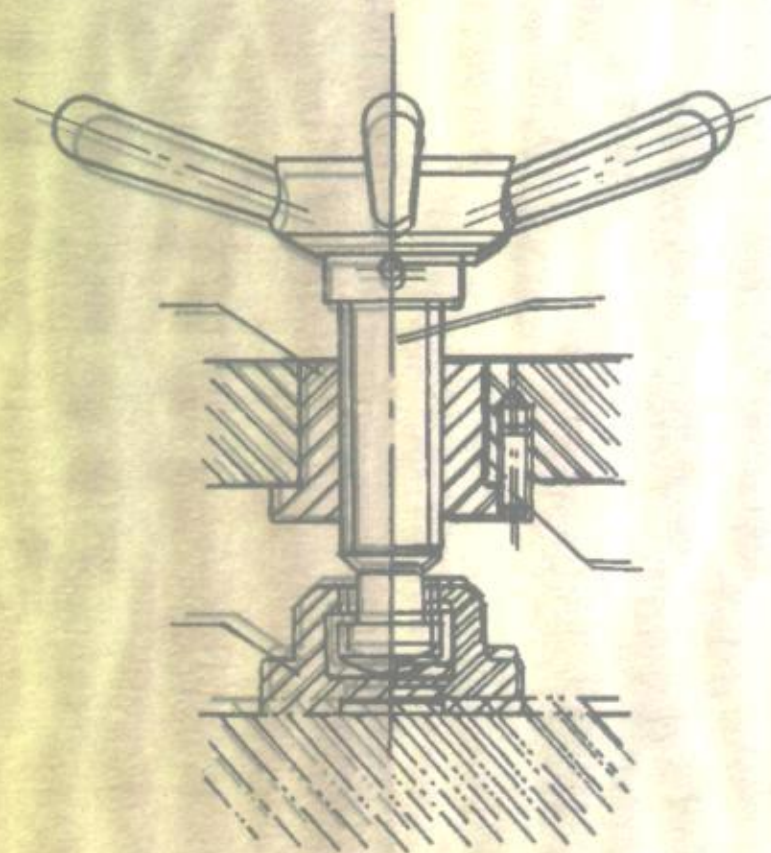


# 动力机械与设备制造工艺学

朱其芳 赵钦新 编著



西安交通大学出版社

# 动力机械与设备 制造工艺学



西安交通大学出版社  
·西安·

## 内容简介

DZ 15/22

本书系统阐述了动力机械与设备制造工艺的基本理论与知识,其中第1篇全面介绍了机械加工工艺、焊接工艺、铸锻成形与表面工程技术、装配技术和结构工艺性。着重阐述了机械加工工艺流程设计、焊接工艺流程设计、尺寸链的应用、加工误差的分析、定位与夹具以及现代制造技术。第2篇对典型的动力机械零件的加工、装配以及设备的制造分别以专门章节进行了介绍与分析。

本书可供高等院校动力机械、流体机械、汽车工程、热动力工程、制冷工程、化工机械与设备、空气调节、空气分离、锅炉、内燃机、泵与风机、压缩机等专业作为教材,也可供上述专业产品制造厂的设计与工艺等部门、科研单位及其维修、使用等单位的技术人员参考。

## (陕)新登字 007 号

### 图书在版编目(CIP)数据

动力机械与设备制造工艺学/朱其芳,赵钦新编著. —西安:西安交通大学出版社,1999.10  
ISBN 7-5605-1184-8

I. 动… II. ①朱… ②赵… III. 动力机械-机械设备-机械制造工艺-教材  
IV. TK05-43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 63621 号

\*

西安交通大学出版社出版发行

(地址:西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668316)

西安向阳印刷厂印装

各地新华书店经销

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:21.375 字数:520千字

1999年10月第1版 1999年10月第1次印刷

印数:0001~3000 定价:25.00元

---

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874



# 前 言

我国现有的专业教材大都是 80 年代根据当时的专业设置而编写或修订的,这些教材在以往的专业教学中发挥了重要作用。但是,随着科学技术的飞速发展,专业之间日益相互交叉、相互渗透、相互取代,专业界限已不再十分清楚,而且许多高新技术也都不同程度地渗透到各个专业的研究领域。另一方面,社会主义市场经济要求人才具有开拓创新能力和综合解决实际问题的能力,越来越多的用人单位已淡化了对分工过细的专业人才的需求,而要求人才的知识 and 能力结构具有通用性、适应性和创造性。在这种情况下,拓宽专业面、打破传统的专业界限、改革旧的人才培养模式就显得非常必要,而原有的基于过窄专业设置所编写的专业教材也就无法适用了。

从现代机械工程的发展趋势来看,其研究领域正突破传统的界限,根据原有的动力机械与设备门类编写的制造工艺教材都是针对某一二种型式产品,如压缩机、锅炉,加工方法也只针对一种冷加工或者是焊接。它们内容单一,不符合当今实际生产的需要,也不符合近代制造技术向着机电一体化、敏捷生产、柔性制造、精良生产发展的需要。本教材从淡化专业的角度出发,内容上按照专业大类的需要,集各种冷热加工为一体,加强工艺与设计间的配合,加强基础理论与基本概念,注意理论与实际的结合,反映当代制造技术的新成就,以扩大学生的视野和思路。在章节安排和内容阐述上,保持系统性和循序渐进,以符合读者的认识规律,并富有启发性。

本书由朱其芳、赵钦新编写,其中朱其芳编写绪论、第 1,2,5,6,7,8,9,10,11,16 章以及 14.1 一节;赵钦新编写第 3,4,12,13,15 章以及 14.2 二节,全书由朱其芳统稿。本书由西安交通大学吴序堂教授主审,杨绍侃教授进行预审,他们提出不少宝贵意见和建议。本书在编写过程中也得到西安交通大学能动学院、机械学院的不少同仁支持和帮助,在此一并向他们表示感谢。

本教材适用面广,较好地符合我国的人才培养模式和国情,可作为高等院校能源动力工程、流体机械、通用机械、化工机械工程等非机制专业本(专)科生必读教材和工程技术人员的参考读物。

限于编者水平,本书难免存在谬误,恳请读者批评指正。

编 者  
1999.8



# 目 录

绪论	(1)
<b>第 1 篇 机械制造工艺与工艺规程设计</b>	
<b>第 1 章 机械加工工艺</b>	(3)
1.1 典型表面的加工方法	(3)
1.2 典型表面的加工路线	(14)
1.3 现代制造技术	(19)
<b>第 2 章 机械加工工艺规程设计</b>	(44)
2.1 基本概念	(44)
2.2 机械加工精度	(48)
2.3 机械加工表面层质量	(67)
2.4 工件的装夹与夹具	(79)
2.5 工艺规程制定的步骤与内容	(95)
2.6 计算机辅助工艺规程设计	(117)
<b>第 3 章 焊接工艺</b>	(121)
3.1 焊接技术在动力机械与设备制造中的应用	(121)
3.2 电弧焊接的基本原理	(122)
3.3 焊接冶金过程	(124)
3.4 常用熔化焊接方法	(132)
3.5 金属材料的切割	(162)
<b>第 4 章 焊接工艺规程设计</b>	(164)
4.1 焊缝符号及标注	(164)
4.2 焊接接头及坡口的型式	(169)
4.3 焊接应力和变形	(172)
4.4 焊接工艺要素和规范	(178)
4.5 焊接工艺评定	(183)
4.6 焊接裂纹及控制	(185)
4.7 锅炉压力容器用钢的焊接工艺特点	(189)
<b>第 5 章 铸锻成形及表面工程技术</b>	(196)
5.1 铸造造型方法	(196)
5.2 锻压成形工艺	(199)
5.3 表面工程技术	(205)
<b>第 6 章 装配工艺及其工艺规程制定</b>	(211)
6.1 装配的内容和作用	(211)

6.2	零、部件联接装配工艺	(211)
6.3	校正	(213)
6.4	平衡	(215)
6.5	装配精度与尺寸链解法	(222)
6.6	装配的组织形式	(230)
6.7	装配工艺规程的制定	(231)
<b>第7章</b>	<b>结构工艺性</b>	<b>(233)</b>
7.1	机械加工件的结构工艺性	(233)
7.2	焊接件的结构工艺性	(236)
7.3	铸件的结构工艺性	(238)
7.4	锻件、冲裁件的结构工艺性	(240)
7.5	结构的装配工艺性	(243)
<b>第2篇 典型零部件的加工与装配</b>		
<b>第8章</b>	<b>活塞加工</b>	<b>(245)</b>
8.1	活塞的工作条件与技术要求	(245)
8.2	活塞的材料与毛坯制造	(247)
8.3	筒形活塞的加工	(247)
<b>第9章</b>	<b>连杆加工</b>	<b>(253)</b>
9.1	连杆的结构特点与技术要求	(253)
9.2	材料与毛坯	(253)
9.3	连杆的机械加工	(254)
<b>第10章</b>	<b>机体加工</b>	<b>(262)</b>
10.1	机体的功用、结构特点及技术要求	(262)
10.2	材料与毛坯	(262)
10.3	机体工艺过程的制订	(263)
10.4	机体的加工过程及其主要工序分析	(264)
<b>第11章</b>	<b>叶片的加工</b>	<b>(268)</b>
11.1	离心式叶片的制造	(268)
11.2	轴流叶片的加工	(270)
<b>第12章</b>	<b>锅筒制造</b>	<b>(274)</b>
12.1	锅筒筒节的制造工艺	(274)
12.2	封头的制造工艺	(281)
12.3	锅筒与管件的连接	(287)
12.4	锅筒的组焊和总装工艺	(290)
12.5	锅筒制造中的热处理	(291)
12.6	锅筒制造中的检验	(294)
<b>第13章</b>	<b>管件的制造</b>	<b>(298)</b>
13.1	管件的划线与下料	(298)
13.2	管子的弯曲	(298)

13.3	管子的拼接·····	(304)
13.4	蛇形管排的制造工艺·····	(306)
13.5	膜式水冷壁管排的制造工艺·····	(307)
13.6	管件制造中的质量检验·····	(311)
<b>第 14 章</b>	<b>热交换器的制造</b> ·····	<b>(313)</b>
14.1	壳管式冷凝器的制造·····	(313)
14.2	空气预热器的制造工艺·····	(317)
<b>第 15 章</b>	<b>集箱的制造</b> ·····	<b>(323)</b>
15.1	集箱的对接拼焊·····	(323)
15.2	集箱管座坡口结构·····	(324)
15.3	集箱端盖的制造特点·····	(325)
15.4	集箱的焊后热处理·····	(326)
<b>第 16 章</b>	<b>活塞式压缩机装配</b> ·····	<b>(327)</b>
16.1	装配实例概述·····	(327)
16.2	组件与部件装配·····	(328)
16.3	总装配·····	(331)
<b>参考文献</b>	·····	<b>(333)</b>



# 绪 论

机械制造业是国民经济各部门的装备部,各部门的生产技术水平和经济效益在很大程度上取决于机械工业所提供的装备的技术性能、质量和可靠性。这些装备多由一定形状和尺寸的机械零件所组成。生产这些零件并将它们装配成机械产品的过程属于机械制造过程。机械制造工艺是各种机械的制造方法和过程的总称,它是机械生产过程中的主要部分,任何机械产品的设计都须通过工艺手段才能物化为现实的产品,没有先进的工艺,就很难造出先进的产品。统计表明,工艺的进步对生产力的发展与生产率的提高做出的贡献最大,超过所有其余因素(资金与劳力)所做出的贡献的总和。

建国 50 年来,尤其是改革开放以来,机械制造业贯彻了“经济建设靠科学技术,科学技术工作面向经济建设”的基本方针,执行了“四上两提高”(上质量、上品种、上水平、上成套,提高经济效益、提高服务质量)和“抓基础,攻成套”的工作方针,使机械制造业跨入稳步发展的时期,取得很大成绩,现已拥有一批骨干企业,形成门类比较齐全、能提供具有先进水平的大型成套技术装备的工业体系,如为电力工业提供 60 万 kW 火力发电和 30kW 水力发电的成套设备,为化学工业提供 52 万吨尿素成套设备,为交通运输提供各种汽车、机车等,这为繁荣市场、扩大出口创汇、推动国民经济发展起了重要作用。但是与工业发达国家相比,我国机械工业的水平还存在着阶段性差距,主要表现在质量水平不够高,低层次的重复多,高水平的少,重复引进多,消化、开发少,技术开发能力不够强,科技投入少。当今,各工业化国家都把制造技术视为当代科技发展最为活跃的领域和国际间科技竞争的主战场,制订了一系列振兴计划,建立世界级制造技术中心,把先进制造技术列为关键技术和优先发展领域。我国也明确提出,要振兴机械工业,使之成为国民经济的支柱产业,并把发展现代制造技术作为优先发展的领域之一,其主要途径是,引进先进技术,调整产品结构,优化工艺要素,提高经济效益,进行技术改造,实现生产组织结构由刚性向柔性转变。当前一段时间里,制造技术发展战略是:以新兴微电子、光电子技术、重大成套技术装备、基础机械的关键制造技术和轿车大批量制造技术为重点,把研究开发优质高效精密工艺与装备、为新一代产品投产和形成经济规模生产提供新工艺、新装备为总目标,加强基础技术研究,积极消化掌握引进技术,抓好技术储备,提高自主开发能力,抓好工艺与装备紧密结合和微电子技术应用两个薄弱环节,形成常规制造技术、先进制造技术和高技术并存的多层次制造技术发展结构。

动力机械与设备是一种实现热能与动力转换的机械装置,如各种内燃机、风机、泵、压缩机、汽轮机、制冷设备、空调装置、锅炉等,它们的工作介质一般是气、水等流体,产品通常由运动的机械和静止的设备两部分组成,其产品大多是一种技术密集与资金密集型产品,就其制造技术的先进性和多样性而言,大体上反映了整个机械制造业的技术水平与发展趋势。与一般的机械制造工艺相比,它具有如下特点:

(1) 通常,动力机械与设备是在高温、高压与高转速等条件下工作,产品中承受的作用力与

热负荷都很大,为保证产品工作的可靠性,对零件的精度、表面层质量、材料等要求都比较高。

(2) 为了保证流体工质高效率和低泄漏地工作,动力机械与设备中许多零件具有形状复杂且精度与表面粗糙度要求很高的型面,这就增加了制造的难度。

(3) 生产方式的多样性是动力机械与设备制造的特点之一。在动力机械与设备中有大量生产的民用电器中的压缩机、风机和民用轿车等,但更多品种的动力机械与设备是属于成批生产。这样就要求有不同的工艺特征与之相适应,就要求有不同的工艺装备、管理体制、信息系统来保证,但从总体上讲是向着以纳米技术、敏捷制造、机电一体化、工艺设计一体化等为代表的高精度、自动化、柔性化和高效的方向发展。

动力机械与设备制造工艺学是以动力机械与设备的制造系统为研究对象的一门应用性技术学科,也是一门主要专业课,其工艺研究的范围包括热加工与冷加工两部分,热加工指铸造、塑性加工、焊接、热处理等,冷加工指机械加工以及产品的装配等,其指导思想是在保证质量的前提下达到高生产率和经济性。课程的主要任务有以下几点:

(1) 掌握机械加工、焊接和装配等方面的基本理论和知识,从保证成形与精度以及表面层质量的角度去分析、比较各种冷、热加工工艺,增强工艺与产品设计协调一致的概念,掌握零件加工与装配中的定位理论、工艺尺寸链理论、加工精度理论、影响加工质量的各项因素与控制途径以及零、部件的结构工艺性等。

(2) 初步了解与学会制订零件加工工艺过程和产品装配工艺过程的方法、内容与步骤。

(3) 了解典型零、部件的加工过程与主要工序分析。

(4) 了解机床夹具设计的基本原理和方法。

(5) 了解当前制造技术的发展趋势。

本课程的特点及其学习方法归纳如下:

一是实践性强。本学科的内容来自生产和科研实践,学习工艺的目的在于应用和提高工艺水平,故应多下厂,多实践,重视生产实习。有了一定感性知识,就能较容易地理解和掌握工艺学的概念、理论和方法。在学习过程中要着重理解和掌握基本概念并提高在生产实践中的应用能力。

二是涉及面广,内容丰富。动力机械与设备制造工艺不仅涉及机械加工和装配,还要涉及焊接、铸造、锻压和热处理;不仅涉及加工设备和工艺装备等物质流,还要涉及控制物质流的信息流;不仅涉及制造技术,还要涉及管理技术;不仅要涉及《金属工艺学》、《互换性与技术测量》等课程的知识,还要注意和动力机械与设备的原理与结构等专业课内容的衔接,因此学习时必须抓住主要矛盾,针对专业特点选学某些章节。

三是与产品的结构设计密切相关。先进的产品往往需要先进的工艺来保证。一个经得起市场考验的好产品必然有一个相应的最佳工艺方案与之匹配,才能做到高质量、低成本、高效益。在学习过程中要带着实现产品典型结构的目的是来掌握相应的工艺方法,掌握两者之间的内在关系,向着工艺、设计一体化方向努力。

四是应用时灵活多变。工艺理论和工艺方法的应用灵活性、兼容性很强,因此在应用工艺理论与方法解决工艺问题时必须坚持具体情况具体分析。此外也可将某些工艺理论与方法灵活地移植到动力机械与设备的结构设计中去,在改进和开发新产品中得到启发或创造性运用,因为动力机械与设备与机械制造的设备都同属于运动精度较高的机械设备,它们在定位、精度理论与改进措施等方面有许多共同之处。

# 第 1 篇 机械制造工艺与工艺规程设计

## 第 1 章 机械加工工艺

### 1.1 典型表面的加工方法

机械零件一般都是由若干个基本的几何表面组成,这些表面有外圆、内孔、平面、螺纹、齿形等,零件的加工过程,即是获得这些表面的过程,这些典型表面,是由起切削作用的刀具刃形相对于工件的切削运动而得到的。这种运动也叫表面形成运动,可分成:

- (1) 主运动,即直接切除工件上的余量形成工件新表面的运动,可用切削速度表示。
- (2) 进给运动,即不断把余量投入的切削运动,用进给速度或进给量表示。

主运动和进给运动可分别由工件或刀具来完成,运动的形式有直线运动( $T$ )、回转运动( $R$ )或两者之复合( $T/R$ )。

下面分别对外圆、内孔、平面、螺纹、齿形这五种典型表面根据不同的刃形及运动方式所组成的加工方法进行说明。最后介绍去毛刺的机械加工法。

#### 1.1.1 外圆加工

外圆是最常见的表面,加工时因所用刀具与表面形成运动不同,可以有许多不同的加工方法。常见的加工方法见表 1-1。

以下就表中所列方法依次作扼要说明:

**车削** 普通车削法使用最广泛。表面形成运动是由工件回转主运动与刀具平移进给运动组成。为了提高加工效率,出现了高速切削、强力切削、超高速切削;为了提高加工质量,出现精密切削、超精密切削;在提高加工精度的同时又要求降低表面粗糙度,出现了镜面车削和虹面车削等。镜面车削主要用于不能以磨削作为最后精加工工序的铝合金或铜合金工件,它是一种“精细切削”,一般采用刃面粗糙度很低的金刚石车刀,在刚性良好、振动极小的高精度车床上以高的切削速度、均匀细小的进给量进行切削,切削过程具有切削和挤压双重作用,因此加工出的表面如镜面,光可鉴人。

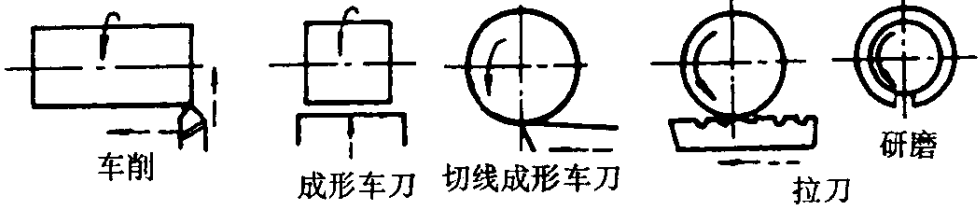
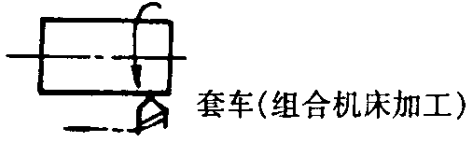
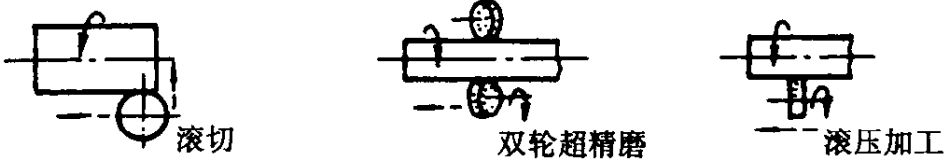



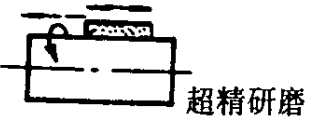

**成形车削** 成形车刀车削外圆分径向进刀(沿工件径向进给)与切向进刀(用切线成形车



刀沿工件切向进给)两类,一般用于自动车床上。

**旋转拉削** 工件回转,拉刀沿切向进行直线运动而完成外圆加工称为旋转拉削。它是一项可提高生产率、获得好的经济效益的先进工艺,适用于大批量生产。在拉刀上使用可转位刀片,加工出的外圆可获得与磨削相同的粗糙度。这是由于切削过程的最后阶段与切线成形车刀工作过程相似,刀刃对加工表面会产生剃削作用。

表 1-1 外圆表面的加工方法

工 件		刀 具		表面形成原理图
主运动	进给运动	主运动	进给运动	
R			T	 <p>车削      成形车刀      切线成形车刀      拉刀</p>
		R	T	 <p>套车(组合机床加工)</p>
R			T/R	 <p>滚切      双轮超精磨      滚压加工</p>
	R	R		 <p>铣削      成形磨</p>
	T/R	R		 <p>普通外圆磨      无心磨</p>
	R	R	T	 <p>车铣加工</p>
	R	T		 <p>超精研磨</p>
R	T			 <p>纵切自动机</p>

注:R—旋转;T—平移;→主运动;--→进给运动;...→调整运动

**研磨** 工件回转,研具沿工件轴向完成往复进给运动。

图 1-1 是用于外圆研磨的研具示意图。研具材料一般为铸铁、铜、铝或硬木等。研磨剂一般为氧化铝、碳化硅、金刚石、碳化硼以及氧化铁、氧化铬微粉等,加切削液和添加剂混合而成。根据研磨对象的材料和精度要求来选择研具材料和研磨剂。研磨时,工件作回转运动,研具作轴向往复运动(可以手动,也可以机动)。研具和工件表面之间应留有适当的间隙(一般为  $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ )以存留研磨剂,研磨余量  $0.01 \sim 0.03\text{mm}$ ,能得到  $R_a 0.1 \sim 0.006$  的粗糙度和  $0.001 \sim 0.005\text{mm}$  的尺寸精度。

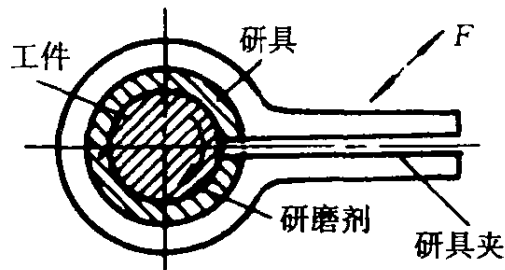


图 1-1 研磨外圆示意图

**套车** 若工件不宜进行回转运动,则主运动与进给运动都应由刀具完成。这一方法常用在组合机床上加工外圆。

**滚切外圆** 滚切加工时不用普通车刀而改用圆形滚切刀。刀具按一定角度倾斜安装,在切削过程中受切削力作用便自动回转使圆刃轮流工作,因此刀具耐用度高,可提高切削用量。

**双轮超精磨** 双轮超精加工是一种光整加工方法。工件在两顶尖间回转,两个修整成双曲线形的磨轮反向倾斜安装在工件的两边,在弹簧力作用下压向工件而被带动回转,同时磨轮还沿工件轴线作进给运动。工作过程具有切削、挤压和抛光作用。

**滚压加工** 滚压强化是用可自由旋转的滚子对工件表面均匀地施加压力,使表面产生塑性变形,表面微观不平度的凸峰被压平而填充到凹谷。滚压后表面层得到强化,并在表面形成残余应力,表面粗糙度也得到减小。

**铣削外圆** 可用于加工长度较短、具有部分圆柱形的表面。

**磨削外圆** 有普通外圆磨削、宽砂轮径向进给成形磨削、无心磨削等,这里不作详述。

**车铣加工** 在通常情况下,车削是加工外圆表面效率最高的切削方法。但在加工不平衡工件时,譬如加工偏心轴和曲轴,此时工件不允许高速旋转,刀具的潜力也就不能充分利用。采用端铣刀车铣外圆,则可达到高的切削效率,又能可靠断屑,后者在加工过程的自动化中是十分重要的问题。车铣时铣刀和工件互相垂直布置,如图 1-2 所示。通过偏移铣刀中心和工件轴线之间的位置改变三种成形运动——工件转速、轴向进给运动和切深,在工件上可以车铣出各种不同的形状。

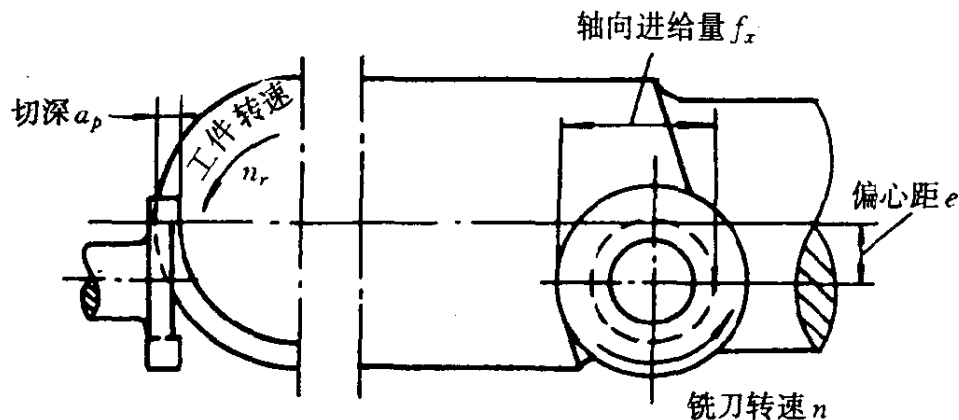


图 1-2 车铣加工示意图

**超精研磨** 也称超精加工,是用磨条进行表面光加工的方法。工作时工件作回转运动,磨条以很小的压力压住工件,并作  $8 \sim 35\text{Hz}$  的低频振动。磨痕呈复杂的交叉网纹,可获得表面粗糙度极小的加工表面。

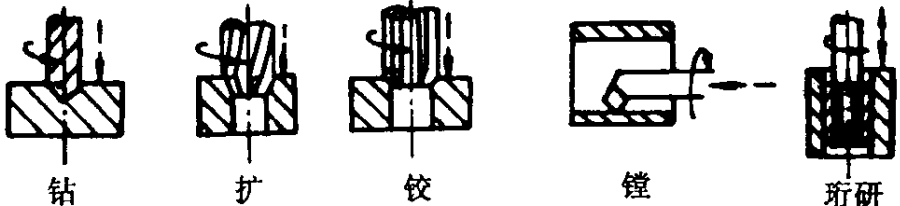
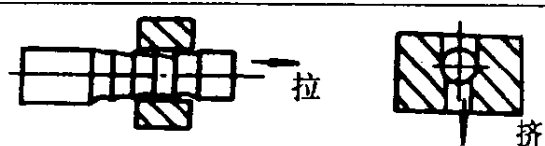
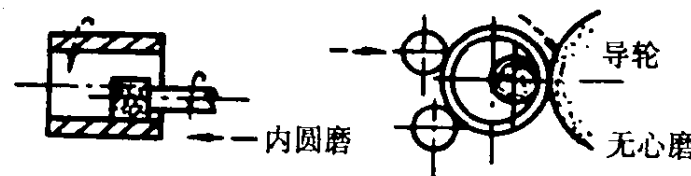
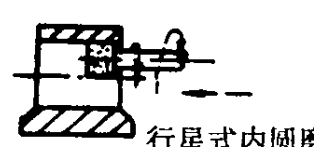
纵车外圆 在纵切自动机上,在棒料进行回转完成主运动的同时,又由凸轮控制完成轴向进给运动。用于加工小型精密零件,这是加工外圆表面高效、简易的自动化方法,在大量生产中仍得到广泛应用。

### 1.1.2 内孔加工

内孔加工时切削区在工件内部,排屑、散热条件差,并且刀具尺寸受孔径的限制,因此孔加工比外圆加工困难。由于孔径大小和质量要求的不同,孔加工方法也有很多种。表 1-2 为一些常见的加工方法。下面依次对这些方法进行说明。

钻孔 一般用于在实心材料上加工 0.2~80mm 直径的孔。钻孔加工有各种不同方式,在一般钻床、镗床上加工,则主运动和进给运动由刀具完成;在车床上钻孔时则主运动由工件完成,进给运动可由刀具完成,也可由工件完成(如纵切自动机加工);在组合机床上加工时刀具完成主运动,由工件完成进给运动。钻孔加工用的刀具有扁钻、麻花钻、中心钻及深孔钻等。钻孔技术的先进性在很大程度上决定于所采用的刀具性能,如近年来生产中已出现涂层钻头、整体硬质合金钻头、硬质合金镶齿钻头,几何形状的改进有圆弧刃钻头、修磨分屑槽钻头、群钻等。另外深孔加工用喷吸钻是一种加工精度好而效率高的加工方法。它利用流体的喷射效应,使排屑容易,改善钻头的工作条件,可保证钻削在较大的切削用量下进行。

表 1-2 内孔表面的加工方法

工 件		刀 具		表 面 形 成 原 理 图
主运动	进给运动	主运动	进给运动	
		R	T	 钻      扩      铰      镗      珩研
R	T			钻、铰、镗,工艺图与上相似
	T	R		
R			T	
		T		 拉      挤
T				
	R	R	T	 内圆磨      无心磨      导轮
		R	R/T	 行星式内圆磨



**扩孔、铰孔** 扩、铰是孔加工的中间及终结工序,其表面形成运动与钻孔相似。比较先进的工具有钻-扩或钻-扩-铰复合刀具,常用于组合机床上。硬质合金铰刀则可用于高速铰孔。振动钻孔(轴向进给方向附加振动运动)可用于难加工材料的加工(钻屑易断)。超声波振动铰孔(铰刀作附加扭振)可提高表面质量。

**镗孔** 在镗床、车床、铣床、组合机床、数控机床上进行,工件与刀具间可能有各种不同的表面形成运动。镗刀是单刃刀具,可以加工不同尺寸和不同精度的孔。在单件、小批生产中得到广泛应用。

**研磨** 研磨时,工件回转,研具沿工件轴向完成往复进给运动。

**珩磨** 珩磨是一种常用的孔加工方法。用细粒度砂条组成珩磨头,加工时工件不动,珩磨头回转并作往复送进运动,图 1-3 是其工作原理图,珩磨头砂条数量为 2~8 根不等,均匀地分布在圆周上,靠机械或液压作用涨开在工件表面上,产生一定的切削压力。经珩磨后的内孔表面呈网纹状。加工范围宽,通常能加工的孔径为 1~1 200mm,对机床精度要求不高。若无珩磨机,可利用车床、镗床或钻床进行珩孔加工。珩磨精度与前道工序的精度有关。一般情况下,经珩磨后的尺寸和形状精度可提高一级,表面粗糙度可达  $R_a 0.63 \sim 0.04 \mu\text{m}$ 。

钻、铰、铰、镗还可有不同的表面形成运动,见表 1-2 第二行。

**拉孔** 它利用多刃刀具,在直线主运动中完成加工工作,是一种高生产率的加工方法。

**钢珠挤压内孔** 用比工件孔径稍大的钢珠,由挤压杆加压力强行通过内孔,使孔的粗糙度得到降低,孔壁得到硬化。建立在金属塑性变形基础上的冷压光加工方法由于工具简单,操作简便,正得到日益广泛的应用。

**磨孔** 是高精度、淬硬内孔加工的主要方法。其基本加工方式有内圆磨削,无心磨削和行星磨削等。

### 1.1.3 平面加工

平面的加工方法也很多,常用的有刨、铣、磨、车、拉、研磨、超精加工、刮研等方法。主要方法的表面形成原理见表 1-3。下面依次对这些方法作简要说明。

**刨平面** 刨削是至今仍采用的平面加工方法,其所用机床和工夹具结构简单,具有机动灵活的优点。在生产车间里,牛头刨床已逐渐被各种铣床代替,但龙门刨床仍广泛用于大件加工。另外宽刃精刨工艺(指采用的刨刀刃口平直光洁,宽度一般为 10~60mm,以极微切深和极低切削速度的刨削)可以减少甚至完全取代平面的刮研工作。

**插削** 它是加工内孔键槽常用的方法。

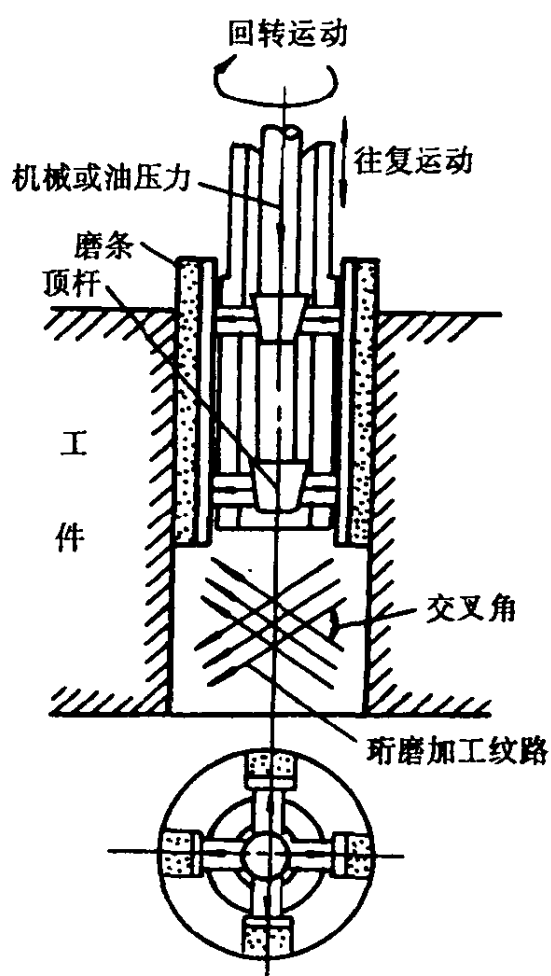
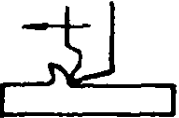

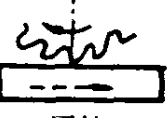




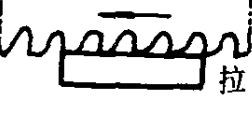


图 1-3 珩磨加工示意图

表 1-3 平面的主要加工方法

工 件		刀 具		表面形成原理图
主运动	进给运动	主运动	进给运动	
	T	T		 刨  插
	T	R		 周铣  端铣  圆周磨  端面磨
R			T	 车
		T		 拉

**铣平面** 有周铣和端铣两种方式。后者因刀杆刚性好,能够进行高速铣削和强力铣削,生产效率高,所以在大批量生产中用得更多。

**磨削平面** 磨削平面方法也可分圆周磨和端面磨两大类。圆周磨由于砂轮和工件的接触面小,磨削区的散热排屑条件好,可获得加工精度要求较高的平面。端面磨允许采用较高的磨削用量,生产效率高,但因加工精度较低,适用于要求不很高的工件。平面磨削一般作为刨削和铣削后的加工工序。由于缓进给磨削的发展,目前已有可能从带黑皮的毛坯直接加工成最终产品。另外各种高精度导轨面的手工刮研,近来也可用导轨磨削取代。

**研磨** 工件与研具间作平面内的相互运动。

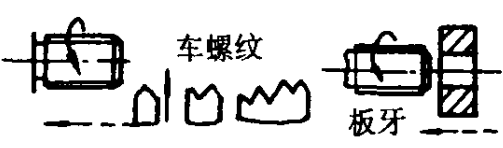
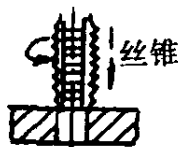
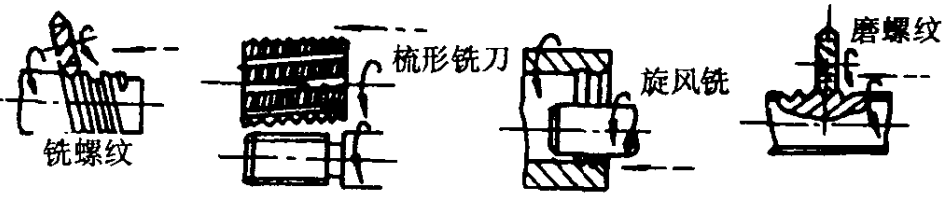
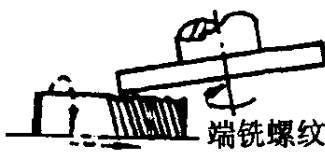

**车平面** 各种类型车床利用车刀加工平面是很常见的方法。在镗床上加工孔的端面,则主运动和进给运动都可由刀具完成。

**拉平面** 它是精度高、表面粗糙度小、生产效率高的加工方法。但由于拉刀结构复杂,成本高,一般只用于大量生产。近年来由于组合装配式拉刀技术的发展,拉平面也可在成批生产中应用。拉削运动在表中所示为工件不动,由刀具完成主切削运动。另外也可是刀具不动,由工件完成直线主运动或回转主运动。后者可减少空程,提高拉削速度,易于实现自动化。

#### 1.1.4 螺纹加工

加工螺纹时所用刀具一般具有与螺纹截面相同或相似(指设计时经修正计算后有变化)的刃形,按照形成螺纹表面的运动,主要加工方法列于表 1-4。按表中内容依次有:车螺纹、攻丝与套丝、盘形铣刀铣螺纹、梳形铣刀铣螺纹、旋风铣螺纹、磨螺纹、端铣螺纹、滚压螺纹等。



表 1-4 螺纹的加工方法

工 件		刀 具		表 面 形 成 原 理 图
主运动	进给运动	主运动	进给运动	
R			T	
		R	T	
	R	R	T	
	R/T	R		
	R	R		

1.1.5 齿形加工

齿形的形成方法主要可分成两大类：成形法加工与展成法加工。各种方法形成齿形表面的原理见表 1-5。

表 1-5 齿形的加工方法

工 件		刀 具		表 面 形 成 原 理 图
主运动	进给运动	主运动	进给运动	
	T	R		
T				



续表 1-5

工件		刀具		表面形成原理图
主运动	进给运动	主运动	进给运动	
	R/T	R		
	R	T	R	

注:⊕为垂直纸面的运动

### 1.1.6 成形表面的加工

成形表面可的加工方法可分为三大类:

#### 1. 轨迹法

这一类加工方法的特点是刀刃形状简单,刀具运动复杂。通常以带有尖点的或圆弧的刀尖与加工表面以点接触的方式进行工作,但有时刀刃为直线形与加工表面以线接触方式工作,如用立铣刀按靠模加工样板或用钼丝进行线切割均属此类。

轨迹法要求刀刃沿工件要求的曲线形状运动,具体的方法有下列几种:

##### (1) 划线加工:

划线加工是一种原始的方法,它用在单件小批生产中加工平面上的直线成形表面、旋转成形表面。这种加工方法的精度和生产率较低,且需要技术熟练的工人。

① 平面上的直线成形表面:如图 1-4 所示,加工时先在零件表面上划出曲线形状,然后视零件的长短决定加工方法。如零件是圆盘凸轮样板等,厚度较薄(图 1-4(b)),则可在曲线四周用小钻头钻许多孔,去掉不需要部分,再用锉刀、砂布修光。亦可把工件装在铣床工作台上,用手控制工作台的纵向和横向移动,铣去不需要的部分,再用锉刀、砂布修光。

若工件较长图(1-4(a)),则可按划线刨或插出成形表面。因为这种表面较长,一般仅用砂布、油石修光,以减少表面粗糙度值。

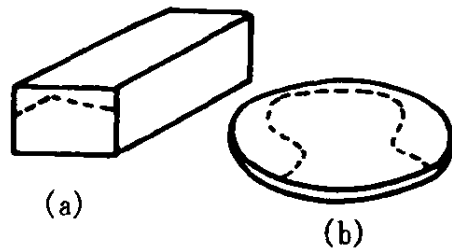


图 1-4 平面上的直线成形表面的划线

② 在光学曲线磨床上加工成形表面:这也是划线法的一种,图 1-5 所示为光学曲线磨床的示意图。这种机床由下列部分组成:带有盘状砂轮 S 的磨头、安装工件的支架 B 以及带有显微镜 M 和图板的放图器等,加工时手持销子 A 沿放大的工件图的轮廓线移动,显微镜也随之移动。在磨削过程中通过显微镜观察,要将砂轮送进到 C 点与显微镜十字线交点相重。这样连续磨下去就可磨出工件的全部轮廓。若图纸按 50:1 比例画出,而图纸上有 0.5mm 的误差,则反映到工件上的误差只有 0.01mm,故加工精度较高,机床图板一般可放置尺寸为 500mm×500mm 的图纸,若工件轮廓尺寸更大,则可分段加工。此法多用于样板加工,譬如螺杆刀具样

板的磨制。

(2) 利用仿形机构或机床本身附加一些运动的机构进行加工：

对于简单而又有规则的成形表面可以在普通机床上利用仿形机构进行加工。

图 1-6 所示为在六角车床和普通车床上镗内球面的例子,图 1-6 的夹具的主要部分就是镗刀杆,刀杆的一端以装在转塔中的支承 E 来支住,而另一端则进入装在卡盘上的套筒中,转塔纵向移动时,起初全部装置像一个整体一样移动着,直到刀杆挡块 F 被卡盘套筒阻止为止。此后

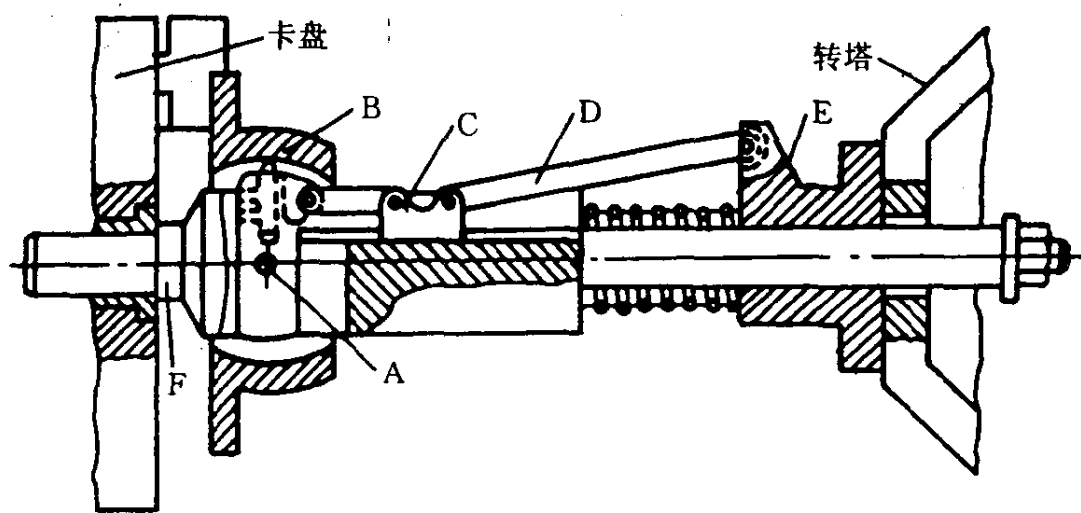


图 1-6 车削内球体表面的工具

随着转塔进一步纵向移动,刀杆不动,而转塔一面压紧弹簧,一面通过连杆推动滑块 C 使后者沿着刀杆上加厚部分的沟槽滑动,滑块又借助圆环和镗刀夹持器相连,镗刀可绕 A 轴旋转,这时刀尖 B 划出一个圆周,从而开始进行球面加工。

(3) 利用靠模法加工成形表面：

由于靠模可按照被加工的成形表面的特点设计,故此法可加工各种类型的成形表面。

图 1-7 表示用于在车床上加工的单边靠模装置,横刀架上装有滚子,拆去横向送进的丝杆和螺帽,重锤把刀架的滚子压在靠模上。当溜板作纵向送进时,滚子沿靠模滚动,刀具即走靠模曲线所规定的轨迹。很明显,重锤的重量要超过径向切削分力  $P_y$  才行。

图 1-8 是在立式铣床上的一种靠模装置,它有一个旋转的自动送进,工作台的径向送进由重锤来实现,这种装置可加工封闭的直线成型表面(如圆盘凸轮)。

图 1-9 为机械仿型磨刀机床,被磨的工件(盘形铣刀片) 12,可获得与靠模板 14 一样尺寸的曲线形状。

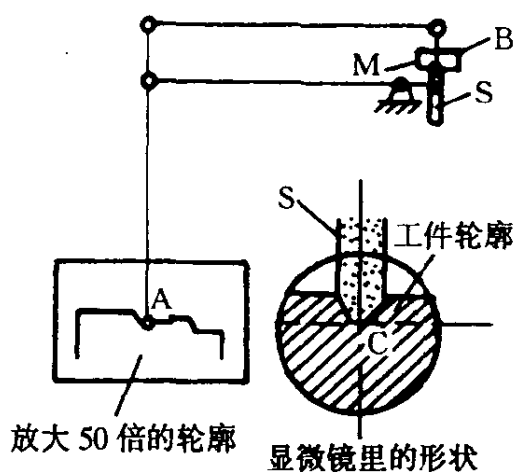


图 1-5 在光学曲线磨床上磨成形表面

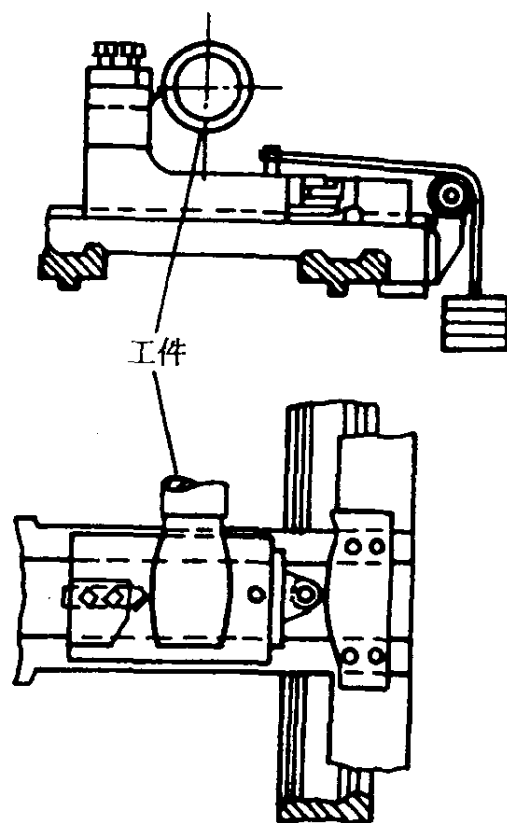


图 1-7 单边靠模装置

## (4) 程序控制法加工:

数控机床可以加工各种成形表面,尤其在数控线切割机床上加工平面上的直线成形表面(如切割冷冲模的凹模、样板等),其精度与光学曲线磨相似。

用数控加工成形表面不需要靠模,不受靠模精度影响,精度高,成形表面形状可以复杂,工件的成形表面形状改变时,只要改编程序即可适合多品种生产。

## 2. 成形法

成型法要求刀刃形状与工件形状一致,其加工方法有如下几种:

利用成形车刀在车床上加工,利用成形砂轮在外圆磨床上加工主轴轴颈上过渡圆角,用拉刀加工花键孔、方孔等均属于刀刃状与工件形状一致的加工方法,此外成形铣刀加工成形槽或者用标准模数的盘形或指形铣

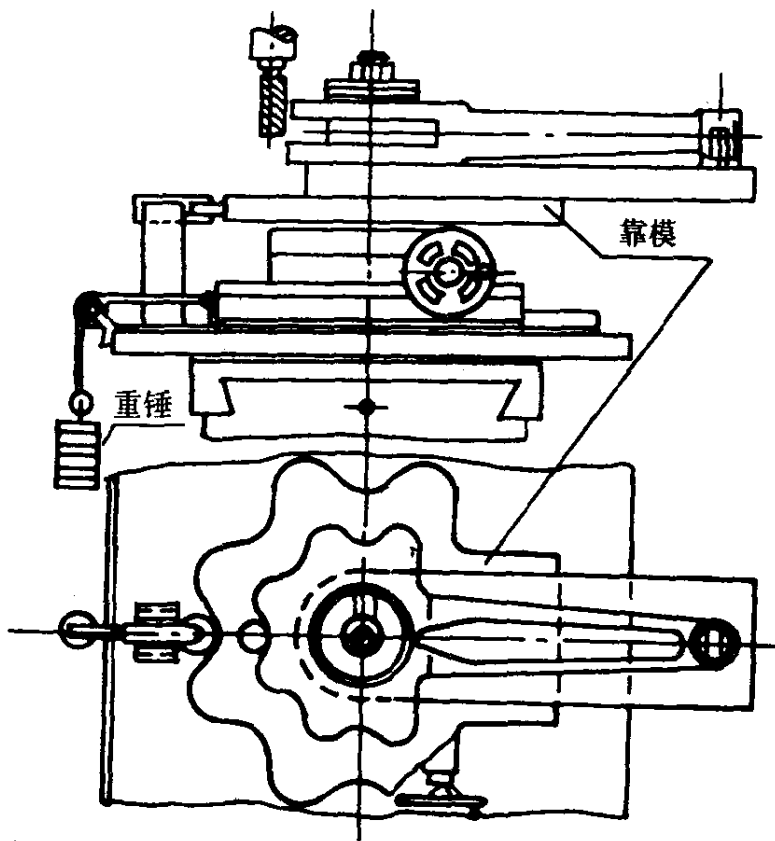


图 1-8 立式铣床上的靠模装置

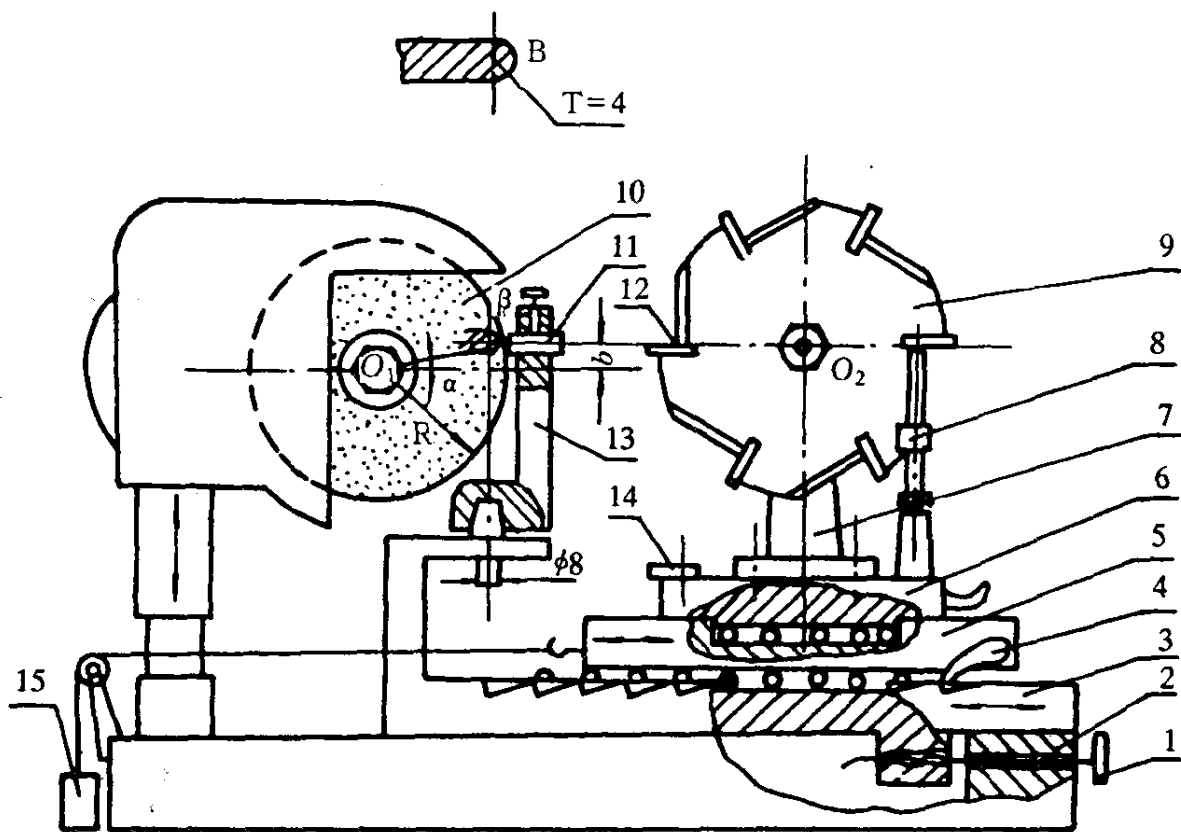


图 1-9 专用仿形磨刀机示意图

1—丝杠;2—床身;3—下滑板;4—棘爪;5—上滑板;6—转盘平台;7—铣刀支架;8—定位支承;9—镶齿式铣刀盘;10—卧轴砂轮;11—金刚石刀头;12—刀片;13—修砂轮用刀架;14—靠模板;15—重锤

刀在铣床上加工亦属于此种方法。利用成形工具在超声波加工机床加工成形孔或槽,在电火花加工机床、电解加工机床上也均可进行成形表面的加工,图 1-10 为利用电火花加工的高压离心压缩机窄流道整体叶轮及其电极示意图。

### 3. 包络法

用包络法加工的工件成形表面的几何形状是刀刃在成形运动中的包络面,如目前广泛采用的盘形铣刀或指形铣刀加工螺杆压缩机转子型面。这种铣刀是根据刀具与工件空间曲面的接触线而设计的成形刀具,加工时刀具作回转切削运动,工件完成螺旋运动(转动与轴向运动的结合)。图1-11中,(a)为指形铣刀,(b)为盘形铣刀加工转子型面的示意图。

此外,目前广泛应用的用滚刀、插齿刀加工齿轮齿形以及用蜗杆砂轮磨齿等,也属于包络法。

#### 1.1.7 去毛刺加工

各种机械加工方法都会在工件表面产生毛刺,它对产品性能带来影响,而现在很多工厂去毛刺仍然用锉刀、刮刀和刷子等手工工具,劳动量大,费用高,因此去毛刺的技术日益被重视。下面对常用的机械法去毛刺的方法作一介绍。

(1) 利用锉刀、刮刀、刷子、砂轮进行手工去毛刺或利用倒角刀进行机动去毛刺。

(2) 砂带磨削:常用于冲压件去毛刺。磨削时产生的灰尘少,可以磨削平面和曲面,由于砂带磨削去毛刺的发展,也促使研磨砂布、砂纸和磨床的发展。

(3) 滚磨法:它是一种去毛刺、倒角、提高零件表面质量(去鳞屑、表面整修、使表面光洁等多种目的)的加工方法。它的工作原理是把一定比例的工件和磨料放在封闭的滚筒中,在滚筒转动、振动过程中使零件与磨料、零件与零件间产生磨削。滚磨是去毛刺的有效方法,易于实现机械化和自动化。一般的滚磨机是使滚筒回转,离心滚抛机则在滚筒自转的同时还有公转运动。

(4) 振动光饰法:也叫振动滚磨法去毛刺,是一种表面光饰加工和去毛刺的方法。它是将工件放入按一定比例配制好的磨料和添加剂的容器中,依靠容器的周期性振动使工件的毛刺被磨去,锐边被倒圆。我国已生产和使用了不同容积和不同结构的立式振动光饰机、卧式振动光饰机和风动振动光饰机。与此同时不仅发掘了价廉质优的磨料,还广泛利用废旧砂轮、木屑、废陶瓷片等作磨料。有的还制造了陶瓷块、铝块等专用磨料。

(5) 喷射法:它去毛刺的原理是将配制好的喷射物质通过管道输送到喷嘴,然后喷射到去毛刺的部位。喷射物质具有一定的速度并以一定角度喷射到工件上便可去除其毛刺,带走少量的切屑。喷射物质有流体和固体两类。流体为空气、水或气与水并用;固体有砂子、铁丸、砂料(可用钢、铁、铝制造)、核桃壳、玻璃珠、尼龙球等。喷射方法有压力式、离心式两种。喷射去毛刺不受零件形状的限制,适应性较好。如使用微粒磨料,可用于精密去毛刺作业。

(6) 磨料流动法:它是使磨粒与半固体状介质的一起流动,对形状复杂而精度较高的零件进行去毛刺、倒角及光整加工。由于磨料介质的粘度不同,磨料流动速度也不同。用半固体状

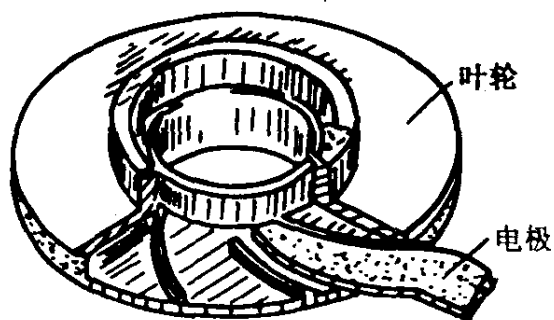


图 1-10 电火花加工的窄流道整体叶轮及电极

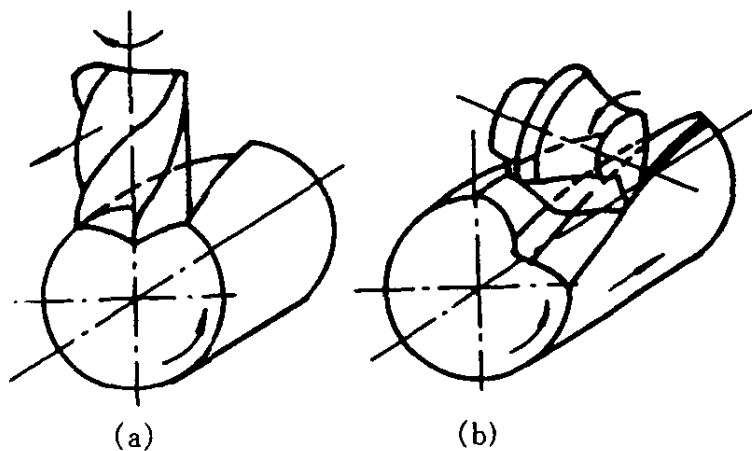


图 1-11 螺杆转子型面的几种加工方法

介质的称为挤压珩磨;用的介质粘度比较低,流动速度较快的称为动力流法去毛刺。这类方法可去除零件微细毛刺,适用于复杂内孔、交叉孔等去毛刺并倒角。

## 1.2 典型表面的加工路线

熟悉一些较成熟的加工路线对工艺规程编制有指导作用。加工路线是根据典型表面的精度要求选择一种最终的加工方法,然后辅以先导工序的预加工方法组成的。

### 1.2.1 外圆表面的加工路线

零件的外圆表面主要采用下列四条基本加工路线来加工(见图 1-12)。

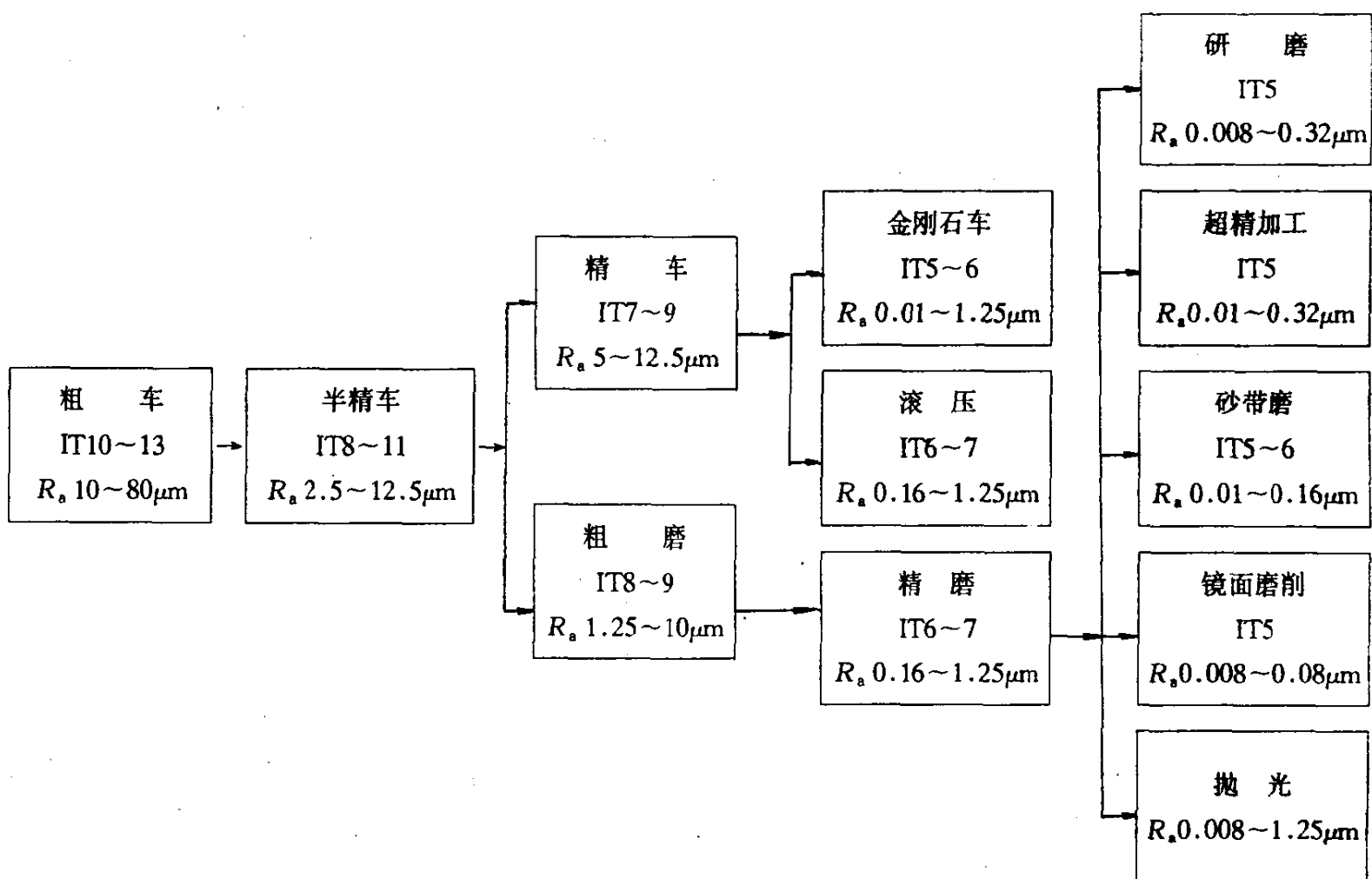


图 1-12 外圆表面的加工路线

(1) 粗车—半精车—精车:这是应用最广泛的一条加工路线。只要工件材料可以切削加工,加工精度等于或低于 IT7,表面粗糙度等于或大于  $R_a 0.8\mu\text{m}$  的外圆表面都可以在这条加工路线中加工。如果加工精度要求较低,可以只取粗车,也可以只取粗车—半精车。

(2) 粗车—半精车—粗磨—精磨:对于黑色金属材料,特别是对半精车后有淬火要求,加工精度等于或低于 IT6,表面粗糙度等于或大于  $R_a 0.16\mu\text{m}$  的外圆表面,一般可安排在这条加工路线中加工。

(3) 粗车—半精车—精车—金刚石车:这条加工路线主要适用于工件材料为有色金属(如铜、铝),不宜采用磨削加工的外圆表面。

金刚石车是在精密车床上用金刚石车刀进行车削,精密车床的主运动系统多采用液体静压轴承或空气静压轴承,送进运动系统多采用液体静压导轨或空气静压导轨,因而主运动平稳,送进运动比较均匀,少爬行,可以有比较高的加工精度和比较细的表面粗糙度。目前,这种

加工方法已有用于尺寸精度为  $0.1\mu\text{m}$  数量级和表面粗糙度为  $R_a0.01\mu\text{m}$  数量级的超精切削加工之中。

(4) 粗车—半精车—粗磨—精磨—研磨、超精加工、砂带磨、镜面磨或抛光:这是在前面加工路线(2)的基础上又加进研磨、超精加工、砂带磨、镜面磨或抛光等精密、超精密加工或光整加工工序。这些加工方法多以减小表面粗糙度、提高尺寸精度、形状和位置精度为主要目的,有些加工方法,如抛光、砂带磨等则以减小表面粗糙度为主。

超精磨削加工是指工件作回转运动,用细磨粒油石作高频短幅振动和送进运动,以很小的压力对工件表面进行加工的一种加工方法。这种加工方法可使工件表面粗糙度减小到  $0.06\mu\text{m}$ ,但对改变加工面宏观形状和位置精度的能力较弱。图 1-13 是用于加工外圆面的工作原理示意图。

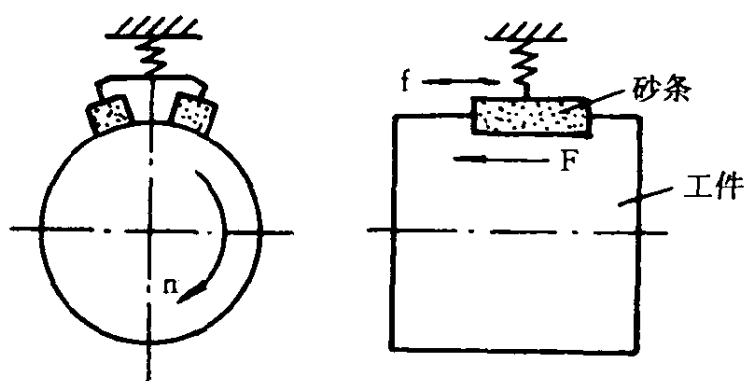


图 1-13 超精加工外圆示意图

砂带磨削是以粘满砂粒的砂带高速回转,工件缓慢转动并作送进运动对工件进行磨削加工的加工方法。图 1-14(a),(b)是闭式砂带磨削原理图。图 1-14(c)是开式砂带磨削原理图。其中图 1-14(a)和(c)是通过接触轮使砂带与工件接触。可以看出其磨削方式和砂轮磨削类似,但磨削效率可以很高。图 1-14(b)是砂带直接和工件接触(软接触),主要用于减小表面粗糙度的加工。由于砂带基底质软,接触轮也是在金属骨架上浇注橡胶做成,也属软质,所以砂带磨有抛光性质。高精度砂带磨可使工件表面粗糙度减小至  $0.02\mu\text{m}$ 。

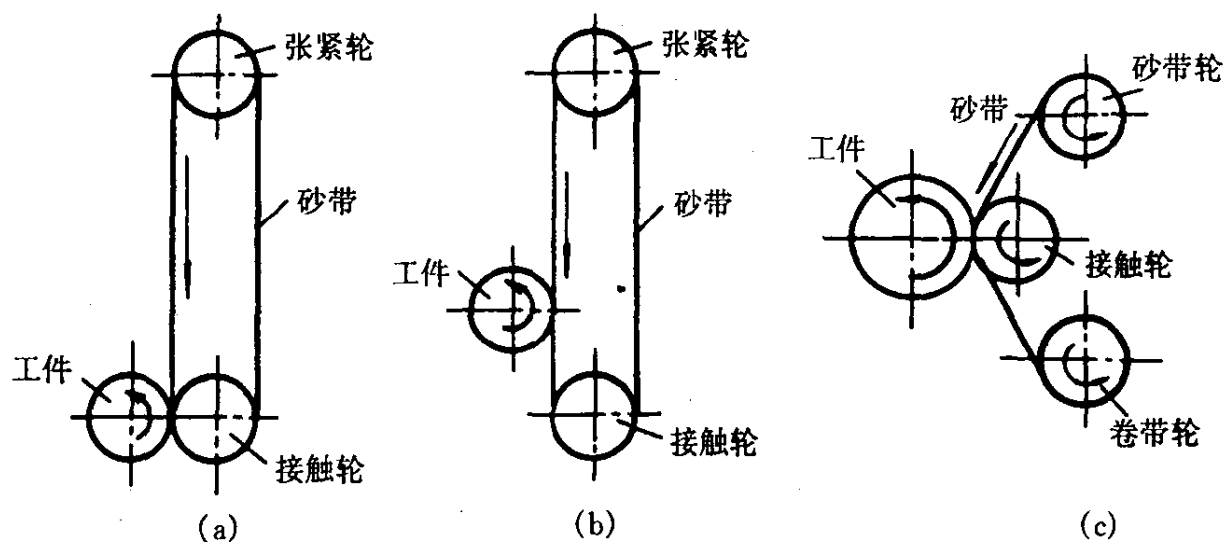


图 1-14 砂带磨加工原理

镜面磨削是指磨削后工件表面粗糙度可减小至  $0.01\mu\text{m}$  或更小的磨削加工。这种磨削方式的最大特点是不仅可以加工出表面粗糙度值很小的光整表面,而且亦可得到很高的形状和位置精度。镜面磨削对机床、砂轮粒度、硬度、修整用量及磨削用量等都有很高的要求。

抛光是用敷有细磨粉或软膏磨料的布轮、布盘或皮轮、皮盘等软质工具,靠机械摩擦和化学作用,减小工件表面粗糙度的加工方法。这种加工方法去除余量通常小到可以忽略,不能提高尺寸和位置精度。

### 1.2.2 孔的加工路线

图 1-15 是常见的孔的加工路线框图,可分为下列四条基本的加工路线来介绍。

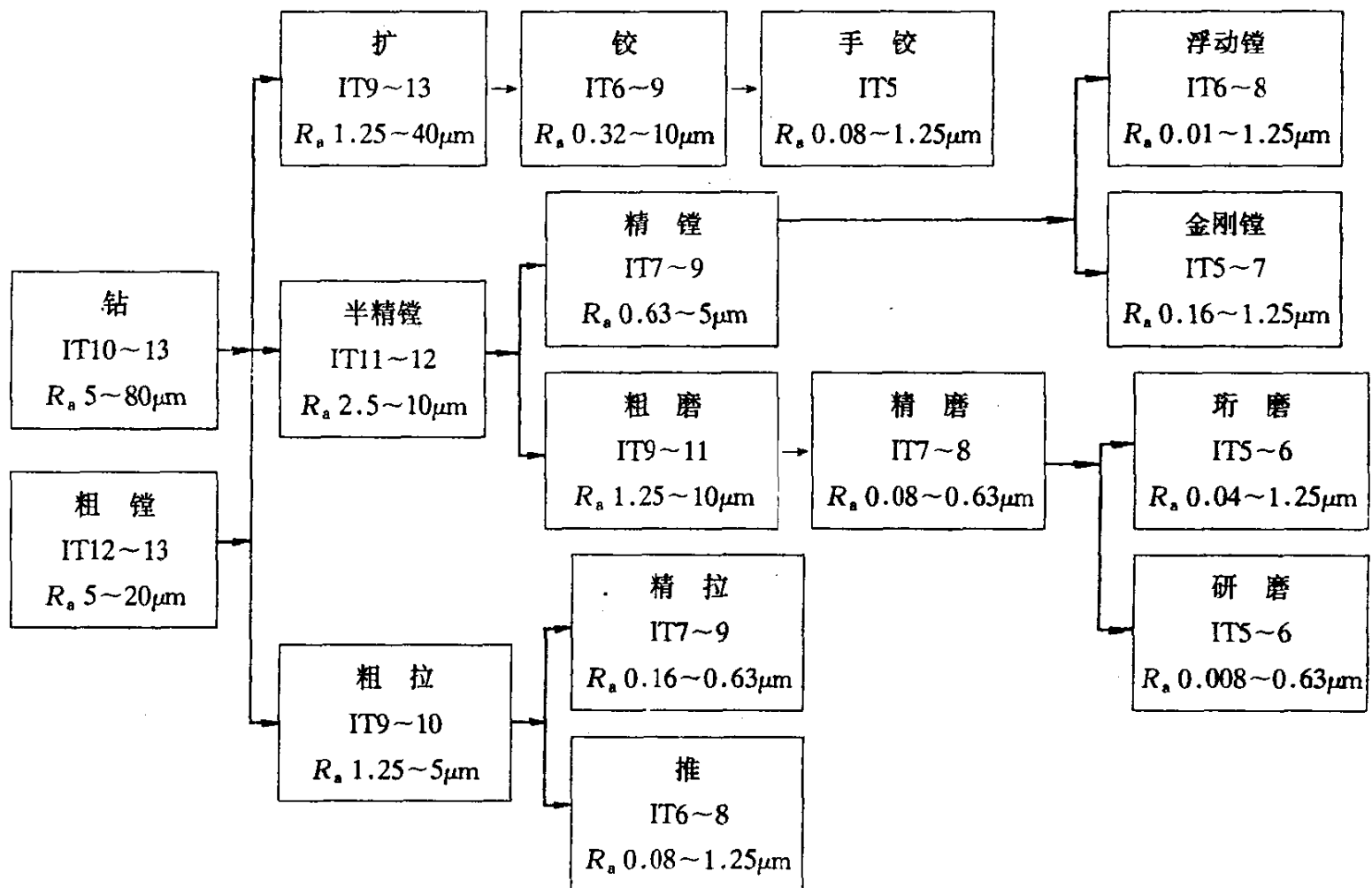


图 1-15 孔的加工路线

(1) 钻—粗拉—精拉:这条加工路线多用于大批或大量生产盘套类零件的圆孔、单键孔和花键孔加工。其加工质量稳定、生产效率高。当工件上没有铸出或锻出毛坯孔时,第一道工序需安排钻孔;当工件上已有毛坯孔时,则第一道工序需安排粗镗孔,以保证孔的位置精度。如果模锻孔的精度较好,也可以直接安排拉削加工。

(2) 钻—扩—铰—手铰:这是一条应用最为广泛的加工路线,在各种生产类型中都有应用,多用于中、小孔加工。其中扩孔有纠正位置精度的能力,铰孔只能保证尺寸、形状精度和减小孔的表面粗糙度,不能纠正位置精度。当孔的尺寸精度、形状精度要求比较高,表面粗糙度要求又比较细时,往往安排一次手铰加工。有时,用端面铰刀手铰,可用来纠正孔的轴心线与端面之间的垂直度误差。

(3) 钻或粗镗—半精镗—精镗—浮动镗或金刚镗:下列情况下的孔多在这条加工路线中加工:

- ① 单件小批生产中的箱体孔系加工;
- ② 位置精度要求很高的孔系加工;
- ③ 在各种生产类型中,直径比较大的孔,例如: $\phi 80\text{mm}$ 以上,毛坯上已有位置精度比较低的铸孔或锻孔;



④ 材料为有色金属,需要由金刚镗来保证其尺寸、形状和位置精度以及表面粗糙度的要求。

在这条加工路线中,当工件毛坯上已有毛坯孔时,第一道工序安排粗镗,无毛坯孔时则第一道工序安排钻孔。后面的工序视零件的精度要求,可安排半精镗,亦可安排半精镗—精镗或安排半精镗—精镗—浮动镗,半精镗—精镗—金刚镗。

浮动镗刀块属定尺寸刀具,它安装在镗刀杆的方槽中,沿镗刀杆径向可以自由滑动(见图 1-16),其加工精度和表面粗糙度都比较好,生产效率高。

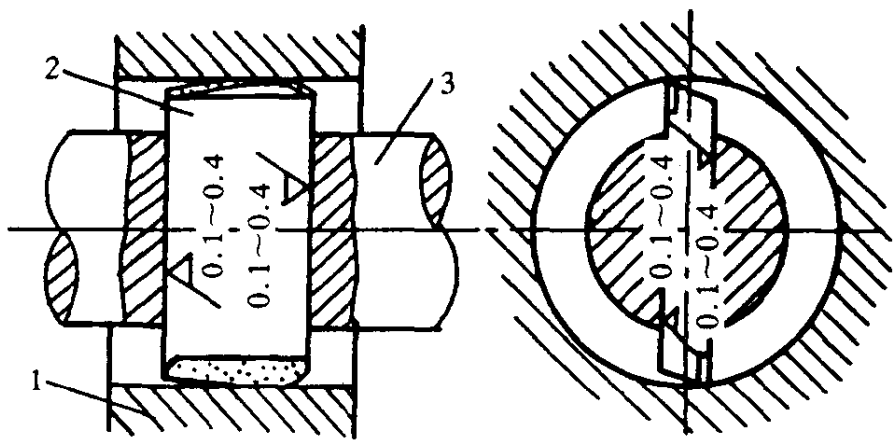


图 1-16 镗刀块在镗杆方槽内可以浮动

1—工件;2—镗刀块;3—镗杆

金刚镗是指在精密镗头上安装刃磨质量较好的金刚石刀具或硬质合金刀具进行高速、小进给精镗孔加工。金刚镗床也有精密和普通之分。精密金刚镗指金刚镗床的镗头采用空气(或液体)静压轴承,送进运动系统采用空气(或液体)静压导轨,镗刀采用金刚石镗刀进行高速、小进给镗孔加工。

(4) 钻(或粗镗)—粗磨—半精磨—精磨—研磨或珩磨:这条加工路线主要用于淬硬零件加工或精度要求高的孔加工。其中,研磨孔是一种精密加工方法。研磨孔用的研具是一个圆棒。研磨时工件作回转运动,研具作往复送进运动。有时亦可工件不动,研具同时作回转和往复送进运动,同外圆研磨一样,需要配置合适的研磨剂。

对上述孔的加工路线作两点补充说明:①上述各条孔加工路线的终加工工序,其加工精度在很大程度上取决于操作者的操作水平(刀具刃磨、机床调整、对刀等)。②对以微米为单位的特小孔加工,需要采用特种加工方法。例如:电火花打孔、激光打孔、电子束打孔等。有关这方面的知识,可根据需要查阅有关资料。

### 1.2.3 平面的加工路线

图 1-17 是常见的平面的加工路线框图,可按如下五条基本的加工路线来介绍:

(1) 粗铣—半精铣—精铣—高速铣:在平面加工中,铣削加工用得最多。这主要是因为铣削生产率高。近代发展起来的高速铣,其加工精度比较高(IT6~7),表面粗糙度也比较小( $R_a 0.16 \sim 1.15 \mu\text{m}$ )。在这条加工路线中,视被加工面的精度和表面粗糙度的技术要求,可以只安排粗铣,或安排粗、半精铣;粗、半精、精铣以及粗、半精、精、高速铣。

(2) 粗刨—半精刨—精刨—宽刀精刨、刮研或研磨:刨削加工也是应用比较广泛的一种平面加工方法。同铣削加工相比,由于生产率稍低,因此,从发展趋势上看,不像铣削加工那样应用广泛。但是,对于窄长面的加工来说,刨削加工的生产率并不低。

宽刀精刨多用于大平面或床身导轨面加工,其加工精度和表面粗糙度都比较好,在单件、成批生产中被广泛应用。

刮研是获得精密平面的传统加工方法。例如,精密平面一直是用手工刨研的方法来保证平面度要求的。由于这种加工方法劳动量大,生产率低,在大批量生产的一般平面加工中有被

磨削取代的趋势。但在单件小批生产或修配工作中,仍有广泛应用。

同铣平面的加工路线一样,可根据平面精度和表面粗糙度要求,选定终加工工序,截取前半部分作为加工路线。

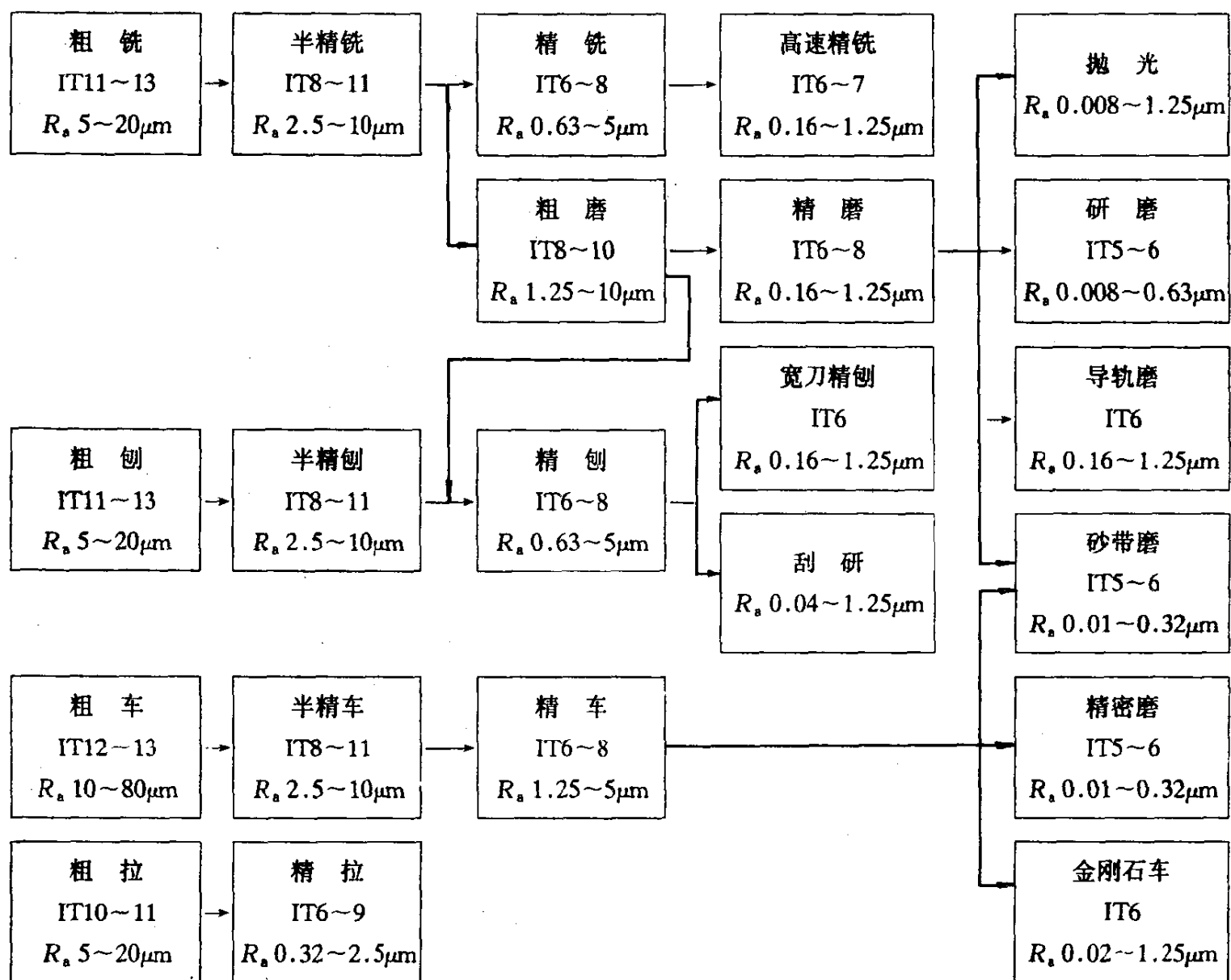


图 1-17 平面的加工路线

(3) 粗铣(刨)—半精铣(刨)—粗磨—精磨—研磨、精密磨、砂带磨或抛光:如果被加工平面有淬火要求,则可在半精铣(刨)后安排淬火。淬火后需要安排磨削工序:视平面精度和表面粗糙度要求,可以只安排粗磨;亦可安排粗磨—精磨;还可以在精磨后安排研磨或精密磨。

(4) 粗拉—精拉:这条加工路线主要在大批或大量生产中采用。生产率高,尤其对有沟槽或台阶的表面,拉削加工的优点更加突出。例如,某些内燃机气缸体的底平面、曲轴半圆孔以及分界面等就是全部在一次拉削中直接拉出的。但是,由于拉刀和拉削设备昂贵,这条加工路线只适合在大批或大量生产中使用。

(5) 粗车—半精车—精车—金刚石车:这条加工路线主要用于有色金属零件的平面加工,这些平面有时就是外圆或孔的端面。如果被加工零件是黑色金属,则精车后可安排精密磨、砂带磨或研磨、抛光等。

## 1.3 现代制造技术

### 1.3.1 现代制造技术特点与发展方向

现代制造已成为一个系统,它是在计算机技术、数控技术、控制论及系统工程与制造技术相结合的基础上建立的,它是从产品概念到最终产品的集成活动,是一个功能体系和信息处理系统。在现代机械制造中,只有把机械制造的全过程及其组成部分看成一个整体,用系统的观点来分析和研究,才有可能对机械制造过程实行最有效的管理和控制,取得最佳的经济效果。

图 1-18 所示是一个生产系统的基本框图。点划线框内表示生产系统,框外表示系统的外界环境。整个生产活动分成三个阶段:第一阶段是决策阶段,企业的最高领导机构根据市场信息或国家下达的任务以及工厂自身的条件,进行分析研究,对产品的类型、产量及生产方式等作出决策;第二阶段是研究与开发阶段,它根据工厂的决策要求进行设计、试验研究和开发新产品;第三阶段是产品的制造阶段,直接将原材料或毛坯变成成品。在上述

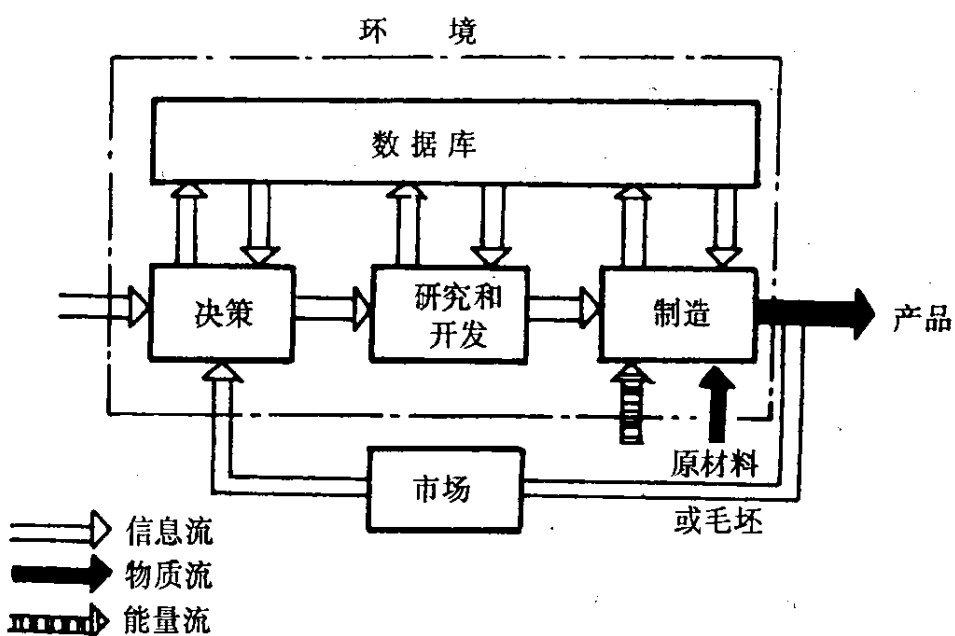


图 1-18 生产系统

过程中,存在着以生产对象和机床设备、工艺装备等为中心的“物质流”,以生产管理和信息处理等管理技术为主体的“信息流”,以及为了保证生产活动正常进行所必需的“能量流”。制造系统是生产系统中的一个组成部分,在制造系统中直接将输入的原材料或毛坯加工成成品,它一般由机械设备、工艺装备和各种制造过程三部分形成。

现代制造技术提倡并运用并行工程、精良生产、灵活制造、及时生产和面向制造的设计以及设计与工艺一体化等新概念、新哲理。

并行生产是集成地、并行地设计产品及其相关的制造过程和支持过程,要求产品开发人员在设计一开始就考虑产品从概念形成、生产到报废处理整个生命周期中的所有因素,如用户要求、质量、进度及成本等,它是采用动态优化方法处理问题的一种系统工程方法。精良生产是在产品开发、生产、销售过程中,实现最大限度精简组织机构,进行各方面人员的集成或使成为多面手,获取最大效益,最大限度满足用户需求,提高企业竞争能力。灵活制造是利用人工智能和信息技术,通过多方面的协作来改变传统的大批生产方式。及时生产是指把在精确的时间内,生产所需的质量、产量的产品,做到零缺陷、零库存、零准备、零搬运、零故障、零提前期、批量为一的理想状况作为目标的一种哲理。以往的大批量生产,设计与工艺是分开的,甚至出现了工艺从属于设计的现象,但随着社会发展和人类的需求提高,产品规格、样式不断更新,多品种小批生产在整个生产中的地位日益重要,从而导致设计与工艺的一体化,甚至会出现工艺过程主宰产品的现象,为了保证设计变成现实和工程一次成功,并行工程技术和面向制造的设计

计应运而生。

现代制造技术的发展方向大体上可从6个方面来论述。

(1) 制造系统的自动化:机械制造过程是一种离散的生产过程,与连续的生产过程相比,实现自动化更为困难。机械制造自动化的发展经历了单机自动化、刚性自动线、数控机床和加工中心、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System—FMS)和计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System—CIMS)等几个阶段,并向柔性化、集成化、智能化进一步发展。自动化的目的不仅是提高生产效率和改善劳动条件,而且往往是保证产品质量的必要措施。

(2) 精密工程:它包括精密加工和超精密加工技术、微细加工和超微细加工技术、微型机械和纳米( $10^{-9}$ m)技术等方面。20世纪初由于发明了能测量0.001mm的千分表和光学比较仪等,加工精度逐渐向微米级过渡,当时将达到微米级的加工称为精密加工(精密加工指加工精度为 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ ,表面粗糙度为 $R_a\ 0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的技术),本世纪50年代末以来,由于生产航天飞机、大规模集成电路、高密度硬磁盘、激光器等需要,出现了各种微细加工工艺(微小尺寸零件亚微米级加工精度的加工技术),使机械加工精度提高1~2个数量级,提高到目前的纳米(nm)级( $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ),从而进入了超精密加工的时代,各个年代达到的加工精度的大致水平和相应机床、测量仪器的情况见图1-19。所谓超精密加工是指加工精度达到 $0.01\mu\text{m}$ ,表面粗糙度 $R_a$ 值达到 $0.001\mu\text{m}$ 的加工技术,这些超精密加工往往反映在某些精密装置与仪器零部件制造上,如高精度的圆柱气浮轴承、激光反射镜、电液伺服阀、零零级块规、超高精度的母机床等的制造上。从机械加工的内容来看,大体上是加工精度为 $0.1\mu\text{m}$ 以下的球体或圆柱面圆度加工, $0.1\mu\text{m}$ 以下的平面与镜面多边形加工, $\pm 0.1$ 角秒的圆分度机构加工,精密导轨

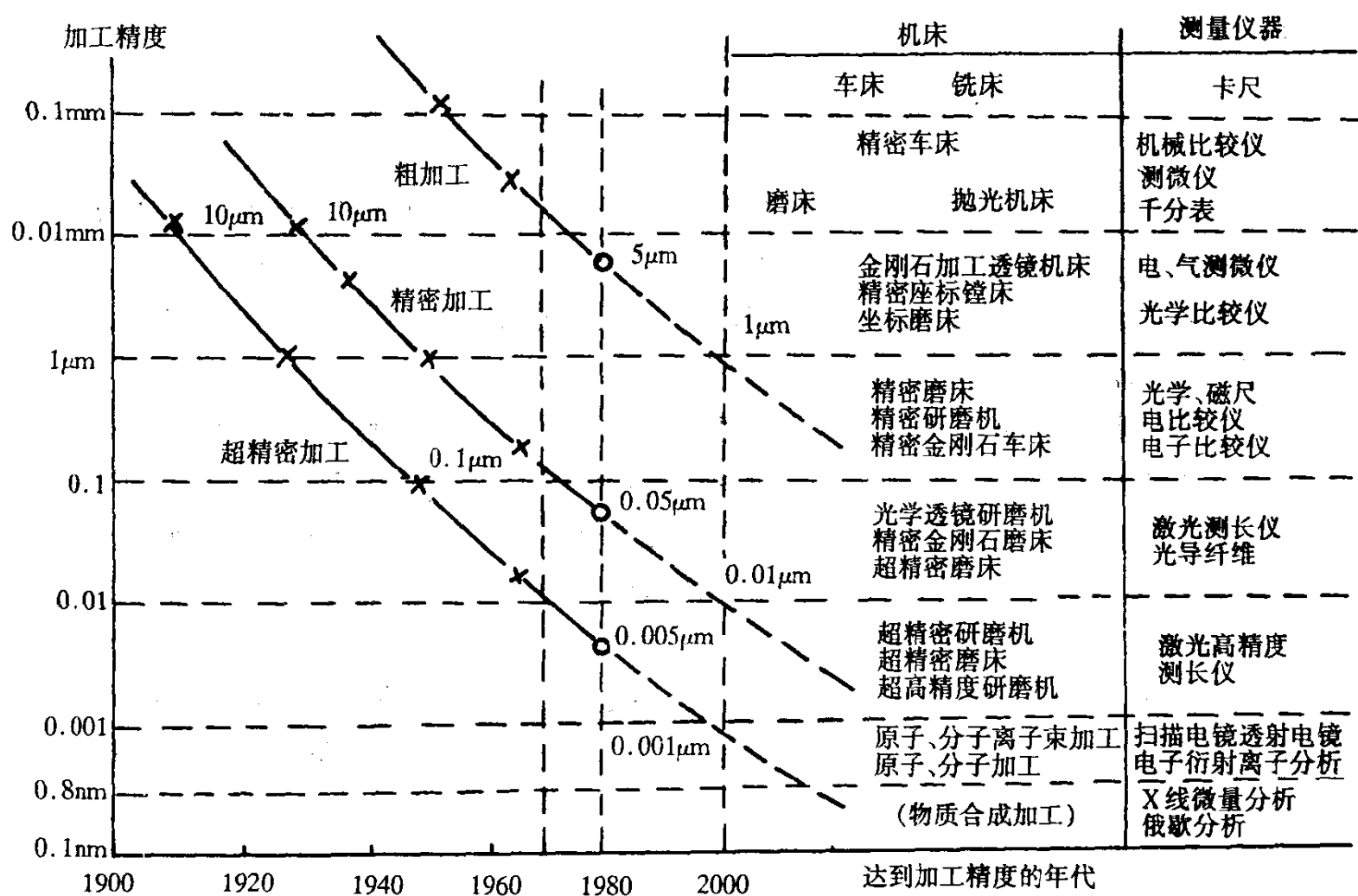


图 1-19 各年代达到的加工精度

与精密丝杆加工,精密齿轮制造等等。

实现超精密加工,就需要高于加工精度  $0.01\mu\text{m}$  以下的精度测量技术和监控技术,就需要高精度加工机床和相应的抗热、抗振特性。

高精度机床必须有极高的回转精度,其主轴的结构必须简单又便于加工,许多国家普遍采用空气静压轴承的主轴结构来提高回转精度,图 1-20 所示的空气静压轴承,当转速为  $534\text{r/s}$  时,径向跳动量仅为  $0.05\mu\text{m}$ ,轴向窜动量在  $0.01\mu\text{m}$  以内。除此而外,实现超精密加工尚需要锋利的刀具和精确的对刀和微量进给、微量进刀机构。刀具的锋利程度以刀刃的刃口圆角半径  $\rho$  的大小来表示,刀具的  $\rho$  与刀片材料的晶体微观结构有关,单晶体金刚石刀具的

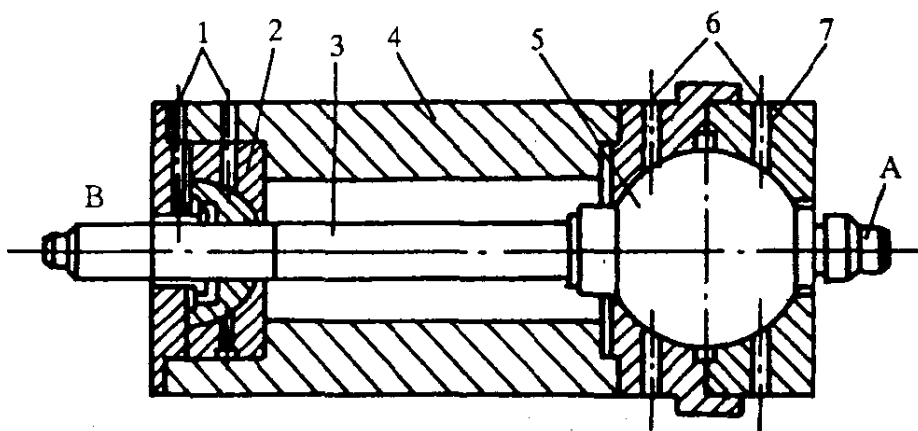


图 1-20 空气静压轴承精密镗头主轴

1,6—进气口;2—半球面轴;3—球轴;4—主轴箱;  
5—整球面;7—整球面轴承;A—主轴前端(装卡盘);  
B—主轴后端(装皮带轮)

$\rho$  可达到  $0.005\mu\text{m}$ ,并且硬度、耐磨性极高。是实现镜面车削的理想刀具材料之一。其它新型刀具材料如聚晶立方氮化硼、应用涂层硬质合金等也在开发采用。

实现微量进给的机构的种类不少,图 1-21 为用于电子显微镜试片切片机的热膨胀微量进给机构。试件 1 被夹持在由镍钢制成的主轴 7 的左端,主轴的右端由止推轴承顶住,外围有加热线圈 8。当线圈 8 通电后,主轴 7 受热伸长,因主轴的右端为固定端,其伸长向左方向。当试件 1 向前送进一个试片的厚度后,电磁铁 3 断电,刀具 2 向上抬起,切下很薄的试片,电磁铁 3 通电,刀具 2 复位即退刀。控制加热时间(加热量与位移成正比),进给量在  $0.05\sim 0.01\mu\text{m}$  内变化。

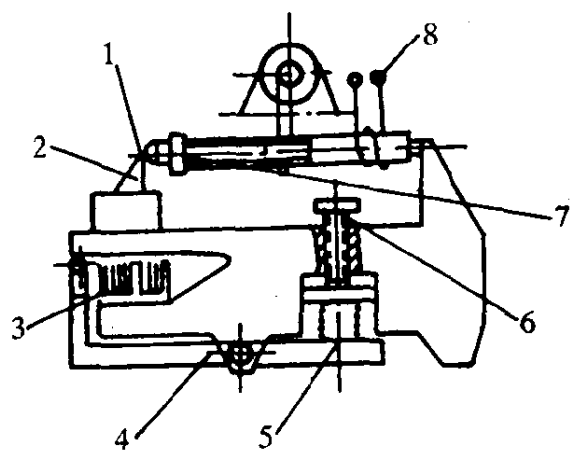


图 1-21 试片切片机的热膨胀微量进给机构

1—试件;2—刀具;3—电磁铁;  
4—床身;5—弹簧;6—调节螺钉;  
7—主轴;8—加热线圈

在微细加工中,利用高速钢钻头可钻孔最小直径为  $0.04\text{mm}$ ,利用特种微细钻头钻孔最小直径可达  $2.5\mu\text{m}$ ,例如一种带皮带轮的钻头,以钻头本身为主轴并采用 V 形轴承支承,钻孔直径可达  $2.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 。

在微细加工中光刻加工是其主要加工方法之一,它也属于特种加工方法。光刻加工可分为两个阶段:第一阶段为原版制作,生成工作原版或工作掩膜,为光刻时的模板;第二阶段为光刻。

光刻过程分为涂胶、曝光、显影与烘片、刻蚀、剥膜与检查等工作。

光刻又称光刻蚀加工或刻蚀加工,简称刻蚀,主要是制作由高精度微细线条所构成的高密度微细复杂图形。

贝尔实验室中开创了一项称之为 SCALPEL 的新电路板制片技术,它使用了电子束曝光来刻版,刻划线只有 250 个原子宽度,或者说是  $0.08\mu\text{m}$ 。这样可使每个芯片上的晶体管的数

目成倍地增长,可达到 200 亿个晶体管,在一块硅片上实现一个系统,在不久的将来,一块硅片上将实现现在一台 PC 的功能。

当前,以纳米技术为代表的超精密加工技术和以微细加工为手段的微型机械技术有重要意义,它们代表了这一时期精密工程的方向。

(3) 特种加工方法(Nontraditional Machining Method):又称非传统加工方法,它是指一些物理的、化学的加工方法,如电火花加工、电解加工、超声波加工、激光加工、电子束加工、离子束加工等。加工方法本身又包括分离(去除)加工、附着(注入)加工和变形加工,即加工的概念不仅包含使工件的形状、尺寸产生变化,还包括工件表面层材料的化学成分、组织结构、力学性能等的变化。特种加工方法的主要对象是难加工材料的加工,如金刚石、陶瓷等超硬材料的加工,其加工精度可达分子级加工单位或原子级加工单位,所以它常常又是精密加工和超精密加工的重要手段。当前最值得注意的是激光加工、电子束加工、离子束加工等。目前激光加工多用固体激光器,后者多用氙灯作光泵以发出光能,经过聚光器将光能聚集以集中激发到红宝石上,使它的原子核的能级发生变化而辐射出红色激光,再经二次反射和共振作用以发射出单色性、方向性好的激光束。发散角可达  $0.1\text{mrad}$ ,光束可聚到  $0.001\text{mm}$ ,它的加工机理是利用热效应,使被照射斑点材料的局部温度升高、熔化、气化而形成小坑,继而爆炸形成小孔。激光可进行微细加工,它是非接触方式,力、热变形小。特种加工与传统加工相结合的复合加工也有较大的发展前途。例如,在普通机床上,利用等离子加热使切削层形成一个温度场,可大大提高切削用量,尤其适宜于粗加工表面有粘砂和切削不均的零件,工效可提高 4 倍以上。

(4) 快速成形(零件)制造(Rapid Prototype (Part) Manufacturing — RPM):零件是一个三维空间实体,它可由在某个坐标方向上的若干个“面”叠加而成。因此,利用离散/堆积成形概念,可将一个三维实体分解为若干二维实体制造出来,再经堆积而构成三维实体,这就是快速成形(零件)制造的基本原理,其具体制造方法很多,较成熟的商品化有分层实体制造(Laminated Object Manufacturing — LOM)和立体光刻(Stereo Lithography Apparatus — SLA)等。图 1-22 为分层实体制造示意图,根据零件分层几何信息,用数控激光机在铺上的一层箔材上切出本层轮廓,去除非零件部分,再铺上一层箔材,用加热滚压,以固化粘接剂,使新铺上的一层箔材牢固地粘接在已成形体上,再切割该层的轮廓,如此反复直至加工完毕。可见 RPM 是与 CAD/CAM、数控、激光和材料科学等有关。西安交通大学等单位推出的智能激光快速成型机是利用激光固化树脂的原理直接将 CAD 数据转变为三维零件模型而无需任何刀具、工装的准备工作。清华大学、华中理工大学等单位开发的 RPM 也各具特色。

(5) 传统加工工艺的改造和革新:这一方面的技术潜力很大,如高速切削、超高速切削(切削速度  $>1\text{km}/\text{min}$ )、高速磨削(磨削速度达到  $120\text{m}/\text{s}$ )、强力磨削(大吃刀量缓进给磨削)、高速铣切、超精强化、螺纹滚压、过渡圆角机械硬化处理、砂带磨削、涂层刀具、超硬材料刀具(金刚石、立方氮化硼、陶瓷等)、超硬材料磨具(金刚石、立方氮化硼等)的出现都对加工理论的发展、加工质量和效率的提高有重要意义。此外,旧设备改造与挖潜,如普通机床改成数控机床的作用也不容忽视。

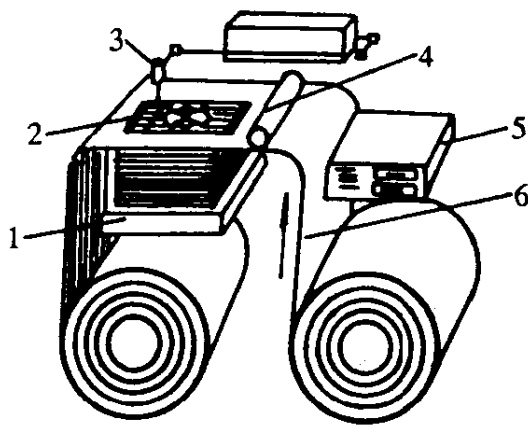


图 1-22 快速成形分层实体制造  
1—工作台;2—层周边及交叉阴影线;  
3—数控激光机;4—加热滚;  
5—计算机;6—箔材

(6) 其它方面:如细密的分组装配法、毛坯精化、非加工表面不打腻子直接喷漆等。

下面对制造系统自动化予以深入介绍。

### 1.3.2 机械制造系统自动化

机械制造系统自动化的目的是:①提高或保证产品的质量;②减少人员的劳动强度、劳动量,改善劳动条件,减少人为因素的影响;③提高生产率;④减少生产面积、人员,节省能源消耗,降低产品成本;⑤提高对市场变化的响应速度和竞争能力。

机械制造系统自动化可以分为单一品种大批量生产的自动化和多品种小批量生产的自动化两大类,由于两类的特点不同,所采用的自动化手段也不同。

#### 1. 单一产品大批量生产的自动化

产品单一、批量大时,可采用专用设备、专用流水线和自动线等刚性自动化措施来实现,一旦产品变化,则不能适应。通常采用的自动化措施有以下几项:

(1) 通用机床的自动化改造

(2) 自动机床和半自动机床

(3) 组合机床:

组合机床是由大量通用部件(占75%左右)和少量专用部件组成的工序集中的高效专用机床,它能对一种(或几种)零件进行多刀、多轴、多面、多工位加工,可以单独或组合完成钻、扩、铰、攻丝、车、铣、磨、滚压等工序。其特点是:

① 设计与制造周期较短,投资少,通用部件由专门厂制造,结构稳定,工作可靠,使用和维修方便。

② 由于采用多刀加工,自动化程度高,比通用机床效率高,质量稳定,劳动强度低。

③ 当产品更新时,其通用部件可重复利用,因为组合机床是用标准零部件组合起来的专用机床。其它专用机床无此优点。

组合机床有小型与大型之分。大型又分为带有固定式夹具的单工位组合机床与带有移动式夹具(多工位)的组合机床。前者夹具、工件与工作台均不动,后者的工作台带动工件等作直线往复移动或回转运动。以完成按顺序改变工位的运动。

组合机床中通用部件可分为:

① 支承部件:有侧底座(卧式床身)、立柱(立式床身)、底座(包括中间底座和立柱底座,中间底座是支持工件的,立柱底座是支持立柱的)等。它们起着机床的基础骨架作用。

② 动力部件:有动力箱(只作主运动)、动力滑台(只完成进给运动的动力部件)和各种工艺切削头。工艺切削头中,只完成主运动的有铣削头、镗削头、钻削头等,既完成主运动又完成进给运动的有镗孔车端面头和其它动力头等。

③ 输送部件:为了使工件(或夹具)移位或转位用的移动工作台或回转工作台。

④ 控制部件:如液压控制元件、按钮等。

⑤ 辅助部件:如气动夹紧装置、冷却、润滑、排屑装置等。

组合机床也可按照动力箱主轴方向不同分成立式、卧式、立卧复合式、倾斜式几种。图1-23为卧式固定式单工位组合机床。图中件2为夹具,一般为非标准的专用部件,其余各件均为通用部件。图1-24为立式组合机床,这两类机床虽然配置型式不同,但都具有大量的通用部件。利用这些通用部件还可以组成各种不同型式的组合机床。



组合机床在大批生产的柴油机、冰箱与空调压缩机等制造业中广泛使用。中批生产中,其关键工序往往采用组合机床。可换主轴箱式组合机床用于成组加工零件,经济效果较好,是中小批生产的发展方向之一。

#### (4) 自动生产线:

简称自动线,在汽车、拖拉机等制造业中广泛应用。其组成方式有两种,一种是由通用自动机或改装的通用机床组成,另一种由组合机床组成。图 1-25 为由三台组合机床组成的自动线,加工箱体零件。自动线中有转台和鼓轮使工件转位以便进行多面加工。较长的自动线一般都分成若干段,每段之间配置储料装置,便于分段维修,以免因故造成全线停车,从而保证自动线的工作。在自动线设计中,生产节拍及其平衡是十分重要的,要根据产品的生产纲领,计算自动线的生产节拍,并按此节拍拟订零件的工艺过程,进行节拍平衡。

#### 2. 多品种小批量生产的自动化

在机械制造业中,多品种、中小批生产的企业约占企业总数的 75%~80%,多年来,实现多品种小批量生产自动化是一个难题。由于计算机技术、数控技术、加工中心、工作站、工业机器人等的发展,使这方面有很大突破,出现了以计算机集成制造系统为代表的机械制造系统自动化。实现多品种小批量生产自动化可以采取以下措施:① 成组技术(Group Technology—GT);② 数字控制(Numerical Control—NC)技术和数控机床;③ 适应控制(Adaptive Control-AC);④ 柔性制造系统(Flexible Manufacturing System—FMS);⑤ 计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System—CIMS)。

下面对上述几种措施加以阐述:

#### (1) 成组技术:

##### ① 成组技术的原理:

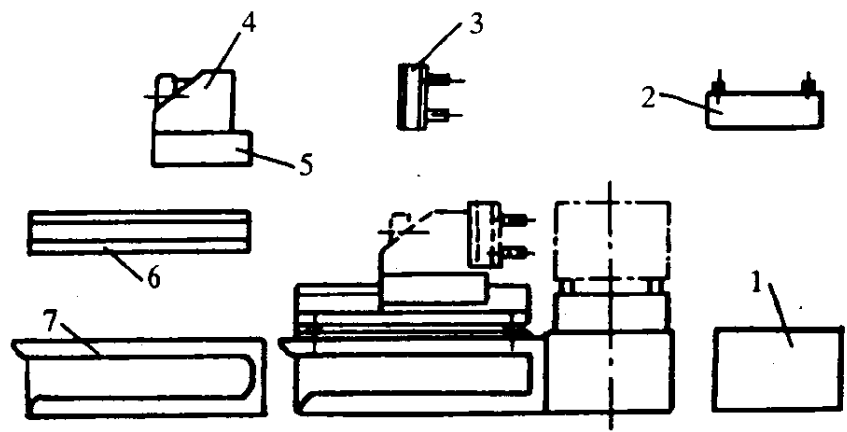


图 1-23 卧式组合机床及其组成部件

1—中间底座;2—夹具;3—主轴箱;4—动力箱;  
5—滑台;6—滑座;7—床身(侧底座)

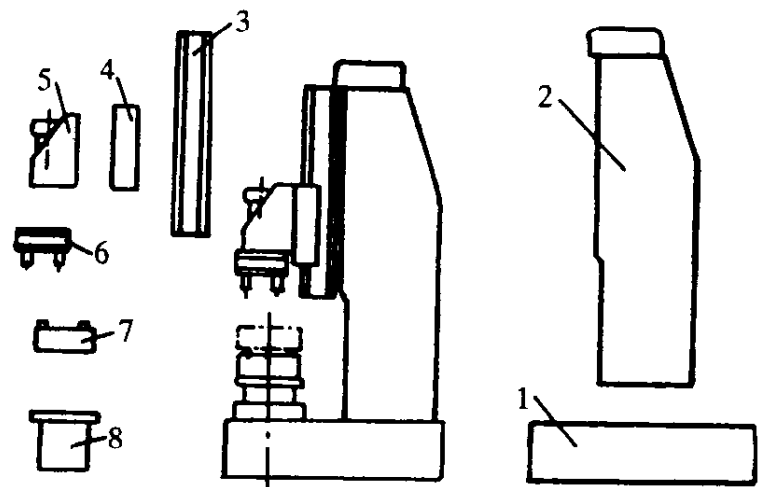


图 1-24 立式组合机床及其组成部件

1—底座;2—立柱;3—滑座;4—滑台;  
5—动力箱;6—主轴箱;7—夹具;8—回转工作台

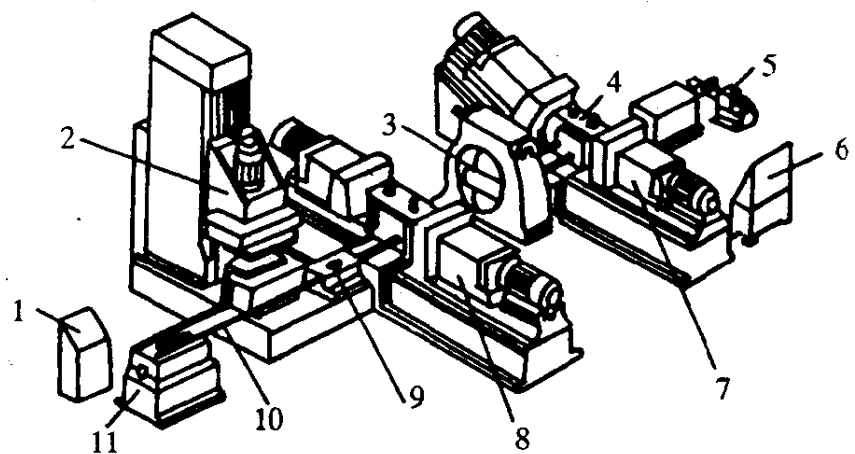


图 1-25 加工箱体零件的组合机床自动线

1—控制台;2—组合机床;3—鼓轮;4—夹具;  
5—切屑输送装置;6—液压油泵站;7—组合机床;  
8—组合机床;9—转台;10—工件输送带;  
11—输送带传动装置

随着生产的发展,产品的更新换代的速度加快,多品种、中小批生产的地位日益重要。它的生产模式有两种类型:一类是传统的制造模式,采用万能的通用的机械制造系统;另一类是采用数控机械制造系统。为了使企业获得最佳经济效益,这两种类型都需应用成组技术。

对于传统的制造模式,加工设备按机群式布置,设备是万能的,存在着生产周期长、效率低、成本高、生产准备工作量大、管理困难等缺点,使用成组技术是作为改造常规机械制造系统的战略性组织-技术措施。对于采用数控机械制造系统的模式,使用成组技术,使之与计算机技术、数控技术相结合,大大推动了中小批生产的自动化进程,并且成组技术成为进一步发展计算机辅助设计、计算机辅助工艺过程设计、计算机辅助制造和柔性制造系统的重要的技术基础。

成组技术的定义就是把相似的问题归并成组,从而找到一个单一解决一组问题的解答,以节省时间和精力。在工程方面,这一定义可应用于设计、绘图、机械制造等工作中,对机械加工来讲,成组加工就是将工厂产品中的被加工零件,按照其几何形状、结构及加工工艺相似性进行分类分组,并根据各组零件加工工艺要求将机床分成若干机床组,再按零件组的工艺流程排列各机床组内的机床,即零件组与机床组一一对应。被纳入同一组的零件可按照共同的工艺过程,在同一机床组中稍加调整后加工出来,以减少调整时间与加工时间。

任何机械产品的组成零件都可分成三大类:①复杂件或特殊件,占总数5%~10%,不同产品中这类零件差别很大;②简单件或标准件,如螺钉等;③相似件,占总数70%,如轴、套、法兰盘、支座、盖板、齿轮等。相似件在结构、材料、工艺方面的相似性和普遍性是推行成组技术的客观基础,将众多的不同品种零件按其相似性分类以形成零件族,把同一族中诸零件原先分散的小批量汇集成较大的成组生产量,这样就把原先的多品种转化为少品种,小批量转化为大批量,可以使用大批量生产中行之有效的高效率工艺方法和设备,从而使多品种小批生产获得接近大批生产的技术经济效果。

## ② 零件的分类和编码:

在实施成组技术的过程中,必须先建立相应的零件分类编码系统,然后应用该编码系统使零件的有关信息代码化,接着再将已分类编码的零件进行分组,以便进一步以成组的方式组织生产。零件的分类码反映了零件的固有名称、功能、结构、形状的工艺特征等信息,一个零件有一个代码,但一个代码可以为多个零件所共有。

奥匹兹(Opitz)分类编码系统是比较著名并应用较广的一种分类编码系统,该系统于1964年由前西德阿亨工业大学奥匹兹教授领导编制的,它是以零件的结构形状及工艺过程相似的原则进行分类的,其基本结构如图1-26所示。

奥匹兹分类编码系统由9位10进制数字代码组成。前5位(1~5码位)为主码,表示零件的形状特征,也称形状代码。后4位(6~9码位)为辅码,分别表示零件的尺寸、材料、原材料原始形式和精度,也称辅助代码。每个码位有10个特征码(0~9)分别表示10种零件特征。

该系统属于以链式结构为主的混合式代码结构。主码中第1,2码位间为树式结构,即码位之间是隶属关系,其它均为链式结构,即码位之间的关系是并列的。因此整个系统结构比较简单。各码位的简要内容说明如下:

第1码位表示零件的类别。按总体形状将零件分为回转体和非回转体两大类。回转体零件有六类(0~5):为套筒、齿轮、传动轴等。不带偏异的回转体零件按长径比( $\frac{L}{D}$ )又分成三类。

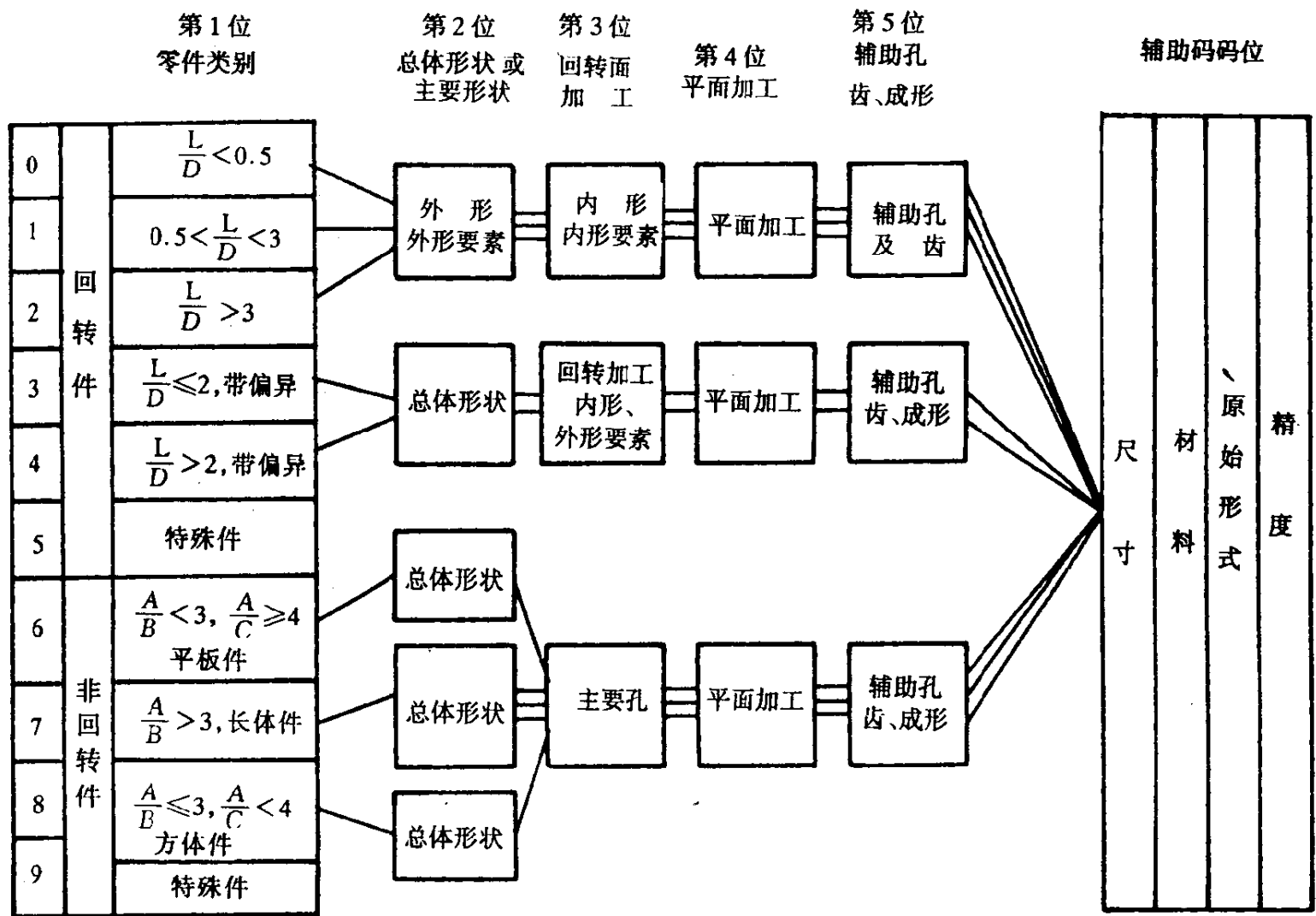


图 1-26 奥匹兹分类编码系统的基本结构

非回转体零件分为四类(6~9),它又按长(A)、宽(B)、高(C)的尺寸比分为6,7,8三类。

第2码位表示零件的主要形状。对于不带偏异的回转体零件,按其外表面形状要素分为10项(形状要素是指有明确功能,并且有一定精度和粗糙度要求的形状,如螺纹、密封槽)。对于带偏异的回转体零件和非回转体零件均按其总体形状由简到繁地分为10项。

第3码位表示零件的内表面形状和回转加工。对0,1,2类零件,此码位描述内表面形状和内部形状要素;3,4类零件描述其内外表面回转加工情况;对非回转体零件是描述主要孔和回转面加工的情况。

第4码位表示零件的平面加工,指不能用钻床、镗床或车床加工的平面、槽和缝。

第5码位表示零件上辅助孔、齿形及成形面的加工。

第6码位表示零件的一个最大外廓尺寸,它是组织生产单元和设计检索的一个重要特征信息。

第7码位表示零件的材料,按种类、强度和热处理分为10项。

第8码位表示零件加工前的原始形式。

第9码位表示零件上有精度要求的部位。凡表面公差等级在H7级以上,粗糙度在 $R_a = 0.8\mu\text{m}$ 以下就作为有精度要求。

分类代号 12031

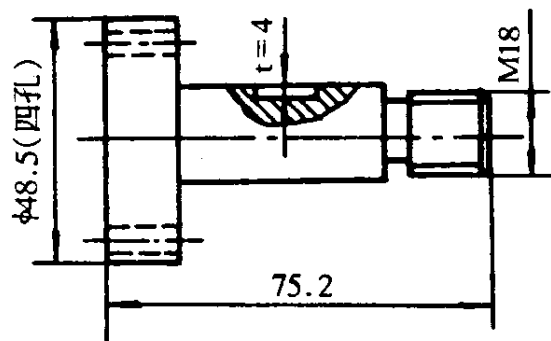


图 1-27 零件的编号

例如,图1-27所示回转体零件, $L/D = 75.2/48 \approx 1.5$ ,故由表1-6可见第一位数是1;外形是一端有台肩和紧固螺纹,故第二位数是2;零件无内孔,第三位数是0;有键槽,故第四位数是

表 1-6 奥匹兹分类方法(回转体零件)

第一位数字		第二位数字		第三位数字		第四位数字		第五位数字	
零件类		外表形状及其要素		内表面形状及其要素		需要加工的平面		辅助孔及齿形	
0	盘状 $\frac{L}{D} \leq 0.5$	0	光滑, 无形状要素	0	无通孔, 无盲孔	0	不需要加工的平面	0	无辅助孔
		1	无形状要素	1	无形状要素	1	外平面或在一个方向弯曲的平面	1	有轴向孔, 位置无要求
1	短轴类 $0.5 < \frac{L}{D} < 3$	2	有螺旋纹	2	有螺旋纹	2	几个外平面在一个圆周上, 彼此有角度关系	2	有轴向孔, 位置有要求
		3	或光滑	3	有工作槽	3	外表布的浅槽和深槽	3	有径向孔, 位置无要求
		4	一端有台肩	4	无形状要素	4	外花键或多边形	4	有径向孔、轴向孔及斜孔、位置无要求
2	长轴类 $\frac{L}{D} \geq 3$	5	两端有台肩	5	有螺旋纹	5	外平面及深槽、浅槽、花键	5	有径向也、轴向孔、及斜孔、位置有要求
		6	有工作槽	6	有工作槽	6	内平面及浅槽	6	圆柱齿轮
		7	有工作锥度	7	有工作锥度	7	内花键或多边形	7	伞齿轮
3	非圆柱 $\frac{L}{D} \leq 2$ 有偏异	8	有传动螺旋纹	8	有传动螺旋纹	8	内平面键或深槽、浅槽	8	其他齿形
		9	其他( $L > 10$ 倍工作直径)	9	其他( $L > 10$ 倍工作直径)	9	其他	9	其它
4	圆柱 $\frac{L}{D} > 2$ 有偏异	(按外形分类)		(按需要回转加工的内表面形状要素分类)		(需要加工的平面分类)		(按辅助孔齿形及成形表面分类)	
5	不能归入上面五类的回转体零件								

3;有四个轴向孔,与其他要素无位置要求,故第五位数是1。因此,上述零件分类代号为:12031。

### ③ 零件归并成组:

根据零件的代码再按照一定的准则将零件分类归并成组。在划分零件组(或称为零件族)时,如果仅把代码完全相同的零件划分为一组,则同组零件相似性很高甚至完全相同,但每组零件数很少,这样就不能充分体现成组的优越性。实际上代码不完全相同的零件也往往具有相似的工艺特征,依据大量的统计资料和生产经验,可以制定出各零件族的相似性准则。编码分类法的原理就是将零件编码与上述相似性准则相比较,从而将众多的零件进行分选,使之归属于相应的组。

常用的编码分类成组的方法有以下几种:

#### A. 特征码位法:

如前所述,利用零件整个分类编码代号相同作为依据进行分组是不合理的。如果从零件代码中选择其中反映零件工艺特征的部分代码相同作为分组的依据,就可得到一系列具有相似工艺特征的零件族。这几个码位就称为特征码位。如图1-28所示,规定1,2,6,7四个码位相同的零件划分为一组,可以看出这组零件的特征为轴类零件  $L/D > 3$ ,具有双向阶梯的外圆柱面,直径  $D > 20 \sim 50\text{mm}$ ,材料为优质钢。所以这组零件可以在相同的机床上用相同的装夹方法进行加工。零件4虽然第II位代码是6而不是4,但是它与上面三个零件相比仅仅多了一个功能槽,故也可以归并在这一类中。

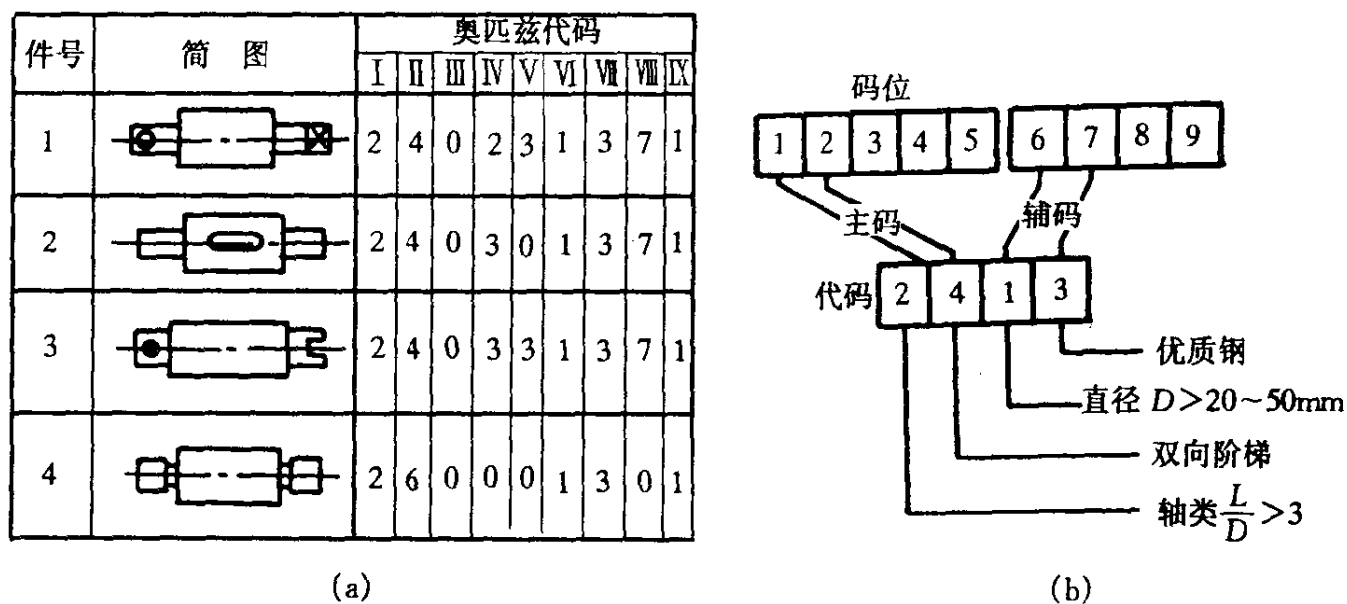


图 1-28 用特征码位法分组

(a)零件简图和代码;(b)特征码位含义

#### B. 码域法:

如果对零件代码各码位的特征规定几种允许的数据,用它作为分组的依据,就将相应码位的相似特征放宽了范围。在图1-29(a)所示的矩阵表上,横向数字表示码位,纵向数字表示各个码位上的代码,图中“×”表示的范围称为码域。图1-29(a)是根据大量统计资料和生产经验而制定的零件相似性特征矩阵表。凡零件各码位上的编码落在该码域内,即可划分为同一零件组,如图1-29(b)中所示3个零件为一组,或称为一个零件族。图1-29(a)也称为零件族特征矩阵。这种分类方法就称为码域法。

除上述编码分类法以外,生产中有时还采用视检法和工艺流程分析法对零件进行分类成组。工艺流程分析法是一种研究工厂生产活动中物料流程客观规律的统计方法,它的实质是通过分析寻求工厂本已客观存在着的加工族及其相应的加工设备组,以达到将零件分类成组的目的。

④ 成组工艺设计:



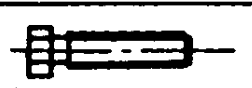
根据零件组编制成组工艺的方法有以下两种:

A. 复合零件法:

按照零件族中的复合零件来设计工艺规程的方法称为复合零件法,或样件法。所谓复合零件是拥有同组零件的全部待加工表面要素的一个零件。它可以是零件组中实际存在的某个具体零件,也可以是一个假拟的零件。由于它包含了组内其它零件所具有的所有待加工表面要素,所以按复合零件设计的成组工艺,只要从中删除一些不为某一零件所用的工序或工步内容,便能为该某零件使用,从而可形成组内各个零件的加工工艺。如图 1-30 所表示的零件组,该假想的复合件(见各种最右下角)是由 8 个结构要素(加工表面)组成,它包含了该零件组中 10 种不同零件的全部结构特征。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	×	×	×	×	×	×		×	×
1	×	×		×		×		×	×
2	×	×		×		×	×		
3				×		×	×		
4							×		
5							×		
6							×		
7							×		
8									
9									

(a)

零件	代码
	10030 0401
	11030 1301
	22020 1200

(b)

图 1-29 码域法分组  
(a)零件族特征矩阵; (b)零件及其代码

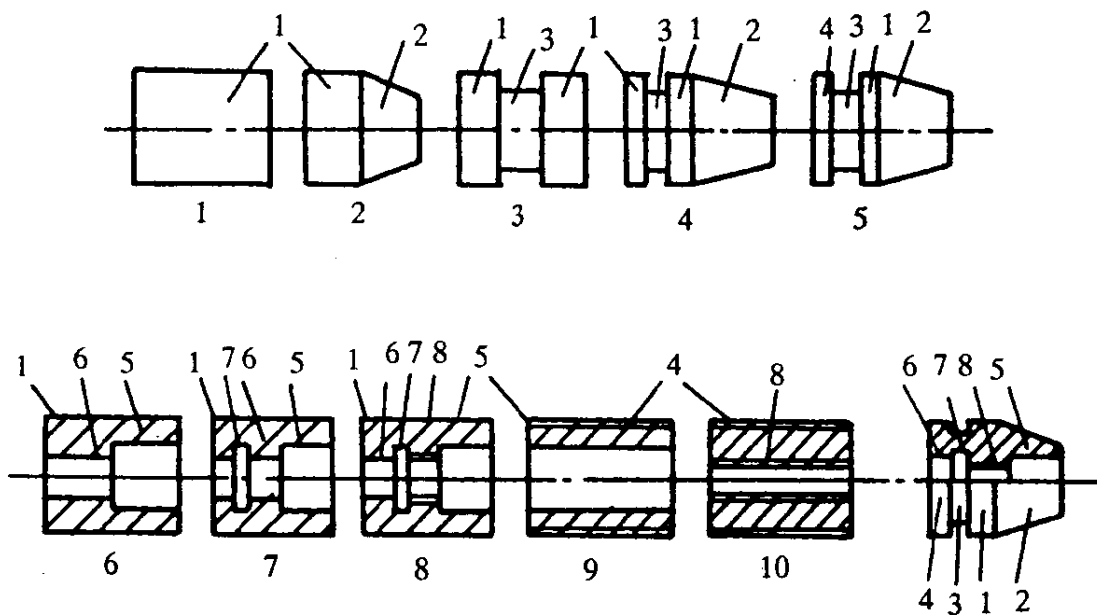


图 1-30 叠加法获得复合零件

表 1-7 即为按复合零件法编制的成组工艺过程卡片。

B. 复合路线法:

对于非回转体类零件,由于其形状不规则,为某一零件组找出它的复合零件来常常十分困难,所以上述复合零件法一般仅适用于回转体零件。而非回转体零件,常采用复合路线法。

表 1-7 成组工艺过程卡片

零件图	工 序							
	1 六角	2 车	3 车	4 铣	5 拉	6 钻	7 磨	入 库
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.

复合路线法是在零件分类成组的基础上,把同组零件的工艺路线作一比较,以组内最复杂零件的工艺路线为基础,然后将此路线与组内其它零件的工艺路线作比较,凡组内其它零件需要而作为代表的工艺路线中没有的工序,一一添上,最终形成一个能满足全组零件要求的成组工艺。图 1-31 是按复合路线法设计成组工艺的例子。

零件组的工艺过程编好后,选择合理的高生产率机床,将它们编制成机床组,并按工艺流程原则布置这一机床组,再计算各零件组的时间定额和机床负荷率,设计成组夹具及刀具的结构和调整方案。

⑤ 成组生产组织形式:

A. 单机成组加工:

在六角车床或自动车床上成组加工小型回转体零件,这些零件的全部加工工序都在这一台设备上完成,这种形式称为单机成组加

本组零件图	工艺路线
	X1 - X2 - Z - X
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">                     选作代表路线:                      X1 - C - Z - X                 </div>
	X1 - C - Z
	X1 - X2 - Z
本组零件的复合工艺路线 (在代表路线中补入所缺 的 X2 工序)	X1 - X2 - C - Z - X

图 1-31 按复合路线法设计成组工艺的例子  
 X1—铣平面; X2—铣另一面; C—车; Z—钻; X—铣槽



工。单机成组加工时机床的布置虽然与机群式生产工段类似,但在生产方式上却有着本质的差别,它是按照成组工艺来组织和安排生产的。一般六角车床和单轴六角自动机是典型的成组单机,加工中心机床是实现单机封闭形式的理想机床。如果一台设备只完成零件组的某一道或几道工序的加工,其余工序仍然是单独工序,分别在其它机床上完成,则称为成组工序加工。它是单机成组加工的一种特殊形式,这种形式虽然扩大了零件的批量,减少了调整机床的时间,但是对复杂零件,不便于生产组织管理,经济效益也不明显。

### B. 成组生产单元:

生产单元是指一组(或几组)工艺上相似的零件,按其工艺流程合理排列出完成该组零件工艺过程所需的一组设备,构成车间内的一个小的封闭生产系统,这就构成一个生产单元。图1-32表示一个生产单元的平面布置形式,按奥匹兹分类代号系统,对零件进行分类,于是得出六个尺寸相当、工序内容相近的零件组,每个零件组的代号和组中代表零件如图上部所示,根据各组零件的分类代号,可查出其主要工艺路线如图中部所示,根据这六个组的工艺路线,决定由车、铣、钻、磨等四台机床组成一个生产单元。选择六个零件组固定在这一生产单元中加工,纯粹是从这四台机床所必须合理负荷的角度来考虑的。根据生产单元的概念,这六个零件组的所有零件,在这四台机床所配置的这块生产面积上完成其全部机械加工工艺过程。

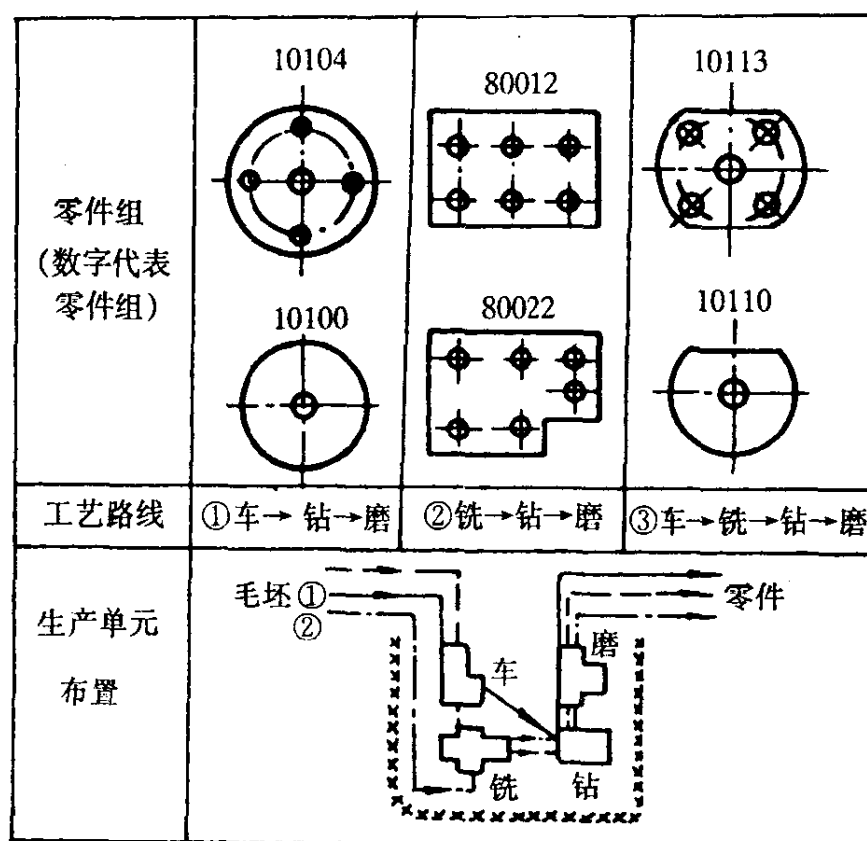


图1-32 零件组及其加工单元

与成组零件单机加工比较,可以看出这时不是由一个工作位置,也不是由一种类型机床来完成某一成组零件的加工,而是由几种类型机床组成一个单元来完成。生产单元与流水线相似,但不等于流水线,因它不要求工序之间保持一定的节拍,根据生产单元中设备负荷情况,一个生产单元也不只限于固定一个零件组。

### C 成组流水线:

成组流水线是严格地按照零件组的工艺过程组织起来的,其各工序的节拍是一致的,它的工作过程是连续而有节奏地进行的。成组流水线与普通流水线的主要区别在于:生产线上流

动的不是一种零件,而是一组相似零件。但对每一种零件来说,它的流动必须是单向的,不能有反向,但不一定经过线上每一台机床的加工。

成组流水线具有大批或大量生产性质的合理性和优越性,它既可用于形状复杂的零件组,如曲轴流水线,也可用于形状简单的零件组,如法兰盘类等零件。

## (2) 数控加工:

### ① 数控机床的工作过程:

根据被加工零件图纸和工艺要求,编制成以数码表示的程序,输入到机床的数控装置或控制计算机中,以控制工件和工具的相对运动,使之加工出合格零件的方法,称为数控加工。

图 1-33 表示了数控机床的工作过程。它先依据零件图纸编制出工艺方案,再按一定的格式将它转变成信息代码,即编成程序,并记录在信息载体(穿孔带或磁带等)上,然后经输入装置(如光电输入机)读出并送到数控装置中。进入数控装置的信息,经过处理和运算变成脉冲信号,通过功率放大后驱动机床的伺服进给系统,控制机床的执行元件(如步进电机、宽调速直流电机等),产生机床的坐标运动和其它的辅助动作(如变速、换刀等),实现机床的加工。

由图 1-33 可以看出,数控机床一般由控制介质、输入装置、数控装置、伺服系统及机床本体几部分组成。

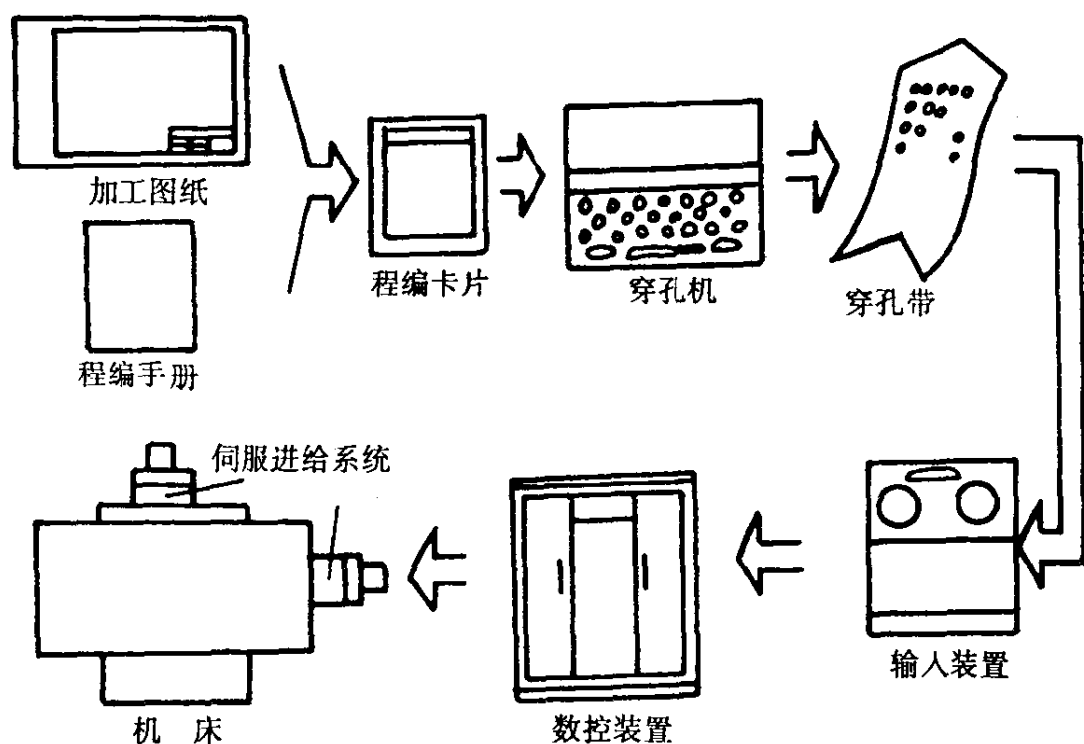


图 1-33 数据控机床的工作过程

数控机床的加工精度是由数控装置及机床系统自动保证的,与操作者无关,因此具有较高的加工精度,而且其精度不受零件形状复杂程度的影响。同时,使用数控机床加工,节省了准备工作时间和辅助时间,大大提高了生产率。尤其在加工零件经常改变时,只要改变零件的加工程序,就能方便地达到重新加工的目的,而无需过多地准备与调整。此外数控机床还减轻了工人的劳动强度,使劳动条件大为改善,生产管理更加方便。因此数控机床在机械加工中的应用日益广泛。尤其在精度高、形状复杂的中小批量零件加工中,显示出了越来越大的优越性。

### ② 数控机床的分类:

#### A. 按照数控机床的控制系统分

点位控制系统 点位控制系统是只控制机床移动部件的终点位置,使加工前刀具相对于

工件有一个正确的定位,而对它们移动过程中的运动轨迹没有严格的要求。刀具从一个定位点到另一个定位点的移动过程中是不切削的。它的移动方式可以沿一个坐标移动完毕再沿另一个坐标移动,也可两个坐标联动。为了提高加工效率并保证刀具定位精度,在刀具向定位点的移动过程中速度并非一直是常数,而是先快后慢,一般采用分级降速或连续降速的方法来实现。

数控钻床、数控镗床等采用点位控制的方式。

**直线控制系统** 直线控制系统控制工作台以适当的速度按平行于坐标轴的方向直线移动并进行切削加工。这类系统有时也可以沿  $45^\circ$  斜线进行切削,但不能沿任意斜率直线切削。

将点位控制系统与直线控制系统结合在一起,就成为点位直线控制系统。如数控镗铣床、加工中心等大都采用这种方式。它们大多具有主轴转速控制、刀具转位及自动换刀等功能。

**连续控制系统** 连续控制系统又称为轮廓控制系统,如图 1-34 所示。它对刀具与工件相对运动的轨迹进行连续控制,以便加工曲面、模腔等形状复杂的表面。这种控制系统必须具有插补运算功能,才能加工任意曲面。

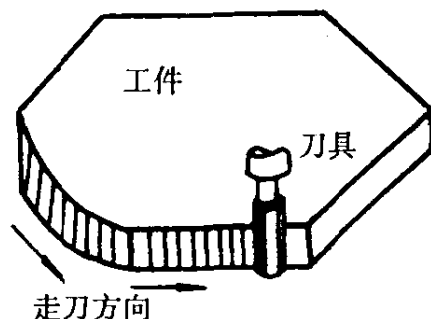


图 1-34 连续控制系统的刀具和工件

#### B. 按伺服系统的原理分

**开环伺服系统** 典型的开环伺服系统,是使用步进电机的伺服系统。由数控装置发来的每一个进给脉冲,经驱动线路放大后驱动步进电机旋转一个步距,再经过减速齿轮带动丝杆旋转,使工作台移动一个距离,这个距离值称为脉冲当量。这种系统由于没有采取检测和校正措施,故称为开环系统(如图 1-35(a)所示)。它的精度较低,但是结构简单,调试容易,价格便宜,所以在数控机床中应用仍十分广泛。

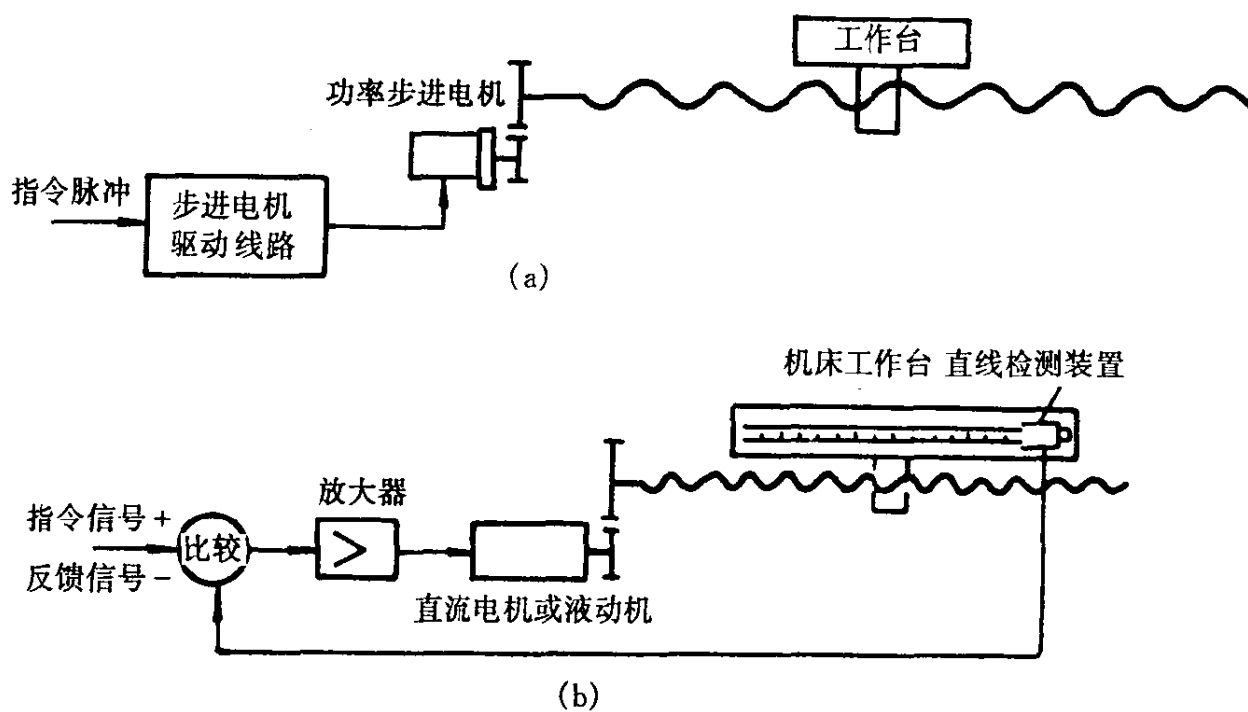


图 1-35 开环和闭环伺服系统

(a)开环;(b)闭环

闭环伺服系统 如图 1-35(b)所示,用直线位移测量装置测量机床移动部件(如工件台)的位移量,将测量结果反馈到数控装置中,与原来的指令值相比较,两者若不相等,将其差值放大作为讯号,控制伺服马达带动工作台作补充移动,再测量再反馈,直至上述差值为零,测量值与命令值相符为止。

闭环伺服系统由于具有反馈校正功能,所以精度较高。但是其结构复杂,调试困难,价格也比较贵,一般在高精度的数控机床中采用。

半闭环伺服系统 如果在上述闭环系统中,检测装置不是装在机床运动的最终环节工作台上,而是装在丝杠端部,则称为半闭环系统。

半闭环系统精度虽然比闭环系统略逊,但由于在反馈环节中排除了工作台这个惯性较大的元件,因此系统比较稳定,得到了广泛的应用。

### C. 按数控装置的性质分

硬件数控(NC) 数控机床所需要的输入运算、插补运算、控制功能等由专用的固定逻辑电路来实现,这些专门设计的集成电路(即硬件)构成了机床的数控装置,这种数控叫硬件数控。当改变机床功能时,必须改变这些硬件才能达到目的,改变元件和固接的线路显然是困难和麻烦的。因此这种类型的数控机床通用性和灵活性差,功能不强,成本高。早期出现的数控机床均为这一类型。

计算机数控(CNC) 在小型计算机和微型计算机问世以后,人们开始用存储程序计算机来代替专门设计的数控装置,按照计算机中的控制程序来执行一部分或全部数控功能,这样的数字控制系统称为计算机数控(CNC)。在 CNC 中,改变软件程序就能改变控制功能,而无需改变硬件逻辑,因此计算机数控又称为软件数控。显然,CNC 十分灵活、方便。

与硬件数控相比,计算机数控的功能大大加强,如存储容量大,可以一次存储零件的全部加工程序;通过修改和编辑程序,可以对原有加工程序进行直接修改和编辑,而不必通过修改纸带的过程,这就减少了麻烦和出错;通过诊断和监测程序可在系统运行过程中进行检测等。由于具有上述特点,CNC 一经问世,发展就十分迅速。随着微型计算机成本的不断下降,近年来新生产的数控机床几乎全部以 CNC 的型式出现。

在计算机数控中,用一台计算机以分时的方式控制多台机床,称群控,也叫计算机直接控制(DNC)。

### D. 按工序集中程度分

#### 普通数控机床

加工中心——工序集中的数控机床 这是由数控机床发展而来的,这种机床多半是具有多个坐标控制的镗铣床,在一次安装下完成钻、铰、攻丝、镗和铣等工序,从而实现通常由几台不同类型的普通机床才能完成的多种工序的数控机床。它与数控机床的主要区别在于,它能够按照穿孔纸带发出的指令自动换刀。自动换刀机构能够完成如下操作:a. 自刀库选择需要的刀具并传递给机床主轴;b. 自动夹紧并保证刀具在一定位置上;c. 将用过的刀具送回刀库。

#### (3) 适应控制:

在机械加工(如切削和磨削)中,在线检测加工状态,及时修正控制参数,以获得加工过程的优化,达到预定的加工目标或效果,这种控制称为适应控制,一个适应控制系统必须具备判别功能、决策功能和校正功能才能胜任上述工作。

加工过程的适应控制可分为性能适应控制和几何适应控制,图 1-36 为控制内孔尺寸精度

的内圆磨床几何适应控制系统,它用双触点电感式传感器检测,其采样数据经微处理后控制微进给机构带动砂轮头架作工件径向方向的位移,以进行尺寸精度补偿。

#### (4) 柔性制造系统:

利用计算机控制系统和物料输送系统,把若干台设备联系起来,形成没有固定加工顺序和节拍的制造系统,在加工完一定批量的某种工件后,能在不停机调整的情况下,自动地向另一种工件转换的自动化制造系统,称为柔性制造系统。

##### ① 柔性制造系统的功能:

**自动变换加工程序的功能** 它能按照不同产品生产的需要,在不停机的情况下,迅速方便地自动变更各个设备上的工作程序。

**自动变换被加工对象的功能** 在成组技术的基础上,FMS能完成多种产品或零件族的加工,而减少零件的装夹、运输和机器重调的时间。

**自动适应不同加工顺序和生产节拍的功能** FMS能按照不同的加工顺序,以不同的运输路线,按不同的生产节拍同时加工不同的产品零件。

**高效率自动加工和自动换刀的功能** 以最大限度地减少切削时间和辅助时间,提高生产率。

**自动监测和自动诊断故障的功能。**

② FMS的组成:FMS由加工设备、物料搬运系统、计算机控制系统三部分组成。

##### A. 加工设备:

在FMS上大多采用可以自动换刀的加工中心和其它数控机床。这些机床一般都具有很高的精度和自动化程度,能在各个方向接近工件。

数控加工中心机床(简称加工中心)是一种具有自动换刀装置的复合型数控机床。由于有了自动换刀装置,它可将铣、镗、钻等多种加工功能结合起来,集中较多的工序对工件进行连续加工,因此大量节省了装夹工件的时间和大大提高了加工精度,特别适用于中小批量下对箱体类零件的加工,近年来发展很快。

根据自动换刀装置的结构和类型,加工中心有多种形式。图1-37所示为一种带有刀库、机械手及主轴直接换刀的加工中心。它的刀库为一转塔式的锥形刀盘,与机床立柱安装成一定的倾斜角,使所要更换的刀位轴线与机床主轴平行。

加工中心带的刀库有各种形式,如盘式、链式、转塔式和鼓式等,如图1-38所示。刀库储存刀具的数量称为刀库容量。一般转塔式刀库容量最小,只有6~8把刀具,适用于小型加工

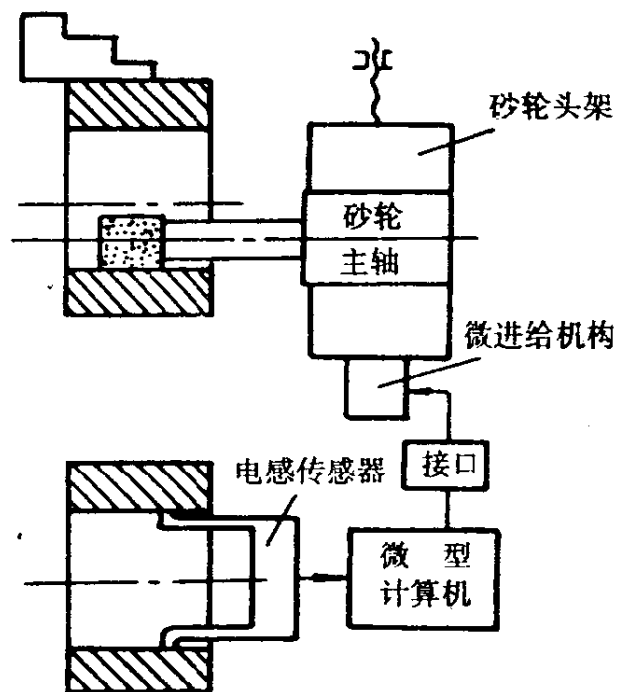


图 1-36 内圆磨床几何适应控制系统

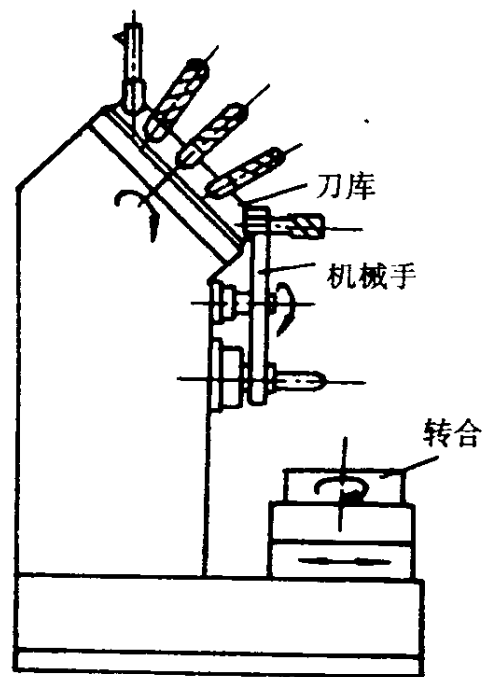


图 1-37 加工中心

中心。大型加工中心多采用链式刀库,其刀库容量可达40~80把刀具。

加工中心使用时先将所有刀具编码,连同刀夹插入刀库中。常用的刀具编码方式有编码环和编码钥匙等。图1-39(a)为一种带编码环的标准刀柄,其编码环共有9位,分成三组,采用2—10进制表示刀具的编号。如图1-39(b)的编码环表示刀具编号为425。

机床开动后,根据程序指令中指定的刀号将相应的刀具送到换刀位置,由换刀机械手进行换刀,卸下的刀具仍按刀号插入相应的刀座中。

图1-37所示加工中心换刀过程如下:

**抓刀** 机械手逆时针方向回转 $90^\circ$ ,其两端的手爪同时分别抓住刀库上的刀和主轴上已用过的刀。

**拔刀** 机械手沿主轴轴向同时将所抓的两把刀拔出。

**换刀** 机械手顺时针回转 $180^\circ$ ,两把刀交换位置。

**插刀** 机械手沿主轴轴向向里移动,将刀具插入主轴和刀库上的刀夹中。刀具在主轴内定位夹紧,插入刀库的刀也应被锁住,以防掉刀。

**复位:**机械手逆时针回转 $90^\circ$ ,回到水平原始位置。

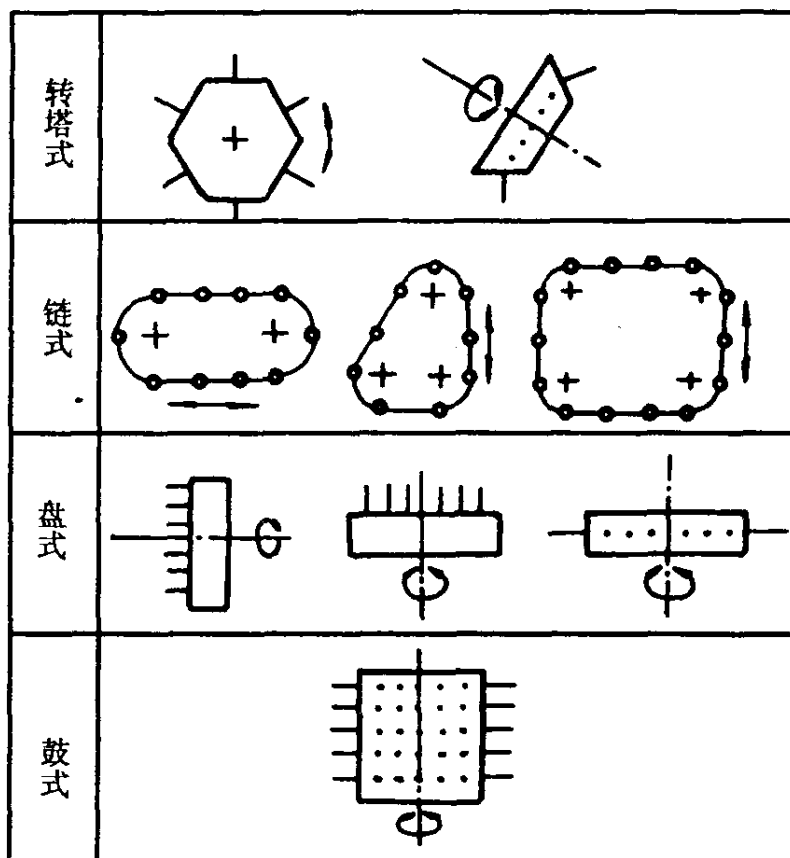


图1-38 刀库的类型

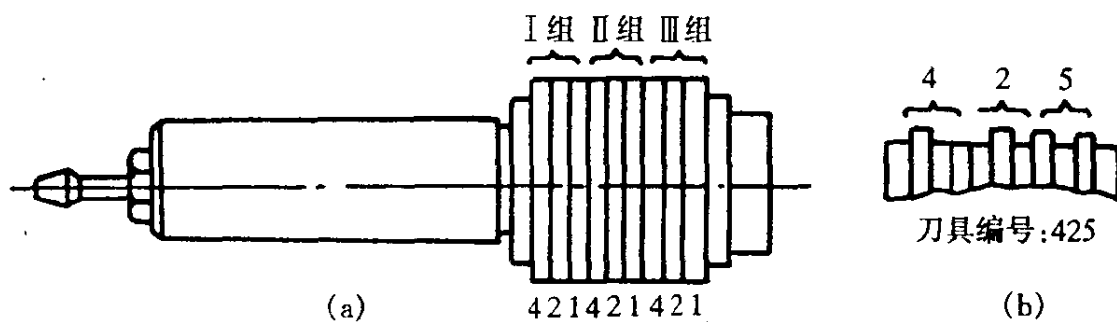


图1-39 带编码环的标准刀柄

(a)刀柄;(b)码环

这种加工中心,结构简单,使用灵活方便。

图1-40是另一种带有排链式刀库和双机械手的加工中心,各种刀具都存放在链式刀库内。工序转换、刀具和切削参数选择、各执行部件的运动都由程序控制,自动进行。换刀时间一般只有3~10s。“加工中心”可对工件各个表面连续完成铣、钻、镗、铰及攻丝等多种工序,而且各工序可按任意顺序安排。

为了进一步增加系统的柔性,现今又趋向于发展加工可能性更广的万能的数控机床,如自动更换主轴箱和自动更换刀库的数控机床,各种模块式数控机床等。由这些机床组成的FMS柔性更大,但运输装置和控制系统比较复杂。

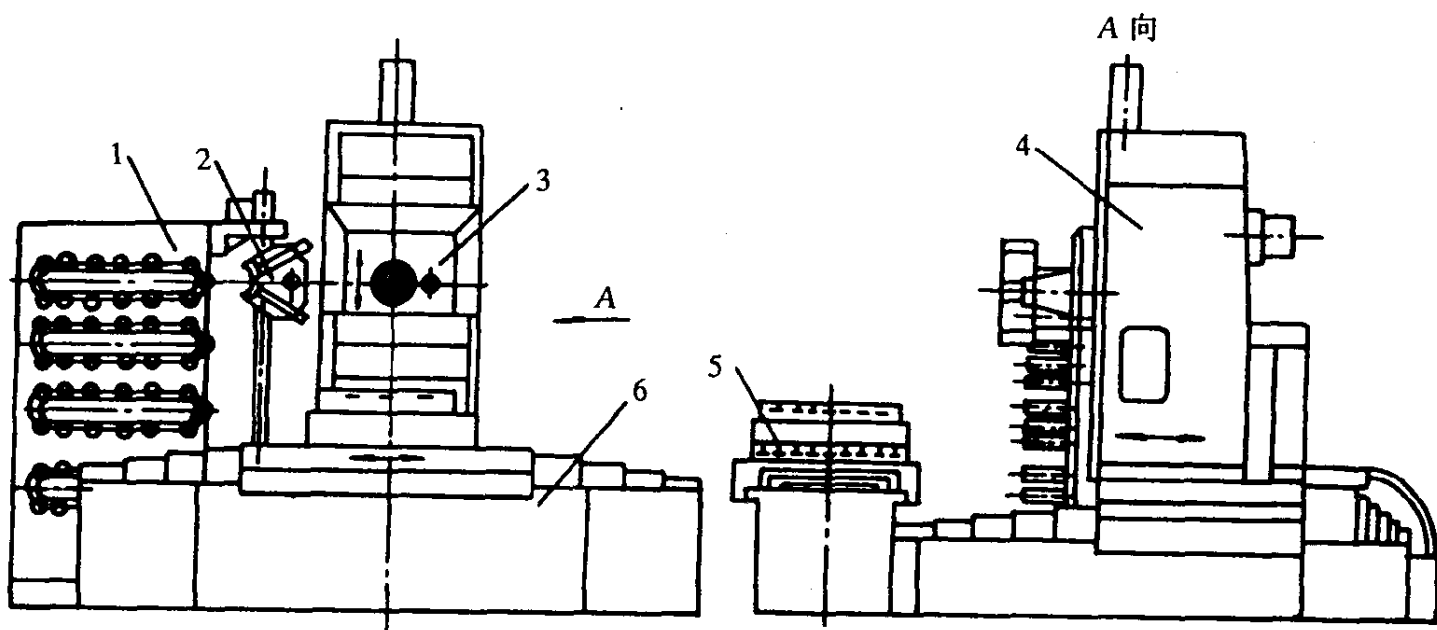


图 1-40 卧式“加工中心”结构示意图

1—刀库；2—换刀装置；3—主轴头；4—移动式立柱；5—工作台；6—床身

### B. 物料输送系统：

在 FMS 上,工件和随行夹具常常安装在一个托板上进行输送。托板的作用,一方面是便于运送和能在机床上按统一的方式定位和夹紧;另一方面也为了便于在自动仓库中存储和编码寻检,并在输送线上供数码读取器识别和选择。

托板是一个标准部件,在它的底面一般有定位块与 T 型槽或燕尾槽,供机床定位夹紧之用。在托板上表面上常加工出网格状的 T 型槽、螺孔及基准孔,供工件或随行夹具定位夹紧之用。托板连同夹具可存储在中间仓库内,使用时由自动小车根据给定的指令信息,自动地按编码把需要的夹具取出,送到装料工位上,进行工件的装夹,然后再由输送装置送到预定的机床上加工。

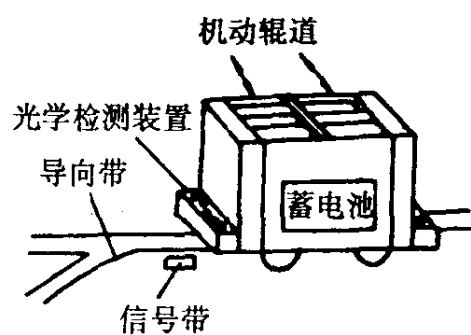


图 1-41 自动小车

运输用的自动小车可分为有轨和无轨两种。如图 1-41 所示的固定路线型的无轨自动小车用得很多。设置在地面上的制导导线,利用电磁或光学的原理自动导向,使小车能按加工路线要求作任意路线的行驶,并可方便地改变运输路线。

此外,如图 1-42 所示的工业机器人在柔性制造系统中常被用来进行工件装卸和机床间运输。工业机器人是一种可在远端独立进行生产作业的可编程操作机,它一般由操作系统、驱动系统和控制系统组成。操作系统又包括手部、腕部、臂部和机身等。有些机器人还有行进系统、感觉系统和人工智能系统,这种工业机器人具有较大的通用性和多种操作机能,能完成人能做的某些动作。工业机器人常常是 FMS 的重要组成部分,有时它可在制造单元中为两台、三台或更多的机床装卸工件,或者采用多台机器人组成一个物料搬运系统。

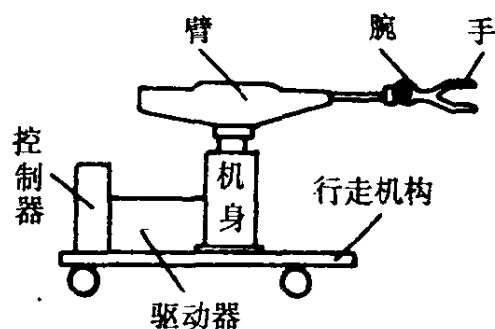


图 1-42 工业机器人

### C. 计算机控制系统：

计算机控制系统主要完成下列任务：



- 数控程序的存储和分配;
- 生产控制和管理;
- 运输物料的控制和管理;
- 刀具的监测和控制;
- 系统的性能监测和报告。

使用 FMS 时,人只要进行下列有限的工作,即可以使整个加工过程实现自动化:

- 向系统装卸工件;
- 更换和调整刀库中的刀具;
- 设备的保养和维护;
- 进行人机对话,输入必要的数据和程序。

### ③ 柔性制造系统类型和应用范围:

如前所述,柔性自动化的主要特征是:工序集中,没有固定的生产节拍,以及物料的非顺序输送等。按照制造系统的规模、柔性和其它特征,柔性自动化具有下述多种形式:

#### A. 独立制造岛(AMI):

独立制造岛是近年来出现的一种新形式。它是以成组技术为基础,由若干台数控机床和许多普通机床共同组成的制造系统,其特点是将生产设备、组织管理和制造过程结合在一起,并不过分强调物料流的自动化,而是将重点放在信息流的自动化上,借助软件来克服硬件的不足,由计算机进行工艺过程设计、作业计划编制、实行生产调度和质量管理等。厂部对独立岛仅是下达生产指令,一切生产活动全由岛内人员承担,形成一个独立的、封闭的生产系统。它充分发挥了人和计算机的潜力,把工艺设计、生产计划调度和制造过程三者有机地联成一体,以达到投资少、效益高、见效快的目的。独立制造岛的出现和发展促使了生产成本的进一步降低和产品质量的提高,比较容易实行。

#### B. 柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell — FMC):

这是由单台计算机控制的数控机床或加工中心、环形(圆形或椭圆形)托盘输送装置或工业机器人所组成,采用切削监视系统实现自动加工,不停机转换工件进行连续生产(图 1-43)。它是一个可变加工单元,是组成柔性制造系统的基本单元。

#### C. 柔性制造系统(FMS):

它是由两台或两台以上的数控机床或加工中心及工件上下料装置、自动运输装置等组成。它也可以由几个柔性加工单元组成。

图 1-44 所示为我国自己设计和制造的小型 FMS 系统。它由两个柔性制造单元、有轨输送车、托板、托板站及控制系统组成。由图可见,两台柔性制造单元布置在导轨的一侧,托板站

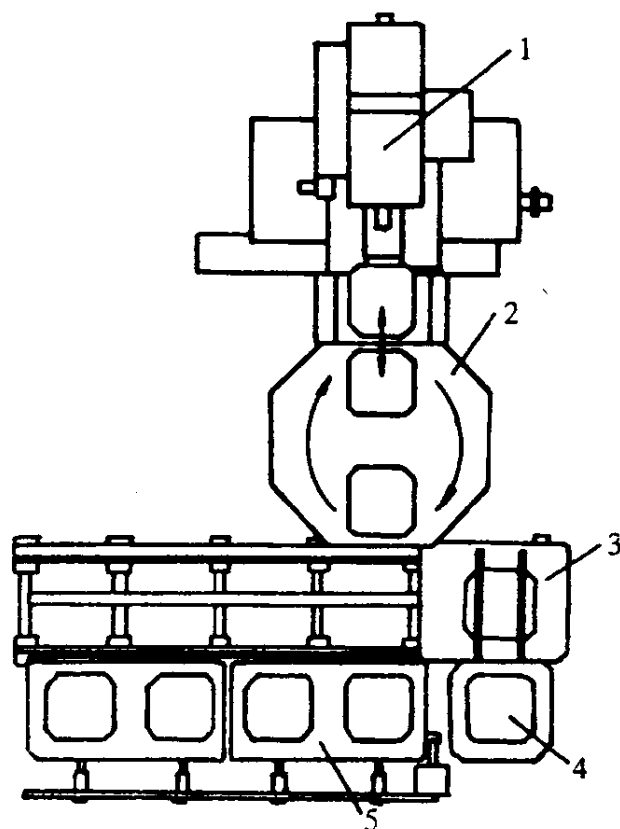


图 1-43 柔性加工单元

1—加工中心;2—自动托板更换器;3—台车  
4—托板;5—托板输送装置

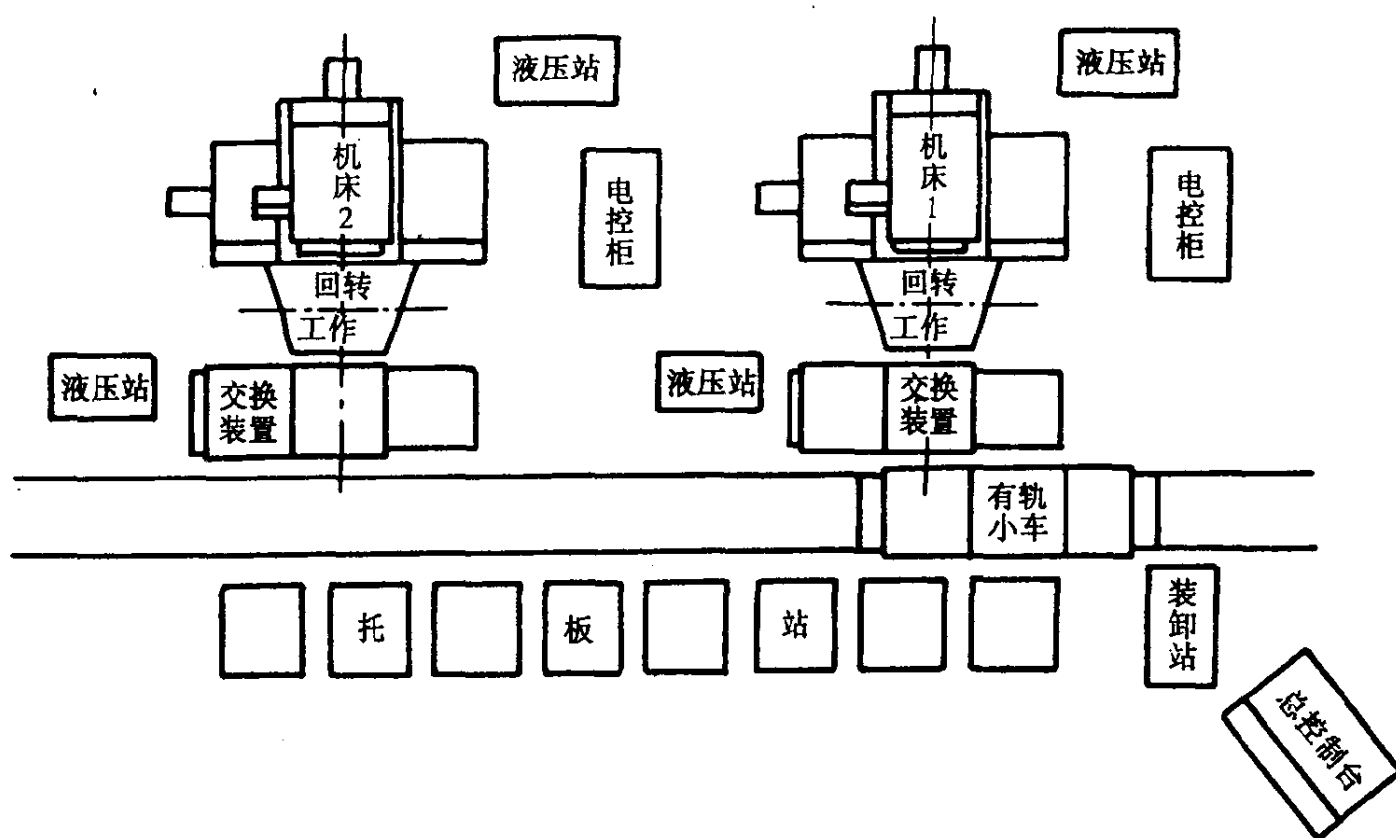


图 1-44 柔性制造系统

布置在另一侧,导轨的右端有中央控制台及装卸料工位。工件在装卸料托板站装入托板,托板由输送车送入单元的交换装置,再送上回转工作台。托板被识别后,调用相应的工件程序对工件进行加工。若机床正在加工,而交换装置的空位有待加工的托板,则输送车就将托板送入就近的空托板站,等待以后被调用。加工完成的托板,从交换装置取出,由输送车送入装卸料站,或送入就近的空托板站。系统就这样不停地工作,直至加工完全部工件。根据刀库容量、工件加工内容、机床程序号的容量情况,两台加工单元可以进行互相交替或互相补充加工。

构成制造单元的加工中心机床由若干模块如坐标移动模块、刀库及机械手模块、回转工作台模块及托板移动交换模块等组成。控制系统采用两级控制,机床为 CNC 控制,小车用 PC 控制,上一级用微机控制。该系统还可以通过图形模拟方式,在屏幕上显示整个系统的动态情况,并对部分控制命令的结果进行监视,若有错可通过屏幕显示出错信息,并阻止系统继续执行。

#### D 柔性制造生产线(Flexible Manufacturing Line — FML):

这是针对某种类型(族)零件的,带有专业化生产或成组化生产的特点。它由多台加工中心或数控机床组成,其中有些机床带有一定的专用性,全线机床按工件的工艺流程布局,可以有生产节拍,但它本质上是柔性的,是可变加工生产线,具有柔性制造系统的功能。

柔性制造系统的适应范围很广,如图1-45所示,图中柔性制造单元、柔性制造生产线都属于柔性制造系统的范畴,独立制造岛也属于柔性制造系统的范畴,它介于柔性制造单元与数控机床、通用机床适用范围之间(图中未注出)。柔性制造系统主要解决单件小批生产的自动化,把高柔性、高质量、高效率结合和统一起来,具有很强的生命力,是当前最有实效的生产手段,并逐渐向中大批多品种生产的自动化发展。

#### (5) 计算机集成制造系统:

计算机集成制造系统(CIMS)是在柔性制造技术、计算机技术、信息技术和系统科学的基

基础上,将制造工厂生产经营活动所需的各种自动化系统有机地集成起来,使生产系统形成一个从市场研究、产品设计、工艺计划、生产制造到销售经营的良性循环,以提高机械工厂的技术经济效益和市场竞争能力,并且能根据市场需求的变化,使多品种、中小批量产品的生产获得高效益、高柔性,成为具有智能的制造系统。30多年来,计算机技术已经渗透到制造企业的各个环节,如计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工艺规程设计(CAPP)、辅助制造(CAM)、辅助测试(CAT)、辅助质量控制(CAQC)、辅助生产管理(CAPM)、辅助材料搬运(CAMH)、辅助销售(CAS)等等。所以计算机集成制造系统是以信息为媒介,用计算机把企业活动中多种业务领域及其职能集成起来,追求整体高效益的现代化生产制造系统。一般说,CIMS是由四个功能分系统和两个支撑分系统组成,图1-46表示了六个分系统的框图及其与外部信息的联系。下面对此六个分系统做一简要介绍。

#### ① 四个功能分系统:

##### A. 管理信息系统:

它是以 MPR II 为核心,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、人力资源等管理信息功能,通过信息的集成,达到缩短产品生产周期、降低流动资金占用、提高企业应变能力的目的。

##### B. 产品设计与制造工程设计自动化系统:

它是用计算机来辅助产品设计、制造准备及产品性能测试等阶段的工作,即常说的 CAD/CAPP/CAM 系统,目的是使产品开发活动更高效、更优质、更自动地进行。

##### C. 制造自动化或柔性制造系统:

它是 CIMS 中信息流和物料流的结合点,是 CIMS 最终产生经营效益的聚集地,可以由数控机床、加工中心、清洗机、测量机、运输小车、立体仓库、多级分布式控制(管理)计算机等设备及相关支持软件组成。根据产品的工程技术信息、车间层的加工指令,完成对零件毛坯加工的作业调度及制造,使产品制造活动优化、周期短、成本低、柔性高。

##### D. 质量保证系统:

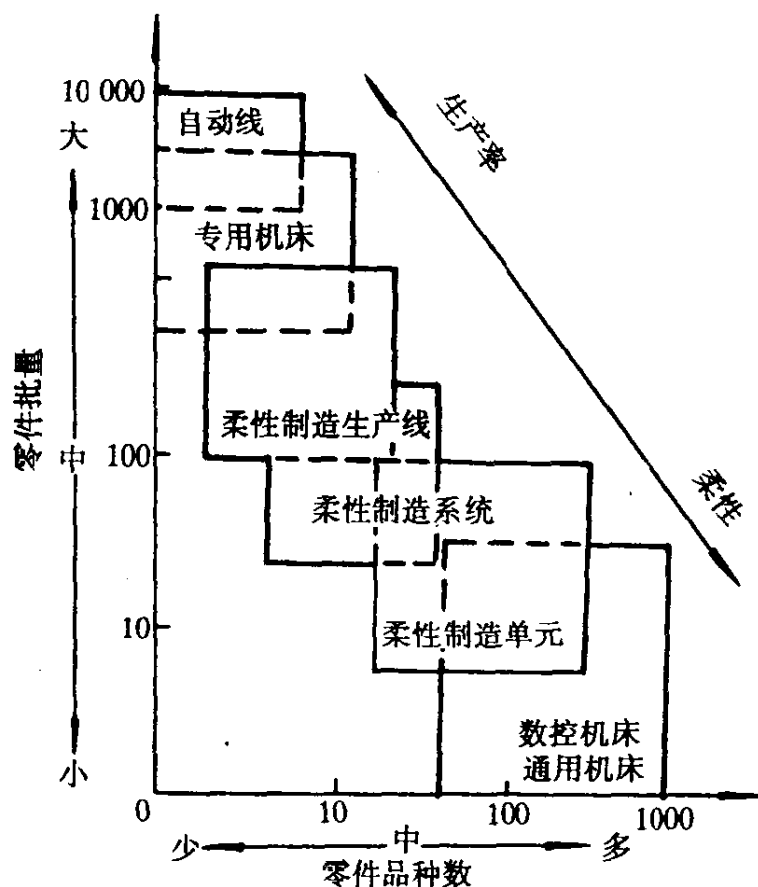


图 1-45 柔性制造系统的适应范围

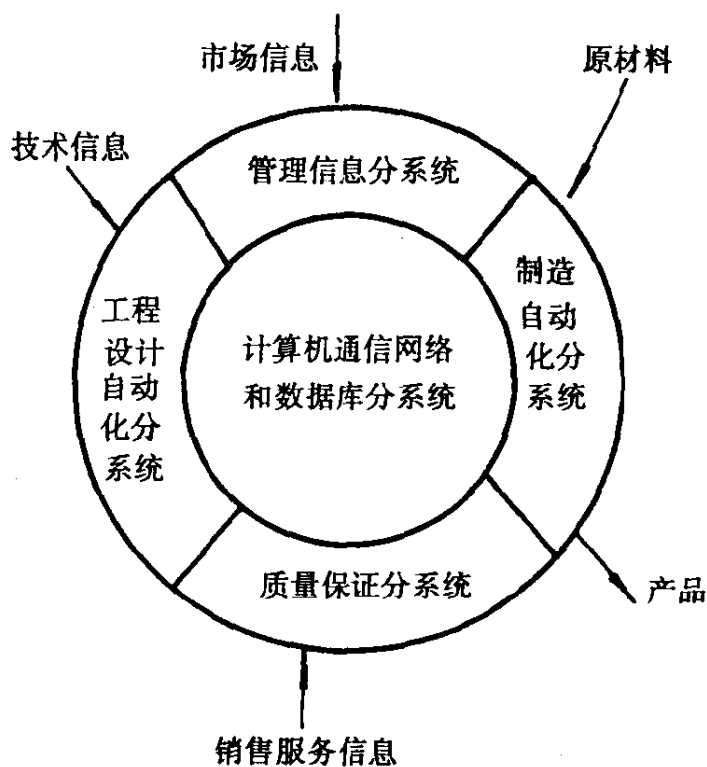


图 1-46 CIMS 组成框图

包括质量决策、质量检测与数据采集、质量评价、控制与跟踪等功能。系统保证从产品设计、制造、检验到售后服务的整个过程,以达到产品的高质量、低成本、提高企业的竞争力的目的。

② 两个支撑分系统:

A. 计算机网络分系统:

它是支持 CIMS 各个分系统的开放型网络通信系统。采用国际标准和工业标准规定的网络协议,可以实现异种机互联,异构局部网络及多种网络的互联。以分布为手段,满足各应用分系统对网络支持服务的不同需求,支持资源共享、分布处理、分布数据库、分层递阶和实时控制。

B. 数据库分系统:

它是支持 CIMS 各分系统,覆盖企业全部信息的数据库系统,它在逻辑上是统一的,在物理上可以是分布的全局数据管理系统,以实现企业数据共享和信息集成。

下面重点说明一下其中几个分系统。

一是产品设计与制造工程设计自动化系统,它实质上是指在产品开发过程中(这里不包括制造、销售及售后服务等内容),引入计算机技术,从而使产品开发活动可以借助于计算机辅助系统更高效、更优质、更自动地进行。

产品开发活动包含了产品的概念设计、工程与结构分析、详细设计、工艺设计与数控编程。通常将它们划分为 CAD, CAPP, CAM 三大部分。

CAD 系统应该包括产品结构的设计、定型产品的变型设计及模块化结构的产品设计。计算机应用比较成功的有计算机绘图、有限元分析、计算机造型及图像显示、优化设计、动态分析与仿真、生成材料清单等 CAD 软件系统。

CAPP 系借助于计算机完成从产品设计转换为按此设计要求将原材料加工成产品所需要的一系列加工动作和对需求资源的描述。CAPP 系统可进行毛坯设计、加工方法选择、工序设计、工艺路线制定和工时定额计算等,其中工序设计又可包含装夹设备选择或设计,加工余量分配,切削用量选择以及机床、刀具和夹具的选择,必要的工序图生成等功能。

CAM 系统目前通常可进行刀具路径的规划、刀位文件的生成、刀具轨迹仿真以及 NC 代码的生成。

由于 CAD, CAPP, CAM 长期处于独立发展的状态,因此它们在各自的活动领域内发挥全部或部分功能。CIM 的出现与发展使得 CAD/CAPP/CAM 的集成化成为重要的性能指标,这意味着产品数据格式的标准化以及相互之间数据的可交换性与共享。基于产品模型的 CAD/CAPP/CAM 集成化系统将取代基于工程图纸的 CAD, CAPP, CAM 分离式系统。从信息集成的角度加深了对工艺设计的认识, CAPP 应是从产品设计数据到面向制造(或加工控制)的数据的转换过程,是工程设计自动化系统内部信息集成的关键环节。它是 CIMS 中设计信息与物料信息的“交汇点”,它与生产计划、车间控制有着紧密联系,是工程设计自动化系统与其它系统交换信息的主要信息源和信息处理核心。

二是 CIMS 计算网络系统,它是一种支撑技术,是信息集成的技术关键之一。计算机通信网络要提供系统互连和信息互通的能力,通过通信网络将物理上分布的 CIMS 四个功能子系统的信息联系起来,达到共享目的。

在 CIMS 中,一般采用 MAP/TOP 联网技术(MAP 是制造自动化协议, TOP 是技术办公

协议)。

将各种网络互联起来,可以扩大网络范围。其中数据链路层的互联称之为信桥(Bridge),用以联接具有相同链路层协议的网络。网络层的互联称之为信由(Router),用以把几个子网联到一个公共点上,应用层的互联称之为信关(Gateway),用以解决不兼容网络之间的联接。图 1-47 是一个机械制造厂 CIMS 网络的模型。

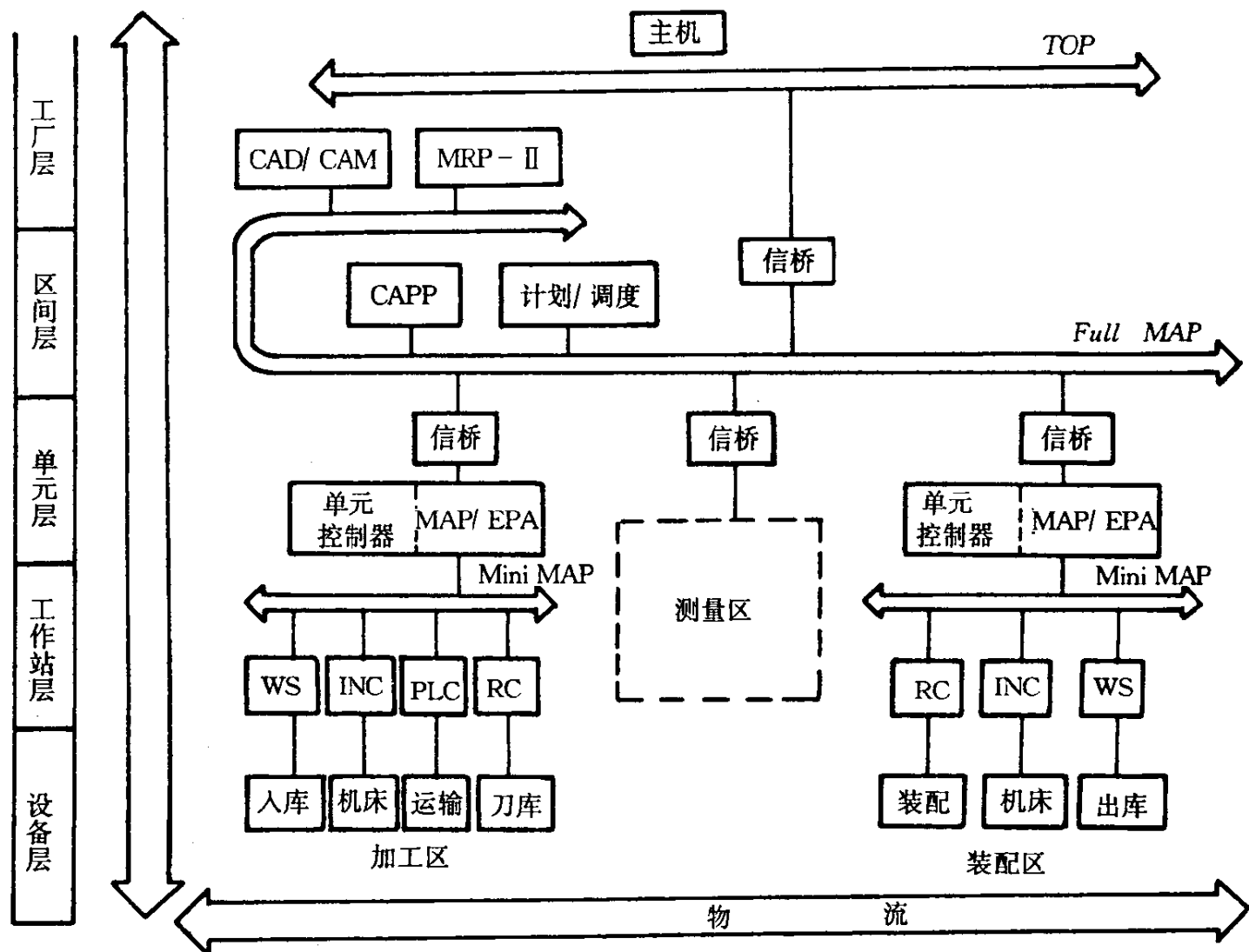


图 1-47 CIMS 一种网络结构

单元层以工艺流程为特征。例如可以分为设计加工单元、测量单元、装配单元等,由于零件品种的变化、工艺的改变,单元控制器可以重新组合。每个单元控制器可以控制若干个工作站控制器,如数字集成控制器(INC)、可编程逻辑控制器(PLC)、机器人控制器(RC)等。在单元层、工作站层和设备之间采用了 Mini MAP 网,具有实时性和经济性。

在区间层采用了 Full MAP 网,接受工厂层送来的设计信息、工艺信息、资源管理信息、决策信息等,进行较大范围的生产计划和高度信息的处理,进行全面质量管理和监控。Mini MAP 通过 MAP/EPA(是一种将应用层直接与链路层联结的方法)和信桥与 Full MAP 联网。

在工厂层,其工程设计和管理工作,如 CAD/CAM, CAPP, MRP-II 等,由于信息量大,应该挂在 Full MAP 网上。但工厂主计算机、办公自动化、销售定货等则由 TOP 联网,并通过信桥与 Full MAP 联接。

三是管理信息分系统,它以经营生产计划、主生产计划、物料需求计划、能力需求计划、车间作业计划、车间调度与控制为主体形成闭环的一体化生产经营与管理信息系统。它从制造资源出发,考虑了企业进行经营决策的战略层、中短期生产计划编制的战术层以及车间作业计

划与生产活动控制的操作层,其功能覆盖了市场销售、物料供应、各级生产计划与控制、财务管理、成本、库存和技术管理等部分的活动。经营与管理信息系统有下列特点:

- 它是一个一体化的系统,把企业中各个子系统有机地结合起来;
- 所有数据来源于企业的中央数据库(这里是指逻辑上的),各子系统在统一的数据环境下工作。

通常,经营与管理信息系统可由以下子系统组成:

经营决策子系统、综合统计分析子系统、计划管理子系统、办公自动化子系统、财务管理子系统、销售管理子系统、生产管理子系统、库存管理子系统、车间数据管理子系统、技术管理子系统、新产品开发子系统、物资供应子系统、设备管理子系统、能源管理子系统、人事劳资管理子系统、基建管理子系统、情报管理子系统、海外事务管理子系统等。

管理信息分系统是 CIMS 中的一个重要分系统,它与产品设计与制造工程设计自动化分系统、制造自动化分系统均有着密切的信息联系,可以说它是 CIMS 中的神经中枢,指挥与控制着各个部分有条不紊地工作。

## 第2章 机械加工工艺规程设计

### 2.1 基本概念

#### 2.1.1 工艺过程与生产过程

制造工艺是制造方法和制造工艺过程的总称,本书以研究制造工艺过程为核心。工艺过程是生产过程中的主要部分,生产过程是指将原材料转变为成品的全过程,对机械制造而言,该全过程包括下列过程:

- ① 原材料、半成品和成品(产品)的运输和保管。
- ② 生产和技术准备工作,如产品的开发和设计、工艺设计、专用工艺装备的设计和制造、各种生产资料的准备以及生产组织等方面的准备工作。
- ③ 毛坯制造,如铸造、锻造、冲压和焊接等。
- ④ 零件的机械加工、热处理和其它表面处理。
- ⑤ 部件和产品的装配、调整、检验、试验、油漆和包装等。

在上述制造过程中,改变生产对象的形状、尺寸、相对位置和性质等,使其成为成品或半成品的过程称为工艺过程,工艺过程可具体分为铸造、锻造、冲压、焊接、机械加工、热处理、电镀、装配等工艺过程,其中由原材料经浇铸、锻造、冲压或焊接成为铸件、锻件、冲压件或焊接件的过程分别称为铸造、锻造、冲压或焊接工艺过程;机械加工工艺过程是利用机械加工方法使铸、锻件或型材毛坯逐步改变形状和尺寸及表面质量使其最终成为合格零件的过程(此外利用滚压、喷丸处理等强化工艺的机械加工以改变材料性能的过程也属此过程)。装配工艺过程是把零件、外购件、标准件装配成组件、部件和机器的过程。动力机械和设备制造工艺学主要是研究动力机械的加工工艺过程和装配工艺过程以及设备的焊接等工艺过程的一门科学。

零件的机械加工工艺过程一般是由若干个按一定顺序排列的工序所组成的。也就是说工序是工艺过程的基本组成部分,毛坯依次通过多个工序变为成品。而工序本身又可细分为安装、工位、工步和走刀,它们的概念与相互关系如下:

#### 1. 工序

一个工人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。所谓连续是指该工件在加工过程中未更换工作地,并在该工作地未更换工件。

对于同一工件,由于加工方法不同,其工序道数也不同。例如图 2-1 所示小轴,若在普通车床上先加工一个端面 and 中心孔,然后调头加工另一端面和中心孔,最后车外圆,则为一道工序。若先在中心孔机床上加工两端面及其中心孔,然后在普通车床上加工外圆,则为两道工序。若在同一机床上先加工一批小轴的一个端面 and 中心孔,然后再依次加工另一端面及其中



心孔,最后加工一批外圆,则为三道工序。

### 2. 安装

它是指工件在一次装夹中所完成的那部分工序。图2-1中小轴若先车 $a, b$ 两段外圆,然后调头车 $c$ 段外圆,则此工序包括两次安装。

### 3. 工位

在一次安装所对应的那部分工序之中,工件与夹具或设备的可动部分一起相对于刀具或设备的固定部分所占据的每一位置,称为工位。图2-2为三轴四工位回转工作台的组合机床的加工示意图。四个工位的工作依次是装(卸)、钻孔、扩孔、精铰,有三个工件同时在加工。

### 4. 工步

这是指加工表面、刀具和切削用量(仅指转速和走刀量)均不变时所完成的那部分工序。只要其中的一个因素改变,就成为一个新工步。

如图2-1中的小轴,若用一把刀具以同样的切削条件依次加工 $b, c$ 段外圆时,由于加工表面不同,故构成两个工步。

### 5. 走刀

在一个工步内,若被加工表面需切去的金属层很厚,就可以分 $n$ 次切削,每切削一次的工作行程叫一次走刀,如图2-3中,在加工 $c$ 段的第二个工步中,因所需切去的金属很厚,需分两次切削,则每一次切削就是一次走刀。

## 2.1.2 工艺规程

规定产品或零部件制造工艺过程和操作方法的工艺文件称为工艺规程。

工艺规程是指导生产的主要技术文件。按照工艺规程进行生产,有利于保证产品质量、生产效率和经济效益。工艺规程也是生产、组织和管理工作的基本依据,因为在生产管理中,产品投产前原材料及毛坯的供应,通用工艺装备的准备,机床负荷的调整,专用工艺装备的设计和制造,作业计划的编排,劳动力的组织以及生产成本的核算等都是工艺规程作为基本依据的。工艺规程同时也是新建或扩建工厂、车间的基本资料,因为在新建或扩建工厂、车间时,只有根据工艺规程和生产纲领才能正确确定生产所需的机床和其他设备的种类、规格和数量,车间的面积,机床的排列布置,生产工人的工种、等级和数量以及辅助部门的安排等等。

工艺规程的种类很多、格式不一,有装配工艺规程,有机械加工工艺规程等等。在机械加工工艺规程中最常用的有两种:

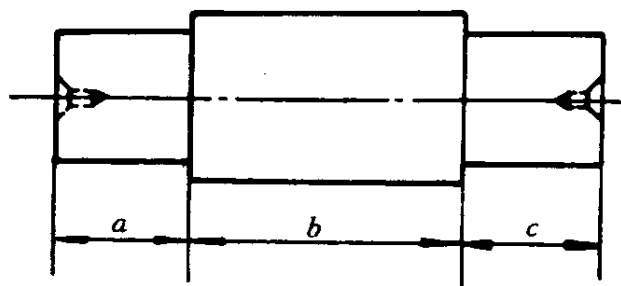


图 2-1 小轴的结构

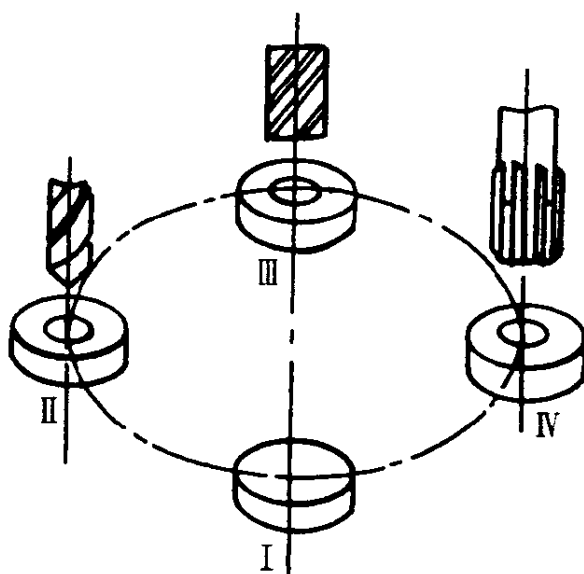


图 2-2 多工位加工

工位 I—装卸工件;工位 II—钻孔;  
工位 III—扩孔;工位 IV—铰孔

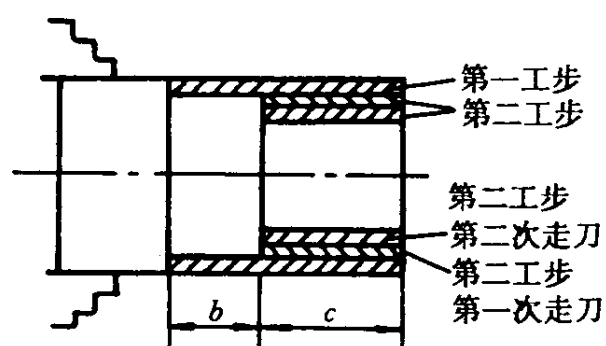


图 2-3 工步与走刀

① 零件的机械加工工艺过程卡,该卡片是针对每个零件单独编写的,它列出了零件在整个加工过程中的加工方法、工艺路线、所经历的车间、各工序所用的工艺装备和时间定额等,它是进行生产技术准备和编制计划的依据。

② 零件的机械加工工序卡片,它是在工艺过程卡的基础上针对每道工序所编制的,一般具有工序简图(图上应标明定位基准、工序尺寸及公差、表面粗糙度、用粗实线表示的加工部位等),并详细说明该工序中每个工步的加工内容(细分到走刀)、工艺参数、操作要求以及所用设备和工艺装备等,工序卡片用于大批或大量生产中的所有零件、中批生产的关键件以及单件小批生产中的关键工序。

对工艺规程的基本要求是应具有:① 技术上的先进性,即在工艺规程中尽量采用适用于本行业的先进工艺和工艺装备;② 经济上的合理性,即通过核算和对比在保证工件技术要求的条件下选择经济上最合理的工艺方案,使人、物和能源的消耗最低;③ 使用上的安全性,即在工艺方案中注意采用机械化、自动化措施,以保证工人具有良好而又安全的劳动条件。

### 2.1.3 基准

在工件的机械加工过程中或在编制工艺规程中常需按不同的要求选择相应的工艺基准。例如在切削加工时为了确定工件在机床上装夹的位置,首先要对工件的定位基准进行正确选择,这些基准选择的正确与否是影响工件表面之间相互位置精度的重要因素,因此首先要对基准有个全面的概念。

基准是用来确定生产对象上几何要素间的几何关系所依据的那些点、线、面。基准按用途不同可分为设计基准与工艺基准。

#### 1. 设计基准

设计基准是设计图样上所采用的基准,即标注设计尺寸的起端的点、线、面。它是被用来标定设计尺寸的终端的点、线、面的位置用的,也就是说,设计基准是零件图上用来确定与该起端的点、线、面有相互关系的其它点、线、面位置的,是设计者根据产品的工作原理和性能要求来确定的。如图 2-4 中以曲柄销的对称线  $O-O$  作为确定曲轴的轴向尺寸的设计基准线。

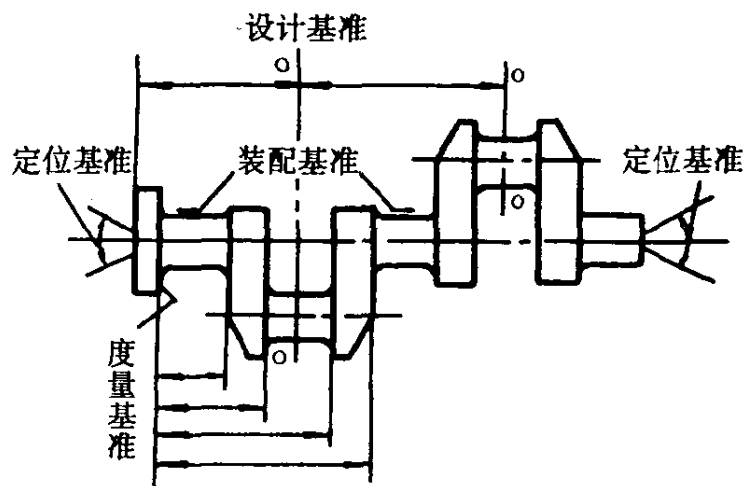


图 2-4 曲轴上的各种基准

#### 2. 工艺基准

工艺基准是在工艺过程中所采用的基准,按用途不同又可细分为工序基准、定位基准、测量基准、装配基准。

##### (1) 工序基准:

工序基准是在工序图上用来确定本工序被加工表面加工后的尺寸、形状、位置的基准,它是该工序所要求达到的加工尺寸(即工序尺寸)的起端的点、线、面。图 2-5 所示为钻孔工艺简图,(a)和(b)是被加工孔的工序基准的两种不同方案,工序基准不同,则工序尺寸也不相同。

##### (2) 定位基准:

定位基准是在加工中工件上用来在机床上定位的基准。它是该工序能直接达到的加工尺寸的起端的点(线、面),例如轴类零件的顶尖孔(见图 2-4)就是用来作为该轴的车、磨工序的

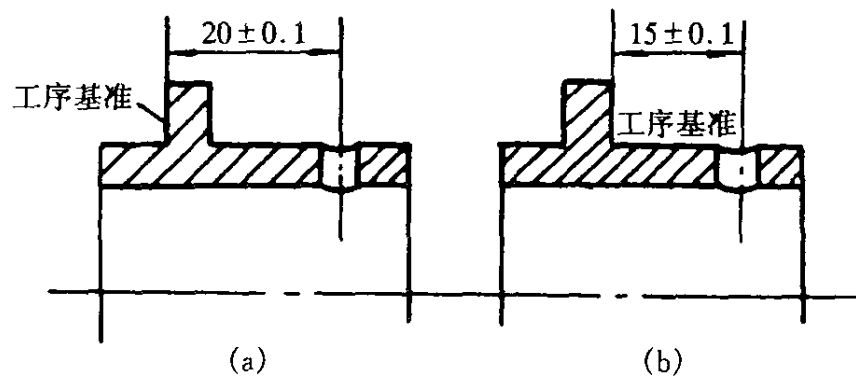


图 2-5 钻孔的不同工序基准

定位基准。图 2-6 是加工筒形活塞的先后两个工序各自不同的定位基准的情况。图 2-6(a) 是加工底端面 E 及内止口 F 的工序, 毛坯内圆 A 及内端面 B 是定位基准。图 2-6(b) 是加工上端面 C 和外圆 D 及环槽 G 的工序, E 及 F 是其定位基准。

由此可见, 作为定位基准的表面有时是经过加工的面, 这样的面称为精基准(如图中 E, F 面), 有时却是没有经过加工的面, 没有经过加工的面称为粗基准(毛基准), 如图 2-6(a) 中的 A, B 面。

### (3) 测量基准:

测量时所采用的基准即测量基准, 图 2-7 (a) 和 (b) 为检验已加工平面的位置所采用的两种不同的测量基准方案的示意图。图 2-8(a) 和 (b) 为检验已加工孔的位置的两种不同的测量基准。

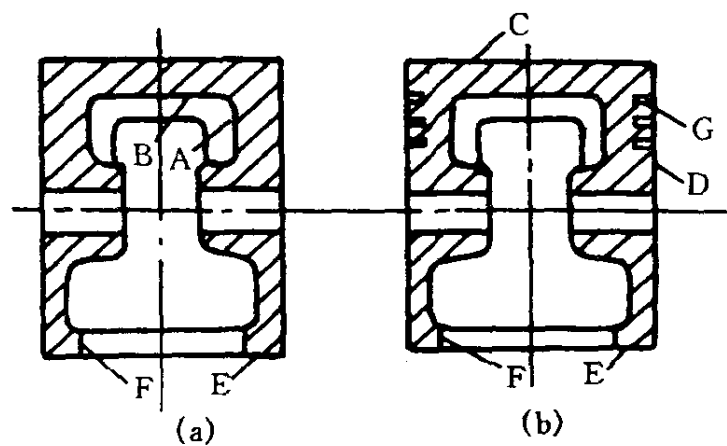


图 2-6 活塞的加工

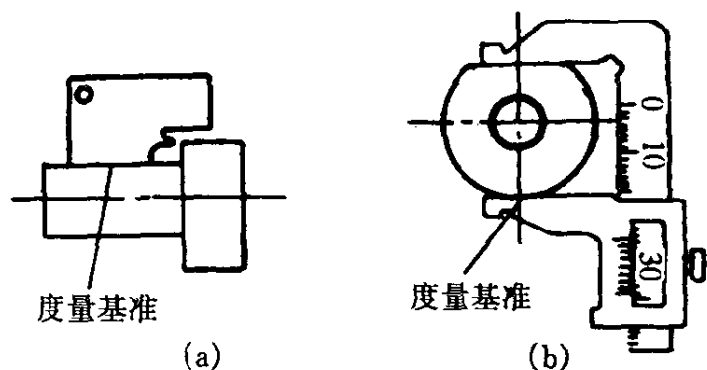


图 2-7 测量基准

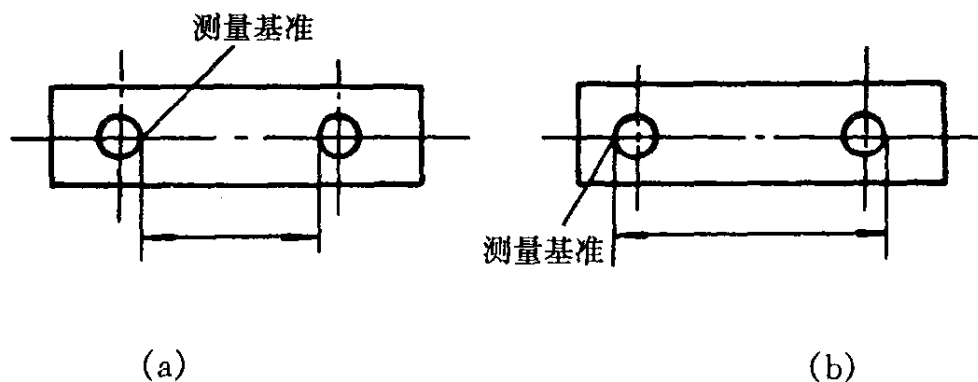


图 2-8 测量基准

### (4) 装配基准:

装配基准是装配时用来确定零件或部件在产品中的相对位置所采用的基准。例如在图 2-4 中, 曲轴装进曲轴箱中是以主轴颈与主轴孔接触来确定曲轴相对于曲轴箱的径向位置的, 故主轴颈是曲轴的径向装配基准。

设计基准、工序基准、定位基准、测量基准以及装配基准, 可以重合也可以不重合。在选择

基准时应尽可能使它们重合,这样可避免不重合所引起的有关误差。

## 2.2 机械加工精度

### 2.2.1 机械加工精度与获得加工精度的方法

#### 1. 机械加工精度的概念

零件的加工质量(技术条件)是整台机器质量的基础。机械加工精度是加工质量的一个重要部分,后者包括加工精度和表面层质量两大部分。

机械加工精度的概念是指零件加工以后的实际几何参数(尺寸、几何形状和位置)与理想零件的几何参数的相符合程度。符合程度越高,则加工精度越高,反之,则加工精度越低。加工精度包括尺寸精度、形状精度与位置精度三个方面。

#### 2. 获得机械加工精度的方法

在机械加工中,根据生产批量和生产条件的不同,可采用如下一些获得机械加工精度的方法。

##### (1) 获得尺寸精度的方法:

在机械加工中,获得尺寸精度的方法主要有如下几种。

##### ① 试切法:

它是获得零件尺寸精度最早采用的加工方法,同时也是目前常用的能获得高精度尺寸的主要方法之一。所谓试切法,即是在零件加工过程中不断对已加工表面的尺寸进行测量,并相应调整刀具相对工件加工表面的位置,进行试切,直到达到尺寸精度要求的一种加工方法。零件上轴颈尺寸的试切车削加工、轴颈尺寸的在线测量磨削、箱体零件孔系的试镗加工及精密量块的手工精研等,均属试切法加工。

##### ② 调整法:

它是在成批生产条件下采用的一种加工方法。所谓调整法,即是按试切好的工件、标准件或对刀块、行程档块等调整确定刀具相对零件定位基准的准确位置,并在保持此准确位置不变的条件下,对一批零件进行加工的方法。如在多刀车床或六角自动车床上加工轴类零件,在铣床上铣槽,在无芯磨床上磨削外圆及在摇臂钻床上按照钻模板加工孔系等,均属调整法加工。

##### ③ 定尺寸刀具法:

即是在加工过程中采用具有一定尺寸的刀具或组合刀具,以保证被加工零件尺寸精度的一种方法。如用方形拉刀拉方孔,用钻头、扩孔钻、铰刀或镗刀块加工内孔,以及用组合铣刀铣工件两侧面和槽面等,均属定尺寸刀具法加工。这种方法的尺寸精度主要由刀具来保证。

##### ④ 自动控制法:

即在加工过程中,通过由尺寸测量装置、动力进给装置和控制机构等组成的自动控制系统,使加工过程中的尺寸测量、刀具的补偿调整和切削加工等一系列工作自动完成,从而自动获得所要求尺寸精度的一种加工方法。如在数控机床上,通过数控装置、测量装置及伺服驱动机构,控制刀具在加工时应具有的准确位置,从而保证工件的尺寸精度,就属于自动控制法加工。

##### (2) 获得形状精度的方法:

## ① 轨迹法:

让刀具相对于工件作有规律的运动,以其刀尖轨迹获得所要求的表面几何形状,如图 2-9 所示。车圆锥面,以及常见的圆柱面、平面、螺旋面、球面等均可用此种成形运动轨迹法获得,表面几何形状精度取决于成形运动的精度。

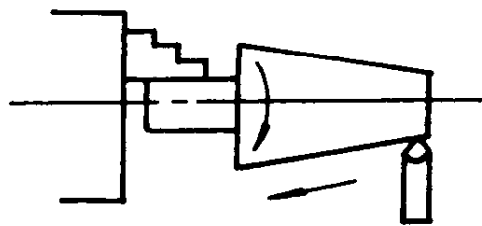


图 2-9 轨迹法

## ② 成型法:

用成型刀取代普通刀具,成型刀的切削刃就是工件外形。这种方法可以简化机床,提高生产率。如图 2-10 车球面用成形车刀加工出,此外用拉刀,用宽砂轮横进给磨削,用成形刀车螺纹表面等均是成型法的实例,其精度既取决于成型运动的精度,也取决于刀刃的形状精度。

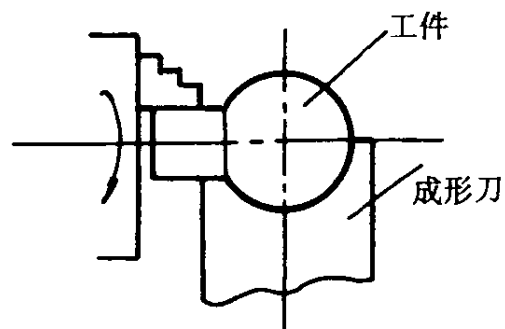


图 2-10 成型法

## ③ 包络法:

这种方法用于各种齿轮齿廓、花键键齿、蜗轮轮齿的加工。其特点是刀刃的形状与所需表面几何形状不同,例如齿轮加工中,刀刃为直线(滚刀、齿条刀),而加工表面为渐开线。此时用这种展成法形成的渐开线是滚刀与工件按严格速比转动时,刀刃的一系列切削位置的包络线,如图 2-11 所示。也即用展成法,刀具相对工件做展成啮合的成形运动,其加工后的几何形面是刀刃在成形运动中的包络面。其形状精度既取决于展成运动的精度,也取决于刀刃的形状精度。

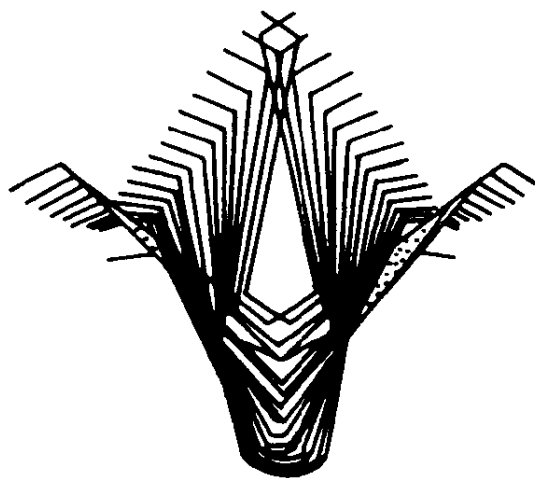


图 2-11 包络法

## (3) 获得位置精度的方法:

在机械加工中,获得位置精度的方法根据零件加工的整个过程是在一次装夹还是多次装夹下完成而有所区别:

## ① 一次装夹法:

即零件所加工出的各有关表面间的位置精度是直接在工作的一次安装中,由各有关刀具相对工件的成形运动之间的位置关系保证的。如轴类零件外圆与端面、端台的垂直度,箱体孔系加工各孔之间的同轴度、平行度和垂直度等,往往可采用一次装夹法获得保证。显然,一次装夹法所加工的各表面间的位置精度是由机床本身的运动精度来保证的。

## ② 多次装夹法:

即零件上全部加工面是分在多次装夹下定成的,此时零件上所加工出的各表面间的位置精度不仅和刀具相对工件的成形运动的精度有关还和工件上各不同定位基准面(后者往往是前几次安装时的加工面)之间的位置精度有关。例如轴类零件上键槽对外圆表面的对称度、箱体的平面与平面之间的平行度、垂直度,箱体孔与平面的平行度和垂直度等往往采用多次装夹法加工来保证。此时,由于在多次装夹法中,各次装夹所采用的定位基面往往不尽相同,故这些定位基面之间的位置精度也影响了多次装夹下所加工出的所有表面之间的位置精度。

## 2.2.2 影响加工精度的原始误差

实践证明,不可能将零件加工得绝对准确。零件加工后的实际几何参数对理想几何参数,

总会有所偏差,这种偏差即为加工误差。所以,加工误差就是与理想状态尺寸的不符合程度。只要零件的加工误差不超过设计要求的公差标准所规定的偏差,就是保证了加工精度。所以,保证和提高加工精度问题,就是限制和减少加工误差的问题。加工误差是加工精度的度量标准。

机械加工中,由机床、刀具、夹具和工件所组成的统一体,称为工艺系统。产生加工误差是由于工艺系统中存在很多误差因素在起作用,这些误差因素称为原始误差。由原始误差引起加工表面在加工尺寸方向产生的实际误差称加工误差,当原始误差的方向与加工表面法向方向相同时,引起的加工误差才最大,而一般讲加工误差与原始误差有关,但不一定相等,故原始误差是一种误差因素,它可区分为几何因素和物理因素,也可区分为动误差、静误差。总的讲,影响加工精度的原始误差主要有下列八项:

### 1. 原理误差

原理误差是由于采用了近似的加工运动方式或者近似的刀具轮廓而产生的工件误差。例如要车削带有几位小数的螺纹螺距的工件,而床头齿轮箱的挂轮齿轮有限,传动比达不到准确的要求,只能近似达到。这种由于近似的运动方式产生的工件误差叫“原理误差”。又如,采用仿型法铣切齿轮时,由于每种模数不同齿数的齿轮只用一套(8, 15 或 26 把)同一模数铣刀来加工,其中每把刀分别各管一定齿数范围的工件组的加工,而每把刀是按该组中最少齿数的工件的截形设计的。故加工该组中其它齿数的工件时就产生了误差,这种由于采用近似的刀具轮廓而引起的误差,也叫原理误差。

再如用成形铣刀或滚刀加工螺杆转子或齿轮时,由于刀具刀刃数有限,因而所切出之齿形实际上是由许多折线组成的,而不是光滑的理论型线,相比之下就有误差,这也属于一种近似加工方法的原理误差,如图 2-12 所示。

原理误差可以用分析法或作图法确定。

当包含原理误差在内的加工误差总和不超过图纸规定的公差时,就可采用上述近似的加工方法,因为它往往比采用精确的理论加工方法简易。

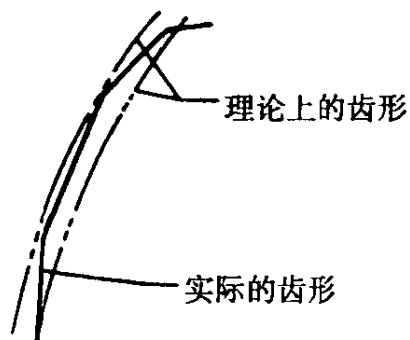


图 2-12 齿轮齿形误差

### 2. 工艺系统的几何误差

#### (1) 机床的制造误差与磨损:

机床影响加工精度的主要因素是主轴的回转精度、导轨的直线度、前后导轨的平行度以及主轴与导轨间的位置精度,由于机床上述因素的制造误差或磨损,使加工的工件产生误差。

##### ① 主轴回转精度:

主轴回转精度通常反映在主轴径向跳动和轴向窜动。

##### A. 径向跳动:

主轴的径向跳动会使工件产生圆度误差,尤其是在用坐标镗床、精密磨床等机床精加工时,要求机床主轴有较高的回转精度。

在用滑动轴承的机床结构中,主轴是以轴颈在轴套内旋转的,对于车床类机床由于主轴受力方向不变(因切削力方向不变),切削力使主轴轴颈在加工过程中始终被压在轴承孔的某个固定点  $M$  上,这样,主轴轴颈的圆度误差将传给工件,使工件产生圆度误差(图 2-13(a))而轴承孔的形状误差对工件圆度影响不大。

镗床上镗孔时,由于刀具是装在旋转的主轴上,所以切削力的方向随镗刀一同旋转,主轴轴颈上的一条母线依次与轴承孔的各条母线接触,所以轴承孔的形状误差将反映到工件上,而工件孔的误差与主轴轴颈的形状误差关系不大,(见图 2-13(b))。

在用滚动轴承的机床结构中,主轴的回转精度不但和滚动轴承的外圈内滚道的圆度(对镗床)或内圈外滚道的圆度(对车床)有关,而且还和与滚动轴承相配合的箱体孔圆度(对镗床)或主轴的轴颈的圆度(对车床)等有关。

一般车床主轴的径向跳动控制在 0.01~0.015mm,精密丝杆车床为 0.003mm。

B. 轴向窜动:

车床的主轴是以其轴肩靠在床头箱轴孔的套筒端面上进行旋转的,主轴的轴向窜动只发生在轴肩和套筒端面都不垂直于主轴旋转轴线的情况下,而且窜动量的大小只取决于其中垂直度误差较小的那一个端面。主轴轴向窜动对外圆加工无影响,但加工端面会引起端面不平和使端面与圆柱面的垂直度产生误差(图 2-14),对于螺纹车削加工,则造成螺距的小周期误差,普通车床规定主轴的轴向窜动不大于 0.01mm。

② 导轨的直线度:

以车床和外圆磨床加工圆柱面为例,机床导轨在水平面内的直线度误差,使得刀具在纵向走刀过程中产生同样程度的位移  $\Delta Y$ ,而此位移刚好发生在被加工表面的法线方向(误差敏感方向),所以工件产生的半径误差  $\Delta R = \Delta Y$ ,使工件产生鼓形或鞍形加工误差(见图 2-15 和图 2-16)。

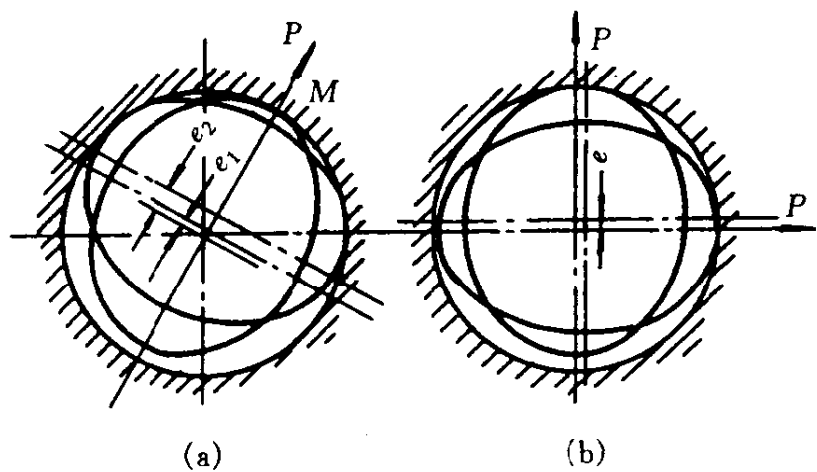


图 2-13 轴颈与轴孔圆度误差引起的径向跳动

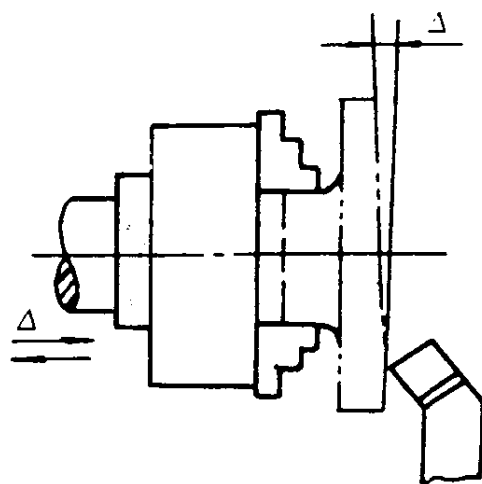


图 2-14 主轴轴向窜动对加工度的影响

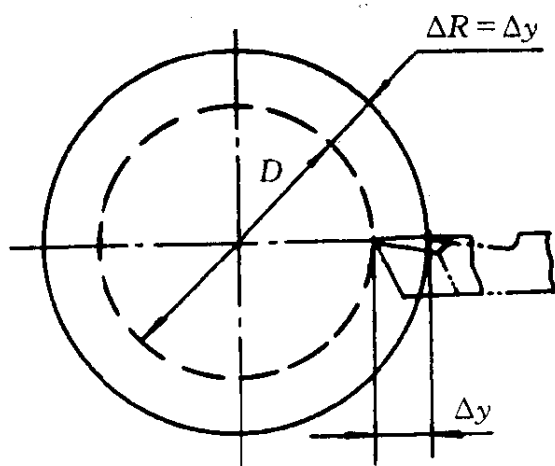


图 2-15 车床导轨在水平面内的直线度误差引起的加工误差

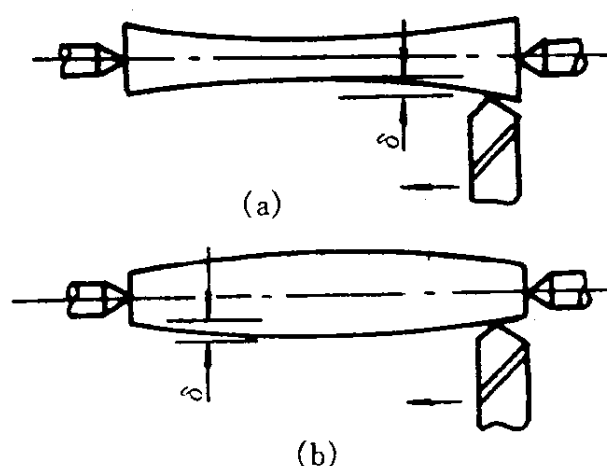


图 2-16 导轨弯曲产生的加工误差



导轨在垂直面内的直线度误差,使得刀尖在被加工表面的切线方向产生位移  $\Delta Z$ ,从而造成加工误差  $\Delta R = \frac{(\Delta Z)^2}{(D + \Delta R)} \approx \frac{(\Delta Z)^2}{D}$  (见图 2-17),其值甚小,可忽略不计。

### ③ 前后导轨的平行度:

若前后导轨不平行,则垂直于纵向走刀的任意截面内,前后导轨就有一扭曲量  $\Delta Z$  (见图 2-18) 则产生工件半径的变化量  $\Delta R$ ,

$$\Delta R \approx \Delta Y = \frac{H}{B} \Delta Z \quad (2-1)$$

一般车床  $H/B = 2/3$ ,外圆磨床  $H \approx B$ ,故  $\Delta Z$  引起的工件几何形状误差(鼓形或鞍形等)就不容忽视。

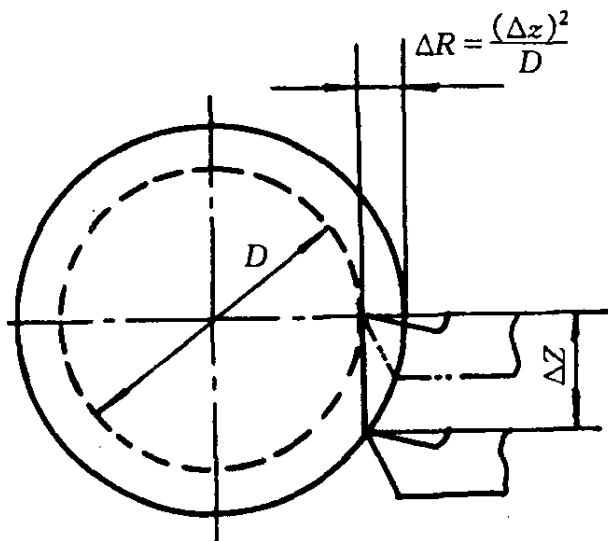


图 2-17 车床导轨在垂直面内的直线度误差引起的加工误差

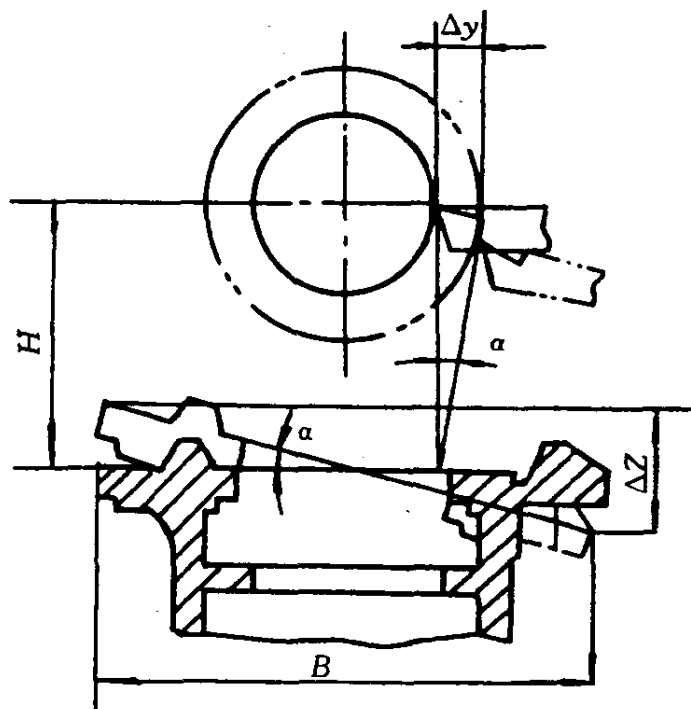


图 2-18 机床导轨的扭曲对加工误差的影响

### ④ 机床主轴与导轨间的位置精度:

当车削或磨削工件圆柱面时,如果车刀或砂轮的直线移动轨迹由导轨决定,而工件的轴线与机床主轴轴线一致,则导轨与主轴轴线在水平面的不平行将导致加工出的表面为圆锥表面,若导轨与工件轴线在垂直面上不平行,则加工出的表面为一旋转双曲面,形成圆柱度误差,但其值不大。故一般车床和磨床的前后顶尖在水平方向都应可以调整,而上下的等高则可以在一次装配好后不再调整。

镗床镗孔时,当工件直线进给运动与镗杆的回转轴不平行时(图 2-19),镗出的孔在垂直于进给方向的截面内为一椭圆,整个内孔将是一个椭圆柱面。

用立铣刀铣平面时,如果铣刀的回转轴线与工作台直线进给运动不垂直,工件表面就会呈凹形而产生平面度误差  $\Delta$ ,如图 2-20 所示。

### (2) 刀具的制造误差与磨损:

用定尺寸刀具如钻头、铰刀、丝锥、切槽刀等加工时,由于加工面的尺寸直接由刀具尺寸决定,故刀具的制造精度和磨损情况将直接影响工件的尺寸精度。

用成形刀具(如成形车刀、成形铣刀、成形砂轮等)加工时,刀具的几何形状直接决定被加工表面的形状,刀具刃口形状的制造精度及磨损情况将直接影响工件的形状精度。某些用包

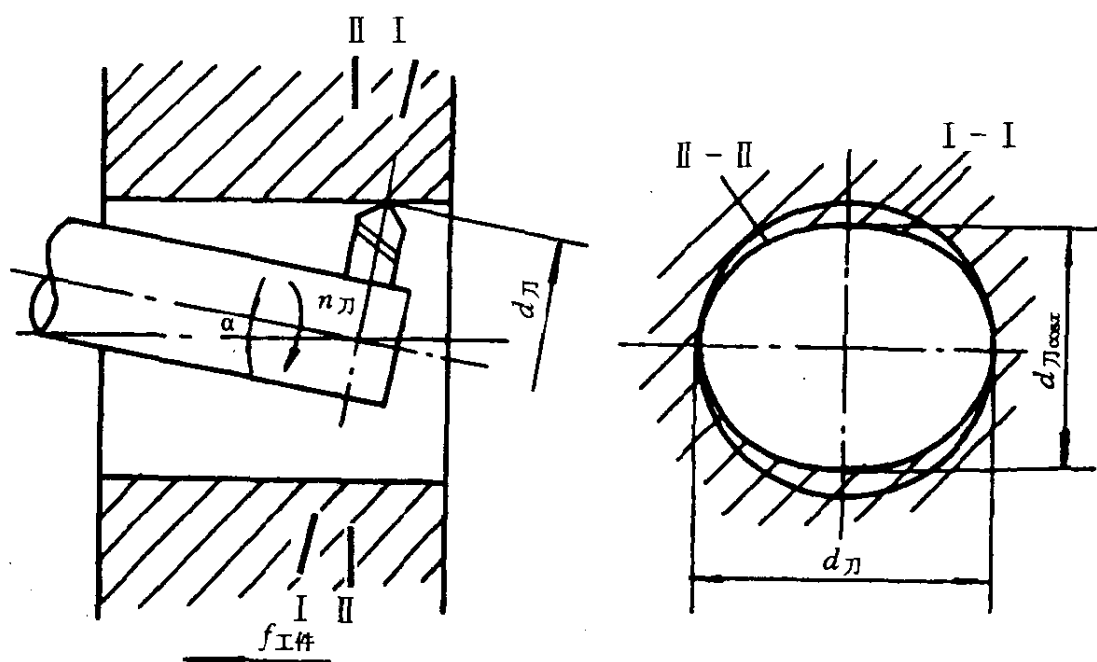


图 2-19 工件直线进给运动与砂轮回转轴线不平行所引起的工件形状误差

络法加工的刀具如齿轮滚刀等,虽然刀具形状与加工表面形状不完全相同,但两者有一定的关系,故仍会影响工件的形状精度。

对于某些刀具如普通车刀、镗刀等,加工尺寸精度常靠调整来保证,故刀具制造精度对加工精度基本上没有什么影响。

无论什么刀具,在切削过程中都不可避免地要磨损,使刀具尺寸变化,并由于切削刃变钝而使切削力增大,引起工艺系统弹性变形的增大,这些都会使工件尺寸发生变化。

刀具在加工表面法线方向的磨损是最重要的,因而主要是刀具后面的磨损影响加工精度。在切削过程中,应尽可能采用较大的进给量,既能保证生产率,又可减少刀具磨损。

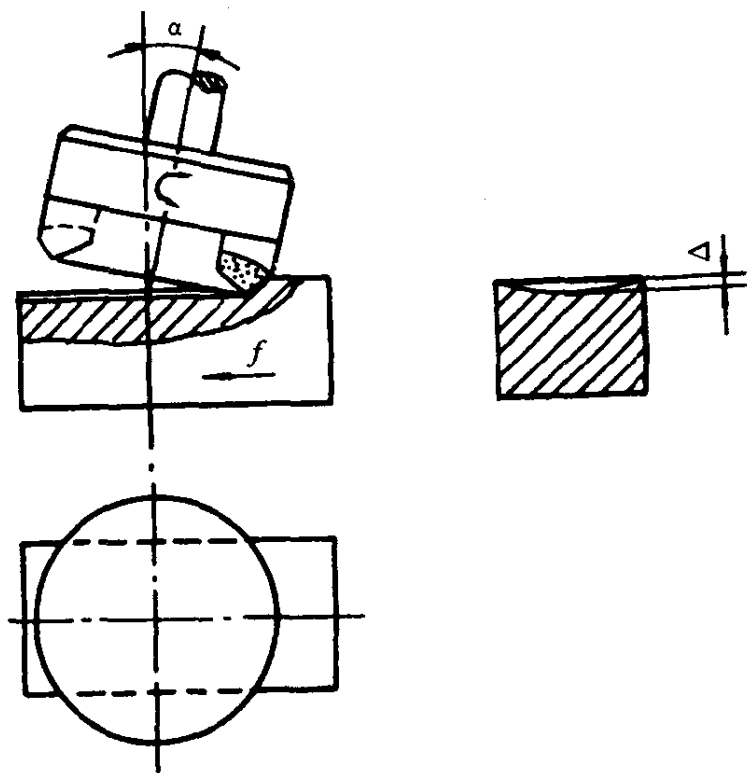


图 2-20 立铣刀倾斜后造成的误差

### (3) 夹具的制造误差与磨损:

夹具的制造误差与磨损也影响工件的加工精度。其中以定位元件和刀具导向件的制造误差与磨损影响较大。图 2-21 所示是用专用夹具在摇臂钻床上加工连杆螺栓孔的情况。支承钉 A, 短销 C 和钻套的尺寸及其相互位置的制造误差都直接影响两螺孔之间及相对于连杆其他表面的位置精度。这些元件在磨损之后,装在夹具上的连杆体就要以小头孔为中心而相对于正确位置顺时针偏转一个角度,但钻模套位置不变,因此钻出的螺栓孔就与大头孔等其他表面之间产生位置误差。故一般夹具制造误差控制在工件允许的误差的 $1/3 \sim 1/5$ 。

### 3. 度量误差与调整误差

#### (1) 度量误差:

度量误差是工件的度量尺寸与实际尺寸的差值。度量误差同样会影响工件加工精度。用试切法或调整法加工,试切时的度量误差就影响了刀具的调整精度,因此也影响了刀具加工一

个(试切法)或一批(调整法)工件的加工精度。此外,在检验已加工的表面尺寸时,也会因度量误差而影响工件的实际尺寸精度。

度量误差通常是由下述原因产生的:

- ① 量具与工件的相对位置不正确。
- ② 量具本身的制造误差或调整误差和磨损。
- ③ 在度量过程中使用的度量力不一致,或度量力过大而引起量具或量仪的变形。
- ④ 在度量过程中量具或工件发生热变形。
- ⑤ 读数的主观误差。

度量误差太大时,加工方法本身所允许的加工误差必须相应减少,这就增加了加工的困难。例如,要求工件尺寸为  $100 \pm 0.1\text{mm}$ ,如果度量误差为  $\pm 0.05\text{mm}$ ,则加工出来的尺寸必须不超过  $100 \pm 0.05\text{mm}$ 。度量误差与度量方法和量具有很大关系。用光学比较仪来量轴类零件,误差不超过  $1\mu\text{m}$ ,但是千分尺的度量误差可达  $5 \sim 10\mu\text{m}$ ,游标卡尺的度量误差可达  $10 \sim 50\mu\text{m}$ 。所以,应当根据所要求的加工精度在工艺规程中规定适当的度量方法和量具,要使度量误差在允许的范围以内(一般度量误差控制在工件公差的  $1/10 \sim 1/3$ ),不可无原则地提高度量精度,以免造成浪费。

车间的温度变化也会影响度量误差,特别是大尺寸零件和膨胀系数大的铝合金零件所受影响较大。此外,振动、毛刺、灰尘以及操作者的技术水平也是引起度量误差的一些因素。

#### (2) 调整误差:

调整误差是在加工时由于刀具-机床-夹具工艺系统没有调整到正确位置而产生的加工误差。工艺系统的调整一般包括:

- ① 在机床上安装夹具。
- ② 按要求精度调整加工尺寸,即调整刀具相对于工件定位基准或机床、夹具上的定位面的距离。

③ 固定了刀具和夹具的位置以后,应当试切工件,检查调整精度,必要时进行补充调整,直到合格为止。

试切头几个工件时会有度量误差。用标准试样调整者,标准试样也有误差。因此调整好的机床也会出现调整误差。此外,在大批、大量生产中,有时采用靠模、凸轮、行程挡块等机构来保证加工尺寸,这些机构的精度、调整位置及其控制机构(如离合器、电器开关、控制阀等)的灵敏度,也是影响调整误差的重要因素。

以上是采用调整法加工时出现的调整误差的情况,当采用试切法加工时,则是在边试切的过程中边调整刀具与工件之间的相对位置,这时除了测量误差影响调整误差外,当试切是按刻度盘值来微调刀架的进给量时,进给机构的“爬行”使刀具的实际进给与刻度显示值不一致,也会造成加工误差,这也属于调整误差。

#### 4. 装夹误差

装夹误差包含定位误差和夹紧误差两部分。

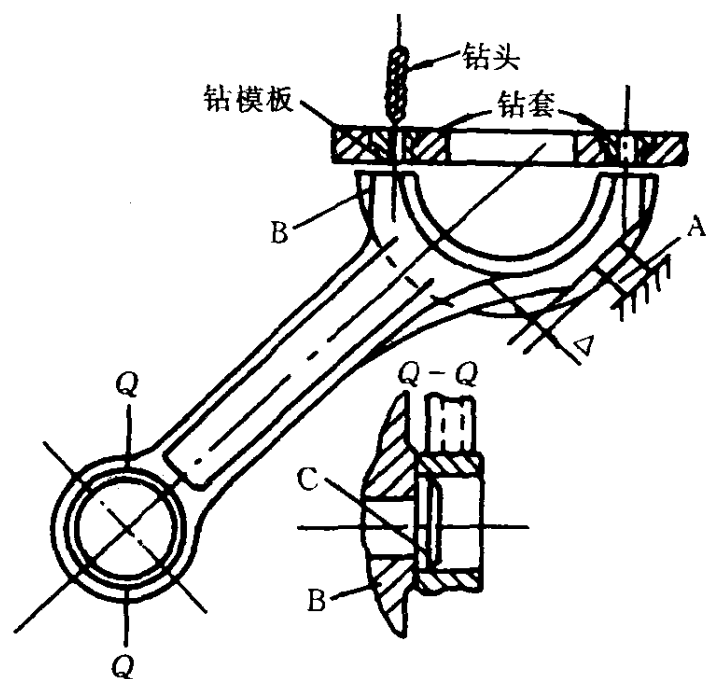


图 2-21 夹具的制造误差与磨损对加工精度的影响

(1) 定位误差:

工件的定位误差主要是由下列原因造成: 夹具定位元件的制造误差或磨损; 工件定位基面的制造误差; 定位基准与工序基准不重合等等。例如, 当采用夹具加工工件时, 工件以圆孔作为定位基面, 而定位元件是心轴, 它们都有制造误差, 这样就使定位基准的位置发生变化, 由此引起的误差称基准位移误差  $\Delta d_b$ , 是一种定位误差,  $\Delta d_b$  用下式表示:

$$\Delta d_b = \frac{1}{2}(\delta_D + \delta + \delta_d) \quad (2-2)$$

式中  $\delta_D$ ——孔的直径公差(工件孔的直径公差);

$\delta$ ——最小配合间隙;

$\delta_d$ ——轴的直径公差(心轴的直径公差);

$\Delta d_b$ ——工件轴心线的位移误差(见图 2-22)。

当工件的定位基面为平面时, 夹具定位元件的制造误差或磨损也会产生定位误差, 它对工件加工误差的影响, 可用夹具制造误差与磨损一节的实例(见图 2-21)来说明。

定位基准与工序基准不重合误差可用图 2-23 所示的筒形活塞为例来说明, 工序要求保证尺寸 A, 亦即加工顶面的工序基准应为销孔中心线 3—3, 若加工顶面时是以下底面 1 为定位基面, 则尺寸 A 是通过尺寸 B 和 C 间接保证的, 这样, 加工误差  $\delta_A$  中, 除了本工序的加工误差  $\delta_C$  外还包含有前面工序所加工的尺寸 B 的误差  $\delta_B$ , 也即

$$\delta_A = \delta_B + \delta_C \quad (2-3)$$

这种连接工序基准与定位基准的联系尺寸 B 的加工误差(在本工序之前形成的)  $\delta_B$  就是本工序的定位误差。

定位基准与工序基准或设计基准不重合产生定位误差的例子也可用 V 形块定位的例子来说明, 用 V 形块定位时, 工件直径变化所产生的定位误差, 与工件工作图上设计基准的选择有关。如图 2-24 所示, 在圆柱体上铣槽, 槽尺寸的标注有三种方法: 尺寸  $h_1$  的设计基准为工

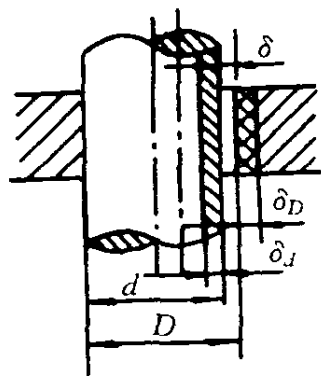


图 2-22 圆柱孔的定位误差

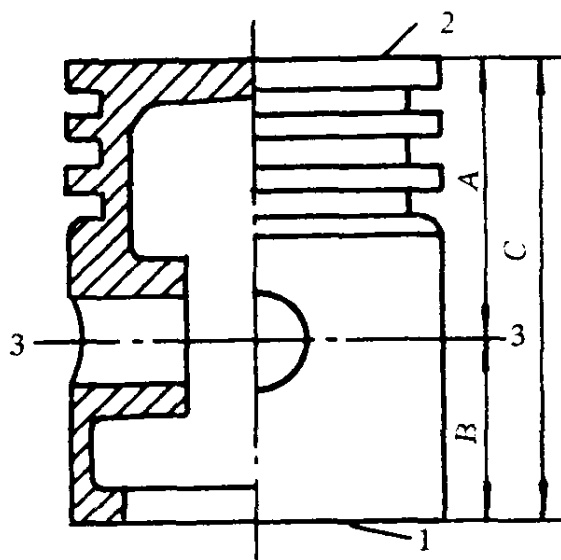


图 2-23 活塞的基准

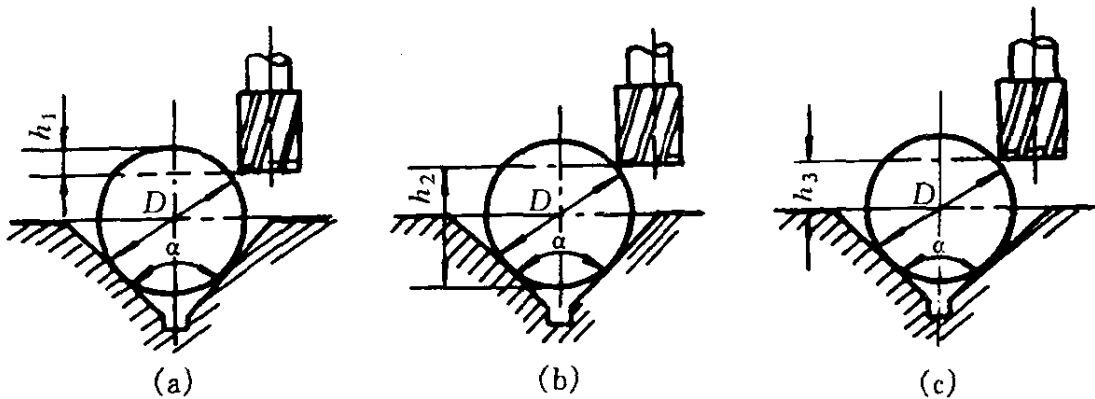


图 2-24 V 形块定位时的三种情况

件的上母线,  $h_2$  的设计基准为工件的下母线,  $h_3$  的设计基准为工件的中心线。在计算定位误差时应包括这种基准不重合误差。因此, 当工件直径由  $D$  变化到  $D - \delta_D$  时, 定位误差分别为 (图 2-25):

$$\Delta h_3 = \frac{\delta_D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2-4)$$

$$\Delta h_2 = \frac{\delta_D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{\delta_D}{2} = \frac{\delta_D (1 - \sin \frac{\alpha}{2})}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2-5)$$

$$\Delta h_1 = \frac{\delta_D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{\delta_D}{2} = \frac{\delta_D (1 + \sin \frac{\alpha}{2})}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2-6)$$

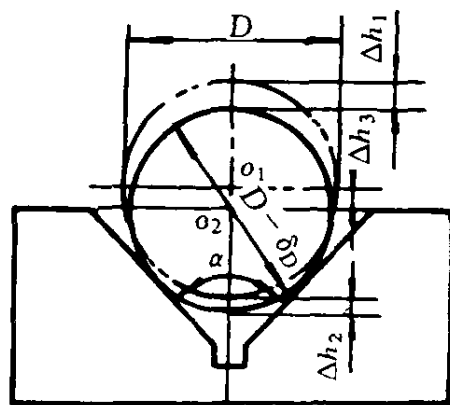


图 2-25 V形块的定位误差

式中:  $\alpha$  为 V 形块两侧面间的夹角。

分析上述各式可知:

① 定位误差除与  $\delta_D$  有关外还与  $\alpha$  角有关,  $\alpha$  愈大则定位误差  $\Delta h$  愈小。但  $\alpha = 120^\circ$  时工件夹紧的稳定性较差, 故常用  $\alpha = 90^\circ$  的 V 形块。

② 定位误差与设计基准的选择有关, 按  $h_2$  标注槽的位置尺寸, 定位误差最小。轴类零件上键槽深度尺寸都按此法标注, 即为此理。

(2) 夹紧误差:

工件在夹紧时的弹性变形会引起加工误差。当加工薄壁套筒类工件时, 如夹紧方法不当常会引起工件的形状误差, 如图 2-26 所示, 在夹紧前, 薄壁套的内外圆是正圆形, 当三爪卡盘夹紧后套筒成三棱形 (见图中(a)); 镗孔后, 内孔呈正圆形 (如图中(b)), 当松开卡爪后, 工件由于弹性恢复, 使已镗好的孔产生三棱形, 如图中的(c)所示, 为了减少加工误差, 可采用开口过渡环 (见图中(d)) 或专用卡爪 (见图中(e))。

再如磨削薄板工件, 如图 2-27 所示。当磁力将工件吸向磁盘表面时, 工件将产生弹性变形, 如图 2-27(b) 所示, 磨完后, 由于弹性恢复, 已磨完的表面又产生翘曲, 如图 2-27(c) 所示。改进的办法是在工件和磁力吸盘之间垫橡皮垫 (厚 0.5mm)。如图 2-27(d), (e) 所示, 工件夹紧时, 橡皮垫被不均匀压缩, 减小了工件的变形, 然后再以磨好的表面为定位基准, 磨另一面, 这样, 多次交替正反面磨削即可获得较高平面度的平面。

### 5. 工艺系统受力变形不均所引起的加工误差

工艺系统受力变形是指机床—刀具—夹具—工件组成的工艺系统在切削过程中受力而产生的变形, 后者会改变刀具与工件加工表面的相对位置, 因而造成加工误差, 所受的力指切削力和离心力、工件重力等。工艺系统的总变形量由各环节

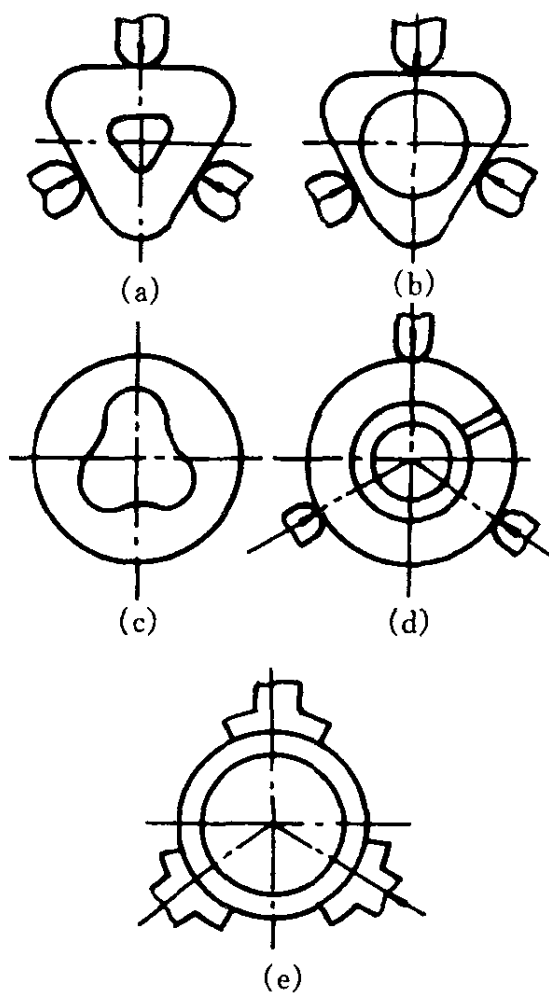


图 2-26 零件夹紧变形引起的误差

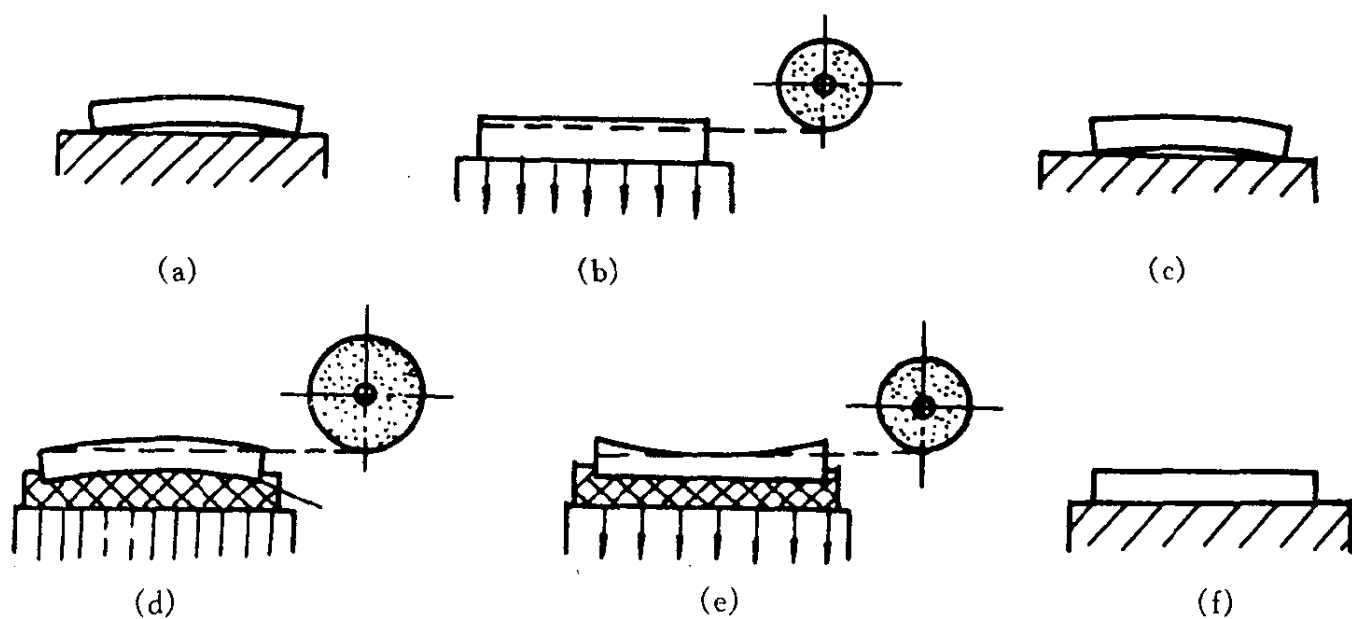


图 2-27 薄板工件磨削

(a)毛坯翘曲;(b)吸盘吸紧;(c)磨后松开;(d)磨削凸面;(e)磨削凹面;(f)磨后松开

沿表面法线方向的变形之和组成,变形引起的加工误差有下面两种情况:

(1) 工件各部位处的工艺系统总变形量不等所引起的加工误差:

以车床两顶尖之间车削光轴为例来分析工艺系统在任一  $X$  处之总变位量,见图 2-28 所示。

图中  $L$ ——工件长度;  
 $X$ ——刀尖与前顶尖的距离;  
 $R$ ——未切削时刀尖与工件轴心线的距离;  
 $R_x$ ——工件切削后在  $X$  处的半径(放大绘出);  
 $Y_g$ ——工艺系统在  $X$  处的总变位量;  
 $Y_c$ ——前顶尖的位移;  
 $Y_w$ ——后顶尖的位移;  
 $Y_z$ ——前后顶尖的综合位移反映在  $X$  处的变位量;  
 $Y_j$ ——刀架的变位量;  
 $Y_i$ ——工件反映在  $X$  处的变形量。

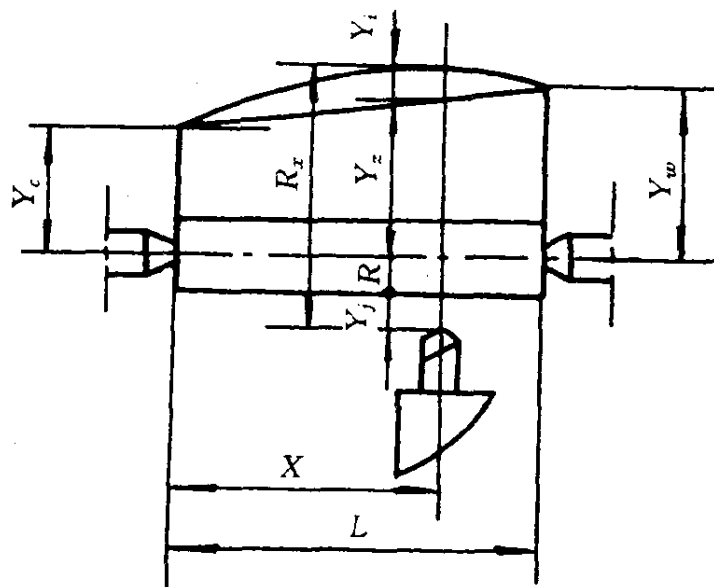


图 2-28 车床受力变形的组成

其中  $R_x = R + Y_j + Y_z + Y_i$

$Y_g = R_x - R = Y_j + Y_z + Y_i$

由于  $Y_j = \frac{P_x}{j_j}$

$$Y_c = \frac{P_y}{j_c} \left( \frac{L-X}{L} \right)$$

$$Y_w = \frac{P_y}{j_w} \left( \frac{X}{L} \right)$$

$$Y_z = Y_c + (Y_w - Y_c) \frac{X}{L} = \frac{P_y}{j_c} \left( \frac{L-X}{L} \right)^2 + \frac{P_y}{j_w} \left( \frac{X}{L} \right)^2$$

$$Y_i = \frac{P_y(L-X)^2 X^2}{3EIL} \quad (E——弹性模数, I——惯性距)$$

即

$$Y_g = \frac{P_y}{j_j} + \frac{P_y}{j_c} \left( \frac{L-X}{L} \right)^2 + \frac{P_y}{j_w} \left( \frac{X}{L} \right)^2 + \frac{P_y(L-X)^2 X^2}{3EIL}$$

$$Y_g = P_y \left[ \frac{1}{j_j} + \frac{1}{j_c} \left( \frac{L-X}{L} \right)^2 + \frac{1}{j_w} \left( \frac{X}{L} \right)^2 + \frac{(L-X)^2 X^2}{3EIL} \right] \quad (2-7)$$

由上式可知,工艺系统的变位量  $Y_g$  是随工件轴心线  $X$  方向上的位置不同而变化,加工以后工件在各个横截面上的直径尺寸是不同的。这就使工件产生形状误差和尺寸误差。必须指出,这种情况下变位量  $Y_g$  的不同不是由于切削力不同,而是由于不同  $X$  处的系统刚度不同引起的。

工艺系统各环节的变化(工件的变形,前后顶尖的位移、刀架的变位)对工件形状和尺寸误差的影响如图 2-29 所示。对于一般轴类零件(特别是细长轴),  $Y_i$  的影响比其它三项大得多,工件将产生腰鼓状的形状和尺寸误差(见图 2-29(a))。对于短轴或盘类零件,  $Y_i$  的影响则较小,工件产生中间凹的形状和尺寸误差(见图 2-29(b))。

#### (2) 毛坯误差的复映规律与复映误差:

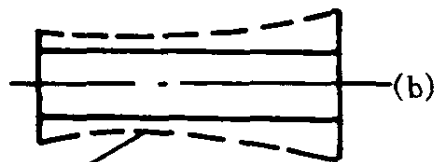
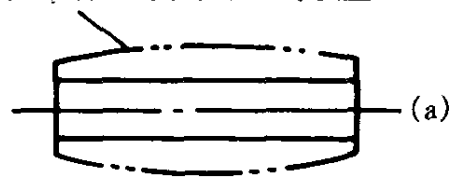
工件的毛坯外形虽然具有粗略的零件形状,但它在尺寸上、形状上以及表面层硬度上都有一定的区别或误差。毛坯的这些区别或误差在加工时使切削深度发生变化,从而引起切削力的变化,使工艺系统产生相应的不同的变形,因而在加工后的工件表面上还保留着与毛坯表面类似的形状或尺寸误差。当然工件表面残留的误差比原毛坯表面的误差从数值上看已大大减少了。这种现象称为毛坯误差的复映规律。

如图 2-30 所示,在车外圆时,若原毛坯有椭圆误差,当车刀位于毛坯椭圆长轴时理论切深  $t$  最大为  $t_1$ ,在椭圆短轴时理论切深最小为  $t_2$ ,在椭圆长、短轴之间的理论切深介于  $t_1$  和  $t_2$  之间。因此,切削分力  $P_y$  随实际切深  $t'$  的变化由  $P_{y\max}$  到  $P_{y\min}$ ,引起工艺系统的相应变形由  $Y_1$  到  $Y_2$ 。这样就使毛坯的椭圆误差  $\Delta_m$  复映到工件表面而产生工件的椭圆误差  $\Delta_i$ 。设工艺系统的刚度为  $j$ ,由图 2-30 可知:

$$\Delta_m = t_1 - t_2$$

$$\Delta_i = Y_1 - Y_2$$

由  $Y_i$  引起的形状和尺寸误差



由  $Y_c$  及  $Y_w$  引起的形状和尺寸误差

图 2-29 工艺系统各环节变位对工件造成的加工误差

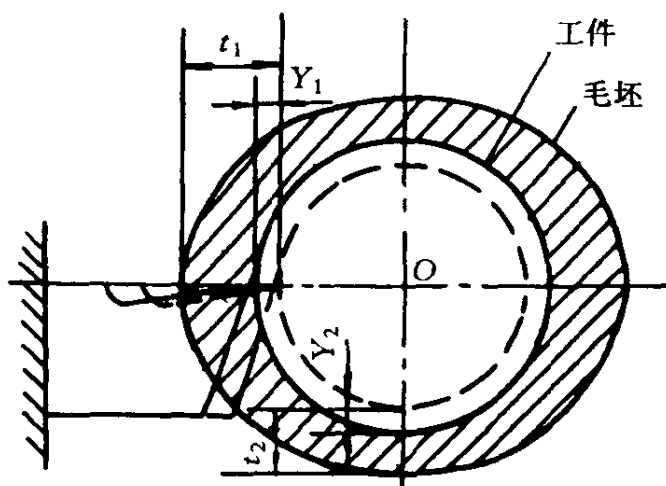


图 2-30 毛坯形状误差的复映



$$Y_1 = \frac{P_{y\max}}{j}$$

$$Y_2 = \frac{P_{y\min}}{j}$$

$$P_y = \lambda C_{pz} t' S^{0.75}$$

其中  $\lambda = P_y/P_z$ , 一般取 0.4。

$C_{pz}$  是与工件材料和刀具几何角度有关的系数

$$Y_1 = \frac{\lambda C_{pz} t'_1 S^{0.75}}{j}$$

$$Y_2 = \frac{\lambda C_{pz} t'_2 S^{0.75}}{j}$$

工件在一次走刀以后

$$\Delta_i = Y_1 - Y_2 = \frac{\lambda C_{pz} S^{0.75}}{j} (t'_1 - t'_2)$$

式中  $t'_1 = t_1 - Y_1$

$t'_2 = t_2 - Y_2$  (也即实际切深  $t'$  较之理论切深  $t$  减少一个变形量  $Y$ )

代入后得:

$$\Delta_i = Y_1 - Y_2 = \frac{\frac{\lambda C_{pz} S_1^{0.75}}{j}}{1 + \frac{\lambda C_{pz} S_1^{0.75}}{j}} (t_1 - t_2) \quad (2-8)$$

工件的椭圆误差  $\Delta_i$  与毛坯的椭圆误差  $\Delta_m$  之比称为一次走刀下的复映系数  $K$ , 则

$$K = \frac{Y_1 - Y_2}{t_1 - t_2} = \frac{\frac{\lambda C_{pz} S_1^{0.75}}{j}}{1 + \frac{\lambda C_{pz} S_1^{0.75}}{j}} \quad (2-9)$$

因为  $K \ll 1$ , 故多次走刀可使毛坯误差复映在工件上的最终复映误差大大减小。

降低系统受力变形的措施是提高工艺系统刚度, 如使用中心架、跟刀架、导套、镗套、尾架、顶尖等, 以及提高机床零件间的配合表面质量或预加载荷以提高接触刚度, 或者改变进给的方向以提高系统的稳定性等等。

#### 6. 工艺系统热变形引起的误差

机械加工过程中, 工艺系统因受多种热源影响, 引起温度升高而产生变形, 因此改变了系统中各元件间正确的相互位置, 破坏了工件和刀具的相对运动的准确性, 改变了已调整好的刀具的尺寸、形状或相互位置, 亦即产生热变形影响加工精度。

兹分别讨论机床、刀具和工件热变形对工件加工精度的影响。

##### (1) 机床热变形引起的加工误差:

实验表明, 机床在工作中受到多种热源的影响, 如:

① 电气及机械动力源的能量损耗转化为热能(电动机、电气箱、油泵、液压操纵箱、活塞副、各种阀件等)。

② 传动部分发生的摩擦热(轴承副、离合器、导轨副等), 并通过润滑油将热量散布开来,

特别是床身内部的润滑油池形成了一个很大的热源,对床身的热变形影响很大,使导轨弯曲。

③ 切削热的大部分是被切屑和冷却液带走的,但是切屑和冷却液落在床身下,其热量也就传给床身,使后者产生热变形。

以上三项称为内部热源。

④ 环境传来的热即外部热源,如环境温度的影响,阳光照射、气流、取暖装置的影响等,使机床各部分受热不均匀而引起变形。

从各种机床的主要热源来看,大体可归并为下列三类:

① 以机床的主传动系统为主要热源,如普通车床、六角车床、铣床、卧式镗床、坐标镗床等。

② 以机床导轨摩擦为主要的热源,如龙门刨床、立式车床、牛头刨床等。

③ 以机床的液压系统为主要热源,如磨床、液压仿形车床等。

图 2-31 表示了几种机床在工作状态下热变形的大概趋势。

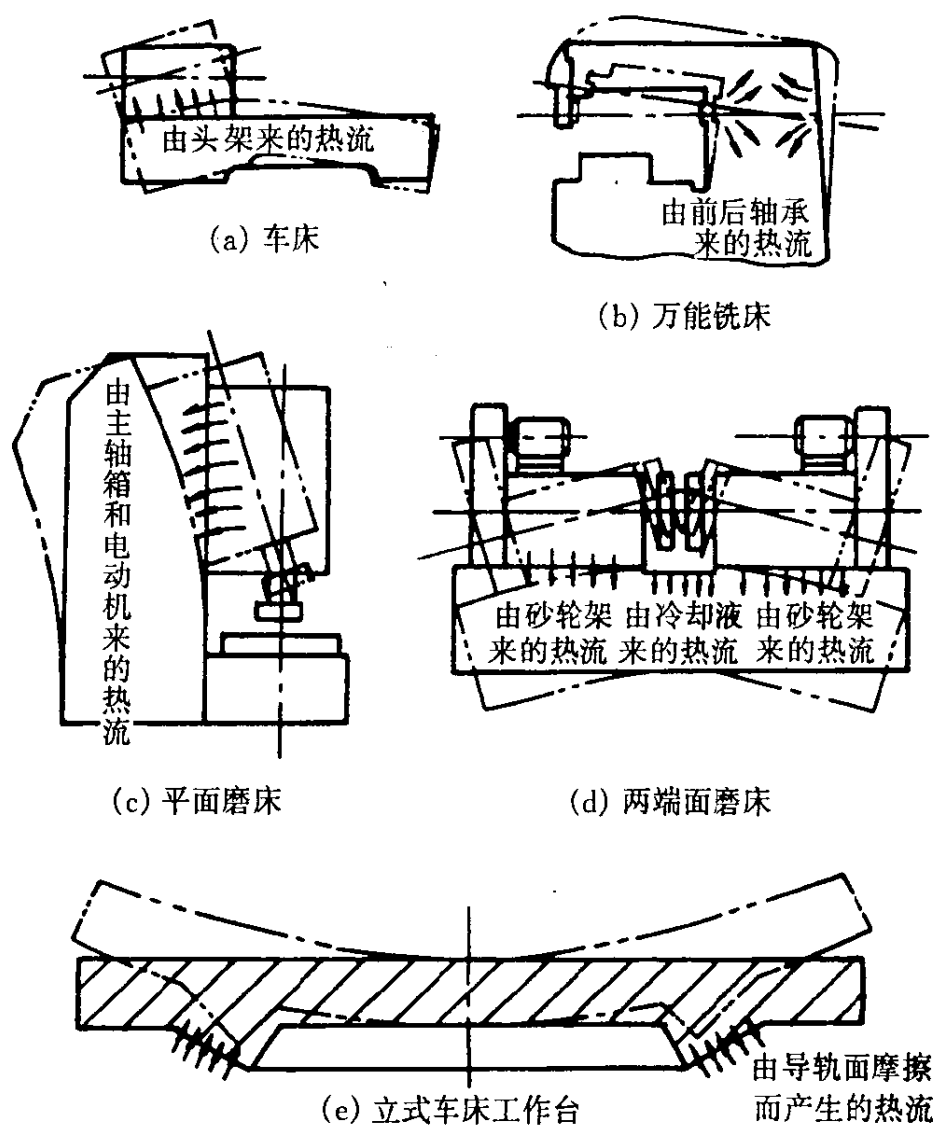


图 2-31 几种机床的热变形趋势

机床热变形引起的加工误差要视具体的机床和加工方式而定,例如图 2-31 中所示的普通车床,在热变形后,主轴在水平方向的位移约  $10\mu\text{m}$ ,而在垂直方向的位移达  $190\mu\text{m}$  左右,这对刀具水平安装的普通车床影响较小,而对刀具垂直安装的自动车床和转塔车床来说,则对加工精度影响较大。

(2) 工件热变形引起的加工误差:

工件热变形主要是工件受切削热而产生变形,对于车、铣、刨、镗等,切削热大部分是由切屑带走,传到工件的只有较少一部分,在钻削过程中,大部分热量传到工件上去。工件热变形有两种情况:一种是均匀受热,例如车外圆,外圆面在经多次走刀切削后,工件外圆均匀受热,此时仅对工件的尺寸精度有影响,而对形状精度无影响;另一种是不均匀受热,例如磨削长方体工件的上平面时,磨削热使工件的上表面受热,温度升高,上下表面温度不均,而产生上凸的变形,其变形量  $h$  可按下式计算:

$$h = \alpha \cdot \Delta t \frac{L^2}{8H} \quad (2-10)$$

式中  $L$ ——工件长度(mm);

$H$ ——工件厚度(mm);

$\Delta t$ ——上下表面温度差;

$\alpha$ ——工件材料的线膨胀系数。

加工时,表面的上凸部分被磨去,故冷却后平面产生的形状误差为下凹一个  $h$  量,对于一个长 2 000mm 的床身,若磨削时上下表面温差  $\Delta t = 2.4^\circ\text{C}$ ,则上平面的下凹量可达 0.02mm,对于板类零件,表面下凹量更大,故工件不均匀受热或散热会影响工件的形状误差。

当粗、精加工间隔时间较短时,粗加工时的热变形将影响到精加工,因为精加工后的冷却将产生加工误差。例如在一台多工位组合机床上,第二个工位是钻孔,第三工位是铰孔,工件尺寸为  $\phi 40 \times 40$ ,材料为铸铁,钻孔后温升达  $107^\circ\text{C}$ ,钻孔后紧接着铰孔,孔的尺寸为  $\phi 20$ ,等到工件冷却下来其收缩量  $\Delta d = 20 \times 11 \times 10^{-6} \times 107 = 0.024\text{mm}$ ,误差超过了 7 级精度的公差。

### (3) 刀具热变形对加工精度的影响:

刀具热变形主要是由切削热引起的,刀刃温度可达  $800 \sim 1\ 000^\circ\text{C}$ ,热伸长达  $0.03 \sim 0.05\text{mm}$ 。在开始阶段,热变形增长速度较快,热平衡后热变形变化不大,对加工精度影响不明显。

### 7. 工件残余内应力重新分布而引起的加工误差

残余内应力是指外部载荷去除后仍残留在工件内部的应力,它往往处于一种很不稳定的相对平衡状态,在外界因素影响下,很易失去原有平衡,使残余应力重新分布以达到一个新的较为稳定的平衡状态。当残余应力重新分布时,零件就发生相应的变形,从而破坏原有的精度。在加工过程中,由于切削力、切削热等因素的影响使残余应力重新分布,使加工的前一道工序获得的精度遭到破坏,不仅如此,加工好的零件在放置一段时间后,因为零件内的金属组织始终有恢复到没有内应力的稳定状态的趋势,也会使零件出现较大变形,精度明显下降。

残余应力产生的原因是由于锻、铸、焊和热处理等热加工过程中零件各个表面冷却速度不均匀、塑性变形程度不一致而又互相牵制而造成;另一方面是因为在机械加工过程中的塑性变形、局部高温以及局部相变引起局部体积变化,而各部分又彼此互相牵制、不能自由伸缩而造成。

图 2-32(a)是一个铸造毛坯,壁 1 和 2 较壁 3 为薄,因而冷却也较壁 3 快。当壁 1 和 2 冷却到常温而变硬时,壁 3 的温度仍较高,尚处于塑性状态,当壁 3 继续冷却到弹性状态时,企图收缩,但受到温度已很低的壁 1 和 2 的限制,因此壁 3 产生拉应力,壁 1 和 2 产生压应力,并处于平衡状态。如果在壁 2 处铣个缺口,则壁 2 的应力消失,在壁 1 和 3 的内应力作用下,工件将发生如图 2-32(b)所示的变形,以达到新的平衡。

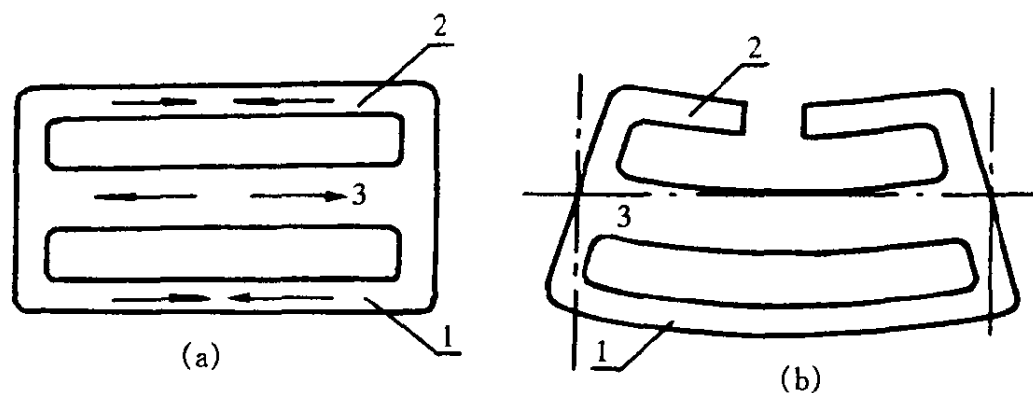


图 2-32 由于内应力而引起的变形

箱体零件上顶平面的铣削加工产生的影响就有如同图 2-32 中的铸造毛坯在壁 2 处铣开缺口一样的效果,箱体零件将出现顶面呈中部下凹形的形状误差。

为了克服内应力的重新分布而引起的变形,一般采取以下几个措施:

① 安排热处理工序来消除毛坯和零件粗加工后产生的内应力,对于特别精密的零件,还要进行多次消除内应力的热处理工序。例如,陀螺仪表框架的铝合金压铸毛坯,为了消除其内应力、稳定尺寸、减小加工和使用过程中的变形,常常采用“高低温处理”,即在  $250 \sim 350^{\circ}\text{C}$  和  $-50 \sim -60^{\circ}\text{C}$  的温度下反复放置一定时间,使在变化的温度下内应力逐渐消除。

② 对于构造复杂、刚度低的零件,将工艺过程分为粗、半精、精三个加工阶段,以减小内应力引起的变形。

③ 严格控制切削用量和刀具磨损,使零件不致产生较大的内应力。

④ 合理设计零件结构,尽量减小各部分厚度尺寸差值,以减小毛坯制造中的内应力。

⑤ 采用无切削力的特种工艺方法,如电化学加工、电蚀加工等。

### 2.2.3 加工误差的统计分析法

#### 1. 概述

前面我们对影响加工误差的各主要因素进行了分析,但属于局部的单因素性质的分析,而生产实际中影响加工误差的因素往往是错综复杂的,很难用单因素的估算方法来分析其因果关系,为了全面分析产生误差的原因,掌握各种误差的规律,从而减小加工误差或进行补偿,就要用数理统计方法来找出解决问题的途径。

各种单因素误差,按其性质的不同,可以分为系统性误差和随机性误差两大类。

##### (1) 系统性误差:

当顺次加工一批零件时,大小和方向保持不变或按加工顺序作有规律的变化了的误差称为系统性误差。前者是常值系统性误差,后者是变值系统性误差。

例如,当铰刀直径比规定值小于  $0.02\text{mm}$  时,若不考虑其它因素,铰出的每一个孔在直径上都小  $0.02\text{mm}$ ,此即为常值系统性误差。又如,刀具的磨损随加工表面长度的变化是有规律的,因此,刀具磨损引起的加工误差是变值系统性误差。

##### (2) 随机性误差:

在加工一批零件中,大小和方向无规律变化的误差称为随机性误差。例如,用同一把铰刀加工一批零件的孔,条件虽然相同,但孔的直径尺寸却互不一样,这与毛坯的加工余量的差异、硬度的不均匀有关。这种毛坯误差的复映就是一种随机性误差。

就工件表面的加工误差而言,它经常是许多系统性误差和随机性误差综合作用的结果。我们的任务就是要将这两大类误差分开,确定系统性误差的数值和随机性误差的范围,从而采取相应的措施来提高加工精度。解决此类问题最常用的方法就是统计分析法。

统计分析法 是以现场观察所得到的资料为基础,用概率论和数理统计的方法进行处理,以确定在一定加工条件下全部作用因素的共同影响而得到的尺寸散布范围。这种方法既可以显示出系统性误差的大小,又可以指示出随机性因素对加工精度的综合影响。下面主要介绍统计分析法中的直方图法和  $\bar{X}$ -R 图法。

## 2. 统计分析法

### (1) 直方图法(分布曲线法):

检查一批精镗后的活塞销孔直径,图纸规定的尺寸及公差为  $\phi 28_{-0.015}^0$ ,检查件数为 100,测量时会发现它们的尺寸各不相同,称之为“尺寸分散”,把测量所得的尺寸数据按大小分组,每组的尺寸间隔取为 0.002mm,则可列出表 2-1。

表 2-1 活塞销孔测量结果

组 别	尺寸范围(mm)	中点尺寸 $x_i$ (mm)	$(x_i - x_{\text{平均}})^2$	组内工件数 $m_i$	频率 $m_i/n$
1	27.992~27.994	27.993	0.000 024 01	4	4/100
2	>27.994~27.996	27.995	0.000 008 41	16	16/100
3	>27.996~27.998	27.997	0.000 000 81	32	32/100
4	>27.998~28.000	27.999	0.000 001 21	30	30/100
5	>28.000~28.002	28.001	0.000 009 61	16	16/100
6	>28.002~28.004	28.003	0.000 026 01	2	2/100

表中  $n$  是测量的工件数(100 件),如果用每组的件数  $m$  或频率  $m/n$  作为纵坐标,以尺寸范围内中点尺寸为横坐标,就可以作成折线图,如图 2-33 中的实线所示。

图中还表示了分散范围=最大孔径-最小孔径=28.004-27.992=0.012mm。

分散范围中心(即平均孔径)  $x_{\text{平均}} = \frac{\sum m_i x_i}{n} = 27.9979\text{mm}$ 。

公差范围中心 =  $28 - \frac{0.015}{2} = 27.9925\text{mm}$ 。

实测结果,18%的工件(尺寸为 >28.000~28.004)超出公差范围,成了废品(图 2-33 中阴影部分)。但由图可知,这批工件的分散范围 0.012mm 比公差带 0.015mm 小,如果设法将分散中心调整到公差范围中心,成为图中的虚线就可以完全合格。即镗孔时要把镗刀伸出量调整得短一些。因此解决这道工序的精度问题

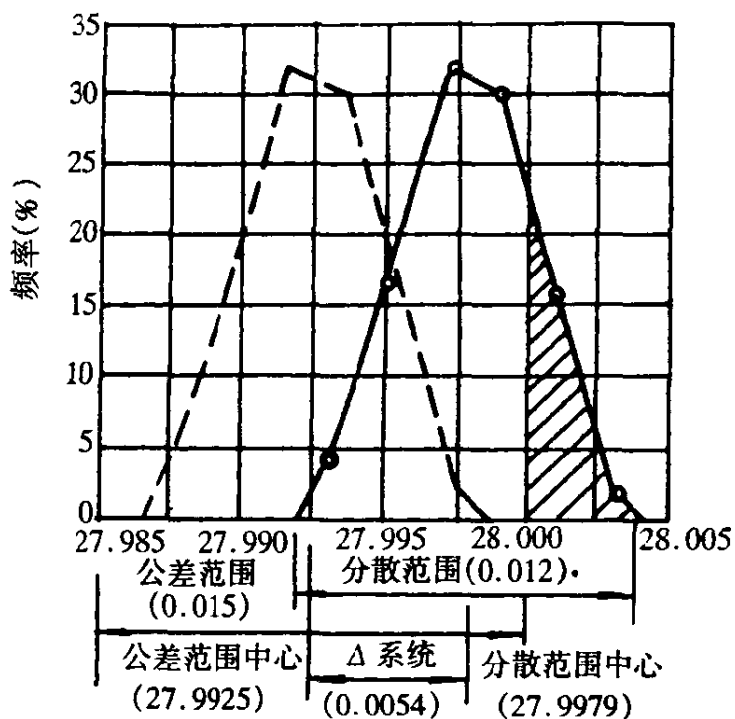


图 2-33 活塞销孔实测直径分布折线

是消除系统性常值误差,后者  $\Delta_{\text{系统}} = 27.9979 - 27.9925 = 0.0054\text{mm}$ 。

当零件数目增多、尺寸间隔很小时,上述折线图变成曲线图,所以直方图法又称分布曲线法。

概括地说从分布曲线图中可判断如下特性:

① 判别加工误差的性质:若实际尺寸分布服从正态高斯分布,则表明没有变值系统误差,若此时  $x_{\text{平均}}$  与公差带中心重合,则表明无常值系统误差,不重合则表明有常值系统误差,还可从实际分布与正态分布的差异情况判断变值系统性误差是什么类型。

② 根据所加工的工件得出的分布曲线图标出的均方根偏差  $\sigma$ ,按分布范围等于  $6\sigma$  的规律,可确定该加工方法所能达到的精度。上述表中数据标出的

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 m_i}{n}} = 0.002232935(\text{mm})$$

式中  $\bar{x} = x_{\text{平均}}$

$$6\sigma = 0.0134(\text{mm})$$

③ 确定工艺能力及其等级:所谓工艺能力是用工艺能力系数  $C_p$  来表示的,它是公差范围  $\delta$  和实际加工误差(分散范围  $6\sigma$ )之比,即

$$C_p = \delta/6\sigma \quad (2-11)$$

根据工艺能力系数  $C_p$  的大小,可以将工艺分成五个等级:

- |                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| $C_p > 1.67$           | 为特级,说明工艺能力过高,不一定经济;     |
| $1.67 \geq C_p > 1.33$ | 为一级,说明工艺能力足够,可以允许一定的波动; |
| $1.33 \geq C_p > 1.00$ | 为二级,说明工艺能力勉强,必须密切注意;    |
| $1.00 \geq C_p > 0.67$ | 为三级,说明工艺能力不足,可能出少量不合格品; |
| $0.67 \geq C_p$        | 为四级,说明工艺能力不行,必须加以改进。    |

一般情况下,工艺能力不应低于二级。

上例活塞销孔尺寸公差  $\delta = 0.015$ ,故  $C_p = \delta/(6\sigma) = 0.015/0.0134 = 1.1194$ ,工艺能力为二级。

④ 估算不合格废品率:分布曲线中超出公差带的部分下的面积代表废品量,后者与全部工件量(整个曲线下的面积)之比即为废品率。

由于直方图法是加工完一批工件后才进行绘制的,故有了废品的话,也为时已晚。下面的  $\bar{x}$ -R点图法则可预防废品的生产。

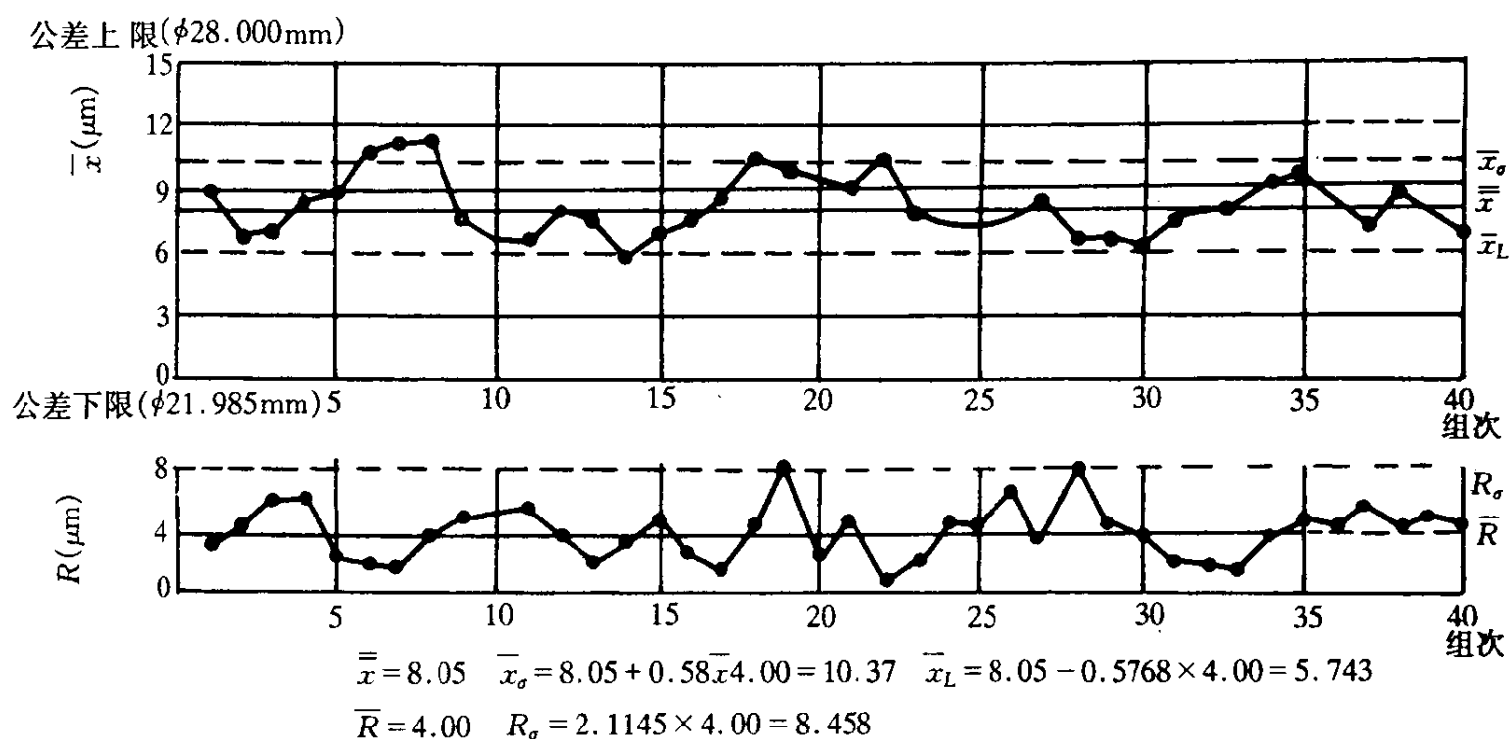
(2)  $\bar{x}$ -R 点图法:

$\bar{x}$ -R 点图法是用来反映加工质量指标随时间发生波动的图表,是分析工序是否处于稳定状态,以及保持工序处于控制状态及早预防出废品的有效工具。质量指标中,若平均值  $\bar{x}$  和均方根误差  $\sigma$  在整个过程(工序)中保持不变则工艺是稳定的。

为了验证工艺的稳定性,需要应用  $\bar{x}_i$  和  $R_i$  两张点图。 $\bar{x}_i$  是将一批工件依照加工顺序分成  $m$  个为一组后的第  $i$  组的平均值,共  $K$  组; $R_i$  是  $i$  组数值的极差  $(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})_i$ 。两张图常常合在一起应用,通称为  $\bar{x}$ -R 图(图 2-34)。

不难理解, $\bar{x}$  和  $R$  的波动反映了工件平均值的变化趋势和随机误差的分散程度。

在  $\bar{x}$ -R 图上分别画上中心线和控制线,控制线就是用来判断工艺是否稳定的界限线。

图 2-34  $\bar{x}$ -R 图

$$\bar{x} \text{ 图的中心线为 } \bar{\bar{X}} = \sum_{i=1}^K \bar{x}_i / K \quad (2-12a)$$

$$R \text{ 图的中心线为 } \bar{R} = \sum_{i=1}^K R_i / K \quad (2-12b)$$

$$\bar{x} \text{ 图的上控制界限为 } \bar{x}_U = \bar{\bar{x}} + A\bar{R} \quad (2-12c)$$

$$\bar{x} \text{ 图的下控制界限为 } \bar{x}_L = \bar{\bar{x}} - A\bar{R} \quad (2-12d)$$

$$R \text{ 图的上控制界限为 } R_U = D\bar{R} \quad (2-12e)$$

一般每个组数  $m$  取 4 或 5; 式中  $A$  和  $D$  的数值是根据数理统计的原理而定出的, 见表 2-2。

表 2-2 系数  $A$ 、 $D$  值

每个组数 $m$	$A$	$D$
4	0.728 5	2.281 9
5	0.576 8	2.114 5

图 2-34(a) 是活塞精镗孔的一个例子,  $\bar{x}$  图中绘有  $\bullet$  的点子共有 6 个超出控制线,  $R$  图中有 2 个点子超出控制线, 说明了工艺是不稳定的, 虽然根据这批工件尺寸计算出的  $6\sigma$  并没有超过公差带  $\delta$  (数据从略)。这里要着重指出: 工艺过程稳定与否和加工质量是否符合公差要求还不能说是一回事, 但加工过程中若包含有不稳定的因素, 就不能等闲视之, 如果放任自流, 迟早会出现超差而产生废品。

在  $\bar{x}$ - $R$  图中, 若满足下列三个情况才为正常波动, 否则为异常波动, 这三个情况是: ①没有点子超出控制线; ②大部分点子处在平均线上下 (而不是在一侧) 波动; ③点子应处于无规律变化, 而不是处于单调升或单调降或周期性波动的情况。只有波动是正常的, 才能说工艺过程是稳定的。



### 2.2.4 加工经济精度

加工过程中有各种因素影响加工精度,所以同一种加工方法,如降低切削用量,多费一些工时去细心操作,就能提高加工精度。但这样将会降低生产率,增加了成本。

图 2-35 表明了加工精度与加工成本的关系。在一定范围内(如曲线的 B 段),加工误差与加工成本是近似地成反比例的。

所谓某种加工方法的经济精度,就是指在使用符合质量标准的设备和工艺装备、具有标准技术等级的工人及标准的时间消耗等正常情况下,完成某工序所能达到的加工精度范围。这个加工精度的范围,就是这种加工方法的经济加工精度,简称经济精度。

不同的加工方法,其经济精度也不相同。如图 2-36 所示的三种加工方法。若要求加工公差小于  $\delta_2$  时应该选用磨削,这种加工方法的经济精度较高;要求公差大于  $\delta_1$  者,应该粗车,这种加工方法的经济精度低;要求公差介于  $\delta_1$  和  $\delta_2$  之间,则应精车,其经济精度适中。

各种加工方法的一般经济精度可从有关手册中查阅。表 2-3 列出普通机床各种加工方法的经济精度。而组合机床加工所能达到的精度如下:在铸铁件上钻孔,精度可达 6 级;在铸铁件上扩孔,精度可达 6~5 级,个别情况可达 4 级;精铰孔的精度可达 3~2 级,精镗孔可达 2~1 级精度;组合铣床铣平面,

可达到在  $500 \times 500 \sim 800 \times 800(\text{mm}^2)$  内不大于  $0.04 \sim 0.1\text{mm}$  的表面不平度。利用攻丝靠模装置,在良好的润滑下,在铸铁件上可加工出 2 级精度螺纹孔。

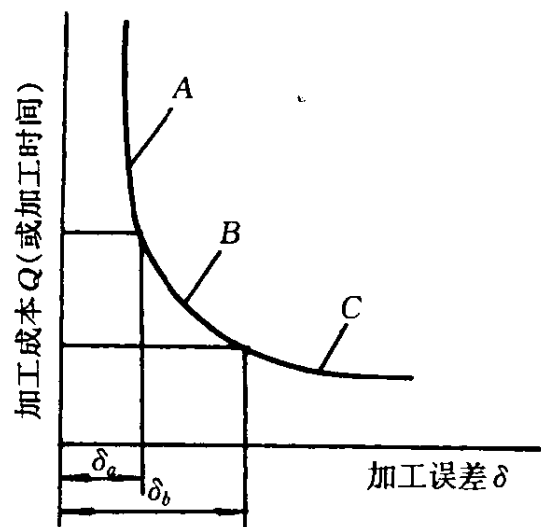


图 2-35 加工误差和加工成本的关系

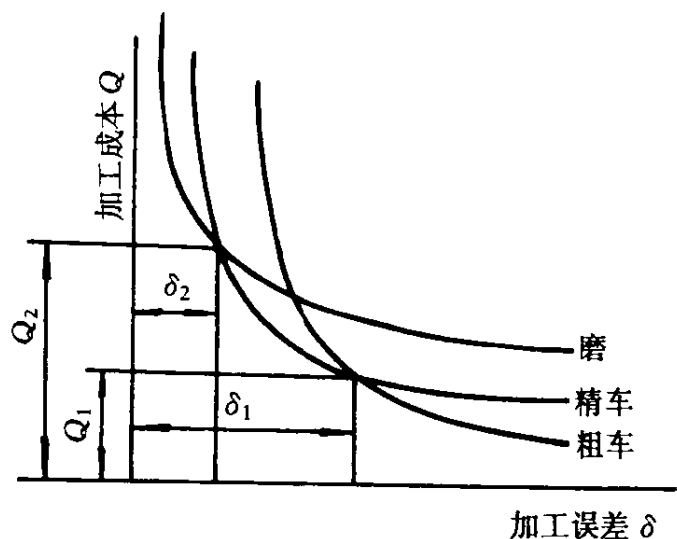


图 2-36 不同加工方法的加工误差和加工成本的关系

表 2-3 普通机床各种加工方法的经济精度

加工方法	精度等级	
	平均经济精度	上下范围
粗车,粗镗	7	6~9
半精车,半精镗	6	5~6
精车,精镗	4	3~5
细车,细镗	2	1~3
精铣	6	5~7
半精铣,精铣	4	3~6
钻孔	7	6~9
粗铰	4	3~4
精铰	2	1~3
粗拉	3	2~4
精拉	2	1~2

续表 2-3

加工方法	精度等级	
	平均经济精度	上下范围
粗磨	5	4~6
半精磨	2	1~3
精磨	1	
研磨	1级以上	
超精加工,抛光	1级以上	

这些数据是在一般生产条件下对不同的加工方法进行大量的综合性观察,并用统计法将所得数据整理归纳而成。可供制定工艺规程选择表面加工方法时参考。

## 2.3 机械加工表面层质量

### 2.3.1 机械加工表面层质量的重要性及其含义

机械零件的加工质量除了加工精度外还有表面层质量,产品的工作性能尤其是它的可靠性、耐久性等,在很大程度上取决于其主要零件的表面层质量,尤其对于能源动力机械设备等属于高温、高压、高速的机械设备,对耐磨损、耐疲劳、耐腐蚀以及密封性等要求较高,就需要有较高的表面质量,这是由于下列四个原因所致:①外部载荷所引起的零件的应力的最大值往往出现在零件的表面层;②经过加工后的零件表面易产生如裂纹、裂痕、加工痕迹等缺陷,这些缺陷在动载荷作用下会引起应力集中而导致零件破坏;③零件经过机械加工后表面层的物理机械性能、金相组织不同于基体材料,从而影响使用寿命;④零件失效往往从表面局部损坏开始的。

表面层质量也叫表面完整性,表面完整性不但指机械加工后表面的粗糙度、波纹度、以及纹理等表面特征,还包含已加工表面大致在0.38mm(0.015英寸)厚度范围内各种物理、机械、冶金方面的特性,如残余应力、硬化程度、微观组织变化、晶间腐蚀、热损伤区、材质不匀等等。表面完整性对于在工作时受的应力很大,或经受的是反复载荷,以及使用环境恶劣的零件尤为重要。

表面层质量的含义主要归结为两方面内容:

#### 1. 表面几何形状特性

##### (1) 表面粗糙度:

加工表面微小峰谷和间距组成的微观几何形状特征。波距小于1mm。

##### (2) 表面波度:

波距在1~10mm范围内的表面微观几何形状特征。通常是加工过程中工艺系统的低频振动所造成的。

#### 2. 表面层物理机械性能

##### (1) 表面层加工硬化。

##### (2) 表面层金相组织的变化。

##### (3) 表面层残余应力。

### 2.3.2 影响表面粗糙度的因素

#### 1. 切削加工中影响表面粗糙度的因素

##### (1) 几何因素——由残留面积的高度引起的横向表面粗糙度:

在切削过程中,刀刃相对于工件表面的运动轨迹,形成残留面积。它是产生横向粗糙度(在垂直于切削速度方向的截面内)的基本因素。理论残留面积的高度  $H$  可根据刀具的主偏角  $\varphi$ 、副偏角  $\varphi_1$ 、刀尖圆弧半径  $r$  和进给量  $f$ ,由几何关系求得(图 2-37):

$$H = \frac{f - r(\tan\varphi/2 + \operatorname{tg}\varphi_1/2)}{\cot\varphi + \cot\varphi_1} \quad (2-13)$$

由上式可知,理论残留高度  $H$  随  $f$ ,  $\varphi$  和  $\varphi_1$  的减小和  $r$  的增大而降低。

利用降低理论残留高度  $H$  来降低表面粗糙度是各种加工方法均可采用的普遍规律。在精加工时保证粗糙度是很重要的,但此时进给量  $f$  已经很小,而减小主偏角  $\varphi$  又会影响切削分力之间的比例,因此只有通过改变副偏角  $\varphi_1$  来使  $H$  值降到最小。一般采用直线形或大圆弧修光刃,使有效副偏角  $\varphi_1 = 0$ 。图 2-38(a)为普通的带修光刃的刀具,修光刃长度  $l = (1.2 \sim 1.5)f$ 。在强力切削中,为增强刀尖强度,修光刃与过渡刃并用,过渡刃的偏角一般为主偏角的一半(图 2-38(b))。大圆弧宽修光刃用在精铣时,半径  $R$  约为 500mm(图 2-38(c))。采用带刃倾角  $\lambda$  的宽修光刃,可以减小振动,进一步降低表面粗糙度(图 2-38(d))。

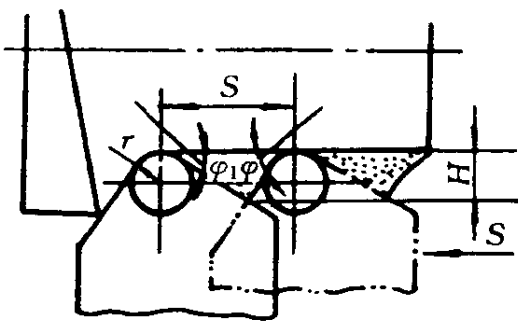


图 2-37 车削时的残留面积

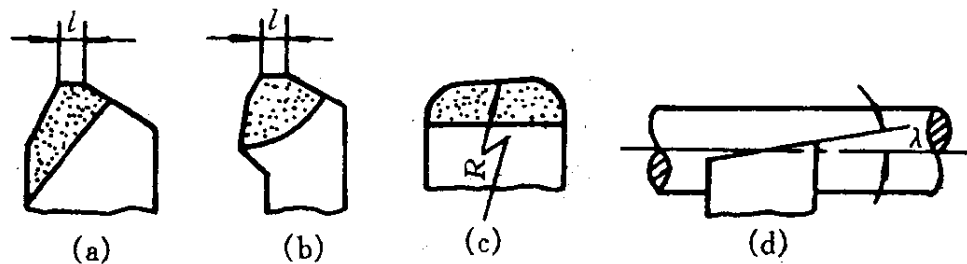


图 2-38 降低表面粗糙度的几种刀刃形状

##### (2) 物理因素:

切削加工后表面粗糙度的实际轮廓形状一般都与纯几何因素所形成的理想轮廓有较大的差别,这是由于存在着与被加工材料的性质及切削机理有关的物理因素的缘故。在切削过程中刀具的刃口圆角及后面的挤压与摩擦使金属材料发生塑性变形而使理想残留面积挤歪或沟纹加深,因而增大了表面粗糙度。图 2-39 中所示为垂直于切削速度方向的粗糙度,称为“横向粗糙度”。图中的实际轮廓为几何因素和物理因素的综合。在切削方向的粗糙度,称为“纵向粗糙度”,它主要由物理因素所造成。

##### ① 已加工表面的形成过程与物理因素:

为了阐明物理因素,首先要了解切削过程中工件的变形区与已加工表面的形成过程。

切削塑性金属时可划分三个变形区:

第一变形区 图 2-40 中  $OA \sim OM$  间的 I 区域,也

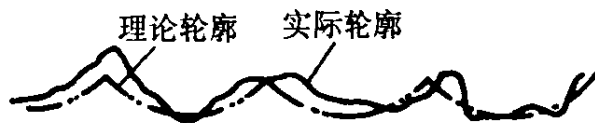


图 2-39 加工后表面的实际轮廓和理想轮廓

就是剪切区,是切削过程中产生变形的  
主要区域。为了研究切削层在第一变形  
区内剪切滑移过程,可跟踪切削层金属  
中某点  $P$  进行观察(图 2-41)。

当刀具前面推挤切削层时,在切削  
层内产生应力和应变。在  $P$  点离切削  
刃较远时,它所受到的应力较小,由此产  
生的弹性变形也较小。随着  $P$  点逐渐  
趋近切削刃,其应力和应变随之增大。当  
 $P$  点到达点 1 位置时,若通过点 1 的等  
应力曲线  $OA$ ,其剪应力达到材料的屈  
服强度,即  $\tau = \tau_s$ ,则从 1 点再向前移动的  
同时,还沿  $OA$  面开始剪切滑移,其合成运  
动将使  $P$  点从点 1 流动到点 2 位置,2'-2  
就是滑移量或剪切距离,称  $OA$  线为始滑  
移线(或称始剪切线)。由于在塑性变形过  
程中产生加工硬化现象(即材料的屈服强  
度提高),材料要继续滑移必须不断提高应  
力  $\tau$ 。也就是  $P$  点向 1, 2, 3, ... 各点移动  
时,它所受到的剪应力不断增加。通过各  
点的等应力曲线都从切削刃开始一直延伸  
到切削层外层表面(又称自由表面),它们

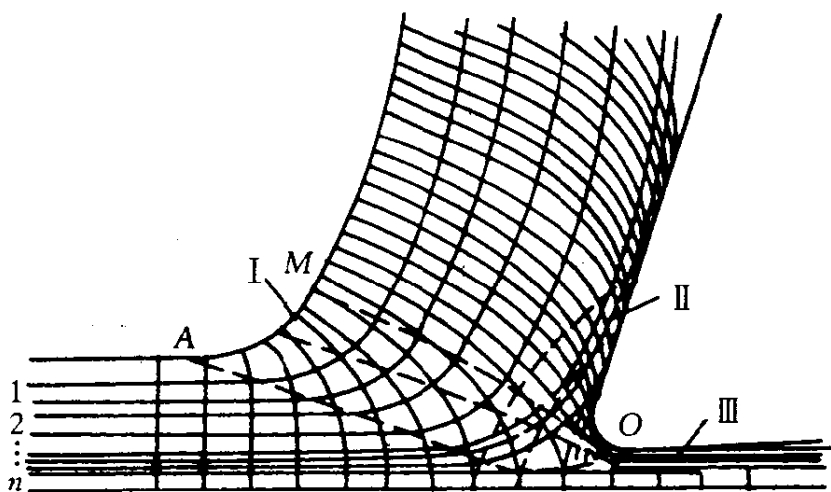


图 2-40 金属切削过程中的流线和滑移线示意图

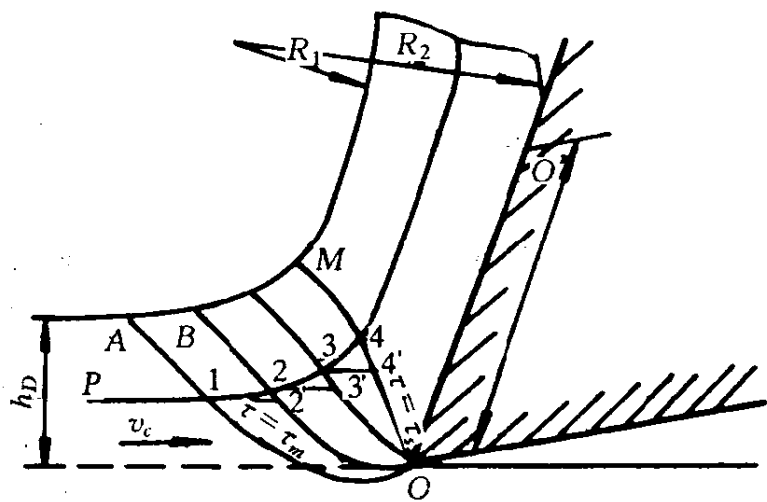


图 2-41 第一变形区金属的滑移

均与自由表面成  $45^\circ$  夹角。直到  $P$  点到达点 4 位置,其流动方向与前刀面平行,不再作剪切滑移,基本变形到此结束,这时剪应力和剪应变达到最大值,其中  $\tau = \tau_{\max}$ ,点 4 的等应力曲线  $OM$  称为终滑移线(或称终剪切线)。切削层的材料经过由  $OA$  到  $OM$  的第一变形区后逐渐成为切屑,在第一变形区内,其变形主要是沿滑移线的剪切变形,并伴有加工硬化现象。

**第二变形区** 第一变形区的剪切变形不是切屑形成过程的全部。切屑从  $OM$  处开始同材料基体相分离,并沿刀具前面流出时,还将受到前刀面的挤压和摩擦,使切屑进一步产生滑移变形,这就是第二变形区,它发生在刀-屑接触区,如图 2-40 中 II 所示。

**第三变形区** 刀具后面与已加工表面间的挤压和摩擦产生的以加工硬化和残余应力为特征的滑移变形,构成了第三变形区,如图 2-40 中 III 所示。

在分析第一、二变形区的变形时,是假设刀具的切削刃是绝对锋利的,而实际的切削刃的刃口有一个钝圆半径  $r_n$ 。 $r_n$  的大小与刃磨质量、刀具材料及刀具楔角  $\beta_0$  有关。刃磨后,高速钢刀具的  $r_n = 3 \sim 10 \mu\text{m}$ ; 硬质合金刀具的  $r_n = 18 \sim 32 \mu\text{m}$ 。另外,刀具开始切削不久,主后面就会产生磨损,从而形成一段后角  $\alpha_\alpha = 0$  的棱面。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  $r_n$  和主后面磨损棱面的作用。

图 2-42(a) 表示已加工表面的形成过程。在切削的金属以速度  $v_n$  进入第一变形区产生塑性变形和晶粒伸长后,靠近切削刃圆弧处的金属,由于刃口圆弧的摩擦和挤压作用,它的晶

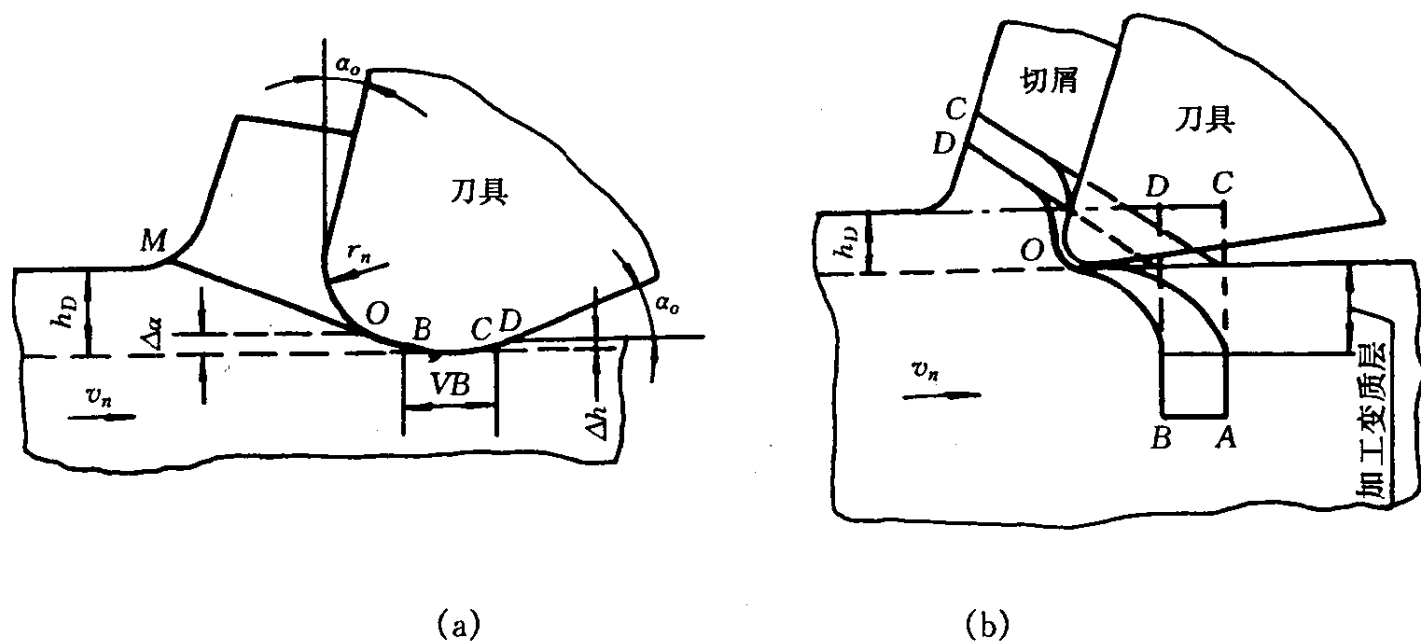


图 2-42 已加工表面的形成过程

粒伸得更长,成为包围在切削刃周围的纤维层(图 2-42(b))。在切削刃圆弧上有一  $O$  点,与该点相接触的金属所受正应力最大,在其两侧急剧减小;而剪应力在  $O$  点为零,在其两侧逐渐增大,方向则相反。这使在  $O$  点前方的金属产生向第一变形区和已加工表面内部两个方向的滑移,从而使此处的纤维层越来越细,最后在  $O$  点断裂。整个切削厚度  $h_D$  中在  $O$  点处分离为两部分: $O$  点以上的金属成为切屑沿前面流出; $O$  点以下的部分,即图 2-42 中  $\Delta a$  的一薄层金属,则在切削刃钝圆半径圆弧的下方挤压过去。后一部分金属经过钝圆部分  $B$  点之后,又受到主后面上  $VB$  棱面的挤压和摩擦;经过  $C$  点后开始弹性恢复(假定弹性恢复的高度为  $\Delta h$ ),在  $CD$  长度上继续与主后面摩擦,使最后成为已加工表层的变形更加剧烈,它的金属纤维被拉伸得更长更细,其纤维方向平行于已加工表面。这就是形成已加工表面的全过程。

从已加工表面的形成过程可看出表面层物理机械性能形成的原因,也可看出影响表面粗糙度的物理因素是:切削层从工件表面撕裂不均匀,刀刃圆角半径与后刀面对工件表面的挤压与摩擦引起的塑性变形、振动、刀瘤、打滑与鳞刺。其中主要物理因素是振动、刀瘤与鳞刺。

## ② 振动:

振动破坏了工艺系统的各种形成运动,使工件与刀具的相对位置发生周期性改变,当振动频率低时产生波度,频率高时产生表面粗糙度。

对于加工过程影响较大的是强迫振动和自激振动,因为它们都是非衰减性振动。

强迫振动产生原因有:

- 系统外部周期性干扰力通过地基传入正在进行加工的机床,引起振动。
- 工艺系统中的旋转零件如工件、卡盘、砂轮、联轴器、皮带轮等由于材质不均或形状不对称、安装偏心等原因在旋转时产生方向周期性变化的离心力激发系统振动。
- 传动机构的缺陷:如平皮带传动中平皮带接头、三角皮带厚度不均匀、齿轮的周节误差使齿与齿传动时发生冲击等等。
- 切削过程的间歇特性:如常见的铣、拉、滚齿等加工,由于切削的不连续导致切削力的周期性改变,从而产生振动。

控制强迫振动的措施有:

- 隔振以减小外界干扰力对需要防振的机床或部件产生的激振力,通常在振源与需防振的系统之间安放合适的弹性隔垫。

- 减小系统内部产生的激振力,如对系统内的回转零件进行动、静平衡,提高齿轮传动中齿的基节和齿形精度等。

- 避免共振、提高静刚度、增加阻尼或提高系统的质量刚度系数比等方法以提高工艺系统的动刚度,增加抗振性。例如,刮研机床接触面,减小轴承游隙,增加预紧力,增设中心架、跟刀架,都可以提高静刚度,改变或调节系统固有频率以提高动刚度等等。

自激振动是在非周期性外力作用的情况下由振动过程本身产生的切削力周期性的变化,同时由这种变化的切削力来加强和维持的一种振动。

控制自激振动的措施有:

- 合理选择切削用量:提高切削速度,当  $v > 60 \sim 70 \text{m/min}$  既可提高生产率又减小振动;选取较大的进给量和减小切削深度和切削宽度有利于减小自激振动。

- 合理选择刀具的几何角度:主偏角越大则振动越小,因为此时径向切削分力  $P_y$  越小,而机床的轴向刚度好于径向刚度;前角加大,颤振减小;后角减小到  $2^\circ \sim 3^\circ$  时,由于后刀面摩擦,产生阻尼,对粗加工有减振作用;减小刀尖圆角半径,以减小  $P_y$  力,可减振。

- 提高工艺系统的动刚度和阻尼,增强抗振性。例如在机床床身内腔中采用薄壁封砂结构(见图 2-43 所示),以增加阻尼。

- 采用阻尼式减振器或动力式吸振器以减小振动。图 2-44 是车刀上用的动力吸振器,它是利用套筒——弹簧系统与车刀共振来吸收车刀振动的能量的。图 2-45(a) 是带消振块的镗杆结构,设镗杆振动时的振幅为  $A$ ,消振块与镗杆孔壁间隙为  $C$ ,在  $A, C$  一定的条件下,振动过程如图 2-45(b) 所示。当镗杆向上振时,消振块跟着镗杆一起向上,到振动中间位置时速度最快,再向上振动,镗杆速度逐渐降低,直至为零,但消振块仍以镗杆最大速度向上,因此消振块和镗杆分离。当镗杆由上向下回振时,回至中间位置正好和消振块相撞,从而消耗了振动的能量。

### ③ 刀瘤与鳞刺:

在低切削速度下加工塑性材料(如低碳钢、铬钢、不锈钢、高温合金、铝合金等)时,常容易出现刀瘤与鳞刺,使加工表面粗糙度严重地恶化,成为切削加工的主要问题。

刀瘤是切削过程中切屑底层与前刀面发生冷焊的结果,刀瘤形成后并不是稳定不变的,而是不断地形成、长大,然后粘附在切屑上被带走或留在工件上,图 2-46 说明了这种情况。由于刀瘤有时会伸出切削刃之外,其轮廓也很不规则,因而使加工表面上出现深浅和宽窄都不断变化的刀痕,大大地提高了表面粗糙度。

鳞刺是已加工表面上出现的鳞片状毛刺的缺陷。加工中出现鳞刺是由于切屑在前刀面上的摩擦和冷焊作用造成周期性的停留,代替刀具推挤切削层,造成切削层和工件之间出现撕裂

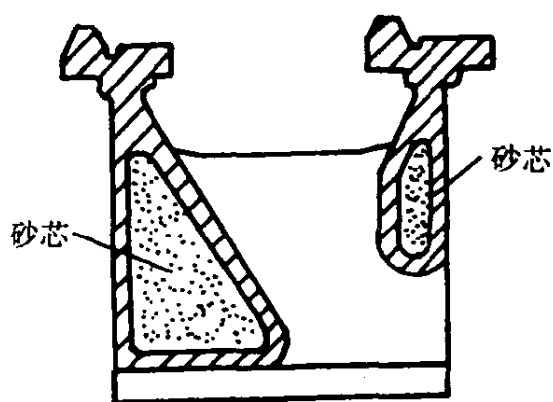


图 2-43 铸件薄壁封砂结构

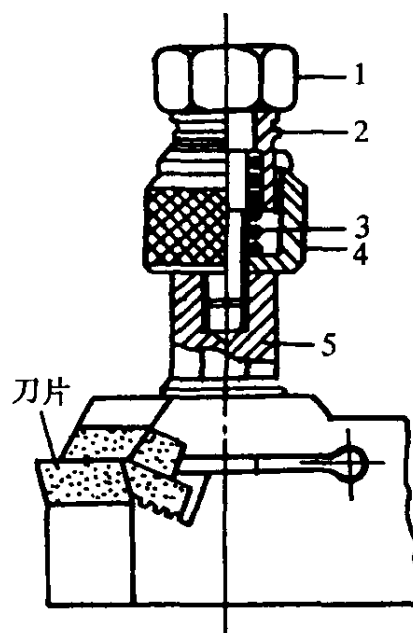


图 2-44 V 车刀上用的动力式消振器

1—调节螺钉; 2—套筒; 3—弹簧;  
4—碰撞质量; 5—支柱

现象,如图2-47所示,当推挤到一定程度后,切削力增大,克服了切屑与刀具前刀面上的粘接和摩擦力,切屑又开始流动,而后摩擦力增大,切屑又停留,如此连续发生,就在加工表面上出现一系列的鳞刺,构成已加工表面的纵向粗糙度。鳞刺的出现并不依赖于刀瘤,但刀瘤的存在会影响鳞刺的生成。

从物理因素看,要降表面粗糙度主要应采取措施减少加工时的塑性变形,避免产生刀瘤和鳞刺。对此影响最大的是切削速度和被加工材料的性质。

#### A. 切削速度 $v$ 的影响:

从实验知道,  $v$  愈高,切削过程中切屑和加工表面的塑性变形程度就愈低,因而粗糙度也可愈低。刀瘤和鳞刺都在较低的速度范围产生,此速度范围随不同的工件材料、刀具材料、刀具前角等变化。采用较高的切削速度常能防止刀瘤、鳞刺的产生。图2-48所示即为不同速度对表面粗糙度的关系曲线。实线表示只受塑性变形影响,虚线表示受刀瘤影响时的情况,当切削速度小时,不产生刀瘤,当切削速度很大时,温度高,刀瘤不易粘在刀具上。

#### B. 被加工材料性质的影响:

一般来说,韧性较大的塑性材料,加工后粗糙度较粗,而脆性材料的加工粗糙度比较地接近理想粗糙度。对于同样的材料,晶粒组织愈是粗大,加工后的粗糙度也粗。因此为了减小加工后的表面粗糙度,常在切削加工前进行调质或正常化处理,以得到均匀细密的晶粒组织和较高的硬度。

#### C. 刀具的几何形状、材料、刃磨质量的影响:

刀具的前角  $\gamma$  对切削过程的塑性变形有很大影响,  $\gamma$  值增大时,塑性变形程度减小,粗糙度也就能降低。  $\gamma$  为负值时,塑性变形增大,粗糙度也将增大。后角  $\alpha$  过小会增加摩擦,刃倾角  $\lambda$  的大小又会影响刀具的实际前角,因此都会影响加工表面的粗糙度。刀具的材料与刃磨质量

对产生刀瘤、鳞刺等现象影响甚大,如用金刚石车刀精车铝合金时,由于摩擦系数较小,刀面上

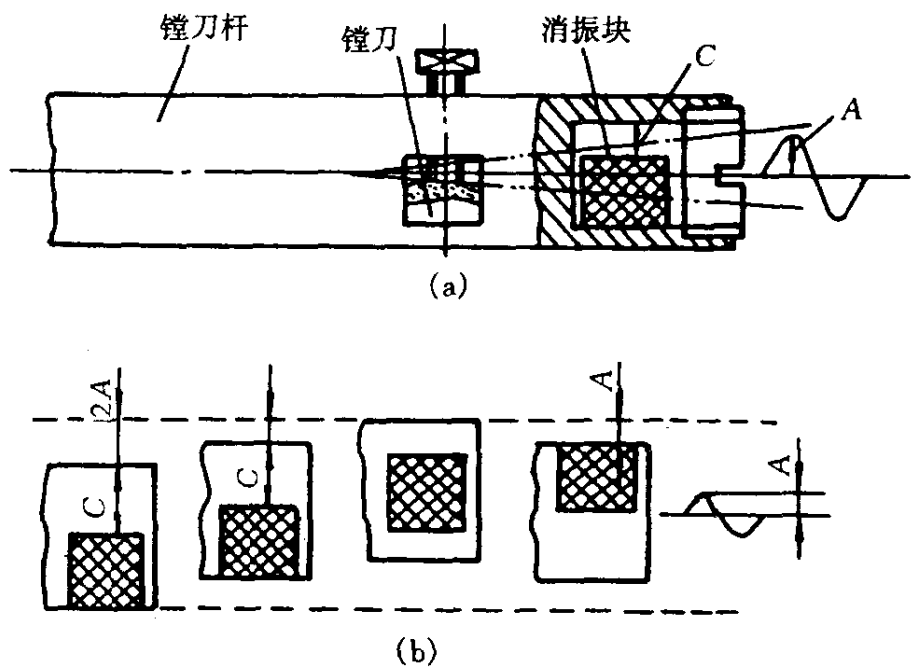


图 2-45 镗杆上用的动力式消振器

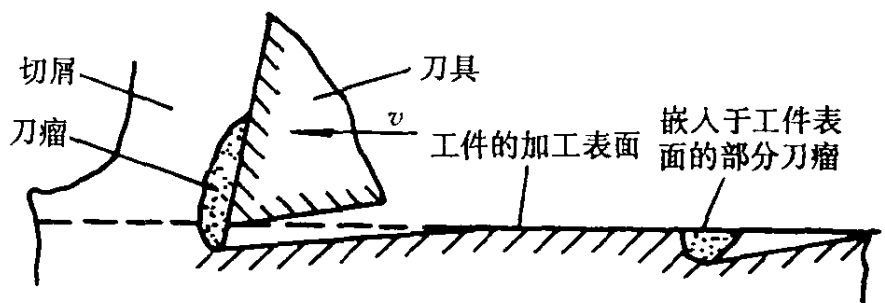


图 2-46 刀瘤对工件表面质量的影响

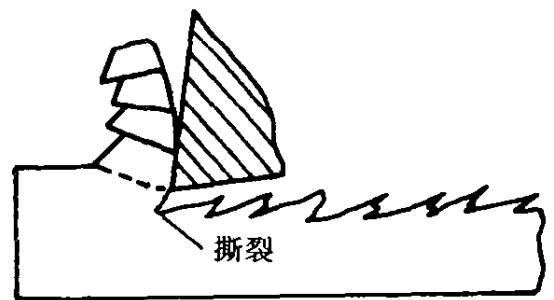


图 2-47 鳞刺的产生

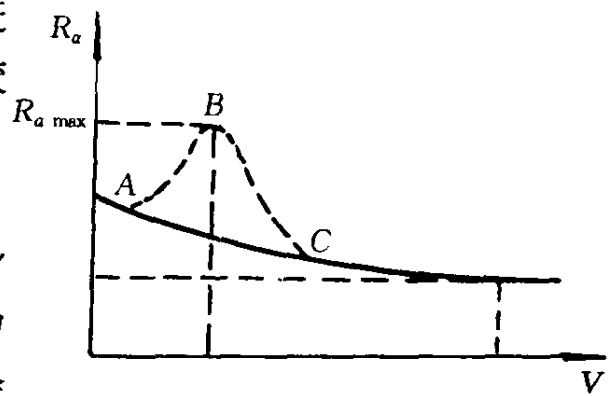


图 2-48 切削速度对表面粗糙度的影响



就不会产生切屑的粘附、冷焊现象,因此能降低粗糙度。降低前、后刀面的刃磨粗糙度,也能起到同样作用。

此外,合理选择冷却润滑液,提高冷却润滑效果,常能抑制刀瘤、鳞刺的生成,减少切削时的塑性变形,有利于降低表面粗糙度。

## 2. 磨削加工中影响表面粗糙度的因素

磨削加工不同于车、铣等切削加工。磨削加工表面是由砂轮上磨粒的微刃进行切削的。这些带有负前角的磨粒刻划出沟槽形成了加工表面,这是几何方面因素影响表面粗糙度。另外,由于切削刃不锋利,切屑厚度一般仅为 $0.2\mu\text{m}$ 左右。所以大多数磨粒在工作时只是对表面产生挤压作用,而使表面出现塑性变形,磨削时的高温更加剧了塑性变形。这是物理方面因素影响表面粗糙度。磨削加工中影响表面粗糙度的主要因素有:

### (1) 磨削用量的影响:

#### ① 砂轮速度 $v_s$ :

实验表明,砂轮线速度对表面粗糙度有一定的影响。速度提高,可增加工件单位面积上的刻痕数,同时参与切削的磨粒刃口多,残留面积小,而且每个刃口切除的金属量少,因而刻痕多而均匀,所以表面粗糙度较小。此外,因高速磨削下塑性变形不充分,变形程度小,也有利于降低表面粗糙度。砂轮速度过高时,会引起振动,使工件表面产生几何形状缺陷或烧伤,从而破坏表面质量。

#### ② 工件线速度 $v_w$ 和纵向进给量 $f$ :

$v_w$  低则每一刃口的平均切削厚度减小; $f$  小则加工表面上同一点磨削次数多,所以都能降低表面粗糙度,但并不显著。 $v_w$  过低时,因工件与砂轮接触时间长,传到工件上的热量增多,有可能出现烧伤。

#### ③ 磨削深度 $a_p$ :

磨削深度(即径向进给量)对表面粗糙度影响较大。因为  $a_p$  增加,表面塑性变形程度加剧,表面粗糙度也增大。为提高磨削效率,一般开始采用较大的磨削深度,后期采用较小磨削深度或进行无进给磨削(光磨),以使表面粗糙度降低。

光磨即无横向进给磨削。它是靠工艺系统弹性恢复获得的微量进给进行磨削。磨削次数对粗糙度影响较大。特别是采用细粒度的树脂或橡胶砂轮进行超精密磨削时,微刃几乎无切削动作。只是因砂轮与工件表面具有一定的压力,摩擦与抛光作用降低了表面粗糙度,因此采用光磨并适当掌握磨削的次数,对降低粗糙度起着重要作用。

### (2) 砂轮的影响:

#### ① 砂轮粒度:

粒度愈细,单位面积上磨粒数愈多,工件表面上刻痕密而细,则表面粗糙度愈细。粒度过细时,砂轮易堵塞,切削性能下降,粗糙度反而会增大,同时还会引起烧伤。

#### ② 砂轮硬度:

硬度应大小合适,半钝化期愈长愈好。砂轮太硬,磨粒钝化后仍不易脱落,使工件表面受到强烈摩擦和挤压作用,塑性变形程度增加,表面粗糙度增大或使表面烧伤。砂轮太软,磨粒易脱落,常会产生磨损不均匀现象,而使表面粗糙度变差。硬度适当时,有良好的自锐性,使磨钝的磨粒及时脱落,新磨粒继续切削,就会得到较细的表面粗糙度。



## (3) 工件材料的影响:

工件材料硬度太大,砂轮易磨钝,故粗糙度大。工件硬度太软,砂轮易堵塞变钝,磨削热增加,粗糙度增大。

塑性、韧性大的工件材料,其塑性变形程度大,磨削后工件的粗糙度较大。

## 2.3.3 影响表面物理机械性能的因素

## 1. 表面层的加工硬化

## (1) 加工硬化的产生机理及衡量指标:

表面加工硬化是由于机械加工时,工件表层金属受到切削力的作用,产生强烈的塑性变形,使金属的晶格被拉长、扭曲、甚至被破坏而引起的,金属表面层产生加工硬化后,表面硬度提高,塑性降低,物理力学性能发生变化。加工硬化也称为冷作硬化,另一方面,机械加工中产生的切削热在一定条件下会使金属在塑性变形中产生回复现象(已加工硬化的金属回复到正常状态)使金属失去加工硬化中所得到的物理力学性能,这种现象称之为软化。因此,金属在加工过程中最后的加工硬化取决于硬化速度与软化速度的比率。

衡量加工硬化的指标有下列三项:

- ① 表面层的显微硬度  $HV$ 。
- ② 硬化层深度  $h$ 。
- ③ 硬化程度  $N$ 。

$$N = \frac{HV - HV_0}{HV_0} \times 100\% \quad (2-14)$$

式中  $HV_0$ ——金属原来的显微硬度。

## (2) 各种机械加工方法的表面层加工硬化及其影响因素:

各种机械加工方法在加工钢件时表面层加工硬化的情况如表 2-4 所示。

表 2-4 各种加工方法的加工硬化

加工方法	硬化层深度 $h(\mu\text{m})$	硬化程度 $N(\%)$
	平均值	平均值
车削	30~50	20~50
精细车削	20~60	40~80
端铣	40~100	40~60
圆周铣	40~80	20~40
钻孔、扩孔	180~200	60~70
拉孔	20~75	50~100
滚齿、插齿	120~150	60~100
外圆磨低碳钢	30~60	60~100
外圆磨未淬硬中碳钢	20~60	40~60
外圆磨淬火钢	20~40	25~30
平面磨	16~25	50
研磨	3~7	12~17

影响表面层加工硬化的因素,可以从三个方面来分析:

① 切削力愈大,塑性变形愈大,硬化程度愈大,硬化层深度也愈大。因此,增大进给量  $f$ ,切削深度  $a_p$  和减小刀具前角  $\gamma$ ,都会增大切削力,使加工硬化严重。

② 切削温度越高,软化作用增大,使得冷硬作用减小。

③ 当形变速度很快(即切削速度很高)时,塑性变形可能跟不上,这样塑性变形将不充分,因此硬化层深度和硬化程度都减小。

(3) 磨削表面层的硬度变化:

磨削表面显微硬度变化的起因主要为:金属剧烈的塑性变形产生的加工硬化,使得表层的硬度提高;磨削热使表层温度急剧上升,导致该部分金属软化(回火、再结晶等),使硬度下降;磨削高温下的表层材料,在受到外部磨削液的骤冷后,产生了淬火的效果,使得硬度明显提高。磨削表面层显微硬度的变化,一般是上述三种作用的综合结果。但是,对不同的零件和不同的磨削条件,这三种作用所占的地位是各有主次的。实验表明,一般磨削加工后,工件表面层硬度的变化,较为典型的情况有如图 2-49 中所示的三种。

图 2-49(a)所示,工件表层硬度的升高主要是由于加工硬化所致,此时磨削温度不高。在磨削强度、硬度不太高的材料以及砂轮的自锐性能好且冷却充分时,多出现此种曲线的情况。

图 2-49(b)所示,由于磨削区温度的影响,使表面马氏体组织产生回火软化现象,硬度降低。而稍里一层温度较低,仅有加工硬化作用,故硬度上升,并比基体的硬度高。磨削淬火钢和用较钝的砂轮进行半精磨时,出现图(b)所示的曲线的情况。

图 2-49(c)所示,磨削温度很高,而冷却不充分,致使外层金属发生退火,里层发生回火。加工硬化也无法发挥其促使表层硬度提高的作用。所以工件表层和稍里层的硬度均较基体硬度为低。磨削淬火钢时,如果砂轮修整质量欠佳或磨削深度过大、磨削液不充分,就会出现图(c)的曲线的情况。

## 2. 表面层金相组织变化

(1) 金相组织变化与磨削烧伤的产生:

机械加工过程中,在工件的加工区及其邻近区域,将产生一定的温升。当温度超过金相组织变化的临界点时,金相组织就会发生变化。对于一般的切削加工而言,温度还不至于上升到如此程度,但对于磨削加工来说,由于它产生的单位面积上的切削热比一般切削方法要大几十倍,使工件非常易于达到相变点。因此,磨削是一种典型的容易产生加工表面金相组织变化(磨削烧伤)的加工方法。

磨削淬火钢时,在工件表面层上形成的瞬时高温将使金属产生以下三种金相组织变化:

① 如果工件表面层温度超过相变温度  $A_{c3}$  (一般中碳钢为  $720^{\circ}\text{C}$ ),则马氏体转变为奥氏

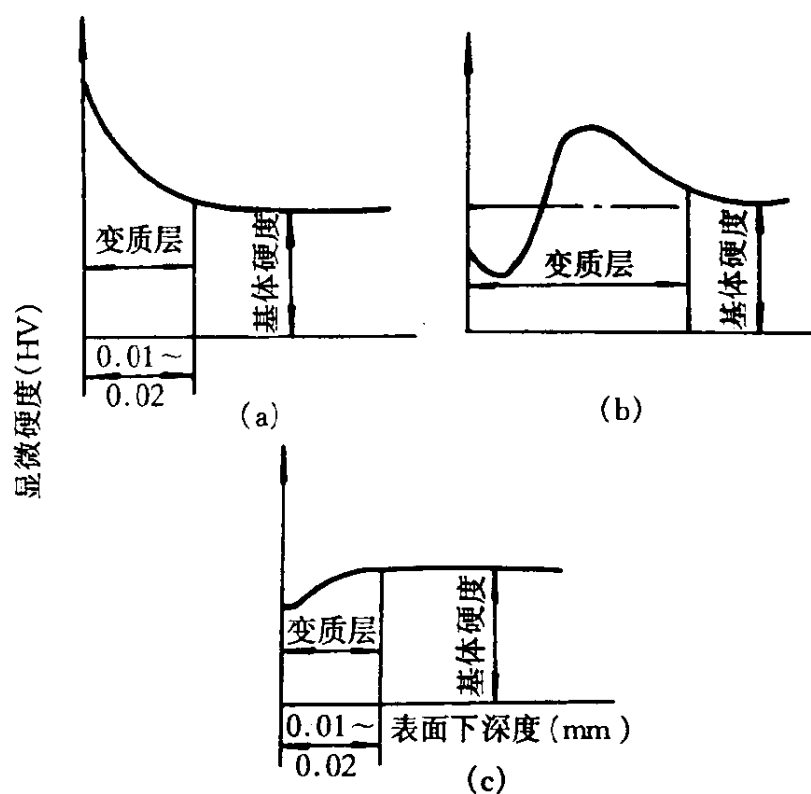


图 2-49 磨削表面层硬度变化

体,而这时又无冷却液,则表面硬度急剧下降,这时工件表层被退火,这种现象称为退火烧伤。干磨时很容易产生这种情况。

② 如果工件表面层温度超过相变温度  $A_{c3}$ , 马氏体转变成奥氏体,且这时有充分的冷却液,则表层将速冷形成二次淬火马氏体,硬度比回火马氏体高,但很薄,只有几微米厚,其下为硬度较低的回火索氏体和屈氏体。由于二次淬火层极薄,表面层总的硬度是降低的。因此认为是烧伤,称为淬火烧伤。

③ 如果工件表面层温度未超过相变温度  $A_{c3}$ , 但超过马氏体的转变温度(一般中碳钢为  $300^{\circ}\text{C}$ ), 这时,马氏体将转变为硬度较低的回火屈氏体或索氏体,这叫回火烧伤。

严重的磨削烧伤使零件使用寿命成倍下降,有时甚至根本无法使用。工件磨削出现的烧伤色是工件表面在瞬时高温下产生的氧化膜颜色,多为黄、褐、紫、青等颜色,烧伤的温度为由低至高,烧伤的深度由浅至深,当颜色呈淡黄时,说明烧伤温度最低,烧伤深度最浅。

## (2) 影响磨削烧伤的因素:

### ① 磨削用量:

磨削深度  $a_p$  当磨削深度增加时,无论是工件表面温度,还是表层下不同深度的温度,都随之升高,烧伤会加重,故  $a_p$  不能选得太大。

工件纵向进给量  $f_a$   $f_a$  越大,磨削区表面温度越低,磨削烧伤越轻。其原因是  $f_a$  的增加使砂轮与工件的表面接触时间相对减少,因而热的作用时间减少,散热条件得到改善。为了弥补纵向进给量增大而导致表面粗糙的缺陷,可采用较宽的砂轮。

工件速度  $v_w$  增大工件速度时,磨削区温度会上升,但因为  $v_w$  增大,虽使发热量增大,但热的作用时间却减少了。因此,为了减少烧伤而同时又能保持高的生产率,在选择磨削用量时,应选择较大的工件线速度和较小的磨削深度,同时为了弥补  $v_w$  增大而导致表面粗糙的缺陷,一般还应提高砂轮转速。

### ② 工件材料:

工件材料对磨削区温度的影响主要取决于它的硬度、强度、韧性和导热系数。

硬度愈高,磨削热量愈多;但材料过软,易于堵塞砂轮,反而使加工表面温度急剧上升。工件强度愈高,磨削时消耗的功率愈多,发热量也愈多;工件韧性愈大,磨削力愈大,发热愈多。导热性能比较差的材料,如耐热钢、轴承钢、不锈钢等,在磨削时都容易产生烧伤。

### ③ 砂轮的选择:

硬度太高的砂轮,自锐性不好,使磨削力增大,温度升高,容易产生烧伤,因此用软砂轮较好。

立方氮化硼砂轮热稳定性好,磨削温度低,且本身硬度、强度仅次于金刚石,磨削力小,能磨出较高的表面质量。

砂轮结合剂最好采用具有一定弹性的材料,如树脂、橡胶等,这样当由于某种原因导致磨削力增大时,砂轮的磨粒能产生一定的弹性退让,使切削深度减小,避免烧伤。

选用粗粒度砂轮磨削,不容易产生烧伤。当磨削软而塑性大的材料时,为了避免砂轮堵塞,也宜选用较粗磨粒的砂轮。

### ④ 冷却条件:

采用切削液带走磨削区的热量可以避免烧伤。目前通用的冷却方法效果较差,实际上,没

有多少切削液能进入磨削区  $AB$ , 如图 2-50 所示。比较有效的冷却方法是内冷法, 切削液可直接进入磨削区, 发挥有效的冷却作用。

### 3. 表面层的残余应力及裂纹

#### (1) 表面残余应力产生的原因:

在没有外力的情况下, 工件表面层及其与基体材料的交界处所产生的互相平衡的应力称为表面层残余应力。表面残余应力的产生, 有以下三种原因。

##### ① 冷态塑性变形引起的残余应力:

在切削力作用下, 已加工表面受到强烈的塑性变形, 表面层金属体积发生变化, 此时基体金属受到影响而处于弹性变形状态。切削力除去后, 基体金属趋向恢复, 但受到已产生塑性变形的表面层的限制, 恢复不到原状, 因而在表面层产生残余应力。一般地说, 表面层在切削时受刀具后刀面的挤、压和摩擦影响较大, 其作用使表面层产生伸长塑性变形, 受到基体材料的限制而产生残余压应力。

##### ② 热态塑性变形引起的残余应力:

工件被加工表面在切削热作用下产生热膨胀, 此时基体金属温度较低, 因此表层产生热压应力。当切削过程结束时, 表面温度下降, 由于表层已产生热塑性变形并受到基体的限制, 故而产生残余拉应力。磨削温度越高, 热塑性变形越大, 残余拉应力也越大, 有时甚至产生裂纹。

##### ③ 金相组织变化引起的残余应力:

切削时产生的高温会引起表面层的金相组织变化。不同的金相组织有不同的密度, 马氏体密度  $\rho_{\text{马}} = 7.75\text{g/cm}^3$ , 奥氏体密度  $\rho_{\text{奥}} = 7.96\text{g/cm}^3$ , 珠光体密度  $\rho_{\text{珠}} = 7.78\text{g/cm}^3$ , 铁素体密度  $\rho_{\text{铁}} = 7.88\text{g/cm}^3$ 。以淬火钢磨削为例, 淬火钢原来的组织是马氏体, 磨削加工后, 表层可能产生回火, 马氏体变为接近珠光体的屈氏体或索氏体, 密度增大而体积减小, 产生残余拉应力。如果表面温度越过  $A_{c3}$ , 冷却又充分, 则表层将又成为马氏体, 体积膨胀, 产生残余压应力。

#### (2) 裂纹产生的原因:

残余拉压力是由于加热引起的, 当出现的残余拉应力超过工件材料的强度极限时, 工作表面就会出现裂纹, 当烧伤严重时表面就会出现裂纹。

#### (3) 影响表面残余应力及磨削裂纹的主要因素:

在切削加工中, 如果切削热不高, 表面层以冷塑性变形为主, 则此时表面层中将产生残余压应力。而一般磨削时, 热态塑性变形和相变却占主导地位。

影响磨削裂纹的因素很多, 其中许多因素与磨削烧伤相同。

磨削用量是影响磨削裂纹的首要因素。比如提高工件速度  $v_w$  可以减小残余拉压力, 消除裂纹 (见图 2-51)。减小磨削深度  $a_p$  可减小残余应力,

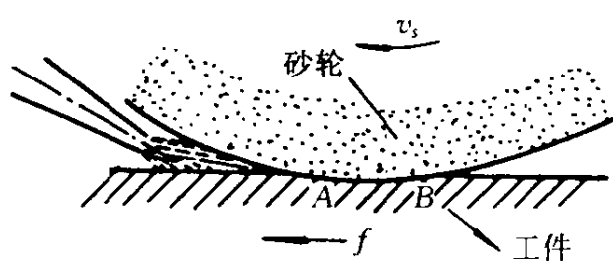


图 2-50 一般冷却方法

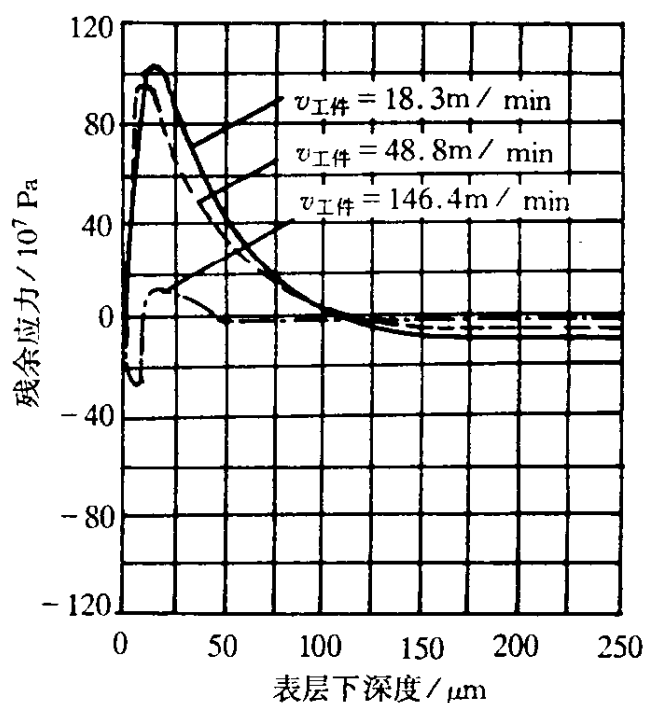


图 2-51  $v_w$  对表面残余应力的影响

当减小  $a_p$  到一定程度时,可得到很低的残余应力(见图 2-52)。降低砂轮速度可以得到残余压应力(见图 2-53),这对消除裂纹很有好处,但对生产率影响较大。

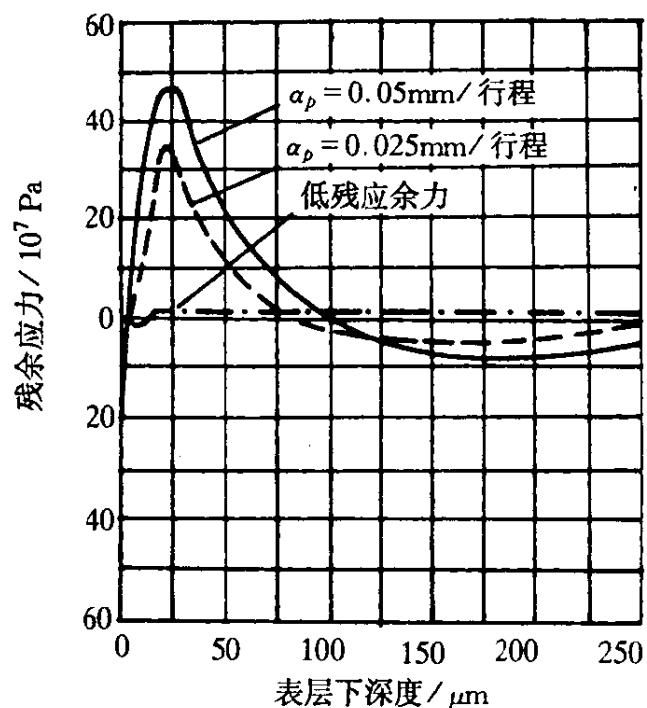


图 2-52  $a_p$  对表面残余应力的影响

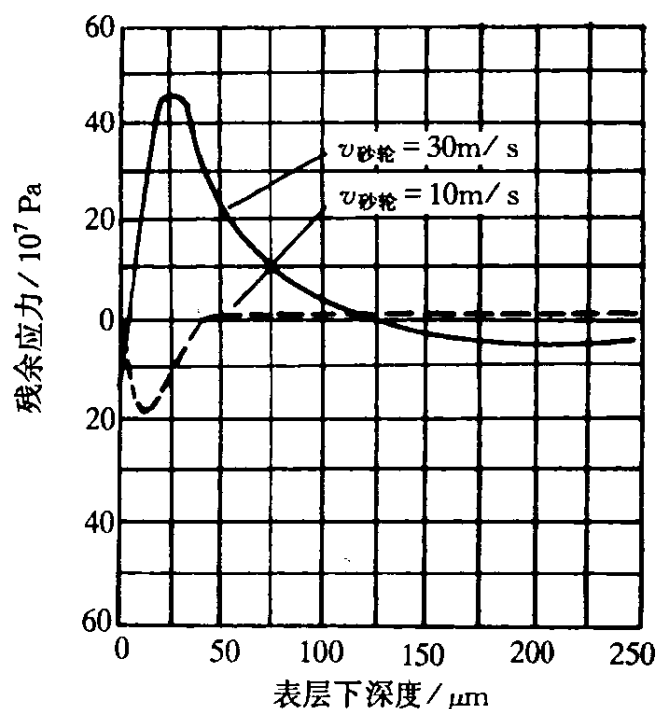


图 2-53  $v_{\text{砂轮}}$  对表面残余应力的影响

其次,工件材料也是影响磨削裂纹的一个重要因素。磨削导热性能差的高强度合金钢,表面易产生裂纹。磨削硬质合金时,由于它脆性大,抗拉强度低,而且导热性不好,因此极易产生裂纹,但用金刚石砂轮磨削就好得多。磨削碳钢时,含碳量越高,越容易产生裂纹。当含碳量小于 0.6%~0.7%时,几乎不产生裂纹。

热处理方法对磨削裂纹的产生也有一定影响。磨削淬火钢时,由于晶界脆弱,容易产生裂纹。渗碳钢和渗氮钢受温度影响易在晶界析出脆性碳化物和氮化物,故磨削时易出现网状裂纹。

#### 2.3.4 表面粗糙度的获得方法

要达到规定的表面粗糙度,首先要确定加工方法,各种典型的加工方法所能达到的表面粗糙度见表 2-5。其次,要制订适当的工艺路线来逐步减小表面破坏层和减小表面粗糙度。例如,对于要求表面粗糙度为  $R_a 0.1 \sim 0.05 \mu\text{m}$  的轴,不是单纯靠精研一道工序就能获得的。

表 2-5 各种加工方法所能达到的表面粗糙度

加工方法	粗糙度数值 $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )												相当于旧的国标表面光洁度	
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025		
火焰切割	...	—	...											$\nabla 2 \sim \nabla 3$
粗磨	...	—	—	...										$\nabla 2 \sim \nabla 4$
锯	...	—	—	—	...									$\nabla 2 \sim \nabla 5$
刨和插	...	—	—	—	—	—	...							$\nabla 2 \sim \nabla 7$
钻削			...	—	—	...								$\nabla 4 \sim \nabla 6$
化学铣			...	—	—	...								$\nabla 4 \sim \nabla 6$
电火花加工			...	—	—	...								$\nabla 5 \sim \nabla 6$
铣削		...	...	—	—	—	...							$\nabla 4 \sim \nabla 7$

续表 2-5

加工方法	粗糙度数值 $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )													相当于旧的国 标表面光洁度
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025		
拉 削					...	—	—							$\nabla 5 \sim \nabla 7$
铰 孔					...	—	—	...						$\nabla 5 \sim \nabla 7$
镗、车削			...	...	—	—	—	—	...	...	...			$\nabla 4 \sim \nabla 8$
滚筒光整						...	...	—	—	...	...			$\nabla 7 \sim \nabla 9$
电解磨削								...	—	...				$\nabla 7 \sim \nabla 9$
滚压抛光								...	—	...				$\nabla 8 \sim \nabla 9$
磨 削					...	...	—	—	—	—		...	...	$\nabla 6 \sim \nabla 10$
珩 磨							...	—	—	—	...	...		$\nabla 7 \sim \nabla 10$
抛 光								...	—	—	...	...		$\nabla 8 \sim \nabla 10$
研 磨								...	—	—	—	...		$\nabla 8 \sim \nabla 11$
超精加工								...	...	—	—	...		$\nabla 9 \sim \nabla 11$
砂型铸造		...	—	...										$\nabla 2 \sim \nabla 3$
热 滚 轧		...	—	...										$\nabla 2 \sim \nabla 3$
锻			...	—	—	...								$\nabla 3 \sim \nabla 5$
永久模锻造					...	—	...							$\nabla 5 \sim \nabla 6$
熔模铸造					...	—	...							$\nabla 5 \sim \nabla 6$
挤 压				...	...	—	—	...						$\nabla 5 \sim \nabla 7$
冷轧、拉拔					...	—	—	...	...					$\nabla 5 \sim \nabla 7$
压 铸						...	—	...						$\nabla 6 \sim \nabla 7$

注:1. 符号:—为平均适用,···为不常适用;2. 此表为国际标准秘书国澳大利亚提出的 ISO/R286 的修订草案;3. 此表适用于普通材料和一般生产过程

## 2.4 工件的装夹与夹具

### 2.4.1 工件在机床上的装夹

为了保证工件加工表面的精度,在加工之前,工件放到机床的装夹面或夹具定位元件上需先占有某一相对于刀具及其切削成形运动的正确位置,这就叫做定位。为了在加工中使工件在切削力、重力、离心力和惯性力等作用下仍能保持定位时已获得的正确位置不变,必须把工件压紧、夹牢,这便是夹紧。装夹就是将工件在机床上或夹具中定位、夹紧的过程。

工件的装夹根据加工技术要求不同可采取先定位后夹紧或在夹紧过程中同时实现定位这两种形式,其目的都是为了保证工件在加工过程中对刀具及其成形运动具有正确的位置。

工件的装夹是设计工艺规程中关键问题之一,因为工件的加工精度,特别是加工面之间的尺寸和位置精度与工件的装夹过程中产生的定位和夹紧误差有密切关系,此外,装夹的方便迅

速与否直接影响辅助时间长短和生产效率与安全。

### 1. 装夹方式

根据定位方式的不同,工件在机床上的装夹也有下列三种不同的装夹方式:

#### (1) 直接定位的装夹法:

即通过在机床上或在机床的夹具上直接安装工件,从而保证加工表面与定位基准面之间位置精度的方法。例如,在车床上加工一个与外圆同轴的内孔表面,可通过采用三爪卡盘直接装夹工件的外圆面;利用夹具直接定位工件的安装,其实质也一样,因为夹具事先已正确地固定装置在机床上,可作为机床的一部分,直接定位的装夹法都是利用工件的定位基面与机床或机床上的夹具直接接触而定位后装夹的。

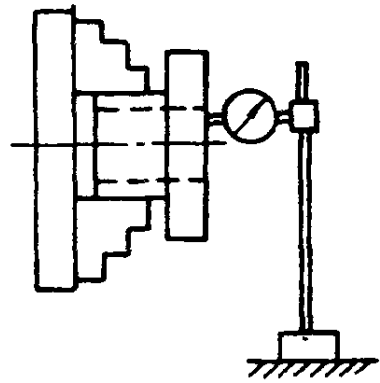


图 2-54 直接找正安装

#### (2) 按工件表面找正定位的装夹法:

这是通过对工件的作为定位基准面的表面进行找正,从而保证加工表面与该定位基面之间的位置精度的一种方法。例如图 2-54 中,在车床上用四爪卡盘和千分表找正后将工件夹紧,找正是按大端面及其外圆面来找。这样,可加工出一个与大端面垂直并同大端外圆面同心的孔,找正精度可达 0.02mm 左右。

#### (3) 工件按划线痕校正定位的装夹法:

对于形状复杂、毛坯精度较差的工件,可事先在工件上划线,以划线痕作为定位基准面在机床上来进行校正,校正后将工件夹紧,从而保证加工表面与定位基准面之间的位置精度。其中的校正定位的过程如下:校正前将划针固定在机床的固定平台或移动平台或机床主轴上,在校正过程中,使工件上的划线痕与划针作一定的相对运动(直线或圆周运动)。此时划针起着类似夹具上的定位元件表面的角色,而划线痕起着工件上的定位基面的角色,校正的过程就是使上述两者重合,这样,就达到类似于夹具直接定位中的工件基面与定位元件接触的一样效果,从而得到定位。

### 2. 定位原理与要求

上述三种装夹方式虽然定位方式不同,但它们的定位原理是一样的,定位的目的就是限制工件运动的自由度。应该限制的自由度的数目应由工序的加工要求来决定,不允许产生欠定位和不合理的过定位。

#### (1) 六点定位原则:

任何刚体(工件可以看作是刚体)在空间都有六个自由度,即沿三个直角坐标轴移动的三个自由度( $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$ )和绕此三轴转动的三个自由度( $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$ )(图 2-55(a))。根据两点决定一直线,三点决定一平面的原理,就可以简单地用六点来限制工件的六个自由度。至于六个点位置的分布则随具体零件的形状而定。例如,图 2-55(b)所示的立方体,其六个自由度可以这样限制: XOY 平面上的三个点消除三个自由度( $\vec{z}$ ,  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ), ZOY 平面上的两个点消除两个自由度( $\vec{x}$ ,  $\vec{z}$ ), XOZ 平面上的一个点消除了沿 Y 轴移动的最后一个自由度( $\vec{y}$ )。

由此可知,一个任意形状的工件安放在夹具中,若已完全消除了六个自由度,则一定可以找出相应于六个点的定位元件。每一个点限制一个自由度,恰当分布的六个点限制了六个自由度,这样,工件在空间的位置就完全被确定。这就是六点定位原则。

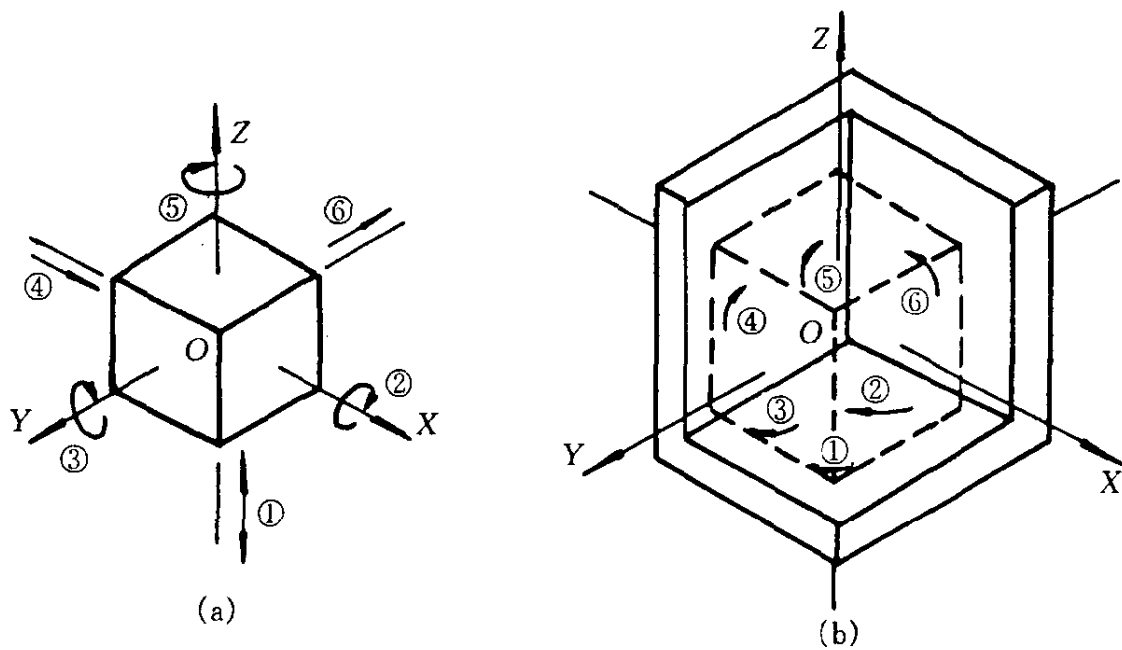


图 2-55 工件在空间的自由度和定位

### (2) 过定位:

由几个定位点重复限制同一个自由度即产生过定位,这是产生过定位的充分必要条件,过定位时可能产生两种情况:或是工件位置没有完全确定(如四脚椅子因四脚不一样长而摇晃不定);或是在夹紧力的作用下使工件或夹具变形,影响加工精度。

图 2-56(a)所示连杆,其两端面及大头孔已加工出来,今欲加工小头孔,要求此孔与端面

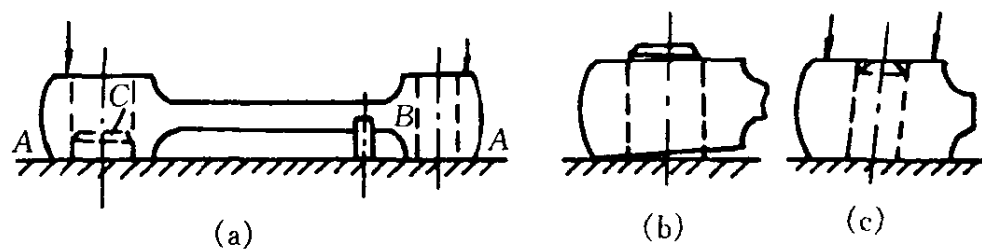


图 2-56 连杆的定位情况

垂直,并与大头孔保持一定距离和平行度。此时定位平面 A 限制一个移动和两个转动的自由度,故相当于三点;短销 C 限制了两个移动的自由度,相当于两点;挡销 B 限制了一个转动的自由度,相当于一。因此,工件在夹具中有六点定位,这是正确的。

若上述夹具不用短销而改用长销,则后者限制了两个移动及两个转动的自由度,相当于四点,因此工件在夹具中共有八点定位,与六点定位原则不符,产生过定位。这样,连杆的大头孔若与端面不垂直,就成图 2-56(b)所示的连杆的弯曲变形(底面弯曲)的情况,或者在很大夹紧力的作用下可能使长销弯曲(图 2-56(c)),加工后工件不符合要求。

对于大型工件,有时为了增加其刚性,采用活动的辅助支承。此种辅助支承可以调节,不影响工件的定位精度,故不作定位点计算。

一般来说,对于工件上以形状精度和位置精度很低的毛坯表面作定位表面时,是不允许出现过定位的,若定位基面是加工过的或精度很高的毛坯表面作为定位基准时,则为了提高定位的稳定性和刚度,在一定条件下是允许过定位的。

### (3) 欠定位:

按工件加工要求应限制的自由度而没有得到限制,则工件定位不足,称为欠定位。这样就



不能保证一批工件在夹具中定位的一致性和工序中的加工精度的要求,因而是允许的,如同一个桌子只有两条腿定位是不能保持一定的水平桌面的。

(4) 限定的自由度数应由加工要求决定:

并不是工件的六个自由度都需限制,应视加工尺寸精度的要求来确定限制自由度的数目与内容(见表 2-6 中部分实例),对于不产生影响的自由度可以不予以限制。

表 2-6 根据加工尺寸要求需要限制的自由度示例

序号	工序简图	位置要求	机床及刀具	需要限制的 自由度数目
1		1. 尺寸 $B$ 2. 尺寸 $H$	立式铣床 棒铣刀	$\vec{X}, \vec{Z}, \dot{X},$ $\dot{Y}, \dot{Z}$
2		1. 尺寸 $B$ 2. 尺寸 $H$ 3. 尺寸 $L$	同上	$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$
3		1. 尺寸 $H$ 2. $W$ 中心与 $\phi D$ 轴线的不对称度	同上	$\vec{X}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Z}$
4		1. 尺寸 $H$ 2. 尺寸 $L$ 3. $W$ 中心与 $\phi D$ 轴线的不对称度	同上	$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Z}$

续表 2-6

序号	工序简图	位置要求	机床及刀具	需要限制的 自由度数目
5	<p>加工面 “宽 W 槽”</p> <p>尺寸 H, L, W, W<sub>1</sub>, phi D</p>	1. 尺寸 H 2. 尺寸 L 3. W 中心与 phi D 轴线的不对称度 4. W 与 W <sub>1</sub> 中心的不对称度	同上	$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$
6	<p>加工面 “圆孔”</p> <p>尺寸 R, phi d</p> <p>Z 轴为基准(phi D)的中心线</p>	通孔 1. 尺寸 R(加工孔轴线与 phi D 轴线的距离) 2. 对 phi d 的角度位置	立式钻床	$\vec{X}, \vec{Y},$ $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$
		不通孔	钻头	$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$
7	<p>加工面 “外圆柱”</p> <p>尺寸 phi d</p> <p>Y 轴为基准(phi d)的中心线</p>	加工面对 phi d 的不同轴度	车床	$\vec{X}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Z}$
8	<p>加工面 “外圆柱和台肩”</p> <p>尺寸 L, phi D</p> <p>Y 轴为基准(phi D)的中心线</p>	1. 加工面对 phi D 的不同轴度 2. 尺寸 L	同上	$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z},$ $\dot{X}, \dot{Z}$

### 3. 夹紧要求

#### (1) 夹紧的总要求:

工件夹紧的总要求是:

##### ① 保证加工精度:

要保证工件与定位元件可靠接触,夹紧元件在夹紧过程中的移动不能破坏工件的定位并减小夹紧变形,还应保证工件在加工过程中不产生所定位置的移动和振动。

##### ② 提高生产率:

夹紧装置必须操作方便,夹紧迅速,其自动化程度应与工件的产量和质量相适应。

##### ③ 降低成本:

夹紧装置力图结构简单、紧凑,制造容易,维修方便。

## ④ 安全可靠:

手动夹具自锁性必须可靠,加工中振动较大时(如铣削或车、刨不连续表面时),自锁问题需特别注意。机动夹紧如气动、液动、真空夹紧时必须有电气联锁装置(如压力继电器),一旦压力消失,机床能立即停车,夹紧机构要有足够的刚度。

## ⑤ 省力:

设计手动夹具必须考虑省力,因为一个班中往往要操作几十次,甚至几百次,扳动手柄所用的力一般限制在  $80 \sim 150\text{N}$  左右,所以应采用快速夹紧机构和联动夹紧机构。

## (2) 夹紧力大小、方向和作用点的确定原则:

为满足上述总要求,其核心问题是夹紧力的方向、作用点和大小的正确确定。

## ① 夹紧力方向的确定原则:

## A. 夹紧力的方向应朝向定位元件。

当工件有几个表面作定位基面时,要使工件以均匀的压力压向各定位元件,这就需要有合适的夹紧力的方向。图 2-57 中,夹紧力  $Q_1$  作用在支承 1,2 之间,并与之垂直。这时夹紧力通过工件对 1,2 点均匀施压;夹紧力  $Q_2$  作用于支承 3 并与其在同一直线上。最好加一个夹紧力使支承 1,2,3 同时均匀受力,使工件定位可靠,如图 2-57 中的  $Q$ 。当切削力不大时,一个夹紧力就够了,但夹紧力必须垂直于主定位面。

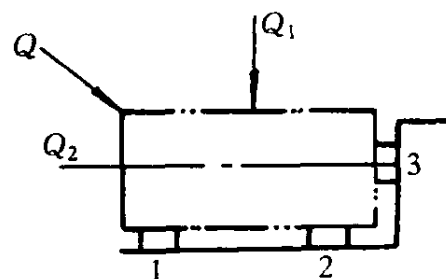


图 2-57 夹紧力如何保证定位

## B. 夹紧力的方向应使工件在夹紧后变形最小。

工件夹紧后会发接触变形和工件本身的变形,如图 2-58(a)所示,用三爪卡盘夹持薄壁零件,工件因径向刚性不足引起畸变。若采用一个特制的螺母沿工件轴向夹紧,因轴向刚度大不易产生畸变,如图 2-58(b)所示。对于筒形活塞,也是采用轴向夹紧,比起径向夹紧来变形小,因为筒形活塞径向刚度低于轴向刚度。

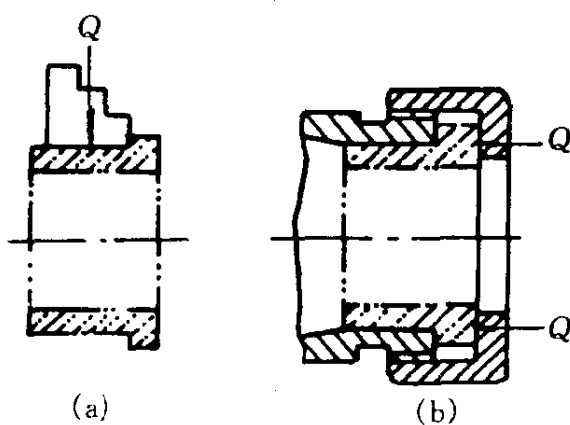


图 2-58 夹紧力与刚度的关系

## C. 夹紧力的方向应使所需的夹紧力最小。

夹紧机构在满足要求的前提下其夹紧力越小越好,而夹紧力的大小与作用力的方向有关。如图 2-59 所示的夹紧力  $Q$ 、工件重量  $G$  和切削力  $P$ ,其中  $G$  的方向总朝向地面。因此,从安装方便出发,主要定位元件表面应水平朝上,这样放置工件最稳定,如图 2-59(a),(b)所示。按(c),(d)和(e)安装工件,工件稳定性就差。按(f)安装工件不方便。从夹紧力的方向看,假定图中工件重量  $G$  与切削力  $P$  都相同,所需的夹紧力  $Q$  各方案不同。图 2-59(a)的夹紧力最小;(e)次之;(d)需力最大,当夹紧力的方向与切削力的方向和工件重力方向重合时所需的夹紧力最小,此时,只需防工件振动。凡是靠用夹紧力所产生的摩擦力来平衡重力、切削力的方案所需的夹紧力就大。

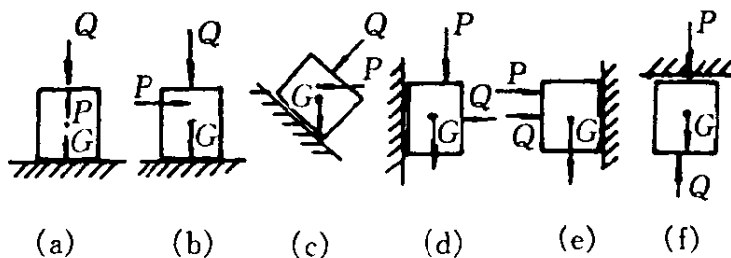


图 2-59 夹紧力方向与夹紧力大小的关系

## D. 夹紧力方向应使夹紧时不破坏正确定

位。

为了使定位基面与定位元件可靠接触,对于图 2-60 所示工件要求孔的中心线垂直于定位基面  $B$  面,此时夹紧力应垂直于  $B$  面。否则若夹紧力方向垂直于  $A$  面,而  $B$  面与  $A$  面总有垂直度误差,则加工出来的孔与  $B$  面就不垂直了,因为这时夹紧后  $B$  面不与定位元件全面接触而破坏了定位。

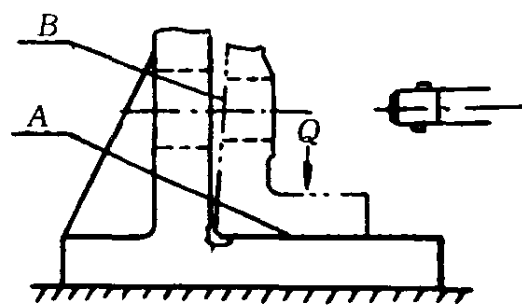


图 2-60 夹紧力方向不垂直于主要定位面的影响

### ② 夹紧力作用点的确定:

夹紧力作用点是指夹紧元件与工件接触的一块小面积。在夹紧方向已确定的情况下选择作用点。选择作用点位置时应注意下列问题:

A. 夹紧力作用点应选在工件刚性较大的部位上,特别是刚性较差的薄壁类零件更是如此,以减小工件夹紧的变形(参见图 2-26)。再如图 2-61 所示的连杆杆身处刚度最差,在该处加压不可取。

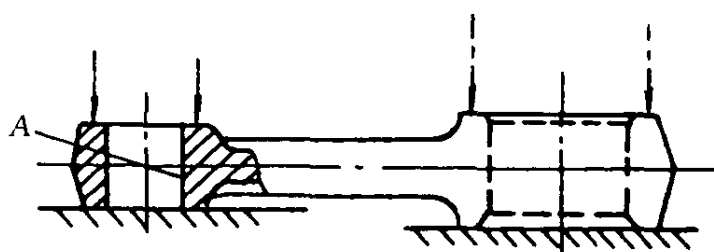


图 2-61 夹紧力作用点应靠近加工面

B. 夹紧力作用点应靠近加工表面,因为工件和夹紧元件都不是绝对刚体,夹紧力不可能均匀分布在整个接触表面上,在近作用点下面的接触面积,夹紧力就大,而远作用点下面者,则夹紧力较小,甚至根本没有力的作用。若在远离夹紧力作用点的地方进行加工,可能由于切削力的作用而使工件产生振动,影响加工精度。如图 2-61 所示,在加工连杆小头孔  $A$  时,其夹紧力应尽量靠近加工部位,以减少在钻孔时产生的振动。

### ③ 夹紧力大小的确定:

夹紧力的大小对加工精度影响很大,夹紧力过小,工件夹不紧;夹紧力过大会使工件产生变形。因此,正确计算夹紧力是十分必要的。在切削过程中由于加工余量、硬度不同以及刀具磨损等因素的影响,使切削力产生变化,而且切削力的方向、作用点也是变化的,因此要准确地计算所需的夹紧力是困难的,只能按公式(2-15)粗略地估算。

$$Q = k \cdot P \quad (2-15)$$

式中  $Q$ ——夹紧力, N;

$P$ ——切削力, N;

$k$ ——安全系数,一般,粗加工时取  $k = 2.5 \sim 3$ ;精加工时取  $k = 1.5 \sim 2$ 。

## 2.4.2 机床夹具

### 1. 机床夹具的定义、作用、分类与组成

#### (1) 机床夹具的定义:

机床夹具是机床上用以装夹工件(和引导刀具)的一种装置。

#### (2) 机床夹具的作用:

夹具有如下作用:

- ① 可以保证被加工表面与定位基面之间的位置精度。
- ② 可省去对工件的逐个找正、校正和对刀时间,容易实现多刀、多件加工,以提高劳动生

产。

③ 扩大机床使用范围,例如在普通车床上,利用图 2-62 所示的偏心夹具就可以车削曲轴的曲拐销,使用时,曲轴以主轴颈或与主轴颈同心的外圆作为定位基面,装入夹具支座 2 的孔中。为了保证平衡,夹具上装有平衡块 3。曲轴装上夹具后就作为一整体,以夹具体 1 上的螺纹孔与机床主轴相连接,另一端的夹具体则支承在特殊尾架上。

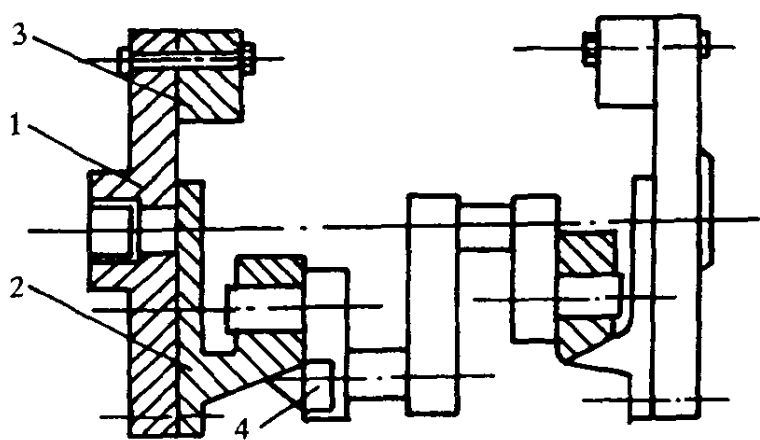


图 2-62 车曲柄销的偏心夹具

④ 降低对工人的技术要求和减轻工人劳动强度。

### (3) 机床夹具的分类:

机床夹具按使用范围分成下面四类:

#### ① 通用夹具:

例如通用的三爪、四爪卡盘,机器虎钳,万能分度头,磁性工作平台等,这些夹具通用性强,广泛用于单件、小批生产。

#### ② 专用夹具:

对于位置精度要求高或生产效率要求高的工件,通用夹具往往不能胜任,需设计专用夹具。专用夹具是针对工件的某一工序而专门设计制造的夹具,因此当产品变换或工序内容更动后,夹具往往也就无法使用。故专用夹具主要适用于产品和工艺相对稳定、批量较大的生产中。

#### ③ 组合夹具:

是指按工件某一工序的加工要求,选择一套预先准备好的通用的标准元件或部件组合而成的夹具。这种夹具用完后,可以拆卸、清洗、入库,以备为加工其他零件重复使用。采用组合夹具可以缩短夹具的设计和制造周期,有利于加快生产准备工作,同时一套标准化的组合夹具元件,可多次重复使用,所以在多品种、小批量生产特别是新产品试制中尤为适用。

#### ④ 通用可调夹具和成组夹具:

这两种夹具的共同特点是:经过适当调整或更换夹具上的个别元件后,即可用于加工形状、尺寸和加工工艺相似的多种工件。其中通用可调夹具的加工对象并不很明确,其通用范围很大,如车床用的可调整花盘,钻床用的可调整滑柱式钻模等,而成组夹具则是专门为成组加工工艺中某一组零件而设计制造的,它的加工对象和适用范围明确,针对性强,其结构更加紧凑。这类夹具使小批量生产有可能获得类似于大批量生产的效益,是改革工艺装备设计的一个发展方向。

### (4) 机床夹具的组成:

一套完整的夹具通常包括:定位元件、夹紧元件与机构、导向元件(或对刀元件)、夹具体及其他辅助元件等。今以钻床专用夹具为例加以说明,图 2-63 为同时加工连杆大小头孔的钻夹具,其组成部分如下:

#### ① 定位元件:

图中垫块 1 和 V 形铁 2,3 都是定位元件,它们使连杆端面及大、小头外圆得到定位。

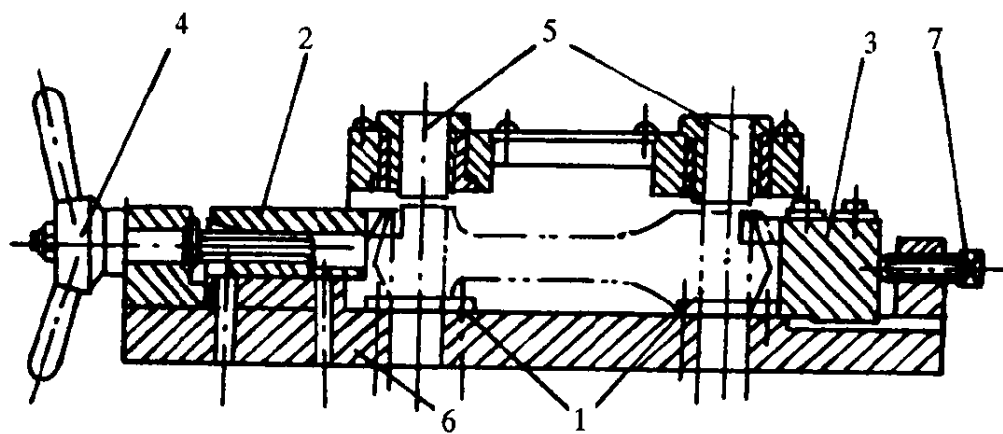


图 2-63 加工连杆用钻夹具

## ② 夹紧元件与机构：

图中手柄 4 及与之相连的螺杆即为夹紧元件，它们使连杆在切削力作用下不致移动，保证定位可靠。V 形铁 2,3 兼起定位夹紧作用，故又称为定位夹紧元件。

## ③ 导向元件：

它可以保证刀具与工件相对位置的正确性，并防止刀具在切削过程中偏移。图中钻套 5 即为导向元件。

## ④ 夹具体：

它将夹具上各部分零件组合成一整体，并与机床连接。图中底座 6 即属此类零件。

## ⑤ 其它的辅助元件：

如调整 V 形铁的螺钉 7 和其他紧固元件(螺钉、螺帽)等。

## 2. 定位元件

由于工件的定位基面不外乎是平面、圆柱面、锥面等，而定位元件是直接与工件定位基面接触来起定位作用的，故定位元件可分成下列类型。

## (1) 工件以平面定位的定位元件：

当工件以平面作定位基面时，夹具的定位元件可用平面作为工作表面。由于表面粗糙度的存在，两平面间只能有三个最突出的小点相接触，而这种接触点的位置是随机性的。因此，三接触点所构成三角形的面积可能很小，使定位不稳。为了使三接触点控制在足够大的面积内，可将定位元件的工作表面作成三个相距较远的支承点。因此，原则上粗基面采用点支承定位，精基面采用面支承定位。

平面定位的定位元件有支承钉和支承板。图 2-64(a)为三种主要的支承钉结构。它们在夹具体中的配合为  $n6$  或  $r6$ ，以便于装拆而又不易松动。图 2-64(b)为支承板，供精基面定位用。

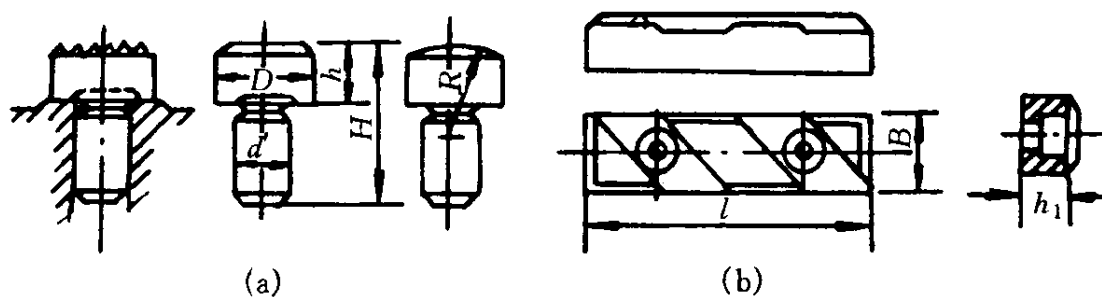


图 2-64 定位支承

(2) 工件以孔定位的定位元件:

① 工件以顶尖孔定位的定位元件:

在加工轴类件时,常在工件的两端钻有定位用的顶尖孔,采用前、后顶尖作为定位元件。前顶尖常是不能轴向移动的,用来确定工件的中心位置,并且起着止推的作用,可以认为能限制工件三个自由度(但浮动前顶尖可轴向移动,限制工件两个自由度)。后顶尖是可以轴向移动的,除了用来确定工件的中心位置以外,还可用于轴向夹紧,所以它也是定位夹紧元件,可以认为能限制工件的两个自由度(见图 2-65)。

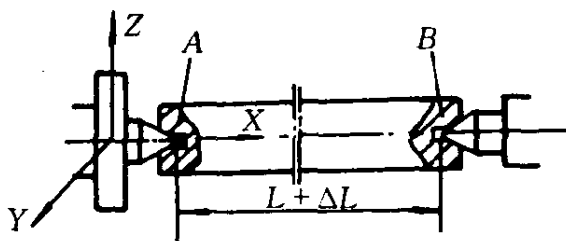
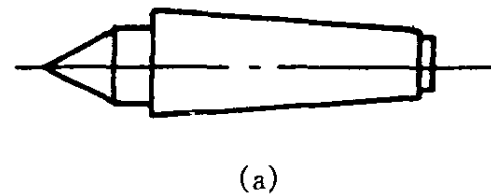
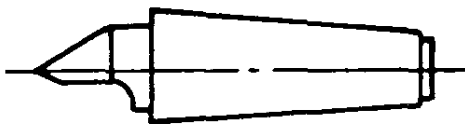


图 2-65 双顶尖定位

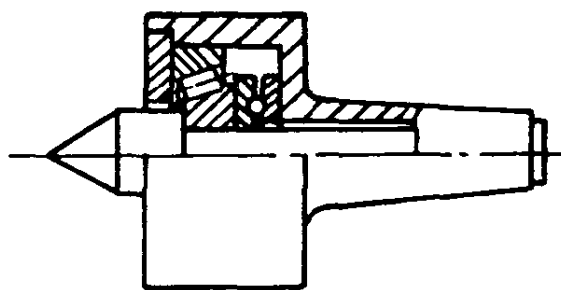
顶尖的形式较多。图 2-66 绘出了几种常用的形式。前顶尖往往是与工件一起转动,不容易磨损,可用图 2-66(a)所示的标准固定顶尖。削边固定顶尖(图 2-66(b))适用于工件轴端面要加工的情况。后顶尖一般不与工件一起转动,与顶尖孔摩擦较大,在工件转速较低的情况下也可采用标准固定顶尖,工件转速高则用活顶尖(图 2-66(c))。



(a)



(b)



(c)

顶尖的工作锥面的顶角为  $60^\circ$ 。尾端锥柄的锥度要与机床主轴或尾架套筒的锥孔配合。两端锥面之间留有一段圆柱面,工作锥面磨损后可以重新磨尖。

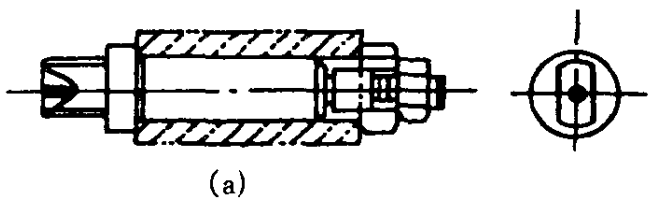
顶尖常用工具钢(T7A 或 T8A)或合金钢制造,并淬硬至 HRC58~62。

② 工件以圆柱孔定位的定位元件:

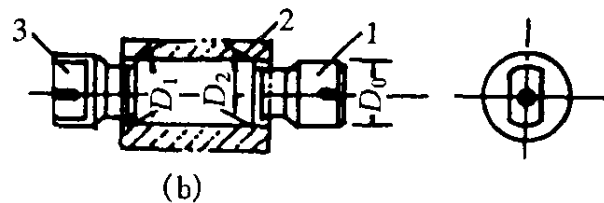
工件以圆柱孔为定位基准所用的定位元件有心轴、定位销、锥销及自动定心夹紧机构。这种定位的特点是要求定位孔与定位元件的轴心线重合。

A. 心轴定位:

**刚性心轴** 刚性心轴主要用在车、铣、磨等机床上加工套类零件、盘类零件和齿轮零件。图 2-67 表示刚性心轴的两种形式。图 2-67(a)中工件孔与心轴为间隙配合,通常采用 H7/h6, H7/g6 或 H7/f6,这种心轴结构简单,装卸方便。但定心精度不高,只适合于工件同轴度要求不高的场合。图 2-67(b)中心轴与工件是过盈配合。心轴由引导部分 1,工作部分 2 及与传动装置(如鸡心夹头等)相联系部分 3 组成。这种心轴定心精度高,还可以加工端面,能传递一定扭矩,常用于精车、精磨和多刀机床加工。但装卸工件较费时,多用于加工批量不大的较小工件。最大过盈量不应大于 H7/r6 配合,以免压入压出的力过大使工件过分变形。



(a)



(b)

图 2-67 常用圆柱心轴结构

1—引导部分;2—工作部分;  
3—与传动装置相联系部分

**锥度心轴** 图 2-68 所示为锥度心轴,这种心轴能消除配合间隙,定心精度很高,然而工件

易歪斜。为克服这一缺点,常采用 $(\frac{1}{1000} \sim \frac{1}{3000})$ 的小锥度心轴。工作时,工件在心轴上,由于弹性变形的存在,基准孔与心轴实际接触长度会增加,径向定位可靠,不易歪斜,定心精度可达 $0.01 \sim 0.005\text{mm}$ 。

在生产中,当基准孔较长而加工精度不高时,采用大锥度心轴可使工件正确定心,且轴向位移不大,这种大锥度心轴,工件孔仍是圆柱孔,限定了三个自由度。

心轴一般用20号钢或20Cr钢制作,渗碳淬火硬度HRC58~62。当表面硬度要求较低时,可用45号钢制作,热处理后硬度为HRC45~50。

#### B. 定位销定位:

定位销的结构如图2-69所示,图中(a),(b),(c)三种是固定的,以 $\frac{H7}{r6}$ 的配合压入夹具体,

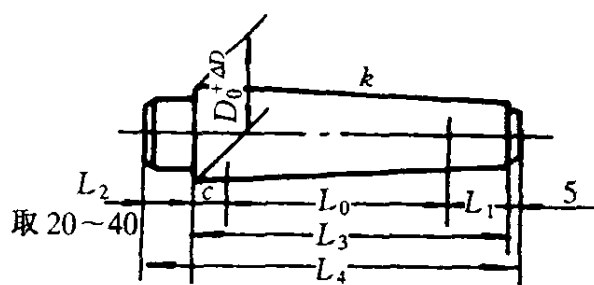


图 2-68 锥度心轴

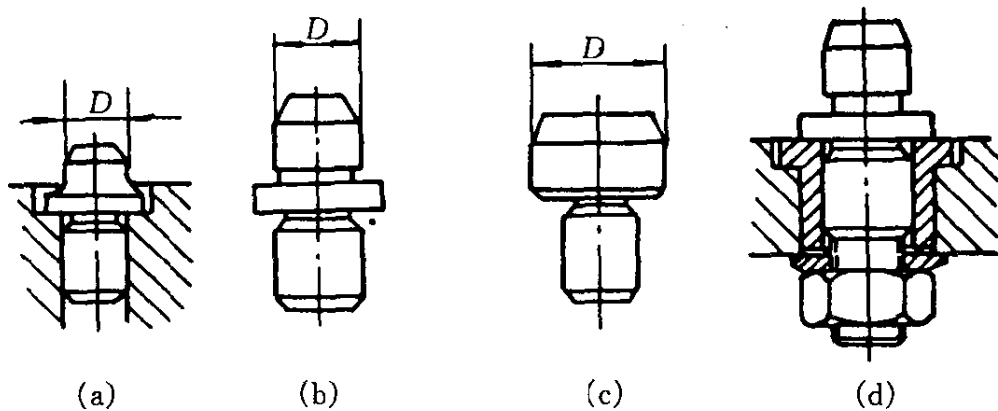


图 2-69 圆柱定位销结构

结构简单,但不便于更换。图2-69(d),是可换式定位销,夹具体中压有衬套。定位销用螺栓经中间套将其装在夹具体上,销与衬套的配合为 $\frac{H7}{r6}$ ,适用于磨损较快的场合。当定位销直径大于16mm,用20号钢,渗碳深 $0.8 \sim 1.2\text{mm}$ ,淬火HRC55~60,当定位销直径等于或小于16mm时,用T7A钢制造,热处理硬度HRC53~58。定位销工作部分直径可按h5,h6,g5,g6,f6,f7级精度制造。

当定位销直径 $d < 10\text{mm}$ ,采用图2-69(a)的形式; $d > 10 \sim 18\text{mm}$ ,采用图2-69(b)形式; $d > 18\text{mm}$ ,采用图2-69(c)的形式,图2-69(d)为可换式,主要用于定位销需要定期更换的在成批、大量生产中使用的夹具上。短圆柱定位销限定工件两个自由度,而单个短菱形定位销限定工件一个自由度,这是因为菱形销是在整销的基础上在 $x$ 方向被削扁呈菱形(见图2-70), $b$ 为削扁宽度,由于 $b \ll D_2$ ,由下列近似式

$$b = \frac{D_2 \Delta_2}{2 BC} \quad (2-16)$$

可见,在 $y$ 方向的间隙 $\Delta_2/2$ 比较小时,而在 $x$ 方向的间隙 $BC$ 就可比较大,也即在 $y$ 方向定位,在 $x$ 方向不定位。故上述对于短菱形销定工件一个自由度的结论成立。

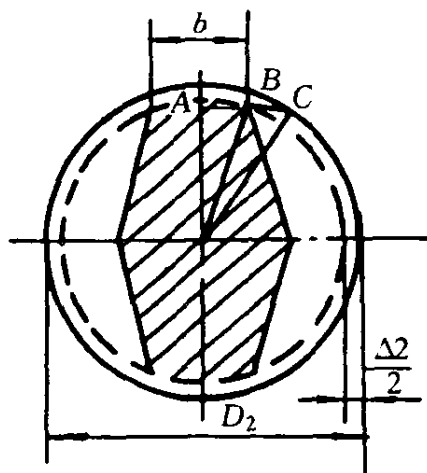


图 2-70 菱形销的计算



### C. 锥销定位:

工件孔仍是圆柱孔,孔端与锥销接触,定位情况与大锥度心轴的定位情况一样,也是限定三个自由度。

### D. 自动定心夹紧装置:

工件孔定位常采用自动定心夹紧装置,它可使工件同时定位并夹紧,减少定位和夹紧时间。常用的有弹性心轴、弹簧夹头(涨胎式)心轴和液性塑料心轴。其特点是定心精度高,工作装卸方便。内三爪卡盘装夹工件,也属于自动定心夹紧装置。

### (3) 工件以外圆柱面定位的定位元件:

工件以外圆柱面为基准在夹具中定位时,应力求使其轴线处于规定的位置上。常见的定位元件有:圆柱孔定位件、半孔定位件、V形块和自动定心装置等。

#### ① 定位衬套的定位:

将工件的定位基准——外圆柱面直接放入定位孔中,即可实现定位。定位件常做成衬套形式镶在夹具体上,定位孔因长短不同而各有不同的定位作用。定位孔短时,会限制工件两个沿径向移动的自由度。长定位孔则还能限制工件轴线两个转动的自由度(共限制四个自由度)。

定位衬套的结构如图 2-71 所示,材料常用 20 钢,经渗碳淬火,其硬度达到 HRC55~60。小衬套可用  $\frac{H7}{r6}$  或

$\frac{H7}{r5}$  配合压入夹具体;大衬套则宜按  $\frac{H7}{k6}$  或  $\frac{H7}{js6}$  过渡配合,装

入夹具体后再用螺钉固定。

#### ② 半孔定位件的定位:

将定位衬套分成两半,下半孔固定在夹具体上作定位件,上半孔装在可卸式或铰链式的盖上作夹紧件,这种定位方法就叫半孔定位。其结构如图 2-72 所示。

半孔定位主要用于不适宜以孔定位的大型轴类工作,如曲轴、涡轮轴、压气机等,其优点是定位方便,夹紧力均匀。半孔定位件在装

配后,还可在所使用的机床上最后加工定位表面,以提高定位孔与机床主轴的同轴度。

#### ③ 用 V 形块定位:

V形块是由两个互为  $\alpha$  角的平面组成的定位元件,用 V形块定位装卸工件方便,并且在垂直于对称面的方向上误差等于 0,所以特别适用于下列情况:

A. 当垂直于 V形块底面的方向上原始尺寸的公差较大,而水平方向的位置尺寸要求较高时,如图 2-73 所示,当键槽或孔的对称性要求高时,用 V形块定位最为合适。

B. 用外圆柱面作定位基准而不适于以孔定位时,如长轴定位或两端大而中间细的台阶轴必须以中间细的部分作定位基准时,适用 V形块定位。

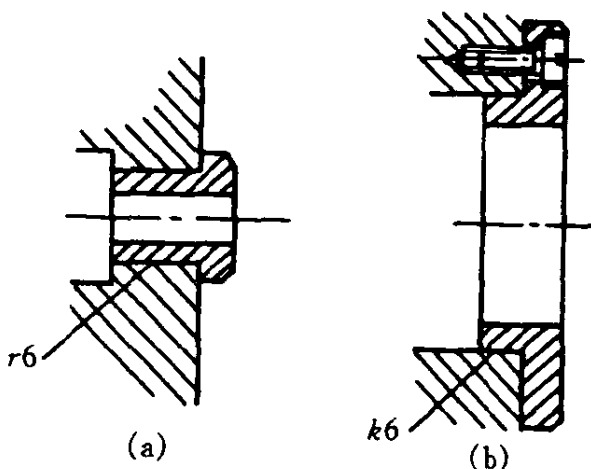


图 2-71 定位衬套的结构

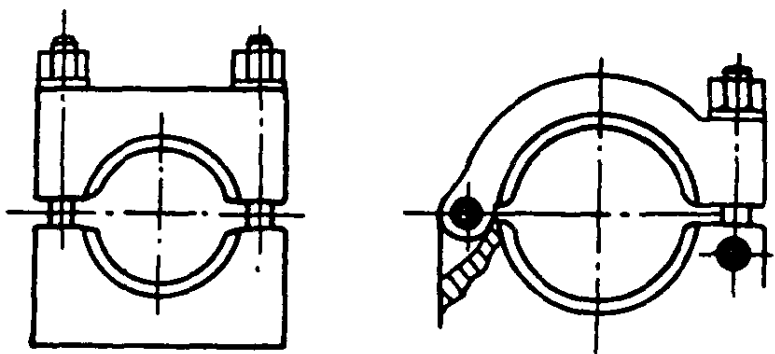


图 2-72 半孔定位件的构造

C. 用于任何有 $(180^\circ - \alpha)$ 的一段圆弧做定位基准的时候。这是别的定位方法所不及的,此时多用V形块作角向定位件。

用V形块定位也和用孔定位一样,如果V形块比较长,可以认为消除四个自由度,如果V形块比较短,可以认为消除两个自由度,这里所谓较长、较短都是相对工件而言。

V形块是由两个互相成 $\alpha$ 角的平面组成的定位件,在制造V形块时,划线和加工都是根据尺寸 $c$ 和 $h$ (图2-74),在最后检验和调整时,则是利用一等于基准的基本直径 $D$ 的量规,放在V形块上。测量其高度 $H$ ,由图中关系可以推出:

$$H = h + \frac{1}{2} \left[ \frac{D}{\sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{C}{\tan \frac{\alpha}{2}} \right] \quad (2-17)$$

当 $\alpha = 90^\circ$ 时,

$$H = h + 0.707D - 0.5C \quad (2-18)$$

利用之间的关系可以互相校验。V形块的夹角 $\alpha$ 有 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 三种,以 $90^\circ$ 用的最多,因为它在保证定位稳定性和减小夹具外形尺寸

方面比 $120^\circ$ 和 $60^\circ$ 的都好。V形块的规格与尺寸已标准化了,可参考国标(GB2208—80)。

#### ④ 在自动定心装置中定位:

外圆柱面非常容易采用自动定心装置。它可使工件同时定位并夹紧,其最大优点是可以减少定位和夹紧时间,减小工件定位面尺寸公差对轴心线定位精度的影响。常见的自动定心装置有:弹簧夹头、自动定心卡盘、液性塑料定心夹头等。

#### (4) 组合定位:

利用工件上几个面一起来定位叫组合定位,其型式很多,常用的工件基面的组合有一面一孔、一面两孔以及双孔定位等,它们的定位元件是由前面介绍的单个定位元件组合而成。

### 3. 夹紧机构

在任何夹紧装置中,要把手动或机动的作用力转化为夹紧力,都必须通过夹紧机构来实现。今按其作用原理和结构分类如下:

#### (1) 楔块夹紧:

图2-75所示为楔块夹紧的钻具,作用力 $P$ 转化为夹紧力 $Q$ 的分析可见图2-75(b)。根据力的平衡关系,可以得出夹紧力 $Q$ 的计算公式:

$$Q = \frac{P}{\tan(\alpha + \varphi_2) + \tan \varphi_1} \quad (2-19)$$

式中  $P$ ——施加在楔块上的作用力;

$\alpha$ ——楔块的升角,考虑自锁时常取 $6^\circ \sim 10^\circ$ ;

$\varphi_1, \varphi_2$ ——楔块两工作面处的摩擦角。

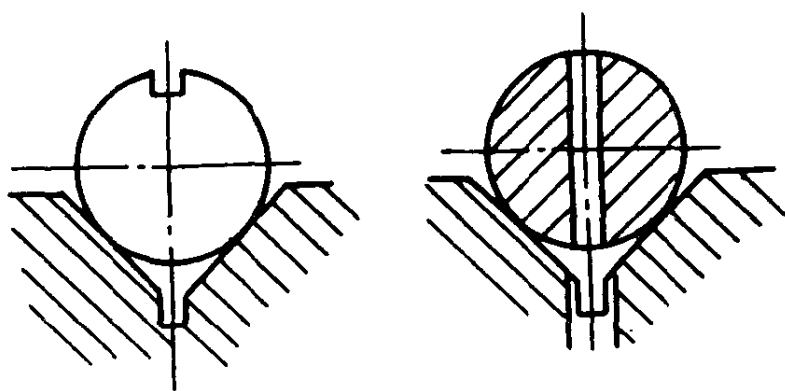


图2-73 适合用V形块定位的例子

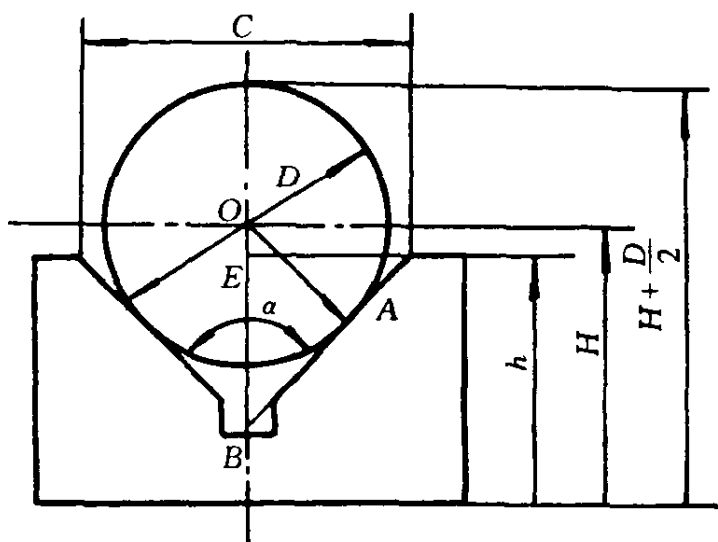


图2-74 V形块的尺寸关系

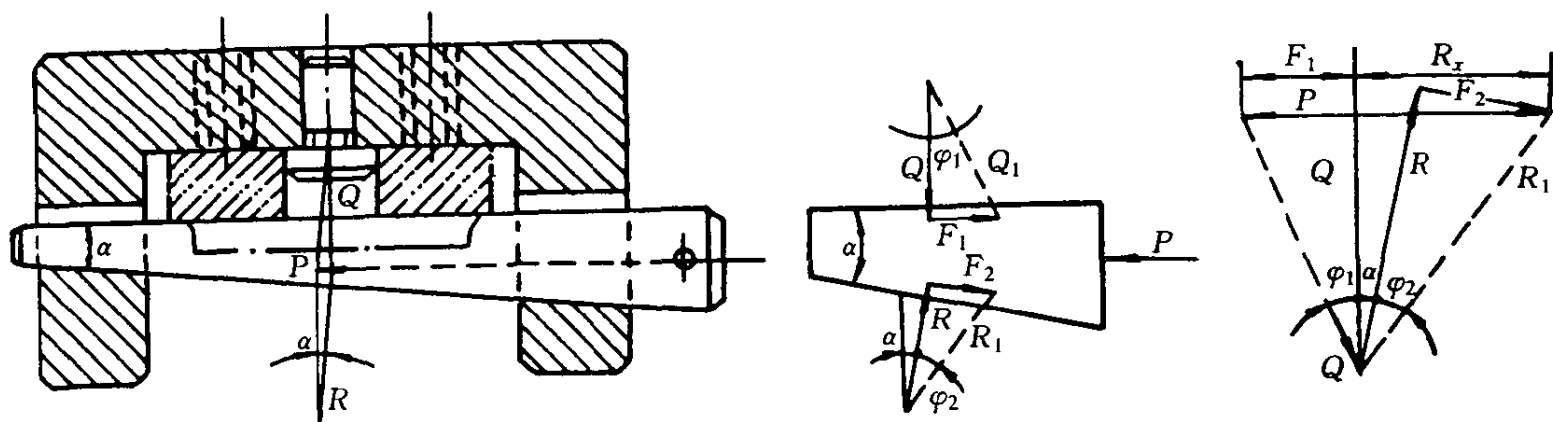


图 2-75 楔块夹紧

如果  $\varphi_1, \varphi_2 = \varphi$ , 一般钢铁间的摩擦系数 ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) 为  $0.1 \sim 0.15$ , 也就是  $\varphi = 5^\circ 43' \sim 8^\circ 28'$ , 于是可算得夹紧力  $Q$  为作用力  $P$  的两倍多。由此可见, 楔块夹紧力是不大的, 只宜在受力不大的工序中或与其它增力机构组合使用。

### (2) 螺旋夹紧:

螺旋夹紧包括螺钉夹紧(见图 2-76)和螺母夹紧(见图 2-77)两类。螺钉夹紧件上带有压块, 螺母夹紧件要配备垫圈。其夹紧原理与楔块夹紧相似。由于螺旋的升角很小(如 M8 ~ M52 螺钉的升角  $\alpha = 3^\circ 10' \sim 1^\circ 51'$ ), 使用扳手施力的力臂又长, 所以夹紧力很大, 约为手作用力的 100 倍。但由于螺旋夹紧难用机械自动, 所以一般用在手动夹紧的夹具中。

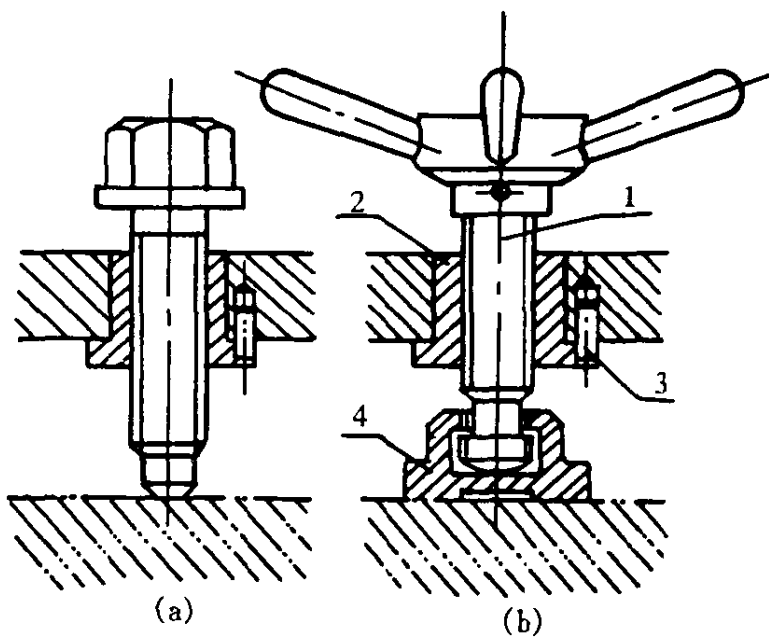


图 2-76 螺钉夹紧机构

### (3) 偏心夹紧:

常用的偏心夹紧件是偏心轮(轴), 其构造如图 2-78 所示。它的优点是操作迅速, 构造简单; 缺点是工作行程小(取决于偏心距), 自锁性较差, 只宜使用在切削力较小和振动不大的工序中。

偏心夹紧好似一个弧形楔作用在转轴和工件之间。夹紧的最大行程虽是  $2e$  ( $e$  为偏心距), 但通常是在  $60^\circ \sim 90^\circ$  范围内使用, 所以其实用行程只有  $\frac{2}{3}e \sim e$ 。根据圆偏心的升角在  $P$  点附近变化的特点, 所以偏心的夹紧工作段就选取在  $P$  点前后各  $30^\circ \sim 45^\circ$  的范围内。

根据圆偏心的自锁条件(见图 2-78 中各力的平衡)

$$Qe \leq F_1 \frac{D}{2} + F_2 \frac{d}{2}$$

式中  $F_1$  和  $F_2$ ——分别为偏心轮对垫块和对转轴间的摩擦力;

$Q$ ——夹紧力。

若忽略轴颈处的摩擦, 因  $F_1 = \mu Q$  ( $\mu$  为摩擦系数), 并取其摩擦系数为  $0.1 \sim 0.15$ , 可得

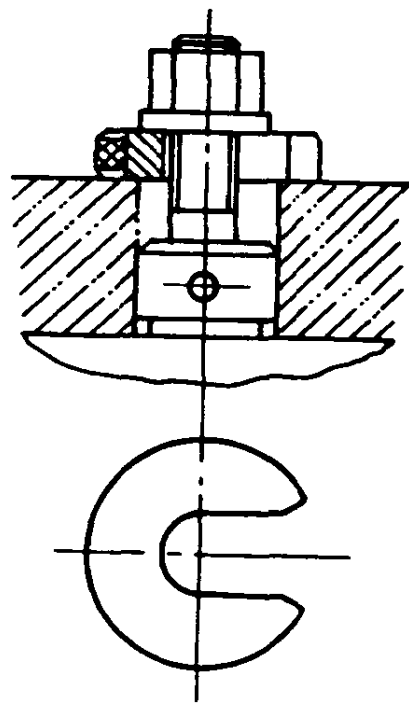


图 2-77 螺母夹紧机构

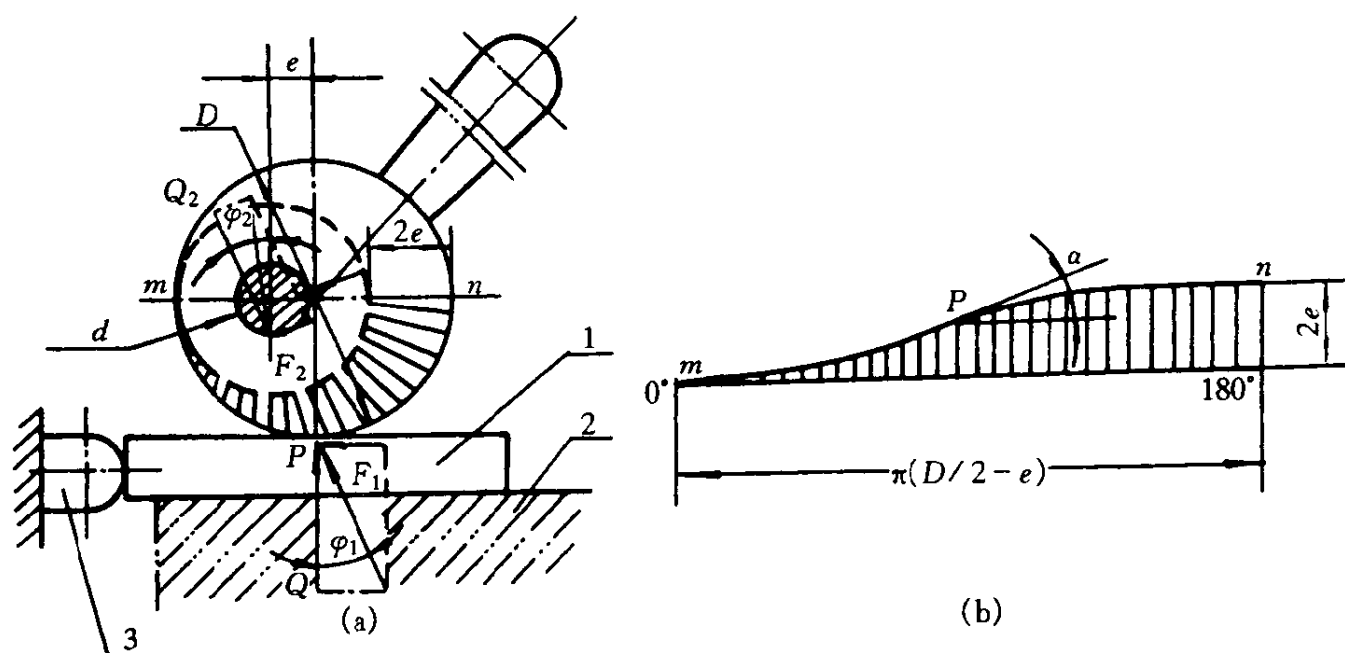


图 2-78 偏心夹紧件

$$e = \frac{D}{20} \sim \frac{D}{14}$$

所以,一般都按  $D \geq 14e$  或  $D \geq 20e$  来设计偏心轮。

偏心夹紧工件时,若取其手柄长  $L = (2 \sim 2.5)D$ ,其夹紧力约为作用力的 12 倍。在使用标准偏心件时,其夹紧力一般约为 1 600~2 450N。所以偏心夹紧宜使用在切削负荷不大且振动较小的工序中。

(4) 杠杆夹紧机构:

杠杆夹紧机构是由某个简单夹紧件和杠杆组合在一起,利用杠杆作用来扩大夹紧力,并在适当部位夹紧工件的机构。其组合方式和构造见图 2-79。图中表示出了几种由螺旋压板(螺旋和杠杆组合),偏心压板(偏心轮和杠杆组合)等组合的夹紧机构(其中被夹紧的工件均用双

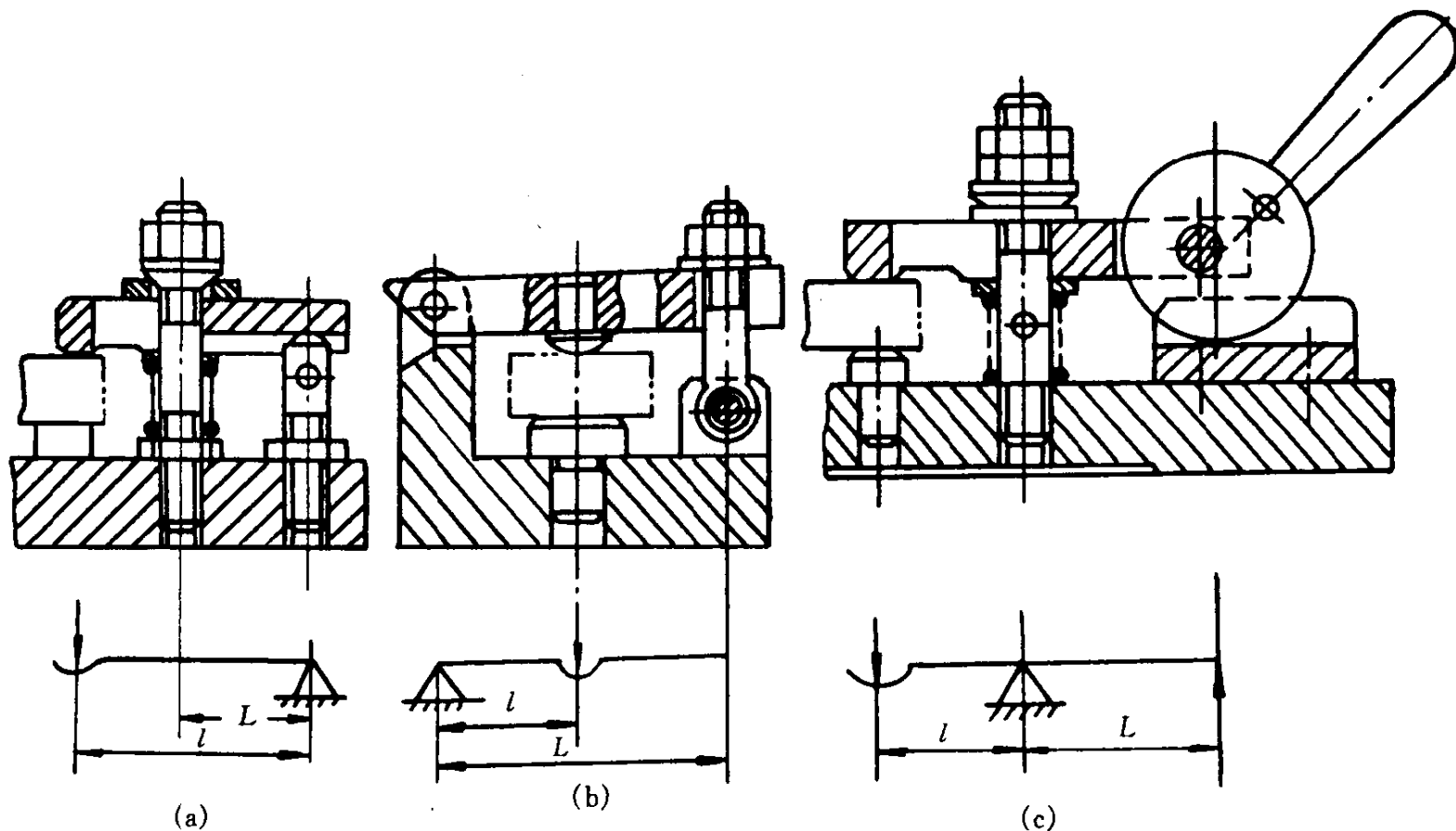


图 2-79 螺旋压板与偏心压板

点画线表示)。从例图可以看到,组合夹紧机构不但可以扩大夹紧力的大小或行程,而且可以改变力的方向(便于在适当的方向和位置上夹紧工件)。手动夹紧的施力部分还能自锁,因而使用方便、可靠。

#### 4. 夹具的其它元件

上述定位元件和夹紧元件是夹具中主要的元件。作为一套完整的夹具还需要有夹具体把它们连接起来,并固定到机床上去。此外,针对不同类型的夹具,还需要有一些特殊的元件,如钻夹具上的钻套等导向元件以及铣夹具上的对刀块等。

##### (1) 导向元件:

导向元件用来确定刀具运动的方向,减少刀具在加工过程中的偏斜。其中最常用的是钻套。

钻套的结构形式很多,图 2-80 为几种典型结构。图中(a),(b)为固定式钻套,其外径与夹具体之间采用  $r6$  配合。这种钻套结构简单,但磨损后需打出,使夹具体上孔径扩大,故新钻套应特殊配制,(c)为可换钻套,它可以多次更换,为防止夹具体孔径磨损,加有衬套。衬套与夹具体间仍用  $r6$  配合,与钻套间用  $g6$  或  $f7$  配合,这种钻套的缺点是需要松开螺钉,才能取下钻套。(d)为速换钻套,用于同一工序中需要多次更换刀具时(如钻、扩、铰)。它在更换时只需将钻套转至有缺口处,即可取下。使用这种钻套时要注意缺口方向,勿使钻头带动钻套旋转时将缺口转至螺钉处。

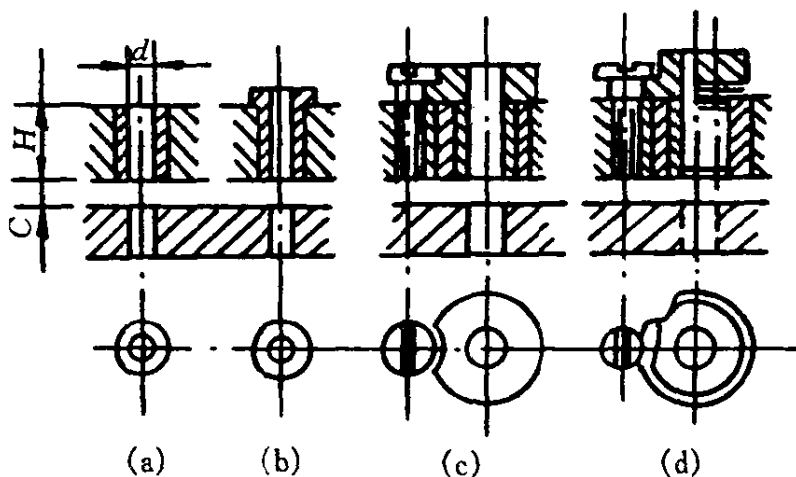


图 2-80 钻套类型

在设计钻套时要考虑:

① 钻套的高度  $H$  及与工件间的距离  $C$ (图 2-80) 一般说来, $H$  大时导向性好,加工精度高,但钻套磨损快,通常取  $H = (1.5 \sim 2)d$ 。距离  $C$  值小时,切屑通过钻套流出,适用于工件表面已加工过的情况。当工件表面粗糙时,切屑无需通过钻套,以增加钻套的寿命,此时距离  $C$  应加大,一般取  $C = 0.5d$ (加工铸铁,青铜时),或  $C = d$ (加工钢时)。

② 钻套孔径公差 它取决于工件孔径的精度,当孔的加工精度为 IT8 级时,钻套采用 G7 或 F8 配合公差(基轴制);当孔的加工精度较高时,钻套采用 H7 配合公差。

③ 材料及热处理:钻套与刀具直接接触,耐磨性要求较高,对于  $d \leq 25\text{mm}$  的钻套,采用 T10A,淬硬 HRC58~63;对于  $d > 25\text{mm}$  的钻套,采用 20 号钢或 20Cr 渗碳淬硬。

##### (2) 对刀装置:

对刀装置用来确定刀具与工件或与夹具的相对位置,以便进行定距加工。对刀装置主要用在铣床夹具上,在切削加工前进行对刀装置的调刀。与采用试切法调刀、用标准件调刀相比,用对刀装置调刀最为方便。

对刀装置由对刀块 1 和塞尺 2(见图 2-81)组成,图中 3 为铣刀,对刀块的工作表面一般做成平面状,用螺钉及定位销固定在夹具体上,并预先算准其位置。塞尺用来防止对刀时刀具损坏对刀块的工作面,塞尺常作成板状或圆柱状。

在机床调整时,使刀具逐渐靠近对刀块工作面,若塞尺刚好通过其间隙,则相对位置已经

确定,毋需再改变。这是一种简便的调整方法。对刀块与塞尺材料采用 T8A 或 20 号钢(渗碳),淬硬 HRC55~60。

### (3) 夹具体:

夹具体的作用是将夹具中所有元件连接成一整体,并通过它将整个夹具固定在机床上。因此,对夹具体的要求是:有足够的强度和刚度;使用过程中尺寸要稳定;为了装卸方便,重量应尽可能轻。

夹具体的形状主要有平板形、角铁形、T 字形、槽形或其他复杂形状。材料通常用铸铁 HT100 及 3 号钢,在个别情况下(如回转夹具的夹具体)采用铝合金。

夹具体的构成方法较多,主要有:铸造、焊接、用螺钉连接及锻造等。对于形状复杂的夹具体通常以铸造为主。

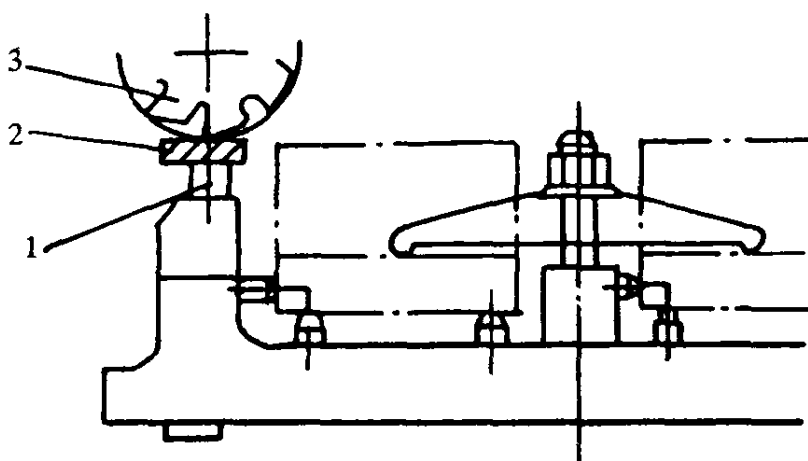


图 2-81 利用对刀装置调刀

## 2.5 工艺规程制定的步骤与内容

### 2.5.1 工艺规程制定的步骤

编制工艺规程时,通常应具备下列原始资料:产品的装配图和零件图,产品验收的质量标准,产品的生产纲领,毛坯资料,现场生产条件,国内外工艺技术发展情况,有关工艺手册等。有了上列原始资料后,就可按下列步骤制定零件的机械加工工艺规程:

- ① 审查零件的工艺性;
- ② 根据生产纲领确定生产组织形式和生产节拍;
- ③ 选择毛坯制造方法;
- ④ 选择定位基准;
- ⑤ 确定零件的加工路线;
- ⑥ 确定加工余量,必要时画出毛坯图;
- ⑦ 计算工序尺寸及其公差;
- ⑧ 规定单个工序的内容,选择加工设备、刀具与夹具;
- ⑨ 选择切削用量与调整尺寸;
- ⑩ 计算工时定额,如工时定额超过工作节拍,可修改切削用量;
- ⑪ 进行技术经济分析,若分析结果不理想,可改用别的工艺路线方案进行上述各项设计,并进行技术经济分析的对比,直至达到最优的工艺路线为止,然后将最终方案填入工艺卡片中。

下面,分别按上述步骤对主要内容逐项叙述。

### 2.5.2 工艺规程制定的主要内容

#### 1. 零件的工艺性分析

对零件进行工艺性分析,以及对产品零件图提出修改意见,是制订工艺规程时的一项重要工作,常包括以下各项工作:

(1) 分析和审查产品零件图和装配图:

通过分析产品零件图及有关的装配图,了解零件在机械中的功用。在此基础上,进一步审查图纸的完整性与正确性,例如图纸是否有足够的视图,尺寸、公差是否标注齐全,若有错误和遗漏,应及时提出修改意见。

同时,还要分析零件的技术要求:被加工表面的尺寸精度和几何形状精度,各个被加工表面之间的相互位置精度,被加工表面的粗糙度、表面质量、热处理要求等。通过分析、了解这些技术要求的作用,从中找出主要的技术要求及在工艺上难以达到的技术要求,特别是对制订工艺方案起决定作用的技术要求。

在分析技术要求时,还应考虑到影响达到技术要求的主要因素,并着重研究零件在加工过程中可能产生的变形及其对技术要求的影响,以便通过这一步的工作,掌握制订工艺规程时应解决的主要问题,为制订合理的工艺规程作好必要准备。

(2) 零件结构工艺性分析:

零件的结构工艺性是影响零件在加工过程中能否多快好省地被加工出来的一项基本特性。许多功能完全相同而结构工艺性不同的零件,它们的加工方法与制造成本常常有着很大的差别,所以应仔细检查零件的结构工艺性,必要时提出修改意见。

目前,对零件结构工艺性的分析大多采用定性分析法。即定性比较不同结构的工艺性的优缺点,关于机械加工的结构工艺性定性分析可参阅第7章,其主要内容是根据经验概括地提出一些要求,属于定性分析指标。近来,有关部门正在探讨和研究评价结构工艺性的定量指标。如机械电子工业部指导性技术文件 JB/Z388.3-88《工艺管理导则 产品结构工艺性审查》中推荐的部分主要指标项目有:

① 加工精度系数  $K_{ac}$ :

$$K_{ac} = \frac{\text{产品(或零件)图样中标注有公差要求的尺寸数}}{\text{产品(或零件)的尺寸总数}}$$

② 结构继承性系数  $K_s$ :

$$K_s = \frac{\text{产品中借用件数} + \text{通用件数}}{\text{产品零件总数}}$$

③ 结构标准化系数  $K_{st}$ :

$$K_{st} = \frac{\text{产品中标准件数}}{\text{产品零件总数}}$$

④ 结构要素统一化系数  $K_e$ :

$$K_e = \frac{\text{产品中各零件所用同一结构要素数}}{\text{该结构要素的尺寸数}}$$

⑤ 材料利用系数  $K_m$ :

$$K_m = \frac{\text{产品净重}}{\text{该产品的材料消耗工艺定额}}$$

结构工艺性分析中发现的问题,工艺人员可提出修改意见,经设计部门同意,通过一定审批程序后方可修改。

## 2. 生产类型与生产组织形式的确定

由于零件机械加工的工艺规程与所采用的生产组织类型是密切相关的,所以在制订零件的机械加工工艺规程时,应首先确定零件机械加工的生产组织类型。而生产组织类型又主要是与零件的年生产纲领有关的。

(1) 生产纲领的计算:

生产纲领是指企业在计划期内应当生产的产品产量和进度计划。

生产纲领中应计入备品和废品的数量。产品的生产纲领确定后,就可根据各零件在产品中的数量、供维修用的备品率和在整个加工过程中允许的总废品率来确定零件的生产纲领。在成批生产中,当零件的生产纲领确定后,就要根据车间具体情况按一定期限分批投产。一次投入或产出的同一产品(或零件)的数量,称为生产批量。

零件在计划期为一年中的生产纲领  $N$  可按下式计算:

$$N = Qn(1 + a\%)(1 + b\%) \quad (2-20)$$

式中  $N$ ——零件的年生产纲领,单位为件;

$Q$ ——产品的年生产纲领,单位为台/年;

$n$ ——每台产品中所含零件的数量,单位为件/台;

$a\%$ ——备品的百分率;

$b\%$ ——废品的百分率。

(2) 生产类型及其工艺特点:

生产类型是指企业(或车间、工段、班组、工作地)生产专业化程度的分类,一般分为大量生产、成批生产和单件生产三种类型。

表 2-7 示出了生产类型与生产纲领及其产品重量的关系,同时也列出了各类生产类型的主要工艺特点。

表 2-7 各种生产类型的生产纲领(单位为件)及工艺特点

生产纲领		生产类型	单件生产	批量生产			大量生产
				小批	中批	大批	
产品类型	重型机械	<5	5~100	100~300	300~1 000	>1 000	
	中型机械	<20	20~200	200~5 000	500~5 000	>5 000	
	轻型机械	<100	100~500	500~5 000	5 000~50 000	>50 000	
工艺特点	毛坯特点	自由锻造,木模手工造型,毛坯精度低,余量大		部分采用模锻,金属模造型,毛坯精度及余量中等	广泛采用模锻,机器造型等高效方法,毛坯精度高、余量小		
	机床设备及机床布置	通用机床按机群式排列,部分采用数控机床及柔性制造单元		通用机床及部分专用机床及高效自动机床,机床按零件类别分工段排列	广泛采用自动机床、专用机床,采用自动线或专用机就要流水线排列		



续表 2-7

生产纲领	生产类型	批量生产			大量生产
		单件生产	小批	中批	
工 艺 特 点	夹具及尺寸保证	通用夹具,标准附件或组合夹具,划线试切保证尺寸	通用夹具,专用或成组夹具,调整法保证尺寸	通用夹具,专用或成组夹具,调整法保证尺寸	高效专用夹具,调整法及自动测量控制尺寸
	刀具、量具	通用刀具,标准量具	专用或标准刀具、量具	专用或标准刀具、量具	专用刀具、量具,自动测量
	零件的互换性	配对制造,互换性差,多采用钳工修配	多数互换,部分试配或修配	多数互换,部分试配或修配	全部互换,高精度偶件采用分组装配,配磨
	工艺文件的要求	编制简单的工艺过程卡片	编制详细的工艺规程及关键工序的工序卡片	编制详细的工艺规程及关键工序的工序卡片	编制详细的工艺规程,工序卡片,调整卡片
	生产率	用传统加工方法,生产率低,用数控机床可提高生产率	中等	中等	高
	成本	较高	中等	中等	低
	发展趋势	采用成组工艺,数控机床,加工中心及柔性制造单元	采用成组工艺,用柔性制造系统或柔性自动线	采用成组工艺,用柔性制造系统或柔性自动线	用计算机控制的自动化制造系统、车间或无人工厂,实现自适应控制

## ① 大量生产:

大量生产是指在机床上长期地进行某种固定的工序。例如汽车、拖拉机、轴承、冰箱压缩机、自行车的制造,通常是以大量生产的方式进行的。

## ② 成批生产:

成批生产是在一年中分批地生产相同的零件,生产呈周期性的重复。每批生产相同零件的数量,生产批量的大小要根据具体生产条件来决定。成批生产又可分为小批、中批、大批生产三种类型。通用机械(一般的车、铣、刨、钻、磨床、压缩机等)的制造往往属于这种生产类型。

## ③ 单件生产:

单件生产是指单个(或少数几个)生产不同结构、尺寸的产品,很少重复。重型机器、大型船舶制造及新产品试制等常属于这种生产类型。

## (3) 生产类型和生产组织形式的确定:

在计算出零件的生产纲领以后,可参考表 2-7 所提出的规范,确定相应的生产类型。生产类型确定以后,就可确定相应的生产组织形式。在大量生产时采用自动线;在成批生产时采用流水线;在单件小批生产时采用机群式的生产组织形式。对于多品种小批量生产类型,目前的

发展方向是按成组工艺组织生产,采用柔性制造系统或计算机集成制造系统。

### 3. 确定毛坯与毛坯图

#### (1) 毛坯:

毛坯的形状和尺寸越接近成品零件,即毛坯精度越高,则零件的机械加工劳动量越少,材料消耗越少,因而机械加工的生产率提高,成本降低。但是,毛坯的制造费用却提高了。因此,确定毛坯要从机械加工和毛坯制造两方面综合考虑,以求得最佳效果。

确定毛坯包括选择毛坯类型及其制造方法。毛坯类型有铸、锻、压制、冲压、焊接、型材和板材等。确定毛坯时要考虑下列因素:

#### ① 零件的材料及其机械性能:

当零件的材料选定后,毛坯的类型就大致确定了。例如,材料是铸铁,就选铸造毛坯;材料是钢材,且力学性能要求高时,可选锻件;力学性能要求较低时,可选型材或铸钢。

#### ② 零件的形状和尺寸:

形状复杂的毛坯,常用铸造方法。薄壁零件,不可用砂型铸造;尺寸大的铸件宜用砂型铸造;中、小型零件可用较先进的铸造方法。常见的一般用途的钢质阶梯轴零件,如各台阶的直径相差不大,可用棒料;如各台阶的直径相差较大,宜用锻件;尺寸大的零件,因受设备限制,一般用自由锻;中、小型零件可选模锻;形状复杂的钢质零件不宜用自由锻。

#### ③ 生产类型:

大量生产应选和生产率都比较高的毛坯制造方法,用于毛坯制造的昂贵费用可由材料消耗的减少和机械加工费用的降低来补偿。如铸件应采用金属模机器造型或精密铸造;锻件应采用模锻、冷拉型材等。单件小批生产则应采用木模手工造型或自由锻。

#### ④ 生产条件:

确定毛坯必须结合具体生产条件,如现场毛坯制造的实际水平和能力、外协的可能性等。有条件时,应积极组织地区专业化生产,统一供应毛坯。

#### ⑤ 充分考虑利用新工艺、新技术和新材料的可能性:

为节约材料和能源,随着毛坯制造专业化生产的发展,目前毛坯制造方面的新工艺、新技术和新材料的发展很快。例如,精铸、精锻、冷轧、冷挤压、粉末冶金和工程塑料等在机械制造中的应用日益增加。应用这些方法后,可大大减少机械加工量,有时甚至可不再进行机械加工,其经济效果非常显著。

#### (2) 毛坯图:

毛坯图是毛坯制造和编制零件加工工艺规程的重要文件。制定工艺规程时,需要分析毛坯图,主要是分析粗加工的定位基准,其次分析铸件毛坯的分型面,浇口、冒口的位置,拔模斜度,圆角半径的大小,锻件毛坯的锻模分模面,锻件的纤维方向等。在成批生产中,由毛坯车间提出毛坯图。在单件、小批量生产中,通常在确定机械加工工艺规程时,一起考虑毛坯的类型和确定毛坯的尺寸。

用型材、棒料、钣料为原料加工零件时不需设计毛坯图,在零件加工工艺规程中只需定出材料的规格以及由型材切成的毛坯的尺寸,因为毛坯尺寸与零件加工总余量有关。

毛坯为铸件和锻件时需要有毛坯图。毛坯图的表示方法如图 2-82 所示。

① 用双点划线“— · — · —”表示经切削加工后的表面,在剖面图上用交叉十字线表示加工余量。

② 毛坯图上的尺寸应包括加工总余量。为清楚起见,还可在毛坯图上标注出成品尺寸,但应外加括号,并且只注基本尺寸(如  $\phi 300$ )。

③ 在毛坯图上可用符号表示初次机械加工工序的基准面。

④ 在毛坯图上注有材料的规格及其必要的技术条件。

⑤ 在毛坯图上注有检验的主要尺寸及其公差,一些次要尺寸可不注公差。

毛坯的技术要求是根据零件的使用要求规定的。保证毛坯的质量是保证零件质量的前提。毛坯制造完毕后应进行各项技术检验,如外观检验、形状和尺寸检验、金相检验,以及化学成分分析等,合格后才可投入生产。

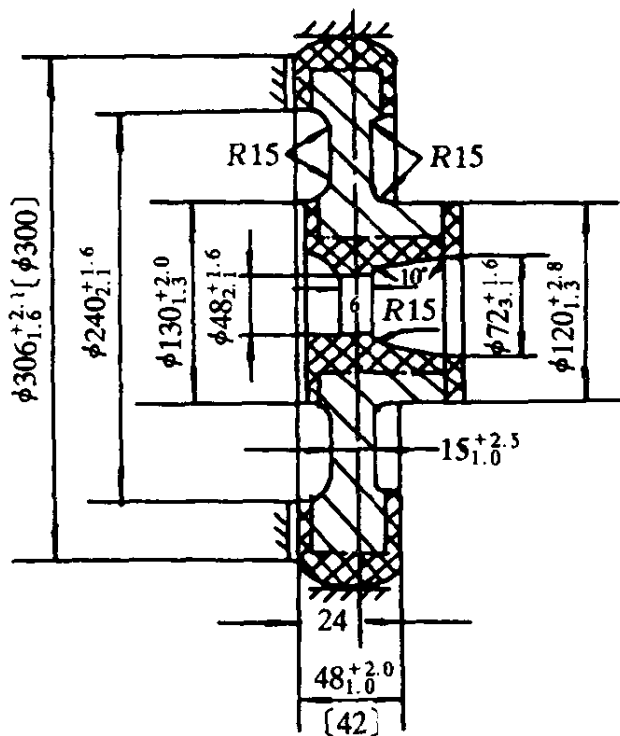


图 2-82 模锻齿轮毛坯图

#### 4. 定位基准的选择

在起始工序中,只能选择未经加工的毛坯表面作定位基准,这种基准称为粗基准。用加工过的表面作定位基准,则称为精基准。基准的选择对加工精度的工艺路线有很大影响。

在选择定位基准时,是从保证工件精度要求出发的,因而分析定位基准选择的顺序就应从精基准到粗基准。

##### (1) 精基准的选择:

选择精基准时,应能保证加工精度和装夹可靠方便,可按下列原则选择。

##### ① “基准重合”原则:

采用设计基准作为定位基准称为基准重合。为避免基准不重合而引起的误差,保证加工精度,应遵循基准重合原则。例如,图 2-83 所示主轴箱箱体,孔 IV 轴线在垂直方向的设计基准是底面 D。加工孔 IV 时采用设计基准作定位基准,能直接保证尺寸  $y_N$  的精度,即遵循基准重合原则。若如图 2-83 所示,用夹具装夹、调整法加工,为了在镗模(镗孔夹具)上能布置固定的中间导向支承,提高镗杆的刚性,需把箱体倒放,采用面 F 作定位基准。此时,加工一批主轴箱箱体,由于镗模能直接保证

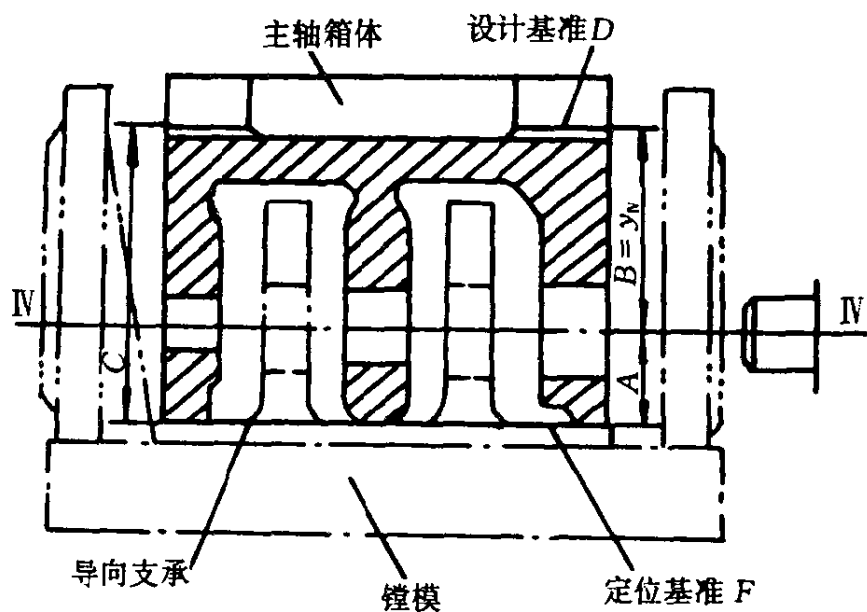


图 2-83 设计基准与定位基准不重合

的是 A 尺寸,而设计要求是尺寸 B(B 就是  $y_N$ ),两者不同。这样,尺寸 B 只能通过控制尺寸 A 和 C 间接保证。控制尺寸 A 和 C 就是控制它们的误差变化范围。设尺寸 A 和 C 可能的误差变化范围分别为它们的公差值  $\pm \frac{T_A}{2}$  和  $\pm \frac{T_C}{2}$ ,那么在调整好镗杆加工一批主轴箱箱体后,尺

寸  $B$  可能的误差变化范围为

$$B_{\max} = C_{\max} - A_{\min}$$

$$B_{\min} = C_{\min} - A_{\max}$$

将上两式相减,可得到

$$B_{\max} - B_{\min} = C_{\max} - A_{\min} - (C_{\min} - A_{\max})$$

即

$$T_B = T_C + T_A$$

此式说明:尺寸  $B$  所产生的误差变化范围是尺寸  $C$  和尺寸  $A$  误差变化范围之和。

从上面分析可知,零件图样上原设计 requirements 是尺寸  $C$  和  $B$ ,它们是分别单独要求的,彼此无关。但是,由于加工时定位基准与设计基准不重合,致使尺寸  $B$  的加工误差中引入了一个从定位基准到设计基准之间的尺寸  $C$  的误差,这个误差称为基准不重合误差。它属于定位误差,其大小等于  $T_C$ 。

### ② “基准统一”原则:

应选择多个表面加工时都能使用的定位基准作为精基准,即应遵守“基准统一”的原则,这样便于保证各加工表面间的相互位置精度,避免基准变换所产生的误差,并简化夹具的设计和制造工作。

如轴类零件,采用顶尖孔作统一基准加工各外圆表面,这样可以保证各表面之间较高的同轴度;机床床头箱体多采用底面和导轨面为统一基准加工各轴孔、前端面和侧面;一般箱体形零件常采用一大平面和两个距离较远的孔为精基准;图 2-84 所示的汽车柴油机的机体,在加工机体上的主轴承座孔、凸轮轴座孔、气缸孔及座孔端面时,就是采用底面  $A$  及底面上相距较远的两个工艺孔作为统一精基准,这样就能较好地保证这些加工表面的相互位置关系。

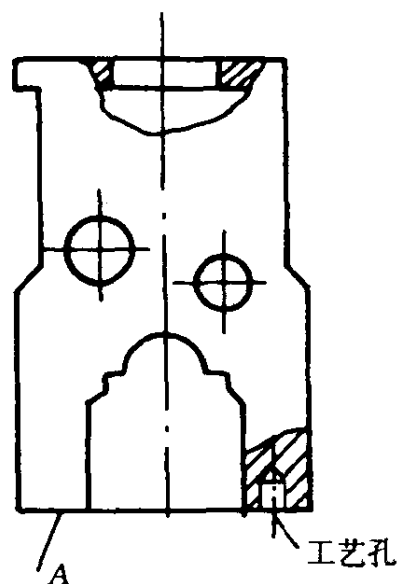


图 2-84 柴油机机体

圆盘和齿轮零件常用一端面和短孔为精基准完成各种加工工序;活塞常用底面  $A$  和止口  $B$  (工艺孔)作为统一精基准以完成活塞的多种加工(见图 2-85)。

### ③ “互为基准”原则:

当两个表面相互位置精度要求高,并且它们自身的尺寸与形状精度都要求很高时,可以采取互为精基准的原则,反复多次进行精加工。如精密齿轮高频淬火后,为了消除淬火变形和提高齿面及支承轴孔的精度,保证表面淬硬层深度均匀一致并要求去除的淬硬层很薄,在进行磨削精加工时常以齿面为基准磨内孔,然后再以内孔为基准磨齿面,这样可以保证齿面与装配基面有较高的位置精度。又如车床主轴的主轴颈和锥孔同轴度要求很高,也采用互为基准进行精细加工。

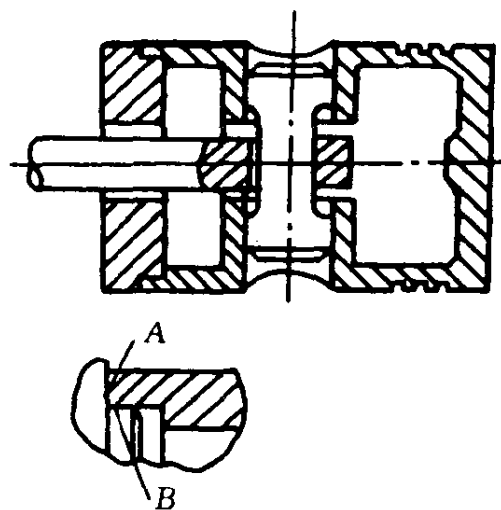


图 2-85 活塞的统一精基准

### ④ “自为基准”原则:

在有些精加工或光整加工工序中,要求余量尽量小而均

匀,在加工时就应尽量选择加工表面本身作为基准(即“自为基准”原则),而该表面与其他表面之间的位置精度则由先行工序保证。

例如,磨削车床床身导轨面时,由于要求导轨面均匀致密的耐磨层能保持一定深度,其磨削余量一般小于0.5mm,这时可用装在磨头上的百分表找正床身导轨面,以符合“自为基准”原则,如图2-86所示。对气缸孔或连杆孔利用珩磨头或浮动搪刀进行加工也是利用这个“自为基准”的原则。

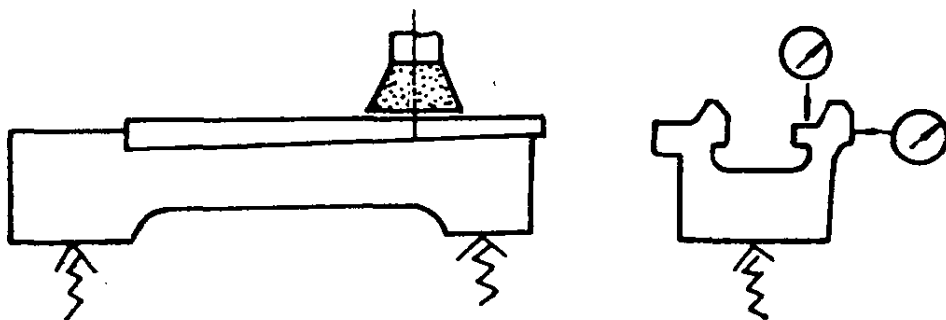


图2-86 床身导轨面自为基准

应该强调的是,精基准选择时,一定要保证工件的夹紧稳定可靠、夹具结构简单及操作简便。如零件的定位基准应有足够的装夹刚度,在切削力和夹紧力作用下变形最小,工件在夹具上的安装面应足够大并尽量靠近加工表面等。因此,用零件的装配基准来定位,无论从定位精度或受力变形等方面考虑,往往都是很好的。

值得指出的是,上述四条选择精基准的原则,有时是相互矛盾的。例如,保证了基准统一就不一定符合基准重合等等。在使用这些原则时,要具体情况具体分析,以保证主要技术要求为出发点,合理选用这些原则。也可以几个原则结合起来使用,例如可先采取基准统一原则进行前面工序的加工,然后用基准重合的原则进行最后工序的加工。

## (2) 粗基准选择:

选择粗基准的原则如下:

① 粗基准一般只使用一次,以后不应重复使用,以免由于精度及表面粗糙度都很差的毛面多次定位造成重复精度不高而产生定位误差。但是,当毛坯是精密铸件或精密锻件时,毛坯质量高,而工件精度要求又不高时,可以重复使用某一粗基准。

由于粗基准只使用一次,以后的加工都是采用精基准加工出来的,并且精基准也是这一个粗基准加工出来的,而且后续工序的加工量是愈来愈小的,这样,粗基准选择的不同会影响工件成品在毛坯中的位置,从而也影响到各加工面余量的分配,这样就派生出下面一些粗基准选择原则。

② 若工件必须首先保证某重要表面的加工余量均匀,则应选该表面为粗基准。

例如箱体零件中,其主轴孔的精度要求很高,且要求在加工主轴孔时余量均匀,并使加工时的切削力和工艺系统的弹性变形均匀,且不易发生振动,有利于保证高的尺寸精度和形状精度,所以应选用主轴孔为粗基准加工底面(或顶面),再以底面(或顶面)为精基准加工主轴孔。

③ 在没有要求保证重要表面加工余量均匀的情况下,若零件上每个表面都要加工,则应以加工余量最小的表面作为粗基准。这样选择粗基准,可使这个表面在以后加工中不致因余量太小而留下没有经过加工的毛坯表面。

例如,铸造和锻造的轴套,常是孔的加工余量大而外圆表面的加工余量较小,这时就以外圆表面为粗基准来加工内孔。图2-87就是该轴套用外圆作为粗基准的定位情况。

④ 在没有要求保证重要表面加工余量均匀的情况下,若零件有的表面不需要加工时,则应以不加工表面中与加工表面的位置精度要求较高的表面为粗基准。若工件上既需保证某重

要表面加工余量均匀,又要求保证不加工表面与加工表面的位置精度,则仍应该按本项原则处理。

⑤ 选作粗基准的表面,应尽可能平整和光洁,不能有飞边、浇口、冒口及其它缺陷,以便定位准确、装夹可靠。

### 5. 工艺路线的拟订

拟订工艺路线是制订工艺规程中关键性的一步,它与定位基面的选择有密切的关系。应该多提出一些方案,加以分析比较。工艺路线不但影响加工的质量和效率,而且影响到工人的劳动强度、设备投资、车间面积、生产成本等问题,必须严谨从事。

在拟订工艺路线时要考虑下列四个方面的问题:

#### (1) 加工方法的选择:

在分析研究零件图的基础上,对各加工表面选择相应的加工方法。

① 首先要根据每个加工表面的技术要求,确定加工方法及其加工路线。各种加工方法所能达到的精度和粗糙度可参阅本章的表 2-3,表 2-5 或一般的机械加工手册。但是必须指出:这是在一般情况下可能达到的精度和粗糙度,在具体条件下是会有差别的。随着生产技术的发展 and 工艺水平的提高,同一种加工方法所能达到的精度和表面粗糙度也会更好。

② 决定加工方法时要考虑被加工材料的性质。例如,淬火钢必须用磨削的方法加工;而有色金属则磨削困难,一般都采用金刚镗或高速精密车削的方法进行精加工。

③ 选择加工方法要考虑到生产类型,即要考虑生产率和经济性的问题。在大批或大量生产中可采用专用的高效率设备和专用工艺装备。例如,平面和孔可用拉削加工;轴类零件可采用半自动液压仿型车床加工;盘类或套类零件可用单能车床加工等。在大批或大量生产中甚至可以从根本上改变毛坯的形态,大大减少切削加工的工作量。例如,用粉末冶金制造油泵的齿轮,用失蜡浇铸制造柴油机上的小尺寸零件等。在单件小批生产中,就采用通用设备、通用工艺装备及一般的加工方法。提高单件小批生产的生产率亦是目前机械制造工艺的研究课题之一。例如,在车床上装液压仿形刀架,采用数控机床或采用成组加工方法等。

④ 选择加工方法还要考虑本厂(或本车间)的现有设备情况及技术条件。应该充分利用现有设备,挖掘企业潜力,发挥工人群众的积极性和创造性。有时虽有该项设备,因负荷的平衡问题,还得改用其他的加工方法。

此外,选择加工方法还应该考虑一些其他因素,例如,工件的形状和重量以及加工方法所能达到的表面物理机械性能等。

#### (2) 加工阶段的划分:

##### ① 加工阶段的划分:

当加工质量要求较高时,就需将加工过程分成几个阶段:

粗加工阶段 切去大部分余量,要求较高的生产率。

半精加工阶段 完成一些次要表面的加工,或为主要表面的精加工作准备,一般在热处理以前进行。

精加工阶段 保证各重要表面达到规定的质量要求。

有时,加工余量过大,表面太粗糙,在粗加工前还需安排荒加工阶段,以切去外皮。当零件精度要求较高和粗糙度要求较细时,在精加工之后还有光整加工阶段。

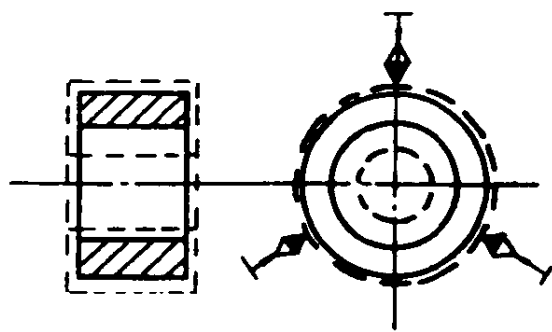


图 2-87 轴套的粗基面

## ② 划分加工阶段的原因:

容易保证零件的加工精度和表面质量 粗加工阶段中,切削余量大,切削力和切削热都较大,夹紧力也应相应增大。在这种情况下,内应力以及由此引起的变形都很大,表面质量也差,只有通过各个加工阶段,使余量逐步减小,才能不断修正工件的变形和切除表面破坏层,使加工精度和表面质量逐步提高。此外,各阶段之间的时间间隔相当于自然时效,使工件有充分变形的时间,有利于消除内应力,以便在后一加工阶段中加以修正。

可合理使用机床 粗加工时采用功率大、精度不高的机床,精加工时用高精度机床。这样既发挥了机床功率和精度的性能特点,又延长了高精度机床的使用寿命。

安排热处理工序的需要 为了改善工件的加工性能或保证工件的技术要求,往往需要在工艺过程中插入必要的热处理工序。由于热处理中工件变形大,这样就自然地地区分了加工阶段。例如,螺杆压缩机转子为锻件时,粗加工前应进行正火,粗加工后需调质,半精加工后需要进行表面淬火。

可及时发现缺陷 铸、锻件材料内部容易产生气孔、裂纹等缺陷,因粗加工切削量大,故粗加工后可及时发现并进行处理,以免浪费后续工序的时间。精加工工序通常安排在最后,可以起到保护加工表面的作用。

## (3) 工序的集中和分散:

在制订工艺规程时,还要解决工序的数量及其内容问题。我们知道,任一零件的加工都是由许多工步组成的,这些工步构成工序时,可以有集中和分散两种原则。

### ① 工序集中:

工序集中,就是把工步集中在少数机床上,而在每台机床上力求完成尽可能多的工步。在极端情况下,所有工步可以集中在一台机床上完成。例如压缩机的机体,有些工厂采用多工位的专用机床或是在加工中心上加工,就是集中工序的一种方式。其特点为:

- 采用高生产率的机床,工序数量少,工艺路线短,运输工作量减少,缩短了生产周期;
- 减少工作的定位次数,提高了各表面的相互位置精度;
- 减少设备的数量、操作工人及生产面积;
- 机床和专用工艺装备的调整、维修麻烦,生产准备工作量大。

### ② 工序分散:

分散工序就是将工步分散成许多简单的工序,其极端情况就是每一工步都作为一道工序在一台机床上加工。这种组织工序的方式,具有如下特点:

- A. 机床与工艺装备简单,调整容易,能较快地适应新的生产对象,工人易于掌握;
- B. 切削用量可以选择得更为合理,批量大时可以设计简单的高效设备;
- C. 设备、工人数量多,生产面积大。

至于工序集中与分散的合理使用范围,很难严格区分,必须根据生产规模,机床设备,工件的精度、重量,以及工厂条件灵活处理。

## (4) 加工顺序的安排:

### ① 加工顺序的原则:

先基面后其他 决定加工顺序的一个主要因素是工件的定位装夹,亦即前一道工序要为后道工序加工出基面。因此在加工开始,总是由先把精基面加工出来。如果精基面不止一个,则应按照基面转换次序来安排基面的加工。



**先粗后精** 先粗加工,中间安排半精加工,最后安排精加工和光整加工,这样可以逐步提高加工精度。对于要求较高的定位基面亦应按此顺序加工。

**先主后次** 先加工主要表面(如装配基面、工作表面)后加工次要表面(如键槽,紧固用光孔和螺孔等)。次要表面加工时不容易造成废品,把它们安排在主要表面的主要加工工序之后及最终精加工工序之前比较合适。

**先平面后轴孔** 一般说来,机器零件上平面所占的轮廓尺寸比较大,适于用作定位基面,应先予以加工。例如箱体类零件、轴类零件,后者先加工端面和顶尖孔。

### ② 热处理工序的安排:

零件加工过程中经常要安排热处理工序,应根据不同的热处理目的进行相应的顺序安排:改善材料的加工性,消除毛坯制造时的内应力 所谓加工性就是金属切削的难易程度。其影响因素主要为材料的强度、硬度及内部组织。对于含碳量  $C > 0.5\%$  的碳钢采用退火,以降低硬度;对于  $C \leq 0.5\%$  碳钢采用正火,以适当提高硬度,防止切屑粘刀,影响粗糙度。调质(淬火后高温回火)处理能获得组织细致均匀的回火索氏体,有利于切削加工。这些热处理工序通常在机械加工前进行。

**消除内应力** 在粗加工后,精加工前,最好安排退火或时效处理(人工时效、自然时效),以消除内应力。但对于要求不高的零件,为了减少零件的运输量,亦可合并并在机械加工之前进行。

**提高材料的强度** 淬火、渗碳、氮化等类热处理,通常放在半精加工之后,磨削加工之前进行。调质处理能使钢材获得强度、硬度和冲击韧性均较良好的综合机械性能,经常用于连杆、曲轴(主轴)等零件的最后热处理。

### ③ 辅助工序的安排:

辅助工序主要是检验工序,它是使加工过程顺利进行,保证产品质量,防止废品的主要措施。除了在每道工序的进行中由操作者自检外,还必须在下列情况下安排单独的检验工序:粗加工阶段结束后;费工或重要工序前后;送往外车间之前;磁力探伤和密封之前;最终加工后。

此外,属于辅助工序的还有:去毛刺、倒棱、去磁、清洗、涂防锈油、喷砂等。这些工序亦应给予足够的重视,否则会影响产品质量。

## 6. 加工余量的确定

### (1) 加工余量及其影响因素:

机械加工时所切下的金属层厚度称为机械加工余量。而在每道工序中所切下的金属层厚度称为工序间加工余量。对于外圆、孔等旋转表面,加工余量是指直径上的,称为对称余量,实际切削层厚度为余量之半;平面加工余量是单边余量,它等于实际切削层厚度。

加工余量要制定得适当。余量太大,浪费原材料,降低生产率,甚至会由于切削力过大而影响加工精度;余量太小,则不能保证零件各加工表面所要求的精度和表面层质量。

目前,在规定加工余量时多半采用经验资料,很少采用计算的方法。但不管采用何种方法,在确定加工余量时均需考虑下列因素的影响:

#### ① 上工序所造成的表面层:

毛坯工序若为铸造,则在表面形成硬皮及脱碳层;若为锻造,则产生氧化皮。这些表面层对切削加工极为不利,应予除去。切削加工工序后,工件表层产生表面不平度  $H_s$  及表面破坏层  $T_s$ (图 2-88),为了避免上工序产生的这种表面层逐渐扩大,故应在本工序中作为加工余量



切除。随着加工过程中切削层厚度和切削力的逐渐减小,这种应该切除的表面层厚度亦逐步减小。在光整加工中,表面粗糙度和表面破坏层是组成加工余量的主要因素。

### ② 上工序的尺寸公差:

上工序的尺寸公差应作为加工余量加以切除。因此凡是已包括在尺寸公差范围内的几何形状误差和相对位置误差就不再单独考虑。属于这类误差的有圆度和圆柱度(包括在直径公差内)、平行度(包括在距离公差内)等。

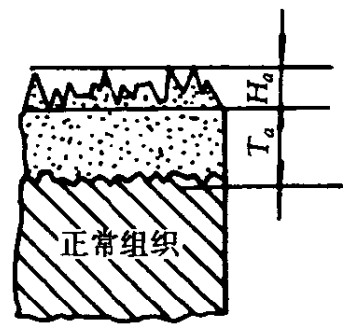


图 2-88 加工表面层

### ③ 需要单独考虑的形位公差:

零件上有些几何形状和相对位置误差并不包括在尺寸公差的范围,但这些误差又必须在加工中加以纠正,这时必须单独计入加工余量中去。属于这一类误差的有直线度、平面度、垂直度、平行度和同轴度等。如图 2-89 所示工件的轴心线有  $\omega$  的弯曲量,为了纠正这种误差,车削余量不应小于  $2\omega$ 。

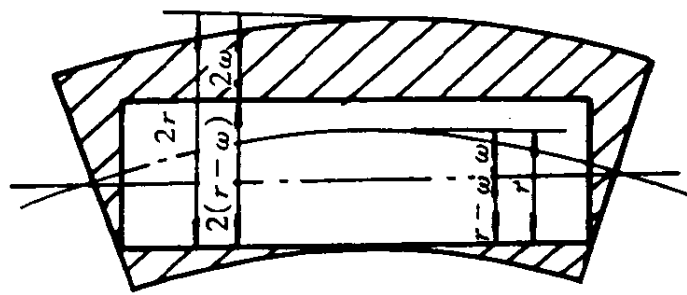


图 2-89 轴心直线度误差对加工余量的影响

### ④ 本工序的安装误差:

在安装误差中主要是定位误差和夹紧误差,但有时还要考虑夹具本身的误差。如用三爪卡盘夹紧工件外圆加工内孔时,若三爪卡盘本身定心不准确,使工件与机床的旋转中心偏移  $e$  值时,必须在加工余量中增加  $2e$  值,以弥补由于偏心引起的余量不均匀(见图 2-90)。

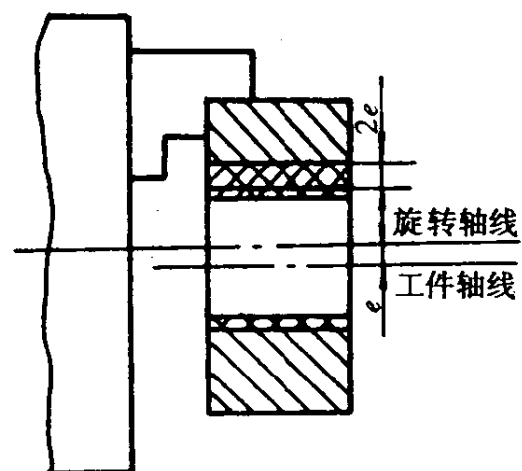


图 2-90 三爪卡盘装夹误差对加工余量的影响

## (2) 确定加工余量的方法:

确定加工余量的方法有下列三种。

### ① 查表法:

由工厂的生产实践和试验研究积累的数据整理成的表格,查阅这些表格,再结合本厂的实际情况进行适当修改后确定加工余量。目前,我国各工厂广泛采用查表法。表 2-8~表 2-13 列出了外圆、孔、平面的加工余量,供参考。

表 2-8 粗车外圆后半精车余量

(mm)

轴 径	长 度(L)					
	≤100	>100~250	>250~500	>500~800	>800~1 200	>1 200~2 000
≤10	0.8	0.9	1.0	-	-	-
>10~18	0.9	0.9	1.0	1.1	-	-
>18~30	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	-
>30~50	1.0	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7
>50~80	1.1	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8
>80~120	1.1	1.2	1.2	1.4	1.6	1.8
>120~180	1.2	1.2	1.3	1.5	1.7	2.0
>180~260	1.3	1.3	1.4	1.6	1.8	2.0
>260~360	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1
>360~500	1.4	1.5	1.5	1.7	1.9	2.2

表 2-9 用金刚石刀精车外圆加工余量 (mm)

零件材料	零件基本尺寸	直径加工余量
轻合金	≤100	0.3
	>100	0.5
青铜及铸铁	≤100	0.3
	>100	0.4
铜	≤100	0.2
	>100	0.3

注:1. 如果采用两次车削(半精车及精车),则精车的加工余量为0.1mm;2. 精车前零件加工的公差按h9, h8决定;3. 本表所列的加工余量适用于零件的长度为直径的3倍为限。超过此限时,加工余量应适当加大

表 2-10 外圆磨削余量 (mm)

轴 径	热处理状态	长 度		
		≤100	>100~250	>250~500
≤10	未淬硬	0.2	0.2	0.3
	淬硬	0.3	0.3	0.4
>10~18	未淬硬	0.2	0.3	0.3
	淬硬	0.3	0.3	0.4
>18~30	未淬硬	0.3	0.3	0.3
	淬硬	0.3	0.4	0.4
>30~50	未淬硬	0.3	0.3	0.4
	淬硬	0.4	0.4	0.5
>50~80	未淬硬	0.3	0.4	0.4
	淬硬	0.4	0.5	0.5
>80~120	未淬硬	0.4	0.4	0.5
	淬硬	0.5	0.5	0.6
>120~180	未淬硬	0.5	0.5	0.6
	淬硬	0.5	0.6	0.7
>180~260	未淬硬	0.5	0.6	0.6
	淬硬	0.6	0.7	0.7

表 2-11 端面精车及磨削余量 (mm)

轴 径	零 件 全 长											
	≤18		>18~50		>50~120		>120~260		>260~500		>500	
	精车	磨削	精车	磨削	精车	磨削	精车	磨削	精车	磨削	精车	磨削
≤30	0.5	0.2	0.6	0.3	0.7	0.3	0.8	0.4	1.0	0.5	1.2	0.6
>30~50	0.5	0.3	0.6	0.3	0.7	0.3	0.8	0.4	1.0	0.5	1.2	0.6
>50~120	0.7	0.3	0.7	0.3	0.8	0.4	1.0	0.5	1.2	0.6	1.2	0.6
>120~260	0.8	0.4	0.8	0.4	1.0	0.5	1.0	0.5	1.2	0.6	1.4	0.7
>260~500	1.0	0.5	1.0	0.5	1.2	0.5	1.2	0.6	1.4	0.7	1.5	0.7
>500	1.2	0.6	1.2	0.6	1.4	0.6	1.4	0.7	1.5	0.8	1.7	0.8

表 2-12 孔加工余量

(mm)

零件基本尺寸	直径的余量						
	钻孔后				扩孔或镗孔后		粗铰孔后 半精铰孔
	扩孔	精镗孔	半精镗孔	铰孔	铰孔	粗铰孔	
3~6	-	-	-	0.15	-	0.15	0.15
>6~10	-	-	-	0.2	0.2	0.2	0.1
>10~18	0.8	0.8	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1
>18~30	1.2	1.2	0.8	0.3	0.3	0.2	0.1
>30~50	1.5	1.5	1.0	-	-	-	-
>50~80	-	2.0	1.0	-	-	-	-
>80~120	-	2.0	1.3	-	-	-	-
>120~180	-	2.0	1.5	-	-	-	-

表 2-13 平面加工余量

(mm)

加工性质	加工表面长度	加工表面宽度					
		≤100		>100~300		>300~1 000	
		余量 a	公差 (+)	余量 a	公差 (+)	余量 a	公差 (+)
精加工后精刨或精铣	≤300	1.0	0.3	1.5	0.5	2.0	0.7
	>300~1 000	1.5	0.5	2.0	0.7	2.5	1.0
	>1 000~2 000	2.0	0.7	2.5	1.2	3.0	1.2
精加工后磨削,零件安装时未经校准	≤300	0.3	0.10	0.4	0.12	-	-
	>300~1 000	0.4	0.12	0.5	0.15	0.6	0.15
	>1 000~2 000	0.5	0.15	0.6	0.15	0.7	0.15
精加工后磨削,零件安装在夹具中或用千分表校准	≤300	0.2	0.10	0.25	0.12	-	-
	>300~1 000	0.25	0.12	0.30	0.15	0.4	0.15
	>1 000~2 000	0.3	0.15	0.40	0.15	0.4	0.15
刮	≤300	0.15	0.06	0.15	0.06	0.2	0.10
	>300~1 000	0.2	0.10	0.20	0.10	0.25	0.12
	>1 000~2 000	0.25	0.12	0.25	0.12	0.30	0.15

注:1. 表中数值为每一加工表面的加工余量;2. 当精刨或精铣时,最后一次行程前留的余量应 $\geq 0.5$ ;

3. 热处理的零件磨前的加工余量需将表中数值乘以 1.2

### ② 经验估计法:

本法是根据实际经验确定加工余量。一般情况,为防止因余量过小而产生废品,经验估计的数值总是偏大一些。经验估计法常用于单件小批生产。

### ③ 分析计算法:

本法是根据上述影响加工余量的各项因素进行逐项定量分析和计算来确定加工余量,这

种方法比较合理,但必须有比较全面和可靠的试验资料。目前,只在材料十分贵重,以及军工生产或少数大量生产的工厂中采用。

在确定加工余量时,要分别确定加工总余量(毛坯余量)和工序余量。加工总余量的大小与所选择的毛坯制造精度有关。

### 7. 工序尺寸及其公差计算

工序尺寸及其公差的计算是工序设计中的重要内容,也是工艺技术人员的基本功之一。算得不合适就可能保证不了零件图上设计尺寸的精度要求,或者无谓地提高加工切削量,或者无谓地提高加工精度要求,或者出现加工余量不够等缺陷,甚至上述缺陷兼而有之。这个问题对于批量大,精度高,或者大型的零件尤为重要。

就零件上某个表面而言,它在加工过程中一般是经过若干个工序,逐步切除余量而最后才达到图纸设计要求的,该表面的每个工序有一工序尺寸,这工序尺寸当然不一定与设计尺寸相同,除此之外工序尺寸的工艺基准也有可能变换,也就是说工序尺寸与公差是和零件的设计要求、加工中的基准转换、工序间的余量以及工序本身的加工经济精度相互关联的。工序尺寸的计算可以分成下列两类情况进行:

#### (1) 工艺基面不变换的情况下的工序尺寸计算:

这里所谓的工艺基面指定位基面(对于调整法加工)或度量基面(对于试切法加工),当工艺基面不变换的情况下,在决定各工序间余量和工序所能达到的精度之后,就可以计算各工序的尺寸和公差。注意这种计算的顺序应由最后一道工序开始往前推算。这里,最后一道工序所形成的尺寸叫终结尺寸,通常,终结尺寸应该和设计尺寸一致。举例如下:

某车床主轴箱箱体的主轴孔的设计要求是:  $\phi 180\text{Jb} \begin{pmatrix} +0.018 \\ -0.007 \end{pmatrix}$ ,  $R_a \leq 1.25\mu\text{m}$ 。在成批生产条件下,若参照图 1-15 所制订的加工方法为:粗镗—半精镗—精镗—铰孔(用浮动镗刀块)。

从机械加工手册所查得的各工序的加工余量和所能达到的精度,见表 2-14 中第二、三两列,其计算结果列于第四、五两列。其中关于毛坯的公差,可根据毛坯的生产类型、结构特点、制造方法和生产厂的具体条件,参照手册资料确定。

表 2-14 工序尺寸及公差计算

工序名称	工序间双边余量 (mm)	工序达到的公差 等级(mm)	最小极限尺寸 (mm)	工序尺寸及极限偏差
铰孔	0.2	IT6	$\phi 179.993$	$\phi 180 \begin{matrix} +0.018 \\ -0.007 \end{matrix}$
精镗孔	0.6	IT7	$\phi 179.8$	$\phi 179.8 \begin{matrix} +0.04 \\ 0 \end{matrix}$
半精镗孔	3.2	IT9	$\phi 179.2$	$\phi 179.2 \begin{matrix} +0.1 \\ 0 \end{matrix}$
粗镗孔	6	IT11	$\phi 176$	$\phi 176 \begin{matrix} +0.25 \\ 0 \end{matrix}$
毛坯孔		+1 -2	$\phi 168$	$\phi 170 \begin{matrix} +1 \\ -2 \end{matrix}$

#### (2) 工艺基面变换情况下的工序尺寸计算:

在进行工序尺寸计算时,零件图上规定的设计尺寸以及所代表的设计基准均是已知的。而终结尺寸是指工件在所有工序加工完毕后形成的尺寸,一般情况下终结尺寸与设计尺寸一致,若不一致就产生基准不重合,此时就需通过尺寸换算由已知的设计尺寸计算出终结尺寸来。总之,工序尺寸计算是在已知终结尺寸及其公差的条件下去进行的。下面举一个工艺基面变换的条件下的典型实例来说明解工序尺寸的方法与步骤:

我们研究一轴承座类的零件,其零件图上所要求的轴向尺寸  $B_i$  分布情况见图 2-91 的下部所示,其机械加工工艺过程及其每个工步所对应的工序尺寸  $A_i$ ,毛坯尺寸  $M_i$  和工步余量  $Z_i$  等分布的情况均如图 2-91 所示,图中各工序尺寸均从度量基准注起。现已知  $B_i$  的尺寸如下:  $B_1 = 80_{-0.1}$ ,  $B_2 = 20_{+0.05}$ ,  $B_3 = 16_{-0.25}$ ,  $B_4 = 12_{+0.3}$ ,  $B_5 = 14_{-0.3}$ ,这些轴向尺寸  $B_i$  既是设计尺寸,也作为终结尺寸,现欲求各工序尺寸  $A_i$ ,毛坯尺寸  $M_i$ ,工步余量尺寸  $Z_i$ ,并检查余量等尺寸是否合理。

解题步骤如下,根据与零件图上的终结尺寸  $B_i$  的约束程度的不同,各工序尺寸可分成三类:第一类工序尺寸与终结尺寸雷同,如本例中的  $A_4, A_7$ ;第二类工序尺寸虽然不与终结尺寸雷同,但受终结尺寸严格制约,如本例中之  $A_2, A_3, A_6$ ;第三类工序尺寸虽然也受终结尺寸制约,但制约不严格,可以在一定的小范围内变化,如本例中的  $A_1, A_5$ 。对于不同类的工序尺寸,其尺寸与公差的要求有不同的计算方法,下面分述并求取之。

① 求第一类工序尺寸及其公差:

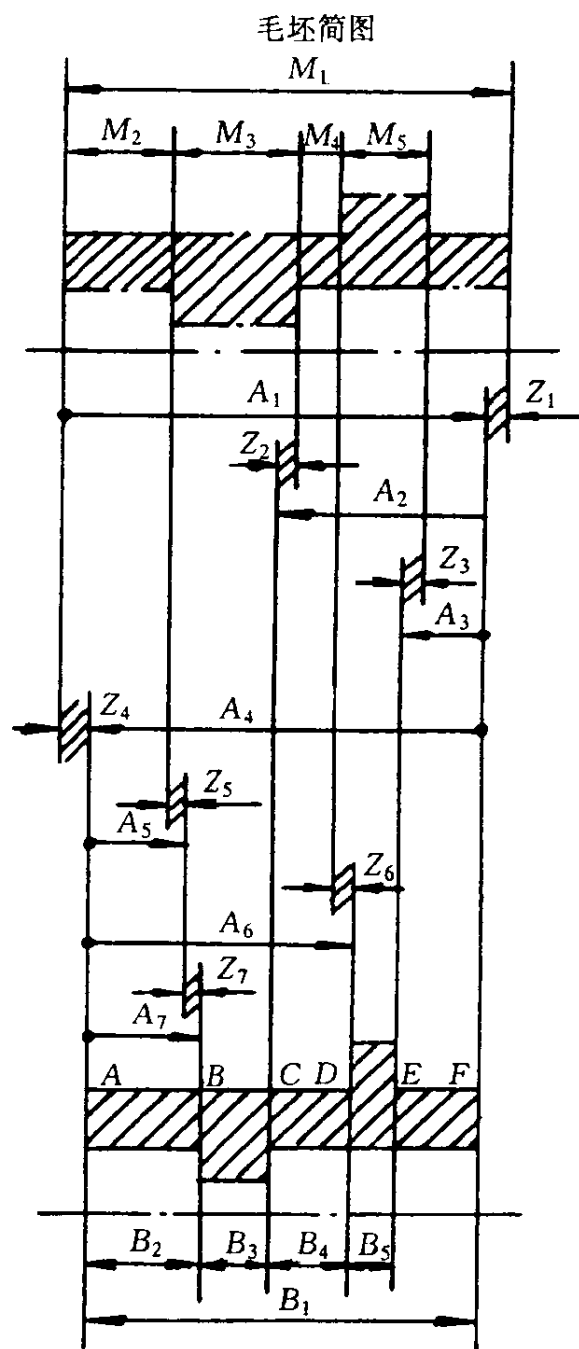
由图可知,对于第一类工序尺寸及其公差,直接沿用终结尺寸即可,故

$$A_4 = B_1 = 80_{-0.1}$$

$$A_7 = B_2 = 20_{+0.05}$$

② 求第二类工序尺寸及其公差:

对于第二类工序尺寸及其公差的要求,需解相关的尺寸链方能求得,其中所欲求的第二类工序尺寸作为该尺寸链中的一个组成环,而该尺寸链的封闭环必须是零件图上的一个有关的



工序号	1			2			3
工步名称	车端面 F	镗孔至 C	车台阶 E	车端面 A	镗孔至 B	车台阶 D	磨孔至 B
工序尺寸	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
工步余量	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$

图 2-91 零件的工序尺寸、工步余量分布图

终结尺寸,寻找该尺寸链及其组成环时,须循该终结尺寸按向前面工序的方向上去追迹,并按最短路线原则找出各有关工序尺寸作为其组成环,此外还需将其它各终结尺寸作为封闭环的尺寸链按同样的方法同时寻找出来,然后从只有一个未知数的尺寸链入手去解,譬如从含封闭环  $B_3$  的尺寸链(见图 2-92(a))所示,图 2-92 为寻找出的三个终结尺寸作为封闭环的尺寸链)入手,可以写出下式

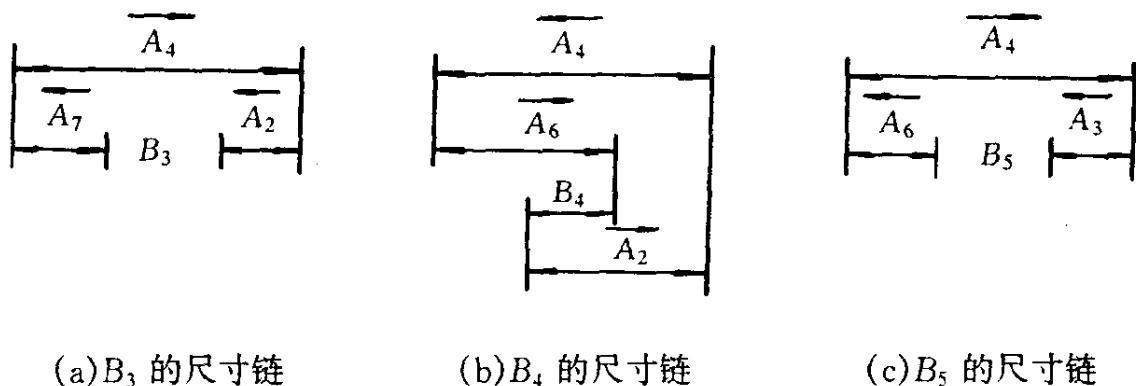


图 2-92 终结尺寸作为封闭环的尺寸链

$$B_3 = \bar{A}_4 - \bar{A}_7 - \bar{A}_2 \quad (2-21)$$

式中  $B_3$  为零件图上的终结尺寸,而  $A_4, A_7, A_2$  为其组成环,均为有关的工序尺寸,其中的  $A_4, A_7$  两个工序尺寸均通过与已知的终结尺寸之关系式(见求第一类工序尺寸所用公式)事先求出而成为已知的了。这样只剩下一个未知数,这个未知数就是所欲求第二类尺寸  $A_2$ ,它的尺寸及其公差可通过  $B_3$  尺寸链关系式(2-21)求出:

$$B_{3\max} = A_{4\max} - A_{7\min} - A_{2\min}$$

所以

$$A_{2\min} = A_{4\max} - A_{7\min} - B_{3\max} = 44$$

$$A_{2\max} = A_{4\min} - A_{7\max} - B_{3\min} = 44.1$$

即求出组成环  $A_2$  的尺寸及其公差为  $A_2 = 44_0^{+0.1}$ ,由式(2-21)可见第二类工序尺寸  $A_2$  是受终结尺寸  $B_3, B_1, B_2$  严格制约而被限定的。然后用同样的方法利用  $B_4$  的封闭环之尺寸链(见图 2-92(b))得:

$$B_4 = \bar{A}_6 + \bar{A}_2 - \bar{A}_4 \quad (2-22)$$

经过同样的方法计算后得

$$A_6 = 48_0^{+0.1}$$

同样利用  $B_5$  封闭环之尺寸链(见图 2-92(c))得

$$B_5 = \bar{A}_4 - \bar{A}_3 - \bar{A}_6 \quad (2-23)$$

经过同样的方法变换并代入已知数值后即可求得工序尺寸

$$A_3 = 18_0^{+0.1}$$

由以上计算可知,第一、二类工序尺寸均由零件图上终结尺寸完全决定。

③ 求第三类尺寸及其公差:

为了求第三类尺寸  $A_1, A_5$  及其公差,需按下述步骤进行:

第一,求尺寸  $A_1, A_5$  的平均值及其名义余量  $Z_1, Z_5$ 。

① 注意,此处不可写成  $B_4 = \bar{A}_6 - \bar{B}_2 - \bar{B}_3$

A. 首先对上面已求出的各工序尺寸根据其尺寸大小、加工方法查表确定其各工步相应的名义余量  $Z_2, Z_3, Z_4, Z_6, Z_7$  值, 对于本例初步确定分别为 4, 4, 3, 3, 0.2(mm)。

B. 根据图 2-91 所示的尺寸间的关系, 按下式求出  $A_1, A_5$  之平均尺寸:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A_4 + Z_4 = 82.95 \\ A_5 &= A_7 - Z_7 = 19.825 \end{aligned} \right\} \quad (2-24)$$

式中  $A_4, A_7$  均为平均尺寸, 由下式求得

$$A_{i\text{平均}} = \frac{A_{i\text{max}} + A_{i\text{min}}}{2} \quad (2-25)$$

C. 根据  $A_1, A_5$  之平均值, 初步确定名义余量  $Z_1, Z_5$  分别为 3, 2.8, 并将各名义余量汇总列于表 2-15 中。

表 2-15 工步余量 (mm)

序号 $i$	名义余量 $Z_i$	最大余量 $Z_{i\text{max}}$	最小余量 $Z_{i\text{min}}$
1	3	4.7	1.5
2	4	6.3	2
3	4	7.8	0.5
4	3	3.1	2.8
5	2.8	4.0	1.6
6	3	5.7	0.3
7	0.2	0.25	0.1

第二, 求取毛坯尺寸  $M_i$  及其公差

A. 按下式求取零件图各终结尺寸的平均值

$$B_{i\text{平均}} = \frac{B_{i\text{max}} + B_{i\text{min}}}{2} \quad (2-26)$$

得:  $B_1 = 79.95; B_2 = 20.05; B_3 = 15.875; B_4 = 12.15; B_5 = 13.85$

B. 根据图 2-91 中所示的尺寸间的关系, 按下式分别求出各毛坯尺寸的初步平均值  $M'_i$ :

$$\left. \begin{aligned} M'_1 &= B_1 + Z_1 + Z_4 = 85.95 \\ M'_2 &= B_2 + Z_4 - Z_7 - Z_5 = 20.05 \\ M'_3 &= B_3 + Z_7 + Z_5 + Z_2 = 22.875 \\ M'_4 &= B_4 - Z_2 - Z_6 = 5.15 \\ M'_5 &= B_5 + Z_6 + Z_3 = 20.85 \end{aligned} \right\} \quad (2-27)$$

将上述各  $M'_i$  值取整后作为毛坯尺寸的名义值  $M_i$  列入表 2-16 中。

C. 按  $M_i$  的大小查表确定各  $M_i$  所相应的公差分别为:  $d_{M1} = 3, d_{M2} = 2, d_{M3} = 2, d_{M4} = 1, d_{M5} = 2$ 。并令各毛坯尺寸之公差为对称分布, 于是得各毛坯尺寸的上、下极限尺寸为

$$M_{i\text{min}}^{\text{max}} = M_i \pm \frac{d_{M_i}}{2} \quad (2-28)$$

所得之值列于表 2-16 中。

表 2-16 毛坯尺寸

(mm)

序号 $i$	名义尺寸 $M_i$	最大尺寸 $M_{imax}$	最小尺寸 $Z_{imin}$
1	86	87.5	84.5
2	20	21	19
3	23	24	22
4	5	5.5	4.5
5	21	22	2.0

第三,初步设定  $A_1, A_5$  的上、下偏差以求出其工序极限尺寸。

按式(2-24)所算出的  $A_1, A_5$  的值作为名义值,并根据相应的加工工序之精度初步确定其上、下偏差分别为: $S_1 = 0.05, N_1 = -0.15, S_5 = 0.075, N_5 = -0.025$ ,于是得工序极限尺寸:

$$A_{1max} = A_1 + S_1 = 83$$

$$A_{1min} = A_1 + N_1 = 82.8$$

$$A_{5max} = A_5 + S_5 = 19.9$$

$$A_{5min} = A_5 + N_5 = 19.8$$

第四,求出在上述初步设定条件下各工步实际余量的最大值与最小值。

求算工步余量的最大值、最小值的步骤是采取将各余量作为封闭环,利用图 2-91 中的关系,向上追迹,按最短路线原则,找出由有关工序尺寸作为组成环所形成的尺寸链,并解其尺寸链以求得各工步余量的最大值与最小值。其各计算公式与计算结果分别如下:

由图 2-91 中的尺寸关系形成的尺寸链解出

$$Z_1 = M_1 - A_1$$

所以

$$Z_{1max} = M_{1max} - A_{1min} = 4.7$$

$$Z_{1min} = M_{1min} - A_{1max} = 1.5$$

同样由

$$Z_2 = A_2 - A_1 + M_2 + M_3, \text{ 得出}$$

$$Z_{2max} = 6.3$$

$$Z_{2min} = 2$$

其余由下式公式:

$$Z_3 = A_3 - A_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5$$

$$Z_4 = A_1 - A_4$$

$$Z_5 = A_5 - A_1 - A_4 - M_2$$

$$Z_6 = A_6 + A_1 - A_4 - M_2 - M_3 - M_4$$

$$Z_7 = A_7 - A_5$$

(2-29)

分别求出  $(Z_3 \sim Z_7)_{max}, (Z_3 \sim Z_7)_{min}$  值,均一并列入表 2-15 中。

第五,检验上述所算出之各余量的最大值及最小值是否合理。若合理,则上述算出之工序尺寸  $A_1$  与  $A_5$  及其初步设定的公差即为确定值,否则,则需重新设定  $S_1, N_1, S_5, N_5$ ,直至所有的工步余量的最大值、最小值均合适为止。在仍然无法满足时,甚至有必要对上面其它的初



步设定值重新改设再进行相应计算以满足之。

总之,一个合适的工序尺寸与公差的设计与计算必须满足下列目标:

一是必须达到各个终结尺寸  $B_i$  的精度要求,否则设计尺寸超差。

二是最终计算出的各工步余量的最小值  $Z_{i\min}$  必须大于零,否则加工出的工件表面会留有“黑皮”而报废。

三是为了便于制造,应该使各个毛坯尺寸  $M_i$  的公差,以及各个第三类工序尺寸  $A_1, A_5$  的公差不要太小。

四是为了减少加工工时,应使各工步余量的最大值  $Z_{i\max}$  不要太大,尤其是磨削工序的加工余量不要太大。

显然上述目标是互相矛盾、互相制约的,为此必须结合具体情况,分清主次,统筹兼顾,找寻综合性能较好的方案。

#### 8. 切削用量的选择

正确的选择切削用量应该是在保证加工质量的前提下能达到较高的生产率和经济性。减少切削加工的基本时间  $t_j$  可以提高生产率,对于图 2-93 所示的在车床上切削圆轴的例子,单件基本时间与切削用量的关系如下式:

$$t_j = \frac{L \cdot Z}{f \cdot a_p \cdot n} \quad (\text{min}) \quad (2-30)$$

式中  $Z$ ——每边加工余量,(mm);

$f$ ——进给量,(mm/r);

$a_p$ ——切削深度,(mm);

$L$ ——刀具总行程(包括工件长度  $l_w$ ,  $y_1$  和切出长度  $y_2$ ),(mm);

$n$ ——工件每分钟转数,  $n = \frac{1000v}{\pi D}$ , (r/min);

$v$ ——切削速度,(m/min);

$D$ ——工件外径,(mm)。

切削用量就是切削速度  $v$ ,进给量  $f$  和切削深度  $a_p$  的总称。提高切削用量中的任一个参数,都可减少切削基本时间  $t_j$ ,从而都可以提高生产率。因此,在选择切削用量时总希望尽量使三个参数都达到最大值。但是切削用量  $f, v, a_p$  三者之间有着内在的、互相制约的联系,不能任意提高。影响切削用量提高的因素很多,但在一般情况下,主要是受到刀具耐用度的限制。所谓刀具耐用度就是新磨的刀具从开始切削到磨钝的总时间(即刀具两次重磨之间的切削总时间)。试验研究表明,刀具耐用度  $T$  与切削用量存在下列关系:

$$T^m = \frac{C_v}{v \cdot f^{y_v} \cdot a_p^{x_v}} \quad (\text{min}) \quad (2-31)$$

式中  $C_v$  及  $m, y_v, x_v$  分别为系数与指数。

由式可见在保持刀具耐用度的条件下,增大切削用量中的一个参数,必然要降低其他两个

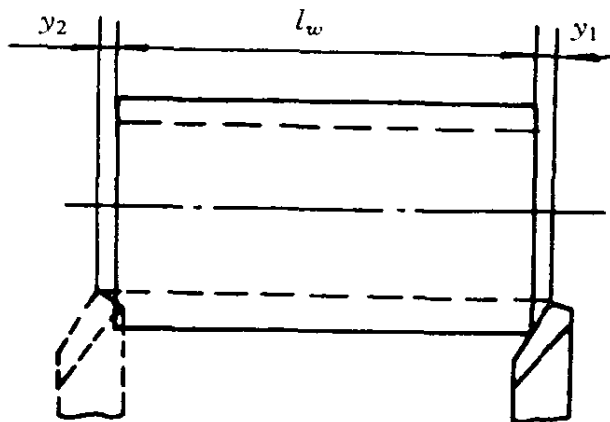


图 2-93 外圆纵车的进给行程

参数。那么,首先应该使哪个参数成为最大值,然后再考虑其余两个参数呢?这就需要确定选择切削用量的次序。

问题的实质在于切削用量三参数对刀具耐用度的影响是不同的。由该式可见,由于式中的  $x_v < y_v < 1$ ,故切削速度对刀具耐用度的影响最大,其次是进给量,影响最小的是切削深度。如果片面地提高  $v$ ,则刀具磨损很快,刀具耐用度急剧下降,增加了换刀所消耗的辅助时间,并且对刀具材料亦造成浪费。因此,在一般情况下,应首先取最大的切削深度,再取尽量大的进给量,最后才确定切削速度。精加工时,应首先决定进给量。

在选择切削用量时,应首先根据工件材料、机床动力及其他性能决定刀具材料的牌号,刀杆尺寸及切削部分的几何角度等,然后按顺序选择  $a_p$ ,  $f$  和  $v$ 。

### (1) 切削深度 $a_p$ 的选择

切削深度原则上应选得尽可能大,以减少走刀次数,但亦要考虑到  $a_p$  太大时会产生“闷车”或刀具崩刃等现象。其一般原则为:

① 粗加工余量应尽量一次切除。例如车削时精加工余量为  $0.05 \sim 0.80\text{mm}$ ,半精车为  $1.0 \sim 3.0\text{mm}$ ,把这些余量留下后,剩下的争取一次切除。

② 若由于刀片尺寸较小或切削力过大等原因,不能一次切去粗加工余量时,可分几次切削,但第一次切削深度应尽可能大。这一点对切削具有硬皮的铸、锻件时特别重要。

③ 当刀刃受到较大冲击(如切削断续表面时)或工件刚性较差时,应取较小的切深,以降低切削力。

### (2) 进给量 $f$ 的选择

切深  $a_p$  决定后,  $f$  应尽可能取大值,但  $f$  的选择比较复杂,因为  $a_p$  值已定,  $f$  的大小就直接影响切削力的大小,选择的自由度就小了。粗加工时限制进给量的是切削力,故应按刀具、机床走刀机构的强度和工件刚度所允许的切削力来选择。半精加工和精加工时,限制进给量的因素是表面粗糙度,故应选用粗糙度所允许的进给量。

### (3) 切削速度 $v$ 的确定

在确定了  $a_p$ ,  $f$  后,在计算  $v$  之前,需先决定刀具耐用度  $T$  的数值,  $T$  值可从有关手册中查得,对于普通车床(刀杆截面按  $16\text{mm} \times 25\text{mm}$  计算),可取  $T = 45 \sim 60\text{min}$ ,连同辅助时间在内,大约是两小时换一次刀。定下  $T$  值后可利用式(2-31)的关系求出切削速度  $v$  来,最后再校核一下机床电机功率是否足够满足切削功率的需要,后者是和切削速度  $v$  成正比的,如不满足,可适当降低  $v$  值。

## 9. 时间定额的计算

工时定额是完成某一工序所规定的时间定额,时间定额不仅是衡量劳动生产率的指标,也是安排生产计划、计算生产成本的重要依据,又是新建或扩建工厂(或车间)时计算设备和工人数量的依据。

工序时间定额又称单件时间定额或单件工时,它是指在一定生产规模和工作条件正常情况下完成该工序所需的时间,它由以下各部分时间组成:

### (1) 基本时间 $t_j$ :

它是直接改变生产对象的尺寸、形状、相对位置、表面状况或材料性质等工艺过程所消耗的时间,也称机动时间。直接切除工序余量所消耗的基本时间  $t_j$  可按式 2-30 求出。

(2) 辅助时间  $t_f$ :

辅助时间是为实现工艺过程所必须进行的各种辅助动作消耗的时间。它包括:装卸工件、开停机床、引进或退出刀具、改变切削用量、试切和测量工件等所消耗的时间。

辅助时间的确定方法随生产类型而异:大批或大量生产时,为使辅助时间规定得合理,需将辅助动作进行分解,再分别确定各分解动作的时间,最后予以综合;中批生产则可根据以往的统计资料来确定;单件或小批生产则常用基本时间的百分比进行估算。

基本时间和辅助时间的总和称为作业时间  $t_B$ ,它是直接用于制造产品或零、部件所消耗的时间。

(3) 布置工作地时间  $t_s$ :

布置工作地时间是为使加工正常进行,工人照管工作地(如更换刀具、润滑机床、清理切屑、收拾工具等)所消耗的时间。 $t_s$ 不是直接消耗在每个工件上的,而是消耗在一个工作班内的时间,再折算到每个工件上的。一般按作业时间的2%~7%(以百分率 $\alpha$ 表示)计算。

(4) 休息与生理需要时间  $t_r$ :

休息与生理需要时间是工人在工作班内为恢复体力和满足生理上的需要所消耗的时间。 $t_r$ 也是按一个工作班为计算单位,再折算在每个工件上的。对由工人操作的机床加工工序,一般按作业时间的2%~4%(以百分率 $\beta$ 表示)计算。

以上四部分时间的总和称为单件时间  $t_p$ ,即

$$t_p = t_j + t_f + t_s + t_r = t_B + t_s + t_r = (1 + \alpha + \beta)t_B$$

(5) 准备与终结时间  $t_c$ (简称准终时间):

准终时间是工人为了生产一批产品或零、部件,进行准备和结束工作所消耗的时间。例如,在单件或成批生产中,每当开始加工一批工件时,工人需要熟悉工艺文件,领取毛坯、材料、工艺装备,安装刀具和夹具,调整机床和其它工艺装备等所消耗的时间;加工一批工件结束后,需拆下和归还工艺装备,送交成品等所消耗的时间。 $t_c$ 既不是直接消耗在每个工件上,也不是消耗在一个工作班内的时间,而是消耗在一批工件上的时间。因而分摊到每个工件上的时间为  $t_c/n$ ,其中  $n$  为批量。

故单件和成批生产的单件计算时间  $t_c$  应为

$$t_c = t_p + \frac{t_c}{n} = t_j + t_f + t_s + t_r + \frac{t_c}{n}$$

大量生产中,由于  $n$  的数值很大,  $\frac{t_c}{n} \approx 0$ ,可忽略不计。

所以

$$t_c = t_p = t_j + t_f + t_s + t_r$$

## 10. 工艺方案的技术经济分析

一个零件的机械加工工艺过程,可同时拟定出几个能满足该零件技术要求的方案,但它们的经济性是不同的,对它们进行技术经济分析的目的,是选择一个在给定的生产条件下最为经济的方案,而生产成本最低的方案就是最经济的方案。生产成本是制造一个零件或一台产品所必需的一切费用的总和。在分析工艺方案的优劣时,只需分析与工艺过程直接有关的生产成本,即工艺成本。在进行经济分析时,还必须全面考虑改善劳动条件,提高劳动生产率以及促进生产技术发展等问题。

工艺成本可分为两个部分,即可变费用和不变费用。

可变费用是与年产量有关并与之成正比例的费用。可变费用以  $V$  表示,它包括材料费、机床工人的工资、机床电费、通用机床折旧费、通用机床修理费、刀具费以及通用夹具费等。

不变费用是与年产量的变化没有直接关系的费用,当产量在一定范围内变化时,全年的费用基本上保持一定。不变费用以  $S$  表示,它包括调整工人的工资、专用机床折旧费、专用机床修理费以及专用夹具费等。

全年的工艺成本可用下式表示:

$$E = S + V \cdot N \quad (2-32)$$

式中  $E$ ——一种零件或其某一个工序全年的工艺成本(元/年);

$S$ ——不变费用(元);

$V$ ——可变费用(元/件);

$N$ ——年产量(件)。

一个零件的单件工艺成本或一个零件的某一个工序的工序成本可用下式表示:

$$E_{\text{单}} = \frac{S}{N} + V$$

式中  $E_{\text{单}}$ ——单件工艺成本或某一个工序的工序成本(元/件)。

根据以上两式就可以进行不同工艺方案的经济分析比较。如有三个不同的工艺方案,它们的全年工艺成本为:

$$E_1 = S_1 + V_1 \cdot N$$

$$E_2 = S_2 + V_2 \cdot N$$

$$E_3 = S_3 + V_3 \cdot N$$

由于全年工艺成本  $E$  与年产量  $N$  成正比关系,可以作出如图 2-94 的图形。在图中对第一方案来说,当年产量  $N$  超过  $N_1$  时,就需增加一套专用机床和专用工艺装备,因此不变费用  $S$  就要增加一倍。同样当  $N$  再增到某一值时,  $S$  还要增加。这种关系在图上表现为折线。

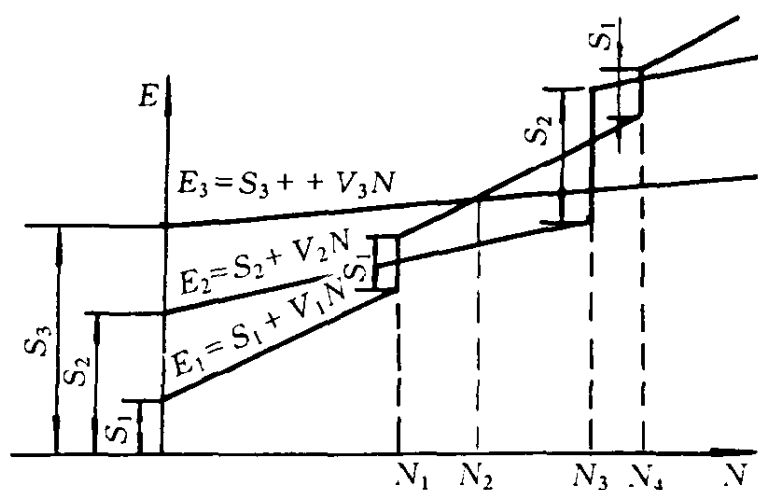


图 2-94 比较三个工艺方案的经济性的图解法

现在就可以根据该图对这三种不同的工艺方案进行经济分析比较。当年产量  $N$  从零到  $N_1$  时第一种方案经济;从  $N_1$  到  $N_3$  时第二种方案经济;超过  $N_3$  时则第三种方案经济。如果只比较第一和第二两个方案,则  $N$  在零到  $N_1$  和  $N_3$  到  $N_4$  范围内第一方案经济,除此以外则第二方案经济。

这里要说明一下,用上述方法进行经济分析比较时,不变费用中,计算专用机床和专用夹具折旧费所依据的它们的使用年限应少于产品预计的稳定生产的年限,否则就有可能得到不正确的结论。

## 2.6 计算机辅助工艺规程设计

计算机辅助工艺规程设计(CAPP)是 CAM 的一部分,也是联系 CAD 与 CAM 系统之间的

桥梁, CAD 数据库信息只有经过 CAPP 系统才能变成 CAM 的加工信息。随着产品设计和产品制造中采用了计算机辅助手段, 这就要求作为中间环节的工艺过程设计也必须实现自动化, 才能与之相适应, 而计算机技术的发展以及成组技术的实施为工艺设计自动化奠定了基础。通过向计算机输入被加工零件的原始数据、加工条件和加工要求, 由计算机自动进行编码、编程直至最后输出经过优化的工艺规程卡片的过程, 称为计算机辅助工艺规程设计。

按照 CAPP 的基本原理和方法, 可将它分为三种类型: 派生法、创成法和半创成法, 以下分别简述其原理。

### 2.6.1 派生法

派生法工艺过程设计是建立在成组技术基础上的, 它利用零件的相似性来检索已存入计算机的标准工艺规程, 再加以修改编辑, 生成新的工艺过程。其具体工作步骤如下。

#### 1. 准备阶段

(1) 对大量零件编码, 建立零件特征矩阵:

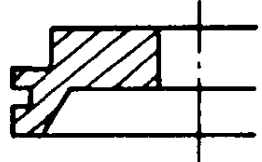
如用奥匹兹系统对某零件进行编码, 得到该零件的代码为 041003072, 用二维数组表示为 1.0, 2.4, 3.1, 4.0, 5.0, 6.3, 7.0, 8.7, 9.2。其中第一维数组表示码位, 第二维数组表示码值, 相应的特征矩阵如图 2-95 所示。同理可得其它零件的代码和特征矩阵。

(2) 建立零件族特征矩阵:

将已编码的若干零件按照特征码位法或码域法分类归并成组(族), 并把同组零件的特征矩阵综合统计在一张特征矩阵表上, 就可以得到一份零件族的实际特征矩阵表, 如图 2-96 所示的就是其中的一张, 它是用码域表示的零件族特征矩阵, 凡适合此表的零件均为同一族, 不同的族有不同的族特征矩阵。

(3) 制定标准工艺规程:

用复合零件法或复合路线法分别对上述各零件族制定标准工艺规程。

工 件	代 码
	04100 3072

(a)

码位 码值	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	×			×	×		×		
1			×						
2									×
3						×			
4		×							
5									
6									
7								×	
8									
9									

(b)

图 2-95 零件的代码和特征矩阵

(a)零件及代码;(b)特征矩阵

码位 码值	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	×			×	×		×		
1	×		×	×					
2									×
3					×	×			
4		×							
5		×							×
6									
7			×					×	
8									
9									

图 2-96 零件族特征矩阵

## (4) 存入计算机:

将上述零件族特征矩阵和相应的标准工艺规程一一对应地存入计算机存储器中。

这一准备阶段的工作量是相当大的,原始的统计资料越多,系统必然越完善。

## 2. 使用阶段

(1) 当一个新零件需要设计工艺规程时,先用同样的编码系统对零件编码,然后将这个代码输入计算机,通过计算机中零件族检索程序,找到这个零件所属的零件族。

(2) 调出该零件族的标准工艺规程。

(3) 按照一定的工艺决策模型,根据该工件的结构、形状、尺寸参数等特点从标准工艺文件中筛选修改有关工序,并进行切削用量的计算,最后生成该零件的单独工艺规程。

上述各步骤都是通过计算机直接进行的。

## 2.6.2 创成法

创成法是另一种类型的CAPP。它直接根据输入的图形和加工信息生成新的工艺规程。这种方法的主要特点是在计算机中并没有预先存入标准工艺规程,而是存储了大量的逻辑原则和决策方法,当系统输入零件图形后,计算机自动分析其几何要求并进行逻辑判断和决策,生成新的工艺规程,并使其优化。

表示决策逻辑的方法常用的有:

## 1. 决策表法

有不少工艺问题不易用语言表达清楚,如孔加工的决策逻辑是:孔径小于25mm,位置精度 $>0.1\text{mm}$ ,公差 $>0.05\text{mm}$ 时用钻孔;如其它条件相同,位置精度 $\leq 0.1\text{mm}$ 时,则先钻后扩;如若孔公差需 $<0.05\text{mm}$ ,则需用钻、扩、铰等等,如果用表格方式来表示则可一目了然,这样的表格称为决策表,表2-17为孔加工决策表。决策表被用双线十字线分成四个区域,左上部列出条件的名称,左下部列出所有决策动作的名称,右上部引出各种可能的条件组合,用T表示给定条件是“真”,F为“假”;空白表示均不发生,右下部说明所在列的所有条件都满足时,某项动作是否执行,阿拉伯数字表示动作的顺序,对无序的动作只用“X”号。

表 2-17 孔加工决策表

孔径 $\leq 25\text{mm}$	T	T	T		
孔径 $> 25\text{mm}$	F	F	F	T	T
位置精度 $\leq 0.1\text{mm}$	F	T	T	F	T
位置精度 $> 0.1\text{mm}$	T	F	F	T	F
孔径公差 $\leq 0.05\text{mm}$	F	F	T	F	T
孔径公差 $> 0.05\text{mm}$	T	T	F	T	
钻 孔	X	1	1	1	1
扩 孔		2	2		2
铰 孔			3		3
镗 孔				2	

## 2. 决策树法

决策表可以转换为决策树,即为转换的示意图。可见两者的功能类似。

决策树便于观察、建立、修

一棵决策树可以转换成一个计算机流程图。

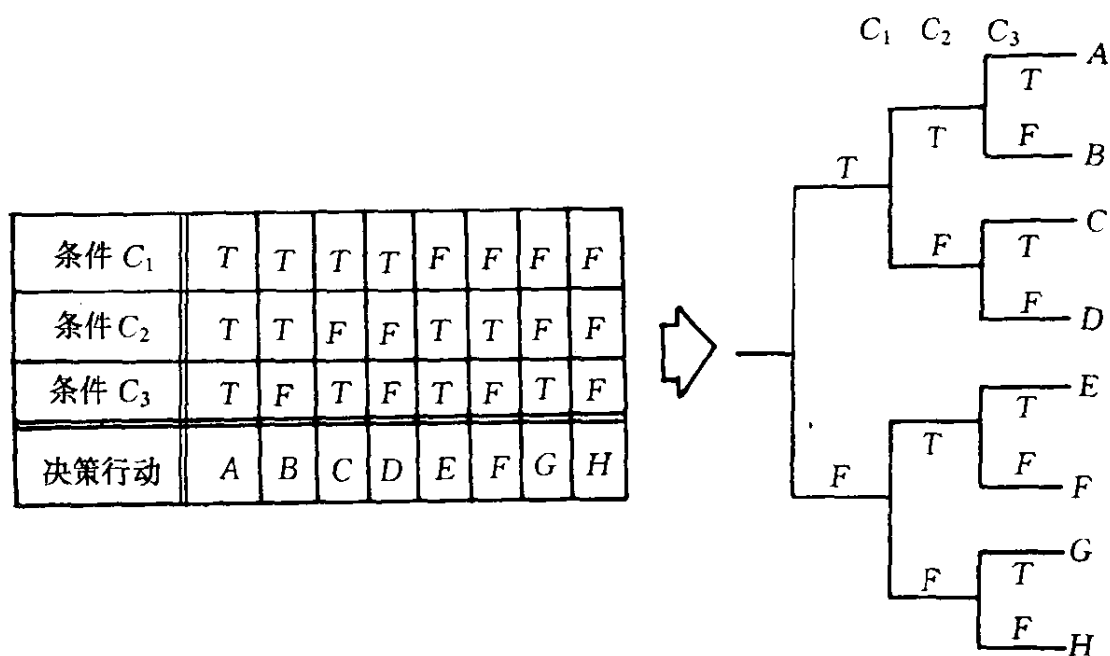


图 2-97 决策表转换成决策树

### 2.6.3 半创成法

采用创成法与派生法配合使用称之为半创成法或综合法,目前常用的是以派生法为主,创成法为辅的半创成法。如工序设计用派生法,而工步设计用创成法,两种方法结合使用时可取得较好效果,是目前发展的趋势。这还因为完全自动生成工艺过程的创成法系统涉及的因素较多,还存在许多技术上困难,目前尚处于研究阶段。

在计算机辅助工艺规程设计时,所需的信息和数据都以文件的形式存储在计算机的存储器中,形成数据库以备检索和调用。数据库所存的文件有以下几部分:

① 工艺规程组成文件。如工序、工位、工步等的名称、定义和内容,各种表面的典型加工工艺等,它们用自己的代码表示,以备存储与检索。

② 机床和工艺装备文件。如各种机床的型号规格、加工精度和范围,刀夹量具的名称、规格与使用场合等。

③ 材料及其主要力学性能。

④ 加工余量、切削用量及时间定额的有关资料。

⑤ 有关加工成本的经济资料。

⑥ 采用派生法时,大量的零件族矩阵文件和主样件的标准工艺规程。

⑦ 为创成法所需的各种逻辑决策和资料数据。

近年来的发展趋势是应用人工智能技术建立专家系统进行工艺设计。

# 第 3 章 焊接工艺

## 3.1 焊接技术在动力机械与设备制造中的应用

焊接是 20 世纪初兴起的科学技术,几十年来进展、传播迅速,现已广泛地应用于航空、航天、原子能、化工、造船、海洋工程、动力机械、建筑、交通运输、电力、机械制造等工业部门。

根据焊接过程的特点,金属的焊接可以分为熔化焊和加压焊两大类。每类又可细分为许多方法,见图 3-1。

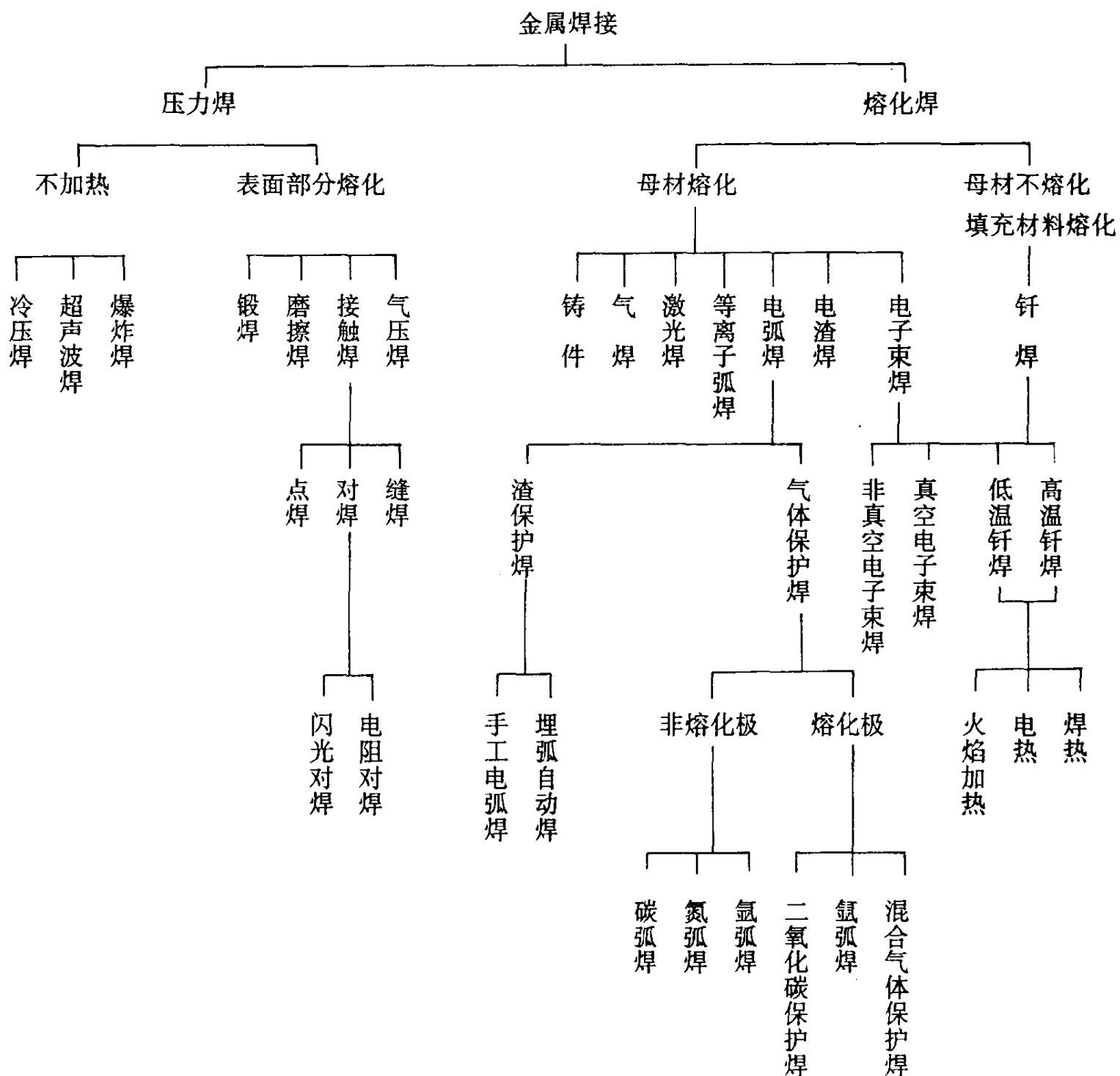


图 3-1 金属焊接方法分类



动力机械设备很多是焊接结构,而焊接是动力机械制造中的关键工艺,它直接影响产品的质量、生产率和成本。动力机械制造过程中,特别是压力容器的制造,应用的焊接方法以熔化焊为主,手工电弧焊、埋弧焊、电渣焊、气体保护焊、等离子焊等是目前压力容器焊接的常用方法。电子束焊和激光焊在动力机械制造中的应用尚处于研究与试用阶段。

在动力设备和机械的制造中,焊接占着十分重要的地位,根据国内一些锅炉厂的统计资料,在锅炉本体的制造工作量中,焊接工作量约占一半以上。另一方面,在锅炉制造中采用的焊接方法种类特别多。焊接技术的发展往往对锅炉制造技术的发展具有很大的影响。因此,在锅炉制造中必须对焊接技术予以十分重视。

焊接技术之所以能在动力机械制造中得到广泛应用,主要是因为它具有许多不同于其它制造工艺的特点。与铆接、铸造、锻造结构相比,焊接结构有以下明显的优点:

(1) 构造合理,应力集中系数小,接头连接效率高,对接接头可达 100%,而铆接很难达到 70%。

(2) 简化结构,减轻自重。由于焊接的强度较高,在同样承载条件下,可更轻、更薄,对交通运输工具来说还可因此而节约能量。

(3) 密封性好。焊接结构对水、油、气的密封性都很好,是理想的密封结构,适合于制造各类容器。

(4) 板厚限制小。铆接在板厚大于 50mm 时将会十分困难,而焊接结构高压容器的单层壁厚可达 300mm 以上。

(5) 设计上简单、灵活。铆接结构的连接部分在设计上相当复杂,而焊接结构可将结构元件比较简单地对接、角接、T 形接或搭接起来,同时可制成任意结构,也较灵活,不像铸、锻工艺对工件形状有很多限制。

(6) 制造周期短,成本低,经济效益好。焊接结构的制造工艺比铆接结构简单得多,可省钻孔和划埋头孔等工作。采用现代的焊接制造工艺,很容易实现专业化和批量生产。

(7) 可焊接不同金属材料。采用焊接工艺能把不同金属连接起来,有效利用材料。焊接结构还可在不同部位采用不同性能的材料,充分发挥各种性能不同材料的优势。

## 3.2 电弧焊接的基本原理

焊接电弧是一种强烈的气体放电现象,在这种气体放电过程中,产生大量的热能和强烈的光辉,电弧焊接就是利用这种热量加热、熔化焊条(或焊丝)和母材,使之形成焊接接头的。

### 1. 电弧放电过程

气体通常是不导电的,但在一定的电场和温度条件下,可以使电弧空间的气体介质发生电离,中性的原子被离解为带正电荷的正离子和带负电荷的电子(或负离子),这两种带电质点分别向电场的两极运动,这样便形成了电流,电弧空间就成为一个导电通道,这就是电弧放电现象。

由上可知,电弧空间气体介质的电离,是电弧放电的一个主要方面,实际电弧放电过程中,在电场的阴极上,必须发射电子,才能维持电弧的连续放电过程。阴极上发射出来的电子,在电场作用下不断加速,以很高的速度向阳极方向运动,它具有很高的动能,当碰撞到中性原子时,可以使之激发电离而释放出新的电子,形成撞击电离。它与热电离一起,促使气体介质离

解导电。

在电弧放电过程中,阴极的发射电子主要是依靠强场发射和热发射。要使电子从金属表面发射出来,必须使它具有足够大的动能,电子从金属表面逸出所需的能量称为“逸出功”或“逸出电位”。一般讲来,金属的逸出电位愈低,愈易发射电子。表3-1中列出了某些金属的逸出电位。从表中可知,碱金属、碱土金属和某些稀土金属及其氧化物的逸出功较低,因而它们较易发射电子,即在同样电场和温度下,可以达到更大的电流密度。

表 3-1 某些金属的逸出电位

名 称	逸出电位(eV)	名 称	逸出电位(eV)
铯 (Cs)	1.49	铁 (Fe)	4.5
钡 (Ba)	2.0	钨 (W)	4.5
钾 (K)	2.2	氧化钡 (BaO)	1.0
钠 (Na)	2.3	氧化钍 (ThO <sub>2</sub> )	3.1
碳 (C)	4.4		

实际焊接工作中,焊接电弧的引燃,通常可采用两种方法:接触引弧和非接触引弧。

接触引弧即短路引弧,当焊条(或焊丝)与工件接触时,焊条(或焊丝)便与工件形成短路,此时有很大的短路电流通过焊条(或焊丝)端部与工件的接触表面,由于焊条(或焊丝)端头与工件表面并非理想的平面,因而,它们之间首先只在某几个凸起点上接触,很大的短路电流只能从这几个接触点通过,在该处形成极大的电流密度,并产生很大的热量,使接触点处的金属很快被加热、熔化和蒸发,当焊条(或焊丝)迅速拉开时,焊条(或焊丝)端头与工件之间的空隙内充满了金属蒸气。与此同时,由于接触点处的高温,而且因为间距很小,阴极将发射电子,在电子向阳极方向高速运动时,与电弧空间的气体介质撞击,使之电离,从而引燃电弧。此时,只要能维持一定的电压,放电过程就能连续进行,电弧就能连续燃烧下去。

非接触引弧通常是依靠高频或高压脉冲引弧器将电弧引燃的。引弧器在电极和工件之间施加高频高压或工频高压脉冲电场,使阴极表面发射出电子。依靠电子把气体介质撞击电离,从而引燃电弧。

## 2. 焊接电弧的物理物征

根据焊接电弧的物理过程特征,可以把它分为三个区域:阴极区、弧柱区和阳极区。各个区域的电压分布如图3-2所示。

① 阴极区:阴极区是紧紧靠近阴极表面的一段很短的区域,其长度大约只有 $10^{-5}$ cm,在阴极区的阴极表面上,往往有一个白炽、光亮、剧烈活动的斑点,称为阴极斑点,阴极就是从这个斑点内发射电子的。阴极斑点的大小与电流的大小有关,随着电流的增大,斑点直径增大,而其电流密度降低,只有斑点面积受电极端部的限制而不能自由扩张时,电流密度才随电流的增大而增大。

② 弧柱:弧柱是一段呈圆锥状的气柱,它的长度几乎等于整个弧长,它具有很高的温度,

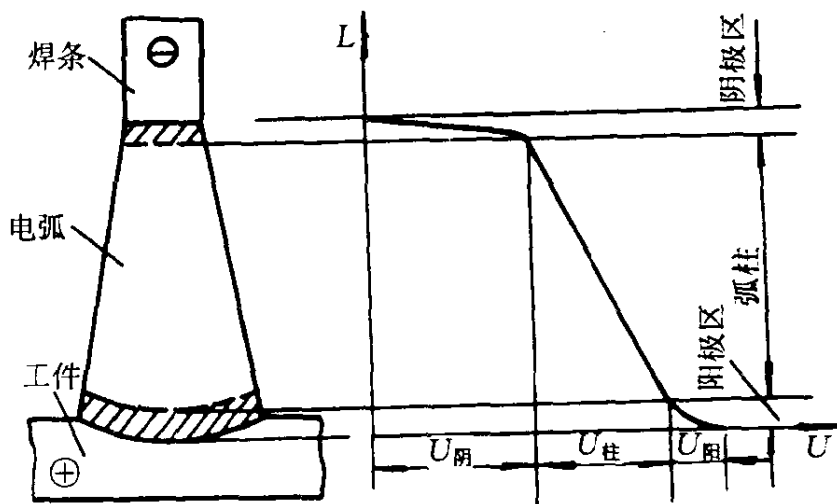


图 3-2 焊接电弧中的电压分布

钢电极电弧焊时,弧柱温度可达 5 000~8 000 K。弧柱是由中性原子与电荷数量相等的、分别向两极方向运动的电子(或负离子)和正离子组成。弧柱具有很好的导电性能,在整个弧柱长度上压降很小。在弧柱的轴线方向,电离度和温度基本是均匀一致的。

③ 阳极区:阳极区是靠近阳极表面的一个很短的区域,它的长度比阴极区稍大些。在阳极区电极表面上有一个光亮的阳极辉斑,称为阳极斑点。电流基本上集中在阳极斑点中。阳极斑点具有极高的温度,通常比阴极斑点的温度高。阳极斑点的能量来自于高速电子流到达阳极表面时与正离子复合放出的电离能和动能。其能量基本上消耗于阳极金属的加热、熔化和蒸发。

### 3. 焊接电弧的静特性

所谓电弧的静特性曲线,就是在焊接电弧维持一定的长度稳定燃烧时,电弧电压与焊接电流的关系。电弧的静特性曲线说明:当电弧长度(即焊条或焊丝离工件的距离)和焊条的种类等条件一定时,只有当电弧电压和电流符合电弧静特性曲线上某一点时,电弧才能稳定燃烧。

由图 3-3 可知,电弧静特性曲线可分为三个区段:下降段、水平段和上升段。随着电流的增大,电弧弧柱的温度显著升高(见图 3-4),弧柱气氛的电离度增大,其导电率增高,这也使弧柱压降降低。

在实际电弧焊接过程中,正常焊接时,手工电弧焊、埋弧自动焊由于所用的焊条、焊丝比较粗,一般  $\phi 3\sim 8\text{mm}$ ,电流密度不太大,电弧的静特性曲线主要在水平段,而下降段只是在引弧的一瞬间出现。在熔化极气体保护焊时由于焊丝较细,一般最粗 2.2mm,  $\text{CO}_2$  焊时一般为 0.8~1.2mm,电流密度大,同时由于气体对电弧的冷却作用,多数情况下工作在上升段。

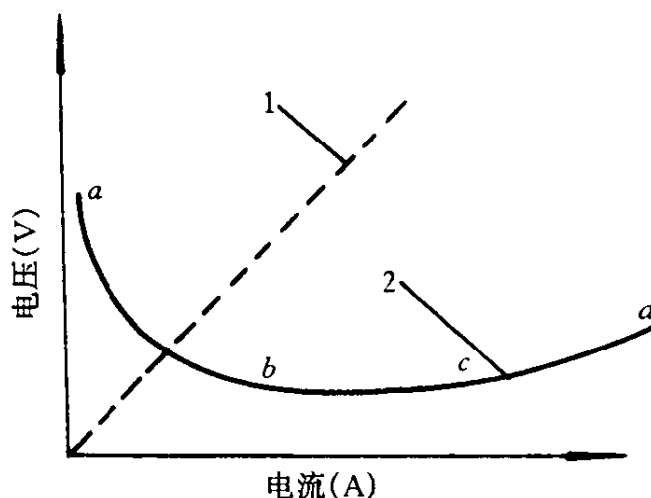


图 3-3 一般电阻和电弧的静特性曲线

1—一般电阻静特性曲线;2—电弧静特性曲线

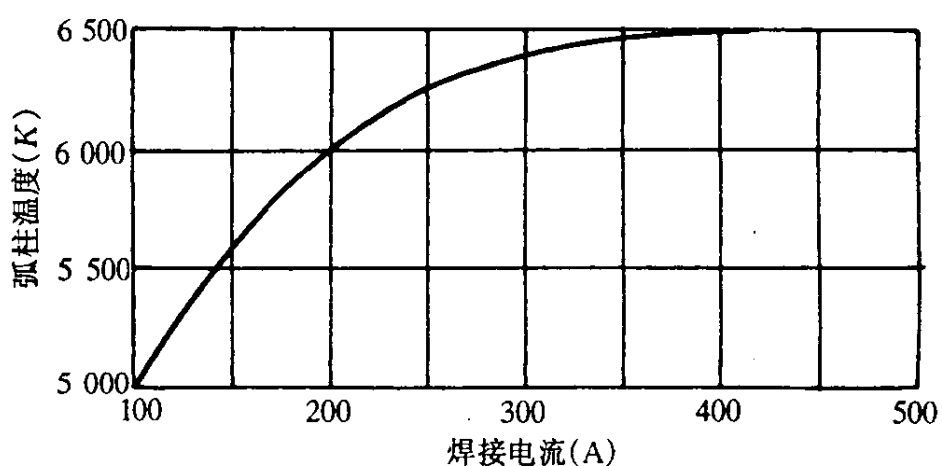


图 3-4 焊接电流与弧柱温度的关系

## 3.3 焊接冶金过程

### 3.3.1 焊接过程的分析

认识焊接过程的物理本质对提高焊接质量、发展焊接技术具有重要意义。

从微观上讲可以这样定义焊接:两种或两种以上的材料(同种或异种),通过加热或加压(或并用),使接头处产生原子或分子间的结合和扩散,从而造成永久性联接的工艺过程叫做焊接。

对于钢铁材料的熔化焊来讲,一般要经历以下过程:加热—熔化—冶金反应—结晶—固态

相变—形成接头。图3-5示出焊接过程各局部过程间的联系,一般地说,焊接过程可以归纳为三个互相交错进行而又彼此联系着的局部过程。

### 1. 焊接热过程

焊接热过程贯穿整个焊接过程的始终,可以说一切焊接物理化学过程都是在热过程中发生和发展的。焊接温度场实际决定了焊接的应力场和应变场,它也与冶金、结晶、相变过程有着密切的联系,使其成为影响焊接质量和生产率的主要因素之一。

### 2. 焊接化学冶金过程

熔化焊时,熔化金属、熔渣、气相之间进行着一系列化学冶金反应,如金属的氧化、还原、脱硫、脱磷、焊缝金属氮化、渗合金、与氢的作用,等等。这些冶金反应将直接影响焊缝金属的成分、组织和性能,因此控制冶金过程是提高焊接质量的主要措施之一。

### 3. 焊接时金属的结晶和相变过程

随着热源的离开,熔化金属就开始结晶,即由液态转变为固态。对于具有同素异构转变的金属,随着温度的下降还将发生固态相变。例如,钢将发生 $\delta \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ 相的转变。由于焊接件是快速连续冷却,使焊缝金属的结晶和相变都具有各自的特点,并且有可能在这些过程中产生诸如偏析、夹杂、气孔、热裂纹、淬硬脆化、冷裂纹等缺陷。因此,控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

#### 3.3.2 焊接冶金过程的特点

焊接冶金过程实质上是金属在焊接条件下的再熔炼过程,其中不仅包括化学变化,而且包括物质在作用相之间的迁移和分布过程。例如,手工电弧焊有下列冶金特点:

#### 1. 电弧反应区温度高

电弧焊时,弧柱温度可达6000K以上,熔滴温度可达1800~2400℃,由于焊接电弧的温度很高,能使液体金属强烈地蒸发,使气体分子( $N_2, H_2, O_2$ 等)分解。分解后的气体原子或离子,其化学活性显著增加,很容易溶解到液体金属中去,这就增加了金属凝固后产生气孔的可能。

#### 2. 金属液体以细滴状进入熔池

焊条溶化形成熔滴,由焊条顶端滴入熔池,而且熔化金属基本上暴露在空气中,这使得金属熔滴与气体、熔渣的接触面大大超过一般的炼钢过程。接触面加大可以加速冶金反应进行,但同时,气体浸入液体金属的机会也增多,因而使焊缝金属更易发生氧化、氮化以及产生气孔。细滴状的金属液体和熔渣发生强烈的冶金反应。细滴在过渡的同时发生渗Mn, Si, 增氧反应,而且在细熔滴反应区,渗合金过程也基本完毕。

#### 3. 熔池反应区体积小,冷却速度快。

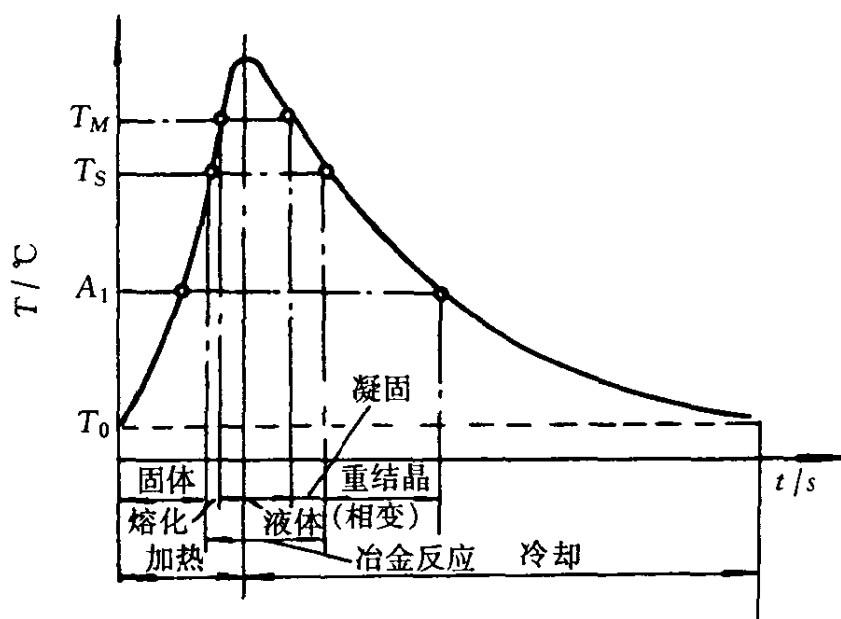


图3-5 焊接过程示意图

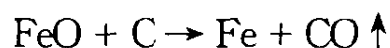
$T_M$ —金属熔化温度(液相线);  $T_S$ —金属凝固温度(固相线);  
 $A_1$ —钢的  $A_1$  变态点;  $T_0$ —初始温度

熔池的平均温度在 2 000℃ 以上,而它被冷态的金属所包围,两者温差很大。因此,使焊接结构常常产生内应力,引起变形或产生裂纹。

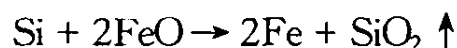
熔池反应区温度较低,稍高于金属的熔点,液体金属和熔渣接触面积小,冶金反应较弱。但熔池反应却是重要的反应,它决定焊缝金属的成分。

熔池反应对焊缝是否形成气孔、夹渣等缺陷具有很大影响。这些反应包括:

(1) 气体的逸出,液体金属在凝固时,气体的溶解度会随着温度的下降明显降低,这样溶解不了或根本不溶的气体将以气泡形式向外逸出,若逸出的速度小于熔池的结晶速度,则气体有可能来不及析出而形成气孔,熔池反应区脱氧反应产生的 CO 气体亦将析出:



(2) 夹杂物的形成:一般熔渣在高温下直接形成夹杂物的机会很少,熔渣的比重一般为  $3.8\text{g/cm}^3$ ,而 Fe 的比重为  $7.8\text{g/cm}^3$ ,而且熔渣受气流的作用向焊接的反方向移动,容易浮在熔池表面。因此焊缝中的夹杂物具有“内生”特性,主要成分是  $\text{SiO}_2$ 。



$\text{SiO}_2$  是否形成夹渣主要决定于其颗粒性质,而熔池中的 Mn/Si 比例对颗粒度大小有影响,当  $\text{Mn/Si} \approx 3 \sim 6$  时  $\text{SiO}_2$  颗粒最大,不易形成夹渣,另外,由于  $\text{SiO}_2$  是酸性氧化物,因此提高熔渣的碱度有利于吸收  $\text{SiO}_2$ ,从而降低焊缝中金属夹杂物的数量。

(3) 合金元素的过渡:

① 掺合金的目的:

向焊缝掺合金的目的是:为了补偿焊接过程中合金元素由于氧化和蒸发而造成的损失,以维持焊缝金属的合金成分和机械性能;为了使焊缝金属得到某些特殊性能,如抗裂性、耐磨性、耐腐蚀性等。例如掺入一定量(过量反而有害)的锰、硅可提高强度和塑性;渗钛可细化晶粒提高塑性等。

② 掺合金的方法:

掺合金的方法很多,常用的有以下三种:

A. 通过合金焊条芯掺合金:

此法是把合金元素加入焊条芯。优点是可靠、掺入量稳定、均匀、合金元素的利用率高。为减少其烧损可配合使用氧化性很小的碱性焊条,从而保证有较高的合金过渡系数。合金过渡系数可用下式表示:

$$\text{合金过渡系数} = \frac{\text{该元素在焊缝中的实际含量}}{\text{向焊缝掺入的该元素的计算含量}}$$

缺点是焊芯需专门熔炼,同时有些合金还不易轧制、拔丝。

B. 通过合金药皮掺合金:

此法是将要掺入的合金元素以铁合金的形式加入焊条药皮中,焊接时药皮中的铁合金熔化进入液态金属中。其优点是简便灵活。缺点是合金元素烧损严重,有的还可能残留于渣中,故合金元素的利用率低,合金过渡系数还受到焊接规范的影响,均匀性也较差。

③ 提高合金过渡系数的措施:

由于合金元素常因氧化、蒸发或残留于渣中而造成损失,使合金过渡系数较低,降低了经济性。因此为提高合金过渡系数,就必须设法减少上述各项损失。

A. 正确选择合金剂:在同样条件下,应尽量选用与氧亲和力小的元素为合金剂。在

1 600℃(接近一般的焊接温度)时各元素对氧亲和力按以下顺序增强:铜、镍、钴、铁、钨、钼、铬、锰、钒、硅、钛、锆、铝。在焊接碳钢时,位于铁左边的元素(铜、镍、钴)过渡系数高;位于铁右边的元素则随与铁的接近程度而异,越靠近铁(钨、钼、铬)氧化损失越小,过渡系数越大;越远离铁(铝、锆等)则很难过渡到焊缝中去。

沸点较高的元素为合金剂。合金元素的沸点越高,因蒸发造成的损失越小,过渡系数必然较大。在焊接温度下,最易蒸发的元素是锰、铬、硅、铝等,应尽量避免用它们作合金剂。

B. 根据合金元素氧化物的性质来选择焊条药皮的酸碱性。

在掺合金时要防止由于酸碱中和作用使合金元素氧化,降低合金过渡系数。为此应使合金元素的氧化物与渣同性质。一般情况下,为防止合金元素氧化烧损常选用碱性渣系来过渡合金元素。如果合金元素氧化物酸性很强,如硅,则以选用酸性渣系的药皮为好。

C. 选择氧化性最小的焊接方法来过渡合金元素。

在使用同样焊接材料的情况下,氩弧焊的过渡系数大,埋弧焊次之,CO<sub>2</sub>焊再次之。

### 3.3.3 焊接区的气体

焊接区内气相的成分随着焊接方法、工艺参数、药皮或焊剂的种类不同而变化,各种反应产生的气相成分主要有一氧化碳、二氧化碳、氢气、水蒸气、氮气和氧气,其中对焊缝金属产生不利影响的气体主要是氢气、氧气和氮气。

1. 焊接区内气体的主要来源

(1) 来自焊接材料:

一般焊条药皮、陶质焊剂、焊丝药芯中都含有造气剂,这些造气剂在加热时发生分解或燃烧,析出大量气体。用潮湿的焊条或焊剂焊接时将析出水汽。气、电焊时,焊接区内的气体主要来自所采用的保护气体。

(2) 来自热源周围的气体介质:

这主要是指空气。药皮或焊剂中的造气剂所产生的保护气体,并不能完全排除电弧内的空气。空气在电弧区内的体积约占3%。

(3) 来自焊丝和母材表面上的杂质:

如油污、铁锈、油漆会吸附一些水分,当这些物质受热后将析出气体进入气相。

(4) 来自高温蒸发产生的气体:

由于焊接时局部温度很高,也常常会产生金属和熔渣的蒸气。

2. 焊缝金属中的氢

(1) 氢的来源和危害:

正常状态下,钢材中的氢是极少的。焊接时,由于焊条和焊剂中吸附的水分,某些组成物中所含的结晶水及其它氢化合物、潮湿的空气,以及坡口表面存在的水汽、锈、油等,在电弧高温作用下分解为原子氢溶入到焊接溶池中。

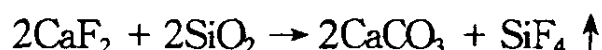
焊缝中氢含量过高且控制不良时,其危害性是很大的,不仅会在焊缝中形成氢气孔和白点,更严重的是造成氢脆,使焊缝金属的塑性明显下降,并表现出缺口敏感性,降低断裂强度,在一定条件下会诱发产生冷裂纹。

(2) 控制氢的措施:

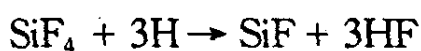
① 限制焊接材料中的含氢量;彻底清除待焊件上的油污、锈蚀和水分,尤其是在使用低氢

型焊条时更应注意;一定要严格烘干焊条,国内曾发生用潮湿的低氢焊条焊接锅筒上的水位表管座,结果引起氢致延迟裂纹,待锅筒运至用户后,水位表管座已经裂开脱落。

② 通过冶金处理降低气相中氢的分压,以减少氢在液态金属中的溶解度,其措施是在药皮或焊剂中加入  $\text{CaF}_2$ ,则在焊接时发生如下反应:



靠  $\text{SiF}_4$  气体降低 H 在焊接气氛中的分压力。除此之外  $\text{SiF}_4$  还具有化学去氢的作用



### 3. 焊缝金属中的氧

焊缝金属中的氧主要来源于大气、焊接材料(包括焊丝、焊条药皮和焊剂)和钢材中的氧气和氧化物,以及气焊时气体火焰中的氧气等。

焊缝中氧含量过高而又脱氧不完全时,易形成不溶于金属的一氧化碳和水蒸汽,结晶过程中来不及逸出会产生气孔。而非金属夹杂物在冷却时未能排入熔渣,则造成焊缝夹渣。氧易引起飞溅,影响焊接过程的稳定性,且会烧损锰、硅等有益合金元素。由于氧化反应中不少为吸热反应,会降低熔池温度而对焊接不利。氧化物在晶界上使焊缝金属的强度、塑性、韧性、持久性和耐腐蚀性等都会降低,同时提高脆性转变温度和引起焊缝金属的热脆和冷脆。

要控制氧对焊缝性能的影响,必须利用熔渣与液态金属的反应来进行脱氧。常用的脱氧剂有 Mn, Si, Al, Ti 等,它们与氧的亲合力大于 Fe,一般酸性焊条用 Mn 脱氧,而碱性焊条常用 Si, Ti 脱氧,以使脱氧的生产物结合成盐类进入渣系中,提高脱氧效果。

### 4. 焊缝金属中的氮

焊缝中铁的氮化物( $\text{Fe}_3\text{N}$ )呈针状,是一种硬而脆的化合物,使焊缝金属的强度提高,而塑性和韧性(尤其是低温韧性)急剧下降,对动载下工作的焊接结构极为不利,氮一旦进入焊缝就很难排除,唯一防止方法是加强对熔池的保护,严防空气中的氮侵入。氮还会引起蓝脆和冷脆,降低导电性和导磁性。

## 3.3.4 焊接接头的组织和性能

### 1. 焊接接头

电弧焊接的焊接接头一般由焊缝、熔合线、热影响区组成,如图 3-6 所示。

焊接熔池由焊条或焊丝熔滴金属和融化了的母材金属组成,在焊接时要考虑坡口形式、装配间隙、熔深、熔宽和焊缝加强高等因素的影响,因为这些因素会影响熔合比。熔合比就是母材金属在整个焊缝中所占的比例。熔合比可粗略地用下式计算:

$$d = \frac{F_m}{F_m + F_d}$$

式中  $F_m$ ——焊缝横截面中母材金属的面积;

$F_d$ ——焊缝横截面中填充金属的面积。

改变熔合比,就能改变焊缝金属中母材与填充金属的比例,从而改变焊缝的化学成分。

### 2. 焊缝金属的组织 and 性能

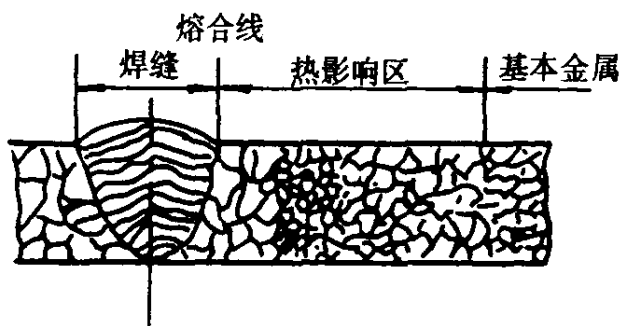


图 3-6 电弧焊接的焊接接头



焊缝金属由熔池的液态金属凝固而成。熔池金属由高温冷却到室温要经过两次组织变化。以低碳钢为例,第一次是从液态转变为固态(奥氏体)时的凝固结晶过程,称“一次结晶”;第二次是从固相线开始冷却到常温发生的金相组织转变,称“二次结晶”。常温下看到的焊缝组织就是二次结晶的结果。

#### (1) 焊缝金属的一次结晶:

① 一次结晶的特点。焊缝金属结晶时,上有液态熔渣覆盖,下有固态金属散热,基本上呈一种铸造组织。但它与一般铸造组织又不完全一样。首先,熔池金属通过熔池壁散热,熔池壁附近的液态金属即在熔合线上半熔化状态的母材晶粒上,以垂直熔池壁的方向结晶,并朝熔池中心不断长大。因为散热方向主要垂直熔池壁,兼之熔池体积小,晶粒之间相互阻碍地无法横向发展而得到柱状晶粒。其次,整个焊缝金属的结晶过程是有顺序地间断地进行,从而使宏观组织呈厚度很小的层状组织。这种组织的晶粒比铸锭细小,但比轧材粗大。第三,焊接过程中焊条的摆动对熔池起到搅拌作用,利于焊缝中气体、杂质的排除。

② 焊缝金属中存在偏析和夹杂物。焊缝金属的体积虽小,但化学成份并不均匀。从结晶的一般机理可知,在每个柱状晶粒的内部,结晶的中心部份(先凝固部分)总是熔点高的纯金属,而含有较多合金元素或杂质部分总是后凝固并处于晶粒的表面。这种存在于晶粒内部的化学成分不均匀现象叫做微观偏析,又称枝晶偏析。由于存在枝晶偏析,使晶粒之间的连系在结晶过程中显得比较脆弱(由尚处于液态的低熔物质和杂质构成),当存在焊接拉伸应变时,就成为热裂纹之源。液、固相线之间距离越大,枝晶偏析就越严重。低碳钢的液、固相线之差仅 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ,故枝晶偏析不很明显;而高碳钢、高合金钢的液、固相线距离很大,枝晶偏析就很严重。

#### (2) 焊缝金属的二次结晶:

焊缝金属凝固后在冷却过程中的组织转变与热影响区的情况相似,分析方法也一样。总的来说,由于冷却速度快,故塑性和韧性较母材差。

### 3. 热影响区金属的组织与性能

由于热影响区经焊接热循环后,相当于进行了一次热处理,故在分析热影响区某点的组织与性能时,可根据该点热循环曲线上的最高加热温度、高温停留时间和冷却速度,配合该合金成份的状态图,根据有关热处理知识来进行。

#### (1) 低碳钢或其它不易淬火钢的热影响区:

图3-7(a)为热影响区各点上加热最高温度分布曲线。图(b)为铁—碳状态图的一部分,取其中含碳量为0.2%的低碳钢为例,(a),(b)两图对应即可判断该成分的钢在不同加热温度时所具有的组织状态。由图中可知,低碳钢焊接热影响区,根据其组织特征可分为以下六个温度区:

① 半熔化区(熔合区):此区处于焊缝与母材的交界处,属于半熔化状态。其组织属于过热组织,冷却后晶粒粗大,化学成分和组织都存在较大不均匀性,尤其是异种金属焊接时,这种情况更为严重,因此,塑性较低。虽然此区一般都较窄,但由于与母材相连,故对焊接接头的性能有很大影响,应引起重视。

② 过热区:此区温度范围在固相线以下到 $1\ 100^{\circ}\text{C}$ 左右。金属处于过热状态。在这样高的温度下,奥氏体晶粒发生严重长大现象,冷却后得到过热组织。此区的性能特点是冲击韧性显著降低,一般可降低 $25\%\sim 30\%$ ,以至刚性大的结构常在此区开裂。过热程度与高温停留



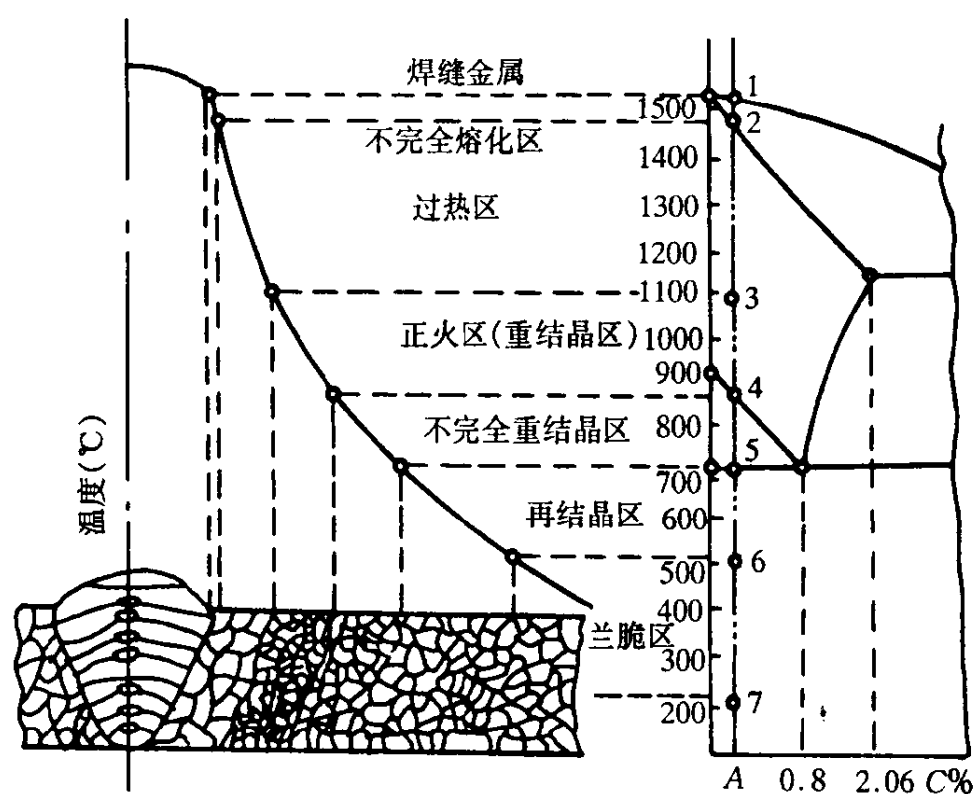


图 3-7 焊接热影响区的组织分布

时间有关。气焊、电渣焊过热严重,电弧焊较轻,对同一焊接方法而言,线能量越大,过热现象越严重。

③ 正火区(完全重结晶区):此区温度范围是  $A_3$  到  $1100^\circ\text{C}$  之间。金属被加热到这个温度后将发生重结晶,使晶粒细化,得到相当于正火热处理的组织,故此区金属的机械性能一般较好。

④ 部分相变区(不完全重结晶区):此区温度范围在  $A_1$  与  $A_3$  之间。焊接时,当加热到稍高于  $A_{c1}$  时,首先是珠光体转变为奥氏体,随着温度的升高,便有部分铁素体逐步溶解到奥氏体中,当冷却时,又由奥氏体中析出微细的铁素体,直到  $A_{r1}$  时,残余的奥氏体转变为珠光体,晶粒也很细。可见,在此温度范围内只有一部分组织发生相变重结晶过程,而始终未溶入奥氏体中的那部分铁素体不断长大,变成粗大的铁素体组织,所以这个区的金属组织是不均匀的。由于晶粒大、小不同,故机械性能不好。埋弧自动焊时此区很窄;手工电弧焊时此区较宽。此区越窄,焊接接头性能就越好。

⑤ 再结晶区:此区温度范围为  $450\sim 500^\circ\text{C}$  到  $A_{c1}$  之间,未发生向奥氏体的转变。只有焊前经过冷塑性变形(冷变、冷冲压、冷轧等)的母材金属,由于加工硬化,晶粒被破碎、晶体歪扭,当焊件被加热到此温度范围时才会发生再结晶,晶粒又重新恢复为原来的等轴晶粒,加工硬化得以消除,性能有所改善。若焊前未经冷塑性变形,焊接时便无此过程。

⑥ 蓝脆区:此区温度范围为  $200\sim 500^\circ\text{C}$ 。特别是在  $200\sim 300^\circ\text{C}$  时,自铁素体内析出非常细小的渗碳体,使强度稍增,塑性下降,冷却时可能出现裂纹。此区显微组织与母材同。

理论上分析存在上述六个区,但在显微镜下观察时,一般只能见到②,③,④三个区。其中对焊接接头影响最大的是过热区。

影响热影响区宽窄的因素很多,焊接方法、焊接规范、施焊条件等都会使热影响区的大小发生变化。表 3-2 为焊接低碳钢时热影响区的平均尺寸,供分析时参考。

表 3-2 焊接低碳钢时热影响区的平均尺寸 (mm)

焊接方法	各区平均尺寸			总宽
	过热区	正火区	部分相变区	
手弧焊	2.2	1.6	2.2	6.0
埋弧焊	0.8~1.2	0.8~1.7	0.7	2.5
电渣焊	18	5.0	2.0	25.0
气焊	21	4.0	2.0	27.0
气电焊	-	-	-	0.8
真空电子束焊	-	-	-	0.05~0.75

焊接淬火倾向较大的某些低合金钢时,热影响区的组织分布与钢板焊前的热处理状态有关,如图 3-8 所示。

(2) 正火或退火状态易淬火的钢的热影响区,其组织与低碳钢不同,一般分为以下三个区。

① 过热区:此区显微组织特征是粗大马氏体。

② 淬火区:由于此类钢淬透性好,故在相当于低碳钢正火区的冷却速度下亦发生淬火现象,产生极细的针状马氏体组织。若含碳量和合金元素量低,则有有索氏体和马氏体共存的组织。

③ 不完全淬火区:此区显微组织特征是马氏体与稍粗大的网状铁素体组织,即产生部分淬火组织。

(3) 调质状态易淬火的钢的热影响区,其组织又与正火状态的不同。

① 淬火区:相当于正火状态的过热区和淬火区,都是属于淬火组织。

② 不完全淬火区:与正火状态的相同。

③ 回火区:在焊接时加热温度低于  $A_{c1}$  就发生不同程度的回火,使硬度和强度略有下降,出现所谓“回火软化区”。

高合金钢、有色金属等,焊接加热时热影响区的组织转变,比上述复杂得多,但分析方法是相同的。

#### 4. 焊缝组织和性能的关系

(1) 一次结晶组织与性能的关系:

焊缝金属的一次结晶过程及其组织特征,不仅影响焊缝金属的抗裂性能,而且对焊缝金属

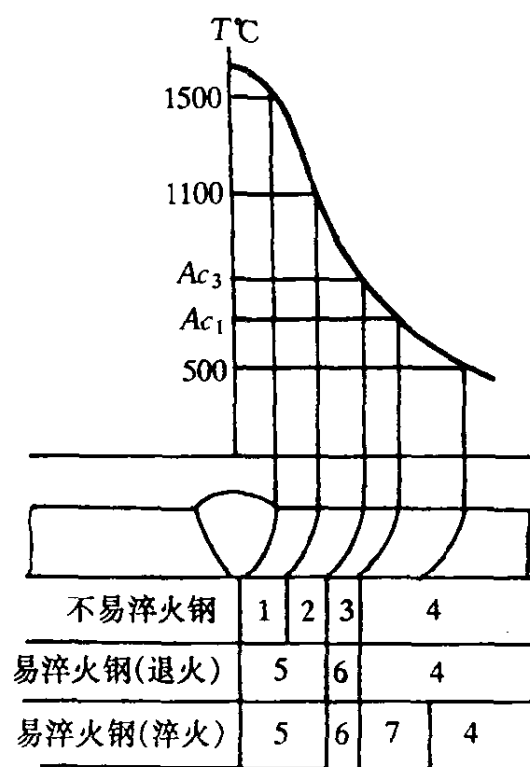


图 3-8 热影响区各部分组织分布

- 1—过热区; 2—正火区;
- 3—不完全重结晶区;
- 4—未发生组织变化区;
- 5—淬火区;
- 6—不完全淬火区; 7—回火区

的强度、塑性、韧性和抗腐蚀能力等都有一定的影响。

当焊缝一次结晶组织为细的柱状晶时,其性能要比粗大的柱状晶好,粗大的柱状晶不仅降低焊缝的强度,而且降低其塑性和韧性。柱状晶的粗细对采用碱性焊条焊接的低碳钢焊缝的冲击韧性影响见图 3-9。

#### (2) 二次结晶组织与性能的关系:

由于焊缝的化学成分、焊接工艺条件和热处理规范的不同,焊缝金属的二次结晶组织也各不相同。二次结晶组织的类型、特征和形态直接影响着焊缝金属的性能。

从强度来看,马氏体强度最高,贝氏体次之,然后是铁素体加珠光体,铁素体和奥氏体强度较低。

从塑性和韧性来看,奥氏体在温度下降时无明显的脆性转变现象,塑性和韧性较其它组织为好,铁素体加珠光体组织次之。粒状贝氏体强度较低但具有较好的韧性,下贝氏体具有较高的强度又有良好的韧性,而低碳马氏体则具有相当的强度和良好的塑性和韧性相结合的特点。

从抗裂性来看,铁素体加珠光体组织和奥氏体抗裂性较好,奥氏体加少量铁素体双相组织比单相奥氏体具有更好的抗热裂性能,贝氏体加马氏体对冷裂纹的敏感性最大。

此外,细而均匀的焊缝组织,其性能要比粗大而不均匀的好,低碳钢焊接过热形成的粗大的魏氏体组织使塑性和韧性降低,图 3-10 为不锈钢焊件中不同晶粒大小对延伸率的影响,晶粒越细,延伸率越高。

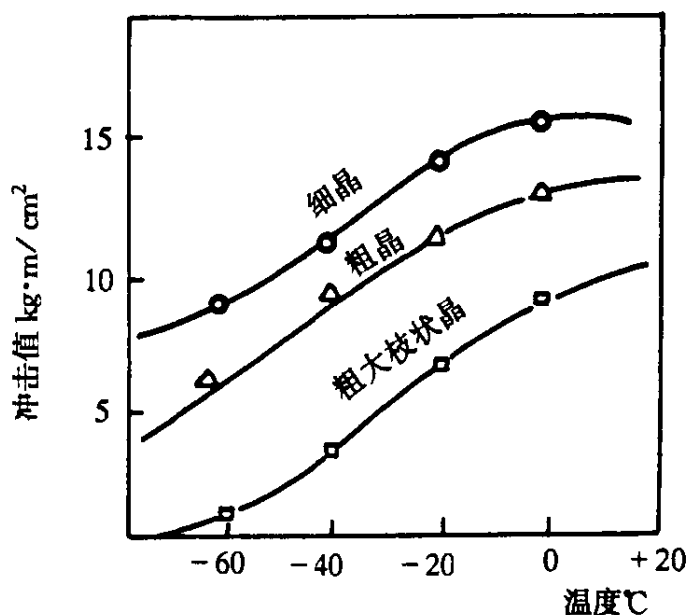


图 3-9 焊缝晶粒对性能的影响

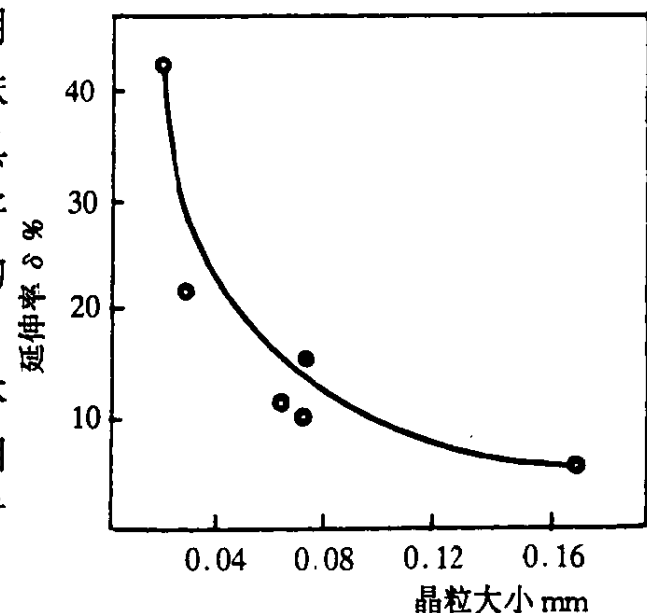


图 3-10 不锈钢焊缝晶粒大小对延伸率的影响

## 3.4 常用熔化焊接方法

### 3.4.1 手工电弧焊

手工电弧焊通常是指采用药皮焊条的手工焊接法,手工电弧焊利用产生于工件和焊条之间的电弧热来熔化焊条和母材,形成连接被焊工件的焊接接头。这种方法具有以下特点:

① 操作灵活方便,容易实现全位置焊接,特别适合焊接对象变化大、现场施工(如锅炉制造、安装和现场维修)等方面的焊接需要。

② 易于在施焊过程中,根据情况的变化适当改变焊接工艺参数,以保证质量要求。

③ 无需专用施焊设备,生产准备周期短,设备费用低。

④ 焊接质量易受人为因素影响,尤其在大长度大施焊量情况下更为突出。

⑤ 大量施焊时,特别是多道焊时生产率低,劳动强度大。

手工电弧焊是锅炉厂制造受压元件和现场安装的最简易连接手段。

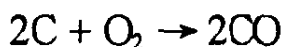
### 1. 电焊条

电焊条是手工电弧焊的主要焊接材料,由钢芯和药皮组成。

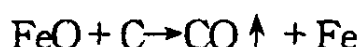
#### (1) 焊条钢芯:

焊条钢芯是指被药皮包围的金属芯棒,焊接时,焊芯一方面起导电维持电弧燃烧的作用,另一方面作为填充金属熔化后,形成焊缝金属,其熔化量约占焊缝金属的 50%~70%。

钢中含有的合金元素主要还是 C, Si, Mn, S, P, 其中 C 可作脱氧剂,在溶滴反应区:



在溶池反应区



碳含量不能太高,应 $\leq 0.1\%$ ,否则易引起熔滴爆炸和形成气孔。Mn 是脱氧脱硫剂,一般 Mn 的含量 $\leq 0.3\% \sim 0.55\%$ ,Si 是强脱氧剂,但硅含量增多会造成严重飞溅,且 Mn, Si 比减小,易表成夹渣,因此硅含量应 $\leq 0.03\%$ 。

S, P 是有害元素, S 含量高容易引起热脆性,产生热裂纹, P 含量高容易引起冷脆性,产生冷裂纹,对普通焊条 S, P 的含量应 $\leq 0.04\%$ ,优质焊条应小于 0.03%。

#### (2) 药皮作用:

药皮是焊条中压涂在焊芯表面上的涂料。它由各种粉料、粘结剂按一定比例配制而成,药皮的作用有:

① 机械保护作用:焊接时,药皮产生大量气体和熔渣,可以很好地保护熔化金属,防止空气中的氮、氢、氧侵入焊接区。

② 冶金处理作用:通过熔渣与熔化金属间的化学冶金反应,可以去除杂质、过渡有益的合金元素,从而提高焊缝的力学性能。

③ 改善焊接工艺性能:药皮中加入一些能使电弧燃烧稳定、减少飞溅、改善焊缝成型、提高熔敷效率和脱渣性的物质,因而能改善焊接工艺性能。

#### (3) 药皮原材料的作用:

药皮原材料的作用,归纳起来主要有以下几个方面。

① 稳弧:有一些物质中含有低电离电位元素,这些物质容易形成带电质点,因而可以起到改善焊条的引弧性能和提高电弧的稳定性作用。此种物质称为稳弧剂。如碳酸钾、水玻璃等。

② 造气:药皮中的一些材料在焊接时能产生气体,可以对熔化金属进行机械保护。这类物质称为造气剂。主要有碳酸盐和有机物等。

③ 造渣:药皮中某些物质焊接时能形成熔渣,可以对液体金属起保护和冶金处理作用。主要是矿石类和化工产品类材料,通常称为造渣剂。

④ 合金化:金属或铁合金加入药皮中可以起到合金剂的作用,在焊接时使焊缝合金化。

⑤ 脱氧:焊接时,加入药皮中的某些物质对氧亲和力比铁大,因而可以作为脱氧剂,保护金属不被氧化。常用的主要有锰铁、钛铁、硅铁和铝粉等。

⑥ 稀释:药皮中有些物质能够降低熔渣粘度,增加熔渣流动性,通常称为稀释剂。常用的主要有萤石、长石、钛白粉等。

⑦ 粘结:可以起粘结配粉作用的物质称粘结剂。它可以将药皮粘到焊芯上并具有一定强

度。常用的是水玻璃。

⑧ 成型:药皮中加入某些物质,以改善涂料的塑性、弹性和流动性、使药皮容易压涂在焊芯上,不致开裂,而且表面光滑,被称为成型剂。常用的有云母、糊精、钛白粉等。

每种药皮涂料在药皮中的作用往往不是单一的,可能兼有几种作用,但有主次之分。选用时除考虑主次作用不同外,还必须注意某些物质可能带来的诸如氧化、增氢、增硫、增磷等副作用。

#### (4) 焊条牌号:

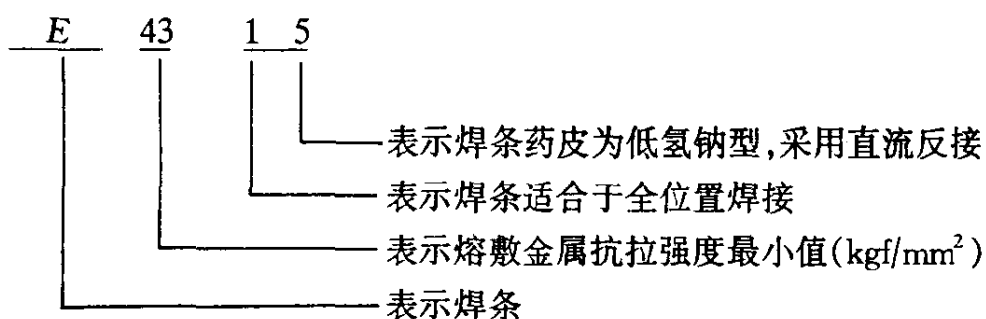
焊条型号编制方法如下:字母“E”表示焊条;前两位数字表示熔敷金属抗拉强度的最小值,单位为  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ;第三位数字表示焊条位置,“0”及“1”表示焊条适用于全位置焊接(平、立、横、仰焊),“2”表示焊条适用于平焊及平角焊,“4”表示焊条适用于向下立焊;第三位和第四位数字组合时表示焊接电流种类及药皮类型,药皮分类表示法见表 3-3。

表 3-3 钢焊条药皮分类表示法(不包括铁粉焊条)

类 型	高钛型	钛钙型	钛铁矿型	氧化铁型	纤维素型	低氢钾型	低氢钠型	特殊型
统一牌号	1	2	3	4	5	6	7	0
国标型号	12 13	03	01	20 22	10 11	16	15	00

低合金焊条用后缀字母表示熔敷金属分类代号,以“—”与前面数字分开;用元素符号直接代表附加化学成分,并用短“—”与后缀字母分开。

碳钢焊条型号举例如下:



碳钢焊条分为熔敷金属抗拉强度  $\sigma_b \geq 43\text{kgf}/\text{mm}^2$  的 E43 系列和  $\sigma_b \geq 50\text{kgf}/\text{mm}^2$  的 E50 系列。

焊条统一牌号第三位数字 1~5 示为酸性焊条,焊接时可采用交流和直流焊机,6、7 表示碱性焊条,为 6 时焊接电源可以交、直流两用,为 7 时表示只用于直流焊机。

#### 2. 酸性和碱性焊条的区别

酸性与碱性焊条有着明显的区别,其比较可参见表 3-4。

#### 3. 电焊条选用原则

焊条的种类很多,各有其适用范围,选用是否恰当将直接影响焊接质量、劳动生产率和产品成本。通常是根据焊件的化学成分、机械性能、抗裂性能、耐腐蚀性以及高温性能等要求,选用相应的焊条种类。再考虑焊接结构形状、受力情况、工作条件和焊接设备等方面来选用具体的型号与牌号,必要时还需进行可焊性试验来确定焊条和采取必要的工艺措施。

表 3-4 酸性焊条与碱性焊条的比较

序号	比较项目	酸性焊条	碱性焊条
1	熔渣酸碱度	熔渣呈酸性	熔渣呈碱性
2	药皮主要成分	药皮组分氧化性强,合金元素过渡效果差	药皮成分有还原性 合金元素过渡效果好
3	对油锈、水的敏感性	敏感性小 使用前经 150℃ ~ 200℃ 烘干 1h 即可,若不吸潮,可不烘干	敏感性大 焊条使用前经 300 ~ 350℃ 烘干 2~3h,而后放保温筒待用。
4	焊缝抗裂性	焊缝抗裂性差 焊缝含氢量高	焊缝抗裂性好 焊缝含氢量低
5	焊后机械性能	焊缝常温冲击韧性一般	焊缝常温冲击性能高,综合性能好
6	外观辨识	酸性焊条端部具有金属光泽	碱性焊条端部呈蓝色
7	脱渣性	熔渣呈玻璃状 脱渣性能好	熔渣呈结晶状 脱渣较困难
8	电源选择性	电弧稳定,可采用直流和交流电源	药皮中 $\text{CaF}_2$ 使电弧稳定性变差,需直流焊接,添加稳弧剂后方可交、直流两用

(1)对于结构钢焊件,一般都是按和母材等强度的原则来选用,即焊缝金属的强度不低于母材规定的下限值。

(2)对特种钢焊件,如耐热钢,不锈钢应选用专用焊条,以保证焊缝金属的主要成份、性能和母材相同。

(3)同一强度等级的酸性焊条或碱性焊条的选用,主要取决于焊件的结构形式(简单或复杂)、钢板厚度、工作条件(静载或动载)、钢材的可焊性和抗裂性能等。通常对要求塑性好、冲击韧性高、抗裂能力强者优先选用碱性焊条。若构件承受静载荷,可采用酸性焊条,当构件承受交变或冲击载荷,则应选用碱性焊条。

(4)低碳钢与普通低合金钢焊接时,可按异种钢接头中强度等级较低的钢材来选取相应焊条。

(5)中碳钢焊接时,由于钢材含碳量较高,增大了焊接裂纹倾向,可选用低氢焊条或焊缝金属具有良好塑性和较高韧性的焊条。

(6)如焊件受力不复杂,母材质量较好,应尽量选用较经济的酸性焊条,对形状复杂的构件应选用碱性焊条。

### 3.4.2 埋弧自动焊接

埋弧焊是一种利用在焊剂层下于光焊丝和焊件之间燃烧的电弧产生的热量,熔化焊丝,焊剂和母材金属而形成焊缝的方法。在埋弧焊中,颗粒状的焊剂保护了电弧和焊接区。填充金属由光焊丝提供。

#### 1. 埋弧自动焊焊接过程

埋弧自动焊的过程如图 3-11 所示,自动焊机头将焊丝自动送入电弧区保证选定的弧长,电弧靠焊机控制均匀向前移动,在焊丝前面,焊剂从漏斗中不断流出洒在工件表面上,焊后部分焊剂熔化成渣壳覆盖在工件表面上,未熔化的部分可以回收利用。图 3-12 是焊接进行时的纵截面图,焊剂熔化后形成熔渣和由电弧造成的气体所包围,因此电弧区保护良好。

埋弧自动焊接的主要特点有:

#### (1) 生产率高。

①焊接线能量大,焊接线能量是指在焊接过程中单位长度的焊缝所获得的用于熔化金属的有效热量,单位时间焊接电弧产生的热能可用下式表示:

$$Q_0 = UI$$

由于热辐射、对流、熔化焊剂和药皮以及金属飞溅等热能损失,则用于熔化金属的有效热为:

$$Q = \eta Q_0$$

$\eta$  为焊接热效率,对不同焊接方法、焊接规范和焊接材料, $\eta$  数据不同,如表 3-5 所示。

焊接线能量为

$$J = \frac{Q}{v} \quad \text{J/cm}$$

式中  $v$ ——焊接速度,cm/s。

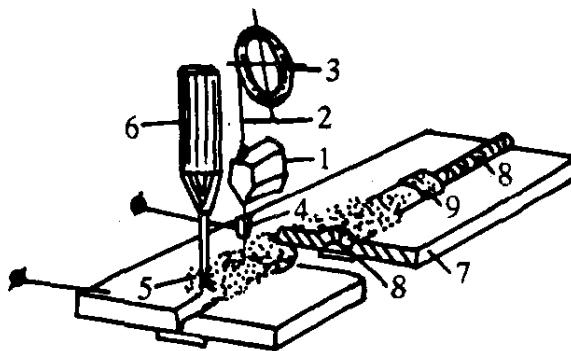


图 3-11 埋弧自动焊示意图

1—自动焊机头;2—焊丝;3—焊丝盘;  
4—导电嘴;5—焊剂;6—焊剂漏斗;  
7—工件;8—焊缝;9—渣壳

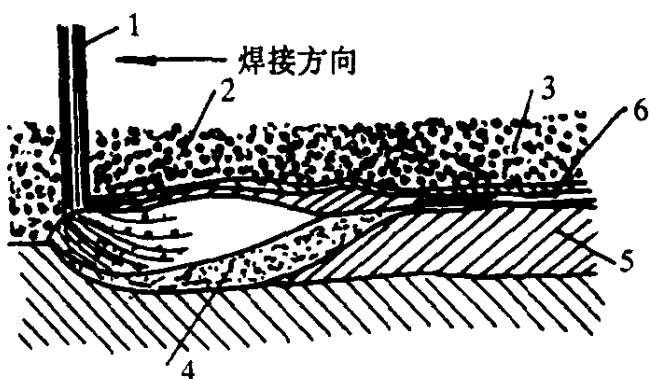


图 3-12 埋弧自动焊的纵截面图

1—焊丝;2—熔渣泡;3—焊剂;  
4—金属熔池;5—焊缝;6—渣壳

表 3-5 不同焊接方法的线能量

焊接方法	焊接电流(A)	焊接电压(V)	焊接速度 $v$ (m/h)	热效率 $\eta$	焊接线能量 $J$ (kJ/cm)
埋弧自动焊	700	36	32	0.85	24
手工电弧焊	180	24	9	0.75	13
手工钨极氩弧焊	160	11	9	0.75	0.5

②熔化系数高,熔化系数是指单位时间单位电流量所熔化的焊丝或钢芯的重量。一般手工电弧焊接的熔化系数为 8~12g/A·h,而埋弧自动焊为 14~18g/A·h。

另外,埋弧自动焊由于采用焊剂进行保护,使这种方法可以采用大电流完成焊接过程,焊

缝可达到相当大的熔深,14mm 以下的焊件可以不开坡口或只开小坡口,因此也大大提高了生产效率。

(2) 焊接质量好,特别是焊缝外表面光滑、美观,由于热量集中,熔池停留时间长,冶金反应充分,产生的气体和夹渣有充分时间上浮,因而形成气孔和夹渣的可能性较小。另外埋弧自动焊的焊接质量受人为因素影响小,质量稳定,锅炉制造厂一般采用埋弧自动焊焊接主要受压件的主焊缝。

(3) 埋弧自动焊易于实现焊接过程的自动化,从而大大改善了焊接劳动强度。

(4) 改善劳动条件,自动焊看不到弧光,没有光辐射,有害气体少,焊接时不需要焊工用手操作,劳动条件大大改善。

埋弧自动焊的缺点是只适宜于平焊,不能用于立焊、横焊和仰焊;也只适宜于长焊缝焊接,不适宜于短焊缝焊接或间断焊。

## 2. 埋弧自动焊焊接材料

埋弧自动焊时,焊剂和焊丝的匹配对焊缝质量关系很大,须针对不同钢种的焊接选择合适的焊丝与焊剂匹配使用。

### (1) 焊剂的要求:

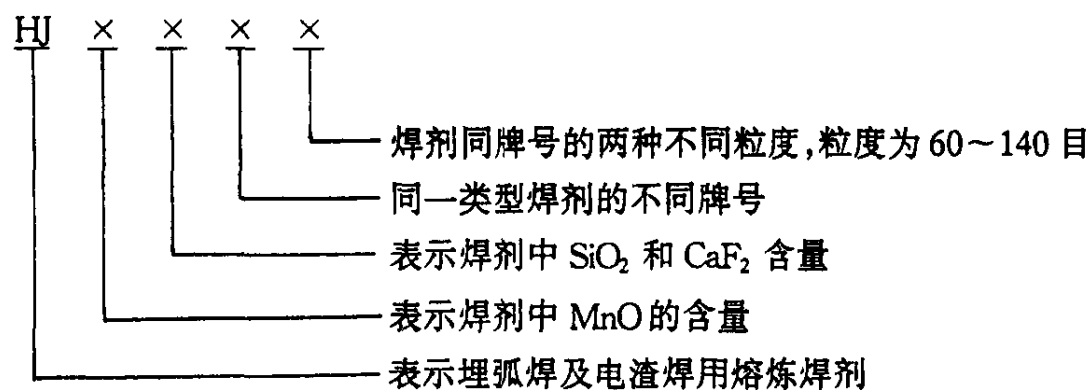
焊剂是埋弧焊与电渣焊不可缺少的焊接材料。在焊接过程中,焊剂的作用相当于焊条药皮,可以保护被焊金属,同时具有冶金处理和改善工艺性能的作用。

①焊剂稳弧性要好,以保证焊接过程的稳定进行,电离电位低的物质如钾、钠、钙加入电弧气氛中,可提高电弧稳定性,而易形成负离子的物质具有消离作用,如氟、氯、氧等,这些离子会降低电弧稳定性。

②焊剂应具有很强的抗气孔能力,气孔是埋弧焊缝中常见的缺陷之一,主要有 CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> 孔,CO 气孔主要是由于含碳量太高,含硅量不足引起的;N<sub>2</sub> 孔主要是熔池保护不周而引起,只要加强焊接区保护就可避免;大多数情况下产生的是 H<sub>2</sub> 孔,这需要在焊接前一定清除焊件表面的油、锈、水。

### (2) 焊剂牌号:

焊剂牌号也采用统一编号,一般对熔炼型焊剂,可采用如下形式



HJ 后面第一位数字表示焊剂中 MnO 含量,第二位数字是焊剂中 Si, F 的含量,第三位数字 0 表示含锰量取下限,1 取中限,2 取上限。

### (3) 焊剂和焊丝的匹配:

要获得高质量的埋弧焊焊接接头,必须选用合适的焊丝和焊剂进行匹配。

在焊接低碳钢时,可用高 Mn、高 Si 焊剂配合低碳钢优质焊丝,如 HJ430 + H08A;也可用无锰高 Si 焊剂配合含锰焊丝,如 HJ130 + H10Mn2,因为低碳钢抗氧氧性差,对氢的敏感性小,



一般是采用高 Si 高 Mn 脱氧、脱硫,采用低氟去氢,Mn 一般可单独由焊剂提供,亦可由焊剂焊丝联合提供。而 Si,F 一般只能由焊剂提供。

对低合金高强度钢,如 18MnMoNb,其抗氧化性较好,但氢的敏感性大,一般可采用中硅中锰中氟用 250 或 350 焊剂配 H08MnMoA 或 H08MnMoVA。

焊接高合金钢时,主要采用碱度较高的焊剂。如焊不锈钢时,可选用相应成份的不锈钢焊丝:H04Cr18Ni9Ti、H04Cr18Ni9N6 等与焊剂 172、焊剂 173 配合。

### 3. 焊接设备及焊接的自动调节过程

埋弧焊装置由焊接电源,送丝机构,焊丝盘,焊剂输送系统。行走小车,控制器和指示仪表等组成。半自动埋弧焊机则由带软管的焊头代替行走小车。

(1) 焊接电源:埋弧焊用的焊接电源与手弧焊电源相似,只是电源的容量比手弧焊电源大得多。埋弧焊电源亦分两大类:一种是直流电源;另一种是交流电源。直流电源有弧焊发电机和硅整流直流电源。弧焊发电机由于噪声大,结构复杂,维修困难等原因目前已逐步被焊接硅整流电源所取代。交流电源为弧焊变压器。在埋弧焊中,交流电和直流电均能焊出成形良好的焊缝。但是在焊接低合金高强度钢厚壁容器时,要求采用直流电源,因为在这种情况下,为获得抗裂性高的低氢焊缝,必须采用碱性焊剂。

埋弧焊可采用两种不同外特性的电源,即外特性陡降和缓降的两种电源。但是必须注意电源的特性要与送丝系统的类型相配,也就是说,陡降特性的电源应与电压反馈的送丝系统相配,而缓降特性的电源则应与等速送丝系统联作。

为了使交流埋弧焊过程更加稳定,对埋弧焊用的变压器提出了一些特殊要求。即要求电源输出电流的波形应近似于正弦波,而输出电压波形应为矩形波,并在每半波极性变换瞬间产生峰值电压,以利引燃电弧。其次,埋弧焊用弧焊变压器应具有较高的空载电压。大容量变压器的空载电压一般为 80~100V,小容量为 65~75V。

(2) 送丝机构:送丝机构及其控制系统是埋弧自动焊机的关键组成部分,并可分为两类:电弧自调节系统(等速送丝式)和电弧电压反馈系统(变速送丝式)。

① 等速送丝系统:在等速送丝系统中,送丝速度经调定后,在焊接过程中是保持不变的。电弧长度是靠电源的特殊外特性实现自动调节的,如图 3-13 所示。如果在焊接过程中,由于某种原因弧长由  $L_1$  变到  $L_2$ ,即弧长缩短,则工作点由  $O_1$  移至  $O_2$ ,电流增大,焊丝熔化速度加快,从而使电弧拉长,恢复至  $O_1$  工作点。同理可知电弧伸长时的自调节过程。图示曲线还说明,缓降外特性曲线与陡降外特性曲线相比,弧长变化所引起的电流升降较大,即缓降外特性曲线的自调节能力较强。所以,装有等速送丝系统的埋弧焊机应配用缓降外特性电源。

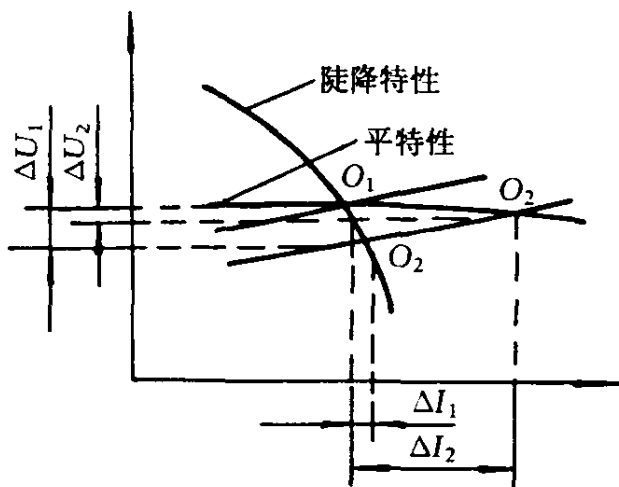


图 3-13 等速送丝系统自调节原理

② 电压反馈送丝系统:在电压反馈送丝系统中,弧长的调节是通过专门设计的自动控制电流来完成。这种电路是从焊接电弧的两端检测实际的电弧电压并与给定的电压相比较。当实际电弧电压高于给定值时,使送丝电机的他励绕组励磁电流增大,即加快了送丝速度,电弧电压恢复到给定值。反之,弧压降低时,则该绕组中的电流减小,送线速度降低而使电弧电压回升。由此可见,

电弧电压反馈系统应配用陡降外特性的电源,以使焊接过程中保持恒定的焊接电流。

#### 4. 埋弧自动焊焊接工艺

(1) 规范参数:在埋弧自动焊中,规范参数对焊接质量起主要作用,而焊工的操作技能只占次要地位。埋弧自动焊的规范参数有焊接电流,电弧电压,焊接速度,焊丝直径和焊丝伸出长度等。

① 焊接电流:焊接电流是影响焊接质量的主要参数之一。它决定了焊丝的熔化速度及熔深。在其它参数不变的条件下,随着焊接电流的提高,熔深和余高增大。但是电流过大,除了容易发生烧穿外,还使焊缝金属晶粒变粗,机械性能恶化,热裂倾向提高。如电流过小,电弧燃烧就不稳定,焊道成形不良并容易造成未熔合等缺陷。通常,在保证焊缝金属性能和质量的前提下,总是选用尽可能高的焊接电流,以获得最高的焊接效率。焊接低碳钢主要决定于所要求的熔深,焊接高强度钢和不锈钢时,焊接电流主要根据焊缝金属和热影响区的性能来决定。

② 焊接电压:电弧电压主要影响焊缝的尺寸和形状。在其它参数不变的条件下,随着电弧电压的提高,焊缝的宽度明显地增大,而熔深和余高则略有减小。电弧电压过高时,会形成浅而宽的焊道,从而导致未焊透和咬边等缺陷。

③ 焊接速度:焊接速度对焊缝的熔深和宽度有一定的影响,在其它参数不变的条件下,增加焊接速度,则单位长度焊缝上的热输入量以及填充金属量减少,因而使熔深,熔宽及加强高都相应地减小,焊接速度太快会促使咬边和气孔等缺陷产生。

④ 焊丝直径:焊丝直径的选择,主要取决于所使用的焊接设备和所焊工件的形状和尺寸。采用细焊丝焊接时,由于在电弧中过渡的金属熔滴直径较小,使形成的焊缝表面波纹细密光滑,外表美观,脱渣容易。因此在深而窄,难以清渣的坡口内应优先考虑采用细焊丝。大直径焊丝的优点是能够承受较高的电流,从而可获得较高的熔敷速度。在大型焊件的焊接中,焊接效率是必须考虑的因素,因此大多数采用直径4~5mm的焊丝。

表3-6 列出各种规格焊丝及其适用的电流范围。

表 3-6 各种埋弧焊焊丝适用的焊接电流范围

焊丝直径(mm)	焊接电流范围(A)	焊丝直径(mm)	焊接电流范围(A)
1.6	150~400	4.0	400~1 000
2.0	200~600	5.0	500~1 100
2.5	250~700	5.5	600~1 200
3.0	300~800	6.0	700~1 400

#### (2) 埋弧自动焊焊接技术:

① 焊前准备:埋弧自动焊接在焊前必须做好准备工作,包括较厚焊件的坡口加工、焊接部分清理以及焊件的装配工作。

埋弧焊的焊接接头也和手弧焊一样有对接、搭接、角接和丁字接头等多种。无论哪种接头,在埋弧焊时都把它置于接近平焊位置,以便于施焊。

对接接头的坡口型式有V形、X形、U形、双U形等多种,无论哪种坡口型式,都有以下几个基本参数。

间隙 C:作用是保证焊透,但又不可太大,以防液态金属从间隙处漏出,不便施焊。

坡口角度(又称含角) $\alpha$ :作用是保证较厚板易于施焊并消除根部的焊接缺陷,如未焊透、微裂纹、夹渣等。但不可太大,否则填充金属量大,既影响生产率,又易产生较大的角变形和焊接应力。

钝边高度  $p$ :作用是避免烧穿。若太大,则不易烧透。

由于埋弧焊比手弧焊的熔透能力大,因此二者坡口有关尺寸的规定就有些不同。如埋弧焊的  $C, \alpha$  值均比手弧焊稍小,而  $p$  值则允许大些。这样,仅从坡口设计能减少焊缝填充量这一点看,埋弧焊的生产率也比手弧焊高。

由于自动焊电流大、熔深大,所以在焊接 14mm 以下对接焊缝时,可不开坡口,实现单面焊双面成形。当焊件厚度为 14~22mm 时一般开 V 形坡口;厚度为 22~50mm 时可开 X 形或 U 形坡口。在 V 形、X 形坡口中,坡口角度一般为 50~60°,以利于提高焊接质量和生产率。

坡口可用刨边机、气割或碳弧气刨等设备加工,焊前必须将坡口及焊接部位的锈蚀、油污、水分清除干净。

②对接焊接技术 对接焊缝从一面烧透是合理的,如果焊接时无法接近焊缝背面,那么为了从一面焊透而又不使熔池液态金属流淌,焊接时应加垫板,当放置垫板有困难时,也可选用手工焊打底,然后进行埋弧自动焊,如图 3-14 所示。

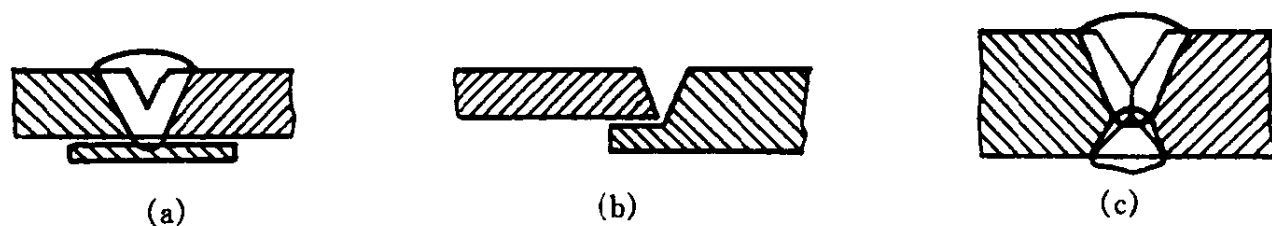


图 3-14 对接焊缝

(a)带垫板的;(b)锁底的;(c)手工焊打底的

对接接头采用单面焊双面成型最为合理,其背面利用焊剂垫、铜板垫,焊剂与铜的复合垫板以及其它装置成型,如图 3-15 所示。

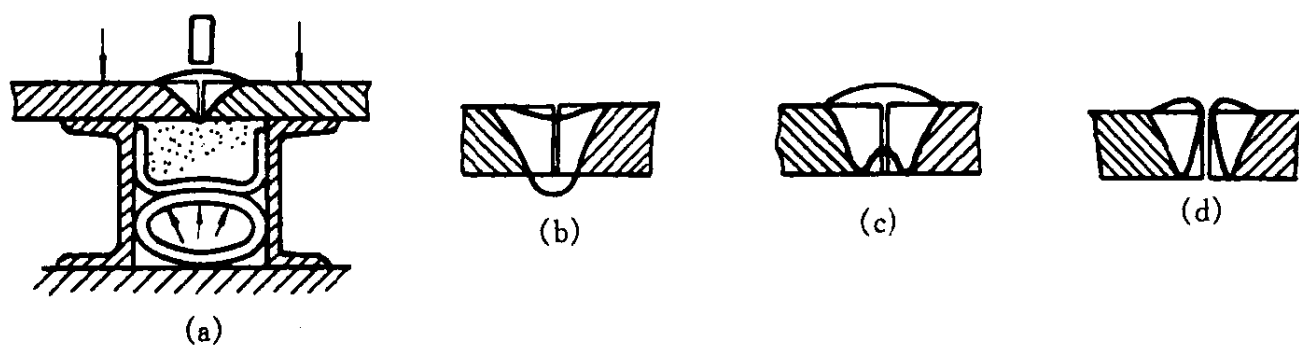


图 3-15 带焊剂垫的对接焊缝的焊接

(a)和焊缝成形;(b)焊剂压力不足;(c),(d)焊剂压力过大

焊缝在焊剂垫上的成形(图 3-15 (a)),其形状(图 3-15(b)~(d))在很大程度上取决于焊剂的压力以及压力沿焊缝长度的均匀分布。各种焊剂垫装置都要保证焊剂能够紧贴在坡口背面。单面焊时,为了使铜垫板特别是铜-焊剂复合垫板上的焊缝成形优良可靠,应在铜垫板上开出沟槽,同时,坡口应留有间隙,以便焊接时液态金属能到达坡口背面,以获得优良的背面成形。图 3-16 为铜制水冷却复合型垫板,其中(a)用于等厚度的对接,(b),(c)用于不等厚度的对接。各种垫板相对于被焊工件无论是静止的(图 3-16(a))还是运动的(图 3-16(b)),都能

实现焊接。

厚板(30~350mm)对接接头的多层焊,可采用图 3-17 所示的各种型式的坡口。窄间隙坡口(图 3-17(b)~(e)),与普通坡口(图 3-17(a))相比其焊缝截面积减少很多,因此焊接变形也小。窄间隙坡口在低碳钢、低合金钢、耐蚀钢以及铝合金、钛合金的焊接中已经成功地应用。

第一层焊缝可在铜垫板(图 3-17(b))、永久性的或可拆卸垫板(图 3-17(c))、坡口钝边(图 3-17(d))或者预先堆成的焊道上施焊。双面坡口中间的钝边同样可用堆焊焊道的方法来形成。在窄间隙焊时,由于焊丝伸出长度增加,从机头 4(图 3-18)伸出来的焊丝 1 必须沿接触式导电管 2(图 3-18(a))或具有耐热绝缘性能的导向管 3(图 3-18(b))送入熔池。多层多道焊时,若每层仅焊 2~3 条焊道,则可采用鹅颈式的导电嘴 1(图 3-18(c))焊接同层相邻焊缝时,仅将其转一角度即可。

双面焊技术:

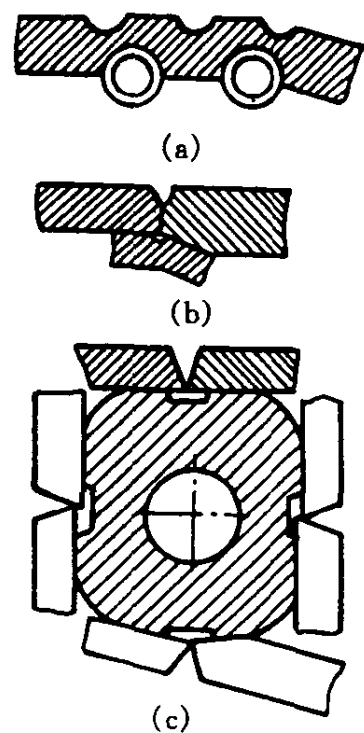


图 3-16 多用途铜冷却板

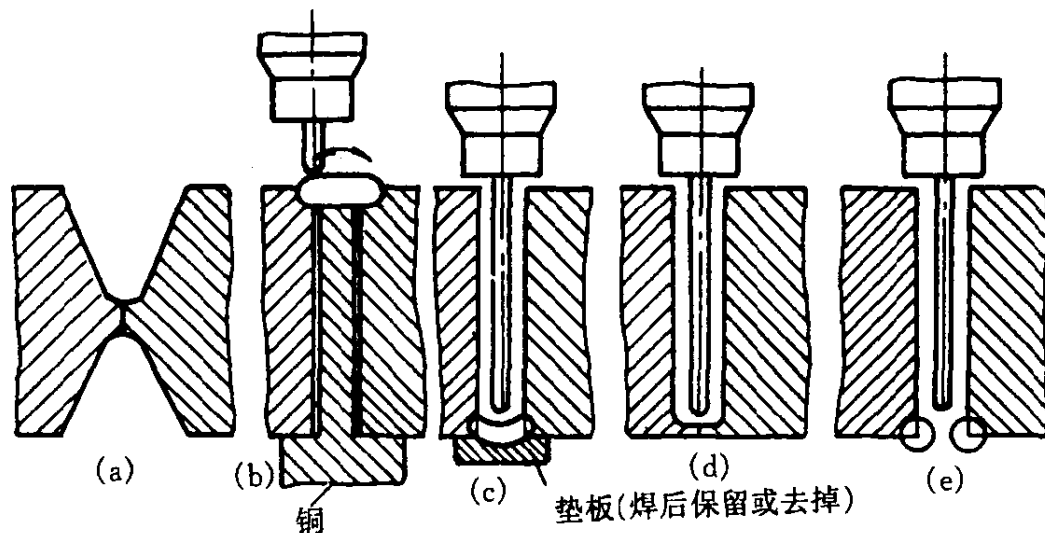


图 3-17 多层焊的坡口准备

(a)普通坡口; (b)~(e)窄间隙坡口

板厚大于 22mm 的焊件需开坡口进行双面焊接,第一道焊缝在背面进行,焊后从焊缝正面用碳弧气刨挑焊根,去除第一道焊缝的根部缺陷,并刨削成正面坡口形状,对于厚板需进行多层焊接或采用窄间隙埋弧自动焊接方法。

埋弧自动焊时的引弧技术:

埋弧焊常用的引弧方法是与工件轻轻接触。通电后电流集中在直径极小(将焊丝削成尖状)的尖端通过,产生高热,焊丝尖端立即熔化而引燃电弧,这是一种简单的引燃法,因而得到普遍的应用。

在焊接重要构件或不能在工件上直接起弧时,为避免引弧处的缺陷,一般常在纵缝的两端焊上引弧板与出弧板,如图 3-19 所示,即在引弧板上开始引弧焊接,然后再进入工件焊缝焊到尽头以后,再在出弧板上熄弧停止焊接,焊后将引弧板和出弧板切下,引弧(出)板与工件的固定,以及引弧(出)板之间自身的固定,则采用定位焊。

### 5. 锅筒、压力容器筒形件纵环焊缝的埋弧自动焊接装置

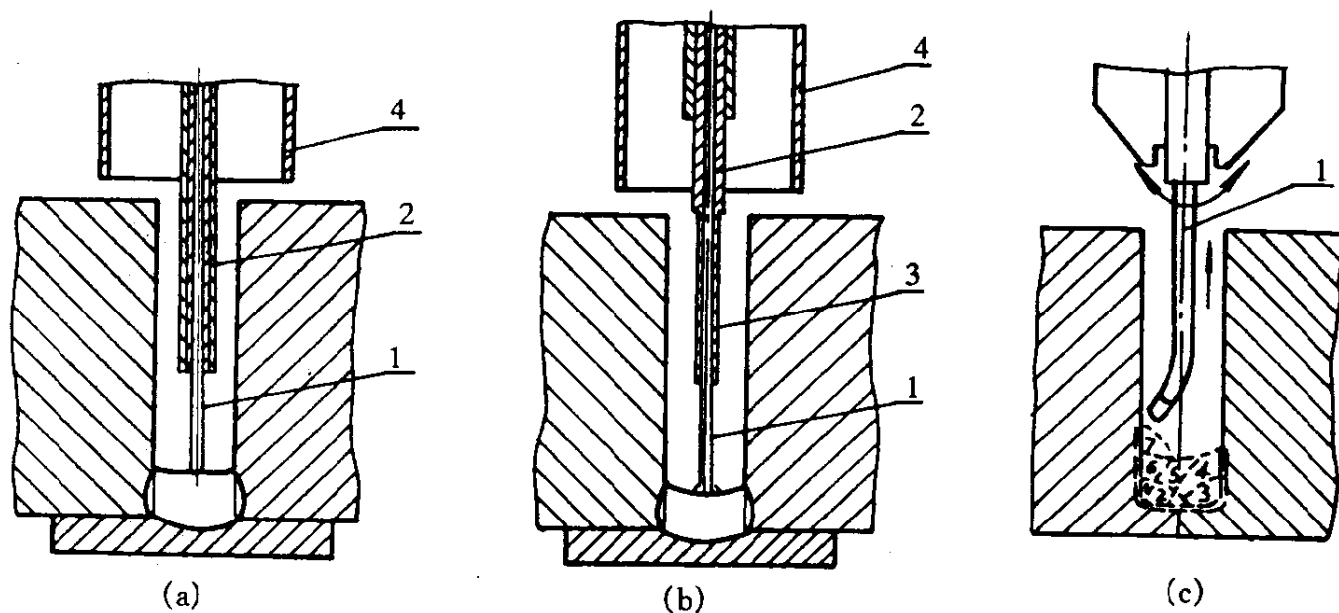
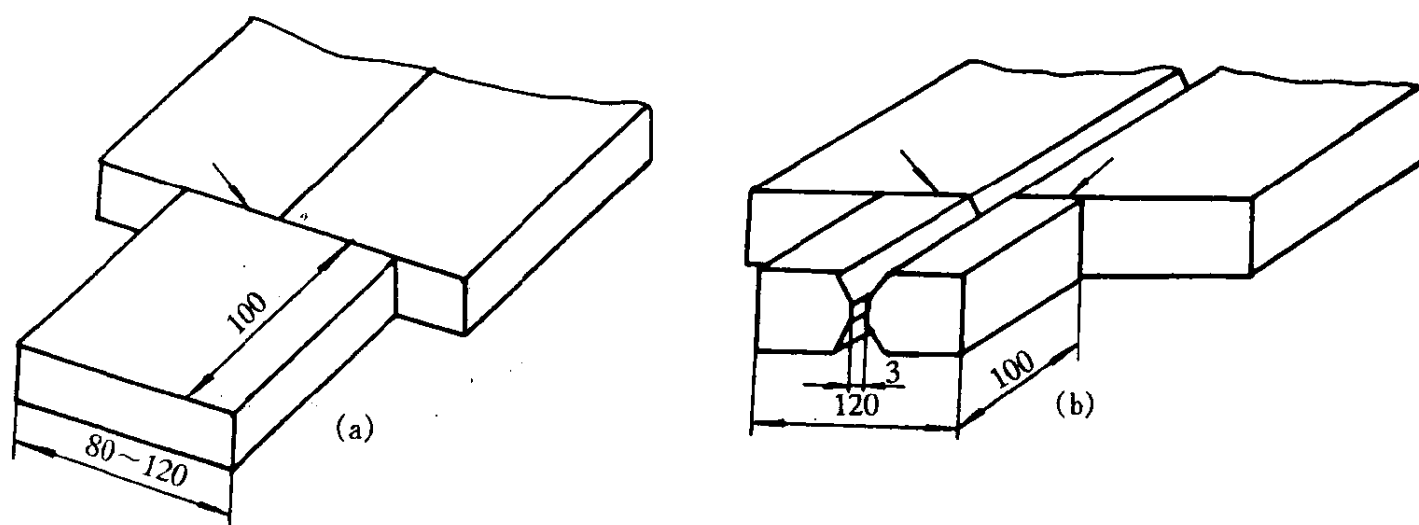


图 3-18 焊丝送入熔池的示意图

图 3-19 引弧(出)板  
(a)无坡口的;(b)有坡口的

锅筒或压力容器筒体一般是由几个筒节和两个封头装配焊接而成,如图 3-20 是一台带机械翻转台的筒体埋弧自动焊接装置,整个装置有三部分组成。

(1) 可移动式的龙门架:

可移动式龙门架可沿着筒体纵向移动,通过减速及调速机构可使立柱获得各种不同的移动速度,以适应不同焊接情况的要求,龙门架上带有能自动升降的悬臂式工作台。

(2) 自动焊接机头:

自动焊接机头装置在工作台上,用以焊接锅筒的纵向焊缝及外环缝。它只完成送丝的动作,焊接速度是由方柱或翻转台来实现的。

(3) 滚轮翻转台:

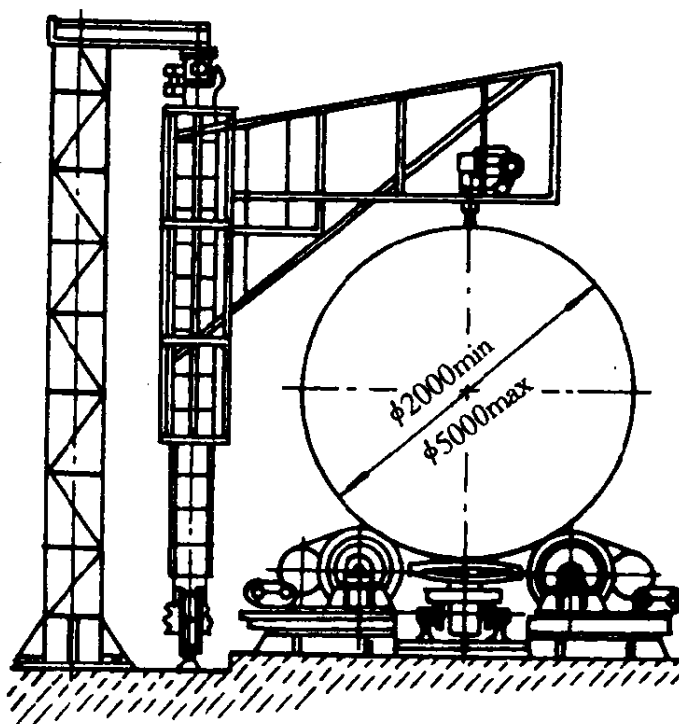


图 3-20 环焊缝接头自动焊台架

位于筒体下方的翻转台主要作用是放置筒体并使筒体旋转,以获得环焊缝焊接时所需的焊接速度,机械转动的翻转台分别有主动支承轮和从动支承轮,主动支承轮是由电机通过减速机构来带动,支承轮之间的距离可以调节,以适应不同直径的筒节。

### 3.4.3 气体保护电弧焊接

#### 1. 概述

气体保护电弧焊是用气体保护熔滴和熔池金属不受空气作用的电弧焊接方法,简称气体保护焊或气电焊。

气电焊和以渣保护方法为主的手工电弧焊埋弧自动焊相比较,在工艺性和经济效果等方面有一系列的优点:

(1)气电焊是一种明弧焊接。焊接过程中电弧和熔池的加热熔化情况清晰可见,便于发现问题及时调整,故对焊接过程和焊缝质量易于控制。

(2)气电焊通常不需采用涂药焊条或焊剂,因而焊接过程没有熔渣,这不仅可节省制造涂药焊条或焊剂的费用,而且焊后不需清渣,这一点在多层焊时更为突出,因而能降低焊接成本。

(3)常用的几种气电焊方法的适用范围较广。通常只要改变所用的电极直径和焊接规范参数值,即可适应于薄板焊接,也能焊接厚壁件。

(4)由于不采用涂药焊条或焊剂,便于实现机械化、自动化和全位置焊接。

(5)当采用惰性气体作为保护气时,特别适于焊接活泼金属材料,易于获得优良的焊接接头质量。这是一般渣保护焊方法难以做到的。

但是,气电焊也存在着一些不足之处,这主要是:焊接时采用明弧和使用的电流密度大,电弧光辐射较强,存在着对焊工的劳动保护问题;其次是不适于在有风的地方或露天施焊;设备也较复杂。

#### 2. 焊接用保护气体

焊接时气体保护的主要作用,在于用这种保护气体把电弧区周围的空气排除,保护电极、熔化金属和处于高温下的近缝区金属,使它们不与周围空气接触和发生作用。保护效果的好坏,受到很多因素的影响,例如保护气体从喷嘴中喷出的流动状况、保护气体的纯度、焊接规范参数、以及焊接接头类型等。

常用的保护气体有三类:惰性气体,如氩气和氦气;还原性气体,如氢气和氮气;氧化性气体,如二氧化碳和水蒸汽等。表 3-7 给出了某些气体的电、热物理性质。

表 3-7 某些气体的电、热物理性能

气体	分子量 (或原子量)	重度[0℃,0.1MPa] /(kg·m <sup>-3</sup> )	电离热 /V	比热容[0℃时] /(J·cm <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数[0℃时] /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	5 000K 时 分解程度
Ar	39.944	1.782	15.7	0.5234	1.583×10 <sup>-2</sup>	不分解
He	4.003	0.178	24.5	5.2335	13.900×10 <sup>-2</sup>	不分解
H <sub>2</sub>	2.016	0.089	13.5	14.2351	19.762×10 <sup>-2</sup>	0.96
N <sub>2</sub>	28.016	1.250	14.5	1.0383	2.428×10 <sup>-2</sup>	0.038
CO <sub>2</sub>	44.01	1.976	13.7	0.8206	1.591×10 <sup>-2</sup>	0.99
O <sub>2</sub>	32	1.428	13.5	0.9085	24.702×10 <sup>-2</sup>	0.97
空气	29	1.293	—	1.0048	—	—

(1) 惰性气体:惰性气体的比重大于空气,有利于排除焊接区域的空气;惰性气体的比热容小,导热性差,有利于焊接时保持高温,从而保证电弧的稳定性。

采用惰性气体可焊接各种金属材料,特别是活泼金属,如锰、铝、钛及其合金,在工业生产中广泛采用氩气作保护气体,而氮气价格高,很少采用。

(2) 氧化性气体:氧化性气体主要有二氧化碳气体,在高温下分解成一氧化碳和氧,因为用  $\text{CO}_2$  作保护气体,对电弧有较强的冷却作用,另外因具有氧化性,所以必须采用有较强脱氧能力的焊丝,才能保证焊接的冶金质量,二氧化碳气体主要用于焊接低碳钢和低合金钢,二氧化碳焊的主要优点是成本较低。

(3) 还原性气体:还原性气体主要有  $\text{H}_2$  和  $\text{N}_2$ ,在一定条件下能使某些金属氧化物或氮化物还原。其重度很小,且导热系数大,因而用作保护气体时,对电弧有较强的冷却作用。另外,氢是分子气体,在电弧区吸热分解成原子氢。这样,一方面原子氢流到较冷的焊件表面时,会复合成分子氢而释放出化学能,对焊件起补充加热作用;另一方面原子氢在高温下溶入液体金属中,随后在液体金属冷凝时,如果氢来不及析出外逸,则易在焊缝金属中产生气孔、白点等缺陷。因此,只有在原子氢焊时才单纯用氢作为保护气体,此时由于焊缝金属冷却速度较慢,溶解于液体金属中的氢有足够的时间可以析出外逸,不易引起焊缝缺陷。

氮气是一种分子气体。氮对铁、钛等金属在高温时有较强的化学作用,且容易和氧化合生成一氧化氮而进入熔池,使焊缝金属脆化,因而焊接这些金属不能用氮作为保护气体。但是,氮对铜和镍不产生化学作用,同时氮是促进奥氏体化的元素,在奥氏体不锈钢中有较大的溶解度,所以在焊接铜及其合金或氮合金化的奥氏体钢时,可用氮气作为焊接保护气体。

(4) 多元混合气体:根据上述原则,除了单一成分气体外,还广泛采用由不同成分气体组成的混合保护,其目的是使混合气体具有良好的综合性能,以适应不同金属材料和焊接工艺的需要,获得最佳的保护效果、电弧特性、熔滴过渡特性以及焊缝成形和质量等。例如,在用熔化极气体保护焊焊接合金结构钢或不锈钢时,采用富氩保护气,即在氩气中加入少量的  $\text{CO}_2$  气或氧气。可降低熔滴和熔池金属的表面张力,容易获得稳定的喷射过渡,改善焊缝成形。从熔化极气体保护焊的发展来看,采用混合气体的趋向愈来愈强,不仅用二元混合气 ( $\text{Ar} + \text{CO}_2$ 、 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$  等),还有用三元混合气(如  $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$  等)的。

采用混合气体的主要目的是:

- ①提高电弧稳定性,减少飞溅,如在  $\text{CO}_2$  中加少量氩气。
- ②加强对母材的保护作用,如焊接铜和铜合金时采用氩气 + 氮气,因为氮气对铜及铜合金是一种惰性气体,而且氮气比氩气成本低。
- ③提高熔滴过渡的稳定性,减小焊接电流,在焊接黑色金属时,在氩气中加少量氧气成二氧化碳,减少熔滴和熔池张力,获得稳定喷射过渡。

### 3. 钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)

图 3-21 为钨极氩弧焊示意图。它是以高熔点的钨棒为电极,在氩气流的保护下,靠不熔化的钨极与工件之间产生的电弧热熔化母材和焊丝来进行焊接。可以手工操作,也可自动焊、半自动焊。

(1) 钨极氩弧焊特点:

- ①钨极氩弧焊仅适于薄板焊接,因为钨极的载流能力是有限的。

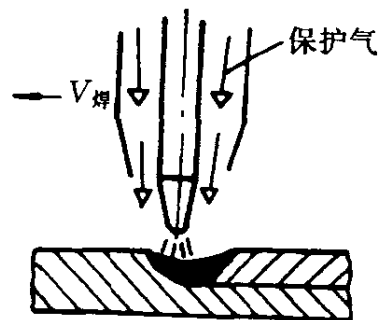


图 3-21 钨极氩弧焊



若焊接电流太大,则钨极将局部熔化,钨滴污染焊缝,造成焊缝夹钨,降低使用性能。因此钨极氩弧焊的电弧功率提不高,焊接熔敷速度也慢。焊接厚度通常小于10mm,其接头型式可为卷边、不开坡口和V型坡口的对接、角接、搭接及T型接头等。对小于2~3mm的不锈钢薄板,可不开坡口,有时也不用填充金属。

一般当焊件厚度0.1~0.8mm时可采用脉冲TIG焊,而板厚为0.8~3mm,采用不可坡口的TIG焊,当板厚3~10mm时采用开坡口的TIG焊;在锅炉制造厂生产工艺中,TIG焊主要用于管件的对接和容器的打底焊接。

### ②氩弧的特性:

**引弧特性** 由于氩气电离势较高,再加之引弧时只能采用非接触引弧,因而必须提高引弧电压,一般为2000~3000V,而设备上需加装高压脉冲或高压振荡引弧器。

**氩弧的稳定性** 电弧的稳定性决定于气体对电弧所吸走的热量的多少,因为氩气比热容小,导热性差,所以氩在电弧气氛中吸热量少,氩弧较稳定,氩弧温度一般可达8000~12000K。

**氩弧的电压** 在同样的弧长下,氩弧所需的电压最小,因此,氩弧一旦引弧,可在较长的电弧长度条件下稳定燃烧,不易灭弧。

氩弧焊使用惰性气体保护,消除了氧化问题,焊接过程单纯是熔化结晶,故能焊接化学活性很强的金属;焊缝金属致密,不易产生气孔,成型美观,焊缝纯净,机械性能和耐腐蚀性能都较高。它不仅用于铝、镁、钛、铜及其合金,稀有金属、高强钢、高合金钢以及异种金属的焊接,而且还适用于难度较大的补焊、定位焊、单面焊双面成型的打底焊。

在使用上要注意两个问题:焊接接头型式要便于氩气流的保护作用,对气体保护效果较差的接头型式要采取加挡板等措施来解决(见图3-22(a),(b),(c))。

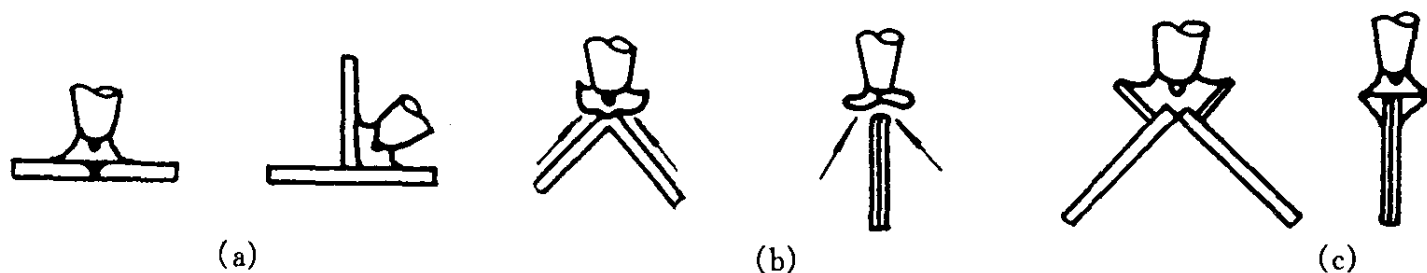


图3-22 几种焊接接头形式的气体保护  
(a)保护效果好;(b)保护效果较差;(c)加挡板

### ③电源和极性:

一般情况下,TIG焊均采用直流电源正极性接法,即钨极接负极,工件接正极。

使用直流电源时,电弧燃烧稳定。正接极时,阴极斑点在钨极上,比较稳定,电子发射能力强,电弧稳定,同时,工件接正极,允许使用较大的焊接电流,这样,工件热量较多,温度较高,熔深也较大,适于合金钢和一些难熔金属的焊接。而且,正离子冲击钨极表面,产生大量的热量主要用于钨极发射电子,只有少量热量用于提高钨极表面的温度,因此钨极烧损量少。当用直流反接极时,钨极是正极,温度较高,高温下钨极消耗加快,钨滴掉落在熔池中易造成焊缝夹钨;同时,阴极斑点在工件上,活动范围大,易散热,电子发射困难,电弧不够稳定,故一般少用。但在直流反接极时,氩气的正离子以高速冲向工件并产生大量的热。氩气的正离子质量较大,可以把工件表面上的高熔点氧化膜冲破,这种现象叫做“阴极破碎”作用,这种作用是使像铝这



样活性大的金属能进行熔化焊的重要条件。而在直流正接极时,冲向工件的是电子,其质量较正离子小得多,动能低,无破碎作用。

#### ④氩气的纯度:

根据焊件材料和对焊接质量要求来选择氩气纯度。一般而言,化学活性弱的金属对氩气纯度要求低,反之要求高。

#### ⑤TIG 焊的电极材料:

选择 TIG 焊的电极材料主要考虑两个方面,一是减少在焊接过程中的烧损量,保证焊接过程顺利进行;二是电极材料的电子逸出电位要低,易于发射电子。

现代工业生产中一般在钨中加入逸出电位较低的元素如钍、铈、锆,广泛使用钍钨电极就是在纯钨中加入 1%~3% 的  $\text{ThO}_2$ ,或在纯钨中加入 2%~3% 的  $\text{CeO}_2$  组成铈钨极,不仅使电子发射能力提高,还提高了载流能力,而且容易引弧和稳定电弧,使使用寿命增长。

#### (2) 钨极氩弧焊接技术:

钨极氩弧焊的操作比较简单,氩弧一旦引燃,就相当稳定,对弧长的控制也不象其它方法那样严格,所以其工艺灵活性较好,能适应任何位置的焊接,但正确地选择焊接规范是保证焊缝成形良好和焊接过程稳定的重要措施。

#### ①焊接规范:

表 3-8 示出了碳钢对接接头手工氩弧焊典型焊接规范参数。

表 3-8 碳钢对接接头手工氩弧焊典型焊接规范参数

板 厚 (mm)	焊接电流 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (m/h)	填充丝直径 (mm)	钨极直径 (mm)	气体流量 (L/min)
1.0	60~70	8~10	8~10	1.6	2.0	5~6
1.5	80~90	10~11	10~12	1.6	2.0	5~6
2.0	90~100	10~11	10~12	1.6	2.0	5~6
3.0	100~110	11~12	10~12	2.5	2.5	6~7
4.0 V形坡 60°	110~130	12~13	6~8	2.5	2.5	6~7

#### 焊接电流:

当焊接电流增加时,焊缝熔宽和熔深都增加,焊缝高度相应减小,焊接电流太大,焊缝容易产生焊穿和咬边等缺陷,如果焊接电流太小,焊缝易产生未焊透现象。

#### 焊接电压:

随着电弧长度的加大焊接电压也随之增大,焊缝宽度增加,熔深稍有减少。电弧长度过大时,将不利于气体的保护,易产生未焊透和氧化现象,所以在保证不短路情况下,应尽量采用短弧焊接。

钨极直径和形状:钨极直径的大小要根据工件厚度和焊接电流大小来选择。钨极直径选定后,也就限定了焊接电流,如超过此电流值,钨极将产生强烈的发热、熔化和挥发,将引起电弧不稳定和向焊缝金属中渗钨。

采用直流钨极氩弧焊时,应将钨极磨成平底锥形(如图 3-23 所示),钨极直径与锥形尺寸

的关系为:

$$l = (2 \sim 4)D$$

$$d = (1/3 \sim 1/4)D$$

式中  $l$ —锥形长度,mm;  
 $D$ —钨极直径,mm;  
 $d$ —锥体端头直径,mm。

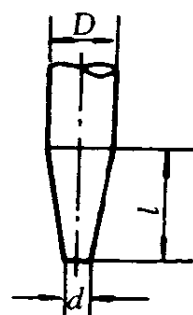


图 3-23 氩弧焊用钨极形状

②焊接技术:

钨极氩弧焊中焊接技术是焊接工艺的重要组成部分,其中包括焊前准备,坡口设计、焊缝装配、引弧和收弧技术以及成形衬垫的采用等。

焊前准备中,必须清除焊接区的杂质、灰尘和氧化物,当焊件表面锈蚀严重或较厚时,应用砂轮打磨或作喷丸处理。

氩弧焊坡口尺寸公差,尤其是钝边和底部圆角公差应控制在 0.5mm 以下,其坡口必须采用机械加工方法制造,不应采用火焰切割方法。

电弧引燃后,使焊枪的轴线与焊件表面约成 75°角,并将电弧作环向移动,直到形成所要求尺寸的熔池,然后再作横向摆动,使坡口的两侧很好地熔合。添加填充焊丝时,应使填充焊丝相对于焊件表面倾斜 15°,并缓慢地向焊接熔池给送,填充焊丝切勿与钨极接触,否则钨极会被污染,加剧了钨极的烧损。焊接结束时,应先将填充焊

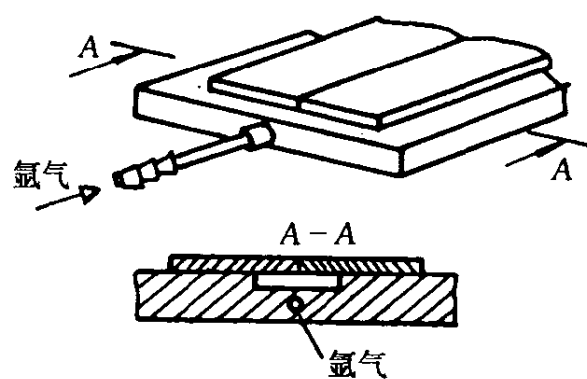


图 3-24 保护焊缝背面用的充氩垫板

丝抽出熔池,但仍应在保护气体的保护区内,以防止填充焊丝加热端的氧化。准备灭弧时,应将电弧移至熔池的边缘。灭弧最好通过焊枪上的微动开关切断主电源来实现。对于重要的焊件,灭弧前应使电流逐渐衰减,以完全消除收弧坑。

在碳钢和低合金钢焊件根部焊缝的封底氩弧焊时,一般可不加衬垫。对于根部焊缝背面成形有严格要求的焊件,如高压管道,则在根部焊缝焊接时,在焊缝背面通入成形气体以获得理想的成形。为了使背面焊缝不受空气的污染,在铜衬垫上加工出一条凹槽,对准焊缝并通入保护气体。这种工艺措施还具有控制焊缝熔深的作用。图 3-24 示出可向焊缝背面通保护气体的铜衬垫。

图 3-25 示出了耐热钢气体保护焊用的垫板尺寸。

草 图	焊接板厚 (mm)	槽宽 $b$ (mm)		高 $h$ (mm)
		纵 缝	环 缝	
	0.8~1.5	4~6	5~10	0.5
	1.5~3.0	6~8	7~10	0.6

图 3-25 耐热钢气体保护焊用的垫板尺寸

4. 熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)

熔化极惰性气体保护焊,简称 MIG 焊,如图 3-26 为熔化极气体保护焊的示意图,它是

焊丝作电极,在焊丝和工件之间形成电弧。熔化的焊丝金属与部分熔池的母材一起形成焊缝金属。惰性气体通常采用氩气,因而也称为熔化极氩弧焊。

熔化极氩弧焊是在钨极氩弧焊和埋弧焊的基础上发展起来的。钨极氩弧焊虽然有许多优点,但为了防止钨极的烧损,电流密度不能太大。所以,它的热功率较小,熔深小,只适用于焊接较薄的工件。

熔化极氩弧焊所用的电流密度较大,它具有电弧热功率大,热量集中等特点。所以生产率高,焊接变形较小,尤其是对于焊接较厚的导热快的材料,不需要预热,从而改善了劳动条件,提高了生产率。例如,某厂生产一种厚 20mm 的铝制容器,采用手工钨极氩弧焊时,需要预热到 250℃,分七道焊成,改用熔化极氩弧焊后,不需要预热,只要正反正各焊一道,生产率提高十多倍,大大改善了劳动条件,提高了焊接质量。

#### (1) 熔化极气体保护焊的熔滴过渡:

熔滴过渡是指当电极末端金属熔化后,主要以液状形式通过电弧过渡到熔池中去。所有熔化极电弧焊(包括手弧焊)都存在熔滴过渡问题。它对熔化极氩弧焊电弧的稳定燃烧,气体保护效果和焊接质量都有很大影响。

#### 熔滴过渡的主要形式及其特点:

熔滴过渡有短路过渡、滴状过渡、射流过渡和混合过渡等形式,参见图 3-27。

**短路过渡** 焊丝熔化后的液体金属在未脱离焊丝端头时,就和熔池相接触,称为短路过渡。

焊丝端头开始熔化后形成液态金属滴并不断长大经过短一段时间后,熔滴长大到和熔池金属相接触,使焊丝与熔池之间产生了短路然后进入熔池。此过程进行得极为迅速,一般短路时间短于 1/50s。当手弧焊采用薄皮焊条、小电流或短弧的情况下易形成短路过渡,如图 3-27(a)。

**滴状过渡** 也称为颗粒状过渡,如图 3-27(b)所示。在一定的电弧电压下,当焊接电流较小时,焊丝末端的熔化金属逐渐聚集成粗大的金属熔滴,其直径往往大于焊丝直径。当它积聚到足够大时,在其本身重力的作用下脱离焊丝,经过电弧空间自由落入熔池。这种过渡形式称为大滴过渡,其特点是熔滴尺寸大,过渡频率低(每秒钟几滴到十几滴),容易造成大颗粒飞溅,焊接过程较不稳定,焊缝表面粗糙,工业生产中,一般不采用。随着焊接电流的增加,焊丝金属的熔化量增大,熔滴尺寸逐渐减小,过渡频率逐渐提高,此时,熔滴尺寸往往小于焊丝直径,这种过渡形式称为小滴过渡,其特点是熔滴尺寸较小,过渡频率较高(约每秒钟几十滴),焊接过程较稳定,飞溅小,焊缝成形好。

**喷射过渡** 喷射过渡也称射流过渡,如图 3-27(c)所示。当焊接电流增大至超过某一临

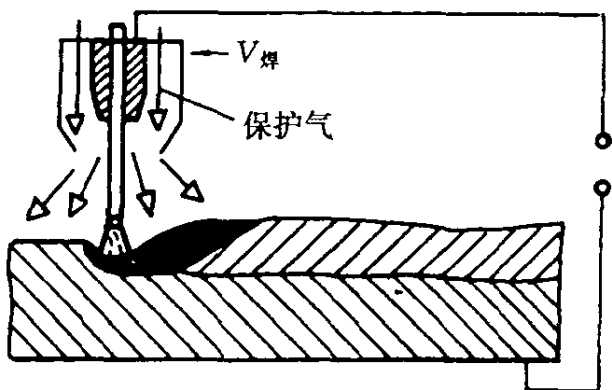


图 3-26 熔化极气体保护焊

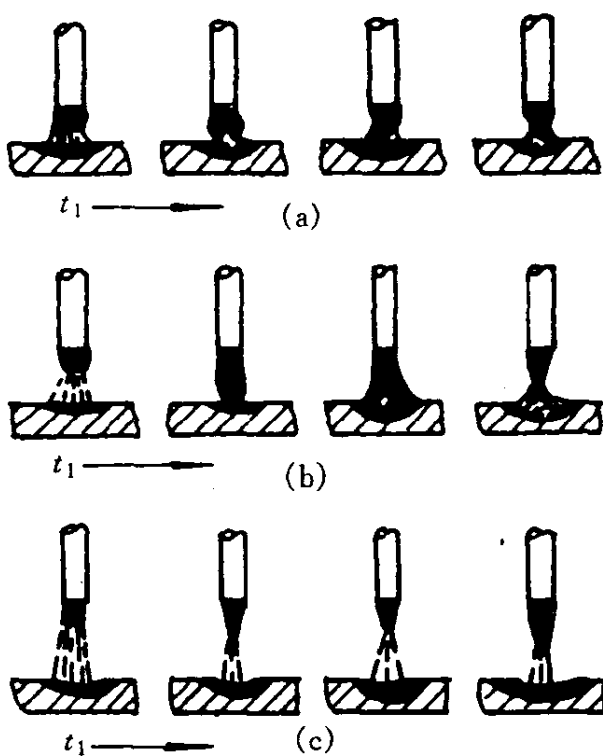


图 3-27 熔化极气体保护焊的熔滴过渡形式  
(a)短路过渡;(b)滴状过渡;(c)喷射过渡

界值时,焊丝端头金属的熔化量大大增加,此时熔滴尺寸很小,过渡频率极高,焊丝端头呈尖锥状,焊丝熔化金属以细雾状高速喷射入焊接熔池。这种熔滴过渡的特点是熔滴尺寸极小,呈细雾状,过渡频率很高(每秒钟可达200滴左右),焊接过程十分稳定,飞溅很少,焊接熔深大,焊缝成形好。

射流过渡时,金属熔滴是在焊丝轴线所指的直线上过渡,熔滴位置容易控制,且容易指向到水平角焊缝和仰焊焊缝中;电弧很稳定,可获得良好的焊缝形状和接头质量,射流过渡是MIG焊的主要过渡形式。

临界电流值是获得喷射过渡的主要参数,临界电流的大小和很多因素有关,如焊丝材料的物理特性。材料熔点低,表面张力小,临界电流也低;MIG焊时一般都采用直流电源,一般说来,直流正极性不易出现喷射过渡,此时熔化焊丝的热量较少,所以MIG焊通常采用直流反接极;临界电流和保护气体种类有关,喷射过渡只发生在氩气或富氩气体气氛中,MIG焊时一般都加入一定量的氧化性气体,否则焊道成形凹凸不平, $\text{CO}_2$ 的加入比例一般为5%~20%,否则对合金元素烧损过大,而且 $\text{CO}_2$ 分解要吸收大量的热量,会使临界电流值升高。

### (2) 熔滴过渡时的受力分析:

MIG焊熔滴过渡时受力比较复杂,这些力主要包括:重力,表面张力,电磁收缩力,等离子流力和斑点压力。这些力有的阻碍熔滴过渡,有的促进熔滴过渡,实际熔滴过渡时是各种力综合的结果。

**重力** 重力的方向始终指向地面,因此平焊时重力促进熔滴过渡,仰焊、立焊、横焊时,阻碍熔滴过渡。

**表面张力** 表面张力在短路过渡时起促进作用。

**电磁收缩力** 电流通过截面变化的导体时将产生电磁力,其方向是小截面指向大截面,因此,电磁收缩力在短路和滴状过渡的起促进作用。

**等离子流力** 由于电弧截面不等产生的电磁压缩力。当截面不等时,气流的上下形成压力差,此压差造成中心部位流体形成等离子流,MIG焊时等离子流力是促进熔滴过渡的,而且焊接电流愈大等离子流力也愈大。

**斑点压力** 焊接时,在电弧根部的斑点上会产生一个向上顶推溶滴的作用力,这种力称斑点压力,这种力是阻碍溶滴过渡的,特别是 $\text{CO}_2$ 气体保护焊时,斑点压力较大,将溶滴顶弯,造成熔滴非轴向过渡,引起严重的飞溅。

### (3) MIG焊接技术:

#### ①焊接规范参数的选择:

进行MIG焊接时,焊接电流是主要的规范参数之一。焊接电流由焊丝直径和给送速度所决定,并且能够获得稳定的喷射过渡,在富氩保护气体下焊接时,选用较高的电流和相应的电弧电压可以获得无飞溅的喷射过渡,当采用细焊丝焊接时,选用低电流和低电压可实现短路过渡,当熔滴以滴状形式过渡时,焊接电流的大小应控制在小滴过渡的范围内以避免过大的飞溅。

熔化极气体保护焊时,电弧静特性曲线是上升的,当焊接电流增大时,电弧电压也相应提高。因此,电弧电压和焊接电流存在严格的匹配关系。

焊丝直径首先按所焊工件的厚度来选择,一般厚板采用0.8~1mm细丝焊接,中厚板则采用直径1.6~2.0mm的焊丝焊接,在全位置焊接时,亦推荐细丝,便于控制。

### ②电源和极性选择:

由于交流电弧的稳定性差, MIG 焊目前还只采用直流焊接电源。实践证明, 直流反接极时, 电弧稳定性好, 容易产生喷射过渡, 而且临界电流低, 飞溅小, 焊缝成形好, 因而 MIG 焊大都采用直流反接极。

### ③保护气体的选择:

保护气体的选择也很重要, TIG 焊接时, 要采用 99.99% 纯度以上的氩气, 而在 MIG 焊接时, 往往要在氩气中加入少量氧化性气体, 一般为  $\text{CO}_2$ , 表 3-9 是锅炉厂推荐的不同钢种的混合气体比例。

表 3-9 不同钢种的混合气体推荐比例

接头种类	SA-210C	15CrMo	SA-213 T91	SA-213 TP347H	异种钢接头
混合气体比例	Ar+15-20% $\text{CO}_2$	Ar+15-20% $\text{CO}_2$	Ar+5-10% $\text{CO}_2$	Ar+5% $\text{CO}_2$	Ar+ $\text{CO}_2$ (<5%)

### (4) 熔化极脉冲氩弧焊:

一般 MIG 焊接是在熔滴喷射过渡的条件下进行的, 其焊接电流须大于临界电流值。对于薄板以及可焊性差、热敏感性大的金属来讲, 大的电流会影响焊接的正常进行和焊接质量, 另外想获得较低的电流必须采用细焊丝, 又会增加送丝机构的困难, 熔化极脉冲氩弧就可以解决这个问题, 脉冲氩弧焊是在一般氩弧焊用的电流中加进脉冲电流。脉冲电流可加在钨极氩弧焊中, 也可以在熔化极氩弧焊中。主要加在熔化极氩弧焊中, 称为熔化极脉冲氩弧焊。

熔化极脉冲氩弧焊的电流由两部分组成(如图 3-28), 维弧电流用以保护电弧不致熄灭并使焊丝末端加热熔化; 脉冲电流使瞬时电流达到并超过射流过渡所需临界电流值, 造成熔滴以

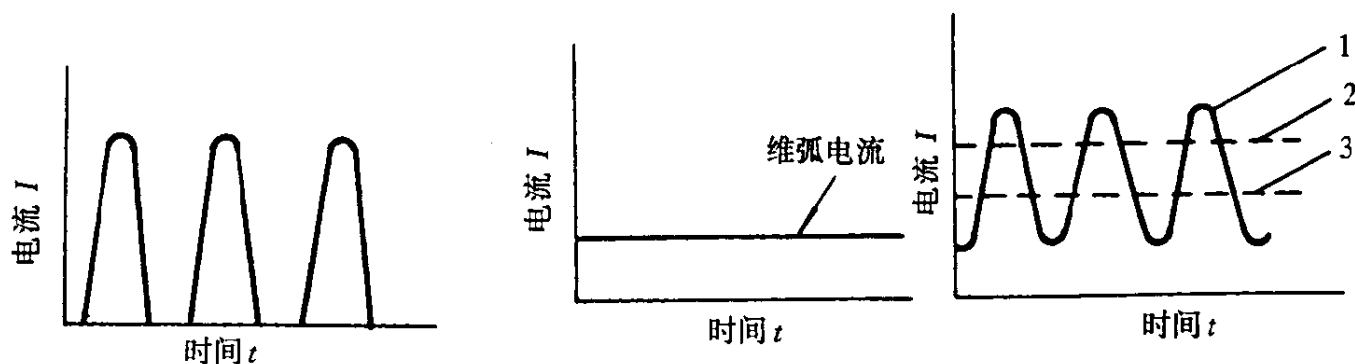


图 3-28 脉冲弧焊用电压

射流形式过渡, 一般每输入一次脉冲电流, 熔滴过渡一次。这两部分电流分别由两个电源来供给, 它们是并联的。脉冲电源的最简单装置是单相交流半波整流后产生 50Hz 或经全波整流后产生 100Hz 的脉冲。

加进脉冲电流后, 扩大了熔化极脉冲氩弧焊的应用范围, 主要优点为:

①实现了低电流值(平均值)下的射流过渡, 使热输入小、熔池存在时间短、变形较小, 成本较低, 同时利于进行薄板焊接和全位置焊。

②在相同电流水平和熔敷率下, 脉冲电弧焊可采用较粗的焊丝。粗丝成本低且便于送进; 提高了电弧的稳定性。采用粗丝后, 焊丝比表面积减少, 形成气孔的机率减少, 对铝、钛的焊接特别有利。

③易实现对厚板的焊接。

④采用脉冲电流后,易于实现对电弧能量的调节,扩大了焊接的厚度范围。

⑤脉冲电流能加强对熔池的搅拌作用,有助于消除气孔。

(5)二氧化碳气体保护焊:

二氧化碳气体保护焊,简称 CO<sub>2</sub> 焊,50 年代初前苏联人首先采用,80 年代获得在工业上的普及,是一种高效率、低成本的焊接方法,CO<sub>2</sub> 焊可分为半自动焊和自动焊两类,CO<sub>2</sub> 焊和手工电弧焊相比具有明显优势。

① CO<sub>2</sub> 焊的特点:

A. 焊接成本低,和氩弧焊相比,CO<sub>2</sub> 气价廉易得,降低焊接成本,其焊接成本只有埋弧焊和手工电弧焊的 40%~50%。

B. 耗能低,由于 CO<sub>2</sub> 气体代替了药皮和焊剂,电能消耗也减少,一般情况下,每米焊缝耗能是手工电弧焊的 40%~70%。

C. CO<sub>2</sub> 焊电弧穿透力强,熔深大而且焊丝的熔化系数大,熔敷速度快,生产率是手工电弧焊的 1~3 倍。

D. 适用范围广,不受焊件位置和焊件壁厚的限制。

E. 抗锈能力强,焊缝含氢量低,抗裂性能好,

F. 焊后不需清渣,而且属明弧焊接,便于对焊接过程的监视和控制,有利于实现焊接过程的自动化。

CO<sub>2</sub> 焊有三大问题,其中最突出的是熔滴飞溅问题,不论从焊接电源,焊接材料及工艺上采用何种措施,都只能使飞溅减少,并不能完全消除,而其它两个问题——氧化和脱氧及气孔问题从冶金上采取措施可以解决,详见下面的讨论。

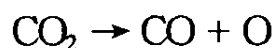
CO<sub>2</sub> 焊主要用于焊接低碳钢及低合金钢等黑色金属,因 CO<sub>2</sub> 呈弱氧化性,故不能焊接铝、镁、钛等化学活性强的金属。

② CO<sub>2</sub> 焊的冶金特点:

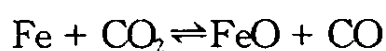
A. 合金元素的氧化和脱氧问题:

CO<sub>2</sub> 属弱氧化性气体,在焊接过程中参与冶金反应,对焊缝质量有一定影响,这点与氩弧焊有很大区别。

在电弧的高温作用下,CO<sub>2</sub> 被分解成一氧化碳和氧:



氧与 CO<sub>2</sub> 同时对熔池金属中的铁、硅、锰等元素起氧化作用,生成一氧化碳和氧化物。反应式为



生成的氧化铁在熔池开始凝固时,一方面被熔池中主要脱氧元素硅、锰等还原,造成熔池金属中硅、锰元素的大量烧损、降低了它们在焊缝金属中的含量,影响机械性能,另一方面,它还与焊缝金属中的碳起作用,生成一氧化碳和铁。



氧化作用产生的 FeO 大量溶入熔池中,使焊缝金属产生气孔和夹渣缺陷,其次 Mn, Si 等元素被氧化,减少了焊缝中这些合金元素的含量,使焊缝机械性能降低。因此通常要在焊丝中加入足够数量的脱氧元素。

可作为脱氧剂的有铝、钛、硅、锰等合金元素,铝和钛虽然和氧具有很强的亲和力,但其向熔池的过渡系数小,单独采用 Si, Mn 作脱氧剂,则它们生成的氧化物熔点高,密度大,易在焊缝中形成夹渣。因此,须采用 Si, Mn 联合脱氧,反应后产生复合化合物  $MnO \cdot SiO_2$ , 其熔点低,密度小,且能凝聚成大块,易浮出熔池,因此  $CO_2$  焊所用焊丝比较特殊,一般焊丝中的含硅量为 1% 左右,含锰量为 1% ~ 2% 左右,这种焊丝一般用于焊低碳钢和低合金钢。

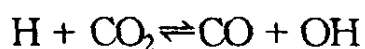
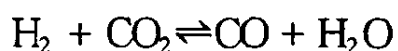
#### B. 气孔问题:

CO 气孔: CO 气孔主要是指熔池反应中碳的脱氧反应,在结晶时生成的 CO 气孔,CO 的气孔问题一般采用高锰、高硅超低碳焊丝可以解决。

$N_2$  孔:  $N_2$  的来源主要是空气和  $CO_2$  中的  $N_2$ ,  $CO_2$  的纯度一般在 99.6% 以上,所以  $N_2$  气孔主要是焊接区保护不周引起的,因此焊接时应加强对焊接区的保护。

$H_2$  孔: 电弧区氢主要来自焊丝、焊件表面的油污和铁锈,以及  $CO_2$  气体中所含水蒸汽。因此,减少焊接区的油、锈、水,有利于防止  $H_2$  孔。

另外,由于  $CO_2$  是氧化性气体,增加了氧的分压力,使自由状态的 H 可被氧化成不溶于金属的水蒸汽和羟基,从而减轻了氢的有害作用,其氧化过程为:



#### C. $CO_2$ 焊的飞溅问题:

$CO_2$  焊产生飞溅的原因有三个:

一是熔滴的非轴向过渡,由于  $CO_2$  气体在电弧区高温分解;产生气体体积膨胀,对熔滴产生向上的顶压力;另一方面,熔滴下面的斑点压力向上使尚未脱离焊丝端部的熔滴被顶弯,熔滴重心偏离焊丝轴线,形成熔滴的非轴向靴状过渡。

二是焊丝含 Si 量较高,在熔滴中形成高熔点的二氧化硅质点,促进熔滴过早脱离焊丝而产生飞溅。

三是  $CO_2$  气体在溶滴中发生体积膨胀,导致熔滴发生爆炸,引起飞溅。

针对以上三个原因,可以采取相应措施来减少飞溅。

一是采用短路过渡或小端过渡,减少非轴向过渡造成的飞溅。

二是采用超低碳焊丝减少 CO 气在高温下爆炸。

三是采用富  $CO_2$  气体,在  $CO_2$  气体中加入一些氩气,是减少颗粒过渡焊金属飞溅最有效的办法。表 3-10 是采用三种气体的保护焊比较。

$CO_2$  焊多采用高硅高锰型合金焊丝。焊低碳钢时常用 H08MnSiA 焊丝;焊低合金高强度钢时常用 H08Mn2SiA 和 H04Mn2SiA 焊丝;机械性能要求很高的焊缝可用还原能力强和含有较多合金元素的 H14CrMoVA 焊丝。

#### ③ 管状药芯焊丝 $CO_2$ 气保焊:

管状药芯焊丝  $CO_2$  气保焊是采用含有药芯的管状空心焊丝、并采用  $CO_2$  气体保护的气—



渣联合保护焊接方法  $\text{CO}_2$ 。

表 3-10 三种气体保护焊比较

指 标	纯 $\text{CO}_2$	混 合 气	纯 氩 气
焊缝成形、熔宽、熔深、熔池大小	凸起、较窄、深、很小	较平、较宽、中等、较大	更平、更宽、浅、最大
飞溅、采用脉冲电流可能性	最大、不可能	较小、满意	小、很好
对流动空气的敏感性	敏感	很敏感	很敏感
焊接结构钢的适应性	好	很好	不大合适
焊接不锈钢的适应性	有限	好	很好
气体成本	低	较高	最高

图 3-29 示出了管状药芯焊丝  $\text{CO}_2$  焊的焊缝成形过程。它有以下一些优点：

A. 由于药芯成分改变了纯  $\text{CO}_2$  电弧气氛的物理化学性质,因而飞溅减少,且飞溅颗粒细,容易清除。此外,熔池表面有熔渣覆盖,所以焊缝成形类似手弧焊,比用纯  $\text{CO}_2$  焊时美观。

B. 与焊条手弧焊相比,由于  $\text{CO}_2$  电弧的热效率高,焊接电流密度比手弧焊大(可达  $100 \text{ A/mm}^2$ ),所以焊丝熔化快,生产率可为手弧焊的 3~5 倍。又由于熔深大,焊接坡口可比手弧焊小,钝边高度则可以增大。角焊缝焊接时药芯焊线  $\text{CO}_2$  焊的熔深可比手弧焊大 50% 左右,这既节省了填充金属的使用量,又可提高焊接速度。

C. 焊接不同成分钢材的适应性强,只要调整药芯的成分和比例,就可提供所要求的焊缝金属化学成分,而不像冶炼实心焊丝那样复杂。在堆焊研究试验和生产中尤其方便。

D. 由于焊接熔池受到  $\text{CO}_2$  气体和熔渣两方面的保护,抗气孔能力比实心焊丝  $\text{CO}_2$  焊强。

药芯焊丝  $\text{CO}_2$  焊也有不足之处,除送丝比实心焊线困难外,药芯焊丝外表容易锈蚀,粉剂容易吸潮。使用前药芯焊丝必须在  $250 \sim 300^\circ\text{C}$  温度下进行烘烤。否则,粉剂中吸收的水分将会在焊缝中引起气孔。

国外一些锅炉制造厂广泛采用药芯焊丝  $\text{CO}_2$  气体保护焊焊接锅炉锅筒的下降管接缝和厚壁压力容器主焊缝。我国已进行了药芯焊丝生产线生产  $\phi 1.6 \sim 3.0 \text{ mm}$  的低碳钢和低合金钢药芯焊丝。上海锅炉厂也将药芯焊丝  $\text{CO}_2$  气体保护焊替代手工电弧堆焊用于 560 吨加氢裂化反应器筒体、封头、接管端面不锈钢耐蚀层的堆焊,提高了堆焊质量和生产率。

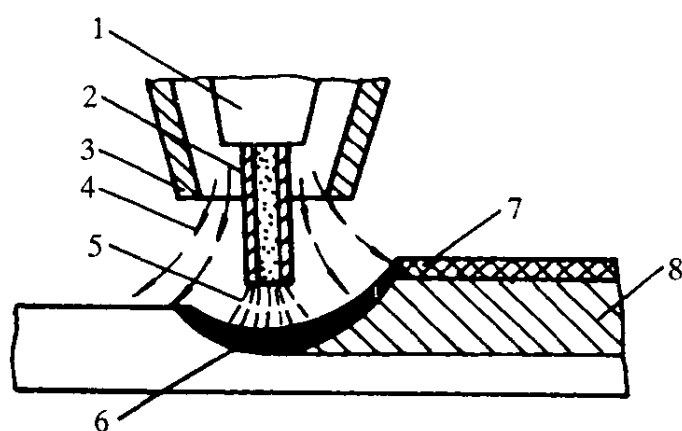


图 3-29 管状药芯焊线  $\text{CO}_2$  焊示意图  
1—导电嘴;2—管状药芯焊丝;3—喷嘴;  
4— $\text{CO}_2$  气体;5—电弧;6—熔池;  
7—熔渣;8—焊缝



### 3.4.4 电渣焊

由前苏联巴顿焊接研究所的技术人员发明的电渣焊方法,在我国工业部门以至国外都获得了广泛的应用。电渣焊是厚度 40mm 以上的低碳钢、低合金钢、高合金钢最经济的焊接方法,在小厚度的安装作业中采用这种焊接方法也是有效的。它可取代整铸、整锻制造的许多大型工件并将其改造成最经济的拼焊结构。

电渣焊是利用电流通过液态熔渣所产生的电阻热来熔化金属的一种熔化焊接方法。它能使大厚度焊件不开坡口一次焊成。电渣焊的过程,可参照图 3-30。

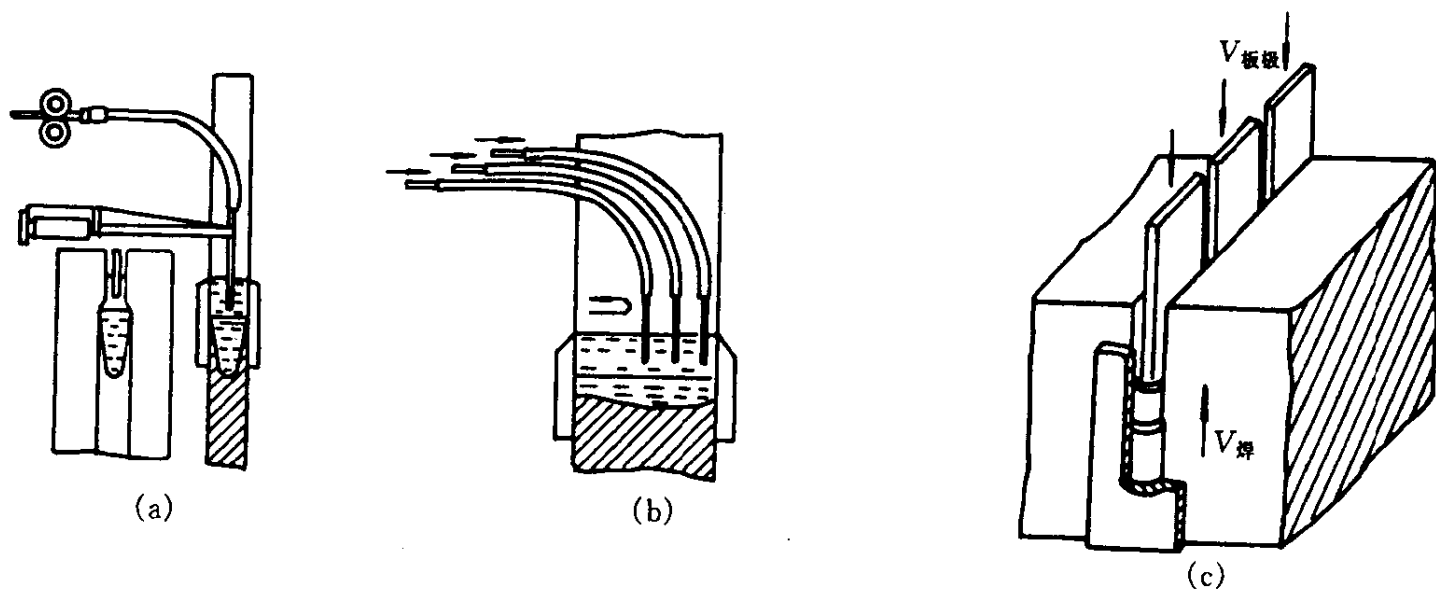


图 3-30 电渣焊过程示意图  
(a)单丝焊;(b)三丝摆动焊;(c)板极电渣焊

电渣焊时,先在焊缝端部的引弧板上引弧,同时添加适量的焊剂,电弧立即将焊剂熔化。当液态熔渣层到达一定高度后,电弧熄灭,转变为电渣过程。液态熔渣具有一定的导电性。当焊接电流由焊丝经过渣池至焊件时,从焊丝端部至金属熔池表面形成了温度高达 1 900℃ 的高温锥,使焊丝和接缝边缘母材熔化而形成液态金属熔池。随着焊丝不断地熔化,金属熔池逐渐上升,远离热源的高温金属在滑块的强制冷却下凝固而形成焊缝。

焊接直缝时,要用引入、引出板将焊缝起末端放在焊缝工作区以外。

当用电渣焊焊接大厚度铝合金工件时,要采取特殊措施。焊接厚度 30mm 以上的钛及钛合金工件时,要对渣池表面通氩保护才是合理的。

#### 1. 电渣焊的特点

##### (1) 热过程特点:

电渣焊接时,靠整个渣池同时加热金属,热能比较分散,热循环曲线平缓;焊接速度较低,工件在高温停留时间较长,焊接接头不易出现淬硬组织和冷裂纹,但易过热,使热影响区增宽,晶粒粗大,降低了焊接接头的塑性和韧性。为了改善接头的机械性能,焊后须经热处理,这对工件来说带来了一定的困难。

##### (2) 冶金过程特点:

电渣焊时,金属熔池表面始终覆盖着一层很厚的液态熔渣,将熔池与空气隔开,大大减弱了空气中氧、氮对熔滴和熔池的直接影响,液态金属与熔渣之间的反应,也由于热源温度较低,反应较为缓和。此外,在整个电渣焊过程中,熔剂的消耗量比埋弧焊少数十倍,熔渣向焊缝中

过渡的合金元素很少,焊缝金属的合金成分主要靠焊丝来过渡。

(3) 从理论上讲,可焊厚度不受限制(实际受电流功率的限制);对接处不开坡口,只需预留 15~35mm 的间隙;电能和焊剂消耗量也少,是一种经济的厚板焊接工艺。

(4) 熔池截面积大,冷却缓慢,熔池中的气体、杂质易于排出,不易产生气孔、夹杂物等缺陷。

(5) 为便于维持一定深度的渣池,电渣焊焊缝只能在垂直位置上施焊,且主要用于纵缝焊接。此外必须连续操作,中途不能停顿。

(6) 设备复杂、笨重,辅助工作量大,准备周期较长。

## 2. 电渣焊接方法

电渣焊的方法较多,有丝极电渣焊、板极电渣焊、熔嘴电渣焊、管状熔嘴电渣焊、窄间隙电渣焊多种。动力设备制造中广泛采用的是丝极电渣焊。

丝极电渣焊的优点是:许用功率小,监控熔池方便。缺点是焊接大厚度、复杂截面的工件较困难,另外,起码要从焊缝的一侧有必需的自由通道。板极电渣焊的优点是:电极板从上方插入,成形装置不动,可获得致密可靠的接头。缺点是:消耗功率很大,校正电极板的方位困难。熔嘴电渣焊的优点是:通用性强,焊接的工件实际上不受尺寸、形状的限制,可在难以到达的部位进行焊接。缺点是:对熔池的监控很困难。

### (1) 丝极电渣焊(图 3-30(a),(b)):

丝极电渣焊根据工件厚度不同,可用一根或多根焊丝。为增加焊接厚度,除保证焊丝送进外,还作横向摆动,并在两端停顿一定时间以使工件边缘完全熔透。目前最多用到三根焊丝,焊丝直径 3mm,可焊厚度达 450mm。

### (2) 管状熔嘴电渣焊:

管状熔嘴电渣焊是以管状熔嘴为熔化电极,管内通以焊丝,管外涂以药皮。熔嘴不移动,但随不断送进的焊丝一道熔化作为焊缝的填充金属;管外药皮熔化后,既起熔渣作用,又向焊缝过渡一定的合金元素,从而起到调节焊缝金属成分和改善焊接接头机械性能的作用。在药皮中可加入细化晶粒元素,这样,对一般用途的厚壁焊件可省去焊后热处理工序。

### (3) 板极电渣焊:

板极电渣焊是采用金属板条作为电极。由于板极较宽,所以不需要像丝极电渣焊那样作横向摆动。此外,板极横断面积大,刚性大,故板极伸出长度可以很大,可省去导电嘴、电极校正机构、机头爬行机构,从而使板极电渣焊的设备大为简化。如图 3-30(c)所示。

## 3. 电渣焊存在的问题

电渣焊接能量大,加热和冷却速度低,高温停留时间长,所以电渣焊缝的一次结晶组织为粗大的柱状组织,焊接热影响区宽并严重过热,在焊接低碳钢时焊缝和近缝区产生粗大的魏氏组织,为了改善电渣焊焊接接头的综合性能,焊后一定要进行热处理,一般锅炉厂采用焊后正火和校圆。

既使进行了正火和热校圆,焊缝的综合性能依然不能令人满意,后来巴顿研究所又采用了跟踪正火和超声波振荡细化晶粒的办法,在结晶时将粗晶粒打碎、细化,但这些方法,很难改进热影响区的组织特性,因此,在锅炉行业中锅筒的制造有的工厂已不再用电渣焊接方法,东方锅炉厂对电渣焊接工艺研究较多,结果表明,电渣焊用于配 20 万 kW 发电机组的 95mm 的由 BHW35 制成的锅炉汽包纵缝焊,焊缝性能能够满足要求,而用于配 30 万 kW 发电机组的

145mm 的由 BHW35 制成的锅炉汽包纵焊缝,其焊接接头性能达不到要求,这是电渣焊接固有的缺点造成的。

### 3.4.5 摩擦焊

#### 1. 摩擦焊基本原理和特点

摩擦焊是将工件的接合面相互贴紧并相对运动,利用其产生的摩擦热实现焊接的一种方法。用下述方法都可实现摩擦焊接,一个工件旋转;两个工件同时施转并焊到第三个工件上;一个工件振动(如图 3-31)。

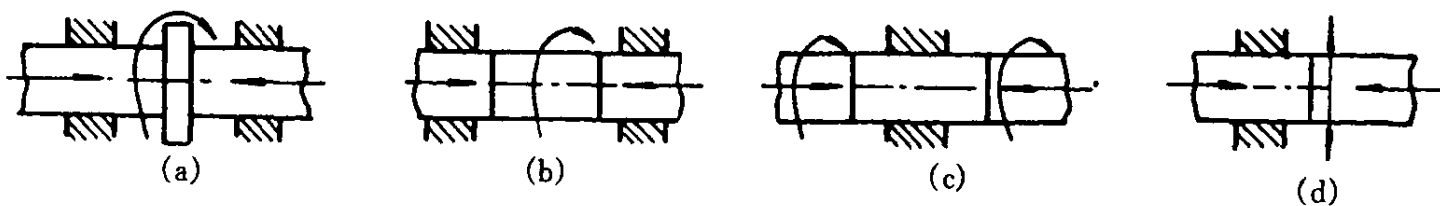


图 3-31 摩擦焊的各种过程

低碳钢、中碳钢、各种系列的高合金工具钢、铝、铜、钛合金、锆等金属无论是同种材料组合,还是异种材料组合以及热塑性材料,都可进行摩擦焊。对难以焊接的异种金属组合,如铝及铝合金与钢,铜及铜合金与钢,铜与铝等也可进行摩擦焊接。接头截面积  $20 \sim 8\,000\text{mm}^2$  的摩擦焊最为经济合理。接头直径  $8 \sim 80\text{mm}$  的棒材、 $20 \sim 120\text{mm}$  的管材的对接,采用摩擦焊最适宜。

摩擦焊现已成功地用于管子焊接自动线,用来焊接生产过热器、省煤器蛇形管。还用于锅炉阀门、工具、石油钻杆等的焊接,但经过几年的使用来看,摩擦焊用于焊接过热器蛇形管会出现焊接接头持久强度偏低的情况,这主要是因为摩擦焊接温度为  $950 \sim 1\,040^\circ\text{C}$ ,基本上还是冷压的范围。因此摩擦焊目前在锅炉厂主要用于焊接低温的省煤器蛇形管。大大提高了生产效率。

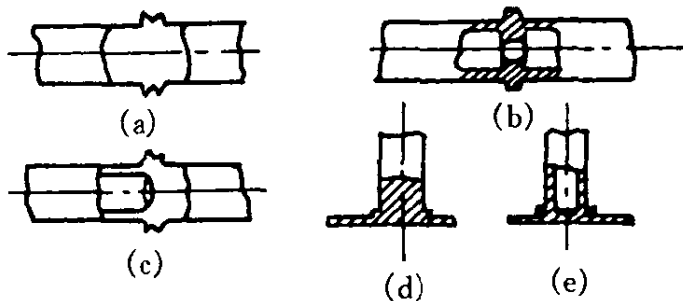


图 3-32 摩擦焊的接头形式

(a),(b),(c)对接接头;(d),(e)丁字接头

#### 2. 摩擦焊接工艺

摩擦焊的通用接头型式是等断面的对接,如图 3-32 所示,多用于杆—杆、管—管的对接,也可焊接外轮廓相等的管—杆对接。摩擦焊也可用于不相等断面的对接,如图 3-32 所示的板—杆、板、管或不同直径管子的对接。

摩擦焊的焊接工艺规范参数主要有工件旋转数(即摩擦速度)、摩擦压力、摩擦时间、焊接温度与顶锻压力等。对钢与钢焊接来说,摩擦压力一般取为  $150 \sim 120\text{MPa}$ ,顶锻压力取为  $100 \sim 200\text{MPa}$ ,摩擦压力加大,加热速度可以加快;顶锻压力增大,可提高接头强度。

由于摩擦焊的应用日益广泛,为了严格控制工艺规范参数,保证摩擦焊接头的焊接质量,已在蛇形管摩擦焊生产线当中,应用了光电温度控制法和焊接功率极值控制法,即根据接头温度光电效应和高温金属摩擦力矩变化峰值,来迅速控制适当的顶锻加压时间,从而确保管接头的焊接质量,简化管接头焊接的检验工作。

摩擦焊焊接规范典型示例如表 3-11。

表 3-11 摩擦焊焊接规范示例

产品名称及材料	接头尺寸 (mm)	旋转转数 (r/min)	摩擦压力 MPa	摩擦时间 (s)	顶锻压力 MPa
省煤器管 20	$\phi 32 \times 4$	1 430	62	0.8~1	108
过热器管 12Cr1MoV	$\phi 42 \times 5$	1 430	110	1~1.5	186
锅炉阀门 25 号钢阀体 + 1Cr13 密封面	$\phi 22 \times 2.5$	1 920	118	0.4	176
锅炉阀门 25 号钢阀体 + 25 号钢法兰	$\phi 48 \times 7$	1 430	60	2~3	118

### 3.4.6 等离子弧焊接

等离子体是完全电离了的气体,或称等离子态,是一种特殊的物质形态,现代物理学把它列为固体、液体、气体之后的物质第四态。全部由离子和电子所组成(就其整体来说是中性的)。等离子体具有极高的温度和极好的导热性,能量高度集中,所以可用于熔化一些难熔金属和非金属。

#### 1. 等离子弧焊接过程

等离子弧焊是利用特殊构造的等离子弧焊炬进行的,如图 3-33 所示。

焊接时,用等离子弧熔化工件造成熔池,必要时另加填充焊丝。为了对焊接部位进行保护,焊炬的最外圈有通保护气体的环形通道,一般使用氩气作为离子气和保护气体。所以等离子弧焊接实质上是一种压缩的钨极气体保护焊。

等离子弧焊接与氩弧焊比较,具有能量高度集中,弧柱温度高,穿透力强,稳定性好,焊接速度快等特点。如焊接厚度为 8~10mm 的不锈钢,可提高效率 3~5 倍,而且焊接质量好,热影响区小,变形小,机械性能高,不锈钢、耐热钢等的焊接,如很难焊的 12Cr1MoV 钢蛇形管,用等离子弧焊接,可以确保质量。

在焊接时,一般不加填充金属。但根据焊缝的要求亦可加填充金属。填充丝是从旁引入的,引入方法与钨极氩弧焊相似。

等离子弧焊接设备比较复杂,灵活性不如手工氩弧焊,要特别注意通风和加强劳动保护。

#### 2. 两类等离子弧的焊接

等离子弧焊接通常可分为微弧等离子焊和等离子小孔焊接两类。

微弧等离子焊时,焊接电流较小,通常在 10A 以下,有时甚至仅有零点几安培。适于焊接 1.5~2.5mm 以下的薄板。

等离子小孔焊接是利用等离子弧的小孔效应来进行。其过程是,等离子弧将金属板材对

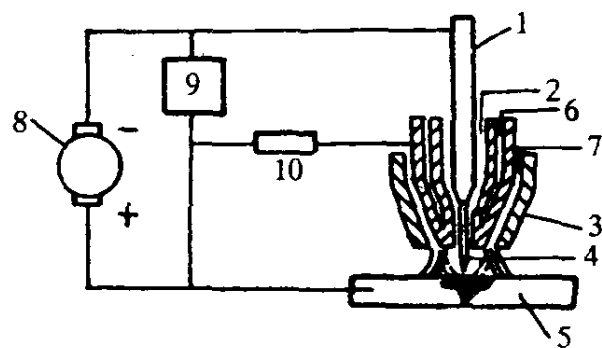


图 3-33 等离子弧焊接示意图

- 1—钨极;2—氮或氩;3—喷嘴;  
4—等离子弧;5—工件;6—冷却水;  
7—保护气;8—直流电焊机;  
9—高频振荡器;10—电阻

缝处熔化并穿透成孔,由于吹力调节适当,熔化的金属并不被吹走,只是被排列到小孔周围,靠自身的表面张力支持不下流,当焊炬前移后,靠表面张力支持的熔化金属就自动合拢并填满小孔的后部,冷却凝固形成致密焊缝。

小孔焊接的好处是:能保证焊缝完全均一的焊透,可以单面焊双面成型,这对小直径管的焊接尤为优越;在一定厚度范围内不必开坡口,当厚度较大必须开坡口时,也比其他焊接方法开得小。

### 3.4.7 窄间隙焊接

#### 1. 概述

窄间隙焊接是一种坡口间隙远小于焊件厚度的电弧焊接方法如图 3-34。它不是一种新的焊接过程,而是一种特殊的焊道熔敷技术。有人曾把其特征归纳为:①是利用了现有电弧焊接方法的一种特殊技术;②多数采用 I 形坡口,坡口间隙窄,坡口角度大小视焊接中的变形量而定;③多层焊接;④自下而上的各层焊道数目相同(一般为 1~3 道);⑤采用小或中等线能量进行焊接;⑥有全位置焊接的可能性。

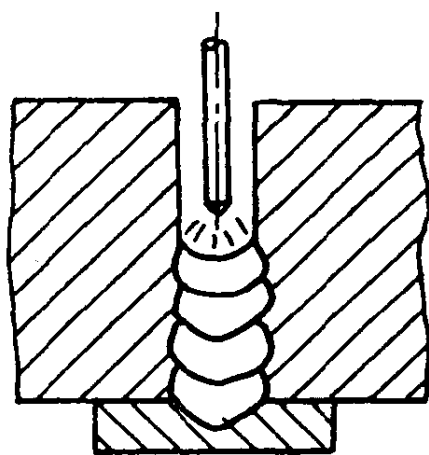


图 3-34 窄间隙焊接示意图

窄间隙焊接在本世纪 60 年代中期被提出后,在厚板焊接方面显示出明显的优越性,其主要优点为:

(1)由于坡口窄小,使焊缝截面积明显减小,从而大大提高了焊接速度。窄间隙坡口的截面比其它坡口小得多,而且焊件愈厚,其优越性愈明显。

(2)由于坡口窄小,除缩短焊接时间外,还可大大节约焊接材料(焊丝)和电能消耗,降低焊接生产成本。

(3)焊接热输入量小,热影响区狭小,焊接接头的冲击韧性好,焊后残余应力低,焊缝中氢含量少,发生焊接裂纹的可能性降低。对于低合金高强度钢和焊接性能较差的材料焊接,有可能降低焊前预热温度和简化焊后热处理工艺。

(4)由于焊缝体积小,所以焊接收缩量小;同时由于坡口角度很小,故焊接变形也很小。

窄间隙焊接的坡口型式,基本上可分为两类,如图 3-35 所示。图 3-35(a)为对接直口型坡口。这种坡口的优点是:坡口制备简单、费用低廉、焊接生产率高,特别是采用每层单道焊时更为明显。但也有难点:难于保证两侧壁良好地熔合;要保证根部焊道的质量就必须采用永久性或临时性垫板;由于焊接时的收缩,使坡口间隙逐渐减小,焊头不易伸入,这为上层焊道施焊带来困难。图 3-35(b)为对接 U 形坡口。这种坡口能克服上述一些缺点,它能控制根部焊道的焊透程度,能保证侧壁的熔合,当焊接收缩时能保持间隙的宽度。但也有些缺点,即坡口制备费用较高,对接装配质量要求严格。

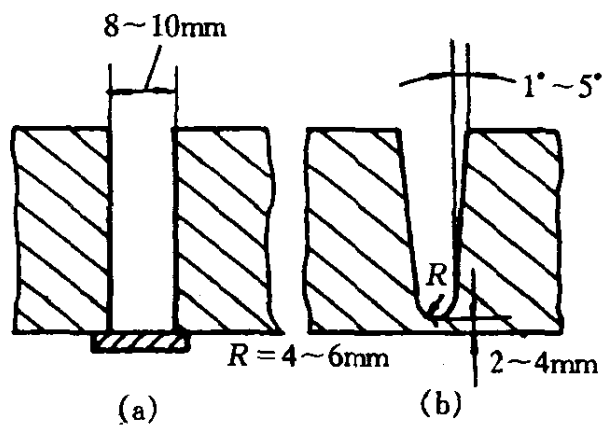


图 3-35 窄间隙焊接的坡口型式  
(a)对接直口型;(b)对接 U 型

按照所用焊接方法的不同,窄间隙焊接可分为:窄间隙熔化极气体保护焊(窄间隙 MIG 焊),窄间隙钨极气体保护焊(窄间隙 TIG 焊)、窄间隙埋弧焊和窄间隙电渣焊。目前,在工业

生产中用得较多的是前三类,锅炉制造厂采用窄间隙焊接锅筒的纵焊缝、环焊缝和集箱筒体的对接环焊缝。

窄间隙焊接适宜的焊件厚度范围大约为 25~300mm。

## 2. 窄间隙熔化极气体保护焊接

MIG 焊是最先用于窄间隙焊的焊接方法,根据 1980 年对日本制造厂家的调查,这种焊接方法占目前窄间隙焊的 78%。MIG 焊之所以在窄间隙焊接中得到广泛的应用,是由于其电弧易于观察,相对间隙较窄,焊缝质量高,生产率和经济效益高。但是对侧壁缺陷的敏感性、强烈的飞溅、电弧磁偏吹、设备成本高和复杂等缺点影响着 MIG 焊在窄间隙焊中的应用。特别是如何防止窄间隙焊时坡口侧壁的未熔合,亦即设法使狭窄的坡口深处的侧壁都能焊透是窄间隙 MIG 焊的关键,目前 MIG 焊焊接方法改进的共同特点是电极摇摆及采用脉冲电流,提高焊缝成形的可控性和减少飞溅。

### (1) 单丝或双丝焊接法:

这种方法往往采用直径 0.9~1.6mm 的细焊丝。单丝焊时,单根焊丝居中,导电嘴伸入坡口间隙中,如图 3-36(a) 所示。双丝焊时,一根焊丝弯向左侧,另一根焊丝弯向右侧,如图 3-36(b) 所示。此时,每层双道焊。由于两焊丝分别弯向一侧,故能保证侧壁的良好熔合。

(2) 焊丝预弯:第二类的这种 MIG 焊改进方法是焊丝受控制预弯法的延伸,即焊丝进入导管前,要通过不同形式的弯曲机。所有这些装置的主要目的都是为了产生某种有规律的电弧摆动,以改善坡口边的熔化熔透性。

双绞丝:在这种方法中,由一股缠绕着的焊丝产生电弧转动,通常由 2 根 2 毫米的焊丝形成电弧。操作时,导管沿窄间隙坡口的中心移动(平焊位置),除此以外,还有波形焊丝和折曲焊丝焊接法,如图 3-37 所示为折曲焊丝焊接法。

(3) 焊炬摆动和电极转动:可供选择的电弧摆动法有两种:一种是摇晃焊炬,一种是转动导管。在管道焊接中,报导过一些焊炬摆动的实例。已经使用的有两种摆动方式:一种是焊炬沿接头间隙从左至右作横向反复移动,一种是沿接头前后移动,同时焊接电流和电压发生改变。工人们已经使用过一种装置,这种装置采用了一个偏心孔焊丝导管,使电弧高速旋转。有少量报导(主要在日本),报导了使用窄间隙 MIG 焊的例子,其中包括压力容器接头和管接头与筒体的接头。斜边坡口窄间隙 MIG 焊技术也已广泛用于管道环缝焊接。

## 3. 窄间隙钨极惰性气体保护焊

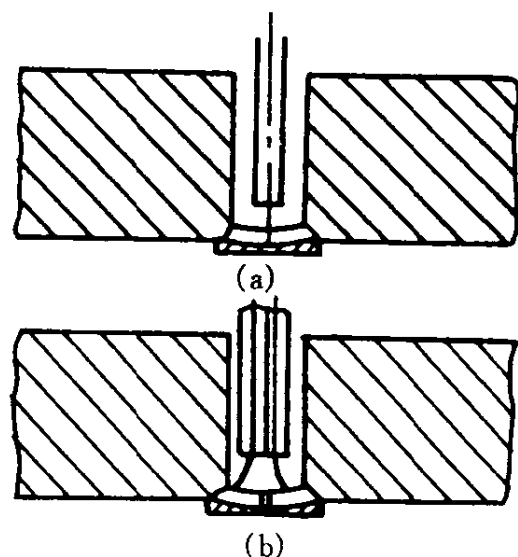


图 3-36 单丝或双丝窄间隙 MIG 焊  
(a)单丝焊;(b)双丝焊

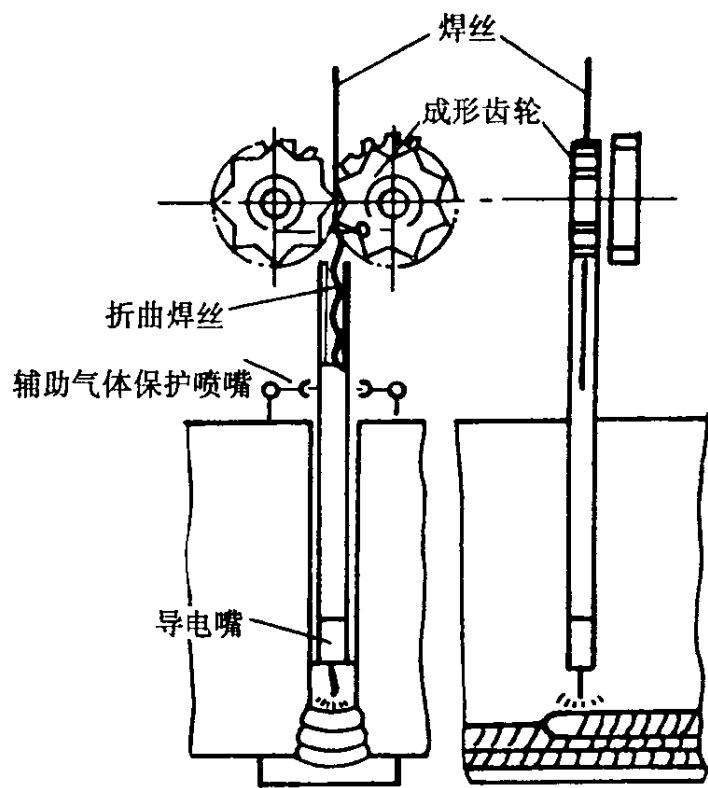


图 3-37 折曲焊丝焊接法

TIG 焊接时,焊接电流和填充焊丝的送进量可以分别调整,因此其焊接线能量和熔敷速度可自由选择,这是 MIG 焊所不具备的特点。另外,TIG 焊的接头质量好,焊道成形美观,便于实现全位置焊接。其主要缺点是熔敷速度小,焊接效率低。为了克服这一缺点,开发了热丝 TIG 焊的方法,亦即在焊接过程中,预先对填充焊丝进行加热,但采用热丝 TIG 焊时,应防止通入焊丝的电流引起磁偏吹现象。

采用窄间隙 TIG 焊接时,如果焊件厚度小于 30mm,则可利用普通 TIG 焊炬,仅将钨极加长即可焊接。如焊件厚度大于 30mm,则需采用特制的适用于窄间隙焊接的焊炬。

窄间隙 TIG 焊接的坡口一般采用 U 型,根部半径 3mm,钝边高度 3.5mm。这样的坡口型式可以很好地控制根部的焊透和成型。

#### 4. 窄间隙埋弧自动焊

窄间隙埋弧焊是否成功取决于两个主要因素:

良好的操作性能,主要与焊剂的选择和焊接参数有关,以确保坡口边熔合,焊缝的几何形状必须有利于自动除渣。

良好的焊接接头机械性能,它取决于焊剂、焊丝的选用,并与焊接工艺即焊接热输入以及与焊缝宏观组织有关。

使用每层两道焊技术,既能很好地除渣,又能获得满意的焊缝性能。

(1) 窄间隙埋弧焊的主要优点:

- ① 坡口边可控熔化,减少稀释作用,热影响区窄长。
- ② 每层具有相同焊道数的均匀熔敷。
- ③ 全自动化焊接操作,缺陷产生率低。
- ④ 高操作率,降低了部件生产成本。
- ⑤ 操作工少,生产率成四倍增长,降低劳务成本。
- ⑥ 节省材料,焊材消耗较少,电能消耗少。

(2) 窄间隙埋弧自动焊接方法:

有两种重要的工艺方法已被工业上采用:

第一种是每层单道焊接技术,效率高,但除渣困难,而且在焊接中接头间隙收缩逐渐变窄;第二种是每层两至三道焊道,质量可靠,但坡口较宽,使效率下降。

① 具有铰接导丝头的窄间隙埋弧焊:

在窄间隙埋弧焊时,每层采用双道焊可以克服单道焊的坡口侧壁咬边和夹渣现象。为此,采用了特制的焊头,如图 3-38 所示。

在焊头的端部有一个铰接的导丝头,

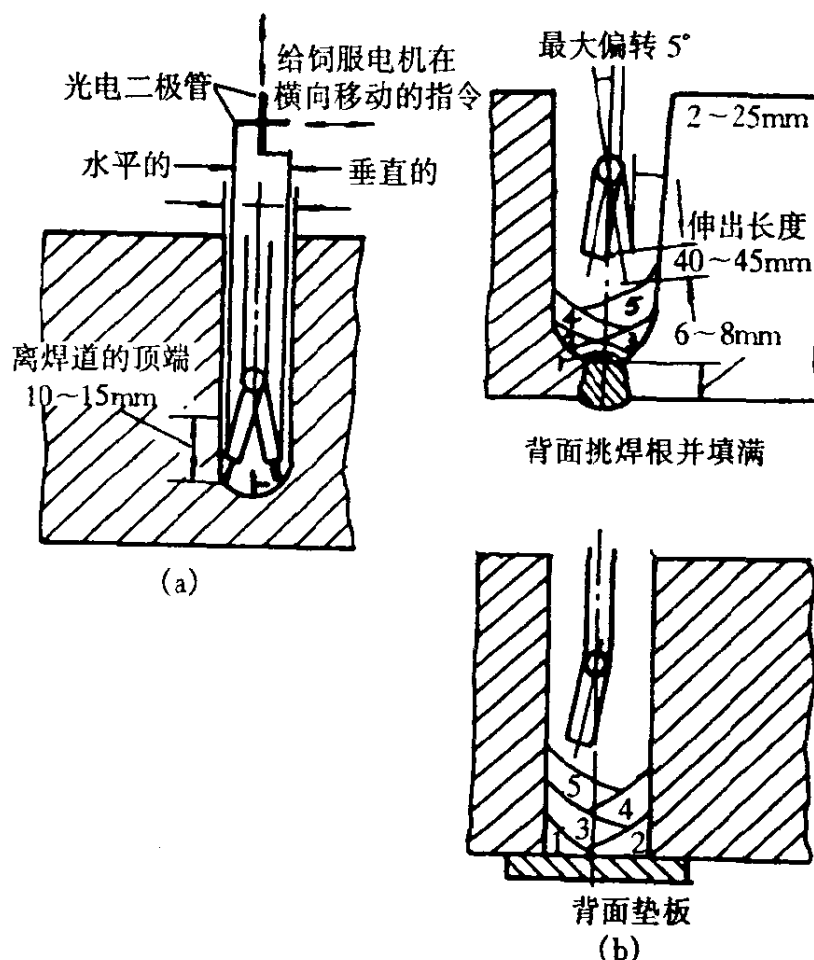


图 3-38 具有铰接导丝头的窄间隙埋弧焊

(a) 焊缝跟踪机械;(b) 铰接导丝头



使焊丝作 $5^\circ$ 弯曲,因此,可以控制左右两个焊道与坡口侧壁均有良好的熔合。焊头精确定位(高度定位和一侧跟踪)的方法是将两个接触式传感器的探头一个放在焊道上,另一个贴靠在侧壁上(见图3-38(b))。焊接时,当第一道焊道焊完后,铰接的导丝头在几秒内转换指向另一侧焊第二道焊道。

采用这种方法已经成功地焊接了厚300mm的压力容器环缝,其坡口根部间隙为18mm,顶部为22mm,焊接时,随着压力容器环缝的转动,悬挂式焊嘴在几秒钟内朝另一壁边来回偏转。

### ②双丝窄间隙焊:

对于厚板,为了提高焊接生产率,可采用双丝窄间隙埋弧焊,这种焊接方法在原理上和普通双丝埋弧焊相同,只是使用细直径焊丝和小的焊嘴,以便能在窄间隙坡口中焊接。可使用直径1.2mm和1.6mm两种焊丝,由于使用细丝,熔敷效率高,且可用低的焊接线能量(30 000J/cm以下),所以容易保证焊接接头具有良好的断裂韧性。

前丝与后丝采用不同的电源:前丝用直流电流,较大的焊接电流,以获得必需的熔深;后丝用交流电源,焊接电流较小,电弧电压较高,以获得足够的熔宽。

这种方法可用以焊接碳钢、低合金钢、不锈钢和因科镍合金。

## 3.4.8 钎焊

钎焊是把熔点低于基本金属的钎料加热熔化,使加热的固态焊件连接起来的焊接方法。钎焊的实质是靠液态钎料的浸润和毛细作用,进入焊件的装配缝隙,钎料和焊件金属的原子之间发生溶解和扩散,使焊件连接起来。

钎焊构件的接头形式都采用板料搭接和套件镶接,图3-39示出了几种常见的型式。这些接头都有较大的钎接面,以弥补钎料强度的不足,保证接头有一定的承载能力。接头之间应有良好的配合和适当的间隙。接头间隙视焊件材料和钎料的不同而不同,一般在0.03~0.25mm之间。间隙太小,会影响钎料的渗入与润湿,达不到全部焊合。间隙太大,不但浪费钎料,而且会降低钎焊接头强度。

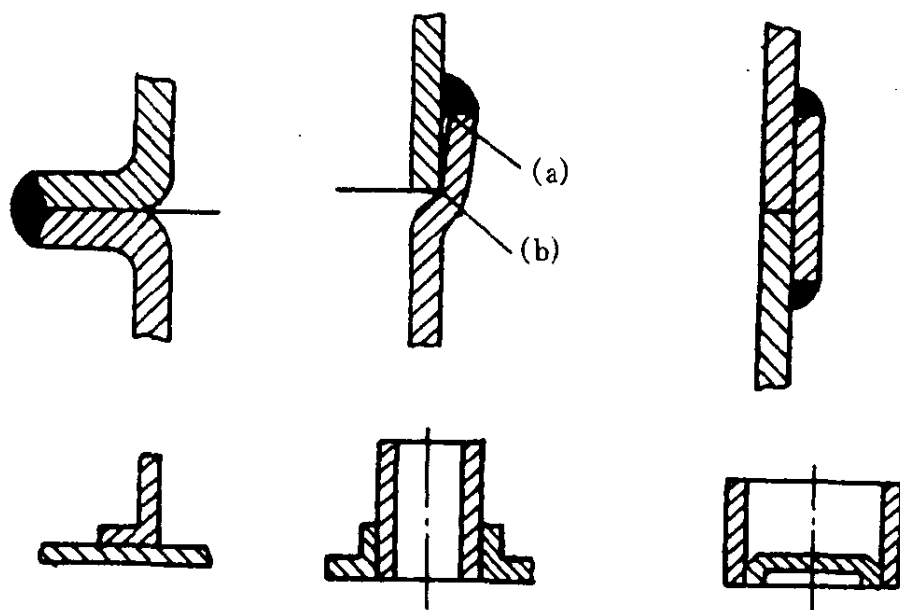


图3-39 钎焊的接头型式

钎焊过程如图3-40所示。图(a)是钎焊前的情况。接头处需进行清理和装配,一般采用机械刮擦或酸洗,再用热水和冷水清洗,最后烘干。



钎料放于接头间隙处。为了清除接头表面的氧化膜,保护钎料和焊件不受氧化,提高钎料的润湿性,钎焊时要添加钎剂。图(b)是钎焊后的情况,钎料和焊件被加热到钎焊温度,钎料熔化并进入接头的装配间隙中,冷凝后形成焊缝。为防止钎剂腐蚀焊件,钎焊后应清除钎剂残渣,一般可用热水和冷水清洗。

按照钎料熔点不同,可把钎焊分为软钎焊和硬钎焊两大类:

### 1. 软钎焊

钎料熔点在  $450^{\circ}\text{C}$  以下,接头强度较低( $\leq 80\text{MPa}$ )。常用的钎料有锡铅钎料、铅基钎料、锡基钎料、锌基钎料、镉基钎料等,称为软钎料。焊接时一般添加松香或氯化锌水溶液等作钎剂。软钎焊只用于受力较小和工作温度较低的焊件。

### 2. 硬钎焊

钎料熔点在  $450^{\circ}\text{C}$  以上,接头强度较高( $>200\text{MPa}$ ,可达  $500\text{MPa}$ )。常用的钎料有铜基、镍基、银基、铝基和镍基钎料等,称为硬钎料。焊接时一般添加硼砂、硼酸、氯化物和氟化物配制的钎剂。硬钎焊通常用于焊接受力较大和工作温度较高的焊件。

按照加热方法的不同,又可把钎焊分为烙铁钎焊、火焰钎焊、电气钎焊、炉中钎焊、浸沾钎焊等。

同一般熔料相比,钎焊具有下述优点:

加热温度低,应力和变形很小,焊件组织和性能变化小,易于保证焊件的尺寸精度;

可以焊接异种材料,如不同金属、金属与非金属等;

能焊复杂结构,且可同时焊接很多甚至上千条接缝,生产率很高。

但是,钎焊也存在一些缺点:接头强度较低;耐热能力差;采用搭接或套接接头增加了结构重量。

由于钎焊具有独特的优点,其应用是很广泛的。钎焊可以连接碳钢、不锈钢、高温合金、高速钢、硬质合金、难熔合金和铝、铜、钛等有色金属及其合金,特别适宜焊接精密、复杂、多接缝和异种材料的焊件,例如电子管、电真空器件、硬质合金、刀具、散热器、飞机蜂窝夹层蒙皮结构等,在机械、电器、仪表、原子能、航空、全封闭制冷压缩机等工业部门应用很广。随着钎焊技术的不断进步,其应用范围还在与日俱增。

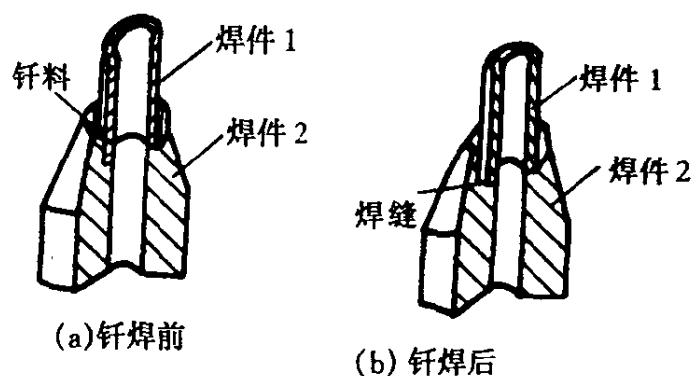


图 3-40 钎焊过程  
(a)钎焊前;(b)钎焊后

## 3.5 金属材料的切割

工业生产中采用的切割方法大致可分为四类:机械切割、火焰切割、等离子弧切割和碳弧气刨。

机械切割是利用各种机械设备对被割材料施加剪切力或切削力,使之分离。常用的各种剪床(如龙门式剪床、圆盘式剪床等)、锯床(如齿条锯床、圆盘锯床等)以及一些专用切管机均属于这一类。机械切割在工业生产中得到广泛采用,但受到切割机械结构及传动功率的限制,

通常只能用以切割厚度相对较薄的板材以及尺寸相对较小的型材与管材。

火焰切割也称为气割,是依靠金属材料的被割部位在火焰的高温下发生燃烧,生成熔化状态的金属氧化物,再利用高速气流氧化物吹除,形成切口。火焰切割具有成本低、切割速度快、设备简单等优点,在工业生产中也得到广泛的应用。

等离子弧切割是依靠特制的割炬,产生具有极高温度的高速等离子焰流,使金属材料局部熔化而形成割缝。在工业生产中,等离子弧切割常用于不锈钢和有色金属材料。

碳弧气刨是一种空气切割过程,锅炉制造中,广泛采用碳弧气刨代替风铲进行挑焊根和开坡口的工作,也是对金属进行“刨削”的一种工艺方法。

## 第4章 焊接工艺规程设计

### 4.1 焊缝符号及标注

要看懂焊接机械设备图纸,就必须了解焊缝的符号及其标注方法。焊缝代号是工程语言的一种,它可以统一焊接结构图纸上的符号。我国的焊缝符号是由国家标准 GB324-88 规定的。焊缝符号由以下内容组成:

#### 1. 常用焊接方法的代号

可用简明的字母符号来代表各种常用的焊接方法,具体内容见表 4-1。

表 4-1 常用焊接方法的代号

焊接方法	字母符号	焊接方法	字母符号
手工电弧焊	S	冷压焊	L
氩弧焊	A	埋弧自动焊	Z
气焊	Q	埋弧半自动焊	B
电渣焊	D	二氧化碳保护焊	C

#### 2. 基本符号

基本符号是表示焊缝横截面形状的符号,它采用近似于焊缝横截面形状的符号表示,见表 4-2。

#### 3. 辅助符号及补充符号

辅助符号是表示焊缝表面形状特征的符号,不需要确切地说明焊缝的表面形状时,可不用。补充符号是为了补充说明焊缝的某些特征面用的符号,它们的表示方法见表 4-3。

#### 4. 焊缝的尺寸符号

在设计或生产需注明焊缝尺寸时,其焊缝的尺寸符号表示,见表 4-4。

表 4-2 焊缝形式的基本符号


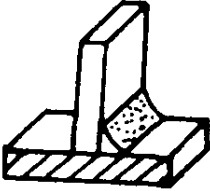



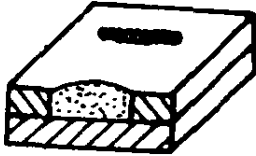







序号	焊缝名称	焊缝形式	基本符号	序号	焊缝名称	焊缝形式	基本符号
1	I形焊缝			9	角焊缝		△
2	V形焊缝		V				
3	钝边V形焊缝		Y				
4	单边V形焊缝		V	10	塞焊缝		┌
5	钝边单边V形焊缝		Y				
6	U形焊缝		U				
7	单边U形焊缝		U	11	点焊缝		○
8	喇叭形焊缝		Y				
				12	缝焊缝		⊙
				13	封底焊缝		D

表 4-3 焊缝的辅助符号和补充符号










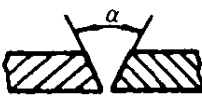
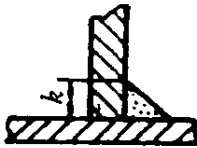

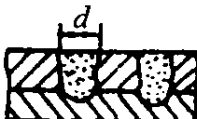



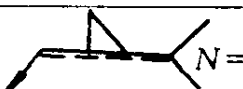


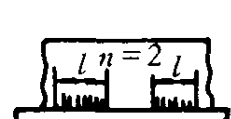


序号	名称	型式	辅助符号	说明
1	平面符号		—	表示焊缝表面齐平
2	凹陷符号		∪	表示焊缝表面凹陷
3	凸起符号		∩	表示焊缝表面凸起
序号	名称	型式	补充符号	说明
1	带垫板符号		□	表示焊缝底部有垫板
2	三面焊缝符号		┌	要求三面焊缝符号的开口方向与三面焊缝的实际方向画得基本一致
3	周围焊缝符号		○	表示环绕工件周围焊接
4	现场符号		┌	表示在现场或工地焊接

表 4-4 焊缝的尺寸符号

符号	名称	示意图	符号	名称	示意图
$\delta$	板材厚度		$e$	焊缝间距	
$\alpha$	坡口角度		K	焊角尺寸	
$b$	对接间隙		$d$	熔核直径	
$p$	钝边高度		S	焊缝有效厚度	
$c$	焊缝宽度		N	相同焊缝数量符号	

续表 4-4

符号	名称	示意图	符号	名称	示意图
R	根部半径		H	坡口深度	
l	焊缝长度		h	焊缝余高	
n	焊缝段数		$\beta$	坡口面角度	

5. 指引线

指引线是用以表示指引焊缝位置的符号,如图 4-1 所示。它是由箭头线和两条基准线(一条实线和一条虚线)两部分组成,基准线应与主标题栏平行,基准线的虚线可以画在基准实线的下侧或上侧,箭头线应指到有关焊缝处,必要时可在实线末端加一尾部,作为标注焊接工艺方法等其它内容。

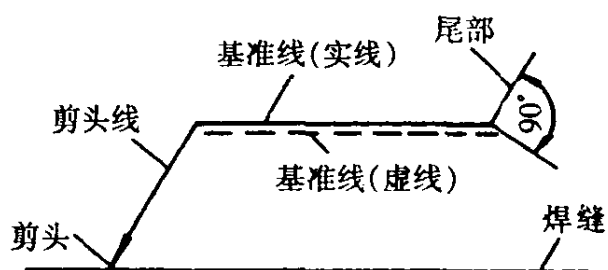


图 4-1 焊缝符号的指引线


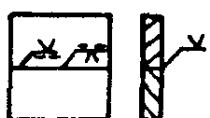


6. 常用焊缝的尺寸标注方法

焊缝尺寸符号及数据的标注原则是:①焊缝横截面上的尺寸标在基本符号的左侧;②焊缝长度方向的尺寸标在基本符号的右侧;③坡口角度、坡口面角度、根部间隙等尺寸标在基本符号的上侧或下侧;④相同焊缝数量符号标在尾部;⑤当需要标注的尺寸数据较多而不易分辨时,可在数据前面增加相应的尺寸符号。



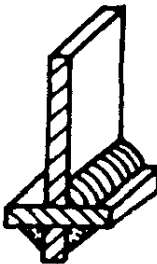
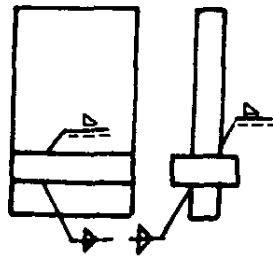

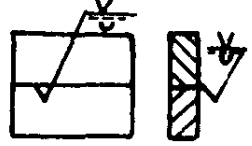
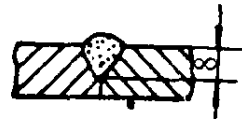
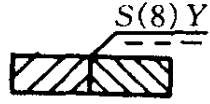

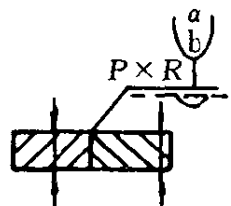
为了能在图样上确切地表示焊缝的位置,特将基本符号相对基准线的位置作以下规定:①如焊缝在接头的箭头侧,则将基本符号标在基准线的实线侧;②如焊缝在接头的非箭头侧,则将基本符号标在基准线的虚线侧;③在标对称焊缝及双面焊缝时,可不加虚线。

常见焊缝的尺寸标注方法举例如表 4-5 所示。

表 4-5 常用焊缝的尺寸标注方法

焊缝型式	标注方法	注
		正面焊缝,基本符号在基准实线上面或下面
		背面焊缝,基本符号在基准虚线的下面或上面

续表 4-5

焊缝型式	标注方法	注
		双面焊缝,在引出线上下都标注基本符号
		两个以上零件焊后形成的焊缝,不能按照双面焊缝来标注,必须分别标注各焊缝
		单面单边坡口的焊缝,引出线的箭头必须指向带有坡口的焊件上
		在对接时,只要求焊透一定深度,必须在基本符号的左侧注明焊缝有效厚度符号 S 及具体厚度数字。否则即为全熔透焊接
		要求标注焊缝具体尺寸时,在焊缝尺寸符号的相应位置标注具体数字

标注位置具体规定如下:

- ① 在焊缝符号左边标注:钝边高度  $P$ ,坡口高度  $H$ ,焊角高度  $K$ ,焊缝增高量  $h$ ,熔透深度  $s$ ,坡口圆弧半径  $R$ ,焊缝宽度  $c$ ,焊点直径  $d$ 。
- ② 在焊缝符号右边标注:焊缝长度  $l$ ,焊缝间虎  $e$ ,相同焊缝数量  $n$ 。
- ③ 在焊缝符号上边标注:坡口角度  $\alpha$ ,对接间隙  $b$ 。

图 4-2 示出了焊缝尺寸符号及数据的标注原则。

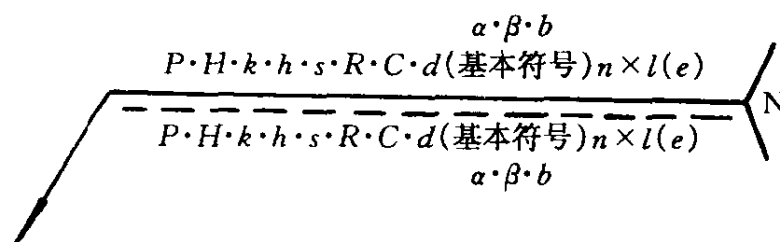


图 4-2 焊缝尺寸符号及数据的标注原则

## 4.2 焊接接头及坡口的型式

通常焊接接头的基本型式有对接接头、搭接接头、T形接头和角接头四种,如图4-3所示。在型式选择时,主要根据焊件的结构型式、钢材厚度和对强度的要求以及施工条件等情况而定。因此,要选择好接头型式,就应熟悉各种接头的优缺点。

### 1. 对接接头

对接接头是各种焊接结构中采用最多、也是最完善的一种接头型式,受力好、强度大和节省金属是它的特点。其应力分布见图4-4。在焊接生产中,通常使焊缝略高于母材板面,这加厚层造成了构件表面的不平滑,在焊缝与平材的过渡处引起应力集中。应力的主要与加厚高和焊缝向母材过渡的半径有关,焊缝正面与母材的过渡处,应力集中系数为1.6,在焊缝背面与母材的过渡处,应力集中系数为1.5。因此大型和要求较高的锅筒、压力容器上的对接焊缝一般要求打磨平整或喷丸后出厂。

按照焊件厚度及坡口准备的不同,对接接头可分为不开坡口、单边V形、V形坡口、U形坡口、单边U形、K形坡口、X形坡口、U形V形混合坡口和双U形坡口等(见图4-5)。

一般情况下,手工电弧焊焊接6mm以下焊件和自动焊焊接14mm以下焊件时,可以不开坡口。钢板超过上述厚度时,电弧不能熔透钢板,应考虑开坡口,开坡口可使热源伸入根部,保证焊透,且可降低热规范,减小热影响区和减少焊件的变形。钝边和间隙的尺寸若能很好配合,不仅可保证焊透,而且也可避免烧穿、未焊透等缺陷。坡口型式的选择,主要根据被焊工件的厚度、焊后应力变形的大小、坡口加工的难易程度、焊条的消耗量以及焊接工艺等各方面的因素来考虑。

V形坡口加工方便,但同样厚度的焊件,焊条消耗量比X形坡口大得多,另外由于焊缝不对称,焊后引起较大的角变形。X形坡口由于焊缝对称,从两面施焊产生均匀的收缩,所以角变形很小,此外焊条消耗量也较少。U形坡口焊条消耗量比V形少,但同样由于焊缝不对称将产生角变形。双U形坡口焊条消耗量最小,变形也较均匀。与X形及V形比较,U形及双U形坡口加工较复杂,一般只在较重要的及板厚较大的构件中采用。

在不同厚度钢板对接时,由于接头处断面有突然变化,会造成应力集中,如焊缝两边钢板中心线不一致,受力时将产生附加弯矩,这些都将影响接头强度。因此,必须对边缘偏差加以

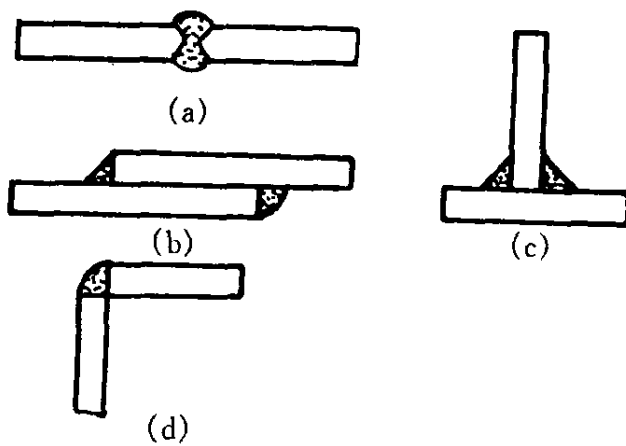


图4-3 焊接接头的基本型式  
(a)对接接头;(b)搭接接头;  
(c)T形接头;(d)角接头

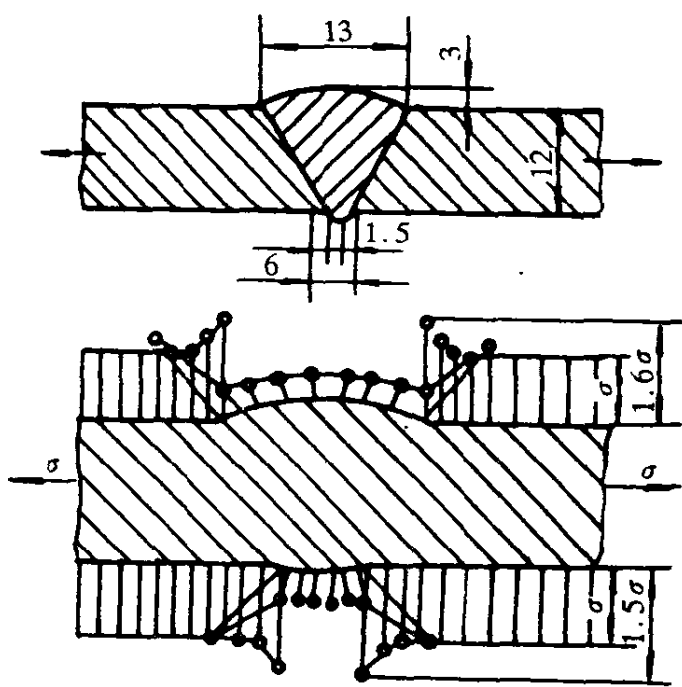


图4-4 对接接头的应力分布



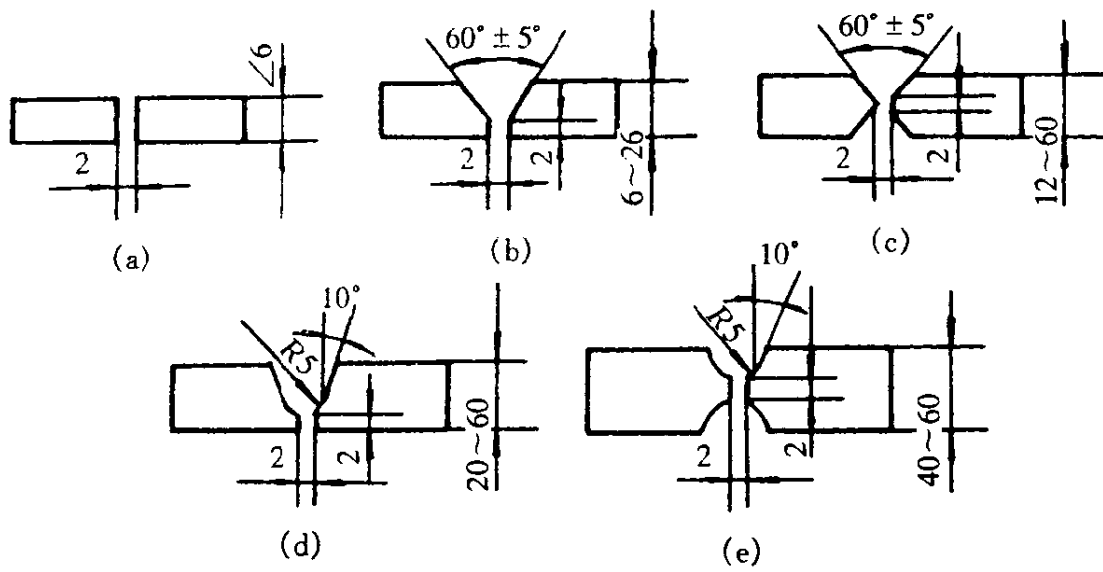


图 4-5 对接接头

(a)不开坡口;(b)V形坡口;(c)X形坡口;(d)单 U形坡口;(e)双 U形坡口

控制,应在较厚的板上作出双面或单面(如图 4-6)削薄,其削薄长度  $L \geq 4\delta$ 。

2.T形(十字)接头

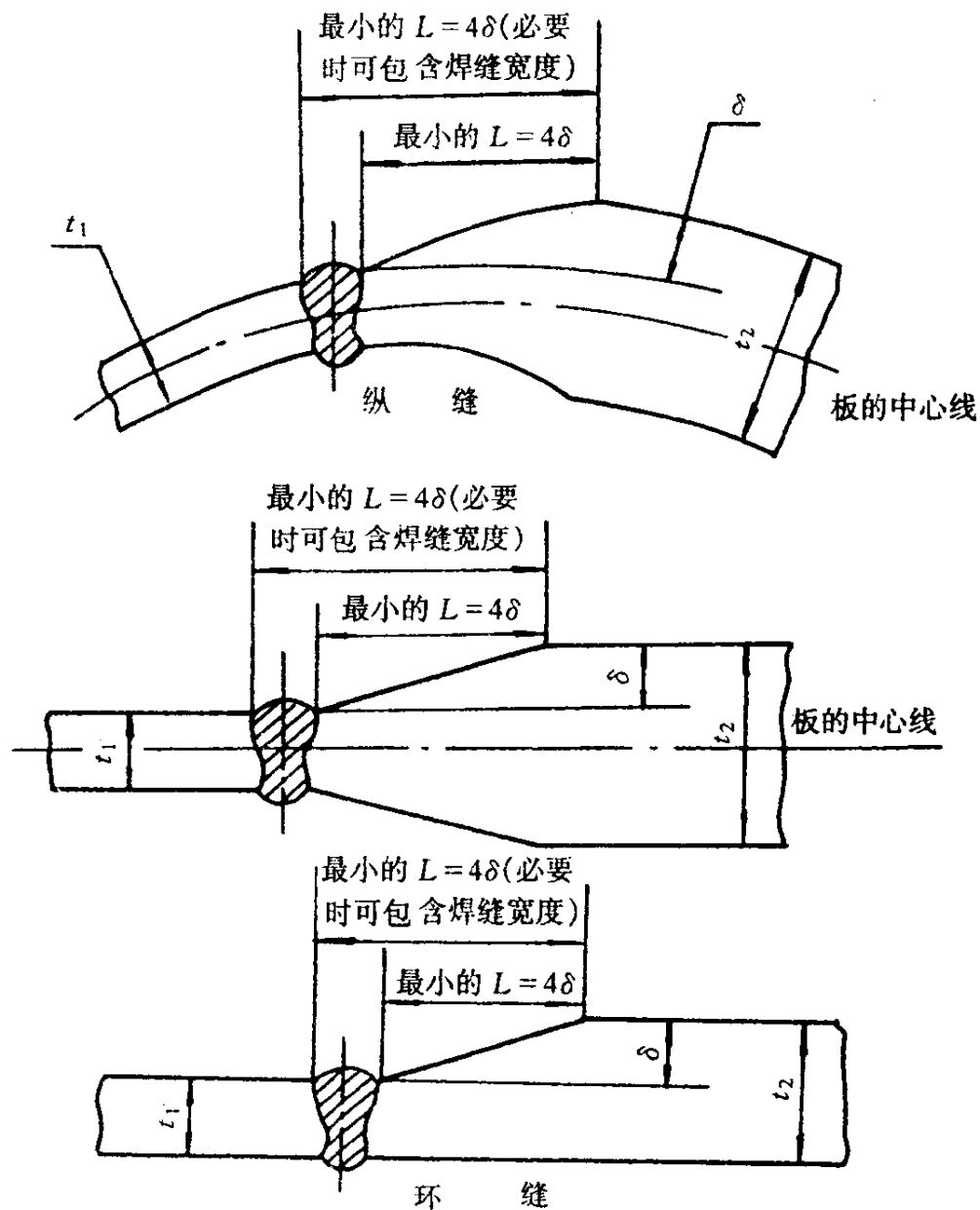


图 4-6 不同板厚的对接

$\delta$ —名义边缘偏差; $t_1$ —薄板的厚度; $t_2$ —厚板的厚度; $L$ —削薄的长度

T形(十字)接头是将相互垂直的被连接件用角焊缝连接起来的接头,能承受各种方向的力和力矩。T形接头是各种箱型结构中最常见的接头型式,在锅炉压力容器制造中,插入式管子与筒体的连接、人孔加强圈与筒体的连接等也都属于这一类。

由于T形接头(十字接头)焊缝向母材过渡较急剧,接头在外力作用下力线扭曲很大,造成应力分布极不均匀、比较复杂,在角焊缝根部和趾部都有很大的应力集中,如图4-7所示。图4-7(a)是未开坡口T形接头中正面焊缝的应力分布状况,由于整个厚度没有焊透,所以焊缝根部应力集中很大,应力集中系数值随角焊缝的形状而变。图4-7(b)是开坡口并焊透的T形接头,这种接头的应力集中大大降低。由此可见,保证焊透是降低T形接头应力集中的重要措施之一。

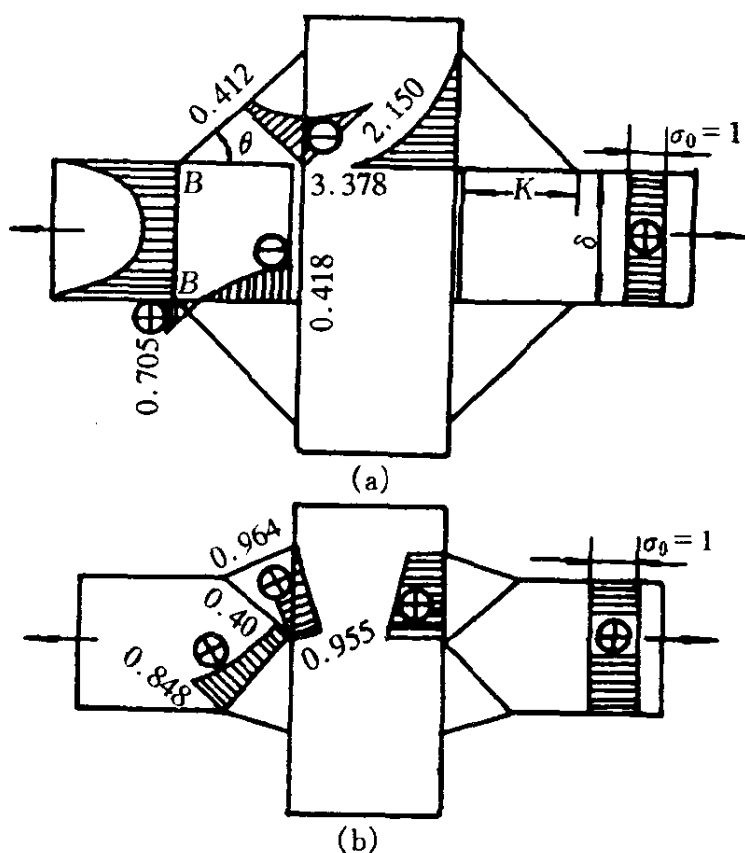


图4-7 T形(十字)接头的应力分布

T形接头的型式可分不开坡口、单边V形坡口、K形坡口和双U形坡口等(见图4-8)。

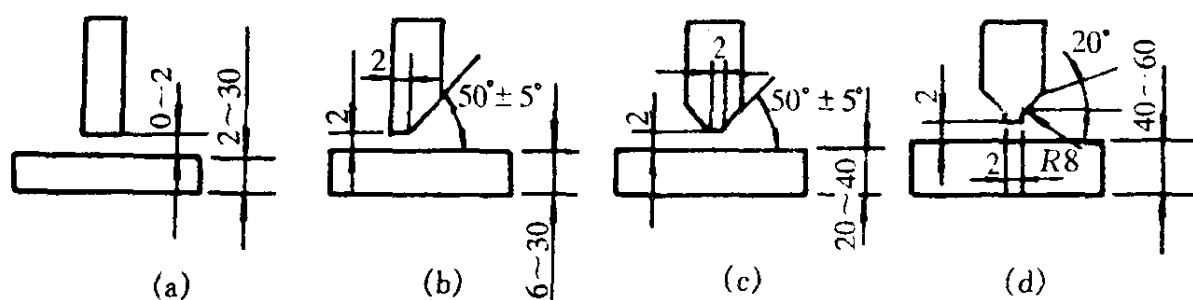


图4-8 T形接头

(a)不开坡口;(b)单边V形坡口;(c)K形坡口;(d)双U形坡口

对不开坡口的T形接头,应尽量避免采用单面角焊缝,因为这种接头的根部有很深的缺口,其承受反方向弯曲的能力很低(图4-9)。对较厚的板,可采用K形坡口,根据受力情况决定是否需焊透。

### 3. 角接头

两钢板成一定角度,在钢板边缘焊接的接头称角接接头。角接头多用于箱形构件上,骑座式管接头和筒体的联接,小型锅炉火筒和封头联接也属于这种型式。

与T形接头一样,单面焊的角接接头承受反向弯矩的能力极低,除了钢板很薄或不重要的结构外,一般都应开坡口两面焊,否则不能保证质量。

根据板厚及工件重要性,角接接头也有不开坡口、V形、单边V形及K形坡口等型式,如图4-10所示。

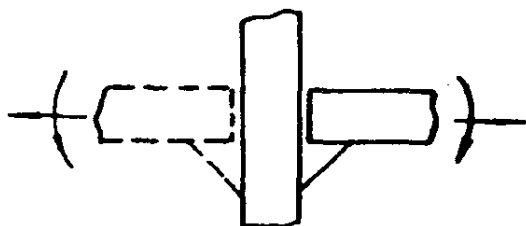


图4-9 单面角焊缝

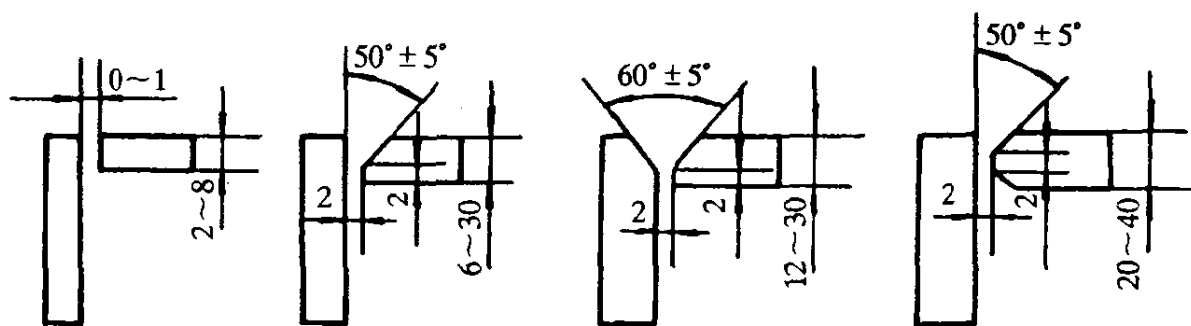


图 4-10 角接头

(a)不开坡口;(b)单边 V 形坡口;(c)V 形坡口;(d)K 形坡口

#### 4. 搭接接头

两块板料相叠,在其端部或侧面进行角焊的接头称为搭接接头。由于搭接接头中两钢板中心线不一致,受力时产生附加弯矩,会影响焊缝强度,因此,一般锅炉、压力容器的主要受压元件的焊缝都不用搭接型式,但在构架梁结构中仍有广泛应用,如图 4-11 所示。

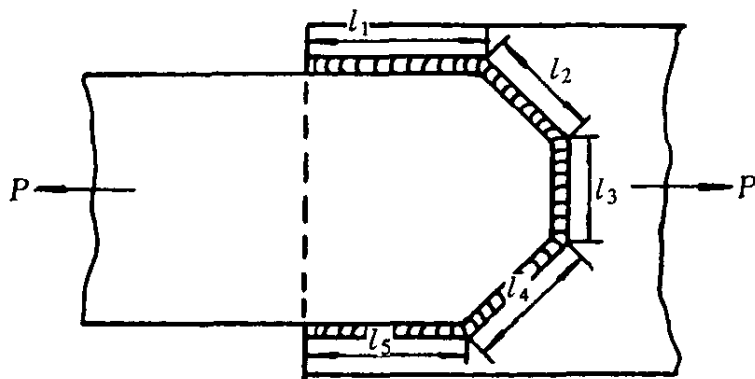


图 4-11 搭接接头角焊缝

### 4.3 焊接应力和变形

结构焊接时总是要产生焊接变形和应力的。在焊接过程中,焊件中产生的随时间而变化的变形和内应力分别称为瞬时变形和焊接瞬时应力。焊后焊件温度冷却至室温时留存于焊件中的变形和应力分别称为焊接残余变形和焊接残余应力。

#### 4.3.1 焊接应力和变形产生的原因

焊接时焊接接头局部区域的加热和冷却是很不均匀的,而局部区域内的各部分金属又处于从液态→塑性状态→弹性状态的不同状态,并随热源的变化而变化,这就是产生焊接应力和变形的根本原因。

下面以平板对接焊为例进行说明(见图 4-12)。焊接时,由于对焊件进行局部加热,焊缝区被加热到很高温度,加热温度随离开焊缝距离的增加而降低。根据金属热胀冷缩的特性,焊件各区域的金属因温度不同将产生大小不等的纵向膨胀,如各区域的金属能纵向自由伸长而不受周围金属的阻碍,其伸长应像图 4-12(a)中 *abcde* 所示那样。但钢板是一个整体,这种伸长不能自由地实现,钢板端而只能比较均衡地伸长,于是被加热的高温焊缝区金属 *bcd* 区域因受两边金属的阻碍而产生压应力,远离焊缝区的 *ab* 及 *de* 区域则受到拉应力。

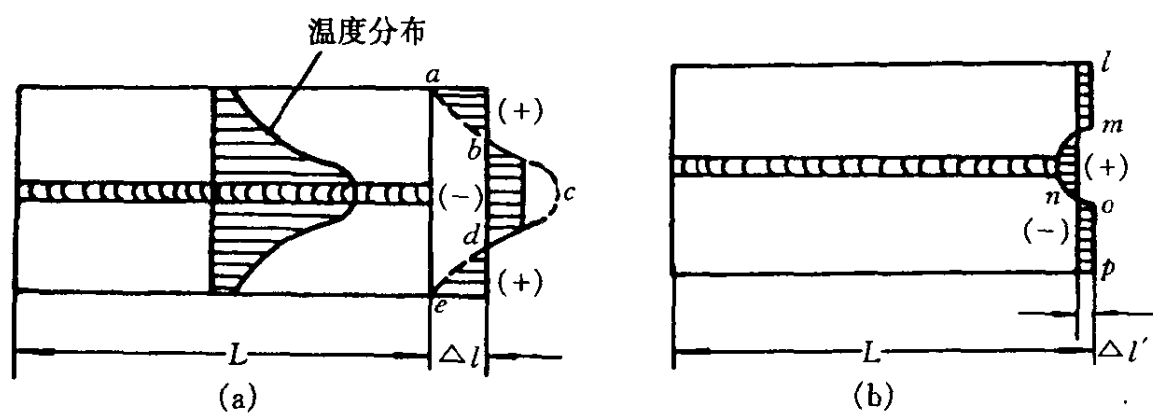


图 4-12 平板对接焊时的应力与变形

(a)焊接过程中;(b)焊接以后

此时,焊缝区( $c$ 区)金属温度高、塑性好,当所受压应力超过屈服限时,该区产生压缩塑性变形,这时钢板中存在着压应力和拉应力,两者平衡,同时整块钢板比原尺寸伸长 $\Delta l$ 。

焊接后,焊件冷到常温,由于中间部位的金属在加热焊接时已产生了压缩塑性变形,所以冷却后的长度要比原来尺寸短些,所缩短的长度应等于压缩塑性变形的长度(见图4-12(b)中的圆弧线),其它只产生过弹性变形的部位应该回复到原长 $l$ ,即焊件端面应呈 $lmnop$ 形状。但钢板是个整体,各部位互相牵制,两边的金属将阻碍中间 $n$ 区域的局域缩短,因此焊件沿整个宽度比较平均地一起收缩到比原长小 $\Delta l'$ 的位置,此收缩变形 $\Delta l'$ 称之为“焊接变形”。此时,两边金属由于受压缩而产生压应力,中间焊缝区被拉长而产生拉应力并相互平衡。这些应力焊后残留在构件内部,亦称“焊接残余应力”,简称“焊接应力”。

#### 4.3.2 焊接残余应力的分布、影响和消除

焊接应力可分为热应力、拘束应力、相变应力和焊接残余应力,焊接残余应力往往数值很大,在厚度较大的焊接结构中,焊接残余应力一般可达到材料的屈服强度。

##### 1. 焊接残余应力的分布

在厚度不大的焊接结构中,厚度方向的应力一般很小,此时焊接应力是双轴向的。我们把沿着焊缝纵向的应力称为纵向应力,用 $\sigma_x$ 表示;把垂直于焊缝纵向的应力称为横向应力,用 $\sigma_y$ 表示。图4-13示出了一定长度的平板焊缝中纵向应力 $\sigma_x$ 的分布。可以看到,焊缝及其附近的压缩塑性变形区内的 $\sigma_x$ 为拉应力,其值一般可达材料的屈服强度。

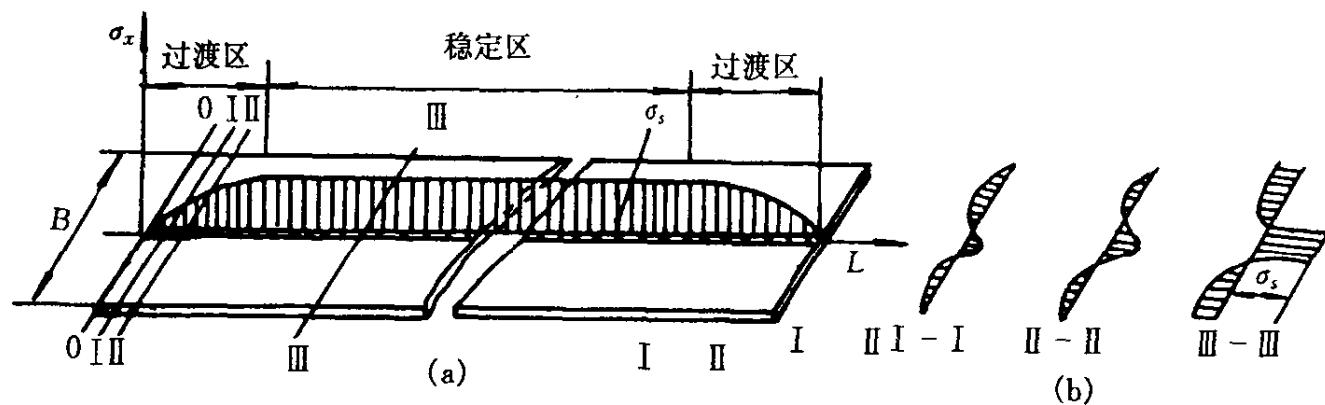
图 4-13 焊缝各截面 $\sigma_x$ 的分布

图4-14示出了一定长度的平板焊缝中横向应力 $\sigma_y$ 的分布。可以看到,焊缝及其附近的压缩塑性变形区内的 $\sigma_y$ 为拉应力,两端为压应力,离开焊缝中心越远, $\sigma_y$ 迅速衰减。

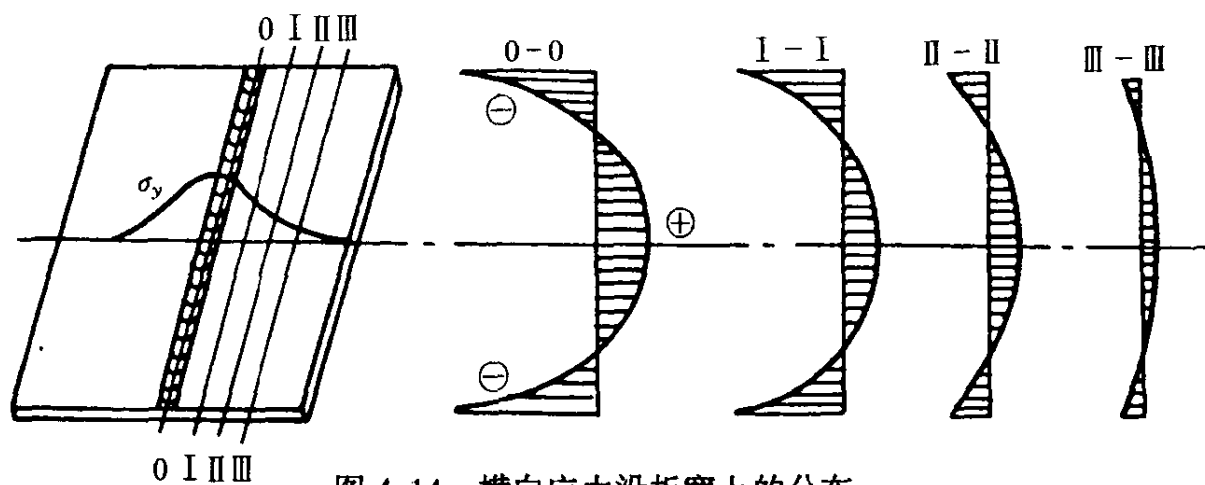


图 4-14 横向应力沿板宽上的分布

厚板焊接结构中除了纵向应力  $\sigma_x$  和横向应力  $\sigma_y$  外,还存在沿厚度方向的应力  $\sigma_z$ 。研究表明,这三个方向的内应力在厚度方向的分布极不均匀。厚板电渣焊时焊缝中心出现三轴向拉应力,  $\sigma_z$  随板厚的增加而增加,但在表面为压应力。

## 2. 焊接残余应力的影响

### (1) 对结构强度与受压件稳定性的影响:

在构件承受拉伸载荷时,焊接残余内应力将与载荷应力相叠加,从而影响构件的强度。而当构件承受压力载荷时,如外载引起的压应力与焊接残余压应力相叠加之和达到  $\sigma_s$ ,这部分截面就丧失了进一步承受外载的能力,会降低受外压薄壁筒体或其他受压构件的稳定性。

### (2) 对构件脆性断裂的影响:

焊接残余应力加大了构件的名义应力,加上焊接接头区材料韧性的下降和焊接缺陷的产生,都会促使构件在外载不大的情况下发生低应力脆断,这是必须充分注意的。

### (3) 对疲劳强度的影响:

如构件中存在焊接残余压应力,可降低应力循环的平均值,从而提高构件局部区域的疲劳强度,但对整体无大影响。焊缝区的残余拉应力能提高结构平均拉应力值,使疲劳寿命降低。

### (4) 对焊件加工精度和尺寸稳定的影响:

焊接残余应力随时间的变化会直接影响到焊件尺寸的稳定性,内应力是否稳定与材料的组织有关。

### (5) 对裂纹扩展的影响:

评定焊接区裂纹时,必须考虑焊接残余应力。在计算裂纹扩展驱动力——应力强度因子  $K_I$  时,残余应力  $\sigma_r$  用拉应力的当量值  $\sigma_3$  来考虑残余应力对裂纹扩展的贡献,即:

$$\sigma_3 = \alpha_r \cdot \sigma_r$$

其中  $\alpha_r$  和裂纹的类型(穿透裂纹、埋藏裂纹、表面裂纹)及裂纹方向(和熔合线平行的裂纹、和熔合线垂直的裂纹、角焊缝裂纹)有关。

## 3. 减少和消除焊接残余应力的措施与方法

为了减少焊接残余应力,通常应从设计和焊接工艺两方面采取措施,而当焊后所造成的残余应力会影响结构安全运行时,就需设法消除焊接残余应力。

(1) 设计上减少焊接应力的核心是正确布置焊缝,从而避免应力叠加,降低应力峰值。具体措施有:

① 尽量减少焊缝的数量,在保证结构强度的前提下,尽量减少焊缝截面尺寸和长度。

② 焊缝应避免过分集中,焊缝间应保证足够的距离,要尽可能避免交叉,以免出现三向复杂应力。如对称球形容器的两种焊缝拼接法(图 4-15),应尽可能避免设计交叉焊缝。焊接管孔,应尽量避免开在焊缝上,且避免管孔焊缝与相邻焊缝的热影响区重合。焊缝间距应大于三倍钢板厚度,且不得小于 100 mm。

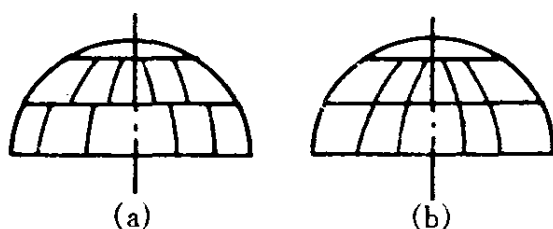


图 4-15 球形容器的两种拼接法  
(a)焊缝错开;(b)焊缝交叉

③ 焊缝不要布置在高应力区及断面突变的地方,以避免应力集中。

④ 采用刚性较小的接头表式。

对管接头,如用翻边联接代替插入管联接,可降低焊缝的约束度,减少焊接应力。

(2) 工艺上减小焊接应力的方法有:

① 采用合理的焊接顺序和方向:

基本原则是:让大多数焊缝在刚性较小的情况下施焊,以便都能自由收缩而降低焊接应力。

② 缩小焊接区与结构整体之间的温差,从而减小焊接内应力。通过整体预热,采用较小的线能量均可达到这一目的。

③ 锤击焊缝。在每道焊缝的冷却过程中,用圆头小锤锤击焊缝,使焊缝金属受到锤击减薄而向四周延展,补偿焊缝的一部分收缩,从而减小焊接应力与变形。多层多道焊时,第一层及最后一层一般不锤击,以防止产生根部裂纹及影响焊缝表面质量。

④ 减少氢含量及清氢处理法:

为了减小氢致集中应力,应尽量选择扩散氢含量较低的碱性低氢型焊条和碱性焊剂;焊条与焊剂应在规定的较高烘干温度下烘干。焊接时应控制环境的温度,除去坡口表面的水汽和油、锈等。

(3) 消除残余应力的方法主要是焊后消除残余应力,对厚度超过一定尺寸的锅炉、压力容器受压元件,均应进行焊后热处理以消除内应力,除焊后热处理外,焊后采用加载的方法也能消除焊接残余应力。

### 4.3.3 焊接变形的形式、影响因素及控制方法

焊接变形可能是多种多样的,最常见的有五种基本形式或者是这几种变形的组合。

#### 1. 焊接变形的形式

图 4-16(a)是平板对接焊后产生的纵向和横向收缩变形;图 4-16(b)是平板对接后的角变形;图 4-16(c)是圆筒件焊缝布置偏离焊件形心轴形成的弯曲变形;图 4-16(d)是薄壁焊件焊后产生的波浪形变形。除此以外,在梁柱结构焊接时还易出现扭曲变形。其中收缩变形、弯曲变形属整体变形,而另外几种形式为局部变形。

#### 2. 焊接变形的影响因素

(1) 焊缝位置对焊接变形的影响:

在结构刚性不大时,焊缝在结构中布置对称,或焊缝截面重心与接头截面重心在同一位置上,施焊程序合理,则只产生纵向和横向缩短。但当焊缝在结构中布置不对称时,则会引起弯

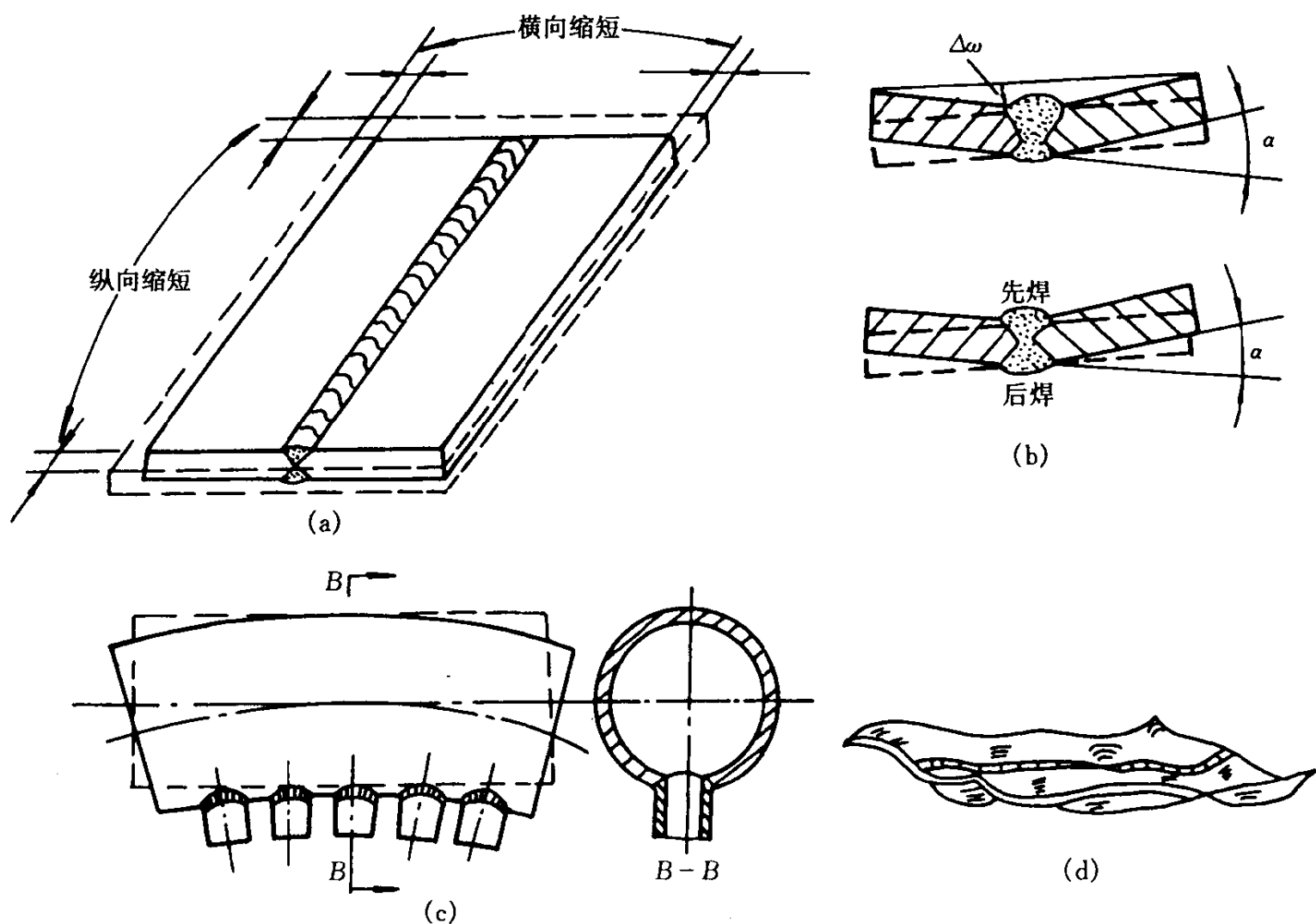


图 4-16 焊接变形的基本形式

(a)纵向、横向收缩变形；(b)角变形；(c)弯曲变形；(d)波浪形变形

曲变形；而当焊缝截面重心偏离接头截面重心时，则会产生角变形。

#### (2) 结构刚性的影响：

受同样大小的力，刚性大的结构变形小，刚性小的结构则变形大。焊接变形总是沿着结构或焊件刚性的约束最小的方向进行。

结构的刚性就是结构抵抗拉伸和弯曲变形的能力，其大小主要取决于结构截面的形状、尺寸和布置。

#### (3) 装配和焊接次序的影响：

一个焊接结构的整体刚性是随着装配焊接过程而逐步形成的，而每一条焊缝焊接时的刚性约束大小取决于装配焊接程序。因此，对截面对称、焊缝布置对称的简单焊接结构，可采用先装配成整体，然后按焊接的方法进行生产。而对复杂的焊接结构，因为焊缝多，各焊缝引起的变形相互影响，难以控制，因此必须采用部分装配、焊接、再装配、再焊接的次序，以控制总体焊接变形。

#### (4) 其他影响因素：

焊缝长度和焊接结构的坡口型式、装配间隙等也影响焊接变形，焊缝越长，变形越大，坡口填充金属越多，变形也越大。

焊接变形和焊接规范、焊接方法也密切相关。一般来说，焊接电流增加则变形增大，焊接线能量增加，变形也相应增大。在焊件型式、尺寸及约束相同条件下，埋弧自动焊产生的变形比手工电弧焊大，而手工电弧焊产生的变形比气体保护焊大。

焊接变形使组焊件的装配质量下降,增大应力集中程度,降低结构承载能力,使结构安全性降低,因此,实际生产中应对焊接变形进行控制。

### 3. 控制焊接变形的的方法

为了控制和减小焊接变形,应采用必要的合理设计方案和工艺措施。

#### (1) 合理的设计:

在保证结构的承载能力的条件下,设计时应尽量减小焊缝数量、长度和尺寸。厚板接头尽可能采用坡口焊缝焊接。

设计焊接结构时应尽量应用型钢、冲压件代替板材拼焊,以便减小不必要的焊缝,从而减少变形。

设计时,应合理安排焊缝的位置,使结构中所有焊缝尽量对称于截面中性轴,或接近中性轴,以减小焊件的变曲变形。

#### (2) 必要的工艺措施:

##### ① 预留收缩余量:

在工件备料时加一定的收缩余量。一般焊缝的纵向收缩量按焊缝的长度来计算。焊缝的横向收缩则随着焊缝宽度的增加而增加,一般每条焊缝横向收缩 1.3~1.5 mm,具体数值和坡口型式、接头型式及板厚有关。

##### ② 反变形法:

用经验或计算方法,预先判断工件在焊后可能发生的变形大小和方向(图 4-17(a)),在焊前装配时,预先将焊件向将要变形的反方向摆放或人为的变形(图 4-17(b)),控制得当,可使焊件得到正确的形状,防止残余变形。

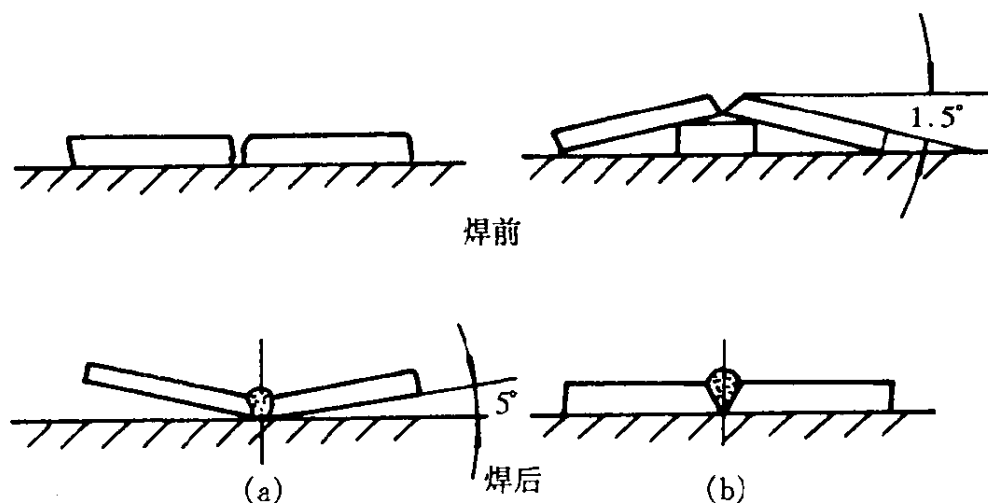


图 4-17 厚度 8~12 mm 钢板对接焊的反变形控制

##### ③ 选择合理的焊接方法和规范:

采用能量集中的热源和快速焊接方法可以减小变形,如用气体保护焊、等离子弧焊代替气焊和手工电弧焊进行薄板焊接,可减小和控制变形量。用手工电弧焊接比较厚的工件时,采用多层焊比单层焊变形小。在保证质量前提下增加焊接速度,也会使焊接变形减小。

##### ④ 合理的装配焊接次序:

把大型结构适当地分成几个部件,分别装配焊接,然后再拼焊成整体,使不对称的焊缝或收缩量较大的焊缝能自由收缩,这既有利于控制和减小焊接变形,又能扩大作业面积,缩短生产周期。



### ⑤ 刚性固定法:

焊前将结构固定夹紧,依靠外加约束减小焊接变形,但是刚性夹持阻止了焊件的自由收缩,将在构件内部产生较大内应力,应针对焊件材料和结构形式慎重选择。

对焊接结构首先要采取各种有效措施防止和减小变形,但由于各种原因,在实际生产中,即使采用这种或那种方法,构件焊接后还是难以避免产生或大或小的变形。在不少情况下,当超出产品技术要求所允许的焊接变形时,都要求焊后进行矫正,使之符合产品质量要求。矫正的实质是使焊接构件产生新的变形,以抵消焊接时所发生的变形。

应该指出,矫正焊接变形的过程往往增加构件的内应力。因此矫正变形之前最好先消除焊接残余应力,以免矫正变形时构件发生局部破裂。

生产中常用的矫正变形方法有两大类,即机械矫正和火焰加热矫正。在选用矫形方法时,要特别注意钢种。对耐腐蚀设备不宜用锤击,以防应力腐蚀,对具有晶间腐蚀倾向的不锈钢和淬硬倾向较大的钢材不宜用火焰矫形;对冷裂倾向较大的高强钢要少用机械法矫形,因该法易产生冷作硬化。

## 4.4 焊接工艺要素和规范

焊接工艺是控制接头焊接质量的关键因素,因此必须按焊接方法、焊件材料的种类、板厚和接头形式编制相应的焊接工艺。在工厂中,目前以焊接工艺细则卡来规定焊接工艺的内容。焊接工艺细则卡的编制依据是相应的焊接工艺评定试验结果。

焊接工艺细则卡应当规定所有的焊接工艺要素,其中包括:①焊前准备;②焊接材料的牌号及规格;③焊接工艺规范参数;④操作技术;⑤焊后检查等。

### 4.4.1 焊前准备

碳钢和低合金钢部件的焊缝坡口可以采用机械加工或火焰切割制备,而不锈钢部件的坡口应使用等离子切割或机械加工方法制备,具体坡口成形加工方法可根据钢板厚度、焊接接头型式及现有加工条件选用,一般有以下几种方法。

#### 1. 剪切——常用于不开坡口的薄板

此法生产率高,加工方便,加工后边缘平直,但在剪床上不能剪切厚钢板,也不能加工有角度的坡口,一般适用于 25mm 以下板厚。

#### 2. 刨边——用于直边坡口

用刨床或刨边机加工直边坡口,加工质量好,坡口平直,精度高,适用于自动焊工件的边缘加工。国内生产的刨边机,一般加工长度可达 12m 左右,如不开坡口可一次刨削成叠钢板。

#### 3. 车削——用于管子坡口

车削可加工出各种型式的坡口,厚壁筒体的 U 型坡口常用这种加工方法,对较长、较重等无法搬动的管子可用移动式的管子坡口机。小直径薄壁管子可用手动式坡口机,大直径厚壁管子则可采用电动车管机。

#### 4. 氧乙炔切割——应用最广的加工坡口方法

利用气割可以得到任何角度的 V 形、X 形、单边 V 形、K 形等坡口,此法更适合厚钢板的切割,生产率高。气割有手工(灵活,但边缘不够平直精确,适用于单件或小批生产)、半自动

(应用广,为提高效率可同时安装二三把割炬,能将V形、X形坡口一次切成)、自动(质量好,生产率高,但灵活性较差,适合于大批量生产)切割方法。

对于高强钢等淬火倾向大的钢材,气割割口表面和热影响区要进行探伤,避免气割造成的裂纹隐藏下来。

#### 5. 铲削——用于加工坡口、清焊根

用风铲来铲削坡口,劳动强度较大,噪声严重,应尽量少用。这种方法已日益被碳弧气刨所代替。

#### 6. 碳弧气刨——常用于清焊根

碳弧气刨效率比风铲高,劳动强度小,特别在开U形坡口时更为显著,正在逐渐取代风铲。缺点是要用直流电源,刨割时烟雾大,要采取排烟措施。

坡口两侧的内、外表面必须清除锈斑、氧化膜和油垢等污染,这是防止焊缝产生气孔和裂纹的有效措施。手工电弧焊焊接区的清理宽度一般要求在20mm范围内,埋弧焊为30mm,电渣焊为40mm。对于焊接过程中不会发生冶金反应的焊接方法,例如钨极氩弧焊,焊前坡口面及两则的清理更为重要,因为在这种情况下不可能通过熔渣与金属之间的冶金反应去除有害杂质。用不锈钢制作重要部件的焊接中,焊前必须用丙酮、酒精等溶剂擦洗坡口表面,去除油垢和水分。特别是在超低碳不锈钢容器的焊接时,这种清理工序将直接影响到焊缝金属的碳含量,而最终影响到接头的耐蚀性。

焊件组装时,接头两侧边缘必须相互对准,这不仅是保证焊缝外形和尺寸的基本要求,而且也是为了避免接头受力时产生附加的弯曲力矩。焊件组装后应作错边量的检查。在压力容器制造中,对接接头错边量的要求较高。A、B类焊缝对口错边量 $b$ 应符合表4-6的规定。

表4-6 A、B类焊缝对口错边量要求 (GB150—1998)

对口处的名义厚度 $\delta_n$ (mm)	按焊缝类别划分的对口错边量 $b$ (mm)	
	A	B
$\leq 10$	$\leq 1/4\delta_n$	$\leq 1/4\delta_n$
$10 < \delta_n \leq 20$	$\leq 3$	$\leq 1/4\delta_n$
$20 < \delta_n \leq 40$	$\leq 3$	$\leq 5$
$40 < \delta_n \leq 50$	$\leq 3$	$\leq 1/8\delta_n$
$> 50$	$\leq 1/16\delta_n$ , 且不大于 10	$\leq 1/8\delta_n$ , 且不大于 20

注:①表中A类焊缝的对口错边量要求不包括球形封头与圆筒连接的环向焊缝以及嵌入式接管与圆筒或封头对接连接的焊缝;②表中B类焊缝的对口错边量要求包括球形封头与圆筒连接的环向焊缝

压力容器受压部分的焊缝按其所在的位置分为A、B、C、D四类:

A. 受压部分的纵向焊缝(多层包扎压力容器层板层纵向焊缝除外)、各种凸形封头的所有对接焊缝、球形封头与圆筒连接的环向焊缝以及嵌入式接管与圆筒或封头对接连接的焊缝,均属于A类焊缝。

B. 受压部分的环形焊缝、锥形封头小端与接管连接的焊缝,均属于B类焊缝,但已规定为A、C、D类的焊缝除外。

C. 法兰、平封头、管板等与壳体、接管连接的焊缝,内封头与圆筒的搭接填角焊缝以及多

层包扎压力容器层板层纵向焊缝,均属于C类焊缝。

D. 接管、人孔、凸缘等与壳体连接的焊缝,均属于D类焊缝,但已规定为A,B类的焊缝除外。

#### 4.4.2 焊接工艺规范参数

焊接工艺规范参数包括焊前的预热温度,焊接电参数(电流、电压、电流种类、频率、焊接速度和送丝速度等),后热温度和保温时间,消氢处理温度和保温时间,焊后热处理和消除应力处理制度等。在气体保护焊中,还应包括气体种类、混合比和流量等。所有这些参数在焊接工艺细则中必须明确规定。

##### 1. 焊前预热温度的选定

预热温度是焊接工艺规范的主要参数之一。焊前的预热具有下列作用:①降低焊接热影响区的冷却速度,避免淬硬组织的形成,防止冷裂纹并改善热影响区塑性;②减小焊接区的温度梯度,从而降低焊接接头的内应力;③扩大焊接区的加热范围,使焊接接头在较宽的区域内处于塑性状态,减弱焊接应力的不利影响;④改变焊接区的应变集中区部位,降低了促使冷裂纹形成的应力峰值;⑤延长焊接区在100℃以上温度的停留时间,有利于焊缝金属中氢的逸出,降低氢致裂纹形成的危险。

对于结构简单的焊件,可按表4-7规定的温度范围进行预热。

表 4-7 几种常用压力容器钢的预热温度

钢 号	壁厚(mm)	预热温度范围(℃)
20g, Q235 - A	≥90	100~120
16Mng, 15MnVg, 19Mn6	>32	100~150
12CrMo, 15CrMo, 20MnMo	>15	150~200
14MnMoVg, 18MnMoNbg 13MnNiMoNbg	>10	150~200
12Cr2Mo1, 20CrMo, 2 $\frac{1}{4}$ Cr1Mo	>6	150~200
0Cr13 0Cr17	任何厚度	300

##### 2. 焊接电参数

在使用连续的交流电和直流电焊接时,焊接规范中的电参数主要是焊接电压和焊接电流。在采用脉冲电流焊接时,电参数还包括电流的交变频率、通断比、基本电流和峰值电流值。焊接规范参数的选择原则首先是保证接头的熔透、无裂纹并获得成形良好的焊道,同时所选择的

焊接规范电参数还应保证接头的性能满足技术条件规定的各项要求,因而在选择电参数时要考虑焊接热输入量对接头性能的影响。

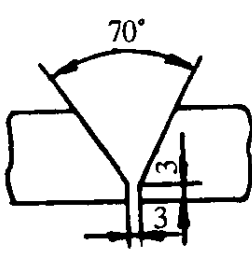
从提高焊接生产率考虑,应选用较大电流和粗焊条,实际上则应根据板厚、焊接位置和线能量要求等因素来选择焊接电流和焊条直径。焊接电流过大,容易烧穿和咬边,飞溅增大,同时焊条易发红使药皮脱落,保护性能下降;焊接电流太小容易产生夹渣和未焊透。手工电弧焊焊条直径选择及相应的焊接电流范围见表4-8。

表4-8 手工电弧焊焊条直径及焊接电流选择

钢件厚度 (mm)	1.5	2	3	4~5	6~8	9~12	12~15	16~20	>20
焊条直径 (mm)	1.6	2	3	3~4	4	4~5	5	5~6	6~10
焊接电流 (A)	25~40	40~65	65~100	100~160	160~210	160~250	200~270	260~300	320~400

对开坡口工件双面埋弧自动焊的规范选择可见表4-9。

表4-9 开坡口工件双面埋弧自动焊规范选择

	工件厚度 (mm)	坡口形式	焊丝直径	焊缝顺序	焊接电流	电弧电压	焊接速度
			(mm)		(A)	(V)	(m/h)
埋弧自动焊	14		5	正	830~850	36~38	25
			5	反	600~620	36~38	45
	16		5	正	830~850	36~38	20
			5	反	600~620	36~38	45
	18		5	正	830~850	36~38	20
			5	反	600~620	36~38	45
	22		6	正	1 050~1 150	38~40	18
			5	反	600~620	36~38	45
	24		6	正	1 100	38~40	24
			5	反	800	36~38	28
	30		6	正	100~1 100	36~40	18
			5	反	900~1 000	36~38	20

### 3. 焊后加热和消氢处理

焊后加热是指焊接结束后将焊件或焊接区立即加热到150~250℃的范围内,并保持一段时间,这种工艺简称为后热。为区别于焊后消氢处理和消除应力处理,将其称为低温后热更为确切。在后热的温度范围内加热,虽然也能产生消氢的作用,但由于温度较低,氢逸出的速度

较慢,特别对于厚壁焊缝需相当长的时间才能达到预期的效果。而在 300℃ 以上较高的温度下,氢的扩散作用加快,消氢效果显著改善。因此以消氢为目的的,后热处理应在 300~400℃ 温度范围内进行,这种处理就称为“消氢处理”。其要点是当每条焊缝焊完后立即将焊件或整条焊缝加热到上述温度,并保温 2~4h 后空冷。

#### 4. 焊后热处理

在锅炉压力容器制造中,常用的焊后热处理有下列几种形式:

(1)水调质处理,即水淬加回火处理。在厚壁压力容器中,目前已开始应用水调质处理来提高壳体材料的强度和韧性,以更好地发挥低合金钢的综合性能。由于厚壁容器筒节必须采用热卷或热压的工艺成形,因此水调质处理在筒节纵缝焊成后进行,这样水调质处理也就成为一种焊后热处理。

淬火后回火处理的温度对壳体和焊接接头的性能有很大影响。回火温度应在  $A_{c3}$  点以下 50~100℃。对一种钢材最适用的回火温度范围可通过预先的回火处理试验来确定。

#### (2)正火或正火加回火:

厚壁筒节纵缝常采用电渣焊完成。但是电渣焊缝晶粒粗大,达不到所要求的机械性能,因此焊后必须作正火处理以细化晶粒。某些采用埋弧焊焊成的筒节也可能在热校和热整形过程中经受正火处理。

正火温度应在该种钢材  $A_{c3}$  点以上 30~50℃ 进行,过高的正火温度会导致晶粒的长大,起不到正火的效果。保温时间按 1~2min/mm 壁厚计算。保温结束后将工件放在平静空气中冷却。如筒节的热成形、热校或热整形温度可控制在规定的正火温度范围之内,则上述加热工序与正火工序可合二为一。如热加工必须在大大高于常规的正火温度下进行,则可能引起钢的奥氏体晶粒的急剧长大而损害了塑性和韧性。因此在这种热加工后应该作一次正规的正火处理。

#### (3)消除应力处理:

消除应力处理对于保证压力容器的安全运行是十分重要的。有关规程对此作了明确规定。当压力容器的壁厚超过表 4-10 所列的界限就必须将其作消除应力处理。

表 4-10 需作消除应力处理的容器壁厚界限

钢 号	需作消除应力处理的厚度(mm)	
	不预热	预热 100℃ 以上
Q 235, 20, 20R	>34	>38
16Mn, 19Mn6	>30	>34
15MnV, 15MnTi	>28	>32
14MnMoV, 18MnMoNb 13MnNiMo54	任何厚度	>20
12Cr1Mo, 15CrMo	任何厚度	>10
12Cr1MoV, 2 $\frac{1}{4}$ Cr1Mo	任何厚度	>6

## 4.5 焊接工艺评定

进行焊接工艺评定是确保产品质量的重要措施,世界上工业先进的国家都制订有锅炉压力容器焊接工艺评定标准。我国也相应制订了适合我国具体条件的焊接工艺评定方法,如《蒸汽锅炉安全技术监察规程》等。

### 4.5.1 压力容器焊接工艺评定的要求

锅炉、压力容器焊接工艺所包括的内容相当广泛,并且任何一种主要焊接工艺参数,如焊接电流、焊接电压、焊接速度、预热温度、层间温度、焊接材料的牌号或成分、焊后热处理温度和保温时间、焊件厚度和焊接位置的改变等都会对接头的性能产生较大的影响,因此对于所编制的并将用于生产的每项焊接工艺应作相应的评定。焊接工艺评定的主要内容是按准备采用的焊接工艺在接近实际生产的条件下焊制模拟产品接头的试板,并从焊成的试板中按产品的技术条件截取拉力、弯曲和冲击韧性试样,并将焊接条件变化是否影响焊接接头力学性能作为是否需要重新评定焊接工艺的判断准则,评定标准和规则也是根据这一判断准则制定的。如果所有试样的检验结果全部符合技术要求,则证明所编制的焊接工艺是可行的,可根据工艺评定报告拟定正式的焊接工艺细则卡。

焊接工艺评定也可用以评定施焊单位是否有能力焊出符合规程和产品技术条件所要求的焊接接头,验证施焊单位制订的焊接工艺指导书是否合适。

焊接工艺评定是在焊接性试验基础上进行的生产前工艺验证试验,应在制订焊接工艺指导书以后焊接产品以前进行。

### 4.5.2 焊接工艺评定试验

焊接工艺评定用试板应具有足够的尺寸,对手工电弧焊、氩弧焊和 $\text{CO}_2$ 气体保护焊,试板尺寸至少为 $300\text{mm} \times 500\text{mm}$ ,对于埋弧焊至少为 $400\text{mm} \times 600\text{mm}$ ,对于电渣焊至少为 $500\text{mm} \times 800\text{mm}$ 。

焊接工艺评定试板焊完后,应按工艺规定进行焊后热处理。然后按图4-18取样,并加工成拉力、弯曲和冲击试样,各种试样的尺寸和加工精度按相应的国家标准的规定制作。试验结果应符合产品技术条件的要求。容器壳体上的管接头可按图4-19焊制模拟试板并取宏观试样检验。

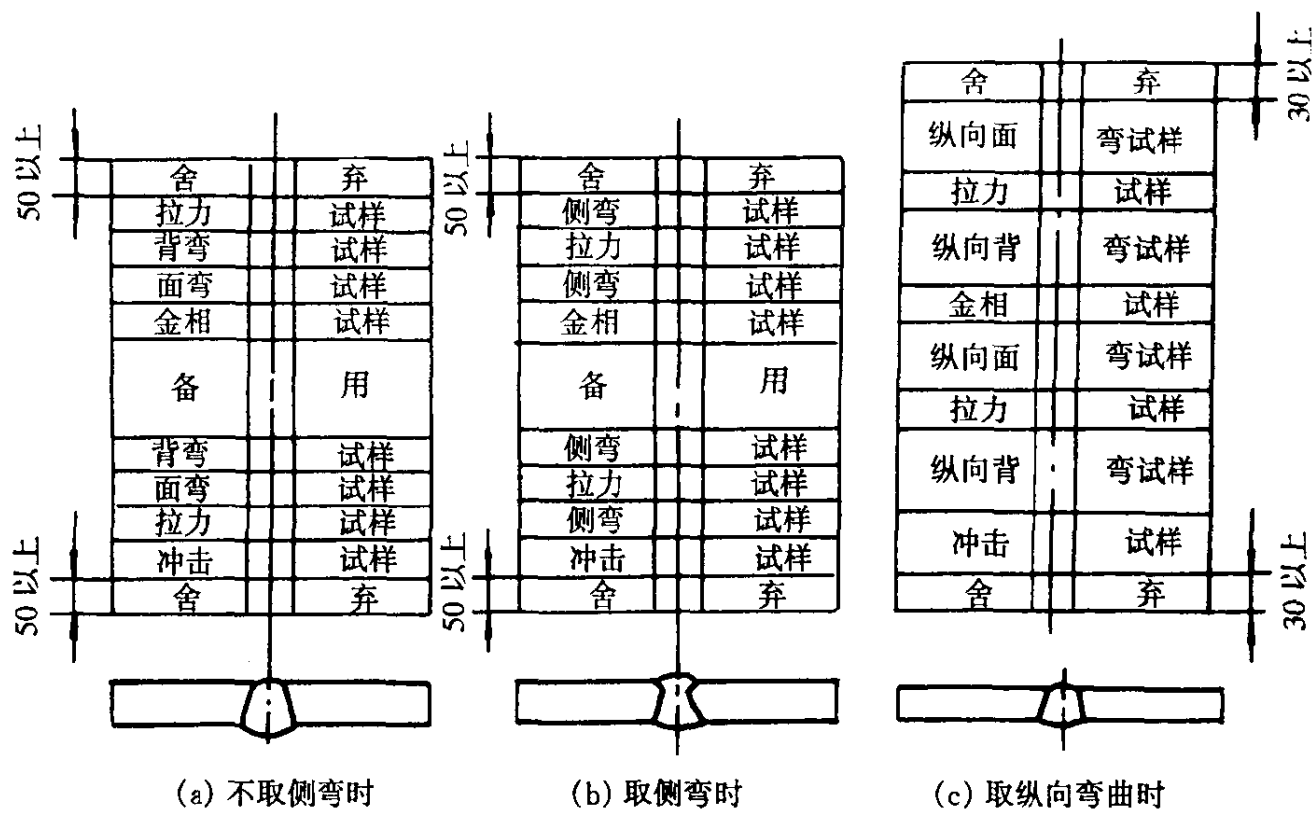


图 4-18 对接焊缝板状试件切取试样部位图

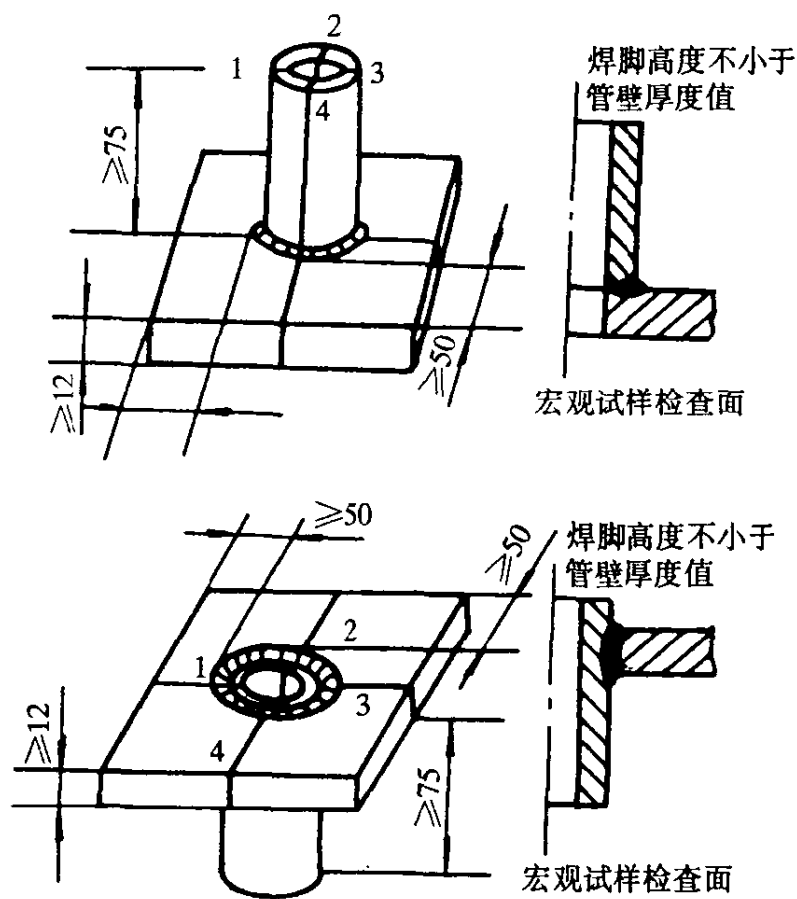


图 4-19 管板试件切取宏观试样示意图

### 4.5.3 焊接工艺评定的特点和一般过程

钢材焊接性能试验和焊接工艺评定试验都在产品施焊前进行,而产品试板是与产品同时施焊。

焊接工艺评定的一般过程如下:

(1)拟定焊接工艺指导书,由具有一定专业知识和有相当实践经验的焊接工艺人员,根据

钢材的焊接性能试验,结合产品特点、制造工艺条件来拟定,内容包括焊接工艺的重要因素、补加因素和次要因素。

(2)按照焊接工艺指导书和标准规定来施焊试件,检验及测定试样性能,填写焊接工艺评定报告。如果评定不合格应修改焊接工艺指导书继续评定,直到评定合格。

(3)经评定合格的焊接工艺指导书可直接用于生产,也可以根据焊接工艺指导书、焊接工艺评定报告结合实际生产条件,编制焊接工艺卡,用于产品施焊。

## 4.6 焊接裂纹及控制

从更严格的定义来说,焊接裂纹是指焊接过程中或焊后一段时间内,由于焊接的原因(冶金、材料的或内外力的原因),在焊接接头范围内产生的金属材料分离现象(局部断裂)。裂纹是一种最危险的焊接缺陷,其特点为两端尖锐,而且分离宽度(张开位移)比裂纹长度小得多。防止焊接裂纹是焊接结构设计和制造的重大课题之一。

### 4.6.1 焊接裂纹的分类

焊接裂纹的种类繁多,其区分方法也随人们对裂纹实质的认识不断加深而有很大不同,表4-11是目前通用的按裂纹发生时期和部位来分类的方法。

表 4-11 目前的裂纹分类划分方法

裂纹发生时期		发生部位	命名	
焊接过程	在固相线附近	焊缝	凝固裂纹	热裂纹
		热影响区	液化裂纹	
	在固相线以下	焊缝	多边化裂纹	
	再结晶温度 $T_g$ 附近	热影响区,焊缝	高温失塑裂纹	
	在室温附近	热影响区,焊缝	冷裂纹	
热影响区及母材轧层		层状撕裂		
焊后再次高温回火加热过程中		热影响区	再热裂纹	
在腐蚀介质使用期间		焊缝、热影响区	应力腐蚀裂纹	

### 4.6.2 焊接裂纹形成的一般条件

对于不同的产品结构,由于应用的材料和制造工艺不同,所容易产生的裂纹类型也不尽相同。比如使用高强钢的桥梁,造船中的钢结构,多出现冷裂纹,约占90%。而在300℃以上工作的石化装置或动力设备,热裂纹则占多数。对于珠光体耐热钢,其再热裂纹又很容易出现。但归纳起来,裂纹的产生无外乎以下两个原因。

(1)拘束造成的应力应变是造成开裂的主要原因之一。开裂过程必须要求有一定的应力作用,而焊接过程中的局部不均匀加热过程必然造成接头在焊接的冷却过程中由于结构整体的拘束而受到拉伸应力应变,且随刚度和拘束度的加大,应力增加。



(2)一定材料在某一温度区间,由于存在某些致脆因素,使接头的具体部位具有最低塑性值,在拉伸应力作用下,极易在此温度区间产生开裂。超出此温度区间,则由于接头塑性较高而不致开裂。

综上所述,裂纹的产生是焊接应力应变和材料致脆因素综合作用的结果。

### 4.6.3 焊接裂纹

#### 1. 热裂纹

(1) 焊接热裂纹的特征:

热裂纹具有以下形态特征,有别于其他裂纹:

- ①裂纹大多在焊缝表面开口,且有氧化色彩。
- ②裂纹往往产生于树枝晶的会合处,在焊缝横截面中心沿纵长方向产生。
- ③裂纹一般沿晶界分布,具有高温沿晶断裂性质。
- ④大多数发生在凝固过程中,也有在凝固结束之后产生的。

(2) 形成机理:

在焊缝凝固过程中当存在低熔点共晶体时,由于焊接冷却速度很快,极易在晶界产生微观偏析,使晶粒之间由低熔点共晶体隔开。当晶粒已凝固,而晶界处于液态,变形阻力几乎为零时,若焊接拉伸应变很大,则可能使晶界被拉开,冷却后就成为裂纹。这种由于微观偏析而形成的裂纹称为微观裂纹。

① 焊缝化学成份的影响:焊接中的许多低熔共晶体是焊接冶金反应的产物。因而,凡能产生低熔共晶体的元素都是促进热裂的元素;凡能细化晶粒或产生高熔点化合物或能使低熔点共晶体成球状或块状分布的元素均对抑制热裂有效,表 4-12 可供参考。

表 4-12 合金元素对热裂纹倾向的影响

严重影响形成热裂纹	少量时影响不大,多量时促使热裂	降低焊缝的热裂倾向	尚未定论者
碳、硫、磷、铜、氢、镍、铌	硅(>0.4%) 锰(>0.8%) 铬(>0.8%)	钛、锆、铝、稀有元素、 锰(在 0.8%以内)	氮、氧、砷

② 焊缝断面形状的影响:深而窄的焊缝由于宏观偏析主要集中于焊缝中间,易形成热裂纹。为此在厚板埋弧自动焊时要特别注意调节焊接电流与电弧电压的比例,使焊缝形状系数大于 1.3~1.5。手弧焊时由于焊缝截面较小,电流值较低,不易造成深而窄的焊缝,同时其区域偏析也不明显,故这方面的影响不突出。

③ 焊接工艺及焊件结构的影响:焊件结构和焊接工艺直接影响到焊接接头的拘束度,反映在焊接拉伸应变的大小上,它对热裂纹的影响属于力学因素。

(3) 预防热裂纹的措施:

预防热裂纹的基本措施是严格控制焊缝化学成份,限制碳、硫、磷含量。当上述措施还无法避免热裂纹时,就必须采取工艺措施,如焊前预热、伴热、用大线能量施焊(应保证焊缝形状系数不过小)以及尽量降低焊件刚性等,另外可在焊接材料中加入足够脱硫剂。

## 2. 冷裂纹

### (1) 冷裂纹的特点:

冷裂纹是焊接低合金高强钢、中合金钢和中碳钢等易淬钢材时最易产生的焊接缺陷。它与热裂纹有本质的区别,其特点是:

- ①产生于焊缝金属凝固之后,一般产生于马氏体转变温度以下或常温。
- ②主要产生于热影响区,产生于焊缝区的可能性极小。
- ③常具有延迟性。有的钢材不是焊后立即产生冷裂纹,而是在焊后几小时、几十小时甚至更长时间才产生。这类不是在焊后立即产生的冷裂纹又称延迟裂纹,它是冷裂纹中比较普遍的形态。由于它不能在制造过程中被检测出来,故更具有危险性。

### (2) 产生原因:

冷裂纹产生的本质,是焊件热影响区的低塑性组织、焊接接头中的氢中和焊接应力综合作用的结果。

#### ① 淬硬作用:

易淬钢在焊接时过热区会产生粗大马氏体组织,从而使热影响区金属的塑性下降,脆性增加,当受到大的焊接拉应力作用时就易开裂。

#### ② 氢的作用:

氢是产生焊接冷裂纹的一个重要因素。低合金高强度钢的焊接冷裂纹是与氢的含量直接相关的。试验研究表明,母材本身的残余含氢量对焊接接头的冷裂纹不起主要作用。焊接接头中的含氢量主要是在焊接过程中,由于焊接材料中存在各种水分以及焊口存在的油、锈、水清理不干净,在电弧高温作用下,分解成氢和氧,这种氢以原子状态溶入金属熔滴和熔池,造成了焊接接头中的富氢区。

可以用图 4-20 来说明焊接接头中富氢区的形成原因,在电弧高温作用下,由水分分解产生的原子氢,大量溶解在液体金属中,随着溶池温度的降低,氢在金属中的溶解度急剧下降,当金属由液相转变为固相时,氢的溶解度发生突变,并因快速冷却而在金属中形成过饱和的含氢量。随后在固相状态的相变过程中,从奥氏体转变为铁素体时,溶解度又显著地减小。与此同时,氢在铁素体中的扩散系数发生相反的转变。通常焊缝金属的碳当量总比母材低一些,再加之焊缝的上面覆盖着导热系数较低的熔渣,冷却速度慢,而与焊接热影响区相接触的是大范围的母材,冷却速度快,容易生成马氏体组织  $M$ 。因此焊缝金属发生奥氏体转变的温度  $T_w$  高于热影响区发生马氏体组织  $M$  转变的温度  $T_H$ 。此时在两个相变等温面  $T_w$  和  $T_H$  之间的熔合线区段  $AB$  上下存在着很大的氢浓度,在其上是含氢量过饱和的焊缝金属的铁素体组织,在其下是含氢量较低的、但对氢的溶解度较大的奥氏体组织。这样焊缝金属中的过饱和的氢经过  $AB$  区段向热影响区的奥氏体中扩散。扩散到热影响区奥氏体中的氢,则由于它在奥氏体中的扩散系数小而聚集在其中,从而形成了富氢区。随着焊接过程的进行,相变等温面  $T_H$  向前推进,含大量氢的奥氏体组织转变为含过饱和氢的马氏体组织。

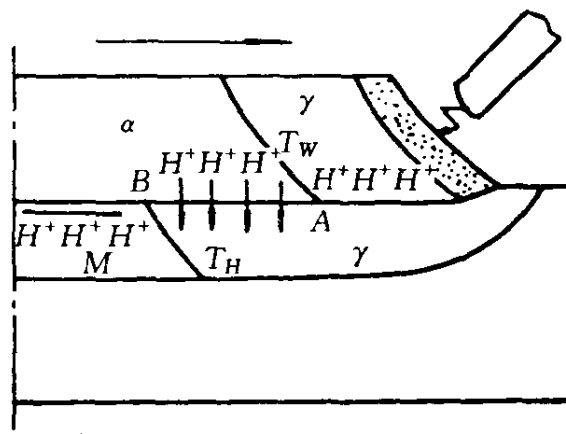


图 4-20 氢的相应诱导扩散  
 $T_w$  — 焊缝奥氏体相变等温面;  
 $T_H$  — 热影响区奥氏体相变等温面

因为低碳钢的淬硬倾向小,焊接接头中不易产生马氏体组织转变,焊缝金属和热影响区的相变等温面是相同的,冷却后均形成含过饱和氢的铁素体组织,因为氢在铁素体中具有较高的扩散系数,因此,低碳钢的焊接接头影响区不易形成富氢区。

氢所诱发的冷裂纹,从潜伏、萌生、扩展,以至开裂具有延迟断裂和特征,至于延迟时间的长短和氢的浓度以及焊接接头的应力水平有关。

### ③焊接应力的作用:

当焊接应力为拉应力并与氢的析集和淬火硬化同时发生时,极易发生冷裂纹。

厚板焊接更易在根部产生冷裂纹,一则由于厚板刚性大,二则厚板冷却速度快,促使产生淬火组织,从而产生较大的焊接应力所致。

综上所述,冷裂纹是上述三个因素综合作用的结果,排除或削弱其中任何一个因素都对防冷裂有利。若仅存在某一因素的作用,冷裂纹也不致产生,这也是防冷裂的基本出发点。

### (3) 预防冷裂纹的措施:

①最大限度地降低焊缝氢含量。可采取以 350~400℃ 的高温烘干焊条,保温 2~4h 的方法,焊接高强钢时,随焊随从炉内取用,以彻底去除潮气。焊后缓冷或焊后又立即加热到一定的温度(称为后热,一般为 200~300℃),并保持一定时间,以利于氢的扩散逸出及预防延迟裂纹。

②采用预热、伴热和焊后热处理以及采用大线能量施焊均利于氢的逸出和降低淬火倾向。

③严格控制母材含磷量,以防冷脆。

④采取有利于降低焊接残余应力的措施。

### 3. 再热裂纹(主要是消除应力热处理裂纹)

再热裂纹是容器在焊后消除应力热处理再加热到 540~930℃ 范围内产生的一种晶间裂纹。这种裂纹沿热影响区的粗晶区的晶粒周界扩展,呈分枝状。裂纹扩展到焊缝或母材的细晶粒区就终止了。

#### (1) 形成机理:

热处理前后粗晶区塑性的变化主要与合金碳化物所处状态有关。在焊接时,该区被加热到 1100℃ 以上,合金碳化物溶于奥氏体内并发生晶粒粗化。在焊后的快速冷却过程中,一般合金碳化物都来不及析出,对该区塑性无多大影响。但在随后的消除应力热处理中,受到 550~700℃ 的加热并经过一定的保温,这时合金碳化物( $V_4C_3$ ,  $NbC$ ,  $Mo_2C$ ,  $TiC$  等硬化相)会弥散析出在位错线上,强化了晶内。与此同时,也有片状、条状碳化物( $Cr_{23}C_6$  等)析出于晶界,本来粗晶区的晶界上,低熔点杂质和某些微量元素相对含量就高,塑性较差,在其后的再加热过程中,残余应力要释放,但晶界承担变形的能力比较小,晶界强度又低于晶内,导致晶界开裂。

#### (2) 影响因素:

影响再热裂纹的因素很多,如母材的化学成分、拘束状态、焊接规范、焊条强度、消除应力规范和使用温度等。其中化学成份主要影响热影响区晶界塑性;拘束状态、焊接规范主要影响焊接残余应力大小;消除应力热处理规范或使用温度主要影响再热作用下所引起的塑性应变量和合金碳化物弥散析出程度。因此,热影响区晶界的塑性应变能力、焊接残余应力和再热引起的塑性应变是影响再热裂纹的三个基本因素,也是制订预防措施的基本出发点。

#### (3) 再热裂纹的预防措施:

①选用再热裂纹敏感性小的母材,这是最根本的措施。

②采取一切有利于降低残余应力的措施。

③避免焊接残余应力与其他应力(结构应力、再热过程中的热应力等)的复合。

④采用低匹配焊接材料。

⑤在确保消除应力效果的前提下,尽量采用较低的再热温度和较短的保温时间。如果能以略低于预热温度的后热来代替再热,则以后热为好。

#### 4. 层状撕裂

层状撕裂是在焊缝快速冷却过程中,在板厚方向拉伸应力作用下,在钢板中产生的与母材轧制表面平行的裂纹,常发生在T形、K形厚板接头中,如图4-21所示。层状撕裂也是在常温下产生的裂纹,大多数在焊后150℃以下或冷却到室温数小时以后产生。但是,当结构拘束度很高和钢材层状撕裂敏感性较高时,在300~250℃范围内也可能产生。

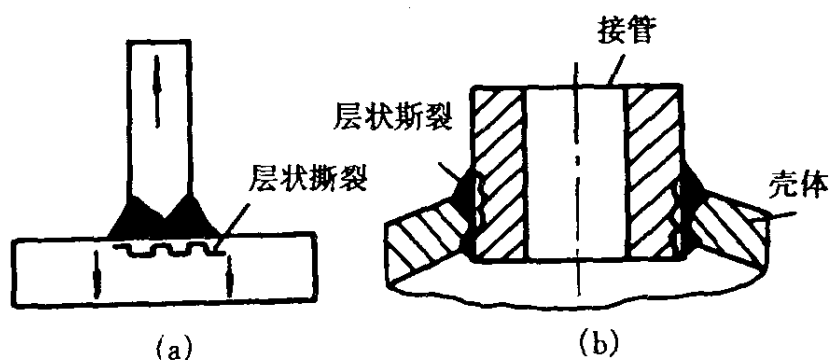


图4-21 层状撕裂

(a)层状撕裂在“T”型接头中的典型位置;

(b)锅炉汽包下降管接头中的层状撕裂

(1)造成层状撕裂的主要因素:

①夹杂物的影响。夹杂物是造成钢材各向异性的主要原因,也是层状撕裂的发源地。

②母材性能的影响。金属基体本身的塑性、韧性对层状撕裂有重要影响。塑性、韧性差,就意味着抗层状撕裂的能力差。

③拘束应力的影响。任何焊接裂纹都是在拉伸应力的作用下发生的,层状撕裂也不例外。只有在角接接头和T形接头这类易形成较大两向拘束应力的情况下,才会引起层状撕裂。所以接头设计要尽量减小两向拘束应力。此外,工艺上用多道焊代替单道焊,以及预热或保持层温也能降低拘束应力。

(2)层状撕裂的预防措施:

已经发生的层状撕裂修复十分困难,对这种缺陷主要是预防。

①当焊接接头的拘束程度可能会导致层状撕裂时,就应对所用钢板进行层状撕裂敏感性评定,并选用对层状撕裂敏感性低的钢板。

②采用合理的坡口型式,尽可能使焊缝熔合线同钢板成一角度。

③对层状撕裂比较敏感的钢种,如设计允许,可用强度等级较低、塑、韧性较好的焊接材料,使焊缝承受较大的拘束应力而降低钢板厚度方向的应力。

④钢种的层状撕裂敏感性较高,可在焊接坡口处的钢板表面预先堆焊几层低强度的焊缝金属,堆焊厚度可按钢板的层状撕裂敏感性和结构刚性来确定。

### 4.7 锅炉压力容器用钢的焊接工艺特点

机械设备,特别是锅炉的受压元件一般工作在不同的温度区段,所以构成锅炉受压件的材料品种也相当齐全,归纳起来有五大类:低碳钢、低合金结构钢、低合金珠光体耐热钢、9%~12%Cr的马氏体或马氏体-铁素体耐热钢和奥氏体不锈钢。表4-13给出了国际上广泛使用的

各种锅炉钢的各义化学成分以及使用温度范围。下面分别叙述这五种钢的焊接工艺特点。

表 4-13 材料名义成分及外表的最高使用金属温度

相应规范 合金标准	名义成分	临界氧化 温度 <sup>°F</sup>	临界氧化 温度 <sup>°C</sup>
SA-178,210,192	碳 钢	850	454
SA-209 T1	0.5Mo	900	482
SA-213 T11	1.25Cr-0.5Mo	1 025	552
SA-213 T22	2.25Cr-1Mo	1 100	593
SA-213 T9	9Cr-1Mo	1 175	635
DIN17175 X20CrMoV121	12Cr-0.5MoV	1 175	635
EM12/NFA49213	9Cr-2MoVNb	1 175	635
SA-213 T91	9Cr-1MoVNbN	1 200	650
SA-213 T92	9Cr-0.5Mo-1.8WVNb	1 200	650
SA-213 T122	12Cr-0.4Mo-2WVNb	1 200	650
SA-213 Type 304H	18Cr-8Ni	1 400	760
SA-213 Type 347H	18Cr-10Ni	1 400	760
SA-213 Type 321H	18Cr-10Ni	1 400	760
12Cr1MoV GB5310	1Cr-0.5Mo	1 112	600
12Cr2MoWVTiB GB5310	2Cr-0.5Mo-0.5W-0.3V	1 148	620

#### 4.7.1 低碳钢焊接工艺

制造锅炉受压元件的低碳钢主要有 Q235 - A, 20g, 15g, 22g 钢板和 10, 20, 20G 钢管, 这些材料主要用来制造工业锅炉的锅筒、管件、集箱等, 管材主要用来制造水冷壁和对流管束。因碳钢强度低, 所以高压或超高压以上的自然循环锅炉锅筒一般不采用低碳钢, 而是采用低合金结构钢。但美国、日本的一些锅炉制造厂习惯上仍采用低碳钢来制造锅炉锅筒, 如 SA299 钢板, 这主要是因为低碳钢的可焊性好, 工艺性能好。这些钢的碳含量低, 最高不超过 0.26%, 故没有淬硬倾向, 焊接性能良好, 不必采用特殊的焊接工艺, 通常一些薄壁件也不需要焊后热处理, 可采用所有的焊接方法进行焊接, 并能获得性能良好的焊接接头。

#### 4.7.2 低合金高强度钢的焊接工艺

锅炉、压力容器广泛采用低合金高强度钢, 常用的钢种有 16Mng, 15MnVg, 19Mn6, 13Mn-NiMo54, 13MnNiMoNb, 14MnMoVg, 18MnMoNb, 这类钢的共同点是焊缝热影响区具有不同程度的淬硬倾向, 焊缝和热影响区对冷裂纹都比较敏感。电弧焊时, 各种冷却速度下都可能在热影响区内形成马氏体组织。钢中碳和合金元素的含量愈高, 热影响区的淬硬倾向就愈大, 同时金相组织中马氏体组分的比例就愈高。因此, 在拟定其焊接工艺时, 应以防止接头各区马氏体组织和冷裂纹形成及防止热影响区淬硬变脆为基本出发点。其焊接工艺特点如下:

①使用碱性低氢焊条,烘干温度 $400^{\circ}\text{C}$ ,时间2h,放在保温筒内随用随取。

②采取适当的焊接规范以控制焊接冷却速度。既要防止因焊接规范过小,冷却速度大,增加热影响区淬硬倾向;也要防止因焊接规范过大,冷却速度缓慢,使高温停留时间过长,晶粒严重长大。因此,对于有过热倾向而又有一定淬硬性的钢,可以用线能量小的规范,以减少高温停留时间,同时采用预热来减小过热区的淬硬性。

③焊前预热和焊后低温消氢处理相配合,防止强度级别较高的低合金钢产生冷裂纹。

④尽量减少结构的刚性和装配应力,禁止强力组装,并采用合理的焊接顺序。

⑤采用焊后热处理,以减少焊缝残余应力和改善组织。

#### 1. 屈服极限小于 $400\text{MPa}$ 高强度钢的焊接

属于这类的有 $16\text{Mn}$ , $15\text{MnV}$ 和 $19\text{Mn6}$ 三种,它们的锰含量( $<2\%$ )提高了钢的强度,但还未损害钢材的塑性和韧性。由于碳含量较低,焊接性良好,当板厚不超过 $30\text{mm}$ ,可采用与低碳钢相同的工艺焊接这类钢。但是当板厚大于 $50\text{mm}$ 时,焊接区的冷却速度已足以使热影响区淬硬,需考虑采取相应的焊接工艺措施。

#### 2. 屈服极限大于 $400\text{MPa}$ 高强度钢的焊接

这一类的钢主要有 $13\text{MnNiMo}$ , $13\text{MnNiMo54}$ , $14\text{MnMoV}$ , $18\text{MnMoNb}$ , $20\text{MnMo}$ 等。

$18\text{MnMoNb}$ 钢和 $14\text{MnMoV}$ 钢的焊接性与 $13\text{MnMoNi54}$ 钢基本属于同一等级。 $18\text{MnMoNb}$ 钢和 $14\text{MnMoV}$ 钢由于含有 $\text{Mo}$ , $\text{V}$ 和 $\text{Nb}$ 等碳化物形成元素,有一定的消除应力裂纹倾向,在拟定高拘束度厚壁接头的焊接工艺时,应采取相应的措施。壁厚大于 $20\text{mm}$ 的工件,焊接必须预热至 $150^{\circ}\text{C}$ ,预热区的宽度至少为焊件厚度的3倍。在厚壁焊件中必须注意内外壁均匀达到所规定的预热温度,不均匀的预热反而会导致裂纹的形成。焊接过程中,焊件应保持不低于预热温度的层间温度,但层间温度也不宜太高,否则会显著地降低接头的强度和韧性。 $14\text{MnMoV}$ 钢焊件的最佳层间温度为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。 $20\text{MnMo}$ 钢作为一种压力容器用大型锻件材料,虽然标准规定的屈服极限小于 $400\text{MPa}$ ,但是大型锻件一般都需作调质处理,这种钢的实际屈服极限往往大于 $400\text{MPa}$ 。从钢的焊接性来看, $20\text{MnMo}$ 钢也应按强度较高的钢来考虑,在大锻件的焊接中,必须注意锻件的成份偏析对焊接的不良影响,因此应采用较保守的焊接工艺。

### 4.7.3 珠光体耐热钢的焊接工艺

低合金珠光体耐热钢在正火后得到的组织是珠光体,它能在 $450\sim 620^{\circ}\text{C}$ 温度下长期工作,具有足够的蠕变强度和抗氧化能力,中、高压以上锅炉的过热器、再热器管、集箱、蒸汽导管等大多采用这种钢材。常用的有 $12\text{CrMo}$ , $15\text{CrMo}$ , $12\text{Cr1MoV}$ , $20\text{CrMo}$ , $12\text{Cr2MoWVTiB}$ , $12\text{Cr3MoVSiTiB}$ 等。

#### 1. 低合金珠光体耐热钢的焊接特点

##### (1) 具有淬硬倾向。

珠光体耐热钢含有不等的合金元素 $\text{Cr}$ , $\text{Mo}$ , $\text{W}$ , $\text{V}$ 。由于钢中碳与合金元素共同作用,使钢的奥氏体稳定性增加,不易发生正常的分解,而在冷却较低温度时才发生马氏体转变。因此这类钢焊接时易形成淬硬组织,使焊接接头脆性增大,常导致产生裂缝。钢的淬硬程度取决于冷却速度和合金元素含量。钢中含碳量及合金元素越多,冷却速度越大,淬硬倾向也越大。因此这类钢焊前一般都需预热(小直径薄壁管视情况也可不预热)。预热温度较普通低合金钢要



高些,一般为 200~300℃,并要求将工件一次焊完。

#### (2)产生冷裂纹及再热裂纹倾向。

珠光体耐热钢对冷裂纹较敏感。因此,任何厚度的耐热钢焊接接头焊后都应进行热处理,以消除残余应力,加快接头中氢的逸出,避免冷裂纹产生。

珠光体耐热钢还易产生火口裂纹,焊接收弧时应特别注意。

### 2. 珠光体耐热钢焊接方法及焊接材料

用于制造锅炉的珠光体耐热钢主要是各种不同直径的管子。小直径珠光体耐热钢管对接焊可用手工电弧焊、氩弧焊及等离子焊等方法,大直径管还可以用埋弧焊。

焊接珠光体耐热钢,电弧焊用的焊接材料,主要应考虑焊缝金属的成分要和母材的化学成分基本一致,以保证高温使用性能。如果焊缝金属成分同母材的化学成分相差很大,其接头经长期高温工作后,因成分不均匀,有些元素易发生扩散,会导致焊接接头持久强度的明显下降。除了成分以外,还要求焊缝金属的机械性能和母材相近,尤其要考虑高温性能。另外焊缝金属的强度不宜选得过高,因强度高,塑性将下降。

焊接珠光体耐热钢的手工电弧焊,焊条药皮均为碱性低氢型焊条,因此要特别注意焊条的烘干问题。

12Cr1MoV 钢的手工电弧焊可选用 R317 焊条。埋弧焊选用 H08CrMoV 焊丝配 HJ350 焊剂。气体保护焊可采用 H08CrMnSiMoV 焊丝和富氩混合体。焊条和焊剂必须严格烘干,并保持低氢的焊接条件。焊件的层间温度不应低于规定的最低预热温度,焊件厚度超过 60mm,焊后应立即作消氢处理。厚度大于 6mm 的 12Cr1MoV 钢焊件焊后应作 730~750℃ 的热处理。

### 4.7.4 高合金 9%~12%Cr 铁素体钢焊接工艺特点

9%~12%Cr 系耐热钢具有很高的蠕变断裂强度和抗氧化能力,填补了介于低合金钢和奥氏体钢之间的空白,其主要代表有美、英商用 9Cr-1Mo,法国 EM12(9Cr-2Mo),瑞典 Sandvik 公司的 HT9(12%Cr),德国的 X20CrMoV121(12%Cr)和日本研制的 HCM9M(9Cr-2Mo)。这些材料都是从 50 年代末开始陆续开发出来,应用于发电设备,其中以法国 EM12 和德国 X20CrMo121 使用比较广泛。近几年一些先进国家已开始发展高参数大容量机组,主蒸汽温度已从 540℃ 逐步向 566℃ 和 593℃ 发展,其中日本、丹麦等国家已经有再热蒸汽温度 593℃ 的发电机组在运行,而蒸汽参数的提高需要高强度、高性能的电站耐热材料,其中美国在商用 9Cr-1Mo 的基础上研制了改良 9Cr-1Mo(9Cr-1MoVNbN)钢,在 ASME 规范中列为 T91 和 P91(T91-小口径,P91-大口径),日本在开发 12%Cr 钢上发展了新型的 HCM12A(12%Cr)。改良 9Cr-1Mo 钢,其蠕变断裂强度在 625℃ 时和奥氏体不锈钢 TP304H 等强。我国 300MW 和 600MW 的亚临界发电机组锅炉已引进 T91 钢来代替 TP304H,取得了显著的经济效益。

#### 1. T91 钢焊接工艺特点

改良 9Cr-1Mo 钢焊接接头的蠕变断裂实验表明,T91/P91 在 600℃ 时,焊缝的蠕变强度和母材相当;650℃ 时的焊缝强度稍低于母材,但线性外推获得的 100,000h 的焊缝强度仍然能满足 ASME 规范的许用应力标准。

T91/P91 是马氏体型耐热钢,适用于制造管壁温度≤650℃ 的过热器管和蒸汽管道。

用 Tigamajig 法进行的热开裂试验,并未显示 T91 钢材有何特殊敏感性,焊接产生的重要

结构改变局限于两个区域:热影响区和熔敷金属。T91的预热温度须在150℃和250℃之间,焊缝最终的微观组织和硬度取决于奥氏体化的温度和冷却过程,但目前锅炉厂所用的T91钢管管径小,壁厚薄,试验证明,对于小口径薄壁管焊前不预热,也不会产生冷裂纹,另外预热和不开预热焊接的接头性能基本上没有差异,其结果也符合规定要求。T91钢可用各种方法进行焊接,焊后的热处理是必须进行的,规定的最低温度750℃,为获得接头合理硬度和良好延展性,法国Vallurec Industries公司建议热处理的温度掌握在 $760^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 为宜。

我国几大锅炉厂对国产、日产二种T91钢管的焊接性进行了工艺试验,采用的焊接方法有手工电弧焊、手工TIG焊、热丝TIG焊和自动MIG焊等四种,采用焊接材料有国产的H06Cr9Mo1V焊丝和CM-9Nb焊条,焊前有预热和不预热的,经焊后热处理后没有发现宏观和微观的裂缝和其它缺陷。焊接接头的性能都达到ASME要求。

#### 2. X20CrMoV121(12%Cr)钢的焊接工艺特点

X20CrMoV121是马氏体型的热强钢,适合于制造金属壁温 $\leq 650^{\circ}\text{C}$ 的过热器、再热器管子和管道,在美国T91/P91使用以前,X20CrMoV121(简称X20)在商业上已获得极大成功,有超过150 000h的运行实绩。但该钢工艺性能不如T91/P91,由于该钢含有过高的碳含量(0.17%~0.23%)使得该钢可焊性差,X20钢可进行手工电弧焊和TIG焊,但焊前必须预热,焊后要进行热处理,预热温度根据钢管壁厚大小来决定,对于厚壁管和苛刻的焊接条件,至少要预热到400℃,焊后空冷到100~150℃,随后进行消除应力退火或回火。X20CrMoV121钢可以冷弯,但对变形较大的钢管,应作去应力退火,X20钢管供应状态为调质处理,既在1 020~1 070℃的温度中加热空冷或油冷,然后进行730~780℃回火空冷,去应力温度为600~650℃空冷。

#### 4.7.5 奥氏体不锈钢的焊接特点

奥氏体钢具有高的热强性和优良的抗氧化性、抗介质腐蚀的能力,是高蒸汽参数的锅炉过热器,再热器管材的高温段的主要用钢。这一系列比较典型的有18-8,15-10型,25-20型奥氏体不锈钢。

##### 1. 奥氏体钢焊接的主要问题及防止措施

晶间腐蚀是18-8型奥氏体钢最危险的破坏形式之一。特点是腐蚀沿晶界深入金属内部,并引起金属机械性能显著下降。

晶间腐蚀的形成过程是不锈钢在450~850℃的温度范围停留一段时间后,由于碳在奥氏体中扩散速度大于铬在奥氏体中扩散速度,为奥氏体中的含碳量超过它在室温的溶解度时,碳就不断向奥氏体晶粒边界扩散,并和铬化合,析出碳化铬。而铬扩散速度小,来不及向边界扩散、补充,即造成奥氏体边界贫铬,使晶粒边界丧失抗腐蚀性能,产生晶间腐蚀。焊接过程中可能在焊缝附近某一区加热到上述温度,并停留一段时间,如母材成分不当或焊条选择及焊接工艺不恰当,在焊缝或热影响区都有可能产生晶间腐蚀。为防止晶间腐蚀,可采取如下措施:

(1)控制含碳量。碳是造成晶间腐蚀的主要因素。如含碳量很小,则碳全部溶解在固溶体中,不易扩散产生晶间腐蚀。一般焊接材料含碳量控制在0.08%以下或更低( $< 0.04\%$ ),可提高焊缝抗晶间腐蚀性能,如奥107、奥007焊条,H00Cr17Ni11Mo2焊丝等。

(2)添加稳定剂。在焊接材料中加入钛、钽、铌、锆等和碳亲和力比铬强的元素,能够与碳结合成稳定的碳化物,从而避免在奥氏体晶界造成贫铬,可提高抗晶间腐蚀能力。一般加钛为



碳含量的 5 倍,加铌为碳含量的 10 倍,如奥 137 焊条, H0Cr18Ni9Ti 焊丝等。

(3) 采用合理的工艺措施。为防止奥氏体钢在 450~850℃ 停留时间过长,产生晶间腐蚀,焊奥氏体钢时,一般不预热,应尽可能采用大的焊接速度、短弧和焊条不作横向摆动。多道焊时,待前一条焊缝完全冷却再焊下一道焊缝,或用垫板加速焊缝冷却。

(4) 焊后热处理。焊后可将焊接接头进行固溶处理。方法是把焊接接头加热到 1 050~1 100℃,此时碳化铬又重新溶入奥氏体中,然后迅速冷却以稳定奥氏体组织。

## 2. 焊接方法

奥氏体钢可用手工电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊,埋弧自动焊、等离子焊、电阻焊、摩擦焊等各种方法焊接。电渣焊由于其热过程特点,对奥氏体钢焊接接头质量不利,所以很少采用。

采用手工电弧焊时,如焊条和焊接工艺合适,可以得到质量较好的接头,对一般锅炉常用含钛 18—8 型奥氏体耐热钢,可用奥 132、奥 137 等焊条;对 25~20 型奥氏体钢,可用奥 402、奥 407 焊条。对铬-锰-氮型奥氏体钢、钢 D1 钢 101 可用奥 407 焊条;钢 A4 可用与母材成分相近的奥 707 焊条。

用自动焊焊接奥氏体钢时,主要根据母材牌号选用成分类似的焊丝,焊剂应具有较低的氧化性,可用低锰高硅中氟焊剂 260 及低硅高氟焊剂 172。

氩弧焊由于热量集中,加上氩气对焊接区的冷却及保护作用,焊接奥氏体钢时能得到质量优异的焊接接头。对薄板及直径较小的管子,可用钨极氩弧焊,对厚度较大的奥氏体钢件可用熔化极氩弧焊,用直流反接,以减轻工件的过热,焊接材料采用与母材成分相类似的焊丝。

## 4.7.6 异种钢焊接

锅炉介质的变化温度是一个连续的过程,因此,随着蒸汽温度的升高,所要求的锅炉耐热材料的热强性也不断提高,低合金耐热钢的最高耐热温度约为 600℃,中合金 9%~12%Cr 铁素体钢的最高耐温度约为 650℃,因为当蒸汽温度处于 566℃ 和 593℃ 时,高温过热器的金属壁温将达到 650℃ 以上,因此,铁素体钢和奥氏体不锈钢的异种钢焊接问题不可避免。

异种钢焊接问题常会遇到一些特殊问题,如,两种材料所含合金元素熔入焊缝,可能使其性能良好,或产生裂开缺陷。

异种钢焊接时应注意以下问题:

### 1. 焊缝金属的稀释问题

异种钢焊缝金属的化学成分取决于填充金属的成分及其被母材稀释的程度。如果 18-8 不锈钢和低碳钢相焊接,在没有焊条金属填充时,不锈钢与低碳钢熔入焊接溶池中的数量大体相当,则在焊缝金属中,合金元素铬、镍的含量明显少于不锈钢,为了确保焊缝成分的合理性,必须选用高合金材料作为填充金属,并在焊接时适当控制熔合比。

### 2. 对熔合区塑性的影响

异种钢焊接时奥氏体焊缝金属中紧邻熔合线处存在一个窄的低塑性带,宽度一般为 0.2~0.6mm,其化学成分和组织与焊缝不同,称作熔合区脆性交界层。它的存在会严重降低焊接接头的韧性。因此,在低温下工作的异种钢接头应选用高镍合金焊条,以减小溶合区脆性马氏体层的宽度和熔合区附近冲击韧性降低的幅度。

### 3. 碳迁移及对高温性能的影响

异种钢焊接接头在焊后热处理或在高温下工作时,熔合线附近会发生碳的迁移现象,其结果是在含碳化物形成元素低的珠光体钢一侧出现脱碳层,而相邻的铬镍奥氏体焊缝出现增碳层,从而使脱碳层软化,增碳层硬化,接头的高温持久强度和抗腐蚀性能下降。

提高焊缝金属中含镍量可以阻止碳的迁移。工作温度愈高,焊缝含镍量应愈高。

#### 4. 热应力的影响

奥氏体钢热膨胀系数比铁素体钢大 30% ~ 50%,因此,这两种材质的异种钢接头在焊后冷却、热处理和运行中将产生较大的热应力,若在周期性加热和冷却的条件下工作,还可能出现熔合区珠光体侧的热疲劳裂纹,使接头过早断裂。

采用线膨胀系数与珠光体钢或碳钢较接近的高镍基焊条焊接或堆焊过渡层,可以减小热应力及热疲劳的不利影响。

当将两种机械性能与焊接工艺要求均不相同的钢种焊接成一体时,其焊接材料的机械性能指标,应与机械性能较低的钢种相符;而焊接工艺则应符合焊接工艺要求较高的钢种。同等强度的焊条以选用抗裂性及塑性好的低氢焊条为佳。从化学成分看,要针对不同情况区别对待,例如低合金钢与 12% 铬钢焊接,应选用相应的低合金钢焊条;低合金钢与铬镍奥氏体钢焊接要选用高铬镍焊条。常用的异种钢焊接材料选用情况见表 4-14。

表 4-14 异种钢焊接材料的选用

类别	钢号	手工电弧焊	埋弧焊	预热温度 (℃)
碳钢 + 低合金	Q235-A + 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	E4303	H08MnA + 焊剂 431	200
低合金 + 低合金	2 $\frac{1}{4}$ Cr1Mo + Cr5Mo	E6015 - B3	12CrMnMoA + 焊剂 2250	200
低合金 + 9% Cr 钢	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo + 9Cr-1MoVNbN	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	250
9% ~ 12% Cr 合金	9Cr-1MoVNbN + X20CrMoV121	9Cr-1MoVNbN E1505-15 ASME SFA5.4	9Cr-1MoVNbN	250
9% ~ 12% Cr + 奥氏体钢	9Cr-1MoVHbN + TP304H(18-8)	INConel182 ASME SFA5.11 TPENiCrFe3	INConel182 ASME SFA5.11 TPENiCrFe3	200

## 第5章 铸锻成形及表面工程技术

### 5.1 铸造造型方法

铸造造型方法很多,可根据铸件的结构形状、批量大小等情况选用比较经济的造型方法。从成形角度来区分常用的造型方法有如下几种:

#### 1. 整模造型

用一个整体模型,型腔全部位于一个砂箱内,分型面是平的。图5-1是一个平衡块整模造型图。整模造型操作简便,不会错箱,适合形状简单的铸件,零件的一侧有一个最大的平面。

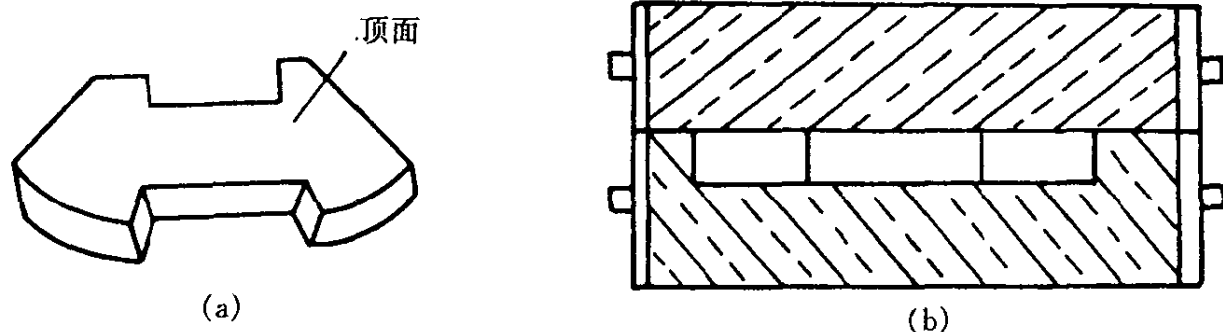


图 5-1 平衡块整模造型图

(a)平衡块毛坯;(b)造型图

整模造型可分为熔模铸造与实型铸造两种。

#### (1) 熔模铸造:

熔模铸造又称“失蜡铸造”,这种方法是用可溶性材料(不限于石蜡)制成尺寸精确且没有分型面的实体模样,在模样上涂挂数层耐火材料,经硬化、干燥制成型壳,然后加热使模样熔失制得空心型壳,再经高温焙烧,然后进行浇注而得到铸件。因无需起模,故型壳为整体而无分型面,且型壳是由高温性能优良的耐火材料制成,故用熔模铸造出的铸件精度和表面粗糙度均较好。

#### (2) 实型铸造:

实型铸造(Full Mold Casting),这种方法是用某种可燃物或可挥发物[通常为聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)]制成模型,造型后模型不取出呈实体铸型,浇入金属液时,随着充填过程进行,模型气化,直至模型空间被液态金属所占据,而得到铸件。由于模型无需从铸型中取出,故造型材料可用无任何粘结剂的干砂,从而使工艺过程大大简化,为了使铸型有一定强度以免崩溃,尚需经过多次振动紧实工序。为了进一步简化,人们用磁丸代替干砂,用磁场代替粘结剂从而形成一种造型新工艺,可免去振动紧实工序,这种新工艺叫做“磁型铸造”。其基本原理是:将铁磁性材料(铁丸或钢丸)充填在泡沫塑料实型周围,通过外磁场作用,使铁磁材料相互吸引而获得一定强度的铸型,如图5-2所示。磁丸造型后,与实型干砂法一样便可浇注,浇注

时模型气化,液体金属占据空间,冷却凝固后形成铸件。

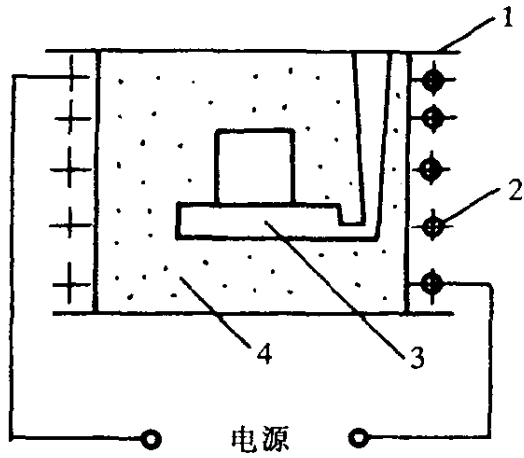


图 5-2 磁丸造型原理图  
1—砂箱;2—磁场线图;  
3—塑料模;4—铁丸(或钢丸)

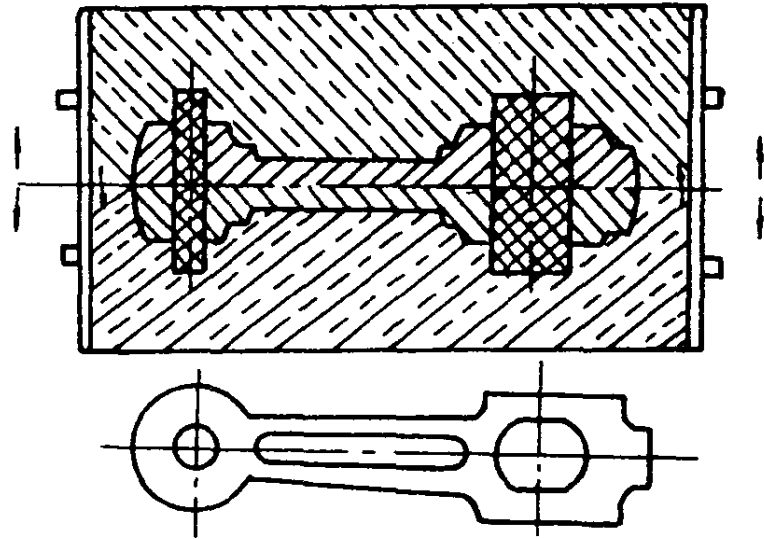


图 5-3 连杆分开模及其造型

### 2. 分模造型

当铸件模型不能由一个方向起模时,可以将模型沿最大截面分成两半,并用销钉将其定位,这种模型叫分模,模型的分开平面即作为造型的分型面,图 5-3 为连杆分模及其造型图。对于复杂零件有时模型分开达 5~6 层,每分开一层就意味增加一个分型面,增加一层砂箱,分开模造型容易错箱。

### 3. 挖砂造型

如果铸件的最大截面不在铸件最外端部,而是在中间,并且模型又不便于分成两半,这时可采用挖砂造型。图 5-4 中的铸件为一阀盖,用挖砂造型修分型面时,必须正好修到模型最大

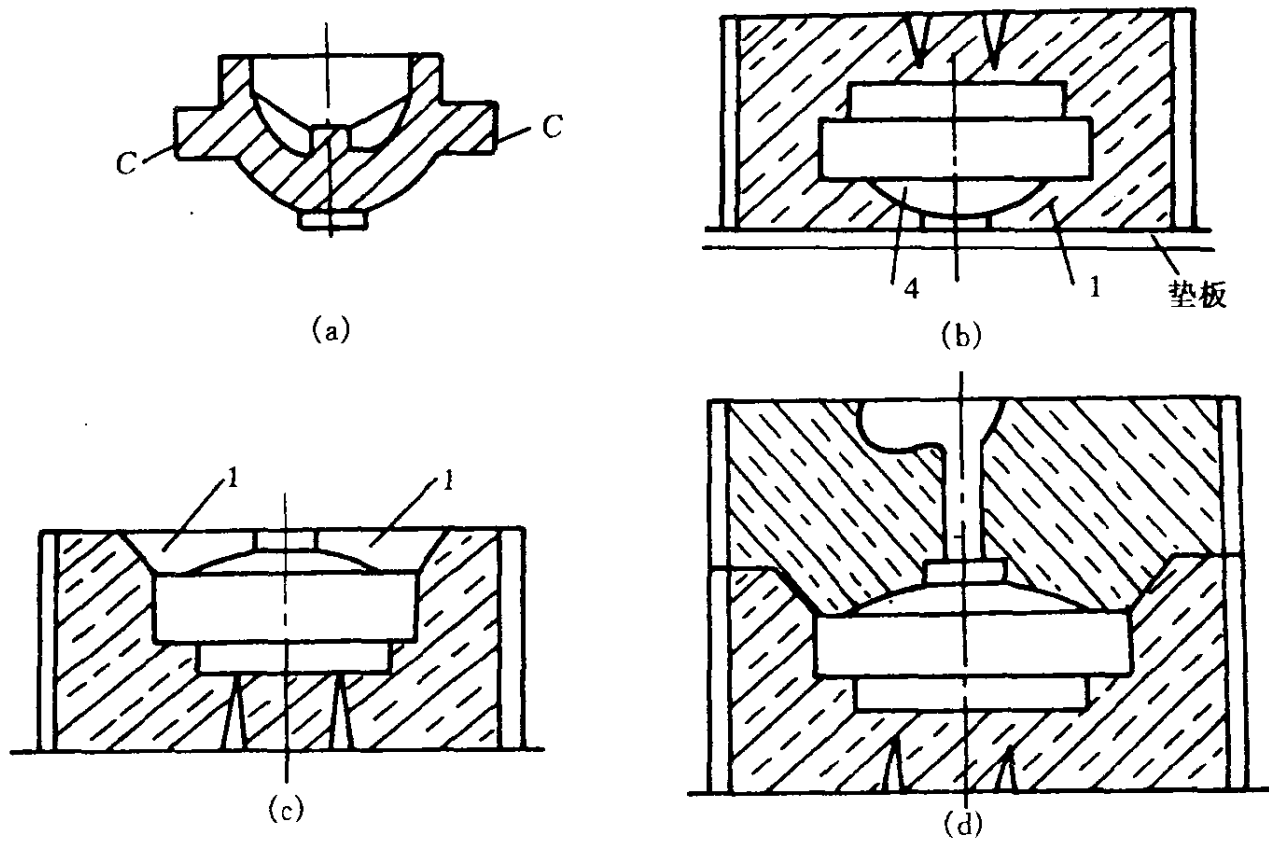


图 5-4 阀盖的挖砂造型图  
(a)阀盖图(模型图);(b)造下砂型;(c)挖砂;(d)做好的铸型

截面上,否则起模时易把砂型弄坏,对于该零件,分型面不是一平面,而呈一曲折面。用了挖砂造型,在仍保证取出模型的条件,可以少增加模型的分型,其缺点是增加挖砂的劳动量。

#### 4. 假箱造型与翻箱板造型

在上述挖砂造型中,每做一个砂型均要挖一次砂,这时可用假箱造型来代替。假箱造型的方法是:用含粘土较多的型砂做成如图 5-5 的形状,便于放置模型,该箱并不用来浇注,只是用来造型,所以叫假箱,造型时,在假箱上放好模型,撒上分型砂,就可上面制造下砂型,翻转下砂型,然后在此上面和一般方法一样做上砂型。该用过的假箱下一次造型时可继续使用。

此法用于需深处挖砂时和大批制造时。当用一般的方法造型时模型摆不平,而且又无法分型时,也可采用此方法。

假箱也可用翻箱板代替,这就是翻箱造型,见图 5-6,用翻箱板造型与假箱造型,其原理是类似的。

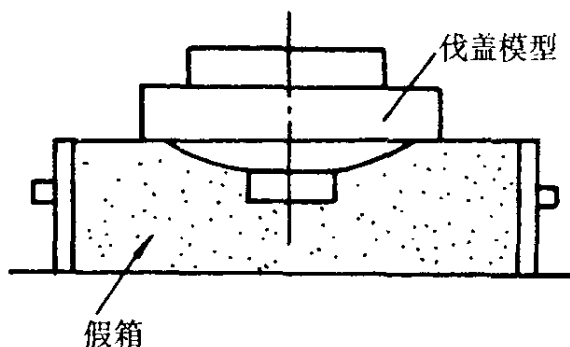


图 5-5 假箱造型

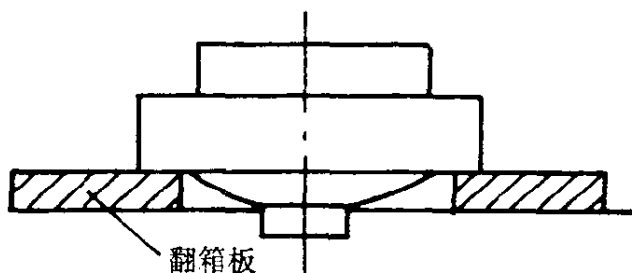


图 5-6 翻箱板造型

#### 5. 活动块造型

某些铸件上有小凸台或加强筋,这些部分在造型时,往往妨碍起模。为不妨碍起模,可将该部位做成活动的模型块。图 5-7 是支架,支架上有一凸台,为不妨碍起模,做成活动块“A”,在模型的主体部分起模时,该活动的模型块暂时仍留在铸型内,在主体模起出后,再自侧面将该活动的模型块“A”取出。

活动块造型化费工时较多,用于单件、小批生产。

#### 6. 带有插入泥芯的造型与泥芯组芯造型

铸件上的凹槽和孔穴往往妨碍模型的起模,解决这种模型形状与起模的矛盾的方法多种多样,如吊砂、凸砂、挖砂等。但当其凹槽、孔穴深度大于其直径时,若用吊砂或凸砂或挖砂(挖砂与凸砂是同一造型的上、下两个方面,成对存在的),其本身的强度已不够,这时可以采用泥芯。泥芯是用另外配制的泥芯砂单独制成的。而带有泥芯铸件本体的造型仍和一般造型相同,不过要在铸模上多做出供泥芯座用的泥芯头,以便在铸型上做出相应的泥芯座,供支撑泥芯用。如图 5-3,连杆的大、小头孔较长,很多工厂均采用了泥芯,其两端支撑在铸型的泥芯座上。

泥芯也可以用来形成毛坯外壁的铸型,如发动机气缸,有的就是用几个泥芯拼凑合成的,其优点是强度高、透气好,合箱方便,大批生产时适用,这叫组芯造型。

#### 7. 刮板造型

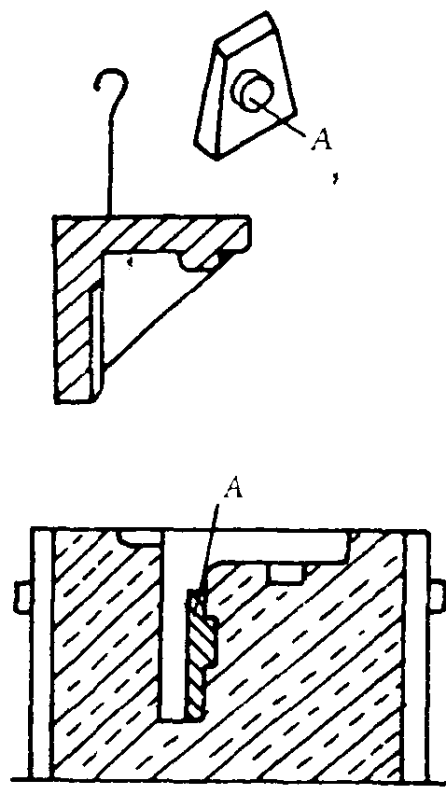


图 5-7 支架活动模造型

制造回转体或等截面形状的铸件时,如弯管、带轮等,若生产数量很少,为了节省制造实体木模所需的木材和工时,可用与铸件截面形状相适应的刮板来刮出所需要的砂型型腔,这就称为刮板造型。刮板分为绕轴旋转的(称为车板)及沿导轨往复移动的(称为刮板)两类。图 5-8 为带轮铸件刮板造型,该刮板是一种车板。

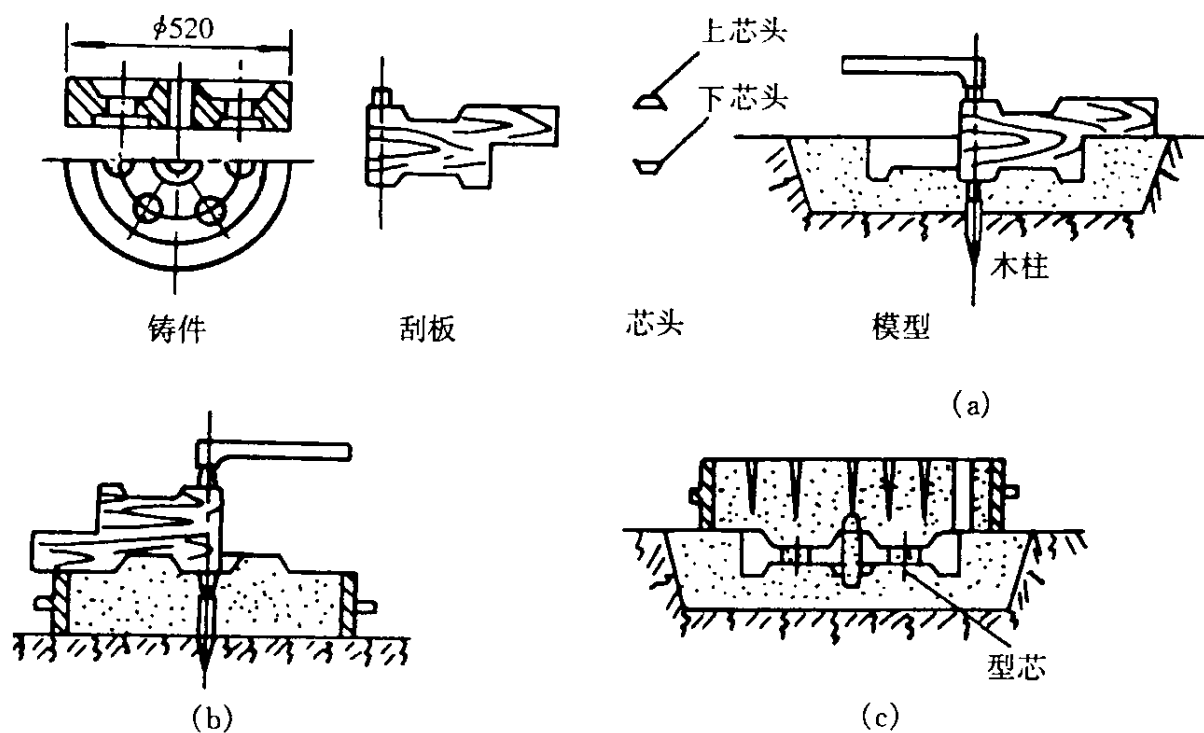


图 5-8 带轮的刮板造型  
(a)刮制下型;(b)刮制上型;(c)下型芯,合箱

## 8. 机器造型

机器造型是用模板在造型机上进行造型的过程(模板可看作是模型与翻箱板的结合),它将紧砂与起模两道工序实现机械化,能大大提高劳动生产率,减轻劳动强度,起模平稳,模型移动量小,对工人操作技术要求不高,铸件尺寸精度较高。

## 5.2 锻压成形工艺

锻造与冲压都是利用外力通过工具或模具使金属坯件或板料产生塑性变形,从而获得具有一定形状、尺寸的工件的一种压力加工方法。

一般,冲压直接形成成品,而锻造则是提供成品的毛坯。锻造可分成手工锻造和机器锻造两种,后者是在各种锻造机械设备上进行的。根据所用设备和工具不同又可分为自由锻造、模型锻造、胎模锻造和特种锻造等四类,其中主要是自由锻造和模型锻造。自由锻造主要用于批量不大的大型零件,模锻用于批量大的零件。

锻造不仅能获得零件的形状,还可改善金属的组织,改善金属的机械性能和物理性能,通常用于制造受力较大的重要零件。

### 5.2.1 自由锻造基本工序

自由锻造是指利用通用工具或直接在锻造设备(锻锤或液压机)的上、下砧之间进行锻造。金属只有部分表面与上述工具或上、下砧接触,其余则为自由表面,自由锻的基本工序有镦粗、

拔长、冲孔等。

### 1. 墩粗

墩粗用于:由横截面积较小的坯料得到横截面积较大而高度较小的锻件,如齿轮坯、凸缘、圆盘等。在锻造环、套筒等空心锻件时,墩粗可作为冲孔前的预备工序,此外,墩粗也可作为提高下一步拔长时锻造比的预备工序。墩粗有完全墩粗和局部墩粗两种。

完全墩粗是将坯料直立在铁砧上锻打,使其沿全长产生变形的墩粗方法(图 5-9)。

端部墩粗是局部墩粗的一种,金属的变形都集中在坯料的端部,通常可在漏盘或胎模内进行。

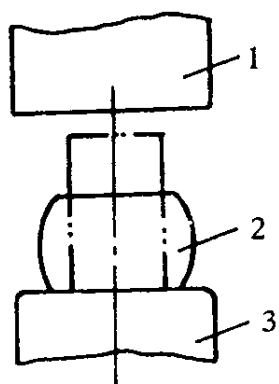


图 5-9 完全墩粗

1—上砧;2—坯料;3—上砧

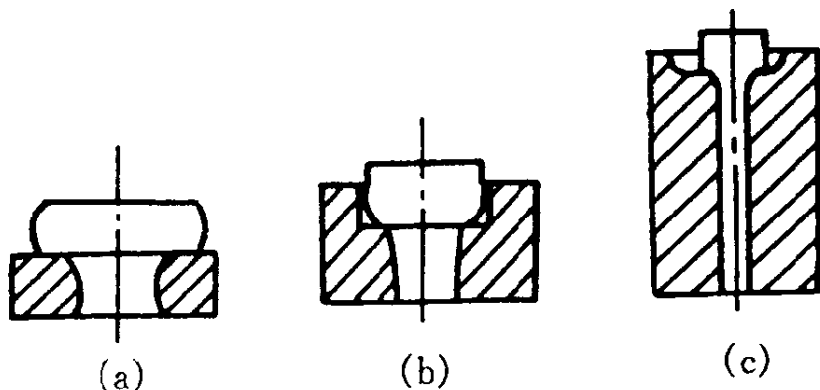


图 5-10 端部墩粗方法

(a)漏盘内墩粗;(b),(c)胎模内墩粗

漏盘内墩粗(图(5-10(a)))适用于小批量的锻件,操作不当时容易产生墩歪现象,使得上下两部分不同心。图 5-10(b),(c)是在胎模内进行端部墩粗,胎模是专用的模具,用在锻件数量较多的情况下。

### 2. 拔长

拔长是使坯料横截面积减小而长度增加的锻造工序,通常用锻造比  $Y$  表示金属变形量。

$$Y = \frac{A_{前}}{A_{后}} \quad (5-1)$$

式中  $A_{前}$ ,  $A_{后}$  分别为拔长前后的坯料横截面积,为了控制锻件内部质量,对于用钢锭锻造的锻件,  $Y \leq 2.5 \sim 3$ ,用钢材锻造时,  $Y = 1.1 \sim 1.3$ ;用高速钢锻造时,  $Y > 5$ 。拔长常用于锻造轴类、拉杆等长轴类锻件。

### 3. 冲孔

冲孔的主要工具是冲头,常用碳素工具钢 T7 制造。

冲孔前必须将坯料加热到始锻温度,然后将坯料放在铁砧上墩粗到所需的高度。再在坯料上安放冲头,轻轻锤击一下后把冲头取出,看所冲的凹坑位置是否准确。若没有偏差,在凹坑内放些煤粉,放上冲头继续锤击,

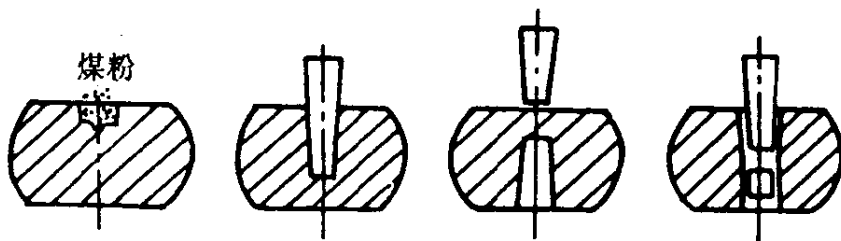


图 5-11 实心冲头双面冲孔

冲入深度约为坯料高度的  $2/3 \sim 3/4$  时,取出冲头。将坯料翻转  $180^\circ$ ,再把冲头(此时要去除第一次冲孔后粘在冲头上的余煤,避免弹出伤人)在反面对准孔的位置冲入,把孔冲穿(图5-11)。这是一种用实心冲头双面冲孔的方法。

#### 4. 其它

其它有弯曲、切割等工序,弯曲是将坯料弯曲成规定形状,切割是将坯料的一部分从坯料上切去的锻造工序,它既可以获得所需形状,亦可用于长毛坯的下料。

#### 5.2.2 冷冲压的基本工序

冷冲压是指在常温下利用压力机和模具将薄板形坯料变成所需的形状、尺寸和性能的零件加工方法,为使坯料在常温下能够产生永久变形而不致损坏,该坯料的材料必须在常温下具有足够的在破裂前可利用的塑性变形阶段,低碳钢、低碳合金钢、变形铝合金具有上述特性,适宜用来作板材。精密的板材或带材由冷轧方法制成,厚度较大的板材也可用热轧制成,但其尺寸精度与表面质量较差。

板制零件的表面粗糙度由板材保证,形状和尺寸精度由模具与冲压工艺保证,通常尺寸精度为 IT10~14 级。各种冷冲压工艺根据使板材变形的程度不同可分为分离工序与成形工序两大类。

##### 1. 分离工序

分离工序是使坯料一部分与另一部分相互分离的工序,包括冲裁、切断、修整等。

冲裁又分成落料与冲孔两种,若冲裁目的是为了制取一定外形的冲落部分,则这种冲裁工序称为落料;为了制取内孔,则称为冲孔。

##### (1) 冲裁变形过程分析:

冲裁变形过程如图 5-12 所示。在模具间隙正常时,这个过程大致可以分为弹性变形、塑性变形、断裂分离三个阶段。

##### ① 弹性变形阶段(图 5-12(a)):

凸模接触板料后,对其加压,板料发生弹性压缩与弯曲,并略有挤入凹模模口。此时,板料的内应力还未超过屈服极限,若凸模回升,板料恢复原状。

##### ② 塑性变形阶段(图 5-12(b)):

凸模继续对板料施加压力,部分材料被挤入凹模模口,产生塑性剪切变形,形成光亮的剪切断面。由于凸、凹模间存在间隙,在剪切变形的同时还伴有板料的拉伸与弯曲。外力继续增加,板料的内应力随之增大,在凸、凹模刃口附近,由于应力集中而出现微小裂纹。微裂纹的出现,表明材料开始破坏,塑性变形阶段告终。

##### ③ 断裂分离阶段(图 5-12(c)):

凸模断续下压,在凸、凹模刃口附近已形成的微裂纹不断向材料内部扩展。当上、下裂纹相遇重合时,工件与板料分离。

上述冲裁过程所形成的冲裁件断面有明显的四部分组成:圆角带、光亮带、断裂带、毛刺(图 5-12(d))。

圆角带产生于塑性变形阶段的开始,由板料的弯曲与拉伸变形所引起,板料软时比硬时的圆角大。光亮带产生于塑性变形阶段,是剪切变形造成的,光亮带和板面垂直,断面质量最佳,其宽度约占板厚的  $1/3 \sim 1/2$ ,软料的光亮带较宽,硬料的光亮带窄些。断裂带产生于冲裁过程的断裂阶段,断裂面比较粗糙,且带有斜度。

##### (2) 冲裁模间隙:

冲裁凸模和凹模间的间隙,对冲裁件的质量、冲裁力和模具寿命等有很大的影响。可用下



述经验公式计算合理的冲裁间隙值:

$$Z = mS \quad (5-2)$$

式中  $S$ ——材料厚度, mm;

$m$ ——与材料性能及厚度有关的系数。

实用中,材料较薄时,  $m$  可以选用如下数据:

低碳钢、纯铁  $m = 0.06 \sim 0.09$

铜、铝合金  $m = 0.06 \sim 0.1$

高碳钢  $m = 0.08 \sim 0.12$

当材料厚度  $S > 3\text{mm}$  时,或材料硬时,由于冲裁力较大,应适当把系数  $m$  放大。对冲裁件断面质量没有特殊要求时,系数  $m$  可放大 1.5 倍。

(3) 凸、凹模刃口尺寸的确定:

设计落料模时,应先按落料件确定凹模刃口尺寸,取凹模作设计基准件,然后根据间隙  $Z$  确定凸模尺寸(即用缩小凸模刃口尺寸来保证间隙值)。

设计冲孔模时,先按冲孔件确定凸模刃口尺寸,取凸模作设计基准件,然后根据间隙  $Z$  确定凹模尺寸(即用扩大凹模刃口尺寸来保证间隙值)。

冲模在工作过程中必然有磨损,落料件尺寸会随凹模刃口的磨损而增大,而冲孔件尺寸则随凸模的磨损而减小。为了保证零件的尺寸要求,并提高模具的使用寿命,落料时取凹模刃口的尺寸应靠近落料件公差范围内的最小尺寸,而冲孔时,选取凸模刃口的尺寸应靠近孔的公差范围内的最大尺寸。

## 2. 变形工序

变形工序是使坯料的一部分相对于另一部分产生位移而不破裂的工序,如拉延、局部成形、翻边等。

(1) 拉延:

拉延是利用模具将平板毛坯制成空心开口零件的一种工艺方法。

① 筒形件的拉延过程:

筒形件的拉延过程如图 5-13 所示。拉延开始,凸模压在直径为  $D$  的平板毛坯的中央部位,凸模下行,坯料的凸缘部分不断被拉入凹模模腔,筒壁随之增高,直至坯料全部进入凹模,坯料就被拉成了内径为  $d$  的筒形件。

在拉延变形过程中,尚未进入凹模腔内的凸缘部分,切向受压应力,径向受拉应力,拉延变形主要发生在这一部分。已形成的筒壁在拉延中起传力作用,使凸缘产生变形的力是由它来传递的,因而筒壁部分受拉应力。至于筒底部分,在拉应力的作用下材料发生少量的减薄,属于微小变形区。

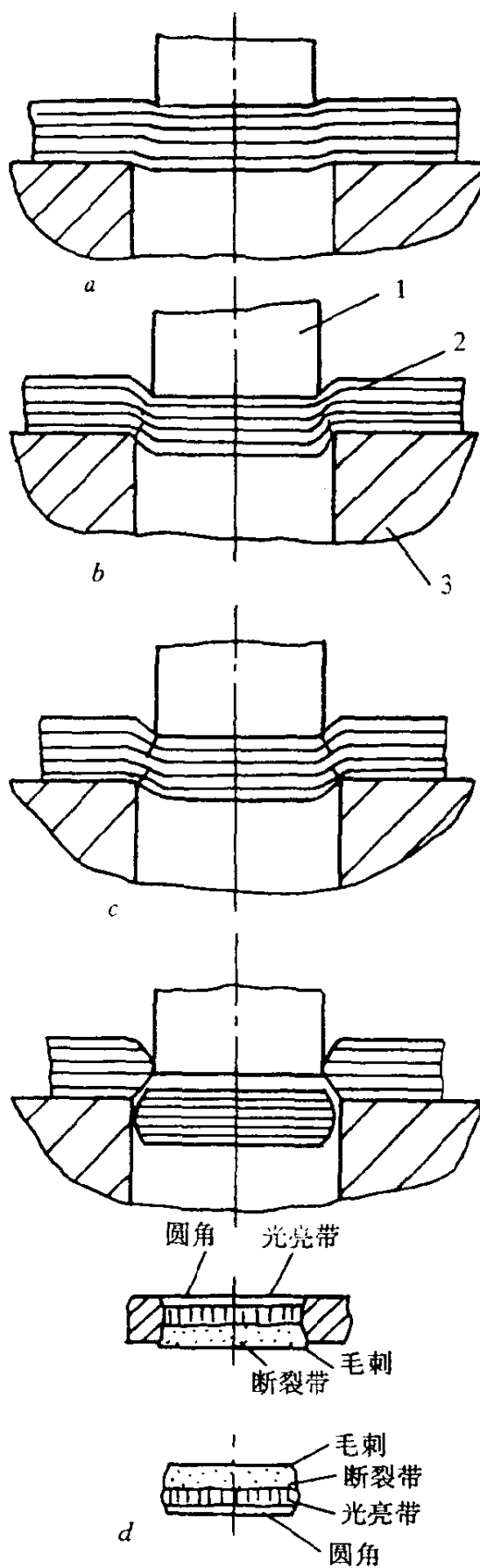


图 5-12 冲裁变形过程与断面  
1—凸模;2—板料;3—凹模

## ② 拉延系数:

在将直径为  $D$  的毛坯拉延成直径为  $d$  的圆筒的过程中,毛坯变形程度的大小取决于  $d/D$  的值, $d/D$  的值越小,拉延变形程度越大。比值  $d/D$  称为拉延系数,用  $m$  表示。

$$\text{即 } m = \frac{d}{D} \quad (5-3)$$

在圆筒件拉延过程中,如果拉延系数  $m$  小到一定程度,凸缘的切向压缩变形程度将很大,使切向压应力超过临界应力,凸缘就会因失稳而起皱(图 5-14)。

拉延过程中毛坯是否起皱,除了受拉延系数  $m$  的影响外,与毛坯的相对厚度  $t/D$  也直接有关。毛坯的相对厚度越小,拉延变形区抗失稳的能力愈差,也愈容易起皱。生产中常用经验公式判断拉延中毛坯能否起皱,坯料不致起皱的条件是

$$(t/D) \times 100 \geq 4.5(1 - m) \quad (5-4)$$

式中  $t/D$ ——板料相对厚度;

$m$ ——拉延系数。

由式(5-4)不难看出,拉延系数  $m$  越大(坯料变形程度越小),毛坯的相对厚度  $t/D$  越大,毛坯愈不容易起皱。

当拉延工艺不满足上述条件时,需采取防皱措施。生产中常用的防皱方法是加压边圈(图 5-15),使毛坯在压边圈与凹模平面之间的缝隙中通过,从而避免起皱。

拉延系数  $m$  过小时,拉延变形程度很大,虽可用压边圈防止起皱,但筒底圆角部分会因厚度变薄较多而成为危险断面,当拉延时的内应力超过材料的强度极限时,筒底靠近圆角处将被拉裂。

因此,在制定拉延工艺时,一次拉延的拉延系数不能取得过小。在一定的工艺条件下,保证拉延正常进行所能采用的最小拉延系数,称为极限拉延系数。如果拉延系数小于一次成形的极限拉延系数,必须采用多次拉延使工件成形(见图 5-16)。由于每次拉延都会产生加工硬化,故拉延系数一次总比一次略大些。

图 5-17(b)是一个带凸缘的圆筒件,当  $d_F/d = 1.1 \sim 1.4$  时,属于小凸缘件(式中: $d_F$  为凸缘直径, $d$  为圆筒直径,参见图 5-18),小凸缘件可当作一般圆筒件进行拉延,只是在倒数第二道工序时才拉出凸缘或拉成具有圆锥的凸缘,最后通过整形工序压成水平凸缘,小凸缘件的拉延过程如图 5-17(a)所示。

## (2) 局部成形和翻边:

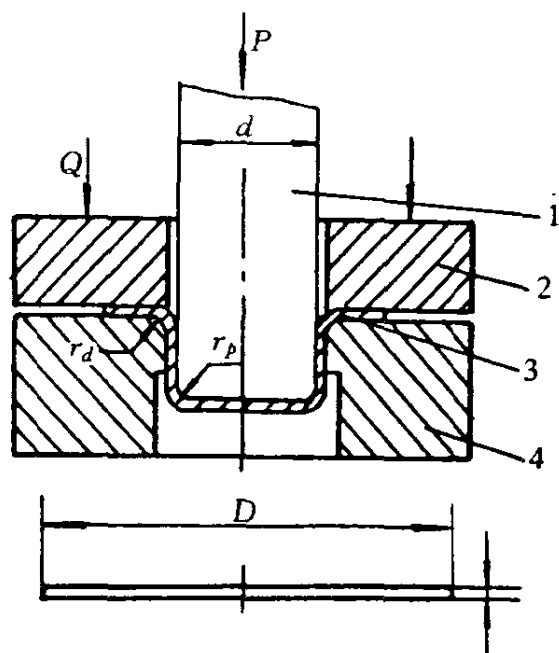


图 5-13 拉延过程  
1—凸模;2—压边圈;  
3—毛坯;4—凹模

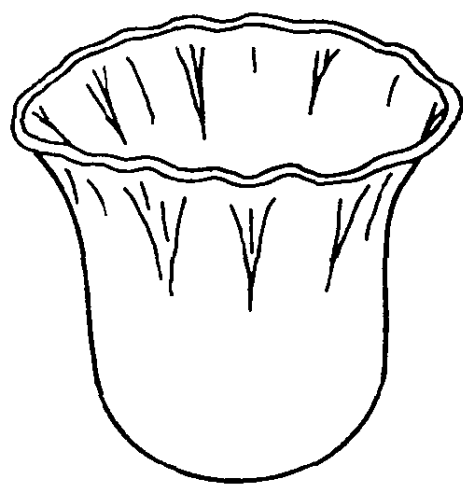


图 5-14 拉延时毛坯的起皱

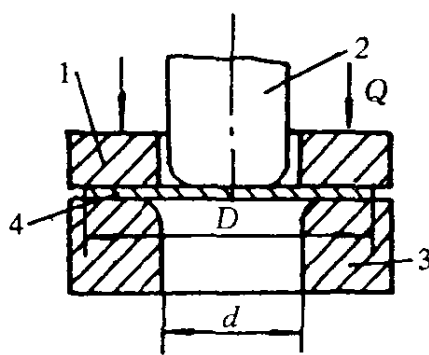


图 5-15 带压边圈的拉延模  
1—压边圈;2—凸模;3—凹模;4—毛坯

局部成形和翻边工序都是局部变形的工序。

① 局部成形：

局部成形是板料在凸、凹模作用下，通过局部材料的变薄、伸长、冲制出某些形状(如压筋、压花等)，变形只产生于被压制部分及其附近。

如图 5-18 所示的带凸缘的圆筒件，在不改变圆筒直径  $d$  的情况下，随着凸缘直径  $d_F$  的增大，拉延时凸缘部分的阻力随之增大，凸缘材料流入凹模内变得越来越困难。当比值  $d_F/d$  达到某一值后，凸缘材料基本上不能流入圆筒部分，这时，圆筒部分成形只能在凸模作用下，靠局部材料的变薄来实现。

由此可见，局部成形和宽凸缘件拉延的主要区别在于：前者是由材料局部变薄而得到的，而后者是由凸缘材料流入凹模而得到。

比值  $d_F/d$  是区分局部成形和凸缘件拉延的重要依据，一般把  $d_F/d = 3$  作为大体的区分界限。 $d_F/d > 3$  时，大致属于局部成形； $d_F/d < 3$  时，则大致属于拉延变形。

根据制件的要求，局部成形可压出各种形状，如压筋(图 5-19(a))、压包(图 5-19(b))、压字、压花等。局部成形工艺不仅用以装饰工件的外形，而且能有效地提高工件的刚度，所以在生产中应用很广泛。

② 翻边：

如欲制成如图 5-20 所示的空心无底板制件，可采用凸缘件拉延后切底的工艺，也可采用内孔翻边的工艺。所谓内孔翻边，是将工件孔的边缘在模具作用下翻成竖立的直边。

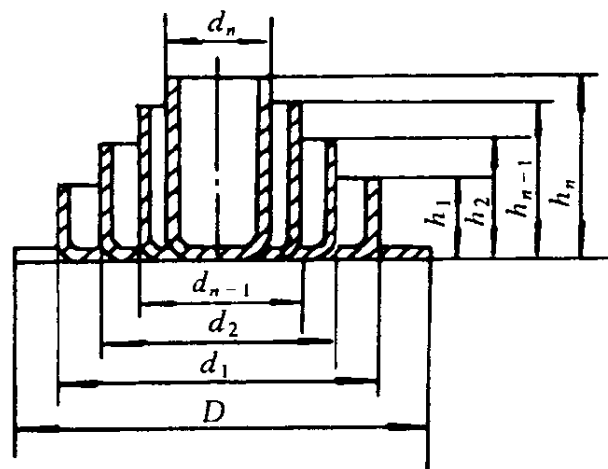


图 5-16 拉延工序示意图

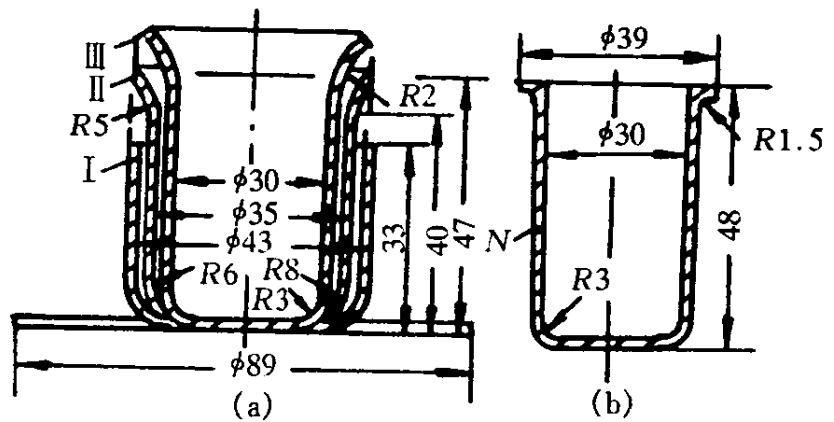


图 5-17 小凸缘件的拉延

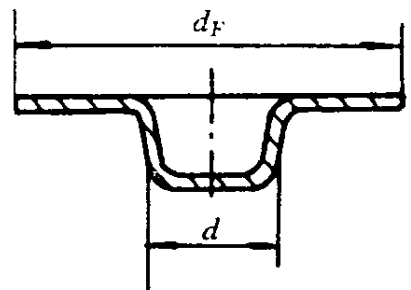


图 5-18 带凸缘的圆筒件

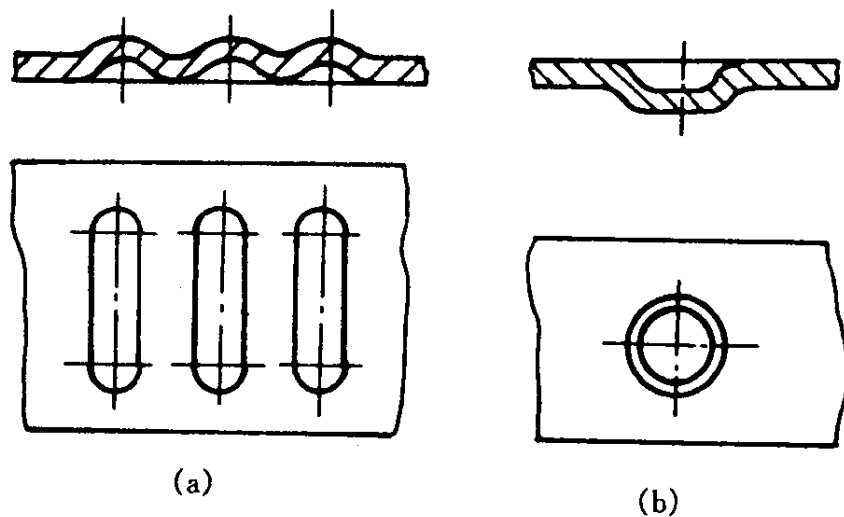


图 5-19 压筋和压包

如图 5-21 所示,翻边前毛坯板料上的孔径为  $d_0$ ,翻边后圆筒形的外径为  $D$ ,则翻边变形区是内径为  $d_0$  而外径为  $D$  的环形部分。

变形程度以翻边前毛坯上的孔径  $d_0$  与翻边后孔径  $D$ (考虑到板厚,一般应为板厚中线处的直径)的比值  $K$  表示。

$$K = \frac{d_0}{D} \quad (5-5)$$

$K$  称为翻边系数。 $K$  值愈大,变形程度愈小;反之,变形程度愈大。翻边系数小到一定程度,孔的边缘就破裂,使翻边无法进行。所以翻边系数不能太小。使翻边能正常进行的翻边系数的最小值,称为极限翻边系数。

对于酸洗钢,  $K \leq 0.68 \sim 0.72$ ,对于镀锡铁皮,  $K \leq 0.65 \sim 0.7$ 。

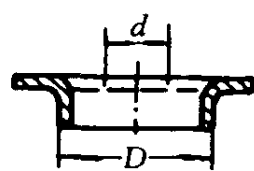


图 5-20 内孔翻边

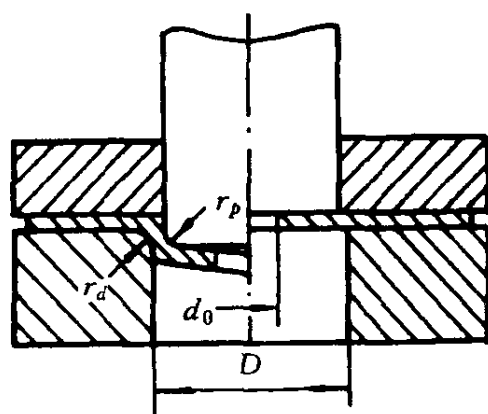


图 5-21 内孔翻边时的变形

### 5.3 表面工程技术

金属零件的失效形式中,磨损、疲劳、腐蚀占绝大多数,而动力机械与设备是在高温、高速、高压、腐蚀的介质条件下工作的,其失效往往是通过零件表面的局部损坏或损伤开始的。表面工程技术所以越来越得到重视,是因为它赋予零件表面耐磨、耐热、耐疲劳等性能,从而提高产品质量和寿命。按提高材料表面性能的本质表面工程技术不同可分为表面涂层技术、表面改性技术和表面涂蚀技术等。

#### 5.3.1 表面涂层技术

##### 1. 热喷涂

热喷涂的基本原理是将涂层材料加热熔化,以高速气流将其雾化成极细的颗粒,并以极高的速度喷射到事先准备好的零件表面上,形成所需性能的涂层。因此,与表面堆焊相比较而言,它也可以用于恢复零件因磨损或其它原因而造成的尺寸不足,但就热喷涂技术本身而言,它具有更广泛的材料选择和应用范围。无论是金属、合金,还是陶瓷、玻璃、水泥、石膏、塑料、木材都可作为喷涂的基体材料。喷涂材料也是多样的,金属、合金、陶瓷、复合材料都可选用。根据需要选用不同的涂层材料可以获得耐腐、耐蚀、耐热、抗氧化等方面的一种或数种性能,也可获得其它特殊性能的涂层。

热喷涂根据所用热源不同可分为:火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂和爆炸喷涂。若按照喷涂材料的形状可分为:粉末喷涂、金属丝喷涂、金属带喷涂和熔罐喷涂。目前广泛使用的是粉末喷涂,其次是金属丝喷涂。

氧乙炔火焰喷涂是最古老的热喷涂方法。根据喷涂材料的形状一般可分为线材火焰喷涂和粉末火焰喷涂,及棒材火焰喷涂。

##### (1) 线材火焰喷涂:

图 5-22 为线材火焰喷涂法的原理图。棒材喷涂法原理与此法大体相同。将线材(或棒材)从喷涂枪中心孔中送出,并使线材端部进入氧-燃气火焰,由火焰熔化,周围的压缩空气流(雾化气)将熔化的金属微粒化,并喷射到基材表面沉积为涂层。线材是由喷枪内的空气蜗轮

或电动机经减速机构驱动轮以所需速度输送的。空气蜗轮送进线材时,线材送进速度难于实现微调与恒定,但枪体结构紧凑且重量轻,易于手工操作。用电动机输送线材虽能克服空气蜗轮输送线材的不足,但因枪体重量大,通常用于机械化喷涂装置。喷涂线材直径一般为3mm以下,但在高效率喷涂低熔点金属(铝、锌等)时,因采用大型喷枪,线材直径可达5~7mm。

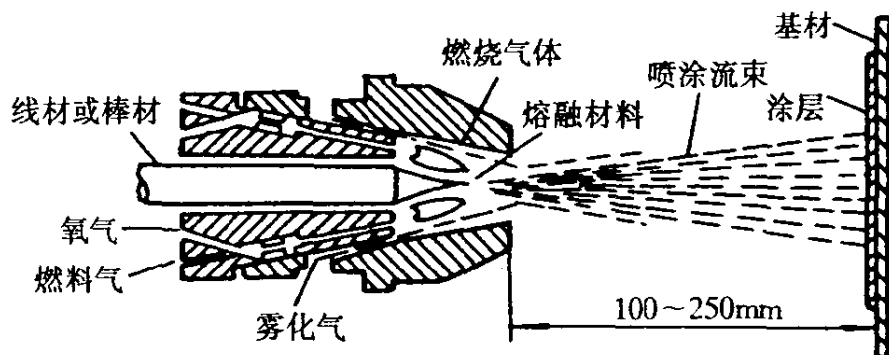


图 5-22 线材气体火焰喷涂法原理图

喷涂过程中,雾化粒子的大小及速度取决于雾化气流速度,调节雾化气流速度,可以获得速度远大于粉末火焰喷涂的熔融粒子。喷涂材料可以是低熔点的金属,也可以是高熔点的氧化物陶瓷。

### (2) 粉末火焰喷涂:

粉末火焰喷涂和线材火焰喷涂的区别在于用粉末材料代替了线材。该法设备简单,粉末材料由送料罐内自然落下或由自动送给粉末装置等将粉末送入流经喷枪内的气流中,随着气流从喷嘴端部的燃烧火焰中喷出,在飞行中被加热和加速,并成为熔融粒子,高速度地撞击基材表面成为扁平状粒子,形成所需涂层。

火焰喷涂的热源一般采用氧-乙炔混合气体,在喷涂塑料时,也可用氧-丙烷气体或空气-丙烷气。

## 2. 表面堆焊

堆焊是用焊接方法在零件表面堆敷一层金属的工艺过程。堆焊技术有两方面的应用,一方面可以恢复零件因磨损或加工过程中的失误而造成的尺寸不足;另一方面可以对零件的表面进行改性,以获得所需要的耐磨、耐热、耐蚀等特殊性能。这两方面的应用在表面工程学中分别称之为零件的修复与强化。

表面堆焊技术包含堆焊材料的选择以及堆焊工艺,前者取决于堆焊表面需要具有何种特殊性能。后者和所需的堆焊质量以及堆焊材料和被堆焊的母材有关,与一般的焊接工艺基本没有差别。

堆焊层与其它涂层技术所形成的涂层相比,由于基体在堆焊过程中发生熔化,而在堆焊层与基体间存在一层熔合层,属于冶金结合熔合层的厚度从数毫米至数十毫米,堆焊对基体的热影响较大,将引起组织性能变化和结构的变形。

## 3. 电镀与电刷镀

电镀及电刷镀的基本原理都是通过电场力的作用使镀液中的金属离子扩散到零件表面,在表面获得电子后还原成金属原子,这些金属原子沉积结晶就形成了镀层。镀层随电场作用时间的延长而增厚。

电镀通常需一镀槽,电镀时将被镀零件整个浸泡在镀槽的镀液中,在直流电作用下,镀液(电解液)中金属离子在阴极(工件)表面上还原成原子而形成金属层,而电刷镀不需要镀槽,它是将零件与镀笔分别接通电源的阴极及阳极,在两者产生相对运动的间隙中通入镀液。由于这一工艺上的变革使电刷镀设备体积小,便于拿到现场使用,同时镀层的质量也较好,是目前

发展较快的一种表面镀层方法。

电镀与电刷镀均可用于零件的表面修复,强化零件表面,提高零件表面的耐磨性、耐腐蚀性等。同时也是零件表面装饰的重要方法之一。

### 5.3.2 表面改性技术

表面改性技术包含有表面形变强化、表面相变强化、表面化学热处理强化等等。

#### 1. 表面形变强化

为减少表面层内的缺陷并保留残余应力状态,现在已发展了多种表面强化的工艺方法,如碾压、孔挤压、喷丸、超声波强化、激光强化……等等。以前三种应用比较广泛。

表面碾压是在室温下,用专门的碾压头装在机床的刀架上,碾压工件的表面。碾压头是用工具钢、硬质合金或金刚石制成的滚轮或滚珠(半径 $2\sim 2.5\text{mm}$ )。在一定的力,例如 $150\sim 200\text{N}$ 的作用下压过工件表面。在碾压过程中,金属表面不分离出切屑,但存在较大的塑性变形。结果使表面的凹、凸、峰、谷被挤平,表面层的微裂纹等缺陷被挤压合拢。部分晶粒与碳化物破碎成更细的、分布更均匀的颗粒,表面层也保留残余应力。如涡轮叶片榫头经碾压后,表层残余压应力为 $196\sim 392\text{MPa}$ 。

碾压前工件表面要预先加工到表面粗糙度 $R_a 1.6\sim 0.2\mu\text{m}$ 。碾压后可降低到 $R_a 0.1\sim 0.05\mu\text{m}$ 。因此,两相接触表面的接触面可达理论面积的 $65\%\sim 75\%$ 。材料表面硬度可提高 $25\%\sim 40\%$ ,强化层深 $300\sim 500\mu\text{m}$ 。

碾压方法可用于各种合金钢、耐热合金与有色金属制成的零件的外圆面、圆柱端面、平面以及直径较大的内孔等。

直径比较小的孔可采用球挤光工艺来强化表面。工具球由工具钢或硬质合金制成。如尺寸合适也可利用滚珠轴承的滚珠。工具球直径比工件孔径大 $1\%\sim 3\%$ 。用顶杆在压力机上将球推过孔即可在 $1\text{s}$ 内完成表面的挤压强化。盲孔的挤光则要用带把的球头工具完成。

孔经挤光后,表面粗糙度可降低 $75\%\sim 90\%$ ,如由 $R_a 2\mu\text{m}$ 减少到 $R_a 0.2\mu\text{m}$ 。尺寸允差缩小到原来的 $1/3$ ,如由 $0.05\text{mm}$ 下降到 $0.013\text{mm}$ ,孔的圆度也得到改善。表面硬度提高 $2\%\sim 5\%$ 。有时可使零件寿命提高 $20\sim 40$ 倍。

喷丸是采用直径为 $0.4\sim 2.4\text{mm}$ 的铸铁、钢或玻璃小丸来冲击零件的表面。其中玻璃丸直径在 $0.25\sim 0.4\text{mm}$ 左右,硬度为HRC46~50,常用于有色金属的加工;铸铁丸、钢丸常用于黑色金属等的加工。冲击力由空气流、水流(玻璃丸 $(6\sim 7)\times 10^5\text{Pa}$ )或旋转离心力(转速 $1\ 800\sim 2\ 250\text{r/min}$ )来提供。弹丸以接近 $60\text{m/s}$ 的速度冲击到表面上,使局部产生塑性变形,挤合微裂纹,也使表面产生残余压应力,由于弹丸的冲击使表面粗糙度略有增加,但却使切削加工的尖锐刀痕圆滑化,这些变化如图5-23所示。因此,经喷丸后零件的疲劳强度极限显著提高,使承受交变载荷的零件寿命显著延长。如喷丸后,齿轮轴的疲劳强度极限可以提高 $80\%$ 。齿轮齿面喷丸后使用寿命可提高 $4\sim 5$ 倍。曲轴颈喷丸后寿命可提高 $10$ 倍,而圆柱形螺旋弹簧喷丸后可使寿命提高多达 $35$ 倍。因此,表面喷丸已经成为这类零件制造中不可缺少的标准工艺方法。

#### 2. 表面相变强化

表面相变强化是利用金属的固态相变的一种强化方法。当零件表面层被快速加热时,零件表面温度升高值是由表及里逐渐减小的。如表层温度超过相变点温度达到奥氏体状态时,随后的快冷即可获得马氏体或其它奥氏体的转变组织。而未被加热到相变点以上温度的心部

仍保留其原组织状态,从而使表层与心部的组织不一,这样性能也就不同,从而达到表面强化的目的。

依热源不同,表面相变强化的方法有感应加热表面淬火、激光加热表面淬火、火焰加热表面淬火和电子束加热表面淬火等。目前工业上使用较多的为感应加热与激光加热表面淬火。它们适合大规模专业化生产,而火焰加热表面淬火,由于不需专用设备及工装,适用于单件或小批量生产。本节主要介绍感应加热表面淬火与火焰加热表面淬火。

#### (1) 感应加热表面淬火:

感应加热是利用钢铁零件放在交变电磁场中会感应出巨大的涡流,同时由于集肤效应的作用,使零件感应出的电流大部分集中在零件的表面层,从而使零件表层材料被迅速加热而转变为奥氏体组织。零件经感应加热后再表面淬火以使表层获得马氏体而强化,但心部仍保持处理前的组织。这样,表层的高硬度以抵抗磨损,而心部保持较好的韧性而防止断裂,从而使零件服役寿命提高。

在淬火状态时,零件表面层电流的透入深度  $\delta$  (mm) 与电流频率  $f$  之间有如下经验公式

$$\delta = 500/f$$

但需注意的是电流透入深度并不等于淬硬层深度,通常后者要比前者小。

感应加热表面淬火具有如下优点:

- ① 可获得隐针马氏体,硬度比普通淬火高 2~3HRC。
- ② 由于马氏体相变时的体积膨胀,使表层相变区产生残余压应力,提高了疲劳强度。
- ③ 淬火变形小,且表面氧化脱碳少。

感应加热表面淬火最适合于中碳钢或中碳合金钢,有时也用于球墨铸铁件。含碳量过高会增加表层硬度,同时使表层脆性增加,心部韧性下降。而含碳量过低,又会使表层硬度不够,而影响耐磨性。在制定淬火工艺时,应主要控制表面硬度值、淬硬层深度及其分布、组织等。

由于表面淬火的淬硬层深度有限,因此一般在零件经精加工后接近图纸尺寸时才进行。同时为满足使用要求,在进行淬火前应预先进行调质或正火处理,使心部获得所要求的组织性能。表面淬火后一般要进行低温回火,以降低表面内应力和脆性,同时使表层硬度达到图纸要求。

#### (2) 火焰加热表面淬火:

火焰加热表面淬火是利用氧-乙炔焰(火焰最高温度可达 3 200℃)对零件表面快速加热,当表面达到淬火温度后,立即快冷的一种表面淬火方法。淬硬层深度约为 2~6mm,适用于单件或大型零件,也可用于表面局部。此方法由人工操作,故淬火温度不易控制,质量不易稳定。

### 3. 表面化学热处理强化

表面化学热处理是利用固态扩散,使合金元素渗入金属表层的一种热处理工艺。其基本过程是:首先将工件置于含有渗入元素的活性介质中加热到一定温度,使渗入元素通过分解、

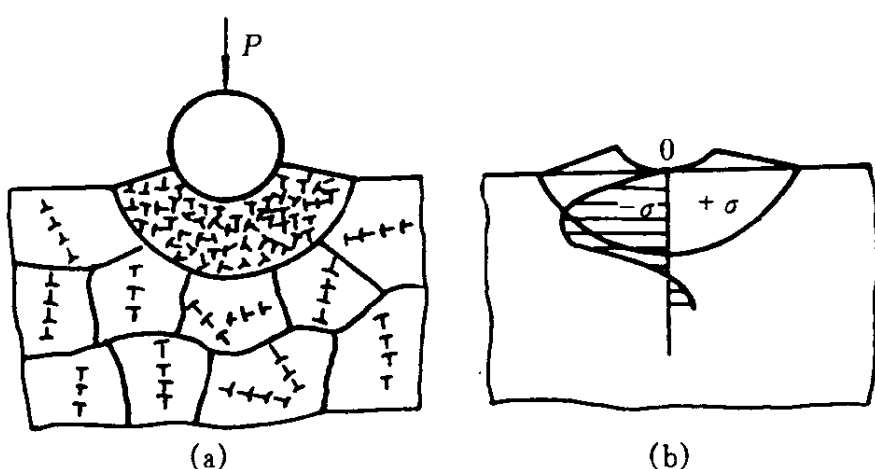


图 5-23 喷丸形变硬化层结构和应力变化示意图  
(a)硬化层结构变化;(b)残余应力。



吸附、扩散进入金属表层,从而改变金属表层的成分、组织、性能,以达到提高表层强度、硬度、耐磨性、疲劳强度和耐蚀性等的目的。

依据渗入元素介质所处状态的不同,化学热处理可分为下述几类:

- ① 固体法:包括粉末填充法、膏剂涂覆法、电热旋流法、覆盖层扩散法等。
- ② 液体法:包括盐浴法、电解盐浴法、水溶液电解法等
- ③ 气体法:包括固态气体法、间接气体法、流动粒子炉法等
- ④ 等离子法:所渗元素可以是碳、氮、硼等,也可采用几种元素共渗的方法,如碳氮共渗、氮碳共渗、铝硼共渗等。渗氮工艺由于可获得较高的耐磨性及抗疲劳强度,并且温升不高,在重要的轴类零件,活塞杆类零件中应用较多。

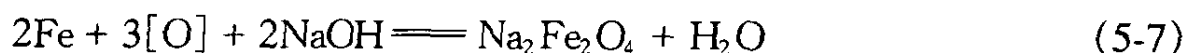
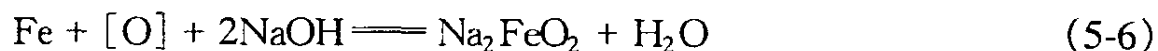
### 5.3.3 表面涂蚀技术

为了提高耐磨、耐腐蚀性能,并起到装饰作用,以金属材料着色技术为主的表面涂蚀技术得到了广泛应用。下面对常用的钢铁制件的着色予以介绍。

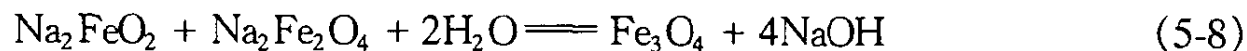
钢铁制件在自然条件下,由于与空气中的氧相接触,表面会形成一层  $10\sim 20\text{\AA}$  的氧化物薄膜。自然成膜时,依据金属本身的物理性能、表面状态及氧化条件的不同,所形成的氧化膜,有的较薄,有的致密完整,有的却很疏松而不完整。要在钢铁表面生成致密完整并具有一定机械强度的氧化膜,可以用化学或电化学的方法完成。钢铁的氧化处理方法很多,有碱性氧化法、无碱氧化法、高温气体氧化法和电解氧化法等。目前广泛采用的是碱性氧化法,钢铁表面经过氧化,其表面形成一定厚度的氧化膜,呈现出一种特殊的氧化色——蓝黑色,故而一般简称为“发蓝”或“发黑”。钢铁制作的这层氧化膜,色泽美观,无氢,有弹性,膜层薄,不影响精度,对消除热处理后形成的应力也有一定的作用。发蓝或发黑是机械零件表面处理和工序间防锈等常用的一种方法。

碱性氧化性的机理是把钢铁制件置于含有氢氧化钠、硝酸盐或亚硝酸盐的溶液中,在一定温度下进行表面处理。当溶液温度接近沸点时,钢铁与氧化性的浓碱发生如下相互作用:

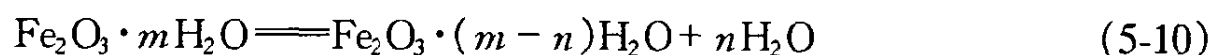
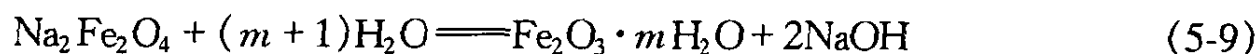
- ① 钢铁开始溶解,生成亚铁酸钠和铁酸钠。



- ② 亚铁酸钠和铁酸钠再互相作用,生成磁性氧化铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。



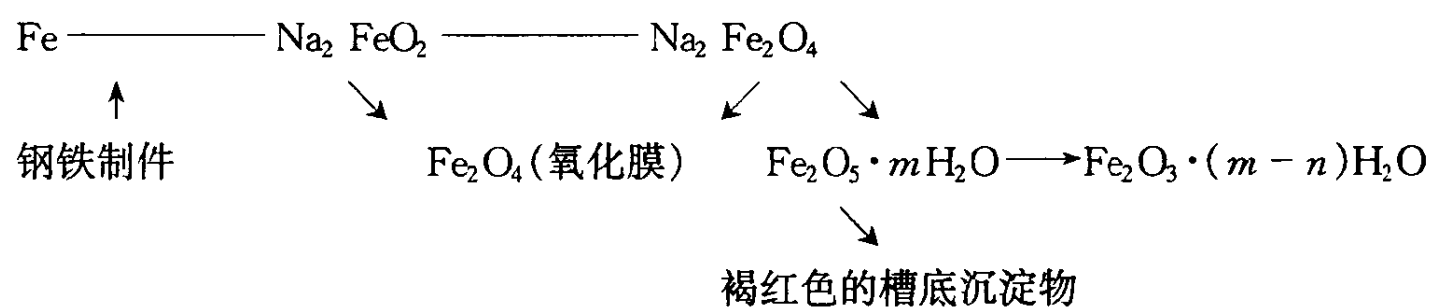
- ③ 同时有部分铁酸钠再互相作用,生成三氧化二铁的水化物(褐红色沉淀物)。



氧化膜的外观和防护性能随氧化膜的厚度而变化,但无论膜厚或膜薄,组成膜的主要成分是磁性氧化铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。

- ④ 整个氧化过程可用如下的反应式表示:





钢铁制件的着色工艺总流程如下：

钢铁制件 → 化学除油 → 清洗 → 酸洗 → 清洗 → 氧化处理 → 冷水或温水清洗 → 沸水清洗 → 浸皂液 → 上油 → 包装。

## 第 6 章 装配工艺及其工艺规程制定

### 6.1 装配的内容和作用

任何机器都是由许多零件和部件所组成。按照规定的技术要求将若干个零件接合成部件或将若干个零件和部件结合成机器(或制品)的过程称为装配。装配工艺过程由一系列装配工序所组成,这些工序有下列内容:①零件的联接与预紧;②零件相互位置精度的检查、校正与固定;③调整与修配;④平衡;⑤个别机构或整个机器的检查与试验;⑥其他,如清洗、油漆等。

装配之所以重要不仅在于它对产品质量有直接影响,而且由于它占有大量的劳动量,同时它对生产任务的完成和资金的周转(人力和物力的利用)有较直接的影响。

一台机器的装配劳动量有时达机械加工量的 30% 以上,其中,大量繁重的装配工作是工件的输送、螺纹连接和手工修配工作。为此,目前我国动力机械行业愈来愈多地采用风动或电动扳手、机械手、轨道运输、随行夹具、清洗机、自动平衡去重机等设备和措施,使装配工作向机械化、自动化和生产线的发展方向发展。此外,还要努力降低手工装配量,其途径有二:

①钳工机械化,如用宽刀精刨代替刮研,用专用研磨机代替人工研磨。

②降低修配余量,即事先提高机械加工精度或选择适当的装配方法来降低钳工的修配工作量。

### 6.2 零、部件联接装配工艺

#### 6.2.1 螺纹联接装配

螺纹联接在动力机械的连接件中占主要地位,螺纹联接的装配劳动量占装配总劳动量的 25%~40%。装配中螺纹联接的主要技术要求是:获得规定的预紧力;获得规定的配合;螺母螺钉不产生偏斜和弯曲;防松装置可靠。

保证得到规定的预紧力并使同一组联接的预紧力均衡是一项重要的装配技术要求,因为动力机械是承受压力且是动载荷的机器,若预紧力不足,则导致附加动载荷增大,甚至产生间隙而漏气、漏水、漏油,同时使螺栓、螺母引起附加应力。若一组联接的锁紧力不均衡,则对于气缸盖与气缸体之间的螺纹连接,可使密封性能破坏,对于连杆体与连杆盖的螺纹连接,会招致其大头瓦产生歪曲形变,而连杆本身产生应力集中。故除一般紧固的螺纹联接没提出预紧力的要求外,对重要的螺纹连接,均在技术条件中提出拧紧力矩的公差要求。

为了获得规定的预紧力的大小与均衡,通常采用定长度扳手,扳手的长度一般不大于螺纹直径的 15 倍,以获得合理的预紧力和防止螺纹损坏,但是此扳手的预紧力会因人而异,即因不

同人施力不同而得到不同预紧力,故较重要的场合应采用限力扳手或扭力扳手。

图 6-1 是一扭力扳手,拧紧螺母时,指示针在读数板上指出达到的扭矩值,通用性较好。由于扭矩受不同的摩擦系数的影响,因此不能严格保证螺栓拉紧力为额定值。最好采用液力拉伸法或直接测量螺栓的伸长量的方法。

图 6-2 是一种液力拉伸器的结构图,压力轴(根据预紧力调定)将 4 顶起,使螺栓达到规定伸长的拉伸后,即可拧紧(或松开)螺母 2。此法螺栓不受附加力矩,误差较小,在高压压缩机中采用。图 6-3 为在装配前和装配后直接用分厘尺测量螺栓的长度,可直接测得螺栓的伸长量,保证一定的拉紧力。此法最精确,可用于连杆、曲轴等的重要螺纹连接之中。

### 6.2.2 过盈联接的装配

过盈联接一般属于不可拆卸的固定联接,其主要技术要求是:保证规定的联接强度;对于一批相同的联接应保证其联接强度的均等性;获得规定的尺寸精度和相互位置精度;不降低联接件的表面质量及材料的物理机械性能等。

装配过盈联接的方法主要有压入配合法、热胀配合法和冷缩配合法。当用一种方法不能完成装配时,可将上述方法联合使用。

#### 1. 压入配合法

压入配合法系用各种压床专用夹具将被包容件用静力压入包容件中,也可用锤或冲击器打入。压配的过程一般是:清洗零件,在配合表面上涂油(小零件可不涂),然后加轴向力于包容件(或被包容件)使两者产生相对位移而完成装配。

#### 2. 热胀配合法

采用加热包容件的方法,使包容件尺寸大于被包容件的尺寸,则两者很容易装配,不必经过压合过程中的压平阶段,故在同样的过盈值下,比压入配合法的连接所能传递的扭矩大一倍左右。

中小尺寸的包容件通常在沸水池(100℃)、水蒸汽箱(100℃)、热油槽(70℃~120℃,应比所用油的闪点低 20℃~30℃)、电橱(200℃~500℃)中以全部表面受热的方式进行加热;大尺

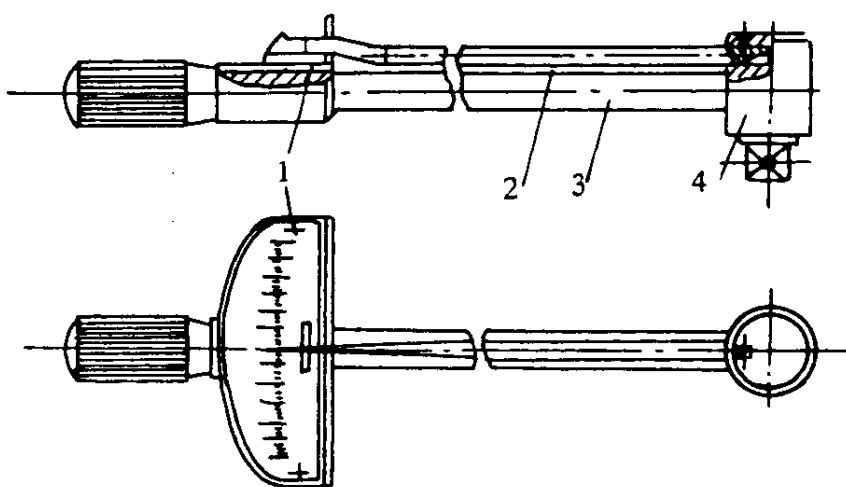


图 6-1 扭力扳手

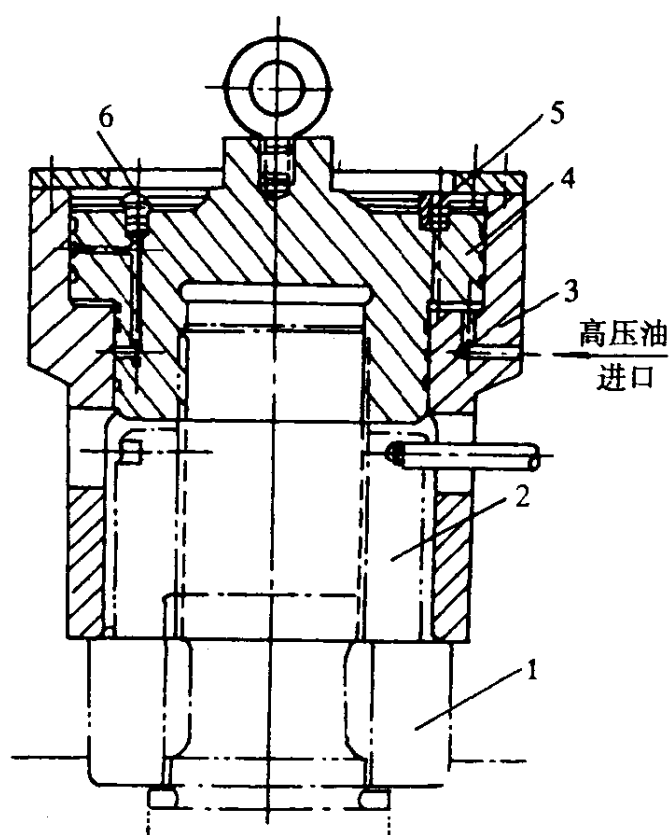


图 6-2 液力拉伸器结构

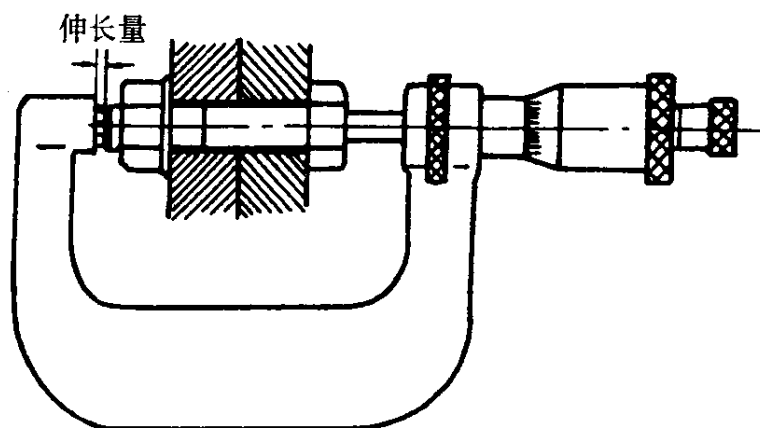


图 6-3 测量伸长量保证拉紧力的方法

寸(例如直径大于1m)的包容件可以用焦炭炉、气体加热器、电阻加热器等局部加热其孔面、端面或外圆面,或用感应加热设备加热。加热局部表面时,零件各处温度不同,如果加热速度太快,零件内温差增大,则热应力可使材料发生塑性变形,故需控制温升速度。

### 3. 冷缩配合法

在包容件尺寸和重量都比较大,加热不方便或加热时间很长(例如2~8h)时,可采用冷却被包容件的方法。用干冰(固态二氧化碳可达 $-78^{\circ}\text{C}$ )、氨冷却装置( $-120^{\circ}\text{C}$ )、液态空气、液态氧气或液态氮气(可达 $-180^{\circ}\text{C} \sim -190^{\circ}\text{C}$ )等进行冷却。冷却前,零件要去除油垢,若介质是液氮,则工件可同介质直接接触,若是用液态氧气、液态空气冷却,则不应直接接触,以免工件上附有油脂而爆炸。

## 6.3 校正

校正是指对各零件间相互位置的找正、找平及相应的调整。装配中的调整法、修配法就包含校正的内容。当零件是互换的或由装配夹具保证精度的就无须校正。大型动力机械设备中校正工作运用较多。下面以联轴器为例说明典型的校正方法。

联轴器联接的旋转件有两类:

①刚性的 经校正后的中心线基本上成一直线。

②挠性的 轴颈处有一定的倾斜度(或称扬度),校正后的中心线不是直线。应在装配时按轴承负荷分配、工作介质作用力等因素决定其装配倾斜度。

两类旋转件联轴器的校正要求及工艺方法是相同的。如无特殊技术要求,允差值见表6-1,当转速较高(如大于3000r/min)时,允差值应比表中数值小些,否则易产生振动。

表 6-1 联轴器安装时的允许偏差

联轴器型式	联轴器直径 D mm	不同轴度 mm	端面不平行度 mm/m	联轴器型式	联轴器直径 D mm	不同轴度 mm	端面不平行度 mm/m
十字头滑块式 和挠性爪型	$\leq 300$	0.10	0.80	弹性圆柱 销式	105~260	0.05	0.20
	$> 300 \sim 600$	0.20	1.20		290~500	0.10	0.20
蛇形弹簧式	$< 200$	0.10	1.00	齿轮式	170~185	0.30	0.50
	$> 200 \sim 400$	0.20	1.00		220~250	0.45	0.50
	$> 400 \sim 700$	0.30	1.50		290~430	0.65	1.00
	$> 700 \sim 1\ 350$	0.50	1.50		490~590	0.90	1.50
	$> 1\ 350 \sim 2\ 500$	0.70	2.00		680~780	1.20	1.50
				900~1\ 250	1.50	2.00	

联轴器校正方法如下:

图6-4所示是径向轴向联合测量的几种方式,其测量找正的步骤是一样的:在联轴器外圆柱面及端面上选取测点,用百分表、塞尺及其附件等进行测量。测量时,在联轴器外圆上作四等分记号,同时转动两轴,每转 $90^{\circ}$ 记录 $a, b_1, b'_1$ 等读数,四个位置的读数见图6-5。测点在两联轴器上的相对位置应保持不变,以消除加工所产生的误差。图6-6所示为联轴器校

正前在垂直方向发生误差的位置,水平方向的情况与此类似。

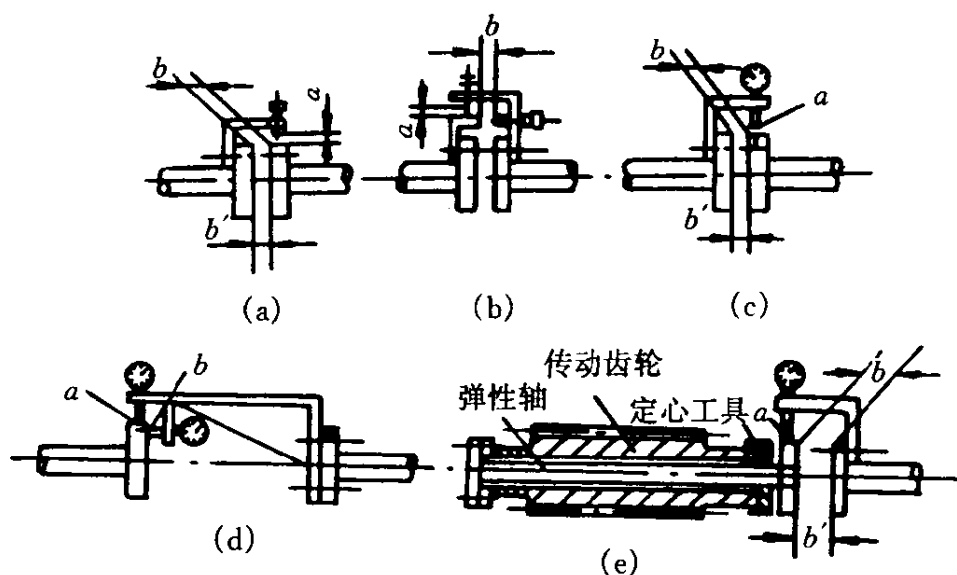


图 6-4 径向轴向联合测量法校正联轴器的几种方式

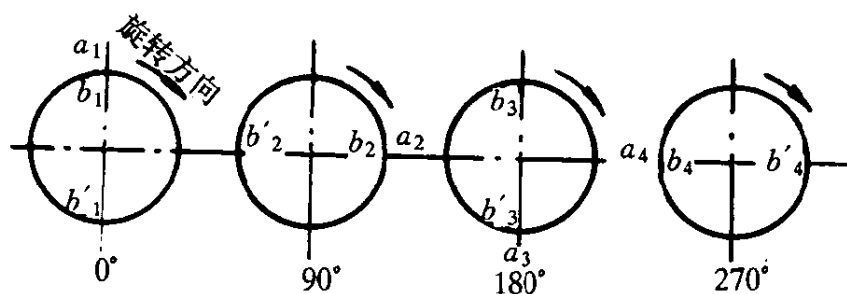


图 6-5 联轴器转动四个位置的读数

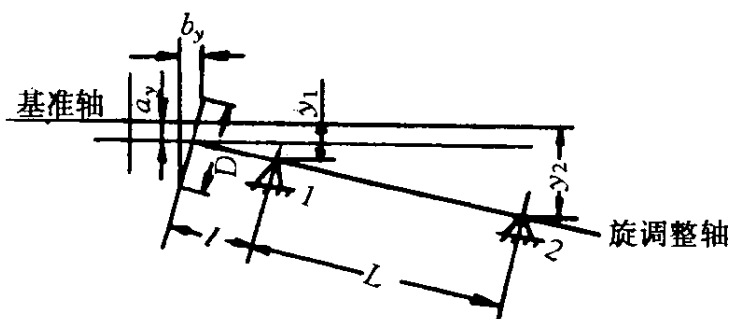


图 6-6 联轴器校正前的位置

根据测量数据按下式计算联轴器偏差值:

径向位移:

水平方向

$$a_x = \frac{a_2 - a_4}{2} \quad (6-1)$$

垂直方向

$$a_y = \frac{a_1 - a_3}{2} \quad (6-2)$$

倾斜量:

水平方向

$$b_x = \frac{(b_2 + b'_4) - (b'_2 + b_4)}{2} \quad (6-3)$$

垂直方向

$$b_y = \frac{(b_1 + b'_3) - (b'_1 + b_3)}{2} \quad (6-4)$$

根据求出的径向位移和倾斜量,按下式计算支承 1 和支承 2 在水平方向和垂直方向的调节量:

$$Y_1 = \frac{l}{D}b_y + a_y \quad (6-5)$$

$$Y_2 = \frac{l+L}{D}b_y + a_y \quad (6-6)$$

通过改变支承点处垫片尺寸或采用精加工调整轴承相对位置来实现这个调节量。

水平方向调节量的计算与垂直方向的相同。

这种径向轴向联合测量法工件盘动次数及测量次数较多,但读数直观、运算简便,故目前应用普遍。

## 6.4 平 衡

透平机械转子由于制造上的原因存在着加工尺寸或浇铸砂眼的不对称分布,或材料内部密度不均匀等导致质量的不均匀分布,也即相对于它自己的转动轴线产生了不平衡,当在高速转动时,即使不平衡质量不大,也会产生巨大的不平衡离心力,而使轴承受动力载荷,使机器产生振动,当其大小超过许用值时,甚至会破坏机器。故透平机械转子(回转式、离心式压缩机等)或某些高速活塞式机器的曲轴,必须进行静平衡和动平衡。

### 6.4.1 静平衡

平行台(架)是最简单、最常用的静平衡设备,它是由固定在底座上的两根棱柱形水平导轨组成的。常用的导轨截面见图 6-7。

图 6-8 中固定三棱形轨道的立架 1 应装置在不传递任何振动的专门基础的底板上,进行平衡之前,应检查三棱形轨道的平行性和水平性,此偏差不大于每米长 0.02mm。

静平衡的准确度决定于所平衡零件的轴颈在水平轨道上滚动的摩擦力,这种摩擦力愈大,则平衡也就愈不准确,故为了减少摩擦系数,导轨应淬硬至 HRC50~60,研磨得很光。

对于小于 60~70kg 的叶轮可用圆形截面的轨道,它加工简单(用外圆磨床即可),磨损后转动一角度仍可使用。

静平衡时,工作轮是套装在专门的通用心轴上,且夹在两个可替换的垫圈组(对中夹盘)之中,不同的垫圈组用来平衡不同孔径的零件,(见图 6-9),心轴轴颈淬硬并磨削到  $R_a 0.2\mu\text{m}$  以下,其跳动须小于 0.0075~0.01mm,心轴应进行静平衡。

静平衡的方法有两种:当有显著的不平衡时用第一法,

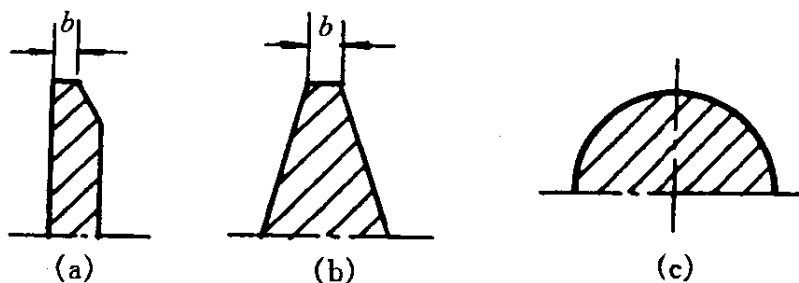


图 6-7 平行台导轨截面的形状  
(a)平刀形;(b)三棱形;(c)圆柱形

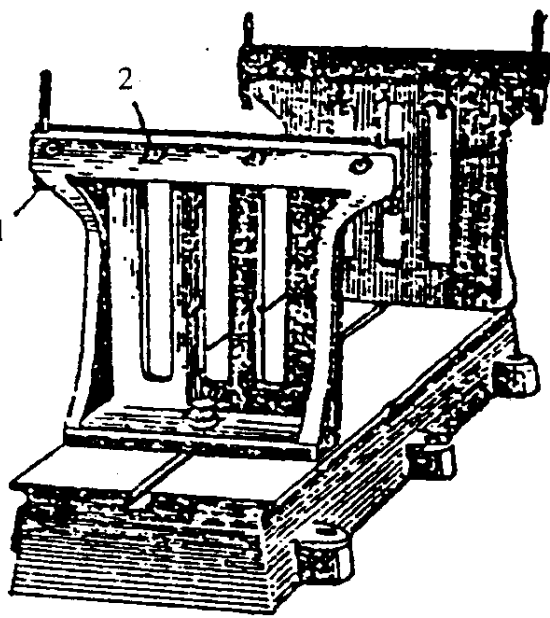


图 6-8 平行台

当没有显著的不平衡时用第二法。

### 1. 有显著的不平衡

将叶轮自由地放在导轨上,由于有显著的不平衡,它就会滚动,直到它的不平衡质量  $H$  的重心处于通过叶轮的旋转轴的一个垂直平面上,并且在轮孔的下方,这时用粉笔在轮面上画一根垂直向下的半径线,然后在  $H$  的对面系一个试加重量  $K$ ,使得叶轮处于水平位置时仍还能按照原来转动的方向旋转一个不大的角度(见图 6-10),然后将叶轮转动  $180^\circ$ ,再在  $K$  处加一确定的某一质量  $P$ ,使叶轮依同样的方向(图中为顺时针方向),转过一个与前次相等的较小的角度,于是可以认为这两次的平衡转矩相等,即

$$\begin{aligned} H \cdot X - K \cdot R \\ = (K + P)R - H \cdot X \end{aligned}$$

得 
$$\frac{H \cdot X}{R} = K + \frac{P}{2} \quad (6-7)$$

式中  $R$ , 分别为  $K, H$  至叶轮旋转轴线的垂直距离。于是,很显然,若在  $K$  位置上最后改放  $Y = \frac{H \cdot X}{R} = K + \frac{P}{2}$  的质量,就可将原来的不平衡质量  $H$  平衡掉。

### 2. 无显著的不平衡

由于没有显著的不平衡,也即不平衡的力矩  $H \cdot X \leq M_K$ , 式中  $M_K$  为滚动阻力矩,故工作轮随意地放在平衡导轨上,就会停留在该位置上。这时,若用第二法进行平衡时,首先将工作轮的圆周分成  $n$  个等分,譬如八等分(图 6-11(a))。各分点从 1 开始依次标上号码,首先将叶轮转到使记号 1 成水平的位置,选择能使零件开始沿导轨滚动的最小试验载重  $G_{\text{试}}$ ,对每一个分点记号都这样做一遍,使每次叶轮都依同一方向转动相等的小角度,记下每一分点上所需的试重  $G_{\text{试}}$ ,将其结果列于表 6-2。

表 6-2 所需试重值

号 码	1	2	3	4	5	6	7	8
载重重量 $G_{\text{试}}(\text{g})$	65	75	78	65	53	38	36	50

并作图(见图 6-11(b)),其曲线应该是正弦曲线,在此例中,附加重量应该安装在第二号码和第三号码之间,其附加载重的重量应为

$$G_y = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2} = \frac{80 - 36}{2} = 22$$

式中  $A_{\max}$  ——曲线的最大纵坐标值;

$A_{\min}$  ——曲线的最小纵坐标值。

用  $e$  标志旋转体经过静平衡后的实际的平衡精度,则

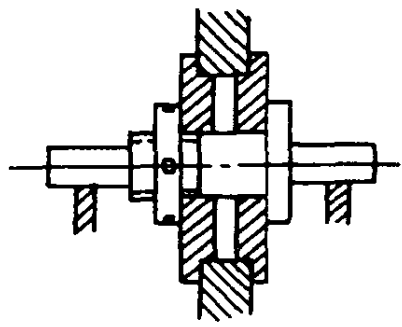


图 6-9 通用心轴与垫圈组

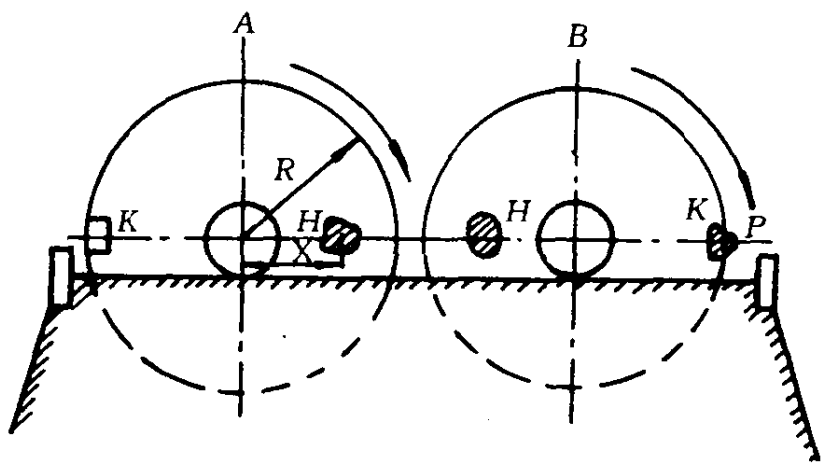


图 6-10 第一法加重示意图

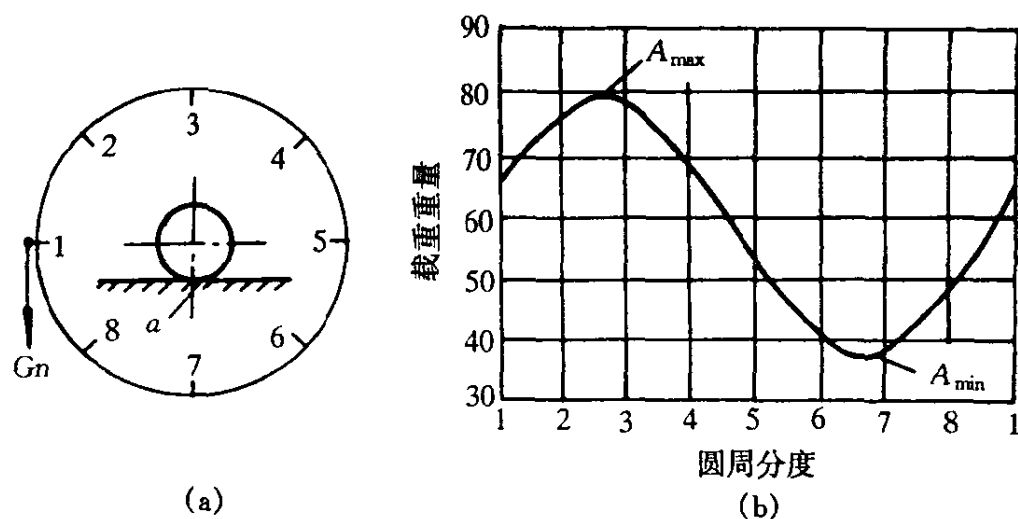


图 6-11 试样周移法确定不平衡量

$$e = \frac{G_y \cdot R}{W} \quad (6-8)$$

式中  $W$ ——旋转体质量。

### 6.4.2 动平衡

这里,只研究刚性转子的动平衡。

刚性转子通常是指在不平衡离心力的作用下没有轴线变形的转子,显然,绝对刚性的转子是不存在的,但是当转子在低速平衡时,由于不平衡离心力不大,产生的变形可忽略,或者,转子制造准确,存在的不平衡量本来就不大,平衡时的转速离临界转速较远,这时也可作为刚性转子处理。

#### 1. 动平衡基本原理

一个实际的转子的不平衡分布可能是各种各样的,我们可把一个转子看成是无数个很薄的垂直于轴心线的圆盘所组成,设每个薄圆盘都有一定偏心,转动时产生一定的离心力,这些离心力都作用在各自的圆盘平面内,但其大小、方向均不一定相同。任意决定两个与轴线相垂直的平面  $A_1 A_2$ 。根据力学原理,每一圆盘中的不平衡力都可分解为作用在平面  $A_1$  或  $A_2$  上的两个分力,而在同一个平面  $A_1$  (或

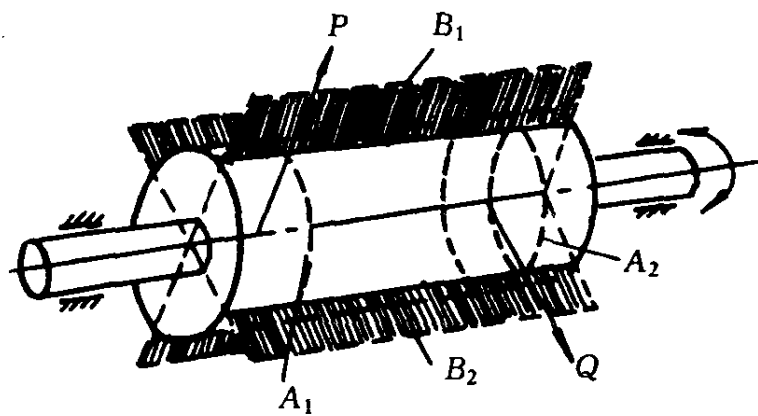


图 6-12 转子的不平衡离心力

$A_2$ )中各个被分解的分力又都可按照向量相加的原理合成一个单独的合力。因此转子中的不平衡离心力最终可由这两个横断面( $A_1, A_2$ )上的两个合力  $P, Q$  来代表。这两个力都垂直于旋转中心线,但通常情况下不一定平行,即不一定在同一个纵向平面内,见图 6-12。图中  $A_1, A_2$  是转子上任选的两个横断面,  $P, Q$  是其面上不平衡离心力的合力,前者处于纵向平面  $B_1$  中,后者于  $B_2$  中,其实这就是不平衡的最一般情况,即既有静不平衡又有动不平衡。

刚性转子的平衡标准是转子和轴承的振动等于“0”。对于刚性转子,可以认为轴承的振动与转子的振动是一致的,因此平衡的标准也就是轴承的振动为“0”。轴承振动为“0”的条件是没有周期性的干挠力作用在轴承上,因此刚性转子的动平衡问题就归结为选择一定的加重平面,加上一定的平衡重量,使得平衡重量产生的离心力和不平衡重量产生的离心力所构成的力



系符合支承反力等于“0”的条件。对于图 6-12 所示的两个不平衡离心力  $P, Q$ , 可以在转子上再任选两个横断平面作为校正平面, 在其平面内加适当的荷重, 使在旋转时所产生的离心力正好将  $P$  与  $Q$  的作用抵消。图 6-13 就是这种方法的图解。I 和 II 是所选的两个加荷重的横断面(叫校正面), 对于透平机转子, 一般总是选择两端的叶轮外型面或者转鼓的两个外端面作为校正面,  $P_1$  和  $P_2$  与  $P$  在同一纵向平面  $B_1$  中(见图 6-12 和图 6-13), 他们的大小可由下式联立决定:

$$P_1 + P_2 = P \quad (6-9)$$

$$P_1 a = P_2 b \quad (6-10)$$

这样, 离心力  $P$  可由  $P_1, P_2$  平衡掉; 同样, 离心力  $Q$  可由  $Q_1$  和  $Q_2$  平衡掉。于是求出合力  $R_1, R_2$ 。其中:

$$R_1 = P_1 + Q_1 \quad (6-11)$$

$$R_2 = P_2 + Q_2 \quad (6-12)$$

于是, 最终在平面 I 和 II 上加荷重  $R_1, R_2$ , 即可将  $P, Q$  平衡掉。由此可见, 只要确定了不平衡离心力  $P$  和  $Q$  的位置和大小, 就不难在任意两个垂直于轴线的平面内加上平衡重将它们平衡掉。

利用动平衡设备进行动平衡的内容就是找出不平衡离心力  $P$  和  $Q$  的位置和大小, 或者直接找出两校正平面内应加的平衡重的大小和方位。

动平衡的方法很多, 可分为低速动平衡与高速动平衡两类, 其设备可分为:

- ①软支承结构的动平衡机, 其支承的固有频率低于试验转速的频率的  $1/3$ 。
- ②硬支承结构的动平衡机, 其支承的固有频率高于试验转速的频率  $2 \sim 3$  倍。
- ③共振支承结构的动平衡台, 其支承的固有频率等于试验转速。

必须指出的是刚性转子的平衡与转速无关, 在某一转速下加重所得到的平衡, 在另一转速下也将是平衡的, 这是因为不平衡力与加重所产生的平衡力同样都是与转速的平方成正比的缘故。

## 2. 动平衡的方法

动平衡的设备可分为平衡台和平衡机两大类, 制造厂多用平衡机, 使用厂和小批生产的制造厂由于条件限制, 一般多用平衡台。

平衡机可分为摆式平衡机、框架式平衡机、电子平衡机等, 下面结合摆式平衡机介绍确定试件不平衡量的大小和位置的方法。

图 6-14 是一种摆式平衡机, 它在小批生产的大型透平机械的转子平衡中广泛应用。动平衡机有两个独立的轴承座, 支持着转子, 该图是通过它的一个

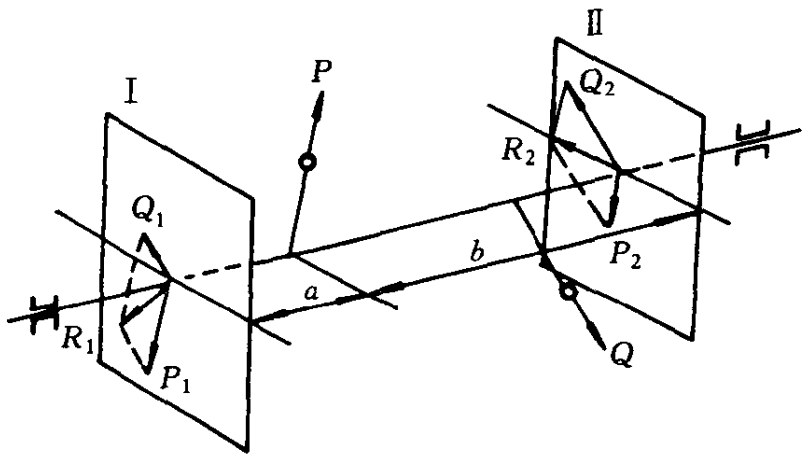


图 6-13 动平衡状态中的转子

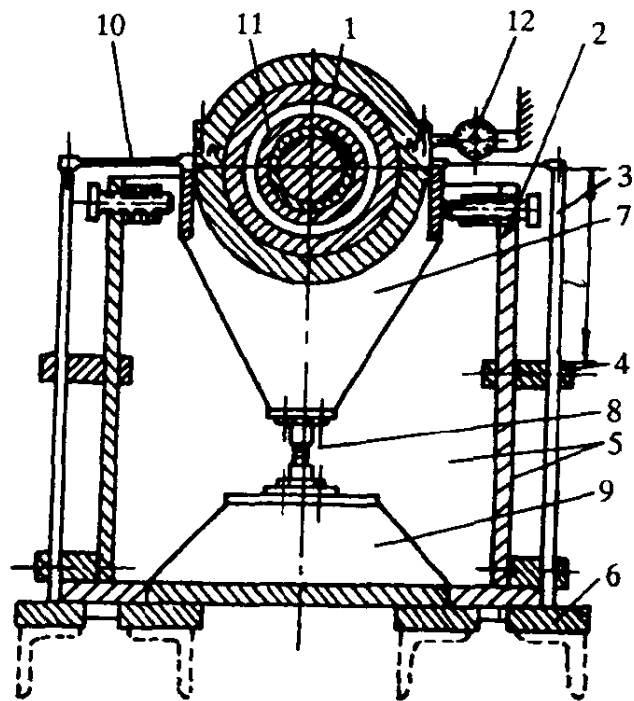


图 6-14 动平衡机的平衡头架

一端头架的轴承中心的横断面图,其结构包括轴承 1,焊合体 7,平板弹簧 8,基座 9,构架 5,底板 6 等。轴承及轴承座由左、右两根横杆 10 与两根条形弹簧 3 相连,弹簧 3 的自由长度  $l$  可用弹簧夹 4 调整,从而得到所需的头架在转子质量下的振动频率,可获得  $300 \sim 600 \text{r/min}$  范围内的任何共振频率。头架体的左右两边装有制动螺钉 2,能将头架夹紧而使轴承刚性地固定在基础上,弹簧 8 使头架有可能左右摆动,轴承在不平衡离心力作用下的振动幅度可从百分表 12 上读出。

该机器的轴承是普通的轴颈式轴承,具有球面轴瓦套,以便转子能够绕轴承的垂直中心在水平平面内摆动,轴承具有水平中分面,上半很容易打开,以容许轴承轴颈放进去。机器的一端装有马达传动装置,变速马达通过磁力接合器转动平衡的转子,这种接合器可以很方便地在旋转时将马达轴和转子脱离。

这种平衡机属于共振支承型平衡设备,即利用在共振转速下测量振动的灵敏度高的特点进行的,一般属于低速动平衡。

摆式平衡机有两种平衡方法:一种是单端轴承松开的平衡的方法,另一种是两端轴承同时松开的平衡方法。前者启动次数多、效率低,但当使用后一种方法而会发生共振振幅过大以致无法读出读数时,可以采用前者,或者先采用前者,然后将振动振幅适当降低后再用后者。下面先介绍一端轴承松开,另一端紧固时的测量平衡原理。

选择横断面 2 和 B 作为转子的两个不平衡离心力  $P$  和  $Q$  的作用面,首先假定平衡机一端的轴承 B 夹紧,另一端的轴承 A 放松,由弹簧控制着,(图 6-15(a)),这样,当转子旋转时,离心力  $Q$  绕 B 的力矩等于零。因此, A 端的振动就单独标志了平面 2 上的离心力大小,所以在平面 2 上系上平衡荷重就可完全平衡  $P$ 。

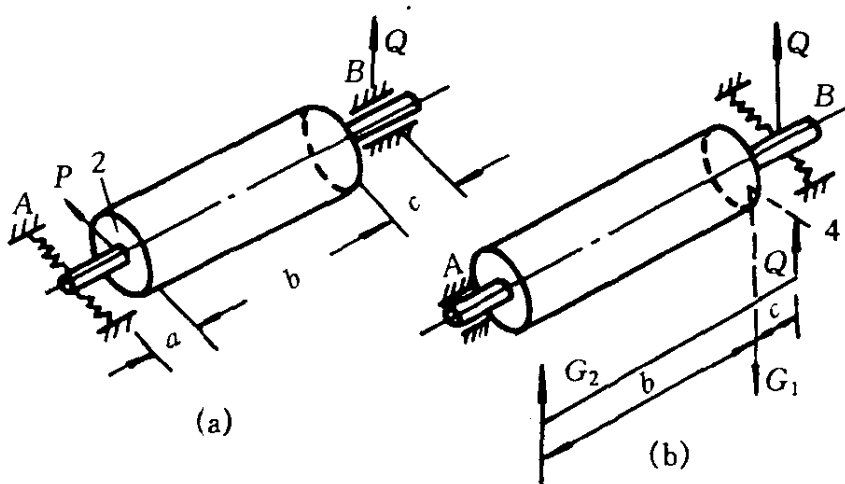


图 6-15 单端轴承松开的测量原理图

为了便于测量和消除驱动系统的干扰,一般将转子驱动到高于共振转速约  $50 \sim 100 \text{r/min}$ ,然后脱开离合器,使转子惰转;松开一端轴承两侧的制造螺栓,待传动装置去掉所引起的暂时干扰的摆动终止后,记录振幅与转速的关系,测得的最大振幅即为共振转速下的振幅。为了确定不平衡量的大小和方位,试验方法可很多。下面介绍两种主要的方法。

#### (1) 试量周移法:

在转子上左右各取一校正平面,如图 6-16 中的 2,4 平面,并将其 8 等分,首先将试加质量  $P_{\text{试}}$  逐次固定在左校正平面上的各等分点上,(此时轴承 A 放开,轴承 B 固定)驱动旋转体及时测量其共振转速下的振幅  $A$ ,以振幅为纵坐标,试量的相位为横坐标,作出曲线 1(图 6-16(b)),若  $P_{\text{试}}$  太大则会出现曲线 2 的形状,这时,若按所得的曲线,在估计  $A_{\text{max}}$  所在分点附近,再加试量  $P_{\text{试}}$ ,测其振幅,即可得出较精确的  $A_{\text{max}}$  的位置。 $A_{\text{max}}$  的相位即为不平衡量的相位,在此处去除不平衡质量  $P_1$  或在相对  $180^\circ$  处加配重,以达到平衡。 $P_1$  可由下式求出。

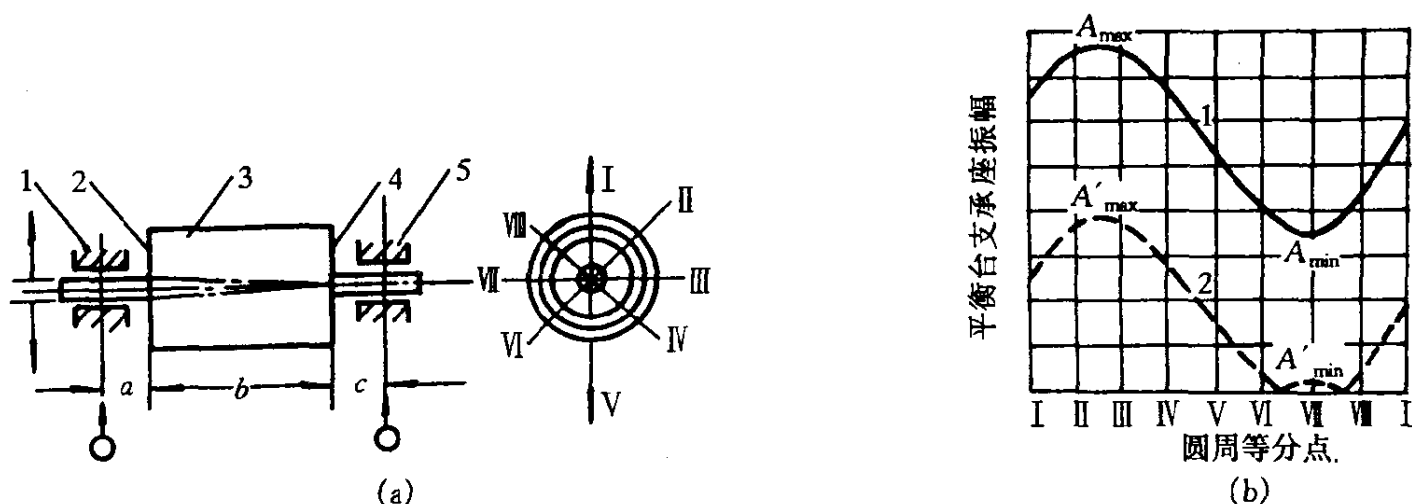


图 6-16 试量周移法确定不平衡量的作图

对于曲线 1 的情况, 因为

$$A_{0\text{平均}} = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}$$

$$\text{故 } P_1 = P_{\text{试}} \frac{A_{\max} + A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}$$

对于曲线 2 的情况:

$$\frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} > A_0$$

故

$$P_1 = P_{\text{试}} \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}$$

式中

$A_{\min}$  —— 曲线 1 和 2 上与  $A_{\max}$  相隔  $180^\circ$  处的振幅。

因为曲线 1, 2 均应为正弦曲线, 若  $P_{\text{试}}$  恰当, 则  $A_{\min}$  可接近于零, 此时  $P_1$  接近于  $P$ , 精度最高。故为提高精度可用试凑法, 将首次算出的  $P_1$  略加大或略缩小, 改为  $P'_1$  放入  $A_{\min}$  点处, 再起转子, 测出振幅, 然后将不同的  $P'$  作为横坐标, 测出相应的振幅为纵坐标, 作出相交的直线 (见图 6-17), 其交点  $S$  对应的  $P_s$  即为所要求的校正平面 2 上的配重。

在平面 2 上加了平衡重得到了平衡以后, 将 A 端夹紧, B 端放松 (图 6-15(b)), 在旋转达到共振转速时, 力  $Q$  造成 B 端振动, 可用同上面一样的方法求出在转子另一个校正面 4 上应加的配重大小和位置 (图 6-15(b)), 但是, 这样所加的配重  $G$  所得到的平衡只有在 A 端固定的情况下才能保持, 因为配重所在的校正平面和  $Q$  是不同的平面, 不能对 A 点以外的任意一点都保持相互平衡, 所以当两个轴承同时松开时, 转子仍旧会有振动, 为此必须进行下列换算 (或分离解算)。

设用此方法求出在平面 4 上加的荷重所产生的离心力是  $G$ , 则根据力学原理只要将  $G$  化为作用在两个平面上的力  $G_1$  和  $G_2$  就可以在任何情况下平衡  $Q$ , 现仍选择 2 和 4 平面, 则在此两平面上的  $G_1$  与  $G_2$  须满足下列关系:

$$G_1 - G_2 = Q$$

$$G_2 b = Q \cdot c$$

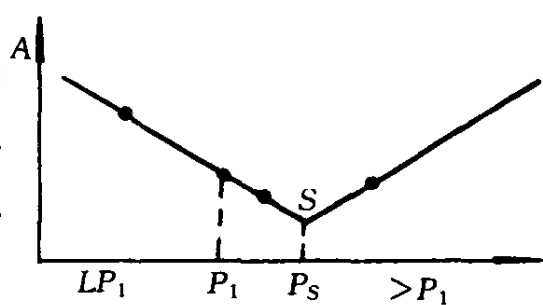


图 6-17 作图法求准确平衡配置

从图(6-15(b))中可看出,由于存在关系

$$Q = \frac{G(a+b)}{(a+b+c)}$$

将这个  $Q$  值代入上面的方程,得到

$$G_2 = \frac{Q \cdot c}{b} = \frac{G(a+b)c}{b(a+b+c)} \quad (6-13)$$

$$G_1 = Q + G_2 = \frac{G(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \quad (6-14)$$

这样,在先求出校正平面 4 上的配量之后,在实际施加荷重时是由在校正平面 2 上加一荷重产生离心力(配量) $G_2$  和校正平面 4 上加一配量  $G_1$  来代替(总之,如果顾及到在这之前在 B 端夹紧时曾经在校正平面 2 上已加了配量  $P_s$ ,则实际上在平面 2 上总共加了  $P'_R = P_s + G_2$ ,而在校正平面 4 上加配重量  $G_1$ ),则转子就可得到完全动平衡。

(2) 两点法:

两点法有同位两点法、垂直两点法、对称两点法。下面介绍对称两点法(即  $180^\circ$ 法)。

两点法是利用平衡的线性条件,只测量振动振幅,不必测出相位(故对于一般平衡台尤其适用),经过几次不同条件下的振幅的测量,间接求出应加的平衡量的大小与方位。

其原理与方法如下:

可采取两端轴承同时松开的条件进行测量。

先对原始振幅进行测量分析,对两端高共振转速下的动平衡与两端低共振转速下的动平衡分开进行,譬如两端高共振转速下的振幅大于低共振转速下的振幅,说明动不平衡分量大于静不平衡分量,同时两端的振幅相差不大,故可先平衡动不平衡(高共振下),然后再作低共振转速下的静不平衡,其步骤如下:

先记下两端支承在高共振转速的原始振幅  $A_{L0}, A_{R0}$ ,在旋转体的左右校正平面上同时分别加试量  $P_L, P_R$ (位置是任意的,但相位差  $180^\circ$ ),测出振幅为  $A_{L1}, A_{R1}$ 。然后将各试量在原来的校正平面各自转移  $180^\circ$ (对称两点法的名称就由此  $180^\circ$ 而来),重新启动,进行高共振下测量,测出振幅分别为  $A_{L2}, A_{R2}$ (L 代表左端,R 代表右端),然后进行作图。下面以左端为例进行介绍:

由于存在着线性条件:

$$A_{L1} = A_{L0} + A_{LP1}$$

$$A_{L2} = A_{L0} + A_{LP2}$$

而

$$A_{LP1} = -A_{LP2} \quad (\text{对于对称两点法成立})$$

故进行如下作图:

画直线段  $AB$  等于 2 倍原始振幅  $A_{L0}$ (见图 6-18),即  $AB = 2A_{L0}$ ,取其中点为  $O$ ,使  $AO = OB = A_{L0}$ ,分别以  $A$  和  $B$  点为圆心,以振幅  $A_{L1}$  和  $A_{L2}$  为半径画圆或弧交于两点  $C, C'$ ,联接  $O$  和  $C$  以及  $O$  和  $C'$ ,则线段  $CO = OC' = A_{LP}$ ,这样即可求出所需的平衡配量

$$Q_L = P_L \frac{A_{L0}}{A_{LP}} \quad (6-15)$$

平衡配量应加的方位,相应于矢量  $P_L$  应转移  $\angle AOC$  角,但由图 6-18 可知, $C$  与  $C'$  点都是可能的解,即有两个解,故应加的配重量的角度是顺时针抑逆时针应按试验来确定。

用同样的方法对右端作矢量图, 求出  $Q_R = P_R \frac{A_{R0}}{A_{RP}}$ , 这样采取了加重  $Q_L, Q_R$  之后, 就获得初步平衡, 在此基础上再进行低共振转速下测量和平衡, 这时的方法和步骤和上述一样, 所不同的只是这时在旋转体左、右校正平面上同时所加的试量  $P'_L$  与  $P'_R$  改为同位相, 因为平衡的是静不平衡, 这样最终求出所需配量  $Q'_L, Q'_R$  在相应位置追加以后, 整个转子的平衡即告完成。

### 3. 动平衡的许可值

不可能有绝对平衡的转子, 因此, 在技术条件中规定了转子的许可不平衡值。有的工厂以轴承的振动作为检验的标准, 规定了转子动平衡的振动许可值:

$n \leq 3\,000 \text{ r/min}$  允许振动值  $0.08 \sim 0.10 \text{ mm}$ ;

$n = 6\,000 \sim 7\,000 \text{ r/min}$  允许振动值  $0.04 \text{ mm}$ ;

$n \geq 10\,000 \text{ r/min}$  允许振动值  $0.02 \text{ mm}$ 。

也有以作用在每一轴承上的剩余惯性力作为许可不平衡值的, 例如, 一般对重型轴, 不应超过转子重量的 1%; 重级转子  $n = 3\,000 \text{ r/min}$  时, 为转子重量的 3%; 中级转子  $n = 5\,000 \sim 8\,000 \text{ r/min}$  时, 为转子重量的 5%。

也可利用零件重心对旋转轴线的偏心距来检验转子的动平衡情况, 其许用的偏心距  $\rho_0$  按表 6-3 选取。

表 6-3 许用偏心距  $\rho_0$

转子转速 (r/min)	$\leq 1\,500$	$\leq 3\,000$	$\leq 5\,500$	$\leq 8\,000$	$\leq 10\,000$	$> 10\,000$
许用偏心距 $\rho_0$ 不高于 ( $\mu\text{m}$ )	8.0	5.0	3.0	2.0	1.5	1.0

## 6.5 装配精度与尺寸链解法

装配的主要目的是将各单独的零件连接成一个整体, 使它们具有预先规定的相对位置, 尤其是那些主要零件的主要表面之间具有规定的相对位置。这些表面通常是摩擦表面, 如滑道导轨面、气缸镜面、轴瓦工作表面等。研究装配的一个重要目的就是在满足机器的使用要求的条件下, 既要使机器加工容易, 还要使装配方便、经济。任何机械都由若干相互关联的零件组成, 这些零件以相关尺寸进行联系, 机器的装配精度不仅与零件的相关尺寸的加工精度有关, 而且与装配方法有关, 三者存在一定的数量联系。尺寸链原理就是研究一系列具有数量联系 (它们必需具有相同量纲) 的事物是如何统一的。

应用尺寸链原理来解决具体的装配工艺问题, 其关键在于如何根据不同的装配方法, 结合具体的机器或部件的装配图来建立相应的装配尺寸链并解出该尺寸链。从所建立的装配尺寸链中可以看出装配与加工之间的联系, 而所谓解尺寸链, 是指在保证达到规定的装配精度的条件下, 如何考虑加工与装配的可能性、经济性, 确定出各有关零件的有关尺寸 (或角度等) 的公差, 也即在已知封闭环公差条件下确定尺寸链中组成环的公差。按照装配方法不同, 解装配尺

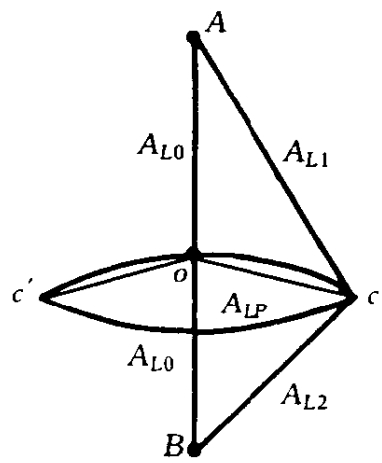


图 6-18 矢量图

寸链有下列四种类型:①完全互换装配法;②部分互换装配法;③选择装配法;④修配法和调整装配法。现分述如下:

### 6.5.1 完全互换装配法

采用完全互换装配法时,机器的每个零件在装配时,不需要经过任何选择、修配或调整就能直接进行装配,并保证达到规定的装配技术要求。

图 6-19 所示的键装配到键槽内后,形成一个装配尺寸链。当采用极大极小计算法时,该尺寸链的封闭环公差等于各组成环公差的算术和,即  $\delta_{A\Sigma} = \delta_{A_1} + \delta_{A_2}$ 。我们解装配尺寸链就是在已知封闭环公差条件下求组成环的公差。为求解简单,设各组成环的公差相等,即  $\delta_{A_1} = \delta_{A_2} = \delta_{A_3} = \dots = \delta_{A_i}$ ,则有

$$\delta_{A_i} \leq \frac{[\delta_{A\Sigma}]}{n-1} \quad (6-16)$$

式中  $[\delta_{A\Sigma}]$ ——允许的封闭环公差。

用极大极小计算法求出的完全互换法装配尺寸链的解只用于单件小批生产,因为此时,各组成环出现次数较少,没有办法预先可靠而又精确地确定它们的实际尺寸,因此不得不按最坏情况来考虑。

在大批、大量生产中,相同的尺寸链出现的次数就是成品的生产数量,各组成环出现次数较多。按照概率论原理,各个环的实际尺寸必按一定的规律分布,且多半分布在数学期望值(均值)附近。这时,封闭环的公差与组成环公差之间的关系可按概率法计算:

$$\delta_{A\Sigma} = \sqrt{\sum \lambda \delta_{A_i}^2}$$

式中  $\lambda$ ——组成环尺寸分布系数,正态分布时  $\lambda = 1$ 。

则

$$\delta_{A\Sigma} = \sqrt{\sum \delta_{A_i}^2}$$

设  $\delta_{A_1} = \delta_{A_2} = \dots = \delta_{A_i}$ , 则

$$\delta_{A\Sigma} = \sqrt{(n-1)\delta_{A_i}^2} = \delta_{A_i} \sqrt{n-1}$$

故当允许的封闭环公差  $[\delta_{A\Sigma}]$  为已知时,组成环公差按下式计算:

$$\delta_{A_i} \leq \frac{[\delta_{A\Sigma}]}{\sqrt{n-1}} \quad (6-17)$$

这就是概率法计算完全互换装配的尺寸链的解。由式(6-16)和式(6-17)可知,用概率法解,其组成环公差可大于用极大极小法求出之组成环公差,即加工要求可放宽。

完全互换的装配法的优点是:

- ①可保证零件完全互换,装配工作简单迅速、经济。
- ②装配时间容易确定和稳定,便于组织流水装配。
- ③更换备件方便,不需选择或修配。

这种方法的缺点是对零件的加工精度要求较高,尤其是当尺寸链环数较多时更为严重。故上法较适用于:①装配精度要求低的尺寸链中;②大批生产中的尺寸链环数较少时,如轴承

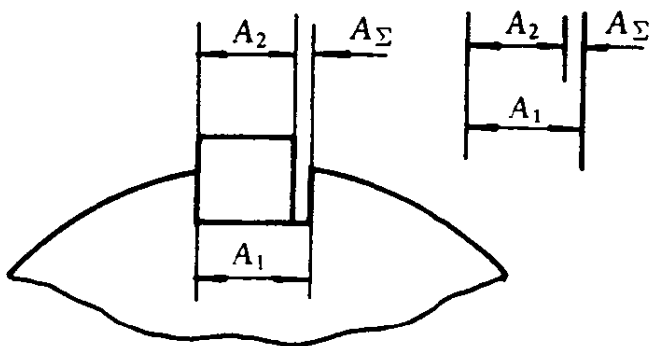


图 6-19 键与键槽配合

等。

### 6.5.2 部分互换装配法

部分互换装配法又称不完全互换法,它的实质是将尺寸链中各组成环的公差预先放得比用完全互换法解出的公差更宽,使加工容易。可以预料,将这些组成环(指零件)装配时,大部分的尺寸链(指装配单元)可以不必经过挑选、修配或调整而直接达到规定的装配精度,而小部分尺寸链的封闭环公差将超过规定的范围,这就是部分互换装配法。其计算可按以下两式进行:

$$\delta'_{A_i} > \delta_{A_i} = \frac{[\delta_{A_\Sigma}]}{n-1} \quad (6-18)$$

$$\delta'_{A_i} > \delta_{A_i} = \frac{[\delta_{A_\Sigma}]}{\sqrt{n-1}} \quad (6-19)$$

式中,  $\delta'_{A_i}$ ——按部分互换装配法所定的组成环加工公差。

式(6-18)系用极大极小法算出,式(6-19)用概率法算出。前者用于单件小批生产,后者用于大批、大量生产。下面我们利用概率原理求取部分互换装配法中废品率,即不能互换的百分比。图 6-20 中,  $n=3$ , 令组成环公差相等, 则

$$\delta'_{A_\Sigma} = [\delta_{A_\Sigma}] = \sqrt{\delta_{A_2}^2 + \delta_{A_1}^2} = \sqrt{2}\delta_{A_i}$$

由于按  $\delta'_{A_i}$  制造且

$$\delta'_{A_i} > \delta_{A_i}$$

故产生封闭环公差

$$\delta'_{A_\Sigma} = \sqrt{\delta'^2_{A_2} + \delta'^2_{A_1}} = \sqrt{2}\delta'_{A_i} > \sqrt{2}\delta_{A_i} = [\delta_{A_\Sigma}]$$

即要产生图 6-20 中阴影区的废品。根据  $\delta'_{A_i}/\delta_{A_i}$  之比可由表 6-4 求得废品率大小。

由表可知,不完全互换法只要对少量超出规定的封闭环公差范围的不合格产品采取修复措施,就可以采用较完全互换法大得多的公差来制造组成环。与完全互换法相比,前者所花的修复劳动量通常总比后者所增加的劳动量为少(尤其是在精度高时)。故部分互换法适用于采用完全互换法不易加工时。但当封闭环精度很高或组成环环数很多时,即使用部分互换法也不能使加工简化许多,可考虑采用选择装配法、修配法和调整装配法。

表 6-4 废品率与  $\frac{\delta'_{A_i}}{\delta_{A_i}}$  之关系

不合格的百分率	1%	5%	10%	15%	...	31.74%
$\frac{\delta'_{A_i}}{\delta_{A_i}}$	1.165	1.53	1.822	2.083	...	3.00

### 6.5.3 选择装配法

选择装配法是在加工时将零件的尺寸公差放大,然后在装配时进行选择,此时有两种选择

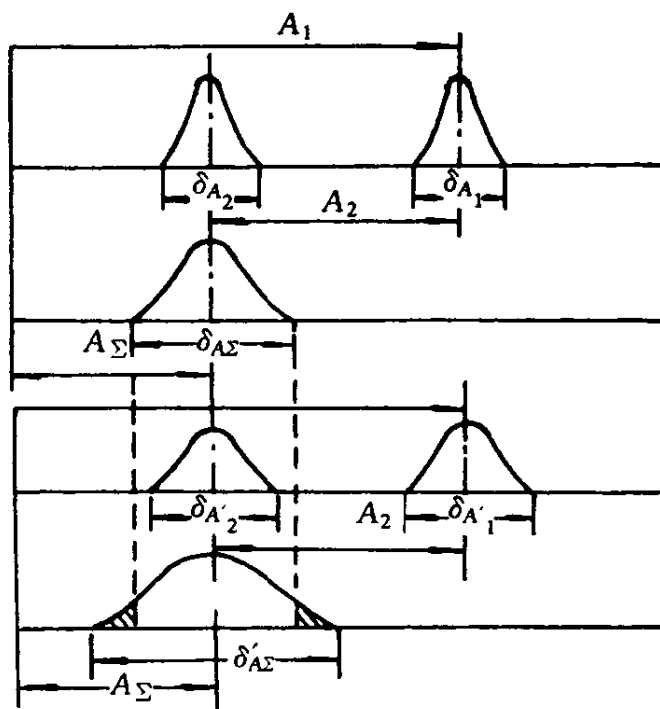


图 6-20 部分互换法与废品率

法:

### 1. 直接选择装配法

直接选配法是指工人从许多加工好的同种零件(组成环)中直接任意挑一个零件来装配。若这一个不合适,再换另一个,一直到满足要求为止。通常活塞环与活塞环槽装配采用此法。

### 2. 分组装配法

分组装配法是先对一批互相配合的零件进行测量。然后按照该批相配零件的实际尺寸大小分成相同的若干组(譬如是三组),对于分好了组的零件打上组号或装入专用的容器内,最后从对应组内任意各取一个即可互配,不需挑选,保证组内任意互换,故该法又称为分组互换装配法。

采用分组装配时,其分组公差  $\delta_A$ , 不仅决定于零件的制造公差  $\delta'_A$ , 而且还决定于分组数  $M$ , 即

$$\delta_A = \frac{\delta'_A}{M} \quad (6-20)$$

最终装配精度(即封闭环的最终公差  $\delta_{A\Sigma}$ )只直接由分组公差来决定,于是分组装配法可由以下两式来解:

$$\begin{cases} \delta'_A = M\delta_A \leq \frac{[\delta_{A\Sigma}]}{n-1}M \\ \delta'_A = M\delta_A \leq \frac{[\delta_{A\Sigma}]}{\sqrt{n-1}}M \end{cases} \quad (6-21)$$

这就是已知封闭环允许公差,求组成环公差的公式。式中假定各组成环公差相等,前式适用于小批生产,后式适用于大量生产。由式(6-21)可知,随着分组数  $M$  增加,在封闭环规定公差不变时,零件(组成环)公差可大大放宽。

选择装配法用于装配精度要求较高的大批量生产场合,但尺寸链的总环数  $n$  不宜大于 4。同时,挑选或分组要花费一定时间,并且希望相互位置及形状误差与分组公差相适应。另外在实际运用中有可能产生对应分组内的零件数不一定相等(虽然总件数是相等),这意味着挑选完毕后有一些零件剩余。为了克服上述缺点对其剩余部分可考虑采用修配法或调整法。

#### 6.5.4 修配法和调整装配法

修配法和调整装配法的实质是一样的,即事先有意识地将各零件公差放大,然后在装配时再通过修配的方法,即利用补充的机械加工或手工修配切去某一零件上的多余金属量的方法(这是修配法),或者在装配时通过调整的方法,即利用更换大小不同的补偿件或调整原补偿件不同位置的方法(这是调整法),来达到所要求的封闭环尺寸的精度(装配精度)。

图 6-19 所示的键与键槽配合也可利用修配法来达到装配精度,若其配合间隙(封闭环)为  $0 \sim 0.05 \text{ mm}$ , 则公差  $[\delta_{A\Sigma}] = 0.05 \text{ mm}$ 。当采用完全互换法时,对于单件生产,用等公差法求得各组成环公差为

$$\delta_{A1} = \delta_{A2} = \frac{[\delta_{A\Sigma}]}{2} = \frac{0.05}{2} = 0.025 \text{ mm}$$

则此公差值太小(见图 6-21(a)),加工不经济,故可改用修配法,即将键的宽度和键槽的宽度尺寸的公差事先放大到  $\delta'_{A1} = 0.22 \text{ mm}$ ,  $\delta'_{A2} = 0.1 \text{ mm}$ (图 6-21(b))进行加工,装配后形成的



间隙公差按极大极小法计算,为  $\delta'_{A\Sigma} = \delta'_{A_1} + \delta'_{A_2} = 0.22 + 0.1 = 0.32\text{mm}$ 。由于  $\delta'_{A\Sigma} > [\delta_{A\Sigma}]$ ,不符合装配精度要求。为此就必须由尺寸链中考虑一个补偿环,在该环事先加大一个补偿值  $\delta_K$ 。由于键比键槽容易修配,故选键宽  $A_1$  作为补偿环,在其  $A_1$  上至少加大一个补偿值  $\delta_K$ ,以便在出现最大尺寸偏差时,也能通过对键宽度 ( $A_1 + \delta_K$ ) 进行锉削来达到规定的间隙要求(图 6-21(c))。必须的最小补偿量  $\delta_K$  按下式求得:

$$\delta_K = \delta'_{A\Sigma} - [\delta_{A\Sigma}] = 0.32 - 0.05 = 0.27\text{mm}$$

对极大极小法和概率法可分别改写成:

$$\begin{cases} \delta_K = \sum_{i=1}^{n-1} \delta'_{A_i} - [\delta_{A\Sigma}] \\ \delta_K = \sqrt{\sum \delta'^2_{A_i}} - [\delta_{A\Sigma}] \end{cases}$$

若设各组成环公差相等,则

$$\begin{cases} \delta_K = (n-1)\delta'_{A_i} - [\delta_{A\Sigma}] \\ \delta_K = \sqrt{n-1}\delta'_{A_i} - [\delta_{A\Sigma}] \end{cases} \quad (6-22)$$

或

$$\begin{cases} \delta'_{A_i} = \frac{[\delta_{A\Sigma}] + \delta_K}{n-1} \\ \delta'_{A_i} = \frac{[\delta_{A\Sigma}] + \delta_K}{\sqrt{n-1}} \end{cases} \quad (6-23)$$

式(6-23)可求出组成环公差,这就是用修配法解

装配尺寸链的公式。式中  $\delta_K$  为整批零件均适合的必须的最小补偿量。

修配法的方法可通过手工锉掉一层金属,实际除去的修锉量在  $0 \sim \delta_K$  之间。也可用机械加工在装配过程中临时除去。修配法的优点在于扩大组成环的加工公差,精度可以任意提高;缺点是没有互换性,装配时需要临时修配,且修配量各不相同,不便于组织流水生产。此法适合单件、小批生产的多环尺寸链。

调整装配法与修配法的区别仅仅在于前者不是锉掉或加工掉某一补偿环(零件)的一层金属,而是用增减或改换补偿件(固定补偿件)或调节活动补偿件的办法来实现的。实际必需增加的补偿件厚度或调节活动补偿件的调节量每组不尽相同,但总在  $0 \sim \delta_K$  范围内变化。 $\delta_K$  为增减与调节所需的最大量,仍按式(6-22)计算。

例如,在活塞式压缩机中,线性余隙容积的尺寸(封闭环)有一定的公差要求,可通过旋转活塞杆上的螺纹,调节它在十字头内的轴向深度位置来达到。这就是活动补偿件调节法,这里活塞杆是活动补偿件。

此外,也可在活塞杆与十字头接触的端面间,或在缸体与缸盖接触的端面间,安放一片或一组具有一定厚度的补偿片的方法来达到规定的线性余隙容积要求,这是利用固定补偿件来调整的装配法。

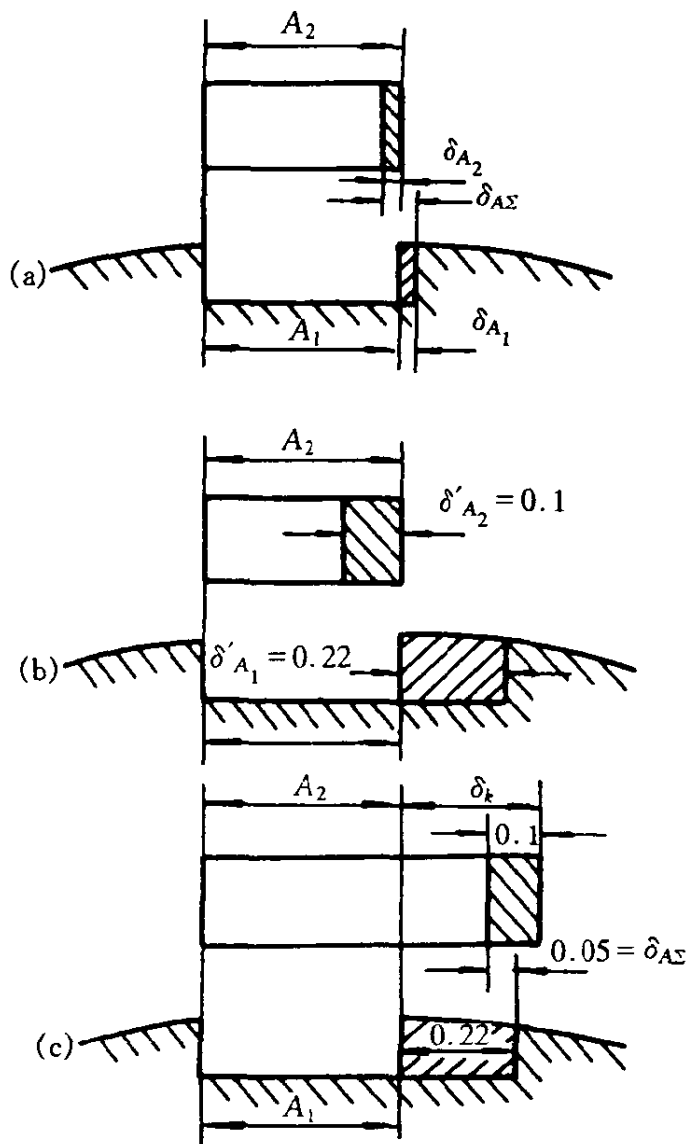


图 6-21 修配法尺寸图

调整法的优点是:①可加大组成环的尺寸公差;②可使封闭环达到很高的精度;③装配时不需要手工修配,工时易于掌握,容易组织流水生产;④对旧机器也可利用此法恢复原有精度。

用调整装配法解装配尺寸链的例子如下:

对于图 6-19 的例子,已知原来  $A_2 = 80_{-0.025}^0$ ,  $A_1 = 80_{+0.025}^0$ ,  $A_\Sigma = 0.025_{-0.025}^{+0.025}$ ,但若为方便加工将  $A_1, A_2$  公差放大到:  $\delta'_{A_1} = 0.22$ ,  $\delta'_{A_2} = 0.1$ ,则装配时就超差。事先设想采用固定垫片的调整装配法,问需要准备多少什么样尺寸的固定垫片?

解:

(1) 补偿量的确定:

设所加的垫片厚度名义值暂定为  $2\text{mm}$ ,其加工公差取  $\delta_{AK} = 0.01\text{mm}$ ,亦即使  $A_1$  减少  $2\text{mm}$ ,即已知  $A_2 = 78_{-0.1}$ ,  $A_1 = 80_{+0.22}$ ,则不计垫片加工公差时的所需补偿量为

$$\delta_K = \delta'_{A_\Sigma} - [\delta_{A_\Sigma}] = (\delta'_{A_1} + \delta'_{A_2}) - [\delta_{A_\Sigma}] = 0.1 + 0.22 - 0.05 = 0.27$$

式中  $[\delta_{A_\Sigma}] = A_{\Sigma_{\max}} - A_{\Sigma_{\min}} = 0.025 - (-0.025) = 0.05$

由图 6-22 中可见,当顾及固定垫片本身也有加工公差时,为使得最大一组垫片做成为最小时,而最小一组垫片尺寸做成为最大时,仍有足够的补偿量  $\delta_K$ ,则所需的总补偿量

$$\delta'_K = \delta_K + \delta_{AK} = 0.27 + 0.01 = 0.28$$

(2) 组数  $M$  的确定:

假定采用  $M$  组固定垫片,其厚度尺寸按等差级数分布,则相邻各组之名义间隔

$$\Delta_{\text{各}} = \frac{\delta'_K}{M-1} \quad (6-24)$$

为了避免出现选用上一组垫片嫌太大,选用本组垫片又太小的情况发生,故所选的组数  $M$  要足够多,以使  $\Delta_{\text{各}}$  足够小才行。图 6-23 中列出了相邻两组 ( $i, i-1$  组) 垫片在空间的位置。为了保证满足装配精度要求,则在  $A_1, A_2$  一定的情况下至少需使封闭环尺寸中心处箭头  $B$  所最接近的那组垫片(图 6-23 中为第  $i$  组)的公差带处在封闭环允许的公差范围内。也即

$$\left(\leq \frac{\Delta_{\text{各}}}{2}\right) + \frac{\delta_{AK}}{2} \leq \frac{[\delta_{A_\Sigma}]}{2}$$

因为若它不满足,则第  $i-1$  组以及其它任一组就更不能满足。

若能满足下式

$$\frac{\delta_{AK}}{2} + \frac{\Delta_{\text{各}}}{2} \leq \frac{[\delta_{A_\Sigma}]}{2} \quad (6-25)$$

则上式就更能满足,于是

$$\delta_{AK} + \Delta_{\text{各}} \leq [\delta_{A_\Sigma}] \quad (6-26)$$

联立式(6-24)与式(6-26)后得

$$\delta_{AK} + \frac{\delta'_K}{M-1} \leq [\delta_{A_\Sigma}]$$

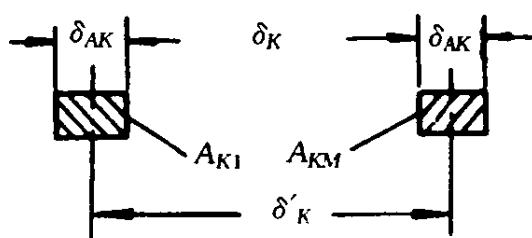


图 6-22 两个补偿量间之关系

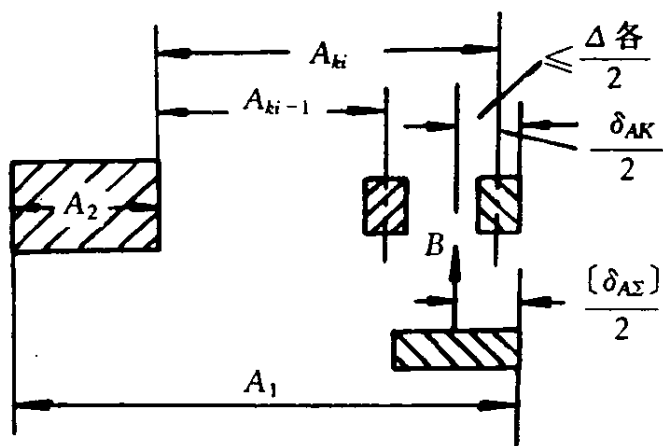


图 6-23 相邻垫片组之分布

即

$$\begin{aligned}
 M &\geq \frac{\delta'_K}{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}} + 1 \\
 &= \frac{\delta_K + \delta_{AK}}{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}} + 1 \\
 &= \frac{0.27 + 0.01}{0.05 - 0.01} + 1 = 8(\text{组}) \quad (6-27)
 \end{aligned}$$

也即组数  $M$  满足上式,即可避免出现用本组垫片不行,用上一组也不行的情况,并且用本组(箭头  $B$  接近的那一组)肯定行。于是

$$\Delta_{\text{名}} = \frac{\delta'_K}{M-1} = \frac{0.28}{8-1} = 0.04 \text{ mm}$$

(3) 各组尺寸之求取:

先求调整垫片中最厚一组尺寸  $A_{K1}$ :

由于垫片是装配尺寸链中的减环,另外最厚一组垫片是在封闭环最大时才选用的,为了在使用它时不致使封闭环最大尺寸超差,故需

$$A_{\Sigma\text{max}} = \Sigma A_{i\text{max}} - \Sigma A_{i\text{min}} = A_{2\text{max}} - (A_{1\text{min}} + A_{K1\text{min}}) \not\geq [A_{\Sigma}]_{\text{max}}$$

故得:

$$A_{K1\text{min}} \geq A_{2\text{max}} - A_{1\text{min}} - [A_{\Sigma}]_{\text{max}} = 80.22 - (78_{-0.1}) - 0.05 = 2.27\text{mm}$$

由此得:

$$\begin{aligned}
 A_{K1} &= 2.27_0^{+0.01} \\
 A_{K2} &= A_{K1} - \Delta_{\text{名}} = 2.27_0^{+0.01} - 0.04 = 2.23_0^{+0.01} \\
 A_{K3} &= A_{K2} - \Delta_{\text{名}} = 2.19_0^{+0.01} \\
 &\vdots \\
 A_{K8} &= 1.99_0^{+0.01}
 \end{aligned}$$

(4) 验算:

当组成环中增环最小,减环最大,即  $A_2$  为  $A_{2\text{min}} = 80$ ,  $A_1$  为  $A_{1\text{max}} = 78$  时,则这时必然动用最小一组  $A_{K8}$ 。

选用  $A_{K8}$  后封闭环之尺寸为  $A_{\Sigma} = 80 - 78 - 1.99_0^{+0.01} = 0^{+0.01}$ , 在规定的  $[A_{\Sigma}] = 0.0 \sim 0.05$  范围内,合格。

由上述例子可见对于固定垫片的调整装配法其尺寸链的解的公式可由下面推导得出:

由式(6-27)得

$$M \geq \frac{\delta_K + \delta_{AK}}{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}} + 1 = \frac{\delta_K + [\delta_{A\Sigma}]}{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}} = \frac{(n-1)\delta'_{Ai}}{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}} \quad (\text{极大极小法})$$

上式右式适用于各组成环公差相等,并且总环数  $n$  中不包括固定垫片。

于是

$$\delta'_{Ai} \leq \frac{M\{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}\}}{n-1} \quad (6-28)$$

这就是利用极大极小法解固定垫片调整装配法的装配尺寸链之解,解中体现了组成环与封闭环公差之间的关系。

大量生产时用概率法解,则公式可写成

$$\delta'_{Ai} \leq \frac{M\{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}\}}{\sqrt{n-1}} \quad (6-29)$$

图 6-24 为 170 系列制冷压缩机结构简图, 已知:  $A_1 = 561(\pm 0.225)$  为机体缸座端面至主轴孔中心距,  $A_3 = 20.5_0^{+0.05}$ ,  $A_4 = 33_0^{+0.05}$ ,  $A_5 = 20_{-0.084}^0$ ,  $A_2 = 420(\pm 0.125)$  为连杆大小头孔中心距,  $A_{12} = 70(\pm 0.1)$  为曲柄回转半径,  $g = 105.05 \pm 0.101$ 。需保证  $N = 1.0 \sim 1.6$ , 求  $A_2$  的垫片的厚度与张数。

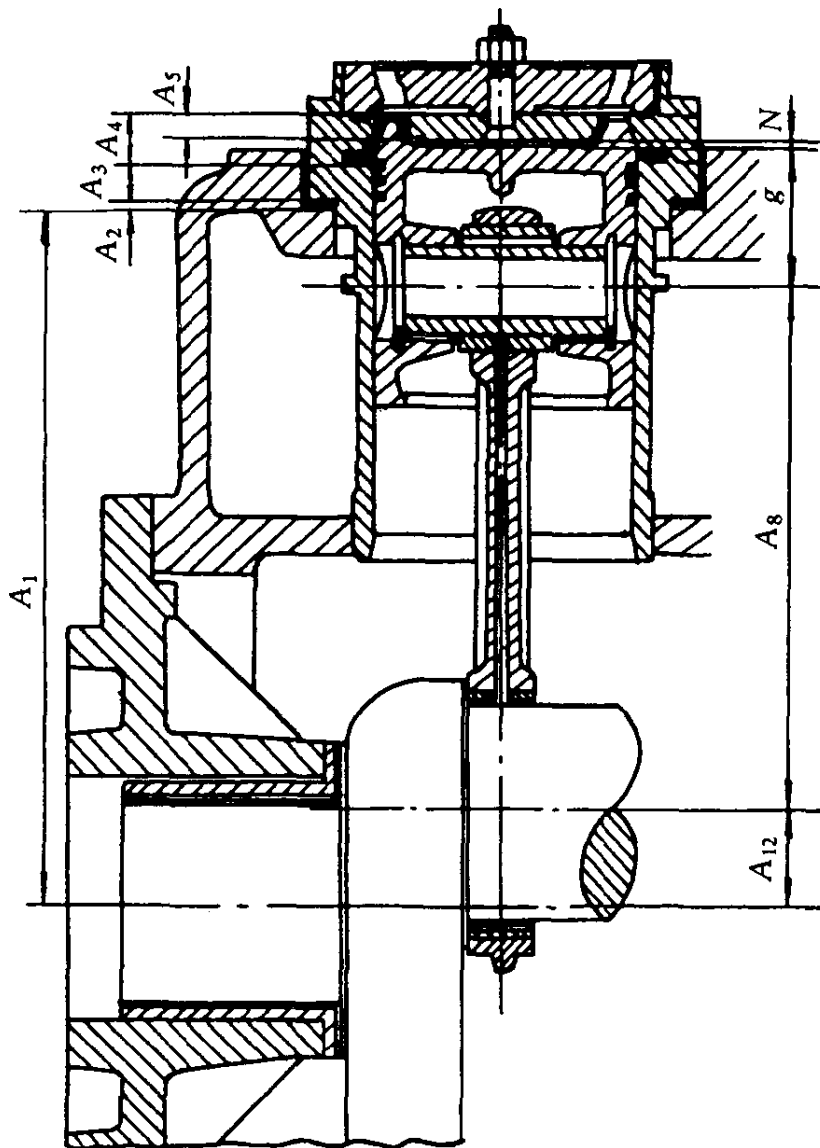


图 6-24 压缩机结构简图

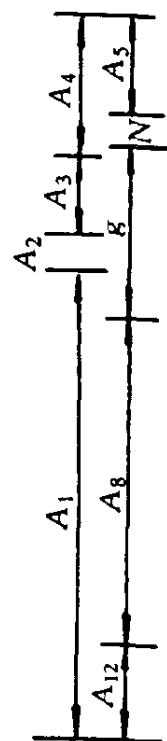


图 6-25 尺寸链图

解: 首先将各环尺寸换算成对称公差, 以便于计算:  $A_1 = 561 \pm 0.225$ ,  $A_3 = 20.525 \pm 0.025$ ,  $A_5 = 19.958 \pm 0.042$ ,  $A_{12} = 70 \pm 0.1$ ,  $A_4 = 33.025 \pm 0.025$ ,  $A_8 = 420 \pm 0.125$ ,  $g = 105.05 \pm 0.101$ ,  $N = 1.3 \pm 0.30$ 。封闭环即为线性余隙容积  $N$ 。其尺寸链如图 6-25 所示。

由该尺寸链可求出固定垫片的名义尺寸  $A_2$ 。

$$N = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - A_5 - A_{12} - A_8 - g$$

$$A_2 = N - A_1 - A_3 - A_4 + A_5 + A_{12} + A_8 + g$$

$$= 1.3 - 561 - 20.525 - 33.025 + 19.958 + 70 + 420 + 105.05$$

$$= 1.758 \text{ mm}$$

我们按极大极小法计算封闭环公差

$$\delta'_N = \sum \delta_{A_i} = \pm 0.225 \pm 0.025 \pm 0.025 \pm 0.042 \pm 0.125 \pm 0.1 \pm 0.101 \pm \frac{\delta_{AK}}{2}$$

$$= 1.286 + \delta_{AK}$$

式中  $\delta_{AK}$  为  $A_2$  环之制造公差。

$$\delta'_K = \delta'_N - [\delta_{A\Sigma}] = 1.286 + \delta_{AK} - 0.60 = 0.686 + \delta_{AK}$$

取  $\delta_{AK} = 0.06$ , 则  $\delta'_K = 0.686 + 0.06 = 0.746$

$$M \geq \frac{\delta'_K}{[\delta_{A\Sigma}] - \delta_{AK}} + 1 = \frac{0.746}{0.6 - 0.06} + 1 = 2.381 \quad \text{取 } M = 3$$

$$\Delta_{\text{名}} = \frac{\delta'_K}{M - 1} = \frac{0.746}{3 - 1} = 0.373$$

中间组尺寸  $A_{K2} = A_2 \pm \frac{\delta_{AK}}{2} = 1.758 \pm 0.03$

则

$$A_{K1} = A_{K2} + \Delta_{\text{名}} = (1.758 + 0.373) \pm 0.03 = 2.131 \pm 0.03$$

$$A_{K3} = A_{K2} - \Delta_{\text{名}} = (1.758 - 0.373) \pm 0.03 = 1.385 \pm 0.03$$

验算:

(1) 当所有增环最大、减环最小时, 此时选用  $A_{K3}$  组之固定垫片(因为  $A_K$ , 即  $A_2$  是增环) 后之封闭环尺寸为

$$\begin{aligned} N &= A_{1\max} + A_{3\max} + A_{4\max} - A_{5\min} - A_{12\min} - A_{8\min} - g_{\min} + A_{K3} \\ &= 561 + 0.225 + 20.525 + 0.025 + 33.025 + 0.025 - 19.958 + 0.042 \\ &\quad - 70 + 0.1 - 420 + 0.125 - 105.05 + 0.101 + 1.385 \pm 0.03 \\ &= 1.57 \pm 0.03 \quad (\text{在允许的 } 1 \sim 1.60 \text{ 范围内, 故合适。}) \end{aligned}$$

(2) 用同样的方法验算, 所有增环最小、减环最大时, 此时采用  $A_{K1}$  垫片, 则

$$\begin{aligned} N &= A_{1\min} + A_{3\min} + A_{4\min} - A_{5\max} - A_{12\max} - A_{8\max} - g_{\max} + A_{K1} \\ &= 561 - 0.225 + 20.525 - 0.025 + 33.025 - 0.025 - 19.958 - 0.042 \\ &\quad - 70 - 0.1 - 420 - 0.125 - 105.05 - 0.101 + 2.131 \pm 0.03 \\ &= 1.03 \pm 0.03 \quad (\text{在允许的 } 1 \sim 1.60 \text{ 范围内, 故合适。}) \end{aligned}$$

## 6.6 装配的组织形式

装配的组织形式很多, 根据被装配的机器(或部件)、装配工作地点以及装配工人之间结合的不同, 可以区分为集中工序与分散工序, 也可分为移动式装配与固定式装配等等, 它们之中又可有多种不同组合。

所谓集中工序, 是指整个装配只有一个工序, 全部装配工作只由一组工人在同一个工作位置完成。

所谓分散工序, 是指装配工作过程分散, 一台机器的装配由不同的几组工人完成, 每组工人只完成其中一部分特定的工作任务。譬如整个机器装配过程分为部件装配与总装配, 若干部件由若干工人分别装配, 而总装配则由另一组工人完成, 这就是一种分散工序法。再如该总装配又可分成几个工人小组去完成, 这就是更多分散的分散工序。

在分散工序的情况下, 各工序的完成根据移动的对象不同又可分成三种典型方式:

① 一个工序完成之后进行下一个工序时, 是通过制品的移动, 制品从一个装配位置移到另一个装配位置, 而装配工人在原装配位置不变动。

② 各个工序的完成是制品在同一个装配位置不变动的情况下进行的,而由几组工人分别按先后次序的流动来完成特定的装配工作。

③ 工人与制品同时移动。

分散工序在多件成批、大量生产的条件下才有可能。在采用分散工序时,为保证提高生产率和充分利用人力、物力和装配面积,就需要消除工人停工待料或制品停工等人的现象,也就是需要使各个工序的装配时间尽量一致,即所谓“工作节拍”相等,制品由一个工作地点转到另一个工作地点应在严格规定的时间内完成。这样才能保证制品连续地或在稳定的节奏下生产,这样的装配叫流水装配。

综合上述,集中工序要求工人的技术水平较高,生产作业面积较大,所需装配周期较长,适用于单件生产、大型机器、试制产品以及修理车间的装配工作。

分散工序可使装配工人专业化,有较好的专用夹具和工作地点,可同时装配,生产率高。

制品固定式装配,对于那些难于移动、大而重的产品较适宜,或者对其基础零件刚度不足,而机器精度要求较高的制品是适宜的。

制品移动式装配一般需要有相应的起重机、传送带或专用小车等装置,连续地或一定周期地或不定期运动地输送制品。采用这种方式时,车间作业面积可小,生产率高,但装配的准备工作较多,适宜于中、小型机器的大批、大量生产。

流水装配是分散工序装配中的高级形式,装配周期较短,生产率较高,厂房作业面积利用率高,是成批和大量装配生产的发展方向之一,自动的流水线叫自动线。

## 6.7 装配工艺规程的制定

装配工艺规程是装配工作的指导性技术文件,是进行装配工作的依据,它必须包括下列内容:①确定装配方法;②确定组织形式;③规定装配单元及其装配顺序并画出装配系统图;④划分装配工序;⑤选择工艺装备;⑥确定工时定额;⑦写出工艺文件等等。

制定工艺规程应遵循下列原则:①保证机器装配后的质量并提高其质量精度储备;②钳工的装配工作量尽可能少;③装配周期尽可能短;④所占车间的生产面积尽可能最小。

制定装配工艺规程的一般步骤如下:

(1) 确定装配方法:

先分析装配图,根据机器特点查明尺寸链,根据生产条件、批量的大小,确定其装配方法并选择相应的解尺寸链的方法。

(2) 决定装配的组织形式:

根据工厂的生产规模和产品的结构特点,确定装配的组织形式。譬如成批生产的机器多采用固定式的流水装配。

(3) 确定装配顺序:

装配基本上是由机器的结构特点和装配的组织形式决定的,装配的顺序可用装配系统图来表示(见图 6-26),图上按纵向分成五行,依次列出五种等级的装配单元:零件、合件、组件、部件和机器。

零件 组成机器的基本元件,它是由一整块金属制成的部分元件。零件一般都是预先装成合件、组件或部件才安装到机器上去,直接装入机器的零件不太多。

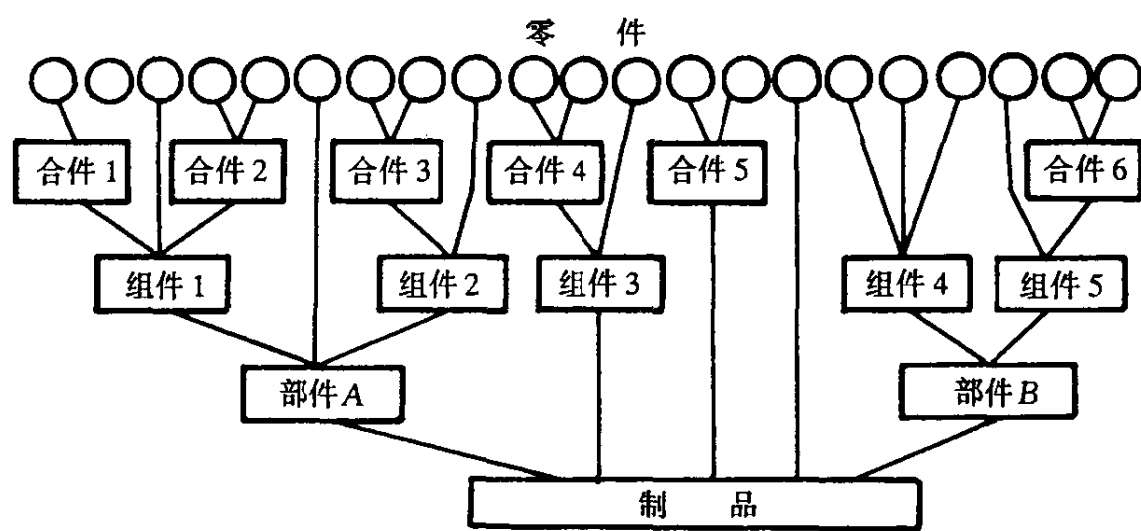


图 6-26 装配系统图

**合件** 合件可以是若干零件永久结合(焊、铆等)或者是组合后还需加工的零件接合(如在连杆小头孔中压入衬套后再镗孔)。

**组件** 组件是指一个合件或几个合件和几个零件的结合。

**部件** 它是由各组件组成。如气缸部件是由气缸、缸套、缸盖、活塞组件、气阀组件等组成。

**机器** 或叫制品,它是由部件所组成,如压缩机是由气缸部件、曲轴箱部件等组成。

在图 6-26 中,在横向方向,按照部件装配的顺序,排列出各等级中所有装配单元,这样可以表示出总装的顺序,而纵向可表示各部件、组件本身的装配顺序。

通过装配系统图也可以决定能否组织平行流水装配作业,对于单件、小批生产它还可以代替装配工艺规程。

#### (4)划分工序:

在成批、大量生产时有必要划分装配工序,所谓划分装配工序就是确定工序数目、次序和工作内容。在确定时,必须注意前一个工序不得影响后一个工序的进行,在完成某些可能产生废品的工序以及包括有调整工作的工序之后,都必须安排检查工序。在流水装配时,完成每一工序所需的时间须与装配节拍大致相等或成为整倍数。

工序的划分需根据装配系统图并考虑到厂内运输等条件予以制定。

#### (5)选择工艺装备:

根据产品的结构特点和生产规模,应尽可能地选用相应的较先进的装配工具和设备。

#### (6)确定工序的工时定额:

工时定额是在实际生产条件下根据现场实测而制定的,一般多是根据工厂的实际经验和统计资料估计的。

#### (7)编写相应的工艺文件:

在单件小批生产时,通常不制定装配工艺卡片,而用装配工艺系统图代替,工人装配时按产品装配图和装配工艺系统图进行装配。

在成批生产时,通常制定部件装配及机器装配的装配工艺卡片,在工艺卡片上,记录各工序的次序、工序的简要内容、所需的工艺设备、工时定额等;在大批大量生产时,则应制定装配工序卡片,一个工序一张卡片。工序卡片直接指导工人进行装配。

编写工艺规程应从生产实际出发,通过调查研究、经济核算、对比分析,尽可能采用先进技术,使工艺规程制定得合理、先进而又切实可行。

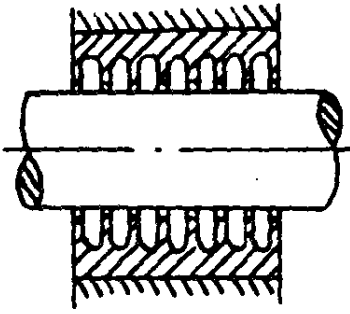
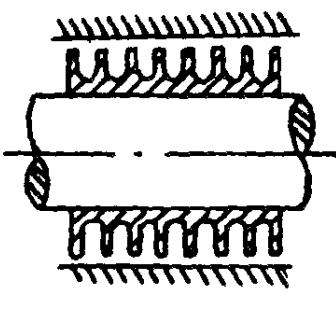
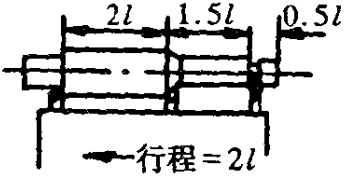
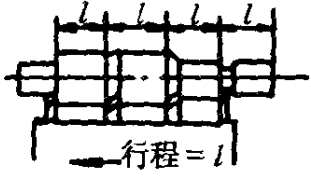
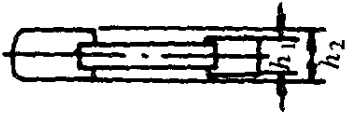
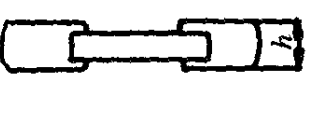
## 第 7 章 结构工艺性

在设计动力机械与设备及其零件时,除了要考虑它们的工作条件、性能要求外,还必须注意结构工艺性。结构工艺性就是一种结构在满足工作性能及产品质量的要求前提下,按照一定的生产规模和生产条件,能以最少的劳动量、最低的成本及较高的生产率的方法制造出来,并且还便于维修。动力机械与设备的结构工艺性包括了零件的结构工艺性和零、部件的装配工艺性,而零件又分为切削加工件、焊接件、铸件、锻压件等等,从而就有相应的机械加工件的结构工艺性、焊接件的结构工艺性等等。

### 7.1 机械加工件的结构工艺性

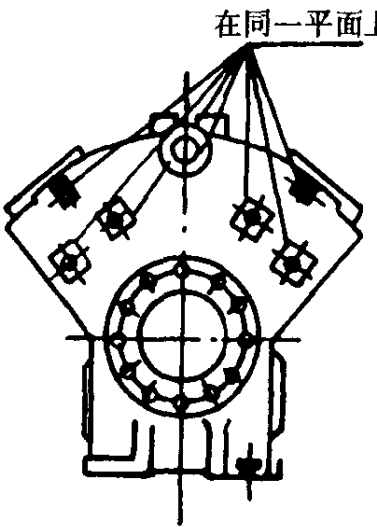
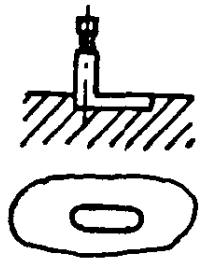
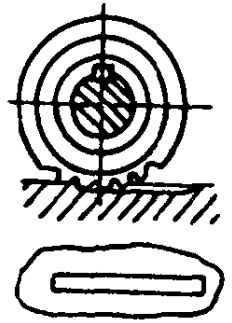
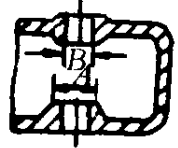
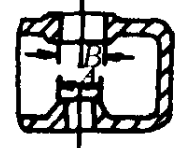
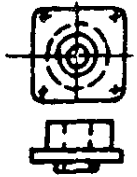


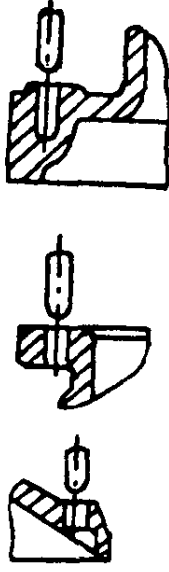
机械加工(切削加工)是零件生产过程中的主要阶段,机械加工件的结构工艺性对加工质量、经济性、生产率的影响较大,结构工艺性的好或差可通过表 7-1 中所列的部分示例对比来说明。

表 7-1 零件结构的机械加工工艺性

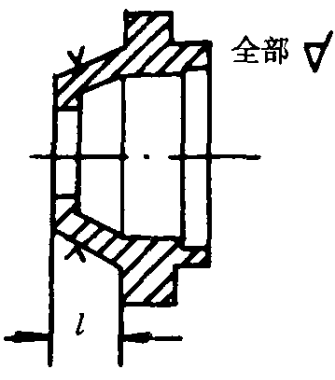
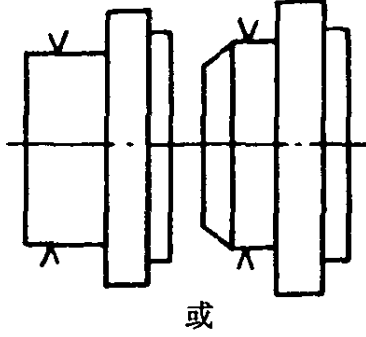
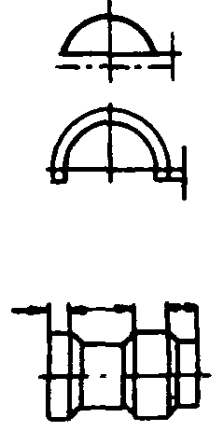
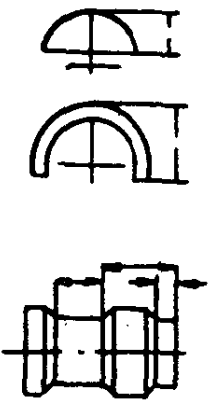
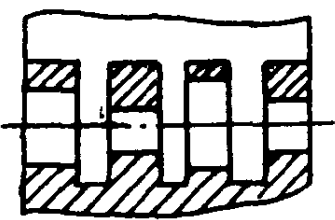
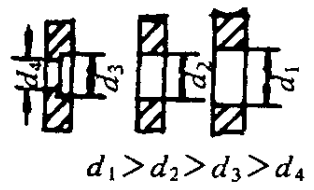
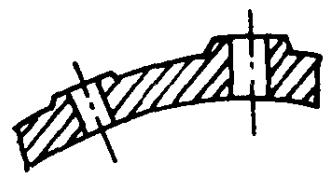
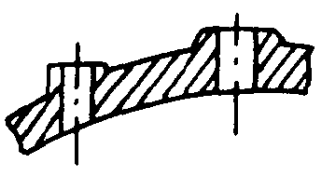
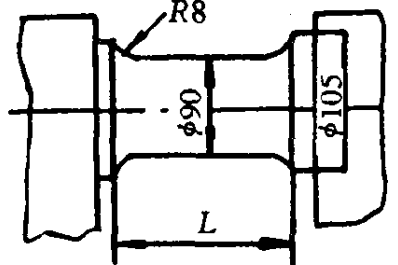
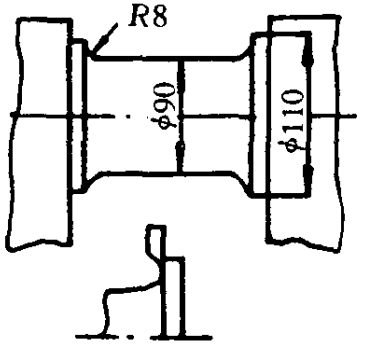
工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		避免内成形表面的加工
		阶梯轴各段轴向长度相等,可同时进行多刀加工
		连杆大小头高度相等,可减少加工时的调整与安装



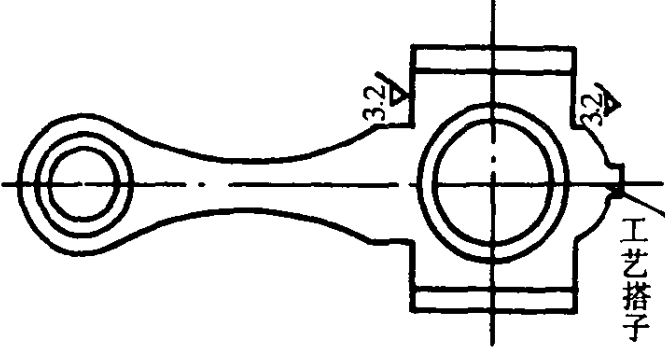

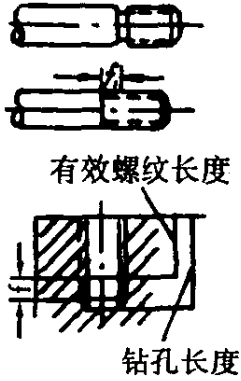
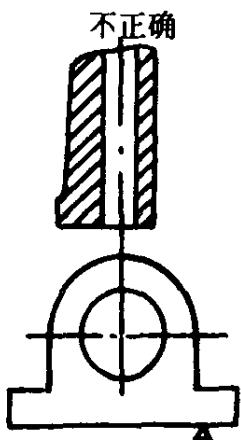
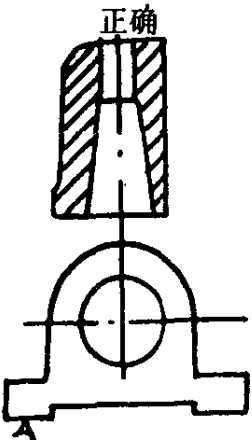
续表 7-1

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
	 <p>在同一平面上</p>	<p>同一方向的各个凸台应放在同一平面中,便于加工</p>
		<p>盘形铣刀较指形铣刀加工的生产率高</p>
		<p>为了加工 A 端面,需 B 尺寸大于 A 尺寸</p>
		<p>矩形侧面加工时有冲击</p>
		<p>孔的轴线应垂直于孔的进口与出口的端面,以避免钻头歪断</p>

续表 7-1

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		<p>端盖改用或增加圆柱形部分,可便于装卡</p>
		<p>尺寸标注要正确,便于加工度量</p>
	 <p><math>d_1 &gt; d_2 &gt; d_3 &gt; d_4</math></p>	<p>同轴的孔系各孔孔径尽可能从一边递减排列,各孔径差要小,避免较小的孔存在影响镗杆本身刚度</p>
		<p>斜孔改为垂直孔,便于工件在机床上的安装</p>
		<p>圆弧外凸台直径相对于 R 应有少许超越尺寸,便于量具卡爪准确测量 L 尺寸</p>

续表 7-1

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		<p>增设工艺搭子,以便打中心孔,供车削<sup>3.2</sup>平面</p>
		<p>应该有退刀槽或退刀扣</p>
		<p>减少加工长度和面积</p>

## 7.2 焊接件的结构工艺性

在设计焊接结构时,除了要满足产品使用性能要求外,还要考虑焊接结构的工艺性,这就要求在结构件材料、焊接方法的选择上、焊接接头的工艺设计上均要考虑工艺的方便与可行性。主要的要求有下列原则:

### 1. 焊缝位置应便于焊接操作

在布置焊缝时要考虑留有足够的操作空间。例如对于手工电弧焊焊件,图 7-1(a),(b),(c)所示的内侧焊缝,焊条无法伸入,应分别改为(d),(e),(f)所示的设计才比较合理。对于自动焊结构,为了施焊时在接头处存放焊剂方便,图 7-2(a)方案中应改为(b)方案;对于点焊与缝焊时为考虑电极伸入方便,图 7-3 中(a)方案和(b)方案应分别改为(c)和(d)方案。

### 2. 焊缝位置应避开最大应力处和应力集中处

对于受力较大较复杂的焊接构件,在最大应力和应力集中的位置不应该布置焊缝。例如

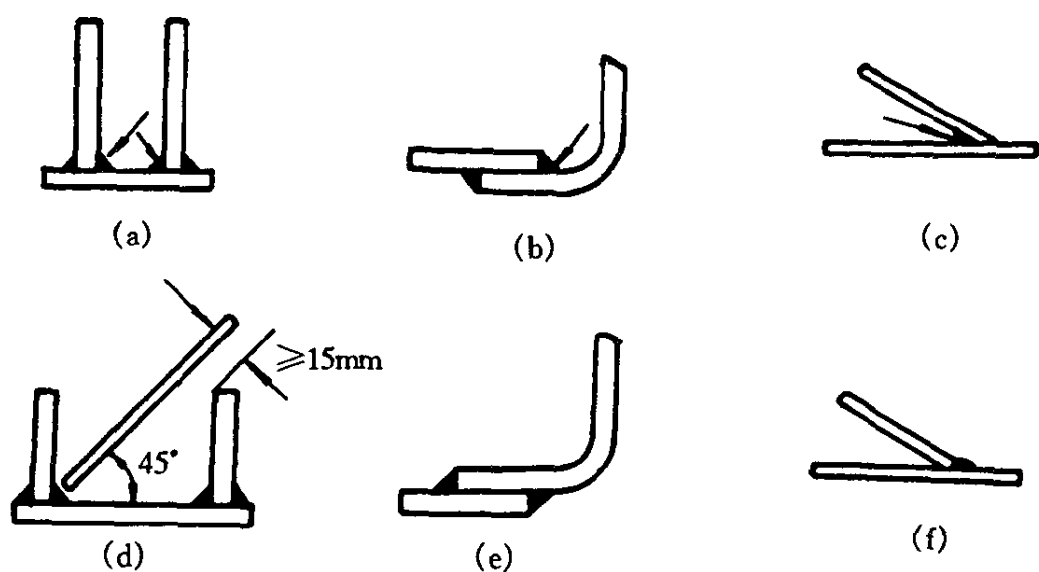


图 7-1 手工弧焊焊缝位置的设计  
(a), (b), (c)不合理; (d), (e), (f)合理

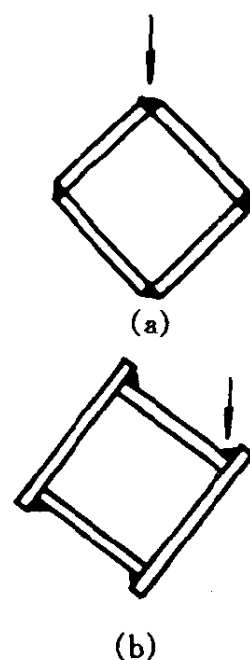


图 7-2 焊缝便于自动焊的设计  
(a)放焊剂困难;  
(b)放焊剂方便

大跨度的焊接钢梁和板料的拼料焊缝,应避免放在梁的中间,而宁愿增加一条焊缝(如图 7-4(d)),压力容器的凸形封头应有一直段(如图 7-4(e)),使焊缝避开应力集中的转角位置,直段应不小于 25mm。在构件截面有急剧变化的位置或尖锐棱角部位,易产生应力集中,应避免布置焊缝,例如应将图 7-4(c)改为(f)。

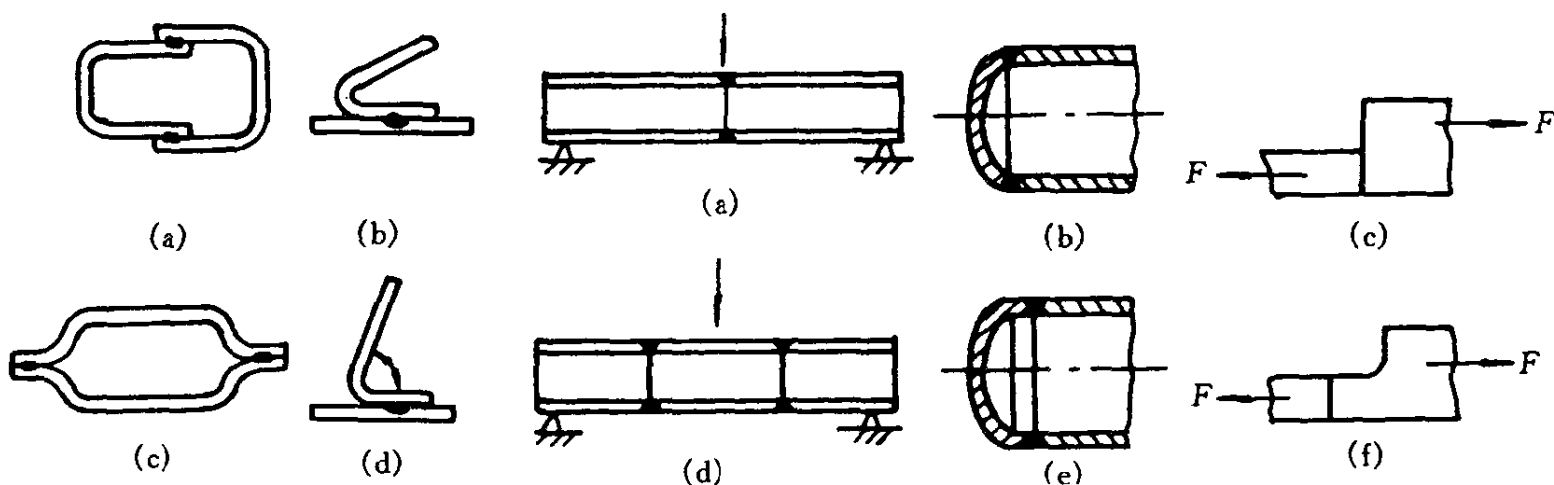


图 7-3 便于点焊及缝焊的设计  
(a), (b)电极难以伸入; (c), (d)操作方便

图 7-4 焊缝避开最大应力与应力集中位置的设计  
(a), (b), (c)不合理; (d), (e), (f)合理

### 3. 焊缝的布置应分散以减少焊接应力和变形

对图 7-5 中(a), (b), (c)结构,由于焊缝密集或交叉,会造成金属过热,应改为(d), (e), (f)。

### 4. 焊缝应尽量避免机械加工表面

有些焊接结构,只是某些部分零件需要进行机械加工,如焊接轮毂、管配件、焊接支架等,如要求先加工后焊接,则焊缝位置的设计应尽可能离已加工表面远一些,如图 7-6 所示。

### 5. 焊接件端部过渡截面设计应平滑过渡并避免焊时熔化

焊接件端部应无锐角,以避免焊时熔化,也即图 7-7 中(a)方案在锐角处焊时易熔化应改为(c)方案,另外两焊接接头处应平滑过渡避免应力集中,即(b)方案应改为(d)方案。

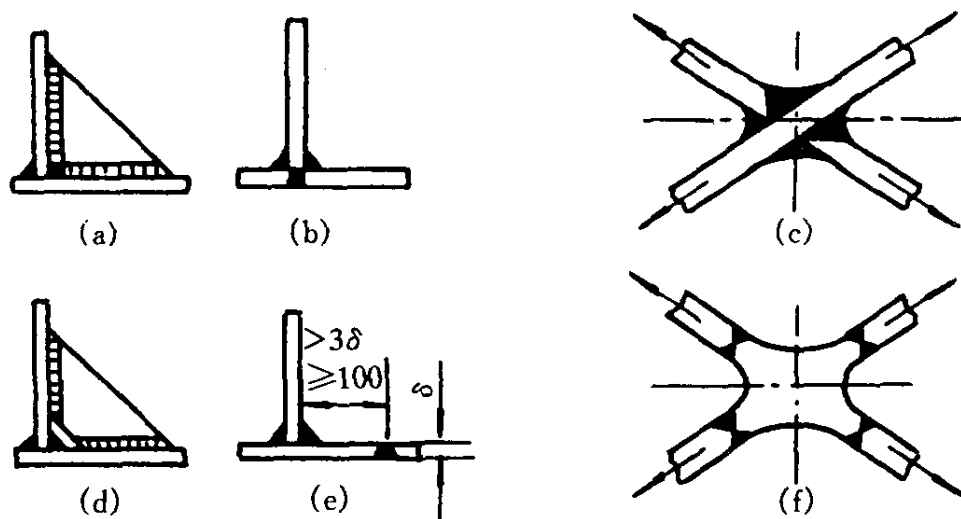


图 7-5 焊缝分散布置的设计  
(a), (b), (c)不合理; (d), (e), (f)合理

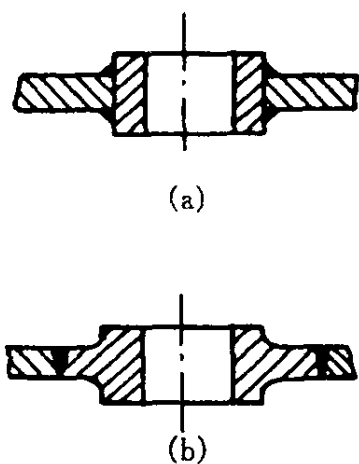


图 7-6 焊缝远离机械加工表面的设计  
(a)不合理; (b)合理

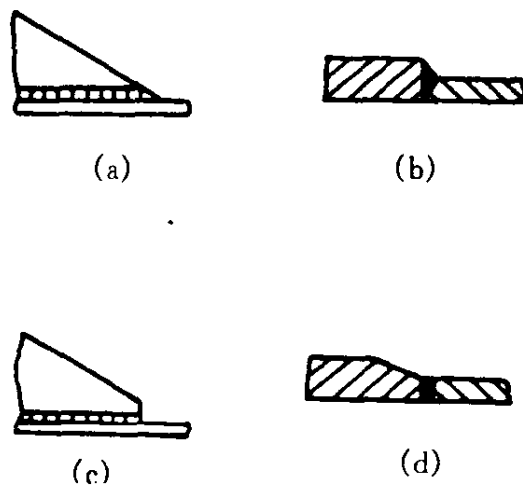
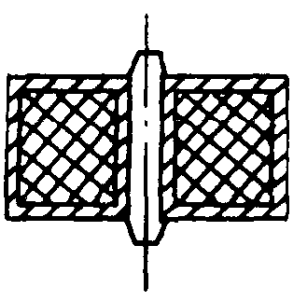
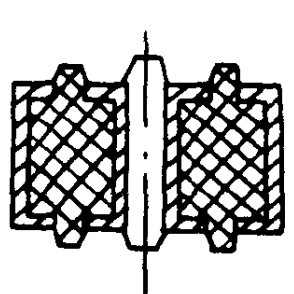


图 7-7 焊接件端部过渡截面的设计

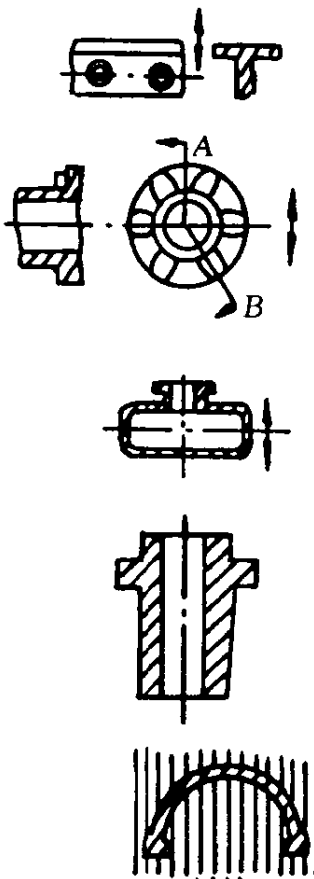
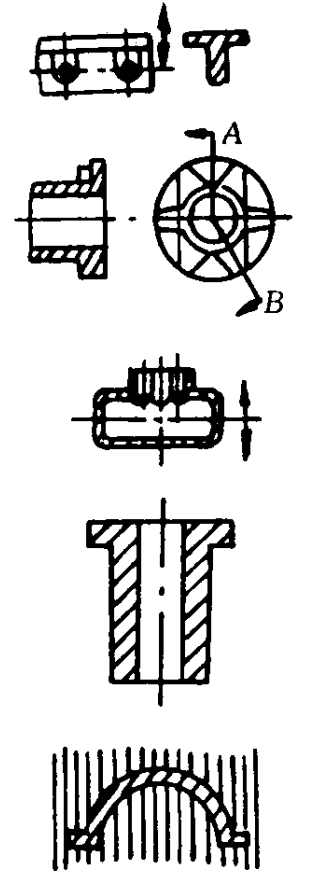
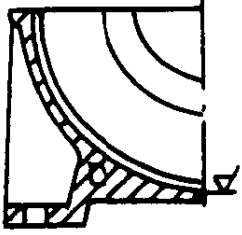
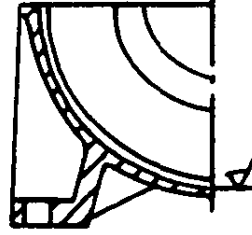
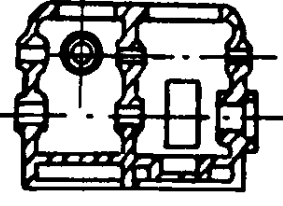
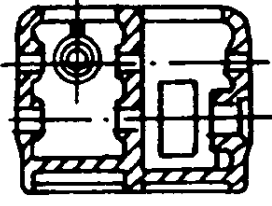
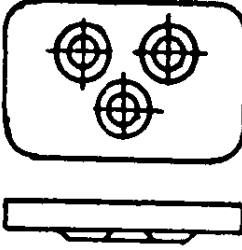
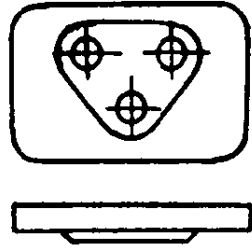
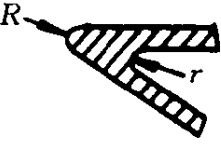
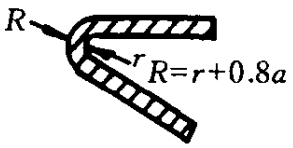
### 7.3 铸件的结构工艺性

动力机械的零件很多是铸造的,铸造尤其适宜于制造形状的复杂的零件,如机体、缸盖、曲轴箱、缸体、活塞等,铸件的结构工艺性通过表 7-2 来说明。

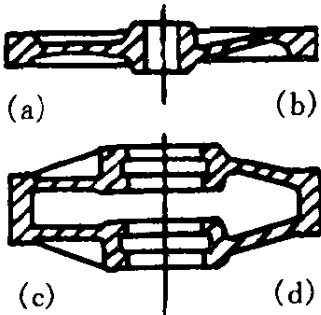
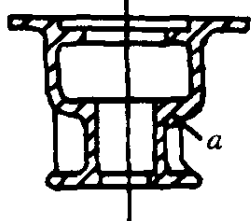
表 7-2 铸件的结构工艺性

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		<p>泥芯无法支撑,无法清砂,气体也无法从泥芯中排出</p>

续表 7-2

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		<p>铸件造型时便于从砂型中取模</p>
		<p>避免壁厚不均</p>
		<p>凸台布置在零件内部造型较为方便</p>
		<p>相近的凸台合并成一个,造型及其制模简单</p>
		<p>减少过渡处的应力</p>

续表 7-2

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		避免有较大的水平表面,以利于排除型腔内空气
		a 处开孔可避免金属积聚,弯曲形筋条可避免裂纹

## 7.4 锻件、冲裁件的结构工艺性

设计锻压件的结构时,除满足使用性能要求外,尚需符合工艺性要求。

### 7.4.1 自由锻锻件的结构工艺性

#### 1. 锻件上应避免锥体或斜面结构

锻件上具有锥体或斜面的结构,从工艺角度衡量是不合理的(图 7-8(a))。因为锻造这种结构,必须制造专用工具,锻件成形也比较困难,使工艺过程复杂,操作很不方便,影响设备的使用效率,所以要尽量避免,应改进设计,如图 7-8(b)所示。

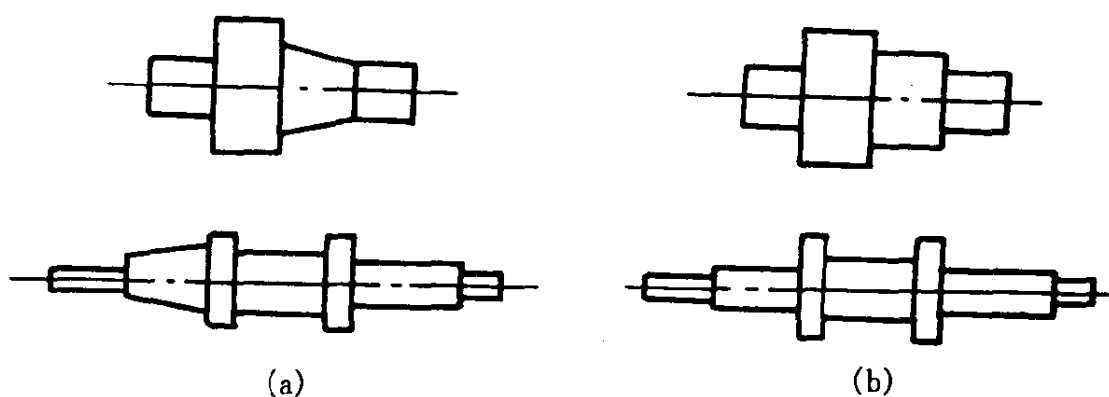


图 7-8 焊缝件端部过渡截面的设计  
(a) 工艺性差的结构;(b) 工艺性好的结构

#### 2. 锻件上的几何体之间应避免形成空间曲线

锻件由数个简单几何体构成时,几何体的交接处不应形成空间曲线,如图 7-9(a)所示结构。这种结构锻造成形极为困难,应改成平面与圆柱、平面与平面相接(图 7-9(b)),消除空间曲线结构,使锻造成形容易。

#### 3. 自由锻锻件上不应设计出加强筋、凸台、工字形截面或空间曲线形表面

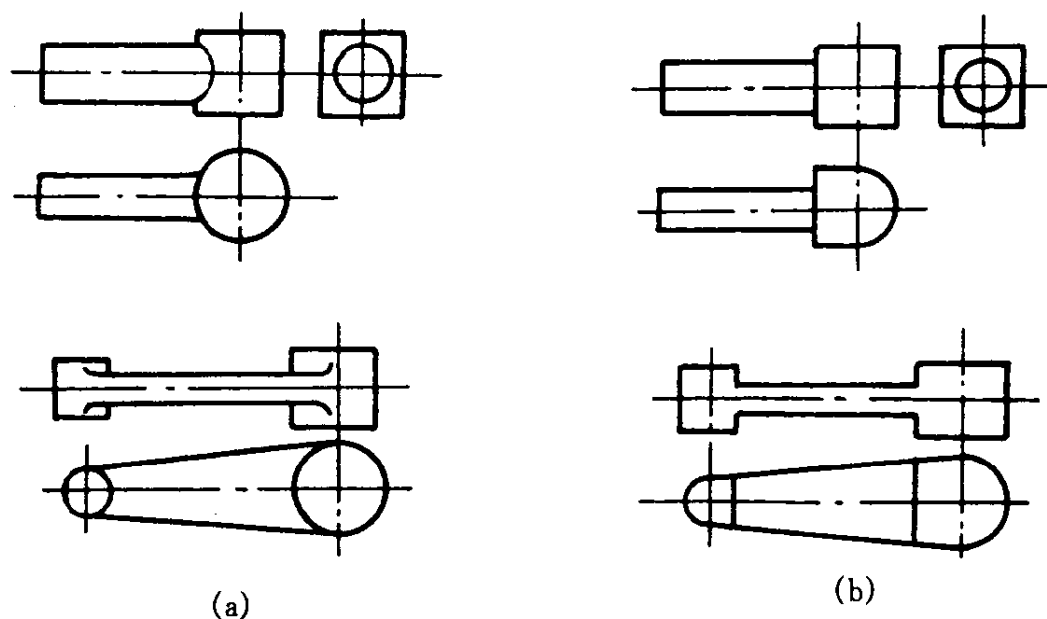


图 7-9 杆类锻件结构  
(a)工艺性差的结构;(b)工艺性好的结构

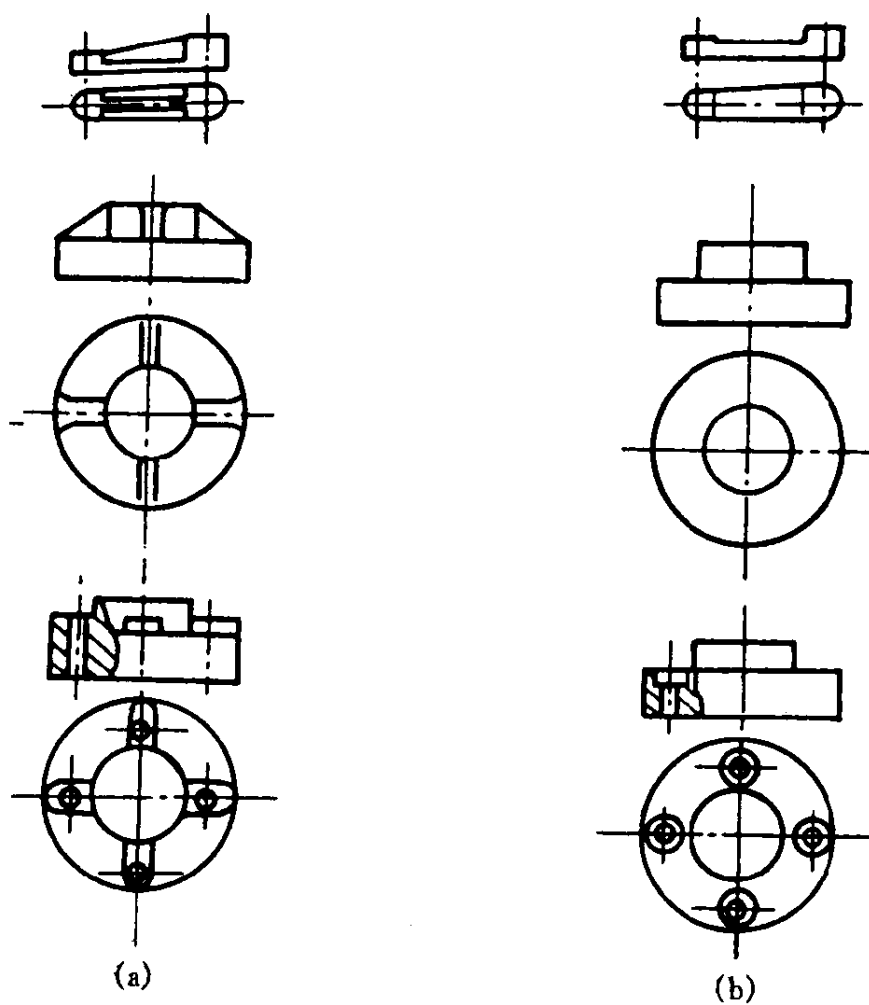


图 7-10 锻件结构  
(a)工艺性差的结构;(b)工艺性好的结构

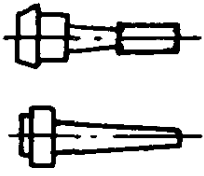
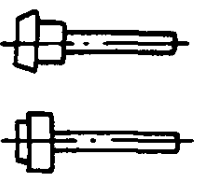


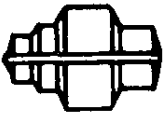
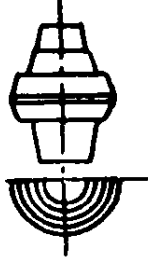
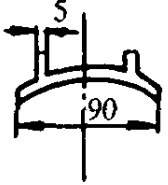

自由锻锻件上不应设计出加强筋、凸台、工字形截面或空间曲线形表面(图 7-10(a)),因为该种结构难以用自由锻方法获得。如果采用特殊工具或特殊工艺措施来生产,必将降低生产率,增加产品成本。将锻件结构改成如图 7-10(b)所示结构,则工艺性好,经济效益大。



### 7.4.2 模锻件的结构工艺性

模锻件的结构工艺性通过表 7-3 中的对比示例及其说明来阐述。

表 7-3 模锻件的结构工艺性

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		水平锻造时零件避免出现锥柄和洼处
		自由锻避免加强筋分型面最好是平面
		分开模模锻分型面应垂直于旋转体零件的对称轴线
		筋条太薄太高模锻不能直接获得,还必须有机加工才行

### 7.4.3 冲裁件的结构工艺性

冲裁件的工艺性,是指冲裁件对冲裁工艺的适应性。冲裁件工艺性的好坏,对冲裁件的质量、模具寿命、材料利用率、生产率、制造成本等有很大影响。冲裁件的工艺性主要考虑以下方面:

①冲裁件的形状应尽可能简单、对称,轮廓最好由直线、圆弧构成。

②工件应避免有过长的悬臂和过深的凹槽(图 7-11),否则会降低模具寿命和工件质量。一般情况下, $B \geq 1.5t$  ( $t$  为板厚),  $L \leq 5B$ 。

③落料和冲孔件的轮廓交角处,应避免尖角,其连接处的最小圆角半径  $r_{\min} \geq (0.8 \sim 0.90)t$ 。

④冲裁件的孔径不能太小,否则冲头易弯曲或折断。冲孔的最小尺寸取决于材料的机械性能、板厚、凸模强度和模具结构,对于用无保护套凸模冲圆孔、方孔的最小尺寸一般应大于等于  $(0.7 \sim 2.2)t$ 。

⑤弯曲件尺寸应考虑工艺性。弯曲件尺寸的标注不同,会影响冲压工序的安排和

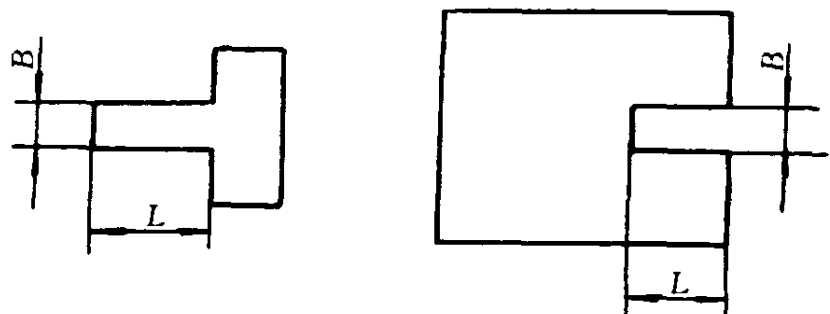


图 7-11 冲裁件的悬臂和切槽

数量。图 7-12(a)所示的弯曲件,可以先落料、冲孔成一工序,然后再弯曲成形(但孔的位置需处于弯曲变形区之外,以免弯曲变形时使孔发生变形),这种工艺较简单。图 7-12(b)所示的尺寸标注法,冲孔只能安排在弯曲之后进行,增加了工序。

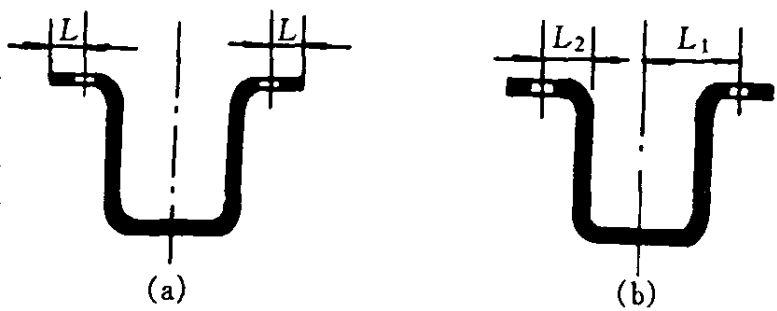


图 7-12 弯曲件尺寸的标注

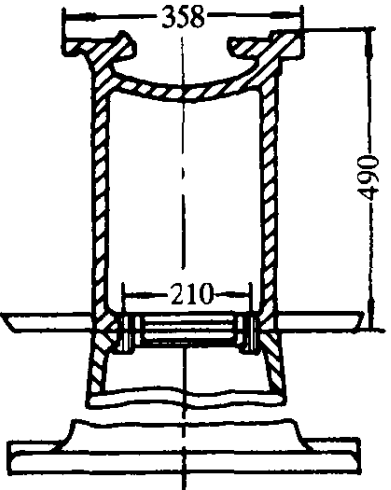
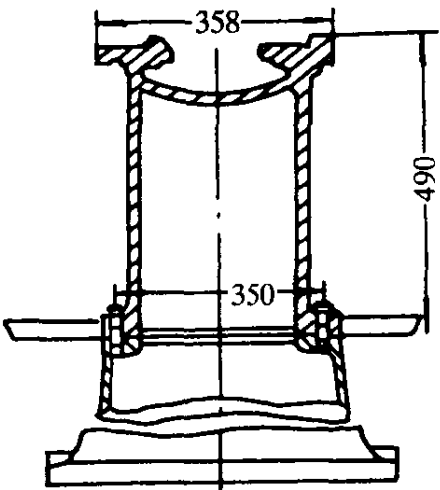
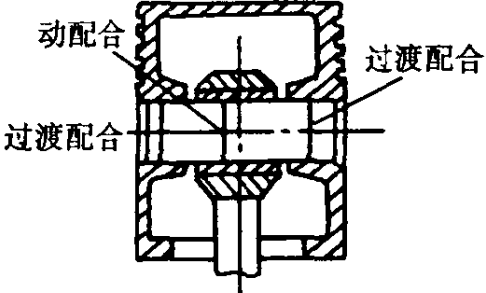
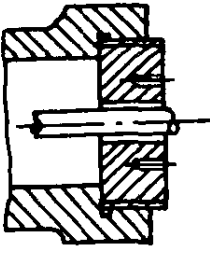
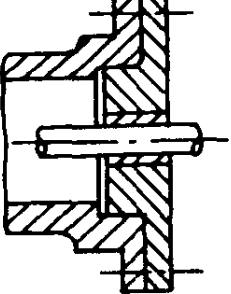
### 7.5 结构的装配工艺性

零部件的装配工艺性的好坏直接影响装配质量、装配所需的劳动量,提高装配工艺性的一些原则可通过表 7-4 中示例对比来说明。

表 7-4 机器结构的装配工艺性

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说明
		组件的或零件的几个表面装配时不应同时进入与之相配的零件之中
		拆卸要方便
		装配件应该有倒角
		在保证零件装配稳定性的前提下减少钳工修配量
		难于油漆

续表 7-4

工艺性差的结构	工艺性较好的结构	说 明
		<p>安装螺钉不方便</p>
		<p>正确选用基轴制或基孔制(本例中对于与活塞销相配的活塞、连杆衬套等各配合尺寸应采用基轴制)</p>
 <p>(a)</p>	 <p>(b)</p>	<p>螺纹配合间隙大,不能兼作装配的定位基面</p>

## 第2篇 典型零部件的加工与装配

### 第8章 活塞加工

#### 8.1 活塞的工作条件与技术要求

往复式发动机与压缩机的活塞在气缸中工作时承受周期性变化的气体压力与往复惯性力,并在高温气体直接作用下承受着由温度不均而形成的热应力,对于内燃机和无滑块压缩机,筒形活塞还承受一定的侧向力和较大的摩擦力。对于内燃机,筒形活塞所承受的温度不均引起的热变形以及受单面活塞力引起的变形较大(见图 8-1),故活塞裙部外圆常设计成椭圆状,并且设计成裙部外圆尺寸大于活塞头部外圆尺寸的圆锥度,以避免工作时活塞与气缸间磨擦增加而咬死。活塞在工作中润滑条件较差,毛坯制造与机械加工质量不好容易造成工作时磨损增加、漏气、窜油、拉缸、功耗损失增加,从而影响压缩机的输气量和发动机的有效功率以及它们的可靠性,因此对活塞技术条件提出一定要求,已有国家标准作了规定。现对铝活塞的技术条件 JB3931-85 摘要说明如下:

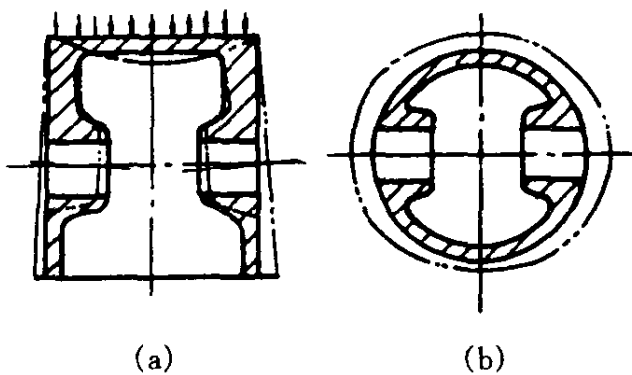


图 8-1 活塞在工作过程中的变形  
(a)受力变形;(b)受热变形

##### 1. 活塞裙部外圆尺寸精度与表面粗糙度

裙部外圆一般要求公差等级为 IT6,对于高速内燃机则为 IT5。对于大批量生产,活塞按裙部尺寸进行分组装配,故可将该尺寸公差放大几倍进行加工。裙部的椭圆度和锥度公差仍在分组公差范围内,裙部外圆粗糙度  $R_a \leq 1.25\mu\text{m}$ 。对于图 8-2 所示活塞  $R_a$  值为  $0.63\mu\text{m}$ 。

##### 2. 活塞销孔精度与表面粗糙度

对于浮动式活塞销孔,要求活塞销可自由转动,销孔尺寸公差等级为 IT6,在生产中活塞销与活塞销孔也按分组进行装配,可以扩大销孔的加工公差,还能保证原有配合精度。销孔的圆度也有较高要求( $\phi 50\text{mm}$  以下销孔,圆度为  $0.0015\text{mm}$ ,锥度不大于  $0.003\text{mm}$ ),表面粗糙度  $R_a \leq 0.32\mu\text{m}$ ,对于图 8-2 所示活塞  $R_a$  值为  $0.16\mu\text{m}$ 。

##### 3. 活塞销孔位置精度

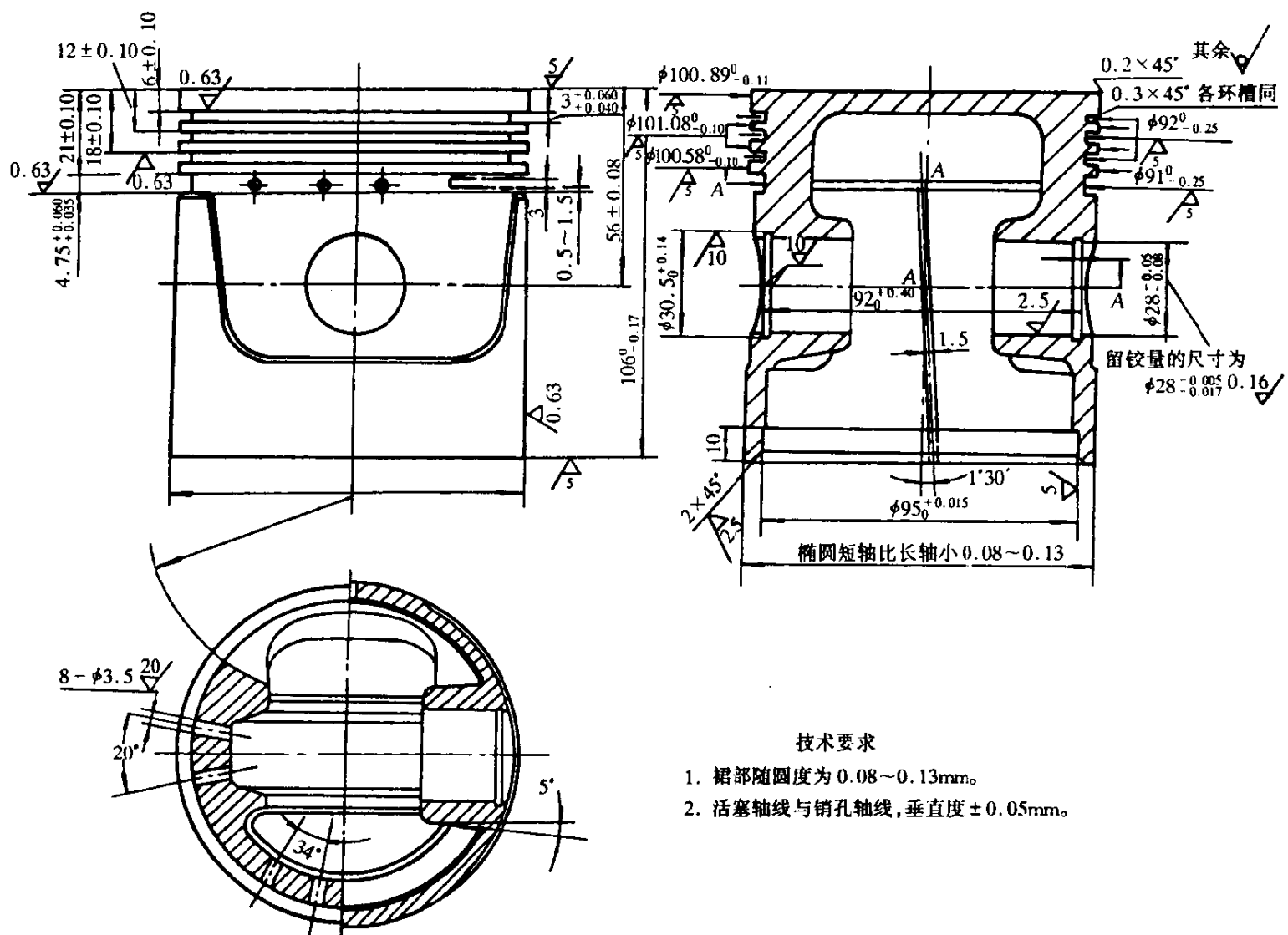


图 8-2 某活塞简图

① 活塞销孔轴线到顶面距离: 该尺寸影响气缸内的压缩比或输气量, 应严格控制, 如图 8-2 所示活塞为  $56 \pm 0.08\text{mm}$ 。

② 销孔轴线对裙部轴线的垂直度: 该垂直度影响活塞销、活塞和连杆的受力状态, 垂直度误差过大, 活塞单侧受力, 活塞在气缸中将倾斜。如该活塞控制在 100mm 长度上垂直度为  $0.035\text{mm}$ 。

③ 活塞销孔轴线与裙部轴线的对称度: 它也会引起活塞倾斜, 图示活塞规定的对称度为  $0.2\text{mm}$ 。

#### 4. 活塞环槽的技术要求

环槽内装有活塞环, 环槽质量对气体密封影响较大, 环槽质量要求如下:

① 环槽两侧面对裙部轴心线的垂直度在 25mm 长度上为  $0.07\text{mm}$ 。

② 环槽两侧对裙部轴心线的圆跳动为  $0.05\text{mm}$ 。

③ 环槽宽度尺寸公差为  $0.02 \sim 0.04\text{mm}$ 。

④ 活塞环槽上下平面粗糙度  $R_a \leq 0.63\mu\text{m}$ 。

#### 5. 活塞重量要求

为了机器运转平稳, 同一机器各活塞的重量差不得大于名义重量的  $\pm 2.5\%$ 。

## 8.2 活塞的材料与毛坯制造

活塞材料应具有高强度、耐磨、致密和比重轻、导热性好以及防止“生长”的稳定性。

常用的活塞材料为铸铝合金、合金灰口铸铁、球墨铸铁等。中、大型活塞也有用铸钢或用低碳钢板焊接的。

铜硅铝合金比铸铁具有导热好、重量轻、惯性力小、可切削性好、可得到精确的毛坯等优点,缺点是价格贵,热膨胀系数大,机械强度和耐磨性较差,但总的说优点超过缺点,故在高速机器中广泛使用。

筒形活塞毛坯用砂型铸造或用金属硬模铸造,也有活塞外形用硬模而活塞内腔由内置的干燥型芯来铸造。金属硬模铸造的生产率高,精度高(铝活塞铸造精度可达13~15级),活塞销孔也可铸出,机械加工量小,多用于铝合金活塞。浇注时活塞顶部朝下,以保证顶部材料有较高的致密性。铸造方法有常压或低压铸造两种。后者压力为588kPa左右,低压铸造使活塞的致密性大大提高,同时又减少了冒口。目前采用的液态模锻新工艺是将液态金属浇入金属硬模模型内,然后在压力作用下使液态金属结晶凝固成型并产生塑性变形,使毛坯组织致密、表面粗糙度和材料利用率有进一步改善,同时避免了气孔、缩孔等铸造缺陷。

铸铁制的薄壁活塞在粗加工后进行人工时效(加热到500℃~550℃,保持2~3h,炉冷至200℃,然后在空气中冷却),以消除内应力。

铝活塞毛坯在机械加工前切去浇冒口,并进行时效处理,将活塞加热至180℃~200℃,保温6~8h后,自然冷却,以消除铸造的内应力,和达到较高的强度和硬度。

## 8.3 筒形活塞的加工

### 8.3.1 加工过程的制定

活塞的特点是壁薄、刚度差,而主要表面(外圆、销孔、环槽)加工精度要求高,在制定工艺过程时必须加以考虑,有下列问题需要研究:

#### 1. 考虑能否采用分组装配

对于批量大、加工质量较为稳定的活塞,可以进行分组装配。例如,对活塞和气缸、活塞销和活塞销孔、活塞环和活塞环槽均可采用分组或选择配合,既保证了装配精度,又降低了加工精度要求。

#### 2. 加工方法的选择

活塞属于回转类零件,其外圆、环槽和止口的加工路线均分别以粗、精车为宜。对于大量生产,则外圆加工尚需增加磨削工序。销孔的加工路线为粗、精(或细)镗再加冷压光加工,对于小批生产可采用粗、精车,小直径销孔采用钻、扩和镗。

#### 3. 定位基准的选择

##### (1) 精基准的选择:

考虑到销孔中心线应与裙部外圆轴心线垂直且相交,以及环槽上、下两面与裙部外圆轴心线垂直,应该以外圆作精基准,这样可达到基面重合原则,避免定位误差。但这样,在加工外圆

时需另外找基准,即意味着加工时基面要转换,增加了夹具品种的要求,且这种以外圆为基准的夹紧容易使活塞变形,故很少采用。通常采用“统一基准”的定位原则。为此,采用内止口及其端面作为辅助精基准,其优点:

①可在一次安装中同时加工外圆、顶面和环槽,易于保证这些表面间的相互位置的精度,又可提高生产率。

②活塞属于薄壁零件,尤其是裙部在径向容易变形,利用止口和其端面(或锥面与中心孔)定位,可以沿活塞轴向夹紧,从而能保证有足够的夹紧力,而不致产生很大的变形,便于进行多刀切削。

③止口及其端面定位适合于多品种生产和配件生产。因为改换产品时,定位等元件不变或稍变一下即可;对于配件生产,当气缸磨损时,活塞外圆不同了,但止口尺寸不变,故夹具可直接沿用。同样也便于修理时加工。

采用这种方法也有不足之处:

①要增加加工辅助基准的工序,而且精度要求较高,有时尚需二次加工(修整加工)。

②工艺基准与设计基准不重合而产生了定位误差。

这些都需增加设备与工时,但从保证加工质量来看,利用统一基准优点超过缺点,故目前这种方式得到广泛应用。

(2) 粗基准的选择:

为了保证不加工的内表面和加工的工作表面(后者是以辅助基准定位加工出来的)能够同心,以达到壁厚均匀,活塞的辅助精基准应以活塞的不加工内腔作为粗基准来加工,即加工止口时应以内孔壁为粗基准,加工端面时,应以顶部内壁端面为粗基准。根据粗基准只利用一次的原则,应迅速地过渡到光基准的加工,故希望该辅助精基准应尽量提前到第一道工序中加工出。这种利用内表面定位的夹具见图 8-3。夹具的前端有支承头,用以确定工件的轴向位置,在夹具体的前后两个圆周上,有两排柱塞,前排四只,对称分布(避开销孔的内搭子),后排三只均匀分布,当心轴与套筒(用螺纹固定在一起)向前移动时,靠心轴上的斜面使前排的柱塞向外推,撑紧在活塞的内表面上,同时套筒通过预紧弹簧使斜面的套筒向右移动,把后面一排柱塞撑紧在活塞裙部的内表面上。两排柱塞和支承点使活塞五点定位,并利用柱塞顶部与活塞内表面间的摩擦力带动工件旋转。这种定位方式除加工止口外还可同时加工外圆、顶面和环槽;不仅可以提高精度而且也可提高生产率,尚可较早地(即在该工序就可)发现毛坯中是否有气孔、黑皮等缺陷。

但由于工件内壁定位使夹具的夹持、调整较困难,夹具结构又复杂,故在使用中受到一定限制。当批量不大时,可采用内壁找正定位或划线校正定位。大批生产时,这种找正或校正法很费工时,这时可考虑采用外圆和内顶面定位的方法来加工止口(图 8-4),在装夹时用外圆和内顶面定位。由于工件尚是毛坯表面,用一般的三爪卡盘夹持不够牢固,可以将三爪做成长三

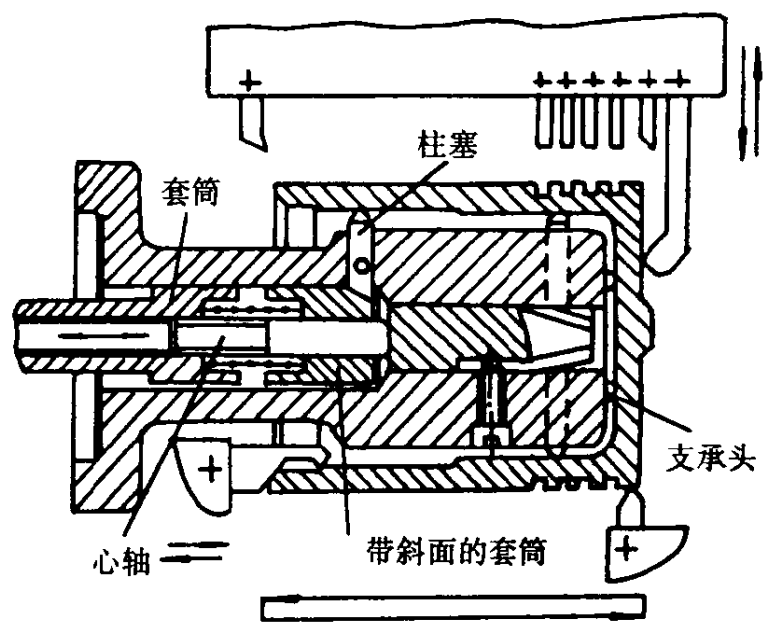


图 8-3 用内表面定位加工的示意图

爪,以免工件在切削力作用下产生倾斜,用这种方法装夹工件对夹具的要求比较简单,但易产生成品壁厚不均匀的问题。当活塞是用金属模浇铸时,由于毛坯精度较高,即毛坯的内外圆表面的同轴度误差较小,此时采用这种方法,基本上可保证壁厚差小于0.4~0.9mm(对于铝活塞)。

#### 4. 考虑工序的次序以及工序的集中分散程度

考虑到活塞壁薄,刚度差,内腔形状复杂,精度要求高,以及铝活塞切削加工热变形大的特点,故将整个工艺过程划分为粗、精加工两个加工阶段。此外,在每一加工阶段内的工序最好集中些,例如将外圆面、顶面和环槽面集中在同一工序内,因为

这些表面宜于高速切削,此外,这些表面相互位置要求较高,若工序集中,安装次数少,就容易保证这些加工面的相互位置精度的要求并减少辅助时间。

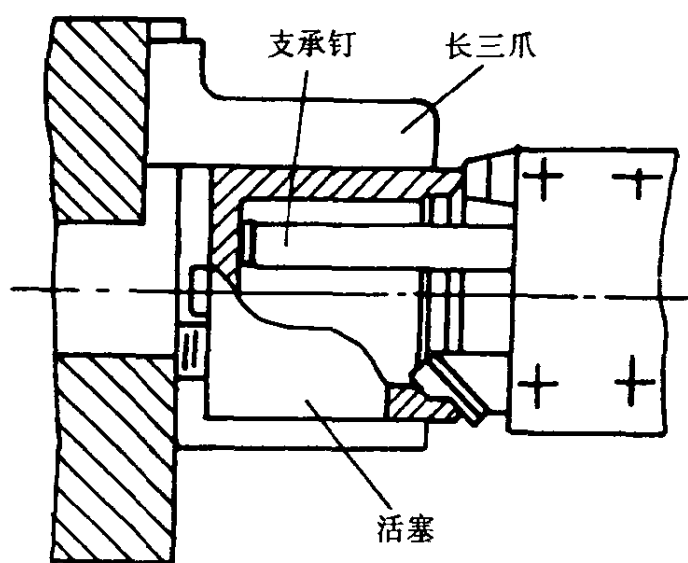


图 8-4 粗车止口的加工示意图

### 8.3.2 筒形活塞机械加工工艺过程

表 8-1 为解放牌活塞所采用的机械加工工艺过程,年产量为 25~30 万只,属于大批、大量生产,采用流水线生产。工件的加工精度靠机床和工夹具保证,材料为铝合金,毛坯用金属硬模浇铸。整个加工阶段分成粗加工阶段和精加工阶段,在精加工之前设有修整辅助基准的工序。

表 8-1 活塞机械加工工艺过程

工序号	工序内容	定位基准	加工设备
1	粗车止口(内环面,端面,倒角)	活塞外圆、内顶面	C618 车床
2	粗镗销孔	止口、端面、销孔	普通车床
3	粗车外圆、顶面、环槽	止口、端面	C720 型多刀半自动车床
4	钻油孔	止口、端面	Z12 型台钻
5	铣直横槽	止口、端面	专用铣槽机
6	精车止口、打中心孔、倒角	外圆、顶面	普通车床
7	精切环槽	止口、端面	C620 型车床
8	精车外圆	中心孔,止口处倒角(锥孔)	C111D 型车床
9	精磨外圆	同工序 7	椭圆磨床
10	精车顶面及倒角	止口、端面	普通车床
11	精镗销孔	止口、端面、销孔	专用镗床
12	切削锁环槽	止口、端面	普通车床
13	滚击加工	外圆、销孔	2535 立式钻床
14	检验		



### 8.3.3 主要工序分析

#### 1. 活塞外圆的加工

活塞外圆尺寸精度要求较高,粗糙度为  $R_a 0.8 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ,一般为粗车、精车、磨。小批生产时,可以以车代磨,特别是铝活塞,由于磨削时磨屑易堵塞砂轮,往往以高速细车代磨。

本工艺过程中,精车外圆和磨外圆工序的定位方式一样,均是以止口处的倒角(锥孔)与中心孔定位,裙部椭圆在磨外圆时才予以磨出,所用的椭圆磨床是利用靠模或偏心连杆机构来形成椭圆形状,也有的厂是利用车削法加工出最终椭圆形状,此时可利用偏转套车法或两次偏心车削法来完成。

#### 2. 环槽加工

对活塞环槽底直径尺寸要求不高,但对环槽宽度尺寸精度、两侧面的粗糙度以及它对活塞外圆轴心线的垂直度要求比较高。如图 8-5 所示,环槽的宽度决定于切槽刀宽度。切槽刀的形状见图 8-6,切槽刀宽度公差控制在  $0.005\text{mm}$  之内,为了保证槽间距离,切槽刀和夹板两侧面均要在平面磨床上磨到  $R_a \leq 0.63 \mu\text{m}$ ,使两侧面互相平行。夹板的厚度偏差限制在  $0.01\text{mm}$  之内。为了保证槽的侧面与裙部轴心线垂直,刀架溜板的运动方向应与活塞裙部的轴心线垂直,前后移动时的误差应在  $0.01\text{mm}$  以内。

由于切槽刀在  $x$  方向刚度较差,故进行两次粗切和两次精切,以减小切深,每次精切量只有  $0.20\text{mm}$ ,以保证尺寸精度与相对位置精度。为了降低环槽侧面粗糙度,在刀刃部分磨出一条宽为  $0.2 \sim 0.4\text{mm}$  的棱边,后角为  $0^\circ$  (见图 8-6),它除了有切削作用外,尚有压光作用,从而使粗糙度变细。

#### 3. 销孔加工

销孔是许多工序加工时施加夹紧力的部位,故在粗车外圆、顶面和环槽等工序之前就安排加工,以便夹紧力能较均匀地分布而不至于压坏销孔。

活塞销孔精加工是加工过程中关键工序之一。通常铰削可达到 IT6 级精度,粗糙度为  $R_a 0.4 \mu\text{m}$ 。

但铰孔时,相互位置精度不能提高,故一般采用高速细镗(金刚镗)或冷压光作为终加工。销孔镗削可采用双边镗或单边镗,前者镗杆悬伸较少,刚度好,可以减少加工中的振动,但不能保证销孔同心。单边镗削用一根镗杆,易保证销孔同心,但因镗杆悬臂过长刚度差,易引起振动,故应尽量减少切深,或采用冲击式消振镗杆。

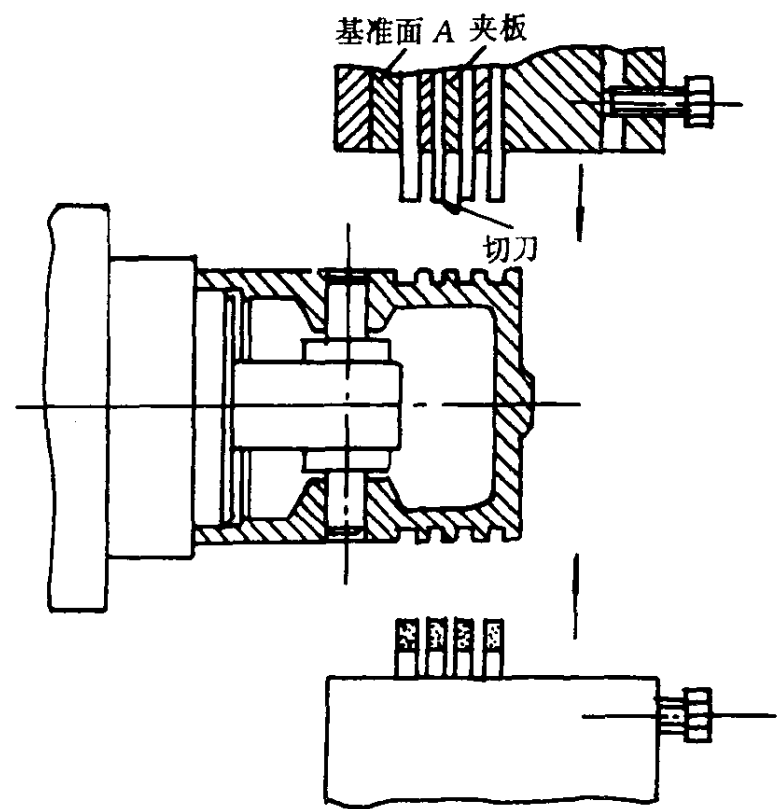


图 8-5 精切环槽的加工示意图

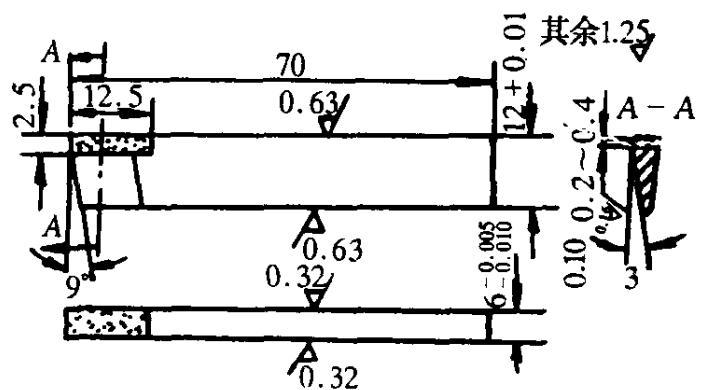


图 8-6 切槽刀

精镗销孔可采用刚度好、精度高的金刚镗床,但价格高,故多用专用镗床。这些镗床特点是传动链短,结构简单,转速高,采用皮带传动,从而传动平稳。轴承采取预加载荷,间隙小,从而旋转精度较高。

图 8-7 是利用端面和止口定位精镗销孔的示意图,止口和端面消除五个自由度,剩下的转动自由度用一根装在尾座套筒中的菱形销插入销孔中定位来消除。这种定位使精镗加工余量均匀,但由于销孔轴线的轴向设计基准是顶面,而该图定位基准是下端面,故产生工艺基准与设计基准不重合。

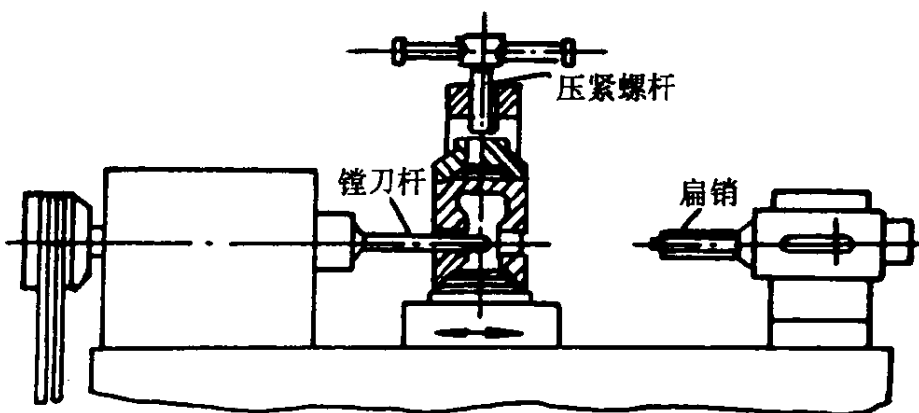


图 8-7 端面和止口定位精镗销孔

精镗销孔达到粗糙度为  $R_a 0.63\mu\text{m}$ ,为了进一步降低活塞销孔的粗糙度与提高精度,可采用滚击加工,这可使销孔的圆柱度控制在  $3\mu\text{m}$  之内,粗糙度达  $R_a 0.1\mu\text{m}$ 。滚击加工时使用图 8-8 所示的滚击器进行,滚击器的心轴 1 与滚针 2 相配合的表面是多边形的,当心轴转动时,多边形心轴推动滚针在销孔表面形成脉冲式滚击,滚击的频率取决于滚击器的转速和多边形心轴之边数,一般约为 100 次/s。加工可在立式台钻上进行,加工过程中需输送大量冷却润滑液。整个工作循环约 25~35s 左右。

#### 4. 活塞的检验

(1) 裙部外圆直径与圆度的测量(图 8-9)。将工件按图示方向放入,旋转活塞,读出最大读数与最小读数,两者之差即为裙部圆度误差,最后按最大尺寸将活塞分组,以便与气缸选配。

为了克服环境气温变化对测量结果的影响,可先用一个直径为已知的标准件(也可以是一个标准活塞),设该标准件的直径在  $20^\circ\text{C}$  时为  $101.518\text{mm}$ ,而活塞工作图标注的裙部最大尺寸为  $101.6_{-0.110}^{+0.065}$ ,即该极限尺寸分别比该标准件的尺寸小  $0.028$  和大  $0.017\text{mm}$ ,故在任何环境温度下进行任何一个活塞工件测量时,只要在该环境温度下先将百分表用该同一个标准件尺寸调整到零位,则  $-0.028, +0.017\text{mm}$  即为实际测量时的允许的公差范围,若实测工件的结果在此范围即表示合格。

(2) 销孔轴心线对裙部轴心线垂直度的测量(图 8-10)。测量时,将活塞 4 套在心轴 1 上,并使之与 V 形块靠紧,这时,活塞外圆柱母线相对于活塞销孔轴心线的垂直度即可由百分表 3 读出(最好绕活塞轴心线转  $180^\circ$  后,再套入心轴 1 上再读表 3 一次,取其差值为准)。

(3) 销孔轴心线至顶面距离的测量(图 8-11)。图中 1 是指示表,2 是长 V 形块,3 是工件,

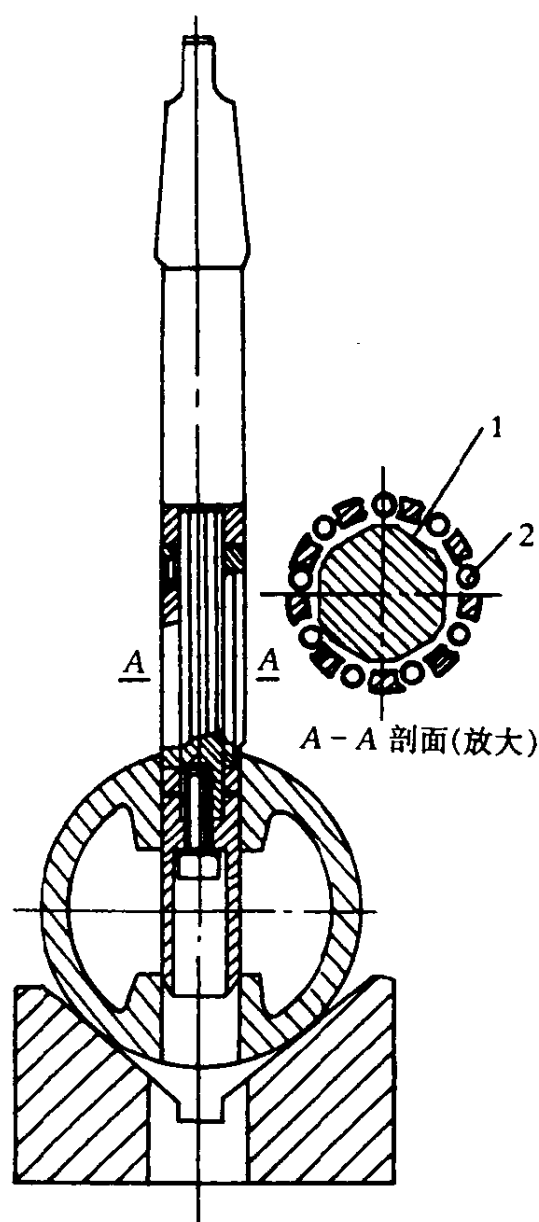


图 8-8 销孔滚击器加工示意图

4 是心轴,可从指示表上读出该距离之大小。

(4)销孔尺寸的检验。用气动量仪检验销孔直径的原理如图 8-12 所示,当压缩空气从管 1 经过过滤由压力调整器稳压后进入上大下小的锥形管 4 内,管内有一个浮子 5 可自由上下运

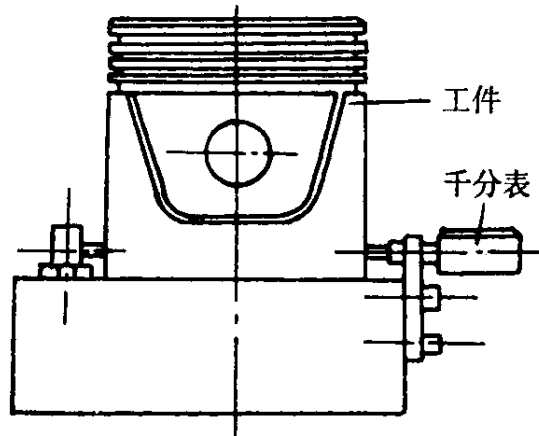


图 8-9 裙部直径和椭圆度的测量

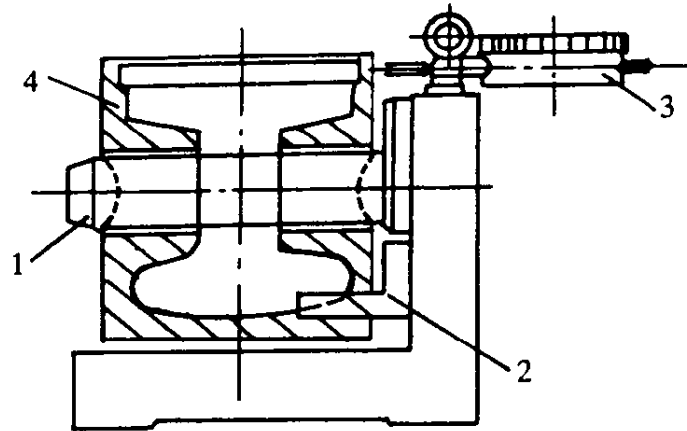


图 8-10 销孔轴线对裙部轴线垂直度测量

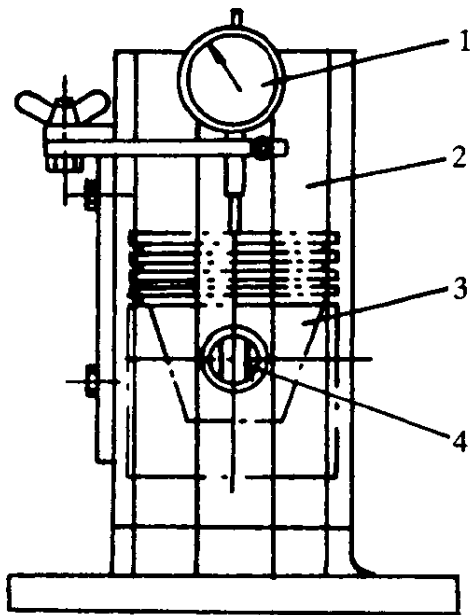


图 8-11 测量活塞销孔轴线至顶面距离的夹具

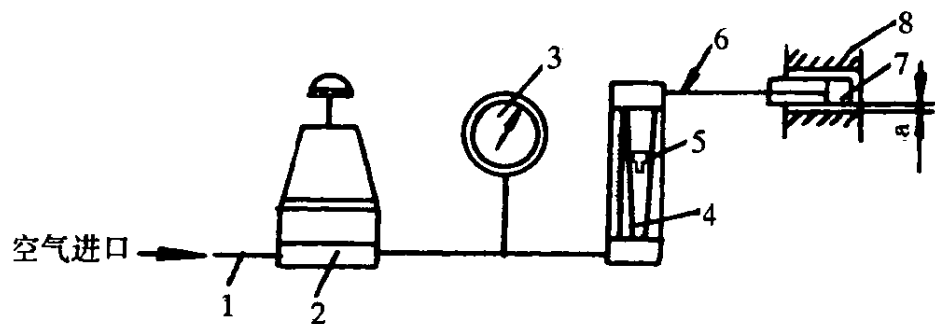


图 8-12 气动量仪检验销孔直径的原理图

动,在气流的动力作用下浮子能悬浮在某稳定的高度位置上。压缩空气从管 4 的顶部出去,经过软管 6 进入测量工具(标准的塞规)7 中,并从量具的喷嘴与被测工件 8 之间所形成的间隙  $a$  排出,当  $a$  增大时,气体流量增加,浮子上部的压力下降,浮子上升到一个新位置,使新的减小了的气流力与上部压力平衡,而当  $a$  减小时,则浮子上部压力上升,浮子下降。这样,由锥形管中的刻度上读出浮子的位置,即可确定孔径大小(因为塞规的尺寸是标准的)。若将塞规沿着孔的轴线移动,并绕着轴线转动,即可测出圆柱度误差。气动量仪的测量精度可达到  $1\mu\text{m}$ 。

## 第 9 章 连杆加工

### 9.1 连杆的结构特点与技术要求

连杆的作用是变曲轴的旋转运动为十字头或活塞的往复运动,它在空间作平面运动,受到活塞力引起的交变载荷。

连杆小头一般是整体的,而大头除了曲柄轴、蛇形轴外,一般做成剖分的。为了减少磨损,以及便于在磨损后进行修理,常在连杆小头孔中压入青铜或锡青铜衬套,在连杆大头镶有轴瓦,大头轴瓦主要有两种形式:厚壁刚性轴瓦与薄壁双金属轴瓦(或是一层金属上喷镀塑料的薄壁轴瓦)。由于薄壁瓦刚性小,工作时受力变形的形状取决于轴瓦座形状,故对大头孔尺寸精度要求较高,加之薄壁轴瓦应是可互换的标准件,不应该刮削,故对大头孔间的位置精度要求也较高。

连杆大头与小头的端面一般在同一平面上,个别多缸小型机器不在同一平面,即存在所谓的“落差”,这给加工带来麻烦。

连杆是重要零件,加工不正确会使大头轴瓦、小头衬套、曲轴主轴瓦、活塞与气缸或十字头与滑道等摩擦性质变坏,磨损加快,功率损失加大,传热恶化、寿命降低,甚至发生冲击、咬死、烧坏和被迫停车,所以对连杆的加工提出一定的技术要求,主要要求如下:

- ①连杆体上的大小头孔、螺栓孔粗糙度  $R_a 3.2\mu\text{m}$ 。
- ②大小头孔的公差带为 H7,当采用厚壁瓦时为 H9。
- ③连杆体大小头孔圆柱度不低于 7 级。
- ④连杆体大小头孔轴心线在轴心线公共面上的平行度不低于 6 级,在连杆横向剖面上的平行度不低于 7 级。
- ⑤连杆大头孔轴心线对其端面垂直度为 7 级。
- ⑥连杆螺栓孔轴心线的纵向平行度不低于 9 级。
- ⑦连杆螺栓孔轴心线与支承面的垂直度不低于 6 级。

### 9.2 材料与毛坯

连杆承受较大的疲劳载荷,为了减少惯性力还希望质量轻,故选择材料时应特别注意。

连杆材料一般用 40, 50 号优质碳钢锻造,特殊重要场合以及一些高速机器也有用 40Cr、30Mn 等合金钢锻造。对于大型机器也有用铸钢件的。随着工业的发展,“以铸代锻”已成为机械制造发展的一个方面,球墨铸铁连杆也日益被采用,牌号有 QT400-15, QT450-10, QT600-3, QT700-2 等。由于铸造连杆切削加工量小,材料利用率高,从而可大大降低制造成本。对于小型、移动式往复式机器也有用铝合金连杆、青铜连杆以及可锻铸铁连杆的。

锻造有自由锻和模锻两种,自由锻的连杆杆身多为圆形截面,当大小头孔直径 $\geq 60\text{mm}$ 时,该孔在锻造时应冲出通孔。模锻生产率较高,用于中小型连杆的大批、大量生产,但需较大的锻造设备。

连杆毛坯的锻造工艺有两种方案:连杆体与连杆盖分开锻造或者两者连成一整体锻造。分开锻金属纤维方向是连续的(图 9-1(a)),具有较高的强度,工作时不易变形,而整体锻造的连杆(图 9-1(b))在随后的切断加工后,金属纤维是割断的,但可提高材料利用率,减少接合面的加工余量,而且只需一套锻模一次锻成,便于组织生产,故多用整体锻造。

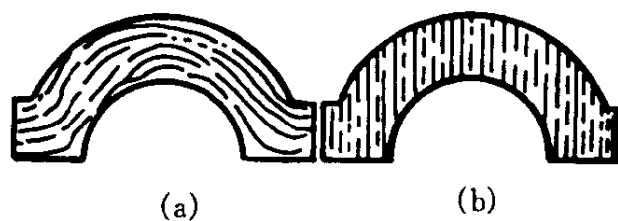


图 9-1 整体锻与分开锻连杆杆盖处的纤维方向

对于整体毛坯的大头孔,若切开后尚需镗孔,为使镗孔余量均匀,则整体毛坯的大头孔应做成椭圆形。

对于普通碳钢,锻后要正火,以改善金相组织、机械性能和消除内应力,此种正火是锻件获得最后组织的热处理,而对于合金钢锻造毛坯,则是先退火,后粗加工,然后在精加工前进行调质处理。

为减轻重量,铸造连杆杆身一般采取工字形截面,且铸造后其杆身不进行机械加工,材料利用率高。

球墨铸铁连杆毛坯的热处理视材料的牌号而定,有的是退火(对 QT400-15),有的则是正火加回火(对于 QT600-3),均在机械加工之前进行。

## 9.3 连杆的机械加工

### 9.3.1 工艺过程的制定

连杆的形状复杂,大、小头孔及其端面等加工表面相距较远,且是由刚度很低的杆身连接起来的,加之连杆的加工精度要求较高,故其加工工艺较复杂,一般从基面加工开始,再加工主要表面和次要表面。由于连杆结构各有所不同,各种连杆的机械加工过程常有所不同。但在拟定工艺过程时,应遵守下面几个原则:

(1) 应根据主要技术条件安排主要加工表面所需的工序。

为了保证零件主要表面的精度和粗糙度,考虑孔加工余量较大,在安排机械加工时,应将粗加工、半精加工和精加工工序分开,各主要表面的典型工艺过程如下:

- ①大头外侧面、螺栓孔肩台(端面):采用铣削或以中心孔定位车削。
- ②大头(以及小头)端面:粗磨、精磨或粗铣、精铣、或拉削后精磨。
- ③大头孔:粗镗(或拉)、半精镗、金刚镗、或再加珩磨。
- ④小头孔:钻(或扩)、铰(或拉)、金刚镗小头底孔、压入衬套后金刚镗小头衬套孔。
- ⑤螺栓孔:钻、扩、粗铰、精铰或钻、扩、铰(或拉、或镗)。
- ⑥大头剖分面:铣开后铣平(或磨平)。

(2) 应根据连杆的形状来选择合适的定位基面。

①精基准的选择:

轴向基准应采用连杆上下端面中的一个指定端面担任。因为该端面支承面积大,定位稳定、方便。

径向基准的作用是限定连杆在杆身对称平面内的移动和转动自由度,常有下列六种方案供考虑。

第一种方案(图 9-2(a1), (a2))在生产中用得较为普遍,它的优点是:可以使得在整个加工过程中定位基面统一,简化夹具结构,无论是粗镗、半精镗、精镗大、小头孔或是铣、磨剖分面或是加工螺栓孔时均可采用这种定位方案。但在加工小头孔时必需将小头定位销做成活动的(所谓假销),当工件在定位夹紧之后,再将假销抽出,以便加工。这种方案可以同时夹压大、小头端面,在镗孔时,切削力和夹紧力的方向一致,使工件以主要定位基面可靠地支承在定位元件上,工艺系统刚度较好。但是,由于工艺上难以保证大、小头端面做得很平正,故同时夹紧大、小头端面时,会使连杆变形,从而对大、小头孔轴心线的平行度有很大影响,故此法宜用于粗加工和半精加工。

为了改善因大、小头端面不平而引起的工件变形,可采用第二种定位方案(图 9-2(b)),此方案支承面只是大头孔端面,夹紧力主要作用于大头,大头孔限制了二个自由度,小头孔限制了一个自由度。此方案定位可靠,精度高,宜用于精加工,但刚度差,不宜用于粗加工,并且在整个加工过程中基面往往不可能统一。

为了克服这个缺点,可用第三种方案(图 9-2(c)),这时小头孔仍限制一个自由度,但菱形销转过了 $90^\circ$ ,大头不是以大头孔定位,而是以其外侧面定位。这样可基面统一,适用于直剖式连杆,但要求定位侧面长度 A 要足够大,否则定位不稳。

第四种方案可使连杆从铣两端面起到精镗大、小头孔止的更多工序中采用统一的定位基面(图 9-2(d))。这样,工件就可以装在随行夹具(跟随自动线,按节拍向前运行的夹具)上,在

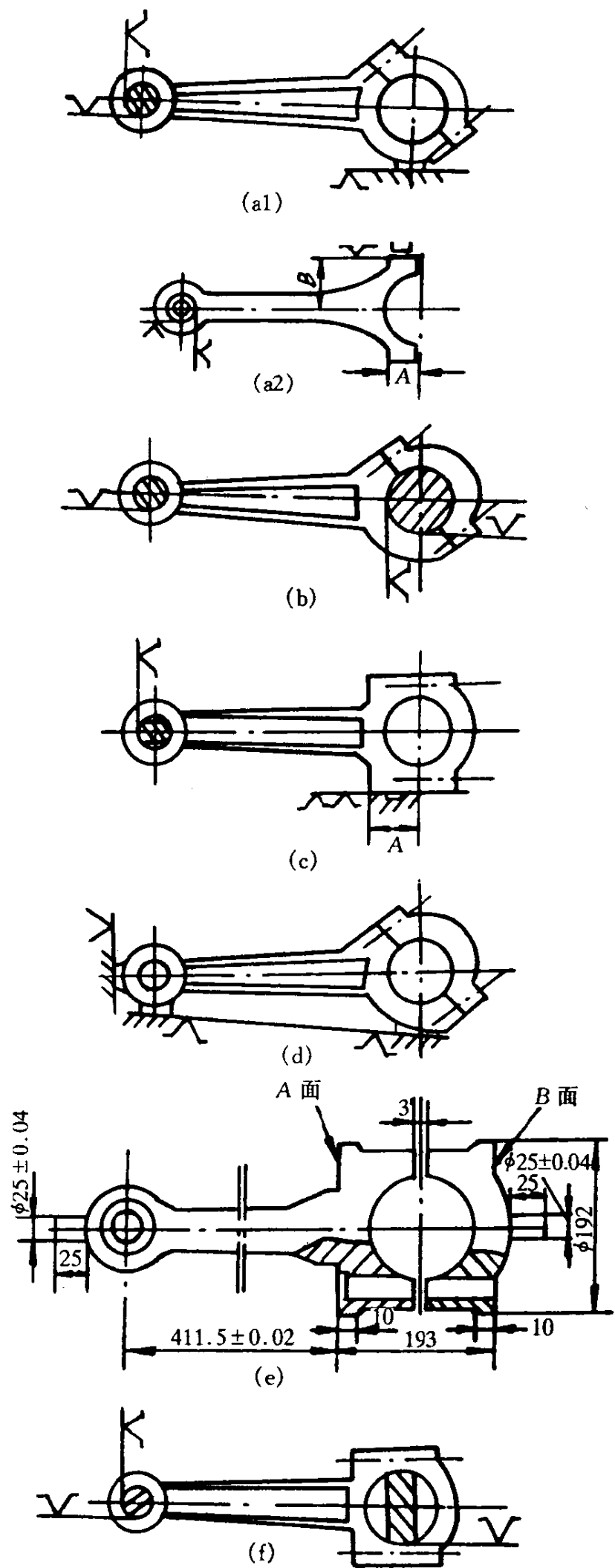


图 9-2 连杆的定位基面

自动线或流水线上进行加工,小头侧面的凸台最好与大头侧面的凸台做在一个平面上,以提高定位精度。这种方案一般适用于自动线上的加工,在整个加工过程中不必再装卸工件,基准也不再转换,但需对上述辅助基面事先加工好。

第五种方案(见图 9-2(e))是采用两中心孔定位,可消除五个自由度,这种定位可加工圆锥形杆身,大头侧面、大头外圆、小头外球面等,用于小批生产的自由锻连杆。

第六种方案(见图 9-2(f)),当加工大头外侧表面时,利用(a2)图定位方案有所不便,故可用此第六种方案代替,方案中,小头孔定二个自由度,大头孔用菱形销定一个自由度。

### ②粗基准的选择:

轴向粗基准最好是采用连杆不加工的杆身对称面,(见图 9-3),这种定位方法使工件在夹紧时的变形较小,可同时铣出工件的两端面,且使一部分切削力互相抵消,易于得到平面度较好的平面。同时由于以对称面定位,两端面的切削量相近,毛坯加工后的外形偏差也比较小。径向粗基准通常选择大、小头外形毛坯面,这样可保证大、小头径向壁厚均匀。

### ③确定合理的夹紧方法:

连杆是一个刚性较差的工件,应该十分讲究夹紧力的大小、方向和着力点的选择,避免因受夹紧力的作用而产生变形,影响加工精度。例如,在连杆杆身上加压后加工出来的大小头孔就与端面不垂直,应力求避免见图(9-4)。

在粗加工大、小头孔的工序中,主要夹紧力应垂直作用在大小头端面上,并由定位元件承受,以保证所加工的孔的圆度。在精镗、半精镗大头孔时,应以大头端面定位,只夹紧大头这一端。例如图 9-5 为半精镗大头孔的夹具,夹紧力只垂直作用在大头端面,并由定位元件承受。

在粗铣两端面的工序中(见图 9-3),夹紧力的方向与大小头端面平行,并通过工件直接作用在定位元件上,在夹紧力作用的方位上,连杆的刚性高,变形小,即使有一些变形,亦产生在平行于端面的方向,很少影响端面的平面度。

### ④考虑工序的次序与工序集中分散程度:

由于连杆本身刚性低,孔加工余量又较大,切削时将产生较大残余内应力和随后的内应力重新分布。为了保证零件的加工精度,应将机械加工的工艺过程分成粗加工、半精加工、精加工三个阶段。这样,前面的加工阶段产生的误差可通过后面的加工阶段予以修正。例如,粗镗大头孔之后,再安排一次半精镗大头孔的工序。这样,粗加工后引起的内应力重新分布,在随后的半精镗大头孔的工序中予以修正。同样,对于半精镗后所产生的内应力造成的变形,以及大头孔切开后所引起的内应力重新分布应安排一次拆装工序,使连杆体和盖所形成的大头孔

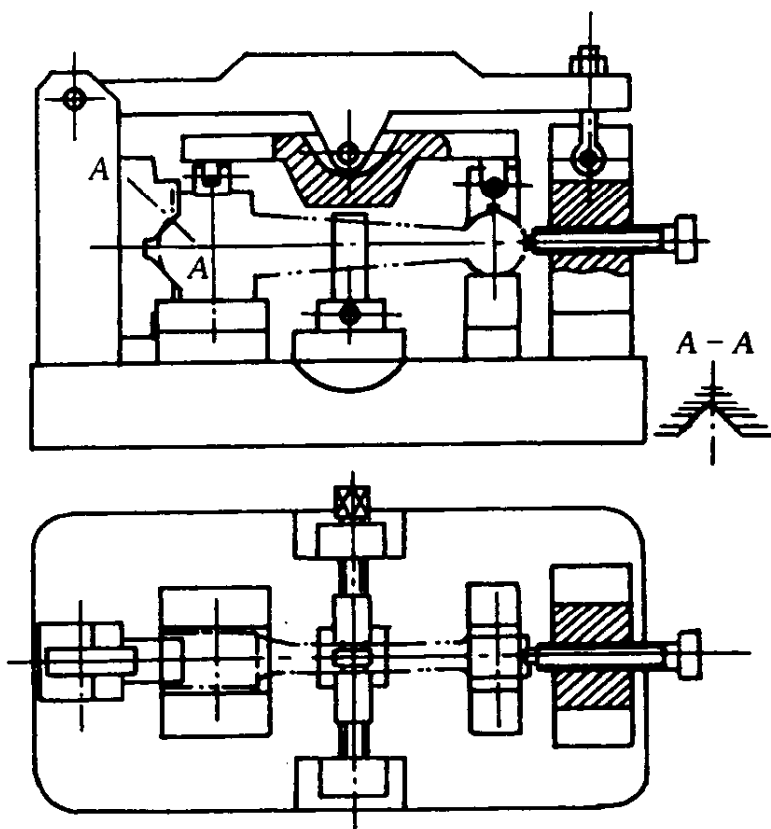


图 9-3 粗铣连杆两端面夹具

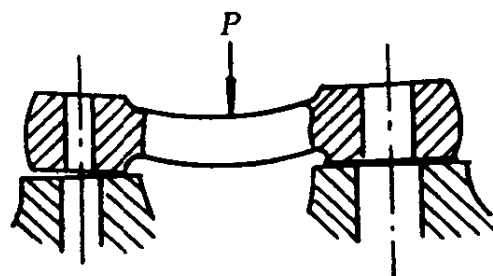


图 9-4 连杆的夹紧变形

得到自由伸展。重装后,大头孔不再是圆形,其变形量可在随后的精镗工序中消除或减小。总之,要顾及到连杆大头孔因每次加工后内应力重新分布而产生变形这一特点,将有关工序作适当的分散。

其次,在安排工序时应遵循基准先行和先加工平面后加工孔的原则,即每一加工阶段,总是先将定位平面加工出来,然后再加工孔。

螺栓孔的加工:其钻、扩、铰(或镗)加工可集中在一个工序中,而不是分散在三个工序中,这不仅容易保证精度,而且因为更换刀具比更换工件来得方便、轻巧。

根据上述各原则,结合工厂条件、工件结构和生产批量,就可安排工艺过程的具体内容。

### 9.3.2 连杆的机械加工过程

表 9-1 为连杆机械加工的一个全过程。毛坯为模锻,大头孔在半精加工完毕后切开,小头孔在压入衬套后再同时精加工衬套孔与大头孔,这样就容易保证它们的最终尺寸精度与相互位置精度。由于该连杆大、小头具有落差,故增加车削小头两端面的工序。一般,连杆盖与连杆体不能互换,该工艺过程适合于年产数千件的成批生产。

表 9-1 连杆机械加工工艺流程

工序号	工序内容	定位基准	加工设备
1	铣二平面	大头外形与杆身中心面	双面铣专用机床
2	粗磨二平面	大小头端面	M7475 型转盘磨床
3	退磁		退磁机
4	钻、扩小头孔	小头端面、小头外形面	Z535 型立钻床
5	铰小头孔口、倒角	小头孔及其端面	同工序 4
6	拉小头孔	同工序 5	L55 型立式拉床
7	粗镗大头孔	小头孔及大头外圆及大头端面	镗孔专用机床
8	车大头外圆	大、小头孔及其端面	C618 车床
9	打成套编号		
10	粗铣螺栓孔平面	小头孔、大头外圆及其端面	X63W 型卧式铣
11	精铣螺栓孔平面	同工序 10	同工序 10
12	钻、扩、铰两螺栓孔	同工序 10	同工序 4

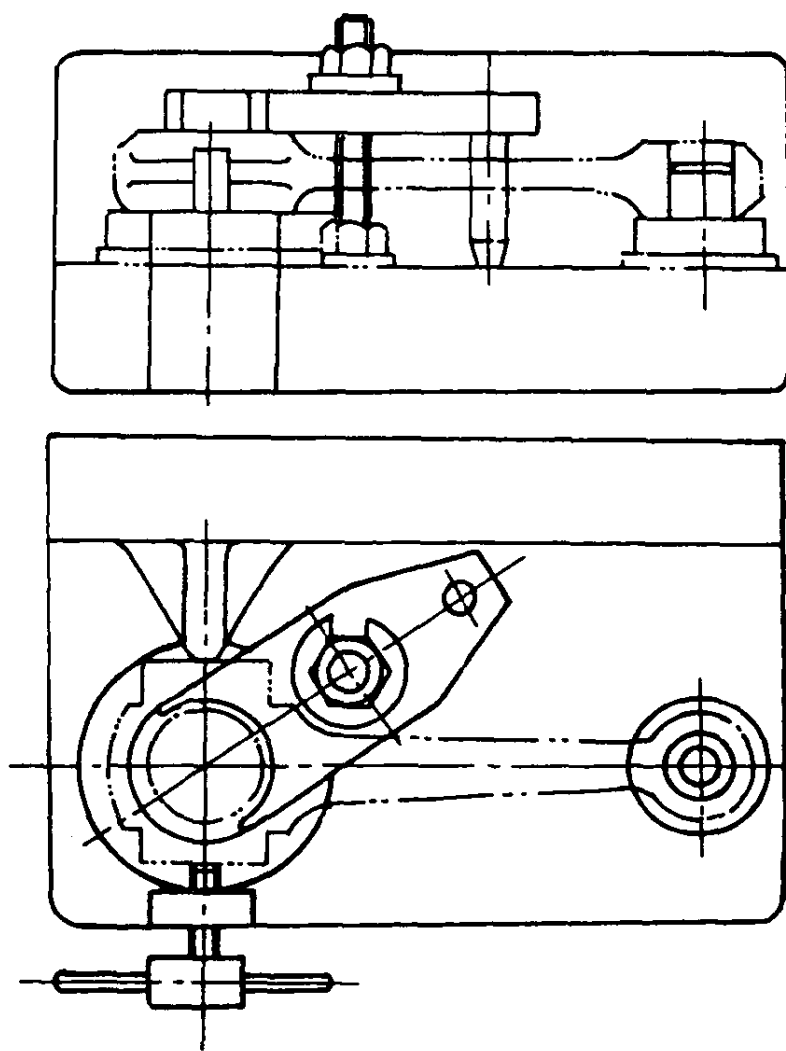


图 9-5 半精镗大头孔夹具



续表 9-1

工序号	工序内容	定位基准	加工设备
13	中间检验		平板
14	半精磨二平面	大小头端面	同工序 2
15	退磁		退磁机
16	半精镗大头孔	小头孔、大头外圆及其端面	镗孔专用机床
17	半精镗小头孔	小头孔、大头外圆,大、小头端面	T760 型金刚镗床
18	中间检验		检验台
19	钻小头油孔	大头外圆、小头孔及其端面	台钻
20	去小头孔内毛刺		
21	压入小头衬套		油压机
22	铣开大头	小头孔及大、小头端面,大头外圆	同工序 10
23	去全部毛刺		
24	铰螺栓孔口的倒角		台钻
25	钻连杆体定位销孔	螺栓孔口端面	台钻
26	钻连杆盖定位销孔	螺栓孔口端面	台钻
27	装配连杆体与连杆盖		
28	精磨两平面	大小头端面	M7475 平面磨床
29	精镗衬套孔和大头孔	小头孔,大、小头端面、大头外圆	专用镗床(双轴)
30	中间检验		
31	车小头二端面及孔口倒角	小头孔及其端面	车床
32	去全部毛刺		
33	清洗		
34	最后检验		

### 9.3.3 主要工序介绍

#### 1. 连杆两端平面的加工

连杆大、小头端面以及工艺搭子表面等是连杆机械加工中不断使用的主要定位基面,在各加工阶段中,必须先将它们加工好。

端平面的切削可以采用铣、拉、磨等方法进行。大量生产中可采用拉削、磨削。此时要求毛坯尺寸比较准确。在成批生产中广泛采用铣削。

粗铣平面时,应以不加工的杆身和大头外形定位,图 9-3 就是采用这样定位的一种夹具,它同时铣削工件的两端面,可使一部分切削力抵消。

精磨端面时,为了保证精度,宜用砂轮的周边磨削。

#### 2. 连杆螺栓孔的加工

两螺栓孔的加工,一般经过钻、扩、粗铰、精铰或钻、扩、铰、拉。

拉削用于大量大批生产。对于较大尺寸的螺栓孔成批生产中常用精镗代替铰、拉。对于单件生产可在卧式镗床上进行。钻、扩、铰也可在摇臂钻床上进行,一般工厂将钻、扩、铰放在

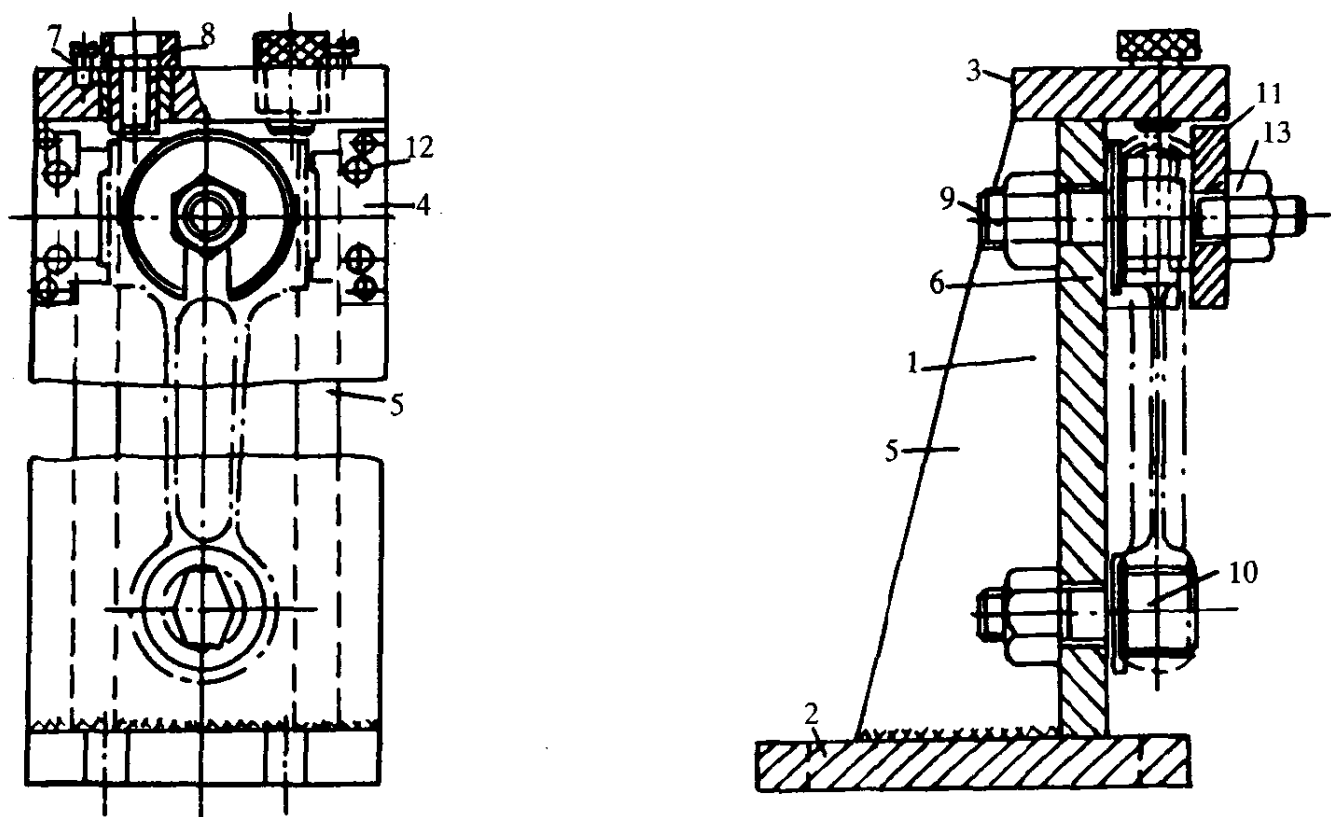


图 9-6 加工连杆螺栓孔的夹具

同一工序中,在立式钻床上进行。图 9-6 所示的夹具是其中采用的一种,加工时,以小头孔、大头端面及大头一侧的外圆定位,在大头端面夹紧。表 9-1 中所采用的夹具稍有不同,不同之处在于小头孔定两个自由度,大头一侧的外圆定一个自由度。

### 3. 连杆大、小头孔加工

连杆大、小头孔的加工是连杆加工中极为重要的工序,均分成粗镗、半精镗、精镗三道工序来完成。

小头孔是定位孔,在用作定位孔之前,它经过了钻、扩、拉(铰)三道工序,加工大头时往往以小头孔定位,故小头孔的粗加工必须安排在粗镗大头孔之前。这样,加工小头孔的第一道工序(钻)时的定位是很重要的,应以小头外形定位,见图 9-7,这样可保证加工后的孔与外圆不会偏心过多。大、小头孔的粗、精镗在批量大时,往往在专用双轴镗床上同时加工(图 9-8)。粗、精加工在分开的机床上进行,由于精镗大孔放在铣开剖分面之后,故在合装连杆体与连杆盖时,应装上一定厚度的工艺垫片,然后再进行精镗大头孔。

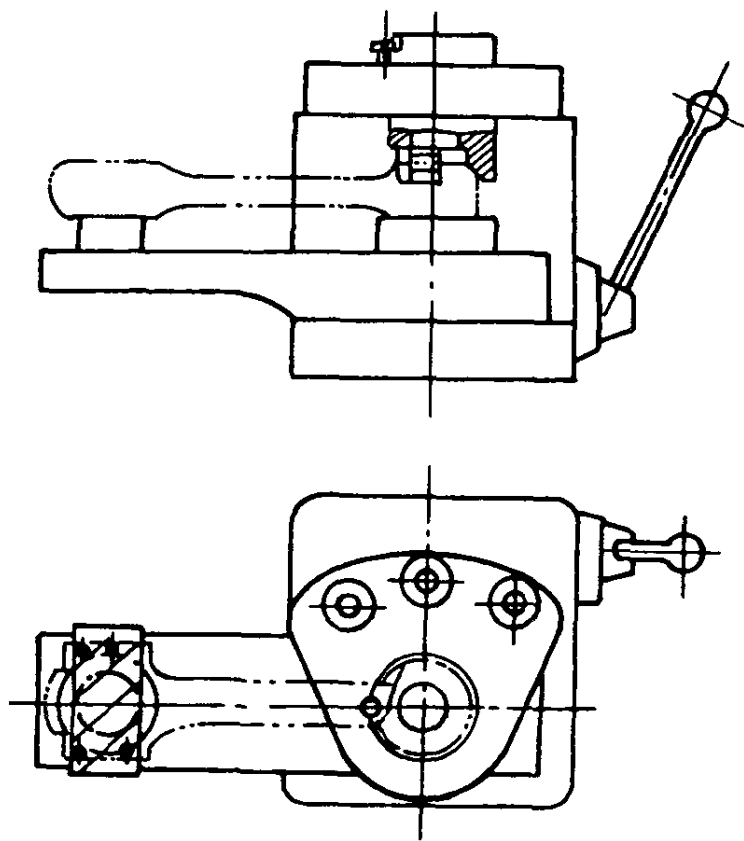


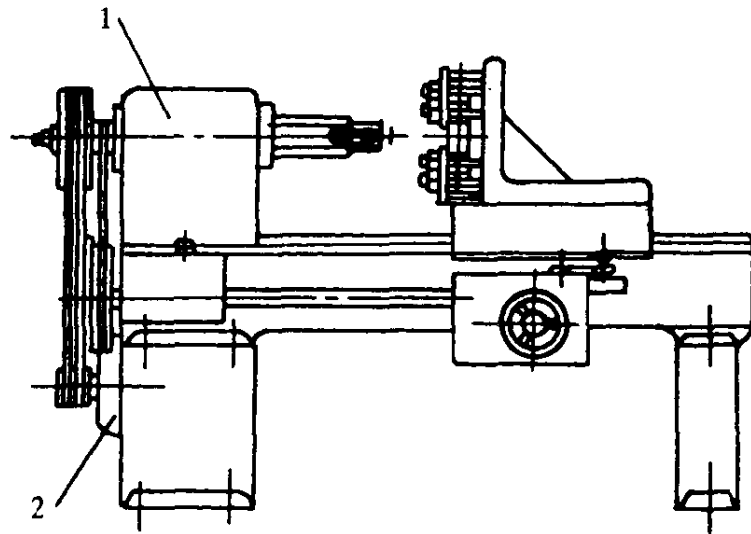
图 9-7 钻小头孔的滑柱式钻模

批量小时,大、小头孔也可分别在普通卧式镗床上加工出来,位置精度由机床或找正来保证。

### 4. 大头外圆的加工

车大头外圆采用图 9-9 所示的夹具,它是用一个圆销(小头孔),一个菱形销(大头孔)及端

面定位,在车床上加工。



固定架

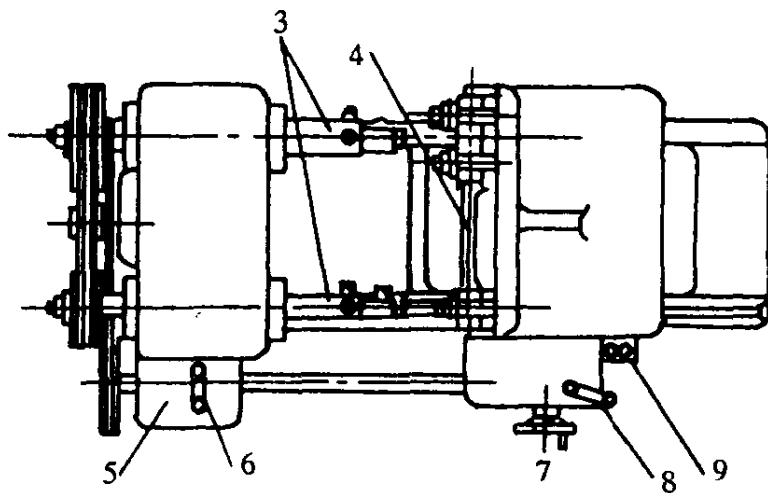


图 9-8 加工连杆大小头孔专用镗床

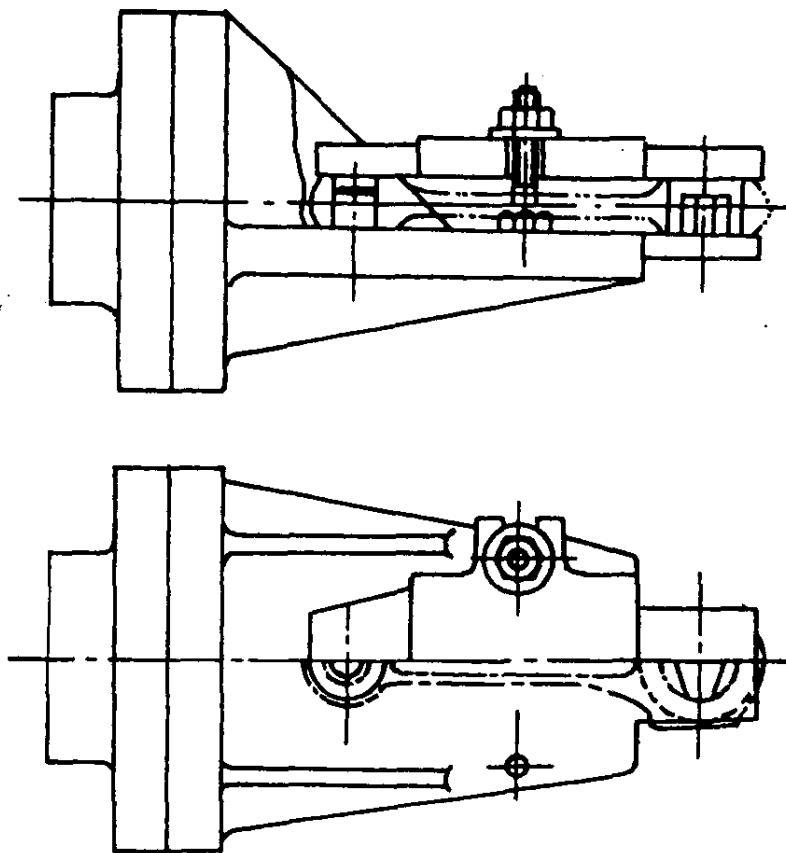


图 9-9 车连杆大头外圆夹具

### 5. 连杆的检验

连杆在机械加工中要进行多次中间检验,加工完毕后进行最终检验,其检验项目除了观察外表缺陷、表面粗糙度及用通用量具检验主要表面的尺寸精度外,还需检验主要表面的相对位置精度。

大、小头孔轴心线的平行度可用图 9-10 所示的方法进行检查,若平行度不合格,可将连杆体和盖的大头孔进行刮研修正。

连杆螺栓孔与其端面的垂直度可用标准样杆插入连杆螺栓孔中进行涂色检查(见图 9-11),孔端面与样杆台肩面接触面积在达 70% 以上者为合格。若不合格,可对连杆螺栓孔的端面进行刮研。连杆的重量也应测定,若不合格,应在连杆的两头外侧预留的凸台上取重,以符合规定的标准。

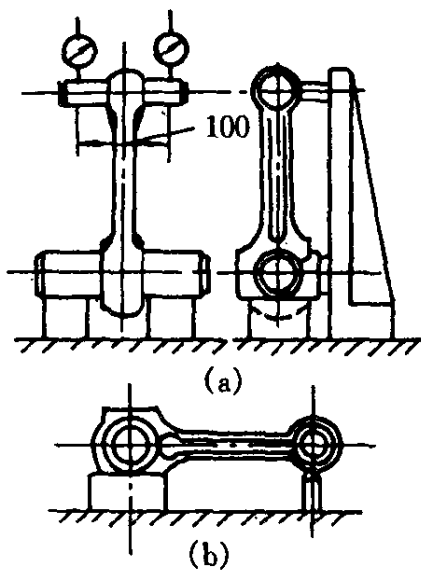


图 9-10 连杆大小头孔的平行度检验

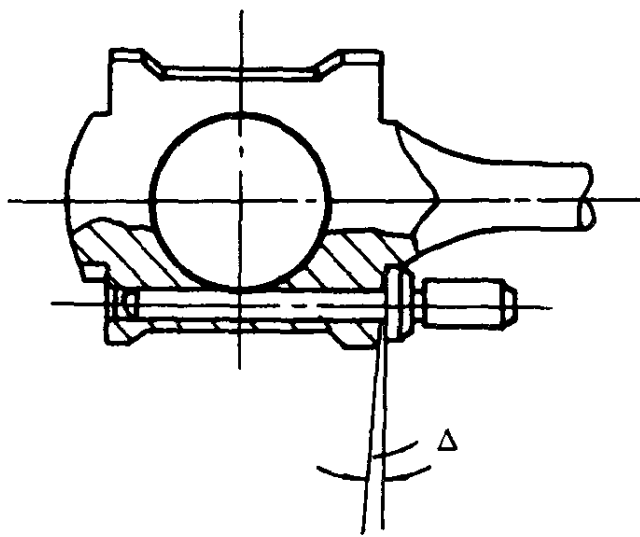


图 9-11 螺栓孔轴心线与其端面垂直度检查简图

## 第 10 章 机体加工

### 10.1 机体的功用、结构特点及技术要求

机体是往复式机器中的基础零件,它是用来集合各种零件、部件,使它们之间保持一正确位置或一定的运动关系的。所以机体的刚度和各面间的相互位置精度是个重要指标。

在压缩机等机器中与别的零件相比,机体结构差异最大,但它们均有下列主要加工面:一是底面,它用来使整个机器安装在基础上或机架上;一是连接中体(或气缸)的安装孔系及其端面;一是装置曲轴用的轴承孔系及其端面;此外有时还有供装置十字头的滑道孔。

压缩机工作时,机体受到复杂的交变应力,加上结构也较复杂,在加工中或长时间运转中易产生变形,从而使轴承、十字头导轨、气缸拉毛,磨损增加,同时引起温升、振动增加和产生附加噪声;也会使密封失效,引起漏气、漏油或漏水,破坏工作可靠性。故对机体零件提出了下列主要技术要求:

- ①轴承孔尺寸精度不低于 7 级。
- ②滑道孔尺寸精度不低于 7 级。
- ③轴承孔的圆柱度不低于 8 级,各轴承孔轴心线对公共轴心线的同轴度不低于 8 级。
- ④滑道孔的圆柱度不低于 8 级。
- ⑤滑道孔轴心线对公共轴心线的垂直度不低于 6 级。
- ⑥安装气缸(或缸座)的贴合面对滑道轴心线的垂直度不低于 6 级。
- ⑦安装气缸(或缸座)用的定位止口轴心线对滑道轴心线的同轴度不低于 8 级。
- ⑧机体轴承孔和滑道表面粗糙度不高于  $R_a 1.6\mu\text{m}$ 。

图 10-1 为检查上述第 5,6,7,8 项要求的综合检具。

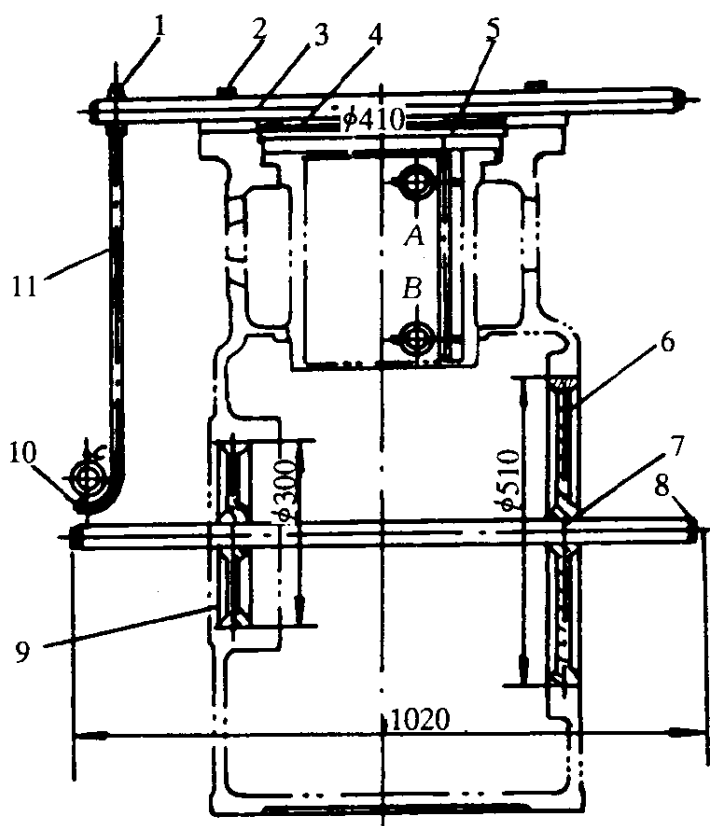


图 10-1 机体综合检查检具

### 10.2 材料与毛坯

一般机体的材料采用铸铁,它具有容易成型、切削性能好、价格低以及吸振性好等优点,在微型压缩机中也有采用压铸铝的,只有在单件小批生产中,为缩短生产周期,有时采用钢板焊接。

铸铝牌号可选用 ZL108、ZL109。铸铁牌号可选用 HT150~HT300,通常采用 HT200,小批生产时毛坯采用木模手工造型,大批量时采用金属模造型。

### 10.3 机体工艺过程的制订

#### 1. 加工方法的选择

加工方法选择不当会影响零件的加工精度与粗糙度,或者会降低生产率,增加成本。大多数工厂用车、铣、刨、镗等加工方法即可达到要求。但滑道孔尚需用珩磨或精铰的方法来达到。在机床选择上,轴承孔、滑道孔小批生产多采用通用万能镗床,或数控机床,批量大时采用专用镗床或组合镗床。大端面、底面在小批时采用龙门刨床、龙门铣床,大批时采用卧式端面铣床。

#### 2. 精基准选择

有两种典型方案可供选择:

(1)以“一面两孔”作为精基准,即以机体底面和底面上二螺栓孔作为精基准,为此,此两孔先要经过钻、扩、铰工序,使加工精度提高到7级。用一面两孔定位的优点是可限制六个自由度,定位稳定可靠,在一次安装下可同时加工除定位面外的所有五个方向上的孔和面。也可在多次安装下,用多道工序加工这些表面,从而达到基准统一原则。但底面和螺孔不是设计基准,故会产生定位误差。此法由于夹紧方便,易于实现自动定位和夹紧,故适用于大批大量自动线生产。

(2)以装配基面作精基准。通常采用大轴承孔及端面作为精基准来加工两滑道孔孔系及其端面,这里的大轴承孔及其端面就是装配基面。此法符合基准重合原则,减少定位误差。它可消除5个自由度,从而减少辅助时间,同时由于采用了轴承孔定位,两个滑道孔加工可用普通卧式镗床。

#### 3. 粗基准选择

选择粗基准时应考虑三条要求:第一,在保证各加工面都有加工余量的前提下,应首先保证轴承孔和滑道孔加工余量尽量均匀;第二,所选定位基面应使定位夹紧可靠;第三,使压缩机工作时运动部件不至于同机体不加工面相碰。

为此,通常以机体的重要孔(如轴承孔、滑道孔)作粗基准,这样可以保证机体上重要孔加工余量均匀,对提高孔的加工质量、耐磨性等具有重要意义。同时,由于铸造机体毛坯时,形成重要孔、其他孔以及机体内壁的泥芯常是做成(或装成)整体放入的,从而还能较好地全面保证这些孔加工余量的均匀性,对整个孔系加工都有利。此外这也促使运动部件不容易与机体不加工的内壁相碰。反之,若以机体的底面作粗基准,则虽然可得到较好的外形尺寸,并且支撑、定位较为稳定,但上述第一、第三条要求则难以保证。

实际上,由于轴承孔作粗基准,表面粗糙,定位不稳,自动定心夹紧的夹具结构复杂,加之机体形状复杂,加工面多,为了能面面俱到,在一般批量不大,毛坯精度不太高时,就不可能以某一二个表面作唯一粗基准,而是采用划线法来建立基准(这时,实际的划线也是基本上以轴承孔为基准)。当批量大时,毛坯精度高,则可以以轴承孔作粗基准。

#### 4. 夹紧部位的选择

工件在机床上安装时的夹紧部位的选择必须考虑操作方便,可达性好,同时工件变形要小。在机体顶面上向下夹紧容易使工件变形,在机体内部下部夹紧则操作不便,达及性不好,

若在用机体底部定位支持时,可选择底座上的螺孔处夹紧,则可避免上述变形和操作不便的缺点,若在用轴承孔及其端面定位时,其夹紧部位选在端面上螺孔处,则也可达到同样效果。

#### 5. 先面后孔的加工顺序

先加工平面,后加工孔,这是机体零体加工的一般规律,因为这样可为孔加工提供稳定可靠的精基准,另外加工平面,切除了铸件表面的凹凸不平,对孔加工有利,可减少钻头引偏,减少扩、铰孔刀具崩刃,对刀调整也方便。

#### 6. 粗精分开的考虑

机体零体主要表面加工常将粗、精加工分成两道工序进行。但尚需指出,随着粗精加工分开,机床和夹具数量要相应增加,安装次数也相应增加,因此当批量不大以及机体较重,刚度较高时,往往又将粗精加工合并在一个工序内进行,此时最好在粗加工后松开工件,使工件因夹紧而产生的弹性变形得以恢复,然后再用较小的夹紧力夹紧工件进行精加工(为同一工序)。此外在粗加工后,经充分冷却再进行精加工则更好。

#### 7. 热处理工序的安排

为了消除铸造时形成的较大内应力,通常机体毛坯在铸造后进行人工时效处理(加热到 $530^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$ ,保温 $6\sim 8\text{h}$ ,冷却 $\leq 30^{\circ}/\text{h}$  出炉温度 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ )。对于精度要求高或形状特别复杂的机体,在粗加工后再进行一次人工时效处理,以消除粗加工本身造成的内应力。

## 10.4 机体的加工过程及其主要工序分析

以L型压缩机机体的加工工艺为例,其零件简图如图10-2所示,主要加工过程见表10-1。

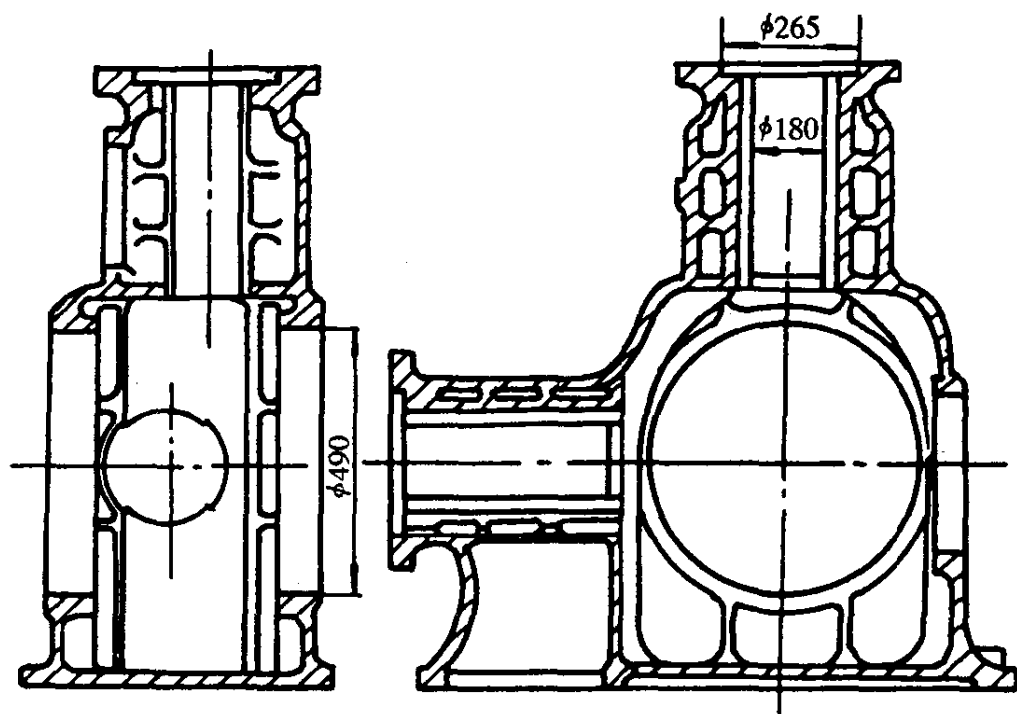


图 10-2 L3.3-13/320 机体简图

表 10-1 L 型机体主要加工过程

序号	加工内容	定位基准	加工机床
1	划中心线和主要面加工线		
2	加工底面	按划线找正	龙门刨床
3	粗、精镗轴承孔 $\phi 490^{+0.06}$ 、车端面	底面及划线	镗床

续表 10-1

序号	加工内容	定位基准	加工机床
4	钻、攻轴承孔两端螺孔	钻模对十字线	钻床
5	粗、精镗滑道孔, 气缸安装孔及其端面、铰(或珩磨)滑道孔	轴承孔及其端面、划线	专用镗床
6	铣各窗孔	底面	铣床
7	钻、铰、攻各光孔及螺孔, 刮平各孔凸台	钻模及划线	钻床

主要工序分析如下:

### 1. 划线

首先将机体用千斤顶安放在平台上(见图 10-3(a)), 调整千斤顶, 使前后主轴孔 F 与水平列滑道孔的中心所决定的平面与台面基本平行, 在毛坯上划出上述各孔中心的水平线 I-I, 四个面均要划出, 作为第一校正线。划此线时, 应根据图样要求, 检查顶部 A(特别是底部 C 平面)等各所有加工部位在水平方向是否均有加工余量, 若有的加工部位无加工余量, 则需要重新调整 I-I 线的位置, 作必要校正, 以确保加工面均有加工余量。I-I 线确定后, 即可划出 A 面和 C 面的加工线, 然后将机体翻转 90°, 使水平列之滑道孔朝上, 以原来一侧面 D 置于千斤顶上(图(b)), 调整千斤顶, 使前后轴承孔处之 I-I 线垂直于台面, 并在兼顾前后轴承孔和垂直列滑道孔的加工余量下调定千斤顶, 并划出上述三孔的垂直轴线 II-II 线, 作为第二校正线, 也是在四个面上均划出, 并据此画出水平列滑道孔侧端面 E 和窗口端面 D 的加工线, 再将机体翻转 90°, 将轴承孔端面置于千斤顶上(图(c)), 调整千斤顶, 使 I-I 线与 II-II 线均与台面垂直, 再划出两列滑道孔中心线与孔加工线和上下填函窗孔面的加工线和轴承孔端面加工线。

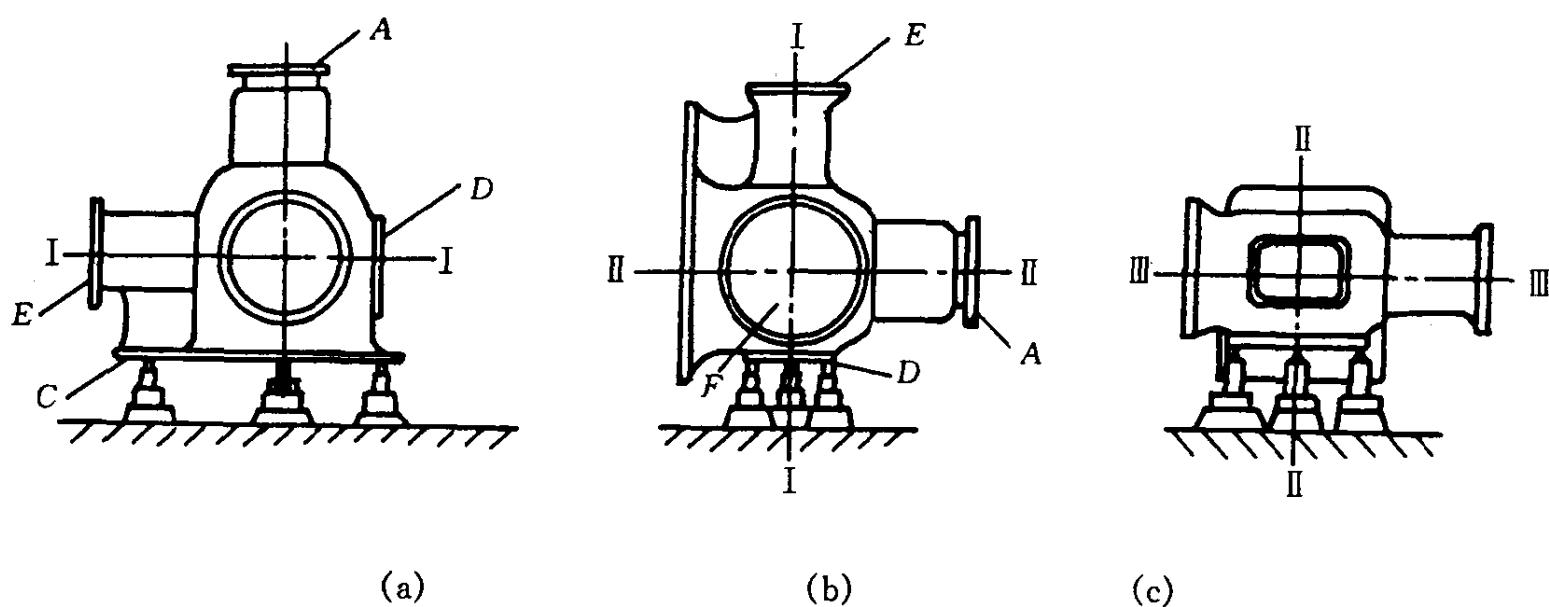


图 10-3 机体划线

### 2. 底平面加工

底平面常是中间凹下、边缘凸起的框形平面, 或者两条相距较远的窄条平面组成, 常采用铣削或龙门刨床加工。工件以划线痕校正定位。

### 3. 轴承孔及其端面加工

轴承孔左右共有两个, 通常在镗床上加工, 个别也有将机体躺在立式车床上加工的。小批



生产时多在普通卧镗床上加工,此时若镗杆从一个方向加工两轴承孔,势必悬伸太长,镗杆刚度不够,故可在镗好一孔后将工作台连同工件旋转  $180^\circ$  再加工另一孔。但这时工作台偏心误差会双倍反映到两孔同轴度误差上,故在普通镗床上加工,效率低,质量也不稳定。有的厂采用专用镗床,由两镗杆同时对头镗孔,镗杆悬臂短,而且还可车削大轴承孔外端面。这种专用机床使生产效率较原普通镗床提高一倍,质量稳定,粗糙度较细,同时也保证了轴承孔与外端面的垂直度。加工时,工件是以底面和轴承孔的划线来定位的。

轴承孔的端面在镗床上加工切削条件较差,在批量大时最好采用端面铣床加工,图 10-4 就是另一种机体轴承孔端面的加工示意图,由于此时端面与孔不在同一机床上加工出,故不利于保证它们之间的垂直度。

#### 4. 滑道孔加工

该机体滑道孔长与孔径之比为 2:3,孔径较大,能使用有足够刚度的镗杆在镗床上加工。滑道横截面通常作成两段圆弧而不是整圆,加之粗加工时,切削力很大,这对保持工件和机床精度是不利的,故宜将加工分成粗、精加工两阶段。由于精镗很难达到  $R_a 0.8\mu\text{m}$  的粗糙度,故除精镗工序外,尚需增加珩磨或精铰。精铰与珩磨相比可少一道工序,工时较少,且工件滑道面上不会沾上残余磨屑,不致影响压缩机工作。当批量小时,滑道孔及其端面的加工在通用镗床上进行,当批量大时,应在带有镗孔车端面的动力头的专用机床上加工。图 10-5 为某厂的专用镗滑道孔的镗床,是加工 L 型压缩机机体滑道及止口贴合端面和外端面的。整个机床呈直角形布置。机体(工件)以轴承孔及其端面定位,同时又利用滑道孔的划线校正定位安放在支座 8 上,并利用机体轴承孔端面上的螺栓孔用螺栓螺母夹紧。两滑道孔轴心线的垂直度,以及各滑道孔与及端面的垂直度均由机床保证。

滑道孔的珩磨可在珩磨机上进行,但通常的滑道孔圆周上有两块较大的缺口,在珩磨时磨条容易跳出,造成事故。解决磨条跳出的方法有好几种:有的厂配作两块专用辅助导轨填充滑道缺口,有的厂用“刚性珩磨头”,也有的厂用螺旋形珩磨头。所谓螺旋形珩磨头,即磨条做成螺旋形,其分布所占据的圆周角大于滑道缺口所占角度。

铰滑道孔可用专用铰刀在精镗之后进行的。精铰的切削用量如下:进刀量  $s = 2\text{mm/r}$ ,切削速度  $v = 10 \sim 14\text{m/min}$ ,精铰余量为  $0.08 \sim 0.15\text{mm}$ ,冷却润滑剂为煤油,滑道孔精铰的经济精度为  $0.02\text{mm}$ ,圆柱度为  $0.1\text{mm}$ 。精铰后不必再珩磨。精铰可与镗合为一个工序。

#### 5. 钻、扩、铰、攻各光孔及螺孔

在机体上有许多分布在各个平面上的螺栓光孔或螺钉孔需要加工,占了机加工总工时的  $1/4$  左右,除了采用钻模板在普通钻床上加工外,批量大时最好在多工位多钻头的组合机床上加工。

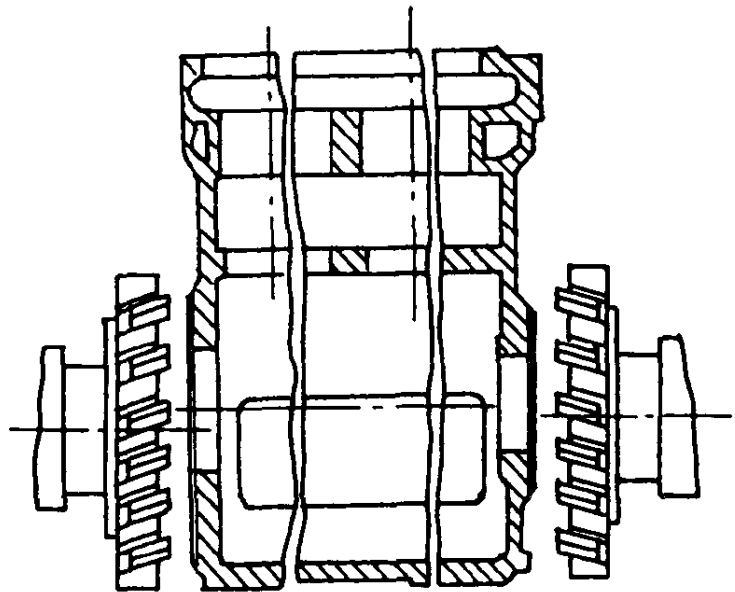


图 10-4 机体前、后端面加工简图

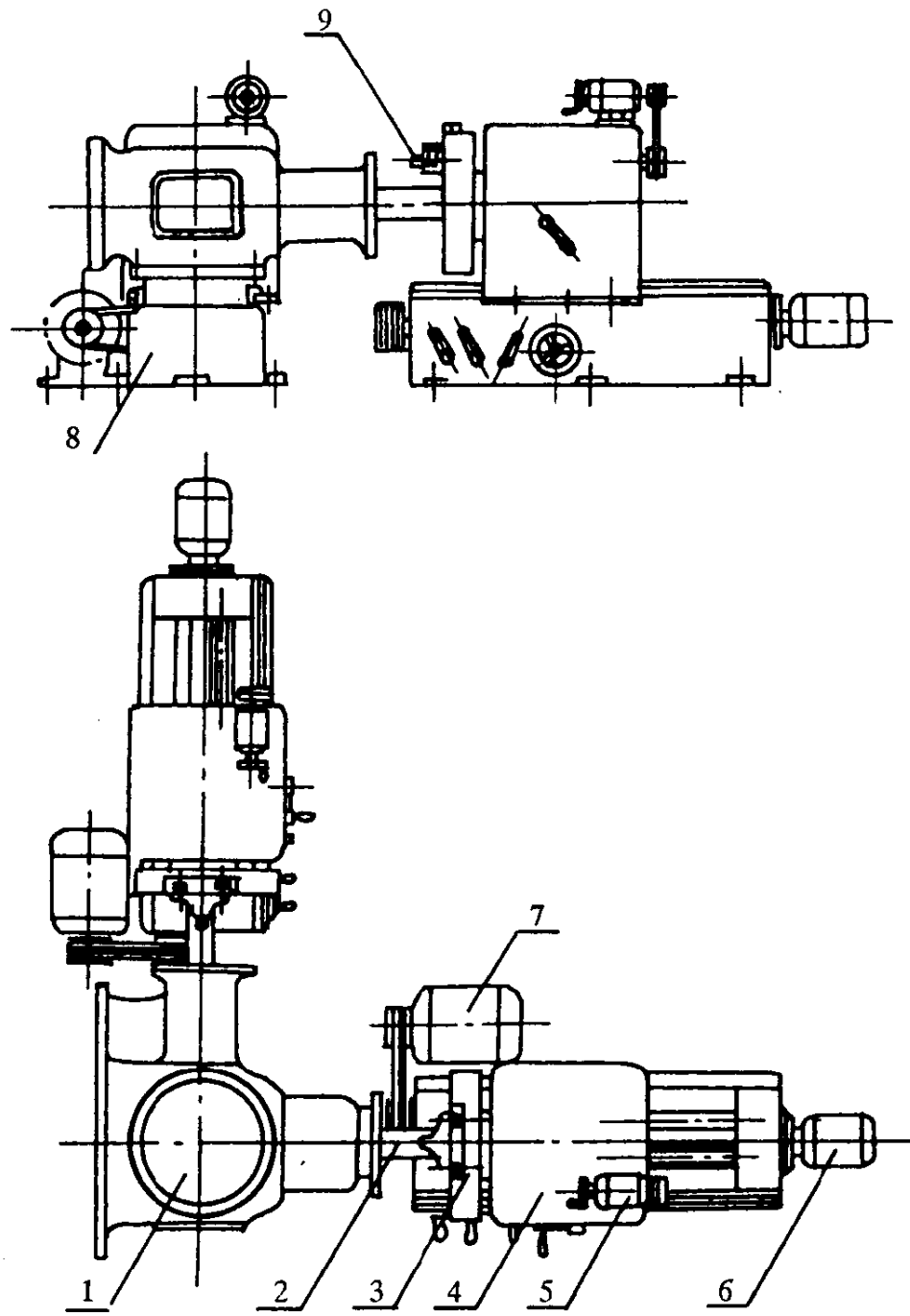


图 10-5 L 型机体滑道孔专用镗床

## 第 11 章 叶片的加工

叶片有离心式、轴流式、横流式与混流式等多种型式,离心式叶片多用于离心式风机与离心式压缩机,轴流叶片多用于轴流风机与压缩机以及汽轮机,它们是应用最广泛的两种叶片的型式,下面分别叙述其加工。

### 11.1 离心式叶片的制造

离心式风机和离心式压缩机的叶片一般有五种型式:榫头式、贯穿铆钉式、U型、Z型和焊接叶片(见图 11-1 所示)。U形的叶片由于制造简单,只要很少特种设备,但如气道宽度小于 20mm 或者双侧进气的工作轮,为了改善气流和使铆接叶轮方便,就可用 Z 形叶片。这些叶片都是用钢板热压弯成 U 形或 Z 形,再用铆钉与轮盘以及与轮盖铆接的,当根据强度计算叶片的高度大于 7mm 以上而叶轮尺寸不大时,可采用榫头式叶片或具有贯穿铆钉孔的叶片,后者宜用在通道高度 < 15mm 的场合,因为此时, Z, U 形叶片的摺边较困难,榫头式与贯穿铆钉孔式的叶片制造都很复杂,但气道平滑无阻塞,在制冷压缩机中用得较广泛。随着焊接质量的提高,也可用焊接叶片,这样既可缩短机械加工工时,气道阻塞也小,强度也可增高,特别是高速闭式径向叶轮,更有采用焊接叶片的必要,这是目前广泛运用的原因之一。当然,焊接叶片的形状就没有摺边的必要(见图 11-1 中(e)),与图(a),(b),(c),(d)相比,(e)型的结构形状最为简单。

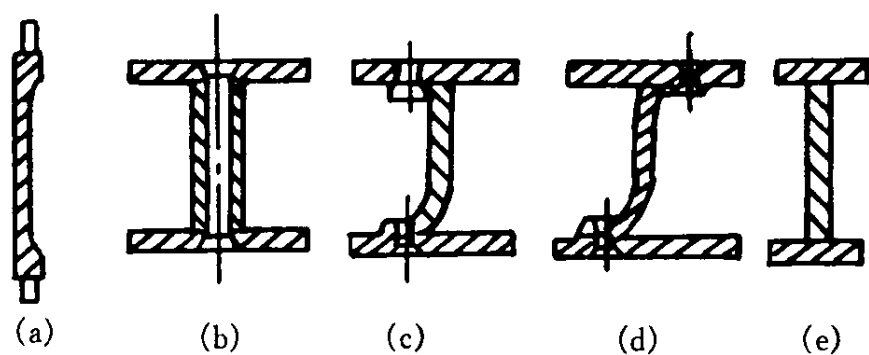


图 11-1 叶片的形状

a—榫头式;b—贯穿铆钉式;c—U型;d—Z形;e—焊接叶片

叶片一般用低合金钢的热轧钢板制造,表 11-1 是常用的几种材料。对叶片材料的主要要求是:

- ①机械性能高,以便承受工作时离心力产生的弯曲应力。
- ②必须在加热状态下具有很好的塑性,以便模压成形。
- ③必须耐磨,以免在与流动的工质一起存在的硬质微粒的摩擦下产生较大的磨损。
- ④满足一些其他要求,如耐腐蚀等。

表 11-1 离心式压缩机叶片材料

钢 号	抗拉强度 $\sigma_b$ (kg/mm <sup>2</sup> )	屈服强度 $\sigma_s$ (kg/mm <sup>2</sup> )	延伸率 $\delta_2$ (%)	布氏硬度 HB
1Cr13, 2Cr13, 15MnV 1Cr18Ni9, 1Cr18Ni9Ti	50	$\geq 30$	25	197~248
20Cr, 20MnV 40MnB, 40Cr	70	$\geq 50$	17	217~255
7SiMnMoV, 30CrMnSi 32SiMnMoV, 35CrMnSiA	95	$\geq 75$	12	268~302

⑤材料必须光滑,无裂缝、剥层、疤痕、夹层及其他影响强度的缺陷。

下面阐述叶片的制造:

#### 1. 毛坯的落料

落料即是从钢板上切割叶片的毛坯,它是在剪床上按划线进行,而划线则是按照毛坯展开的样板进行的。

#### 2. 叶片的弯曲成形与热处理

叶片的弯曲通常是在热的状态下在专门的弯曲模中,利用摩擦压力机来进行,叶片模压时的加热温度及其后进行的热处理见表 11-2,回火后选取叶片制成试样,试验拉伸、冲击等机械性能,选取那些硬度最高和最低的叶片,占同一次熔炼和同批热处理叶片总数的 2%,但不少于两个。试样沿垂直于热轧钢板的方向切割。所有其余的叶片,可利用试验布氏硬度的方法,检查他们在热处理过程中获得的机械性能的差别,各个叶片的差别容许在 HB30 的范围内。

表 11-2 叶片模压热处理操作规程

钢 号	淬 火		回 火		布氏硬度 HB
	加热温度℃	冷 却	温度℃	冷 却	
2Cr13	1 050~1 070	在水冷却的压模中保持到变暗色,随后在空气中冷却	680~720	空 气	197~248
20Cr	770~880		650	空 气	$\leq 179$
30CrMnSiA	950~960		580~590	空 气	$\leq 229$

#### 3. 清理

检验了叶片的机械性能之后,即着手清理叶片上的氧化铁屑,这一工序在喷砂机中进行。

#### 4. 调直

模压后当热处理时,叶片的尺寸会发生偏差,有时很大,因而有些叶片需要重新模压和再度热处理,但大多数叶片用手工即可调直。

调直了的叶片,当利用角尺在平板上测量时,其工作背面的偏差值不应大于 0.3mm,叶片摺边与压模间的间隙用塞尺检验时,仅允许局部存在,并小于 0.3mm,同一叶轮的一套叶片中,个别叶片在高度上的差别应小于 0.2mm,而所有叶片高度的误差应在 0.2~0.5mm 的范

围内。

### 5. 叶片进、出口的加工

叶片进、出口的加工是按划线在铣床上铣切。

进、出口边的倒角的加工一般是用手工锉削,或用砂轮磨削,大型叶片也有用铣床铣进、出口的倒角的。

## 11.2 轴流叶片的加工

轴流压缩机、汽轮机的轴流叶片是一种形状复杂、刚度差的精密零件,对表面完整性要求较高。加工中要注意减少变形及表面的残余应力。对于余量较大的模锻件毛坯,加工通常要经过粗、细与精加工三个阶段。

为了减少切削力及热的影响,也广泛应用电解加工方法加工叶身。表 11-3 中表示一种由模锻毛坯制成的轴流工作叶片的工艺路线。为了便于安装定位,这种叶片的毛坯预先制有工艺凸台。加工中在其上钻、铰一个孔做为定位基准,如图 11-2 所示。加工完成后,叶尖的工艺基准要切去。工艺路线表中各工序所用的定位基准面的代号如图 11-3 所示。

一般叶片的整个加工过程主要由叶身型面加工和叶片榫头加工两部分组成。

表 11-3 轴流叶片的工艺路线

工序号	工 序 内 容	定位基准
1	模锻毛坯	
2	粗铣排气边和进气边	A,B
3	粗铣叶盆方向基准面 B	A
4	磨叶背方向基准面 A	B
5	粗磨排气边	C
6	粗铣两端面 E,H	A,D
7	钻、铰定位孔 G 至 $\phi 8 \begin{matrix} +0.022 \\ +0.018 \end{matrix}$	A,E
8	粗铣进气边倾角	A,G,F
9	粗铣排气边	A,G
10	研磨叶背方向的基准 A	
11	磨叶盆方向的基准 B	A
12	粗铣叶盆型面	A,G,E
13	靠模粗车叶背型面	B,G,F
14	粗铣榫头斜面	
15	电解加工叶盆叶背型面	
16	腐蚀叶身、检查冶金缺陷、及低倍组织	
17	细铣榫齿型面	
18	细铣榫齿顶面	
19	铣叶肩凸台的减重槽	
20	抛光叶身型面	

续表 11-3

工序号	工 序 内 容	定位基准
21	检验型面	
22	精磨榫头四边	
23	铣榫头斜边	
24	在磨床上切去工艺凸台	
25	去毛刺	
26	在氩气保护下进行 1 050℃保温 2.5h,以消除内应力	
27	总检验	

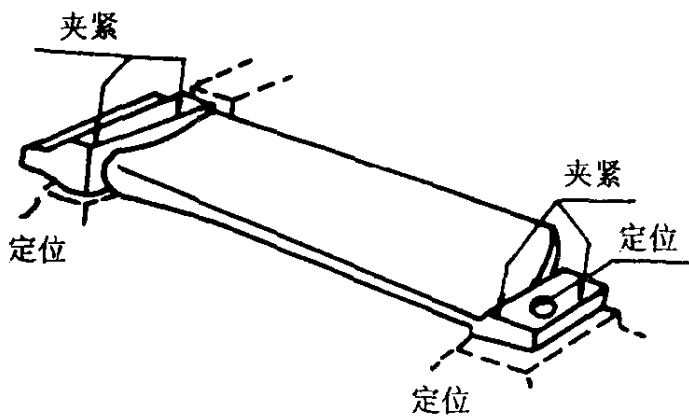


图 11-2 叶片加工中用工艺基准定位

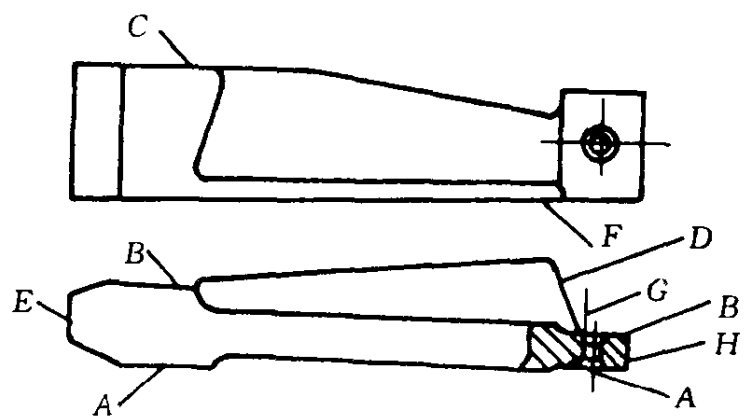


图 11-3 叶片加工中的定位基准面代号

### 11.2.1 叶身型面的加工

#### 1. 叶身型面的几何特点

叶身型面是叶片的主要工作表面。型面由叶盆与叶背组成,其垂直截面上的形状称为叶型。

短小的叶片与有些静止整流器叶片的叶型沿叶高方向是相同的,因此,这些叶片的型面是直纹面。另一类直纹面是使叶片的叶盆或叶背逼近成为圆锥表面的一部分,如图 11-4 所示。直纹面的型面便于加工与检验。

长度较大的叶片为适应气动设计的要求,沿叶高的叶型形状、厚薄与安装角均不相同。

为了保证加工后叶片型面的光顺,叶高各截面上叶盆与叶背的曲线应是光顺的,同时各截面之间沿叶高方向也应是光顺的,为此必须分别对设计给出的曲线上型值点以及对给出的截面进行加密,这时就需应用各种样条函数和曲面光顺的技巧,有时还必须与叶片的气动设计结合起来,通常可用计算机辅助几何造型(CAGD)来完成。

#### 2. 叶身型面的加工方法

叶身型面的粗、细加工可以用靠模车或靠模铣来加工。图 11-5 与 11-6 中示出叶背用靠

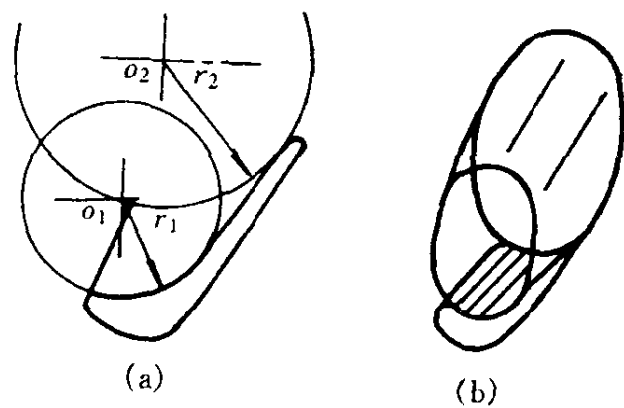


图 11-4 叶身型面为直纹面的另一类情况  
(a)型面的标注;(b)叶身型面为直纹面

模车、铣的原理图。型面的细、精加工也可以用电解加工。成型磨、砂带磨也可用以精加工型面。最终加工通常是用抛光,使表面粗糙度为  $R_a 0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ,型面形状误差在  $\pm 0.1\text{mm}$  左右。通常在抛光与精磨工序中就需要对型面不断地检验以控制抛光的进程。在工作地通常用样板来检验型面。叶片用榫头在测具上定位。沿叶高截面的距离由定距块确定。用塞尺检查实际型面上的曲线与样板之间的误差、通常以透光度表示。样板检验的过程如图 11-7 所示。

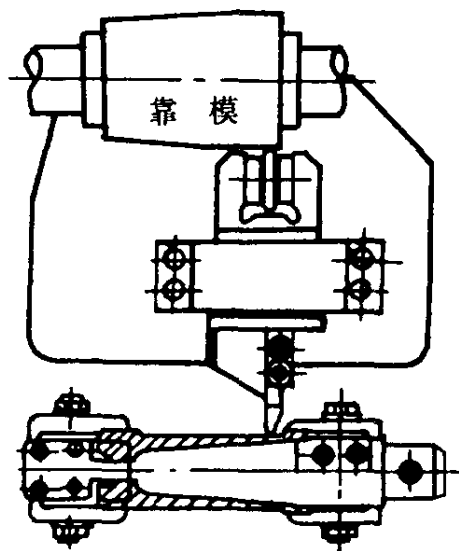


图 11-5 叶背的靠模车削

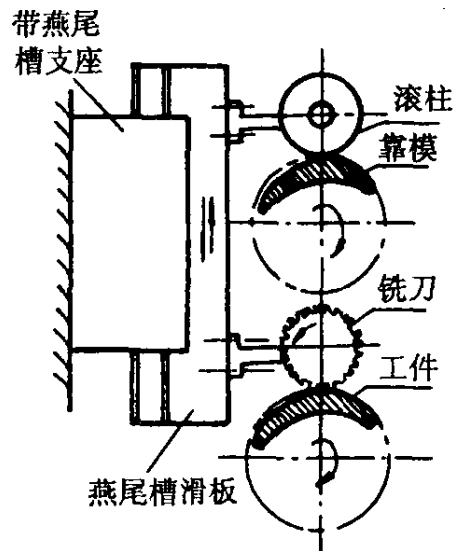


图 11-6 靠模铣叶背的原理图

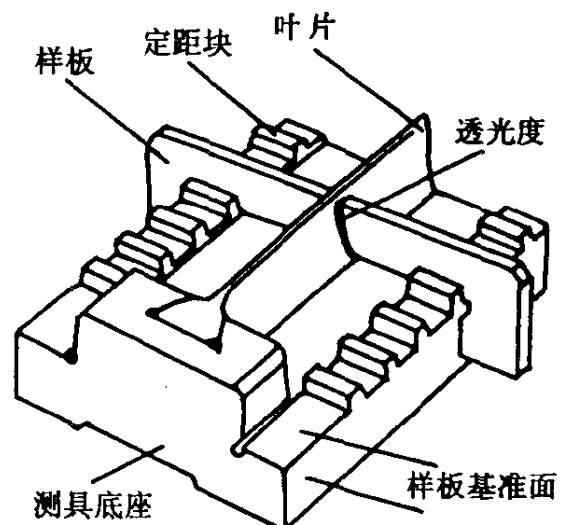


图 11-7 用样板检查叶身型面

为提高测量精度与检验效率,可以使用气动式测量。用一排沿理论曲线排列的小气动喷嘴来代替样板。喷嘴与叶身实际曲面间的间隙与气压降有关。由此可以快速判断曲线是否合格。但气动测具比较精密,只宜在清洁的环境中使用。

### 11.2.2 叶片榫头的加工

榫头加工一般经过粗、精两道工序,粗加工通常用铣,加工出榫头的外形。涡轮工作叶片榫头的铣削如图 11-8 所示。榫头的精加工是加工榫齿,为了保证均匀接触以均匀受力,榫齿的尺寸精度较高,对形状位置公差及表面粗糙度也有严格的要求。例如枞树型榫头各齿节距尺寸误差约为  $0.008 \sim 0.01\text{mm}$ ,榫头中心线对理论位置偏移不大于  $0.1\text{mm}$  并要求榫齿的工作表面沿表面法向的偏差一对齿不大于  $0.02\text{mm}$ 。榫头及转接圆弧要加工到表面粗糙度  $R_a 0.8 \mu\text{m}$ 。

榫齿的精加工可用铣、拉或磨削来完成。由于耐热合金加工性差,用铣削加工枞树型榫头时刀具磨削大,因此进给及切削速度都十分低,生产率也很低。

拉削是通常用来加工榫齿的方法,可以用卧式拉床、立式拉床或侧式拉床来进行。图 11-9 示出用卧式拉床加工枞树型榫齿的情况。这时,对拉刀制造的材料、精度有较高的要求。

榫头加工时要用叶身定位以保证叶身与榫头的相对位置。由于叶身是空间曲面,定位夹

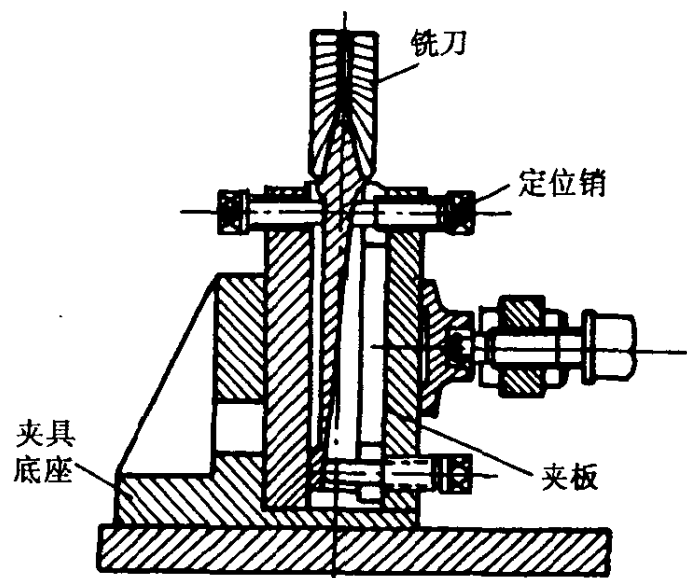


图 11-8 铣削榫头外形

紧均比较困难。如果叶身型面在榫头加工后还要进行抛光等工序,则可选用叶身上几个点来定位夹紧,如图 11-8 与图 11-9 所示。为提高定位的可靠性、避免夹紧力损伤叶身型面,对于叶身型面已经经过最终加工的叶片,加工榫头时可以采用低熔点合金定位法。叶片用叶身型面上的几个点先在定位盆内定位,如图 11-10 所示。然后在盒内注入低熔点合金。当它凝固后就把叶片固定在定位盒内。定位盒外表面加工十分精确,拉削榫头时即可利用这些外表面定位与夹紧,十分方便而牢固。拉完榫头后,将定位盒加温到  $120\sim 140^{\circ}\text{C}$  使低熔点合金熔化流出,即可取出叶片。定位盒能多次反复使用。

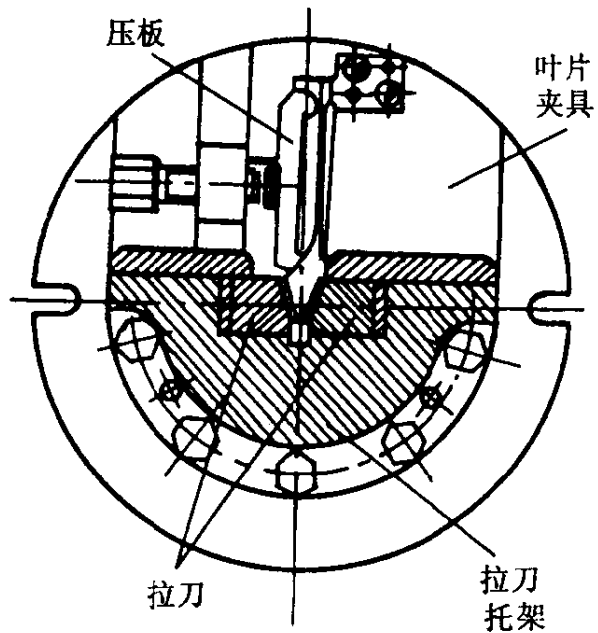


图 11-9 拉削榫齿

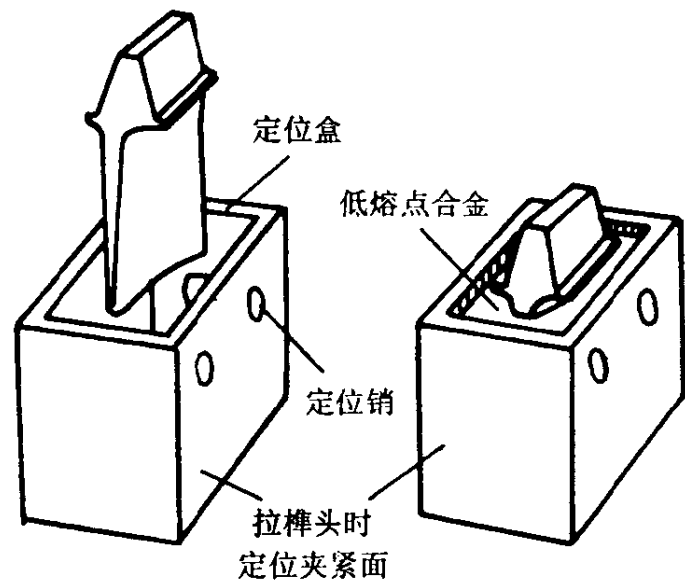


图 11-10 用低熔点合金使叶身在定位盒内固定



## 第 12 章 锅筒制造

国内外各种燃料的自然循环、辅助循环炉型,从 200MW 超高压锅炉到 600MW 亚临界锅炉不同厂商的锅炉锅筒的结构参数范围是:内径 1 524~2 210mm,采用低合金高强度钢的壁厚在 90~155mm,采用 C-Mn 钢时为 130~220mm。筒身的最大长度一般在 30m 以内,锅筒上各类管接头的大小,数量和布置也不相同,有的在封头上布置下降管,有的锅筒甚至没有集中下降管,但布置 3 500 多个分散下降管。锅筒壳体有等厚度和上、下两半不等厚两种形状,封头则比较简单,一般采用球形封头。

锅筒的结构简图如图 12-1 所示。

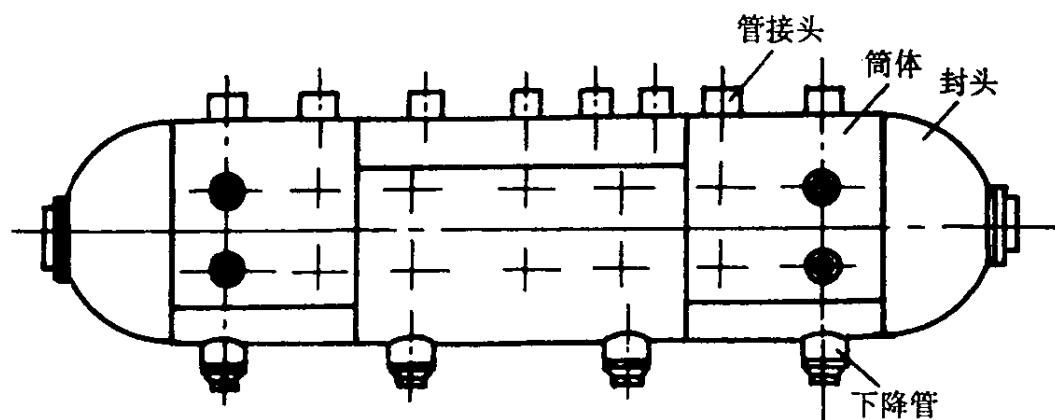


图 12-1 锅筒结构示意图

锅筒是由筒体、封头及管接头等零部件组成的。这些零部件以及整个产品通常采用冷加工或热加工和焊接的方法进行制造,是一种典型的焊接结构。

锅筒拼装时,其接头型式按受力情况和所处的位置可分为四种类型:A 类接头为筒体的纵缝,B 类接头为筒体的环缝。A,B 两类接头为对接接头。从焊缝的受力情况看,A 类接头所受的工作应力比 B 类接头高一倍。A,B 接头都是锅筒的重要焊缝,焊缝要求全焊透。C 类接头为角接接头,所受的工作应力一般较小,但也要求全焊透。D 类接头为接管与筒体相贯接头,由于处于应力集中部位,弹性应力集中系数大致在 1.5~2.5 范围内,焊缝在较高应变状态或较高应力下工作。同时,焊接时刚性拘束较大,容易产生缺陷,这种接头焊缝也是锅筒中的重要焊缝。

### 12.1 锅筒筒节的制造工艺

筒节制造工艺主要程序:划线→气割→涂料→加热→卷板→划割间隙→焊接→涂料→正火→校圆→清理→磨光→探伤→缺陷退修→机加。

工艺简要说明如下:

划线——指毛坯下料线,划下料线同时要留出焊接试板,加工余量及收缩余量并打上各种标记钢印。

气割——可采用半自动气割下料或手工气割下料。

加热——封头毛坯与筒体毛坯的加热是给卷板、冲压及校圆工序做准备,可在煤气加热炉内进

行,加热温度要在再结晶温度以上。

冲压——封头的冲压可在大型的水压机上采用专用模具,热压一次成形。

涂料——钢坯料在卷板前为防止产生卷轧出凹陷,在加热前以及校圆和正火加热前涂刷一层耐高温抗氧化的涂料,这种涂料可以显著减少工艺减薄量(氧化皮)。

卷板、校圆——筒体的卷板和校圆可在卷板机和弯板机上进行。

机加——指筒体端面和封头端面的坡口加工。封头端面坡口加工可在立车上车削,筒体端面坡口加工可在边缘车床上进行,加工时要注意质量,否则给装配,焊接造成困难。

装配——指各筒节装成筒体,装配各管接头,下降管、封头,内部预埋件等,要严格控制装配质量,装配时的定位焊可参见锅筒的焊接。

纵缝焊——采用电渣焊、窄间隙焊或其它组合焊接方法焊接筒节纵缝。

环缝焊——每个筒节组装成筒体时,首先是在内部进行手工底焊,然后在外面采用埋弧环缝自动焊,焊接时带环缝焊接试板。

正火——电渣焊后,为了细化焊缝晶粒,改善接头性能,需进行正火处理。正火可在煤气加热炉内进行。

磨光——纵缝、环缝、下降管角缝焊后应磨光焊缝表面,呈现出金属光泽,为探伤做准备。

探伤——指进行超声探伤、磁粉探伤、X线探伤、检查焊缝及接头质量。

水压试验——指焊后整体热处理完所进行的压力检验。

### 12.1.1 筒节的卷制

表 12-1 示出了 50 年代至今采用过的锅筒筒节制造工艺方法。

表 12-1 锅筒筒节制造方法

序号	50 年代至今采用过的锅筒筒节制造工艺方法	已制造过的锅炉锅筒特厚壁筒节长度水平		筒节工艺制造精度比较
		国外最大	国内最大	
1	卧式卷板机热卷圆 + 一条纵缝焊接 + 焊后同一卷板机正火 校圆 + { 环缝错边用水压机冷校圆度,直径超差错边无法 校 不校圆度	4m	杭州锅炉厂 3.6m	热卷精度不高,在生产中要遇到超差
2	立式卷板机弯圆 + 一条纵缝焊接 + { 同一卷板机校圆度 不校圆度	3.65m	尚未采用过	精度高,裕度较大
3	窄梁弯板机热弯瓦片 + 同一弯板机冷弯校瓦片 + 两条纵缝焊接 + { 环缝错边用水压机冷校圆度 不校圆度	12.5m	尚未采用过	精度能保证,有裕度
4	宽梁弯板机热弯瓦片 + 同一弯板机冷弯校瓦片 + 两条纵缝焊接 + { 环缝错边用同一弯板机冷校圆度 不校圆度	7.5m 最大能力 <9m	哈尔滨 锅炉厂 <7m	精度能保证,有裕度

表 12-1

序号	50年代至今采用过的锅筒筒节制造工艺方法	已制造过的锅炉锅筒特厚壁筒节长度水平		筒节工艺制造精度比较
		国外最大	国内最大	
5	水压机热模压瓦片 + $\left\{ \begin{array}{l} \text{纵缝错边用同一水压机冷校} \\ \text{不校} \end{array} \right\}$ + 两条 纵缝焊接 + $\left\{ \begin{array}{l} \text{环缝错边用同一水压机冷校圆度} \\ \text{不校圆度} \end{array} \right\}$	6m	尚未采用过	精度较高, 裕度很小
6	水压机热模压瓦片 + $\left\{ \begin{array}{l} \text{纵缝错边用同一水压机热校} \\ \text{不校} \end{array} \right\}$ + 两条 纵缝焊接 + 卷板机正火热校圆	尚未采用过	东方锅炉厂	精度较高, 裕度大
7	锻造筒节 + 内外径机械加工		二重厂 3m	精度最高

### 1. 锅筒筒节的划线与下料

锅筒筒节的划线工作就是在钢板上划出锅筒筒节的展开图。在划线时,应注意以下几点:

(1)首先应检查钢板的来料情况。如果来料为毛边钢板,则由于在轧制过程中,钢板边缘部分往往容易形成夹层等缺陷,因而在筒节划线前,必须先划出边缘切割线。然后根据此线进行筒节的划线工作。

(2)划线时,筒节的展开尺寸,应以筒节的平均直径为计算依据。对于热态弯卷的筒节,则应考虑到热卷后钢板的伸长。此时,下料尺寸应比按平均直径计算的展开尺寸小一些。具体数值应根据具体的卷制工艺(如加热温度、卷滚次数等)来确定。通常,下料尺寸大约比按平均直径计算的展开尺寸缩短0.5%左右。实践表明,冷态弯卷时,钢板也有少量的伸长,大约7~8mm左右。另外,卷制后,钢板的厚度也有所减薄,一般热卷时约减薄3~4mm,冷卷及热校圆时约减薄1mm左右。

(3)划线时,还需要考虑筒节的机械加工余量(包括直边切割和坡口加工余量)。

(4)为了便于筒节的装配及锅筒的排孔划线,应根据展开图在钢板上划出锅筒纵向中心线,并打上铰眼,作为筒节装配及锅筒排孔划线的基准线。

(5)锅筒筒节的划线工作是十分重要的工序,如果划线产生错误,将导致整个筒节报废。因此,在划线完成后,必须进行认真仔细的检验。

近年来,在划线工序的改进方面,主要有电子计算机数控划线与电子照相划线(或称感光划线)二种。这些方法的采用,使划线劳动量降低,速度快。

### 2. 锅筒筒节的弯卷工作

筒节的弯卷过程是钢板的弯曲塑性变形过程。在卷板过程中,钢板产生的塑性变形沿钢板厚度方向是变化的。其外圆周伸长,内圆周缩短,中间层保持不变。

为了保证锅筒的制造质量,根据长期生产实践中积累的经验,一般冷态弯卷时,最终的外圆周伸长率应限制在下列范围内:

对于碳素钢,外圆周伸长率 $\leq 5\%$ ;

对于高强度低合金钢,外圆周伸长率 $\leq 3\%$ 。

对于厚板或小直径的筒节通常采用热态弯卷。热态弯卷可以减轻卷板机所需的功率,并可防

止冷加工硬化现象,但也带来了不少麻烦。例如:①把钢板加热到较高的温度会产生严重的氧化现象;②热态弯卷时操作困难;③热卷时,钢板的轧薄较严重;④在弯卷过程中,氧化皮危害较严重,会使筒节的内外表面产生麻点和压坑。

为了消除冷、热卷板的困难,兼取冷、热卷板的优点,近年来提出了温卷的新工艺,即将钢板加热至 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 。在此温度下进行卷制,既可使钢板获得比冷卷时具有稍大的塑性,减少卷板机超载的可能,又可减少氧化皮的危害,操作也较热卷时方便。由于温卷的加热温度一般在材料的再结晶温度以下,因此它实质上仍属于冷加工范围。

弯曲成型是制造筒体的基本方法,厚板弯曲成型方法,国内外两条路线并存。一条是压弯原理的弯板机成型;另一条是卷弯原理的卷板机成型,二者壁厚均已达到 $380\text{mm}$ 水平(见表12-2)。

表12-2 卷板机和弯板机

设备	用户		制造厂	主要规格
最大弯板机	国外	美国 CE公司	西德 Sack	下拉式 $14\,000\text{t}$ 弯板机,热弯板 $380\times 6\,000\text{mm}$ ,热压封头能力 $\phi 4\,500\text{mm}\times 308\text{mm}$
	中国	哈尔滨 锅炉厂	日本	上压式 $8\,000\text{t}$ 宽梁弯板油压机,柱间净距 $4\,900\text{m}\times 6\,800\text{mm}$ ,移动工作台尺寸 $4\,000\text{mm}\times 7\,000\text{mm}$ 机械手最大板壳件重量 $50\text{t}$ ,长度 $2\,000\text{mm}\sim 6\,600\text{mm}$
最大卷板机	国外	比利时 Cockrill	意大利 Boldrini	PS10型卧式水平下调三辊机,上辊液压下压,下辊机械传动,上辊重量 $73\text{t}$ 冷卷 $190\text{mm}$ ,热卷 $380\text{mm}\times 3\,600\text{mm}$
	中国	杭州锅炉厂	第二重型 机器厂	卧式水平下调三辊机,上辊液压下压力 $2\,400\text{t}$ ,辊径 $1\,200\text{mm}$ ,下辊水平移动,热卷能力 $202\text{mm}\times 3\,600\text{mm}$ ,冷卷能力 $95\text{mm}\times 3\,000\text{mm}$

筒节的卷制工作通常是在卷板机上进行的。常用的卷板机可分为三辊卷板和四辊卷板机两类。

用三辊卷板机卷制筒节,如图12-2所示。三辊卷板机的上辊是从动的,它可以上下移动,对钢板产生压力。两个下辊是主动的,依靠它的转动,可使钢板在上下辊之间来回移动,产生塑性变形,使整块钢板卷制成圆筒形。但由图12-2可知,在钢板的两端各有一段无法弯卷的部分,通常称为平直段。平直段的长度与卷板机结构有关,对于常用的对称三辊卷板机,平直段约为其两下辊中心距的一半(即图12-2中 $a$ 的一半)。因此,为了获得完整的圆筒形,在弯卷前,必须先将钢板的两端预先弯制成所需弯曲半径的弧形,此项工作称为预弯。

预弯工作可用各种压力机进行,也可利用预弯模在三辊卷板机上进行,如图12-3所示。在两下辊的上面搁置一块由厚钢板制成的预弯模,将钢板的端部放入预弯模中,依靠上辊把它弯成型。改变预弯模在下辊中的位置以及钢板的伸入长度,便可获得不同的预弯半径。

近年来,在工业上开始应用一些可以直接进行预弯工作的三辊卷板机,以便于卷制工作的进

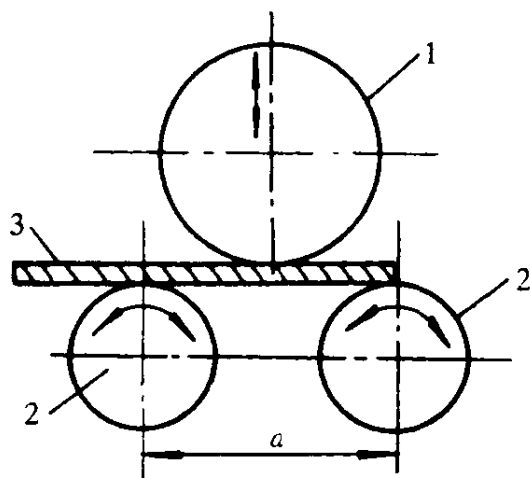


图12-2 三辊卷板机卷制钢板  
1—上辊;2—下辊;3—钢板

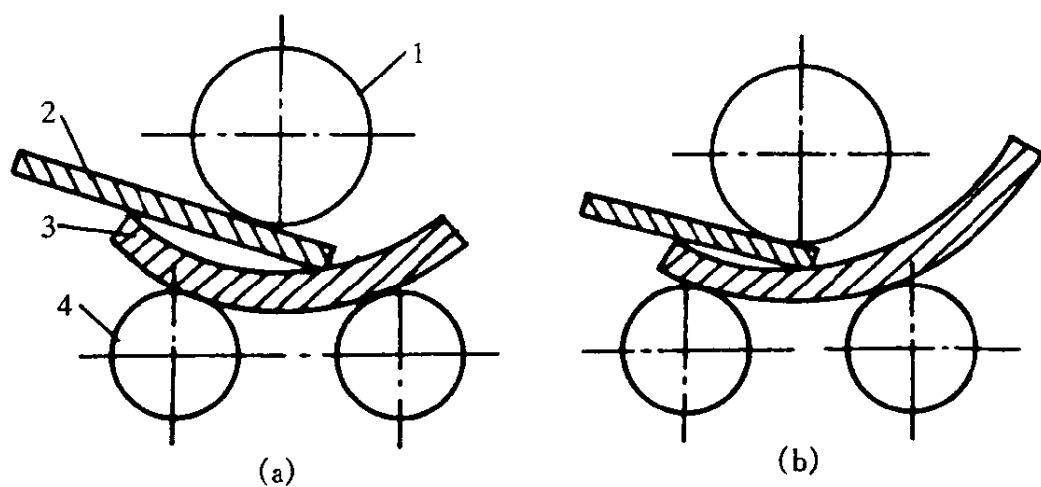


图 12-3 利用三辊卷板机进行预弯工作  
(a)所需弯曲半径较小时;(b)所需弯曲半径较大时  
1—上辊;2—钢板;3—预弯模;4—下辊

行。

对于厚壁圆筒往往采用大型的四辊卷板机进行卷制工作,如图 12-4 所示。这种卷板机的上辊是主动的,电动机通过减速箱带动上辊转动。下辊可上下移动,用以夹紧钢板,两侧辊可沿斜向升降,用以对钢板施加变形力。四辊卷板机也可进行预弯工作,依靠下辊的上升,把钢板端头压紧在上下辊之间,然后利用侧辊的移动,使钢板端部发生弯曲变形,达到所要求的曲率。

由于四辊卷板机设备庞杂,投资费用较高,近年来,逐渐有被各种新型的三辊卷板机所代替的趋势。

### 12.1.2 筒节纵环缝焊接

国外发展起来的厚壁筒节的纵缝主要焊接方法有电渣焊、单丝或多丝埋弧自动焊的常规焊接工艺以及可焊更大厚度的窄间隙焊与电子束焊等先进焊接工艺。国内目前生产中应用的是前三种,已从国外引进窄间隙埋弧自动焊机,并制造了双丝埋弧自动焊机,已经解决生产中的问题。除电渣焊外,其他焊接方法纵环缝均适用。我国锅炉厂用单丝埋弧自动焊工艺,已经焊接了多台 300MW 亚临界自然循环锅炉锅筒。锅炉锅筒有近百米主焊缝,对 BHW35,厚 145mm 锅筒纵环缝焊接的制造工艺要求是:

(1)为保证焊接质量稳定和焊接接头性能,对每一条内、外纵缝和每一条外环缝,均采用自动焊工艺。

(2)由于板较厚,沟槽深,熔敷道数多,焊接持续时间长,应严格执行筒节的充分预热。中断焊接时充分保温,焊后及时消氢处理,焊丝必须去除油污,加强对焊接过程中焊道可能出现的缺陷的观察检查,以减少或避免厚壁焊缝返修。

#### 1. 焊接坡口

选择锅筒坡口的基本原则是,尽量采用全焊透的焊接坡口形式,尽量减小筒体内部的工作量,改善劳动条件。因此,内部宜选用小坡口,尽量减小填充金属量。外部应根据板厚,焊接方法和接头类型分别采用不同型式的坡口。

(1)埋弧自动焊坡口:若板厚 $<14\text{mm}$ 可不开坡口(图 12-5);板厚为 $14\sim 22\text{mm}$ 时多开 V 形坡

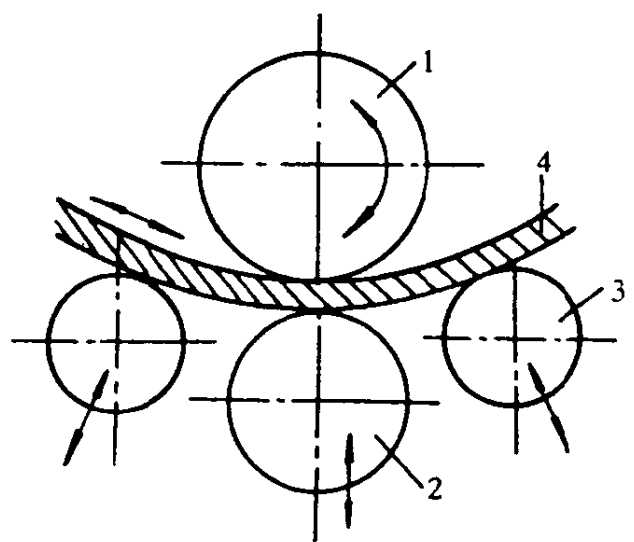


图 12-4 四辊卷板机的工作原理  
1—上辊;2—下辊;3—侧辊;4—钢板

口(图 12-6);板厚 $>22\text{mm}$ 时,多开 U 形坡口(图 12-7)和 U,V 混合形坡口(图 12-8)。

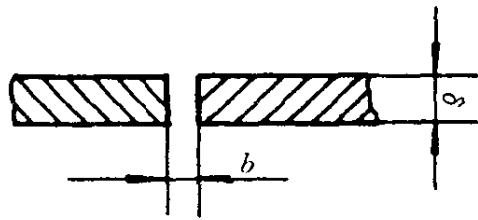


图 12-5 I形坡口

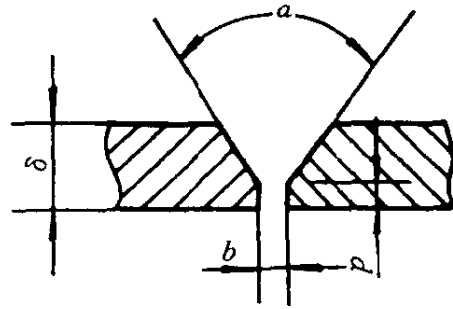


图 12-6 V形坡口

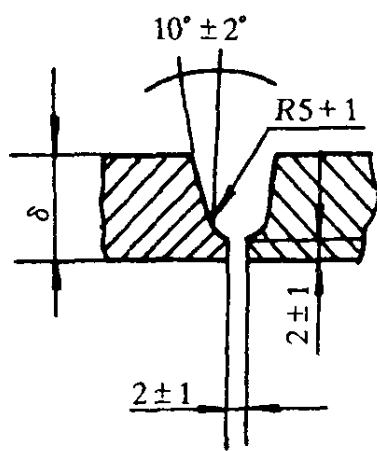


图 12-7 U形坡口

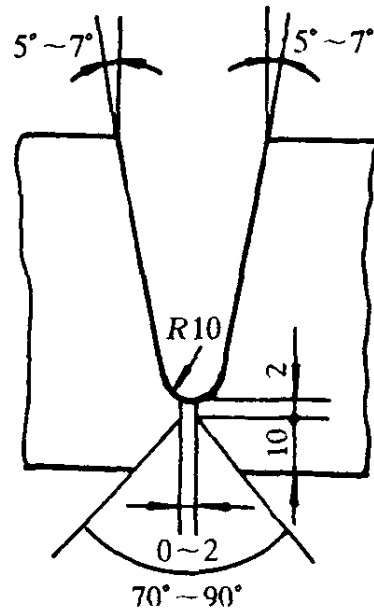


图 12-8 U,V混合形坡口

(2)窄间隙埋弧自动焊坡口:厚壁容器壳体的窄间隙埋弧自动焊可以采用图 12-9 所示的三种坡口形式。带固定衬垫或装有陶瓷衬垫的坡口主要用于筒体纵缝焊接,环缝多采用第三种坡口形式。

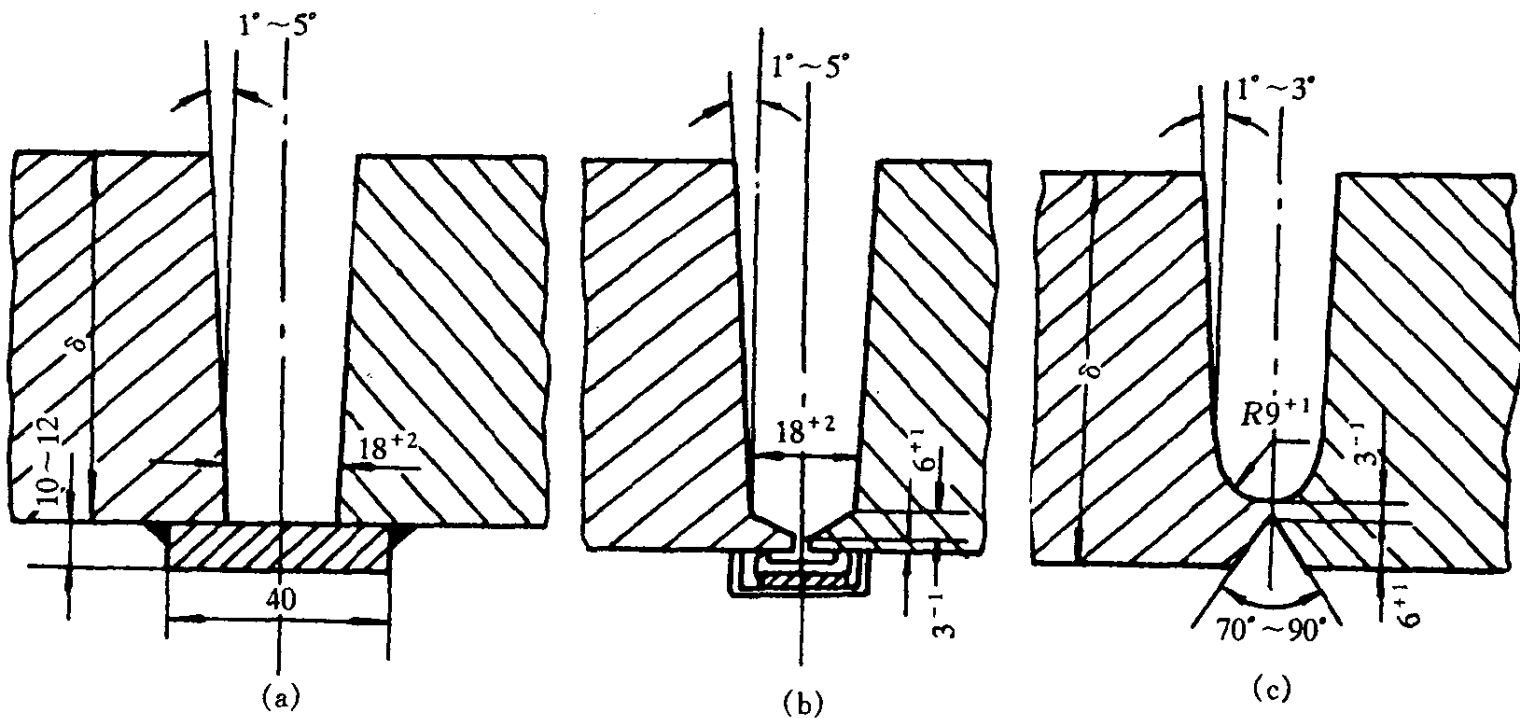


图 12-9 窄间隙埋弧焊通用的坡口形式

(a)固定衬垫单面焊坡口;(b)陶瓷衬垫单面焊坡口;(c)背面封底的单面焊坡口

(3)手工焊坡口:环缝打底焊坡口(图 12-8),装配间隙及钝边为 2mm 左右;管接头坡口型式如图 12-10 和图 12-11 所示。

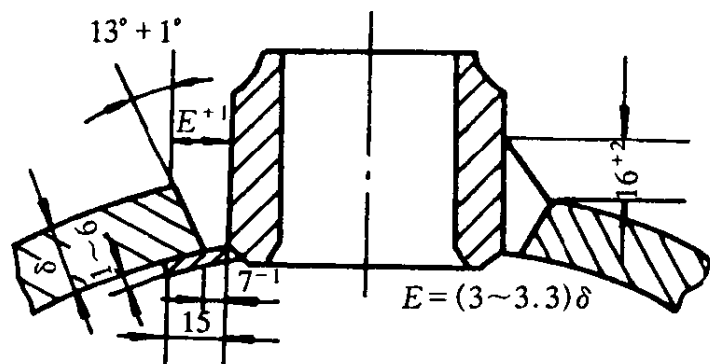


图 12-10 全焊透管接头坡口

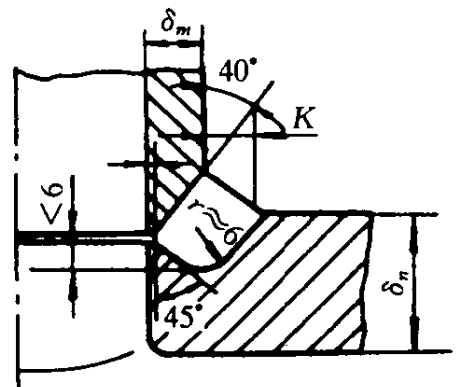


图 12-11 马鞍形管接头坡口

(4)坡口加工:可采用刨边或车削,手工打底焊后的清根,可采用碳弧气刨或风铲进行。

## 2. 焊前准备

(1)手工焊:首先要检查坡口尺寸及装配质量,错边量不大于 1.5mm,焊件装配必须保证间隙均匀,高低平整,坡口处和坡口边缘 10~20mm 范围要将锈蚀、油污、氧化皮、水分等杂质清理干净,露出金属光泽,焊条经 250~400℃ 2h 烘干,随取随用。

(2)埋弧自动焊:坡口装配质量和清理要求同手工焊。焊丝表面的锈蚀、油污等必须清理干净,如有局部弯折必须在盘丝时校直,焊剂经 350~300℃ 烘干 2h 后方可使用。

(3)电渣焊:工件装配前,必须将焊缝的熔合面及其附近 40~50mm 处(筒体内外)清理干净,露出金属光泽,焊缝两侧要保持平整、光滑,必要时可进行砂轮磨光或进行机械加工以使冷却铜块能贴紧工件和顺利滑行。工件装配前,为便于冷却铜块的安装与通过,多采用“Π”形“马”铁来固定工件位置。工件装配间隙一般为 20~40mm。由于电渣焊是一次焊接成形,且加入的填充金属量较多,所以焊缝的收缩量较大,装配间隙应留有收缩余量和反变形,一般焊缝上端间隙比下端要大些,其差值的大小视焊缝长度而定,焊缝越长,差值越大。装配时,接头错边量 $\leq 1.5\text{mm}$ ,且在焊缝始端装焊 50~70mm 高的引弧板,焊缝末端装焊 75~80mm 高的引出板,焊丝除油锈,有局部折弯处盘丝时校直。焊剂经 250~300℃ 2h 的烘干,根据工件焊缝的体积,确定焊丝用量,每次焊接前所准备的焊丝,必须保证能足够焊完一条焊缝。焊丝如需接头要事先焊好,并且接头要牢固和光滑。另外,焊前应对焊机各部分进行检查调试,水冷却铜块要预先通水试验。需要有应急措施,如准备适量石棉泥,以便发生漏渣时及时堵塞,不使电渣过程的稳定遭到破坏。

(4)窄间隙埋弧自动焊:近年来,随着窄间隙焊接技术的发展,在厚壁锅筒纵、环缝的焊接工作中,有用窄间隙焊接取代电渣焊接和埋弧自动焊接的趋势。这主要是因为厚壁锅筒上采用窄间隙焊接更能发挥其生产率高、成本低、焊接质量好的优点,而且,可以去除电渣焊后所必须进行的正火处理,从而简化了锅筒的制造工艺程序。目前使用较多的窄间隙焊是窄间隙埋弧自动焊,根据锅炉制造厂的使用经验,窄间隙埋弧自动焊可以采用图 12-12 所示的三种工艺方案,即每层单道焊,每层双道焊和每层三道焊。每层单道焊工艺方案适用于 70~150mm 的工件厚度,而每层双道焊的厚度使用范围为 100~300mm。焊件厚度在 300mm 以上时可选用每层三道焊工艺。表 12-3 同时示出了窄间隙埋弧自动焊在实际生产中采用的典型的焊接工艺规范参数,以供参考。

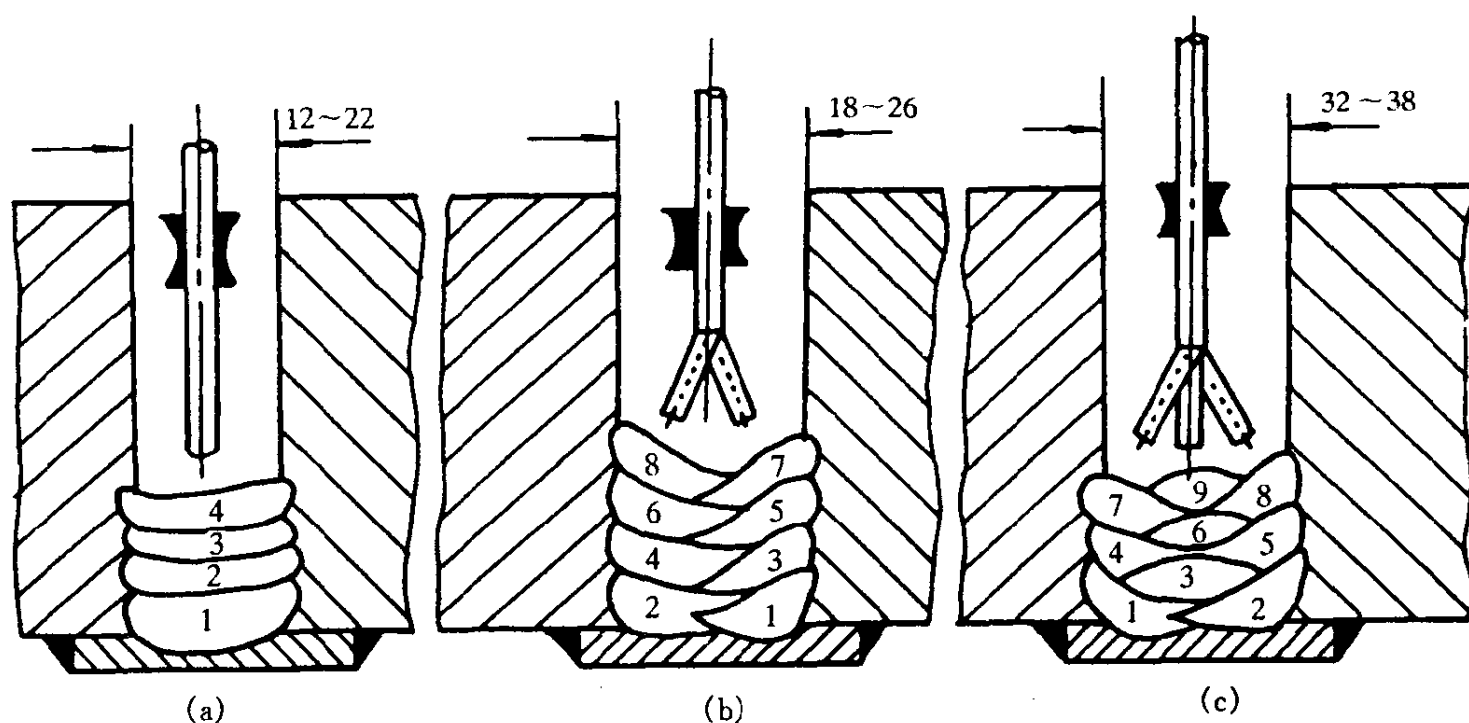


图 12-12 短间隙埋弧焊的三种基本工艺方案

(a)每层单道焊;(b)每层双道焊;(c)每层三道焊

表 12-3 窄间隙埋弧焊的典型规范参数

工艺方法	每层焊道数	焊 丝		坡 口 根部间隙 (mm)	坡口倾角 (°)	电流种类 及极性	电 流 (A)	电 压 (V)	焊接速度 (m/h)
		根数	直径 (mm)						
每层单道焊 (日本川崎)	1	1	3.2	12	3	交 流	425	27	11.0
		1	3.2	18	3	交 流	600	31	15.0
		2	3.2	18	3	交 流	(前置)600 (后置)600	32 28	27
每层单道焊 (日本钢管)	1	1	3.2	12	7	直 流 反 极	450~550	26~29	15~18
每层双道焊 (瑞典伊莎)	2	1	3.0	18	2	直 流 反 极	525	28	24
每层双道焊 (苏联巴东)	2	1	3.0	18	0	交 流	400~425	37~38	30
每层双道焊 (哈 锅)	2	1	3.0	20~21	1.5	直 流 反 极	500~550	29~31	30
	2	1	4.0	22	1.5	直 流 反 极	550~580	29~30	30
每层三道焊 (西 德)	3	1	5.0	35	1~2	交 流	700	32	30

## 12.2 封头的制造工艺

对于不同参数的锅炉,封头的型式是不同的。低压锅炉常采用平封头或椭圆形封头;中压锅炉,一般采用椭圆封头;高压及超高压锅炉,则采用半球形封头。封头的制造工艺过程大体上包括下列各道工序。

原材料检验——划线——切割下料——加工焊接坡口——封头毛坯拼板的装配与焊接——毛坯成型——热处理——封头边缘余量切割——质量检验。



### 12.2.1 封头毛坯展开尺寸的计算

#### 1. 平封头毛坯尺寸的计算

通常,平封头的毛坯尺寸有下列两种计算方法:

(1) 周长法 假定毛坯直径  $D_0$  等于平封头纵截面的周长,并考虑一定的加工余量。

$$D_0 = d_2 + \pi\left(r + \frac{S}{2}\right) + 2h_0 + 2\delta$$

式中  $\delta$ ——封头边缘的机械加工余量。

其余各符号见图 12-13。

生产实践表明,按此式计算所得的平封头毛坯直径是偏大的,应根据实际生产情况予以适当的修正。

下式是以周长法为基础的经验计算式:

$$D = d_n + r + 1.5S + 2h_0$$

当  $h_0 > 5\%d_n$  时,式中  $2h_0$  值应以  $(h_0 + 3\%d_n)$  代入。

(2) 面积法 假定封头毛坯面积等于成型封头的面积,再考虑一定的加工余量。为了简化计算公式,可以忽略不计圆角半径  $r$ 。此时,计算公式为

$$\frac{\pi}{4}D_0^2 = \frac{\pi}{4}(d_n + S)^2 + \pi(d_n + S)(h_n + \delta)$$

由此可得  $D_0 = \sqrt{(d_n + S)^2 + 4(d_n + S)(h_n + \delta)}$

#### 2. 椭圆形封头毛坯尺寸的计算

椭圆形封头的形状较复杂(参看图 12-14),通常其毛坯直径都是用近似计算方法来确定的。

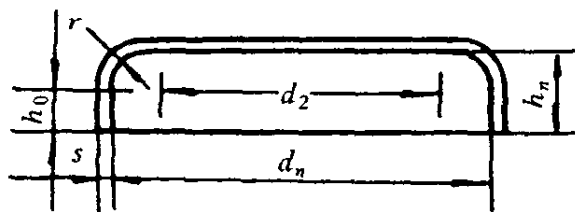


图 12-13 平封头简图

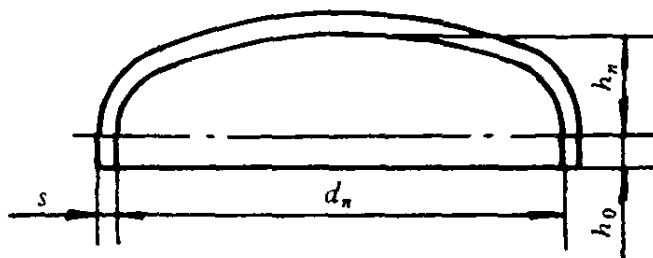


图 12-14 椭圆形封头简图

椭圆形封头(包括碟形)坯料的经验计算公式为

$$D_0 = k(d_n + s) + 2h_0$$

式中  $k$ ——经验系数,可根据椭圆半长轴  $a$  与半短轴  $b$  的比值按表 12-4 确定。

式中其余符号见图 12-14,当  $h_0 > 5\%d_n$  时,式中的  $2h_0$  值应按  $h_0 + 5\%d_n$  代入计算。

表 12-4 经验系数  $k$  值

$\frac{a}{b}$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
$k$	1.42	1.38	1.34	1.31	1.29	1.27	1.25	1.23	1.22	1.21	1.19	1.18	1.17	1.16	1.16	1.15	1.14	1.13	1.13	1.12	1.12

锅筒所用的椭圆形封头,通常采用标准椭圆,即  $\frac{a}{b} = 2.0$  的椭圆。因此,锅筒椭圆形封头毛坯直径在实际计算时,经验系数取  $k = 1.19$ 。

#### 3. 球形封头毛坯尺寸的计算

球形封头的毛坯尺寸通常根据面积法计算。此时：

$$\frac{\pi}{4} D_0^2 = \frac{1}{2} \pi d_n^2 + \pi d_n (h_n + \delta)$$

$$D_0 = \sqrt{2d_n^2 + 4d_n(h_n + \delta)}$$

式中  $\delta$ ——球形封头边缘的机械加工余量。

其余符号见图 12-15。

此外,也可接近拟公式计算:

$$D_0 = 1.43d_n + 2h_0$$

当  $h_0 > 5\%(d_n - S)$  时,式中  $2h_0$  值应以  $h_0 + 5\%(d_n - S)$  代入。

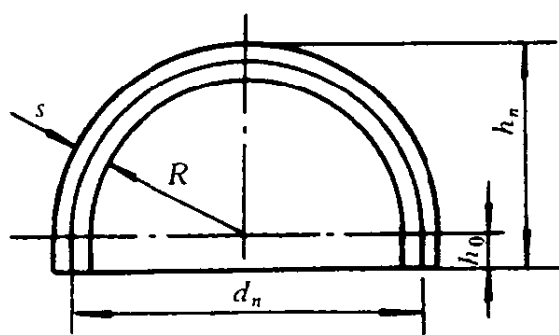


图 12-15 球形封头筒图

### 12.2.2 封头的冲压成型与受力分析

锅筒封头的冲压成型,一般在 800~8 000t 的冲压水压机或油压机上进行。

图 12-16 是封头冲压的典型过程示意图,上冲模与下冲模(冲环)分别装在水压机的两个抵铁之上,将加热的钢板坯料放在下冲环上并与冲环对正中心(图 a)。而后让压边圈下降压紧钢板(图 b),开动水压机,使上冲模下降与钢板坯料接触,并继续下降加压使钢板产生变形(图 c)。随着上冲模的下压,毛坯钢板逐渐包在上冲模表面并通过下冲环(图 d 及 e)。此时,封头已冲压成型,但由于材料的冷却收缩已卡紧在上冲模表面,需用特殊的脱件装置使封头与上冲头脱离。常用的脱件装置是滑块,一般沿圆周有三个或四个滑块。当冲压变形完了时,将滑块推入,压住封头边缘(图 f)。待上冲模提升时,封头被滑块挡住,即从上冲模表面脱落下来,从而完成了整个冲压过程。这种方法称为一次成型冲压法。由低碳钢或普通低合金钢制成的通用尺寸封头,均可一次成型进行冲压。

图 12-17 示出了椭圆形封头和球形封头冲压后,材料各部分壁厚变化的情况。由图中可知,对于椭球形封头,通常在接近大曲率部位变薄最大,碳钢封头减薄可达 8~10% s;球形封头在接近底部范围内减薄较严重,可达 10%~14% s。

### 12.2.3 封头冲压工艺与影响质量因素分析

通用无孔封头的冲制过程已如上述,当封头有椭圆人孔(或圆孔)时,一种结构是封头冲制后,再切割人孔,焊上加强圈;另一种结构是在钢板上割出人孔预切椭圆,在热态下进行翻孔工序。采用何种结构型式由设计者根据批量、工厂条件、经济性与经验决定。一般工业锅炉厂采用前面一种方法,生产电站锅炉制造厂因采用球形封头,一般在封头上开圆形人孔即可。

封头冲制后再在翻孔模上进行外翻孔(扳出)如图 12-18 所示,化工容器应用较多。

工业锅炉封头人孔的内翻孔工序,一般是在封头冲压过程中进行的。先在钢板坯料上割出人

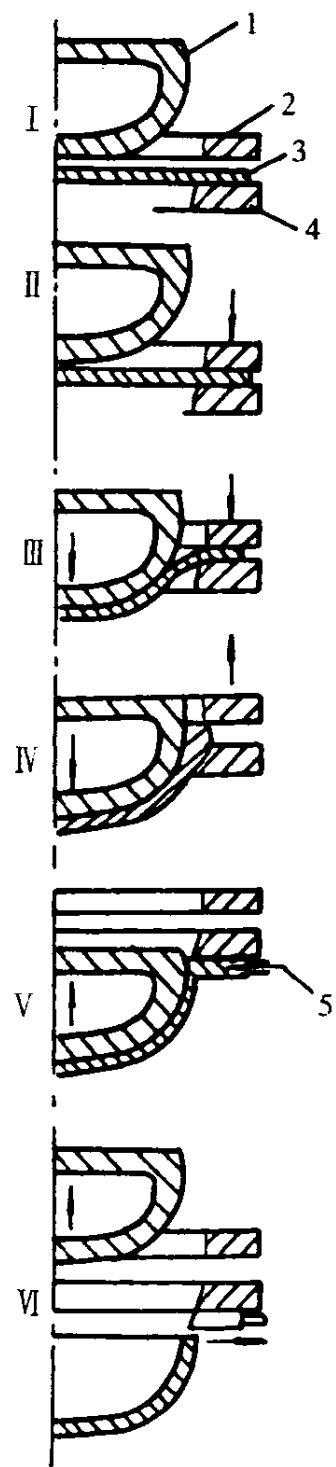


图 12-16 封头冲压过程

1—上冲模;2—压边圈;  
3—封头坯料;4—下冲环;  
5—脱件装置

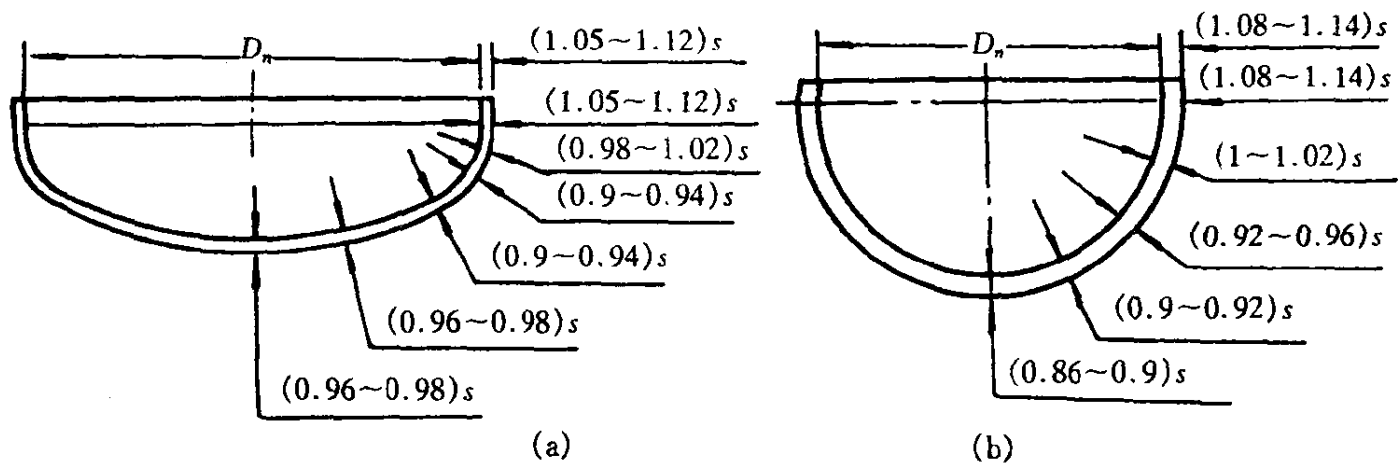


图 12-17 大型钢制封头冲压后的壁厚变化  
(a) 椭球形; (b) 球形

孔预切椭圆, 上冲模在此起着冲封头凸模和翻孔冲环两个作用, 其典型结构如图 12-19 所示。上冲模 1 的内部是中空的, 有圆角  $r$  的内圈相当于内翻孔的冲环。在压力机下抵铁的冲环 3 下面, 另安装一个人孔翻边冲头 4。因此, 钢板坯料被上冲模压下后, 先经封头冲压成形, 继续下降, 再经人孔翻孔扳边工序。区别于图 12-18 的只是翻孔冲头在此是固定的(也可下板铁向上运动翻孔), 运动着的上冲模内孔起翻孔的冲环作用。

对于薄壁封头(一般指  $D_0 - d_n > 45s$ ), 即使采用带有压边圈的一次成形法, 也会出现鼓包和皱折现象。因此, 常采用两次成形法, 如图 12-20(a), 第一次冲压采用比上冲模直径小 200mm 左右的下冲模, 将毛坯冲压成碟形, 可以将 2~3 块毛坯钢板重叠起来进行成型; 第二次采用与封头规格相配合的上下模模具, 最后冲压成形。

对于厚壁封头(一般指  $D_0 - d_n < 8s$  时), 因毛坯较厚, 边缘部分不易压缩变形, 尤其是球形封头, 在成形过程中边缘厚度会急剧增加, 需要很大的冲压力, 并导致底部材料过分拉薄。因此在压制厚壁封头时, 常事先把封头毛坯车斜面, 再进行冲压, 如图 12-21 所示。

封头是采用热态还是冷态冲压, 主要依据下列两个因素, 即封头材料性能和封头坯料的尺寸大小。

(1) 封头材料性能 常温下塑性较好的材料可考虑采用冷态压制, 如铝及铝合金。热塑性较好的钢材, 一般应采用加热冲压。因冲压过程中钢板受力复杂, 变形很大, 热态冲压则有利于材料变形, 可避免加工硬化现象和产生裂纹, 易于保证封头质量。

(2) 封头坯料尺寸 主要看封头坯料  $D_0$  与厚度  $S$  的关系。当封头较薄时, 即:

$$\frac{S}{D_0} \times 100 < 0.5 \quad \text{—— 碳素钢或低合金钢}$$

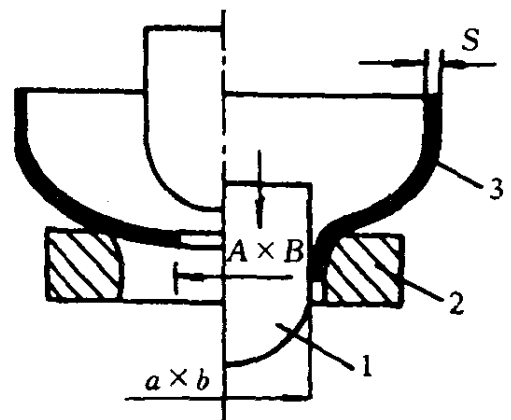


图 12-18 外翻孔示意图  
1—上冲头; 2—冲环; 3—封头

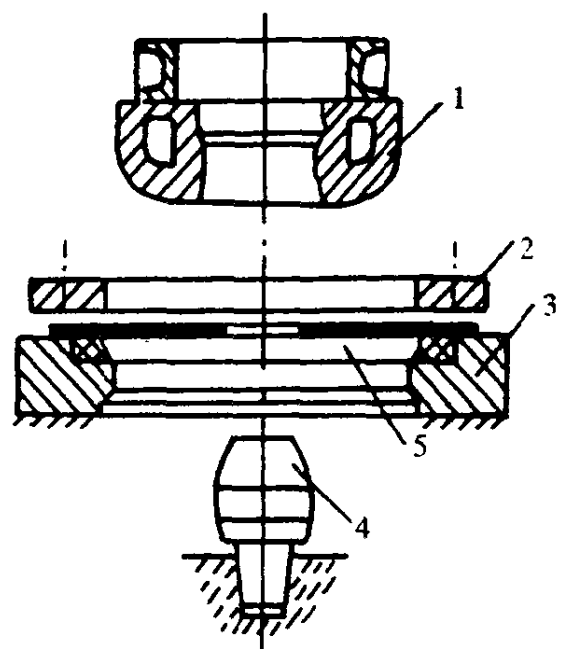


图 12-19 带人孔封头压制示意图  
1—上冲模; 2—压边圈; 3—冲模与冲环;  
4—人孔翻孔冲头; 5—坯料

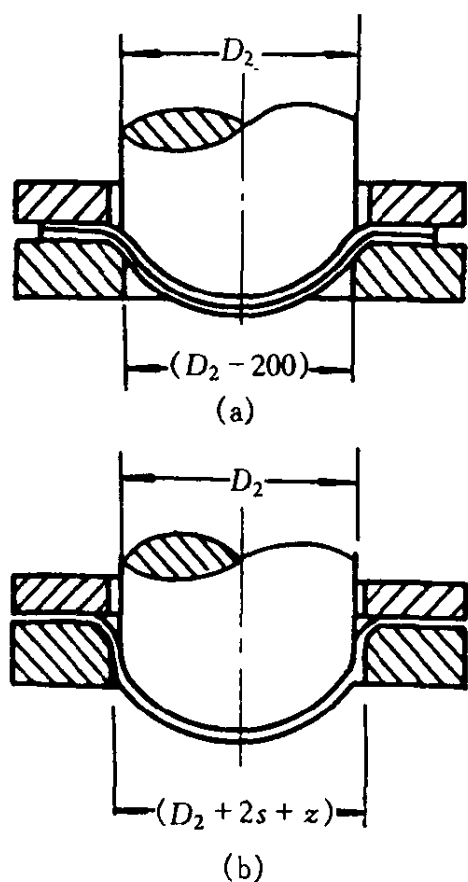


图 12-20 薄壁封头两次成形法  
 $D_2$ —上冲模直径;  $Z$ —间隙

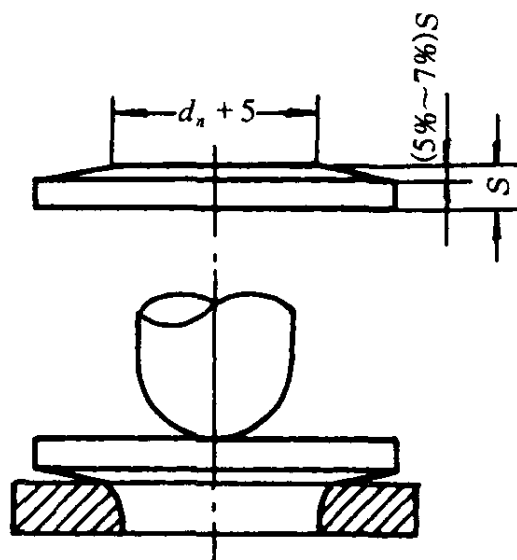


图 12-21 厚壁封头的压制

$$\frac{S}{D_0} \times 100 < 0.7 \quad \text{—— 不锈钢或合金钢}$$

可以采用冷态冲压封头。

当封头较厚时,即

$$\frac{s}{D_0} \times 100 \geq 0.5 \quad \text{—— 碳素钢或低合金钢}$$

$$\frac{s}{D_0} \times 100 \geq 0.7 \quad \text{—— 不锈钢或合金钢}$$

应采用热态冲压封头。

几种常用材料的加热范围可参考表 12-5。

表 12-5 常用封头材料的加热规范

钢材牌号	加热温度/℃	终压温度/℃	冲压后的热处理温度/℃
15g	≥1100	≤850	880~920
20g	≥1100	≤850	880~910
22g	≥1100	≤850	880~900
10CrMo910	≥1100	≤850	910~940
12CrMoV	≥960	≤900	890~920
12Cr1MoV	≥1100	≤850	880~910
1Cr18Ni9Ti	≥1150	≤950	—

一般来说,当满足下式时,便需要采用压边圈。

$$\frac{S}{D_0} \times 100 \leq 4.5(1-K)$$

式中  $D_0$ ——封头毛坯直径；

$S$ ——封头毛坯厚度；

$K$ ——材料拉伸系数,通常可取 0.75~0.80。

因此,在实际生产中,往往需要根据具体情况确定需要采用压边圈的范围。例如,根据国内某些厂的实践经验,对于椭圆形热压封头的压边范围为

$$D_0 - d_n \geq (18 \sim 20)S$$

式中  $D_0$ ——封头毛坯直径；

$d_n$ ——封头内径；

$S$ ——封头壁厚。

对于球形封头,压边范围为

$$D_0 - d_n \geq (14 \sim 15)S$$

对于平封头,压边范围为

$$D_0 - d_n \geq (21 \sim 22)S$$

封头冲压时常采用的润滑剂如表 12-6。

表 12-6 板料压制时常用的润滑剂

工 件 材 料	润 滑 剂
碳素钢	石墨粉+水
不锈钢	石墨粉+水,滑石粉+机油+肥皂水
铝	机油,工业凡士林
钛	二硫化钼,石墨+云母粉+水

#### 12.2.4 封头的爆炸成型

爆炸成型是一种高能成型工艺,它是利用炸药爆炸时所产生的高温高压气体,通过介质的传递,在极短的时间内(通常在 0.001s 内)产生巨大的冲击波施加于毛坯钢板上,使之产生塑性变形,从而获得设计上所要求的几何形状和尺寸。

爆炸成型具有下列特点:

(1)质量好 可确保工件达到所要求的几何尺寸,表面光洁,壁厚减薄现象不严重。工件经退火处理后,机械性能可进一步得到改善。

(2)设备简单,不需要大型的复杂设备。

(3)操作方便,生产率高,成本低,对于成批生产的封头尤为显著。

爆炸成型可分为有模成型和自由成型两类。前者是指毛坯在爆炸冲击波的作用下迅速贴向模壁,形成与模具形状相同的零件。后者是指毛坯各部分在不同压力冲击波的作用下发生自由变形,形成所需形状的零件。封头的爆炸成型通常采用自由成型方式。

#### 12.2.5 封头的旋压成型

60 年代以来,随着压力容器的大型化,大型薄壁及厚壁封头的制造成为迫切需要解决的问题。此时,如果仍采用冲压成型法,不但需要吨位大、工作台面宽大的水压机,冲压模具成本高,而且制

造质量不能保证。旋压成型法就是在这样条件下逐渐得到广泛采用的,如图 12-22。

旋压成型法具有下列优点:

投资省,能适应大型化产品的发展。旋压成型所需的设备与冲压设备相比,体积小、重量轻,特别是在制造大型封头时,旋压成型更能发挥其优越性。采用旋压法,目前已可制造  $\phi 5\,000$ ,  $\phi 7\,000$ ,  $\phi 8\,000\text{mm}$ ,甚至  $\phi 2\,0000\text{mm}$  的超大型封头。

模具费用低,适合单件小批量生产。旋压成型只需要几套简单的压鼓模和翻边内滚轮,就可旋压多种尺寸规格的封头,因而模具费用低,且灵活性大。

成本低、节约能源、操作简单、劳动条件好。总的来说,采用旋压法还是冲压法来制造封头主要取决于两方面的因素:一是生产批量问题,单件小批生产以旋压法较经济,成批生产可采用冲压法;二是尺寸问题,薄壁大直径封头以采用旋压法较合理,厚壁小直径封头用冲压法较适宜。

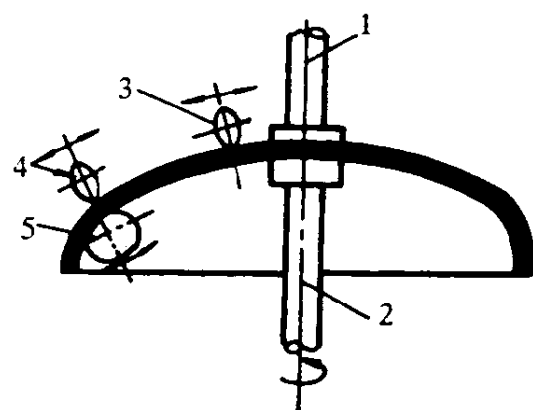


图 12-22 旋压成型法示意图

1—上主轴;2—下主轴;3—外旋辊 I;  
4—外旋辊 II;5—内旋辊

### 12.2.6 成型封头的端面加工与质量检验

封头在冲压或旋压过程中,由于毛坯钢板边缘的相互的挤压,使封头的直边部分增长且参差不齐,这多余部分必须切除,同时将封头端面加工出焊接坡口,以使与锅筒筒身焊接。

切割边缘可以用氧气切割或机械加工。为保证坡口尺寸及边缘整齐,一般多在立式车床上进行加工,如多余部分过长,可先进行氧气切割,再进行车削加工。

封头的质量检验包括封头的表面状况、几何形状和几何尺寸等。

封头表面状况的检查主要是检查其表面是否有起皱裂纹、划痕、凹坑及起包等。封头不允许有裂纹、重皮等缺陷。对于微小的表面裂纹和距人孔圆弧起点大于 5mm 处的裂口,经检验部门同意可进行修磨或补焊。但修磨后的钢板厚度应在厚度的允许偏差范围之内。

对于起包,凹陷和划痕等缺陷,当其深度不超过件厚的 10%,且最大不超过 3mm 时,可将其磨光,但需保证平滑过渡。

## 12.3 锅筒与管件的连接

### 12.3.1 排孔划线与钻孔

在锅筒上进行排孔划线应以钢板下料时划出的锅筒纵向中心线(纵向基准线)为依据。但由于在锅筒制造过程中,此基准线可能产生偏差,因此在排孔划线前,应予以校核。校核工作可按下述方法进行。

将锅筒在滚轮架上旋转,并使纵向基准线处于其顶部,然后在锅筒的一端搁置直尺,用水平仪找平直尺。在直尺两端挂线与锅筒外壁相切。此时,在直尺的一端用锅筒的外半径长度在锅筒顶部划出中心点。用同样方法以直尺的另一端为中心,也在锅筒上划出中心点,参看图 12-23,根据在锅筒两端划出的这两个中心线点,定出锅筒的纵向中心线。另一方面,由于锅筒是由几段筒节和两个封头拼接而成的,制成后锅筒的总长度往往与图纸上规定的尺寸有偏差。根据生产实践的经验,当环缝采用埋弧自动焊接时,锅筒的总长度一般比规定尺寸略长;当采用手工电弧焊接时,锅筒

的总长度一般比规定尺寸略短。因此,为了确保管孔位置的准确性,锅筒的横向中心线(横向基准线)应根据锅筒中间一段筒节来确定,也就是根据中间筒节两端焊缝中心之间的距离定出横向中心点。在锅筒的外圆周上每隔  $45^\circ$  划出一个横向中心点,连接这些点,便得到横向中心线(横向基准线)。然后以横向中心线为依据,按图纸要求,向锅筒两端排出管孔位置。

管孔的加工往往需分几步进行。首先是用直径较小(通常为 24mm 左右)的麻花钻头在锅筒上管孔中心钻出定位孔,作为大直径钻头的定位对中孔。其次用大直径钻头或扩孔割刀进行扩孔,直至所需直径。第三步进行端面扩钻,加工出管座。对于胀接管孔,最后还需进行一次精加工,以保证管孔表面有足够的光洁度。

### 12.3.2 锅筒与管件的连接

锅筒与管件的连接方法可采用焊接连接,也可采用胀接连接。

这两种连接方法各有优缺点和其适用范围。焊接连接能保证连接部分具有较高的强度和较好的严密性,但需消耗一些焊接材料,而且在检修时更换管件较不方便。胀接连接具有操作简便,更换管子方便,不需消耗其他材料等优点。但连接处的强度和严密性相对较差。通常,对于中压、高压、超高压及更高压力的锅炉,由于锅筒承受压力较高,因此保证连接处具有较高的强度和较好的严密性便成为主要矛盾,此时应采用焊接连接。对于低压水管锅炉和火管锅炉,往往采用胀接连接,但目前这类低压锅炉的胀口在实际运行过程中由于原先胀接力的不均匀和胀接力随着时间延长而减小出现泄漏的情况很多,低压锅炉的胀接连接也已逐步被淘汰,因此,胀接目前在锅炉制造厂一般只用来消除管子和管孔内壁的间隙。

#### 1. 锅筒与管件的焊接连接

锅筒与管件的焊接连接,对于大型锅炉来说,一般都是先在锅筒上焊以管接头(短管)。在锅炉安装时,再将管件与管接头对接焊合。管接头的数量很多,焊接工作量大。由于其焊接工作是围绕管接头圆周,在锅筒弧形表面上进行的,加以锅筒与管接头的壁厚相差悬殊,因此长期来未能使其焊接工作实现自动化。近年来,在生产上已采用了一些管接头自动焊接设备,这是近 10 年来锅炉制造行业中的一项重大革新。

管接头自动焊接的方法可采用埋弧自动焊,也可采用气体保护焊。管接头采用自动焊可使工效大大提高,以焊接  $\phi 89 \times 14\text{mm}$  的管接头为例,采用埋弧自动焊可比手工电弧焊节省 30% 的工时。

锅筒与和管件采用焊接连接时,需注意下列几点:

(1) 焊接管孔的最小允许节距:如前所述,焊接热影响区是焊接连接中组织和性能较差的部位,往往在此区域引发裂纹,导致破坏。因此,避免两相邻焊缝的热影响区重合,是确定两相邻焊缝间所允许的最小距离的基本出发点。锅筒上焊接管孔间的最小允许节距也应根据这一原则予以确定。国家标准 GB/T16508-1996 规定,相邻焊接管孔焊缝边缘净间距不得小于 6mm,如焊后进行热处理时,可不受此限制。

(2) 焊缝的形状:锅筒与管件的焊接连接一般均为角接焊缝。通常,角接焊缝的抗剪面为  $45^\circ$  方向,如图 12-24 中的(a)截面。凸形截面角焊缝(图 12-24(c))与母材之间为突变式过渡,其应力集中程度很大;而凹形截面角焊缝(图 12-24(b))与母材间为平滑过渡,其应力集中程度较小。

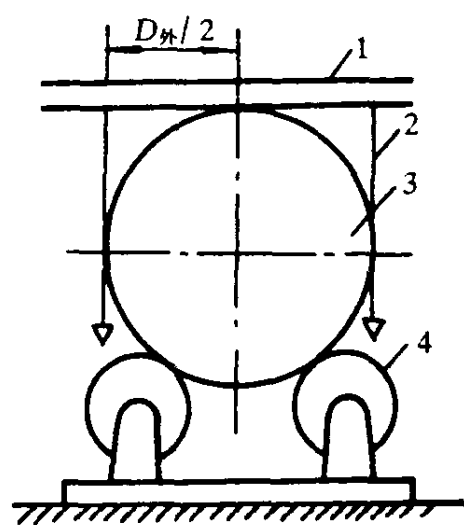


图 12-23 锅筒吊中示意图

1—直尺;2—挂线;3—锅筒;  
4—滚轮台

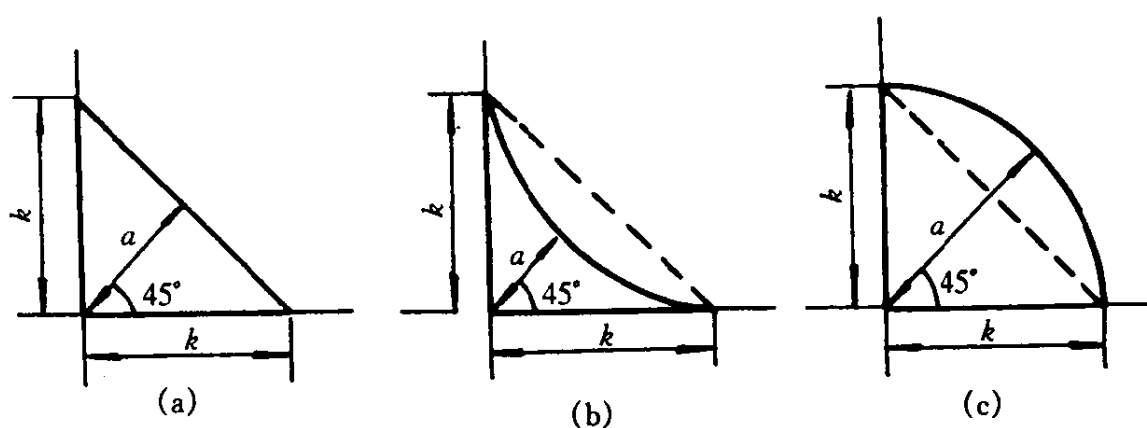


图 12-24 角接焊缝的截面形状

(a)等腰三角形截面;(b)凹形截面;(c)凸形截面

由此可知,从连接安全性看,在保证角焊缝具有足够的抗剪面尺寸  $a$  的情况下,采用凹形截面为最佳。但是,凹形截面在焊接时较难实现,在实际生产中以采用介于凹形与凸形截面之间的等腰三角形截面的角焊缝为宜。

(3)焊脚高度尺寸的确定:在焊缝形状确定后,焊脚高  $k$  值的大小直接关系到角接焊缝抗剪面的大小,从而影响焊缝的抗剪能力。通常,可根据管件的壁厚大致上确定焊脚高。此时,可参照表 12-7 选取。

表 12-7 焊接管接头的焊脚高度尺寸

管件壁厚 $S_1$ /mm	角接焊缝的焊脚高 $k$ /mm
$S_1 \leq 3$	4
$3 < S_1 \leq 4.5$	$S_1 + 1.5$
$S_1 > 4.5$	$S_1 + 3$
锅壳式锅炉的拉撑管	$S_1 + 3$

## 2. 锅筒与管件的胀接连接

锅筒与管件的胀接连接通常是在锅炉安装时进行的。对于低压小容量快装锅炉,胀接工作是在锅炉制造厂内组装时进行。在进行胀管之前,应先将管件端头胀接部分进行退火,使管端材料的硬度低于锅筒材料的硬度,管端应磨光至发出金属光泽。胀管前,可在管子内壁涂少许黄油,然后把胀管器插入管中进行胀接。胀管率按规定选取,欠胀和过胀都不能保证胀接质量,过胀还会因管壁减薄太多而导致管子开裂。

在锅筒和管件采用胀接连接时,必须根据胀接管孔间的最小允许节距来确定锅筒上胀接管孔之间的距离。

国家标准 GB/T16508—1996 和 GB9222—1988 标准规定,对于胀接管孔,管孔最小中心距  $t \geq \frac{10}{7}d$ ,其中  $d$  为管孔直径。

## 3. 锅筒与管件采用胀接与焊接相结合的连接方式

对于某些次中压锅炉或采用焊接连接的焊缝位于锅炉的烟气侧时,为了封闭水侧管件与管孔之间的间隙,防止水中的碱分在间隙中浓缩沉积结垢而导致裂纹,往往采用胀接与焊接相结合的连接方式。此时,必须正确地选择胀接与焊接的工艺顺序。其理由是:

(1)采用先焊后胀工艺顺序时,焊接时产生的大量气体可由管件与管孔之间的间隙向外逸出,从而减少了焊缝中产生气孔的机率。



(2)在采用先焊后胀工艺顺序时,由于胀接工作在焊好后进行,因而机械胀接时的油污对焊接质量无影响。

(3)采用先焊后胀工艺顺序时,在连接部位存在的残余应力小于采用先胀后焊工艺顺序时的值。

(4)如果采用先胀后焊工艺顺序,则在胀后进行焊接时,由于角接焊缝的应力作用,使管端发生收缩变形,致使管件与管孔胀接的贴紧程度降低,甚至会出现缝隙。如果焊缝中的缺陷与该缝隙连通,则会由于受到腐蚀介质的影响而引起腐蚀坑,成为应力腐蚀开裂的裂源。

由上述四方面可以明显地看出应该采用先焊接后胀接的工艺顺序。根据不同的作用和要求,又可有三种不同作用的焊接与胀接的配合方式,即强度焊配合贴胀、强度焊配合强度胀和密封焊配合强度胀。

所谓强度焊和强度胀是指连接接头的强度和严密性均由焊接或胀接单独给予保证。所谓贴胀是指胀接只起到使管子外壁与管孔壁面紧密贴合消除间隙的作用。此时采用的胀管率一般小于1%,即  $H < 1\%$ 。所谓密封焊是指连接焊缝主要起保证接头严密性的作用,而焊缝的强度可能不满足连接强度的需要。关于怎样的焊缝属于密封焊,日本规定:对于碳素钢,采用  $\phi 3.2$  或  $\phi 4.0\text{mm}$  以下的焊条,只焊一道焊缝作为密封焊。美国凯洛格公司规定:凡焊缝的抗剪面长度小于1.4倍管子实际壁厚时的焊缝作为密封焊。

在上述三种焊接与胀接的配合方式中,以强度焊配合贴胀得到最广泛的采用,而在电厂高、低压给水加热器制造中,小直径管和厚管板的连接则采用强度胀配合密封焊的连接方式,至于是先胀后焊,还是先焊后胀,这和所采用的焊接方法、胀接方法以及工厂的经验有关。

#### 4. 锅筒的翻边管接头

翻边管接头就是从筒壁上直接顶拉或冲压出一个管接头,以便与管子连接。这种管接头目前已在锅筒、集箱、球形压力容器以及核能容器上得到应用。其主要优点是:

(1)与普通补强的接管接头相比,应力集中情况有明显降低。节省材料及焊接工作量,因而成本低。

(2)由于管接头与容器壁是圆滑过渡,流动介质不易形成涡流,故介质流动阻力小。

(3)翻边工作简便。特别是对于现代化大型锅炉的大直径下降管,采用焊接管接头往往应力集中十分严重,而且在焊缝区域很易产生裂纹等缺陷。采用翻边管接头就可避免这些缺点。

翻边管接头的制造过程是:首先在锅筒筒节(或封头)上预开出适当尺寸的孔(生产经验表明,对于内径为307mm和346mm的大直径下降管,预开孔直径可取为150mm和160mm);然后进行局部加热,加热温度对翻边质量有很大影响,温度太低或太高都会导致翻边时管接头端部撕裂。对于碳素钢和低合金钢,其加热温度可取在850~1100℃之间,具体数值视钢种而定。加热后的翻边工作可利用模具依靠液压千斤顶进行预拉,也可依靠各种压力机进行冲压翻边。我国武汉锅炉厂曾将翻边管接头用于410t/h锅炉的集中下降管,获得了良好的效果,经现场测试翻边管接头内壁最大应力集中系数为2.1左右。

## 12.4 锅筒的组焊和总装工艺

根据锅筒制造公差的保证手段,从缩短制造周期、改善内部预埋件施工条件、合理利用组装场地与设备,以及适应传统生产习惯的需要出发,国内外锅炉制造厂家采用的锅筒组焊总装工艺方法,可归纳为下面四种组合方式:

按管接头在总装中组装程度不同,有如下两种:

(1)大段筒体上先焊好管接头,再合拢成锅筒。其中仅有妨碍在滚轮架上滚动的几排管接头,待合拢后再补焊上。

(2)大段筒体合拢成锅筒后,再装焊全部管接头,这一方法又有两种不同程序。

①大段筒体先钻好管孔后进行合拢。

②大段筒体合拢后再进行管孔的切割加工和钻孔。

按锅筒内部预埋件组装程度不同,又有如下两种:

(3)壳体合拢前,先焊好预埋件,这一方法也有两种程序:

(1)留下一端封头或两端封头,待预埋件焊好后,最后再焊上。

(2)两大段各焊好预埋件,合拢后再补焊上合拢处预埋件。

(4)封头、筒节全部总装成壳体后,再焊全部预埋件。

东方锅炉厂在制造第一台 300MW 锅炉汽包时,为了缩短制造周期,曾采用过总装合拢前大段筒体焊好管接头和总装合拢后焊预埋件的组装方法,而以后几台生产仍采用工厂传统锅筒组装工艺,即总装合拢后再焊全部管接头和预埋件。

汽包的组焊总装工艺中,大直径厚壁下降管和其他直径的连接管的角焊缝焊接方法,国外有自动焊、半自动焊和手工焊三种方法,管接头自动焊是先进的焊接工艺。值得指出的是 MZM-500 埋弧自动焊马鞍形国产焊机,用于焊接插入式下降管角焊缝后,对提高焊接效率,保证焊接质量稳定,改善劳动条件等方面已取得了明显效果。

我国锅炉厂 300MW 自然循环锅炉锅筒的碳钢和合金钢所有管接头的焊接,至今仍全部采用手工焊。

## 12.5 锅筒制造中的热处理

为了保证锅筒的制造质量,在锅筒制造过程中,往往要经过多次各种热处理工作,主要包括锅筒筒节纵向焊缝电渣焊的正火处理,高强度低合金钢锅筒的调质处理及锅筒的退火处理。

### 12.5.1 锅筒筒节的正火处理

采用电渣焊接的锅筒筒节,其焊缝金属的结晶组织是十分粗大的柱状晶粒。为了改善焊缝金属的晶粒组织和机械性能,焊后必须进行正火处理,细化晶粒。

正火的加热温度通常取为钢材的  $A_3 + (30 \sim 50)^\circ\text{C}$ 。通常采用在静止空气中冷却的方法。图 12-25 示出了中压及高压锅炉筒节的正火处理规范。

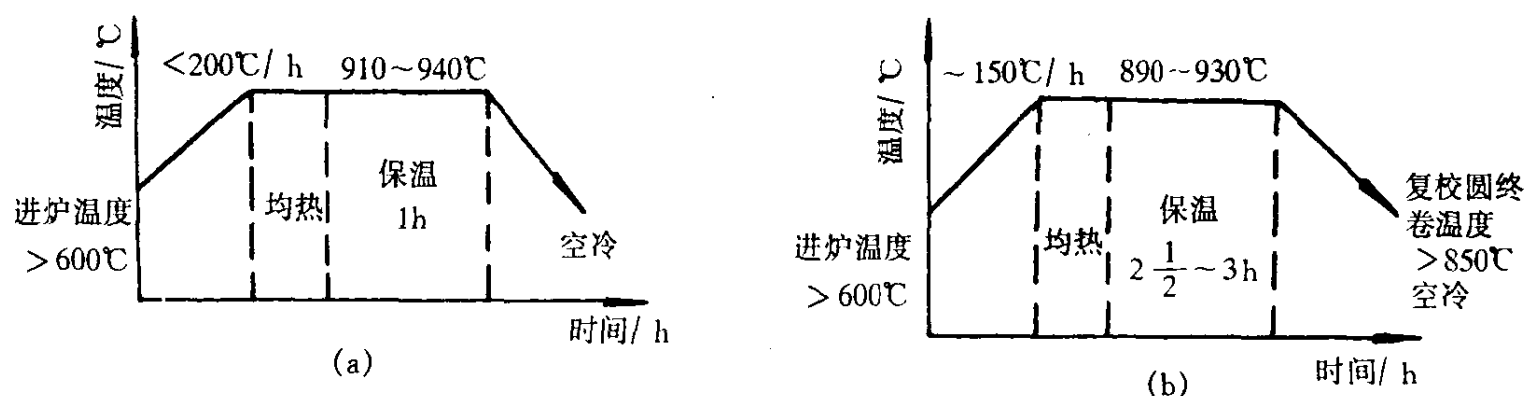


图 12-25 锅筒筒节的正火处理规范

(a)20g 筒节,壁厚 46mm;(b)19Mn6 筒节,壁厚 92mm

### 12.5.2 高强度低合金钢锅筒的调质处理

热处理工艺是提高低合金钢性能的重要手段之一。通过热处理可使低合金钢的强度性能大大提高,塑性和韧性得到改善,获得良好的综合力学性能,使低合金钢的潜力得到充分发挥。

对于低合金钢来说,要获得优良的综合机械性能,必须使材料在热处理后具有细小而均匀的晶粒组织,并且其中碳化物比较均匀地分布在基体组织上,这样既能保证钢材具有高的强度性能,又能保持较好的塑性和韧性。通常对于低合金钢均可采用正火+回火的热处理制度。对于厚钢板来说,如果仍采用正火+回火的热处理制度,则由于其冷却速度比薄工件小得多,就不能保证材料获得均匀细密的显微组织,从而使强度和韧性降低。由此可知,为了获得良好的综合机械性能,对于低合金钢厚板必须提高热处理时的冷却速度。

高强度低合金钢的加速冷却处理也可采用喷淋淬火的方法。此时,不需要大型的淬火水槽及一套起吊工具,设备较简单。采用喷淋淬火能否达到要求,主要决定于是否有足够的喷水量,以保证必须的冷却速度。

热成形后的受压元件一般需进行正火或回火处理,以使所要求的性能得到恢复。我国电站锅炉厂在制造 200MW 发电机组锅炉锅筒(采用 BHW35 低合金高强钢板,壁厚 95mm)时采用的热成形过程是:

加热卷板→电渣焊→加热校圆→正火校圆+回火

其中,加热卷板温度为  $990^{\circ}\text{C} \sim 1025^{\circ}\text{C}$ ,终卷温度  $\geq 850^{\circ}\text{C}$ ;加热校圆温度为  $940^{\circ}\text{C} \sim 960^{\circ}\text{C}$ ,终校温度  $\geq 800^{\circ}\text{C}$ ;正火校圆+回火热处理规范如图 12-26 所示。

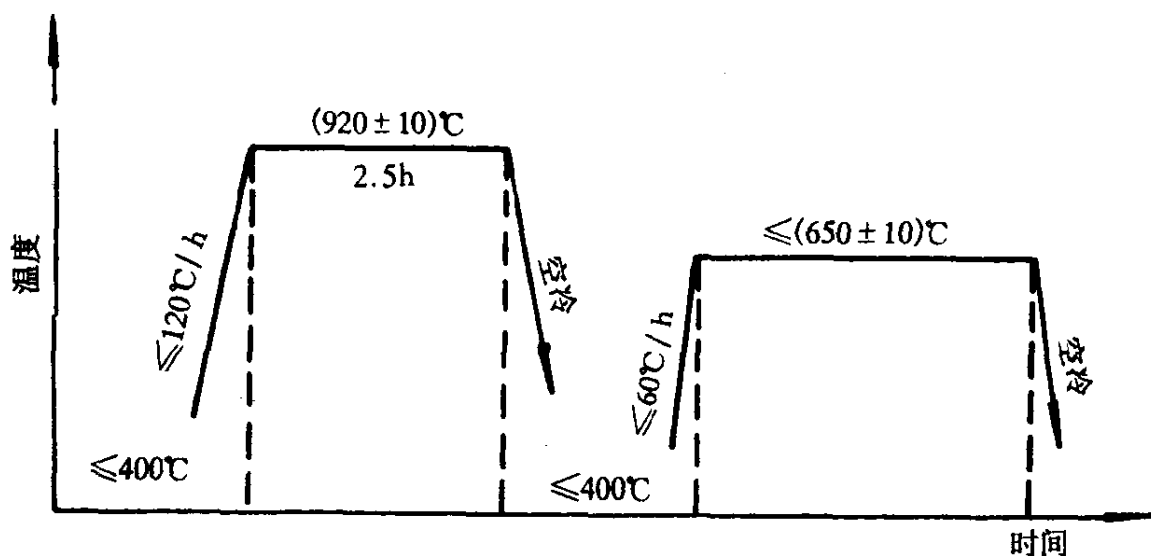


图 12-26 正火校圆+回火热处理规范(BHW35,壁厚 95mm)

冷成形一般会导致拉伸强度提高及韧性降低,因此冷成形后的低合金高强度钢板的冷加工变形大小也应该进行限制。一般情况下,当冷加工应变  $\leq 2\%$  时,可不进行热处理;当应变大于  $2\%$  小于或等于  $5\%$ ,可进行焊后热处理;当冷加工应变大于  $5\%$  时,也应进行正火+回火处理。

### 12.5.3 锅筒的焊后热处理

锅筒焊后热处理是保证其制造质量的重要措施之一。它可达到以下目的:①消除残余应力,稳定构件尺寸;②改善构件母材与焊缝的性能,亦即改善焊缝金属及热影响区的塑性和韧性;③提高构件抗应力腐蚀的能力;④析出焊缝区域的有害气体特别是氢气,防止延迟裂纹;⑤提高耐疲劳强度和蠕变强度。

锅筒及压力容器在进行焊后热处理时必须考虑的各因素列于表 12-8 中,可供参考。

表 12-8 锅筒及压力容器焊后热处理的主要考虑因素

条 件	加热温度的上限	加热温度的下限	保温时间的上限	保温时间的下限	加热速度的上限	加热速度的下限	冷却速度的上限	冷却速度的下限	出入炉温度的上限
必须考虑的因素	1. 在材料相变温度以下 2. 调质钢回火温度以下 3. 不使母材焊缝其他性能恶化〔注1〕	1. 保证清除应力效果 2. 保证硬化部分软化〔注2〕 3. 释放出氢等气体	1. 母材及焊缝的使用性能不恶化〔注1〕 2. 缩短制造时间	1. 保证清除应力效果 2. 保证硬化部分软化〔注2〕 3. 释放出氢等气体	1. 厚件、重型件的温差不均匀 2. 由于形状和尺寸引起的不均匀	1. 退火炉的控制条件 2. 缩短制造时间	1. 厚件、重型件的温差不均匀 2. 由于形状和尺寸引起的不均匀 3. 考虑残余应力、变形及裂纹	1. 退火炉的控制条件 2. 考虑母材和焊缝的性能	1. 由于形状尺寸变化的不均匀 2. 考虑残余应力、变形及裂纹
备 注	〔注1〕使用性能例如:强度极限、延伸率、冲击韧性、断裂韧性以及在使用条件下的耐蚀性等。 〔注2〕按材料与使用目的不同,对应力腐蚀、氢脆等特别重要。								

锅筒及压力容器的焊后热处理通常采用整体进炉热处理方法。这样,锅筒整体的温度均匀,而且温度易控制,能有效地消除残余应力,而且热处理时的热损失较少,费用较低。其主要缺点是需要大型加热炉,设备投资费用大。特别是随着锅筒及压力容器的大型化,往往使整体进炉加热处理发生困难。此时,只有采用局部热处理的方法。局部热处理的优点是:①无需固定的加热炉,操作灵便;②采用电气式局部加热时,可用热电偶控制温度,准确方便;③仅需对必须热处理的局部进行热处理工作。其主要缺点是由于产生了加热部分与未加热部分的温度差,因而消除残余应力的效果比整体热处理稍差,因此,大型锅炉制造厂一般都进行整体进炉加热。根据表 12-8 提出的锅筒焊后热处理时应考虑的诸多因素,锅炉制造厂在实际生产中不断实践和总结,对一些常用锅筒材料总结出了表 12-9 所示的锅筒焊后热处理常用工艺参数。

表 12-9 锅筒焊后热处理工艺参数

序号	部件名称	材料牌号	壁厚 mm	焊后热处理工艺参数					
				入炉温度 ℃	升温速度 ℃/h	保温温度 ℃	保温时间 h	冷却速度 ℃/h	出炉温度
1	锅筒	19Mn6	90~100	≤400	≤60	560±10	5	炉冷	≤400
2	锅筒	19Mn6	90~100	≤400	≤60	560±10	5	炉冷	≤400
3	锅筒	BHW35	85~100	≤400	≤70	600±10	7	炉冷	≤400
4	锅筒	SA299	200	≤400	≤55	621±14	3.5	≤55	≤400
5	锅筒	SA299	168~200	≤400	≤55	621±14	3.5	≤55	≤400
6	锅筒	19Mn6	100	≤300	≤150	535±15	3.5	炉冷	≤400
7	锅筒	BHW35	92	≤300	≤100		3.5~4	炉冷	≤300
8	锅筒	BHW35	145	≤300	≤100	560±15	5	炉冷	≤400
9	锅筒	SA299	203	≤300	≤100	620±15	3.5	炉冷	≤300

局部热处理的方法很多,应用较普遍的是电感应局部加热,这种方法生产效率高,操作自动化程度高,设备较简单,控制温度准确。

利用气体红外线加热器单元可以很方便地组装成适合于焊缝的形状进行热处理工作。

70年代初以来,还提出了用机械法消除残余应力,也就是利用有控制的超压过载方法使元件产生局部屈服的办法释放焊缝区的残余应力。施加的超应力越高,机械的消除应力就愈完全。从理论上讲,当元件整体达到屈服状态时,残余应力可完全被消除。

采用控制超压的方法来消除元件的残余应力时,必须注意以下几点:①必须事先用无损探伤方法查明元件中没有重大缺陷;②加压超载时,不会使元件产生扭曲变形;③加载过程应在元件钢材的脆性转变温度以上进行,亦即要保证钢材始终处于韧性状态;④元件产生的局部屈服应变宜控制在5%以下,防止产生严重的硬化现象。

## 12.6 锅筒制造中的检验

锅筒制造中的检验工作包括原材料检验、锅筒元件检验、锅筒焊接缺陷检验以及锅筒致密性检验四个方面。

### 1. 原材料的检验

对每批材料需在钢板两端割取试样进行化学成分、力学性能、金相分析等检验。此外,还需检查钢板的表面质量和尺寸偏差是否符合要求。对于制造中压、高压及超高压锅筒的锅炉钢板还应逐张进行超声波检查。

### 2. 锅筒元件的检验

在锅筒制造过程中,必须对锅筒封头、筒节等元件的制造质量及其相互装配质量进行仔细的检验。主要是检验元件的表面质量、几何形状和尺寸偏差以及管孔位置偏差等,应按照相应的制造技术条件中的规定进行。

### 3. 锅筒焊接缺陷的检验

#### (1) 常见的焊接缺陷及其分析:

锅筒焊接中常见的缺陷主要有以下几种:

#### ① 焊缝几何尺寸不符合要求:

焊缝长度和宽度不够、焊道宽狭不齐、表面高低不平、焊缝高度低于母材、焊脚两边不均等都属于焊缝几何尺寸不符合要求。尺寸过小的焊缝使接头强度降低,尺寸过大的焊缝则浪费焊接材料,增加元件的变形。

焊缝几何尺寸不符合要求的主要原因是:焊件坡口角度不恰当或装配间隙不匀;焊接电流过大或过小;焊接速度不当或焊条倾角不合适;电弧长度控制不稳等。

#### ② 焊缝的形状缺陷:

所谓形状缺陷是指焊缝表面形状可以反映出来的不良状态。它在一定程度上会降低焊缝的质量。常见的形状缺陷有如下几种:

**咬边** 这是指由于焊接参数选择不当,或操作工艺不正确,沿焊趾的母材部位产生的沟槽或凹陷。咬边分为内咬边、外咬边或者焊缝两侧同时咬边等几种,如图 12-27 所示。

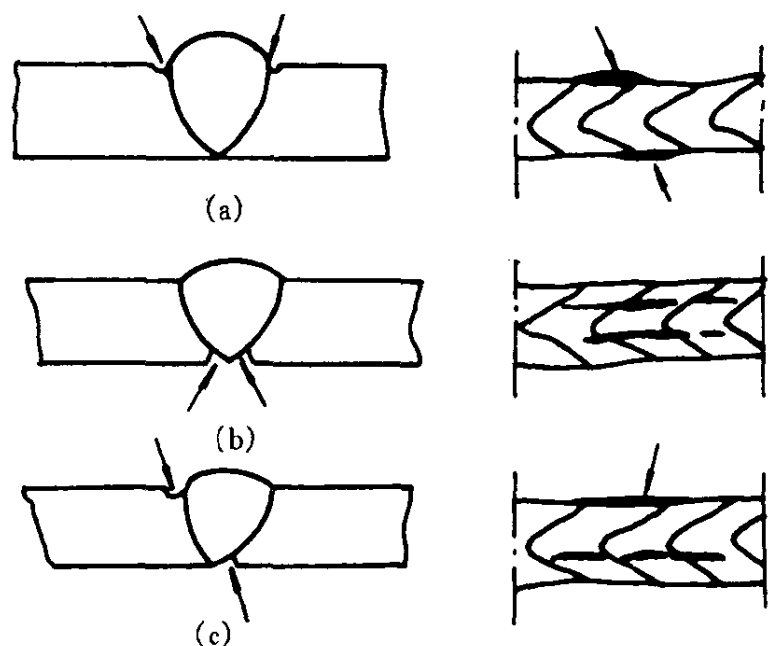


图 12-27 咬边

(a) 外焊缝两侧咬边; (b) 内焊缝(根部)两侧咬边;  
(c) 外焊缝与根部单侧咬边

**焊瘤** 焊瘤是指焊接过程中,熔化金属流淌到焊缝之外未熔化的母材上所形成的金属瘤,见图12-28。

**凹坑** 这是指在焊缝表面或背面形成的低于母材表面的局部低洼部分。它可以发生在焊缝上表面或焊缝根部,如图12-29所示。

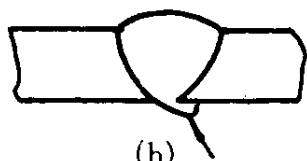
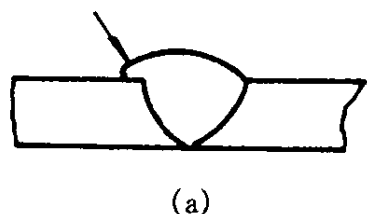


图12-28 焊瘤(a)外焊瘤;(b)内焊瘤



图12-29 焊缝根部凹坑

**烧穿** 焊接过程中,熔化金属自坡口背面流出,形成穿孔的缺陷。烧穿使焊缝完全受到破坏,这是一种不允许存在的缺陷。发生烧穿现象必须修补填平。

③气孔:焊接时,熔池中的气体在凝固时未能逸出而残留下来所形成的空穴称为气孔。

④夹渣:焊后残留在焊缝中的熔渣称为夹渣。它在焊缝中的形状有单个点状夹渣、条状夹渣、链状夹渣和密集链状夹渣等。

⑤未焊透:熔焊时,接头根部未完全熔透的现象叫未焊透。表现在焊接后的焊接接头中母材之间还存在缝隙。在单面焊的焊缝根部和双面焊的焊缝中部容易存在这种缺陷。

⑥未熔合:焊接时,焊道与母材之间或焊道与焊道之间,未完全熔化结合的部分称为未熔合,参看图12-30。

⑦裂纹:焊接时,新界面产生的缝隙称为裂纹。裂纹具有尖锐的端部和大的长宽比的特征,按其产生的方向及部位的不同,可分为纵向裂纹、横向裂纹、熔合线裂纹、根部裂纹(包括焊根裂纹、焊趾裂纹和焊道下裂纹)、弧坑裂纹以及热影响区裂纹等。

裂纹是焊缝中最危险的缺陷,大部分焊接构件的破坏是由裂纹造成的。因而在Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ级焊接接头中不允许有裂纹存在。

#### (2) 焊接接头的检验方法:

焊接接头的检验方法一般可分为破坏性检验与非破坏性检验两大类。属于破坏性检验的有:机械性能试验、化学成分分析和金相组织检验等。它们都是用焊接试样板制取试样进行检查的。非破坏性检查包括外观检验、无损检测及致密性试验。

①外观检验:锅筒上的全部焊缝均应进行外观检验。检验前应将焊缝表面的熔渣和污垢清理干净,然后依靠肉眼或低倍(小于20倍)放大镜检查焊缝和热影响区是否有表面缺陷,并检查焊缝外形尺寸是否符合要求。

②破坏性检验:在锅筒主焊缝(纵、环缝)进行焊接的同时,需进行焊接试样板的焊接。焊接试样板所用材料及板厚必须与锅筒相同,所用焊接设备、焊接工艺规范以及焊后热处理规范均应与锅筒焊接相同,以便使焊接试样板的焊接接头质量在一定程度上可以代表锅筒的焊接质量。

根据具体要求,在焊接试板上割取试样进行各项试验,主要包括:力学性能试验、化学成分分析

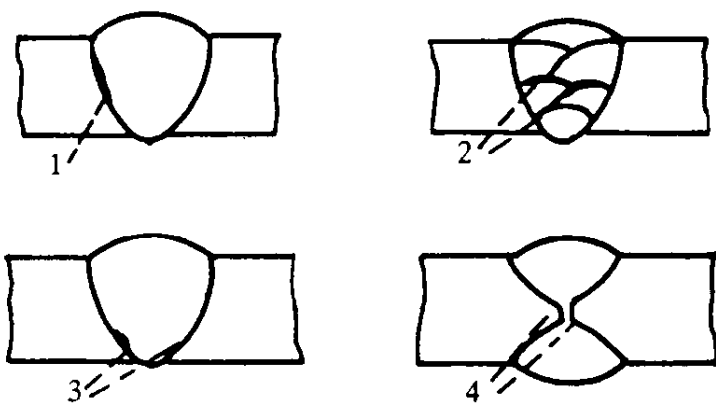


图12-30 未熔合

1—侧面未熔合;2—层间未熔合;3—根部未熔合;  
4—中间未熔合

以及材料的金相组织检验。

③无损检测:无损检测方法很多,各有其特点及适用范围。在焊缝中可能存在的缺陷形式也是多种多样的,限于目前检测的水平,不能直接辨认缺陷的种类(性质),只能识别缺陷的大小和形状,由此间接地判断缺陷的性质。因此有必要根据缺陷的大小、形状、分布状态、方向等对缺陷进行概略的分类,针对不同形状的缺陷,选用最适宜的检测方法。表 12-10 列出了四种常用检测方法对不同形状缺陷检测能力的比较。焊缝中各种缺陷按其形状的分类,列于表 12-11 中,综合表 12-10、表 12-11 就能对不同种类的缺陷按照其形状和分布特点,选择最恰当的检测方法。

表 12-10 缺陷形状和检测方法

探伤方法	缺陷形状				
	平面状缺陷	球状缺陷	圆柱状缺陷	线形表面缺陷	圆形表面缺陷
射线检测	△或×	○	○		
超声波检测	○	△	△		
磁粉检测				○	△或×
着色检测				○或△	○
备注	○最合适,△良好;×困难				

表 12-11 缺陷的种类和形状

缺陷形状	缺陷种类
平面状缺陷	裂纹、未熔合、未焊透
圆柱状缺陷	夹渣
球状缺陷	气孔
圆形表面缺陷	针孔
线形表面缺陷	表面裂纹

④致密性试验:锅筒的致密性试验主要是检查锅筒上存在的各种穿透性缺陷。目前最广泛采用的方法是水压试验,近年来也有采用氦探针试验。

水压试验 它是锅炉受压元件检验焊缝致密性的主要方法,也可用以检验压力容器的强度。水压试验的目的有三个:验证超工作压力条件下结构完整性;验证超工作压力下焊缝有无渗漏;验证有无异常变形。

锅筒水压试验时的试验压力,应根据锅筒的工作压力来确定。工作压力  $p < 0.8\text{MPa}$  时,试验压力为  $1.5p$ ,但不小于  $0.20\text{MPa}$ ;工作压力  $p = 0.8 \sim 1.6\text{MPa}$  时,试验压力为  $p + 0.4\text{MPa}$ ;工作压力  $p > 1.6\text{MPa}$  时,试验压力为  $1.25p$ 。

水压试验应在周围气温高于  $5^\circ\text{C}$  时进行,如低于  $5^\circ\text{C}$ ,则必须有防冻措施。水压试验用水应保持高于周围露点的温度,以防锅炉表面结露,但也不宜温度过高,以防止引起汽化和过大的温差应力,一般为  $20 \sim 70^\circ\text{C}$ 。

对于用低合金高强钢或合金钢制造的容器,为了防止在水压试验过程中发生脆性断裂,所用水温必须保证容器材料在水压试验时处于韧脆转变温度以上,这一点是十分重要的,否则会发生严重的损坏事故。

奥氏体钢受压元件水压试验时,应控制水中的氯离子的质量浓度不超过  $25\text{mg/l}$ ,如不能满足这一要求,水压试验后应立即将元件内的水渍去除干净。

水压试验前应对锅炉进行内部检查,必要时应对强度进行核算。

锅筒进行水压试验时,水压应缓慢地升降,当水压上升到工作压力时,应暂停升压,检查有无漏水或异常现象,然后再升压到试验压力,并在此压力下保持 20min,然后降到工作压力再进行细致的检查。在检查期间压力应保持不变。

锅筒的水压试验符合下列情况,则认为合格:

(a)在受压元件金属壁和焊缝上没有水珠和水雾。

(b)铆缝和胀口处,在降到工作压力后不滴水珠。

(c)水压试验后,没有发现残余变形和异常变形。

**氦探针试验** 氦探针试验是在容器内充入空气和氦气的混合物,如果容器中存在不致密处时,便会有氦气泄漏出来,依靠氦质谱仪就可发现泄漏位置。



## 第 13 章 管件的制造

现代动力设备的热交换管件大都是由各种形状的钢管组成。此外,在锅炉上还有许多其他管件,如下降管、汽水连通管、排污管、取样管和给水管道、蒸汽管道等。各种集箱也大都是由大直径钢管制造的。因此,在锅炉制造中,管件的制造占着很大的比例。锅炉范围内的各种管件虽然用途不同,管件的形状不同,所用的材料也不同,但是,它们制造加工的基本工序都是类似的。制造管件的主要工序是划线、割管、弯管和焊接等。

### 13.1 管件的划线与下料

动力设备的热交换管件往往是弯曲成各种形状的,因此,管子的划线工作应根据管件的展开长度进行,同时应尽量考虑到管料的拼接。在拼接管料时,应尽量满足下列要求:

(1)应考虑到原材料的充分利用,尽量减少废料。同时,又应设法减少拼接焊缝的数量。

(2)对于不同的锅炉,由于管件工作条件不同,对管子拼接的要求也不同。对于火管锅炉,管子长度 $\leq 4\text{m}$ 时,允许有一个拼接焊缝;长度 $> 4\text{m}$ ,允许有两个拼接焊缝,但接上的最短一段管子的长度应不小于 $300\text{mm}$ 。对于水管锅炉的水冷壁管、连接管、锅炉范围内管道等管子的拼接焊缝数量应不超过表 13-1 的规定,具体要求请参见标准 JB/T1611-1993。

表 13-1 水管锅炉管件允许的拼接焊缝

管子长度 $L/\text{m}$	$L \leq 2$	$2 < L \leq 5$	$5 < L \leq 10$	$L > 15$
接头数量 $N$	不得拼接	1	2	4

(3)管子的拼接焊缝应位于管子的直段部分。焊缝中心至管子弯曲起点或支吊架边缘的距离;对于高压锅炉的受热面管子应不小于 $70\text{mm}$ ;中、低压锅炉管允许不小于 $50\text{mm}$ ;锅炉范围内管道应不小于管子外径并且不小于 $100\text{mm}$ 。

管子划线后的切割下料工作,通常采用各种切割机械,可用普通的锯床,也可用各种专用的切管机。对于大直径管道有时也用火焰切割后,再进行端面机械加工。管子切割下料后的端面倾斜度应满足拼接焊接的要求。不同的焊接方法,对端面倾斜度的要求也不同。

### 13.2 管子的弯曲

#### 13.2.1 管件弯曲应力分析

在纯弯曲情况下,管子受力矩  $M$  作用而发生弯曲变形,其受力情况如图 13-1 所示。管子中性轴外侧管壁受拉应力  $\sigma_1$  作用而减薄,内侧管壁受压应力  $\sigma_2$  的作用而增厚。同时,合力  $N_1$  与  $N_2$  使管子横截面发生变形。如果管子是简单的自由弯曲,其横截面将成为近似的椭圆形(参见图 13-2(a))。如果管子是利用具有半圆槽的弯管模进行弯曲,则内侧基本上保持半圆形,而外侧变扁

(图13-2(b))。管子弯曲时变椭圆的程度习惯上用椭圆度  $e$  表示:

$$\text{弯管椭圆度 } e = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_w} \times 100\%$$

式中  $D_{\max}$  ——管横截面上最大外径 mm;

$D_{\min}$  ——弯管横截面上最小外径 mm;

$D_w$  ——管子公称外径, mm。

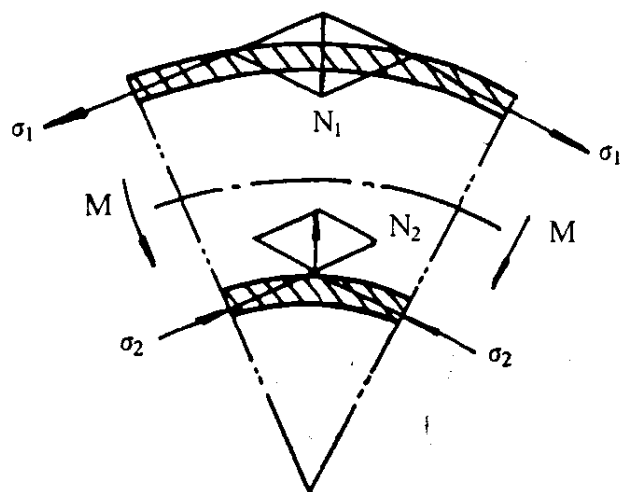
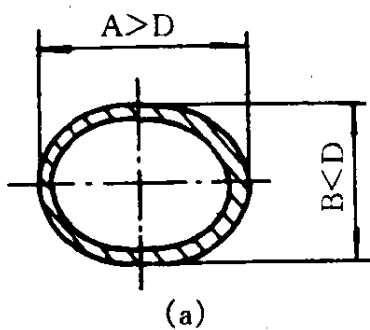
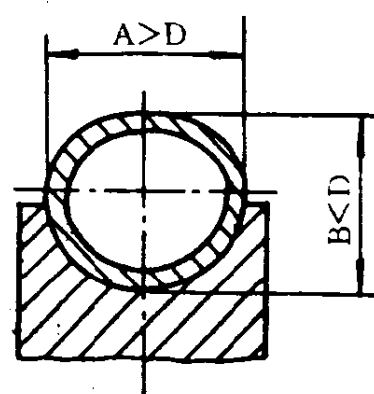


图 13-1 管子弯曲时的应力



(a)



(b)

图 13-2 管子弯曲时的截面变形

(a)简单弯曲;(b)用半圆槽模具弯曲

管子弯曲时除产生椭圆度外,内侧管壁在压应力  $\sigma_2$  作用下,还会丧失稳定性而形成波浪形皱纹(皱折),如图 13-3 所示。

管子在弯曲时的椭圆度大小或弯曲内侧形成波浪皱纹等的严重程度,主要和相对弯曲半径  $R_x$  与相对弯曲壁厚  $s_x$  有关。

$$\text{相对弯曲半径 } R_x = \frac{R}{D_w}$$

$$\text{相对弯曲厚度 } s_x = \frac{s}{D_w}$$

式中  $R$  ——弯管时的弯曲半径, mm;

$D_w$  ——管子公称外径, mm;

$s$  ——管子壁厚, mm。

管子的直径  $D_w$  与壁厚  $s$  由结构与强度设计决定,管子的弯曲半径应按结构与工艺进行选择。生产中选用的最小弯曲半径  $R_{\min}$  可按下式计算:

$$R_{\min} \geq 9.25 D_w \sqrt{0.2 - \frac{s}{D_w}} \quad (\text{mm})$$

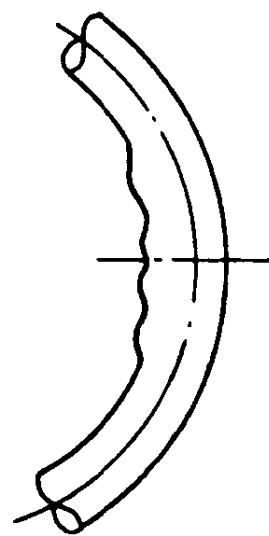


图 13-3 管子弯曲时的内侧波浪形皱纹

而后根据锅炉结构要求、工厂弯管设备条件,按 JB/T1624-1993《中低压锅炉管子弯曲半径》选取常用弯管半径系列中的一个尺寸。

常用弯管半径尺寸可参见表 13-2。

为减少弯管的椭圆度,使弯管易于进行,条件允许时,应取弯管半径  $R \geq 3.5 D_w$ 。

相对弯曲半径  $R_x$  愈小,相对弯曲厚度  $s_x$  愈小时(即弯曲半径  $R$  愈小、管子壁厚  $s$  愈薄,而管子直径愈大),管子在弯曲处的横截面变扁愈严重,管子外侧减薄愈显著,内壁侧越容易出现波浪形皱纹。因此在弯管时,要尽可能采用较大的弯管半径  $R$ ,同时要采用相应的工艺措施以保证弯管

椭圆度在允许范围之内。

表 13-2 中低压锅炉管子制作弯曲半径

管子外径 $D_w$ (mm)	弯曲半径 $R$ (mm)				
32	50	60	100	120	150
51	120	160	200	300	400
63.5	200	300	400		
76	250	300	400		
108	300	400	500		
159	500	600			

### 13.2.2 机械冷态弯管

机械冷态弯管按外力作用方式可分为压(顶)弯、滚弯和拉弯等几种形式。其中的压弯和滚弯如图 13-4 和 13-5 所示。由于弯曲控制较难,弯管质量不稳定,应用较少。目前在锅炉厂广泛采用的是拉拔式弯管方法。

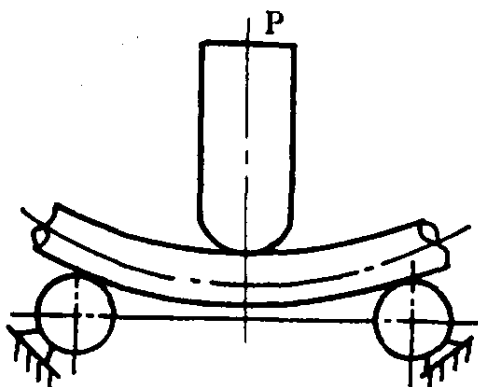


图 13-4 压弯弯管示意图

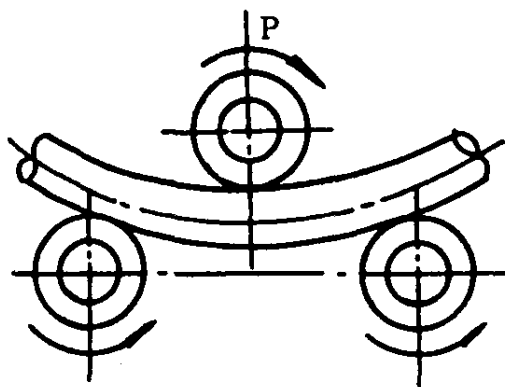


图 13-5 滚弯弯管示意图

#### 1. 压弯弯管

如图 13-4。可在压力机或顶弯机上进行,可以冷弯或加热弯曲。一般在少量弯管且  $R_x > 10, s \geq 0.06$  的情况下可以考虑选择应用。

#### 2. 滚弯弯管

滚弯弯管一般在卷板机或型钢弯曲机上进行,如图 13-5 所示。通常是在冷态下弯管,应使用带槽辊轮滚压,在弯曲螺旋管且  $R_x > 10, s_x \geq 0.06$  情况下可考虑采用。

#### 3. 拉拔式弯管

根据生产经验,对管径小于 89mm 的钢管,当选用合适的弯管半径,按操作规程在拉拔式弯管机上进行弯管时,其椭圆度一般不超过允许范围。因此,通用的  $\phi 51, \phi 57, \phi 63.5, \phi 70, \phi 76$  钢管都可按需要在弯管机上进行一般冷态弯曲。如果管子直径  $\geq 89\text{mm}$ ,或者直径虽小于 89mm 但弯管半径  $R$  取得较小,弯管后椭圆度  $e$  超过允许值;或者壁厚  $s$  较薄,产生波浪形皱折时,则应采取措施以防止过大的椭圆度和皱折,通常是采用有芯弯管或反变形法弯管。

##### (1) 有芯弯管:

根据管子弯曲应力分析可以看出,管子在弯曲变形的同时即产生椭圆度。为了防止椭圆度的产生,可在开始变形处的管内插入一根固定芯棒,使芯棒在管内阻止管子变扁,因此称为有芯弯管。

如图 13-6 是在拉拔式弯管机上进行弯管的示意图。依靠夹块 2 将管子 4 夹紧在模盘上。当模盘 1 顺时针转动时,管子便随着一起旋转。由于压紧导轮 3(一般有两个以上压紧导轮)把管子挡住,管子便只能被围绕在模盘上弯曲成模盘的曲率半径。根据管子设计弯曲角的需要,模盘转动相当角度即停止转动,模盘的半径,在此即为弯管的弯曲半径(弯管机配有不同半径的模盘)。

为了弯制直径大的管子,或为了减小椭圆度,在弯管机上可使用芯棒装置。从前述弯管过程可以看出,管子弯曲发生在模盘(图 13-6)中心线的右侧管子转弯处,因此将长芯杆 6 端部的芯棒 5 伸入管子这个部位撑住,以防止弯曲过程中产生椭圆度。芯杆的另一端固定在弯管机支架上,弯管时芯棒与芯杆不动,管子和它相对运动。

在有芯弯管时,芯棒是保证弯管质量的关键,因此芯棒的形状尺寸以及芯棒伸入管内的位置是很重要的(图 13-7)。弯管时,为了减少芯棒和管子内壁的摩擦,管内应涂润滑油。

芯棒的形状对弯管质量有较大的影响,常用的芯棒如图 13-8 所示。圆柱形芯棒(图 13-8(a))形状简单,制造方便,但芯棒和管壁的接触面积小,防止椭圆变形的效果较差。这种芯棒常用于相对弯曲半径  $R_r = 2$ , 相对弯曲厚度  $S_r = 0.05$  情况或  $R_r \geq 3, S_r = 0.035$  情况。

勺式芯棒(图 13-8(b))与管子内侧壁的支承面积较大,防止椭圆变形的效果较好,但制作稍嫌复杂。这种芯棒可用于相对弯曲半径  $R_r = 2$  的中等壁厚的管子弯曲。

链节式芯棒是一种柔性芯棒,由支承球和链节组成(图 13-8(c)),能在管子的弯曲平面内挠曲,以适应管子的弯曲变形。因为它可以深入管子内部与管子一起弯曲,所以防止椭圆变形的效果最好。但这种柔性芯棒制造过程复杂、成本高,一般不宜采用。

有芯弯管虽能防止管子的椭圆度,但在弯管过程中,由于芯棒和管子内壁摩擦,会使管子内壁拉毛,而且芯棒也易于磨损,同时,弯管所需功率也有所增加。

#### (2)反变形弯管:

为了克服有芯弯管的不足,改善弯管质量,可采用反变形法弯管。生产实践说明,在采用具有半圆形槽的模盘进行弯管时,管子内侧基本上是圆形的,管子变扁主要发生在外侧。如果在管子发生弯曲变形处,事先使管子外侧受到反向变形向外凸出,

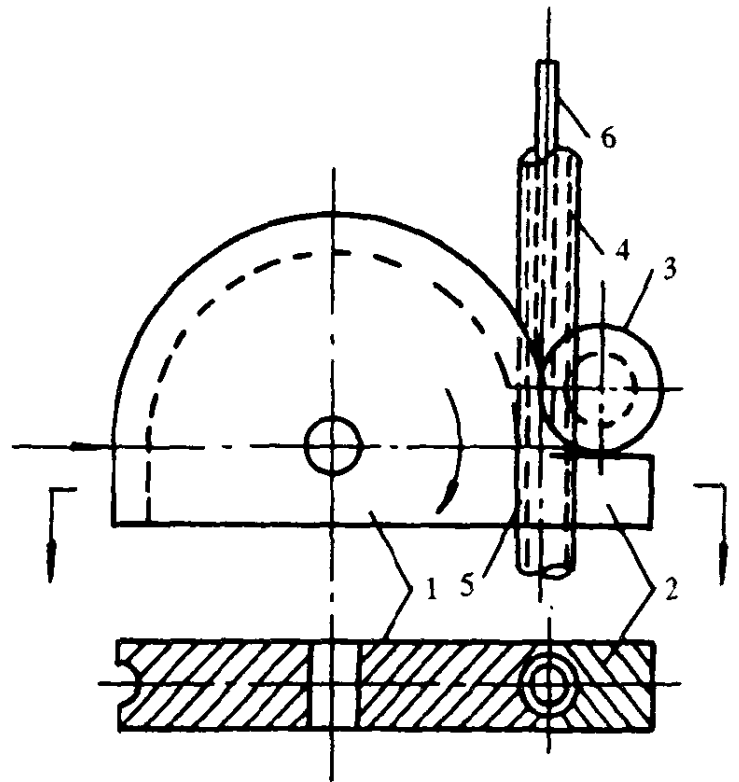


图 13-6 有芯弯管示意图  
1—弯管模盘;2—夹块;3—压紧导轮;  
4—钢管;5—芯棒;6—芯杆

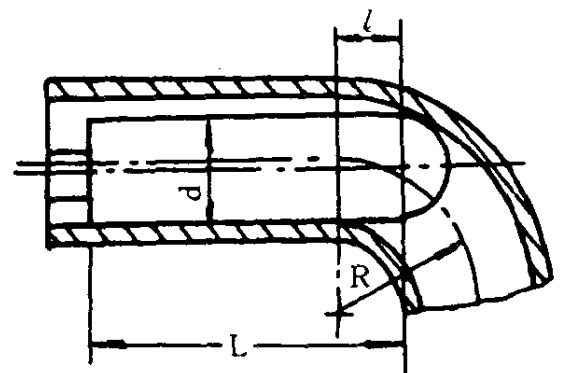


图 13-7 芯棒的位置和尺寸

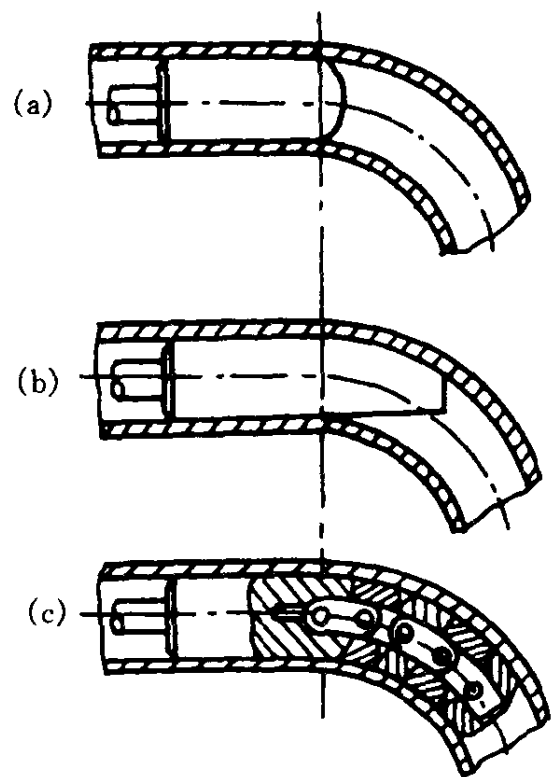


图 13-8 芯棒的形状  
(a)圆柱形;(b)勺式;(c)链节式

用以抵消管子弯曲变形时产生的椭圆度,则可使管子弯曲后的截面恢复到圆形,这就是反变形法弯管的基本原理。从理论上讲,只要反变形槽尺寸适当,弯管部分的椭圆度可降低到零。

反变形法弯管如图 13-9 所示。其所用的模盘、夹块和导向轮与有芯弯管一样,只是压紧轮 3 具有反变形槽。压紧轮中心线与模盘中心线之间的距离  $\delta$  可在 0~12mm 范围内调整,为了便于装卸管子,压紧轮与导向轮的中心线应和模盘中心线倾斜  $3^\circ\sim 4^\circ$ 。

压紧轮上反变形槽的尺寸(图 13-10)可按表 13-3 选取。

表 13-3 反变形槽尺寸

$R_r = \frac{R}{D_w}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
1.5~2	$0.5D_w$	$0.95D_w$	$0.37D_w$	$0.56D_w$
2~3.5	$0.5D_w$	$1.0D_w$	$0.4D_w$	$0.545D_w$
$\geq 3.5$	$0.5D_w$	—	$0.5D_w$	$0.5D_w$

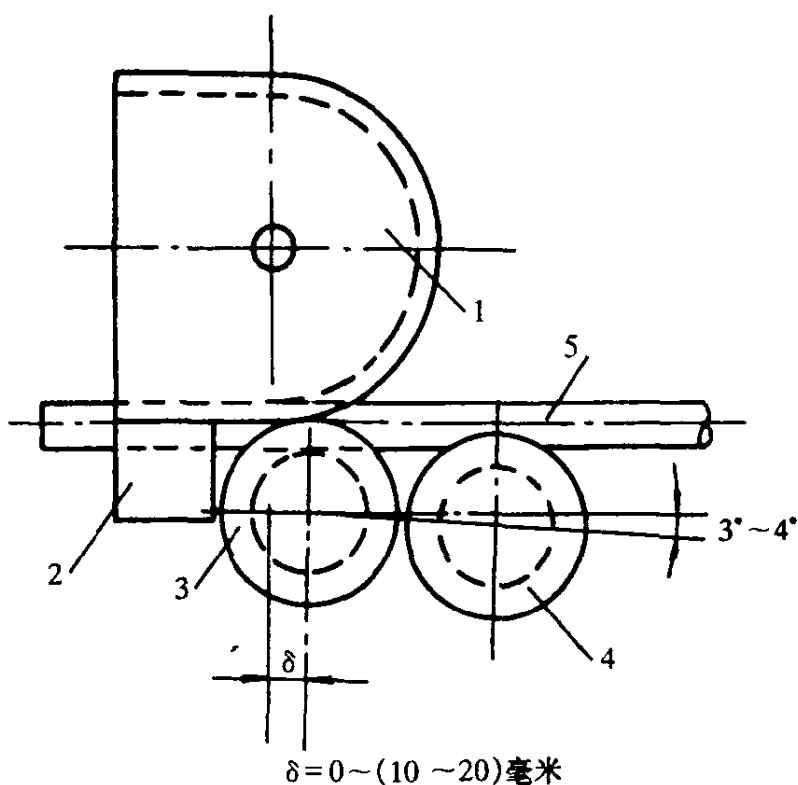


图 13-9 反变形弯管示意图

1—模盘;2—夹块;3—压紧轮;  
4—导向轮;5—被弯管子

### 13.2.3 机械热态弯管

在冷态弯管设备功率不足(如直径较大或壁厚较大)或被弯管材不允许冷弯(如高合金钢管)时,应采用先加热钢管,再进行弯曲的热态弯管方法。大直径管道的弯曲,以及各种急弯头的制造,常常采用热态弯制方法。

#### 1. 大型弯管机上热态弯管

对大直径管道的弯制,可将要弯制部分局部预先加热,而后送到大型弯管机上进行弯管。这种热态弯管可以弯制各种钢材,包括淬火倾向较大的合金钢材管道,但要设置加热钢管的加热炉,使加热弯管变得比较复杂,同时要求有大型弯管机,设备投资也比较大。

#### 2. 火焰加热弯管

利用特制的火焰加热圈对管子进行局部加热,然后进行弯管称为火焰加热弯管。这种方法设备简单,制造方便,成本低廉,但温度较难控制,生产率较低。

#### 3. 中频感应加热弯管

中频感应加热弯管是将特制的中频感应圈固定在弯管机上,套在管径适当位置(如图 13-11),依靠中频电流(一般为 2 500Hz),对管子待弯部位进行局部感应加热,待加热到  $900^\circ\text{C}$  左右时,利用机械传动使管子产生弯曲变形。

中频感应加热弯管机有拉弯式和推弯式两种。拉弯式弯管机的弯曲半径大小可以调节,弯曲均匀,可弯制  $180^\circ$  的弯头,但弯头外侧壁厚减薄量大,弯曲半径的大小受转臂调节范围的限制。

推弯式是为了解决拉弯式的不足而得到应用的。推弯的动力在管子的尾部,靠液压传动装置把管子向前推进。由于管子被夹持在夹头内,夹头与转臂可围绕立柱转动,因此管子末端受到推力

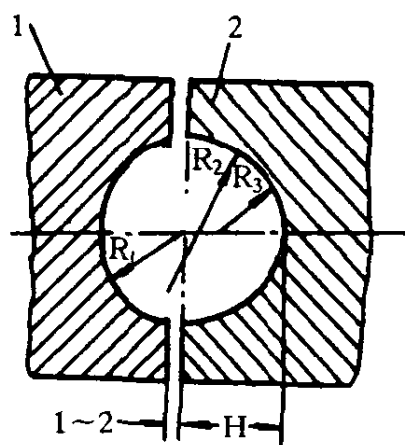


图 13-10 反变形槽

1—弯管模盘;2—反变形压紧轮

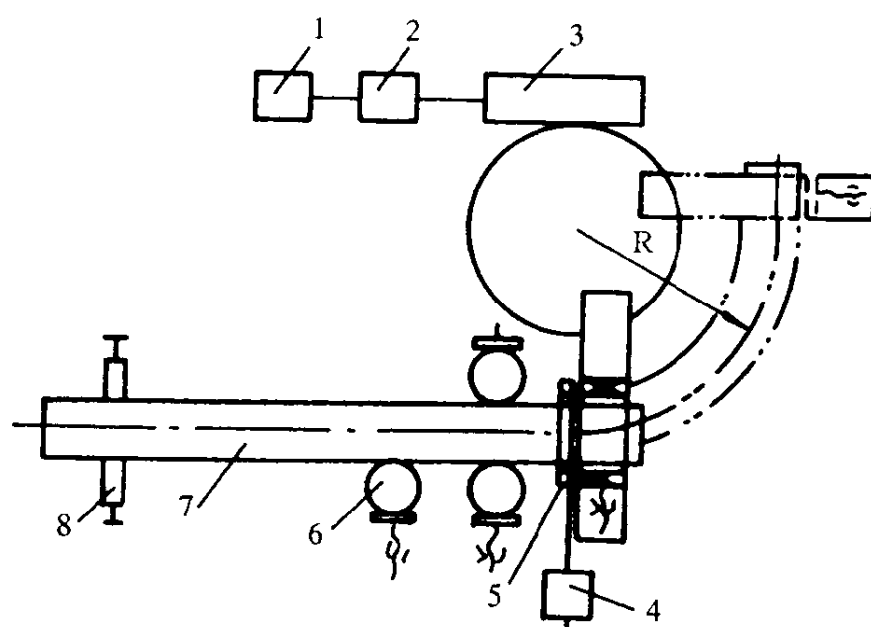


图 13-11 中频感应加热弯管示意图

1—电动机;2—减速器;3—蜗轮副;4—变压器;5—中频感应圈;  
6—导向轮;7—钢管;8—滚轮支架

时,管子沿圆弧曲线弯曲。

应用推弯式弯管机弯制的钢管,弯转处外壁减薄小,可弯制不同的弯管半径,弯曲均匀且调整方便,但弯曲角度一般不超过  $90^\circ$ 。

#### 13.2.4 弯管机类型简介

弯管机的种类较多,一些工厂也曾自行设计制造。按弯管机的传动方式可分为:

- (1) 手动弯管机:设备简单,靠人力弯管,可弯制  $D_w \leq 25\text{mm}$  的管件。
- (2) 气动弯管机:采用气压传动,可弯制  $D_w \leq 32\text{mm}$  的管件。
- (3) 机械传动弯管机:靠电动机与蜗轮副等机械传动,结构也比较简单,制造方便,通用性大,可弯制  $D_w \leq 159\text{mm}$  的管件。
- (4) 液压传动弯管机:传动平稳可靠,噪音小,结构紧凑,易于实现自动化,可弯制各种直径的管件。

一种普遍使用的机械传动(齿轮传动)式弯管机的主要技术性能如表 13-4 所示。

表 13-4 BW27-108 型弯管机主要技术数据

技术项目		技术数据
最大弯管直径		108mm
最小弯管直径		38mm
弯曲半径范围		150~410mm
最大弯曲角度	弯曲半径 $\leq 400\text{mm}$	$180^\circ$
	弯曲半径 $> 400\text{mm}$	$90^\circ$
最大管壁厚度	4.5mm	
弯管机转数	0.42 r/min	

续表 13-4

技术项目	技术数据
电动机规格	7.5kW 1450 r/min
机床外形尺寸(长×宽×高)	3 790×1 810×1 098mm
机床净质量	1960kg

### 13.3 管子的拼接

管子的拼接工作应根据批量、管径与壁厚等具体情况采用适当的焊接方法。近年来,许多新的焊接方法已在管子拼接中得到了应用。

手工气焊目前还用于焊接小直径薄壁管件,特别是已弯制的合金钢管件的拼接,因焊后可适当加热使之缓冷。但气焊生产率低,焊接质量不高,我国在“八五”期间已淘汰这种焊接方法。

手工电弧焊通常用以拼接直径较大,管壁较厚的管件。对已弯制的水冷壁管、下降管和汽水管等的拼接,都常常应用手工电弧焊。

闪光对焊曾用于直径为 38~76mm 的直管的拼接工作,但如何防止接头中的灰斑缺陷和焊后除净内部毛刺一直未很好解决,因此,闪光对接焊用于直管接长在锅炉制造厂已被淘汰。这样一来,摩擦焊的应用反而超过了闪光对接焊,但摩擦焊的旋转端不能过长,因摩擦焊接的温度不太高,接头持久强度偏低。目前只用于焊接用于低温区的省煤器管子。

全位置等离子弧焊接,目前在小直径厚壁管子的拼接中已得到广泛的应用。已成功地焊接了  $\phi 42 \times 5$ ,  $\phi 51 \times 3.5$  和  $\phi 60 \times 5$  等锅炉管件,质量可完全满足要求。

埋弧自动焊主要用于大直径( $\phi 273\text{mm}$  以上),壁厚  $S \geq 20\text{mm}$  的集箱或管道的对接工作。近年来,窄间隙埋弧自动焊在大型厚壁管道的对接工作中得到较为广泛的应用。

全位置 TIG 焊一般用于小直径薄壁管的对接工作,焊接质量好。实际生产中,常采用脉冲电流及全位置自动控制。

TIG/MIG 焊接方法,是锅炉制造厂采用的先进的焊接工艺方法,主要进行小口径管的对接焊,具有效率高、质量好等优点,其焊接原理图如图 13-12 所示,这一工艺方法是采用 TIG 打底焊接,随后用 MIG 或 MAG 焊进行金属填充及盖面,既利用了 TIG 焊单面焊、双面成型的优点,保证了根部焊透,又利用了 MIG 焊具有较高焊接效率的优点,提高了焊接效率和劳动生产率,特别是随着高参数、大容量锅炉的发展,蛇形管膜式壁管子的壁厚增加,其优越性更加突出。

锅炉蛇形管的制造包括省煤器、过热器、再热器等多个部件,涉及的材料种类也较多,有低碳钢、低合金钢、高合金钢、不锈钢等,外径为 38~76mm,厚度为 4~12mm。TIG/MIG 焊设备一般为全自动焊机,包括管子自动输送设备、装卡系统、焊接系统和控制系统,一般既可进行

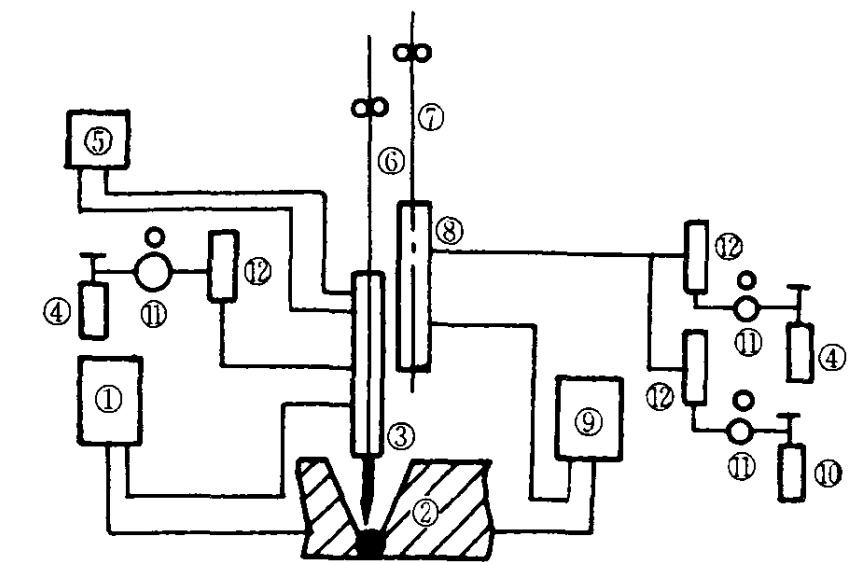


图 13-12 TIG/MIG 焊接原理图

(1)TIG 电源;(2)母材;(3)TIG 焊枪;(4)Ar 气瓶;(5)冷却水循环装置;(6)TIG 焊丝;(7)MIG 焊丝;(8)MIG 焊枪;(9)MIG 电源;(10)CO<sub>2</sub> 气瓶;(11)减压器;(12)气体流量计

TIG, MIG 的单独焊接, 又可进行 TIG/MIG 的联合焊接, 采用 CPU 中心控制单元控制, 可实现工艺参数的预先设置, 过程中适时调节和监控, 故障监视和分析等功能。TIG 打底焊要求根部焊透, 内表面成形光滑, 收弧时弧坑应填满而且搭接过渡圆滑, 焊缝致密性好, 需要调节好引弧, 收弧, 焊接三方面的参数, 表 13-5 是锅炉厂给出的几种接头 TIG 焊接规范参数。

表 13-5 几种接头的 TIG 焊接规范参数

规范参数	SA210C $\phi 57 \times 7$	SA213-T91 $\phi 51 \times 6$	SA213-TP347H $\phi 51 \times 6$	异种钢接头 $\phi 51 \times 6$
焊接电流(A)	164	152	135	142
AVC 控制(V)	11.2	10.98	10.2	10.2
送丝速度(m/min)	0.9	0.7	0.5	0.9
管子转速(r/min)	0.5	0.48	0.44	0.49

TIG 打底焊后, TIG 焊枪自动收起, MIG 焊机平移, 下降到焊接位置调节焊枪, 对准焊缝中心, 按下焊接启动键, 便开始 MIG 焊接, MIG 焊接时, 为了确保电弧平衡燃烧, 熔滴均匀过渡。飞溅少, 收弧快速稳定, 要求合理调节各个参数, 表 13-6 是锅炉厂给出的几种接头的 MIG 焊接规范参数。

表 13-6 几种接头的 MIG 焊接规范参数

规范 \ 接头 参数 \ 种类		SA-210C $\phi 51 \times 7\text{mm}$	15CrMo $\phi 57 \times 8\text{mm}$	SA-213 T91 $\phi 51 \times 6\text{mm}$	SA-213 TP347H $\phi 51 \times 6\text{mm}$	异种钢接头 $\phi 51 \times 6\text{mm}$
焊接平均电流(A)	设定	90	90	85	80	85
	实显	81.3	82.3	78.6	73.2	76.2
电弧电压(V)	设定	23	23.5	23	22.5	23.2
	实显	22.68	23.3	23.2	22.7	22.6
摆动速度(r/min)		50-55	50	50-55	50-55	55
摆动停留时间(s)		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
送丝速度(m/min)		7.3	7.4	6.9	6.7	6.8
转动速度(r/min)	第一层	1.1	0.7	1.16	1.3	0.8
	第二层	0.8	/	0.9	1.0	/
摆动宽度(mm)	第一层	3.0	7.0	2.0	0.5	7.0
	第二层	9.0	8.0	10.0	/	

TIG/MIG 焊接工艺合理, 焊接质量好, 效率高, 用于小口径管的直管对接在锅炉制造厂获得了广泛的应用。

热丝 TIG 焊和常规 TIG 焊相比, 主要是在焊丝进入熔池之前由加热电源对填充焊丝通电, 依靠电阻热将焊丝加热至预热温度, 从而提高了焊丝熔敷速度。一般情况下热丝的熔敷速度可比通常采用的冷丝焊接提高 2 倍以上。因为通入焊丝的电流会引起磁偏吹现象, 使工艺性能变坏。为了消除磁偏吹现象, 焊接时采用交互送电的两个电源, 一个是 TIG 电弧电源; 另一个是焊丝加热电



源。如图 13-13 所示。

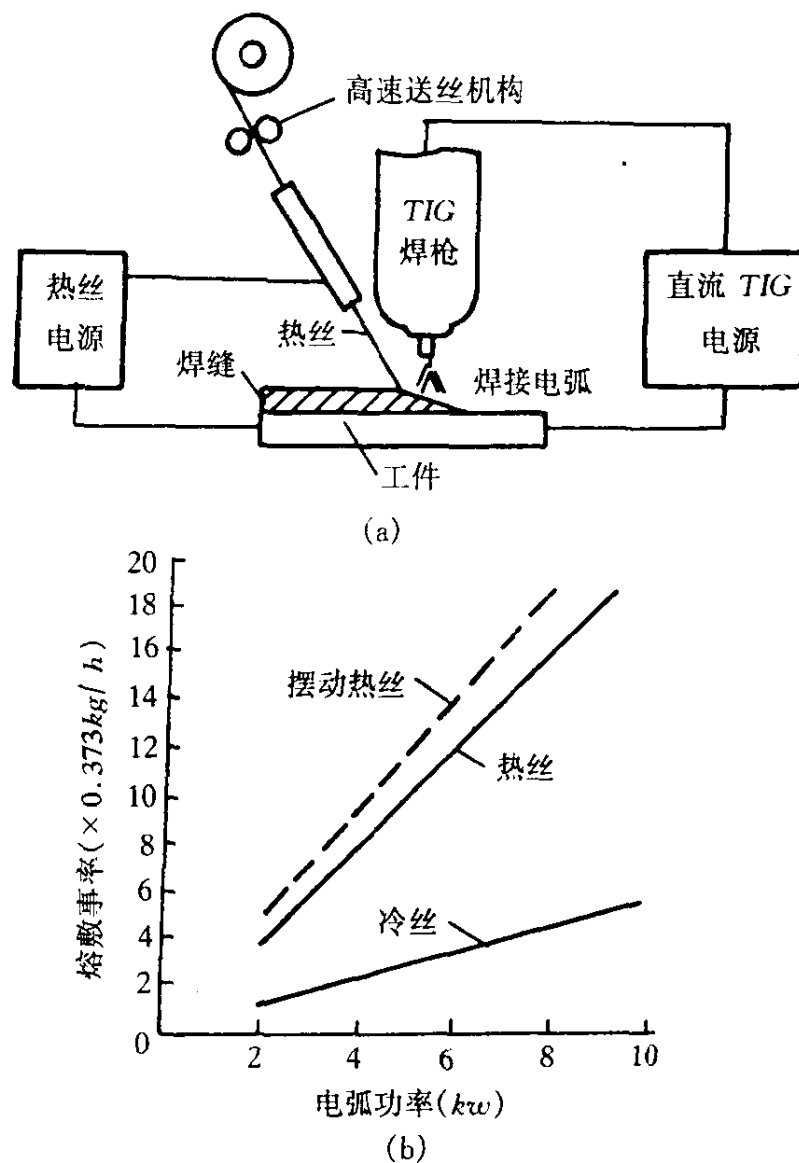


图 13-13 热丝 TIG 焊

(a)方法原理图;(b)熔敷速率对比

## 13.4 蛇形管排的制造工艺

动力机械与设备中的管式受热面,如锅炉的过热器、再热器和省煤器大都采用蛇形管受热面。蛇形管外径一般为  $\phi 25 \sim \phi 51\text{mm}$ ,壁厚一般为  $3.5 \sim 6\text{mm}$ ,但展开长度可达  $60 \sim 80\text{m}$ ,甚至超过  $100\text{m}$ 。由于蛇形管的需要量大、焊接接头多、弯曲半径各不相同等特点,在锅炉制造业都采取一些特殊措施,如建立流水生产线,实现制造过程的机械化与自动化等,以提高蛇形管零部件的制造速度,并保证产品的制造质量。

蛇形管的成型方式主要有三种:第一种是管子弯成弯头元件后,再与直管组装拼焊成蛇形管;第二种是将管子预先接成长直管后,再进行连续弯曲成型;第三种是一边弯管一边接长,即在弯曲过程中逐渐接长管子,从而形成蛇形管。

### 13.4.1 弯头元件与直管组装拼焊成蛇形管

这种方法采用的弯头元件有两种。一种是将手杖形的弯头元件进行焊接,如图 13-14(a)所示。它根据设计尺寸把直管都弯成一端有弯头的手杖形元件,而后把手杖形元件逐个组装拼焊成型。

另一种是采用“标准弯头”与直管组装拼焊成蛇形管,如图 13-14(b)所示。这种方法是先把短管弯制成两端平齐的弯头元件,再按设计要求把直管和弯头组装拼焊成蛇形管。

这两种方法的优点是弯管不需要大面积场地,采用的管子较短,材料利用率高。为提高下料精确度、下料速度和原材料利用率,可采用电子计算机编排管子套裁程序。这种方法自动化程度低,电站锅炉制造厂已不采用这种工艺。

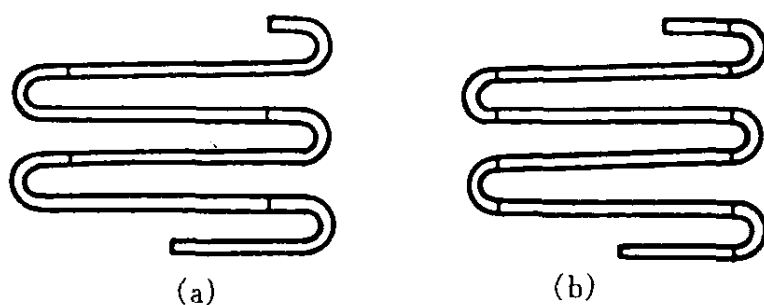


图 13-14 用弯头元件组装拼焊成蛇形管

### 13.4.2 用接长的直管连续弯制成蛇形管

这种方法是先把原料管子进行对接拼焊,接成符合蛇形管展开尺寸的长直管,然后再将长直管按程序控制依次进行弯曲,形成蛇形管。按这种方式制造蛇形管的生产线是专门设计布置的,适于批量生产。它包括自动选管机(选管及分类)、切管机、焊管机(TIG/MIG 焊或全位置等离子弧焊)、长管架与输送装置、液压双头弯管机(两方向弯管)等组成部分。设备台数多,占用厂房面积大,适于专业化批量生产,国内大型锅炉厂已建立了这类生产线,我国几家电站锅炉制造厂主要采用这种方法用接长的直管连续弯制成蛇形管。

### 13.4.3 用边弯管边接长方法制造蛇形管

在制造蛇形管的过程中,管子被一边弯曲一边接长(如图 13-15)。

由于弯管和焊接过程只能依次进行,生产效率较低,占用厂房面积较大,目前应用较少。

## 13.5 膜式水冷壁管排的制造工艺

随着高压、超高压、亚临界锅炉技术的发展,膜式水冷壁已得到广泛应用。膜式水冷壁的制造可分为水冷壁管排的制造、管排的组装和管排的弯制三个阶段。

### 13.5.1 锅炉水冷壁制造技术

#### (1) 直管段水冷壁管屏生产工艺流程:

直管段水冷壁管屏生产工艺流程如图 13-16 所示。对于合金钢和不锈钢水冷壁管屏,不管用户有无要求,一律进行热处理以消除焊后内部应力;而对于碳钢水冷壁管屏,若用户无特殊要求,则不进行热处理消除焊后内部应力。

(2) 有弯管段水冷壁管屏生产工艺流程与直管段水冷壁管屏生产工艺流程大体相同,有所区别的是,先按图纸要求在已焊成的直管段水冷壁管屏的所需位置上切割开孔,后把事先预制好的弯管对接焊接在水冷壁管屏上,再将门孔或金属附件等焊接在所需位置上,如图 13-17。

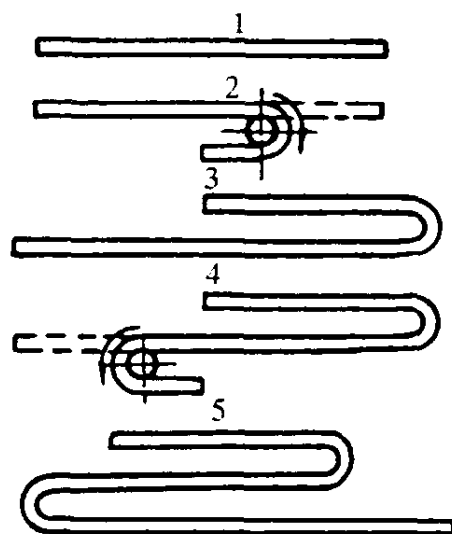


图 13-15 边弯管边接长方法制造蛇形管

- 1—直管;2—弯第一个弯头;  
3—管子接长;4—弯第二个弯头;  
5—管子接长

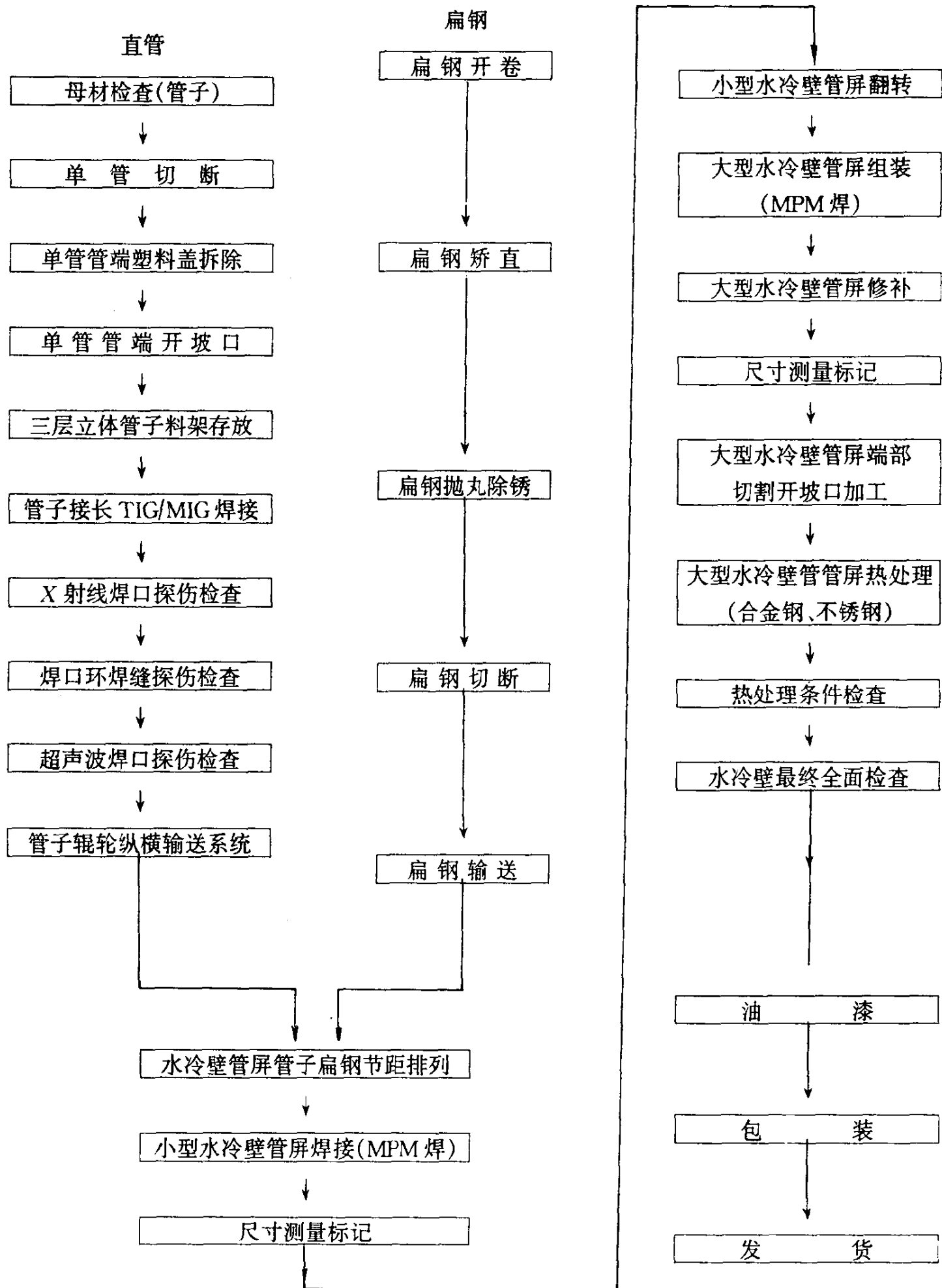


图 13-16 直管段水冷壁管屏生产工艺流程

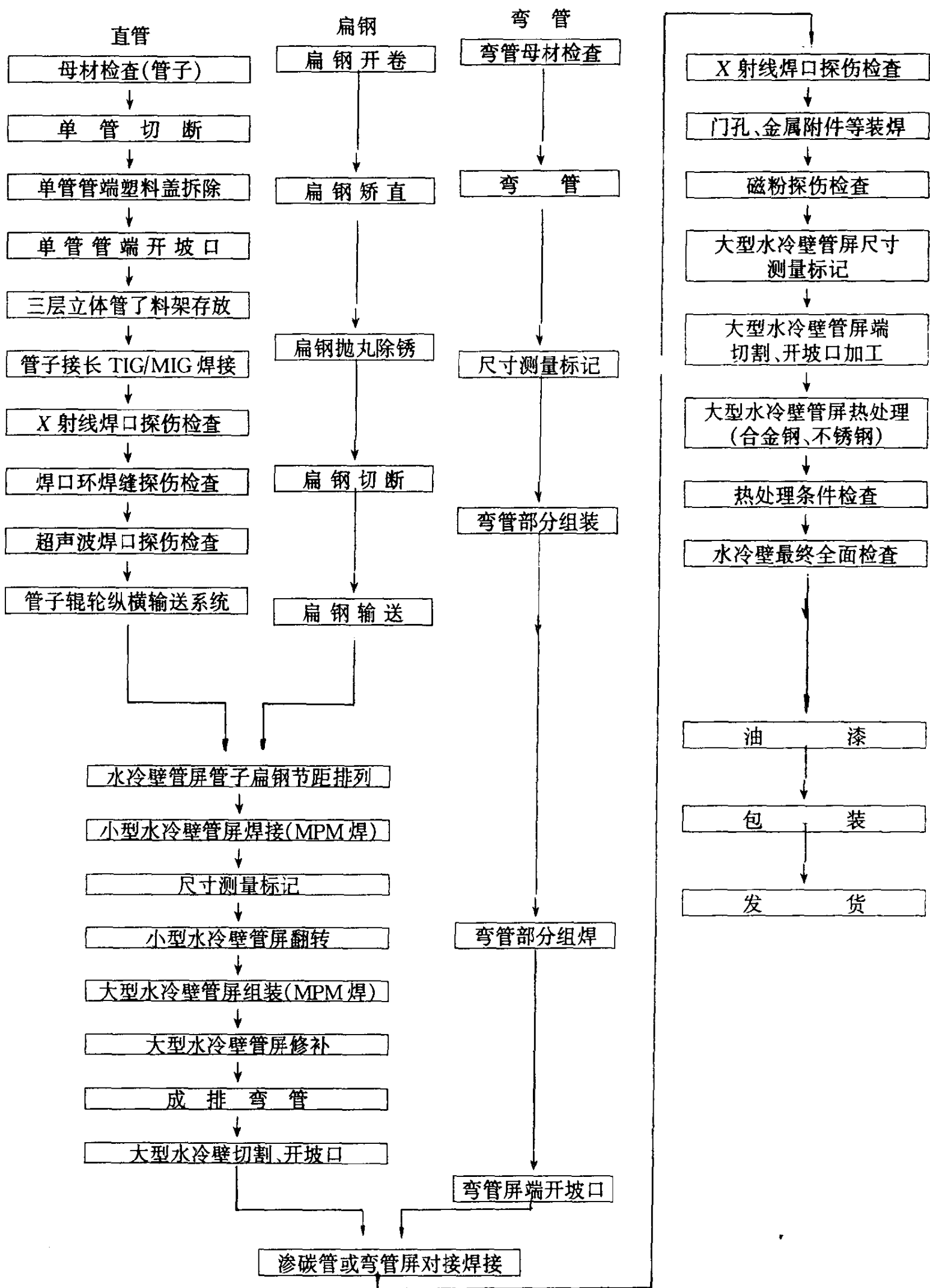


图 13-17 有弯管段水冷壁生产工艺流程

### 13.5.2 膜式水冷壁管排的焊接

生产中采用的膜式水冷壁管排组合焊接的方法有两种,现简要介绍如下:

#### 1. 鳍头管与鳍片管组合焊接

这种组合方式是把轧制成的鳍片管在其鳍片端部相互焊接起来,组成管排(如图 13-18(a))。可采用单面焊一次焊成,熔深应大于鳍端厚度的 70% 以上。一般都使用多头埋弧自动焊或气体保护焊。

这种方法的优点是制造过程简单,生产率高,但鳍片管成本高,而且在管径、管距选择上灵活性小;另外,轧制的鳍片管都比较短,所以组成的管排长度小,如欲加大,则将增加许多鳍片管焊接接头,这种方法目前用得比较少。

#### 2. 光管与扁钢组合焊接

(图 13-18(b))示出了光管与扁钢组合焊接膜式水冷壁的情况。这种组合方式材料成本低,管径与管距的选择更换比较方便,因此得到了较广泛的应用。常用的生产次序是:先将光管两侧焊上扁钢,然后在两根焊好扁钢的管子中间加焊一根光管形成三管组。再在两个三管组中间加焊一光管,组成七管组,即按 1,3,7,15...顺序组合到所需尺寸。或者先将两根光管中间焊上一条扁钢组成双管组,然后将两个双管组中间加焊一条扁钢,焊成四管组,按 2,4,8,16...顺序组合到需要的尺寸。

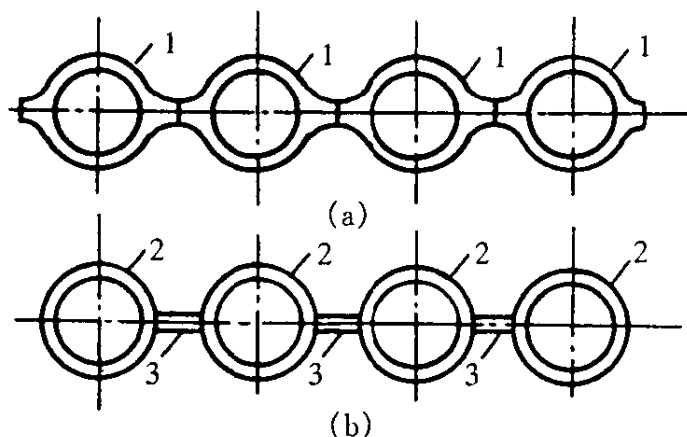


图 13-18 大型锅炉的膜式水冷壁

(a)一由轧制鳍片管焊成;(b)一由钢管加扁钢焊成

1—鳍片管;2—钢管;3—扁钢

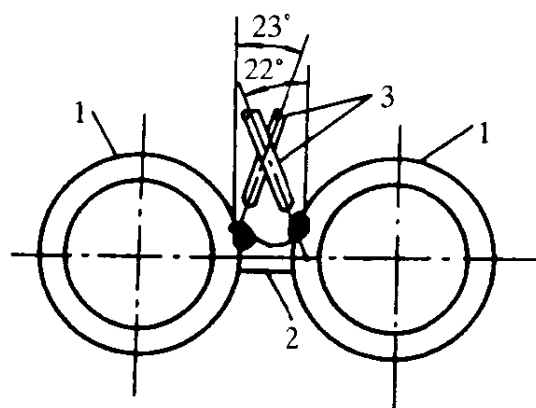


图 13-19 光管与扁钢组焊示意图

1—管子;2—扁钢;3—焊丝

扁钢与光管焊接大都采用双头(或四头)埋弧自动焊,为保证接头熔化均匀,焊丝应倾斜一定角度(如图 13-19 所示)。

光管与扁钢组焊方法的不足是接头多,效率低,工件要经常翻转。

随着动力发电设备向着大容量、高参数的发展,膜式水冷壁的制造工艺有了很大发展,目前我国各电站锅炉制造厂都从国外引进了能成排拼接管子和扁钢的十二焊枪(MIG 焊)的 MPM 焊接生产流水线,可同时焊接三管四扁钢上、下分布的十二道焊缝,管排不需要翻转,大大提高了生产效率和生产质量。

### 13.5.3 膜式水冷壁管排的组装与弯制

把膜式水冷壁管排组装成管屏,一般都使用特制的装配装置,以便提高装配速度,保证装配质量。如设有气动推动管排机构的装配架,具有上下钳口可夹持两个管排,并有保证装配定位的可移动小车等,可保证逐段装配、定位和焊接。

膜式水冷壁管排的弯制,一般采和卧式或立式液压机进行,也可使用卷板机进行辊弯成形。生产批量较大的工厂,常采用专用的成排弯管机进行弯制。成排弯管机控制准确、弯管椭圆度小,操作方便,生产率高。

## 13.6 管件制造中的质量检验

锅炉钢管应按锅炉原材料入厂检验标准 JB3375-1991 进行检验,未经检验或检验不合格者不准投产。

锅炉管件在切料、焊接、成型过程中应进行严格检验,主要检验项目有:

(1)管子焊接处的端面倾斜度  $\Delta f$ (图 13-20),应符合表 13-7 规定。

表 13-7 管子焊接端面的倾斜度

管子外径 $D_w$ (mm)	端面倾斜率 $\Delta f$ (mm)	
$D_w \leq 108(60)^*$	手工焊	$\leq 0.8(0.5)$
	机械化焊	$\leq 0.5(0.3)$
$108 < D_w \leq 159$	$\leq 1.5(1.0)$	
$D_w > 159(219)$	$\leq 2(0.2)$	

\* 括号内数据压力大于 3.82MPa 的蒸汽锅炉

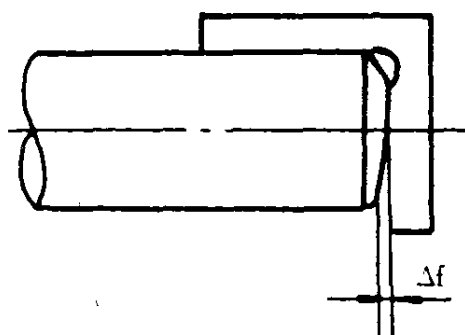


图 13-20 管子端面倾斜度

(2)管子因焊接引起的角变形  $\Delta\omega$ ,每米不应大于 2.5mm(图 13-21);管子外径小于或等于 108mm 时,全长内最大  $\Delta\omega$  不应大于 5mm;管子外径大于 108mm 时,全长内最大  $\Delta\omega$  不应大于 10mm,测量位置应距焊缝中心 50mm 处。

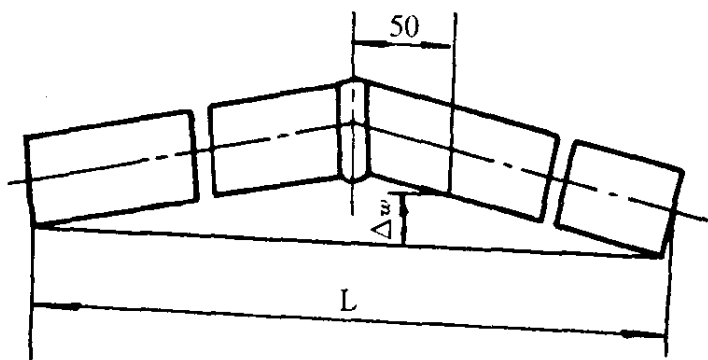


图 13-21 焊接管子引起的角变形

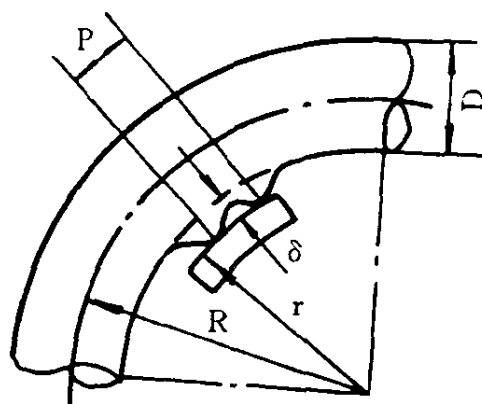


图 13-22 弯管的面轮廓度

(3)管子弯曲处内侧表面波浪形皱纹的面轮廓度  $\delta$ (图 13-22)不得超过表 13-8 的规定,轮廓峰间距  $P$  应大于  $4\delta$ 。

表 13-8 管子弯曲处允许的面轮廓度 (mm)

管子外径 $D_w$ (mm)	$D_w < 76$	$D_w = 76$	$76 < D_w \leq 108$	$D_w = 133$	$159 \leq D_w \leq 219$	$273 \leq D_w \leq 325$	$D_w = 377$	$D_w > 377$
$\delta \leq$	2	3	4	5	6	7	9	11

(4)管子外径大于 60mm 的弯管,其弯头应进行椭圆率检查,外径不大于 60mm 的弯头允许抽查。应注意,管子的椭圆率计算方法和封头、锅筒的椭圆率计算方法有所不同。

弯管允许的椭圆率  $a$  见表 13-9。

表 13-9 弯管允许的椭圆度

弯管半径 $R$	$1.4D_w < R < 2.5D_w$	$R \geq 2.5D_w$
椭圆率 $a_{\text{①}}$	$\leq 12\%$	$\leq 10\%$

①椭圆率  $a = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_w} \times 100\%$ ,  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$  是弯头同一断面上的最大最小外径,  $D_w$  为公称外径, 除检查椭圆率外, 还应对弯头处壁厚减薄量进行计算和控制

(5)管子对接焊缝接头, 焊后的内径应符合表 13-10 规定。

表 13-10 管子对接焊缝接头内径标准

管子公称内径 $D_n$ (mm)	$D_n \leq 25$	$25 < D_n \leq 40$	$40 < D_n \leq 55$	$D_n > 55$
焊缝接头处内径	$\geq 0.75D_n$	$\geq 0.8D_n$	$\geq 0.85D_n$	$\geq 0.9D_n$

(6)管子外径  $D_w$  不大于 60mm 的受热面管子制成以后应进行通球试验, 通球直径按表 13-11 规定。

表 13-11 管子通球试验的通球直径

弯管半径 $R$	$1.4D_w \leq R < 1.8D_w$	$1.8D_w \leq R < 2.5D_w$	$2.5D_w \leq R < 3.5D_w$	$R \geq 3.5D_w$
通球直径	$\geq 0.75D_n$	$\geq 0.8D_n$	$\geq 0.85D_n$	$\geq 0.9D_n$

(7)有对接接头的管子、壁厚不大于 5mm 没有对接接头但在其上焊有非受压元件的管子、壁厚大于 5mm 没有对接接头但在其上焊有密集非受压元件的管子, 上述管子在制成后应按 JB1612 进行水压试验。

对接接头用氩弧焊打底、手弧焊盖面并且按 JB/T1613 中规定的探伤方法经 100% 检查合格的管子, 在制造厂内可免做水压试验。

采用先弯曲后焊接的受热面管子时, 通球直径可按表 13-10 与表 13-11 中规定的较小球进行通球检查试验。

除上述主要检查项目外, 还有管子弯头的平面度、蛇形管偏差、蛇形管平面度、管子弯头处壁厚减薄量等, 可详见 JB/T1611-1993《锅炉管子制造技术条件》。

## 第 14 章 热交换器的制造

冷凝器、蒸发器、散热器与预热器均属于热交换器,它们的结构是类似的,其中工质未产生相变的冷凝器有时也称作冷却器。本章着重介绍一种冷凝器和一种预热器的制造工艺:

### 14.1 壳管式冷凝器的制造

#### 14.1.1 壳管式冷凝器的加工

图 14-1 是一种带有过冷器作用的卧式壳管式冷凝器,常用于冷水机组中。工质蒸汽在管外壳侧冷凝后积聚在筒体下部,再从左下部流入过冷管架组 9 中,过冷管架组中也布满了传热管,温度较低的第一流程的冷却水先从这些传热管内流过,工质液体在传热管间(且布有多块小折流板)流动而得到过冷,最后从出液管 14 流出。传热管呈列管式分布,故此冷凝器也属于列管式冷凝器。

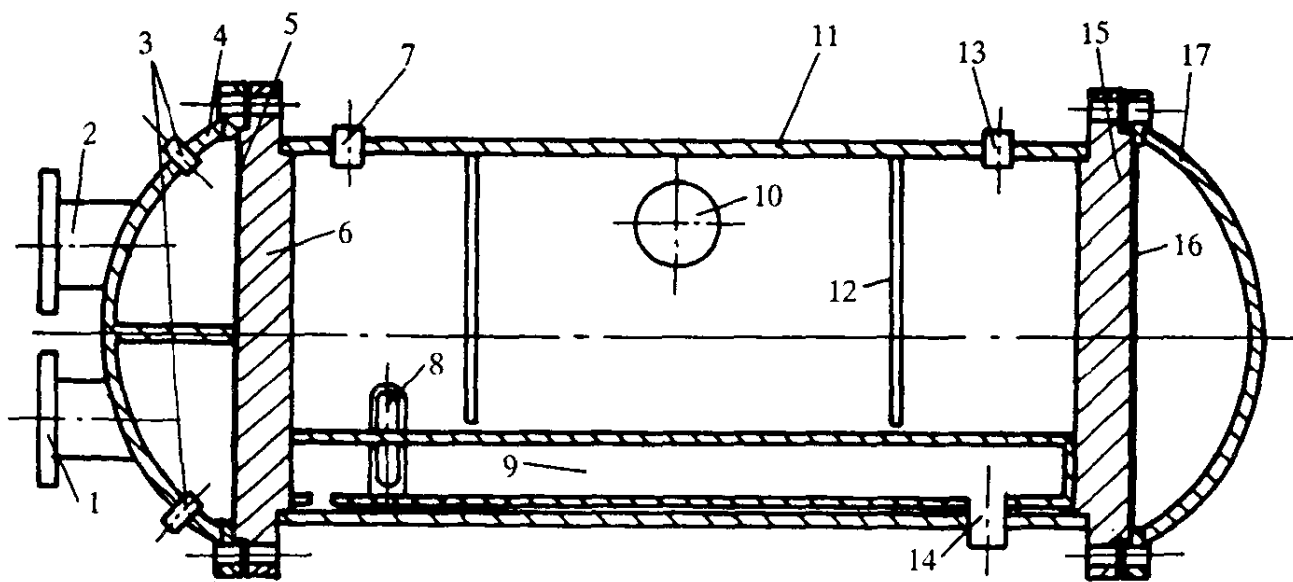


图 14-1 冷凝器结构示意图

1—进水管;2—出水管;3—试水锥牙接头;4—左端盖;5—左垫片;6—左管板;7—压力表锥牙接头;8—液面指示器;9—过冷管架组;10—进气管;11—筒体;12—支撑板;13—安全阀锥牙接头;14—出液管;15—右管板;16—右垫片;17—右端盖

冷凝器主要由筒体、管板、传热管(图 14-1 中未画出)、支撑板或折流板等组成,其加工过程如下:

#### 1. 筒体加工

该制冷用壳管式换热器属于 II 类容器,筒体是壳管式换热器中最重要的承压零件,一般用容器钢板或锅炉钢板制作。国产钢板宽度为 1.8m 或 1.5m(进口钢板有宽度为 2.1m 的),长为 8m,故对于筒体直径大于 570mm 的,常需以多节筒体拼接而成,其制作工艺过程为:

##### (1) 落料:

按图纸展开尺寸划落料尺寸线,展开方向为钢板轧制方向,如图 14-2,除在同一块钢板上划出套料尺寸线外,尚应划出两块  $650 \times 125\text{mm}$  试板尺寸线。然后按线用剪板机或气割下料。

##### (2) 冷作:



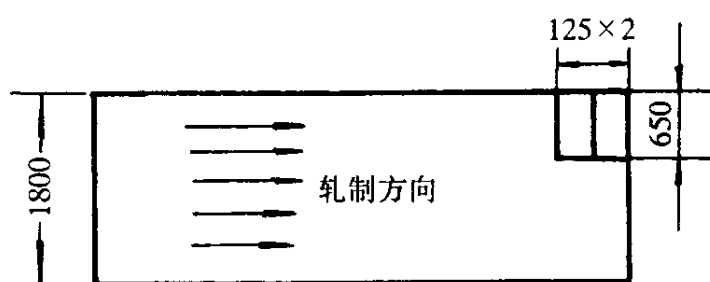


图 14-2 筒体展开划线方向

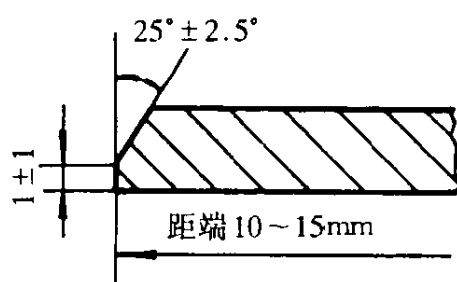


图 14-3 焊接坡口

①在筒体展开尺寸的两端面上铣出焊接坡口,通常坡口角度为  $25^\circ$ ,误差  $1/10$ ,直边尺寸为  $1 \pm 1\text{mm}$ ,如图 14-3 所示。

②清除杂质:在筒体钢板的两展开端面的三个面上,按图 14-3 所示尺寸打磨(包括试板),去除氧化皮,油污等垃圾,以便后面的筒体纵缝焊接。

③预弯:预弯可在各种压力机上进行,如图 14-4 所示,它是利用一副圆心相同的上下模具,在强大的压力(如油压)下,使钢板端部产生塑性变形而弯成的,不同  $R$  的筒体应选用不同的上下模具,由于钢板冷作后还会产生弹性变形,故所选模具的  $R$  应小于筒体的  $R$  尺寸。预弯也可在三辊卷板机上进行(参见图 12-3)。

④轧圆:将预弯后的钢板放入三辊卷板机中,使钢板在下辊带动下左右反复滚动,逐渐使之弯曲形成圆筒状,然后松开上辊轴承,使筒体退出。

⑤固定:点焊外部纵焊缝区域,使之固定。

(3)电焊:

敲击筒体外直缝搭接点焊处焊渣。两块试板分别与筒体点焊固定,使两试板间的拼缝与筒体纵缝在同一直线上,拼缝间隙  $0^{+1}\text{mm}$ 。然后用自动焊机,对包括试板在内的筒体内直缝用同样的电流电压一次焊成。接着再焊接包括试板在内的筒体外直缝。

(4)表面清理:

对筒体内外进行喷砂(小铁丸)处理、去除氧化皮,并清除焊渣。

(5)对试板进行加工与检验:

对焊缝作 100% X 射线拍片探伤,并对试板作机械性能试验,

合格后方可进行下一节筒体焊接。

(6)冷作:

将筒体放入三辊卷板机中再次滚圆,并用榔头对筒体作圆度修正。

(7)检验:

对筒体作  $\geq 20\%$  的直缝 X 射线探伤检查。

以上是壳管式换热器的一节筒体制作工艺过程,其长度仅 1.8m,故一般筒体由两节以上筒体拼接而成,依同样方法制作第二、三节筒体。

## 2. 管板加工

(1)落料:按图纸外圆尺寸线放工艺余量每边约 5mm 画出落料尺寸线,按线切割落料。

(2)车削:在车床上夹住图 14-5 的 A 端面侧外圆,按图纸尺寸车外圆  $\phi a$ ,  $\phi b \times b'$  的凸肩 B 端面,并在凸面上按尺寸起出两条  $0.5 \times 60^\circ$  的圆环形三角槽,此槽是管板法兰与端盖(或水盖)法兰间的密封槽。

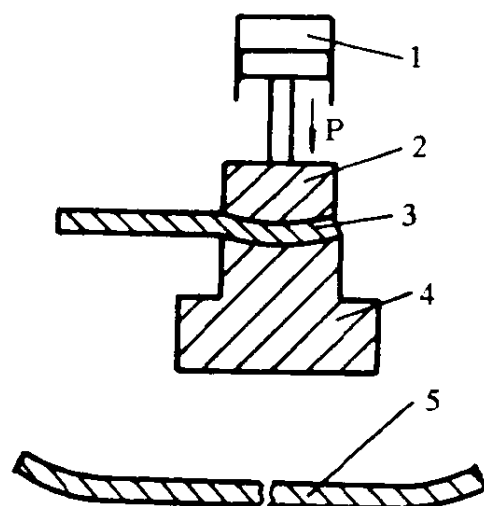


图 14-4 钢板预弯示意图

1—油缸;2—上模;3—钢板;4—下模;5—预弯后的钢板

(3)车削:将工件调头,车床卡盘夹住外圆  $\phi_a$ ,车端面 A 至总厚度尺寸,并车出  $\phi_c \times c'$  的凸肩。

(4)划线:在 A 端面上划中心十字线。

(5)钻削:以  $\phi_c$  外圆及 A 平面为基准定位,装上管孔钻模板,对准周边上所划的十字线夹紧。在钻床上用钻头逐个钻出管孔。用专用起槽工具逐个挖出每管孔中的两道胀接槽。在管孔双面倒角。

(6)钻削:以  $\phi_a$  外圆及 A 平面为基准定位,装上法兰螺钉孔钻模板,对准周边上的十字线夹紧。在钻床上逐个钻出法兰螺钉孔。

(7)钳工:修去全部毛刺和锐角。

以同样的工艺制出列管式换热器的另一端管板。

### 3. 传热管加工

按图中尺寸,用机锯落料,并去除管端毛刺。进行喷砂(小铁丸)处理,以去除管中油污、毛刺及垃圾。

### 4. 支撑板或折流板的加工

图 14-6 为折流板结构与布置图,支撑板和折流板的工艺大体相同。具体如下:

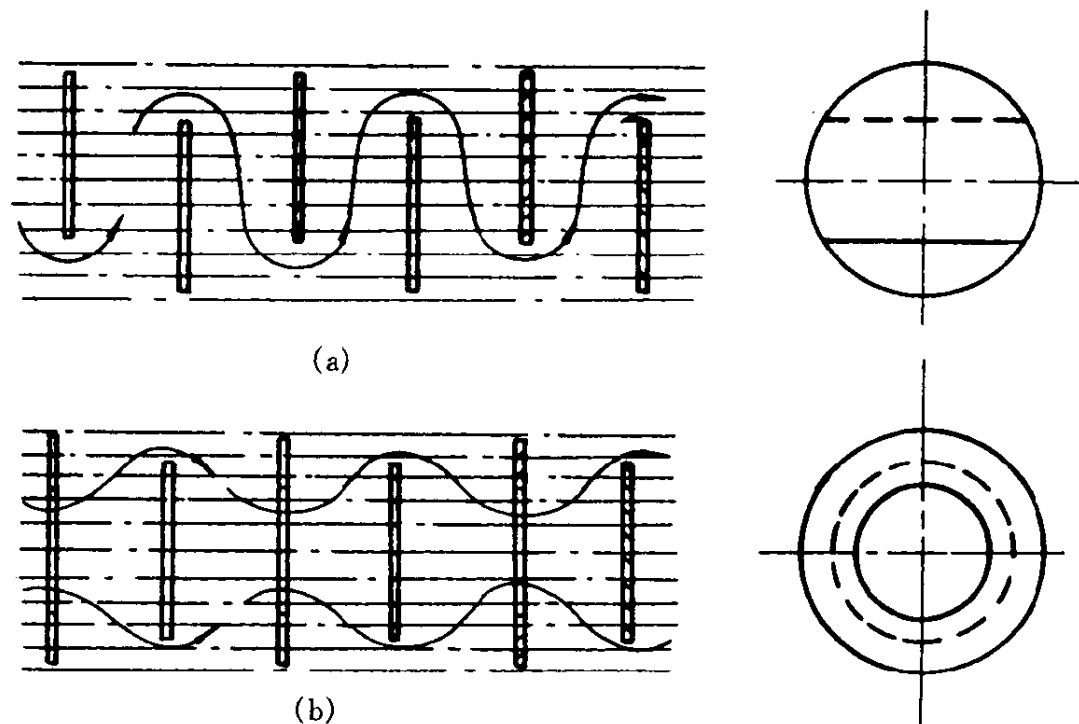
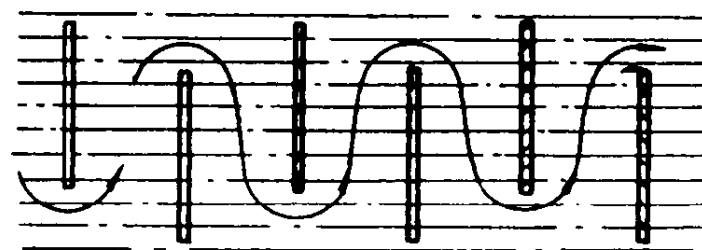
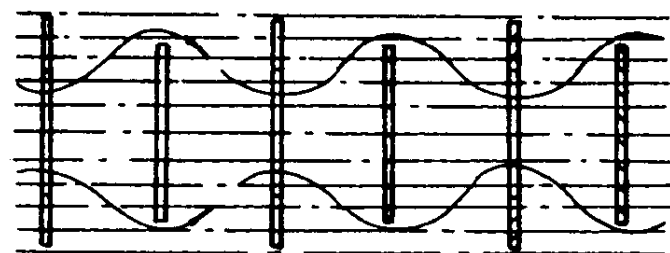


图 14-5 管板零件图



(a)



(b)

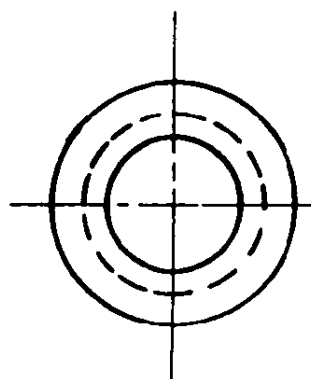
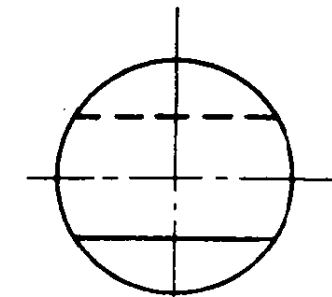


图 14-6 折流板

(a)圆缺形;(b)环盘形

(1)冷钳:按图纸尺寸线放工艺余量每边 6mm 的外圆画出落料尺寸线,用气割按线下料。每块板整形校平,支撑板 6 块以上一组,折流板 20 块左右一组。周边对齐,点焊固定。

(2)钻削:在每组板上装上管孔钻模板,在钻床上钻出全部管孔和拉杆定位孔。再进行孔口倒

角。

(3)车削:将每组板与车夹具底板一起,在管孔中用数根螺栓旋紧,车床卡盘夹牢底板,校正后车出各组板的外圆。

(4)冷钳:对同一板组按上下顺序编号后拆开,划缺口线和剪切线,在剪板机上按线剪切成形,再将各管孔倒角去毛刺。各块板整形校平。

以上是壳管式换热器中的主要零件——筒体、管板、传热管和支撑板(或折流板)的加工工艺,此外还有许多小零件如端盖、筒体和端盖上的进出流体接管及法兰、端盖垫片等,它们的工艺较简单,此处不再详述。

### 14.1.2 壳管式冷凝器的组装

该冷凝器(见图 14-1)的管板与筒体用焊接法连接,管板带有法兰以便与端盖连接。

传热管与管板之间的连接方式常用的有两种如图 14-7 所示。图中(a)是胀管连接,(b)是焊接法连接,焊接法特别适用于直径较大的无缝钢管,因为钢管材质较硬,用胀管法较困难。该冷凝器采用胀管连接。采用胀管法时,管孔与管外径间的间隙较小,常为  $0.2\sim 0.4\text{mm}$ ,管孔表面粗糙度为  $Ra = 2.5\sim 5\mu\text{m}$ 。为使胀管牢固,还常用特制的偏心刀具在管孔中挖两道环形槽(当管板厚度在  $25\text{mm}$  以下时,也可只挖一道)槽宽  $3\text{mm}$ ,深  $0.5\sim 0.8\text{mm}$ ,以便胀管时可将材质较软的铜挤压变形嵌入环形槽内,增加连接的强度和密封性。当管子直径较小( $14\text{mm}$  以下)或设计压力较低(表压  $588\text{kPa}$  以下)时,也可不挖槽而采用光管胀接。采用胀管法连接时,对管和孔的加工要求较高,管板孔壁在胀管前需经打磨,使之发出金属光泽,且打磨时不可抹油。胀管前两管端各约  $200\sim 250\text{mm}$  长度需作退火热处理,且亦需对管端长约  $90\text{mm}$  段打磨至发出金属光泽。清理后的管端外表面和管板孔壁面上均不允许有深度超过  $0.1\text{mm}$  的轴向沟槽,以防胀管后泄漏。管端内壁长约  $100\sim 200\text{mm}$  处的铁锈,需用钢丝刷清除,以免磨损胀管器。下面是该卧式壳管式换热器的总体组装工艺。

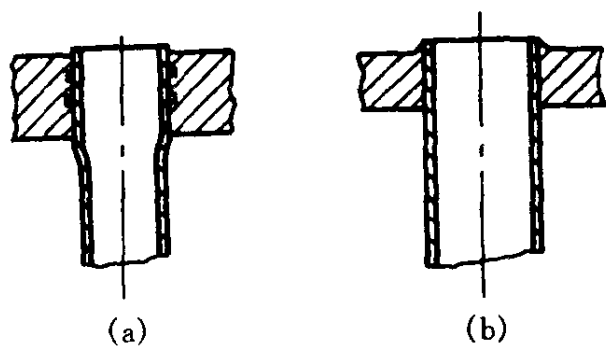


图 14-7 管子与管板的连接方式

#### 1. 拼焊两节筒体

(1)对已制成的每一节筒体的两端面,距端面  $10\sim 15\text{mm}$  的内表面、端面、外表面的三面打磨,去毛刺。

(2)将每节筒体距端面  $20\sim 25\text{mm}$  处的内直缝焊高部分磨平,以便安装焊接衬圈。

(3)制作环缝加强衬圈,表面抛光。

(4)筒体拼接,相邻两节筒体的纵缝与环缝严禁成“十”形焊缝,两节筒体间的纵缝须错开  $100\text{mm}$  以上。

(5)点焊固定两筒体的拼接,焊缝区域外不得引弧。

(6)对两节筒间的环缝作手工焊接打底,焊后去焊渣,对环缝作自动焊盖面。

(7)对焊缝作 X 射线探伤。II 类容器探伤尺寸为  $\geq 20\%$  的环缝长度。

#### 2. 筒体各孔口的加工

在筒体上画出进气孔、出液孔等开孔的中心十字开孔线,按划线气割各孔口和坡口并进行倒角,再用砂轮打磨。

#### 3. 将左管板与过冷架组焊接

在左管板上划线,将左管板与过冷架组点焊。然后按与(6)同样的手工焊法,将左管板与过冷管架组焊接,焊后去除焊渣。

#### 4. 将进气管、支撑板、加强板、左、右管板与筒体焊接

先按图将进气管、支撑板、加强板与筒体点焊固定,再将左、右管板与筒体搭配点焊固定,然后再将上述各板、管与筒体焊成一体。

#### 5. 将锥牙接头、指示器与筒体焊接

按图纸将安装压力表、安全阀等用的几个锥牙接头及液面指示器与筒体点焊固定,然后再将各锥牙接头、进气管、液面指示器与筒体焊接。

#### 6. 冷凝管与管板的胀接

(1)用活络铰刀对管板绞孔,去除油污垃圾,管孔应光洁,无纵向划槽。

(2)去除螺纹管和管板孔内的油污、垃圾,将所有冷凝管逐根从管板孔插入筒体。

(3)将与管板连接的各管端预先扩孔。

(4)利用胀管工具(手工或电动)将铜管与管板胀紧。

(5)留在管板外的管端长短不一,可用刮刀刮齐。

#### 7. 壳侧试压

(1)拼紧各管堵,以温度不低于 $5^{\circ}\text{C}$ 的水通入壳侧,将水压升至 $2\ 942\text{kPa}$ ,保持 $10\text{min}$ ;然后将水压降至 $1\ 961\text{kPa}$ ,保持 $30\text{min}$ 。均不得有渗漏。检查后放尽筒内存液。

(2)当气温高于 $5^{\circ}\text{C}$ 时,则在壳侧通入压缩空气和氮气,维持气压为 $2\ 059\text{kPa}$ ,且保持 $30\text{min}$ ,不得有泄漏,作气密性试验。检查后放尽存气。

#### 8. 管侧试压

将两端的垫片、端盖装上,用螺钉将其与管板拼紧,堵住一端出水口,泵入 $588\text{kPa}$ 的水压,维持 $30\text{min}$ ,再降至 $392\text{kPa}$ 水压,维持 $10\text{min}$ 作管侧水压试验,不得有渗漏。合格后放完存液。

#### 9. 油漆

去除表面油污,外表面涂环氧铁红底漆一层,再漆铝粉红漆一层。

#### 10. 检查

作完工检查,检查容器表面附件,各零部件加工记录卡成册,钉产品铭牌。以上是带过冷装置的壳管式卧式冷凝器的组装工艺全过程。

## 14.2 空气预热器的制造工艺

锅炉的空气预热器主要是加热燃烧用的空气以利燃料着火和燃烧,并通过降低排烟温度来提高锅炉效率,目前得到广泛应用的主要类型为钢管式空气预热器和再生式空气预热器,这两类空气预热器的制造工艺特点有很大不同。

### 14.2.1 钢管式空气预热器

钢管式空气预热器主要由厚度 $10\sim 30\text{mm}$ 的上、中、下管板,壁厚为 $1.2\sim 1.5\text{mm}$ ,直径为 $30\sim 51\text{mm}$ 的高频焊有缝钢管或无缝钢管以及结构框架所组成,图14-8示出了钢管式空气预热器的结构简图。

#### 1. 钢管及其下料

一般情况下,所采用的钢管为在连续成形装置上将钢带变形以后进行高频电阻焊而获得的有

缝钢管,根据锅炉容量的不同,钢管式空气预热器一般为单级或双级布置,受热面一般需要一至二个管箱,当管子直径为40mm时,管箱高度应低于5m;当管子直径为51mm时,管箱高度不超过8m。由于每一个空气预热器管箱都是规则的长方体,所以在每一个管箱中的几百根乃至几千根管子都是同样长的。根据空气预热器管箱的这一结构特点,在管子下料时,往往可按图纸要求的尺寸,在下料设备上装置定长挡块,用以控制管子的下料长度,从而取消了手工划线的繁重工作。或者根据工厂定型产品的尺寸,直接向高频焊管制造商订购具有固定管长的管子,可避免管子下料工作。

管子下料时,因为管壁厚较薄,应采用特制的剪刀,装置在冲剪机上,实现管子的高速冲剪下料,如图14-9所示。

切下的管子由于管端受到剪刀片的冲剪力作用而产生如图14-10所示的凹痕。为了消除这种管口缺陷,可在同一台冲剪机床上加装一套校正设备,予以校圆(图14-11)。校圆用的上模和剪刀片是同步运动的,在剪下一个管口的同时也就校圆了前一个有凹痕的管口。

钢管式空气预热器的受热面管子应尽量用整根管子制成,长度不够时允许拼接,但拼接用管子的最短长度不小于300mm。拼焊短管时,必须选择合理的焊接电流和适当直径的焊条,防止焊接时烧穿。焊后应抽验部分管子进行通球检查。拼焊管子的接缝处应打磨平整,并进行水压试验,以保证拼焊管的质量。

管子拼接时,对接接头的边缘偏差不大于0.5mm,对接焊缝的表面不得有气孔、裂纹和烧穿等缺陷。

## 2. 管板的制造

管板的结构设计主要是根据保证空气预热器管箱的刚度的角度来考虑的。上、下管板在保证整个管箱的外形尺寸以及在受热时不翘曲变形方面有着很大的作用。另外,下管板还要承受整个管箱的重量。所以上、下管板比较厚,一般为20~30mm,中管板较薄,一般为5~15mm。

管板应尽量用整块钢板制成,尺寸不够时允许拼接,但拼接数量不宜超过三块,拼接用最小钢板的宽度不小于300mm,管板拼接时,对接焊缝的表面不得有密集的气孔和裂纹等缺陷,焊缝的咬边深度不大于1mm,两侧咬边总长度不大于该焊缝长的25%。

管板拼接后,应将焊缝的余高修平,在修磨过程中造成的凹陷深度不得大于板厚的15%,并且最大不超过2mm,超过时应补焊并修磨。

管孔的直径偏差不大于 $d_0^{+1}$ mm,纵向和横向相邻两管孔其中心距 $t, t_1, t_2$ 或 $t_3$ 的尺寸偏差 $\Delta t$ 不大于 $\pm 2$ mm。纵向或横向最外两管孔,其中心距 $L$ 或 $L_1$ 的尺寸偏差 $\Delta L$ 不大于 $\pm 3$ mm。如

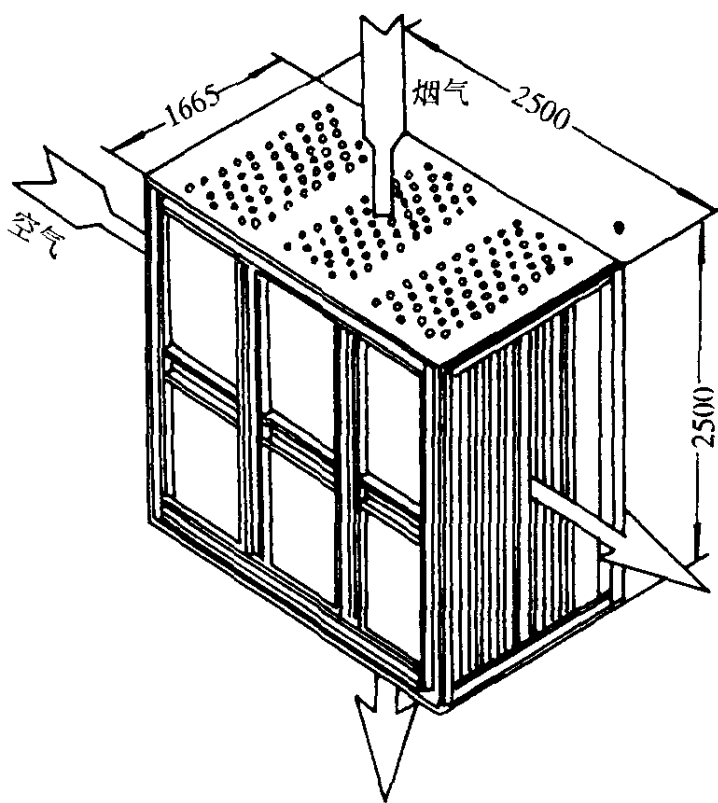


图 14-8 管式空气预热器

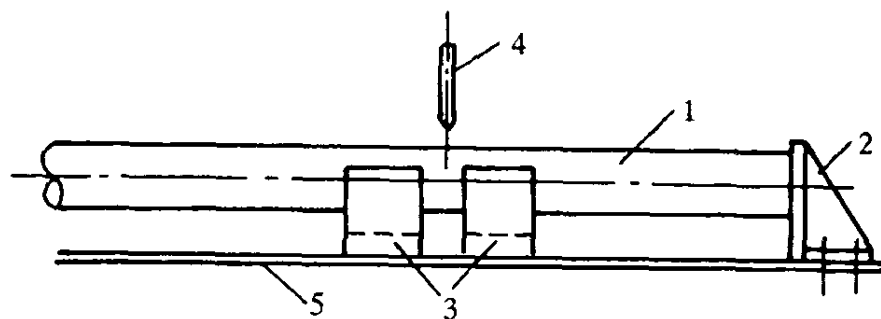


图 14-9 管子的冲剪下料示意图

1—管子;2—一定长档板;3—刀座;4—剪刀片;5—机架

图 14-12 所示。

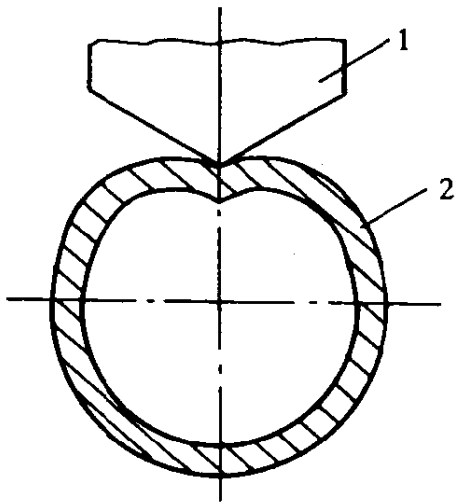


图 14-10 冲剪后管口的凹痕  
1—剪刀片;2—管子

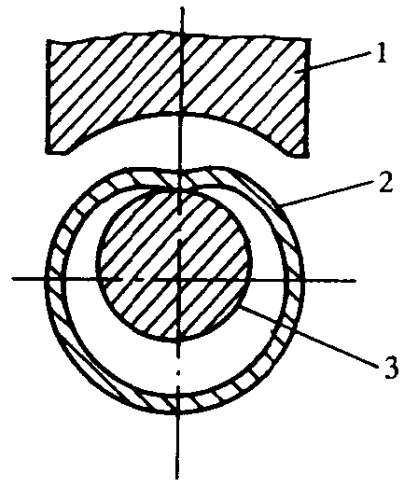


图 14-11 冲剪后管口的校圆  
1—校正上模;2—管子;3—校正芯棒

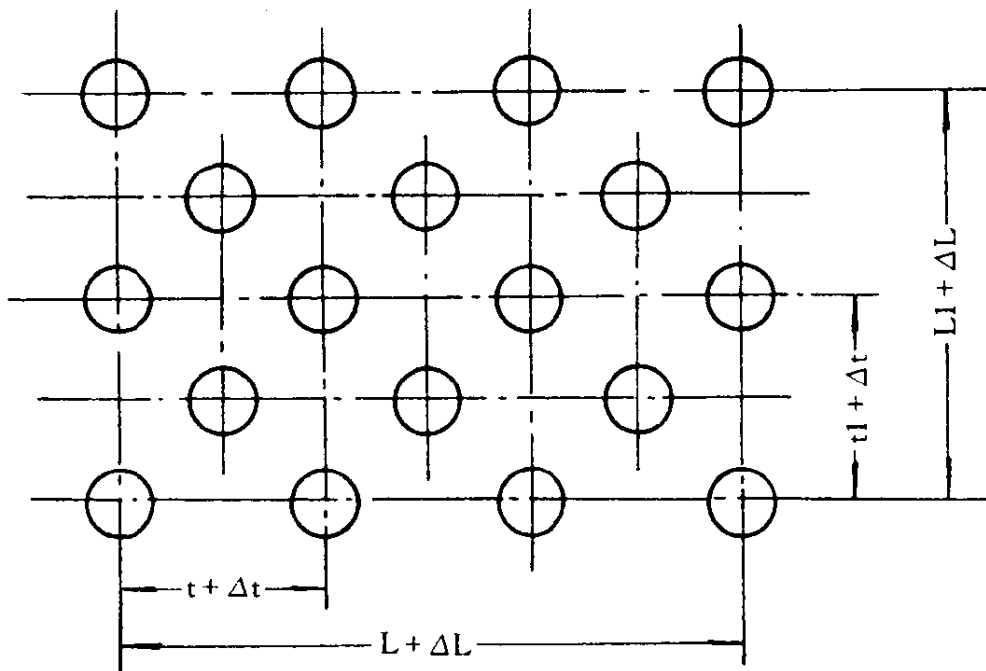


图 14-12 纵向和横向管孔中心距尺寸偏差

### 3. 管箱的装配与焊接

管箱的装配必须按图纸进行,保证管箱外形尺寸的准确性。管箱的装配工作通常在工作平台上进行,在进行大量穿孔之前,一般先在管板的各个不同位置装配 10~14 根左右管子(这些管子称为固定支撑管)并先焊妥,用以固定管箱的装配尺寸,如图 14-13 所示。然后再穿入其它所有的管子。穿管后,管端应伸出管板 0~2mm,以便于管端与管板的焊接。由于管子的数量很多,因而穿管工作是十分繁重的工作。近年来,采用了一些机械化穿管装置,可成排地进行穿管工作,从而提高了劳动生产率,降低了劳动强度。

管端与管板的焊接,大都采用手工电弧焊。为了防止和减少管板因焊接所造成的内应力和变形,通常施焊次序是先焊妥一块管板上的全部管端焊口。施焊的方向一般应从管板中心对称地向外沿进行。焊接完毕后,角焊缝的表面不应有气孔和裂纹等缺陷。

管箱四个侧面上、下管板间两对角线长度之差,当管箱高度不大于 3m 时不大于 5mm;当管箱高大于 3m 但不大于 5m 时不大于 7mm;当管箱高度大于 5m 时不大于 10mm。

由于每个管箱的管子数量很多,每台锅炉的空气预热器又是由许多管箱组成的。因此其焊接工作量是很大的。为了减轻劳动强度,提高劳动生产率。近年来,采用了各种自动焊接方法代替手

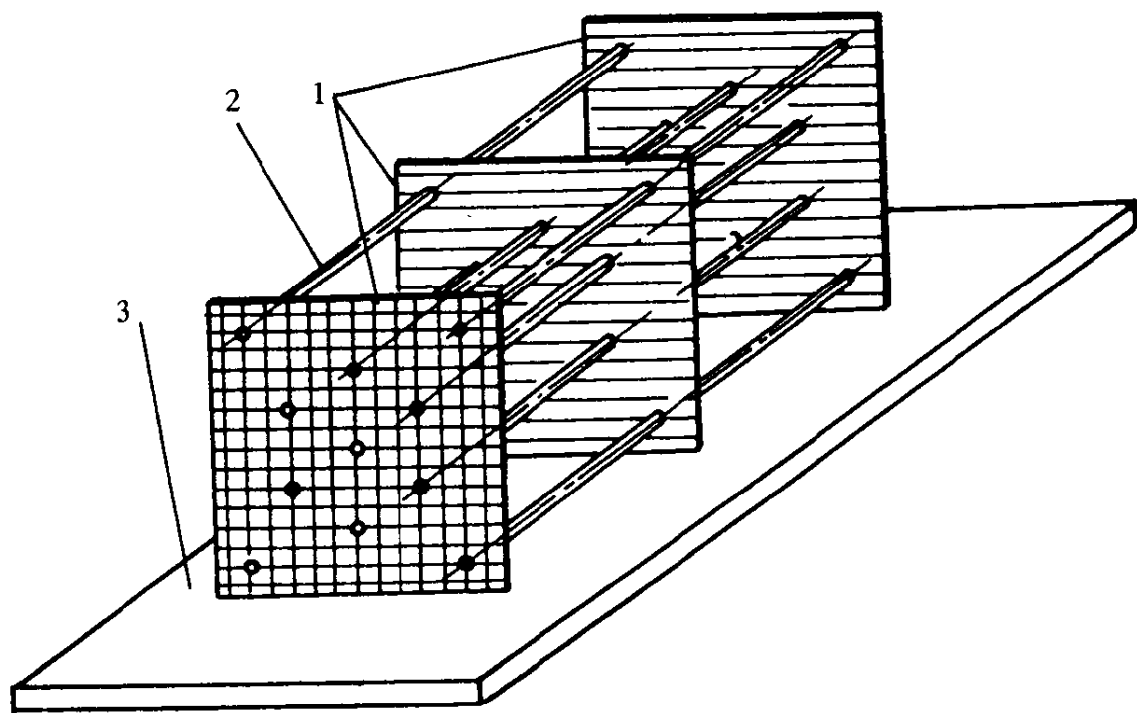


图 14-13 空气预热器管箱的装配

1—管板;2—固定支撑管;3—装配平台

工操作,这些方法大都是采用各种围绕管端旋转的焊接机头进行自动焊接工作,一般都是用气体保护电弧焊接,也有的采用磁弧焊接。

### 14.2.2 回转式空气预热器的制造特点

回转式空气预热器具有结构紧凑、金属耗量少、占地面积小等一系列优点,在现代大容量锅炉上得到十分广泛的应用。但是,由于回转式空气预热器存在着转动部件,这就带来了许多复杂问题,如密封问题、回转平稳性问题、装配的精密性问题等。这些都对其制造工艺提出了更高的要求,以保证回转式空气预热器能正常、可靠、经济地运行。随着锅炉容量不断增大,回转式空气预热器也愈来愈大,其直径已达 17~20m,使上述各问题更为突出。图 14-14 示出了回转式空气预热器的结构简图。

回转式空气预热器的转动部件由置于下梁中心的推力轴承和置于上梁中心的导向轴承支撑,并处于一个多边形的壳体中,上梁和下梁分别与壳体相连,壳体则座落在钢架上。装在壳体上的驱动装置通过转子的外围的围带,使转子旋转。为了防止空气向烟气侧泄漏,在转子上、下端半径方向,外侧轴线方向以及圆周方向分别设有径向、轴向及旁路密封装置。另外,被加工成特殊波纹的金属蓄热元件被紧密地放置在转子的扇形隔仓内以实现热交换。

#### 1. 回转式空气预热器的制造工艺特点

回转式空气预热器根据其结构不同可分为两大类,即受热面回转式(转子式)及风罩回转式(定子式)两类。它们在结构上虽有所差别,但从制造工艺方面来看,有其共同之处。

这两类回转式空气预热器的主要部件为:转子(或定子)、烟风道(或八字风罩)及密封装置等。其中转子(或定子)及烟风道(或八字风罩)均是由较薄的钢板焊接而成,而且体积很大。其焊接工作量极大,往往会由于制造过程中的焊后收缩变形及残余应力,破坏了预热器的密封性能,造成严重的漏风量,影响到预热器的经济安全运行。此外,为了使每个放置受热面的仓格内的受热面元件可以互换,同时为了减小仓格与受热面元件之间的空隙,要求仓格小室的尺寸公差为 $+2 \sim -4$ mm。这样小的公差,对于具有大量焊接工作的大型薄壁构件来讲是一个困难的问题。因此,从制造工艺的角度如何尽量设法减少焊接变形和残余应力,是回转式空气预热器制造工艺中要着重

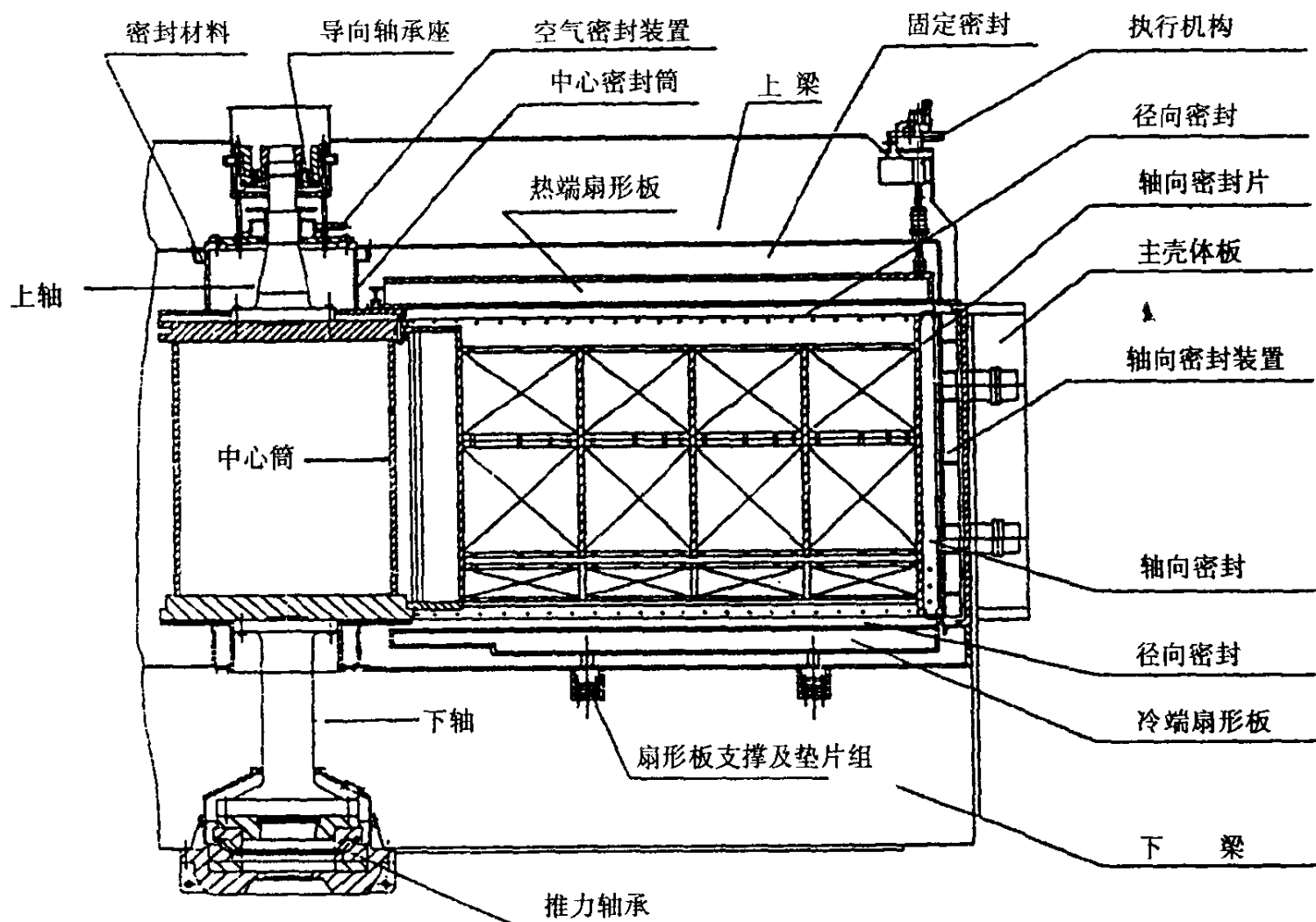


图 14-14 回转式空气预热器的结构简图

解决的一个主要问题。

#### (1) 焊接变形的控制:

现以风罩回转式空气预热器为例说明焊接变形的控制措施。首先,风罩回转式空气预热器的定子主要是由中心筒,定子筒身、上下法兰及几十块径向和横向隔板相互焊接而成。对于中心筒的下端板支承面、定子筒身的上下端面、上下法兰平面等都是保证空气预热器密封性的重要部分,为了保证良好的密封性能,对这些平面必须进行机械加工,以获得平整光洁的密封平面。对于现代大直径回转式空气预热器必须备有大型加工设备。目前,常用的设备是大型立车。近年来,为了提高密封平面的平整度,已开始采用大型立铣进行机加工了。另一方面,为了使这些加工面不受焊接变形的影响,在工艺上应符合先焊接后机械加工的原则。

其次,在定子的整体装配和焊接过程中,为了防止和减少定子整体的变形,在工艺上应先将各零件装配成整体的定子,再进行焊接工作。

第三,装配间隙对产生焊接变形也有很大影响。装配间隙过大,则焊接时的横向收缩和变形也大。另外,在整条长焊缝上,如果装配间隙不均匀更是造成焊后变形和残余应力的主要原因。

第四,在焊接过程中,为了减少变形和残余应力,应从焊接规范和焊接顺序方面采取措施。在工艺规范方面,往往采用直径较小的焊条,选用较小的焊接电流和均匀的焊接速度。近年来,已采用各种自动气体保护电弧焊代替了手工焊,从而进一步减小了焊接变形。另一方面,正确的焊接顺序对减少焊接变形和残余应力有着显著的作用。此时以采用对称分段逆向焊接法最为有效。

另外,回转式空气预热器的旋转平稳性也是影响其经济可靠工作的重要因素。为了保证设备运转可靠,预热器的传动围带的制造质量和转动部分的质量分布是否均匀是影响旋转平稳性的主要因素。传动围带与转子或下风罩的焊接应尽量防止焊接变形,故也应采用对称分段焊接法,并应



使其装配间隙尽可能小而且均匀。为此,围带内圆应进行车削加工。围带上销轴孔的加工必须保证其圆周节距以及上下围带销轴孔的同心度均符合设计要求。

转动部分质量分布的不均匀性往往使转动中心轴及其轴承的工作条件恶化,因此要求转动部分的质量分布必须均匀对称。

#### (2) 模块件的制造工艺要求:

目前制造的回转式空气预热器,直径较大,高度较高,受运输条件限制,一般都将转子分成24个模块和一只中心筒。波形元件在制造厂内全部装入模块中。导向端轴,支承端轴和中心筒在厂内组装成轴,而中心筒和24个模块全部采用销子、螺栓和螺母在工地组装,这就要求较高的制造精度以确保模块件的通用性和互换性。

模块件制造时要严格控制几何尺寸和公差要求,使其成为标准件,增加模块件的通用性和互换性;同时对与中心筒连接部分的连接孔应具有严格的同心度;对模块件的外圆弧板也要保证其圆度,以便和围带、周向密封等有良好的配合。模块件的隔仓尺寸要严格控制公差,以保证传热元件的装填。冷端隔仓的支承栅架表面不得有毛刺、焊瘤等缺陷。

模块件是薄壁组合焊接结构,为控制变形,一般要在模具上装配定位后,在模具上拼装施焊,待焊后基本冷却时才从模具上取下,这时装配模具既是一个定位装配模具,又是一个防止焊接变形的强制模具。

模块件的径向隔板,工艺上一般采用拼焊,拼焊接缝的表面应光滑平整,焊缝不能低于母材。

#### 2. 回转式空气预热器的试运转

回转式空气预热器各部件制造完成后,必须按图纸进行检验性的总体装配,然后进行冷态试运转。

冷态试运转的目的:(1)检查预热器的运转平稳性和可靠性。例如,转动部分(包括轴承)是否平稳可靠;有无冲击及强烈振动;是否有不正常的撞击、噪音、升温、漏油;检查转动部分的摆动情况[通常,径向摆动 $\nlessgtr$   $\pm 1\text{mm}$ /每1000mm(直径),平面摆动 $\nlessgtr$   $\pm 0.65\text{mm}$ /每1000mm(直径)]等。(2)检查密封装置,试运转时必须按要求测量并调整密封元件的位置及间隙值。

## 第 15 章 集箱的制造

锅炉中的屏式、蛇形管式受热面介质的汇聚和分散都需要进出口集箱,大容量、高参数锅炉受热面为减少热偏差,还要中间混合集箱,因此集箱是锅炉制造厂的主要部件。

集箱一般为无缝钢管件,只有大口径集箱才需要钢板弯制或卷制,用钢板弯制或卷制的大口径集箱和锅炉锅筒的制造工艺基本相同,在此不再重叙。

一般工业锅炉制造厂,因锅炉容量小,锅炉本体尺寸也小,集箱一般不需要对接拼焊。其制造工艺的特点主要是下料和集箱管端旋压封口,然后在旋压封口处焊接手孔装置,集箱上一般布置有排孔,也需要焊管划线等工艺,最后进行水压试验。其制造工序如下:

材料验收→划线→切割→  
① →划管座孔、短管孔、管孔线→钻管座孔及短管孔→装座及  
②  
短管→焊接(打钢印)→水压试验→割盲板及开坡口→加工管孔→油漆包装

① 加热管端收口→划中心线及手孔线→气割手孔或盲板孔→装手孔加强圈或堵板→焊接(打钢印)。

② 开坡口→装集箱端盖→焊接(打钢印)→无损探伤。

电站锅炉制造厂所制造的锅炉容量大,本体尺寸大,因此所需要的集箱往往需要对接拼焊,在制造上有其独特的制造工艺。

### 15.1 集箱的对接拼焊

集箱筒体拼焊时,最短筒节的长度不小于 500mm,集箱上拼接环缝总数(设计上需要的不包括在内),当集箱长度不大于 5m 时,不超过一条;当长度大于 5m 但不大于 10m 时,不超过两条;当长度大于 10m 时,不超过三条。

集箱的拼接焊缝对接时,焊接坡口应尽量对准齐平。其边缘偏差应符合下列规定:

(1)集箱的边缘偏差  $\Delta\delta$ (图 15-1(a)所示)应不大于  $0.1t + 0.5$  并且不大于 4mm,其中  $t$  为集箱的公称壁厚。

(2)集箱内表面的边缘偏差  $\Delta\delta$  如果大于集箱公称壁厚的 10%加 0.5mm 或者大于 1mm 时,超出部分应予削薄,使其与接头的另一侧的边缘平齐,削出斜面斜度不大于 1:4(如图 15-1(b)所示)。

#### 15.1.1 集箱对焊拼接方法

集箱的对焊拼接工作常采用手工氩弧焊、手电电弧焊、窄间隙埋弧自动焊等。一般情况下,当集箱直径在  $\phi 273\text{mm}$  以下时,由于集箱直径较小,焊接时焊接区的焊剂不易保持,熔池容易流失,因此,只能采用手工氩弧焊打底,手工电弧焊盖面,手工焊生产率比较低,焊接质量不易保证;当集箱直径在  $\phi 273\text{mm}$  以上时,可采用手工氩弧焊打底,手工电弧焊熔敷到 5~12mm,最后采用窄间隙埋弧自动焊盖面。

### 15.1.2 环焊缝坡口形式

集箱对接的环焊缝坡口一般为 U 形宽间隙坡口(图 15-2(a))和窄间隙坡口(图 15-2(b)),U 形宽坡口适宜于采用常规的埋弧自动焊进行焊接。

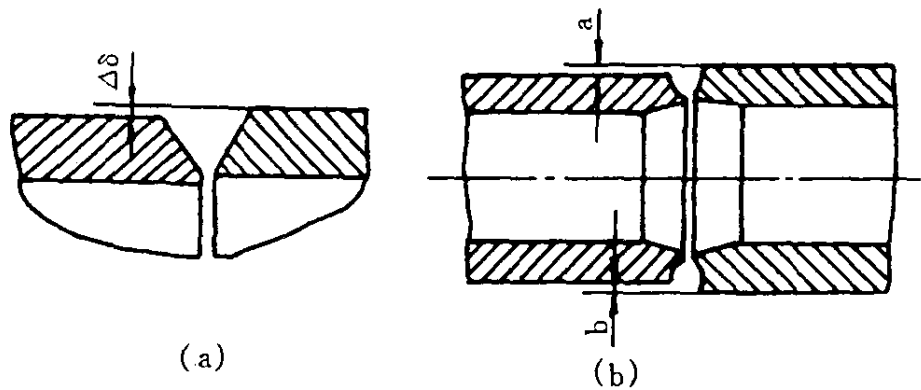


图 15-1 集箱对接边缘的偏差

### 15.1.3 焊前准备

集箱对接环焊缝在装配前要求坡口及

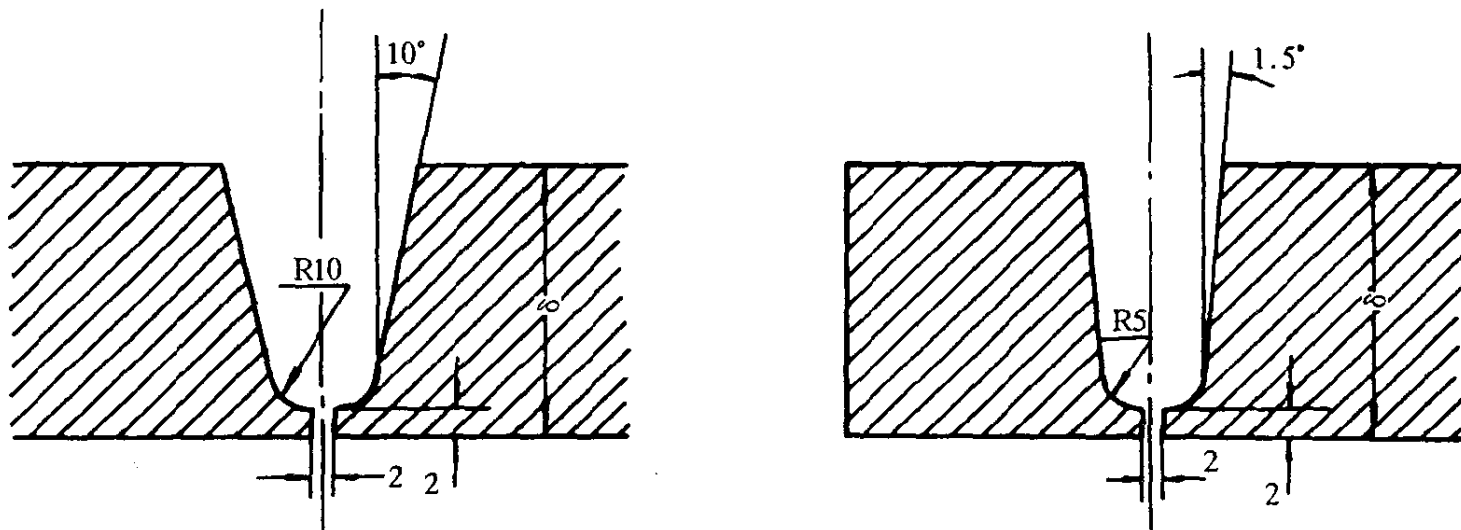


图 15-2 集箱对接环焊缝坡口

(a)U 形宽坡口;(b)窄间隙坡口

其内外表面两侧 10mm 内除去油污、铁锈及其它有害杂质,并磨光,装配时留 2mm 左右焊缝间隙,防止错边过大。

### 15.1.4 焊后检查与缺陷修补

焊后应对环焊缝进行 X 射线探伤,或超声波探伤,封底焊缺陷要用手工氩弧焊填丝修补。

## 15.2 集箱管座坡口结构

锅炉集箱上都开有成排的管孔以便焊接和受热面相连接的管接头,集箱上焊接的管接头有长短之分,我国各锅炉厂一般采用短管接头,而从美国 ABB-CE 引进的亚临界控制循环锅炉集箱上均采用长管接头,这两种管接头各需要不同的管座坡口结构。

我国常用的管座坡口结构如图 15-3 所示,图 15-3(a)属于马鞍形全焊透角焊管座结构,在我国使用非常广泛。图 15-3(b)属于全焊透对接焊管座结构,这种结构的对焊形式有利于管接头的工作状态,但这种结构加工难度大,而且只适合于短管接头。

图 15-4 所示的管座坡口结构是美国 ABB-CE 公司采用长管接头和集箱焊接时采用的未焊透结构。在引进国外技术后,我国大型锅炉厂已开始采用这种结构,这种管座坡口结构在沉孔底部加工一个倾斜  $10^\circ$  的环形斜面,在安装长管接头装配定位时能够适当调整,接触较好,应力集中程度低,抗疲劳能力强。采用盆形槽口使管接头与管座坡口的焊接金属量增加,对接口有补强作用,使连接部位的抗剪能力提高。但这种结构毕竟是未焊透结构,其综合性能不如图 15-3(b)的对接全

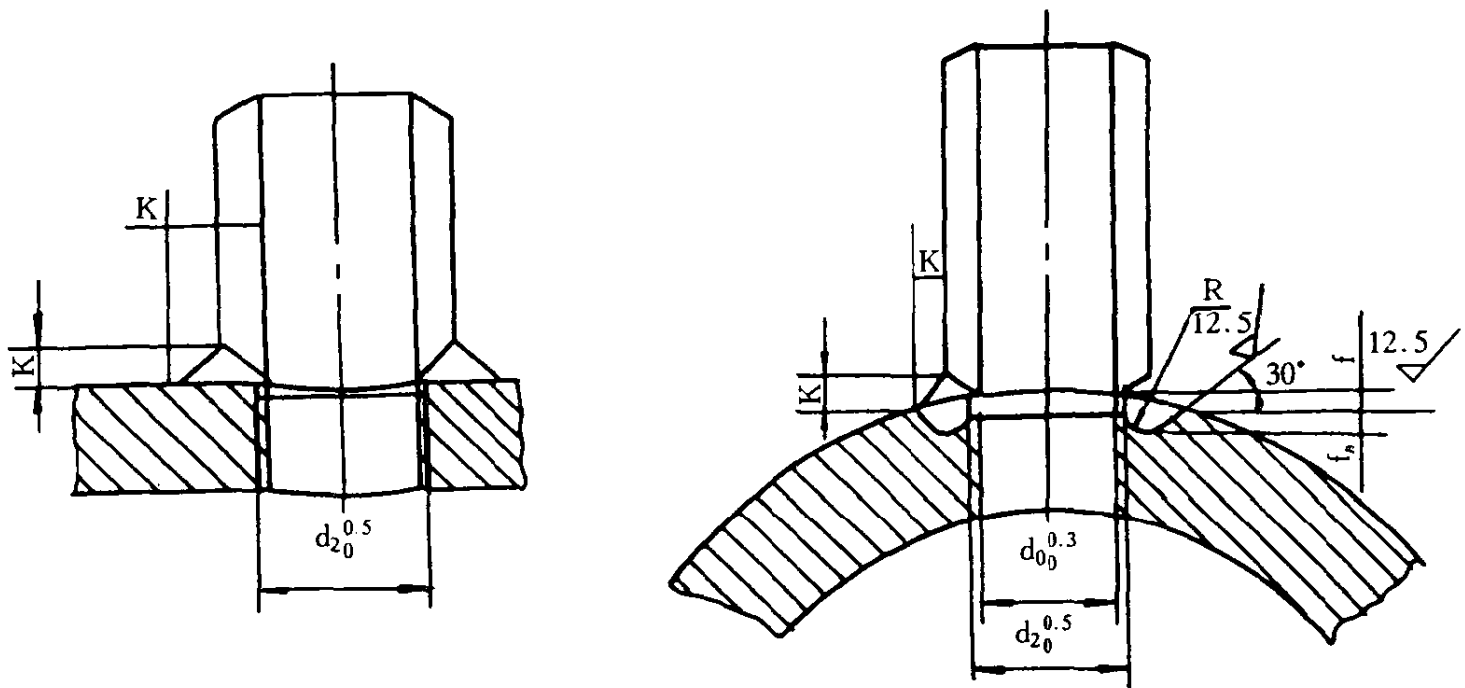


图 15-3 我国电站锅炉集箱管座坡口结构  
(a)马鞍形全焊透结构; (b)全熔透对接结构

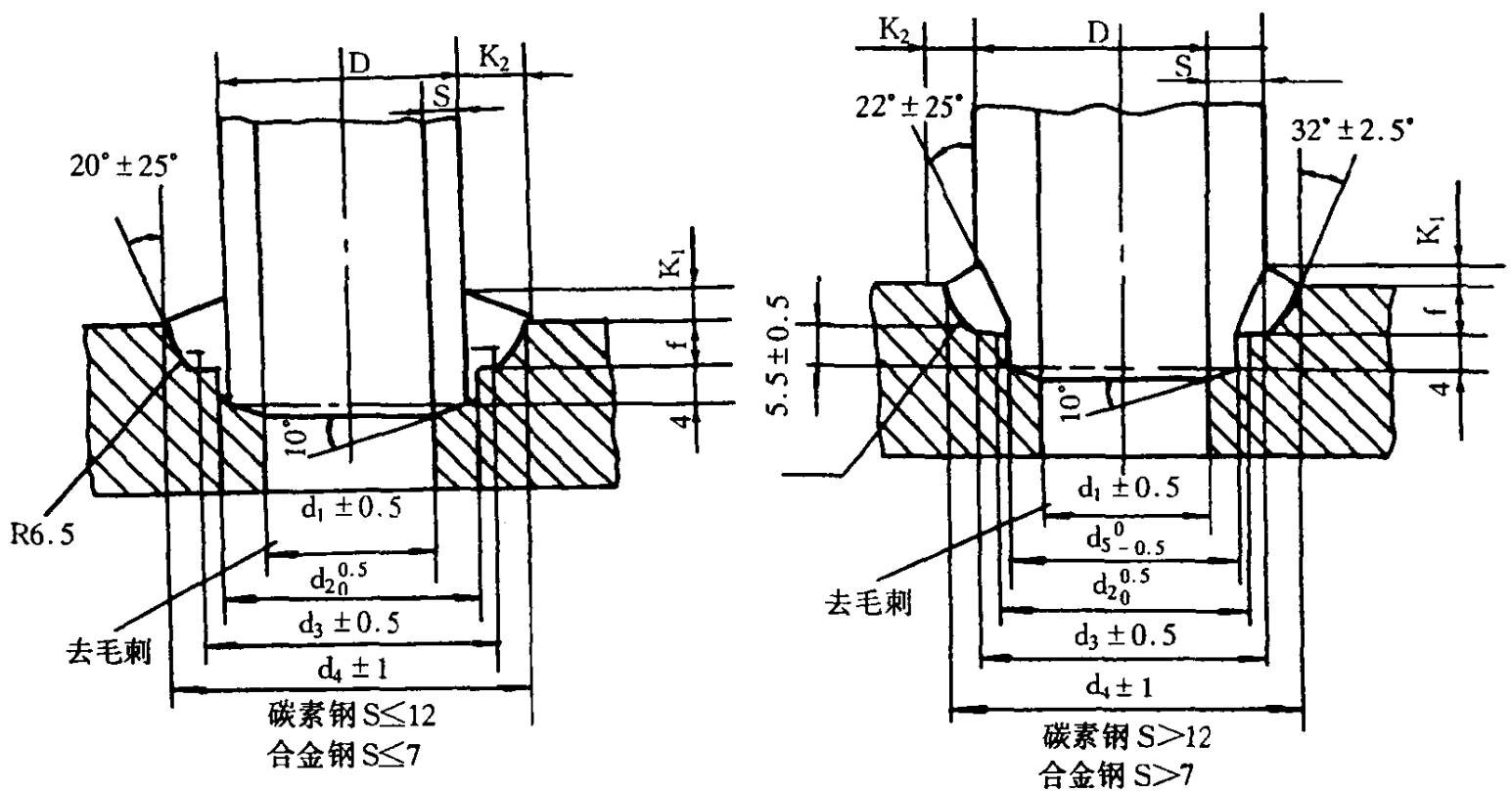


图 15-4 引进机组锅炉集箱管座坡口结构  
(a)阶梯形结构; (b)盆形结构

焊透结构,但这种结构适合长管接头。

### 15.3 集箱端盖的制造特点

目前集箱直径 219mm 以下的集箱端盖基本上采用热旋压工艺以取代通常所采用的焊接端盖。集箱端部旋压收封后,在端盖上采用机械加工开一小孔,然后进行盖板封焊,如图 15-5 所示,或者开一手孔,焊接手孔装置。

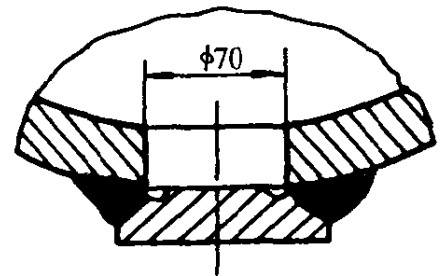


图 15-5 集箱收封端部的封焊

当集箱直径大于 219mm 时,集箱端盖一般采用和集箱材料相同的平板形锻件经过机械加工制造而成,如图 15-6 所示。在集箱端盖和集箱相焊的地方开 U 形坡口,集箱端盖和集箱筒体的焊接

方法和集箱筒体之间的对接焊基本相同。

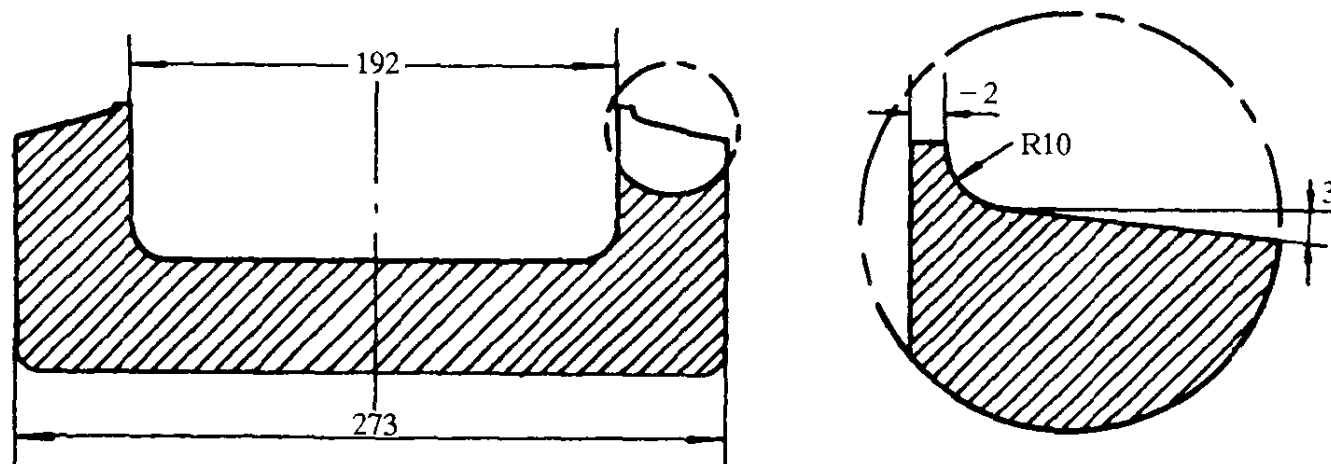


图 15-6 集箱平端盖  
(a)端盖结构图;(b)坡口放大图

## 15.4 集箱的焊后热处理

一般水冷壁和省煤器集箱是用 20G 制造,而过热器、再热器集箱采用 12Cr1 MoV, SA335P12, SA335P22(2.25Cr-1 Mo)等低合金钢制造。集箱壁厚较厚,因此焊后一般都要进行焊后热处理,表 15-1 示出了锅炉厂制订的一些材料制成的集箱的焊后热处理工艺参数。

表 15-1 集箱焊后热处理工艺参数

序号	部件名称	材料牌号	壁厚 mm	焊后热处理工艺参数					出炉温度
				入炉温度 ℃	升温速度 ℃/h	保温温度 ℃	保温时间 h	冷却速度 ℃/h	
1	集箱	20G		≤400	≤150	625 ± 25	3min/mm	≤150	≤400
2	集箱	SA106B		≤400	≤100	635 ± 42	*	炉冷	≤400
3	集箱	12Cr1MoV		≤400	≤150	725 ± 15	5min/mm	炉冷	≤400
4	集箱	SA335P12	25~150	≤400	≤100	677 ± 28	2~5.5	炉冷	≤400
5	集箱	SA335P22	25~150	≤400	≤100	732 ± 28	2~5.5	炉冷	≤400
6	集箱	ST45.8/II	16~50	≤300	≤200	575 ± 25	3.5	炉冷	≤300
7	集箱	SA106B	16~90	≤300	≤200	620 ± 20	3.5	炉冷	≤400
8	集箱	12Cr1MoV	16~120	≤300	≤150	720 ± 20	3.5	炉冷	≤400
9	集箱	13CrMo44	16~75	≤300	≤150	680 ± 20	3.5	炉冷	≤300

## 第 16 章 活塞式压缩机装配

### 16.1 装配实例概述

图 16-1 是 4L-20/8 型两级活塞式空气压缩机的总装配图。从尺寸链的分析得知,该机器的上、下(或左、右)线性余隙容积的尺寸精度,一个是通过在活塞杆上的螺纹调节来达到的,另外一个基本上由加工来保证。前者属于调整法,后者属于部分互换法。对于后者,必要时可采用修配法临时在缸盖上车去一部分金属或采用调整法临时加合适厚度的垫片来保证。

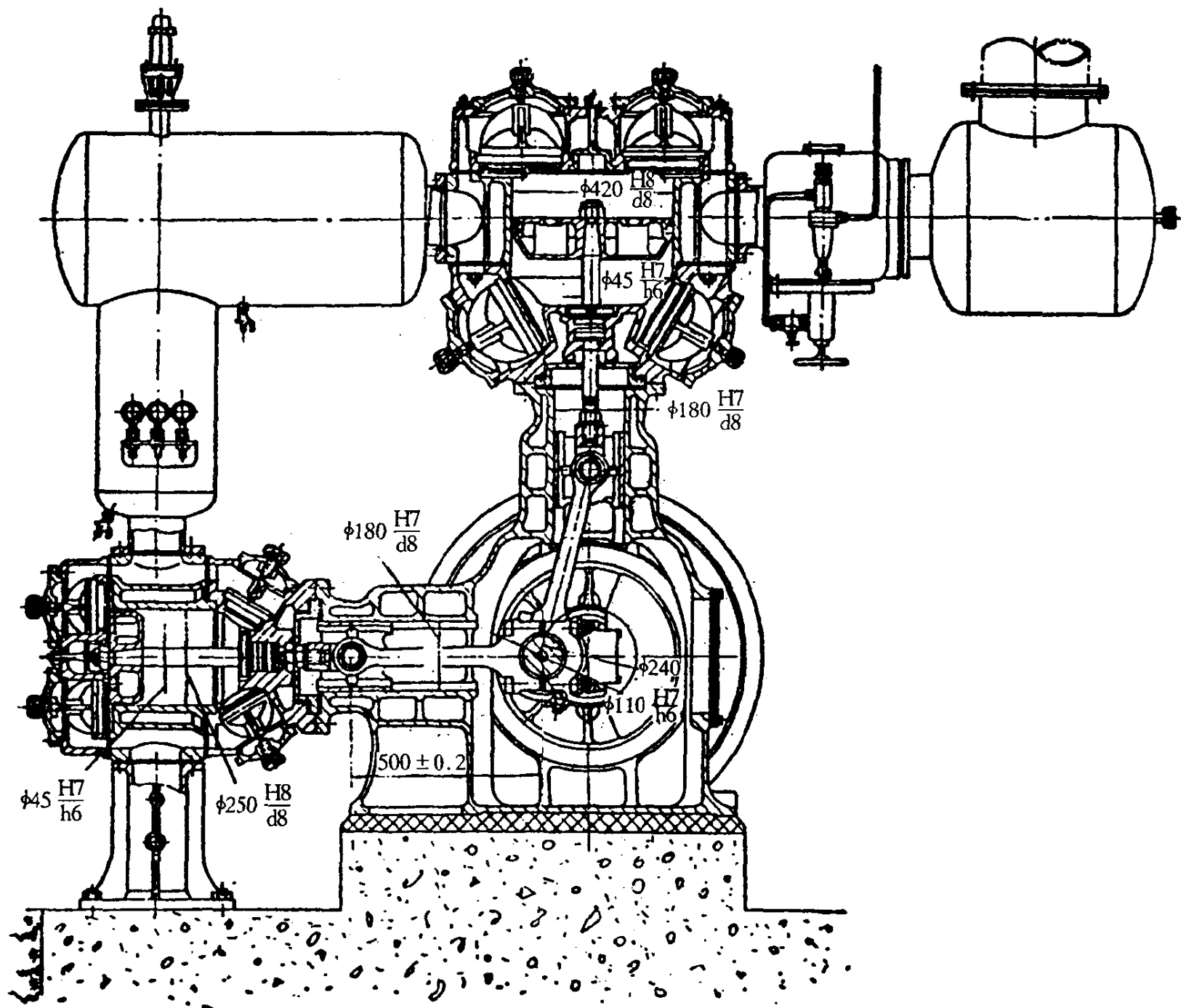


图 16-1 4L-20/8 型两级空气压缩机总装配图

该机器系成批生产,可以采用不变或可变的固定式流水装配。该机器如同大多数压缩机一样,装配的构件与设计的构件具有一致性,允许划分为几个部件和一些组件,这些组件和大部分部件可以成为独立的装配单元先行装配,然后作为整体直接进入总装或部件的装配。上图所示的压缩机可分成曲轴组件、连杆组件、十字头组件,气缸部件等独立装配单元,直接进入总装。同时,气缸部件中又包含有进气阀组件、排气阀组件、填函组件、活塞组件,这些均可作为一个整体直接进入气缸部件的装配中去。由于能这样划分出部件和许多组件,一台压缩机就可分成总装、部件装配和组件装配等几个阶段,这样就允许进行平行作业,各组装配工人可分头同时工作,这就可大大缩短装配周期。当然也有零件直接进入总装的,但那是极个别的,对装配的阶段划分影响很少。

## 16.2 组件与部件装配

### 16.2.1 组件的装配

#### 1. 曲轴组件的装配

曲轴用煤油清洗,洗去油污、金属粉末、防锈油等,擦干,并用压缩空气吹一遍,以保证其油孔畅通,然后在曲轴上装配平衡铁(图 16-2)。平衡铁装配面和曲柄臂装配面之配合应保证一些过盈量,约为  $0.01\text{mm}$ ,用两只螺钉将平衡铁牢固地装在曲轴上,然后钻  $\phi 5$  孔,装柱销并铆死,最后灌铅,  $\phi 12$  两孔是装配好以后钻的销孔,钻好后打入圆销。

平衡铁装好后,将曲轴进行静平衡,不平衡重量可在平衡铁上去除。

然后,采用热套法将轴承装到曲轴的主轴颈上。加热时,将滚动轴承放在油槽内,用机油加热到  $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ ,保持  $10\sim 30\text{min}$ ,取出后即可装配。在装配时,将轴承上印有轴承型号的一侧向外,以便在以后轴承损坏时查型号更换。

最后,将曲轴联轴节侧轴承座压到轴承外圈上,装配时不能使轴承滚柱受力,故应采用辅助工具,使轴承外圈上承受轴向力,同时,在没有摆动的前提下进入轴承座内。

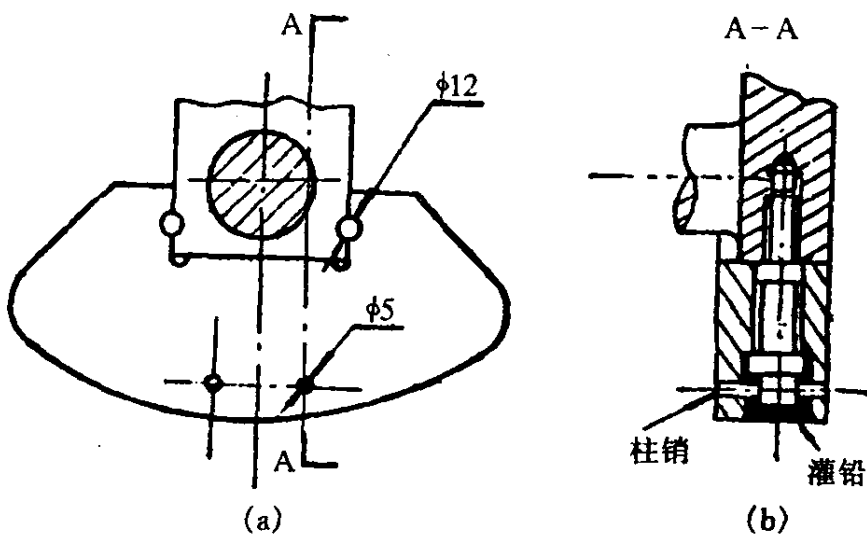


图 16-2 平衡铁的固定

#### 2. 十字头销孔与十字头销的刮削

该压缩机的十字头是整体的。十字头销孔与十字头销是  $1:10$  锥度配合,在装配前用着色法检查其接触情况,务使其接触面不小于  $70\%$ ,可用刮配法来达到这一要求。

#### 3. 十字头与机身导轨的研配

十字头与机身导轨的接触面应达到  $50\%\sim 70\%$ ,接触点应均匀分布,油孔周围接触面不小于  $80\%$ ,十字头与机身导轨间径向间隙应符合规定(对于该机应为  $0.18\sim 0.25\text{mm}$ )。对于卧式气缸列,其径向间隙应置于滑道不受侧向力的一侧,对于立式气缸列,其间隙应保持两侧均匀分布。

#### 4. 连杆组件的装配

主要装配工作是装配大头瓦和小头衬套等,其过程与要求如下:

把一副大头瓦紧固于大头孔中,用着色法检验瓦背与大头的贴合面,接触面积应在70%~85%以上。否则,运转中导热性能恶化。

连杆大头轴瓦的长度,不应比大头孔的长度短,连杆定位端轴向间隙应均匀分布。

连杆轴瓦的半副瓦放入连杆大头分开的大头盖或杆体大头半圆孔中,其切口处应高出轴承座的接触面一段规定的距离,以便在装配时能够使连杆瓦背与连杆大头孔结合得更加紧密。

连杆大头轴瓦与曲轴曲柄销的径向间隙应保证在0.06~0.1mm之内,可采用垫片调节和用大头瓦研磨工具刮配轴瓦内表面的方法达到。

可以用压入薄铜片法测量连杆轴瓦与曲柄销之间的径向间隙。将已刮研好的轴瓦彻底清洗干净,将轴瓦装合在连杆大头孔内,选取厚度等于径向间隙的铜质薄片,放在轴瓦内表面上,如图16-3所示,然后加些机油,将连杆轴瓦装于连杆体内,紧固在曲柄销上。按正常的旋转力矩,拧紧连杆螺栓。用手轻轻推动连杆,如能无阻碍转动半周比较适当。松开轴承盖,检查磨合情况,如果合金层未被损伤,才算良好。也可用压铅丝的方法测量轴瓦径向间隙。

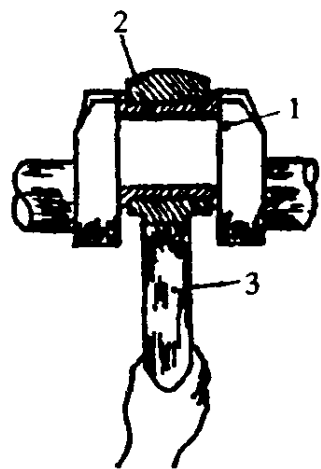


图 16-3 压入铜片测量轴瓦间隙  
轴柄销;2—铜片;3—连杆

连杆轴瓦轴向间隙可用厚薄规进行测量。

将小头衬套用压力机压入连杆小头孔中。压入后使两头各超出连杆小头孔端面5mm,使衬套上的油孔与连杆体的中心线成45°角并与连杆体上的油孔对正。

压入前,衬套外径尺寸应比小头孔内径尺寸大一个过盈量(过盈量为0.02~0.08mm),这可以通过测量进行选配来达到。压入后,衬套内径缩小量为0.03~0.10mm,通常还采用刮配衬套内孔或者采用二次挤压加工,使小头孔衬套与十字头销之配合具有0.025~0.04mm的径向间隙,接触面积达70%以上。

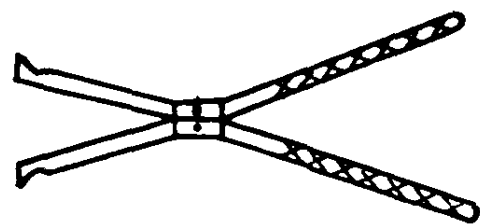


图 16-4 装卸小型活塞环的扩张器

在装配连杆大头轴瓦和小头衬套时还要保证两孔中心线的平行度,并同时垂直于连杆的对称中心线。两孔中心线的平行度误差不得大于0.03/100,检查的方法和连杆加工中检查的方法相同,但此时大小头孔中已装置了轴瓦与衬套,不能用压杆身的方法校正平行度。

装配连杆螺栓时用测力扳手达到规定的预紧力。

### 5. 活塞组件的装配

活塞与活塞杆的连接是锥面与锥孔配合,为了接触均匀,允许研磨或刮配活塞锥孔。活塞杆螺帽与活塞应紧贴无间隙,用着色法检查,其接触面不小于70%。

在装配活塞环之前先对其锁口进行修锉,对45°的锁口,其尖角处应倒棱R0.2,然后用专用的扩张器(图16-4)套装活塞环至活塞的环槽内。

活塞环与环槽的配合要求如下:

活塞环在环槽内应能灵活转动,当用手压紧时,应能沉入环槽内0.25~2mm(图16-6)。可按图16-5所示用厚薄规检验。图中1是活塞,2是活塞环,3是厚薄规,4是直尺。

活塞环的两端面与活塞槽侧向配合间隙B应为0.06~0.10mm;B值可用厚薄规进行检验。

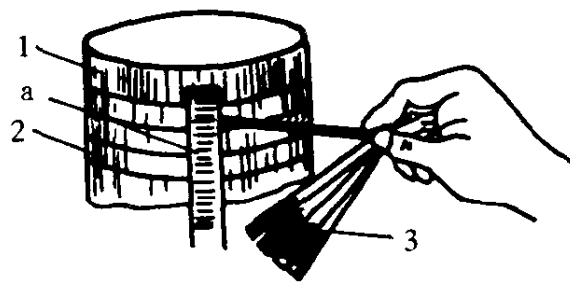


图 16-5 活塞环与活塞环槽的径向间隙检验

### 6. 气阀组件的装配



气阀组件由阀座、升程限制器、阀片、弹簧、中心螺栓及螺帽等零件组成。气阀在装配前应检查密封面与阀片在整个接触面上的接触情况,如有不完全密合时,应将阀片与阀座分别研磨。还应当检查中心螺栓头与螺栓孔端面之间是否密合不漏气。

气阀的装配应注意下列各点:

(1)在弹簧力作用下,阀片应完全紧靠在阀座密封面上。

(2)在一组阀中各弹簧的弹簧力应符合规定并趋于一致,可以采用图 16-7 所示的仪器检查。图中 1 是指示盘,2 是指针,3 是平衡板,4 是支架,5 是底板,6 和 7 分别是被试弹簧和标准弹簧。

(3)阀片在导向槽内应能自由移动,升降灵活,无卡住现象。弹簧应能完全压进升程限制器的槽中,当压缩弹簧时,弹簧在升程限制器内应无任何卡死现象。

(4)当旋紧螺帽到一定程度时,若发现螺栓销子与开口螺帽口不对准时,可拆下螺帽研磨其平面,禁止倒回螺帽的方法来穿开口销。

(5)当旋好螺帽并插入开口销后,升程限制器对阀座应无相对位移。

(6)阀片升程高度应符合图纸规定要求,对第一、二级阀片升程高度应为 2.8mm。

(7)气阀装配后进行气密试验,用煤油灌入气阀,煤油在 5min 内不允许呈线状连续的泄漏,只允许呈单个均匀的点滴,且其滴数不得超过规定值(见表 16-1)

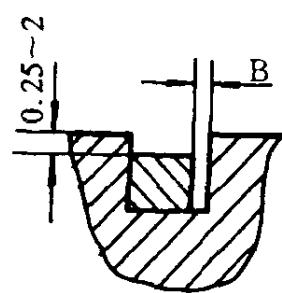


图 16-6 活塞环在活塞环槽内的配合简图

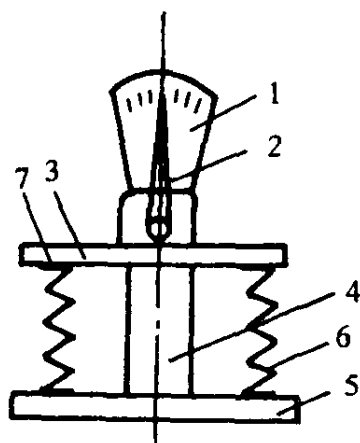


图 16-7 阀弹簧的弹力检查

表 16-1 允许渗漏滴数

阀片圈数	1	2	3	4	5	6
允许渗漏滴数	≤10	≤28	≤40	≤64	≤94	≤130

## 7. 填函组件的装配

(1)填函密封环的各密封面,应用涂色法进行刮研使紧密配合,其接触点总面积不小于 70%~80%,且均匀分布,填函与活塞杆的接触面(图中 A 面)应不漏光。刮研应使用刮刀,不允许用金刚砂,因为一般填料材料质地疏松,金刚砂嵌进后不易清洗掉。

(2)填料及刮油环安装前应全部拆开清洗,并在平板上用涂色法检查,以达到良好的接触,填料开口间隙规定为 1.5~2.0mm。开口间隙的测量是将各瓣填料组对好后套弹簧,装在活塞杆上进行测量。

(3)填函端面应与活塞杆轴心线垂直。

(4)填料盒的两研磨光端面要求彼此均匀接触无缝隙。

(5)填料中安装柱销时,勿使密封环的切口相对,而应互相错开。

(6)每组填料盒内,平面密封环与填料盒之间的轴向间隙,对于金属平面环,则其间隙应在 0.05~0.10mm 之间,对于塑料平面环则其间隙值应在 0.10~0.15mm 之间。

(7)各填料盒经精细研磨后,须按顺序编号打字。

(8)各填料盒按序号装配时,油孔及排气孔应各各对准,以保证油路畅通,并应向给油孔中注油,以证实能够通过油孔给油。

(9)塑料密封环在装配时应在热水中泡一下,装配时,须待活塞杆穿进密封环后才允许将填料压盖轴向压紧,在初开车时,必须把调节螺丝松开,然后逐渐拧紧到适当程度。

### 8. 中间接座组件的装配

刮油器中的刮油环系由聚四氟乙烯压制,各配合面的精度均由加工保证。装配时,刮油环的刃口方向不可弄错。刮油器装好后,将刮油器装在中间接座上以备总装之用。

## 16.2.2 气缸部件的装配

(1)将轴套装入气缸座,并安装填函。组合填函在安装前应彻底清洗,对于锥形金属填函,应等活塞组件装入气缸后,再行套装。

(2)将气缸座与气缸相连接,中间夹装规定厚度的石棉橡胶纸垫片。在加垫片之前,在垫片与气缸平面之间均匀地涂一层薄薄的厚漆以增强密封性。

通常,各级气缸均用止口定位来保证同轴度,一般由加工直接保证而不予检查。同轴度超过允许时,可以通过刮研结合面等方法调整之。

(3)安装中间接座组件。

(4)安装活塞组件。安装前,对活塞与气缸进行选配,以保证中间公差,装入时应使活塞环开口互相错开,并要与气缸上的气阀孔口、注油孔等位置错开(见图16-8),卧式气缸的活塞环锁口应在气缸水平的两侧(见图16-8(a)),图中1,2,3,4为气阀孔口,K为活塞环切口位置,图16-8(b)为立式气缸的情况。活塞环上涂以气缸油。为防止活塞杆上的螺纹擦伤填料密封环表面,故应在螺纹部分套上一个专用的导向套筒,又为了使自由状态的活塞环1能顺利进入气缸2,而不致撞断,故采用专用的导进工具(见图16-9),图中3为锥形套以正确的定位安装在气缸体4上,5为吊环,为吊装活塞用。

(5)安装气缸盖,此时气阀组件暂时不装进去。

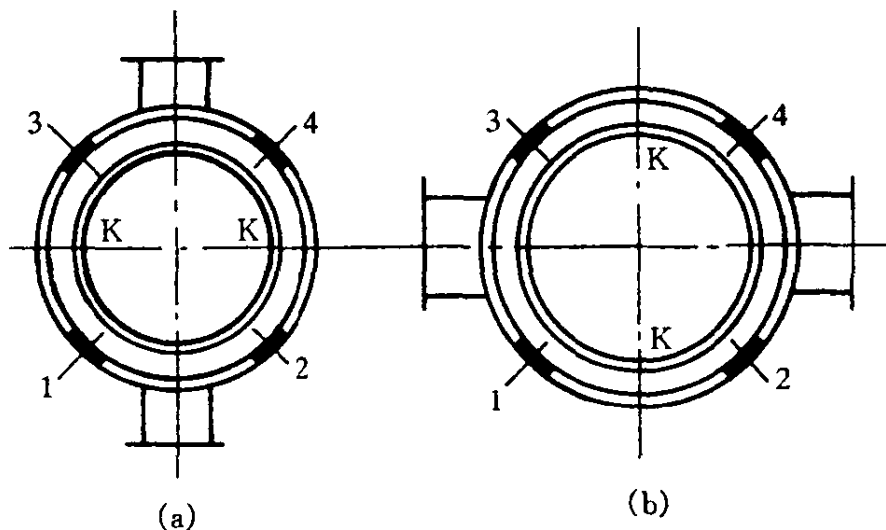


图16-8 活塞环装入气缸中的锁口位置

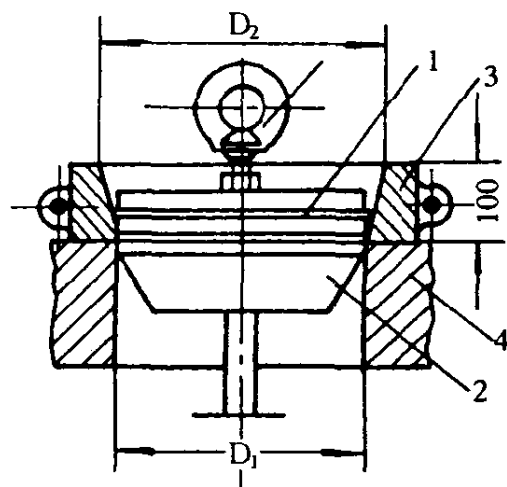


图16-9 活塞组件装入气缸用的锥形导进工具

## 16.3 总装配

总装是以机体为基准零件进行的,其过程如下:

(1)机体在安装前要去掉尖角毛刺,清除污垢,然后进行试漏,将煤油注入机体箱内润滑油的最高位置,经2~4h,不应有渗漏现象,再涂油漆。

机体安装在基座上时,必须保持横向中心线的水平,其水平度误差,在每米长度上不大于0.05mm,对L型机体可在法兰面上测量。

(2)将曲轴组件从机体大端孔一侧水平装入,调整轴向间隙,在机体外侧装上外轴承盖,然后再装上转子油泵及滤油器,油泵在装入前,应先在试验台上进行油泵试验,要求能在0.1~0.4MPa内

调节,但在压力为 0.5MPa 时油量不应少于 14L/min,并检查其运转声响及温升,均不应过高。

(3)从机体滑道侧窗口放入连杆体,利用机体后窗口,进行大头与曲柄销的连接。

(4)从机体滑道侧窗口装进十字头,并与连杆小头孔连接,十字头与机体滑道之间的间隙在上、下死点位置时分别测量,间隙应一致,且在合格范围内(0.18~0.25mm)。装十字头销时应对准油眼,检查油路是否畅通。在十字头与机体导轨处滴入少量机油。

(5)安装气缸部件,吊装气缸部件,必须使两相连的法兰平行而且同心时才能将活塞杆旋入十字头体中,然后上紧法兰面上的连接螺帽,气缸中心线与机体滑道的中心线的不同轴度有一定要求(见表 16-2),对于本机器一级缸允许公差为 0.07mm,若超出允差,可平行移动或刮研结合面来达到要求。

卧式气缸的水平度误差,在每米长度上不大于 0.05mm。气缸一端中心与另一端中心的偏移按表 16-2 规定。

表 16-2 气缸轴心线与机体滑道轴心线的不同轴度的允许值

气缸直径 (mm)	≤100	>100~300	>300~500	>500~1000	>1000~1500
气缸与机体滑道轴心线的不同轴度 (mm)	0.05	0.07	0.10	0.15	0.20
气缸中心线的倾斜度 (mm)	—	0.02	0.04	0.06	0.08

(6)盘车检查。主要检查项目是:

- ①检查各运动部件有无干涉或卡住现象。
- ②检查各级活塞与气缸的径向间隙和轴向间隙。

活塞与气缸的径向间隙应均匀分布,对于立式气缸,其误差不应大于平均间隙的 1/2。对于小型无托瓦的卧式活塞,应保证设计所提出的间隙。卧式气缸与活塞在水平方向上的两侧间隙应相等。

压缩机各级气缸的上、下余隙(左、右余隙)值规定的范围是  $2.5 \pm 0.5$ mm,检查的方法是通过气阀孔放入 3~4mm 的软铅条或用熔断保险丝,用手搬车让活塞运动一个行程进行挤压,然后取出用千分尺测量铅条的厚度值。铅条的压扁度以不超过原直径的 1/3 为宜,否则测量精度不高。③检查活塞环在气缸两端的越出量,规定如下:低压级为 1~3mm,高压级不大于环高的一半。

(7)安装进、排气阀组件和注油嘴等。

在安装中应注意扳紧防松装置,特别是运动部件的防松装置,机器上大多数螺纹连接都是处于变动负荷下(如连杆螺栓、机身与中间接座、气缸与气缸盖、气阀压盖等处的螺栓、螺钉等),这些地方的螺帽要有一定的预紧力,而且须保证各同类螺帽具有同样的预紧力,这对机器寿命、机器精度的保持有重大意义。实践证明,往往由于拧紧不当而使机器上某些零件内受过大应力,其值甚至超过材料的疲劳极限,因此有必要采用限力扳手来保证。

## 参考文献

- 1 顾崇銜主编. 机械制造工艺学. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991
- 2 章燕谋编. 锅炉制造工艺学. 西安交通大学出版社, 1995
- 3 金光熹主编. 压缩机制造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 4 王先逵主编. 机械制造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 5 李云主编. 机械制造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 6 郑修本, 冯冠大主编. 机械制造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 7 肖陵等编著. 热能动力机械工艺学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993
- 8 胡永生编著. 机械制造工艺原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1992
- 9 李厚生编. 内燃机制造工艺学. 北京: 中国农业机械出版社, 1981
- 10 陈冠方主编. 机械制造工艺学. 西安: 电子科技大学出版社, 1990
- 11 李益民主编. 机械制造工艺设计简明手册. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 12 荆长生主编. 机械制造工艺学. 西安: 西北工业大学出版社, 1992
- 13 荆长生, 李俊山主编. 机械制造工艺学学习指导与习题. 西安: 陕西科学技术出版社, 1992
- 14 朱其芳等. 零件加工的工序尺寸计算与分析. 压缩机技术. 1995(3): 23~28
- 15 王宽福, 冯丽云. 焊接与化机焊接结构. 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- 16 [俄]C. A. 库尔金等编著. 焊接结构生产工艺、机械化与自动化图册. 关桥等译. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 17 应潮龙. 实用高效焊接技术. 北京: 国际工业出版社, 1995
- 18 李俊林, 杨兴博等. 锅炉用钢及其焊接. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1988
- 19 中国机械工程学会焊接分会编. 焊选手册. 第一卷: 焊接方法与设备; 第二卷: 材料的焊接; 第三卷: 焊接结构. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 20 胡特生主编. 电弧焊. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 21 张文钺. 焊接物理冶金. 天津大学出版社, 1991
- 22 陈伯蠡. 焊接冶金原理. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 23 陈祝年主编. 焊接设计简明手册. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 24 高广安, 刘曼青. 锅炉制造工艺与检验. 哈尔滨工业大学出版社, 1987
- 25 国家劳动部. 蒸汽锅炉安全技术监察规程. 北京: 中国劳动出版社, 1996
- 26 朱其芳, 丁明扬. 调整装配法在压缩机中的运用及其尺寸链解法. 压缩机技术, 1991(3): 8~11