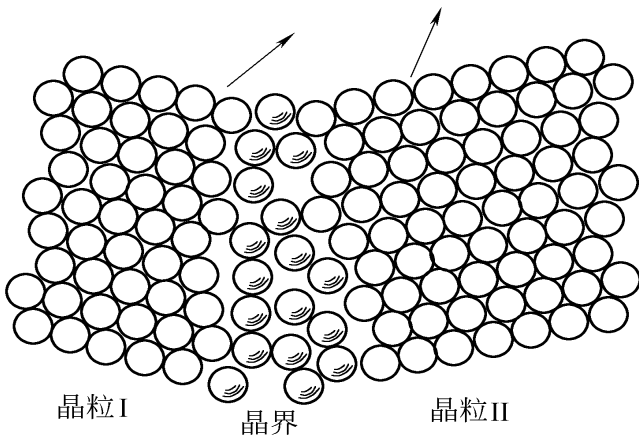


图 1.2.8 晶界的过渡结构示意图

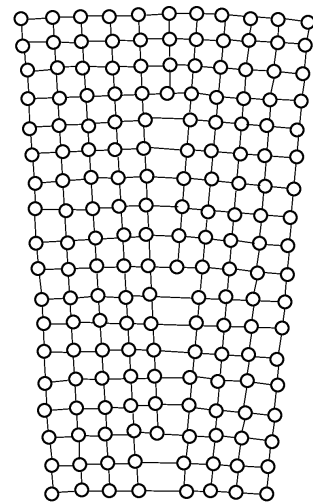


图 1.2.9 亚晶界结构示意图

#### 4. 纯金属的结晶

##### (1) 纯金属的冷却曲线和冷却现象

金属由液态转变为固态晶体的过程叫做结晶。了解金属由液态转变为固态晶体的过程是十分必要的。现以纯金属为例说明如下：

纯金属由液态向固态的冷却过程，可用冷却过程中所测得的温度与时间的关系曲线——冷却转变曲线来表示，这种方法称热分析法。

所测得的结晶温度称为理论结晶温度  $T_0$ 。在实际生产中，纯金属自液态冷却时，是有一定冷却速度的，有时甚至很大，在这种情况下，纯金属的结晶过程是在  $T_1$  温度进行的，如图 1.2.10 所示， $T_1$  低于  $T_0$ ，这种现象称为“过冷”。理论结晶温度  $T_0$  与实际结晶温度  $T_1$  之差  $T = T_0 - T_1$  称为“过冷度”。过冷度并不是一个恒定值，液体金属的冷却速度越大，实际结晶温度  $T_1$  就越低，即过冷度  $T$  就越大。

实际金属总是在过冷情况下进行结晶的，所以过冷是金属结晶的一个必要条件。

##### (2) 金属的结晶过程

液态纯金属在冷却到结晶温度时，其结晶过程是：先在液体中产生一批晶核，已形成的晶核不断长大，并继续产生新的晶核，直到全部液体转变成固体为止。最后形成由外形不规则的许多小晶体所组成的多晶体，如图 1.2.11 所示。

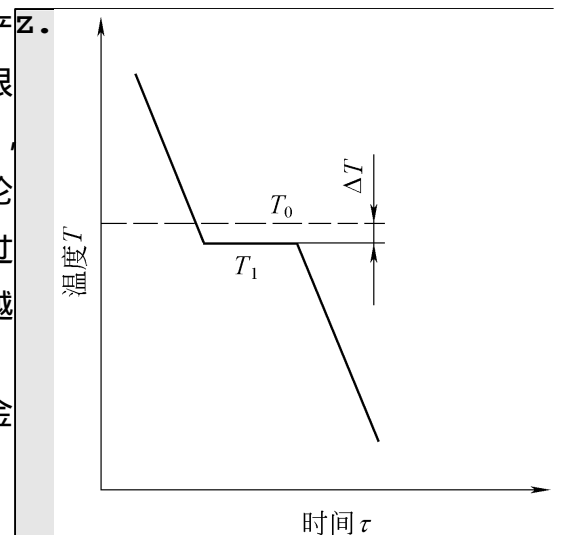


图 1.2.10 纯金属冷却曲线

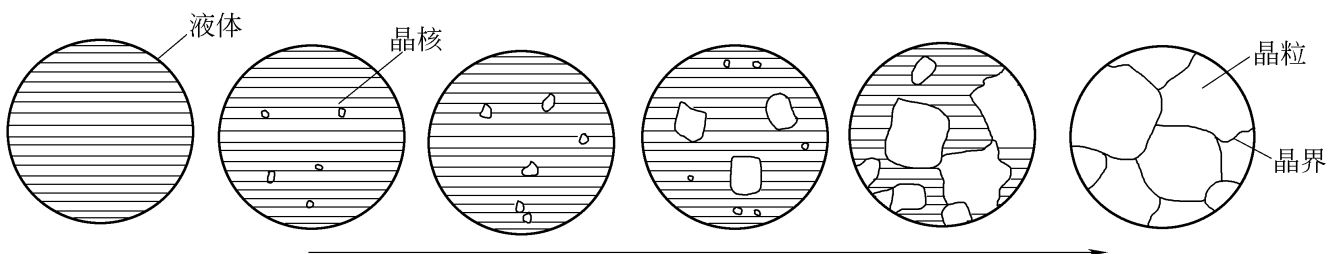


图 1.2.11 金属的结晶过程示意图

在晶核开始长大的初期,因其内部原子规则排列的特点,其外形也是比较规则的。随着晶核长大和晶体棱角的形成,棱角处散热条件优于其他部位,因此优先长大,如图 1.2.12 所示。其生长方式,像树枝状一样,先长出枝干,然后再长出分枝,最后把晶间填满,得到的晶体称为树枝状晶体,简称为枝晶。

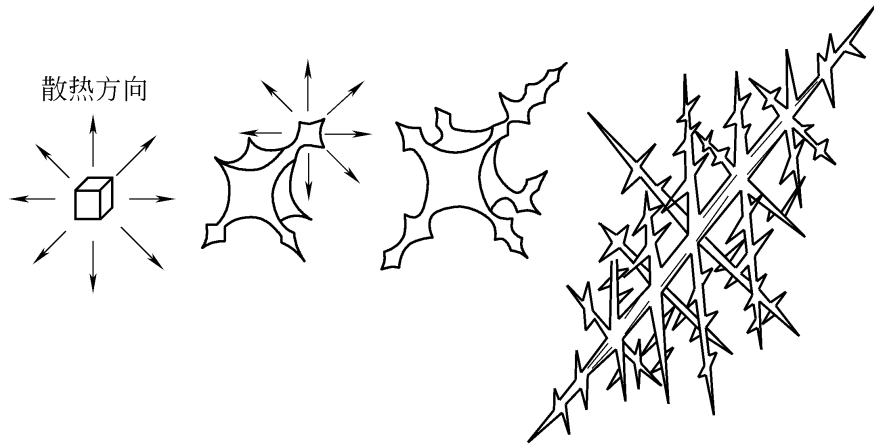


图 1.2.12 晶核长大示意图

### (3) 晶粒大小与金属力学性能的关系

在常温下的细晶粒金属比粗晶粒金属具有较高的强度、硬度、塑性和韧性。

生产中,细化晶粒的方法如下:

#### 1) 增加过冷度

结晶时增加过冷度  $\Delta T$  会使结晶后晶粒变细。

增加过冷度,就是要提高金属凝固的冷却转变速度。实际生产中常常是采用降低铸型温度和采用导热系数较大的金属铸型来提高冷却速度。但是,对大型铸件,很难获得大的过冷度,而且太大的冷却速度,又增加了铸件变形与开裂的倾向。因此工业生产中多用变质处理方法细化晶粒。

#### 2) 变质处理

变质处理是在浇注前向液态金属中加入一些细小的难熔的物质(变质剂),在液相中起附加晶核的作用,使形核率增加,晶粒显著细化。如往钢液中加入钛、锆、铝等。

#### 3) 附加振动

金属结晶时,利用机械振动、超声波振动、电磁振动等方法,既可使正在生长的枝晶熔断成碎晶而细化,又可使破碎的枝晶尖端起晶核作用,以增大形核率。

## 1.2.2 合金的晶体结构

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属与非金属组成的具有金属特性的物质。例如碳钢是铁和碳组成的合金。

组成合金的最基本的、独立的物质称为组元,简称为元。一般来说,组元就是组成合金的元素。例如铜和锌就是黄铜的组元。有时稳定的化合物也可以看作组元,例如铁碳合金中的  $Fe_3C$  就可以看作组元。通常,由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的合金称为三元合金。

相是指合金中成分、结构均相同的组成部分,相与相之间具有明显的界面。

通常把合金中相的晶体结构称为相结构,而把在金相显微镜下观察到的具有某种形态或形貌特征的组成部分总称为组织。所以合金中的各种相是组成合金的基本单元,而合金组织则是

合金中各种相的综合体。

一种合金的力学性能不仅取决于它的化学成分,更取决于它的显微组织。通过对金属的热处理可以在不改变其化学成分的前提下改变其显微组织,从而达到调整金属材料力学性能的目的。

根据构成合金的各组元之间相互作用的不同,固态合金的相结构可分为固溶体和金属化合物两大类。

### 1. 固溶体

合金在固态下,组元间仍能互相溶解而形成的均匀相,称为固溶体。形成固溶体后,晶格保持不变的组元称溶剂,晶格消失的组元称溶质。固溶体的晶格类型与溶剂组元相同。

根据溶质原子在溶剂晶格中所占据位置的不同,可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两种。

#### (1) 置换固溶体

溶质原子代替溶剂原子占据溶剂晶格中的某些结点位置而形成的固溶体,称为置换固溶体,如图 1.2.13a 所示。

置换固溶体可分为有限固溶体和无限固溶体两类。

形成置换固溶体时,溶质原子在溶剂晶格中的溶解度主要取决于两者晶格类型、原子直径的差别和它们在周期表中的相互位置。

#### (2) 间隙固溶体

溶质原子分布于溶剂的晶格间隙中所形成的固溶体称为间隙固溶体,如图 1.2.13b 所示。

由于晶格间隙通常都很小,所以都是由原子半径较小的非金属元素(如碳、氮、氢、硼、氧等)溶入过渡族金属中,形成间隙固溶体。

#### (3) 固溶体的性能

由于溶质原子的溶入,固溶体发生晶格畸变,变形抗力增大,使金属的强度、硬度升高的现象称为固溶强化。它是强化金属材料的重要途径之一。

### 2. 金属化合物

金属化合物是合金组元间发生相互作用而生成的一种新相,其晶格类型和性能不同于其中任一组元,又因它具有一定的金属性质,故称金属化合物。如碳钢中的  $Fe_3C$ 、黄铜中的  $CuZn$  等。

金属化合物大致可分为正常价化合物、电子化合物及间隙化合物。

金属化合物具有复杂的晶体结构,熔点较高,硬度高,而脆性大。当它呈细小颗粒均匀分布在固溶体基体上时,将使合金的强度、硬度及耐磨性明显提高,这一现象称为弥散强化。因此金属化合物在合金中常作为强化相存在。它是许多合金钢、有色金属和硬质合金的重要组成相。

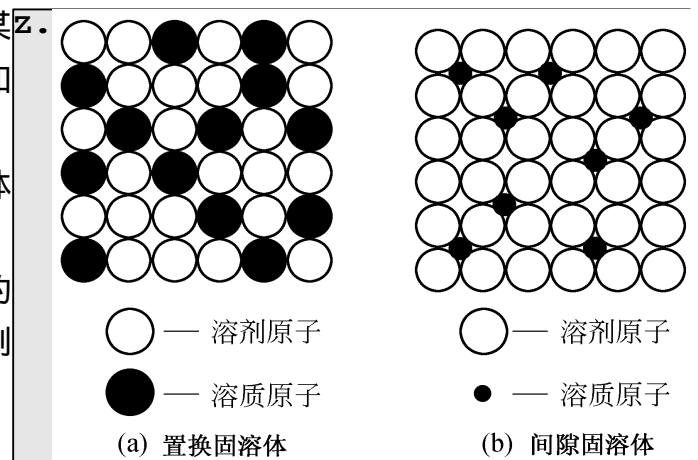


图 1.2.13 固溶体的两种类型

### 1.2.3 铁碳合金相图

#### 1. 纯铁

纯铁的熔点为  $1538^{\circ}C$ 。纯铁的冷却转变曲线如图 1.2.14 所示。液态纯铁在  $1538^{\circ}C$  时结

晶为具有体心立方晶格的  $\delta$ -Fe,继续冷却到  $1394^{\circ}\text{C}$ 由体心立方晶格的  $\delta$ -Fe 转变为面心立方晶格的  $\gamma$ -Fe 再冷却到  $912^{\circ}\text{C}$ 又由面心立方晶格的  $\gamma$ -Fe 转变为体心立方晶格的  $\alpha$ -Fe,先后发生两次晶格类型的转变。金属在固态下由于温度的改变而发生晶格类型转变的现象,称为同素异构转变。同素异构转变有热效应产生,故在冷却曲线上,可看到在  $1394^{\circ}\text{C}$ 和  $912^{\circ}\text{C}$ 处出现平台。

纯铁在  $770^{\circ}\text{C}$ 时发生磁性转变。在  $770^{\circ}\text{C}$ 以下的  $\alpha$ -Fe 呈铁磁性,在  $770^{\circ}\text{C}$ 以上  $\gamma$ -Fe 的铁磁性消失。 $770^{\circ}\text{C}$ 称为居里点,用  $A_2$  表示。

工业纯铁虽然塑性好,但强度低,所以很少用它制造机械零件。在工业上应用最广的是铁碳合金。

## 2. 铁碳合金基本相

铁碳合金在液态时铁和碳可以无限互溶,在固态时根据碳的质量分数不同,碳可以溶解在铁中形成固溶体,也可以与铁形成化合物,或者形成固溶体与化合物组成的机械混合物。因此,铁碳合金在固态下有以下几种基本相。

### (1) 铁素体

碳溶于  $\alpha$ -Fe 中形成的间隙固溶体称为铁素体,常用符号  $F$  表示。铁素体仍保持  $\alpha$ -Fe 的体心立方晶格,碳溶于  $\alpha$ -Fe 的晶格间隙中。由于体心立方晶格原子间的空隙较小,碳在  $\alpha$ -Fe 中的溶解度也较小,在  $727^{\circ}\text{C}$ 时,溶碳能力为最大  $w_c = 0.0218\%$ ,随着温度降低, $\alpha$ -Fe 中的碳的质量分数逐渐减少,在室温时降到  $0.0008\%$ 。

铁素体的力学性能与工业纯铁相似,即塑性、韧性较好,强度、硬度较低。图 1.2.15 为铁素体的显微组织。

### (2) 奥氏体

碳溶于  $\gamma$ -Fe 中形成的间隙固溶体称为奥氏体,用符号  $A$  表示。

奥氏体仍保持  $\gamma$ -Fe 的面心立方晶格。由于面心立方晶格间隙较大,故奥氏体的溶碳能力较强。在  $1148^{\circ}\text{C}$ 时溶碳能力为最大  $w_c = 2.11\%$  随着温度下降, $\gamma$ -Fe 中的碳的质量分数逐渐减少,在  $727^{\circ}\text{C}$ 时碳的质量分数为  $0.77\%$ 。奥氏体是一个硬度较低、塑性较高的相,适用于锻造。绝大多数钢热成形要加热到奥氏体状态进行加工。

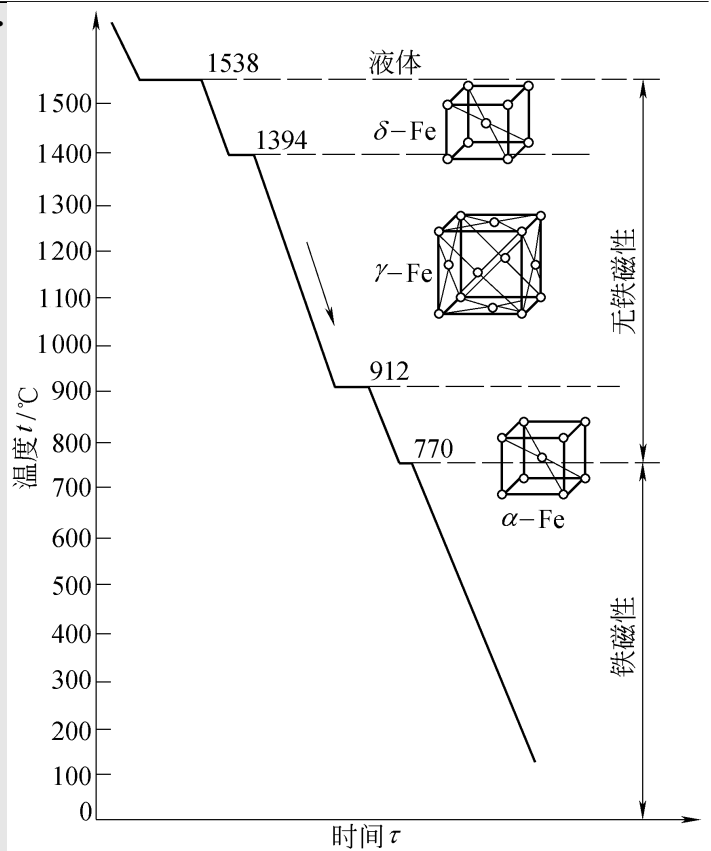


图 1.2.14 纯铁的冷却曲线

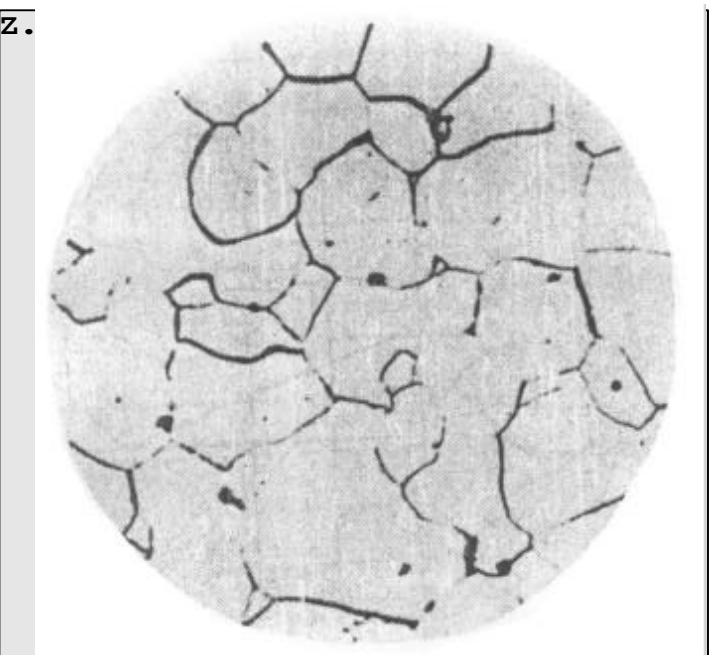


图 1.2.15 铁素体的显微组织



### (3) 渗碳体

铁与碳形成的金属化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$  称为渗碳体,用  $\text{Fe}_3\text{C}$  表示。渗碳体中的  $w_c = 6.69\%$ ,熔点为  $1227^\circ\text{C}$ ,是一种具有复杂晶体结构的间隙化合物。渗碳体的硬度很高,但塑性和韧性几乎等于零。渗碳体是钢中主要强化相,在铁碳合金中存在形式有:粒状、球状、网状和细片状。其形状、数量、大小及分布对钢的性能有很大的影响。

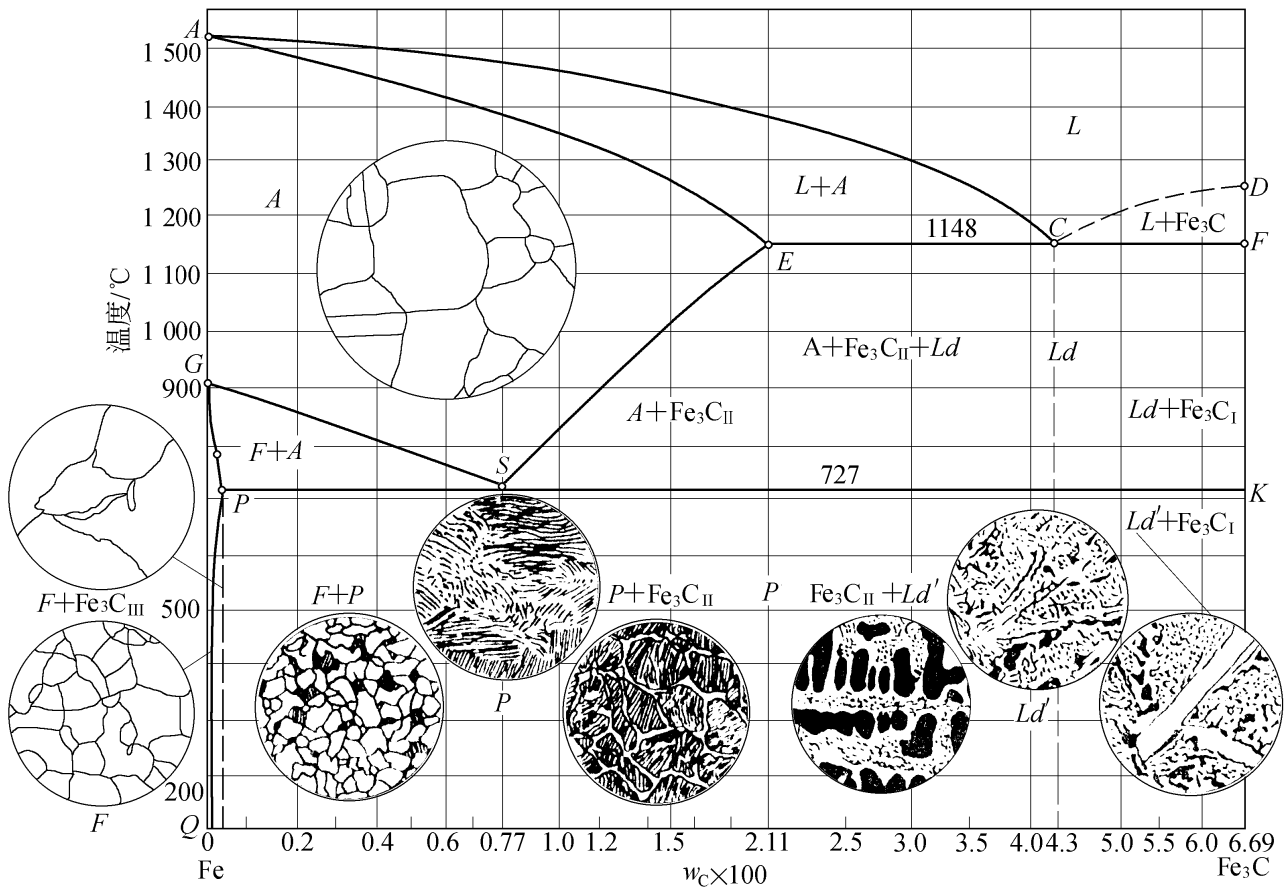


图 1.2.16 Fe -  $\text{Fe}_3\text{C}$  相图

渗碳体是一种亚稳定相,在一定的条件下会分解,形成石墨状的自由碳和铁  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$  (石墨) 这一过程对铸铁具有重要的意义。

#### 3. 铁碳合金相图分析

碳的质量分数  $> 6.69\%$  的铁碳合金脆性极大,没有使用价值。另外,  $\text{Fe}_3\text{C}$  中的碳的质量分数为  $6.69\%$ ,是一个稳定的金属化合物,可以作为一个组元,因此,研究的铁碳合金相图实际上是 Fe -  $\text{Fe}_3\text{C}$  相图,如图 1.2.16 所示。

##### (1) 铁碳合金相图分析

相图中的 AC 和 CD 线为液相线,AE 和 ECF 线为固相线。相图中有四个单相区:液相区 (L)、奥氏体区 (A)、铁素体区 (F)、渗碳体区 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )。

Fe -  $\text{Fe}_3\text{C}$  相图主要特征点及含义见表 1.2.1 所示。

相图由共晶、共析转变组成:

1)  $w_c = (2.11 \sim 6.69)\%$  的铁碳合金,缓冷至  $1148^\circ\text{C}$  (ECF 共晶线) 都发生共晶转变:

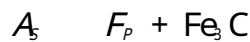


转变的产物是奥氏体和渗碳体的机械混合物,称为莱氏体(Ld)。

表 1.2.1 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图中特征点

符 号	温度/ °C	碳的含量 $w_c \times 100$	说 明
A	1 538	0	纯铁的熔点
C	1 148	4.3	共晶点
D	1 227	6.69	渗碳体的熔点
E	1 148	2.11	碳在 - Fe 中的最大溶解度
F	1 148	6.69	渗碳体的成分
G	912	0	- Fe、 - Fe 同素异构转变点
K	727	6.69	渗碳体的成分
P	727	0.021 8	碳在 - Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点
Q	室温	0.000 8	碳在 - Fe 中的溶解度

2)  $w_c > 0.021 8\%$  的铁碳合金,缓冷至 727 °C (PSK 共析线) 都发生共析转变:



转变的产物是铁素体和渗碳体的机械混合物,称为珠光体(P)。共析温度以  $A_1$  表示。

铁碳合金中还有三条重要的特性线:

1) ES 线 它是碳在奥氏体中溶解度曲线。在 1 148 °C 时,奥氏体中碳的质量分数为 2.11%,而在 727 °C 时,奥氏体中碳的质量分数为 0.77%。故凡是碳的质量分数  $> 0.77\%$  的铁碳合金自 1 148 °C 冷至 727 °C 时,都会从奥氏体中沿晶界析出渗碳体,称为二次渗碳体( $Fe_3C_{II}$ )。ES 线又称  $A_{cm}$  线。

2) PQ 线 它是碳在铁素体中的溶解度曲线。在 727 °C 时,铁素体中的碳的质量分数为 0.021 8%,而在室温时,铁素体中碳的质量分数为 0.000 8%。故一般铁碳合金由 727 °C 冷至室温时,将由铁素体中析出渗碳体,称为三次渗碳体( $Fe_3C_{III}$ )。在碳的质量分数较高的合金中,因其数量极少可忽略不计。

3) GS 线 它是合金冷却时自奥氏体中开始析出铁素体的析出线,通常称为  $A_3$  线。

## (2) 铁碳合金的分类

按其碳的质量分数和显微组织的不同,铁碳合金相图中的合金可分成工业纯铁、钢和白口铸铁三大类。

1) 工业纯铁  $w_c < 0.021 8\%$ 。

2) 钢  $0.021 8\% < w_c < 2.11\%$ 。钢又分为:

a. 亚共析钢  $0.021 8\% < w_c < 0.77\%$ ;

b. 共析钢:  $w_c = 0.77\%$ ;

c. 过共析钢  $0.77\% < w_c < 2.11\%$ 。

3) 白口铸铁  $2.11\% < w_c < 6.69\%$ 。白口铸铁又分为:

- a. 亚共晶白口铸铁  $2.11\% < w_c < 4.3\%$  ;
- b. 共晶白口铸铁 :  $w_c = 4.3\%$  ;
- c. 过共晶白口铸铁 :  $4.3\% < w_c < 6.69\%$ 。

#### 4. 典型铁碳合金的结晶过程及其组织

下面以图 1.2.17、图 1.2.21 所示的几种典型的铁碳合金为例 ,分析其平衡结晶过程。

##### (1) 共析钢 ( $w_c = 0.77\%$ )

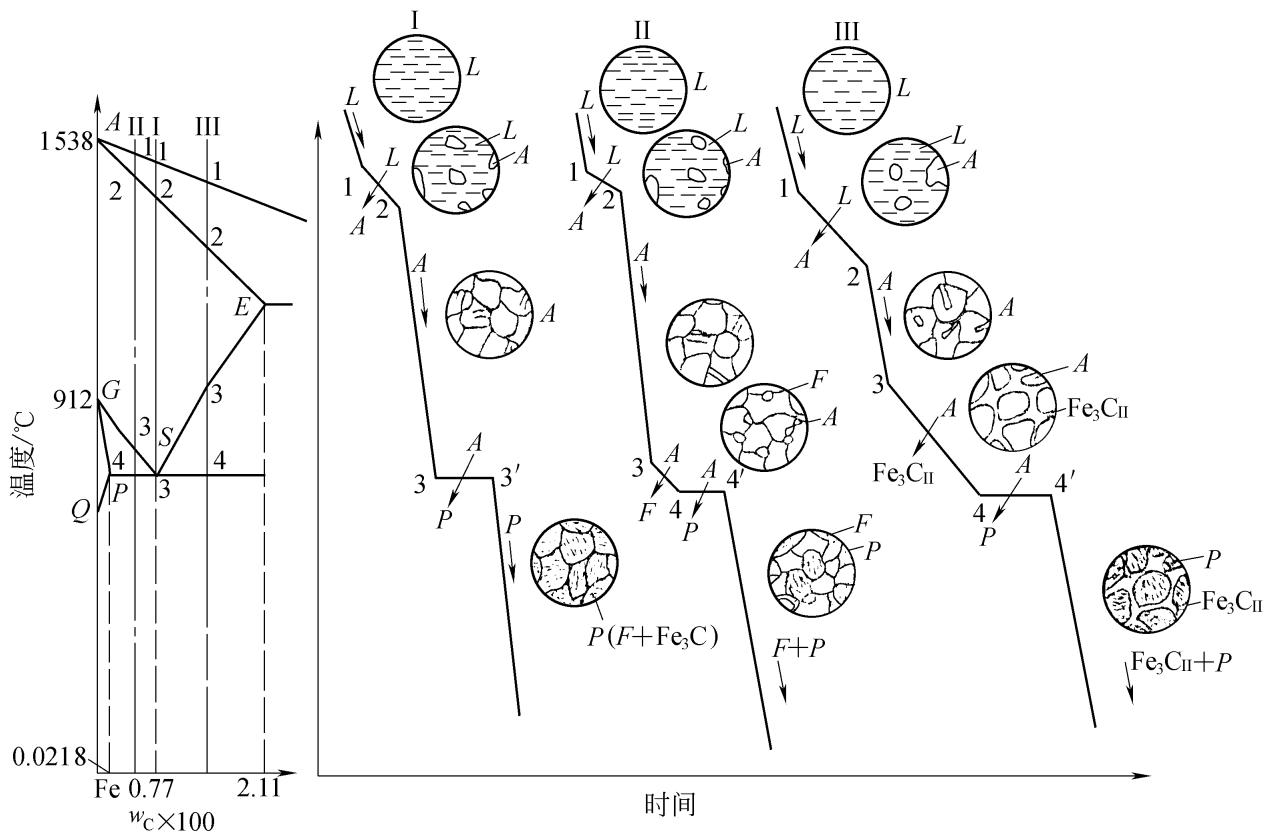


图 1.2.17 钢部分的典型铁碳合金的结晶过程分析示意图

图 1.2.17 中合金 I, 1 点温度以上为  $L$ , 在 1~2 点温度之间从  $L$  中不断结晶出  $A$ , 缓冷至 2 点以下全部为  $A$ , 2~3 点之间为  $A$  冷却, 缓冷至 3 点时  $A$  发生共析转变 ( $A_s \rightarrow P$ ) 生成  $P$ 。该合金的室温组织为  $P$ , 其冷却曲线和平衡结晶过程如图 1.2.17 所示, 显微组织如图 1.2.18 所示。

##### (2) 亚共析钢 ( $0.0218\% < w_c < 0.77\%$ )

图 1.2.17 中合金 II, 1 点温度以上为  $L$ , 在 1~2 点温度之间从  $L$  中不断结晶出  $A$ , 冷至 2 点以下全部为  $A$ , 2~3 点之间为  $A$  冷却, 3~4 点之间  $A$  不断转变成  $F$ , 缓冷至 4 点时, 剩余的  $A$  成分为  $w_c = 0.77\%$ , 发生共析反应 ( $A_s \rightarrow P$ ) 生成  $P$ 。该合金的室温平衡组织为  $F + P$ , 其冷却曲线和平衡结晶过程如图 1.2.17 所示, 显微组织如图 1.2.19 所示。

##### (3) 过共析钢 ( $0.77\% < w_c < 2.11\%$ )

图 1.2.17 中合金 III, 1 点温度以上为  $L$ , 在 1~2 点温度间从  $L$  中不断结晶出  $A$ , 2~3 点为  $A$  冷却, 3~4 点间从  $A$  中不断析出沿  $A$  晶界分布、呈网状的  $Fe_3C_{II}$ , 缓冷至 4 时, 剩余的  $A$  成分为  $w_c = 0.77\%$ , 发生共析转变 ( $A_s \rightarrow P$ ) 生成  $P$ 。该合金室温平衡组织为  $P + Fe_3C_{II}$ , 其冷却曲线及



图 1.2.18 共析钢的显微组织

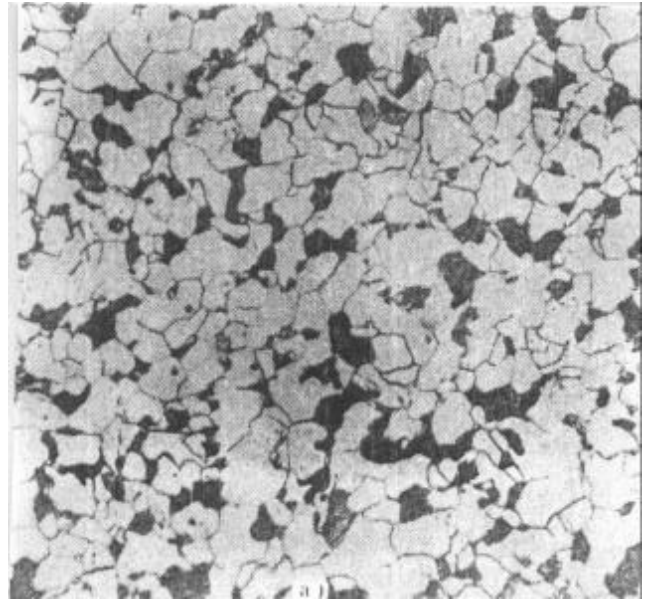


图 1.2.19 亚共析钢的显微组织

平衡结晶过程如图 1.2.17 所示,显微组织如图 1.2.20 所示。

(4) 共晶白口铸铁 ( $w_c = 4.3\%$ )

图 1.2.21 中合金 1 点温度以上为  $L$ , 缓冷至 1 点温度 ( $1148^\circ\text{C}$ ) 时,  $L$  发生共晶转变 ( $L \rightarrow A_\text{I} + \text{Fe}_3\text{C}$ ) 生成莱氏体 ( $L_d$ ), 在 1~2 点之间时,  $L_d$  中  $A$  的碳的质量分数沿  $ES$  线逐渐减少而不断析出  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 。当缓冷至 2 点时, 共晶  $A$  成分降为  $w_c = 0.77\%$ , 发生共析转变 ( $A_\text{I} \rightarrow P$ ) 生成  $P$ 。该合金的室温平衡组织是由  $P$  和  $\text{Fe}_3\text{C}$  组成的共晶体加少量  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ , 称为低温莱氏体或变态莱氏体 ( $L_d$ )。其冷却曲线及平衡结晶过程如图 1.2.21 所示, 显微组织如图 1.2.22 所示。

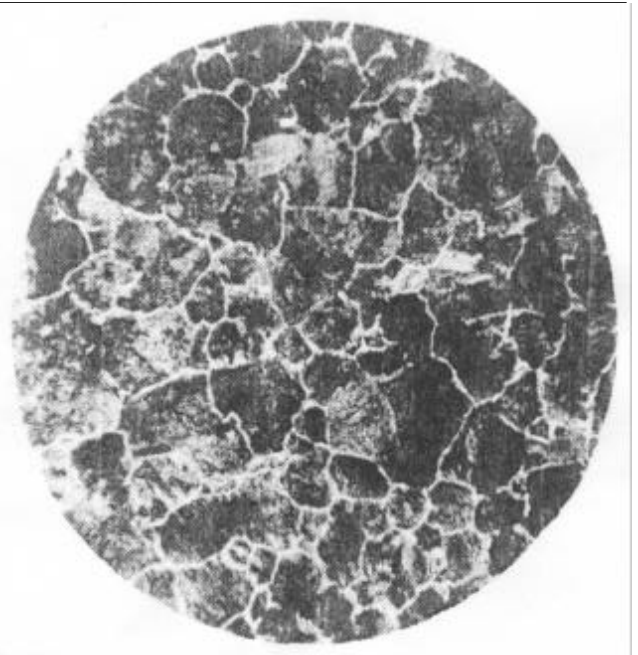


图 1.2.20 过共析钢的显微组织

(5) 亚共晶白口铸铁 ( $2.11\% < w_c < 4.3\%$ )

图 1.2.21 中合金 1 点温度以上为  $L$ , 在 1~2 点间不断自  $L$  中结晶出  $A$ , 温度降至 2 点时, 剩余  $L$  相的成分达到共晶成分, 发生共晶转变 ( $L \rightarrow A_\text{I} + \text{Fe}_3\text{C}$ ) 形成莱氏体, 冷却 2 点以下, 自初晶  $A$  和共晶  $A$  中析出  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ , 所以  $A$  中的碳的质量分数沿  $ES$  线降低。当温度达到 3 点时,  $A$  成分为  $w_c = 0.77\%$ , 发生共析转变 ( $A_\text{I} \rightarrow P$ ) 生成  $P$ 。该合金的室温平衡组织为  $P + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + L_d$ , 其冷却曲线及平衡结晶过程如图 1.2.21 所示。显微组织如图 1.2.23 所示。

(6) 过共晶白口铸铁 ( $4.3\% < w_c < 6.69\%$ )

图 1.2.21 中合金 1 点温度以上为  $L$ , 在 1~2 点间不断自  $L$  中结晶出  $\text{Fe}_3\text{C}$ , 温度降至 2 点时, 剩余  $L$  相的成分达到共晶成分, 发生共晶转变 ( $L \rightarrow A_\text{I} + \text{Fe}_3\text{C}$ ) 生成  $L_d$  在 2~3 点中, 共晶  $A$

中析出  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  ,到3点时  $A$  成分为  $w_c = 0.77\%$  发生共析转变 ( $A \rightarrow P$ ) 生成  $P$  ,此合金的室温平衡组织为  $\text{Fe}_3\text{C} + Ld$  。其冷却曲线及平衡结晶过程如图 1.2.19 所示 ,其显微组织如图 1.2.22 所示。

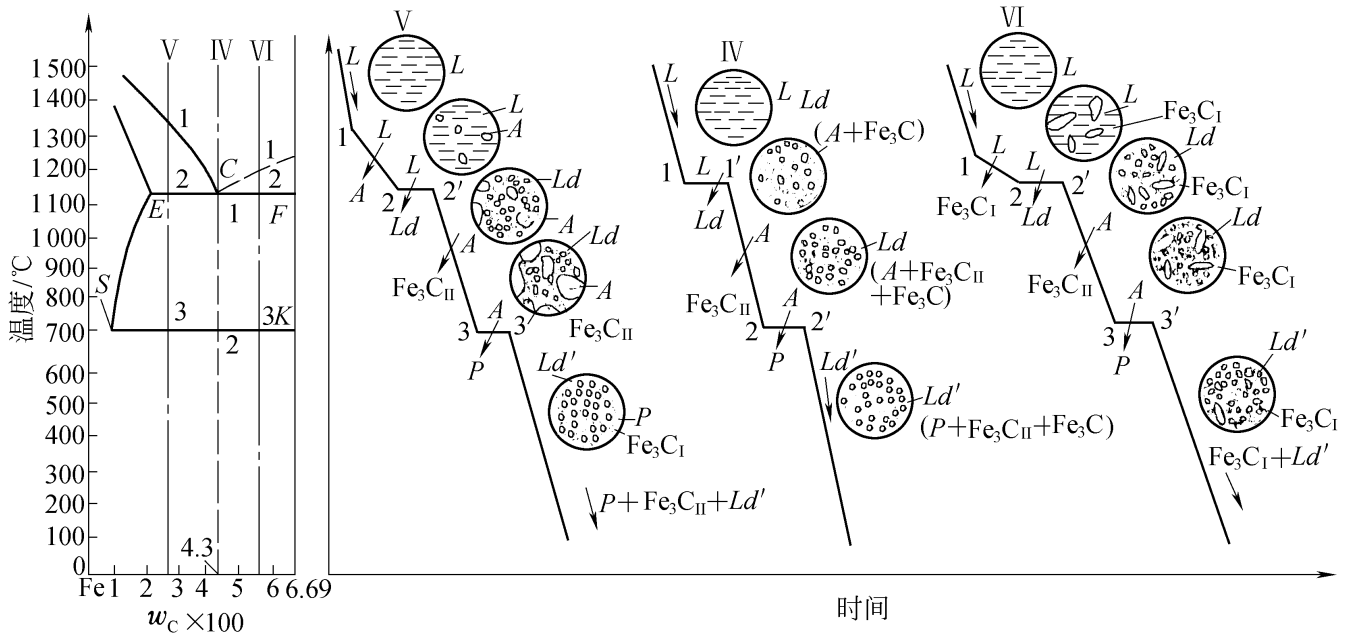


图 1.2.21 白口铸铁部分的典型铁碳合金的结晶过程分析示意图

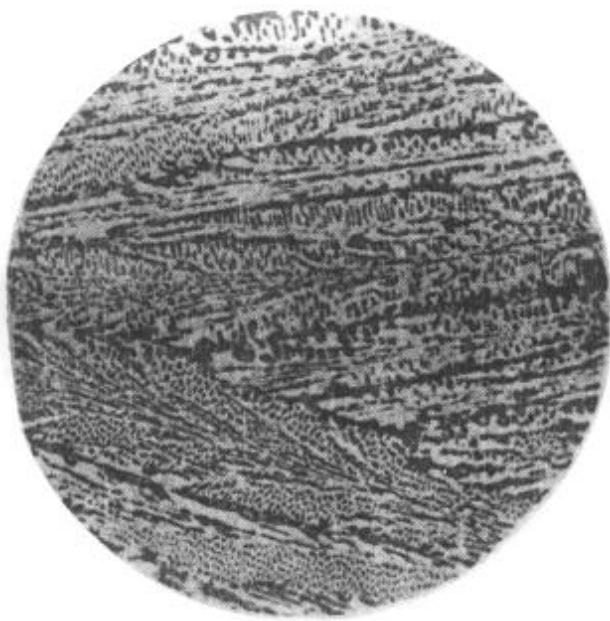


图 1.2.22 共晶白口铸铁显微组织

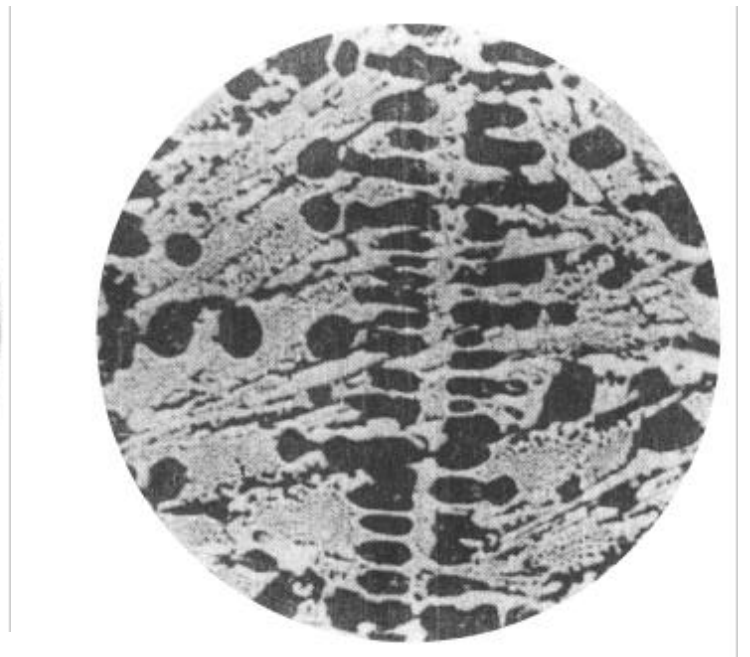


图 1.2.23 亚共晶白口铸铁显微组织

## 5. 碳的质量分数对铁碳合金组织、性能的影响

### (1) 碳的质量分数对平衡组织的影响

由  $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$  相图可知 ,随着碳的质量分数的增加 ,铁碳合金显微组织发生如下变化 :

$F$     $F + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$     $F + P$     $P$     $P + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$     $P + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + Ld$     $Ld$     $Ld + \text{Fe}_3\text{C}$

从图中看出 ,当碳的质量分数增加时 ,不仅组织中  $\text{Fe}_3\text{C}$  相对量增加 ,而且  $\text{Fe}_3\text{C}$  大小、形态和分布也随之发生变化 ,即由分布在  $F$  晶界上 (如  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ ) ,变为分布在  $F$  的基体内 (如  $P$ ) ,进而分

布在原  $A$  的晶界上(如  $Fe_3C_{II}$ ) ,最后形成  $Ld$  时 , $Fe_3C$  已作为基体出现 ,即碳的质量分数不同的铁碳合金具有不同的组织 因此它们具有不同的性能。

### (2) 碳的质量分数对力学性能的影响

碳的质量分数对钢的力学性能影响如图 1.2.25 所示。

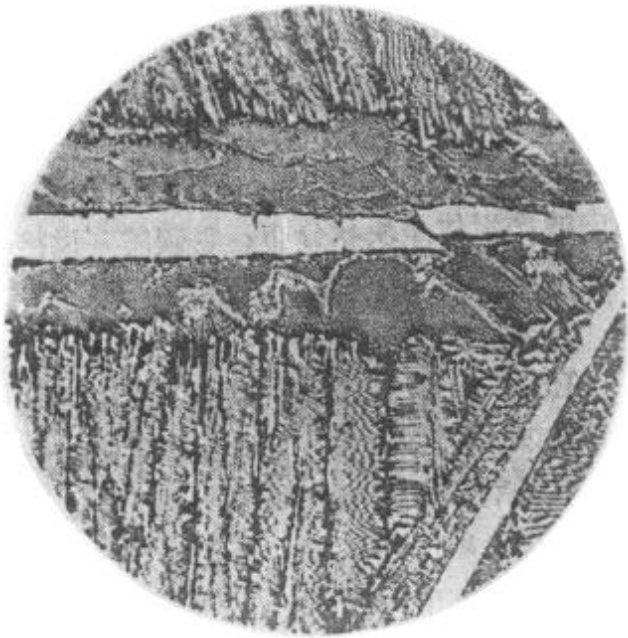


图 1.2.24 过共晶白口铸铁显微组织

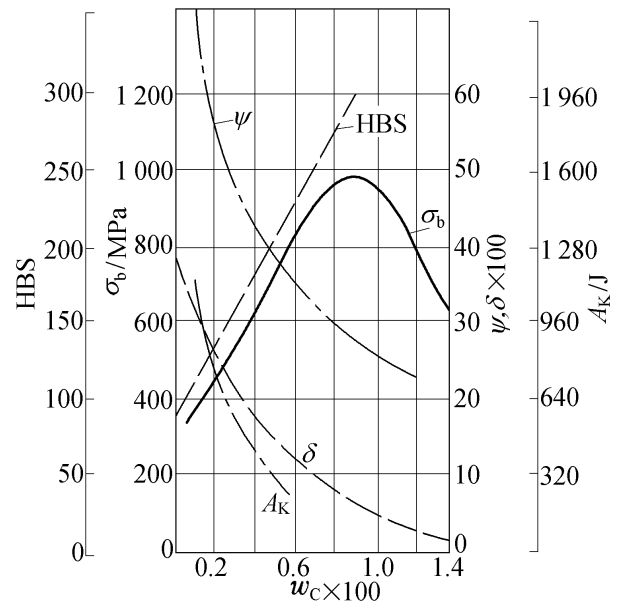


图 1.2.25 碳的质量分数对钢的力学性能影响

由于硬度对组织形态不敏感 ,所以钢中碳的质量分数增加 ,高硬度的  $Fe_3C$  增加 ,低硬度的  $F$  减少 ,故钢的硬度呈直线增加 ,而塑性、韧性不断下降。又由于强度对组织形态很敏感。在亚共析钢中 ,随着碳的质量分数增加 ,强度高的  $P$  增加 ,强度低的  $F$  减少 ,因此强度随碳的质量分数的增加而升高。当碳的质量分数为 0.77% 时 ,钢的组织全部为  $P$  , $P$  的组织越细密 ,则强度越高。但当碳的质量分数为  $0.77\% < w_c < 0.9\%$  时 ,由于强度很低的、少量的、一般未连成网状的  $Fe_3C_{II}$  沿晶界出现 ,所以合金的强度增加变慢 ;当  $w_c > 0.9\%$  时 , $Fe_3C_{II}$  数量增加且呈网状分布在晶界处 ,导致钢的强度明显下降。

### (3) 碳的质量分数对工艺性能的影响

#### 1) 切削加工性

金属的切削加工性能是指切削加工工件的难易程度。低碳钢中  $F$  较多 ,塑性好 ,切削加工时产生切削热大 ,易粘刀 ,不易断屑 ,表面粗糙度差 ,故切削加工性差。高碳钢中  $Fe_3C$  多 ,刀具磨损严重 ,故切削加工性也差。中碳钢中  $F$  和  $Fe_3C$  的比例适当 ,切削加工性较好。在高碳钢  $Fe_3C$  呈球状时 ,可改善切削加工性。

#### 2) 可锻性

金属可锻性是指金属压力加工时 ,能改变形状而不产生裂纹的性能。当钢加热到高温得到单相  $A$  组织时 ,可锻性好。低碳钢中铁素体多可锻性好 ,随着碳的质量分数增加金属可锻性下降。白口铸铁无论在高温或低温 ,因组织是以硬而脆的  $Fe_3C$  为基体 ,所以不能锻造。

#### 3) 铸造性能

合金的铸造性能取决于相图中液相线与固相线的水平距离和垂直距离。距离越大,合金的铸造性能越差。低碳钢的液相线与固相线距离很小,则有较好的铸造性能,但其液相线温度较高,使钢液过热度较小,流动性较差。随着碳的质量分数增加,钢的结晶温度间隔增大,铸造性能变差。共晶成分附近的铸铁,不仅液相线与固相线的距离最小,而且液相线温度也最低,其流动性好,铸造性能好。

#### 4) 可焊性

随着钢中的碳的质量分数增加,钢的塑性下降,可焊性下降。所以,为了保证获得优质焊接接头,应优先选用低碳钢(碳的质量分数  $< 0.25\%$  的钢)。

### 6. 铁碳合金相图的应用

#### (1) 选材料方面的应用

根据铁碳合金成分、组织、性能之间的变化规律,可以根据零件的服役的条件来选择材料。

如要求有良好的焊接性能和冲压性能的机件,应选用组织中铁素体较多、塑性好的低碳钢( $w_c < 0.25\%$ )制造,如冲压件、桥梁、船舶和各种建筑结构;对于一些要求具有综合力学性能(强度、硬度和塑性、韧性都较高)的机械零件,如齿轮、传动轴等应选用中碳钢( $w_c = 0.25\% \sim 0.6\%$ )制造;高碳钢( $w_c > 0.6\%$ )主要用来制造弹性零件及要求高硬度、高耐磨性的工具、磨具、量具等;对于形状复杂的箱体、机座等可选用铸造性能好的铸铁来制造。

#### (2) 制定热加工工艺方面的应用

在铸造生产方面,根据 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图可以确定铸钢和铸铁的浇注温度。浇注温度一般在液相以上 150 °C 左右。另外,从相图中还可看出接近共晶成分的铁碳合金,熔点低、结晶温度间隔小,因此它们的流动性好,分散缩孔少,可得到组织致密的铸件。所以,铸造生产中,接近共晶成分的铸铁得到较广泛的应用。

在锻造生产方面,钢处于单相奥氏体时,塑性好,变形抗力小,便于锻造成型。因此,钢材的热轧、锻造时要将钢加热到单相奥氏体区。一般碳钢的始锻温度为 1 250 ~ 1 150 °C,而终锻温度在 800 °C 左右。

在焊接方面,可根据 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图分析低碳钢焊接接头的组织变化情况。

各种热处理方法的加热温度的选择也需参考 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图,这将在后续章节详细讨论。

必须指出,铁碳合金相图不能说明快速加热和冷却时铁碳合金组织的变化规律。相图中各相的相变温度都是在所谓的平衡(即非常缓慢地加热和冷却)条件下得到的。另外,通常使用的铁碳合金中,除含铁、碳两元素外,尚有其他多种杂质或合金元素,这些元素对相图将有影响,应予以考虑。

## 1.2.4 碳素钢、铸铁

### 1. 碳素钢

#### (1) 碳素钢分类

按碳的质量分数可分为低碳钢( $w_c < 0.25\%$ )、中碳钢( $w_c = 0.25\% \sim 0.60\%$ )、高碳钢( $w_c > 0.60\%$ )。按钢的冶金质量和钢中有害杂质元素硫、磷的质量分数分普通质量钢( $w_s = 0.035\% \sim 0.050\%$ ,  $w_p = 0.035\% \sim 0.045\%$ );优质钢( $w_s, w_p$  均  $< 0.035\%$ );高级优质钢( $w_s = 0.020\% \sim$

0.030% , $w_{\text{P}} = 0.025\% \sim 0.030\%$ )。按用途分为结构钢、工具钢。

## (2) 钢的编号

1) 碳素结构钢 碳素结构钢牌号表示方法由代表屈服点屈字的汉语拼音字母、屈服极限数值、质量等级符号及脱氧方法符号四个部分按顺序组成。牌号中 Q 表示“屈” ;A、B、C、D 表示质量等级 ,它反映了碳素钢结构中有害杂质 (S、P) 质量分数的多少 ,C、D 级硫、磷质量分数最低、质量好 ,可作重要焊接结构件。例如 Q235AF ,即表示屈服点为 235 MPa A 等级质量的沸腾钢。F、b、Z、TZ 依次表示沸腾钢、半镇静钢、镇静钢、特殊镇静钢 ,一般情况下符号 Z 与 TZ 在牌号表示中可省略。

2) 优质碳素结构钢 其牌号用两位数字表示 ,两位数字表示钢中平均碳质量分数的万倍。例如 45 钢 ,表示平均  $w_{\text{C}} = 0.45\%$  ;08 钢表示平均  $w_{\text{C}} = 0.08\%$ 。优质碳素结构钢按锰的质量分数不同 ,分为普通锰钢 ( $w_{\text{Mn}} = 0.25\% \sim 0.80\%$ ) 与较高锰的钢 ( $w_{\text{Mn}} = 0.70\% \sim 1.20\%$ ) 两组。较高锰的优质碳素结构钢牌号数字后加“Mn” ,如 45Mn。

3) 碳素工具钢 其牌号冠以“T” (“T” 为“碳” 字的汉语拼音首位字母) ,后面的数字表示平均碳的质量分数的千倍。碳素工具钢分优质和高级优质两类。若为高级优质钢 ,则在数字后面加“A” 字。例如 T8A 钢 ,表示平均  $w_{\text{C}} = 0.8\%$  的高级优质碳素工具钢。对含较高锰的 ( $w_{\text{Mn}} = 0.40\% \sim 0.60\%$ ) 的碳素工具钢 ,则在数字后加“Mn” ,如 T8Mn、T8MnA 等。

4) 铸造碳钢 其牌号用“ZG” 代表铸钢二字汉语拼音首位字母 ,后面第一组数字为屈服强度(单位 :MPa) ,第二组数字为抗拉强度(单位 :MPa)。例如 ZG200 - 400 ,表示屈服强度  $\sigma_{0.2}$  (或  $\sigma_s$ ) 200 MPa ,抗拉强度  $\sigma_b$  400 MPa 的铸造碳钢件。

## (3) 碳素结构钢

碳素结构钢的硫、磷含量较多 ,但由于冶炼容易 ,工艺性好 ,价格便宜 ,在力学性能上一般能满足普通机械零件及工程结构件的要求 ,因此用量很大 ,约占钢材总量的 70%。表 1.2.2 为碳素结构钢的牌号、化学成分、力学性能及应用。

碳素结构钢一般以热轧空冷状态供应。其中牌号 Q195 与 Q275 碳素结构钢是不分质量等级的 ,出厂时既保证力学性能 ,又保证化学成分。而 Q215、Q235、Q255 牌号的碳素结构钢 ,当质量等级为“A”、“B” 级时 ,只保证力学性能 ,化学成分可根据需方要求作适当调整 ;而 Q235 的“C”、“D” 级 ,则力学性能和化学成分都应保证。D 级 ( $w_{\text{C}} = 0.035\%$  , $w_{\text{P}} = 0.035\%$ ) 质量等级最高 ,达到了碳素结构钢的优质级。

Q195 钢的碳的质量分数很低 ,塑性好。常用作螺钉、螺母及各种薄板 ,也可用来代替优质碳素结构钢 08 或 10 钢 ,制造冲压件、焊接结构件。

Q275 钢强度较高 ,可代替 30 钢、40 钢用于制造较重要的某些零件 ,以降低原材料成本。

## (4) 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢 S、P 含量较低 ,非金属夹杂物也较少 ,因此力学性能比碳素结构钢优良 ,被广泛用于制造机械产品中较重要的结构钢零件 ,为了充分发挥其性能潜力 ,一般都是在热处理后使用。

优质碳素结构钢的牌号、化学成分、力学性能和用途见表 1.2.3。

08F、10F 钢的碳的质量分数低 ,塑性好 ,焊接性能好 ,主要用于制造冲压件和焊接件。



15、20、25 钢属于渗碳钢 ,这类钢强度较低 ,但塑性和韧性较高 ,焊接性能及冷冲压性能较好。可以制造各种受力不大 ,但要求高韧性的零件 ;此外还可用作冷冲压件和焊接件。渗碳钢经渗碳、淬火 + 低温回火后 ,表面硬度可达 60 HRC 以上 ,耐磨性好 ,而心部具有一定的强度和韧性 ,可用来制作要求表面耐磨并能承受冲击载荷的零件。

30、35、40、45、50、55 钢属于调质钢 ,经淬火 + 高温回火后 ,具有良好的综合力学性能 ,主要用于要求强度、塑性和韧性都较高的机械零件 ,如轴类零件 ,这类钢在机械制造中应用最广泛 ,其中以 45 钢更为突出。

60、65、70 钢属于弹簧钢 ,经淬火 + 中温回火后可获得高的弹性极限、高的屈强比 ,主要用于制造弹簧等弹性零件及耐磨零件。

优质碳素结构钢中较高锰含量的一组牌号(15 Mn ~ 70 Mn) ,其性能和用途与普通锰的一组对应牌号相同 ,但其淬透性略高。

#### (5) 碳素工具钢

这类钢的碳的质量分数为  $w_c = 0.65\% \sim 1.35\%$  ,分优质碳素工具钢与高级优质碳素工具钢两类。牌号后加“A”的属高级优质( $w_s = 0.020\%$  , $w_p = 0.030\%$  ;对平炉冶炼的钢 , $w_s = 0.025\%$ )。

这类钢的牌号、化学成分及用途见表 1.2.4。

表 1.2.4 碳素工具钢的牌号、化学成分及用途

牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$			退火状态 HBS 不大于	试样淬火 HRC 不小于	用途举例
	C	Si	Mn			
T7 T7A	0.65 ~ 0.74	0.35	0.40	187	800 ~ 820 °C 水 62	承受冲击 ,韧性较好、硬度适当的工具 ,如扁铲、手钳、大锤、旋具、木工工具
T8 T8A	0.75 ~ 0.84	0.35	0.40	187	780 ~ 800 °C 水 62	承受冲击 ,要求较高硬度的工具 ,如冲头、压缩空气工具、木工工具
T8Mn T8MnA	0.80 ~ 0.90	0.35	0.40 ~ 0.60	187	780 ~ 800 °C 水 62	同 T8 ,但淬透性较大 ,可制作断面较大的工具
T9 T9A	0.85 ~ 0.94	0.35	0.40	192	760 ~ 780 °C 水 62	韧性中等 ,硬度高的工具 ,如冲头、木工工具、凿岩工具
T10 T10A	0.95 ~ 1.04	0.35	0.40	197	760 ~ 780 °C 水 62	不受剧烈冲击、高硬度耐磨的工具 ,如车刀、刨刀、冲头、丝锥、钻头、手锯条、小型冷冲模

续表

牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$			退火状态 HBS 不大于	试样淬火 HRC 不小于	用途举例
	C	Si	Mn			
T11 T11A	1.05 ~ 1.14	0.35	0.40	207	760 ~ 780 °C 水 62	不受剧烈冲击,高硬度耐磨的工具,如车刀、刨刀、冲头、丝锥、钻头、手锯条
T12 T12A	1.15 ~ 1.24	0.35	0.40	207	760 ~ 780 °C 水 62	不受冲击,要求高硬度高耐磨的工具,如锉刀、刮刀、精车刀、丝锥、量具
T13 T13A	1.25 ~ 1.35	0.35	0.40	217	760 ~ 780 °C 水 62	同 T12,要求更耐磨的工具,如刮刀、剃刀

淬火后硬度不是指用途举例中各种工具的硬度,而是指碳素工具钢材料在淬火后的最低硬度。

此类钢在机械加工前一般进行球化退火,组织为铁素体基体 + 细小均匀分布的粒状渗碳体,硬度 217 HBS。作为刃具,最终热处理为淬火 + 低温回火,组织为回火马氏体 + 粒状渗碳体 + 少量残余奥氏体。其硬度可达 60 ~ 65 HRC,耐磨性和加工性都较好,价格又便宜,生产上得到广泛应用。

碳素工具钢的缺点是红硬性差,当刃部温度高于 250 °C 时,其硬度和耐磨性会显著降低。此外,钢的淬透性也低,并容易产生淬火变形和开裂。因此,碳素工具钢大多用于制造刃部受热程度较低的手用工具和低速、小进给量的机用工具,亦可制作尺寸较小的模具和量具。

### (6) 铸造碳钢

铸造碳钢一般用于制造形状复杂、力学性能要求比铸铁高的零件,例如水压机横梁、轧钢机机架、重载大齿轮等,这种机件,用锻造方法难以生产,用铸铁又无法满足性能要求,只能用碳钢采用铸造方法生产。

铸造碳钢中碳的质量分数一般为  $w_c = 0.15\% \sim 0.60\%$ 。碳的质量分数过高则塑性差,易产生裂纹。一般工程用铸造碳钢件的牌号、成分和力学性能见表 1.2.5。

表 1.2.5 一般工程用铸造碳钢件的牌号、成分和力学性能

牌 号	主要化学成分 $w_{Me} \times 100$					室温力学性能				
	C	Si	Mn	P	S	$\sigma_s$ 或 $\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ × 100	$\delta_{10}$ × 100	$A_{kv}$ /J
ZG200 ~ 400	0.20	0.50	0.80	0.04		200	400	25	40	47
ZG230 ~ 450	0.30	0.50	0.90	0.04		230	450	22	32	35
ZG270 ~ 500	0.40	0.50	0.90	0.04		270	500	18	25	27
ZG310 ~ 570	0.50	0.60	0.90	0.04		310	570	15	21	24
ZG340 ~ 640	0.60	0.60	0.90	0.04		340	640	10	18	16

铸造碳钢的特性及用途举例：

1) ZG200 - 400 有良好的塑性、韧性和焊接性能。用于制作承受载荷不大,要求韧性的各种机械零件,如机座、变速箱壳等。

2) ZG230 - 450 有一定的强度和较好的塑性、韧性,焊接性能良好,切削加工性尚可。用于制作承受载荷不大,要求韧性的各种机械零件,如砧座、外壳、轴承盖、底板、阀体、犁柱等。

3) ZG270 - 500 有较高的强度和较好的塑性,铸造性能良好,焊接性能尚好,切削加工性佳,用途广泛,用于制作轧钢机机架、轴承座、连杆、箱体、缸体等。

4) ZG310 - 570 强度和切削加工性良好,塑性和韧性较低,用于制作承受载荷较高的各种机械零件,如大齿轮、缸体、制动轮、辊子等。

5) ZG340 - 640 有高的强度、硬度和耐磨性,切削加工性中等,焊接性能较差,流动性好,裂纹敏感性较大,可用以制作齿轮、棘轮等。

## 2. 铸铁

铸铁是  $w_C = 2.11\%$  的铁碳合金,合金中含有较多的硅、锰等元素,使碳在铸铁中大多数以石墨形式存在。铸铁具有优良的铸造性能、切削加工性、减摩性与消振性和低的缺口敏感性,而且熔炼铸铁的工艺与设备简单、成本低。目前,铸铁仍然是工业生产中最重要工程材料之一。

根据铸铁中石墨的形态铸铁可分为灰口铸铁(石墨以片状形式存在)、球墨铸铁(石墨以球状形式存在)、蠕墨铸铁(石墨以蠕虫状形式存在)、可锻铸铁(石墨以团絮状形式存在)。

### (1) 灰口铸铁

灰口铸铁化学成分的一般范围是： $w_C = 2.5\% \sim 4.0\%$ ， $w_{Si} = 1.0\% \sim 2.2\%$ ， $w_{Mn} = 0.5\% \sim 1.3\%$ ， $w_S = 0.15\%$ ， $w_P = 0.3\%$ 。

灰口铸铁组织由金属基体和片状石墨两部分组成的。其基体可分为珠光体、珠光体 + 铁素体、铁素体三种。

1) 灰口铸铁的性能 灰口铸铁的力学性能主要取决于基体组织和石墨存在形式,灰口铸铁中含有比钢更多的硅、锰等元素,这些元素可溶于铁素体而使基体强化,因此,其基体的强度与硬度不低于相应的钢。但由于片状石墨的强度、塑性、韧性几乎为零,所以铸铁的抗拉强度、塑性、韧性比钢低。石墨片的数量越多,尺寸越粗大,分布越不均匀,铸铁的抗拉强度和塑性就越低。灰口铸铁的抗压强度、硬度与耐磨性,由于石墨存在对其影响不大,故灰口铸铁的抗压强度较好。为了提高灰铸铁的力学性能,生产上常采用孕育处理。它是在浇注前往铁液中加入少量孕育剂(硅铁或硅钙合金),使铁液在凝固时产生大量的人工晶核,从而获得细晶粒珠光体基体加上细小均匀分布的片状石墨的组织。经孕育处理后的铸铁称为孕育铸铁。

孕育铸铁具有较高的强度和硬度,具有断面缺口敏感性小的特点,因此孕育铸铁常作为力学性能要求较高,且断面尺寸变化大的大型铸件,如机床床身等。

灰口铸铁具有良好的铸造性能、切削加工性、减摩性和消振性,铸铁对缺口的敏感性较低。

2) 灰铸铁的牌号和应用 灰铸铁的牌号、力学性能和应用举例见表 1.2.6。其中 HT 表示“灰铁”二字的汉语拼音的字首,后面三位数字表示最小抗拉强度值。

### (2) 球墨铸铁

球墨铸铁的化学成分与灰铸铁相比,其特点是碳、硅的质量分数高,而锰的质量分数较低,对硫和磷的限制较严,并含有一定量的稀土镁。一般  $w_C = 3.6\% \sim 4.0\%$ ， $w_{Si} = 2.0\% \sim 3.2\%$ 。锰

有去硫、脱氧的作用,并可稳定和细化珠光体。珠光体基体  $w_{Mn} = 0.5\% \sim 0.7\%$ ,铁素体基体  $w_{Mn} < 0.6\%$ 。硫、磷都是有害元素,一般  $w_S < 0.07\%$ , $w_P = 0.1\%$ 。

球墨铸铁的组织是在钢的基体上分布着球状石墨。球墨铸铁在铸态下,其基体是有不同数量铁素体、珠光体、甚至有渗碳体同时存在的混合组织,故生产中需经不同热处理以获得不同的组织。生产中常有铁素体球墨铸铁、珠光体+铁素体球墨铸铁、珠光体球墨铸铁和下贝氏体球墨铸铁。

1) 球墨铸铁的性能 由于球墨铸铁中石墨呈球状,对金属基体的割裂作用较小,使球墨铸铁的抗拉强度、塑性和韧性、疲劳强度高于其它铸铁。球墨铸铁有一个突出优点是其屈强比较高,因此对于承受静载荷的零件,可用球墨铸铁代替铸钢。

表 1.2.6 灰铸铁的牌号、力学性能及用途(摘自 GB 9439—88)

牌号	铸件级别	铸件壁厚 /mm	铸件最小抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	适用范围及举例
HT100	铁素体灰铸铁	2.5~10	130	低载荷和不重要零件,如盖、外罩、手轮、支架、重锤等
		10~20	100	
		20~30	90	
		30~50	80	
HT150	珠光体+铁素体灰铸铁	2.5~10	175	承受中等应力(抗弯应力小于 100 MPa)的零件,如支柱、底座、齿轮箱、工作台、刀架、端盖、阀体、管路附件及一般无工作条件要求的零件
		10~20	145	
		20~30	130	
		30~50	120	
HT200	珠光体	2.5~10	220	承受较大应力(抗弯应力小于 300 MPa)和较重要零件,如气缸体、齿轮、机座、飞轮、床身、缸套、活塞、刹车轮、联轴器、齿轮箱、轴承座、液压缸等
		10~20	195	
		20~30	170	
		30~50	160	
HT250	灰铸铁	4.0~10	270	
		10~20	240	
		20~30	220	
		30~50	200	
HT300	孕育铸铁	10~20	290	承受高弯曲应力(小于 500 MPa)及抗拉应力的重要零件,如齿轮、凸轮、车床卡盘、剪床和压力机的机身、床身、高压油压缸、滑阀壳体等
		20~30	250	
		30~50	230	
HT350		10~20	340	
		20~30	290	
		30~50	260	

球墨铸铁的力学性能比灰口铸铁高,而成本却接近于灰口铸铁,并保留了灰口铸铁的优良铸造性能、切削加工性、减摩性和缺口不敏感等性能。因此它可代替部分钢作较重要的零件,对实现以铁代钢,以铸代锻起重要的作用,具有较大的经济效益。

2) 球墨铸铁的牌号和应用 我国国家标准中列了八个球墨铸铁的牌号,见表 1.2.7。牌号由 QT 与两组数字组成,其中 QT 表示“球铁”二字汉语拼音的字首,第一组数字代表最低抗拉强度值,第二组数字代表最低伸长率。

表 1.2.7 球墨铸铁的牌号、力学性能及用途(摘自 GB 1348—88)

牌号	基体组织	力学性能				用途举例
		b/MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta \times 100$	HBS	
		不小于				
QT400 - 18	铁素体	400	250	18	130 ~ 180	承受冲击、振动的零件,如汽车、拖拉机的轮毂、驱动桥壳、减速器壳、拨叉、农机具零件,中低压阀门,上、下水及输气管道,压缩机上高低压气缸,电机机壳,齿轮箱,飞轮壳等
QT400 - 15	铁素体	400	250	15	130 ~ 180	
QT450 - 10	铁素体	450	310	10	160 ~ 210	
QT500 - 07	铁素体 + 珠光体	500	320	7	170 ~ 230	机器座架、传动轴、飞轮、电动机架、内燃机的机油泵齿轮、铁路机车车辆轴瓦等
QT600 - 03	珠光体 + 铁素体	600	370	3	190 ~ 270	载荷大、受力复杂的零件,如汽车、拖拉机的曲轴、连杆、凸轮轴、气缸套,部分磨床、铣床、车床的主轴、轧钢机轧辊、大齿轮,小型水轮机主轴,气缸体,桥式起重机大小滚轮等
QT700 - 02	珠光体	700	420	2	225 ~ 305	
QT800 - 02	珠光体或回火组织	800	480	2	245 ~ 335	
QT900 - 02	贝氏体或回火马氏体	900	600	2	280 ~ 360	高强度齿轮,如汽车后桥螺旋锥齿轮、大减速器齿轮,内燃机曲轴,凸轮轴等

### (3) 可锻铸铁

可锻铸铁又俗称为马铁。可锻铸铁具有一定的塑性与韧性,因此得名,实际上是不能锻造的。

可锻铸铁组织是钢的基体上分布着团絮状的石墨,有铁素体可锻铸铁(黑心可锻铸铁)和珠

光体可锻铸铁两种。以下介绍可锻铸铁的牌号、性能和应用。

表 1.2.8 列出我国常用可锻铸铁的牌号、性能及用途。其牌号由“KTH”或“KTZ”与两组数字表示。其中“KT”表示“可锻”二字的汉语拼音字首；“H”和“Z”分别表示“黑”和“珠”的汉语拼音的字首，牌号后边第一组数字表示最小抗拉强度值，第二组数字表示最小伸长率。

可锻铸铁的力学性能优于灰口铸铁，并接近于同类基体的球墨铸铁。但与球墨铸铁相比，具有铁水处理简易、质量稳定、废品率低等优点。故生产中，常用可锻铸铁制作一些截面较薄、形状较复杂、工作时受振动而强度、韧性要求较高的零件。因为这些零件若用灰铸铁制造，则不能满足力学性能要求，若用铸钢制造，则因其铸造性能较差，质量不易保证。

表 1.2.8 可锻铸铁的牌号、力学性能及用途(摘自 GB 9440—88)

种类	牌号	试样直径/mm	力学性能				用途举例
			$b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\times 100$	HBS	
			不小于				
黑心可锻铸铁	KTH300 - 06	12 或 15	300		6	不大于 150	弯头、三通管件、中低压阀门等
	KTH330 - 08		330		8		扳手、犁刀、犁柱、车轮壳等
	KTH350 - 10		350	200	10		汽车、拖拉机前后轮壳、减速器壳、转向节壳、制动器及铁道零件等
	KTH370 - 12		370		12		
珠光体可锻铸铁	KTZ450 - 06	12 或 15	450	270	6	150 ~ 200	载荷较高和耐磨损零件，如曲轴、凸轮轴、连杆、齿轮、活塞环、轴套、耙片、万向接头、棘轮、扳手、传动链条等
	KTZ550 - 04		550	340	4	180 ~ 250	
	KTZ650 - 02		650	430	2	210 ~ 260	
	KTZ700 - 02		700	530	2	240 ~ 290	

#### (4) 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是上世纪 70 年代发展起来的一种新型铸铁，因其石墨很像蠕虫而命名。蠕墨铸铁的力学性能介于相同基体组织的灰铸铁和球墨铸铁之间，它的抗拉强度、屈服点、伸长率、疲劳强度均优于灰铸铁，接近于铁素体球墨铸铁；而铸造性能、减振能力、导热性、切削加工性均优于球墨铸铁，与灰铸铁相近。蠕墨铸铁是将蠕化剂（稀土镁钛合金、稀土镁钙合金、镁钙合金等）置于浇包内的一侧，另一侧冲入铁液，经熔化而成的。

蠕墨铸铁的牌号由 RuT 与一组数字表示。其中 RuT 表示“蠕铁”二字汉语拼音的字首，后面三位数字表示其最小抗拉强度值，见表 1.2.9。

表 1.2.9 蠕墨铸铁的牌号、力学性能及用途

牌号	力学性能				用途举例
	$b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\times 100$	HBS	
	不小于				
RuT260	260	195	3	121 ~ 195	增压器废气进气壳体、汽车底盘零件等

续表

牌号	力学性能				用途举例
	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ × 100	HBS	
	不小于				
RuT300	300	240	1.5	140 ~ 217	排气管、变速箱体、气缸盖、液压件、纺织机零件、钢锭模等
RuT340	340	270	1.0	170 ~ 249	重型机床件,大型齿轮箱体、飞轮、起重机卷筒等
RuT380	380	300	0.75	193 ~ 274	活塞环、气缸套、制动盘、钢珠研磨盘、吸淤泵体等
RuT420	420	335	0.75	200 ~ 280	

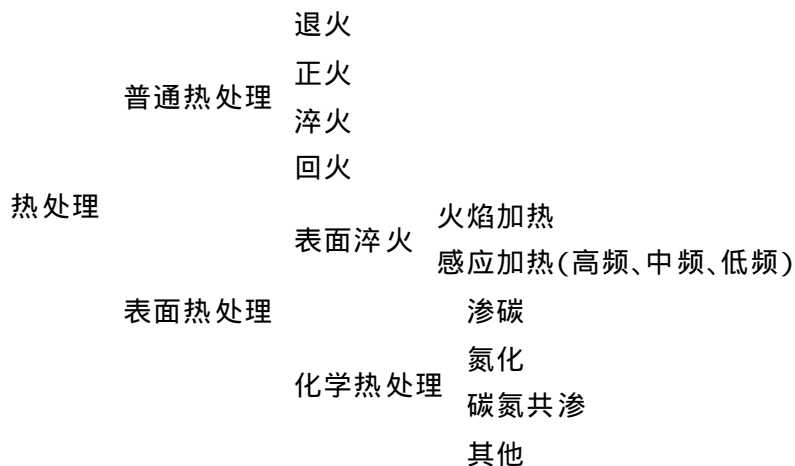
蠕墨铸铁主要用于制造气缸盖、气缸套、钢锭模、液压件等零件。

### 1.3 钢的热处理

钢的热处理是指将钢在固态下进行加热、保温和冷却,以改变其内部组织,从而获得所需要性能的一种工艺方法。

热处理的目的是显著提高钢的力学性能,发挥钢材的潜力,提高工件的使用性能和寿命。还可以作为消除毛坯(如铸件、锻件等)中缺陷,改善其工艺性能,为后续工序作组织准备。随着工业和科学技术的发展,热处理作为改善和强化金属材料、提高产品质量、节省材料和提高经济效益等方面将发挥更大的作用。

钢的热处理种类很多,根据加热和冷却方法不同,大致分类如下:



#### 1.3.1 钢在加热时的组织转变

在 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图中,共析钢加热超过 PSK 线(A<sub>1</sub>)时,其组织完全转变为奥氏体。亚共析钢和过共析钢必须加热到 GS 线(A<sub>3</sub>)和 ES 线(A<sub>cm</sub>)以上才能全部转变为奥氏体。相图中的平衡临

界点  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_{cm}$  是碳钢在极缓慢地加热或冷却情况下测定的。但在实际生产中,加热和冷却并不是极其缓慢的。加热转变在平衡临界点以上进行,冷却转变在平衡临界点以下进行。加热和冷却速度越大,其偏离平衡临界点也越大。为了区别于平衡临界点,通常将实际加热时各临界点标为  $A_G$ 、 $A_3$ 、 $A_{cm}$ ;实际冷却时各临界点标为  $A_r$ 、 $A_r$ 、 $A_{r_{cm}}$ ,如图 1.3.1 所示。

由 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图可知,任何成分的碳钢加热到相变点  $A_G$  以上都会发生珠光体向奥氏体转变,通常把这种转变过程称为奥氏体化。

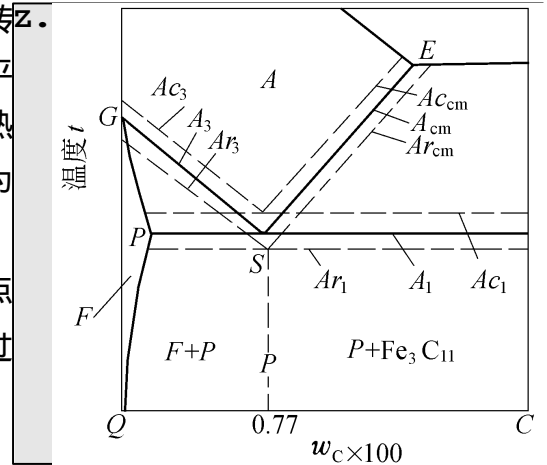
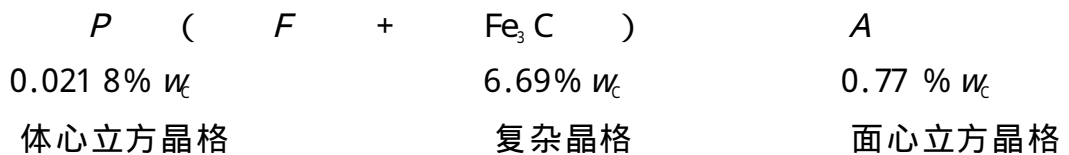


图 1.3.1 加热(冷却)时 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图中各临界点的位置

### 1. 奥氏体的形成

共析钢加热到  $A_G$  以上由珠光体全部转变为奥氏体,这一转变可表示为:



珠光体向奥氏体转变是由碳质量分数、晶格均不同的两相混合物转变成为另一种晶格单相固溶体的过程,因此,转变过程中必须进行碳原子和铁原子的扩散,才能进行碳的重新分布和铁的晶格改组,即发生相变。

奥氏体的形成是通过形核与长大过程来实现的,其转变过程分为三个阶段,如图 1.3.2 所示。第一阶段是奥氏体的形核与长大,第二阶段是剩余渗碳体的溶解,第三阶段是奥氏体成分均匀化。

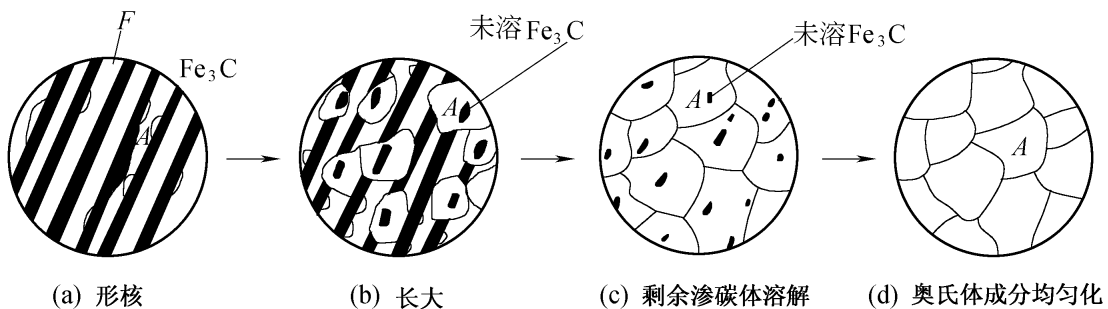


图 1.3.2 珠光体向奥氏体转变过程示意图

亚共析钢和过共析钢的奥氏体形成过程与共析钢基本相同,不同处在于亚共析钢、过共析钢在  $A_G$  稍上温度时,还分别有铁素体、二次渗碳体未变化。所以,它们的完全奥氏体化温度应分别为  $A_G$ 、 $A_{cm}$  以上。

### 2. 奥氏体晶粒的长大及影响因素

钢在加热时,奥氏体的晶粒大小直接影响到热处理后钢的性能。加热时奥氏体晶粒细小,冷却后组织也细小;反之,组织则粗大。钢材晶粒细化,既能有效地提高强度,又能明显提高塑性和韧性,这是其它强化方法所不及的。因此,在选用材料和热处理工艺上,如何获得细的奥氏体晶粒,对工件使用性能和质量都具有重要意义。



### (1) 奥氏体晶粒度

晶粒度是表示晶粒大小的一种量度。图 1.3.3 表示两种钢随温度升高时,奥氏体晶粒长大倾向示意图。由图可见,细晶粒钢在 900~950 °C 以下加热,晶粒长大倾向小,便于热处理。

### (2) 影响奥氏体晶粒度的因素

1) 加热温度和保温时间 在加热转变中,珠光体刚转变为奥氏体时的晶粒度,称为奥氏体起始晶粒度。奥氏体起始晶粒是很细小的,随加热温度升高,奥氏体晶粒逐渐长大,晶界总面积减少而系统的能量降低。所以,在高温下保温时间越长,越有利于晶界总面积减少而导致晶粒粗大。

2) 钢的成分 亚共析钢随奥氏体中碳的质量分数增加时,奥氏体晶粒的长大倾向也增大。过共析钢部分碳以渗碳体的形式存在,当奥氏体晶界上存在未溶的剩余渗碳体时,有阻碍晶粒长大的作用。

钢中加入能形成稳定碳化物元素,如钨、钛、钒、铌等时,钢中能形成高熔点化合物,并存在于奥氏体晶界上,有阻碍奥氏体晶粒长大的作用,故在一定温度下晶粒不易长大。当温度超过一定值时,高熔点化合物溶入奥氏体后,奥氏体才突然长大。

锰和磷是促进奥氏体晶粒长大的元素,必须严格控制热处理时加热温度,以免晶粒长大而导致工件的性能下降。

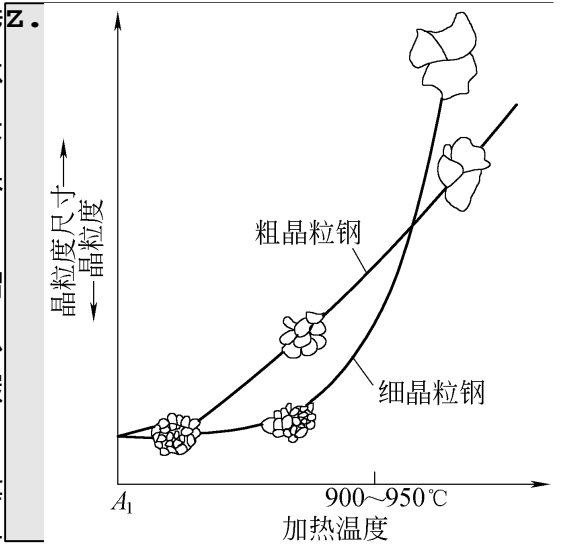


图 1.3.3 奥氏体晶粒长大倾向示意图

## 1.3.2 钢在冷却时的组织转变

冷却过程是热处理的关键工序,它决定着钢热处理后的组织与性能。在实际生产中,钢在热处理时采用的冷却方式通常是两种。一种是等温冷却,另一种是连续冷却。

### 1. 过冷奥氏体的等温转变

奥氏体在临界温度以上是一稳定相,能够长期存在而不转变。一旦冷却到临界温度以下,则处于热力学的不稳定状态,称为“过冷奥氏体”,它总是要转变为稳定的新相。过冷奥氏体等温转变反映了过冷奥氏体在等温冷却时组织转变的规律。

#### (1) 过冷奥氏体的等温转变曲线

从图 1.3.4 可见:由过冷奥氏体开始转变点连接起来的曲线称为等温转变开始线;由转变终了点连接起来的曲线称为等温转变终了线。由于曲线形状颇似字母“C”故也称为“C 曲线图”。图中 A 以下转变开始线以左的区域是过冷奥氏体区;A 以下转变终了线以右和  $M_s$  点以上的区域为转变产物区;在转变开始线与转变终了线之间的区域为过冷奥氏体和转变产物共存区。 $M_s$  线和  $M_f$  线是

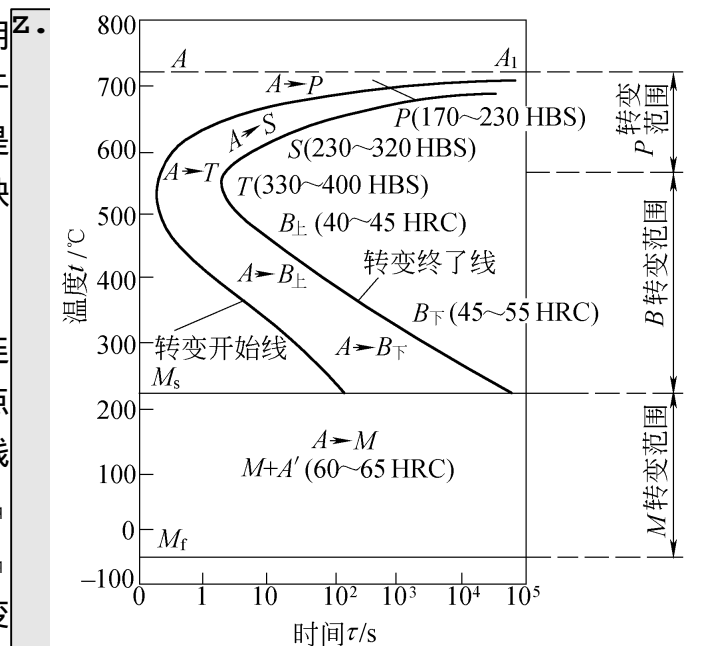


图 1.3.4 共析钢 C 曲线及转变产物

马氏体转变开始线和终了线。

过冷奥氏体在各个温度下的等温转变并非瞬间就开始的,而是经过一段“孕育期”(即转变开始线与纵坐标的水平距离)。孕育期的长短反映了过冷奥氏体稳定性的大小,孕育期最短处,过冷奥氏体最不稳定,转变最快,这里被称为C曲线图的“鼻端”。在靠近 $A_1$ 和 $M_s$ 线的温度,孕育期较长,过冷奥氏体稳定性较大,转变速度也较慢。

共析钢的奥氏体在 $A_1$ 温度以下不同温度范围内会发生三种不同类型的转变,即珠光体转变、贝氏体转变和马氏体转变。

## (2) 过冷奥氏体等温转变产物的组织与性能

1) 珠光体转变——高温转变( $A_1 \sim 550^\circ\text{C}$ ) 在 $A_1 \sim 550^\circ\text{C}$ 温度区间,过冷奥氏体的转变产物为珠光体型组织,都是由铁素体和渗碳体的层片组成的机械混合物。奥氏体向珠光体转变是一种扩散型相变,它通过铁、碳原子的扩散和晶格改组来实现。

高温转变区虽然转变产物都是珠光体,但由于过冷度不同,铁素体和渗碳体的片层间距也不同。转变温度越低,即过冷度越大,片间距越小,其塑性变形抗力越大,强度、硬度越高。根据片间距的大小,将珠光体分为以下三种:

a. 珠光体 过冷奥氏体在 $A_1 \sim 650^\circ\text{C}$ 之间等温转变,形成粗片状(片间距 $d > 0.4 \mu\text{m}$ )珠光体,一般在光学显微镜下放大500倍才能分辨出片层状特征,其硬度大约在170~230 HBS左右,以符号P表示。

b. 索氏体 过冷奥氏体在 $650 \sim 600^\circ\text{C}$ 之间等温转变为细片状( $d = 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ )珠光体,称为索氏体,以符号S表示。它要在高倍(1000倍以上)显微镜下才能分辨出片层状特征,硬度大约230~320 HBS左右。

c. 屈氏体 过冷奥氏体在 $600 \sim 550^\circ\text{C}$ 之间等温转变为极细片状( $d < 0.2 \mu\text{m}$ )珠光体,称为屈氏体,以符号T表示。它只能在电子显微镜下放大2000倍以上才能分辨出片层状结构,硬度为35~40 HRC左右。

上述珠光体、索氏体、屈氏体三种组织,在形态上只有厚薄片之分,并无本质区别,统称为珠光体型组织。

2) 贝氏体转变——中温转变( $550^\circ\text{C} \sim M_s$ ) 共析成分的奥氏体过冷到C曲线“鼻端”到 $M_s$ 线的区域,即 $550 \sim 230^\circ\text{C}$ 的温度范围,将发生奥氏体向贝氏体转变。贝氏体以符号B表示。贝氏体是由过饱和碳的铁素体与碳化物组成的两相机械混合物。奥氏体向贝氏体转变时,由于转变温度低,即过冷度较大,此时铁原子已不能扩散,碳原子也只能进行短距离扩散,结果一部分碳以渗碳体或碳化物的形式析出,一部分仍留在铁素体中,形成过饱和铁素体,即得到贝氏体。贝氏体转变属于半扩散型转变,又称中温转变。

常见的贝氏体组织形态有以下两种:

a. 上贝氏体( $B_{\text{上}}$ ) 过冷奥氏体在 $550 \sim 350^\circ\text{C}$ 范围内的转变产物,在显微镜下呈羽毛状,称为上贝氏体( $B_{\text{上}}$ )。它是由过饱和铁素体和渗碳体组成。其硬度约为40~45 HRC,但强度低、塑性差、脆性大,生产上很少采用。

b. 下贝氏体( $B_{\text{下}}$ ) 过冷奥氏体在 $350^\circ\text{C} \sim M_s$ 温度范围内的转变产物为下贝氏体,在显微镜下呈暗黑色针状或竹叶状,称为下贝氏体( $B_{\text{下}}$ )。它是由过饱和铁素体和碳化物组成。下贝氏

体具有高的强度和硬度(45 ~ 55 HRC) ,好的塑性、韧性。生产中常采用等温淬火获得高强韧性的下贝氏体组织。

3) 马氏体转变——低温转变( $< M_s$ ) 奥氏体被迅速冷却至  $M_s$  温度以下便发生马氏体转变。马氏体以符号  $M$ 表示。应指出,马氏体转变不属于等温转变,而是在极快的连续冷却过程中形成。详细内容将在过冷奥氏体连续冷却转变中介绍。

### (3) 亚共析钢与过共析钢的过冷奥氏体的等温转变

亚共析钢在过冷奥氏体转变为珠光体之前,首先析出先共析相铁素体,所以在  $C$  曲线上还有一条铁素体析出线,如图 1.3.5 所示。

过共析钢在过冷奥氏体转变为珠光体之前,首先析出先共析相二次渗碳体,所以  $C$  曲线上还有一条二次渗碳体析出线,如图 1.3.6 所示。

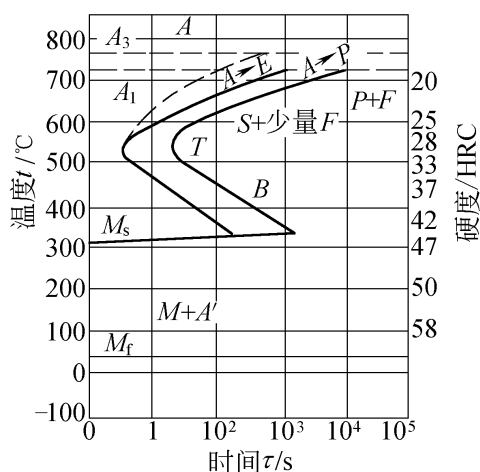


图 1.3.5 亚共析钢等温转变曲线

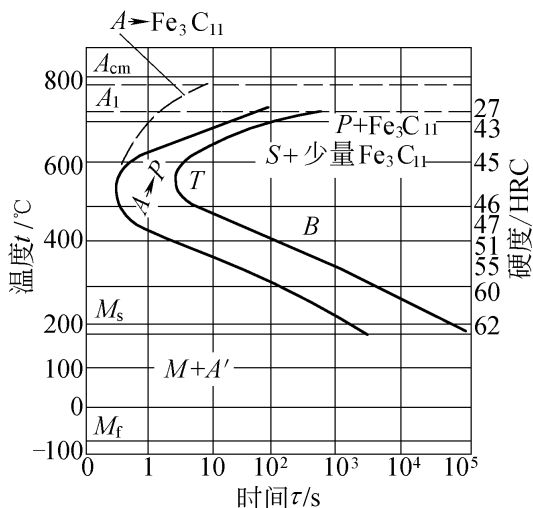


图 1.3.6 过共析钢等温转变曲线

## 2. 过冷奥氏体的连续冷却转变

### (1) 连续冷却转变曲线

在实际生产中,过冷奥氏体大多是在连续冷却中转变的,这就需要测定和利用过冷奥氏体连续转变曲线,图 1.3.7 即为共析钢连续冷却转变曲线,没有出现贝氏体转变区,即共析钢连续冷却时得不到贝氏体组织。连续冷却转变的组织 and 性能取决于冷却速度。采用炉冷或空冷时,转变可以在高温区完成,得到的组织为珠光体和索氏体。采用油冷时,过冷奥氏体在高温下只有一部分转变为屈氏体,另一部分却要冷却到  $M_s$  点以下转变为马氏体组织,即得到屈氏体和马氏体的混合组织。采用水冷时,因冷却速度很快,冷却曲线不能与转变开始线相交,不形成珠光体组织,过冷到  $M_s$  点以下转变成为马氏体组织。 $v_k$  是奥氏体全部过冷到  $M_s$  点以下转变为马氏体的最小冷却速度,通常叫作临界淬火冷却速度。

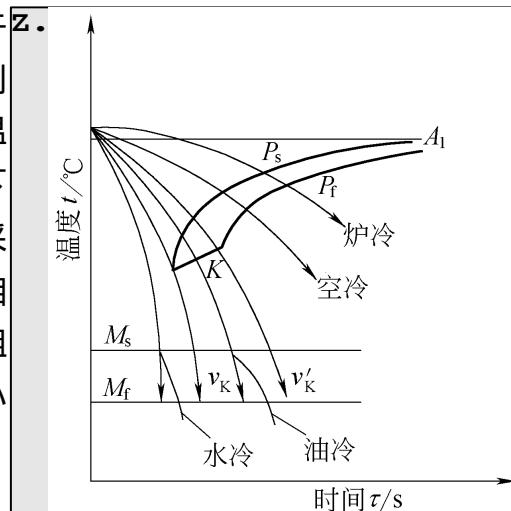


图 1.3.7 共析钢连续冷却转变曲线

### (2) 过冷奥氏体等温转变曲线在连续冷却中的应用

过冷奥氏体连续冷却转变曲线测定困难,目前生产中,还常应用过冷奥氏体等温转变曲线来近似地分析过冷奥氏体在连续

冷却中的转变。图 1.3.8 是在共析钢的等温转变曲线上估计连续冷却时组织转变的情况。 $v_1$  冷却速度相当于炉冷,与等温冷却 C 曲线约交于 700 ~ 650 °C 附近,可以判断是发生珠光体转变,最终组织为珠光体,其硬度 170 ~ 230 HBS;  $v_2$  冷却速度相当于空冷,大约在 650 ~ 600 °C 发生组织转变,可判断其转变产物是索氏体,230 ~ 320 HBS 硬度;  $v_3$  冷却速度相当于油中淬火,一部分奥氏体转变为屈氏体,其余奥氏体在  $M_s$  点以下转变为马氏体,最终产物为屈氏体和马氏体,其硬度为 45 ~ 47 HRC 左右。 $v_4$  冷却速度相当于水中淬火,冷却至  $M_s$  点以下转变为马氏体,其硬度为 60 ~ 65 HRC。

### 3. 马氏体转变

当转变温度在  $M_s$  和  $M_f$  之间时,即有马氏体组织转变。马氏体的转变过冷度极大,转变温度很低,铁原子和碳原子的扩散被抑制,奥氏体向马氏体转变时只发生  $\gamma$ -Fe 向  $\alpha$ -Fe 的晶格改组,而没有碳原子的扩散。因此,这种转变也称非扩散型转变。马氏体的碳质量分数就是转变前奥氏体中的碳质量分数,则马氏体实质上是碳在  $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体。

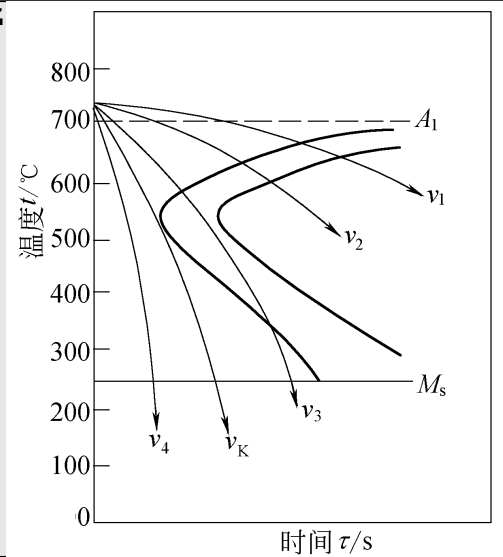


图 1.3.8 应用等温转变曲线分析奥氏体在连续冷却中转变

#### (1) 马氏体的组织形态

马氏体的组织形态因其碳的质量分数不同而异。通常有两种基本形态即片状马氏体与板条状马氏体。当奥氏体中  $w_c < 0.2\%$ , 则形成板条状马氏体(低碳马氏体)。当  $w_c > 1.0\%$ , 则为片状马氏体(高碳马氏体)。当  $1.0\% < w_c < 0.2\%$  时,为板条状马氏体 + 片状马氏体。

#### (2) 马氏体的性能

马氏体的强度与硬度主要取决于马氏体中碳的质量分数。随着马氏体中碳的质量分数增加,其强度与硬度也随之增加。马氏体强化的主要原因是由于过饱和碳原子引起的晶格畸变,即固溶强化。马氏体的塑性与韧性随碳的质量分数增高而急剧降低。板条状马氏体塑性、韧性相当好,是一种强韧性优良的组织。

一般钢中,马氏体转变是在不断降温 ( $M_s \sim M_f$ ) 中进行的,而且转变具有不完全性特点,转变后总有部分残余奥氏体存在。钢的碳质量分数越高,  $M_s$ 、 $M_f$  温度越低,淬火后残余奥氏体(A)越多。随着碳的质量分数或合金元素(除 Co 外)增加,马氏体转变点不断降低,碳的质量分数大于 0.5% 的碳钢和许多合金钢的  $M_s$  都在室温以下。如果将淬火工件冷到室温后,又随即放到零下温度的冷却介质中冷却(如干冰 + 酒精、液态氧等),残余奥氏体将继续向马氏体转变,这种热处理工艺称冷处理。冷处理可达到增加硬度、耐磨性与稳定工件尺寸的目的。

### 1.3.3 钢的退火与正火

常用热处理工艺可分为两类:预先热处理和最终热处理。预先热处理是消除坯料、半成品中的某些缺陷,为后续的冷加工和最终热处理作组织准备。最终热处理是使工件获得所要求的性能。退火与正火主要用于钢的预先热处理,其目的是为了消除和改善前一道工序(铸、锻、焊)所造成的某些组织缺陷及内应力,也为随后的切削加工及热处理做好组织和性能上准备。退火与

正火除经常作预先热处理工序外,对一般铸件、焊接件以及一些性能要求不高的工件,也可作最终热处理。

### 1. 钢的退火

根据钢的成分、退火工艺与目的不同,退火常分为完全退火、球化退火、等温退火、均匀化退火、去应力退火和再结晶退火等。

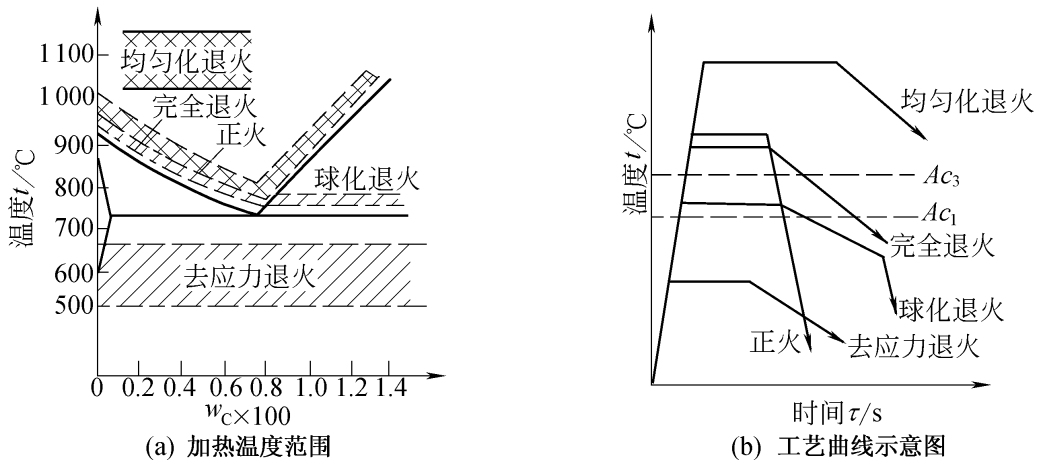


图 1.3.9 各种退火与正火温度的工艺示意图

#### (1) 完全退火

完全退火首先是把亚共析钢加热到  $A_G$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$ ,保温一段时间,随炉缓慢冷却(随炉或埋入干砂、石灰中),以获得接近平衡组织的热处理工艺。

完全退火主要用于亚共析碳钢和合金钢的铸件、锻件、焊接件等。其目的是细化晶粒,消除内应力,降低硬度,改善切削加工性能等。

#### (2) 球化退火

球化退火是使钢中碳化物球状化而进行的退火工艺。一般球化退火是把过共析钢加热到  $A_G$  以上  $10 \sim 20^\circ\text{C}$ ,保温一定时间后缓慢冷却到  $600^\circ\text{C}$  以下出炉空冷的一种热处理工艺。

球化退火主要用于过共析成分的碳钢和合金工具钢。加热温度只使部分渗碳体溶解到奥氏体中,在随后的缓慢冷却过程中形成在铁素体基体上分布球状渗碳体的组织,这种组织称为球化体(球状珠光体)。球化退火的目的是使二次渗碳体及珠光体中片状渗碳体球状化,从而降低硬度,改善切削加工性,并为淬火作好组织准备。

若钢原始组织中存在严重渗碳体网时,应采用正火将其消除后再进行球化退火。

#### (3) 等温退火

对于奥氏体比较稳定的钢,完全退火全过程所需的时间长达数十小时,为缩短整个退火周期可采用等温退火。其目的与完全退火、等温球化退火相同。但等温退火能得到更均匀的组织与硬度,而且显著缩短生产周期,主要用于高碳钢、合金工具钢和高合金钢。

#### (4) 均匀化退火

合金铸锭在结晶过程中,往往易于形成较严重的枝晶偏析。为了消除铸造结晶过程中产生的枝晶偏析,使成分均匀化,改善性能,需要进行均匀化退火。均匀化退火是把合金钢铸锭或铸件加热到  $A_G$  以上  $150 \sim 200^\circ\text{C}$ ,保温  $10 \sim 15\text{h}$  后缓慢冷却的热处理工艺。由于加热温度高、时

间长,会引起奥氏体晶粒的严重粗化。因此一般还需要进行一次完全退火或正火。

#### (5) 去应力退火

去应力退火是为了去除锻件、焊件、铸件及机加工工件中内存的残余应力而进行的退火。

去应力退火将工件缓慢加热到  $A_{c1}$  以下  $100 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  ,保温一定时间后随炉慢冷至  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  ,再出炉冷却。去应力退火是一种无相变的退火。

### 2. 钢的正火

将钢材或钢件加热到  $A_{c1}$  或  $A_{cm}$  以上  $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  ,保温一定的时间,出炉后在空气中冷却的热处理工艺称为正火。

正火与退火的主要区别是:正火的冷却速度较快,过冷度较大,因此正火后所获得的组织比较细,强度和硬度比退火高一些。

正火是成本较低和生产率较高的热处理工艺。在生产中应用如下:

#### (1) 对于要求不高的结构零件,可作最终热处理

正火可细化晶粒,正火后组织的力学性能较高。而大型或复杂零件淬火时,可能有开裂危险,所以正火可作为普通结构零件或大型、复杂零件的最终热处理。

#### (2) 改善低碳钢的切削加工性

正火能减少低碳钢中先共析相铁素体,提高珠光体的量和细化晶粒。所以能提高低碳钢的硬度,改善其切削加工性。

#### (3) 作为中碳结构钢的较重要工件的预先热处理

对于性能要求较高的中碳结构钢,正火可消除由于热加工造成的组织缺陷,且硬度还在  $160 \sim 230 \text{ HBS}$  范围内,具有良好的切削加工性,并能减少工件在淬火时的变形与开裂,提高工件质量。为此,正火常作为较重要工件的预先热处理。

#### (4) 消除过共析钢中二次渗碳体网

正火可消除过共析钢中二次渗碳体网,为球化退火作组织准备。

### 1.3.4 钢的淬火

淬火是将钢件加热到  $A_{c1}$  或  $A_{c1}$  以上  $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  ,保温一定时间,然后以大于淬火临界冷却速度冷却获得马氏体或贝氏体组织的热处理工艺。

淬火的目的是为了得到马氏体组织。再经回火后,使工件获得良好的使用性能,以充分发挥材料的潜力。

#### 1. 钢的淬火工艺

##### (1) 淬火加热温度的选择

碳素钢的淬火加热温度由  $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$  相图来确定,如图 1.3.10 所示。

亚共析钢淬火加热温度为  $A_{c1}$  以上  $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

共析钢和过共析钢淬火加热温度为  $A_{c1}$  以上  $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

对含有阻碍奥氏体晶粒长大的强碳化物形成元素(如钛、铌、锆等)的合金钢,淬火温度可以高一些,以加速其碳化物的溶解,获得较好的淬火效果。而对促进奥氏体长大元素(如锰等)含量较高的合金钢,淬火加热温度则应低一些,以防止晶粒粗大。

## (2) 淬火冷却介质

目前常用的淬火冷却介质有水、油和盐浴。

水是最便宜而且在  $650 \sim 550^\circ\text{C}$  范围内具有很大的冷却能力；但在  $300 \sim 200^\circ\text{C}$  时也能很快冷却，所以容易引起工件的变形与开裂，这是水的最大缺点，但目前仍是碳钢的最常用淬火介质。

油也是最常用的淬火介质，生产上多用各种矿物油。油的优点是在  $300 \sim 200^\circ\text{C}$  范围内冷却能力低，这有利于减少工件的变形。其缺点是在  $650 \sim 550^\circ\text{C}$  范围内冷却能力也低，不适用于碳钢，所以油一般只用作合金钢的淬火介质。

为了减少工件淬火时变形，可采用盐浴作为淬火介质，如熔化的  $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{KNO}_3$  等。主要用于贝氏体等温淬火、马氏体分级淬火。其特点是沸点高，冷却能力介于水与油之间，常用于处理形状复杂、尺寸较小和变形要求严格的工件。

为了寻求较理想的淬火介质，已发展新型淬火介质如聚醚水溶液、聚乙烯醇水溶液等。

## 2. 淬火方法

常用淬火方法有：

### (1) 单介质淬火

将淬火加热后的钢件在一种冷却介质中冷却，称为单介质淬火，如图 1.3.11 曲线 所示。例如碳钢在水中淬火，合金钢或尺寸很小的碳钢工件在油中淬火。

单介质淬火操作简单，易实现机械化、自动化，应用广泛。缺点是：水淬容易变形或开裂，油淬大型零件容易产生硬度不足现象。

### (2) 双介质淬火

将淬火加热后的钢件先淬入一种冷却能力较强的介质中，在钢件还未到达该淬火介质温度前即取出，马上再淬入另一种冷却能力较弱的介质中冷却，称为双介质淬火，如图 1.3.11 曲线 所示。例如先水后油的双介质淬火法。

双介质淬火法的目的是使过冷奥氏体在缓慢冷却条件下转变成马氏体，减少热应力与相变应力，从而减少变形、防止开裂。这种工艺的缺点是不易掌握从一种淬火介质转入另一种淬火介质的时间，要求有熟练的操作技艺。它主要用于中等形状复杂的高碳钢和尺寸较大的合金钢工件。

### (3) 马氏体分级淬火

将淬火加热后的钢件迅速淬入温度稍高或稍低于  $M_s$  点的硝盐浴或碱浴中冷却，在介质中短时间停留，待钢中内外层达到介质温度后取出空冷，以获得马氏体组织。这种工艺特点是在钢件内外温度基本一致时，使过冷奥氏体在缓冷条件下转变成马氏体，从而减少变形，如图 1.3.11 曲线 所示。这种工艺的缺点

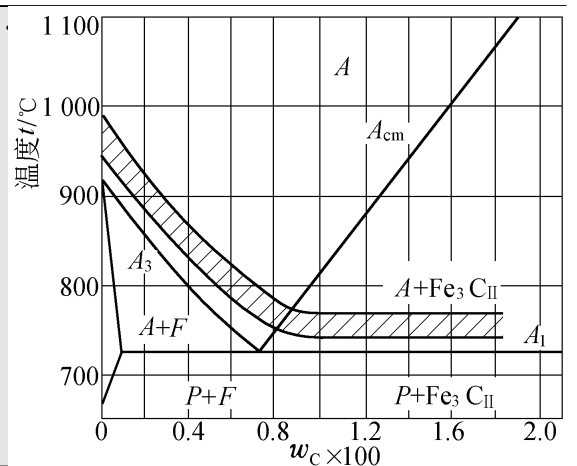


图 1.3.10 碳钢的淬火加热温度范围

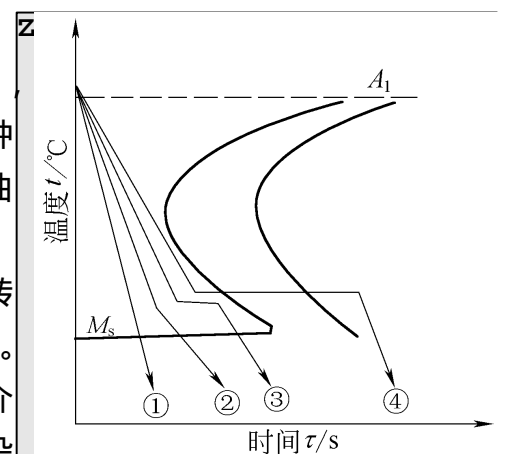


图 1.3.11 常用淬火方法示意图

— 单介质淬火； — 双介质淬火；  
— 马氏体分级淬火；  
— 贝氏体等温淬火

是由于钢在盐浴和碱浴中冷却能力不足,只适用尺寸较小的零件。

#### (4) 贝氏体等温淬火

将淬火加热后的钢件迅速淬入温度稍高于  $M_s$  点的硝盐浴或碱浴中,保持足够长时间,直至过冷奥氏体完全转变为下贝氏体,然后在空气中冷却,如图 1.3.11 曲线所示。下贝氏体的硬度略低于马氏体,但综合力学性能较好,因此在生产中被广泛应用,如一般弹簧、螺栓、小齿轮、轴、丝锥等的热处理。

#### (5) 局部淬火

对于有些工件,如果只是局部要求高硬度,可将工件整体加热后进行局部淬火。为了避免工件其他部分产生变形和开裂,也可局部进行加热淬火冷却。

### 1.3.5 钢的回火

将淬火钢重新加热到  $A_c$  点以下的某一温度,保温一定时间后冷却到室温的热处理工艺称为回火。一般淬火件必须经过回火才能使用。

#### 1. 回火的目的

##### (1) 获得工件所要求的力学性能

工件淬火后得到马氏体组织硬度高、脆性大,为了满足各种工件的性能要求,可以通过回火调整硬度、强度、塑性和韧性。

##### (2) 稳定工件尺寸

淬火马氏体和残余奥氏体都是不稳定组织,它们具有自发地向稳定组织转变的趋势,因而将引起工件的形状与尺寸的改变。通过回火使淬火组织转变为稳定组织,从而保证在使用过程中不再发生形状与尺寸的改变。

##### (3) 降低脆性,消除或减少内应力

工件在淬火后存在很大内应力,如不及时通过回火消除,会引起工件进一步的变形与开裂。

#### 2. 淬火钢在回火时组织的转变

钢经淬火后获得马氏体与残余奥氏体是亚稳定相。在回火加热、保温中,都会向稳定的铁素体和渗碳体(或碳化物)的两相组织转变。根据碳钢回火时变化的过程和形成的组织,一般回火分为四个转变。

##### (1) 马氏体分解

淬火钢在  $100^\circ\text{C}$  以下,内部组织的变化并不明显,硬度基本上也不下降。当回火温度大于  $100^\circ\text{C}$  时,马氏体开始分解,马氏体中碳以碳化物( $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$ )形式析出,使马氏体中碳的过饱和度降低,晶格畸变度减弱,内应力有所下降,析出的碳化物不是一个平衡相,而是向  $\text{Fe}_3\text{C}$  转变的过渡相。

这一转变的回火组织是由过饱和固溶体与碳化物所组成,这种组织称为回火马氏体。马氏体这一分解过程一直进行到约  $350^\circ\text{C}$ 。马氏体中碳的质量分数越多,析出碳化物越多。对于  $w_c = 0.2\%$  的低碳马氏体,在这一阶段不析出碳化物,只发生碳原子在位错附近的偏聚。

##### (2) 残余奥氏体的转变

回火温度达到  $200 \sim 300^\circ\text{C}$  时,马氏体继续分解,残余奥氏体也开始发生转变,转变为下贝氏



体。下贝氏体与回火马氏体相似,这一转变后的主要组织仍为回火马氏体,此时硬度没有明显下降,但淬火内应力进一步减少。

### (3) 碳化物的转变

回火温度在 250 ~ 450 °C 时,因碳原子的扩散能力增大,碳过饱和固溶体转变为铁素体,同时碳化物亚稳定相也转变为稳定的细粒状渗碳体,淬火内应力基本消除,硬度有所降低,塑性和韧性得到提高,此时组织由保持马氏体形态的铁素体和弥散分布的极细小的片状或粒状渗碳体组成,称为回火屈氏体。

### (4) 渗碳体的聚集长大和铁素体再结晶

回火温度大于 450 °C 时,渗碳体颗粒将逐渐聚集长大,随着回火温度升到 600 °C 时,铁素体发生再结晶,使铁素体完全失去原来的板条状或片状,而成为多边形晶粒,此时组织由多边形铁素体和粒状渗碳体组成,称为回火索氏体。

回火碳钢硬度变化的总趋势是随回火温度的升高而降低。

## 3. 回火种类与应用

根据对工件力学性能要求不同,按其回火温度范围,可将回火分为三种。

### (1) 低温回火

淬火钢件在 250 °C 以下回火称低温回火。回火后组织为回火马氏体,基本上保持淬火钢的高硬度和高耐磨性,淬火内应力有所降低。主要用于要求高硬度、高耐磨性的刀具、冷作模具、量具和滚动轴承,渗碳、碳氮共渗和表面淬火的零件。回火后硬度为 58 ~ 64 HRC。

### (2) 中温回火

淬火钢件在 350 ~ 500 °C 之间回火称为中温回火。回火后组织为回火屈氏体。具有高的屈强比,高的弹性极限和一定的韧性,淬火内应力基本消除。常用于各种弹簧和模具热处理,回火后硬度一般为 35 ~ 50 HRC。

### (3) 高温回火

淬火钢件在 500 ~ 650 °C 回火称为高温回火。回火后组织为回火索氏体,具有强度、硬度、塑性和韧性都较好的综合力学性能。因此,广泛用于汽车、拖拉机、机床等承受较大载荷的结构零件,如连杆、齿轮、轴类、高强度螺栓等。回火后硬度一般为 200 ~ 330 HBS。

生产中常把淬火 + 高温回火热处理工艺称为调质处理。调质处理后的力学性能(强度、韧性)比相同硬度的正火好,这是因为前者的渗碳体呈粒状,后者为片状。

调质一般作为最终热处理,但也作为表面淬火和化学热处理的预先热处理。调质后的硬度不高,便于切削加工,并能获得较低的表面粗糙度值。

除了以上三种常用回火方法外,某些精密的工件,为了保持淬火后的硬度及尺寸的稳定性,常进行低温(100 ~ 150 °C)、长时间(10 ~ 50 h)保温的回火,称为时效处理。

## 1.3.6 钢的表面淬火

表面淬火是通过快速加热使钢表层奥氏体化,而不等热量传至中心,立即进行淬火冷却,仅使表面层获得硬而耐磨的马氏体组织,而心部仍保持原来塑性、韧性较好的退火、正火或调质状态的组织。表面淬火不改变零件表面化学成分,只是通过表面快速加热淬火,改变表面层的组织来达到强化表面的目的。

许多机械零件,如轴、齿轮、凸轮等,要求表面硬而耐磨,有高的疲劳强度,而心部要求有足够的塑性、韧性,采用表面淬火,使钢表面得到强化,能满足上述要求。

碳的质量分数在 0.4% ~ 0.5% 的优质碳素结构钢最适宜于表面淬火。这是由于中碳钢经过预先热处理(正火或调质)以后再进行表面淬火处理,即可以保持心部原有良好的综合力学性能,又可使表面具有高硬度和耐磨性。

表面淬火后,一般需进行低温回火,以减少淬火应力和降低脆性。

表面淬火方法很多,目前生产中应用最广泛的是感应加热表面淬火,其次是火焰加热表面淬火。

### 1. 感应加热表面淬火

感应加热表面淬火是利用感应电流通过工件表面所产生的热效应,使表面加热并进行快速冷却的淬火工艺。

感应表面加热淬火法的原理,如图 1.3.12 所示。当感应圈中通入交变电流时,产生交变磁场,于是在工件中便产生同频率的感应电流。由于钢本身具有电阻,因而集中于工件表面的电流,可使表层迅速加热到淬火温度,而心部温度仍接近室温,随后立即喷水(合金钢浸油)快速冷却,使工件表面淬硬。

所用电流频率主要有三种:一种是高频感应加热,常用频率为 200 ~ 300 kHz,淬硬层为 0.5 ~ 2 mm,适用于中、小模数齿轮及中、小尺寸的轴类零件;第二种是中频感应加热,常用频率为 2 500 ~ 3 000 Hz,淬硬层深度为 2 ~ 10 mm,适用于较大尺寸的轴和大、中模数的齿轮等;第三种是工频感应加热,电流频率为 50 Hz,硬化层深度可达 10 ~ 20 mm,适用于大尺寸的零件,如轮辋、火车车轮等。此外还有超音频感应加热,它是 20 世纪 60 年代后发展起来的,频率为 30 ~ 40 kHz,适用于硬化层略深于高频,且要求硬化层沿表面均匀分布的零件,例如中、小模数齿轮、链轮、轴、机床导轨等。

感应加热速度极快,加热淬火有如下特点:第一,表面性能好,硬度比普通淬火高 2 ~ 3 HRC,疲劳强度较高,一般工件可提高 20% ~ 30%;第二,工件表面质量高,不易氧化脱碳,淬火变形小;第三,淬硬层深度易于控制,操作易于实现机械化、自动化,生产率高。

对于表面淬火零件的技术要求,在设计图纸上应标明淬硬层硬度与深度、淬硬部位,有的还应提出对金相组织及限制变形的要求。

### \* 2. 火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火是以高温火焰作为加热源的一种表面淬火方法。常用火焰为乙炔—氧火焰(最高温度为 3 200 °C)或煤气—氧火焰(最高温度为 2 400 °C)。高温火焰将钢件表面迅速加

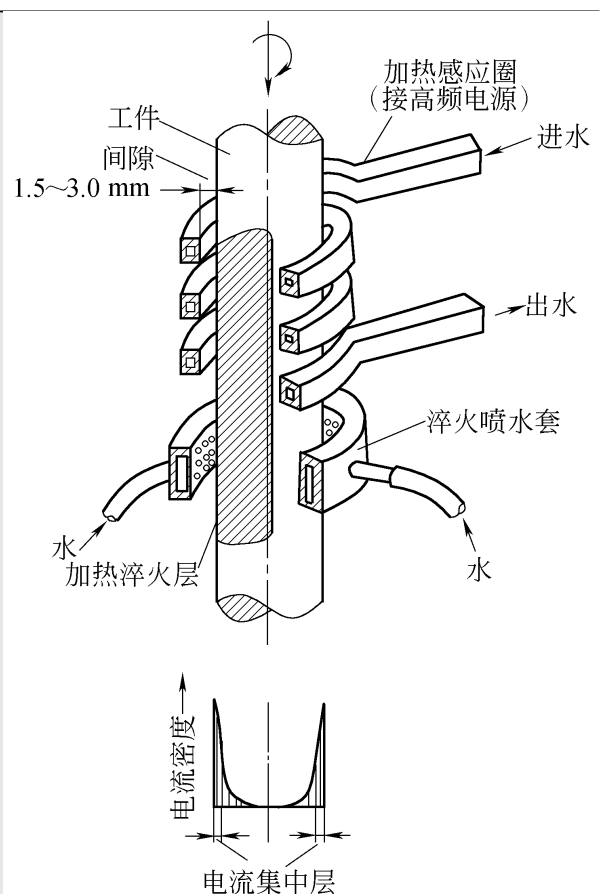


图 1.3.12 感应加热表面淬火示意图

热到淬火温度,随即喷水快冷使表面淬硬。火焰加热表面淬硬层通常为 2~8 mm。

火焰加热表面淬火设备简单,方法易行,但火焰加热温度不易控制,零件表面易过热,淬火质量不够稳定。火焰淬火尤其适宜处理特大或特小件、异型工件等,如大齿轮、轧辊、顶尖、凹槽、小孔等。

### \* 3. 电接触加热表面淬火

电接触加热的原理如图 1.3.13 所示,当工业电流经调压器降压后,电流通过压紧在工件表面的滚轮与工件形成回路,利用滚轮与工件之间的高接触电阻实现快速加热,滚轮移去后,由于基体金属吸热,表面自激冷淬火。

电接触表面淬火可显著提高工件表面的耐磨性和抗擦伤能力。设备及工艺简单易行,硬化层薄,一般为 0.15~0.35 mm。适用于表面形状简单的零件,目前广泛用于机床导轨、气缸套等表面淬火。

### \* 4. 激光加热表面淬火

激光加热表面淬火是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型的高能密度的表面强化方法。这种表面淬火方法是用激光束扫描工件表面,使工件表面迅速加热到钢的临界点以上,而当激光束离开工件表面时,由于基体金属的大量吸热,使表面急速冷却而自淬火,故无需冷却介质。

激光淬火硬化层深度与宽度一般为:深度 < 0.75 mm,宽度小于 1.2 mm。激光淬火后表层可获得极细的马氏体组织,硬度高且耐磨性好。激光淬火能对形状复杂,特别是某些部位用其它表面淬火方法极难处理的(如拐角、沟槽、盲孔底部或深孔)工件。

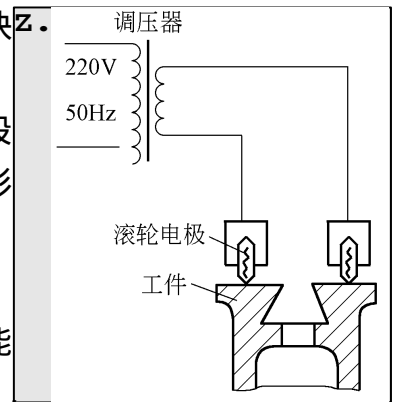


图 1.3.13 电接触加热的原理

## 1.3.7 钢的化学热处理

化学热处理是将金属或合金工件置于一定温度的活性介质中加热和保温,使介质中一种或几种活性原子渗入工件表面,以改变表面层的化学成分和组织,使表面层具有不同于心部的性能的一种热处理工艺。

化学热处理的种类和方法很多,最常见的有渗碳、氮化、碳氮共渗等。

### 1. 钢的渗碳

将钢件在渗碳介质中加热并保温使碳原子渗入表层的化学热处理工艺,称为渗碳。渗碳的目的是提高工件表面的硬度和耐磨性,同时保持心部的良好韧性。

常用渗碳材料是碳的质量分数一般为  $w_c = 0.1\% \sim 0.25\%$  的低碳钢和低碳合金钢,经过渗碳后,再进行淬火与低温回火,可在零件的表层和心部分别得到高碳和低碳的组织。一些重要零件如汽车、拖拉机的变速箱齿轮、活塞销、摩擦片等,它们都是在循环载荷、冲击载荷、很大接触应力和严重磨损条件下工作的。因此要求此类零件表面具有高的硬度,耐磨性及疲劳强度,心部具有较高的强度和韧性。

常用渗碳温度为 900~950 °C,渗碳层厚度一般为 0.5~2.5 mm,图 1.3.14 为气体渗碳示意图。

低碳钢零件渗碳后,表面层碳的质量分数  $w_c = 0.85\% \sim 1.05\%$ 。低碳钢渗碳缓冷后的组织,表层为珠光体 + 网状二次渗碳体,心部为铁素体 + 少量珠光体,两者之间为过渡区,愈靠近表

面层铁素体愈少。

对渗碳件,在设计图纸上应标明渗碳淬火、回火后的硬度(表面和心部),渗碳的部位(全部或局部)及渗层深度等。对重要的渗碳件还应提出对金相组织的要求。当工件上某些部位不要求渗碳时,也应在图纸上标明,并采用镀铜或其他方法防止该部位渗碳,或留出加工余量,渗碳后再切削除去。

工件经渗碳后都应进行淬火+低温回火。最终表面为细小片状回火马氏体及少量渗碳体,硬度可达58~64 HRC,耐磨性很好;心部的组织决定于钢的淬透性,普通低碳钢如15、20钢,心部组织为铁素体和珠光体,低碳合金钢如20CrMnTi心部组织为回火低碳马氏体(淬透件),具有较高强度和韧性。

## 2. 钢的氮化

氮化是在一定温度(一般在 $A_c$ 以下),使活性氮原子渗入工件表面的化学热处理工艺,也称渗氮。氮化的目的是提高工件表面的硬度、耐磨性、疲劳强度及耐蚀性。氮化广泛应用于耐磨性和精度均要求很高的零件,如镗床主轴、精密传动齿轮等;在循环载荷下要求高疲劳强度的零件,如高速柴油机曲轴;要求变形很小和具有一定抗热、耐蚀能力的耐磨件,如阀门、发动机气缸以及热作模具等。

### (1) 气体氮化

气体氮化是向密闭的渗氮炉中通入氨气,利用氨气受热分解来提供活性氮原子进行氮化的方法。氮化温度一般为550~570℃,因此氮化件变形很小,比渗碳件变形小得多,同样也比表面淬火件变形小。

应用最广泛的氮化用钢是38CrMoAl钢,钢中Cr、Mo、Al等合金元素在氮化过程中形成高度弥散、硬度极高的稳定化合物,如CrN、MnN、AlN等。氮化后工件表面硬度可高达950~1200 HV(相当于68~72 HRC),具有很高的耐磨性,因此钢氮化后,不需要进行淬火处理。

结构钢氮化前,宜先进行调质处理,获得回火索氏体组织,以提高心部的性能,同时也为了减少氮化中的变形。由于氮化层很薄,一般不超过0.6~0.7 mm,因此氮化往往是加工工艺路线中最后一道工序,氮化后至多再进行精磨。工件上不需要氮化的部分可用镀锡等保护。

对氮化工件,在设计图纸上应标明氮化层表面硬度、厚度、氮化区域。重要工件还应提出心部硬度、金相组织及氮化层脆性级别等具体要求。

气体氮化的主要缺点是生产周期长,例如要得到0.3~0.5 mm的渗层,需要20~50 h,因此成本高。此外氮化层较脆,不能承受冲击,在使用上受到一定限制。目前,国内外针对上述缺点,发展了新的氮化工艺,如离子氮化等。

### (2) 离子氮化

离子氮化是将工件放在低于一个大气压的真空容器内,通入氨气或氮、氢混合气体,以真空容器为阳极,工件为阴极,在两极间加直流高压,迫使电离后的氮正离子高速冲击工件(阴极),使其渗入工件表面,并向内扩散形成氮化层。

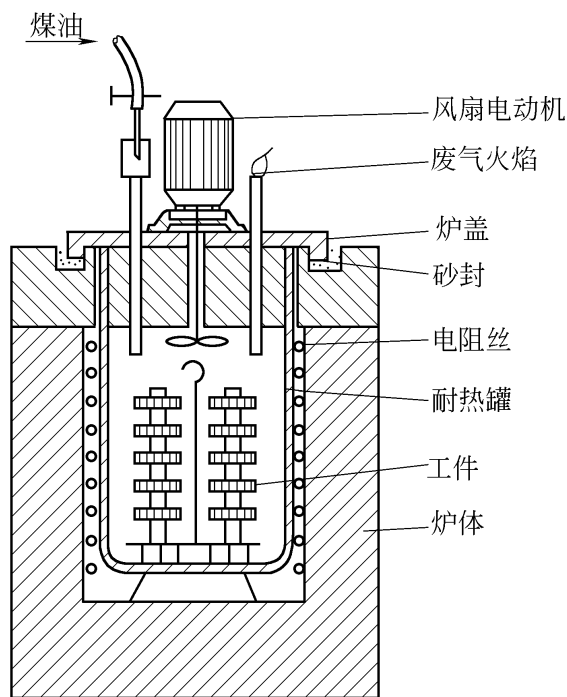


图 1.3.14 气体渗碳法示意图

离子氮化的优点是氮化时间短,仅为气体氮化的1/2~1/3,易于控制操作,氮化层质量好,脆性低一些,此外,省电、省气、无公害。缺点是工件形状复杂或截面相差悬殊时,由于温度均匀性不够,很难达到同一硬度和渗层深度。

### 3. 钢的碳氮共渗与氮碳共渗

#### (1) 气体碳氮共渗

在一定温度下同时将碳、氮渗入工件表层奥氏体中,并以渗碳为主的化学热处理工艺称碳氮共渗。

由于共渗温度(850~880℃)较高,它是以渗碳为主的碳氮共渗过程,因此处理后再进行淬火和低温回火处理。共渗深度一般为0.3~0.8mm,共渗层表面组织由细片状回火马氏体、适量的粒状碳氮化合物,以及少量的残余奥氏体组成。表面硬度可达58~64HRC。

气体碳氮共渗所用的钢,大多为低碳钢或中碳钢和合金钢,如20CrMnTi、40Cr等。

气体碳氮共渗与渗碳相比,处理温度低且便于直接淬火因而变形小,共渗速度快、时间短、生产效率高、耐磨性高。主要用于汽车和机床齿轮、蜗轮、蜗杆和轴类等零件的热处理。

#### (2) 气体氮碳共渗(软氮化)

工件表面渗入氮和碳,并以渗氮为主的化学热处理,称为氮碳共渗。常用的共渗温度为560~570℃,由于共渗温度较低,共渗1~3h,渗层可达0.01~0.02mm,又称低温氮碳共渗。与气体氮化相比,渗层硬度较低,脆性较低,故又称软氮化。

氮碳共渗具有处理温度低、时间短、工件变形小的特点,而且不受钢种限制,碳钢、合金钢及粉末冶金材料均可进行氮碳共渗处理,达到提高耐磨性、抗咬合、疲劳强度和耐蚀性的目的。由于共渗层很薄,不宜在重载下工作,目前软氮化广泛应用于模具、量具、刃具以及耐磨、承受弯曲疲劳的结构件。

## 1.3.8 热处理的技术条件和结构工艺性

### 1. 热处理技术条件的标注

热处理零件在图纸上应注明热处理的技术条件,其内容包括最终热处理方法及热处理应达到的力学性能指标等。标定的硬度值允许有一个波动范围,一般布氏硬度波动范围在30~40个单位,洛氏硬度波动范围在5个单位左右。例如,调质220~250HBS,淬火回火40~45HRC。

常见的热处理工艺代号及技术条件的标注方法如表1.3.1所列。

表 1.3.1 热处理技术条件要求的表示方法

名 称	代 号	说 明
退火	Th	Th 退火
正火	Z	Z:正火
固溶处理	R	R:固溶处理
调质	T	T 215 :调质 200~230 HBS
淬火	C	C42 :淬火 42~47 HRC
感应淬火	G	G48 :感应淬火 48~52 HRC
		G 0.8 - 48 :感应淬火深度 0.8~1.6 48~52 HRC

名称	代号	说明
调质感应淬火	T - G	T 235 - G 48 :调质 220 ~ 250 HBS 感应淬火 48 ~ 52 HRC
火焰淬火	H	H42 :火焰淬火 42 ~ 48 HRC
		H1.6 - 42 :火焰淬火深度 1.6 ~ 3.6 $\mu$ m 42 ~ 48 HRC
渗碳、淬火	S - C	S 0.8 - C58 :渗碳淬火深度 0.8 ~ 1.2 58 ~ 63 HRC
渗碳、感应淬火	S - G	S1.0 - G58 :渗碳感应淬火深度 1.0 ~ 2.0 58 ~ 63 HRC
碳氮共渗、淬火	Td - C	Td0.5 - C5 :碳氮共渗淬火深度 0.5 ~ 0.8 58 ~ 63 HRC
渗氮	D	D 0.3 - 850 :渗氮深度 0.25 ~ 0.4 , 850 HV
调质、渗氮	T - D	T265 - D 0.3 - 850 :调质 250 ~ 280 HBS 渗氮深度 0.25 ~ 0.4 , 850 HV
氮碳共渗	Dt	Dt480 :氮碳共渗 480 HV

## 2. 热处理零件的结构工艺性

热处理零件的结构工艺性,是指在设计热处理零件,特别是淬火件时,一方面要满足热处理零件的使用性能要求,另一方面应考虑热处理工艺对零件结构的要求,不然会使热处理操作困难,增加淬火变形、开裂,使零件报废。因此设计人员需考虑热处理零件的结构工艺性,尽量考虑以下原则:

### (1) 避免尖角

零件的尖角是淬火应力集中的地方,往往成为淬火开裂的起点。因此,一般应尽量将尖角设计成圆角、倒角,以避免淬火开裂,如图 1.3.15 所示。

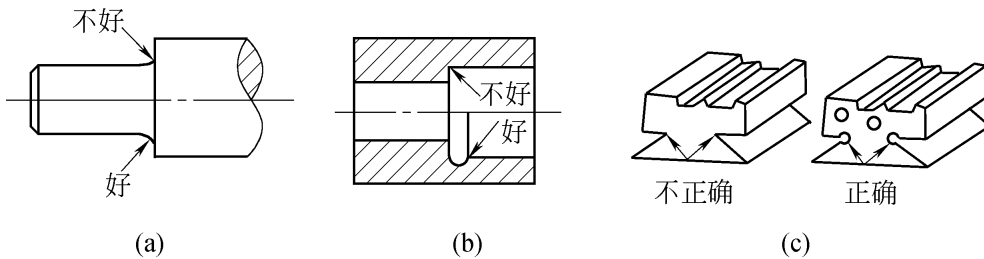


图 1.3.15 避免尖角、棱角的设计

### (2) 避免厚薄悬殊的截面

厚薄悬殊的零件淬火冷却时,由于冷却不均匀造成的变形、开裂倾向较大。

为了避免厚薄悬殊造成淬火变形或开裂,可在零件太薄处加厚,或采用开工艺孔、变不通孔为通孔等方法,如图 1.3.16、图 1.3.17 所示。

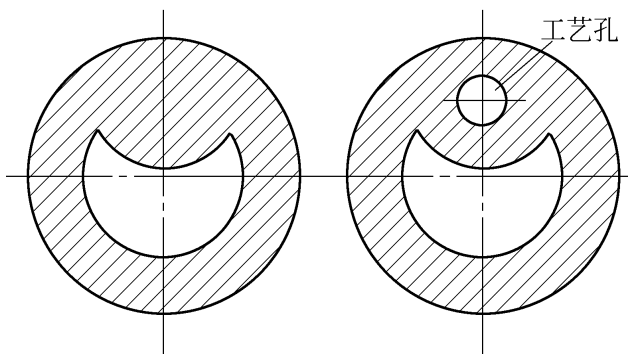


图 1.3.16 开工艺孔示意图

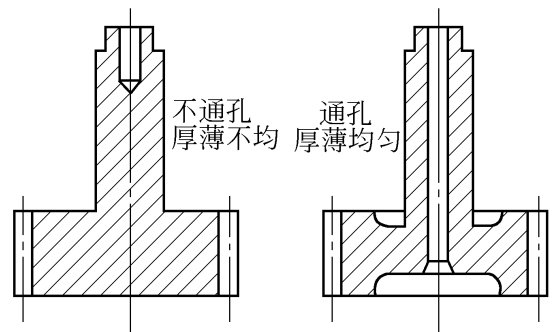


图 1.3.17 不通孔为通孔示意图

### (3) 采用封闭、对称结构

开口或不对称结构的零件在淬火时应力分布亦不均匀,容易引起变形,应改为封闭或对称结构。

图 1.3.18a 所示的零件,中间单面有一槽,淬火将发生较大变形(如图中双点画线所示)。改成图 1.3.18b,对使用无影响,却减少了淬火变形。

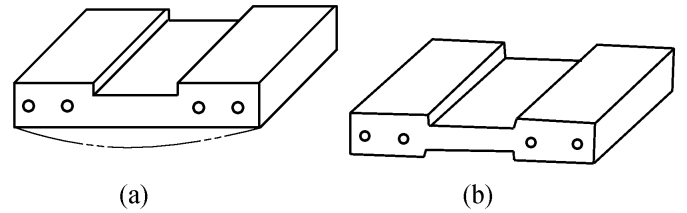


图 1.3.18 零件对称实例

图 1.3.19 所示是槽形零件,淬火前留筋形成封闭,热处理后切开或去掉。

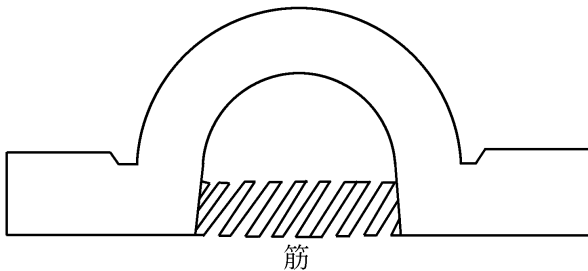


图 1.3.19 槽形零件淬火前留筋

### (4) 采用组合结构

某些有淬裂倾向而各部分工作条件要求不同的零件或形状复杂的零件,在可能条件下可采用组合结构或镶拼结构。

图 1.3.20a 所示是山字形硅钢片冲模,如果将其做成整体,热处理后要变形(如双点画线所示)。若把整体改为四块组合件,如图 1.3.20b 所示,热处理变形可不考虑,将单块磨削后钳工装配组合即可。

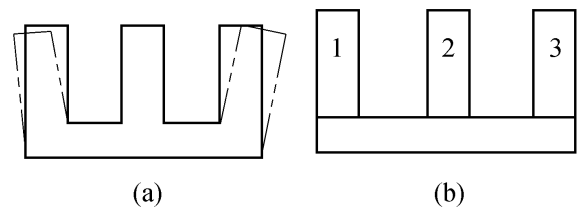


图 1.3.20 硅钢片冲模

## 1.4 合金钢

### 1.4.1 合金钢的分类与编号

#### 1. 合金钢的分类

按合金元素总的质量分数分为低合金钢( $w_{Me} < 5\%$ )、中合金钢( $w_{Me} = 5\% \sim 10\%$ )、高合金钢( $w_{Me} > 10\%$ );按钢中主要合金元素种类不同,又可分为锰钢、铬钢、硼钢、铬镍钢、铬锰钢等;按用途分合金结构钢、合金工具钢、特殊性能钢;按正火后组织分铁素体钢、奥氏体钢、莱氏体钢等。

#### 2. 合金钢的编号方法

##### (1) 低合金高强度结构钢

其牌号由代表屈服点的汉语拼音首位字母(Q)、屈服极限数值、质量等级符号(A、B、C、D、E)三个部分按顺序排列。例如 Q390A,表示屈服强度  $\sigma_s = 390 \text{ MPa}$ 、质量等级 A 的低合金高强度结构钢。

##### (2) 合金结构钢

其牌号由“两位数字 + 元素符号 + 数字”三部分组成。前面两位数字代表钢中平均碳质量分数的万倍,元素符号表示钢中所含的合金元素,元素符号后面数字表示该元素的平均质量分数的百倍。合金元素的平均质量分数  $w_{Me} < 1.5\%$  时,一般只标明元素而不标明数值;当平均质量分数 1.5%、2.5%、3.5% … 时,则在合金元素后面相应地标出 2、3、4 …。例如 40Cr,其平均碳的质量分数  $w_C = 0.4\%$ ,平均铬的质量分数  $w_{Cr} < 1.5\%$ 。如果是高级优质钢,则在牌号的末尾加“A”。例如 38CrMoAlA 钢,则属于高级优质合金结构钢。

### (3) 滚动轴承钢

其牌号由加“G(“滚”字汉语拼音的首位字母) + Cr + 数字”等部分组成,后面数字表示铬的质量分数的千倍,其碳的质量分数不标出。例如 GCr15 钢,就是平均铬的质量分数  $w_{Cr} = 1.5\%$  的滚动轴承钢。铬轴承钢中若含有除铬外的其他合金元素时,这些元素的表示方法同一般的合金结构钢。滚动轴承钢都是高级优质钢,但牌号后不加“A”。

### (4) 合金工具钢

这类钢的编号方法与合金结构钢的区别仅在于:当  $w_C < 1\%$  时,用一位数字表示碳的质量分数的千倍;当碳的质量分数 1% 时,则不予标出。例如 Cr12MoV 钢,其平均碳的质量分数为  $w_C = 1.45\% \sim 1.70\%$ ,所以不标出;Cr 的平均质量分数为 12%,Mo 和 V 的质量分数都是小于 1.5%。又如 9SiCr 钢,其平均  $w_C = 0.9\%$ ,平均  $w_{Si}$ 、 $w_{Cr}$  均  $< 1.5\%$ 。不过高速工具钢例外,其平均碳的质量分数无论多少均不标出。因合金工具钢及高速工具钢都是高级优质钢,所以它的牌号后面也不必再标“A”。

### (5) 不锈钢与耐热钢

这类钢牌号前面数字表示碳质量分数的千倍。例如 3Cr13 钢,表示平均  $w_C = 0.3\%$ ,平均  $w_{Cr} = 13\%$ 。当碳的质量分数  $w_C = 0.03\%$  及  $w_C = 0.08\%$  时,则在牌号前面分别冠以“00”及“0”表示,例如 00Cr17Ni14Mo2、0Cr19Ni9 钢等。

## 1.4.2 合金元素在钢中的作用

在冶炼钢的过程中有目的地加入一些元素,这些元素称为合金元素。常用的合金元素有:锰( $w_{Mn} > 1\%$ )、硅( $w_{Si} > 0.5\%$ )、铬、镍、钼、钨、钒、钛、锆、铝、钴、硼、稀土(RE)等。

钢中加入合金元素改变钢的组织结构和力学性能,同时也改变钢的相变点和合金状态图。合金元素在钢中的作用十分复杂,本节主要分析合金元素对钢中基本相、铁碳合金相图和热处理影响。

### 1. 合金元素在钢中的存在形式

#### (1) 强化铁素体

绝大多数合金元素都可或多或少地溶于铁素体中,形成合金铁素体。

合金元素溶入铁素体后,引起铁素体晶格畸变,另外合金元素还易分布在晶体缺陷处,使位错移动困难,从而提高了钢的塑性变形抗力,产生固溶强化,使铁素体的强度、硬度提高,但塑性、韧性都有下降趋势。

硅、锰能显著提高铁素体强度、硬度,但当  $w_{Si} > 0.6\%$ 、 $w_{Mn} > 1.5\%$  时,将降低其韧性。而铬、镍这两个元素,在适量范围内( $w_{Cr} = 2\%$ ,  $w_{Ni} = 5\%$ ),不但可提高铁素体的硬度,而且能提高其韧



性。为此,在合金结构钢中,为了获得良好强化效果,对铬、镍、硅和锰等合金元素要控制在一定的含量范围内。

## (2) 形成合金碳化物

钒、铌、锆、钛为强碳化物形成元素,铬、钼、钨为中强碳化物形成元素,锰为弱碳化物形成元素。

钢中形成的合金碳化物的类型主要有合金渗碳体和特殊碳化物。

合金渗碳体较渗碳体略为稳定,硬度也较高,是一般低合金钢中碳化物的主要存在形式。特殊碳化物是与渗碳体晶格完全不同的合金碳化物。特殊碳化物特别是间隙相碳化物,比合金渗碳体具有更高的熔点、硬度与耐磨性,并且更为稳定,不易分解。

合金碳化物的种类、性能和在钢中分布状态会直接影响到钢的性能及热处理时的相变。

## 2. 合金元素对 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图的影响

钢中加入合金元素后,对铁碳合金相图的相区、相变温度、共析成分等都有影响。

### (1) 改变了奥氏体区的范围

铜、锰、镍等这类合金元素使  $A_3$ 、 $A_1$  温度下降,GS 线向左下方移动,如图 1.4.1a 所示。随着锰、镍含量的增大,会使相图中奥氏体区一直延展到室温下。因此,它在室温的平衡组织是稳定的单相奥氏体,这种钢称奥氏体钢。

铝、铬、钼、钨、钒、硅、钛等这类合金元素使  $A_3$  和  $A_1$  温度升高,GS 线向左上方移动,如图 1.4.1b 所示。随着钢中这类元素含量的增大,可使相图中奥氏体区消失,此时,钢在室温下的平衡组织是单相的铁素体,这种钢称为铁素体钢。

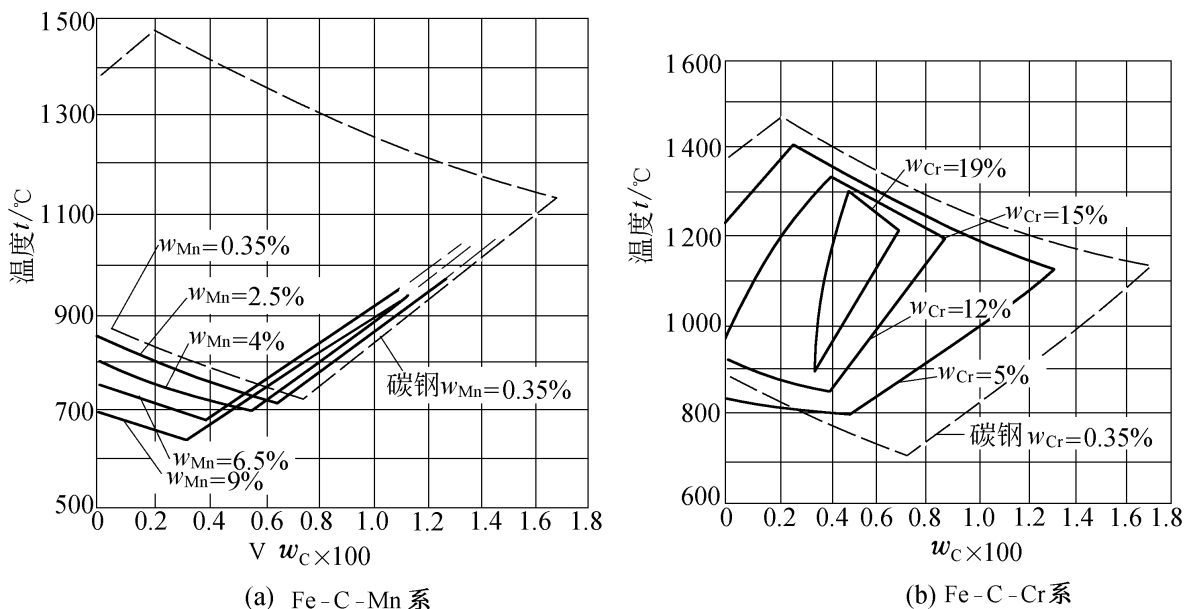


图 1.4.1 合金元素对 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图中奥氏体区的影响

### (2) 改变 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图 S、E 点位置

大多数合金元素均能使 S 点、E 点左移。共析钢中碳的质量分数就不是  $w_c = 0.77\%$ ,而是  $w_c < 0.77\%$ 。出现共晶组织的最低碳的质量分数不再是  $w_c = 2.11\%$ ,而是  $w_c < 2.11\%$ 。

例如,含  $w_c = 0.4\%$  的碳钢原属亚共析钢,当加入  $w_{Cr} = 12\%$  后就成了共析钢。又如含  $w_c = 0.7\% \sim 0.8\%$  的高速钢,由于大量合金元素的加入,在铸态组织中却出现合金莱氏体,这种钢称为莱氏体钢。

### 3. 合金元素对钢的热处理的影响

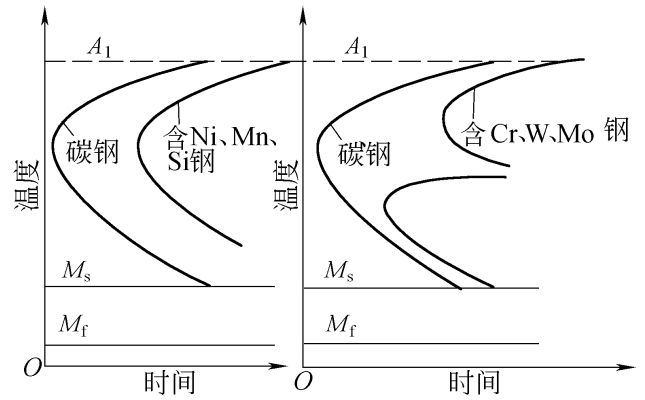
#### (1) 合金元素对钢加热时转变的影响

由于合金元素的扩散速度很缓慢,因此对于合金钢应采取较高的加热温度和较长的保温时间,以保证合金元素溶入奥氏体并使之均匀化,从而充分发挥合金元素的作用。

合金元素形成的特殊碳化物在高温下比较稳定,不易溶于奥氏体,并以细小质点的形式弥散地分布在奥氏体晶界上,机械地阻碍奥氏体晶粒长大。因此,使得钢在高温下较长时间的加热仍能保持细晶粒组织,这是合金钢的一个重要特点。

#### (2) 合金元素对钢冷却转变的影响

1) 合金元素对过冷奥氏体等温转变的影响 除钴外,大多数合金元素溶入奥氏体后降低原子扩散速度,使奥氏体稳定性增加,从而使C曲线右移。含有这类元素的低合金钢,其C曲线形状与碳钢相似,只有一个鼻尖,如图1.4.2a所示。当碳化物形成元素溶入奥氏体后,由于它们对推迟珠光体转变与贝氏体转变的作用不同,使C曲线出现两个鼻尖,曲线分解成珠光体和贝氏体两个转变区,而两区之间,过冷奥氏体有很大的稳定性,如图1.4.2b所示。



(a) 非碳化物形成元素 (b) 碳化物形成元素

图 1.4.2 合金元素对 C 曲线的影响

由于合金元素使C曲线右移,故降低了钢的马氏体临界冷却速度,增大了钢的淬透性。

2) 合金元素对过冷奥氏体向马氏体转变的影响 除钴、铝外,大多数合金元素溶入奥氏体后,使马氏体转变温度  $M_s$  和  $M_f$  降低,其中铬、镍、锰作用较强。 $M_s$  越低,则淬火后钢中残余奥氏体的数量就越多。

#### (3) 合金元素对淬火钢回火转变的影响

钢在回火时抵抗硬度下降的能力,称回火稳定性。淬火时溶于马氏体的合金元素,回火时有阻碍马氏体分解和碳化物聚集长大的作用,使回火硬度降低过程变缓,从而提高钢的回火稳定性。由于合金钢的回火稳定性比碳钢高,若要得到相同的回火硬度时,则合金钢的回火温度就比同样碳的质量分数的碳钢要高,回火时间也长。而当回火温度相同时,合金钢的强度、硬度都比碳钢高。

一些含有钨、钼、钒的合金钢,经高温奥氏体充分均匀化并淬火后,在  $500 \sim 600^\circ\text{C}$  回火时会从马氏体中析出特殊碳化物,析出的碳化物高度弥散分布在马氏体基体上,使钢的硬度反而有所提高,这就形成了二次硬化。二次硬化实质是一种弥散硬化。另外,由于特殊碳化物的析出,使残余奥氏体中碳及合金元素浓度降低,提高了  $M_s$  温度,故在随后冷却时就会有部分残余奥氏体转变为马氏体,这也是在回火时钢的硬度提高而产生二次硬化的原因。二次硬化现象对需要较高红硬性的工具钢(如高速钢)具有重要意义。

### 1.4.3 合金结构钢

#### 1. 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢是结合我国资源条件发展起来的钢种。它是低碳结构钢,合金元素总

量在 3% 以下,以 Mn 为主要元素。与碳素结构钢相比有较高强度,足够的塑性、韧性,良好的焊接工艺性能,较好的耐腐蚀性和低的冷脆转变温度。

为保证有良好的塑性与韧性,良好的焊接性能和冷成形性能,低合金高强度结构钢中碳的质量分数一般均较低,大多数为  $w_c = 0.16\% \sim 0.20\%$ 。

合金元素的主要作用是:加入锰(为主加元素)、硅、铬、镍元素为强化铁素体;加入钒、铌、钛、铝等元素为细化铁素体晶粒;合金元素使 S 点左移,增加珠光体数量;加入碳化物形成元素(钒、铌、钛)及氮化物形成元素(铝),使细小化合物从固溶体中析出,产生弥散强化作用。

低合金高强度结构钢可按屈服极限分 295、345、390、420、460 (MPa) 五个强度等级,其中 295 ~ 390 MPa 级的应用最广。它们的牌号、化学成分、力学性能及用途见表 1.4.1、表 1.4.2。

低合金高强度结构钢大多数是在热轧、正火状态下使用,其组织为铁素体 + 少量珠光体。对 Q420、Q460 的 C、D、E 级钢也可先淬成低碳马氏体,然后进行高温回火以获得低碳回火索氏体组织,从而获得良好的力学性能。其中 Q345 钢的应用最广泛。我国的南京长江大桥、内燃机车机体、万吨巨轮及压力容器、载重汽车大梁等都采用 Q345 钢制造。

## 2. 合金渗碳钢

合金渗碳钢主要用来制造工作中承受较强烈的冲击作用和磨损条件下的渗碳零件。例如,制作承受动载荷和重载荷的汽车变速箱齿轮、汽车后桥齿轮和内燃机里的凸轮轴、活塞销等。

这类钢经渗碳、淬火和低温回火后表面具有高的硬度和耐磨性,心部具有较高的强度和足够的韧性。

合金渗碳钢中碳的质量分数一般在  $w_c = 0.10\% \sim 0.25\%$  之间,以保证渗碳零件心部具有良好的塑性和韧性。碳素渗碳钢的淬透性低,热处理对心部的性能改变不大,加入合金元素可提高钢的淬透性,改善心部性能。常用的合金元素有铬、镍、锰和硼等,其中以镍的作用最好。为了细化晶粒,还加入少量阻止奥氏体晶粒长大的强碳化物形成元素,如钛、钒、钼等,它们形成的碳化物在高温渗碳时不溶解,有效地抑制渗碳时的过热现象。

为了保证渗碳零件表面得到高硬度和高耐磨性,大多数合金渗碳钢采用渗碳后淬火 + 低温回火。

渗碳后的钢种,表层碳的质量分数为  $0.85\% \sim 1.05\%$ ,经淬火和低温回火后,表层组织由合金渗碳体、回火马氏体及少量残余奥氏体组成,硬度可达 58 ~ 64 HRC,而心部的组织与钢的淬透性及零件的截面有关:当全部淬透时是低碳回火马氏体,硬度可达 40 ~ 48 HRC,未淬透的情况下是珠光体 + 铁素体或低碳回火马氏体加少量铁素体的混合组织,硬度约为 25 ~ 40 HRC。

合金渗碳钢可按淬透性分为低淬透性、中淬透性及高淬透性钢三类。主要牌号、成分、热处理、力学性能和用途列于表 1.4.3。

## 3. 合金调质钢

合金调质钢指调质处理后使用的合金结构钢,其具有良好的综合力学性能。合金调质钢广泛用于制造一些重要零件,如机床的主轴、汽车底盘的半轴、柴油机连杆螺栓等。

合金调质钢碳的质量分数一般在  $w_c = 0.25\% \sim 0.50\%$  之间。碳的质量分数过低不易淬硬,回火后达不到所需要的强度;如果碳的质量分数过高,则零件韧性较差。

合金调质钢的主加元素有铬、镍、锰、硅、硼等,以增加淬透性、强化铁素体;钼、钨的主要作用是防止或减轻第二类回火脆性,并增加回火稳定性;钒、钛的作用是细化晶粒。

合金调质钢在锻造后为了改善切削加工性能应采用完全退火作为预先热处理。最终热处理采用淬火后进行 500 ~ 650 °C 的高温回火,以获得回火索氏体,使钢件具有高的综合力学性能。

合金调质钢常按淬透性大小分为三类,其主要牌号、成分、热处理、力学性能和用途见表 1.4.4。

#### 4. 合金弹簧钢

弹簧是机器、车辆和仪表及生活中的重要零件,主要在冲击、振动、周期性扭转和弯曲等交变应力下工作,弹簧工作时不允许产生塑性变形,因此要求制造弹簧的材料具有较高的强度。

合金弹簧钢的碳的质量分数一般为  $w_c = 0.5\% \sim 0.7\%$ ,碳的质量分数过高时,塑性和韧性差,疲劳强度下降。常加入以硅、锰为主的合金元素,提高钢的淬透性和强化铁素体。

根据弹簧尺寸的不同,成形与热处理方法也有不同。

1) 热成形弹簧钢 弹簧丝直径或弹簧钢板厚度大于 10 ~ 15 mm 的螺旋弹簧或板弹簧,采用热态成形,成形后利用余热进行淬火,然后中温回火(350 ~ 500 °C)处理,得到回火屈氏体,具有高的弹性极限、高的屈强比,硬度一般为 42 ~ 48 HRC。弹簧经热处理后,一般还要进行喷丸处理,使表面强化,并在表面产生残余应力,以提高其疲劳强度。

2) 冷成形弹簧钢 对于钢丝直径小于 8 ~ 10 mm 的弹簧,常用冷拉弹簧钢丝冷卷成形。钢丝在冷拔过程中,首先将盘条坯料加热至奥氏体组织后( $A_c$  以上 80 ~ 100 °C),再在 500 ~ 550 °C 的铅浴或盐浴中等温转变获得索氏体组织,然后经多次冷拔,得到均匀的所需直径和具有冷变形强化效果的钢丝。

冷拉钢丝在拉制过程中已被强化,所以在冷卷成型后,不必再作淬火处理,只需在 200 ~ 300 °C 进行一次去应力退火,以消除在冷拉、冷卷过程中产生的应力并稳定弹簧尺寸。常用合金弹簧钢的牌号有 60Si2Mn、60Si2CrVA 和 50CrVA。合金弹簧钢主要用于制造各种弹性元件,如制作汽车、拖拉机、坦克、机车车辆的减震板弹簧和螺旋弹簧,大炮的缓冲弹簧,钟表的发条等。

#### 5. 滚动轴承钢

滚动轴承钢是制造各种滚动轴承的滚珠、滚柱、滚针的专用钢,也可做其它用途,如形状复杂的工具、冷冲模具、精密量具以及要求硬度高、耐磨性高的结构零件。

一般的轴承用钢是高碳低铬钢,其碳的质量分数为  $w_c = 0.95\% \sim 1.15\%$ ,属过共析钢,目的是保证轴承具有高的强度、硬度和足够的碳化物,以提高耐磨性。铬的含量为  $w_{Cr} = 0.4\% \sim 1.65\%$ ,铬的作用主要是提高淬透性,使组织均匀,并增加回火稳定性。铬与碳作用形成的  $(Fe, Cr)_3C$  合金渗碳体,能提高钢的硬度及耐磨性,铬还提高钢的回火稳定性。

滚动轴承钢的纯度要求极高,硫、磷含量限制极严( $w_s < 0.020\%$ ,  $w_p < 0.027\%$ )。因硫、磷形成非金属夹杂物,降低接触疲劳抗力,故它是一种高级优质钢(但在牌号后不加“A”字)。

滚动轴承钢的热处理包括预先热处理(球化退火)和最终热处理(淬火 + 低温回火)。

轴承钢淬火、回火后的组织为极细回火马氏体和分布均匀的细小碳化物以及少量的残余奥氏体,回火后硬度为 61 ~ 65 HRC。

对于精密轴承,由于低温回火不能完全消除残余应力和残余奥氏体。因此为了稳定尺寸,可在淬火后立即进行冷处理(-60 ~ -80 °C),以减少残余奥氏体量,然后再进行低温回火和磨削加工,最后再进行一次稳定尺寸的稳定化处理(在 120 ~ 130 °C 保温 10 ~ 20 h)。

常用滚动轴承钢的牌号、成分、热处理和主要用途见表 1.4.5。

表 1.4.5 常用滚动轴承钢的牌号、化学成分、热处理及用途

牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$						热 处 理			用途举例
	C	Cr	Mn	Si	S	P	淬火温度/ $^{\circ}\text{C}$	回火温度/ $^{\circ}\text{C}$	回火后硬度/HRC	
GCr9	1.00 ~ 1.10	0.90 ~ 1.20	0.25 ~ 0.45	0.15 ~ 0.35	0.020	0.027	810 ~ 830	150 ~ 170	62 ~ 66	直径 10 ~ 20 mm 的滚珠、滚柱及滚针
GCr15	0.95 ~ 1.05	1.40 ~ 1.65	0.25 ~ 0.45	0.15 ~ 0.35	0.020	0.027	825 ~ 845	150 ~ 170	62 ~ 66	壁厚 < 12 mm、外径 < 250 mm 的套圈, 直径为 25 ~ 50 mm 的钢球
GCr15 - SiMn	0.95 ~ 1.05	1.40 ~ 1.65	0.95 ~ 1.25	0.45 ~ 0.75	0.020	0.027	820 ~ 840	150 ~ 170	62	壁厚 12 mm、外径 > 250 mm 的套圈, 直径 > 50 mm 的滚珠

#### 1.4.4 合金工具钢

合金工具钢按用途分为合金刀具钢、合金模具钢、合金量具钢。

##### 1. 合金刀具钢

刀具钢是用来制造各种切削刀具的钢,如车刀、铣刀、钻头等,对刀具钢的性能要求是:高的硬度、高耐磨性、高的红硬性(红硬性是指钢在高温下保持高硬度的能力)、一定的韧性和塑性。

##### (1) 低合金刀具钢

为了保证高硬度和耐磨性,低合金刀具钢的碳的质量分数为  $w_c = 0.75\% \sim 1.45\%$ ,加入的合金元素硅、铬、锰可提高钢的淬透性,硅、铬还可以提高钢的回火稳定性,使其一般在  $300^{\circ}\text{C}$  以下回火后硬度仍保持 60 HRC 以上,从而保证一定的红硬性。钨在钢中可形成较稳定的特殊碳化物,基本上不溶于奥氏体,能使钢的奥氏体晶粒保持细小,增加淬火后钢的硬度,同时还提高钢的耐磨性及红硬性。

常用低合金刀具钢的牌号、成分、热处理及用途见表 1.4.6。

刀具毛坯经锻造后的预先热处理为球化退火,最终热处理采用淬火 + 低温回火,组织为细回火马氏体 + 粒状合金碳化物 + 少量残余奥氏体,硬度一般为 60 HRC。

##### (2) 高速钢

高速钢是一种红硬性、耐磨性较高的高合金工具钢,它的红硬性高达  $600^{\circ}\text{C}$ ,可以进行高速切削,故称为高速钢。高速钢具有高的强度、硬度、耐磨性及淬透性。

表 1.4.6 常用低合金刀具钢的牌号、成分、热处理及用途

牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$					试样淬火		退火状 态 HBS 不小于	用途举例
	C	Si	Mn	Cr	其他	淬火温 度/°C	HBC 不小于		
Cr06	1.30 ~ 1.45	0.40	0.40	0.50 ~ 0.70	—	780 ~ 810 水	64	241 ~ 187	锉刀、刮刀、刻刀、刀片、剃刀、 外科医疗刀具
Cr2	0.95 ~ 1.10	0.40	0.40	1.30 ~ 1.65	—	830 ~ 860 油	62	229 ~ 179	车刀、插刀、铰刀、冷轧辊等
9SiCr	0.85 ~ 0.95	1.20 ~ 1.60	0.30 ~ 0.60	0.95 ~ 1.25	—	830 ~ 860 油	62	241 ~ 197	丝锥、板牙、钻头、铰刀、齿轮、 铣刀、小型拉刀、冷冲模等
8MnSi	0.75 ~ 0.85	0.30 ~ 1.60	0.80 ~ 1.10	—	—	800 ~ 820 油	60	229	多用作木工凿子、锯条或其 它工具
9Cr2	0.85 ~ 0.95	0.40	0.40	1.30 ~ 1.70	—	820 ~ 850 油	62	217 ~ 179	尺寸较大的铰刀和车刀等刃 具、冷轧辊、冷冲模与冲头、木工 工具等
W	1.05 ~ 1.25	0.40	0.40	0.10 ~ 0.30	W0.80 ~1.20	800 ~ 830 水	62	229 ~ 187	低速切削硬金属刀具,如麻 花钻、车刀和特殊切削工具

高速钢的成分特点是含有较高的碳和大量形成碳化物的元素钨、钼、铬、钒、钴、铝等,碳的质量分数为  $w_C = 0.70\% \sim 1.60\%$ ,合金元素总量  $w_{Me} > 10\%$ 。

由于高速工具钢含有大量合金元素,故铸态组织出现莱氏体,属于莱氏体钢。其中共晶碳化物呈鱼骨状且分布很不均匀,造成强度及韧性下降。这些碳化物不能用热处理来消除,必须通过高温轧制及反复锻造将其击碎,并使碳化物呈小块状均匀分布在基体上。因此,高速工具钢锻造的目的不仅仅在于成形,更重要的是打碎莱氏体中粗大的碳化物。

因高速工具钢的奥氏体稳定性很好,经锻造后空冷,也会发生马氏体转变。为了改善其切削加工性能,消除残余内应力,并为最终热处理作组织准备,必须进行退火。通常采用等温球化退火(即在  $830 \sim 880^\circ\text{C}$  范围内保温后,较快地冷却到  $720 \sim 760^\circ\text{C}$  范围内等温),退火后组织为索氏体及粒状碳化物,硬度为  $210 \sim 250$  HBS。

高速钢的红硬性主要决定于马氏体中合金元素的含量,即加热时溶入奥氏体中的合金元素量。对 W18Cr4V 钢,随着加热温度升高,溶入奥氏体中的合金元素量增加,为了使钨、钼、钒元素尽可能多地溶入奥氏体,提高钢的红硬性,其淬火温度应高(为  $1270 \sim 1280^\circ\text{C}$ )。但加热温度过高时,奥氏体晶粒粗大,剩余碳化物聚集,使钢性能变坏,故高速工具钢的淬火加热温度一般不超过  $1300^\circ\text{C}$ 。高速工具钢的淬火方法常用油淬空冷的双介质淬火法或马氏体分级淬火法。淬火后的组织是隐针马氏体、粒状碳化物及  $20\% \sim 25\%$  的残余奥氏体。

为了消除淬火应力,减少残余奥氏体量,稳定组织,提高力学性能指标,淬火后必须进行回火。在  $560^\circ\text{C}$  左右回火过程中,由马氏体中析出高度弥散的钨、钒的碳化物,使钢的硬度明显提

高,同时残余奥氏体中也析出碳化物,使其碳和合金元素含量降低, $M_s$ 点上升,在回火冷却过程中残余奥氏体转变成马氏体使硬度提高达到64~66 HRC,形成二次硬化。

由于W18Cr4V钢在淬火状态约有20%~25%的残余奥氏体,一次回火难于全部消除,经三次回火后即可使残余奥氏体减至最低量(第一次回火1h降到10%左右,第二次回火后降到3%~5%,第三次回火后降到最低量1%~2%)。

高速钢正常淬火、回火后组织为极细小的回火马氏体+较多的粒状碳化物及少量残余奥氏体,其硬度为63~66 HRC。

我国常用的高速工具钢有三类,见表1.4.7。

W18Cr4V是钨系高速工具钢,其热硬性较高,过热敏感性较小,磨削性好,但碳化物较粗大,热塑性差,热加工废品率较高。W18Cr4V钢适用于制造一般的高速切削刀具,但不适合作薄刃的刀具。

表 1.4.7 常用高速工具钢的牌号、成分、热处理、硬度及热硬性

种类	牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$						热处理			红硬性 /HRC
		C	Cr	W	Mo	V	其他	淬火温度 /°C	回火 温度/°C	回火后硬 度/HRC	
钨系	W18Cr4V	0.70~ 0.80	3.80~ 4.40	17.50~ 19.00	0.30	1.00~ 1.40		1 270~ 1 285	550~ 570	63	61.5 ~ 62
钨钼系	CW6Mo5Cr4V2	0.95~ 1.05	3.80~ 4.40	5.50~ 6.75	4.50~ 5.50	1.75~ 2.20		1 190~ 1 210	540~ 560	65	—
	W6Mo5Cr4V2	0.80~ 0.90	3.80~ 4.40	5.50~ 6.75	4.50~ 5.50	1.75~ 2.20		1 210~ 1 230	540~ 560	64	60~ 61
	W6Mo5Cr4V3	1.00~ 1.10	3.75~ 4.50	5.00~ 6.75	4.75~ 5.50	2.80~ 3.30		1 200~ 1 240	540~ 560	64	64
	W9Mo3Cr4V	0.77~ 0.87	3.80~ 4.40	8.50~ 9.50	2.70~ 3.30	1.30~ 1.70		1 210~ 1 230	540~ 560	64	—
超硬系	W18Cr4V2Co8	0.75~ 0.85	3.75~ 5.00	17.50~ 19.00	0.50~ 1.25	1.80~ 2.40	Co:7.00~ 9.50	1 270~ 1 290	540~ 560	65	64
	W6Mo5Cr4V2Al	1.05~ 1.20	3.80~ 4.40	5.50~ 6.75	4.50~ 5.50	1.75~ 2.20	Al:0.80~ 1.20	1 230~ 1 240	540~ 560	65	65

## 2. 合金模具钢

根据工作条件的不同,模具钢又可分为冷作模具钢和热作模具钢。

### (1) 冷作模具钢

冷作模具钢用于制造在室温下使金属变形的模具,如冷冲模、冷镦模、拉丝模、冷挤压模等。它们在工作时承受高的压力、摩擦与冲击,因此冷作模具要求具有高的硬度和耐磨性、较高强度、足够韧性和良好的工艺性。

常用来制作冷作模具的合金工具钢中有一部分为低合金工具钢,如 CrWMn、9CrWMn、9Mn2V 以及列在表 1.4.6 中的 9SiCr、Cr2、9Cr2 等。对尺寸比较大、工作载荷较重的冷作模具应采用淬透性比较高的低合金工具钢制造。对于尺寸不很大但形状复杂的冷冲模,为减少变形也应使用此类钢制造。

对于要求热处理变形小的大型冷作模具采用高碳高铬模具钢(Cr12、Cr12MoV)。Cr12 型钢中主要的碳化物是(Cr、Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>,这些碳化物在高温加热淬火时大量溶于奥氏体,增加钢的淬透性。Cr12 型钢缺点是碳化物多而且分布不均匀,残余奥氏体含量也高,强度、韧性大为降低。

在 Cr12 钢基础上加入钼、钒后,除了可以进一步提高钢的回火稳定性,增加淬透性外,还能细化晶粒,改善韧性,所以 Cr12MoV 钢性能优于 Cr12 钢。

含有钼、钒的高碳高铬钢在 500 °C 左右回火后产生二次硬化,因此具有高的硬度和耐磨性。冷作模具用合金工具钢的化学成分、热处理及硬度见表 1.4.8。

## (2) 热作模具钢

热作模具钢是用来制作加热的固态金属或液态金属在压力下成形的模具。前者称为热锻模或热挤压模,后者称为压铸模。

由于模具承受载荷很大,要求强度高。模具在工作时往往还承受很大冲击,所以要求韧性好,即要求综合力学性能好,同时又要求有良好的淬透性和抗热疲劳性。

常用热作模具钢的牌号、化学成分、热处理及硬度见表 1.4.9。

1) 热锻模具钢 包括锤锻模用钢以及热挤压模、热锻模及精锻模用钢。一般碳的质量分数为  $w_c = 0.4\% \sim 0.6\%$ ,以保证淬火及中、高温回火后具有足够的强度与韧性。

热锻模经锻造后需进行退火,以消除锻造内应力,均匀组织,降低硬度,改善切削加工性能。加工后通过淬火、中温回火,得到主要是回火屈氏体的组织,硬度一般为 40 ~ 50 HRC 来满足使用要求。

常用的热锻模具钢牌号是 5CrNiMo、5CrMnMo。5CrNiMo 钢具有良好韧性、强度、耐磨性和淬透性。5CrNiMo 钢是世界通用的大型锤锻模用钢,适于制造形状复杂的、受冲击载荷重的大型及特大型的锻模。5CrMnMo 钢以锰代镍,适于制造中型锻模。

热作模具钢中的 4CrMnSiMoV 钢具有良好的淬透性,故尺寸较大的模具空冷也可得到马氏体组织,并具有较好的回火稳定性和良好的力学性能,其抗热疲劳性及较高温度下的强度和韧性接近 5CrNiMo 钢,因此在大型锤锻模和水压机锻造用模上,4CrMnSiMoV 钢可以代替 5CrNiMo 钢。

铬系热模具钢 4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV,可用于制作尺寸不大的热锻模、热挤压模、高速精锻模、锻造压力机模等。5Cr4Mo3SiMnVA1 为冷热兼用的模具钢,可用其制作压力机热压冲头及凹模,寿命较长。

2) 压铸模钢 压铸模工作时与炽热金属接触时间较长,要求有较高的耐热疲劳性,较高的导热性,良好的耐磨性和必要的高温力学性能。此外,还需要具有耐高温金属液的腐蚀和冲刷能力。

常用压铸模钢是 3Cr2W8V 钢,具有高的热硬性和抗热疲劳性。这种钢在 600 ~ 650 °C 下强度可达  $\sigma_b = 1\,000 \sim 1\,200$  MPa,淬透性也较好。

近些年来,铝镁合金压铸模用钢还可用铬系热模具钢 4Cr5MoSiV 及 4Cr5MoSiV,其中用 4Cr-5MoSiV 钢制作的铝合金压铸模具,寿命要高于 3Cr2W8V 钢。

## 3. 合金量具钢



量具钢是用于制造游标卡尺、千分尺、量块、塞规等测量工件尺寸的工具用钢。

量具在使用过程中与工件接触,受到磨损与碰撞,因此要求工作部分应有高的硬度(58~64 HRC)、耐磨性、尺寸稳定性和足够的韧性。

合金工具钢 9Mn2V、CrWMn 以及 GCr15 钢,由于淬透性好,用油淬造成的内应力比水淬的碳钢小,低温回火后残余内应力也较小;同时合金元素使马氏体分解温度提高,因而使组织稳定性提高,故在使用过程中尺寸变化倾向较碳素工具钢小。因此要求高精度和形状复杂的量具,常用合金工具钢制造。

量具的最终热处理主要是淬火、低温回火,以获得高硬度和高耐磨性。对于高精度的量具,为保证尺寸稳定,在淬火与回火之间进行一次冷处理(-70~-80℃),以消除淬火后组织中的大部分残余奥氏体。对精度要求特别高的量具,在淬火、回火后还需进行时效处理。时效温度一般为 120~130℃,时效时间 24~36 h,以进一步稳定组织,消除内应力。量具在精磨后还要进行 8 h 左右的时效处理,以消除精磨中产生的内应力。

#### 1.4.5 特殊性能钢

特殊性能钢是指具有特殊的物理、化学性能的钢。其种类较多,常用的特殊性能钢有不锈钢、耐热钢和耐磨钢。

##### 1. 不锈钢

在腐蚀性介质中具有耐腐蚀能力的钢,一般称为不锈钢。

##### (1) 金属腐蚀

腐蚀通常可分为化学腐蚀和电化学腐蚀两种类型。化学腐蚀指金属与周围介质发生纯化学作用的腐蚀,在腐蚀过程中没有微电流产生。例如钢的高温氧化、脱碳等。电化学腐蚀指金属在大气、海水及酸、碱、盐类溶液中产生的腐蚀,在腐蚀过程中有微电流产生。在这两种腐蚀中,危害最大的是电化学腐蚀。

大部分金属的腐蚀都属于电化学腐蚀。

为了提高钢的耐电化学腐蚀能力,主要采取以下措施:

1) 提高基体电极电位 例如当  $w_{Cr} > 11.7\%$ ,使绝大多数铬都溶于固溶体中,使基体电极电位由 -0.56 V 跃增为 +0.20 V,从而提高耐电化学腐蚀的能力。

2) 减少原电池形成的可能性 使金属在室温下只有均匀单相组织。例如铁素体钢、奥氏体钢。

3) 形成钝化膜 在钢中加入大量合金元素,使金属表面形成一层致密的氧化膜(如  $Cr_2O_3$  等),使钢与周围介质隔绝,提高耐腐蚀能力。

##### (2) 常用不锈钢

目前常用的不锈钢,按其组织状态主要分为马氏体不锈钢、铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢三大类,其牌号、成分、热处理及用途见表 1.4.10。

1) 马氏体不锈钢 常用马氏体不锈钢碳的质量分数为  $w_C = 0.1\% \sim 0.4\%$ ,铬的含量为  $w_{Cr} = 11.50\% \sim 14.00\%$ ,属铬不锈钢,通常指 Cr13 型不锈钢。淬火后能得到马氏体,故称为马氏体不锈钢。它随着钢中碳的质量分数的增加,钢的强度、硬度、耐磨性提高,但耐蚀性下降。为了提高耐蚀性,不锈钢的碳的质量分数一般  $w_C < 0.4\%$ 。

碳的质量分数较低的 1Cr13 和 2Cr13 钢,具有良好的抗大气、海水、蒸汽等介质腐蚀的能力,塑性、韧性很好。适用于制造在腐蚀条件下工作、受冲击载荷的结构零件,如汽轮机叶片、各种阀、机泵等。这两种钢常用热处理方法为淬火后高温回火,得到回火索氏体组织。

碳的质量分数较高的 3Cr13、7Cr17 钢,经淬火后低温回火,得到回火马氏体和少量碳化物,硬度可达 50 HRC 左右。用于制造医疗手术工具、量具、弹簧、轴承及弱腐蚀条件下工作而要求高硬度的耐蚀零件。

2) 铁素体不锈钢 典型牌号有 1Cr17、1Cr17Mo 等。常用的铁素体不锈钢中,  $w_C = 0.12\%$ ,  $w_{Cr} = 12\% \sim 13\%$ , 这类钢从高温到室温,其组织均为单相铁素体组织,所以在退火和正火状态下使用,不能利用热处理来强化。其耐蚀性、塑性、焊接性均优于马氏体不锈钢,但强度比马氏体不锈钢低,主要用于制造耐蚀零件,广泛用于硝酸和氮肥制造设备中。

3) 奥氏体不锈钢 这类钢一般铬的含量为  $w_{Cr} = 17\% \sim 19\%$ ,  $w_{Ni} = 8\% \sim 11\%$ , 故简称 18-8 型不锈钢。其典型牌号有 0Cr19Ni9、1Cr18Ni9、0Cr18Ni11Ti、00Cr17Ni14Mo2 钢等。这类钢中碳的质量分数不能过高,否则易在晶间析出碳化物  $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 。引起晶间腐蚀,使钢中铬量降低产生贫铬区,故其碳的质量分数一般控制在  $w_C = 0.10\%$  左右,有时甚至控制在 0.03% 左右。有晶间腐蚀的钢,稍受力即沿晶界开裂或粉碎。

这类钢在退火状态下呈现奥氏体和少量碳化物组织,碳化物的存在,对钢的耐腐蚀性有很大损伤,故采用固溶处理方法来消除。固溶处理是把钢加热到 1100 °C 左右,使碳化物溶解在高温下所得到的奥氏体中,然后水淬快冷至室温,即获得单相奥氏体组织,提高钢的耐蚀性。

由于铬镍不锈钢中铬、镍的含量高,且为单相组织,故其耐蚀性高。它不仅能抵抗大气、海水、燃气的腐蚀,而且能抗酸的腐蚀,抗氧化温度可达 850 °C,具有一定的耐热性。铬镍不锈钢没有磁性,故用它制造电器、仪表零件,不受周围磁场及地球磁场的影响。又由于塑性很好,可以顺利进行冷、热压力加工。

## 2. 耐热钢

耐热钢是抗氧化钢和热强钢的总称。

钢的耐热性包括高温抗氧化性和高温强度两方面的综合性能。高温抗氧化性是指钢在高温下对氧化作用的抗力;而高温强度是指钢在高温下承受机械载荷的能力,即热强性。因此,耐热钢既要求高温抗氧化性能好,又要求高温强度高。

在钢中加入铬、硅、铝等合金元素,它们与氧亲和力大,优先被氧化,形成一层致密、完整、高熔点的氧化膜  $(Cr_2O_3、Fe_2SiO_4、Al_2O_3)$ ,牢固覆盖于钢的表面,可将金属与外界的高温氧化性气体隔绝,从而避免进一步被氧化。

钢铁材料在高温下除氧化外其强度也大大下降,这是由于随温度升高,金属原子间结合力减弱,特别当工作温度接近材料再结晶温度时,也会缓慢地发生塑性变形,且变形量随着时间的延长而增大,最后导致金属破坏,这种现象称为蠕变。

为了提高钢的高温强度,在钢中加入铬、钼、锰、铌等元素,可提高钢的再结晶温度。在钢中加入钛、铌、钒、钨、钼以及铝、硼、氮等元素,形成弥散相来提高高温强度。

常用耐热钢的牌号、化学成分、热处理、力学性能及用途见表 1.4.11。

常用的耐热钢,按正火状态下的组织不同主要有珠光体钢、马氏体钢、奥氏体钢三类。

其中 15CrMo 钢是典型的锅炉用钢,可用于制造在 500 °C 以下长期工作的零件,此钢虽然耐热性不高,但其工艺性能(焊接性、压力加工性和切削加工性等)和物理性能(导热性和膨胀系数等)都较好。4Cr9Si2、4Cr10Si2Mo 钢适用于 650 °C 以下受动载荷的部件,如汽车发动机、柴油机的排气阀,故此两种钢又称为气阀钢,也可用作 900 °C 以下的加热炉构件,如料盘、炉底板等。1Cr13、0Cr18Ni11Ti 钢既是不锈钢又是良好的热强钢。1Cr13 钢在 450 °C 左右和 0Cr18Ni11Ti 钢在 600 °C 左右都具有足够的热强性。0Cr18Ni11Ti 钢的抗氧化能力可达 850 °C,是一种应用广泛的耐热钢,可用来制造高压锅炉的过热器、化工高压反应器等。

### 3. 耐磨钢

耐磨钢是指在冲击和磨损条件下使用的高锰钢。

高锰钢的主要成分是  $w_C = 0.9\% \sim 1.5\%$ ,  $w_{Mn} = 11\% \sim 14\%$ 。经热处理后得到单相奥氏体组织,由于高锰钢极易冷变形强化,使切削加工困难,故基本上是铸造成形后使用。

高锰钢铸件的牌号,前面的“ZG”是代表“铸钢”二字汉语拼音字首,其后是化学元素符号“Mn”,随后数字“13”表示平均锰的质量分数的百倍(即平均  $w_{Mn} = 13\%$ ),最后的一位数字 1、2、3、4 表示顺序号。如 ZGMn13 - 1,表示 1 号铸造高锰钢,其碳的质量分数最高( $w_C = 1.00\% \sim 1.50\%$ );而 4 号铸造高锰钢 ZGMn13 - 4,碳的质量分数低( $w_C = 0.90\% \sim 1.20\%$ )。高锰钢铸件的牌号、化学成分、力学性能及用途见表 1.4.12。

表 1.4.12 高锰钢铸件的牌号、化学成分、热处理、力学性能及用途

牌 号	化学成分 $w_{Me} \times 100$					热处理 (水韧处理)		力 学 性 能				用途举例
	C	Si	Mn	S	P	淬火温 度/°C	冷却 介质	$\sigma_b$ /	$\delta_5 \times$	$A_k$	HBS	
								MPa	100	/J		
ZGMn13 - 1	1.00~ 1.50	0.30~ 1.00	11.00~ 14.00	0.050	0.090	1 060~ 1 100	水	637	20	—	229	用于结构简 单、要求以耐磨 为主的低冲击 铸件,如衬板、齿 板、辊套、铲齿等
ZGMn13 - 2	1.00~ 1.40	0.30~ 1.00	11.00~ 14.00	0.050	0.090	1 060~ 1 100	水	637	20	118	229	
ZGMn13 - 3	0.90~ 1.30	0.30~ 0.80	11.00~ 14.00	0.050	0.080	1 060~ 1 100	水	686	25	118	229	
ZGMn13 - 4	0.90~ 1.20	0.30~ 0.80	11.00~ 14.00	0.050	0.070	1 060~ 1 100	水	735	35	118	229	

注:牌号、化学成分、热处理、力学性能摘自 GB 5680—85《高锰钢铸件技术条件》。

高锰钢由于铸态组织是奥氏体 + 碳化物,而碳化物要沿奥氏体晶界析出,降低了钢的韧性与耐磨性,所以必须进行水韧处理。所谓“水韧处理”,是将高锰钢铸件加热到 1 000 ~ 1 100 °C,使碳化物全部溶解到奥氏体中,然后在水中急冷,防止碳化物析出,获得均匀的、单一的过饱和单相奥氏体组织。这时其强度、硬度并不高,而塑性、韧性却很好( $\sigma_b = 637 \sim 735 \text{ MPa}$ ,  $\delta_5 = 20\% \sim$

35% ,硬度 229 HBS , $A_k$  118 J)。但是 ,当工作时受到强烈的冲击或较大压力时 ,则表面因塑性变形会产生强烈的冷变形强化 ,从而使表面层硬度提高到 500~550 HBW ,因而获得高的耐磨性 ,而心部仍然保持着原来奥氏体所具有的高的塑性与韧性 ,能承受冲击。当表面磨损后 ,新露出的表面又可在冲击和磨损条件下获得新的硬化层。因此 ,这种钢具有很高耐磨性和抗冲击能力。但要指出 ,这种钢只有在强烈冲击和磨损下工作才显示出高的耐磨性 ,而在一般机器工作条件下高锰钢并不耐磨。

高锰钢被用来制造在高压、强冲击和剧烈摩擦条件下工作的抗磨零件 ,如坦克和矿山拖拉机履带板、破碎机颚板、挖掘机铲齿、铁道道岔及球磨机衬板等。

## 1.5 有色金属

### 1.5.1 铝及铝合金

#### 1. 工业纯铝

纯铝为面心立方晶格 ,无同素异构转变 ,呈银白色。塑性好 (  $\delta$  = 80% )、强度低 (  $\sigma_b$  = 80~100 MPa ) ,一般不能作为结构材料使用 ,可经冷塑性变形使其强化。铝的密度较小 (约  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  ) ,仅为铜的三分之一 ;熔点  $660^\circ\text{C}$  ;磁化率低 ,接近非磁材料 ;导电导热性好 ,仅次于银、铜、金而居第四位。铝在大气中其表面易生成一层致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜而阻止进一步的氧化 ,故耐大气腐蚀能力较强。

根据上述特点 ,纯铝主要用于制作电线、电缆 ,配制各种铝合金以及制作要求质轻、导热或耐大气腐蚀但强度要求不高的器具。

纯铝中含有铁、硅等杂质 ,随着杂质含量的增加 ,其导电性、导热性、耐大气腐蚀性及塑性将下降。

工业纯铝分未加压力加工产品(铝锭)和压力加工产品(铝材)两种。按 GB 1196—88 规定 ,铝锭的牌号有 A199.7、A199.6、A199.5、A199、A198 五种。铝的质量分数不低于 99.0% 的铝材为纯铝。按 GB/T 16474—1996 规定 ,铝材的牌号有 1070A、1060、1050A、1035、1200 等(即化学成分近似于旧牌号 L1、L2、L3、L4、L5) ,牌号中数字越大 ,表示杂质的含量越高。

#### 2. 铝合金分类

由于纯铝的强度低 ,向铝中加入硅、铜、镁、锌、锰等合金元素制成铝合金 ,具有较高的强度 ,并且还可利用变形或热处理方法 ,进一步提高其强度。故铝合金可作为结构材料制造承受一定载荷的结构零件。

根据铝合金的成分及工艺特点 ,可分为变形铝合金和铸造铝合金两类。铝合金相图的一般类型如图 1.5.1 所示 ,凡位于  $D$  左边的合金 ,在加热时能形成单相固溶体组织 ,这类合金塑性较高 ,适于压力加工 ,故称为变形铝合金。合金成分位于  $D$  以右合金 ,都具有低熔点共晶

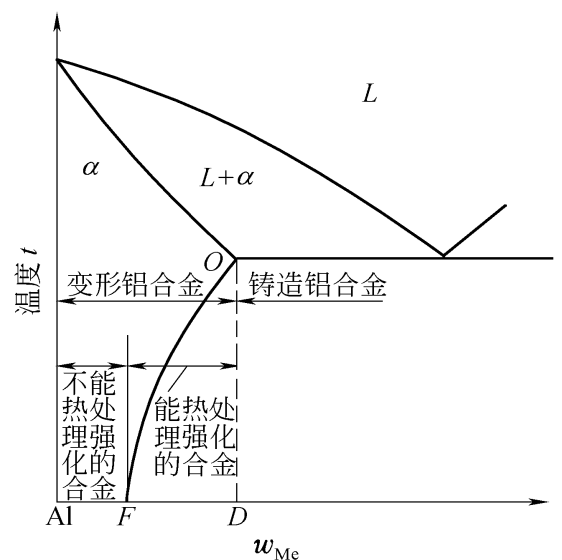


图 1.5.1 铝合金相图的一般类型

组织流动性好,塑性低,适于铸造而不适于压力加工,故称为铸造铝合金。对于变形铝合金来说,位于F点左边的合金,其固溶体的成分不随温度的变化而变化,故不能用热处理强化,称为不能热处理强化的铝合金。成分在F与D点之间的合金,其固溶体成分随温度的变化而改变,可用热处理来强化,故称为能热处理强化的铝合金。

### 3. 铝合金的热处理

当铝合金加热到相区,保温后在水中快速冷却,其强度和硬度并没有明显升高,而塑性却得到改善,这种热处理称为固溶热处理。由于固溶热处理后获得的过饱和固溶体是不稳定的,有分解出强化相过渡到稳定状态的倾向。如在室温放置相当长的时间,强度和硬度会明显升高,而塑性明显下降。

固溶处理后铝合金的强度和硬度随时间变化而发生显著提高的现象,称为时效强化或沉淀硬化。在室温下进行的时效为自然时效,加热条件下进行的时效为人工时效。

在不同温度下进行人工时效时,其效果也不同,时效温度愈高,时效速度愈快,其强化效果愈低。

### 4. 变形铝合金

常用变形铝合金的牌号、成分、力学性能见表1.5.1。

表 1.5.1 常用变形铝合金的牌号、成分、力学性能(摘自 GB/T 16474—1996)

新牌号	旧牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$					直径及板厚/mm	力学性能	
		Cu	Mg	Mn	Zn	其他		$\sigma_b$ /MPa	$\delta_{10} \times 100$
5A05	LF5	0.10	4.8~5.5	0.30~0.60	0.20	—	200	265	15
3A21	LF21	0.20	—	1.0~1.6	—	—	所有	< 167	20
2A01	LY1	2.2~3.0	0.20~0.50	0.20	0.10	Ti 0.15	—	—	—
2A11	LY11	3.8~4.8	0.40~0.80	0.40~0.80	0.30	Ti 0.15	> 2.5~4.0	< 235 373	12 15
2A12	LY12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.30~0.90	0.30	Ti 0.15	> 2.5~4.0	216 456	14 8
7A04	LC4	1.4~2.0	1.8~2.8	0.20~0.60	5.0~7.0	Cr 0.10~0.25	0.50~4.0	245	10
							> 2.5~4.0	490	7
							20~100	549	6
2A12	LD2	0.20~0.6	0.45~0.90	或 Cr 0.15~0.35	—	Si 0.5~1.2 Ti 0.15	20~150	304	8
2A50	LD5	1.8~2.6	0.40~0.8	0.40~0.80	0.30	Si 0.7~1.2 Ti 0.15	20~150	382	10

变形铝合金按其性能特点可分为防锈铝、硬铝、超硬铝与锻铝等。通常加工成各种规格的型材(板、带、线、管等)产品供应。

变形铝合牌号用(GB/T 16474—1996 规定)2 ~ 8 系列表示。牌号第一位数字表示组别,按铜、锰、硅、镁和硅、锌,其他元素的顺序来确定合金组别;牌号第二位的字母表示原始合金的改型情况,如果牌号第二位的字母是 A,表示为原始合金,如果是 B~Y 的字母,则表示为原始合金的改型合金;牌号的最后两位数字没有特殊意义,仅用来区分同一组中不同的铝合金。

防锈铝合金属于热处理不能强化的铝合金,常采用冷变形方法提高其强度。主要有 Al-Mn、Al-Mg 合金。这类铝合金具有适中的强度、优良的塑性和良好的焊接性,并具有很好的耐蚀性,故称为防锈铝合金,常用于制造油罐、各式容器、防锈蒙皮等。常用牌号有 5A05 等。

其他类都属于热处理能强化的铝合金,其中硬铝属于 Al-Cu-Mg 系,超硬铝属于 Al-Cu-Mg-Zn 系。硬铝和超硬铝在固溶处理后,可进行人工时效或自然时效,时效后强度很高,其中超硬铝的强化作用最为强烈。这两类铝合金的耐蚀性较差,为了提高铝合金的耐蚀性,常采用包铝法(即包一层纯铝)。2A01 硬铝有很好的塑性,大量用于制造铆钉,飞机上常用铆钉的硬铝牌号为 2A10。它比 2A01 铜的含量稍高,镁的含量低,塑性好,且孕育期长,又有较高的抗剪强度。2A11 硬铝既有相当高的硬度又有足够的塑性,在仪器、仪表及飞机制造中获得广泛的应用。7A04 超硬铝,多用于制造飞机上受力大的结构零件,如起落架、大梁等。

锻铝合金大多是 Al-Mg-Si-Cu 系,含合金元素较少,有良好的热塑性和耐蚀性,适于用压力加工来制造各种零件,有较高的力学性能。一般锻造后再经固溶处理和时效处理。常用牌号为 2A50、2A70 等。

## 5. 铸造铝合金

铸造铝合金中有一定数量的共晶组织,故具有良好的铸造性能,但塑性差,常采用变质处理和热处理的办法提高其力学性能。铸造铝合金可分为 Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系和 Al-Zn 系四大类,其牌号、成分、力学性能及用途见表 1.5.2。

铸造铝合金代号用“ZL”(铸铝)及三位数字表示。第一位数字表示合金类别(如 1 表示 Al-Si 系,2 表示 Al-Cu 系,3 表示 Al-Mg 系,4 表示 Al-Zn 系等);后两位数字为顺序号,顺序号不同,化学成分不同。

### (1) Al-Si 系合金

Al-Si 系铸造铝合金又称硅铝明,是铸造铝合金中应用最广泛的一类。这种合金流动性好,熔点低,热裂倾向小,耐蚀性和耐热性好,易气焊,但粗大的硅晶体严重降低合金的力学性能。因此生产中常采用变质处理提高合金的力学性能,即在浇注前向合金溶液中加入  $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$  混合物的变质剂(加入量为合金重量的 2%~3%),变质剂中钠能促进硅形核,并阻碍其晶体长大。因此合金的性能显著提高。ZL102 经变质处理,其力学性能由  $\sigma_b = 140 \text{ MPa}$  提高到  $\sigma_b = 180 \text{ MPa}$ ,  $\delta = 3\%$  提高到  $\delta = 8\%$ 。

为提高硅铝明的强度,常加入能产生时效强化的 Cu、Mg、Mn 等合金元素制成特殊硅铝明,这类合金除变质处理外,还可固溶时效处理,进一步强化合金。

### (2) 其他铸造铝合金

Al-Cu 铸造铝合金耐热性好,但由于其铸造性能不好,有热裂和疏松倾向,耐蚀性差,比强

度低于一般优质硅铝明,故有被其他铸造铝合金取代的趋势。常用牌号有 ZL201、ZL202。

Al - Mg 铸造铝合金耐蚀性好,强度高,密度小 ( $2.55 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ),但其铸造性能差,耐热性低,熔铸工艺复杂,时效强化效果小,常用牌号有 ZL301、ZL302。

Al - Zn 铸造铝合金铸造性能好,铸态下可自然时效,是一种铸态下高强度合金,价格是铝合金中最便宜的,但耐蚀性差,热裂倾向大,有应力腐蚀断裂倾向,密度大。常用牌号有 ZL401、ZL402。

## 1.5.2 铜及铜合金

### 1. 工业纯铜

铜是贵重有色金属,是人类应用最早和最广的一种有色金属,其全世界产量仅次于钢和铝。工业纯铜又称紫铜,密度为  $8.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,熔点为  $1083^\circ\text{C}$ 。纯铜具有良好的导电、导热性,其晶体结构为面心立方晶格,因而塑性好,容易进行冷热加工。同时纯铜有较高的耐蚀性,在大气、海水及不少酸类中皆能耐蚀。但其强度低,强度经冷变形后可以提高,但塑性显著下降。

工业纯铜按杂质含量可分为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  四种。“T”为铜的汉语拼音字首,其数字越大,纯度越低。如  $T_1$  的  $w_{\text{Cu}} = 99.95\%$ ,而  $T_4$  的  $w_{\text{Cu}} = 99.50\%$ ,余为杂质含量。纯铜一般不作结构材料使用,主要用于制造电线、电缆、导热零件及配制铜合金。

### 2. 黄铜

黄铜是以锌为主要合金元素的铜锌合金。按化学成分分为普通黄铜和特殊黄铜两类。

普通黄铜是由铜与锌组成的二元合金。它的色泽美观,对海水和大气腐蚀有很好的抗力。当  $w_{\text{Cu}} < 32\%$  时为单相黄铜,单相黄铜塑性好,适宜于冷、热压力加工;当  $w_{\text{Cu}} > 32\%$  后,组成双相黄铜,适宜于热压力加工。

黄铜的代号用“H”(黄的汉语拼音字首) + 数字表示,数字表示铜的平均质量分数。

H80 色泽好,可以用来制造装饰品,故有“金色黄铜”之称。H70 强度高、塑性好,可用深冲压的方法制造弹壳、散热器、垫片等零件,故有“弹壳黄铜”之称。

H62、H59 具有较高的强度与耐蚀性,且价格便宜,主要用于热压、热轧零件。

为改善黄铜的某些性能,常加入少量 Al、Mn、Sn、Si、Pb、Ni 等合金元素,形成特殊黄铜。

特殊黄铜的代号是在“H”之后标以主加元素的化学符号,并在其后标以铜及合金元素的质量分数。例如 HPb59 - 1 表示  $w_{\text{Cu}} = 59\%$ 、 $w_{\text{Pb}} = 1\%$ ,余量为  $w_{\text{Zn}}$  的铅黄铜。

### 3. 青铜

青铜原指人类历史上应用最早的一种 Cu - Sn 合金。但逐渐地把除锌以外的其它元素的铜基合金,也称为青铜。所以青铜包含锡青铜、铝青铜、铍青铜、硅青铜和铅青铜等。

青铜的代号为“Q(青) + 主加元素符号及其质量分数 + 其他元素符号及质量分数”。铸造青铜则在代号(牌号)前加“ZCu”。

#### (1) 锡青铜

以 Sn 为主加入元素的铜合金,我国古代遗留下来的钟、鼎、镜、剑等就是用这种合金制成的,至今已有几千年的历史,仍完好无损。

锡青铜铸造时,流动性差,易产生分散缩孔及铸件致密性不高等缺陷,但它在凝固时体积收缩小,不会在铸件某处形成集中缩孔,故适用于铸造对外形尺寸要求较严格的零件。

锡青铜的耐腐蚀性比纯铜和黄铜都高,特别是在大气、海水等环境中。耐磨损性能也高,多用于制造轴瓦、轴套等耐磨零件。

常用锡青铜牌号有 QSn4 - 3、QSn6.5 - 0.1、ZCuSn10P1。

## (2) 铝青铜

铝青铜是以铝为主加元素的铜合金,它不仅价格低廉,且强度、耐磨性、耐蚀性及耐热性比黄铜和锡青铜都高,还可进行热处理(淬火、回火)强化。当含 Al 量小于 5% 时,强度很低,塑性高;当含 Al 量达到 12% 时,塑性已很差,加工困难。故实际应用的铝青铜的  $w_{Al}$  一般在 5% ~ 10% 之间。当  $w_{Al} = 5\% \sim 7\%$  时,塑性最好,适于冷变形加工。当  $w_{Al} = 10\%$  左右时,常用于铸造。

常用铝青铜牌号有 QAl7。

铝青铜在大气、海水、碳酸及大多数有机酸中具有比黄铜和锡青铜更高的耐蚀性。因此铝青铜是无锡青铜中应用最广的一种,也是锡青铜的重要代用品,缺点是其焊接性能较差。铸造铝青铜常用来制造强度及耐磨性要求较高的摩擦零件,如齿轮、轴套、蜗轮等。

## (3) 铍青铜

铍青铜的含 Be 量很低,约  $w_{Be} = 1.7\% \sim 2.5\%$ ,Be 在 Cu 中的溶解度随温度而变化,故它是唯一可以固溶时效强化的铜合金,经固溶处理及人工时效后,其性能可达  $\sigma_b = 1\ 200\ \text{MPa}$ ,  $\delta = 2\% \sim 4\%$ , 330 ~ 400 HBS。

铍青铜还有较高的耐蚀性和导电、导热性,无磁性。此外,有良好的工艺性,可进行冷、热加工及铸造成形。通常制作弹性元件及钟表、仪表、罗盘仪器中的零件,电焊机电极等。

## 1.5.3 钛及其合金

钛及其合金具有质量轻、比强度高、良好的耐蚀性。钛及其合金还有很高的耐热性,实际应用的热强钛合金工作温度可达 400 ~ 500 °C,因而钛及其合金已成为航空、航天、机械工程、化工、冶金工业中不可缺少的材料。但由于钛在高温中异常活泼,熔点高,熔炼、浇注工艺复杂且价格昂贵,成本较高,因此使用受到一定限制。

### 1. 纯钛

纯钛是灰白色轻金属,密度为 4.54g/cm<sup>3</sup>,熔点为 1 668 °C,固态下有同素异晶转变,在 882.5 °C 以下为  $\alpha$ -Ti(密排六方晶格),882.5 °C 以上为  $\beta$ -Ti(体心立方晶格)。

纯钛的牌号为 TA0、TA1、TA2、TA3。TA0 为高纯钛,仅在科学研究中应用,其余三种均含有一定量的杂质,称工业纯钛。

纯钛焊接性能好、低温韧性好、强度低、塑性好,易于冷压力加工。

### 2. 钛合金

钛合金可分为三类:钛合金、钛合金和( + )钛合金。我国的钛合金牌号以 TA、TB、TC 后面附加顺序号表示,常用钛合金的牌号、化学成分、力学性能,见表 1.5.3。

#### (1) 钛合金

由于  $\alpha$ -Ti 合金的组织全部为  $\alpha$  固溶体,因此组织稳定,抗氧化性和抗蠕变性好,焊接性能也很好。其室温强度低于  $\beta$ -Ti 合金和( + )钛合金,但高温(500 ~ 600 °C)强度比后两种钛合金高。 $\beta$ -Ti 合金不能热处理强化,主要是固溶强化来提高其强度。



表 1.5.3 常用钛合金的牌号、化学成分、力学性能

类型	合金 牌号	化学成分	状态	室温化学性能 ,不小于				高温化学性能		
				$\sigma_b$ / Mpa	$\alpha$ 100	$\beta$ 100	$K_{IC}$ / ( $J \cdot cm^2$ )	试验 温度 /°C	瞬时 强度 / MPa	持久 强度 / MPa
钛 合 金	TA4	Ti - 3Al	退 火	450	25	50	80	—	—	—
	TA5	Ti - 4Al - 0.005B		700	15	40	60	—	—	—
	TA6	Ti - 5Al		700	10	27	30	350	430	400
	TA7	Ti - 5Al - 2.5Sn		800	10	27	30	350	500	450
	TA8	Ti - 5Al - 2.5Sn - 3Cu - 1.5Zr		1 000	10	25	20 ~ 30	500	700	500
合 钛 金	TB1	Ti - 3Al - 8Mo - 11Cr	淬 火 + 时 效	1300	5	—	15	—	—	—
	TB2	Ti - 5Mo - 5V - 3Cr - 3Al		1400	7	10	15	—	—	—
+ 合 钛 金	TC1	Ti - 2Al - 1.5Mn	退 火	600	15	30	45	350	350	350
	TC2	Ti - 3Al - 1.5Mn		700	12	30	40	350	430	400
	TC4	Ti - 6Al - 4V		950	10	30	40	400	530	580
	TC6	Ti - 6Al - 1.5Cr - 2.5Mo - 0.5Fe - 0.3Si		950	10	23	30	450	600	550
	TC9	Ti - 6.5Al - 3.5Mo - 2.5Sn - 0.3Si		1140	9	25	30	500	850	620
	TC10	Ti - 6Al - 6V - 2Sn - 0.5Cu - 0.5Fe		1150	12	30	40	400	850	800

TA7 是常用的 钛合金。该合金有较高的室温强度、高温强度和优良的抗氧化性及耐蚀性，并具有很好的低温性能，适宜制作使用温度不超过 500 °C 的零件，如导弹的燃料罐、超音速飞机的涡轮机匣等。

### (2) 钛合金

钛合金具有较高的强度、优良的冲压性，但耐热性差，抗氧化性能低。当温度超过 700 °C 时，该合金很容易受大气中的杂质气体污染。它的生产工艺复杂，且性能不太稳定，因而限制了它的使用。钛合金可进行热处理强化，一般可进行淬火和时效强化。

TB1 是应用最广泛的 钛合金，淬火后容易得到介稳定的单相 组织，这时该合金具有良好的冷成形性能。该合金使用温度在 350 °C 以下，多用于制造飞机结构件和紧固件。

### (3) ( + ) 钛合金

( + ) 钛合金室温组织为( + )，它兼有 钛合金和 钛合金两者的优点，强度高，塑性好，耐热性高，耐蚀性和冷热加工性及低温性能都很好，并可以通过淬火和时效进行强化，是钛合金中应用最广的合金。

TC4 是用途最广的( + ) 钛合金，退火状态具有较高的强度和良好的塑性(  $\sigma_b = 950$  MPa， $\alpha = 10\%$  )，经淬火和时效处理后其强度可提高至 1 190 MPa。该合金还具有较高的抗蠕变能力、低温韧度及良好的耐蚀性，因此常用于制造 400 °C 以下工作的零件，如飞机发动机压气机盘和叶

片、压力容器等。

#### 1.5.4 滑动轴承合金

##### 1. 对轴承合金的性能要求

轴承合金是指制造滑动轴承中的轴瓦及内衬的合金。当轴承支撑着轴进行工作时,由于轴的旋转,使轴和轴瓦之间产生强烈的摩擦。因轴价格较贵,更换困难,为了减少轴承对轴颈的磨损,确保机器的正常运转,轴承合金应具有以下性能:

- (1) 具有足够的强度和硬度,以承受较高的周期性载荷;
- (2) 塑性和韧性好,以保证轴承与轴的配合良好,并耐冲击和振动;
- (3) 与轴之间有良好的磨合能力及较小的摩擦系数,并能保留润滑油,减少磨损;
- (4) 有良好的导热性和抗蚀性;
- (5) 有良好的工艺性,容易制造且价格低廉。

为了满足上述要求,轴承合金的组织应该是在软的基体上分布着硬的质点,当轴工作时,软的基体很快磨凹下去,而硬的质点凸出于基体上,支撑着轴所施加的压力,减小轴与轴瓦的接触面,且凹下去的基体可以储存润滑油,从而减小轴与轴颈间的摩擦系数,同时偶然进入外来硬物也被压入软基体中,不至于擦伤轴。软的基体还能承受冲击与振动,并使轴与轴瓦很好地磨合。属于这类组织的有锡基和铅基轴承合金。

对高转速、高载荷轴承,强度是首要问题,轴承合金可以采取硬基体(其硬度低于轴颈硬度)上分布软质点的组织,来提高单位面积上的承载能力。属于这类组织的轴承合金有铜基及铝基轴承合金。这种组织具有较大的承载能力,但磨合能力差。

最常用的轴承合金是锡基或铅基轴承合金,亦称“巴氏合金”,其牌号、成分、力学性能及用途见表 1.5.4。

表 1.5.4 铸造轴承合金的牌号、化学成分、力学性能及用途举例

类别	牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$					硬度 HBS (不小于)	用途举例
		Sb	Cu	Pb	Sn	杂质		
锡基 轴 承 合 金	ZSnSb12Pb10Cu4	11.0~ 13.0	2.5~ 5.0	9.0~ 11.0	余量	0.55	29	一般发动机的主轴承,但不 适于高温工作
	ZSnSb11Cu6	10.0~ 12.0	5.5~ 6.5	—	余量	0.55	27	1 500 kW 以上蒸汽机、370 kW 涡轮压缩机、涡轮泵及高 速内燃机的轴承
	ZSnSb8Cu4	7.0~ 8.0	3.0~ 4.0	—	余量	0.55	24	一般大机器轴承及高载荷 汽车发动机的双金属轴承
	ZSnSb4Cu4	4.0~ 5.0	4.0~ 5.0	—	余量	0.50	20	涡轮内燃机的高速轴承及 轴承衬

类别	牌号	化学成分 $w_{Me} \times 100$					硬度 HBS (不小于)	用途举例
		Sb	Cu	Pb	Sn	杂质		
铅基轴承合金	ZPbSb16Sn16Cu2	15.0 ~ 17.0	1.5 ~ 2.0	余量	15.0 ~ 17.0	0.6	30	110 ~ 880 kW 蒸汽涡轮机, 150 ~ 750 kW 电动机和小于 1 500 kW 起重机的重载荷推力轴承
	ZPbSb15Sn5Cu3Cd2	14.0 ~ 16.0	2.5 ~ 3.0	Cd1.75 ~ 2.25 As0.6 ~ 1.0 余量 Pb	5.0 ~ 6.0	0.4	32	船舶机械、小于 250 kW 电动机、抽水机的轴承
	ZPbSb15Sn10	14.0 ~ 16.0	—	余量	9.0 ~ 11.0	0.5	24	中等压力的机械、也适用于高温轴承
	ZPbSb15Sn5	14.0 ~ 15.5	0.5 ~ 1.0		4.0 ~ 5.5	0.75	20	低速、轻压力机械轴承
	ZPbSb10Sn6	9.0 ~ 11.0	—		5.0 ~ 7.0	0.75	18	重载荷、耐蚀、耐磨轴承

## 2. 锡基轴承合金

锡基及铅基轴承合金的牌号为：“Z + 基体元素 + 主加元素及含量 + 辅加元素及含量。”其中“Z”为“铸”字汉语拼音字首。例如 ZSnSb11Cu6 为铸造锡基轴承合金，基体元素为锡，主加元素为锑，辅加元素为 Cu，其中  $w_{Sb} = 11\%$ ， $w_{Cu} = 6\%$ ，其余为  $w_{Sn}$ 。

锡基轴承合金膨胀系数小，减摩性好，并具有良好的导热性、塑性和耐蚀性，适于制造汽车、拖拉机、汽轮机的高速轴瓦，但其疲劳强度差。锡是稀缺元素，应尽量少用。

为了提高锡基轴承合金的强度和寿命，可以把它用离心浇注法镶铸在钢质轴瓦上，形成薄而均匀的一层内衬，这步工艺称为“挂衬”。

## 3. 铅基轴承合金

铅基轴承合金的硬度、强度和韧性比锡基轴承合金低，但由于价格便宜，铸造性能好，常做低速、低负荷的轴承使用，如汽车、拖拉机的曲轴轴承及电动机轴承等。

## 4. 铜基轴承合金

铜基轴承合金有铅青铜(如 ZCuPb30)、锡青铜(如 ZCuSn10Pb1)。

铅青铜 ZCuPb30 具有高的疲劳强度和承载能力，优良的耐磨性、导热性和低的摩擦系数，能在较高温度(250 °C)下正常工作，因此可以制造承受高载荷、高速度的重要轴承，如航空发动机、高速柴油机等的轴承。铅青铜的强度较低，因此也需在钢瓦上挂衬，制成双金属轴承。

锡青铜 ZCuSn10Pb1 能承受较大的载荷，广泛用于中等速度及受较大的固定载荷的轴承，如电动机、泵、金属切削机床的轴承。

## 5. 铝基轴承合金

铝基轴承合金是一种新型减摩材料,具有密度小、导热性好、疲劳强度高和耐蚀性好等优点,并且原料丰富,价格低廉。但其膨胀系数大,运转时容易与轴咬合。常用的铝基轴承合金有如下两类。

### (1) 铝锑镁轴承合金

该合金与 08 钢板一起热轧成双金属轴承,生产工艺简单,成本低廉,并具有良好的疲劳强度和耐磨性,但承载能力不大。

### (2) 铝锡轴承合金

这种合金也以 08 钢为衬背轧制成双合金带。它具有较高的疲劳强度和较好的耐热性、耐磨性及耐蚀性,生产工艺简单,成本低。目前用它代替其他轴承合金,广泛应用于汽车、拖拉机和内燃机车等。

## 1.6 其他材料

### 1.6.1 粉末冶金材料

粉末冶金是用金属粉末或金属与非金属粉末的混合物作原料,经压制成形后烧结,以获得金属零件和金属材料的方法。粉末冶金是一种不经熔炼生产材料或零件的方法,其零件的生产是一种精密的无切屑或少切屑的加工方法。粉末冶金可生产其他工艺方法无法制造或难以制造的零件和材料,如高熔点材料、复合材料、多孔材料等。

#### 1. 硬质合金

硬质合金是采用高硬度、高熔点的碳化物粉末和粘结剂混合、加压成形、烧结而成的一种粉末冶金材料。硬质合金的硬度在常温下可达 86 ~ 93 HRA (相当于 69 ~ 81 HRC),红硬性可达 900 ~ 1 000 °C。因此,其切削速度比高速钢可提高 4 ~ 7 倍,刀具寿命可提高 5 ~ 80 倍。由于硬质合金的硬度高,脆性大,不能进行机械加工,故常将其制成一定形状的刀片,镶焊在刀体上使用。

常用硬质合金按成分与性能的特点可分为三类,其类别、牌号、主要成分及性能特点见表 1.6.1。

#### (1) 钨钴类硬质合金

它的主要化学成分为碳化钨及钴。其牌号用“硬”、“钴”两字的汉语拼音的字首“YG”加数字表示。数字表示钴的质量分数。钴含量越高,合金的强度、韧性越好,钴含量越低,合金的硬度越高、耐热性越好。例如 YG6 表示钨钴类硬质合金的  $w_{Co} = 6\%$ ,余量为碳化钨。这类合金也可以用代号“K”来表示,并采用红色标记。

#### (2) 钨钴钛类硬质合金

它的主要成分为碳化钨、碳化钛和钴。其牌号用“硬”、“钛”两字的汉语拼音的字首“YT”加数字表示。数字表示碳化钛的质量分数。例如 YT15 表示钨钴钛类硬质合金的  $w_{TiC} = 15\%$ ,余量为碳化钨和钴。这类合金也可用代号“P”表示,并采用蓝色标记。

YT 类硬度合金由于加入碳化钛,因此具有较高的硬度与耐磨性。同时,由于这类合金表面

会形成一层氧化钛薄膜,切削时不易粘刀,故有较高的红硬性,但强度和韧性比 YG 类硬质合金低。因此, YG 类硬质合金适于加工脆性材料(如铸铁等),而 YT 类硬质合金适宜于加工塑性材料(如钢等)。同一类硬质合金中,钴的含量较高的适宜于制造粗加工的刀具;反之,则适宜于制造精加工的刀具。

表 1.6.1 常用硬质合金的牌号、化学成分、力学性能

类别	ISO 代号		牌号	化学成分 $w_b \times 100$				物理、力学性能		
				WC	TiC	TaC	Co	密度 /( $\text{kg/m}^3$ )	HBA	$\sigma_b$ /MPa
									不小于	
钨钴类 硬质合金	K 红色	K01	YG3X	96.5	—	<0.5	3	15.0 ~ 15.3	91.5	1 079
		K20	YG6	94.0	—	—	6	14.6 ~ 15.0	89.5	1 422
		K10	YG6X	93.5	—	<0.5	6	14.6 ~ 15.0	91.0	1 373
		K30	YG8	92.0	—	—	8	14.5 ~ 14.9	89.0	1 471
			YG8N	91.0	—	1	8	14.5 ~ 14.9	89.5	1 471
		—	YG11C	89.0	—	—	11	14.0 ~ 14.4	86.5	2 060
		—	YG15	85.0	—	—	15	13.0 ~ 14.2	87	2 060
		—	YG4C	96.0	—	—	4	14.9 ~ 15.2	89.5	1 422
		—	YG6A	92.0	—	2	6	14.6 ~ 15.0	91.5	1 373
—	YG8C	92.0	—	—	8	14.5 ~ 14.9	88.0	1 716		
钨钛钴 类硬质 合金	P 蓝色	P30	YT5	85.0	5	—	10	12.5 ~ 13.2	89.5	1 373
		P10	YT15	79.0	15	—	6	11.0 ~ 11.7	91.0	1 150
		P01	YT30	66.0	30	—	4	9.3 ~ 9.7	92.5	883
通用硬 质合金	M 黄色	M10	YW1	84 ~ 85	6	3 ~ 4	6	12.6 ~ 13.5	91.5	1 177
		M20	YW2	82 ~ 83	6	3 ~ 4	8	12.4 ~ 13.5	90.5	1 324

### (3) 通用硬质合金

它是碳化钽(TaC)或碳化铌(NbC)取代 YT 类硬质合金的一部分 TiC 制成的合金。通用硬质合金兼有上述两类合金的优点,应用广泛,因此通用硬质合金又称“万能硬质合金”。其牌号用“硬”、“万”两字的汉语拼音的字首“YW”加数字表示,其中数字无特殊意义,仅表示该合金的序号。它也可以用代号“M”表示,并采用黄色标记。

近些年来,用粉末冶金法又生产了一种新型硬质合金——钢结硬质合金。它是以一种或几种碳化物(如 TiC 和 WC)为硬化相,以碳钢或合金钢(高速钢或铬相钢)粉末为粘结剂(基体),经配料、混合、压制、烧结而成的粉末冶金材料。钢结硬质合金坯料与钢一样,可以锻造、热处理、切削加工、焊接。它在淬火与低温回火后硬度可达相当于 70 HRC,具有高耐磨性、抗氧化、耐腐蚀等优点。用作刀具时,钢结硬质合金的寿命与 YG 类硬质合金差不多,大大超过合金工具钢。由于它可以切削加工,故适宜于制造各种形状复杂的刀具、模具和耐磨零件。

## 2. 烧结减摩材料

### (1) 多孔轴承

机械行业广泛使用的多孔轴承有铁基的(98%铁粉+2%石墨粉)和铜基的(99%锡青铜粉+1%石墨粉)两种。前者可以取代部分铜合金,价格便宜;后者的减摩性好。

多孔轴承具有较高减摩性。这种材料压制成轴承后再浸入润滑油中,因组分中含有石墨,它本身具有一定的孔隙度,在毛细现象作用下可吸附大量润滑油,故称为多孔轴承。多孔轴承有自动润滑作用。多孔轴承一般用做中速、轻载荷的轴承,特别适宜不经常加油的轴承,在家用电器、精密机械及仪表工业中得到广泛应用。另外,多孔轴承使用时还能消除因润滑油的漏落而造成产品的污染。

### (2) 金属塑料减摩材料

用烧结好的多孔铜合金作骨架,在真空下浸渍聚四氟乙烯乳液,使聚四氟乙烯浸入其孔隙中,获得金属与塑料成为一体的金属塑料减摩材料。

聚四氟乙烯具有一定的减摩性、耐蚀性及较宽的工作温度范围(-26~+250℃)。铜合金骨架具有较高的强度和较好的导热性。

### 3. 烧结铁基结构材料

烧结铁基结构零件的材料,又称烧结钢。用粉末冶金方法生产结构零件的最大特点是发挥了冶金工艺无切削或少切削加工的优点,使零件精度高及表面光洁(径向精度2~4级,表面粗糙度 $Ra$ 1.60~0.20),零件还可通过热处理强化提高耐磨性。

用碳钢粉末烧结的合金,其碳含量较低时,可制造承受载荷小的零件、渗碳件及焊接件;其碳含量较高时,淬火后可制造要求一定强度或耐磨性的零件。用合金钢粉末烧制的合金,其中常有铜、镍、钼、硼、锰、铬、硅、磷等合金元素,它们可强化基体,提高淬透性,加入铜还可提高耐蚀性。合金钢粉末冶金淬火后,可达500~800 MPa,硬度为40~45 HRC,可制造承受载荷较大的烧结结构件,如油泵齿轮、汽车差速齿轮等。

## 1.6.2 陶瓷材料

### 1. 概述

陶瓷是人类最早使用的材料之一。现代陶瓷材料是指除金属和有机材料以外的所有固体材料,又称无机非金属材料。

现代陶瓷充分利用了各不同组成物质的特点以及特定的力学性能和物理化学性能。从组成上看,其除了传统的硅酸盐、氧化物和含氧酸盐外,还包括碳化物、硼化物、硫化物及其他的盐类和单质,材料更为纯净,组合更为丰富。而从性能上看,现代陶瓷不仅能够充分利用无机非金属物质的高熔点、高硬度、高化学稳定性,得到一系列耐高温、高耐磨和高耐蚀的新型陶瓷,而且还充分利用无机非金属材料优异的物理性能,制得了大量的不同功能的特种陶瓷,如介电陶瓷、压电陶瓷、高导热陶瓷以及具有半导体特性、超导性和各种磁性的陶瓷,适应了航天、能源、电子等新技术发展的需求,也是目前材料开发的热点之一。

### \* 2. 陶瓷材料的分类

陶瓷材料及产品种类繁多,而且还在不断扩大和增多。陶瓷材料大致可以分为普通陶瓷(传统陶瓷)和特种陶瓷两大类。

普通陶瓷是以天然原料如高岭土( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ )、石英( $SiO_2$ )、长石( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ )

等烧结而成,这类陶瓷按性能特征和用途又可分为日用陶瓷、建筑陶瓷、电绝缘陶瓷、化工陶瓷等。

特种陶瓷又称近代陶瓷,是指各种新型陶瓷,多采用高纯度人工合成的原料烧结而成。根据特种陶瓷的成分不同可分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、金属陶瓷等;按用途又可分为高温陶瓷、光学陶瓷、磁性陶瓷等。

### 3. 常用工业陶瓷

#### (1) 普通陶瓷

普通陶瓷质地硬,不导电,易于加工成型但其内部含有较多玻璃相,高温下易软化,耐高温及绝缘性不及特种陶瓷。其成本低,产量大,广泛用于工作温度低于 200 °C 的酸碱介质、容器、反应塔、管道和供电系统的绝缘子等。

#### (2) 特种陶瓷

1) 氧化铝陶瓷 这是以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主要成分的陶瓷,一般含量大于 45%,另含有少量的  $\text{SiO}_2$ 。根据  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量不同又分为 75 瓷(含 75%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、95 瓷(含 95%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )和 99 瓷(含 99%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),后两者又称刚玉瓷。氧化铝陶瓷中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量越高,玻璃相含量越少,气孔越少,其性能也越好,但此时工艺变得复杂,成本升高。

氧化铝陶瓷耐高温性好,在氧化性气氛中,可用温度达 1 950 °C,且耐蚀性好,故可用作高温器皿,如熔炼铁钴镍等的坩埚及耐热用品等。氧化铝有高硬度及高温强度,可用作高速切削及难切削材料加工的刀具(760 °C 时 HRA 87,1 200 °C 时 HRA 80);还可作耐磨轴承、模具及活塞、化工用泵和阀门等。同时氧化铝陶瓷有很好的绝缘性能,内燃机火花塞基本都是用氧化铝陶瓷做的。氧化铝陶瓷的缺点是脆性大,不能承受冲击载荷,抗热震性差,不适用于有温度急变的场合。

2) 其他氧化物陶瓷  $\text{BeO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{MgO}$  等氧化物陶瓷熔点高,均在 2 000 °C 附近,甚至更高,且还具有一系列特殊的优异性能。 $\text{MgO}$  是典型的碱性耐火材料,用于冶炼钢铁、合金、铜、铝、镁以及熔化高纯铀、钍及其合金。 $\text{BeO}$  陶瓷在还原性气氛中特别稳定,其导热性极好(与铝相近),故抗热冲击性能好,可用作高频电炉坩埚和高温绝缘子等电子元件,以及用于激光管、晶体管的散热片、集成电路基片等。铍的吸收中子截面小,故氧化铍还是核反应堆的中子减速剂和反射材料。但氧化铍粉末及蒸气有剧毒,生产和应用中应注意安全。 $\text{ZrO}_2$  高强且耐热性好,热导率高,高温下是良好的隔热材料。另外, $\text{ZrO}_2$  室温下是绝缘体,但在 1 000 °C 以上变为导体,是优异的固体电解质材料,用于离子导电材料(电极),传感及敏感元件及 1 800 °C 以上的高温发热体,还可用于熔炼 Pt、Pd、Rh 等合金的坩埚。

3) 非氧化物陶瓷 常用的非氧化物陶瓷主要有碳化物陶瓷(如  $\text{SiC}$ 、 $\text{B}_4\text{C}$ )、氮化物陶瓷(如  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、BN 等),它们也具有各自的优异性能。

氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )陶瓷稳定性极好,除氢氟酸外能耐各种酸碱腐蚀,也可抵抗熔融有色金属的侵蚀。氮化硅硬度很高,摩擦系数小(只有 0.1~0.2,相当于加油的金属表面),耐磨性、减摩性好(自润滑性好),是很好的耐磨材料。同时  $\text{Si}_3\text{N}_4$  还有很好的抗热震性,故氮化硅陶瓷可用作腐蚀介质下的机械零件、密封环、高温轴承、燃气轮机叶片、坩埚以及刀具等。

碳化硅( $\text{SiC}$ )陶瓷是一种高强度、高硬度的耐高温陶瓷,在 1 200~1 400 °C 时抗弯强度仍达 500~600 MPa,且其导热性好,热稳定性、耐蚀性、耐磨性也很好,主要可用于制作火箭尾喷管喷

嘴、炉管、热电偶套管等高温下工作的部件 ;利用它的导热性可制造高温热交换器 ;利用它的高硬度和耐磨性可制造砂轮、磨料等。

氮化硼(BN)陶瓷按晶体结构不同分为六方结构和立方结构两种。六方氮化硼结构与石墨相似 ,性能也比较接近 ,故又称“白石墨” ,具有良好的耐热性、导热性和高温介电强度 ,是理想的散热和高温绝缘材料。另外 ,六方氮化硼化学稳定性好 ,具有极好的自润滑性 ,同时由于硬度较低 ,可进行机械加工 ,能制成各种结构的零件。立方氮化硼为立方结构 ,结构紧密 ,其硬度与金刚石接近 ,是优良的耐磨材料 ,常用于制作刀具。

陶瓷的品种很多 ,其所具有的性能也是十分广泛的 ,在所有的工业领域都有这一类材料的应用天地 ,随着材料的发展 ,其应用必将越来越广泛。常用工业陶瓷的组成、性能及应用见表 1.6.2。

表 1.6.2 常用工业陶瓷的组成、特性和应用

种 类	主要组成	性能特征	用 途
耐热材料	MgO、ThO <sub>2</sub>	热稳定性高	耐火材料
	SiC、Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	高温强度高	燃汽轮机叶片、火焰导管、火箭喷嘴等
高硬度材料	SiC、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	高弹性模量	复合材料用纤维
	TiC、B <sub>4</sub> C、BN	高硬度	切削刀具、模具等
介电材料	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	绝缘性	集成电路基板
	PbTiO <sub>3</sub> 、BaTiO <sub>3</sub>	热电性	热敏电阻
	PbTiO <sub>3</sub> 、LiNbO <sub>3</sub>	压电性	振荡器
	BaTiO <sub>3</sub>	强介电性	电容器
光学材料	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CrNd 玻璃	荧光、发光性	激光
	CaAs、CdTe	红外透过性	红外线窗口
	SiO <sub>2</sub>	高透明度	光导纤维
	WO <sub>3</sub>	电发色效应	显示器
磁性材料	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	软磁性	磁带、磁盘
	SrO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	硬磁性	电声器件、仪表及控制器件的磁心
半导体材料	CdS、Ca <sub>2</sub> Sx	光电效应	太阳能电池
	VO <sub>2</sub> 、NiO	阻抗温度变化效应	温度传感器
	LaB <sub>6</sub> 、BaO	热电子放射效应	热阴极

### 1.6.3 塑料、橡胶材料

塑料和橡胶都属高分子材料。高分子材料分无机高分子材料和有机高分子材料两类 ;若按来源分 ,又有天然高分子材料和人工合成高分子材料之分。天然有机高分子材料主要有松香、淀粉、纤维素、蛋白质、天然橡胶等。人工合成的有机高分子材料主要有塑料、合成橡胶、合成纤维等。无机高分子材料的分子组成中没有碳元素 ,常用的有硅酸盐材料、玻璃、水泥及陶瓷等。



## 1. 塑料

### \* (1) 塑料的组成

塑料是高分子材料在一定温度区间内以玻璃态状态使用时的总称。因此塑料材料在一定温度下可变为橡胶态而加工成型,而在另外的一些条件下又可变为纤维材料。但工程上所用的塑料,都是以有机合成树脂为主要成分,加入其他添加剂制成的,其大致组成如下:

1) 合成树脂 合成树脂是塑料的主要成分,它决定塑料的主要性能,并起粘结作用,故绝大多数塑料都以相应的树脂来命名。

2) 添加剂 工程塑料中的添加剂都是以改善材料的某种性能而加入的。添加剂的作用和类型主要包括:

a. 改善塑料工艺性能 如增塑剂、固化剂、发泡剂和催化剂等。其中增塑剂改善高分子材料可塑性和柔软性,使其易于成型;固化剂则促进塑料受热交联反应,由线型结构变为体型结构,使其尽快达到形状尺寸和性能的最终稳定化(如环氧树脂加入乙二胺即为此类);催化剂加速成型过程中的材料的结构转变过程;发泡剂则是为了获得比表面积大的泡沫高分子材料而加入的。

b. 改善使用性能 如增塑剂、稳定剂、填料、润滑剂、着色剂、阻燃剂、静电剂等,主要用于改善塑料的某些使用性能而加入。如填料起提高强度、改善某些特殊性能并降低成本的作用;稳定剂防止使用过程中的老化;润滑剂是为了防止塑料在成形过程中产生粘模,便于脱模;而着色剂、阻燃剂也都有着各自的使用性能。

### \* (2) 塑料的分类

#### 1) 按热性能分类

a. 热塑性塑料 该类材料加热后软化或熔化,冷却后硬化成型,且这一过程可反复进行,具有可塑性和重复性。常用的材料有聚乙烯、聚丙烯、ABS塑料等。

b. 热固性塑料 材料成型后,受热不变形软化,但当加热至一定温度则会分解,故只可一次成型或使用,如环氧树脂等材料。

#### 2) 按使用性能分

a. 工程塑料 可用作工程结构或机械零件的一类塑料,它们一般有很好的稳定的力学性能,耐热耐蚀性较好,且尺寸稳定性好,如ABS、尼龙、聚甲醛等。

b. 通用塑料 是主要用于日常生活用品的塑料,其产量大、成本低、用途广,占塑料总产量的3/4以上。

c. 特种塑料 具有某些特殊的物理化学性能的塑料,如耐高温、耐蚀、耐光化学反应等。其产量少、成本高,只用于特殊场合,如聚四氟乙烯(PTFE)具有润滑耐蚀和电绝缘性。

### (3) 常用工程塑料

1) 聚乙烯(PE) 聚乙烯产品相对密度小( $0.91 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$ ),耐低温、耐腐蚀、电绝缘性好。高压聚乙烯质软,主要用于制造薄膜;低压聚乙烯质硬,可用于制造一些零件。聚乙烯产品缺点是强度、刚度、硬度低,蠕变大,耐热性差,且容易老化。但若通过辐射处理,使分子链间适当交联,其性能会得到一定的改善。

2) 聚氯乙烯(PVC) 是最早使用的塑料产品之一,应用十分广泛。它是由乙烯气体和氯化氢合成氯乙烯再聚合而成。较高温度的加工和使用时会有少量的分解,产物为有毒的氯化氢及

氯乙烯,因此产品中常加入增塑剂和碱性稳定剂抑制其分解。增塑剂用量不同可将其制成硬质品(板、管)和软质品(薄膜、日用品)。PVC使用温度一般在 $15\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其突出的优点是耐化学腐蚀、不燃烧、成本低、易于加工;缺点是耐热性差,抗冲击强度低,还有一定的毒性。当然,若用共聚和混合法改进,也可制成用于食品和药品包装的无毒聚氯乙烯产品。

3) 聚苯乙烯(PS) 该类塑料的产量仅次于上述两者(PE、PVC)。PS具有良好的加工性能;其薄膜有优良的电绝缘性,常用于电器零件;其发泡材料相对密度低达 $0.33\text{g/cm}^3$ ,是良好的隔音、隔热和防震材料,广泛用于仪器包装和隔热。其中还可加入各种颜色的填料制成色彩鲜艳的制品,用于制造玩具及日常用品。聚苯乙烯的缺点是脆性大、耐热性差,但常将聚苯乙烯与丁二烯、丙烯腈、异丁烯、氯乙烯等共聚使用,使材料的抗冲击性能、耐热耐蚀性大大提高,可用于耐油的机械零件、仪表盘、接线盒和开关按钮等。

4) 聚丙烯(PP) 聚丙烯相对密度小( $0.9\sim 0.91\text{g/cm}^3$ ),是塑料中最轻的。其力学性能(如强度、刚度、硬度、弹性模量等)优于低压聚乙烯(PE)。它还具有优良的耐热性,在无外力作用时加热至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变形,因此它是常用塑料中唯一能经受高温消毒的产品。它还有优良的电绝缘性。其主要的缺点是:粘合性、染色性和印刷性差,低温易脆化、易燃,且在光热作用下易变质。PP具有好的综合力学性能,故常用来制各种机械零件、化工管道、容器;其无毒及可消毒性,可用于药品的包装。

5) ABS塑料 ABS塑料由丙烯腈(A)、丁二烯(B)和苯乙烯(S)三种组元共聚而成,三组元单体可以任意比例混合。由于ABS为三元共聚物,丙烯腈使材料耐蚀性和硬度提高,丁二烯提高其柔顺性,而苯乙烯则使其具有良好的热塑性加工性,因此ABS是“坚韧、质硬且刚性”的材料。ABS由于其低的成本和良好的综合性能,且易于加工成形和电镀防护,因此在机械、电器和汽车等工业领域有着广泛的应用。

6) 聚酰胺(PA) 聚酰胺的商品名称是尼龙或锦纶,是目前机械工业中应用比较广泛的一种工程热塑性塑料。聚酰胺的机械强度高、耐磨、自润滑性好,而且耐油耐蚀消音减震,大量用于制造小型零件,代替有色金属及其合金。缺点是耐热性不高,工作温度不超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;蠕变值也较大,导热性差,约为金属的 $1\%$ ;吸水性大,导致性能和尺寸的改变。

7) 聚甲醛(POM) 是高密度高结晶性的线型聚合物,性能比尼龙好,其按分子链结构特点又分为均聚甲醛和共聚甲醛。聚甲醛性能较好,但热稳定性和耐候性差,大气中易老化,遇火燃烧,目前广泛用于汽车、机床、化工、仪表等工业中。

8) 聚碳酸酯(PC) 是一种新型热塑性塑料,品种较多。工程上用的是芳香族聚碳酸酯,产量仅次于尼龙。PC的化学稳定性很好,能抵抗日光、雨水和气温变化的影响;它透明度高,成型收缩小,因此制件尺寸精度高。它广泛用于机械、仪表、电讯、交通、航空、照明和医疗机械等工业。如波音747飞机上有2500多个零件要用到聚碳酸酯。

9) 有机玻璃(PMMP) 有机玻璃的化学名称为聚甲基丙烯酸甲酯,是目前最好的透明有机物,透光率为 $92\%$ ,超过了普通玻璃,且其力学性能好,冲击韧性高,耐紫外线和防老化性能好,同时密度低( $1.18\text{g/cm}^3$ ),易于加工成型。缺点是硬度低,耐磨擦性、耐有机溶剂腐蚀性、耐热性、导热性差,使用温度不能超过 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。主要用于制造各种窗体、罩及光学镜片和防弹玻璃等零部件。

10) 聚四氟乙烯(PTFE或F-4) 是含氟塑料的一种,具有极好的耐高低温性和耐磨蚀等性

能,又称特氟隆。PTFE 几乎不受任何化学药品的腐蚀,即使在高温、强酸、强碱及强氧化环境中也都稳定,故有“塑料王”之称;其熔点为 327 °C,能在 -195 ~ 250 °C 范围内保持性能的长期稳定性,其摩擦系数小,只有 0.04,具有极好的自润滑性;在极潮湿的环境中也能保持良好的电绝缘性。缺点是强度、硬度较低,加热后粘度大,加工成型性较差,只能用冷压烧结方法成型。在高于 390 °C 工作时将分解出剧毒气体,应予注意。PTFE 主要用于化工管道、泵、电器设备、隔离防护层等方面。

11) 酚醛塑料(PF) 由酚类或醛类经缩聚反应而制成的树脂称为酚醛树脂。根据不同的性能要求加入不同的填料,便能制成各种酚醛塑料。它属于热固性塑料,具有优异的耐热、绝缘、化学稳定和尺寸稳定性,较高的强度、硬度和耐磨性,其抗蠕变性能优于许多热塑性工程塑料,广泛用于机械电子、航空、船舶工业和仪表工业中,如高频绝缘件、耐酸耐碱耐霉菌件及水润滑轴承。其缺点是质脆、耐光性差、色彩单调(只能制成棕黑色)。

12) 环氧塑料(EP) 是在环氧树脂中加入固化剂(胺类和酸酐类)后形成的热固性塑料,具有强度高、耐热性、耐腐蚀性及加工成型性优良的特点。它成形工艺好,主要用于制作塑料模具,船体,电气、电子元件。环氧树脂对各种工程材料都有突出的粘附力,是极其优良的粘结剂,有“万能胶”之称,广泛用于各种结构粘结剂和制成各种复合材料,如玻璃钢等。

## 2. 橡胶

### (1) 橡胶的组成

橡胶是在使用温度范围内处于高弹态的高分子材料,是常用的弹性材料、密封材料、减震防震材料和传动材料。

工业用橡胶是由生胶(或纯橡胶)和橡胶配合剂组成的。

1) 生胶(或纯橡胶) 是橡胶制品的主要成分,也是形成橡胶特性的主要因素,其来源可以是合成的也可是天然的,但生胶性能随温度和环境变化很大,如高温发粘、低温变脆,且极易被溶剂溶解,因此必须加入各种不同的橡胶配合剂,以提高橡胶制品的使用性能和加工工艺性能。

2) 橡胶配合剂 橡胶中常加入的配合剂有硫化剂、硫化促进剂、防老化剂、填充剂、发泡剂和着色剂等。硫化剂的作用是提高橡胶制品的弹性、强度、耐磨性和抗老化能力;硫化促进剂可缩短橡胶硫化时间、降低硫化温度、减少硫化剂用量,同时能改善橡胶制品的性能;防老化剂是为了防止和延缓橡胶制品的老化,填充剂的作用是提高橡胶制品的强度、硬度,减少生胶的用量及改善工艺性能。

### (2) 常用橡胶材料

橡胶品种很多,主要有天然橡胶和合成橡胶两类。合成橡胶按用途及使用量分为通用橡胶和特种橡胶。

1) 天然橡胶 天然橡胶是橡胶树流出的胶乳,经凝固、干燥等工序制成的弹性固状物,其单体为异戊二烯高分子化合物。它具有很好的弹性,但强度、硬度不高。为提高强度并硬化,需进行硫化处理。天然橡胶是优良的绝缘体,但耐热老化性和耐大气老化性较差,不耐臭氧、油和有机溶剂,且易燃。天然橡胶广泛用于制造轮胎、胶带和胶管等。

2) 合成橡胶 合成橡胶是指具有类似橡胶性质的各种高分子化合物。它的种类很多,主要有以下几种:

a. 丁苯橡胶 它是合成橡胶中应用最广、产量最大的一种,由丁二烯和苯乙烯聚合而成,具有较好的耐磨、耐自然老化、耐臭氧性,但加工性能不如天然橡胶,广泛用于制造轮胎、胶布、胶鞋、胶管等。

b. 顺丁橡胶 顺丁橡胶是以丁二烯为原料,在催化剂作用下经聚合反应而得到的产品,产量仅次于丁苯橡胶。顺丁橡胶具有良好的耐磨性、耐老化性、耐寒性和高弹性,但不易加工、强度较差,主要用于制造轮胎、三角胶带、减震器和橡胶弹簧等。

c. 氯丁橡胶 氯丁橡胶是由氯丁二烯经聚合反应得到的产品,具有良好的耐臭氧、耐油和耐溶剂性能,但绝缘性能较差,主要用于制造胶带、胶管、汽车门窗嵌条等。

d. 丁腈橡胶 是由丙烯腈和丁二烯经聚合反应得到的产品,具有良好的耐油性、耐磨性、耐热性,但耐臭氧性、耐寒性较差,加工性能不好,主要用于制造耐油制品,如输油管、耐油密封圈等。

e. 聚氨酯橡胶 是由氨基甲酸酯经聚合而成,属特种橡胶,具有良好的耐磨性、耐油性,但耐水、酸、碱性能较差,主要用于制造胶辊、实心轮胎和耐磨制品。

f. 硅橡胶 是指分子链中含有硅氧键,经硫化后具有弹性的有机硅聚合物,属特种橡胶。它具有耐高温、耐寒、电绝缘性能优良的特点,但抗拉强度低、价格较贵,主要用于制造耐高温、耐寒或耐高温电绝缘制品等。

g. 氟橡胶 主要是全氟丙烯和偏二氟乙烯的共聚物,属特种橡胶。它具有耐高温、耐腐蚀、耐臭氧和大气老化性能,但加工性能差,价格贵,主要用于制造高级密封件、高真空耐蚀件等。

#### 1.6.4 复合材料

复合材料是由两种或两种以上性质不同的材料组合起来的一种多相固体材料,它不仅保留了组成材料各自的优点而且还具有单一材料所没有的优异性能。在自然界和人类发展中,复合材料并不是一个陌生的领域,自然界中的树木,建筑中的混凝土和人体的骨骼等都是复合材料。

现代复合材料则是在充分利用材料科学理论和材料制作工艺的基础上发展起来的一类新型材料,在不同的材料之间,如金属之间、非金属之间、金属与非金属之间进行复合,既保持了各组成部分的性能又有组合的新功能,充分发挥了材料的性能潜力。

工程复合材料的组分是人为选定的,通常可将其划分为基体材料和增强体。基体材料大多为连续的,除保持自身特性外,还有粘结或连接和支承增强体的作用;而增强体主要是起承受载荷或发挥其他特定物理化学功能的作用。

##### \* 1. 复合材料的分类

复合材料常见的分类方法有以下三种:

##### (1) 按材料的用途分

可将其分为结构复合材料和功能复合材料两大类。前者主要是用于工程结构,以承受各种载荷的材料,主要是利用其优良的力学性能;后者则为具有各种独特物理化学性质的材料,具有优异的功能特性,如吸波、电磁、超导、屏蔽、光学、摩擦润滑等。

##### (2) 按基体材料类型分

按复合材料基体的不同可分为金属基和非金属基两类。目前大量研究和使用的多为以高聚物材料为基体的复合材料。

### (3) 按增强体特性分

按复合材料中增强体的种类和形态不同可将其分为纤维增强复合材料、颗粒增强复合材料、层状复合材料和填充骨架型复合材料。

## 2. 常用复合材料

### (1) 纤维增强树脂基复合材料

一般来说,纤维增强树脂基复合材料的力学性能主要由纤维的特性决定,化学性能、耐热性等则由树脂和纤维共同决定。按增强纤维的不同,主要有以下几类:

1) 玻璃纤维树脂复合材料 又称玻璃钢。玻璃钢生产成本低、工艺简单、应用很广,根据所用基体不同可分为两类:

a. 热塑性玻璃钢 它是由20%~40%的玻璃纤维和80%~60%的基体材料(如尼龙、聚烯烃类、聚苯乙烯类等热塑性树脂)组成。主要特点是具有高强度、高冲击韧性、良好的低温性能及低热膨胀系数,常用来制造轴承、齿轮、仪表盘、壳体等零件。

b. 热固性玻璃钢 它是由60%~70%的玻璃纤维和40%~30%的基体材料(如环氧树脂、酚醛树脂等)组成。主要特点是密度小、强度高,强度超过一般高强度钢和铝合金及钛合金,耐磨性、绝缘性和绝热性好,吸水性低,易于加工成型。但是,这类材料弹性模量低,只有结构钢的1/5~1/10,耐热性比热塑性玻璃钢好但仍不够高,只能在300℃以下工作。主要用于各种机器的护罩、复杂壳体、车辆、船舶、仪表、化工容器、管道等。

2) 碳纤维—树脂复合材料 它是由碳纤维与聚酯、酚醛、环氧、聚四氟乙烯等树脂组成,其性能优于玻璃钢,具有密度小,强度高,弹性模量高,并具有优良的抗疲劳性能和抗冲击性能、良好的自润滑性、减摩耐磨性、耐蚀和耐热性。但碳纤维与树脂的结合力低,各向异性明显。这类材料主要应用于运动器材、航空航天、机械制造、汽车工业及化学工业中。

3) 硼纤维—树脂复合材料 是由硼纤维和环氧、聚酰亚胺等树脂组成,具有高的强度和弹性模量,良好的耐热性。其缺点是各向异性明显、加工困难、成本太高,已逐渐被碳纤维取代。主要用于航空航天和军事工业。

4) 碳化硅纤维—树脂复合材料 是由碳化硅与环氧树脂组成的复合材料,具有高的强度和弹性模量,抗拉强度接近碳纤维—环氧树脂复合材料,而抗压强度为其两倍,是一类很有发展前途的新材料,主要用于航空航天工业。

5) 有机纤维—树脂复合材料 是由芳香族聚酰胺纤维(芳纶)与环氧、聚乙烯、聚碳酸酯、聚酯等树脂组成。主要品种有凯芙拉(Kevlar)、诺麦克斯(Nomex)等。其中最常用的是Kevlar纤维与环氧树脂组成的复合材料,主要性能特点是抗拉强度较高,与碳纤维—环氧树脂复合材料相似,其延展性好,可与金属相当,耐冲击性超过碳纤维增强塑料;有优良的疲劳抗力和减震性,其疲劳抗力高于玻璃钢和铝合金,减震能力为钢的8倍。主要用于制造防弹衣、飞机机身、雷达天线罩、轻型舰船等。

6) 纤维增强陶瓷基复合材料 纤维—陶瓷复合材料中的纤维能起到强化陶瓷的作用,但其更重要的作用是增加陶瓷材料的韧性,因此陶瓷—纤维复合材料中的纤维具有“增韧补强”作用。这种机制几乎可以从根本上解决陶瓷材料的脆性问题。目前用于增强陶瓷材料的纤维主要是碳

纤维或石墨纤维能大幅度提高冲击韧性和热震性,降低陶瓷的脆性,而陶瓷基体则保证纤维在高温下不氧化烧蚀,使材料的综合力学性能大大提高。如碳纤维— $\text{Si}_3\text{N}_4$  复合材料可在 $1400^\circ\text{C}$  长期工作,可用于制造飞机发动机叶片;碳纤维—石英陶瓷的冲击韧性比烧结合石英大40倍,抗弯强度大5~12倍,能承受 $1200\sim 1500^\circ\text{C}$  的高温气流冲蚀,可用于航天飞行器的防热部件上。

### (2) 颗粒增强复合材料

是由一种或多种颗粒均匀地分布在基体中所组成的材料。一般粒子的尺寸越小,增强效果越明显。颗粒直径小于 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$  的称为弥散强化材料。常见的颗粒复合材料有两类:

1) 金属颗粒与塑料复合 金属颗粒加入塑料中,可改善导热、导电性能,降低线膨胀系数。如将铅粉加入氟塑料中,可做轴承材料。含铅粉多的塑料还可以做射线的罩屏等。

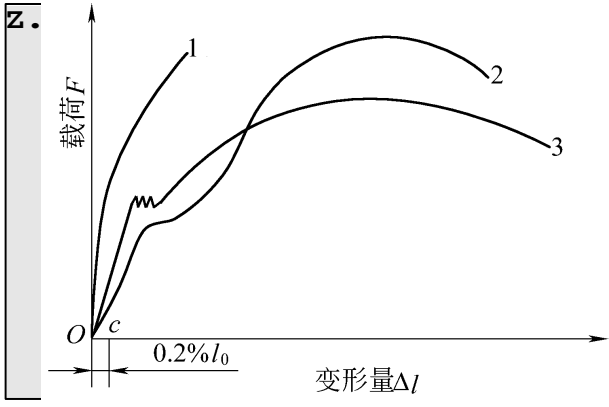
2) 陶瓷颗粒与金属复合 陶瓷颗粒与金属复合即金属陶瓷。氧化物金属陶瓷,如 $\text{Al}_2\text{O}_3$  金属陶瓷,可用于制造高速切削刀具及高温耐磨材料;钛基碳化钨可制造切削刀具;镍基碳化钛可制造航天器的高温零件。

### (3) 叠层或夹层复合材料

叠层或夹层复合材料是由两层或两层以上的不同材料经热压胶合而成,其目的是充分利用各组成部分的最佳性能。这样不但可减轻结构的重量,提高其刚度和强度,还可获得各种各样的特殊功能,如耐磨、耐蚀、绝热隔音等。如最简单的叠层材料有控温的双金属片和用于耐蚀耐热的不锈钢—普通钢的双层复合钢板材料。最典型的夹层材料是航空航天结构件中常用的蜂窝夹层结构材料,其基本结构形式是在两层面板之间夹一层蜂窝芯。

## 复习与思考题

1-1 有一低碳钢试样,原直径为 $10\ \text{mm}$ ,在试验力为 $2100\ \text{N}$ 时屈服,试样断裂前的最大试验力为 $30000\ \text{N}$ ,拉断后长度为 $133\ \text{mm}$ ,断裂处最小直径为 $6\ \text{mm}$ ,试计算 $s_s$ 、 $b_s$ 、 $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 、 $\delta$ 、 $\psi$ 。

1-2 图所示为三种不同材料的拉伸曲线(试样尺寸相同) 。试比较这三种材料的抗拉强度、屈服强度和塑性大小,并指出屈服强度的确定方法。

1-3 为什么相同材料进行拉伸试验时 $s_5 > s_{10}$ 。

\* 1-4  $A_k$  的含义是什么?它的单位是什么?有了塑性指标为何还要测定 $A_k$ ?

\* 1-5 如果其它条件相同,试比较下列铸造条件下铸件晶粒大小:

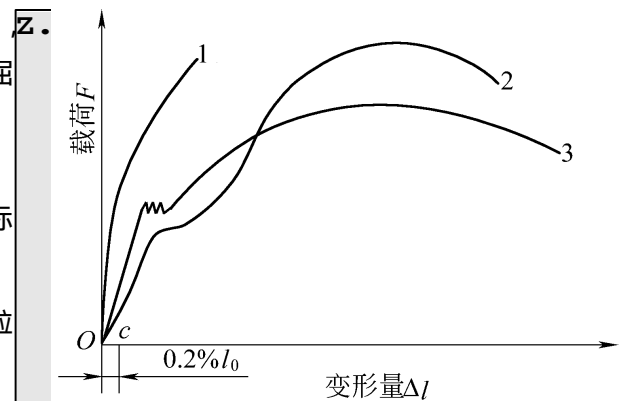
- (1) 金属型浇注与砂型浇注;
- (2) 浇注温度较高些与较低些;
- (3) 铸成薄壁件与铸成厚壁件;
- (4) 厚大壁件的表面部分与中心部分;
- (5) 浇注时采用振动与不采用振动。

1-6 液态金属发生结晶的必要条件是什么?可用哪些方法获得细晶粒组织?其依据是什么?

1-7 为什么单晶体呈各向异性,而多晶体则无各向异性?

\* 1-8 解释下列名词:

合金 组元 合金系 相和组织



题 1-2 图

\* 1 - 9 判别下列情况下是否有相变：

- (1) 液态金属结晶；
- (2) 晶粒由粗变细；
- (3) 同素异构转变；
- (4) 磁性转变。

1 - 10 什么是金属的同素异构转变？试以纯铁为例说明之。

1 - 11 比较下列名词：

- (1) 铁素体；
- (2) 奥氏体；
- (3) 共晶转变、共析转变。

1 - 12 默画简化后的 Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图，指出图中 S、C、E、G 及 GS、SE、ECF、PSK 等点、线的意义，并标出各相区的相组分和组织组分。

1 - 13 分析碳的质量分数分别为 0.40%、0.77%、1.2% 的铁碳合金从液态缓冷到室温的结晶过程和室温组织。

1 - 14 试从显微组织方面来说明  $w_c = 0.2\%$ 、 $w_c = 0.45\%$ 、 $w_c = 0.77\%$  三种钢的力学性能有何不同？

1 - 15 说明下列现象的原因：

- (1)  $w_c = 1.0\%$  的钢比  $w_c = 0.5\%$  的钢硬度高；
- (2) 钢适用于压力加工成形，而铸铁适用于铸造成形；
- (3) 钢铆钉一般用低碳钢制成；
- (4) 在退火状态下， $w_c = 0.77\%$  的钢比  $w_c = 1.2\%$  的钢强度高；
- (5) 在相同条件下， $w_c = 0.1\%$  的钢切削后，其表面粗糙度的值不如  $w_c = 0.45\%$  的钢低。

1 - 16 什么是共析转变和共晶转变？试以铁碳合金为例，说明这两种转变过程及其显微组织的特征。

1 - 17 根据碳在铸铁中存在的形态的不同，铸铁可分为几种？

1 - 18 什么是热处理？热处理的目的是什么？热处理有哪些基本类型？

1 - 19 简述共析钢过冷奥氏体在  $A_1 \sim M_f$  温度之间不同温度等温转变的产物及性能。

1 - 20 共析碳钢的 C 曲线与亚共析碳钢、过共析碳钢的 C 曲线在特征上有何差异？

\* 1 - 21 何谓钢的马氏体临界冷却速度？它与钢的淬透性有何关系？

1 - 22 正火与退火的主要区别是什么？生产中如何选择正火与退火？

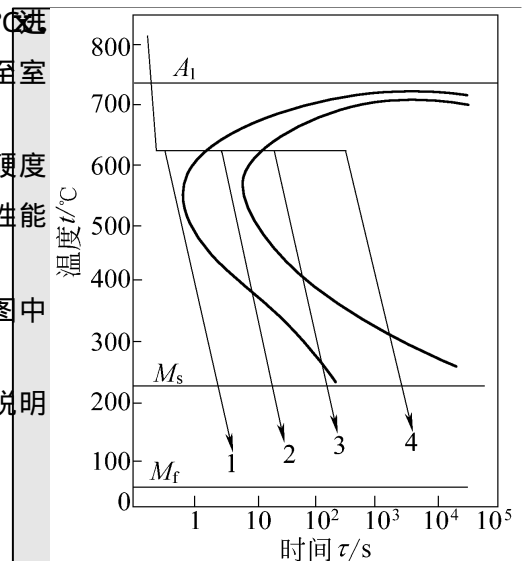
1 - 23 T8 钢的过冷奥氏体等温转变曲线如图所示。该钢在 625 °C 进行等温转变，并经不同时间保温后，按图示 1、2、3、4 曲线冷却速度冷却至室温，试问各获得什么组织？然后再进行中温回火，又各获得什么组织？

1 - 24 有低碳钢齿轮和中碳钢齿轮各一只，为了使齿面具有高的硬度和耐磨性，问各应采取怎样的热处理，并比较热处理后它们在组织与性能上的差别。

1 - 25 共析碳钢的等温转变 C 曲线和冷却曲线如图所示，标出图中“ ”处的组织名称。

1 - 26 分别比较 45 钢、T12 钢经不同热处理后硬度值的高低，并说明其原因。

- (1) 45 钢加热到 700 °C 后，投入水中冷却；
- (2) 45 钢加热到 750 °C 后，投入水中冷却；
- (3) 45 钢加热到 840 °C 后，投入水中冷却；



题 1 - 25 图

- (4) T12 钢加热到 700 °C 后 ,投入水中冷却 ;
- (5) T12 钢加热到 750 °C 后 ,投入水中冷却 ;
- (6) T12 钢加热到 900 °C 后 ,投入水中冷却。

1 - 27 合金元素对铁碳合金相图有什么影响 ? 这种影响有什么意义 ?

1 - 28 合金元素对钢的热处理过程有何影响 ? 试从加热冷却两方面加以说明。

1 - 29 为什么调质钢的碳含量均为中碳 ? 合金调质钢中常含有哪些元素 ? 它们在调质钢中起什么作用 ?

1 - 30 为什么常用弹簧钢在淬火后一般要中温回火 ? 回火后的硬度大致是多少 ?

1 - 31 对 - (+) 字旋具 (螺丝刀) 性能有何要求 ? 选择何种材料 ? 要求硬度多少 ?

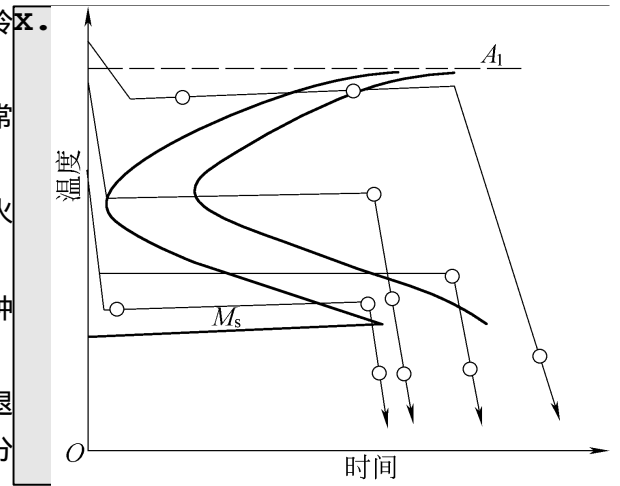
1 - 32 用 9SiCr 钢制成圆板牙 ,其工艺流程为 锻造 球化退火 机械加工 淬火 低温回火 磨平面 开槽加工。试分析 :

- (1) 球化退火、淬火及低温回火的目的 ;
- (2) 球化退火、淬火及低温回火的大致工艺参数。

1 - 33 高速钢经铸造后为什么要反复锻造 ? 锻造后切削加工前为什么必须要退火 ? 淬火温度选择在高温 (1 280 °C) 的目的何在 ? 淬火后为什么需要经过三次以上回火 ? 它在 560 °C 回火是否是调质处理 ?

1 - 34 1Cr13、2Cr13、3Cr13、1Cr17 与 Cr12、Cr12MoV 钢中铬的质量分数均在 12% 以上 ,是否都是不锈钢 ? 为什么 ?

- 1 - 35 奥氏体不锈钢和耐磨钢的热处理目的与一般钢的淬火目的有何不同 ?
- 1 - 36 硬质合金的主要组成是什么 ? 常用的硬质合金分为哪几类 ? 它们各有何主要作用 ?
- 1 - 37 什么是复合材料 ? 纤维增强树脂基复合材料有哪几种类型 ? 各有什么特点 ?
- 1 - 38 何谓玻璃钢 ? 玻璃钢与金属材料相比 ,在性能和应用上有哪些差别 ?



题 1 - 27 图



## 第 2 章 铸 造

铸造是液态成形,它能制造各种尺寸不同、形状复杂的毛坯或零件。铸造具有适应性广、成本低廉的优点,在一般机械中广泛采用铸件。因此,铸造是机械零件毛坯或成品零件热加工的一种重要工艺方法。

本章主要介绍铸造工艺基础知识、常用铸造方法、铸造工艺设计和铸件结构工艺基础知识等。

### 2.1 概 述

铸造就是熔炼金属,制造与零件形状相适应的铸型,并将熔融金属浇入铸型中,待其冷却凝固后获得毛坯或零件的方法。用铸造方法制造的毛坯或零件称为铸件。铸件生产过程如图 2.1 所示。

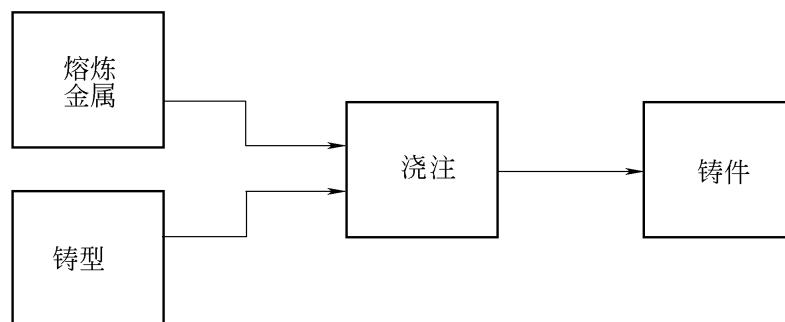


图 2.1.1 铸件生产过程框图

由上可知,铸造的实质就是材料的液态成形。由于液态金属易流动,各种金属材料都能用铸造的方法制成具有一定尺寸和形状的铸件,并使其形状和尺寸尽量与零件接近,以节省金属,减少加工余量,降低成本。因此,铸造在机械制造业中占有重要地位。据统计,在一般的机器设备中,铸件占机器总重量的 45% ~ 90%,而铸件成本仅占机器总成本的 20% ~ 25%。但是,液态金属在冷却凝固过程中,形成的晶粒较粗大,容易产生气孔、缩孔和裂纹等缺陷,所以铸件的力学性能不如相同材料的锻件好,而且存在生产工序多,铸件质量不稳定,废品率高,工作条件差,劳动强度较高等问题。随着生产技术的不断发展,铸件的性能和质量正在进一步提高,劳动条件正逐步改善。当前铸造技术发展的趋势是,在加强铸造基础理论研究的同时,发展铸造新工艺,研制新设备,在稳定提高铸件质量、精度、减少表面粗糙度的前提下发展专业化生产,积极实现铸造生产过程的机械化、自动化,减少公害,节约能源,降低成本,使铸造技术进一步成为可与其它成形工艺相竞争的少余量、无余量成形工艺。

## 2 2 铸造工艺基础

铸件的质量与铸件的工艺过程密切相关,其中影响较大的是铸件的凝固和合金的铸造性能。

### 2 2 .1 铸件的凝固

物质由液态转变为固态的过程称为凝固,铸造时由于固态金属均为晶体,因此金属的凝固过程又称为结晶。

#### 1 .铸造合金的结晶

铸造合金的结晶通过晶核的形成和晶体的长大这两个相互联系的基本过程来实现。

实际铸造合金的结晶,大多是以非均质方式形核。晶核的形成可能是由于液态金属中的一些原子自发地聚集在一起,按金属晶体的固有规律排列起来,形成自发晶核;也可能是由于液态金属中一些外来的微细的固态质点而形成的外来晶核。非均质形核所需能量较小,因而可以在较小过冷度下获得较多的晶核数目,这也是孕育(变质)处理技术可获得细晶铸件的原因。

晶体长大是合金液体中的原子不断向晶核表面堆砌的过程,也是液—固界面不断向液体中推进的过程。晶体沿各个方向的生长速度是不均匀的,它主要沿生长线速度最大的方向发展,这样就形成了晶轴。晶轴继续长大,并在其上长出许多小晶轴,发展为树枝状。在晶体长大的同时新的晶核又陆续出现,它们也同样地形成晶体,这样就有许多晶体在不同的程度上长大着。当它们长大到与相邻的晶体相抵触时,这个方向的长大就停止了。当全部长大的晶体都相互抵触时,液态金属即已耗尽,结晶过程也就完成了。当过冷度较大,特别是液体中存有杂质时,晶体往往以树枝状形式长大。

凝固条件不同,晶体形态会发生变化。铸型型壁处传热快,型壁表面又有促进形核的作用,使得达到液相线温度的那部分液体合金在型壁上产生大量晶核,在型壁“激冷”及液体合金热对流的综合作用下,形成一层很薄的等轴细晶区。在细晶区形成的同时,铸型温度升高,液体合金的冷却速度降低,过冷度减小,形核率降低,使那些与传热最快方向相反、与型壁垂直的晶核,优先长大并顺利长入液体合金;而其它方向上的晶核受相邻晶体的阻碍生长较慢。此过程继续下去,就形成了向液体合金内部平行长大的柱状晶区。铸型心部,过冷度大为减小,温度梯度小,传热逐渐无方向性,晶体向各个方向充分、均匀长大,形成了粗大的等轴晶区。

铸件的质量和机械性能主要取决于柱状晶和等轴晶所占的比例。铸件究竟是以柱状晶为主,还是以等轴晶为主,除了和铸造合金的成分有关,还与铸件的凝固方式有关。

#### 2 .铸件的凝固方式

铸件在凝固过程中,除纯金属和共晶成分合金外,一般都存在三个区域,即固相区、凝固(固—液两相)区和液相区。根据凝固区宽度的不同,铸件的凝固方式可分为逐层凝固、糊状凝固和中间凝固三种方式。

##### (1) 逐层凝固

纯金属、共晶类合金及窄结晶温度范围的合金,如灰口铸铁、铝硅合金、硅黄铜及低碳钢等,倾向于逐层凝固方式。其特征是,紧靠铸型壁的外层合金,一旦冷却至凝固点或共晶点温度时,即凝固成固态晶体,而处于上述温度以上的里层合金,仍为液态。固—液界面分明、平滑,不存在

固液交错。随着热量传向型壁,温度不断下降,又一层固态晶体形成。如此凝固过程继续下去,柱状晶向液体内生长,直至彼此抵触为止。断面心部尚未凝固的液体金属及低熔点杂质,被柱状晶所封闭,见图 2 2 .1a。

### (2) 糊状凝固

结晶温度范围大的合金,如铝铜合金、锡青铜及球墨铸铁、高碳钢等,倾向于糊状凝固方式。这些合金一旦冷却至液相线温度时,结晶出的第一批晶粒即被周围剩余的液体合金所包围,晶体生长在各个方向上比较均匀;温度继续下降,新形成的另一批晶粒又被液体合金包围,这使小晶粒充斥整个断面,固液交错,最终在铸件整个断面上生成粗大的等轴晶;尚未凝固的液体合金,则被众多的等轴晶封闭。这种凝固方式犹如水泥凝固,先呈糊状而后固化,见图 2 2 .1b。

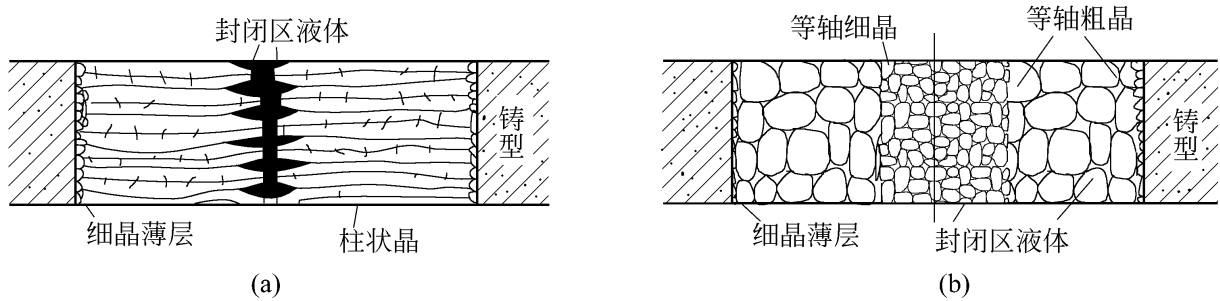


图 2 2 .1 铸件的凝固方式

### (3) 中间凝固

中碳钢、白口铁以及部分特种黄铜等,倾向于中间凝固方式。它介于逐层凝固和糊状凝固之间,既有柱状晶又有等轴晶。

合金铸件的凝固区不是一成不变的,它还与铸件的温度有关,因此凡是影响铸件温度梯度的因素,都影响凝固区的大小。例如,有些合金在砂型制造时呈中间凝固,而改为金属型铸造时可减小凝固区的宽度。

## 2 2 .2 合金的铸造性能

合金的铸造性能是指在铸造生产过程中,铸造成形的难易程度,容易获得正确的外形、内部又健全的铸件,其铸造性能就好。应该指出,铸造性能是一个复杂的综合性能,通常用充型能力、收缩性等指标来衡量。影响铸造性能的因素很多,除合金元素的化学成分外,还有工艺因素。因此,必须掌握合金的铸造性能,以便采取工艺措施,防止铸造缺陷,提高铸件质量。

### 1. 合金的充型能力

熔融金属充满型腔,形成轮廓清晰、形状完整的铸件的能力叫做液态合金的充型能力。影响液态合金充型能力的因素有两个:一是合金的流动性,二是外界条件。

#### (1) 合金的流动性

铸造合金流动性的好坏,通常以螺旋形流动性试样的长度来衡量。将金属液浇入图 2 2 .2 所示的螺旋形试样的铸型中,在相同的铸型及浇注条件下,得到的螺旋形试样越长,表示该合金的流动性越好。不同种类合金的流动性差别较大,如表 2 2 .1 所示。铸铁和硅黄铜的流动性最好,铝硅合金次之,铸钢最差。在铸铁中,流动性随碳、硅含量的增加而提高。同类合金的结晶温度范围越小,结晶时固液两相区越窄,对内部液体的流动阻力越小,合金的流动性也越好。

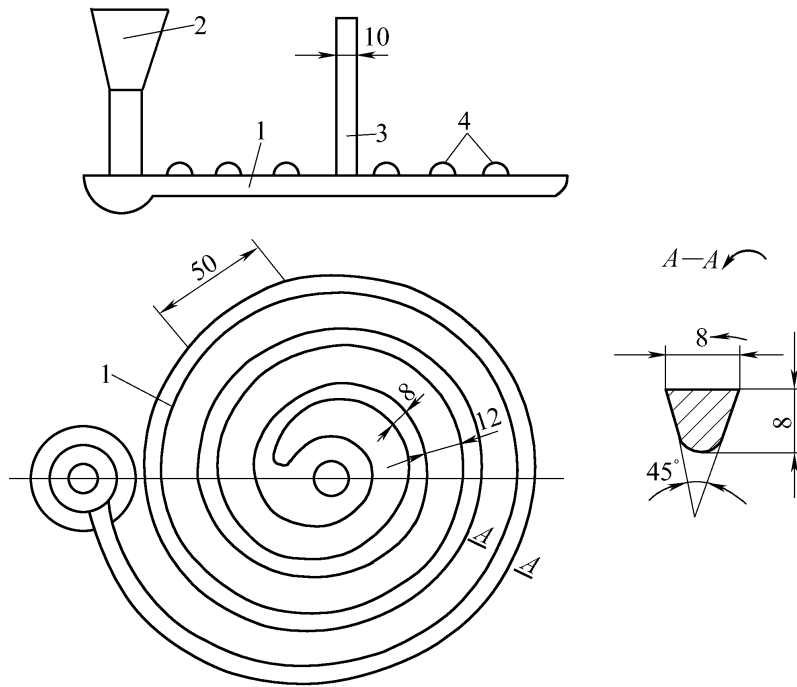


图 2 2 2 螺旋形流动性试样示意图

1—试样；2—浇口杯；3—冒口；4—试样凸点

表 2 2.1 常用合金的流动性比较

合金	造型材料	浇注温度/°C	螺旋线长度/mm
铸铁 ( $w_{C+Si} = 6.2\%$ ) ( $w_{C+Si} = 5.9\%$ ) ( $w_{C+Si} = 5.2\%$ ) ( $w_{C+Si} = 4.2\%$ )	砂型	1 300	1 800
		1 300	1 300
		1 300	1 000
		1 300	600
铸钢 ( $w_C, 0.4\%$ )	砂型	1 600	100
		1 640	200
铝硅合金	金属型 (300 °C)	690 ~ 720	100 ~ 800
镁合金 (Mg Al Zn)	砂型	700	400 ~ 600
锡青铜 ( $w_{Sn}, 9\% \sim 11\%$ ) ( $w_{Sn}, 2\% \sim 4\%$ )	砂型	1 040	420
		1 100	1000
硅黄铜 ( $w_{Si}, 1.5\% \sim 4.5\%$ )			

流动性好的合金,充型能力强,易得到形状完整、轮廓清晰、尺寸准确、薄而复杂的铸件。反之,铸件容易产生浇不足、冷隔等缺陷。流动性好,还有利于金属液中的气体、非金属夹杂物的上浮与排除有利于补充铸件凝固过程中的收缩。以免产生气孔、夹渣以及缩孔、缩松等缺陷。

铸件的凝固方式对合金的流动性影响较大。如前所述,呈逐层凝固的灰口铸铁、硅黄铜等合金,其凝固前沿比较平滑,对金属的流动阻力小,因而充型能力强,见图 2 2.3a;而呈糊状凝固的球墨铸铁、高碳钢等,凝固前沿为发达的枝晶与液体合金互相交错,对金属流动的阻力大,因而充型能力差,容易产生铸造缺陷,见图 2 2.3b。所以,从流动性考虑,宜选用共晶成分或窄结晶温度范围的合金作为铸造合金。

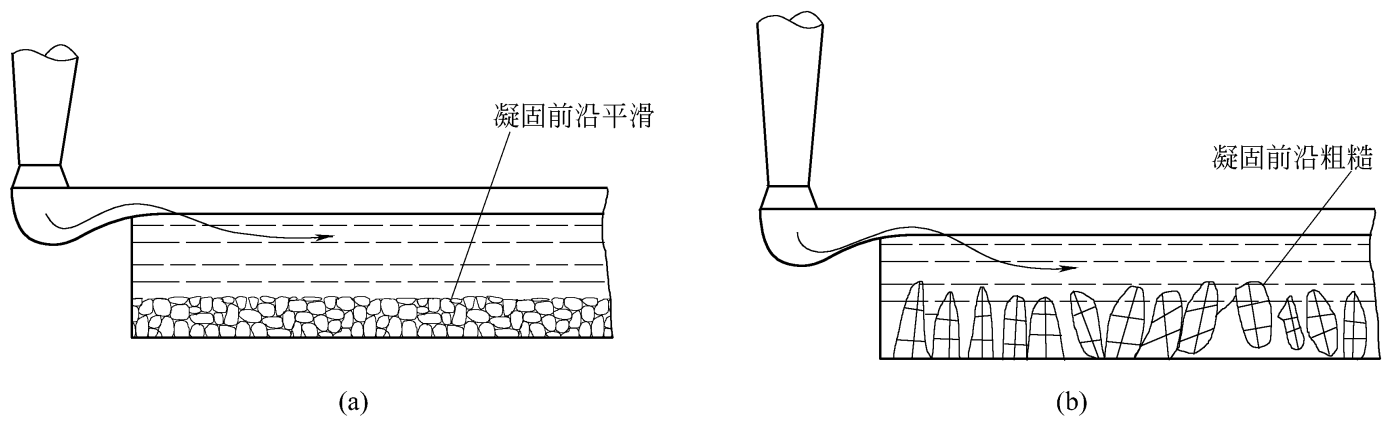


图 2 2 3 凝固方式对流动性的影响

除此之外,合金液的粘度、结晶潜热、导热系数等物理性能对合金的流动性都有影响。

## (2) 外界条件

影响充型能力的外界因素有铸型条件、浇注条件和铸件结构等。这些因素主要是通过影响金属与铸型之间的热交换条件,从而改变金属液的流动时间,或是通过影响金属液在铸型中的水动力学条件,从而改变金属液的流动速度来影响合金充型能力的。如果能够使金属液的流动时间延长,或加快流动速度,就可以改善金属液的充型能力。

1) 铸型条件 铸型的导热速度越大或对金属液流动阻力越大,金属液流动时间就短,合金的充型能力越差。例如,液态合金在金属型中的充型能力比在砂型中差。砂型铸造时,型砂中水分过多,排气不好,浇注时产生大量气体,会增加充型的阻力,使合金的充型能力变差。

2) 浇注条件 在一定范围内,提高浇注温度,可使液态合金粘度下降,流速加快,还能使铸型温度升高,金属散热速度变慢,从而大大提高金属液的充型能力。但如果浇注温度过高,容易产生粘砂、缩孔、气孔、粗晶等缺陷。因此,在保证金属液具有足够充型能力的前提下应尽量降低浇注温度,例如铸钢的浇注温度范围为  $1520 \sim 1620^{\circ}\text{C}$ , 铸铁的浇注温度范围为  $1230 \sim 1450^{\circ}\text{C}$ , 铝合金的浇注温度范围为  $680 \sim 780^{\circ}\text{C}$ , 薄壁复杂铸件取上限,厚大铸件取下限。提高金属液的充型压力和浇注速度可使充型能力增加,如增加直浇口的高度,也可以用人工加压方法(压力铸造、真空吸铸及离心铸造等)。此外,浇注系统结构越复杂,流动阻力越大,充型能力越低。

3) 铸件结构 当铸件壁厚过小,壁厚急剧变化,结构复杂以及有大的水平面等结构时,都使金属液的流动发生困难。因此,设计时铸件的壁厚必须大于最小允许壁厚值(见表 2.2.2),有的铸件还需设计流动通道。

表 2 2 2 不同金属和不同铸造方法铸造的铸件的最小壁厚值

mm

	砂型	金属型	熔模	压铸
灰铸铁	3	>4	0.4~0.8	—
铸钢	4	8~10	0.5~1	—
铝合金	5	3~4	—	0.6~0.8

## 2. 合金的收缩性

铸件在冷却过程中,其体积和尺寸缩小的现象叫做收缩。合金的收缩量通常用体收缩率和线收缩率来表示。金属从液态到常温的体积改变量称为体收缩,金属在固态由高温到常温的线性尺寸改变量称为线收缩,铸件的收缩与合金成分、温度、收缩系数和相变体积改变等因素有关,

除此之外还与结晶特性、铸件结构以及铸造工艺等有关。

### (1) 收缩三阶段

铸造合金收缩要经历三个相互联系的收缩阶段,即液态收缩、凝固收缩和固态收缩,见图 2 2 4。

1) 液态收缩 是合金从浇注温度  $t_{\text{浇}}$  ( $A$ 点)冷却至开始凝固(液相线)温度( $B$ 点)之间的收缩。金属液体的过热度越高,液态收缩越多。

2) 凝固收缩 是合金从开始凝固( $B$ 点)至凝固结束(固相线)之间的收缩。结晶温度范围越宽,凝固收缩越大。

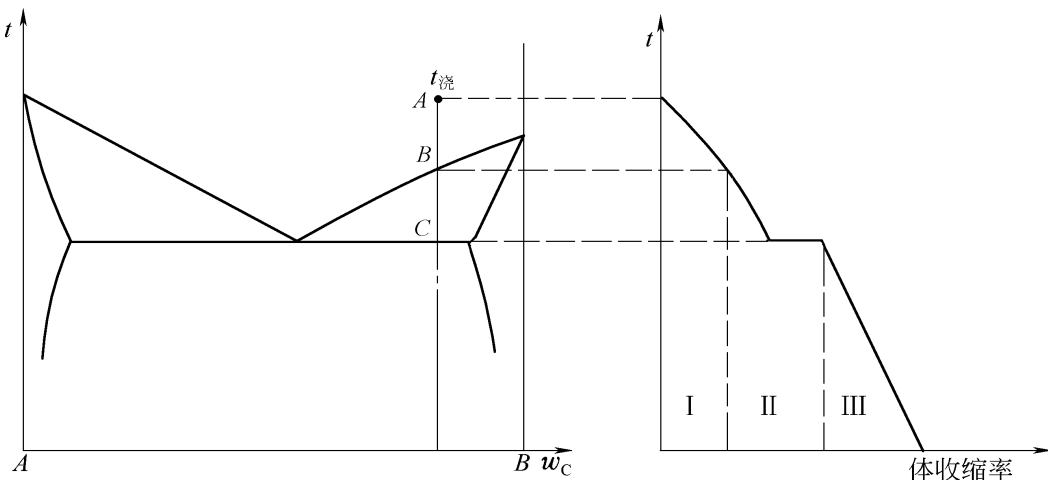


图 2 2 4 铸造合金的收缩阶段

— 液态收缩； — 凝固收缩； — 固态收缩

液态收缩和凝固收缩,一般表现为铸型空腔内金属液面的下降,是铸件产生缩孔或缩松的基本原因。

3) 固态收缩 是合金在固态下冷却至室温的收缩。它将使铸件的形状、尺寸发生变化,是产生铸造应力导致铸件变形,甚至产生裂纹的主要原因。

常用的金属材料中,铸钢收缩最大,有色金属次之,灰口铸铁最小。灰口铸铁收缩小是因析出石墨而引起体积膨胀的结果。

### (2) 影响收缩的因素

合金总的收缩为液态收缩、凝固收缩和固态收缩三个阶段收缩之和,它和金属本身的化学成分、浇注温度以及铸型条件和铸件结构等因素有关。

1) 化学成分 不同成分合金的收缩率不同,如碳素钢随含碳量的增加,凝固收缩率增加,而固态收缩率略减。表 2 2 3 列出了几种铁碳合金的收缩率。灰铸铁中,碳、硅含量越高,硫含量越低,收缩率越小。

2) 浇注温度 浇注温度主要影响液态收缩。浇注温度升高,使合金液态收缩率增加,则总收缩量相应增大。为减小合金液态收缩及氧化吸气,并且兼顾流动性,浇注温度一般控制在高于液相线温度  $50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

3) 铸件结构与铸型条件 铸件的收缩并非自由收缩,而是受阻收缩。其阻力来源于两个方面:一是由于铸件壁厚不均匀,各部分冷却速度不同,收缩先后不一致,而相互制约产生阻力;二是铸型和型芯对收缩的机械阻力。铸件收缩时受阻越大,实际收缩率就越小。因此,在设计和制

造模样时,应根据合金的种类和铸件的受阻情况,考虑收缩率的影响。

表 2 2 3 几种铁碳合金的收缩率

合金种类	含碳量 $w_c$ /%	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	液态收缩率/%	凝固收缩率 /%	固态收缩率 /%	总体收缩率 /%
碳素铸钢	0.25	1610	1.6	3.0	7.86	12.46
白口铸铁	3.00	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰铸铁	3.50	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

### (3) 收缩对铸件质量的影响

1) 缩孔与缩松 如果铸件的液态收缩和凝固收缩得不到合金液体的补充,在铸件最后凝固的某些部位会出现孔洞,大而集中的孔洞称为缩孔,细小而分散的孔洞称为缩松。

缩孔产生的基本原因是合金的液态收缩和凝固收缩值远大于固态收缩值。缩孔形成的条件是金属在恒温或很小的温度范围内结晶,铸件壁是以逐层凝固方式进行凝固,如纯金属、共晶成分的合金。图 2 2 5 为缩孔形成过程示意图。液态合金注满铸型型腔后,开始冷却阶段,液态收缩可以从浇注系统得到补偿,见图 2 2 5a。随后,由于型壁的传热,使得与型壁接触的合金液温度降至其凝固点以下,铸件表层凝固成一层细晶薄壳,并将内浇口堵塞,使尚未凝固的合金被封闭在薄壳内,见图 2 2 5b。温度继续下降,薄壳产生固态收缩,液态合金产生液态收缩和凝固收缩,而且远大于薄壳的固态收缩,致使合金液面下降,并与硬壳顶面分离,形成真空空穴,在负压及重力作用下,壳顶向内凹陷,见图 2 2 5c。温度再度下降,上述过程重复进行,凝固的硬壳逐层加厚,孔洞不断加大,直至整个铸件凝固完毕。这样,在铸件最后凝固的部位形成一个倒锥形的大孔洞,见图 2 2 5d。铸件冷至室温后,由于固态收缩,使缩孔的体积略有减小,见图 2 2 5e。通常缩孔产生的部位一般在铸件最后凝固区域,如壁的上部或中心处,以及铸件两壁相交处,即热节处。若在铸件顶部设置冒口,缩孔将移至冒口,见图 2 2 5f。

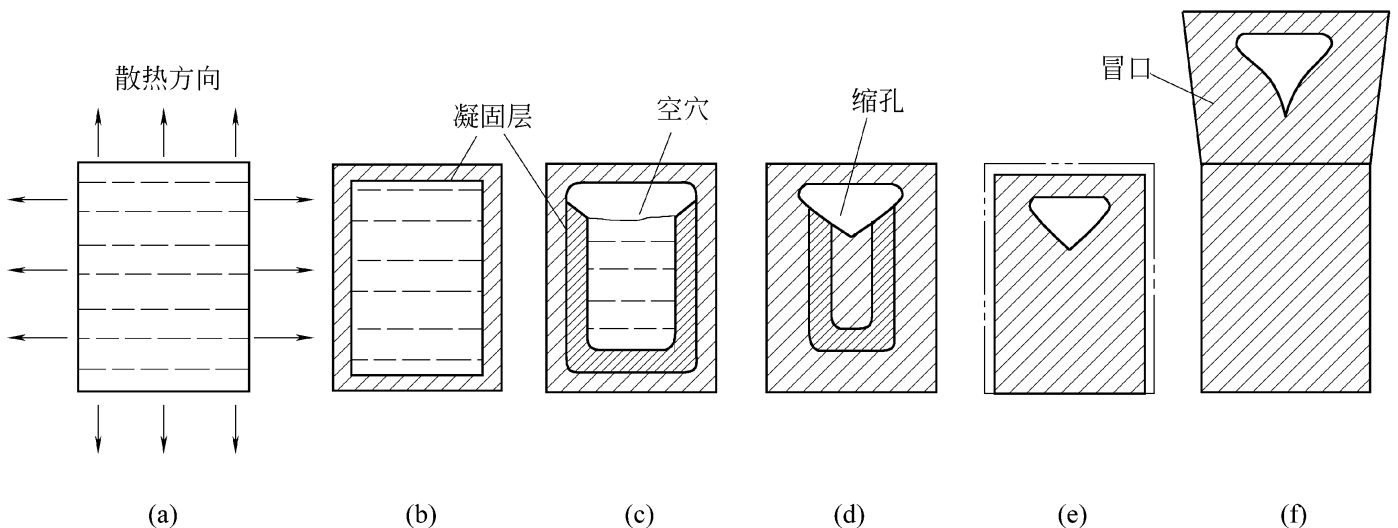


图 2 2 5 缩孔形成过程

缩松形成的基本原因虽然和形成缩孔的原因相同,但是形成的条件却不同,它主要出现在结晶温度范围宽、呈糊状凝固方式的铸造合金中。图 2 2 6 为缩松形成过程示意图。这类合金倾

向于糊状凝固或中间凝固方式,凝固区液固交错,枝晶交叉,将尚未凝固的液体合金彼此分隔成许多孤立的封闭液体区域。此时,如同形成缩孔一样,在继续凝固收缩时得不到新的液体合金补充,在枝晶分叉间形成许多小而分散孔洞,这就是缩松。它分布在整个铸件断面上,一般出现在铸件壁的轴线区域、热节处、冒口根部和内浇口附近,也常分布在集中缩孔的下方。

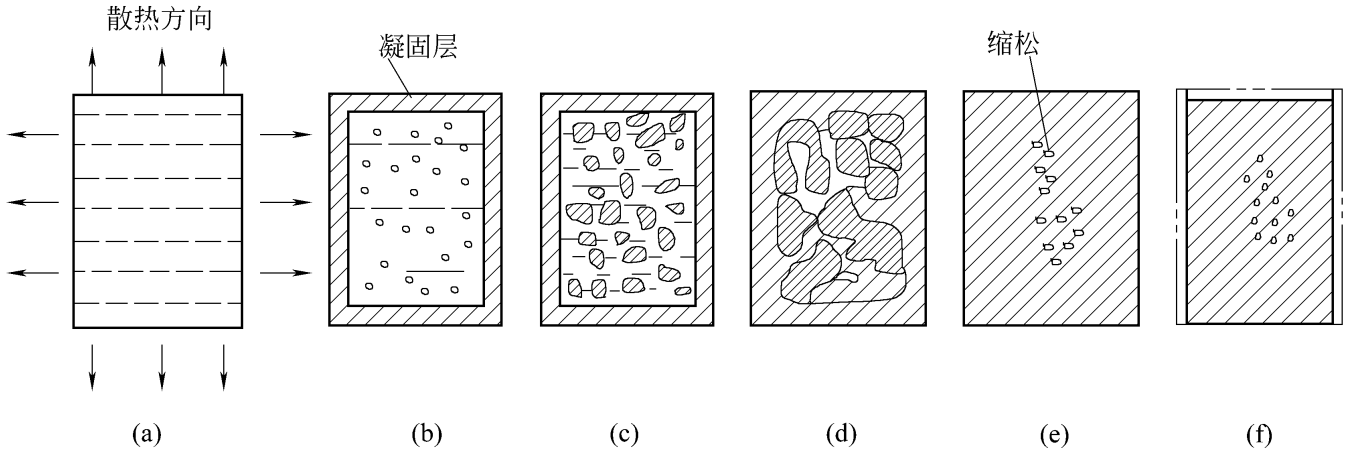


图 2 2 6 缩松形成过程

不论是缩孔还是缩松,都使铸件的力学性能、气密性和物理化学性能大大降低,以致成为废品。所以,缩孔和缩松是极其有害的铸造缺陷,必须设法防止。

为了防止铸件产生缩孔、缩松,在铸件结构设计时应避免局部金属积聚。工艺上,应针对合金的凝固特点制定合理的铸造工艺,常采取“顺序凝固”和“同时凝固”两种措施。

所谓“顺序凝固”就是在铸件可能出现缩孔或最后凝固的部位(多数在铸件厚壁或顶部),设置“冒口”或将冒口与“冷铁”配合使用,使铸件按照“远离冒口的部位先凝固,靠近冒口的部位后凝固,最后才是冒口凝固”的顺序进行。这样,先凝固的收缩由后凝固部位的液体金属补缩,后凝固部位的收缩由冒口中的金属液补缩,使铸件各部位的收缩均得到金属液补缩,而缩孔则移至冒口,最后将冒口切除,如图 2 2.7 所示。顺序凝固适于收缩大的合金铸件,如铸钢件、可锻铸铁件、铸造黄铜件等,还适于壁厚悬殊以及对气密性要求高的铸件。顺序凝固使铸件的温差大、热应力大、变形大,容易引起裂纹,必须妥善处理。

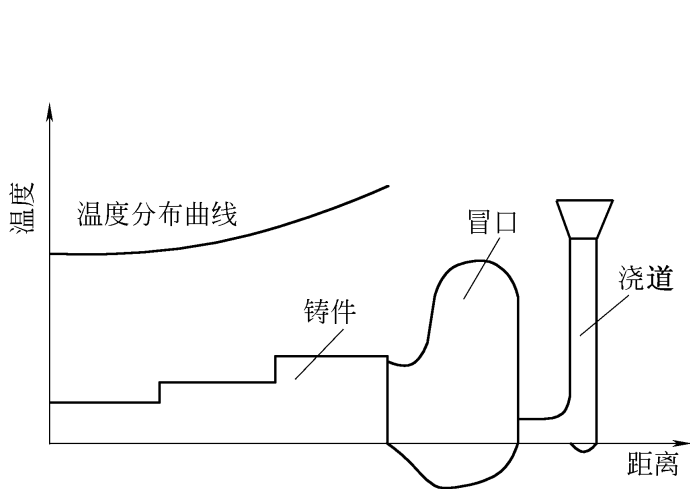


图 2 2 7 顺序凝固

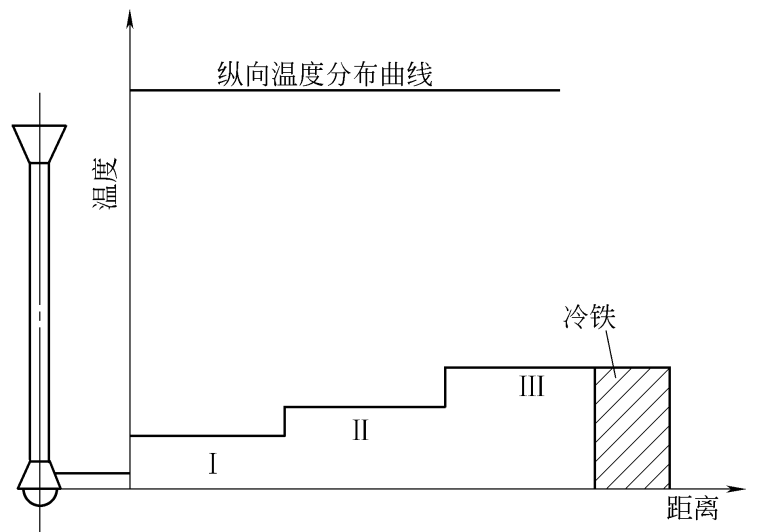


图 2 2 8 同时凝固



所谓“同时凝固”就是使铸件各部位几乎同时冷却凝固,以防止缩孔产生。例如,在铸件厚部或紧靠厚部处的铸型上安放冷铁,如图 2.2.8 所示。同时凝固可减轻铸件热应力,防止铸件变形和开裂,但是容易在铸件心部出现缩松。故仅适于收缩小的合金铸件,例如,碳、硅含量较高的灰口铸铁件。

2) 铸造应力、变形和裂纹 铸件在冷凝过程中,由于各部分金属冷却速度不同,使得各部位的收缩不一致,再加上铸型和型芯的阻碍作用,使铸件的固态收缩受到制约,就会产生铸造应力。在应力作用下铸件容易产生变形,甚至开裂。

a. 铸造应力 铸件固态收缩受阻所引起的应力称为铸造内应力。它包括机械应力和热应力等。

机械应力是铸件收缩受到铸型、型芯或浇冒口的阻碍而引起的应力,见图 2.2.9。落砂后阻碍消除,应力将自行消失。

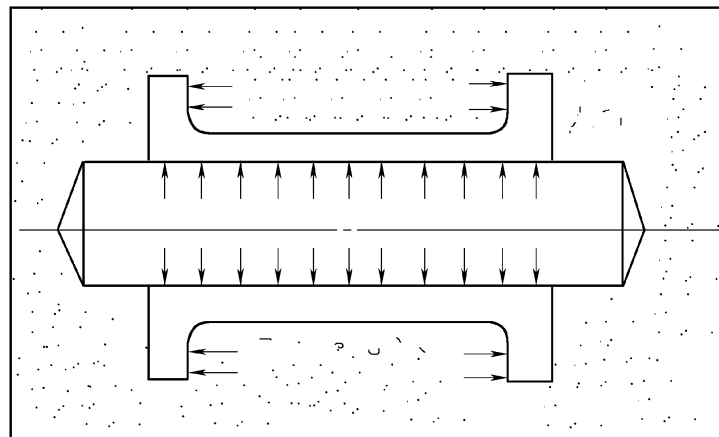


图 2.2.9 机械应力

热应力是因铸件壁厚不均匀,结构复杂,使各部分冷却收缩不一致,又彼此制约而引起的应力。下面以应力框铸件应力的形成过程为例,讨论热应力的形成过程(图 2.2.10)。

图 2.2.10a 是应力框铸件,它由粗杆 1 和两根细杆 2 以及上、下横梁 3 构成。图 2.2.10b 中的  $t_1$  和  $t_2$  是铸件粗杆 1 和细杆 2 的温度变化曲线,横坐标表示铸件的冷却时间,纵坐标  $t$  表示铸件的温度。图 2.2.10c 是铸件在冷却过程中粗杆 1 和细杆 2 的温差变化曲线。图 2.2.10d 为应力框铸件在冷却过程中粗杆 1 和细杆 2 的应力变化曲线。

由粗杆 1 和细杆 2 的温度变化曲线可见,开始阶段杆 2 比杆 1 冷却速度快,随后杆 1 比杆 2 冷却速度快。应力框铸件从浇注温度  $t_L$  开始冷却,到  $t_0$  时,杆 2 已经冷却到合金线收缩开始温度  $t_s$ ,而杆 1 没有冷却到  $t_s$ ,于是杆 1 将随杆 2 的收缩而产生塑性变形,直到  $t_1$  杆 1 冷却到  $t_s$  温度之前,铸件内部没有应力产生。从  $t_1$  开始,铸件整体冷却到  $t_s$  以下,杆 1、杆 2 都将产生线收缩。粗杆 1 冷却速度慢,线收缩小,细杆 2 则相反,细杆 2 的线收缩被粗杆 1 强烈地阻碍,于是产生热应力,杆 2 内部形成拉应力,杆 1 则产生压应力,并且在粗细杆温差达到最大值  $t_{max}$  ( $t_2$  时)前热应力不断增加。从  $t_2$  到  $t_3$ ,随着粗细杆温差减小,热应力降低,到  $t_3$  (温差为  $t_s$ ) 时,应力下降为零。从  $t_3$  进一步冷却,细杆 2 冷却速度变慢,线收缩小,开始阻碍粗杆的线收缩,导致在粗细杆的截面上产生改变符号的热应力,并不断增加。最终粗杆 1 承受拉应力  $\sigma_1$ ,细杆 2 承受压应力  $\sigma_2$ 。由于热应力一经产生就不会自行消除,故又称为残余内应力。

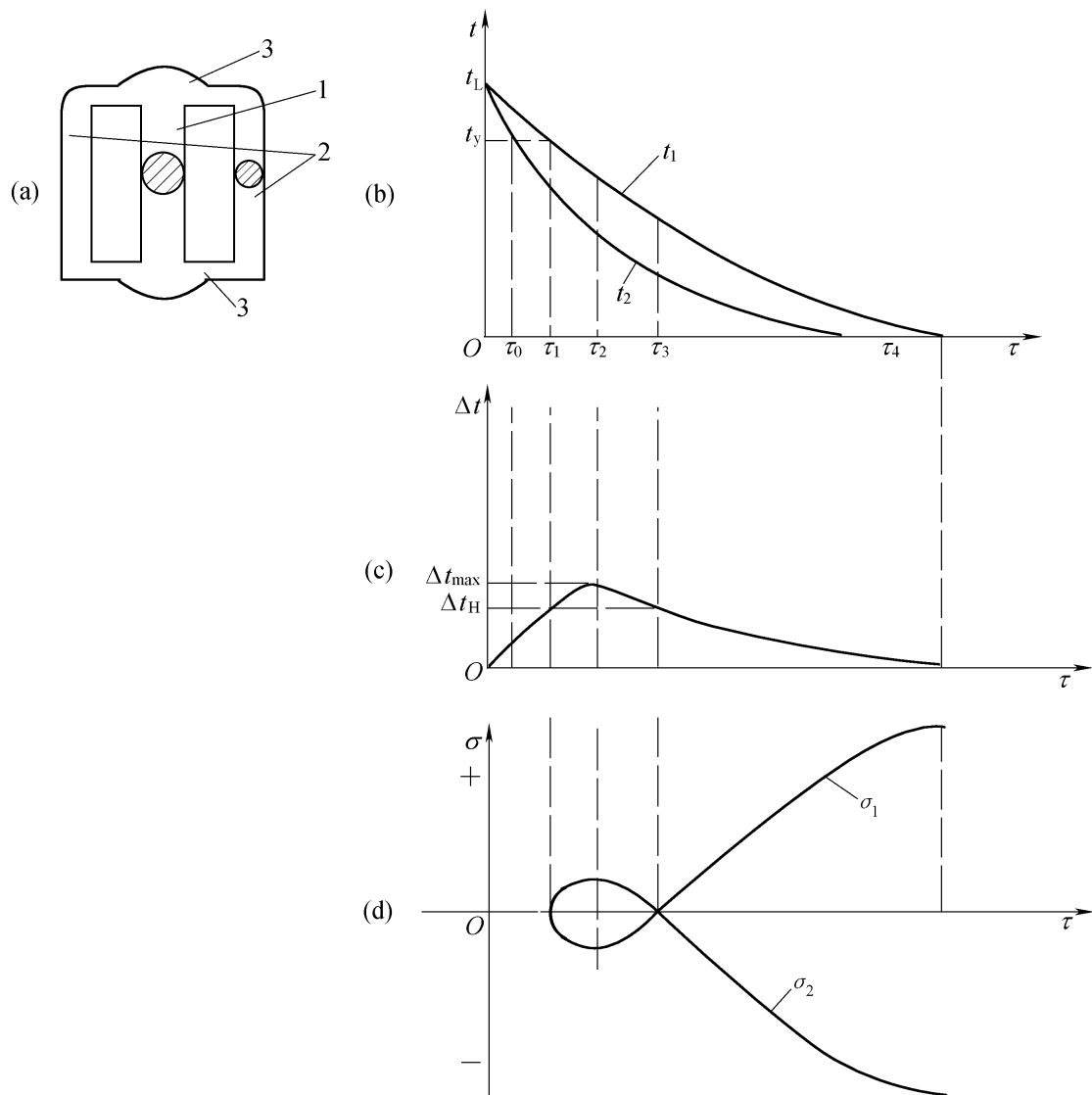


图 2.2.10 壁厚不同的应力框铸件热应力的形成过程

1—粗杆；2—细杆；3—横梁

铸造应力使铸件的精度和使用寿命大大降低。在存放、加工甚至使用过程中，铸件内的残留应力将重新分布，使铸件发生变形或裂纹。它还降低了铸件的耐腐蚀性，其中机械应力尽管是暂时的，但是当它与其他应力相互叠加时，也会增大铸件产生变形与裂纹的倾向，因此必须尽量减小或消除之。要减少铸造应力就应设法减少铸件冷却过程中各部位的温差，使各部位收缩一致，如将浇口开在薄壁处，在厚壁处安放冷铁，即采取同时凝固原则。此外，改善铸型和砂芯的退让性，减少机械阻碍作用，以及通过热处理等方法也可减少或消除铸造应力。

b. 铸造变形与裂纹 如前所述，当铸件中存在内应力时，会使其处于不稳定状态。当铸造应力值超过合金的屈服强度时，铸件将发生塑性变形；当铸造应力值超过合金的抗拉强度时，铸件将产生裂纹。

对于厚薄不均匀、截面不对称及具有细长特点的杆类、板类及轮类等铸件，当残余铸造应力超过铸件材料的屈服强度时，往往产生翘曲变形。一般来说，薄壁或外层部位冷却速度快，存在压应力，如果铸件刚度不够，应力释放后往往会引起伸长或外凸变形；反之，厚壁或内层部位冷却速度慢，存在拉应力，会导致压缩或内凹变形。例如，前述应力框铸件如果连接两杆的横梁刚度不够，结果会出现如图 2.2.11 所示的翘曲变形。图 2.2.12a 所示 T 形梁铸钢件，板厚、板

薄,若铸钢件刚度不够,将发生图中虚线所示的板内凹、板外凸的变形;反之,如果板薄、板厚时,将发生反向翘曲(图2.2.2b)。图2.2.13所示为车床床身,导轨部分厚,侧壁部分薄,铸造后往往发生导轨面下凹变形。

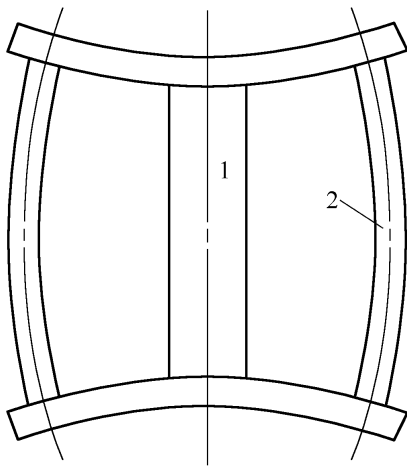


图2.2.11 应力框铸件变形示意图

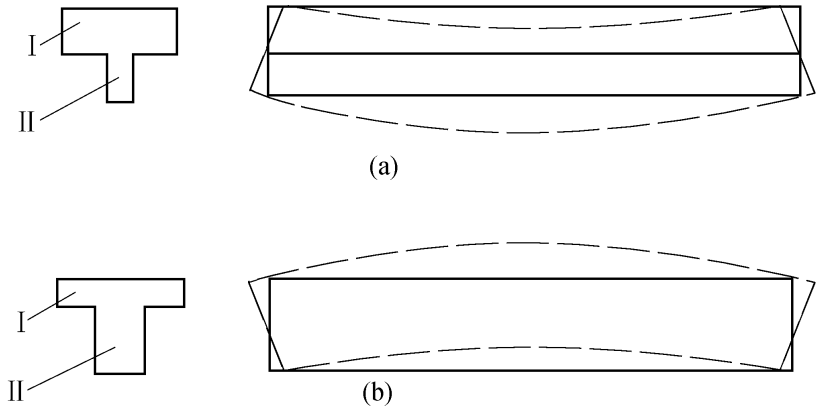


图2.2.12 T形梁铸钢件变形示意图

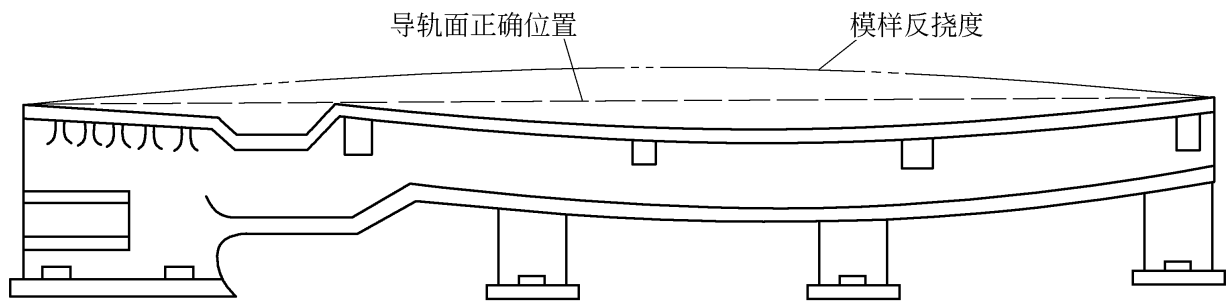


图2.2.13 床身导轨面的挠曲变形

变形会使铸造应力重新分布,残留应力减小一些,但不会完全消除。铸件产生变形以后,常因加工余量不够或因铸件放不进夹具无法加工而报废。前述防止铸造应力的方法,也是防止变形的根本方法。此外,工艺上还可采取某些措施,如反变形法,即在模样上做出与挠曲量相等,但方向相反的预变形量,来消除床身导轨的变形,见图2.2.13。

当铸造应力超过材料的强度极限时,铸件会产生裂纹,裂纹有热裂纹和冷裂纹两种。热裂纹是在铸件凝固末期的高温下形成的。此时,结晶出来的固体已形成完整的骨架,开始进入固态收缩阶段,但晶粒间还有少量的液体,因此合金的强度很低。如果合金的固态收缩受到铸型或型芯的阻碍,使机械应力超过了在该温度下该合金的强度,就会发生裂纹。热裂纹具有裂纹短,缝隙宽,形状曲折,缝内严重氧化、裂口沿晶界产生和发展等特征。热裂纹是铸钢和铝合金铸件常见的缺陷。冷裂纹是在较低温度下形成的裂纹,当铸件产生的应力的总和大于该温度下金属的强度时,则产生冷裂。冷裂常出现在铸件受拉伸的部位,其形状细小,呈连续直线状,裂纹断口表面具有金属光泽或轻微氧化色。壁厚差别大、形状复杂的铸件,尤其是大而薄的铸件易发生冷裂纹。

铸件中存在任何形式的裂纹都严重损害其力学性能,使用时会因裂纹扩展使铸件断裂,发生事故。凡是减少铸造内应力或降低合金脆性的因素,都有利于防止裂纹的产生。

## 2.3 铸造方法

根据铸型的方法不同,铸造方法分为砂型铸造和特种铸造两大类。砂型铸造是目前最常用、最基本的铸造方法。

### 2.3.1 砂型铸造

砂型铸造的基本工艺过程如图 2.3.1 所示。主要工序有制造模样和芯盒、备制型砂和芯砂、造型、造芯、合型、浇注、落砂清理和检验等。其中造型(芯)是砂型铸造最基本的工序,按紧实型砂和起模方法不同,造型方法可分为手工造型和机器造型两种。

#### 1. 手工造型

手工造型操作灵活,工装简单,但劳动强度大,生产率低,常用于单件和小批量生产。

手工造型的方法很多,有整模造型、分模造型、挖砂造型、活块造型、刮板造型等,表 2.3.1 为这些常用手工造型方法的特点和应用范围。

表 2.3.1 常用手工造型方法的特点和应用范围

造型方法	特点	应用范围
整模造型	整体模,分型面为平面,铸型型腔全部在一个砂箱内。造型简单,铸件不会产生错箱缺陷	铸件最大截面在一端,且为平面
分模造型	模样沿最大截面分为两半,型腔位于上、下两个砂箱内。造型方便,但制作模样较麻烦	最大截面在中部,一般为对称性铸件
挖砂造型	整体模,造型时需挖去阻碍起模的型砂,故分型面是曲面。造型麻烦,生产率低	单件小批量生产,分模后易损坏或变形的铸件
假箱造型	利用特制的假箱或型板进行造型,自然形成曲面分型。可免去挖砂操作,造型方便	成批生产需要挖砂的铸件
活块造型	将模样上妨碍起模的部分,做成活动的活块,便于造型起模。造型和制作模样都麻烦	单件小批量生产带有突起部分的铸件
刮板造型	用特制的刮板代替实体模样造型,可显著降低模样成本。但操作复杂,要求工人技术水平高	单件小批量生产等截面或回转体大、中型铸件
三箱造型	铸件两端截面尺寸比中间部分大,采用两箱造型无法起模时,铸型可由三箱组成,关键是选配高度合适的中箱。造型麻烦,容易错箱	单件小批量生产具有二个分型面的铸件
地坑造型	在地面以下的砂坑中造型,一般只用上箱,可减少砂箱投资。但造型劳动量大,要求工人技术较高	生产批量不大的大、中型铸件,可节省下箱

#### 2. 机器造型

机器造型(芯)使紧砂和起模两个重要工序实现了机械化,因而生产率高,铸件质量好。但设备投资大,适用于中、小型铸件的成批大量生产。

机器造型按紧实的方式不同,分压实造型、震击造型、抛砂造型和射砂造型四种基本方式。

##### (1) 压实造型

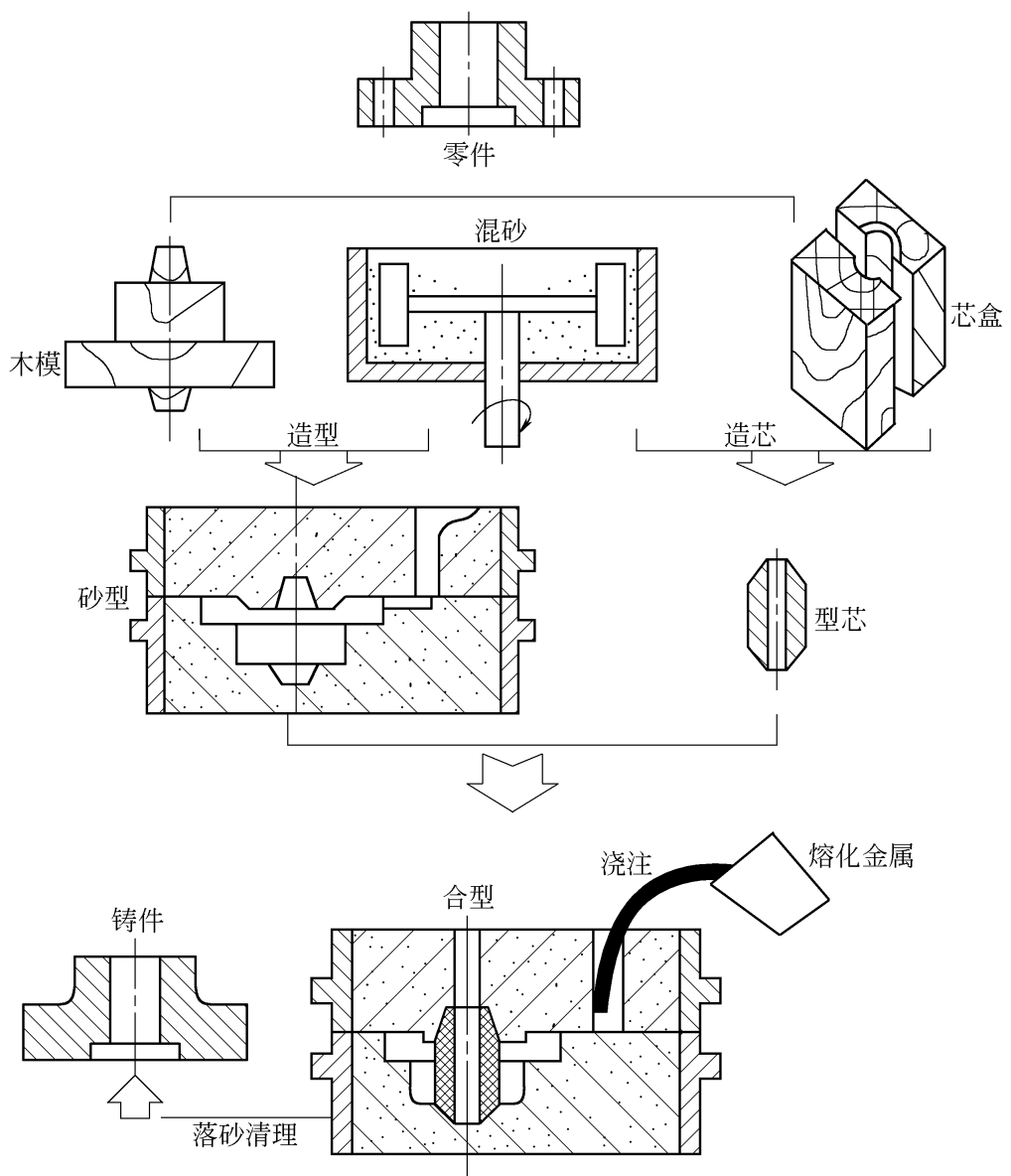


图 2 3.1 砂型铸造的基本工艺过程

压实造型是利用压头的压力将砂箱的型砂紧实,图2 3 2为压实造型示意图。先把型砂填

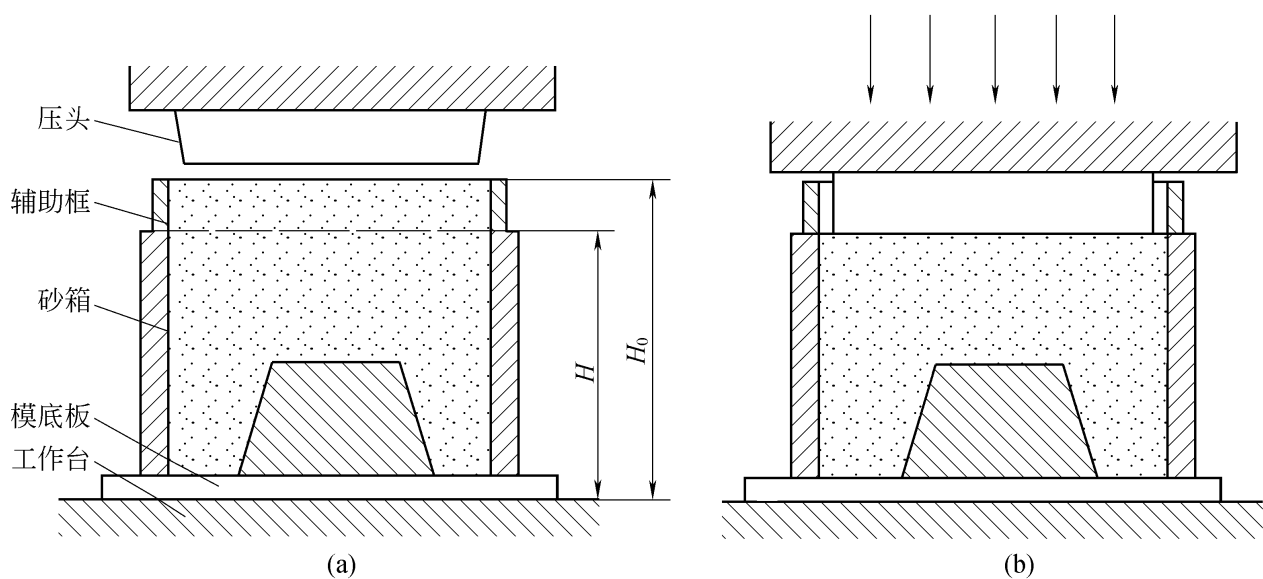


图 2 3 2 压实造型

入砂箱 ,然后压头向下将型砂紧实 ,辅助框是用来补偿紧实过程中型砂被压缩的高度。压实造型生产率高 ,但型砂沿高度方向的紧实度不够均匀 ,一般越接近底板 ,紧实度越差 ,因此适用于高度不大的砂箱。

### (2) 震击造型

这种造型方法是利用震动和撞击对型砂进行紧实 ,如图 2 3 3 所示。砂箱填砂后 ,震击活塞将工作台连同砂箱举起一定高度 ,然后下落 ,与缸体撞击 ,依靠型砂下落时的冲击力产生紧实作用。型砂紧实度分布规律与压实造型相反 ,越接近模底板型砂紧实度越高 ,因此可以将震击造型

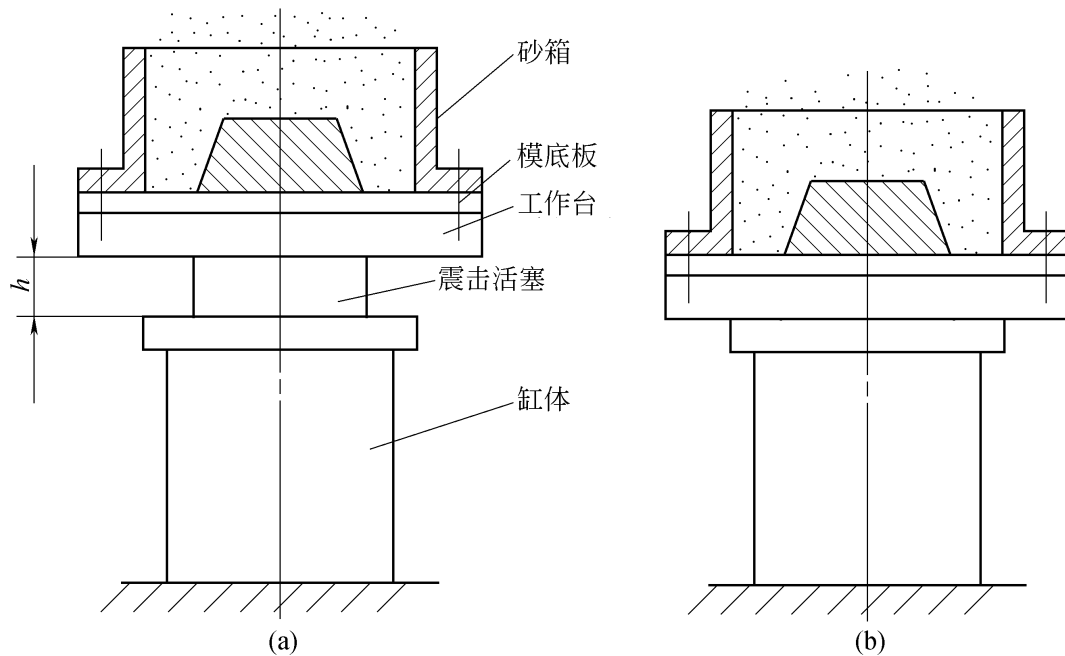


图 2 3 3 震击造型

与压实造型联合使用。

### (3) 抛砂造型

图 2 3 4 为抛砂机工作原理。抛砂头转子上装有叶片 ,型砂由皮带输送机连续地送入 ,高速旋转的叶片接住型砂并分成一个个砂团 ,当砂团随叶片转到出口处时 ,由于离心力作用 ,以高速抛入砂箱 ,同时完成填砂和紧实。

### (4) 射砂造型

射砂紧实的方法除用于造型外多用于造芯。图 2 3 5 为射砂机工作原理。由储气筒中迅速进入到射膛的压缩空气 ,将型砂由射砂孔射入芯盒的空腔中 ,而压缩空气经射砂上的排气孔排出 ,射砂过程在较短的时间内同时完成填砂和紧实 ,生产率极高。

## 2 3 2 特种铸造

与砂型铸造不同的其他铸造方法统称为特种铸造。各种特种铸造方法均有其突出的特点和一定的局限性 ,下面简要介绍常用的特种铸造方法。

### 1. 熔模铸造

如图 2 3 6 所示 ,熔模铸造就是先用母模制造压型 ,然后用易熔材料制成模样 ,再用造型材料将其表面包覆 ,经过硬化后将模样熔去 ,从而制成无分型面的铸型壳 ,最后经浇注而获得铸件。由于熔模广泛采用蜡质材料来制造 ,所以熔模铸造又称“失蜡铸造”。

熔模铸造的特点和应用范围：

1) 熔模铸造属于一次成型,又无分型面,所以铸件精度高,表面质量好。

2) 可制造形状复杂的铸件,最小壁厚可达0.7 mm,最小孔径可达1.5 mm。

3) 适应各种铸造合金,尤其适于生产高熔点和难以加工的合金铸件。

4) 铸造工序复杂,生产周期长,铸件成本较高,铸件尺寸和质量受到限制,一般不超过25 kg。

熔模铸造适用于制造形状复杂,难以加工的高熔点合金及有特殊要求的精密铸件。目前,主要用于汽轮机、燃气轮机叶片,切削刀具,仪表元件,汽车、拖拉机及机床等零件的生产。

## 2. 金属型铸造

把液体金属浇入用金属制成的铸型内,而获得铸件的方法称为金属型铸造。一般金属型用铸铁或耐热钢制造,由于金属型可重复使用多次,故又称为永久型。

按照分型面的位置不同,金属型分为整体式、垂直分型式、水平分型式和复合分型式。图2.3.7所示为水平分型式和垂直分型式结构简图,其中垂直分型式便于布置浇注系统,铸型开合方便,容易实现机械化,应用较广。

金属型导热快,无退让性和透气性,铸件容易产生浇不足、冷隔、裂纹、气孔等缺陷。此外,在高温金属液的冲刷下型腔易损坏。为此,需要采取如下工艺措施:浇注前预热,浇注过程中适当冷却,使金属型在一定温度范围内工作;型腔内刷耐火涂料,以起到保护铸型、调节铸件冷却速度、改善铸件表面质量的作用;在分型面上做出通气槽、出气孔等;掌握好开型的时间,以利于取件和防止铸件产生裂纹等缺陷。

金属型铸造的特点和应用范围：

1) 铸件冷却速度快,组织致密,力学性能好。

2) 铸件精度和表面质量较高。

3) 实现了“一型多铸”,工序简单,生产率高,劳动条件好。

4) 金属型成本高,制造周期长,铸造工艺规程要求严格。

金属型铸造主要适用于大批量生产形状简单的有色金属铸件,如铝活塞、气缸、缸盖、泵体、轴瓦、轴套等。

## 3. 压力铸造

将熔融金属在高压下快速压入铸型,并在压力下凝固,而获得铸件的方法称为压力铸造,简称压铸。

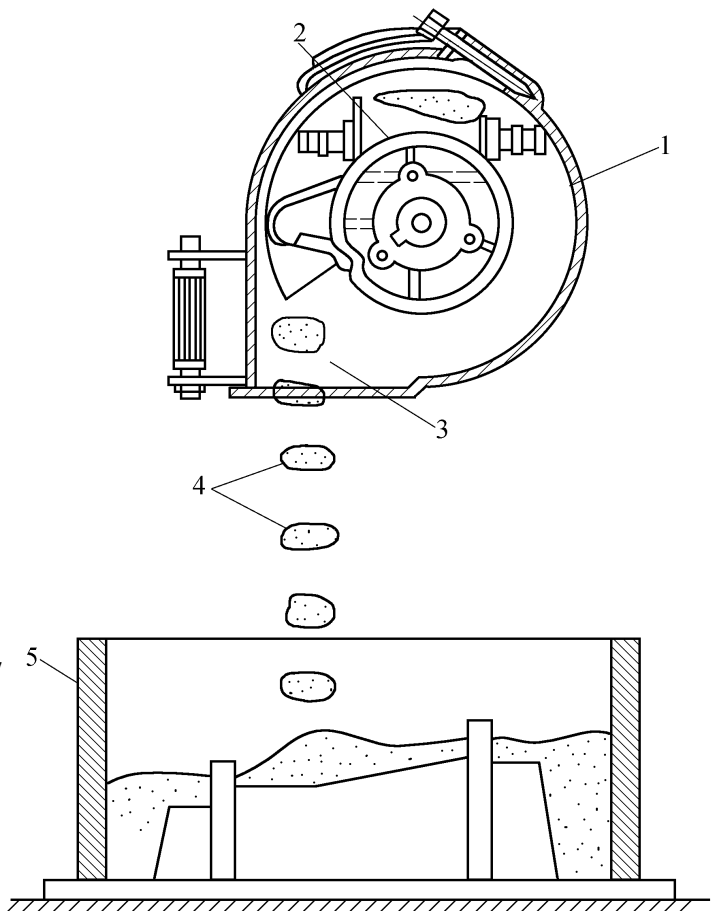


图 2.3.4 抛砂造型

1—机头外壳;2—型砂入口;3—砂团出口

4—被紧实的砂团;5—砂箱

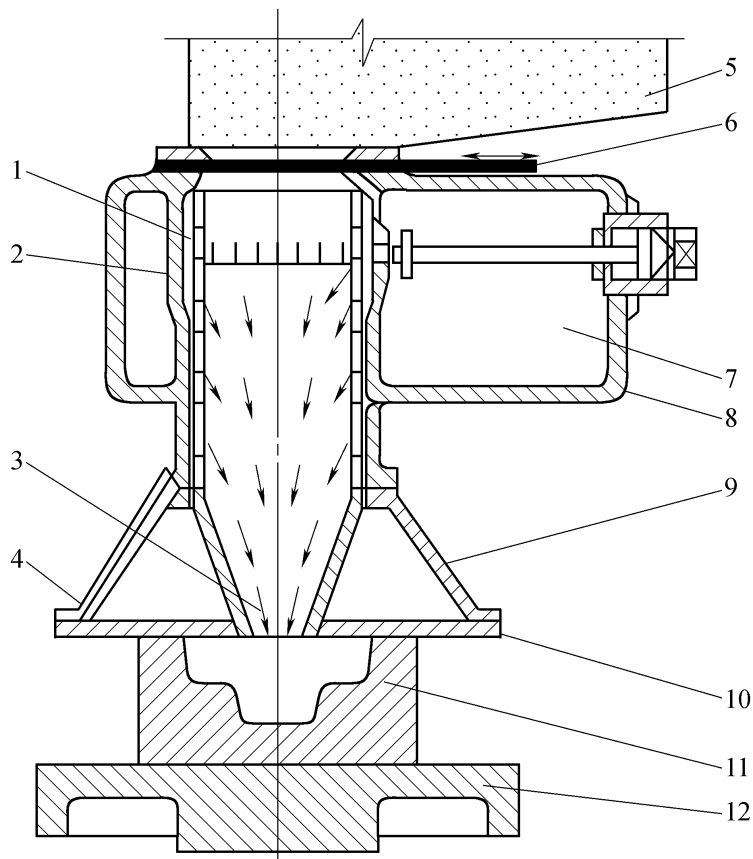


图 2 3 5 射砂造型

- 1—射砂筒；2—射膛；3—射砂孔；4—排气孔；  
 5—砂斗；6—砂闸板；7—进气阀；8—储气筒；  
 9—射砂头；10—射砂板；11—芯盒；12—工作台

压铸是通过压铸机完成的,图 2 3 8 为立式压铸机工作过程示意图。合型后把金属液浇入压室(图 a),压射活塞向下推进,将液态金属压入型腔(图 b),保压冷凝后,压射活塞退回,下活塞上移顶出余料,动型移开,利用顶杆顶出铸件(图 c)。

压力铸造的特点和应用范围：

- 1) 压铸件尺寸精度高,表面质量好,一般不需机加工即可直接使用。
- 2) 压力铸造在快速、高压下成型,可压铸出形状复杂、轮廓清晰的薄壁精密铸件,铝合金铸件最小壁厚可达 0.5 mm,最小孔径 0.7 mm。
- 3) 铸件组织致密,力学性能好,其强度比砂型铸件提高 25% ~ 40%。
- 4) 生产率高,劳动条件好。
- 5) 设备投资大,铸型制造费用高,周期长。

压力铸造主要用于大批量生产低熔点合金的中小型铸件,如铝、锌、铜等合金铸件,在汽车、拖拉机、航空、仪表、电器等部门获得广泛应用。

#### 4 离心铸造

离心铸造是将液体金属浇入高速旋转的铸型中,使其在离心力作用下凝固成形的铸造方法。

根据铸型旋转轴空间位置不同,离心铸造机可分为立式和卧式两大类(图 2 3 9)。立式离心铸造机的铸型绕垂直轴旋转(图 a),由于离心力和液态金属本身重力的共同作用,使铸件的内表面为一回转抛物面,造成铸件上薄下厚,而且铸件越高,壁厚差越大。因此,它主要用于生产高



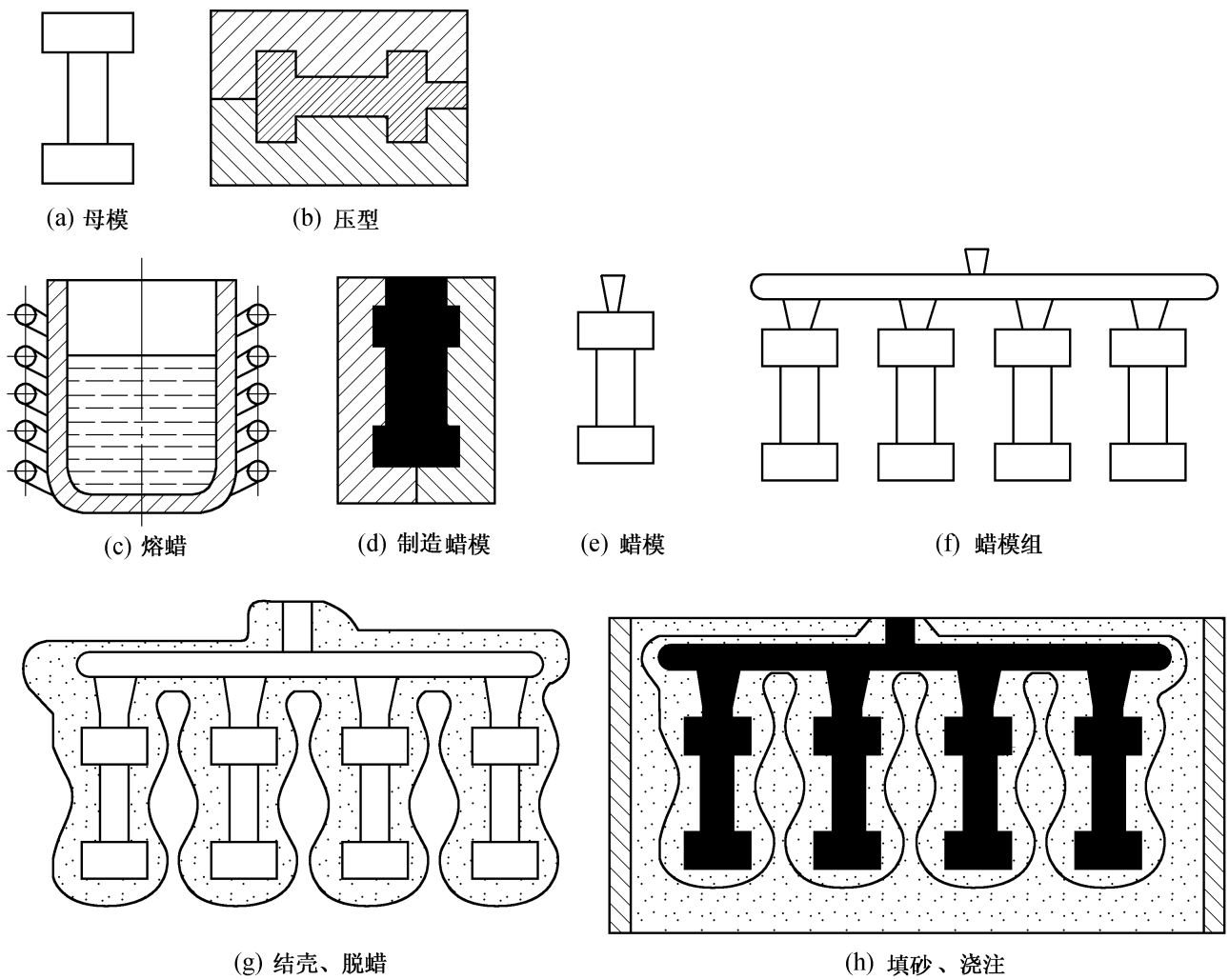


图 2 3 6 熔模铸造工艺过程

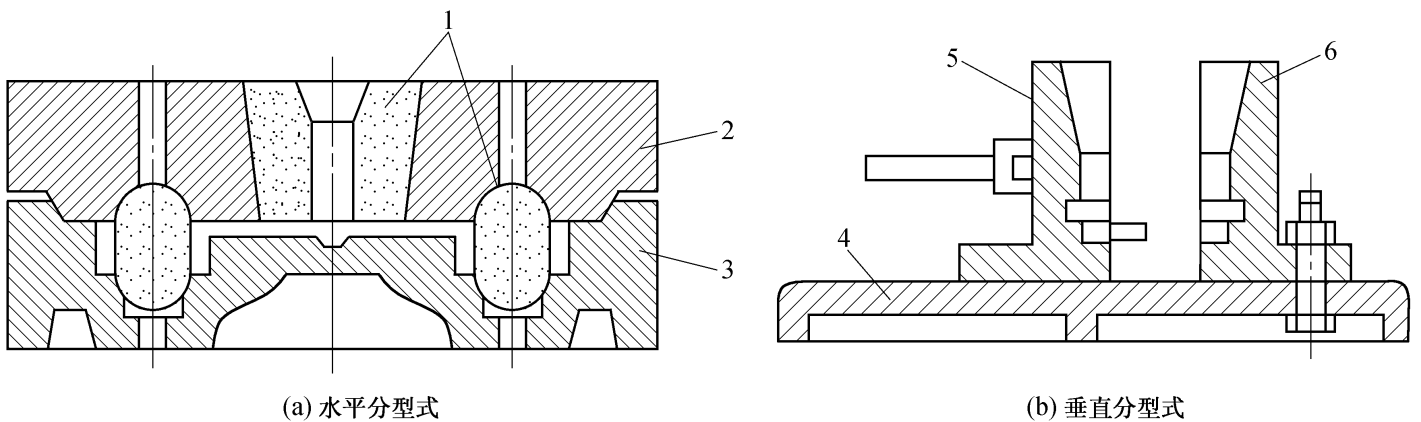


图 2 3 7 金属型

1—型芯；2—上型；3—下型；4—模底板；5—动型；6—定型

度小于直径的圆环类铸件。卧式离心铸造机的铸型绕水平轴旋转(图 b),由于铸件各部分冷却条件相近,故铸件壁厚均匀,适于生产长度较大的管、套类铸件。

离心铸造的特点和应用范围：

- 1) 铸件在离心力作用下结晶,组织致密,无缩孔、缩松、气孔、夹渣等缺陷,力学性能好。
- 2) 铸造圆形中空铸件时,可省去型芯和浇注系统,简化了工艺,节约了金属。

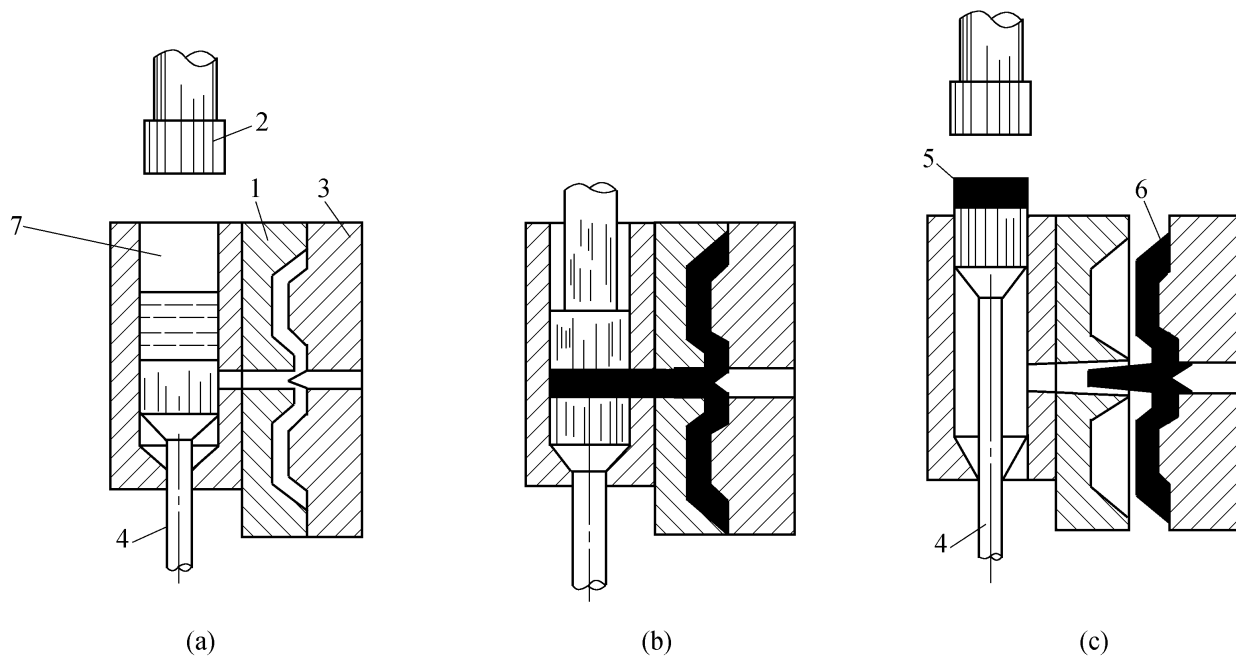


图 2 3 8 立式压铸机工作过程示意图

1—定型 ; 2—压射活塞 ; 3—动型 ; 4—下活塞 ; 5—余料 ; 6—压铸件 ; 7—压室

3) 便于制造双金属铸件 ,如钢套镶铸铜衬。

4) 离心铸造内表面粗糙 ,尺寸不易控制 ,需要增加加工余量来保证铸件质量 ,且不宜生产易偏析的合金。

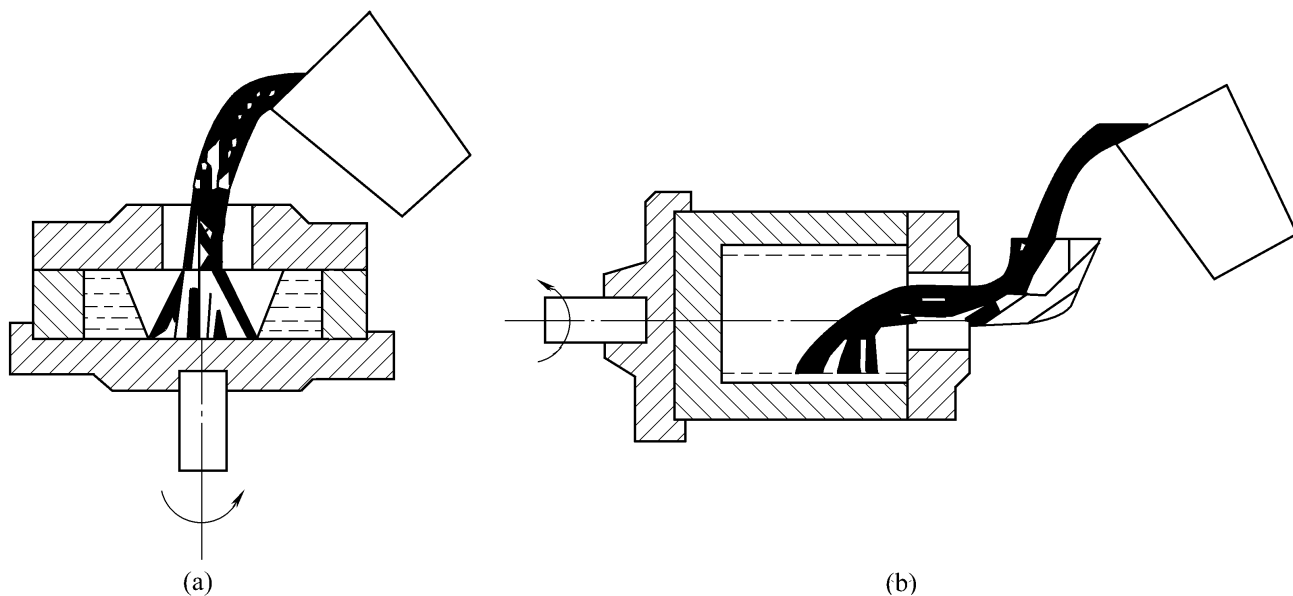


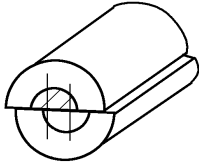
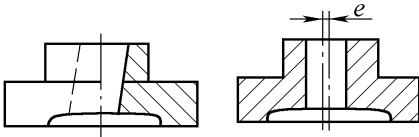
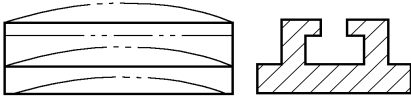
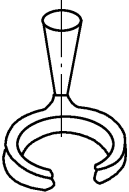
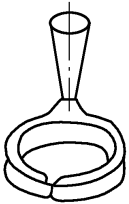
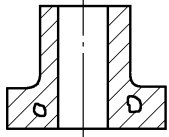
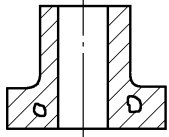
图 2 3 9 离心铸造

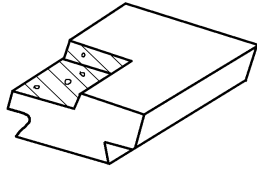
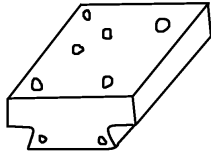
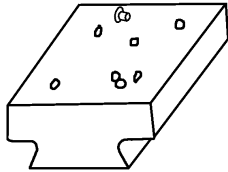
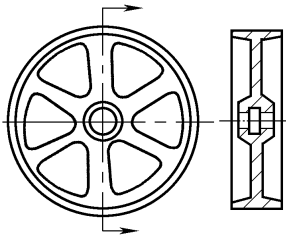
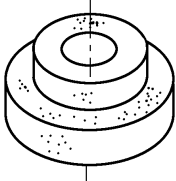
离心铸造是生产管、套类铸件的主要方法 ,如铸铁管、铜套、汽缸套、双金属轧辊、滚筒等。

### 2 3 3 铸造生产常见缺陷

由于铸造生产工序繁多 ,很容易使铸件产生缺陷。为了减少铸件缺陷 ,首先应正确判断缺陷类型 ,找出产生缺陷的主要原因 ,以便采取相应的预防措施。表 2 3 2 给出了常见铸造缺陷的名称、特征以及产生的主要原因。

表 2 3 2 常见铸造缺陷的名称、特征以及产生的主要原因

类别	名称	图例及特征	产生的主要原因
形状类缺陷	错型	 <p>铸件在分型面处有错移</p>	合型时上、下砂箱未对准； 上、下砂箱未夹紧； 上、下半模有错移
	偏型	 <p>铸件上孔偏斜或轴心线偏移</p>	型芯放置偏斜或变形； 浇口位置不对,液态金属冲歪了型芯； 合型时碰歪了型芯； 制模样时,型芯头偏心
	变形	 <p>铸件向上、向下或向其他方向弯曲或扭曲</p>	铸件结构设计不合理,壁厚不均匀； 铸件冷却不当,冷缩不均匀
	浇不足	 <p>液态金属未充满铸型,铸件形状不完整</p>	铸件壁太薄,铸型散热太快； 合金流动性不好或浇注温度太低； 浇口太小,排气不畅； 浇注速度太慢； 浇包内液态金属不够
	冷隔	 <p>铸件表面似乎融合,实际未融透,有浇坑或接缝</p>	铸件设计不合理,铸壁较薄； 合金流动性差； 浇注温度太低,浇注速度太慢； 浇口太小或布置不当,浇注曾有中断
空洞类缺陷	<td>  <p>铸件的厚大部分有不规则的粗糙孔形</p> </td> <td>                     铸件结构设计不合理,壁厚不均匀,局部过厚；                      浇、冒口位置不对,冒口尺寸太小；                      浇注温度太高                 </td>	 <p>铸件的厚大部分有不规则的粗糙孔形</p>	铸件结构设计不合理,壁厚不均匀,局部过厚； 浇、冒口位置不对,冒口尺寸太小； 浇注温度太高

类别	名称	图例及特征	产生的主要原因
孔洞类缺陷	气孔	 <p>析出气孔多而分散,尺寸较小,位于铸件各断面上侵入气孔数量较少,尺寸较大,存在于局部地方</p>	熔炼工艺不合理、金属液吸收了较多的气体; 铸型中的气体侵入金属液; 起模时刷水过多,型芯未干; 铸型透气性差; 浇注温度偏低; 浇包工具未烘干
	砂眼	 <p>铸件表面或内部有型砂充填的小凹坑</p>	型砂、芯砂强度不够,紧实较松,合型时散落或被液态金属冲垮; 型腔或浇口内散砂未吹净; 铸件结构不合理,无圆角或圆角太小
夹杂类缺陷	夹渣	 <p>铸件表面上有不规则并含有融渣的孔眼</p>	浇注时挡渣不良; 浇注温度太低,熔渣不易上浮; 浇注时断流或未充满浇口,渣和液态金属一起流入型腔
	裂纹	 <p>在夹角处或厚薄交接处的表面或内层产生裂纹</p>	铸件厚薄不均,冷缩不一; 浇注温度太高; 型砂、芯砂退让性差; 合金内含硫、磷较高
表面缺陷	粘砂	 <p>铸件表面粘砂粒</p>	浇注温度太高 型砂选用不当,耐火度差 未刷涂料或涂料太薄

## 2.4 铸造工艺设计

铸造生产要实现优质、高产、低成本、少污染,必须根据铸件结构的特点、技术要求、生产批量、生产条件等进行铸造工艺设计,并绘制铸造工艺图。铸造工艺图就是根据零件图利用各种铸造工艺符号、各种工艺参数,把制造模样和铸型所需的资料直接绘制在图纸上的图样,图中应表示出铸件的浇注位置、分型面、型芯的形状、数量、尺寸及其固定方式、工艺参数、浇注系统等。这既是生产管理的需要,也是铸件验收和经济核算的依据。

### 2.4.1 浇注位置和分型面的选择

浇注位置与分型面的选择密切相关,通常分型面取决于浇注位置,选择时既要保证质量又要简化造型工艺。对一些质量要求不高的铸件,为了简化造型工艺,可以先选定分型面。

#### 1. 浇注位置的选择

所谓浇注位置是指浇注时铸件在铸型中所处的位置。确定浇注位置应考虑以下原则:

##### (1) 铸件的重要表面朝下或处于侧面

气孔、夹渣等缺陷多出现在铸件上表面,而底部或侧面组织致密,缺陷少,质量好。图2.4.1所示床身的导轨面是重要受力面和加工面,浇注时朝下是合理的选择。图2.4.2所示伞齿轮的齿面质量要求高,采用立浇方案,则容易保证铸件质量。个别加工表面必须朝上时,可采用增大加工余量的方法来保证质量要求。

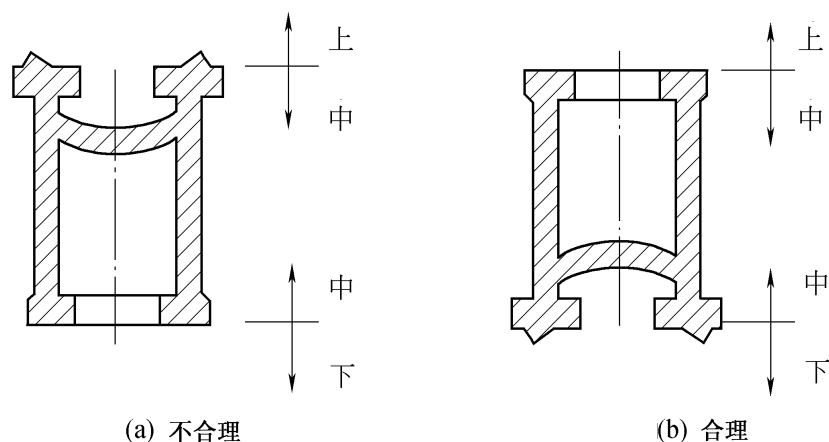


图2.4.1 床身

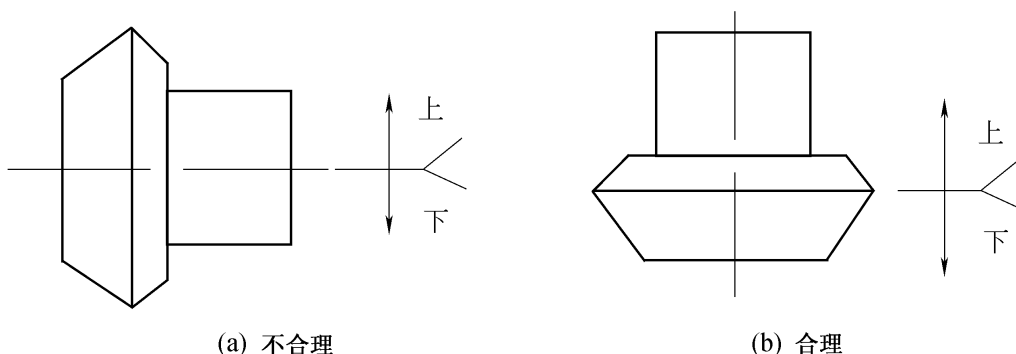


图2.4.2 伞齿轮

(2) 铸件的宽大平面朝下

对于平板类铸件,使其大平面朝下(图 2 4 3)既可避免气孔、夹渣,又可防止型腔上表面经受强烈烘烤而产生夹砂结疤缺陷。

(3) 铸件的薄壁部分朝下

按图 2 4 4b 正确位置浇注,可保证铸件的充型,防止产生浇不足、冷隔缺陷。这对于流动性差的合金尤为重要。

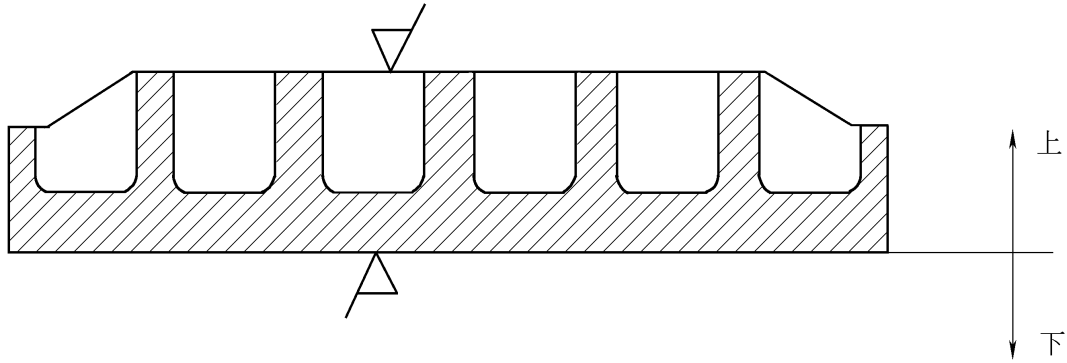


图 2 4 3 大平面铸件正确的浇注位置

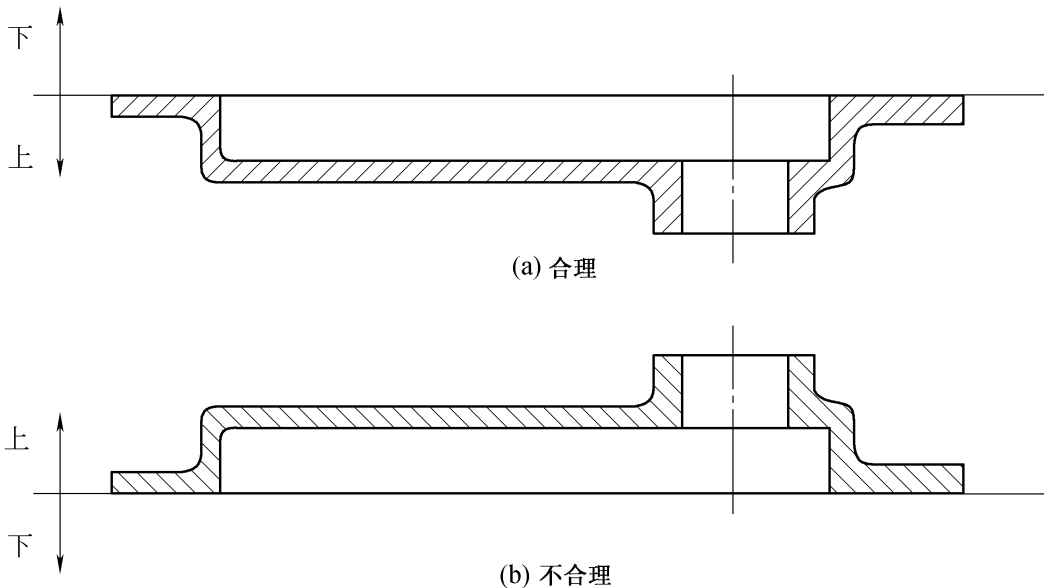


图 2 4 4 曲轴箱的浇注位置

(4) 铸件的厚大部分朝上,便于补缩

容易形成缩孔的铸件,厚大部分朝上,便于安置冒口,实现自下而上的定向凝固,防止产生缩孔。图 2 4 5 所示铸钢链轮的厚壁朝上,并设置冒口。

(5) 浇注位置应利于减少型芯,便于安装型芯。通常型芯用来获得内孔和内腔,有时也为了获得局部外形。采用型芯会使造型工艺复杂,增加成本,因此选择浇注位置应有利于减少型芯数目(图 2 4 6)。

## 2. 选择分型面

铸型时,砂箱与砂箱之间的结合面称之为分型面。就同一铸件而言,可以有几种不同的分型

方案,应从中选出一种最佳方案,使得起模方便,造型工艺简化。具体选择原则如下:

(1) 应尽量使铸件位于同一铸型内

铸件的加工面和加工基准面应尽量位于同一砂箱,避免合型不准产生错型,从而保证铸件尺寸精度。图 2.4.7 所示水管堵头是以顶部方头为基准加工管螺纹的,图 b 分型方案易产生错型,无法保证外螺纹加工精度,故方案 a 合理。

(2) 尽量减少分型面

分型面数量少,既能保证铸件精度,又能简化造型操作,如图 2.4.8 所示三通铸件的分型面选择。机器造型一般只允许有一个分型面,凡阻碍起模的部位均采用型芯减少分型面,见图 2.4.9 所示绳轮铸件分型面的确定。

(3) 尽量使分型面平直

平直的分型面可简化造型工艺和模板制造,容易保证铸件精度,这对于机器造型尤为重要,如图 2.4.10 所示起重臂分型面的确定。

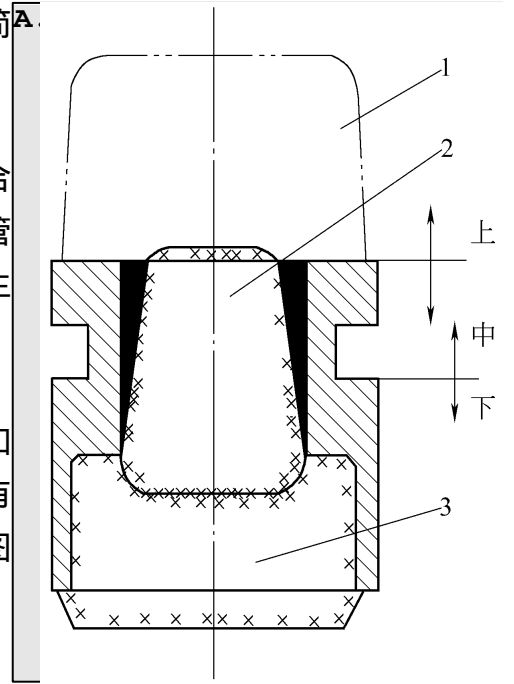


图 2.4.5 铸钢链轮的浇注位置图  
1—冒口;2—型芯 1;3—型芯 2

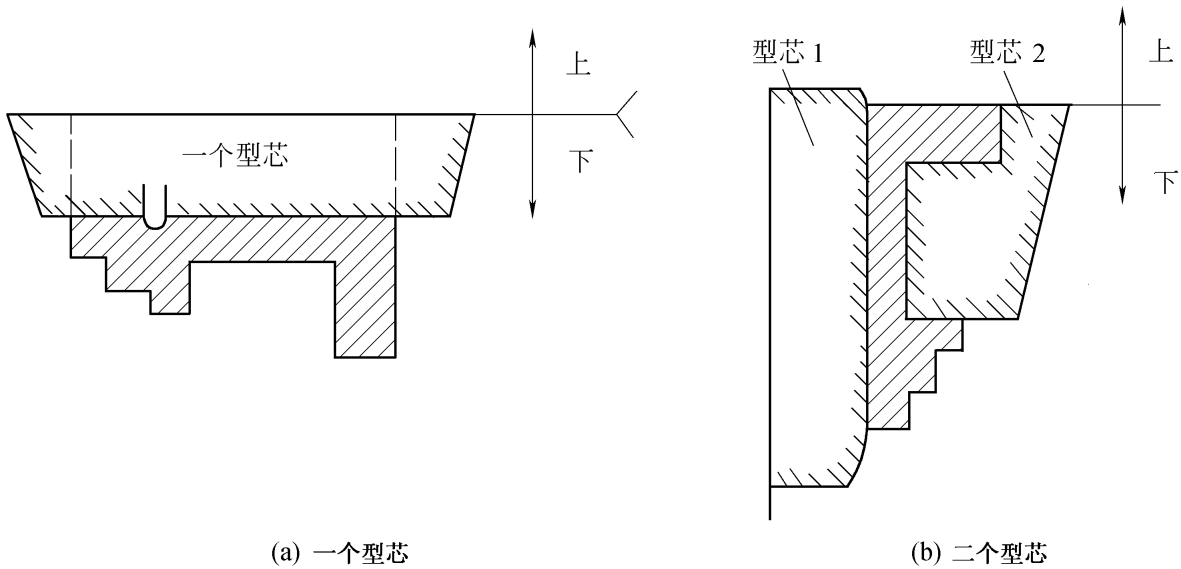


图 2.4.6 浇注位置应利于减少型芯

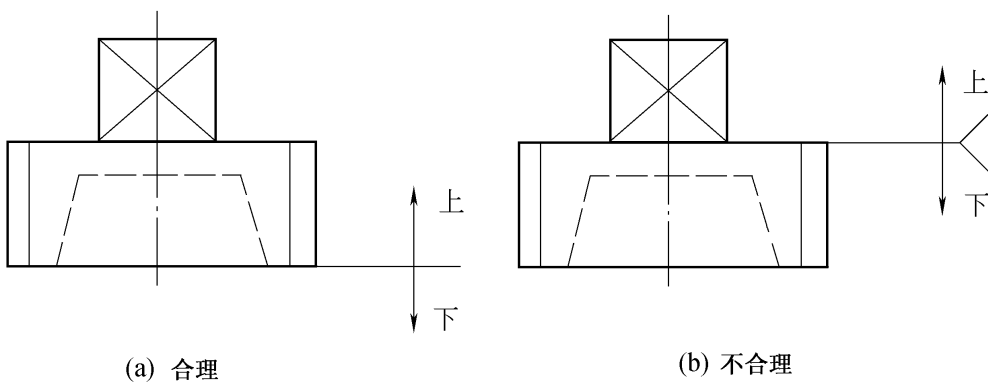


图 2.4.7 管子堵头分型方案

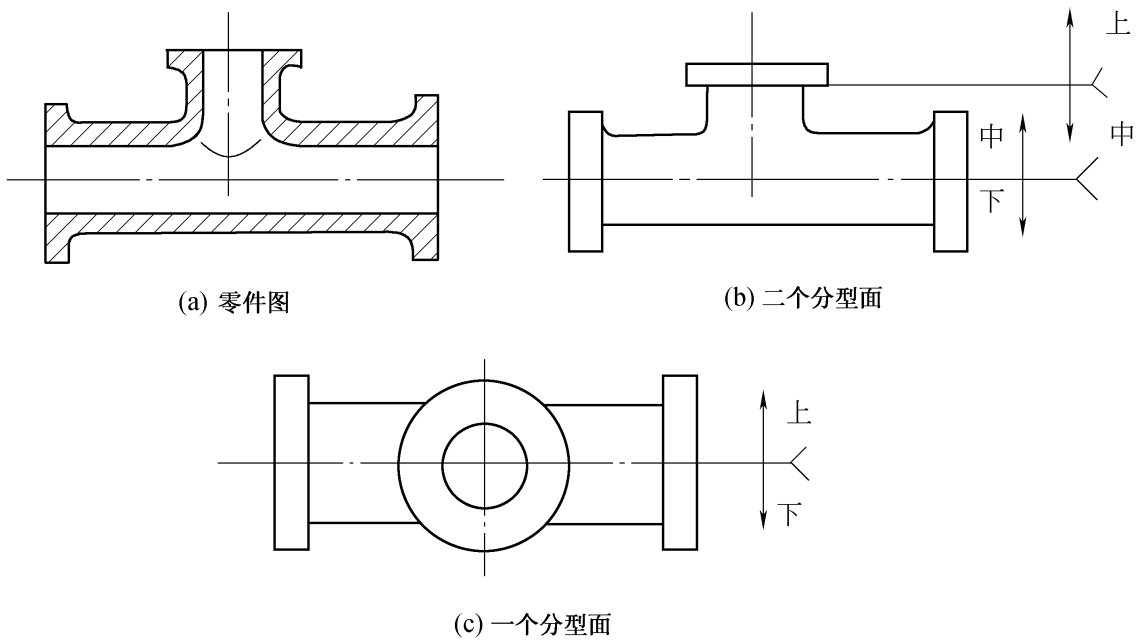


图 2.4.8 三通铸件的分型面选择

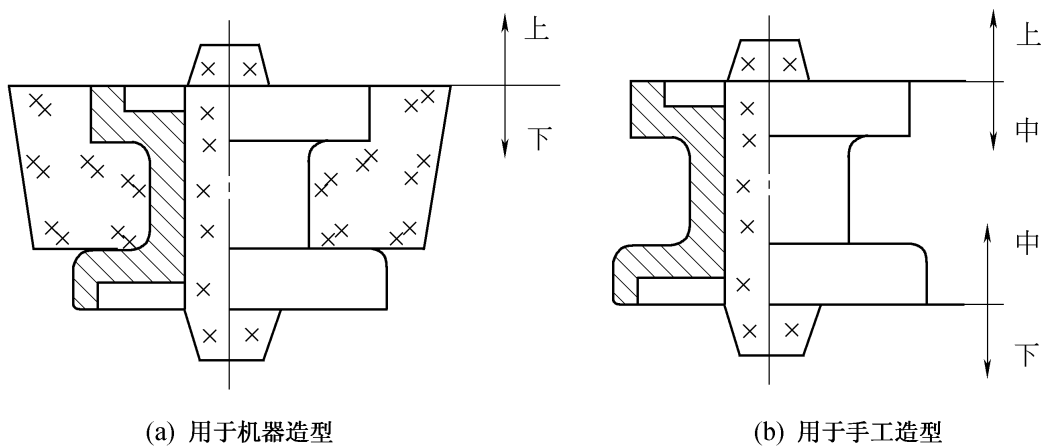


图 2.4.9 绳轮铸件分型面的确定

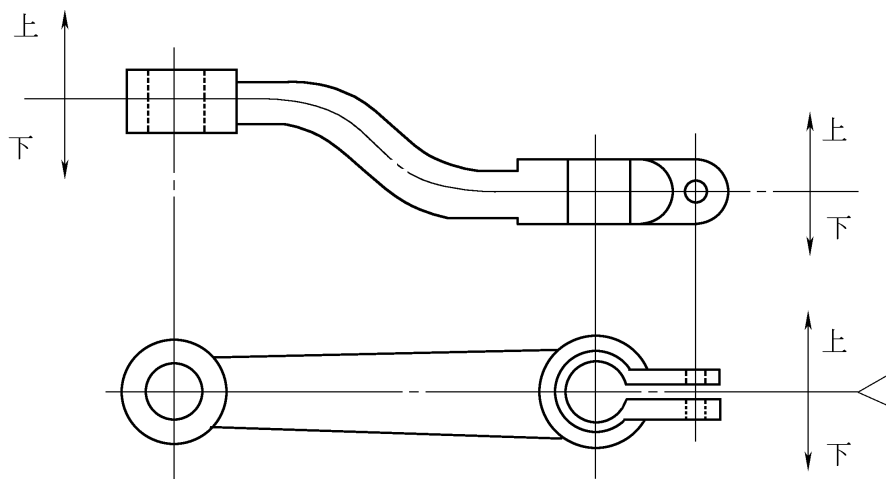


图 2.4.10 起重臂分型面的确定

(4) 尽量使型腔和主要型芯位于下砂箱

图 2.4.11 所示铸件,若按图 a 方式铸型,一方面不便于检验铸件壁厚,另一方面合型时还容易碰坏型芯,而采用图 b 的方式铸型既便于造型、下芯、合型,也便于检验铸件壁厚。



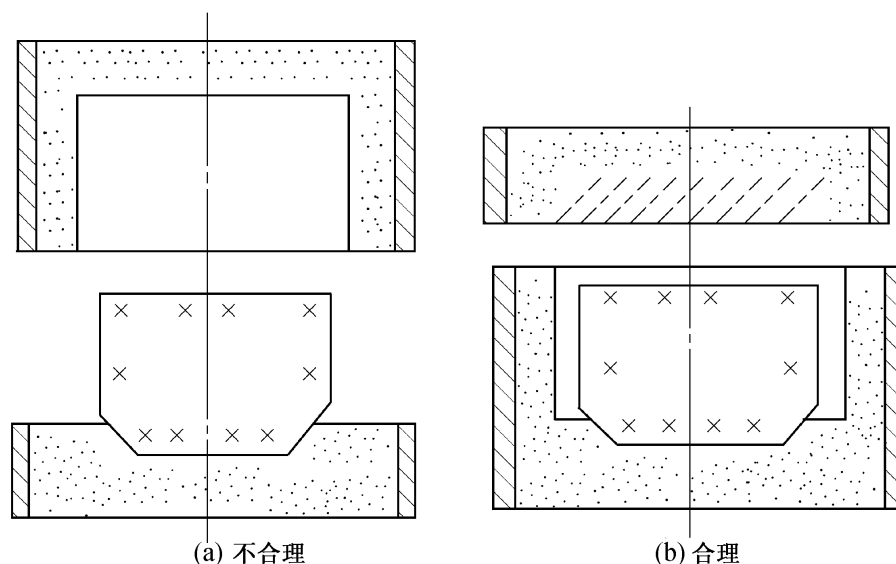


图 2 4 .11 型腔和型芯位置分布

生产中 ,浇注位置和分型面的选择有时是相互矛盾和制约的 ,需要根据铸件特点和生产条件综合分析 ,以确定最佳方案。

## 2 4 2 确定铸造主要工艺参数

铸造工艺参数是指铸造工艺设计时需要确定的某些数据。主要指加工余量、起模斜度、铸造收缩率、型芯头尺寸、铸造圆角等。这些工艺参数不仅和浇注位置及模样有关 ,还与造芯、下芯及合型的工艺过程有关。

在铸造过程中 ,为了便于制作模样和简化造型操作 ,一般在确定工艺参数前要根据零件的形状特征简化铸件结构。例如零件上的小凸台、小凹槽、小孔等可以不铸出 ,留待以后切削加工。在单件小批生产条件下铸件的孔径小于 30 mm、凸台高度和凹槽深度小于 10 mm 时 ,可以不铸出。

### 1 . 加工余量

在铸件工艺设计时预先增加而在机加工中再切去的金属层厚度 ,称为加工余量。在制作模样时 ,考虑到铸造收缩率还要在铸件的加工面上适当增大尺寸。但加工余量不能随意确定 ,加工余量过大 ,浪费金属材料和加工工时 ,过小则使铸件因残留黑皮而报废。根据 GB/T 11350 —1989《铸件机械加工余量》的规定 ,确定加工余量之前 ,需先确定铸件的尺寸公差等级和加工余量等级。

#### (1) 铸件的尺寸公差等级

铸件尺寸公差等级代号为 CT ,公差等级由高到低分为 16 级 ,它是设计和检验铸件尺寸的依据。表 2 4 .1 列出了小批和单件生产铸件时的尺寸公差等级。表 2 4 2 列出了成批和大量生产铸件时的尺寸公差等级。

表 2 4 .1 小批和单件生产铸件的尺寸公差等级

造型材料	公差等级 CT					
	铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	轻金属合金
干、湿型砂	13~15	13~15	13~15	13~15	13~15	11~13
自硬砂	12~14	11~13	11~13	11~13	10~12	10~12

表 2 4 2 成批和大量生产铸件的尺寸公差等级

铸造 工艺方法	公差等级 CT					
	铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	轻金属合金
砂型手工造型	11~13	11~13	11~13	10~12	10~12	9~11
砂型机器造型	8~10	8~10	8~10	8~10	8~10	7~9
金属型		7~9	7~9	7~9	7~9	6~8
压力铸造					6~8	5~7
熔模铸造	5~7	5~7	5~7		4~6	4~6

注：表 2 4 .1 和表 2 4 2 中的公差等级适用于大于 25 mm 的铸件基本尺寸，对小于或等于 25 mm 的铸件基本尺寸，通常应采用下述较高的公差等级：

铸件基本尺寸 < 10 mm 时，其公差等级提高 3 级。

铸件基本尺寸 = 10~16 mm 时，其公差等级提高 2 级。

铸件基本尺寸 = 16~25 mm 时，其公差等级提高 1 级。

### (2) 加工余量等级

铸件加工余量等级代号为 MA，其等级由精到粗分为 A、B、C、D、E、F、G、H、J 共 9 个等级。对于小批和单件生产的铸件，加工余量等级按表 2 4 3 选取，成批和大量生产铸件时加工余量等级按表 2 4 4 选取。

### (3) 加工余量的数值

当尺寸公差等级 CT 和加工余量等级 MA 确定后，可根据基本尺寸由表 2 4 5 查得铸件的加工余量的数值。此外，铸件顶面的加工余量等级应比表中降一级选用，孔的加工余量可与顶面同级。

表 2 4 3 小批和单件生产铸件的机械加工余量等级

造型材料、尺寸 公差、加工余量		加工余量等级					
		铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	轻金属合金
干、湿型砂	CT	13~15	13~15	13~15	13~15	13~15	11~13
	MA	J	H	H	H	H	H
自硬砂	CT	12~14	11~13	11~13	11~13	10~12	10~12
	MA	J	H	H	H	H	H

表 2 4 4 成批和大量生产铸件的机械加工余量等级

铸造工艺方法、尺寸 公差、加工余量		加工余量等级					
		铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	轻金属合金
砂型手工造型	CT	11~13	11~13	11~13	10~12	10~12	9~11
	MA	J	H	H	H	H	H
砂型机器造型	CT	8~10	8~10	8~10	8~10	8~10	7~9
	MA	H	G	G	G	G	G

续表

铸造工艺方法、尺寸公差、加工余量		加工余量等级					
		铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铜合金	轻金属合金
金属型	CT		7~9	7~9	7~9	7~9	6~8
	MA		F	F	F	F	F
压力铸造	CT					6~8	5~7
	MA					E	E
熔模铸造	CT	5~7	5~7	5~7		4~6	4~6
	MA	E	E	E		E	E

表 2 4 5 与铸件尺寸公差配套使用的铸件加工余量

尺寸公差等级		8		9		10		11		12			13			14		15	
加工余量等级		G	H	G	H	G	H	G	H	G	H	J	G	H	J	H	J	H	J
基本尺寸		加工余量数值/mm																	
大于	至																		
—	100	2.5	3.0	3.0	3.5	3.5	4.0	4.0	4.5	4.5	5.0	6.0	6.0	6.5	7.5	7.5	8.5	9.0	10
		2.0	2.5	2.5	3.0	2.5	3.0	3.0	3.5	3.0	3.5	4.5	4.0	4.5	5.5	5.0	6.0	5.5	6.5
100	160	3.0	4.0	3.5	4.5	4.0	5.0	4.5	5.5	5.5	6.5	7.5	7.0	8.0	9.0	9.0	10	11	12
		2.5	3.5	3.0	4.0	3.0	4.0	3.5	4.5	4.0	5.0	6.0	4.5	5.5	6.5	6.0	7.0	7.0	8.0
160	250	4.0	5.0	4.5	5.5	5.0	6.0	6.0	7.0	7.0	8.0	9.5	8.5	9.5	11	11	13	13	15
		3.5	4.5	4.0	5.0	4.0	5.0	4.5	5.5	5.0	6.0	7.5	6.0	7.0	8.5	7.5	9.0	8.5	10
250	400	5.0	6.5	5.5	7.0	6.0	7.5	7.0	8.5	8.0	9.0	11	9.5	11	13	13	15	15	17
		4.5	6.0	4.5	6.0	5.0	6.5	5.5	7.0	6.0	7.5	9.0	6.5	8.0	10	9.0	11	10	12
400	630	5.5	7.5	6.0	7.5	6.5	8.5	7.5	9.5	9.0	11	14	11	13	16	15	18	17	20
		5.0	7.0	5.0	7.0	5.5	7.5	6.0	8.0	6.5	8.5	11	7.5	9.5	12	11	13	12	14
630	1 000	6.5	8.5	7.0	9.0	8.0	10	9.0	11	11	13	16	13	15	18	17	20	20	23
		6.0	8.0	6.0	8.0	6.5	8.5	7.0	9.0	8.0	10	13	9	11	14	12	15	14	17

注：表中每栏有两个加工余量数值，上面的数值为以一侧为基准，进行单侧加工的加工余量值；下面的数值是进行双侧加工时，每侧的加工余量值。

## 2. 起模斜度

为便于起模 在平行于模样或芯盒起模方向的侧壁上的斜度 称为起模斜度。

起模斜度的形式有三种 ,如图 2 4 .12 所示 ,当不加工的侧面壁厚  $< 8 \text{ mm}$  时 ,可采用增加壁厚法 ;当壁厚为  $8 \sim 16 \text{ mm}$  时 ,可采用加减壁厚法 ;当壁厚  $> 16 \text{ mm}$  时 ,可采用减小壁厚法。当铸件侧面需要加工时必须采用增加壁厚法 ,而且加工表面上的起模斜度 ,应在加工余量的基础上再给出斜度数值。图中 的取值见表 2 4 .6。

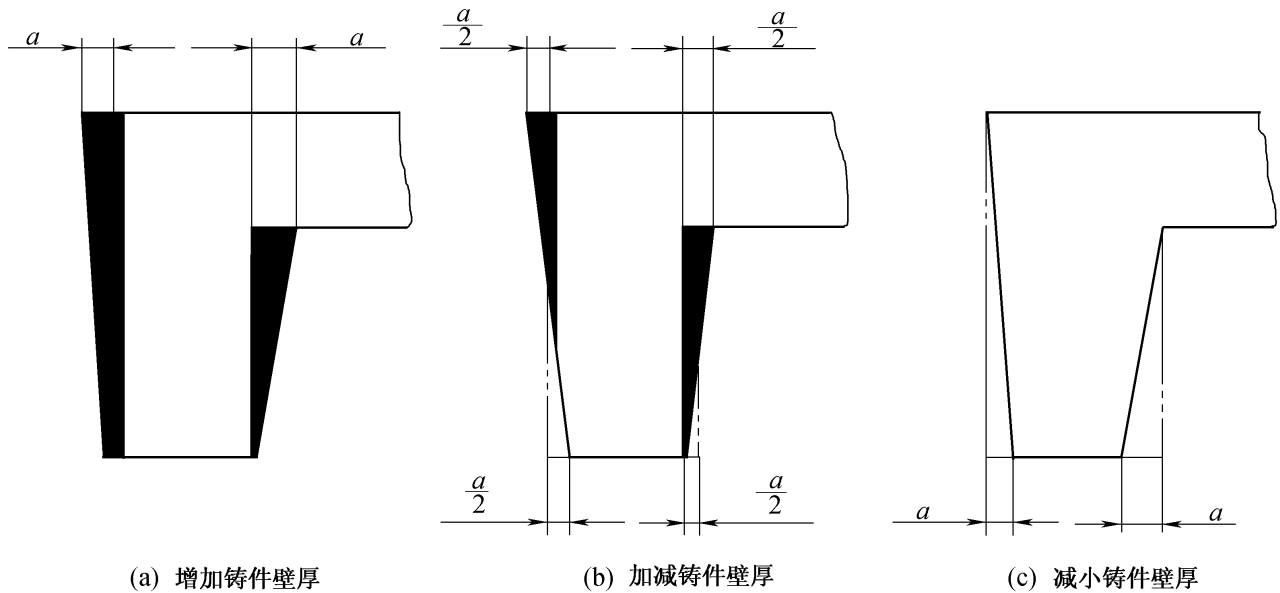


图 2 4 .12 起模斜度

表 2 4 6 起模斜度 的数值

测量面高度	金属模	木模
20	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0
> 20 ~ 50	0.5 ~ 1.2	1.0 ~ 1.5
> 50 ~ 100	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0
> 100 ~ 200	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5
> 200 ~ 300	2.0 ~ 3.0	2.5 ~ 3.5
> 300 ~ 500	2.5 ~ 4.0	3.5 ~ 4.5

起模斜度的大小取决于模样的起模高度、造型方法、模样材料等因素。中小型木模通常取  $0^{\circ}30' \sim 3^{\circ}$  ,金属模比木模斜度小 ;立壁越高 ,斜度越小 ;机器造型比手工造型斜度小 ;铸孔内壁的起模斜度应比外壁大 ,常取  $3^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

## 3. 收缩率

因铸件收缩的影响 ,铸件冷却后其尺寸要比模样的尺寸小 ,为了保证铸件要求的尺寸 ,必须加大模样的尺寸。铸件尺寸收缩的大小一般用铸件线收缩率  $K$  表示 :

$$K = \frac{L_M - L_J}{L_M} \times 100\%$$

式中 , $L_M$  为模样(芯盒)尺寸 , $L_J$  为铸件尺寸。灰铸铁和碳钢的线收缩率见表 2 4 .7。

表 2 4 .7 铸造收缩率

铸件种类		收缩率/(%)	
		有阻碍收缩	自由收缩
灰铸铁	小型铸件	0.9	1.0
	中型铸件	0.8	0.9
	大型铸件	0.7	0.8
碳钢铸件		1.3~1.7	1.6~2.0

#### 4. 芯头设计

型芯在铸型中的位置一般是用型芯头来固定的,芯头有垂直芯头和水平芯头,见图 2 4 .13。芯头设计主要是确定芯头的长度、斜度和间隙。

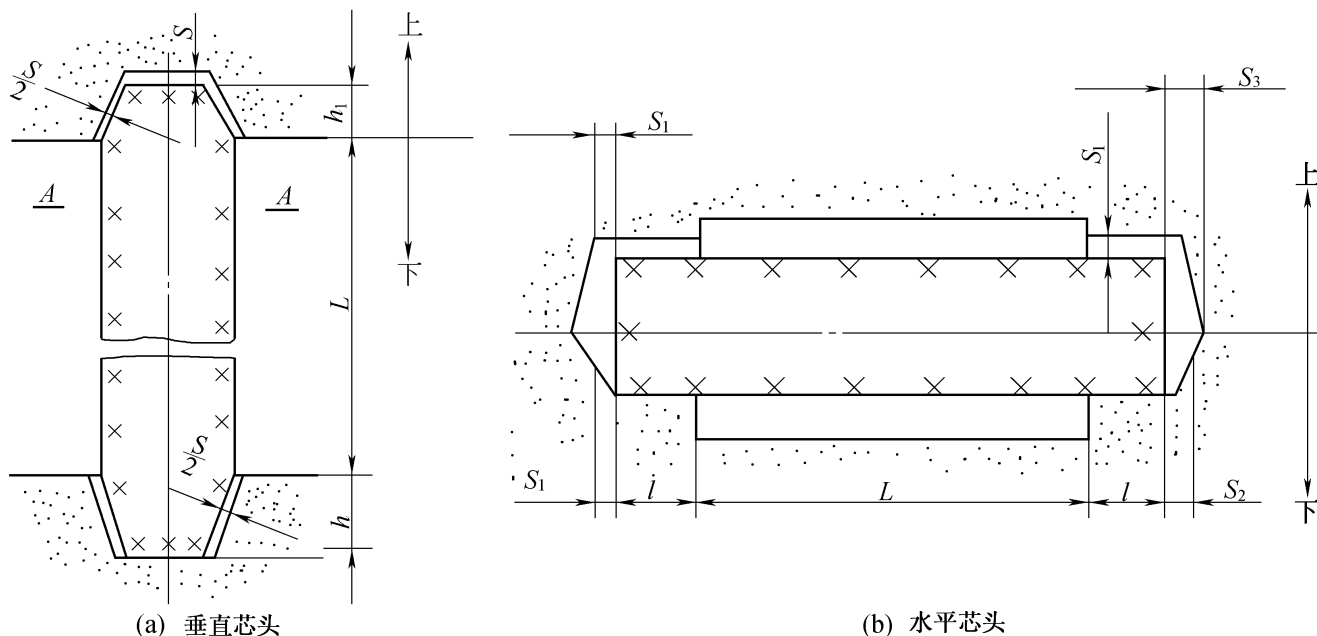


图 2 4 .13 芯头

##### (1) 芯头长度

为了保证型芯的稳固,芯头必须有一定的长度  $l$ ,垂直芯头的长度通常称为芯头高度  $h$ 。芯头长度取决于型芯的直径和长度,其具体尺寸可查阅有关手册。

##### (2) 芯头斜度

垂直型芯的上、下芯头都留有斜度。为增加型芯的稳定性,下芯头斜度小,高度大;为便于合型,上芯头斜度大,高度小。垂直芯头的斜度可查手册。水平芯头一般不留斜度,而是在芯座上形成一定的间隙。

##### (3) 芯头间隙

为便于下芯,芯头与芯座之间应留有间隙  $S$ 。间隙大小取决于造型方法、铸型种类及型芯大小,水平芯头和垂直芯头的间隙可查阅有关手册。

#### 5. 铸造圆角

制造模样时 壁的连接和转角处要做成圆弧过度 ,即铸造圆角。它既可使转角处不产生脆弱面 ,又可减少应力集中 ,还可避免产生冲砂、缩孔和裂纹。一般小型铸件 外圆角半径取 2~8 mm ,内圆角半径取 4~16 mm。

### 2 4 3 确定浇注系统

浇注系统是金属液流入铸型型腔的通道。通常由浇口杯、直浇道、横浇道和内浇道所组成 ,图 2 4 .14。它应使金属液均匀、平稳地充满型腔 ,能防止熔渣和气体卷入。铸铁件浇注系统设计主要是选择浇注系统类型、确定内浇道开设位置、各组元截面积、形状和尺寸等。按照内浇道在铸件上开设的位置不同 ,浇注系统类型可分为顶注式、底注式、中间注入式和分段注入式 ,如图 2 4 .15 所示。

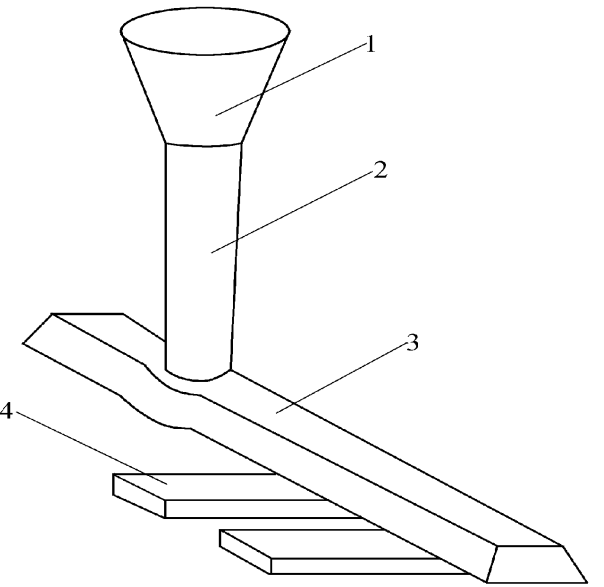


图 2 4 .14 浇注系统

1—浇口杯 ; 2—直浇道 ; 3—横浇道 ; 4—内浇道

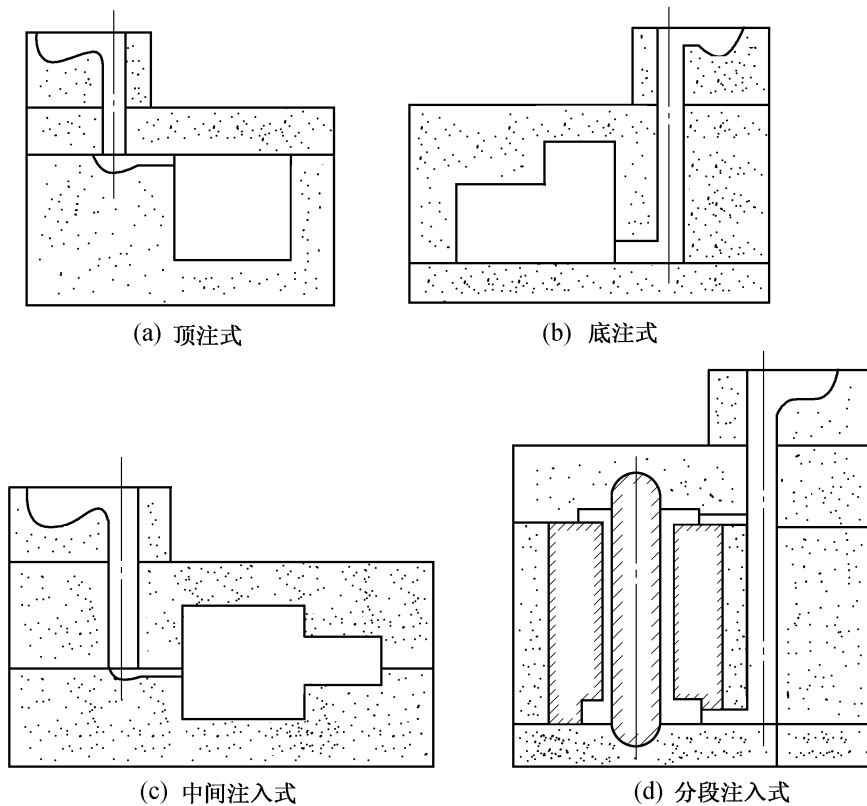

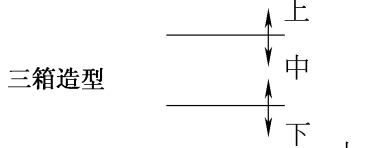
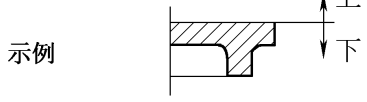
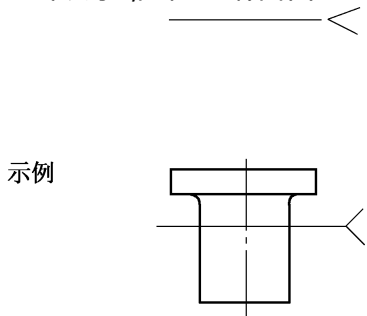
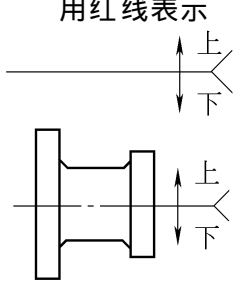
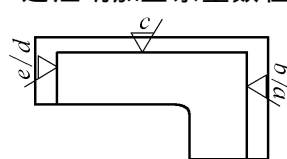
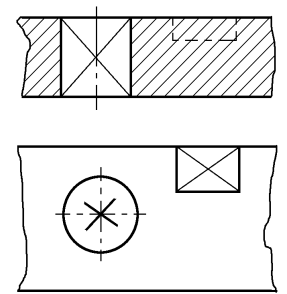
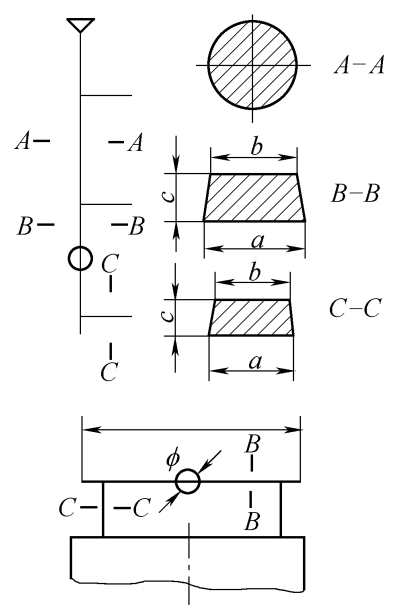
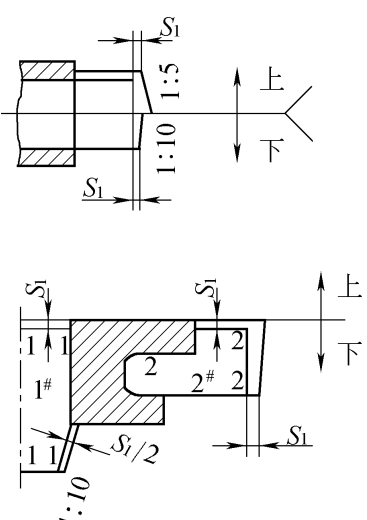
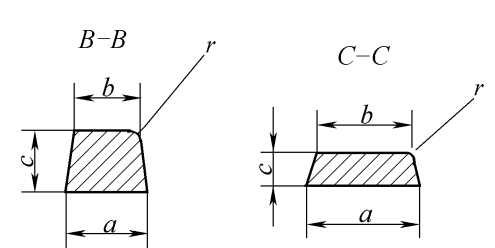


图 2 4 .15 浇注系统类型

### 2 4 4 绘制铸造工艺图

在进行铸造工艺设计时 ,为了表示设计意图和要求 ,需要绘制铸造工艺图。铸造工艺图是在零件图上用规定的工艺符号表示出铸造工艺内容的图形 ,它决定了铸件的形状、尺寸、生产方法和工艺过程。是制造模样、芯盒、造型、造芯和检验铸件的依据。在蓝图上绘制的铸造工艺图 ,采用红、蓝铅笔将各种工艺符号直接标注在零件图样上。铸造工艺图常用符号及表示方法可参阅表 2 4 8。

表 2 4 8 铸造工艺符号和表示方法

名称	工艺符号和表示方法	名称	工艺符号和表示方法
分型线	<p>用红线表示,并用红色写出“上、中、下”字样</p> <p>两箱造型 </p> <p>三箱造型 </p> <p>示例 </p>	分模线	<p>用红线表示,在任一端面画“&lt;”符号</p> <p>示例 </p>
分型分模线	<p>用红线表示</p> 	机加工余量	<p>用红线表示(本图用细实线代)在加工符号附近注明加工余量数值</p> 
不铸出孔和槽	<p>不铸出的孔和槽用红色线打叉</p> 	浇注系统位置与尺寸	<p>用红色线或红色双线表示,并注明各部分尺寸</p> 
芯头斜度与芯头间隙	<p>用蓝色线表示,(本图用细实线代)并注明斜度和间隙数值,有两个以上的型芯时,用“1#”、“2#”等标注</p> 		

现以联轴器零件为例,说明铸造工艺设计的步骤。已知:图 2.4.16 为联轴器的零件图,选择材料为 HT200,小批生产,采用砂型铸造,手工造型。

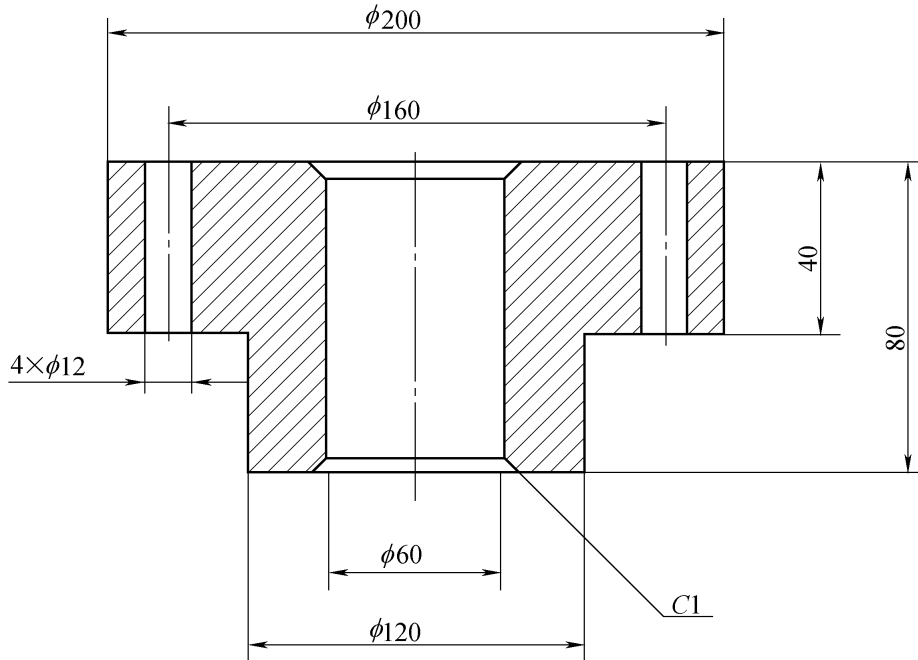


图 2.4.16 联轴器零件图

要求:对零件进行工艺分析

该零件为一般连接件,60孔和两端面质量要求较高,不允许有铸造缺陷。50孔较大,用型芯铸出,四个12mm小孔则不予铸出。

(1) 选择浇注位置和分型面

该铸件的浇注位置有两个方案,一是零件轴线呈垂直位置,二是零件轴线呈水平位置。若采用后者,需分模造型,容易错型,而且质量要求高的60孔和两端面质量无法保证。浇注采用垂直位置,并沿大端面分型,造型操作方便;可采用整模造型,避免了错型;质量要求高的端面和孔处于下面或侧面,铸件质量好;直立型芯的高度不大,稳定性尚可。综合分析选择前者方案。

(2) 确定加工余量

该铸件为回转体,基本尺寸取200mm,查表2.4.2得尺寸公差等级为CT13。再查表2.4.4得加工余量等级为MA-H级。200mm大端面是顶面,应降为MA-J级。查表2.4.5得加工余量8.5mm。200mm与120mm之间的台阶面可视为底面,查表2.4.5按加工余量MA-H级得此面加工余量7mm。200mm外圆是侧面,按基本尺寸200mm查表2.4.5得加工余量7mm,120mm端面是底面,按MA-H级查表2.4.5得加工余量5.5mm,同法查得120mm外圆加工余量5.5mm。60mm孔径小于高度80mm,故基本尺寸取80mm,孔的加工余量等级同顶面,查表2.4.5得加工余量5.5mm。

(3) 确定起模斜度

因铸件全部加工,两处侧壁高度均为40mm,查表2.4.6木模的起模斜度增加值为1,图2.4.16中“8/7”和“6.5/5.5”表示侧壁分别增加8mm和6.5mm,上端比下端大1mm构成起模斜度。

(4) 确定线收缩率

对于灰铸铁、小型铸件,查表2.4.7线收缩率取1%。



(5) 芯头尺寸

垂直芯头查手册得到图 2 4 .16 芯头尺寸。

(6) 铸造圆角

对于小型铸件 ,外圆角半径取 2 mm ,内圆角半径取 4 mm。

(7) 绘制铸造工艺图

图 2 4 .17 是按上述铸造工艺设计步骤 ,并根据表 2 4 8 规定绘制的铸造工艺图。

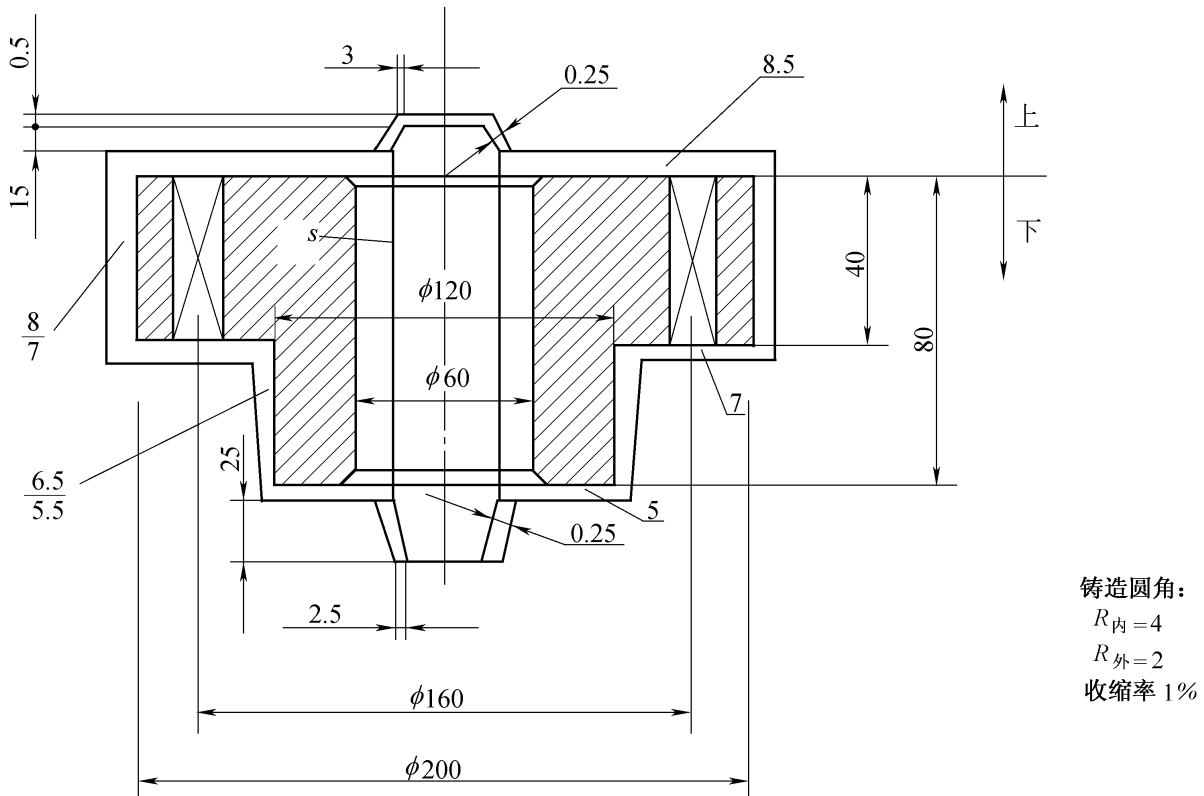


图 2 4 .17 铸造工艺图

## 2 5 铸件结构工艺性

铸件结构工艺性是指铸件的结构应在满足使用要求的前提下 ,还要满足铸造性能和铸造工艺对铸件结构要求的一种特性。它是衡量铸件设计质量的一个重要方面。合理的铸件结构不仅能保证铸件质量 ,满足使用要求 ,而且工艺简单、生产率高、成本低。

### 2 5 .1 铸造性能对铸件结构的要求

#### 1 .铸件壁厚要合理

在一定的工艺条件下 ,由于受铸造合金流动性的限制 ,能铸出的铸件壁厚有一个最小值。若实际壁厚小于它 就会产生浇不到、冷隔等缺陷。表 2 5 .1 列出了在砂型铸造条件下常用铸造合金所允许的最小壁厚值。但是 ,铸件壁厚过大 ,铸件壁的中心冷却较慢 ,会使晶粒粗大 ,还容易引起缩孔、缩松缺陷 ,使铸件强度随壁厚增加而显著下降 ,因此 ,不能单纯用增加壁厚的方法提高铸件强度。通常采用加强肋(图 2 5 .1)或合理的截面结构(丁字形、工字形、槽形)满足薄壁铸件的强度要求。一般铸件的最大临界壁厚约为最小壁厚的三倍。

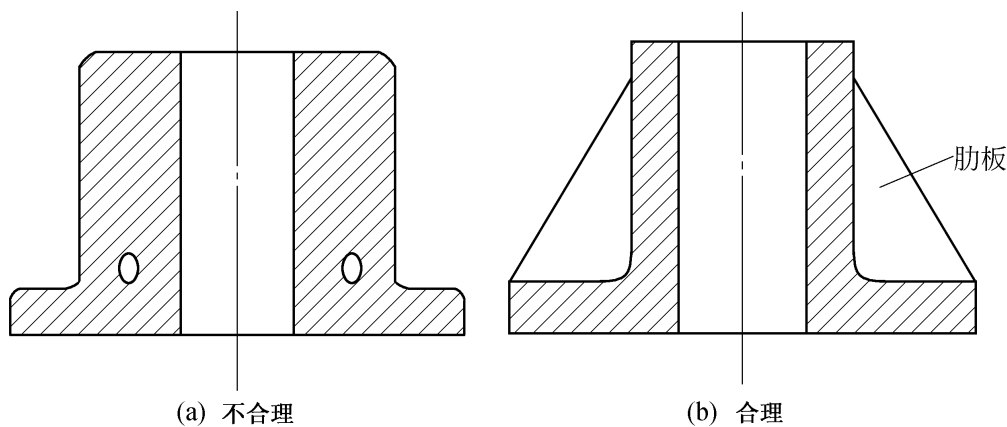


图 2.5.1 采用加强肋减小壁厚

表 2.5.1 在砂型铸造条件下铸件的最小壁厚值

mm

铸件尺寸	铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铝合金	铜合金
< 200 × 200	6~8	5~6	6	5	3	3~5
200 × 200 ~ 500 × 500	10~12	6~10	12	8	4	6~8
> 500 × 500	15	15	—	—	5~7	—

## 2. 铸件壁厚要均匀

铸件薄厚不均,必然在壁厚交接处形成金属聚集的热节而产生缩孔、缩松,并且由于冷却速度不同容易形成热应力和裂纹(图 2.5.2)。确定铸件壁厚,应将加工余量考虑在内,有时加工余量会使壁厚增加而形成热节。

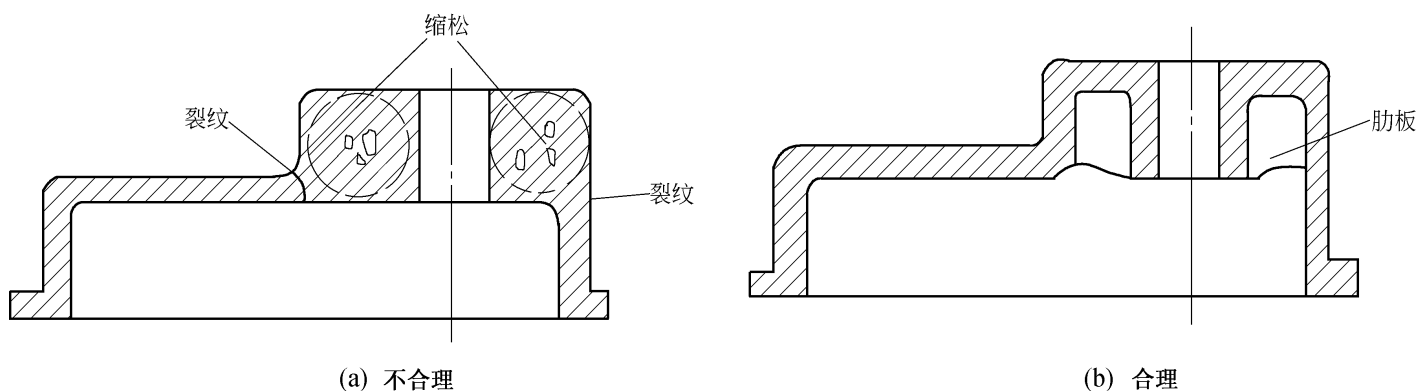


图 2.5.2 采用加强肋减小壁厚

## 3. 铸件内壁应薄于外壁

铸件内壁和肋,散热条件较差,内壁薄于外壁,可使内、外壁均匀冷却,减小内应力,防止裂纹。内、外壁厚相差值约为 10%~30%。

## 4. 铸件壁连接要合理

为减少热节,防止缩孔,减少应力,防止裂纹,壁间连接应有铸造圆角(图 2.5.3)。不同壁厚的连接应逐步过渡(图 2.5.4),以防接头处热量聚集和应力集中。铸件上的肋或壁的连接应避

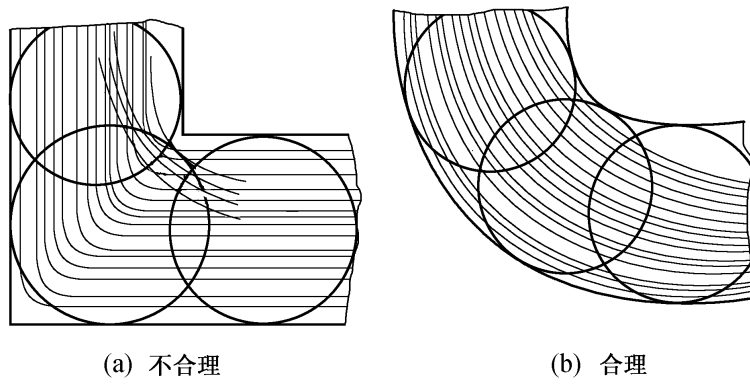


图 2.5.3 铸造圆角

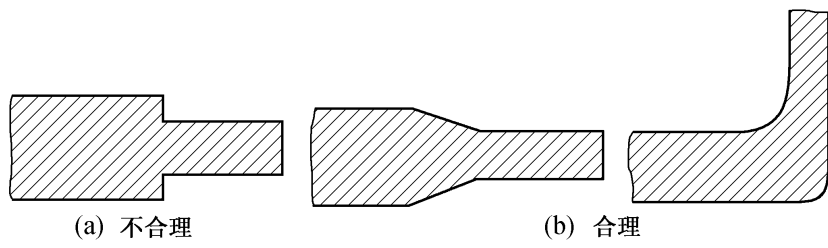
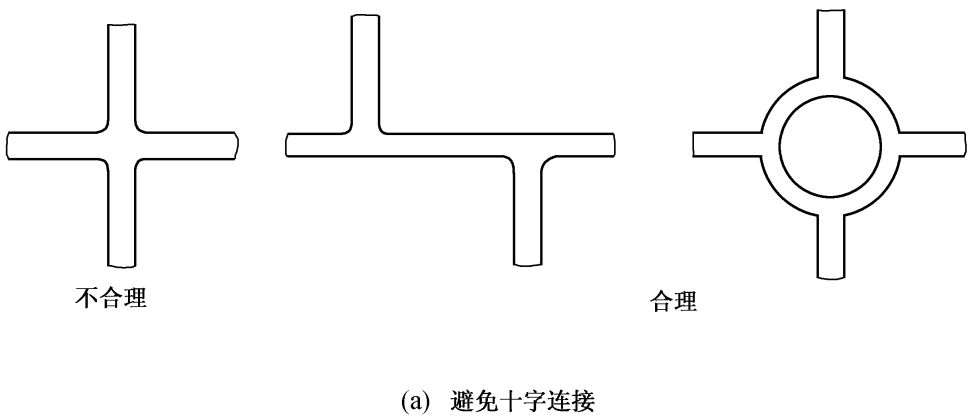
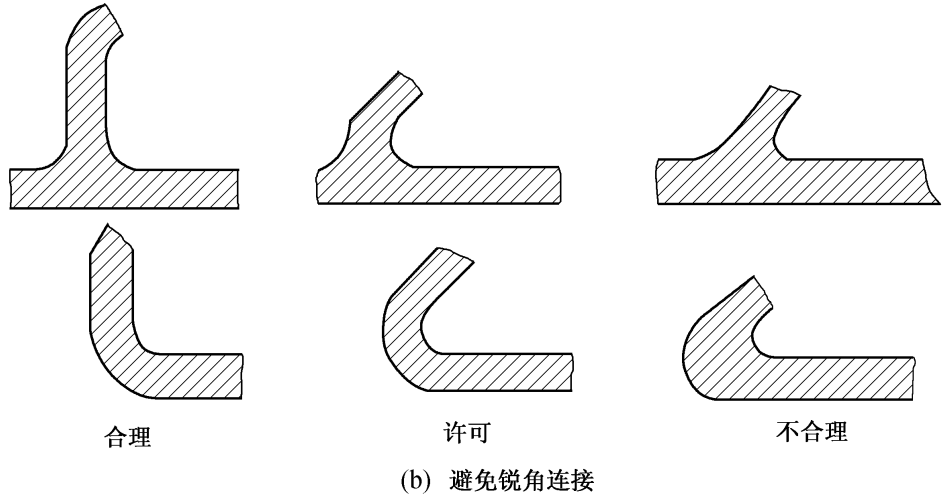


图 2.5.4 壁厚过渡形式

免十字交叉和锐角连接(图 2.5.5)。



(a) 避免十字连接



(b) 避免锐角连接

图 2.5.5 铸件接头结构

5. 避免铸件收缩受阻

如果铸件收缩受到阻碍,产生的内应力超过材料的抗拉强度时将产生裂纹。如图 2.5.6 所示手轮铸件,图 a 为直条形偶数轮辐,在合金线收缩时手轮轮辐中产生的收缩力相互抗衡,容易

出现裂纹。可改用奇数轮辐（图 b）或弯曲轮辐（图 c）这样可借助轮缘、轮毂和弯曲轮辐的微量变形自行减缓内应力，防止开裂。

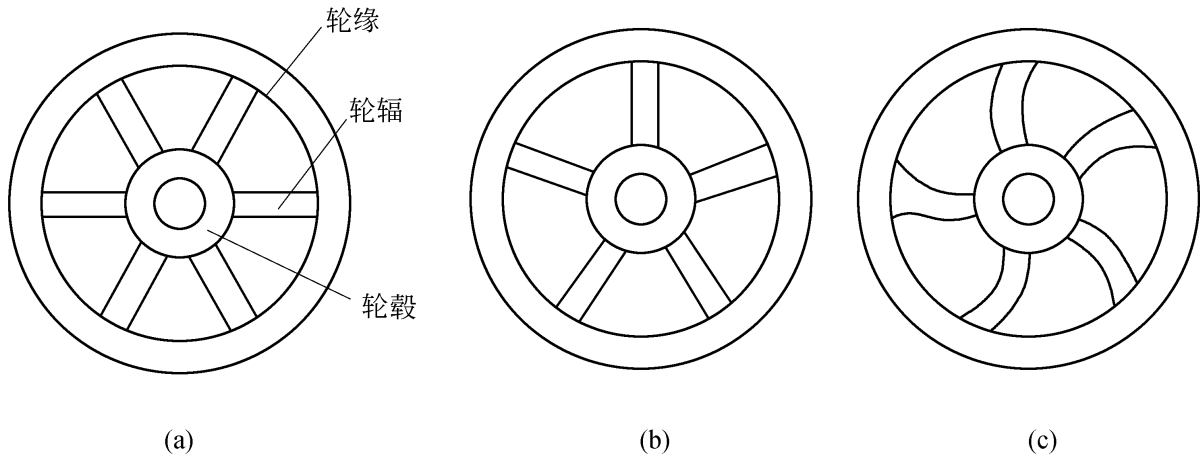


图 2 5 6 手车轮辐的设计

### 6 防止铸件翘曲变形

细长形或平板类铸件在收缩时易产生翘曲变形。如图 2.5.7 所示，改不对称结构为对称结构或采用加强肋，提高其刚度，均可有效地防止铸件变形。

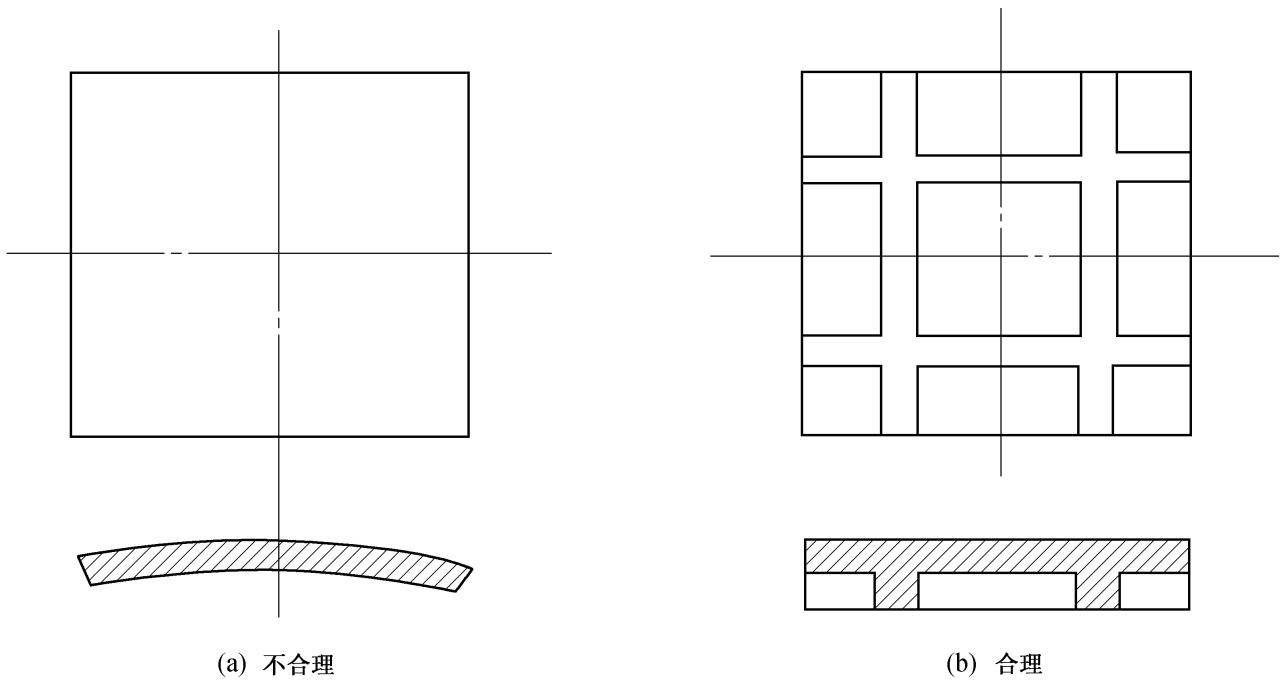
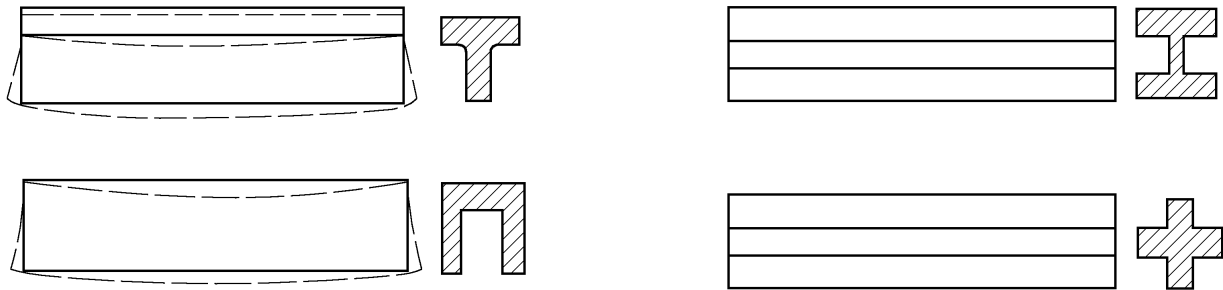


图 2 5 7 防止铸件变形的结构

## 2 5 2 铸造工艺对铸件结构的要求

从工艺上考虑,铸件的结构设计,应有利于简化铸造工艺,有利于避免产生铸造缺陷;便于后续加工。注意以下几个方面:

### 1. 铸件外形力求简单

在满足铸件使用要求的前提下,应尽量简化外形,减少分型面,以便造型。图 2 5 .8a 所示端盖存在侧凹,需三箱造型或增加环状型芯。若改为图 b 结构,可采用简单的两箱造型,造型过程大为简化。

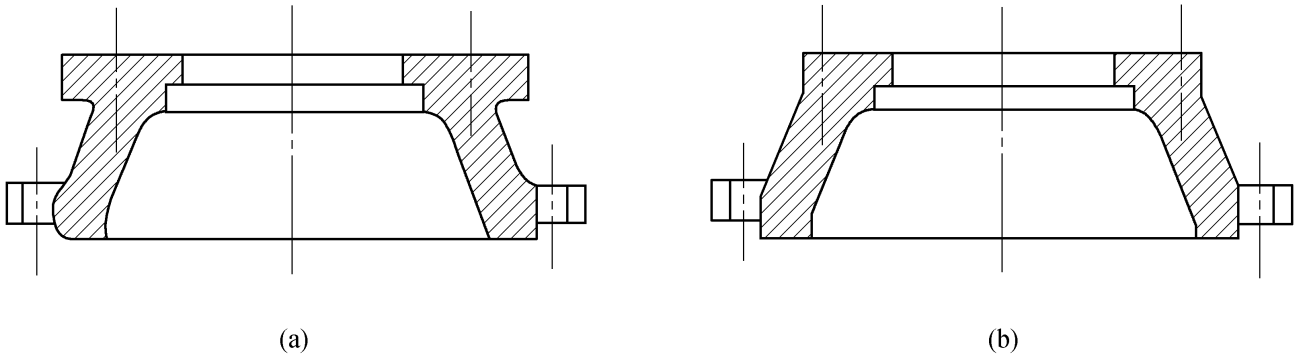


图 2 5 8 端盖铸件

图 2 5 9a 所示凸台通常采用活块(或外型芯)才能起模,若改为图 b 结构,可以避免活块或型芯,造型简单。图 2 5 .10a 铸件上的肋条使起模受阻,改为图 b 结构后便可顺利地取出模样。

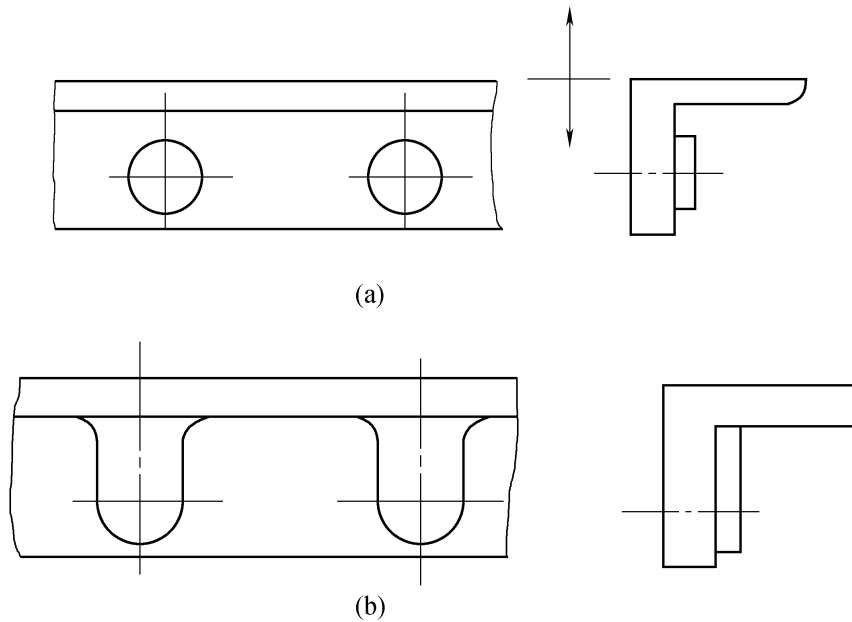


图 2 5 9 凸台设计

### 2. 铸件内腔设计

铸件内腔结构采用型芯来形成,使用型芯会增加材料消耗,且工艺复杂,成本提高,因此,设计铸件内腔时应尽量少用或不用型芯。图 2 5 .11a 所示铸件,其内腔只能用型芯成形,若改为图 b 结构,可用自带型芯成形。图 2 5 .12 所示支架,用图 b 的开式结构代替图 a 的封闭结构,可省去型芯。在必须采用型芯的情况下,应尽量做到便于下芯、安装、固定以及排气和清理。如图

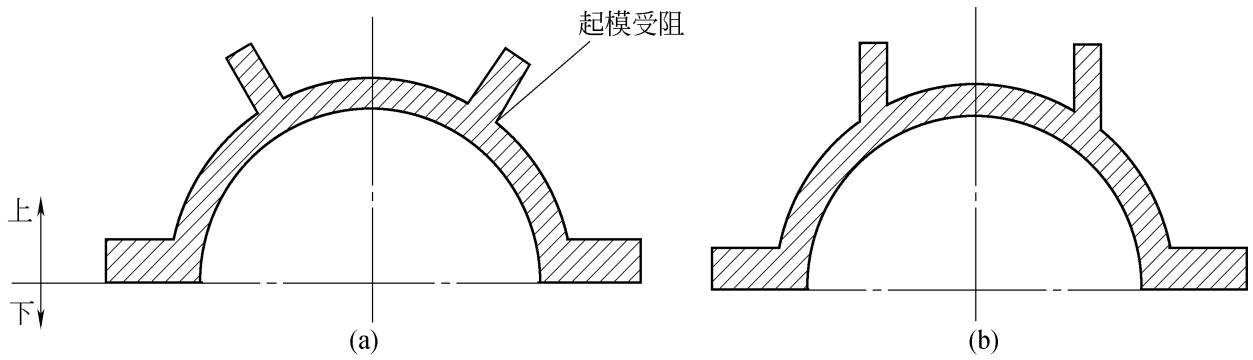


图 2.5.10 结构斜度的设计

2.5.13a所示的轴承架铸件,图 a 的结构需要两个型芯,其中大的型芯呈悬臂状态,需用芯撑支撑。若按图 b 改为整体芯,其稳定性大大提高,排气通畅,清砂方便。

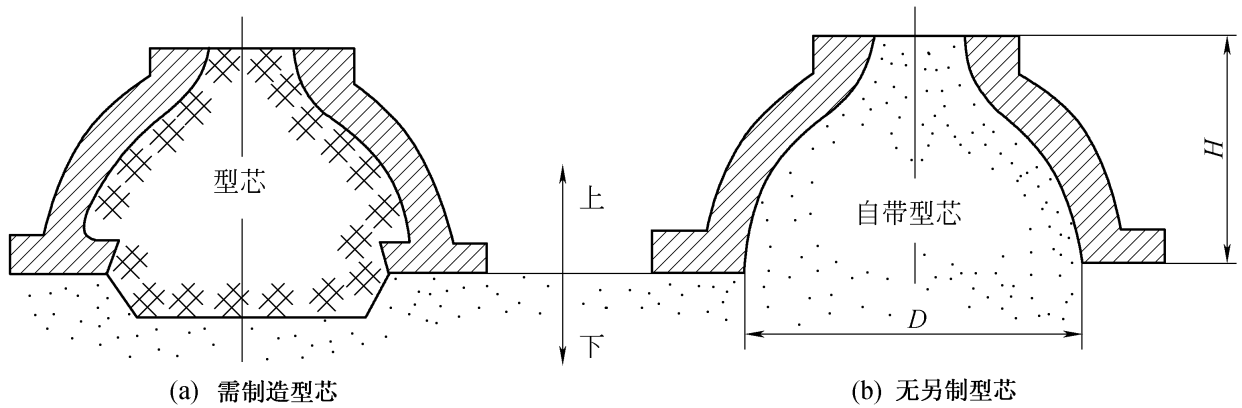


图 2.5.11 铸件内腔设计

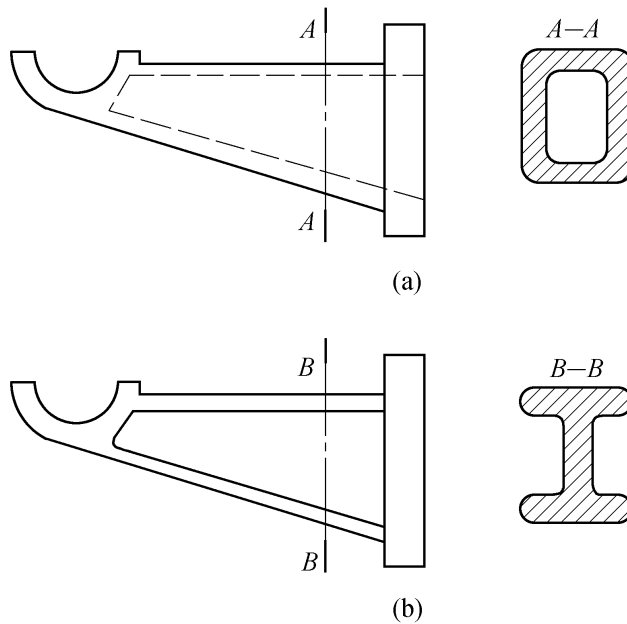


图 2.5.12 支架

### 3. 铸件的结构斜度

为了便于起模,垂直于分型面的非加工表面应设计结构斜度,图 2.5.14 中 a、b、c、d 不带结构斜度不便起模,改为 e、f、g、h 较合理。

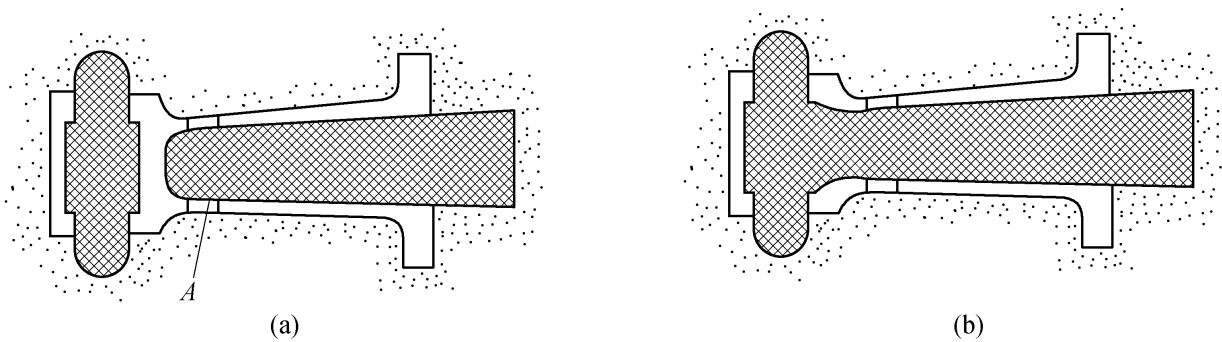


图 2.5.13 轴承架

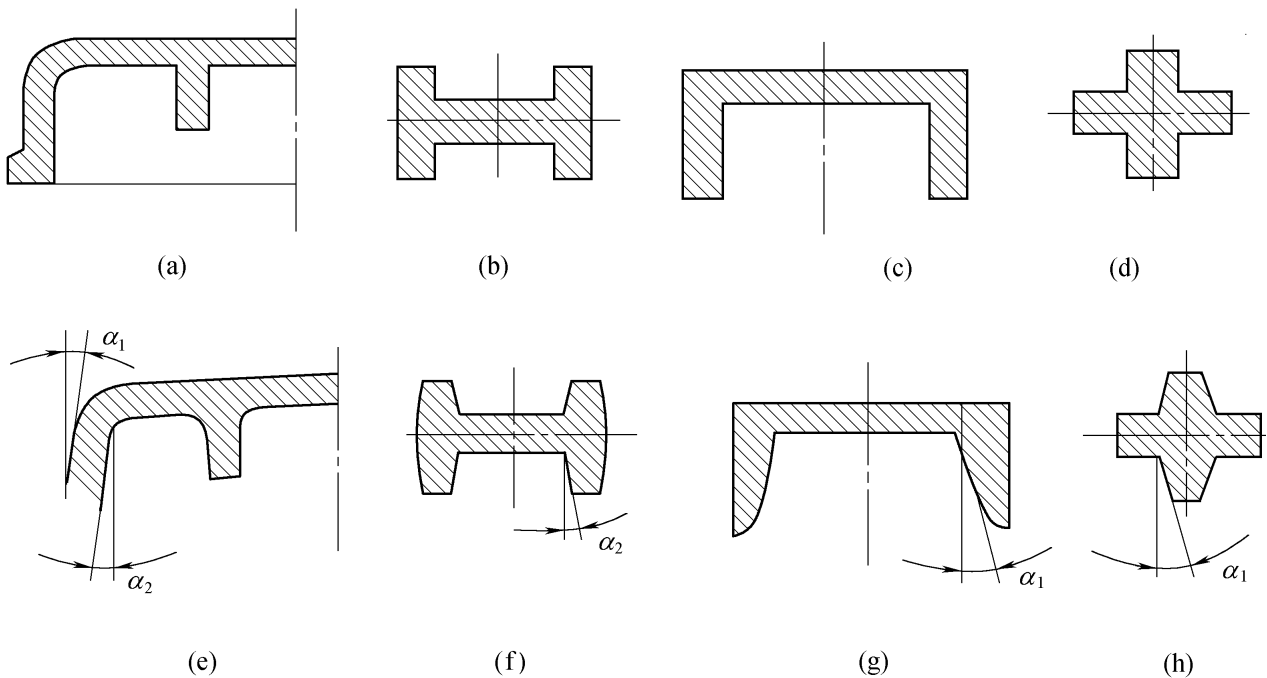


图 2.5.14 结构斜度的设计

## 2.6 常用铸造合金的生产

用于铸造的金属统称铸造合金,常用的铸造合金有铸铁、铸钢和铸造有色金属。

### 2.6.1 铸铁件的生产

铸铁是含碳量大于 2.11% 的铁碳合金,工业用铸铁是以铁、碳、硅为主的多元合金。铸铁具有许多优良性能,且制造简单,成本低廉,是最常用的金属材料。根据碳在铸铁中的存在形式及石墨形态,铸铁可分为灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁等。

#### 1. 灰铸铁

灰铸铁是指具有片状石墨的铸铁,其断口呈暗灰色。由于片状石墨有割裂基体的作用,所以灰铸铁的特点是:力学性能低,抗拉强度远低于钢,而塑性、韧性近于零,是典型的脆性材料;减震性好,为钢的 5~10 倍,是制造床身、机座的优选材料;减摩性好,石墨本身就是良好的润滑剂,在摩擦面上有润滑作用;缺口敏感性低,其中的石墨片相当于大量裂口,因此,外来缺口(如孔洞、键槽、刀痕、夹渣等)对铸铁的强度影响很小,故缺口敏感性低。

### (1) 灰铸铁的铸造性能

灰铸铁的碳硅当量接近共晶成分,熔点低,结晶温度范围小,呈逐层凝固方式凝固,流动性好。另外凝固时石墨析出,使总收缩较小,因此,灰铸铁的熔铸工艺容易,铸件缺陷少。

### (2) 灰铸铁的铸造工艺特点

灰铸铁铸熔点低,对型砂耐火性要求低,适合于湿型铸造,浇注温度可适当降低。灰铸铁流动性好,可浇注形状复杂的薄壁铸件。而且灰铸铁收缩小,铸件不易产生缩孔、裂纹等缺陷,一般可不用或少用冒口和冷铁。

## \* 2. 球墨铸铁

球墨铸铁是指具有球状石墨的铸铁,它是灰铸铁经过球化、孕育处理,并配合适当的热处理得到的。由于球状石墨对基体的缩减和割裂作用小,从而使基体强度提高,其力学性能远超过灰铸铁,优于可锻铸铁,抗拉强度可与钢媲美,塑性、韧性明显提高,更增加了使用的可靠性。球墨铸铁具有良好的铸造性能、减震性、耐磨性、切削加工性能及低的缺口敏感性。

### (1) 球墨铸铁的铸造性能

球墨铸铁的流动性与灰铸铁相近,但是球墨铸铁收缩大,易产生缩孔、缩松和皮下气孔。它的结晶区间宽,属糊状凝固,补缩困难,而且球墨铸铁凝固后期的石墨化膨胀又远大于灰铸铁,会引起铸型胀大,造成铸件内部金属液不足,很容易产生缩孔、缩松。

### (2) 球墨铸铁的铸造工艺特点

球墨铸铁含碳量高,球化处理使铁水得到净化,流动性应比灰铸铁好,但经过球化处理和孕育处理,铁水温度大幅度降低,且易于氧化,因此,实际生产中应注意适当提高球墨铸铁的浇注温度。同时要加大内浇道截面,采用快速浇注等措施,以防止产生浇不足、冷隔等缺陷。球墨铸铁件表面完全凝固的时间较长,收缩大,而且外壁与中心几乎同时凝固,造成凝固后期外壳不坚实,此时因析出石墨的膨胀所产生的压力会使铸型型腔扩大,容易产生缩孔、缩松等缺陷。常采用顺序凝固原则,并增设冒口以加强补缩。同时应提高铸型的紧实度,增强其刚度,使型腔不胀大或尽快在铸件表层形成硬壳,使石墨膨胀能补偿铸铁收缩。此外,球墨铸铁凝固时有较大内应力,产生变形、裂纹的倾向大,所以要注意消除内应力。由于铁水中的MgS与型砂中的水分作用,生成H<sub>2</sub>S气体,易使铸件产生皮下气孔。所以应严格控制型砂中水分和铁水中硫的含量。球墨铸铁还易产生石墨飘浮及球化不良等缺陷,所以必须严格控制碳、硅的含量和尽量缩短球化处理后铁水的停留时间。一般不超过15~20 min。球化处理后常含有MgO、MgS等夹渣,故应考虑排渣措施,一般常采用封闭式浇注系统。

## \* 3. 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是指具有蠕虫状石墨的铸铁。它是在原铁水中加入蠕化剂和变质剂,处理后制得。蠕墨铸铁的性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间,强度、塑性、韧性优于灰铸铁,突出的优点是屈强比在铸造合金中最高(0.72~0.82),导热性、铸造性能、切削加工性能优于球墨铸铁接近于灰铸铁。特别适合制造工作温度较高而又要求强度高、耐磨性好、形状复杂的大型铸件。

蠕墨铸铁碳当量接近共晶点,蠕化剂又使铁水得以净化,因此具有良好的流动性。蠕墨铸铁的收缩与蠕化率有关,蠕化率越低越接近球墨铸铁,反之接近于灰铸铁。因而,要获得无缩孔、缩松的致密铸件比球墨铸铁容易,但比灰铸铁稍困难些。

## 4. 可锻铸铁



可锻铸铁是由白口铸铁经石墨化退火得到的,其组织中有团絮状石墨。可锻铸铁比灰铸铁强度高,兼有良好的塑性和韧性,故得名可锻铸铁,实际上不能制造锻件。

可锻铸铁主要用来制造一些形状复杂,又受振动的薄壁小型铸件。近年来,由于球墨铸铁的发展,许多可锻铸铁铸件已被球墨铸铁所取代。但可锻铸铁生产历史悠久,工艺成熟,质量比较稳定,对原材料要求不高,退火时间正在缩短,所以仍有不少工厂生产可锻铸铁。

## 2.6.2 铸钢件的生产

铸钢比铸铁强度高,尤其是韧性好,故适于制造承受重载荷及冲击载荷的重要零件,如大型轧钢机立柱、火车挂钩及车轮等。但由于铸钢铸造性能差,生产成本低,其应用不如铸铁广泛。

铸钢按化学成分分为碳素铸钢和合金铸钢两大类。碳素铸钢占铸钢总产量的80%以上,用于制造零件的铸钢主要是中碳钢。

铸钢的铸造性能和工艺特点如下:

1) 熔点高、流动性差、收缩率高,而且在熔炼过程中氧化、吸气严重。容易产生浇不足、冷隔、缩孔、缩松、变形、裂纹、夹渣、粘砂和气孔等缺陷,因此其铸造性能差。在铸造工艺上应采取相应措施,如合理设计铸件的结构(参照本章2.5),合理设计冒口、冷铁等,以确保铸钢件质量。

2) 浇注温度高,为了防止变形、裂纹,所用的型(芯)砂的透气性、耐火性、强度和退让性都要好。为防止粘砂,铸型表面要涂以耐火度高的石英粉或铅砂粉涂料。为了减少气体的来源,提高合金的流动性和铸型强度,大件多用干型或快干型来铸造。

中小型铸钢件的浇注系统开设在分型面上或开设在铸件的上面(顶注),大型铸钢件开设在下面(底注)。为使金属液迅速充满铸型,减少流动阻力,其浇注系统的形状应简单,内浇道横截面面积应是灰铸铁的1.5~2倍,一般采用开放式。铸钢件大多需要设置一定数量的冒口,采用顺序凝固原则,以防缩孔、缩松等缺陷。冒口所耗钢水常占浇入金属重量的25%~50%。为控制凝固顺序,在热节处需设置冷铁。对少数壁厚均匀的薄件,因其产生缩孔的可能性小,可采用同时凝固原则,并常开设多道内浇道,以使钢水均匀、迅速地充满铸型。

## 2.6.3 有色合金铸件的生产

常用的铸造有色合金有铜合金、铝合金、镁合金及轴承合金。在机械制造中应用最多的是铸造铝合金和铸造铜合金。

### 1. 铸造铝合金

铸造铝合金按成分可分为铝硅合金、铝铜合金、铝镁合金和铝锌合金等。其中铝硅合金具有良好的铸造性能,如流动性好、收缩率较小,不易产生裂纹、致密性好。应用较广,约占铸造铝合金总产量的50%以上。含硅10%~13%的铝硅合金是最典型的铝硅合金,是共晶类型的合金。

铸造铝合金的熔点低,流动性好,对型砂耐火性要求不高,可用细砂造型,以减小铸件表面粗糙度值,还可浇注薄壁复杂铸件。为防止铝液在浇注过程中的氧化和吸气,通常采用开放式浇注系统,并多开内浇道,使铝液迅速而平稳地充满铸型,不产生飞溅、涡流和冲击。为去除铝液中的夹渣和氧化物,浇注系统的挡渣能力要强。另外,铸型应能造成合理的温度分布,使铸件进行顺序凝固,并在最后凝固部位设置冒口进行补缩,以利于消除缩孔和缩松等缺陷。

### 2. 铸造铜合金

铸造铜合金分为铸造黄铜和铸造青铜两大类。

铸造黄铜是铜锌合金。黄铜强度高,成本低,铸造性能好,产量大。黄铜的铸造性能和工艺特点是熔点低,结晶温度范围较窄,流动性好,对型砂耐火性要求不高,可用较细的型砂造型,以减小铸件表面粗糙度值,减少加工余量,并可浇注薄壁复杂铸件。但是铸造黄铜容易产生集中缩孔,铸造时应配置较大的冒口,进行充分补缩。

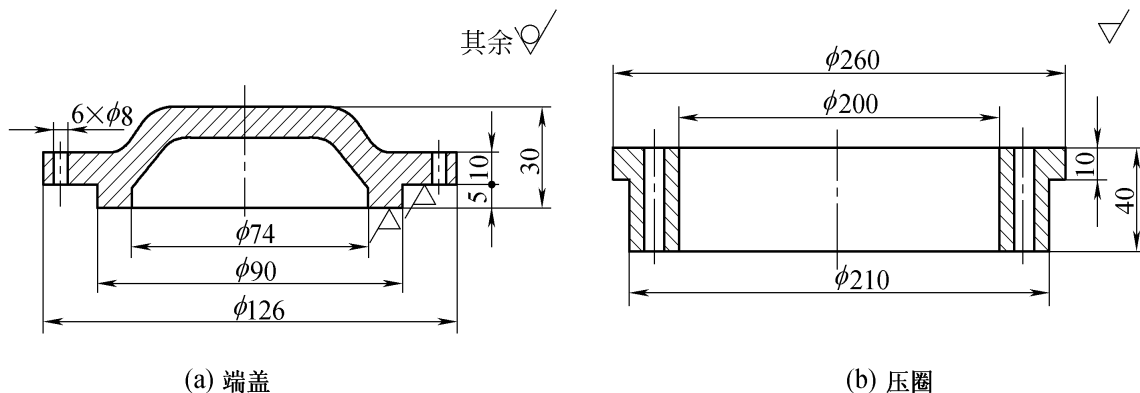
铸造青铜又分锡青铜和铝青铜。

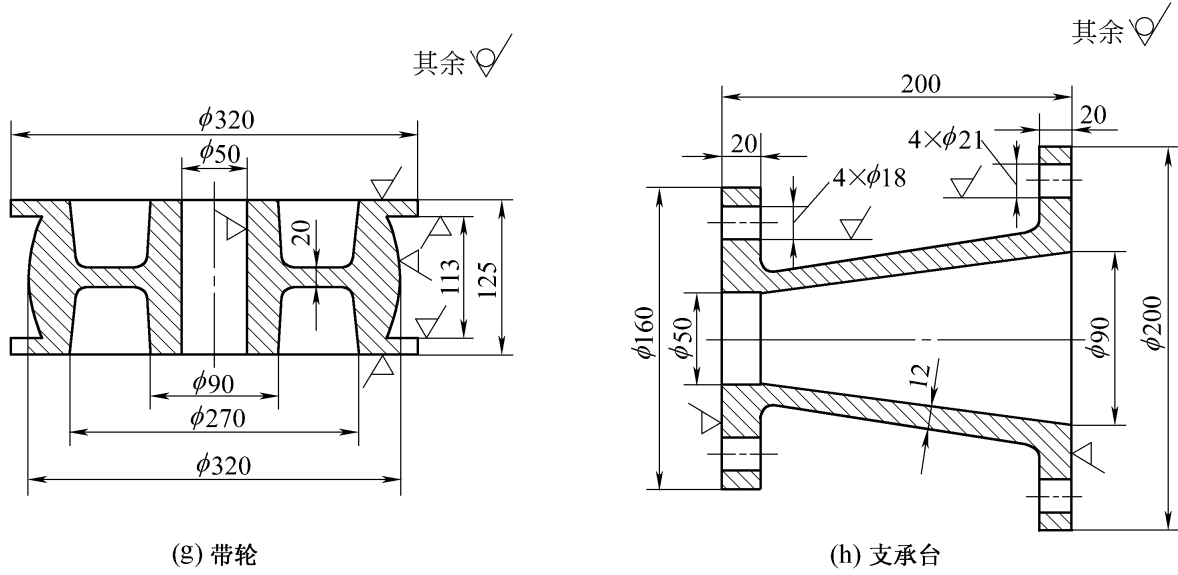
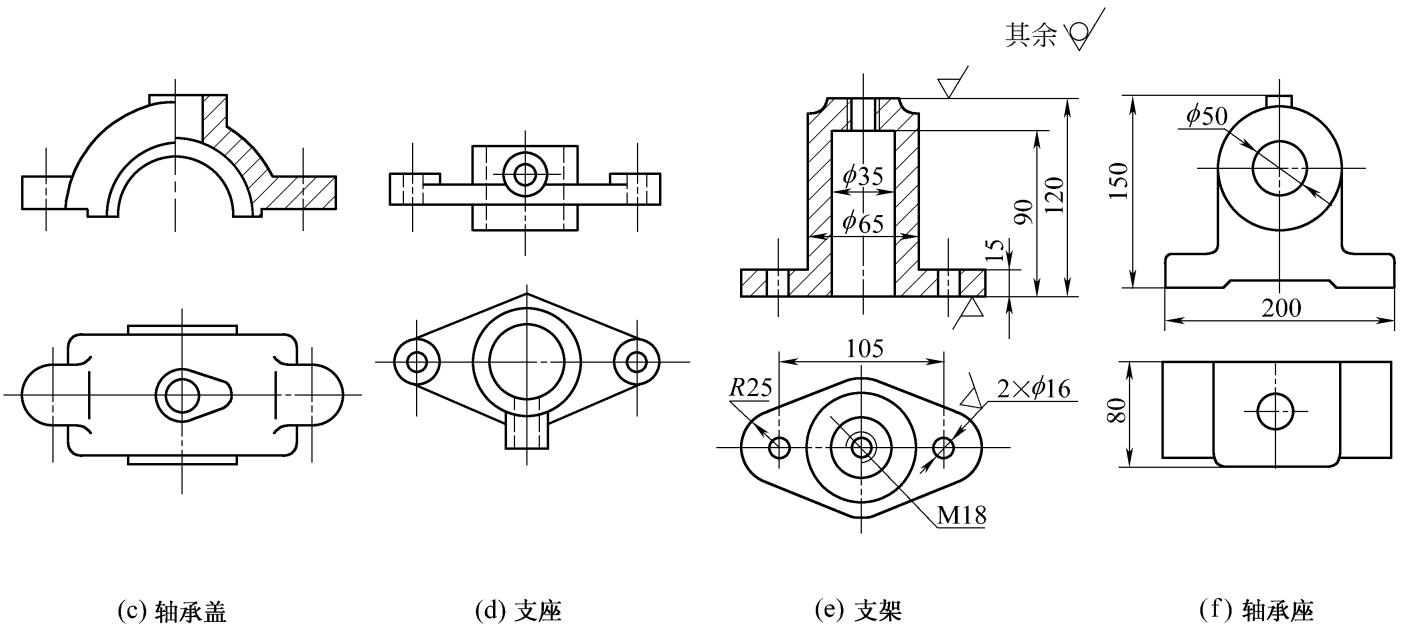
锡青铜的结晶温度范围较宽,流动性差,但凝固收缩及线收缩率均小,不易产生缩孔,却易产生枝晶偏析与缩松,降低了铸件致密度。然而这种缩松便于存储润滑油,故适于制造滑动轴承。壁厚不大的锡青铜铸件,常用同时凝固的方法。锡青铜宜采用金属型铸造,因冷速大而易于补缩,使铸件结晶细密。锡青铜在液态下易氧化,在开设浇口时,应使金属液流动平稳,防止飞溅,故常用底注式浇注系统。锡青铜的耐磨性、耐蚀性优于黄铜,适于制造形状复杂,致密性要求不高的耐磨、耐蚀零件,如轴承、轴套水泵壳体等。

铝青铜的结晶温度范围窄,流动性好,易获得致密铸件。但其收缩大,易产生集中缩孔,需安置冒口、冷铁,使之顺序凝固。又因铝青铜易吸气和氧化,所以浇注系统宜采用底注式,并在浇注系统中安放过滤网以除去浮渣。

## 复习与思考题

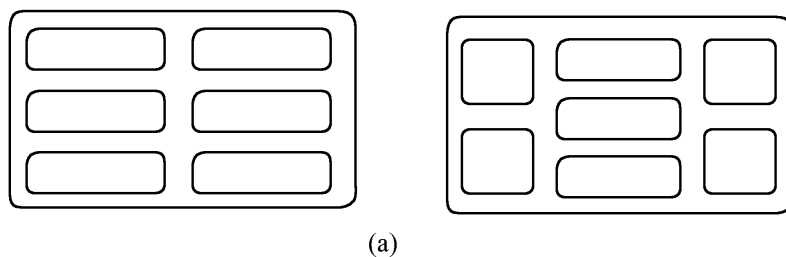
- 2-1 试述铸造生产的特点,并举例说明其应用情况。
- 2-2 试分析比较整模造型分模造型挖砂造型、活块造型和刮板造型的特点和应用情况。
- 2-3 典型浇注系统由哪几部分组成?各部分有何作用?
- 2-4 什么是合金的铸造性能?试比较铸铁和铸钢的铸造性能。
- 2-5 什么是合金的流动性?合金流动性对铸造生产有何影响?
- 2-6 铸件为什么会产生缩孔、缩松?如何防止或减少它们的危害?
- 2-7 什么是铸造应力?铸造应力对铸件质量有何影响?如何减小和防止这种应力?
- 2-8 熔模铸造、金属型铸造、压力铸造和离心铸造各有何特点?应用范围如何?
- 2-9 砂型铸造时铸型中为何要有分型面?举例说明选择分型面应遵循的原则。
- 2-10 零件、铸件、模样之间有何联系?又有何差异?
- 2-11 试确定下图各灰铸铁零件的浇注位置和分型面,绘出其铸造工艺图(批量生产、手工造型,浇、冒口设计略)。

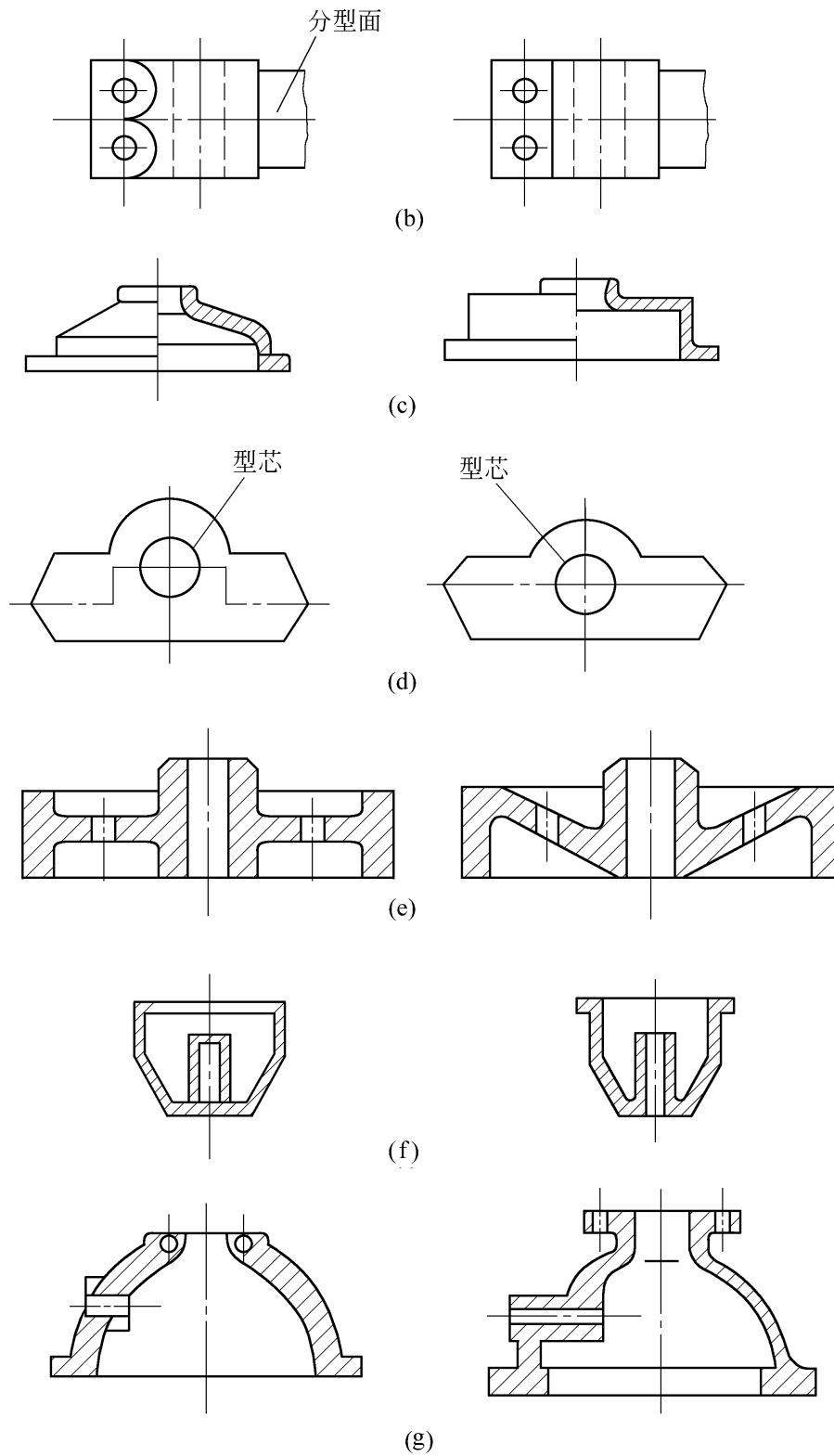




题 2 - 11 图

- 2 - 12 为什么要规定铸件的最小壁厚？灰铸铁件的壁过薄或过厚会出现哪些问题？
- 2 - 13 为什么铸件壁的连接要采用圆角和逐步过渡的结构？
- 2 - 14 试述铸造工艺对铸件结构的要求。
- 2 - 15 下图所示铸件各有两种结构，哪一种比较合理？为什么？





题 2 - 15 图

# 第3章 锻 压

锻压是一种借助工具或模具在冲击或压力作用下,对金属坯料施加外力,使其产生塑性变形,改变尺寸、形状及性能,用以制造机械零件或零件毛坯的成形加工方法,锻压又称作锻压。

锻压具有细化晶粒、致密组织,并可具有连贯的锻压流线,从而可以改善金属的力学性能。此外,锻压还具有生产率高,节省材料的优点。因此锻压在金属热加工中占有重要的地位。本章主要介绍自由锻、模锻及冲压等热加工的基础知识和成形方法。

## 3.1 概 述

### 3.1.1 锻压生产的特点

锻压加工与其他加工方法比较,具有较高的生产效率。可消除零件或毛坯的内部缺陷。锻件的形状、尺寸稳定性好,并具有较高的综合力学性能。锻件的最大优势是韧性好、纤维组织合理、锻件间性能变化小。锻件的内部质量与其加工历史有关,且不会被任何一种金属加工工艺超过。图3.1.1示意地表示出了铸造、锻压、机械加工三种金属加工方法所得到的零件低倍宏观流线。

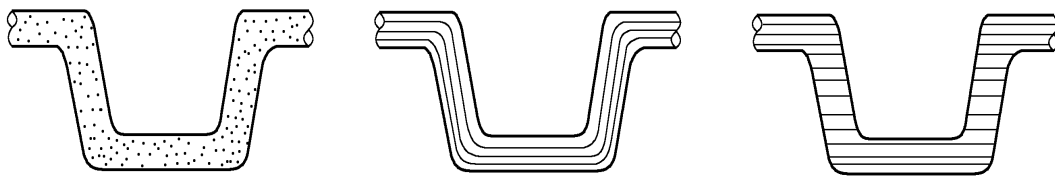


图 3.1.1 三种金属加工方法所得零件低倍宏观流线

但是锻压生产也存在以下缺点:不能直接锻制成形状较复杂的零件;锻件的尺寸精度不够高;锻压生产所需的重型的机器设备和复杂的工模具,对于厂房基础要求较高,初次投资费用大。

### 3.1.2 锻压生产的适用范围

锻压生产根据使用工具和生产工艺的不同而分为自由锻、模锻和特种锻造。锻造工艺在锻件生产中起着重大作用。工艺流程不同,得到的锻件质量有很大的差别,使用的设备类型、吨位也相去甚远。锻件的应用范围很广,几乎所有运动的重大受力构件都是由锻压成形的。锻压在机器制造业中有着不可替代的作用,一个国家的锻造水平,可反映出这个国家机器制造业的水平。随着科学技术的发展,工业化程度的日益提高,需求锻件的数量逐年增长。据预测,飞机上

采用的锻压(包括板料成形)零件将占 85% ,汽车将占 60% ~ 70% ,农机、拖拉机将占 70%。

### 3.1.3 锻压生产的发展趋势

锻压生产虽然生产效率高,锻件综合性能高,节约原材料;但因其生产周期较长,成本较高,处于不利的竞争地位。锻压生产要跟上当代科学技术的发展,需要不断改进技术、采用新工艺和新技术,进一步提高锻件的性能指标;同时缩短生产周期、降低成本。

当代科学技术的发展对锻压生产本身的完善和发展有着重大影响,这主要表现在以下几个方面:

首先,材料科学的发展对锻压技术有着最直接的影响。新材料的出现必然对锻压技术提出了新的要求,如高温合金、金属间化合物、陶瓷材料等难变形材料的成形问题。锻压技术也只有不断解决材料带来的问题的情况下才能得以发展。

其次,新兴科学技术的出现。当前主要是计算机技术在锻压技术各个领域的应用。如锻模计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术,锻造过程的计算机有限元数值模拟技术等。这些新技术的应用,缩短了锻件的生产周期,提高锻模设计和生产水平。

第三,机械零件性能的更高要求。推动锻压技术发展的最大动力是来自交通工具制造业——汽车制造业和飞机制造业。锻件的尺寸、质量越来越大,形状越来越复杂、精密,一些重要受力件的工作环境更苛刻,受力状态更复杂。除了更换强度更高的材料外,研究和开发新的锻压技术是必然的出路。

## 3.2 锻压工艺基础

### 3.2.1 金属的塑性变形

塑性是金属的重要特性。利用金属的塑性可加工各种制品。不仅轧制、锻造、挤压、冲压、拉拔等成形加工工艺都是金属发生大量塑性变形的过程,而且在车、铣、刨、钻等各种切削加工工艺中,也都发生金属的塑性变形。

塑性变形不仅可以使金属获得一定的形状和尺寸,而且还会引起金属内部组织与结构变化,使铸态金属的组织与性能得到一定的改善。因此,研究金属的塑性变形过程及其机理,了解变形后金属的组织结构与性能的变化规律,以及加热的影响,对改进金属材料加工工艺,提高产品质量和合理使用金属材料等方面都具有重要意义。

各种金属压力加工方法都是通过金属的塑性变形实现的。金属受外力后,首先产生弹性变形,当外力超过一定限度后,才产生塑性变形。

弹性变形的实质是在外力的作用下,金属内部的原子偏离了原来的平衡位置,使金属产生变形,这会造成原子位能的提高,而处于高位能的原子具有返回原来位能最低的平衡位置的倾向。因而,当外力取消后,原子返回原来的位置,变形也就消失了。

塑性变形的实质是在外力的作用下金属内部的原子沿一定的晶面和晶向产生了滑移的结果。

在一般情况下,实际金属都是多晶体。多晶体的变形是与其中各个晶粒的变形行为有关。

为了便于研究,有必要先通过单晶体的塑性变形来掌握金属塑性变形的基本规律。

### (1) 单晶体的塑性变形

实验表明,晶体只有在切应力作用下才会发生塑性变形。单晶体的塑性变形过程如图3.2.1所示。图3.2.1a为晶体未受外力的原始状态;当晶体受到外力作用时,晶格将产生弹性畸变,如图3.2.1b所示,此为弹性变形阶段;若外力继续增加,超过一定限度后,晶格的畸变程度超过了弹性变形阶段,则晶体的一部分将会相对另一部分发生滑移,如图3.2.1c所示;晶体发生滑移后,去除外力,晶体的变形将不能全部恢复因而产生了塑性变形,如图3.2.1d所示。

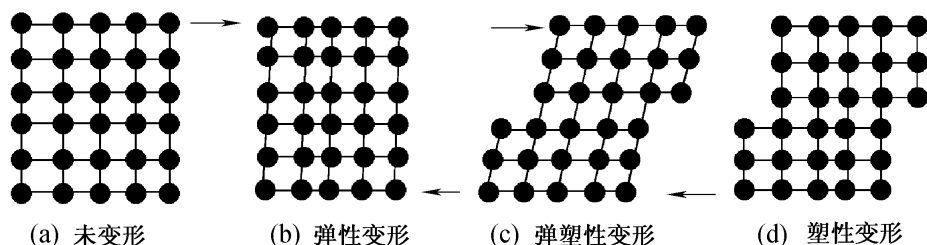


图3.2.1 单晶体的变形过程

### (2) 多晶体的塑性变形

实际使用的金属材料由都不相同的许多晶粒所组成,故每个晶粒在塑性变形时,将受到周围位向不同的晶粒及晶界的影响与约束,即每个晶粒不是处于独立的自由变形状态。晶粒变形时既要克服晶界的阻碍,又需要其周围晶粒同时发生相适应的变形来协调配合,以保持晶粒间的结合和晶体的连续性,否则将导致晶体破裂。

大量实验结果表明,多晶体的塑性变形正是由于存在着晶界和各晶粒的位向差别,其变形抗力要比同种金属的单晶体高得多。

## 3.2.2 变形后金属的组织 and 性能

### 1. 加工硬化、回复和再结晶

金属材料经塑性变形后,其组织和性能发生了一系列重大变化。组织上的变化表现为:晶粒沿金属流动方向伸长,晶格畸变,位错密度增加,产生内应力,产生碎晶。性能上的变化表现为:随着变形程度的增加,强度及硬度显著提高,而塑性和韧性则很快下降。变形度愈大,性能的变化也愈大。这种由于塑性变形的变形度增加,使金属的强度、硬度提高,而塑性下降的现象称为加工硬化或冷作硬化。

加工硬化现象在工程技术中具有重要的实用意义。首先可利用加工硬化来强化金属,提高金属强度、硬度和耐磨性。特别是对那些不能用热处理强化的材料,如纯金属、某些铜合金、镍铬不锈钢和高锰钢等,加工硬化更是唯一有效的强化方法。冶金厂出厂的“硬”或“半硬”等供应状态的某些金属材料,就是经过冷轧或冷拉等方法,生产加工的硬化产品。

加工硬化还可以在在一定程度上提高构件在使用过程中的安全性。因为构件在使用过程中,往往不可避免地会在某些部位(如孔、键槽、螺纹以及截面积过渡处)出现应力集中和过载荷现象。在这种情况下,由于金属能加工硬化,局部过载部位在产生少量塑性变形后,提高了屈服强度并与所承受的应力达到了平衡,变形就不会继续发展,从而在一定程度上提高了构件的安全性。

加工硬化也有其不利的一面。由于它使金属塑性降低,给进一步冷塑性变形带来困难,并使压力加工时能量消耗增大。为了使金属材料能继续变形,必须进行中间热处理来消除加工硬化现象。这就增加了生产成本,降低了生产率。

为了消除加工硬化效应,恢复材料的塑性,以便继续进行变形加工,或为了消除变形过程中产生的内应力,就要对工件进行退火处理。

经塑性变形后的工件,在退火加热温度不太高时,冷变形金属的显微组织无明显的变化,只能使内应力明显降低和消除,金属的力学性能没有显著变化,即强度、硬度下降很少,塑性提高不多,这一过程称为回复。

当加热温度较高,塑性变形后金属被拉长的晶粒重新形核、结晶,变为等轴晶粒,称为再结晶。再结晶后的金属,强度、硬度显著下降,塑性和韧性显著提高,内应力完全消除。开始产生再结晶现象的最低温度称为再结晶温度。纯金属的再结晶温度与熔点的大致关系是  $T_{再} = 0.4 T_{熔} (K)$ 。

再结晶完成后,若加热温度继续升高或加热时间延长,金属的晶粒便开始不断长大。再结晶后的金属的力学性能与再结晶晶粒度关系很大,晶粒越细小,金属的综合力学性能越好。金属的加工硬化及回复、再结晶过程中的力学性能变化如图 3.2.2 所示。

## 2. 塑性变形的分类和对金属组织和性能的影响

根据变形时的温度,金属的塑性变形分为冷变形和热变形。

金属在其再结晶温度以下进行塑性变形称为冷变形。冷变形加工后金属内部形成纤维组织,变形后金属具有明显的加工硬化现象,所以冷变形的变形量不宜过大,避免工件撕裂或降低模具寿命。冷变形加工具有精度高、表面质量好、力学性能好的特点,广泛应用于板料冲压、冷挤压、冷镦及冷轧等常温变形加工。

金属在其再结晶温度以上进行变形加工称为热变形。加工过程中产生的加工硬化随时被再结晶软化和消除,使金属塑性显著提高,变形抗力明显减小。因此,可以利用较小的能量获得较大的变形量。适合于尺寸较大、形状复杂的工件的变形加工。热变形加工产品表面易形成氧化皮,尺寸和表面质量较低。自由锻、热模锻、热轧等都属于热变形的范畴。

金属热变形时组织和性能的变化主要表现在以下几个方面:

(1) 变形加工时,金属中的脆性杂质被破碎,并沿金属“流动”方向呈粒状或链状分布,塑性杂质则沿变形方向呈带状分布,这种杂质的定向分布称为流线。通过热变形可以改变和控制流线的方向和分布,加工时应尽可能使流线与零件的轮廓相符合而不被切断。图 3.2.3 是锻造曲轴和轧材切削加工曲轴的流线分布,明显看出经切削加工的曲轴流线易沿轴肩部位发生断裂,流线分布不合理。

(2) 热变形加工可以使铸坯中的组织缺陷得到明显改善,如铸坯中粗大的柱状晶经热变形加工后能变成较细的等轴晶粒,气孔、缩松被压实,使金属组织的致密度增加,某些合金钢中的大块碳化物被打碎并均匀分布,可以消除金属材料的偏析,使成分均匀化。

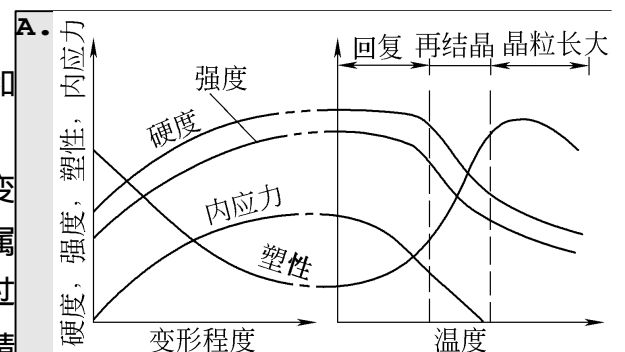


图 3.2.2 金属加工硬化及回复和再结晶与性能的关系

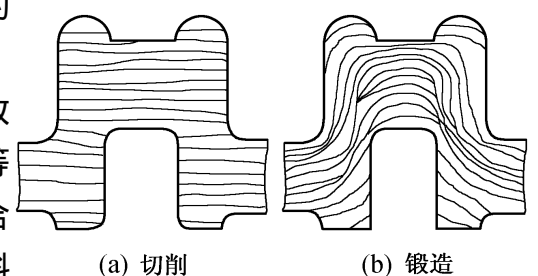


图 3.2.3 曲轴的流线分布示意图



### 3 2 3 金属的锻造性能

金属的锻造性能是衡量金属材料利用锻压加工方法成形的难易程度,是金属的工艺性能指标之一。金属的锻造性能的优劣,常用金属的塑性和变形抗力两个指标来衡量。金属塑性好,变形抗力低,则锻造性能好,反之则差。影响金属材料塑性和变形抗力的主要因素有两个方面。

#### 1. 金属的本质

##### (1) 金属的化学成分

不同化学成分的金属,其塑性不同,锻造性能也不同。一般纯金属的锻造性能较好。金属组成合金后,强度提高,塑性下降,锻造性能变差。例如碳钢随着碳含量的增加,塑性下降,锻造性能变差。合金钢中合金元素的含量增多,锻造性能也变坏。

##### (2) 金属的组织状态

金属的组织结构不同,其锻造性能有很大差别。由单一固溶体组成的合金,具有良好的塑性,其锻造性能也较好。若含有多种合金而组成不同性能的组织结构,则塑性降低,锻造性能较差。

另外,一般来说,面心立方结构和体心立方结构的金属比密排六方结构的金属塑性好。金属组织内部有缺陷,如铸锭内部有疏松、气孔等缺陷,将引起金属的塑性下降,锻造时易出现锻裂等现象。铸态组织和晶粒粗大的结构不如轧制状态和晶粒细小的组织结构锻造性能好,但晶粒越细小,金属变形抗力越大。

#### 2. 金属的变形条件

##### (1) 变形温度

随着温度的升高,金属原子动能升高,易于产生滑移变形,从而提高了金属的锻造性能。所以加热是锻压生产中很重要的变形条件。但温度过高金属出现过热、过烧时,塑性反而显著下降。对于加热温度,需根据金属的材质不同,要控制在一定范围,即合适的变形温度范围。

##### (2) 变形速度

变形速度是指金属在锻压加工过程中单位时间内的相对变形量。变形速度大,会使金属的塑性下降,变形抗力增大。但变形速度很大时,由于热效应,会使变形金属的温度升高而提高塑性、降低变形抗力。

##### (3) 变形时的应力状态

压应力使塑性提高,拉应力使塑性降低。工具和金属间的摩擦力将使金属的变形不均匀,导致金属塑性降低,变形抗力增大。

综合上述,金属的塑性和变形抗力是受金属的本质与变形条件等因素制约的。在选用锻压加工方法进行金属成形时,要依据金属的本质和成形要求,充分发挥金属的塑性,尽可能降低其变形抗力,用最少的能耗,获得合格的锻压件。

## 3 3 自由锻

### 3 3.1 概述

自由锻是将加热好的金属坯料,放在锻造设备的上、下砧铁之间,施加冲击力或压力,使之产

生塑性变形,从而获得所需锻件的一种加工方法。坯料在锻造过程中,除与上、下砧铁或其它辅助工具接触的部分表面外,都是自由表面,变形不受限制,故称自由锻。

自由锻通常可分为手工自由锻和机器自由锻。手工自由锻主要是依靠人力利用简单工具对坯料进行锻打,从而改变坯料的形状和尺寸获得所需锻件。手工锻造生产率低,劳动强度大,锤击力小,在现代工业生产中已为机器锻造所代替。机器自由锻主要依靠专用的自由锻设备和专用工具对坯料进行锻打,改变坯料的形状和尺寸,从而获得所需锻件。自由锻的优点是:所用工具简单、通用性强、灵活性大,适合单件和小批锻件,特别是特大型锻件的生产。自由锻的缺点是:锻件精度低、加工余量大、生产效率低、劳动强度大等。

### 3.3.2 自由锻设备

根据锻造设备不同,又分为锤锻自由锻和水压机自由锻两种。前者用于锻造中、小自由锻件,后者主要用以锻造大型自由锻件。

#### 1. 锤锻自由锻

锤锻自由锻的通用设备是空气锤和蒸气—空气自由锻锤。空气锤由自身携带的电动机直接驱动,落下部分重量在40~1000 kg之间,锤击能量较小,只能锻造100 kg以下的小型锻件。空气锤的结构如图3.3.1所示,它主要由以下几个主要部分组成:

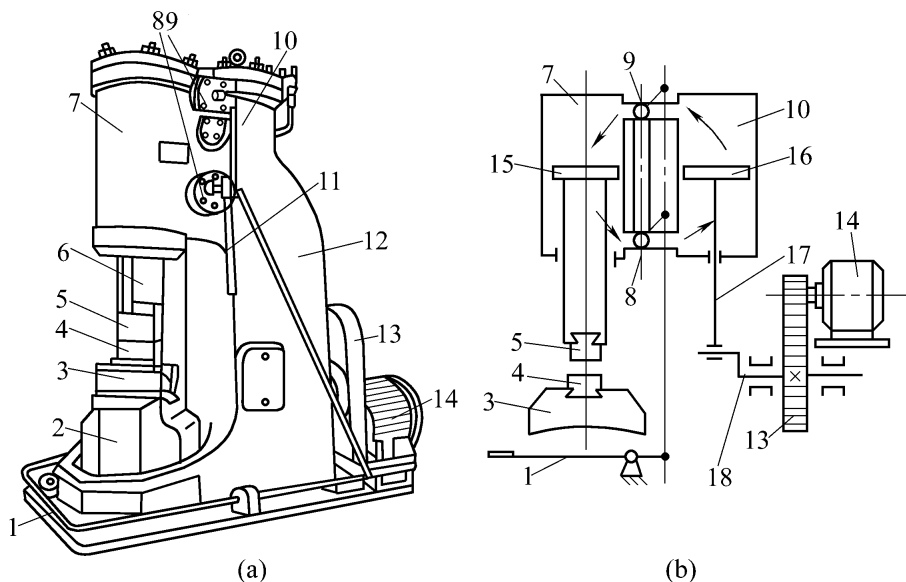


图3.3.1 空气锤的结构和工作原理

1—踏杆;2—砧座;3—砧垫;4—下砧;5—上砧;6—锤杆;7—工作缸;  
8—下旋阀;9—上旋阀;10—压缩气缸;11—手柄;12—锤身;13—减速器;  
14—电动机;15—工作活塞;16—压缩活塞;17—连杆;18—曲柄

- 1) 机架 机架又称锤体,由工作缸、压缩缸、锤身和底座组成。
- 2) 传动部分 由电动机、减速器、曲柄连杆及压缩活塞等组成。
- 3) 操纵部分 由上、下旋阀、旋阀套和操纵手柄(踏杆)等组成。
- 4) 工作部分 包括落下部分(工作活塞、锤杆和上砧块)和锤砧(下砧、砧垫、砧座)。

为满足锻造的稳定性,砧座的质量要求不小于落下部分质量的12~15倍。砧座安装在坚固

的钢筋水泥基础上,而且在砧座与基础之间垫有垫木,以消除打击时产生的震动。

蒸气—空气锤利用压力为 0.6~0.9 MPa 的蒸气或压缩空气作为动力,蒸气或压缩空气由单独的锅炉或空气压缩机供应,投资比较大。常用的双柱式蒸气—空气锤的构造如图 3.3.2 所示,其主要组成部分有:

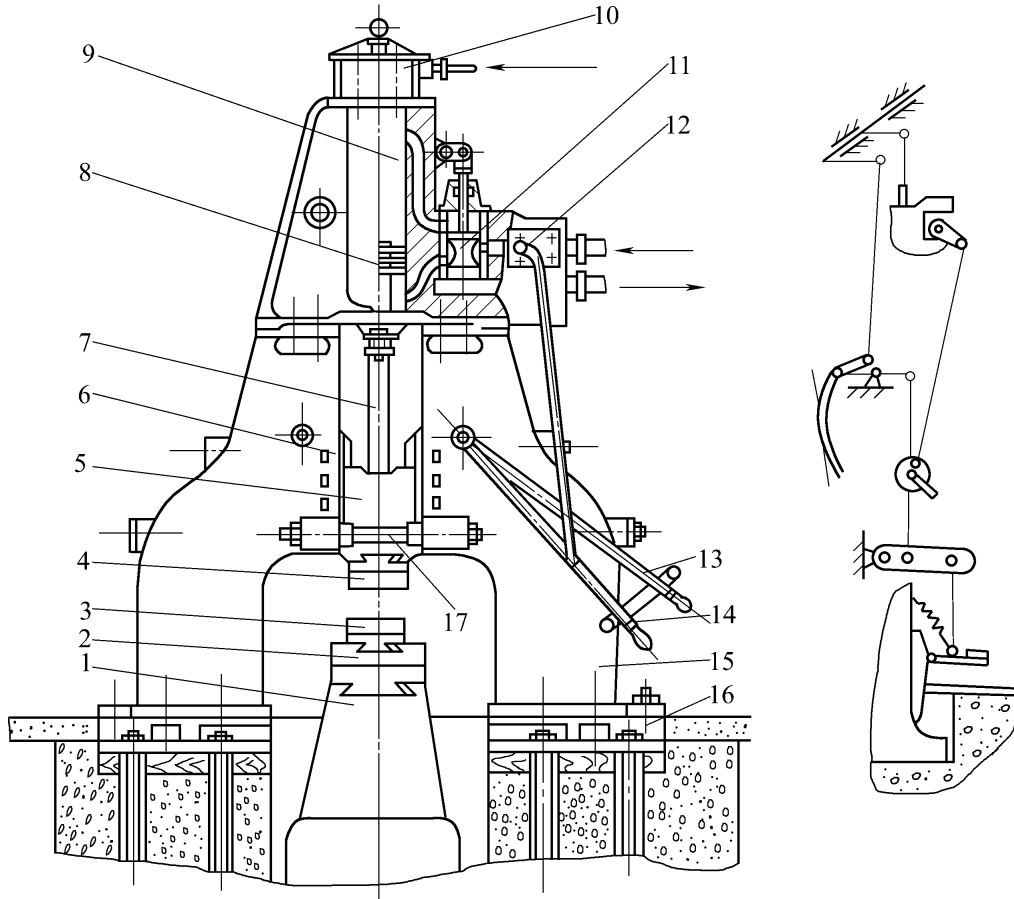


图 3.3.2 双柱式蒸气—空气自由锻锤

1—砧座;2—砧垫;3—下砧;4—上砧;5—锤头;6—导轨;7—锤杆;  
8—活塞;9—气缸;10—缓冲缸;11—滑阀;12—节气阀;13—滑阀操  
纵杆;14—节气阀操纵杆;15—立柱;16—底座;17—拉杆

1) 机架 机架又称锤身,由铸铁或铸钢铸成的左右立柱 15 组成,并由螺栓紧固在底座 16 上,再用前后拉杆将两立柱连接起来,以增强刚性。

2) 气缸及缓冲机构 气缸 9 是将蒸气或压缩空气所具有的能量转变为打击功能的结构,在上部安装有缓冲气缸 10,以防活塞 8 冲击气缸盖。

3) 落下部分 落下部分包括活塞 8、锤杆 7、锤头 5 和上砧 4 等。

4) 配气—操纵机构 配气机构位于气缸侧面,由滑阀 11 和滑阀 12 组成。操纵机构由节气阀操纵杆 14、滑阀操纵杆 13 等组成。操纵机构的作用是通过操作节气阀和滑阀,使锤头实现悬空、压紧工件、单次打击和连续打击等动作。

5) 砧座 砧座由下砧 3、砧垫 2 和砧座 1 组成。砧座的质量是落下部分质量的 10~15 倍,足够的质量可保证打击时不会产生弹跳和减弱打击,也不易产生下沉。

## 2. 水压机自由锻

自由锻水压机是锻造大型锻件的主要设备。大型锻造水压机的制造和拥有量是一个国家工

业水平的重要标志。我国已经能自行设计制造 125 000 kN 以下的各种规格的自由锻水压机。水压机是根据液体的静压力传递原理(即帕斯卡原理)设计制造的。水压机主要由本体和附属设备组成。水压机本体的典型结构如图 3 3 3 所示,它由固定系统和活动系统两部分组成:

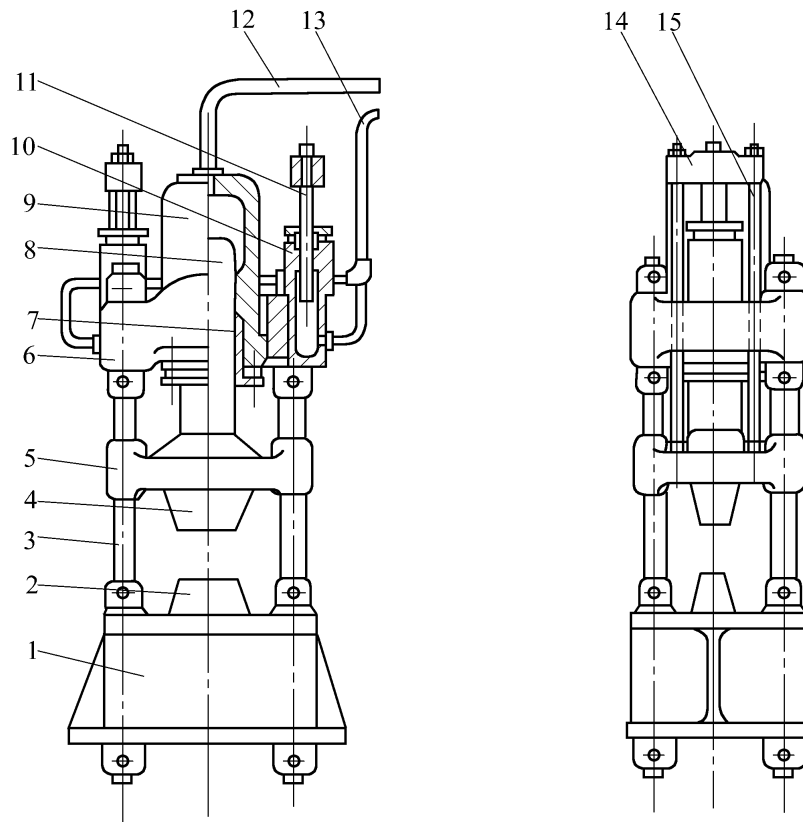


图 3 3 3 水压机本体的典型结构

1—下横梁 ;2—下砧 ;3—立柱 ;4—上砧 ;5—活动横梁 ;6—上横梁 ;7—密封圈 ;  
8—柱塞 ;9—工作缸 ;10—回程缸 ;11—回程柱塞 ;12、13—管道 ;  
14—回程横梁 ;15—回程拉杆

1) 固定系统 主要由下横梁 1、立柱 3、上横梁 6、工作缸 9 和回程缸 10 等组成,下横梁固定基础上。

2) 活动系统 主要由活动横梁 5、工作柱塞 8、回程柱塞 11、回程横梁 14 和回程拉杆 15 等部分组成。

水压机的附属设备主要有水泵、蓄压器、充水罐和水箱等。

在水压机上锻造时,以压力代替锤锻时的冲击力,大型水压机能够产生数万 kN 甚至更大的锻造压力,坯料变形的压下量大,锻透深度大,从而可改善锻件内部的质量,这对于以钢锭为坯料的大型锻件是很必要的。此外,水压机在锻造时振动和噪音小,工作条件好。

### 3 3 3 自由锻工序

根据作用与变形要求不同,自由锻的工序分为基本工序、辅助工序和精整工序三类。

#### 1. 基本工序

指改变坯料的形状和尺寸以达到锻件基本成形的工序,称为基本工序。包括镦粗、拔长、冲孔、弯曲、切割、扭转、错移等工步。

#### 2. 辅助工序

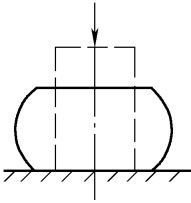
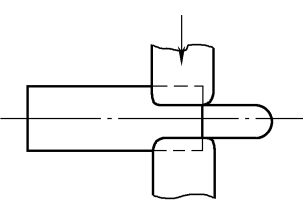
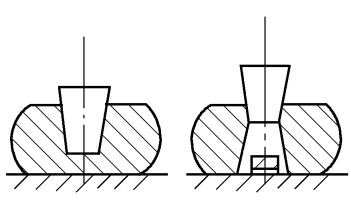
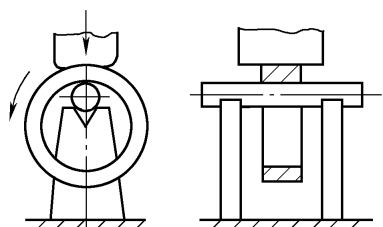
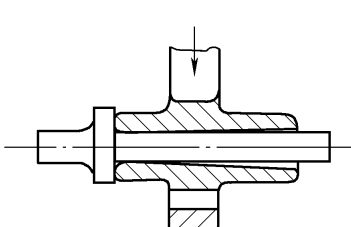
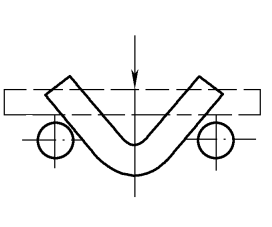
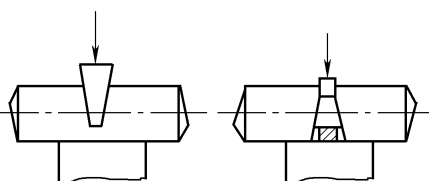
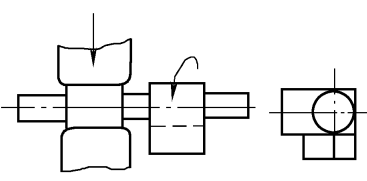
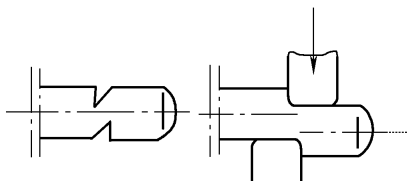
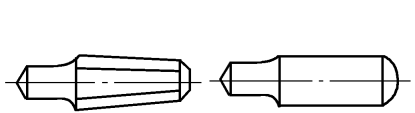
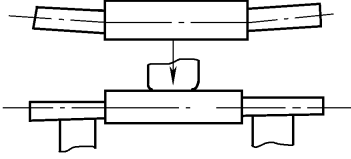
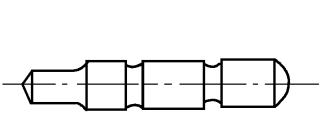
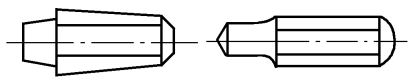
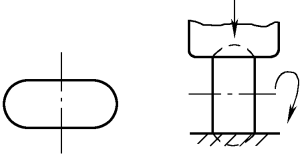
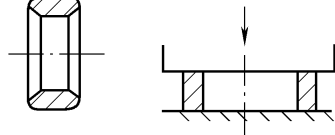
是为了方便基本工序的操作,而使坯料预先产生某些局部变形的工序。如倒棱、压肩等工步。

### 3. 修整工序

修整锻件的最后尺寸和形状,提高锻件表面质量,使锻件达到图纸要求的工序叫修整工序。如修整鼓形、平整端面、校直弯曲等工步。

任何一个自由锻件的成形过程,上述三类工序中的各工步可以按需要单独使用或进行组合。自由锻各工序和所包含的工步简图见表 3 3.1 所示。

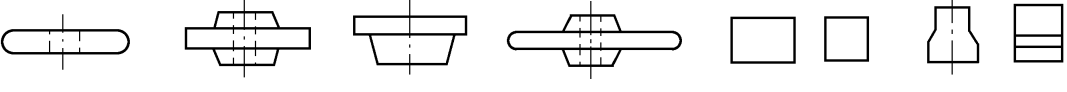
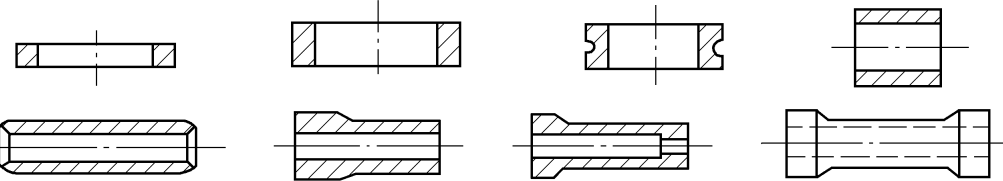
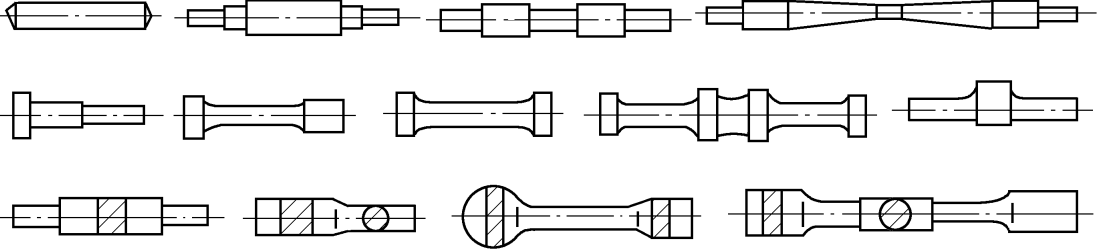
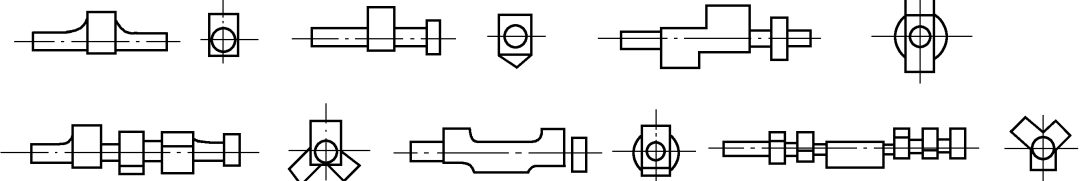
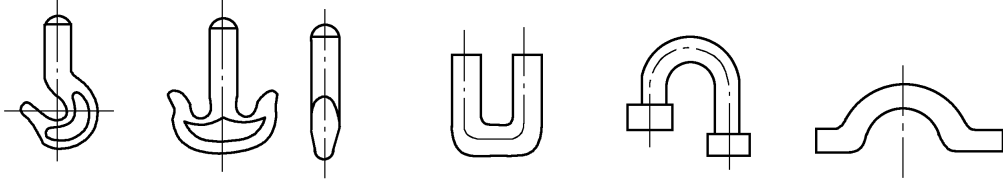
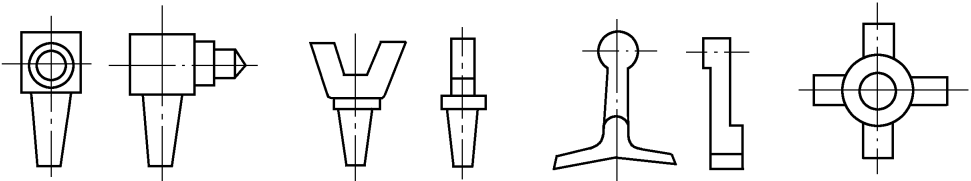
表 3 3.1 自由锻工步简图

基本 工序	 <p>镦粗</p>	 <p>拔长</p>	 <p>冲孔</p>
	 <p>芯轴扩孔</p>	 <p>芯轴拔长</p>	 <p>弯曲</p>
	 <p>切割</p>	 <p>扭转</p>	 <p>错移</p>
辅助 工序	 <p>倒棱</p>	 <p>校正</p>	 <p>压痕</p>
	 <p>压钳把</p>	 <p>滚圆</p>	 <p>平整</p>

### 3 3 4 自由锻件的分类和锻造过程

按自由锻件的外形及其成形方法,可将自由锻件分为六类:饼块类、空心类、轴杆类、曲轴类、弯曲类和复杂形状类锻件。自由锻件分类简图见表 3 3 2 所示。

表 3 3 2 自由锻件分类表

饼块类锻件	
空心类锻件	
轴杆类锻件	
曲轴类锻件	
弯曲类锻件	
复杂形状锻件	

#### 1. 饼块类锻件

这类锻件主要有圆盘、叶轮、齿轮等零件的毛坯。其所采用的基本工序是镦粗工步。随后的

辅助工序和修整工序有：倒棱、滚圆、平整等工步。饼块类锻件锻造过程如图 3 3 4 所示。

## 2. 空心类锻件

这类锻件主要有各种圆环、齿圈、轴承环、缸体、空心轴等零件的毛坯。所采用的基本工序有镦粗、冲孔、扩孔或芯轴拔长等工步。辅助工序和修整工序有：倒棱、滚圆、校正等工步。空心类锻件锻造过程如图 3 3 5 所示。

## 3. 轴杆类锻件

这类锻件可以是直轴或阶梯轴，如传动轴、轧辊、立柱、拉杆等；也可以是矩形、方形、工字形或其他截面的杆件，如连杆、摇杆、杠杆等。锻造轴杆类锻件的基本工序有拔长或镦粗 + 拔长工步。辅助工序和修整工序有倒棱和滚圆工步。轴杆类零件锻造过程如图 3 3 6 所示。

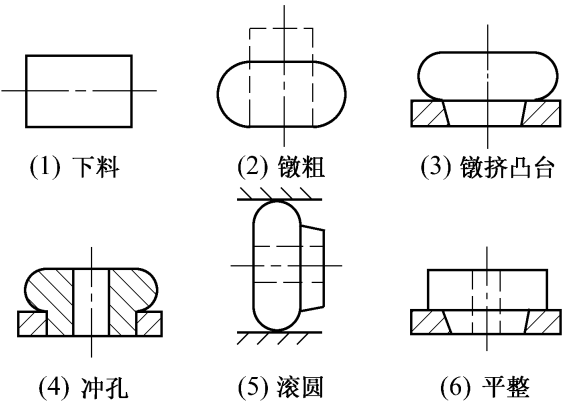


图 3 3 4 饼块类锻件齿坯锻造过程

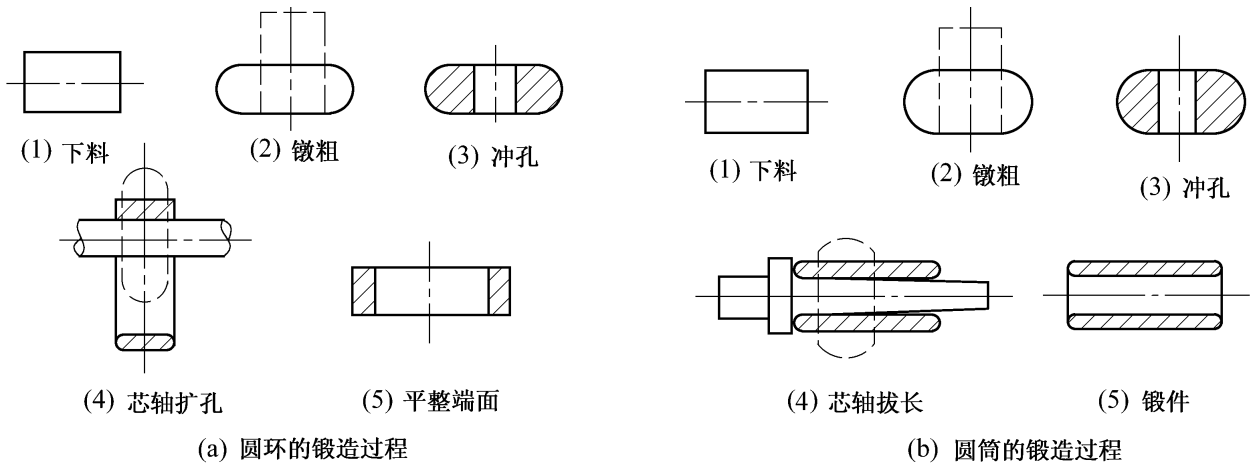


图 3 3 5 空心类锻件锻造过程

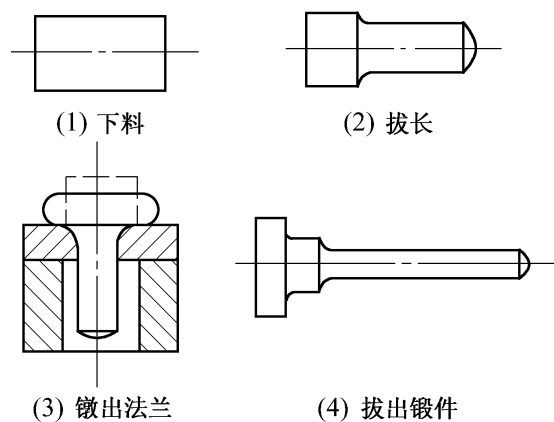


图 3 3 6 轴杆类锻件锻造过程

## 4. 曲轴类锻件

锻造曲轴类锻件的基本工序有拔长、错移和扭转等工步。辅助和修整工序有：分段压痕、局部倒棱、滚圆和校正等工步。曲轴类零件锻造过程如图 3 3 7 所示。

## 5. 弯曲类锻件

锻造这类锻件的基本工序有拔长、弯曲工步。辅助工序和修整工序有：分段压痕、滚圆和平

整等工步。弯曲类锻件的锻造过程如图 3 3 8 所示。

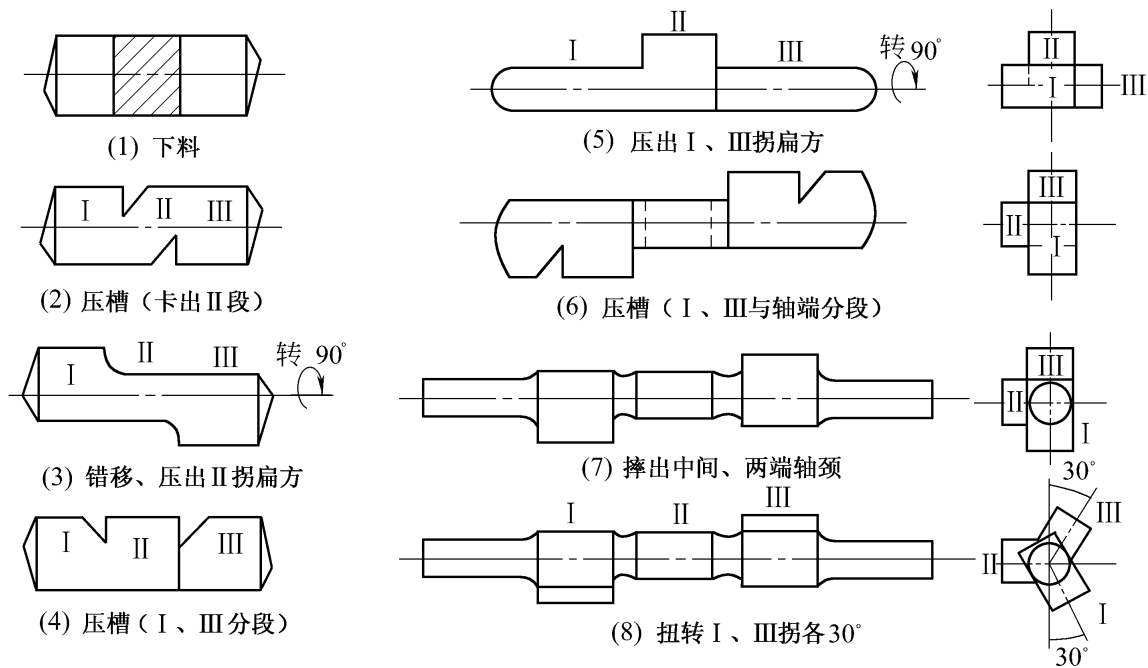


图 3 3 7 三拐曲轴锻造过程

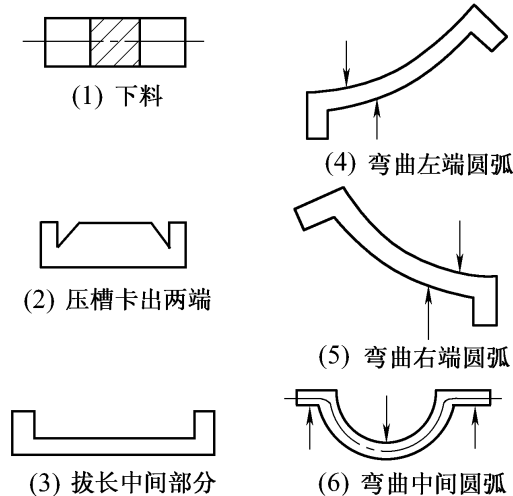


图 3 3 8 弯曲类锻件锻造过程

## 6. 复杂形状类锻件

这类锻件主要有阀体、叉杆、吊环体、十字轴等。其形状较复杂,锻造难度比较大,所用辅助工具也较多。因此在锻造时应选择合理的锻造工序,保证锻件顺利成形。

## 3 4 模 锻

模锻是将加热后的坯料放在锻模模膛内,在锻压力的作用下使坯料变形而获得锻件的一种加工方法。坯料变形时,金属的流动受到模膛的限制和引导,从而获得与模膛形状一致的锻件。与自由锻相比,模锻的优点是:

- 1) 由于有模膛引导金属的流动,锻件的形状可以比较复杂;
- 2) 锻件内部的锻造流线按锻件轮廓分布,从而提高了零件的机械性能和使用寿命;



- 3) 锻件表面光洁、尺寸精度高、节约材料和切削加工工时；
- 4) 生产率较高；
- 5) 操作简单,易于实现机械化。

但是,由于模锻是整体成形,并且金属流动时,与模膛之间产生很大的摩擦阻力,因此所需设备吨位大,设备费用高;锻模加工工艺复杂、制造周期长、费用高,所以模锻只适用于中、小型锻件的成批或大量生产。不过随着计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)技术的飞速进步,锻模的制造周期将大大缩短。

按使用的设备类型不同,模锻又分为锤上模锻、曲柄压力机上模锻、摩擦压力机上模锻、平锻机上模锻、液压机上模锻等。

### 3.4.1 锤上模锻

锤上模锻是在自由锻基础上最早发展起来的一种模锻生产方法,即在模锻锤上的模锻。它是将上、下模块分别固紧在锤头与砧座上,将加热透的金属坯料放入下模型腔中,借助于上模向下的冲击作用,迫使金属在锻模型槽中塑性流动和填充,从而获得与型腔形状一致的锻件。

模锻锤包括蒸气—空气模锻锤、无砧座锤、高速锤和螺旋锤。其中蒸气—空气模锻锤是普遍应用的模锻锤,国外最大的模锻锤是 31.75 t,我国最大的模锻锤为 16 t。其结构如图 3.4.1 所示。

锤上模锻能完成墩粗、拔长、滚挤、弯曲、成形、预锻和终锻等各变形工步的操作,锤击力量的大小和锤击频率可以在操作中自由控制和变换,可完成各种长轴类锻件和短轴类锻件的模锻,在各种模锻方法中具有较好的适应性;设备费用也比其他模锻设备相对较低,是我国当前模锻生产中应用最多的一种锻造方法,该设备结构简单、造价低、操作简单、使用灵活,目前广泛应用于汽

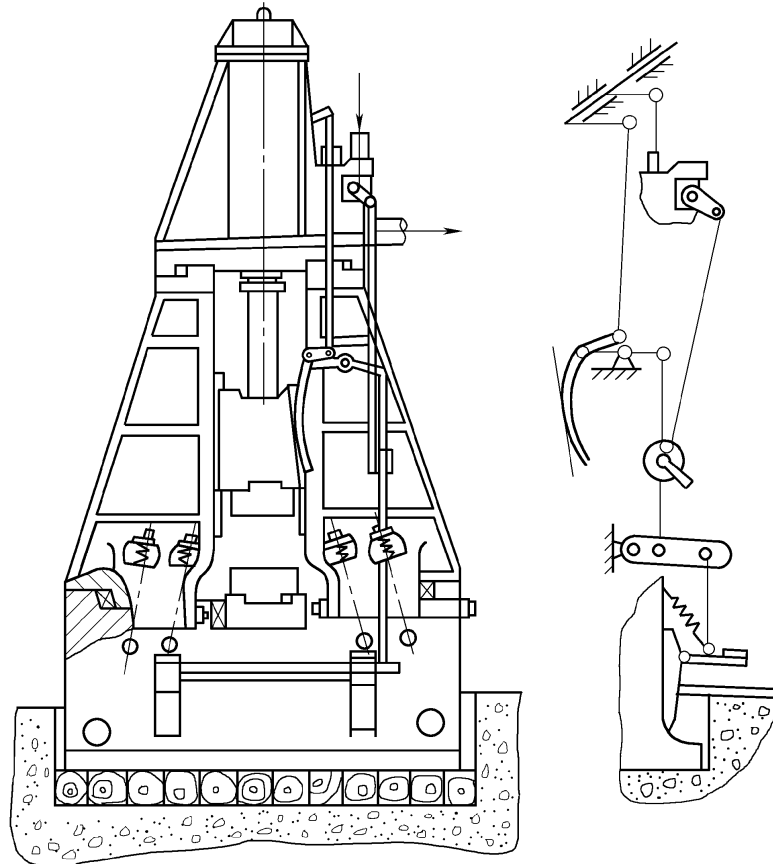


图 3.4.1 模锻锤结构简图

车、船舶及航空锻件的生产。其缺点是工作时振动和噪音大,劳动条件仍然较差;难以实现较高等度的操作机械化;完成一个变形工步要经过多次锤击,生产率仍不太高。因而,在大批生产中有逐渐被压力机上模锻取代的趋势。

### 3.4.2 曲柄压力机上模锻

曲柄压力机上模锻是一种比较先进的模锻方法。曲柄压力机的结构和工作原理如图3.4.2所示。电动机通过飞轮释放能量,曲柄连杆机构带动滑块沿导轨作上下往复运动,进行锻压工作。锻模分别安装在滑块的下端和工作台上。

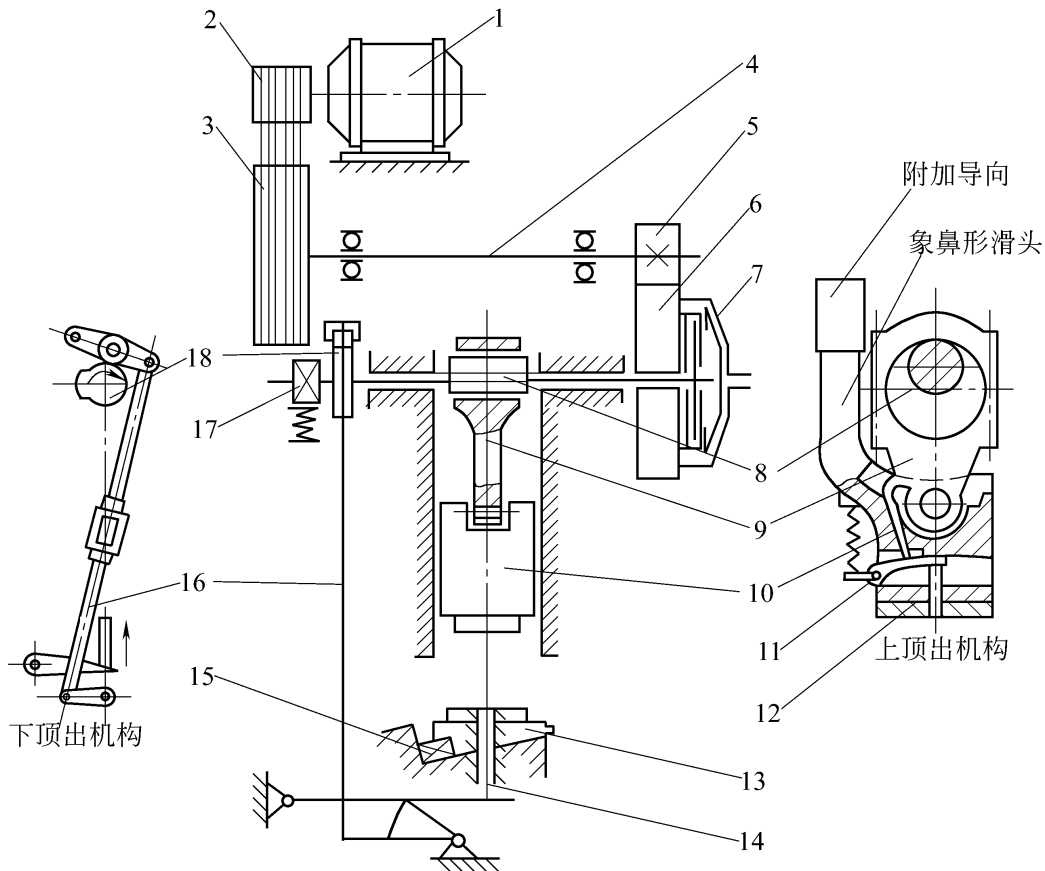


图 3.4.2 曲柄压力机的结构及传动原理简图

- 1—电动机;2—小皮带轮;3—飞轮;4—传动轴;5—小齿轮;6—大齿轮;  
7—圆盘摩擦离合器;8—曲柄;9—连杆;10—滑块;11—上顶出机构;  
12—上顶杆;13—楔形工作台;14—下顶杆;15—斜楔;16—下顶出机构;  
17—带式制动器;18—凸轮

与锤上模锻相比,曲柄压力机模锻具有以下优点:

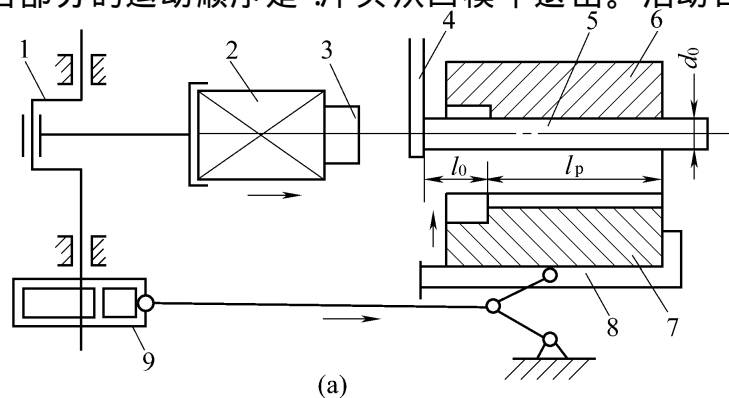
- 1) 作用于坯料上的锻造力是压力,不是冲击力,工作时振动和噪音小,劳动条件得到改善。
- 2) 坯料的变形速度较低。这对于低塑性材料的锻造有利,某些不适于在锤上锻造的材料,如耐热合金、镁合金等,可在压力机上锻造。
- 3) 锻造时滑块的行程不变,每个变形工步在滑块的一次行程中即可完成,并且便于实现机械化和自动化,具有很高的生产率。
- 4) 滑块运动精度高,并有锻件顶出装置,使锻件的模锻斜度、加工余量和锻造公差大大减小,因而锻件精度比锤上模锻件高。

这种模锻方法的主要缺点是设备费用高,模具结构也比一般锤上锻模复杂,仅适用于大批量生产的条件,对坯料的加热质量要求高,不允许有过多的氧化皮;由于滑块的行程和压力不能在锻造过程中调节,因而,不能进行拔长、滚挤等工步的操作。

### 3.4.3 平锻机上模锻

平锻机是曲柄压力机的一种,又称卧式锻造机。它沿水平方向对坯料施加锻造压力。按照分模面的位置可分为垂直分模平锻机和水平分模平锻机。

图 3.4.3 为平锻机工作原理示意图。平锻机启动前,棒料放在固定凹模 6 的型槽中,并由前挡料板 4 定位,以确定棒料的变形部分长度  $l_p$ 。然后,踏下脚踏板,使离合器工作。平锻机的曲柄凸轮机构保证按下列顺序工作:在主滑块前进过程中,活动凹模 7 迅速进入夹紧状态,在  $l_p$  部分将棒料夹紧;前挡板 4 退去,凸模(冲头)3 与热毛坯接触,并使其产生塑性变形直至充满型槽为止。当机器回程时,各部分的运动顺序是:冲头从凹模中退出。活动凹模回复原位,冲头回复



1—曲柄; 2—主滑块; 3—凸模; 4—前挡料板; 5—坯料;  
6—固定凹模; 7—活动凹模; 8—夹紧滑块; 9—侧滑块

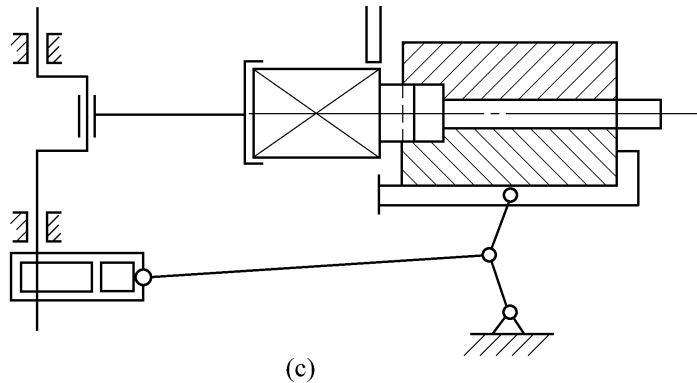
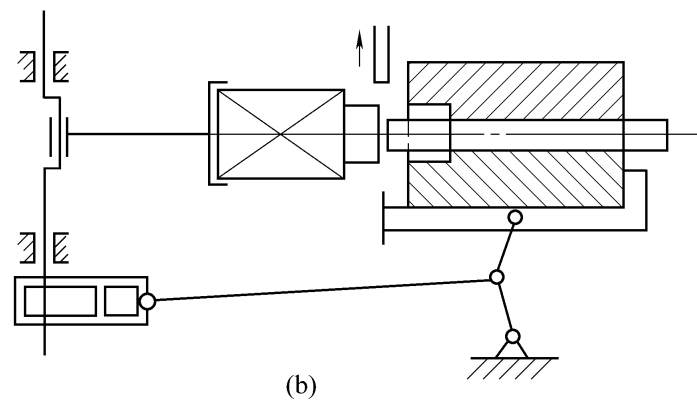


图 3.4.3 平锻机工作原理示意图

原位 从凹模中取出锻件。

平锻机上模锻在工艺上有如下特点：

1) 锻造过程中坯料水平放置,坯料都是棒料或管材,并且只进行局部(一端)加热和局部变形加工。因此,可以完成在立式锻压设备上不能锻造的某些长杆类锻件,也可用长棒料连续锻造多个锻件。

2) 锻模有两个分模面,锻件出模方便,可以锻出在其它设备上难以完成的在不同方向上有凸台或凹槽的锻件。

3) 需配备对棒料局部加热的专用加热炉。

与曲柄压力机上模锻类似,平锻机上模锻也是一种高效率、高质量、容易实现机械化的锻造方法,劳动条件也较好,但平锻机是模锻设备中结构较复杂的一种,价格贵、投资大,仅适用于锻件的大批量生产。目前平锻机已广泛用于大批量生产汽门、汽车半轴、环类锻件等。

### 3 4 4 摩擦压力机上模锻

摩擦压力机是靠飞轮旋转所积蓄的能量转化成金属的变形能进行锻造,如图 3 4 4 所示。摩擦压力机属于锻锤锻压设备,其行程速度介于模锻锤和曲柄压力机之间,有一定的冲击作用,滑块行程和冲击能量都可自由调节,坯料在一个模膛内可以多次锻击,因而工艺性能广泛,既可完成墩粗、成形、弯曲、预锻、终锻等成形工序,也可进行校正、精整、切边、冲孔等后续工序的操作,必要时,还可作为板料冲压的设备使用。

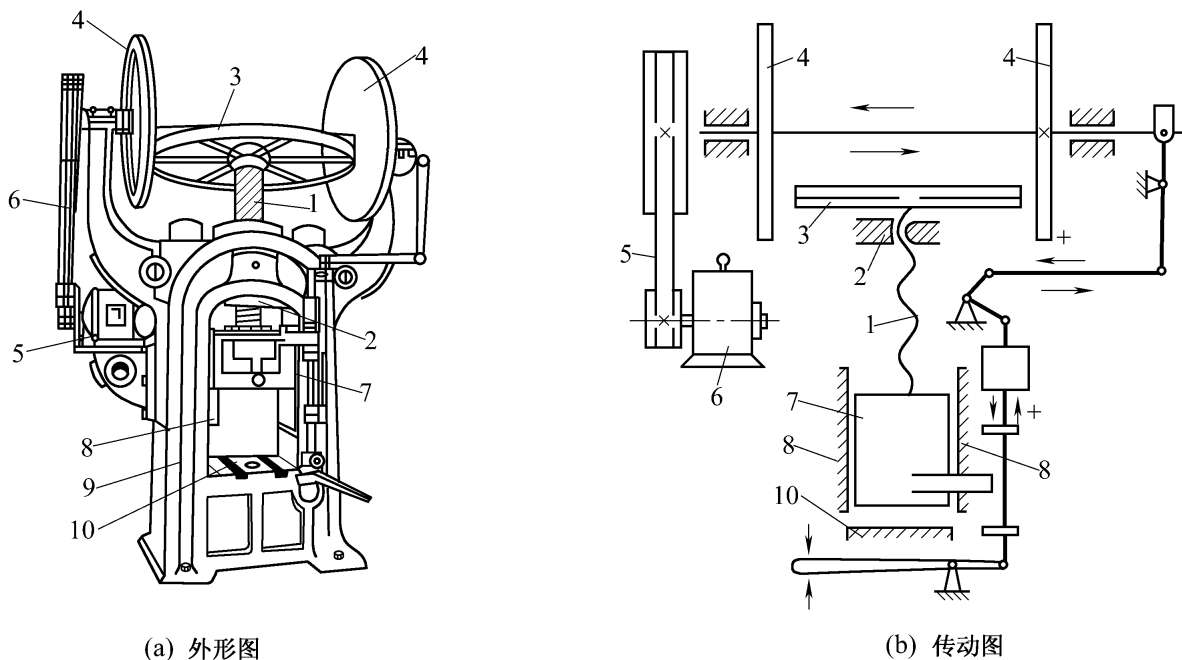


图 3 4 4 摩擦压力机传动图

1—螺杆;2—螺母;3—飞轮;4—圆轮;5—传动带;6—电动机;

7—滑块;8—导轨;9—机架;10—机座

摩擦压力机的飞轮惯性大,单位时间内的行程次数比其它设备低得多,这对于再结晶速度较低的塑性材料的锻造是有利的,但也因此生产率较低。由于采用摩擦传动,摩擦压力机的传动效率低,因而,设备吨位的发展受到限制,通常不超过 10 000 kN。

摩擦压力机上模锻适用于小型锻件的批量生产。摩擦压力机结构简单、性能广泛、使用维护

方便 是中、小型工厂普遍采用的锻造设备。近年来,许多工厂还把摩擦压力机与自由锻锤、辊锻机、电锻机等配成机组或组成流水线,承担模锻锤、平锻机的部分模锻工作,有效地扩大了它的使用范围。

### 3 4 5 其他模锻设备

#### 1. 螺旋压力机

螺旋压力机一般适用于中、小批量生产的各种形状的模锻件,尤其是适用于锻造轴对称性的锻件。螺旋压力机按其结构分类,可分为摩擦螺旋压力机、液压螺旋压力机和电动螺旋压力机,如图 3 4 5 所示。近年来还出现了气液螺旋压力机和离合器式高能螺旋压力机。它们共同的特点是飞轮在外力驱动下储备足够的能量,再通过螺杆传递给滑块来打击毛坯做功。螺旋压力机同时具有锤和曲柄压力机的特点,可进行模锻、冲压、锻锻、挤压、精压、切边、弯曲和校正等工作。而且该设备结构简单、振动小、基础简单,可大大减少设备和厂房的投资。

#### 2. 液压机

液压机是一种利用液体压力来传递能量的锻压设备,它包含以油做工作介质的油压机和以水为工作介质的水压机。

锻造液压机有自由锻液压机、模锻液压机和切边液压机之分。锻造生产常用的模锻液压机又有通用模锻液压机和专用模锻液压机两类。模锻水压机外形如图 3 4.6 所示。

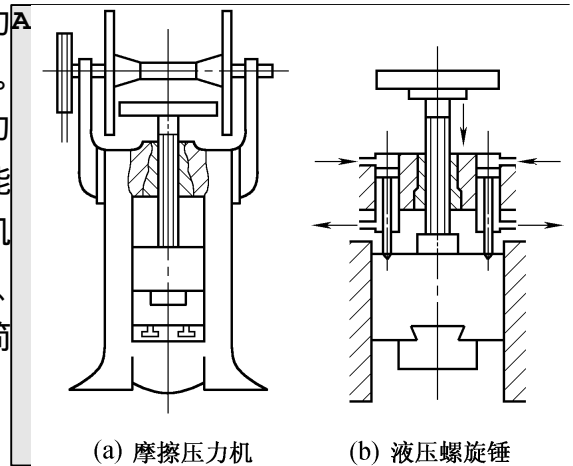


图 3 4 5 螺旋压力机结构原理图

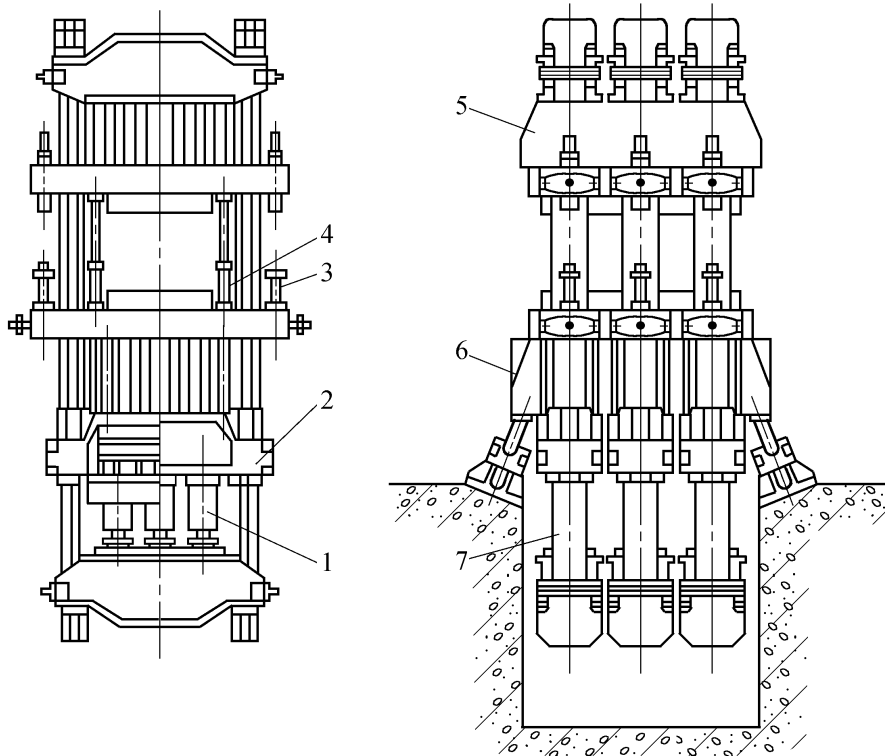


图 3 4.6 450 MN 模锻水压机

1—工作缸 2—工作缸支承梁 3—同步缸 4—回程缸;  
5—纵梁 6—固定梁 7—立柱

此类设备的特点是：行程和锻造能力较大，工作台面大，工作液体的压力高，在整个工作过程中压力和速度变化不大，在静压条件下金属变形均匀，锻件组织均匀，应用范围广，对于铝镁合金、钛合金或高温合金锻件更为适用。现在世界最大的模锻水压机是原苏联在 1955 ~ 1960 年间制造的 750 000 kN 大型模锻水压机。

### 3. 精压机

精压机是一种工作行程小、刚度大、变形力较大的锻造设备。它的特点是滑块行程小，曲柄—连杆机构通过短而粗的肘杆机构带动滑块上、下运动。其结构如图 3 4.7 所示。精压机的结构与其它压力机的最大差别是滑块、肘杆机构及装模高度调节机构不同，大部分工作变形力由两肘杆承受，连杆受力较小。精压机模锻件的公差约为普通模锻件的 1/3 左右。在飞机结构和发动机中，精压机模锻件的应用较多。但精压机模锻要求有高质量的毛坯、精确的模具、少或无氧化的加热条件、良好的润滑和较复杂的工序间清理等，所以生产成本较高，在一定批量下才能降低成品零件的总成本。

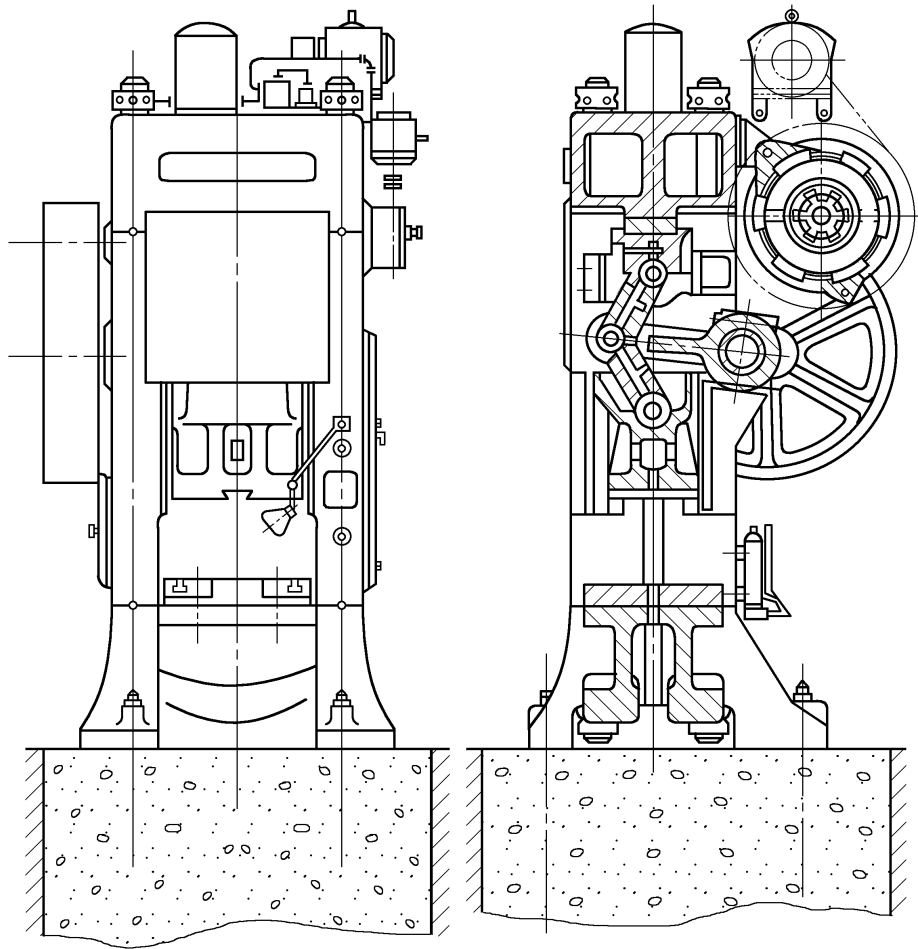


图 3 4.7 精压机结构简图(下压式)

### 4. 楔横轧机

楔横轧机主要用来生产大批量的轴类锻件或预制毛坯。其结构形式可分为单辊弧形式楔横轧机、辊式楔横轧机和板式楔横轧机三种，如图 3 4.8 所示。其中辊式楔横轧机由于生产率较高，轧制产品尺寸精度容易保证，能方便准确地实现径向、轴向的调整而得到广泛应用。

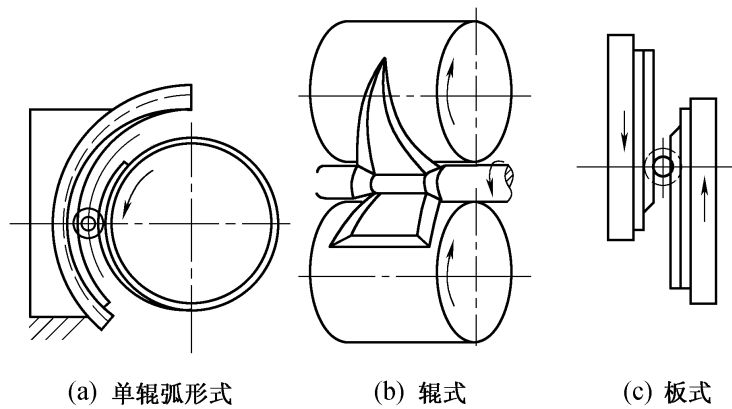


图 3 4 8 三种基本类型的楔横轧机

## 3.5 板料冲压

### 3.5.1 概述

板料冲压是利用装在冲床上的冲模对金属板料加压,使之产生变形或分离,从而获得零件或毛坯的加工方法。板料冲压的坯料通常都是较薄的金属板料,而且,冲压时不需加热,故又称为薄板冲压或冷冲压,简称冷冲或冲压。

#### 1. 板料冲压的特点和应用

与锻造和其它加工方法相比,板料冲压具有下列特点:

1) 它是在常温下通过塑性变形对金属板料进行加工的,因而,原材料必须具有足够的塑性,并应有较低的变形抗力。

2) 金属板料经过塑性变形的冷变形强化作用,并获得一定的几何形状后,具有结构轻巧、强度和刚度较高的优点。

3) 冲压件尺寸精度高、质量稳定、互换性好,一般不再进行切削加工,即可作为零件使用。

4) 冲压生产操作简单,生产率高,便于实现机械化和自动化。

5) 冲压模具结构复杂、精度要求高、制造费用高,只有在大批量生产的条件下,采用冲压加工方法在经济上才是合理的。

板料冲压是机械制造中的重要加工方法之一,它在现代工业的许多部门都是得到广泛的应用,特别是在汽车制造、拖拉机、电机、电器、仪器仪表、兵器及日用品生产等工业部门中占有重要的地位。

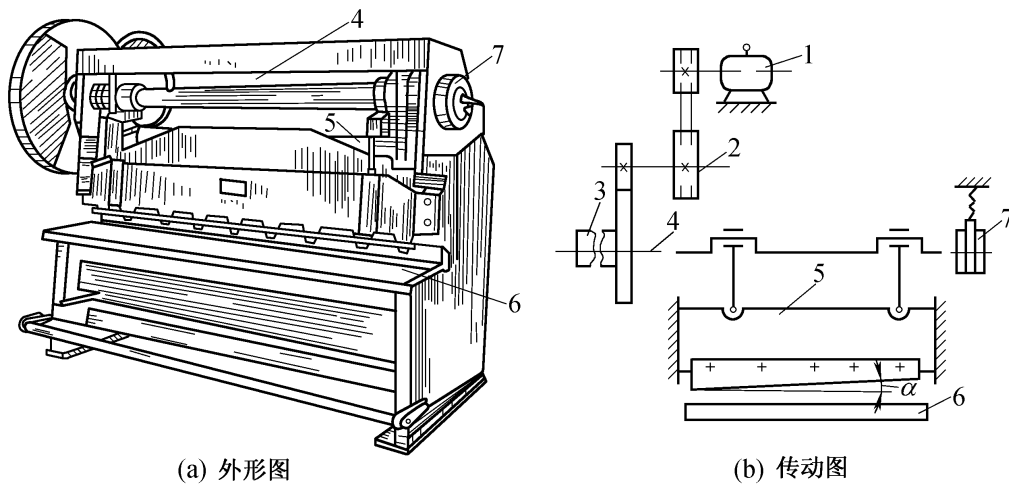
#### 2. 冲压设备

板料冲压设备主要是剪床和冲床。

##### (1) 剪床

剪床用于把板料切成需要宽度的条料,以供冲压工序使用。剪床的外形及传动机构如图 3 5 .1所示。电动机 1 通过带轮使轴 2 转动,再通过齿轮传动及离合器 3 使曲轴 4 转动,于是带有刀片的滑块 5 便上下运动,进行剪切工作。6 为工作台,7 是滑块制动器。

##### (2) 冲床



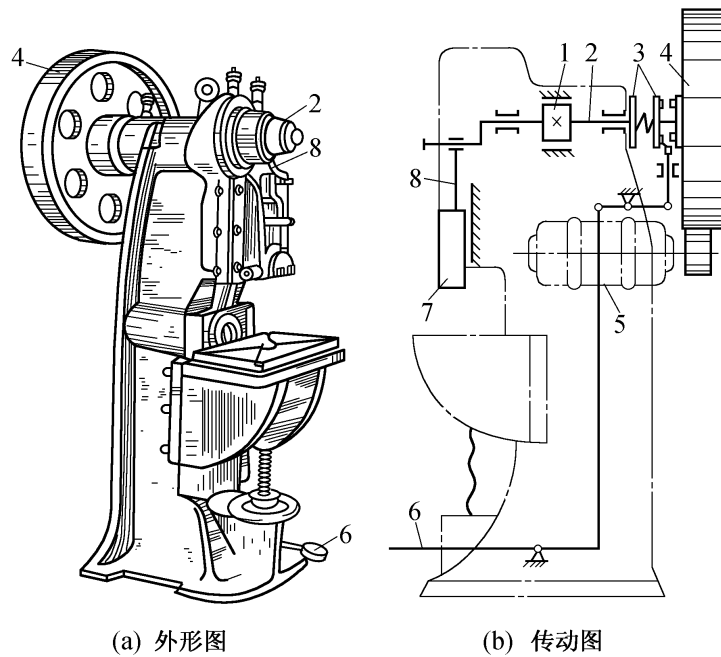
(a) 外形图

(b) 传动图

图 3.5.1 剪床

1—电动机；2—轴；3—离合器；4—曲轴；5—滑块；6—工作台；7—滑块制动器

冲床的种类很多,主要有单柱冲床、双柱冲床、双动冲床等。图 3.5.2 是单柱冲床外形及传动示意图。电动机 5 带动飞轮 4 通过离合器 3 与单拐曲轴 2 相接,飞轮可在曲轴上自由转动。曲轴的另一端则通过连杆 8 与滑块 7 连接。工作时 踩下踏板 6 离合器将使飞轮带动曲轴转动,滑块做上下运动。放松踏板,离合器脱开,制动闸 1 立即停止曲轴转动,滑块停留在待工作位置。



(a) 外形图

(b) 传动图

图 3.5.2 单柱冲床

1—制动闸；2—曲轴；3—离合器；4—飞轮；5—电动机；  
6—踏板；7—滑块；8—连杆

### 3.5.2 板料冲压的基本工序

板料冲压的基本工序有冲裁、弯曲、拉深、成形等。

#### 1. 冲裁

冲裁是使板料沿封闭的轮廓线分离的工序,包括冲孔和落料。这两个工序的坯料变形过程



和模具结构都是一样的,二者的区别在于冲孔是在板料上冲出孔洞,被分离的部分为废料,而周边是带孔的成品;落料是被分离的部分是成品,周边是废料。

冲裁时板料的变形和分离过程如图 3 5 3 所示。凸模和凹模的边缘都带有锋利的刃口。当凸模向下运动压住板料时,板料受到挤压,产生弹性变形并进而产生塑性变形,当上、下刃口附近材料内的应力超过一定限度后,即开始出现裂纹。随着冲头(凸模)继续下压,上、下裂纹逐渐向板料内部扩展直至汇合,板料即被切离。

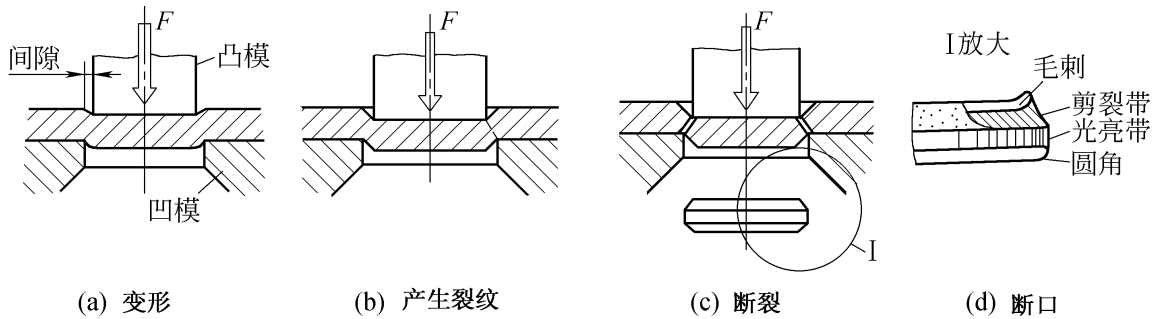


图 3 5 3 冲裁过程

冲裁后的断面可明显地区分为光亮带、剪裂带、圆角和毛刺四部分。其中光亮带具有最好的尺寸精度和光洁的表面,其他三个区域,尤其是毛刺则降低冲裁件的质量。这四个部分的尺寸比例与材料的性质、板料厚度、模具结构和尺寸、刃口锋利程度等冲裁条件有关。为了提高冲裁质量,简化模具制造,延长模具寿命及节省材料,设计冲裁件及冲裁模具时应考虑:

1) 冲裁件的尺寸和形状 在满足使用要求的前提下,应尽量简化,多采用圆形、矩形等规则形状,以便于使用通用机床加工模具,并减少钳工修配的工作量。线段相交处必须圆弧过渡。冲圆孔时,孔径不得小于板料厚度;冲方孔时,孔的边长不得小于 0.9;孔与孔之间或孔与板料边缘的距离不得小于。

2) 模具尺寸 冲裁件的尺寸精度依靠模具精度来保证。凸凹模间隙对冲裁件断面质量具有重要影响,合理的间隙值可按表 3 5 1 选择。在设计冲孔模具时,应使凸模刃口等于所要求孔的尺寸,凹模刃口尺寸则是孔尺寸加上两倍的间隙值。设计落料模具时,则应使凹模刃口尺寸为成品尺寸,凸模则减去两倍的间隙值。

表 3 5 1 冲裁模的合理间隙值

材料种类	材料厚度 /mm				
	0.1~0.4	0.4~1.2	1.2~2.5	2.5~4.0	4.0~6.0
黄铜、低碳钢	0.01~0.02	7%~10%	9%~12%	12%~14%	15%~18%
中、高碳钢	0.01~0.05	10%~17%	18%~25%	25%~27%	27%~29%
磷青铜	0.01~0.04	8%~12%	11%~14%	14%~17%	18%~20%
铝及铝合金(软)	0.01~0.03	8%~12%	11%~12%	11%~12%	11%~12%
铝及铝合金(硬)	0.01~0.03	10%~14%	13%~14%	13%~14%	13%~14%

3) 冲压件的修整 修整工序是利用修整模沿冲裁件的外缘或内孔,切去一薄层金属,以除去塌角、剪裂带和毛刺等,从而提高冲裁件的尺寸精度和降低表面粗糙度。只有当对冲裁件的质量要求较高时,才需要增加修整工序。修整在专用的修整模上进行,模具间隙约为 $0.006 \sim 0.01$  mm。修整时单边切除量约为 $0.05 \sim 0.2$  mm,修整后的切面粗糙度 $Ra$ 值可达 $1.25 \sim 0.63$   $\mu\text{m}$ ,尺寸精度可达IT6~IT7。

## 2. 弯曲

弯曲是将平直板料弯成一定角度和圆弧的工序,如图3.5.4所示。弯曲时,坯料外侧的金属受拉应力作用,发生伸长变形。坯料内侧金属受压应力作用,产生压缩变形。在这两个应力—应变区之间存在一个不产生应力和应变的中性层,其位置在板料的中心部位。当外侧的拉应力超过材料的抗拉强度时,将产生弯裂现象。坯料越厚、内弯曲半径 $r$ 越小,坯料的压缩和拉伸应力越大,越容易弯裂。为防止弯裂,弯曲模的弯曲半径要大于限定的最小弯曲半径 $r_{\min}$ ,通常取 $r_{\min} = (0.25 \sim 1) \delta$ 。此外,弯曲时,应尽量使弯曲线和坯料纤维方向垂直,不仅能防止弯裂,也有利于提高零件的使用性能。

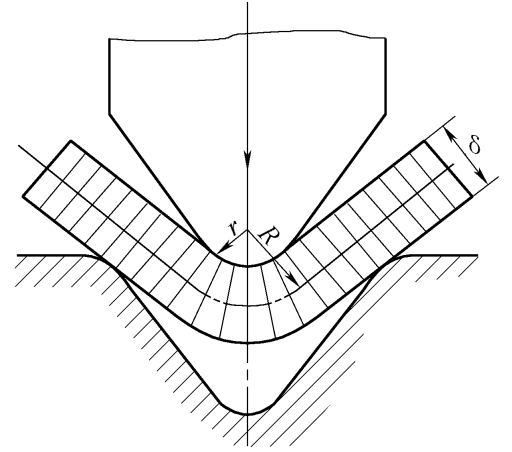


图 3.5.4 弯曲过程

塑性弯曲和任何的塑性变形一样,在外加载荷的作用下,板料产生的变形由弹性变形和塑性变形两部分组成。当外载荷去除后,塑性变形保留下来,而弹性变形部分则要恢复,从而使板料产生与弯曲方向相反的变形,这种现象称为弹复,又称回弹,如图3.5.5所示。弹复后,弯曲角减小(由 $\alpha$ 变为 $\alpha'$ ),弯曲半径增大(由 $r$ 变为 $r'$ )。

弹复的程度通常以弹复角表示:

$$\alpha' = \alpha - \Delta\alpha$$

显然,弹复现象会影响弯曲件的尺寸精度。弹复角的大小与材料的机械性能、弯曲半径、弯曲角等因素有关。材料的屈服强度越高、弯曲半径越大(即弯曲程度越轻),则在整个弯曲过程中,弹性变形所占的比例越大,弹复角则越大。这就是曲率半径大的零件不易弯曲成形的道理。此外,在弯曲半径不变的条件下,弯曲角越大,变形区的长度就越大,因而,弹复角也越大。

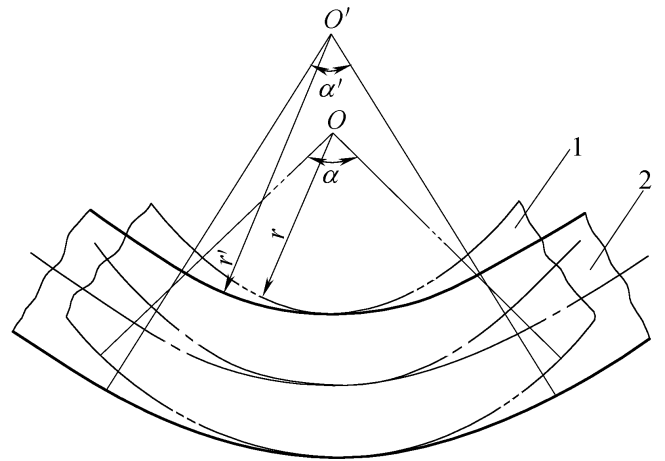


图 3.5.5 弯曲时的弹复现象

1—弹复前;2—弹复后

为了克服弹复现象对弯曲零件尺寸的影响,通常采取的措施是利用弹复规律,增大凸模压下量,或适当改变模具尺寸,使弹复后达到零件要求的尺寸。此外,也可通过改变弯曲时的应力状态,把弹复现象限制在最小的范围内。

## 3. 拉深

拉深是利用拉深模使平面板料变为开口空心件的冲压工序,又称拉延。拉深可以制成筒形、阶梯形、球形及其他复杂形状的薄壁零件。

拉深过程如图3.5.6所示。原始直径为 $D$ 的板料,经拉深后变成内径为 $d$ 的杯形零件。凸

模压入过程中,伴随着坯料变形和厚度的变化。拉深件的底部一般不变形,厚度基本不变。其余环形部分坯料经变形成为空心件的侧壁,厚度有所减小。侧壁与底之间的过渡圆角部位被拉薄最严重。拉深件的法兰部分厚度有所增加。拉深件的成形是金属材料产生塑性流动的结果,坯料直径越大,空心件直径越小,变形程度越大。

拉深件最容易产生的缺陷是拉裂和起皱。拉裂产生的最危险的部位是侧壁与底的过渡圆角处。为使拉深过程正常进行,必须把底部和侧壁的拉应力限制在不使材料发生塑性变形的限度内,而环形区内的径向拉应力,则应达到和超过材料的屈服极限,并且,任何部位的应力总和都必须小于材料的强度极限,否则,就会造成如图 3 5 7a 所示的拉穿缺陷。起皱是拉深时坯料的法兰部分受到切向压应力的作用,使整个法兰产生波浪形的连续弯曲现象。环形变形区内的切向压应力很大,很容易使板料产生如图 3 5 7b 所示的皱褶现象,从而造成废品。为此,必须采取以下措施:

1) 拉深模具的工作部分,必须加工成圆角。圆角半径  $r_{凹} = 10 r_{凸} = (0.6 \sim 1) r_{凹}$  ;

2) 控制凸模和凹模之间的间隙  $Z = (1.1 \sim 1.5) t$ 。间隙过小,容易擦伤工件表面,降低模具寿命。

3) 正确选择拉深系数。板料拉深时的变形程度通常以拉深系数  $m$  表示:

$$m = d/D$$

式中  $d$ ——拉深后的工件直径;  
 $D$ ——坯料直径。

拉深系数越小,拉深件直径越小,变形程度越大,越容易产生拉裂废品。拉深系数一般不小于  $0.5 \sim 0.8$ ,塑性好的材料可取下限值。

4) 为了减少由于摩擦引起的拉深件内应力的增加及减少模具的磨损,拉深前要在工件上涂润滑剂。

5) 为防止产生皱折,通常都用压边圈将工件压住。压边圈上的压力不宜过大,能压住工件不致起皱即可。

#### 4. 成形

成形是使板料或半成品改变局部形状的工序,包括压肋、压坑、胀形、翻边等。

##### (1) 压肋和压坑(包括压字,压花)

是压制出各种形状的凸起和凹陷的工序。采用的模具有刚模和软模两种。图 3 5 8 所示是用刚模压坑。与拉深不同,此时只有冲头下的这一小部分金属在拉应力作用下产生塑性变形,其余部分的金属并不发生变形。图 3 5 9 所示是用软模压肋,软模是用橡胶等柔性物体代替一半模具。这样,可以简化模具制造,冲制形状复杂的零件。但软模块使用寿命低,需经常更换。此

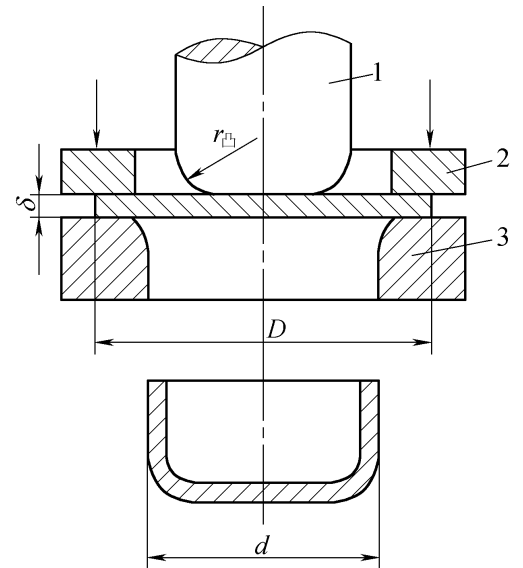


图 3 5 6 拉深过程

1—冲头;2—压板;3—凹模

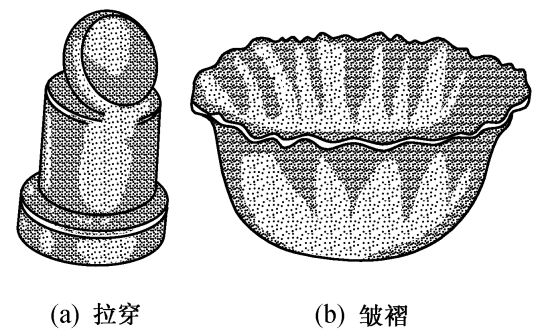


图 3 5 7 拉深废品

外,也可采用气压或液压成形。

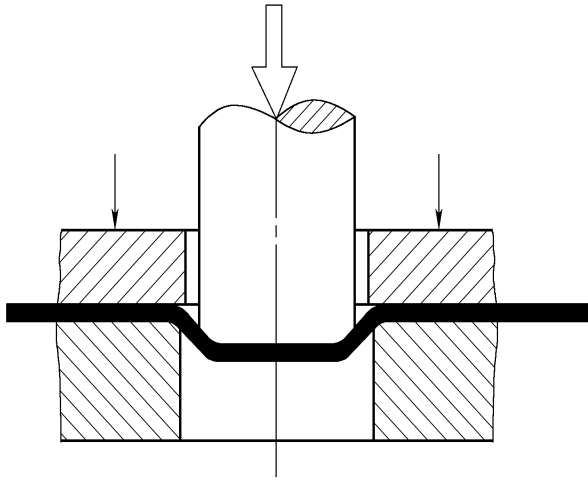


图 3 5 8 刚模压坑

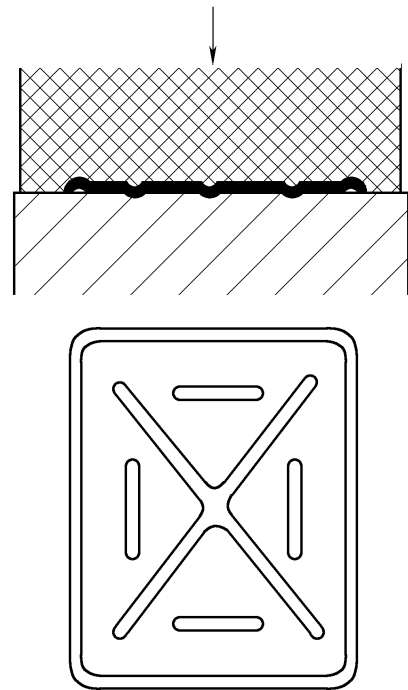


图 3 5 9 软模压肋

### (2) 胀形

是将拉深件轴线方向上局部区段的直径胀大,也可采用刚模(如图 3 5 .10 所示)或软模(如图 3 5 .11 所示)进行。刚模胀形时,由于芯子 2 的锥面作用,分瓣凸模 1 在压下的同时沿径向扩张,使工件 3 胀形。顶杆 4 将分瓣凸模顶回到起始位置后,即可将工件取出。显然,刚模的结构和冲压工艺都比较复杂,而采用软模则简便得多。因此,软模胀形得到广泛应用。

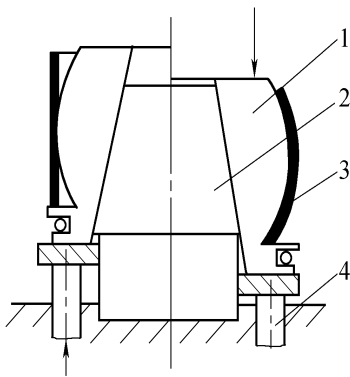


图 3 5 .10 刚模胀形

1—分瓣凸模;2—芯子;3—工件;4—顶杆

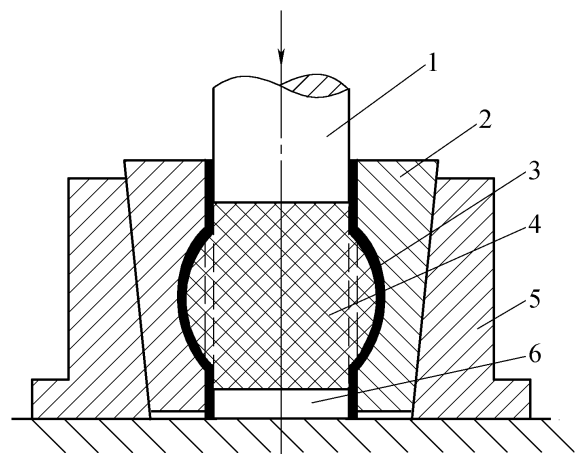
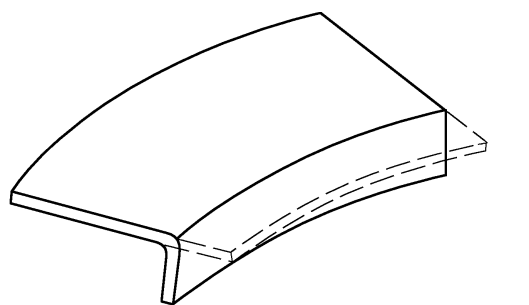


图 3 5 .11 软模胀形

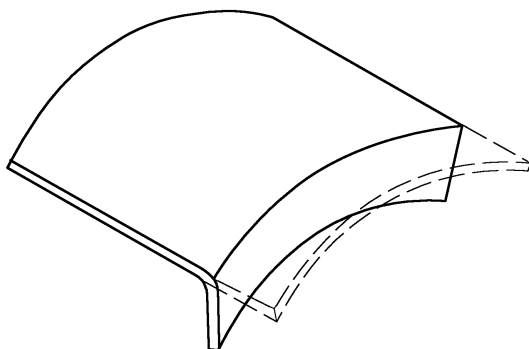
1—凸模;2—凹模;3—工件;4—橡胶;5—外套;6—垫块

### (3) 翻边

是在板料或半成品上沿一定的曲线翻起竖立边缘的冲压工序。按变形的性质,翻边可分为伸长翻边和压缩翻边。当翻边在平面上进行时,称平面翻边;当翻边在曲面上进行时,又称曲面翻边。如图 3 5 .12 所示。孔的翻边是伸长类平面翻边的一种特定形式,又称翻孔,其过程如图 3 5 .13 所示。



(a) 平面伸长翻边



(b) 曲面压缩翻边

图 3 5 .12 翻边

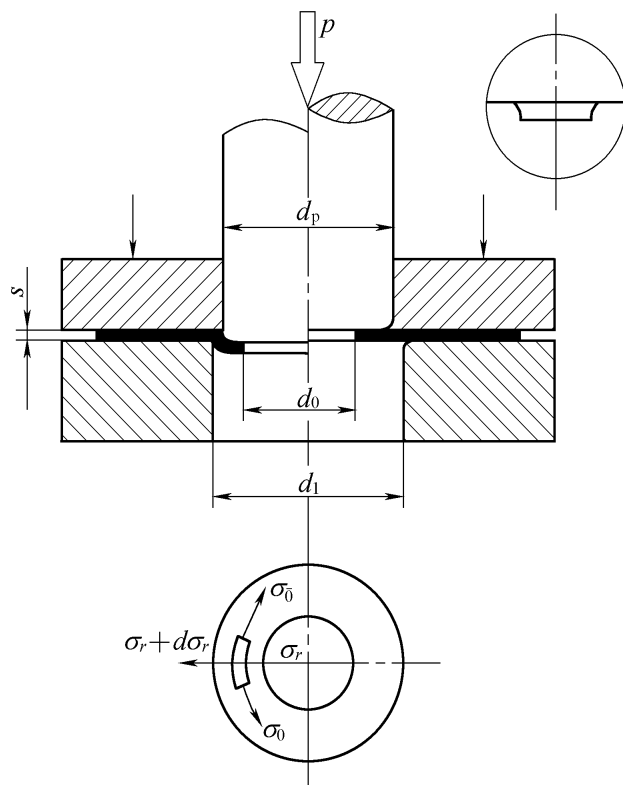


图 3 5 .13 翻孔过程

成形工序使冲压件具有更好的刚度和更加合理的空间形状。

### 3.6 锻压件结构设计

在设计锻压件结构和形状时,除满足使用性能要求外,还应考虑锻压设备和工具的特点。良好的锻压件结构工艺性应以结构合理、锻造方便、减少材料和工时的消耗和提高生产率为目的加以确定。在进行锻压件的结构设计时应注意的主要问题见表 3 6 .1 所示。

表 3 6 .1 锻压件的合理结构

图 例		说 明
不 合 理	合 理	
		<p>自由锻不易锻出锥形和楔形,设计时应尽量采用平直结构</p>

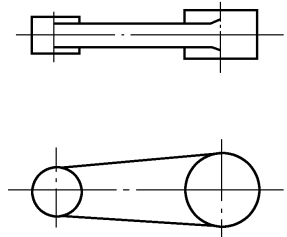
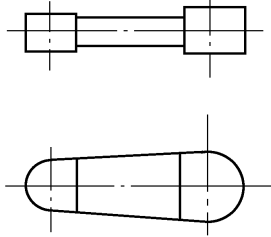
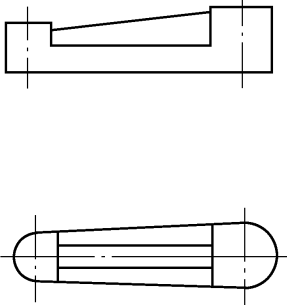
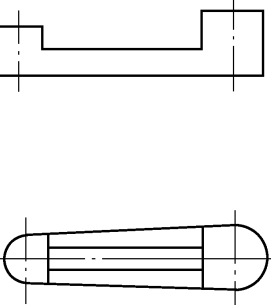
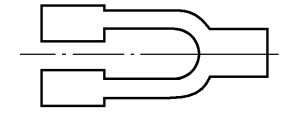
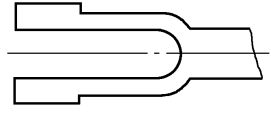
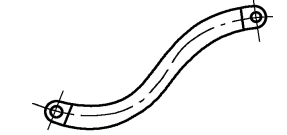
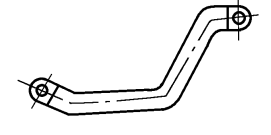
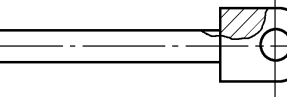
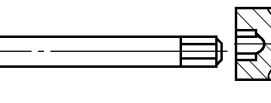
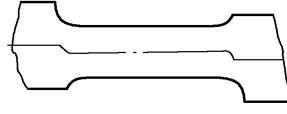
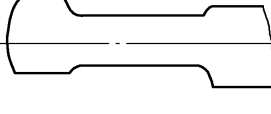
图 例		说 明
不 合 理	合 理	
		自由锻无法锻出几何形体(圆柱、立方体等)表面相贯的复杂形状。如图所示的圆柱体与平板相连接的形状比较复杂,采用自由锻制造困难
		自由锻件不应有加强肋、工字形截面等复杂形状。避免用肋板
		自由锻件的内部凸台是无法锻出的,应予以简化结构。如不合理图中叉形零件内部不应有凸台
		自由锻件应避免不必要的曲线轮廓
		当锻件具有复杂的形状或细长柄时,应设法改用几个较简单的部分组合或焊接。锻件形状应尽量简单
		模锻件的分模面尺寸应当是零件的最大尺寸,且分模面应为平面

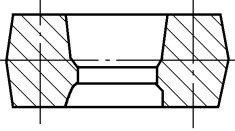
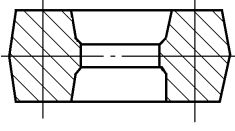
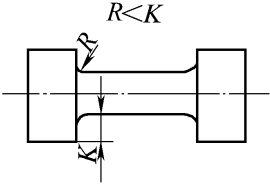
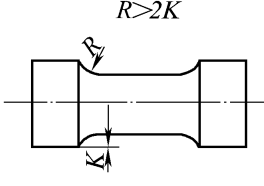
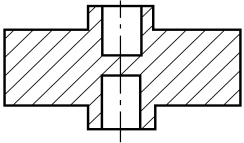
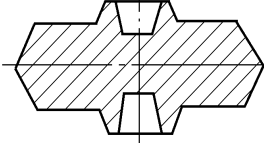
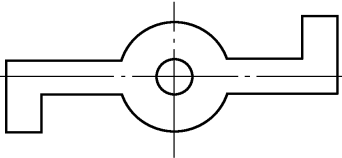
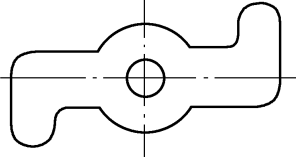
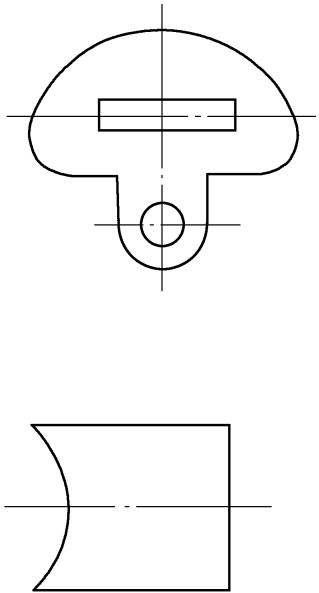
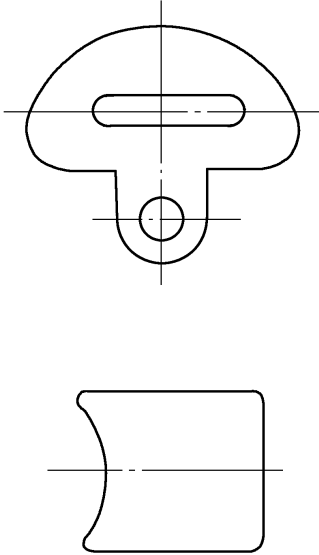
图 例		说 明
不 合 理	合 理	
		<p>对称形状的零件便于分模,应将模锻件尽量设计成对称的外形</p>
		<p>模锻件的圆角半径通常应设计得大一些,既可以改善锻造工艺性,又可以减少应力集中</p>
		<p>模锻件形状应便于脱模,内外表面都应有足够的拔模斜度,孔不宜太深,分模面尽量安排在中间</p>
		<p>冲压件的局部宽度都不应太小。否则将造成凹模难于制造,冲出的零件也难于保证质量</p>
		<p>冲压件外形尽可能对称,轮廓要平滑,孔应是圆的或方的,避免采用窄而长的细孔及单独伸出的细长结构等</p>

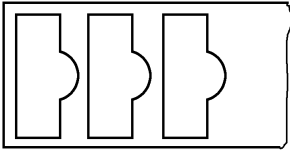
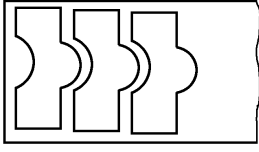

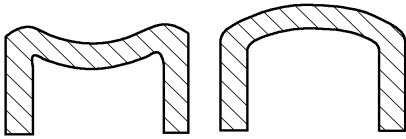
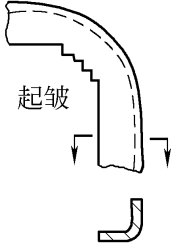
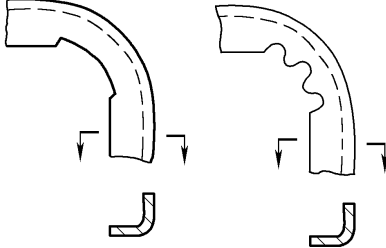
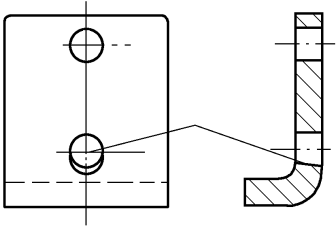
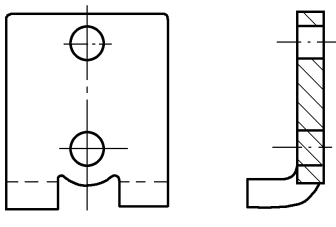
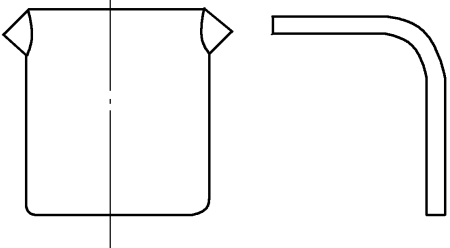
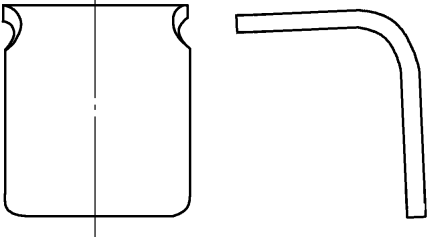
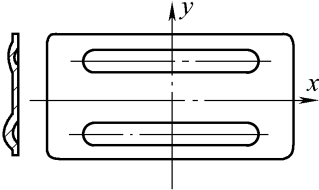
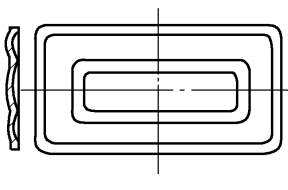
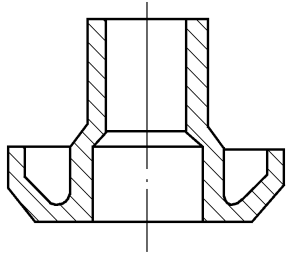
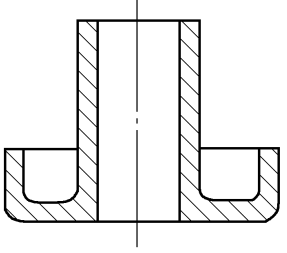
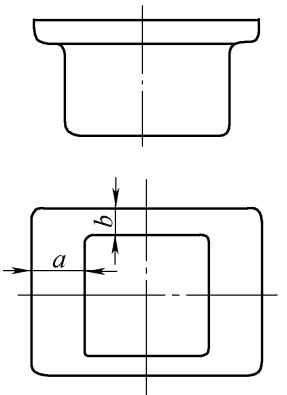
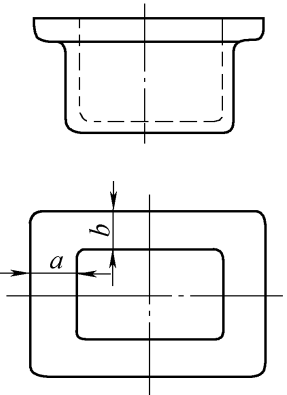
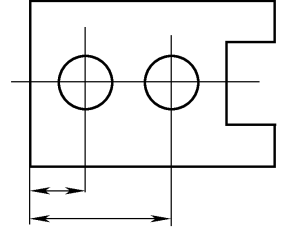
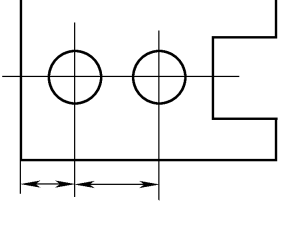
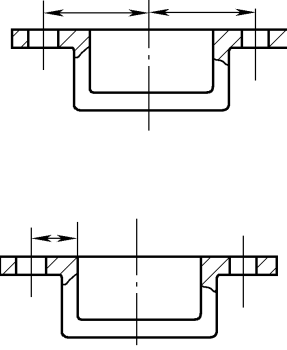
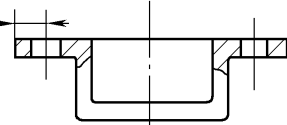
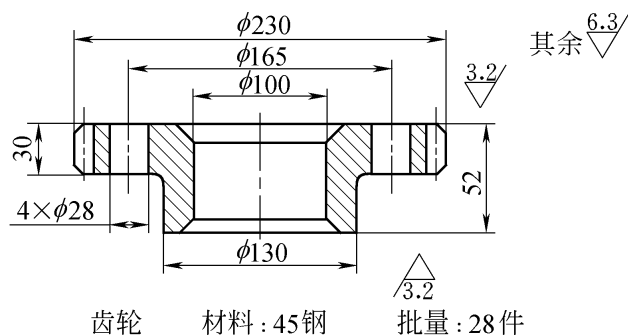
图 例		说 明
不 合 理	合 理	
		<p>璩 冲压件应考虑节约材料</p>
		<p>璩 冲压件外形应避免大的平面,否则将造成制模困难,零件的刚度也较差。如图可以设计成拱形结构解决</p>
		<p>璩 弯曲件在弯曲处要避免起皱。可切去弯角处的部分竖边加以解决</p>
		<p>璩 弯曲带孔的零件时,为避免孔的变形。可在零件的弯折圆角部分的曲线上冲出工艺孔或月牙槽,可防止弯曲时孔变形</p>
		<p>璩 对有宽度要求的薄板弯曲件在弯曲处要有切口,可避免弯曲处变宽</p>
		<p>璩 压肋能提高零件的刚度,但有方向性。压肋的形状尽量与零件外形相近或对称</p>



图 例		说 明
不 合 理	合 理	
		<p><b>璠</b> 拉深件结构应尽量简单,以减少拉深次数。如图所示,简化结构后,减少了加工工序,节约了金属材料</p>
		<p><b>璠</b> 拉深件周围凸边的大小尺寸和形状要合适,边宽最好相同</p>
		<p><b>璠</b> 冲压件标注尺寸时应考虑冲模磨损。以零件一边为基准标注尺寸,当冲模磨损后,将引起孔间距的误差。如图直接标注孔间距要求可较好地保证两孔之间的距离</p>
		<p><b>璠</b> 标注冲压件尺寸要考虑冲压过程。不合理的标注方法必须将坯料冲压成形后才能冲孔,加工困难。合理的标注可以在冲裁时一起完成冲孔,节省工序,提高了效率</p>

## 复习与思考题

- 3 - 1 为什么钢制机械零件需要锻造而不宜直接选用型材进行加工？
- 3 - 2 单晶体和多晶体塑性变形的实质各是什么？
- 3 - 3 区分冷变形和热变形。
- 3 - 4 冷变形强化对金属组织性能有何影响 ,在实际生产中怎样运用其有利因素？
- 3 - 5 再结晶对金属组织性能有何影响 ,在实际生产中怎样运用其有利因素？
- 3 - 6 锻造流线的存在对金属机械性能有何影响 ,在零件设计中应注意哪些问题？
- 3 - 7 为什么要规定锻造加热温度范围？
- 3 - 8 金属在加热时可能会出现哪些缺陷 ,如何预防？
- 3 - 9 自由锻有哪些主要工序？并叙述其应用范围。
- 3 - 10 设计自由锻零件时应注意哪些问题？
- 3 - 11 试确定下图所示零件的锻造工艺。



题 3 - 11 图

- 3 - 12 试比较各种模锻方法的工艺特点及应用。
- 3 - 13 生活用品中有哪些产品是板料冲压制成的？举例说明其冲压工序。
- 3 - 14 弯曲时 ,工件受力和变形的过程如何？易产生什么缺陷 ,如何防止？
- 3 - 15 拉深时 ,工件受力和变形的情况如何？拉深时常见的废品有哪些 ,如何防止？

## 第4章 焊 接

焊接是使相互分离的金属材料借助于原子间的结合力连接起来的一种热加工工艺方法。焊接连接性好、省工省料、结构重量轻,广泛应用于锅炉、压力容器、船舶、桥梁、化工设备等的制造。焊接方法很多,本章主要介绍各种焊接的工艺原理和方法以及常用金属材料的焊接性能和焊接结构工艺。

### 4.1 概 述

焊接是通过加热或加压,或者两者并用,以及用或不用填充材料,使工件达到结合的一种方法。其实质就是通过适当的物理—化学过程,使两个分离表面的金属原子接近到晶格距离(0.3~0.5 nm)形成金属键,从而使两金属连为一体。

焊接方法的种类很多,根据金属原子间结合方式的不同,可分为熔化焊、压力焊和钎焊三大类。以热源类型为横坐标,以两材料发生结合时的物理状态为纵坐标,用二元坐标法将焊接方法进行分类,见表4.1.1。

焊接方法的主要特点:

1) 节省材料,减轻重量 焊接的金属结构件可比铆接件节省材料10%~25%;采用点焊的飞行器结构重量明显减轻,油耗降低,运载能力提高。

2) 简化复杂零件和大型零件的制造过程 焊接方法灵活,可化大为小,以简拼繁,加工快,工时少,生产周期短。许多结构都以铸—焊、锻—焊的形式组合,简化了加工工艺。

3) 适应性强 多样的焊接方法几乎可焊接所有的金属材料和部分非金属材料。可焊范围较广,而且连接性能较好。焊接接头可达到与工件金属等强度或相应的特殊性能。

4) 满足特殊连接要求 不同材料焊接在一起,能使零件的不同部分或不同位置具备不同的性能,达到使用要求。如防腐容器的双金属筒体焊接、钻头工作部分与柄的焊接、水轮机叶片耐磨表面堆焊等。

5) 降低劳动强度,改善劳动条件。

尽管如此,焊接加工在应用中仍存在某些不足。例如,不同焊接方法的焊接性能有较大差别,焊接接头的组织不均匀,焊接热过程所造成的结构应力与变形以及各种裂纹问题等,都有待进一步研究和完善。

焊接方法在工业生产中主要用于:

1) 制造金属结构件 焊接方法广泛应用于各种金属结构件的制造,如桥梁、船舶、压力容器、化工设备、机动车辆、矿山机械、发电设备及飞行器等。

2) 制造机器零件和工具 焊接件具有刚性好、改型快、周期短、成本低的优点,适合于单件或小批量生产加工各类机器零件和工具。如机床机架和床身、大型齿轮和飞轮、各种切削工具



3) 修复 采用焊接方法修复某些有缺陷、失去精度或有特殊要求的工件,可延长使用寿命,提高使用性能。

近年来,焊接技术迅速发展,新的焊接方法不断出现,在应用了计算机技术后,使其功能大增。焊接的精密化和智能化必将效力无比。

## 4.2 手工电弧焊

手工电弧焊是熔化焊中最基本的一种焊接方法。它利用电弧产生的热熔化被焊金属,使之形成永久结合。由于它所需要的设备简单、操作灵活,可以对不同焊接位置、不同接头形式的焊缝方便地进行焊接,因此是目前应用最为广泛的焊接方法。

手工电弧焊按电极材料的不同可分为熔化极手工电弧焊和非熔化极手工电弧焊。非熔化极手工电弧焊如手工钨极气体保护焊。熔化极手工电弧焊是以金属焊条作电极,电弧在焊条端部和母材表面燃烧的方法。

图 4.2.1 是手工电弧焊示意图,图中的电路是以弧焊电源为起点,通过焊接电缆、焊钳、焊条、工件、接地电缆形成回路。在有电弧存在时形成闭合回路,形成焊接过程。焊条和工件在这里既作为焊接材料,也作为导体。焊接开始后,电弧的高热瞬间熔化了焊条端部和电弧下面的工件表面,使之形成熔池,焊条端部的熔化金属以细小的熔滴状过渡到熔池中去,与母材熔化金属混合,凝固后成为焊缝。

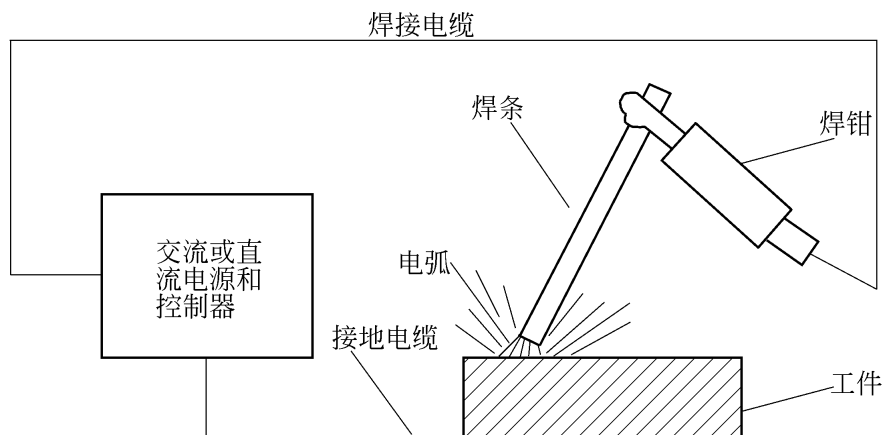


图 4.2.1 手工电弧焊示意图

手工电弧焊所用的设备需根据焊条和被焊材料选取。电源分为交流电和直流电两种。使用酸性焊条焊接低碳钢一般构件时,应优先考虑选用价格低廉、维修方便的交流弧焊机;使用碱性焊条焊接高压容器、高压管道等重要钢结构,或焊接合金钢、有色金属、铸铁时,则应选用直流弧焊机。购置能力有限而焊件材料的类型繁多时,可考虑选用通用性强的交、直流两用弧焊机。当采用某些碱性药皮焊条时,如结 507 时,必须选用直流焊接电源,而且要注意此时应将电焊机的负极接工件,正极接焊条,称为直流反接法;反之称为正接法。如图 4.2.2 所示。

### 4.2.1 焊接电弧

焊接电弧是指发生在电极与工件之间的强烈、持久的气体放电现象。

#### 1. 电弧的引燃

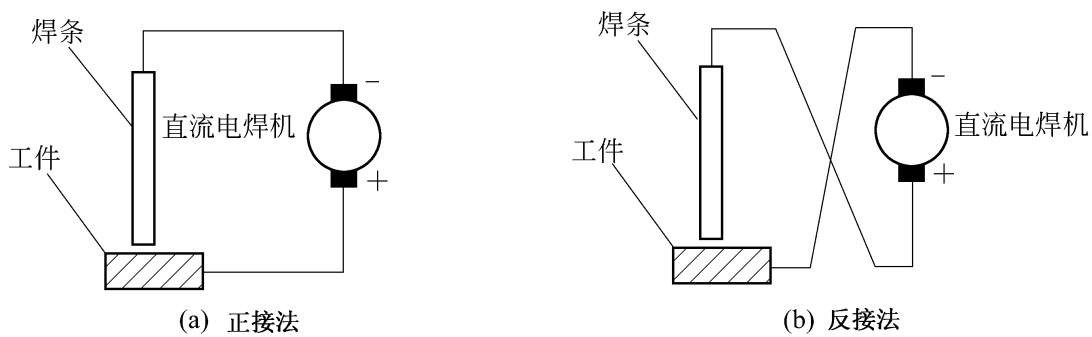


图 4 2 2 采用直流电焊接的极性接法

常态下的气体由中性分子或原子组成,不含带电粒子。要使气体导电,首先要有一个使其产生带电粒子的过程。操作中一般采用接触引弧。先将电极(钨棒或焊条)和焊件接触形成短路(图 4 2 3a)此时在某些接触点上产生很大的短路电流,温度迅速升高,为电子的逸出和气体电离提供能量条件,而后将电极提起一定距离( $< 5 \text{ mm}$ ,图 4 2 3b)。在电场力的作用下,被加热的阴极有电子高速逸出,撞击空气中的中性分子和原子,使空气电离成阳离子、阴离子和自由电子。这些带电粒子在外电场作用下定向运动,阳离子奔向阴极,阴离子和自由电子奔向阳极。在它们的运动过程中,不断碰撞和结合,产生大量的光和热,形成电弧(图 4 2 3c)。电弧的热量与焊接电流和电压的乘积成正比,电流愈大,电弧产生的总热量就愈大。

## 2. 电弧的组成

焊接电弧由阴极区、阳极区和弧柱区 3 部分组成(图 4 2 3c)。

阴极区因发射大量电子而消耗一定能量,产生的热量较少,约占电弧热的 36%。阳极表面受高速电子的撞击,传入较多的能量,因此阳极区产生的热量较多,占电弧热的 43%。其余 21% 左右的热量在弧柱区产生。

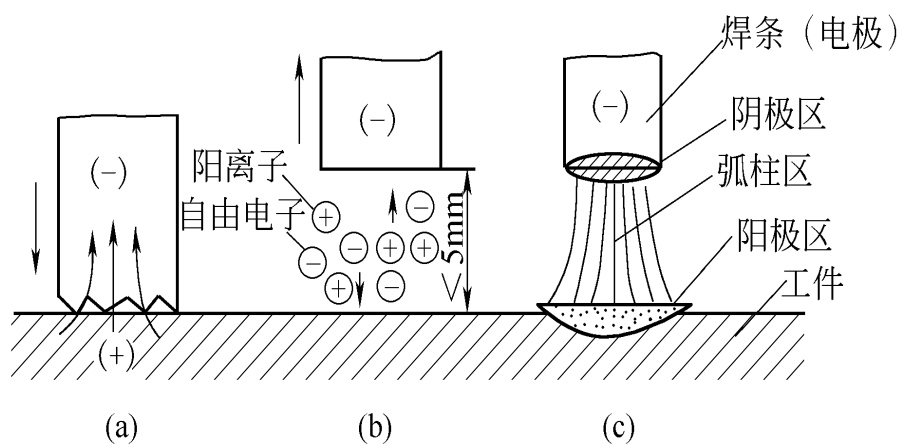


图 4 2 3 电弧的引燃

电弧中阳极区和阴极区的温度因电极的材料(主要是电极熔点)不同而有所不同。用钢焊条焊接钢材料时,阳极区热力学温度约  $2600 \text{ K}$ ,阴极区热力学温度约  $2400 \text{ K}$ ,弧柱区热力学温度高达  $5000 \sim 8000 \text{ K}$ 。正接时,电弧热量主要集中在焊件(阳极)上,有利于加快焊件熔化,保证足够的熔深,适用于焊接较厚的工件。反接时,焊条接阳极,适用于焊接有色金属及薄钢板,以避免烧穿焊件。

## 4 2 2 焊接接头

焊缝以及其周围受不同程度加热和冷却的母材是焊缝的热影响区,统称为焊接接头。

### 1. 焊缝形成过程

熔焊焊缝的形成经历了局部加热熔化,使分离工件的结合部位产生共同熔池,再经凝固结晶成为一个整体的过程。

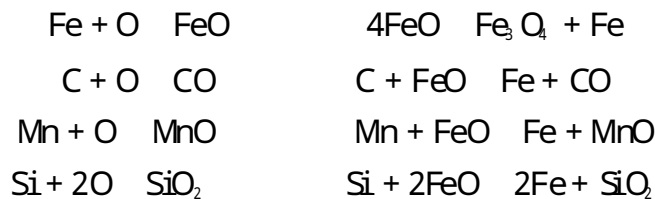
图 4 2 4 为焊缝形成示意图。在电弧高温作用下,焊条和工件同时产生局部熔化,形成熔池。熔化的填充金属呈球滴状过渡到熔池。电弧在沿焊接方向移动过程中,熔池前部(2-1-2区)不断参与熔化,并依靠电弧吹力和电磁力的作用,将熔化金属吹向熔池后部(2-3-2区),逐步脱离电弧高温而冷却结晶。所以电弧的移动形成动态熔池,熔池前部的加热熔化与后部的顺序冷却结晶同时进行,形成完整的焊缝。

焊条药皮在电弧高温下一部分分解为气体,包围电弧空间和熔池,形成保护层。另一部分直接进入熔池,与熔池金属发生冶金反应,并形成渣而浮于焊缝表面,构成渣保护。

### 2. 焊接冶金过程

电弧焊时,焊接区内各种物质在高温下相互作用,产生一系列变化的过程称为冶金过程。象在小型电弧炼钢炉中炼钢一样,熔池中进行着熔化、氧化、还原、造渣、精炼和渗合金等一系列物理化学过程。焊接的冶金过程与一般的冶炼过程相比较,有以下特点:温度远高于一般冶炼温度,因此金属元素强烈蒸发,并使电弧区的气体分解成原子状态,使气体的活性大为增强,导致金属元素烧损或形成有害杂质。冷却速度快,熔池体积小,四周又是冷的金属,熔池处于液态时间很短,一般在 10 秒钟左右,各种化学反应难以达到平衡状态致使化学成分不均匀,气体和杂质来不及浮出,从而产生气孔和夹渣等缺陷。

由于上述特点,所以在焊接过程中如不加以保护,空气中的氧、氮和氢等气体就会侵入焊接区,并在高温作用下分解出原子状态的氧、氮和氢,与金属元素发生一系列物理化学作用:



其结果是,钢中的一些元素被氧化,形成  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Mn} \cdot \text{SiO}_2$  等熔渣,使焊缝中 C、Mn、Si 等大量烧损。当熔池迅速冷却后,一部分氧化物熔渣残存在焊缝金属中,形成夹渣,显著降低焊缝的力学性能。

氢和氮在高温时能溶解于液态金属内,氮和铁还可以形成  $\text{Fe}_3\text{N}$ 、 $\text{Fe}_2\text{N}$ 。冷却后,一部分氮保留在钢的固溶体中, $\text{Fe}_3\text{N}$  则呈片状夹杂物留存在焊缝中,使焊缝的塑性和韧性下降。氢的存在

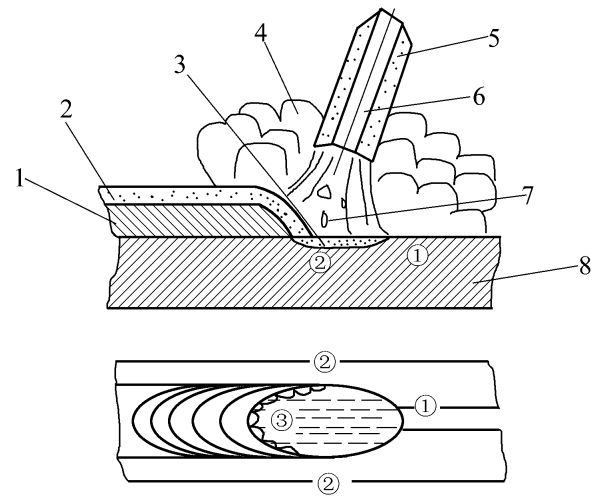


图 4 2 4 电弧焊焊缝形成示意图

1—已凝固的焊缝金属;2—熔渣;3—熔化金属(熔池);4—焊条药皮燃烧产生的保护气体;5—焊条药皮;6—焊条芯;7—金属熔滴;8—母材

则引起氢脆性,促进冷裂纹的形成,并且易造成气孔。

综上所述,为了保证焊缝质量,焊接过程中必须采取必要的工艺措施,来限制有害气体进入焊缝区,并补充一些烧损的合金元素。手工电弧焊焊条的药皮、埋弧自动焊的焊剂等均能起到这类作用。气体保护焊的保护气体虽不能补充金属元素,但也能起到保护作用。

### 4 2 3 焊条

#### 1. 焊条组成和作用

焊条由焊芯和药皮两部分组成。焊芯是金属丝,药皮是压涂在焊芯表面的涂料层。

##### (1) 焊芯

焊芯的作用,一是作为电极传导电流,二是熔化后作为填充金属与母材形成焊缝。焊芯的化学成分和杂质含量直接影响焊缝质量。生产中有不同用途的焊丝(焊芯),如焊条焊芯、埋弧焊焊丝、CO<sub>2</sub>焊焊丝、电渣焊焊丝等。

##### (2) 药皮

药皮的作用,一是改善焊接工艺性,如药皮中含有稳弧剂,使电弧易于引燃和保持燃烧稳定。二是对焊接区起保护作用。药皮中含有造渣剂、造气剂等,造渣后熔渣与药皮中有机物燃烧产生的气体对焊缝金属起双重保护作用。三是起有益的冶金化学作用。药皮中含有脱氧剂、合金剂、稀渣剂等,使熔化金属顺利地进行脱氧、脱硫、去氢等冶金化学反应,并补充被烧损的合金元素。

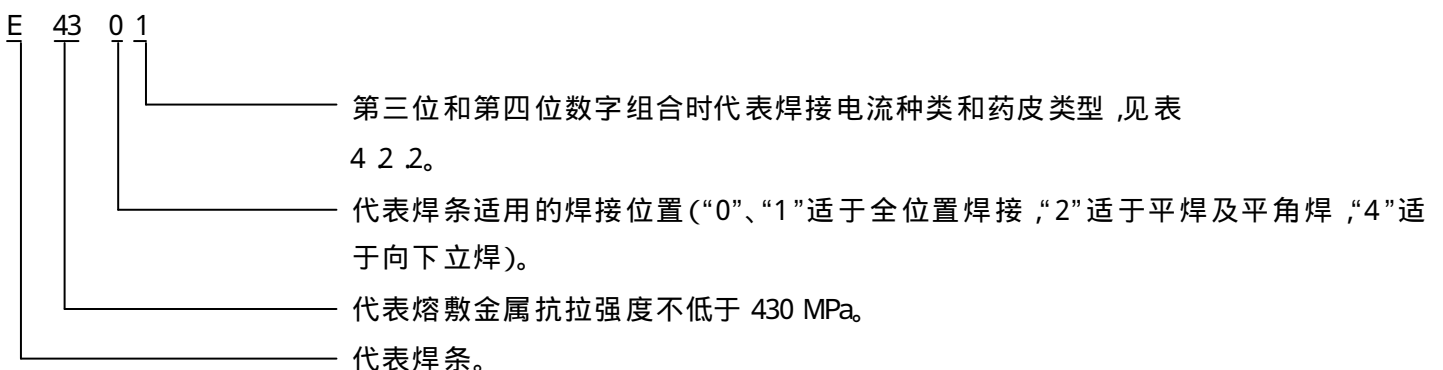
#### 2. 焊条分类

焊条按用途不同分为十大类:结构钢焊条,钼和铬钼耐热钢焊条,低温钢焊条,不锈钢焊条,堆焊焊条,铸铁焊条,镍及镍合金焊条,铜及铜合金焊条,铝及铝合金焊条,特殊用途焊条等。其中结构钢焊条分为碳钢焊条和低合金钢焊条两类。

结构钢焊条按药皮性质不同可分为酸性焊条和碱性焊条两种。酸性焊条的药皮中含有多量酸性氧化物(如SiO<sub>2</sub>、MnO<sub>2</sub>等),碱性焊条药皮中含有多量碱性氧化物(如CaO等)和萤石(CaF<sub>2</sub>)。由于碱性焊条药皮中不含有机物,药皮产生的保护气体中氢含量极少,所以又称为低氢焊条。

#### 3. 焊条型号与牌号

焊条型号是国家标准中规定的焊条代号。焊接结构生产中应用最广的碳钢焊条和低合金钢焊条,相应的国家标准为GB/T 5117—1995和GB/T 5118—1995。标准规定,碳钢焊条型号由字母“E”和四位数字组成。如“E4301”,其含义如下:



在我国已公布的碳钢焊条型号中,代表熔敷金属抗拉强度最小值的数字仅有“43”和“50”系列两种。



焊条牌号是焊条生产行业统一的焊条代号。表 4.2.1 为用途不同的焊条分类与对应牌号。焊条牌号前的字母表示焊条类别，“×××”代表数字，前两位数字代表焊缝金属抗拉强度等级。末尾数字表示焊条的药皮类型和焊接电流种类(表 4.2.2)。表 4.2.3 列举出部分常用碳钢焊条型号与对应的焊条牌号及数字含义。

表 4.2.1 焊条用途类别与焊条牌号表示方法

名称	焊条牌号	名称	焊条牌号
结构钢焊条	J×××	铸铁焊条	Z×××
钼及铬钼耐热钢焊条	R×××	镍及镍合金焊条	Ni×××
低温钢焊条	W×××	铝及铝合金焊条	L×××
不锈钢焊条	G×××	铜及铜合金焊条	T×××
	A×××	特殊用途焊条	TS×××
堆焊焊条	D×××		

表 4.2.2 焊条牌号末尾数字与焊条药皮类型及焊接电流种类之间的关系

末尾数字	药皮类型	焊接电流种类	末尾数字	药皮类型	焊接电流种类
××0	不属已规定的类型		××5	纤维素型	交流或直流正、反接
××1	氧化钛型	交流或直流正、反接	××6	低氢钾型	交流或直流反接
××2	氧化钛钙型		××7	低氢钠型	直流反接
××3	钛铁矿型		××8	石墨型	交流或直流正、反接
××4	氧化铁型		××9	盐基型	直流反接

表 4.2.3 部分常用碳钢焊条型号与牌号对应表

焊条型号	焊条牌号	熔敷金属抗拉强度数值( )		药皮种类	焊条类别	电流种类与极性	用途
		kgf/mm <sup>2</sup>	MPa				
E4301	J423	43	420	钛铁矿型	酸性焊条	交流或直流正、反接	较重要的碳钢结构
E5001	J503	50	490				
E4303	J422	43	420	钛钙型		交流或直流反接	一般碳钢结构
E5003	J502	50	490				
E4311	J425	43	420	高纤维素钾型		交流或直流正接	较重要的碳钢结构
E5011	J505	50	490				
E4320	J424	43	420	氧化铁型	碱性焊条	直流反接	重要碳钢、低合金钢结构
E4327	J424Fe	43	420	铁粉氧化铁型			
E4315	J427	43	420	低氢钠型	碱性焊条	交流或直流反接	重要碳钢、低合金钢结构
E5015	J507	50	490				
E4316	J426	43	420	低氢钾型	碱性焊条	交流或直流反接	重要碳钢、低合金钢结构
E5016	J506	50	490				
E5018	J506Fe	50	490	铁粉低氢钾型	碱性焊条	交流或直流反接	重要碳钢、低合金钢结构

焊条型号是根据熔敷金属抗拉强度、药皮类型、焊接位置、电流种类及极性划分的,以便供用户选焊条时参考。但同一种焊条型号可能有不同性能的几种焊条牌号与之对应,如 J427 和 J427Ni 属于同一种焊条型号 E4315。

#### 4. 焊条的选用原则:

##### (1) 等强度原则

焊接低碳钢和低合金钢时,一般应使焊缝金属与母材等强度,即选用与母材同强度等级的焊条。

##### (2) 同成分原则

焊接耐热钢、不锈钢等金属材料时,应使焊缝金属的化学成分与母材的化学成分相同或相近,即按母材化学成分选用相应成分的焊条。

##### (3) 抗裂缝原则

焊接刚度大、形状复杂、要承受动载荷的结构时,应选用抗裂性好的碱性焊条,以免在焊接和使用过程中接头产生裂纹。

##### (4) 抗气孔原则

受焊接工艺条件的限制,如对焊件接头部位的油污、铁锈等清理不便,应选用抗气孔能力强的酸性焊条,以免焊接过程中气体滞留于焊缝中,形成气孔。

##### (5) 低成本原则

在满足使用要求的前提下,尽量选用工艺性能好、成本低和效率高的焊条。

此外,应根据焊件的厚度、焊缝位置等条件,选用不同直径的焊条。一般焊件愈厚,选用焊条的直径就愈大。

### 4.2.4 焊接接头的金属组织与性能

#### 1. 焊接工件温度的变化与分布

焊接时,电弧沿着工件逐渐移动并对工件进行局部加热。因此在焊接过程中,焊缝区的金属都是由常温状态开始被加热到较高的温度,然后再逐渐冷却到常温。但随着各点金属所在位置的不同,其最高加热温度是不同的。图 4.2.5 是焊接时焊件横截面上不同点的温度变化情况,由于各点离焊缝中心距离不同,所以各点的最高温度不同。又因热传导需要一定时间,所以各点是在不同时间达到该点最高温度的。但总的看来,在焊接过程中,焊缝受到一次冶金过程,焊缝附近区相当于受到一次不同规范的热处理,因此必然有相应的组织与性能的变化。

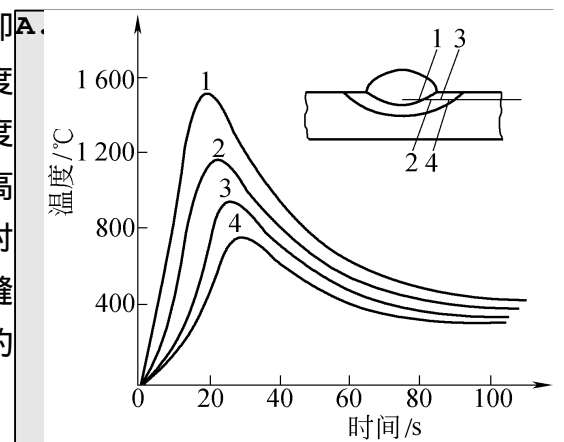


图 4.2.5 焊缝区各点温度变化示意图

#### 2. 焊接接头金属组织与性能的变化

现以低碳钢为例,来说明焊缝和焊缝附近区由于受到电弧不同加热而产生的金属组织与性能的变化。如图 4.2.6,左侧下部是焊件的横截面,上部是相应各点在焊接过程中被加热的最高温度曲线(并非某一瞬时该截面的实际温度分布曲线)。图中 1、2、3 等各段金属组织性能的变化,可从右侧所示的部分铁—碳合金状态图来对照分析。工件截面图上已示出了相应各点的金属组织变化情况。

##### (1) 焊缝金属

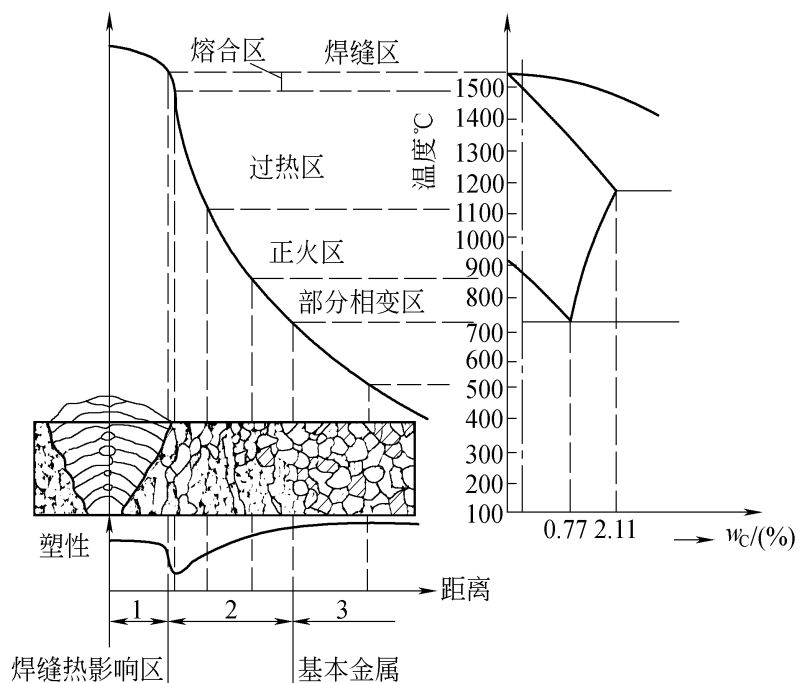


图 4.2.6 低碳钢焊接热影响区组织变化示意图

焊缝金属的结晶过程,首先从熔池和母材的交界处开始,然后以联生结晶的方式,即依附于母材晶粒现成表面而形成共同晶粒的方式向熔池中心生长,形成柱状晶,如图 4.2.7 所示。因结晶时各个方向冷却速度不同,因而形成柱状的铸态组织,由铁素体和少量珠光体组成。

因结晶是从熔池底壁的半熔化区开始逐渐进行的,低熔点的硫磷杂质和氧化铁等易偏析集中在焊缝中心区,将影响焊缝的力学性能,因此对焊条或其他焊接材料应慎重选用。

焊接时,熔池金属受电弧吹力和保护气体吹动,使熔池底壁的柱状晶体成长受到干扰,因此柱状晶体呈倾斜层状,晶粒有所细化。又因焊接材料的渗合金作用,焊缝金属中锰、硅等合金元素含量可能比基本金属高,所以焊缝金属的性能可不低于基本金属。

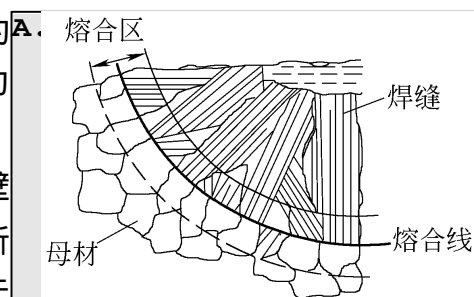


图 4.2.7 焊缝的柱状晶

## (2) 焊接热影响区

是指焊缝两侧因焊接热作用而发生组织性能变化的区域。由于焊缝附近各点受热情况不同,热影响区可分为熔合区、过热区、正火区和部分相变区等。

1) 熔合区 是焊缝和基本金属的交界区,相当于加热到固相线和液相线之间,焊接过程中母材部分熔化,所以也称为半熔化区。熔化的金属凝固成铸态组织,未熔化金属因加热温度过高而成为过热粗晶。在低碳钢焊接接头中,熔合区虽然很窄(约 0.1~1 mm),但因强度、塑性和韧性都下降,而此处接头断面发生变化,引起应力集中,在很大程度上决定着焊接接头的性能。

2) 过热区 被加热到  $A_c3$  以上 100~200 °C 至固相线温度区间,奥氏体晶粒急剧长大,形成过热组织,因而过热区的塑性及韧性降低。对于易淬火硬化钢材,此区脆性更大。

3) 正火区 被加热到  $A_c3$  至  $A_c3$  以上 100~200 °C 区间,金属发生重结晶,冷却后得到均匀而细小的铁素体和珠光体组织,其机械性能优于母材。

4) 部分相变区 相当于加热到  $A_c1 \sim A_c3$  温度区间。珠光体和部分铁素体发生重结晶,使

晶粒细化,部分铁素体来不及转变,冷却后晶粒大小不匀,因此力学性能稍差。

从图4 2 6左侧缝焊横截面的下部所示的性能变化曲线可以看出,在焊接热影响区中,熔合区和过热区的性能最差,产生裂缝和局部破坏的倾向性也最大,应使之尽可能减小。

#### 4 2 5 焊接应力与变形

金属构件在焊接以后,总要发生变形和产生焊接应力,且二者是伴生的。

焊接应力的存在,对构件质量、使用性能和焊后机械加工精度都有很大影响,甚至导致整个构件断裂,焊接变形不仅给装配工作带来很大困难,还会影响构件的工作性能。变形量超过允许数值时必须进行矫正,矫正无效时只能报废。因此,在设计和制造焊接结构时,应尽量减小焊接应力和变形。

(1) 焊接过程中,对焊接件进行不均匀加热和冷却,是产生焊接应力和变形的根本原因。

(2) 常见的焊接变形有收缩变形、角变形、弯曲变形、波浪变形和扭曲变形等五种形式(图4 2 8)。

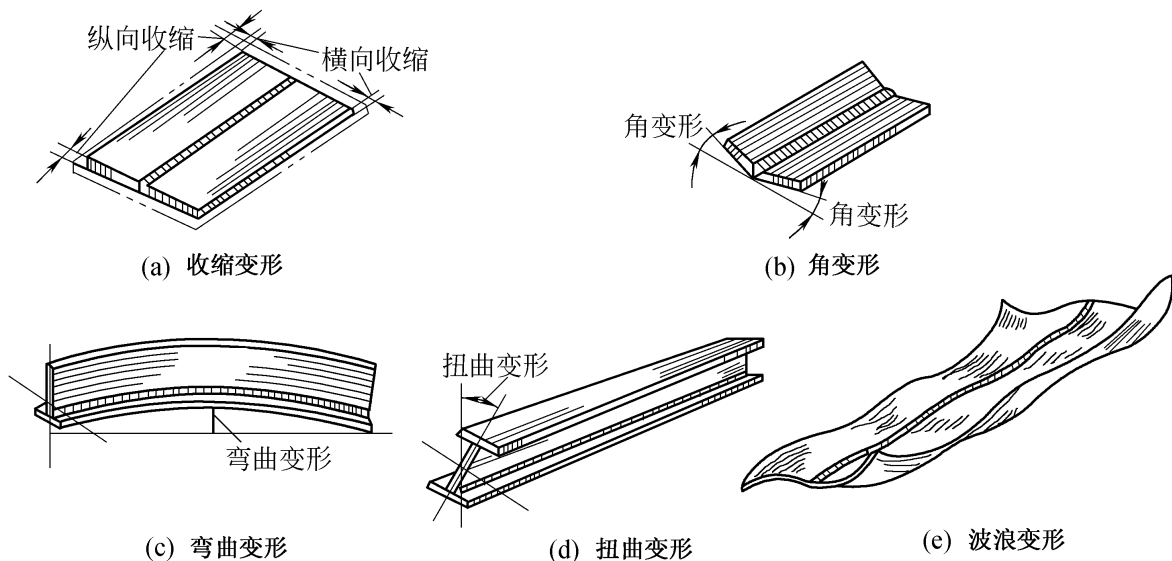


图4 2 8 焊接变形的基本形式

收缩变形是由于焊缝金属沿纵向和横向的焊后收缩而引起的;角变形是由于焊缝截面上下不对称,焊后沿横向上下收缩不均匀而引起的;弯曲变形是由于焊缝布置不对称,焊缝较集中的一侧纵向收缩较大而引起的;扭曲变形常常是由于焊接顺序不合理而引起的;波浪变形则是由于薄板焊接后焊缝收缩时,产生较大的收缩应力,使焊件丧失稳定性而引起的。

(3) 减少焊接应力与变形的措施:除了设计时应考虑之外,可采取一定的工艺措施,有预留变形量、反变形法、刚性固定法、锤击焊缝法、加热“减应区”法等。重要的是,选择合理的焊接顺序,尽量使焊缝自由收缩。焊前预热和焊后缓冷也很有效。详细可参阅有关资料。

### 4 3 其他焊接方法

#### 4 3.1 埋弧自动焊

埋弧焊(SAW)又称焊剂层下电弧焊。它是通过保持在光焊丝和工件之间的电弧将金属加

热,使被焊件之间形成刚性连接。按自动化程度的不同,埋弧焊分为半自动焊(移动电弧是手工操作)和自动焊。这里所指的埋弧焊都是指埋弧自动焊,半自动焊已基本上被气体保护焊代替。

### 1. 埋弧自动焊的焊接过程

如图4-3-1所示,埋弧自动焊时,焊剂由给送焊剂管流出,均匀地堆敷在装配好的焊件(母材)表面。焊丝由自动送丝机构自动送进,经导电嘴进入电弧区。焊接电源分别接在导电嘴和焊件上,以便产生电弧。给送焊剂管、自动送丝机构及控制盘等通常都装在一台电动小车上。小车可以按调定的速度沿着焊缝自动行走。

颗粒状焊剂层下的焊丝末端与母材之间产生电弧,电弧热使邻近的母材、焊丝和焊剂熔化,并有部分被蒸发。焊剂蒸气将熔化的焊剂(熔渣)排开,形成一个与外部空气隔绝的封闭空间,这个封闭空间不仅很好地隔绝了空气与电弧和熔池的接触,而且可完全阻挡有害电弧光的辐射。电弧在这里继续燃烧,焊丝便不断地熔化,呈滴状进入熔池并与母材中熔化的金属以及焊剂提供的合金元素相混合。熔化的焊丝不断地被补充,送入到电弧中,同时不断地添加焊剂。随着焊接过程的进行,电弧向前移动,焊接熔池随之冷却而凝固,形成焊缝。密度较小的熔化焊剂浮在焊缝表面形成熔渣层。未熔化的焊剂可回收再用。

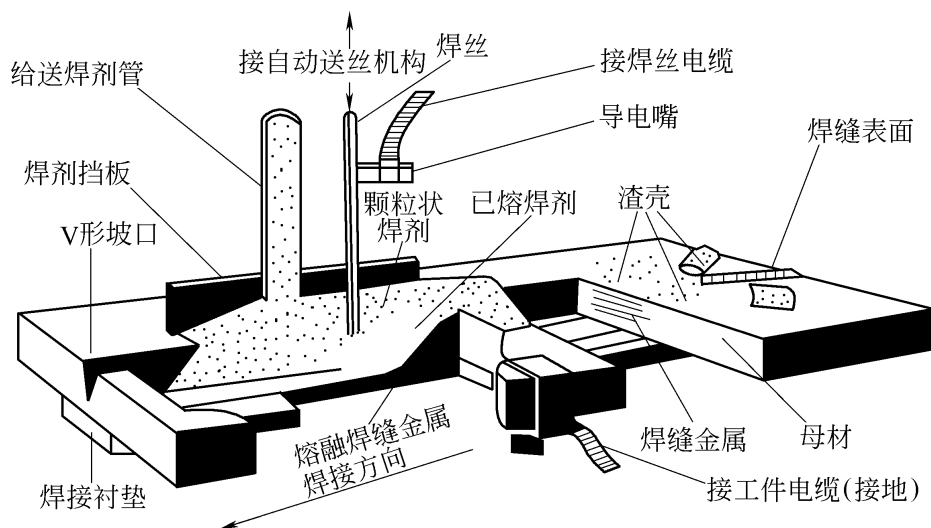


图4-3-1 埋弧自动焊方法

### 2. 埋弧自动焊的特点及应用

#### (1) 焊接质量好

焊接过程能够自动控制,各项工艺参数可以调节到最佳数值,焊缝的化学成分比较均匀和稳定,焊缝光洁平整,有害气体难以侵入,熔池金属冶金反应充分,焊接缺陷较少。

#### (2) 生产率高

焊丝从导电嘴伸出长度较短,可用较大的焊接电流,而且连续施焊的时间较长,这样就能提高焊接速度。同时,焊件厚度在14 mm以内的对接焊缝可不开坡口,不留间隙,一次焊成,故其生产率高。

#### (3) 节省焊接材料

焊件可以不开坡口或开小坡口,可减少焊缝中焊丝的填充量,也可减少因加工坡口而浪费掉的焊件材料。同时,焊接时金属飞溅少,又没有焊条头的损失,所以可节省焊接材料。

#### (4) 易实现自动化,劳动条件好,强度低,操作简单。

埋弧自动焊的缺点是 适应性差 ,通常只适用于焊接水平位置的直缝和环缝 ,不能焊接空间焊缝和不规则焊缝 ,对坡口的加工、清理和装配质量要求较高。

埋弧自动焊通常用于碳钢、低合金结构钢、不锈钢和耐热钢等中厚板结构的长直缝、直径大于 300 mm 环缝的平焊。此外 ,它还用于耐磨、耐腐蚀合金的堆焊、大型球墨铸铁曲轴以及镍合金、铜合金等材料的焊接。

### 4 3 2 气体保护电弧焊

气体保护焊是指用外加气体作为电弧介质并保护电弧和焊接区的电弧焊。

气体保护焊是明弧焊接 ,焊接时便于监视焊接过程 ,故操作方便 ,可实现全位置自动焊接 ,焊后还不用清渣 ,可节省大量辅助时间 ,大大提高了生产率。另外 ,由于保护气流对电弧有冷却压缩作用 ,电弧热量集中 ,因而焊接热影响区窄 ,工件变形小 ,特别适合于薄板焊接。

#### 1. 氩弧焊

氩弧焊是以氩(Ar)气作为保护气体的气体保护电弧焊。氩气是一种惰性气体 ,在高温下 ,它不与金属和其他任何元素起化学反应 ,也不溶于金属 ,因此保护效果良好 ,所焊接头质量高。

按使用的电极不同 ,氩弧焊可分为不熔化极氩弧焊即钨极氩弧焊(TIG 焊)和熔化极氩弧焊(MIG 焊)两种 ,如图 4 3 2 所示。

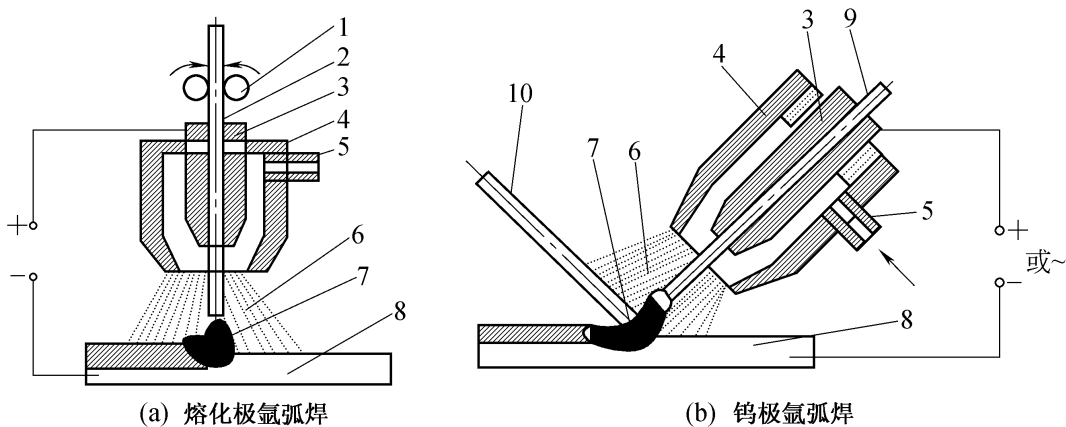


图 4 3 2 氩弧焊示意图

1— 送丝轮 ; 2— 焊丝 ; 3— 导电嘴 ; 4— 喷嘴 ; 5— 进气管 ;  
6— 氩气流 ; 7— 电弧 ; 8— 工件 ; 9— 钨极 ; 10— 填充焊丝

#### (1) 钨极氩弧焊(TIG 焊)

常采用熔点较高的钍钨棒或铈钨棒作为电极 ,焊接过程中电极本身不熔化 ,故属不熔化极电弧焊。钨极氩弧焊又分为手工焊和自动焊两种。焊接时填充焊丝在钨极前方添加。当焊接薄板时 ,一般不需开坡口和加填充焊丝。

钨极氩弧焊的电流种类与极性的选择原则是 :焊接铝、镁及其合金时 ,采用交流电 ,焊其他金属(低合金钢、不锈钢、耐热钢、钛及钛合金、铜及铜合金等)采用直流正接。由于钨极的载流能力有限 ,其电功率受到限制 ,所以钨极氩弧焊一般只适于焊接厚度小于 6 mm 的工件。

#### (2) 熔化极氩弧焊(MIG 焊)

熔化极氩弧焊是以连续送进的焊丝作为电极 ,电弧产生在焊丝与工件之间 ,焊丝不断送进 ,并熔化过渡到焊缝中去 ,因而焊接电流可大大提高。

熔化极氩弧焊可分为半自动焊和自动焊两种,一般采用直流反接法。

与 TIG 焊相比, MIG 焊可采用高密度电流,母材熔深大,填充金属熔敷速度快,生产率高。

MIG 焊和 TIG 焊一样,几乎可焊接所有的金属,尤其适合于焊接铝及铝合金、铜及铜合金以及不锈钢等材料。主要用于中、厚板的焊接。目前采用熔化极脉冲氩弧焊可以焊接薄板,进行全位置焊接、实现单面焊双面成型以及封底焊。

## 2. CO<sub>2</sub> 气体保护焊

CO<sub>2</sub> 气体保护焊是利用廉价的 CO<sub>2</sub> 作为保护气体的电弧焊。CO<sub>2</sub> 保护焊的焊接装置如图 4 3 3 所示。它是利用焊丝作电极,焊丝由送丝机构通过软管经导电嘴送出。电弧在焊丝与工件之间产生。CO<sub>2</sub> 气体从喷嘴中以一定的流量喷出,包围电弧和熔池,从而防止空气对液体金属的有害作用。CO<sub>2</sub> 保护焊可分为自动焊和半自动焊。目前应用较多的是半自动焊。

CO<sub>2</sub> 气体保护焊除具有前述的气体保护焊的那些优点外,还有焊缝含氢量低,抗裂性能好;CO<sub>2</sub> 气体具有价格便宜、来源广泛,生产成本低等优点。

由于 CO<sub>2</sub> 气体是氧化性气体,高温时可分解成 CO 和氧原子,易造成合金元素烧损,焊缝吸氧,导致电弧稳定性差、飞溅较多、弧光强烈、焊缝表面成形不够美观等缺点。若控制或操作不当,还容易产生气孔。为保护焊缝的合金元素,须采用含锰、硅较高的焊接钢丝或含有相应合金元素的合金钢焊丝。

常用的 CO<sub>2</sub> 保护焊焊丝是 H08Mn2SiA,适于焊接低碳钢和普通低合金结构钢( $\sigma_s < 600$  MPa)。还可使用 Ar 和 CO<sub>2</sub> 气体混合保护,焊接强度级别较高的普通低合金结构钢。为了稳定电弧,减少飞溅,CO<sub>2</sub> 保护焊采用直流反接。

由于 CO<sub>2</sub> 保护焊的优点较多,目前已广泛应用于机械制造业各部门中。

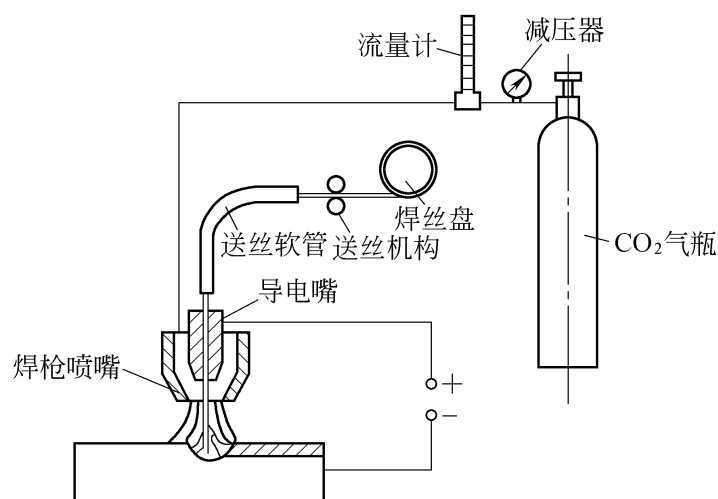


图 4 3 3 CO<sub>2</sub> 焊示意图

## 4 3 3 气焊和气割

### 1 气焊

气焊是利用气体火焰作热源的焊接方法。最常用的是氧 - 乙炔焊,利用氧 - 乙炔焰进行焊接。

乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)为可燃气体,氧气为助燃气体。乙炔和氧气在焊炬中混合均匀后从焊嘴喷出燃烧,将焊件和焊丝熔化形成熔池,冷却凝固后形成焊缝,如图 4 3 4 所示。气焊时气体燃烧,产生

大量的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  气体笼罩熔池，起到保护作用。气焊使用不带药皮的光焊丝作填充金属。

气焊设备简单、操作灵活方便、不需电源，但气焊火焰温度较低（最高约  $3150^\circ\text{C}$ ），且热量较分散，生产率低，工件变形大，所以应用不如电弧焊广泛。主要用于焊接厚度在  $3\text{mm}$  以下的薄钢板、铜、铝等有色金属及其合金、低熔点材料以及铸铁焊补等。气焊设备由氧气瓶、乙炔瓶、减压器、回火保险器及焊炬等组成。如图 4.3.5、图 4.3.6 所示。

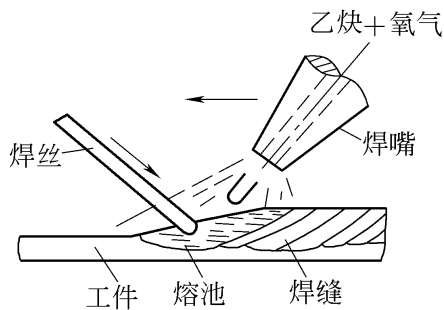


图 4.3.4 气焊示意图

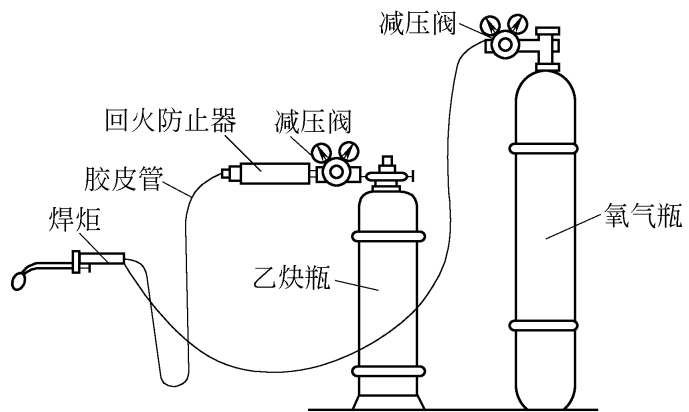


图 4.3.5 气焊设备及其连接

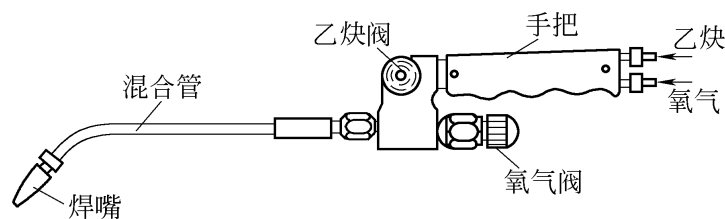


图 4.3.6 焊炬

### (1) 气焊火焰的种类及应用

气焊时通过调节氧气阀和乙炔阀，可以改变氧气和乙炔的混合比例，从而得到三种不同的气焊火焰：中性焰、碳化焰和氧化焰，如图 4.3.7 所示。

1) 中性焰（正常焰） 中性焰是指在一次燃烧区内既无过量氧又无游离碳的火焰（最高温度  $3100 \sim 3200^\circ\text{C}$ ），中性焰中氧和乙炔的比例为  $1 \sim 1.2$ 。其火焰由焰芯、内焰、外焰三部分组成。焰芯呈亮白色清晰明亮的圆锥形，内焰的颜色呈淡橘红色，外焰为橙黄色不甚明亮。由于内焰温度高（约  $3150^\circ\text{C}$ ），又具有还原性（含有一氧化碳和氢气），故最适宜气焊工作。中性焰使用较多，如焊接低碳钢、中碳钢、低合金钢、紫铜、铝合金等。

2) 碳化焰 当氧气和乙炔的比例小于 1 时，得到的火焰是碳化焰。向火焰中提供的氧气量不足而乙炔过剩，使火焰焰芯拉长，白炽的碳层加厚呈羽翅状延伸入内焰区中。整个火焰燃烧软弱无力，冒黑烟。用此种火焰焊接金属能使金属增碳，通常用于焊接高碳钢、高速钢、铸铁及硬质合金等。

3) 氧化焰 当氧气和乙炔的比例大于  $1.2$  时，得到的火焰是氧化焰。火焰中有过量的氧，焰芯变短变尖，内焰区消失，整个火焰长度变短，燃烧有力并发出响声。用此种火焰焊接金属

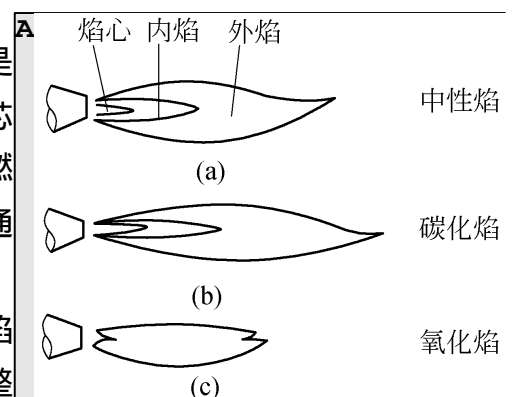


图 4.3.7 气焊火焰



能使熔池氧化沸腾,钢性能变脆,故除焊接黄铜之外,一般很少使用。

## (2) 接头形式和焊接准备

气焊可以进行平、立、横、仰等各种空间位置的焊接。其接头型式也有对接、搭接、角接和T型接头等。在气焊前,必须彻底清除焊丝和焊件接头处表面的油污、油漆、铁锈以及水分等,否则不能进行焊接。

## (3) 焊丝与焊剂

在焊接时,气焊的焊丝作为填充金属,与熔化的母材一起形成焊缝,因此焊丝质量对焊件性能有很大的影响。焊接时常根据焊件材料选择相应的焊丝。

焊剂的作用是保护熔池金属,除去焊接过程中形成的氧化物,增加液态金属的流动性。焊接低碳钢时,由于中性焰本身具有相当的保护作用,可不用焊剂。我国气焊焊剂的主要牌号有CJ101(用于焊接不锈钢、耐热钢)、CJ201(用于焊接铸铁)、CJ301(用于焊接铜合金)、CJ401(用于焊接铝合金)。焊剂的主要成分有硼酸、硼砂、碳酸钠等。

## 2. 气割

气割是利用高温的金属在纯氧中燃烧而将工件分离的加工方法。气割使用的气体 and 供气装置可与气焊通用。

气割时,先用氧—乙炔焰将金属加热到燃点,然后打开切割氧阀门,放出一股纯氧气流,使高温金属燃烧。燃烧后生成的液体熔渣,被高压氧流吹走,形成切口,如图4.3.8所示。金属燃烧放出大量的热,又预热了待切割的金属。所以气割是预热—燃烧—吹渣形成切口不断重复进行的过程。气割所用的割炬与焊炬有所不同,多了一个切割氧气管和切割氧阀门。

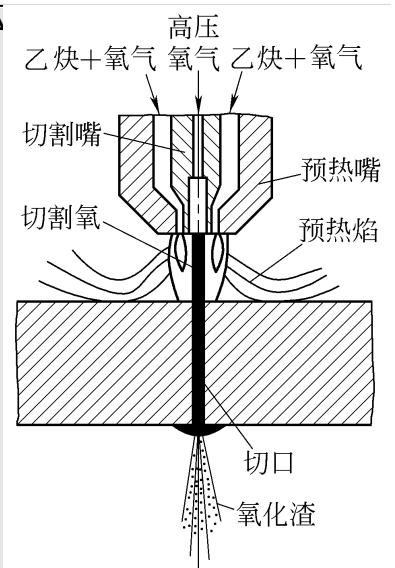


图 4 3 8 气割

符合下列条件的金属才能进行气割。

1) 金属的燃点应低于本身的熔点,否则变为熔割,使切割质量降低,甚至不能切割。

2) 金属氧化物的熔点应低于金属本身的熔点。否则高熔点的氧化物会阻碍着下层金属与氧气流接触,使气割无法继续进行。另外,气割时所产生的氧化物应易于流动。

3) 金属的导热性不能太高,否则使气割处的热量不足,造成气割困难。

4) 金属在燃烧时所产生的大量热能应能维持气割的进行。

碳素钢和低合金结构钢具有很好的气割性能,因钢中主要成分是铁,其燃烧时生成 $FeO$ , $Fe_3O_4$ 和 $Fe_2O_3$ 放出大量的热。并且熔点低流动性好,故切口光洁整齐而质量好。但气割铸铁时,因其燃点高于熔点,且渣中有大量粘稠的 $SiO_2$ ,妨碍切割进行。气割铝和不锈钢,因存在高熔点 $Al_2O_3$ 和 $Cr_2O_3$ 膜,故亦不能用一般气割方法切割。

## 4.3.4 电渣焊

电渣焊是利用电流通过液态熔渣时所产生的电阻热熔化母材和填充金属进行焊接的方法。它与电弧焊不同,除引弧外,焊接过程中不产生电弧。

电渣焊一般在立焊位置进行,焊前将边缘经过清理、侧面经过加工的焊件装配成相距 20 ~ 40 mm 的接头,如图 4.3.9 所示。焊接过程如图 4.3.10 所示。

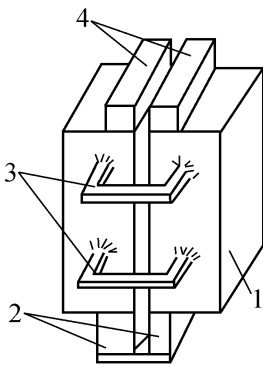


图 4.3.9 电渣焊  
工件装配图

1—工件;2—引弧板;  
3—门形板;4—引出板

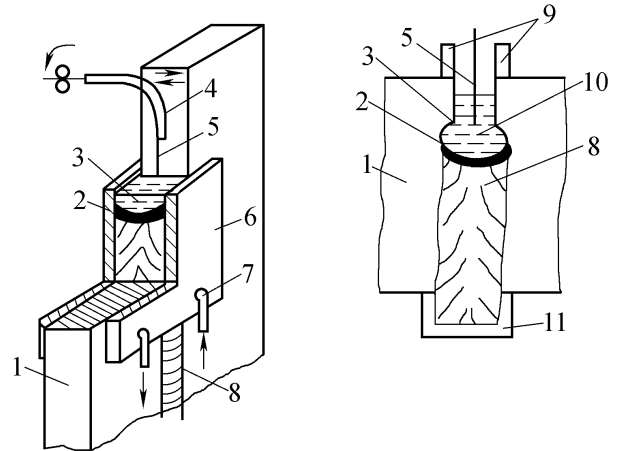


图 4.3.10 丝极电渣焊示意图

1—工件;2—金属熔池;3—熔渣;4—导丝管;  
5—焊丝;6—强制成形装置;7—冷却水管;  
8—焊缝;9—引出板;10—金属熔滴;11—引弧板

焊件与填充焊丝接电源两极,在接头底部焊有引弧板,顶部装有引出板。在接头两侧还装有强制成形装置即冷却滑块(一般用铜板制成、并通水冷却),以利熔池冷却结晶。焊接时将焊剂装在引弧板、冷却滑块围成的盒状空间里。送丝机构送入焊丝,同引弧板接触后引燃电弧。电弧高温使焊剂熔化,形成液态熔渣池。当渣池液面升高淹没焊丝末端后,电弧自行熄灭,电流通过熔渣,进入电渣焊过程。由于液态熔渣具有较大电阻,电流通过时产生的电阻热将使熔渣温度升高达 1700 ~ 2000 °C,使与之接触的那部分焊件边缘及焊丝末端熔化。熔化的金属在下沉过程中,同熔渣进行一系列冶金反应,最后沉积于渣池底部、形成金属熔池。以后随着焊丝不断送进与熔化,金属熔池不断升高并将渣池上推,冷却滑块也同步上移,渣池底部则逐渐冷却凝固成焊缝,将两焊件连接起来。比重轻的渣池浮在上面既作为热源,又隔离空气,保护熔池金属不受侵害。

电渣焊的特点:

(1) 对于厚大截面的焊件可一次焊成,生产率高。工件不开坡口,焊接同等厚度的工件,焊剂消耗量只是埋弧自动焊的 1/50 ~ 1/20。电能消耗量是埋弧焊的 1/3 ~ 1/2、焊条电弧焊的 1/2,因此电渣焊的经济效果好,成本低。

(2) 由于熔渣对熔池保护严密,避免了空气对金属熔池的有害影响,而且熔池金属保持液态时间长,有利于冶金反应充分,焊缝化学成分均匀和气体杂质上浮被排除。因此焊缝金属比较纯净,质量较好。

(3) 焊接速度慢,焊件冷却慢,因此焊接应力小。但焊接热影响区却比其他焊接方法的宽,造成接头晶粒粗大,力学性能下降。所以电渣焊后,焊件要进行正火处理,以细化晶粒。

电渣焊主要用于焊接厚度大于 30 mm 的厚大工件。由于焊接应力小,它不仅适合低碳钢的焊接,还适合于中碳钢和合金结构钢的焊接。目前电渣焊是制造大型铸—焊、锻—焊复合结构,如水压机、水轮机和轧钢机上大型零件的重要工艺方法。

### 4 3 5 等离子弧焊

等离子弧的产生原理如图 4 3 .11 所示。钨极与工件之间加一高压 ,经高频振荡器的激发 ,使气体电离形成电弧 ,电弧通过细孔喷嘴时 ,弧柱截面缩小 ,产生机械压缩效应 ;向喷嘴内通入高速保护气流(如氩气、氮气等) ,此冷气流均匀地包围着电弧 ,使弧柱外围受到强烈冷却 ,于是弧柱截面进一步缩小 ,产生了热压缩效应。

此外 ,带电离子在弧柱中的运动可看成是无数根平行的通电“导体” ,其自身磁场所产生的电磁力使这些“导体”互相吸引靠拢 ,电弧受到进一步压缩 ,这种作用称为电磁压缩效应。这三种压缩效应作用在弧柱上 ,使弧柱被压缩得很细 ,电流密度极大提高 ,能量高度集中 ,弧柱区内的气体完全电离 ,从而获得等离子弧。这种等离子弧的热力学温度可高达 15 000 ~ 16 000 K ,能够用于焊接和切割。

利用等离子弧作为热源的焊接方法称为等离子弧焊。焊接时 ,在等离子弧周围还要喷射保护气体以保护熔池 ,一般保护气体和等离子气体相同 ,通常为氩气。

按焊接电流大小 ,等离子弧焊分为微束等离子弧焊和大电流等离子弧焊两种。微束等离子弧的电流一般为 0 .1 ~ 30 A ,可用于厚度为 0 .025 ~ 2 .5 mm 箔材和薄板的焊接。大电流等离子弧主要用于焊接厚度大于 2 .5 mm 的焊件。

等离子弧焊具有能量集中 ,穿透能力强 , 电弧稳定等优点。因此 ,焊接 12 mm 厚的工件可不开坡口 ,能一次单面焊透双面成型 ;其焊接热影响区小 ,焊件变形小 ;而且焊接速度快 ,生产率高。但等离子弧焊设备复杂 ,气体消耗大 ,焊接成本较高 ,并且只适宜于室内焊接 ,因此应用范围受到一定限制。

现在等离子弧焊已广泛应用于化工、原子能、精密仪器仪表及尖端技术领域的不锈钢、耐热钢、铜合金、铝合金、钛合金及钨、钼、钴、铬、镍、钛的焊接。

此外 ,利用高温高速的等离子弧还可以切割任何金属和非金属材料 ,包括氧—乙炔焰不能切割材料 ,而且切口窄而光滑 ,切割效率比氧—乙炔焰切割提高 1 ~ 3 倍。

电子束焊和激光焊的工作原理可参考“特种加工”中的有关内容。

### 4 3 6 压焊与钎焊

#### 1. 压焊

利用加压(或同时加热)的方法使两工件的结合面紧密接触并产生一定的塑性变形 ,借用原子之间的结合力将它们牢固地连接起来。这类焊接方法称为压力焊。根据加热加压的方式不同 ,压力焊可分为电阻焊、摩擦焊、超声波焊、扩散焊和爆炸焊等。

#### (1) 电阻焊

电阻焊是利用电流通过焊件及其接触面产生的电阻热作热源 ,将焊件局部加热到塑性或熔融状态 ,然后在压力下形成焊接接头的一种焊接方法。

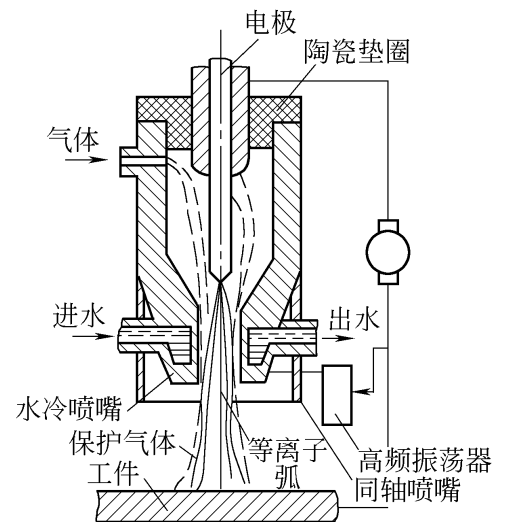


图 4 3 .11 等离子弧焊原理图

根据焦耳—楞次定律电阻焊在焊接过程中产生的热量为  $Q = 0.24 I^2 R t (\text{J})$

由于电阻  $R$  (包括工件本身电阻和工件间接触电阻) 有限, 为使工件在极短的时间(从十毫秒至几秒)内迅速加热到焊接温度, 以减少散热损失, 必须采用很大的焊接电流 ( $I = 10^3 \sim 10^4 \text{ A}$ ), 因此电阻焊设备的特点就是低电压、大功率。

电阻焊分为点焊、缝焊、对焊三种形式, 其示意图如图 4.3.12 所示。

与其他焊接方法相比, 电阻焊具有生产率高、焊件变形小、劳动条件好、不需填充材料和易于实现自动化等特点。但设备较一般熔化焊复杂, 耗电量大, 适用的接头形式和可焊工件厚度受到一定限制, 且焊前清理要求高。

1) 点焊 如图 4.3.12a 所示, 点焊是利用柱状电极在两块搭接工件接触面之间形成焊点而将工件焊在一起的焊接方法。

点焊的焊接过程分预压、通电加热和断电冷却几个阶段。

a. 预压 将表面已清理好的工件叠合起来, 置于两电极之间预压夹紧, 使工件欲焊处紧密接触。

b. 通电加热 由于电极内部通水, 电极与被焊工件之间所产生的电阻热被冷却水带走, 故热量主要集中在两工件接触处, 将该处金属迅速加热到熔融状态而形成熔核, 熔核周围的金属被加热到塑性状态, 在压力作用下发生较大塑性变形。

c. 断电冷却 当塑性变形量达到一定程度后, 切断电源, 并保持压力一段时间, 使熔核在压力作用下冷却结晶, 形成焊点。

焊完一点后, 移动工件焊第二点, 这时候有一部分电流流经已焊好的焊点, 这种现象称为分流。分流会使第二点处电流减小, 影响焊接质量, 因而两点间应有一定距离。被焊材料的导电性越好, 焊件厚度越大, 分流现象越严重, 因此两点间的间距就应该越大。

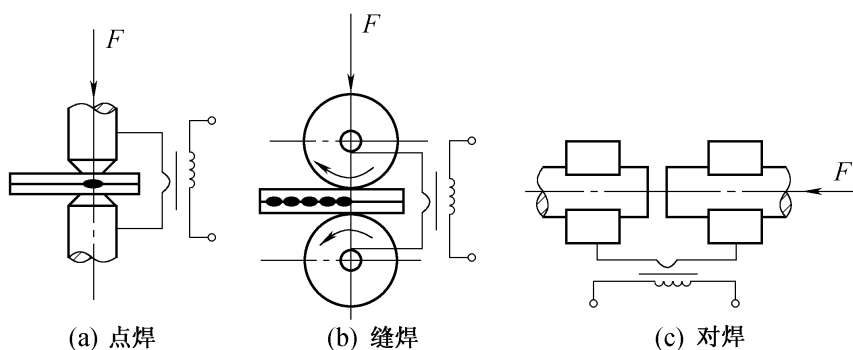


图 4.3.12 电阻焊示意图

点焊主要用于薄板结构, 板厚一般在 4 mm 以下, 特殊情况下可达 10 mm。这种焊接方法广泛用来制造汽车车厢、飞机外壳等轻型结构。

2) 缝焊 缝焊过程与点焊基本相似。缝焊焊缝是由许多焊点相互依次重叠而形成的连续焊缝。由于缝焊机的电极是两个可以旋转的盘状电极, 所以缝焊又称滚焊。

如图 4.3.12b 所示, 当两工件的搭接处被两个圆盘电极以一定的压力夹紧并反向转动时, 自动开关按一定的时间间隔断续送电, 两工件接触面间就形成许多连续而彼此重叠的焊点, 这样就获得了缝焊焊缝, 焊点相互重叠率在 50% 以上。

缝焊在焊接过程中分流现象严重。因此缝焊只适于焊接了 3 mm 以下的薄板焊件。

缝焊焊缝表面光滑美观, 气密性好。缝焊已广泛应用于家用电器(如电冰箱壳体)、交通运输

(如汽车、拖拉机油箱)及航空航天(如火箭燃料贮箱)等工业部门中要求密封的焊件的焊接。

3) 对焊 对焊是利用电阻热将两工件端部对接起来的一种压力焊方法。根据焊接过程不同,对焊又可分为电阻对焊和闪光对焊。

a. 电阻对焊 把工件装在对焊机的两个电极夹具上对正、夹紧,并施加预压力,使两工件的端面挤紧,然后通电。由于两工件接触处实际接触面积较小,因而电阻较大,当电流通过时,就会在此产生大量的电阻热,使接触面附近金属迅速加热到塑性状态,然后增大压力,切断电源,使接触处产生一定的塑性变形而形成接头。

电阻对焊具有接头光滑、毛刺小、焊接过程简单等优点,但接头的机械性能较低。焊前必须对焊件端面进行除锈、修整,否则焊接质量难以保证。电阻对焊主要用于截面尺寸小且截面形状简单(如圆形、方形等)的金属型材的焊接。

b. 闪光对焊 闪光对焊时,将工件装在电极夹头上夹紧,先接通电源,然后逐渐靠拢。由于工件接头端面比较粗糙,开始只有少数几个点接触,当强大的电流通过接触面积很小的几点时,就会产生大量的电阻热,使接触点处的金属迅速熔化甚至气化,熔化的金属在电磁力和气体爆炸力作用下连同表面的氧化物一起向四周喷射,产生火花四溅的闪光现象。继续推进焊件,闪光现象便在新的接触点处产生,待两工件的整个接触端面有一薄层金属熔化时,迅速加压并断电,两工件便在压力作用下冷却凝固而焊接在一起。

闪光对焊对工件端面的平整度要求不高,接头质量也较电阻对焊的好,但操作比较复杂,对环境也会造成一定污染。

## (2) 摩擦焊

摩擦焊是利用两工件焊接端面之间相互摩擦而产生的热量将工件接合端加热到塑性状态后,在压力作用下使它们连接起来的一种压力焊方法。

### 1) 摩擦焊过程

如图 4 3 .13 所示,将工件 I、II 分别夹持在焊机的旋转夹头和移动夹头上,加上预压力使两工件紧密接触。然后使工件 I 高速旋转,工件 II 在一定的轴向压力作用下不断向工件 I 方向缓缓移动。于是两工件接触端面强烈摩擦而发出大量的热并被加热到塑性状态,同时在轴向压力作用下逐步发生塑性变形。变形的结果使覆盖在端面上的氧化物和杂质迅速破碎并被挤出焊接区,露出纯净的金属表面。

随着焊接区金属塑性变形的增加,接触端部很快被加热到焊接温度。这时,立即刹车,停止工件 I 的旋转并加大轴向压力,使两工件在高温高压下焊接起来。

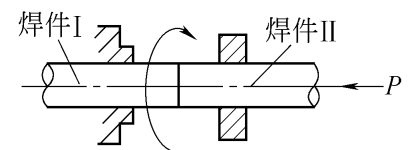


图 4 3 .13 摩擦焊工作原理

### 2) 摩擦焊特点

a. 焊接接头质量高且稳定。由于工件接触表面强烈摩擦,使工件接触表面的氧化膜和杂质挤出焊缝之外,因而接头质量好,焊件尺寸精度高。

b. 不仅可以实现同种金属的焊接,还可实现异种金属的焊接,如高速钢与 45 钢焊接,铜合金与铝合金焊接等。

c. 生产率高。焊好一个接头所需时间一般不超过 1 min,与闪光焊相比,生产率可提高几倍甚至几十倍。

d. 摩擦焊操作技术简单,容易实现自动控制,且没有火花和弧光,劳动条件好。

e. 焊机所需功率小 ,省电。与闪光焊相比 ,可节约电能 5 ~ 10 倍以上。

### 3) 摩擦焊的接头形式

摩擦焊接头一般是等截面的 ,也可以是不等截面的。

摩擦焊作为一门新技术 ,在国内外已得到很大发展 ,世界各国投入使用的摩擦焊机逐年增多。我国目前已能焊接直径 168 mm 的大型石油钻杆 ,并对摩擦焊机实现了微机控制。改善了接头质量 ,提高了产品合格率。随着研究的深入和生产的发展 ,摩擦焊将会得到更广泛应用。

## 2. 钎焊

钎焊是通过加热 ,使被焊工件接头处温度升高 ,但不熔化 ,同时使熔点较低的钎料熔化并渗入到被焊工件的间隙之中 ,通过原子扩散相互相溶解 ,冷却凝固后将两工件连接起来的一类焊接方法。

与一般焊接方法相比 ,钎焊的加热温度较低 ,焊件的应力和变形较小。对材料的组织和性能影响很小 ,易于保证焊件尺寸。钎焊还能实现异种金属甚至金属与非金属的连接。因此钎焊在电工、仪表、航空等机械制造业中得到广泛应用。

### (1) 钎料

按熔点不同 ,钎料可分为易熔钎料和难熔钎料两大类。

1) 易熔钎料 熔点在 450 °C 以下 ,又称软钎料 ,常用的软钎料有锡基和铅基钎料。这种钎料的焊缝强度较低 ,用于强度要求低或无强度要求的焊件 ,如电子产品和仪表中线路的焊接。

2) 难熔钎料 熔点高于 450 °C ,又称硬钎料。常用的硬钎料有银基和铜基钎料。这种钎料的接头强度较高 ,常用于受力较大或工作温度较高的工件焊接 ,如车刀上硬质合金刀头与刀杆的焊接。

### (2) 钎焊方法

1) 焊件去膜 大气中的金属表面都覆盖着一层氧化膜。氧化膜的存在会使液态钎料不能浸润工件而难于焊接 ,因此必须设法清除。常用的去膜法有钎剂去膜法(如锡焊时采用松香、铜焊时采用硼酸或硼砂)和机械去膜法(如利用器械刮除)。

2) 接头形式 钎焊接头的强度往往低于钎焊金属的强度 ,因此钎焊常采用搭接接头形式。依靠增大搭接面积 ,可以在接头强度低于钎焊金属强度的条件下 ,达到接头与焊件具有相等的承载能力的目的。另外 ,它的装配要求也比较简单。

### (3) 加热方法

1) 烙铁加热 利用烙铁头积聚的热量来熔化钎料并加热工件钎焊部位。烙铁钎焊只适用于软钎料焊接薄件和小件 ,多用于电工、仪表等线路连接。烙铁钎焊一般采用钎剂去膜。

2) 火焰加热 利用可燃性气体或液体燃料燃烧所形成的火焰来加热焊件和熔化钎料。这种加热方法常用于银基和铜基钎料 ,钎焊碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及铜合金的薄壁和小型焊件。火焰钎焊主要由手工操作 ,对工人的技术水平要求较高。

3) 电阻加热 依靠电阻热加热焊件和熔化钎料 ,并在压力作用下完成焊接过程。电阻钎焊加热迅速、生产率高 ,易于实现自动化 ,但接头尺寸不能太大。目前主要用于钎焊刀具、带锯、导线端、各种电触点 ,以及集成电路块和晶体管等元件的焊接。

4) 感应加热 将工件的钎焊部分置于交变磁场中 ,通过工件在磁场中产生的感应电流的电阻热来实现钎焊焊接。感应加热的速度快 ,生产率高 ,便于实现自动化。特别适用于管件套接、

管子和法兰、轴和轴套之类接头的焊接。

## 4.4 常用金属材料的焊接

### 4.4.1 碳钢的焊接

#### 1. 低碳钢的焊接

低碳钢的碳的质量分数  $< 0.25\%$  ,所以这类钢的焊接性良好 ,焊接时一般不需要采取特殊的工艺措施 ,用各种焊接方法都能获得优质焊接接头。只有厚大结构件在低温下焊接时 ,才应考虑焊前预热 ,如  $20\text{ mm}$  以下板厚、温度低于零下  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  或板厚大于  $50\text{ mm}$ 、温度低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,应预热  $100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

低碳钢结构件焊条电弧焊时 ,根据母材强度等级 ,一般选用酸性焊条 E4303(J422)、E4320(J424)等 ;承受动载荷、结构复杂的厚大焊件 ,选用抗裂性好的碱性焊条 E4215(J427)、E4316(J426)等。埋弧焊时 ,一般选用焊丝 H08A 或 H08MnA 配合焊剂 HJ431。采用电渣焊时 ,焊后应进行正火处理。

沸腾钢脱氧不完全 ,含氧量较高 ,S、P 等杂质分布不均匀 ,局部区域 S、P 含量可能超出规定范围 ,焊接时裂纹倾向大 ,不宜作为焊接结构件 ,应改用镇静钢。

#### 2. 中、高碳钢焊接

中碳钢焊接时 ,热影响区组织淬硬倾向增大 ,较易出现裂纹和气孔 ,为此要采取一定的工艺措施。如 35、45 钢焊接时 ,焊前应预热  $150\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据母材强度级别 ,选用焊条 E5015(J507)、E5016(J506)、E5515-x(J557)、E5516-x(J556)等(x 代表后缀字母 ,表示熔敷金属化学成分分类的代号)。为避免母材过量熔入焊缝中导致碳含量升高 ,要开坡口并采用细焊条 ,小电流 ,多层焊等工艺。焊后缓冷 ,并进行  $600\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  回火 ,以消除应力。

高碳钢碳的质量分数在  $0.60\%$  以上 ,淬硬倾向大 ,易出现各种裂纹和气孔 ,焊接性差 ,一般不用来制作焊接结构 ,只用于破损工件的焊补。焊补时通常采用焊条电弧焊或气焊 ,焊条选用 E6015-x(J607)、E7015-x(J707)等 ,预热  $250\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,焊后缓冷 ,并立即进行  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上高温回火 ,以消除应力。

中、高碳钢焊条电弧焊时 ,若焊件无法预热 ,应选用奥氏体不锈钢焊条进行焊接。

### 4.4.2 低合金结构钢的焊接

低合金结构钢在焊接生产中应用很广。这种钢可分为两大类 :强度用钢和特殊性能钢。强度用钢按照屈服点数值分为三类 : $\sigma_s = 294\sim 490\text{ MPa}$  的热轧及正火钢(焊前为热轧及正火状态) , $\sigma_s = 441\sim 980\text{ MPa}$  的低碳调质钢( $w_c < 0.25\%$  ,焊前为调质状态)和  $\sigma_s = 880\sim 1\ 176\text{ MPa}$  的中碳调质钢( $w_c = 0.25\%\sim 0.45\%$  ,焊前为调质状态)。特殊性能钢包括低温钢、耐热钢和耐蚀钢。

#### 1. 强度用钢焊接

热轧及正火钢焊接 :表 4.4.1 列出 5 种常用的热轧及正火钢焊接工艺特点。焊前预热温度取决于焊件厚度和现场温度 ,以 16Mn 为例 ,其预热温度见表 4.4.2。

表 4 4 .1 五种常用强度用钢焊接工艺特点

钢号	09Mn2	16Mn	15MnV		15MnVN	14MnMoV
碳当量值	0.36	0.39	0.40		0.43	0.50
屈服点 $\sigma_s$ /MPa	294	343	392		441	491
抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	420	490	540		590	690
预热温度/°C	不预热(板厚 $h \leq 16$ mm)	100 ~ 150 ( $h \leq 30$ mm)	100 ~ 150 ( $h \leq 28$ mm)		100 ~ 150 ( $h \leq 25$ mm)	200
焊条型号	E4303 E4315	E5003 E5015 E5016	E5003 E5015 E5016 E5515		E5515 E6015	E6015
埋弧焊焊丝	H08A H08MnA	H08A (不开坡口) H08MnA (不开坡口) H10Mn2 (开坡口)	H08MnA (不开坡口) H08Mn2SiA H10Mn2 (中板开坡口) HJ431	H08MnMoA (厚板开深 坡口)	H08MnMoA H04MnVTiA	H08Mn2MoA
埋弧焊焊丝	HJ431	HJ431		HJ350 HJ250	HJ431 HJ350	HJ350
CO <sub>2</sub> 焊焊丝	H08Mn2Si, H08Mn2SiA					H06Mn2SiMoA
焊后热处理 规范	电弧焊、电渣 焊 不热处理	电弧焊 :600 ~ 650 °C回火 电渣焊 :900 ~ 930 °C正火 600 ~ 650 °C回火	电弧焊 :550 °C或 600 °C回 火 电渣焊 :950 ~ 980 °C正火 550 °C 或 600 °C回火	电 弧 焊 : 550 °C 或 600 °C 回火 电 渣 焊 : 980 °C正火 550 °C 950 °C 正 火 或 600 °C回火 650 °C回火	电 弧 焊 : 550 °C 或 600 °C 或 600 °C回火 电 渣 焊 : 950 ~ 980 °C正火 550 °C 或 600 °C回火	

表 4 4 .2 不同环境温度下焊接 16Mn 钢的预热温度

板厚/mm	不同气温下的预热温度
16 以下	不低于 - 10 °C 不预热 , - 10 °C 以下预热 100 ~ 150 °C
16 ~ 24	不低于 - 5 °C 不预热 , - 5 °C 以下预热 100 ~ 150 °C
25 ~ 40	不低于 0 °C 不预热 0 °C 以下预热 100 ~ 150 °C
40 以上	均预热 100 ~ 150 °C



低、中碳调质钢的碳当量数值在 0.45% 以上,焊接时热影响区产生淬硬组织倾向较大,易产生冷裂纹,且钢的强度级别越高,冷裂倾向越大。因此,焊接前应预热,表 4.4.3 列出两种低碳调质钢的预热温度。由于中碳调质钢的焊接性比低碳调质钢差,所以预热温度应更高,约为 200 ~ 350 °C。

表 4.4.3 低碳调质钢的预热温度

钢号	板厚/mm			
	< 13	13 ~ 16	16 ~ 22	22 ~ 35
	温度/°C			
14MnMoVN	不预热	50 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200
14MnMoNbB	不预热	100 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 250

焊接强度用钢的常用方法有焊条电弧焊、埋弧焊和 CO<sub>2</sub> 焊等。钨极氩弧焊可用于要求全焊透的管形工件的打底焊。焊接厚板工件如厚壁压力容器,可采用电渣焊。

## 2. 专用钢焊接

珠光体耐热钢是以 Cr、Mo 为基础的低、中合金钢,如 12CrMo、20Cr3MoWV 等。其碳当量数值约为 0.45% ~ 0.90%,裂纹倾向较大,焊接性较差。焊条电弧焊时,要选用与母材成分相近的焊条,预热温度 150 ~ 400 °C,焊后应及时进行高温回火处理。如果焊前不能预热,应选用 Ni、Cr 含量较高的奥氏体不锈钢焊条。

低温钢中含 Ni 量较高的 5Ni、9Ni 钢等,焊前不需预热,焊条成分要与母材匹配,焊接时能量输入要小,焊后回火注意避开“回火脆性区”。

耐蚀钢中除 P 含量较高的钢以外,其他耐蚀钢焊接性较好,不需预热或焊后热处理等。但要选择与母材相匹配的耐蚀焊条。

## 4.4.3 不锈钢的焊接

奥氏体型不锈钢如 0Cr18Ni9 等,虽然 Cr、Ni 元素含量较高,但 C 含量低,焊接性良好,焊接时一般不需要采取工艺措施,因此它在不锈钢焊接中应用最广。焊条电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊时,焊条、焊丝和焊剂的选用应保证焊缝金属与母材成分类型相同。焊接时采用小电流、快速不摆动焊,焊后加大冷速,接触腐蚀介质的表面应最后施焊。

铁素体型不锈钢如 1Cr17 等,焊接时热影响区中的铁素体晶粒易过热粗化,使焊接接头的塑、韧性急剧下降甚至开裂。因此,焊前预热温度应在 150 °C 以下,并采用小电流、快速焊等工艺,以降低晶粒粗大倾向。

马氏体型不锈钢焊接时,在空冷条件下焊缝就可转变为马氏体组织,所以焊后淬倾向大,易出现冷裂纹。如果碳含量较高,淬硬倾向和冷裂纹现象更严重。因此,焊前预热温度 200 ~ 400 °C,焊后要进行热处理。如果不能实施预热或热处理,应选用奥氏体不锈钢焊条。

铁素体型不锈钢和马氏体型不锈钢焊接的常用方法是焊条电弧焊和氩弧焊。

## 4.4.4 铸铁的焊补

铸铁中 C、Si、Mn、S、P 的含量比碳钢高,焊接性能差,不能作为焊接结构件,但对铸铁件的局

部缺陷进行焊补很有经济价值。

铸铁焊补的主要问题有两个：一是焊接接头易生成白口组织和淬硬组织，难以机加工；二是焊接接头易出现裂纹。

根据焊前预热温度，将铸铁焊补分为不预热焊法和热焊法两种。

#### 1. 不预热焊法

焊前工件不预热(或局部预热至 300 ~ 400 °C，称半热焊)，焊后缓冷。常用的焊补方法是焊条电弧焊。焊条的选择根据如何保证焊缝中碳、硅含量合适而不致生成白口组织或使焊缝组织为塑性好的非铸铁型组织，并保证焊后工件的加工性能和使用性能来选定。

铸铁件裂纹的不预热焊法：先将裂纹处清理干净，并在裂纹两端钻止裂孔，防止裂纹扩展。焊接时采用与焊条种类相适应的工艺，焊后采用缓冷和锤击焊缝等方法，防止白口组织生成，减少焊接应力。

铸铁焊补的焊条有多种，如镍基铸铁焊条、纯铁芯和低碳钢芯铸铁焊条和铁基铸铁焊条等。镍基铸铁焊条的焊缝金属有良好的抗裂性和加工性，但价格较贵，主要用于重要铸铁件，如机床导轨面的不预热焊法。纯铁芯和低碳钢芯铸铁焊条与铁基铸铁焊条的熔合区和焊缝区易出现白口组织和裂纹，适于非加工面或刚度小的小型薄壁件的焊补。

不预热焊法生产率高，劳动条件好，工件焊补成本低，应尽量多用。

#### 2. 热焊法

焊前把工件预热至 600 ~ 700 °C，并在此温度下施焊，焊后缓冷或在 600 ~ 700 °C 保温消除应力。常用的焊补方法是焊条电弧焊和气焊。焊条电弧焊适于中等厚度以上 (> 10 mm) 的铸铁件，选用铁基铸铁焊条或低碳钢芯铸铁焊条。10 mm 以下薄件为防止烧穿，采用气焊，用气焊火焰预热和缓冷焊件，选用铁基铸铁焊丝并配合焊剂使用。

热焊法劳动条件差，一般用于焊补后还需机械加工的复杂、重要铸铁件，如汽车的缸体、缸盖和机床导轨等。

### 4.4.5 非铁金属的焊接

常用的非铁金属有铝、铜、钛及其合金等。由于非铁金属具有许多特殊性能，在工业中应用越来越广，其焊接技术也越来越重要。

#### 1. 铝及铝合金的焊接

铝及铝合金焊接的主要问题是：

1) 极易氧化 铝极易生成难熔的  $Al_2O_3$  薄膜(熔点为 2 050 °C)，覆盖在金属表面，阻碍母材熔合。薄膜比重大，易进入焊缝造成夹杂而脆化。

2) 易生成气孔 氢在液态铝合金中的溶解度比固态高 20 多倍，所以熔池凝固时氢气来不及完全逸出，造成焊缝气孔。另外  $Al_2O_3$  薄膜易吸附水分，使焊缝出现气孔的倾向增大。

3) 熔融状态难控制 铝及铝合金从固态转化为液态时颜色无明显变化，令操作者难以识别，不易控制熔融时间和温度，有可能出现烧穿等缺陷。

采用氩弧焊焊接铝及铝合金，由于有“阴极破碎”作用可解决氧化问题，惰性气体保护等措施可以解决气孔问题，所以在氩弧焊条件下，纯铝、防锈铝合金、少部分铸造铝硅合金焊接性较好。

目前，氩弧焊是焊接铝及铝合金最理想的熔焊方法。为保证焊接质量，焊前要严格清洗焊件、

焊丝,并一定要干燥后再焊,否则焊缝中易出现气孔。焊接时尽量选用与母材化学成分相近的专用焊丝。若没有专用焊丝也可从母材上切下窄条替代焊丝(钨极氩弧焊和气焊时)。还可使用电阻焊、钎焊方法焊接铝材,但焊前必须清除焊件表面的氧化膜,电阻焊时要采用气焊,气焊时需使用焊剂去除氧化物,但焊剂同时也使工件焊后的耐腐蚀性下降,且气焊生产率低,工件变形大。

## 2. 铜及铜合金的焊接

铜及铜合金分为紫铜、黄铜和青铜等。焊接结构件常用的是紫铜和黄铜,铜及铜合金焊接的主要问题是:

1) 难熔合及易变形 由于铜的导热性很强,约为钢的6倍,焊接时热量极易散失,不易达到焊接所需的温度,出现填充金属与母材金属难熔合、工件未焊透、焊缝成形差等缺陷。铜的线膨胀系数和凝固时的收缩率都大,导热性强还使热影响区范围宽,结果焊接应力大,易变形。

2) 热裂纹倾向大 铜和铜合金中一般含有S、P、Bi等杂质,铜在液态时氧化形成 $\text{Cu}_2\text{O}$ ,硫化形成 $\text{Cu}_2\text{S}$ 。 $\text{Cu}_2\text{O}$ 、 $\text{Cu}_2\text{S}$ 、P、Bi都能与铜形成低熔点共晶体存在于晶界上,易引起热裂纹。

3) 易产生气孔 氢在液态铜中的溶解度比在固态铜中的溶解度高数倍,焊缝凝固时氢来不及完全析出;另外氢还与熔池中的 $\text{Cu}_2\text{O}$ 反应生成水蒸气,造成焊缝中易出现氢气和水蒸气气孔。

由于上述原因,铜及铜合金焊接接头的塑性和韧性下降明显,为此采用焊接强热源设备和焊前预热( $150\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$ )来防止难熔合、未焊透现象并减少焊接应力与变形;严格限制杂质含量,加入脱氧剂,控制氢来源,降低熔池冷却速度等方法防止裂纹、气孔缺陷;焊后采用退火处理以消除应力等措施。

焊接铜和铜合金常用的方法有氩弧焊、气焊、埋弧焊和钎焊。氩弧焊是焊接铜和铜合金应用最广的熔焊方法。厚度小于3mm的工件采用TIG焊,可不开坡口不加焊丝;厚度3~12mm的工件采用填丝TIG焊或MIG焊;厚度大于12mm的工件一般采用MIG焊。选用焊丝除满足一般工艺、冶金要求外,应注意控制其杂质含量和提高脱氧能力。气焊黄铜采用弱氧化焰,其他均采用中性焰,由于温度较低,除薄件外,焊前应将工件预热至 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,焊后应进行退火或锤击处理。埋弧焊适用于中、厚板长焊缝的焊接,厚度20mm以上的工件焊前应预热,单面焊时背面应加成形垫板。铜及铜合金的钎焊性优良,硬钎焊时采用铜基钎料、银基钎料,配合硼砂、硼酸混合物等作为钎剂;软钎焊时可用锡铅钎料,配合松香、焊锡膏作为钎剂。

## 3. 钛及钛合金的焊接

钛(熔点 $1725\text{ }^\circ\text{C}$ ,密度为 $4.5\text{ g/cm}^3$ )及钛合金具有高强度、低密度、强抗腐蚀性和好的低温韧性,是航天工业的理想材料,因此焊接该种材料成为在尖端技术领域中之必然要遇到的问题。

由于钛及钛合金化学性质非常活泼,极易出现多种焊接缺陷,焊接性差,所以主要采用氩弧焊,此外还可采用等离子弧焊、真空电子束焊和钎焊等。

钛及钛合金极易吸收各种气体,使焊缝出现气孔。过热区晶粒粗化或钛马氏体生成以及氢、氧、氮与母材金属的激烈反应,都使焊接接头脆化,产生裂纹。氢是使钛及钛合金焊接出现延迟裂纹的主要原因。

3mm以下薄板钛合金的钨极氩弧焊焊接工艺比较成熟,但焊前的清理工作,焊接中工艺参数的选定和焊后热处理工艺都要严格控制。

## 4 5 焊接结构工艺设计

### 4 5 .1 焊接结构生产工艺过程概述

各种焊接结构 ,其主要的生产工艺过程为 :备料 装配 焊接 焊接变形矫正 质量检验 表面处理(油漆、喷塑或热喷涂等)。

#### (1) 备料

包括型材选择 ,型材外形矫正 ,按比例放样、画线 ,下料切割 ,边缘加工 ,成形加工(折边、弯曲、冲压、钻孔等)。

#### (2) 装配

利用专用卡具或其他紧固件装置将加工好的零件或部件组装成一体 ,进行定位焊 ,准备焊接。

#### (3) 焊接

根据焊件材质、尺寸、使用性能要求、生产批量及现场设备情况选择焊接方法 ,确定焊接工艺参数 ,按合理顺序施焊。

### 4 5 .2 焊接结构工艺设计

焊接结构件种类各式各样 ,在其材料确定以后 ,对焊接结构件进行工艺设计主要包括三方面内容 :焊缝布置、焊接方法选择和焊接接头设计等。

#### 1 .焊缝布置

焊缝布置是否合理 ,直接影响结构件的焊接质量和生产率。因此 ,设计焊缝位置时应考虑下列原则 :

##### (1) 焊缝应尽量处于平焊位置

各种位置的焊缝 ,其操作难度不同。以焊条电弧焊焊缝为例 ,其中平焊操作最方便 ,易于保证焊接质量 ,是焊缝位置设计中的首选方案 ,立焊、横焊位置次之 ,仰焊位置施焊难度最大 ,不易保证焊接质量。

##### (2) 焊缝要布置在便于施焊的位置

焊条电弧焊时 ,焊条要能伸到焊缝位置 ,如图 4 5 .1 所示。点焊、缝焊时 ,电极要能伸到待焊位置 ,如图 4 5 .2 所示。埋弧焊时 ,要考虑焊缝所处的位置能否存放焊剂。设计时若忽略了这些问题 ,无法施焊。

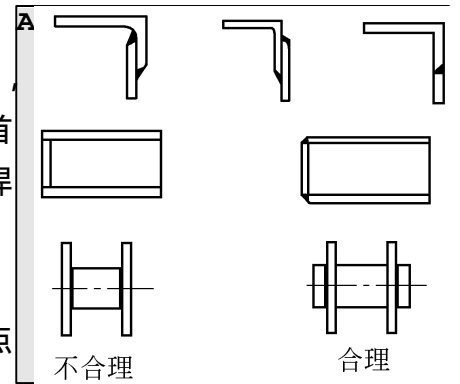


图 4 5 .1 焊条电弧焊焊缝位置

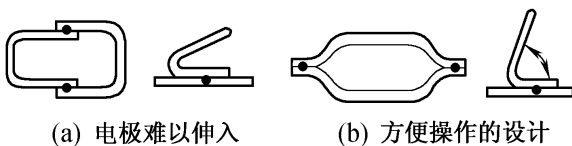


图 4 5 2 点焊、缝焊焊缝位置

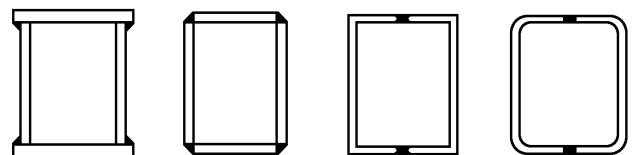


图 4 5 3 减少焊缝数量示例

##### (3) 焊缝布置要有利于减少焊接应力与变形

1) 尽量减少焊缝数量及长度,缩小不必要的焊缝截面尺寸。设计焊件结构时,可通过选取不同形状的型材、冲压件来减少焊缝数量。如图 4 5 3 所示的箱式结构,若用平板拼焊需四条焊缝,若改用槽钢拼焊需两条焊缝,焊缝数量的下降,既可减少焊接应力和变形,又可提高生产率。

焊缝截面尺寸的增大会使焊接变形量随之加大,但过小的焊缝截面尺寸,又可能降低焊件结构强度,且截面过小焊缝冷速过快易产生缺陷,因此在满足焊件使用性能前提下,应尽量减少不必要的焊缝截面尺寸。

2) 焊缝布置应避免密集或交叉。焊缝密集或交叉,会使接头处严重过热,导致焊接应力与变形增大,甚至开裂。因此两条焊缝之间应隔开一定距离,一般要求大于三倍的板材厚度,且不小于 100 mm,如图 4 5 4 所示。处于同一平面焊缝转角的尖角处相当于焊缝交叉,易产生应力集中,应尽量避免,改为平滑过渡结构。即使不同一平面的焊缝,若密集堆垛或排布在一列都会降低焊件的承载能力。

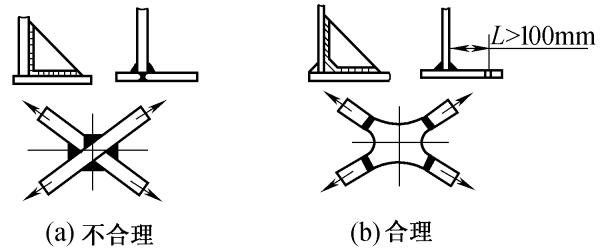


图 4 5 4 焊缝布置应避免密集和交叉

3) 焊缝布置应尽量对称。当焊缝布置对称于焊件截面中心轴或接近中心轴时,可使焊接中产生的变形相互抵消而减少焊后总变形量。焊缝位置对称分布在梁、柱、箱体等结构的设计中尤其重要,如图 4 5 5 所示,图 a 中焊缝布置在焊件的非对称位置,会产生较大弯曲变形,不合理;图 b、图 c 将焊缝对称布置,均可减少弯曲变形。

4) 焊缝布置应尽量避免最大应力位置或应力集中位置。尽管优质的焊接接头能与母材等强度,但焊接时难免出现程度不同的焊接缺陷,使结构的承载能力下降。所以在设计受力的焊接结构时,最大应力和应力集中的位置不应布置焊缝。在图 4 5 .6a 中,大跨度钢梁的最大应力处在钢梁中间,若整个钢梁

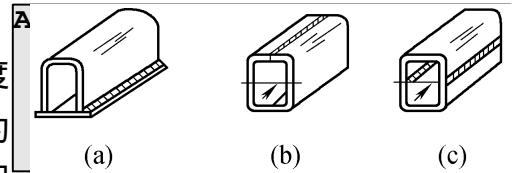


图 4 5 5 焊缝布置应对称

结构由两段型材焊成,焊缝正布置在最大应力处,整个结构的承载能力下降,若改用 b 图结构,钢梁由三段型材焊成,虽增加了一条焊缝,但焊缝避开了最大应力处,提高了钢梁的承载能力。压力容器结构设计,为使焊缝避开应力集中的转角处,不应采用图 4 5 6c 所示的无折边封头结构,应采用 d 图所示有折边封头结构。

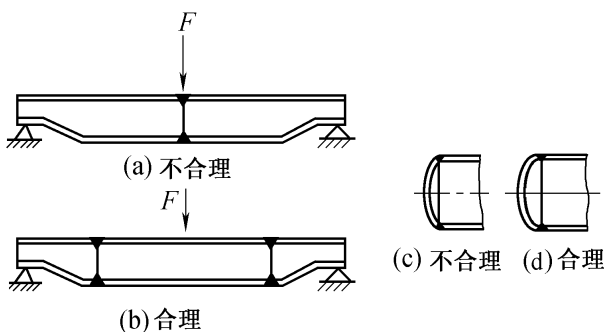


图 4 5 6 焊缝应避开应力集中处的布置

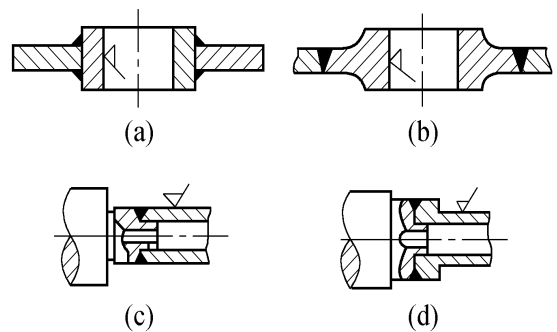


图 4 5 7 焊缝布置应避开机加工表面

5) 焊缝布置应避开机加工表面。有些焊件某些部位需切削加工,如采用焊接结构制造的零件如轮毂等,如图 4 5 .7 所示。为机加工方便,先车削内孔后焊接轮辐,为避免内孔加工精度受焊接变形影响,必须采用图 b 结构,焊缝布置离加工面远些。对机加工表面要求高的零件,由于焊后

接头处的硬化组织,影响加工质量,焊缝布置应避开机加工表面,如图4-5-7d所示结构比c合理。

## 2. 焊接方法的选择

各种焊接方法都有其各自特点及适用范围,选择焊接方法时要根据焊件的结构形状及材质、焊接质量要求、生产批量和现场设备等,在综合分析焊件质量、经济性和工艺可能性之后,确定最适宜的焊接方法。

常用焊接方法的特点及适用范围见表4-5-1。

选择焊接方法时应依据下列原则:

### (1) 焊接接头使用性能及质量要符合结构技术要求

选择焊接方法时既要考虑焊件能否达到力学性能要求,又要考虑接头质量是否符合技术要求。如点焊、缝焊都适于薄板轻型结构焊接,缝焊才能焊出有密封要求的焊缝。又如氩弧焊和气体保护焊都能焊接铝材容器,但接头质量要求高时,应采用氩弧焊。又如焊接低碳钢薄板,若要求焊接变形小时,应选用 $CO_2$ 焊或点(缝)焊,而不宜选用气焊。

### (2) 提高生产率,降低成本

若板材为中等厚度时,选择焊条电弧焊、埋弧焊和气体保护焊均可,如果是平焊长直焊缝或大直径环焊缝,批量生产,应选用埋弧焊。如果是位于不同空间位置的短曲焊缝,单件或小批量生产,采用焊条电弧焊为好。氩弧焊几乎可以焊接各种的金属及合金,但成本较高,所以主要用于焊接铝、镁、钛合金结构及不锈钢等重要焊接结构。焊接铝合金工件,板厚 $>10\text{ mm}$ 采用熔化极氩弧焊为好,板厚 $<6\text{ mm}$ 采用钨极氩弧焊适宜。若是板厚 $>40\text{ mm}$ 钢材直立焊缝,采用电渣焊最适宜。

### (3) 焊接现场设备条件及工艺可能性

选择焊接方法时,要考虑现场是否具有相应的焊接设备,野外施工有没有电源等。此外,要考虑拟定的焊接工艺能否实现。例如,无法采用双面焊工艺又要求焊透的工件。采用单面焊工艺时,若先用钨极氩弧焊(甚至钨极脉冲氩弧焊)打底焊接,更易于保证焊接质量。

## 3. 焊接接头设计

焊接接头设计包括焊接接头形式设计和坡口形式设计。设计接头形式主要考虑焊件的结构形状和板厚、接头使用性能要求等因素。设计坡口形式主要考虑焊缝能否焊透、坡口加工难易程度、生产率、焊条消耗量、焊后变形大小等因素。

### (1) 焊接接头形式设计

焊接接头按其结合形式分为对接接头、盖板接头、搭接接头、T形接头、十字形接头、角接接头和卷边接头等,如图4-5-8所示。其中常见的焊接接头形式有对接接头、搭接接头、角接接头和T形接头。

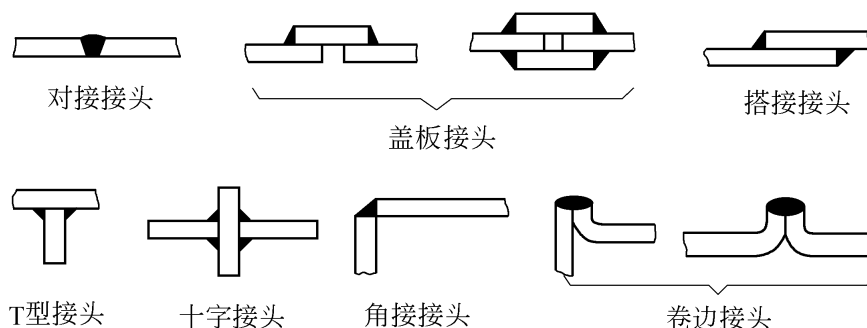


图4-5-8 焊接接头形式

表 4 5 .1 常用焊接方法的特点及适用范围

焊接方法	焊接热源	可焊空间位置	适用钢板厚度/mm	焊缝成形性	生产率	设备费用	可焊材料	适用范围及特点
气焊	氧 - 乙炔气体或其他可燃气体	全位置	1~3	较差	低	低	碳钢、低合金钢、铸铁、铝及铝合金、铜及铜合金	薄板、薄管焊件,灰铸铁补焊,铝、铜及其合金薄板结构件的焊接、补焊。但焊件变形大,焊接质量较差
焊条电弧焊	电弧	全位置	> 1 常用 2~10	较好	中等	较低	碳钢、低合金钢、不锈钢、铸铁等	成本较低,适应性强,可焊各种空间位置的短、曲焊缝
埋弧焊	电弧	平焊	3 常用 4~60	好	高	较高	碳钢、低合金钢等	成批生产、中厚板长直焊缝和直径 > 250 mm 环焊缝
氩弧焊	电弧	全位置	0.5~25	好	中等	较高	铝、铜、钛、镁及其合金、不锈钢、耐热钢	焊接质量好,成本高
CO <sub>2</sub> 焊	电弧	全位置	0.8~50 常用于薄板	较好	高	较高	碳钢、低合金钢	生产率高,无渣壳,成本低,宜焊薄板,也可焊中厚板,长直或短曲焊缝
电渣焊	电阻热	立焊	25~1000 常用 40~450	好	高	高	碳钢、低合金钢、铸铁	较厚工件立焊缝
点焊	电阻热	全位置	常用 0.5~6	好	很高	较低~较高	碳钢、低合金钢、铝及铝合金	焊接薄板,接头为搭接
缝焊		平焊	< 3			较高		焊接有密封要求的薄板容器和管道,接头为搭接
对焊			—			高		较低~较高
钎焊	各种热源(常用烙铁和氧-乙炔焰)	平、立焊	—	好	高	一般为金属材料	常用于电子元件、仪器、仪表及精密机械零件的焊接,还可完成其他焊接方法难以完成的异种金属间焊接。但接头强度较低,接头多为搭接	

对接接头应力分布均匀,节省材料,易于保证质量,是焊接结构中应用较多的一种,但对下料尺寸和焊前定位装配尺寸要求精度高。锅炉、压力容器等焊件常采用对接接头。搭接接头不在同一平面,接头处部分相叠,应力分布不均匀,会产生附加弯曲力,降低了疲劳强度,多耗费材料,但对下料尺寸和焊前定位装配尺寸要求精度不高,且接头结合面大,增加承载能力,所以薄板、细杆焊件如厂房金属屋架、桥梁、起重机吊臂等桁架结构常用搭接接头。点焊、缝焊工件的接头为搭接,钎焊也多采用搭接接头,以增加结合面。角接接头和T形接头根部易出现未焊透,引起应力集中,因此接头处常开坡口,以保证焊接质量,角接接头多用于箱式结构。对于1~2 mm薄板,气焊或钨极氩弧焊时为避免接头烧穿又节省填充焊丝,可采用卷边接头。

## (2) 焊接接头坡口形式设计

开坡口的根本目的是为使接头根部焊透,同时也使焊缝成型美观,此外通过控制坡口大小,能调节焊缝中母材金属与填充金属的比例,使焊缝金属达到所需的化学成分。加工坡口的常用方法有气割、切削加工(车或刨)和碳弧气刨等。

焊条电弧焊的对接接头、角接接头和T形接头中有各种形式的坡口,其选择主要取决于焊件板材厚度。

1) 对接接头坡口形式设计 对接接头的坡口基本形式有I形坡口、Y形坡口、双Y形坡口、带钝边U形坡口、带钝边双U形坡口、单边V形坡口、双单边V形坡口、带钝边J形坡口、带钝边双J形坡口等,图4.5.9中列出其中六种坡口形式。此外,还有带垫板的I形坡口等。

2) 角接接头坡口形式设计 角接接头的坡口基本形式有I形坡口、错边I形坡口、Y形坡口、带钝边单边V形坡口、带钝边双单边V形坡口等。如图4.5.10所示。

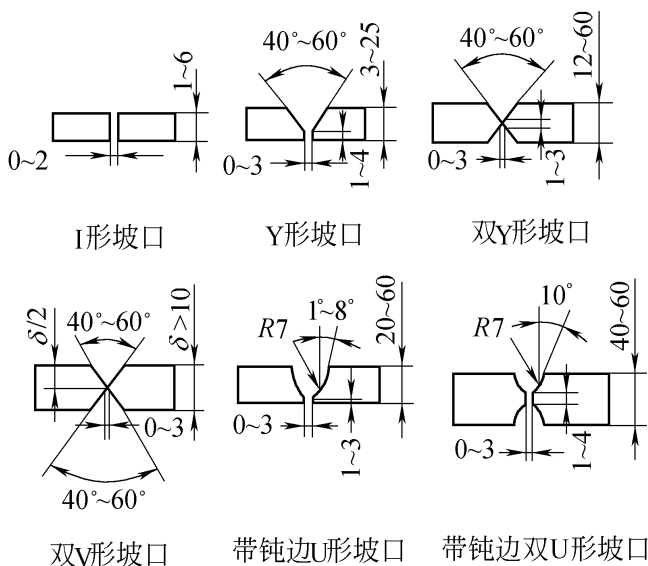


图 4.5.9 几种对接接头坡口形式

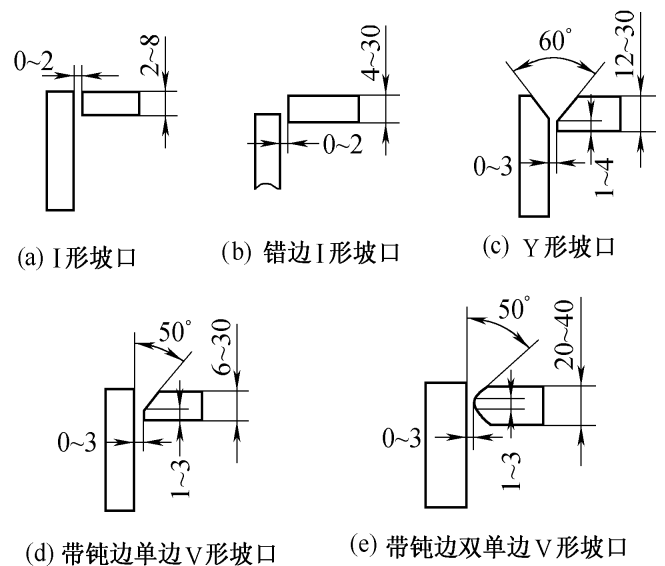


图 4.5.10 几种角接接头坡口形式

3) T形接头坡口形式设计 T形接头的坡口基本形式有I形坡口、带钝边单边V形坡口、带钝边双单边V形坡口等,见图4.5.11所示。

焊条电弧焊板厚<6 mm时,一般采用I形坡口,但重要结构件板厚>3 mm就需开坡口,以保证焊接质量。板厚在6~26 mm之间可采用Y形坡口,这种坡口加工简单,但焊后角变形大。板厚在12~60 mm之间可采用双Y形坡口;同等板厚情况下,双Y形坡口比Y形坡口需要的填充金属量约少1/2,且焊后角变形小,但需双面焊。带钝边U形坡口比Y形坡口省焊条,省焊接工



时,但坡口加工麻烦,需切削加工。

埋弧焊焊接较厚板采用I形坡口时,为使焊剂与焊件贴合,接缝处可留一定间隙。

坡口形式的选择既取决于板材厚度,也要考虑加工方法和焊接工艺性。如要求焊透的受力焊缝,能双面焊尽量采用双面焊,以保证接头焊透,变形小,但生产率下降。若不能双面焊时才开单面坡口焊接。

对于不同厚度的板材,为保证焊接接头两侧加热均匀,接头两侧板厚截面应尽量相同或相近,如图4.5.12所示。不同厚度钢板对接时允许的厚度差见表4.5.2。

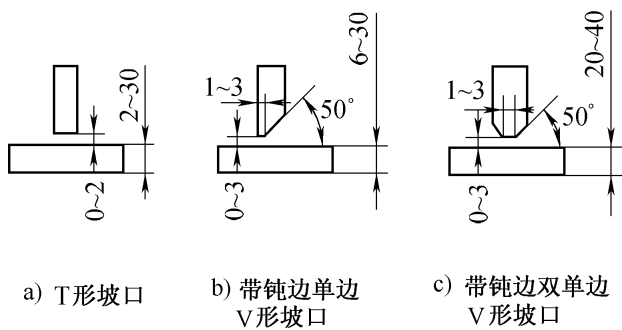


图 4.5.11 三种 T 形接头坡口形式图

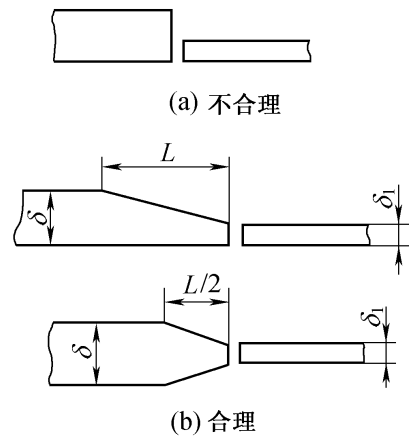


图 4.5.12 不同板厚对接

表 4.5.2 不同厚度钢板对接允许厚度差

较薄板的厚度 $\delta_1$	>2~5	>5~9	>9~12	>12
允许厚度差	1	2	3	4

### 4.5.3 焊接结构工艺设计实例

**例题** 图4.5.13a所示低压储气罐,壁厚8mm,压力为1.0MPa,温度为常温,介质为压缩空气,大批量生产。

焊接结构工艺设计要求如下:

(1) 图4.5.13b所示为低压贮气罐装配焊接图,筒节、封头、封头 焊合成筒体,贮气罐由筒体及四个法兰管座焊合而成。

(2) 选择母材材料 根据技术参数,考虑到封头拉深、筒节卷圆、焊接工艺及成本,筒节、封头及法兰选用塑性和焊接性好的普通碳素结构钢 Q235 - A,短管选用优质碳素结构钢 10。

(3) 设计焊缝位置及焊接接头、坡口形式 筒节的纵焊缝和筒节与封头相连处的两条环焊缝均采用对接I形坡口双面焊,法兰与短管焊合采用不开坡口角焊缝,法兰管座与筒体焊合采用开坡口角焊缝。

(4) 选择焊接方法和焊接材料 由于各条角焊缝长度均较短,且大部分焊缝在弧面上,故采用焊条电弧焊方法,焊条选用 E4303(J422),选用弧焊变压器(因用酸性焊条)。焊接三条纵、环焊缝时,为保证质量,提高生产率,采用埋弧焊方法,焊丝选用 H08A,配合焊剂 HJ431。

(5) 主要工艺流程如下:

筒体:

(封头):气割下料 拉深 切边 开管座孔  $b d$

(筒节) 剪切下料 卷圆 焊接内纵缝 焊接外纵缝 筒节与封头、组对 开管座孔  $a, c$  焊接内环缝 焊接外环缝 射线探伤 法兰、短管、筒体装配与焊接 清理 水压试验 气密性试验。

法兰管座:

(法兰):下料 切削加工 钻孔

(短管):下料

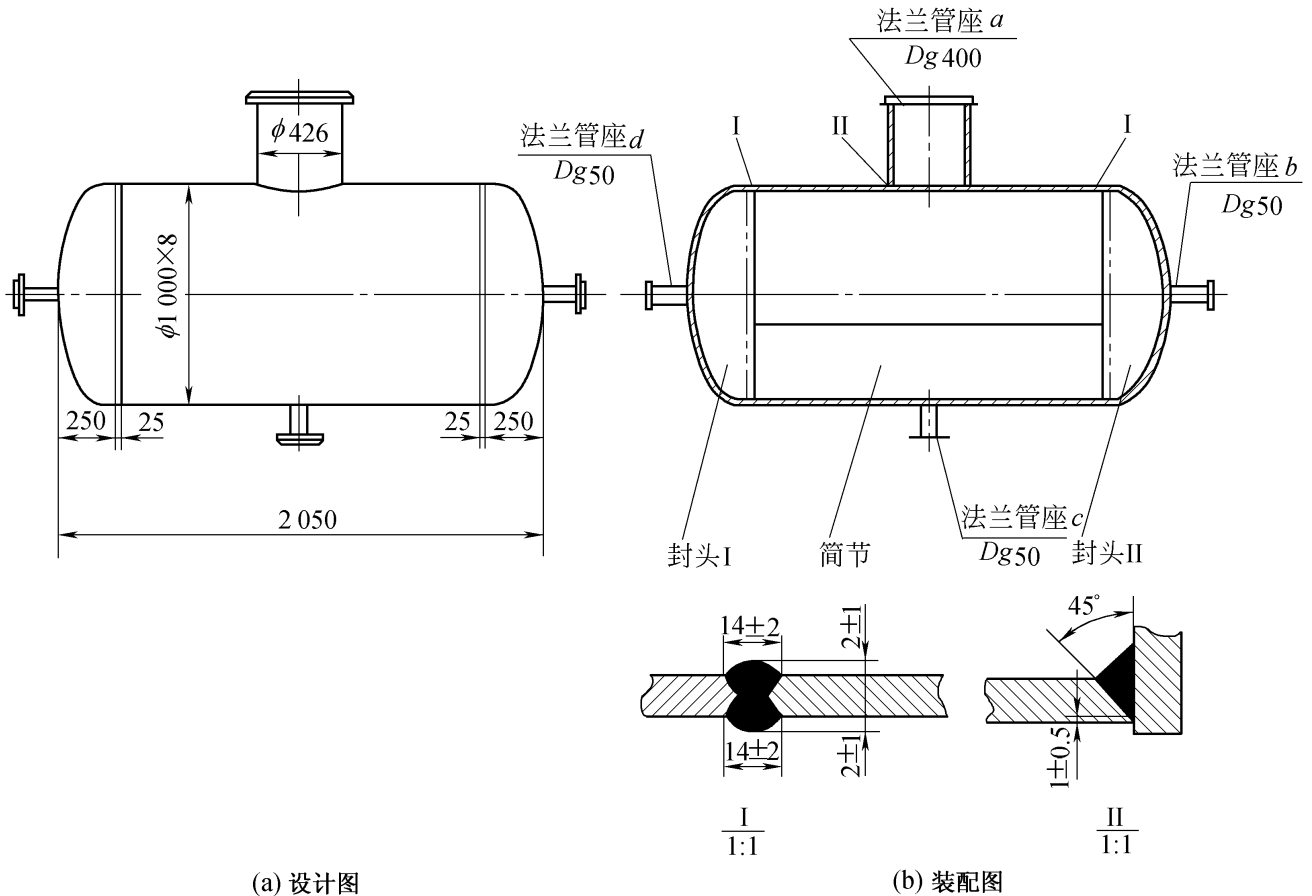


图 4.5.13 低压储气罐设计、装配示意图

## 复习与思考题

- 4-1 焊接电弧是如何产生的? 电弧中各区的温度有多高? 用直流或交流电焊接效果一样吗?
- 4-2 焊接时为什么要进行保护? 说明各电弧焊方法中的保护方式和保护效果有什么不同?
- 4-3 焊芯的作用是什么? 其化学成分有何特点? 焊条药皮有哪些作用?
- 4-4 何谓焊接热影响区? 低碳钢焊接时各有哪些区段? 各区段组织性能变化如何? 对接头性能有何影响?
- 4-5 如何防止焊接变形? 减少焊接应力的工艺措施有哪些?
- 4-6 你所了解的其他焊接方法有哪些? 各有什么特点?
- 4-7 低碳钢焊接有何特点? 普通低合金钢焊接的主要问题是什么? 焊接时应采取哪些措施?
- 4-8 奥氏体不锈钢焊接的主要问题是什么?
- 4-9 铝、铜及其合金焊接常用哪些方法? 优先采用哪一种为好? 为什么?

## 第5章 机械零件毛坯的选择

机械零件的制造包括毛坯成形和切削加工两个阶段。毛坯成形不仅对后续的切削加工将产生很大的影响,而且对零件乃至机械产品的质量、使用性能、生产周期和成本等都有影响。因此,正确选择毛坯的类型和成形方法对于机械制造具有重要意义。本章具体介绍各类毛坯的特点、适用范围、毛坯选择的原则及典型零件毛坯的选择。

### 5.1 常见零件毛坯的分类与比较

#### 5.1.1 毛坯类型及制造方法的比较

机械零件的常用毛坯包括铸件、锻件、轧制型材、挤压件、冲压件、焊接件、粉末冶金件和注射成型件等。

各类毛坯制造方法及其主要特点的比较见表 5.1.1。

表 5.1.1 常用毛坯制造方法及其主要特点的比较

毛坯类型 比较内容	铸 件	锻 件	冲 压 件	焊 接 件	轧 材
成形特点	液态下成形	固态下塑性变形	同锻件	永久性连接	同锻件
对原材料工艺性能要求	流动性好,收缩率低	塑性好,变形抗力小	同锻件	强度高,塑性好,液态下化学稳定性好	同锻件
常用材料	灰铸铁、球墨铸铁、中碳钢及铝合金、铜合金等	中碳钢及合金结构钢	低碳钢及有色金属薄板	低碳钢、低合金钢、不锈钢及铝合金等	低、中碳钢,合金结构钢,铝合金、铜合金等
金属组织特征	晶粒粗大、疏松、杂质无方向性	晶粒细小、致密	拉深加工后沿拉深方向形成新的流线组织,其他工序加工后原组织基本不变	焊缝区为铸造组织,熔合区和过热区有粗大晶粒	同锻件

续表

毛坯类型 比较内容	铸件	锻件	冲压件	焊接件	轧材
力学性能	灰铸铁件力学性能差,球墨铸铁、可锻铸铁及铸钢件较好	比相同成分的铸钢件好	变形部分的强度、硬度提高,结构刚度好	接头的力学性能可达到或接近母材	同锻件
结构特征	形状一般不受限制,可以相当复杂	形状一般较铸件简单	结构轻巧,形状可以较复杂	尺寸、形状一般不受限制,结构较轻	形状简单,横向尺寸变化小
零件材料利用率	高	低	较高	较高	较低
生产周期	长	自由锻短,模锻长	长	较短	短
生产成本	较低	较高	批量越大,成本越低	较高	低
主要适用范围	灰铸铁件用于受力不大或承压为主的零件,或要求有减震、耐磨性能的零件;其他铁碳合金铸件用于承受重载或复杂载荷的零件;机架、箱体等形状复杂的零件	用于对力学性能,尤其是强度和韧性要求较高的传动零件和工具、模具	用于以薄板成形的各种零件	主要用于制造各种金属结构,部分用于制造零件毛坯	形状简单的零件
应用举例	机架、床身、底座、工作台、导轨、变速箱、泵体、阀体、带轮、轴承座、曲轴、齿轮等	机床主轴、传动轴、曲轴、连杆、齿轮、凸轮、螺栓、弹簧、锻模、冲模等	汽车车身覆盖件、电器及仪器、仪表壳及零件、油箱、水箱、各种薄金属件	锅炉、压力容器、化工容器、管道、厂房构架、吊车构架、桥梁、车身、船体、飞机构件、重型机械的机架、立柱、工作台等	光轴、丝杠、螺栓、螺母、销子等

由于每种类型的毛坯都可以有多种制造方法,各类毛坯在某些方面的特征可以在一定范围内变化。因此,表中所列特点并不是绝对的,只是就一般情况比较而言。例如:铸件中一般砂型铸件晶粒组织粗大而疏松,但压力铸造的薄壁铸件晶粒细小而致密;一般铸件的力学性能差,但一些球墨铸铁的强度,尤其是屈强比( $\sigma_s/\sigma_b$ ),可以超过碳钢的锻件;锻件是固态下成形,金属流动困难,加工余量较大,材料利用率一般较低,但精密锻造的锻件和冷挤压件,可以基本上实现零件的最终成形,材料利用率也很高;铸件因工序多,模锻件和冲压件因模具制造复杂,一般生产周期较长。但小而简单的铸件、模锻件和冲压件的生产周期也可以很短。相反,对于一

般生产周期较短的焊接,有时焊接大而复杂的焊件时,生产周期也可能很长。

### 5.1.2 毛坯生产成本的比较

毛坯的生产成本涉及因素很多。在保证零件使用要求的前提下,提高生产率,降低生产成本,是毛坯生产中的一个重要问题。

#### 1. 铸件的生产成本

影响铸件生产成本的主要因素有铸件设计、铸造方法、铸造工艺和铸造生产管理等方面。

##### (1) 铸件设计

铸件设计主要包括材料的选择和结构尺寸的确定。铸件材料对铸件成本影响较大。各类铸造材料的相对价格见表 5.1.2,由表中数据可知,灰铸铁的相对价格最低。因此,在保证零件使用要求的前提下,选用灰铸铁可使生产成本降低。

表 5.1.2 各类铸造材料的相对价格

材料类型	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	碳钢	低锰钢	含铬钢	铝硅合金	黄铜	锡青铜
相对价格	0.6	0.8	1.0	1.0	1.2	1.4	6.0	5.0	8.0

铸件的结构形状和尺寸对成本的影响主要是通过铸件的结构工艺性来起作用的。如果铸件的结构工艺性良好,可防止铸件缺陷的产生,使废品率下降,并能使铸造工艺过程简化,从而提高生产率,使铸件的生产成本降低。

##### (2) 铸造方法的选择

铸造方法不同,则铸造工艺、所需设备投资、生产率、铸件质量、合金的利用率及后续的切削加工费用均不同。各铸造方法的经济性比较见表 5.1.3。由表可知,在小批量生产的情况下砂型铸造的生产成本较低;在大批量生产的情况下,由于对生产率要求较高,而设备费用分摊到单个铸件上的数额较小,所以金属型、压力铸造等铸造方法的生产成本较低。

##### (3) 铸造工艺

砂型铸造中,其造型工艺过程不同,则铸件生产过程中的材料消耗、工时和工模具费用的耗费都不同。各种造型方法的经济性比较见表 5.1.4。由表可知,在生产批量较小的情况下,挖砂造型、刮板造型的成本较低;在生产批量较大时,整模或分模造型、外型芯造型等的经济性较好;在大批量生产的情况下,则以机器造型单个零件的生产成本为最低。

表 5.1.3 各种铸造方法的经济性比较

比较项目	砂型铸造	金属型铸造	压力铸造	离心铸造	熔模铸造
小批量生产的适应性	好	良好	不好	不好	良好
大批量生产的适应性	良好	良好	好	良好	良好
模型、铸型生产成本	低	中等	高	中等	较高
铸件的加工余量	大	较大	最小	大(内孔)	较小
切削加工费用	中等	较小	最小	较大	较小
金属利用率	较低	较高	较低	较低	较差
设备费用	较高(机器造型)	较低	较高	中等	较高
生产率(适当机械化后)	低、中	中等	高	高	中等

表 5.1.4 砂型铸造各种造型方法经济性的比较

比较项目	适应的生产类型	生产率	设备、模具费用
整模造型	各种类型	较高	较低
分模造型	成批、大量	较高	中
挖砂造型	单件、小批	低	低
假箱造型	成批	中	中
三箱造型	单件、小批	低	中
刮板造型	单件、小批	低	低
外型芯造型	成批	中	中
机器造型	成批、大量	高	高

#### (4) 生产管理

科学的生产管理能明显降低废品率和生产过程中原材料的浪费,精简管理人员,减少非生产性成本,都可使毛坯的生产成本下降。

#### 2. 锻件的生产成本

影响锻件成本的主要因素有原材料消耗、工模具费消耗、锻造方法、生产率及生产管理等方面。例如,某专业锻造厂生产 95 系列柴油机连杆及连杆盖锻件的单件成本统计中,锻件生产成本的组成为:材料费 43.8%、模具费 31.2%、燃料动力费 9.1%、生产管理费用 14.1%、工时消耗费用 1.7%。

#### (1) 原材料消耗

原材料消耗在锻件成本中占的比例最大,而锻件从下料到加工成零件中间有一系列的材料损失,如下料损失、烧损、废料(冲孔芯料和飞边等)和废品损失。根据对上述连杆和连杆盖的材料利用率所作的统计(见表 5.1.5),说明提高材料利用率,降低原材料消耗,对锻件生产成本的降低其影响是很明显的。

表 5.1.5 某厂 95 系列柴油机连杆和连杆盖的材料消耗

分类	下料质量/kg	锻件质量/kg	零件质量/kg	零件材料利用率	总材料利用率
连杆	2.55	1.70	1.15	$1.15/1.70 = 67.6\%$	$1.15/2.55 = 45.1\%$
连杆盖	0.94	0.65	0.48	$0.48/0.65 = 73.8\%$	$0.48/0.94 = 51.1\%$
合计	3.49	2.35	1.63	$1.63/2.35 = 69.4\%$	$1.63/3.49 = 47.0\%$

材料利用率的提高,一方面可以通过降低锻造过程中的下料损失、废料损失、烧损和废品损失来获得,另一方面可以通过减少锻造余块、加工余量来获得,这样既可降低材料消耗,又可以减少大量的切削加工费用。所以,精密锻造是降低锻件生产成本的主要途径之一。

#### (2) 工模具费消耗

在模锻中,模具费用在锻件成本中所占的比例仅次于原材料消耗,约占总成本的 1/3。合理地设计、制造和使用模具,减少模具的成本,延长模具的使用寿命,可明显降低锻件生产成本。

#### (3) 锻造方法和生产率

锻造方法不同,其生产率、材料利用率和需要的设备投资规模就不同。因此,锻造方法主要通过锻件生产的工时消耗、投资规模及材料的利用率来影响锻件的生产成本。

锻造方法的选择应视其具体的生产规模而论。从降低成本的角度来说,对于单件小批量生产,自由锻是优先选用的锻造方法,以降低设备、模具的总投入;对于成批生产但批量不大时,应

优先选择胎模锻 因为胎模锻具有较高的生产率且能保证一定的锻件精度 ,其设备、模具的投资并不太大 ,可以获得比较好的经济效益 ;对于大批量生产 ,则应采用高生产率、高精度的锤上模锻或其他模锻 ,以便提高生产率 ,降低材料的消耗 ,虽然设备、模具等方面的投资增大 ,但由于生产量大而分摊到单个锻件上的成本增加并不多 ,从而使锻件成本下降。

#### (4) 生产管理

实行科学的生产管理 ,生产过程中的浪费和废品必然较少 ,非生产性成本较低 ,其生产成本也较低。

### 3. 冲压件的生产成本

冲压件的生产成本主要包括材料消耗费(原材料费、外购件费用)、加工费(工人工资、设备折旧、生产管理等费用)、模具费等。

因为冲压件的生产离不开模具 ,不管生产批量的大小如何 ,冲压件的生产总成本中 ,模具费相差不是很大。所以 ,单个冲压件的生产成本受生产批量的影响极大。要降低冲压件的生产成本 ,主要从以下几个方面考虑。

#### (1) 节约模具费

试制和小批量生产冲压件时 ,降低模具费是降低生产成本的最有效途径。除工件质量要求严格必须采用正规的高价模具外 ,在能保证使用要求的前提下 ,一般都是使用工序分散、结构简单、制造周期短而价格低廉的简易模具 ,采用焊接、机械加工及钣金加工等方法制成。对于外形尺寸小的工件 ,采用通用模、简单模、甚至钢丝钳、剪刀等工具生产 ;对于外形尺寸较大的工件 ,可用剪床、电动工具、火焰切割等方法。

大批量生产冲压件时 ,采用高合金钢或硬质合金模具 ,通过提高生产率和延长模具使用寿命来减少单件的生产成本。

#### (2) 合理制订生产工艺

合理的冲压工艺能降低模具费 ,节约加工工时 ,降低材料消耗等 ,使冲压件单件成本降低。

工艺的合理化即是将工序适当地集中 ,以减少模具数 ,提高生产率 ,降低生产成本。例如某汽车前大灯的外壳 ,图 5.1.1a 所示为原设计 ,生产过程中需拉深五次 ,酸洗退火两次 ;在保证使用要求的前提下改为图 5.1.1b 所示的形状后 ,一次拉深成功 ,节省了材料 ,降低了成本。

但是 ,工序的集中与分散是一个比较复杂的问题 ,它取决于零件的生产批量、结构形状、质量要求及工艺特点等。在大批量生产情况下 ,一般应尽量将工序集中 ,采用复合模或连续模。但工序集中也不宜过多 ,一般对于复合模为 2~3 道工序 ,最多为 4 道工序 ,对于连续模可稍多一些。

#### (3) 多个工件同时成形

生产批量较大时 ,采用多件同时冲压 ,可减少模具费、材料费和加工费。例如 ,采用两个工件左右对称成形 ,如图 5.1.2 所示 ,不仅可以降低成本 ,还可使变形均匀 ,并改

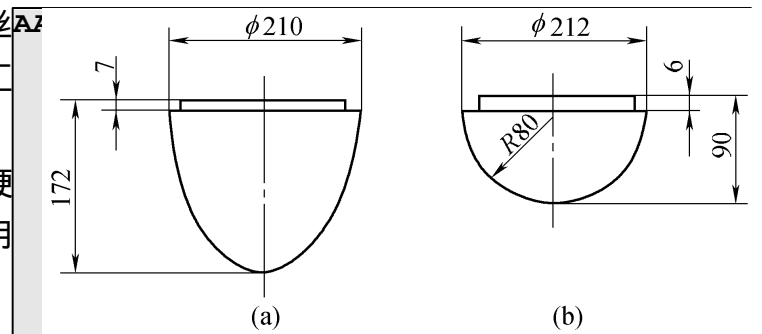


图 5.1.1 某汽车前大灯外壳的形状改进

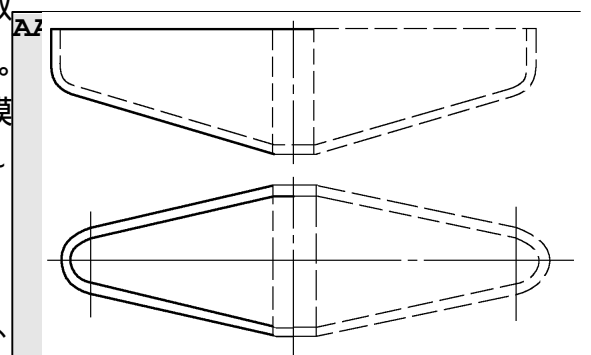


图 5.1.2 两个工件同时成形示意图

善模具的受力状况,延长模具的使用寿命。

#### (4) 提高材料利用率、降低材料费用

冲压件生产中,工件原材料费占成本的60%左右,所以提高材料的利用率,是降低冲压件生产成本的重要措施之一,尤其对于原材料价格较高的工件更是如此。

因此,在满足零件使用要求的前提下,减少材料厚度或采用价格较低的材料;改进毛坯形状,合理排样,减小搭边,采用少废料或无废料排样;采用对称压制,多件同时成形后再切开;组合排样利用废料;无底拉深件可先用带料或条料焊接后再成形等。

#### (5) 冲压过程自动化

对于大批量生产,自动化生产对降低成本和保证安全都是十分必要的。

## 5.2 毛坯选择的原则

### 5.2.1 满足材料的工艺性能要求

零件材料的选择与毛坯的选择关系密切,零件材料的工艺性能直接影响着毛坯生产方法的选择。按加工工艺方法的不同,金属材料可分为铸造合金和压力加工合金两大类。各种材料与毛坯生产方法的关系见表5.2.1。

表5.2.1 材料与毛坯生产方法的关系

材料 毛坯 生产方法	低碳钢	中碳钢	高碳钢	灰铸铁	铝合金	铜合金	不锈钢	工具钢 模具钢	塑料	橡胶
砂型铸造										
金属型铸造										
压力铸造										
熔模铸造										
锻造										
冷冲压										
粉末冶金										
焊接										
挤压型材改制										
冷拉型材改制										
备注									可压制及吹塑	可压制

注:表中“ ”表示材料适宜或可以采用的毛坯生产方法。

根据表5.2.1可以粗略地估计各种材料所能适应的毛坯生产方法和各种方法所能适应的材料。例如,碳素钢主要适应锻造生产,但有些碳素钢也具有较好的铸造性能。这时就要在保证满足力学性能要求的前提下,根据材料工艺性能的好坏来作出选择。

应当指出,铸铁、铸铝等铸造合金焊接性一般都较差,因此,在采用“铸—焊”方法生产毛坯时,主要是利用各种铸钢。



### 5.2.2 满足零件的使用要求

机械产品都是由若干零件组成的,保证零件的使用要求是保证产品使用要求的基础。因此,毛坯选择首先必须保证满足零件的使用性能要求。

零件的使用要求主要包括零件的工作条件(通常指零件的受力情况、工作环境和接触介质等)对零件结构形状和尺寸的要求,以及对零件性能的要求。

#### 1. 结构形状和尺寸的要求

机械零件由于使用功能的不同,其结构形状和尺寸往往差异较大,各种毛坯制造方法对零件结构形状和尺寸的适应能力也不相同。所以,选择毛坯时,应认真分析零件的结构形状和尺寸特点,选择与之相适应的毛坯制造方法。

对于结构形状复杂的中小型零件,为使毛坯形状与零件较为接近,应选择铸件毛坯。为满足结构形状复杂的要求,可根据其他方面的要求选择砂型铸造、金属型铸造或熔模铸造等;对于结构形状很复杂且轮廓尺寸不大的零件,宜选择熔模铸造。对于结构形状较为复杂,且抗冲击能力、抗疲劳强度要求较高的中小型零件,宜选择模锻件毛坯;对于那些结构形状相当复杂且轮廓尺寸又较大的大型零件,宜选择组合毛坯。

#### 2. 力学性能的要求

对于力学性能要求较高,特别是工作时要承受冲击和交变载荷的零件,为了提高抗冲击和抗疲劳破坏的能力,一般应选择锻造毛坯,如机床、汽车的传动轴和齿轮等;对于由于其他方面原因需采用铸件,但又要求零件的金相组织致密、承载能力较强的零件,应选择相应的能满足要求的铸造方法,如压力铸造、金属型铸造和离心铸造等。

#### 3. 表面质量的要求

为降低生产成本,现代机械产品上的某些非配合表面有尽量不加工的趋势,即实现少、无切削加工。为保证这类表面的外观质量,对于尺寸较小的非铁金属件,宜选择金属型铸造、压力铸造或精密模锻;对于尺寸较小的钢铁件,则宜选择熔模铸造(铸钢件)或精密模锻(结构钢件)。

#### 4. 其他方面的要求

对于具有某些特殊要求的零件,必须结合毛坯材料和生产方法来满足这些要求。例如,某些有耐压要求的套筒零件,要求零件金相组织致密,不能有气孔、砂眼等缺陷。如果零件选材为钢材,则宜选择型材(如液压油缸常采用无缝钢管);如果零件选材为铸铁,则宜选择离心铸造(如内燃机的汽缸套,其材料为 QT 600 - 2,毛坯即为离心铸造铸件),对于在自动机床上进行加工的中小型零件,由于要求毛坯精度较高,故宜采用冷拉型材,如微型轴承的内、外圈是在自动车床上加工的,其毛坯采用冷拉圆钢。

### 5.2.3 满足降低生产成本的要求

要降低毛坯的生产成本,在选择毛坯时,必须认真分析零件的使用要求及所用材料的价格、结构工艺性、生产批量的大小等各方面情况。首先,应根据零件的选材和使用要求确定毛坯的类别,再根据零件的结构形状、尺寸大小和毛坯生产的结构工艺性及生产批量大小确定具体的制造方法,必要时还可按有关程序对原设计提出修改意见,以利于降低毛坯生产成本。

#### 1. 生产批量较小时的毛坯选择

生产批量较小时,毛坯生产的生产率不是主要问题,材料利用率的矛盾也不太突出,这时应主要考虑的是减少设备、模具等方面的投资,即使用价格比较便宜的设备和模具,以降低生产成本。如使用型材、砂型铸造件、自由锻件、胎模锻件、焊接结构件等作为毛坯。

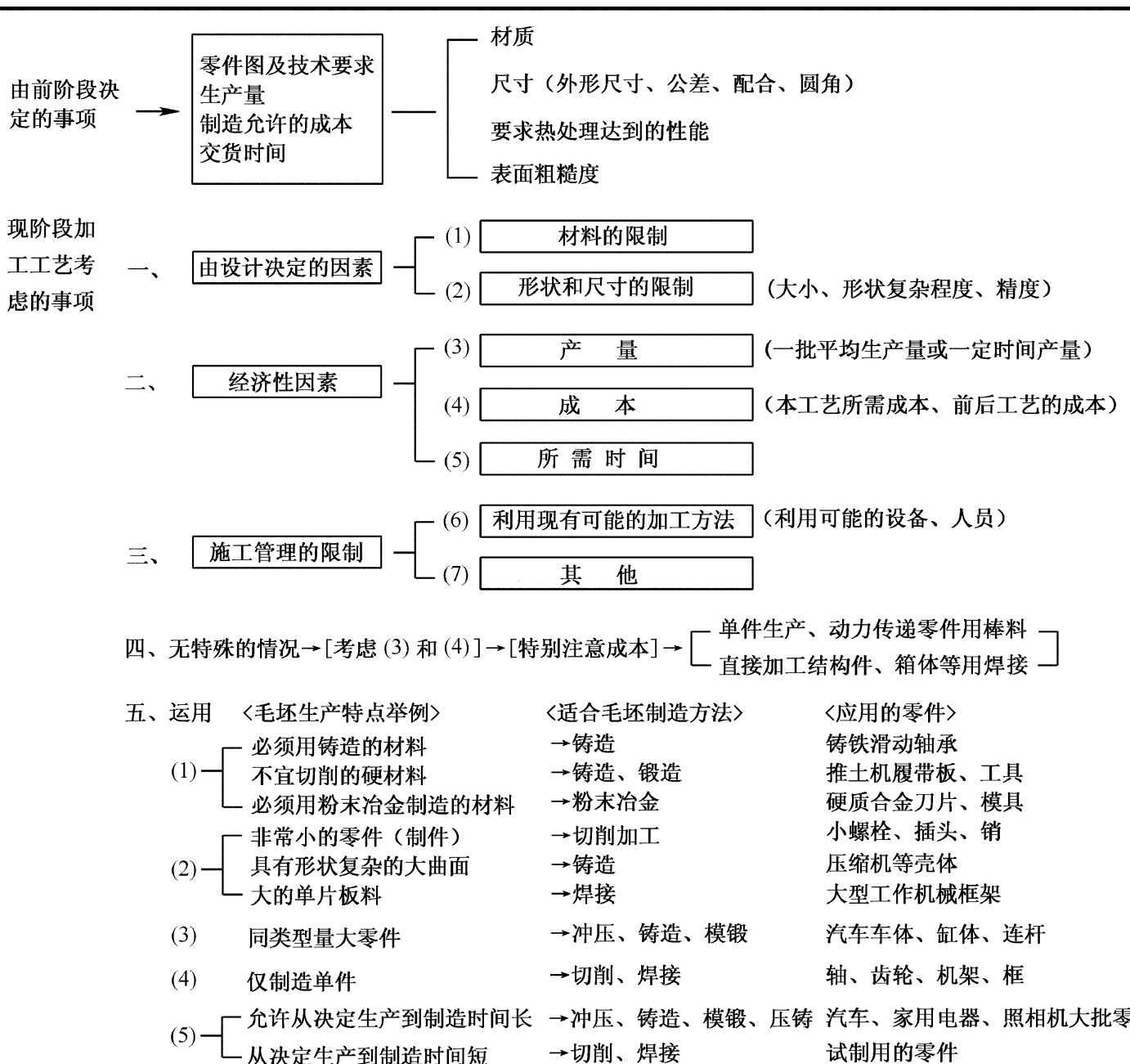
## 2. 生产批量较大时的毛坯选择

生产批量较大时,提高生产率和材料的利用率,降低废品率,对降低毛坯的单件生产成本将具有明显的经济意义。因此,应采用比较先进的毛坯制造方法来生产毛坯。尽管此时的设备造价昂贵、投资费用高,但分摊到单个毛坯上的成本是较低的,并由于工时消耗、材料消耗及后续加工费用的减少和毛坯废品率的降低,从而有效地降低毛坯生产成本。

### 5.2.4 符合生产条件

为兼顾零件的使用要求和生产成本两方面的原则,在选择毛坯时还必须与本企业的具体生

表 5.2.2 选择毛坯制造方法的顺序



产条件相结合。当对外订货的价格低于本企业生产成本,且又能满足交货期要求时,应当向外订货,以降低成本。

考虑生产条件要认真分析以下三方面的情况:当代毛坯生产的先进技术与发展趋势,在不脱离我国国情及本厂实际的前提下,尽量采用比较先进的毛坯生产技术;产品的使用性能和成本方面对毛坯生产的要求;本厂现有毛坯生产能力状况,包括生产设备、技术力量(含工程技术人员和技术工人)、厂房等方面的情况。

总之,毛坯选择应在保证毛坯质量的前提下,力求选用高效、低成本、制造周期短的毛坯生产方法。选择毛坯制造方法的顺序见表5.2.2。首先由设计人员提出毛坯材料和加工后要达到的质量要求。然后,再由工艺人员根据零件图、生产批量或一定时间内的数量,并综合考虑交货期限及现有可利用的设备、人员和技术水平,选定合适的毛坯制造方法,以便在保证产品质量的前提下,获得最好的经济效益。

## 5.3 典型零件毛坯的选择

根据毛坯的选择原则,下面分别介绍轴杆类、盘套类和机架箱体类等典型零件的毛坯的选择方法。

### 5.3.1 轴杆类零件的毛坯选择

轴杆类零件是机械产品中支承传动件、承受载荷、传递扭矩和动力的常见典型零件,其结构特征是轴向(纵向)尺寸远大于径向(横向)尺寸,包括各种传动轴、机床主轴、丝杠、光杠、曲轴、偏心轴、凸轮轴、齿轮轴、连杆、摇臂、螺栓、销子等,如图5.3.1所示。

轴类零件最常用的毛坯是型材和锻件,对于某些大型的、结构形状复杂的轴也可用铸件或焊接结构件。

对于光滑的或有阶梯但直径相差不大的一般轴,常用型材(即热轧或冷拉圆钢)作为毛坯。

对于直径相差较大的阶梯轴或要承受冲击载荷和交变应力的重要轴,均采用锻件作为毛坯。当生产批量较小时,应采用自由锻件;当生产批量较大时,应采用模锻件。

对于结构形状复杂的大型轴类零件,其毛坯可采用砂型铸造件、焊接结构件或铸一焊结构毛坯。

下面举例说明几种轴杆类零件毛坯的选择:

例5.1 如图5.3.2所示为减速器传动轴,工作载荷基本平衡,材料45钢,小批量生产。由于该轴工作时不承受冲击载荷,工作性质一般,且各阶梯轴径相差不大,因此,可选用热轧圆钢作为毛坯。下料尺寸为45mm×220mm。

例5.2 如图5.3.3所示为高精度磨床砂轮主轴,该零件精度要求很高,材料为38CrMoAlA,生产批量中等。该零件属于重要的机械零件,根据结构形状和生产批量,生产

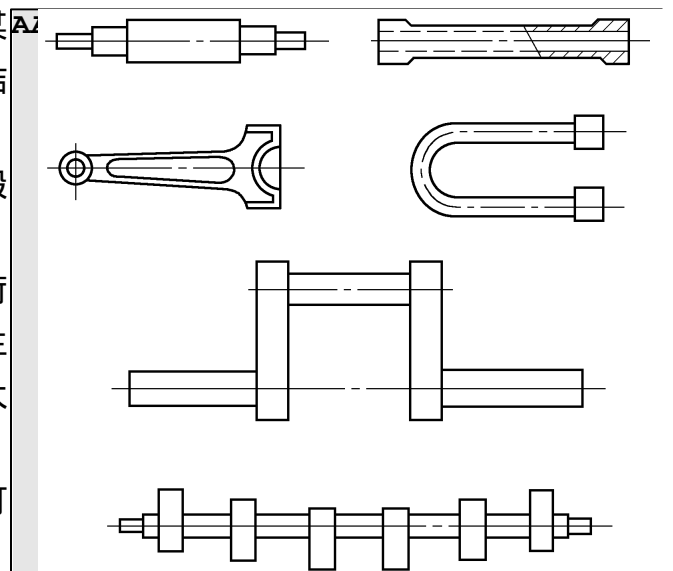


图5.3.1 轴杆类零件

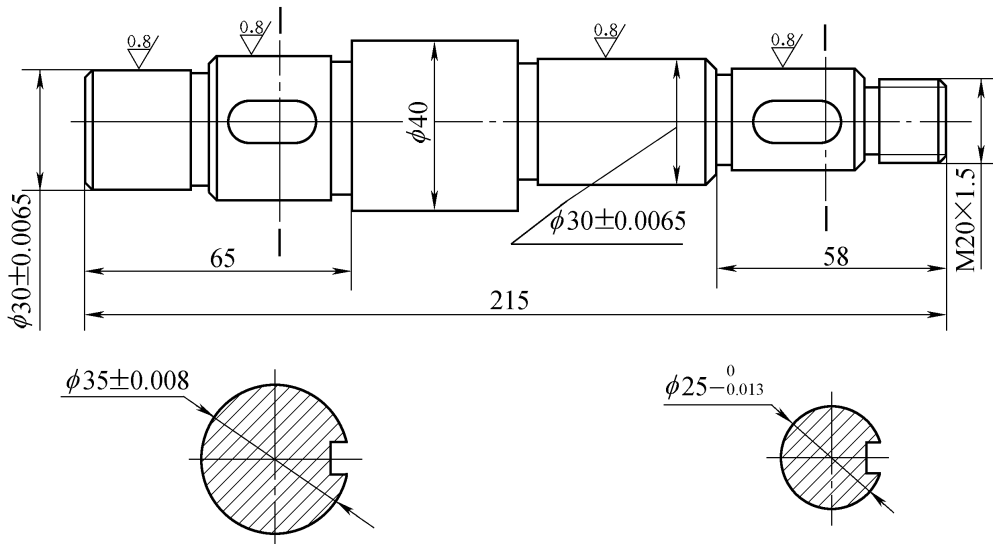


图 5.3.2 减速器传动轴

中应采用模锻件。

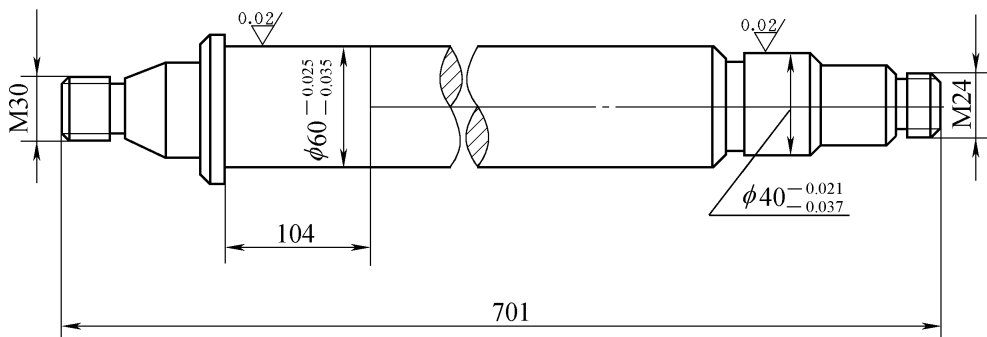


图 5.3.3 高精度磨床砂轮主轴简图

例 5.3 如图 5.3.4 所示为汽车排气阀的外形简图。该零件在高温状态下工作,要求材料为耐热钢,大批量生产。在保证满足零件的使用要求的前提下,为节约较贵重的耐热钢,故采用焊接件毛坯。阀杆部分采用耐热钢,阀帽部分采用碳素结构钢,焊接方法采用电阻焊。

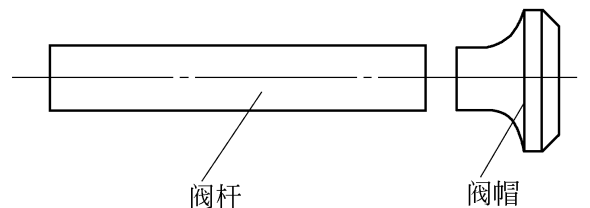


图 5.3.4 焊接的汽车排气阀示意图

例 5.4 如图 5.3.5 所示 1 200 t 水压机立柱。该立柱长 18 m,质量达 80 t,只能选用铸—焊结构毛坯。

采用铸钢 ZG270 - 500 分成六段铸造,经粗加工后用电渣焊焊接成整体毛坯。

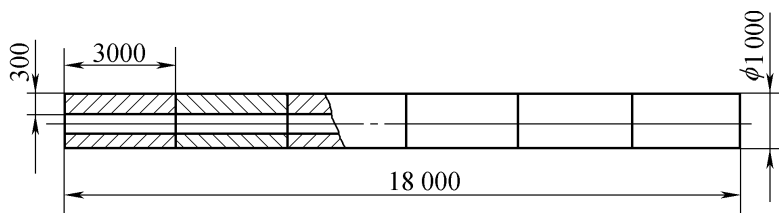


图 5.3.5 铸—焊结构的水压机立柱简图

### 5.3.2 盘套类零件的毛坯选择

盘套类零件是指直径尺寸较大而长度尺寸相对较小的回转体零件(一般长度与直径之比小

于 1) ,如图 5.3.6 所示。

属于这类零件的有各种齿轮、带轮、飞轮、联轴节、套环、轴承环、端盖及螺母、垫圈等。

盘类零件由于其用途不同 ,所用的材料也不相同 ,毛坯生产方法也较多。下面主要讨论几种盘套类零件的毛坯选择问题。

### (1) 圆柱齿轮的毛坯选择

齿轮的毛坯选择取决于齿轮的选材、结构形状、尺寸大小、使用条件及生产批量等因素。

对于钢制齿轮 ,如果尺寸较小且性能要求不高 ,可直接采用热轧棒料 ,除此之外 ,一般都采用锻造毛坯。生产批量较小或尺寸较大的齿轮采用自由锻造 ;生产批量较大的中小尺寸的齿轮采用模锻。

对于直径比较大 ,结构比较复杂的不便于锻造的齿轮 ,采用铸钢毛坯或焊接组合毛坯。

例如 ,大批量生产的汽车变速箱齿轮 ,材料选用 20CrMnTi 钢。由于汽车齿轮要求能够承受较大冲击载荷 ,为满足结构形状和生产批量要求 ,其毛坯采用模锻。

### (2) 带轮的毛坯选择

带轮是通过中间挠性件(各种带)来传递运动和动力的 ,一般载荷比较平稳。因此 ,对于中小带轮多采用 HT150 制造 ,故其毛坯一般采用砂型铸造 ,生产批量较小时用手工造型 ;生产批量较大时可采用机器造型 ;对于结构尺寸很大的带轮 ,为减轻重量可采用钢板焊接毛坯。

### (3) 链轮的毛坯选择

链轮是通过链条作为中间挠性件来传递动力和运动的 ,其工作过程中的载荷有一定的冲击 ,且链齿的磨损较快。

链轮的材料大多使用钢材 ,故其最常用的毛坯为锻件。单件小批生产时 ,采用自由锻造 ;生产批量较大时使用模锻 ,对于新产品试制或修配件 ,亦可使用型材 ;对于齿数大于 50 的从动链轮也可采用强度高于 HT150 的铸铁 ,其毛坯可采用砂型铸造 ,造型方法视生产批量决定。

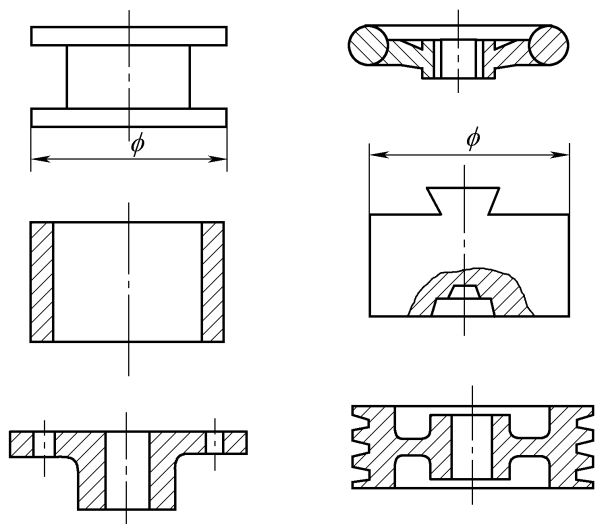


图 5.3.6 盘套类零件

## 5.3.3 箱体机架类零件的毛坯选择

箱体机架类零件是机器的基础件 ,它的加工质量将对机器的精度、性能和使用寿命产生直接影响。这类零件包括机身、齿轮箱、阀体、泵体、轴承座等 ,如图 5.3.7 所示。

由于箱体类零件的结构形状一般都比较复杂 ,且内部呈腔形 ,为满足减振和耐磨等方面的要求 ,其材料一般都采用铸铁。为达到结构形状方面的要求 ,最常见的毛坯是砂型铸造的铸件。在单件小批生产、新产品试制或结构尺寸很大时 ,也可采用钢板焊接毛坯。

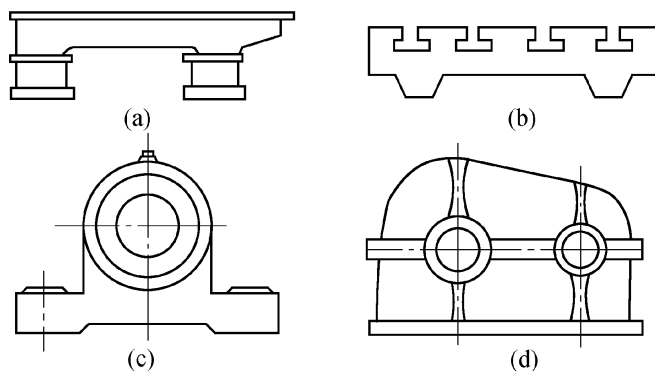


图 5.3.7 箱体、机架类零件

如图 5.3.8 所示为泵体零件图 ,材料为

HT150 ,大批生产。考虑到该零件是泵的支承件 ,结构比较复杂 ,材料为灰铸铁 ,而且生产批量大等因素 ,选择机器造型的砂型铸造方法生产零件毛坯比较适宜。

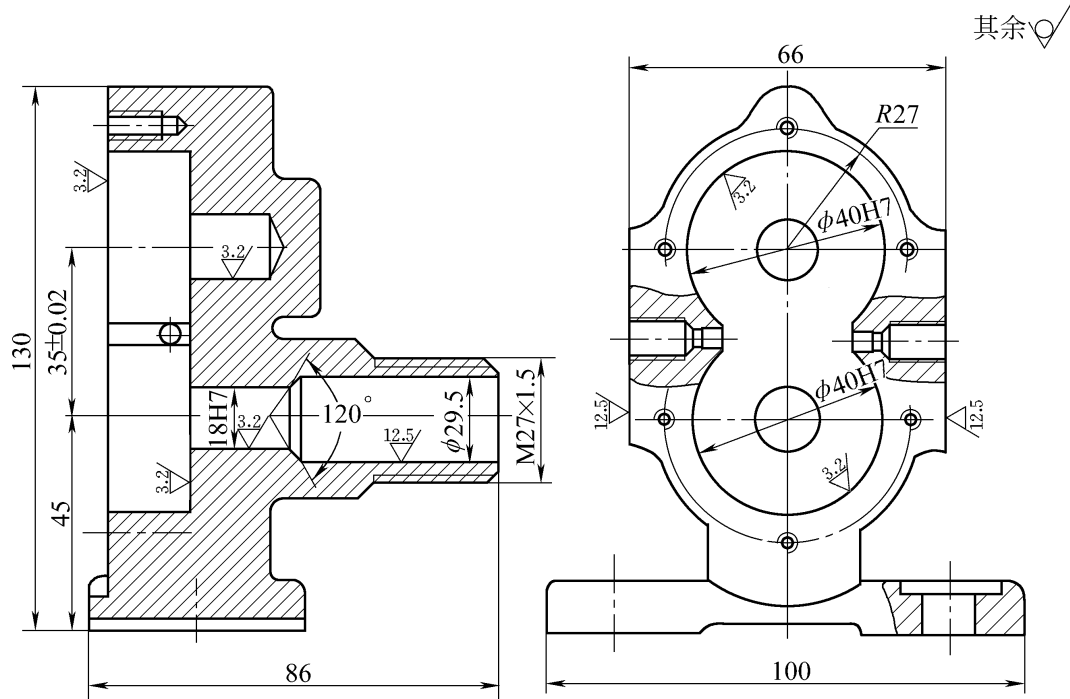
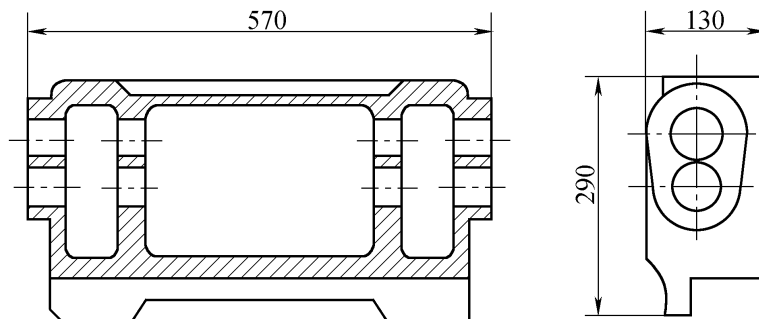


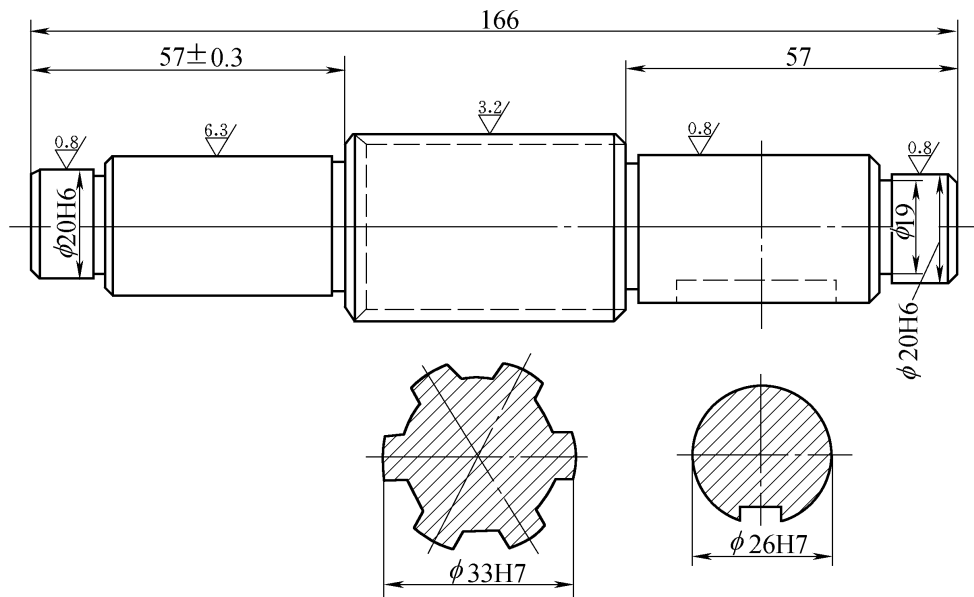
图 5.3.8 泵体零件图

### 复习与思考题

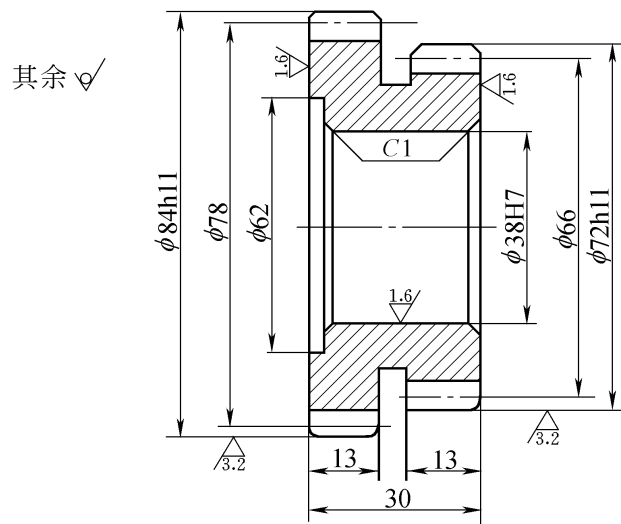
- 5 - 1 常用的毛坯形式有哪几类？选择毛坯应遵循的基本原则是什么？
- 5 - 2 影响毛坯生产成本的主要因素有哪些？根据不同的生产规模 ,如何降低毛坯的生产成本？
- 5 - 3 轴类零件的常用毛坯有哪几种？生产实际中如何选择？
- 5 - 4 箱体机架类零件的常用毛坯有哪几种？生产实际中如何选择？
- 5 - 5 试为下图所示的零件选择合适的毛坯。



(a) 车床进给箱体, 材料 HT200, 中批量生产



(b) 阶梯轴，材料 45 钢，小批生产



(c) 双联齿轮，材料 40Cr，大批生产

题 5 - 5 图

## 第6章 几何量公差

机械产品由若干个零部件装配而成,每一个零件都存在尺寸误差以及各种几何形状误差。各几何要素之间又存在相互位置误差。要提高产品的质量,就要对尺寸、形状和位置规定恰当的公差。对零件表面也要限定它的粗糙度。本章主要讨论这三方面的几何参数即几何量的误差与公差,从“误差”或“精度”的观点出发来分析机械产品的质量。

### 6.1 尺寸公差与配合

#### 6.1.1 极限与配合(GB1800)

##### 1. 有关尺寸的术语

###### (1) 尺寸

尺寸是以特定单位表示线性尺寸值的数值。

###### (2) 基本尺寸(设计给定的尺寸)

通过它应用上、下偏差可算出极限尺寸的尺寸。孔用  $D$  轴用  $d$ (或  $L$ 、 $l$ ),如  $32$ 、 $8.75$ 、……等等。

###### (3) 实际尺寸

通过测量获得的某一孔、轴的尺寸。孔用  $D_a$  轴用  $d_a$ 。由于测量误差的存在,所以实际尺寸不一定是被测尺寸的真值。

###### (4) 局部实际尺寸

一个孔或轴的任意横截面中的任一距离,即任何两相对应点之间测得的尺寸。

###### (5) 极限尺寸

极限尺寸是一个孔或轴所允许尺寸的两个极端(界限值)。实际尺寸应位于其中,也可达到极限尺寸。孔、轴的最大最小极限尺寸分别用  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ 、 $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ 。

##### 2. 有关偏差与公差的术语

###### (1) 偏差

某一尺寸(实际尺寸、极限尺寸……等等)减其基本尺寸所得的代数差称为偏差,偏差可以为正、负或零。

实际偏差  $EA = D_a - D$

$$ea = d_a - d$$

极限偏差 孔的上偏差  $ES = D_{\max} - D$

孔的下偏差  $EI = D_{\min} - D$



$$\text{轴的上偏差 } es = d_{\max} - d$$

$$\text{轴的下偏差 } ei = d_{\min} - d$$

**基本偏差** 在本标准极限与配合制中,确定公差带相对于零线位置的那个极限偏差。它可以是上偏差或下偏差,一般为靠近零线的那个偏差。

### (2) 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(是个没有符号的绝对值),称为尺寸公差。公差是允许尺寸的变动量。

$$\text{孔公差 } T_D = D_{\max} - D_{\min} = ES - EI$$

$$\text{轴公差 } T_d = d_{\max} - d_{\min} = es - ei$$

### (3) 标准公差(IT)

本标准极限与配合制中,所规定的任一公差。

### (4) 标准公差等级

在本标准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。

$$\text{公差 } T = ai \text{ 如 IT7} = 16i$$

式中  $i = f(D)$   $i$  随基本尺寸  $D$  的改变而改变

如尺寸 500 mm 时,国家标准的公差单位(公差因子)  $i$  按下式计算:

$$i = 0.45 \sqrt[3]{D} + 0.001 D (\mu\text{m})$$

对于所有的基本尺寸 IT7 的公差等级系数  $a$  都等于 16 而公差值是不同的。由一系列公式如 IT5 = 7*i* IT6 = 10*i* IT7 = 16*i* IT8 = 25*i*..... 等等可以计算出不同基本尺寸分段下的标准公差值。国家标准已将计算并圆整后的标准公差值列表在表 6.1.1。

### (5) 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一个区域,称为公差带(或尺寸公差带)。

以基本尺寸为零线(零偏差线),用适当的比例画出两极限偏差,以表示尺寸允许变动的界限及范围,称为公差带图(尺寸公差带图),如图 6.1.1。

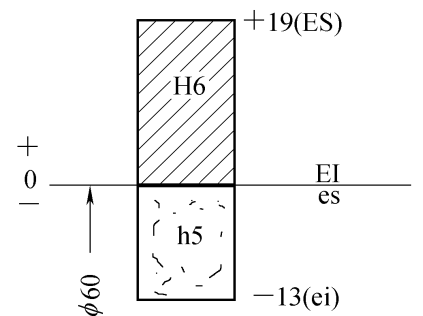


图 6.1.1 公差带图  
(公差配合图解)

## 3. 有关配合的术语

### (1) 间隙与过盈

孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸之差为正,称间隙,用  $X$  表示。孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸之差为负,称过盈,用  $y$  表示。

$$\text{极限间隙 } X_{\max} = D_{\max} - d_{\min} = ES - ei$$

$$X_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = EI - es$$

$$\text{极限过盈 } y_{\min} = D_{\max} - d_{\min} = ES - ei$$

$$y_{\max} = D_{\min} - d_{\max} = EI - es$$

### (2) 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称为配合。共分三类：

1) 间隙配合 具有间隙(包括最小间隙等于零)的配合称为间隙配合。此时,孔的公差带在轴的公差带之上。

例 6.1  $30^{+0.033}_0$  的孔与  $30^{-0.020}_{-0.041}$  的轴相配合形成间隙配合。

孔和轴的基本尺寸： $D=30\text{ mm}$ ， $d=30\text{ mm}$ ；(以下 mm 省略)

孔的上下偏差： $ES=+0.033$ ， $EI=0$ ；

轴的上下偏差： $es=-0.020$ ， $ei=-0.041$ ；

孔、轴的标准公差： $T_D=0.033$ ， $T_d=0.021$ ；

孔的极限尺寸： $D_{\max}=30.033$ ， $D_{\min}=30$ ；

轴的极限尺寸： $d_{\max}=29.980$ ， $d_{\min}=29.959$ ；

最大间隙： $X_{\max}=ES-ei=0.033-(-0.041)=0.074$ ；

最小间隙： $X_{\min}=EI-es=0-(-0.020)=0.020$ ；

公差带图见图 6.1.2。

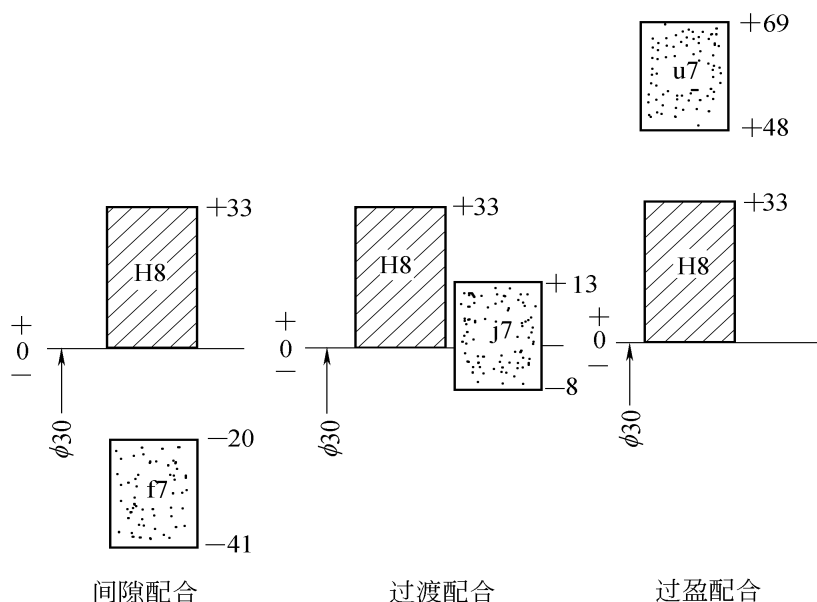


图 6.1.2 三种配合

2) 过渡配合 可能具有间隙或过盈的配合称为过渡配合。此时,孔的公差带与轴的公差带相互交叠。

例 6.2  $30^{+0.033}_0$  的孔与  $30^{+0.013}_{-0.008}$  的轴相配合形成过渡配合。

孔和轴的基本尺寸： $D=30\text{ mm}$ ， $d=30\text{ mm}$ ；(以下 mm 省略)

孔的上下偏差： $ES=+0.033$ ， $EI=0$ ；

轴的上下偏差： $es=+0.013$ ， $ei=-0.008$ ；

孔、轴的标准公差： $T_D=0.033$ ， $T_d=0.021$ ；

孔的极限尺寸： $D_{\max}=30.033$ ， $D_{\min}=30$ ；

轴的极限尺寸： $d_{\max}=30.013$ ， $d_{\min}=29.992$ ；

最大间隙： $X_{\max}=ES-ei=0.033-(-0.008)=0.041$ ；

最大过盈： $Y_{\max}=EI-es=0-0.013=-0.013$ ；

公差带图见图 6.1.2。

3) 过盈配合 具有过盈(包括最小过盈等于零)的配合 称为过盈配合。此时 ,孔的公差带在轴的公差带之下。

例 6.3  $30^{+0.033}_0$  的孔与  $30^{+0.069}_{+0.048}$  的轴相配合形成过盈配合

孔和轴的基本尺寸 :  $D=30\text{ mm}$  ,  $d=30\text{ mm}$  ;(以下 mm 省略)

孔的上下偏差 :  $ES=+0.033$  ,  $EI=0$  ;

轴的上下偏差 :  $es=+0.069$  ,  $ei=+0.048$  ;

孔、轴的标准公差 :  $T_D=0.033$  ,  $T_d=0.021$  ;

孔的极限尺寸 :  $D_{\max}=30.033$  ,  $D_{\min}=30$  ;

轴的极限尺寸 :  $d_{\max}=30.069$  ,  $d_{\min}=30.048$  ;

最大间隙 :  $Y_{\min}=ES - ei = 0.033 - 0.048 = -0.015$  ;

最大过盈 :  $Y_{\max}=EI - es = 0 - 0.069 = -0.069$  ;

公差带图见图 6.1.2

### (3) 配合公差与配合公差带图

配合公差是组成配合的孔、轴公差之和。它是允许间隙或过盈的变动量 ,是一个没有符号的绝对值。将极限间隙或极限过盈之间的变动范围画在同一个图上 ,可以清楚地看出这对配合的松紧情况。此图就称为配合公差带图。如图 6.1.3 所示。

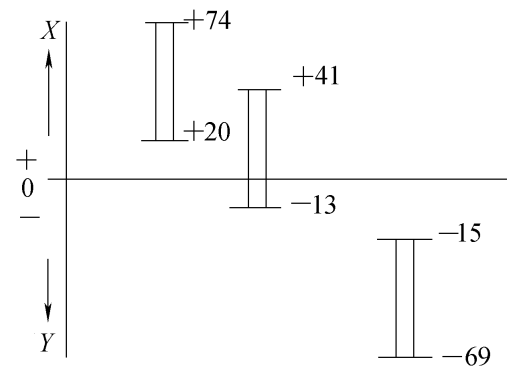


图 6.1.3 配合公差带图

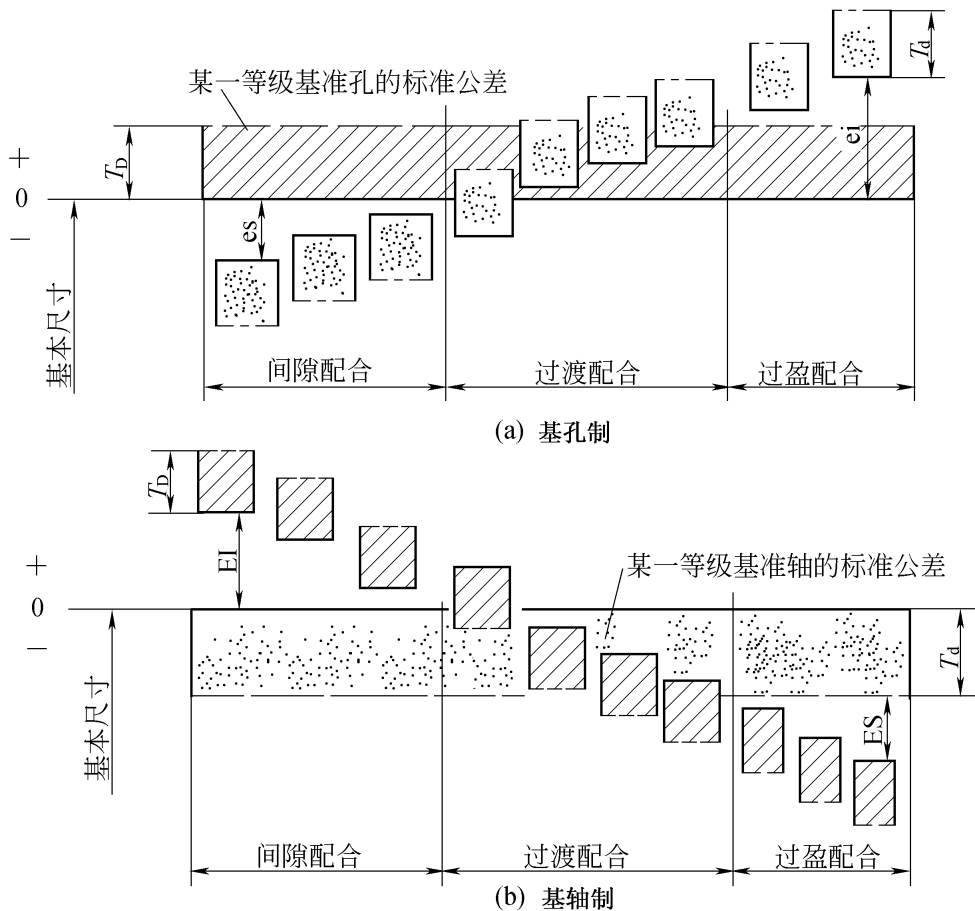


图 6.1.4 基孔制与基轴制公差带

间隙配合的配合公差： $T_f = X_{\max} - X_{\min} = 0.074 - 0.020 = 0.054$ ；

过渡配合的配合公差： $T_f = X_{\max} - Y_{\max} = 0.041 - (-0.013) = 0.054$ ；

过盈配合的配合公差： $T_f = X_{\min} - Y_{\max} = -0.015 - (-0.069) = 0.054$ ；

这里三对配合的配合公差都等于 0.054，是否是一种巧合呢？不！这是因为这三对配合的孔公差都是  $T_D = 0.033$ ，而且它们的轴公差也都是  $T_d = 0.021$ 。因此，它们的配合公差也都相等，即  $T_f = T_D + T_d = 0.033 + 0.021 = 0.054$ 。

#### (4) 配合制

国家标准规定配合制分两种：

1) 基孔制配合 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。(孔的下偏差为零。)见图 6.1.4a。

2) 基轴制配合 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(轴的上偏差为零)。见图 6.1.4 b。

### 6.1.2 极限制与配合制

经标准化的公差与偏差制度称为极限制。它是一系列标准的孔、轴公差数值和极限偏差数值。配合制则是同一极限制的孔和轴组成配合的一种制度。如上述的基孔制和基轴制。

#### 1. 标准公差系列

本标准规定了 20 个公差等级。按公差增大的顺序分别为 IT01, IT0, IT1, IT2, ..., IT17, IT18。表 6.1.1 为 IT1 ~ IT18 的标准公差数值。

#### 2. 基本偏差系列

表 6.1.1 标准公差数值

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	$\mu\text{m}$											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

本标准规定,基本偏差代号有 28 个。大写表示孔,小写表示轴。I(i),L(l),O(o),Q(q),W(w),五个代号不用。

图 6.1.5 为基本偏差系列。由图可见,对于孔,A~H 以下偏差 EI 为基本偏差 J~ZC(JS 除外)以上偏差 ES 为基本偏差;对于轴,a~h 以上偏差 es 为基本偏差 j~zc(js 除外)以下偏差 ei 为基本偏差。由于 JS、js 的公差带是对称分布的,故它们的基本偏差可以是上偏差,也可以是下偏差。

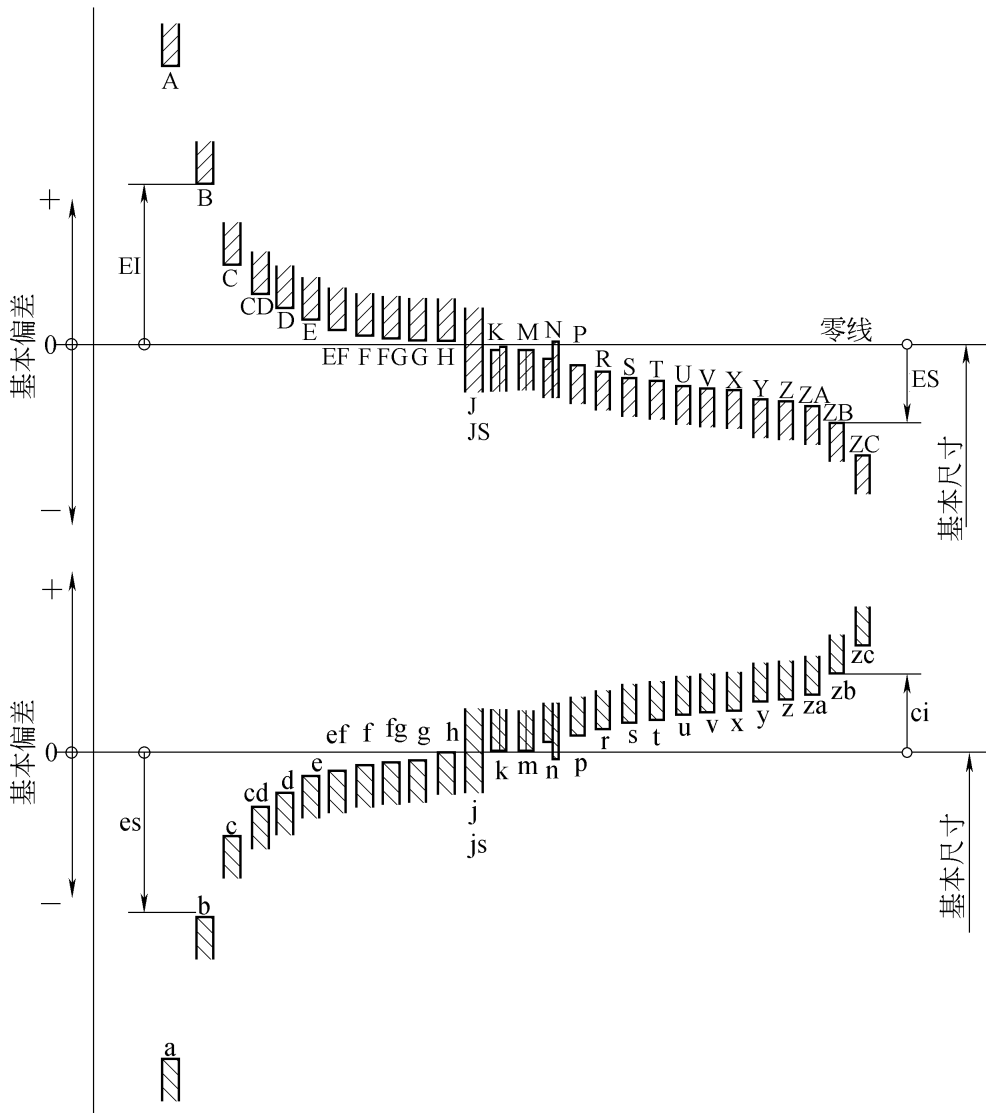


图 6.1.5 基本偏差系列

轴的基本偏差数值是以基孔制配合为基础,根据各种配合性质,经过理论计算、实验和统计分析得到的。a 至 h 的绝对值正好等于最小间隙的绝对值。其中 a、b、c 三种用于大间隙或热动配合,故最小间隙采用与直径成正比的关系计算。如  $> 160 \sim 500 \text{ mm}$  的  $b$  的  $es = 1.8 D$ 。d、e、f 三种考虑到保证良好的液体摩擦以及表面粗糙度的影响,因而最小间隙略小于直径的平方根。如  $f$  的  $es = 5.5 D^{0.41}$ 。g 主要用于滑动、定心或半液体摩擦,间隙要小,故直径的指数更小些。g 的  $es = 2.5 D^{0.34}$ 。中间插入的 cd、ef、fg 三种是取它们前后两个基本偏差的绝对值的几何平均值来计算。j、k、m、n 用于过渡配合,它们的基本偏差值由经验和统计方法确定。p~zc 用于过盈配合。它们的基本偏差数值计算是从保证配合的最小过盈来考虑的。国家标准根据一系列公式计算并圆整后列表在表 6.1.2。

公差带中的另一个偏差是在基本偏差基础上增加或减少一个标准公差值。如 60H6 的基本偏差是“0”，另一个偏差就是  $0 + IT_6 = 0.019$ 。

孔的基本偏差数值是由轴的基本偏差换算而得。一种是通用规则即  $EI = -es, ES = -ei$  (A ~ H)，另一种是特殊规则即  $ES = -ei + \Delta$ ，式中  $\Delta = IT_n - IT_{n-1}$ ，为了避免算错，也为了查表方便，现将特殊规则中一些常用、优先的公差带的孔的极限偏差数值 (J ~ U) 列表于表 6.1.3，…，6.1.7。

例 6.4 查表确定 30H8/f7 和 30F8/h7 配合中孔、轴的极限偏差。

解 (1) 查表确定 30H8/f7 配合中孔、轴的极限偏差

基本尺寸 30 属于大于 18 至 30 mm 尺寸段，由表 6.1.1 得  $IT_7 = 21 \mu\text{m}$ ， $IT_8 = 33 \mu\text{m}$ 。基准孔 H8 的  $EI = 0$ ，其  $ES$  为

表 6.1.3 孔 J 和 K 的极限偏差

$\mu\text{m}$

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	$\pm 6$	+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			

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. 基本尺寸在 3 ~ 6 mm 间的 J7 的偏差值与对应尺寸段的 JS7 等值。

表 6.1.5 孔 P 的极限偏差

 $\mu\text{m}$ 

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	

表 6.1.6 孔 R 的极限偏差

 $\mu\text{m}$ 

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

续表

基本尺寸/mm		R							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
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		
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		



表 6.1.7 孔 S 的极限偏差

 $\mu\text{m}$ 

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	

续表

基本尺寸/mm		S							
大于	至	3	4	5	6	7	8	9	10
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	- 187 - 244	- 208 - 348	
400	450			- 225 - 252	- 219 - 259	- 209 - 272	- 209 - 272	- 232 - 387	
450	500			- 245 - 272	- 239 - 279	- 229 - 292	- 229 - 292	- 252 - 407	

表 6.1.8 孔 T 和 U 的极限偏差

 $\mu\text{m}$ 

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

续表

基本尺寸/mm		T				U					
大于	至	5	6	7	8	5	6	7	8	9	10
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
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 - 637	- 540 - 790

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 GB/T 1800.3 计算。

$$ES = EI + IT8 = 0 + 33 = + 33 \mu\text{m}$$

轴 f7 的极限偏差,先由表 6.1.2 得  $es = - 20 \mu\text{m}$ ,其  $ei$  为

$$ei = es - IT7 = - 20 - 21 = - 41 \mu\text{m}$$

由此可得  $30H8 = 30 \begin{smallmatrix} +0.033 \\ 0 \end{smallmatrix}$ ,  $30f7 = 30 \begin{smallmatrix} -0.020 \\ -0.041 \end{smallmatrix}$

(2) 查表确定 30F8/h7 配合中孔、轴的极限偏差

孔 F8 的极限偏差,由上述知 f 的  $es = -20 \mu\text{m}$ ,根据通用规则 孔 F8 的

$$EI = -es = +20 \mu\text{m}$$

$$ES = EI + IT8 = 20 + 33 = +53 \mu\text{m}$$

基准轴 h7 的  $es = 0$ ,  $ei = es - IT7 = 0 - 21 = -21 \mu\text{m}$

由此可得  $30F8 = 30^{+0.053}_{+0.020}$

$$30h7 = 30^{0}_{-0.021}$$

例 6.5 查表确定 25H7/p6 和 25P7/h6 配合中孔、轴的极限偏差,并计算两对配合的极限过盈。

解 基孔制配合 25H7/p6,用例 6.4 同样方法得

孔 25H7 的  $EI = 0$ ,  $ES = 0 + IT7 = +21 \mu\text{m}$

轴 25p6 的  $ei = +22 \mu\text{m}$ ,  $es = +35 \mu\text{m}$

由此可得

$$25H7 = 25^{+0.021}_{0}$$

$$25p6 = 25^{+0.035}_{+0.022}$$

基轴制配合 25P7/h6 的孔 25P7,由表 6.1.5 得

$$ES = -14 \mu\text{m}, EI = -35 \mu\text{m}。$$

轴 25h6,由表 6.1.1 和 6.1.2 得

$$es = 0, ei = -13 \mu\text{m}$$

由此可得

$$25P7 = 25^{-0.014}_{-0.035}$$

$$25h6 = 25^{0}_{-0.013}$$

25H7/p6 配合的极限过盈为

$$Y_{\min} = ES - ei = +21 - 22 = -1 \mu\text{m}$$

$$Y_{\max} = EI - es = 0 - 35 = -35 \mu\text{m}$$

25P7/h6 配合的极限过盈为

$$Y_{\min} = ES - ei = -14 - (-13) = -1 \mu\text{m}$$

$$Y_{\max} = EI - es = -35 - 0 = -35 \mu\text{m}$$

由上述计算可以看出, 25H7/p6 和 25P7/h6 两对配合的最小过盈和最大过盈均相等,即两配合相同。

### 6.1.3 尺寸至 500 mm 孔、轴公差带与配合

轴的一般公差带有 116 种,常用公差带有 59 种,优先公差带为 13 种。

孔的一般公差带有 105 种,常用公差带有 44 种,优先公差带为 13 种。

基孔制有常用配合 59 种,优先配合 13 种。

基轴制有常用配合 47 种,优先配合 13 种。

现列出尺寸至 500 mm 基孔制优先、常用配合在表 6.1.9 中。

表 6.1.9 基孔制优先、常用配合

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						$\frac{H6}{f5}$	$\frac{H6}{g5}$	$\frac{H6}{h5}$	$\frac{H6}{js5}$	$\frac{H6}{k5}$	$\frac{H6}{m5}$	$\frac{H6}{n5}$	$\frac{H6}{p5}$	$\frac{H6}{r5}$	$\frac{H6}{s5}$	$\frac{H6}{t5}$					
H7						$\frac{H7}{f6}$	$\frac{H7}{g6}$	$\frac{H7}{h6}$	$\frac{H7}{js6}$	$\frac{H7}{k6}$	$\frac{H7}{m6}$	$\frac{H7}{n6}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{H7}{r6}$	$\frac{H7}{s6}$	$\frac{H7}{t6}$	$\frac{H7}{u6}$	$\frac{H7}{v6}$	$\frac{H7}{x6}$	$\frac{H7}{y6}$	$\frac{H7}{z6}$
H8					$\frac{H8}{e7}$	$\frac{H8}{f7}$	$\frac{H8}{g7}$	$\frac{H8}{h7}$	$\frac{H8}{js7}$	$\frac{H8}{k7}$	$\frac{H8}{m7}$	$\frac{H8}{n7}$	$\frac{H8}{p7}$	$\frac{H8}{r7}$	$\frac{H8}{s7}$	$\frac{H8}{t7}$	$\frac{H8}{u7}$				
				$\frac{H8}{d8}$	$\frac{H8}{e8}$	$\frac{H8}{f8}$		$\frac{H8}{h8}$													
H9			$\frac{H9}{c9}$	$\frac{H9}{d9}$	$\frac{H9}{e9}$			$\frac{H9}{h9}$													
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 3mm 和  $\frac{H8}{r7}$  的基本尺寸在小于或等于 100mm 时,为过渡配合。

2. 标注 的 配合为优先配合。

### 6.1.4 配合的选用

为了解决零件在机器内的相互关系,保证各个零件按预定任务协调工作,必须正确选用配合,并能使制造经济合理。公差等级和基准制确定后,配合的选择主要是确定非基准件的基本偏差代号。选用时,应首先采用优先公差带及优先配合;其次采用常用公差带及常用配合;再次采用一般用途公差带。必要时,可按标准公差和基本偏差组成所需孔、轴公差带及配合。

按照计算法选择配合,虽然由于把条件理想化和简单化,结果不完全符合现实,但它比较科学,有指导意义,计算虽较麻烦,但随着计算机辅助设计技术的发展,这种方法也将逐步完善,并不断地扩大应用范围。

对于特别重要的配合,需要进行专门试验,以求获得最佳工作性能的间隙或过盈,其结果比较准确,但所需费用比较大且周期较长,故较少采用。

生产中最常用的办法,是参照经过实践应用并取得好效果的典型实例,通过比较分析,按类比法选定配合。具体分析如下:

#### 1. 使用要求和工作条件

对孔、轴配合的使用要求,一般有三种情况:装配后有相对运动的,应选用间隙配合;装配后需传递载荷的,应选用过盈配合;装配后有定位精度要求,或需要拆卸的,应选用过渡配合或小间隙或小过盈的配合。

(1) 对间隙配合,间隙的大小与运动速度、运动精度、载荷大小及特性,润滑方式润滑油粘度、工作温度、轴承结构及孔、轴材料特性,有关零件的几何精度等许多因素有关。

(2) 对过渡配合,主要考虑定位导向的要求及调整、装拆的频繁程度,同时对承受载荷的过渡配合,还要考虑载荷性质和大小,以及是否使用辅助紧固件等因素。

(3) 对过盈配合,首先要考虑承受载荷的性质和大小,结合件的材料强度,以及装配方法等。

## 2. 各类配合的特性与应用

当公差等级确定后,选择配合的关键是确定轴或孔的基本偏差代号,各类配合的特性与应用,可由基本偏差的应用反映出来。

尺寸至 500 mm 基孔制常用和优先配合的特征及应用列表在表 6.1.10 中,供参考。

基孔制配合的应用举例请见表 6.1.11。

表 6.1.10 尺寸至 500 mm 基孔制常用和优先配合的特征及应用

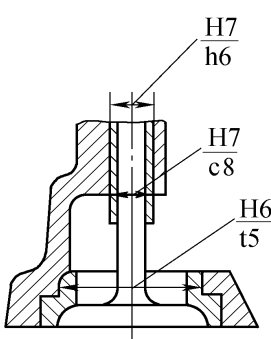
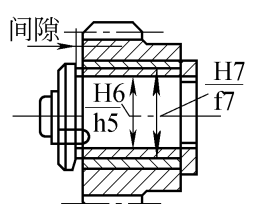
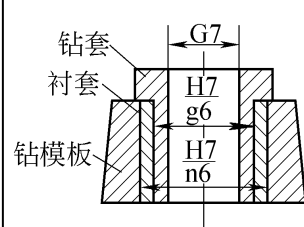
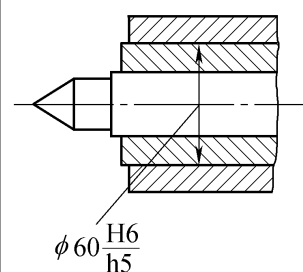
配合类别	配合特征	配合代号	应用
间隙配合	特大间隙	H11/a11 H11/b11 H12/b12	用于高温或工作时要求大间隙的配合
	很大间隙	(H11/c11) H11/d11	用于工作条件较差、受力变形或为了便于装配而需要大间隙的配合和高温工作的配合
	较大间隙	H9/c9 H10/c10 H8/d8 (H9/d9) H10/d10 H8/e7 H8/e8 H9/e9	用于高速重载的滑动轴承或大直径的滑动轴承,也可用于大跨距或多支点支承的配合
	一般间隙	H6/f5 H7/f6 (H8/f7) H8/f8 H9/f9	用于一般转速的动配合。当温度影响不大时,广泛应用于普通润滑的支承处
	较小间隙	(H7/g6) H8/g7	用于精密滑动零件或缓慢间歇回转的零件的配合部位
	很小间隙和零间隙	H6/g5 H6/h5 (H7/h6) (H8/h7) H8/h8 (H9/h9) H10/h10 (H11/h11) H12/h12	用于不同精度要求的一般定位件的配合和缓慢移动和摆动零件的配合
过渡配合	绝大部分有微小间隙	H6/js5 H7/js6 H8/js7	用于易于装拆的定位配合或加紧固件后可传递一定静载荷的配合
	大部分有微小间隙	H6/k5 (H7/k6) H8/k7	用于稍有振动的定位配合。加紧固件可传递一定载荷,装拆方便可用木锤敲入
	大部分有微小过盈	H6/m5 H7/m6 H8/m7	用于定位精度较高且能抗振的定位配合。加键可传递较大载荷。可用铜锤敲入或小压力压入
	绝大部分有微小过盈	(H7/n6) H8/n7	用于精确定位或紧密组合件的配合。加键能传递大力矩或冲击性载荷。只在大修时拆卸
	绝大部分有较小过盈	H8/p7	加键后能传递很大力矩,且承受振动和冲击的配合、装配后不再拆卸

配合类别	配合特征	配合代号	应用
过盈配合	轻型	H6/n5 H6/p5 (H7/p6) H6/r5 H7/r6 H8/r7	用于精确的定位配合。一般不能靠过盈传递力矩。要传递力矩尚需加紧固件
	中型	H6/s5 (H7/s6) H8/s7 H6/t5 H7/t6 H8/t7	不需加紧固件就可传递较小力矩和轴向力。加紧固件后可承受较大载荷或动载荷的配合
	重型	(H7/u6) H8/u7 H7/v6	不需加紧固件就可传递和承受大的力矩和动载荷的配合。要求零件材料有高强度
	特重型	H7/x6 H7/y6 H7/z6	能传递和承受很大力矩和动载荷的配合,需经试验后方可应用

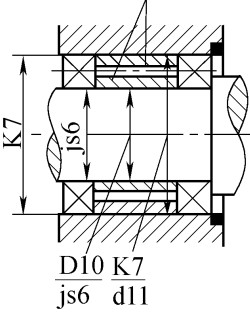
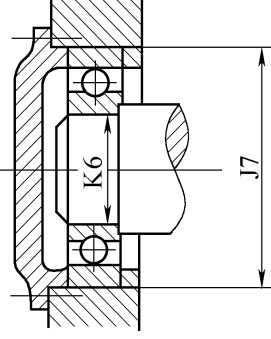
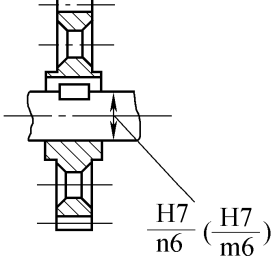
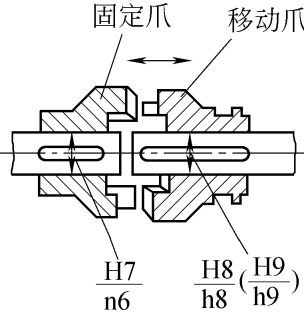
注 1. 括号内的配合为优先配合。

2. 国家标准规定的 44 种基轴制配合的应用与本表中的同名配合相同。

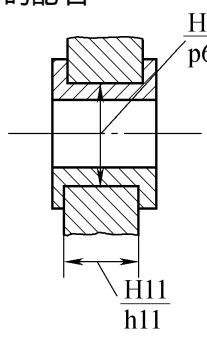
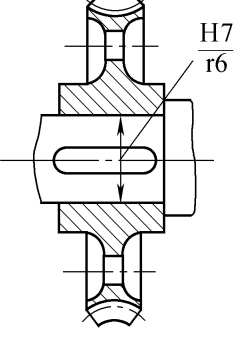
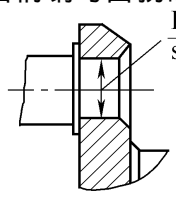
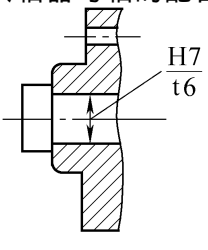
表 6.1.11 基孔制配合的特性及其应用举例

间 隙 配 合				
基本偏差	H/a ,H/b H/c	H/d ,H/e ,H/f	H/g	H/h
特性及应用说明	可以得到很大的间隙。适用于高温下工作的间隙配合及工作条件较差、受力变形大,或为了便于装配的缓慢、松弛的大间隙配合	可以得到较大的间隙。适用于松的间隙配合和一般的转动配合	可以得到的间隙很小,制造成本高,除很轻负荷的精密装置外,不推荐用于转动的配合	广泛用于无相对转动与作为一般定位配合的零件。若没有温度变形的影响也用于精密的滑动配合
应用举例	柴油机气门导杆与衬套的配合 	高精度齿轮衬套与轴承套配合 	钻夹具中钻套和衬套的配合,钻头与钻套之间的配合为 G7 	尾座套筒与尾座体之间的配合 

过 渡 配 合

基本偏差	H/js	H/k	H/m	H/n
特性及应用说明	偏差完全对称,平均间隙较小,而且略有过盈的配合,一般用于易于装卸的精密零件的定位配合	平均间隙接近零的配合。用于稍有过盈的定位配合	平均过盈较小的配合。组成的配合定位好,用于不允许游动的精密定位	平均过盈比 m 稍大,很少得到间隙。用于定位要求较高且不常拆的配合
应用举例	与滚动轴承内、外圈的配合  $\frac{D10}{K7} \frac{K7}{js6} \frac{d11}{js6}$	与滚动轴承内、外圈的配合  $\frac{D10}{k6} \frac{k6}{js6} \frac{d11}{js6}$	齿轮与轴的配合  $\frac{H7}{n6} (\frac{H7}{m6})$	爪形离合器的配合  $\frac{H7}{n6} \frac{H8}{h8} (\frac{H9}{h9})$

过 盈 配 合

基本偏差	H/p	H/r	H/s	H/t, u, v, x, y, z
特性及应用说明	对钢、铁或铜、钢组件装配时是标准压入配合。对非铁类零件为轻的压入配合	对铁类零件是中等打入配合,对非铁类零件为轻打入配合。必要时可以拆卸	用于钢和铁制零件的永久性和半永久性装配,可产生相当大的结合力。尺寸较大时,为了避免损坏配合表面,需用热胀法或冷缩法装配	过盈配合依次增大,一般不采用
应用举例	对开轴瓦与轴承座孔的配合  $\frac{H7}{p6} \frac{H11}{h11}$	蜗轮与轴的配合  $\frac{H7}{r6}$	曲柄销与曲拐的配合  $\frac{H6}{s5}$	联轴器与轴的配合  $\frac{H7}{t6}$



## 6.2 形状与位置公差

### 6.2.1 概述

零件在加工过程中不仅存在尺寸误差,而且还会产生形状和位置误差(简称形位误差)。形位误差对机械产品工作性能的影响不容忽视。例如圆柱形零件的圆度、圆柱度误差会使配合间隙不均,使磨损加剧,或各部分过盈不一致,影响连接强度;机床导轨的直线度误差会使移动部件运动精度降低,影响加工质量;齿轮箱上各轴承孔的位置误差,将影响齿轮传动的齿面接触精度和齿侧间隙;轴承盖上各螺钉孔的位置不正确,则会影响其自由装配等。因此,为保证机械产品的质量和零件的互换性,必须对形位误差加以控制,规定形状和位置公差。

#### 1. 形位公差的研究对象——几何要素

几何要素(简称要素)是指构成零件几何特征的点、线和面。如图 6.2.1 a 所示零件的球面、圆锥面、圆柱面、平面、轴线、素线和球心等。

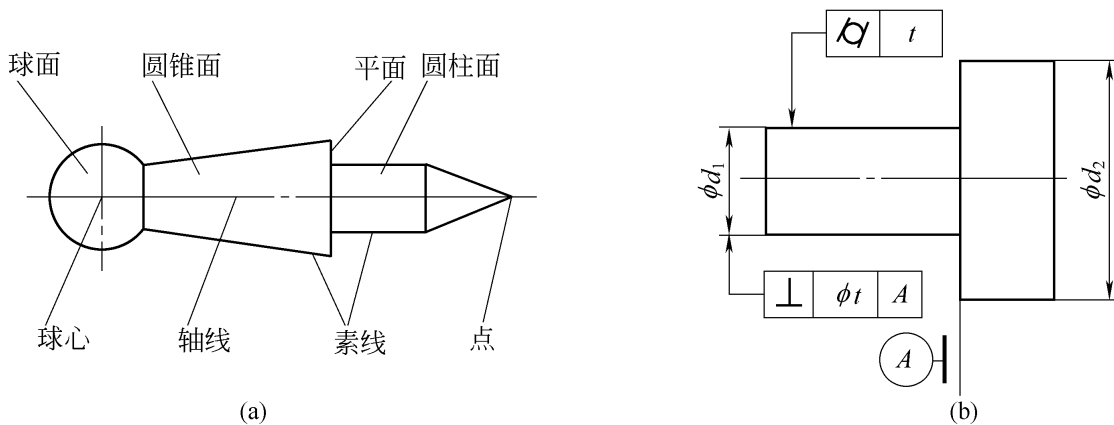


图 6.2.1 几何要素

几何要素可按不同特征分类。

#### (1) 轮廓要素与中心要素

构成零件轮廓的点、线或面称为轮廓要素。如图 6.2.1a 中的球面、圆锥面、圆柱面、平面以及圆柱面和圆锥面的素线。与轮廓要素有对称关系的点、线、面称为中心要素。它是随轮廓要素的存在而存在的。如图 6.2.1 a 中的球心、轴线等。

#### (2) 实际要素与理想要素

零件上实际存在的要素称为实际要素。通常用测量得到的要素来代替实际要素。由于测量误差的存在,它并非是该要素的真实状态。具有几何学意义的要素称为理想要素。它们是不存在任何误差的纯几何的点、线、面。可以说是点无大小,线无粗细,面无厚薄的。

#### (3) 被测要素与基准要素

给出了形状或(和)位置公差要求的要素称为被测要素,也就是需要研究和测量的要素。如图 6.2.1b 中  $d_1$  表面及其轴线分别提出了圆柱度和垂直度公差要求,所以它们是被测要素。用来确定被测要素理想方向或(和)位置的要素称为基准要素。在图 6.2.1b 中  $d_1$  轴线相对于  $d_2$  左端面有垂直度要求。因此  $d_2$  左端面即是基准要素。

#### (4) 单一要素与关联要素

单一要素是指仅对其本身给出形状公差要求的要素。与其他要素无功能关系。关联要素是指与基准要素有功能关系、并给出位置公差要求的要素。在图 6.2.1 b 中  $d$  轴线就是一个关联要素,要求它与端面保持垂直关系。

#### 2. 形位公差的特征项目及其符号

按国家标准《形状和位置公差、通则、定义、符号和图样表示方法》规定,形位公差特征项目共有 14 个,各项目的名称及符号如表 6.2.1 所列。标注中的其他符号见表 6.2.2 及表 6.2.3。

在技术图样中,形位公差采用符号标注。形位公差的标注包括:公差框格、被测要素指引线、公差特征符号、形位公差值及其有关符号、基准符号和相关要求符号等。

#### 3. 形位公差的公差带

形位公差带是用来限制被测要素变动的区域。它是一个几何图形,只要被测要素完全落在给定的公差带内,就表示该要素的形状和位置误差符合要求。

表 6.2.1 形状和位置公差特征项目的名称及符号

公差		特征项目	符号	有无基准要求
形状	形状	直线度		无
		平面度		无
		圆度		无
		圆柱度		无
形状或位置	轮廓	线轮廓度		有或无
		面轮廓度		有或无
位置	定向	平行度		有
		垂直度		有
		倾斜度		有
	定位	位置度		有或无
		同轴(同心)度		有
		对称度		有
	跳动	圆跳动		有
		全跳动		有

表 6.2.2 标注中的其他符号(一)

说 明		符 号	说 明		符 号
被测要素的标注	直接		最大实体要求	最小实体要求	Ⓜ
	用字母				
基准要素的标注			可逆要求	包容要求	Ⓡ
基准目标					
理论正确尺寸			延伸公差带		Ⓟ

表 6.2.3 标注中的其他符号(二)

含义	符号	举例	含义	符号	举例
只许中间向材料内凹下	(-)		只许误差从左至右减小	(▷)	
只许中间向材料外凸起	(+)		只许误差从右至左减小	(◁)	

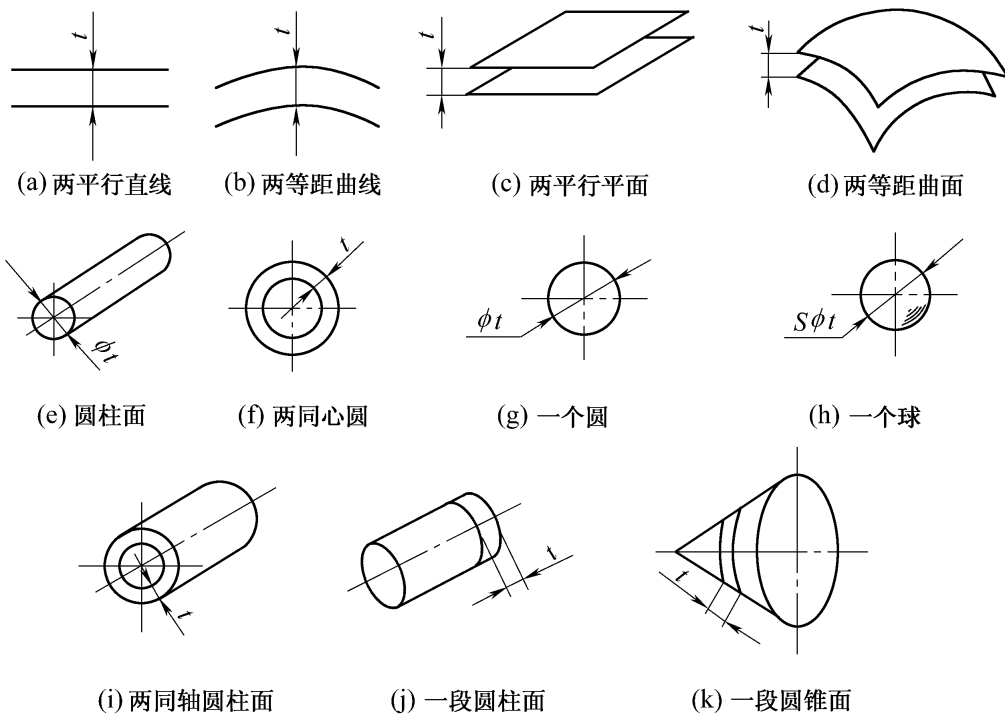


图 6.2.2 形位公差带的形状

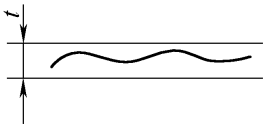
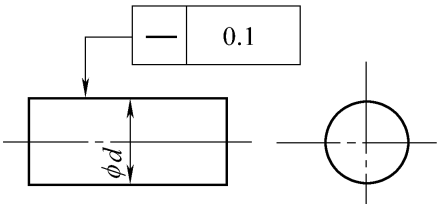
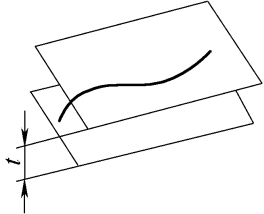
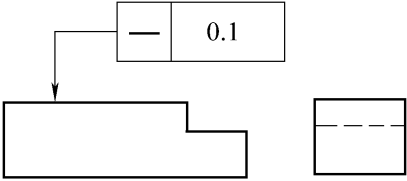
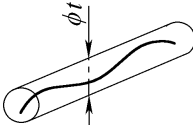
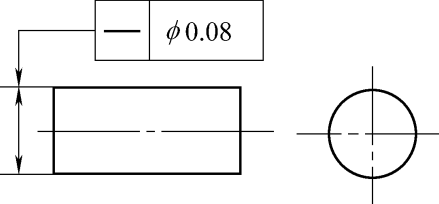
形位公差带具有形状、大小、方向和位置四要素。公差带的形状由被测要素的理想形状和给定的公差特征项目所确定。常见的形位公差带的形状如图 6.2.2 所示。公差带的大小是由公差值  $t$  确定的,指的是公差带的宽度或直径。形位公差带的方向和位置有两种情况:公差带的方向或位置可以随实际被测要素的变动而变动,没有对其他要素保持一定几何关系的要求,这时公差带的方向或位置是浮动的,若形位公差带的方向或位置必须和基准要素保持一定的几何关系,则被认为是固定的。所以,位置公差(标有基准)的公差带的方向和位置一般是固定的。形状公差(未标基准)的公差带的方向和位置一般是浮动的。

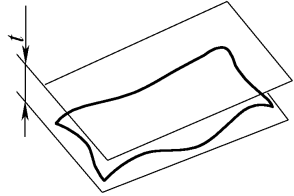
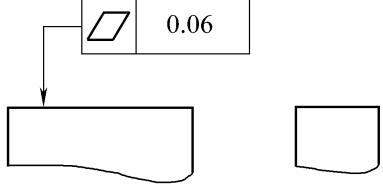
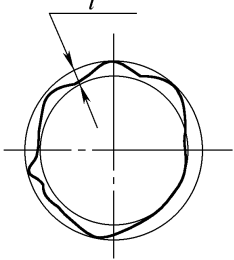
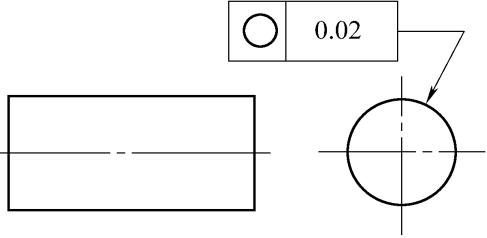
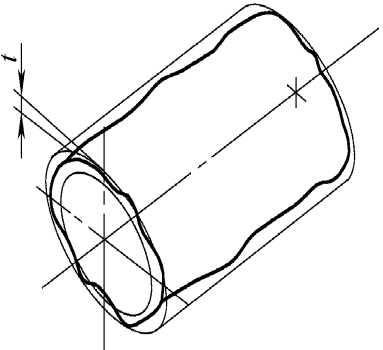
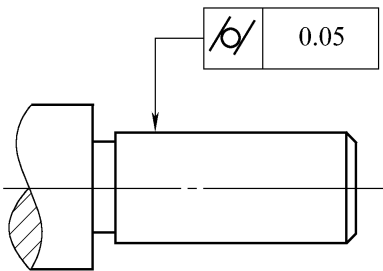
## 6.2.2 形状公差与误差

### 1. 形状公差与公差带

形状公差是指单一实际要素的形状所允许的变动全量。形状公差带是限制实际被测要素变动的一个区域。典型的形状公差带见表 6.2.4。

表 6.2.4 形状公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
直 线 度	<p>在给定平面内,公差带是距离为公差值 <math>t</math> 的两平行直线之间的区域</p> 	<p>被测圆柱面与任一轴向截面的交线(平面线)必须位于在该平面内距离为 0.1 mm 的两平行直线之间</p> 
	<p>在给定方向上,公差带是距离为公差值 <math>t</math> 的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测表面的各条素线必须位于距离为 0.1 mm 的两平行平面之间</p> 
	<p>如在公差值前加注 <math>\phi</math>,则公差带是直径为 <math>t</math> 的圆柱面内的区域</p> 	<p>被测圆柱体的轴线必须位于直径为 0.08 的圆柱面内</p> 

特征	公差带定义	标注和解释
平面度	公差是距离为公差值 $t$ 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 0.06 mm 的两平行平面之间 
圆度	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 0.02 mm 的两同心圆之间 
圆柱度	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公差值 0.05 mm 的两同轴圆柱面之间 

形状公差带的特点是不涉及基准,其方向和位置随实际要素不同而浮动。

## 2. 轮廓度公差与公差带

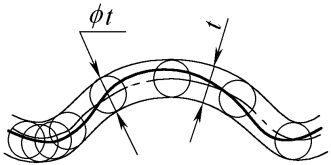
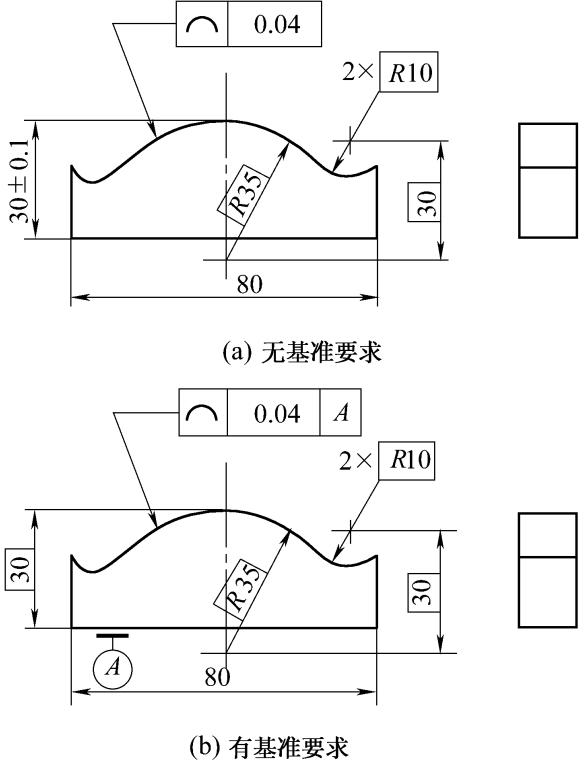
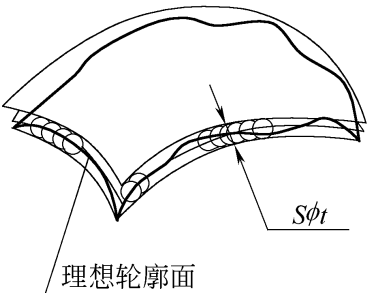
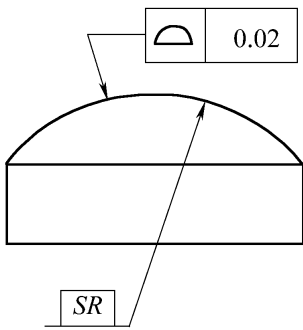
轮廓度公差分为线轮廓度和面轮廓度两种。轮廓度无基准要求时为形状公差,有基准要求时为位置公差。轮廓度公差带的定义和标注示例如表 6.2.5 所示。无基准要求时,其公差带的形状只由理论正确尺寸(带方框的尺寸)确定,其位置是浮动的;有基准要求时,其公差带的形状和位置由理论正确尺寸和基准确定,公差带的位置是固定的。

## 3. 形状误差及其评定

形状误差是被测实际要素的形状对其理想要素的变动量。形状误差值不大于相应的公差值,则被认为是合格的。

被测实际要素与其理想要素进行比较时,理想要素相对于实际要素的位置不同,评定的形状误差值也不同。为了使评定结果唯一,国家标准规定,最小条件是评定形状误差的基本准则。所谓最小条件是:被测实际要素对其理想要素的最大变动量为最小。

表 6.2.5 轮廓度公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
线轮廓度	<p>公差带是包络一系列直径为公差值 <math>t</math> 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轮廓线上</p> 	<p>在平行于图样所示投影面的截面上,被测轮廓线必须位于包络一系列直径为公差值 0.04 mm,且圆心位于具有理论正确几何形状的轮廓线上的两包络线之间</p>  <p>(a) 无基准要求</p> <p>(b) 有基准要求</p>
面轮廓度	<p>公差带是包络一系列直径为公差值 <math>t</math> 的球的两包络面之间的区域,诸球的球心位于具有理论正确几何形状的曲面上</p> 	<p>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 mm,且球心位于具有理论正确几何形状的曲面上</p>  <p>(此图为无基准要求的情况,也有有基准要求的情况)</p>

形状误差值可用最小包容区域(简称最小区域)的宽度或直径表示。最小区域是指包容被测实际要素的最小宽度  $f$  或直径  $f$  的区域。最小包容区域的形状与其相应的公差带的形状相同。以给定平面内的直线度为例来说明。如图 6.2.3 所示,与被测要素比较,理想要素为直线,其位置可能有多种情况,如图中的、、位置等,相应的包容区域的宽度为  $f_1, f_2, f_3$  ( $f_1 < f_2 < f_3$ )。根据最小条件的要求,位置时两平行直线之间的包容区域宽度最小,故取  $f$  为直线度误差。这种评定形状误差的方法称为最小区域法。

最小区域是根据被测实际要素与包容区域的接触状态来判别的。什么样的接触状态才算符合最小条件呢？根据实际分析和理论证明，得出了各项形状误差符合最小条件的判断准则。例如评定在给定平面内的直线度误差，实际直线与两包容的理想直线至少应有高、低、高（或低、高、低）三点接触，这个包容区域就是最小包容区域，如图 6.2.3 中  $S$  所示区域；评定圆度误差时，包容区域为两同心圆之间的区域，实际圆应至少有内、外交叉的四点与两包容圆接触。这个包容区域就是最小包容区域，如图 6.2.4 所示。

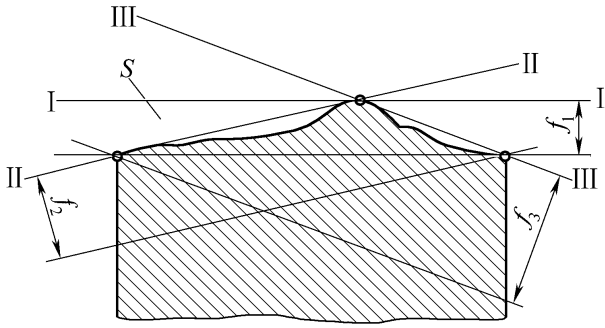


图 6.2.3 直线度误差的最小包容区

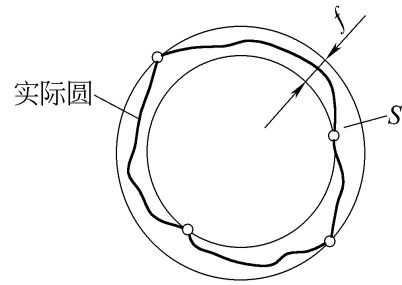


图 6.2.4 圆度误差的最小包容区域

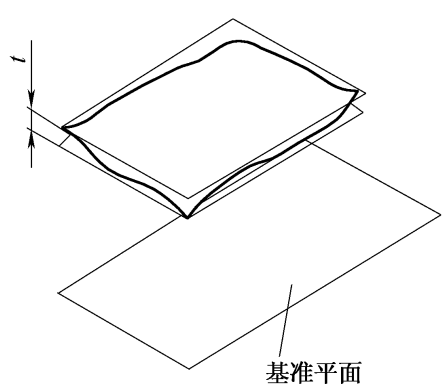
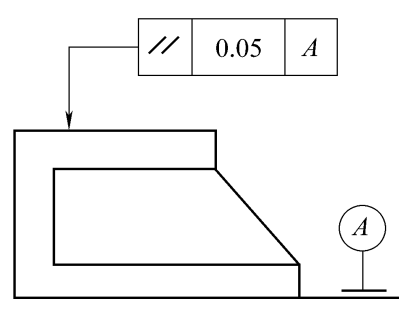
用最小区域法评定形状误差有时比较困难，在实际工作中也允许采用其他的评定方法，得出的形状误差值比用最小区域法评定的误差值稍大，只要误差值不大于图样上给出的公差值，就一定能满足要求，否则就应按最小区域法评定后进行合格性判断。

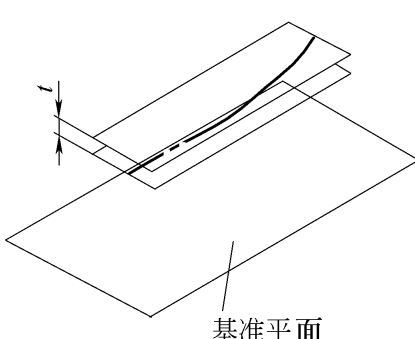
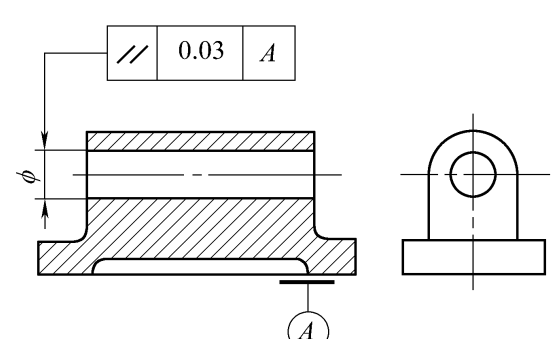
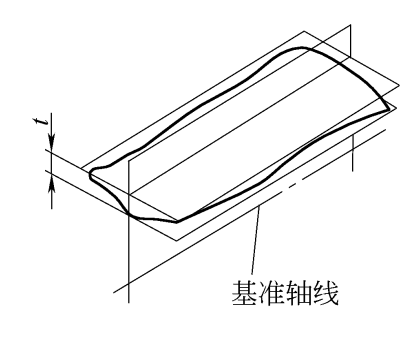
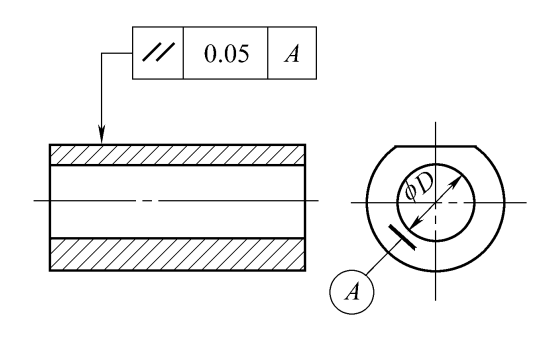
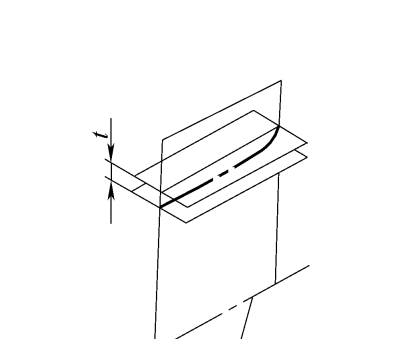
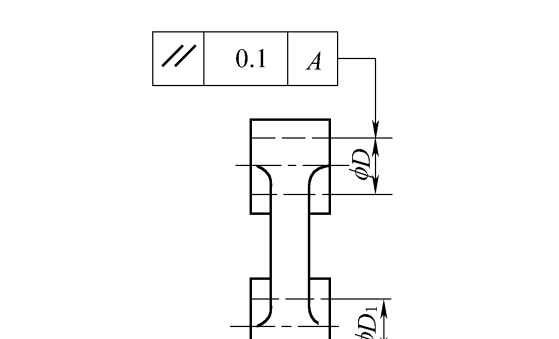
### 6.2.3 位置公差与误差

#### 1. 定向公差与公差带

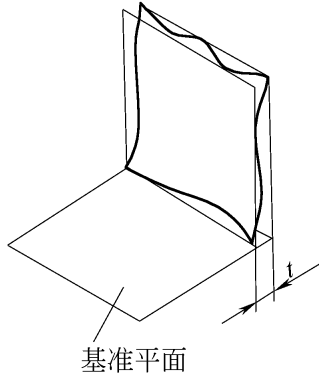
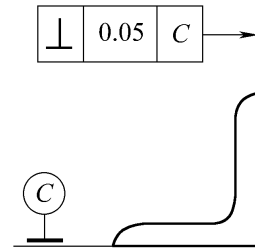
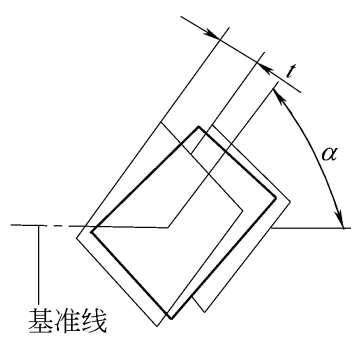
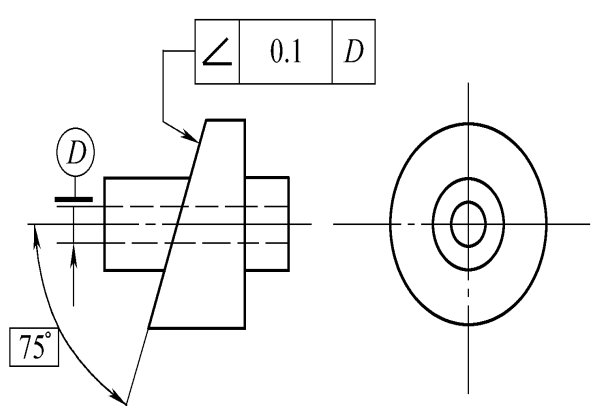
定向公差是关联实际要素对其具有确定方向的理想要素的允许变动量。理想要素的方向由基准及理论正确尺寸（角度）确定。当理论正确角度为  $0^\circ$  时，称为平行度公差；在  $90^\circ$  时，称为垂直度公差；为其他任意角度时，称为倾斜度公差。这三项公差都有面对面、线对线、面对线和线对面几种情况。表 6.2.6 列出了部分定向公差的公差带定义、标注示例和解释。

表 6.2.6 定向公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
平行度	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	被测表面必须位于距离为公差值 $0.05\text{ mm}$ ，且平行于基准表面 $A$ （基准平面）的两平行平面之间
面对面		

特征	公差带定义	标注和解释
线对面	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>,且平行于基准平面的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.03 mm 且平行于基准表面 A(基准平面)的两平行平面之间</p> 
平面对线	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>,且平行于基准轴线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 0.05 mm 且平行于基准线 A(基准轴线)的两平行平面之间</p> 
线对线	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>,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</p> 	<p>被测轴线必须位于距离为公差值 0.1 mm 给定方向上平行于基准轴线的两平行平面之间</p> 



特征	公差带定义	标注和解释
垂直度 面对面	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>,且垂直于基准平面的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测面必须位于距离为公差值 0.05 mm,且垂直于基准平面 <math>C</math> 的两平行平面之间</p> 
倾斜度 面对线	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>,且与基准线成一定角度 <math>\alpha</math> 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 mm,且与基准线 <math>D</math>(基准轴线)成理论正确角度 <math>75^\circ</math> 的两平行平面之间</p> 

定向公差带具有如下特点：

- (1) 定向公差带相对于基准有确定的方向,而其位置往往是浮动的。
- (2) 定向公差带具有综合控制被测要素的方向和形状的功能。在保证使用要求的前提下,对被测要素给出定向公差后,通常不再对该要素提出形状公差要求。需要对被测要素的形状有进一步的要求时,可再给出形状公差,且形状公差值应小于定向公差值。

## 2. 定位公差与公差带

定位公差是关联实际要素对其具有确定位置的理想要素的允许变动量。理想要素的位置由基准及理论正确尺寸(长度或角度)确定。当理论正确尺寸为零,且基准要素和被测要素均为轴线时,称为同轴度公差(若基准要素和被测要素的轴线足够短,或均为中心点时,称为同心度公差);当理论正确尺寸为零,基准要素或(和)被测要素为其他中心要素(中心平面)时,称为对称度

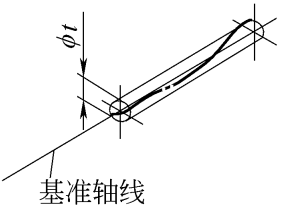
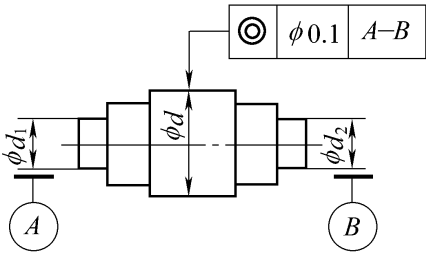
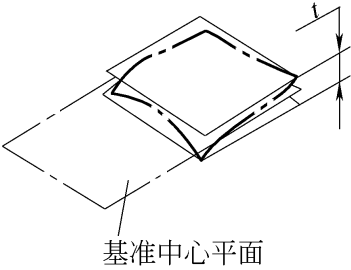
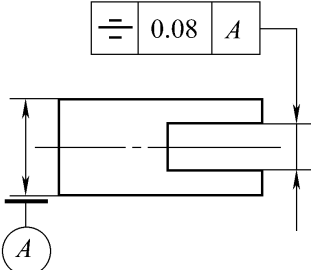
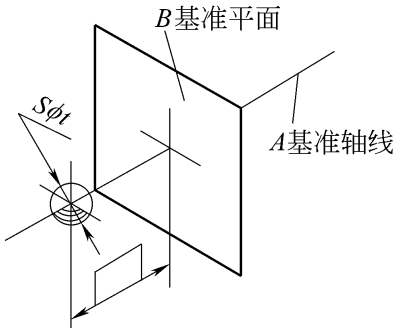
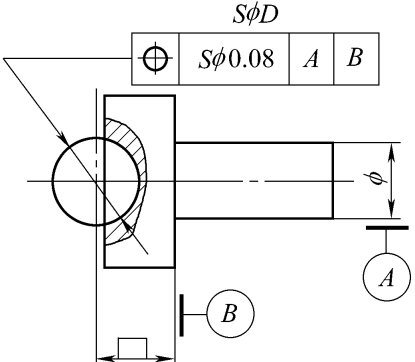
公差 在其他情况下均称为位置度公差。表 6.2.7 列出了部分定位公差的公差带定义、标注和解释示例。

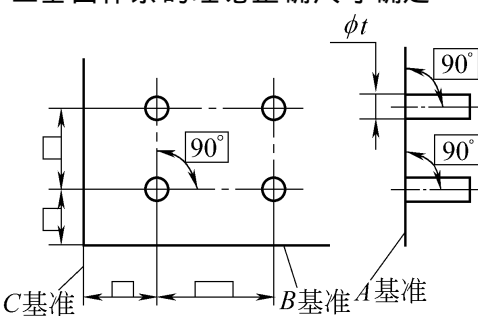
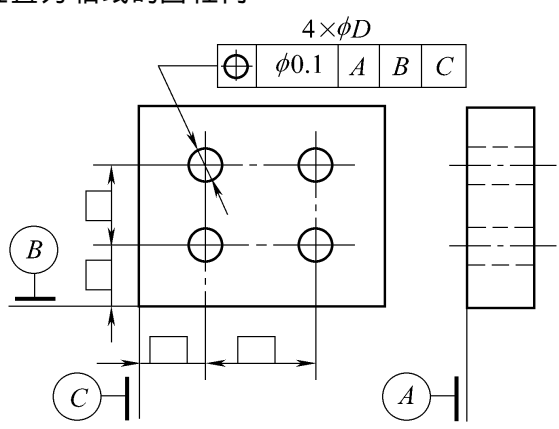
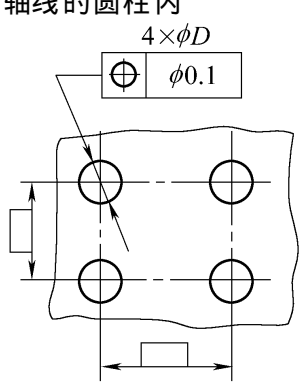
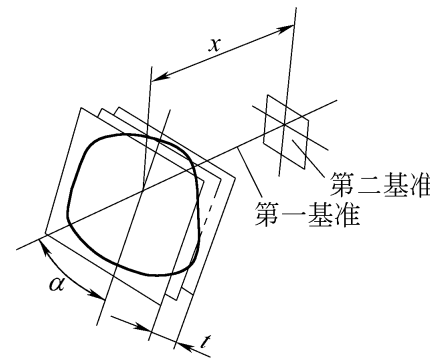
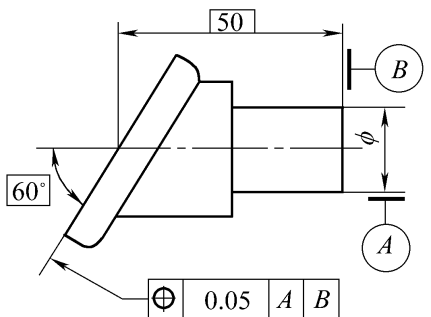
定位公差带具有如下特点：

(1) 定位公差带相对于基准具有确定的位置。其中 ,位置度公差带的位置由理论正确尺寸确定 ,同轴度和对称度的理论正确尺寸为零 ,图上可省略不注。

(2) 定位公差带具有综合控制被测要素位置、方向和形状的功能。在满足使用要求的前下 ,

表 6.2.7 定位公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
同轴度	<p>公差带是直径为公差值 <math>t</math> 的圆柱面内区域 ,该圆柱面的轴线与基准轴线同轴</p> 	<p>大圆柱的轴线必须位于直径为公差值 <math>0.1\text{ mm}</math> ,且与公共基准轴线 <math>A-B</math> 同轴的圆柱面内</p> 
对称度	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math> ,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 <math>0.08\text{ mm}</math> ,且相对基准中心平面 <math>A</math> 对称配置的两平行平面之间</p> 
位置度	<p>如公差值前加注 <math>S</math> ,公差带是直径为公差值 <math>t</math> 的球内的区域 ,球公差带的中心点的位置由相对于基准 <math>A</math> 和 <math>B</math> 的理论正确尺寸确定</p> 	<p>被测球的球心必须位于直径为公差值 <math>0.08\text{ mm}</math> 的球内 ,该球的球心位于相对基准 <math>A</math> 和 <math>B</math> 所确定的理想位置上</p> 

特征	公差带定义	标注和解释
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">线的位置度</p>	<p>如在公差值前加注 <math>\phi</math>, 则公差带是直径为 <math>t</math> 的圆柱面内的区域, 公差带的轴线的位置由相对于三基准体系的理论正确尺寸确定</p> 	<p>每个被测轴线必须位于直径为公差值 0.1 mm, 且以相对于 A、B、C 基准表面 (基准平面) 所确定的理想位置为轴线的圆柱内</p>  <p>有基准要求</p> <p>每个被测轴线必须位于直径为公差值 0.1 mm, 且以理想位置为轴线的圆柱内</p>  <p>无基准要求</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">面的位置度</p>	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>, 中心平面在面的理想位置的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测平面必须位于距离为公差值 0.05 mm, 与基准轴线成 <math>60^\circ</math>, 中心平面距基准 B 为 50 mm 的两平行平面内</p> 

对被测要素给出定位公差后,通常对该要素不再给出定向公差和形状公差。如果需要对方向和形状有进一步要求时,则可另行给出定向或(和)形状公差,但其数值应小于定位公差值。

### 3. 跳动公差与公差带

与定向、定位公差不同,跳动公差是针对特定的检测方式而定义的公差特征项目。它是被测要素绕基准要素回转过程中所允许的最大跳动量,也就是指示器在给定方向上指示的最大读数与最小读数之差的允许值。跳动公差可分为圆跳动和全跳动。

圆跳动是控制被测要素在某个测量截面内相对于基准轴线的变动量。圆跳动又分为径向圆跳动、端面圆跳动和斜向圆跳动三种。

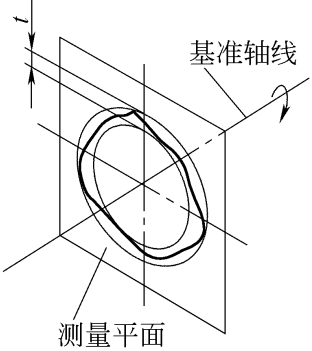
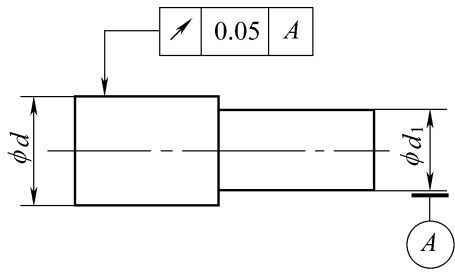
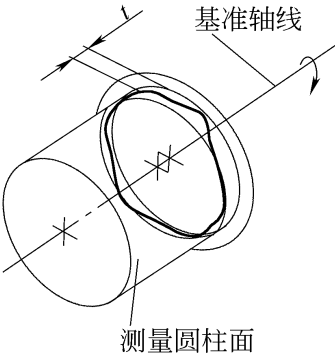
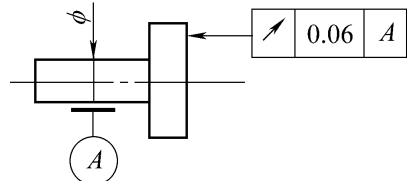
全跳动是控制整个被测要素在连续测量时相对于基准轴线的跳动量。全跳动分为径向全跳动和端面全跳动两种。

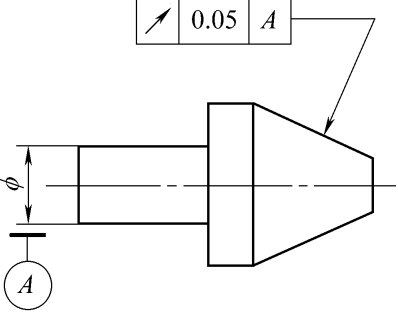
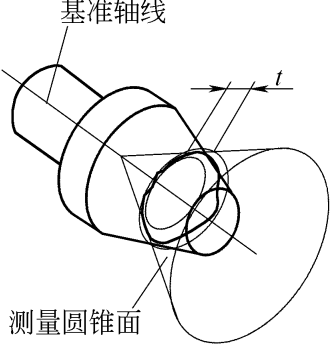
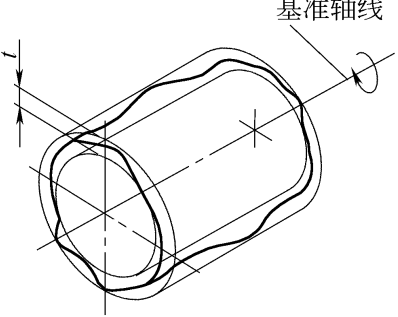
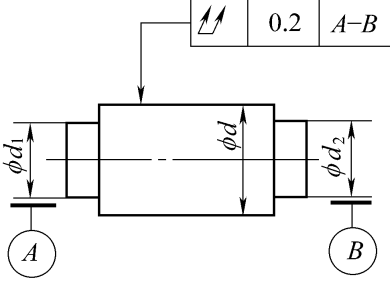
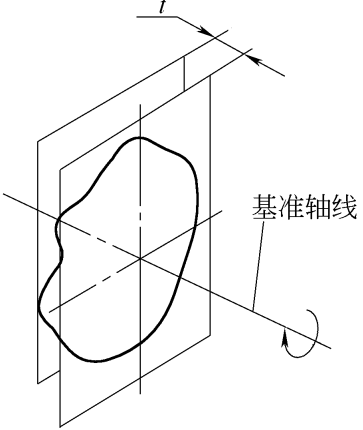
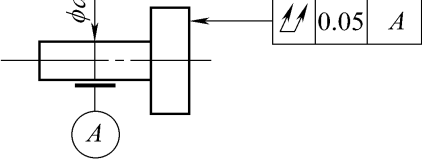
跳动公差适用于回转表面或其端面。表 6.2.8 列出了部分跳动公差带定义、标注和解释示例。

跳动公差带具有如下特点:

(1) 跳动公差带的位置具有固定和浮动双重特点,一方面公差带的中心(或轴线)始终与基准轴线同轴,另一方面公差带的半径又随实际要素的变动而变动。

表 6.2.8 跳动公差带定义、标注和解释

特征	公差带定义	标注和解释
圆跳动 径向圆跳动	<p>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 <math>t</math>,且圆心在基准轴线上的两个同心圆之间的区域</p> 	<p>当被测要素围绕基准线 <math>A</math>(基准轴线)作无轴向移动旋转一周时,在任一测量平面内的径向圆跳动量均不大于 <math>0.05\text{ mm}</math></p> 
圆跳动 端面圆跳动	<p>公差带是在与基准轴线同轴的任一半径位置的测量圆柱面上距离为 <math>t</math>的圆柱面区域</p> 	<p>被测面绕基准线 <math>A</math>(基准轴线)作无轴向移动旋转一周时,在任一测量圆柱面内的轴向跳动量均不得大于 <math>0.06\text{ mm}</math></p> 

特征	公差带定义	标注和解释
圆跳动	<p>公差带是与基准轴线同轴的任一测量圆锥面上距离为 <math>t</math> 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</p> 	<p>被测面绕基准线 A(基准轴线)作无轴向移动旋转一周时,在任一测量圆锥面上的跳动量均不得大于 0.05 mm</p> 
全跳动	<p>公差带是半径差为公差值 <math>t</math>,且与基准同轴的两圆柱面之间的区域</p> 	<p>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 0.2 mm,测量仪器或工件必须沿着基准轴线方向并相对于公共基准轴线 A—B 移动</p> 
端面全跳动	<p>公差带是距离为公差值 <math>t</math>,且与基准垂直的两平行平面之间的区域</p> 	<p>被测要素绕基准轴线 A 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不得大于 0.05 mm,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 A 的正确方向移动</p> 

(2) 跳动公差具有综合控制被测要素的位置、方向和形状的作用。例如,端面全跳动公差可同时控制端面对基准轴线的垂直度和它的平面度误差,径向全跳动公差可控制同轴度、圆柱度误差。

#### 4. 位置误差的评定

位置误差是关联实际要素对其理想要素的变动量。理想要素的方向或位置由基准确定。

判断位置误差的大小,常采用定向或定位最小包容区域去包容被测实际要素,但这个最小包容区域与形状误差的最小包容区域有所不同,其区别在于它必须在与基准保持给定几何关系的前提下使包容区域的宽度或直径最小。图 6.2.5a 所示的面对面的垂直度误差是包容被测实际平面并包得最紧,且与基准平面保持垂直的两平行平面之间的距离。这个包容区域称为定向最小包容区域。

图 6.2.5b 所示的台阶轴,被测轴线的同轴度误差是包容被测实际轴线并包得最紧,且与基准轴线同轴的圆柱面的直径,这个包容区域称为定位最小包容区域。定向、定位最小包容区域的形状与其对应的公差带的形状相同。当最小包容区域的宽度或直径小于或等于公差值时,被测要素被认为是合格的。

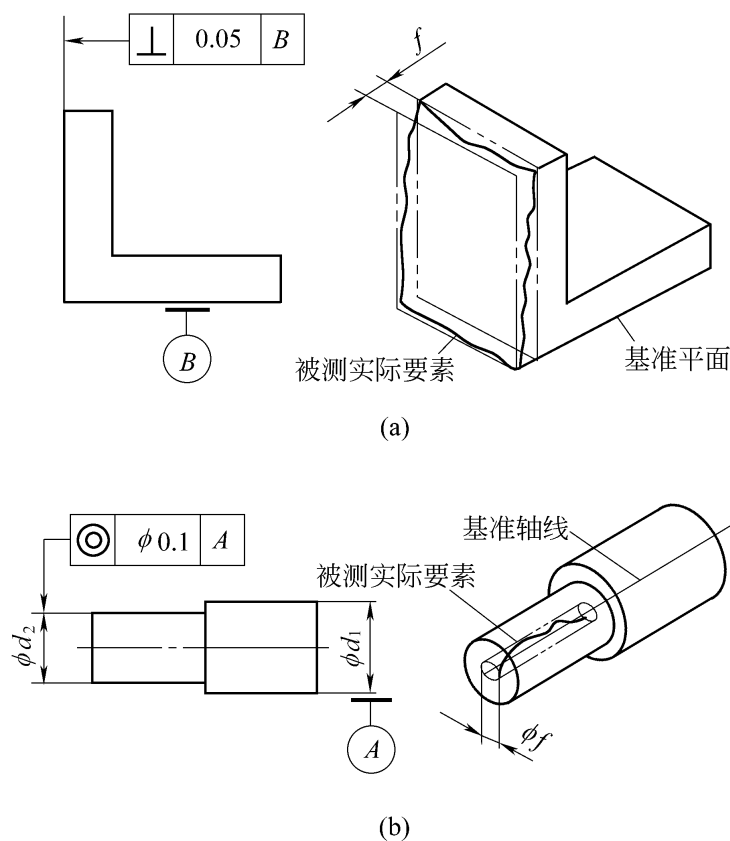


图 6.2.5 定向和定位最小包容区域示例

#### 6.2.4 形位公差与尺寸公差的关系

同一被测要素上,既有尺寸公差又有形位公差时,确定尺寸公差与形位公差之间的相互关系的原则称为公差原则,它分为独立原则和相关要求两大类。

##### 1. 有关术语及定义

##### (1) 局部实际尺寸(简称实际尺寸)

如前章所述,在实际要素的任意正截面上,两对应点之间测得的距离称为局部实际尺寸,简称实际尺寸。内、外表面的实际尺寸分别用  $D_a$ 、 $d_a$  表示。要素各处的实际尺寸往往是不同的,如图 6.2.6 所示。

##### (2) 体外作用尺寸

在被测要素的给定长度上,与实际外表面(轴)体外相接的最小理想面或与实际内表面(孔)体外相接的最大理想面的直径或宽度称为体外作用尺寸,如图 6.2.6 所示。内、外表面的体外作用尺寸分别用  $D_{fe}$ 、 $d_{fe}$  表示。

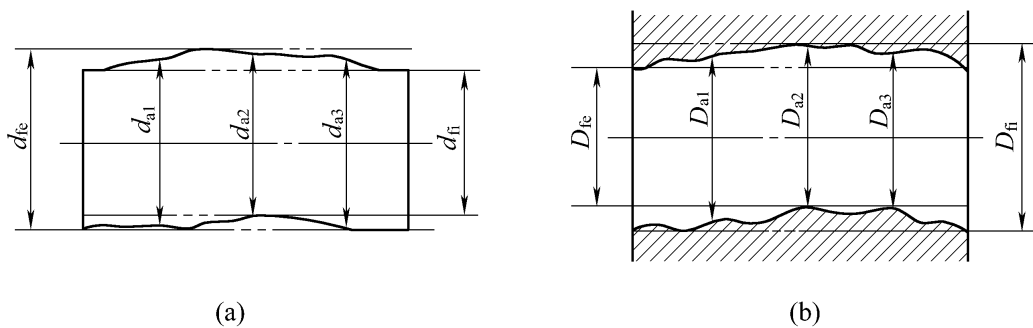


图 6.2.6 实际尺寸和作用尺寸

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。

### (3) 体内作用尺寸

在被测要素的给定长度上,与实际外表面(轴)体内相接的最大理想面或与实际内表面(孔)体内相接的最小理想面的直径或宽度称为体内作用尺寸,如图 6.2.6 所示。内、外表面的体内作用尺寸分别用  $D_{fi}$ 、 $d_{fi}$  表示。

必须注意,作用尺寸是由实际尺寸和形位误差综合形成的,对每个零件不尽相同。

### (4) 最大实体状态、尺寸、边界

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(即材料量最多)时的状态称为最大实体状态。

最大实体状态下的尺寸称为最大实体尺寸。

内、外表面的最大实体尺寸分别用  $D_M$ 、 $d_M$  表示,  $D_M = D_{\min}$ ,  $d_M = d_{\max}$  ( $D_{\min}$ ,  $d_{\max}$  分别为孔的最小极限尺寸和轴的最大极限尺寸)。

尺寸为最大实体尺寸的边界称为最大实体边界,用 MMB 表示。

例如,图 6.2.7a 所示的圆柱形外表面,其最大实体尺寸  $d_M = 30$  mm,其最大实体边界为直径等于 30 mm 的理想圆柱面,如图 6.2.7b 所示。

关联要素的最大实体边界的中心要素还必须与基准保持图样上给定的几何关系,如图 6.2.8 所示。

### (5) 最小实体状态、尺寸、边界

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(即材料量最少)时的状态称为最小实体状态。

最小实体状态下的尺寸称为最小实体尺寸。对于内表面,它为最大极限尺寸,用  $D_L$  表示;

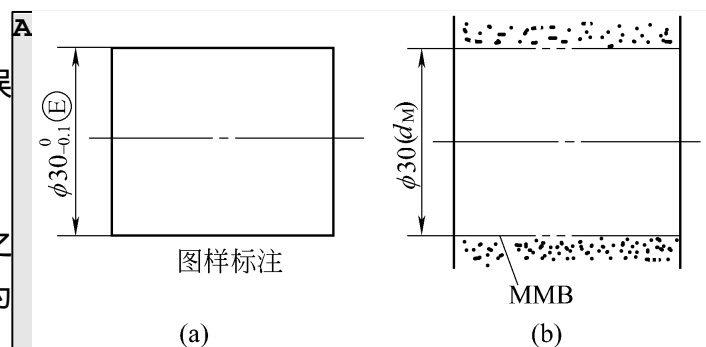


图 6.2.7 单一要素的最大实体边界

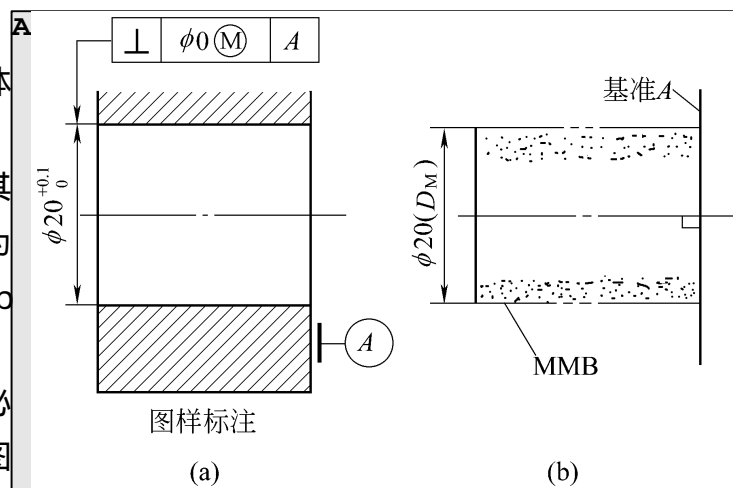


图 6.2.8 关联要素的最大实体边界

对于外表面,它为最小极限尺寸,用  $d$  表示。即  $D_M = D_{max}$ ,  $d_M = d_{min}$ 。

尺寸为最小实体尺寸的边界称为最小实体边界,用 LMB 表示。

### (6) 最大实体实效状态、尺寸、边界

在给定长度上,实际要素处于最大实体状态,且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称为最大实体实效状态。

最大实体实效状态下的体外作用尺寸称为最大实体实效尺寸。对于内表面,它等于最大实体尺寸减其中心要素的形位公差值  $t$ ,用  $D_{MV}$  表示;对于外表面,它等于最大实体尺寸加其中心要素的形位公差值  $t$ ,用  $d_{MV}$  表示。即  $D_{MV} = D_{min} - t$ ,  $d_{MV} = d_{max} + t$ 。

尺寸为最大实体实效尺寸的边界称为最大实体实效边界,用 MMVB 表示。

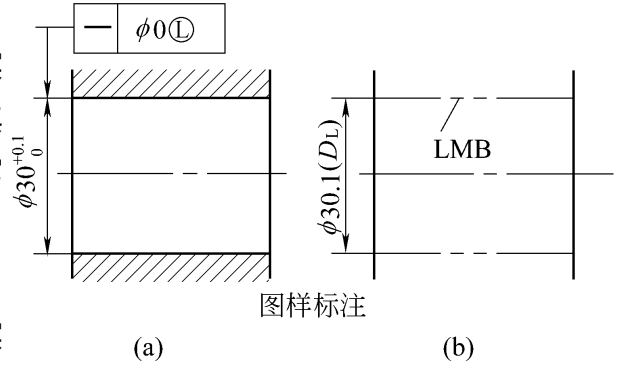


图 6.2.9 单一要素的最大实体实效边界

图 6.2.9 为单一要素的最大实体实效边界的示例。

同理,对于关联要素,最大实体实效边界的中心要素必须与基准保持图样上给定的几何关系。

## 2. 独立原则

独立原则是指被测要素在图样上给出的尺寸公差与形位公差各自独立,应分别满足要求的公差原则。

图 6.2.10 为独立原则的示例,标注时,不需要附加任何表示相互关系的符号。该标注表示轴的局部实际尺寸应在 19.97 ~ 20 mm 之间,不管实际尺寸为何值,轴线的直线度误差都不允许大于 0.05 mm。

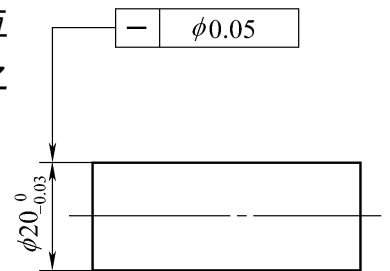


图 6.2.10 独立原则标注示例

独立原则是形位公差与尺寸公差相互关系的基本原则。

## 3. 相关要求

相关要求是指图样上给出的尺寸公差与形位公差相互有关的设计要求。它分为包容要求、最大实体要求、最小实体要求和可逆要求。可逆要求不能单独采用,只能与最大实体要求或最小实体要求联合使用。

### (1) 包容要求

在图样上,单一要素的尺寸极限偏差或公差带代号后面注有符号  $\text{E}$  时,则表示该单一要素遵守包容要求,如图 6.2.11 所示。

采用包容要求时,被测要素应遵守最大实体边界。即当实际尺寸处处为最大实体尺寸时,其形状公差为零,当实际尺寸偏离最大实体尺寸时,允许形状误差可以相应增大,但其体外作用尺寸不得超越其最大实体尺寸,且局部实际尺寸不得超越其最小实体尺寸。即

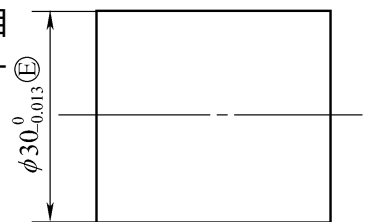


图 6.2.11 包容要求应用示例

对于外表面  $d_e$   $d_M$  ( $d_{max}$ )  $d_a$   $d_L$  ( $d_{min}$ )

对于内表面  $D_{fe}$   $D_M$  ( $D_{min}$ )  $D_a$   $D_L$  ( $D_{max}$ )

图 6.2.11 中所示的轴,  $d_e$  30 mm,  $d_a$  29.987 mm。

当实际尺寸处处为 30 mm 时,其形状公差值  $t=0$ 。



当实际尺寸处处为 29.987 mm 时,其形状公差值为最大  $t_{\max} = 0.013 \text{ mm}$ 。

## (2) 最大实体要求

1) 最大实体要求用于被测要素 图样上形位公差框格内公差值后标注 M,表示最大实体要求用于被测要素,如图 6.2.12 所示。

最大实体要求用于被测要素时,被测要素的形位公差值是在该要素处于最大实体状态时给定的。当被测要素的实际轮廓偏离最大实体状态,即其实际尺寸偏离最大实体尺寸时,允许的形位误差值可以增加,增加的量可等于实际尺寸对最大实体尺寸的偏移量,其最大增加量等于被测要素的尺寸公差。

最大实体要求用于被测要素时,被测要素应遵守最大实体实效边界,即其体外作用尺寸不得超越其最大实体实效尺寸,且局部实际尺寸在最大与最小实体尺寸之间。即

$$\text{对于外表面} \quad d_e \quad d_{MV} = d_{\max} + t$$

$$d_{\max} \quad d_a \quad d_{\min}$$

$$\text{对于内表面} \quad D_e \quad D_{MV} = D_{\min} - t$$

$$D_{\max} \quad D_a \quad D_{\min}$$

图 6.2.12 所标注的轴,当轴处于最大实体状态(实际尺寸为 20 mm)时,其轴线的直线度公差为 0.1 mm。当轴的实际尺寸小于 20 mm,如为

19.9 mm 时,其轴线的直线度公差为  $(0.1 + 0.1) \text{ mm} = 0.2 \text{ mm}$ 。当轴的实际尺寸为最小实体尺寸 19.7 mm 时,其轴线的直线度公差可达最大值,  $t_{\max} = (0.1 + 0.3) \text{ mm} = 0.4 \text{ mm}$ 。

2) 最大实体要求用于基准要素 图样上公差框格中基准字母后面标注符号 M 时,表示最大实体要求用于基准要素,如图 6.2.13 所示。此时,基准应遵守相应的边界。若基准的实际轮廓偏离相应的边界,即其体外作用尺寸偏离边界尺寸,则允许基准要素在一定范围内浮动,其浮动范围等于基准要素的体外作用尺寸与其相应边界尺寸之差。

基准要素应遵守的边界有两种情况:当基准要素本身采用最大实体要求时,其相应的边界为最大实体实效边界;基准要素本身不采用最大实体要求时,其相应的边界为最大实体边界。

图 6.2.13 表示最大实体要求同时用于被测要素和基准要素,基准本身采用包容要求。当被

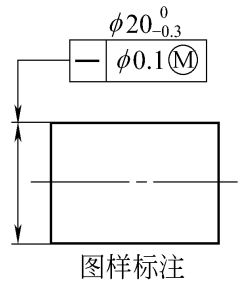


图 6.2.12 最大实体要求用于被测要素示例

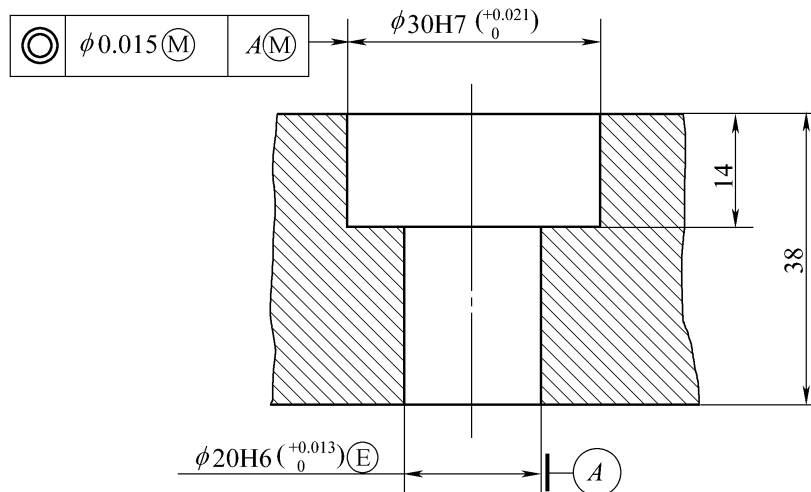


图 6.2.13 最大实体要求同时用于被测要素和基准要素

测要素处于最大实体状态(实际尺寸为 30mm)时,同轴度公差为 0.015mm;当被测要素尺寸增大,允许的同轴度误差也可增大,当其实际尺寸为 30.021mm 时,同轴度公差为  $0.015 \text{ mm} + 0.021 \text{ mm} = 0.036 \text{ mm}$ 。当基准的实际轮廓处于最大实体尺寸 20 mm 时,基准线不能浮动;当基准线的实际轮廓偏离最大实体边界,即体外作用尺寸大于 20 mm 时,基准线可以浮动;当基准的体外作用尺寸等于最小实体尺寸 20.013 mm 时,其浮动范围达到最大值 0.013 mm。基准浮动,可以理解为被测要素的边界可相对于基准在一定范围内浮动,因此,使被测要素更容易达到合格要求。

### (3) 零形位公差

当关联要素采用最大(或最小)实体要求且形位公差为零时称为零形位公差,用  $0 \text{ M}$  (或  $0 \text{ L}$ ) 表示,如图 6.2.14 所示。零形位公差可视为最大(或最小)实体要求的特例。此时,被测要素的最大(或最小)实体实效边界等于最大(或最小)实体边界,最大(或最小)实体实效尺寸等于最大(或最小)实体尺寸。

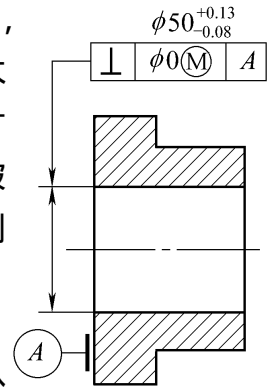


图 6.2.14 零形位公差

### 6.2.5 形位公差的应用

标注及应用示例见图 6.2.15、6.2.16。

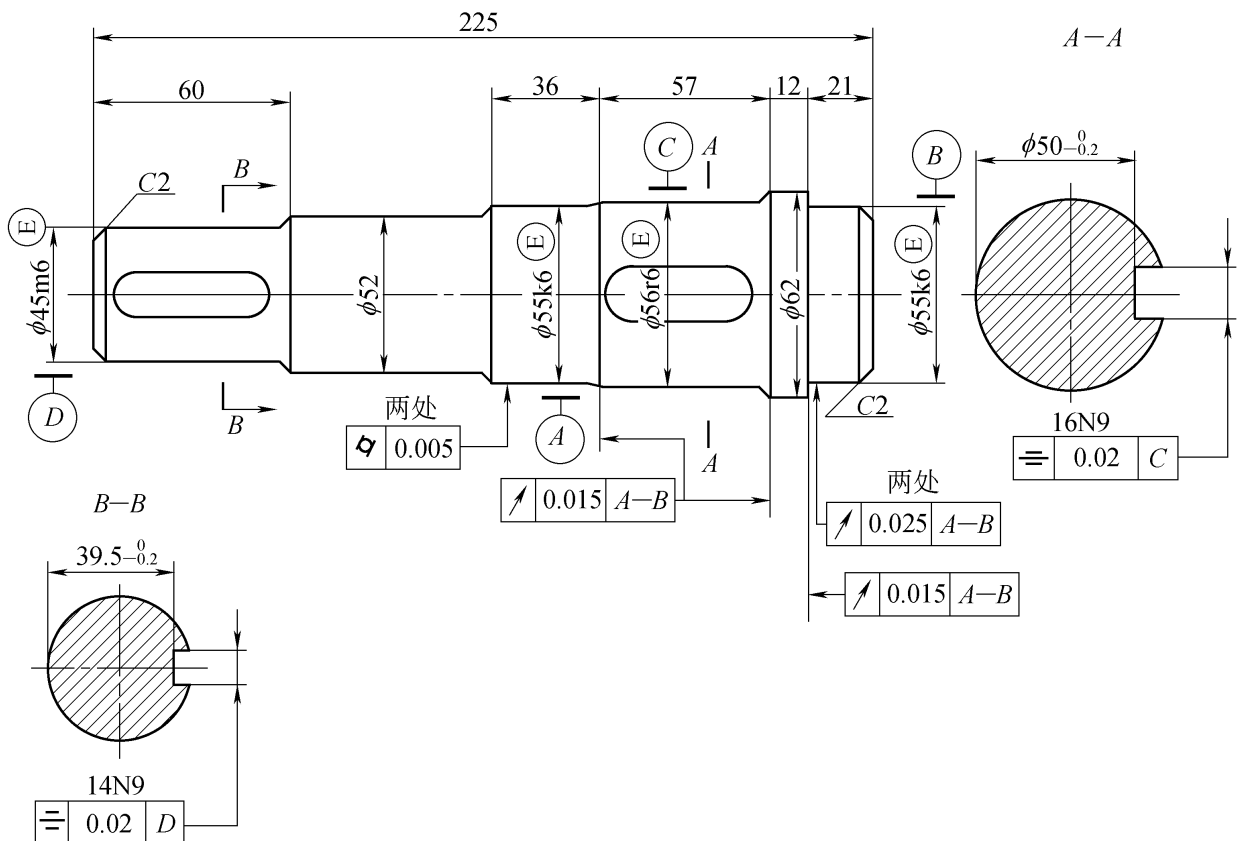


图 6.2.15 输出轴上形位公差应用示例

图 6.2.15 为一减速器的输出轴,根据对该轴的功能要求,给出了有关形位公差。轴颈 55 (两处)与滚动轴承内圈配合,轴头 56 与齿轮内孔配合,为了满足配合性质要求,对轴头和两个轴颈的形位公差都按包容要求给定。与滚动轴承配合的轴颈,按规定应对形状精度提出进一步

的要求,因该轴颈与 G 级滚动轴承配合,故取圆柱度公差 0.005 mm。同时,该两轴颈上安装滚动轴承后,将分别与减速器箱体的两孔配合。为了限制该轴两轴颈的同轴度误差,以保证配合性质,又给出了两轴颈的径向圆跳动公差 0.025 mm(相当于公差等级 7 级)。

此外,在该轴的 56r6 处安装齿轮。为了保证齿轮传递运动的准确性,对 56 mm 圆柱面相对于 55k6 两轴颈的公共基准轴线给出了径向圆跳动公差 0.025 mm。62 mm 处的两轴肩都是止推面,起一定的定位作用,参照安装滚动轴承对轴肩的精度要求,给出两轴肩相对于基准轴线 A—B 的端面圆跳动公差 0.015 mm。键槽对称度通常取 7~9 级对称度公差。该轴两处键槽 14N9 和 16N9 都按 8 级给出对称度公差,公差值为 0.02 mm。

图 6.2.16 为减速器输出轴上的齿轮,其中 56H7 孔按包容要求给定公差。齿轮的两个端面中的一个需要与轴肩贴紧,而且为切齿时的工艺基准,另一个端面作为轴套的安装基准。为了保证齿轮精度和安装时定位的准确性,按规定,对两个端面相对于基准轴线 A 给出了端面圆跳动公差值 0.022 mm,键槽对称度公差按 8 级规定,故对称度公差值为 0.02 mm。

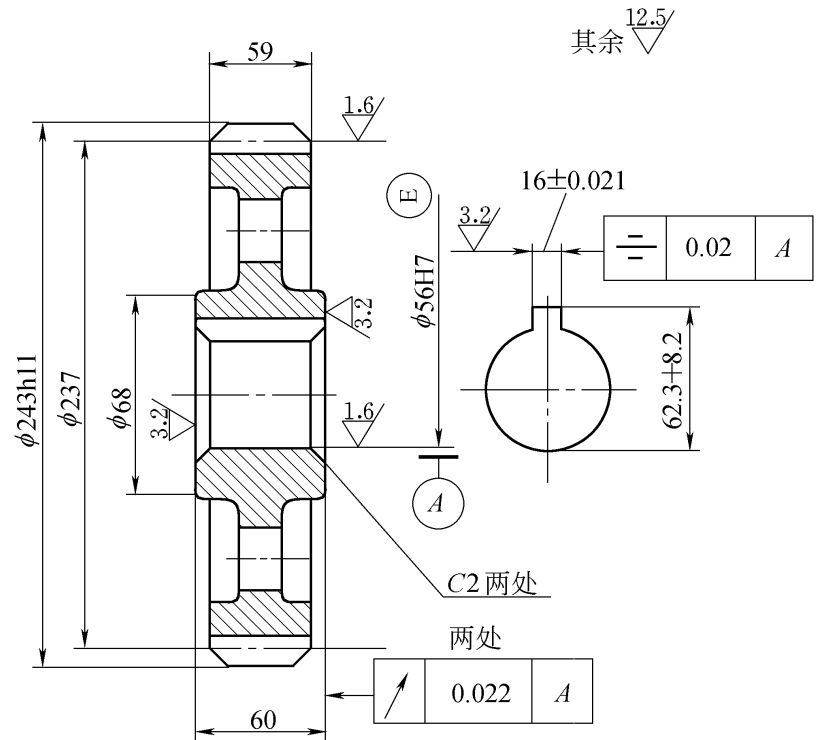


图 6.2.16 齿轮上形位公差应用示例

图 6.2.17 为一曲轴的形位公差标注图例。形位公差的公差值及未注公差值见有关的国家标准。

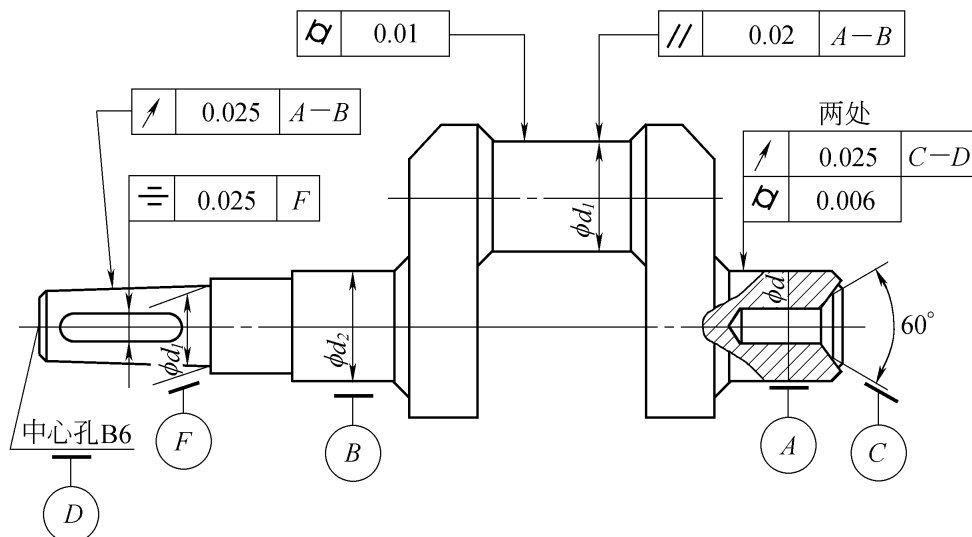


图 6.2.17 曲轴的形位公差标注

## 6.3 表面粗糙度

### 6.3.1 基本概念

#### 1. 表面粗糙度的定义

在机械加工过程中,由于刀具或砂轮切削后留下的刀痕,切削过程中切屑分离时的塑性变形,以及机床的振动等原因,会使被加工零件的表面产生微小的峰谷。这些微小峰谷的高低程度和间距大小综合起来称为表面粗糙度,它是一种微观几何形状误差,也称为微观不平度。表面粗糙度应与表面形状误差(宏观几何形状误差)和表面波度区别开,通常波距小于1 mm的属于表面粗糙度,波距在1~10 mm的属于表面波度,波距大于10 mm的属于形状误差,见图6.3.1。

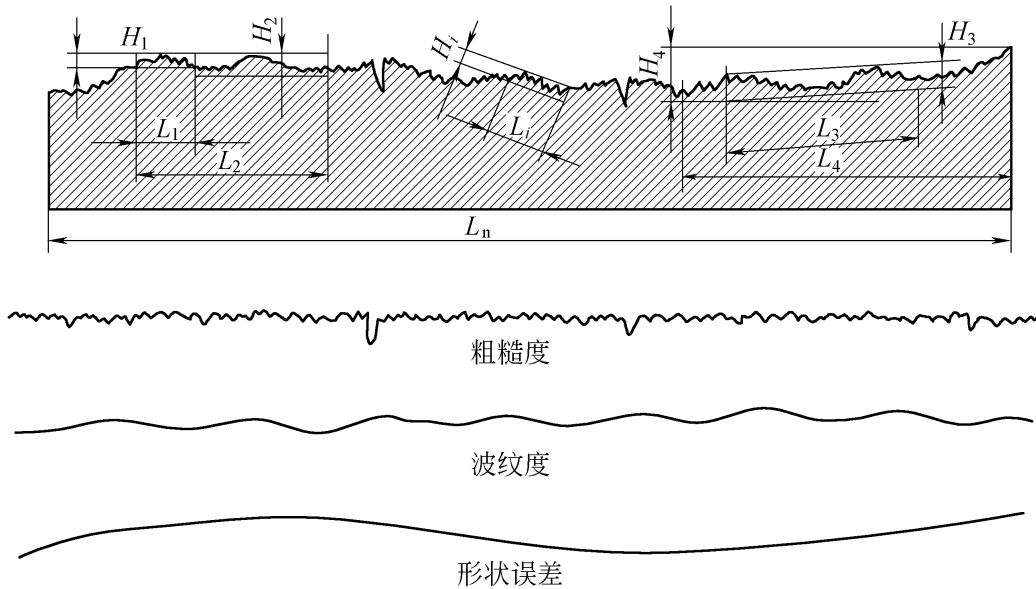


图6.3.1 表面几何形状误差

#### 2. 表面粗糙度对机械零件使用性能的影响

表面粗糙度对机械零件使用性能及其寿命影响较大,尤其对在高温、高速和高压条件下工作的机械零件影响更大,其影响主要表现在以下几个方面:

##### (1) 对摩擦和磨损的影响

较粗糙的两个零件表面,当它们接触并产生相对运动时,峰顶间的接触作用就会产生摩擦阻力,使零件磨损,零件越粗糙,阻力就越大,零件磨损也越快。

但需指出,零件表面越光滑,磨损量不一定越小。因为零件的耐磨性除受表面粗糙度影响外,还与磨损下来的金属微粒的刻划,以及润滑油被挤出和分子间的吸附作用等因素有关,所以,特别光滑的表面磨损量反而增大。实验证明,磨损量与微观不平度  $Ra$  之间的关系如图6.3.2所示。

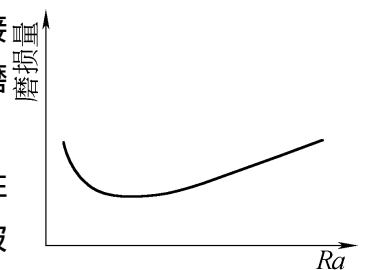


图6.3.2 磨损量与  $Ra$  关系的曲线

##### (2) 对配合性质的影响

对于间隙配合,相对运动的表面因粗糙不平而迅速磨损,致使间隙增大;对于过盈配合,表面轮廓峰顶在装配时易被挤平,实际有效过盈减小,致使连接强度降低。因此,表面粗糙度影响配

合性质的稳定性。

### (3) 对抗疲劳强度的影响

零件表面越粗糙,凹痕越深,波谷的曲率半径也越小,对应力集中越敏感。特别是当零件承受交变载荷时,由于应力集中的影响,使疲劳强度降低。导致零件表面产生裂纹而损坏。

### (4) 对抗腐蚀性的影响

粗糙的表面,易使腐蚀性物质存积在表面的微观凹谷处,并渗入到金属内部,如图 6.3.3 所示,致使腐蚀加剧。因此,减小零件表面粗糙度,可以增强其抗腐蚀的能力。

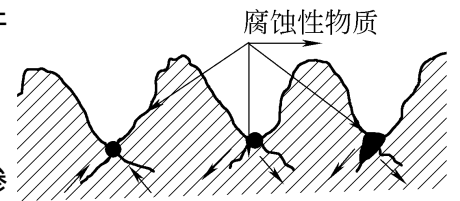


图 6.3.3 腐蚀性的影响

此外,表面粗糙度对零件其他使用性能,如结合的密封性、接触刚度、对流体流动的阻力以及对机器、仪器的外观质量及测量精度等都有很大影响。因此,为保证机械零件的使用性能,在对零件进行几何精度设计时,必须合理地提出表面粗糙度的要求。

## 6.3.2 表面粗糙度的评定

经加工的零件表面的表面粗糙度是否满足使用要求,需要进行测量和评定。

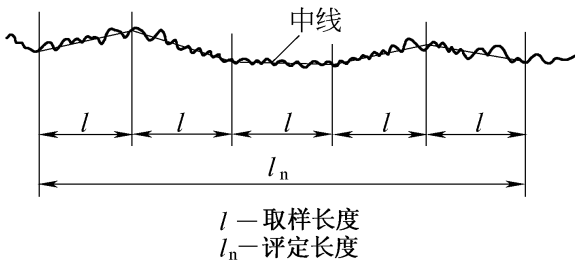


图 6.3.4 取样长度

### 1. 评定基准

为了评定表面粗糙度的数值大小及其量值统一,需要确定取样长度、评定长度和基准线。

#### (1) 取样长度 ( $l$ )

取样长度是指测量或评定表面粗糙度时所规定的一段基准线长度,它至少包含 5 个以上轮廓峰和谷,如图 6.3.4 所示,取样长度  $l$  的方向与轮廓走向一致。规定取样长度的目的在于限制和减弱其他几何形状误差,特别是表面波度对测量结果的影响。一般表面越粗糙,取样长度就越大。

#### (2) 评定长度 ( $l_n$ )

由于零件表面粗糙度不均匀,为了合理地反映表面粗糙度特征,在测量和评定时所规定的一段最小长度称为评定长度 ( $l_n$ )。

评定长度可包括一个或几个取样长度,如图 6.3.4 所示。一般情况下,取  $l_n = 5l$ 。

#### (3) 基准线

评定表面粗糙度参数值大小的一条参考线为基准线,基准线有下列两种:

1) 轮廓最小二乘中线 ( $m$ ) 它是指在取样长度内,使轮廓线上各点的轮廓偏距  $y_i$  平方和为最小的线,即

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = \min$$

如图 6.3.5 所示。

2) 轮廓算术平均中线 它是指在取样长度内,将实际轮廓划分为上、下两部分,且使上下两

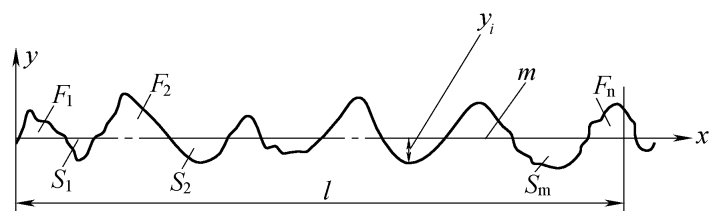


图 6.3.5 轮廓算术平均中线

部分面积相等的线,即  $F_1 + F_2 + \dots + F_n = S_1 + S_2 + \dots + S_m$ ,见图 6.3.5。

在轮廓图形上确定最小二乘中线的位置,用计算机程序进行计算较容易确定。在无计算程序的条件下,通常用目测估计确定算术平均中线。

## 2. 评定参数

为了满足对零件表面不同的功能要求,国标根据表面微观几何形状的高度、间距和形状等三个方面的特征,规定了相应的评定参数。

### (1) 高度特性参数

1) 轮廓算术平均偏差  $Ra$  在取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值为轮廓算术平均偏差,如图 6.3.5 所示,用  $Ra$  表示。即

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

或近似为

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

式中  $y$ ——为轮廓偏距(轮廓上各点至基准线的距离)

$y_i$ ——第  $i$  点的轮廓偏距( $i=1, 2, 3, \dots$ )。

测得的  $Ra$  值越大,则表面越粗糙。 $Ra$  能客观地反映表面微观几何形状误差,但因受到计量器具功能限制,不宜用作过于粗糙或太光滑表面的评定参数。

2) 微观不平度十点高度  $Rz$  在取样长度内 5 个最大的轮廓峰高  $Y_{pi}$  的平均值与 5 个最大的轮廓谷深  $Y_{vi}$  的平均值之和,即

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 Y_{pi} + \sum_{i=1}^5 Y_{vi}}{5}$$

式中  $Y_{pi}$ ——第  $i$  个最大轮廓峰高;

$Y_{vi}$ ——第  $i$  个最大轮廓谷深。

见图 6.3.6。

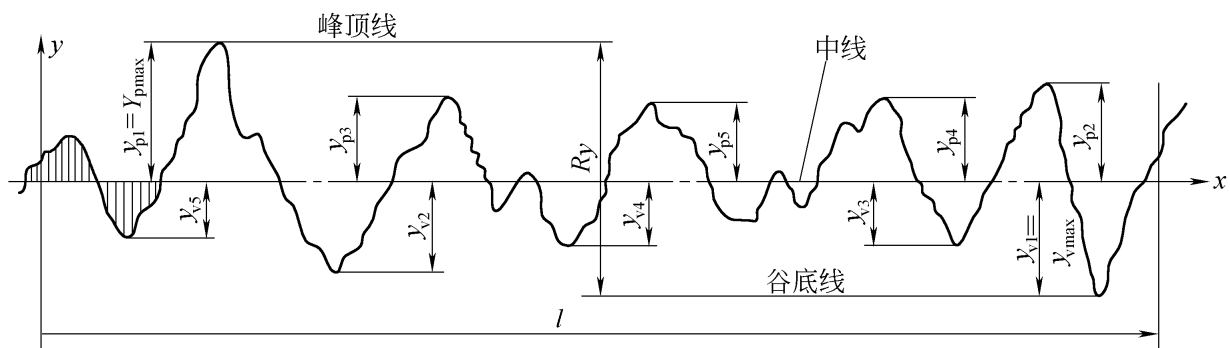


图 6.3.6 表面粗糙度的高度参数

$Rz$  值越大,则表面越粗糙。 $Rz$  只能反映轮廓的峰高和谷深,不能反映峰顶和容底的尖锐或平钝的几何特性。

3) 轮廓最大高度  $Ry$  取样长度内轮廓峰顶线和轮廓谷底线之间的距离为轮廓最大高度,如图 6.3.6 所示,用  $Ry$  表示。即

$$Ry = y_{pmax} + y_{vmax}$$

式中  $y_{pmax}$ 、 $y_{vmax}$  同样都取正值。

高度特征参数 ( $Ra$ 、 $Rz$ 、 $Ry$ ) 是标准规定必须标注的参数, 故又称为基本参数。

### (2) 间距特征参数

1) 轮廓微观不平度的平均间距  $S_m$  在取样长度内轮廓微观不平度的间距的平均值, 如图

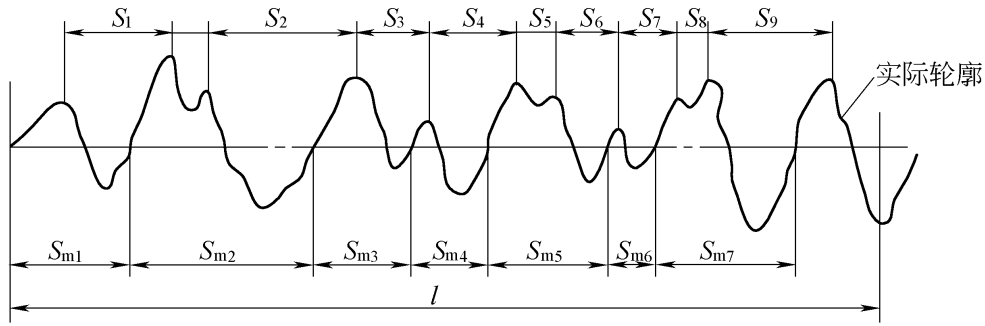


图 6.3.7 表面粗糙度的间距参数

6.3.7 所示, 用  $S_m$  表示。即

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}$$

轮廓微观不平度的间距是指含有一个轮廓峰和相邻的一个轮廓谷的一段中线长度。

2) 轮廓的单峰平均间距  $S$  在取样长度内轮廓的单峰间距的平均值, 如图 6.3.7 所示, 用  $S$  表示。即

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

单峰间距是指两相邻单峰的最高点间沿中线方向上的距离。

应明确轮廓单峰、轮廓单谷、轮廓峰和轮廓谷的概念。轮廓单峰、轮廓单谷分别是指两相邻轮廓最低、最高之间的轮廓部分; 轮廓峰是指在取样长度内, 连接轮廓与中线两相邻交点向外 (从材料到周围介质) 的轮廓部分; 所谓轮廓谷是指在取样长度内, 连接轮廓与中线两相邻交点向内 (从周围介质到材料) 的轮廓部分, 如图 6.3.8 所示。

### (3) 形状特性参数

轮廓支承长度率  $t_p$  在取样长度内轮廓支承长度  $p$  与取样长度  $l$  之比, 用  $t_p$  表示。即

$$t_p = \frac{p}{l} \times 100\%$$

所谓轮廓支承长度  $p$ , 是指在取样长度内, 一平行于中线的线从峰顶线向下移一水平截距  $C$  时, 与轮廓相截所得的各段截线长度之和, 如图 6.3.9a 所示。即

$$p = b_1 + b_2 + \dots + b_i + \dots + b_n = \sum_{i=1}^n b_i$$

轮廓的水平截距  $C$  可用微米或用它占轮廓最大高度  $Ry$  的百分比来表示。由图 6.3.9a 可以

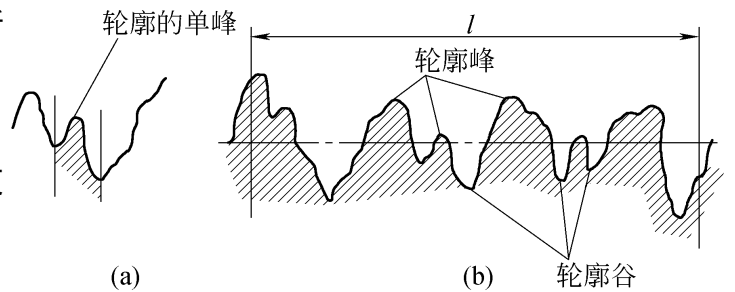


图 6.3.8 轮廓单峰、轮廓峰和轮廓谷

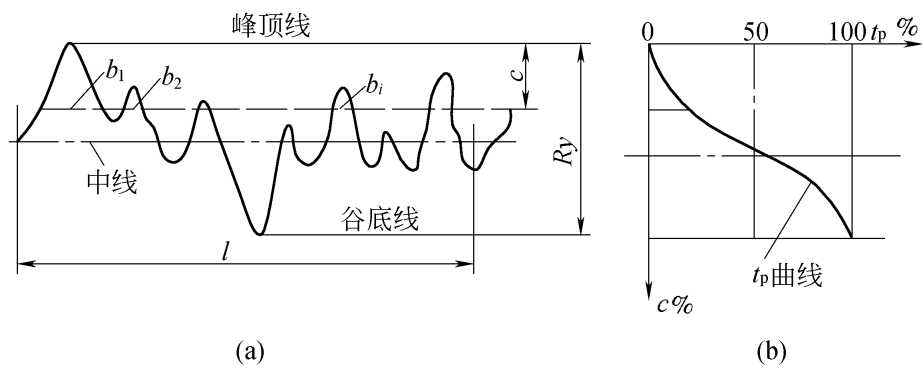


图 6.3.9 Abbots 曲线

看出, 支承长度率是随着水平截距大小的变化而变化的, 其关系曲线称支承长度率曲线, 又称 Abbots 曲线, 如图 6.3.9b 所示。支承长度率曲线对于反映表面耐磨性具有显著的功效, 即从中可以明显地看出支承长度的变化趋势, 且比较直观。

间距特性参数 ( $S_m$ 、 $S$ ) 与形状特征参数 ( $t_p$ ) 相对基本参数而言, 它们称附加参数。它们是只有少数零件的重要表面有特殊使用要求时, 才选用的附加评定参数。

### 6.3.3 表面粗糙度的参数值及其选用

#### 1. 表面粗糙度的参数值

表面粗糙度的参数值已经标准化, 设计时应按国家标准《表面粗糙度参数及其数值》规定的参数值系列选取。

高度特性参数值列于表 6.3.1 和表 6.3.2

表 6.3.1  $R_a$  的数值

				$\mu\text{m}$
0.012	0.20	3.2	50	
0.025	0.40	6.3		
0.050	0.80	12.5		
0.100	1.60	25		

表 6.3.2  $R_z$ 、 $R_y$  的数值

					$\mu\text{m}$
0.025	0.40	6.3	100	1 600	
0.050	0.80	12.5	200		
0.100	1.60	25	400		
0.20	3.2	50	800		

表 6.3.3  $l$  和  $l_n$  的数值

				$\text{mm}$
$R_a/\mu\text{m}$	$R_z$ 、 $R_y/\mu\text{m}$	$l/\text{mm}$	$l_n/\text{mm} (l_n = 5l)$	
0.008 ~ 0.02	0.025 ~ 0.10	0.08	0.4	
> 0.02 ~ 0.10	> 0.10 ~ 0.5	0.25	1.25	
> 0.1 ~ 2.0	> 0.50 ~ 10.0	0.8	4.0	
> 2.0 ~ 10.0	> 10.0 ~ 50.0	2.5	12.5	
> 10.0 ~ 80.0	> 50.0 ~ 32.0	8.0	40.0	



在一般情况下,测量  $R_a$ 、 $R_z$  和  $R_y$  时,推荐按表 6.3.3 选用对应的取样长度及评定长度值,此时在图样上可省略标注取样长度值。当有特殊要求不能选用表 6.3.3 中数值时,应在图样上标注出取样长度值。

## 2. 表面粗糙度的选用

### (1) 评定参数的选用

1) 对高度参数的选用 一般情况下可以从高度参数  $R_a$ 、 $R_z$  和  $R_y$  中任选一个,但在常用值范围内( $R_a$  为  $0.025 \sim 6.3 \mu\text{m}$ ,  $R_z$  为  $0.1 \sim 25 \mu\text{m}$ ),优先选用  $R_a$ 。因为通常采用电动轮廓仪测量零件表面的  $R_a$  值,其测量范围为  $0.02 \sim 8 \mu\text{m}$ 。

$R_z$  通常用光学仪器——双管显微镜或干涉显微镜测量。粗糙度要求特别高或特别低( $R_a < 0.025 \mu\text{m}$  或  $R_a > 6.3 \mu\text{m}$ )时,选用  $R_z$ 。

$R_y$  用于测量部位小,峰谷少或有疲劳强度要求的零件表面的评定。

如图 6.3.10 中,三种表面的轮廓最大高度参数相同,而使用质量显然不同,由此可见,只用高度参数不能全面反映零件表面微观几何形状误差,应采用形状特性参数来区分。



图 6.3.10 形状特性

2) 对间距参数的选用 对附加评定参数  $S_m$ 、 $S$  和  $t_\zeta$ ,一般不能作为独立参数选用,只有少数零件的重要表面,有特殊使用要求时,才附加选用间距参数和形状特性参数。

$S_m$ 、 $S$  主要在涂漆性能,冲压成形时抗裂纹、抗振性、抗腐蚀性、减小流体流动摩擦阻力等要求时附加选用。选用  $S_m$  还是  $S$ ,主要根据测量仪器的可测性和测量是否方便来决定。

3) 对形状特性参数的选用 支承长度率  $t_\zeta$  主要在耐磨性、接触刚度要求高等场合附加选用。

### (2) 参数值选用

表面粗糙度参数值的选用原则是满足功能要求,其次是考虑经济性及工艺的可能性。在满足功能要求的前提下,参数的允许值应尽可能大些(除  $t_\zeta$  外)。在工程实际中,由于表面粗糙度和功能的关系十分复杂,因而很难准确地确定参数的允许值,在具体设计时,一般多采用经验统计,用类比法来选用。

根据类比法初步确定表面粗糙度后,再对比工作条件做适当调整。这时应注意下述一些原则:

- 1) 同一零件上,工作表面的  $R_a$  或  $R_z$  值比非工作表面小;
- 2) 摩擦表面  $R_a$  或  $R_z$  值比非摩擦表面小;
- 3) 运动速度高、单位面积压力大,以及受交变应力作用的重要零件圆角沟槽的表面粗糙度都应较小;
- 4) 配合性质要求高的配合表面(如小间隙配合的配合表面)、受重载荷作用的过盈配合表面的表面粗糙度都应较小;
- 5) 在确定表面粗糙度参数值时,应注意与尺寸公差和形位公差协调,有时尺寸公差值越小,形位公差值、表面  $R_a$  或  $R_z$  值应越小。同一公差等级时,轴的粗糙度数值应比孔小;

6) 要求防腐蚀、密封性能好,或外表美观的表面粗糙度数值应较小;

7) 凡有关标准已对表面粗糙度要求作出规定(如与滚动轴承配合的轴颈和外壳孔的表面粗糙度),则应按该标准确定表面粗糙度参数值。

表面粗糙度的表面特征、经济加工方法及应用举例见表 6.3.4。

表 6.3.4 表面粗糙度的表面特征、经济加工方法及应用举例

表面微观特征		$Ra/\mu\text{m}$	$Rz/\mu\text{m}$	加工方法	应用举例
粗糙表面	微见刀痕	20	80	粗车、粗刨、粗铣、钻、毛锉、锯断	半成品粗加工表面,非配合的加工表面,如轴端面、倒角、钻孔、齿轮和皮带轮侧面、键槽底面、垫圈接触面
	微见加工痕迹	10	40	车、刨、铣、镗、钻、粗铰	轴上不安装轴承、齿轮处的非配合表面,紧固件的自由装配表面,轴和孔的退刀槽
半光表面	微见加工痕迹	5	20	车、刨、铣、镗、磨、拉、粗刮、滚压	半精加工表面,箱体、支架、盖面、套筒等和其他零件结合而无配合要求的表面,需要发蓝的表面等
	看不清加工痕迹	2.5	10	车、刨、铣、镗、磨、拉、刮、压、铣齿	接近于精加工表面,箱体上安装轴承的镗孔表面,齿轮的工作面
光表面	可辨加工痕迹方向	1.25	6.30	车、镗、磨、拉、刮、精铰、磨齿、滚压	圆柱销、圆锥销,与滚动轴承配合表面,普通车床导轨面,内、外花键定心表面
	微辨加工痕迹方向	0.63	3.2	精铰、精镗、磨、刮、滚压	要求配合性质稳定的配合表面,工作时受交变应力的重要零件,较高精度车床的导轨面
	不可辨加工痕迹方向	0.32	1.6	精磨、珩磨、研磨、超精加工	精密机床主轴锥孔、顶尖圆锥面、发动机曲轴、凸轮轴工作表面,高精度齿轮齿面
极光表面	暗光泽面	0.16	0.8	精磨、研磨、普通抛光	精密机床主轴轴颈表面,一般量规工作表面,汽缸套内表面,活塞销表面
	亮光泽面	0.08	0.4	超精磨、精抛光、镜面磨削	精密机床主轴轴颈表面,滚动轴承的滚珠,高压油泵中柱塞和柱塞套配合表面
	镜状光泽面	0.04	0.2		
	镜面	0.01	0.05	镜面磨削、超精研	高精度量仪、量块的工作表面,光学仪器中的金属镜面

### 3. 基本符号周围的有关标注

图样上给定的表面特征代(符)号是指完工后表面的要求。一般情况下,只注出粗糙度评定参数代号及其允许值即可。如对零件表面功能有特殊要求时,则还应注出表面特征的其他规定,如取样长度、加工纹理方向、加工方法等,如图 6.3.11 所示。

$Ra$  只标数值,本身符号不标。 $Ry$ 、 $Rz$  除标数值外,还需在数值前标出相应的符号。在一个符号上可同时标出上下限两个参数。

标注示例见图 6.3.12。

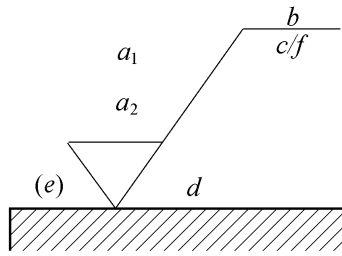


图 6.3.11 各项标注规定在符号中的位置

- $a_1$ 、 $a_2$ ——粗糙度高度参数代号及其数值,  $\mu\text{m}$ ;
- $b$ ——加工要求、镀覆、涂覆、表面处理或其他说明等;
- $c$ ——取样长度(mm)或波纹度( $\mu\text{m}$ );
- $d$ ——加工纹理方向符号;
- $e$ ——加工余量, mm;
- $f$ ——粗糙度间距参数值(mm)或轮廓支承长度率

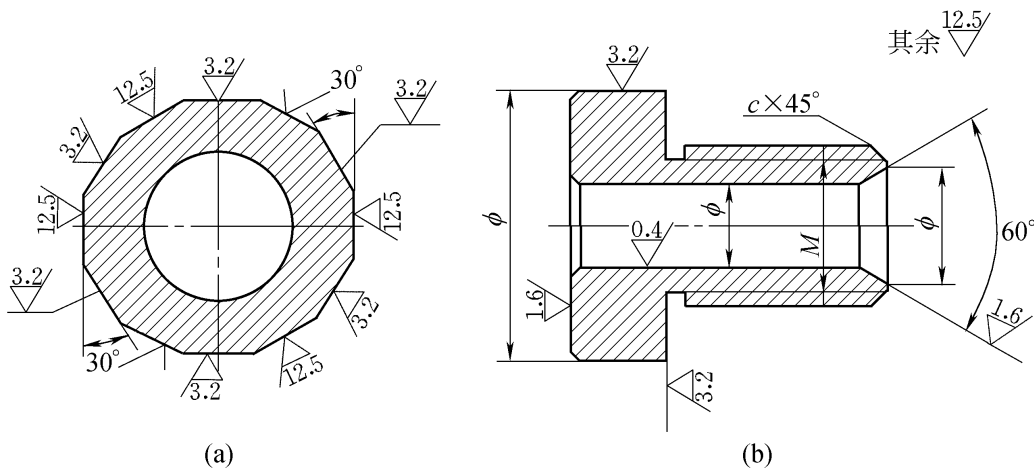


图 6.3.12 粗糙度标注示例

## 复习与思考题

- 6-1 加工好的零件尺寸愈接近基本尺寸,其精度也就愈高,对吗?
- 6-2 尺寸公差有没有零公差和负公差?
- 6-3 基本尺寸相同,基本偏差代号相同,而公差等级不同时,它们的上偏差、下偏差是否都相同?
- 6-4 25H7/k6 中 25 是什么尺寸? H7/k6 是什么代号? H7 是什么代号? k6 是什么代号? 7, 6 表示什么? 这配合属于什么制的什么配合? 它一般用于什么场合?
- 6-5 25H7/k6 与 25K7/h6 孔、轴的上、下偏差各是多少? 这两对配合的极限间隙和过盈各是多少? 平均间隙是多少?
- 6-6 国家标准中规定,标准公差共分几个等级? 基本偏差的代号共有几个?
- 6-7 G7、H7/g6、H7/n6 各属于哪种基准制? 哪一类配合?
- 6-8 说出几种形位公差标注的含义。
- 6-9 根据图 6.2.17,用文字说明形位公差标注的含义。

## 第7章 金属切削加工基础知识

金属切削加工的方法很多,尽管它们的形式有所不同,但是却有着许多共同的规律和现象。掌握这些规律和现象,对正确应用各种金属切削加工方法有着重要的意义。本章主要介绍切削加工过程的切削运动、切削刀具以及其过程的基本规律等金属切削加工基础知识。

金属切削加工就是利用工件和刀具之间的相对(切削)运动,用刀具上的切削刃切除工件上的多余金属层,从而获得具有一定加工质量零件的过程。由此可见,理解零件加工质量的概念;掌握切削运动和金属切削刀具的基本知识;认识金属切削过程的基本规律是学习金属切削加工的基本内容。

### 7.1 加工质量

为了保证机电产品的质量,设计时应为零件提出加工质量的要求,机械零件的加工质量包括加工精度和表面质量两方面,它们的好坏将直接影响产品的使用性能、使用寿命、外观质量、生产率和经济性。

#### 7.1.1 加工精度

经机械加工后,零件的尺寸、形状、位置等参数的实际数值与设计理想值的符合程度称为机械加工精度,简称加工精度。实际值与理想值相符合的程度越高,即偏差(加工误差)越小,加工精度越高。

加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度。零件图上,对被加工件的加工精度要求常用尺寸公差、形状公差和位置公差来表示。

##### 1. 尺寸精度

是指加工表面本身的尺寸(如圆柱面的直径)和表面间的尺寸(如孔间距离等)的精确程度。尺寸精度的高低,用尺寸公差的大小来表示。

尺寸公差是尺寸允许的变动量,国家标准《极限与配合》中规定,尺寸公差分20个等级,即IT01、IT0、IT1、IT2...、IT18。IT后面的数字代表公差等级,数字愈大,公差等级越低,公差值越大,尺寸精度越低。不同公差等级的加工方法和应用见表7.1.1。

加工过程中影响尺寸精度的因素很多,表7.1.1中表示的某种加工方法所对应达到的加工精度,是指在正常产生条件下保证一定生产率所能达到的加工精度,称为经济精度。

##### 2. 形状精度

是指零件加工后的表面与理想表面在形状上相接近的程度。如直线度、圆度、圆柱度、平面

度等。

### 3. 位置精度

是指零件加工后的表面、轴线或对称平面之间的实际位置与理想位置接近的程度。如平行度、垂直度、同轴度、对称度等。

国家标准《形状和位置公差》中规定 形状和位置公差共有 14 个项目。

在零件图上 通常只规定尺寸公差 ,对要求较高的零件 除了规定尺寸公差外 ,还要规定形状和位置公差。

一般机械加工精度越高 ,加工的成本也越高 ,所以在设计零件时 ,应在满足零件使用要求的前提下 选用经济精度。

## 7.1.2 表面质量

机械零件的表面质量 主要是指零件加工后的表面粗糙度以及表面层材质的变化。

### 1. 表面粗糙度

在切削加工中 ,由于刀痕、塑性变形、振动和摩擦等原因 ,会使加工表面产生微小的峰谷。这些微小峰谷的高低程度和间距状况称为表面粗糙度。表面粗糙度对零件的耐磨性、抗腐蚀性和配合性质等有很大影响。它直接影响机器的使用性能和寿命。

国家标准规定了表面粗糙度的评定参数及其数值。常用的评定表面粗糙度的参数是轮廓算术平均偏差  $Ra$  值 ,常见加工方法一般能达到的表面粗糙度值见表 7.1.1。

表 7.1.1 各种加工方法所能达到的公差等级和表面粗糙度

表面微观特征		$Ra/\mu m$	加工精度	加工方法	应用
不加工	清除毛刺		IT16 ~ IT14		铸件、锻件、焊接件、冲压件
粗加工	明显可见刀痕	80	IT13 ~ IT10	粗车、粗刨、粗铣、钻、毛锉、锯断	用于非配合尺寸或不重要的配合
	可见刀痕	40	IT10		用于一般要求 ,主要用于长度尺寸的配合
	微见刀痕	20	IT10 ~ IT8		
半精加工	可见加工痕迹	10	IT10 ~ IT8	半精车、精车、精刨、精铣、粗磨	用于重要配合
	微见加工痕迹	5	IT8 ~ IT7		
	不见加工痕迹	2.5	IT8 ~ IT7		
精加工	可辨加工痕迹方向	1.25	IT8 ~ IT6	精车、精刨、精磨、铰	用于精密配合
	微辨加工痕迹方向	0.63	IT7 ~ IT6		
	不辨加工痕迹方向	0.32	IT7 ~ IT6		
超精加工	暗光泽面	0.16	IT6 ~ IT5	精磨、研磨、镜面磨、超精加工	量块、量仪和精密仪表、精密零件的光整加工
	亮光泽面	0.08	IT6 ~ IT5		
	镜状光泽面	0.04			
	雾状光泽	0.02			
	镜面	0.01			

一般来说,零件的表面粗糙度越小,零件的使用性能越好,寿命也越长,但零件的制造成本也会相应增加。

## 2. 表面层材质的变化

零件加工后表面层的力学、物理及化学等性能会与基体材料不同,表现为加工硬化、残余应力产生、疲劳强度变化及耐腐蚀性下降等,这些将直接影响零件的使用性能。

零件加工质量与加工成本有着密切的关系。加工精度要求高,将会使加工过程复杂化,导致成本上升,所以在确定零件加工精度和表面粗糙度时,总的原则是,在满足零件使用性能要求和后续工序要求的前提下,尽可能选用较低的精度等级和较大的表面粗糙度值。

# 7.2 切削运动

## 7.2.1 切削运动

切削加工时,为了获得各种形状的零件,刀具与工件之间必须具有一定的相对运动,即切削运动,切削运动按其所起的作用可分为主运动和进给运动。

### 1. 主运动

由机床或人力提供的运动,它使刀具与工件之间产生主要的相对运动。主运动的特点是速度最高,消耗功率最大。车削时,主运动是工件的回转运动,如图 7.2.1 所示;牛头刨床刨削时,主运动是刀具的往复直线运动,如图 7.2.2 所示。

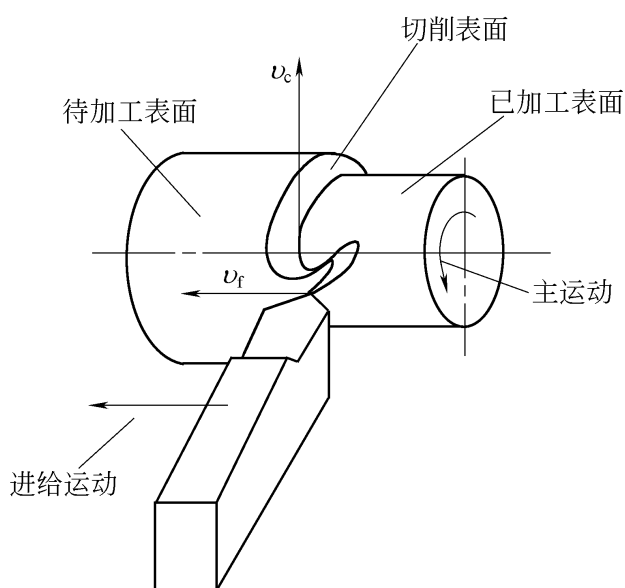


图 7.2.1 车削运动和工件上的表面

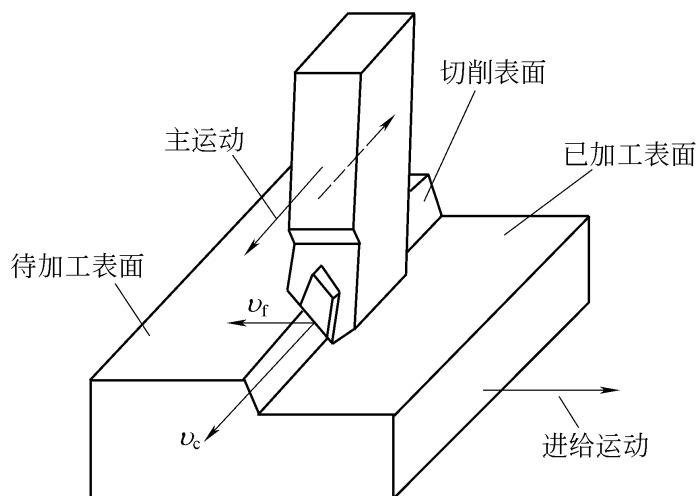


图 7.2.2 刨削运动和工件上的表面

### 2. 进给运动

由机床或人力提供的运动,它使刀具与工件间产生附加的相对运动,进给运动将使被切金属层不断地投入切削,以加工出具有所需几何特性的已加工表面。车削外圆时,进给运动是刀具的纵向运动;车削端面时,进给运动是刀具的横向运动。牛头刨床刨削时,进给运动是工作台的移动。

主运动的运动形式可以是旋转运动,也可以是直线运动;主运动可以由工件完成,也可以由刀具完成;主运动和进给运动可以同时进行,也可以间歇进行;主运动通常只有一个,而进给运动

的数目可以有一个或几个。

### 3. 主运动和进给运动的合成

当主运动和进给运动同时进行时,切削刃上某一点相对于工件的运动为合成运动,常用合成速度向量  $v_c$  来表示,如图 7.2.3 所示。

## 7.2.2 工件表面

切削加工过程中,在切削运动的作用下,工件表面上一层金属不断地被切下来变为切屑,从而加工出所需要的新的表面,在新表面形成的过程中,工件上有三个依次变化着的表面,它们分别是待加工表面,切削表面和已加工表面,如图 7.2.1 和图 7.2.2 所示。

其涵义是:

#### 1. 待加工表面

即将被切去的金属层表面;

#### 2. 切削表面

切削刃正在切削而形成的表面,切削表面又称加工表面或过渡表面;

#### 3. 已加工表面

已经切去多余金属层而形成的新表面。

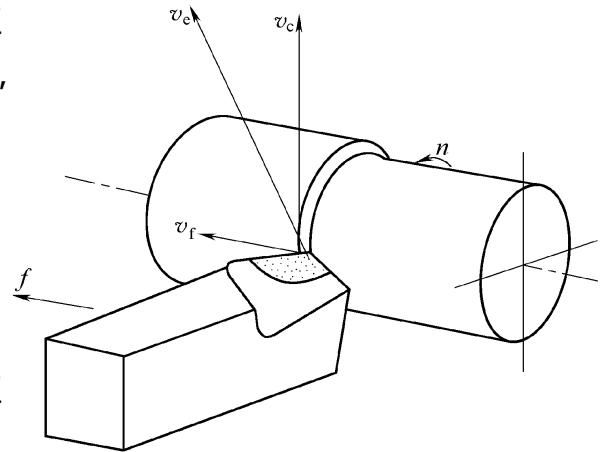


图 7.2.3 合成速度

## 7.2.3 切削用量

切削用量是用来表示切削加工中主运动和进给运动参数的数量。切削用量包括切削速度、进给量、背吃刀量三个要素。

#### 1. 切削速度 $v_c$

在切削加工时,切削刃选定点相对于工件主运动的瞬时速度称为切削速度,它表示在单位时间内工件或刀具沿主运动方向相对移动的距离,单位为  $m/min$  或  $m/s$ 。

主运动为旋转运动时,切削速度  $v_c$  计算公式为:

$$v_c = \frac{dn}{1000} (m/min \text{ 或 } m/s)$$

式中  $d$ ——工件直径  $mm$ ;

$n$ ——工件或刀具每分(秒)钟转数( $r/min$  或  $r/s$ )。

主运动为往复运动时,平均切削速度为:

$$v_c = \frac{2L\eta}{1000} (m/min)$$

式中  $L$ ——往复运动行程长度  $mm$ ;

$\eta$ ——主运动每分钟的往复次数,往复次数/ $min$ 。

#### 2. 进给量 $f$

进给量是刀具在进给运动方向上相对工件的位移量,可用刀具或工件每转或每行程的位移量来表述或度量。车削时进给量的单位是  $mm/r$ ,即工件每转一圈,刀具沿进给运动方向移动的

距离。刨削的主运动为往复直线运动,其间歇进给的进给量为 mm/双行程,即每个往复行程刀具与工件之间的相对横向移动距离。

单位时间的进给量,称为进给速度,它是切削刀选定点相对于工件进给运动的瞬时速度。车削时的进给速度  $v_f$  (mm/min 或 mm/s) 计算公式为:

$$v_f = n \cdot f$$

铣削时,由于铣刀是多齿刀具,进给量单位除 mm/r 外,还规定了每齿进给量,用  $a_z$  表示,单位是 (mm/z),  $v_f$ 、 $f$ 、 $a_z$  三者之间的关系为:

$$v_f = n \cdot f = n \cdot a_z \cdot z$$

$z$  为多齿刀具的齿数。

切削速度和进给速度的图示方法见图 7.2.1 和图 7.2.2

### 3. 背吃刀量(切削深度) $a_p$

背吃刀量  $a_p$  是指主刀刃工作长度(在基面上的投影)沿垂直于进给运动方向上的投影值。对于外圆车削,背吃刀量  $a_p$  等于工件已加工表面和待加工表面之间的距离(见图 7.3.12),单位为 mm。即

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2}$$

式中  $d_w$ ——待加工表面直径 mm;

$d_m$ ——已加工表面直径 mm。

## 7.3 刀具切削部分的几何角度

切削刀具种类很多,如车刀、刨刀、铣刀和钻头等。它们几何形状各异,复杂程度不等,但它们切削部分的结构和几何角度都具有许多共同的特征,其中车刀是最常用、最简单和最基本的切削工具,因而最具有代表性。其他刀具都可以看作是车刀的组合或变形(图 7.3.1)。因此,在研

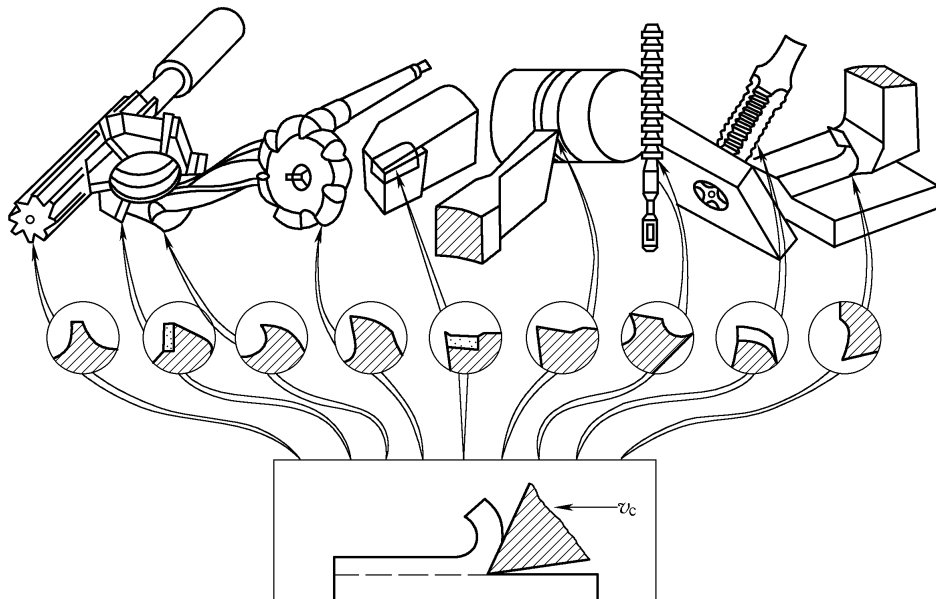


图 7.3.1 各种刀具切削部分的形状



究金属切削工具时 通常以车刀为例进行研究和分析。

### 7.3.1 车刀的组成

车刀由切削部分、刀柄两部分组成。切削部分承担切削加工任务 ,刀柄用以装夹在机床刀架上。切削部分是由一些面和切削刃组成。我们常用的外圆车刀是由一个刀尖、两条切削刃、三个刀面组成的 ,见图 7.3.2 所示。

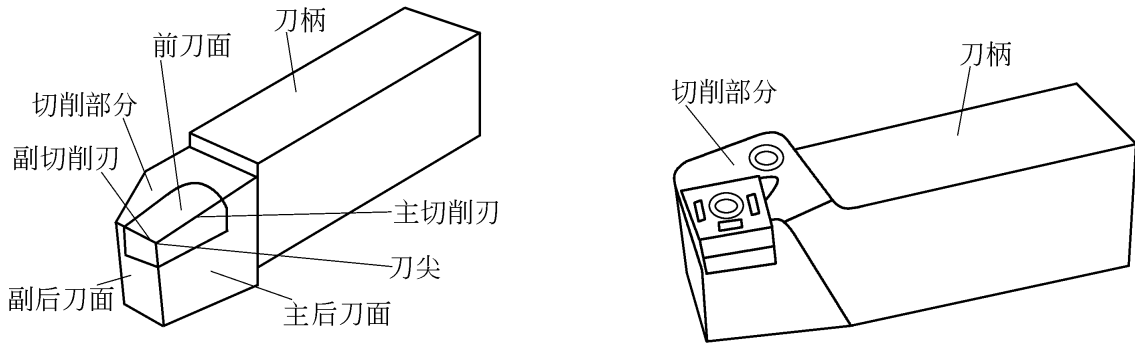


图 7.3.2 车刀的组成

#### 1. 刀面

##### (1) 前刀面 $A$

刀具上切屑流过的表面 ;

##### (2) 后刀面 $A$

与工件上切削表面相对的刀面 ;

##### (3) 副后刀面 $A$

与已加工表面相对的刀面。

#### 2. 切削刃

##### (1) 主切削刃 $S$

前刀面与后刀面的交线 ,承担主要的切削工作 ;

##### (2) 副切削刃 $S$

前刀面与副后刀面的交线 ,承担少量的切削工作。

(3) 刀尖是主、副切削刃相交的一点 ,实际上该点不可能磨得很尖 ,而是由一段折线或微小圆弧组成 ,微小圆弧的半径称为刀尖圆弧半径 ,用  $r$  表示 ,如图 7.3.3 所示。

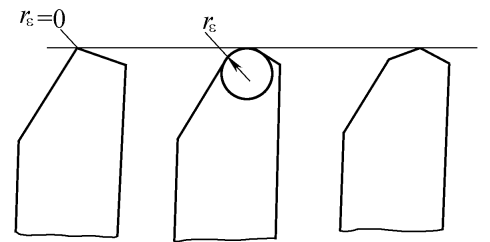


图 7.3.3 刀尖形状

### 7.3.2 刀具几何角度参考系

为了便于确定车刀上的几何角度 ,常选择某一参考系作为基准 ,通过测量刀面或切削刃相对于参考系坐标平面的角度值来反映它们的空间方位。

刀具几何角度参考系有两类 ,刀具标注角度参考系和刀具工作角度参考系。

#### 1. 刀具标注角度参考系

##### (1) 假设条件

刀具标注角度参考系是刀具设计时标注、刃磨和测量角度的基准 ,在此基准下定义的刀具角度称刀具标注角度。为了使参考系中的坐标平面与刃磨、测量基准面一致 ,特别规定了如下假设

条件：

- 1) 假设运动条件 用主运动向量  $v_c$  近似地代替相对运动合成速度向量  $v_e$  (即  $v_f = 0$ )。
- 2) 假设安装条件 规定刀杆中心线与进给运动方向垂直 ; 刀尖与工件中心等高。

## (2) 刀具标注角度参考系种类

根据 ISO3002/1—1997 标准推荐 , 刀具标注角度参考系有正交平面参考系、法平面参考系和假定工作平面参考系三种。

- 1) 正交平面参考系 如图 7.3.4 所示 , 正交平面参考系由以下三个平面组成：

基面  $P_r$  是过切削刃上某选定点平行或垂直于刀具在制造、刃磨及测量时适合于安装或定位的一个平面或轴线 , 一般来说其方位要垂直于假定的主运动方向。车刀的基面都平行于它的底面。

主切削平面  $P_s$  是过切削刃某选定点与主切削刃相切并垂直于基面的平面。

正交平面  $P_o$  是过切削刃某选定点同时垂直于基面和切削平面的平面。

过主、副切削刃某选定点都可以建立正交平面参考系。基面  $P_r$ 、主切削平面  $P_s$ 、正交平面  $P_o$  三个平面在空间相互垂直。

- 2) 法平面参考系 如图 7.3.5 所示 , 法平面参考系由  $P_r$ 、 $P_s$  和法平面  $P_n$  组成。其中法平面  $P_n$  是过切削刃某选定点垂直于切削刃的平面。

- 3) 假定工作平面参考系 如图 7.3.6 所示 , 假定工作平面参考系由  $P_r$ 、 $P_f$  和  $P_p$  组成。

假定工作平面  $P_f$  是过切削刃某选定点平行于假定进给运动并垂直于基面的平面。

背平面  $P_p$  是过切削刃某选定点既垂直于假定进给运动平面又垂直于基面的平面。

刀具在设计标注、刃磨、测量角度时最常用的是正交平面参考系。

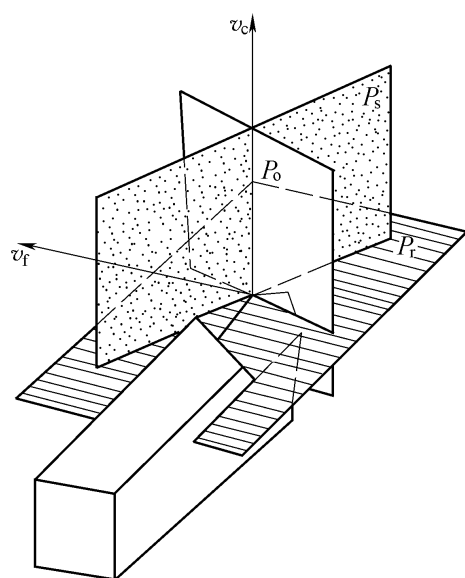


图 7.3.4 正交平面参考系

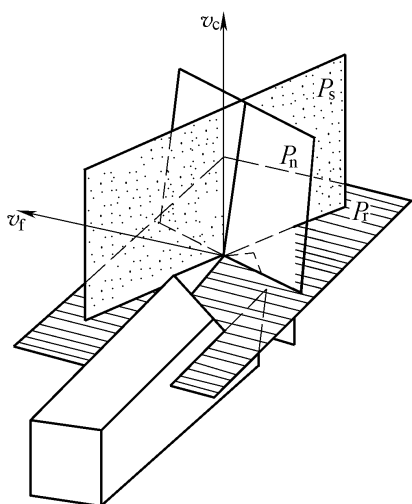


图 7.3.5 法平面参考系

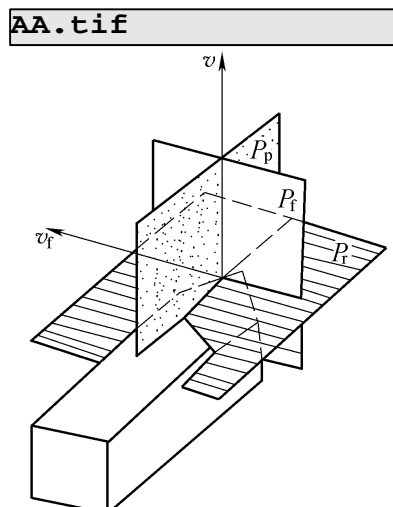


图 7.3.6 假定工作平面参考系

## 2. 刀具工作角度参考系

刀具工作角度参考系是刀具切削工作时角度的基准(不考虑假设条件),在此基准下定义的刀具角度称刀具工作角度。它同样有正交平面参考系、法平面参考系和假定工作平面参考系。

### 7.3.3 刀具标注角度

如图 7.3.7 所示。

#### 1. 在基面内测量的角度

##### (1) 主偏角 $\gamma_r$

主切削刃与进给运动方向之间的夹角。

##### (2) 副偏角 $\gamma'_r$

副切削刃与进给运动反方向之间的夹角。

##### (3) 刀尖角 $\alpha_r$

主切削刃与副切削刃之间的夹角。刀尖角的大小会影响刀具切削部分的强度和传热性能。

它与主偏角和副偏角的关系如下：

$$\alpha_r = 180^\circ - (\gamma_r + \gamma'_r)$$

#### 2. 在主切削刃正交平面( $O-O$ )内测量的角度

##### (1) 前角 $\alpha_o$

前刀面与基面间的夹角。当前刀面与基面平行时,前角为零。基面在前刀面以内,前角为负。基面在前刀面以外,前角为正。

##### (2) 后角 $\beta_o$

后刀面与切削平面间的夹角。

##### (3) 楔角 $\epsilon_r$

前刀面与后刀面间的夹角。

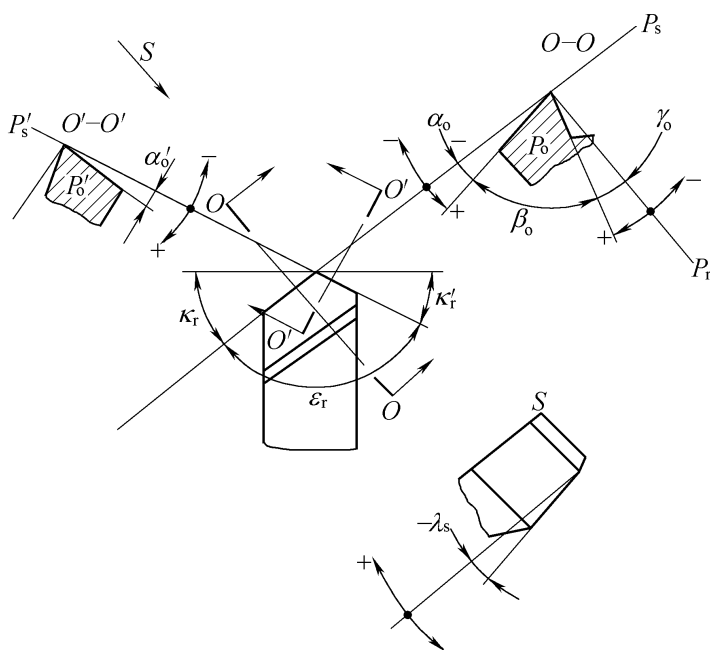


图 7.3.7 车刀的几何角度

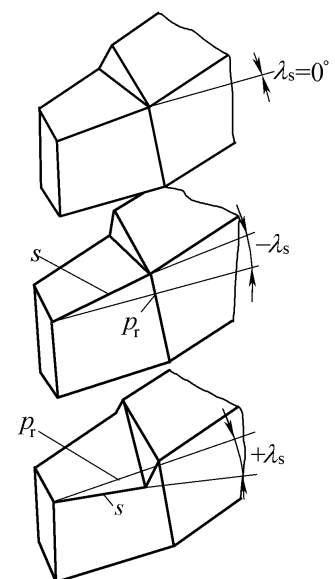


图 7.3.8  $\lambda_s$  的正负规定

楔角的大小将影响切削部分截面的大小,决定着切削部分的强度,它与前角 $\gamma_o$ 和后角 $\gamma_f$ 的关系如下

$$\gamma_o = 90^\circ - (\gamma_o + \gamma_f)$$

### 3. 在切削平面内(S向)测量的角度

刃倾角 $\lambda_s$  主切削刃与基面间的夹角。刃倾角正负的规定如图 7.3.8 所示。刀尖处于最高点时,刃倾角为正;刀尖处于最低点时,刃倾角为负;切削刃平行于底面时,刃倾角为零。

$\lambda_s = 0$  的切削称为直角切削,此时主切削刃与切削速度方向垂直,切屑沿切削刃的法向流出。 $\lambda_s \neq 0$  的切削称为斜角切削,此时主切削刃与切削速度方向不垂直,切屑的流向与切削刃的法向倾斜了一个角度,如图 7.3.9 所示。

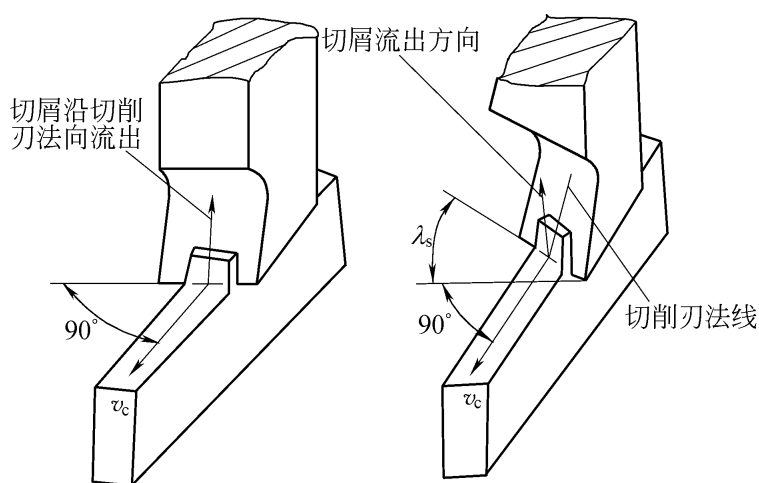


图 7.3.9 直角切削与斜角切削

### 4. 在副切削刃正交平面内(O—O)测量的角度

副后角 $\gamma'_{fo}$  副后刀面与副切削刃切削平面间的夹角。

上述的几何角度中,最常用的是前角( $\gamma_o$ )、后角( $\gamma_f$ )、主偏角( $\gamma_r$ )、刃倾角( $\lambda_s$ )、副偏角( $\gamma'_r$ )和副后角( $\gamma'_{fo}$ ) 通常称之为基本角度,在刀具切削部分的几何角度中,上述基本角度能完整地表达出车刀切削部分的几何形状,反映出刀具的切削特点。 $\gamma_r$ 、 $\gamma'_r$  为派生角度。

## 7.3.4 刀具工作角度

切削过程中,由于刀具的安装位置、刀具于工件间相对运动情况的变化,实际起作用的角度与标注角度有所不同,我们称这些角度为工作角度。现在仅就刀具安装位置对角度的影响叙述如下:

#### 1. 刀柄中心线与进给方向不垂直时对主、副偏角的影响

当车刀刀柄与进给方向不垂直时,实际工作的主偏角 $\gamma_{re}$ 和副偏角 $\gamma'_{re}$ 将发生变化。如图 7.3.10 所示。

$$\gamma_{re} = \gamma_r + G \quad \gamma'_{re} = \gamma'_r - G$$

#### 2. 切削刃安装高于或低于工件中心时,对前角、后角的影响

切削刃安装高于或低于工件中心时,按参考平面定义,通过切削刃作出的实际工作切削平面 $P_{se}$ 、基面 $P_{re}$ 将发生变化,所以使刀具实际工作前角 $\gamma_{oe}$ 和后角 $\gamma_{fe}$ 也随着发生变化,如图 7.3.11

所示。

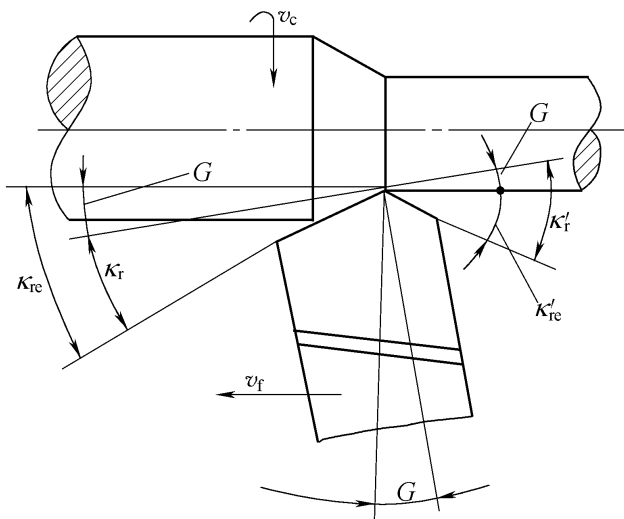


图 7.3.10 刀柄中心线不垂直进给方向

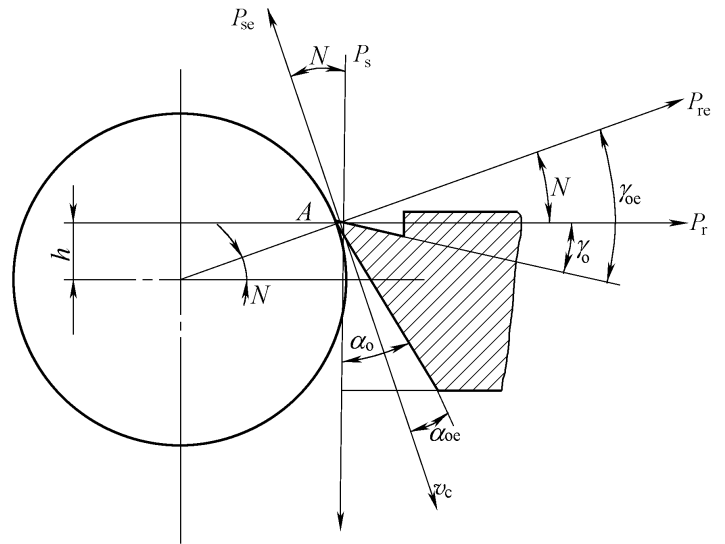


图 7.3.11 车刀安装高低对前角、后角的影响

切削刃安装高于工件中心时：

$$\alpha_{oe} = \alpha_o + N \quad \gamma_{oc} = \gamma_o - N$$

切削刃安装低于工件中心时

$$\alpha_{oe} = \alpha_o - N \quad \gamma_{oc} = \gamma_o + N$$

### 7.3.5 切削层参数

切削层是刀具切削部分切过工件的一个单程所切除的工件材料层。切削层参数就是指这个切削层的截面尺寸。为了简化计算,切削层形状、尺寸规定在刀具的基面中度量,切削层的形状和尺寸将直接影响刀具切削部分所承受的负荷和切屑的尺寸大小。

如图 7.3.12 所示,车外圆时,主、副切削刃为直线,且  $s = 0$ ,切削层就是车刀由位置 I 移动到位置 II 即一个  $f$  距离,刀具正在切削的那层金属层,可见,切削层的形状是平行四边形。

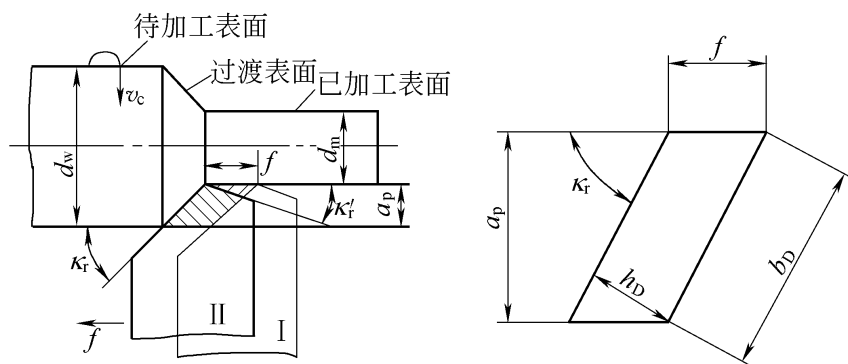


图 7.3.12 切削层参数

#### 1. 切削层公称厚度 $h_o$

是垂直于切削表面度量的切削层尺寸,简称切削厚度。

$$h_o = f \cdot \sin \kappa_r$$

#### 2. 切削层公称宽度 $b_o$

是沿切削表面度量的切削层尺寸,简称切削宽度。

$$b_0 = a_p / \sin \varphi$$

### 3. 切削层公称横截面积 $A_b$

$$A_b = f \cdot a_p = h_b \cdot b_0$$

## 7.4 刀具材料

### 7.4.1 刀具材料应当具备的性能

在切削加工时,刀具切削部分与切屑、工件相互接触的表面上承受了很大的压力和强烈的摩擦,刀具在高温下进行切削的同时,还承受着切削力、冲击和振动,因此要求刀具切削部分的材料应具备以下性能:

#### 1. 高硬度

刀具材料必须具有高于工件材料的硬度,常温硬度应在 HRC 60 以上。

#### 2. 耐磨性

耐磨性表示刀具抵抗磨损的能力,通常刀具材料的硬度越高,耐磨性越好;材料中硬质点的硬度越高,数量越多,颗粒越小,分布越均匀,则耐磨性越好。

#### 3. 强度和韧性

为了承受切削力、冲击和振动,刀具材料应具有足够的强度和韧性。一般用抗弯强度( $\sigma_b$ )和冲击韧性( $\alpha_k$ )值表示。

#### 4. 耐热性

刀具材料应在高温下保持较高的硬度、耐磨性、强度和韧性,并具有良好的抗扩散、抗氧化的能力。这就是刀具材料的耐热性。它是衡量刀具材料综合切削性能的主要指标。

#### 5. 工艺性

为了便于刀具制造,要求刀具材料有较好的可加工性,包括锻、轧、焊接、切削加工、可磨削性和热处理特性等。

此外,在选用刀具材料时,还要考虑经济性。经济性差的刀具材料难以推广使用。

刀具材料种类很多,常用的有碳素工具钢、合金工具钢、高速钢、硬质合金、陶瓷、金刚石(天然和人造)和立方氮化硼等。碳素工具钢(如 T10A、T12A)和合金工具钢(如 9SiCr、CrWMn),因其耐热性较差,仅用于低速手工工具。陶瓷、金刚石和立方氮化硼则由于性质脆、工艺性差及价格昂贵等原因,目前只在较小的范围内使用。当今,用得最多的刀具材料为高速钢和硬质合金。

### 7.4.2 高速钢

高速钢是一种加入了钨(W)、钼(Mo)、铬(Cr)、钒(V)等合金元素的高合金工具钢。它的耐热性较碳素工具钢和一般合金工具钢显著提高,允许的切削速度比碳素工具钢和合金工具钢高两倍以上。高速钢具有较高的强度、韧性和耐磨性,耐热性为 540~600 °C。虽然高速钢的硬度和耐热性不如硬质合金,但由于用这种材料制作的刀具的刃口强度和韧性比硬质合金高,能承受较大的冲击载荷,能用于刚性较差的机床,而且这种刀具材料的工艺性能较好,容易磨出锋利的

刃口,因此到目前为止,高速钢仍是应用较广泛的刀具材料,尤其是用于制造结构复杂的刀具,如成形车刀、铣刀、钻头、铰刀、拉刀、齿轮刀具、螺纹刀具等。

高速钢按其用途和性能可分为通用高速钢、高性能高速钢两类。

### 1. 通用高速钢

通用高速钢是指加工一般金属材料用的高速钢。按其化学成分不同分钨系高速钢和钼系高速钢。

W18Cr4V属于钨系高速钢,其淬火后的硬度为63~66 HRC,耐热性可达620°C,抗弯强度 $\sigma_b = 3430$  MPa。磨削性能好,热处理工艺控制方便,是我国高速钢中用得比较多的一个牌号。

W6Mo5Cr4V2属于钼系高速钢,与W18Cr4V相比,它的抗弯强度、冲击韧性和高温塑性较高,故可制造热轧刀具,如麻花钻等。

### 2. 高性能高速钢

高性能高速钢是在通用高速钢中再加入一些合金元素,以进一步提高它的耐热性和耐磨性。这类高速钢的切削速度可达50~100 m/min,具有比通用高速钢更高的生产率与刀具使用寿命,同时还能切削不锈钢、耐热钢、高强度钢等难加工材料。

高钒高速钢(W12Cr4V4Mo)这种高速钢由于含钒(V)、碳(C)量的增加,提高了耐磨性,刀具寿命比通用高速钢可提高2~4倍,但是随着钒质量分数的提高,其磨削性能变差,刃磨困难。

高钴高速钢和高铝高速钢是近年来为了加工高温合金、钛合金、难熔合金、超高强度钢、奥氏体不锈钢等难加工材料而发展起来的。它们的常温硬度、高温硬度、耐热性和耐磨性都比通用高速钢W18Cr4V高,虽然它的抗弯强度和冲击韧度比较低,但仍是一种综合性能较好的材料,可以制作各种刀具。其牌号有W2Mo9Cr4VCo8、W6Mo5Cr4V2Al等。

## 7.4.3 硬质合金

硬质合金是用粉末冶金法制造的合金材料,它是由硬度和熔点很高的碳化物(硬质相)和金属(称粘结相)组成。

硬质合金的硬度较高,常温下可达74~81 HRC,它的耐磨性较好,耐热性较高,能耐800~1000°C的高温,因此能采用比高速钢高几倍甚至十几倍的切削速度,它的不足之处是抗弯强度和冲击韧性较高速钢低,刃口不能磨得像高速钢刀具那样锋利。

常用硬质合金按其化学成分和使用特性可分为四类:钨钴类(YG),钨钛钴类(YT),钨钛钽钴类(YW)和碳化钛基类(YN)。

### 1. 钨钴类硬质合金(K类)

它由硬质相碳化钨WC和粘结剂钴Co组成,其韧性、磨削性能和导热性较好。主要适用于加工短切屑的脆性材料如铸铁、有色金属及非金属材料。这类硬质合金常用牌号和应用范围见表7.4.1,代号YG后的数值表示钴Co的含量,合金中含钴量越高,其韧性越好,适用于粗加工;含钴量少的,用于精加工。

### 2. 钨钛钴类硬质合金(P类)

它是由硬质相WC、碳化钛TiC和粘结剂Co组成的,由于在合金中加入了碳化钛(TiC),从而提高了合金的硬度和耐磨性,但是抗弯强度、耐磨削性能和热导性有所下降,且低温脆性较大,不耐冲击,因此,这类合金主要适用于加工长切屑的塑性材料,如高速切削一般钢材。钨钛钴类硬

质合金常用牌号和应用范围见表 7.4.1。代号 YT 后的数值表示碳化钛 TiC 的含量,当刀具在切削过程中承受冲击、振动而容易引起崩刃时,有应选用 TiC 含量少的牌号,而当切削条件比较平稳,要求强度和耐磨性高时,应选用 TiC 含量多的刀具牌号。

### 3. 钨钛钽钴类硬质合金(M类)

表 7.4.1 硬质合金常用牌号和应用范围

牌 号	应用范围		
YG3X	硬度 耐磨性 切削速度	抗弯强度 韧性 进给量	铸铁、有色金属及其合金的精加工、半精加工,不能承受冲击载荷
YG3			铸铁、有色金属及其合金的精加工、半精加工,不能承受冲击载荷
YG6X			普通铸铁、冷硬铸铁、高温合金的精加工、半精加工
YG6			铸铁、有色金属及其合金的半精加工和粗加工
YG8			铸铁、有色金属及其合金、非金属材料的粗加工,也可用于断续切削
YG6A			冷硬铸铁、有色金属及其合金的半精加工,亦可用于高锰钢、淬硬钢的半精加工和精加工
YT30	硬度 耐磨性 切削速度	抗弯强度 韧性 进给量	碳素钢、合金钢的精加工
YT15			碳素钢、合金钢在连续切削时的粗加工、半精加工,亦可用于断续切削时精加工
YT14			同 YT15
YT5			碳素钢、合金钢的粗加工,可用于断续切削
YW1	硬度 耐磨性 切削速度	抗弯强度 韧性 进给量	高温合金、高锰钢、不锈钢等难加工材料及普通钢料、铸铁、有色金属及其合金的半精加工和精加工
YW2			高温合金、不锈钢、高锰钢等难加工材料及普通钢料、铸钢、有色金属的粗加工和半精加工

在钨钛钴类硬质合金中加入适量的碳化钽(TaC)或碳化铌(NbC)等稀有难熔金属碳化物,可提高合金的高温硬度、强度、耐磨性、抗粘结温度和抗氧化性,同时,韧性也有所增加,所以具有较好的综合切削性能,人们常称它为“万能合金”。但是,这类合金的价格比较贵,主要用于加工难切削材料。

### 4. 碳化钛基类硬质合金(P01类)

它是由碳化钛作为硬质相,镍、钼作为粘结剂而组成的,硬度高达 90~95 HRA。有高的耐磨性,在 1000℃以上的高温下,它仍能进行切削加工,适合对较高硬度的合金钢、工具钢、淬硬钢等进行切削加工。



随着科学技术的发展,新的工程材料不断出现,对刀具材料的要求也不断提高,在进行切削加工时,我们必须根据具体情况综合考虑,合理的选择刀具材料,既要充分发挥刀具材料的特性,又要较经济地满足切削加工的要求。值得一提的是,在加工一般材料时,仍以使用通用高速钢与硬质合金为宜,当加工难切削材料时,才有必要选用新牌号硬质合金或高性能高速钢。

## 7.5 金属切削过程

金属切削过程是指工件上一层多余的金属被刀具切除的过程和已加工表面形成的过程。在这个过程中始终存在着刀具与工件(金属材料)之间切削和抗切削的矛盾,并产生一系列重要现象。如形成切屑、切削力、切削热与切削温度及刀具的磨损等。研究金属切削过程中这些现象的基本理论,基本规律对提高金属切削加工的生产率和工件表面的加工质量,减少刀具的损耗关系极大。

在对金属切削过程进行实验研究时,常用的切削模型是直角自由切削,所谓自由切削就是只有一个直线切削刃参加切削,如图 7.5.1 所示。

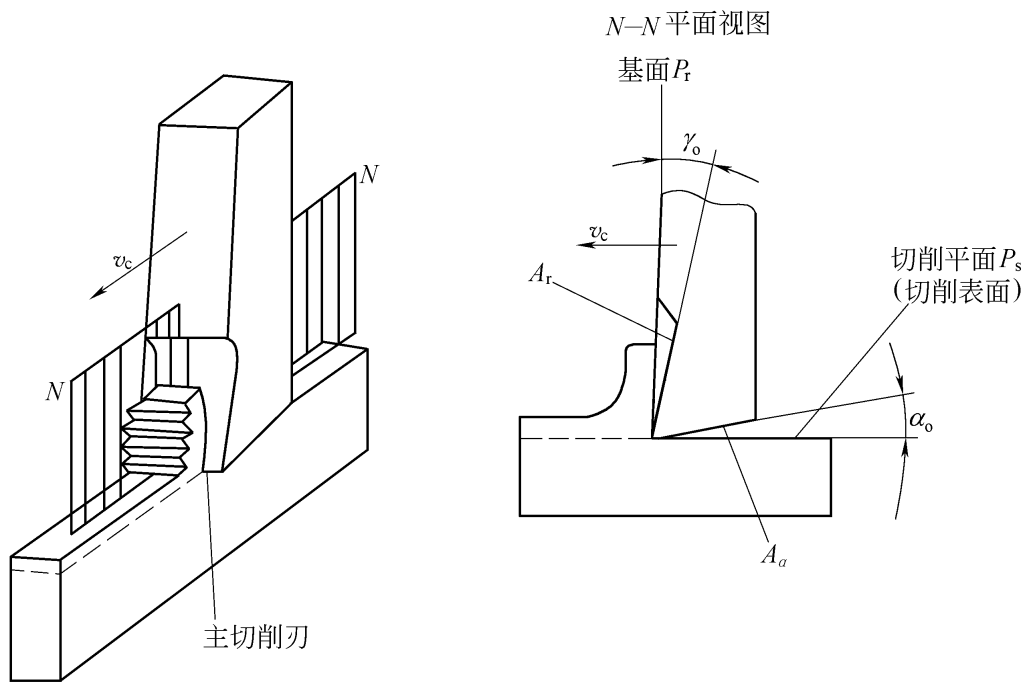


图 7.5.1 直角自由切削模型

### 7.5.1 切屑的形成过程

实验研究表明,金属切削与非金属切削不同,金属切削的特点是被切金属层在刀具的挤压、摩擦作用下产生变形以后转变为切屑和形成已加工表面。

图 7.5.2 是根据金属切削实验绘制的金属切削过程中的变形滑移线和流线,由图可见,工件上的被切削层在刀具的挤压作用下,沿切削刃附近的金属首先产生弹性变形,接着由剪应力引起的应力达到金属材料的屈服极限以后,切削层金属便沿倾斜的剪切面变形区滑移,产生塑性变形,然后在沿前刀面流出去的过程中,受摩擦力作用再次发生滑移变形,最后形成切屑。为了进一步分析切削层变形的规律,通常把被切削刃作用的金属层划分为三个变形区。第 一变形区位

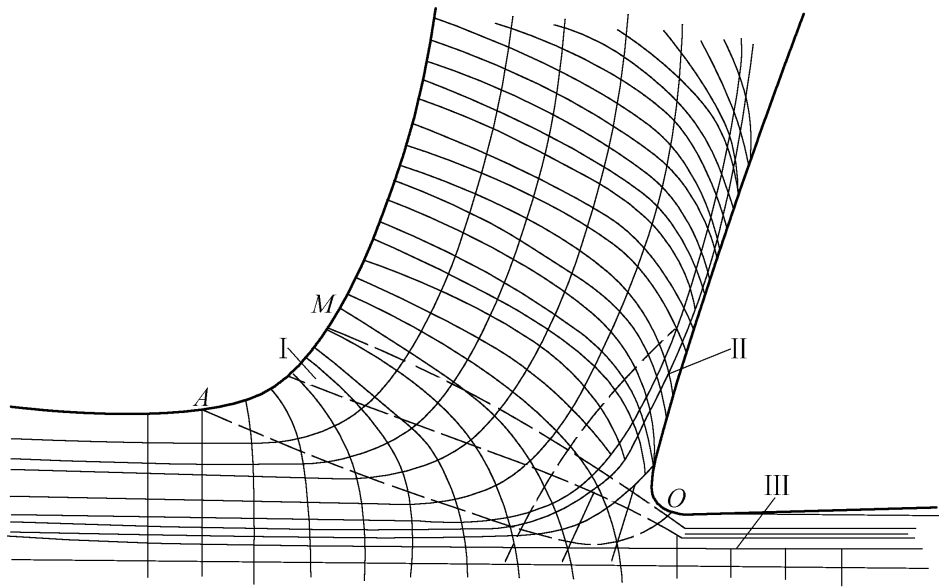


图 7.5.2 金属切削过程中的滑移线和流线

于切削刃和前刀面的前方,面积是三个变形区中最大的,为主变形区;第 II 变形区是与前刀面相接触的附近区域,切屑沿前刀面流出时,受到前刀面的挤压和摩擦,靠近前刀面的切屑底层会进一步发生变形;第 III 变形区是已加工表面靠近切削刃处的区域,这一区域金属受到切削刃钝圆部分和后刀面的挤压、摩擦与回弹,发生变形造成加工硬化。

这三个变形区各具有特点,又存在着相互联系、相互影响。同时,这三个变形区都在切削刃的直接作用下,是应力集中,变形比较复杂的区域。下面分别讨论。

### 7.5.2 第一变形区

这一区域是由靠近切削刃的  $OA$  线处开始发生塑性变形,到  $OM$  线处剪切滑移变形基本完成,是形成切屑的主要变形区。如图 7.5.3 所示。在第一变形区内, $OA$ 、 $OM$  线是等剪应力曲线,当切削层中金属某  $P$  点向切削刃逼近,到达点 1 位置之前, $P$  点受刀具的挤压作用发生弹性变形,到达点 1 时,因为点 1 在等剪应力曲线  $OA$  上,其剪应力达到材料的屈服强度,所以点 1 在向前移动的同时,要沿  $OA$  线滑移,其合成运动将使点 1 流动到点 2,2—2 就是它的滑移量。随着滑移的产生,剪应变将逐渐增加,也就是当  $P$  由点 2 向 3、4...各点移动时,它的剪应变不断增加,直到点 4 位置,此时其流动方向与前刀面平行, $P$  点向前流动不再受到阻力,也就不再沿  $OM$  线滑移。所以  $OM$  线叫终剪切线或终滑移线,而  $OA$  线叫始剪切线或始滑移线。从  $OA$  线到  $OM$  线之间整个第一变形区内,其变形的主要特征就是被切金属层在刀具前刀面和切削刃的作用下,沿滑移线的剪切变形,以及随之产生的加工硬化。

在一般的切削速度范围内,第一变形区的宽度大约为  $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ ,速度越高,宽度越小,所以可以把第一变形区近似看作一个剪切面,用  $OM$  表示,将剪切面与切削速度之间的夹角定义为剪切角,以  $\phi$  表示,见图 7.5.4。

由于工件材料和切削条件的不同,切屑形成过程中的变形情况也不同,因而产生的切屑形状也不同,从变形的观点来看,可将切屑的形状分为四种类型如图 7.5.5 所示。

#### 1. 切屑的类型

##### (1) 带状切屑

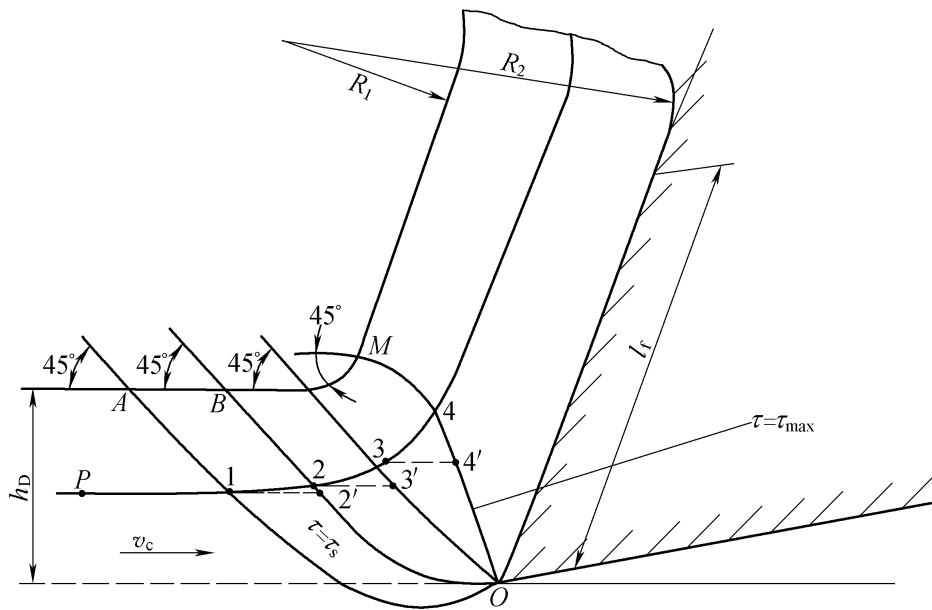


图 7.5.3 第一变形区金属的剪切滑移变形

在切削过程中,切削层变形终了时,如其金属的内应力还没有达到强度极限时,就会形成连绵不断的切屑,切屑靠近前刀面的一面很光滑,另一面略呈毛茸状,这就是带状切屑。当切削塑性较大的金属材料如碳素钢、合金钢、铜和铝合金,刀具前角较大,切削速度较高时,经常出现这类切屑。

#### (2) 挤裂切屑(又称节状切屑)

在切屑形成过程中,如切屑变形较大其剪切面上局部所受到的剪应力达到材料的强度极限时,则剪切面上的局部材料就会破裂成节状,但与前刀面接触的一面常互相连接因而未被折断,这就是挤裂切屑。工件材料塑性越差或用较大进给量低速切削钢材时,较容易得到这类切屑。

#### (3) 粒状切屑(又称单元切屑)

在切屑形成过程中,如其整个剪切面上所受到的剪应力均超过材料的破裂强度时,则切屑就分离成为粒状切屑,形状似梯形。

#### (4) 崩碎切屑

切削铸铁、黄铜等脆性材料时,切削层几乎不经过塑性变形阶段就产生崩裂,得到的切屑呈现不规则的粒状,工件加工后的表面也极为粗糙。

前三种切屑是切削塑性金属时得到的,形成带状切屑时切削过程最平稳,切削力波动较小,已加工表面粗糙度较小,但带状切屑不易折断,常缠在工件上,损坏已加工表面,影响生产,甚至伤人。因此要采取断屑措施,例如在前刀面上磨出卷屑槽等。形成粒状切屑时,切削力波动最大。在生产中一般常见的是带状切屑,当进给量增大,切削速度降低,则可由带状切屑转化为挤裂切屑。在形成挤裂切屑的情况下,如果进一步减小前角,或加大进给量,降低切削速度,就可以得到粒状切屑,反之,如果加大前角,减小进给量,提高切削速度,变形较小则可得带状切屑,这说明切屑的形态是可以随切削条件而转化的。

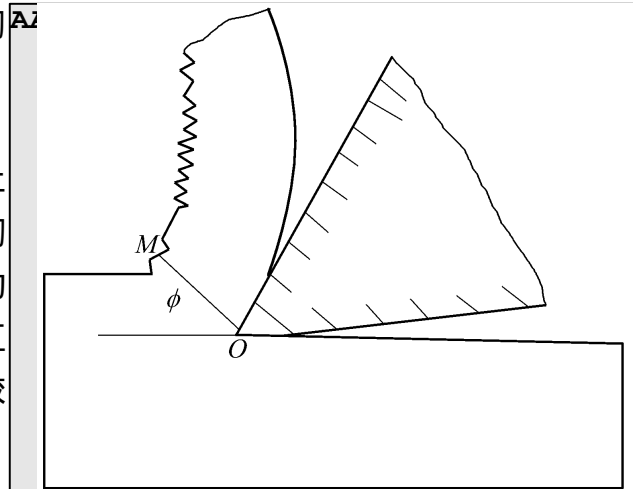


图 7.5.4 剪切角

## 2. 变形系数

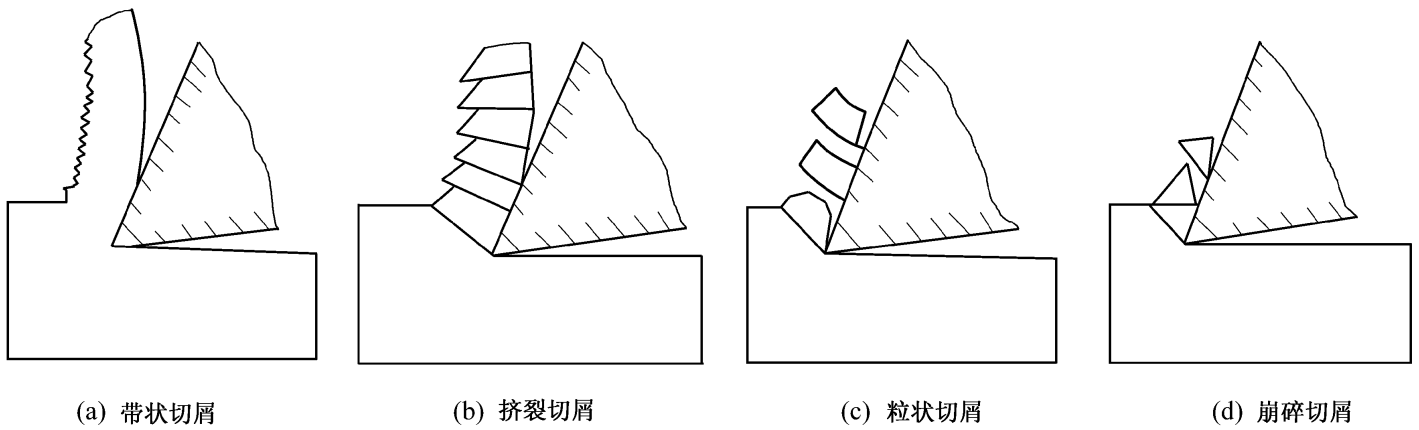


图 7.5.5 切屑的种类

切削过程中,变形量的大小计算很复杂,所以在研究切削变形规律时,通常用剪应变或变形系数  $\eta$  来衡量切削变形的程度,剪应变是指切削层在剪切面上的滑移量;变形系数  $\eta$  是根据金属切削中,刀具切下的切屑厚度 ( $h_{Dh}$ ) 通常大于工件切削层的厚度 ( $h_D$ ),而切屑长度 ( $L_{Dh}$ ) 却小于切削层长度 ( $L_D$ ) 这一事实来衡量切削变形程度,如图 7.5.6 所示。由于工件上切削层变成切屑后宽度的变化很小,根据体积不变原理,变形系数  $\eta$  可用下式表示:

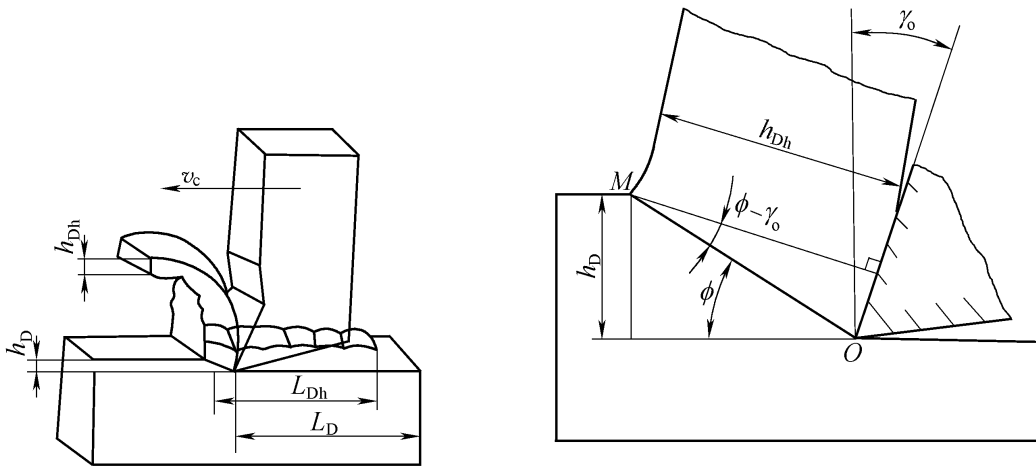


图 7.5.6 切削变形程度的表示

$$\eta = \frac{L_D}{L_{Dh}} = \frac{h_{Dh}}{h_D}$$

式中  $L_D$  ——切削层的长度;  
 $L_{Dh}$  ——切屑的长度;  
 $h_{Dh}$  ——切屑的厚度;  
 $h_D$  ——切削层的厚度。

在一定条件下,变形系数  $\eta$  值的大小能直观地反映切屑的变形程度,且测量方便,  $\eta$  值越大,表示切屑越厚而短,切屑变形就越大,否则反之。

参照图 7.5.6,可以推导出变形系数的计算公式:

$$\eta = \frac{\cos(\phi - \gamma_0)}{\sin \phi}$$

由此可见,影响切削变形的主要因素是前角  $\gamma_0$  和剪切角  $\phi$ 。剪切角  $\phi$  减小,切屑就变厚、变

短,变形系数  $\eta$  增大。剪切角  $\gamma_0$  增大,变形系数  $\eta$  减小。

### 3. 剪切角

如图 7.5.7 所示,根据纯剪切理论,主应力方向与最大剪应力方向之间的夹角呈  $45^\circ$ ,且主应力  $F_a$  与作用合力  $F_r$  一致,可得到剪切角的计算公式为:

$$\gamma_0 = \frac{\phi}{2} - \beta + 45^\circ$$

当前角增大时,  $\gamma_0$  随之增大,变形减小。可见在保证切削刃强度的前提下增大刀具前角对改善切削过程有利。

当摩擦角  $\beta$  增加时,  $\gamma_0$  随之减小,变形增大。所以采用优质切削液减小前刀面上的摩擦系数是很重要的。

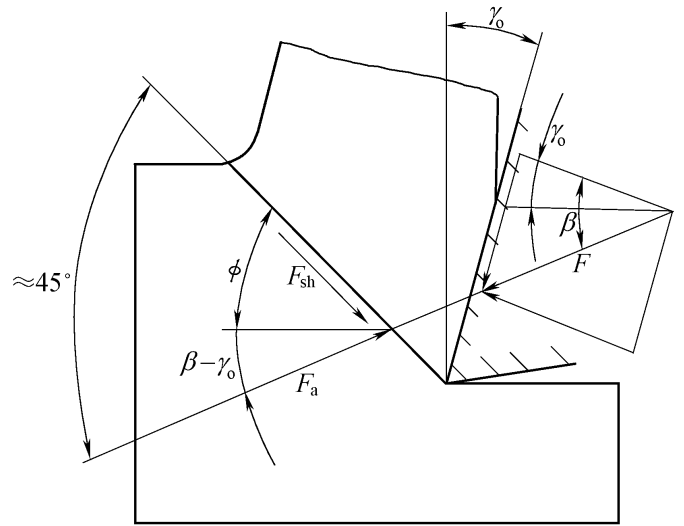


图 7.5.7 剪切角 的确定

### 7.5.3 第 变形区

被切削层金属经过终滑移线 OM 形成切屑沿前刀面流出时,切屑底层仍受到刀具的挤压和接触面之间强烈的摩擦,继续以剪切滑移为主的方式变形,其切屑底层的变形程度比切屑上层剧烈,从而使切屑底层晶粒弯曲拉长,在摩擦阻力的作用下,这部分切屑流动速度减慢,称为滞流层。

#### 1. 摩擦系数

在金属切屑过程中,刀具前刀面和切屑底层之间存在着很大的压力,可达  $2 \sim 3$  GPa,切削液不易流入接触界面,再加上几百度的高温,切屑底层又总是以新生表面与前刀面接触,所以会使刀具和切屑接触面间产生粘结,使得该处的摩擦情况与一般的滑动摩擦不同。由 7.5.8 可见,在刀具和切屑接触的前刀面上正应力的分布是不均匀的,切削刃处最大,随着切屑沿前刀面的流出正应力逐渐减小,在刀具和切屑分离处正应力为零。切应力在  $l_1$  内保持为一定值,等于工件材料的剪切屈服强度,在  $l_2$  内逐渐减小,至刀具和切屑分离时为零。在正应力较大的一段刀具与切屑接触长度  $l_1$  上,切屑底部与前刀面发生粘结现象,在粘结情况下,切屑与前刀面之间的摩擦已不是一般的外摩擦,而是切屑和刀具粘结层与其上层金属之间的内摩擦。这种内摩擦实际就是金属内部的剪切滑移,它与材料的剪切屈服强度和接触面的大小有关。此后切屑沿前刀面继续流出时,离切削刃越远,正应力就越小,切削温度也随之降低,使切削层金属的塑性变形减小,刀具和切屑间实际接触面积减小,直到进入  $l_2$  长度内,摩擦性质由内摩擦转变为外摩擦,即滑动摩擦。

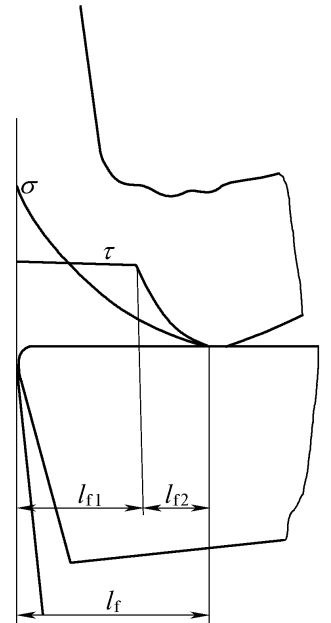


图 7.5.8 前刀面上的应力分布情况

#### 2. 积屑瘤

在切削速度不高而又能形成连续性切屑的情况下,加工一般钢料或其他塑性材料时,常常在刀具前刀面切削处粘着一块剖面呈三角状的硬块,如图 7.5.9,这块冷焊在前刀面上的金属就称

为积屑瘤。积屑瘤的硬度很高,通常是工件材料的2~3倍,当它处于比较稳定的状态时,能够代替切削刃进行切削起到了保护刀具的作用,而且增大了实际前角,可减小切屑变形和切削力,但是积屑瘤会引起过量切削(图中的 $h_b$ ),降低了加工精度,当积屑瘤脱落时,其残片会粘附在已加工表面上恶化表面粗糙度,如果残片粘附在切屑底层会划伤刀具表面,因此在粗加工时可以利用积屑瘤的有利之处,精加工时应避免产生积屑瘤。

积屑瘤形成的原因是切削区温度达到一定时,刀具和切屑接触长度 $l_c$ 的 $l_{c1}$ 接触区上,当切屑底层材料中剪应力超过材料的剪切屈服强度,滞流层中流动速度为零的切削层就被剪切断裂粘结在前刀面上,由于粘结作用,使得切屑底层的晶粒纤维化程度很高,

几乎和前刀面平行,由于这层金属经受了强烈的剪切滑移变形,产生加工硬化,所以它能代替切削刃继续切削较软的金属层,这样依次逐层堆积,高度逐渐增大就形成了积屑瘤。长高的积屑瘤在外力或振动作用下会发生局部的破裂和脱落,继而重复生长与脱落。

影响积屑瘤产生的主要因素是工件材料和切削速度。工件材料塑性越好,越易生成积屑瘤。实践证明,切削速度很高或很低时,很少生成积屑瘤,在某一速度范围内,积屑瘤容易生成,图7.5.10是切削速度与积屑瘤高度 $H_b$ 的关系曲线。此外增大刀具前角、改善前刀面的表面粗糙度、使用合适的切削液,都可减少或避免积屑瘤生成。

#### 7.5.4 第 变形区

第 变形区在刀具后刀面和已加工表面接触的区域上。

前面在分析第、第两个变形区的情况时,假设刀具的切削刃是绝对锋利的,实际上任何刀具的切削刃口都很难磨得绝对锋利,可认为切削刃具有一个钝圆半径 $r_n$ ,刀具磨损时,钝圆半径 $r_n$ 还将增大,而且刀具开始切削不久,后刀面就会产生磨损,形成一段 $\alpha = 0^\circ$ 的棱带VB,因此研究已加工表面的形成过程时,必须考虑切削刃钝圆半径 $r_n$ 及后刀面磨损棱带VB的作用。已加工表面的形成过程如图7.5.11所示。

当切削层金属以速度 $v$ 逐渐接近切削刃时,便发生压缩与剪切变形,切削刃附近的切削层晶粒更为伸长,成为包围在切削刃周围的纤维层,最后在O点断裂,O点以上部分金属成为切屑沿前刀面流出,O点以下部分金属留在已加工表面上,该部分金属经过切削刃钝圆部分的作用,又受到后刀面磨损棱带VB的挤压和摩擦后沿刀具后面流出,这样已加工表面会产生变形,金属晶

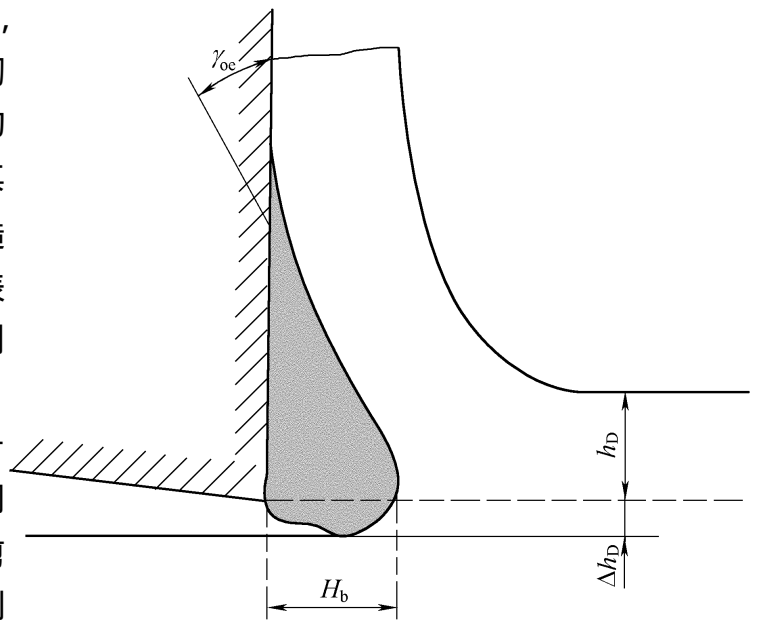


图 7.5.9 积屑瘤

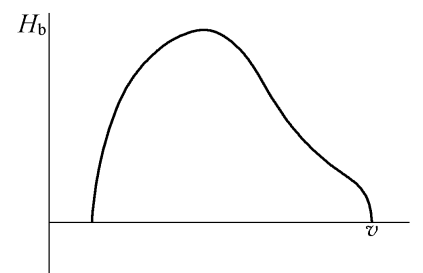


图 7.5.10 切削速度  $v$  与积屑瘤高度  $H_b$  的关系

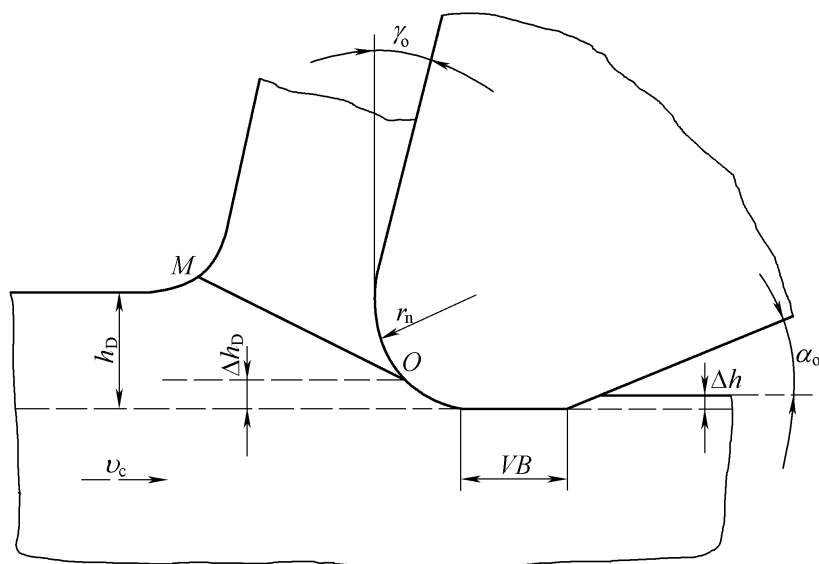


图 7.5.11 已加工表面的形成

粒被拉伸得更长更细,其纤维方向平行于已加工表面,使表层的金属具有和基本组织不同的性质,所以称之为加工变质层,其表面粗糙度及内部应力、金相组织决定了已加工表面质量。

## 7.6 切削力

金属切削时,刀具切入工件使被切金属层发生变形成为切屑所需要的力称为切削力。研究切削力对刀具、机床、夹具的设计和使用都具有很重要的意义。

### 7.6.1 切削力的来源、合力及其分力

金属切削时,力来源于两个方面,其一是克服在切屑形成过程中工件材料对弹性变形和塑性变形的变形抗力,其二是克服切屑与前刀面、已加工表面与后刀面的摩擦阻力。变形力和摩擦力形成了作用在刀具上的合力  $F_r$ 。切削时,合力  $F_r$  作用在切削刃空间某个方向,由于大小与方向都不易确定,因此为了便于测量、计算和反映实际作用的需要,常将合力  $F_r$  分解为互相垂直的  $F_c$ 、 $F_f$  和  $F_p$  三个分力,如图 7.6.1 所示。

切削力  $F_c$  (主切削力  $F_z$ )——在主运动方向上的分力,它切于加工表面,并与基面垂直。 $F_c$  是计算刀具强度,设计机床零件,确定机床功率等的主要依据。

进给力  $F_f$  (进给抗力  $F_x$ )——在进给运动方向上的分力,它处于基面内在进给方向上。 $F_f$  是设计机床进给机构和确定进给功率等的主要依据。

背向力  $F_p$  (切深抗力  $F_y$ )——在切深方向上的分力,它处于基面内并垂直于进给运动方向。 $F_p$  是计算工艺系统刚度等的主要依据。它也是使工件在切削过程中产生振动的力。

由图 7.6.1 可以看出进给力  $F_f$  和背向力  $F_p$  的合力  $F_D$  作用在基面上且垂直于主切削刃。

$F$ 、 $F_D$ 、 $F_f$ 、 $F_p$  之间的关系为：

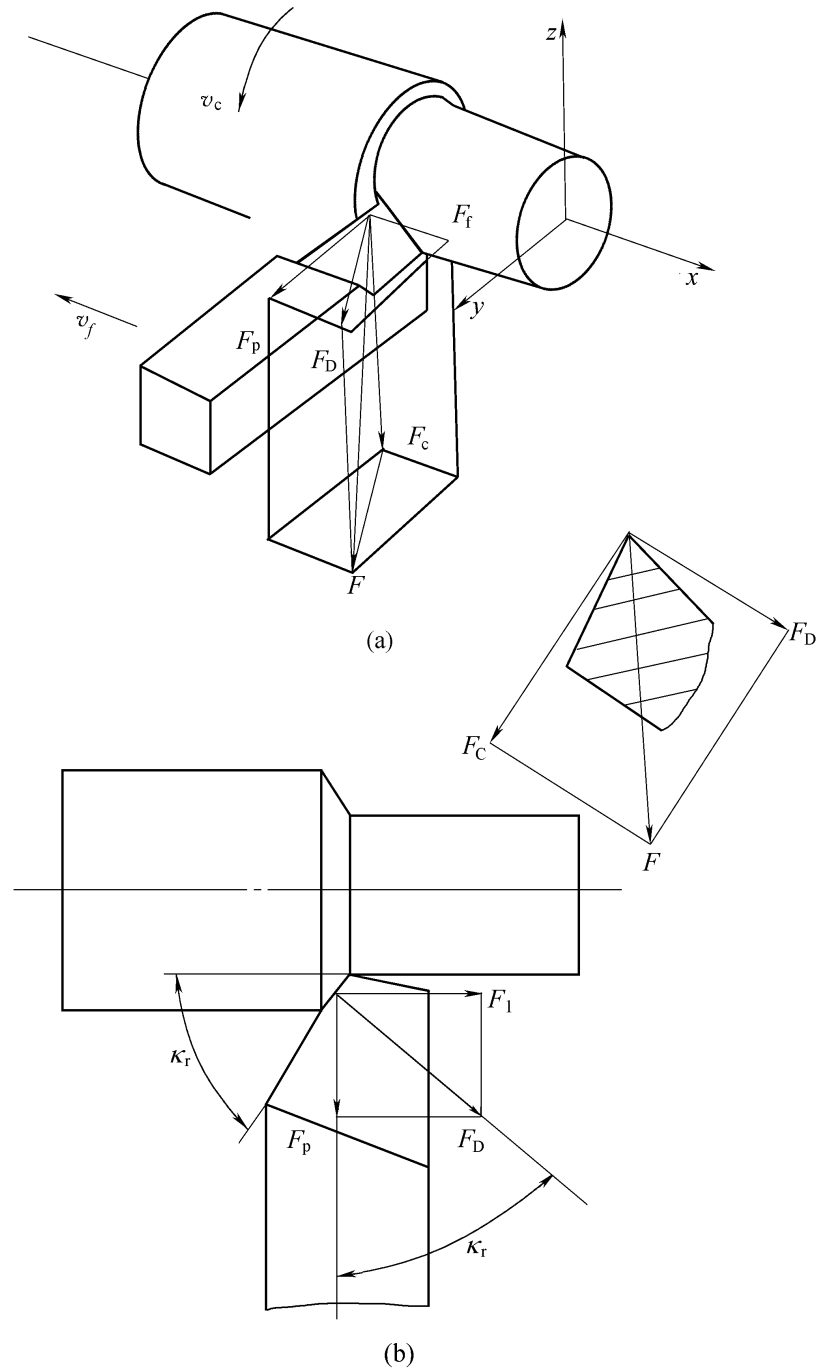


图 7.6.1 切削合力及其分力

$$F_r = F_c^2 + F_D^2 = F_c^2 + F_f^2 + F_p^2$$

$$F_f = F_D \sin \gamma \quad F_p = F_D \cos \gamma$$

## 7.6.2 切削力的计算

为了计算切削力,人们进行了大量的试验和研究。但所得到的一些理论公式还是不能比较精确地进行切削力的计算。所以,目前生产实际中采用的切削力计算公式都是通过大量的试验经数据处理后得到的经验公式。经验公式一般可分为指数形式和单位切削力形式两种。

### 1. 指数形式公式

指数形式的切削力经验公式应用比较广泛,其形式如下:



$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{X_{Fc}} \cdot f^{Y_{Fc}} \cdot v_c^{Z_{Fc}} \cdot K_{Fc}$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{X_{Ff}} \cdot f^{Y_{Ff}} \cdot v_c^{Z_{Ff}} \cdot K_{Ff}$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{X_{Fp}} \cdot f^{Y_{Fp}} \cdot v_c^{Z_{Fp}} \cdot K_{Fp}$$

式中  $C_{Fc}$ 、 $C_{Ff}$ 、 $C_{Fp}$ ——取决于工件材料和切削条件的系数；

$X_{Fc}$ 、 $Y_{Fc}$ 、 $Z_{Fc}$ ——切削力分力  $F_c$  公式中背吃刀量  $a_p$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v$  的指数；

$X_{Ff}$ 、 $Y_{Ff}$ 、 $Z_{Ff}$ ——切削力分力  $F_f$  公式中背吃刀量  $a_p$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v$  的指数；

$X_{Fp}$ 、 $Y_{Fp}$ 、 $Z_{Fp}$ ——切削分力  $F_p$  公式中背吃刀量  $a_p$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v$  的指数；

$K_{Fc}$ 、 $K_{Ff}$ 、 $K_{Fp}$ ——当实际加工条件与求得经验公式的试验条件不符时，各种因素对各切削分力的修正系数。

式中各种系数和指数和修正系数都可以在切削用量手册中查到。

## 2. 单位切削力形式公式

切削层单位切削力  $\rho_c$  (MPa)可按下式计算：

$$\rho_c = \frac{F_c}{A_b} = \frac{F_c}{f \cdot a_p} = \frac{F_c}{h_b \cdot b}$$

各种工件材料的切削层单位切削力  $\rho_c$  可在有关手册中查到。根据上式，可得到切削力  $F_c$  的计算公式：

$$F_c = \rho_c \cdot A_b \cdot K_{Fc}$$

式中  $K_{Fc}$ ——切削条件修正系数，可在有关手册中查到。

### 7.6.3 切削功率的计算

在切削加工过程中，所需的切削功率  $\rho$  可以按下式计算：

$$\rho_c = 10^{-3} F_c v_c + \frac{F_f v_f}{1000} \text{ (kW)}$$

式中  $F_c$ 、 $F_f$ ——主切削力和进给力，N；

$v_c$ ——切削速度，m/s；

$v_f$ ——进给速度，mm/s。

一般情况下， $F_f$  小于  $F_c$ ，且  $F_f$  方向的速度很小，因此  $F_f$  所消耗的功率远小于  $F_c$ ，可以忽略不计。切削功率计算式可简化为：

$$\rho_c = 10^{-3} F_c \cdot v_c \text{ (kW)}$$

根据上式求出切削功率，可按下式计算机床电动机功率  $\rho_e$ ：

$$\rho_e = \rho_c / \eta_c$$

$\eta_c$ ——机床传动效率，一般取  $\eta_c = 0.75 \sim 0.85$

### 7.6.4 影响切削力的主要因素

#### 1. 工件材料

工件材料的强度、硬度越高，剪切屈服强度  $\sigma_s$  也越高，切削时产生的切削力越大。如加工 60

钢的切削力  $F_c$  比 45 钢增大 4% ,加工 35 钢的切削力  $F_c$  比 45 钢减小 13%。

工件材料的塑性、冲击韧性越高 ,切削变形越大 ,切屑与刀具间的摩擦增加 ,则切削力越大。例如不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的延伸率是 45 钢的 4 倍 ,所以切削时变形大 ,切屑不易折断 ,加工硬化严重 ,产生的切削力比 45 钢增大 25%。加工脆性材料时 ,因塑性变形小 ,切屑与刀具间摩擦小 ,切削力较小。

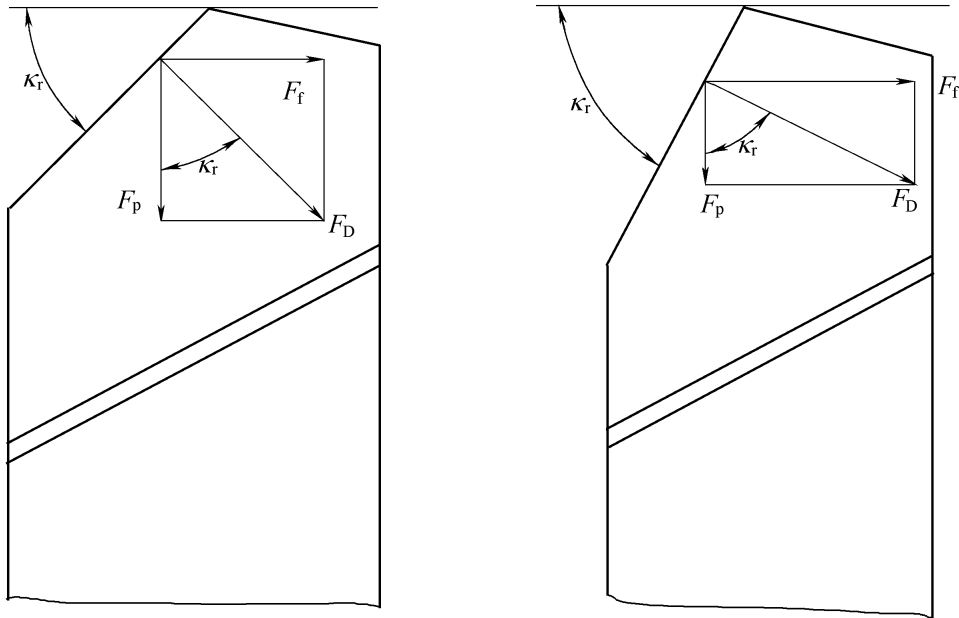


图 7.6.2 主偏角对  $F_f$  和  $F_p$  的影响

## 2. 刀具几何参数

前角  $\alpha_0$  增大 ,切削变形减小 ,故切削力减小。主偏角对切削力  $F_c$  的影响较小 ,而对进给力  $F_f$  和背向力  $F_p$  影响较大 ,由图 7.6.2 可知当主偏角增大时 , $F_f$  增大 , $F_p$  减小。

实践证明 ,刃倾角  $\lambda_s$  在很大范围 ( $-40^\circ \sim +40^\circ$ ) 内变化时 ,对  $F_c$  没有什么影响 ,但  $\lambda_s$  增大时 , $F_f$  增大 , $F_p$  减小。

## 3. 切削用量

切削用量对切削力的影响较大 ,背吃刀量和进给量增加时 ,使切削面积  $A_b$  成正比增加 ,变形抗力和摩擦力加大 ,因而切削力随之增大 ,当背吃刀量增大一倍时 ,切削力近似成正比增加 ,所以切削力经验公式中  $a_p$  的指数  $X_{F_z}$  近似等于 1。进给量  $f$  增大一倍时 ,切削面积  $A_b$  也成正比增加 ,但变形程度减小 ,使切削层单位面积切削力减小 ,因而切削力只增大 70% ~ 80%。所以在切削力经验公式中 , $f$  的指数小于 1。

切削塑性材料时 ,切削速度对切削力的影响分为有积屑瘤阶段和无积屑瘤阶段两种情况。如图 7.6.3 所示 ,在低速范围内 ,随着切削速度的增

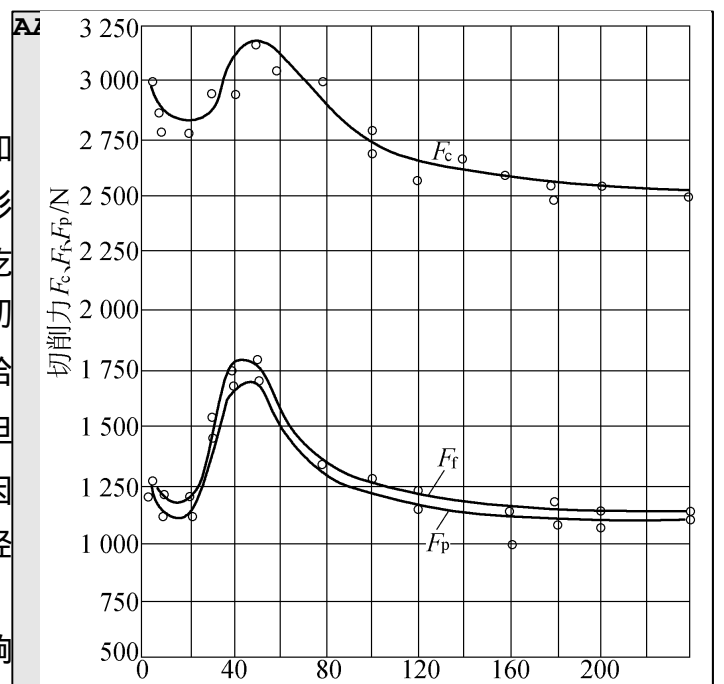


图 7.6.3 切削速度对切削力的影响

加 积屑瘤逐渐长大 ,刀具实际前角增大 ,使切削力逐渐减小。在中速范围内 ,积屑瘤逐渐减小并消失 ,使切削力逐渐增至最大。在高速阶段 ,由于切削温度升高 ,摩擦力逐渐减小 ,使切削力得到稳定的降低。

#### 4. 其他因素

刀具材料与工件材料之间的摩擦系数  $\mu$  会直接影响到切削力的大小。一般按立方碳化硼刀具、陶瓷刀具、涂层刀具、硬质合金刀具、高速钢刀具的顺序 ,切削力依次增大。

切削液有润滑作用 ,可以通过减小摩擦系数使切削力降低。切削液的润滑作用愈好 ,切削力的降低愈显著。在较低的切削速度下 ,切削液的润滑作用更为突出。

刀具后刀面磨损带  $VB$  愈大 ,摩擦越强烈 ,切削力也越大。  $VB$  对背向力的影响最为显著。

## 7.7 切削热和切削温度

切削热是切削过程的重要物理现象之一。切削温度影响工件材料的性能 ,影响前刀面上的摩擦系数和切削力的大小 ,影响刀具磨损和刀具寿命 ,影响积屑瘤的产生和加工表面质量 ;也影响工艺系统的热变形和加工精度。因此 ,研究切削热和切削温度具有重要的实际意义。

### 7.7.1 切削热的产生和传出

切削过程中所消耗的能量有 98% ~ 99% 转换为热能 ,因此可以近似地认为单位时间内所产生的切削热为 :

$$Q = F_c \cdot v_c (\text{J/s})$$

式中  $Q$ ——单位时间内产生的切削热 ,J/s。

切削区域产生的切削热 ,在切削过程中分别由切屑、工件、刀具和周围介质向外传出去 ,例如在空气冷却条件下车削时 ,切削热 50% ~ 86% 由切屑带走 ,10% ~ 40% 传入工件 ,3% ~ 9% 传入刀具 ,1% 左右通过辐射传入空气。

切削温度是指前刀面与切屑接触区内的平均温度 ,它是由切削热的产生与传出的平衡条件所决定的。产生的切削热愈多 ,传出的愈慢 ,切削温度愈高。反之 ,切削温度就愈低。凡是增大切削力和切削功率的因素都会使切削温度上升。而有利于切削热传出的因素都会降低切削温度。

### 7.7.2 切削温度的分布

在切削过程中 ,切屑、刀具和工件上不同部位的切削温度分布是不均匀的 ,如图 7.7.1 所示。在前刀面和后刀面上 ,最高温度点都不在切削刃上 ,而是在离切削刃有一定距离的地方。这是摩擦热沿前刀面不断增加的缘故。在靠近前刀面的切屑底层上 ,温度变化很大 ,说明前刀面上的摩擦热集中在切屑底层。在已加工表面上 ,较高温度仅存在切削刃附近的一个很小的范围 ,说明温度的升降是在极短的时间内完成的。

### 7.7.3 影响切削温度的主要因素

#### 1. 工件材料

工件材料的强度、硬度越高 ,切削时消耗的功就越多 ,产生的切削热越多 ,切削温度就越高。

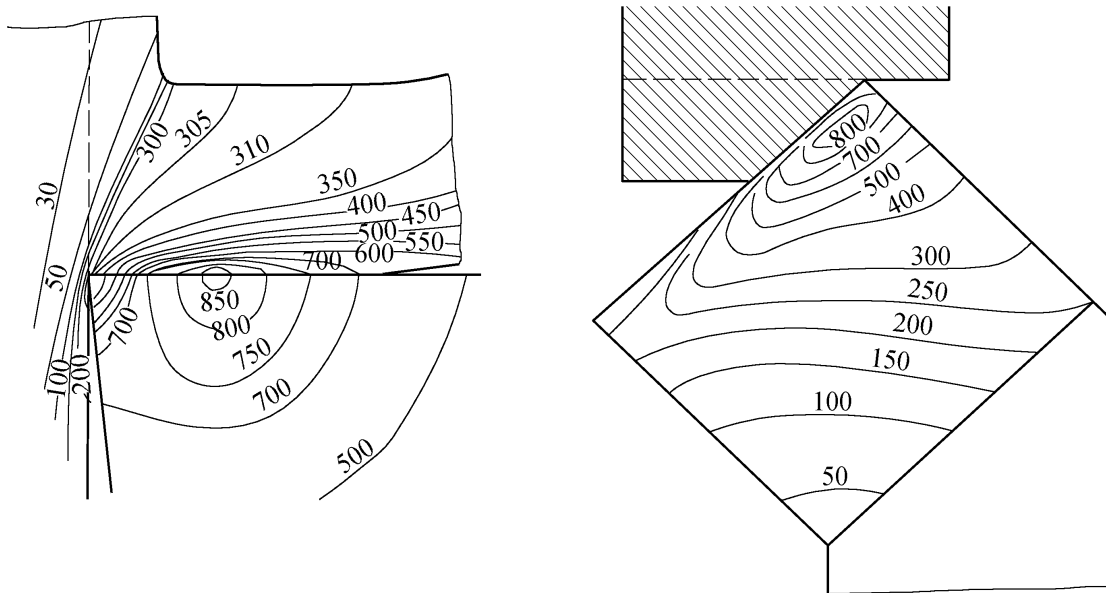


图 7.7.1 切削温度分布

工件材料的热导率愈大,通过切屑和工件传出的热量越多,切削温度下降越快。

## 2. 刀具几何参数

前角增大,切削层变形小,产生的热量少,切削温度降低;但过大的前角会减少散热体积,当前角大于 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 时,前角对切削温度的影响减少。主偏角减小,使切削宽度增大,散热面积增加,切削温度下降。

## 3. 切削用量

对切削温度影响最大的切削用量是切削速度,其次是进给量,而背吃刀量的影响最小,这是因为当切削速度 $v_c$ 增加时,单位时间内参与变形的金属量增加而使消耗的功率增大,提高了切削温度;当 $f$ 增加时,切屑变厚,由切屑带走的热量增多,故切削温度上升不甚明显;当 $a_p$ 增加时,产生的热量和散热面积同时增大,故对切削温度的影响也小。通过实验可以得出切削温度经验公式,对硬质合金刀具来说,切削温度和切削用量的关系式为:

$$= 320 \cdot a_p^{0.05} \cdot f^{0.15} \cdot v_c^{0.26 \sim 0.41}$$

## 4. 其他因素

刀具后刀面磨损量增大时,加剧了刀具与工件间的摩擦,使切削温度升高,切削速度越高,刀具磨损对切削温度的影响就越显著。

切削时,使用切削液对降低切削温度、减少刀具磨损和提高已加工表面质量有明显的效果。切削液的润滑作用可以减少摩擦,减小切削热的产生。

# 7.8 刀具磨损和刀具寿命

金属切削加工时,刀具一方面将切屑切离工件,另一方面自身也要发生磨损或破损。磨损是连续的、逐渐的发展过程;而破损一般是随机的、突发的破坏(包括脆性破损和塑性破损)。这里仅分析刀具的磨损。

### 7.8.1 刀具的磨损形式

刀具的磨损形式有以下三种 如图 7.8.1 所示。

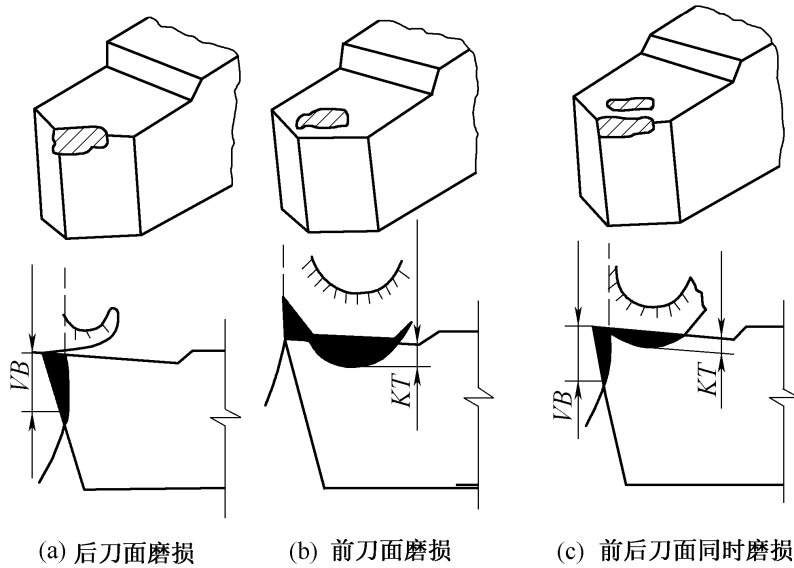


图 7.8.1 刀具磨损形式

#### 1. 前刀面磨损

切削塑性材料时,如果切削速度和切削厚度较大,刀具前刀面上会形成月牙洼磨损。它是以切削温度最高点的位置为中心开始发生,然后逐渐向前向后扩展,深度不断增加。当月牙洼发展到其前缘与切削刃之间的棱边变得很窄时,切削刃强度降低,容易导致切削刃破损。前刀面月牙洼磨损值以其最大深度  $KT$  表示。

#### 2. 后刀面磨损

后刀面与工件表面实际上接触面积很小,所以接触压力很大,存在着弹性和塑性变形,因此,磨损就发生在这个接触面上。在切铸铁和以较小的切削厚度切削塑性材料时,主要也是发生这种磨损。后刀面磨损带宽度往往是不均匀的,可划分为三个区域,如图 7.8.2 所示。

**C区刀尖磨损** 强度较低,散热条件又差,磨损比较严重,其最大值为  $VC$ 。

**N区边界磨损** 切削钢料时主切削刃靠近工件待加工表面处的后刀面(N区)上,会磨成较深的沟,以  $VN$ 表示。这主要是工件在边界处的加工硬化层和刀具在边界处较大的应力梯度和温度梯度所造成的。

**B区中间磨损** 在后刀面磨损带的中间部位磨损比较均匀,其平均宽度以  $VB$ 表示,而其最大宽度以  $VB_{max}$ 表示。

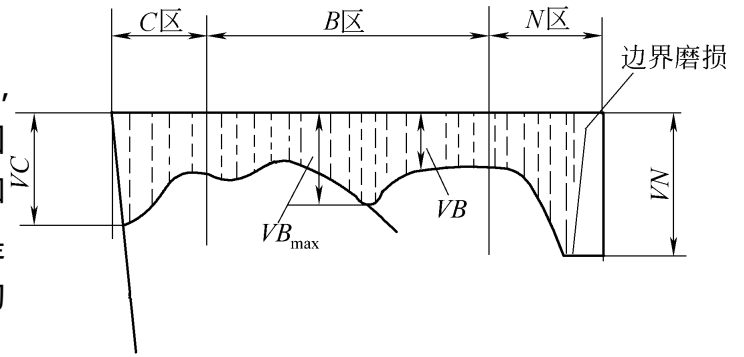


图 7.8.2 后刀面磨损情况

#### 3. 前后刀面同时磨损

在常规条件下,加工塑性金属常常出现图 7.8.1 所示的前后刀面同时磨损的情况。

## 7.8.2 刀具磨损的原因

刀具磨损不同于一般的机械零件的磨损,因为与刀具表面接触的切屑底面是活性很高的新鲜表面,刀面上的接触压力很大(可达 $2 \sim 3 \text{ GPa}$ )接触温度很高(如硬质合金加工钢,可达 $800 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上),所以刀具磨损存在着机械的、热的和化学的作用,既有工件材料硬质点的刻划作用而引起的磨损,也有粘接、扩散、腐蚀等引起的磨损。

### 1. 磨料磨损

磨料磨损是由于工件材料中的杂质、材料基体组织中的碳化物、氮化物、氧化物等硬质点对刀具表面的刻划作用而引起的机械磨损。在各种切削速度下,刀具都存在磨料磨损。在低速切削时,其他各种形式的磨损还不显著,磨料磨损便成为刀具磨损的主要原因。一般可以认为磨料磨损量与切削路程成正比。

### 2. 粘结磨损

在切削过程中,当刀具与工件材料的摩擦面上具备高温、高压和新鲜表面的条件,接触面达到原子间距离时,就会产生吸附粘结现象,又称为冷焊。在刀具和工件相对运动时,粘结点受到较大的剪切或拉伸应力会产生破裂,一般破坏点总是发生于硬度较低的工件材料或切屑一方。但是刀具材料往往也存在组织不均匀、残余应力、微裂纹、空隙、局部软点等缺陷,所以刀具表面也可发生破裂而被工件材料带走,形成粘结磨损。各种刀具材料都会发生粘结磨损,磨损的程度主要取决于工件材料与刀具材料的亲和力和硬度比,切削温度、压力及润滑条件等。粘结磨损是硬质合金刀具在中等偏低切削速度时磨损的主要原因。

### 3. 扩散磨损

当切削温度很高时,刀具与工件材料中的某些化学元素能在固体下互相扩散,使两者的化学成分发生变化,削弱了刀具材料的性能,加速磨损进程。扩散磨损是硬质合金刀具在高温( $800 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ )下切削产生磨损的主要原因之一。一般从 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始,硬质合金中的Co、C、W等元素会扩散到切屑中而被带走,同时切屑中的Fe也会扩散到硬质合金中,使刀面的硬度和强度下降,脆性增加,磨损加剧。不同元素的扩散速度不同,例如Ti的扩散速度比C、Co、W等元素低得多,故YT类硬质合金抗扩散能力比YG类强。

### 4. 氧化磨损

当切削温度达 $700 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,空气中的氧与硬质合金中的钴、碳化钨、碳化钛等会发生氧化作用生成疏松脆弱的氧化物。这些氧化物容易被运动着的切屑和工件带走,加速了刀具磨损。

### 5. 相变磨损

用高速钢刀具切削时,当切削温度超过其相变温度( $500 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ )时,刀具材料的金相组织会发生变化,使刀具材料硬度降低,磨损加快。

## 7.8.3 刀具的磨损过程及磨钝标准

### 1. 刀具的磨损过程

如图7.8.3所示,刀具的磨损过程可分为三个阶段:

#### (1) 初期磨损阶段

这一阶段的磨损速度较快,因为新刃磨的刀具表面较粗糙,并存在显微裂纹、氧化或脱碳等

缺陷,而且切削刃较锋利,后刀面与加工表面接触面积较小,压应力较大,所以容易磨损。

### (2) 正常磨损阶段

经过初期磨损后,刀具粗糙表面已经磨平,缺陷减少,刀具后刀面与加工表面接触面积变大,压强减小,进入比较缓慢的正常磨损阶段。后刀面的磨损量与切削时间近似地成比例增加。正常切削时,这个阶段时间较长,是刀具的有效工作时期。

### (3) 急剧磨损阶段

当刀具的磨损带达到一定程度,后刀面与工件摩擦过大,导致切削力与切削温度均迅速增高。磨损速度急剧增加。生产中为了合理使用刀具,保证加工质量,应该在发生急剧磨损之前就及时换刀。

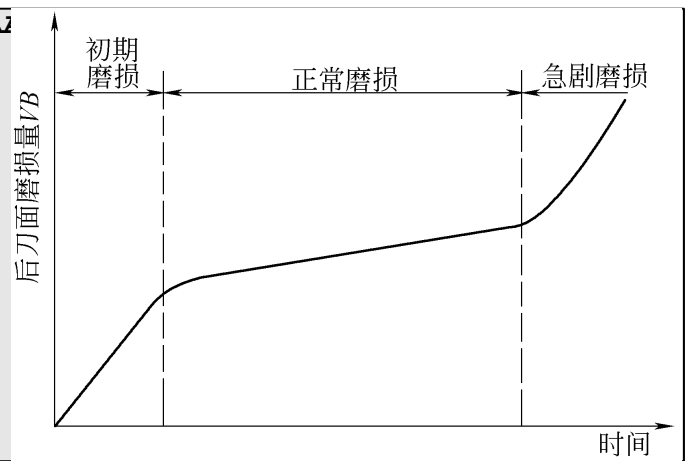


图 7.8.3 刀具的磨损过程

## 2. 刀具的磨钝标准

刀具磨损到一定程度后就不能继续使用。这个磨损限度称为磨钝标准。由于多数切削情况下均可能出现后刀面的均匀磨损量,而  $VB$  值比较容易测量和控制,因此常用  $VB$  值来研究磨损过程,并作为磨钝标准。ISO 标准统一规定以  $1/2$  背吃刀量处的后刀面上测定的磨损带宽度  $VB$  作为刀具的磨钝标准。自动化生产中的精加工刀具,常以沿工件径向的刀具磨损尺寸作为刀具的磨钝标准,称为径向磨损量  $NB$ 。

在国家标准 GB/T 16461—1996 中规定高速钢刀具、硬质合金刀具的磨钝标准见下表。

表 7.8.1 高速钢刀具、硬质合金刀具的磨钝标准

工件材料	加工性质	磨钝标准 $VB/mm$	
		高速钢	硬质合金
碳钢、合金钢	粗车	1.5~2.0	1.0~1.4
	精车	1.0	0.4~0.6
灰铸铁、可锻铸铁	粗车	2.0~3.0	0.8~1.0
	半精车	1.5~2.0	0.6~0.8
耐热钢、不锈钢	粗车、精车	1.0	1.0

## 7.8.4 刀具寿命

在生产实际中,为了更加方便、快速、准确地判断刀具的磨损情况,一般以刀具寿命来间接地反映刀具的磨钝标准。刀具寿命  $T$  的定义为:刀具由刃磨后开始切削,一直到磨损量达到刀具的磨钝标准所经过的总切削时间(单位  $min$ )。

刀具寿命反映了刀具磨损的快慢程度。刀具寿命长表明刀具磨损速度慢;反之表明刀具磨损速度快。影响切削温度和刀具磨损的因素都同样影响刀具寿命。切削用量对刀具寿命的影响较为明显,通过切削实验,我们可以得出  $v_c$ 、 $f$ 、 $a_p$  对刀具寿命  $T$  的影响关系式:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m f^n a_p^k}$$

用 YT5 硬质合金车刀切削  $\sigma_b = 0.637 \text{ GPa}$  ( $f > 0.7 \text{ mm/r}$ ) 的碳钢时,切削用量与刀具寿命的关

系为：

$$T = \frac{C_T}{v_c^5 f^{25} a_p^{0.75}}$$

由上式可以看出,切削速度对刀具寿命影响最大,进给量次之,背吃刀量最小。这与三者对切削温度的影响顺序完全一致。反映出切削温度对刀具寿命有重要的影响。

刀具寿命是一个具有多种用途的重要参数,如用来确定换刀时间;衡量工件材料切削加工性和刀具材料切削性能优劣;判定刀具几何参数及切削用量的选择是否合理等,都可用它来表示和说明。

## 7.9 工件材料的切削加工性

工件材料的切削加工性是指将其加工成合格零件的难易程度。某种材料切削加工的难易,不仅取决于材料本身,还取决于具体的加工要求及切削条件。

### 7.9.1 工件材料的切削加工性的评定

加工要求和生产条件不同,评定材料切削加工性的指标也不相同。常用的评定指标有下面几种：

#### 1. 刀具寿命指标

在相同的切削条件下,使刀具寿命高的工件材料,其切削加工性好。或者在一定刀具寿命( $T$ )下,所允许的最大切削速度( $v_c$ )高的工件材料,其切削加工性就好。由于材料的切削加工性概念具有相对性,所以我们经常以抗拉强度 $\sigma_b = 0.637$  MPa的45钢的 $v_{60}$ 作为基准,写作 $(v_{60})_j$ ,而把其他被切削材料的 $v_{60}$ 与之相比,可得到该材料的相对切削加工性 $K_r$ ,即

$$K_r = \frac{v_{60}}{(v_{60})_j}$$

凡是 $K_r > 1$ 的材料,比45钢容易切削;凡是 $K_r < 1$ 的材料,比45钢难切削。常用金属材料的相对加工性等级见表7.8.2。

#### 2. 已加工表面质量指标

以常用材料是否容易保证得到所要求的已加工表面质量,作为评定材料切削加工性的指标。一般精加工的零件可用表面粗糙度值来评定材料的切削加工性的指标。一般精加工的零件可用表面粗糙度值来评定材料的切削加工性。对某些有特殊要求的零件,在评定材料切削加工性时,不仅用表面粗糙度值指标还要用表面层材质的变化指标来全面评定。

#### 3. 切削力或切削温度指标

在相同的切削条件下,凡使切削力加大、切削温度增高的工件材料,其切削加工性就差;反之,其切削加工性就好,在粗加工或机床动力不足时,常以此指标来评定材料的切削加工性。

#### 4. 切屑控制性能指标

在自动机床或自动生产线上,常用切屑控制的难易程度来评定材料的切削加工性。凡切屑容易被控制或折断的材料,其切削加工性就好,反之,则差。

一种工件材料很难在各方面都能获得较好的切削加工性指标,只能根据需要选择一项或几



表 7.9.1 工件材料的相对切削加工性及分级

加工性等级	名称及种类		相对加工性 $K_r$	代表性材料
1	很容易切削材料	一般有色金属	> 3.0	5 - 5 - 5 铜铝合金 , 铜铝合金 , 铝镁合金
2	容易切削易削钢	易削钢	2.5 ~ 3.0	退火 1.5Cr $\sigma_b = 0.372 \sim 0.441$ GPa 自动机钢 $\sigma_b = 0.392 \sim 0.490$ GPa
3		较易削钢	1.6 ~ 2.5	正火 30 钢 $\sigma_b = 0.441 \sim 0.549$ GPa
4	普通材料	一般钢及铸铁	1.0 ~ 1.6	45 钢 , 灰铸铁 , 结构钢
5		稍难切削材料	0.65 ~ 1.0	2Cr13 调质 $\sigma_b = 0.8288$ GPa 85 钢轧制 $\sigma_b = 0.8829$ GPa
6	难切削材料	较难切削材料	0.5 ~ 0.65	45Cr 调质 $\sigma_b = 1.03$ GPa 60Mn 调质 $\sigma_b = 0.9319 \sim 0.981$ GPa
7		难切削材料	0.15 ~ 0.5	50CrV 调质 , 1Cr18Ni9Ti 未淬火 相钛合金
8		很难切削材料	< 0.15	相铁合金 , 镍基高温合金

项作为衡量其切削加工性的指标。在一般的生产中 , 常以保证一定的刀具寿命所允许的切削速度作为评定材料切削加工性的指标。

### 7.9.2 影响材料切削加工性的主要因素

工件材料的切削加工性能与其本身的物理、力学性能有很大关系。主要影响因素有以下几点 :

#### 1. 材料的强度和硬度

由前面分析可知 , 工件材料的硬度和强度越高 , 切削力就越大 , 消耗的功率也越大 , 切削温度也越高 , 使刀具的磨损加剧 , 切削加工性就越差。特别是工件材料的耐热性(高温硬度值)越高 , 这时刀具材料的硬度与工件材料的硬度之比就越低 , 切削加工性就越差 , 刀具越容易磨损。这也是某些耐热钢、高温合金钢切削加工性差的主要原因。

#### 2. 材料的塑性

材料的塑性越大 , 切削时的塑性变形就越大 , 切削温度就越高 , 刀具容易出现粘结磨损和扩散磨损。以低速切削塑性高的材料时易产生积屑瘤 , 影响表面加工质量 , 而且塑性大的材料 , 切削时不易断屑。但加工塑性太低材料时 , 切削力和切削热集中在切削刃附近 , 加剧刀具的磨损 , 也会影响切削加工性。

#### 3. 材料的韧性

韧性较大的材料 , 在切削变形时吸收的功较多 , 于是切削力和切削温度也越高 , 并且不易断屑 , 影响切削加工性。

#### 4. 材料的导热性

工件材料的导热性越好 , 由切屑带走和由工件散出的热量就越多 , 越有利于降低切削区的温度 , 减小刀具的磨损 , 切削加工性好。

综上所述 , 我们可以通过材料的强度、硬度、塑性、冲击韧性、热导率等来分析所加工工件材料的切削加工性。

### 7.9.3 常用材料的切削加工性

#### 1. 结构钢

普通碳素钢是应用最广泛的金属材料,根据切削加工性来看,它属于普通材料。由于碳的含量不同,其切削加工性有所差异。

低碳钢( $w_c < 0.25\%$ )中金相组织以铁素体为主,硬度 140 HBS,塑性和韧性大,故切削变形大,切屑分离母体时已加工表面会因发生严重的撕扯而产生大量细裂纹(又称鳞刺),而且低碳钢容易与刀具前刀面粘结产生积屑瘤,这两个因素会严重影响精加工表面质量。粗加工时,断屑困难,所以低碳钢的切削加工性较差。

中碳钢( $w_c = 0.3\% \sim 0.6\%$ )的金相组织中铁素体含量减少,珠光体增加,硬度为 180 HBS,有较好的综合性能,切削加工性好,根据需要还可通过正火或调质处理,改善加工过程或加工质量。

高碳钢( $w_c = 0.6\% \sim 0.8\%$ )的金相组织以珠光体为主,正火后的硬度 230 ~ 280 HBS,其切削加工性不如中碳钢。

通常,碳素钢的硬度在 170 ~ 230 HBS 范围内切削加工性较好,过硬,刀具磨损加剧,过软,则不易断屑而影响切削过程,同时也影响工件的加工质量。

合金结构钢的切削加工性一般低于含碳量相近的碳素结构钢。

#### 2. 铸铁

普通铸铁的金相组织是金属基体加游离石墨。塑性和硬度都较低,切屑易断,因为组织中的石墨有一定的润滑作用,切削时摩擦系数小,切削力小,功率消耗少,所以并不难加工。但是由于切屑是从石墨处开始不规则的断裂往往深入到已加工表面以下,使已加工表面粗糙。另外,切削铸铁时,形成的是崩碎切屑,它于前刀面接触长度短,切削力、切削温度集中在刃区,最高温度在靠近切削刃的后刀面上。

#### 3. 有色金属

普通铝及铝合金的硬度和强度都低,且导热性好,属于易切削材料。切削时应选用大的刀具前角( $\gamma > 20^\circ$ )和高的切削速度,所用刀具应锋利、光滑,以减少积屑瘤和加工硬化对表面质量的影响。

铜及铜合金的硬度和强度都较低,导热性能也好,属于易切削材料。纯铜和普通黄铜由于塑性和韧性较大,断屑性差,易粘屑,切削时应采用大的前角和可靠的断屑措施。铅黄铜和锡青铜的强度和硬度较高,但由于铅的存在,使其脆性增加,伸长率降低,故切削变形小,形成崩碎切屑,切削时可选用较高的切削速度。

#### 4. 难加工金属材料

随着科学技术的发展,诸如高锰钢、高强度钢、不锈钢、高温合金、钛合金、难熔金属及其合金等难加工金属材料的应用越来越多。由于这些材料中含有一系列合金元素,在其中形成了各种合金渗碳体、合金碳化物、奥氏体、马氏体及带有残余奥氏体的马氏体等,不同程度地提高了硬度、强度、韧性、耐磨性乃至高温强度和硬度。在切削加工这些材料时,常表现出切削力大,切削温度高,刀具磨损剧烈,而且会造成严重的加工硬化和较大的残余拉应力,使加工精度降低,所以,这些材料的切削加工性很差。

#### 7.9.4 改善工件材料切削加工性的途径

生产中改善金属工件材料切削加工性最常用的办法之一是通过适当的热处理工艺,改变材料的金相组织,使材料的切削加工性得到改善。例如,高碳钢经球化退火,可降低硬度;低碳钢经正火处理,可降低塑性,提高硬度;马氏体不锈钢经调质处理,可降低塑性;铸铁件切削前进行退火,可降低表面层的硬度。

在满足工件使用要求的前提下,应尽可能选择切削加工性能较好的工件材料,同时还应注意合理选择材料的供应状态。例如,低碳钢经冷拔加工后,可降低塑性,提高其切削加工性;中碳钢以部分球化的珠光体组织的切削加工性最好;高碳钢完全球化退火状态易于切削加工;锻造毛坯余量不均匀,且表层有硬皮,不如冷拔或热轧毛坯切削加工性好。

选用合适的刀具材料,确定合理的刀具角度和切削用量,安排适当的加工方法和加工顺序,也可以改善材料的切削加工性。

### 7.10 金属切削条件的选择

金属切削加工过程中的效率、质量和经济性等问题,除了与机床设备的工作能力、操作者技术水平、工件的形状、生产批量、刀具材料及工件材料的切削加工性有关,还受到切削条件的影响和制约。这些切削条件包括刀具几何参数和刀具的寿命,切削用量及切削过程的冷却润滑等。

#### 7.10.1 刀具几何参数的选择

刀具的几何参数,对切削过程中的金属切削变形、切削力、切削温度、工件加工质量及刀具磨损都有显著的影响。选择合理的刀具几何参数,可使刀具潜在的切削能力得到充分发挥,降低生产成本,提高切削效率。

刀具几何参数包含切削刃的形状、切削区的剖面形式、刀面形式和刀具几何角度四个方面,这里我们主要讨论刀具几何角度的合理选择,即前角、后角、主偏角、副偏角、刃倾角及副后角的合理选择。

##### 1. 前角的选择

前角的大小将影响切削过程中的切削变形和切削力,同时也影响工件的表面粗糙度和刀具的强度与寿命。增大刀具前角,可以减小前刀面挤压被切削层,达到减小塑性变形、减小切削力和表面粗糙度的目的;但刀具前角过大,会降低切削刃和刀头的强度,刀头散热条件变差,切削时刀头容易崩刃,因此合理前角的选择既要切削刃锐利,又要有一定的强度和一定的散热体积。

对不同材料的工件,在切削时合理前角值不同,切削钢的合理前角比切削铸铁大,切削中硬钢的合理前角比切削软钢小。

对于不同的刀具材料,由于硬质合金的抗弯强度较低,抗冲击韧性差,所以合理前角就小于高速钢刀具的合理前角。

粗加工、断续切削或切削特硬材料时,为保证切削刃强度,应取较小的前角,甚至负前角。

表 7.10.1 为硬质合金车刀合理前角的参考值,高速钢车刀的合理前角值一般比表中大  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

##### 2. 后角、副后角的选择

表 7.10.1 硬质合金车刀合理前角参考值

工件材料种类	合理前角参考范围		工件材料种类	合理前角参考范围	
	粗车	精车		粗车	精车
低碳钢	20° ~ 25°	25° ~ 30°	不锈钢	15° ~ 20°	20° ~ 25°
中碳钢	10° ~ 15°	15° ~ 20°	灰铸铁	10° ~ 15°	5° ~ 10°
合金钢	10° ~ 15°	15° ~ 20°	铜或铜合金	10° ~ 15°	5° ~ 10°
淬火钢	- 15° ~ - 5°		铝或铝合金	30° ~ 35°	35° ~ 40°
			钛合金	5° ~ 10°	

后角的大小将影响刀具后刀面与已加工表面之间的摩擦。后角增大可减小后刀面与加工表面之间的摩擦,后角越大,切削刃越锋利,但是切削刃和刀头的强度削弱,散热体积减小。

粗加工、强力切削及承受冲击载荷的刀具,为增加刀具强度,后角应取小些;精加工时,增大后角可提高刀具寿命和已加工表面的质量。

工件材料的硬度与强度高,取较小的后角,以保证刀头强度;工件材料的硬度与强度低,塑性大,易产生加工硬化,为了防止刀具后刀面磨损,后角应适当加大。加工脆性材料时,切削力集中在刃口附近,宜取较小的后角。若采用负前角时,应取较大的后角,以保证切削刃锋利。

尺寸刀具精度高,取较小的后角,以防止重磨后刀具尺寸的变化。

为了制造、刃磨的方便,一般刀具的副后角等于后角。但切断刀、车槽刀、锯片铣刀的副后角,受刀头强度的限制,只能取很小的数值,通常取 1°30' 左右。表 7.10.2 为硬质合金车刀合理后角的参考值。

表 7.10.2 硬质合金车刀合理后角参考值

工件材料种类	合理后角参考范围		工件材料种类	合理后角参考范围	
	粗车	精车		粗车	精车
低碳钢	8° ~ 10°	10° ~ 12°	不锈钢	6° ~ 8°	8° ~ 10°
中碳钢	5° ~ 7°	6° ~ 8°	灰铸铁	4° ~ 6°	6° ~ 8°
合金钢	5° ~ 7°	6° ~ 8°	铜或铜合金	6° ~ 8°	6° ~ 8°
淬火钢	8° ~ 10°		铝或铝合金	8° ~ 10°	10° ~ 12°
			钛合金	10° ~ 15°	

### 3. 主偏角、副偏角的选择

主偏角和副偏角越小,刀头的强度越高,散热面积越大,刀具寿命长,而且,主偏角和副偏角减小,工件加工后的表面粗糙度会减小,但是,主偏角和副偏角减小时,会加大切削过程中的背向力,容易引起工艺系统的弹性变形和振动。

主偏角的选择原则与参考值:

工艺系统的刚度较好时,主偏角可取小值,如,  $\varphi_r = 30^\circ \sim 45^\circ$ , 在加工高强度、高硬度的工件材料时,可取  $\varphi_r = 10^\circ \sim 30^\circ$ , 以增加刀头的强度。当工艺系统的刚度较差或强力切削时,一般取

$\gamma_r = 60^\circ \sim 75^\circ$ 。车削细长轴时,为减小背向力,取  $\gamma_r = 90^\circ \sim 93^\circ$ 。在选择主偏角时,还要视工件形状及加工条件而定,如车削阶梯轴时,可取  $\gamma_r = 90^\circ$ ,用一把车刀车削外圆、端面和倒角时,可取  $\gamma_r = 45^\circ \sim 60^\circ$ 。

副偏角的选择原则与参考值:

副偏角主要根据工件已加工表面的粗糙度要求和刀具强度来选择,在不引起振动的情况下,尽量取小值。精加工时,取  $\gamma_{r2} = 5^\circ \sim 10^\circ$ ;粗加工时,取  $\gamma_{r2} = 10^\circ \sim 15^\circ$ 。当工艺系统刚度较差或从工件中间切入时,可取  $\gamma_{r2} = 30^\circ \sim 45^\circ$ 。精车时,可在副切削刃上磨出一段  $\gamma_{r2} = 0^\circ$ ,长度为  $(1.2 \sim 1.5)f$  的修光刃,以减小已加工表面的粗糙度值。

切断刀、锯片铣刀和槽铣刀等,为了保持刀具强度和重磨后宽度变化较小,副偏角宜取  $1^\circ 30'$ 。

#### 4. 刃倾角的选择

刃倾角的正负会影响切屑的排出方向,见图 7.10.1。精车和半精车时刃倾角宜选用正值,使切屑流向待加工表面,防止划伤已加工表面。加工钢和铸铁,粗车时取刃倾角  $0^\circ \sim -5^\circ$ ;车削淬硬钢时,取  $-5^\circ \sim -15^\circ$ ,使刀头坚固,刀尖可避免受到冲击,散热条件好,提高了刀具寿命。

增大刃倾角的绝对值,使切削刃变得锋利,可以切下很薄的金属层。如微量精车、精刨时,可取  $45^\circ \sim 75^\circ$  大刃倾角刀具,使切削刃加长,切削平稳,排屑顺利,生产效率高,加工表面质量好。工艺系统刚性差,切削时不宜选用负刃倾角。

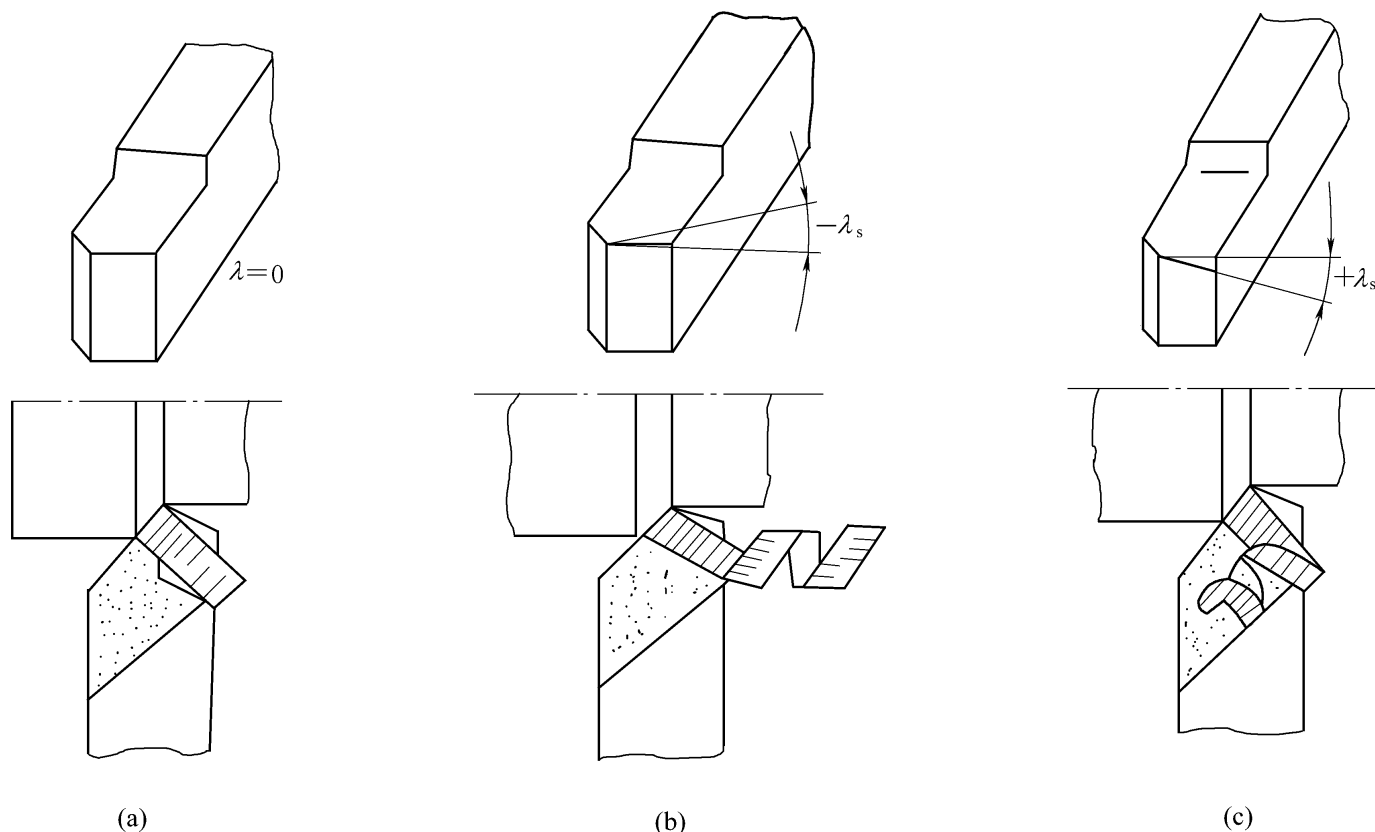


图 7.10.1 刃倾角的正负对切屑的排出方向的影响

#### 7.10.2 刀具寿命的选择

刀具寿命对切削加工的生产率和生产成本有较大的影响。如果将刀具寿命定得过高,必然

要降低切削用量,使机加工时间增加,生产率降低,成本提高;如果将刀具寿命定得过低,虽然可采用较大的切削用量,但会增加换刀和磨刀的次数,辅助时间延长,同样会降低生产率,增加成本。因此,应根据具体的生产条件制定出合理的刀具寿命。

确定合理的刀具寿命的方法有三种:

- (1) 根据单件平均生产时间最短的指标计算出来的最大生产率刀具寿命;
- (2) 根据单件平均加工成本最低的指标计算出来的最低成本刀具寿命;
- (3) 根据平均利润率最大的指标计算出来的最大利润刀具寿命。

在选择刀具耐用度时,通常依据具体情况下的产品销路情况来考虑。在产品销路不畅时或在产品初创阶段,宜采用最低成本寿命,以利于市场竞争。在产品销路畅通甚至供不应求时,宜采用最大利润寿命。在产品急需的情况下,宜采用最大生产率寿命。

在具体制定刀具寿命时,还应注意对于制造和刃磨都比较简单,且成本不高的刀具,寿命可定得低一些;反之,则应定得高些。对于装卡和调整比较复杂的刀具,寿命应定得高些。切削大型工件时,为避免在切削过程中途换刀,刀具寿命应定得高些。

### 7.10.3 切削用量的选择

合理的选择切削用量,能够保证工件加工质量,提高切削效率,延长刀具使用寿命和降低加工成本。

根据不同加工性质对切削加工的要求,切削用量会选得不一样。粗加工时,应尽量保证较高的金属切除率和必要的刀具寿命,一般优先选择大的背吃刀量,其次选择较大的进给量,最后根据刀具寿命,确定合适的切削速度。精加工时,应保证工件的加工质量,一般选用较小的进给量和背吃刀量,尽可能选用较高的切削速度。

#### 1. 背吃刀量的选择

粗加工的背吃刀量应根据工件的加工余量确定,应尽量用一次走刀就切除全部加工余量。当加工余量过大、机床功率不足、工艺系统刚度较低、刀具强度不够以及断续切削或冲击振动较大时,可分几次走刀。对切削表面层有硬皮的铸、锻件,应尽量使背吃刀量大于硬皮层的厚度,以保护刀尖。半精加工和精加工的加工余量一般较小,可一次切除。有时为了保证工件的加工质量,也可二次走刀。多次走刀时,第一次走刀的背吃刀量取得比较大,一般为总加工余量的 $2/3 \sim 3/4$ 。

#### 2. 进给量的选择

粗加工时,进给量的选择主要受切削力的限制。在工艺系统的刚度和强度良好的情况下,可选用较大的进给量值。半精加工和精加工时,由于进给量对工件的已加工表面粗糙度值影响很大,进给量一般取得较小。通常按照工件加工表面粗糙度值的要求,根据工件材料、刀尖圆弧半径、切削速度等条件来选择合理的进给量。当切削速度提高,刀尖圆弧半径增大,或刀具磨有修光刃时,可以选择较大的进给量,以提高生产率。粗车时进给量的参考值和精车时进给量的参考值都可以在切削用量手册中查到。

#### 3. 切削速度的选择

在背吃刀量和进给量选定以后,可在保证刀具合理寿命的条件下,确定合适的切削速度。粗加工时,背吃刀量和进给量都较大,切削速度受刀具寿命和机床功率的限制,一般较低。精加工时,背吃刀量和进给量都取得较小,切削速度主要受工件加工质量和刀具寿命的限制,一般取得

较高。选择切削速度时,还应考虑工件材料的切削加工性等因素。例如,加工合金钢、高锰钢、不锈钢、铸铁等的切削速度应比加工普通中碳钢的切削速度低 20% ~ 30%,加工有色金属时,则应提高 1 ~ 3 倍。在断续切削和加工大件、细长件、薄壁件时,应选用较低的切削速度。切削速度的参考值可以在切削用量手册中查到。

#### 7.10.4 切削液的选择

##### 1. 切削液的作用

切削液进入切削区,可以改善切削条件,提高工件加工质量和切削效率。与切削液有相似功效的还有某些气体和固体,如压缩空气、二硫化铝和石墨等。切削液的主要作用如下:

##### (1) 冷却作用

切削液能从切削区域带走大量切削热,从而降低切削温度。切削液冷却性能的好坏,取决于它的导热系数、比热、汽化热、汽化速度、流量和流速等。

##### (2) 润滑作用

切削液能渗入到刀具与切屑和加工表面之间,形成一层润滑膜或化学吸附膜,以减小它们之间的摩擦。切削液润滑的效果主要取决于切削液的渗透能力、吸附成膜的能力和润滑膜的强度等。

##### (3) 清洗作用

切削液大量的流动,可以冲走切削区域和机床上的细碎切屑和脱落的磨粒。清洗性能的好坏,主要取决于切削液的流动性、使用压力和切削液的油性。

##### (4) 防锈作用

在切削液中加入防锈剂,可在金属表面形成一层保护膜,对工件、机床、刀具和夹具等都能起到防锈作用。防锈作用的强弱,取决于切削液本身的成分和添加剂的作用。

##### 2. 切削液添加剂

为改善切削液的各种性能常在其中加入添加剂。常用的添加剂有以下几种:

##### (1) 油性添加剂

它含有极性分子,能在金属表面形成牢固的吸附膜,在较低的切削速度下起到较好的润滑作用。常用的油性添加剂有动物油、植物油、脂肪酸、胶类、醇类和脂类等。

##### (2) 极压添加剂

它是含有硫、磷、氯、碘等元素的有机化合物,在高温下与金属表面起化学反应,形成耐较高温度和压力的化学吸附膜,能防止金属界面直接接触,从而减小摩擦。

##### (3) 表面活性剂

它是使矿物油和水乳化,形成稳定乳化液的添加剂。表面活性剂是一种有机化合物,由可溶于水的极性基团和可溶于油的非极性基团组成,可定向地排列并吸附在油水两相界面上,极性端向水,非极性端向油,将水和油连接起来,使油以微小的颗粒稳定地分散在水中,形成乳化液。表面活性剂还能吸附在金属表面上,形成润滑膜,起油性添加剂的润滑作用。常用的表面活性剂有石油磺酸钠、油酸钠皂等。

##### (4) 防锈添加剂

它是一种极性很强的化合物,与金属表面有很强的附着力,吸附在金属表面上形成保护膜,

或与金属表面化合形成钝化膜 起到防锈作用。常用的防锈添加剂有碳酸钠、三乙醇胺、石油磺酸钡等。

### 3. 常用切削液的种类与选用

#### (1) 水溶液

它的主要成分是水 其中加入了少量的有防锈和润滑作用的添加剂。水溶液的冷却效果良好 多用于普通磨削和其他加工。

#### (2) 乳化液

它是将乳化油(由矿物油、表面活性剂和其他添加剂配成)用水稀释而成 用途广泛。低浓度的乳化液冷却效果较好 主要用于磨削、粗车、钻孔加工等。高浓度的乳化液润滑效果较好 主要用于精车、攻丝、铰孔、插齿加工等。

#### (3) 切削油

它主要是矿物油(如机械油、轻柴油、煤油等) 少数采用动植物油或复合油。普通车削、攻丝时 可选用机油。精加工有色金属或铸铁时 可选用煤油。加工螺纹时 可选用植物油。在矿物油中加入一定量的油性添加剂和极压添加剂 能提高其高温、高压下的润滑性能 可用于精铣、铰孔、攻丝及齿轮加工。

## 复习与思考题

- 7 - 1 切削加工由哪些运动组成? 它们各有什么作用?
- 7 - 2 切削用量三要素是什么? 它们的单位是什么?
- 7 - 3 刀具正交平面参考系由哪些平面组成? 它们是如何定义的?
- 7 - 4 常用刀具的材料有哪几类? 各适用于制造哪些刀具?
- 7 - 5 硬质合金按化学成分和使用特性分为哪四类? 各适宜加工哪些工件材料?
- 7 - 6 金属切削过程中三个变形区是怎样划分的? 各有哪些特点?
- 7 - 7 切屑类型有哪四类? 各有哪些特点?
- 7 - 8 各切削分力对加工过程有何影响? 试述背吃刀量  $a_p$  与进给量  $f$  对切削力的影响规律。
- 7 - 9 切削热是如何产生的? 它对切削过程有什么影响?
- 7 - 10 试述背吃刀量  $a_p$  进给量  $f$  对切削温度的影响规律。
- 7 - 11 简述刀具磨损的原因。高速钢刀具、硬质合金刀具在中速、高速时产生磨损的主要原因是什么?
- 7 - 12 切削变形、切削力、切削温度、刀具磨损和刀具寿命之间存在着什么关系?
- 7 - 13 何谓工件材料的切削加工性? 它与哪些因素有关?
- 7 - 14 试对碳素结构钢中含碳量大小对切削加工性的影响进行分析。
- 7 - 15 说明前角和后角的大小对切削过程的影响。
- 7 - 16 说明刃倾角的作用。
- 7 - 17 简述半精车切削用量选择方法。
- 7 - 18 常用切削液有哪几种? 各适用什么场合?



## 第8章 机械零件表面加工

机械零件尽管种类繁多,其结构复杂程度不一,但其表面形状不外乎是几种基本形状的表面:平面、圆柱面、圆锥面以及各种成形面。当零件精度和表面质量要求较高时,需要在机床上使用切削刀具或磨具切除多余材料,以获取几何形状、尺寸精度和表面粗糙度都符合要求的零件,由于各种机械零件形状、尺寸和表面质量的不同,其切削加工方法和切削加工设备也就各不相同。本章仅就各种表面切削加工方法的基本原理、特点和应用范围以及所采用的加工设备分别介绍一些基础知识。

### 8.1 金属切削机床的基础知识

金属切削机床是用切削的方法将金属毛坯加工成机器零件的一种机器,人们习惯上称为机床。由于切削加工仍是机械制造过程中获取具有一定尺寸、形状和精度的零件的主要加工方法,所以机床是机械制造系统中最重要的组成部分,它为加工过程提供刀具与工件之间的相对位置和相对运动,为改变工件形状、质量提供能量。

#### 8.1.1 机床的分类

目前金属切削机床的品种和规格繁多,为便于区别、使用和管理,需对机床进行分类。

根据国家标准 GB/T 15375—94,按加工性质和所用刀具的不同,机床可分为 11 大类:车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨插床、拉床、锯床和其他机床。

除了上述基本分类方法之外,根据机床的其他特征,还有其他分类方法。

按机床通用性程度,可分为:通用机床(或称万能机床)、专门化机床和专用机床三类。通用机床适用于单件小批量生产,加工范围较广,可以加工多种零件的不同工序。例如普通车床、卧式镗床、万能升降台铣床等,专门化机床用于大批量生产中,加工范围较窄,可加工不同尺寸的一类或几类零件的某一种(或几种)特定工序。例如精密丝杠车床、曲轴轴颈车床等,专用机床通常应用于成批及大量生产中,这类机床是根据工艺要求专门设计制造的,专门用于加工某一种(或几种)零件的某一特定工序的。例如加工车床导轨的专用磨床、加工车床主轴箱的专用镗床等。

在同一种机床中,按加工精度的不同,可分为:普通精度级、精密级和高精度级机床。

按机床的质量和尺寸不同,可分为:仪表机床、中型(一般)机床、大型机床(质量达 10 t)、重型机床(质量 30 t 以上)、超重型机床(质量在 100 t 以上)。

按机床自动化程度,可分为:手动、机动、半自动和自动机床。

此外,机床还可以按主要工作器官的数目进行分类,如:单刀机床、多刀机床、单轴机床、多轴机床等。

目前,机床正在向数控化方向发展,而且其功能也在不断增加,除了数控加工功能,还增加了

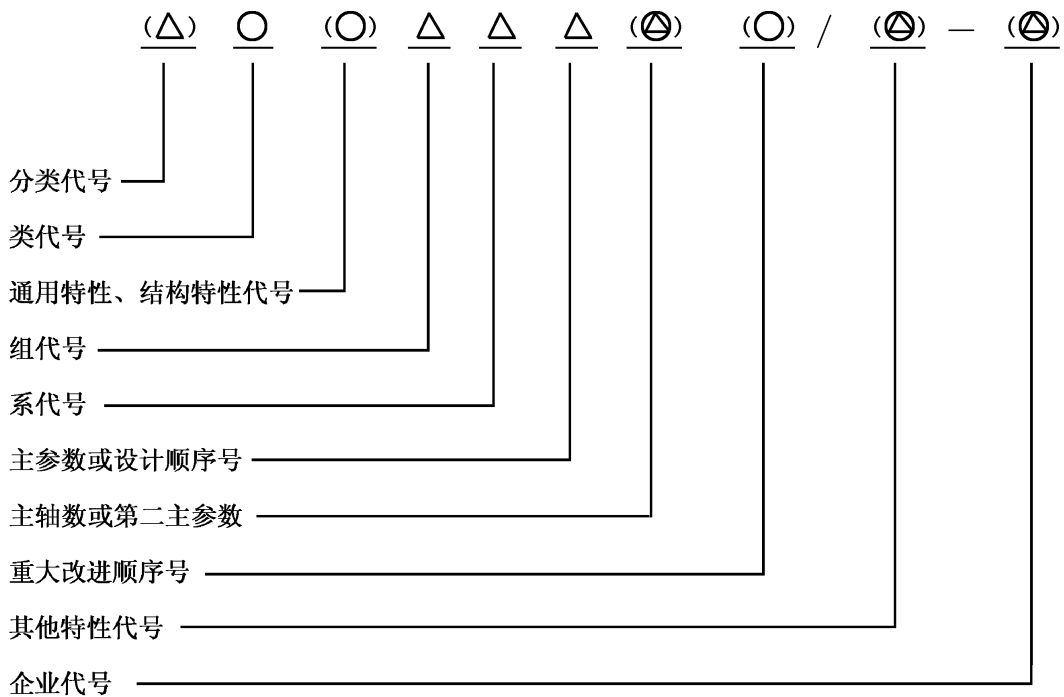
自动换刀、自动装卸工件等功能。因此也可按机床具有的数控功能分一般数控机床、加工中心、柔性制造单元等。

随着新品种机床不断出现 机床的分类也会愈加丰富。

### 8.1.2 机床型号的编制方法

机床型号是机床产品的代号 ,用以简明的表示机床的类型、通用和结构特性、主要技术参数等。GB/T 15375—94《金属切削机床型号编制方法》规定 ,我国的机床型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字按一定规律组合而成 ,适用于各类通用机床和专用机床(组合机床除外)。

#### 1. 通用机床型号的编制方法



注：“ $\Delta$ ”表示阿拉伯数字；“ $\bigcirc$ ”表示大写汉语拼音字母；“ $( )$ ”表示可选项,无内容时不表示,有内容时则不带括号；“ $\otimes$ ”表示大写汉语拼音字母或阿拉伯数字或者两者兼有之。

#### (1) 机床的类代号

用大写的汉语拼音字母表示 ,并按相应的汉字字意读音。当需要时 ,每类又可分为若干分类 ,分类代号用阿拉伯数字表示 ,放在类代号之前 ,但第一分类不予表示。机床的类代号、分类代号及其读音见表 8.1.1。

表 8.1.1 机床类代号和分类代号

类别	车床	钻床	镗床	磨床			齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨插床	拉床	锯床	其他机床
代号	C	Z	T	M	2M	3M	Y	S	X	B	L	G	Q
读音	车	钻	镗	磨	二磨	三磨	牙	丝	铣	刨	拉	割	其

#### (2) 机床的通用特性和结构特性代号

通用特性代号位于类代号之后 ,用大写汉语拼音字母表示。当某种类型机床除有普通型外 ,还有如表 8.1.2 所示的某种通用特性时 ,则在类代号之后加上相应特性代号。如“CK”表示数控

车床 如果同时具有两种通用特性时 ,则可按重要程度排列 ,用两个代号表示 ,如“MBG”表示半自动高精度磨床。

对于主参数相同 ,而结构、性能不同的机床 ,在型号中用结构特性区分。结构特性代号在型号无统一含义 ,它只是在同类型机床中起区分结构、性能不同的作用。当机床具有通用特性代号时 ,结构特性代号位于通用特性代号之后 ,用大写汉语拼音字母表示。如 CA6140 中的“A”和 CY6140 中的“Y” ,均为结构特性代号 ,它们分别表示为沈阳第一机床厂和云南机床厂生产的基本型号的卧式车床。为了避免混淆 ,通用特性代号已用的字母和“L”、“O”都不能作为结构特性代号使用。

表 8.1.2 机床通用特性代号

通用特性	高精度	精密	自动	半自动	数控	加工中心 (自动换刀)	仿形	轻型	加重型	筒式或经济型	柔性加工单元	数显	高速
代号	G	M	Z	B	K	H	F	Q	C	J	R	X	S
读音	高	密	自	半	控	换	仿	轻	重	筒	柔	显	速

### (3) 机床的组别、系别代号

组、系代号用两位阿拉伯数字表示 ,前一位表示组别 ,后一位表示系别。每类机床按其结构性能及使用范围划分为用数字 0~9 表示的 10 个组。在同一组机床中 ,又按主参数相同、主要结构及布局型式相同划分为用数字 0~9 表示的 10 个系。金属切削机床类、组划分见表 8.1.3(系别划分请查阅其他资料)。

### (4) 机床主参数、设计顺序号及第二主参数

机床主参数是表示机床规格大小的一种尺寸参数。在机床型号中 ,用阿拉伯数字给出主参数的折算值 ,位于机床组、系代号之后。折算系数一般是 1/10 或 1/100 ,也有少数是 1。例如 ,CA6140 型卧式车床中主参数的折算值为 40(折算系数是 1/10) ,其主参数表示在床身导轨面上能车削工件的最大回转直径为 400 mm。各类主要机床的主参数及折算系数见表 8.1.4。

某些通用机床 ,当无法用一个主参数表示时 ,则用设计顺序号来表示。

第二主参数是对主参数的补充 ,如最大工件长度、最大跨距、工作台工作面长度等 ,第二主参数一般不予给出。

### (5) 机床的最大改进顺序号

当机床的性能及结构有重大改进 ,并按新产品重新设计、试制和鉴定时 ,在原机床型号尾部加重大改进顺序号 ,即汉语拼音字母 A、B、C、...。

### (6) 其他特性代号与企业代号

其他特性代号用以反映各类机床的特性 ,如对数控机床 ,可用来反映不同的数控系统 ;对于一般机床可用以反映同一型号机床的变型等。其他特性代号可用汉语拼音字母或阿拉伯数字或二者的组合来表示。企业代号与其他特性代号表示方法相同 ,位于机床型号尾部 ,用“—”与其他特性代号分开 ,读作“至”。若机床型号中无其他特性代号 ,仅有企业代号时 ,则不加“—” ,企业代号直接写在“/”后面。

根据通用机床型号编制方法 ,举例如下 :

1) MG1432A 表示高精度万能外圆磨床 ,最大磨削直径为 320 mm ,经过第一次重大改进 ,无

企业代号。

2) Z3040 × 16/S2 表示摇臂钻床,最大钻孔直径为 40 mm,最大跨距为 1 600 mm,沈阳第二机床厂生产。

3) CKM1116/NG 表示数控精密单轴纵切自动车床,最大车削棒料直径为 16 mm,宁江机床厂生产。

表 8.1.3 金属切削机床类、组划分表

组别 类别		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		车床 C	仪表 车床	单轴 自动车 床	多轴 自动、 半自动 车床	回 轮、转 塔车床	曲轴 及凸轮 轴车床	立式 车床	落地 及卧式 车床	仿形 及多刀 车床	轮、 轴、辊、 锭及铲 齿车床
钻床 Z		坐标 镗钻床	深孔 钻床	摇臂 钻床	台式 钻床	立式 钻床	卧式 钻床	铣钻 床	中心 孔钻床	其他 钻床	
镗床 T			深孔 镗床		坐标 镗床	立式 镗床	卧式 铣镗床	精镗 床	汽 车、拖 拉机修 理用镗 床	其他 镗床	
磨床	M	仪表 磨床	外圆 磨床	内圆 磨床	砂轮 机	坐标 磨床	导轨 磨床	刀具 刃磨床	平面 及端面 磨床	曲 轴、凸 轮轴、 花键轴 及轧辊 磨床	工具 磨床
	2M		超精 机	内圆 珩磨机	外圆 及其他 珩磨机	抛光 机	砂带 抛光及 磨削机 床	刀具 刃磨及 研磨机 床	可转 位刀片 磨削机 床	研磨 机	其他 磨床
	3M		球轴 承套圈 磨床	滚子 轴承套 圈滚道 磨床	轴 承套圈 超精机		叶片 磨削机 床	滚子 加工机 床	钢球 加工机 床	气 门、活 塞及活 塞环磨 削机床	汽 车、拖 拉机修 磨机床
齿轮加工机床 Y	仪表 齿轮加 工机		锥齿 轮加工 机	滚齿 机及铣 齿机	剃齿 及珩齿 机	插齿 机	花键 轴铣床	齿轮 磨齿机	其他 齿轮加 工机	齿轮 倒角及 检查机	

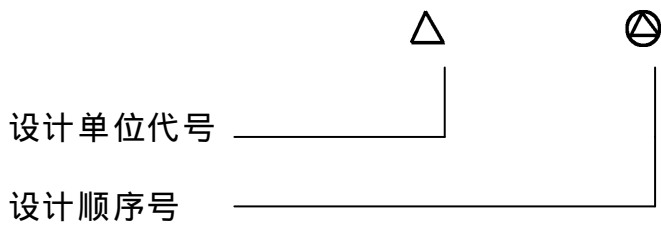
续表

类别	组别									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
螺纹加工机床 S				套丝机	攻丝机		螺纹铣床	螺纹磨床	螺纹车床	
铣床 X	仪表铣床	悬臂及滑枕铣床	龙门铣床	平面铣床	仿形铣床	立式升降台铣床	卧式升降台铣床	床身铣床	工具铣床	其他铣床
刨插床 B		悬臂刨床	龙门刨床			插床	牛头刨床		边缘及模具刨床	其他刨床
拉床 L			侧拉床	卧式外拉床	连续拉床	立式内拉床	卧式内拉床	立式外拉床	键槽、轴瓦及螺纹拉床	其他拉床
锯床 G			砂轮片锯床		卧式带锯床	立式带锯床	圆锯床	弓锯床	锉锯床	
其他机床 Q	其他仪表机床	管子加工机床	木螺钉加工机床		刻线机床	切断机床	多功能机床			

表 8.1.4 各类主要机床的主参数和折算系数

机床	主参数名称	折算系数
卧式车床	床身上最大回转直径	1/10
立式车床	最大车削直径	1/100
摇臂钻床	最大钻孔直径	1/1
卧式镗床	镗轴直径	1/10
坐标镗床	工作台面宽度	1/10
外圆磨床	最大磨削直径	1/10
内圆磨床	最大磨削孔径	1/10
矩台平面磨床	工作台面宽度	1/10
齿轮加工机床	最大工件直径	1/10
龙门铣床	工作台面宽度	1/100
升降台铣床	工作台面宽度	1/10
龙门刨床	最大刨削宽度	1/100
插床及牛头刨床	最大插削及刨削长度	1/10
拉床	额定拉力 (tf)	1/1

## 2. 专用机床型号的编制方法



设计单位代号同通用机床型号中的企业代号。设计顺序号按各单位设计制造专用机床的先后顺序排列。例如 ,B1 - 015 :表示北京第一机床厂设计制造的第 15 种专用机床。

### 8.1.3 零件表面的切削加工成形方法和机床的运动

#### 1. 零件表面的切削加工成形方法

在切削加工过程中 ,机床上的刀具和工件按一定的规律作相对运动 ,通过刀具对工件毛坯的切削作用 ,切除毛坯上多余金属 ,从而得到所要求的零件表面形状。机械零件的任何表面都可以看作是一条线(称为母线)沿另一条线(称为导线)运动的轨迹。如图 8.1.1 所示 ,平面是由一条直线(母线)沿另一条直线(导线)运动而形成的 ;圆柱面和圆锥面是由一条直线(母线)沿着一个圆(导线)运动而形成的 ;普通螺纹的螺旋面是由“ ”形线(母线)沿螺旋线(导线)运动而形成的 ;直齿圆柱齿轮的渐开线齿廓表面是渐开线(母线)沿直线(导线)运动而形成的等等。

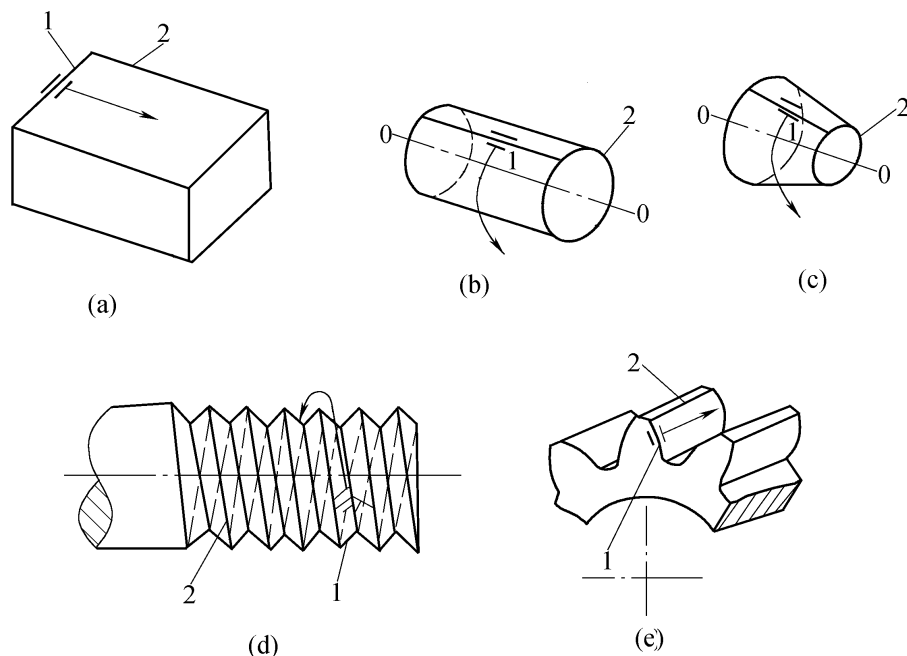


图 8.1.1 零件表面的形成

1—母线 ;2—导线

母线和导线统称为发生线。切削加工中发生线是由刀具的切削刃与工件间的相对运动得到的。一般情况下 ,由切削刃本身或与工件相对运动配合形成一条发生线(一般是母线) ,而另一条发生线则完全是由刀具和工件之间的相对运动得到的。这里 ,刀具和工件之间的相对运动都是由机床来提供。

#### 2. 机床的运动

机床在加工过程中 ,必须形成一定形状的发生线(母线和导线) ,才能获取所需的工件表面形状。因此 ,机床必须完成一定的运动 ,这种运动称为表面成形运动。此外 ,还有多种辅助运动。

##### (1) 表面成形运动

表面成形运动按其组成情况不同,可分为简单成形运动和复合成形运动二种。

如果一个独立的成形运动是由单独的旋转运动或直线运动构成的,则此成形运动称为简单成形运动。例如,用车刀车削外圆柱面时(见图 8.1.2a)工件的旋转运动  $B_1$  产生圆导线,刀具纵向直线运动  $A_2$  产生直线母线,即加工出圆柱面。运动  $B_1$  和  $A_2$  是两个相互独立的表面成形运动,因此,用车刀车削外圆柱时属于简单成形运动。

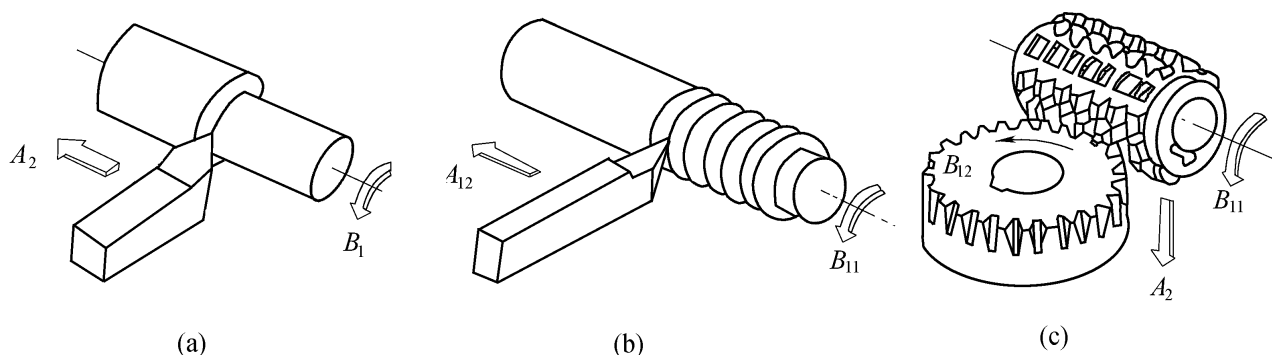


图 8.1.2 成形运动的组成

如果一个独立的成形运动是由两个以上的旋转运动或(和)直线运动,按某种确定的运动关系组合而成,则此成形运动称为复合成形运动。例如,用螺纹车刀车削螺纹表面时(见图 8.1.2b),工件的旋转运动  $B_{11}$  和车刀的直线运动  $A_2$  按规定作相对运动,形成螺旋线导线,三角形母线(由刀刃形成,不需成形运动)沿螺旋线运动,形成了螺旋面。形成螺旋线导线的两个简单运动  $B_{11}$  和  $A_2$ ,由于螺纹导程限定而不能彼此独立,它们必须保持严格的运动关系,从而  $B_{11}$  和  $A_2$  这两个简单运动组成了一个复合成形运动。又如,用齿轮滚刀加工直齿圆柱齿轮时(见图 8.1.2c)它需要一个复合成形运动  $B_{11}$ 、 $B_{12}$ (范成运动),形成渐开线母线,又需要一个简单直线成形运动  $A_2$  才能得到整个渐开线齿面。

成形运动中各单元运动根据其在切削中所起的作用不同,又可为主运动和进给运动(见第 7 章)。

## (2) 辅助运动

机床在加工过程中还需一系列辅助运动,其功能是实现机床的各种辅助动作,为表面成形运动创造条件。它的种类很多,如进给运动前后的快进和快退,调整刀具和工件之间正确相对位置的调位运动,切入运动,分度运动,工件夹紧、松开等操纵控制运动。

### 8.1.4 机床传动的的基本组成和传动原理图

#### 1. 机床传动的的基本组成部分

机床的传动必须具备以下的三个基本部分。

##### (1) 运动源

为执行件提供动力和运动的装置。通常为电动机,如交流异步电动机、直流电动机、直流和交流伺服电动机、步进电动机、交流变频调速电动机等。

##### (2) 传动件

传递动力和运动的零件。如齿轮、链轮、带轮、丝杠、螺母等,除机械传动外,还有液压传动和电气传动元件等。

### (3) 执行件

夹持刀具或工件执行运动的部件。常用执行件有主轴、刀架、工作台等,是传递运动的末端件。

## 2. 机床的传动链

为了在机床上得到所需要的运动,必须通过一系列的传动件把运动源和执行件,或把执行件与执行件联系起来,以构成传动联系。构成一个传动联系的一系列传动件,称之为传动链。根据传动链的性质,传动链可分为两类。

### (1) 外联系传动链

联系运动源与执行件的传动链,称为外联系传动链。它的作用是使执行件得到预定速度的运动,并传递一定的动力。此外,还起执行件变速、换向等作用。外联系传动链传动比的变化,只影响生产率或表面粗糙度,不影响加工表面的形状。因此,外联系传动链不要求两末端件之间有严格的传动关系。如卧式车床中,从主电动机到主轴之间的传动链,就是典型的外联系传动链。

### (2) 内联系传动链

联系两个执行件,以形成复合成形运动的传动链,称为内联系传动链。它的作用是保证两个末端件之间的相对速度或相对位移保持严格的比例关系,以保证被加工表面的性质。如在卧式车床上车螺纹时,连接主轴和刀具之间的传动链,就属于内联系传动链。此时,必须保证主轴(工件)每转一转,车刀移动工件螺纹一个导程,才能得到要求的螺纹导程。又如,滚齿机的范成运动传动链也属于内联系传动链。

## 3. 机床传动原理图

在机床的运动分析中,为了便于分析机床运动和传动联系,常用一些简明的符号来表示运动源与执行件、执行件与执行件之间的传动联系,这就是传动原理图。图 8.1.3 为传动原理图常用的部分符号。

下面以卧式车床的传动原理图为例,说明传动原理图的画法和所表示的内容。如图 8.1.4 所示,从电动机至主轴之间的传动属于外联系传动链,它是为主轴提供运动和动力的。即从电动机——1——2—— $u_1$ ——3——4——主轴,这条传动链亦称主运动传动链,其中 1——2 和 3——4 段为传动比固定不变的定比传动结构,2——3 段是传动比可变的换置机构  $u_1$ ,调整  $u_1$  值用以改变主轴的转速。从主轴——4——5—— $u_2$ ——6——7——丝杠——刀具,得到刀具和工件间的复合成形运动(螺旋运动),这是一条内联系传动链,其中 4——5 和 6——7 段为定比传动机构,5——6 段是换置机构  $u_2$ ,调整  $u_2$  值可得到不同的螺纹导程。在车削外圆面或端面时,主轴和刀具之间的传动联系无严格的传动比要求,二者的运动是两个独立的简单成形运动,因此,除

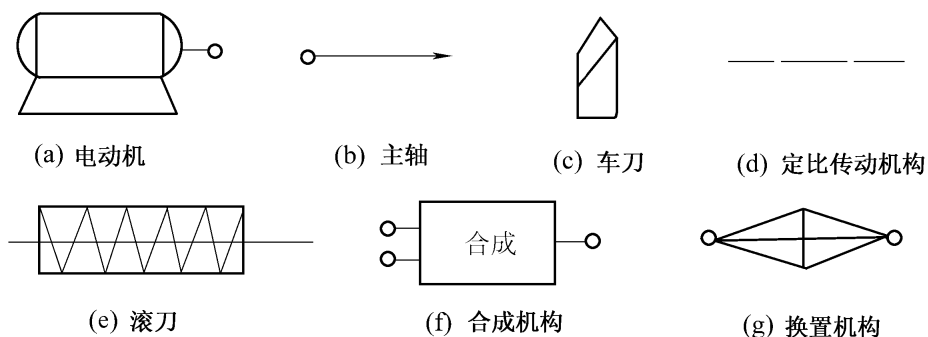


图 8.1.3 传动原理图常使用的部分符号





$$n_{\pm} = n_{\text{电}} \times \frac{D}{D'} (1 - \epsilon) \times \frac{Z_1}{Z_2} \times \frac{Z_3}{Z_4} \times \frac{Z_5}{Z_6}$$

式中  $n_{\pm}$  —— 主轴转速  $r/\text{min}$  ;

$n_{\text{电}}$  —— 电动机转速  $r/\text{min}$  ;

$D$ 、 $D'$  —— 分别为主动、被动皮带轮直径  $\text{mm}$  ;

$\epsilon$  —— 三角带传动的滑动系数,可近似地取  $\epsilon = 0.02$  ;

$Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  及  $Z_4$ 、 $Z_5$ 、 $Z_6$  —— 分别为 I、II、III 轴之间主动和被动齿轮齿数。

主轴各级转速均可由上述运动平衡式计算出来  
如计算所得主轴最高转速和最低转速分别为：

$$n_{\pm \max} = 1440 \times \frac{126}{256} \times (1 - 0.02) \times \frac{36}{36} \times \frac{42}{42} \times \frac{60}{30} =$$

1389  $r/\text{min}$

$$n_{\pm \min} = 1440 \times \frac{126}{256} \times (1 - 0.02) \times \frac{24}{48} \times \frac{22}{62} \times \frac{18}{72} =$$

30.8  $r/\text{min}$

例 8.2 根据图 8.1.6 所示的车削螺纹进给传动链,确定挂轮变速机构的换置公式。

由图示得到的运动平衡式为：

$$1 \times \frac{60}{60} \times \frac{40}{40} \times \frac{a}{b} \times \frac{c}{d} \times 12 = L_{\perp}$$

式中  $L_{\perp}$  —— 被加工螺母的导程  $\text{mm}$  ;

将上式化简后,得到挂轮的换置公式

$$u_{\pm} = \frac{a}{b} \times \frac{c}{d} = \frac{L_{\perp}}{12}$$

应用此换置公式,适当的选择挂轮  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的齿数,就可车削出导程为  $L_{\perp}$  的螺纹。

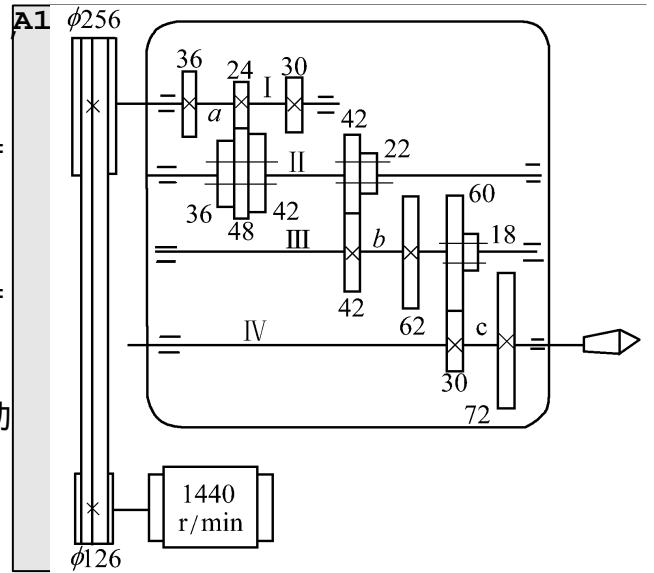


图 8.1.5 12 级变速车床主传动系统图

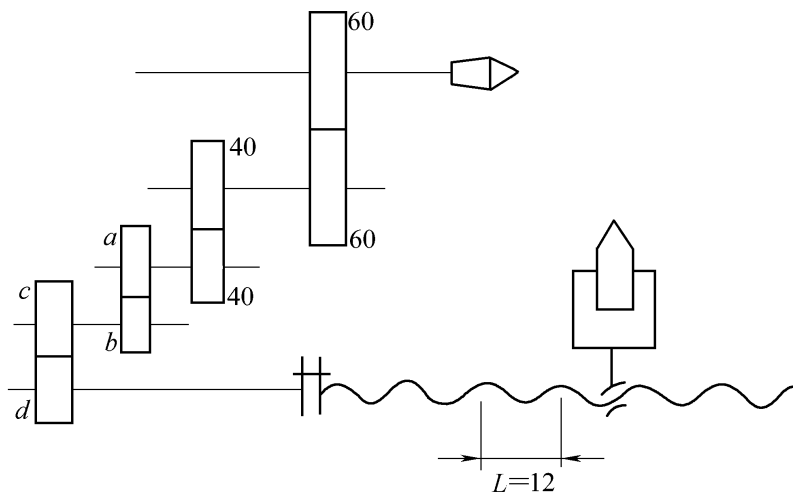


图 8.1.6 车削螺纹进给传动链

## 8.2 外圆表面加工

### 8.2.1 外圆表面的加工方法

轴类、套类和盘类零件是具有外圆表面的典型零件。外圆表面常用的机械加工方法有车削、磨削和各种光整加工方法。车削加工是外圆表面最经济有效的加工方法,但其经济精度来说,一般适于作为外圆表面粗加工和半进精加工方法;磨削加工是外圆表面主要精加工方法,特别适用于各种高硬度和淬火后零件的精加工;光整加工是精加工之后进行的超精密加工方法(如滚压、抛光、研磨等),适用于某些精度和表面质量要求很高的零件。

由于各种加工方法所能达到的经济加工精度、表面粗糙度、生产率和生产成本各不相同,因此必须根据具体情况,选用合理的加工方法,从而加工出满足零件图纸上要求的合格零件。表 8.2.1 为外圆表面各种加工方案和经济加工精度。

表 8.2.1 外圆表面加工方案

序号	加工方法	经济精度 (公差等级)	经济粗糙度 $R_a$ 值/ $\mu\text{m}$	使用范围
1	粗车	IT13 ~ IT11	50 ~ 12.5	适用于淬火钢以外的各种金属
2	粗车—半精车	IT10 ~ IT8	6.3 ~ 3.2	
3	粗车—半精车—精车	IT8 ~ IT7	1.6 ~ 0.8	
4	粗车—半精车—精车—滚压	IT8 ~ IT7	0.2 ~ 0.025 5	
5	粗车—半精车—磨削	IT8 ~ IT7	0.8 ~ 0.4	主要用于淬火钢,也可用于未淬火钢,但不适用于有色金属
6	粗车—半精车—粗磨—精磨	IT7 ~ IT6	0.4 ~ 0.1	
7	粗车—半精车—粗磨—精磨—超精加工(或轮式超精磨)	IT5	0.1 ~ 0.012 (或 $R_{\alpha}0.1$ )	
8	粗车—半精车—精车—精细车(金刚车)	IT7 ~ IT6	0.4 ~ 0.025	主要用于要求较高的有色金属
9	粗车—半精车—粗磨—精磨—超精磨(或镜面磨)	IT5 以上	0.025 ~ 0.006 (或 $R_{\alpha}0.1$ )	极高精度的外圆加工
10	粗车—半精车—粗磨—精磨—研磨	IT5 以上	0.1 ~ 0.012 (或 $R_{\alpha}0.1$ )	

### 8.2.2 外圆表面的车削加工

#### 1. 外圆车削的形式和加工精度

车削外圆是一种最常见、最基本的车削方法,其主要形式见图 8.2.1。

车削外圆一般可划分为荒车、粗车、半精车、精车和精细车,各种车削方案所能达到的加工精

度和表面粗糙度各不相同,必须合理的选用,详见表 8.2.1。

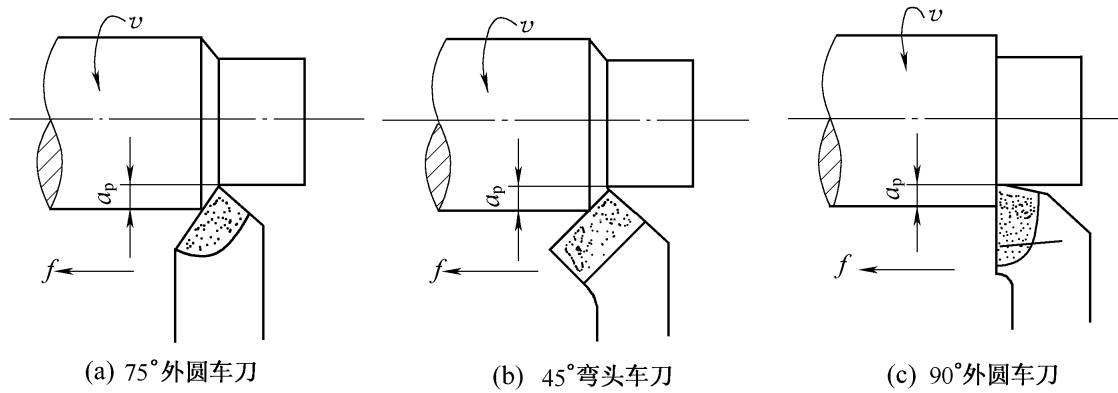


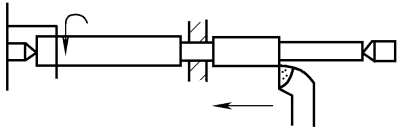
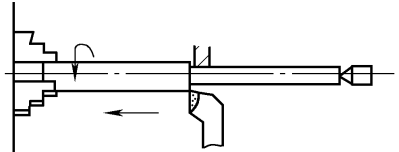
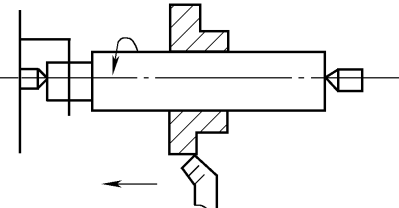
图 8.2.1 车削外圆的形成

## 2. 外圆车削工件的装夹方法

外圆车削加工时,最常见的工件装夹方法见表 8.2.2。

表 8.2.2 最常见的车削装夹方法

名称	装夹简图	装夹特点	应用
三爪卡盘		三个卡爪可同时移动,自动定心,装夹迅速方便	长径比小于 4,截面为圆形,六方体的中、小型工件加工
四爪卡盘		四个卡爪都可单独移动,装夹工件需要找正	长径比小于 4,截面为方形、椭圆形的较大、较重的工件
花盘		盘面上多通槽和 T 形槽,使用螺钉、压板装夹,装夹前需找正	形状不规则的工件、孔或外圆与定位基面垂直的工件的加工
双顶尖		定心正确,装夹稳定	长径比为 4~15 的实心轴类零件加工

名称	装夹简图	装夹特点	应用
双顶尖 中心架		支爪可调,增加工件刚性	长径比大于 15 的细长轴工件粗加工
一夹一顶 跟刀架		支爪随刀具一起运动,无接刀痕	长径比大于 15 的细长轴工件半精加工、精加工
心轴		能保证外圆、端面对内孔的位置精度	以孔为定位基准的套类零件的加工

### 3. 车刀的结构形式

车刀按结构不同可分为整体式、焊接式、机夹重磨式和机夹可转位式等几种。

整体式车刀是将车刀的切削部分与夹持部分用同一种材料制成,如尺寸不大的高速钢车刀常用这种结构。

焊接式车刀是在碳钢刀杆(常用 45 钢)上根据刀片的形状和尺寸铣出刀槽后将硬质合金刀片钎焊在刀槽中,然后刃磨出所需的几何参数。焊接式车刀结构简单、紧凑、刚性好、灵活性大,可根据切削要求较方便地刃磨出所需角度,故应用广泛。但经高温钎焊的硬质合金刀片,易产生应力和裂纹,切削性能有所下降,并且刀杆不能重复使用,浪费较大。

机夹重磨式车刀的刀片与刀杆是两个可拆的独立元件,切削时靠夹紧元件将它们紧固在一起,由于避免了因焊接产生的缺陷,可提高刀具的切削性能,并且刀杆可多次使用。

机夹可转位式车刀是将压制有合理几何参数、断屑槽、并有几个切削刃的多边形刀片,用机械夹固的方法,装夹在标准刀杆上,以实现切削的一种刀具结构。当刀片的一个切削刃磨钝后,松开夹紧元件,把刀片转位换成另一新切削刃,便可继续使用。与焊接式车刀相比,机夹可转位式车刀具有切削效率高,刀片使用寿命长,刀具消耗费用低等优点。可转位车刀的刀杆可重复使用,节省了刀杆材料。刀杆和刀片可实现标准化、系列化,有利于刀具的管理工作。图 8.2.2 为常见车刀的结构示意图。

### 4. 外圆车刀的选择和装夹

外圆车刀应根据外圆表面加工方案选择。粗车外圆要求外圆粗车刀强度高,能在切削深度大或走刀速度快的情况下保持刀头坚固。精车外圆要求外圆车刀刀刃锋利、光洁。如图 8.2.1 所示,主偏角  $\gamma = 75^\circ$  外圆车刀刀头强度高,生产中常选用为外圆粗车刀;主偏角  $\gamma = 45^\circ$  弯头车

刀,使用方便,还可以车端面和倒角,但因其副偏角 $\gamma_r$ 大,工件表面加工粗糙,不适于精加工;主偏角 $\gamma = 90^\circ$ 的外圆车刀可用于粗车或精车,还可车削有垂直台阶的外圆和细长轴。

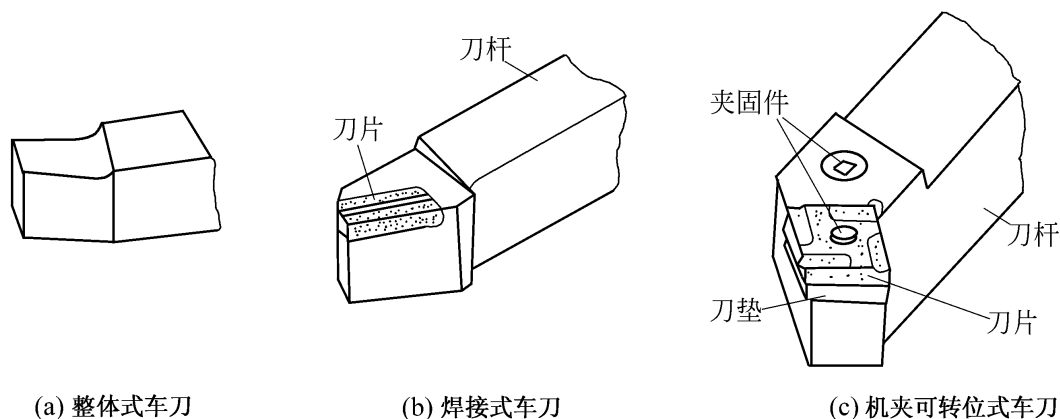


图 8.2.2 常用车刀结构示意图

车刀在刀架上的安装高度,一般应使刀尖在与工件旋转轴线等高的地方。安装时可用尾架顶尖作为标准,或在工件端面车一印痕,就可知道轴线位置,把车刀调整安装好。

车刀在刀架上的位置,一般应垂直于工件旋转轴线,否则会引起主偏角 $\gamma$ 变化,还可能使刀尖扎入工件已加工表面或影响表面粗糙度质量。

## 5. 车床

### (1) 车床的用途

车床主要用于加工零件的各种回转表面,如内外圆柱表面,内外圆锥表面,成形回转表面和回转体的端面等,有些车床还能车削螺纹表面。由于大多数机器零件都具有回转表面,并且大部分需要用车床来加工,因此,车床是一般机器制造厂中应用最广泛的一类机床,约占机床总数的35%~50%。

在车床上,除使用车刀进行加工之外,还可以使用各种孔加工刀具(如钻头、铰刀、镗刀等)进行孔加工,或者使用螺纹刀具(丝锥、板牙)进行内、外螺纹加工。

### (2) 车床的运动

为形成工件加工表面形状,车床必须具备以下运动:

1) 工件的旋转运动 是车床的主运动,其功用是使工件得到所需要的切削速度,其特点是速度较高,消耗功率较大。

2) 刀具的直线移动 是车床的进给运动,其功用是使毛坯上新的金属层被不断投入切削,以便切削出整个加工表面。

上述运动是车床形成加工表面形状所需的表面成形运动。车床上车削螺纹时,工件的旋转运动和刀具的直线移动则形成螺旋运动,是一种复合成形运动。

3) 辅助运动 车床上切入运动以及刀架纵向或横向的快速运动,称为辅助运动,其功用是为表面成形运动创造条件,也是车床必不可少的运动。

### (3) 车床的分类

为适应不同的加工要求,车床分为很多种类。按其结构和用途不同,可分为:卧式车床(图 8.2.3)、立式车床(图 8.2.4)、转塔车床(图 8.2.5)、回轮车床、落地车床、液压仿形及多刀自动和半自动车床、各种专用车床(如曲轴车床、凸轮车床等)、数控车床(图 8.2.6)和车削加工中心等。

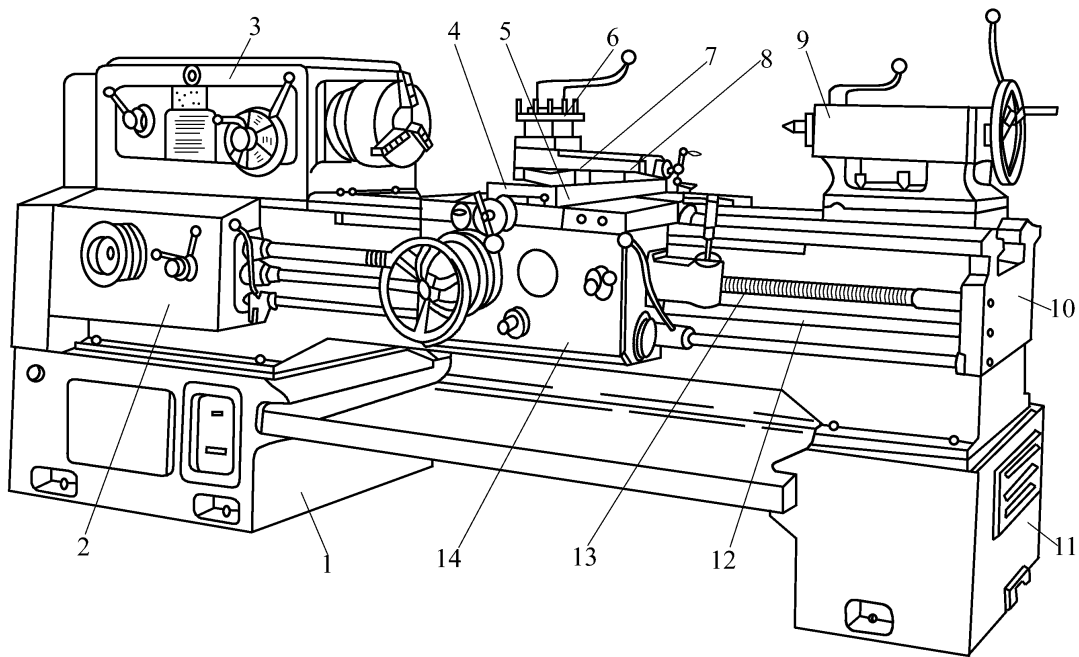


图 8.2.3 CA6140 型卧式车床

1、11—床腿；2—进给箱；3—主轴箱；4—床鞍；5—中滑板；6—刀架；7—回转盘；  
8—小滑板；9—尾架；10—床身；12—光杠；13—丝杠；14—溜板箱

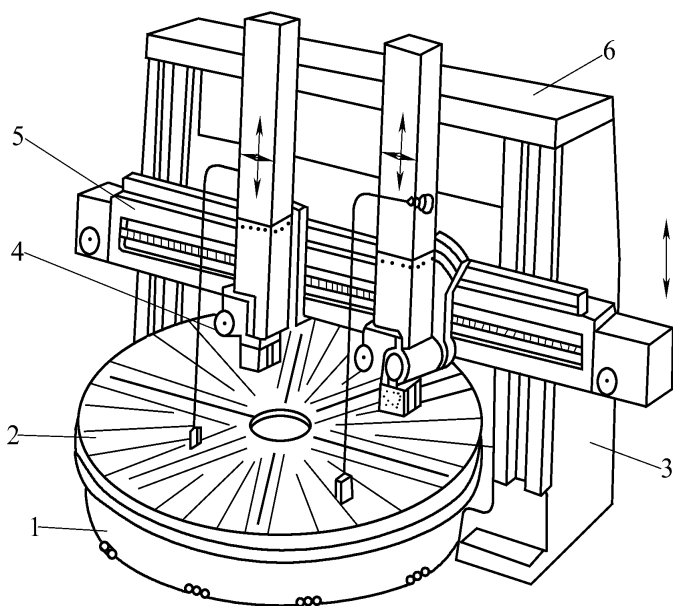


图 8.2.4 双立柱式车床

1—底座；2—工作台；3—立柱；  
4—垂直刀架；5—横梁；6—顶梁

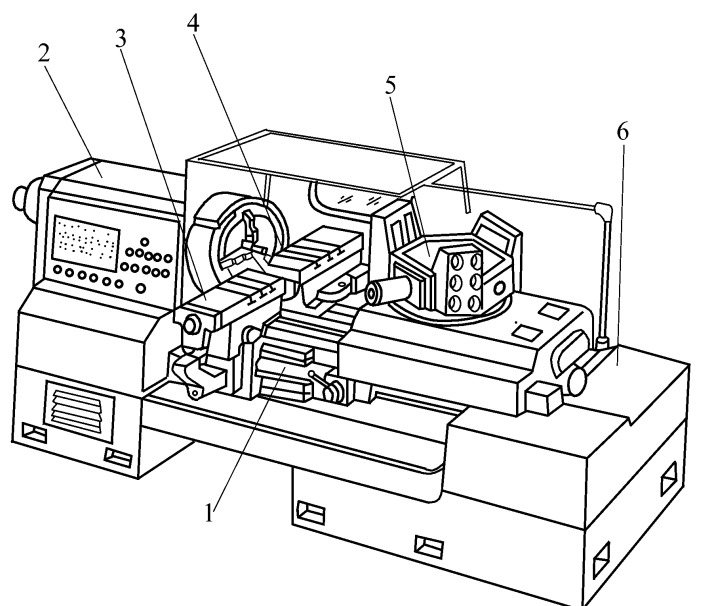


图 8.2.5 CB3463 - 1 型自动转塔车床

1—床身；2—主轴箱；3—前刀架；  
4—后刀架；5—转塔刀架；6—液压装置

## 6. CA6140 型卧式车床

### (1) 机床的工艺范围及其组成

CA6140 型卧式车床的工艺范围很广,能适用于各种回转表面的加工,如车削内外圆柱面、圆锥面、环槽及成形回转面;车削端面及各种常用螺纹;还可以进行钻孔、扩孔、铰孔、滚花、攻螺纹和套螺纹等工作。其加工的典型表面见图 8.2.7。

CA6140 型卧式车床的通用性较强,但机床的结构复杂且自动化程度低,加工过程中辅助时间较长,适用于单件、小批量生产及修理车间。CA6140 型卧式车床的布局及组成见图 8.2.3。

### (2) 机床的传动系统

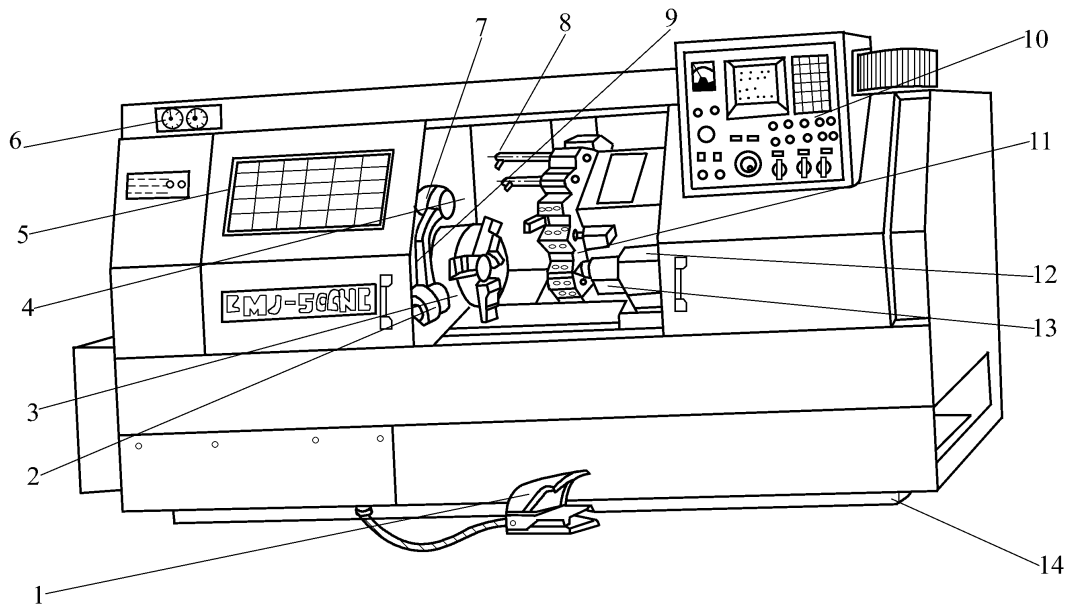


图 8.2.6 MJ - 50 数控车床

- 1—主轴卡盘松、夹开关；2—对刀仪；3—主轴卡盘；4—主轴箱；5—机床防护门；  
6—压力表；7—对刀仪防护罩；8—导轨防护罩；9—对刀仪转臂；  
10—操作面板；11—回转刀架；12—尾座；13—床鞍；14—床身

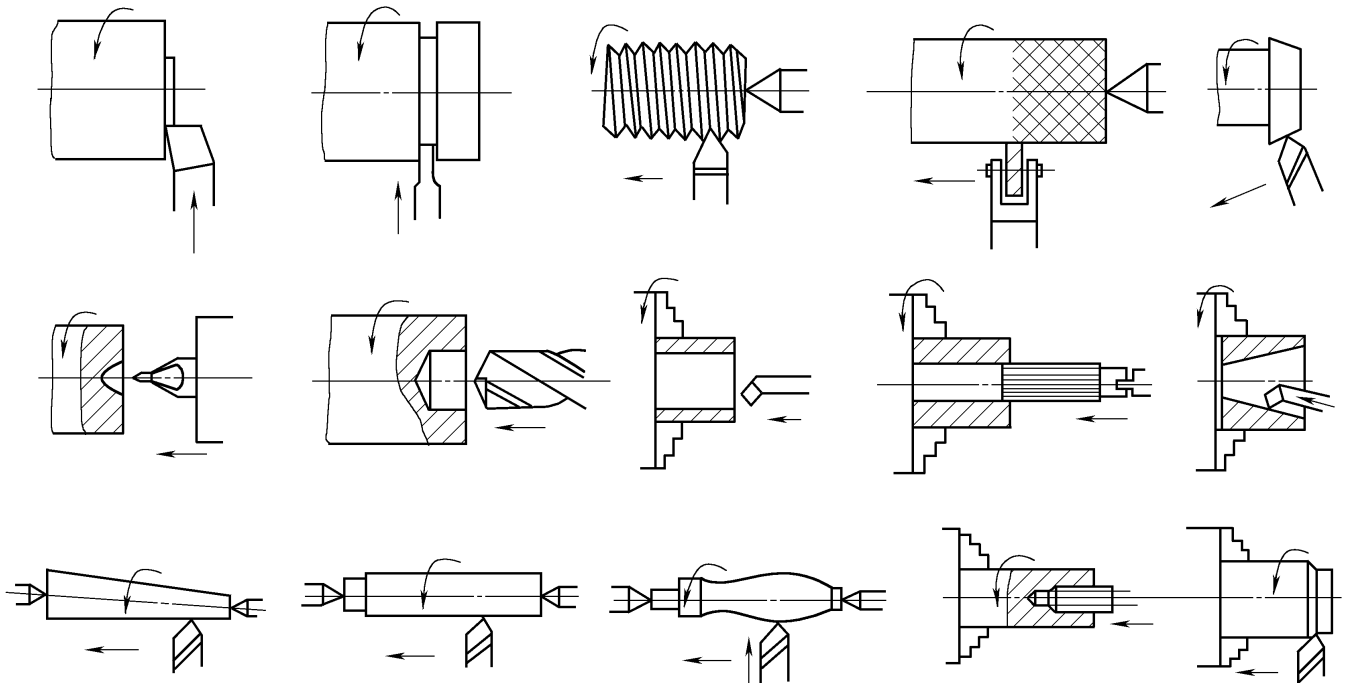
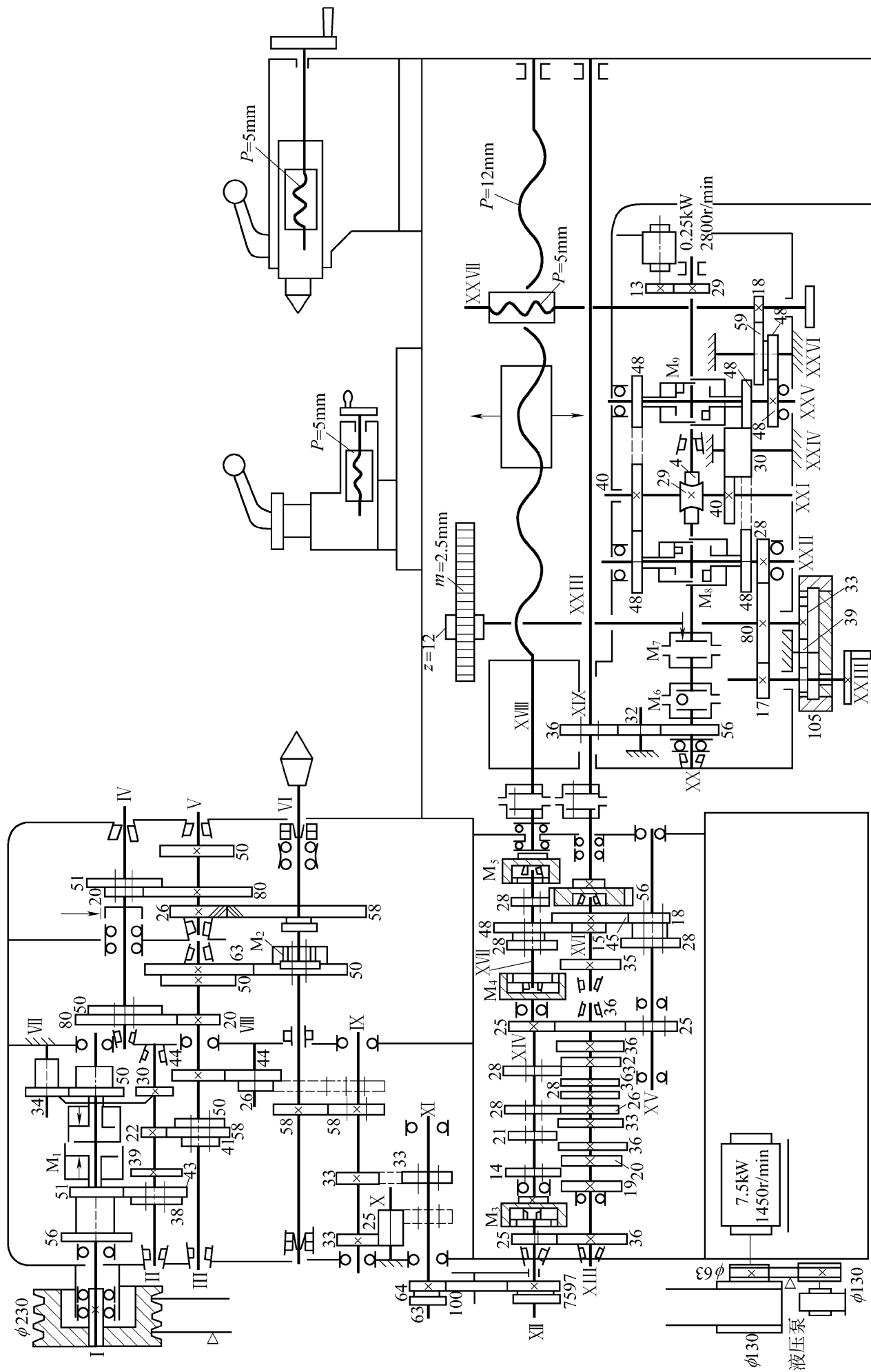


图 8.2.7 CA6140 型卧式车床加工的典型表面

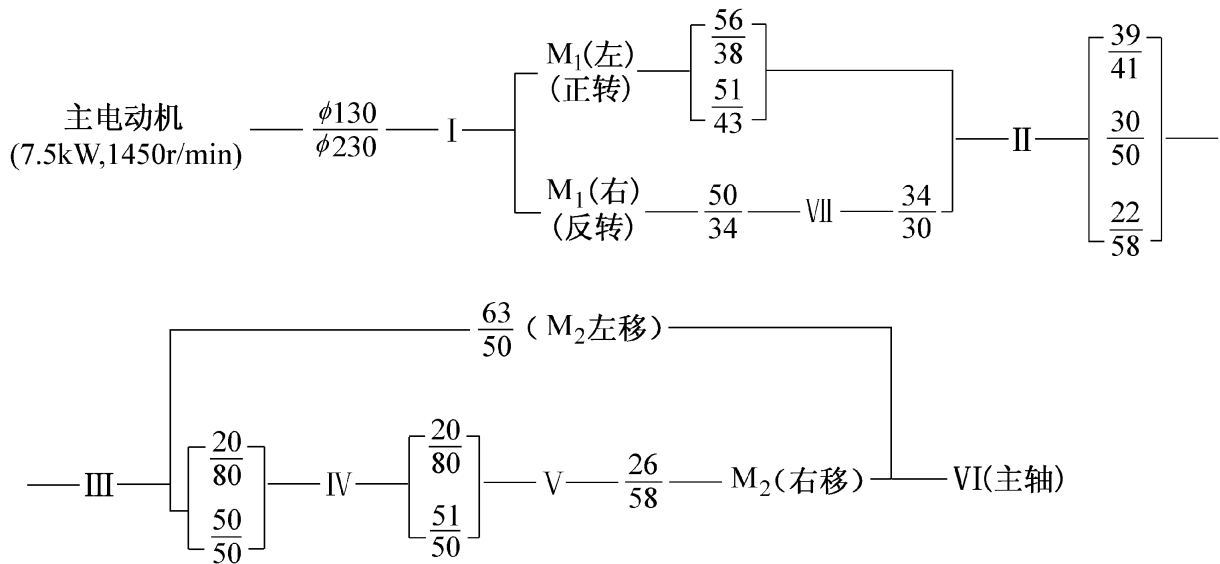
图 8.2.8 为 CA6140 型卧式车床的传动系统图。图中左上方的方框内表示机床的主轴箱，框中是从主电动机到车床主轴的主运动传动链。传动链中的滑移齿轮变速机构，可使主轴得到不同的转速；片式摩擦离合器换向机构，可使主轴得到正、反向转速。左下方框表示进给箱，右下方框表示溜板箱。从主轴箱中下半部分传动件，到左外侧的挂轮机构、进给箱中的传动件、丝杠或光杠以及溜板箱中的传动件，构成了从主轴到刀架的进给传动链。进给换向机构位于主轴箱下部，用于切削左旋或右旋螺纹，挂轮或进给箱中的变换机构，用来决定将运动传给丝杠还是光杠。若传给丝杠，则经过丝杠和溜板箱中的开合螺母，把运动传给刀架，实现切削螺纹传动链；若传给光杠，则通过光杠和溜板箱中的转换机构传给刀架，形成机动进给传动链。溜板箱中的转换机构用来确定是纵向进给或是横向进给。





图系统传动的床车式卧型 04-6A C 8 2 8 图

1) 主运动传动链 运动由主电动机经 V 型带轮传动副  $130\text{ mm}/230\text{ mm}$  传至主轴箱中的轴 轴 上装有双向多片摩擦离合器  $M_1$  ,使主轴正转、反转或停止。主运动传动链的传动路线表达式为 :



由传动路线表达式可以看出 ,主轴可获得  $2 \times 3 \times [(2 \times 2) + 1] = 30$  级正转转速 ,由于轴 至轴 间的两组双联滑移齿轮变速组的 4 种传动比为 :

$$u_1 = \frac{20}{80} \times \frac{20}{80} = \frac{1}{16} ; u_2 = \frac{20}{80} \times \frac{51}{50} = \frac{1}{4} ;$$

$$u_3 = \frac{50}{50} \times \frac{20}{80} = \frac{1}{4} ; u_4 = \frac{50}{50} \times \frac{50}{50} = 1。$$

其中  $u_2 = u_3$  ,所以实际只有 3 种不同的传动比 ,因此主轴只能获得  $2 \times 3 \times [(2 \times 2 - 1) + 1] = 24$  级正转转速。同理主轴可获得  $3 \times [(2 \times 2 - 1) + 1] = 12$  级反转转速。

主轴反转时 轴 - 间传动比的值大于正转时传动比的值 ,所以反转转速大于正转转速。主轴反转一般不用于切削 ,而是用于车削螺纹时 ,切削完一刀后 ,使车刀沿螺旋线退回 ,以免下一次切削时“乱扣”。转速高 ,可节省辅助时间。

2) 车削螺纹传动链 CA6140 型车床能够车削米制、英制、模数制和径节制四种标准螺纹 ,还能够车削大导程、非标准和较精密的螺纹 ,这些螺纹可以是左旋的也可以是右旋的。车削螺纹传动链的作用 ,就是要得到上述各种螺纹的导程。

不同标准的螺纹用不同的参数表示其螺距 ,表 8.2.3 列出了米制、英制、模数制和径节制四种螺纹的螺距参数及其与螺距  $P$ 、导程  $L$  之间的换算关系。

表 8.2.3 各种标准螺纹的螺距参数及其与螺距、导程的换算关系

螺纹种类	螺距参数	螺距/mm	导程/mm
米制	螺距 $P/\text{mm}$	$P = P$	$L = KP$
模数制	模数 $m/\text{mm}$	$P_m = m$	$L_m = KP_m = Km$
英制	每英寸牙数 $a(\text{牙}/\text{in})$	$P_a = 25.4/a$	$L_a = KP_a = 25.4 K/a$
径节制	径节 $DP(\text{牙}/\text{in})$	$P_{DP} = 25.4 / DP$	$L_{DP} = KP_{DP} = 25.4 K/DP$

注 :表中  $K$  为螺纹线数

车削螺纹时,必须保证主轴每转一转,刀具准确地移动被加工螺纹的一个导程  $L_T$ ,其运动平衡式为:

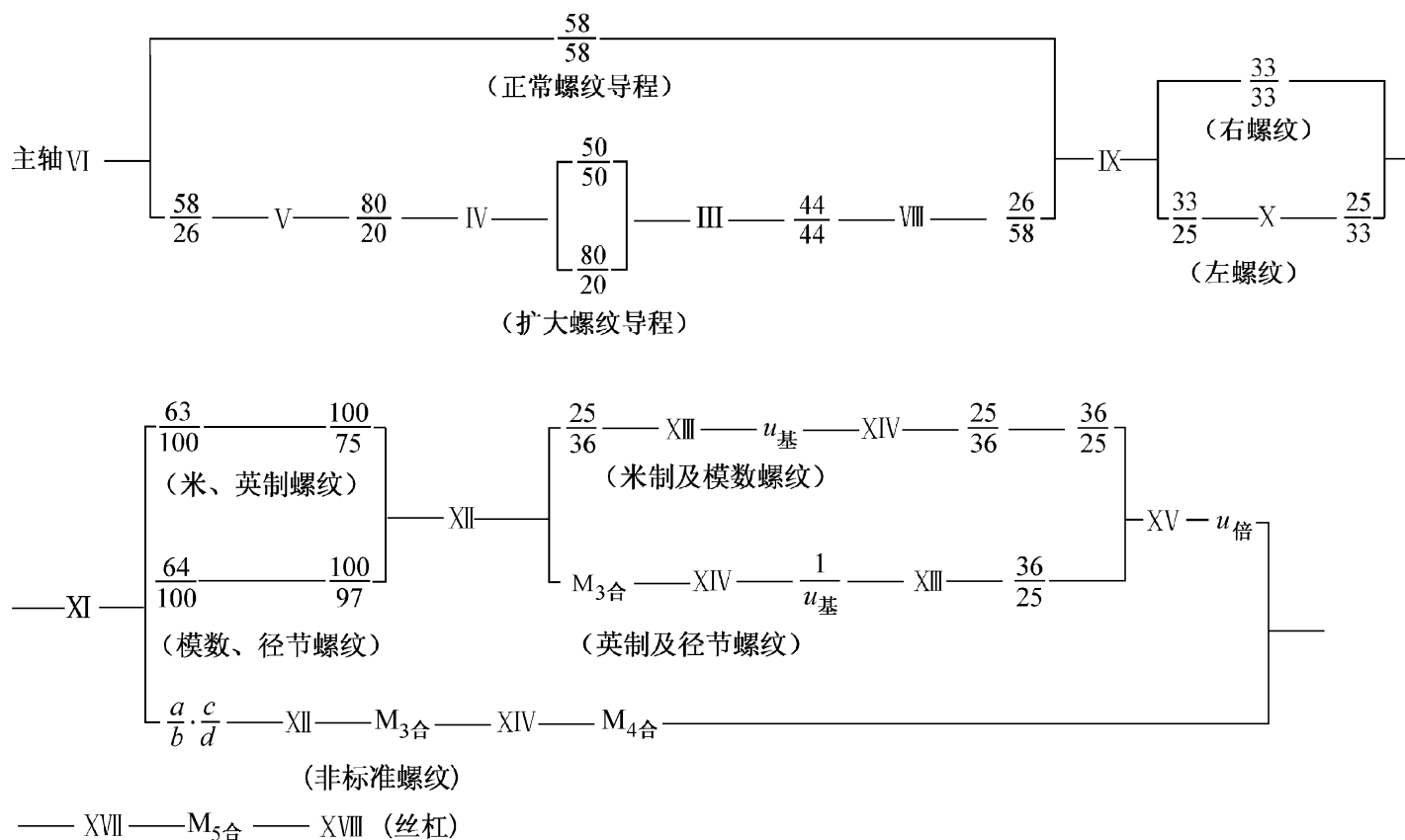
$$1_{(\text{主轴})} \times u \times L_{\text{丝}} = L_T$$

式中  $u$ ——从主轴到丝杠之间的总传动比;

$L_{\text{丝}}$ ——机床丝杠的导程(CA6140型车床  $L_{\text{丝}} = 12 \text{ mm}$ );

$L_T$ ——被加工螺纹的导程,mm;

在这个平衡式中,通过改变传动链中的传动比  $u$ ,就可以得到要加工的螺纹导程。CA6140型车床车削上述各种螺纹时传动路线表达式为:



其中  $u_{\text{基}}$  是轴 和轴 之间变速机构的 8 种传动比,即:

$$u_{\text{基}1} = \frac{26}{28} = \frac{6.5}{7}; u_{\text{基}2} = \frac{28}{28} = \frac{7}{7}; u_{\text{基}3} = \frac{32}{28} = \frac{8}{7}; u_{\text{基}4} = \frac{36}{28} = \frac{9}{7};$$

$$u_{\text{基}5} = \frac{19}{14} = \frac{9.5}{7}; u_{\text{基}6} = \frac{20}{14} = \frac{10}{7}; u_{\text{基}7} = \frac{33}{21} = \frac{11}{7}; u_{\text{基}8} = \frac{36}{21} = \frac{12}{7};$$

上述变速机构是获得各种螺纹的基本机构,称为基本螺距机构或称基本组。 $u_{\text{倍}}$  是轴 和轴 之间变速机构的 4 种传动比,即:

$$u_{\text{倍}1} = \frac{18}{45} \times \frac{15}{48} = \frac{1}{8}; \quad u_{\text{倍}2} = \frac{28}{35} \times \frac{15}{48} = \frac{1}{4};$$

$$u_{\text{倍}3} = \frac{18}{45} \times \frac{35}{28} = \frac{1}{2}; \quad u_{\text{倍}4} = \frac{28}{35} \times \frac{35}{28} = 1.$$

上述 4 种传动比按倍数关系排列。用于扩大机床车削螺纹导程的种数。这个变速机构称为增倍机构或增倍组。

在加工正常螺纹导程时,主轴 直接传动轴 ,其间传动比  $u_{\text{正常}} = \frac{58}{58} = 1$ ,此时能加工的最

大螺纹导程  $L = 12 \text{ mm}$ 。如果需要车削导程更大的螺纹时,可将轴 的滑移齿轮 58 向右移动,使之与轴 上的齿轮 26 啮合,从主轴 至轴 间的传动比为:

$$u_{f1} = \frac{58}{26} \times \frac{80}{20} \times \frac{50}{50} \times \frac{44}{44} \times \frac{26}{58} = 4$$

$$u_{f2} = \frac{58}{26} \times \frac{80}{20} \times \frac{80}{20} \times \frac{44}{44} \times \frac{26}{58} = 16$$

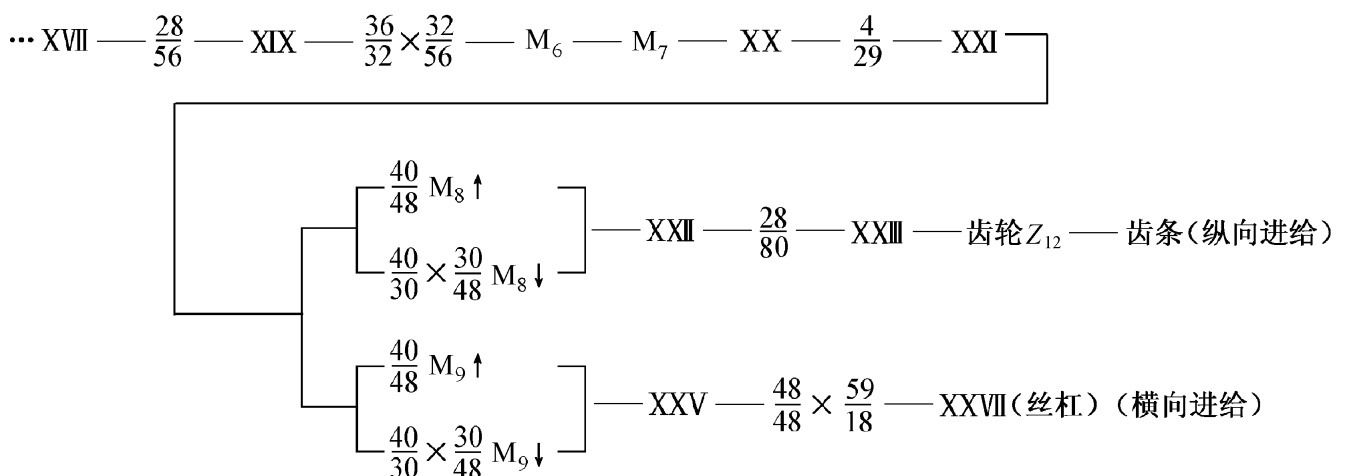
这表明,当车削螺纹传动链其他部分不变时,只做上述调整,便可使螺纹导程比正常导程相应地扩大 4 倍或 16 倍。通常把上述传动机构称之为扩大螺距机构。在 CA6140 型车床上,通过扩大螺距机构所能车削的最大米制螺纹导程为 192 mm。

必须指出,扩大螺距机构的传动比  $u_f$  是由主运动传动链中背轮机构齿轮的啮合位置所确定的,而背轮机构一定的齿轮啮合位置,又对应一定的主轴转速,因此,主轴转速一定时,螺纹导程可能扩大的倍数是确定的。具体地说,主轴转速是 10 ~ 32 r/min 时,导程可扩大 16 倍;主轴转速是 40 ~ 125 r/min 时,导程可扩大 4 倍;主轴转速更高时,导程不能扩大。这也正好符合大导程螺纹只能在低速时车削的实际需要。

当需要车削非标准螺纹和精密螺纹时,需将进给箱中的齿式离合器  $M_3$ 、 $M_4$  和  $M_5$  全部接合上,此时,轴 、 和丝杠 联成一体,运动由挂轮直接传给丝杠,被加工螺纹的导程  $L_T$  可通过选配挂轮来实现,因此可以车削任意导程的非标准螺纹。同时,由于传动链大大地缩短,减少了传动件制造和装配误差对螺纹螺距精度的影响,若选用高精度的齿轮作为挂轮,则可加工精密螺纹。挂轮换置公式为:

$$u_{挂} = \frac{a}{b} \times \frac{c}{d} = \frac{L_T}{12}$$

3) 纵向和横向机动进给传动链 纵向进给一般用于外圆车削,而横向进给用于端面车削。为了减少丝杠的磨损和便于操纵,机动进给是由光杠经溜板箱传动的,其传动路线表达式为:



CA6140 型车床纵向机动进给量有 64 级。其中,当进给运动由主轴经正常螺距米制螺纹传动路线时,可获得范围为 0.08 ~ 1.22 mm/r 的 32 级正常进给量;当进给运动由主轴经正常螺距英制螺纹传动路线时,可获得 0.86 ~ 1.59 mm/r 的 8 级较大进给量;若接通扩大螺距机构,选用米制螺纹传动路线,并使  $u_{挂} = 1/8$ ,可获得 0.028 ~ 0.054 mm/r 的 8 级用于高速精车的细进给量;而接通扩大螺距机构,采用英制螺纹传动路线,并适当调整增倍机构,可获得范围为 1.71 ~ 6.33 mm/r 的 16 级供强力切削或宽刃精车之用的加大进给量。

分析可知,当主轴箱及进给箱中的传动路线相同时,所得到的横向机动进给量级数与纵向相同,且横向进给量  $f_{横} = 1/2 f_{纵}$ 。这是因为横向进给经常用于切槽或切断,容易产生振动,切削条件差,故使用较小进给量。

4) 刀架快速移动传动链 刀架的快速移动是由装在溜板箱内的快速电动机(0.25 kW, 2 800 r/min)驱动的。按下快速移动按钮,启动快速电动机后,由溜板箱中的双向离合器  $M_6$  和  $M_7$  控制其纵、横双向快速移动。

刀架快速移动时,可不必脱开机动进给传动链,在齿轮 56 与轴 之间装有超越离合器  $M_6$ , 可保证光杠和快速电机同时传给轴 运动而不相互干涉。

### 8.2.3 外圆表面的磨削加工

用磨具以较高的线速度对工件表面进行加工的方法称为磨削。磨削加工是一种多刀多刃的高速切削方法,它适用于零件精加工和硬表面的加工。

磨削的工艺范围很广,可以划分为粗磨、精磨、细磨及镜面磨。各种磨削方案所能达到的经济加工精度和表面粗糙度值见表 8.2.1。

磨削加工采用的磨具(或磨料)具有颗粒小,硬度高,耐热性好等特点,因此可以加工较硬的金属材料和非金属材料,如淬硬钢、硬质合金刀具、陶瓷等;加工过程中同时参与切削运动的颗粒多,能切除极薄极细的切屑,因而加工精度高,表面粗糙度值小。磨削加工作为一种精加工方法,在生产中得到广泛应用。目前,由于强力磨削的发展,也可以直接将毛坯磨削到所需要的尺寸和精度,从而获得了较高的生产率。

#### 1. 砂轮的特性与选择

砂轮是磨削加工中最主要的一类磨具。砂轮是在磨料中加入结合剂,经压坯、干燥和焙烧而制成的多孔体。由于磨料、结合剂及制造工艺等不同,砂轮的特性差别很大,因此对磨削的加工质量、生产率和经济性有着重要影响。砂轮的特性主要是由磨料、粒度、结合剂、硬度、组织、形状和尺寸等因素决定的。

##### (1) 磨料

磨料是砂轮的主要组成成分,它应具有很高的硬度、耐磨性、耐热性和一定的韧性,以承受磨削时的切削热和切削力,同时还应具备锋利的尖角,以利磨削金属。常用磨料代号、特点及应用范围见表 8.2.4。

表 8.2.4 常用磨料代号、特性及适用范围

系别	名称	代号	主要成分	显微硬度(HV)	颜色	特性	适用范围
氧化物系	棕刚玉	A	$Al_2O_3$ 91~96%	2 200~2 280	棕褐色	硬度高,韧性好,价格便宜	磨削碳钢、合金钢、可锻铸铁、硬青铜
	白刚玉	WA	$Al_2O_3$ 97~99%	2 200~2 300	白色	硬度高于棕刚玉,磨粒锋利,韧性差	磨削淬硬的碳钢、高速钢

续表

系别	名称	代号	主要成分	显微硬度 (HV)	颜色	特性	适用范围
碳化物系	黑碳化硅	C	SiC > 95%	2 840 ~ 3 320	黑色带 光泽	硬度高于刚玉,性脆而锋利,有良好的导热性和导电性	磨削铸铁、黄铜、铝及非金属
	绿碳化硅	GC	SiC > 99%	3 280 ~ 3 400	绿色带 光泽	硬度和脆性高于黑碳化硅,有良好的导热性和导电性	磨削硬质合金、宝石、陶瓷、光学玻璃、不锈钢
高硬磨料	立方氮化硼	CBN	立方氮化硼	8 000 ~ 9 000	黑色	硬度仅次于金刚石,耐磨性和导电性好,发热量小	磨削硬质合金、不锈钢、高合金钢等难加工材料
	人造金刚石	MBD	碳结晶体	10 000	乳白色	硬度极高,韧性很差,价格昂贵	磨削硬质合金、宝石、陶瓷等高硬度材料

## (2) 粒度

粒度是指磨料颗粒尺寸的大小。粒度分为磨粒和微粉两类。对于颗粒尺寸大于 40 μm 的磨料称为磨粒。用筛选法分级,粒度号以磨粒通过的筛网上每英寸长度内的孔眼数表示。如 60# 的磨粒表示其大小刚好能通过每英寸长度上有 60 孔眼的筛网。对于颗粒尺寸小于 40 μm 的磨料称为微粉。用显微测量法分级,用 W 和后面的数字表示粒度号,其 W 后的数值代表微粉的实际尺寸。如 W20 表示微粉实际尺寸为 20 μm。

砂轮的粒度对磨削表面的粗糙度和磨削效率影响很大。磨粒粗,磨削深度大,生产率高,但表面粗糙度值大。反之,则磨削深度均匀,表面粗糙度值小。所以粗磨时,一般选粗粒度,精磨时选细粒度。磨软金属时,多选用粗磨粒,磨削脆而硬材料时,则选用较细的磨粒。粒度的选用见表 8.2.5。

表 8.2.5 磨料粒度的选用

粒度号	颗粒尺寸范围/μm	适用范围	粒度号	颗粒尺寸范围/μm	适用范围
12 ~ 36	2 000 ~ 1 600 500 ~ 400	粗磨、荒磨、切断钢坯、打磨毛刺	W40 ~ W20	40 ~ 28 20 ~ 14	精磨、超精磨、螺纹磨、珩磨
46 ~ 80	400 ~ 315 200 ~ 160	粗磨、半精磨、精磨	W14 ~ W10	14 ~ 10 10 ~ 7	精磨、精细磨、超精磨、镜面磨
100 ~ 280	165 ~ 125 50 ~ 40	精磨、成形磨、刀具刃磨、珩磨	W7 ~ W3.5	7 ~ 5 3.5 ~ 2.5	超精磨、镜面磨、制作研磨剂等

## (3) 结合剂

结合剂是把磨粒粘结在一起组成磨具的材料。砂轮的强度、抗冲击性、耐热性及耐腐蚀性,

主要取决于结合剂的种类和性质。常用结合剂的种类、性能及适用范围见表 8.2.6。

表 8.2.6 常用结合剂的种类、性能及适用范围

种类	代号	性能	用途
陶瓷	V	耐热性、耐腐蚀性好、气孔率大、易保持轮廓、弹性差	应用最广,适用于 $v < 35$ m/s 的各种成形磨削、磨齿轮、磨螺纹等
树脂	B	强度高、弹性大、耐冲击、坚固性和耐热性差、气孔率小	适用于 $v > 50$ m/s 的高速磨削,可制成薄片砂轮,用于磨槽、切割等
橡胶	R	强度和弹性更高、气孔率小、耐热性差、磨粒易脱落	适用于无心磨的砂轮和导轮、开槽和切割的薄片砂轮、抛光砂轮等
金属	M	韧性和成形性好、强度大、但自锐性差	可制造各种金刚石磨具

#### (4) 硬度

砂轮硬度是指砂轮工作时,磨粒在外力作用下脱落的难易程度。砂轮硬,表示磨粒难以脱落,砂轮软,表示磨粒容易脱落。砂轮的硬度等级见表 8.2.7。

表 8.2.7 砂轮的硬度等级及代号

硬度等级	大级	超软			软			中软		中		中硬			硬		超硬
	小级	超软			软 1	软 2	软 3	中软 1	中软 2	中 1	中 2	中硬 1	中硬 2	中硬 3	硬 1	硬 2	超硬
代号		D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	Y

砂轮的硬度与磨料的硬度是两个完全不同的概念。硬度相同的磨料可以制成硬度不同的砂轮,砂轮的硬度主要决定于结合剂性质、数量和砂轮的制造工艺。例如,结合剂与磨粒粘固程度越高,砂轮硬度越高。

砂轮硬度的选用原则是:工件材料硬,砂轮硬度应选用软一些,以便砂轮磨钝磨粒及时脱落,露出锋利的新磨粒继续正常磨削;工件材料软,因易于磨削,磨粒不易磨钝,砂轮应选硬一些。但对于有色金属、橡胶、树脂等软材料磨削时,由于切屑容易堵塞砂轮,应选用较软砂轮。粗磨时,应选用较软砂轮,而精磨、成形磨削时,应选用硬一些砂轮,以保持砂轮的必要形状精度。机械加工中常用砂轮硬度等级为 H 至 N(软 2 ~ 中 2)。

#### (5) 组织

砂轮的组织是指组成砂轮的磨粒、结合剂、气孔三部分体积的比例关系。通常以磨粒所占砂轮体积的百分比来分级。砂轮有三种组织状态:紧密、中等、疏松;细分成 0 ~ 14 号间,共 15 级。组织号越小,磨粒所占比例越大,砂轮越紧密;反之,组织号越大,磨粒比例越小,砂轮越疏松,见表 8.2.8。

#### (6) 形状与尺寸


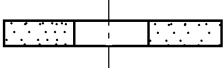

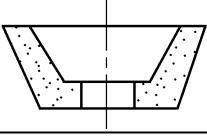
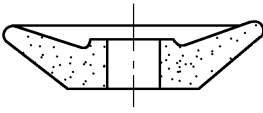
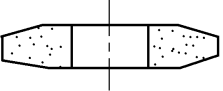

砂轮的形状和尺寸是根据磨床类型、加工方法及工件的加工要求来确定的。常用砂轮名称、形状简图、代号和主要用途见表 8.2.9。

表 8.2.8 砂轮组织分类

组织号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
磨粒率/%	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	
类别	紧密				中等				梳松							
应用	精磨、成形磨				淬火工件、刀具				韧性大和硬度低的金属							

砂轮的特性均标记在砂轮的侧面上,其顺序是:形状代号、尺寸、磨料、粒度号、硬度、组织号、结合剂、线速度。例如:外径 300 mm,厚度 50 mm,孔径 75 mm,棕刚玉,粒度 60,硬度 L,5 号组织,陶瓷结合剂,最高工作线速度 35 m/s 的平行砂轮,其标记为:砂轮 1 - 300 × 55 × 75 - A60L5V - 35 m/s。

表 8.2.9 常用砂轮形状、代号和用途

砂轮名称	代号	简 图	主要用途
平行砂轮	1		外圆磨、内圆磨、平面磨、无心磨、工具
薄片砂轮	41		切断及切槽
筒形砂轮	2		端磨平面
碗形砂轮	11		刃磨刀具、磨导轨
蝶形 1 号砂轮	12a		磨铣刀、铰刀、拉刀、磨齿轮
双斜边砂轮	4		磨齿轮及螺纹
杯形砂轮	6		磨平面、内圆、刃磨刀具

## 2. 外圆磨床的磨削方法



外圆表面磨削一般在外圆磨床或无心外圆磨床上进行,也可采用砂带磨床磨削。在外圆磨床上磨削工件外圆时,轴类零件常用顶尖装夹,其方法与车削时基本相同,但磨床所用顶尖不随工件一起转动。这样,主轴与轴承的制造误差、轴承间隙、顶尖的同轴度误差等就不会反映到工件上,可提高加工精度。盘套类工件则用心轴和顶尖装夹,所用心轴和车削心轴基本相同,只是形状和位置精度以及表面粗糙度要求较严格。磨削短又无中心孔的轴类工件时,可用三爪自定心卡盘或四爪单动卡盘装夹。

在外圆磨床上常用的磨削方法有:

### (1) 纵磨法

如图 8.2.9a 砂轮高速旋转起切削作用,工件旋转作圆周进给运动,并和工作台一起作纵向往复直线进给运动。工作台每往复一次,砂轮沿磨削深度方向完成一次横向进给,每次进给(吃刀深度)都很小,全部磨削余量是在多次往复行程中完成的。当工件磨削接近最终尺寸时(尚有余量 0.005 ~ 0.01 mm),应无横向进给光磨几次,直到火花消失为止。纵磨法加工精度和表面质量较高,适应性强,用同一砂轮可磨削直径和长度不同的工件,但生产率低。在单件、小批量生产及精磨中应用广泛,特别适用于磨削细长轴等刚性差的工件。

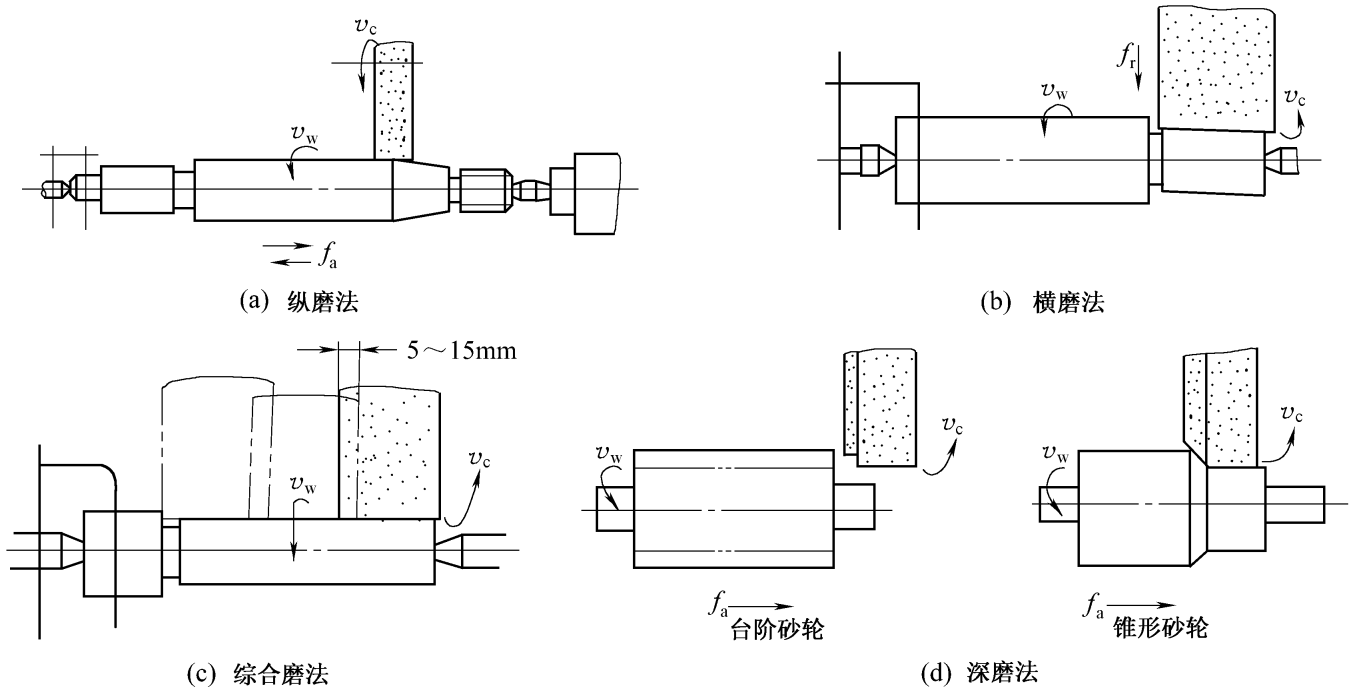


图 8.2.9 外圆磨床的磨削方法

### (2) 横磨法(切入法)

如图 8.2.9b,磨削时,工件不作纵向往复运动,砂轮以缓慢的速度连续或间断地向工件作横向进给运动,直到磨去全部余量。横磨时,工件与砂轮的接触面积大,磨削力大,发热量大而集中,所以易发生工件变形、烧刀和退火。横磨法生产效率高,适用于成批或大量生产中,磨削长度短、刚性好、精度低的外圆表面及两侧都有台肩的轴颈。若将砂轮修整成形,也可直接磨削成形面。

### (3) 综合磨法

如图 8.2.9c,先用横磨法将工件分段进行粗磨,相邻之间有 5 ~ 15 mm 的搭接,每段上留有 0.01 ~ 0.03 mm 的精磨余量,精磨时采用纵磨法。这种磨削方法综合了纵磨和横磨法的优点,适

用于磨削余量较大(余量 0.7 ~ 0.6 mm)的工件。

#### (4) 深磨法

磨削时,采用较小的纵向进给量(1 ~ 2 mm/r)和较大的吃刀深度(0.2 ~ 0.6 mm)在一次走刀中磨去全部余量。为避免切削负荷集中和砂轮外圆棱角迅速磨钝,应将砂轮修整成锥形或台阶形,外径小的台阶起粗磨作用,可修粗些,外径大的起精磨作用,修细些。深磨法可获得较高精度和生产率,表面粗糙度值较小,适用于大批大量生产中,加工刚性好的短轴。

### 3. 无心外圆磨床的磨削方法

在无心磨床磨削工件外圆时,工件不用顶尖来定心和支承,而是直接将工件放在砂轮和导轮(用橡胶结合剂做的粒度较粗的砂轮)之间,由托板支承,工件被磨削的外圆面作定位面,见图 8.2.10a。无心外圆磨床有两种磨削方式。

#### (1) 贯穿磨削法(纵磨法)

如图 8.2.10b,磨削时将工件从机床前面放到托板上,推入磨削区,由于导轮轴线在垂直平面内倾斜,角( $\alpha = 1^\circ \sim 6^\circ$ ),导轮与工件接触处的线速度  $v_{导}$  可以分解成水平和垂直两个方向的分速度  $v_{导水平}$  和  $v_{导垂直}$ ,  $v_{导垂直}$  控制工件的圆周进给运动; $v_{导水平}$  使工件作纵向进给。所以工件进入磨削区后,便既作旋转运动,又作轴向移动,穿过磨削区,工件就磨削完毕。角增大、生产率高,但表面粗糙度值增大;反之,情况相反。为保证导轮与工件呈线接触状态,需将导轮形状修整成回转双曲面形。这种磨削方法不适用带台阶的圆柱形工件。

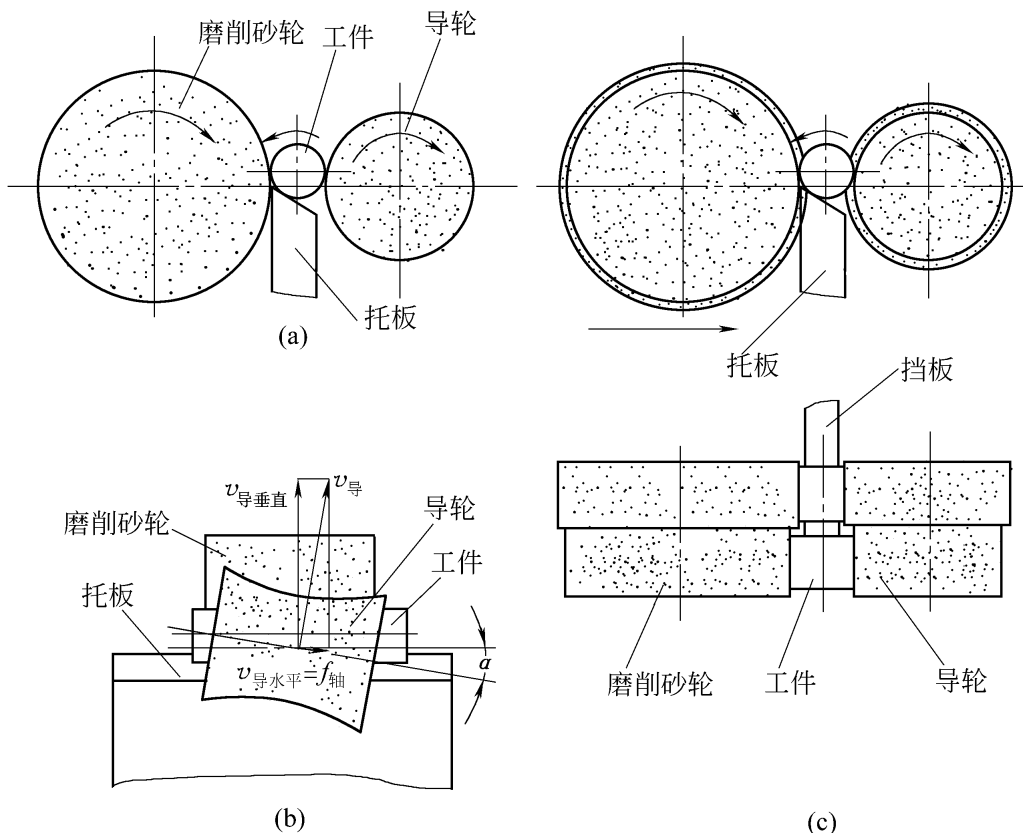


图 8.2.10 无心外圆磨削的加工示意图

#### (2) 切入磨削法(横磨法)

先将工件放在托板和导轮之间,然后由工件(连同导轮)或磨削砂轮横向切入进给,磨削工件

表面。这时导轮的中心线仅倾斜很小角度(约  $30^\circ$ ) ,以便对工件产生一微小的轴向推力 ,使它靠住挡板 ,得到可靠轴向定位 ,见图 8.2.10c。切入磨法适用于磨削有阶梯或成形回转表面的工件 ,但磨削表面长度不能大于磨削砂轮宽度。

在磨床上磨削外圆表面时 ,应采用充足的切削液 ,一般磨钢件多用苏打水或乳化液 ;铝件采用加少量矿物油的煤油 ;铸铁、青铜件一般不用切削液 ,而用吸尘器清除尘屑。

#### 4. M1432A 型万能外圆磨床

M1432A 型万能外圆磨床主要用于磨削内外圆柱面、内外圆锥面、阶梯轴轴肩以及端面和简单的成形回转表面等。它属于普遍精度级机床 ,磨削精度可达 IT7 ~ IT6 级 ,表面粗糙度  $Ra$  值在  $1.25 \sim 0.08 \mu\text{m}$  之间。这种机床万能性强 ,但自动化程度较低 ,磨削效率不高 ,适用于工具车间 ,维修车间和单件小批生产类型。其主要参数为 :最大磨削直径为 320 mm。

图 8.2.11 为 M1432A 型万能外圆磨床外形图。由图可见 ,在床身 1 的纵向导轨上装有工作台 8 ,台面上装有头架 2 和尾架 5 ,用以夹持不同长度的工件 ,头架带动工件旋转。工作台由液压传动沿床身导轨往复移动 ,使工件实现纵向进给运动。工作台由上下两层组成 ,其上部可相对下部在水平面内偏转一定的角度(一般不大于  $\pm 10^\circ$ ) ,以便磨削锥度不大的圆锥面。砂轮架 4 安装在滑鞍 6 上 ,转动横向进给手轮 7 ,通过横向进给机构带动滑鞍及砂轮架作快速进退或周期性自动切入进给。内圆磨具 3 放下时用以磨削内圆(图示处于抬起状态)。

图 8.2.12 为万能外圆磨床的典型加工方法 :图 a 为用纵磨法磨削外圆柱面 ,图 b 为扳转工作台用纵磨法磨削长圆锥面 ,图 c 为扳动砂轮架用切入法磨削短圆锥面 ,图 d 为扳动头架用纵磨法磨削圆锥面 ,图 e 为用内圆磨具磨削圆柱孔。

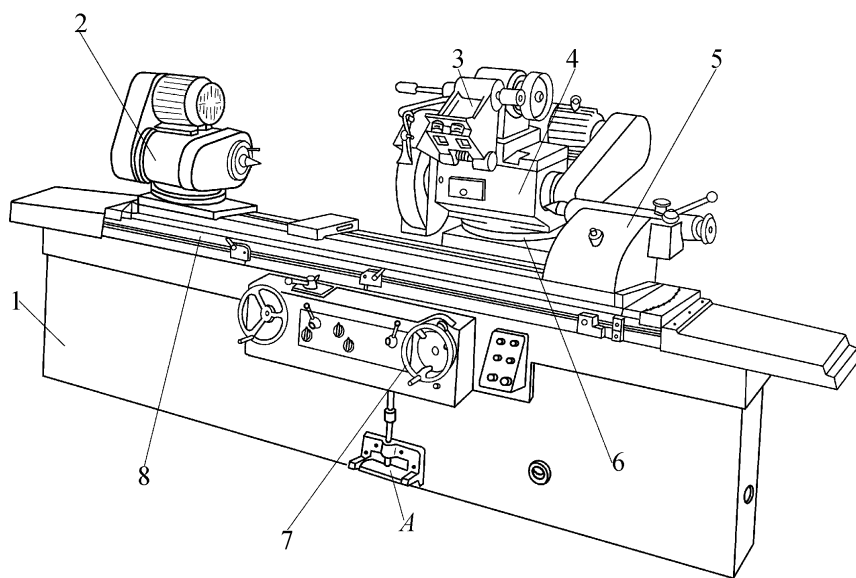


图 8.2.11 M1432A 型万能外圆磨床

1—床身 ; 2—头架 ; 3—内圆磨具 ; 4—砂轮架 ; 5—尾架 ;  
6—滑鞍 ; 7—手轮 ; 8—工作台 ; A—脚踏操纵板

分析 M1432A 型万能外圆磨床的典型加工方法可知 ,机床必须具备以下运动 :外圆磨和内圆磨砂轮的旋转主运动 ;工件圆周进给运动 ;工件(工作台)往复纵向进给运动 ;砂轮横向进给运动。此外 ,机床还应有两个辅助运动 :砂轮横向快速进退和尾架套筒缩回 ,以便装卸工件。

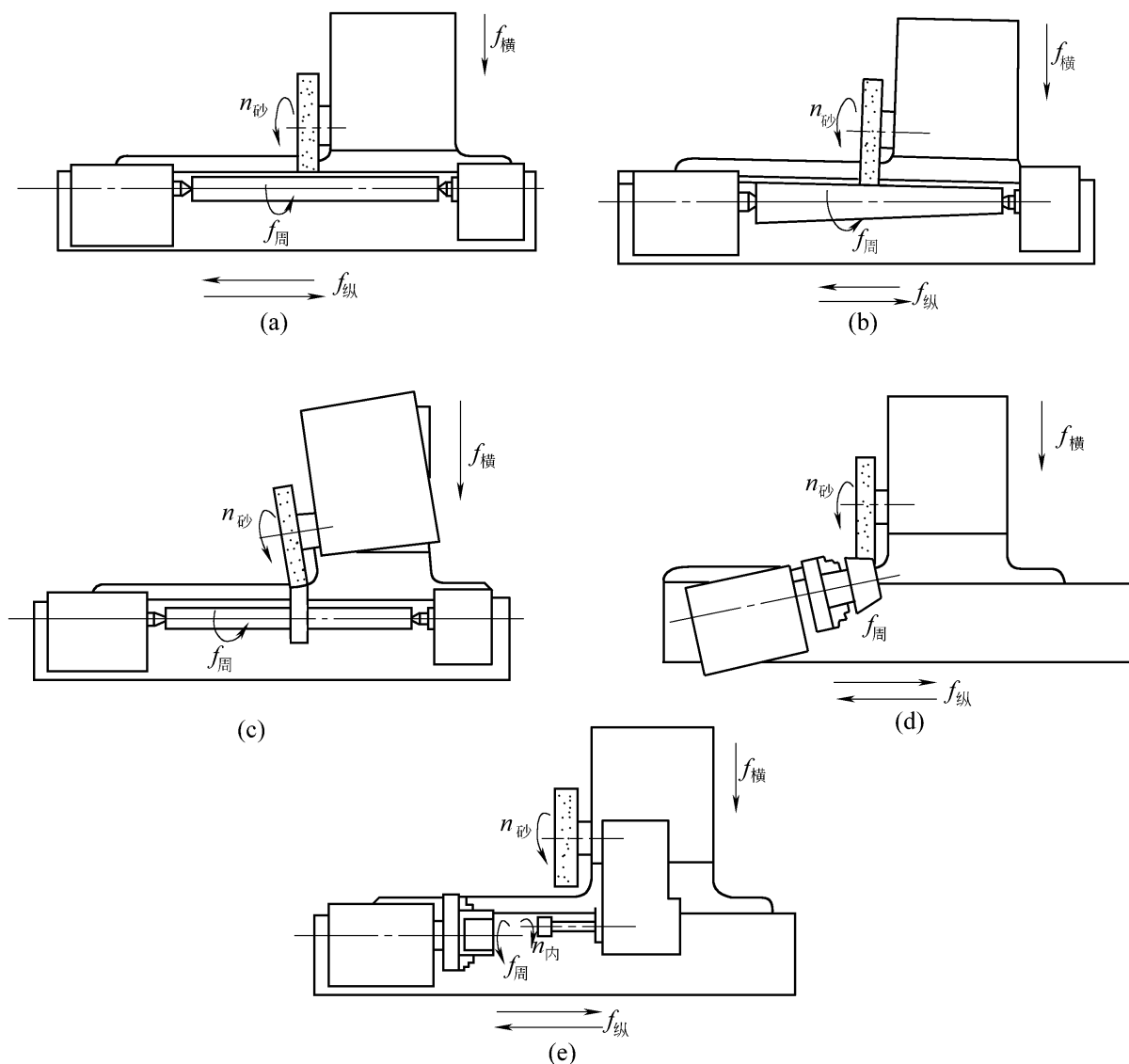


图 8.2.12 万能外圆磨床典型加工示意图

## 8.3 内圆表面加工

### 8.3.1 内圆表面的加工方法

内圆表面(即内孔)也是组成零件的基本表面之一。零件上有多种多样的孔,如螺钉、螺栓的紧固孔,套筒、法兰盘及齿轮等回转体零件上的孔;箱体类零件上的主轴及传动轴的轴承孔;炮筒、空心轴内的深孔(一般 $l/d > 10$ );以及常用于保证零件间配合准确性的圆锥孔等。

与外圆表面的加工相比,内圆表面的加工条件差,因为孔加工刀具或磨具的尺寸(直径、长度)受被加工孔本身尺寸的限制,刀具的刚性差,容易产生弯曲变形及振动;切削过程中,孔内排屑、散热、冷却、润滑条件差。因此,孔的加工精度和表面粗糙度都不容易控制。此外,大部分孔加工刀具为定尺寸刀具,刀具直径的制造误差和磨损,将直接影响孔的加工精度。故在一般情况下,加工孔比加工同样尺寸、精度的外圆表面要困难些。当一个零件要求内圆表面与外圆表面必须保持某种确定关系时,一般总是先加工内圆表面,然后再以内圆表面定位加工外圆表面。

内圆表面的可以在车、钻、镗、拉、磨床上进行。常用的加工方法有:钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、

拉孔和磨孔等。选择加工方法时,应考虑孔径大小、深度、精度、工件形状、尺寸、重量、材料、生产批量及设备具体条件。对于精度要求较高的孔,最后还须经珩磨或研磨及滚压等精密加工。

内圆表面的各种加工方案及其所能到的经济加工精度和表面粗糙度值,详见表 8.3.1。

表 8.3.1 内圆表面加工方案

序号	加工方案	经济精度级	表面粗糙度 $Ra$ 值/ $\mu\text{m}$	适用范围
1	钻	IT12 ~ IT11	12.5	加工未淬火钢及铸铁实心毛坯,也可加工有色金属(但表面粗糙度稍粗糙,孔径小于 15 ~ 20 mm)
2	钻—铰	IT9	3.2 ~ 1.6	
3	钻—铰—精铰	IT8 ~ IT7	1.6 ~ 0.8	
4	钻—扩	IT11 ~ IT10	12.5 ~ 6.3	同上,但孔径大于 15 ~ 20 mm
5	钻—扩—铰	IT9 ~ IT8	3.2 ~ 1.6	
6	钻—扩—粗铰—精铰	IT7	1.6 ~ 0.8	
7	钻—扩—机铰—手铰	IT7 ~ IT6	0.4 ~ 0.1	
8	钻—扩—拉	IT9 ~ IT7	1.6 ~ 0.1	大批大量生产(精度由拉刀精度决定)
9	粗镗(或扩孔)	IT12 ~ IT11	12.5 ~ 6.3	除淬火钢外各种材料,毛坯有铸出孔或锻出孔
10	粗镗(粗扩)—半精镗(精扩)	IT9 ~ IT8	3.2 ~ 1.6	
11	粗镗(扩)—半精镗(精扩)—精镗(铰)	IT8 ~ IT7	1.6 ~ 0.8	
12	粗镗(扩)—半精镗(精扩)—精镗—浮动镗刀精镗	IT7 ~ IT6	0.8 ~ 0.4	
13	粗镗(扩)—半精镗—磨孔	IT8 ~ IT7	0.8 ~ 0.2	主要用于淬火钢,也可用于未淬火钢,但不宜用于有色金属
14	粗镗(扩)—半精镗—粗磨—精磨	IT7 ~ IT6	0.2 ~ 0.1	
15	粗镗—半精镗—精镗—金刚镗	IT7 ~ IT6	0.4 ~ 0.05	主要用于精度要求高的有色金属加工
16	钻—(扩)—粗铰—精铰—珩磨; 钻—(扩)—拉—珩磨; 粗镗—半精镗—精镗—珩磨	IT7 ~ IT6	0.2 ~ 0.025	精度要求很高的孔
17	以研磨代替上述方案中珩磨	IT6 级以上		

### 8.3.2 钻削加工

用钻头在实体材料上加工孔的方法称为钻孔 ;用扩孔钻对已有孔进行扩大再加工的方法称为扩孔。它们统称为钻削加工。钻削加工主要在钻床上进行。钻削加工操作简便 ,适应性强 ,应用很广。

#### 1. 钻孔

钻孔最常用的刀具是麻花钻 ,用麻花钻钻孔属于粗加工。钻孔主要用于质量要求不高的孔的终加工 ,例如螺栓孔、油孔等 ,也可作为质量要求较高孔的预加工。

麻花钻由工具厂专业生产 ,其常备规格为 0.1 ~ 80 mm。麻花钻的结构主要由柄部、颈部及工作部分组成 ,见图 8.3.1。

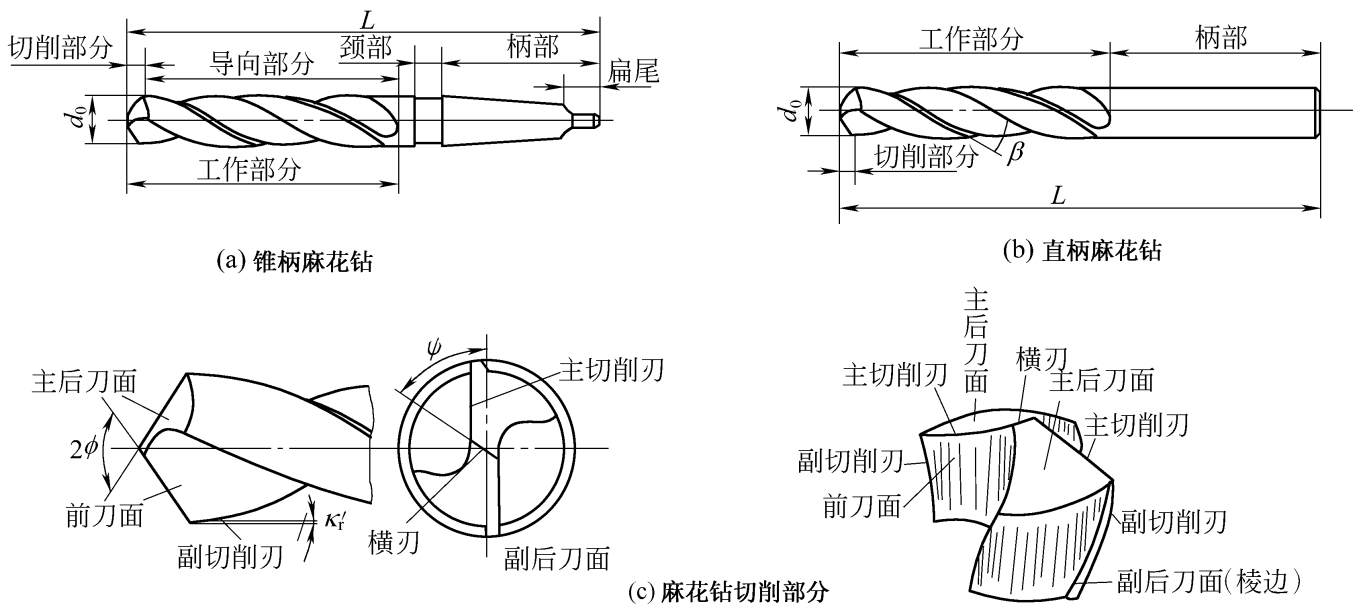


图 8.3.1 麻花钻的结构

柄部是钻头的夹持部分 ,用以传递扭矩和轴向力。柄部有直柄和锥柄两种形式 ,钻头直径小于 12 mm 时制成直柄 ,见图 b ;钻头直径大于 12 mm 时制成莫氏锥度的圆锥柄 ,见图 a。锥柄后端的扁尾可插入钻床主轴的长方孔中 ,以传递较大的扭矩。

颈部是柄部和工作部分的连接部分 ,是磨削柄部时砂轮的退刀槽 ,也是打印商标和钻头规格的地方。直柄钻头一般不制有颈部。

钻头的工作部分包括切削部分和导向部分。切削部分担负主要切削工作 ,如图 c 所示 ,切削部分由两条主切削刃、两条副切削刃和一条横刃及两个前刀面和两个后刀面组成。螺旋槽的一部分为前刀面 ,钻头的顶锥面为主后刀面。导向部分的作用是当切削部分切入工件后起导向作用 ,也是切削部分的后备部分。导向部分有两条螺旋槽和两条棱边 ,螺旋槽起排屑和输送切削液作用 ,棱边起导向、修光孔壁作用。导向部分有微小的倒锥度 ,即从切削部分向柄部每 100 mm 长度上钻头直径  $d$  减少 0.03 ~ 0.12 mm ,以减少与孔壁的摩擦。

麻花钻的主要几何角度有顶角  $2\phi$  ,螺旋角  $\psi$  ,前角  $\kappa_r$  ,后角  $\phi$  ,和横刃斜角  $\psi$  等。这些几何角度对钻削加工的性能、切削力大小 ,排屑情况等都有直接的影响 ,使用时要根据不同加工材料和切削要求来选取。

麻花钻虽然是孔加工的主要刀具,长期以来一直被广泛使用,但是由于麻花钻在结构上存在着比较严重的缺陷,致使钻孔的质量和生产率受到很大影响,这主要表现在:

1) 钻头主切削刃上各点的前角变化很大,钻孔时,外缘处的切削速度最大,而该处的前角最大,刀刃强度最薄弱,因此钻头在外缘处的磨损特别严重。

2) 钻头横刃较长,横刃及其附近的前角为负值,达 $-55^{\circ} \sim -60^{\circ}$ 。钻孔时,横刃处于挤刮状态,轴向抗力较大。同时横刃过长,不利于钻头定心,易产生引偏,致使加工孔的孔径增大,孔不圆或孔的轴线歪斜等。

3) 钻削加工过程是半封闭加工。钻孔时,主切削刃全长同时参加切削,切削刃长,切屑宽,而各点切屑的流出方向和速度各异,切屑呈螺卷状,而容屑槽又受钻头本身尺寸的限制,因而排屑困难,切削液也不易注入切削区域,冷却和散热不良,大大降低了钻头的使用寿命。

## \* 2. 钻深孔

对于孔的深度与直径之比 $L/d=5 \sim 10$ 的普通深孔,可以用加长麻花钻加工;对于孔的深度与直径之比 $L/d > 5 \sim 10$ 的深孔,必须采用特殊结构的深孔钻才能加工。

深孔加工难度大,技术要求高,这是深孔加工的特点所决定的。因此,设计和使用时应注意钻头的导向,防止偏斜;保证可靠的断屑和排屑;采取有效的冷却和润滑措施。下面介绍几种常见深孔钻的工作原理与结构特点。

### (1) 单刃外排屑深孔钻

单刃外排屑深孔钻又称枪钻。主要用于加工直径 $d=3 \sim 20 \text{ mm}$ ,孔深与直径之比 $L/d > 100$ 的小深孔。其工作原理见图 8.3.2。切削时高压切削液(约为 $3.5 \sim 10 \text{ MPa}$ )从钻杆和切削部分的进液孔注入切削区域,以冷却、润滑钻头,切屑经钻杆与切削部分的 V 形槽冲出,因此称之为外排屑。

枪钻的特点是结构较简单,钻头背部圆弧支承面在切削过程起导向定位作用,切削稳定,孔加工直线性好。

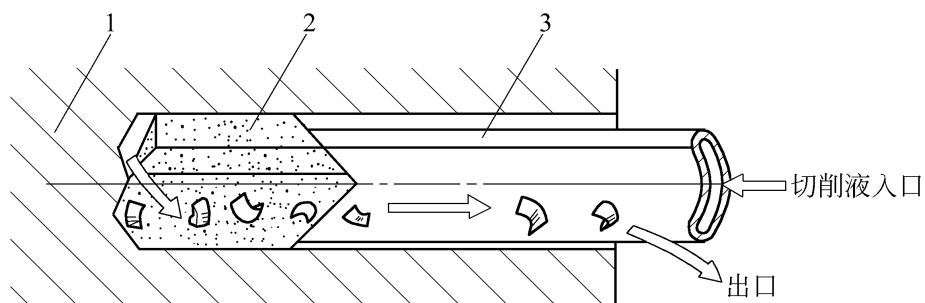


图 8.3.2 单刃外排屑深孔钻工作原理

1—工件;2—切削部分;3—钻杆

### (2) 错齿内排屑深孔钻

错齿内排屑深孔钻适于加工直径 $d > 20 \text{ mm}$ ,孔深与直径比 $L/d < 100$ 的直径较大的深孔。其工作原理见图 8.3.3。切削时高压切削液(约 $2 \sim 6 \text{ MPa}$ )由工件孔壁与钻杆的表面之间的间隙进入切削区,以冷却、润滑钻头切削部分,并利用高压切削液把切屑从钻头和钻管的内孔中冲出。

错齿内排屑深孔钻的切削部分由数块硬质合金刀片交错排列焊接在钻体上,实现了分屑,便于切屑排出,切屑是从钻杆内部排出而不与工件已加工表面接触,所以可获得好的加工表面质

量 分布在钻头前端的硬质合金导向条 ,使钻头支承在孔壁上 ,实现了切削过程中的导向 ,增大了切削过程的稳定性。

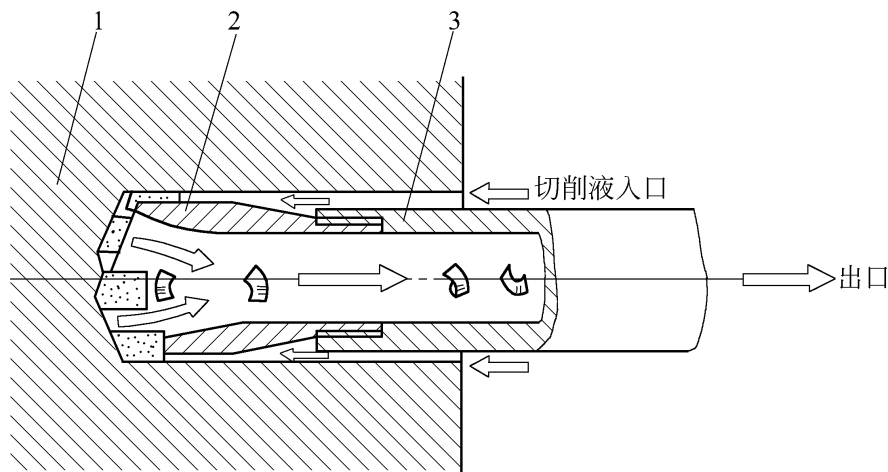


图 8.3.3 错齿内排屑深孔钻工作原理

1—工件 ; 2—钻头 ; 3—钻杆

### (3) 喷吸钻

喷吸钻适用于加工直径  $d=16\sim 65\text{ mm}$  ,孔深与直径比  $L/d<100$  的中等直径一般深孔。喷吸钻主要由钻头、内钻管、外钻管三部分组成 ,钻头部分的结构与错齿内排屑深孔钻基本相同 ,其工作原理见图 8.3.4。工作时 ,切削液以一定的压力(一般为  $0.98\sim 1.96\text{ MPa}$ )从内外钻管之间输入 ,其中  $2/3$  的切削液通过钻头上的小孔压向切削区 ,对钻头切削部分及导向部分进行冷却与润滑 ;另外  $1/3$  切削液则通过内钻管上月牙形槽喷嘴喷入内钻管 ,由于月牙形槽缝隙很窄 ,喷入的切削液流速增大而形成一个低压区 ,切削区的高压与内钻管内的低压形成压力差 ,使切削液和切屑一起被迅速“吸”出 ,提高了冷却和排屑效果 ,所以喷吸钻是一种效率高 ,加工质量好的内排屑深孔钻。

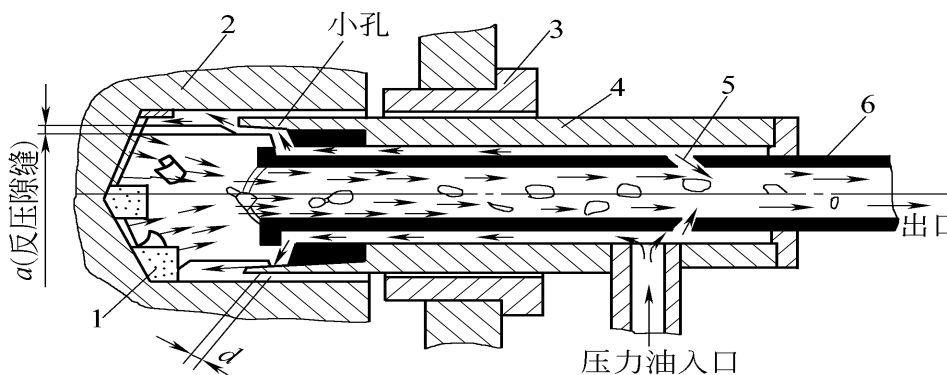


图 8.3.4 喷吸钻工作原理

1—钻头 ; 2—工件 ; 3—钻套 ; 4—外钻管 ; 5—月牙形槽喷嘴 ; 6—内钻管

### 3. 扩孔

扩孔是用扩孔钻对工件上已钻出、铸出或锻出的孔进行扩大加工。扩孔可在一定程度上校正原孔轴线的偏斜 ,扩孔属于半精加工。扩孔常用作铰孔前的预加工 ,对于质量要求不高的孔 ,扩孔也可作孔加工的最终工序。

扩孔用的扩孔钻结构型式分为带柄和套式两类。如图 8.3.5 所示 ,带柄的扩孔钻由工作部



分及柄部组成 ;套式扩孔钻由工作部分及 1:30 锥孔组成。

扩孔钻与麻花钻相比 ,容屑槽浅窄 ,可在刀体上做出 3~4 个切削刃 ,所以可提高生产率。同时 ,切削刃增多 ,棱带也增多 ,使扩孔钻的导向作用提高了 ,切削较稳定。此外 ,扩孔钻没有横刃 ,钻芯粗大 ,轴向力小 ,刚性较好 ,可采用较大的进给量。

选用扩孔钻时应根据被加工孔及机床夹持部分的型式 ,选用相应直径及型式的扩孔钻。通常直柄扩孔钻与适用范围为  $d=3\sim 20\text{ mm}$  ;锥柄扩孔钻适用范围为  $d=7.5\sim 50\text{ mm}$  ,套式扩孔钻主要用于大直径及较深孔的扩孔加工 ,其适用范围为  $d=20\sim 100\text{ mm}$ 。扩孔余量一般为  $0.5\sim 4\text{ mm}$ (直径值)。

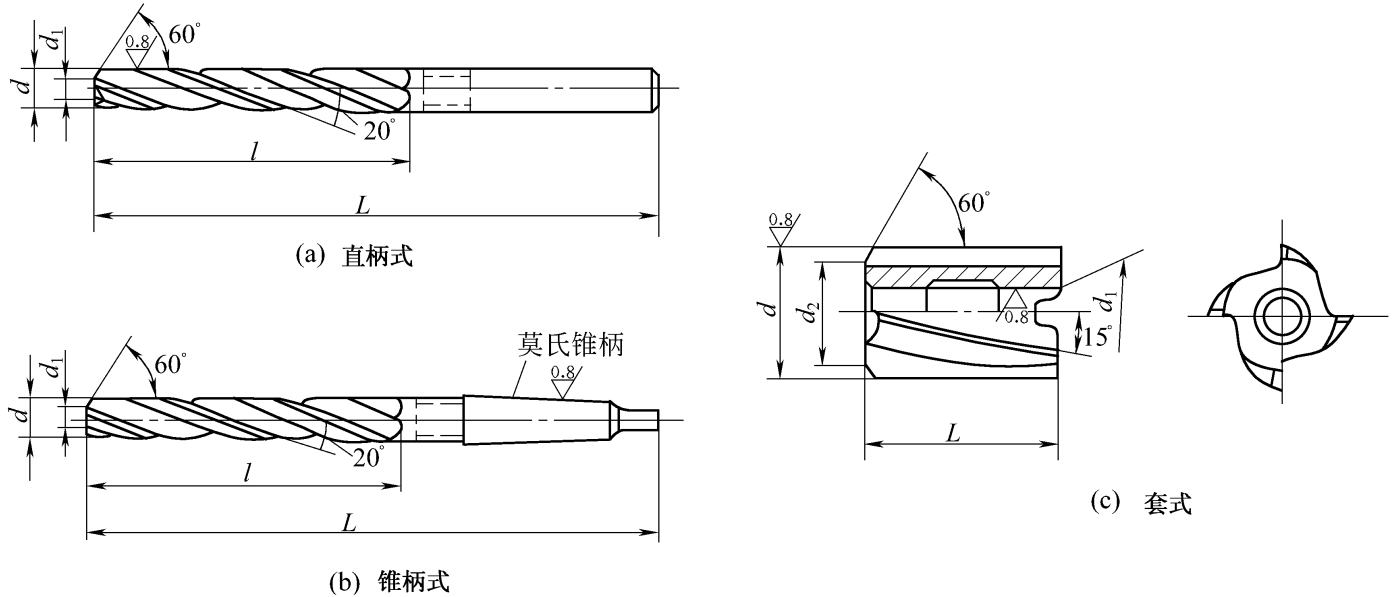


图 8.3.5 扩孔钻类型

#### 4. 铰孔

用铰刀从被加工孔的孔壁上切除微量金属 ,使孔的精度和表面质量得到提高的加工方法 ,称为铰孔。铰孔是应用较普遍的对中小直径孔进行精加工的方法之一 ,它是在扩孔或半精镗孔的基础上进行的。根据铰刀的结构不同 ,铰孔可以加工圆柱孔、圆锥孔 ;可以手动操作 ,也可以在机床上进行。

铰刀的结构如图 8.3.6 所示 ,铰刀由柄部、颈部和工作部分组成。工作部分包括切削部分和修光部分(标准部分)。切削部分为锥形 ,担负主要切削工作。修光部分起校正孔径、修光孔壁和导向作用。为减少修光部分刀齿与已加工孔壁的摩擦 ,并防止孔径扩大 ,修光部分的后端为倒锥形形状。

铰刀可分为手用铰刀和机用铰刀两种。手用铰刀为直柄(见图 a) ,其工作部分较长 ,导向性好 ,可防止铰孔时铰刀歪斜。机用铰刀又分为直柄、锥柄和套式三种(见图 b、c)。

选用铰刀时 ,应该据被加工孔的特点及铰刀的特点正确选用。一般手用铰刀用于小批生产或修配工作中 ,对未淬硬孔进行手工操作的精加工。手用铰刀适用范围为  $d=1\sim 71\text{ mm}$ 。

机用铰刀适用于在车床、钻床、数控机床等机床上使用。主要对钢、合金钢、铸铁、铜、铝等工件的孔进行半精加工和精加工。一般机用铰刀的适用范围为  $d=1\sim 50\text{ mm}$  ,套式机用铰刀适合于较大孔径的加工 ,其范围为  $d=23.6\sim 100\text{ mm}$ 。

另外 ,铰刀分为三个精度等级 ,分别用于不同精度孔的加工(H7、H8、H9)。在选用时 ,应根据

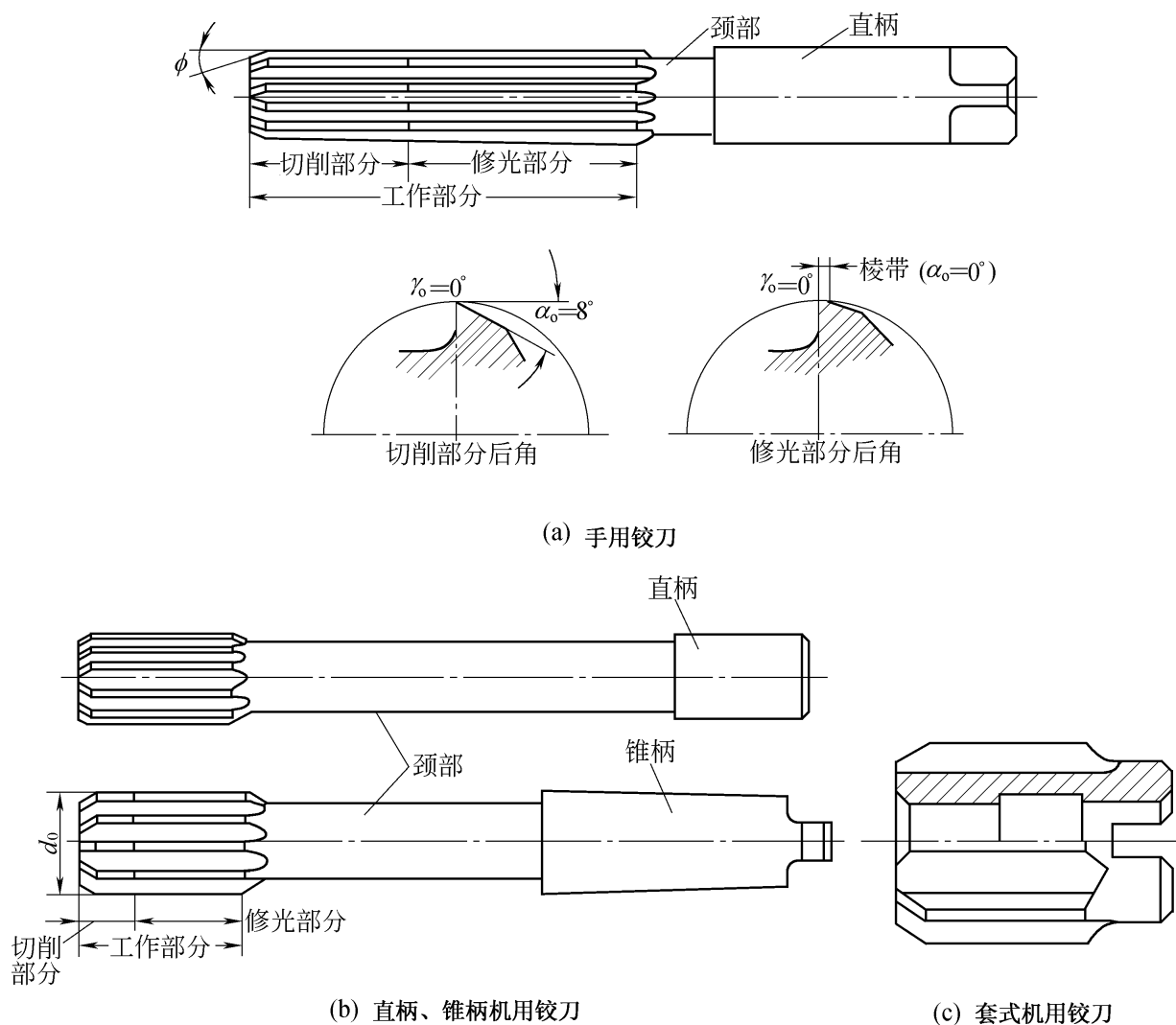


图 8.3.6 铰刀结构

被加工孔的直径、精度和机床夹持部分的型式来选用相应的铰刀。

铰孔生产率高,容易保证孔的精度和表面粗糙度,但铰刀是定值刀具,一种规格的铰刀只能加工一种尺寸和精度的孔,且不宜铰削非标准孔、台阶孔和盲孔。对于中等尺寸以下较精密的孔,钻—扩—铰是生产中经常采用的典型工艺方案。

### 5. 钻床

钻床主要是用钻头钻削直径不大、精度要求较低的孔,此外还可以进行扩孔、铰孔、攻螺纹等加工。加工时,工件固定不动,刀具旋转形成主运动,同时沿轴向移动完成进给运动。钻床的应用很广,其主要加工方法见图 8.3.7。

钻床的主要类型有台式钻床、立式钻床、摇臂钻床以及深孔钻床等。

#### (1) 立式钻床

立式钻床是应用较广的一种机床,其主参数是最大钻孔直径,常用的有 25 mm、35 mm、40 mm 和 50 mm 等几种。

立式钻床的特点是主轴轴线垂直布置,而且位置是固定的。加工时,为使刀具旋转中心线与被加工孔的中心线重合,必须移动工件,因此立式钻床只适用于加工中小工件上直径  $d \leq 50$  mm 的孔。

图 8.3.8 是立式钻床的外形图。变速箱 4 中装有主运动变速传动机构,进给箱 3 中装有进

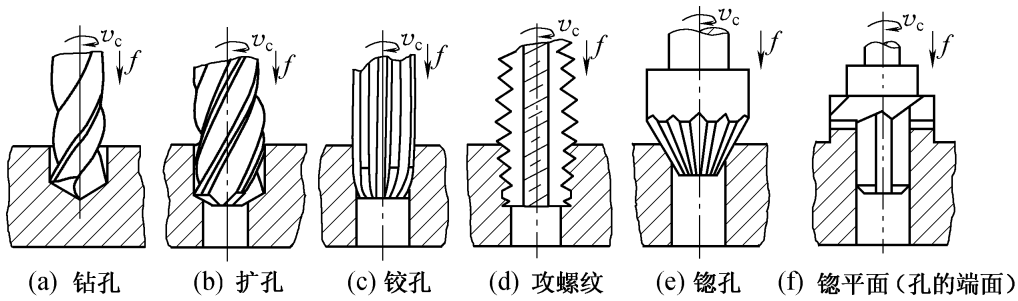


图 8.3.7 钻床的加工方法

给运动变速机构及操纵机构。加工时,进给箱3固定不动,转动操纵手柄6,由主轴2随主轴套筒在进给箱3中作直线移动来完成进给运动。工作台1和进给箱3都装在立柱5的垂直导轨上,并可上下调整位置,以适应加工不同高度的工件。

### (2) 摇臂钻床

摇臂钻床广泛地用于大、中型零件上直径  $d > 80$  mm 孔的加工。其外形如图 8.3.9。主轴箱4可以在摇臂3上水平移动,摇臂3既可以绕立柱2转动,又可沿立柱2垂直升降。加工时,工件在工作台6或底座1上安装固定,通过调整摇臂3和主轴箱4的位置,使主轴5中心线与被加工孔的中心线重合。

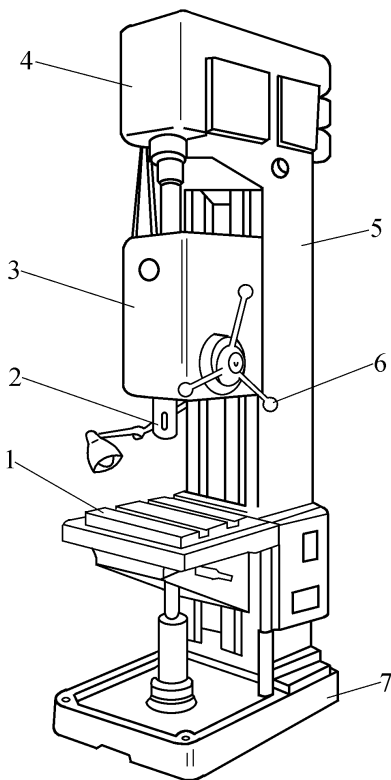


图 8.3.8 立式钻床

1—工作台;2—主轴;3—进给箱;  
4—变速箱;5—立柱;6—操纵  
手柄;7—底座

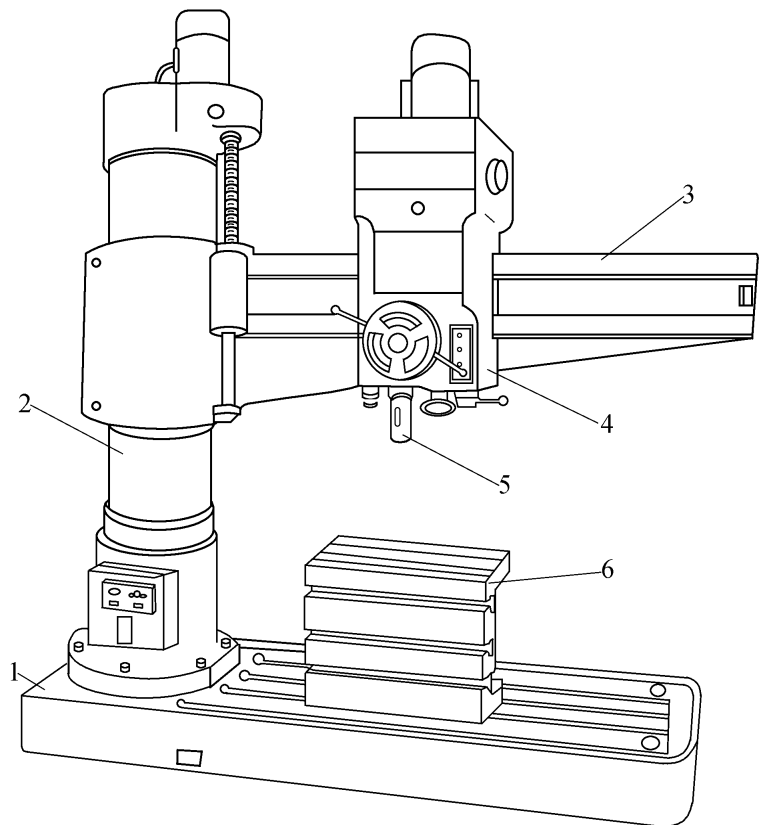


图 8.3.9 摇臂钻床

1—底座;2—立柱;3—摇臂;  
4—主轴箱;5—主轴;6—工作台

### (3) 其他钻床

台钻是一种加工小型工件上孔径  $d = 0.1 \sim 13$  mm 的立式钻床,多轴钻床可同时加工工件上的很多孔,生产率高,广泛用于大批量生产;中心孔钻床用来加工轴类零件两端面上中心孔,深孔钻床用于加工孔深与直径比  $l/d > 5$  深孔。

### 8.3.3 镗削加工

镗孔是用镗刀在已加工孔的工件上使孔径扩大并达到精度和表面粗糙度要求的加工方法。

镗孔是常用的孔加工方法之一,根据工件的尺寸形状、技术要求及生产批量的不同,镗孔可以在镗床、车床、铣床、数控机床和组合机床上进行。一般回旋体零件上的孔,多用车床加工;而箱体类零件上的孔或孔系(即要求相互平行或垂直的若干孔)则可以在镗床上加工。

镗孔不但能校正原有孔轴线偏斜,而且能保证孔的位置精度,所以镗削加工适用于加工机座、箱体、支架等外形复杂的大型零件上的孔径较大、尺寸精度要求较高、有位置要求的孔和孔系。

#### 1. 镗刀

镗刀有多种类型,按其切削刃数量可分为单刃镗刀、双刃镗刀和多刃镗刀;按其加工表面可分为通孔镗刀、盲孔镗刀、阶梯孔镗刀和端面镗刀;按其结构可分为整体式、装配式和可调式。图 8.3.10 所示为单刃镗刀和多刃镗刀的结构。

##### (1) 单刃镗刀

单刃镗刀刀头结构与车刀类似,刀头装在刀杆中,根据被加工孔孔径大小,通过手工操纵,用螺钉固定刀头的位置。刀头与镗杆轴线垂直(图 8.3.10a)可镗通孔,倾斜安装(图 8.3.10b)可镗盲孔。

单刃镗刀结构简单,可以校正原有孔轴线偏斜和小的位置偏差,适应性较广,可用来进行粗加工、半精加工或精加工。但是,所镗孔径尺寸的大小要靠人工调整刀头的悬伸长度来保证,较为麻烦,加之仅有一个主切削刃参加工作,故生产效率较低,多用于单件小批量生产。

##### (2) 双刃镗刀

双刃镗刀有两个对称的切削刃,切削时径向力可以相互抵消,工件孔径尺寸和精度由镗刀径向尺寸保证。

图 8.3.10c 为固定式双刃镗刀。工作时,镗刀块可通过斜楔、锥销或螺钉装夹在镗杆上,镗刀块相对于轴线的位置偏差会造成孔径误差。固定式双刃镗刀是定尺寸刀具,适用于粗镗或半精镗直径较大的孔。

图 8.3.10d 为可调节浮动镗刀块,调节时,先松开螺钉 2,转动螺钉 1,改变刀片的径向位置

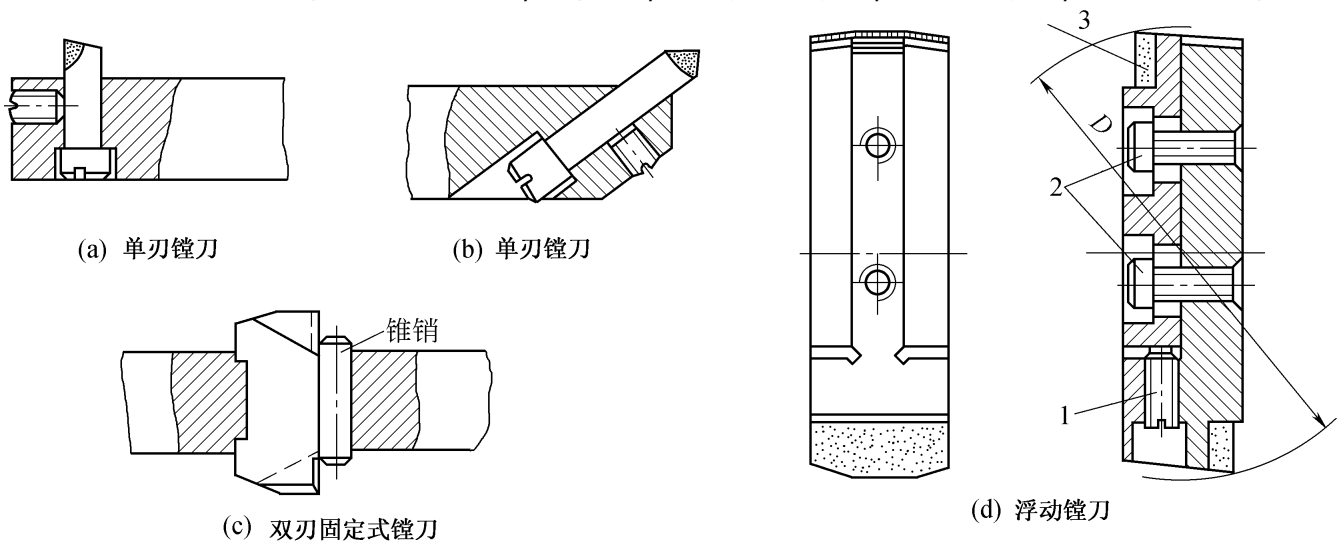


图 8.3.10 单刃镗刀和多刃镗刀的结构

至两切削刃之间尺寸等于所要加工孔径尺寸,最后拧紧螺钉2。工作时,镗刀块在镗杆的径向槽中不紧固,能在径向自由滑动,刀块在切削力的作用下保持平衡对中,可以减少镗刀块安装误差及镗杆径向跳动所引起的加工误差,而获得较高的加工精度。但它不能校正原有孔轴线偏斜或位置误差,其使用应在单刃镗之后进行。浮动镗削适于精加工批量较大、孔径较大的孔。

## 2. 镗床

镗床主要用于加工尺寸较大且精度要求较高的孔,特别是分布在不同表面上、孔距和位置精度要求很严格的孔系,如箱体、汽车发动机缸体等零件上的孔系加工。镗床工作时,由刀具作旋转主运动,进给运动则根据机床类型和加工条件的不同或者由刀具完成,或者由工件完成。镗床主要类型有卧式镗床、坐标镗床以及金刚镗床等。

### (1) 卧式镗床

卧式镗床的外形如图8.3.11所示。它主要由床身10、主轴箱8、工作台3、平旋盘5和前后立柱7、2等组成。主轴箱中装有镗轴6、平旋盘5及主运动和进给运动的变速、操纵机构。加工时,镗轴6带动镗刀旋转形成主运动,并可沿其轴线移动实现轴向进给运动;平旋盘5只作旋转运动,装在平旋盘端面燕尾导轨中的径向刀架4除了随平旋盘一起旋转外,还可带动刀具沿燕尾导轨作径向进给运动;主轴箱8可沿前立柱7的垂直导轨作上下移动,以实现垂直进给运动。工件装夹在工作台3上,工作台下面装有下列滑座11和上滑座12,下滑座可沿床身10水平导轨作纵向移动,实现纵向进给运动;工作台还可在上滑座的环形导轨上绕垂直轴回转,进行转位;以及上滑座沿下滑座的导轨作横向移动,实现横向进给。再利用主轴箱上、下位置调节,可使工件在一次装夹中,对工件上相互平行或成一定角度的平面或孔进行加工。后立柱2可沿床身导轨作纵向移动,支架1可在后立柱垂直导轨上,进行上下移动,用以支承悬伸较长的镗杆,以增加其刚性。

综上所述,卧式镗床的主运动有:镗轴和平旋盘的旋转运动(二者是独立的,分别由不同的传动机构驱动);进给运动有:镗轴的轴向进给运动,平旋盘上径向刀架的径向进给运动,主轴箱的垂直进给运动,工作台的纵向、横向进给运动;此外,辅助运动有:工作台转位,后立柱纵向调位,后立柱支架的垂直方向调位,以及主轴箱沿垂直方向和工作台沿纵、横方向的快速调位运动。

卧式镗床结构复杂,通用性较大,除可进行镗孔外,还可进行钻孔、加工各种形状沟槽、铣平面、车削端面和螺纹等。卧式镗床的主参数是镗轴直径。它广泛用于机修和工具车间,适用于单件小批量生产。图8.3.12为其典型加工方法。

其中,图a为利用装在镗轴上的镗刀镗孔,纵向进给运动 $f_1$ 由镗轴移动完成;图b为利用后立柱支架支承长镗杆镗削同轴孔,纵向进给运动 $f_2$ 由工作台移动完成;图c为利用平旋盘上刀具镗削大直径孔,纵向进给运动 $f_3$ 由工作台完成;图d为利用装在镗轴上的端铣刀铣平面,垂直进给运动 $f_4$ 由主轴箱完成;图e、f为利用装在平旋盘径向刀架上的刀具车内沟槽和端面,径向进给运动 $f_5$ 由径向刀架完成。

### (2) 坐标镗床

该类机床上具有坐标位置的精密测量装置,加工孔时,按直角坐标来精密定位,所以称为坐标镗床。坐标镗床是一种高精度机床,主要用于镗削高精度的孔,特别适用于相互位置精度很高的孔系,如钻模、镗模等的孔系。坐标镗床还可以进行钻、扩、铰孔及精铣加工。此外,还可以作

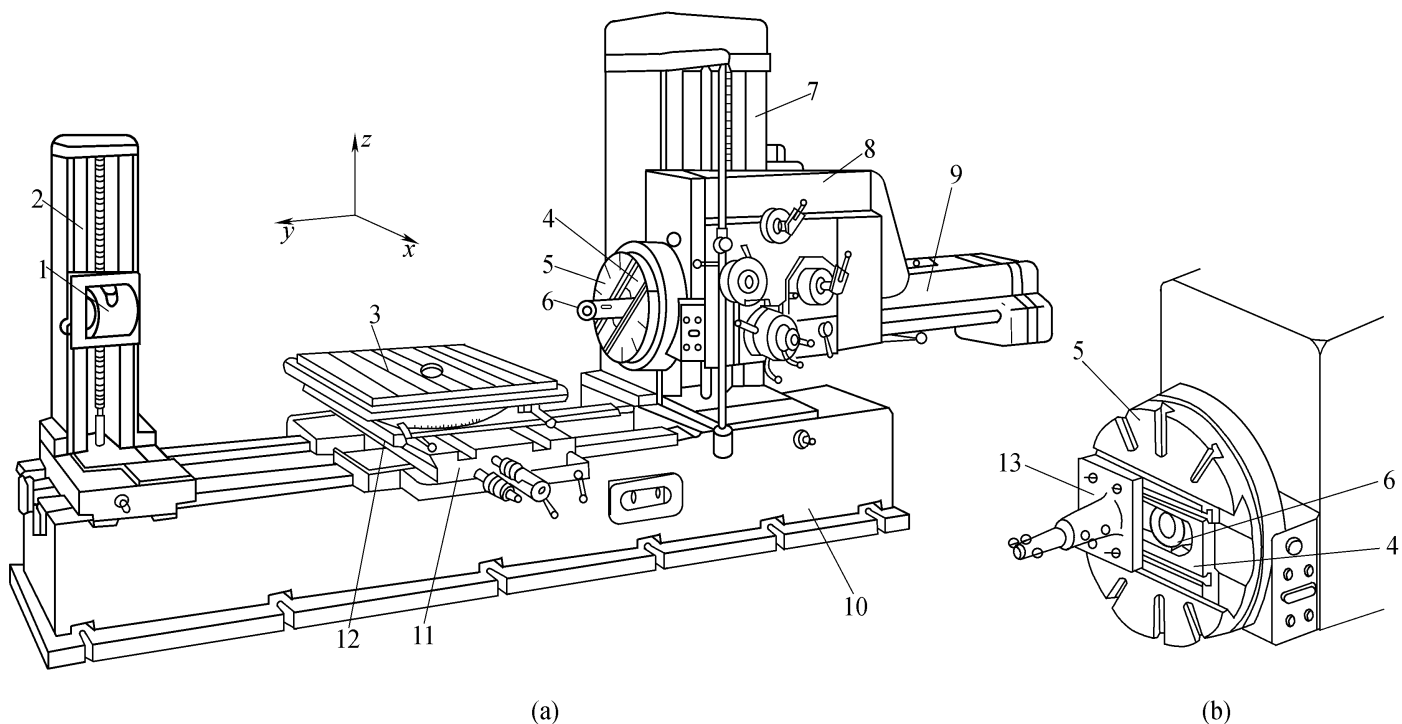


图 8.3.11 卧式镗床

1—支架；2—后立柱；3—工作台；4—径向刀架；5—平旋盘；6—镗轴；7—前立柱；  
8—主轴箱；9—后尾筒；10—床身；11—下滑座；12—上滑座；13—刀座

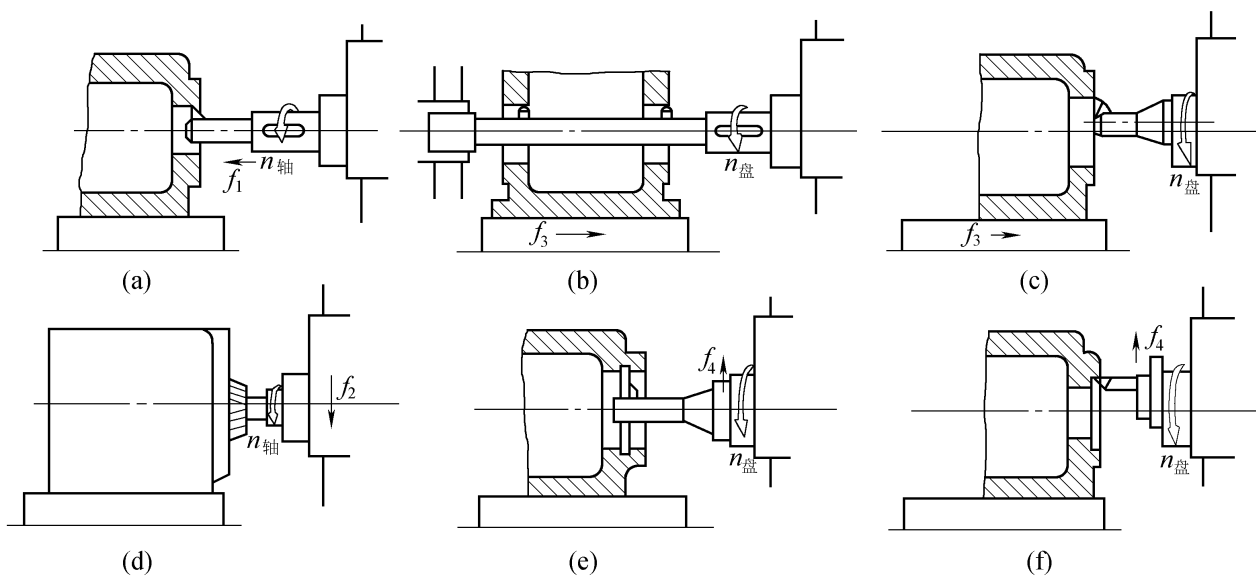


图 8.3.12 卧式镗床的典型加工方法

精密刻线、样板画线、孔距及直线尺寸的精密测量等工作。

### 8.3.4 拉削加工

在拉床上用拉刀加工工件的工艺流程称为拉削加工。拉削工艺范围广,不但可以加工各种形状的通孔,还可以拉削平面及各种组合成形表面。图 8.3.13 为适用于拉削加工的典型工件截面形状。由于受拉刀制造工艺以及拉床动力的限制,过小或过大尺寸的孔均不适宜拉削加工(拉削孔径一般为 10 ~ 100 mm,孔的深径比一般不超过 5),盲孔、台阶孔和薄壁孔也不适宜拉削加工。

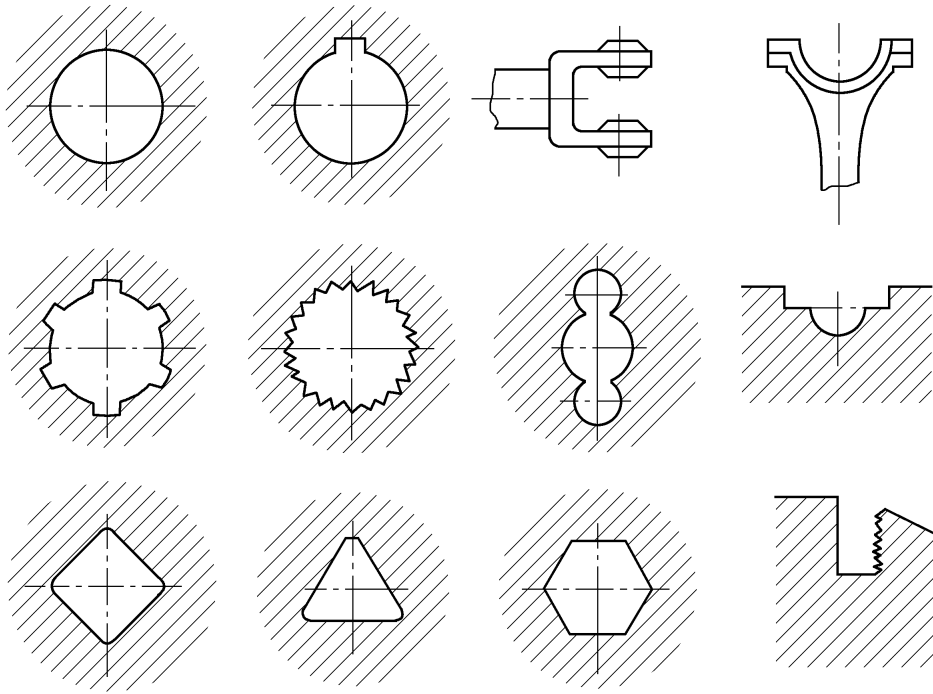


图 8.3.13 拉削加工的典型工件截面形状

### 1. 拉刀

根据工件加工面及截面形状不同,拉刀有多种形式。常用的圆孔拉刀结构见图 8.3.14,其组成部分包括:

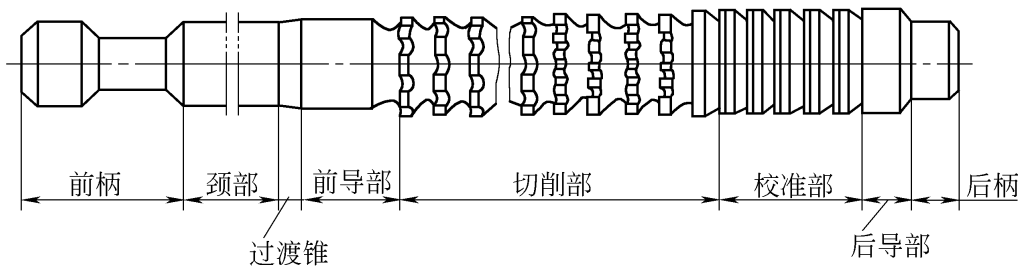


图 8.3.14 圆孔拉刀的结构

#### (1) 前柄

用以拉床夹头夹持拉刀,带动拉刀进行拉削。

#### (2) 颈部

是前柄与过渡锥的连接部分,可在此处打标记。

#### (3) 过渡锥

起对准中心的作用,使拉刀顺利进入工件预制孔中。

#### (4) 前导部

起导向和定心作用,防止拉孔歪斜,并可检查拉削前的孔径尺寸是否过小,以免拉刀第一个切削齿载荷太重而损坏。

#### (5) 切削部

承担全部余量的切除工作,由粗切齿、过渡齿和精切齿组成。

#### (6) 校准部

用以校正孔径,修光孔壁,并作为精切齿的后备齿。

### (7) 后导部

用以保持拉刀最后正确位置,防止拉刀在即将离开工件时,工件下垂而损坏已加工表面或刀齿。

### (8) 后柄

用作直径大于 60 mm 既长又重拉刀的后支承,防止拉刀下垂。直径较小的拉刀可不设后柄。

## 2. 拉孔的工艺特点

分析前述圆孔拉刀的结构可知,拉刀是一种高精度的多齿刀具,由于拉刀从头部向尾部方向其刀齿高度逐齿递增,拉削过程中,通过拉刀与工件之间的相对运动,分别逐层从工件孔壁上切除金属(见图 8.3.15),从而形成与拉刀的最后刀齿同形状的孔。

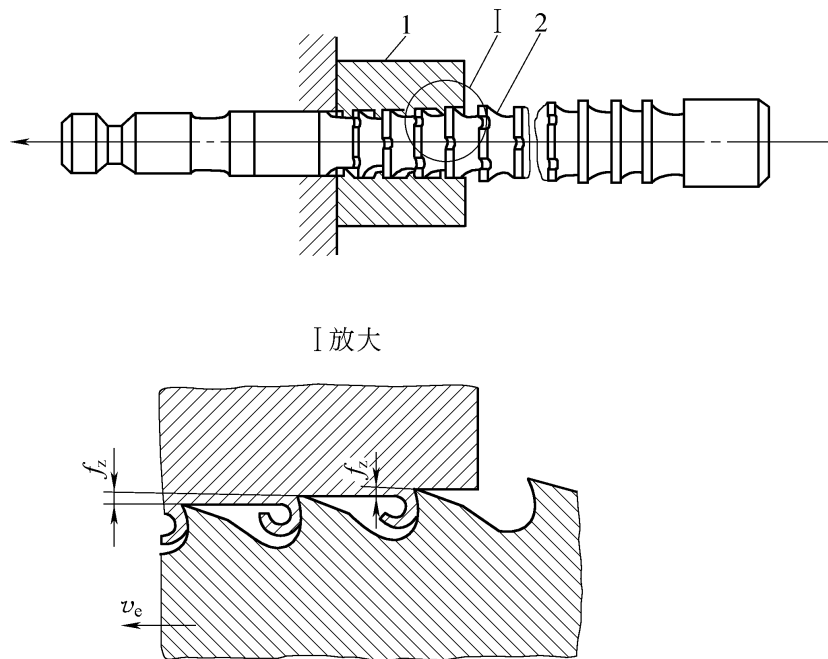


图 8.3.15 拉刀拉孔过程

拉孔与其他孔加工方法比较,具有以下特点:

#### (1) 生产率高

拉削时,拉刀同时工作的刀齿数多、切削刃总长度长,在一次工作行程中就能完成粗、半精及精加工,机动时间短,因此生产率很高。

#### (2) 可以获得较高的加工质量

拉刀为定尺寸刀具,有校准齿对孔壁进行校准、修光;拉孔切削速度低( $v_c = 2 \sim 8 \text{ m/min}$ ),拉削过程平稳,因此可获得较高的加工质量。一般拉孔精度可达 IT8~IT7 级,表面粗糙度  $Ra$  值为  $1.6 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

#### (3) 拉刀使用寿命长

由于拉削速度低,切削厚度小,每次拉削过程中,每个刀齿工作时间短,拉刀磨损慢,因此拉刀耐用度高,使用寿命长。

#### (4) 拉削运动简单

拉削的主运动是拉刀的轴向移动,而进给运动是由拉刀各刀齿的齿升量  $f_z$ (见图 8.3.15)来完成的。因此,拉床只有主运动,没有进给运动,拉床结构简单,操作方便。但拉刀结构较复杂,



制造成本高。拉削多用于大批量或成批生产中。

### 3. 拉床

拉床按用途可分为内拉床及外拉床,按机床布局可分为卧式和立式。其中,以卧式内拉床应用最为普遍。

图 8.3.16 为卧式内拉床的外形结构。液压缸 1 固定于床身内,工作时,液压泵供给压力油驱动活塞,活塞带动拉刀 4,连同拉刀尾部活动支承 5 一起沿水平方向左移,装在固定支承上的工件 3 即被拉制出符合精度要求的内孔。其拉力通过压力表 2 显示。

拉削圆孔时,工件一般不需夹紧,只以工件端面支承,因此,工件孔的轴线与端面之间应有一定的垂直度要求。当孔的轴线与端面不垂直时,则需将工件的端面紧贴在一个球面垫板上,如图 8.3.17 所示,在拉削力作用下,工件 3 连同球面垫板 2 在固定支承板 1 上作微量转动,以使工件轴线自动调到与拉刀轴线一致的方向。

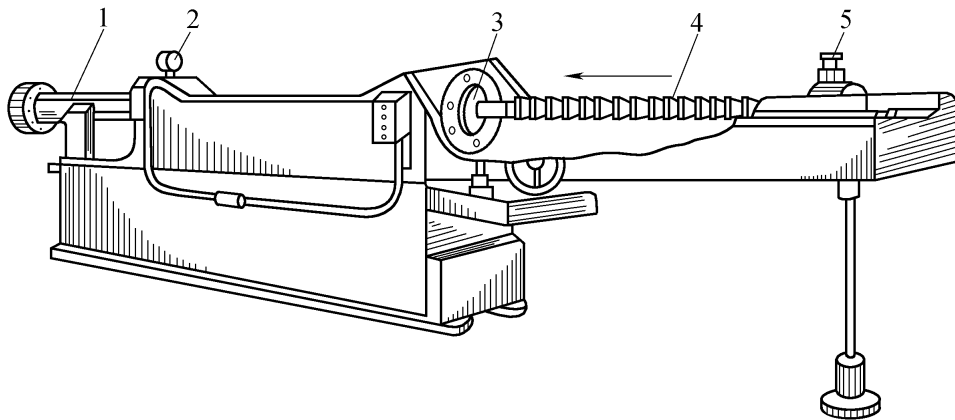


图 8.3.16 卧式内拉床

1—液压缸;2—压力表;3—工件;4—拉刀;5—活动支承

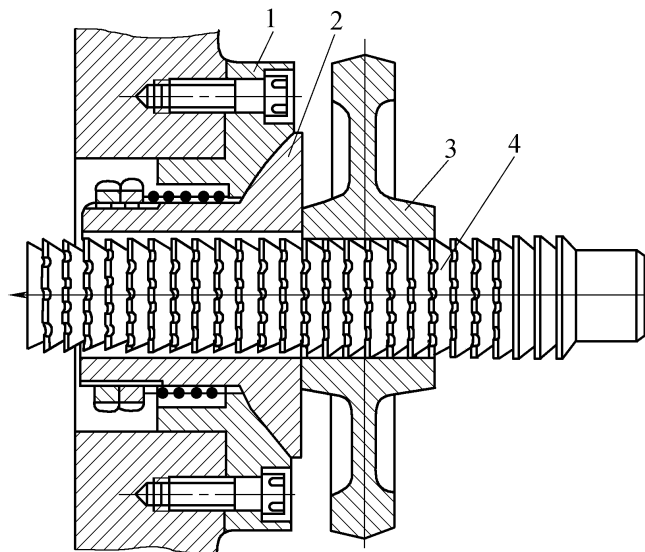


图 8.3.17 拉圆孔的方法

1—固定支承架;2—球面垫板;3—工件;4—拉刀

### 8.3.5 内圆表面磨削加工

内圆表面的磨削可以在内圆磨床上进行,也可以在万能外圆磨床上进行。内圆磨床的主要

类型有普通内圆磨床、无心内圆磨床和行星内圆磨床。不同类型的内圆磨床其磨削方法是不相同的。

## 1. 内圆磨削方法

### (1) 普通内圆磨床的磨削方法

普通内圆磨床是生产中应用最广的一种,图 8.3.18 所示为普通内圆磨床的磨削方法。磨削时根据工件的形状和尺寸不同,可采用纵磨法(见图 a)、横磨法(见图 b),有些普通内圆磨床上备有专门的端磨装置,可在一次装夹中磨削内孔和端面(见图 c),这样不仅容易保证内孔和端面的垂直度,而且生产效率较高。

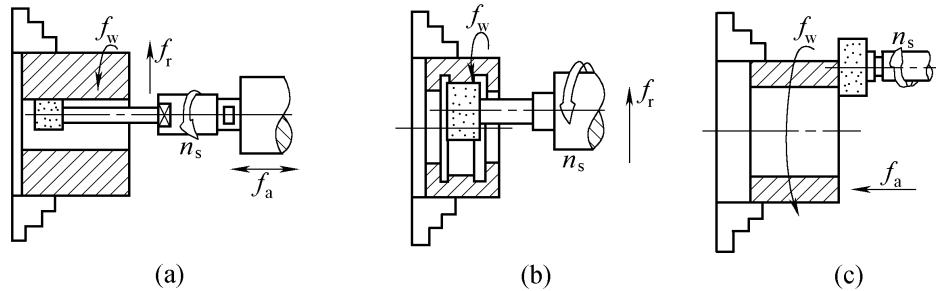


图 8.3.18 普通内圆磨床的磨削方法

如图 a 所示,纵磨法机床的运动有:砂轮的高速旋转运动作主运动  $n_s$ ;头架带动工件旋转作圆周进给运动  $f_w$ ,砂轮或工件沿其轴线往复作纵向进给运动  $f_a$ ,在每次(或几次)往复行程后,工件沿其径向作一次横向进给运动  $f_r$ 。这种磨削方法适用于形状规则、便于旋转的工件。

横磨法无需纵向进给运动  $f_a$ ,如图 b 所示,横磨法适用于磨削带有沟槽表面的孔。

### (2) 无心内圆磨床磨削

图 8.3.19 所示为无心内圆磨床的磨削方法。磨削时,工件 4 支承在滚轮 1 和导轮 3 上,压紧轮 2 使工件紧靠在导轮 3 上,工件即由导轮 3 带动旋转,实现圆周进给运动  $f_w$ 。砂轮除了完成主运动  $n_s$  外,还作纵向进给运动  $f_a$  和周期性横向进给运动  $f_r$ 。加工结束时,压紧轮沿箭头 A 方向摆开,以便装卸工件。这种磨削方法适用于大批量生产中,外圆表面已精加工的薄壁工件,如轴承套等。

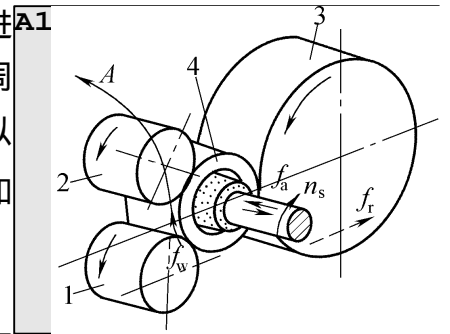


图 8.3.19 无心内圆磨床的磨削方法

1—滚轮;2—压紧轮;  
3—导轮;4—工件

## 2. 内圆磨削的工艺特点及应用范围

内圆磨削与外圆磨削相比,加工条件比较差,内圆磨削有以下一些特点:

(1) 砂轮直径受到被加工孔径的限制,直径较小。砂轮很容易磨钝,需要经常修整和更换,增加了辅助时间,降低了生产率。

(2) 砂轮直径小,即使砂轮转速高达每分钟几万转,要达到砂轮圆周速度  $25 \sim 30 \text{ m/s}$  也是十分困难的,由于磨削速度低,因此内圆磨削比外圆磨削效率低。

(3) 砂轮轴的直径尺寸较小,而且悬伸较长,刚性差,磨削时容易发生弯曲和振动,从而影响加工精度和表面粗糙度。内圆磨削精度可达 IT8 ~ IT6,表面粗糙度  $Ra$  值可达  $0.8 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。

(4) 切削液不易进入磨削区,磨屑排除较外圆磨削困难。

虽然内圆磨削比外圆磨削加工条件差,但仍然是一种常用的精加工孔的方法。特别适用于

淬硬的孔、断续表面的孔(带键槽或花键槽的孔)和长度较短的精密孔加工。磨孔不仅能保证孔本身的尺寸精度和表面质量,还能提高孔的位置精度和轴线的直线度;用同一砂轮,可以磨削不同直径的孔,灵活性大。内圆磨削可以磨削圆柱孔(通孔、盲孔、阶梯孔)、圆锥孔及孔端面等。

### 3. 普通内圆磨床

图 8.3.20 为普通内圆磨床外形图。它主要由床身 1、工作台 2、头架 3、砂轮架 4 和滑鞍 5 等组成。磨削时,砂轮轴的旋转为主运动,头架带动工件旋转运动为圆周进给运动,工作台带动头架完成纵向进给运动,横向进给运动由砂轮架沿滑鞍的横向移动来实现。磨锥孔时,需将头架转过相应角度。

普通内圆磨床的另一种形式为砂轮架安装在工作台上做纵向进给运动。

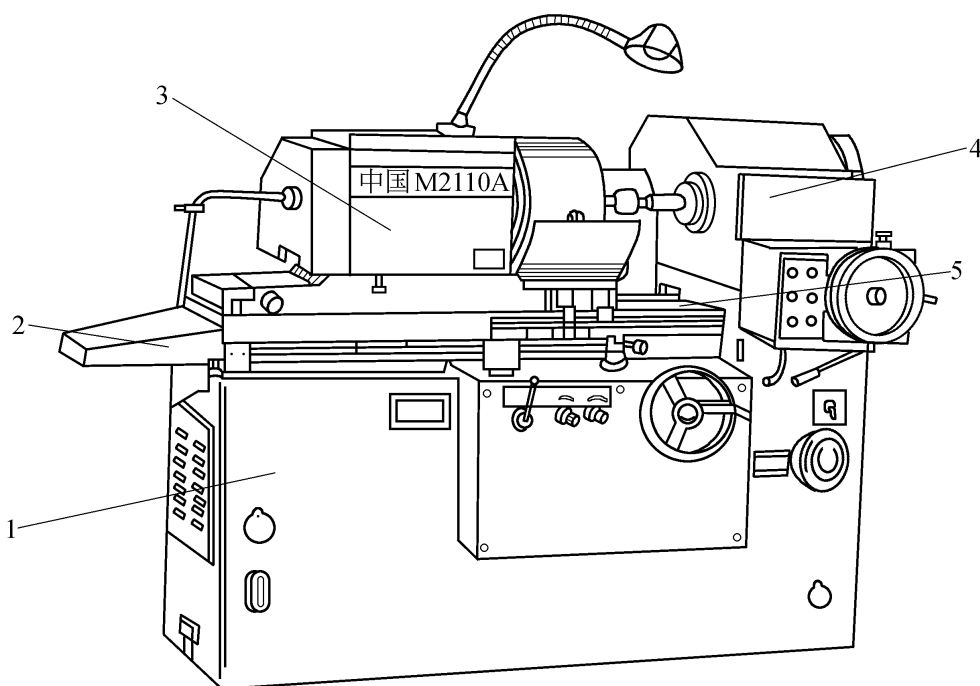


图 8.3.20 普通内圆磨床

1—床身;2—工作台;3—头架;4—砂轮架;5—滑鞍

## 8.4 平面加工

### 8.4.1 平面加工方法

平面是基础类零件(如箱体、工作台、床身及支架等)的主要表面,也是回旋体零件的重要表面之一(如端面、台肩面等)。根据平面所起的作用不同,可以将其分为非结合面、结合面、导向面、测量工具的工作平面等。平面的加工方法有车削、铣削、刨削、磨削、拉削、研磨、刮研等。其中,刨削、铣削、磨削是平面的主要加工方法。

由于平面作用不同,其技术要求不同,因此采用不同的加工方案时,应根据工件的技术要求、毛坯种类、原材料状况及生产规模等因素进行合理选用,以保证平面加工质量。常用的平面加工方案见表 8.4.1

表 8.4.1 平面加工方案

序号	加工方案	经济精度级	表面粗糙度 $Ra$ 值/ $\mu\text{m}$	适用范围
1	粗车—半精车	IT9	6.3~3.2	回转体零件的端面
2	粗车—半精车—精车	IT8~IT7	1.6~0.8	
3	粗车—半精车—磨削	IT8~IT6	0.8~0.2	
4	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)	IT10~IT8	6.3~1.6	精度不太高的淬硬平面
5	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—刮研	IT7~IT6	0.8~0.1	精度要求较高的淬硬平面
6	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—磨削	IT7	0.8~0.2	精度要求较高的淬硬或不淬硬平面
7	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—粗磨—精磨	IT7~IT6	0.4~0.02	
8	粗铣—拉	IT9~IT7	0.8~0.2	大量生产,较小平面(精度与拉刀精度有关)
9	粗铣—精铣—精磨—研磨	IT5以上	0.1~0.06	高精度平面

## 8.4.2 刨削与插削加工

### 1. 刨削加工

在刨床上使用刨刀对工件进行切削加工称为刨削加工。刨削加工主要用于加工各种平面(如水平面、垂直面和斜面等)和沟槽(如T形槽、燕尾槽、V形槽等)。刨削加工的典型表面见图8.4.1(图中的切削运动是按牛头刨床加工时标注的)。

刨削加工常见的机床有牛头刨床和龙门刨床。

#### (1) 牛头刨床

如图8.4.2所示,牛头刨床主要由床身、横梁、工作台、滑枕、刀架等组成,因其滑枕和刀架形似“牛头”而得名。牛头刨床工作时,装有刀架1的滑枕3由床身4内部的摆杆带动,沿床身顶部的导轨作直线往复运动,由刀具实现切削过程的主运动。夹具或工件则安装在工作台6上,加工时,工作台6带动工件沿横梁5上导轨作间歇横向进给运动。横梁5可沿床身的垂直导轨上下移动,以调整工件与刨刀的相对位置。刀架1还可以沿刀架座上的导轨上下移动(一般为手动),以调整刨削深度,以及在加工垂直平面和斜面作进给运动时。调整转盘2,可以使刀架左右回旋,以便加工斜面和斜槽。

牛头刨床的刀具只在一个运动方向上进行切削,刀具在返回时不进行切削,空行程损失大,此外,滑枕在换向的瞬间,有较大的冲击惯性,因此主运动速度不能太高,加工时通常只能单刀加工,所以它的生产率比较低。牛头刨床的主参数是最大刨削长度。它适用于单件小批量生产或机修车间,用来加工中、小型工件的平面或沟槽。

#### (2) 龙门刨床

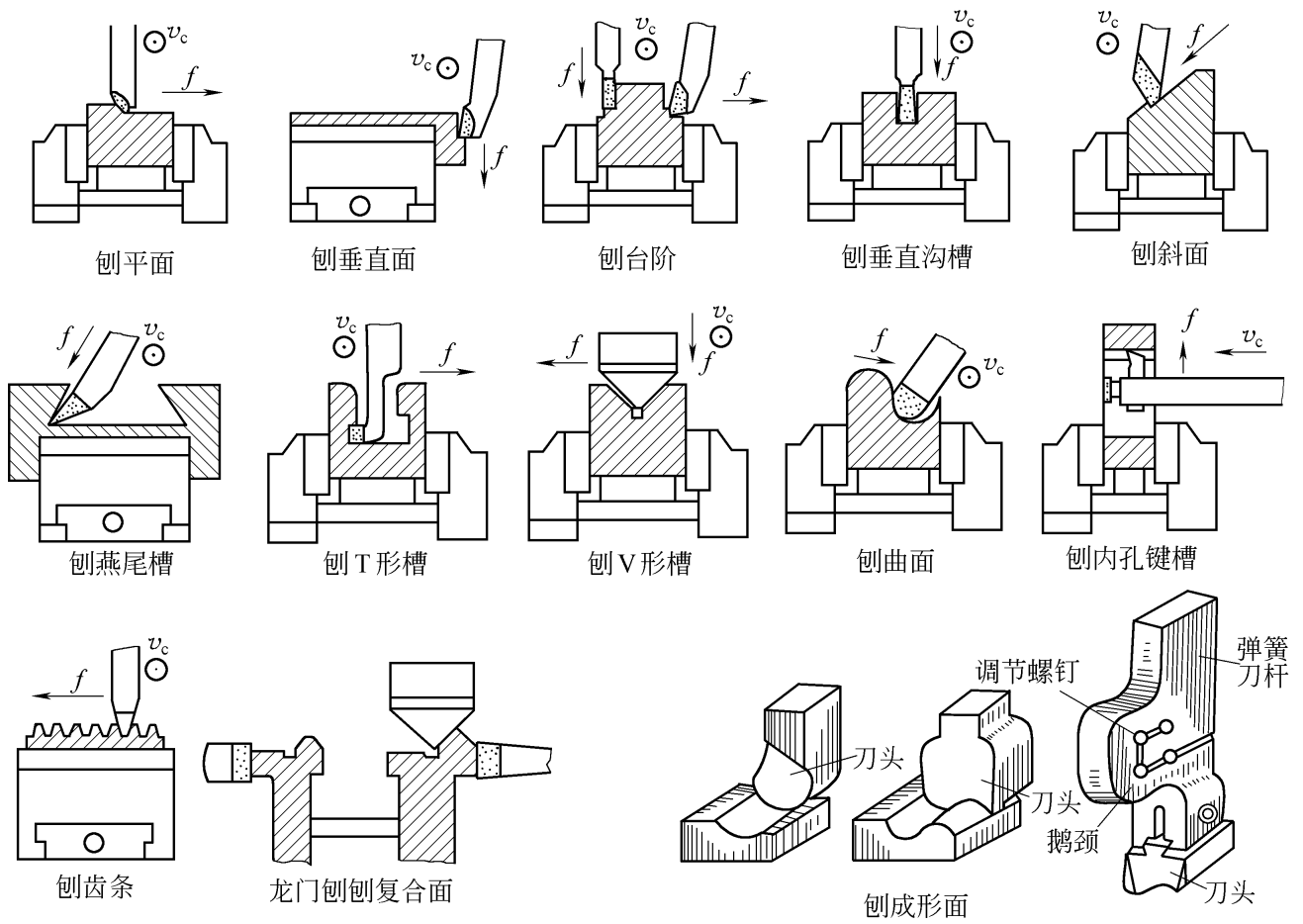


图 8.4.1 刨削加工的典型表面

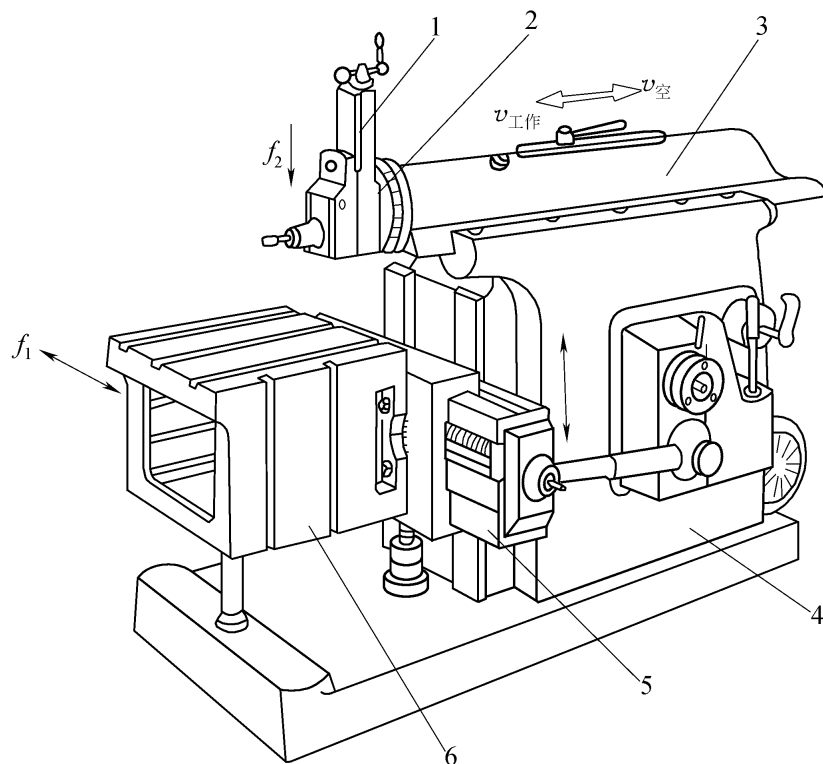


图 8.4.2 牛头刨床

1—刀架；2—转盘；3—滑枕；4—床身；5—横梁；6—工作台

图 8.4.3 是龙门刨床的外形图,因它具有一个“龙门”式框架而得名。龙门刨床工作时,工件装夹在工作台 9 上,随工作台沿床身 10 的水平导轨作直线往复运动以实现切削过程的主运动。装在横梁 2 上的垂直刀架 5、6 可沿横梁导轨作间歇的横向进给运动,用以刨削工件的水平面,垂直刀架的溜板还可使刀架上下移动,作切入运动或刨竖直平面。此外,刀架溜板还能绕水平轴调整至一定角度位置,以加工斜面或斜槽。横梁 2 可沿左右立柱 3、7 的导轨作垂直升降以调整垂直刀架位置,适应不同高度工件的加工需要。装在左右立柱上的侧刀架 1、8 可沿立柱导轨作垂直方向的间歇进给运动,以刨削工件竖直平面。

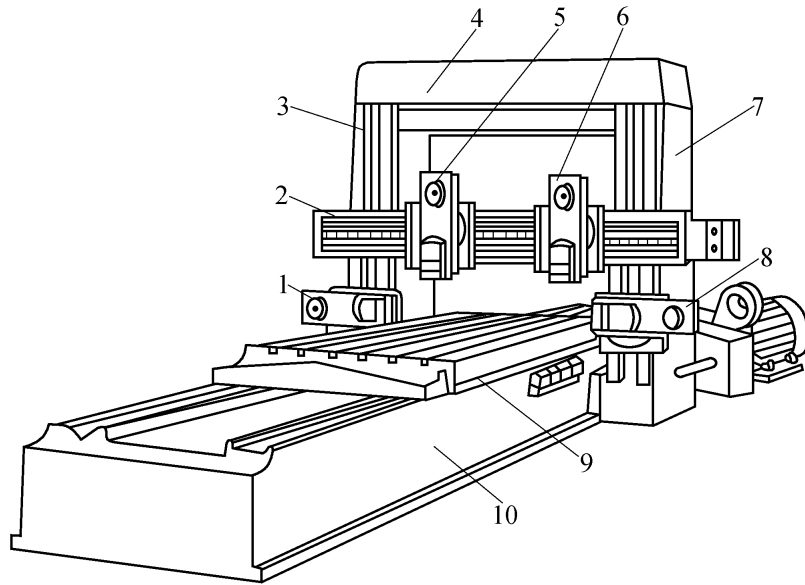


图 8.4.3 龙门刨床

1、8—左、右侧刀架;2—横梁;3、7—立柱;4—顶梁;  
5、6—垂直刀架;9—工作台;10—床身

与牛头刨床相比,它具有形体大、动力大、结构复杂、刚性好、工作稳定、工作行程长、适应性强和加工精度高等特点。龙门刨床的主参数是最大刨削宽度。它主要用来加工大型零件的平面,尤其是窄而长的平面,也可加工沟槽或在一次装夹中同时加工数个中、小型工件的平面。

### (3) 刨刀

刨刀的结构与车刀相似,其几何角度的选取原则也与车刀基本相同。但因刨削过程中有冲击,所以刨刀的前角比车刀约小  $5^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ;而且刨刀的刃倾角也应取较大的负值,以使刨刀切入工件时产生的冲击力作用在离刀尖稍远的切削刃上。刨刀的刀杆截面比较粗大,以增加刀杆刚性和防止折断。如图 8.4.4 所示,刨刀刀杆有直杆和弯杆之分,直杆刨刀刨削时,如遇到加工余量不均或工件上的硬点时,切削力的突然增大将增加刨刀的弯曲变形,造成切削刃扎入已加工表面,降低了已加工表面的精度和表面质量,也容易损坏切削刃(见图 a)。若采用弯杆刨刀,当切削力突然增大时,刀杆产生的弯曲变形会使刀尖离开工件,避免扎入工件(见图 b)。

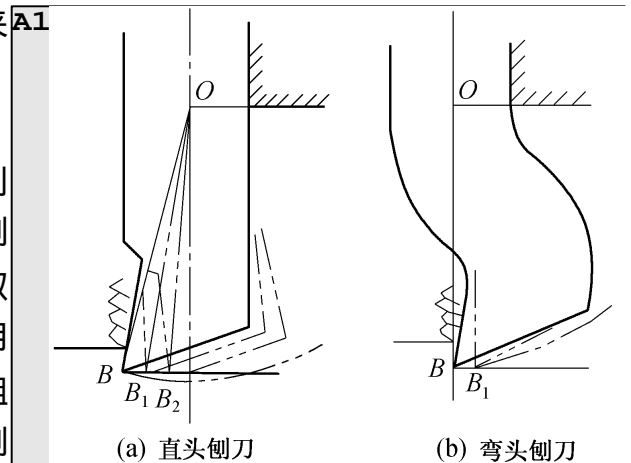


图 8.4.4 刨刀刀杆形状

#### (4) 刨削加工的工艺特点

刨床结构简单,调整、操作方便;刨刀制造、刃磨、安装容易,加工费用低;刨削加工切削速度低,加之空行程所造成的损失,生产率一般较低。但在加窄长面和进行多件或多刀加工时,刨削的生产率并不比铣削低;刨削特别适宜加工尺寸较大的T形槽、燕尾槽及窄长的平面。

#### 2. 插削加工

插削和刨削的切削方式基本相同,只是插削是在垂直方向进行切削。因此,可以认为插床是一种立式的刨床。图8.4.5是插床的外形图。插削加工时,滑枕2带动插刀沿垂直方向作直线往复运动,实现切削过程的主运动。工件安装在圆工作台1上,圆工作台可实现纵向、横向和圆周方向的间歇进给运动。此外,利用分度装置5,圆工作台还可进行圆周分度。滑枕导轨座3和滑枕一起可以绕销轴4在垂直平面内相对立柱倾斜 $0^{\circ} \sim 8^{\circ}$ ,以便插削斜槽和斜面。

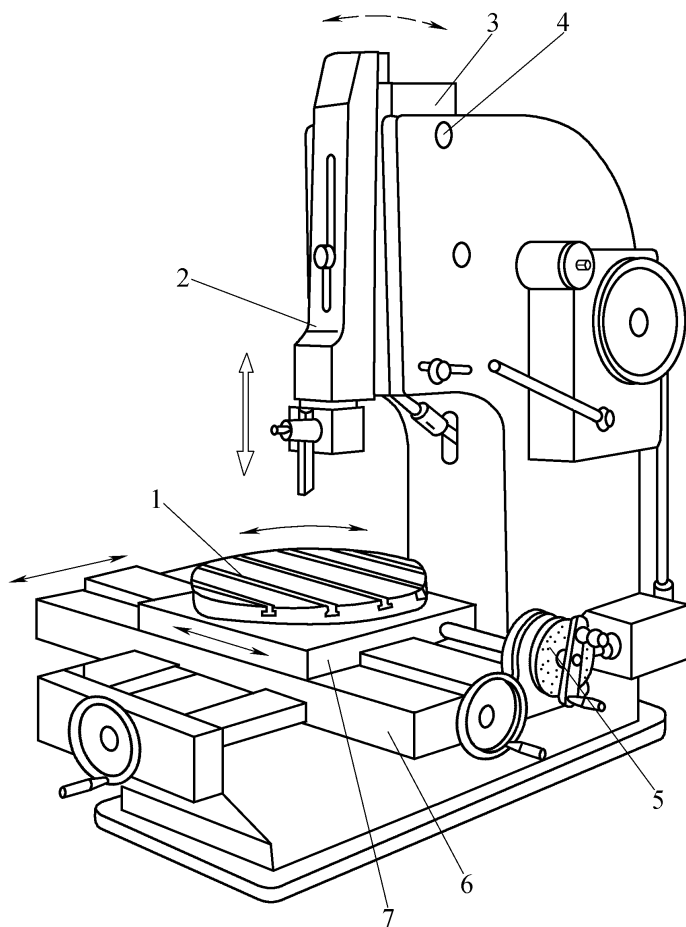


图 8.4.5 插床

1—圆工作台;2—滑枕;3—滑枕导轨座;4—销轴;5—分度装置;6—床鞍;7—溜板

插床的主参数是最大插削长度。插削主要用于单件、小批量生产中加工工件的内表面,如方孔、多边形孔和键槽等。在插床上加工内表面,比刨床方便,但插刀刀杆刚性差,为防止“扎刀”,前角不宜过大,因此加工精度比刨削低。

### 8.4.3 铣削加工

#### 1. 铣削加工的工艺范围及特点

铣削加工是利用多刃回旋体刀具在铣床上对工件表面进行加工的一种切削加工方法。它可以加工水平面、垂直面、斜面、沟槽、成形表面、螺纹和齿形等,也可以用来切断材料。因此,铣削加工的工艺范围相当广泛,也是平面加工的主要方法之一。铣削加工的典型表面如图 8.4.6 所示。

与其他平面加工方法相比较,铣削的工艺特点是:

(1) 铣刀是典型的多刃刀具,加工过程有几个刀齿同时参加切削,总的切削宽度较大,铣削时的主运动是铣刀的旋转,有利于进行高速切削,故铣削的生产率高于刨削加工。

(2) 铣削加工范围广,可以加工刨削无法加工或难以加工的表面。例如可铣削周围封闭的凹平面、圆弧形沟槽、具有分度要求的小平面和沟槽等。

(3) 铣削过程中,就每个刀齿而言是依次参加切削,刀齿在离开工件的一段时间内,可以得到一定的冷却。因此,刀齿散热条件好,有利于减少铣刀的磨损,延长了使用寿命。

(4) 由于是断续切削,刀齿在切入和切出工件时会产生冲击,而且每个刀齿的切削厚度也时刻在变化,这就引起切削面积和切削力的变化。因此,铣削过程不平稳,容易产生振动。

(5) 铣床、铣刀比刨床、刨刀结构复杂,铣刀的制造与刃磨比刨刀困难,所以铣削成本比刨削高。

(6) 铣削与刨削的加工质量大致相当,经粗、精加工后都可达到中等精度。但在加工大平面时,刨削后无明显接刀痕,而用直径小于工件宽度的端铣刀铣削时,各次走刀间有明显的接刀痕,影响表面质量。

铣削加工适用于单件小批量生产,也适用于大批量生产。

## 2. 铣床及附件

铣床是用铣刀进行切削加工的机床,它的用途极为广泛。在铣床上采用不同类型的铣刀,配备万能分度头、回转工作台等附件,可以完成如图 8.4.6 所示的各种典型表面加工。

铣床工作时的主运动是主轴部件带动铣刀的旋转运动,进给运动是由工作台在三个互相垂直方向的直线运动来实现的。由于铣床上使用的是多齿刀具,切削过程中存在冲击和振动,这就要求铣床在结构上应具有较高的静刚度和动刚度。

铣床的类型很多,主要类型有卧式升降台铣床、立式升降台铣床、工作台不升降铣床、龙门铣床、工具铣床;此外,还有仿形铣床、仪表铣床和各种专门化铣床(如键槽铣床、曲轴铣床)等。随着机床数控技术的发展,数控铣床、镗铣加工中心的应用也越来越普遍。

### (1) 万能卧式升降台铣床

万能卧式升降台铣床是指主轴轴线呈水平安置的,工作台可以作纵向、横向和垂直运动,并可在水平平面内调整一定角度的铣床。图 8.4.7 是一种应用最为广泛的万能卧式升降台铣床外形图。

加工时,铣刀装夹在刀杆上,刀杆一端安装在主轴 3 的锥孔中,另一端由悬梁 4 右端的刀杆支架 5 支承,以提高其刚度。驱动铣刀作旋转主运动的主轴变速机构 1 安装在床身 2 内。工作台 6 可沿回转盘 7 上的燕尾导轨作纵向运动,回转盘 7 可相对于床鞍 8 绕垂直轴线调整至一定角度( $\pm 45^\circ$ ),以便加工螺旋槽等表面。床鞍 8 可沿升降台 9 上的导轨作平行于主轴轴线的横向运动,升降台 9 则可沿床身 2 侧面导轨作垂直运动。进给变速机构 10 及其操纵机构都置于升降台内。这样,用螺栓、压板或机床用平口虎钳或专用夹具装夹在工作台 6 上的工件,便可以随工



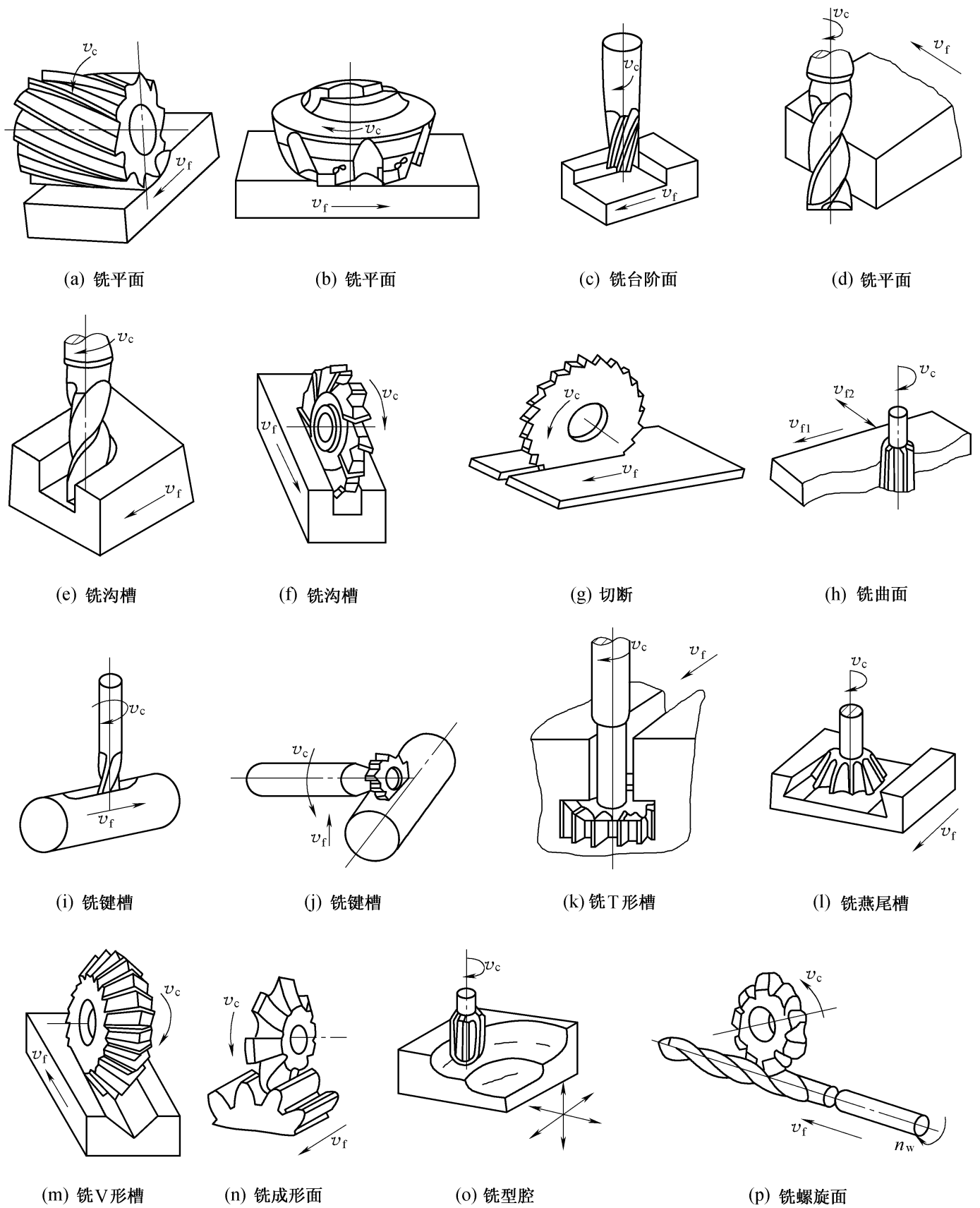


图 8.4.6 铣削的典型加工方法

作台一起在三个方向实现任一方向的位置调整或进给运动。

卧式升降台铣床结构与万能卧式升降台铣床基本相同,但卧式升降台铣床在工作台和床鞍

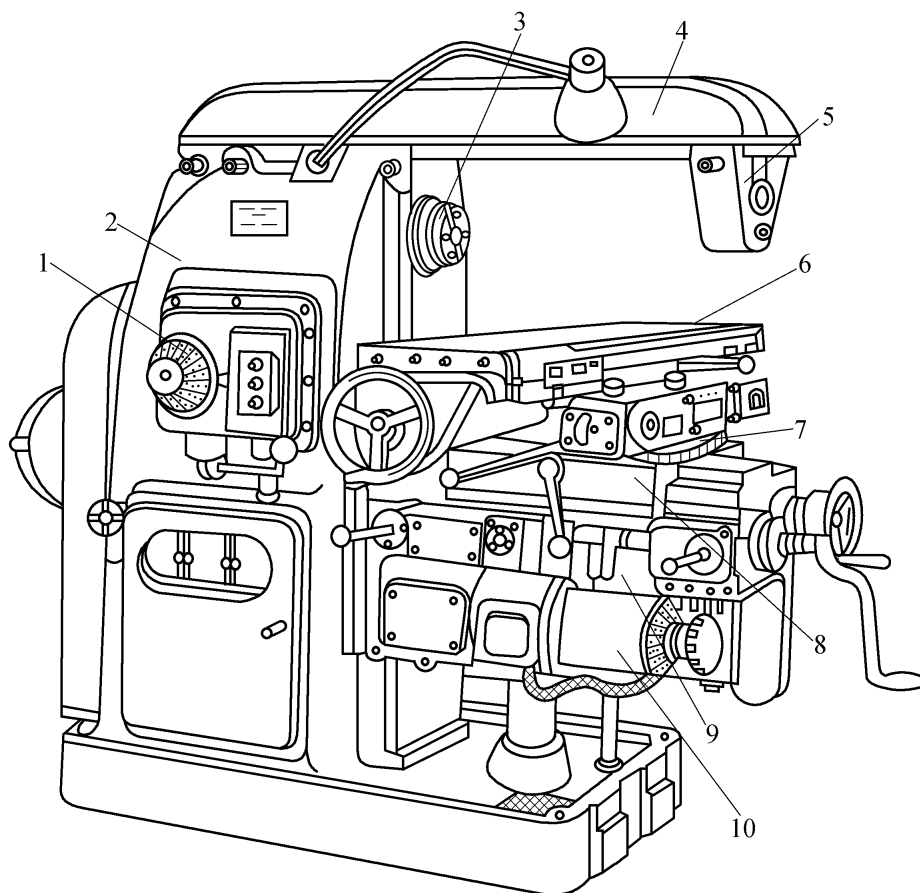


图 8.4.7 万能卧式升降台铣床

1—主轴变速机构；2—床身；3—主轴；4—悬梁；5—刀杆支架；  
6—工作台；7—回转盘；8—床鞍；9—升降台；10—进给变速机构

之间没有回转盘 因此工作台不能在水平面内调整角度。这种铣床除了不能铣削螺旋槽外 ,可以完成和万能卧式升降台铣床一样的各种铣削加工。万能卧式升降台铣床及卧式升降台铣床的主参数是工作台面宽度。它们主要用于中、小零件的加工。

### (2) 立式升降台铣床

立式升降台铣床与卧式升降台铣床的主要区别仅在于它的主轴是垂直安置的 ,可用各种端铣刀(亦称面铣刀)或立铣刀加工平面、斜面、沟槽、台阶、齿轮、凸轮以及封闭的轮廓表面等。图 8.4.8 为常见的一种立式升降台铣床外形图 ,其工作台 3、床鞍 4 及升降台 5 与卧式升降台铣床相同。立铣头 1 可在垂直平面内旋转一定的角度 ,以扩大加工范围 ,主轴 2 可沿轴线方向进行调整或作进给运动。

### (3) 龙门铣床

龙门铣床是一种大型高效能通用机床 ,主要用于加工各类大型工件上的平面、沟槽 ,它不仅对工件可以进行粗铣、半精铣 ,也可以进行精铣加工。图 8.4.9 为具有四个铣头的中型龙门铣床。四个铣头分别安装在横梁和立柱上 ,并可单独沿横梁或立柱的导轨作调整位置的移动。每个铣头即是一个独立的主运动部件 ,又能由铣头主轴套筒带动铣刀主轴沿轴向实现进给运动和调整位置的移动 根据加工需要每个铣头还能旋转一定的角度。加工时 ,工作台带动工件作纵向进给运动 ,其余运动均由铣头实现。由于龙门铣床的刚性和抗振性比龙门刨床好 ,它允许采用较

大切削用量,并可用几个铣头同时从不同方向加工几个表面,机床生产效率高,在成批和大量生产中得到广泛应用。龙门铣床的主参数是工作台面宽度。

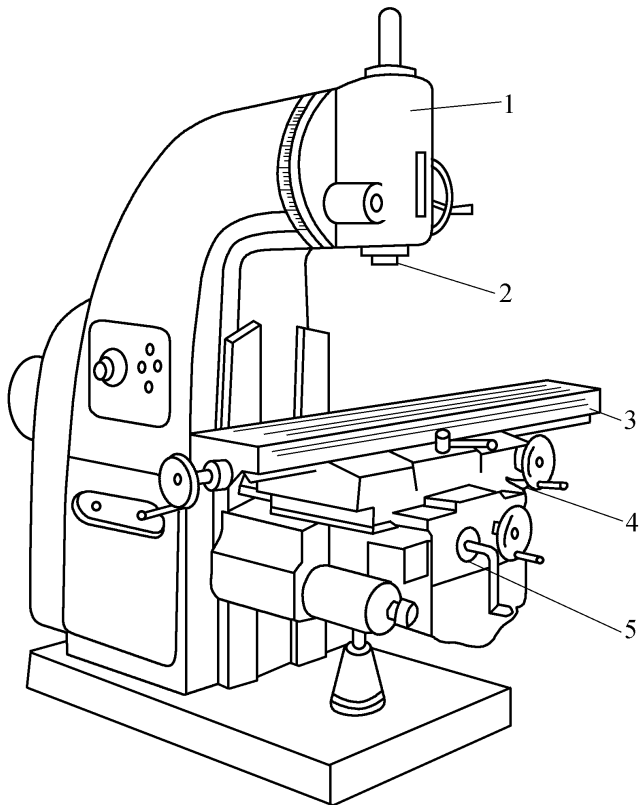


图 8.4.8 立式升降台铣床

1—立铣头；2—主轴；3—工作台；4—床鞍；5—升降台

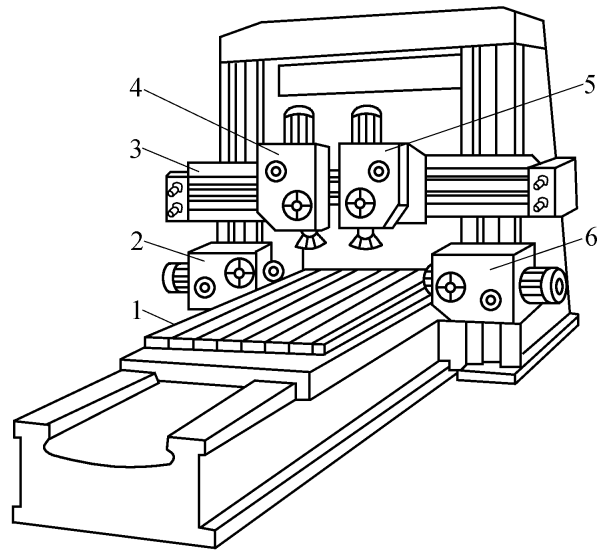


图 8.4.9 龙门铣床

1—工作台；2、6—水平铣头；3—横梁；  
4、5—垂直铣头

#### (4) 铣床附件

升降台式铣床配备有多种附件,用来扩大工艺范围。其中回转工作台(圆工作台)和万能分度头是常用的两种附件。

1) 回转工作台 回转工作台安装在铣床工作台上,用来装夹工件,以铣削工件上的圆弧表面或沿圆周分度。如图 8.4.10,用手轮转动方头 5,通过回转工作台内部的蜗杆蜗轮机构,使转盘 1 转动,转盘的中心为圆锥孔,供工件定位用。利用 T 形槽、螺钉和压板将工件夹紧在转盘上。传动轴 3 和铣床的传动装置相连接,可进行机动进给。扳动手柄 4 可接通或断开机动进给。调整挡铁 2 的位置,可使转盘自动停止在所需的位置上。

2) 万能分度头 图 8.4.11 为 FW250 型(夹持工件最大直径为 250 mm)万能分度头的外形。万能分度头最基本的功能是使装夹在分度头主轴顶尖与尾座顶尖之间或夹持在卡盘上的工件,依次转过所需的角度,以达到规定的分度要求。它可以完成以下工作:由分度头主轴带动工件绕其自身轴线回转一定角度,完成等分或不等分的分度工作,用以铣削方头、六角头、直齿圆柱齿轮、键槽、花键等的分度工作,通过配备挂轮,将分度头主轴与工作台丝杠联系起来,组成一条以分度头主轴和铣床工作台纵向丝杠为两末端件的内联系传动链,用以铣削各种螺旋表面、阿基米德螺旋线凸轮等;用卡盘夹持工件,使工件轴线相对于铣床工作台倾斜一定角度,以铣削与工件轴线相交成一定角度的沟槽、平面、直齿锥齿轮、齿轮离合器等。

#### 3. 铣刀的类型及应用

铣刀为多齿回转刀具,其每一个刀齿都相当于一把车刀固定在铣刀的回转面上。铣刀刀齿

的几何角度和切削过程,都与车刀或刨刀基本相同。铣刀的类型很多,结构不一,应用范围很广,是金属切削刀具中种类最多的刀具之一。铣刀按其用途可分为加工平面用铣刀、加工沟槽用铣刀、加工成形面用铣刀等类型。通用规格的铣刀已标准化,一般均由专业工具厂制造。以下介绍几种常用铣刀的特点及适用范围。

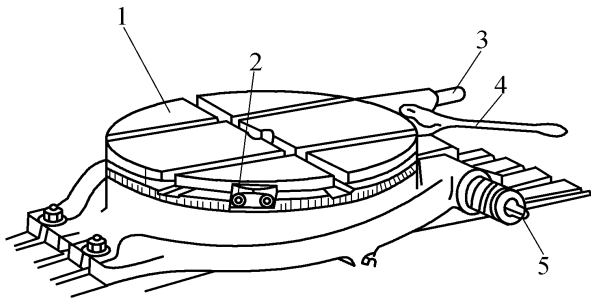


图 8.4.10 回转工作台

1—转盘；2—挡铁；3—传动轴；  
4—手柄；5—方头

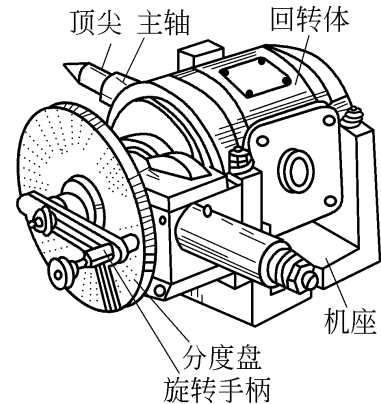


图 8.4.11 FW250 型万能分度头

### (1) 圆柱铣刀

如图 8.4.6a 所示,圆柱铣刀一般都是用高速钢整体制造,直线或螺旋线切削刃分布在圆周表面上,没有副切削刃。螺旋形的刀齿切削时是逐渐切入和脱离工件的,所以切削过程较平稳。主要用于卧式铣床铣削宽度小于铣刀长度的狭长平面。

### (2) 面铣刀(端铣刀)

如图 8.4.6b 所示,面铣刀主切削刃分布在圆柱或圆锥面上,端面切削刃为副切削刃。按刀齿材料可分为高速钢和硬质合金两大类,多制成套式镶齿结构。镶齿面铣刀刀盘直径一般为 75 mm~ 300 mm,最大可达 600 mm,主要用在立式或卧式铣床上铣削台阶面和平面,特别适合较大平面的铣削加工。用面铣刀加工平面,同时参加切削刀齿较多,又有副切削刃的修光作用,使加工表面粗糙度值小。硬质合金镶齿面铣刀可实现高速切削(100~150 m/min),生产效率高,应用广泛。

### (3) 立铣刀

如图 8.4.6c、d、e、h 所示,立铣刀一般有 3~4 个刀齿组成,圆柱面上的切削刃是主切削刃,端面上分布着副切削刃,工作时只能沿着刀具的径向进给,不能沿着铣刀轴线方向作进给运动。它主要用于铣削凹槽、台阶面和小平面,还可以利用靠模铣削成形表面。

### (4) 三面刃铣刀

三面刃铣刀可分为直齿三面刃和错齿三面刃,它主要用在卧式铣床上铣削台阶面和凹槽。如图 8.4.6f 所示,三面刃铣刀除圆周具有主切削刃外,两侧面也有副切削刃,从而改善了两端面切削条件,提高了切削效率,减小了表面粗糙度值。错齿三面刃铣刀,圆周上刀齿呈左右交错分布,和直齿三面刃铣刀相比,它切削较平稳、切削力小、排屑容易,故应用较广。

### (5) 锯片铣刀

如图 8.4.6g 所示,锯片铣刀很薄,只有圆周上有刀齿,侧面无切削刃,用于铣削窄槽和切断工件。为了减小摩擦和避免夹刀,其厚度由边缘向中心减薄,使两侧面形成副偏角。

## (6) 键槽铣刀

如图 8.4.6i 所示,它的外形与立铣刀相似,不同的是它在圆周上只有两个螺旋刀齿,其端面刀齿的刀刃延伸至中心,因此在铣两端不通的键槽时,可作适量的轴向进给。它主要用于加工圆头封闭键槽。铣削加工时,先轴向进给达到槽深,然后沿键槽方向铣出键槽全长。

如图 8.4.6 所示,其他还有角度铣刀(图 m)、成形铣刀(图 n、p)、T 形槽铣刀(图 k)、燕尾槽铣刀(图 l)及头部形状根据加工需要可以是圆锥形、圆柱形球头和圆锥形球头的模具铣刀(图 o)等等。

### 4. 铣削用量

#### (1) 铣削用量要素

铣削时调整机床用的参量称为铣削要素,也称为铣削用量要素,其内容为:

1) 铣削速度  $v_c$  即铣刀最大直径处切削刃的线速度,单位为  $m/min$ 。其值可用下式计算

$$v_c = dn/1000$$

式中  $d$ ——铣刀直径,mm;

$n$ ——铣刀转速,  $r/min$ 。

2) 进给量 铣削进给量有三种表示方法:

每齿进给量  $f_z$  铣刀每转过一个刀齿时,工件与铣刀沿进给方向的相对位移量,单位是  $mm/齿$ 。

每转进给量  $f$  铣刀每转一转时,工件与铣刀沿进给方向的相对位移量,单位是  $mm/r$ 。

进给速度  $v_f$  单位时间(每分钟)内,工件与铣刀沿进给方向的相对位移量,单位是  $mm/min$ 。

$f_z$ 、 $f$ 、 $v_f$  三者的关系是  $v_f = fn = f_z zn$  ( $z$  为铣刀刀齿数)

铣削加工规定三种进给量是由于生产的需要,其中  $v_f$  用以机床调整及计算加工工时;每齿进给量  $f_z$  则用来计算切削力、验算刀齿强度。一般铣床铭牌上进给量是用进给速度  $v_f$  标注的。

3) 背吃刀量  $a_p$   $a_p$  是指平行于铣刀轴线测量的切削层尺寸,单位为  $mm$ 。周铣时  $a_p$  是已加工表面宽度,端铣时  $a_p$  是切削层深度。

4) 侧吃刀量  $a_e$   $a_e$  是指垂直于铣刀轴线测量的切削层尺寸,单位为  $mm$ 。周铣时  $a_e$  是切削层深度,端铣时  $a_e$  是已加工表面宽度。

#### (2) 铣削用量的选择

铣削用量应根据工件材料、加工精度、铣刀耐用度及机床刚度等因素进行选择。首先选定铣削深度(背吃刀量  $a_p$ ),其次是每齿进给量  $f_z$ ,最后确定铣削速度  $v_c$ 。

表 8.4.2 和表 8.4.3 为铣削用量推荐值,供参考。

### 5. 铣削方式

#### (1) 周铣

用圆柱铣刀的圆周齿进行铣削的方式,称为周铣。周铣有逆铣和顺铣之分。

1) 逆铣 如图 8.4.12a 所示,铣削时,铣刀每一刀齿在工件切入处的速度方向与工件进给方向相反,这种铣削方式称为逆铣。逆铣时,刀齿的切削厚度从零逐渐增大至最大值。刀齿在开始切入时,由于刀齿刃口有圆弧,刀齿在工件表面打滑,产生挤压与摩擦,使这段表面产生冷硬层,至滑行一定程度后,刀齿方能切下一层金属层。下一个刀齿切入时,又在冷硬层上挤压、滑行,这

样不仅加速了刀具磨损,同时也使工件表面粗糙值增大。

表 8.4.2 粗铣每齿进给量  $f_z$  的推荐值

刀 具		材 料	推荐进给量/(mm/齿)
高速钢	圆柱铣刀	钢	0.1~0.15
		铸铁	0.12~0.20
	面铣刀	钢	0.04~0.06
		铸铁	0.15~0.20
	三面刃铣刀	钢	0.04~0.06
		铸铁	0.15~0.25
硬质合金铣刀		钢	0.1~0.20
		铸铁	0.15~0.30

表 8.4.3 铣削速度  $v_c$  的推荐值

工件材料	铣削速度/(m/min)		说 明
	高速钢铁刀	硬质合金铣刀	
20	20~45	150~190	粗铣时取小值,精铣时取大值 工件材料强度和硬度越高取小值,反之取大值 刀具材料耐热性好取大值,耐热性差取小值
45	20~35	120~150	
40Cr	15~25	60~90	
HT150	14~22	70~100	
黄铜	30~60	120~200	
铝合金	112~300	400~600	
不锈钢	16~25	50~100	

由于铣床工作台纵向进给运动是用丝杠螺母副来实现的,螺母固定,由丝杠带动工作台移动,由图 8.4.12a 可见,逆铣时,铣削力  $F$  的纵向铣削分力  $F_x$  与驱动工作台移动的纵向力方向相反,这样使得工作台丝杠螺纹的左侧与螺母齿槽左侧始终保持良好接触,工作台不会发生窜动现象,铣削过程平稳。但在刀齿切离工件的瞬时,铣削力  $F$  的垂直铣削分力  $F_z$  是向上的,对工件夹紧不利,易引起振动。

2) 顺铣 如图 8.4.12b 所示,铣削时,铣刀每一刀齿在工件切入处的速度方向与工件进给方向相同,这种切削方式称为顺铣。顺铣时,刀齿的切削厚度从最大逐步递减至零,没有逆铣时的滑行现象,已加工表面的加工硬化程度大为减轻,表面质量较高,铣刀的耐用度比逆铣高。同时铣削力  $F$  的垂直分力  $F_z$  始终压向工作台,避免了工件的振动。

顺铣时,切削力  $F$  的纵向分力  $F_x$  始终与驱动工作台移动的纵向力方向相同。如果丝杠螺母副存在轴向间隙,当纵向切削力  $F_x$  大于工作台与导轨之间的摩擦力时,会使工作台带动丝杠出现左右窜动,造成工作台进给不均匀,严重时会出现打刀现象。粗铣时,如果采用顺铣方式加工,则铣床工作台进给丝杠螺母副必须有消除轴向间隙的机构。否则宜采用逆铣方式加工。

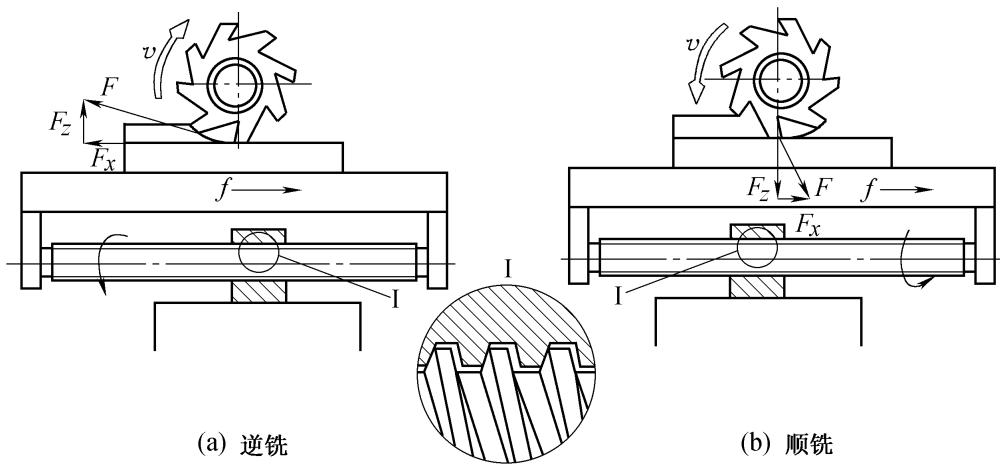


图 8.4.12 周铣方式

## (2) 端铣

用端铣刀的端面齿进行铣削的方式称为端铣。如图 8.4.13 所示,铣削加工时,根据铣刀与工件相对位置的不同,端铣分为对称铣和不对称铣两种。不对称铣又分为不对称逆铣和不对称顺铣。

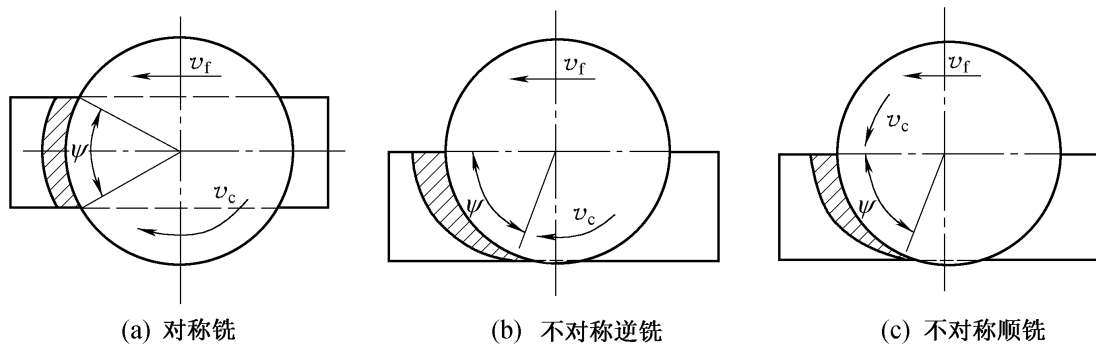


图 8.4.13 端铣方式

1) 对称铣 如图 8.4.13a 所示,铣刀轴线位于铣削弧长的对称中心位置,铣刀每个刀齿切入和切离工件时切削厚度相等,称为对称铣。对称铣削具有最大的平均切削厚度,可避免铣刀切入时对工件表面的挤压、滑行,铣刀耐用度高。对称铣适用于工件宽度接近面铣刀的直径,且铣刀刀齿较多的情况。

2) 不对称逆铣 如图 8.4.13b 所示,当铣刀轴线偏置于铣削弧长的对称位置,且逆铣部分大于顺铣部分的铣削方式,称为不对称逆铣。不对称逆铣切削平稳,切入时切削厚度小,减小了冲击,从而使刀具耐用度和加工表面质量得到提高。适合于加工碳钢及低合金钢及较窄的工件。

3) 不对称顺铣 如图 8.4.13c 所示,其特征与不对称逆铣正好相反。这种切削方式一般很少采用,但用于铣削不锈钢和耐热合金钢时,可减少硬质合金刀具剥落磨损。

上述的周铣和端铣,是由于在铣削过程中采用不同类型的铣刀而产生的不同铣削方式,两种铣削方式相比,端铣具有铣削较平稳,加工质量及刀具耐用度均较高的特点,且端铣用的面铣刀易镶硬质合金刀齿,可采用大的切削用量,实现高速切削,生产率高。但端铣适应性差,主要用于平面铣削。周铣的铣削性能虽然不如端铣,但周铣能用多种铣刀,铣平面、沟槽、齿形和成形表面

等 适应范围广 ,因此生产中应用较多。

#### 8.4.4 平面磨削加工

对于精度要求高的平面以及淬火零件的平面加工 ,需要采用平面磨削方法。平面磨削主要在平面磨床上进行。平面磨削时 ,对于形状简单的铁磁性材料工件 ,采用电磁吸盘装夹工件 ,操作简单方便 ,能同时装夹多个工件 ,而且能保证定位面与加工面的平行度要求。对于形状复杂或非铁磁性材料的工件 ,可采用精密平口虎钳或专用夹具装夹 ,然后用电磁吸盘或真空吸盘吸牢。

##### 1. 平面磨削方式

根据砂轮工作面的不同 ,平面磨削分为周磨和端磨两类。

##### (1) 周磨

如图 8.4.14a、b 所示 ,它是采用砂轮的圆周面对工件平面进行磨削。这种磨削方式 ,砂轮与工件的接触面积小 ,磨削力小 ,磨削热小 ,冷却和排屑条件较好 ,而且砂轮磨损均匀。

##### (2) 端磨

如图 8.4.14c、d 所示 ,它是采用砂轮端面对工件平面进行磨削。这种磨削方式 ,砂轮与工件的接触面积大 ,磨削力大 ,磨削热多 ,冷却和排屑条件差 ,工件受热变形大。此外 ,由于砂轮端面径向各点的圆周速度不相等 ,砂轮磨损不均匀。

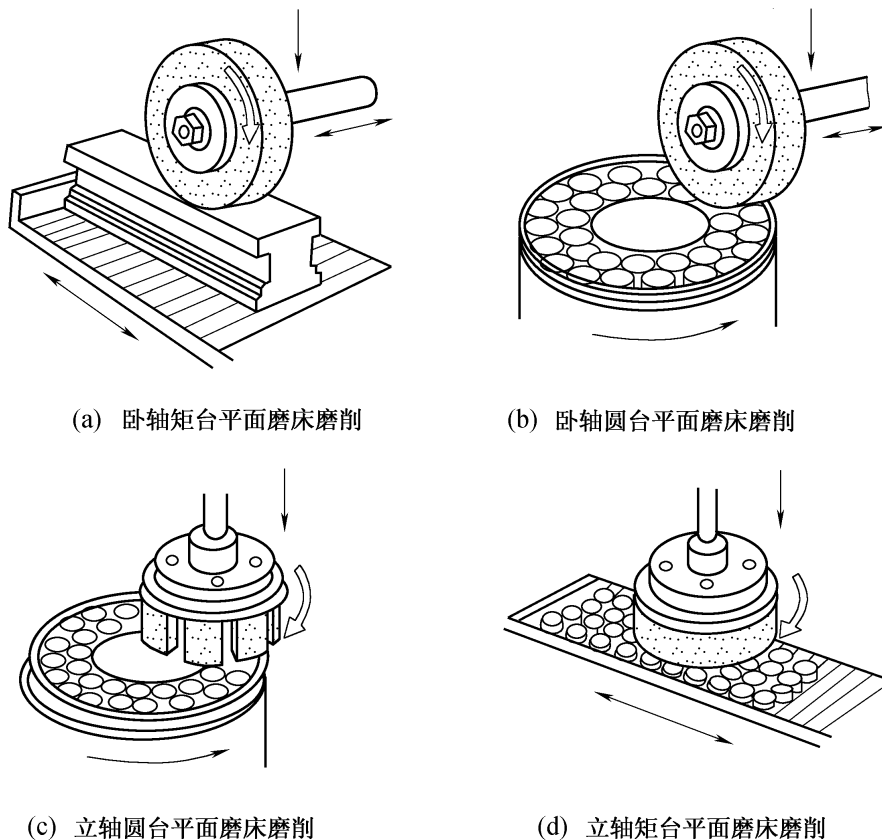


图 8.4.14 平面磨床加工示意图

##### 2. 平面磨床的类型及特点

根据平面磨床工作台的形状和砂轮工作面的不同 ,普通平面磨床可分为四种类型 :卧轴矩台式平面磨床(图 8.4.14a) ;卧轴圆台式平面磨床(图 8.4.14b) ;立轴圆台式平面磨床(图 8.4.14c) ;



立轴矩台式平面磨床(图 8.4.14d)。

上述四种平面磨床中,用砂轮端面磨削的平面磨床与用砂轮圆周面磨削的平面磨床相比,由于端面磨削的砂轮直径往往比较大,能同时磨削出工件的宽度和面积大,同时砂轮悬伸长度短,刚性好,可采用较大的磨削用量,生产率较高。但砂轮散热、冷却、排屑条件差,所以加工精度和表面质量不高,一般用于粗磨。而用圆周面磨削的平面磨床,加工质量较高,但这种平面磨床生产效率低,适合于精磨。圆台式平面磨床和矩台式平面磨床相比,由于圆台式是连续进给,生产效率高,适用于磨削小零件和大直径的环形零件端面,不能磨削长零件。矩台式平面磨床,可方便磨削各种常用零件,包括直径小于工作台面宽度的环形零件。生产中常用的是卧轴矩台式平面磨床和立轴圆台式平面磨床。图 8.4.15 是卧轴矩台式平面磨床外形图。工作台 2 沿床身 1 的纵向导轨的往复直线进给运动由液压传动,也可手动进行调整。工件用电磁吸盘式夹具装夹在工作台上。砂轮架 3 可沿滑座 4 的燕尾导轨作横向间歇进给(或手动或液动)。滑座和砂轮架一起可沿立柱 5 的导轨作间歇的垂直切入运动(手动)。砂轮主轴由内装式异步电动机直接驱动。

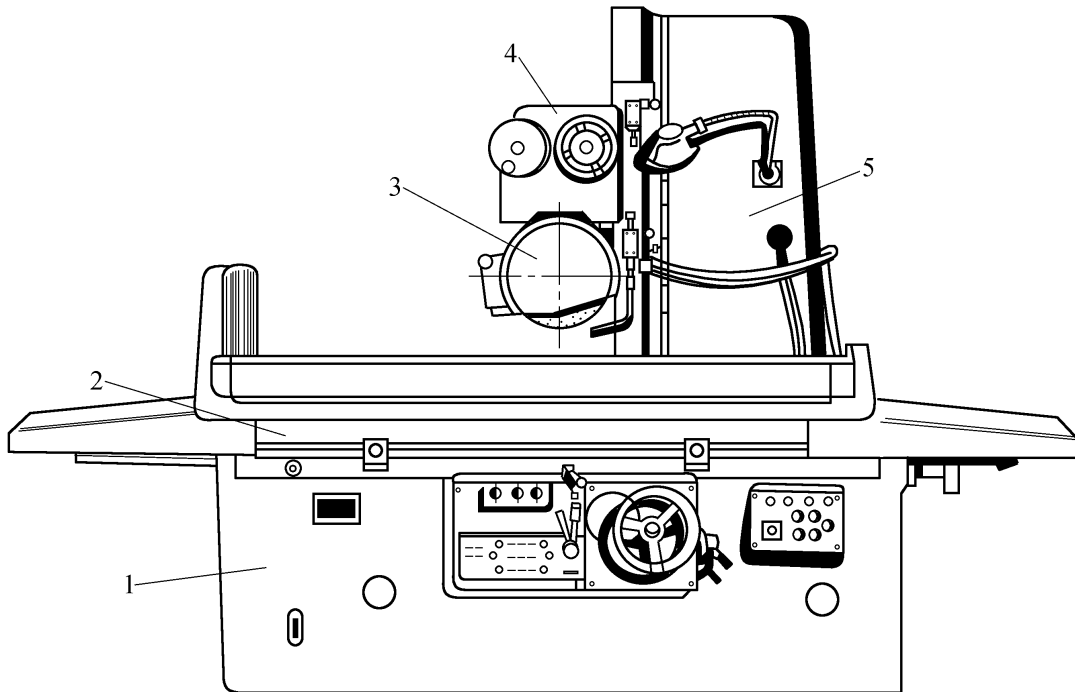


图 8.4.15 卧式矩台平面磨床

1—床身;2—工作台;3—砂轮架;4—滑座;5—立柱

## 8.5 齿轮的齿形加工

齿轮在各种机械、仪器、仪表中应用广泛,它是传递运动和动力的重要零件,齿轮的质量直接影响到机电产品的工作性能、承载能力、使用寿命和工作精度等。常用的齿轮副有圆柱齿轮、圆锥齿轮及蜗杆蜗轮等,见图 8.5.1。其中,外啮合直齿圆柱齿轮是最基本的,也是应用最多的。

在现代机电产品中,虽然数控技术和液压电气传动技术有很大的发展,但由于齿轮传动的传动效率高、传动比准确,在高速重载条件下工作,齿轮传动体积小,所以应用仍很广泛。随着科学技术的发展和机电产品精度的不断提高,对齿轮的传动精度和圆周速度等方面的要求越来越高。

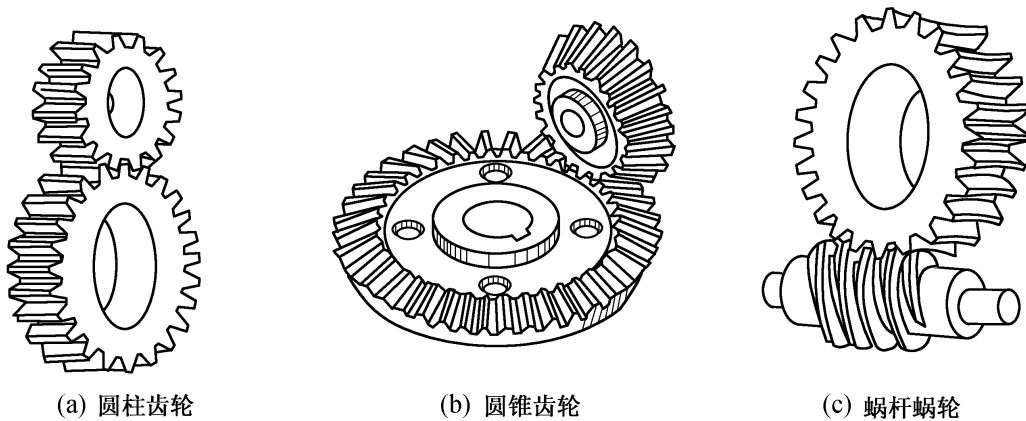


图 8.5.1 常见齿轮的种类

因此, 齿轮齿形加工在机械制造业中仍占重要地位。

齿轮的齿形曲线有渐开线、摆线、圆弧等, 其中最常用的是渐开线。本章仅介绍渐开线齿轮齿形的加工方法。

### 8.5.1 圆柱齿轮齿形加工方法

在齿轮的齿坯上加工出渐开线齿形的方法很多, 按齿廓的成形原理不同, 圆柱齿轮齿形的切削加工可分为成形法和展成法两种。

#### 1. 成形法

成形法加工齿轮齿形的原理是利用与被加工齿轮齿槽法向截面形状相符的成形刀具, 在齿坯上加工出齿形的方法。成形法加工齿轮的方法有铣齿、拉齿、插齿及磨齿等, 其中最常用的方法是在普通铣床上用成形铣刀铣削齿形。当齿轮模数  $m < 8$  时, 一般在卧式铣床上用盘状铣刀铣削, 见图 8.5.2a; 当齿轮模数  $m \geq 8$  时, 在立式铣床上用指状铣刀铣削, 见图 8.5.2b。

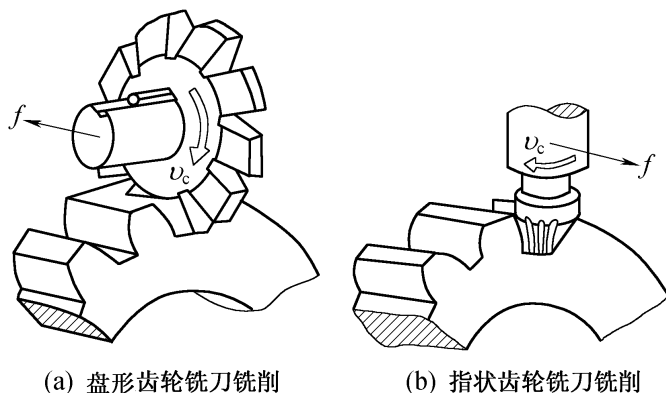


图 8.5.2 直齿圆柱齿轮的成形铣削

铣削时, 将齿坯装夹在心轴上, 心轴装在分度头顶尖和尾座顶尖间, 模数铣刀作旋转主运动, 工作台带着分度头、齿坯作纵向进给运动, 实现齿槽的成形铣削加工。每铣完一个齿槽, 工件退回, 按齿数  $z$  进行分度, 然后再加工下一个齿槽, 直至铣完所有的齿槽。铣削斜齿圆柱齿轮应在万能铣床上进行, 铣削时, 工作台偏转一个齿轮的螺旋角, 齿坯在随工作台进给的同时, 由分度头带动作附加转动, 形成螺旋线运动。

用成形法加工齿轮的齿廓形状是由模数铣刀刀刃形状来保证; 齿廓分布的均匀性则由分度

头分度精度保证。标准渐开线齿轮的齿廓形状是由该齿轮的模数  $m$  和齿数  $z$  决定的。因此,要加工出准确的齿形,就必须要求同一模数不同齿数的齿轮都有一把相应的模数铣刀,这将导致刀具数量非常多,在生产中是极不经济的。实际生产中,将同一模数的铣刀一般只做出 8 把,分别铣削齿形相近的一定齿数范围的齿轮。模数铣刀刀号及其加工齿数范围见表 8.5.1。

表 8.5.1 模数铣刀刀号及其加工齿数范围

刀号	1	2	3	4	5	6	7	8
加工齿数范围	12 ~ 13	14 ~ 16	17 ~ 20	21 ~ 25	26 ~ 34	35 ~ 54	55 ~ 134	135 以上

每种刀号齿轮铣刀的刀齿形状均按加工齿数范围中最少齿数的齿形设计。所以在加工该范围内其他齿数齿轮时,会有一些的齿形误差产生。

当加工精度要求不高的斜齿圆柱齿轮时,可以借用加工直齿圆柱齿轮的铣刀。但此时铣刀的刀号应按照斜齿轮法向截面内的当量齿数  $z_d$  来选择。

$$z_d = \frac{z}{\cos^3 \alpha}$$

式中  $z$ ——斜齿圆柱齿轮齿数;

$\alpha$ ——斜齿圆柱齿轮的螺旋角。

成形法铣齿的优点在于:可在一般铣床上进行,对于缺乏专用齿轮加工设备的工厂较为方便,模数铣刀比其他齿轮刀具结构简单,制造容易,因此生产成本低。但由于每铣一个齿槽均需进行切入、切出、退刀以及分度等工作,加工时间和辅助时间长,所以生产效率低。由于受刀具的齿形误差和分度误差的影响,加工的齿轮存在较大的齿形误差和分齿误差,故铣齿精度较低。加工精度为 9 ~ 12 级、齿面粗糙度  $Ra$  值为 6.3 ~ 3.2  $\mu\text{m}$ 。

成形法铣齿一般用于单件小批量生产或机修工作中,加工直齿、斜齿和人字齿圆柱齿轮,也可加工重型机械中精度要求不高的大型齿轮。

## 2. 展成法

展成法加工齿轮齿形是利用一对齿轮啮合的原理来实现的。即把其中一个转化为具有切削能力的齿轮刀具,另一个转化为被切工件,通过专用齿轮加工机床,强制刀具和工件作严格的啮合运动(展成运动),在运动过程中,刀具切削刃的运动轨迹逐渐包络出工件的齿形。

展成法加工齿轮,一种模数和压力角的刀具,可以加工出相同模数和压力角而齿数不同的齿轮,其加工过程是连续的,具有较高的加工精度和生产效率,是齿轮齿形主要的加工方法。滚齿和插齿是展成法中最常见的两种加工方法。

## 8.5.2 滚齿加工

### 1. 滚齿加工原理

滚齿加工是按照展成法的原理来加工齿轮的。用滚刀来加工齿轮相当于一对交错轴的螺旋齿轮啮合。在这对啮合的齿轮副中,一个齿数很少、只有一个或几个,螺旋角很大,就演变成了一个蜗杆状齿轮,为了形成切削刃,在该齿轮垂直于螺旋线的方向上开出容屑槽,磨前、后刀面,形成切削刃和前、后角,于是就变成了滚刀。滚刀与齿坯按啮合传动关系作相对运动,在齿坯上切出齿槽,形成了渐开线齿面,如图 8.5.3a 所示。在滚切过程中,分布在螺旋线上的滚刀各刀齿相

继续切出齿槽中一薄层金属,每个齿槽在滚刀旋转中由几个刀齿依次切出,渐开线齿廓则由切削刃一系列瞬时位置包络而成,如图 8.5.3b 所示。因此,滚齿加工齿面的成形方法是展成法,成形运动是由滚刀的旋转运动和工件的旋转运动组成的复合运动( $B_{11} + B_{12}$ ),这个复合运动称为展成运动。当滚刀与工件连续啮合转动时,便在工件整个圆周上依次切出所有齿槽。在这一过程中,齿面的形成与齿轮分度是同时进行的,因而展成运动也就是分度运动。

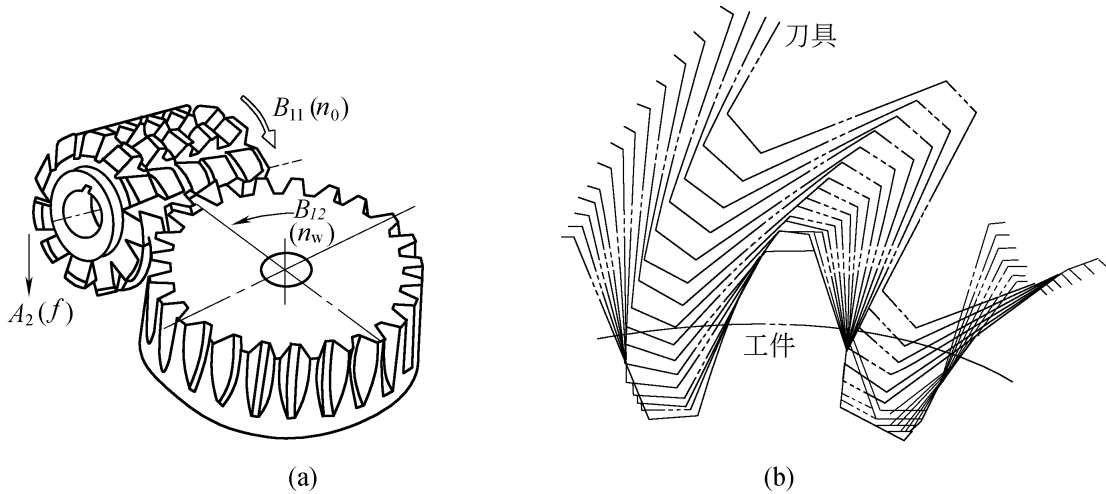


图 8.5.3 滚齿加工原理

综上所述,为了得到渐开线齿廓和齿轮齿数,滚齿时,滚刀和工件间必须保持严格的相对运动关系,即当滚刀转过 1 转时,工件相应地转过  $K/z$  转( $K$  为滚刀头数, $z$  为工件齿数)。

## 2. 加工直齿圆柱齿轮的传动原理

在滚齿机上加工直齿圆柱齿轮必须具备两个运动:形成渐开线齿廓的展成运动和形成直线齿面(导线)的运动。图 8.5.4 为滚切直齿圆柱齿轮的传动原理图。

### (1) 展成运动传动链

联系滚刀主轴的旋转运动  $B_{11}$  和工件旋转运动  $B_{12}$  的传动链(4—5— $u_x$ —6—7—工作台)为展成运动传动链。由这条传动链保证工件和刀具之间严格的运动关系,其中换置机构  $u_x$  用来适应工件齿数和滚刀头数的变化。这是一条内联系传动链,它不仅要求传动比准确,而且要求滚刀和工件两者旋转方向必须符合一对交错轴螺旋齿轮啮合时相对运动方向。当滚刀旋转方向一定时,工件的旋转方向由滚刀螺旋方向确定。

### (2) 主运动传动链

主运动传动链是联系动力源和滚刀主轴的传动链。如图 8.5.4 所示,主运动传动链为:电动机—1—2— $u_v$ —3—4—滚刀。这是一条外联系传动链,其传动链中换置机构  $u_v$  用于调整渐开线齿廓的成形速度,应当根据工艺条件确定滚刀转速来调整其传动比。

### (3) 垂直进给运动传动链

为了切出整个齿宽,滚刀在自身旋转的同时,必须沿工件轴线作直线进给运动  $A_1$ ,滚刀的垂直进给运动是由滚刀刀架沿立柱导轨移动实现的。在图 8.5.4 中,将工作台和刀架联系起来的

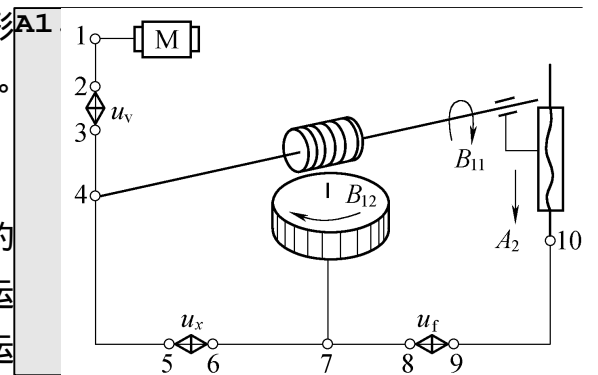


图 8.5.4 滚切直齿圆柱齿轮的传动原理图



属于展成法的滚齿加工,不存在成形法铣齿的那种齿形曲线理论误差,所以分齿精度高,一般可加工 8~7 级精度的齿轮。

## (2) 生产率高

滚齿加工属于连续切削,无辅助时间损失,生产率一般比铣齿、插齿高。

## (3) 一把滚刀可加工模数和压力角与滚刀相同而齿数不同的圆柱齿轮

在齿轮齿形加工中,滚齿应用最广泛,它除可加工直齿、斜齿圆柱齿轮外,还可以加工蜗轮、花键轴等。但一般不能加工内齿轮、扇形齿轮和相距很近的双联齿轮。滚齿适用于单件小批量生产和大批大量生产。

## 5. Y3150E 型滚齿机的组成

Y3150E 型滚齿机是一种中型通用滚齿机,主要用于加工直齿和斜齿圆柱齿轮,也可以采用径向切入法加工蜗轮。可以加工的工件最大直径为 500 mm,最大模数 8 mm,图 8.5.6 为该机床的外形图。立柱 2 固定在床身 1 上,刀架溜板 3 可沿立柱导轨上下移动。刀架体 5 安装在刀架溜板 3 上,可绕自己的水平轴线转位。滚刀安装在刀杆 4 上,作旋转运动。工件安装在工作台 9 的心轴 7 上,随工作台一起转动。后立柱 8 和工作台 9 一起装在床鞍 10 上,可沿机床水平导轨移动。用于调整工件的径向位置或作径向进给运动。

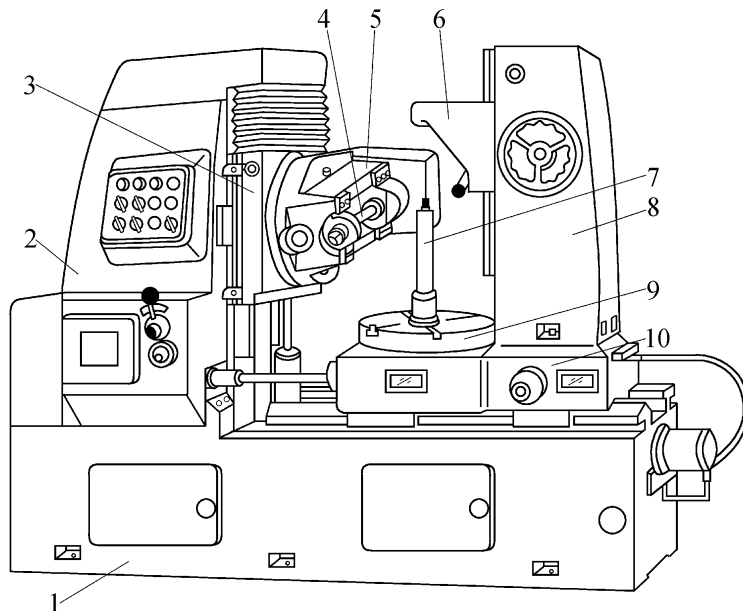


图 8.5.6 Y3150E 型滚齿机

1—床身;2—立柱;3—刀架溜板;4—刀杆;5—刀架体;  
6—支架;7—心轴;8—后立柱;9—工作台;10—床鞍

## 8.5.3 插齿加工

### 1. 插齿原理

插齿是利用插齿刀在插齿机上加工内、外齿轮或齿条等的齿面加工方法。

插齿的加工过程,从原理上讲,相当于一对直齿圆柱齿轮的啮合。工件和插齿刀的运动形式,见图 8.5.7a。插齿刀相当于一个在齿轮上磨出前角和后角,形成切削刃的齿轮,而齿轮齿坯则作为另一个齿轮。插齿时刀具沿工件轴线方向作高速的往复直线运动,形成切削加工的主运动,同时还与工件作无间隙的啮合运动,在工件上加工出全部轮齿齿廓。在加工过程中,刀具每

往复一次仅切出工件齿槽的很小一部分,工件齿槽的齿面曲线是由插齿刀切削刃多次切削的包络线所组成的,如图 8.5.7b 所示。

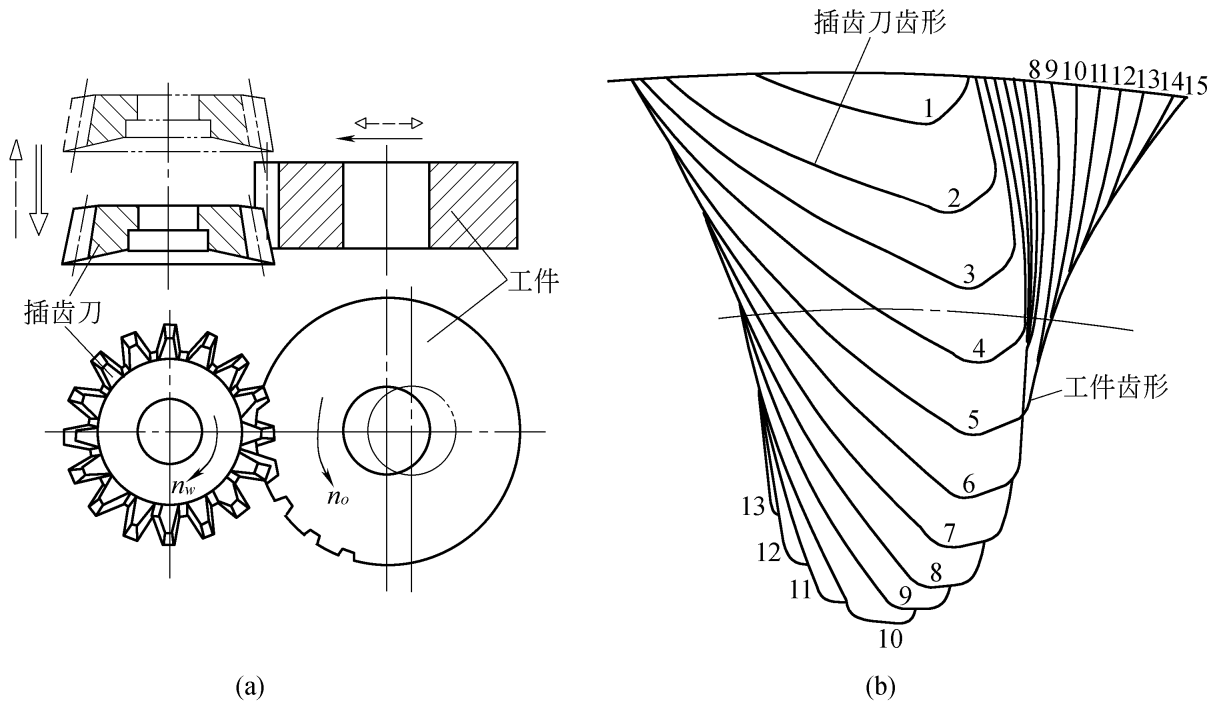


图 8.5.7 插齿原理

插齿加工时,插齿机必须具备以下运动:

(1) 主运动

插齿刀的上、下往复运动称为主运动。以每分钟的往复次数来表示,向下为切削行程,向上为返回行程。

(2) 展成运动

插齿时,插齿刀和工件之间必须保持一对齿轮副的啮合运动关系,即插齿刀每转过一个齿( $1/z_1$  转)时,工件也必须转过一个齿( $1/z_2$  转)。

(3) 径向进给运动

为了逐渐切至工件的全齿深,插齿刀必须有径向进给运动。径向进给量是用插齿刀每次往复行程中工件或刀具径向移动的毫米数来表示。当达到全齿深时,机床便自动停止径向进给运动,工件和刀具必须对滚一周,才能加工出全部轮齿。

(4) 圆周进给运动

展成运动只确定插齿刀和工件的相对运动关系,而运动快、慢由圆周进给运动来确定。插齿刀每一往复行程在分度圆上所转过的弧长称为圆周进给量,其单位为 mm/往复行程。

(5) 让刀运动

为了避免插齿刀在回程时擦伤已加工表面和减少刀具磨损,刀具和工件之间应让开一段距离,而在插齿刀重新开始向下工作行程时,应立即恢复到原位,以便刀具向下切削工件。这种让开和恢复原位的运动称为让刀运动。一般新型号的插齿机通过刀具主轴座的摆动来实现让刀运动,以减小让刀产生的振动。

图 8.5.8 是插齿机的传动原理图。主运动传动链由“电动机 M—1—2— $u_r$ —3—





加工。

插齿适用于加工模数小,齿宽较窄的内齿轮、双联或多联齿轮、齿条、扇形齿等。

#### 8.5.4 齿形的其他加工方法

对于6级精度以上的齿轮,或者淬火后的硬齿面加工,往往需要在滚齿、插齿之后经热处理再进行精加工,常用的齿面精加工方法有剃齿、珩齿和磨齿。以下简述这三种加工方法原理及应用。

##### 1. 剃齿

剃齿是利用剃齿刀在专用剃齿机上对齿轮齿形进行精加工的一种方法,专门用来加工未经淬火(HRC35以下)的圆柱齿轮。剃齿加工精度可达7~6级,齿面的 $Ra$ 值可达 $0.8\sim 0.4\mu\text{m}$ 。

剃齿在原理上属于展成法加工。剃齿刀的形状类似于螺旋齿轮,齿形做得非常准确,在齿面上沿渐开线方向开有许多小沟槽以形成切削刃(见图8.5.9a)。当剃齿刀与被加工齿轮啮合运转时,剃齿刀齿面上的众多切削刃将从工件齿面上剃下细丝状的切屑,使齿形精度提高和齿面粗糙度值降低。

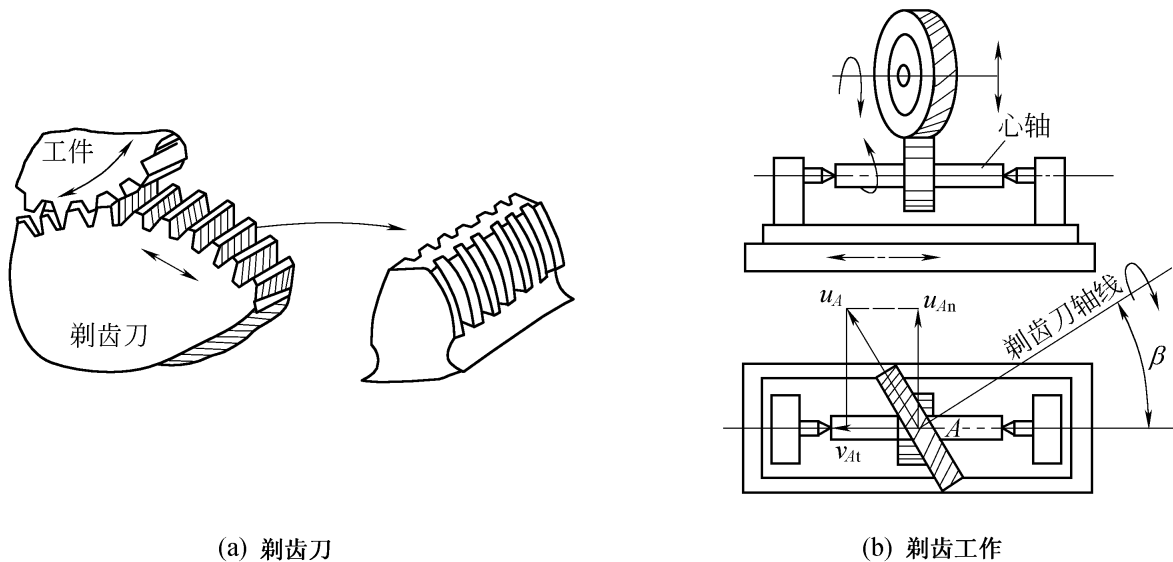


图8.5.9 剃齿刀和剃齿原理

剃齿加工时工件与刀具的运动形式见图8.5.9b。工件安装在心轴上,由剃齿刀带动旋转,由于剃齿刀刀齿是倾斜的(螺旋角为 $\beta$ ),为使它能与工件正确啮合,必须使其轴线相对于工件轴线倾斜一个 $\beta$ 角。剃齿时,剃齿刀在啮合点A的圆周速度 $v_A$ 可以分解为沿工件切向速度 $v_{An}$ 和沿工件轴向速度 $v_{At}$ , $v_{An}$ 使工件旋转, $v_{At}$ 为齿面相对滑动速度,即剃齿速度。为了剃削工件的整个齿宽,工件应由工作台带动作往复直线运动。工作台每次往复行程终了时,剃齿刀沿工件径向作进给运动,使工件齿面每次被剃去一层约为 $0.007\sim 0.03\text{mm}$ 的金属。在剃削过程中,剃齿刀时而正转,剃削轮齿的一个侧面;时而反转,剃削轮齿的另一个侧面。

剃齿加工主要用于提高齿形精度和齿向精度,降低齿面粗糙度值。剃齿不能修正分齿误差。剃后齿轮精度可达7~6级,表面粗糙度 $Ra$ 值为 $0.8\sim 0.2\mu\text{m}$ 。剃齿主要用于成批和大量生产中精加工齿面未淬硬的直齿和斜齿圆柱齿轮。

##### 2. 磨齿

磨齿是用砂轮在专用磨齿机中对已淬火齿轮进行精加工的一种方法。磨齿按加工原理可分为成形法和展成法两种。

### (1) 成形法磨齿

成形法磨齿和成形法铣齿的原理相同,砂轮截面形状修整成与被磨齿轮齿槽一致,磨齿时的工作状况与盘状铣刀铣齿工作状况相似,如图 8.5.10 所示。

磨齿时的分度运动是不连续的,在磨完一个齿之后必须进行分度,再磨下一个齿,轮齿是逐个加工出来的。成形法磨齿由于砂轮一次就能磨削出整个渐开线齿面,故生产率高,但受砂轮修整精度和机床分度精度的影响,其加工精度较低(6~5级),在生产中应用较少。

### (2) 展成法磨齿

是将砂轮的磨削部分修整成锥面(见图 8.5.11b),以构成假想齿条的齿面。磨削时,砂轮作高速旋转运动(主运动),同时沿工件轴向作往复直线运动,以磨出全齿宽。工件则严格按照一齿轮沿固定齿条作纯滚动的方式,边转动、边移动,从齿根向齿顶方向先后磨出一个齿槽两侧面。之后砂轮退离工件,机床分度机构进行分度,使工件转过一个齿,磨削下一个齿槽的齿面,如此重复上述循环,直至磨完全部齿槽齿面。

锥面砂轮磨齿精度可达 6~4 级,齿面粗糙度  $Ra$  值为  $0.4 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。主要用于单件、小批生产中、加工精度要求很高的淬硬或非淬硬齿轮。

如果将两个碟形砂轮倾斜成一定角度,以构成假想齿条两个齿的两个外侧面,同时对齿轮轮齿的两个齿面进行磨削(图 8.5.11a),其原理同前述锥面砂轮磨齿相同。这种磨齿方法,加工精度高(最高可达 3 级)、齿面粗糙度  $Ra$  值为  $0.4 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。但所用设备结构复杂,成本高、生产率低,故应用不广。

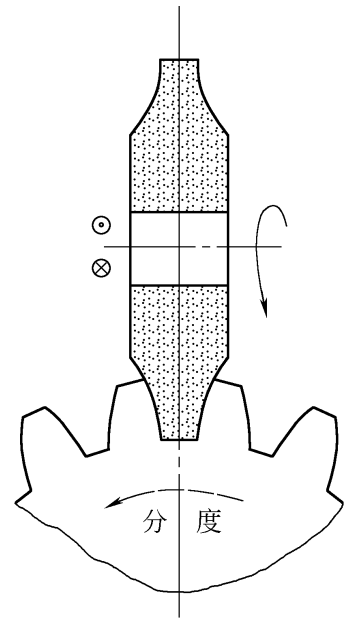


图 8.5.10 成形法磨齿

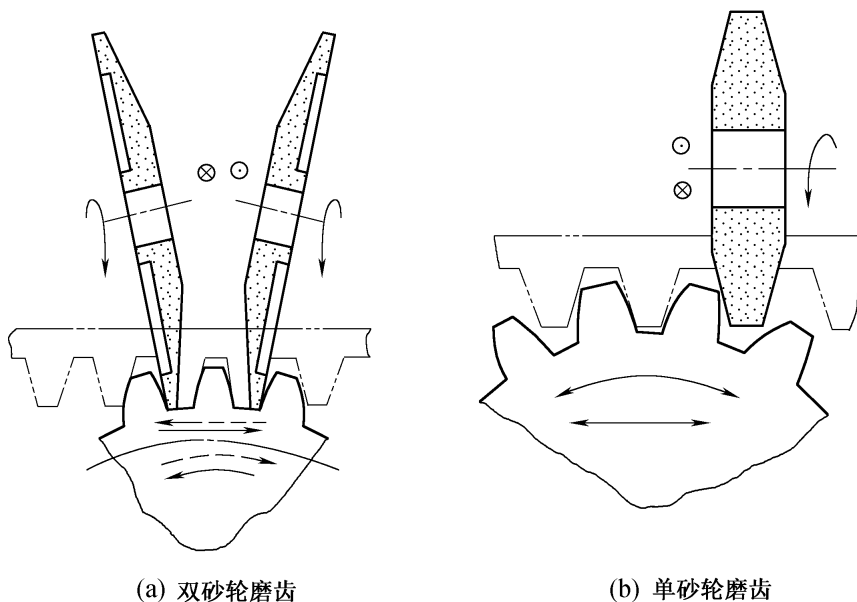


图 8.5.11 展成法磨齿

## 3. 珩齿

当工件硬度超过 HRC35 时,使用珩齿代替剃齿。珩齿是在珩磨机上用珩磨轮对齿轮进行精

整加工的一种方法,其原理和运动与剃齿相同。

珩磨轮是用金刚砂及环氧树脂等浇注或热压而成的具有较高齿形精度的斜齿轮,它的硬度极高,其外形结构与剃齿刀相似,只是齿面上无容屑槽,是靠磨粒进行切削的。

珩磨时,珩磨轮转速高(约为 1 000~2 000 r/min),可同时沿齿向和渐开线方向产生滑动进行连续切削,生产率高。珩磨过程具有磨、剃、抛光等综合作用。

珩齿对齿形精度改善不大,主要用于剃齿后需淬火齿轮的精加工,能去除氧化皮、毛刺,改善热处理后的轮齿表面粗糙度( $Ra$  值为 0.4~0.2  $\mu\text{m}$ )。珩齿也可用于非淬硬齿轮加工。

### 8.5.5 齿形加工方案的选择

齿形加工是齿轮加工的关键,其加工方案的选择取决于诸多因素,主要决定于齿轮的精度等级,此外还应考虑齿轮的结构特点、硬度、表面粗糙度、生产批量、设备条件等。常用齿形加工方案如下:

#### 1. 9 级精度以下齿轮

一般采用铣齿—齿端加工—热处理—修正内孔的加工方案。若无热处理可去掉修正内孔的工序。此方案适用于单件小批生产或维修。

#### 2. 8~7 级精度齿轮

采用滚(插)齿—齿端加工—淬火—修正基准—珩齿(研齿)的加工方案。若无淬火工序,可去掉修正基准和珩齿工序。此方案适于各种批量生产。

#### 3. 7~6 级精度齿轮

采用滚(插)齿—齿端加工—剃齿—淬火—修正基准—珩齿(或磨齿)的加工方案。单件小批生产时采用磨齿方案;大批大量生产时采用珩齿方案。如不需淬火,则可去掉磨齿或珩齿工序。

#### 4. 6~3 级精度齿轮

采用滚(插)齿—齿端加工—淬火—修正基准—磨齿加工方案。此方案适用各种批量生产。如果齿轮精度虽低于 6 级,但淬火后变形较大的齿轮,也需采用磨齿方案。

### 复习与思考题

8-1 按加工性质和所用刀具不同,机床可分为哪几类?

8-2 通用机床的型号包含哪些内容?

8-3 说明下列机床型号的意义:

X6132, X5032, C6132, Z3040, T6112, Y3150, C1312, B2010A。

8-4 何谓简单运动?何谓复合运动?试举例说明。

8-5 何谓外联系传动链?何谓内联系传动链?对这两种传动链有何不同要求?试举例说明。

8-6 根据题 8-6 图 a 和 b 所示传动系统图,要求:

1) 分别列出图 a、图 b 的传动路线表达式;

2) 分析图 a、图 b 轴的转速级数;

3) 分别计算图 a、图 b 轴的最高转速和最低转速。

8-7 车刀按结构不同有哪几种类型,各有什么特点?

8-8 简述车削加工的工艺范围。

8-9 当 C6140 型卧式车床齿轮处于图 8.2.8 所示啮合位置时,试计算:刀架的纵、横进给量?如  $M_5$  接合,



- 8 - 19 试分析钻孔、扩孔和铰孔三种孔加工方法的工艺特点,并说明这三种孔加工工艺之间的联系。
- 8 - 20 试分析比较外排屑、内排屑和喷吸式深孔钻的工作原理、优缺点和使用范围。
- 8 - 21 镗削加工有何特点?常用的镗刀有哪几种类型?其结构和特点如何?
- 8 - 22 卧式镗床有哪些成形运动?说明它能完成哪些加工工作。
- 8 - 23 试述拉削工艺特点和应用。
- 8 - 24 拉削有时要将工件端面靠在球面垫上,为什么?
- 8 - 25 常用圆孔拉刀的结构有哪几部分组成?各部分起什么作用?
- 8 - 26 试述内圆磨削的工艺特点及应用范围。
- 8 - 27 试述刨削的工艺特点和应用。
- 8 - 28 常用刨床有哪几种?它们的应用有何不同?
- 8 - 29 试述铣削加工的工艺范围及特点。
- 8 - 30 常用铣床及铣床附件有哪几种?各自的主要用途是什么?
- 8 - 31 铣削为什么比其他切削加工方法容易产生振动?
- 8 - 32 端铣与周铣,逆铣与顺铣各有何特点?应用如何?
- 8 - 33 试分析磨平面时,端磨法与周磨法各自的特点。
- 8 - 34 平面磨床有哪几种类型?常用的是哪种类型?
- 8 - 35 电磁吸盘装夹工件有何优点?磨削非磁性材料及薄片工件平面时,应如何装夹?
- 8 - 36 切削加工齿轮齿形,按齿形的成形原理,齿形加工分为哪两大类?它们各自有何特点?
- 8 - 37 加工模数  $m = 3 \text{ mm}$  的直齿圆柱齿轮,齿数  $z_1 = 26, z_2 = 34$ ,试选择盘形齿轮铣刀的刀号。在相同切削条件下,哪个齿轮加工精度高?为什么?
- 8 - 38 加工一个模数  $m = 5 \text{ mm}$ ,齿数  $z = 40$ ,分度圆柱螺旋角  $\beta = 15^\circ$  的斜齿圆柱齿轮,应选何种刀号的盘形齿轮铣刀?
- 8 - 39 滚切直、斜齿圆柱齿轮各需几个成形运动和几条运动传动链?各条传动链的性质如何?
- 8 - 40 滚齿和插齿加工各有何特点?
- 8 - 41 剃齿、磨齿、珩齿各有何特点?用于什么场合?

# 第9章 特种加工

特种加工去除材料的原理完全不同于常规的切削方法。它是直接利用电能、热能、声能、光能、化学能和电化学能,有时也结合机械能对工件进行的加工。特种加工主要用于难加工材料、形状特别复杂、细微结构以及高精度、表面质量有特殊要求的零件的加工。特种加工方法很多,本章介绍常用的电火花加工、电火花线切割加工以及电解加工、超声加工等的基本原理、工艺特点及其应用。

## 9.1 概 述

传统的切削加工方法都是采用比工件材料硬的刀具,依靠机械力进行加工的。20世纪40年代发明的电火花加工,开始出现了用硬度低于工件的工具,不靠机械力来加工硬工件的方法。50年代后又先后出现了电子束加工、等离子弧加工、激光加工等等,逐步形成了特种加工的新领域。它们是直接利用电能、热能、声能、光能、化学能和电化学能,有时也结合机械能对工件进行的加工。特种加工技术在加工高强度、高硬度、高韧性等机械、物理、化学性能特殊的难加工材料和形状复杂、精密、微细的特殊零件中,愈来愈显示出它的无比威力和特殊作用。

近年来,电子信息技术、计算机技术等新技术与特种加工技术的渗透和融合,使特种加工技术又有了新的发展。同样,特种加工技术又更有力地推动着各制造业向前发展。它在模具、刀具、量具、微电子器件、生物医疗、仪器仪表、纺织、汽车、航空航天等制造业中得到越来越广泛的应用。

特种加工按能量来源、作用形式以及加工原理可分为以下几种,见表9.1.1。

表9.1.1 常用特种加工方法分类表

特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、气化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、气化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	ECM(ELM)
	电解磨削	电化学、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(ECG)
	电解研磨	电化学、机械能	阳极溶解、研磨	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM

续表

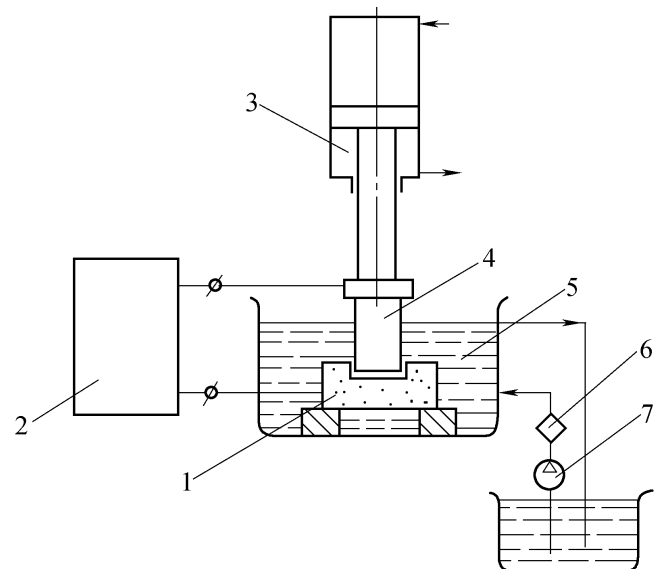
特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、气化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、气化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBT
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、气化	EBM
离子束加工	蚀刻、镀覆、注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割(喷镀)	电能、热能	熔化、气化(涂覆)	PAM
超声加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	USM
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	CHM
	化学抛光	化学能	腐蚀	CHP
	光刻	光、化学能	光化学腐蚀	PCM

## 9.2 电火花加工

### 9.2.1 电火花加工原理

电火花加工是利用两电极之间脉冲放电时产生的电蚀现象对工件材料进行加工的方法

图 9.2.1 所示。加工时工具和工件分别作为两个电极浸入绝缘介质(如煤油等)中。将脉冲电压加至两电极,并使工具电极逐渐向工件电极靠拢。当两电极间达到一定距离时,极间电压将在相对最接近点处使绝缘介质发生雪崩式的电离击穿。两极间的绝缘状态在很短时间(10<sup>-7</sup> ~ 10<sup>-5</sup> s)发展为低阻值的放电通道。因而放电电流随即急剧上升,极间电压也相应降至放电维持电压(见图 9.2.2)。放电通道的截面积很小,使得通道中的电流密度高达 10<sup>5</sup> ~ 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>,即形成脉冲放电。通道中,正负带电粒子在极间电场作用下高速运动,发生剧烈碰撞,并产生大量热量,使通道的温度很高,其通道中心温度最高达 10 000 以上,同时工具电极及工件表面分别受电子流和离子流的高速轰击,也产生大量热量,使放电点周围的金属迅速熔化和气化,



4—工具;5—工作液;6—过滤器;7—工作液泵

并产生爆炸力,将熔化的金属屑抛离工件表面,这就是放电腐蚀。被抛离的金属屑由工作液带走,于是在工件的表面就形成一个微小的带凸边的凹坑,如图 9.2.3 和图 9.2.4 所示。由此,完

成了一次脉冲放电。在脉冲间隔期间,介质恢复绝缘,等待下一个脉冲到来,称为消电离。如此不断地进行放电腐蚀,工具电极持续向工件进给,只要维持一定的放电间隙,就会在工件表面上腐蚀出无数微小的圆形凹坑,从而使工具电极的轮廓形状复印在工件上。

放电腐蚀时,工具和工件作为两个电极,由于正、负极接法不同而造成蚀除量不同,这种现象称为“极性效应”。产生极性效应的基本原因是,在电火花放电过程中,正、负电极表面分别受到负电子和正离子的撞击以及瞬时热源的作用,在两极表面所得到的能量不一样,因而熔化、气化、抛出的金属数量也就不一样。

一般来说,用短脉冲(例如脉宽小于  $30 \mu\text{s}$ ) 加工时,在放电过程中,负电子的质量和惯性较小,容易获得加速度和速度,很快奔向正极,其电能、动能便转换成热能蚀除掉正极的金属,而正离子由于质量和惯性较大,所以启动、加速也较慢,有一大部分还未来得及到达负极表面时脉冲就已结束,所以正极的蚀除量大于负极的蚀除量。在这种情况下加工时,工件应接正极,称为“正极性加工”。反之,当用较长脉冲(例如脉宽大于  $300 \mu\text{s}$ ) 加工时,负极的蚀除量大于正极的蚀除量,此时工件应接负极,称为“负极性加工”。这是因为随着脉冲宽度,即放电时间的加长,质量和惯性都较大的正离子也逐渐被加速,陆续地都撞击在负极表面上。由于正离子的质量大于负电子,所以对负极的撞击破坏作用要比负电子的作用大且显著。显然,正极性加工用于精加工,负极性加工用于粗加工。

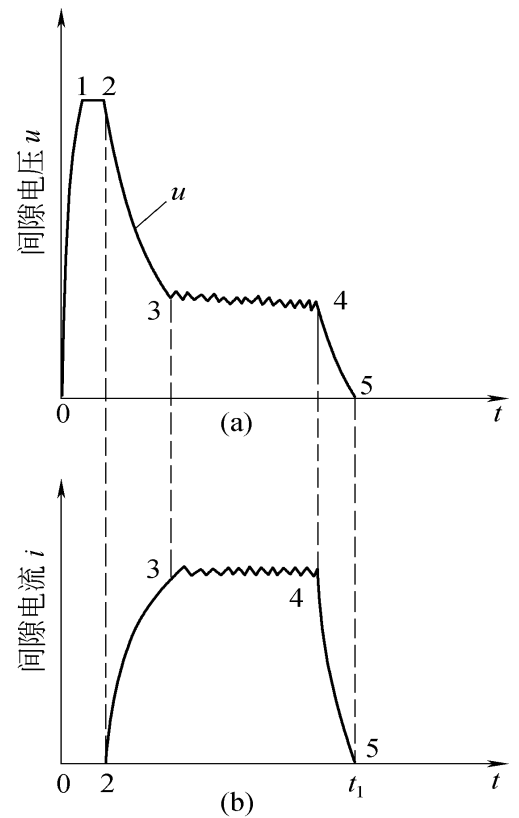


图 9.2.2 极间放电电压和电流波形

- 0~1—电压上升沿;
- 1~2—击穿延时;
- 2~3—电压下降、电流上升沿;
- 3~4—火花维持电压和维持电流;
- 4~5—电压、电流下降

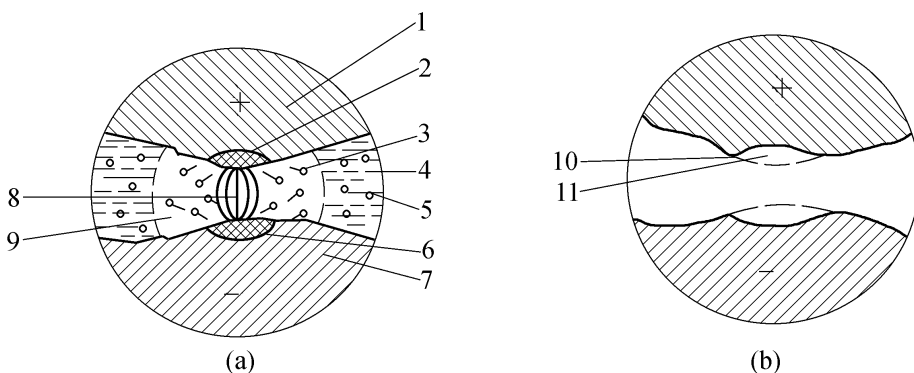


图 9.2.3 放电间隙状况示意图

- 1—阳极; 2—从阳极上抛出金属的区域; 3—熔化的金属微粒; 4—工作液; 5—在工作液中凝固的金属微粒; 6—在阴极上抛出金属的区域; 7—阴极; 8—放电通道; 9—气泡; 10—翻边凸起; 11—凹坑

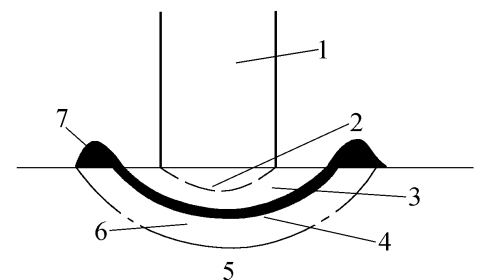


图 9.2.4 放电腐蚀痕剖面

- 1—放电通道; 2—气化区; 3—熔化区; 4—熔化层; 5—无变化区; 6—热影响区; 7—凸起



电火花加工中材料的去除速度、表面粗糙度和切除量都随电流的增大和频率的降低（或较长的接通时间）而增加。

## 9.2.2 电火花加工设备

电火花加工的设备主要由四大部分组成。如图 9.2.1 所示：脉冲电源、自动进给调节装置、工具电极和液体介质（如煤油）。

### 1. 脉冲电源

目前电火花加工用的脉冲电源种类很多，用于小功率精加工时，常采用 RC 线路脉冲电源。它由两个回路组成：一个是充电回路，一个是放电回路，如图 9.2.5 所示。电容器时而充电，时而放电，一弛一张，故称为弛张式脉冲电源。

除 RC 线路脉冲电源外，在大功率的电火花加工设备中多采用独立式脉冲电源，如闸流管式、晶闸管式和晶体管式等脉冲电源。

### 2. 自动进给调节装置

从电火花加工原理可以看出，若要使两极间不断进行火花放电，就必须使两极间保持有一定的间隙，一般间隙约为  $0.01 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。若间隙过大，电火花就不能连续工作；若间隙过小，就会引起电弧或造成短路。保证这样的间隙必须依靠自动调节装置来完成。

伺服电动机自动进给调节装置原理如图 9.2.6a 所示。它直接利用电桥式测量环节送来的电压和电流两个信号带动执行电机 M，使其调速及换向。图 9.2.6b 是它的等效电路，其中  $R$  为 RC 脉冲电源的限流电阻，电位器  $r = r_1 + r_2$  为电桥的两平衡臂， $R_K$  为放电间隙的等效电阻。当电极间隙为合理值，即正常加工时，电桥四个臂的电阻有  $r_1 r_2 = R R_K$  关系，桥路平衡，电动机 M 两端的电压约为零，工具不动。当两极间隙增大时，放电间隙电阻  $R_K$  也相应增大，电桥逐渐失去平衡，电动机 M 左端电位升高，于是电动机朝正方向转动，使工具电极进给。电极开路时  $R_K$  为无穷大，此时电极的进给也最大。相反，当电极间隙减小或接近短路状态时， $R_K$  大大下降，甚至趋于零，电桥失去平衡，电动机 M 右端的电位升高，于是反转使工具电极离开工件，这样就达到了自动调节间隙的目的。

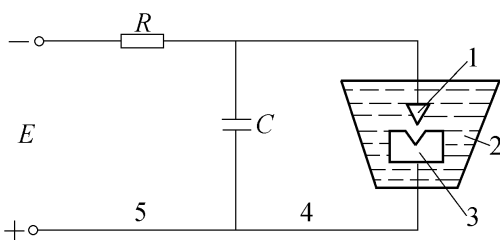


图 9.2.5 RC 线路脉冲电源

1—工具电极；2—介质；3—工件；  
4—放电回路；5—充电回路

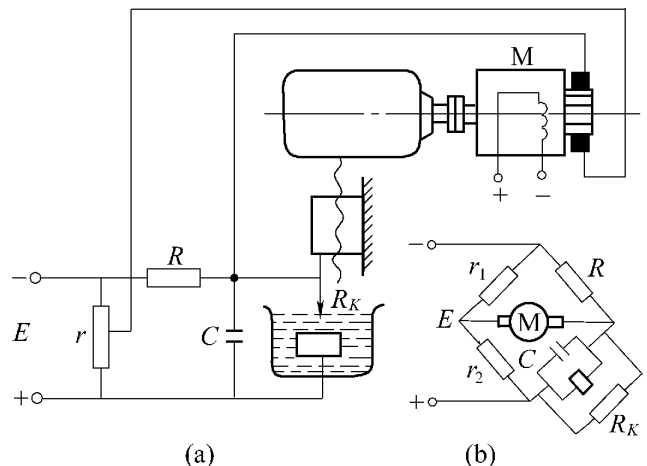


图 9.2.6 伺服电机自动  
进给调节装置

### 3. 工具电极

电火花加工时,工具与工件两电极同时受到不同程度的电腐蚀,单位时间内工件的电腐蚀量称为生产率  $V_k$ ,而单位时间内工具的电腐蚀量则称之为工具损耗率  $V_d$ 。衡量某工具电极是否耐损耗,不仅要看工具损耗率  $V_d$  的大小,同时还应看所能达到的加工生产率  $V_k$ ,也即应知道每蚀除单位工件金属量时工具相对损耗了多少。因此,常用“相对损耗比”或“相对损耗率” $\nu$ 作为衡量工具耐损耗的指标,即

$$\nu = \frac{V_d}{V_k} \times 100\%$$

工具损耗率与所处极性和工具材料有关,根据加工需要确定极性后,正确选用工具材料是至关重要的。

一般常用黄铜或紫铜作为工具材料,但如果要求尽可能减少电极的蚀耗,那么最好采用铜基石墨或碳化钨。采用铜基石墨作为工具电极时,工具尖端的紫铜基体将迅速蚀耗,而石墨熔点很高,会反过来阻止基体的进一步蚀耗,保护了工具电极其余部分的紫铜基体,也就保护了工具电极的形状和尺寸不过多地受到损耗,故能延长其使用寿命,加工精度较高。加工很小的深孔时,经常使用钨丝,因为它能较好地承受火花放电时产生的冲击波。

### 4. 液体介质

电火花加工中,放电必须在具有一定绝缘强度的液体介质(如煤油)中进行。

#### (1) 液体介质的作用

- 1) 保证两电极之间的绝缘,以创造火花放电的条件。
- 2) 能把电火花加工后的金属微屑等电蚀产物从放电间隙中排除出去。
- 3) 加工中对两电极起冷却作用,防止热变形。

#### (2) 对液体介质的要求

1) 汽化热要高,即热容量要大,以保证在两电极之间小缝隙内的液体蒸发,而其他部分仍处于液体状态,从而保证两电极及其他部分的冷却。

2) 液体介质粘度要低,易于流动,以便冷却并带走金属颗粒。

3) 液体介质消电离作用要快,即恢复绝缘强度要快,以减少放电后的残留离子,避免电弧放电。

此外,还要求介质中性无毒。

常用的液体介质有煤油、90号透平油、20号机油和变压器油等。

## 9 2 3 电火花加工特点

### 1. 加工特点

- (1) 两电极不接触,无明显切削力,故不会产生由此而引起的残余应力或变形。
- (2) 可以加工任何难切削的硬、脆、韧、软和高熔点的导电材料。
- (3) 直接利用电能加工,便于实现自动化。
- (4) 脉冲参数可以调节,可在一台机床上连续进行粗、半精、精加工。

### 2. 加工质量

#### (1) 加工精度

- 1) 穿孔加工尺寸精度可达  $0.05 \sim 0.01$  mm,型腔加工可达  $0.1$  mm。

2) 有圆柱度误差 其原因是孔上半部分在加工过程中产生附加放电的机会多,受电蚀的时间长,故尺寸变化大,产生了锥度。

3) 得不到清棱清角 如图 9.2.7 所示,导致工件尖角变圆的原因是: 工件和工具尖角处都存在蚀除量大的问题; 放电间隙的等距性,使工件上只能被加工出以  $r$  为半径的圆弧。目前采用了前沿很陡的高频短脉冲进行加工,已对复制尖角精度有所提高,可获得圆角半径为 0.1 mm 的尖棱。

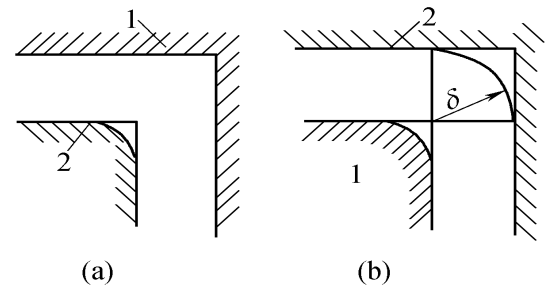


图 9.2.7 电火花加工变圆的情况

1—工具;2—工件

## (2) 表面质量

1) 粗加工时的表面粗糙度在  $Ra0.8 \mu\text{m}$  左右,精加工时可达  $Ra1.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。若表面粗糙度值要求在  $Ra0.8 \mu\text{m}$  以下,则生产率会成十倍地下降,此时一般应采用人工研磨或电解修磨以获得较小的表面粗糙度。

2) 电火花加工后的表面易存留润滑油,因而在相同表面粗糙度时,其润滑效果和耐磨性均优于机械加工的表面。

## 9.2.4 电火花加工的应用

电火花加工可用于导电材料的各种型腔面的加工、各种异形孔的加工、小孔加工,尤其适用于模具和难加工材料的加工。目前已成功地用于成形及穿孔加工、线切割加工、电火花磨削和镗削加工、电火花同步回转共轭加工、表面强化和雕刻加工等。电火花加工参数常用值见表 9.2.1。

表 9.2.1 电火花加工参数常用值

可单独控制的参数		非独立的变量及结果	
开路电压	50 ~ 300 V	平均电流	0.1 ~ 500 A (少数大型机床采用多回路 500 A 电源,分开引线)
频率	50 ~ 500 kHz 或每个脉冲通断时间的等效占空因素规则	火花间隙	0.013 ~ 0.13 mm
工作液种类	碳氢化物(石油)油类、去离子水、煤油、气体(干态)	超切量	0.005 ~ 0.50 mm/边
工作液流动压力	54 mmHg 真空度到 482 kPa 压力	材料去除速度	0.05 ~ 24.6 $\text{cm}^3/\text{h}$
电极材料	石墨、铜、黄铜、锌—锡合金、铜、铜—钨合金、铜—石墨、银—钨合金、钨	损耗比(工件蚀除对电极蚀除之比)	0.05 : 1 ~ 100 : 1
伺服传动间隙控制	间隙: 0.013 ~ 0.13 mm	表面粗糙度	$Ra0.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$
电容	(在某些类型机床上) 根据试加工确定	再铸层深度加热影响层厚度	0.0025 ~ 0.13 mm
极性	“标准”极性是工件为正,电极为负	圆角半径锥度	0.025 mm 或等于超切量 0.0005 ~ 0.005 mm/mm 边、用适当工具可减小锥度

## 9 2 5 电火花线切割加工

电火花线切割加工利用一根运动着的金属丝(直径为  $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$  的钼丝或黄铜丝)作为工具电极,在工具电极和工件电极之间通以脉冲电流,使之产生放电腐蚀。控制工作台按一定的轨迹运动,工件就被切割成所需要的形状,如图 9.2.8 所示。

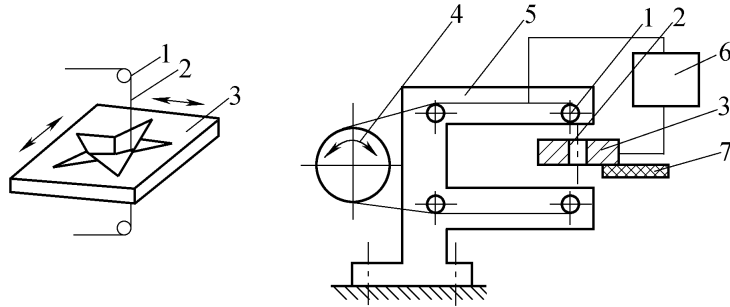


图 9.2.8 电火花切割原理

1—导向轮;2—钼丝;3—工件;4—传动轮;  
5—支架;6—脉冲电源;7—绝缘底板

与电火花成形加工相比,线切割加工不需成形电极,也不用进行预加工,可以一次成形。一般采用数控线切割。其自动化程度高,成本低。

电火花线切割加工适合于加工各种形状的冲裁模、拉丝模、冷拔模和粉末冶金模等。图 9.2.9 为电机转子冲裁模。厚度为  $5 \text{ mm}$ ,采用线切割加工可一次成形。线切割加工还可加工各种微细孔、槽、窄缝及曲线图形。

图 9.2.10 所示固体电路冲裁模即为一例。在试制某些新产品时,可应用线切割加工直接在板料上切割零件,省去了制作模具的过程,如图 9.2.11 所示。

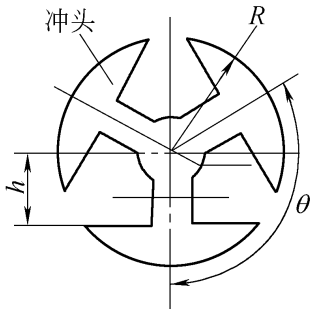


图 9.2.9 电机转子冲裁模

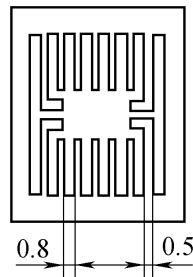


图 9.2.10 固体电路冲裁模

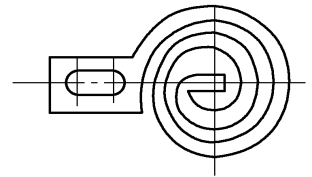


图 9.2.11 螺旋形簧片

## 9 3 电解加工

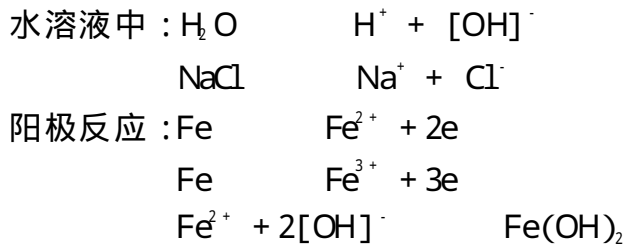
### 9 3 .1 电解加工原理

电解加工是利用金属在电解液中产生阳极溶解的电化学反应,将工件加工成形的一种方法。其加工原理如图 9 3 .1 所示。

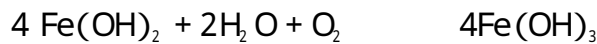
电解加工时,在工件(阳极)和工具电极(阴极)之间接入低电压、大电流的直流电源( $6 \sim$

24 V、500 ~ 2 000 A) ,在两电极间的狭小间隙(0.1 ~ 0.8 mm)内有高速电解液通过,这时工件就会不断溶解。开始时,两极之间的间隙大小不等,间隙小处电流密度大,金属(阳极)去除速度快;而间隙大处电流密度小,去除速度慢,如图 9.3.2 所示。随着工件表面金属材料的不断溶解,工具阴极不断地向工件进给,溶解的电解产物不断被电解液冲走,工件表面也就逐渐被加工成接近于工具电极的形面。如此,直至将工具形面复印到工件而得到所需形面。

电解加工中的电化学反应是随加工条件而改变的。以 NaCl 电解液加工钢件为例,分析其化学反应:



$\text{Fe}(\text{OH})_2$  沉淀为墨绿色的絮状物,随着电解液的流动而被带走。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$  又逐渐被电解液中及空气中的氧氧化为  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 。



$\text{Fe}(\text{OH})_3$  为黄褐色沉淀(铁锈)。

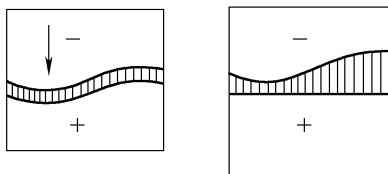
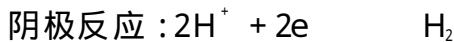


图 9.3.1 电解加工原理

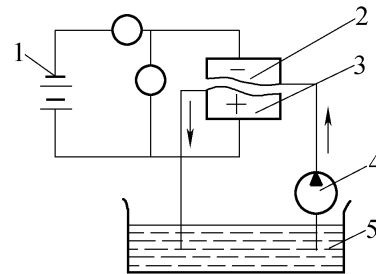


图 9.3.2 电解加工成形过程

1—直流电源;2—工具(阴极) 3—工件(阳极);4—泵;5—电解液

### 9.3.2 电解加工特点

- (1) 能以简单的进给运动一次加工出形状复杂的形面和形腔。生产率比电火花加工高 5 ~ 10 倍。
- (2) 可加工高硬度、高强度和高韧性等难切削的金属材料(如淬火钢、高温合金、钛合金等)。
- (3) 加工中无切削力,适合于薄壁零件的加工。
- (4) 工具电极在理论上不会损耗,可长期使用。
- (5) 加工后零件表面无残余应力、无毛刺,表面粗糙度达  $Ra0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。

电解加工存在的问题是加工尺寸精度不太高(难以达到  $\pm 0.03 \text{ mm}$  以上的精度);电解液对设备有腐蚀作用,电解产物难以处理与回收,故应采取防护措施。

### 9.3.3 电解加工的应用

电解加工主要应用于以下几个方面:

- (1) 各种异形形腔加工。
- (2) 沟槽、斜面、轮廓及深孔加工等用传统方法难于加工的零件。
- (3) 零件的倒棱、去毛刺及微孔加工。
- (4) 难加工材料的加工。
- (5) 电解抛光。

### 9.3.4 电解磨削

磨削是将电解作用与机械磨削相结合的一种新加工方法，其加工原理如图 9.3.3 所示。磨削时工件接正极，导电磨轮接电源的负极，由磨料保持一间隙。工件表面的电解腐蚀物和阳极膜等由磨轮再由电解液冲走。

磨削时几乎不产生磨削力和磨削热，所以磨削效率很高。磨削表面粗糙度可达  $Ra0.012 \sim 0.008$ 。磨削表面不会产生烧伤、裂纹、变形和毛刺等缺陷。磨削材料包括高硬度、高脆性、高韧性、高强度、热敏感合金、高速钢、不锈钢、钛合金和镍合金。

磨削时会产生刺激性气体及雾状电解液溢出，故应考虑设备防腐及劳动保护。

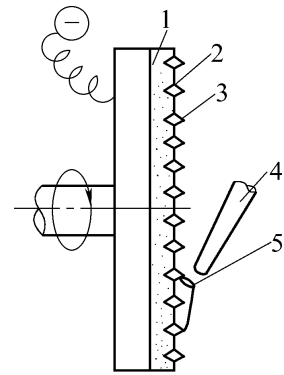


图 9.3.3 电解磨削

1—导电磨轮 2—金属结合剂 3—磨料；  
4—电解液喷嘴 5—阳极膜

## 9.4 超声波加工

### 9.4.1 超声波加工原理

超声波加工是利用振动频率超过 16 kHz 的工具头，通过悬浮液磨料对工件进行成形加工的一种方法，其加工原理如图 9.4.1 所示。

当工具以 16 kHz 以上的振动频率、0.01 ~ 0.1 mm 的振幅作用于悬浮液磨料时，磨料便以极高的速度强力冲击加工表面，对被加工表面造成很大的局部压力，使工件材料产生局部变形，当变形超过强度极限时便发生破坏，成粉末状掉下来。虽然每次打击下来的材料不多，但单位时间内打击的次数却很多，所以仍有较高的加工速度。这是超声波加工工件的主要作用。此外还有悬浮液磨料在工具头高频振动下对工件表面的抛磨作用、工作液进入被加工材料裂缝处造成加速机械破坏的作用。在这几方面作用之下，工件表面就按工具截面形状逐渐被加工成形。

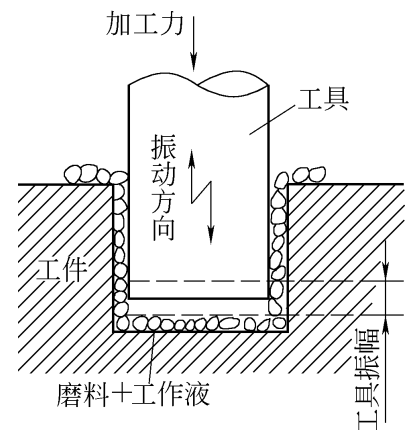


图 9.4.1 超声波加工的原理

## 9 4 2 超声波加工装置

超声波加工装置如图 9 4 2 所示。一般包括 :高频发生器、超声波换能器、变幅杆、工具头和磨料悬浮液等。

### 1. 高频发生器

高频发生器即超声波发生器。其作用是将低频交流电转变为具有一定功率输出的超声频电振荡,以供给工具往复运动和加工工件的能量。要求其功率和频率在一定范围内应连续可调。

### 2. 磁致伸缩换能器

其作用是把超声频电振荡信号转换为机械振动。换能器的材料为铁、钴、镍及其合金。这些材料能随着磁场强度的变化而伸缩,其中镍为尺寸缩短,而铁、钴为伸长,当磁场消失后又恢复原有尺寸。

### 3. 变幅杆

其作用是将振幅放大。由于换能器材料伸缩变形量很小,在共振情况下也超不过  $0.005 \sim 0.01 \text{ mm}$ ,而超声波加工却需要  $0.01 \sim 0.1 \text{ mm}$  的振幅,因此必须用上粗下细(按指数曲线设计)的变幅杆放大振幅。其应用的原理是:因为通过变幅杆的每一截面的振动能量是不变的,所以随着截面积的减小,振幅就会增大。

### 4. 工具头

工具与变幅杆相连,将放大后的机械振动作用于悬浮液磨料对工件进行冲击。工具材料应选用硬度和脆性不很大的韧性材料,如 45 钢,这样可以减少工具的相对磨损。工具的尺寸和形状取决于被加工表面,它们相差一个加工间隙值(略大于磨料直径)。

### 5. 磨料液

它是磨料和工作液的混合物。常用的磨料有碳化硼、碳化硅、氧化锶或氧化铝等;常用的工作液是水,有时用煤油或机油。磨料的粒度大小取决于加工精度、表面粗糙度及生产率的要求。

## 9 4 3 超声波加工特点

(1) 适于加工各种硬脆材料,特别是不导电的非金属材料,如宝石、陶瓷、玻璃及各种半导体材料等。

(2) 工件只受磨料瞬时局部冲击力的作用,没有横向摩擦力,故受力很小,这对薄壁或刚性差的工件加工很有利。

(3) 加工精度较高,尺寸精度可达  $0.02 \text{ mm}$ ,表面粗糙度可达  $Ra0.1 \mu\text{m}$ ,工件表面无残余应力,不发生组织改变和烧伤等。

(4) 通过选择不同的工具端部形状和不同的运动方法可进行各种微细加工,如图 9 4 3 所示。

(5) 加工机床结构和工具均较简单,操作维修方便。

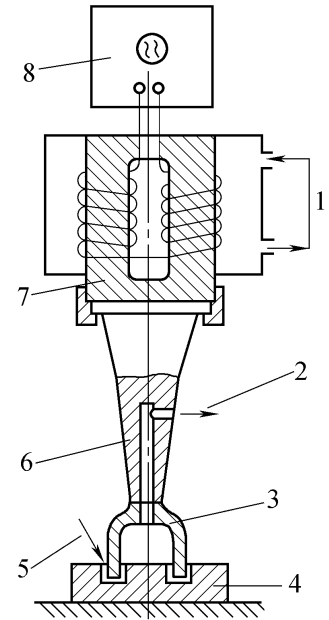


图 9.4.2 超声波加工装置

1—冷却器;2—磨料悬浮液抽出;3—工具;  
4—工件;5—磨料悬浮液送入;6—变幅杆;  
7—磁致伸缩换能器;8—高频发生器

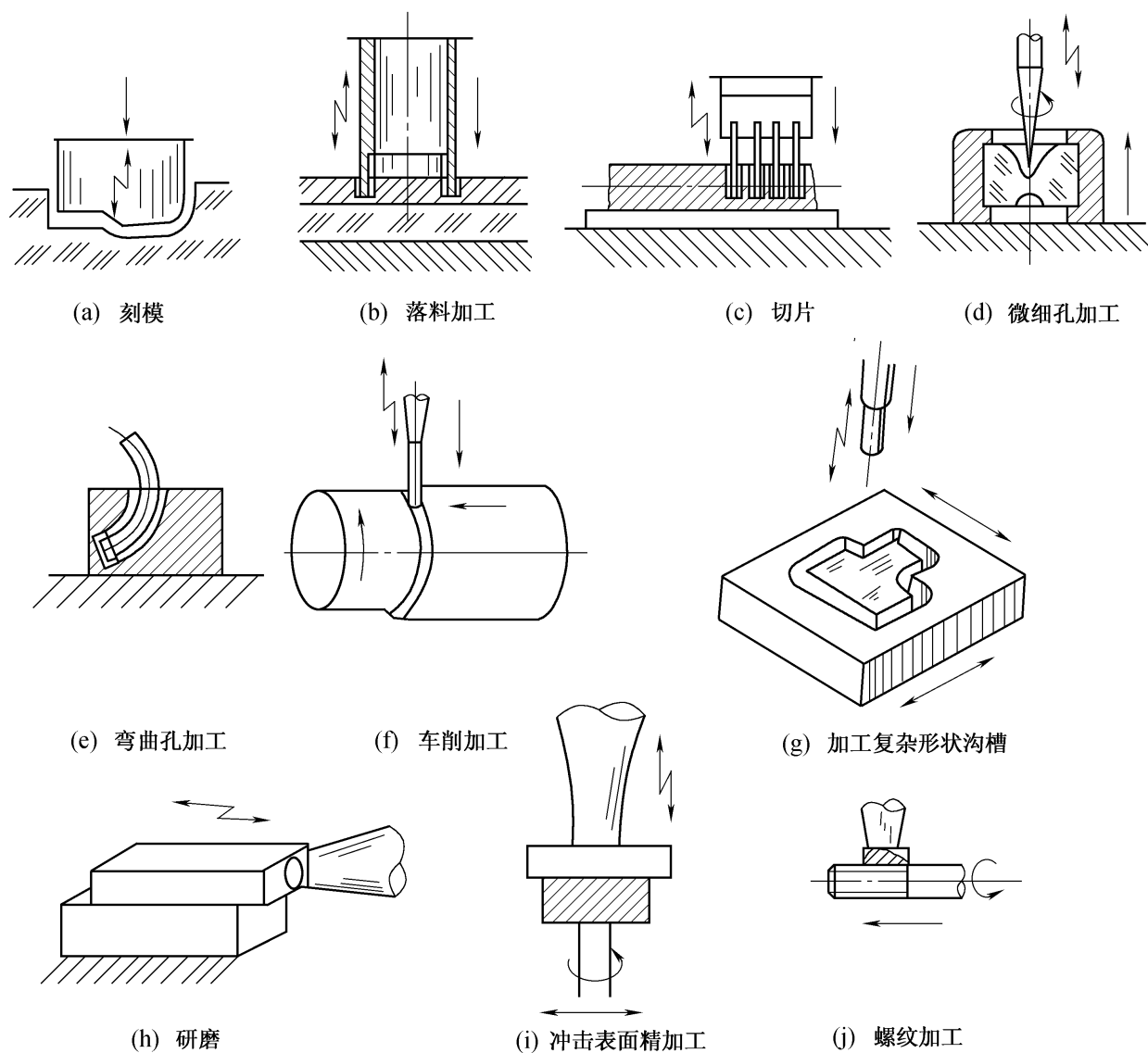


图 9.4.3 超声波加工的基本种类

(6) 生产率较低。这是超声波加工的一大缺点。

超声波不但可以完成图 9.4.3 所示的各种加工,还可与抛光、电火花、激光、塑性成形、焊接、去毛刺、清洗、电镀等各种加工方式结合起来使用。

## 9.5 激光加工

### 9.5.1 激光加工原理

激光加工是一种利用光能进行加工的方法。激光是一种能量密度高、方向性强、单色性好的相干光。激光加工原理如图 9.5.1 所示。当激光工作物质 2(如红宝石、钕玻璃等具有亚稳态能级结构的物质)受到光泵 3(脉冲激励光源)的激发后,便产生受激辐射跃迁,形成光放大,再经过由全反射镜 1 和部分反射镜 2 组成的谐振腔产生振荡后,成为单向平行光束,由腔的一端输出,通过透镜 5 将激光束聚焦到工件待加工表面 6。工件材料就在高温熔融和冲击波的同时作用下蚀除了部分物质,于是可进行打孔、切割等各种加工。



激光束被聚焦为一个极小的光斑,其直径仅有几微米到几十微米,而能量密度却可达  $10^8 \sim 10^{10} \text{ W/cm}^2$ ,温度达一万摄氏度以上,能在千分之几秒甚至更短的时间内使各种坚硬或难熔材料熔化和气化。在激光加工区内,工件被激光照射的局部区域的温度迅速升高,使该点材料熔化以致气化,气体迅速膨胀,压力突增,熔融物以极高速度喷出,且产生一强烈反冲击波作用于加工区。工件材料在高温熔融和冲击波的同时作用下便被打出一个孔。

### 9.5.2 激光加工特点

(1) 激光加工不需要工具,故不存在工具损耗、更换调整工具等问题,因此适于自动化连续操作。

(2) 不受切削力的影响,易于保证加工精度。

(3) 几乎能加工所有的金属和非金属材料。如果是透明材料,可采取着色或打毛措施后再加工。

(4) 加工速度快,效率高,热影响区小。

(5) 能进行微细加工,例如深的微孔(直径小至几微米,长径比达几十至上百)及小至几微米的窄缝。

(6) 可透过玻璃等透明介质对工件进行加工,这在某些情况下是非常便利的(如工件需要在真空中加工等)。

(7) 无加工污染,在大气中无能量损失。

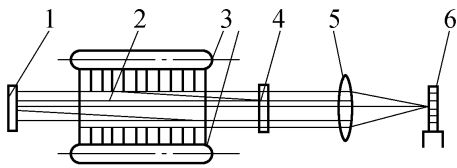


图 9.5.1 固体激光器加工原理示意图

1—全反射镜;2—激光工作物质;3—光泵(激励脉冲氙灯);4—部分反射镜;5—透镜;6—工件

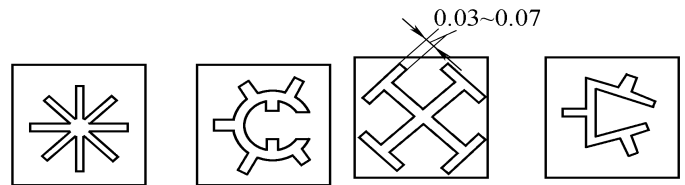


图 9.5.2 喷丝头的几种形孔

### 9.5.3 激光加工的应用

#### 1. 激光打孔

适于金刚石、红宝石、陶瓷、橡胶、塑料以及硬质合金、不锈钢等各种材料。

#### 2. 激光切割

只要工件与激光束之间有相对移动,就可实现激光切割。当切割直线时,还可借助于柱面透镜将激光束聚焦成线,以提高切割速度。采用氧气喷嘴与激光器连用的方法,一边吹氧一边切割,可大大提高切割效率。图 9.5.2 表示了用激光切割加工的几种化纤喷丝头的形孔。

除此之外,激光焊接和激光热处理的应用也日趋广泛。

## 9.6 电子束加工

### 9.6.1 电子束加工原理

电子束加工是利用高速电子的冲击动能来加工工件的。在真空条件下,将具有很高速度和

能量的电子束聚焦到被加工材料上,电子的动能绝大部分转变为热能,使材料局部瞬时熔融、气化蒸发而去除。

控制电子束能量密度的大小和能量注入时间,可以达到不同的加工目的。如果只使材料局部加热,就可以进行电子束热处理;使材料局部熔化可进行电子束焊接;提高电子束能量密度,使材料熔化和气化,可进行打孔、切割等加工;利用较低能量密度的电子束轰击高分子材料会产生化学变化的原理,还可进行电子束光刻加工。

## 9.6.2 电子束加工装置

电子束加工装置的基本结构如图 9.6.1 所示。它主要由电子枪、真空系统、控制系统和电源等部分组成。

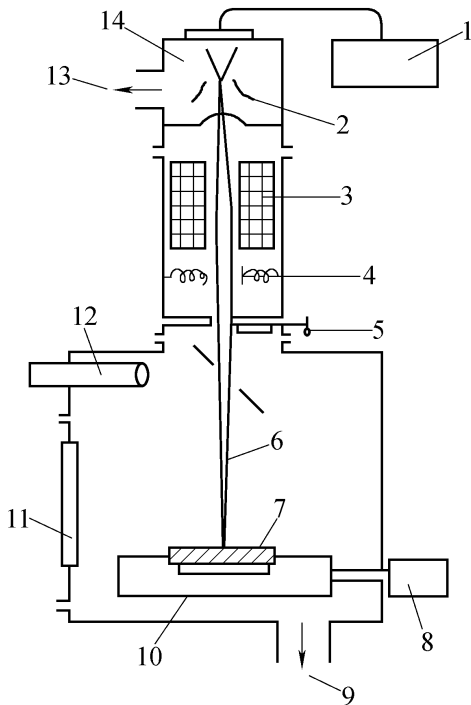


图 9.6.1 电子束加工装置结构示意图

1—加速电压;2—流强度控制;3—流聚焦控制;4—流位置控制;  
5—更换工件用截止阀;6—电子束;7—工件;8—驱动电动机;  
9—抽气;10—移动工作台;11—工件更换盖及观察窗;  
12—观察筒;13—抽气;14—电子枪

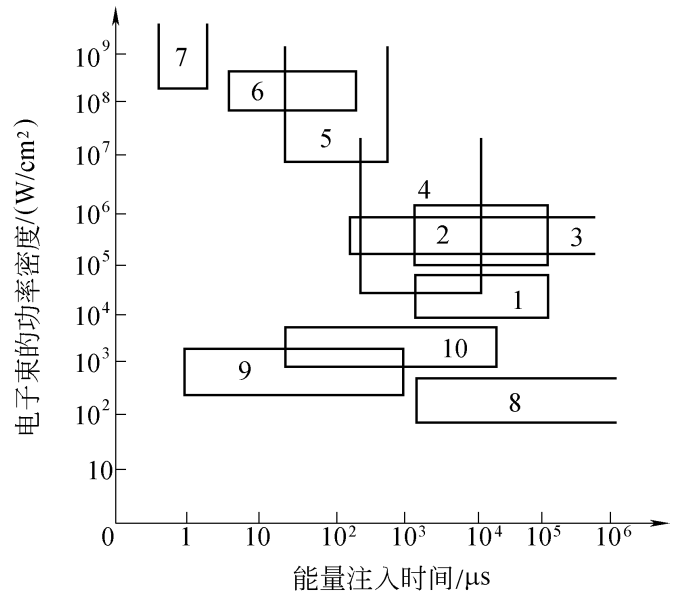


图 9.6.2 电子束加工的应用范围

1—淬火硬化;2—熔炼;3—焊接;4—打孔;  
5—钻、铣;6—刻蚀;7—升华;8—塑料聚合;  
9—电子抗蚀剂;10—塑料打孔

### 1. 电子枪系统

它包括电子发射阴极、控制栅极和加速阳极等部分,用来发射高速电子流并对其进行初步聚焦。

### 2. 真空系统

用来保证在电子束加工时装置内达到  $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-4}$  Pa 的真空度。

### 3. 控制系统及电源

控制系统包括电子束流的聚焦、位置、强度的控制以及工作台的位置控制。

### 9.6.3 电子束加工特点

(1) 能量密度高(在直径为 0.025 mm 的焦点处的能量密度可达  $1.55 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ )。用于加工微孔或窄缝时,生产率比电火花加工高几十倍。高能电子能透入表面层深至十几微米,并以热的形式向周围传输。

(2) 加工中工件受到的力极小,因此所产生的应力及变形也很小。

(3) 加工时在真空室中进行,故无杂质渗入,表面高温时也不易氧化,特别适于加工易氧化的金属材料以及纯度要求极高的半导体材料。

(4) 电子束加工的系统可采用电、磁的方法实现,所以加工过程易于实现自动化。

(5) 所需的专用设备和真空系统价格较贵,因而其应用有一定的局限性。

### 9.6.4 电子束加工的应用

电子束加工按其功率密度和能量注入时间的不同,可分别用于打孔、切割、蚀刻、焊接、热处理和光刻等加工。图 9.6.2 表示了电子束加工的应用范围。

#### 1. 电子束打孔

电子束可用来加工不锈钢、耐热钢、宝石、陶瓷、玻璃等各种材料上的小孔、深孔。最小加工直径可达 0.003 mm,最大深径比可达 10。如将电子枪发射的片状电子束分解成很多小电子束,就可实现同时多孔加工。加工脆性材料时,加工前应预热或加工时用回火束加热,以防止因热应力引起的变形和断裂。

#### 2. 电子束切割

可切割各种形孔和复杂形面,切口宽度 3~6  $\mu\text{m}$ 。利用电子束在磁场中偏转的原理,控制工件内部磁场强度的分布,就可加工弯曲的孔。再配合以工件的相对运动,又可加工所需要的曲面,如图 9.6.3 所示。

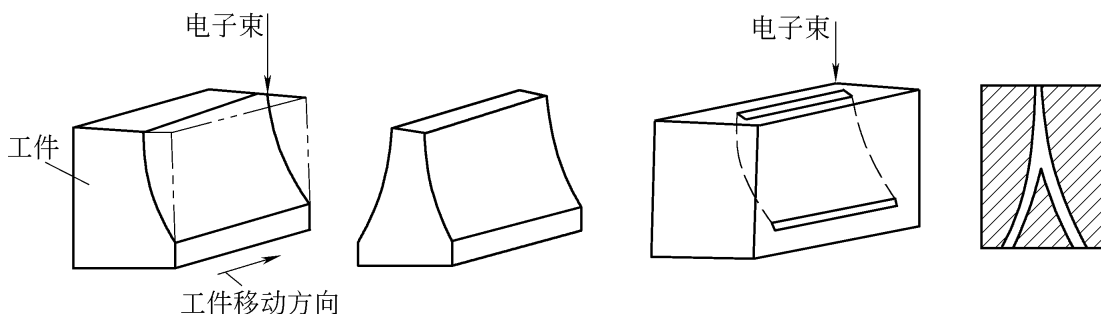


图 9.6.3 电子束加工曲面、弯孔

#### 3. 光刻

电子束光刻加工如图 9.6.4 所示。当用低能量密度的电子束照射高分子材料时,将使材料分子链被切断或重新聚合,引起分子量变化,即产生了潜象,再将其浸入合适的溶剂中便将潜象显影出来。把这种方法与其他处理工艺结合使用,就能实现在金属掩膜或材料表面上刻槽。

#### 4. 其他应用

用计算机控制对陶瓷、半导体或金属材料进行电子束刻蚀加工;异种金属焊接;精加工后的

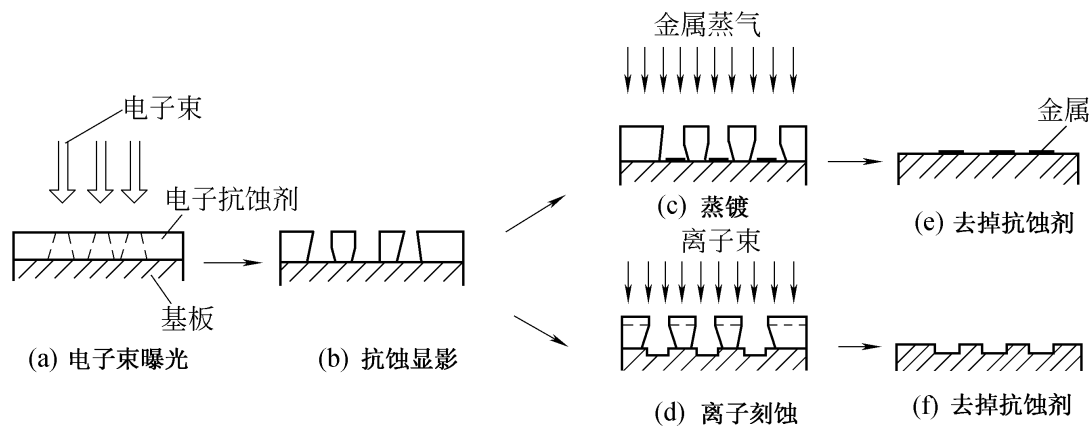


图 9.6.4 电子束光刻加工过程

焊接 电子束热处理等。

## 9.7 离子束加工

### 9.7.1 离子束加工原理

离子束加工原理与电子束加工原理基本类似,也是在真空条件下,将离子源产生的离子束经过加速、聚焦后投射到工件表面的加工部位以实现加工目的的。所不同的是离子带正电荷,其质量比电子大数千倍乃至数万倍,故在电场中加速较慢,但一旦加至较高速度,就比电子束具有更大的撞击动能。离子束加工是靠微观机械撞击能量转化为热能进行的。离子束加工包括离子刻蚀、离子溅射沉积、离子镀和离子注入等,如图 9.7.1 所示。

离子刻蚀是用能量为  $0.5 \sim 5 \text{ keV}$  的氦离子轰击工件,将加工部位的原子逐个剥离。这种原子尺度的切削加工又称为离子铣削。

如把被轰击的工件换成某种材料制成的靶,那么离子就会将靶材原子击出,沉积在靶材附近的工件上,使工件表面镀上一层薄膜。这种镀膜工艺又称为离子溅射沉积。

离子镀是用  $0.5 \sim 5 \text{ keV}$  的氦离子,在镀膜前或镀膜时轰击工件表面,以增强膜材与工件基体之间的结合力。

离子注入是采用  $5 \sim 500 \text{ keV}$  能量的离子束,直接轰击被加工材料。离子钻进被加工材料表面零点几微米,改变了工件表面化学成分,从而改变了工件表面的机械物理性能。

### 9.7.2 离子束加工特点

- (1) 加工精度高(微米级)。因离子束流密度及离子的能量可得到精确控制。
- (2) 加工应力小,变形极微小,加工质量高,适于各种材料和低刚度零件的加工。
- (3) 因在较高的真空度中进行加工,故污染小,特别适于加工易氧化的金属材料及半导体材料。

### 9.7.3 离子束加工的应用

#### 1. 刻蚀加工

离子刻蚀加工是逐个原子剥离的过程。剥离速度大约每秒一层到几十层原子。多数材料在

300 eV 到 500 eV 时刻蚀率最高。入射角一般宜取为  $40^\circ \sim 60^\circ$ 。

离子束刻蚀可用于加工空气轴承的沟槽、打孔、加工极薄材料及超高精度非球面透镜。例如当放电电压为 300 V 时,经聚焦可产生能量为 10 ~ 15 keV、束流强度 0.5 mA 的离子束,实现在 10  $\mu\text{m}$  厚的镍铂上打出直径为 20  $\mu\text{m}$  的小孔;在玻璃上打出 6  $\mu\text{m}$  的小孔。用  $20 \times 10^3$  V 的加速电压加速氩离子使其轰击已被机械磨光的玻璃时,玻璃表面 1  $\mu\text{m}$  左右被剥离并形成极光滑的表面。用离子轰击厚度为 0.2  $\mu\text{m}$  的玻璃,能改变其折射率分布,使之具有偏光作用。离子束还可用于刻蚀集成电路等器件的高精度图形。

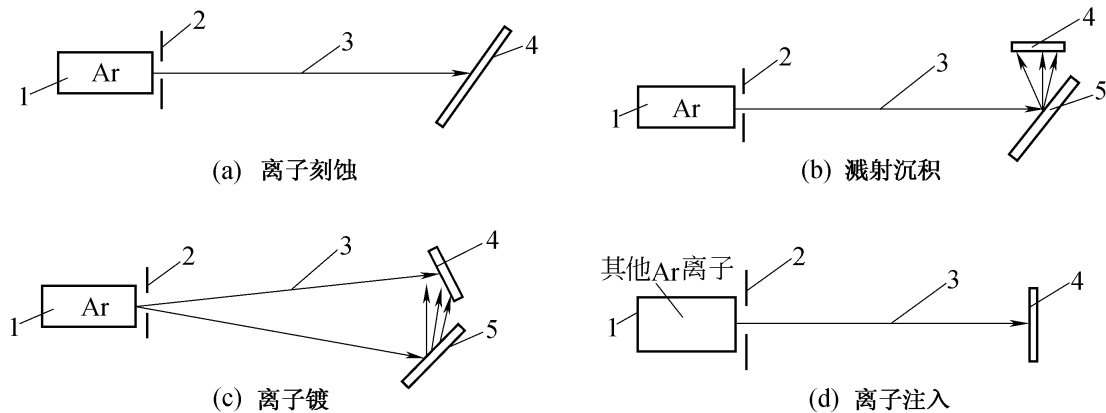


图 9.7.1 各类离子束加工示意

1—离子源 2—吸极 3—离子束;4—工件;5—靶材

## 2. 镀膜加工

离子镀膜加工有溅射沉积和离子镀两种。离子镀时工件不仅接受靶材溅射出来的原子,还同时受到离子的轰击,因此具有许多独特的优点。

工件在镀膜前存在的表面污物和氧化物首先被离子清洗掉,提高了工件表面的附着力。镀膜开始时,由工件表面溅射出来的基材原子,有一部分与工件周围气氛中的原子和离子发生碰撞而返回工件。它们与镀膜的膜材原子同时到达工件表面,从而形成了基材原子与膜材原子的共混膜层。随着膜层的增厚,逐渐过渡到单纯膜材原子构成的膜层。由于存在有混合过渡层,使得因膜材和基材膨胀系数不同而产生的热应力减少,增强了结合力,膜层不易脱落。离子镀镀层组织细密,针孔气泡少。

离子镀的可镀材料广泛,可在金属或非金属表面上镀制金属或非金属材料,已用于镀制润滑膜、耐热膜、耐蚀膜、耐磨损膜、装饰膜和电气膜等。

## 3. 注入加工

离子注入是向工件表面直接注入离子。注入量可精确控制,深度可达 1  $\mu\text{m}$  以上。

离子注入已在半导体方面得到了广泛的应用。当用硼、磷等“杂质”离子注入半导体时,改变了它的导电型式(P型或N型),可制造出一些通常热扩散难以得到的、各种特殊要求的半导体器件。

离子注入可以改变金属表面的物理化学性能,也可以制造出新合金,从而改变了金属表面的耐腐蚀、耐磨损和润滑性能。

上述几种常用特种加工方法的综合比较见表 9.7.1。

表 9.7.1 几种常用特种加工方法的综合比较

加工方法	可加工材料	工具损耗率/(%) 最低/平均	材料去除率/ (mm <sup>3</sup> /min) 平均/最高	可达到尺寸 精度/mm 平均/最高	可达到表面 粗糙度/ $\mu\text{m}$ 平均/最高	主要适用范围
电火花加工	任何导电的金属 材料如硬质合金、耐 热钢、不锈钢、淬 火钢、钛合金等	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	Ra1.0/ Ra0.04	从数微米的孔、槽到 数米的超大型模具、工 件等。如圆孔、方孔、导 形孔、深孔、微孔、弯孔、 螺纹孔以及冲模、锻模、 压铸模、塑料模、拉丝模。 还可刻字、表面强化、涂 覆加工
电火花线 切割加工		较小 (可补偿)	20/200 mm <sup>2</sup> /min	0.02/0.002	Ra5/ Ra0.32	切割各种冲模、塑料 模、粉末冶金模等二维 及三维直纹面组成的模 具及零件。可直接切割 各种样板、磁钢、硅钢片 冲片。也常用于钼、钨、 半导体材料或贵重金属 的切割
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.01	Ra1.25/ Ra0.16	从细小零件到一吨重 的超大工件及模具。如 仪表微型小轴、齿轮上 的毛刺,蜗轮叶片、炮管 膛线,螺旋花键孔、各种 异形孔、锻造模、铸造模, 以及抛光、去毛刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	Ra1.25/ Ra0.04	硬质合金等难加工材 料的磨削。如硬质合金 刀具、量具、轧辊、小孔、 深孔、细长杆磨削,以及 超精光整研磨、珩磨
超声加工	任何脆 性的材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	Ra0.63/ Ra0.016	加工、切割脆硬材料。 如玻璃、石英、宝石、金刚 石、半导体单晶锗、硅等。 可加工型孔、型腔、小孔、 深孔、切割等

续表

加工方法	可加工材料	工具损耗率/(%) 最低/平均	材料去除率/ (mm <sup>3</sup> /min) 平均/最高	可达到尺寸 精度/mm 平均/最高	可达到表面 粗糙度/ $\mu\text{m}$ 平均/最高	主要适用范围
激光加工	任何材料	不损耗 (三束加工,没有成形的工具)	瞬时去除率很高,受功率限制,平均去除率不高	0.01/0.001	Ra1.0/ Ra1.25	精密加工小孔、窄缝及成形切割、刻蚀。如金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、化纤喷丝头、镍、不锈钢板上打小孔,切割钢板、石棉、纺织品、纸张,还可焊接、热处理
电子束加工						在各种难加工材料上打微孔、切缝、蚀刻、曝光以及焊接等,现常用于制造中、大规模集成电路微电子器件

### 复习与思考题

- 9 - 1 常规加工工艺和特种加工工艺有何区别？
- 9 - 2 电火花加工的工作原理中,大致可分为哪几个阶段？
- 9 - 3 电火花加工时为什么必须设有自动进给调节装置？
- 9 - 4 电火花线切割加工和电火花成型加工有哪些共性和不同点？
- 9 - 5 电解加工的工作原理是什么？有无可能发展成为“纳米级加工”或“原子级加工”技术？
- 9 - 6 激光为什么比普通光有更大的瞬时能量和功率密度？为什么称它作“激”光？
- 9 - 7 激光加工有哪些特点？
- 9 - 8 电子束和离子束加工在原理上和和应用范围上有何异同？
- 9 - 9 什么是超声波？为什么超声波加工工具必须做成上粗下细的棒杆？
- 9 - 10 金刚石拉丝模和化纤喷丝头一般是用哪一种方法加工出来的？

# 第 10 章 机械加工工艺规程

各种类型的机械零件,由于其结构形状、精度、表面质量、技术条件和生产数量等要求各不相同,所以针对某一零件的具体要求,在生产实际中要综合考虑机床设备、生产类型、经济效益等诸多因素,确定一个合适的加工方案,并合理安排加工顺序,经过一定的加工工艺过程,才能制造出符合要求的零件。本章将主要介绍与制订机械加工艺过程及工艺规程有关的一些基础知识。

## 10.1 工艺过程与工艺规程

### 10.1.1 概述

#### 1. 生产过程

生产过程是指产品由原材料到成品之间的各个相互联系的劳动过程的总和。它不仅包括毛坯制造、零件加工、装配调试、检验出厂,而且还包括生产准备阶段中生产计划编制、工艺文件制订、刀夹量具准备,生产辅助阶段中原料与半成品运输和保管,设备维修和保养、刀具刃磨、生产统计与核算等等。

#### 2. 工艺过程和工艺路线

生产过程中,按一定顺序逐渐改变生产对象的形状、尺寸、相对位置和性质,使其成为成品或半成品的过程,称为工艺过程。总的工艺过程又可分为铸造、锻造、冲压、焊接、机械加工、热处理、电镀、装配等工艺过程。本章主要讨论机械加工艺过程中的一系列问题。

零件依次通过的全部加工过程称为工艺路线或工艺流程,它表明先做什么后做什么的工作顺序。工艺路线是制订工艺过程和进行车间分工的重要依据。

#### 3. 机械加工艺过程

机械加工艺过程是采用机械加工方法,直接改变毛坯形状、尺寸、相对位置和性质等,使其转变为成品的过程。由于机械加工艺过程直接决定零件的质量,并且也直接影响生产成本和制造周期,因此是整个工艺过程的重要组成部分。

### 10.1.2 机械加工艺过程的组成

机械加工艺过程是由一个或若干个顺序排列的工序组成的,而每一个工序又可分为安装、工位、工步和走刀。

#### 1. 工序、工步和走刀

一个或一组工人,在一个工作地点对同一个或同时对几个工件所连续完成的那一部分工艺过程,称为工序。它是组成工艺过程的基本单元。



在加工表面(或装配时的联接表面)和加工(或装配)工具不变的情况下,所连续完成的那一部分工序为工步。

在一个工步内,若被加工表面需切去材料很厚,就可分几次切削,每切去一层材料称为一次走刀。

图 10.1.1 所示齿轮轴零件,可采用两种不同的加工方案。表 10.1.1 所示为第一方案的工艺过程,如果零件产量很大,则可选用表 10.1.2 所示第二方案的工艺过程。

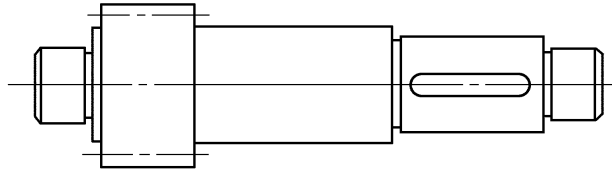


图 10.1.1 齿轮轴

表 10.1.1 第一方案的工艺过程

工 序	内 容	设 备
1	车端面,钻中心孔;调头车另一端面,钻中心孔	车床
2	车大外圆端,割槽和倒角;调头车小外圆端,割槽和倒角	车床
3	滚削齿轮,去毛刺	滚齿机
4	铣键槽,去毛刺	铣床
5	磨外圆	磨床

表 10.1.2 第二方案的工艺过程

工 序	内 容	设 备
1	铣两端面;钻中心孔	铣两端面钻中心孔机床
2	车大外圆端,割槽和倒角	车床
3	车小外圆端,割槽和倒角	车床
4	滚削齿轮	滚齿机
5	去毛刺	钳工台
6	铣键槽	键槽铣床
7	去毛刺	钳工台
8	磨外圆	磨床

在表 10.1.1 中,工序 2 由于加工表面和刀具都在改变,所以此道工序包括 6 个工步。工序 3 中由于键槽有一定深度,往往需要多次走刀来完成。由于生产量不大,去毛刺工作则由滚齿工或铣工在加工完毕后用手工连续完成,所以是同一工序中的另一工步。表 10.1.2 所示适用于产量很大的工艺过程,为了提高生产效率,两端面和中心孔的加工被安排在双面铣端面钻中心孔机床上作为一个工序同步完成,如图 10.1.2 所示;外圆车削按大小端分别在二个工序中用定距对刀法加工,可节省对刀和测量的辅助时间。此外,去毛刺安排有钳工专门完成,以免占用滚齿工和铣工的工时。

用几把刀具同时加工几个表面也可看作一个工步,称为复合工步。如图 10.1.2 所示,铣端面和钻中心孔都是用两把刀具同时加工,它们都是复合工步。

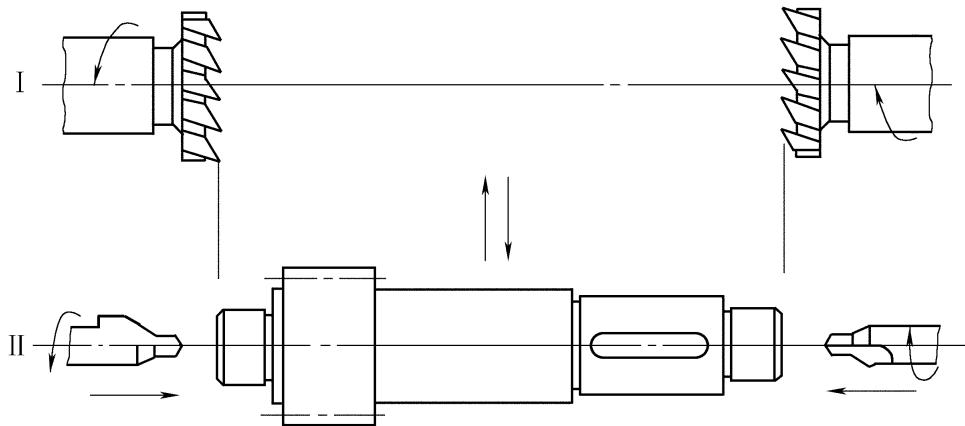


图 10.1.2 铣端面打中心孔工序

对于连续进行的若干个相同的工步,为了简化工序内容的叙述,通常都看作一个工步。例如图 10.1.3 盘类零件,用同一钻头连续钻削 6 个孔,可写成一个工步。

## 2. 安装和工位

工件在机床上或在夹具中定位和夹紧的过程称为安装。表 10.1.1 中工序 1 和 2 都是在同一工序中有两次安装,其他工序以及表 10.1.2 中各道工序中都是一次安装。

为了减少工件的安装次数,缩短工时,提高效率,同时保证加工质量,常采用各种回转工作台,回转夹具或移动夹具,使工件在一次装夹中,先后经过若干位置依次进行加工。

为了完成一定的工序内容,一次装夹工件后,工件与夹具或设备的可动部分一起相对刀具或设备的固定部分所占据的某一位置称为工位。如表 10.1.2 中的工序 1 铣端面、钻中心孔,就是在两个工位上加工。由图 10.1.2 所示,工件装夹后,先在 I 工位上铣端面,然后移到 II 工位上钻中心孔。

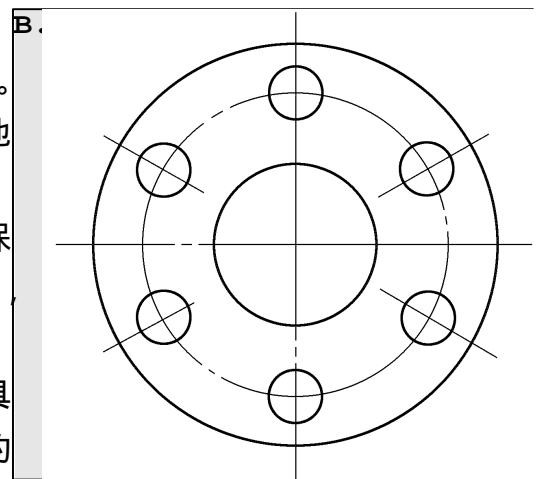


图 10.1.3 盘类零件

## 10.1.3 生产纲领与生产类型

### 1. 生产纲领

根据市场需求和本企业的生产能力编制的企业在计划期内应当生产的产品产量和进度计划称为生产纲领。

在生产纲领中除了零件在产品中的数量,还应计入备品和废品的数量。其中废品由整个加工过程中允许的总废品率来确定。

某产品的年生产纲领可按下式计算:

$$N = Qn(1 + a\%)(1 + b\%)$$

式中  $N$ ——零件的年产量,件/年;

$Q$ ——产品的年产量,台/年;

$n$ ——每台产品中该零件的数量,件/台;

- $a$ ——备品的百分率；
- $b$ ——废品的百分率。

在零件年生产纲领确定后,可根据具体情况按一定期限分批投产,每批投产的零件数量称为批量。

## 2. 生产类型

根据零件的生产纲领或生产批量可划分为不同的生产类型,生产类型是指生产单位(企业、车间、工段、班组、工作地)生产专业化程度的分类。一般分为三种生产类型。

### (1) 单件、小批生产

产品品种很多,每一产品只做一个或数个,各个工作地的加工对象经常改变,很少重复生产。重型机械、船舶制造、专用设备及新产品试制属于这种生产类型。

### (2) 成批生产

一年中分批轮流地制造几种不同的产品,每种产品有一定的数量,工作地的加工对象周期性地重复出现。例如机床、电机、轻工机械的制造常属于这种生产类型。

### (3) 大批、大量生产

产品数量很大,每一个工作地用重复的工序加工某种零件,或以同样方式按期分批更换加工对象。汽车、冰箱、空调、自行车等的制造属于这种生产类型。

生产类型取决于生产纲领,但也与产品的尺寸和复杂程度有关。表 10.1.3 列出了它们之间关系。各种生产类型的工艺特征请参阅表 10.1.4。

由于大批大量生产广泛采用高效的专用机床,按流水线排列或采用自动线进行生产,因而生产效率高、产品成本低,增加了产品在市场上的竞争力。但是,上述生产方式具有很大的“刚性”即专用性,一旦产品改型,要改变生产对象的工艺过程,就不能适应。

表 10.1.3 生产类型与生产纲领的关系(年生产量)

生产类型 \ 产品类别	重型机械	中型机械	小型机械
单件生产	少于 5	少于 20	少于 100
小批生产	5 ~ 100	20 ~ 200	100 ~ 500
中批生产	—	200 ~ 500	500 ~ 5 000
大批生产	—	500 ~ 5 000	5 000 ~ 50 000
大量生产	—	5 000 以上	50 000 以上

随着科学技术和生产技术的不断发展,功能更好,效率更高的新产品不断开发;另一方面,适合市场的需求,民用产品的品种愈来愈多,从而导致产品的更新换代的周期越来越短。这就要求机械制造业逐步采用数控机床、加工中心、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)等高度自动化的生产方式。

## 10.1.4 机械加工工艺规程制订

把产品或零部件制造工艺过程的各项内容用表格的形式写成文件,就是工艺规程。它是直接指导生产准备、生产计划、生产组织、实际加工及技术检验等重要技术文件,是进行生产活动

的基础资料。

### 1. 工艺规程的内容

零件的机械加工工艺规程包括的内容为:加工的工艺路线,各工序工步的加工内容,操作方法及要求,所采用的机床和刀夹量具,零件的检验项目及方法,切削用量及工时定额等。

### 2. 工艺规程的格式

机械加工工艺规程的种类有机械加工工艺过程卡、机械加工工艺卡和机械加工工序卡。

表 10.1.4 各种生产类型的工艺特征

	单件生产	成批生产	大量生产
加工对象变换	经常变换	周期性变换	固定不变
毛坯的制造方法及加工余量	木模手工造型或自由锻,毛坯精度低,加工余量大	金属模造型或模锻。毛坯精度与余量中等	广泛采用模锻或金属模机器造型,毛坯精度高余量少
机床设备及布置	采用通用机床,部分采用数控机床,按机床种类及大小采用“机群式”排列	通用机床及部分高生产率机床,按加工零件类别分工段排列	专用机床,自动机床及自动线,按流水线形式排列
夹具	通用夹具或组合夹具	广泛采用专用夹具	采用高效率专用夹具
刀具与量具	通用刀具和万能量具	较多采用专用刀具及专用量具	采用高效率刀具和量具,自动测试
对工人的技术要求	需要技术水平较高的工人	需要一定技术水平的工人	对操作工人的技术要求较低,对调整工人技术要求较高
工艺文件	有工艺过程卡	有工艺过程卡,关键零件有工艺卡	有工艺卡和工序卡,关键工序有调整卡和检验卡
零件的互换性	零件不互换,主要靠钳工修配	多数互换,少数试配或修配	全部互换或分组互换
生产率	低	中	高
成本	高	中	低
发展趋势	箱体类复杂零件采用加工中心加工	采用成组技术,数控机床或柔性制造系统等进行加工	在计算机控制的自动化制造系统中加工,并可能实现在线故障诊断,自动报警和加工误差自动补偿

单件、小批生产可采用较简单的机械加工工艺过程卡,如表 10.1.5 所示。它主要说明零件加工的整个工艺路线应如何进行,其中包括每道工序名称、内容以及所用的机床和工艺装备。对于大批大量生产的零件,既要有较详细的机械加工工艺卡,如表 10.1.6 所示,还要有机械加工工

序卡 如表 10.1.7 所示。机械加工工序卡是按机械加工工艺过程卡中的每一道工序所编制的一种工艺文件。它详细地说明了每道工序的内容和进行步骤,绘有工序加工简图,图中注明了该工序工件定位基准和装夹方式、加工表面及工序尺寸和公差、加工表面的粗糙度和技术要求、刀具的类型及其位置、进刀方向和切削用量等。

表 10.1.5 机械加工工艺过程卡片格式

企业名称		机械加工工艺过程卡片								产品 型号	零(部)件型号			共 页			
										产品 名称	零(部)件名称			第 页			
材料牌号		毛坯种类		毛坯外形尺寸				每毛坯 件数		每台 件数		备注					
工 序 号	工 序 名 称	工 序 内 容								车 间	工 段	设 备	工 艺 装 备			工 时	
																准 终	单 件
										编制(日期)	审核(日期)	会签(日期)					
标 记	处 记	更 改 文 件 号	签 字	日 期	标 记	处 记	更 改 文 件 号	签 字	日 期								

表 10.1.6 机械加工工艺卡

企业名称			机械加工工艺卡片							产品 型号	零(部)件 型号			共 页	
										产品 名称	零(部)件 名称			第 页	
材料牌号			毛坯种类		毛坯外 形尺寸			每毛坯 件数		每台 件数		备注			
工 序	装 夹	工 步	工 序 内 容	同 时 加 工 零 件 数					设备名称 及编号	工艺装备名 称及编号			技 术 等 级	工 时 定 额	
					背吃 刀量 /mm	切削 速度/ (m/min)	每 分 钟 转 数 或 往 复 次 数	进 给 量 /(mm/r)		夹 具	刀 具	量 具		单 件	准 终
										编制(日期)	审核(日期)	会签(日期)			
标 记	处 记	更 改 文 件 号	签 字	日 期	标 记	处 记	更 改 文 件 号	签 字	日 期						

### 3. 工艺规程的作用

工艺规程是企业生产活动中最主要的指导性技术文件之一。它是在总结实践经验的基础上,依据科学的理论和必要的工艺实验后制订的。它是企业规章制度的重要组成部分,企业员工在生产中必须严格执行。其作用如下:

(1) 它是指导生产、保证产品质量和提高经济效益的主要技术文件,也是投产前进行生产准备和技术准备的依据。

(2) 它是组织生产和计划管理的基本依据。生产的组织管理包括材料供应、毛坯制造、工艺装备设计、制造或采购、机床安排、人员组织、生产调度、统计核算等。

表 10.1.7 机械加工工序卡

企业名称		机械加工工序卡片						产品型号		零(部)件型号			共 页	
								产品名称		零(部)件名称			第 页	
材料牌号		毛坯种类		毛坯外形尺寸				每毛坯件数		每台件数		备注		
				车间		工序号		工序名称		材料牌号				
				毛坯种类		毛坯外形尺寸		毛坯件数		每台件数				
				设备名称		设备型号		设备编号		同时加工数				
						夹具编号		夹具名称		冷却液				
										工序工时				
										准终		单件		
工步号		工步内容				工艺装备		主轴转速 /(r/min)	切削速度 /(m/min)	进给量 /(mm/r)	背吃刀量 /mm	进给次数	工时定额	
													机动	辅助
								编制(日期)		审核(日期)		会签(日期)		
标	处	更改	签	日	标	处	更改	签	日					
记	记	文件号	字	期	记	记	文件号	字	期					

(3) 它是新建、扩建工厂或车间的基本资料。因为只有依据生产纲领和工艺规程才能确定所需要机床的种类、规格、数量和布置,工人的工种、等级和数量,车间的作业面积以及辅助部门的设置等。

#### 4. 机械加工工艺规程的原则

(1) 所制订的工艺规程要结合本企业的生产实践和生产条件。

(2) 所制订的工艺规程要保证产品质量并有相当的可靠度,还应力求高效率、低成本。

(3) 所制订的工艺规程随着生产实践检验,工艺技术和机床设备更新,应不断地修订,使其更加完善和合理。

#### 5. 机械加工工艺规程所需的原始资料

(1) 零件图,反映零件功能的装配图。

(2) 产品质量检验标准。

(3) 产品的生产纲领。

(4) 企业有关机械加工条件,例如毛坯制造,机床设备品种、规格和性能,工人的技术水平,工艺装备的设计制造能力等。

(5) 相关国内外工艺技术水平资料。

(6) 有关的标准,手册及图册等。

#### 6. 制订机械加工工艺规程的步骤

(1) 分析研究产品装配图和零件图。

1) 熟悉产品的性能、用途、工作条件,明确各零件的相互装配关系及其功用,了解及研究各项技术要求,找出其关键技术问题。

2) 对装配图和零件图进行工艺审查。主要内容如下:

a. 检查图纸是否完整和正确,是否缺少必要的视图、尺寸或技术条件。

b. 审查图纸上选用的材料和规定的技术条件是否合理。

c. 审查零件的结构工艺性。

如果发现有问题,则应与有关设计人员共同研究,按规定程序对原图纸进行必要的修改和补充。

(2) 毛坯的选择及加工余量的确定。

零件的毛坯和加工余量在很大程度上影响机械加工的加工质量、生产效率和经济效益。

(3) 拟定工艺路线。

这是制订工艺规程的关键。拟订工艺路线,就是把加工工件所需的加工方案和加工顺序加以确定。这里还包括选定定位基准和夹紧方法,以及安排热处理、检验以及其他辅助工序(例如去毛刺、倒角等)。

(4) 确定各工序所采用的机床设备。

(5) 确定各工序所采用的刀具、夹具、量具和辅助工具。

如果需要设计专用的刀具、夹具、量具和辅助工具,应提出具体的设计任务书,由专门人员进行设计和制造。

(6) 确定各工序的加工余量,计算工序尺寸和公差。

(7) 确定切削用量。



单件或批量生产一般不规定切削用量,而由操作者自选。但对大量流水线或自动线生产,则各工序、工步都需要规定切削用量,以保证刀具寿命和生产节拍。

(8) 确定各主要工序的技术要求和检验方法。

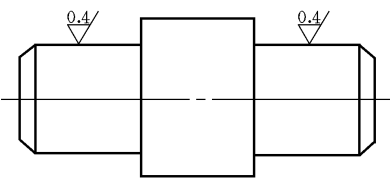
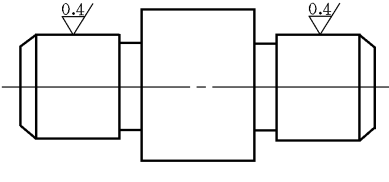
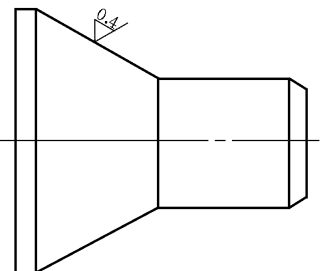
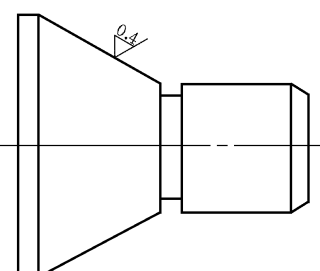
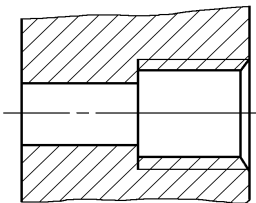
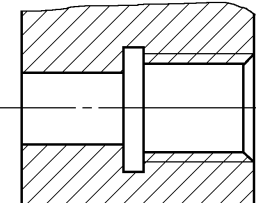
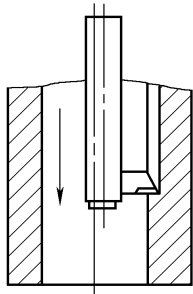
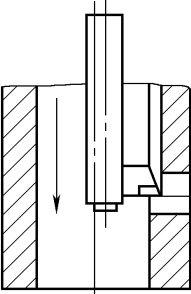
(9) 确定工时定额。

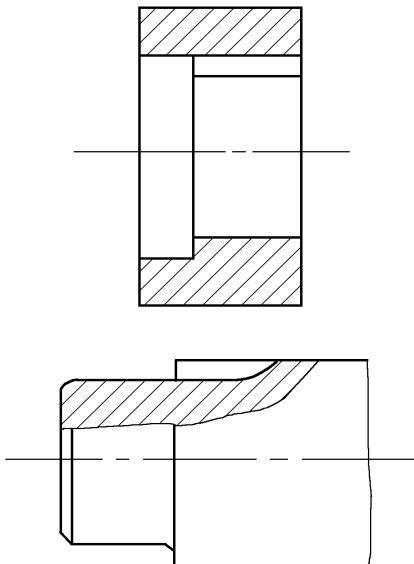
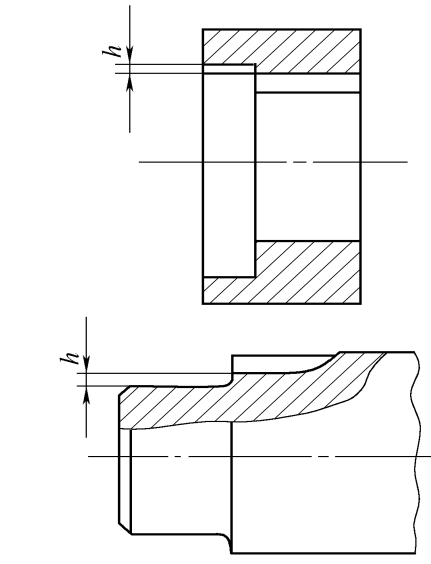
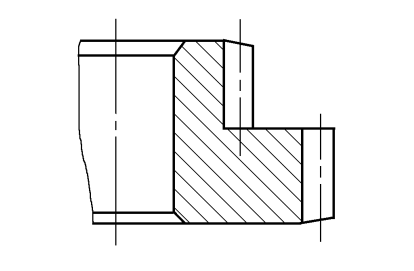
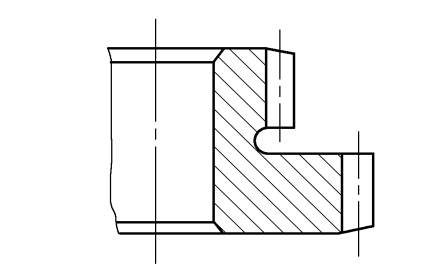
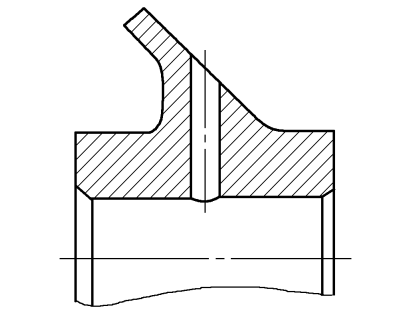
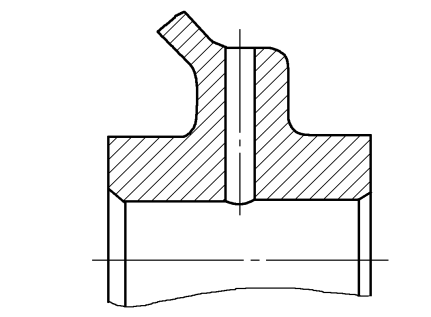
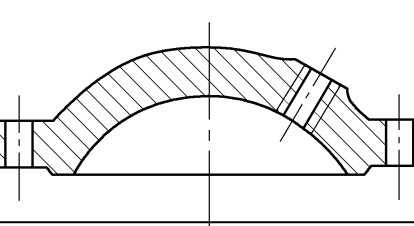
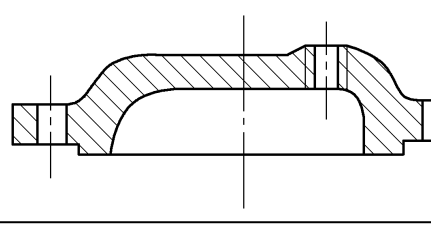
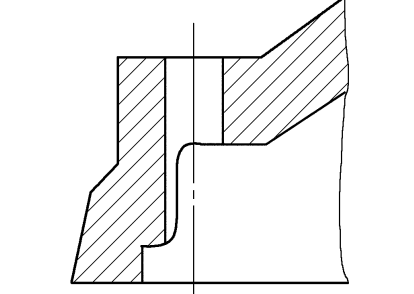
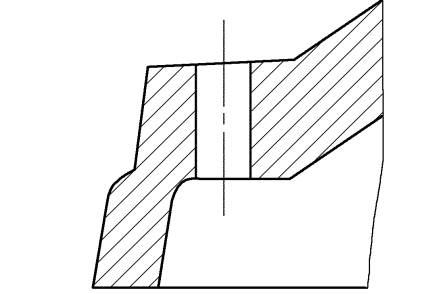
(10) 填写工艺文件。

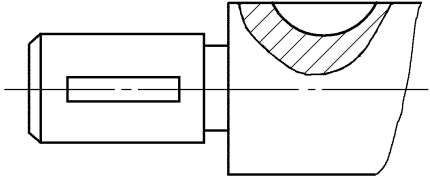
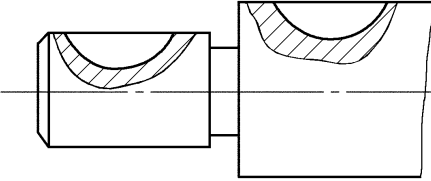
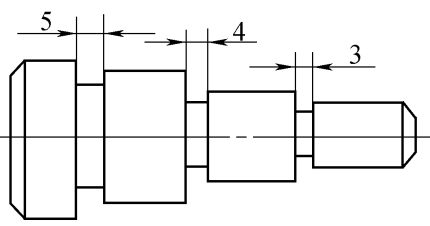
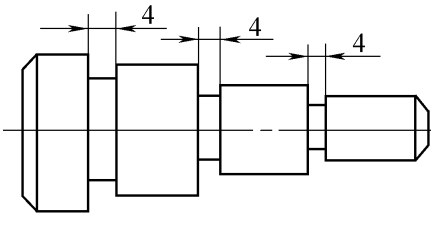
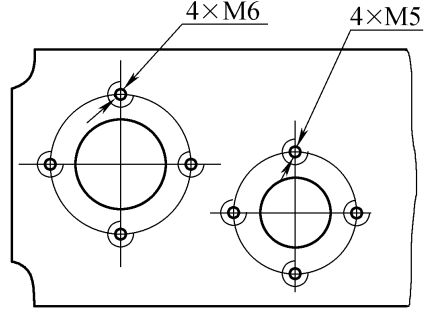
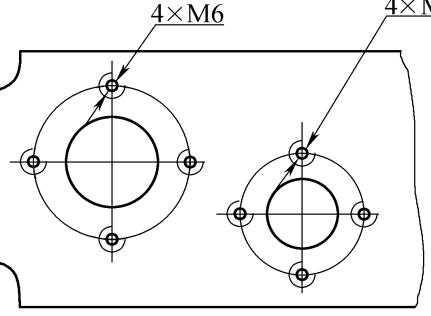
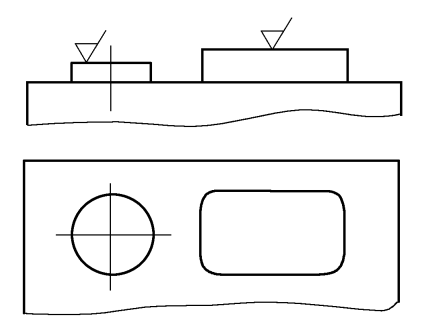
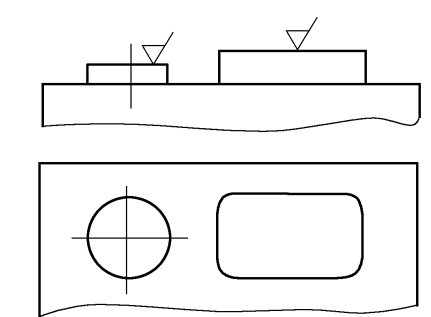
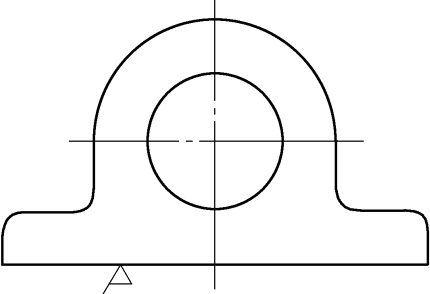
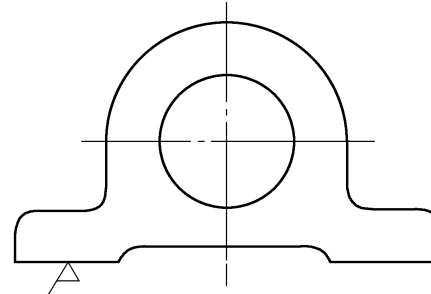
### 10.1.5 零件的结构工艺性

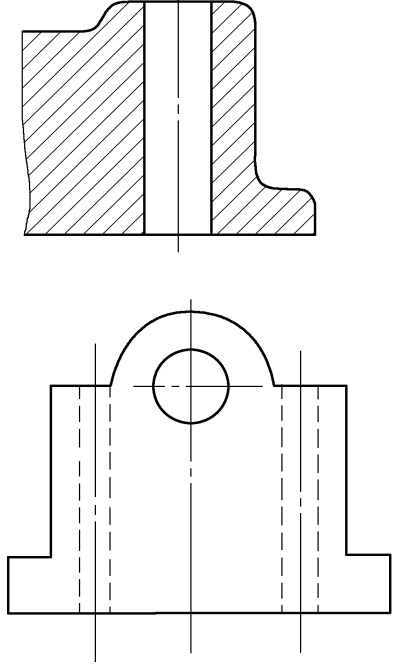
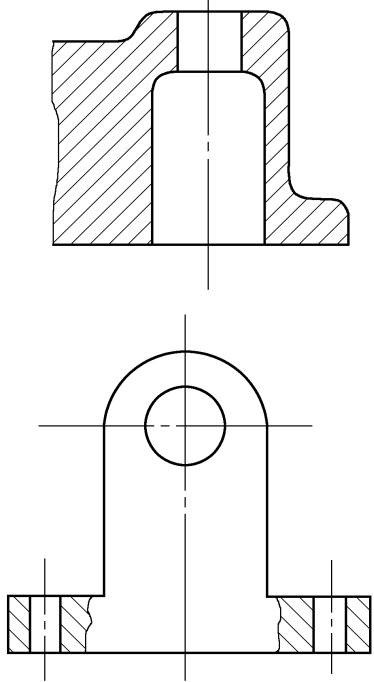
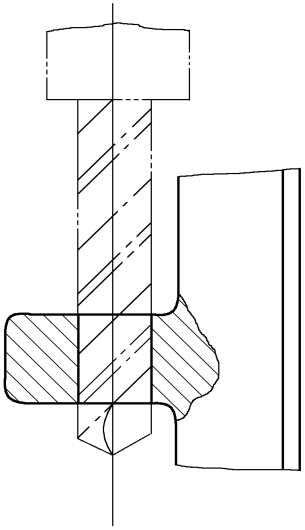
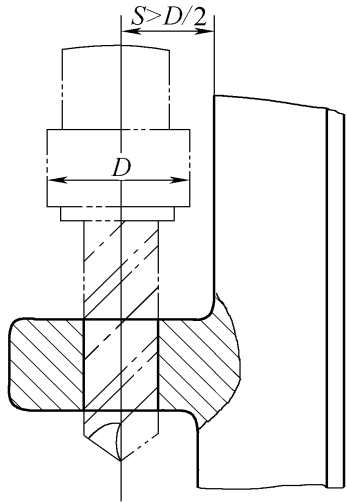
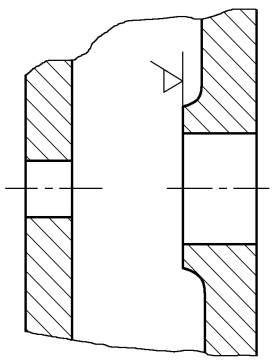
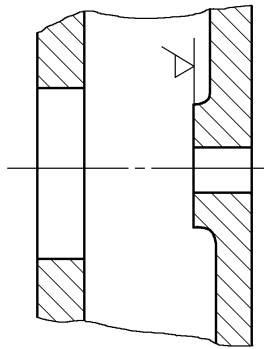
零件的结构工艺性,是指零件所具有的结构是否便于毛坯制造,是否便于机械加工,是否便于装配拆卸。它是评价零件结构设计优劣的一个重要指标。表 10.1.8 列出了常见的零件机械加工结构工艺性对比的一些实例。

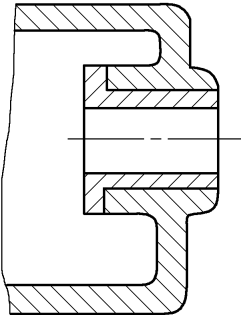
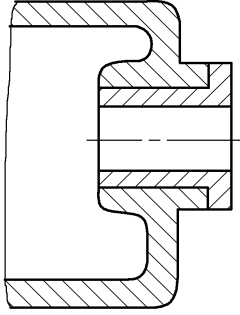
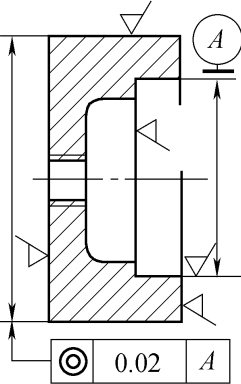
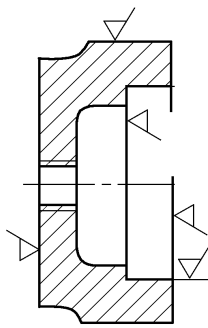
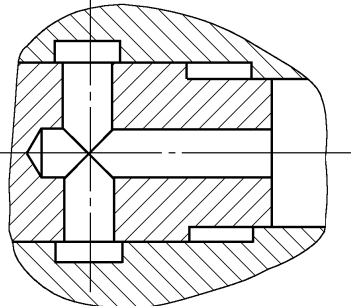
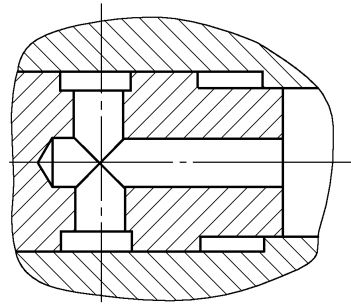
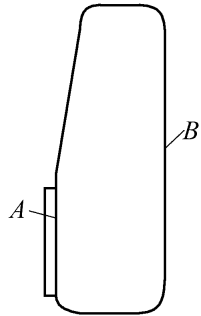
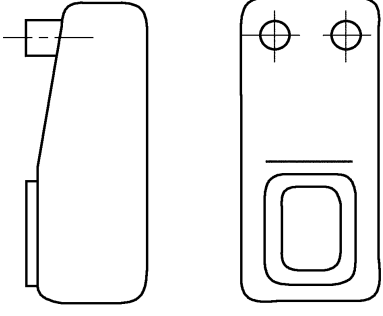
表 10.1.8 零件的机械加工结构工艺性对照表

序号	零件结构	
	工艺性差	工艺性好
1	<p>因砂轮圆角不能磨成清根,而且自动纵向来回进给要碰伤表面</p> 	 <p>留有越程槽。可以磨成清根,而且可以进行纵向来回自动进给磨削</p>
2	<p>磨锥面时要碰伤圆柱面,而且不能清根</p> 	 <p>磨削锥面和圆柱面互不干涉</p>
3	<p>车螺纹时较为紧张,而且车至根部容易打刀</p> 	 <p>留有退刀槽,操作相对容易,避免打刀,螺纹根部清根</p>
4	<p>插键槽回程时易损坏刀具</p> 	 <p>留有退刀槽或孔,避免打刀</p>

序号	零件结构		
	工艺性差	工艺性好	
5	<p>槽与沟的表面不应与其他加工表面重合,否则易破坏已加工表面,并且损坏刀具</p> 	 <p><math>h &gt; 0.2 \sim 0.5</math></p>	<p>有出刀空间,不损坏刀具,也不破坏已加工表面</p>
6	<p>小齿轮无法切削加工</p> 		<p>留有越程槽,小齿轮可以插齿加工</p>
7	<p>在斜面上钻孔,钻头易引偏折断</p> 		<p>留出平台,方便钻孔</p>
8	<p>加工斜孔较麻烦</p> 		<p>一组平行的孔便于同时加工</p>
9	<p>钻孔出头时遇到阶梯面或斜面,容易钻偏或断钻</p> 		<p>钻孔出口处平整,既方便钻削,又容易保证钻孔精度</p>

序号	零件结构			
		工艺性差	工艺性好	
10	两键槽需在二次装夹中加工			将所有键槽设计在同一径向上,可在一次装夹中加工全部键槽
11	三个不同尺寸的退刀槽就需三把不同尺寸的割槽刀			可使用同一把割刀槽
12	在同一平面上,尽管螺纹孔尺寸相近,但需要更换不同刀具,加工和装配都不方便			统一尺寸的螺纹孔,加工和装配都很方便
13	不在同一平面的两个加工面需要二次调整刀具加工,生产效率低			在同一平面上的两个加工面,可以一次调整刀具加工完毕
14	接触面太大,既增加加工工时,浪费材料,又降低接触联结精度			加工面减小,节省工时;接触面减少,提高联结精度

序号	零件结构	
	工艺性差	工艺性好
15	<p>钻深孔，既费工时，又费材料</p> 	 <p>省工又省料</p>
16	<p>孔与壁的距离太近，要用接长钻头加工，容易折断</p> 	 <p>根据刀夹具所占空间设计孔的位置，可提高加工精度和生产效率</p>
17	<p>箱体内壁凸台过大，不易操作和刮削加工</p> 	 <p>外口的孔径大于内壁凸台，便于操作观察和刮削加工</p>

序号	零件结构	
	工艺性差	工艺性好
18	<p>加工面设计在箱体内部, 操作观察和调整刀具都不方便</p> 	 <p>加工面设计在外部, 加工方便</p>
19	<p>内孔和外圆需要在两次装夹中加工, 同轴度不易保证</p> 	 <p>在一次装夹中, 加工外圆和内孔全部, 同轴度容易保证</p>
20	<p>油(气)槽设计在孔壁上, 加工困难</p> 	 <p>油(气)槽设计在阀芯外圆上, 加工容易</p>
21	<p>A面太小, 作为定位基准加工B面不可靠</p> 	 <p>增加工艺搭子, 也增大了A面作为定位基准面积, 使加工可靠。完毕后, 可将工艺搭子去掉</p>

## 10 2 典型零件机械加工工艺过程

### 10 2.1 轴类零件加工

图 10 2.1 所示齿轮减速箱中一转轴。现以其加工为例,说明在单件小批生产中,一般轴类零件加工工艺过程。

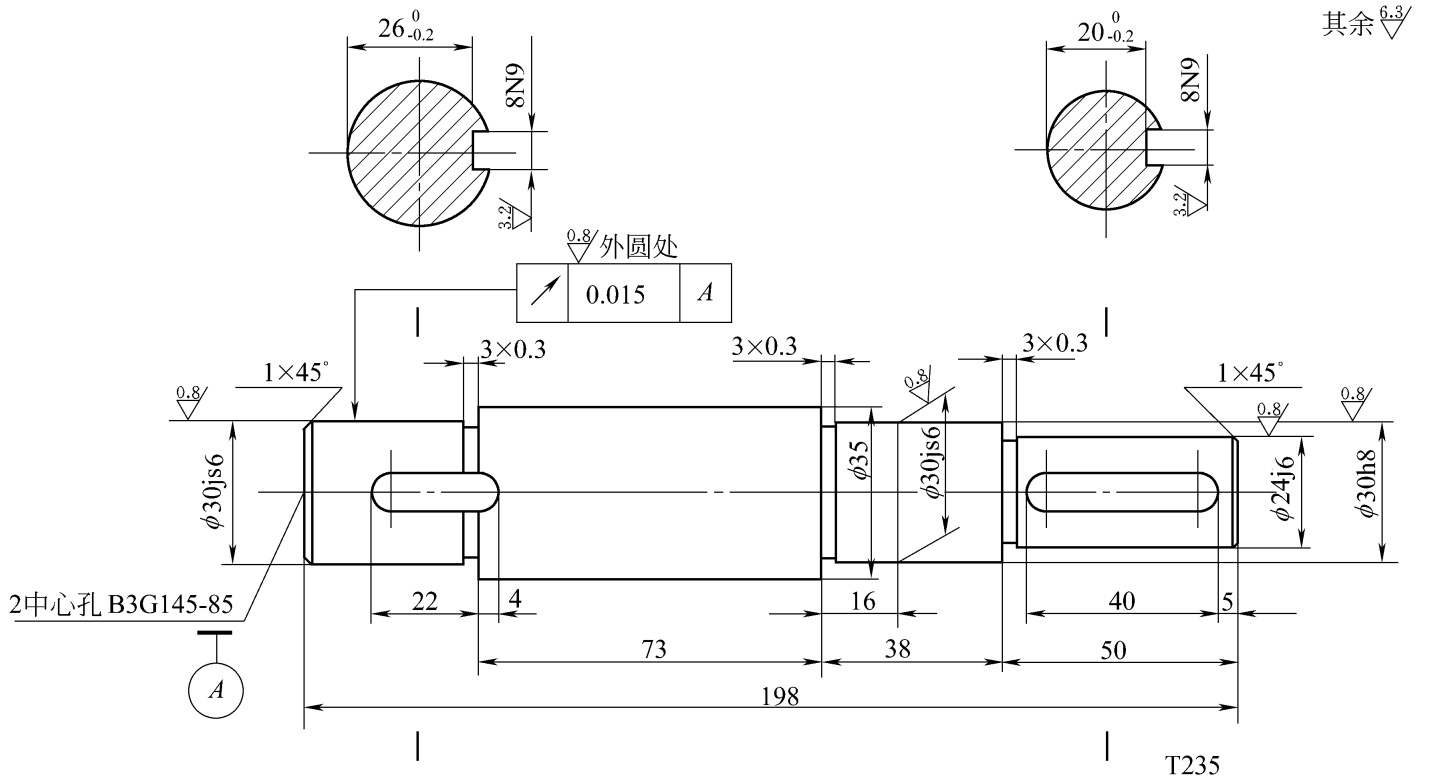


图 10.2.1 轴

#### 1. 零件各主要部分的功用和技术要求

(1) 在  $30js6$  带键槽轴段上安装锥齿轮,  $24j6$  轴段为减速箱输出轴,为了传递运动和动力分别铣有键槽;  $30js6$  两段为轴颈,安装滚动轴承,并固定于减速箱体的轴承孔中。表面粗糙度  $Ra$  值都为  $0.8\mu m$ 。

(2) 各圆柱配合表面相对于轴线的径向圆跳动允差  $0.015mm$ 。

(3) 工件材料选用 45 钢,并经调质处理,布氏硬度 HBS235。

#### 2. 工艺分析

该零件的各配合轴段除了有一定尺寸精度(IT6)和表面粗糙度要求外,还有一定的位置精度(径向跳动)。

根据对各加工表面的具体要求,可采用如下的加工方案:

粗车——调质——半精车——铣键槽——磨外圆

#### 3. 基准选择

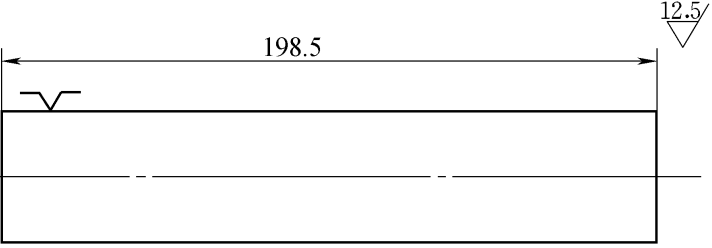
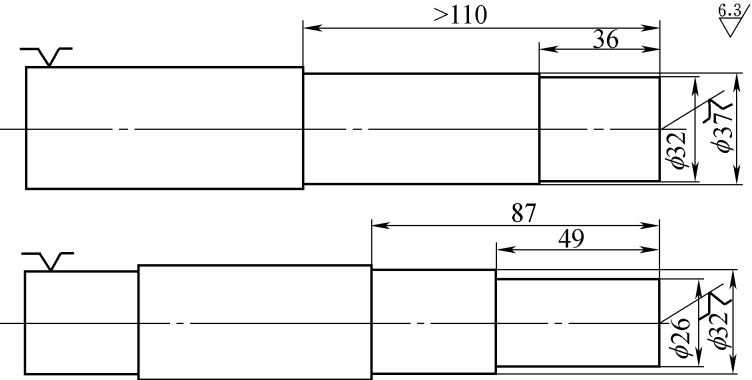
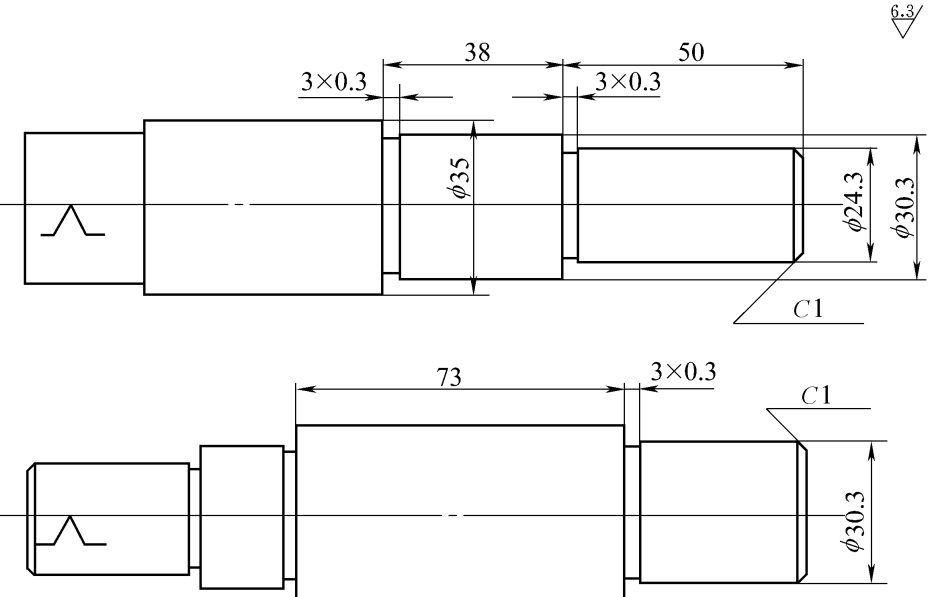
轴类零件一般选用两端中心孔作为粗、精加工的定位基准。由于符合基准同一原则和基准重合原则,保证了各轴段的位置精度,也有利于生产率的提高。为了保证定位基准的精度和粗糙

度,以及轴的各配合表面加工后的形状精度和粗糙度,热处理后应修研中心孔,大型轴类零件需要磨削中心孔。

#### 4. 工艺过程

该轴的毛坯选用  $38 \times 200$  型材。在单件小批生产中,其工艺过程可按表 10.2.1 进行。

表 10.2.1 单件小批生产轴的加工工艺过程

工序号	工序名称	工序内容	加工简图	设备
1	车	车一端面,钻中心孔 车另一端面,保证总长为 198.5,钻中心孔		车床
2	车	一端用三爪卡盘轧住,另一端用顶尖顶住。 粗车一端外圆分别至 $37 \times > 110$ , $32 \times 36$ 调头车另一端外圆,分别至 $32 \times 87$ , $26 \times 49$		车床
3	热	调质处理 HBS235		
4	车	修研中心孔		车床
5	车	用两顶尖定位,半精车小端外圆分别为 $35$ , $24.3 \times 50$ , $30.3 \times 38$ 车割二槽 $3 \times 0.3$ 倒角 $C1$ 调头车另一端外圆为 $30.3 \times 37$ ,保证 $35$ 外圆长度为 73 车割槽 $3 \times 0.3$ 倒角 $C1$		车床

续表

工序号	工序名称	工序内容	加工简图	设备
6	铣	铣键槽分别至 $8_{-0.036}^0 \times 26_{-0.2}^0$ $8_{-0.036}^0 \times 20_{-0.2}^0$		立式铣床
7	磨	粗磨一端外圆至 24.6 和 30.6 精磨该端分别至 $24_{-0.004}^{+0.009}$ 和 $30 \pm 0.0065$ 调头粗磨另一端外圆至 30.1 精磨该端外圆至 $30 \pm 0.0065$		磨床
8	检	按图纸要求检验		

注 1. 加工简图中粗实线为该工序加工表面；

2. 简图中的“ $\wedge$ ”符号表示所指定的定位基准。

## 10.2.2 套类零件加工

图 10.2.2 所示套筒齿轮零件。现以其加工为例,说明在单件小批中,套类零件的加工工艺过程。

### 1. 零件各主要部分的功用和技术要求



(1) 50js6 外圆上设置滚动轴承并安装在箱体轴承孔内,起支承作用,左边另外一根轴的右轴端可插入 30H7 孔内,与套筒齿轮联在一起转动;右边另外一根轴的左轴端可通过滚动轴承被支承在 52H7 孔内。

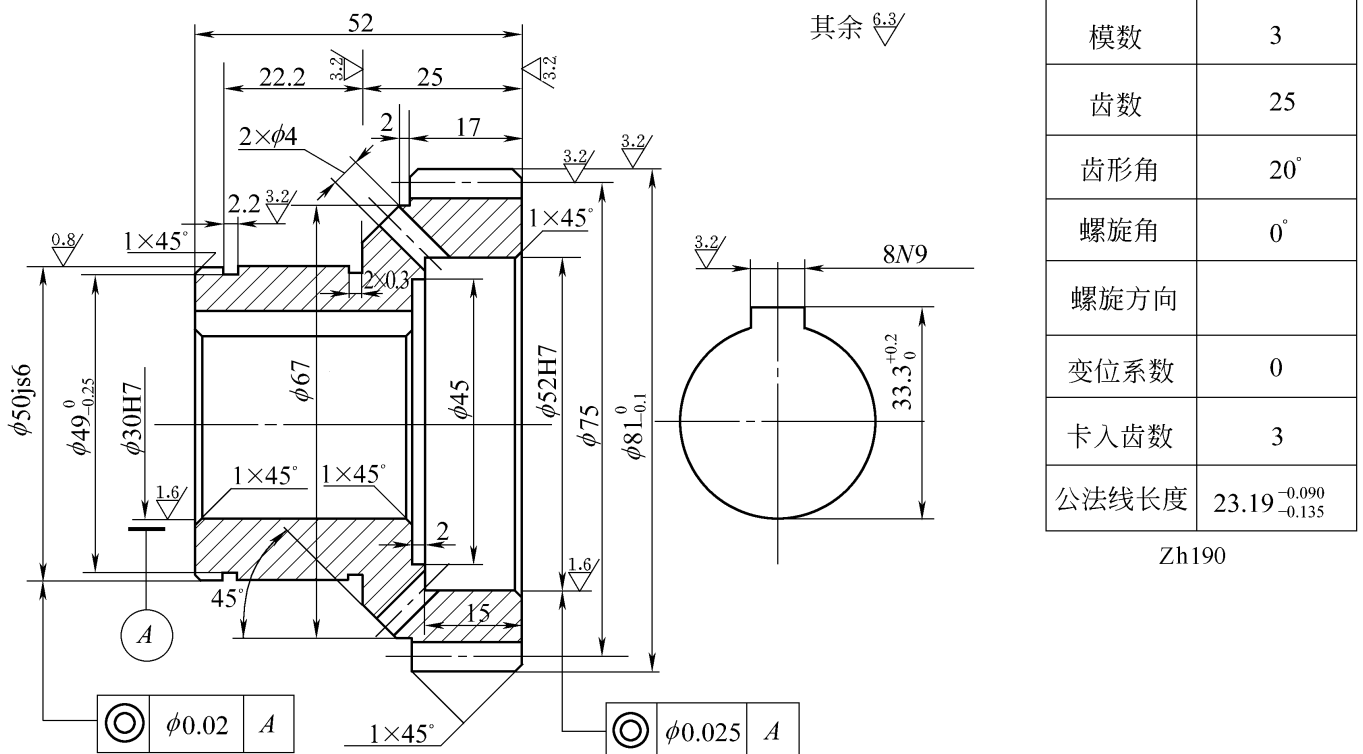


图 10.2.2 套筒齿轮

(2) 内孔表面粗糙度  $Ra$  值都为  $1.6 \mu\text{m}$ , 50js6 外圆表面粗糙度  $Ra$  值为  $0.8 \mu\text{m}$ 。

(3) 50js6 外圆上的  $2.2 \times 9^{0}_{-0.25}$  槽为安装轴用弹性挡圈槽。

(4) 50js6 外圆对 30H7 孔同轴度允差为  $0.02\text{mm}$ , 52H7 孔对 30H7 孔同轴度允差  $0.025 \text{mm}$ 。

(5) 工件材料选用 45 钢,毛坯为锻件,经正火处理,布氏硬度为 HBS190。

## 2. 工艺分析

该套筒齿轮要求较高的表面是孔 30H7 和孔 52H7 外圆 50js6。它们不仅对本身尺寸精度(IT7 和 IT6)和粗糙度有较高要求,而且对相对位置精度也有一定的要求。

根据工件材料及热处理和具体尺寸精度、粗糙度的要求,可采用粗车—正火—精车—滚(插)齿—磨的工艺来满足。孔 52H7 相对孔 30H7 的同轴度要求,可以在一次安装中用车加工来保证。外圆 50js6 相对于孔 30H7 的同轴度要求,可以在孔 30H7 精加工后用胀胎心轴或锥度心轴装夹后,用磨削加工来保证。

## 3. 基准选择

为了给车削大端时提供一个精基准,先以工件毛坯大端外圆作粗基准,粗车小端外圆和端面。这样在车削大端时保证了加工余量均匀。

然后调头卡住小端外圆,以小端外圆和肩面为定位基准,在一次安装中,加工大端外圆、各内孔及端面,以保证所要求的位置精度。

再调头卡住大端齿轮外圆加工小端其余部分,50js6 外圆放磨削余量  $0.3 \text{mm}$ 。最后可用胀

胎心轴或锥度心轴,以 30H7 孔定心,磨削 50js6 外圆,以保证其同轴度要求。

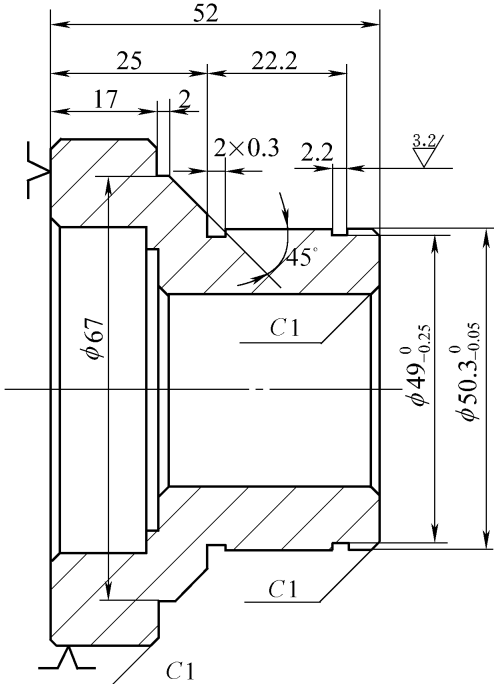
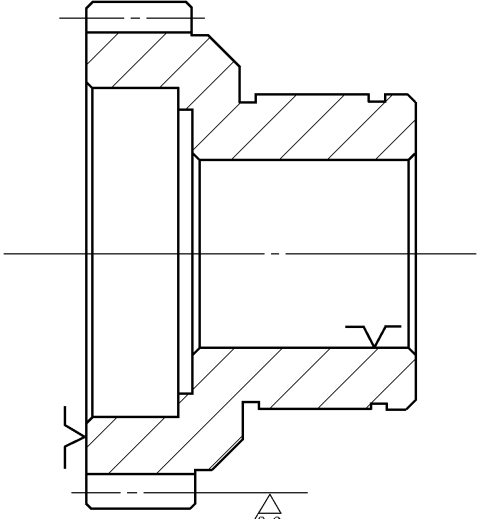
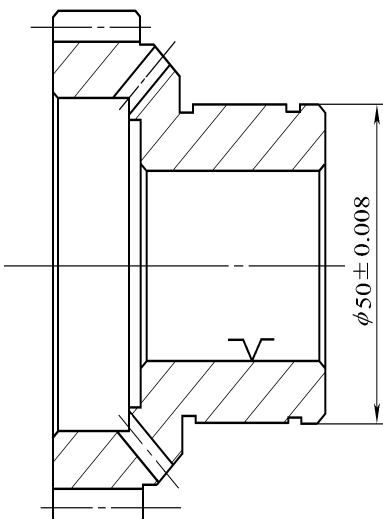
#### 4. 工艺过程

在单件小批生产中,该套筒齿轮工艺过程可按表 10 2 2 进行。

表 10 2 2 单件小批生产套筒齿轮的加工工艺过程

序号	工序名称	工序内容	加工简图	设备
1	车	卡住大端,粗车小端外圆 $52 \times 27$ , $69 \times 8$ 及各端面 钻孔 $\phi 28$ 调头卡住小端,粗车大端外圆 $83 \times 19$ ,内孔 $50 \times 15$ 及大端面		车床
2	热	正火处理 HBS190		
3	车	以小端外圆和肩面为定位基准,精车大端外圆 $81 \times 19$ ,大端面 车内孔 $52 \times 15$ , $45 \times 2$ , $30^{+0.025}_0$ 倒角 C1		车床

续表

序号	工序名称	工序内容	加工简图	设备
4	车	<p>以大端外圆和端面为定位基准,精车小端外圆, <math>50 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.05 \end{smallmatrix} \times 27</math>, 肩面,并保证 25 mm 尺寸; <math>67 \times 8</math> 外圆,并保证 17 mm 齿轮宽度尺寸;车小端面 并保证总长尺寸</p> <p>车 45°锥面</p> <p>割 <math>2 \times 0.3</math> 和 <math>2.2 \times 49 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.25 \end{smallmatrix}</math> 槽</p> <p>倒角 C1</p>	 <p>其余 <math>\sqrt[6.3]{}</math></p>	车床
5	滚齿 (插齿)	<p>以孔和大端为定位基准 滚齿(插齿)加工齿轮轮齿部分至尺寸</p> <p>修去齿端毛刺</p>		滚齿机 (插齿机)
6	磨	<p>磨削外圆 <math>50 \pm 0.008</math> 至尺寸</p>	 <p><math>\sqrt[0.8]{}</math></p>	外圆磨床 (胀胎心轴)

续表

序号	工序名称	工 序 内 容	加 工 简 图	设 备
7	拉	拉内孔键槽 $8_{-0.036}^0 \times 33_{0}^{+0.2}$ 至尺寸		拉床 (导套)
8	钳	钻 $2 \times 4$ 孔 修去毛刺		钳床 (钻模)
9	检	按图纸要求检验		

### 10 2 3 箱类零件加工

以图 10 2 3 所示卧式车床床头箱箱体加工为例 ,来说明单件小批生产中箱体零件的加工工艺过程。

#### 1. 箱体的功用、结构特点和主要技术要求

箱体是机器中箱体部件装配时的基准零件 ,由它将有关轴、套、齿轮、轴承及其他零件组装在一起 ,使它们保持正确的相互位置 ,彼此按照一定的传动关系正常地运转。

箱体的结构特点是 :构造比较复杂 ,中空壁薄。加工面多为平面和孔。它既有许多尺寸精度、位置精度和表面粗糙度要求较高的孔 ,也有许多精度较低的紧固用的孔。因此 ,其工艺过程

是比较复杂的。

以卧式车床床头箱箱体为例,其主要技术要求如下:

(1) 作为箱体部件装配基准的底面和导向面,其平面度要求允差  $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$ ,粗糙度为  $Ra0.8 \mu\text{m}$ 。顶面和侧面的平面度允差  $0.04 \sim 0.06 \text{ mm}$ ,粗糙度为  $Ra1.6 \mu\text{m}$ 。顶面对底面的平行度允差  $0.1 \text{ mm}$ ;侧面对底面的垂直度允差  $0.04 \sim 0.06 \text{ mm}$ 。

(2) 主轴轴承孔孔径精度为 IT6,粗糙度为  $Ra0.8 \mu\text{m}$ ;其余轴承孔的精度为 IT7 ~ IT6,粗糙度为  $Ra1.6 \mu\text{m}$ ;其他非配合紧固用的孔精度较低,粗糙度为  $Ra6.3 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 。

(3) 孔的圆度和圆柱度公差不超过孔径公差的  $1/2$ 。

(4) 轴承孔轴间距离尺寸公差为  $0.046 \sim 0.072 \text{ mm}$ ,主轴轴承孔轴线与基准面距离尺寸公差为  $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。

(5) 不同箱壁上同一轴线孔的同轴度允差为最小孔径公差的  $1/2$ ;各相关孔轴线间平行度允差  $0.06 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。端面对孔轴线的垂直度允差  $0.06 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。

(6) 工件材料取 HT200,毛坯为铸件。

## 2. 工艺分析

箱体在铸造后需经清理处理,在机械加工之前需经人工时效处理,以消除铸造过程中产生内应力。加工余量一般为:底面  $8 \text{ mm}$ ,顶面  $9 \text{ mm}$ ,侧面和端面  $7 \text{ mm}$ ,孔径  $7 \text{ mm}$ 。粗加工后,会引起工件内应力的重新分布,为了使内应力分布均匀,以防变形,还需经适当的时效处理。

在单件小批生产条件下,该床头箱箱体的主要工艺过程应考虑以下几个方面:

(1) 底面、顶面、侧面和两端面可采用粗刨——精刨工艺。因为底面和导向面是定位基准和装配基准,精度和粗糙度要求较高,所以在精刨后,还应进行精细加工——刮研。

(2) 直径小于  $40 \sim 50 \text{ mm}$  的孔,一般不铸出,可采用钻——扩(或半精镗)——铰(或精镗)的工艺。对于已铸出的孔,可采用粗镗——半精镗——精镗的工艺。由于箱体的轴承孔,尤其主轴轴承孔精度和粗糙度要求较高,故在精镗后,还要用浮动镗刀进行精细镗。

(3) 其余要求不高的紧固孔、螺纹孔及油塞油标孔等,可以放在最后加工。目的在于避免主要面或孔在加工过程中出现气孔、夹沙或加工超差时,已花费了这部分的工时。

(4) 整个工艺过程分为粗加工和精加工两个阶段,以保证箱体主要表面精度和粗糙度的要求,避免粗加工时由于切削量较大引起工件变形、走动、装夹变形或可能划伤已加工表面。

(5) 为了保证各主要表面位置精度的要求,不管粗加工或精加工时,都应采用同一的定位基准。一个平面上所有主要孔应在一次安装中加工完成。在普通镗床上加工可采用镗模夹具,以保证各孔位置精度。

(6) 无论是粗加工还是精加工,都应遵循“先面后孔”的原则。即先加工平面,后以平面定位,再加工孔。这是因为平面常常是箱体的装配基准和定位基准,其次平面的面积较大,加工孔时以平面定位,装夹稳定,定位可靠,有利于提高定位精度和加工精度。

## 3. 基准选择

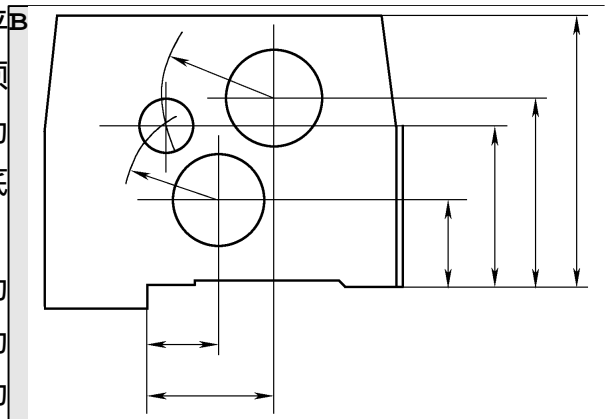


图 10.2.3 车床床头箱

### (1) 粗基准选择

在单件小批生产中,首先要保证各轴承孔,尤其主轴轴承孔的加工余量分布均匀,常常以主轴轴承孔和与之相距最远的一个孔为基准;同时还要保证装入箱体中的齿轮和拨叉之类零件与箱体的内壁有足够的空隙,并且兼顾导向面和底面的余量,对箱体毛坯进行画线。然后,在粗加工中按画线找正粗加工顶面,实际上就是以主轴轴承孔和与之相距最远的一个孔为粗基准。

### (2) 精基准选择

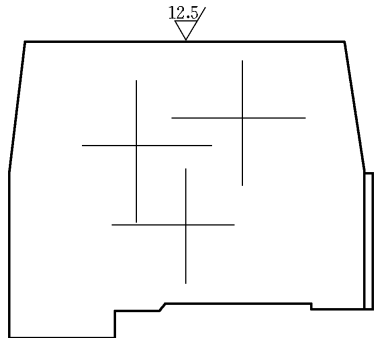
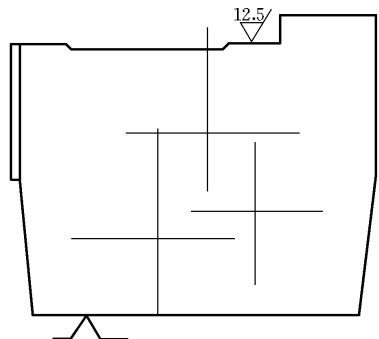
以该箱体的底面和导向面为精基准,加工各纵向孔、侧面和端面,因为该二平面为装配基准,同时符合基准同一和基准重合的原则,有利于加工精度提高。

既然底面和导向面作为精加工的定位精基准,那么其一定要有相当高的精度。所以在粗加工和时效处理后,以精加工后的顶面为基准,对底面和导向面进行精刨,最后还要进行刮研,这样进一步提高了精加工的定位基准精度,有利于保证精加工的精度。

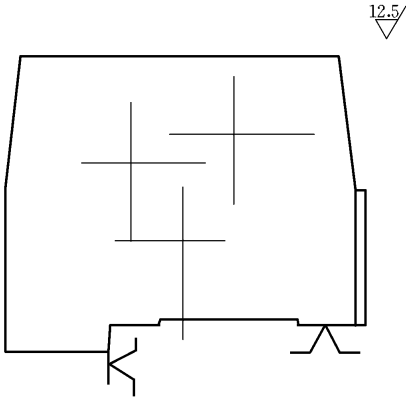
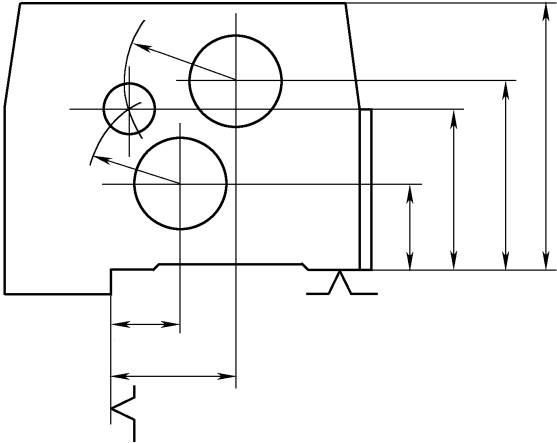
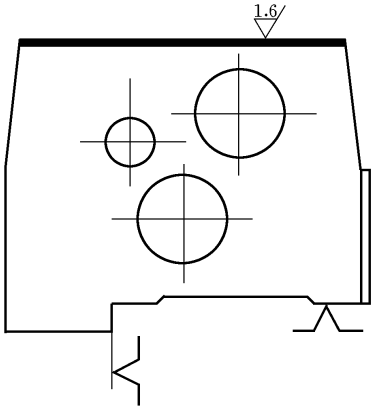
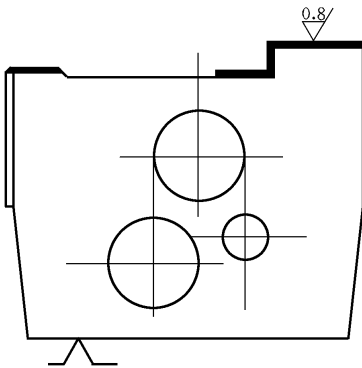
## 4. 工艺过程

根据上述分析,在单件小批生产中,车床床头箱箱体的工艺过程可按表 10 2 3 进行。

表 10 2 3 单件小批生产箱体的工艺过程

工序号	工序名称	工 序 内 容	加 工 简 图	设 备
1	铸	清理处理		
2	热	时效处理		
3	钳	划出各平面加工线	(以主轴轴承孔和与之相距最远的一个孔为基准,并兼顾底面和顶面的加工余量)	
4	刨	粗刨顶面,留精刨余量 2 mm		龙门刨床
5	刨	粗刨底面和导向面,留精刨余量 2 ~ 2.5 mm		龙门刨床

续表

工序号	工序名称	工序内容	加工简图	设备
6	刨	粗刨前面和两端面,留精刨余量 2 mm		龙门刨床
7	镗	粗镗纵向各孔,主轴承孔留半精镗、精镗余量 2 ~ 2.5 mm,其余各孔留半精镗、精镗余量 1.5 ~ 2 mm (小直径孔钻出,大直径孔用镗刀加工)		卧式镗床 (镗模)
8	热	时效处理		
9	刨	精刨顶面至尺寸		龙门刨床
10	刨	精刨底面和导向面,留刮研余量 0.1 mm		龙门刨床

续表

工序号	工序名称	工 序 内 容	加 工 简 图	设 备
11	钳	刮研底面和导向面至尺寸	(要求 $25 \times 25\text{mm}^2$ 内 8 ~ 10 个点)	
12	刨	精刨侧面和两端面至尺寸	同工序 6( $Ra1.6 \mu\text{m}$ )	龙门刨床
13	镗	半精镗各纵向孔, 主轴轴承孔和其他轴承孔留精镗余量 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}$ , 其余各孔留精镗余量 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ (小孔用扩孔钻, 大孔用镗刀加工) 精镗各纵向孔至尺寸, 各轴承孔留精镗余量 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ (小孔用铰刀, 大孔用浮动镗刀加工) 精细镗主轴轴承孔和其他轴承孔 (用浮动镗刀加工)	同工序 7 ( $Ra1.6 \mu\text{m}$ , 主轴轴承孔为 $Ra0.8 \mu\text{m}$ )	卧式镗床
14	钳	钻螺纹底径孔, 紧固孔及放油孔等至尺寸 攻丝, 去毛刺		横臂钻床
15	检	按图纸要求检验		

### 复习与思考题

- 10 - 1 什么是机械加工工艺流程? 什么是机械加工工艺流程? 工艺流程在生产中起什么作用?
- 10 - 2 试述工序、工步、走刀、安装和工位的概念。
- 10 - 3 拟定机械加工工艺流程的原则和步骤有哪些?
- 10 - 4 生产类型有哪几种? 不同生产类型对零件的工艺流程有哪些主要影响?
- 10 - 5 某塑料挤出机械厂年产某种规格塑料挤出机 360 台, 其中螺杆筒每台 1 件, 备品率为 10%, 废品率



为 2%。试计算该螺杆筒的年生产纲领,并说明它属于哪一种生产类型,其工艺过程有何特点?

10 - 6 常用的工艺文件有哪几种?各适用于什么场合?

10 - 7 加工轴类零件时,常以什么作为统一的精基准?为什么?

10 - 8 如何保证套类零件外圆、内孔及端面的位置精度?

10 - 9 安排箱体类零件的工艺时,为什么一般要依据“先面后孔”加工原则?

# 第 11 章 先进制造技术

随着现代科学技术的进步,特别是微电子技术、计算机技术、信息技术等与制造技术的深度结合,制造工业的面貌发生了深刻的变化,形成了先进(现代)制造体系。先进制造技术的内涵及范围很广,本章扼要的介绍先进制造工程加工技术中的数控加工技术、快速成形技术、超精密与纳米加工技术、工业机器人、柔性制造技术的概念和应用场合。

## 11.1 数控加工技术

### 11.1.1 数字控制与数控机床的概念

数字控制(Numerical Control)是用数字化信号对机械设备的运动及加工过程进行控制的一种方法,简称数控(NC)。它是一种自动控制技术。它所控制的一般是位置、角度、速度等机械量,也可以控制温度、压力、流量等物理量。

数控机床,就是采用了数控技术的机床,或者说是装备了数控系统的机床。国际信息处理联盟(IFIP)第 5 技术委员会,对数控机床作了如下定义:数控机床是一个装有程序控制系统的机床,该系统能够逻辑地处理具有使用号码或其他符号编码指令规定的程序(定义中所提的程序控制系统,就是所说的数控系统)。

进一步说,数控机床是一种以数字量作为指令信息形式,通过电子计算机或专用电子计算装置,对这种信息进行处理而实现自动控制的机床。数控机床是电子技术、计算机技术、自动控制、精密测量、伺服驱动和精密机械结构等新技术综合应用的成果,是一种柔性好、效率高的自动化机床。

### 11.1.2 数控机床的基本组成及工作原理

如图 11.1.1 所示,数控机床加工零件的工作过程可分成以下几个步骤实现:

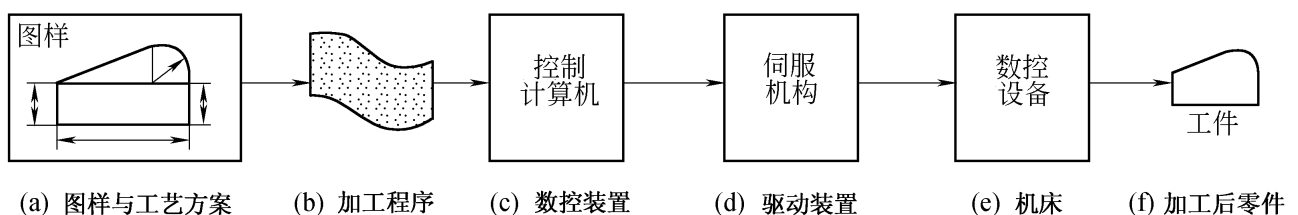


图 11.1.1 数控机床加工零件的工作过程

- (1) 根据被加工零件的图样与工艺方案,用规定的代码和程序格式编写加工程序。
- (2) 所编程序指令输入机床数控装置中。

(3) 数控装置对程序(代码)进行译码,运算之后,向机床各坐标轴的伺服驱动机构和辅助控制装置发出信号,驱动机床各运动部件,并控制所需的辅助动作。

(4) 机床加工出合格的零件。

分析数控机床的工作过程可知,数控机床的基本组成包括加工程序、输入装置、数控系统、伺服系统和辅助控制装置、检测装置及机床本体。见图 11.1.2。

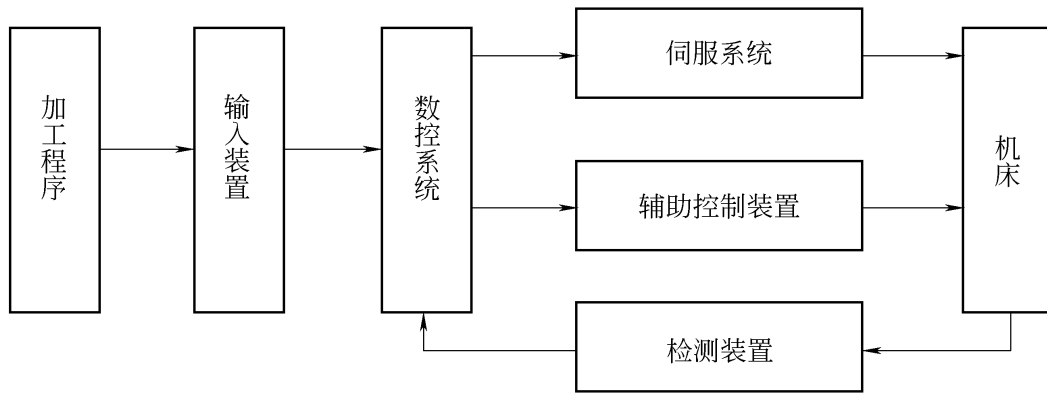


图 11.1.2 数控机床的基本组成

### 1. 加工程序

数控机床工作,不需要工人直接去操作机床,要对数控机床进行控制,必须编制加工程序。加工程序上存储着加工零件所需的全部操作信息和刀具相对工件位移信息等。加工程序可存储在控制介质(也称信息载体)上,常用的控制介质有穿孔带、磁带、磁盘等。

信息是以代码的形式按规定格式存储的,代码分别表示十进制的数字(0~9)、字母(A~Z)或符号。目前国际上通常使用 EIA 代码和 ISO 代码,我国规定使用 ISO 代码作为标准代码。

### 2. 输入装置

输入装置的作用是将控制介质(信息载体)上的数控代码变成相应的电脉冲信号,传递并存入数控系统内。根据控制介质的不同,输入装置可以是光电阅读机、磁带机或软盘驱动器等。数控加工程序也可通过键盘,用手工方式(MDI 方式)直接输入数控系统,或者将数控加工程序由编程计算机用通讯方式传送到数控系统中。

### 3. 数控系统

数控系统是数控机床的中枢。数控系统接受输入装置送来的脉冲信息,经过数控系统的逻辑电路或系统软件进行编译、运算和逻辑处理后,输出各种信息和指令,控制机床的各部分进行规定有序的动作。这些控制信息中最基本的信息是,经插补运算确定的各坐标轴的进给速度、进给方向和进给位移指令。其他还有主运动部件的变速、换向和启停指令;刀具的选择和交换指令;冷却、润滑装置的启停;工件和机床部件的松开、夹紧,分度工作台的转位等辅助指令。

### 4. 伺服系统及检测装置

伺服系统接受来自数控装置的指令信息,经功率放大后,严格按照指令信息的要求驱动机床的移动部件,以加工出符合图样要求的零件。因此,它的伺服精度和动态响应是影响数控机床的加工精度、表面质量和生产率的主要因素之一。

检测装置将数控机床各坐标轴的实际位移量检测出来,经反馈系统输入到机床的数控系统中。数控系统将反馈回来的实际位移量与设定位移量进行比较,控制伺服系统按指令设定值

运动。

## 5. 辅助控制装置

辅助控制装置的主要作用是接收数控装置输出的主运动换向、变速、启停、刀具的选择与交换,以及其他辅助动作的开关量指令信息,经必要的编译、逻辑判断和运算,再经过功率放大后驱动相应的电器,带动机床的机械、液压、气动等装置完成指令规定的动作。

由于可编程逻辑控制器(PLC)具有响应快、性能可靠、易于使用、编程和修改程序,并可直接驱动机床电器,现已广泛用作数控机床的辅助控制装置。

## 6. 机床本体

数控机床的机床本体仍然由主运动装置、进给传动装置、床身、工作台以及辅助运动装置、液压气动系统、润滑、冷却装置等组成。但数控机床的整体布局、外观造型、传动系统、刀具系统的结构以及操作机构等方面都已发生了很大变化。这种变化的目的是为了满足不同数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点。

### 11.1.3 数控机床的分类

数控机床种类繁多,据不完全统计,已有400多个品种规格,归纳起来可以用下面几种方法进行分类:

#### 1. 按工艺用途分类

##### (1) 金属切削类数控机床

这类数控机床有与普通通用机床种类相同的数控车床、铣床、镗床、钻床、磨床、齿轮加工机床等。此外,还有带有刀库和自动换刀装置的加工中心机床(例如,镗铣加工中心、车削中心等)。

##### (2) 金属成形类机床

包括数控冲床、弯管机、折弯机、板材成形加工机床等。

##### (3) 特种加工机床

包括数控线切割机床、电火花加工机床、激光切割机床和高压水切割机床等。

##### (4) 其他数控设备

如数控火焰切割机、数控自动装配机、数控多坐标测量机、自动绘图机及工业机器人等。

#### 2. 按控制运动方式分类

##### (1) 点位控制

点位控制数控机床的特点是机床运动部件只能实现从一个位置到另一个位置的精确定位,在移动和定位过程中不进行任何加工。数控系统只需要控制行程起点和终点的坐标值,而不控制运动部件的运动轨迹,数控钻床、数控镗床、数控点焊机均属于点位控制。图11.1.3为点位控制加工示意图。

##### (2) 点位直线控制

其特点是除了控制点与点之间的准确位置外,还需保证移动轨迹是一条直线,一般是沿着与坐标轴平行方向作切削运动,或是沿着与坐标轴成 $45^\circ$ 的方向作斜线运动。可用于加工阶梯轴或盘类零件的数控车床或用于数控镗床等。图11.1.4所示为点位直线控制加工示意图。

##### (3) 轮廓控制

又称连续控制。其特点是能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行联动控制。它不仅要控

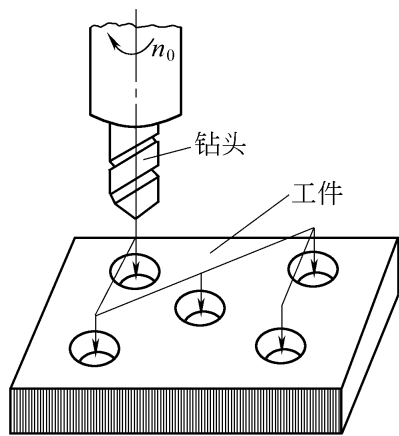


图 11.1.3 点位控制加工示意图

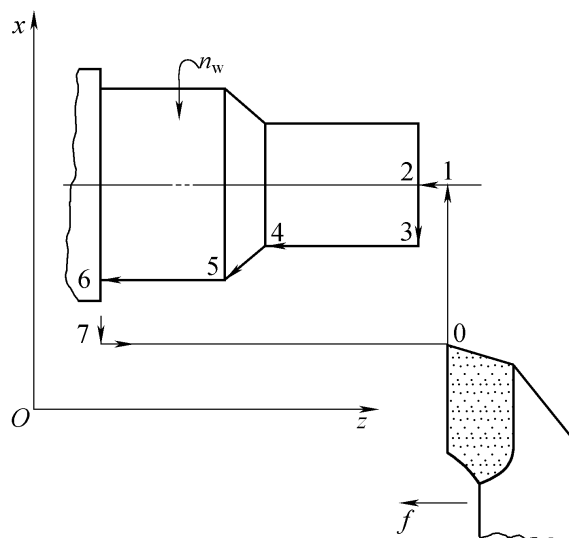


图 11.1.4 点位直线控制加工示意图

制运动部件的起点与终点坐标位置,而且要控制整个加工过程每一点的速度与位移量,即要控制运动轨迹。用于加工平面内的直线、曲线表面或空间曲面。轮廓控制多用数控车床、铣床、磨床和齿轮加工机床等。图 11.1.5 为轮廓控制加工示意图。

### 3. 按伺服系统的类型分类

#### (1) 开环控制系统

图 11.1.6 为开环控制系统原理图。这类数控机床的伺服系统不带位置检测元件,伺服驱动元件一般为功率步进电动机。数控装置输出的控制脉冲通过步进驱动电路,不断改变步进电动机的供电状态,使步进电动机转过相应步距角,再经过机械传动链驱动,实现运动部件的直线位移。移动部件的移动速度和位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数所决定的。

开环控制系统结构简单,调整方便,精度低,一般用于加工精度要求不高的中小型数控机床,特别是经济型数控机床。

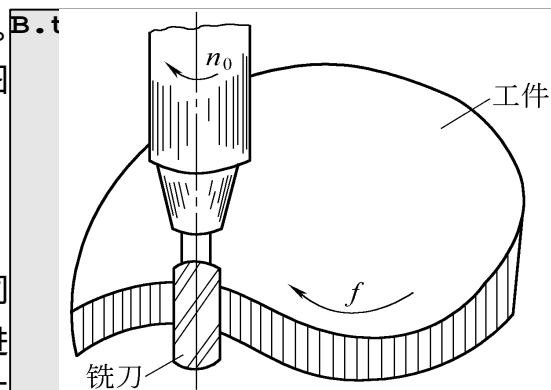


图 11.1.5 轮廓控制加工示意图

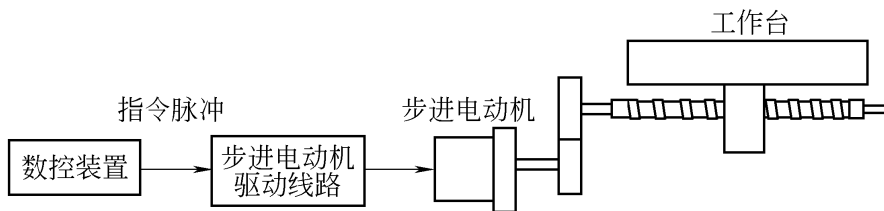


图 11.1.6 开环控制系统原理图

#### (2) 闭环控制系统

闭环控制是在机床移动部件上直接安装直线位移检测装置,将测量的实际位移值反馈到数控装置中,与输入的指令位移值进行比较,用差值对机床进行控制,使移动部件按照实际需要的位移量运动,最终实现移动部件的精确运动和定位。图 11.1.7 所示为闭环控制系统原理图,通过测速机和位置检测器进行测量,将其与命令值相比,构成速度与位置环控制。

闭环控制的数控机床加工精度高、速度快,但现场调试、维修困难,成本高,系统稳定性控制

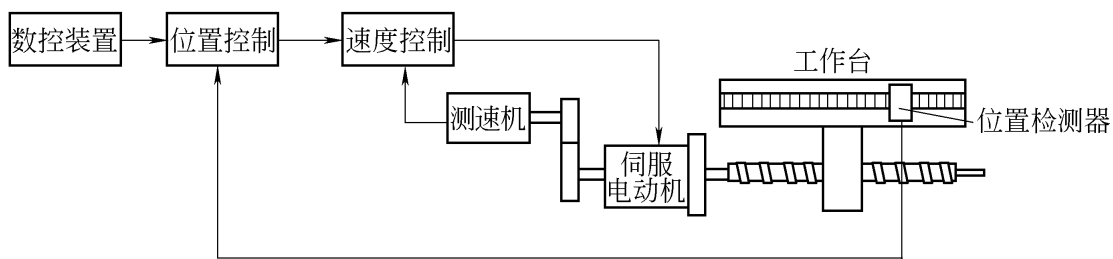


图 11.1.7 闭环控制系统原理图

也较困难,主要用于高精度数控机床。

### (3) 半闭环控制系统

半闭环控制是在伺服电动机的轴上或滚珠丝杠的端部装有角位移检测装置,通过检测伺服电动机或丝杠的转角间接地检测移动部件的实际位移,然后反馈到数控装置中去,并对误差进行修正。图 11.1.8 所示为半闭环控制系统原理图,通过测速机和转角检测器进行测量,将其与命令值比较,构成速度与位置环控制。

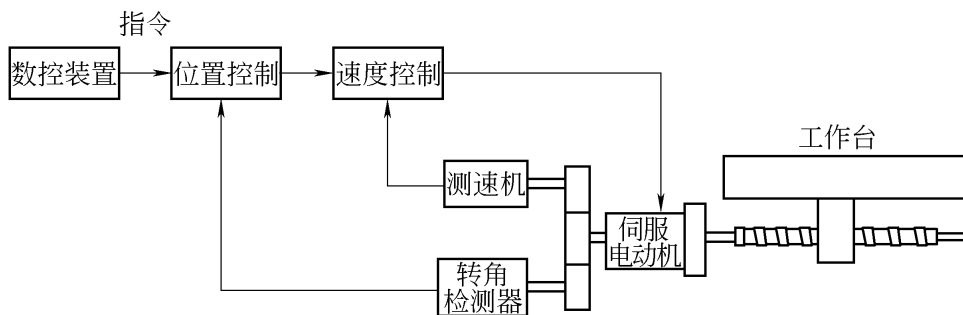


图 11.1.8 半闭环控制系统原理图

半闭环控制调试比较方便,并且具有很好的稳定性,广泛应用于各类中等精度以上连续控制的数控机床中。

除了上述三种分类方法以外,目前出现了按所使用的数控装置结构进行分类,即硬件数控(NC)和计算机数控(CNC,亦称软件数控);也有按控制坐标轴数与联动轴数的方法分类,如三轴二联动、四轴四联动等;还有按功能水平的高低分类,如高档数控、中档数控和低档数控(又称经济型数控)等。

## 11.1.4 数控机床的特点及应用范围

### 1. 数控机床的加工特点

数控机床加工与普通机床加工相比较有以下的特点:

#### (1) 加工精度高

目前数控机床加工精度已提高到  $\pm 0.005 \text{ mm}$ ,定位精度已达到  $\pm 0.002 \sim \pm 0.005 \text{ mm}$ 。并且数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定性,因此加工精度高。此外,数控机床的自动加工方式避免了人为的干扰因素,同一批零件的尺寸一致性好,加工质量十分稳定。

#### (2) 对加工对象的适应性强

在数控机床改变零件加工时,只需重新编制或更换加工程序,就能实现对新零件的加工。

这就为复杂结构的单件、小批量生产以及试制新产品提供了极大的方便。

### (3) 生产效率高

数控机床主轴的转速和进给量的变化范围大,并且数控机床的结构刚性好,因此可进行大切削用量的强力切削,这就提高了数控机床的切削效率,节省了机动时间。数控机床的移动部件空行程运动速度快,工件装夹时间短,刀具可自动更换,辅助时间比一般机床少。在加工中心机床上加工时,一台机床实现了多道工序的连续加工,生产效率的提高更为明显。

### (4) 自动化程度高,劳动强度低

数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者除了装卸工件,操作键盘,进行关键工序的中间检测以及观察机床运行之外,不需要进行繁杂的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度均可大为减轻,劳动条件也得到相应的改善。

### (5) 良好的经济效益

数控机床虽然设备昂贵,加工时分摊到每个零件上的设备折旧费较高。但在单件、小批量生产的情况下,使用数控机床加工可节省画线工时、减少调整、加工和检验时间,节省了直接生产费用。数控机床加工一般不需制作专用工夹具,节省了工艺装备费用。数控机床加工精度稳定,减少了废品率,使生产成本进一步下降。此外,数控机床可实现一机多用,节省了厂房面积和建厂投资,因此使用数控机床可获得良好的经济效益。

### (6) 有利于现代化管理

采用数控机床加工,能准确地计算零件加工工时和费用,有效地简化检验工夹具、半成品的管理工作。这些特点都有利于使生产管理现代化。

数控机床使用数字信息与标准代码输入,适于数字计算机联网,成为计算机辅助设计、制造及管理一体化的基础。

## 2. 数控机床的应用范围

数控机床具有一般机床不具备的许多优点,其应用范围正在不断扩大,但它不能完全代替普通机床、组合机床和专用机床,也不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。数控机床最适合加工具有以下特点的零件:

- (1) 多品种小批量生产的零件;
- (2) 形状结构比较复杂的零件;
- (3) 精度要求比较高的零件;
- (4) 需要频繁改型的零件;
- (5) 价格昂贵,不允许报废的关键零件;
- (6) 需要生产周期短的急需零件。

## 11.2 快速成形技术

### 11.2.1 快速成形技术的概念

快速成形(RP, Rapid Prototyping)技术是运用堆积成形法,由CAD模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维实体零件的技术总称。

RP 技术的成形原理不同于常规制造的去除法(切削加工、电火花加工等)和变形法(铸造、锻造等),而是利用光、电、热等手段,通过固化、烧结、粘结、熔结、聚合作用或化学作用等方式,有选择地固化(或粘结)液体(或固体)材料,实现材料的迁移和堆积,形成所需要的原型零件。因此,RP 制造技术好像燕子衔泥垒窝一样,是一种分层制造的材料累加方法。RP 制造技术可直接从 CAD 模型中产生三维物体,它综合了机械工程、自动控制、激光、计算机和材料等学科的技术。

### 11.2.2 快速成形技术的工作原理

RP 技术是一种基于离散堆积成形思想的数字化成型技术。根据生产需要,先由三维实体 CAD 软件设计出所需要零件的计算机三维曲面或实体模型(亦称电子模型),然后根据工艺要求,将其按一定厚度进行分层,把原来的三维实体模型变成二维平面(截面)信息;再将分层后的数据进行一定的处理,加入工艺参数,产生数控代码;最后在计算机控制下,数控系统以平面加工方式,把原来很复杂的三维制造转化为一系列有序的低维(二维)薄片层的制造并使它们自动粘结叠加成形。

### 11.2.3 快速成形技术的工艺方法

RP 技术的具体工艺有很多种,根据采用的材料和对材料的处理方式不同,选择其中 3 种方法的工艺原理进行介绍。

#### 1. 选择性液体固化

选择性液体固化又称光固化法。

该方法的典型实现工艺有立体光刻(SL, StereoLithography),其工艺原理如图 11.2.1 所示。成形过程中,计算机控制的紫外激光束按零件的各分层截面信息在树脂表面进行逐点扫描,使被扫描区域的树脂薄层产生光聚合反应而固化,形成零件的一个薄层。头一层固化完后,升降台下移一个层厚的距离,再在原先固化好的树脂表面上覆盖一层液态树脂,再进行扫描加工,新生成的固化层牢固地粘结在前一层上。重复上述步骤,直到形成一个三维实体零件。

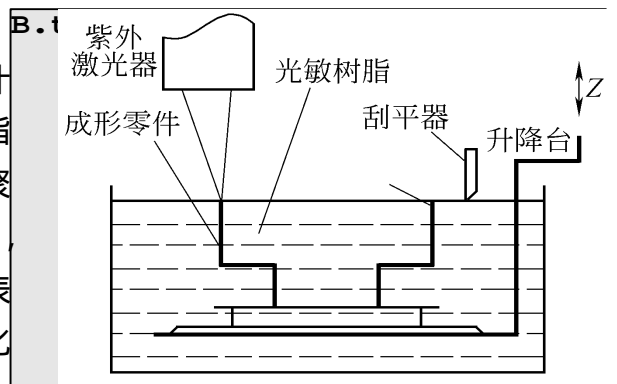


图 11.2.1 光固化法工艺原理图

光固化法是目前应用最广泛的快速成形制造方法。光固化的主要特点是:制造精度高( $\pm 0.1 \text{ mm}$ )、表面质量好、原材料利用率接近 100%。能制造形状复杂(如腔体等)及特别精细(如首饰、工艺品等)的零件;能使用成形材料较脆、材料固化伴随一定收缩的材料制造所需零件。

#### 2. 选择性层片粘结

选择性层片粘结又称分层实体制造、叠层制造法(LOM, Laminated Object Manufacturing)。其工艺原理如图 11.2.2 所示。叠层法在成形过程中首先在基板上铺上一层箔材(如纸箔、陶瓷箔、金属箔或其他材质基

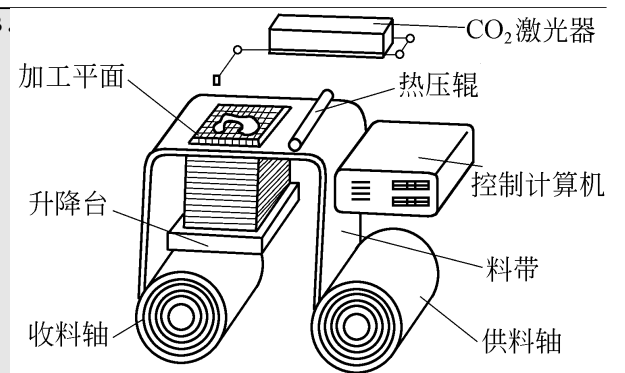


图 11.2.2 叠层法工艺原理图

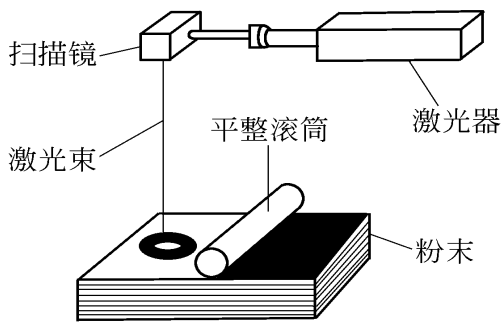


的箔材) ,再用一定功率的 CO<sub>2</sub> 激光器在计算机控制下按分层信息切出轮廓 ,同时将非零件的多余部分按一定网络形状切成碎片去除掉。加工完上一层后 ,重新铺上一层箔材 ,用热辊碾压 ,使新铺上的一层箔材在粘结剂作用下粘结在已成形体上 ,再用激光器切割该层形状。重复上述过程 ,直至加工完毕。最后去除掉切碎的多余部分即可得到完整的原形零件。

叠层法的主要特点是 :不需要制作支撑 ;激光只作轮廓扫描 ,而不需填充扫描 ,成形率高 ;运行成本低 ;成形过程中无相变且残余应力小 ,适合于加工较大尺寸零件 ;但材料利用率较低 ,表面质量差。

### 3. 选择性粉末熔结/粘结

选择性粉末熔结/粘结又称激光选区烧结法 (SLS ,Selective Laser Sintering) ,其工艺原理如图 11.2.3所示。激光选区烧结法采用 CO<sub>2</sub> 激光器作为能源 ,成形材料常选用粉末材料(如铁、钴、铬等金属粉 ,也可以是蜡粉、塑料粉、陶瓷粉等)。成形过程中 ,先将粉末材料预热到稍低于其熔点的温度 ,再在平整滚筒的作用下将粉末铺平压实(约 100 ~ 200 μm 厚) ,CO<sub>2</sub> 激光器在计算机



控制下 ,按照零件分层轮廓有选择地进行烧结 ,烧结成一个层面。再铺粉用平整滚筒压实 ,让激光器继续烧结 ,逐步形成一个三维实体 ,再去掉多余粉末 ,经打磨、烘干等处理后便获得所需零件。它是直接可以制造工程材料的真实零件 ,应用前景看好。

激光选区烧结法的主要特点是 :不需制作支撑 ;成形零件的机械性能好 ,强度高 ;粉末较松散 ,烧结后精度不高 ,Z 轴精度难以控制。

图 11.2.3 激光选区烧结法工艺原理图

## 11.2.4 快速成形技术的特点和用途

### 1. 主要特点

用 RP 制造技术可以制造任意复杂的三维几何实体零件。并且在制造过程中省掉了一系列技术准备 ,无需专用夹具和工具 ,也无需人工干预或较少干预。因此零件制造的设备少 ,占地少 ,时间快 ,成本低。通过 CAD 模型的直接驱动对原型的快速制造、检验、实样分析研究 ,可以将新产品开发的风险减到最小程度。

### 2. 用途

(1) 能用于制造业中快速产品开发(不受形状复杂限制)、快速工具制造、模具制造、微型机械制造、小批零件生产。

(2) 用于与美学有关的工程设计 ,如建筑设计、桥梁设计、古建筑恢复等 ,以及首饰、灯饰等的制作设计。

(3) 在医学上可用于颅外科、体外科、牙科等制造颅骨、假肢、关节、整形。

(4) 可用于考古等康复考古工程。

(5) 可制作三维地图、光弹模型制作等。

## 11.3 超精密与纳米加工技术

### 11.3.1 超精密加工技术

超精密加工是指被加工零件的尺寸公差为  $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$  数量级,表面粗糙度  $Ra$  值在  $0.03 \sim 0.005 \mu\text{m}$  数量级的加工技术。加工时所使用的设备,其分辨率和重复精度应为  $0.01 \mu\text{m}$  数量级。

超精密加工方法有金刚石刀具精密切削、精密和镜面磨削、精密研磨和抛光等方式。

#### 1. 金刚石刀具超精密切削

金刚石刀具拥有很高的高温强度和硬度,而且材质细密,经过精细研磨,切削刃可磨得极为锋利,表面粗糙度值很小,因此可进行镜面切削。此外,金刚石与有色金属的亲合力极低,摩擦系数小,切削有色金属不易产生积屑,所以用金刚石刀具切削有色金属和非金属材料时,可得到表面粗糙度值  $Ra = 0.02 \sim 0.002 \mu\text{m}$  的镜面。金刚石刀具的切削加工余量仅为几微米,切削层非常薄(常在  $0.1 \mu\text{m}$  以下),使用金刚石刀具的双坐标数控超精密机床,可使被加工的平面和非球曲面达到很高的几何精度。

金刚石刀具超精密切削主要用于加工铜、铝等有色金属,如高密度硬磁盘的铝合金基片、激光器的反射镜、复印机的硒鼓,光学平面镜,凹凸镜、抛物面镜等。

#### 2. 精密和镜面磨削

磨削时尺寸精度和几何精度主要靠精密磨床保证,可达亚微米级精度(指精度为  $1 \sim 10^{-2} \mu\text{m}$ )。在某些超精密磨床上可磨削出数十纳米精度的工件。在精密磨床上使用细粒度磨粒砂轮可磨削出  $Ra = 0.1 \sim 0.05 \mu\text{m}$  的表面。使用金属结合剂砂轮的在线电解修整砂轮的镜面磨削技术可得到  $Ra = 0.01 \sim 0.002 \mu\text{m}$  的镜面。

#### 3. 精密研磨和抛光

精密研磨和抛光技术意指:使用超细粒度的自由磨料,在研具的作用和带动下冲击加工表面,产生压痕和微裂纹,依次去除表面的微细突出处,加工出  $Ra = 0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$  的镜面。由于研磨剂含有化学活性剂,故研磨、抛光工具加工是一种机械与化学的复合作用过程。研磨、抛光是常用的超精密加工方法,它不仅可获得很小的表面粗糙度值,还可得到很高的平面度,控制好时还可使加工表面变质层很小。研磨、抛光常作为大规模集成电路的硅基片、标准量块、光学平面镜、棱镜、高精度钢球、计量用标准球等的最后精加工工序。

超精密加工是以精密元件(零件)为加工对象。超精密加工必须具有稳定的加工环境,即必须在恒温、超净、防振等条件下进行。高精度的加工设备也是实施超精密加工的必备条件之一。如机床主轴采用空气静压轴承和液体静压轴承,以保证主轴具有极高的回转精度及很高的刚性和热稳定性;机床必须配备位移精度极高的微量进给机构,以实现微量进给,且不产生爬行现象;机床应采用计算机控制系统、自适应控制系统,以避免手工操作引起的随机误差。另外,精密测量是超精密加工的必要手段,否则无法判断加工精度。

### 11.3.2 纳米加工技术

纳米(Nanometer) ,是一个长度单位 ,简称为 nm。  $1 \text{ nm} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ m}$ 。 纳米技术是 20 世纪 80 年代末诞生并在蓬勃发展的一种高新科学技术。 纳米不仅是一个空间尺度上的概念 ,而且是一种新的思维方式 ,即生产过程越来越细 ,以至于在纳米尺度上直接由原子、分子的排布制造具有特定功能的产品。

#### 1. 纳米技术的含义

纳米技术通常指纳米级(0.1 ~ 100 nm)的材料、设计、制造、测量、控制和产品的技术。 它将加工和测量精度从微米级提高到纳米级。

#### 2. 纳米技术的主要内容

纳米技术是一门多学科交叉的高新技术 ,从基础研究角度来看 ,纳米技术包括 纳米生物学、纳米电子学、纳米化学、纳米材料和纳米机械学等新学科。 从应用开发角度来看 ,纳米技术包括 :纳米级精度和表面形貌的测量 ;纳米级表层物理、化学和力学性能的检测 ;纳米级精度的加工 ;纳米级微传感器和控制技术 ;微型和超微型机械 ;微型和超微型机电系统等。

#### 3. 纳米级加工

纳米级加工是指 :加工精度高于  $10^{-3} \mu\text{m}$  ,表面粗糙度值  $Ra$  小于  $0.005 \mu\text{m}$  ,达到纳米级精度。 包括纳米级尺寸精度、纳米级几何形状精度和纳米级表面质量。

纳米级加工方法包括 机械加工、化学腐蚀、能量束加工、复合加工、扫描隧道显微加工等。

纳米级机械加工方法包括 :单晶金刚石刀具的超精密切削 ;金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮的超精密磨削及镜面磨削 ;珩磨和砂带抛光等固定磨料工具的加工 ;研磨、抛光等自由磨料的加工等。

## 11.4 工业机器人

### 11.4.1 工业机器人的基本概念

#### 1. 工业机器人的定义

工业机器人(Industrial Robot 简称 Robot)是一种可重复编程的、自动控制的、多自由度的、机体独立的自动操作机械。

工业机器人技术是在控制工程、计算机科学、人工智能和机构学等多种学科基础上发展起来的一种综合性技术。 在现代制造系统中 ,工业机器人是以多品种、少批量生产自动化为服务对象的 ,因此 ,它在柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)和其他机电一体化系统中获得了广泛的应用 ,成为现代制造系统不可缺少的组成部分。

#### 2. 工业机器人的组成

如图 11.4.1 所示 ,工业机器人一般由执行系统(含行走机构)、控制系统、驱动系统、检测系统和智能系统 5 部分组成。

##### (1) 执行系统

它是一种具有和人手相似动作功能 ,可在空间抓取、搬运物体或执行其他操作动作的机械装

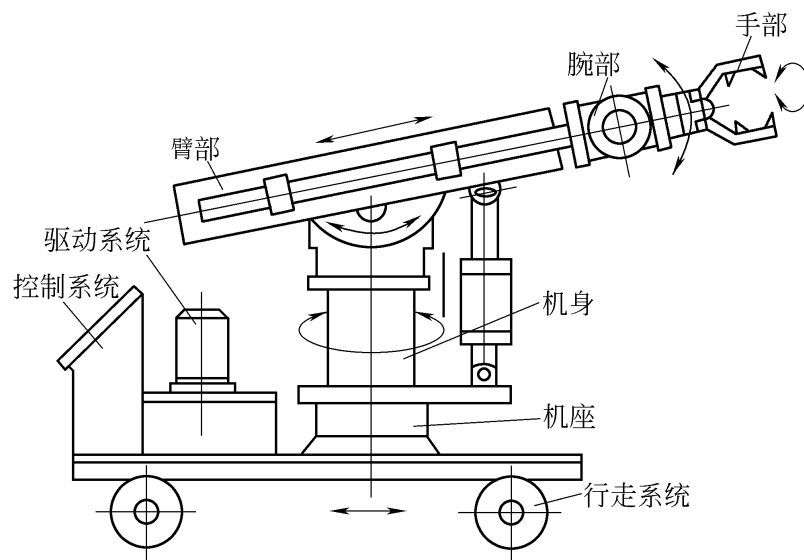


图 11.4.1 工业机器人的组成

置,通常由手指(又称抓取器和夹持器)、手腕、手臂、立柱(或称机座)及行走机构组成。

#### (2) 驱动系统

它是驱动执行机构运动的动力和传动装置,是整个机器人的动力源,常用的有液压传动、气压传动的高性能电机传动等。

#### (3) 控制系统

它通过对驱动系统的控制,使执行系统按照规定要求进行操作。必要时对机器人的动作进行监控,当发生错误或故障时发出报警信号。

#### (4) 检测系统

它通过各种检测器、传感器,检测执行系统的运动情况,并将测量值与设定值进行比较,作出相应调整,以确保机器人正常工作。

#### (5) 智能系统

(指智能机器人具有的系统)它拥有思维功能,有学习、记忆、重现、逻辑判断和自编程序的功能。

### 3. 工业机器人的分类

按系统功能分类:

#### (1) 专用机器人

这种机器人在固定地点以固定程序工作,无独立控制系统,结构简单、工作对象单一。如加工中心机床上的自动换刀机械手。

#### (2) 通用机器人

它是一种具有独立控制系统、动作灵活多样,通过改变程序能完成多种作业的机器人。它结构复杂、工作范围大、通用性高,适用于不断变换生产品种的柔性制造系统。

#### (3) 示教再现机器人

这种机器人具有记忆功能,能采用示教法进行编程,即由操作者通过手动控制“示教”机器人做一遍操作示范,其存储装置便能记忆所有工作顺序。此后,机器人便能“再现”操作者教给它的动作。适应多工位和经常变换工作路线的作业。

#### (4) 智能机器人

这种机器人具有视觉、听觉、触觉等各种感觉功能,能通过识别作出决策,自动反馈补偿,完成预定工作。由计算机控制,是一种具有人工智能的工业机器人。

此外,按结构形式分类,可分为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、球坐标机器人、关节机器人。按驱动方式分类,可分为气压传动机器人、液压传动机器人、电力传动机器人。按承担工作任务性质可分为搬运机器人和作业机器人等。

虽然工业机器人品种繁多,但从设计与使用角度出发,工业机器人的主要技术性能参数包括以下几个方面:

- 1) 运动自由度 指各运动部件在三维空间相对于固定坐标所具有的独立运动数。
- 2) 工作空间 指机器人运用手爪(指)进行工作的空间范围。
- 3) 工作负荷 指抓取、搬运或传递物件的质量。
- 4) 运动速度 它影响机器人的运动周期和工作效率。
- 5) 位置精度 典型机器人定位精度一般在  $\pm 0.02 \sim \pm 5 \text{ mm}$  范围。

#### 11.4.2 工业机器人的应用

工业机器人的最初应用主要是对人体有危险或者有危害的操作环境。例如加热炉中烧热零件的取放;有毒材料的处理;深海探测等方面。

今天,在现代制造业中,利用机器人能扩大机械制造系统的功能和范围,以及提高自动化程度,是实现柔性自动化的基本设备。用于生产中的工业机器人有:铸造机器人、焊接机器人、喷漆机器人、装配机器人、搬运机器人等。此外,高压线作业、服装裁剪、管道作业、擦玻璃等机器人也发挥着巨大作用。图 11.4.2 所示为焊接机器人的应用举例。

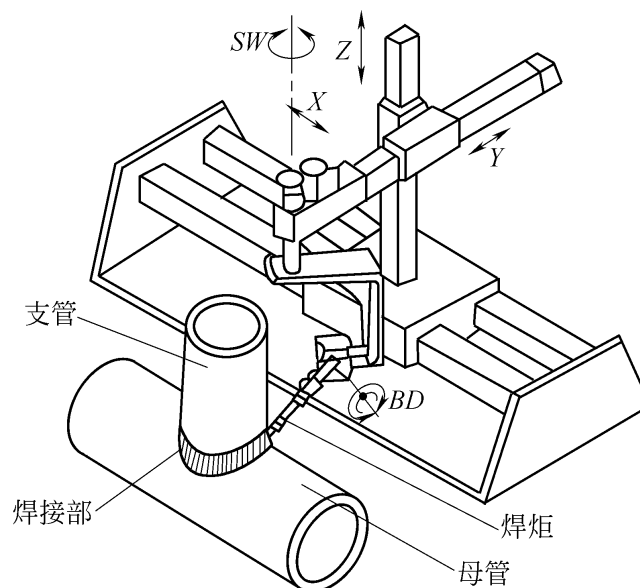


图 11.4.2 焊接机器人

### 11.5 柔性制造技术

传统的专用机床和“刚性”自动生产线虽然有很高的生产效率,但其加工的零件形状和尺寸

单一,难以改变,这对于大批大量生产是合适的。为满足多品种、小批量、产品更新换代周期短的要求,20世纪70年代以来,随着微电子技术,特别是计算机技术、传感技术的发展,一种以机械加工为主的柔性制造技术得到迅速发展,主要有柔性制造单元、柔性制造系统、计算机集成制造系统。

### 11.5.1 柔性制造单元

FMC(Flexible Manufacturing Cell)是在加工中心的基础上,增加了存贮工件的自动料库、输送系统所构成的自动加工系统。FMC有较齐全的监控功能,包括刀具损坏检测、寿命检测和加工工时监测等。工件的全部加工一般是在一台机床上完成,常用于箱体类复杂零件的加工。

图11.5.1为配有托盘交换系统构成的FMC。托盘上装夹有工件,在加工过程中,它与工件一起流动,类似通常的随行夹具。环形工作台用于工件的输送与中间存储,托盘座在环形导轨上由内侧的环链拖动而回转,每个托盘座上有地址识别码。当一个工件加工完毕,数控机床发出信号,由托盘交换装置将加工完的工件(包括托盘)拖至回转台的空位处,然后转至装卸工位,同时将待加工工件推至机床工作台并定位加工。

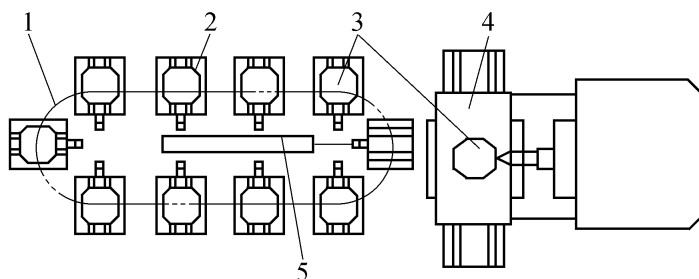


图 11.5.1 带有托盘交换系统的 FMC

1—环形交换工作台;2—托盘座;3—托盘;

4—加工中心;5—托盘交换装置

FMC适于多品种、小批量工件的生产。FMC具有规模小、成本低,便于扩展等优点。但FMC的信息系统自动化程度较低,加工柔度不高,只能完成品种有限的零件加工。

### 11.5.2 柔性制造系统

#### 1. FMS(Flexible Manufacturing System)的定义和组成

FMS是在FMC的基础上扩展而形成的一种高效率、高精度、高柔性的加工系统。对FMS进行直观的定义:“柔性制造系统至少是由两台数控加工设备、一套物料运储系统(装卸高度自动化)和一套计算机控制系统所组成的制造系统。它通过简单地改变软件的方法便能制造出多种零件中任何一种。”

从上述定义可以看出,FMS主要由以下三部组成:

#### (1) 加工系统

该系统由自动化加工设备、检验站、清洗站、装配站等组成,是FMS的基础部分。加工系统中的自动化加工设备通常由两台以上数控机床、加工中心以及其他加工设备所组成,例如测量机、清洗机、动平衡机和各种特种加工设备等。

#### (2) 物料运储系统

物料运储系统在计算机控制下,主要完成工件和刀具的输送及入库存放,它由自动化仓库、自动运送小车、搬运机器人、上下料托盘、交换工作台等组成。

### (3) 信息系统

信息系统由一套计算机控制系统构成,能够实现对 FMS 的运行控制、刀具管理、质量控制,以及 FMS 的数据管理和网络通信。

除上述的三个主要组成部分外,FMS 还包含冷却系统、排屑系统、刀具监控和管理等附属系统。

图 11.5.2 是一个典型的柔性制造系统示意图。该系统由 4 台卧式加工中心、3 台立式加工中心、2 台平面磨床、2 台自动导向小车、2 台检验机器人组成。此外还包括自动仓库、托盘站和装卸站等。毛坯在装卸站由工人安装在托盘夹具上,然后根据计算机控制室的计算机指令,由物料传递系统自动小车把毛坯连同托盘夹具输送到第一道工序的加工机床的托盘交换台,等待加工。一旦该机床空闲,就由自动上下料装置立即将工件送上机床加工。每道工序加工完成后,物料传递系统便将该机床加工完半成品取出,并送至下一道工序的机床等候,如此不断运行,直到完成最后一道加工工序为止。整个运作过程中,除了进行切削加工之外,若有必要还需进行清洗、检验等工序,最后将加工结束的零件入库储存。

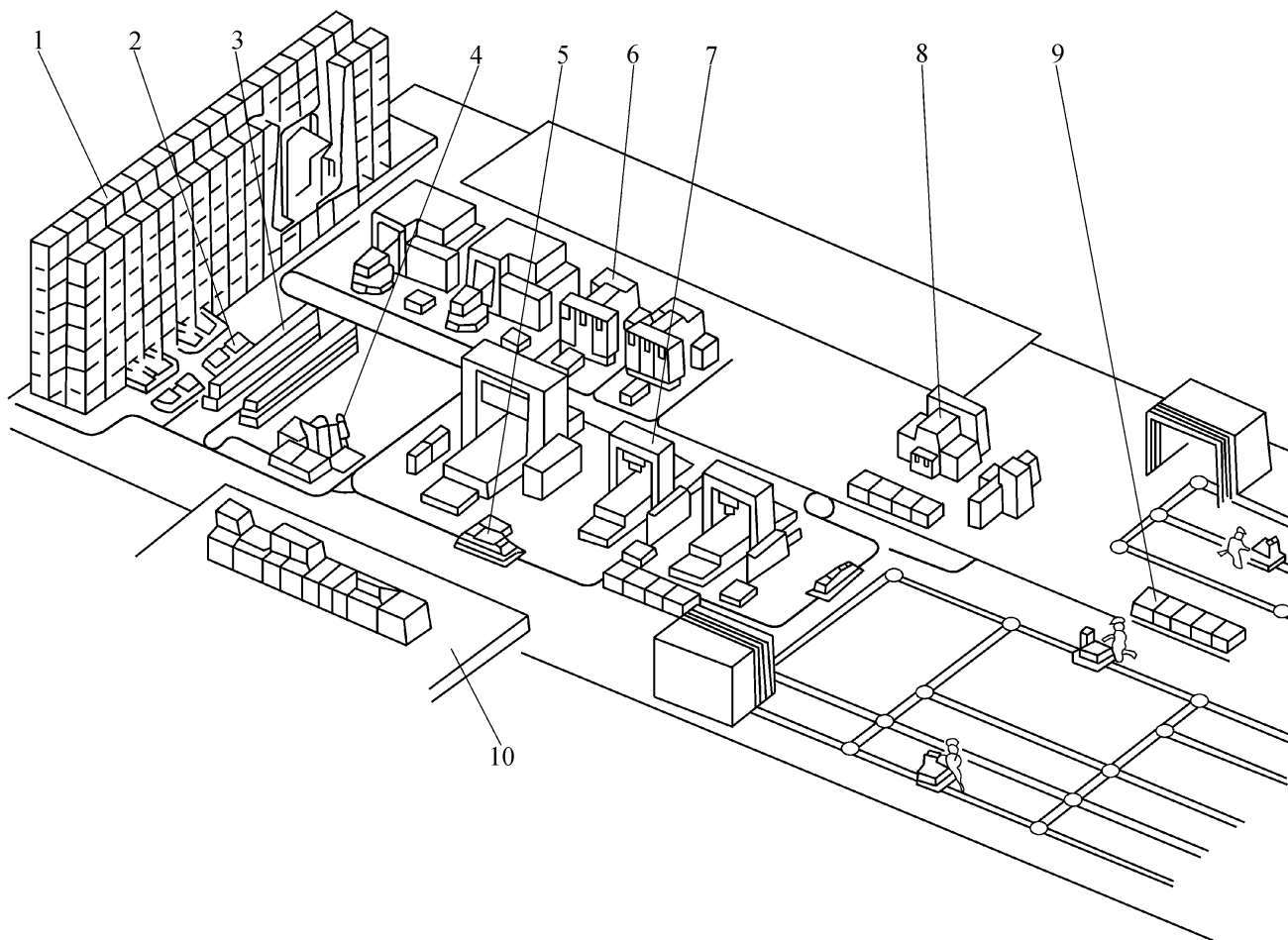


图 11.5.2 典型的柔性制造系统

1—自动仓库;2—装卸站;3—托盘站;4—检验机器人;5—自动小车;6—卧式加工中心;7—立式加工中心;8—磨床;9—组装交付站;10—计算机控制室

## 2. FMS 的优点和效益

由于 FMS 备有较多刀具、夹具以及数控加工程序,因此能接受各种不同零件加工,解决了多品种、中小批量生产的生产率与柔性之间的矛盾,对扩大变形产品的生产和新产品开发特别有利。因集中控制、灵活性好,加工过程中工件输送和刀具更换等实现了自动化,人的介入减少到最低程度,提高了生产连续性和数控设备利用率,所以生产周期短、成本低。通过计算机的数据处理,在加工过程中采用自动检测设备,可及时发现机床精度、刀具磨损及加工质量等方面出现的问题,能及时采取措施,使加工质量得到保证。另外,由于 FMS 具有高柔性、高生产率以及准备时间短的特点,能够对市场的变化作出迅速反应,没有必要保持较大的在制品和成品库存量,这对企业的竞争力和资金周转也是十分有利的。

### 11.5.3 计算机集成制造系统

#### 1. CIMS(Computer Integrated Manufacturing System)的基本概念

CIMS 是在自动化技术、信息技术及制造技术的基础上,通过计算机及其软件,将制造工厂全部生产活动有关的各种分散的自动化系统有机地集成起来,并适合于多品种、中小批量生产的总体高效率、高柔性的制造系统。

CIMS 必须包含下述两个特征:

(1) 在功能上,CIMS 包含了一个工厂的全部生产经营活动,即从市场预测、产品设计、加工制造、质量管理到售后服务的全部活动。CIMS 比传统的工厂自动化范围大得多,是一个复杂的大系统。

(2) CIMS 涉及的自动化不是工厂各个环节的自动化或计算机及其网络的简单相加,而是有机的集成。这里的集成,不仅是物料、设备的集成,更主要是体现以信息集成为本质的技术集成,当然也包括人的集成。

#### 2. CIMS 的构成

从系统的功能角度考虑,一般认为 CIMS 可由经营管理信息系统、工程设计自动化系统、制造自动化系统和质量保证信息系统四个功能分系统,以及计算机网络和数据库两个支撑分系统组成。

##### (1) 经营管理信息系统

包括预测、经营决策、各级生产计划、生产技术准备、销售、供应、财务、成本、设备、工具、人力资源等各项管理信息功能。

##### (2) 工程设计自动化系统

包含产品的概念设计、工程与结构分析、详细设计、工艺设计以及数控编程等设计和制造准备阶段的一系列工作,即通常所说的 CAD、CAPP、CAM 三大部分。

##### (3) 制造自动化系统

通常由 CNC 机床、加工中心、FMC 和 FMS 等组成。

##### (4) 质量保证系统

包括质量计划(质量标准和技术标准)、质量检测、质量评价、质量信息综合管理与反馈子系统。

##### (5) 数据库系统

上述四个功能系统的信息数据都要在一个结构合理的数据库系统里进行存储和调用,以满



足各系统信息的交换和共享。

#### (6) 计算机网络系统

通过计算机通信网络将物理上分布的 CIMS 各功能分系统的信息联系起来 ,以达到共享的目的。

#### 复习与思考题

- 11 - 1 何谓数控机床？
- 11 - 2 简述数控机床由哪些部分组成？各起什么作用？
- 11 - 3 从不同角度分类 数控机床有哪些类型？
- 11 - 4 简述数控机床的特点及应用范围？
- 11 - 5 简述快速成形技术的概念和常用工艺方法 ,每种方法的特点和应用范围。
- 11 - 6 常用超精密加工方法有哪些？
- 11 - 7 何谓纳米技术、纳米级加工？列举常用的纳米级机械加工方法。
- 11 - 8 试述工业机器人的概念、组成、分类的应用场合。
- 11 - 9 何谓柔性制造单元、柔性制造系统？
- 11 - 10 简述柔性制造系统的主要特点和效益。

## 参考文献

- 1 刘世荣主编 .金属学与热处理 北京 :机械工业出版社 ,1985
- 2 刘国勋主编 .金属学原理 北京 :冶金工业出版社 ,1980
- 3 王运炎主编 .机械工程材料 .北京 :机械工业出版社 ,1992
- 4 刘舜尧 ,刘水华主编 .机械制造基础与实践 .湖南 :中南工业大学出版社 ,1996
- 5 严绍华主编 .材料成形工艺基础 北京 :清华大学出版社 ,2001
- 6 陆剑中 ,孙家宁主编 .金属切削原理与刀具 .北京 :机械工业出版社 ,2001
- 7 肖智清主编 .机械制造基础 .北京 :机械工业出版社 ,2001
- 8 张万昌主编 .热加工工艺基础 北京 :高等教育出版社 ,1997
- 9 姚泽坤主编 .锻造工艺学与模具设计 西安 :西北工业大学出版社 ,2001
- 10 吴宗泽主编 .机械设计禁忌 .北京 :机械工业出版社 ,2000
- 11 机械工业职业技能鉴定指导中心编 .锻造工技术 .北京 :机械工业出版社 ,1999
- 12 任福东主编 .热加工工艺基础 .北京 :机械工业出版社 ,2001
- 13 胡亚民主编 .材料成形技术基础 .重庆 :重庆大学出版社 ,2000
- 14 乐齐华主编 .工程材料及成形工艺基础 .西安 :西北工业大学出版社 ,2002
- 15 曾光廷主编 .材料成形加工工艺及设备 .北京 :化学工业出版社 ,2000
- 16 刘品 ,刘丽华主编 .互换性与测量技术基础 .哈尔滨 :哈尔滨工业大学出版社 ,2001
- 17 陈于萍主编 .互换性与测量技术基础 .北京 :机械工业出版社 ,2001
- 18 陈于萍 ,高晓康编著 .互换性与测量技术 .北京 :高等教育出版社 ,2002
- 19 中国机械工业标准汇编 极限与配合卷 .第 2 版 .北京 :中国标准出版社 ,2002
- 20 顾崇銜等编 .机械制造工艺学 .西安 :陕西科学出版社 ,1998
- 21 邓文英主编 .金属工艺学 .北京 :高等教育出版社 ,1990
- 22 唐宗军主编 .机械制造基础 .北京 :机械工业出版社 ,2000
- 23 苏建修主编 .机械制造基础 .北京 :机械工业出版社 ,2002
- 24 刘建亭主编 .机械制造基础 .北京 :机械工业出版社 ,2002
- 25 颜景平主编 .机械制造基础 .北京 :中央广播电视大学出版社 ,1995
- 26 司乃钧主编 .机械加工工艺基础 .北京 :高等教育出版社 ,2001
- 27 韩秋实主编 .机械制造技术基础 .北京 :机械工业出版社 ,1998
- 28 张普礼主编 .机械加工设备 .北京 :机械工业出版社 ,1999
- 29 李华主编 .机械制造技术 .北京 :高等教育出版社 ,2000
- 30 李伟光主编 .现代制造技术 .北京 :机械工业出版社 ,2001
- 31 林朝平主编 .现代制造技术 .南京 :东南大学出版社 ,2001

- 32 王隆太主编 现代制造技术 .北京 机械工业出版社 ,2000
- 33 曾家驹主编 机械制造技术 .北京 机械工业出版社 ,1999
- 34 杨岳等主编 .CAD 技术与应用 .北京 机械工业出版社 ,1996
- 35 孙大涌主编 先进制造技术 .北京 机械工业出版社 ,1999
- 36 张志等主编 纳米技术与纳米材料 .北京 国防工业出版社 ,2002
- 37 于春生等主编 数控机床编程及应用 .北京 高等教育出版社 ,2001
- 38 李爱平等编著 现代机床的数控技术 .上海 同济大学出版社 ,1999
- 39 李宏胜主编 机床数控技术及应用 .北京 高等教育出版社 ,2001