

高等学校适用教材

制造技术工程实训

主编：陈君若
副主编：葛夏文 马俊武
参编者：曲文斌 魏镜弢 向启宾
李自良 孙东明 王胜民
主审：周 荣

机械工业出版社

前 言

本书是根据教育部 1995 年颁布的“高等学校工科本科金工实习教学基本要求”，并结合教学改革的需要及高等学校工科金工实习实际而编写的。在编写过程中，参考了“工程材料及机械制造基础课程指导小组”1997 年 6 月发布的“重点高等工科院校工程材料及机械制造基础系列课程改革指南”中有关“金工实习”的改革意见。

科学技术的发展，涌现出许多新的制造方法和加工理念。如何在“金工实习”中反映这些内容，使学生在“金工实习”的过程中，对先进的制造方法和加工理念有所了解，有所接触，是“金工实习”课程改革的主要内容之一。可喜的是，近年来各学校都把“金工实习”列为校级重点课程加以建设，投入了大量的资金，改善金工实习基地的设备，主要内容是增加先进制造技术的有关设备。但适应于这种改革，反映这种变化的教材却很少，这就是编写本教材的初衷。

此外，制造技术的发展，已不再仅仅局限于金属材料、铸、锻、焊及切削加工等传统的“金工实习”内容，大量非金属材料的应用，大量非传统制造技术的涌现，迫切需要在高等学校的各种教材里有所反映。因此，本教材不再沿用传统的《金属工艺学实习教材》的名称，而改称为《制造技术工程训练教材》，以图适应制造技术的新发展和教学改革的需要。

编写本教材的目的，是为帮助学生在进行金工实习时，正确地掌握材料的各种加工方法；了解毛坯和零件加工的工艺过程；了解当今制造业的先进加工方法和先进制造理念。指导实习操作，获得初步的操作技能；巩固感性知识，为后继课程的学习和今后的工作打下一定的实践基础。

为适应教学改革的需要，本教材大幅度增加了先进制造技术，以及各种新工艺、新技术的内容（约占全书的三分之一），同时压缩了传统加工方法的叙述。编写过程中，力求做到先进加工方法与传统加工方法的结合与连贯，既具有科学性、系统性，又具有适用性、先进性，着力反映现代科技新成就。各章后均有复习思考题，有助于学生消化、巩固和深化教学内容。

本教材中所涉及的各项技术标准及专业名词术语，均采用最新的国家标准或有关部门标准。

本书第一、第二章、第四章由葛夏文编写；第三章、第五章、第六章由曲文斌、魏镜弢编写；第七章、第九章由向启宾编写；第八章由马俊武编写；第十章由陈君若编写；第十一章由李自良、孙东明编写、第十二章由魏镜弢、王胜民编写。最后由陈君若统稿并担任主编。由周荣教授审阅，并提出宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，得到昆明理工大学机电工程学院领导、金工教研室全体同仁以及昆明理工大学工程实践训练中心、昆明理工大学教务处领导的大力支持和热忱帮助，同时得到机械工业出版社有关同志的大力支持，特此致谢！

由于编者水平有限，书中难免有欠妥或错误之处，敬请批评指正。

编 者
2003 年 1 月

目 录

第一篇 工程材料基础知识

第一章 工程材料

- 第一节 金属材料基础知识
- 第二节 常用金属材料
- 第三节 常用非金属材料

第二章 材料处理技术

- 第一节 金属材料热处理
- 第二节 常用表面处理技术

第二篇 材料成形加工

第三章 金属铸造成形

- 第一节 铸造工艺基础知识
- 第二节 砂型铸造
- 第三节 铸钢及有色金属铸造简介
- 第四节 铸件质量分析
- 第五节 特种铸造简介

第四章 金属塑性成形

- 第一节 锻造
- 第二节 板料冲压
- 第三节 先进塑性成形加工工艺

第五章 金属焊接成形

- 第一节 焊接工艺基础知识
- 第二节 手工电弧焊
- 第三节 气焊与切割
- 第四节 其它常用焊接方法
- 第五节 焊接质量及分析
- 第六节 先进焊接工艺

第六章 非金属材料成形

- 第一节 工程塑料成形
- 第二节 橡胶制品成形
- 第三节 特种陶瓷成形

第三篇 金属切削加工

第七章 切削加工基本知识

- 第一节 切削加工概述
- 第二节 切削刀具的几何角度及材料
- 第三节 常用切削加工机床的类型和型号
- 第四节 常用量具
- 第五节 零件的加工质量

第八章 机械切削加工

- 第一节 车削加工
- 第二节 刨削加工
- 第三节 铣削加工

- 第四节 齿形加工
- 第五节 磨削加工

第九章 钳工

- 第一节 钳工概述
- 第二节 划线
- 第三节 锯切
- 第四节 锉削
- 第五节 钻孔、扩孔和铰孔
- 第六节 攻螺纹和套螺纹
- 第七节 装配

第四篇 现代制造技术

第十章 现代制造技术概述

- 第一节 先进制造技术介绍
- 第二节 CAD/CAE/CAM 技术
- 第三节 虚拟产品开发技术
- 第四节 计算机集成制造系统
- 第五节 快速原型技术

第十一章 数控加工技术

- 第一节 概述
- 第二节 常用数控机床简介
- 第三节 数控编程技术基础
- 第四节 数控机床的操作和使用
- 第五节 常用数控机床的编程及应用实例

第十二章 特种加工

- 第一节 概述
- 第二节 电火花加工
- 第三节 电火花线切割加工
- 第四节 其它特种加工方法简介

参考文献

第一篇 工程材料基础知识

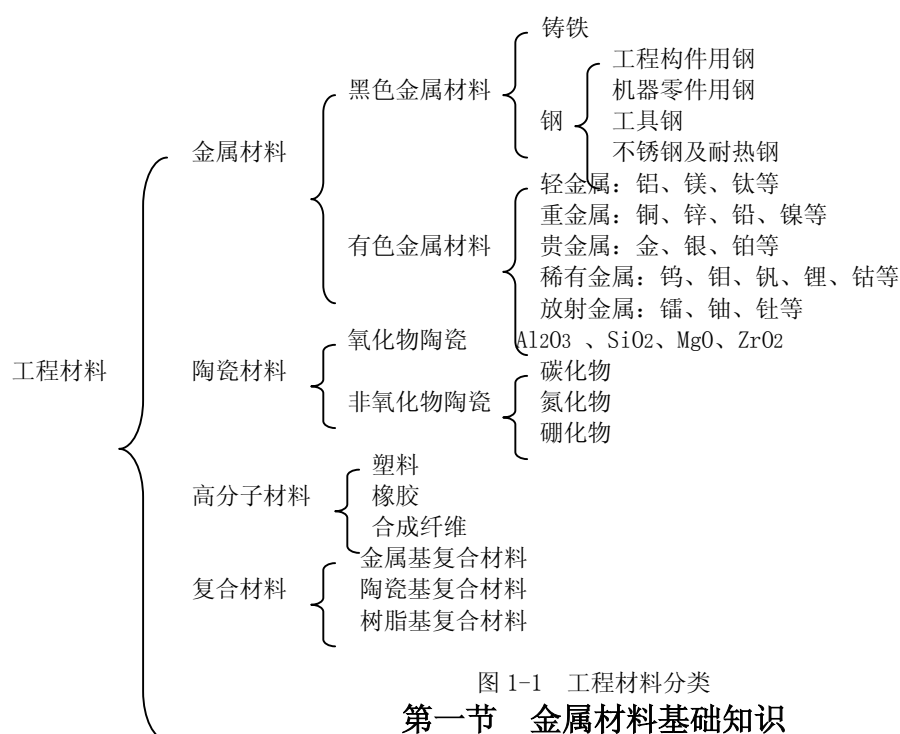
在人类新的历史进程中，材料、能源、信息以及生物技术已成为一个国家经济建设的支柱产业，其中材料占有十分突出的地位。上世纪 40~50 年代，材料的开发应用主要围绕着机械制造业，因此，主要发展了以一般力学性能为主的金属材料。90 年代以后，随着科学技术的发展，材料工艺不断进步，从而全面推动了新材料的开发和应用，极大的提高了材料的性能和质量，可以看出，没有新材料就没有科技发展的物质基础。因此，在产品的开发、设计、制造过程中，一个合格的工程技术人员必须具备工程材料的基本知识，只有了解了材料的机械性能、物理、化学性能以及工艺和经济等各种性能，才能根据使用要求，合理的制定工艺方法、合理的选材和加工，生产出合格的产品。

鉴于此，本篇通过对工程材料基础知识以及材料处理技术的介绍，为后续各种制造技术的学习以及工程实践训练打下良好的基础。

第一章 工程材料

凡与工程有关的材料均可称为工程材料(Engineering Materials)，工程材料按其性能特点可分为结构材料 and 功能材料。结构材料通常以硬度、强度、塑性、冲击韧性等力学性能为主，兼有一定的物理、化学性能。而功能材料是以光、电、声、磁、热等特殊的物理、化学性能为主的功能和效应材料。

工程材料种类繁多，用途广泛，工程上通常按化学分类法对工程材料进行分类，可分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料等，如图 1-1 所示。



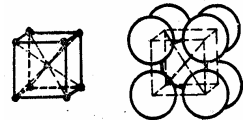
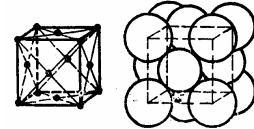
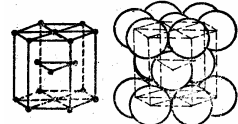
第一节 金属材料基础知识

金属材料是目前制造业使用最为广泛的材料，它具有许多优良的综合性能，如物理性能、化学性能、力学性能、工艺性能等，因而广泛应用于现代科技和日常生活中，可采用各种加工方法制成各种形状和性能的零件。

一、金属的晶体结构

固态物质按其原子排列，可分为晶体和非晶体两种。固态金属和合金基本上都是晶体物质。在晶体中，原子按一定的几何形状呈规则重复的空间排列，为了便于描述晶体中的原子排列规律及其几何形状，把每个原子抽象成几何结点，以假想的直线连接起来，使之成为一个空间格子，称为晶格。在金属元素中，常见的晶格形式有以下三种：见表 1-1

表 1-1 常见金属及其晶格形式

晶 格 类 型	常 见 金 属	晶 格 与 晶 胞 示 意 图
体心立方晶格	属于这种晶格类型的金属有： α -Fe(912℃以下的纯铁)、铬(Cr)、钼(Mo)、钨(W)、钒(V)等。这类金属具有较好的强度和塑性。	
面心立方晶格	属于这种晶格类型的金属有： γ -Fe(温度在 912-1394℃的纯铁)、铝(Al)、铜(Cu)、金(Au)、银(Ag)、镍(Ni)等。这类金属的塑性都很好。	
密排六方晶格	属于这种晶格类型的金属有：铍(Be)、镁(Mg)、锌(Zn)、 α -钛(Ti)、 β -铬(Cr)及 α -钴(Co)等。	

各种金属因为其晶格结构的不同,其机械性能(弹性、塑性、强度、硬度、冲击韧性等)也不一样。从以上常见的晶格类型中,我们还可以看出纯铁在不同的温度下,存在不同的晶格类型,其机械性能也不相同,这种同一金属具有两种或两种以上晶体结构的现象称为金属的同素异构性。金属的晶体结构随温度的变化而改变的现象称为同素异构转变。铁的同素异构转变是钢材进行热处理的重要理论基础。

二、合金的结构

纯金属虽然得到了一定的应用,但是它的机械性能较差,而且价格昂贵。因此在工业生产上应用的大都是合金。一种金属元素与其它金属或非金属元素,通过熔化或其它方法结合成的具有金属特性的物质叫合金。例如,工业上广泛应用的碳素钢和铸铁就是以铁和碳两种元素为主组成的合金;黄铜则是由铜和锌组成的合金。合金除具有纯金属的特性外,还具有更好的机械性能,并可以通过调节组成元素的比例来获得一系列性能各不相同的合金,以满足工业生产中所需要的各种性能要求。合金的组成元素称为组元。由两个组元组成的合金称为二元合金,如黄铜就是由铜和锌组成的二元合金;其它由三个组元或四个组元组成的合金称为三元合金和四元合金,如硬铝是由铝、铜和镁组成的三元合金。

合金的结构比纯金属复杂,根据组成合金的组元之间在结晶时的相互作用,合金可以形成:固溶体、金属化合物和机械混合物三种。

1. 固溶体 合金在固态时,由两种或两种以上物质相互溶解构成单一均匀的物质即为固溶体。固溶体具有溶剂组元的晶格类型。例如碳溶解在 α -Fe中的固溶体称为铁素体,具有溶剂组元 α -Fe的晶格类型——体心立方晶格。溶质原子溶入溶剂晶格形成固溶体后,造成溶剂晶格发生歪扭和畸变,导致固溶体的塑性变形抗力增大、强度和硬度升高的现象称为固溶强化。

2. 金属化合物 金属化合物是两组元相互作用而形成的一种新的具有金属特性的物质。如铁碳合金中铁和碳可以组成晶格复杂的碳化物——渗碳体(Fe_3C)。另外还有如 CuZn、 Cr_7C_3 、MoC、VC 等金属化合物。金属化合物一般具有较高的熔点以及高的硬度和脆性,

3. 机械混合物 是指纯金属、固溶体或金属化合物按一定重量比例组成的均匀物质。如铁碳合金中的铁素体和渗碳体在一定条件下形成的均匀物质就是一种机械混合物——称为珠光体。机械混合物的性能决定于组成混合物各部分的性能、数量、大小和形态。

三、铁碳合金

钢铁是现代工业中应用最广泛的金属材料,其基本组成元素是铁和碳,统称为铁碳合金。

合金的结构远比纯金属复杂。为了更好地研究和使用的合金,就必须了解合金中各种组织与成分之间的变化规律。合金状态图就是研究这些规律的有效工具。合金状态图是通过实验制作出来的。它用图解的方法表示合金的状态、组织、温度和成分之间的变化规律。最为典型的是铁碳合金状态图。(见图 1-2)

(一) 铁碳合金的基本组织 见表 1-2

表 1-2 铁碳合金的基本组织、结构类型及性能特点

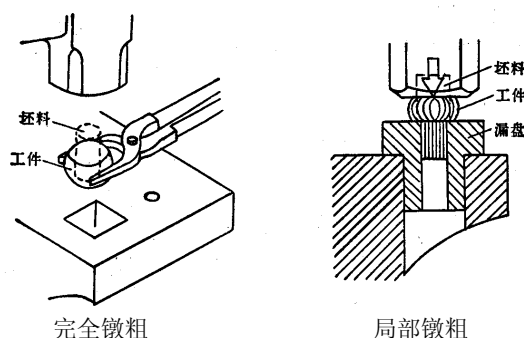


图 4-3 镦粗



基本组织	结 构 类 型	性 能 特 点
铁素体	碳溶于 α -Fe 中形成的间隙固溶体。常用符号 F 或 α 表示。	它仍保持 α -Fe 的体心立方晶格。碳在 α -Fe 中的溶解度很小，在 727℃ 时的溶解度为 0.0218%。随着温度的降低，碳在 α -Fe 中的溶解度下降，在室温时只能溶解微量的碳。因此其性能接近于纯铁，塑性、韧性较好；强度、硬度较低。可用于冷变形加工。
奥氏体	碳溶于 γ -Fe 中形成的间隙固溶体。常用符号 A 或 γ 表示。	它仍保持 γ -Fe 的面心立方晶格。由于面心立方晶格的间隙较大，因而奥氏体的溶碳能力较强，在 1148℃ 时可溶碳 2.06%，在 723℃ 时能溶碳 0.77%。奥氏体的强度、硬度较低，塑性很好，适于压力加工。钢大多数加热到奥氏体温度区进行锻造。
渗碳体	铁与碳形成的金属化合物 Fe ₃ C。	它具有不同于铁和碳的复杂晶体结构，其含碳量为 6.69%。渗碳体的硬度很高，脆性很大，塑性、韧性极差。渗碳体在钢中主要起强化作用，随着钢中含碳量的增加，渗碳体的数量增多，钢的强度、硬度提高，而塑性和韧性下降。
珠光体	铁素体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 P 表示。	珠光体中软而韧的铁素体和硬的渗碳体层片相间，使珠光体具有较高的强度，又有较好的塑性和韧性，其综合机械性能较好。

（二）铁碳合金的分类及其组织转变过程

1. 铁碳合金的分类 根据铁碳合金状态图，含碳量大于 2.11% 的铁碳合金为铁；含碳量小于 2.11% 的为钢。其中钢分为：亚共析钢——含碳量在 0.0218%~0.77% 之间；共析钢——含碳量为 0.77%；过共析钢——含碳量在 0.77%~2.11% 之间。生铁可分为：亚共晶生铁——含碳量在 2.11%~4.3% 之间；共晶生铁——含碳量为 0.7%；过共晶生铁——含碳量在 4.3%~6.69% 之间。

2. 铁碳合金的组织转变过程

现以含碳量为 0.4%、0.77%、1.2% 的三种钢为例，说明在冷却过程中钢的组织转变过程。

含碳量为 0.4% 的亚共析钢，在高温时组织为奥氏体，冷却到 GS 线时，开始析出铁素体。当冷却到 PSK 线时，发生共析转变，余下的奥氏体全部转变为珠光体。因此，亚共析钢在室温时的组织为铁素体和珠光体；含碳为 0.77% 的共析钢高温组织为单一奥氏体，冷却到 S 点时，奥氏体发生共析转变，全部转变为珠光体。故室温时共析钢的组织为珠光体；含碳为 1.2% 的过共析钢在高温时组织也为单一奥氏体，当冷却到 ES 线时，开始从奥氏体中析出渗碳体。随着温度的下降，析出的渗碳体增加，剩余的奥氏体减少。当冷却到 PSK 线时，发生共析转变，剩余的奥氏体转变为珠光体。因此室温下过共析钢的组织为渗碳体和珠光体。

用分析钢的方法可同样分析生铁的组织变化。室温时亚共晶生铁的组织为珠光体、二次渗碳体和莱氏体；共晶生铁的组织为珠光体和渗碳体，过共晶生铁的组织为一次渗碳体和莱氏体（P 与 Fe₃C 的机械混合物）。

在 1148℃ ~727℃ 的冷却过程中，由于奥氏体中碳的溶解度不断减少，所以在此温度区要从奥氏体中不断析出渗碳体。为区别直接从液态合金中析出的渗碳体和从奥氏体中析出的渗碳体，把前者称为一次渗碳体，后者称为二次渗碳体。

第二节 常用金属材料

一、碳素钢

碳素钢 (Carbon Steel) 是指含碳量小于 2.11% 和含有少量硅、锰、硫、磷等杂质元素所组成的铁碳合金，简称碳钢。其中锰、硅是有益元素，对钢有一定的强化作用；硫、磷是有害元素，分别增加钢的热脆性和冷脆性，应严格控制。碳钢的价格低廉，工艺性能良好，在机械制造中广泛应用。常用碳钢的牌号、性能及用途见表 1—3 所示。

表 1-3 碳钢的牌号、性能、应用及说明示例

名称	牌 号	性 能 及 应 用	说 明
碳素结构钢	Q195 Q215A Q215B	塑性较高，有一定强度，通常轧制成薄板、钢筋、钢管、型材等，用作桥梁、钢结构等，机械中用作铆钉、螺钉、地脚螺栓、轴套、开口销、拉杆、冲压零件等	碳素钢的牌号是由钢材屈服点的字母 Q、屈服点值、质量等级符号（分 A、B、C、D 四个等级）、脱氧方法四个部分组成。
	Q235A Q235B Q235C Q235D	强度较高，可用作转轴、心轴、拉杆、摇杆、吊钩链、套圈及心部强度要求不高的渗碳或氮化件及焊接件	
	Q255A Q255B Q275	强度更高，可用作工具、轧辊、主轴摩擦离合器、刹车钢等	
优质碳素结构钢	08	含碳低，塑性好，主要用来制作强度要求不高，需经受大变形的冲压件和焊接件。	牌号用两位数字表示平均含碳量的万分之几。如 20 钢即表示其平均含碳量为 0.20%。其中含碳量 ≤0.25% 的是低碳钢 含碳量在 0.25%~0.60% 之间的是中碳钢 含碳量 ≥0.60% 的是高碳钢
	10 15 20 25	强度低、塑性好，可焊性好。常用作制造各种容器、冲压件和焊接结构件。也常用于制造螺钉、螺母、垫圈以及需要渗碳的零件。	
	35 40 45 50	含碳量中等，强度、韧性、加工性较好，经调质处理后，可得到具有良好综合机械性能的零件。广泛用来制造齿轮、轴类及套筒等零件。	
	55 60 70	含碳量较高，淬火后具有较高的弹性，主要用来制造弹簧、轧辊等。	
碳素工具钢	T7、T8	常用于制造要求韧性较高、硬度中等的零件，如冲头、凿子等。	牌号用“碳”或“T”后面加数字表示。数字表示钢中平均含碳量的千分之几。 平均含碳量为 0.7%~1.3%，属高碳钢
	T9、T10、T11	常用作制造韧性中等、硬度较高的零件，如锯条、钻头、丝锥等。	
	T12、T13	常用于制造硬度高、耐磨性好而韧性较低的零件，如量具、锉刀、丝锥等。	

二、合金钢

为了改善和提高钢的性能，在碳钢的基础上加入其它合金元素，如硅、锰、铬、镍、钨、钼、钛等，这种钢叫合金钢（Alloy steel）。合金钢根据加入合金元素的不同，具有不同的性能，如高的耐磨性、耐蚀性、耐低温、高磁性等良好的特殊性能。合金钢按用途分为合金结构钢、合金工具钢和特殊性能钢。常用合金钢的牌号、性能、用途见表 1—4 所示。

表 1-4 常用合金钢的牌号、性能、应用及说明示例

种 类	牌 号	性能及应用	说 明
普通低合金 结 构 钢	09Mn2 16Mn 14MnNi 15MnTi 15MnV	与碳钢相比有较高的强度，较好的塑性、韧性、焊接性和耐蚀性。通常在热轧后经退火或正火状态使用，用于油槽、桥梁、锅炉、压力容器、建筑结构等	合金钢的牌号采用“数字+化学元素+数字”的方法表示。 具体规定如下： 前边的数字表示钢的平均含碳量，结构钢以万分之几表示，工具钢一般以千分之几表示（≥1.0%则不标）。 后边的数字表示合金元素的平均含量，以百分之几表示，小于 1.5%时不标。 特殊性能的合金钢与工具钢相似
渗 碳 钢	20Cr 20MnV 20Mn2 20CrMoTi 20CrNi4A	含碳量低，可以保证渗碳零件心部较好的韧性和塑性，常用于齿轮、活塞销、轴、蜗杆、及大型渗碳齿轮等	
调质钢	40Cr 42CrMo 40MnB 40NiMoA 38CrMoAl	经调质处理后使用的钢，大多采用中碳钢，具有良好的综合机械性能，即强度高、塑性和韧性好。广泛用于制造各种重要的机械零件，如齿轮、连杆、轴及螺栓等	
弹簧钢	65Mn 60Si2Mn 50CrVA 60Si2CrVA	经热处理后具有较高的屈强比，用于制造各种弹性零件的主要材料，如各种弹簧和板簧等。	
滚动轴承钢	GCr9 GCr15	用于制造滚动轴承的滚珠、套圈	

三、铸铁

铸铁(Cast Iron)是含碳量大于 2.11% 的铁碳合金，与钢相比其碳、硅含量较高（大致成分为 2.5～4.0%C, 1.0～3.0%Si），灰口铸铁中碳以石墨的形式存在。铸铁的抗拉强度、塑性和韧性不如钢，其力学性能比钢差，不能锻造。但它具有优良的铸造性、减震性、耐磨性和切削加工性等特点，加之成本低廉、生产设备和工艺简单，在机械制造中应用较广。

根据铸铁中碳的存在形态不同，分为灰口铸铁和白口铸铁。其中，灰口铸铁应用广泛，分为灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁等。常用铸铁的牌号、用途如表 1—5 所示。

表 1—5 铸铁牌号、应用及说明

名称	牌 号	应 用	说 明
灰 铸 铁	HT150	用于承受中等负荷的零件。如机座、支架、轴承座、阀体等。	牌号以 HT×××表示，其中“HT”为灰铸铁代号，后面的三位数字表示φ30 试棒的最低抗拉强度值（MPa）。
	HT200	用于承受较大负荷的零件。如汽缸、齿轮、机座、飞轮、床身、汽缸体、汽缸套、活塞、齿轮箱等。	
	HT250		
可 锻 铸 铁	KTH300-06	用于承受冲击、振动及扭转负荷的零件，如汽车、拖拉机的后桥壳，转向机构壳体，弹簧钢板支座、低压阀门和各种管接头等	“KT”为可锻铸铁代号，“KTH”“KTZ”分别是黑心和白心可锻铸铁的代号，它们后面的数字分别代表最低抗拉强度值（MPa）和最低延伸率 %。
	KTH330-08		
	KTZ450-06	用于负荷较高和耐磨损零件，如曲轴、连杆、齿轮、凸轮轴等	
球 墨 铸 铁	QT400-18	用于承受冲击、震动的零件，如汽车、拖拉机底盘零件、中低压阀门、管道等	“QT”为球墨铸铁代号，它后面的数字分别代表最低抗拉强度值（MPa）和最低延伸率 %。
	QT450-10		
	QT500-7	用于负荷大、受力复杂的零件，如曲轴、汽缸套、齿轮、凸轮轴、连杆、轧钢机轧辊等	
	QT800-2		

四、有色金属及其合金

工业上把铁及其合金称为黑色金属(Ferrous Metal)，把其它金属及其合金统称为有色金属(Nonferrous Metal)。常用的铸造有色金属有铝、镁、铜、锌、铅、锡、钛等。其中铜及其合金是应用最早的金属，它具有优良的导电性、导热性、抗腐蚀性和耐磨性。铝合金是比铜、铁、钢应用时间较晚的金属，它既具有铜合金的某些优点，又有很高的比强度（抗拉强度/比重），工业中应用广泛而且发展迅速。

常用的有色金属及其合金的牌号、应用如表 1—6 所示。

表 1—6 有色金属及其合金的牌号、应用及说明

名 称	牌 号	应 用	说 明
工业纯铜	T1 T2 T3 T4	电线、热交换器、导电螺钉及各种管道等	纯铜又称紫铜，“T”表示铜，其后的数字越大，纯度越高。
普通黄铜	H62 H59	垫圈、弹簧、螺钉、螺母及热轧、热压零件	“H”表示黄铜，其后的数字表示铜的平均含量

铸造黄铜	ZHSi80-3-3	抗蚀性好，铸造性能好，作泵壳、叶轮、水泵活塞和阀体等	“ZH”表示铸造黄铜，其后的数字表示平均含量：其中 Tu80%、Si3%、Pb3%、其余为 Zn（14%）
锡青铜	ZCuSn5Pb5Zn5 ZCuSn10Pb5	耐磨零件、耐磨轴承等	数字表示平均含量：如 ZCuSn5Pb5Zn5 其中 Sn5%、Pb5%、Zn5%、其余为 Tu（85%）
铸造铝合金	ZA1Si12（ZL102）	铸造性能好，仪表、抽水机壳体等外型复杂零件	“ZA1”表示铸铝，其后的数字表示平均含量：其中 Si12%、其余为 Al（88%）。 ZL102 是其代号
硬铝合金	LY1 LY11	中等强度结构件、如骨架、叶片、铆钉等	“LY”表示硬铝，其后的数字表示其顺序编号

第三节
 常用非金属材料

随着科学技术的发展，工业中除大量使用金属材料外，非金属材料在近几十年来有了迅速的发展，也得到愈来愈广泛的应用。常用的有：工程塑料、复合材料、工业橡胶、工业陶瓷等。

一、工程塑料

工程塑料(Engineering Plastics)是应用最广的有机高分子材料，也是最重要的工程结构材料。其主要成分是合成树脂，此外还包括填料或增强材料、增塑剂、固化剂等添加剂。它具有很多优良性能，如密度小、耐腐蚀、耐磨和减摩性好、良好的电绝缘性和成形性等，其不足之处是强度、硬度较低，耐热性差，易老化和儒变等。现已有几百种工程塑料在工业生产被广泛应用。以下介绍几种较典型的工程塑料。见表1—7。

表 1—7 典型的工程塑料及其性能与应用

名称	性 能	应 用
聚 氯 乙 烯 (P V C)	分为硬质和软质二种。硬质聚氯乙烯强度、硬度较高，耐蚀、耐水性好、易于热成形、热接和切削加工；软质聚氯乙烯强度、硬度低，耐蚀性差，易老化。	常用于制造塑料管、塑料板、薄膜、软管、低压电线的绝缘层等。加入发泡剂可制成泡沫塑料，用于垫衬、包装袋等。
ABS 塑 料	是丙烯腈(A)、丁二烯(B)、苯乙烯(S)的三元共聚物，具有三种组元的特性。丙烯腈使ABS具有良好的耐热、耐蚀性和一定的表面硬度；丁二烯能提高ABS的弹性和韧性；苯乙烯使ABS有较高的刚性、良好的加工工艺性和着色性。所以ABS具有较高的综合性能。	ABS的用途极广，在机械工业中可制造轴承、齿轮、叶片、叶轮、设备外壳、管道、容器、把手等，以及电气工业中仪器、仪表的各种零件。近年来在交通运输车辆、飞机零件上的应用发展很快，如车身、方向盘、内衬材料等。
聚 酰 胺 (PA) (尼 龙)	又称为尼龙或锦纶，具有较高的强度和韧性，较好的耐磨性、自润滑性以及良好的成形工艺性。此外，其耐蚀性也较好，并且抗霉、抗菌、无毒。但尼龙具有较大的吸水性，尺寸稳定性差，耐热性不高，蠕变值较大。	尼龙被广泛用作各种机器零件，如轴承、齿轮、轴套、螺帽、垫圈等。
聚四氟乙烯 (F-4)	在很宽的温度范围内性能相当稳定，可长期在-180～240℃之间使用，耐热性和耐寒性极好，还具有极高的耐蚀性和极低的摩擦系数，吸水性极小，绝缘性优良，素有“塑料王”之称。缺点是其强度较低，冷流动性大，结晶熔点高，加工成形困难。	广泛用于化工管道、泵、阀门和各种机械密封垫圈、无润滑活塞环等。
酚醛塑料 (PF)	有热塑性和热固性两类。具有较高的硬度、刚度和一定的强度、耐热性、绝缘性及优良的耐磨性等。	用于电开关、插座、灯头等绝缘件以及齿轮、轴承、汽车刹车片等机械零件。

二、复合材料

复合材料(Compound Materials)是指由两种或两种以上物理、化学性质不同的物质，经人工合成的一种多相固体材料。一般由高强度、高模量、脆性大的增强材料和低强度、低模量、韧性好的基体材料所组成。它不仅具有各组成材料的优点，而且还可以获得单一材料不具备的优良综合性能。其有高的比强度和比模量，较好疲劳强度和耐蚀、耐热、耐磨性，同时还有一定的减震性。已成为一种大有发展和应用前途的新型工程材料。

根据增强剂的种类和形状，复合材料分为下列几种，见表1—8。

表 1—8 复合材料的种类、组成、及应用

种类	组成方式	应用
纤 维 增 强 复 合 材 料	常以树脂、橡胶、塑料、陶瓷等非金属材料或金属材料为基体，以玻璃纤维、碳纤维、石墨纤维等有机纤维或金属及陶瓷晶须等高强度、高模量的纤维为增强材料组合而成。	热固性玻璃钢：轴承、齿轮、仪表盘、壳体、叶片等。 热塑性玻璃钢：车身、船体、直升机旋翼等。 碳纤维树脂复合材料：比强度和比模量高的飞行器结构件、重型机械的轴瓦、齿轮及化工设备的腐蚀件等。
层 合 复 合 材 料	由两层或两层以上不同性质的材料叠合而成，以达到增强的目的。	三层复合材料：无油润滑轴承、机床导轨、衬套、垫片等。 夹层复合材料：飞机、船舶的隔板及冷却塔等。

颗粒复合材料	以高硬度、高强度的细小陶瓷或金属颗粒，均匀分散在韧性基体中而形成的。	颗粒与树脂复合材料：塑料中加颗粒状填料，橡胶加碳黑增强。 陶瓷粒与金属复合：(金属陶瓷)如 WC 硬质合金刀具。
--------	------------------------------------	---

三、工业陶瓷

陶瓷(Pottery and Porcelain)是一种无机非金属固体材料。其特点是高硬度、高耐磨性、高弹性模量、高抗压强度、高熔点、高化学稳定性、耐高温、耐腐蚀，但抗拉强度低，脆性大。此外，大多数陶瓷可作绝缘材料，有的可作半导体材料、压电材料、热电和磁性材料，故其在工业上的应用日益广泛。根据成分和用途，工业陶瓷可分为硅酸盐陶瓷(或普通陶瓷)和特种陶瓷两种。其性能与应用见表 1—9。

表 1—9 陶瓷的性能和应用

名称	性能	应用
硅酸盐陶瓷	质地坚硬、耐酸、耐高温、不生锈，良好的绝缘性能。由于成分中含有较多的碱金属氧化物和其他物质，故脆性大，强度不高。	广泛用于日用、电气、化工、建筑等方面，如装饰瓷、绝缘材料、餐具、耐蚀容器、管道、设备等。
特种陶瓷	特种陶瓷按化学成分可分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷，硅化物陶瓷、氟化物陶瓷等。其性能优于硅酸盐陶瓷，如，硬度、强度高，耐磨、耐高温；有极高的化学稳定性和耐腐蚀性。	各种泵类机械的密封件，轴承垫圈、刀具、汽车发动机、柴油机内耐热、耐磨零件，化工管道、泵、阀等。

四、合成橡胶

合成橡胶(Synthetic Rubber)是通过化学合成的方法，即以生胶为基础加入适量的配合剂而制成的高分子材料。配合剂包含有硫化剂、填充剂、软化剂及发泡剂等。常用合成橡胶的性能和应用见表 1—10

表 1—10 常用合成橡胶的性能和应用

种类		性能	应用
通用橡胶	丁苯橡胶 (SBR)	比天然橡胶质地均匀，耐热、耐老化性能好，但加工成形困难，硫化速度慢。	广泛用于制造车胎、胶布、胶版等。
	顺丁橡胶 (BR)	有较高的耐磨性，比丁苯橡胶高 26%	用于制造轮胎、三角胶带、减震器、弹橡胶簧、电绝缘制品等。
特种橡胶	丁腈橡胶 (NBR)	有良好的耐油性和耐蚀性，较好的耐热、耐磨、耐老化性等其耐寒性和电绝缘性较差，加工性能也不好。	用于制造耐油制品，如输油管、密封圈、油箱等。
	硅橡胶	具有优良的耐热、耐寒、耐臭氧性，有良好的绝缘性。	主要用于制造各种耐高温、低温的橡胶制品。如管道接头，高温设备的垫圈、衬垫，电线绝缘层等。

复习思考题

1. 简述工程材料的分类及主要用途。
2. 什么是金属材料的机械性能？其衡量指标主要有那些？
3. 什么是合金？举例说明什么是二元合金和三元合金？
4. 金属中有哪些常见晶格类型？纯铁从液态结晶到室温，其晶格类型有哪些变化？
5. 铁碳合金的基本组织有哪些？各有何性能特点？
6. 举出常用碳素钢、合金钢及铸铁的牌号并说明其用途？
7. 常用的非金属材料有哪几类？各有何性能特点？

第二章 材料处理技术

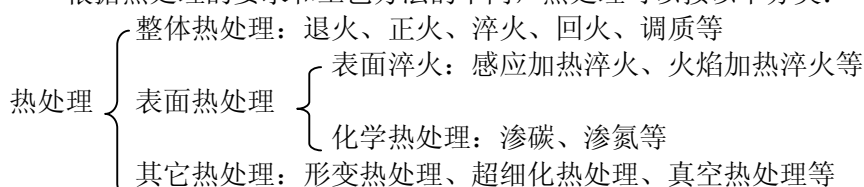
在机械零件制造过程中，为了提高和获得金属材料的物理、化学以及机械性能，人们常常采取一定的工艺方法，通过对材料的表面或内部进行加工处理，从而获得与基体材料不同的各种特性，这就是材料处理技术。常用的处理方法有热处理和表面处理技术。

第一节 金属材料热处理

金属材料的热处理(Heat Treatment)是将固态金属或合金，采用适当的方式进行加热、保温和冷却，改变材料内部组织结构，从而获得改善材料性能的工艺，称之为热处理。其工艺过程通常可用温度—时间坐标的工艺曲线来表示。钢常用的各种热处理工艺规范如图 2-1 所示。

热处理工艺按其工序位置可分为预备热处理和最终热处理。预备热处理可以改善材料的加工工艺性能，为后续工序作好组织和性能的准备。最终热处理可以提高金属材料的使用性能，充分发挥其性能潜力。因此，热处理得到了广泛的应用。

根据热处理的要求和工艺方法的不同，热处理可以按以下分类：



下面介绍常用的热处理工艺方法：

一、钢的常用热处理

(一) 退火与正火

1. 退火 退火是将金属或合金加热到适当的温度，保持一定的时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。

退火的目的：(1) 降低硬度，改善切削加工性；(2) 消除残余应力，稳定尺寸，减少变形与裂纹倾向；(3) 细化晶粒，调整组织，消除组织缺陷。

在生产中，退火工艺应用很广泛。根据工件要求退火的目的不同，退火的工艺规范有多种，常用的有完全退火、球化退火、和去应力退火等。

2. 正火 正火是将钢加热到 A_{c3} （亚共析钢）或 A_{cm} （共析、过共析钢）以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，保温一定时间后，在静止的空气中冷却的热处理工艺方法。

正火的目的：(1) 对于力学性能要求不高的碳钢、低合金钢结构件，可作最终热处理。(2) 对于低碳钢可用于调整硬度，避免切削加工中的“粘刀”现象，改善切削加工性。(3) 对于共析、过共析钢，正火可消除网状二次渗碳体，为球化退火作准备。

正火的冷却速度比退火快，得到的组织较细，工件的强度和硬度比退火高。对于高碳钢的工件，正火后硬度偏高，切削加工性能变差，故宜采用退火工艺。从经济方面考虑，正火比退火的生产周期短，设备利用率高，生产效率高，节约能源、降低成本以及操作简便，所以在满足工作性能及加工要求的条件下，应尽量以正火代替退火。

退火和正火可在电阻炉或煤、油、煤气炉中进行，最常用的是电阻炉。电阻炉是利用电流通过电阻丝产生的热量来加热工件，同时用热电偶等电热仪表控制温度，操作简单、温度准确。在加热过程中，由于工件与外界介质在高温下发生化学反应，当加热温度和加热速度控制不当或装炉不合适时，会造成工件氧化、脱碳、过热、过烧及变形等缺陷。因此要严格控制加热温度和加热速度等。图 2-2 为退火和正火的加热温度范围。

(二) 淬火

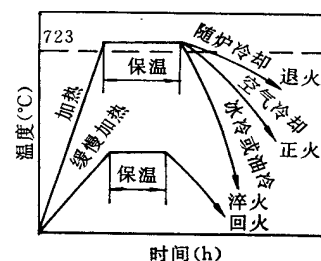


图 2-1 钢的各种热处理工艺规范

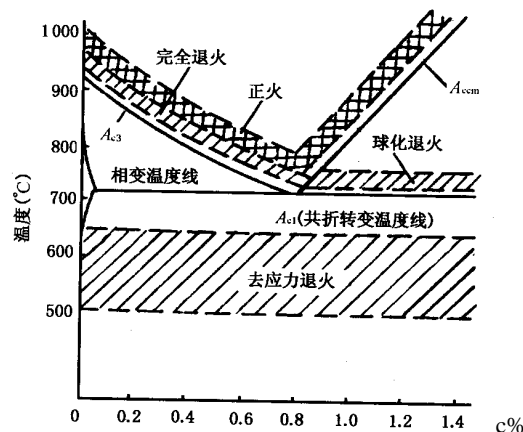


图 2-2 退火和正火的加热温度范围。

淬火是将工件加热到 A_{c1} 或 A_{c3} 以上某一温度，保温一定时间使其奥氏体化，然后以一定的冷却速度冷却，从而获得马氏体（或贝氏体）的热处理工艺方法。（马氏体：C 在 α -Fe 中的过饱和固溶体）

淬火的目的是提高钢的强度和硬度，增加耐磨性，并通过回火处理可获得既有较高的强度、硬度，又有一定弹性、韧性的具有优良综合机械性能的工件。

淬火的冷却介质称为淬火剂。常用的淬火剂有水和油两种。水通常用于一般碳钢零件的淬火。在水中加入食盐或碱，可以提高冷却速度。淬火时也常用植物油或矿物油作淬火剂。油作淬火剂时，冷却能力较水低，可防止工件产生裂纹等缺陷，适用于合金钢淬火。但油易燃，价格较高，且易老化。

淬火操作时，应注意淬火工件浸入淬火剂的方式。如果浸入方式不正确，则可能因工件各部分的冷却速度不一致而造成极大的内应力，使工件发生变形、裂纹或产生局部淬不硬等缺陷。浸入方式的根本原则是保证工件最均匀地冷却，具体操作如图 2—3 所示

厚薄不均的工件，厚的部分应先浸入淬火剂中；细长的工件，如钻头、挫刀、轴等，应垂直地浸入淬火剂中；薄而平的工件，如圆盘铣刀等，不能平着放入而必须立着放入淬火剂中；薄壁环状工件，必须沿其轴线垂直于液面方向浸入；截面不均匀的工件，应斜着浸入淬火剂中，使工件各部分的冷却速度接近。

（四）回火

回火是将淬火后的钢重新加热到 A_{c1} 以下某一温度范围（大大低于退火、正火和淬火时的加热温度），保温后在空气中、油或水中冷却的热处理工艺。回火的目的是减小或消除工件在淬火时产生的内应力，降低淬火钢的脆性，使工件获得较好的强度、韧性、塑性、弹性等综合力学性能。

根据回火温度的不同，回火分为低温回火、中温回火和高温回火。

1. 低温回火 回火温度为 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 。低温回火可以部分消除淬火造成的内应力，降低钢的脆性，提高韧性，同时保持较高的硬度。故广泛应用于要求硬度高、耐磨性好的零件，如量具、刀具、冷变形模具及表面淬火件等。

2. 中温回火 回火温度为 $300\sim 450^{\circ}\text{C}$ 。中温回火可以消除大部分内应力，硬度有显著的下降，但仍有一定的韧性和弹性。中温回火主要应用于各类弹簧、高强度的轴、轴套及热锻模具等工件。

3. 高温回火 回火温度为 $500\sim 650^{\circ}\text{C}$ 。高温回火可以消除内应力，使工件既具有良好的塑性和韧性，又具有较高的强度。淬火后再经高温回火的工艺称为调质处理。对于大部分要求较高综合力学性能的重要零件，都要经过调质处理，如轴、齿轮等。

二、钢的表面热处理

很多机器零件，如曲轴、齿轮、凸轮、机床导轨等，是在冲击载荷和强烈的摩擦条件下工作的，要求表面层坚硬耐磨，不易产生疲劳破坏，而心部则要求有足够的塑性和韧性。显然，采用整体热处理是难以达到上述要求的，这时可通过对工作表面采取强化热处理，即表面热处理（Surface Heat Treatment）的方法解决。常用的表面热处理方法有表面淬火和化学热处理两种。

（一）表面淬火

钢的表面淬火一般分为火焰加热表面淬火和感应加热表面淬火等。表面淬火使工件表层得到高硬度的淬火马氏体，而心部仍然保持原有的韧性。

1. 火焰加热表面淬火

采用乙炔—氧（或煤气—氧）的混合气体燃烧的火焰迅速加热工件表面，至淬火温度后快速冷却（如喷水）的淬火工艺，叫火焰加热表面淬火。淬硬层深度一般为 $2\sim 6\text{mm}$ 。这种淬火方法设备简单，操作方便，成本低廉，特别适用于大型工件、单件、小批生产。但加热温度较难控制，因而淬火质量不稳定。

2. 感应加热表面淬火

如图 2—4 所示，将工件放在通有高频（中频、工频）电流的线圈中，利用感应电流通过工件产生热效应（集肤效应），使工件表层（或局部）迅速加热并进行快速冷却的淬火工艺，叫感应加热表面淬火。由于

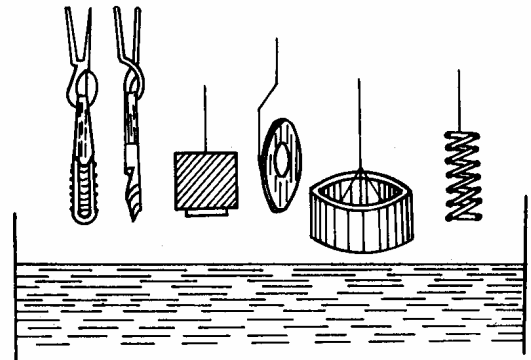


图 2-3 工件浸入淬火剂的正确方法

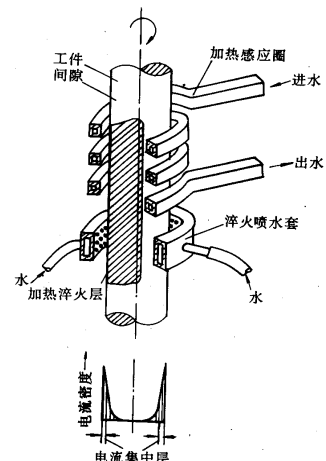


图 2-4 感应加热表面淬火示意图

加热时间短，淬火表层组织细、性能好，感应加热表面淬火生产效率高，工件表面氧化、脱碳极少，变形也小，淬硬层深度易于控制，容易实现自动化。但设备费用昂贵，适宜用于形状简单的工件大批量生产。

(二) 化学热处理

化学热处理是将工件放在一定的介质中加热和保温，使介质中的某些元素渗入工件表层，从而改变表层的化学成分、组织和性能的热处理工艺。通过化学热处理可提高工件表面的硬度和耐磨性，也可提高工件表面的耐蚀性、耐热性等。常用的化学热处理有渗碳、渗氮、碳氮共渗以及渗硼、铝、铬、硅等。

钢件的渗碳应用较广。渗碳是将工件置于渗碳介质中，加热到单相奥氏体状态，保温一段时间，使碳原子渗入工件表层，提高表层含碳量，从而增加表面的硬度及耐磨性。渗碳工件材料一般为低碳钢。

渗碳工艺常用的有气体渗碳和固体渗碳。渗碳后，仍需对工件进行淬火和低温回火处理。

第二节 常用表面处理技术

表面处理技术(Surface Treatment Skill)是在零件的基本形状和结构形成之后，通过不同的工艺方法对零件表面加工处理，使其获得与基体材料性能不同的一项专门技术，它是跨多种学科的通用技术。研究应用和发展表面处理技术，对于提高零件的使用寿命和可靠性、充分发挥材料的潜力、提高产品质量以及推动新技术的发展等都具有十分重要的意义。

根据表面处理技术的科学特点，可以按以下进行分类：

表面处理技术

表面合金化技术：喷焊、堆焊、离子注入、激光渗碳、热渗镀

表面覆层、覆膜技术：气相沉积、涂装、电镀、化学镀、热喷镀、热浸镀

表面组织转化技术：喷丸、滚压、抛光、激光强化、电子束热处理

以下介绍几种常用表面处理技术

一、表面机械强化

工业中常采用机械处理方法来清理、强化及光整金属表面，如喷丸处理、滚压加工、内孔挤压以及磨光和抛光等，其中喷丸处理、抛光处理在生产中应用很广泛。

(一) 喷丸处理

喷丸处理是利用高速喷射的沙丸或铁丸，对工件表面进行强烈的冲击，使其表面发生塑性变形，从而达到强化表面和改变表面状态的一种工艺方法。喷丸的方法通常有手工操作和机械操作两种。常用的喷丸有以下几种：铸铁弹丸、钢弹丸、玻璃弹丸、砂丸等，其中黑色金属常选用铸铁弹丸、钢弹丸和玻璃弹丸，而有色金属与不锈钢常用玻璃弹丸和不锈钢弹丸。

喷丸处理是工厂广泛采用的一种表面强化工艺，其设备简单、成本低廉，不受工件形状和位置限制，操作方便，但工作环境较差。喷丸广泛用于提高零件机械强度以及耐磨性、抗疲劳和耐腐蚀性等。还可用于表面消光、去氧化皮和消除铸、锻、焊件的残余应力等。

(二) 磨光和抛光

1. 磨光 磨光是用磨光轮对零件表面进行加工，以获得平整光滑磨面的一种表面处理方法。其作用在于去掉零件表面的锈蚀、砂眼、焊渣、划痕等缺陷，提高零件的表面平整度。

磨光分粗磨和细磨两种。粗磨是将粗糙的表面和不规则的外形修正成形，可用手工或机械操作。手工操作多数用于有色金属；机械操作用于钢材，一般在砂轮上进行；经过粗磨后金属表面磨痕很深，需要通过细磨加以消除，为抛光做准备。细磨有手工细磨和机械细磨。手工细磨是由粗到细在各号金相砂轮上进行；机械细磨常用预磨机、蜡盘、抛光膏加速细磨过程。

磨光用的磨料，对于青铜、黄铜、铸铁、锌等软材料用人造金刚砂；对于钢用人造刚玉。金刚砂可用于所有金属的磨光，尤其适用于软韧金属材料。

2. 抛光 抛光是镀层表面或零件表面装饰加工的最后一道工序，其目的是消除磨光工序后残留在表面上的细微磨痕，获得光亮的外观。

抛光方法有机械、化学、电解等多种，常用的方法是抛光轮抛光，它是将数层圆形的布、呢绒、毛毯等叠缝成车轮状，安装在抛光机轴上使其旋转进行抛光。抛光轮的载体种类很多，有棉、麻、毛、纸、皮革、塑料及其混合物等；研磨材料颗粒细而均匀，外形呈多角形、刃口锋利。常用抛光粉的种类、性能、用途如表 2—1 所示。粗抛光时用粘结剂将研磨粉粘在抛光轮上，可用金刚石、氧化铁研磨粉，也可用氧化铬研磨粉，或者使用半固态或液态的研磨剂。

表 2—1 常用抛光粉的种类、性能、用途

材 料	莫氏硬度	特 点	应 用 范 围
-----	------	-----	---------

Al ₂ O ₃	9	白色, 平均尺寸 0.3μm	通用粗精抛光
MgO	5.5~6	白色, 颗粒细小均匀	适用 Al, Mg 合金
Cr ₂ O ₃	8	绿色, 高硬度抛光能力差	淬火后合金钢、钛合金
Fe ₂ O ₃	6	红色	抛光较软金属合金
金钢石粉	10	磨削极佳, 寿命长	适用各种材料粗精抛光

二、转化膜处理

转化膜处理是将工件浸入某些溶液中, 在一定条件下使其表面产生一层致密的保护膜, 提高工件防腐蚀的能力, 增加装饰作用。常用的转化膜处理有氧化处理和磷化处理。

(一) 氧化处理

1. 钢的氧化处理 钢的氧化处理是将钢件在空气—水蒸气或化学药物中加热到适当温度, 使其表面形成一层蓝色(或黑色)的氧化膜, 以改善钢的耐蚀性和外观, 这种工艺称为氧化处理, 又叫发蓝处理。氧化膜是一层致密而牢固的 Fe₃O₄ 薄膜, 只有 0.5~1.5μm 厚, 对钢件的尺寸精度无影响。氧化处理后的钢件还要进行肥皂液浸渍处理和浸油处理, 以提高氧化膜的防腐蚀能力和润滑性能。

钢的氧化处理有以下基本工艺过程:

化学除油→热水洗→流动冷水洗→酸洗→流动冷水洗→一次氧化→二次氧化→冷水洗→热水洗→补充处理→流动冷水洗→流动热水洗→干燥。

氧化处理过程中溶液中的氧化剂含量越高, 生成氧化膜速度也越快, 而且膜层致密、牢固。溶液中碱的浓度适当增大, 获得氧化膜的厚度增大, 碱含量过低, 氧化膜薄而脆弱。溶液的温度适当升高, 可以提高氧化致密度。工件含碳量越高, 越容易氧化, 氧化时间越短。氧化处理时间主要根据钢件的含碳量和工件氧化要求来调整。氧化处理工艺不影响零件的精度, 常用于仪器、仪表、工具、枪械及某些机械零件的表面, 使其达到耐磨、耐蚀以及防护与装饰的目的。

2. 铝及其合金的氧化处理 铝(或铝合金)在自然条件下很容易生成致密的氧化膜, 可以防止空气中水分和有害气体的氧化和侵蚀, 但是在碱性和酸性溶液中易被腐蚀。为了在铝和铝合金表面获得更好的保护氧化膜, 应该进行氧化处理。常用的处理方法有化学氧化法与电化学氧化法。

化学氧化法是把铝(或铝合金)零件放入化学溶液中进行氧化处理而获得牢固的氧化膜, 其厚度为 0.3~4μm。按处理溶液的性质可分碱性和酸性溶液氧化处理。例如, 碱性氧化液为 Na₂CO₃ (50 g/L)、Na₂CrO₄ (15 g/L)、NaOH (25 g/L), 处理温度: 80~100℃, 处理时间: 10~20min。经氧化处理后的铝表面呈现厚度为 0.5~1μm 的金黄色氧化膜。此方法适用于纯铝、铝镁、铝锰合金。化学氧化法主要用于提高铝和铝合金的耐蚀性和耐磨性, 并且此工艺方法操作简单, 成本低, 适于大批量生产。

电化学氧化法是在电解液中使铝和铝合金表面形成氧化膜的方法, 又称阳极氧化法, 将以铝(或铝合金)为阳极的工件置于电解液中, 通电后阳极上产生氧气, 使铝或铝合金发生化学或电化学溶解, 结果在阳极表面形成一层氧化膜。阳极氧化膜不仅具有良好的力学性能与抗蚀性能, 而且还具有较强的吸附性, 采用不同的着色方法后, 还可获得各种不同颜色的装饰外观。

为了在铝及铝合金表面获得不同性质的氧化膜, 常采用不同种类的电解液来实现。常用的电解液有硫酸、铬酸和草酸等。

铝及铝合金氧化处理的基本工艺过程如下:

电化学除油→热水洗→冷水洗→出光→冷水洗→阳极氧化→冷水洗→染色→冷水洗→封闭→冷水洗→干燥。

由于阳极氧化膜的多孔结构和强吸附性能, 表面易被污染, 特别是腐蚀介质进入孔内易引起腐蚀。因此阳极氧化膜形成后, 必须进行封闭处理, 封闭氧化膜的孔隙, 提高抗蚀、绝缘和耐磨等性能, 减弱对杂质或油污的吸附。常用的封闭方法有蒸汽封闭法和石蜡、油类、树脂封闭法等。

(二) 磷化处理

把钢件浸入磷酸盐为主的溶液中使其表面沉积, 形成不溶于水的结晶型磷酸盐转化膜的过程称为磷化处理。常用的磷化处理溶液为磷酸锰铁盐和磷酸锌溶液, 磷化处理后的磷化膜厚度一般为 5~15μm, 其抗腐蚀能力是发蓝处理的 2~10 倍。磷化膜与基体结合力较强, 有较好的防蚀能力和较高的绝缘性能, 在大气、油类、苯及甲苯等介质中均有很好的抗蚀能力, 对油、蜡、颜料及漆等具有极佳的吸收力, 适合做油漆底层。但磷化膜本身的强度、硬度较低, 有一定的脆性, 当钢材变形较大时易出现细小裂纹, 不耐冲击, 在酸、碱、海水及水蒸气中耐蚀性较差。在磷化处理后进行表面浸漆、浸油处理, 抗蚀能力可较大提高。

磷化处理所需设备简单, 操作方便, 成本低, 生产效率高。在一般机械设备中可作为钢铁材料零件的

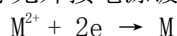
防护层，也可作为各种武器的润滑层和防护层。

（三）电镀与化学镀

1. 电镀 电镀是将镀金属制品作为阴极，外加直流电，使金属盐溶液的阳离子在工件表面沉积形成电镀层。电镀实质上是一种电解过程，其阴极上析出物质的重量与电流强度、时间成正比。欲进行电镀必要的三个条件是：电源、渡槽(度液)及电极。

电镀可以为材料或零件覆盖一层比较均匀、具有良好结合力的镀层，以改变其表面特性和外观，达到材料保护或装饰的目的。电镀除了可使产品美观、耐用外，还可获得特殊的功能，可提高金属制品的耐蚀性、耐磨性、耐热性、反光性、导电性、润滑性、表面硬度以及修复磨损零件尺寸及表面缺陷等，如在半导体器件上镀金，可以获得很低的接触电阻；在电子元件上镀铝—锡合金可以获得很好的钎焊性能；在活塞环及轴上镀铬可以获得很高的耐磨性；防止局部渗碳的镀铜、防止局部渗氮的镀锡等。目前，广泛应用的电镀工艺有镀铜、镀镍、镀铬、镀锌、镀银、镀金等。

2. 化学镀 化学镀亦称无外接电源镀。其原理是：在水溶液中金属沉积一般按下式进行：



即溶液中存在两个正价电荷的金属离子 M ，当它接受两个电子后转变为金属原子 M ，在适当条件下沉积于工件表面形成镀层。化学镀获得电子是通过化学反应直接在溶液中产生的，它一般有电荷交换沉积、接触沉积、还原沉积等几种。目前，化学镀镍、镀铜、镀银、镀金、镀钴、镀钯、镀铂、镀锡等已在工业生产中应用，尤其在电子工业中应用更为广泛。

复习思考题

1. 何为金属材料的热处理？其在零件制造中的重要作用是什么？
2. 简述热处理方法的分类。常用的热处理方法有哪些？
3. 试比较退火和正火的异同点。
4. 淬火的目的是什么？水淬和油淬有什么不同？
5. 什么叫回火？回火的目的是什么？回火温度对钢的性能有什么影响？
6. 常用的表面热处理方法有哪些？概述它们的工艺过程、特点及适用范围？
7. 什么是表面处理技术？表面处理技术分哪几类？各有哪些主要工艺技术？
8. 什么是转化膜处理？钢的氧化处理主要目的是什么？

第二篇 材料成形加工

第三章 金属铸造成形

第一节 铸造工艺基础知识

一、概述

铸造是指将熔化的金属液浇注到与零件形状相适应的铸型空腔中，待其冷却、凝固后，形成具有一定形状与性能的金属件的生产方法。用铸造得到的金属件称为铸件。

铸造按生产方式不同，可分为砂型铸造和特种铸造。特种铸造又可分为熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、离心铸造、陶瓷型铸造、连续铸造等 20 余种。

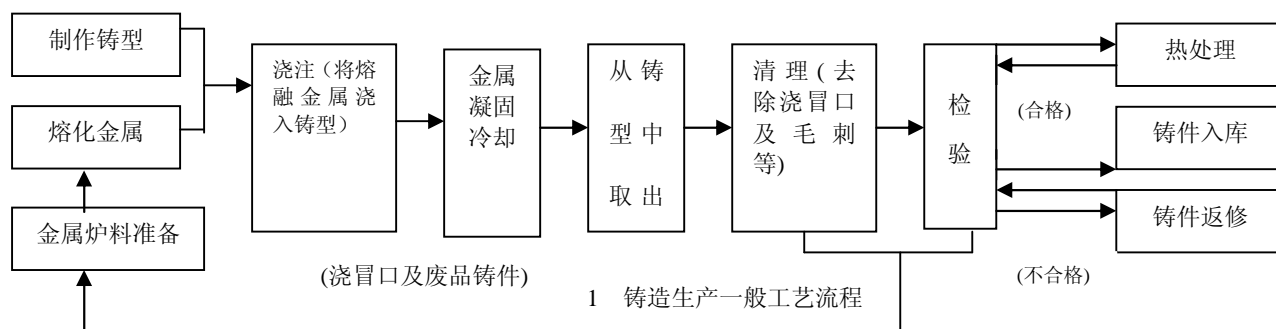
二、铸造生产的特点及其应用

与其它成形工艺相比，铸造是金属液态成形，因此可生产形状十分复杂，尤其是具有复杂内腔的各种尺寸规格的毛坯或零件。铸件的大小、重量及生产批量不受限制，比较灵活。生产成本低，节省资源，材料的利用率高，故应用十分广泛。在机床、汽车、拖拉机、动力机械等制造业中，25~80%的毛坯采用铸造。

铸件的力学性能不如相同化学成分的锻件好，同时由于铸造生产工序多、投料多，控制不好时，铸件质量不够稳定，废品率也相对较高，劳动条件也较差。

三、铸造生产一般工艺流程

图 3-1 所示为铸件生产的一般工艺流程。



第二节 砂型铸造

一、砂型的制造

用型砂紧实成型进行铸造的方法，称为砂型铸造。砂型铸造生产的铸件占铸件总产量的 80% 以上，而在砂型铸造中，重要而大量的工作是制造铸型。

1、造型材料的组成、性能及制备

砂型铸造所用的型（芯）砂由原砂和粘结剂组成，必要时，还加入各种附加物。原砂是耐高温材料。常用的是含 SiO_2 较多的硅砂。常用的粘结剂有粘土、水玻璃等。

型砂和芯砂应具有以下性能：

- (1) 透气性 (2) 强度 (3) 耐火度 (4) 可塑性 (5) 退让性

上述性能要求是最基本的，有时又是互相矛盾的，因此，要求型砂具有良好的综合性能。

生产中常采用砂子、粘土（常用膨润土）和水等经混制而成的粘土砂。为满足透气性、型砂中还可加入锯末、煤粉等。

2、铸型的构造及作用

铸型一般由上型、下型、型芯、浇注系统等几部分组成。图 3-2 为常用两箱造型的铸型示意图。图中铸型各组成部分的作用列入表 3-1。

表 3-1 铸型各部分的作用

各部分名称	作用
砂箱	造型时，用于盛放和填充型砂的开口容器
铸型	浇注时，容纳液态金属，冷却后形成铸件
分型面	上、下铸型的分界面
浇注系统	金属液经浇注系统流入型腔
型腔	容纳金属液的空腔（由造型材料所形成）
型芯	在铸型中安放，可阻挡部分金属以形成铸件内腔或某种特定外形
出气孔	用针在铸型或型芯上扎出的用于排气的小孔
冒口	供补缩铸件用熔融金属的空腔，有时还起排气集渣作用
冷铁	为加快铸件局部冷却，在铸型、型芯中安放的金属物

3、型芯的作用及形成

型芯是砂型中的重要组成部分，在制造中空铸件或有妨碍起模的凸台铸件时，往往要使用型芯。常用的型芯有：(1) 水平型芯，(2) 垂直型芯，(3) 悬臂型芯，(4) 悬吊型芯，(5) 引伸型芯（有利于取模），(6) 外型芯（可使三箱造型变为两箱造型）等。图 3-3 是上述几种型芯的示意图。

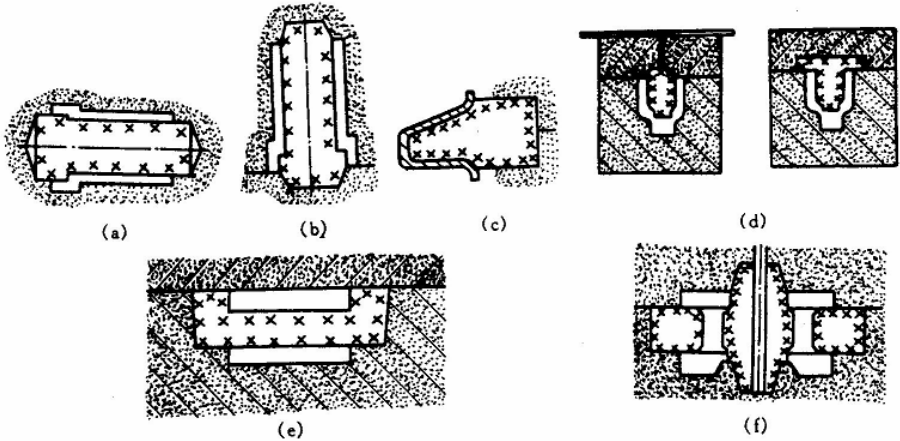
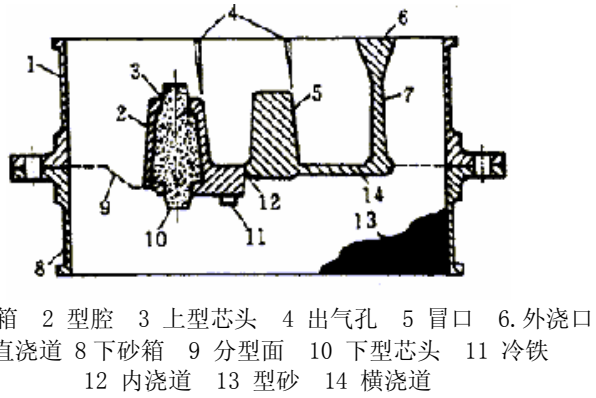


图 3-3 型芯的常见形式

造型方法



造型方法按砂型紧实方式分为手工造型和机器造型两大类。

(1) 手工造型 手工造型是全部用手工或手动工具紧实型砂、制成砂型的造型方法。其优点是操作方便，灵活性强，特别适合于单件小批生产。图 3-4 是手工造型工序流程。

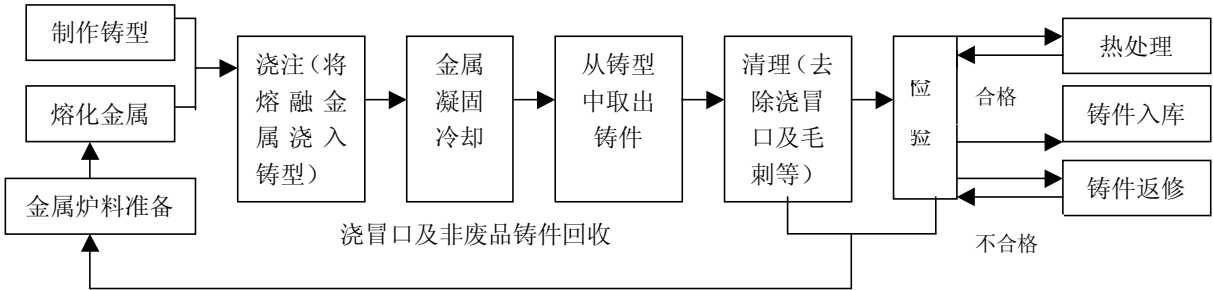


图 3-4 手工造型主要工序流程图

根据铸件结构、生产批量和生产条件，可选用不同的手工造型方法。表 3-2 是常用手工造型方法的特点和应用范围。

表 3-2 常用手工造型方法的特点和应用范围

分类	造型方法	特 点			应用范围
		模样结构和分型面	砂 箱	操 作	
按模样特征	整模造型	整体模，分型面为平面	两个砂型	简单	较广泛
	分模造型	分开模，分型面多为平面	两或三箱	较简单	回转类铸件
	活块造型	模样上有妨碍起模的部分，做成活块	两或三箱	较费事	单件小批量
	挖砂造型	整体模，铸件最大截面不在分型面处，造型时，须挖去阻碍起模的型砂。分型面一般为曲面。	两或三箱	费事，对操作技能要求高	单件小批生产的中小铸件
	假箱造型	为免去挖砂操作，用假箱代替挖砂操作，分型面仍为曲面。	两或三箱	较简单	需挖砂造型的成批铸件
	刮板造型	用与铸件截面相适应的板状模样，分型面为平面。	两箱或地坑	很费事	大中型轮类、管类铸件，单件小批生产
按砂箱特征	两箱造型	各类模样，分型面为平面或曲面，手工或机器造型均可	两个砂箱	简单	较广泛
	三箱造型	铸件截面为中间小两端大，用两箱造型取不出模样。必须用分开模，分型面一般为平面，分型面有两个。	三个砂箱	费事	各种大小铸件，单件小批生产
	地坑造型	中、大型整体模、分开模、刮板模均可，分型面一般为平面。	上型用砂箱、下型用地坑	费事	大、中件单件生产

砂型铸造中，两箱造型应用最广。

1) 两箱整模造型 两箱整模造型（图 3-5）的特点是使用整体模样，模样截面由大到小递减。模样

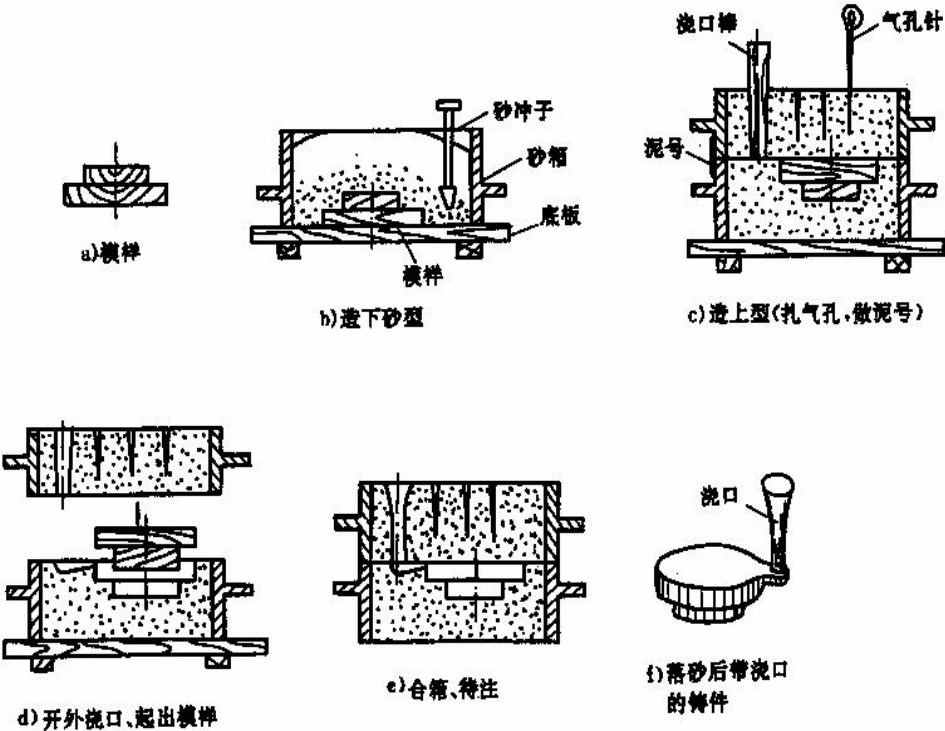


图 3-5 整模两箱造型方法

置于一个砂箱内，且型腔一般在下箱，造型时，模样可一次由砂型中取出，操作方便。

2) 两箱分模造型 分模造型的特点是当铸件截面中间小两端大时，将模样在最大截面处分开（用销钉定位，可合可分）以便于造型时顺利起模。最简单和应用最广的分模造型是两箱分模造型。（图 3-6）

3) 挖砂造型 当模样无法分开而只能制成整模，而分型面又是曲面时，在造型过程中，部分型砂会阻碍模样的取出。此时，必须将这部分覆盖在模样上的型砂挖去，才能顺利取模。这种造型方法称为挖砂造型（图 3-7）。挖砂造型生产率低，操作技术要求高，故只适合于单件小批生产的形状复杂的小铸件。

4) 假箱造型 假箱造型是用预制的假箱（砂制）或成形底板（砂制或木制）承托模样以省去挖砂工序的一种造型方法。假箱只用于造另半型，但不用于组型。假箱造型适用于本应挖砂造型且生产批量较大的铸件。

5) 活块造型 活块造型（图 3-8）是将模样上妨碍起模的凸出部分做成活块（可拆卸）的一种造型方法。起模时，先取主体模，再用适当方法取出活块。

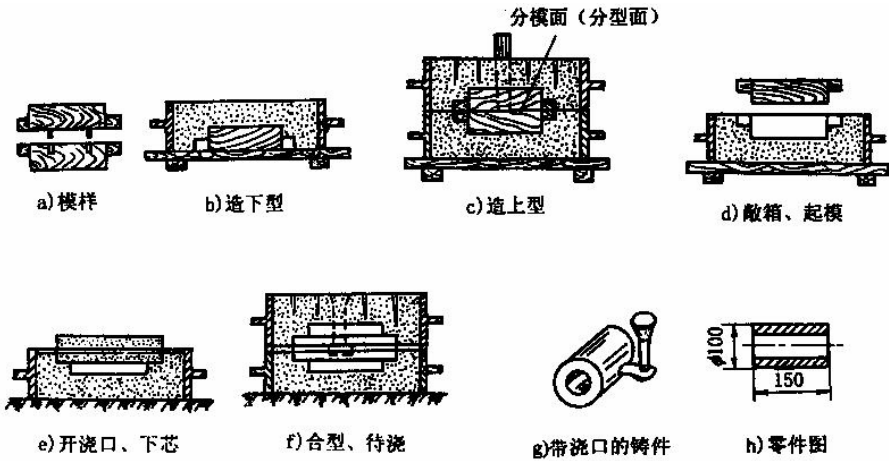


图 3-6 两箱分模造型过程

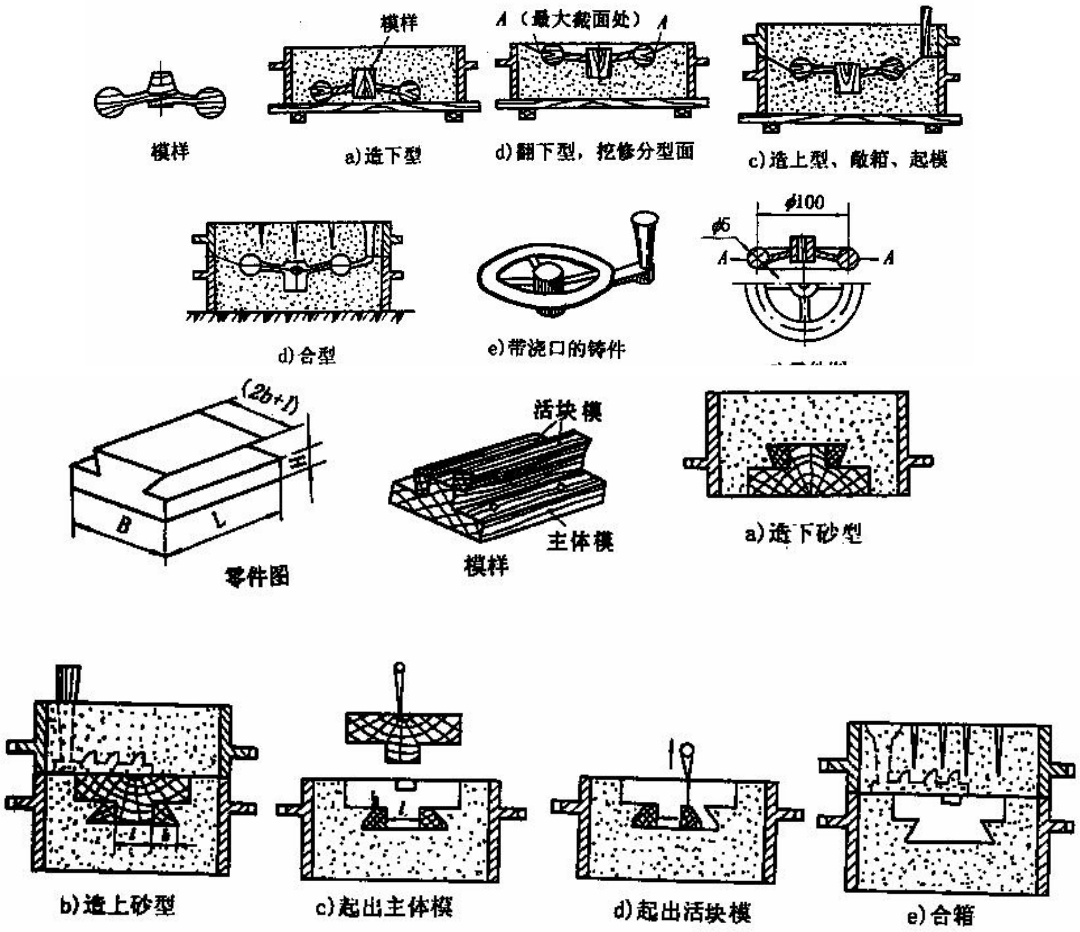


图 3-8 活块造型过程

6) 机器造型 机器造型主要由填砂、紧砂、起模、修型等工序组成。用机器全部完成或至少完成紧砂操作的造型方法称为机器造型。按紧砂和起模方式不同，有多种不同类型的机器造型方法及相应的造型机。

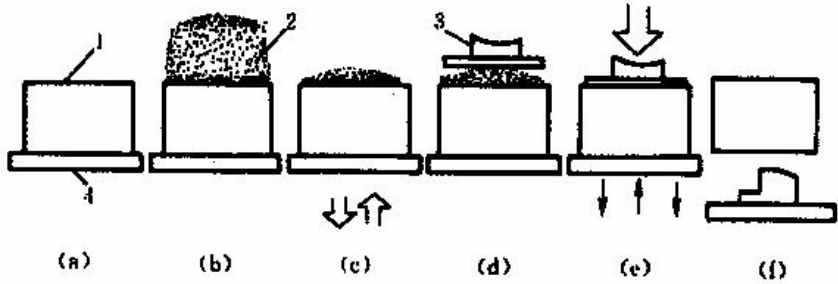


图 3-9 气动微振压实造型机紧砂原理图

(a) 砂箱复位；(b) 加砂；(c) 振实；(d) 压头进入；(e) 压振；(f) 起模

1-砂箱； 2-型砂； 3-压头； 4-单面模板

按型砂的紧实方式，主要的机器造型方法有压实造型、震实造型、抛砂造型、射砂造型、静压造型、高压造型、震压造型等。其中以震压造型在中、小工厂应用较广。

气动微振压实造型机的紧实原理见图 3-9。

常用的砂型铸造机器造型特点及应用范围见表 3-3。

二、 铸造工艺设计简介

铸造生产时，应根据零件的特点、技术要求，生产数量及生产条件等进行铸造工艺设计。在单件、小批量生产时，工艺设计较简单，只能画出铸造工艺图。

铸造工艺图是用规定的红、蓝两色铅笔将一些表示技术要求的工艺符号标注到产品零件图上而形成的图形。它是制造模样、造型、造芯、浇注、检验等的重要技术文件。同时，它也是绘制铸件图及编制铸造工艺卡（成批、大量生产时需要）的依据。

铸造工艺图技术要点如下：

1. 分型面与分模面 两个相邻铸型的接合面称为分型面。分型面可以是平面、斜面和曲面。为便于造型，分型面最好是平面并且应设在铸件最大水平截面处。为适应于分模造型时便于取模而将一个模样分开的切面（平面、斜面或曲面）称为分模面。分模面有时会与分型面重合。
2. 浇注位置 浇注时，铸件在铸型中所处的位置称为浇注位置。浇注位置和分型面对铸造工艺及铸件质量影响很大，须认真考虑。从保证铸件质量上讲，选择浇注位置主要考虑以下原则。

表 3-3 常用的砂型铸造机器造型比较

类 别	紧砂原理	特点及应用范围
振击造型	借机械振击使型砂获得动能，靠惯性紧砂成型	机构简单，振击噪声大。用于要求不高的中小铸件成批生产。
压实造型	靠压头压实型砂	机构简单，噪声小，用于精度要求不高的简单铸件中、小批生产。
振压造型	先振击，后用较低比压压实型砂	特点与振击造型基本相同，但砂型紧实比较均匀，用于要求较高较复杂中小铸件大批量生产。
气动微振压实造型	先预振，然后同时微振（高频率小增幅）压实或者先微振后压实	砂型紧实度高，均匀性较好。用于精度要求较高和较复杂铸件的成批、大量生产。
抛砂造型	靠抛砂头上高速旋转的叶片将砂团抛出，以达到填砂和紧实的目的	砂型（芯）紧实度均匀，适应性较广泛。适用于大中型铸件的单件或中、小批生产。
多触头高压造型	用许多小触头压实型砂，同时还进行微振	砂型紧实，铸件质量好，生产率高，劳动条件好，设备复杂，适用于大批量生产的铸件。
射砂造型	用压缩空气射砂紧实，再用压头补压成型	填砂和紧实两工序一同完成。速度快，铸件质量好。适用于中、小铸件大批量生产。（主要用于型芯）
气流冲击造型	靠具有一定压力的气体瞬时膨胀而产生的冲击波紧砂	砂型紧实度高且均匀，生产率高，铸件质量好。用于要求高的复杂铸件大量生产。

(1) 重要的面应处于型腔的底面或侧面。如车床床身铸件在浇注时，应使其导轨面处于铸型的下方。

- (2) 铸件的薄壁部分应置于铸型的下部或侧面，以保证金属液能顺利充满这一部分。
- (3) 铸件的厚实部分应放在上部或侧面，以便于安置浇、冒口进行补缩。
- (4) 铸件的大平面尽可能朝下。

3. 工艺参数。工艺参数主要有加工余量、拔模斜度、铸造收缩率、不铸孔、型芯等。

三、合金的熔炼及浇注

用于制作铸件的合金有铸铁、铸钢、铝合金和铜合金等。其中，铸铁占铸件产量的 75~80% 以上。

1. 铸铁的熔炼

铸铁熔炼可使用多种炉型，如冲天炉、电炉、反射炉等，但应用最广的是冲天炉。冲天炉的规格以其熔化率 (t/h) 表示。

冲天炉的炉料主要有焦炭、溶剂和金属料。熔化的铁液与消耗的焦炭之重量比称为铁焦比，一般为 8~10。

经熔炼后的铁水化学成分将发生变化。含碳量、含硫量增加，而硅和锰有一定的烧损。

2. 铸铁的浇注

将熔化的液态金属注入铸型的过程，称为浇注。浇注不当，可能会使铸件产生气孔、冷隔、浇不足、缩孔等缺陷。

浇注前应做好现场准备工作，如选好浇包、清理场地等。临浇注时，要扒去金属液面上的熔渣，以免其进入铸型。浇注时，要合理掌握浇注温度和浇注速度。对复杂件、薄壁件，浇注温度要高，浇注速度要快。而对简单件、厚壁件，则正好相反。

第三节 铸钢及有色金属铸造简介

一、铸钢的铸造

用钢（主要为中碳钢和铸造合金钢）作为铸件材料的铸造方法称为铸钢，其应用仅次于铸铁，铸钢产量约占铸件总产量的 15% 左右。

铸钢的熔炼 铸钢熔炼可以用平炉、转炉、电弧炉、感应电炉等。铸钢车间大多采用电弧炉。电弧炉温度易控制，操作方便，熔炼质量好，速度快。

1. 铸钢的铸造工艺特点 铸钢的铸造性能远不如铸铁。为保证铸件质量，必须采取更复杂的工艺措施：

- (1) 型砂性能要求更高（如强度、耐火度、透气性等）。为防止粘砂，铸型表面应涂上一层耐火材料。
- (2) 为使钢液顺利地流动、充型、补缩，使用更多的冒口和冷铁。
- (3) 要严格控制浇注温度，避免过高（使钢液易氧化）或过低（使流动性降低）。

2. 铸钢件的应用。因铸钢件的机械性能（强度、塑性、韧性等）优良和具有良好的焊接性能（指低碳铸钢），所以铸钢常用于制造承受重载荷及冲击载荷的零部件及构件，如水压机的横梁、立柱，锻压机械的机架、大齿轮、轧辊等，还适于制造用于铸—焊联合工艺的大型铸件。

二、有色金属的铸造

常用的铸造有色金属有铝、镁、铜、锌、铅等。而铝合金及铜合金又应用最多。

1. 熔炼特点 铝合金和铜合金熔炼时，都容易氧化和吸气。解决办法为脱氧、除气、精炼除渣等。熔炼设备多用坩埚炉。

2. 铸造工艺特点 铝合金和铜合金的铸造性能和化学成分关系密切。成分不同，其铸造性能差别很大。在生产中可根据合金的不同，在铸造方法、工艺措施方面有所区别以保证铸造质量。

第四节 铸件质量分析

一、常见的铸件缺陷分析

铸造生产的工艺较复杂。因工序多、投料多、管理环节多，所以铸件容易产生缺陷。常见的缺陷特征及分析见表 3-4。

表 3-4 常见铸件缺陷的种类、特征及分析

类别	序号	名称	特征	原因	预防措施
----	----	----	----	----	------

孔洞类	1	气孔 针孔	铸件内部或表面上呈圆形、梨形、椭圆形的光滑孔洞。 存在于铸件表层的针头状小孔（成群分布）	炉料不净或不干，熔炼工艺不当，使金属液含气量过高。型、芯砂含水份太多，透气性差，排气不良，浇注温度过低。	控制炉料的成份和干净程度；控制型砂、芯砂中的水份，使砂型、砂芯排气畅通；控制浇注温度和浇注速度。
	2	缩孔	形状不规则，内壁粗糙的孔洞常位于铸件最后凝固部位。	浇注温度过高；浇口、冒口、冷铁设置不当；铸件设计不合理，不能保证铸件凝固时得到有效的补缩。	合理设计铸件结构及浇口、冒口、冷铁系统，控制定向凝固，提高补缩效果。控制铁水成份及浇注温度。
	3	缩松 疏松	铸件厚壁和热节处出现的细小而分散的缩孔。	浇注温度过低，合金结晶温度范围宽，冷却速度慢，含气量大。	降低合金含气量，提高铸件冷却速度，控制铁水成份及浇注温度。
裂纹及冷隔类	4	热裂	热裂纹沿晶界扩展，形状曲折不规则，有氧化色彩。 冷裂纹常呈穿晶分布，未氧化并发亮有金属光泽。	铸件结构不合理，如壁厚差别大，冷却收缩受阻；浇注系统开设不当，导致铸件各部分收缩不均匀；砂型、砂芯退让性差。	合理设计铸件结构，力求壁厚均匀；合理设置浇注系统，实现同时凝固；改善型砂、芯砂的退让性；控制合金中硫、磷的含量。
	5	冷隔	铸件表面似乎已熔合，但并未熔透，有浇坑或接缝，其边缘呈圆角。	浇注温度及速度偏低；铸件壁厚太薄，浇口太小或位置不当；合金流动性差；浇注不当。	提高浇注温度及速度；增大浇口横截面积及多开内浇口；限制最小壁厚。
表面缺陷类	6	夹砂 结疤	铸件表面有疤片状金属突起物，疤片与铸件间夹有一层型砂。	型砂受热膨胀、内表层拱起或开裂，金属液进入砂型的裂缝而形成。	提高型砂质量及铸型强度；降低浇注温度，缩短浇注时间；提高透气性。
	7	粘砂	铸件表面粘着一层金属与砂粒的机械混合物，常发生在厚大断面，内角或凹槽部位。	浇注温度太高，金属液压力过大，型砂太粗，耐火度差，涂料不好或脱落。	选用合适的浇注温度及压力；选用耐火度好及粗细合适的型砂；均匀刷涂料。
残缺类	8	浇不足	铸件一部分残缺或边角处圆滑光亮。 常产生于远离浇口部位。	合金流动性差或浇注温度太低或浇注速度太慢。 铸件壁太薄或浇注系统设计不合理。	合理设计浇注系统；合理设计铸件，限制最小壁厚。 提高浇注温度及浇注速度。
夹杂类	9	夹渣	非金属夹杂物以不规则形态存在于铸件表面或内部。	浇注时挡渣不良；浇注系统设计不合理。 操作不注意，使渣与液态金属一起进了型腔。	注意浇注的操作，加强挡渣，提高浇注温度。 合理设置浇冒口。
	10	砂眼	包含有砂粒的小孔洞存在于铸件的表面或内部	砂型强度不足，合箱时，砂散落或浇注时被金属液冲垮。 浇注系统设计不合理；浇注速度过快。	提高砂型表面强度；合箱前吹净散砂。 合理设计浇注系统。 控制浇注速度。
形状差错类	11	错型	铸件在分型面处有错移	两半模样定为不良，造型时有错移。 合箱时，操作不当，使上下型错位。	模样定期检修，保证二半模样定位准确。 严格按定位标记、定位销合箱。 搬运、传送砂箱时，防止碰撞。

二、铸件的质量检验及处理

为保证铸件质量，通常对清理完的铸件要进行严格的检验。检验分为外观检验和内在质量检验。前者主要检查铸件的外观形状尺寸、重量的偏差及表面缺陷。后者主要检查铸件的化学成分、显微组织、内部缺陷等。

按检验结果，铸件可分为合格品、返修品及废品三类。对合格品按规定验收入库待用。对不合格品中可以通过返修处理达到技术要求的称为返修品。返修品经过返修（如表面气孔、裂纹的补焊）后再次检验

合格仍可入库。检验不合格、且无返修价值或返修后仍不能达到技术要求的定为废品。废品不能投入生产而只能回炉重新熔炼。上述过程见图 3-1 所示。

第五节 特种铸造简介

一、概述

砂型铸造虽然应用十分广泛，但也存在着一些缺点，如铸件表面质量不高，铸造缺陷较多导致废品率较高，劳动条件差等。随着生产的发展，逐渐出现了许多新的铸造方法。所谓特种铸造，是指除砂型铸造外的其它铸造方法。目前特种铸造已经发展到数十种，其中应用较多的有熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、离心铸造等。

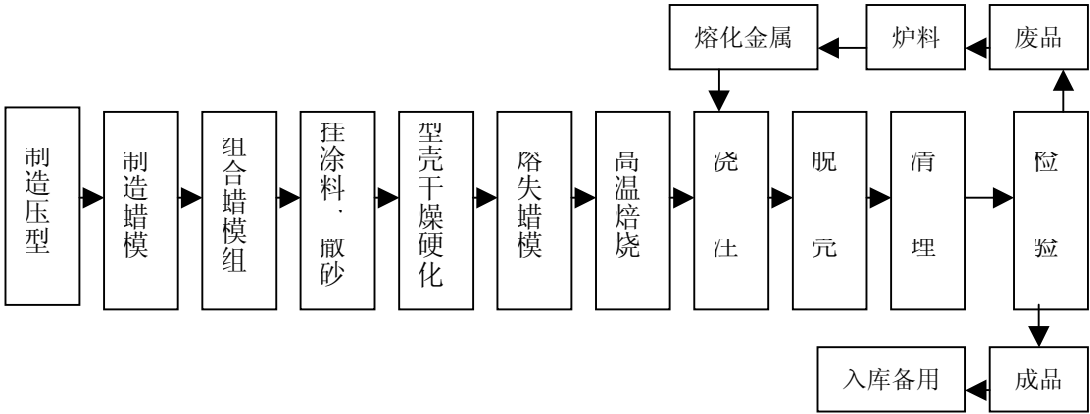


图 3-10 熔模铸造工艺流程图

1. 熔模铸造 用易熔材料（如蜡料）制成零件的精确模样，在模样上涂复多层耐火材料，制成型壳，待型壳干燥、硬化后，加热型壳使蜡模熔化形成型腔，型壳经高温焙烧后即可进行浇注获得铸件的铸造工艺方法叫熔模铸造，又称为失蜡铸造。因此法所得铸件尺寸精度及表面质量好，故又称其为“熔模精密铸造”。(图 3-10)

2. 金属型铸造 用铸铁、铸钢或耐热钢制造铸型，将熔炼好的金属浇注进去，以获得铸件的铸造方法叫金属型铸造。因金属铸型可反复使用几百乃至上万次，故又称永久型。(图 3-11)

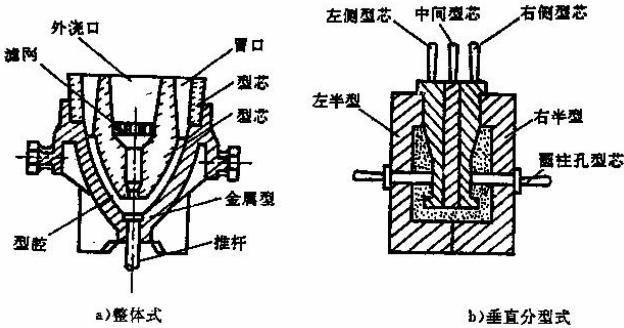


图 3-11 常用金属型结构示意图

3. 压力铸造 将液态金属在高压

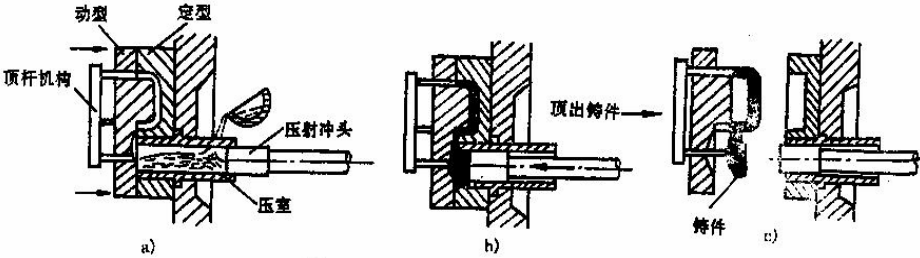


图 3-12 卧式压铸工艺过程示意图

下快速充填到金属铸型中，并在压力下充型和凝固而形成铸件的铸造方法称为压力铸造，简称压铸（图 3-12）。

4. 低压铸造 是一种介于重力铸造与压力铸造之间的铸造工艺方法。(图 3-13)

5. 离心铸造 将液态金属浇入高速旋转的铸型，在离心力

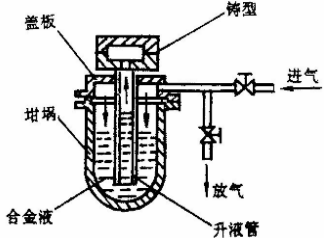


图 3-13 低压铸造工艺原理示意图

作用下凝固成形的工艺叫离心铸造。离心铸造在离心机上进行，按旋转轴的空间位置有卧式和立式两种离心机。铸型多用金属型，也可用非金属型（如砂型、熔模壳型等）。（图 3—14）

和砂型铸造相比，特种铸造的共同特点是这些方法一般都能提高铸件的外在质量（形状、尺寸精度及表面质量）和内在质量（减少铸造缺陷、提高机械性能），提高生产率，金属材料利用率及改善劳动条件，所以得到了迅速发展。

常用的特种铸造特点及适用范围见表 3—5。

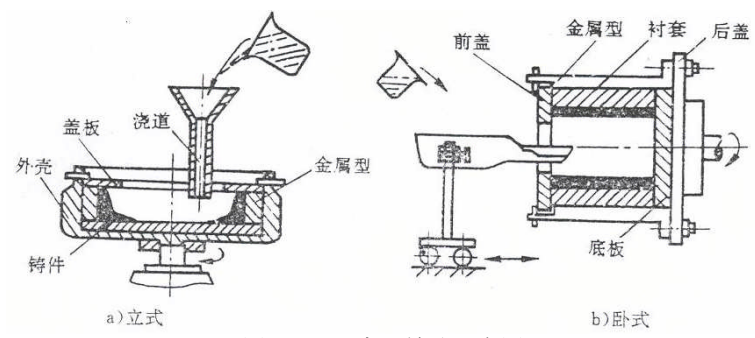


图 3—14 离心铸造示意图

表 3—5 常用的特种铸造特点及适用范围

名称	优 点	缺 点	适用范围
熔模铸造	铸件尺寸精度高，表面粗糙度低，可铸造形状复杂的铸件。 可用于各种铸造合金，各种批量的生产，是少无切削加工的重要方法。	生产工艺过程复杂，周期长，成本高。 不适合生产太大的铸件。	形状复杂、精度高、难加工的铸件，如涡轮叶片。
金属型铸造	铸型反复多次使用，节省造型材料及工时，改善劳动条件。 金属型散热快，铸件晶粒细，组织致密，力学性能好。 铸件精度高，表面质量好，生产率高，适于大批生产有色合金铸件。	金属型的加工周期长，成本高。 难以铸造薄壁及形状复杂的铸件。 金属型无退让性，铸件易产生裂纹。	铝活塞、汽缸体、油泵壳体、铜合金轴瓦、轴套。
压力铸造	铸件尺寸精度高，表面质量好，无需机械加工，即可使用。 金属液冷却快，且在压力下凝固，故组织致密，力学性能好。适于生产薄壁复杂件。 生产率高，易于实现机械化，自动化生产。	铸型结构复杂，准备工作周期长，成本高。 铸件表皮下易产生较多的细小气孔，故铸件不宜机械加工和热处理。	有色金属制造的薄壁复杂小件的大量生产。 广泛用于汽车、仪表、电器、航空等行业。
低压铸造	浇注时的压力和速度可以人为控制，可适于各种铸型。 充型平稳，铸件金属致密，缺陷少，合格率高。 适于铸造形状复杂的薄壁件。 金属利用率高（可达 95% 以上）	生产效率不太高，设备的保养不太方便。	高质量的铝合金、镁合金铸件，如汽缸体、汽缸盖、活塞、叶片等。
离心铸造	铸件致密、无缩孔、缩松、气孔、夹渣等缺陷，力学性能好。 铸造有圆筒形内孔的铸件时，可免去型芯及浇注系统，可简化工艺、节省金属。 生产率高，适于浇注流动性差的合金，薄壁件及双金属件。	铸件易产生偏析，内孔尺寸不准确，内表面粗糙。	盘套类、管类铸件，如铸铁管、铜套、缸套、双金属钢背铜套等

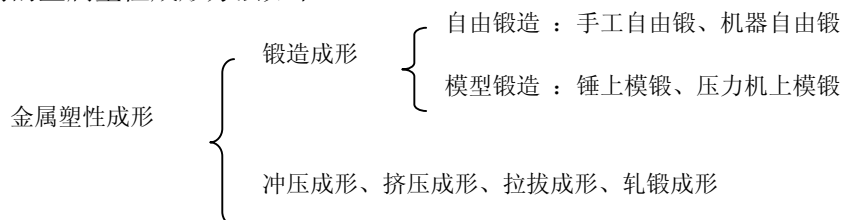
复习思考题

1. 举出 3 种铸件的名称并说明其为何采用铸造方法生产？
2. 型砂的作用是什么？它应具备什么性能？
3. 什么是分型面和分模面？它们各起什么作用？
4. 什么是浇注位置？考虑浇注位置有什么原则？
5. 和铸铁相比，铸钢的生产有何工艺特点？
6. 什么是分模造型、活块造型、挖砂造型和刮板造型？它们各用于何处？
7. 型芯的作用是什么？常见的型芯形式有哪几种？
8. 试比较气孔和缩孔、裂纹的产生原因及防止措施。
9. 什么是铸造工艺图？其技术要点是哪些？
10. 熔模铸造的工艺过程是什么？和砂型铸造相比，它有何工艺特点？
11. 压力铸造、低压铸造、金属型铸造、离心铸造各有什么特点？各有什么用途？

第四章 金属塑性成形

在工业生产中，金属塑性成形方法是指：金属材料通过压力加工，使其产生塑性变形，从而获得所需要工件的尺寸、形状以及性能的一种工艺方法。

常用的金属塑性成形方法如下：



金属材料经过塑性成形后，其内部组织更加致密、均匀，承受载荷能力及耐冲击能力有所提高。因此凡承受重载荷及冲击载荷的重要零件，如机床主轴、传动轴、齿轮、曲轴、连杆、起重机吊钩等多以锻件为毛坯。

用于塑性成形的金属必须具有良好的塑性，以便加工时易于产生永久性变形而不断裂。钢、铜、铝等金属材料具有良好的塑性，可进行锻压加工；铸铁的塑性很差，在外力作用下易裂碎，不用于锻压。

在金属塑性成形方法中，锻造、冲压两种成形方法合称锻压，主要用于生产各种机器零件的毛坯或成品。挤压、拉拔、轧锻三种成形方法是以生产金属材料为主，如型材、管材、线材、板料等，也用于制造某些零件，如轧锻齿轮、挤压活塞销等。

第一节 锻 造

锻造是金属热加工成形的一种主要加工方法，通常采用中碳钢和低合金钢作锻件材料，锻造加工一般在金属加热后进行，使金属坯料具有良好的可变形性，以保证锻造加工顺利进行。基本生产工艺过程如下：

下料→坯料加热→锻造成形→冷却→热处理→清理→检验。

一、锻坯的加热和锻件的冷却

1. 加热的目的 锻坯加热是为了提高其塑性和降低变形抗力，以便锻造时省力，同时在产生较大的塑性变形时不致破裂。一般地说，金属随着加热温度的升高，塑性增加，变形抗力降低，可锻性得以提高。但是加热温度过高又容易产生一些缺陷，因此，锻坯的加热温度应控制在一定的温度范围之内。

2. 锻造温度范围 各种金属材料在锻造时允许的最高加热温度，称为该材料的始锻温度。加热温度过高会产生组织晶粒粗大和晶间低熔点物质熔化，导致过热和过烧现象。碳钢的始锻温度一般应低于其熔点 100~200℃，合金钢的始锻温度较碳钢低。金属材料终止锻造的温度，称为该材料的终锻温度。坯料在锻造过程中，随着热量的散失，温度不断下降，因而，塑性越来越差，变形抗力越来越大。温度下降到一定程度后难以继续变形，且易产生锻裂，必须及时停止锻造重新加热。

从始锻温度到终锻温度之间的间隔，称为锻造温度范围。确定锻造温度范围的原则是：在保证金属坯料具有良好锻造性能的前提下，尽量放宽锻造温度范围，以降低消耗，提高生产率。

几种常用材料的锻造温度范围见表 4—1。

表 4—1 常用金属材料的锻造温度范围

金属种类	始锻温度(℃)	终锻温度(℃)	锻造温度范围(℃)
普通碳素钢	1250~1280	700	580
优质碳素钢	1150~1200	800	400
合金结构钢	1100~1200	800~850	350
碳素工具钢	1100	770~800	330
合金工具钢	1050~1150	800~850	250~300
耐 热 钢	1100~1150	850	250~300
铜 合 金	800~900	650~700	150~200
铝 合 金	450~500	350~380	100~150

在实际生产中，锻坯的加热温度可以通过仪表来测定，也可以通过观察被加热锻坯的颜色(火色)来判断。碳钢火色与其对应的温度关系见表 4—2。

表 4—2 碳钢的加热温度与其火色的对应关系

加热温度(°C)	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600 以下
火 色	黄白	淡黄	黄	桔黄	淡红	樱红	暗红	暗褐

3. 锻件的冷却 锻件的冷却是保证锻件质量的重要环节。锻件的冷却方式有三种：(1)空冷 在无风的空气中，锻件放置于干燥的地面冷却。(2)坑冷 在充填有砂子、炉灰或石棉灰等绝热材料的坑中以较慢的速度冷却。(3)炉冷 在 500~600°C 的加热炉中，随炉缓慢冷却。

碳素结构钢和低合金钢的中小型锻件，一般锻后均采用冷却速度较快的空冷方式冷却，成分复杂的合金钢锻件大都采用冷却速度较慢的坑冷或炉冷，厚截面的大型锻件采用炉冷。冷却速度过快会造成表面硬化，对后续切削加工产生不利影响。

二、自由锻

自由锻是将加热好的金属坯料放在锻造设备的上、下砧铁之间，施加冲击力或压力，直接使坯料产生塑性变形，从而获得所需锻件的一种加工方法。

自由锻由于锻件形状简单、操作灵活，适用于单件、小批量及重型锻件的生产。自由锻分手工自由锻和机器自由锻。手工自由锻生产效率低，劳动强度大，仅用于修配或简单、小型、小批锻件的生产，在现代工业生产中，机器自由锻已成为锻造生产的主要方法，在重型机械制造中，它具有特别重要的作用。

(一) 自由锻设备

自由锻的设备有空气锤、蒸汽—空气锤及自由锻水压机等。其中空气锤和蒸汽—空气锤通过冲击力使金属材料产生塑性变形，适用于锻造中小型锻件；水压机锻造时采用静压力完成塑性变形过程，一般用于锻造大型锻件。

1. 空气锤 图 4—1 为空气锤的外形图和工作原理示意图。它有压缩气缸和工作气缸，电动机通过减速机构和曲柄连杆机构，带动压缩气缸的压缩活塞上下运动，产生压缩空气。当压缩缸的上、下气道与大气相通时，压缩空气不进入工作缸，电动机空转，锤头不工作；通过手柄或踏脚杆操纵上下旋阀，使压缩空气进入工作气缸的上部或下部，推动工作活塞上下运动，从而带动锤头及上砧铁的上升或下降，完成各种击打动作。旋阀与两个汽缸之间有四种连通方式，可以产生提锤、连打、下压、电机空转四种动作。

空气锤的吨位用落下部分(包括工作活塞、锤头、上砧铁)的质量表示，常用的空气锤吨位为 50 kg~750kg。空气锤的吨位主要根据锻件的材料、大小和形状来选择。

2. 蒸气—空气锤 是以的蒸汽或压缩空气(0.6—0.9MPa)为动力，驱动锤头上、下运动进行打击而完成自由锻工艺需要的锻锤。锻锤由锤身、气缸、落下部分和砧座等组成。吨位以落下部分的质量表示，常用的有 1000—5000kg，可锻造 70—700kg 的中小型锻件。图 4—2 为拱式蒸汽自由锻锤的外形及工作原理图。工作时，通过操作手柄控制滑阀，使蒸气或压缩空气进入汽缸上腔或下腔，推动活塞上下运动，实现锤头的悬空、压紧、单次打击和连续打击等自由锻造的基本动作。

3. 水压机 大型锻件通常在水压机上完成，水压机是以高压水(20—200atm)作为动力的一种液压机，通过控制高压水和传动系统实现对坯料的施压变形。水压机锻造时，以静压力代替锤锻时的冲击力，其锻造压力大，锻透深度大，有利于改善大型锻件的内部质量。自由锻造所用水压机的吨位一般为 800—15000t。

(二) 自由锻工序 自由锻加工各种形状的锻件是通过一系列工序逐步完成的。根据变形性质和变形

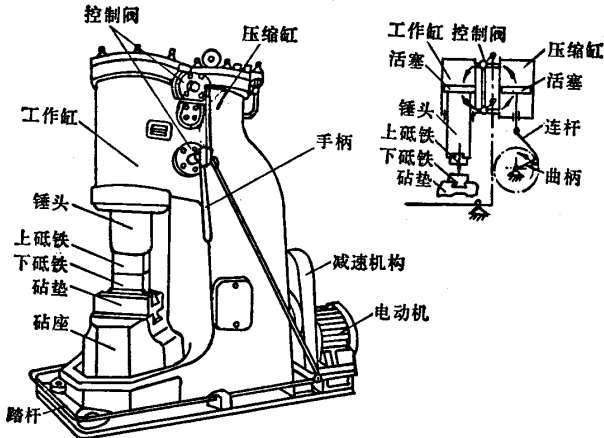


图 4—1 空气锤

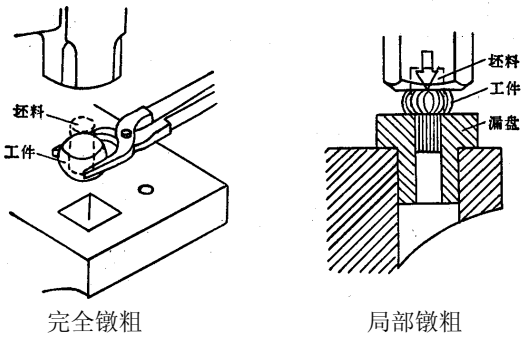


图 4—3 锻 粗

程度的不同,自由锻工序可分为基本工序、辅助工序和精整工序三类。

改变坯料的形状和尺寸,实现锻件基本成形的工序称为基本工序。自由锻的基本工序包括镦粗、拔长、冲孔、弯曲、扭转、切割、错移等;为便于实施基本工序而使坯料预先产生某些局部、少量变形的工序称为辅助工序,如倒棱、压肩、分段等;为修整锻件的形状和尺寸,消除表面不平,校正弯曲和歪扭,使锻件达到图纸要求的工序称为精整工序,一般在终锻温度以下进行,如滚圆、平整、校直等。

下面简要介绍自由锻的基本工序:

1. 镦粗 镦粗是使坯料横截面积增大、高度减小的锻造工序。主要用于饼块状锻件(如齿轮坯);也用于空心锻件冲孔前的准备工序、拔长时为提高锻造比作准备工序等。其基本方法可分为完全镦粗和局部镦粗。如图4-3所示

为使镦粗顺利进行,坯料的高度 H_0 与直径 D_0 之比应小于 $2.5\sim 3$ 。如果高径比过大,则易将坯料镦弯,高径比过大或锤击力量不足时,还可能将坯料镦成双鼓形。若不及时矫正而继续锻打,则会产生折叠,使锻件报废。为保证锻造质量,镦粗时注意以下操作要点:1) 镦粗前,坯料加热温度

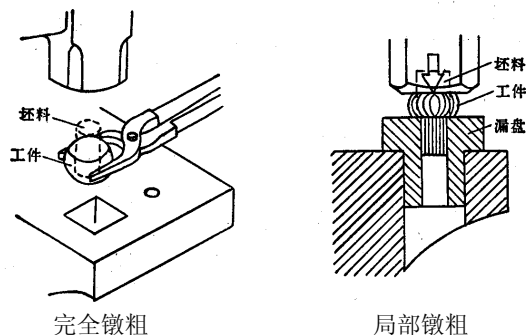


图4-3 镦粗

要均匀,表面不得有凹孔、裂纹等缺陷,否则镦粗会使缺陷扩大。2) 镦粗时,坯料容易产生纵向弯曲,可将坯料放倒,轻轻锤击加以校正。锻造的坯料要放平,防止镦弯,镦弯后应及时校正。3) 锻造中,若产生双鼓形,坯料要及时校形。

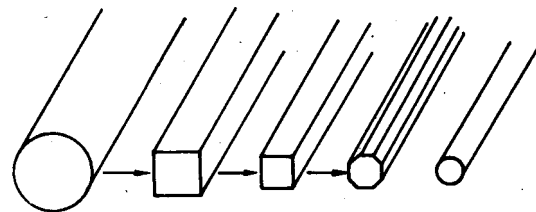


图4-4 圆截面坯料拔长变形过程

通常是镦粗和校形交替反复进行,以防止锻件折叠。4) 操作时,要夹紧坯料、平稳锻击、力要重而且正,以防锻件飞出伤人。

2. 拔长 拔长是使坯料长度增加、横截面积减小的锻造工序。主要用于曲轴、连杆等长轴类锻件。拔长时注意以下操作要点:1) 锻打时,坯料每次的送进量应为砧铁宽度 B 的 $0.3\sim 0.7$ 倍,送进量太小,易产夹层;送进量太大,金属主要向宽度方向流动,展宽多,延长少,反而降低拔长效率。2) 将圆截面的坯料拔长成直径较小的圆截面锻件时,必须先把坯料锻成方形截面,在拔长到边长接近锻件直径时,锻成八角形,然后滚打成圆形,如图4-4所示。3) 拔长过程中应不断翻转锻件,可用反复左右翻转 90° 的方法顺序锻打,使其截面经常保持近于方形;也可以沿轴线锻完一遍后,先翻转 180° 锻打校直,然后再翻转 90° 顺次锻打,如图4-5所示。后一种方法适用于大型坯料的拔长。拔长翻转时,应注意工件的宽度与厚度之比不要超过 2.5 ,否则再次翻转后继续拔长将容易产生折叠。4) 锻造有台阶的轴类锻件,要先在截面分界处用圆棒或三角刀进行压痕或切肩,然后再局部拔长。5) 锻造有孔的长轴线锻件,可将已冲孔的空心坯料套入芯轴后拔长,目的是为了减小壁厚,增加长度。为提高拔长效率,可在上平、下V型的砧铁中锻打。

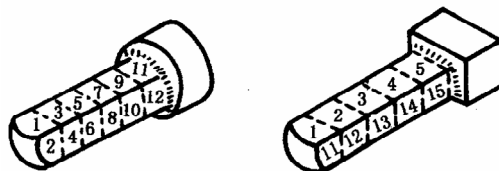


图4-5 拔长的操作

3. 冲孔 在坯料上锻出通孔或不通孔的锻造工序,称为冲孔。冲孔分实心冲头冲孔和空心冲头冲孔(图4-6)两类。冲孔时注意以下操作要点:1) 坯料应均匀加热到始锻温度,以提高塑性和防止冲裂。2) 冲孔前坯料预先镦粗,尽量减少冲孔深度并使端面平整。3) 为保证孔位正确,应先进进行试冲,即先用冲子轻轻冲出孔位的凹痕,检查孔位准确后方可深孔。为便于取出冲头,冲前可向凹痕内撒些煤粉。4) 一般锻件采用双面冲孔法,

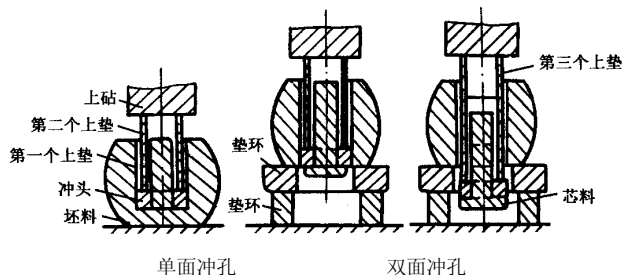


图4-6 空心冲头冲孔

即将孔冲到坯料厚度的 2/3~3/4 深度时, 取出冲子, 翻转坯料, 然后从反面将孔冲透。较薄的坯料可采用单面冲孔, 单面冲孔时应将冲子大头朝下, 漏盘孔径不宜过大, 且须仔细对正。

冲孔后如要进一步增大孔径, 则需扩孔。扩孔是减小空心毛坯壁厚而增加其内、外径, 或仅增加其内径的锻造工序。它用来锻造环形锻件(如轴承环等)。扩孔的基本方法有冲头扩孔和芯轴扩孔两种, 冲头扩孔适用于外径与内径之比大于 1.7 的锻件, 芯轴扩孔可锻造大孔径的薄壁锻件。

4. 弯曲 弯曲是采用一定的工模具将坯料弯成所需角度或形状锻件的工序, 一般用于锻造吊钩、U 形叉等各种弯曲形状的锻件。

5. 扭转 扭转是将坯料的一部分相对于另一部分旋转一定角度的工序。扭转时, 应将坯料加热到始锻温度, 受扭曲变形的部分必须表面光滑, 面与面的相交处要有过渡圆角, 以防扭裂。扭转不在同一平面内、由几部分组成的锻件(如曲轴)时, 可先在一个平面内锻出, 然后再扭转到各自所要求的位置。

6. 切割 切割是分割坯料或切除锻件余料的工序。切割的基本方法有单面切割和双面切割。前者可用于小尺寸截面的坯料切割, 切割后截面较平整、无毛刺。后者用于切割截面尺寸较大的坯料。

7. 错移 错移是将坯料的一部分相对另一部分平移错开的工序。如图 4—7 所示。先在错移部分压肩, 然后加垫块及支撑, 锻打错开, 最后修整。

在上述的自由锻基本工序中, 镦粗、拔长和冲孔三种工序应用最多。此外, 还有压口、压肩、分段等辅助工序以及摔圆、校正、整形等修整工序。在锻造过程中, 应根据锻件的形状来选择合适的锻造工序。

(二) 自由锻工艺过程

不同形状的锻件要采取不同的基本工序锻造成形。在选择和安排自由锻造基本工序时, 应对多种工艺方案进行综合分析比较, 要从优质、高效、低耗的基本原则出发, 尽量减少工序次数和合理安排各工序的顺序, 从而制定最佳工艺过程。

1. 锻件图 在自由锻工艺过程中, 工序的确定是以锻件图为依据的。锻件图是在零件图的基础上考虑了加工余量、锻造公差、工艺余块(为简化锻件形状便于锻造而增加的多余金属, 也称敷料。)等之后绘制的图解。为便于锻工在锻造过程中参考, 可以在锻件图上用双点划线表示零件图的轮廓形状, 并在各尺寸线下面的括号内标出零件的尺寸。形状简单的锻件, 可不画出零件图的轮廓, 直接在零件图上绘制锻件图。(详见表 4-3 中的锻件图一栏)。

2. 带孔圆盘类锻件的自由锻工艺过程, 其主要工序是在漏盘内局部镦粗和双面冲孔。

3. 阶梯轴类锻件的自由锻工艺过程, 其主要工序是在整体拔长后分段压肩和拔长。

表 4-3 所示为带孔圆盘类锻件与阶梯轴坯的锻件图与自由锻工艺过程

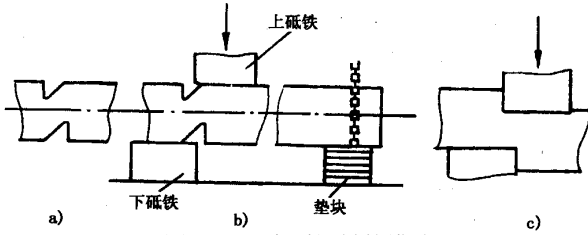


图 4—7 大型坯料的错移

表 4-3 带孔圆盘类锻件与阶梯轴坯的自由锻工艺过程

锻件名称: 齿轮坯 坯料材料: 45 设备: 150kg 空气锤	锻件图: 	温度/℃: 1200~800 工序: 1. 镦粗 2. 冲孔 3. 修整	操作要点: 1. 镦粗后高度 45mm 2. 双面冲孔 3. 轻打修整外圆至 $\phi 92 \pm 1$ mm 4. 轻打修整平面至 $\phi 44 \pm 1$ mm
锻件名称: 齿轮轴坯 坯料材料: 40Cr 设备: 150kg 空气锤	锻件图: 	温度/℃: 1180~850 工序: 1. 拔长 2. 压肩 3. 拔长 4. 摔圆 5. 压肩 6. 拔长	操作要点: 1. 整体拔长至 $\phi 49 \pm 2$ mm 2. 压肩一端拔长至略大于 $\phi 37$ mm 3. 拔长部分摔圆至 $\phi 37 \pm 2$ mm 4. 截出中段长度 42mm 后, 将另一段压肩 5. 拔长后摔圆至 $\phi 32 \pm 2$ mm

三、模型锻造

利用模具使坯料在模膛内产生塑性变形，从而获得锻件的锻造方法称模型锻造，简称模锻。模锻适用于中、小型锻件的大批量生产。模锻与自由锻相比有如下特点：(1) 可锻造形状较为复杂、内部质量较好的中小型锻件；(2) 锻件尺寸精度较高、表面粗糙度小。节约材料和工时；(3) 操作简单，生产效率高，易实现机械化和自动化；(4) 锻模制造复杂、成本高、设备昂贵、能量消耗大，模锻件的质量受到模锻设备吨位的限制，一般在 150kg 以下。根据不同的设备内型，模锻分为锤上模锻和压力机上模锻。

1. 锤上模锻 在模锻锤上进行模锻的方法，称锤上模锻。模锻锤锤头的上下运动具有较高的精度，可锻造各种类型的模锻件，生产效率高，设备造价较低。模锻锤有蒸汽空气锤、无砧座锤、高速锤等。锤上模锻所用的锻模分上模和下模，上模固定在锤头上，下模固定在砧座上，工作时锤头带动上模向下打击，完成锻造过程。(图 4—8)为模锻工作示意图，具有一个模膛的锻模，称为单模膛模锻；具有两个以上模膛的锻模，称为多模膛模锻。模膛根据功用不同可分为模锻模膛和制坯模膛。模锻模膛分预锻模膛和终锻模膛。制坯模膛分拔长、滚压、弯曲、切断等工序模膛。

2. 压力机上模锻 压力机上模锻是指在压力机上进行的模锻。包括曲柄压力机上模锻、摩擦压力机上模锻、平锻机上模锻等。一般，曲柄压力机对于低塑性材料的锻造有利，生产率高，适合大批大量生产；摩擦压力机普遍用于中、小型工厂小型锻件的批量生产；平锻机适于有头部的杆类和有孔的锻件，可进行管件的局部墩粗或胀孔，但造价高，投资大，仅用于大批量生产。

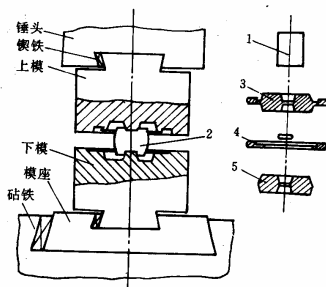


图 4—8 模锻工作示意图
1. 坯料 2. 锻造中的坯料 3. 带飞边和连皮的锻件 4. 飞边和连皮 5. 锻件

四、胎模锻

胎模锻是在自由锻设备上使用简单的非固定模具(胎模)生产模锻件的一种锻造方法。胎模不固定在锤头或砧座上，只是在使用时才放到锻锤砧座上。通常，锻件坯料先用自由锻造进行墩粗或者拔长等工序制坯，然后在胎模内终锻成形。胎模锻适用于小件的中、小批量生产。

胎模由模具钢制造而成，具有较高的热硬性(指材料在高温下仍然保持较高的硬度)、耐磨性和耐冲击性。胎模的种类较多，主要有扣模、筒模和合模三种。

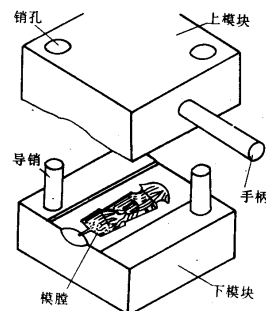


图 4—9 手锤胎模锻

第二节 板料冲压

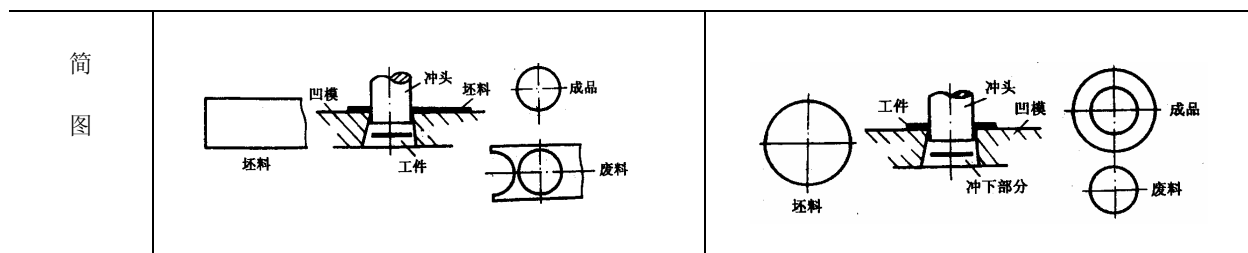
板料冲压是利用装在冲床上的模具使板料分离或变形，从而获得所需形状和尺寸的毛坯或零件的加工方法。板料冲压多用于具有足够塑性和较低变形抗力的金属材料(如低碳钢和有色金属及其合金等)薄板。板料厚度小于 6mm 的称薄板冲压，在一般情况下，板料不需要加热，故又称冷冲压。当板料厚度大于 8~10mm 时，才采用热冲压。板料冲压也可用于加工非金属材料，如硬橡胶、胶木板、石棉板、皮革、云母片等非金属材料。板料冲压具有如下特点：(1) 冲压件具有质量轻，强度较高，刚性好，尺寸精度和表面粗糙度高等优点。(2) 操作简单，工艺过程易实现机械化和自动化，生产率高，材料消耗少，产品成本低。(3) 冲模结构复杂，精度要求高，制造费用高，只适于大批量生产。

一、板料冲压的基本工序

板料冲压的基本工序分为分离工序和变形工序。

1. 分离工序 使坯料的一部分与另一部分产生分离的工序叫分离工序。包括剪切、冲裁(落料和冲孔)、切边、剖切等工序，常用的工序如表 4—4 所示。

表 4—4 分离工序		
工序	落料	冲孔



2. 变形工序 使坯料的一部分相对另一部分产生位移而不破坏的工序叫变形工序。包括弯曲、拉深、成形和翻边等工序。常用的工序如表 4—5 所示。

表 4—5 变 形 工 序

工 序	弯 曲	拉 深	翻 边
简 图			

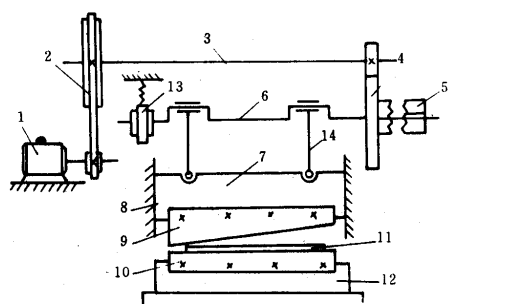
二、冲压设备

1. 剪床 剪床又称剪板机，是对板料进行剪切的设备，主要用于下料。剪切是使板料沿不封闭轮廓分离的工序。剪板机的传动机构如图 4-10 所示。电动机带动皮带轮、齿轮和曲轴转动，曲轴的转动使滑1块及上刀刃作上、下运动，进行剪切工作，（下刃口固定在工作台上）。

剪板机的主要技术参数是能剪板材的厚度和长度，如 Q113×1000 型剪板机，表示能剪板材的最大厚度为 2mm，长度为 1000mm。

2. 冲床

冲床是进行冲压加工的基本设备。常用的开式双柱冲床，如图 4—11 所示。冲模的上、下模分别装在滑块下端和工作台上，电动机通过三角皮带传动带动大带轮转动。踩下踏板后，离合器闭合并带动曲轴旋转，再经过连杆带动滑块沿导轨作上、下往复运动，进行冲压加工。如果将踏板踩下后立即抬起，则离合器脱离，滑块在冲压一次后便在制动器的作用下，停止在最高位置上，如果踏板不抬起，滑块就进行连续冲压。



1-电动机 2-带轮 3-传动轴 4-齿轮 5-离合器 6-曲轴 7-滑块 8-导轨
9-上刀刃 10-下刀刃 11-板料 12-工作台 13-制动器 14-连杆

图 4—10 剪床传动示意图

第三节 先进塑性成形加工工艺

塑性成形加工可以充分改善材料的内部组织，相对于其它成形方法力学性能好而且稳定。但传统塑性加工工艺需要大吨位的压力机，设备重量及其资金投入大，工、模具制造复杂、适应性差，成形精度和生产率有待提高。因此，现代塑性成形加工技术的新发展主要体现在高成形精度、柔性成形加工、省力成形工艺、CAD/CAE/CAPP/CAM 技术等方面。如精密模锻、挤压、轧制、拉拔成形以及特种塑性加工方法中的超塑成形、粉末锻造、爆炸成形、聚氨酯成形等。

一、精密模锻

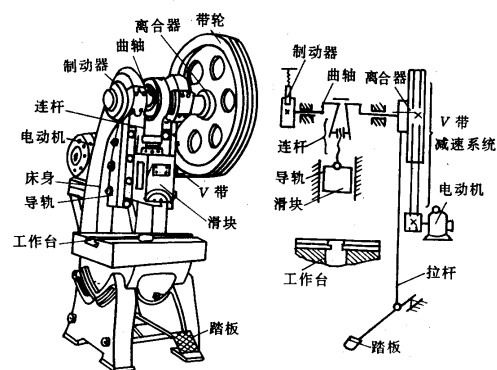


图 4—11 开式双柱冲床

精密模锻一般是指在模锻设备上锻造出高精度以及形状较为复杂锻件的锻压先进工艺。其基本工艺过程如图 4—12 所示。

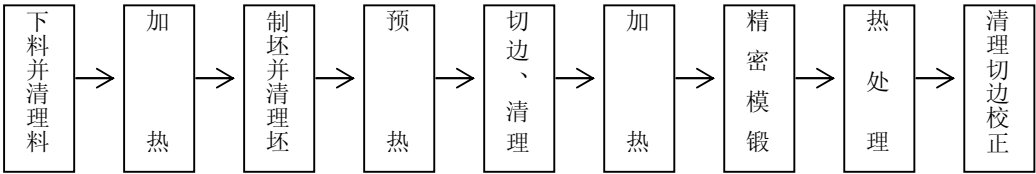


图 4—12 精密模锻基本工艺过程框图

精密模锻的具体工艺虽然因锻件的不同而有所不同，但必须采取模具精确，少、无氧化加热及对锻模进行良好的润滑等工艺措施。其特点主要有：

- (1) 精密模锻件的尺寸精度一般在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以上，表面粗糙度 Ra 低于 $6.31\mu\text{m}$ ，能达到产品的少无切削加工和精密化，直接生产零件；同时便于实现机械化、自动化生产。
- (2) 精密模锻件的纤维组织分布合理，力学性能和使用寿命较好。
- (3) 精密模锻对形状越复杂，批量大的中小型零件，其生产经济性较好。
- (4) 精密模锻工艺复杂，工序较多，要求设备刚度大、精度高、吨位大，维修保养的要求较高，生产上多采用摩擦压力机。

精密模锻在生产中应用较为广泛，主要生产中小型零件，如汽轮机叶片、发动机连杆、飞机操纵杆、汽车中的直齿锥齿轮以及自行车零件、医疗器械等。

二、挤压、轧制、拉拔成形

1. 挤压成形 挤压是使坯料在挤压筒中受强大的压力作用而变形的加工方法。按挤压温度可分冷挤压、温挤压、热挤压。冷挤压是少无切削工艺的主要方法。其基本工艺过程如图 4-13 所示。

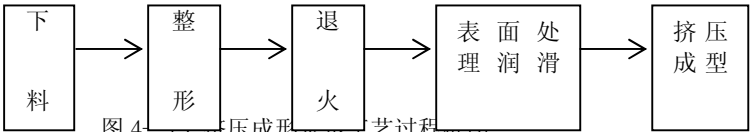


图 4-13 挤压成形基本工艺过程框图

挤压成形加工具有以下特点：1) 挤压时金属坯料在三向压应力状态下变形，其塑性提高。因此，适合挤压加工的材料较为广泛，塑性较好的有色金属（如铝、铜）及其合金、碳钢、合金结构钢、不锈钢等均可采用挤压工艺成形。2) 可挤压生产各种形状复杂、深孔、薄壁、异型截面的零件。3) 零件精度高，表面粗糙度低。一般尺寸精度为 IT6~IT8，表面粗糙度 Ra 为 $3.2\sim 0.4\mu\text{m}$ 、可达到少屑、无屑加工的目的。4) 挤压变形后零件内部的纤维组织是连续的，基本沿零件外形分布而不被切断，从而提高了零件的力学性能。

挤压按金属流动方向和凸模运动方向的不同，可分为正挤压、反挤压、复合挤压、径向挤压四种。

2. 轧制成形 金属材料（或非金属材料）在旋转轧辊的压力下，产生连续塑性变形，获得要求的截面形状并改变其性能的方法称为轧制。根据轧辊轴线与坯料轴线方向的不同，轧制分为纵轧、横轧、斜轧等几种。

(1) 纵轧是轧辊轴线与坯料轴线互相垂直的轧制方法。包括各种型材轧制、辊锻、辗环轧制等。其中辊锻轧制是把轧制工艺应用到锻造生产中的一种新工艺。

(2) 横轧是轧辊轴线与坯料轴线互相平行的轧制方法，如齿轮轧制等。

(3) 斜轧亦称螺旋斜轧。它是轧辊轴线与坯料轴线相交一定角度的轧制方法。如钢球轧制、周期轧制、冷轧丝杠等。

轧制方法除了生产型材、板材和管材外，近年来也用它生产各种零件，在机械制造业中得到了越来越广泛的应用。零件的轧制具有生产率高、质量好、成本低，并可大量减少金属材料消耗等优点。

3. 拉拔成形 拉拔是将金属坯料通过拉拔模的模孔使其变形的塑性加工方法。拉拔过程中坯料在拉拔模内产生塑性变形，通过拉拔模后，坯料的截面形状和尺寸与拉拔模模孔出口相同。因此，改变拉拔模模孔的形状和尺寸，即可得到相应的拉拔成形的产品。

目前的拉拔形式主要有线材拉拔、棒料拉拔、型材拉拔和管材拉拔。

线材拉拔主要用于各种金属导线，工业用金属线以及电器中常用的漆包线的拉制成形。此时的拉拔也称为“拉丝”。拉拔生产的最细的金属丝直径可达 0.01mm 以下。线材拉拔一般要经过多次成形，且每次拉拔的变形程度不能过大，必要时要进行中间退火，否则将使线材拉断。

拉拔生产的棒料可有多种截面形状，如圆形、方形、矩形、六角形等；型材拉拔多用于特殊截面或复杂截面形状的异形型材生产；管材拉拔以圆管为主，也可拉制椭圆形管、矩形管和其他截面形状的管材。

三、特种塑性加工方法

(一) 超塑性成形

超塑性是指金属或合金在特定条件下，即低的形变速率、一定的变形温度和均匀的细晶粒度条件下，其相对延伸率 δ 超过100%的特性。如钢超过500%、纯钛超过300%、锌铝合金超过1000%。

超塑性状态下的金属在拉伸变形过程中不产生缩颈现象，其变形应力可比常态下降百分之几十。因此，超塑性状态下的金属极易成形，可采用多种工艺方法制出复杂零件。

目前常用的超塑性成形材料主要是锌铝合金、铝基合金、钛合金及高温合金。

1. 超塑性成形工艺的应用

(1)板料冲压 零件直径较小，但高度很高。选用超塑性材料可以一次拉深成形，质量很好，零件性能无方向性。

(2)板料气压成形 如图4-14所示。超塑性金属板料放于模具中，把板料与模具一起加热到规定温度，向模具内充入压缩空气或抽出模具内的空气形成负压，把板料贴紧在凹模或凸模上，获得所需形状的工件。该方法可加工的板料厚度为0.4~4mm。

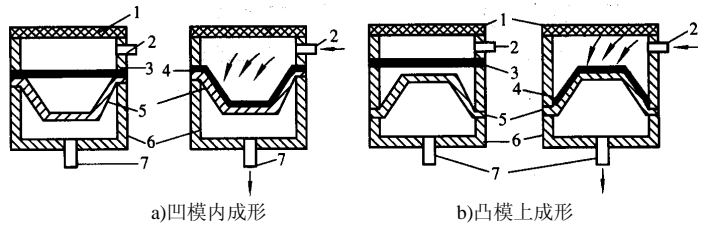


图4-14 板料气压成形

1-电热元件；2-进气孔；3-板料；4-工件；5-凹(凸)模；6-模框；7-抽气孔

(3) 挤压和模锻 高温合金及钛合金在常态下塑性很差，变形抗力大，不均匀变形引起各向异性的敏感性很强，用通常的成形方法较难成形，材料损耗极大，致使产品成本很高。如果在超塑性状态下进行模锻，就可完全克服上述缺点，节约材料，降低成本。

2. 超塑性模锻工艺特点：1) 扩大了可锻金属材料种类。如过去只能采用铸造成形的镍基合金，也可以进行超塑性模锻成形；2) 金属填充模膛的性能好，可锻出尺寸精度高、机械加工余量小甚至不用加工的零件。3) 能获得均匀细小的晶粒组织，零件力学性能均匀一致。4) 金属的变形抗力小，可充分发挥中、小设备的作用。

四、粉末锻造与液态模锻

1. 粉末锻造 粉末锻造通常是指将粉末烧结的预成形坯经加热后，在闭式模中锻造成零件的成形工艺方法。它是将传统粉末冶金和精密锻造结合起来的一种新工艺，并兼两者的优点。可以制取密度接近材料理论密度的粉末锻件，克服了普通粉末冶金零件密度低的缺点。使粉末锻件的某些物理和力学性能达到甚至超过普通锻件的水平，同时，又保持了普通粉末冶金少屑、无屑工艺的优点。通过合理设计预成形坯和实行少、无飞边锻造，具有成形精确，材料利用率高，锻造能量消耗少等特点。

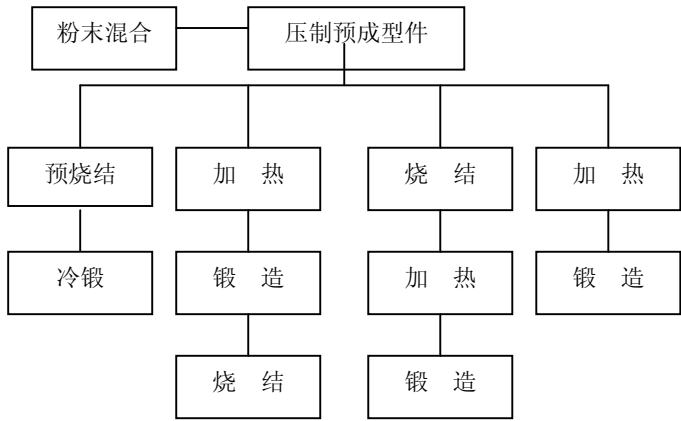


图4-15 粉末锻造基本工艺过程

粉末锻造的目的是把粉末预成形坯

锻造成致密的零件。目前，常用的粉末锻造方法有粉末冷锻、锻造烧结、烧结锻造、和粉末锻造几种，四种基本工艺过程如图4-15所示

粉末锻造在许多领域中得到了应用。特别是在汽车制造业中的应用更为突出。表4-6给出了适于粉末锻造工艺生产的汽车零件。

表4-6 适于粉末锻造工艺生产的汽车零件。

发 动 机	连杆、齿轮、气门挺杆、交流电机转子、阀门、气缸衬套、环形齿轮
变速器（手动）	离合器、轴承座圈、同步器、毂套、回动空转齿轮、各种齿轮
变速器（自动）	内座圈、压板、外座圈、制动装置、离合器凸轮、各种齿轮
底 盘	后轴壳体端盖、扇形齿轮、万向轴、侧齿轮、轮箍、伞齿轮、环齿轮

2. 液态模锻 液态模锻是将一定量的液态金属直接注入金属模膛，随后在压力的作用下，使处于熔融或半熔融状态的金属液发生流动并凝固成形，同时伴有少量塑性变形，从而获得毛坯或零件的加工方法。

液态模锻典型工艺流程如图 4-16 所示。一般分为金属液和模具准备、浇注、合模施压以及开模取件四个步骤。

液态模锻工艺的主要特点如下：1)成形过程中液态金属始终承受等静压力，在压力下完成结晶凝固。2)已凝固金属在压力作用下产生塑性变形，使制件外表面紧贴模膛，保证尺寸精度；3)凝固过程中，液态金属在压力作用下能得到强制补缩，比压铸件组织致密。4)成形能力高于固态金属热模锻，可成形形状复杂的锻件。

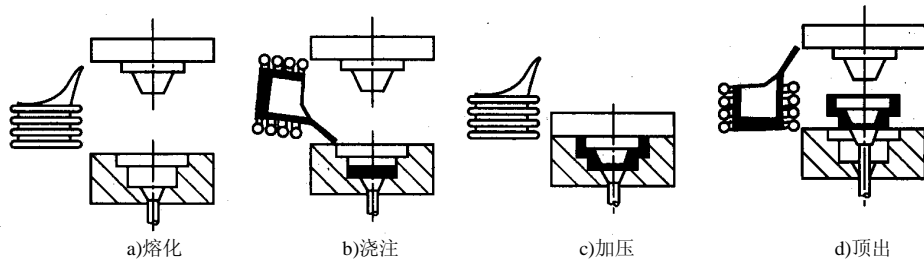


图 4-16 液态模锻典型工艺流程

适用于液态模锻的材料很多，不仅铸造合金，而且变形合金、有色金属及黑色金属的液态模锻也已大量应用。液态模锻适用于各种形状复杂、尺寸精确的零件制造，在工业生产中应用广泛。如活塞、压力表壳体、汽车油泵壳体、摩托车零件等铝合金零件；齿轮、蜗轮、高压阀体等铜合金零件；钢法兰、钢弹头、凿岩机缸体等碳钢、合金钢零件。

五、高能率成形

高能率成形是一种在极短时间内释放高能量使金属变形的成形方法。高能率成形主要包括爆炸成形、电液成形和电磁成形等几种形式。

1. 爆炸成形 爆炸成形是利用爆炸物质在爆炸瞬间释放出巨大的化学能对金属坯料进行加工的高能率成形方法。

爆炸成形时，爆炸物质的化学能在极短时间内转化为周围介质(空气或水)中的高压冲击波，并以脉冲波的形式作用于坯料，使其产生塑性变形并以一定速度贴模，完成成形过程。冲击波对坯料的作用时间为微秒级，仅占坯料变形时间的一小部分。这种高速变形条件，使爆炸成形的变形机理及过程与常规冲压加工有着根本性的差别。

爆炸成形主要特点是：1) 能提高材料的塑性变形能力 适用于塑性差的难成形材料。2) 一般情况下，爆炸成形无需使用冲压设备，生产条件简化。3) 模具简单，仅用凹模即可。节省模具材料，降低成本。4) 适于大型零件成形。爆炸成形不需专用设备，且模具及工装制造简单，周期短，成本低。

爆炸成形目前主要用于板材的拉深、胀形、校形等成形工艺。此外还常用于爆炸焊接、表面强化、管件结构的装配、粉末压制等方面。爆炸成形装置如图 4-17 所示。

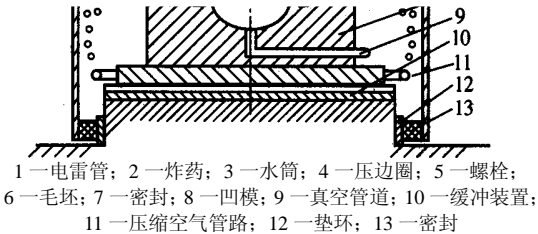


图 4-17 爆炸拉深装置

2. 电液成形 电液成形是利用液体中强电流脉冲放电所产生的强大冲击波对金属进行加工的高能率成形方法。电液成形也具有模具简单、零件精度高、能提高材料塑性变形能力等特点，与爆炸成形相比，电液成形时能量易于控制，成形过程稳定，操作方便，生产率高，便于组织生产。

电液成形装置的基本原理如图 4-18 所示。该装置由两部分组成，即充电回路和放电回路。

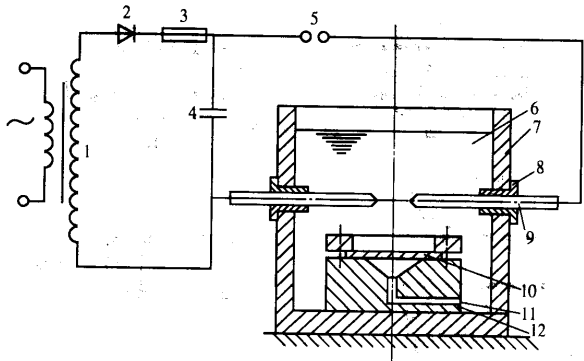


图 4-18 电液成形原理图

充电回路主要由升压变压器 1、整流器 2 及充电电阻 3 组成。放电回路主要由电容器 4、辅助开关 5 及电极 9 组成。来自网路的交流电经升压变压器及整流变压器后变为高压直流电并向电容器充电。当充电电压达到所需值后，点燃辅助间隙，高压电瞬时加到两放电电极所形成的主放电间隙上，并使主间隙击穿，产生高压放电，在放电回路中形成强大的冲击电流，结果在电极周围介质中形成冲击波及液流冲击而使金属坯料成形。

电液成形主要用于板材的拉深、胀形、翻边、冲裁等加工。

复习思考题

1. 金属塑性成形的实质是什么？常用的金属塑性成型的方法有哪些？
2. 锻造生产中，对金属坯料进行加热的目的是什么？
3. 什么是始锻温度和终锻温度？始锻温度过高和终锻温度过低对于锻造生产有何影响？
4. 什么叫自由锻？常规的自由锻设备有哪些？自由锻造的基本工序有哪些？
5. 进行自由锻造基本工序镦粗和拔长时应注意哪些操作要点？
6. 什么叫模型锻造？模型锻造与自由锻造相比具有哪些特点？
7. 什么叫板料冲压？试述板料冲压的特点及其基本工序。
8. 现代塑性成型加工技术的新发展主要体现在哪些方面？
9. 什么是粉末锻造？粉末锻造零件与普通粉末冶金零件相比有何优点？
10. 什么是爆炸成型？其有哪些主要特点？

第五章 金属焊接成形

第一节 焊接工艺基础知识

一、概述

焊接是通过加热或加压（或两者并用），并使用（或不用）填充材料，使焊件形成原子间结合，从而实现永久性（不可拆卸）连接的一种加工方法。

焊接方法种类很多，但按其过程特点不同，可分为 熔化焊、压力焊和钎焊三大类。熔化焊是将两焊件的连接部位加热至熔化状态在不加压力的情况下，使其冷却凝固成一体，从而完成焊接。压力焊是在焊接过程中，必须对焊件施加压力，同时加热（或不加热）以完成焊接。钎焊是将低熔点的钎料熔化，使其与焊件金属（仍加热，但仍处于固态）相互扩散，而实现连接。

在生产中，最常用的是熔化焊，如其中的手工电弧焊、埋弧自动焊、气焊等。随着生产技术的不断发展，气焊有被氩弧焊和 CO_2 气体保护焊取代的趋势。压力焊中的电阻焊应用也十分广泛（如汽车制造业）。

熔化焊的焊接接头如图 5—1 所示。被焊的工件材料称为母材（或称基本金属）。焊接中，母材局部受热熔化形成熔池，熔池不断移动并冷却后形成焊缝。焊缝两侧部分母材因焊接加热的影响而引起金属内部组织和力学性能变化的区域，称为焊接热影响区。焊缝和热影响区的分界线称为熔合线。焊接接头由焊缝、熔合线和焊接热影响区三部分组成。焊缝各部分的名称如图 5—2 所示。



图 5—1 熔化焊焊接接头

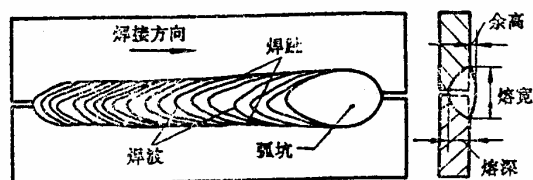


图 5—2 焊缝各部分的名称

二、焊接的特点及应用

焊接主要用于制造金属结构件，也可用于机器的零部件的制造。世界上一些工业发达国家，其焊接结构的年产量大约占钢产量的 45% 左右。焊接能得到广泛的应用是由于它具有以下优点：

1. 连接性能好。可以方便地将板材、型材或铸锻件根据需要进行组合焊接，因而对于制造大型、特大型结构（如机车、桥梁、轮船、火箭等）有重要意义。同时，焊接还可以将不同形状及尺寸（板厚、直径）甚至不同材料（异种材料）连接起来，从而达到降低重量，节约材料，资源优化等目的。

2. 焊接结构刚度大，整体性好。同时又容易保证气密性及水密性，所以特别适合制造高强度、大刚度的中空结构（如压力容器、管道、锅炉等）。

3. 焊接方法种类多，焊接工艺适应性广。焊接生产可适应不同要求及批量的生产。另外，由于焊接规范参数的电信号容易控制，所以焊接自动化比较容易实现（如汽车制造业中广泛使用了点焊机械手、弧焊机器人等）。

焊接也存在一些不足之处：

1. 焊接往往导致焊接接头组织和性能改变，如控制不当会严重影响结构件的质量。

2. 焊缝及热影响区因工艺或操作不当会产生多种缺陷，使结构承载的能力下降。

3. 焊接使工件产生残余应力和变形，影响产品质量。

实践表明，上述缺陷的产生及影响程度取决于材料（母材、焊材）的选用，设计和制造工艺水平等。通过优化设计，合理选材和施工，以及严格管理可以使焊接件达到很高的质量水平。

第二节 手工电弧焊

利用电弧作为热源的焊接方法称为电弧焊。用手工操作焊条进行的电弧焊称为手工电弧焊（或焊条电弧焊），简称手弧焊。

手工电弧焊因设备简单，方便灵活而得到广泛应用。手工电弧焊的焊接过程如图 5—3 所示。

焊接时在焊条和焊件之间产生电弧，高温电弧使焊条端部和工件局部熔化而形成熔池。因焊条不断向下送进，故电弧得以维持。又由于电弧沿焊接方向前移，又产生新的熔池，而原熔池则迅速冷却、凝固形成焊缝，从而使两块焊件连为一体。

焊条药皮熔化后形成熔渣（冷却后叫渣壳）始终覆盖在熔池（或焊缝）上，对焊缝起保护作用。

一、焊接电弧

由焊接电源供给的，具有一定电压的两电极（焊条与工件）间，在气体介质中产生的强烈而持久的放电现象叫焊接电弧。

焊接开始时，先进行引弧。使焊条和工件瞬间接触，形成短路。因焊条端面与工件表面并不平整，所以强大的短路电流经少数几个接触点，使接触处的金属温度迅速升高而熔化，甚至有部分金属蒸发。（图 5—4（a））

此时使焊条和工件迅速分离，因两极处温度已非常高，在电场作用下产生热电子发射。阴极发射大量电子快速飞向阳极，在途中撞击空气分子使之电离成正离子和电子，从而使两电极间的空气导电。上述带电质点定向运动即形成焊接电弧。（图 5—4（b））

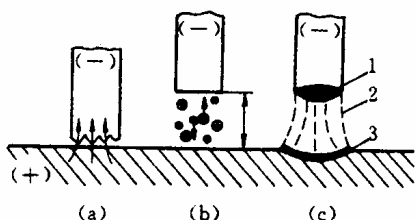


图 5—4 焊接电弧形成
1—阴极区； 2—弧柱区； 3—阳极区

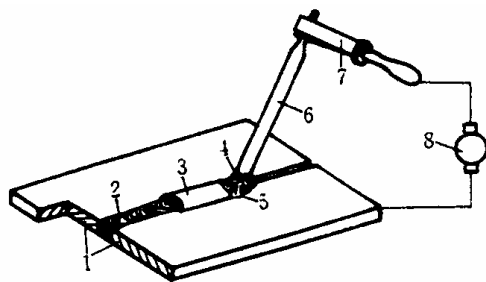


图 5—3 手工电弧焊焊缝形成过程
1—焊件； 2—焊缝； 3—渣壳； 4—电弧；
5—溶池； 6—焊条； 7—焊钳； 8—电焊机

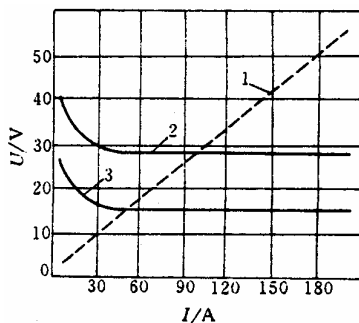


图 5—5 电弧的静特性曲线
1—普通电阻特性；
2—弧长 5mm 的电弧静特性；
3—弧长 2mm 的电弧静特性

1. 焊接电弧的构造和温度分布

焊接电弧由阴极区、弧柱区、阳极区三部分组成。(图 5—5) 阴极区和阳极区的温度与电极材料有关, 当用直流弧焊机焊接, 两电极材料均为低碳钢时, 阴极区温度约为 2400K, 阳极区温度约为 2600K。如用交流弧焊机焊接, 两电极温度均为 2500K 左右(因电流方向交变)。弧柱区的温度最高, 可高达 6000~8000K。焊接电弧产生的热量与焊接电流和电弧电压(电弧两端之间的电压降)的乘积成正比。通常, 焊接电弧在阳极区产生的热量较多, 约占电弧热量的 43%; 阴极区因发射电子要消耗一定能量, 故产生热量较少, 约占 36%; 弧柱区产生的热量只占 21%。手弧焊时, 电弧热量的 65~85% 用于金属的加热与熔化, 而其余的热量则散失在电弧周围的空气中及由飞溅的金属熔滴带走。

2. 焊接电弧的静特性

手弧焊时, 电焊机与电弧组成一个电源——负载系统。(图 5—3) 焊接电弧是负载, 能将电能转变成热能, 在这一点上它与普通电阻相似, 但它们之间又有着根本的区别。电弧是一个变动的负载, 而电阻是固定负载。当通电时, 两者的电压降变化不同。(图 5—5) 电弧燃烧时, 焊接电流与电弧电压之间的关系叫电弧的静特性。

由图 5—5 可知, 当电弧长度一定时, 焊接电流越小, 电弧电压越高; 而焊接电流大于 30~50A 时, 电弧电压则与电流大小无关(曲线呈水平状), 而主要与电弧长度有关, 即电弧越长 所需要的电压也越高。

二、电焊机

1. 电弧焊需要专用的弧焊电源。手工电弧焊电源也称手弧焊机。在焊接时, 为了顺利的引燃电弧并保持稳定燃烧, 手弧焊机在性能上应满足下列要求。

(1) 具有陡降的外特性。在其它参数不变的情况下, 电源输出电压与输出电流之间的关系称为电源的外特性。一般用电设备要求电源电压不随负载变化, 即外特性呈水平状, 但焊接电源则要求其输出电压随焊接电流的增加而迅速下降。(图 5—6)

(2) 适当的空载电压。较高的空载电压有利于引弧及稳弧, 但从安全角度考虑也不宜太高。

(3) 适当的短路电流。焊接时, 当两电极(焊条与工件)短路时, 焊接电流称为短路电流。一般应限制短路电流, 以保证焊接电源不至于过载 烧坏。

(4) 良好的动特性。电弧长度变化或是频繁短路时, 焊接电源应能保证电弧的稳定。

(5) 良好的调节特性。手弧焊机的焊接电流应能在较宽范围内均匀调节, 以适应不同材料, 板厚的焊接要求。

2. 常用手弧焊机简介

弧焊机按其供给电流的性质可分为交流弧焊机和直流弧焊机。直流弧焊机又分为旋转直流弧焊机(发电式)和硅整流弧焊机(整流式)两种。

交流弧焊机(即交流弧焊电源)也称为弧焊变压器。它是一个特殊的降压变压器。常见的交流弧焊机有动铁式(如 BX₁—300)和动圈式(如 BX₃—400)两类。其型号含义为: B 表示弧焊变压器, X 表示下降外特性, 1 是动铁式, 3 是动圈式, 而 300 和 400 等则表示焊机的额定电流值(安培)。

旋转直流弧焊机因稳弧性好曾得到广泛应用, 但由于其结构复杂, 价格高, 能耗大, 效率低, 噪声大等原因已属于淘汰产品。

整流弧焊机也叫弧焊整流器。它是一种将交流电经变压、整流转换成直流电的焊接电源。用硅整流器做整流元件称为硅整流弧焊机(如 ZXG—400), 该焊机因性能优良已得到广泛使用。其型号含义为: Z 表示整流弧焊电源, X 表示下降外特性, G 表示硅整流式, 400 是额定焊接电流为 400 安培。近年来, 逆变式焊机因具有效率高, 体积小, 稳弧性好, 焊接质量稳定等原因得到越来越广泛的应用。该焊机(如 ZX7—400)型号中的 7 表示逆变式, 400 表示额定焊接电流为 400 安培。

整流弧焊机的输出端有正负极之分, 工件接焊机正极, 焊条接负极称为正接法; 反之, 则为反接法。焊厚板时, 为增加熔深, 用正接。焊薄板时, 为防止烧穿, 用反接。在使用碱性焊条时, 均应采用反接, 以保证电弧稳定。使用交流弧焊机焊接时, 因输出的电流周期性变换极性, 故没有正接与反接之分。

三、电焊条

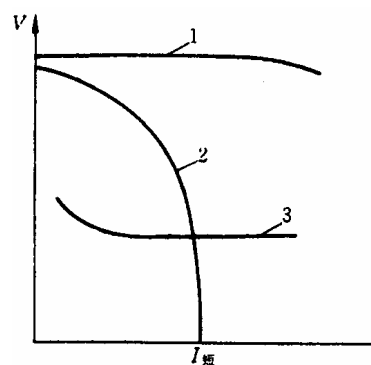


图 5—6 焊接电源特性

- 1—普通电源外特性曲线;
- 2—焊接电源外特性曲线;
- 3—焊接电弧静特性曲线

1. 概述

电焊条（简称焊条）是手弧焊时的焊接材料，是一种涂有药皮的熔化电极，它有焊芯和药皮两部分组成（图 5—7）。

焊芯是焊接专用的金属丝，按规定，它有一定的直径和长度。焊条直径即为焊芯的直径（焊丝直径），通常其规格有 2、2.5、3.2、4、5、6mm 等。其长度一般为 300~450mm。

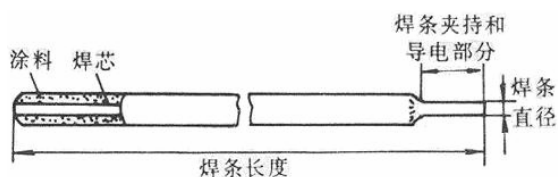


图 5—7 电焊条

焊丝的作用有两个：一是作为电极，传导电流，产生并维持电弧；二是熔化后作为填充金属与熔化的母材一起组成焊缝。另外必要时，也可以用焊芯来渗合金。

按国家标准规定，焊接专用钢丝（焊丝）分为碳素结构钢、合金结构钢和不锈钢三类。常用的碳素结构钢焊芯牌号有 H08、H08A、H08E 和 H10Mn2 等。牌号的含义为：H 表示焊芯，08 表示含碳量为 0.08%，合金元素及其它符号与钢号表示方法相同。

药皮是挤压涂在焊芯表面上的涂料层，它有矿石粉、铁合金粉、粘结剂等原料按一定比例配制而成。其主要作用是使电弧容易引燃并保持稳定；在电弧高温下，产生大量气体，并形成熔渣，保护熔化金属不被氧化；去除有害元素（如氧、氢、硫、磷等），添加有益的合金元素，以改善焊缝质量。

焊条药皮有七类：（1）高钛型，（2）钛钙型，（3）钛铁矿型，（4）氧化铁型，（5）锰型，（6）低氢钾型，（7）低氢钠型。

上述药皮中的（6）和（7）属碱性焊条，其余为酸性焊条；使用的焊接电源除（7）必须用直流（反接）外，其余均是交、直流两用。

2. 焊条的分类及编号

（1）焊条的分类

我国焊条一般按用途进行分类。原机械工业部《焊接材料产品样本》中将焊条按其用途划分为十大类。（表 5—1）

表 5—1 电焊条的分类

焊条类型	牌号符号	焊条类型	牌号符号
结构钢焊条	J（结）	铸铁焊条	Z（铸）
耐热钢焊条	R（热）	镍及镍合金焊条	Ni（镍）
低温钢焊条	W（温）	铜及铜合金焊条	T（铜）
不锈钢焊条	G（铬）	铝及铝合金焊条	L（铝）
	A（奥）	特殊用途焊条	TS（特）
堆焊焊条	D（堆）		

新的国标按用途将焊条分为七大类：碳钢焊条、低合金钢焊条、不锈钢焊条、堆焊焊条、铸铁焊条及焊丝、铜及铜合金焊条、铝及铝合金焊条。

根据焊接后熔渣的化学性质，焊条可分为两大类：酸性焊条和碱性焊条。酸性焊条的工艺性好，但抗裂性不如碱性焊条，所以广泛用于一般钢结构。碱性焊条则正相反，它的工艺性较差（脱渣性及焊缝外观成形不如酸性）但抗裂性好（抗冷、热裂纹），焊缝金属的冲击韧性高，故适用于重要的钢结构（如锅炉、压力容器、压力管道等）。

（2）焊条的型号及牌号

为使用方便，对焊条必须进行统一的分类编号。目前同时存在两种方法，一是焊条型号，指的是国家规定的各类标准焊条；二是焊条牌号，指的是有关部门或厂家实际生产的焊条产品样本上的编号。

以焊接低碳钢和普通低合金结构钢使用的酸性焊条 E4303 为例。E4303 是国家标准型号，其中 E 表示电焊条；43 表示焊缝金属的抗拉强度不低于 420MPa（43Kg/mm²）；0 表示适于全位置焊接；3 表示钛钙型药皮。这种焊条的牌号是 J（结）422，其中 J（结）表示结构钢焊条；42 表示焊缝金属抗拉强度不低于 420MPa；2 表示钛钙型药皮，交直流两用。

常用焊缝型号和牌号对照如表 5—2 所示，其它焊条可参阅相关标准或焊接手册。

表 5—2 常用焊条型号和牌号对照表

型号	牌号	型号	牌号
E4303	J422	E5015	J507
E4316	J426	E6015	J607
E4315	J427	E00-19-10-16	A302
E5003	J502	E0-19-10Nb-15	A137

四、焊接接头形式和坡口

1. 焊接接头形式

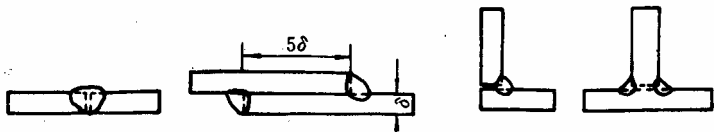


图 5—8 常用的焊接接头形式

在焊接结构中，常用的焊接接头形式有：对接接头、搭接接头、角接头和 T 型接头等形式。(图 5—8)

2. 坡口形式

焊接时，为了保证焊件能焊透并减少母材（被焊金属）在焊缝中所占的比例，需要将焊件接头处加工成所需要的几何形状（即开坡口）。

常见的坡口型式有 I 形（即不开坡口）、

V 形、U 形、K 形和 X 形等。

加工坡口时，在焊接厚度方向留的直边称为钝边，其作用是防止烧穿。接头组装时，常留一定的间隙以保证焊透。如焊件较厚，为使坡口焊满，要采用多层焊或多层多道焊。(图 5—10)

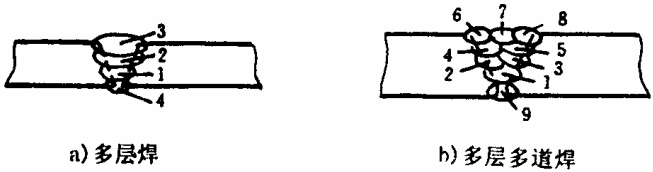


图 5—10 对接接头的多层焊

五、焊接位置

熔焊时，焊件接缝所处的空间位置称为焊接位置。主要有平焊、立焊、横焊和仰焊位置等。对接接头的几种焊接位置(图 5—11)中，平焊因其焊缝质量好，生产率高及劳动条件好等原因，使用最广。立焊和横焊次之，而仰焊最难。

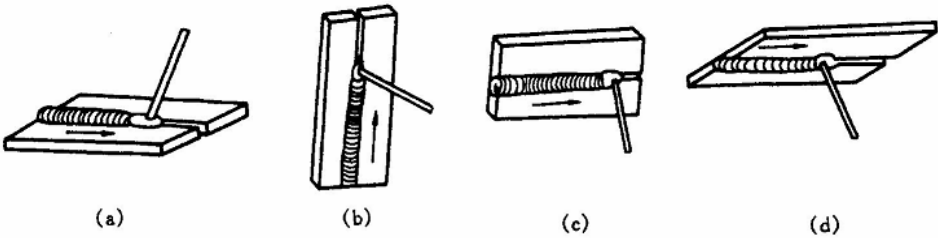


图 5—11 对接接头的焊接位置
(a) 平焊 (b) 立焊 (c) 横焊 (d) 仰焊

六、焊接工艺参数

焊接时，为保证焊接质量而选定的诸物理量（如焊接电流、电弧电压、焊接速度等）统称为焊接工艺参数。手弧焊的工艺参数主要是焊条直径、焊接电流、电弧电压和焊接速度等，其中尤为重要的是，焊条直径和焊接电流。

1. 焊条直径。首先，根据焊件的厚度初步选择焊条直径（表 5—3），然后按焊接工艺条件（接头型式、焊接位置、焊接层数等）作必要的调整。如立焊、横焊和仰焊应选较细焊条；多层焊时，打底层用小直径焊条以保证焊透，减少缺陷和防止烧穿，而中间及覆盖层可用大直径焊条以提高生产率。

表 5—3 焊条直径的选择

焊件厚度 (mm)	2	3	4~7	8~12	>12
焊条直径 (mm)	1.6, 2.0	2.5, 3.2	3.2, 4.0	4.0, 5.0	4.0, 6.0

2. 焊接电流

一般情况下都按焊条直径选择焊接电流。通常可按经验公式 $I = (30 \sim 55) d$ 来确定。式中, I 是焊接电流 (A), 而 d 则是焊条直径 (mm)。

应注意的是, 由上述公式计算所得的电流只是个大致范围, 实际施焊时还要考虑焊条类型、焊条直径、焊件厚度、接头型式、焊接位置等因素进行必要的修整, 通常要经过试焊来确定。

2. 焊接层数

对较厚的工件要开坡口, 采用多层焊或多层多道焊。一般每层焊道厚度不能大于 4~5mm。

3. 其它焊接工艺参数

电弧长度 (和电弧电压成正比, 影响熔宽) 和焊接速度 (单位时间内完成的焊缝长度) 由焊工视具体操作情况掌握, 一般不作规定。通常, 尽量要求用短弧焊接, 电弧长度不超过焊条直径。使用碱性焊条时, 弧长应更短 (约为焊条直径的一半)。

焊接时, 所用工艺参数是否正确, 不但影响焊缝外观成形, 而且影响焊接接头的内部质量。

七、焊接操作

1. 引弧 常用的引弧方法有敲击法和划擦法。将焊条在焊件上轻敲或轻划一下, 迅速将焊条提起 2~4mm 的距离, 电弧即被引燃。

3. 堆平焊波 堆平焊波就是在处于平焊位置的板状焊件上堆焊焊缝, 是手弧焊最基本的操作练习。引弧后, 要注意掌握好焊条角度和正确运条 (包括沿焊条中心线均匀向下送进焊条, 沿焊接方向均匀地移动, 沿与焊接方向垂直的方向均匀地摆动三个运动)。焊缝收尾时, 要注意填满弧坑后, 再熄弧。

第三节 气焊与切割

一、气焊

1. 气焊的特点及应用

气焊是利用可燃气体和助燃气体混合后燃烧产生的高温作为热源的一种焊接方法。最常用的氧乙炔焊。乙炔和氧气混合燃烧形成的火焰称为氧乙炔焰, 其最高温度可达 3150℃ 左右。

气焊使用不带涂料的焊丝作为填充金属。气焊具有火焰易于控制、操作灵活、容易实现均匀焊透和单面焊双面成形, 以及不需要电流, 便于在工地或野外作业等优点。长期以来, 气焊广泛应用于薄板焊接, 管子焊接, 铸铁补焊, 铜、铝等有色金属及其合金的焊接。气焊一般适用于维修及上述工件的单件焊接。

和电弧焊相比, 气焊加热缓慢, 生产率低, 而且加热温度较低, 热量分散, 焊接变形大, 焊接接头质量不高。

近几十年来, 因惰性气体 (如 Ar 气) 和活性气体 (如 CO₂) 保护电弧焊的发展, 气焊被这些新技术替代的趋势不断加强, 其应用范围则不断减小。如今气焊只是在薄钢板和有色金属焊接、钎焊以及修理行业中继续被有限地使用, 重要的结构件几乎都不用气焊。

2. 气焊设备

气焊所用的设备及气路连接如图 5-12 所示。

氧气瓶是贮存高压氧气的容器。乙炔瓶是贮存乙炔的容器。减压器是将高压气体降为低压气体的调节装置。回火保护器是防止火焰进入喷嘴内延乙炔管道回烧 (即回火) 的安全装置。焊炬是用于控制氧气与乙炔的混合比例, 调节气体流量及火焰并进

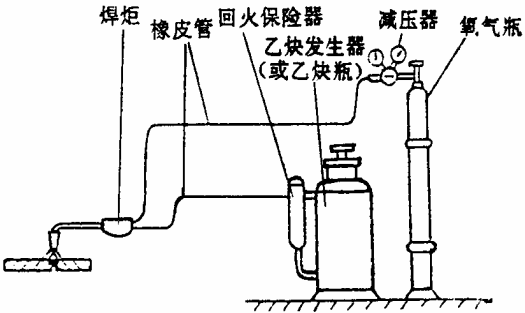


图 5-12 气焊设备及其连接

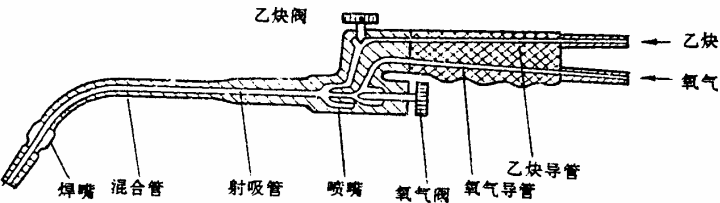


图 5-13 射吸式焊炬构造示意图

行焊接的工具。常用的射吸式焊炬的构造如图 5-13 所示。

3. 气焊火焰及适用性

气焊火焰由焰芯、内焰和外焰组成，如图 5-14 所示。如调节乙炔和氧气的混合比例，可以得到三种性质和用途各异的火焰：

(1) 中性焰 氧气和乙炔的混合比例为 1.1~1.2 时的火焰为中性焰，燃烧所产生的 CO_2 和 CO 对熔池有保护作用。火焰温度 3050~3150℃。焊接时，焰芯离熔池 3~5mm。中性焰可焊低碳钢、中碳钢、铬镍不锈钢、紫铜、锡青铜、铝及铝合金、低合金钢、灰铸铁等。

(2) 碳化焰 氧气和乙炔的混合比小于 1.1 时的火焰称为碳化焰。火焰温度 2700~3000℃，具有较强的还原性，对焊缝有渗碳作用。焊接时，焰芯离熔池 3~5mm。碳化焰适于焊接高碳钢、高速钢、硬质合金、铸铁、镀锌铁皮等。

(3) 氧化焰 氧气和乙炔的混合比大于 1.2 时的火焰称为氧化焰。火焰温度 3100~3300℃，具有氧化作用，一般较少用，仅用于黄铜、青铜的焊接。

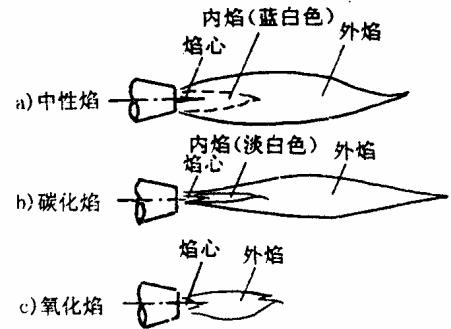


图 5-14 氧乙炔焰

4. 焊丝与气焊熔剂

(1) 焊丝 气焊时要使用焊丝作填充金属。焊接低碳钢常用的气焊丝牌号为 H08、H08A 等。焊丝直径一般为 2~4mm。

(2) 气焊熔剂 气焊熔剂是气焊时使用的助熔剂，其作用是保护熔池金属，去除焊接过程中形成的氧化物，增加液态金属的流动性。除低碳钢外，其它金属材料（如铸铁、不锈钢、耐热钢、铜、铝等）气焊时必须使用气焊熔剂。

二、切割

金属切割的方法有多种，除机械切割外，常用的切割方法有氧—乙炔切割，等离子切割等。

1. 氧—乙炔切割

氧—乙炔切割又称氧气切割（简称气割），它是根据高温金属能在纯氧中燃烧的原理来切割金属的方法。其过程如图 5-15 所示。

气割时，先用中性焰将割缝附近的金属预热到燃点，然后开启切割氧阀门，纯氧气流喷出后使高温金属燃烧并成为熔渣，迅速被高压氧流吹走。随后，下层金属重复上述过程，从而得到平整的割口，随着割炬的移动，气割过程继续进行。

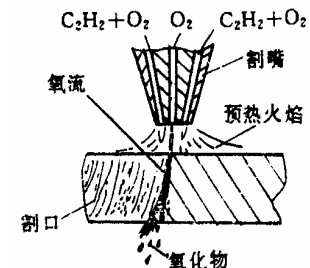


图 5-15 气割过程

手工气割使用割炬进行，割炬有多种型号可供选用，常用的割炬外形如图 5-16 所示。

除手工气割外，还有机械化及自动化气割设备，如半自动气割机、仿形气割机、数控气割机等。

金属材料必须满足以下条件才能进行气割：

(1) 金属材料气割的基本条件是其燃点低于熔点（因为气割过程是燃烧过程而不是熔化过程）。低碳钢的燃点是 1350℃ 而熔点是 1500℃，所以低碳钢气割性能很好。而高碳钢和铸铁不能满足上述条件，故不能气割。

(2) 切割时燃烧形成的金属氧化物的熔点应低于金属本身的熔点，且流动性好，否则难熔的固态氧化物会阻碍下层金属与氧流接触，使气割过程难以进行。如铝及铝合金、铬镍不锈钢不能气割，就是由于这个原因。

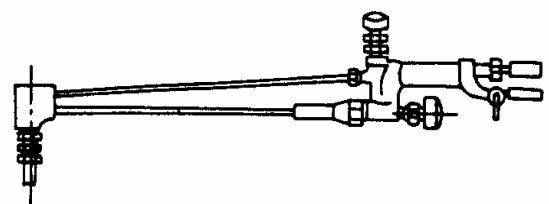


图 5-16 割炬

(3) 金属燃烧所生成的热量应大于金属所传导出外的热量,这样才能确保切口及下层金属得到充分的预热。这也是导热性高的铜、铝及其合金不能气割的重要原因。

2. 等离子弧切割

等离子弧切割是一种先进的金属和非金属材料切割方法。它利用高速、高温和高能的等离子气流加热并熔化材料的切割部位,靠高速气流或水流将熔化材料排开直至等离子气流束穿透背面形成整齐的切口。

因等离子弧切割不是靠氧化燃烧金属,而是靠材料熔化来切割,所以应用范围非常广泛,可以切割大部分金属(如不锈钢、铸铁、铜和铝及其合金等)。由于等离子弧能量密度高,所以加热速度快、工件的变形小、割口质量好。

等离子弧切割方法有多种,其中的空气等离子切割目前应用最广,其切割原理见图 5-17。

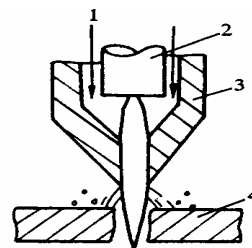


图 5-17 空气等离子切割原理
1-压缩空气; 2-电极; 3-喷嘴; 4-工件

第四节 其它常用焊接方法

一、埋弧自动焊

埋弧自动焊(简称埋弧焊)是电弧在焊剂层下燃烧,用机械自动引燃电弧并进行控制,自动完成焊丝送进和电弧移动的一种电弧焊方法。埋弧自动焊焊缝形成过程如图 5-18 所示。

和手工电弧焊相比,埋弧自动焊以焊丝代替焊条并可连续送进;以颗粒状焊剂代替焊条药皮,但其中无造气剂而只是靠固态的焊剂及焊接中形成的熔渣对熔池进行保护。

埋弧自动焊机由焊接电源、控制箱和焊接小车三部分组成。焊机有多种型号,MZ—1000 型是应用最广的一种。型号中的 M 表示埋弧焊机,Z 表示自动焊机,1000 表示额定焊接电流为 1000 安培。

和手工电弧焊相比,埋弧自动焊有以下特点:

1. 焊接质量好。由于电弧和金属熔池得到可靠保护,焊接过程稳定,焊接规范自动调节,所以焊接质量十分稳定,焊缝成形及力学性能优良。
2. 生产率高。因埋弧焊使用光焊丝,不存在手弧焊的焊条发热问题,以及焊丝导电长度短,所以可使用大电流(可达 1000 安以上)焊接,又因其熔深大,所以中厚板焊接可以不开或少开坡口,故生产率高不说,还大量节省了开坡口工时及填充焊接材料与能耗。
3. 劳动条件好。电弧光在焊剂层下不外露,焊接过程机械化、自动化,劳动条件大为改善。
4. 设备复杂,适应性较差。只适于平焊位置的对接或角接平直长焊缝,或直径较大的环缝。

埋弧自动焊适于中厚板(8~60mm)的焊接,可以焊接低碳钢、低合金结构钢、不锈钢、耐热钢和紫铜等。广泛应用于容器、锅炉、造船及各种中、大型钢结构(如起重机、桥梁等)的制造中。

二、气体保护焊

使用焊丝作为电极和填充材料,用外加气体作为电弧介质及保护气体并由该气体对电弧及熔池进行保护的电弧焊称为气体保护焊。常用的保护气体有氩气、二氧化碳气等。

1. CO₂ 气体保护焊(简称 CO₂ 焊)是一种熔化极焊,它采用 CO₂ 气体进行保护。其焊接设备与器材如图 5-19 所示。

CO₂ 焊成本低(仅为手弧焊及埋弧焊的 40~50%);生产率高(比手弧焊高 1~4 倍);变形较小,抗裂性好,操作灵活,可全位置焊接。CO₂ 焊可用于低碳钢、低合金结构钢的焊接,广泛用于各类钢结构的制造。

由于 CO₂ 气体有一定的氧化性,焊接时会造成合金元素烧损,所以它不适用于有色金属和高合金钢的焊接。

CO₂ 焊飞溅较大,焊缝成形稍差。

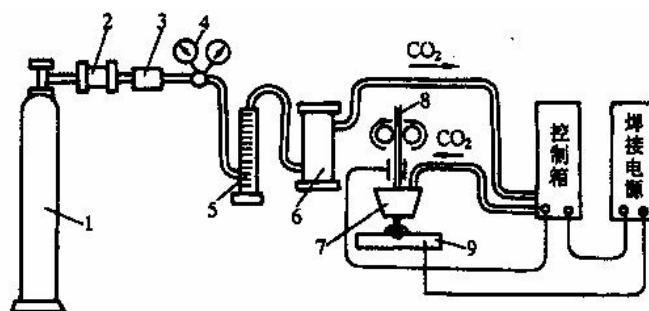


图 5-19 CO₂ 气体保护焊设备示意图
1-气瓶; 2-预热器; 3-高压干燥器; 4-减压表; 5-流量计;
6-低压干燥器; 7-喷嘴; 8-焊丝; 9-焊件

2. 氩弧焊 氩弧焊是用氩气作保护气体的电弧焊。焊接时氩气由喷嘴连续喷出,有效地保护电弧和熔池。由于氩气是惰性气体,在焊接中与液态金属既不发生冶金、化学反应,也不溶入金属,所以电弧稳定,焊接质量高。另外,由于气流压缩使电弧热量集中,因而焊接速度快,熔深大,而焊接变形小。由于上述特点,氩弧焊一般用于有色金属(如铜、铝、钛及其合金)和不锈钢、耐热钢、高强度结构钢的焊接。因氩气较贵,所以氩弧焊主要用于重要结构的焊接。

氩弧焊按电极不同,分为钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊,如 5-20 所示。

钨极氩弧焊用钨棒作电极。焊接时,钨极与工件间产生电弧且钨极不熔化,所以须另加焊丝作为填充金属。它适于焊接 6mm 以下的薄板及管子或作为中厚板焊接(用其它焊接方法)时的打底焊。熔化极氩弧焊用焊丝作电极兼作填充金属。这种方法生产率高,适于中厚板的焊接。

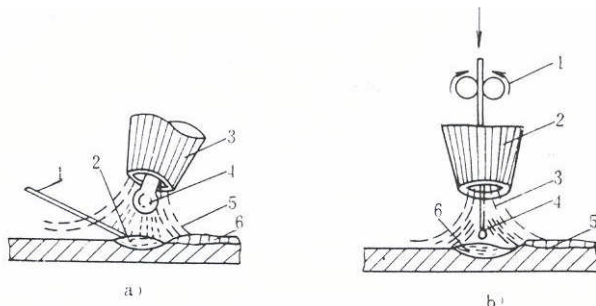


图 5-20 氩弧焊示意图

- a) 钨极氩弧焊: 1 焊丝; 2 熔池; 3 喷嘴; 4 钨极; 5 气体; 6 焊缝
b) 熔化极氩弧焊: 1 滚轮; 2 喷嘴; 3 气体; 4 焊丝; 5 焊缝; 6 熔池

三、电阻焊

电阻焊是利用电流直接通过工件自身和工件间的接触而产生的电阻热,将工件接触面局部加热至塑性状态或熔融状态,在压力下完成焊接的一种方法。按工艺特点,电阻焊分为点焊、缝焊和对焊三种,见图 5-21 所示。

电阻焊的特点是焊接电流大,焊接时间短,生产率高,不使用填充金属,不需要保护,焊接变形小,容易实现机械化、自动化。由于设备复杂,投资大,焊接时耗电量大,所以电阻焊适合于成批、大量生产中的薄板或型钢的焊接。

点焊适于薄板壳体或型钢构件的焊接(如汽车车身);缝焊适于薄壁容器(如汽车油箱)的焊接;对焊适于杆状零件焊接(如刀具、管子、钢筋、钢轨等)。

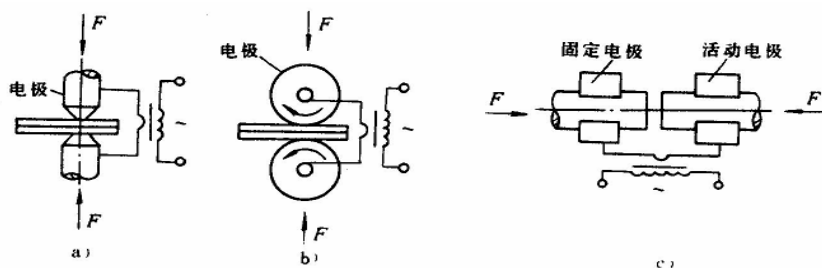


图 5-21 电阻焊示意图

- a) 点焊 b) 缝焊 c) 对焊

四、钎焊

钎焊是用熔点低于母材的金属材料作钎料,将焊件和钎料加热到适当的温度,使焊件仍处于固态而钎料熔化后靠湿润及毛细管作用填充进接头间隙并与母材相互扩散实现连接的一种方法。

按钎料熔点,钎焊分为软钎焊和硬钎焊两类。

1. 软钎焊

软钎焊钎料熔点低于 450°C ,接头强度低($<70\text{MPa}$),常用于受力不大或工作温度较低的工件焊接,如用锡作钎料焊接的锡焊广泛用于仪表、电子线路等的焊接。

2. 硬钎焊

硬钎焊钎料熔点高于 450 ,接头强度较高(可达 $200\text{—}500\text{MPa}$),适用于受力较大、工作温度较高的钢、铜、铝合金的机械零部件焊接。

钎焊时,一般要使用焊剂,其作用是清除钎料及母材表面的氧化物并改善钎料润湿性,如硬钎焊时用硼砂,软钎焊时用松香、氯化锌溶液等。

钎焊按加热方式不同分为烙铁钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、感应钎焊及炉中钎焊等。

钎焊因加热温度低,所以,接头处金属的组织 and 性能变化很小,焊件的应力和变形也小,工件尺寸形状容易保证。钎焊可以连接同种或异种金属,且生产率高,如碳钢、低合金钢、有色金属(如紫铜、青铜、黄铜、钛及钛合金)、碳素工具钢、高速钢、不锈钢、硬质合金等。

钎焊广泛应用于仪器、仪表及电子、航空、航天、机电制造业等。

第五节 焊接质量及分析

一、焊接变形

焊接时，工件受到局部不均匀的加热，导致各部分材料的膨胀和收缩也不均匀，所以，引起焊件内产生应力导致变形。

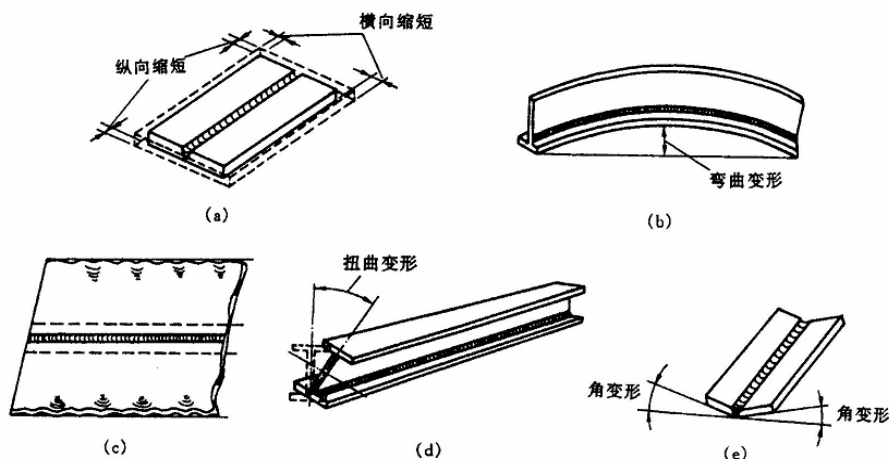


图 5-22 焊接变形的基本形式

(a) 收缩变形；(b) 弯曲变形；(c) 波浪变形；(d) 扭曲变形；(e) 角变形

焊接变形的基本形式有：收缩变形、角变形、弯曲变形、扭曲变形和波浪变形等。不同形式的变形见图 5-22。

焊接变形降低了焊接质量，增加了制造成本，所以应当加以控制。一般以结构的设计和制造工艺两方面考虑。设计上应考虑选择具有一定截面积的板材或型材和合理的结构，以提高刚度；在保证强度的条件下，尽可能减少焊缝的数量和尺寸。制造工艺方面主要的措施有：1. 反变形法；2. 刚性固定法；3. 选用能量集中的焊接方法；4. 合理的焊接顺序及方向；5. 对称焊接；6. 焊前预热，对已经产生的变形，可以进行矫正。主要的方法有机械矫正和火焰矫正两种。

二、焊接缺陷

焊接时，因工艺不合理或操作不当，往往会在焊接接头处产生缺陷。用不同的焊接方法焊接，产生的缺陷及原因也各不相同。熔化焊常见的缺陷有：焊缝外形与尺寸不符合要求，咬边、焊瘤、未焊透、夹渣、气孔、裂纹等，如图 5-23 所示。

咬边是因电弧将焊缝边缘熔化后未得到熔化金属的补充而留下的缺口和凹陷。焊瘤是熔化金属流到焊缝以外的母材上形成的金属瘤。未焊透是焊接接头根部未完全熔透的现象。夹渣是焊接熔渣残留在焊缝内部。气孔是气体未及时全部逸出而残留在焊缝中所形成的空穴。裂纹是焊接接头局部区域形成的缝隙。

上述几种缺陷中，未焊透和裂纹是最危险的缺陷，在重要焊接结构中是绝对不允许存在的。产生裂纹

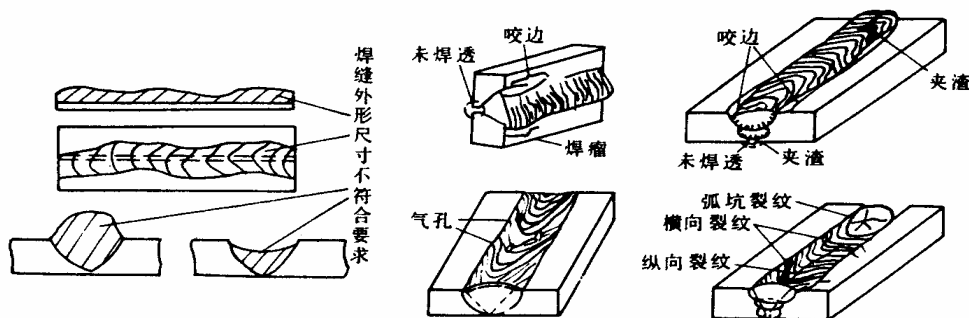


图 5-23 常见焊接缺陷

的原因主要是材料（焊材和母材）选择不当，焊接工艺不正确，焊接结构不合理等。其它一些缺陷产生的原因一般是，焊前准备工作（坡口加工、清理、组装、焊条烘干、焊丝除锈、除油、接头预热等）做得差。焊接工艺参数不合适及焊接操作不当等。

三、焊接检验

工件焊完之后，应根据相关的产品技术条件所规定的要求进行检验。生产中常用的检验方法有：

1. 外观检验：用肉眼或借助低倍放大镜观察焊缝的表面情况，确定是否有缺陷存在；用样板，焊缝量尺等测量焊缝外形尺寸是否合格。

2. 致密性检验：该检验主要是用于检查要求密封的容器和管道，常用的方法有气压试验、水压试验、气密性试验和煤油试验。

水压试验用于检查受压容器的强度和焊缝致密性，试验压力是工作压力的 1.25~1.5 倍。

3. 无损检验：无损检验主要用于检查焊缝内部缺陷。常用方法有磁粉探伤、渗透探伤、射线探伤和超声波探伤等。

磁粉探伤是利用处于磁场中的焊接接头表面磁粉分别具有的特征来检查铁磁性材料表面及近表面缺陷（如微裂纹等）。

渗透探伤是用带有荧光染料（荧光法）或红色染料（着色法）的渗透剂对焊接缺陷的渗透作用来检查表面微裂纹。

射线探伤和超声波探伤是用专门仪器检查焊接接头是否有内部缺陷，如裂纹、未焊透、气孔、夹渣等。

上述方法均属于非破坏性检验。必要时，根据产品设计要求还可以进行破坏性检验，如力学性能试验（将焊接接头按要求加工成试件，进行拉伸、弯曲、冲击等机械性能试验）、金相检验、断口检验及耐腐蚀试验等。

第六节 先进焊接工艺

随着技术进步和经济的快速发展，焊接技术也得到了迅速发展，主要有以下几个方面：

1. 随着新能源的研究开发和工程上（如核工业、航空、航天、海洋工程等）对新材料、新结构的需求，新的焊接方法（如电子束焊、等离子焊、激光焊、超声波焊、扩散焊等）及新工艺等不断出现。

2. 因重要焊接结构对焊接质量生产率的高要求，使常用的焊接方法进一步改善和发展，如窄间隙焊、双丝或三丝埋弧焊、脉冲氩弧焊等。

3. 因节材、节能的需要，新型节材、节能焊机有了长足的发展，如硅整流焊机、逆变焊机等。

4. 运用计算机控制焊接过程，焊接 CAD/CAM 的运用。焊接是机器人运用最多的领域之一，如弧焊及点焊机器人在汽车制造业的广泛应用。

以下简要介绍几种主要的焊接新工艺，见表 5-4。

表 5-4 焊接新工艺简介

焊接方法	原理简介	主要特点	应用范围
等离子弧焊接	是用压缩电弧作热源，用 W 作电极的气体保护焊。电弧弧柱中的气体被电离成高温、高能量等离子流。离子气和保护气均为氩气。 可填充或不填充金属（焊丝）	1. 能量密度大而弧柱温度高（18000~24000K 以上），穿透力强。 2. 小焊接电流（15A 以下，甚至可小到 0.1A）时，等离子弧仍十分稳定，仍能保持良好的电弧挺度和方向性。 3. 热影响区小，变形小，焊接质量好。	可以焊接碳钢、合金钢、不锈钢、铜及铜合金、钛及钛合金、钼、钨等金属。 用微束等离子焊可焊薄板和箔材，用粉末等离子堆焊可对阀门、模具等进行堆焊及修补。
电子束焊	将聚焦和加速后的电子束撞击焊件上准备焊接的部位，利用动能转化成的热能熔化母材并迅速形成焊接接头。 此方法分为真空电子束焊、低真空电子束焊及非真空电子束焊三种。	1. 能量密度大，电子穿透力强。 2. 焊接变形小，可焊已机械加工好的组合零件。 3. 保护效果好（真空电子束焊在真空中进行），热影响区小，焊接质量高，适于焊活泼金属。 4. 焊接工艺参数调节范围广，适应性强。	除含锌较多的材料（如黄铜、铝锌—镁合金）及未脱氧处理的低碳钢外，可焊绝大多数金属与合金。 特别适合焊微型、精密器件、要求小变形的焊件及焊接厚件。

激光焊	<p>将能量密度极高的激光束聚焦后投影到焊件上,被焊件材料吸收后,转变成热能,使加热部位熔化并冷却后形成焊接接头。</p> <p>有脉冲激光点焊和连续激光焊两大类。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度大,焊点小,焊速快,热影响区小,焊接变形小,焊接质量好。 2. 工艺灵活。可将激光经光学系统引导至难以接近的部位焊接。激光还可穿过透明材料进行焊接。 3. 不需要气体保护或真空环境,可在大气中焊接。 4. 可焊异种金属或异种材料。 	<p>可焊低合金高强钢、不锈钢及铜、钛等合金,以及钨、钼、钽等难熔金属。</p> <p>可焊异种金属及对受热敏感的材料。</p> <p>特别适于电子及仪器、仪表行业微型器件的焊接(如集成电路外引线的焊接)</p>
扩散焊	<p>在真空或保护气氛下,在一定的温度和压力下,使工件待焊表面紧密接触,使其发生微观塑性变形,经一定时间保温,使原子间相互扩散,实现冶金连接,从而完成焊接。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 焊接时,母材不过热、不熔化,焊件质量好,焊接变形小。 2. 能焊非金属和异种金属,可焊结构复杂及厚度相差大的工件,可制造多层复合材料。 	<p>焊接同种或异种金属,金属与陶瓷等。</p> <p>适于焊接一般焊接方法难以焊接(如高温合金)或不适于熔化焊(如钨、钼等)的材料。</p>
摩擦焊	<p>利用两工件带焊金属表面相对旋转摩擦产生的热量将金属局部加热至塑性状态,在压力下完成焊接过程形成焊接接头。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 焊件合格率高,尺寸精度高;焊接质量好,而且稳定。 2. 焊接生产率高,成本低。 3. 易于实现机械化和自动化生产。 4. 适于焊接异种金属。 	<p>碳钢、不锈钢、合金钢等。尤其适于焊接异种金属(如铜—铝,铜—不锈钢、铝—钢等)</p>

复习思考题

1. 什么是焊接?它有什么特点?
2. 手弧焊机有哪几种?说明实习中使用的手弧焊机型号及主要技术参数。
3. 什么是正接和反接?说明其用途。
4. 焊条由哪两部分组成?其作用各是什么?
5. 说明焊条代号 E5015, J422, J507 中各符号表示什么。
6. 常见的焊接接头型式和坡口型式各有哪几种?坡口和间隙的作用是什么?
7. 手弧焊工艺参数有哪几种?焊接电流如何选择?
8. 常见的焊接变形有哪几种?
9. 常见的焊接缺陷有那些?哪几种最危险?简述常用的焊接检验方法及用途。
10. 说明气焊火焰的种类及用途。
11. 说明氧气切割的原理和基本条件。为什么铸铁和不锈钢不能用氧气切割,但可以用等离子切割?
12. 和手弧焊相比,埋弧自动焊有何特点?其应用范围怎样?
13. 什么是 CO₂ 焊和氩弧焊?它们各有何特点及用途?
14. 和熔化焊相比,电阻焊和钎焊各有何特点?各自的应用范围怎样?

第六章 非金属材料成形

随着经济的发展和科技进步,各种工程的难度不断增大,工程设计对材料的要求愈来愈高,不仅要求高强度,而且要求质量轻、耐腐蚀、耐高低温、有高弹性和具有良好的电气性能(如绝缘性)等。近几十年来,非金属材料以其独特的性能而受到重视。许多非金属材料如工程塑料、橡胶、陶瓷及复合材料等已被广泛用于各类工程结构中。

第一节 工程塑料成形

塑料工业的生产分为两大类,即塑料生产和塑料制品生产。塑料生产是指树脂或塑料制品原材料的生产加工。塑料制品生产也称为塑料成形加工,是指将塑料按其性能及要求,用多种成形方法制作成为有一定形状、尺寸及用途的塑料件。

塑料制品生产过程为:成形加工→机械加工→修饰→装配。

上述过程中,成形加工是最重要的过程。塑料制品成形加工的方法很多,主要有注射成形、挤出成形、压缩成形和吹塑成形等。

一、注射成形

注射成形是依据金属压铸成形的原理,利用塑料在热状态下的可挤压性和可模塑性成形的。注射成形主要用于热塑性塑料及流动性较大的热固性塑料制品的成形。其成形原理如图 6-1 所示。

首先将颗粒状或松散成形的塑料从注射机的料斗送入高温的料筒内加热,使其熔融而成为粘流态熔体,然后在柱塞(或螺杆)的高压推动下,塑料熔体经喷嘴注入温度较低的闭合模具内腔中,经保压冷却定型后,打开模具,即可取出所需的成形塑料制品。

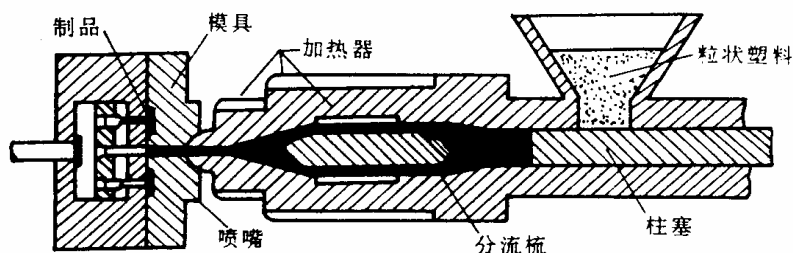


图 6-1 注射成形示意图

注射成形使用注射成形机,常用的有柱塞式和螺杆式两种。注射成形生产效率高、产品质量好,容易实现自动化,加工适应性强。

二、挤出成形

挤出成形是将颗粒状塑料加入挤出机料斗内,并继而进入料筒,经外部加热及料筒内螺杆的机械作用,使塑料熔融而成为粘流状态(塑化),在螺杆的旋转推力下,不断前进。熔料在压力下通过机头口模(机头中具有一定形状的空道)成为与其截面相似的连续体(挤出成形),经冷却固化后,成为连续的塑料型

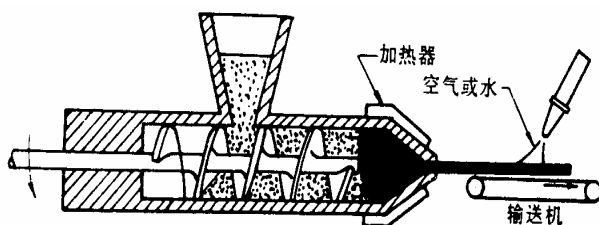


图 6-2 挤出成形示意图

材(冷却定型)。图 6-2 为挤出成形示意图。

挤出成形设备由挤出机、挤出机头(模具)、挤出辅助装置(如定型、冷却、牵引、卷绕、切割等设备)等组成。挤出成形的工艺过程主要有塑化、挤出成形、冷却定型三个阶段。

在塑料成形加工中，挤出成形占有重要地位，其制成品约占到全部塑料制品产量的 30%。它既能生产各种截面的型材（如管材、棒材、板材、线材、薄膜等），也能用于电线和电缆的加工（以铜和铝线作为芯线，外面包一层塑料绝缘套）。

挤出成形生产过程连续、高效，其生产工艺应用广泛。

三、 压缩成形

压缩成形（也称压塑成形、模压成形）主要用于热固性塑料的成形加工，其成形原理是将松散的固态物料（粉状、颗粒状、纤维状塑料或浸有树脂的碎片等）放到处于成形温度下的模具中，经合模加压后，使其软化熔融，经一段时间后，固化成形变为塑料制品（模压法）。

另外，使用片状材料（纸、棉布、丝绸、化纤等），浸上树脂后，逐张叠放在一起，在加热状态下加压（不用模具，仅用模板），隔一定时间后，树脂固化即制成塑料层压板（层压法）。

压缩成形可使用普通压力机（液压机或螺旋压力机），成形模具（或模板）结构简单，故其设备及模具费用较低（和注射成形相比）。塑料件成形收缩小，性能均匀。其缺点是成形周期长，生产率低，产品精度不易控制，而且不太容易实现自动化生产。

四、 吹塑成形

吹塑成形适用于热塑性塑料的成形，是制作中空塑料制品（如瓶、罐等）的一种成形方法。其工作原理是先将塑料加热熔融并制成筒状坯料（可采用注射成形或挤出成形工艺），然后放入开式模内，当模具闭合并向内部通入压缩空气后，塑料坯被吹胀变形紧贴于模腔内壁，经冷却定形后开模，即可得到中空塑料制品。挤出吹塑成形工艺过程见图 6-3。吹塑成形还广泛用于塑料薄膜制品的生产。

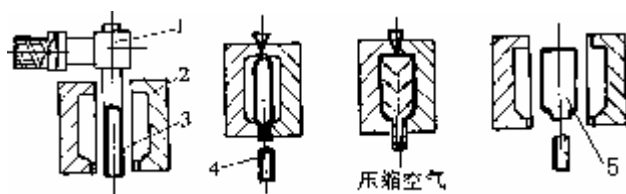


图 6-3 挤出吹塑成形工艺过程

1. 挤出机头 2. 吹塑模 3. 管状型坯 4. 压缩空气吹管 5. 制成品

第二节 橡胶制品成形

由于橡胶是弹性体，它不能被粉碎成碎末，也不能单纯加热为流动状态，因此，必须使用特殊工艺，才能将加了配合剂的橡胶制成橡胶制品。

橡胶制品的生产，一般要按以下工艺流程进行：生胶塑炼→橡胶混炼→模压成型→硫化处理。

1. 塑炼

橡胶的塑炼的目的是使橡胶分子裂解后减小分子量，从而提高其塑性。塑炼的方法可以是在较高温度下靠氧的作用完成，也可在较低温度下由机械作用完成。塑炼后，橡胶的塑性急剧增加，形成橡胶片。

2. 混炼

混炼是在生胶中加入配合剂，并使其均匀混和。加料的顺序应特别注意。配合剂的正确加料顺序为：塑炼胶、防老剂、填充剂、软化剂，最后是硫化剂和硫化促进剂。

3. 成型

完成了混炼的胶即可成型。由压延机可获得板材或片材；由挤出机可获得管、棒类型材（如胶管、电线包皮、内胎等）；将胶贴覆到织物上可得到胶布；将胶片、胶布经裁剪后拼接，贴合可制成各种半成品。

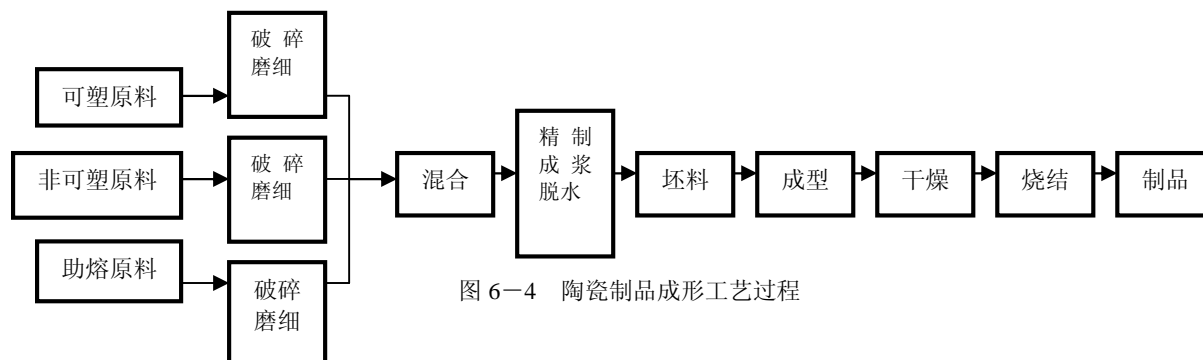
4. 硫化

成型后的橡胶即可放进硫化罐内，在加热、加压条件下，经一定时间后，完成硫化过程。硫化是橡胶制品成形工艺中的重要工序，其目的是提高橡胶制品的强度、刚度及抗变形、抗蠕变性能。

硫化反应是一种形成交联键的化学反应，它使橡胶分子由线型结构转变为网状结构。

第三节 特种陶瓷成形

特种陶瓷制品与普通陶瓷制品的成形工艺基本相同，生产流程都比较复杂，如图 6—4 所示，但一般都包括原料配制、坯料成型和窑炉烧结三个主要工序。



1. 原料配制

特种陶瓷一般采用纯度较高的天然矿物或人工合成的化合物（如金属的氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硅化物等）作为主要原材料。所选的矿石及物料经破碎、精制后，进行配料、混合，再经过磨细等加工，即成为坯料待用。按后续工序不同，坯料可分别制成可塑泥料、粉料或浆料。

2. 坯料成型

成型是将制备好的坯料，用相应的工艺方法制成具有一定形状和尺寸的坯料（生坯）。所用的工艺方法主要有三大类：

（1）可塑性成型 这是一种古老而又被广泛使用的方法。它是用手工或机械对其可塑性的坯料泥团进行加工，使其产生塑性变形而制成生坯。按操作方法不同，可塑成型可分为雕塑、印坯、挤压、旋压和滚压等种类，而其中使用最广泛的是旋压和滚压两种。

（2）注浆法成型 将浆料（即坯料泥浆）注入多孔性模型成型。该方法工艺简单，适用于形状复杂、薄壁而体积大，且尺寸要求不严的陶瓷制品。

（3）干压法成型 将干粉坯料放入金属模具中，加压后即制成致密的生坯。用干压法制成的生坯形状、尺寸精确，易于干燥，内部缺陷少，且便于机械化。

3. 坯体干燥

成型后的坯体必须进行干燥处理，其目的是降低水份，提高强度，以利于后续加工。干燥的方法有自然干燥、热空气干燥、辐射线干燥及微波干燥等。

4. 窑炉烧结

经成型、干燥及施釉后的坯体仍是半成品，必须放入窑炉中加热至高温进行烧结，使其内部发生一系列物理化学变化，生坯即成为达到瓷化状态的陶瓷制品。

复习思考题

1. 塑料制品的生产过程是什么？塑料制品成形加工的主要方法有哪些？
2. 简述橡胶制品生产的工艺流程。
3. 橡胶硫化起什么作用？
4. 简述陶瓷制品成形的工艺过程及坯料成型的主要方法。

第三篇 金属切削加工

第七章 切削加工基本知识

第一节 切削加工概述

在国民经济的各个行业和部门都广泛地使用着各种各样的机器和设备，而组成这些机器和设备的零件绝大多数都经切削加工获得，因而切削加工对保证产品的质量和性能、降低产品成本有着十分重要的意义。

一、切削加工

切削加工是利用切削刀具或工具从毛坯（如铸件、锻件和型材坯料等）上切除多余的材料，获得符合图纸技术要求的零件的加工过程。

切削加工分为机械加工（简称机加工）和钳工两大部分组成。钳工是指工人手持工具进行的切削加工，机械加工是指通过工人操纵机床对工件进行的切削加工。其主要加工方法有车削、钻削、铣削、刨削和磨削等（如图 7-1），所使用的机床相应为车床、钻床、铣床、刨床、磨床。

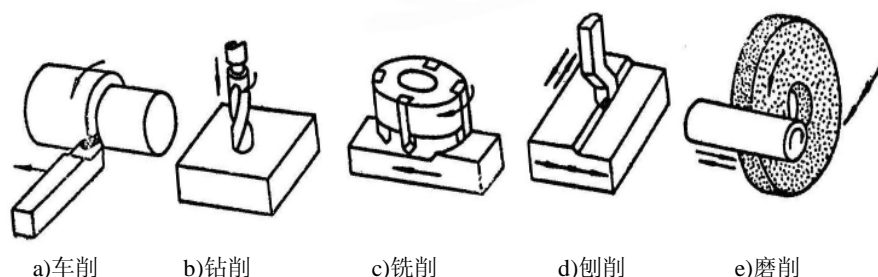


图 7-1 机械加工的主要形式

二、切削运动

在机械加工中，刀具与工件之间的相对运动称为切削运动。根据在切削过程中所起的作用不同，切削运动可分为主运动和进给运动。

1. 主运动 主运动是切下金属层，使之形成切屑的最基本的运动。其特点是在切削过程中速度最高、消耗机床动力最大。它可以是旋转运动，也可以是直线运动。在图 7-1 中，车削时工件的旋转、钻削时钻头的旋转、铣削时铣刀的旋转、刨削时刨刀的往复直线运动、磨削时砂轮的旋转运动均为主运动。

2. 进给运动 进给运动是使金属层不断投入切削过程，从而形成加工表面的运动。它可以是直线运动，也可以是旋转运动。在图 7-1 中，车刀、钻头及铣削时工件的移动、牛头刨床刨削水平面时工件的间歇运动、磨削外圆时工件的旋转和往复的轴向移动及砂轮周期性横向移动均为进给运动。

在机械加工中，主运动只能有一个，进给运动则可能是一个或几个。零件不同表面加工时的切削运动如图 7-2 所示（图中 I 为主运动，II 为进给运动）。

三、切削层的几何参数

进行切削加工时，在工件上将形成三个表面（图 7-3），即：

待加工表面 工件上将被切去切屑的表面。在切削过程中，它的面积不断减少，直至消失。

已加工表面 工件上经刀具切削后形成的新表面。

加工表面 工件上正在被切削刃切削的表面。也就是待加工表面与已加工表面之间的过渡表面，所以

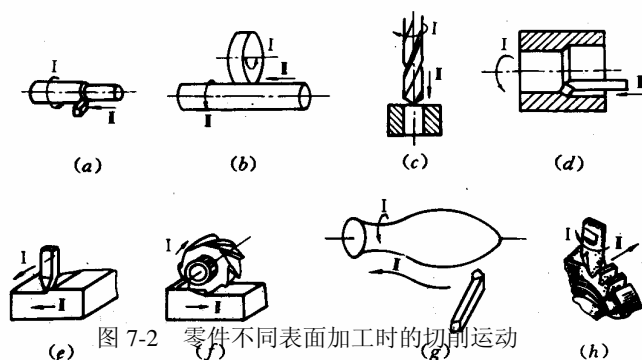


图 7-2 零件不同表面加工时的切削运动

又称为过渡表面。

三、切削用量三要素

切削用量三要素是指切削速度 v 、进给量 f 和切削深度 a_p 。切削加工时，要根据加工条件合理选用 v 、 f 、 a_p 的具体数值。

1. 切削速度 v 在单位时间内工件与刀具沿主运动方向相对移动的距离 (m/min 或 m/s)，即工件表面相对刀具的线速度。

当主运动为旋转运动 (如车削、钻削、铣削等) 时的切削速度计算公式为：

$$v = \frac{\pi d n}{1000} \quad (m/min) \quad \text{或} \quad v = \frac{\pi d n}{1000 \times 60} \quad (m/s)$$

式中： d —工件加工表面或刀具切削处的最大直径 (mm)， n —工件或刀具的转速 (r/min)。

当主运动为往复运动 (如刨削) 时切削速度的计算公式为：

$$v = \frac{2Ln_r}{1000} \quad (m/min)$$

式中： L —往复运动行程长度 (mm)

n_r —每分钟往复次数 (str/min)

2. 进给量 f 在主运动的一个循环或单位时间内，刀具与工件之间沿进给方向相对移动的距离。车削时为工件每转一转，车刀沿进给方向移动的距离 (mm/r)；铣削时常用进给量为工件在一分钟内沿进给方向移动的距离 (mm/min)；刨削时进给量为刨刀每往复一次工件或刨刀沿进给方向间歇移动的距离 (mm/str)。

3. 切削深度 a_p 切削深度 a_p 为待加工表面与已加工表面之间的距离 (mm)。

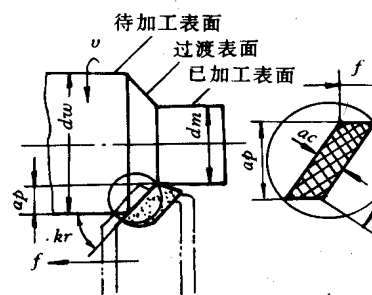


图 7-3 车削时的切削用量

第二节 切削刀具的几何角度及材料

刀具是切削加工中影响生产率、加工质量和成本十分重要的因素。

刀具由刀体和刀柄两部分组成，如图 7-4。刀体是刀具上夹持刀条或刀片的部份，或由它形成切削的部份。刀柄用来将刀具正确地夹持在机床上。

刀具切削性能的优劣主要决定于刀体的材料和几何形状。

一、车刀的组成及主要角度

1、车刀的组成

车刀由刀体和刀柄两部分组成，如图 7-4 所示。刀体是用以焊接或夹持刀片，或由它形成切削刃直接参加切削工作的，故又称切削部分 (俗称刀头)；刀柄是用来将车刀夹持在刀架上的，故又称夹持部分。

外圆车刀的切削部分一般由一尖两刃三面所组成。

一尖：

刀尖——主切削刃与副切削刃的交点。它通常被磨成一小段圆弧形。

两刃：

主切削刃——前刀面与主后刀面相交的切削刃，它担负着主要的切削工作。

副切削刃——前刀面与副后刀面相交的切削刃，它担负着部分切削工作。

三面：

前刀面——刀具上切屑流过的表面。

主后刀面——与工件上的过渡表面相对的面。该面与前刀面相交形成主切削刃。

副后刀面——与工件上的已加工表面相对的面。与前刀面相交形成副切削刃。

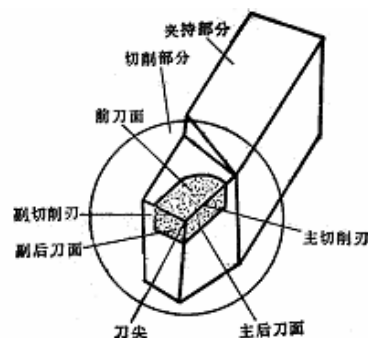


图 7-4 外圆车刀的组成

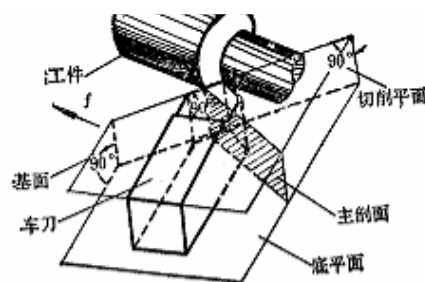


图 7-5 车刀的参考平面

2、车刀的几何角度及选择原则

为了决定车刀刃口的锋利程度及其在空间的位置，必须建立一个坐标系，该坐标系由三个基准平面构成。下面以外圆车刀为例，介绍车刀的几何角度。如图 7-5 所示。

基面：过主切削刃选定点的平面，此平面在主切削刃为水平时包含主刀刃并与车刀安装底面即水平面平行，此平面主要作为度量前刀面在空间位置的基准平面。

切削平面：过主切削刃选定点与主切削刃相切，并与基面相垂直的平面。此平面主要作为度量主后刀面在空间位置的基准面。

主剖面：过主切削刃选定点并同时垂直于基面和主切削平面的平面。

(1)、前角 γ_0 前刀面与基面的夹角，在主剖面中测量。前角的大小影响切削刃锋利程度及强度。增大前角可使刃口锋利，切削力减小，切削温度降低，但过大的前角，会使刃口强度降低，容易造成刃口损坏。取值范围为： -8° 到 $+15^\circ$ 。

选择前角的一般原则是：前角数值的大小与刀具切削部分材料、被加工材料、工作条件等都有关系。刀具切削部分材料性脆、强度低时，前角应取小值。工件材料强度和硬度低时，可选取较大前角。在重切削和有冲击的工作条件时，前角只能取较小值，有时甚至取负值。一般是在保证刀具刃口强度的条件下，尽量选用大前角。如硬质合金车刀加工钢材料时前角值可选 5° - 15° 。

(2)、主后角 α_0 主后刀面与切削平面间的夹角，在主剖面中测量。其作用为减小后刀面与工件之间的摩擦。它也和前角一样影响刃口的强度和锋利程度。选择原则与前角相似，一般为 0 到 8° 。

(3)、主偏角 κ_r 主切削刃与进给方向间的夹角，在基面中测量。其作用体现在影响切削刃工作长度、吃刀抗力、刀尖强度和散热条件。主偏角越小，吃刀抗力越大，切削刃工作长度越长，散热条件越好。

选择原则是：工件粗大刚性好时，可取小值；车细长轴时为了减少径向切削抗力，以免工件弯曲，宜选取较大的值。常用在 15° 到 90° 之间。

(4)、副偏角 κ_r' 副切削刃与进给反方向间的夹角，在基面中测量。其作用是影响已加工表面的粗糙度，减小副偏角可使被加工表面光洁。选择原则是：精加工时，为提高已加工表面的质量，应选取较小的值，一般为 5 到 10° 。

(5)、刃倾角 λ_s 主切削刃与基面间的夹角，在主切削平面中测量。主要作用是影响切屑流动方向和刀尖的强度。以刀柄底面为基准，主切削刃与刀柄底面平行时， $\lambda_s = 0$ ，切屑沿垂直于主切削刃的方向流出。当刀尖为切削刃最低点时， λ_s 为负值，切屑流向已加工表面。当刀尖为主切削刃最高点时， λ_s 为正值，切屑流向待加工表面。

一般刃倾角 λ_s 取 -5° 到 $+10^\circ$ 。精加工时，为避免切屑划伤已加工表面，应取正值或零。粗加工或切削较硬的材料时，为提高刀头强度可取负值。

车刀的几何角度测量如图 7-6 所示。

二、刀具材料的选用原则

在切削过程中，刀具的切削部份要承受很大的压力、摩擦、冲击和很高的切削热，因此刀具切削部分的材应具备如下的性能。

(1) 高的硬度和耐磨性 硬度是指材料抵抗其他材料压入其表面的能力。耐磨性是指材料抵抗磨损的能力。刀具材料只有具备高硬度和耐磨性，才能切入工件，并承受剧烈的磨擦。一般说，材料的硬度愈高，耐磨性也愈好。刀具材料的硬度必须高于工件材料的硬度，常温硬度一般要求在 HRC60 以上。

(2) 足够的强度和韧性 常用抗弯强度 δ_b 和冲击韧性值 a_k 来评定刀具材料的强度和韧性。刀具材料只有具备足够的强度和韧性，才能承受切削力以及切削时产生的冲击和振动，以免刀具脆断和崩刃。

(3) 高的耐热性（即热硬性） 耐热性是指刀具材料在高温下仍能保持其硬度、强度、韧性和耐磨性能，常用其维持切削性能的高温（又称为红硬温度）来评定。

(4) 良好的工艺性能 刀具必须具有一定的几何形状，为便于刀具本身的制造，刀具材料应有较好的锻压、焊接、切削性能及磨刀、热处理性能等。

切削刀具的材料有碳素工具钢、合金工具钢、高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼和人造金刚石等。目前以高速钢和硬质合金用得最多。常用刀具材料的主要性能和用途见表 7-1。

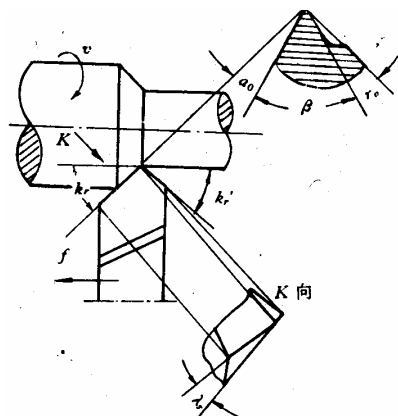


表 7-1 常用刀具材料的主要性能、牌号和用途

种类	常用牌号	硬度/HRC (HRA)	抗弯强度 σ_{bb}/GPa	耐热性 /°C	工艺性能	用途
优质碳素 工具钢	T8A~T10A T12A、T13A	60~65 (81~84)	2.16	200	可冷热加工成形， 刃磨性能好	用于手动工具，如 锉刀、锯条等
合金 工具钢	9SiCr、 CrWMn	60~65 (81~84)	2.35	250~300	可冷热加工成形， 刃磨性能好，热处理 变形小	用于低速成形工 具，如丝锥、板牙、 绞刀等
高速钢	W18Cr4V W6Mo5Cr4V2	63~70 (83~86)	1.96~4.41	550~600	可冷热加工成形， 刃磨性能好，热处理 变形小	用于中速及形状 复杂的刀具，如钻 头、铣刀、齿轮刀 具等
硬质合金	YG8、YG6、 YG3、YT5、 YT15、YT30	(89~93)	1.08~2.16	800~1000	粉末冶金成形，多 镶片使用性较脆	用于高速切削刀 具，如车刀、刨刀、 铣刀等

第三节 常用切削加工机床的类型和型号

(一) 机床的类型和分类

基本的金属切削加工机床有车床、铣床、刨床、钻床、和磨床等。随着生产需要的提高，以及科学技术的发展进步，机床的类型也在逐步增加。目前呈现两种不同的发展趋势，一是向加工方法的组合型发展，如加工中心等；二是向针对特殊加工件的专门化发展，如齿轮加工机床，螺纹加工机床等。同时，一些新的加工方法又产生了新的加工设备，如激光加工机床，等离子切割机床，线切割机床等等。

机床的分类，一般以应用性能、加工精度或重量来进行划分：

- (1) 按应用性能可分为普通机床（万能机床），专用机床两种。
- (2) 按加工精度分为普通精度机床，精密机床和高精度机床三种。
- (3) 按重量和加工件大小，则可分为轻型机床，大型机床和重型机床三种。

(二) 机床型号及表示方法

机床型号的表示一般由一组代号和数字构成，它包括以下内容：

1. 机床的类别

按机床进行加工的工作原理性质和使用刀具的不同，我国机床分为十二大类。如表 7-2 所示。

表 7-2 机床分类及代号

机床 类型	车 床	钻 床	镗 床	磨床			齿 轮 加 工 机 床	螺 纹 加 工 机 床	刨 插 床	拉 床	铣 床	电 加 工 机 床	切 断 机 床	其 他 机 床
代号	C	Z	T	M	2M	3M	Y	S	B	L	X	D	G	Q
参考 读音	车	钻	镗	磨	2 磨	3 磨	牙	丝	刨	拉	铣	电	割	其

型号的字母表示机床的类，采用机床名称的汉语拼音读音的首写大写字母表示。

2. 机床的特性

型号的第二个字母表示机床的特性，仍采用汉语拼音的大写字母表示。机床的特性及其代号见表 7-3。

表 7-3 机床特性及其代号

通用特性	高精度	精密	自动	半自动	程序控制	轻便	万能	简式	自动换刀
代号	G	M	Z	B	K	Q	W	J	H
参考读音	高	密	自	半	控	轻	万	简	换

3. 机床的组和型

型号的第三、四位数字，分别表示机床的组和型（系列）。

4. 机床的基本参数

机床的基本参数一般指机床加工范围的上限或工作台的宽度。型号的第五、六位用数字表示机床的基本参数。机床基本参数表示方法参见下表(表 7-4)：

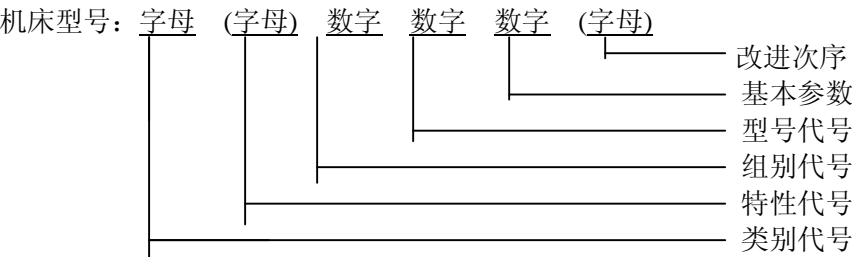
表 7-4 常见机床基本参数及折算系数

机床名称	主参数名称	主参数折算系数
普通车床	床身上工件最大回转直径	1/10
自动车床、六角车床	最大车削直径	1/1
立式钻床、摇臂钻床	最大钻孔直径	1/1
卧式镗床	主轴直径	1/10
牛头刨床、插床	最大刨削或插削长度	1/10
龙门刨床	最大刨削宽度	1/100
拉床	额定拉力（吨）	1/1
卧式、立式升降台铣床	工作台的工作面宽度	1/10
龙门铣床	工作台的工作面宽度	1/100
外圆、内圆磨床	最大磨削外径或孔径	1/10
平面磨床	工作台工作面的宽度或直径	1/10

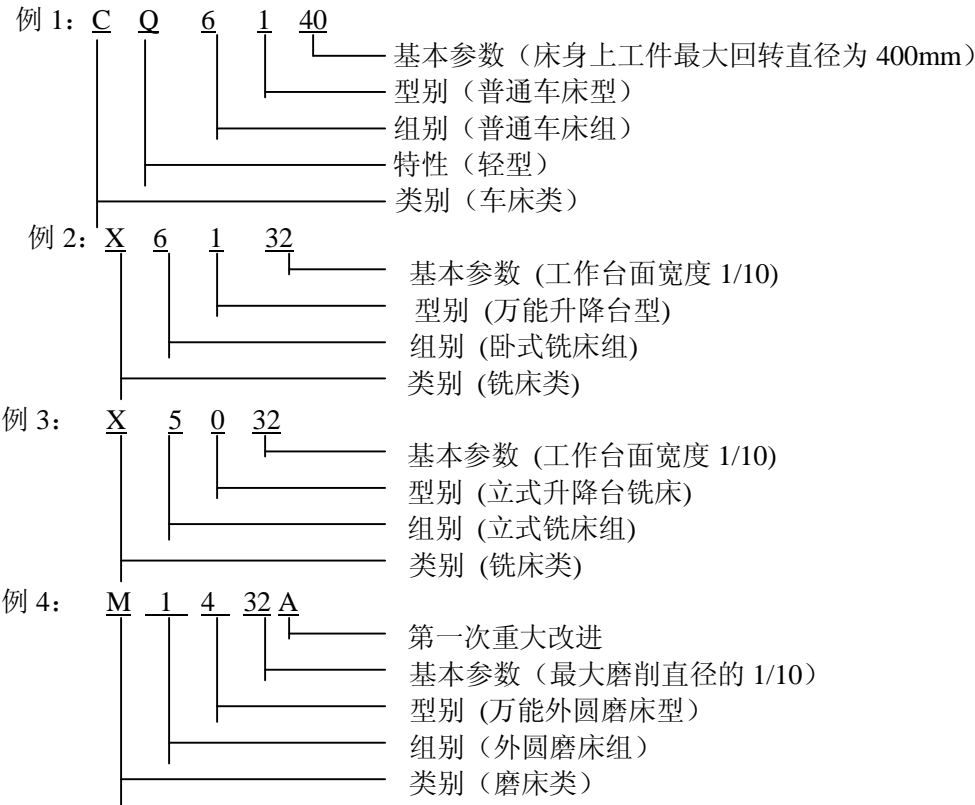
5. 机床结构的改进

对规格相同而结构不同的机床，或经过改进后结构变化较大的机床，按其设计次序或其改进次数分别用汉语拼音字母 A、B、C、D……附加于末尾，以示区别。

表示机床型号的完整结构如下所示：



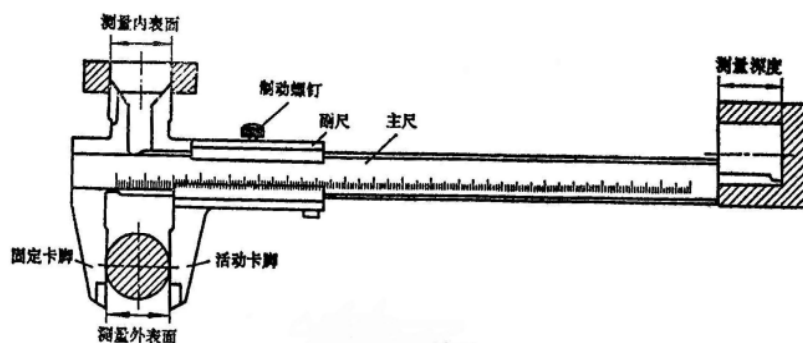
对于已经定型，并按过去机床型号编制办法确定型号的机床，其型号可暂时不改变，故仍有使用原型号的。



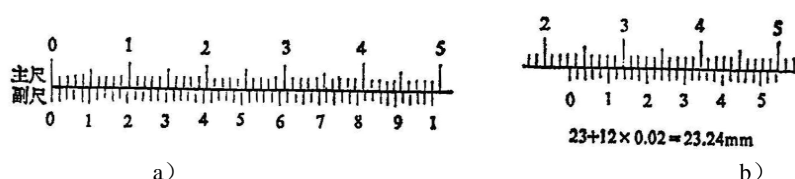
第四节 常用量具

一、游标卡尺

游标卡尺是一种测量精度较高、使用方便、应用广泛的量具，可直接测量工件的外径，内径、宽度、长度、深度尺寸等（图 7—7），其读数准确度有 0.1mm、0.05mm 和 0.02mm 三种。下面以 0.02mm（即 1/50）游标卡尺为例，说明其刻线原理、读数方法、测量方法及注意事项。



7—7 游标卡尺



7—8 0.02mm 游标卡尺的刻线原理和读数方法

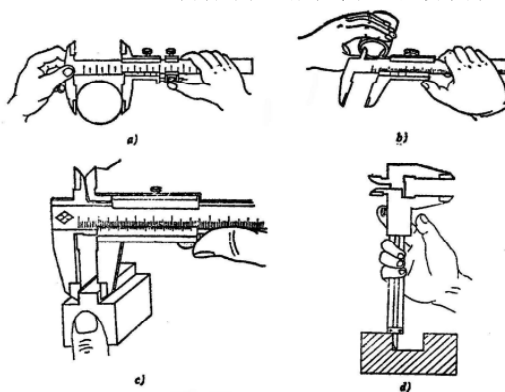


图 7—9 游标卡尺的测量方法

刻线原理 如图 7—8 a) 所示，当主尺和副尺的卡脚始合时，主尺上的零线对准副尺上的零线，副尺上的每一小格为 1mm，取主尺 49mm 长度在刻尺上等分为 50 个格。即：

$$\text{副尺每格长度} = \frac{49}{50} \text{ mm} = 0.98 \text{ mm}$$

$$\text{主、副尺每格之差} = 1 \text{ mm} - 0.98 \text{ mm} = 0.02 \text{ mm}$$

读数方法 如图 7—8 b) 所示，游标卡尺的读数可分为三步：

第一步：根据副尺零线以左的主尺上的最近刻度读出整数；

第二步：根据副尺零线以右与主尺某一刻线对准刻线数乘以 0.02 读出小数；

第三步：将上面的整数和小数两部份相加，即得总尺寸。如图 7—8b) 中的读数为：

$$23 + 12 \times 0.02 = 23.4 \text{ (mm)}$$

测量方法 游标卡尺的测量方法如图 7—9 所示。其中图 a) 为测量工件外径的方法，图 b) 为测量工件内径的方法，图 c) 为测量工件宽度的方法，图 d) 为测量工件深度的方法。

注意事项 使用游标卡尺时应注意以下事项：

(1) 使用前先擦尽卡脚，然后合拢两卡脚使之贴合，检查主、副尺零线是否对齐。若未对齐，应在测量后根据原始误差修正读数。

(2) 测量时，方法要正确，读数时要垂直于尺面，否则测量不正确。

(3) 当卡脚与被测工件接触后,用力不能过大,以免卡脚变形或磨损,降低测量的准确度。

(4) 不得用卡尺测量毛坯表面。使用完毕后须擦拭干净,放入盒内。

游标卡尺的种类很多,除了上述普通游标卡尺外,还有专门用于测量深度和高度的深度游标卡尺和高度游标卡尺。高度游标卡尺还可以用于钳工精密划线。

二、百分尺(又称分厘尺)

百分尺是一种测量精度比游标卡尺精度更高的量具,可测量工件外径和厚度,其测量准确度为 0.01mm 。种类有外径百分尺、内径百分尺、深度百分尺。外径百分尺如图 7-10 所示。螺杆和活动套筒连在一起,当转动活动套筒时,螺杆和活动套筒一起向左或向右移动。

刻线原理 百分尺的读数机构由固定套筒和活动套筒组成(相当于游标卡尺的主尺和副尺),如图 7-8 所示。固定套筒在轴线方向上刻有一条中线,中线的上、下方各刻有一排刻线,刻线每一小格为 1mm ,上、下刻线相互错开 0.5mm ;在活动套筒左端圆周上有 50 等分的刻度线。因测量螺杆的螺距为 0.5mm ,即螺杆每转一周,轴向移动 0.5mm ,故活动套筒上每一小格的读数为 $0.5/50=0.01\text{mm}$ 。当百分尺的螺杆左端面与砧座表面接触时,活动套筒左端的边缘与轴向刻度的零线重合;同时圆周上的零线应与中线对准。

读数方法 百分尺的读数方法见图 7-11,可分为三步:

第一步:读出固定套筒上露出刻线的毫米数和半毫米数;

第二步:读出活动套筒上小于 0.5mm 的小数部份;

第三步:将上面两部份读数相加即为总尺寸。

测量方法 百分尺的使用方法如图 7-12 所示,其中左图是测量小型零件外径的方法,图右是在机床上测量工件的方法。

使用百分尺的注意事项基本上与使用游标卡尺相同,只有一点特别要注意:当测量螺杆快要接触工件时,必须使用其端部棘轮(此时严禁使用活动套筒,以防用力测量不准),当棘轮发出“嘎嘎”打滑声时,表示压力合适,停止拧动,即可读数。

三、百分表

百分表是一种精度较高的比较量具,它只能测出相对数值,不能测出绝对值,主要用于检测工件的形状和位置误差(如圆度、平面度、垂直度、跳动等),也可在机床上于工件的安装找正。百分表的测量准确度为 0.01mm 。

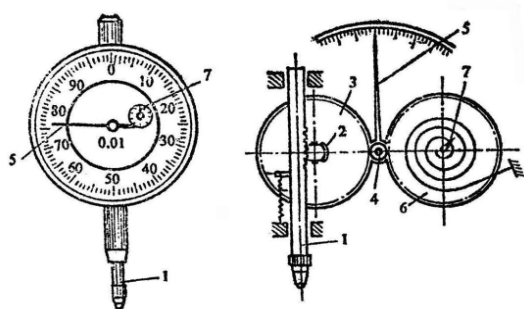


图 7-13 百分表及其结构原理

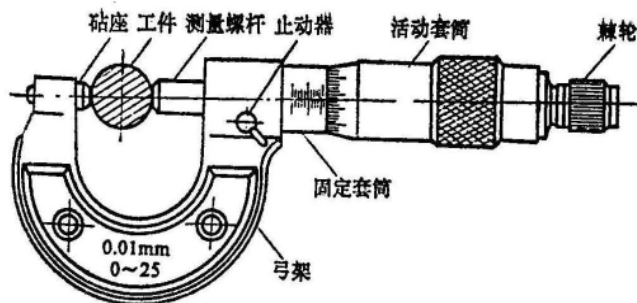


图 7-10 外径百分尺

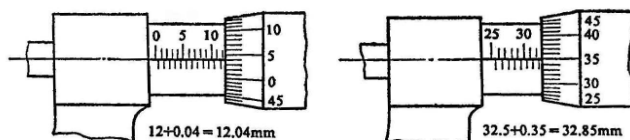


图 7-11 百分尺的刻线原理和读数方法

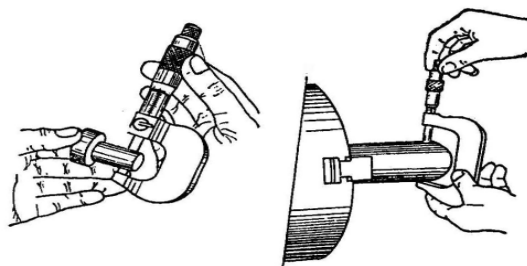


图 7-12 百分尺的使用方法

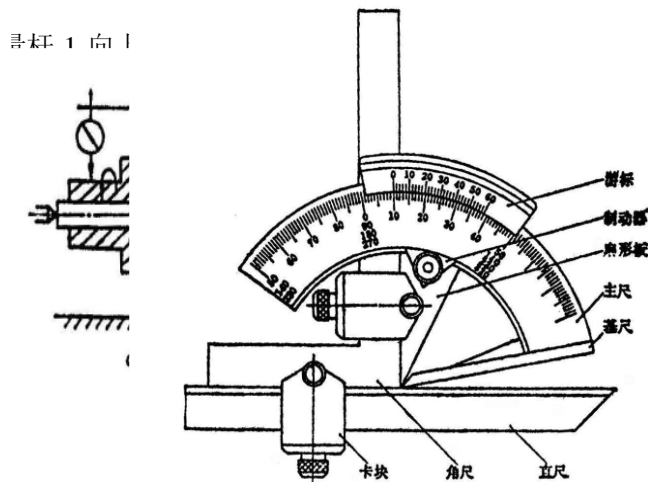


图 7-15 万能角度尺

百分表常装在常用的普通表架或磁性表架上使用，测量时要注意百分表测量杆应与被测表面垂直。测量的应用举例见图 7-14 所示。其中：

- a) 是检查外圆对孔的圆跳动、端面对孔的圆跳动。
- b) 是检查工件两平面的平行度。
- c) 内圆磨床上四爪卡盘安装工件时找正外圆。

四、万能角度尺

万能角度尺是用来测量工件内、外角度是量具，其结构如图 7-15 所示。

万能角度尺的读数机构是根据游标原理制成的。主尺刻线每格为 1° 。游标的刻线是取主尺的 29° 等

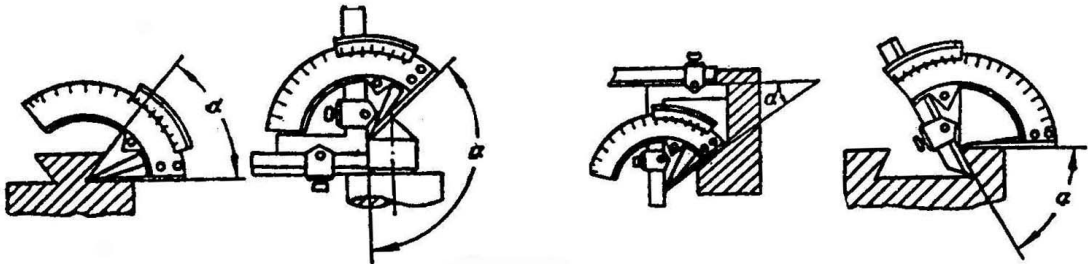


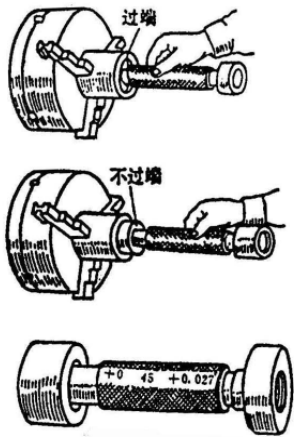
图 7-16 万能角度尺的应用

分为 30 格，因此游标刻线角格为 $29^\circ / 30$ ，即主尺与游标一格的差值为 $1^\circ - \frac{29^\circ}{30} = \frac{1^\circ}{30} = 2'$ ，也就是说万能角度尺读数准确度为 $2'$ 。其读数方法与游标卡尺完全相同。

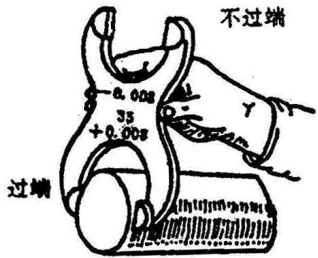
测量时应先校准零位，万能角度尺的零位，是当角尺与直尺均装上，而角尺的底边及基尺与直尺无间隙接触，此时主尺与游标的“0”线对准。调整好零位后，通过改变基尺、角尺、直尺的相互位置可测试 $0-320^\circ$ 范围内的任意角。

应用万能角度尺测量工件时，要根据所测角度适当组合量尺，其应用举例如图 7-16 所示。

五、量规



7-17 塞规及其应用



7-18 卡规及其应用

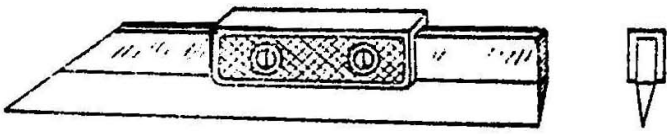
量规是在大批量生产中常用来进行检测的一种专用量具，它又分为塞规和卡规两种。

塞规用于测量孔径或宽槽如图 7-17，其长度较短的一端叫“不过端”或“止端”，用于控制工件的最大极限尺寸；其长度较长一端叫“过端”，用于控制最小极限尺寸。用塞规测量时，只有当过端能进去，止端不能进去，才能说明工件的实际尺寸在公差范围之内，是合格品，否则就不是合格品。

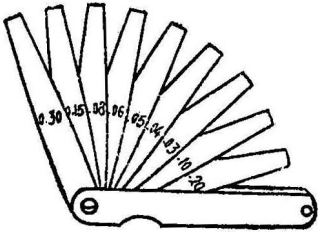
卡规是用来测量外径或厚度的，如图 7-18 所示，与塞规类似，一端为“过端”，另一端为“不过端”，使用方法和塞规相同。

六、刀口尺

刀口尺如图 7—19，用于检查平面的平、直情况。如果平面不平，则刀口尺与平面之间有间隙，再用厚薄尺塞间隙，即可确定间隙数值的大小。



7—19 刀口尺



7—20 厚薄尺

七、厚薄尺

厚薄尺又称塞尺，如图 7—20，用于检查两贴合面之间的缝隙大小。它由一组薄钢片组成，其厚度为 0.03~0.3mm。测量时用厚薄尺直接塞进间隙，当一片或数片（叠合）能进两贴合面之间时，则一片或数片的厚度（可由每片上和标记读出），即为两贴合面之间隙值。

使用厚薄尺时必须先擦拭干净工件和尺面，测量时不能用力太大，以免尺片弯曲和折断。

八、角尺

直角尺的两边成准确的 90°，用来检查工件两垂直面的垂直情况。

第五节 零件的加工质量

机械产品的质量主要取决于组成零件的质量和装配质量，其中零件本身的加工质量具有决定意义。零件加工质量的主要指标是加工精度（包括：尺寸精度、形状精度和位置精度）和表面粗糙度。

设计零件时，应根据各个零件在机器中的作用，合理地制定技术要求，使其装配后能达到规定的性能并满足零件之间的配合关系和互换性。零件的技术要求包括表面粗糙度、尺寸精度、形状精度、位置精度和热处理方法以及表面处理（如电镀、发黑）等，前四项均由切削加工保证。

一、表面粗糙度

切削加后的工件表面，总会遗留下切刃或磨料的加工痕迹。再光滑的表面，放大后也会发现它们是高低不平的。零件表面由较小峰谷和较小间距组成的微观不平度称为表面粗糙度。

国家标准 GB/T1031-95、GB / T131—93 规定了表面粗糙度的代号、标注、各种参数及数值等。常用轮廓算术偏差 R_a 值来表示表面粗糙度，单位为 μm 。

表面粗糙度对零件的尺寸精度和零件之间的配合性质、零件的接触刚度、耐腐蚀性；耐磨性以及密封性等均有很大的影响。在设计零件时，要根据具体条件合理选择 R_a 的允许值。 R_a 值愈小，表面愈光滑，加工愈困难，成本愈高。下面表 7—5 为常用加工方法所能达到的表面粗糙度值。

表 7—5 不同表面特征的表面粗糙度

表面要求	表面特征	$R_a/\mu m$	旧国标光洁度代号	加工方法举例
不加工	毛坯表面清除毛刺		\sim	钳工
粗加工	明显可见刀痕	50	$\nabla 1$	钻孔、粗车、粗铣、粗刨、粗镗
	可见刀痕	25	$\nabla 2$	
	微见刀痕	12.5	$\nabla 3$	
半精加工	可见加工痕迹	6.3	$\nabla 4$	半精车、精车、精铣、精刨、精磨、精镗、铰孔、拉削
	微见加工痕迹	3.2	$\nabla 5$	
	不见加工痕迹	1.6	$\nabla 6$	
精加工	可辨加工痕迹的方向	0.8	$\nabla 7$	精铰、刮削、精拉、精磨
	微辨加工痕迹的方向	0.4	$\nabla 8$	
	不辨加工痕迹的方向	0.2	$\nabla 9$	
精密加工	按表面光泽判别	0.1~0.008	$\nabla 10 \sim \nabla 14$	精密磨削、珩磨、研磨、抛光、超精加工、镜面磨削

二、尺寸精度

尺寸精度是指零件的实际尺寸相对于理想尺寸的准确程度。尺寸精度是用尺寸公差来控制的。尺寸公差是指在切削加工中零件尺寸允许的变动量。在基本尺寸相同的情况下，尺寸公差愈小，则尺寸精度愈高。如图 7—21 所示，尺寸公差等于最大极限尺寸与最小极限尺寸之差，或等于上偏差与下偏差之差。

例如：

$\phi 50$

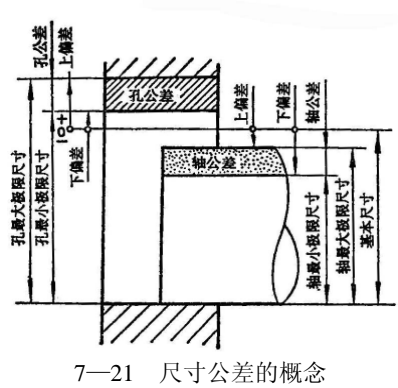
-0.025

-0.064

上偏差

下偏差

基本尺寸



最大极限尺寸 = $50 - 0.025 = 49.975\text{mm}$

最小极限尺寸 = $50 - 0.064 = 49.936\text{mm}$

尺寸公差 = 最大极限尺寸 - 最小极限尺寸 = $49.975 - 49.936 = 0.039\text{mm}$

或 尺寸公差 = 上偏差 - 下偏差 = $-0.025 - (-0.064) = 0.039\text{mm}$

国标 GB1800—79 至 GB1804—79 将确定尺寸精度的标准公差等级分为 20 级，分别用 IT01、IT0、IT1、IT2、……IT18 表示。从 IT01 到 IT18 相应的公差数值依次加大、精度依次降低。

切削加工所获得的尺寸精度一般与使用的设备、刀具和切削条件等密切相关。尺寸精度愈高，零件的工艺过程愈复杂，加工成本也愈高。因此在设计零件时，应在保证零件的使用性能的前提下，尽量选用较低的尺寸精度。

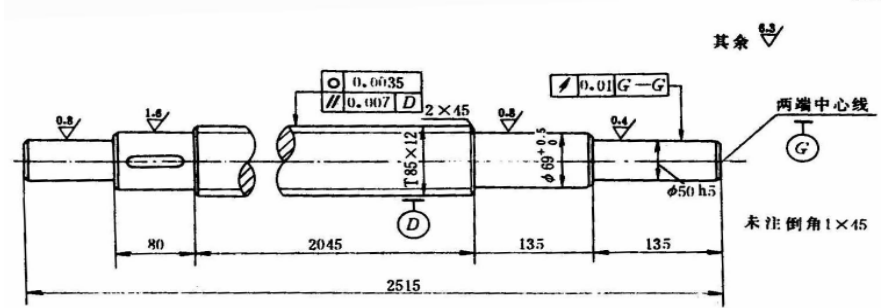


图 7—22 丝杠技术要求标注示例

三、形状精度及位置精度

形状精度是指零件上的线、面要素的实际形状相对于理想形状的准确程度。形状精度是用形状公差来控制的。例如图 7—22 所示的圆度为 0.0035mm 表示丝杠外圆面的实际轮廓必须位于半径为公差值 0.0035mm 的两同心圆之间。

表 7—6 形状公差符号

项目	直线度	平面度	圆度	圆柱度	线轮廓度	面轮廓度
符号	—					

表 7—7 位置公差符号

项目	平行度	垂直度	倾斜度	位置度	同轴度	对称度	圆跳动	全跳动
符号								

位置精度是指零件上点、线、面各要素的实际位置相对于理想位置的准确程度。位置精度是用位置公差来控制的。例如图 7—22 所示的圆跳动 $0.01mm$ ，表示丝杠外轴 $\phi 50h5$ 圆柱面基准线 G—G 作无轴向移动的回转时，在任一测量平面内的径向圆跳动不得大于 $0.01mm$ 。又如图 7—22 所示的平行度 $0.0035mm$ 表示丝杆外圆轴线在垂直方向上平行于基准轴线 D 的两平行平面之间距离不得大于 $0.007mm$ 。

国家标准 GB1182-80 至 GB1184—80 规定，形状公差有六项，其符号和名称如表 7—6 所示。位置公差有八项，其名称和符号如表 7—7 所示。

复习思考题

1. 什么是切削加工？分为哪两类？依据什么对切削加工进行分类？
2. 试分析车、钻、铣、刨、磨几种常用加工方法的主运动和进给运动，并指出它们的运动件（工件或刀具）及运动形式（转动或移动）。
3. 什么是切削用量三要素？试用简图表示切削平面和钻孔的切削用量三要素？
4. 普通外圆车刀切削部分由哪些元素构成？
5. 普通外圆车刀切削部分有哪几个主要角度，是如何测量的，它们的取值范围如何？
6. 刀具材料应具备哪些性能？常用的刀具材料有哪几种？
7. 常用的量具有哪几种？试合理选择下列零件表面尺寸的量具。
 - 1). 锻件外圆 $\phi 100$ ；
 - 2). 铸件上铸出的孔 $\phi 80$ ；
 - 3). 车削后轴外圆 $\phi 50 \phi \pm 0.2$ ；
 - 4). 磨削后轴件外圆 $\phi 30 \pm 0.03$ ；
8. 游标卡尺和百分尺测量准确度是多少？怎样正确使用？能否测量铸件毛坯？
9. 零件加工的技术要求包括哪些内容？怎样表示它们？

第八章 机械切削加工

机械加工是由人操控机械加工设备进行的。通常把用于机械加的设备统称为机床。由于机床进行切削加工的工作原理和方式不同,形成了各种不同的加工方法,主要有车、铣、刨、钻、磨等,相应的加工设备(机床)就分别称为车床、铣床、刨床、钻床、磨床等。

机械加工具有加工精度高,生产效率高,工人劳动强度低的优点。

第一节 车削加工

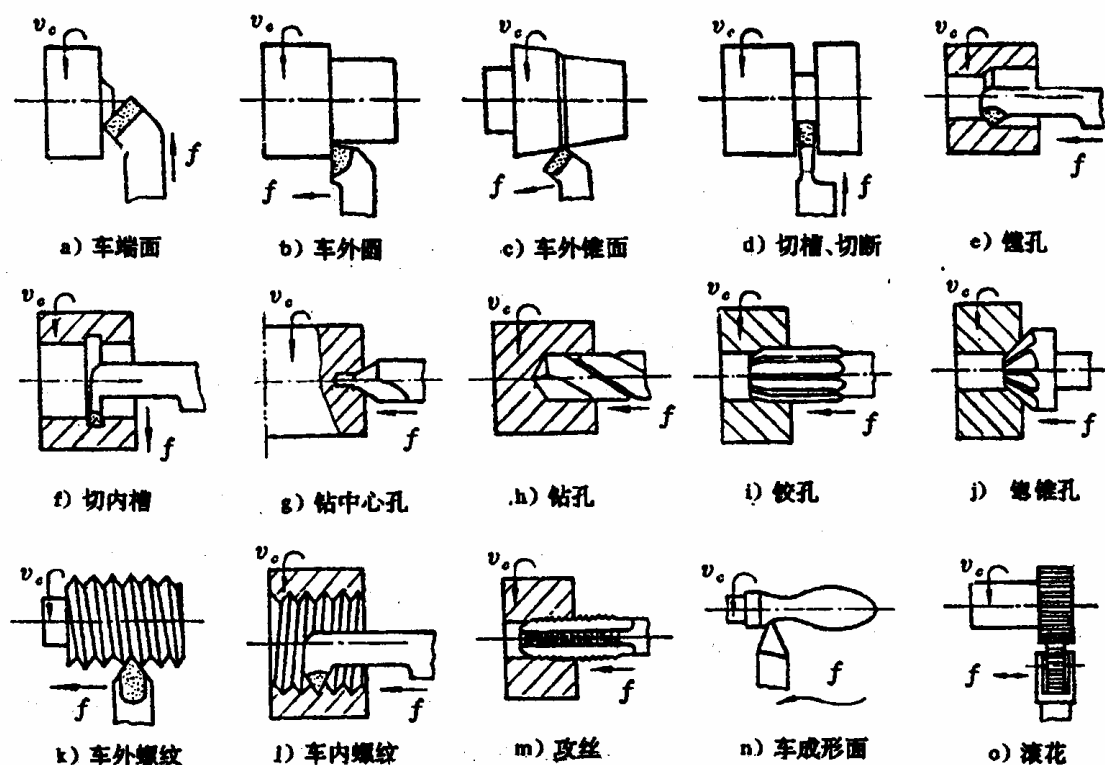
车削加工是在车床上利用工件的旋转和刀具的移动来改变毛坯的形状和大小,将其加工成合乎要求的零件的一种切削加工方法。

一、车床

车床是一种应用非常广泛的金属切削机床,主要用于加工各种回转体表面,特别适宜加工轴、套、盘类零件。还可以通过更换刀具完成多种加工工序。图 8-1 为车床可完成的主要工作。

由于机器中带回转表面的零件很多,所以车削加工在机械加工中占的比重很大,一般占金属切削量的 50%。车削加工工件的表面尺寸公差等级一般为 IT11~IT6,表面粗糙度 R_a 值为 $12.5\mu\text{m}\sim 0.8\mu\text{m}$ 。

车床的种类和型号很多,应用最广泛的是普通卧式车床。下面主要介绍 C6132 型卧式车床。



(一) C6132 型车床主要组成部分及功用

C6132 型车床的外形和各部分名称如图 8-2 所示。

1. 床身 是车床的结构性基础构件,用以连接和安装各主要部件,并保证各部件之间的相对正确位置。床身上有四条平行的导轨,外侧的两条供大拖板做纵向移动之用;内侧的两条用于尾座的移动和定位。床身安装在床脚上,床脚内分别装有变速箱和电气箱。床脚是整台机床的支承件。床身在安装时,需先校平导轨,并将其固定在地基上。

2. 主轴箱 固定地装置在床身的左端,安装有一根空心的主轴及部分变速齿轮。主轴前端的内锥面用来装夹顶尖,外锥面用于装夹卡盘等附件,主轴的通孔可穿入长棒料便于加工。箱内变速齿轮可向主轴提供十二种不同的转速。

3. 变速箱 安装变速机构,向主轴提供六种可选择的转速输出。

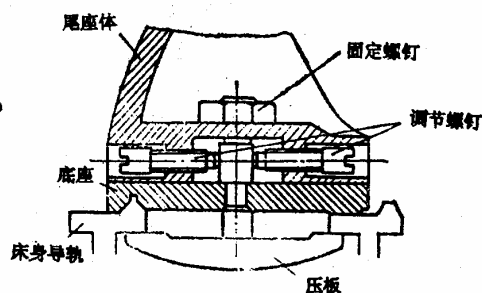
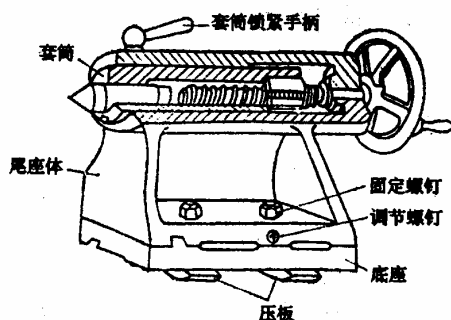
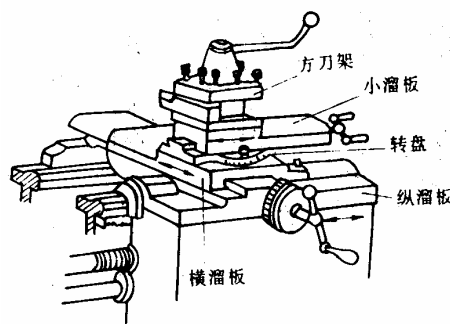
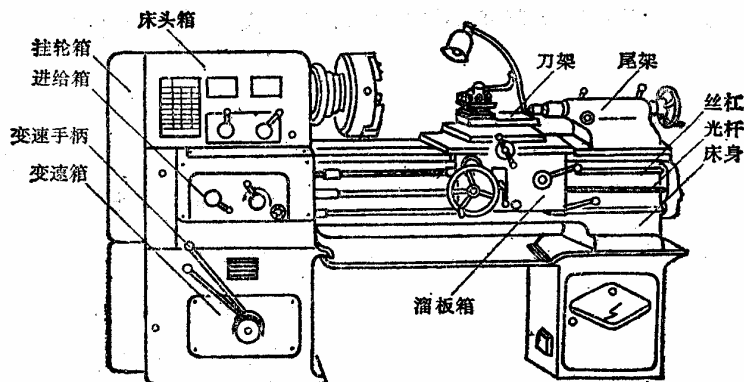
4. 进给箱 内装作进给运动的变速传动机构。主轴的运动由齿轮传入进给箱,再由箱内齿轮组合变速后传动光杆和丝杆,进而调整进给量的大小,或在车螺纹时调螺距。

5. 溜板箱 联接拖板和刀架,是车床进给运动的操作箱。它能使光杆或丝杆传来的旋转运动通过齿轮或齿条(或丝杆和螺母)带动车刀做直线进给运动。

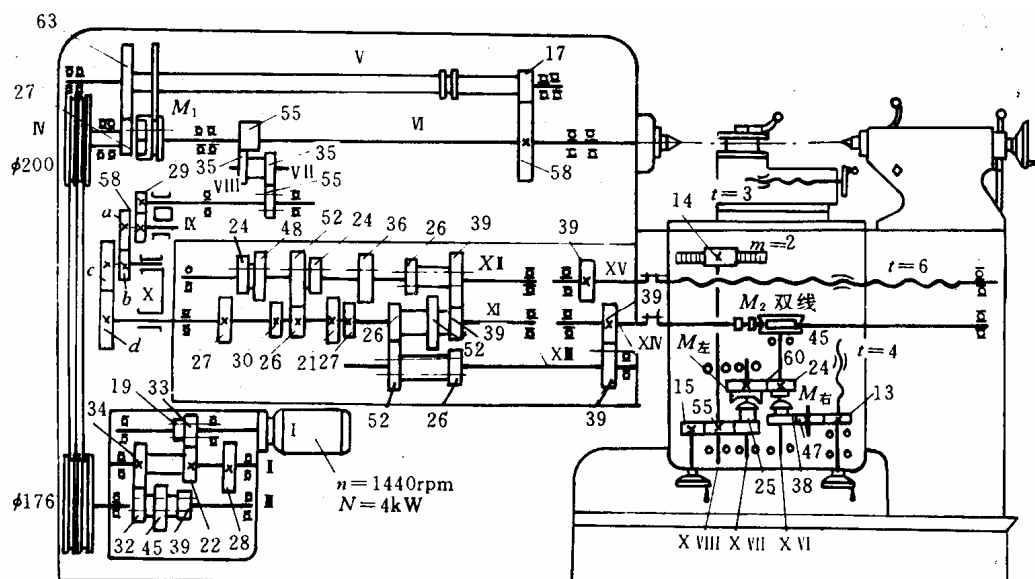
6. 光杆和丝杆 联接进给箱和溜板箱的传动杆。自动进给时用光杆传动;车削螺纹时用丝杆传动。

7. 刀架 用来夹持车刀并使其作纵向、横向或斜向进给运动。刀架为多层结构,由大拖板,中拖板,转盘,小拖板和方刀架组成。如图 8-3 所示。大拖板与溜板箱相联,可带动车刀沿床身导轨做纵向移动。中拖板可带动车刀沿大拖板上导轨做横向移动。转盘与中拖板相联,用螺栓紧固,松开螺母,转盘可在水平面内扳转任意角度,小拖板可沿转盘上的导轨做短距离移动。将转盘扳转一定角度后,小刀架可带动车刀做相应的斜向进给运动。方刀架用来装夹车刀,最多时可同时装夹四把。松开锁紧手柄即可转位,选择装在方刀架上的所需车刀,锁紧手柄即可使用。

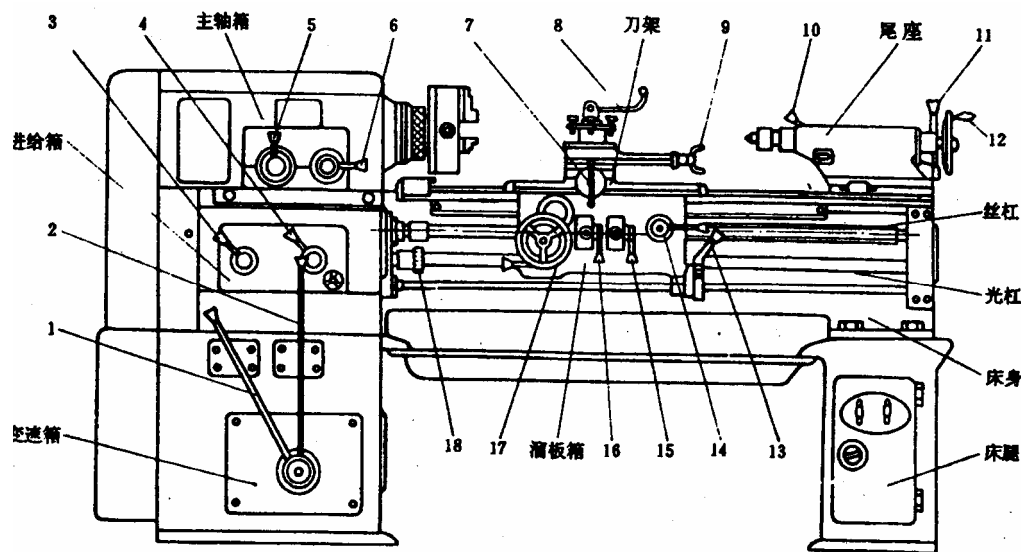
8. 尾座 装置在床身导轨上,安装有尾架套筒及顶尖,可沿导轨移动并锁紧。套筒前端为莫氏锥孔,可装夹尾顶尖以支承工件一端,或装夹钻头、铰刀等孔加工工具。套筒可在尾座内前后伸缩并可自行卸出顶尖或刀具。内部结构如图 8-4 所示。



(二) C6132 车床的传动系统 (如图 8-5 所示)



(三)、C6132 车床的调整及手柄的使用



车床工作的调整主要是通过相应的手柄位置实现的。如图 8-6。

变速手柄：主运动变速手柄为 1、2、6，进给运动手柄为 3、4，根据需要扳至相应位置即可。

锁紧手柄：车刀锁紧手柄为 8，尾座锁紧手柄为 11，套筒锁紧手柄为 10。

移动手柄：刀架纵向移动手柄为 17，刀架横向移动手柄为 7，小刀架移动手柄为 9，尾座移动手柄为 12。

启停手柄：主轴正反转及停止手柄为 13，向上扳则主轴正转，向下扳则主轴反转，中间位置则主轴停止转动。刀架纵向自动手柄为 16，刀架横向自动手柄为 15，向上扳为启动，向下扳为停止。对开螺母开合手柄为 14，向上扳为打开，向下扳为闭合。

换向手柄：刀架左右移动的换向手柄为 5，可根据指示使用。

离合器：光杆与丝杆换向使用的离合器为 18，向右拉为光杆旋转，向左推为丝杆旋转。

二、车刀

在车削加工中,为了加工各种不同表面,或加工不同的工件,需要采用各种不同加工用途的车刀,常用的有外圆车刀、偏刀、切断刀、螺纹车刀等。车刀的种类和用途如图 8-7 所示。

(一) 常用车刀的分类

车刀种类很多,一般按其结构形式或使用场合来进行分类。

按结构形式分为以下三种:

整体式车刀——这类车刀的切削部分与夹持部分是由同一种材料组成的,常用的高速钢刀具即属此类。

焊接式车刀——这类车刀的切削部分与夹持部分的材料完全不同,切削部分材料多以刀片形式焊接在刀杆上,常用的硬质合金车刀即属此类。

机械夹固式车刀——这类车刀多在批量生产和自动化程度较高的场合使用,有机械夹固重磨式车刀和不重磨式车刀两种。

按使用场合可分为尖头外圆车刀,弯头外圆车刀,切断刀,镗孔刀,螺纹车刀,成形车刀等。

(二) 车刀的刃磨

未经使用或用钝后的车刀,必须进行刃磨,以得到应用的形状和角度,才能顺利地车削和保证加工质量。车刀的刃磨一般在砂轮机上进行。刃磨硬质合金车刀时应选用碳化硅砂轮(一般为浅绿色);刃磨高速钢车刀时应选用氧化铝砂轮(一般为白色)。

车刀的几何角度是通过刃磨三个刀面得到的。外圆车刀的刃磨步骤为:先磨前刀面,再刃磨主后刀面和副后刀面,最后修磨刀尖圆弧。

刃磨车刀时应注意下列事项: 1) 砂轮机启动后,操作者应站在砂轮侧面,以防砂轮碎裂时切线飞出击伤。2) 刃磨刀具时要握稳刀具,用力均匀,刀柄靠近支架,使受磨面轻贴砂轮。切忌用力太大或冲击砂轮,以免使砂轮碎裂。3) 刀具应在砂轮圆周上左右移动,使砂轮磨耗均匀,避免产生沟槽。禁止在砂轮侧面用力粗磨刀具,致使砂轮偏摆,甚至破碎。4) 刃磨时会产生摩擦热。刃磨高速钢车刀时,应沾水使之冷却,防止其回火软化。但刃磨硬质合金刀时,则不应沾水,以免产生裂纹。

(三) 车刀的装夹 (如图 8-8)

装夹车刀应注意下列事项: 1) 车刀刀尖应与车床的主轴轴线等高,可根据尾座顶尖或工件轴芯增减垫片厚度进行调整。2) 车刀刀柄应与车床主轴轴线相垂直。3) 车刀应尽可能伸出短些,一般不超过刀柄厚度的两倍。否则刀柄刚性减弱,易产生振动。4) 刀柄下面的垫片应平整并与刀架对齐,一般不得超过 2 片。5) 车刀装夹应稳固,压紧螺钉应交替拧紧。6) 装夹好车刀后,应手动检查在工作行程中是否有相互干涉或碰撞的可能。

三、工件的安装

安装工件时,由于工件的形状大小和加工的数量不同,安装的方法也不同。基本的安装要求: 1) 工件位置要准确,保证工件的回转中心轴线与车床主轴轴线重合; 2) 保证工件装夹稳固,不会因切削力的作用松动或脱落; 3) 保证工件的加工质量和必要的生产效率。

(一) 用三爪卡盘装夹工件

三爪卡盘是车床上应用最广的通用夹具,适于安装短棒料或盘类工件。它的构造如图 8-9 所示。三爪卡盘体内有三个小伞齿轮,转动(用外插手柄)其中任何一个伞齿轮时,可以使与它相啮合的大伞齿轮旋转。大伞齿轮背面的平面螺纹与三个卡爪背面的平面螺纹相啮合。当大伞齿轮旋转时,三卡爪就在卡盘体上的径向槽内同时作向心或离心移动,以夹紧或松开工件。

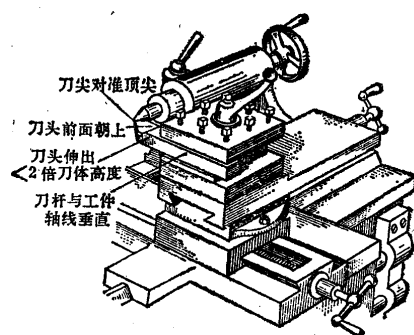
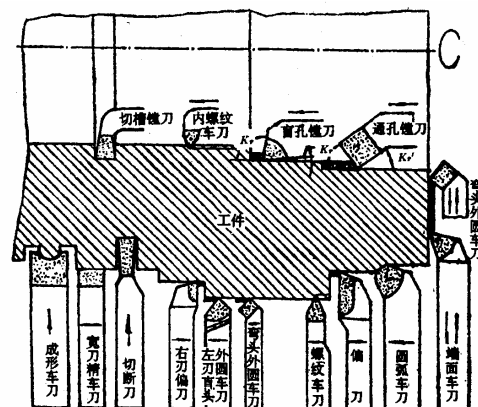


图 8-8 车刀的装夹

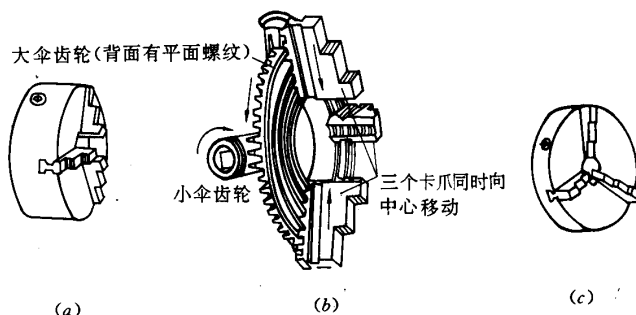


图 8-9 三爪卡盘的构造

三爪卡盘能自动定心,因此装夹很方便。但其定心精度受卡盘本身制造精度和使用后磨损的影响,故工件上同轴度要求较高的表面,应尽可能在一次装夹中车出。此外三爪卡盘的夹紧力较小,一般仅适用于夹持表面光滑的圆柱形或六角形等工件。

用三爪卡盘安装工件时可按下列步骤进行: 1) 首先把工件在卡爪间放正,然后轻轻夹紧。2) 开动机床,使主轴低速旋转,检查工件有无偏摆,若有偏摆应停车用小锤轻敲校正,然后紧固工件。注意必须即时取下扳手,以免开车时飞出,击伤人或机床。3) 移动车刀至车削行程的左端,用手旋转卡盘,检查刀架等是否与卡盘或工件碰撞。

(二) 用顶尖安装工件

较长或加工工序较多的轴类工件,常采用两顶尖安装。如图 8-10。工件装夹在前后顶尖之间,由卡箍、拨盘带动旋转。前顶尖装在主轴上,和主轴一起旋转。后顶尖装在尾架上固定不动,有时亦可用鸡心夹头代替拨盘,此时前顶尖用一段钢材料车成。

普通顶尖的形状如图 8-11 所示。由于后顶尖容易磨损,因

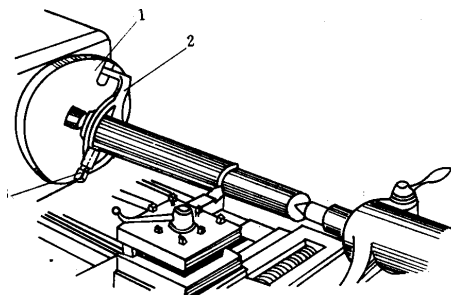


图 8-10 用顶尖安装工件
1-拨盘 2-鸡心夹头 3-紧固螺钉

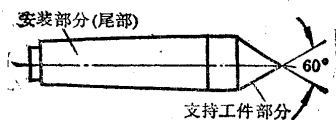


图 8-11 普通顶尖的形状

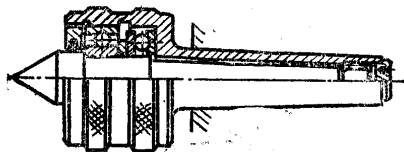


图 8-12 活顶尖

此在工件转速较高的情况下,常采用活顶尖如图 8-12。加工时活顶尖与工件一起转动。

用顶尖安装工件前,要先车平工件的端面,用中心钻钻出中心孔,如图 8-13。中心孔的轴线应与工件毛坯的轴线相重合。中心孔的圆锥孔部分应光滑,因为中心孔的锥面部分是和顶尖锥面相配合的。中心孔的圆柱孔部分一是用来容纳润滑油;二是使顶尖尖端不与工件接触,保证工件和顶尖在锥面处良好配合。

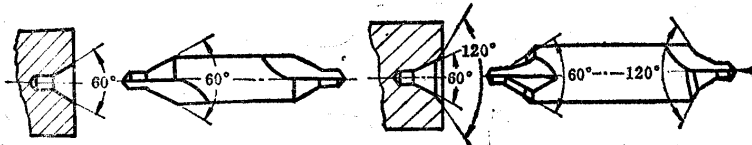


图 8-13 用中心钻钻出中心孔

带有 120° 保护锥面的中心孔为双锥面中心孔,如图 8-13,主要是为了防止 60° 的锥面被碰伤而不能与顶尖良好接触。另外也便于工件装夹在顶尖上后,进一步加工工件的端面。

顶尖安装工件步骤如下: 1) 在工件一端安装卡箍,图 8-14,先用手稍微拧紧卡箍螺钉。在工件的另一端中心孔里涂上润滑油。2) 将工件置于顶尖间,图 8-15,根据工件长短调整尾架位置,保证能让刀架移至车削行程的最右端,同时又要尽量使尾架套筒伸出最短,然后将尾架固定。3) 转动尾架手轮,调节工件在顶尖间的松紧,使之既能自由旋转,但又不会有轴向松动。最后紧固尾架套筒。4) 将刀架移至车削行程最左端,用手转动拨盘及卡箍检查是否会与刀架等碰撞。5) 拧紧卡箍螺钉。

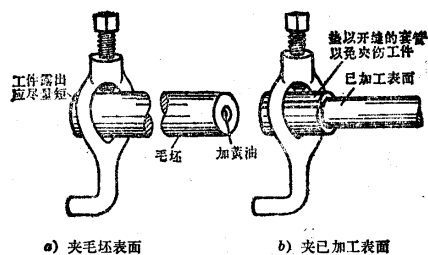


图 8-14 安装卡箍

使用顶尖装夹工件应注意下列事项: 1) 前后顶尖应对准。若在水平面发生偏移,则工件轴线与刀架纵向移动的方向不平行,此时将车出圆锥体。为使两顶尖轴线重合,可横向调节尾架体。2) 中心孔必须平滑和清洁。3) 两顶尖与工件中心孔的配合不宜太松或太紧。顶松了时,工件定心不准,容易引起振动,

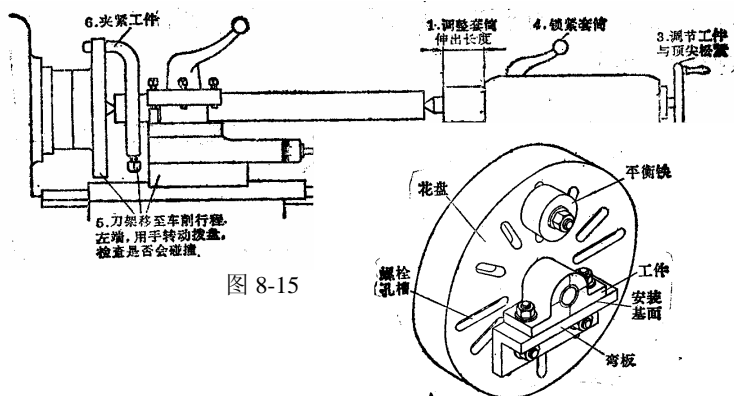


图 8-15

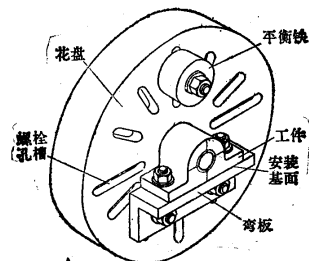


图 8-16 花盘

过松时会发生工件飞出的危险。顶紧了时，因锥面间摩擦增加，会将顶尖和中心孔磨损甚至烧坏。当切削用量较大时，工件因发热而伸长，在加工过程中还需将顶尖位置作一次调整。

（三）用其它附件安装工件

1. 花盘 形状复杂的工件可在花盘上安装。用花盘和弯板安装工件时，找正比较费时，同时要用平衡铁平衡工件和弯板等，以防止旋转时产生偏心振动。如图 8-16。

2. 跟刀架和中心架 在车削细长轴时，由于其刚性差，加工过程中容易产生振动，让刀等现象，工件出现两头细中间粗的腰鼓形，因此须采用跟刀架或中心架作为附加支承。

跟刀架主要用于车削细长的光轴，它装在车床刀架的大拖板上，与整个刀架一起移动。两个支承安装在车刀的对面，用以抵住工件。车削时，在工件右端头上先车出一段外圆，然后使支承与其接触，并调整

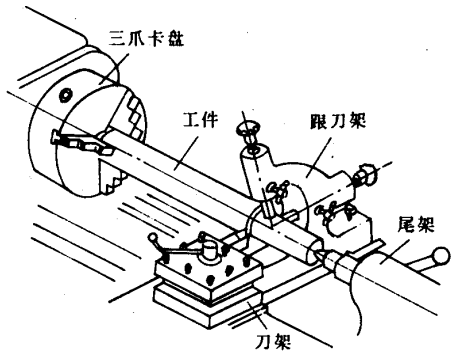


图 8-17 用跟刀架安装工件

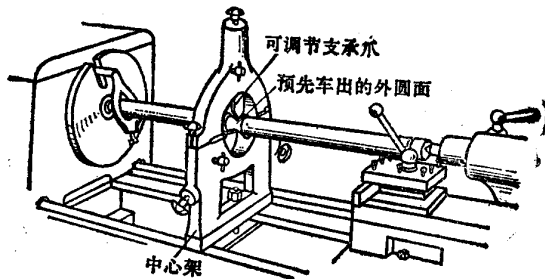


图 8-18 用中心架安装工件

至松紧适宜。工作时支承处要加油润滑。如图 8-17。中心架主要用以车削有台阶或需调头车削的细长轴。中心架是固定在床身导轨上的，如图 8-18。车削时，先在工件上中心架的支承处车出凹槽，调整三个支承与其接触，注意不能太紧或太松，然后进行车削。再调头车另一头。

（四）心轴安装

有些形状复杂和同心要求较高的套筒类零件，须用心轴安装进行加工。这时先加工孔，然后以孔定位，安装在心轴上加工外圆。应根据工件的形状尺寸、精度要求及加工数量的不同应采用不同结构的心轴。

当工件长度大于工件孔径时，可采用稍带有锥度(1:1000 或 1:2000)的心轴，图 8-19 为靠心轴圆锥面与工件间的变形而将工件夹紧。由于切削力是靠其配合面的摩擦力传递的，故切削深度不能太大。

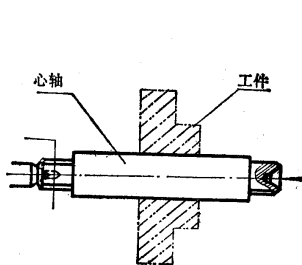


图 8-19 带有锥度的心轴安装

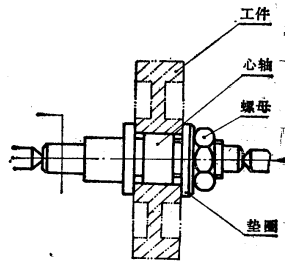


图 8-20 带螺母压紧的心轴心轴安装

当工件长度比孔径小时，则应做成带螺母压紧的心轴。图 8-20 为工件左端紧靠心轴的轴肩，由螺母及垫圈压紧在心轴上。为了保证内外圆同心，孔与心轴之间的配合间隙应尽可能小。

四、车削基本方法

车削的基本方法主要有：车端面，车外圆和台阶，切槽和切断，钻孔和镗孔，车螺纹，车圆锥面，车成形面，滚花等。

（一）车端面

对工件的端面进行车削的方法称为车端面，如图 8-21。车端面时刀具作横向进给，车刀在端面上的轨迹是螺旋线。车刀愈接近工件中心切削速度愈小，刀尖在工件中心时，车削速度为零。因此，刀尖与工件轴线一定要等高(特别是无孔的端面)，否则工件中心余料难以切除。

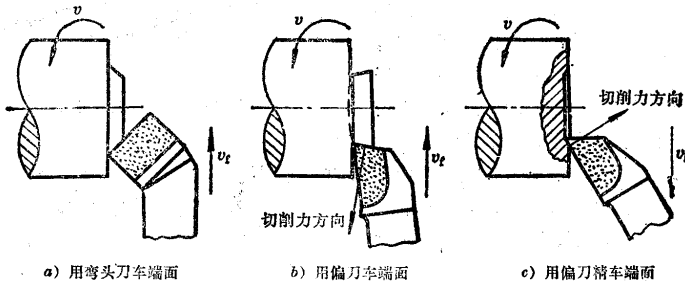


图 8-21 车端面

车削端面时,常采用弯头车刀和右偏刀。弯头车刀车端面时,中心凸台是逐步去掉的,刀尖不易损坏,适用于车削大的端面。使用右偏刀车削时,凸台是瞬间去掉的,容易损坏刀尖,此时若吃刀量较大,在切削力的作用下,易出现打刀,工件产生凹心。但精车端面时可用偏刀由中心向外进给,能提高端面的加工质量。

车削直径较大的端面,若出现凹心或凸面时,应检查车刀和方刀架是否未锁紧,以及中拖板的松紧程度。为避免车刀纵向移动,应将大拖板固定在床身上,用小拖板进给和调整切深。

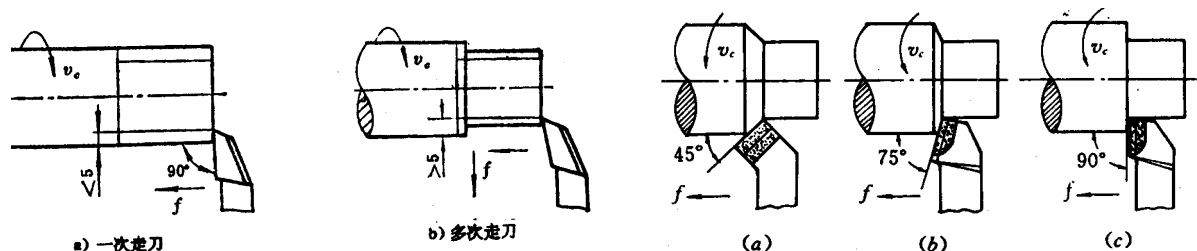


图 8-22 车外圆

图 8-23 车台阶

(二) 车外圆和台阶

车削加工外圆柱面称为车外圆。在工件上车削出不同直径圆柱面的过程称为车台阶。通常把两个相邻圆柱面的直径差小于 5 毫米的称为低台阶,大于 5 毫米的称为高台阶。车台阶实际上是车外圆和端面的组合加工,车削时需兼顾二者的尺寸精度。

车台阶一般使用尖头刀,45°弯头刀和 90°偏刀。前两者主要用于车削(轴径不变的)外圆,和粗加工及半精加工。90°偏刀主要用于加工台阶处为直角的阶梯轴,以及车削细长轴和精加工。常见的外圆车削如图 8-22 所示:

车外圆常须经过粗车和精车两个步骤。粗车的目的是尽快地从毛坯上切去大部分加工余量,使工件接近于最后形状和尺寸,粗车时,对加工质量要求不高,这时切削深度应大些(约为 1~3mm),进给量也可取大一些(0.8~1.2mm)。精车的目的是要保证工件的尺寸精度和表面质量,精车时的切削深度较小(0.1~0.3 mm),进给量也较小(0.05~0.2 mm),因此精车时切削力较小,切削速度可大点,以提高工作效率。粗车和精车开始前,均须进行试车。

车削台阶时,外圆先分层切除,当外径符合要求后对台阶面进行精车。此时刀具应右偏 5°左右使实际工作时主偏角约为 95°。如图 8-23。

为使台阶长度符合要求,可用刀尖预先刻出线痕,作为加工的界限。

(三)、切槽和切断

切槽使用切槽刀,刀的轴线与工件轴线垂直。如图 8-24。切削窄槽时,主切削刃宽度等于槽宽,在横向进刀中一次切出。

切断用切断刀。切断刀形状与切槽刀相似,刀头窄而长,切断时伸进工件内部,散热条件差,排屑困难,易折断。

切断时应注意下列事项:1) 工件用卡盘夹持。工件的切断处应距卡盘近些,以避免工件振动。2) 刀尖与工件的轴线应等高,刀尖过高过低,切断处均将剩有凸起部分,且刀头易折断,如图 8-24。

3) 保证切断时刀架不碰卡盘,在此前提下车刀不应伸出刀架太长。有时可采用分段切断。4) 切断时应降低切削速度和进给速度,以降低切削热,切钢件时应加冷却液。即将切断时,须放慢进给速度,以免刀头折断。

(四)、钻孔和镗孔

用钻头加工内孔称为钻孔。用镗刀加工内孔称为镗孔。

钻孔的方法步骤如下:1) 车平端面,定出中心位置。2) 装夹钻头,锥柄钻头直接装在尾座套筒锥孔内,直柄钻头用钻夹头夹持。3) 调整尾座位置使钻头能进给到所需长度,并使套筒伸出长度较短,固定尾座。4) 开车进行钻削。开始时进给要慢,使钻头准确地钻入。钻削时切削速度不应过大,以免钻头剧烈磨损。钻削过程中应经常退出钻头排屑。钻削碳素钢时,须加切削液,孔将钻通时,应减慢进给速度,以防折断钻头。孔钻通后,先退钻头,后停车。

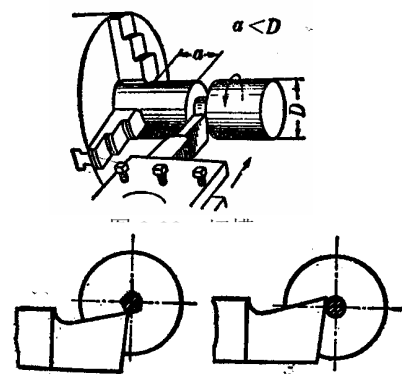


图 8-24 切断刀与工件的位置

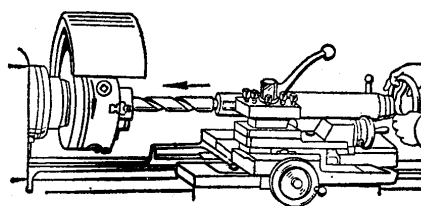


图 8-25 在车床上钻孔

如图 8-25。

镗孔由镗刀伸进孔内进行切削。如图 8-26。镗刀的特点是刀杆细而长，刀头小。镗孔能较好地保证同轴度，常作为孔的粗加工，半精加工和精加工方法。

镗孔的方法步骤如下：1) 选择和安装镗刀 镗通孔应采用通孔镗刀，不通孔用不通孔镗刀。镗刀杆应尽可能粗些，伸出刀架的长度应尽量小，以保证刀杆刚度。刀尖与孔中心等高或略高。刀杆中心线应大致平行于纵向进给方向；2) 选择切削用量和调整车床 镗孔时不易散热，且镗刀刚度较小，又难以加切削液，所以切削用量应比车外圆时小；3) 粗镗时，先试切，调整切深，以自动进给进行切削。必须注意镗刀横向往进给方向与外圆车削时方向相反；4) 精镗时，精镗孔时切深和进给量应更小。当孔径接近最后尺寸时，应以很小的切深重复镗几次，消除孔的锥度。

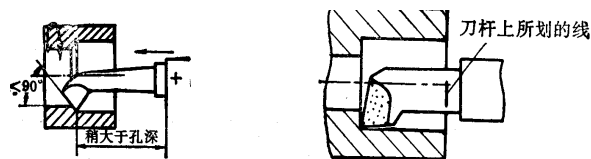
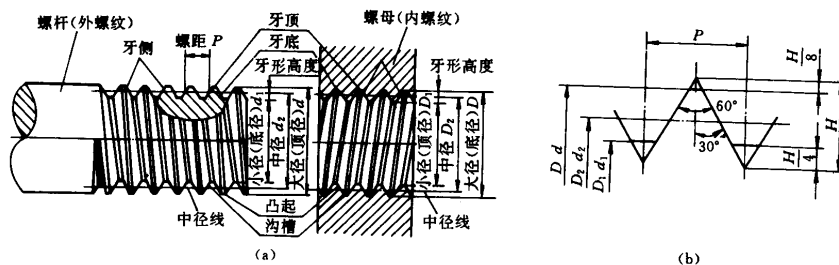


图 8-26 镗孔

(五) 车螺纹

车床能加工各种螺纹。螺纹的种类很多，其中以公制三角螺纹应用最广，称为普通螺纹。

1. 普通螺纹的基本尺寸 GB192-196-81 规定了公称直径自 1~50 毫米普通螺纹的基本尺寸，如图 8-27



(a) 螺纹名称; (b) 螺纹名称要素

图 8-27 普通螺纹名称符号和要素

所示。其中大径、螺距、中径、牙形角是最基本要素，也是车削螺纹时必须控制的部分。

大径 D 、 d ——外螺纹为螺纹外径，用符号 D 表示；内螺纹为螺纹的底径，用符号 d 表示。

中径 D_2 、 d_2 ——指螺纹上螺纹牙厚与槽宽相等处假想圆柱面的直径，是检验的主要控制尺寸。

螺距 P ——指相邻两牙在轴线方向上对应点间的距离，它由机床传动部分控制。

牙形角 α ——指螺纹轴向剖面上相邻两牙侧之间的夹角，由车刀的刀形控制，精度取决于车刀的刃磨和安装。

2. 车削螺纹的传动原理 车削螺纹时必须用丝杠带动刀架进给，使工件每转一周，刀具移动的距离等于螺纹的螺距。此时车床传动如图 8-28。

通常在具体操作时，可按车床进给箱表牌上表示的数值按交换齿轮齿数及工件的螺距值，调整相关的调速手柄位置或更换交换齿轮，使丝杠的转速符合要求，从而车出不同螺距的螺纹。

3. 操作方法 车削螺纹时吃刀量要小，总吃刀量以牙型的高度为准，用中拖板刻度盘或测量工具进行控制。螺纹的牙形是经过多次走刀而形成的。走刀方式有两种，一是正反走刀法，即工件正转进刀，工件反转退刀，开合螺母不提起。此法适用于各种螺纹。另一种是抬闸法，即利用开合螺母的压下和提起完成车削和退刀。此法的特点是，车刀车至终点时，不需反向退刀，而是提起开合螺母，手动退回，再进刀车削。此法操作简单，但只适用于工件螺距与丝杠螺距成整数倍的情况。

4. 螺纹车削注意事项 1) 为保证每次走刀时刀尖都正确落在前次车削好的螺纹槽内，应保持主轴至刀架的传动系统不变，车刀在刀架上的位置不变，工件与主轴的相对位置不变；2) 在车削加工工件的螺距 P 与车床丝杠螺距 $P_{丝}$ 之比不是整数倍时，不能随意提起开合螺母，以免产生乱丝现象；3) 每次进刀要牢记刻度，作为下次进刀的基数；3) 吃刀量大会造成刀尖崩刃或工件被顶弯；4) 无退刀槽时，应注意及时退刀，退刀过早，则螺纹有效长度不够，下次

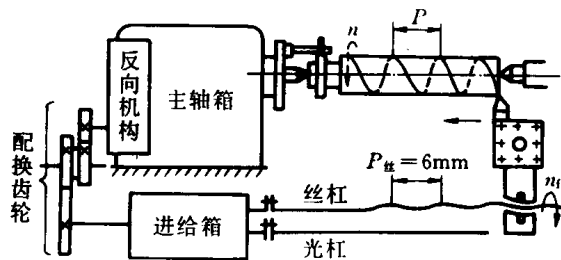


图 8-28 车削螺纹的传动原理

车至此位置时,吃刀量激增,易损坏刀尖。退刀过迟,则车刀会撞上工件,使车刀和工件损坏或报废; 5) 车削内螺纹时,车刀横向进退的方向与车外螺纹相反。

注意,车削螺纹时严格禁止以手触摸工件和用棉纱揩擦转动的螺纹。

对公称直径很小的内螺纹和外螺纹,也可以在车床上用丝锥攻丝或用板牙套丝进行加工。

(六) 车圆锥面

常用车削圆锥面的方法有以下几种:

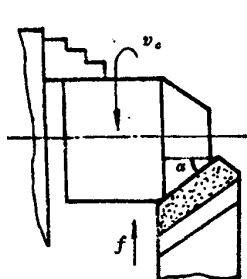


图 8-29 宽刀法车削圆锥面

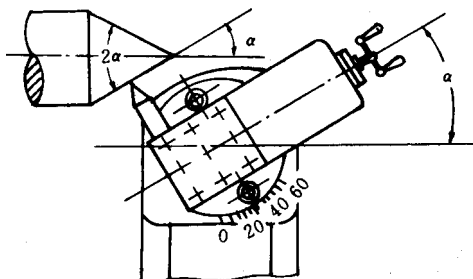


图 8-30 转动小拖板法车削圆锥面

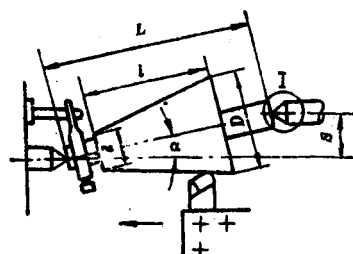


图 8-31 偏移尾架法车削圆锥面

1. 宽刀法 图 8-29 为用宽刀车削圆锥面。这种方法仅适用于车削较短的内、外圆锥面。优点是加工迅速,能加工任意角度的圆锥面。缺点是加工的圆锥面不能太长,切削面积大,要求机床与工件有较好的刚性。

2. 转动小拖板法 图 8-30 为转动小拖板车削圆锥面。此法是将小拖板绕转盘轴线转过 $1/2$ 锥角(见转盘刻度),然后紧固。加工时,转动小拖板手柄,使车刀沿锥面的母线移动,从而加工出所需的圆锥面。

这种方法的优点是调整方便,操作简单,可以加工锥角为任意大小的内外圆锥面,因此应用广泛。缺点是所加工圆锥面的长度受小拖板行程长度的限制,只能加工短锥面。且多为手动进给,故车削时进给量不均匀,表面质量较差。

3. 偏移尾架法 图 8-31 为偏移尾架车圆锥面。方法是把尾架顶尖偏移一个距离 s ,使工件的旋转轴线与机床主轴轴线相交一个角度($1/2$ 圆锥角),利用车刀的纵向进给,车出所需的圆锥面。

这种方法的优点是能自动进给车削较长的圆锥面;缺点是尾架可偏移距离 s 较小,中心孔与顶尖配合不良,特别是当半圆锥角大于 6° 后误差较大,尾架偏移量较大,使中心孔与顶尖的配合变坏,装夹不可靠。故一般用于车削小锥度的长锥面。且精确调整尾架偏移量较费时,也不能加工锥孔。

4. 靠模法 图 8-32 是利用靠模板装置车削圆锥面。对于某些较长的圆锥面和圆锥孔,当其精度要求较高而批量又较大时常用此方法。

靠模板是车床加工圆锥面的附件。一般将靠模板装置底座固定在车床床身的后面,底座上面装有锥度靠模板,它可以绕中心轴线旋转到与工件轴线相交成 $1/2$ 圆锥角的角度。滑板可自由地沿着靠模板滑动,滑板又用固定螺钉与中拖板连接在一起。为了使中拖板能自由滑动,必须把中拖板上的横向进给丝杠与螺母脱开。为了便于调整切削深度,小拖板必须转过 90° 。当大拖板作纵向自动进给时,滑板就沿着靠模板滑动,从而使车刀的运动平行于靠模板,车出所需的圆锥面。

靠模法的优点是可在自动进给条件下车削锥体,能保证一批工件获得稳定一致的合格锥度。但目前已逐步被数控车削锥体所代替。

(七) 车成形面

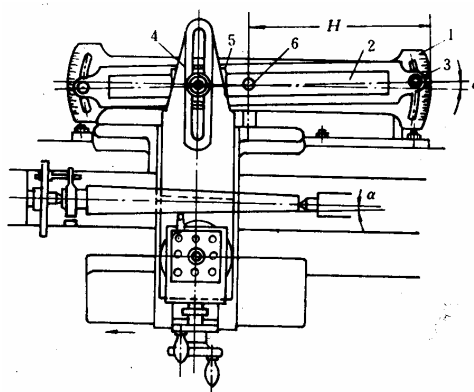


图 8-32 利用靠模板装置车削圆锥面

机械零件中有的表面轮廓不是直线，而是一种曲线，如手柄、球面等。这种带有曲线轮廓的表面称为成形面。车削加工成形面一般可用以下方法：

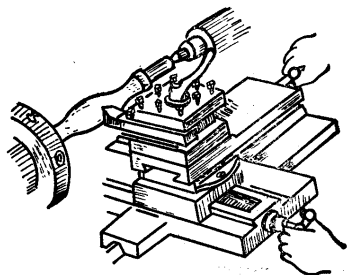


图 8-33 双手控制法车削成形面

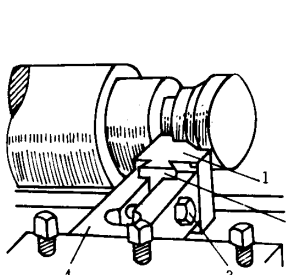


图 8-34 成形刀法车削成形面

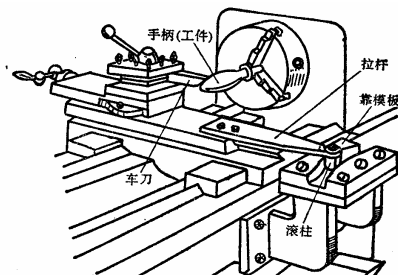


图 8-35 成形刀法车削成形面

1. 双手控制法 如图 8-33 所示。双手控制法是利用双手同时摇动中拖板和小拖板的手柄，控制车刀刀尖运行的轨迹与所需加工成形面的曲线相符，从而车削出成形面。

双手控制法的优点是简单易行，缺点是精确性差，生产效率低，需要较高的操作技能。因此一般用在加工工件数量较少，精度要求不太高的情况。

2. 成形刀法 如图 8-34 所示。成形刀法是利用刀刃形状与成形面轮廓相对应的成形刀进行成形面的车削加工。

用成形刀法车削加工成形面时，车刀只作横向进给。由于切削面积较大，易引起振动，故切削时切削用量必须小，并保持良好的冷却润滑条件。此法的优点是操作方便，能获得准确的表面形状，生产效率高。缺点是受表面形状和尺寸的限制，刀具制备和刃磨困难，所以多在成批加工较短的成形面时使用。

3. 靠模法 图 8-35 所示，用靠模法车削成形面的原理和方法与用靠模板法车圆锥面相似。只是要把滑板换成滚柱，把锥度靠模板换成带有所需曲线的靠模板。这种方法克服了成形刀法的缺点，且加工质量高，生产效率高，广泛地应用于大批量工件的加工生产之中。

（八）滚花

许多工具和零件上都有手握部分，为了便于握持和美观，常在表面滚出花纹。滚花是在车床上用特制的滚花刀挤压工件表面，使其产生塑性变形而形成花纹的一种加工方法。如图 8-36 所示。

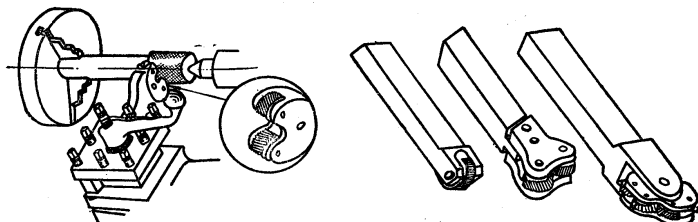


图 8-36 滚花

滚花花纹一般有直纹和网纹两种。因此滚花刀也分为直纹滚花刀和网纹滚花刀两种。滚花前，须将滚花部分的直径车得小于工件所要求尺寸 $0.15\sim 0.8\text{mm}$ 。滚花时滚花刀与工件间的径向压力很大，为避免工件让刀，需把工件装夹得离卡盘近些，必要时可用尾顶尖顶住。在滚花刀接触工件开始吃刀时，必须用较大的径向压力，等吃到一定深度后，再纵向自动进给，纵向来回滚压 $1\sim 2$ 次，直到花纹滚好为止。滚花时工件的转速要低，并充分供给切削液。

第四节 刨削加工

刨削加工是在刨床上用刨刀对工件进行加工的一种切削加工方法。主要用于加工平面（包括水平面、垂直面、斜面）、沟槽（包括矩形槽、T形槽、V形槽、燕尾槽）、和成形面。

刨削加工的尺寸公差等级一般为 $\text{IT}9\sim\text{IT}7$ 。表面粗糙度 R_a 值一般可达 $6.3\sim 1.6\mu\text{m}$ 。刨削加工由于切削速度较低，且回程时不进行切削，因此生产效率较低。但因刨床和刨刀结构简单，加工调整灵活方便，在单件小批量的生产和修配工作中应用较为广泛。

刨削加工的典型零件如图 8-37 所示

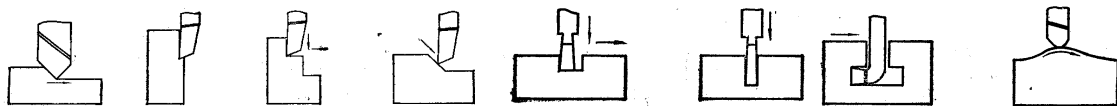


图 8-37 刨削加工的典型零件

一、刨床

常用的刨削设备有牛头刨床、龙门刨床、插床和拉床，其中最常用的是牛头刨床。

(一) 牛头刨床

如图 8-38 是 B6065 牛头刨床的外形图。

牛头刨床主要由床身、滑枕、刀架、工作台、横梁、底座等组成。主要组成部分的名称和作用如下：

1. 床身 它用来支承刨床各部件。其顶面燕尾形导轨供滑枕作往复运动用，垂直面导轨供工作台升降用，床身内内部安装有传动机构。

2. 滑枕 主要用来带动刨刀作直线往复运动。前端安装刀架。

3. 刀架 用于夹持刨刀。摇动上端刀架手柄，可使刨刀上下移动；松开转盘上的螺母，将转盘扳转一定角度，可实现斜向进给。滑板上还安装有可偏转的刀座。抬刀板可以绕刀座横轴向上抬起，刨刀在返回行程时，抬刀板抬起，减少刨刀与工件的摩擦。

4. 工作台 用来安装工件。它可以随横梁作上下调整运动，也可沿横梁作水平方向的移动和进给运动。

(二) 牛头刨床的传动

1. 摇臂机构 摇臂机构安装在刨床内部，其作用是把电机传来的旋转运动变成滑枕的往复直线运动。摇臂机构是由摇臂齿轮和摇臂等组成，如图 8-39。摇臂的下端与支架相连；上端与滑枕的螺母相连。摇臂的滑槽与摇臂齿轮上的偏心滑块相连。当摇臂齿轮由小齿轮带动旋转时，偏心滑块带动摇臂绕支架中心左右摆动，使滑枕作往复直线运动。

刨削前，要调整滑枕的行程大小，使之略大于工件刨削表面长度。调整滑枕行程长度的方法是改变摇臂齿轮上滑块的偏心位置，转动方头便可使滑块在摇臂齿轮的导向槽内移动，从而改变其偏心距。偏心距越大，滑枕的行程越长。

刨削前，还要根据工件的左右位置来调节滑枕的行程位置。方法是先使摇臂停留在极右位置，松开锁紧手柄，用扳手转动滑枕内的圆锥齿轮使丝杆旋转，从而使滑枕右移至合适位置，然后拧紧手柄。

2. 棘轮机构 棘轮机构的作用是将摇臂齿轮轴的旋转运动间歇地传递给横梁内的水平进给丝杆，使工作台在水平方向作自动进给。图 8-40 为棘轮机构工作原理示意图。

棘爪架空套在丝杆轴上，棘轮由键和丝杆轴相连。摇臂轴旋转时，通过齿轮转动，带动偏心销，使连杆拉动棘爪架往复摆动。摇臂齿轮轴每转动一周，刨刀往返一次，棘爪架即往复摆动一次。

棘爪架上装有棘爪，借弹簧压力使棘爪与棘轮保持接触。摇杆向前摆动时，棘爪的垂直面推动棘轮；摇杆向后摆动时，棘爪的斜面从棘轮上

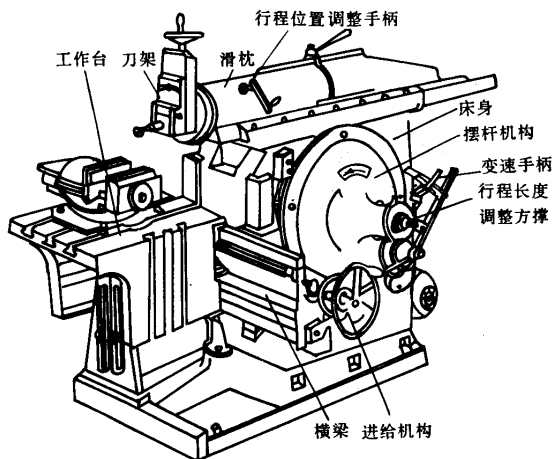


图 8-38 B6065 牛头刨床的外形图

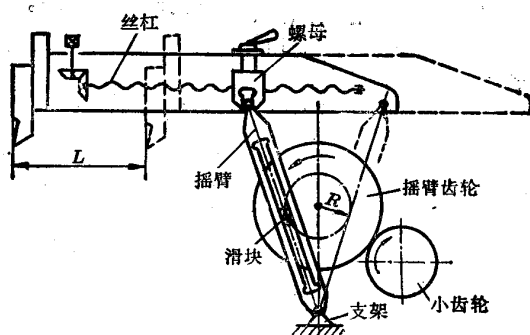


图 8-39 摇臂机构

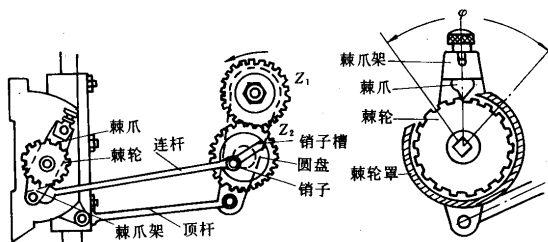


图 8-40 棘轮机构

滑过，而棘轮不动。因此棘爪架每往复摆动一次，即推动棘轮向前转动若干齿，从而使工作台沿水平方向移动一定距离，实现自动进给。改变棘爪的前后方向，即可改变工作台的进给方向。若将棘爪提起，则棘爪与棘轮分离，自动进给停止，此时，可用手动进给。

工作台进给量的大小，可通过调整棘轮罩的位置，即使棘轮罩遮住棘爪摆动范围内的部分棘齿，改变棘爪每次拨动的有效齿数进行改变。调节进给量的另一种方法是改变偏心销的偏心距离，偏心距小，则每次棘爪每次拨动的齿数少，进给量就小；反之进给量就大。

刨削加工的主运动为刨刀的直线运动，刨削为单向加工，向前为加工行程，返回为空程。刨刀每次返回后，工件作横向的间歇移动是进给运动。

二、刨削基本方法

（一）刨刀的安装

刨刀的几何形状与车刀相似，由于是间歇性切削，刨刀要承受较大的冲击力，所以刨刀刀杆的截面积比车刀的大。在刨削较硬的材料（如铸件）时，常将刨刀刀杆做成弓形，防止损坏已加工表面或刀头折断。

刨刀的安装非常简单，正确安装如图 8-41 所示。

（二）工件的安装

工件的安装主要以虎钳安装和工作台安装两种形式；一般小型工件直接用虎钳夹紧，较大的工件可直接安装在工作台上。在虎钳上夹持工件和校正的方法如图 8-42 所示。

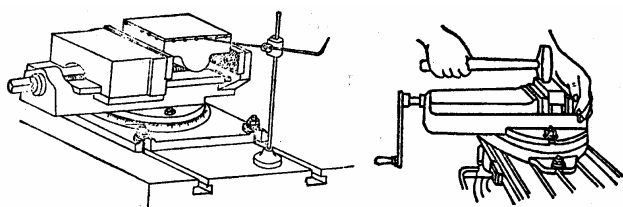


图 8-42 在虎钳上夹持工件和校正的方法

（三）刨水平面

刨水平面可按下列步骤进行：1）装夹工件；2）装夹刨刀；3）调整工作台位置；4）调整滑枕行程长度及位置；5）调整滑枕的往复次数和进给量；6）开车，先手动试切，停车测量尺寸后，利用刀架上的刻度盘调整切削深度。切削量较大时，可分几次进行切削。

当工件表面质量要求较高时，粗刨后还要精刨。精刨的切削深度和进给量应比粗刨小，切削速度可高些。为使工件表面光整，在刨刀返回时，可用手掀起刀座上的抬刀板，使刀尖不与工件摩擦。刨削时一般不用切削液。

一般在牛头刨床上加工工件的切削用量：切削速度 0.2~0.5m/s；进给量 0.33~1mm/str；切削深度 0.5~2mm。

（四）刨垂直面和斜面

刨垂直面，如图 8-44 所示，须采用偏刀进行加工。注意安装偏刀时，刨刀的伸出长度应大于整个刨削面的高度。刨削时，刀架转盘位置应对准零线，使滑板（刨刀）能准确地沿垂直方向移动。刀座必须偏转一定的角度，以使刨刀在返回行程时能自由地离开工件表面，减少刀具的磨损和避免擦伤已加工表面。

安装工件时，注意保证待加工表面与工作台台面垂直，并与切削方向平行。如图 8-45 为用划线找正工件

刨削斜面的方法与刨垂直面基本相同，只是刀架转盘必须扳转一定角度。如图 8-46 所示。

（五）刨沟槽

刨直槽时，可用切槽刀以垂直进给来完成。如图 8-47 所示。

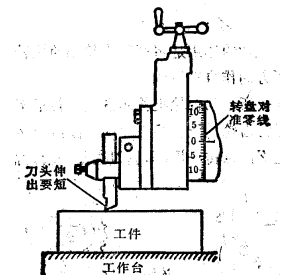


图 8-41 刨刀的安装

在工作台上安装工件，可用压板来固定，应分几次逐渐拧紧各个螺母，以免夹紧力使工件变形。为使工件不致在加工时被推动，应在工件前端加装挡铁。如图 8-43 所示。

如果所加工的工件要求相对两面平行，相邻两面垂直，则应采用平行垫铁和垫上圆棒来保证夹紧。

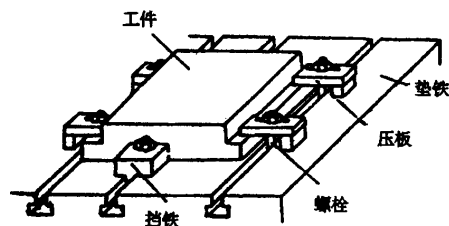
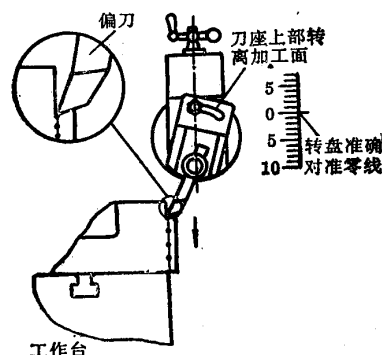


图 8-43 工件前端加装挡铁



工作台

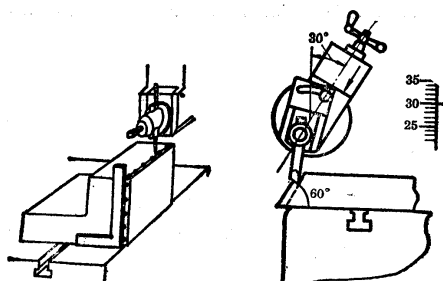


图 8-45 用划线找正工件

图 8-46 刨削斜面

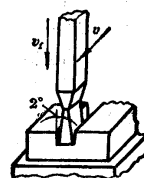


图 8-47 刨直槽

刨 T 形槽时, 要先用切槽刀以垂直进给的方式刨出直槽, 然后用左、右两把弯刀分别加工两侧凹槽, 最后用 45° 刨刀倒角。(如图 8-48) 刨燕尾槽的过程和刨 T 形槽相似, 但在用偏刀刨燕尾槽时, 刀架转盘要偏转一定的角度(如图 8-49)。

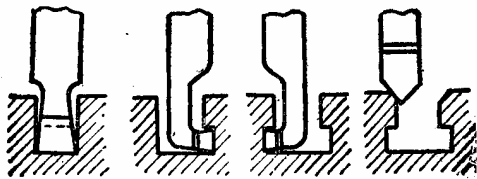


图 8-48 刨 T 形槽

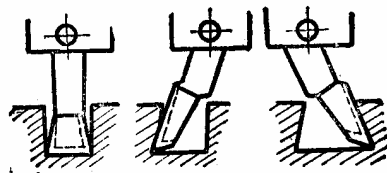


图 8-49 刨燕尾槽

(六) 刨削成形面

成形面是指截面形状为曲线的表面。刨削成形面一般有两种方法。

1. 用划线法加工成形面。(如图 8-50) 即先在工件上划线, 然后按划线进行加工。加工时需用手控制走刀, 对工人的技术水平要求较高, 且加工质量不稳定。此方法主要用于单件加工或加工精度要求不高的工件生产。

2. 用成形刨刀加工成形面。此方法操作简单, 质量稳定, 多用于形状简单, 截面较小, 批量较大的工件的生产。但成形刀制作较困难。

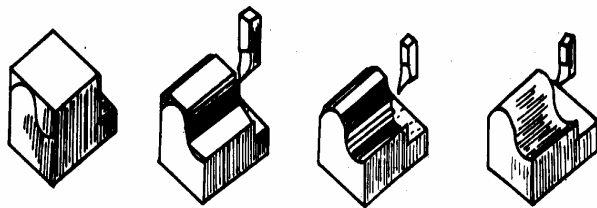


图 8-50 刨削成形面

刨削加工如果加工有一定的批量, 可考虑采用专用夹具, 以提高生产效率; 对于单件或小批量, 应尽量采用通用夹具, 节约生产成本。从工艺上应注意, 为保证各表面之间的垂直和平行, 必须以先加工出来的平面为基准进行定位和加工。

三、其它刨削设备简介

(一) 龙门刨床及其工作

如图 8-51 所示为龙门刨床的外形图。龙门刨床是用来刨削大型零件(如箱体)的刨床。对中、小型零件, 也可以一次装夹几个零件, 用几把刨刀同时进行刨削。

龙门刨床主要由床身、立柱、横梁、工作台、两个垂直刀架、两个侧刀架等组成。进行加工时, 工件装在工作台上, 工作台沿床身导轨作直线往复运动。横梁上的垂直刀架和立柱上的侧刀架都可以垂直或水平进给。刨削斜面时, 可以将垂直刀架转动一定的角度。当刨削高度不同的工件时, 可调整横梁在立柱上的高低位置。龙门刨床的工作台由一套复杂的电气控制系统, 可进行无级调速。

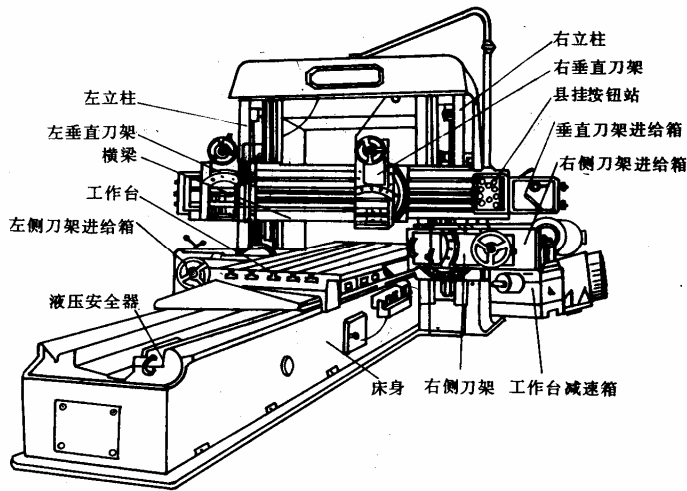


图 8-51 龙门刨床的外形图

(二) 插床

如图 8-52 所示为插床的外形图。插床主要用于单件、小批量生产中插削直线的成形内、外表面, 如键槽、方孔等。

插床主要由床身、底座、工作台、滑枕等组成。加工时, 插刀安装在滑枕的刀架上, 由滑枕带动作上下的直线往复运动。工件安装在工作台上, 可根据需要作纵向、横向和圆周的进给运动。工作台的旋转运动可由分度盘控制进行分度, 如加工花键等。

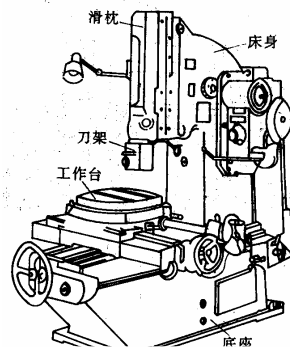


图 8-53 拉刀的组成



图 8-54 拉削加工原理

似刨削。拉刀的组成如图 8-53 所示,其切削部分由一系列高度依次增加的刀齿构成,切削时,拉刀相对工件作直线移动,拉刀的每一个刀齿依次从工件上切下一层材料,当全部刀齿通过后,即完成了工件的切削。由此可见,拉削的主运动为拉刀的移动,进给运动由拉刀切削齿递增的齿升量替代,如图 8-54。

第五节 铣削加工

在铣床上用铣刀对工件进行切削加工的过程称为铣削。铣削可用来加工平面、台阶、斜面、沟槽、成形表面、齿轮和切断等。还可以进行钻孔和镗孔加工。

铣削加工的尺寸公差等级一般可达 IT9~IT7,表面粗糙度一般为 Ra 值 6.3~1.6 μ m。

铣刀是旋转使用的多齿刀具。铣削时,每个刀齿是间歇的进行切削,刀刃的散热条件好,可以采用较大的切削用量,是一种高生产率的加工方法。特别适用于加工平面和沟槽。

一、铣床

铣床的种类很多,常用的是卧式万能升降台铣床和立式升降台铣床,以及数控铣床等。铣床在机械加工设备中仅次于车床,约占机床总数的 25%。

(一) 卧式万能升降台铣床

卧式万能升降台铣床简称万能铣床,它是铣床中应用最多的一种。图 8-55 所示为 X6132 型卧式万能铣床。其主要组成部分:

1. 床身 床身用来固定和支承铣床各部件。顶面上有供横梁移动用的水平导轨。前壁有燕尾形的垂直导轨,供升降台上下移动。内部装有主电动机,主轴变速机构,主轴,电器设备及润滑油泵等部件。

2. 横梁 横梁一端装有吊架,用以支承刀杆,以减少刀杆的弯曲与振动。横梁可沿床身的水平导轨移动,其伸出长度由刀杆长度来进行调整。

3. 主轴 是用来安装刀杆并带动铣刀旋转的。主轴是一空心轴,前端有 7:24 的精密锥孔,其作用是安装铣刀刀杆锥柄。

4. 纵向工作台 纵向工作台由纵向丝杠带动在转台的导轨上作纵向移动,以带动台面上的工件作纵向进给。台面上的 T 形槽用以安装夹具或工件。

5. 横向工作台 横向工作台位于升降台上的水平导轨上,可带动纵向工作台一起作横向进给。

6. 转台 转台可将纵向工作台在水平面内扳转一定的角度(正、反均为 0~45°),以便铣削螺旋槽等。具有转台的卧式铣床称为卧式万能铣床。

7. 升降台 升降台可以带动整个工作台沿床身的垂直导轨上下移动,以调整工件与铣刀的距离和垂直进给。

8. 底座 底座用以支承床身和升降台,内盛切削液。

(二) 立式升降台铣床

立式升降台铣床简称立式铣床(图 8-56),立式铣床与卧式铣床的主要区别是主轴与工作台台面相垂直。有时根据加工的需要,可以将立铣头(包括主轴)左右扳转一定的角度,以便加工斜面等。此外,在卧式万能铣床上,如将横梁移至床身后方,装上立铣头附件,即可作为立式铣床使用。

立式铣床,由于操作时观察、检查和调整铣刀位置等都比较方便,又便于装夹硬质合金端铣刀进行高速切削,生产率高,故应用广泛。

二、铣削常用附件

(一) 分度头及其工作

分度头是铣床的重要附件之一,铣削各种齿轮、多边形、花键等都需要使用分度头进行分度。

1. 分度头的结构 分度头有许多类型,图 8-57 所示为最常见的万能分度头的外型图。它由底座、转动体、主轴、分度盘等组成。工作时,底座用螺钉紧固在工作台上,并利用导向键与工作台上的一条 T 形

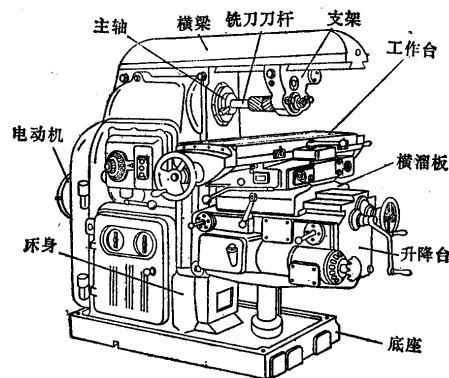


图 8-55 X6132 型卧式万能铣床

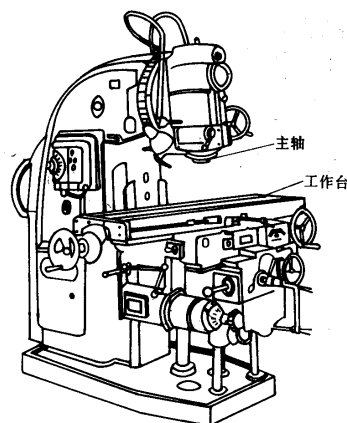


图 8-56 立式升降台铣床

槽相配合, 保证分度头主轴方向平行于工作台纵向, 分度头主轴前端锥孔内可安装顶尖, 用来支持工件, 主轴外部有螺纹便于旋转卡盘等来装夹工件。分度头转动体可使主轴转至一定角度进行工作。分度头转动的位置和角度由侧面的分度盘控制。

2. 分度头的功用 分度头的功用有三方面: 1) 把工件安装成需要的角度, 如铣削斜面等; 2) 进行分度; 3) 铣螺旋槽时, 配合工作台的纵向移动, 使工件连续转动。

3. 分度原理 图 8-57 所示为分度头的传动系统。主轴上固定有齿数为 40 的蜗轮, 与之相啮合的蜗杆的头数为 1, 当拔出定位销, 转动分度手柄时, 通过一对传动比为 1:1 的螺旋齿轮的传动, 使蜗杆转动, 从而带动蜗轮(主轴)进行分度。由其传动关系可知, 当分度手柄转动一周时, 主轴转动 $1/40$ 周, 或分度手柄转数等于 40 倍的主轴(工件)转数。

若工件的等分数为 Z , 则每次分度时, 工件应转过 $1/Z$ 周。

因此, 分度手柄每次转数 $n = 40 \times \frac{1}{Z}$ 周。

4. 分度方法

根据分度头的工作原理, 通过分度盘准确控制手柄的转数, 即可实现分度。分度盘正反两面上有许多孔数不同的孔圈。如国产 FW250 型分度头备有两块分度盘, 其各圈孔数如下:

第一块正面: 24、25、28、30、34、37; 反面: 38、39、41、42、43。

第二块正面: 46、47、49、51、53、54; 反面: 57、58、59、62、66。

例: 铣削六方时, 工件的等分数 Z 为 6。

则分度手柄每次转数 $n = 40 \times 1/6 = 6 \times 2/3$ 周。此时可利用分度盘上孔数为 24 的孔圈(或孔数可被分母 6 除尽的其它孔圈), 使分度手柄旋转 $6 \times 2/3$ 周, 即转动手柄 $6 \times 16/24$ 周。操作步骤为: 1) 将定位销调整至分度盘上 24 的孔圈上; 2) 转 6 圈后再转过 16 个孔距(第 17 孔);

这样, 主轴每次就可准确地转过 $1/6$ 周。

在分度盘上装有两个扇脚, 其作用是为了避免转动分度手柄时发生差错和节省分度时间, 两个扇脚之间的角度大小可任意调节。

四、铣削的基本方法

(一) 铣平面

铣平面可用卧式铣床或立式铣床进行铣削。

在卧式铣床上铣平面应使用圆柱铣刀。圆柱铣刀分为直齿和螺旋齿两种, 由于直齿切削每次只有一个齿进行切削, 不如螺旋齿切削平稳, 因而多用螺旋齿圆柱铣刀铣削平面。

用圆柱铣刀进行加工时, 有两种不同的铣削方式, 即逆铣和顺铣。如图 8-58 所示。逆铣指铣刀的旋转方向和工件的进给方向相反, 而顺铣则方向相同。两者相比, 顺铣更有利于高速切削, 更能提高工件表面的加工质量, 并有助于工件的夹持; 但顺铣对消除工作台进给丝杆和螺母之间的间隙要求较高, 并要求工件没有硬皮; 因此, 在一般情况下, 大多采用逆铣进行加工。

圆柱铣刀在选用时应注意铣刀的宽度要大于所铣平面的宽度; 螺旋齿圆柱铣刀的螺旋线方向应使铣削时产生的轴向切削力指向主轴承方向。

在立式铣床上铣平面应使用端铣刀。用端铣刀铣平面与用圆柱铣刀铣平面相比, 其切削厚度变化较小, 同时参与切削的刀齿较多, 切削较平稳; 端铣刀的主切削刃担负着主要的切削, 而副切削刃具有修光的作用, 表面加工质量较好; 另外端铣刀易于镶装硬质合金刀齿, 刀杆比圆柱铣刀的刀杆短, 刚性较好, 能减少加工中的振动, 提高加工质量。因此广泛地用于铣削平面。

1. 铣台阶面 铣床上铣台阶面主要有两种方法。一是在卧式铣床上用三面刃盘铣刀进行铣削; 二是

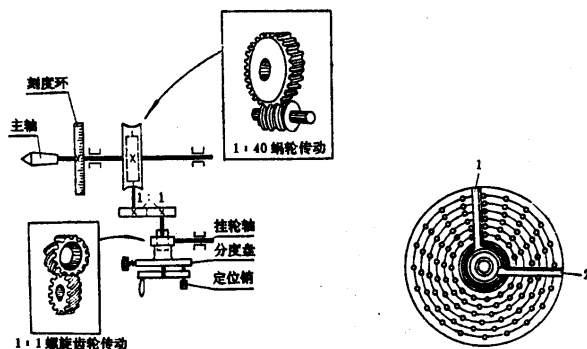


图 8-57 分度头的传动系统

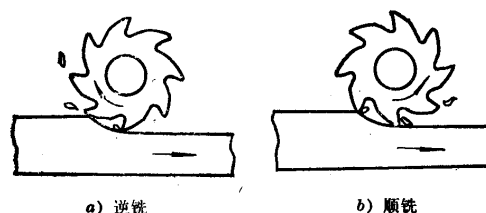


图 8-58 逆铣和顺铣

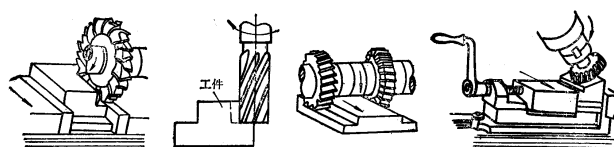


图 8-59 铣台阶面

在立式铣床上用大直径的立铣刀进行铣削。在成批的生产中，则可用组合铣刀同时铣削几个台阶面。如图 8-59。

2. 铣斜面 铣削斜面的方法主要有四种：（如图 8-60）。1）立式铣床上把铣刀转成所需的角度的进行铣削，或在装有立铣头的卧式铣床上使用该方法。2）工件转成所需的角度的进行铣削。先在工件上将要加工的斜面进行划线，然后按照划线在平口钳上或工作台校平工件，夹紧工件即可进行铣削。也可利用分度头或可转动的夹持附件使工件转成所需的角度的进行铣削。3）角度铣刀直接铣削斜面。条件是必须有角度的符合的角度铣刀。

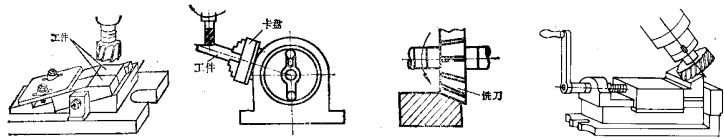


图 8-60 铣斜面

3. 铣沟槽 各种沟槽在铣床上都可以进行加工。常见的有轴上的键槽，工件上的直槽、T 形槽、燕尾槽、螺旋槽等。

（1）铣键槽 轴上常见的键槽有开口键槽和封闭键槽。开口键槽一般在卧式铣床上用三面刃盘铣刀进行铣削。如图 8-61。封闭键槽一般在立式铣床上用键槽铣刀进行铣削。

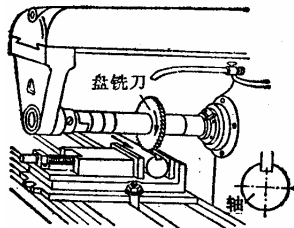


图 8-61 铣开口键槽

（2）铣直槽、T 形槽和燕尾槽 铣直槽可在卧式铣床上用三面刃盘铣刀进行铣削，或在立式铣床上用立铣刀进行铣削。如图 8-62 所示。

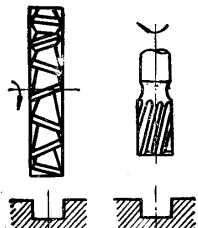


图 8-62 铣直槽

铣 T 形槽和燕尾槽的方法是：先在工件上铣出直槽，然后在立式铣床上用专门的 T 形槽铣刀和燕尾槽铣刀进行加工。如图 8-63 所示。

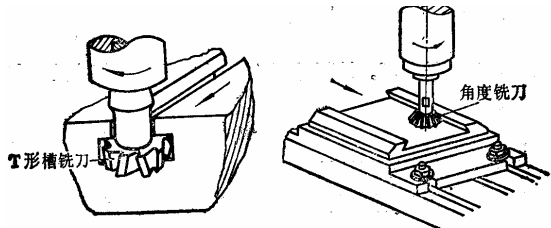


图 8-63 铣 T 形槽和燕尾槽

（3）铣螺旋槽 铣螺旋槽常用分度头在万能铣床上进行，其加工原理与车床上车螺纹的原理相似。铣削时，工件安装在分度头和尾架之间，并使铣刀的旋转平面和螺旋槽的螺旋线方向一致，即将工作台偏转一个螺旋角 β 。铣螺旋槽要求工件纵向进给一个导程时工件应转过一圈，因此必须在分度头后伸出的挂轮轴与工作台纵向进给丝杆之间配上交换齿轮 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 ，松开分度盘的固定螺钉，使工作台纵向进给的同时，通过交换齿轮和分度头带动工件做旋转运动。如图 8-64 所示。注意，铣沟槽时，由于排屑和散热困难，进给量要小，最好采用手动进给，并充分使用切削液。

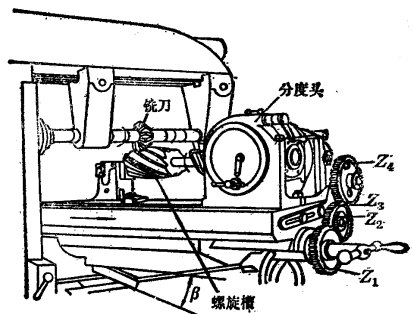


图 8-64 铣螺旋槽

（五）铣成形面和曲面

1. 铣成形面 成形面一般在卧式铣床上用成形铣刀进行加工。成形铣刀的形状要与成形面的形状相吻合，利用成形铣刀在工件材料上的铣削，形成与成形铣刀形状相吻合的成形面。如图 8-65 所示。

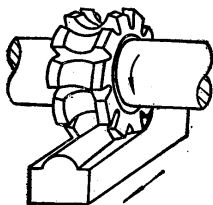


图 8-65 铣成形面

2. 铣曲面 铣曲面一般在立式铣床用立铣刀铣削。方法有三种：

（1）先在工件上进行划线，然后移动工作台沿工件上的线迹铣削。但此法只能用于要求不高的曲面加工。如图 8-66 所示。

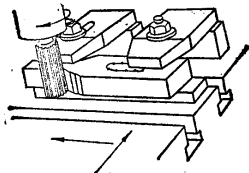


图 8-66 按划线铣曲面

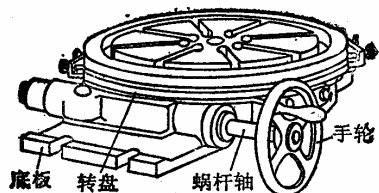


图 8-67 圆形工作台

(2) 利用圆形工作台的工作原理铣曲面，此方法主要用于加工圆弧曲面。工件应安装在转盘的中心，按划线用逆铣法进行铣削。如图 8-67 所示。

(3) 对于大批量生产，可用靠模法铣曲面。靠模安装在工件的上方，铣削时，立铣刀上端的圆柱部分始终与靠模接触，从而铣削出与靠模形状相同的曲面。

第六节 齿形加工

齿轮的齿形加工方法有两大基本类型。一种叫成形法（也称仿形法）；另一种叫展成法（也称范成法）。成形法一般在铣床上进行，而展成法则只能在专用的齿轮加工设备上进行，如滚齿机和插齿机等。

一、成形法

用与被加工齿轮齿槽形状相符的成形铣刀在齿坯上加工出齿形的方法，称为成形法。可在卧式铣床上用盘状铣刀或在立式铣床上用指状铣刀进行加工。如图 8-68 所示。

铣齿轮的齿形属于铣成形面，因此要用专门的齿轮铣刀——模数铣刀，可根据齿轮的模数和齿数选择模数铣刀。同一模数的齿轮铣刀由 8 个号组成一组，每一号铣刀仅适用于一定齿数范围的齿轮，如表 8-4 所示。

表 8-4 铣刀号数与应用齿数范围

铣 刀 号	1	2	3	4	5	6	7	8
加工齿数范围	12 - 13	14 - 16	17 - 20	21 - 25	26 - 34	35 - 54	55 - 135	135 以上及齿条

加工齿形，每次只能加工一个齿槽。完成一个齿槽，必须对工件进行一次分度，再接着铣下一个齿槽，直到完成整个齿轮。所以，铣齿轮时，齿坯要套在芯轴上，用分度头卡盘和尾架顶尖装夹。

铣齿轮的铣削深度可用下式计算： 齿深 = $2.25 \times \text{模数}$

齿深不大时，可一次粗铣完，留下大约 0.2mm 的精铣余量；齿深较大时，应分几次进行粗铣。

使用成形法加工齿轮的特点是：1) 不需专用设备，刀具成本低。2) 铣刀每铣一次，都要重复一次分度、切入、退刀的过程，因此生产效率较低。3) 加工精度低，一般加工精度为 9~11 级。精度不高的原因是同一模数的铣刀只有 8 把，每号铣刀的刀齿轮廓只与该号铣刀规定的铣齿范围内最少齿数齿轮的理论轮廓相一致，其它齿数的齿轮只能获得近似的齿形。此外分度的误差也较大。

因此，成形法加工齿轮一般多用于修配和加工单件某些转速不高且精度要求较低的齿轮。

二、展成法

利用齿轮刀具与被切齿轮的啮合运动切出齿形的方法，称为展成法。常见的有滚齿加工和插齿加工。

(一) 滚齿加工

图 8-69a 为滚齿加工的工作原理。滚齿时切削齿坯的刀具为滚刀，由于滚刀的螺旋升角较大，所以外形像一个蜗杆，滚刀在垂直于螺旋槽方向开槽，形成若干切削刃，其法向剖面具有齿条形状。因此当滚刀连续旋转时，刀齿可视为一个无限长的齿条的移动，如图 8-69b。同时刀齿由上而下的进行切削，保持齿条（滚刀）和齿坯之间的啮合关系，滚刀就可在齿坯上加工出渐开线齿形，图 8-69c。

滚齿加工的精度一般为 8~7 级，表面粗糙度 R_a 为 $3.2 \sim 1.6 \mu m$ 。

滚齿加工是在滚齿机上进行的，图 8-70 为滚齿机外形图。滚刀安装在刀架上的滚刀杆上，刀架可沿着立柱垂直导轨上下移动。工件则安装在心轴上。

滚齿时滚齿机必须有以下几个运动：

1. 切削运动（主运动） 即滚刀的旋转运动，其切削速度由变速齿轮的传动比决定。

2. 分齿运动 即工件的旋转运动，其运动的速度必须和滚刀的旋转速度保持齿轮与齿条的啮合关系。其运动关系由分齿挂轮的传动比来实现。对于单线滚刀，当滚刀每转一转时，齿坯需转过一个齿的分度角度，即 $1/z$ 转（ z 为被加工齿轮的齿数）。

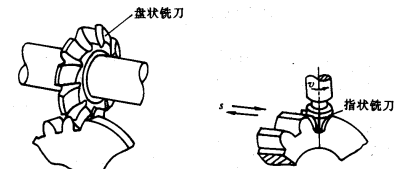


图 8-68 用盘状铣刀和指状铣刀铣齿轮

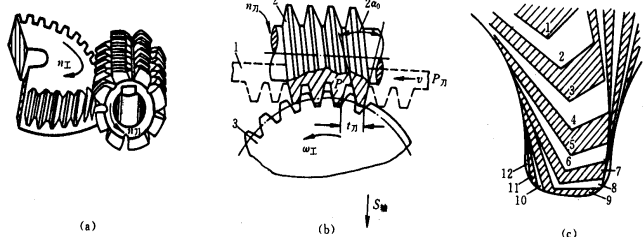


图 8-69 滚齿加工的工作原理

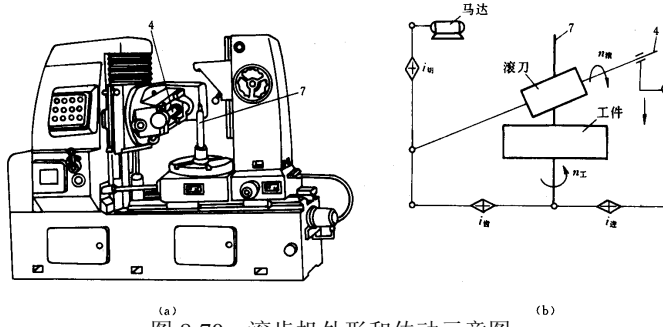


图 8-70 滚齿机外形和传动示意图

3. 垂直进给运动 即滚刀沿工件轴线自上而下的垂直移动, 这是保证切出整个齿宽所必须的运动, 由进给挂轮的传动比再通过与滚刀架相连接的丝杆螺母来实现。

在滚齿时, 必须保持滚刀刀齿的运动方向与被切齿轮的齿向一致, 然而由于滚刀刀齿排列在一条螺旋线上, 刀齿的方向与滚刀轴线并不垂直。所以, 必须把刀架扳转一个角度使之与齿轮的齿向协调。滚切直齿轮时, 扳转的角度就是滚刀的螺旋升角。滚切斜齿轮时, 还要根据斜齿轮的螺旋方向, 以及螺旋角的大小来决定扳转角度的大小及扳转方向。

齿轮滚刀是一种专用刀具, 每把滚刀可以加工模数相同而齿数不等的各种大小不同的直齿或斜齿渐开线外圆柱齿轮。

在滚齿机上除加工直齿、斜齿外圆柱齿轮外, 也可以加工蜗轮、链轮。但不能加工内齿轮。对于加工双联齿轮和三联齿轮它也受到许多限制。

(二) 插齿加工

图 8-71 为插齿加工原理和插齿机外形图。

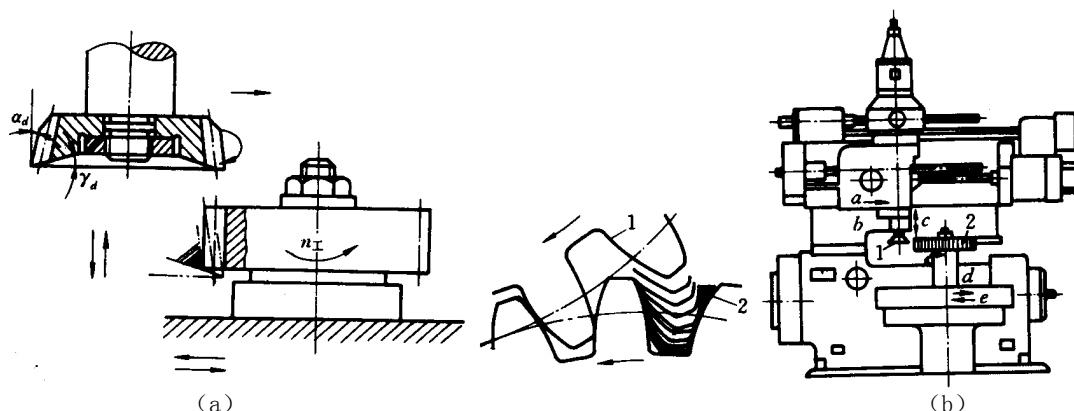


图 8-71 插齿加工原理和插齿机外形图

它是利用一对轴线相互平行的圆柱齿轮的啮合原理进行加工的。插齿刀的外形象一个齿轮, 在每一个齿上磨出前角和后角以形成刀刃, 切削时刀具作上下往复运动, 从工件上切下切屑。为了保证在齿坯上切出渐开线的齿形, 在刀具作上下往复运动时, 通过机床内部的传动系统, 强制要求刀具和被加工齿轮之间保持着一对渐开线齿轮的啮合传动关系。在刀具的切削运动和刀具与工件之间的啮合运动的共同作用下, 工件齿槽部位的金属被逐步切去而形成渐开线齿形。

在插齿加工中, 一种模数的插齿刀可以加工出模数相同而齿数不同的各种齿轮。

插齿多用于内齿轮、双联齿轮、三联齿轮等其它齿轮加工机床难于加工的齿轮加工作。插齿加工的精度一般为 IT8~7 级, 表面粗糙度 R_a 约为 $1.6 \mu m$ 。

插齿加工是在插齿机上进行的, 如图 8-71b 所示为插齿机外形示意图。

插削圆柱直齿轮时, 插齿机必须有下列几个运动:

1. 切削运动(主运动) 插齿刀的往复运动, 通过改变插齿机上不同齿轮的搭配获得不同的切削速度。
2. 周向进给运动 又称圆周进给运动, 它控制插齿刀转动的速度。
3. 分齿运动 保证刀具转过一齿时工件也相应转过一齿的展成运动, 它是实现渐开线啮合原理的关键。

如插齿刀的齿数为 Z_1 , 被切齿轮的齿数为 Z_2 ; 插齿刀的转速为 $n_1(r/min)$, 被切齿轮的转速为 $n_2(r/min)$, 则它们之间应保证如下的传动关系: $n_2/n_1 = Z_1/Z_2$

4. 径向进给运动 插齿时, 插齿刀不能一开始就切至齿全深, 需要逐步地切入, 因此在分齿运动的同时, 插齿刀需沿工件的半径方向作进给运动, 径向进给运动由专用凸轮来控制。

5. 退刀运动 为了避免插齿刀在回程中与工件的齿面发生摩擦, 由工作台带动工件作水平退让运动, 当插齿刀工作行程开始前, 工作台又带动工件复位的运动。

第七节 磨削加工

磨削加工是指利用砂轮作为切削工具，对工件的表面进行加工的过程。磨削是零件精密加工的主要方法之一，磨削加工的精度可达到 IT7~IT5，表面粗糙度值 R_a 为 $0.8\sim 0.2\mu\text{m}$ ，精磨后还可获得更小的表面粗糙度值。并可对淬火钢、硬质合金等普通金属刀具难于加工的高硬度材料进行加工。

磨削加工的用途很多，利用不同类型的磨床可以分别对外圆、内孔、平面、沟槽成形面（齿形、螺纹等）和各种刀具进行磨削加工。此外，还可用于毛坯的预加工和清理工作。图 8-72 为常见的磨削加工。

一、磨床

磨床根据用途的不同分为万能外圆磨床、普通外圆磨床、内圆磨床，平面磨床、无心磨床、工具磨床、齿轮磨床和螺纹磨床等多种类型。

下面以较常见的 M1432A 型万能外圆磨床（如图 8-73）为例进行介绍。

（一）M1432A 型万能外圆磨床的主要组成部分及功用

1. 床身 床身用来安装各部件。上部装有机工作台和砂轮架，床身上的纵向导轨供工作台移动用，横向导轨供砂轮架移动用，床身内部安装液压传动系统。

2. 砂轮架 砂轮架用来安装砂轮，由单独的电动机通过皮带传动带动砂轮高速旋转。砂轮架可在床身后部的导轨上作横向移动，移动方式有间歇进给、手动进给、快速趋近工件和退出。砂轮架可绕垂直轴旋转一定角度。

3. 头架 头架上有主轴，主轴端部可以安装顶尖、拨盘或卡盘，以便装夹工件。主轴由主轴电动机通过皮带传动机构带动，通过变速机构工件可获得不同的转动速度。头架可在水平面内偏转一定的角度。

4. 尾架 尾架的套筒内有顶尖，用来支承工件的另一端。尾架可在纵向导轨上移动位置，以适应工件的不同长度。扳动尾架上的杠杆，顶尖套筒可伸缩，方便装卸工件。

5. 工作台 工作台由液压驱动沿着床身的纵向导轨上做直线往复运动，使工件实现纵向进给。工作台可进行手动或自动进给。在工作台前侧面的 T 形槽内，装有两个换向挡块，用以操纵工作台自动换向。工作台有上、下两层，上层可在水平面内偏转一个不大的角度（ $\pm 8^\circ$ ），以便磨削圆锥面。

6. 内圆磨头 内圆磨头是磨削内圆表面用的，在它的主轴上可装上内圆磨削砂轮，由另一个电动机带动。内圆磨头绕支架旋转，使用时翻下，不用时翻向砂轮架上方。

（二）液压转动原理

磨床采用液压传动是因为其工作平稳，无冲击振动。图 8-74 所示为磨床液压转动原理的示意图。在整个系统中，有油泵、油缸、转阀、安全阀、节流阀、换向滑阀、操纵手柄等组成元件。工作台的往复运动按下述循环进行：

工作台向左移动时（图中实线位置）：

高压油：油泵——转阀——安全阀——节流阀——换向滑阀——油缸右腔。

低压油：动力油缸左腔——换向滑阀——油池。

工作台向右移动时（图中虚线位置）：

高压油：油泵——转阀——安全阀——节流阀——换向滑阀——油缸左腔。

低压油：动力油缸右腔——换向滑阀——油池。

操纵手柄由工作台侧面左右挡块推动。工作台的行程长度由改变挡块的位置来调整。当转阀转过 90°

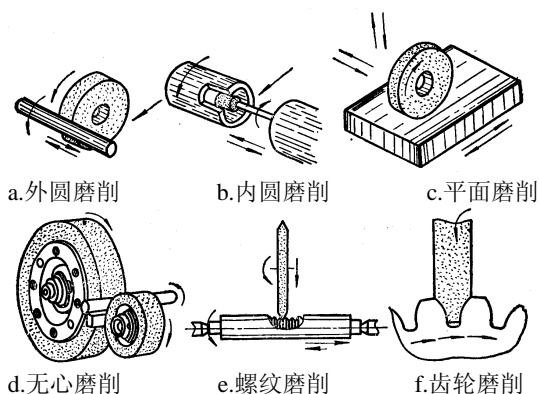


图 8-72 常见的磨削加工

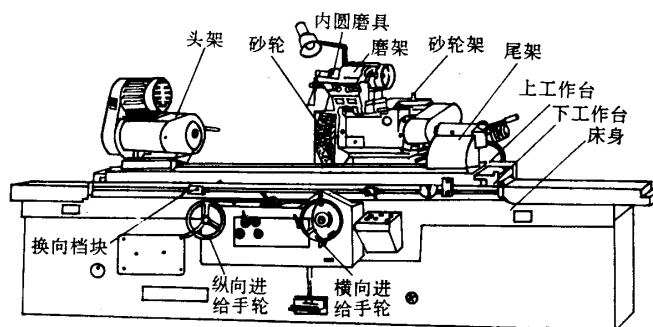


图 8-73 M1432A 型万能外圆磨床外型图

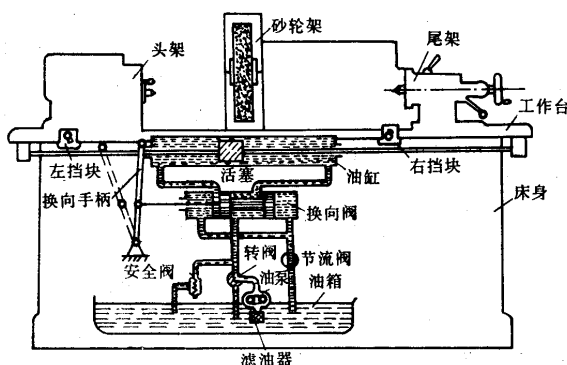


图 8-74 磨床液压转动原理的示意图

时，油泵中的高压油全部流回油池，工作台停止移动。安全阀的作用是使系统中维持一定的压力，并把多余的高压油排入油池。

三、砂轮

（一）砂轮的组成

砂轮是磨削加工的主要切削工具。它是把磨粒（砂粒）用结合剂粘合在一起进行焙烧而形成的疏松多孔体，可根据需要的不同制成各种形状和尺寸，也满足加工要求。常见的砂轮如下图：

图 8-75 为磨削加工原理和常见的砂轮形状。

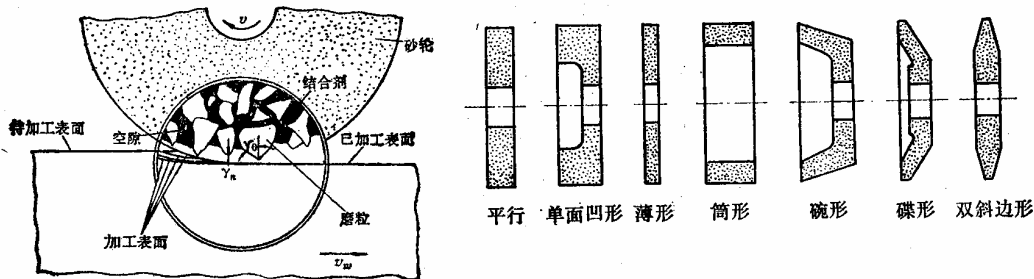


图 8-75 磨削加工原理和常见的砂轮形状

在磨削加工中磨粒直接担负切削任务，因此需要磨粒具有一定的刚度和强度。常用的磨粒有两类：刚玉类（ Al_2O_3 ）和碳化硅类。刚玉类韧性好，适用于磨削钢料及一般刀具；碳化硅类硬度高但性脆，适用于磨削铸铁、青铜等脆性材料及硬质合金。

磨粒的大小用粒度表示，粒度愈大，磨粒愈粗。粗磨粒用于粗加工，细磨粒则用于精加工。

硬度是指磨粒在磨削力的作用下，从砂轮上脱落下来的难易程度，与磨粒本身的硬度无关。磨硬金属材料时，选用较软的砂轮；磨软金属材料时，选用较硬的砂轮。

砂轮中磨粒、结合剂、空隙三者体积的比例关系称为砂轮的**组织**，磨粒所占的体积愈大，砂轮的**组织**愈紧密；反之，砂轮的**组织**愈疏松。粗磨时，选用组织较疏松的砂轮；精磨时，选用组织较紧密的砂轮。

（二）砂轮的**安装与修整**

砂轮的**安装**如图 8-76 所示。由于砂轮工作转速较高，在**安装**砂轮前应对砂轮进行外观检查和平衡试验，确保砂轮在工作时不因有裂纹而分裂或工作不平稳。

砂轮经过一段时间的工作后，砂轮工作表面的磨粒会逐渐变钝，表面的孔隙被堵塞，切削能力降低；同时砂轮的**正确几何形状**也被破坏。这时就必须对砂轮进行修整。修整的方法是用金刚石将砂轮表面变钝了的磨粒切去，以恢复砂轮的切削能力和正确的几何形状。如图 8-77 所示：

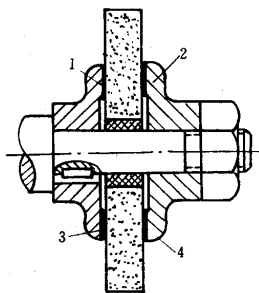


图 8-76 砂轮的**安装**

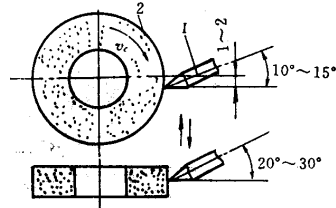


图 8-77 砂轮的**修整**

四、磨削的基本方法

（一）磨外圆

工件外圆表面的磨削一般在普通外圆磨床或万能外圆磨床上进行。

1. 磨外圆时工件的**安装** 磨外圆时工件的**安装**与车削外圆时相类似，最常用的方法是用两顶尖支承工件，或一端用卡盘夹持，另一端用顶尖支承工件。为减小**安装**的误差，在磨床上使用的顶尖都是死顶尖。对内外孔同心度要求较高的工件，常**安装**在芯轴上进行磨削加工。

磨削加工属于精加工，对工件的**安装精度**要求较高。因此常常在加工前对工件中心孔进行修研，其方法是在车床或钻床上用四棱硬质合金顶尖进行挤研。当中心孔较大且修研精度要求较高时，必须选用油石顶尖或铸铁顶尖作前顶尖，一般顶尖作后顶尖，分别对工件的

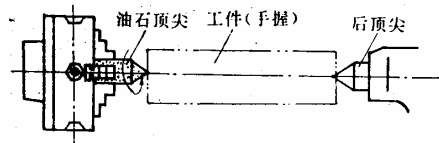


图 8-78 中心孔修研方法

中心孔进行修研。进行修研时，头架带动前顶尖低速转动，手握工件使之不旋转。如图 8-78 所示。

2. 磨削方法 外圆磨削的常用方法有纵磨法和横磨法两种。

(1) 纵磨法(如图 8-79) 纵磨法用于磨削长度与直径之比较大的工件。磨削时，砂轮高速旋转，工件低速旋转并随工作台轴向移动；在工作台改变移动方向时，砂轮作径向进给。纵磨法的特点是可磨削长度不同的各种工件，加工质量好。常用于单件、小批量的生产和精磨加工。

(2) 横磨法(如图 8-80) 横磨法又称径向磨削法。用于工件刚性较好，磨削表面的长度较短的情况。磨削时，选用宽度大于待加工表面长度的砂轮，工件不进行轴向的移动，砂轮以较慢的速度作连续径向进给或断续的径向进给。横磨法的特点是充分发挥了砂轮的磨削能力，生产效率高，特别适用于较短磨削面和阶梯轴的磨削，缺点是砂轮与工件的接触面积大，工件易发生变形和表面烧伤。

另外，为了提高生产效率和质量，可采取分段横磨和纵磨结合的方法进行加工，此法称为综合磨削法。

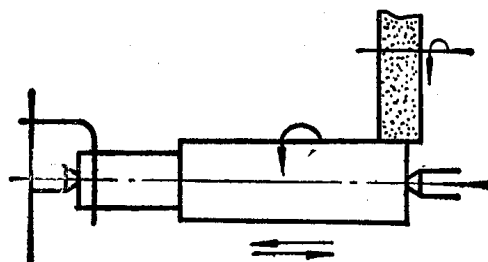


图 8-79 纵磨法磨外圆

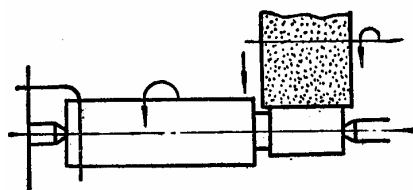
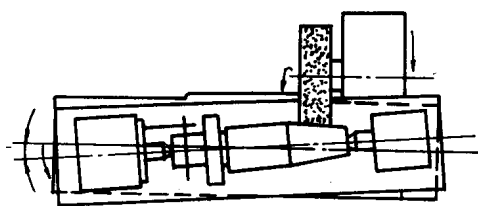


图 8-80 横磨法磨外圆

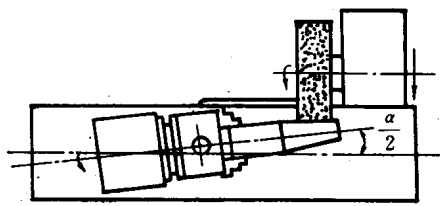
使用时，横磨各段之间应有 5~15mm 的间隔并保留 0.01~0.03mm 的加工余量。

(二) 磨外圆锥面

磨外圆锥面与外圆面的操作基本相同，只是工件和砂轮的相对位置不一样，工件的轴线与砂轮轴线偏斜一个锥角，可通过转动工作台或头架形成。如图 8-81 所示。



a. 转动工作法磨外圆锥面



b. 转动头架法磨外圆锥面

图 8-81 磨外圆锥面方法

(三) 磨内圆面和磨内圆锥面

磨内圆面和磨内圆锥面可在内圆磨床或万能外圆磨床上用内圆磨头进行磨削。

进行内磨时，工件的安装一般采用卡盘夹持外圆。工作时砂轮处于工件的内部，转动方向与外磨时相反。由于受空间的限制，砂轮直径较小，砂轮轴细而长。因此内磨具有以下特点：1) 砂轮与工件的相对切削速度较低；2) 砂轮轴刚性差，易变形和振动，故切削用量要低于外磨；3) 磨削热大且散热和排屑困难，工件易受热变形，砂轮易堵塞。因此，内磨比外磨生产率低，加工质量也不如外磨高。

(四) 磨平面

对工件平面的磨削一般在平面磨床上进行。平面磨床的工作台内部装有电磁线圈，通电后对工作台上的导磁体产生吸附作用。所以，对导磁体(如钢、铸铁等)工件，可直接安装在工作台上；对非导磁体(如铜、铝等)工件，则要用精密平口钳进行装夹。

根据磨削时砂轮的工作表面不同，平面磨削的方式分为两种，即周磨法和端磨法。周磨法是用砂轮的圆周面进行磨削，砂轮与工件的接触面积小，排屑和散热条件好，能获得较好的加工质量，但磨削效率较低。常用于小加工面和易翘曲变形的薄片工件的磨削。

端磨法是用砂轮的端面进行磨削，砂轮与工件的接触面积大，砂轮轴刚性较好，能采用较大的磨削用量，因此磨削效率高，但发热量大，不易排屑和冷却，加工质量较周磨法低。多用于磨

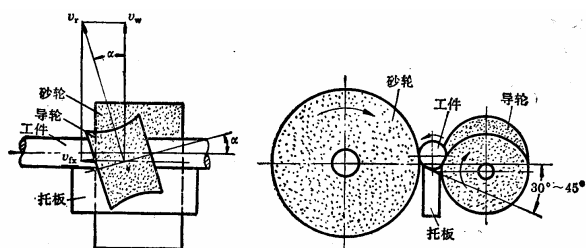


图 8-82 无心外圆磨工作原理示意图

削面积较大且要求不太高的磨削加工。

四、无心外圆磨床简介

无心外圆磨床的结构和加工原理完全不同于一般的外圆磨床。图 8-82 为其工作原理示意图。

磨削工件时，工件不需要夹持，而是放在砂轮和导轮之间，由托板支承。工件的轴线略高于砂轮与导轮轴线，以避免工件在磨削时产生圆度误差；磨削中，导轮与砂轮均按顺时针方向旋转，由于工件受由橡胶结合剂制成的导轮的摩擦力较大，故以和导轮大体相同的低速旋转；当工件的轴线与导轮的轴线成一定角度时（一般为 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$ ），导轮一方面使工件旋转，同时使工件作轴向进给运动。

无心外圆磨削不需要打中心孔和进行工件的安装夹紧，易实现高速和宽砂轮磨削，故生产率高。适用于大批量磨削细长轴及同轴度要求较高的薄壁孔磨削。无心磨削工件的圆度误差可达 $0.005\sim 0.01\text{mm}$ ，表面粗糙度 R_a 值可达 $0.1\sim 0.25\ \mu\text{m}$ 。

复习思考题

1. 车削加工主要用于加工哪些表面？加工不同的表面各用什么刀具？
2. 车床的主要组成部分是哪些？它们各有什么功用？
3. 车床主轴的转速是否就是切削速度？
4. 在车床上安装工件的方式有哪些？
5. 什么样的工件适宜用顶尖安装？为什么要在工件上加工中心孔？
6. 试分析粗车和精车在加工质量、加工成本和工艺上的区别。
7. 什么是钻孔？什么是镗孔？它们各有什么工艺特点？
8. 车削圆锥面的方法有哪些？各有什么特点和用途？
9. 刨削加工主要用于加工哪些表面？加工质量和切削效率如何？
10. 与车削运动相比刨削运动有什么特点？刀具和工件各有哪些运动？
11. 刨削平面、斜面和沟槽时在工艺上有什么不同？
12. 试比较插削和刨削的异同。
13. 铣削加工能进行哪些表面的加工？加工质量和切削效率如何？
14. 铣床有哪几种？其主要区别是什么？
15. 常见的铣刀有哪些？各主要用于什么加工？
16. 如何铣削台阶面？详细列出所加工实习件的工艺内容。
17. 进行齿轮加工的方法有哪些？各有什么特点？
18. 为什么滚齿和插齿都能用一把刀具加工同一模数任一齿数的齿轮？
19. 磨削适宜加工哪些工件？磨削加工的精度和表面粗糙度 R_a 值可达多少？
20. 磨削加工时，砂轮和工件各有哪些运动？

第九章 钳工

第一节 钳工概述

一、钳工的概念

钳工是手持工具对工件进行加工的方法。钳工基本操作包括划线、錾削、锯削、锉削、钻孔、攻丝、套扣、刮削、研磨、装配和修理等。

钳工常用设备有钳工工作台、台虎钳等，如图 9-1 所示。

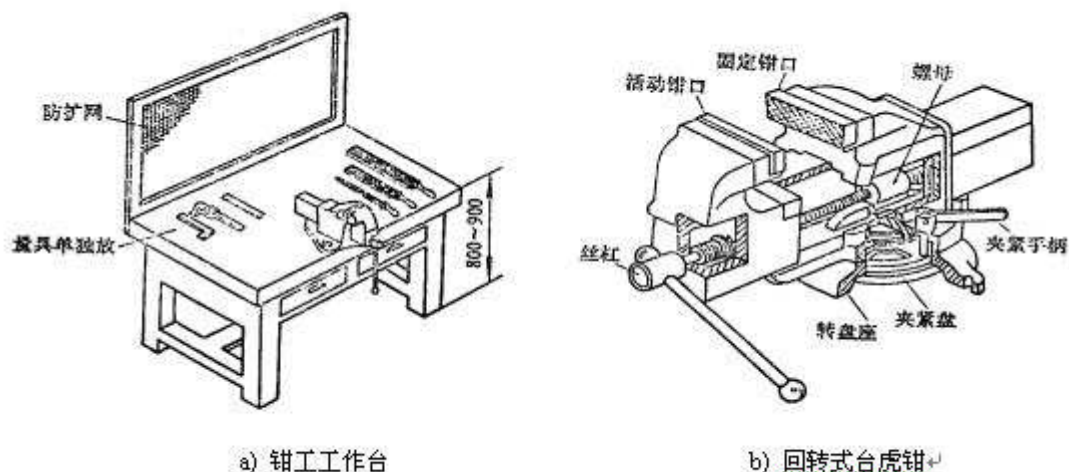


图 9-1 钳工常用设备

二、钳工工作台和虎钳

钳工大多数操作是在钳工工作台和虎钳上进行的。

钳工工作台如图 9-1 a) 所示，一般用固定的木材或铸铁制成，要求牢固平稳，台面高度为 800~900mm。为了安全，台面前方装有防护网。

台虎钳是夹持工件的主要工具，它有固定式台虎钳和回转式台虎钳两种，如图 9-1 b)。台虎钳规格用钳口宽度表示，常用的为 100~150mm。虎钳夹持工件时，尽可能夹在钳口中，使钳口受力均匀。夹持工件的光洁表面时，应垫铜皮或铝皮加以保护。

三、钳工的工艺特点

钳工是目前机械制造和修理工作中不可缺少的重要工种，其主要特点是：（1）钳工工具简单，制造刃磨方便，材料来源充足，成本低；（2）钳工大部分是手持工具进行操作，加工灵活，方便。能够加工形状复杂，质量要求较高的零件；（3）钳工劳动强度大，生产率低，对工人技术水平要求高。

四、钳工的应用范围

钳工的种类繁多，应用范围很广。目前采用机械设备不能加工或不适于机械加工的某些零件可由钳工来完成。随着生产的发展，钳工已经有了明显的专业分工，如普通钳工、划线钳工、模具钳工、装配钳工、修理钳工等。钳工的应用范围主要包括：

（1）在单件小批生产中加工前的准备工作，如毛坯表面的清理，工件上的划线等。

（2）零件装配成机器之前进行的钻孔、铰孔、攻丝和套扣等工作；装配时互相配合零件的修整；整台机器的组装、试车和调整等。

- (3) 精密零件的加工，如锉制样板、刮削机器和量具的配合表面，以及夹具、模具的精加工等。
- (4) 机器设备的维修等。

第二节 划线

一、划线的基本概念

钳工根据图纸要求，在毛坯或半成品的工件表面上划出加工界线的一种操作称为划线。

划线的作用

- 划好的线能明确标出加工余量，加工位置等。作为加工或安装工件时的依据。
- 在单件小批生产中，通过划线检查毛坯的形状和尺寸是否符合图纸要求，避免不合格的毛坯投入机械加工而造成浪费。
- 通过划线合理分配加工余量（亦称“借料”），从而保证少出或不出废品。 划线的种类

根据工件的形状不同，划线可分为平面划线和立体划线两种。

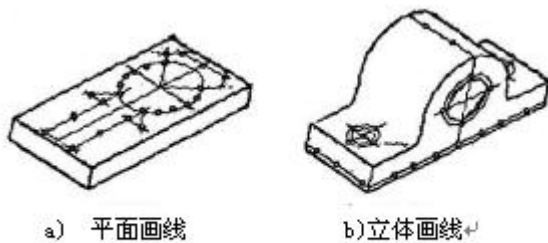


图 9-2 平面划线和立体划线

- 平面划线即在工件的一个平面上划线，如图 9-2 a) 所示。
- 立体划线在工件的几个表面上划线，即在长、宽、高三个方向上划出相关线条，如图 9-2 b) 所示。称为立体划线。

在整个机械加工过程中划线是不可缺少的重要环节，是机械加工的依据。因此所划线条要求清晰，尺寸准确，划线精度一般为 0.25~0.5mm 之间。

二、划线工具及用途

1. 基准工具

划线的基准工具是划线平板和划线平台，如图 9-3，它用铸铁制成，上平面为划线时的基准平面，为使之平整、光洁，要经精刨或刮研。平台或平板要求安装牢固，上平面不允许碰撞或锤击，并保持清洁。若长期不用，上平面应涂油防锈，并用木板护盖。

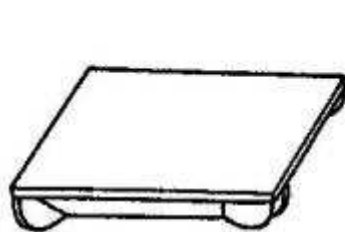


图 9—3 划线平板

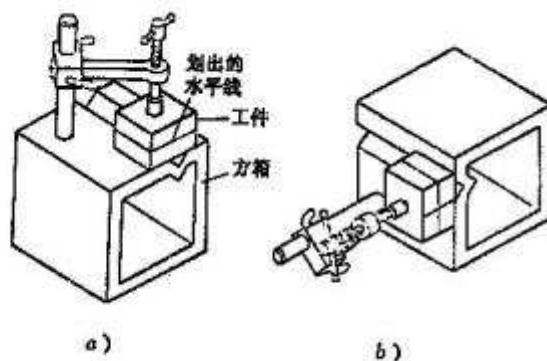


图 9—4 方箱及其用途

2. 支承工具

常用的支承工具有：

- 方箱由铸铁制成的空心立方体。如图 9—4 所示。各面都经过精加工，相邻平面相互垂直，相对平面相互平行。其上有 V 型槽和压紧装置。V 型槽用来安装轴、套筒、圆盘等圆形工件，以便找中心或划中心线，方箱用于夹持尺寸较小而加工面较多的工件。通过翻转方箱，便可在工件表面上划出相互垂直的线来。
- 千斤顶当工件较大，划线时不适合用方箱和 V 型铁时，通常用三个千斤顶来支承工件，其高度可以调整以便找正工件，如图 9—5 所示。
- V 型铁由碳素钢制成，淬火后经磨削加工。其相邻两边相互垂直，V 型槽呈 90° ，如图 9—6 所示，用于划线时支承圆柱形工件，使工件轴线与平板平行。

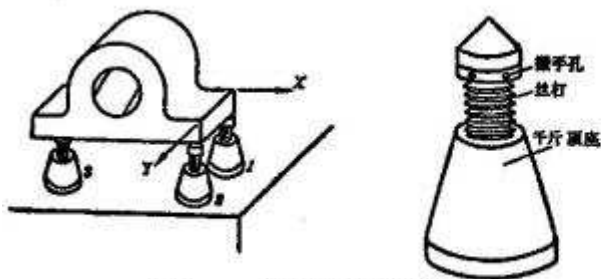


图 9—5 用千斤顶支承工件

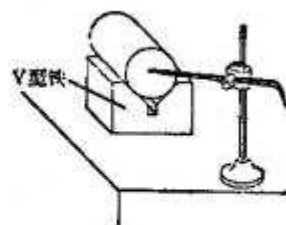


图 9—6 用 V 型铁支承工件定中心

3. 划线工具

常用划线工具如下：

- 划针用来在工件表面上划线的工具，如图 9—7 所示。

划卡用来确定轴和孔的中心位置的工具，如图 9—8 所示。

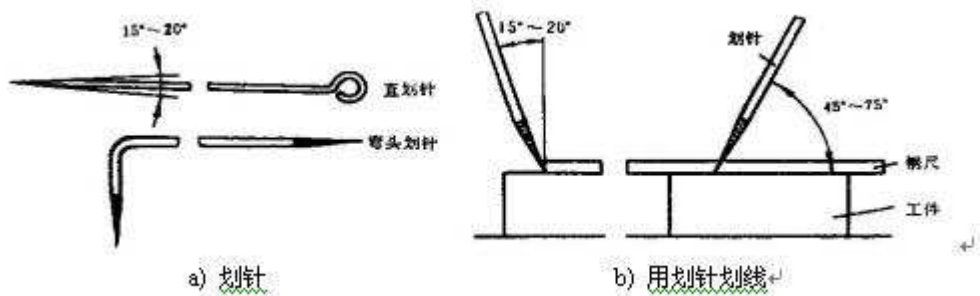


图 9-7 划针及应用

- 划针盘是立体划线和校正工件时常用的工具，如图 9-9 所示。调节划针到一定的高度并在平板上移动划针盘，即可在工件上划出与平板平行的线。
- 划规主要用于划圆、量取尺寸和等分线段等。如图 9-10 所示。

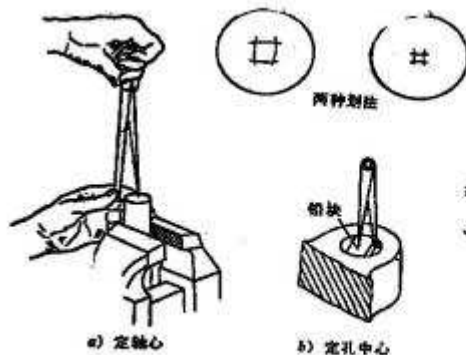


图 9-8 用划规定中心

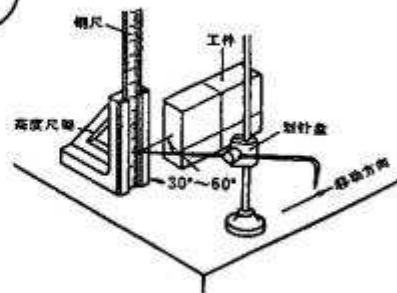


图 9-9 用划针盘划水平线

- 样冲是在所划的线上打样冲眼的工具，以便在所划线模糊后仍能找到原线的位置。打样冲眼时，开始样冲向外倾斜，以便样冲尖头与线对正，然后摆正样冲，用小锤轻击样冲顶部即可，如图 9-11 所示。钻孔前在孔的中心应打样冲眼，便于钻孔时寻找孔的中心，对于小孔还便于钻头定心。

高度尺高度尺如图 9-9，由钢尺和尺座组成。它与划针盘配合使用，以确定划针高度。

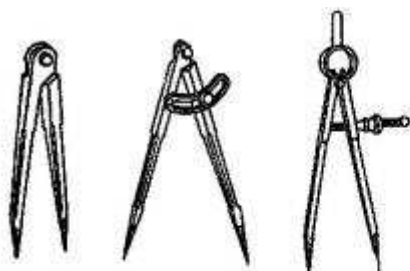


图 9-10 划规

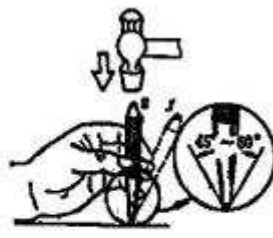


图 9-11 样冲及其用途

划线基准及其选择

划线时应在工件上选择一个或几个面或线作为划线的依据，以确定工件的几何形状和各部分的相对位置，这样的面或线称为划线基准。若工件上有重要的孔需要加工，一般选择该孔的轴线作为划线基准，如图 9-12a)。若工件上个别平面已经加工，则应以该平面作为划线基准，如图 9-12 b)。

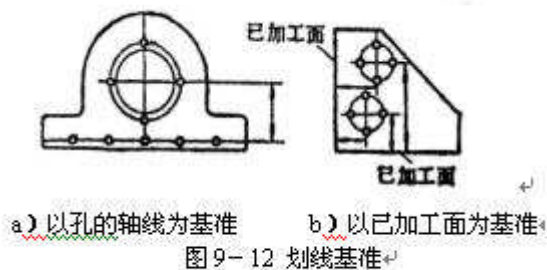


图 9-12 划线基准

四、划线方法及步骤

首先研究图纸，确定划线部位和划线基准，检查毛坯是否合格。然后清理毛坯上的氧化皮和毛刺；在划线的部位上涂一层涂料；铸锻件涂大白浆；已加工面涂品紫或品绿颜料；带孔的毛坯用铅块或木块堵孔，以便确定孔的中心位置。最后进行划线操作。

第三节 锯切

钳工锯切是用手锯锯断材料或在工件上锯出沟槽的操作。

一、锯切工具

手锯是钳工锯切所使用的工具。手锯由锯弓和锯条组成，如图 9-13 所示。

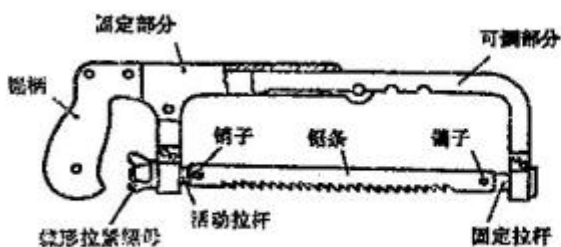


图 9-13 手锯

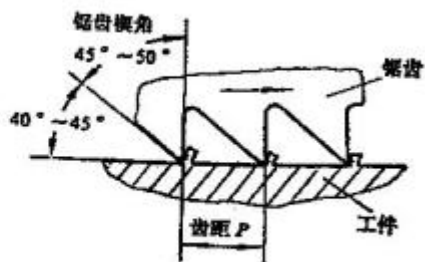


图 9-14 锯齿的形状

1. 锯弓锯弓的作用是安装和张紧锯条，它有可调式锯弓和固定式锯弓两种，如图 9-13 所示。

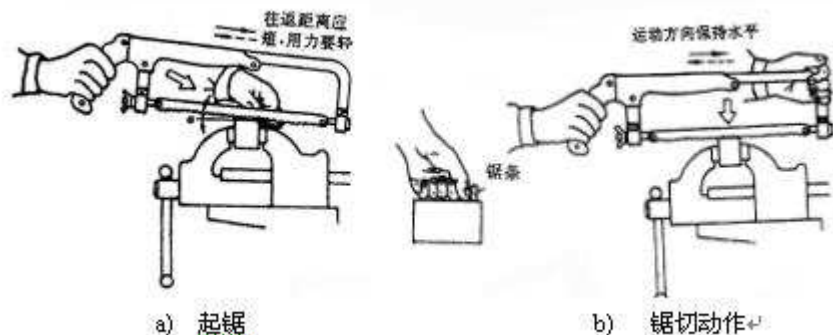


图 9-15 锯切方法

2. 锯条锯条是用碳素工具钢制成，并经淬火处理。常用的手工锯条约长 300mm，宽 12mm，厚 0.8mm。锯齿的形状如图 9-14 所示。锯条按齿锯大小分粗齿、中齿、细齿三种，由每 25mm 长度内的齿数来表示，14~16 齿为粗齿；18~22 齿为中齿；24~32 齿为细齿。锯齿的粗细应根据材料的硬度和厚薄来进行选择。粗齿锯条适宜锯切铜、铝等软金属及厚的工件，因粗齿锯条齿距较大，锯屑不易堵塞齿间。细齿锯条适宜锯

切硬钢、板料及薄壁管子。它可使锯切参加切削时的齿数多，锯齿不易崩裂。中齿锯条适宜锯切普通钢、铸铁及中等厚度的工件。

二、锯切操作

1. 锯条安装在安装锯条时，锯齿尖必须朝前，锯条在锯弓上的松紧度要适当，过紧或过松锯切时锯条易折断。
2. 工件装夹工件尽可能夹持在虎钳的左边，以免锯切操作过程中碰伤左手。工件悬伸要短，以增加工件刚性，避免锯切时颤动。
3. 起锯方法起锯时锯条垂直于工件加工表面，并以左手拇指靠稳锯条，起限位作用，使锯条落在所需要的位置上，右手稳推锯柄，起锯角 α 一般略小于 15° ，如图 9—15。 α 太小不易切入，太大易被工件卡住和损坏锯齿。锯弓往复行程要短，压力要轻。锯出锯口后，锯弓逐渐改变到水平方向。
4. 锯切方法锯切时，锯条前推进行切削，应施加适当压力，返回不切削，不必施加压力，使锯条从工件上轻轻滑过以减少磨损。锯条应直线往复移动，不要左右摆动。应保持锯条全长的 $2/3 \sim 3/4$ 参加工作，以免锯条局部磨钝而降低其使用寿命。临近锯断时，用力要轻，以免碰伤手臂或折断锯条。锯削速度通常以每分钟往复 60 次左右为宜，锯切硬材料速度可慢些，软材料可快些。锯切钢件可加机油润滑。

锯切圆钢、扁钢、圆管、薄板的方法如图 9—16 所示。为了得到整齐的锯缝，锯切扁钢应在较宽的面下锯；锯切圆管不可从上至下一次锯断，而应每锯到内壁后工件向推锯方向转一定角度再继续锯切；锯切薄板时，或用木板夹住薄板两侧，或多片重叠锯切。

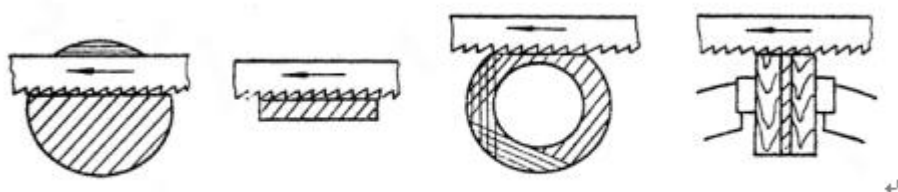


图 9—16 锯切圆钢、扁钢、圆管、薄板的方法

第四节 锉削

锉削是用锉刀对工件表面进行切削加工的操作。它可以加工平面、型孔、曲面、沟槽及各种形状复杂的表面。其加工表面粗糙度 Ra 值可达 $1.6 \sim 0.8 \mu m$ ，是钳工最基本的操作。

一、锉刀

锉刀是锉削所使用的刀具，它由碳素工具钢制成，并经过淬火处理。

1. 锉刀的构造和种类锉刀由锉面、锉边和锉柄等组成，如图 9—17 a) 所示。锉刀的齿纹多制成双纹，双纹锉刀的齿刃是间断的，即在全宽齿刃上有许多分屑槽，使锉屑碎断，不易堵塞锉面，锉削省力，使用较普遍。

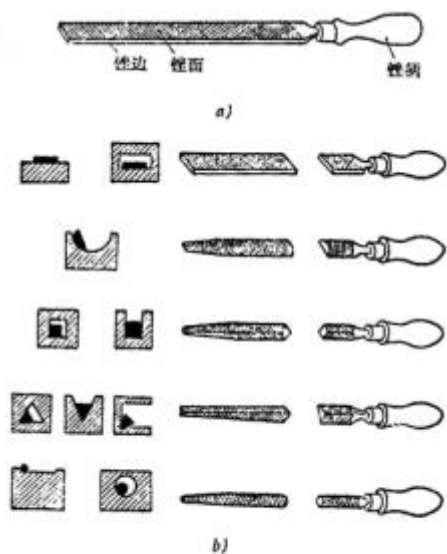


图 9-17 锉刀的构造和种类

锉刀按其断面形状可分为平锉、半圆锉、方锉、三角锉和圆锉等，如图 9-17 b) 所示。按其长度又可分为 100mm、150mm、……、400mm 等；按其齿纹的粗细又可分为粗齿（齿距为 0.83~2.3mm），中齿（齿距为 0.42~0.77mm），细齿（齿距为 0.25~0.33mm）和最细齿等。

2. 锉刀的选用锉刀的长度按工件加工表面的大小选用；锉刀的断面形状按工件加工表面的形状选用；锉刀齿纹的粗细的选用要根据工件材料、加工余量、加工精度和加工表面粗糙度等情况综合考虑。粗加工和锉削铜、铝等软金属多选用粗齿锉刀；半精加工和锉削钢、铸铁多选用中齿锉刀；细齿和最细齿锉刀只用于表面最后修光。

二、锉削操作

1. 锉削时工件夹持在虎钳上，虎钳的高度应适合锉削时用力的要求，在操作过程中人体应感觉自然。适宜的高度是从操作者下颚到钳口距离为一拳一肘。锉削的工件必须牢固地夹持在虎钳的钳口中，并略高于钳口。夹持已加工表面时，应在钳口与工件之间加垫铜皮或铝皮。

2. 锉刀的使用锉削时应正确掌握锉刀的握法及施力的变化。使用大的锉刀时，右手握住锉柄，左手压在锉刀前端，使其保持水平，如图 9-18 a) 所示。使用中型锉刀时，因用力较小，可用左手的拇指和食指握住锉刀的前端，以引导锉刀水平移动，如图 9-18 b) 所示。

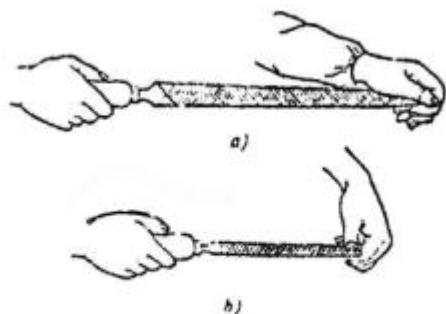


图 9-18 锉刀的握法

锉削时因始终保持锉刀水平移动，因此要特别注意两手的施力变化。开始推进锉刀时，左手压力大右手压力小；锉刀推到中间位置时，两手的压力大致相等；再继续推进锉刀，左手的压力逐渐减小，右手压力逐渐增大。返回时不加压力，以免磨钝锉齿和损伤已加工表面。

3. 锉削方法常用的锉削方法有顺锉法、交叉锉法、推锉法和滚锉法。前三种锉法用于平面锉削，后一种用于弧面锉削。

顺锉法是最基本的锉法，适用于较小平面的锉削，如图 9—19 a) 所示。顺锉可得到正直的锉纹，使锉削的平面较为整齐美观。其中图 a) 左图多用于粗锉，右图只用于修光。

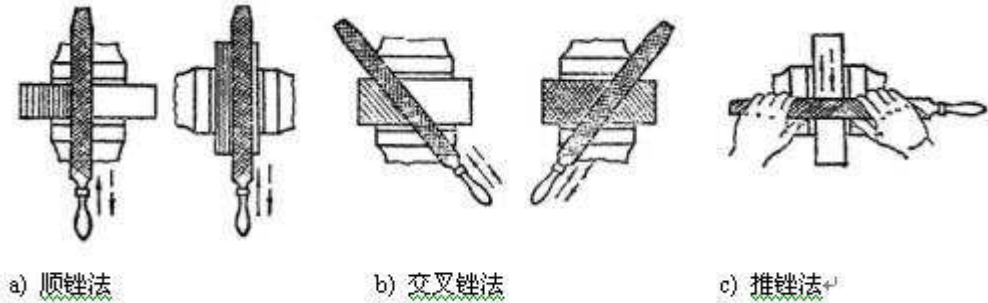


图 9—19 平面锉削方法

交叉锉法适用于粗锉较大的平面，如图 9—19 b) 所示。由于锉刀与工件接触面增大，锉刀易掌握平稳，因此交叉锉易锉出较平整的平面。交叉锉之后要转用图 a) 所示的顺锉法进行修光。

推锉法仅用于修光，尤其适宜窄长平面或用顺锉法受阻的情况，如图 9—19 c) 所示。两手横握锉刀，沿工件表面平稳地推拉锉刀，可得到平整光洁地表面。

锉削平面时，工件的尺寸可用钢尺或游标卡尺测量。工件平面的平直及两平面之间的垂直情况，可用直角尺贴靠是否透光来检查，如图 9—21 所示。

滚锉法用于锉削内外圆弧面和内外倒角，如图 9—20 所示。锉削外圆弧面时，锉刀除向前运动外，还要沿工件被加工圆弧摆动；锉削内圆弧面时，锉刀除向前运动外，锉刀本身还要作一定的旋转运动和向左移动。



图 9—20 圆弧面锉削方法（滚锉法）

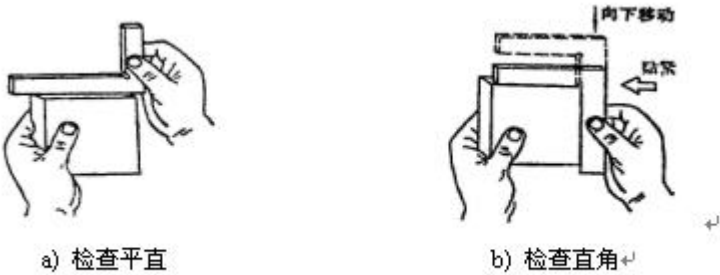


图 9—21 检查平面和直角

4. 锉削操作注意事项锉削操作时，锉刀必须装柄使用，以免刺伤手心。由于虎钳钳口淬火处理过，不要锉到钳口上，以免磨钝锉刀和损坏钳口；不要用手去摸锉刀面或工件以防锐棱刺伤等，同时防止手上油污沾上锉刀或工件表面使锉刀打滑，造成事故；锉下来的屑末要用毛刷清除，不要用嘴吹，以免屑末进入眼内；锉面堵塞后，用钢丝刷顺着锉纹方向刷去屑末；锉刀放置时，不要伸出工作台之外，以免碰落摔断或砸伤脚背。

第五节 钻孔、扩孔和铰孔

一、钻床

钳工的钻孔、扩孔和铰孔工作多在钻床上进行。常用的钻床有台式钻床、立式钻床和摇臂钻床。

1. 台式钻床台式钻床简称台钻。它是一种放在台桌上使用的小型钻床，钻孔直径一般在 12mm 以内。外形和结构如图 9-22 所示。台钻主轴的转速可通过改变三角皮带塔轮上的位置来调节。主轴的向下进给是手动的。台钻小巧灵活，使用方便，主要用于加工小型工件上的小孔。



图 9-22 台式钻床

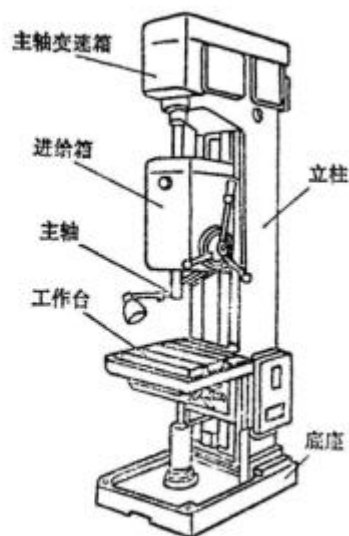


图 9-23 立式钻床

2. 立式钻床立式钻床简称立钻。外形和结构如图 9-23 所示。其最大钻孔直径有 25mm、35mm、40mm、50mm 等几种。主轴向下进给既可手动，又可自动。立钻主要用于加工中小型工件上的中小孔。除钻孔外还可进行镗孔、扩孔、铰孔、攻丝等加工。

3. 摇臂钻床摇臂钻床外形如图 9-24 所示。这类钻床有一个刚性较高的立柱，在立柱上有一个较长的摇臂，可沿立柱上下移动，左右回转。主轴连同主轴变速箱可沿摇臂导轨横向移动。因此主轴能较便捷地对准工件上孔的中心，在很大范围内进行孔的加工。摇臂钻床主要用于较大工件及多孔工件的孔加工。除钻孔外，还有完成扩孔、镗孔、铰孔、锪孔、攻丝等工作。

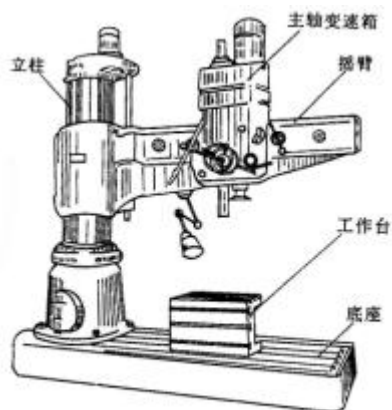


图 9-24 摇臂钻床

二、钻孔

钻孔是用钻头在实体材料上加工孔的方法。在钻床上钻孔，工件固定不动，钻头一边旋转（主运动），一边主轴向下移动（进给运动），如图 9-25 所示。钻孔属于粗加工，尺寸公差等级一般为 IT14~IT11，表面粗糙度 R_a 值为 $50\sim 12.5\mu\text{m}$ 。如要进一步提高加工精度，可根据要求选择扩孔、铰孔或镗孔等加工方法。

1. 麻花钻麻花钻是钻孔最常用的刀具，其组成部分如图 9-26 所示。麻花钻的前端为切削部分，如图 9-27，有两个主切削刃。顶部有横刃、横刃的存在使钻削时轴向拉力增加。麻花钻有两条螺旋槽和两条刃带，螺旋槽的作用是形成切削刃和向孔外排屑；刃带的作用是减少钻头与孔壁的摩擦和导向。麻花钻头的结构决定了它的刚性和导向性均比较差。

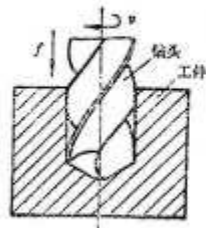


图 9-25 钻孔及钻削运动

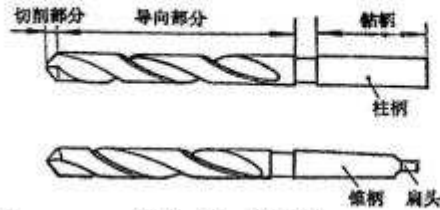


图 9-26 麻花钻

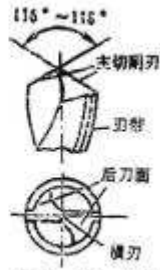


图 9-27 麻花钻的切削部分

2. 工件装夹在台钻或立钻上钻孔，工件多采用平口钳装夹，如图 9-28。对于不便于平口钳装夹的工件，可采用压板螺栓装夹，如图 9-29。工件在钻孔之前，一般要先按划线找正孔的位置。

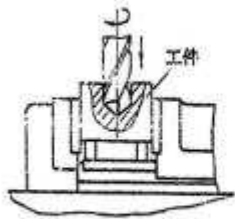


图 9-28 平口钳装夹

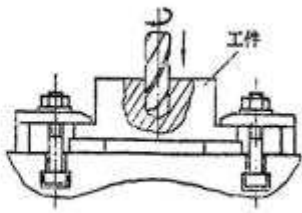


图 9-29 压板螺栓装夹

3. 钻孔方法按划线钻孔时，一定要使麻花钻的尖头对准孔中心的样冲眼。钻削开始时，要用较大的力向下进给，以免钻头在工件表面上来回晃动而不能切入；临近钻透时，压力要逐渐减小。若孔较深，要经常退出钻头以排除切屑和进行冷却，否则切削堵塞在孔内易卡断钻头或因过热而加剧钻头的损坏。

三、扩孔

扩孔是用扩孔钻对已有的孔进行扩大孔径的加工方法。它可以校正孔轴线偏差，提高孔的质量，属半精加工。扩孔也可作为最终加工和铰孔前的预加工。扩孔比钻孔质量高，尺寸公差等级可达 IT10~IT9，表面粗糙度 R_a 值可达 $6.3\sim 3.2\mu\text{m}$ 。

扩孔钻如图 9-30 所示，其形状与麻花钻相似，不同的是：扩孔钻有 3~4 个切削刃，钻芯较粗，无横刃，刚性和导向性较好，切削平稳，因而加工质量比钻孔高。

在钻床上扩孔的切削运动与钻孔相同，如图 9-31 所示。扩孔的加工余量为 $0.5\sim 4\text{mm}$ ，小孔取较小值，大孔取较大值。



图 9-30 扩孔钻



图 9-31 扩孔及其切削运动

四、铰孔

铰孔是用铰刀对孔进行精加工的方法。其尺寸公差等级可达 IT8~IT7, 表面粗糙度 R_a 值可达 $1.6 \sim 0.8 \mu m$ 。

铰刀的结构如图 9-32 所示, 其中图 a) 为机铰刀, 图 b) 为手铰刀。机铰刀切削部分较短, 多为锥柄, 装夹在钻床或车床上进行铰孔。手铰刀切削部分较长, 导向性较好。手铰孔时, 将铰刀沿原孔放正, 然后用手转动铰杠 (手铰用的铰杠与攻丝用的铰杠相同, 参见图 9-34, 并轻压向下进给)。

在钻床上铰孔的切削运动如图 9-33 所示。铰削时铰刀不能反转, 以免崩刀和损坏加工表面; 要选用适当切削液, 以冷却润滑铰刀, 提高孔的加工质量。铰孔的加工余量一般为 $0.05 \sim 0.25 mm$ 。

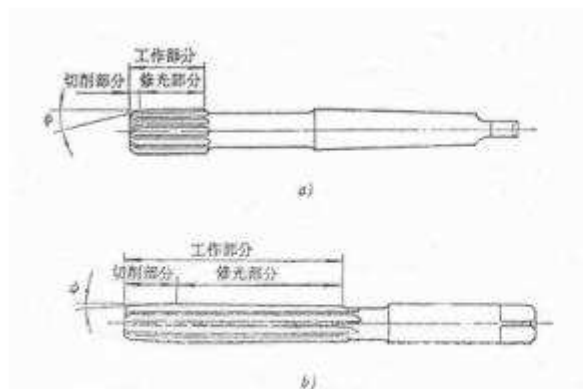


图 9-32 铰刀

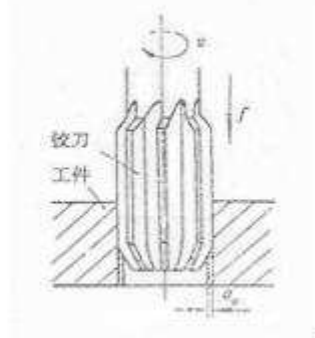


图 9-33 铰孔及其切削运动

第六节 攻丝和套扣

一、攻丝

用丝锥加工内螺纹的方法叫攻丝 (又叫攻螺纹), 如图 9-34 所示。

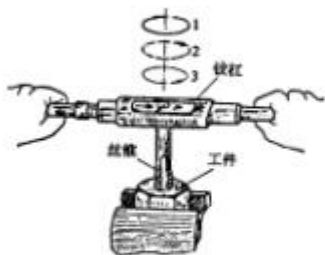


图 9-34 攻丝

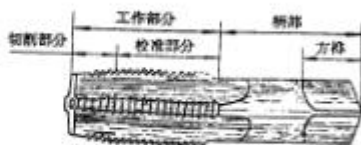


图 9-35 丝锥

1. 丝锥丝锥是攻丝的专用刀具。它由工作部分和柄部构成，如图 9—35 所示。柄部装入铰杠传递扭矩，便于攻丝。工作部分由切削，校准两部分组成。对于 M6~M24 的手用丝锥通常制成两支一套，称为头锥和二锥。它们的主要区别在于切削部分的锥度不同。对于 M6 或大于 M24 的一般制成三支一套，分别称为头锥、二锥和三锥。主要是小直径丝锥强度小，容易折断；大直径丝锥切削余量大，需要分多次切削。丝锥校准部分的作用主要用于引导丝锥和校准螺纹牙形。

2. 攻丝操作攻丝前需要钻底孔。由于攻丝时丝锥的切削刃除对金属有切削作用外，对工件材料还产生挤压作用。挤压结果，可能造成丝锥被挤住，发生崩刃、折断及工件乱扣现象，所以要根据不同材料首先确定螺纹底孔的直径（即钻底孔所用钻头的直径）和深度，对此可查有关手册或按下列经验公式计算：

脆性材料（如铸铁、青铜等）：底孔直径 $D_0 = \text{螺纹大径 } D - (1.05 \sim 1.10) \times \text{螺距 } P$

韧性材料（如钢、紫铜等）：底孔直径 $D_0 = \text{螺纹大径 } D - \text{螺距 } P$

攻盲孔（即不通孔）螺纹时，因丝锥不能攻到底，所以钻孔底深度要大于螺纹长度，即：底孔深度 $L = \text{螺纹的有效长度 } L + 0.7 \times \text{螺纹大径 } D$

其次，钻削底孔，并对孔口进行倒角，其倒角尺寸一般为 $(1 \sim 1.5) \text{螺距 } P \times 45^\circ$ 。若是通孔两端均要倒角。倒角有利于丝锥开始切削时切入，且可避免孔口螺纹牙齿崩裂。

再次，用头锥攻螺纹。开始时，将丝锥垂直插入孔内，然后用铰杠轻压旋入 1~2 圈，目测或用直角尺在两个方向上检查丝锥与孔端面的垂直情况。丝锥切入 3~4 圈后，只转动，不加压，每转 1~2 圈后再反转 $1/4 \sim 1/2$ 圈，以便断屑。如图 9—34 中第二圈虚线，表示要反转。攻钢件螺纹时应加机油润滑，攻铸铁件可加煤油。

最后，用二锥攻螺丝。先将丝锥用手旋入孔内，当旋不动时再用铰杠转动，此时不要加压力。

二、套扣

用板牙加工外螺纹的方法叫套扣，如图 9—36。套扣又称套螺纹。

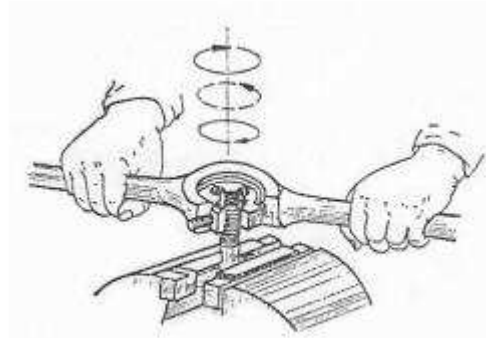


图 9—36 套扣

1. 板牙和板牙架板牙是加工外螺纹的标准工具，有固定式、可调式两种。图 9—37 a) 为常用的固定式圆板牙。圆板牙螺孔的两端各有一段 40° 的锥度，是板牙的切削部分。图 9—37 b) 为套扣用的板牙架，是用来夹持圆板牙，并带动其旋转的工具。

2. 套扣的操作方法首先检查要套扣的圆杆直径，尺寸太大套扣困难。尺寸太小套出的螺纹牙齿不完整。圆杆直径可用下列经验公式计算：圆杆直径 $d_0 = \text{螺纹大径 } d - 0.13 \times \text{螺距 } P$ 。圆杆端部必须倒角，如图 9—38 所示，然后进行套扣。套扣时板牙端面必须与圆杆严格保持垂直，开始可用手掌按住板牙中心，适当施加压力并转动牙架。转动要慢些，切入 1~2 圈后，目测检查，校正板牙位置，切入 3~4 圈后就不必加压，只需转动，以免损坏螺纹和板牙，而且要经常反转，以便断屑。套扣时可加机油润滑。

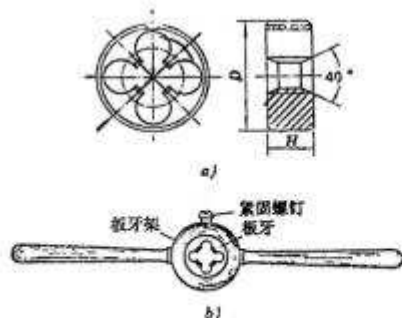


图 9-37 板牙和板牙架

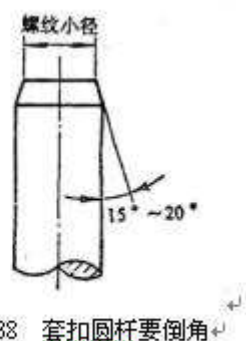


图 9-38 套扣圆杆要倒角

第七节 装配

装配是将若干个已加工的零件按装配工艺过程组装起来，并经过调整、试验使之成为合格产品的过程。

一、装配的作用

装配是产品制造过程中的最后环节。产品质量好坏，不仅取决零件的加工质量，而且取决于装配质量。即使零件的加工质量很好，如果装配工艺不正确，也不能获得高质量的产品。装配质量差的机器，精度低、性能差、寿命短，会造成很大的浪费。因此，装配是一项重要而细致的工作，在机械制造业中占有很重要的地位。

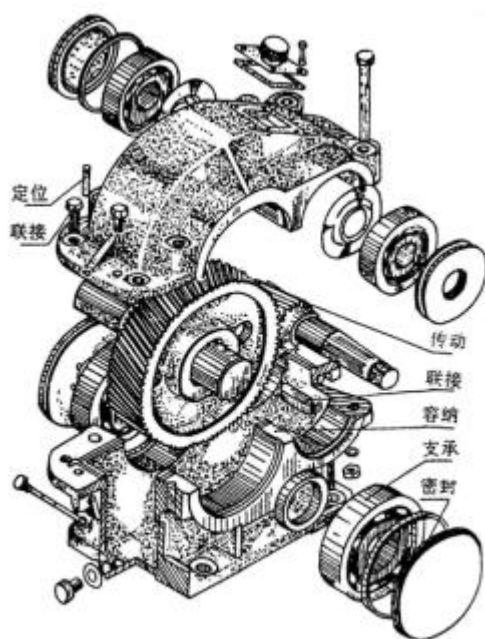


图 9-39 减速箱

二、装配的组合形式

装配过程分为组件装配、部件装配和总装配。

1. 组件装配就是将若干个零件安装在一个基础零件上而构成组件的过程。例如齿轮减速箱中的大轴组件就是由大轴及其轴上的各个零件构成的一个组件。组件可作为基本单元进入装配。
2. 部件装配就是将若干个零件、组件安装在另一个基础零件上而构成部件的过程。部件是装配中比较独立的部分。例如齿轮减速箱，图 9-39 所示。

3. 总装配就是将若干个零件、组件、部件安装在产品的基础零件上而构成产品的过程。例如一台机器。

如图 9-39 所示为一台中等复杂程度的圆柱齿轮减速箱。我们可以把轴、齿轮、键、左右轴承、垫套、透盖、毡圈的组合视为大轴组装，如图 9-40 所示。而整台减速箱则视为若干其它零件、组件安装在箱体这个基础零件上的部装。减速箱经过调试合格后，再和其它部件、组件和零件组合后装配在一起，就组成了一台完整机器，这就是总装配。

三、装配的工作的步骤

装配工作的一般步骤是：研究和熟悉产品装配图及技术要求，了解产品结构、工作原理、零件的作用及相互连接关系→准备所用工具，确定装配方法、顺序→对装配的零件进行清洗，去掉油污、毛刺→组件装配→部件装配→总装配→调整、检验、试车→油漆、涂油、装箱。

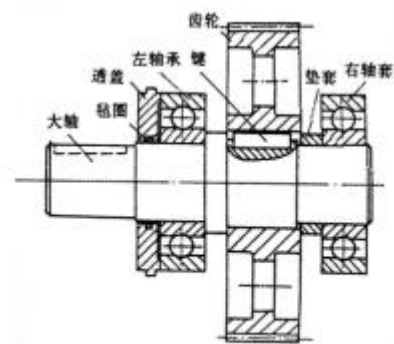


图 9-40 大轴组件结构图

四、组件装配举例

如图 9-40 所示为减速箱大轴组件，其装配顺序如下：(1) 将各零件修毛刺、洗净、上油；(2) 将键配好、压入大轴键槽；(3) 压装齿轮；(4) 装上垫套、压装右端轴承；(5) 压装左端轴承；(6) 在透盖内孔油毡槽内放入毡圈，然后套进轴上。组件装配完毕。

五、几种典型零件的装配

(1). 轴、键、传动轮的装配传动轮（如齿轮、皮带轮、涡轮等）与轴一般采用键连接传递运动及扭矩，其中又以普通平键连接如图 9-41 最为常见。装配时，选取键长与轴上键槽相配，键底面与键槽地面接触，键两侧采用过渡配合。装配轮壳时，键顶面和轮壳间留有一定间隙，但与键两侧配合不允许松动。

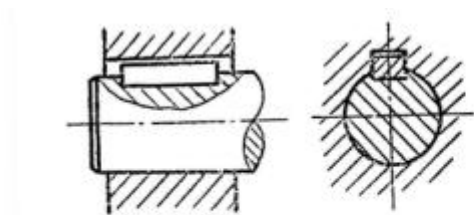


图 9-41 普通平键连接

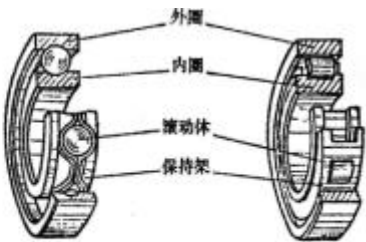


图 9-42 滚动轴承的组成

(2). 滚动轴承的装配

滚动轴承一般由外圈、内圈、滚动体、保持架组成，如图 9-42 所示。滚动轴承的种类很多，有向心球轴承、圆柱滚子轴承、圆锥滚子轴承和滚针轴承。

在一般情况下，滚动轴承内圈随轴转动，外圈固定不动，因此内圈与轴的配合比外圈与轴承座支承孔的配合要紧一些。滚动轴承的装配大多为较小的过盈配合，常用手锤或压力机压装。为了使轴承圈压力均匀，需用垫套之后加压。轴承压到轴上时，通过垫套施力于内圈端面，如图 9-43 a)；轴承压到支承孔中时，

施力于外圈端面，如图 9—43 b) ；若同时压到轴上和支承孔中时，则应同时施力于内外圈端面，如图 9—43 c) 所示。

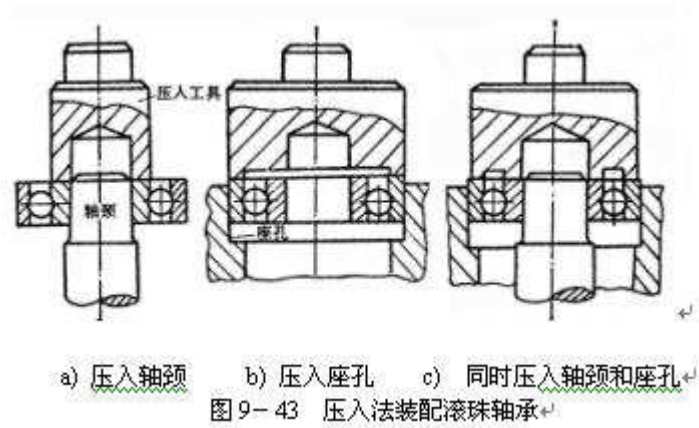


图 9—43 压入法装配滚珠轴承

(3). 螺钉、螺母的装配螺纹连接是一种可拆的紧固连接。在装配工作中要碰到大量的螺钉、螺母的装配，因此在装配时要注意如下事项：

- 内外螺纹的配合应做到能用手自由旋入，既不能过紧，也不能过松。
- 2) 螺钉、螺母端面应与螺纹轴线垂直，零件与螺钉、螺母的贴合面应平整光洁。为了提高贴合面质量合在一定程度上防止松动，一般应加垫圈。
- 3) 装配一组螺钉、螺母时，为了保持零件贴合面受力均匀，应按一定顺序拧紧，如图 9—44 所示顺序，且不要一次完全拧紧，而要按分两次或三次逐步拧紧。

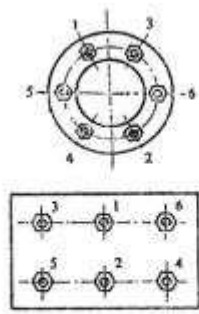


图 9—44 拧紧成组螺母的顺序

4) 螺纹连接在很多情况下要有防松措施，以免在机器的使用过程中螺母回转松动。常用的防松措施有：如图 9—45 所示，双螺母、弹簧垫圈、开口销、止动垫圈、锁片、串联钢丝等。

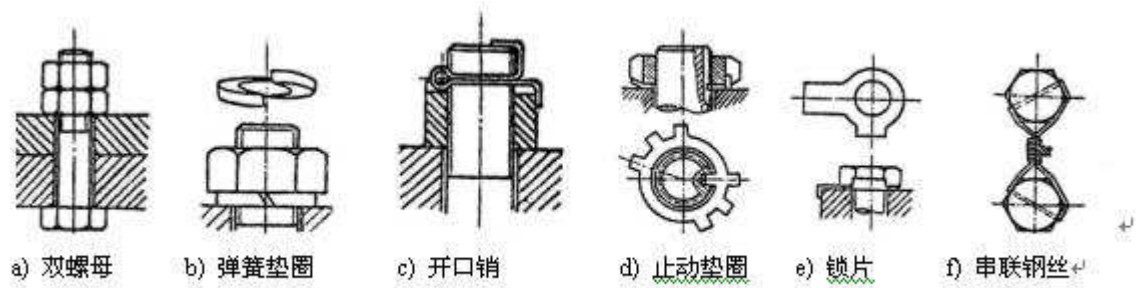


图 9—45 螺纹连接防松措施

4. 销钉的装配

销钉在机器中多用于定位和连接，如图 9—46 所示。常用的销钉有圆柱和圆锥销如图 9—46 a) 。

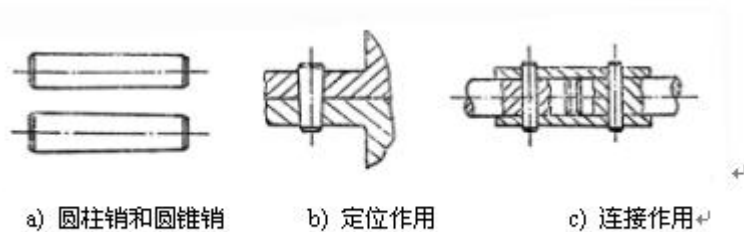


图 9—46 销钉及其作用

圆柱销一般依靠过盈配合固定在孔中，因此对销孔尺寸、形状和表面粗糙度 Ra 值要求较高。被连接件的两孔应同时钻、铰、 Ra 值不大于 $1.6 \mu m$ 。装配时，销钉表面可涂机油，用铜棒轻轻敲入。圆柱销不宜多次装拆，否则会降低定位精度或连接的可靠性。

圆锥销装配时，两连接件的销孔也应一起钻、铰。钻、铰时按圆锥销小头直径选用钻头（圆锥销的规格用销小头直径和长度表示），应相应锥度的铰刀。铰孔时用试装法控制孔径，以圆锥销能自由插入 $80 \sim 85\%$ 为宜。最后用手锤敲入，销钉的大头可稍露出，或与被连接件表面齐平。

六、机器的拆卸及修理

机器经过长期使用后，需要进行检查和修理，这时要对机器进行拆卸。拆卸是修理工作中的重要环节。如拆卸不当就会造成设备损坏或机器精度下降。因此，在拆卸时必须注意如下事项：

1. 机器拆卸前，首先要熟悉图纸，对机器零、部件的结构原理了解清楚，弄清楚修理的故障及部位，确定机器的拆卸方法。防止盲目拆卸，猛敲乱拆，造成零件的损坏。
2. 拆卸就是正确解除零件间的相互连接。拆卸的顺序要按照与装配相反的顺序进行。即先装的后拆，后装的先拆。可以按照先上后下、先外后内的顺序依次进行拆卸。
3. 拆卸时要记住每个零件原来的位置，有些零、部件拆卸时要做好标记（如配合件、不能互换的零件等），以防止以后装错。零件拆下后，要摆放整齐，尽可能按原来结构套在一起，对细小件如销子、止动螺钉、键等，拆卸后要立即拧上或插入孔内。对丝杆、长细零件要用布包好，并用绳索将其吊直，以防弯曲变形或碰伤。
4. 拆卸配合紧密的零部件、要用专用工具（如各种拉出器、固定扳手、弹性卡环钳、铜锤、铜棒、销子冲头等），以免损伤零部件。
5. 对采用螺纹连接或锥度配合的零件，必须辨清方向。
6. 紧固件的防松装置，在拆卸后一般要更换，避免这些零件在装上使用时拆断而造成事故。

复习思考题

1. 钳工划线的作用是什么？
2. 什么叫划线基准？如何选择划线基准？
3. 怎样选择锯条？起锯时和锯切时的操作要领是什么？
4. 怎样选择粗、细锉刀？平面锉削有哪几种方法？各适用于何种场合？
5. 如何检验锉后工作的平面度和垂直度？
6. 如何确定攻丝前底孔的直径和深度？对脆性材料和塑性材料，为何应用不同的经验公式？
7. 为什么套扣前要检查圆杆直径？其大小如何确定？圆杆端部为什么要倒角？

8. 攻丝和套扣时，为什么要经常反转？
9. 装配的组合形式有哪几种？各有何特点？

第四篇 现代制造技术

第十章 现代制造技术概述

现代制造技术一般包含两方面的内容：

(1) 随着技术的发展和进步，传统的加工方法朝着更精密、更高效、更灵活的方向发展，如超精密加工、微机械制造、超高速切削，特种加工（电火花、线切割、激光）等。与传统的制造方法相比，具有更高的加工精度、更低的粗糙度、更灵活的加工方法和更高的生产率等特点。传统加工方法不能加工或难以加工的材料、形状、精度等，利用这些加工手段可以方便地加工出来。

(2) 随着计算机技术的发展，信息技术与制造技术的结合而产生的，由计算机控制的制造新技术。如数控技术、计算机辅助技术、集成制造技术以及快速原型技术等。与传统的制造技术相比，此类技术的最大特点是整个制造过程是由“程序”来控制的，其发展更多的是取决于计算机软硬件的发展。可以加工传统加工方法无法加工的形状，提高加工质量。改变产品只需变更“程序”，具有更大的“柔性”和适应性。

本章将对上述加工技术作一简单介绍。而数控技术、特种加工技术将在后面章节加以介绍。

第一节 先进制造技术介绍

现代科学技术的发展与交叉融合，给制造技术提出了新的要求，也给予了强大支持。因此，涌现了许多先进制造技术。超精密加工、微机械制造、超高速切削等技术近年来有了长足的发展。本节就这些方面给出基本的介绍。

一、超精密加工

精密与超精密是相对而言的，在不同的历史时期，有各不同的理解，这与科学技术水平有关。到 2000 年普通机械加工、精密加工与超精密加工的精度可以分别达到 $1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$ 及 $0.001\mu\text{m}$ 。

现代机械工业之所以要致力于提高加工精度，其主要原因在于：提高产品的性能和质量，提高其稳定性和可靠性，促进产品的小型化，增强零件的互换性，提高装配生产率，并促进自动化装配。它是尖端技术产品发展中不可缺少的关键加工手段。

现将这些典型工艺简单介绍如下。

1. 金刚石镜面切削 金刚石具有无与伦比的硬度，是最佳的切削工具材料。可以得到良好的镜面表面，一些材料的常用切削速度见表 10-1。

2. 精密、超精密镜面磨削 镜面磨削比研磨、抛光的生产率高，形状精度高，特别是对硬脆材料的镜面磨削，具有精度高的特点。用树脂、陶瓷、青铜、铸铁作砂轮结合剂，采用不同粒度的刚玉磨料及微细金刚石、CBN 磨料均可以进行镜面、亚镜面磨削。对硬脆材料磨削可以得到 $Ra\ 0.01\mu\text{m}$ 的镜面表面，效率高且精度高，表面粗糙度小。

3. 研磨与抛光 研磨与抛光都是利用研磨剂使工件与研具进行单纯的对研而获得高质量、高精度的加工方法。通常使用小于 $1\mu\text{m}$ 至几十微米大小的氧化铝和碳化硅等磨料和铸铁等材料的研具进行研磨。研磨、抛光的方法较多（见表 10-2）。近年来出现的新原理的超精密研磨技术中，有无损伤表面的研磨技术。如机械化学复合加工、机械微量去除加工、化学腐蚀加工等方法，表面粗糙度 $Ra<0.001\mu\text{m}$ 。

二、微机械制造

上世纪 60 年代以来，微电子技术渗透到机械工程的各个领域，为机械装备在系统结构、技术经济和性能方面带来了革命性的变化，并大大促进机械装备向微小型化方向发展。上世纪 80 年代中后期兴起的微型机械技术集中地反映了这一发展趋势。

表 10-1 常用切削速度

被切削材料	精加工切削速度/(m/min)
铜	240~300
黄铜类	180~300
铜锡合金	150~240
铝	300~1200
铝合金	120~300

表 10-2 各种超精密研磨、抛光方法

加工法	磨粒	研具	加工液	加工机械、方式	加工机理	应用示例
超精密研磨	• 微细磨粒	• 铸铁	• 煤油 • 机油	• 双面研磨机 • 手工研磨	• 以磨粒的机械作用为主	• 量具 • 量规端面
超精密抛光	• 微细磨粒 • 容易微细化的磨粒 • 软质磨粒	• 软质研具 • 有槽	• 过滤水 • 蒸馏水 • 净化水	• 透镜研磨机 • 修正轮型加工机 • 加压运动稳定化	• 以磨粒的机械作用为主	• 载物台 • 光学元件 • 振动子基板 • 玻璃板
液中研磨	• 微细磨粒	• 合成树脂板	• 过滤水 • 蒸馏水 • 净化水	• 透镜研磨材料 • 液中浸渍	• 以磨粒的机械作用为主 • 用加工液进行磨粒分散，并起缓冲冷却效果	• 硅片
机械——化学抛光	• 微细磨粒	• 人造革	• 湿式	• 高速高压运转	• 通过机械化学作用去除反应生成物	• 硅片
	• 软质磨粒	• 玻璃板	• 干式			• 蓝宝石片
化学——机械抛光	• 微细磨粒	• 软质研具	• 碱性液 • 酸性液	• 修正轮型加工机 • 双面研磨机	• 磨粒的机械作用和加工液的腐蚀作用	• GGG 基片 • Mn、Zn 铁素体
EEM	• 微细磨粒	• 使工件悬浮的动压研具	• 纯净水 • 碱性液	• 加工时通过动压使工件与工具呈非接触状态	• 由于磨粒的冲撞引起微量弹性破坏 • 破碎的磨粒与试件的原子、分子的相互作用 • 加工液的腐蚀作用	• 硅片 • 玻璃
非固体接触加工						
浮法抛光						
液面抛光	• 不使用磨粒	• 软质研具	• Br-甲醇 (甘油 20%)	• 保证工件与研具非接触状态的结构	• 利用加工液的腐蚀作用	• GaAs 晶片 • InP 晶片

在机械装置的小型化过程中出现两类机械，即小型机械和微型机械。可以这样划分：10mm~1mm 为小型机械，用精密加工的方法可以制造出来；1mm~1 μ m 为微型机械，需要用硅微加工技术或 LIGA 技术等微细加工方法才能制造出来。其中小型机械是传统机械的小型化，在工作原理、材料结构和设计理论等方面可以借鉴传统机械学。微型机械在尺度、构造、材料、制造方法和工作原理与传统机械截然不同，其学科基础、研究手段和研究内容也与传统机械学不同。

微型机械不是传统机械的简单微型化，而是指集微型机构、微型传动器以及信号处理和控制电路，甚至外围接口电路、通讯电路和电源等于一体的微型机电系统。因此，微型机械远远超出了传统机械的概念和范畴，是基于现代科学技术，用崭新的思维方法指导的产物。可应用微型机器的领域相当广泛、包括医疗、汽车运输、航空航天、环境、测量分析、制造系统、军事等，尤其以其在生物医学、环境、交通和国防领域的应用令人瞩目。

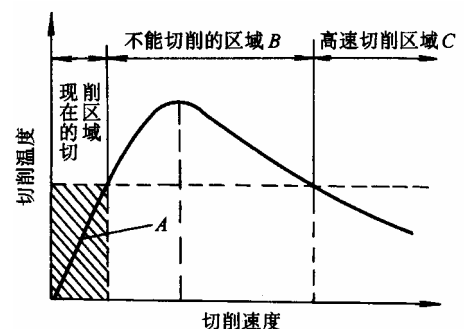
三、超高速切削

通常把切削速度比常规高 5~10 倍以上的切削叫做超高速切削。切削温度通常随切削速度升高而升高，但超过一定范围后，切削温度反而随切削速度的升高而下降如图 10-1 所示。超高速切削可以提高加工质量和生产率，节约能耗，是一项有综合效益的机械加工技术。超高速切削目前主要用于飞机、汽车及模具工业。

超高速切削希望刀具强度高、耐热性能好。刀具材料一般可根据工件材料来选择。常用的刀具材料有：带涂层的硬质合金刀具、陶瓷刀具、立方氮化硼 (CBN) 或聚晶金刚石 (PCD) 刀具。试验表明，在同等情况下，其寿命往往比常规速度下的刀具寿命还要长。

超高速机床，是实现超高速切削的前提条件和关键因素。超高速切削对机床的主要要求如下：

- (1) 要有一个适应于超高速运转的主轴部件及其驱动系统；
- (2) 要有一个快速反应的数控伺服系统和进给部件；
- (3) 高压大流量喷射冷却系统



- (4) 要有一个“三刚”(静刚度、动刚度、热刚度)特性都很好的机床支承件

第二节 CAD/CAE/CAM 技术

计算机的发展和广泛应用,大大提高了产品开发、设计、分析和制造的效率和产品性能。用计算机软件直接绘制产品结构,称为计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD);用计算机来对设计产品实时或者进行随后的分析称为计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE);用计算机来操纵各种精密机器(数控机床)以生产产品称为计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)。

一、CAD 的基本概念

计算机辅助设计(Computer Aided Design, 简称 CAD)是从上世纪 50 年代开始,随着计算机技术及其外围设备的发展而形成的一门新技术。如今, CAD 技术已广泛应用于电子、机械、航空、汽车、建筑以及环境工程等领域。

传统的产品设计是多次“设计——评价——再设计(修改)”的反复过程,它是以满足社会客观需求及提高社会生产力为目标的一种创造性劳动。设计工作是新产品研制的第一道工序,设计工作的质量和水平,直接关系到产品质量、性能、研制周期和技术经济效益。因此,在商品竞争剧烈的市场经济条件下,使设计方法及设计手段科学化、系统化、现代化是十分必要的。应用计算机辅助设计就是实现设计现代化的重要途径之一。

计算机辅助设计是指应用计算机系统,协助工程技术人员完成产品设计过程中各阶段的工作。在方案设计及技术设计阶段, CAD 应用尤为广泛。

在计算机辅助设计工作中,计算机的任务实质上是进行大量的信息加工、管理和交换。也就是在设计人员初步构思、判断、决策的基础上,由计算机对数据库中大量设计资料进行检索,根据设计要求进行计算、分析及优化,将初步设计结果显示在图形显示器上,以人机交互方式反复加以修改。经设计人员确认之后,在自动绘图机及打印机上输出设计结果。

经过多年的实践,证明 CAD 有以下特点:

(1) 制图速度快 一个制图人员用 CAD 技术绘图可提高工效 3~5 倍,加速了设计过程,使新产品能早日投入市场。

(2) 图样格式统一,质量高 不同技术人员在绘制同类零件时,由于习惯不一,绘出图样的格式不尽相同,给生产加工带来不便。用同一计算机绘图软件绘制的各种同类零件的格式是相同的,解决了这个问题。

(3) 修改设计快 当零件的图样存入计算机后,若需要对其作局部修改,以成为另一张新的零件图时, CAD 系统能非常方便、极快地完成此项工作。

(4) 设计计算快 若把零件的设计计算公式和表格编成程序存入计算机,使用时只要给出原始数据或边界条件,计算机就会很快地告诉用户最佳的计算结果。

(5) 设计时可预计产品的性能 在设计机器或零件时,有时要求对它们进行力学分析与仿真,这种工作靠人力完成非常困难,但用计算机来做却很方便。这样,普通的技术人员也能采用复杂的计算方法(如:有限元法和优化方法等)来改善产品的设计质量,提高它的性能,降低成本,从而做到在设计阶段就可以预估产品的性能。

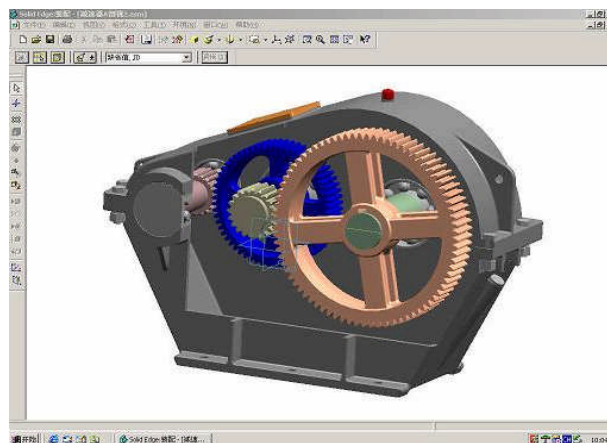
根据当今计算机硬件及软件的发展状况。预计 CAD 技术今后将在以下几方面进行重点研究,并将取得进展。

(1) CAD 技术的智能化 将领域专家的知识与经验,运用人工智能技术,归纳成一些规则,形成知识库。再利用推理机制,进行推理及判断,最终应用计算机处理后,获得具有专家水平的设计结果。“专家系统”是一种计算机程序,且是一种能够在专家水平上工作的计算机程序。“专家系统”具有领域专家的知识 and 能力。因此,专家系统能够在特定的领域和范围内,为解决复杂问题进行“知识”服务,即运用领域专家的专门知识和推理能力,解决在通常情况下难以处理的问题。

(2) 实体造型与仿真 实体造型是用基本体素组合,并通过集合运算和变形操作来建立三维形体的建模方法。它不仅可静态造型,还可进行动态造型。不仅能准确地表达三维物体的形状,还可通过彩色、光照、浓淡处理来增强显示物体的真实感;不仅能对所建立的模型提供几何信息,还能提供物体的体积、质量、加工要求等非几何信息。计算机仿真就是在计算机上建立一个工程设计的实际系统(如机构、机器、机械手、机器人等)的计算机模型,并通过运行仿真软件代替实际系统的运行,以便对设计结果进行试验和考核。仿真的内容十分广泛,设计阶段的仿真有应力分析、振动分析、机构动态分析等。制造阶段的仿真有数控仿真、机器人仿真、搬运仿真、测试仿真、加工刀具轨迹仿真等。仿真与三维实体造型关系十分密切,它的发展将依赖于实体造型与计算机图形学的发展。

(3) CAD 系统的集成化 CAD 系统的集成化是当前 CAD 技术发展的另一个重要方面。集成化形式之一,是将 CAD 与 CAM 集成为一个 CAD / CAM 系统。在这样的系统中,设计师可利用计算机,经过运动分析、动力分析、应力分析、确定零、部件的合理结构形状,自动生成工程图样文件,存放在数据库中。再由 CAD / CAM 系统,对数据库中的图形数据文件,转换后记录在各种存储介质上,直接用它控制计算机数控机床 (CNC) 去加工制造,形成所谓的“无图生产”。

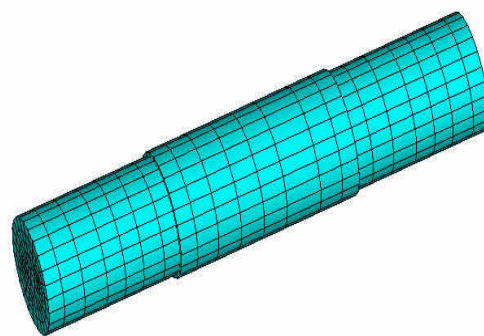
随着 CAD 技术的发展和日趋完善,以及 CAD 系统的普及和应用,可以预料,计算机辅助设计系统必将成为设计工作中不可缺少的手段,计算机辅助设计方法也将成为从事设计工作的工程技术人员必须掌握的基本技能。图 10-2 为用 CAD 建立的减速机三维数字化模型。



二、CAE 的基本概念

计算机辅助工程分析 (Computer Aided Engineering, CAE) 技术,是指在零件或整机的数字化特征建模完成之后,运用有限元及边界元等数值分析方法,对零件或整机对其未来的工作状态和运行行为进行结构、动力、运动及各种物理场耦合等一系列分析、模拟的计算机辅助分析方法,其目的是及早发现设计缺陷、优化结构并证实未来的产品功能和性能的可用性和可靠性。它与 CAD 和 CAM 技术构成了当今计算机技术在机械设计及制造领域最重要的三大支撑技术。

传统的机电产品开发是在产品零件的设计过程中,运用传统的材料力学、机械零件设计或类比的方法对一些重要零件进行强度校核,往往只注重于单个零件和力的作用。但在现实生产中,需要对产品进行复杂工况下全局的分析及优化。许多机电产品往往工作在一些复杂的物理环境中,如高温、磁场、流场等。对零部件强度、寿命的影响已不仅仅是力的作用,而是热、力、磁、流体等的耦合作用。而制作零件的材料在高温、强磁作用下,其物理、力学性能将发生巨大的变化。因此,CAE 技术的研究和应用应该是机械、力学 (包括计算力学、固体力学、流体力学)、传热学、电磁学和材料学等学科的交叉和结合。



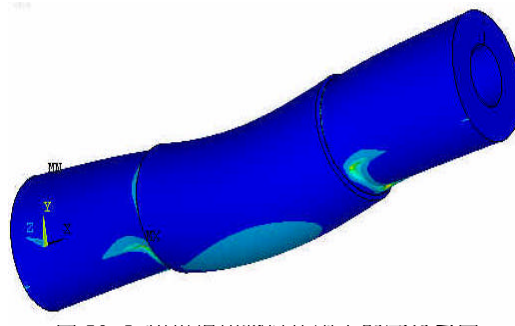
目前,商品化的 CAE 软件一般分为通用软件和专用软件两大类。一般情况下,通用的 CAE 软件包含较多的模块,可以进行多物理场的耦合计算,但分析过程中所需的数据往往由于涉及较多的工程背景知识,需要通过软件接口由使用者引入;专用的 CAE 软件的数据库比较齐全,但一般模块较少,耦合功能较弱。

一般,CAE 软件系统常常由三个独立的部分组成,即前置处理程序、主分析程序和后置处理程序。

前置处理程序的基本任务是根据输入对象的几何信息进行有限元几何造型,按照用户拟订的计算机模型自动生成网格,以及进行不同密度网格间的转换和修补等。图 10-3 为一托轮轴的有限元网格划分。

主分析程序用于工程的有限元分析,它由若干个功能库和子库组成,这些库和子库通过连接模块连成整体。一般的通用程序都有自成体系的数学库、执行矩阵运算、曲线拟合和函数插值等数学功能。

后置处理功能包括绘制应力、应变、位移、速度和加速度等空间和时间变化的曲线图。同时,还要求能对主分析程序的结果进行加工,如坐标变换、插值。曲线光滑、修订输出结果等。图 10-4 为托轮轴在载荷作用下的应力云图。



三、CAM 的基本概念

计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing) 是指利用计算机系统,通过计算机与生产设备直接的或

间接的联系,进行规划、设计、管理和控制产品的生产制造过程。关于 CAM 的概念,有两种理解,一种是狭义的 CAM,指数控自动编程(NCP),包括 NC 代码生成、与数控机床数控装置的软件接口等。另一种是广义的 CAM,除自动编程外,还包括工艺过程设计(CAPP)、制造过程仿真(MPS)、自动化装配(FA)、车间生产计划控制(SFC, shop—Floor Control),制造过程检测与故障诊断等,凡涉及到零件加工与检验,产品装配与检验的环节都属于广义 CAM 的范畴。

CAM 技术的发展大致分为三个阶段:上世纪 60 年代 CAM 以大型机为基础,价格昂贵;70 年代 CAM 系统以小型机为主机,使 CAM 技术得到了较为成熟的发展;80 年代以工作站为基础的 CAM 系统功能越来越强;近年来,由于 PC 机性能价格比大幅度提高,特别是奔腾机出现以后,以 PC 机为主机的 CAM 系统成为 CAM 系统的主流趋势。CAM 技术的未来发展趋势是集成化、智能化和网络化。

目前,CAM 的编程方式有手工编程即 APT 语言编程和图形交互式自动编程两种,手工编程方式将在下一章作详细介绍。这里仅对图形交互式自动编程作简单介绍。

图形交互式自动编程是以 CAD 生成的零件几何信息为基础,采用人机交互对话方式,在计算机屏幕上指定被加工件的几何特征,定义相关的加工参数,由计算机进行数据处理,并动态显示加工路径。仿真切削功能模拟加工环境进行切削,并进行切削干涉与碰撞检查,最后自动输出 NC 代码数据。

CAD/CAM 图像编程是一种全新的编程方法,与手工编程及 APT 语言编程比较,有以下几个特点:

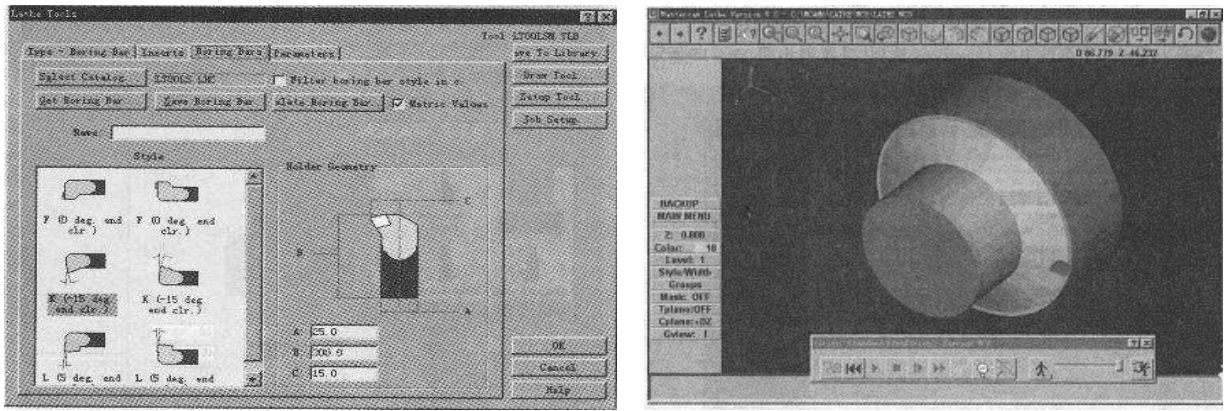


图 10-5 图形交互式自动编程的刀具选择及加工模拟

(1) 这种编程方法既不像手工编程那样,需用复杂的数学计算算出各节点的坐标数据,也不需要像 APT 语言编程那样,用数控编程语言去描绘零件几何形状、加工走刀过程及后置处理的源程序,而是在计算机上直接面向零件的几何图形以光标指点、菜单选择及交互对话的方式进行编程,其编程结果也以图形的方式显示在计算机上,所以该方法具有简便、直观、准确、便于检查的优点。

(2) 通常图形交互自动编程软件和相应的 CAD 软件是有机联在一起的一体化软件系统——既可用来进行计算机辅助设计,又可以直接调用设计好的零件图进行交互编程,对实现 CAD、CAM 一体化极为有利。

(3) 这种编程方法的整个编程过程是交互进行的,而不是像 APT 语言编程那样,事先用数控语言编好源程序,然后由计算机以批处理的方式运行,生成数控加工程序。这种交互式的编程方法简单易学,在编程过程中可以随时发现问题并进行修改。

(4) 编程过程中,图形数据的提取、节点数据的计算、程序的编制及输出都是由计算机自动进行的。因此,编程的速度快、效率高、准确性好。

(5) 此类软件可在通用计算机上运行的,不需要专用的编程机,所以非常便于普及推广。

基于上述特点,可以说 CAD/CAM 图像编程是一种先进的编程技术,是实现零件“无图加工”的关键技术,是数控编程软件的发展方向。

第三节 虚拟产品开发技术

一、虚拟现实

近年来,虚拟现实(Virtual Reality)技术被越来越多地应用于科学研究,已逐渐被认为是重要的科学探索工具。利用这项技术,在新产品、新计划或新概念还远没有成为现实之前,人们就能够以较为现实的方式对其进行观察和探索。从这个意义上讲,虚拟现实技术是一种非常独特的技术,很难有别的技术可以取而代之。虚拟设计正是这项技术在机械产品设计方面的一个应用。

1. 虚拟现实技术的概念

虚拟现实技术是人的想象力和电子学等相结合而产生的一项综合技术，它利用多媒体计算机仿真技术构成一种特殊环境，用户可以通过各种传感系统与这种环境进行自然交互，从而体验比现实世界更加丰富的感受。

2. 虚拟现实系统的特征

虚拟现实系统不同于一般的计算机绘图系统，也不同于一般的模拟仿真系统，它不仅能让用户真实地看到一个环境，而且能让用户真正感到这个环境的存在，并能和这个环境进行自然交互。总结发现虚拟现实系统具有以下特征：

自主性：在虚拟环境中，对象的行为是自主的，是由程序自动完成的，要让操作者感到虚拟环境中的各种生物是有“有生命的”和“自主的”，而各种非生物是“可操作的”，其行为符合各种物理规律。

交互性：在虚拟环境中，操作者能够对虚拟环境中的生物及非生物进行操作，并且操作的结果能反过来被操作者准确地、真实地感觉到。

沉浸感：在虚拟环境中，操作者应该能很好地感觉各种不同的刺激，沉浸感的强弱与虚拟表达的详细度、精确度、真实度有密不可分的关系。

虚拟现实系统除了具有常规的高性能计算机系统的硬件、软件外，还必须对以下关键技术提供强有力的支持。

- (1) 能以实时速度生成有逼真感的景物图像，即三维、全彩色、有明暗纹理的图像。
- (2) 能够高精度且实时地跟踪用户的头部和手部的动作。
- (3) 头戴显示器能产生高分辨率的图像和足够的视角。图 10-6 为 VR 屏幕头盔及数据手套。
- (4) 能对用户的动作产生力学反馈。

二、虚拟设计

虚拟设计（Virtual Design）是以“虚拟现实”技术为基础，以机械产品为对象的设计手段。借助这样的设计手段设计人员可以通过多种传感器与多维的信息环境进行自然地交互，实现从定性和定量综合集成环境中得到感性和理性的认识，从而帮助深化概念和萌发新意。

虚拟设计技术充分地利用了模拟仿真技术，但它又不同于一般的模拟仿真技术，它具有虚拟现实的特征，如：自主性、交互性、沉浸感等。

产品的设计和开发首先是满足市场竞争的需要。当今顾客对产品的要求越来越高，要求真正得到高性能、高附加值、能体现个性的产品，并要求高质量的售后服务等等。以往的大批量生产已经难以满足人们对商品规格多样化日益增长的需要，取而代之的将是小批量多规格的生产。为了解决这个矛盾，人们开始考虑在同一生产线上生产装配不同规格的产品，这无疑要求设计和制造技术应具有更高的灵活性。传统的设计手段已难以满足这样的要求，于是人们开始寻求新技术的支持。

多媒体技术的崛起和各种传感技术的高速发展极大地推动了虚拟现实技术的迅速成熟，市场上支持虚拟现实技术的软硬件越来越多。这种技术已经在许多行业找到了应用的领域，并已被用于产品设计之中。虚拟现实技术和产品设计的结合不仅可以帮助人们进行图形处理。强度计算等繁琐的工作，又可帮助设计人员进行创新设计。因此可以说这样的设计手段对缩短产品的开发设计周期具有非常重要的意义，另外，它可以把设计人员从键盘和鼠标上解脱下来，和设计对象进行更自然、更直观的交互。这样的系统便于操作，适合于具有不同专业背景的人员参与设计。再加上直观逼真的反馈（如三维立体图像、三维环绕声响和精细的触觉反馈）信息，可以使产品的最终用户参与设计这样有利于满足用户的各种消费心愿。

由于计算机辅助设计技术发展得较早，人们已经积累了不少的经验和数据，所以虚拟设计技术应充分地利用计算机辅助设计已获得的这些宝贵财富。另外，虚拟设计系统比现行的 CAD 系统具有更强的人机交互能力，设计人员可以通过视

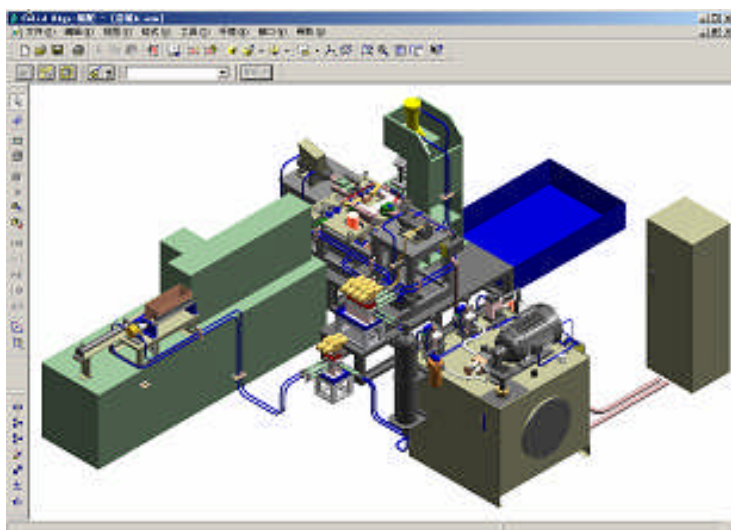


图 10-7 某产品生产线的虚拟设计

觉、听觉、触觉及语音、手势等与设计的对象在虚拟的环境中进行自然地、直观的交互。由此可见，这项技术使得计算机在产品的辅助设计方面向前推进了一步，使计算机辅助设计的工作范围从规范性工作向创造性工作迈进。

三、虚拟制造

“虚拟制造”（Virtual Manufacturing）也是新近产生的一个概念，其定义可以综合概括如下：

虚拟制造是以虚拟现实技术为基础的、一种集成的综合制造环境，用于加强一个企业各层次的决策与管理。

根据侧重点的不同可以将虚拟制造系统划分为三个类别。

（1）以设计为中心的虚拟制造：用于在产品的开发设计过程中为设计研究人员提供有关产品的制造信息。这样的虚拟制造系统通过对产品的某种特殊性能（如，质量、装配性能、操作性能等）的模拟仿真来优化产品的设计及工艺；并以不同角度和精度，利用对产品各制造工序的模拟仿真，来帮助产品设计和生产决策。

（2）以生产为中心的虚拟制造：通过对生产过程的模拟仿真来经济、快捷地评价各种工艺方案、生产效率以及资源的供求状况，从而帮助优化制造环境的配置和生产的供给计划。

（3）以控制为中心的虚拟制造：通过对控制模型及生产过程模拟仿真，帮助在整个生产周期中进行优化处理。它能够为用户提供一个虚拟的环境，用来评价新产品的设计、原有产品的改进以及生产调度的优劣，并为优化制造工艺、提高制造水平提供辅助信息。

总之，虚拟制造是在产品投入生产之前，利用虚拟现实技术对产品进行预先试制，进而发现问题、改进设计、完善生产工艺及确定和修改其他围绕产品设计、生产和管理的各项活动规程。它涉及到从底层生产线到企业最高层的所有生产过程，包括产品的市场分析、开发研究、工艺装配、生产调度、采购供应、销售及售后服务等各个环节。

第五节 计算机集成制造系统

一、计算机集成制造（Computer Integrated Manufacturing）的概念

国际标准化组织 ISO 在 1992 年提出的 CIM 的定义为：“CIM 是把人和经营知识及能力与信息技术、制造技术综合应用，以提高制造企业的生产率和灵活性；由此将企业所有的人员、功能、信息和组织诸方面集成为一个整体”。

CIMS 的主要特征是集成化和智能化。集成化反映了自动化的广度，把系统空间扩展到市场、设计、加工、检验、管理、销售以及用户服务等全部过程；而智能化则体现了自动化的深度，即不仅涉及物料控制的传统体力劳动自动化，还包括信息控制的脑力劳动自动化。

二、CIMS 的基本构成

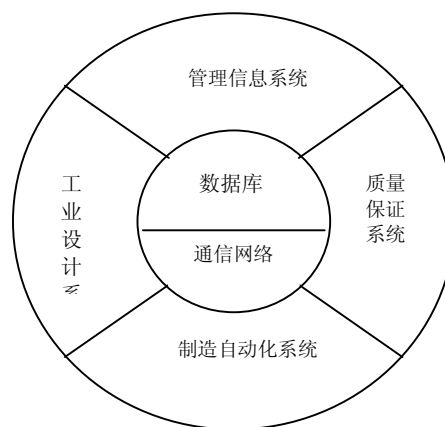
CIM 是人、经营和技术三者的集成。如果单从技术组成的角度，CIMS 由 4 个应用分系统和 2 个支撑分系统组成，如图 10-9 所示。4 个应用分系统是：管理信息系统（MIS Management Information System）、工程设计系统（EDS, Engineering Design System）、质量保证系统（QAS, Quality Assurance System）和制造自动化系统（MAS, Manufacturing Automation System）。2 个支撑分系统是：数据库（DB）和 通讯网络（NET）。

1. 管理信息系统

一个工业企业的管理信息，就是指整个生产经营过程中产、供、销、人、财、物的有关信息，一般可把管理信息系统分解为经营管理、物料管理、生产管理、人力资源管理和财务管理等几个子系统。

在 QM 环境下，MIS 是以制造资源计划（MRP II, Manufacturing Resource Planning）为核心，把各个子系统集成起来，形成一个计算机管理系统。它涉及企业中整个物料流和信息流。物料流指原材料、外构件、半成品、零件、组件、部件，从加工、检验、装配、试验、存储、运输直到产品出厂的全过程。而信息流则是反映物料流的状态，追踪和控制物料流的运动的。图纸、计划表、账本、统计表、工程文件等都是信息的载体。信息流中的信息可以分为两类：①起计划调节作用的控制信息，超前于物料流；②反映物料流状态的反馈信息，滞后于物料流。缩短信息流和物料流之间的时差是管理信息系统功能的重要指标。

管理信息系统的基本功能有 3 个方面：①信息处理，包括信息的收集、传输、加工和查询等；②事务



管理,指经营计划管理、物料管理、生产管理、财务管理、人力资源管理及质量管理等;③辅助决策,分析归纳现有信息,利用各种有关的数学方法和软件,提供辅助决策信息。

2. 工程设计系统

设计阶段是对产品成本影响最大的部分,也是对产品质量起着最重要影响的部分。工程设计系统 EDS 通常指 CAD / CAPP / CAM 的集成,有时还包括工程分析 CAE。

3. 质量保证系统

产品质量是赢得市场竞争的一个极其重要的因素。在 CIMS 中,质量保证系统除了要具有直接实施检测的功能外,它的重要任务是采集、存储和处理企业的质量数据,并以此为基础进行质量分析、评价、控制、规划和决策。质量数据存在于产品生命周期的全过程中,从市场调研、设计、原材料供应、制造、产品销售直到售后服务等,这些信息的采集、分析和反馈便形成一系列各种类型的闭环控制,从而保证产品的最终质量能满足客户需求。

质量保证系统可由 3 个部分组成:①质量计划制定:在生产前,对生产准备各环节制定设计有关质量计划;②制造过程质量信息管理:对生产过程中质量信息进行采集、分析与评价,并对生产加工过程进行质量控制;③质量综合信息管理,包括质量指标考核与分析、质量成本管理、质量文档管理等。质量保证系统功能结构图如图 10-15 所示。

4. 制造自动化系统

自动化技术已广泛应用于生产的过程控制中。制造自动化系统是通过计算机将企业内部生产活动所需的各自分散的自动化过程有机地集成起来,从而使其成为适用于多品种、中小批量生产的高效益、高柔性的智能化的生产制造系统。

三、CIMS 集成的 3 个阶段

CIMS 最重要的特征是集成化。集成的概念不只是把各个单元技术互连起来,而是一个企业内全方位的综合问题。集成过程可分为物理系统集成—应用集成—经营集成 3 个阶段。

1. 物理系统集成 物理系统集成就是在制造自动化设备和数据处理设施之间,用通讯网络互连起来,使各个单项技术应用系统(被称为“自动化岛”)相互沟通,能够互相交换数据和信息。

2. 应用集成 应用集成关心的是整个系统内各部分的应用软件及其用户,包括人和机器之间的控制和信息集成。首先要有公共数据库,通过系统内和系统间的通讯,共享和处理各种信息资源。

3. 经营集成 这是 CIMS 集成的最高阶段,从技术实现上来说,包含 3 个方面。

1) 生产和过程的仿真 对底层生产过程进行物理过程动态调度的仿真和优化;对上层生产计划的安排与调整进行仿真统计分析,提供决策参考信息。

2) 自动化的经营过程监控 对全企业范围内进行综合数据采集和统计分析,使高层人员能随时掌握采购、生产、销售等各个经营过程情况。

3) 基于知识的决策支持 建立决策支持所需的模型库、知识库、方法库,利用已建立的分布式数据库,提供相应软件和工具,辅助高层决策者使之更科学地完成其决策过程。

经营集成中更重要的问题是人的集成,经营思想能否正确贯彻、技术工具能否很好使用,都取决于人。人的集成实际上是技术改造和社会改造相结合的问题,是工程技术和社会科学相结合的问题,需要在 CIMS 实施中得到充分重视。

从思想上要求在设计时就考虑制造和装配的可能性和方便;另一方面,开发相应软件,辅助检查其可制造性和可装配性,以及检查冲突和干涉。概括来讲,在设计过程中必须考虑到下游过程的各种因素,以保证在制造的全过程中满足各过程之间的各种需求,在产品销售后的整个生命周期内满足用户的各种需求。

第六节 快速原型技术

上世纪 80 年代末,出现了一种崭新概念的 CAD / CAM 技术,这种技术具有不同的方法和名称,如快速原形制作(Rapid Prototyping)、薄层制造(Layer Manufacturing)、自由形状粉末造型(Free Form Power Modeling)等。然而,根据其实现制造的过程及特点,也可称为生长型制造技术,或者统称为快速原形技术。它的迅速发展,不仅体现在制造思想和实现方法上有了突破,更重要的是在制作零件的质量、性能、制作速度等方面,也取得了很大的进展,是快速产品开发的一种重要支撑技术。

快速原形技术的原理是,在 CAD / CAM 技术的支持下,采用了粘结、熔结、聚合作用或化学反应等手段,有选择地固化液体(或粘结固体)材料,从而快速制作出所要求形状的零部件。制造方式是不断地把材料按照需要添加在未完成的工件上,直至零件制作完毕。即所谓“使材料生长而不是去掉材料的制造过程”。快速出样技术的出现,开辟了不用刀具制作零件的新途径,为尚不能用传统方法制作或难以制作的零件和模型,提供了一种新的制造手段。快速出样技术能使 CAD 的几何图形快速实体化,在最短时间

内得到实体样件。

一、RPT 的类型

(一) STL (Stereo Lithography) 工艺——立体平版印刷成型工艺

STL 是世界上第一种快速原型技术。其基本原理为：STL 将所设计零件的三维计算机图像数据，转换成一系列很薄的模样截面数据。然后在快速成型机上，用可控制的紫外线激光束，按计算机切片软件所得到的每层薄片的二维图形轮廓轨迹，对液态光敏树脂进行扫描固化，形成连续的固化点，从而构成模样的一个薄截面轮廓。下一层以同样的方法制造。该工艺从零件的最底薄层截面开始，一次一层，连续进行，直到三维立体模样制成。一般每层厚度为 $0.076\sim 0.381\text{ mm}$ ，最后将模样从树脂液中取出，进行最终的硬化处理，再打光、电镀、喷涂或着色即可。图 10-9 所示为 STL 工艺原理示意图。

用 STL 工艺快速制成的立体树脂模可代替蜡模进行结壳，型壳焙烧时去除树脂模，得到中空型壳，即可浇注出具有高尺寸精度和几何形状、表面光洁度较好的各种合金铸件。

(二) SLS (Selective Laser Sintering) 工艺——选择性烧结成型工艺

SLS 工艺是在一个充满氮气的惰性气体加工室中，先将一层很薄的可熔粉末沉积到圆柱形容器的底部的可上、下移动的板上，按 CAD 数据控制 CO_2 激光束的运动轨迹，对可熔粉末材料进行扫描熔化，并调整激光束强度正好能将 $0.125\sim 0.25\text{ mm}$ 的粉末烧结。这样，当激光在模样几何形状所确定的区域内移动时，就能将粉末烧结，从而生成模样的截面形状。同 SLA 工艺一样，每层烧结都是在先制成的那层顶部进行。未烧结的粉末在制完模后，可用刷子或压缩空气去掉。图 10-10 为 SLS 工艺的原理示意图。

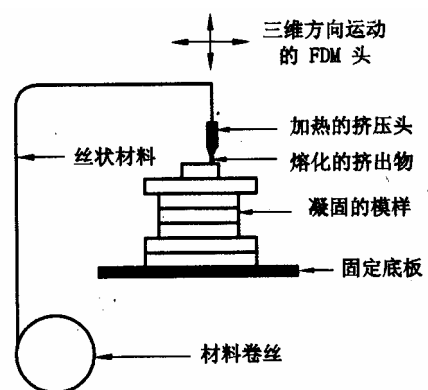
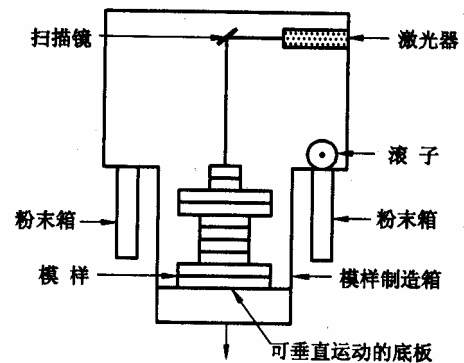
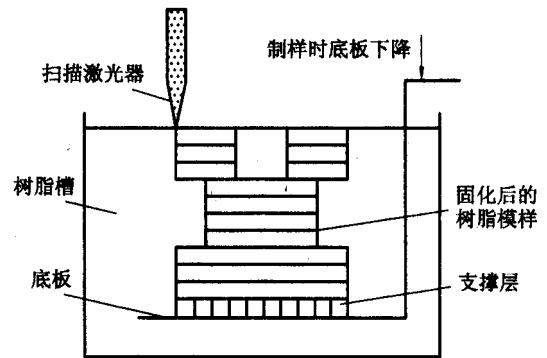
SLS 所用的制模材料包括熔模铸造蜡料、聚碳酸酯和尼龙。别的制模材料如高性能的热塑性塑料，陶瓷粉末及金属粉末也正在研究。SLS 用熔模铸造蜡所制的蜡模，公差为 $\pm 0.13\sim \pm 0.25\text{ mm}$ ，表面粗糙度为 $\text{Ra}6.3\sim 3.2\text{ }\mu\text{ m}$ 。

SLS 工艺成功地生产了汽缸头熔模铸件（原用砂型铸造要 16 周时间，现用 SLS 工艺只需 4 周）。该工艺很适合那些采用机械加工方法难以成型或加工的几何形状复杂的聚碳酸酯模。该工艺的发展方向是用金属粉末和陶瓷粉末来直接制造工具、模具和铸造型壳。

(三) FDM (Fused Deposition Modelling) 工艺——熔丝沉积成型工艺

FDM 工艺是最新申报专利的 RPT 之一。它使用一个外观非常像二维平面绘图仪的装置，只是笔头被一个挤压头代替，它可挤压出一束非常细的蜡状塑料（热塑性）或熔模铸造蜡，并以此逐步挤入热熔塑料丝的方法来画出和堆积由切片软件所形成的每一二维切片薄层。同理，制造模样从底部开始，一层一层进行，由于热塑性树脂或蜡冷却很快，这样形成了一个由二维薄层轮廓堆集并粘结成的立体模样（树脂模或蜡模）。图 10-11 所示为 FDM 艺原理示意图，图 10-12 是放大的 FDM 挤压头的示意图。

与其它 RPT 成型工艺相比，用 FDM 成型工艺制模时，其模样上的突出部分无需支承也能制出，制出的模样表面光洁，尺寸精度更高，且消除了因层间粘结不良而形成的层间台阶毛刺缺陷和分层问题。用这种方法得到的零件的尺寸和形状精度大约可达到 0.15 mm ，如果要为熔模铸造工艺制做零件模型，可采用的材料有热塑性塑料以及模蜡。



(四) LOM (Laminated Object Manufacturing)

工艺——分层叠纸制造成型工艺

LOM 工艺的基本原理是：首先将需进行快速成型的产品的三维图形输入计算机的成型系统，用切片软件对该三维图形进行切片处理，得到沿产品高度方向上的一系列横截面轮廓线。单面涂有热熔胶的纸卷套在纸辊上，并跨过支承辊缠绕到收纸辊上。步进电机带动收纸辊转动，使纸卷沿图中箭头方向移动一定的距离。工作台上升至与纸接触，热压辊沿纸面自右向左滚压，加热纸背面的热熔胶，并使这一层纸与基底上的前一层纸粘合。 CO_2 激光器发射的激光束经反射镜和聚焦镜等组成的光路系统到达光学切割头，激光束跟踪零件的二维横截面轮廓数据，进行切割，并将轮廓外的废纸余料切割出方形小格，以便成型过程完成后易于剥离余料。每切割完一个截面，工作台连同被切出的轮廓层自动下降至一定高度，然后步进电机再次驱动收纸辊将纸移到第二个需要切割的截面，重复下一次工作循环，直至形成由一层层横截面粘叠的立体纸模样。然后剥离废纸小方块，即可得到性能似硬木或塑料的“纸质模样产品”。零件的几何模型加工完之后，不属于工件的区域就被分离出去了，零件模型的表面还应根据要求用手工进行后处理。分层实体制造法可以用厚度在 $0.05\sim 0.5\text{mm}$ 之间的纸箔作为原材料，所得到的模型的尺寸和形状精度在 0.25mm 的范围内。图 10-12 所示为 LOM 工艺原理示意图。

与其它 RPT 技术相比，LOM 艺具有下列优点：

(1) 无需用激光束扫描所制模样的整个二维横截面，只需沿其横截面的内、外周边轮廓线进行切割。故在短时间内（如几小时、几十小时），就能制出形状复杂的零件模样。

(2) 成型件的机械性能较高。LOM 工艺的制模材料是用涂有热熔胶和特殊添加物，使其成型件硬如胶木，有较好的机械性能，表面光滑，能承受 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 的高温，必要时可再对成型件进行机械加工。

(3) 成型件尺寸大，LOM 艺是最适合制造大尺寸模样的快速成型工艺。目前已制出的最大成型件尺寸为 $1200\text{mm}\times 750\text{mm}\times 550\text{mm}$ 。如发动机、汽缸体等中大型精密铸件。

鉴于上述优点，LOM 工艺已得到迅速发展。

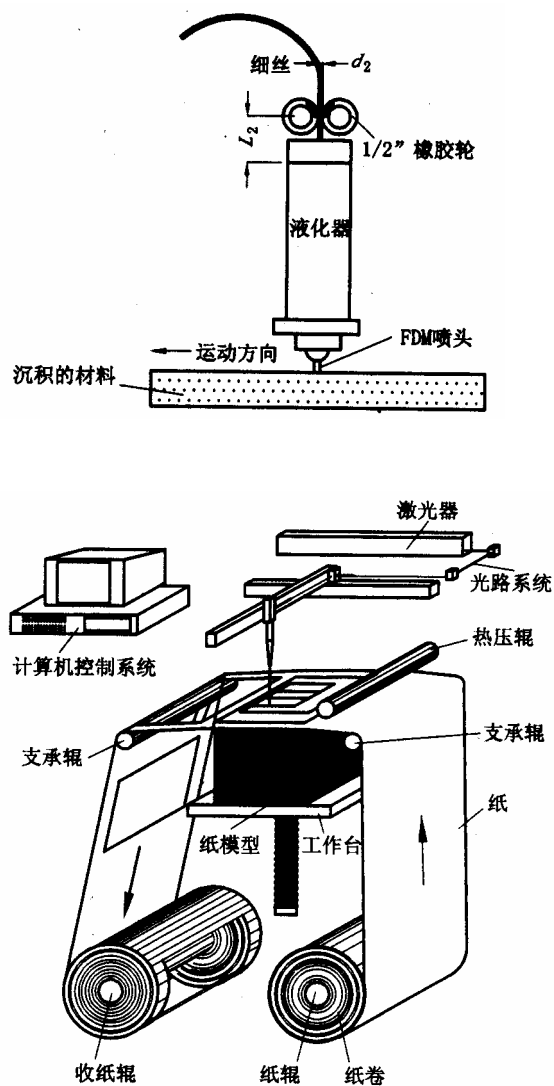
(五) DSPC (Direct Shell Production Casting) 工艺——直接制壳生产铸件的工艺

DSPC 工艺与迄今所描述的制壳工艺有本质上的不同，它允许在计算机屏幕上进行零件设计直到浇注铸造模拟。它直接利用 CAD 数据自动制造陶瓷型壳，而无需模具和压型，使熔模铸造省去了制压型、压蜡模及涂料等繁杂的工序，大大缩短了熔模铸件的生产周期。DSPC 将铸造和计算机数控 (CNC (Computer Numerical Control)) 的优点综合于金属零件的制造工艺中，是一种很有生命力的 RPT 新工艺。

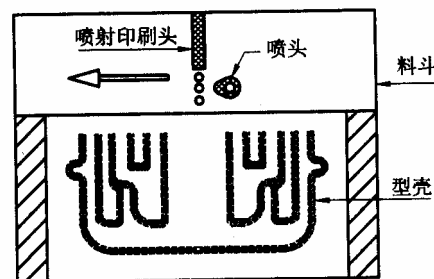
DSPC 的工作原理如下：(图 10-14 所示为 DSPC 工艺原理示意图)

DSPC 主要由两大部分组成，即型壳设计部分 SDU 和型壳制造部分 SPU。

SDU 将所制零件的 CAD 模样转换为型壳的数字化模样，并显示在屏幕上。当确定好每个型壳上零件的数量、型壳壁厚以及收缩率、浇注系统等铸造参数后，计算机就能很快显示出所制铸件型壳的几何形状，并进行铸造工艺的模拟。然后将有关数据传输给 SPU，并控制其工作。



SPU 包括一个用来盛铝矾土陶瓷粉末的料箱。计算机根据 SDU 的数据, 精确控制料箱的上下移动和印刷头的运动轨迹。印刷头以光栅形式运动。当印刷头在料箱中的耐火材料粉末表面掠过时, 按计算机的指令会“喷”出粘结剂。有粘结剂的区域内的耐火材料粉末粘结在一起, 形成型壳的一个截面, 然后喷头再喷出一层粉末, 这样从底部开始, 一层一层进行, 最后就制成了具有整体芯的型壳。未被粘结的耐火材料粉末可以对以后的粘结展起支撑作用。然后型壳经焙烧, 回收未粘结的粉末, 就可以浇注金属液了。



二、RPT 的应用及发展

目前快速原型技术的应用可概括如下列方面:

1. 用 RPT 制造母模, 生产金属或塑料产品;
 - (1) 用 RPT 母模复制硅橡胶型, 生产金属件, 产品精度可达 $\pm 0.5\text{mm}$;
 - (2) 用 RPT 母模复制硬环氧树脂靠模, 加工制造注塑模;
 - (3) 用 RPT 母模代替木模制造砂型, 生产注塑模或金属件;
 - (4) 用 RPT 母模进行熔模铸造。

2. 制造新产品样品, 对其形状及尺寸设计进行直观评估

在新产品设计阶段, 虽然可以借助设计图纸和计算机模拟, 对产品进行评价, 但不直观, 特别是形状复杂的产品, 往往因难于想象其真实形貌。采用 RPT 可以快速制造样品, 供设计者和用户直观测量, 并可迅速反复修改、制造, 可大大缩短新产品的设计周期, 使设计符合预期的形状和尺寸要求。

3. 用 RPT 制件进行产品性能测试与分析

由于用特殊纸制造 RPT 制件有较好的机械性能, 经表面喷涂金属 (锌或铝) 后有更好的防潮和抗高温特性, 因而可用于产品的部分性能测试与分析。如运动特性测试、风洞试验、有限元分析结果的实体表达, 零件装配性能判断等。

4. 在医学上的应用

外科医生已利用 CT 扫描和 MRI 磁共振图像所得数据, 用 RPT 制造模样, 以便策划头颅和面部的外科手术。他们还用 RPT 模样进行复杂手术的演习, 为骨移植设计样板。牙科医生已利用病人牙齿的 RPT 模样进行牙病的诊断和手术安排。

总之, RPT 的发展, 使熔模铸件的近净成形技术发生了突飞猛进的进步。从而使熔模铸件在质量、价格和交货期上可与其它铸造方法, 以及铸造领域之外的其它成型方法进行竞争, 保持和扩大了市场。RPT 已在制造业引起震撼, 在不久的将来必将会有更广泛的使用和更大的发展。

复习思考题

1. 简述 CAD 的特点。
2. 在 CAD 技术中, 计算机主要起到什么作用?
3. 简述 CAE 的特点。
4. 一般 CAE 软件的三个独立组成部分是什么, 各起什么作用?
5. 简述 CAM 的特点。
6. 在 CAM 技术中, 图形交互式自动编程的含义是什么?
7. 简述虚拟现实技术的特征。
8. 简述计算机集成制造 (CIM) 的概念及 CIMS 的组成。
9. RPT 是什么意思?
10. RPT 有哪几种类型, 它们有何异同点?
11. 在 RPT 种类中哪一种使得铸件适时生产成为可能, 为什么?

第十一章 数控加工技术

第一节 概述

一、数控机床及其特点

数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 是指采用数字形式信息控制机床。详言之, 凡是用数字化的代码将零件加工过程中所需的各种操作和步骤以及刀具与工件之间的相对位移量等记录在程序介质上, 送入计算机或数控系统, 经过译码、运算以及处理, 控制机床的刀具与工件的相对运动, 加工出所需要的工件的一类机床即为数控机床。

数控机床较好地解决了复杂、精密、小批、多变的零件加工问题, 是一种灵活的、高效能的自动化机床, 尤其对于约占机械加工总量 80% 的单件、小批量零件的加工, 更显示出其特有的灵活性。概括起来, 采用数控机床有以下几方面的好处:

- ①提高加工精度, 尤其提高了同批零件加工的一致性, 使产品质量稳定;
- ②提高生产效率, 一般约提高效率 3~5 倍, 使用数控加工中心机床则可提高生产率 5~10 倍;
- ③可加工形状复杂的零件;
- ④减轻了劳动强度, 改善了劳动条件;
- ⑤有利于生产管理和机械加工综合自动化的发展。

然而, 数控机床毕竟是一种高度自动化的机床, 技术复杂, 成本较高。在实际采用时, 一定要充分考虑其技术经济效益。目前, 选用数控机床时主要考虑以下三种因素: 即单件、中小批量的生产; 形状比较复杂, 精度要求高的加工; 产品更新频繁, 生产周期要求短的加工。凡是符合这三种因素之一的情况, 采用数控机床, 对于改进产品质量、减轻工人劳动强度、提高经济效益等, 都会获得显著的效果。

二、数控机床的组成

数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服系统和机床本体组成。图 11-1 的实线所示为开环控制的数控机床框图。

为了提高机床的加工精度, 在上述系统中再加入一个测量装置 (即图 11-1 中的虚线部分), 这样就构成了闭环控制的数控机床框图。开环控制系统的工作过程是这样的: 将控制机床工作台运动的位移量、位移速度、位移方向、位移轨迹等参量通过控制介质输入给机床数控装置, 数控装置根据这些参量指令计算得出进给脉冲序列 (包含有上述 4 个参量), 然后经伺服系统转换放大, 最后控制工作台按所要求的速度、轨迹、方向和距离移动。若为闭环系统, 则在输入指令值的同时, 反馈检测机床工作台的实际位移值, 反馈量与输入量在数控装置中进行比较, 若有差值, 说明二者间有误差, 则数控装置控制机床向着消除误差的方向运动。现将各组成部分简述如下:

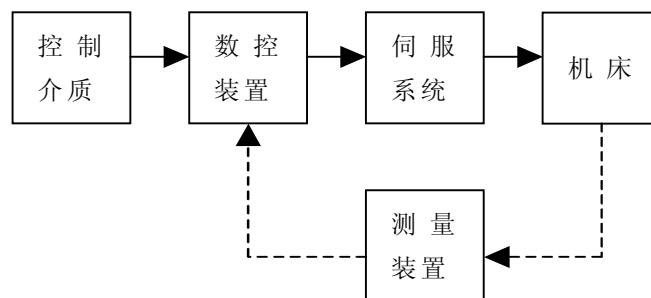


图 11-1 数控机床的组成

1. 控制介质 数控机床工作时, 不需要工人去摇手柄操作机床, 但又要自动地执行人们的意图, 这就必须在人和数控机床之间建立某种联系, 这种联系的媒介物称之为控制介质 (或称程序介质、输入介质、信息载体)。控制介质可以是穿孔带, 也可以是穿孔卡、磁带、磁盘或其他可以储存代码的载体。至于采用哪一种, 则取决于数控装置的类型。而在 CAD/CAM 集成系统中, 将其程序直接送入数控装置, 不需上述控制介质。

2. 数控装置 数控装置是数控机床的中枢, 在普通数控机床中一般由输入装置、存储器、控制器、运算器和输出装置组成。数控装置接收输入介质的信息, 并将其代码加以识别、储存、运算, 输出相应的指令脉冲以驱动伺服系统, 进而控制机床动作。在计算机数控机床中, 由于计算机本身即含有运算器、控制器等上述单元, 因此其数控装置的作用由一台计算机来完成。

3. 伺服系统 伺服系统的作用是把来自数控装置的脉冲信号转换为机床移动部件的运动, 使工作台 (或溜板) 精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动, 最后加工出符合图纸要求的零件。因此伺服系统的性能是决定数控机床的加工精度、表面质量和生产率的主要因素之一。

4. 机床 数控机床中的机床, 在开始阶段使用通用机床, 只是在自动变速、刀架或工作台自动转位和手柄等方面作些改变。实践证明: 数控机床除由于切削用量大、连续加工发热多等影响工件精度外, 并且由于是自动控制, 在加工中不能像在通用机床上那样可以随时由人工进行干预。所以其设计要求比通用机床更严格, 制造要求更精密。因而后来在数控机床设计时, 采用了许多新的加强刚性、减小热变形、提高精度等方面的措施, 使得数控机床的外部造型、整体布局、传动系统以及刀具系统等方面都已发生了很大

的变化。

三、数控机床的分类

目前,数控机床品种已经基本齐全,规格繁多,据不完全统计,已 400 多个品种规格。可以按照多种原则来进行分类。但归纳起来,常见的是以下面 4 种方法来分类的。

(一) 按工艺用途分类

(1) 一般数控机床 这类机床和传统的通用机床种类一样,有数控的车、铣、镗、钻、磨床等等,而且每一种又有很多品种,例如数控铣床中就有立铣、卧铣、工具铣、龙门铣等。这类机床的工艺可能性和通用机床相似,所不同的是它能加工复杂形状的零件。

(2) 数控加工中心机床 这类机床是在一般数控机床的基础上发展起来的。它是在一般数控机床上加装一个刀库(可容纳 10~100 多把刀具)和自动换刀装置而构成的一种带自动换刀装置的数控机床(又称多工序数控机床或镗铣类加工中心,习惯上简称为加工中心—Machining Center),这使数控机床更进一步地向自动化和高效化方向发展。

(3) 多坐标数控机床 有些复杂形状的零件,用三坐标的数控机床还是无法加工,如螺旋桨、飞机曲面零件的加工等,需要三个以上坐标的合成运动才能加工出所需形状。于是出现了多坐标的数控机床,其特点是数控装置控制的轴数较多,机床结构也比较复杂,其坐标轴数通常取决于加工零件的工艺要求。现在常用的是 4, 5, 6 坐标的数控机床。

(二) 按数控机床的运动轨迹分类

(1) 点位控制数控机床 这类机床的数控装置只能控制机床移动部件从一个位置(点)精确地移动到另一个位置(点),即仅控制行程终点的坐标值,在移动过程中不进行任何切削加工,至于两相关点之间的移动速度及路线则取决于生产率。为了在精确定位的基础上有尽可能高的生产率。所以两相关点之间的移动先是以快速移动到接近新的位置,然后降速 1~3 级,使之慢速趋近定位点,以保证其定位精度。这类机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床和数控测量机等,其相应的数控装置称之为点位控制装置、

(2) 点位直线控制数控机床 这类机床工作时,不仅要控制两相关点之间的位置(即距离),还要控制两相关点之间的移动速度和路线(即轨迹)。其路线一般都由和各轴平行的直线段组成。它和点位控制数控机床的区别在于:当机床的移动部件移动时,可以沿一个坐标轴的方向(一般地也可以沿 45° 斜线进行切削,但不能沿任意斜率的直线切削)进行切削加工,而且其辅助功能比点位控制的数控机床多,例如,要增加主轴转速控制、循环进给加工、刀具选择等功能。这类机床主要有简易数控机床、数控镗铣床和数控加工中心等。相应的数控装置称之为点位直线控制装置。

(3) 轮廓控制数控机床 这类机床的控制装置能够同时对两个或两个以上的坐标轴进行连续控制。加工时不仅要控制起成和终点,还要控制整个加工过程中每点的速度和位置,使机床加工出符合图纸要求的复杂形状的零件。它的辅助功能亦比较齐全。这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控磨床和电加工机床等。其相应的数控装置称之为轮廓控制装置(或连续控制装置)。

(三) 按伺服系统的控制方式分类

数控机床按照对被控制量有无检测反馈装置可以分为开环和闭环两种。在闭环系统中,根据测量装置安放的位置又可分为全闭环和半闭环两种。在开环系统的基础上,还发展了一种开环补偿型数控系统。

(四) 按数控装置分类

(1) 硬线数控 又称普通数控,即 NC。这类数控系统的输入、插补运算、控制等功能均由集成电路或分立元件等器件实现。一般来说,数控机床不同,其控制电路也不向,因此系统的通用性较差,因其全部由硬件组成,所以功能和灵活性也较差。这类系统在 70 年代以前应用得比较广泛。

(2) 软线数控 又称计算机数控或微机数控,即 CNC 或 MNC。这类系统利用中、大规模及超大规模集成电路组成 CNC 装置,或用微机与专用集成芯片组成,其主要的数控功能几乎全由软件来实现,对于不同的数控机床,只须编制不同的软件就可以实现,而硬件几乎可以通用。因而灵活性和适应性强,也便于批量生产,模块化的软、硬件,提高了系统的质量和可靠性。所以,现代数控机床大都采用 CNC 装置。

第二节 常用数控机床简介

一、数控车床

(一) 数控车床的组成及布局

典型的数控车床如图 11-2 所示。

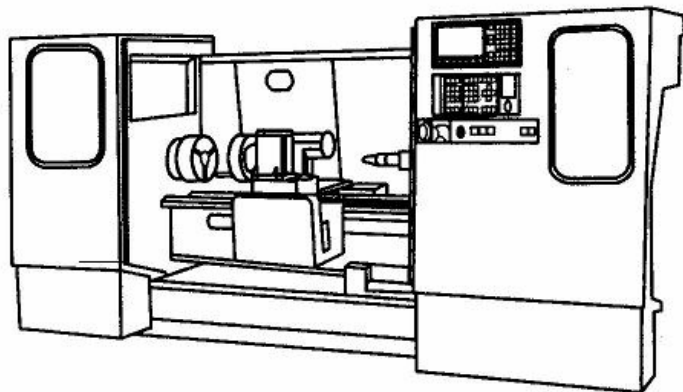


图 11-2 数控车床

与卧式车床相比较，其结构上仍然是由主轴箱、刀架、进给传动系统、床身、液压系统、冷却系统、润滑系统等部分组成，只是数控车床的进给系统与卧式车床的进给系统在结构上存在着本质上的差别。卧式车床主轴的运动经过挂轮架、进给箱、溜板箱传到刀架实现纵向和横向进给运动。而数控车床是采用伺服电动机经滚珠丝杠，传到滑板和刀架，实现Z向（纵向）和X向（横向）进给运动。可见数控车床进给传动系统的结构较卧式车床大为简化。数控车床也有加工各种螺纹的功能，那么主轴的旋转与刀架的移动是如何保持同步关系的呢？一般是采取伺服电动机驱动主轴旋转，并且在主轴箱内安装有脉冲编码器，主轴的运动通过同步齿形带 1:1 的传到脉冲编码器。当主轴旋转时，脉冲编码器便发出检测脉冲信号给数控系统，使主轴电动机的旋转与刀架的切削进给保持同步关系，即实现加工螺纹时主轴转一转，刀架Z向移动工件一个导程的运动关系。

（二）数控车床的用途

数控车床与卧式车床一样，也是用来加工轴类或盘类的回转体零件。但是由于数控车床是自动完成内外圆柱面、圆锥面、圆弧面、端面、螺纹等工序的切削加工，所以数控车床特别适合加工形状复杂的轴类或盘类零件。

数控车床具有加工灵活、通用性强、能适应产品的品种和规格频繁变化的特点，能够满足新产品的开发和多品种、小批量、生产自动化的要求，因此被广泛应用于机械制造业，例如汽车制造厂、发动机制造厂等等。

二、数控铣床

（一）数控铣床的特点

数控铣床是一种用途广泛的机床，分有立式和卧式两种，一般数控铣床是指规格较小的升降台式数控铣床，其工作台宽度多在 46mm 以下，规格较大的数控铣床，例如工作台宽度在 500mm 以上的，其功能已向加工中心靠近，进而演变成柔性加工单元。数控铣床多为三坐标、两轴联动的机床，也称两轴半控制；即在 X、Y、Z 三个坐标轴中，任意两轴都可以联动。一般情况下，在数控铣床上只能用来加工平面曲线的轮廓。对于有特殊要求的数控铣床，还可以加进一个回转的 A 坐标或 C 坐标，即增加一个数控分度头或数控回转工作台，这时机床的数控系统为四坐标的数控系统，可用来加工螺旋槽、叶片等立体曲面零件。

（二）数控铣床的组成结构

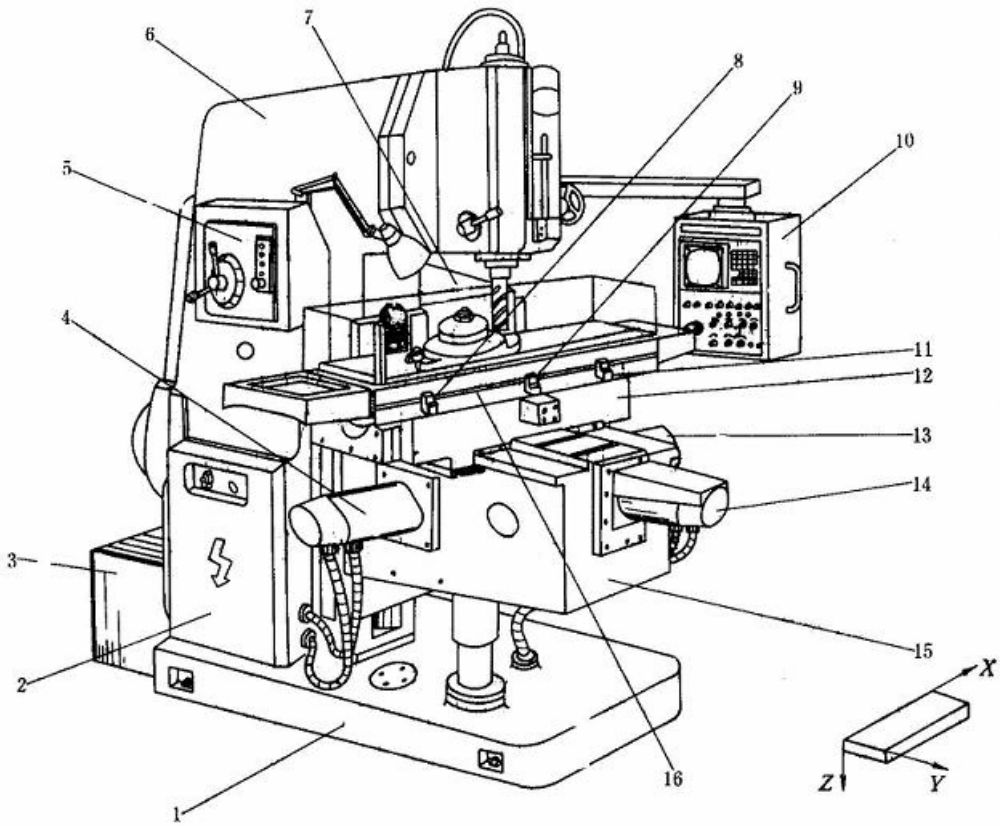


图 11-3 数控铣床

三、加工中心

1958 年世界上第一台加工中心在美国由卡尼·特雷克 (Kearney & Trecker) 公司制造出来。加工中心与普通数控机床的区别主要在于它能在一台机床上完成由多台机床才能完成的工作。图 11—4 为典型立式加工中心的外观图。

现代加工中心包括以下内容：第一，加工中心是在数控镗床或数控铣床的基础上增加自动换刀装置，使工件在一次装夹后，可以连续完成对工件表面自动进行钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻螺纹、铣削等多工序的加工，工序高度集中。第二，加工中心一般带有自动分度回转工作台或主轴箱可自动转角度，从而使工件一次装夹后，自动完成多个平面或多个角度位置的多工序加工。第三，加工中心能自动改变机床主轴转速、进给量和刀具相对工件的运动轨迹及其它辅助机能。第四，加工中心如果带有交换工作台，工件在工作位置的工作台进行加工的同时，另外的工件在装卸位置的工作台上进行装卸，不影响正常的加工工件。

由于加工中心具有上述机能，因而可以大大减少工件装夹、测量和机床的调整时间，减少工件的周转、搬运和存放时间，使机床的切削时间利用率高于普通机床 3~4 倍，大大提高了生产率，尤其是在加工形状比较复杂、精度要求较高、品种更换频繁的工件时，更具有良好的经济性。

第三节 数控编程技术基础

数控机床与普通机床在加工零件时的根本区别在于数控机床是按照事先编制好的加工程序自动地完成对零件的加工，而普通机床是由操作者按照工艺规程通过手动操作来完成零件的加工。机床操作工的熟练技巧与普通机床的加工工效和质量关系很大，而数控机床对所加工零件的质量与效率，很大程度上取决于所编程序的合理与否。理想的加工程序不仅应保证加工出符合图样要求的合格工件，同时应能使数控机床的功能得到合理的应用和充分的发挥，以使数控机床能安全可靠及高效地工作。

一、数控编程的内容和步骤

1. 分析零件图、确定工艺过程 分析零件图纸，即分析零件的材料、形状、尺寸、精度以及毛坯形状及热处理要求等。通过分析，确定该零件是否适宜在数控机床上加工，以及适宜在何种数控机床上加工。有时还要确定在某台数控机床上加工该零件的哪些工序或哪几个表面。然后，再确定零件的工艺方法（包括采用的工夹具和装夹定位方法）和加工路线（包括对刀点、切削路线等），选定加工刀具并确定切削用量等工艺参数。掌握的基本原则是充分发挥数控机床的效能，加工路线要尽量短，要正确选择对刀点、换刀点，以减少换刀次数。

2. 数值计算 根据零件图样的几何尺寸和所确定的加工路线及设定的坐标系，计算出数控机床所需输入的数据。

3. 编写加工程序单 根据计算出的加工路线数据和已确定的工艺参数、刀位数据，结合数控系统对输入信息的要求，编程人员可根据数控系统规定的功能指令代码及程序段格式编写零件加工程序单。编写程序时，还要了解数控机床加工零件的过程，以便填入必要的工艺指令，如机床启停、加工中暂停等。

4. 程序输入 程序输入有手动数据输入、介质输入、通信输入等方式。现代 CNC 系统的存储量大，可储存多个零件加工程序，且可在不占用加工时间的情况下进行输入。因此，对于不太复杂的零件常采用手动数据输入 (MDI)，这样比较方便、及时。介质输入方式是将加工程序记录在穿孔带、磁盘、磁带等介质上，用输入装置一次性输入。

5. 校对检查程序 检查由于计算和编写程序造成的错误等。校对检查方法为：首先，将程序单进行初期检查，并用笔在坐标纸上划出加工路线，以检查机床的运动轨迹是否正确；之后，在有 CRT 图形显示屏的数控机床上进行模拟加工，看机床（刀具）的运动及模拟加工出的工件形状是否正确。

6. 首件加工 程序校验结束后, 必须在机床上试加工。因为, 校验方法只能检验出机床的运动是否正确, 不能查出被加工零件的加工精度。如果加工出来的零件不合格, 需修改程序再试, 直到加工出满足零件图样要求的零件为止。

完成了以上工作, 并确认试切的零件符合零件图纸质量、技术要求后, 数控编程工作才算完结。

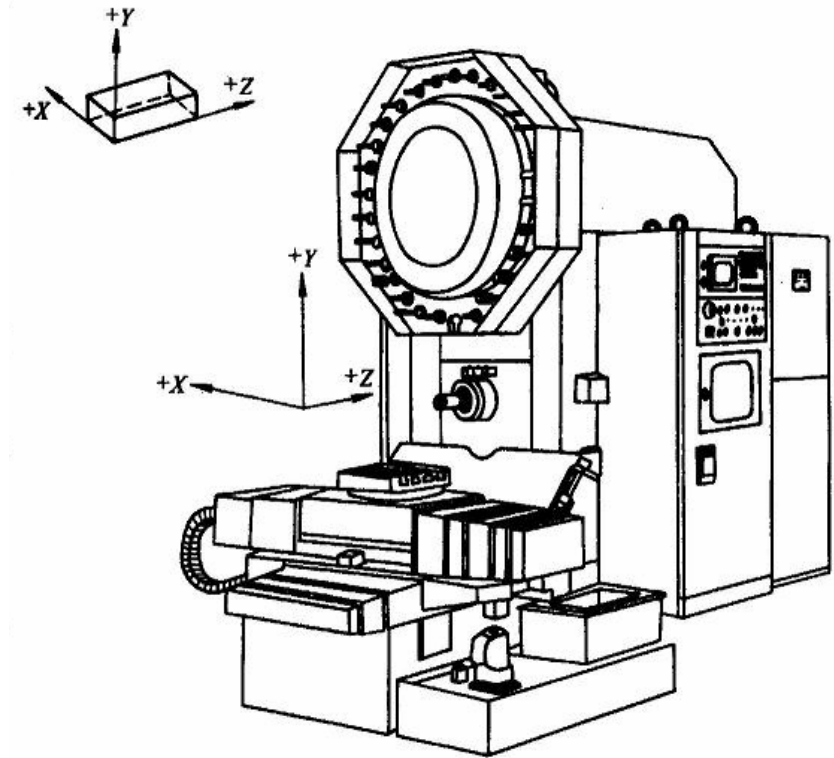


图 11-4 立式加工中心

二、编程方法

(一) 手工编程

从零件图样分析、工艺处理、数值计算、编写程序单、键盘输入程序直至程序校验等各步骤均由人工完成, 称为手工编程。目前, 大部分采用 ISO 标准代码书写。手工编程适于点位加工或几何形状不太复杂的零件, 即二维或不太复杂的三维加工、程序编制坐标计算较为简单、程序段不多、程序编制易于实现的场合。这时, 手工编程显得经济而且及时。

对于几何形状复杂, 尤其是需用三轴以上联动加工的空间曲面组成的零件, 编程时数值计算繁琐, 所需时间长, 且易出错, 程序校验困难, 用手工编程难以完成。据有关统计表明, 对于这样的零件, 编程与机床加工时间之比平均约为 30:1。所以, 为缩短生产周期, 提高数控机床的利用率, 有效的解决各种模具及复杂零件的加工问题, 手工编程已不能满足要求, 必须想办法提高编程的效率, 即采用计算辅助编程。

(二) 计算机辅助编程

对于三维以上的复杂零件程序, 由于数学运算处理复杂, 只能借助于计算机进行辅助编程, 有的书上也称为自动编程。计算机辅助编程的分类, 如图 11-5 所示。

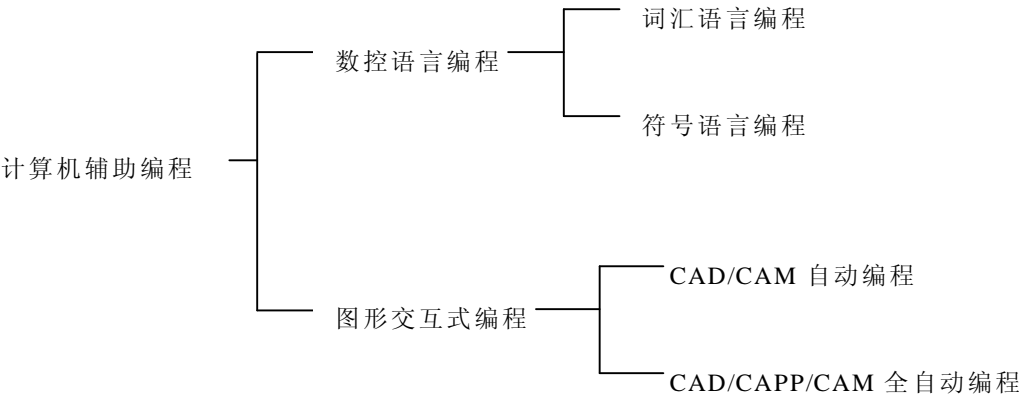


图 11-5 计算机辅助编程的分类

1. 数控语言编程 它是由程序员根据零件图样和有关加工工艺要求,用一种专用的数控编程语言来描述整个零件加工过程,即零件加工源程序。然后将源程序输入计算机中,由计算机进行编译(也称为前置处理),计算刀具轨迹,最后再由与所用数控机床相对应的后置处理程序处理后,自动生成相应的数控加工程序,并同时制作程序纸带或打印出程序清单。

数控语言是由字母、数字及规定好的一套基本符号,按一定的词法及语法规则组成的语言,用来描述加工零件的几何形状、几何元素间的相互关系及加工过程、工艺参数等等。

按数控语言所表达的形式不同。又可分为词汇语言和符号语言。如对于表达某一点、线、圆,词汇语言可分别用 POINT、LINE、CIRCLE 来表示;而符号语言分别用 P_i 、 S_i 、 C_i 来表示。

最典型的数控语言 APT (Automatically Programmed Tools),它最早由美国麻省理工学院电子系研究开发,于 1953 年首先推出 APT-I 系统。1958 年,美国航空空间协会(AIA)组织了 10 多家航空工厂,在麻省理工学院协助下,进一步发展 APT 系统,进而产生了 APT-II,它增加了翻译 APT 语言的能力,用立体定义曲线的功能及自动求出线段的终点坐标值。1962 年,又完成了可解决三维编程的 APT-III 自动编程系统。在此之后又经过进一步完善、充实,于 1970 年推出了 APT-IV 系统。后来文发展成为 APT-V。

APT 语言是世界上发展最早、功能齐全,也是当时应用较为广泛的数控语言编程系统。但由于该系统庞大,使用时需要大型计算机,费用昂贵,使其推广使用受到一定的限制。所以,各厂家和研究单位根据加工零件的特点和用户的不同需要,借助 APT 语言的思想体系,先后开发出许多具有各自特点的数控编程系统。如美国的 ADAPT、AVTOSPOT、UNIAPT,德国的 EXAPT,英国的 2CL,日本的 FAPT,日本德国合作的 MINIAPT,我国的 SKC,2CX 等计算机辅助编程系统。

数控语言编程为当时解决多坐标数控机床加工曲面、曲线提供了有效的方法。由于当时计算机的图形处理功能不强,因而必须在 APT 源程序中用语言的形式来描述本来十分直观的几何图形信息及加工过程,再由计算机处理生成加工程序。这种编程方法直观性差,编程过程比较复杂不易掌握,并且不便于进行阶段性检查。随着计算机技术的发展,计算机图形处理功能已有了极大的增强,“图形交互式自动编程”也应运而生。它直接将零件的几何图形信息,自动转化为数控加工程序。

2. 图形交互式编程 图形交互自动编程是利用计算机辅助设计(CAD)软件的图形编程功能,将零件的几何图形绘制到计算机上,形成零件的图形文件,或者直接调用由 CAD 系统完成的产品设计文件中的零件图形文件,然后再直接调用计算机内相应的数控编程模块,进行刀具轨迹处理,由计算机自动对零件加工轨迹的每一节点上进行运算和数学处理,从而生成刀位文件后,再经相应的后置处理(postprocessing),自动生成数控加工程序,并同时在计算机上动态地显示其刀具的加工轨迹图形。

图形交互式自动编程极大地提高了数控编程的效率,它使从设计到编程的信息流成为连续,可实现 CAD/CAM 集成,为实现计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)一体化,建立了必要的桥梁作用。因此,图形交互式自动编程是目前国内外在实施 CAD/CAM 中普遍采用的数控编程方法,由此,它也习惯地被称为 CAD/CAM 自动编程。

CAD/CAM 编程是目前计算机辅助编程中最流行的方法,CAD/CAM 编程典型的软件有 MasterCAM、Pro/E、UG 等。

随着 CAPP 计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning)技术的发展,在先进制造技术领域,对数控编程又提出了 CAD/CAPP/CAM 集成的全自动编程。图 11-6 为全自动编程系统的组成框图。系统从 CAD 数据库获取零件的几何信息,从 CAPP 数据库获取零件加工过程的工艺信息,然后调用 NC 源程序生成器生成数控源程序。经后置处理后自动生成数控加工程序,并同时进行动态仿真。如果正确无误,则将加工程序指令直接送到 NC 机床加工。

由此可知,CAD/CAPP/CAM 全自动编程与 CAD/CAM 系统编程的最大区别是其编程所需的加工工艺参数,不必由编程人员通过键盘手工输入,它直接从系统内部的 CAPP 数据库获得有关工艺信息。这样不仅使计算机编程过程中减少了许多人工干预,并且使所编程序更加合理、工艺性好、可靠性高。

三、数控机床的坐标系

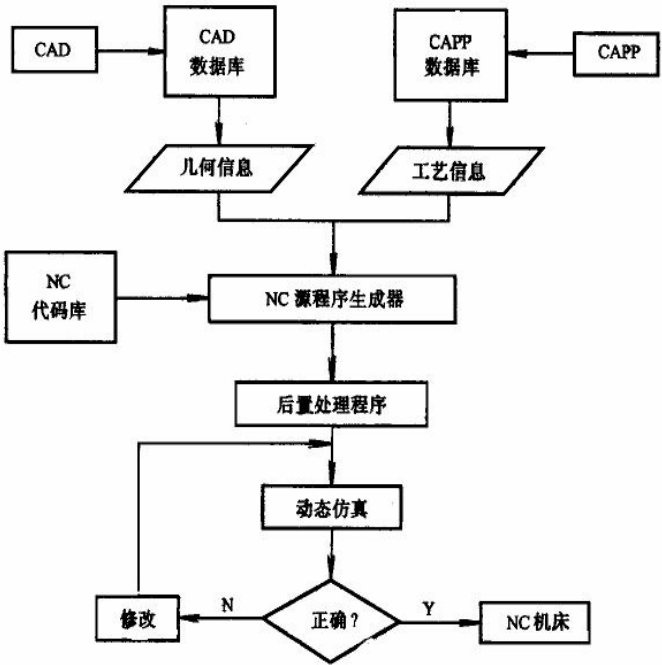


图 11-6 CAD/CAPP/CAM 集成的全自动编程系统框图

在数控机床中，为了完成一个零件的加工，往往需要控制几个方向上的运动，这就需要建立坐标系，以便分别进行控制。一台机床，有几个方向可以进行数字控制就称为几坐标数控机床。例如，三坐标数控机床是指该机床有三个坐标方向采用了数字控制；五坐标数控机床是指该机床有五个坐标方向采用了数字控制。

数控机床坐标系就是为了确定工件在机床中的位置、机床运动部件的特殊位置（如换刀点、参考点等）以及运动范围（如行程范围）等而建立的几何坐标系。目前我国执行的 JB3051—82《数控机床坐标和运动方向的命名》数控标准，与国际上统一的 ISO841 等效。

（一）直线进给和圆周进给运动坐标系

一个直线进给运动或一个圆周进给运动定义一个坐标轴。直线进给运动的直角坐标系用 X、Y、Z 表示，常称基本坐标系。X、Y、Z 坐标轴的相互关系用右手定则决定，如图 11-7 所示，图中大拇指的指向为 X 轴的正方向，食指指向为 Y 轴的正方向，中指指向为 Z 轴的正方向。

围绕 X、Y、Z 轴旋转的圆周进给坐标轴分别用 A、B、C 表示，根据右手螺旋定则，如图所示，以大拇指指向 +X、+Y、+Z 方向，则食指、中指等的指向是圆周进给运动的 +A、+B、+C 方向。

数控机床的进给运动，有的由主轴带动刀具运动来实现。有的由工作台带着工件运动来实现。上述坐标轴正方向，是假定工件不动，刀具相对于工件做进给运动的方向。如果是工件移动则用加“'”的字母表示，按相对运动的关系，工件运动的正方向恰好与刀具运动的正方向相反，即有：

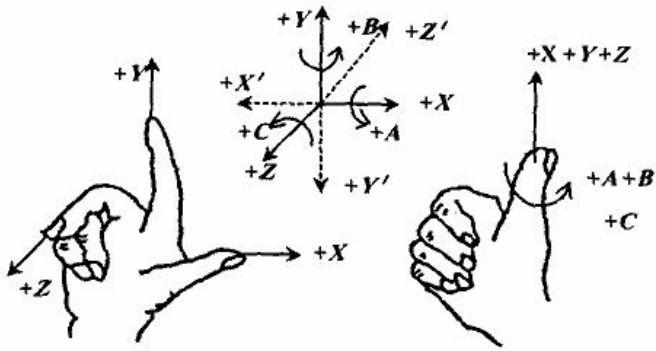


图 11-7 数控机床坐标系

$$\begin{aligned} +X &= -X', \quad +Y = -Y', \quad +Z = -Z', \\ +A &= -A', \quad +B = -B', \quad +C = -C' \end{aligned}$$

同样两者运动的负方向也彼此相反。

机床坐标轴的方向取决于机床的类型和各组成部分的布局，图 11-8 和图 11-9 所示为卧式车床和立式铣床的标准坐标系。

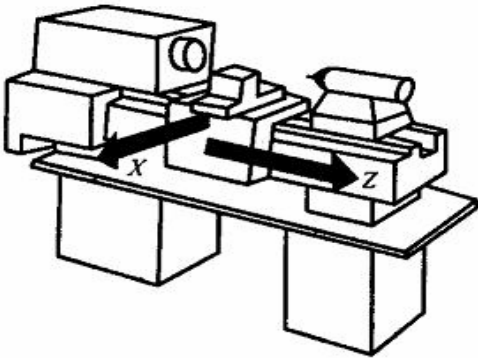


图 11-8 数控车床坐标系

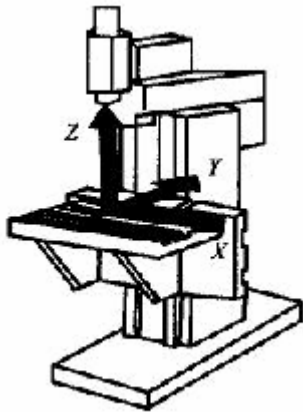


图 11-9 立式铣床坐标系

如果在基本的直角坐标 X、Y、Z 之外，另有第二组坐标和第三组坐标平行于 X、Y、Z，则分别指定为 U、V、W 和 P、Q、R。这些附加坐标系的运动方向，可按决定基本坐标系运动方向的办法来决定。

（二）机床坐标系与工件坐标系

1. 机床坐标系、机床原点与参考点 在数控机床上加工零件，机床的动作由数控系统发出的指令来控制。为了确定机床的运动方向和移动距离，需要在机床上建立一个坐标系，这就是机床坐标系。机床坐标

系是为了确定工件在机床上的位置、机床运动部件的特殊位置（如：换刀点、参考点）以及运动范围（如：行程范围、保护区）等而建立的几何坐标系，是机床上固有的坐标系。

数控机床采用标准笛卡儿直角坐标系。对于一台具体的机床，其坐标系的构建遵从以下三项原则。1) 符合右手法则；2) Z轴与主轴方向一致；3) 刀具远离工件的方向为坐标轴正向。

通常情况下，机床原点就是机床坐标系的原点，它是机床上的一个固定点，由制造厂确定。这里讨论机床原点，是因为机床坐标系的正确建立需要一些必须的操作。在数控系统通电准备正式加工之前，首先要使各个坐标轴回归原点。例如数控车床的原点一般设在主轴前端面的中心，根据构建机床坐标系的三项原则不难得到机床坐标系如图 11-10 (a) 所示。但它是执行了原点回归操作以后才真正建立起来的。原

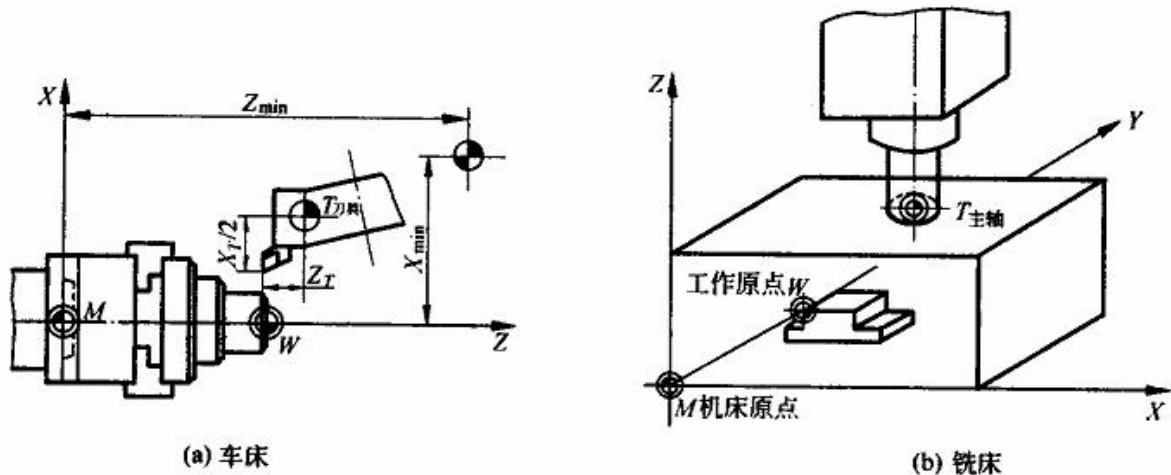


图 11-10 机床原点与机床参考点
M—机床原点；W—工件原点

点回归操作的结果是刀架 Z 方向停在最右端，X 方向停在最上端。再如，立式数控铣床的原点一般设在工作台左下角的运动极限位置，构建的机床坐标系如图 11-10 (b) 所示。原点操作的结果是工作台停在 X 的左极限、Y 的下极限位置，主轴箱停在 Z 的上极限位置。

对于绝大多数数控机床，一旦建立起机床坐标系，无论机床怎样运动，系统总能准确地计算出运动部件的当前坐标。建立坐标系的工作是一次性的，只在开机时作一次。一次开机可多次更换被加工零件和程序，只要不关闭系统，机床坐标系始终有效。

有些简易数控机床，系统只能记忆运动部件移动的相对坐标值，建立一次机床坐标系只能加工完成一个工步的加工（不换刀）。更换工步、更换零件，或更换程序时，必须返回一次原点。为了缩短返回原点的时间，往往根据实际加工需要设置机床原点，这就是说原点可能不是机床上固定的一点，因此称之为参考点。

2. 工件坐标系和编程零点 工件坐标系是以工件设计尺寸为依据建立的坐标系。建立工件坐标系的目的主要是为了编程方便。编程人员以工件图纸上的某一点为原点建立坐标系，而编程尺寸按工件坐标系中的尺寸确定。工件随夹具安装在机床上，这时测得的工件原点与机床原点间的距离称作工件原点偏置，如图 11-11 所示。该偏置值在加工之前预存到数控系统中，加工时，工件原点偏置量自动加到工件坐标系上，使机床实现准确的坐标运动。因此，编程人员可以不考虑工件在机床上的安装位置，直接按图纸尺寸编程。

编程零点是程序中人为采用的零点，一般取工件坐标系原点为编程零点。对形状复杂的零件，需要编制几个程序或子程序。为了编程方便，减少坐标值的计算量，编程零点就不一定设在工件原点上，而是设在便于程序编制的位置。

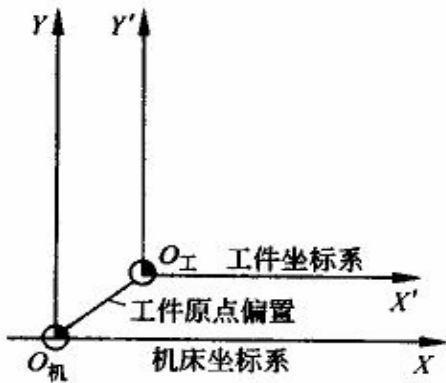


图 11-11 工件原点偏置

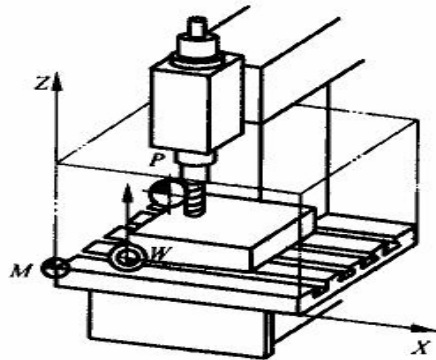


图 11-12 机床坐标系及相关点

机床坐标系及相关点见图 11-12。其中，M 为机床原点；W 为工件零点；P 为编程原点。

对刀点是零件程序加工的起始点，对刀的目的是确定编程零点在机床坐标系中的位置，对刀点可与编程零点重合，也可在任何便于对刀之处，但该点与编程零点之间必须有确定的坐标联系。

（三）绝对坐标与相对坐标

零件图上标注的尺寸一般有两大类：绝对尺寸和相对尺寸。为了保证加工精度，数控加工中采用绝对坐标和相对坐标（增量坐标）与之相对应。

绝对坐标指零件以坐标原点为基准给出的坐标。如图 11-13 中的 A、B 两点，若以绝对坐标标记，A 点的坐标为 (30, 35)；B 点的坐标为 (12, 15)。

相对坐标是指零件上后一点的坐标相对于前一点的增量值。若以相对坐标计，图中 B 点的坐标应为 (-18, -20)，其中负号表示 B 点相对于 A 点在 X_1 、 Y_1 轴的负向。

四、数控加工程序的结构与格式

在数控机床上加工工件时，要把加工工件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据，以数控指令及参数的形式描述出来，这种描述就是加工程序（简称为程序）。编制好的程序可记录在纸带上或磁盘上，通过相应的操作，将纸带上或磁盘上的程序输入到数控系统的工件程序存储区（简称为存储区）。也可以通过数控系统的操作面板按键将程序输入

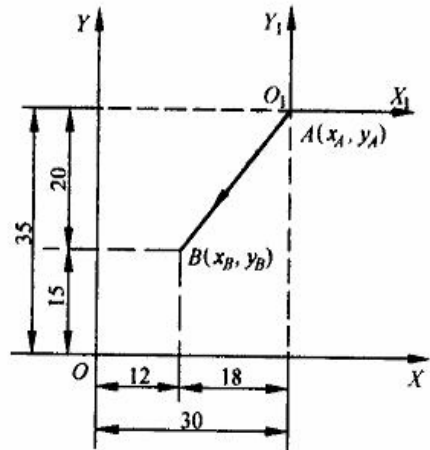


图 11-13 绝对坐标与相对坐标

数控加工程序是数控机床的灵魂。不同的数控系统，加工程序的结构及程序段格式可能有某些差异，但是基本结构和格式是一样的。

（一）数控加工程序的组成

如图 11-14，一个完整的加工程序由若干个程序段(block)组成，一个程序段又由若干个字(word)组成，字是控制系统的具体指令，它由表示地址的英文字母或特殊文字与数字集合而成。

如图所示，在加工程序的开头要有程序号，以便进行程序检索。程序号就是给零件加工程序一个编号，并说明该零件加工程序开始。常用字符“%”及其后 4 位十进制数表示“%××××”。4 位数中若前面为 0，则可以省略，如“%0101”等效于“%101”。有时也用字符“O”或“P”及其后 4 位十进制数表示程序号，如“O1001”。

由程序段组成加工程序的全部内容和机床的停/开信息。每个程序段都包括了程序的开始、程序内容及结束部分，程序段都以序号“N ××”开头，用 LF 结束，M02 作为整个程序结束的字符。其中开头的序号可以省

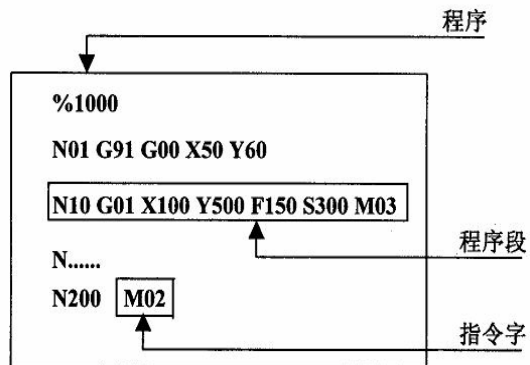


图 11-14 数控加工程序的组成

略，结束部分 LF 在实际面板上不显示。

程序结束可用辅助功能代码 M02、N30 或 M99（子程序结束），用来结束零件加工。

（二）程序段格式

程序段格式是程序段中的字、字符和数据的安排形式。程序段由程序段号（N 后继若干个数字）、程序内容，后加程序段结束字符构成。程序内容就由上述各种指令代码和相应坐标尺寸或规格字组成，一般的书写顺序按表 11-1 所示从左往右进行书写，对其中不用的功能应省略。其中坐标尺寸或规格字的地址符定义如表 11-2 所示。

上述所有地址符后应跟相应的具体数字。其中坐标轴尺寸用“+”或“-”号后继具体数字表示，“+”号可省略。整数前零可省略，小数后零可省略。其余尺寸或规格字就用具体数字来表示。直线轴尺寸的单位一般为 mm（或 inch），旋转轴尺寸的单位一般为度，而螺纹导程若为英制时。单位为每英寸牙数，暂停时间单位一般为秒。

表 11-1 程序段书写顺序格式

程序段号	准备功能	坐标尺寸或规格字			进给功能	主轴速度	刀具功能	辅助功能	程序段结束符
N_	G××	X_Y_Z_ U_V_W_ P_Q_R_ A_B_C_ D_E_	I_J_K_ R_	K_ L_ P_ H_ F_	F_	S_	T_	M××	LF

表 11-2 地址符定义

基本直线坐标轴尺寸	X_Y_Z	圆弧圆心的坐标轴尺寸	I_J_K
第一组附加直线坐标轴尺寸	U_V_W	圆弧半径值	R_
第二组附加直线坐标轴尺寸	P_Q_R	暂停时间设定值	L_（或 K_ P_）
基本旋转坐标轴尺寸	A_B_C	子程序调用次数	P_（或 L_ K_）
附加旋转坐标轴尺寸	D_E	螺纹导程	F_（或 K_）

（三）主程序和子程序

在一个加工过程中，如果有多个程序段完全相同，如在一块较大的材料上加工多个形状和尺寸相同的零件，为了缩短程序，可将这些重复的程序段单独抽出，按规定格式编成子程序，并事先存储在子程序存储器中。子程序以外的程序段为主程序。主程序在执行过程中，如需执行该子程序即可随时调用，并可多次重复调用，从而大大简化编程工作。

主程序和子程序的关系如下：

主程序：N01…LF

N02…LF

…

N11 调用子程序指令（子程序 1）

…

N31 调用子程序指令（子程序 2）

…

N_ _ … M02 LF

子程序 1：N01…LF

…

N_ _ …返回主程序指令 LF

子程序 2：N01…LF

N_ _ … 返回主程序指令 LF

子程序的格式除有子程序号以外，还要有子程序结束并返回主程序的指令，子程序其余部分的编写与主程序相同。调用子程序和返回主程序的指令需参考所使用的机床编程手册，其中华中世纪星系列数控装置使用 M98 来调用子程序，用 M99 表示子程序结束并返回主程序。

五、数控加工常用的功能指令及其代码

数控机床的运动是由程序控制的，功能指令是组成程序段的基本单元，也是程序编制中的核心问题。目前几乎所有的数控机床都支持 ISO 和 EIA 两种标准。我国机械工业部颁布的 JB3208—83《数控机床穿孔

纸带程序段格式中的准备功能和辅助功能的代码》与 ISO 标准等效。

(一) G 指令

数控机床应用中，称 G 指令为准备功能指令，用来规定刀具和工件相对运动的插补方式、机床坐标系、坐标平面、刀具补偿、坐标偏置等多种设置。JB3208—83 标准中规定：G 指令由字母 G 及其后面的两位数字来组成，从 G00 到 G99 共有 100 种代码（见表 11—3）。

表内第 2 栏中，标有字母的表示第一栏所对应的 G 代码为模态代码（续效代码），字母相同的为一组，

代码 (1)	功能保持到 被取消或被 同样字母表 示的程序指 令所代替 (2)	功能仅 在所出 现的程 序段内 有作用 (3)	功能 (4)	代码 (1)	功能保持到 被取消或被 同样字母表 示的程序指 令所代替 (2)	功能仅 在所出 现的程 序段内 有作用 (3)	功能 (4)
G00	a		点定位	G50	(#)d	#	刀具偏置 0/-
G01	a		直线插补	G51	(#)d	#	刀具偏置+/0
G02	a		顺时针方向圆弧插补	G52	(#)d	#	刀具偏置-/0
G03	a		逆时针方向圆弧插补	G53	f		直线偏移，注销
G04		*	暂停	G54	f		直线偏移 X
G05	#	#	不指定	G55	f		直线偏移 Y
G06	a		抛物线插补	G56	f		直线偏移 Z
G07	#	#	不指定	G57	f		直线偏移 XY
G08		*	加速	G58	f		直线偏移 XZ
G09		*	减速	G59	f		直线偏移 YZ
G10~G16	#	#	不指定	G60	h		准确定位 1（精）
G17	c		XY 平面选择	G61	h		准确定位 2（中）
G18	c		XZ 平面选择	G62	h		快速定位（粗）
G19	c		YZ 平面选择	G63		*	攻螺纹
G20~32	#	#	不指定	G64~G67	#	#	不指定
G33	a		螺纹切削，等螺距	G68	(#)d	#	刀具偏置，内角
G34	a		螺纹切削，增螺距	G69	(#)d	#	刀具偏置，外角
G35	a		螺纹切削，减螺距	G70~G79	#	#	不指定
G36~39	#	#	永不指定	G80	e		固定循环注销
G40	d		刀具补偿 / 刀具偏置 注销	G80~ G89	e		固定循环
G41	d		刀具补偿—左	G90	j		绝对尺寸
G42	d		刀具补偿—右	G91	j		增量尺寸
G43	(#)d	#	刀具补偿—正	G92		*	预置寄存
G44	(#)d	#	刀具补偿—负	G93	k		时间倒数进给率
G45	(#)d	#	刀具偏置+ / +	G94	k		每分钟进给
G46	(#)d	#	刀具偏置+ / -	G95	k		主轴每转进给
G47	(#)d	#	刀具偏置- / -	G96	i		恒线速度
G48	(#)d	#	刀具偏置- / +	G97	i		每分钟转速（主轴）
G49	(#)d	#	刀具偏置 0 / +	G98~ G99	#	#	不指定

同组的代码不能同时出现在一个程序段中。模态代码表示这种代码一经在一个程序段中指定，便保持有效到以后的程序段中出现的同组的另一代码为止。即在某一程序段中一经应用某一模态 G 代码，如其后续的程序段中还有相同的功能操作，且尚未出现同组的 G 代码时，则在后续的程序段中可以不再指令或书写这一功能代码。在表内第 2 栏中没有字母的表示对应的 G 代码为非模态代码，不能续效。

表 11—3 准备功能 G 指令

- 注：1. # 号表示：如选作特殊用途，必须在程序格式说明中说明；
2. 如在直线切削控制中没有刀具补偿，则 G43~G52 可指定作其他用途；
3. 在表中左栏括号中的字母（d）表示：可以被同栏中没有括号的字母 d 所注销或代替，亦可被有括号的字母（d）所注销或代替；
4. G45~G52 的功能可用于机床上任意两个预定的坐标；
5. 控制机上没有 G53~G59、G63 功能时，可以指定作其他用途；
6. * 号表示功能仅在所出现的程序段内有效。

1. 与坐标系有关指令

(1) 绝对坐标与相对坐标指令—G90, G91

绝对坐标指令和相对坐标指令分别用 G90 和 G91 表示, 分别指定程序段中的坐标数值是绝对坐标还是相对坐标, 其区别可由图 11-15 反映。图中 AB 和 BC 表示两个直线插补程序段的运动方向。如果用绝对坐标编程, 由 A 点插补到 C 点的程序应该是

```
...
G90
...
G01 X50 Y70 F80
      X30 Y40
...
```

而用相对坐标编程, 该段程序应写成:

```
...
G91
...
G01 X50 Y90 F80
      X-50 Y-30
...
```

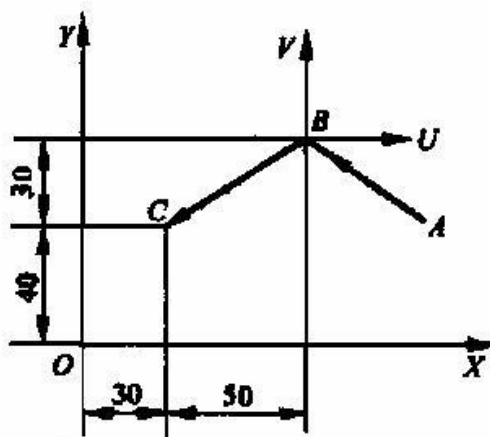


图 11-15 绝对坐标和增量坐标

(2) 坐标系设定指令—G92

用绝对坐标编程时, 有时需要用指令 G92 设定机床坐标系与工件坐标系的关系, 确定工件的绝对坐标原点, 同时要把这个原点设定值存储在数控系统的存储器内, 作为后续程序绝对坐标的基准。使用 G92 建立如图 11-16 所示的工件坐标系的程序段可写为:

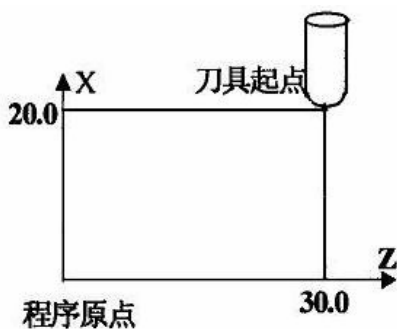


图 11-16 工件坐标系的建立

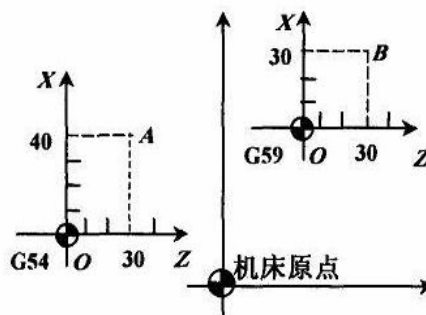


图 11-17 使用工件坐标系编程

```
G92 X20.0 Z30.0
```

G92 为续效指令, 只要后边没有重新设定机床坐标与工件坐标之间的关系 (在整个程序中可设定一次或多次), 那么先前的设定继续有效, 直到后边重新设定, 先前的设定才失效。

应注意: 坐标系设定指令程序段只设定程序原点位置, 它并不产生运动, 即刀具仍在原位置。

(3) 原点设置选择指令—G54~G59

工件原点相对机床原点的坐标值称为原点设置值, G54~G59 称为原点设置选择指令。原点设置值可预先存入 G54~G59 对应的存储单元中, 在执行程序时, 遇到 G54~G59 指令后, 便将对应的原点设置值取出来参加计算。G54~G59 为模态功能, 可相互注销。

如图 11-17, 要使刀具从当前点移动到 A 点, 再从 A 点移动到 B 点, 可通过以下程序实现:

```
%1000
N01 G54 G00 G90 X40 Z30
N02 G59
N03 G00 X30 Z30
```

(4) 平面指令—G17, G18, G19

如图 11-18 所示, 笛卡儿直角坐标系的三个互相垂直的轴 (X, Y, Z) 构成三个平面 XY 平面、XZ 平

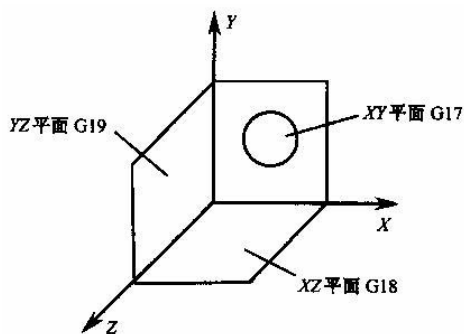


图 11-18 平面设定

面和 YZ 平面。对于三坐标运动的铣床和加工中心常用这些指令确定机床在哪个平面内进行插补（加工）运动。由于数控车床总是在 XZ 平面内运动，故无需设定平面指令。G17 表示在 XY 平面内加工，G18 表示在 XZ 平面内加工，G19 表示在 YZ 平面内加工。

2. 与刀具运动方式有关的 G 代码

（1）快速点定位指令—G00

G00 指令使刀具以点位控制方式，用最快速度从当前点移动到指定点。它只是快速到位，而实际运动轨迹则根据具体控制系统的设计情况，可以是多种多样的。在图 11-19 中，从 A 点移到 B 点可有四种运动轨迹。G00 是续效指令。只有后面的指令给定了 G01、G02 或 G03 时，G00 才无效。另外，指定 G00 的程序段无需指定进给速度指令 F。

（2）直线插补指令—G01

G01 为直线插补指令，用以指定两个坐标轴（或多个坐标轴）以联动的方式，按程序段规定的合成进给速度 F，插补加工出任意斜率的直线段。工件相对于刀具的当前位置是直线的起点，该点为已知点。因此在程序段中只要指定终点的坐标尺寸，就给出了加工出直线的必要条件。

在图 11-20 中，用 G01 可指定刀具从 P 点运动至 A 点，然后沿 AB、BO、OA 切削，再返回 P 点的直线运动轨迹来完成加工。

在 G01 程序段中必须有 F 指令，给出进给速度，且 G01 与 F 都是续效指令。

（3）圆弧插补指令—G02，G03

G02、G03 为圆弧插补指令，分别用于顺时针和逆时针的圆弧加工。圆弧的顺、逆方向可按图 11-21 给出的方法判断。沿圆弧所在平面垂直坐标轴向负方向观察，刀具相对于工件的移动方向为顺时针时用 G02 指令，逆时针时用 G03 指令。

圆弧插补程序段应包括圆弧的顺逆、圆弧的终点坐标以及圆心坐标（或半径），程序格式为

$$\left\{ \begin{matrix} G17 \\ G18 \\ G19 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} G02 \\ G03 \end{matrix} \right\} X_Y_Z_ \left\{ \begin{matrix} I_J_K_ \\ R_ \end{matrix} \right\} F_LF$$

其中圆心坐标 I, J, K 一般用圆弧起点指向圆心的矢量的 X,

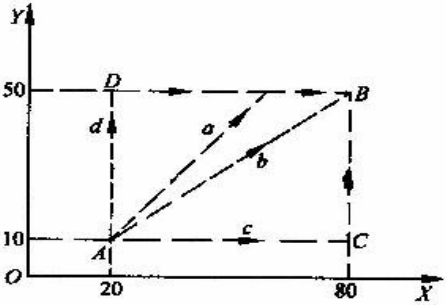


图 11-19 快速点定位

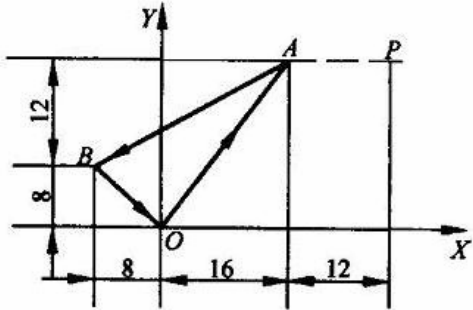


图 11-20 直线加工示意图

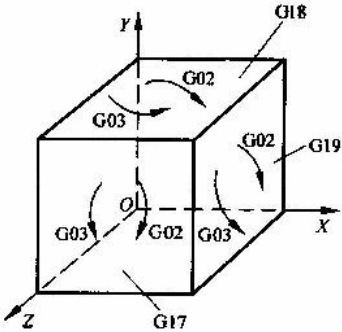


图 11-21 圆弧顺逆的区分

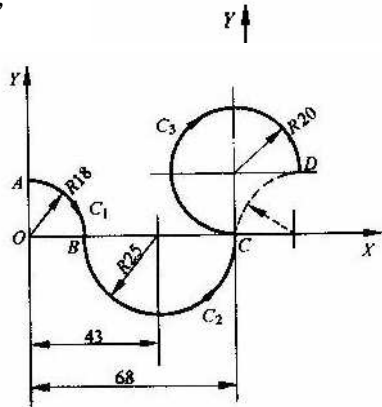


图 11-22 圆弧用 R 编程

Y, Z 坐标分矢量表示，而与指定的 G90 无关。圆心参数也可用半径 R 值表示。规定小于等于 180° 的圆弧，R 值取正；大于 180° 的圆弧，R 值取负。而应注意，用 R 参数时，不能描述整圆，如图 11-22，不是整圆，可用半径来编程。而图 11-23 为封闭圆，即整圆，只能用圆心坐标 I, J, K 编程。

3. 与刀具补偿有关的 G 指令

(1) 刀具半径补偿指令—G41, G42, G40

当我们加工如图 11-24 的零件时, 由于刀具具有一定半径, 因此刀具中心轨迹应是零件轮廓平行的等距线。当 CNC 机床不具有刀具半径补偿功能时, 应按刀具中心轨迹 (零件轮廓的等距线) 进行编程, 有时计算相当复杂。如果 CNC 机床具有刀具半径补偿功能, 则数控装置将自动地计算出刀具中心轨迹, 只须按零件轮廓编程即可。

刀具半径补偿功能的作用归纳如下: 首先, 当用圆头刀具 (如圆头铣刀、圆头车刀) 加工时, 只需按照零件轮廓编程, 不必按刀具中心轨迹编程, 大大简化了程序编制; 其次, 可通过刀具半径补偿功能很方便地留出加工余量, 先进行粗加工, 再进行精加工; 再其次, 可以补偿由于刀具磨损等因素造成的误差, 提高零件的加工精度。

G41 为左刀补指令, 是指顺着刀具前进方向看, 刀具补偿在工件轮廓的左边; 若刀补在轮廓右边, 则用 G42 设置。G40 为注销刀具半径补偿指令。

(2) 刀具长度补偿指令—G43, G44

刀具长度补偿指令一般用于刀具轴向 (Z 方向) 的补偿。当所选用的刀具长度不同或者需进行刀具轴向进刀补偿时, 需使用该指令。它可以使刀具在 Z 方向上的实际位移量大于或小于程序给定值。即实际位移量 = 程序给定值 + 补偿值。

G43—正偏置。即刀具在 +Z 方向进行补偿。

G44—负偏置。即刀具在 -Z 方向进行补偿, 见图 11-25。

通常设定一个基准刀具为零刀具, 其它刀具长度与零刀具之差为偏置值, 并存储在刀具数据存储器中, 供调用。

有的 CNC 机床在刀具数据存储器中, 存入刀号、刀具半径值、长度值及其补偿值。使用时, 从程序中调出刀号即可。

4. 暂停 (延迟) 指令—G04

G04 可使刀具做到短时间的无进给运动, 它适用于车削环槽、镗平面等加工, 其编程格式为

G04 P__ LF

其中: P 为地址符, 常用 X 或 P 表示; “__” 为暂停时间。不同的数控系统, 暂停指令时间的地址符不同, 最大暂停时间也不同, 一般在 1-10s 之间, 其中在华中世纪星系列数控装置中的格式如下:

G04 P_

其中: P 是暂停时间, 单位为 s。

考虑图 11-26 所示孔的加工, 如果孔的底平面有粗糙度要求, 需要用镗钻加工, 则可用 G04 指令, 使镗钻在镗到孔底时空转几圈。

(5) 固定循环指令

在 G 功能代码中, 常选用 G80~G89 作为固定循环指令。有些数控车床, 采用 G33~G35 与 G70~G79 作为固定循环指令。固定循环指令可简化程序, 提高编程质量。例如车螺纹时, 刀具切入、切螺纹、刀具径向 (可斜向) 退出再快速返回四个固定的连续动作, 只需用一条固定循环指令程序去执行, 这样可使程序段数减少三条。

(二) M 指令

M 指令是辅助功能指令, 它是控制机床或系统开一关量的一类命令。如开、停冷却泵, 主轴正、反转, 程序结束等。JB3208

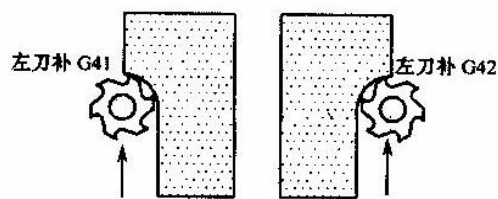
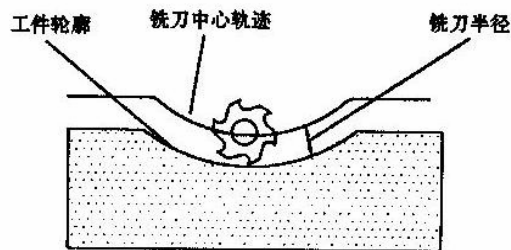


图 11-24 刀具半径补偿

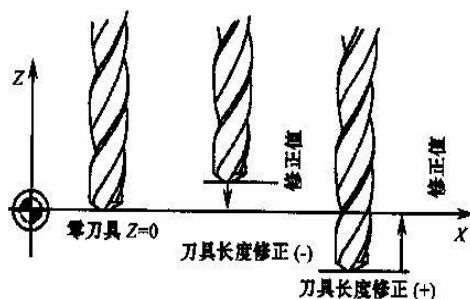


图 11-25 刀具长度补偿

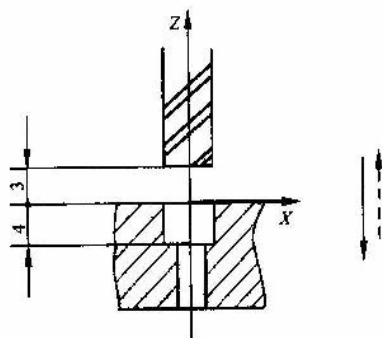


图 11-26 镗平底孔

—83 规定：M 指令由字母 M 及其后面的两位数字组成，从 M00 到 M99 共有 100 种（见表 11—4）。M 指令也有续效与非续效之分。这类指令与控制机床的插补运算无关，所以一般书写在程序段的后部。常用的 M 指令有以下一些。

1. 程序停止指令—M00

执行含有 M00 的程序段后，机床的主轴、进给及冷却液都自动停止。该指令用于加工过程中测量刀具和工件的尺寸、工件调头、手动变速等操作。当程序运行停止时，全部现存的模态信息保持不变，固定操作完成后，重按“启动”键，便可继续执行后续的程序。

2. 计划（任选）停止指令—M01

这个指令又叫“任选指令”或“计划暂停”。该指令与 M00 基本相似，但只有在操作面板上的“任选停止”键按下时，M01 才有效，否则机床将忽略该指令程序段，继续执行后续的程序段。该指令常用于工件关键性尺寸的停机抽样检查等情况，当检查完成后，按“启动”键可继续执行以后的程序。

3. 程序结束指令—M02, M30

该指令用在程序的最后一个程序段中。当全部程序结束后，用此指令可使主轴、进给及冷却液全部停止。M02 的功能比 M00 多一项“复位”。此时按“启动”键无效，因为已经运行到程序尾。M30 是执行完程序段内所有指令后，使主轴停转、冷却液关闭、进给停止，并将程序指针指向程序首，以便再加工下一个零件。它比 M02（程序结束）多了一个“复位程序指针”的功能，其他功能相同。

4. 与主轴有关的指令—M03, M04, M05

M03 表示主轴正转，M04 表示主轴反转。所谓主轴正转，是沿主轴往正 Z 方向看去，主轴处于顺时针方向旋转；而若沿逆时针方向旋转则为反转。

M05 为主轴停止。

5. 换刀指令—M06

M06 是手动或自动换刀的指令。它不包括刀具选择功能，但兼有主轴停转和关闭冷却液的功能，常用于加工中心机床刀库换刀前的准备工作。

6. 与冷却液有关的指令—M07, M08, M09

M07 为命令 2 号冷却液开或切屑收集器开；M08 为命令 1 号冷却液（液状）开或切屑收集器开；M09 为冷却液关闭。冷却液的开关是通过冷却泵的启动与停止来控制的。

7. 运动部件的夹紧及松开指令—M10, M11

M10 为运动部件的夹紧；M11 为运动部件的松开。

8. 主轴定向停止指令—M19

M19 使主轴准确地停止在预定的角度位置上。这个指令主要用于点位控制数控机床和自动换刀数控机床，如数控坐标镗床、加工中心等。

需要说明的是，由于生产数控机床的厂家很多，每个厂家使用的 G 功能、M 功能与 ISO 标准略有差异，因此对于某一台具体的数控机床，必须根据机床说明书的规定进行编程。

表 11—4 辅助功能 M 指令

注：1. # 号表示：如选作特殊用途，必须在程序说明中说明；2. M90—M99 可指定为特殊用途。

代 码	功能开始时间		功能保持到被注销或被适当程序指令代替	功能仅在所出现的程序段内有作用	功 能	代 码	功能开始时间		功能保持到被注销或被适当程序指令代替	功能仅在所出现的程序段内有作用	功 能
	与程序段指令运动同时开始	在程序段指令运动完成后开始					与程序段指令运动同时开始	在程序段指令运动完成后开始			
M00		*		*	程序停止	M36	*		*		进给范围1
M01		*		*	计划停止	M37	*		*		进给范围2
M02		*		*	程序结束	M38	*		*		主轴速度范围1
M03	*		*		主轴顺时针方向	M39	*		*		主轴速度范围2
M04	*		*		主轴逆时针方向	M40~M45	#	#	#	#	如有需要作为齿轮换档,此外不指定
M05		*	*		主轴停止	M46~M47	#	#	#	#	不指定
M06	#	#		*	换刀	M48		*	*		注销 M49
M07	*		*		2 号切削液开	M49	*		*		进给率修正旁路
M08	*		*		1 号切削液开	M50	*		*		3 号切削液开
M09		*	*		切削液关	M51	*		*		4 号切削液开
M10	#	#	*		夹紧	M52~M54	#	#	#	#	不指定
M11	#	#	*		松开	M55	*		*		刀具直线位移,位置1
M12	#	#	#	#	不指定	M56	*		*		刀具直线位移,位置2
M13	*		*		主轴顺时针方向, 切削液开	M57~M59	#	#	#	#	不指定
M14	*		*		主轴逆时针方向, 切削液开	M60		*		*	更换工件
M15	*			*	正运动	M61	*		*		工件直线位移,位置1
M16	*			*	负运动	M62	*		*		工件直线位移,位置2
M17 ~ M18	#	#	#	#	不指定	M63~M70	#	#	#	#	不指定
M19		*	*		主轴定向停止	M71	*		*		工件角度位移,位置1
M20 ~ M29	#	#	#	#	永不指定	M72	*		*		工件角度位移,位置2
M30		*		*	纸带结束	M73~M89	#	#	#	#	不指定
M31	#	#		*	互锁旁路	M90~M99	#	#	#	#	永不指定
M32 ~ M35	#	#	#	#	不指定						

（三）F，S，T 指令

1. F 指令—进给速度指令 该指令是实效指令，它有两种表示方法：

（1）代码法 F 后面跟两位数字，这些数字表示的不是进给速度的大小，而是机床进给速度数列的序号。进给速度数列可以是算术级数，也可以是几何级数。

（2）直接指定法 F 后面跟的数字就是进给速度的大小，例如 F100 的进给速度是 100mm/min。这种指定方法比较直观，因此现在大多数数控机床都采用这一方法。

S 指令—主轴转速指令 该指令也是实效指令，用来确定主轴的转速，单位是 r/min。S 后面所跟数字的指定方法与 F 指令的指定方法相同。

2. T 指令—刀具指令 在自动换刀的数控机床中,该指令用以选择所需的刀具。指令以 T 为首,其后所跟两位数字代表刀具的编号。也有带刀具补偿值的表示方式。其具体做法应参阅机床说明书。

第四节 数控机床的操作使用

数控机床在进入正常自动循环加工前,一般还需要进行开机回机床参考点、手动操作调整、对刀与刀具补偿参数设定等一系列前期准备工作。另外,根据机床维护保养的需要,也需通过手动调整机床位置等。因此,掌握好数控机床各项功能的操作使用,是正确应用数控机床、有效发挥机床效益的首要前提。

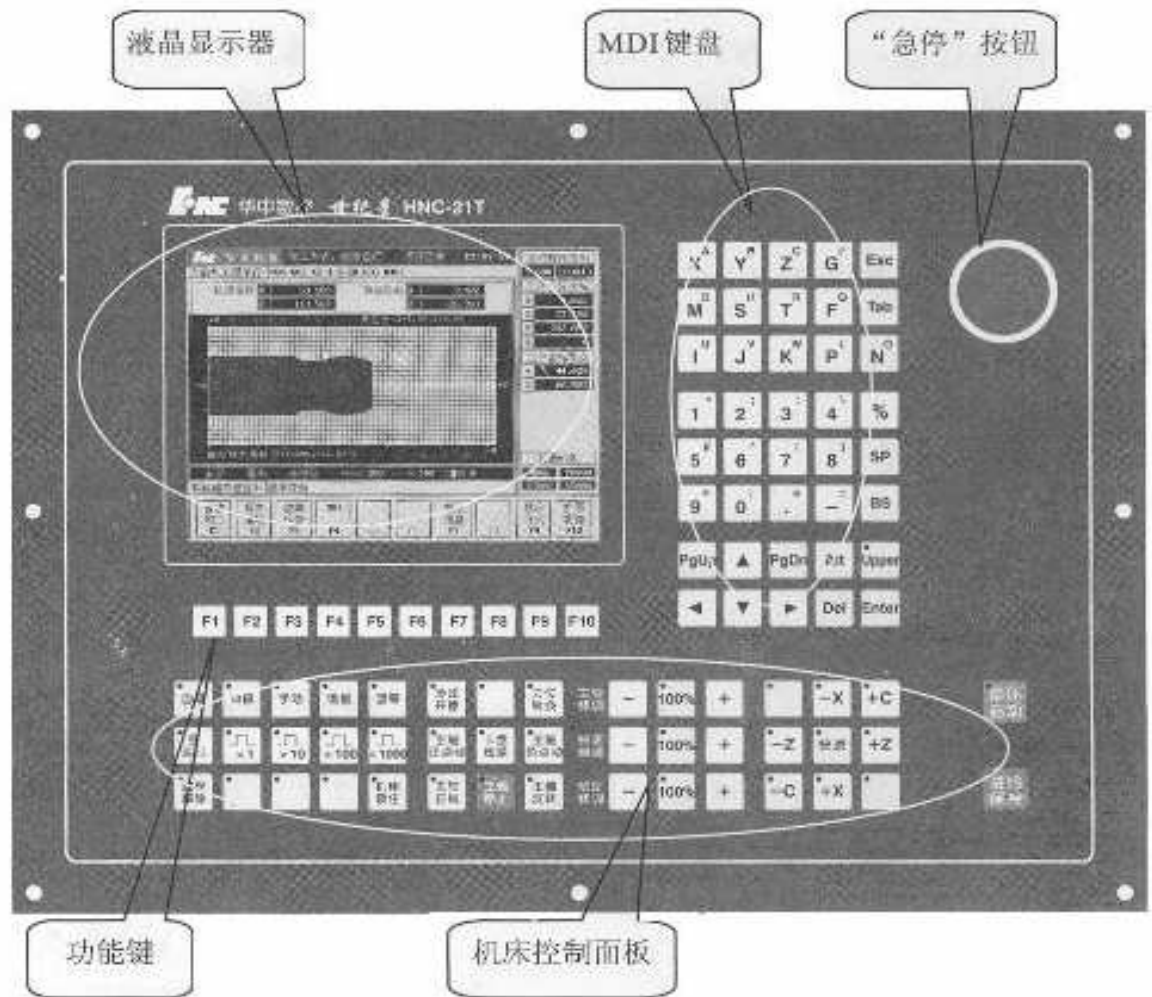


图 11-27 华中世纪星车床数控装置操作台

一、操作装置

数控系统的操作装置是操作人员控制、操作数控机床的最主要介质,是人们学习、了解、掌握数控系统的重要途径。各种数控系统的操作装置是不相同的,但大多数是有共性或相近的,这里以华中世纪星 HNC-21T 数控系统为例介绍数控系统的操作装置,这对于学习其他数控系统的操作装置和工作原理具有一定的普遍意义。

1. 操作台结构

HNC-21T 世纪星车床数控装置操作台为标准固定结构,其外形如图 11-27 所示,其结构美观、体积小,外形尺寸为 420 × 310 × 110 毫米 (W × H × D)。

(1) 显示器

操作台的左上部为 7.5 寸彩色液晶显示器 (分辨率为 640 × 480),用于汉字菜单、系统状态、故障报警的显示和加工轨迹的图形仿真。

(2) NC 键盘

NC 键盘包括精简型 MDI 键盘和 F1~F10 十个功能键。标准化的字母数字式 MDI 键盘介于显示器和“急

停”按钮之间，其中的大部分键具有上档键功能，当“Upper”键有效时（指示灯亮），输入的是上档键。F1~F10 十个功能键位于显示器的正下方。

NC 键盘用于零件程序的编制、参数输入、MDI 及系统管理操作等。

（3）机床控制面板 MCP

标准机床控制面板的大部分按键（除“急停”按钮外）位于操作台的下部，“急停”按钮位于操作台的右上角。机床控制面板用于直接控制机床的动作或加工过程。

2. MPG 手持单元

MPG 手持单元由手摇脉冲发生器、坐标轴选择开关组成，用于手摇方式增量进给坐标轴。MPG 手持单元的结构如图 11-28 所示。

3. 软件操作界面

HNC-21T 的软件操作界面如图 11-29 所示。其界面由如下几个部分组成：

①图形显示窗口 可以根据需要，用功能键 F9 设置窗口的显示内容。

②菜单命令条 通过菜单命令条中功能键 F1~F9 来完成系统功能的操作。

③运行程序索引 自动加工中的程序名和当前程序段行号。

④选定坐标系下的坐标值 坐标系可在机床坐标系/工件坐标系之间切换，而显示值可在指令位置/实际位置/剩余进给/跟踪误差/负载电流/补偿值之间切换。

⑤工件坐标零点 即工件坐标系零点在机床坐标系下的坐标。



图 11-28 MPG 手持单元的结构

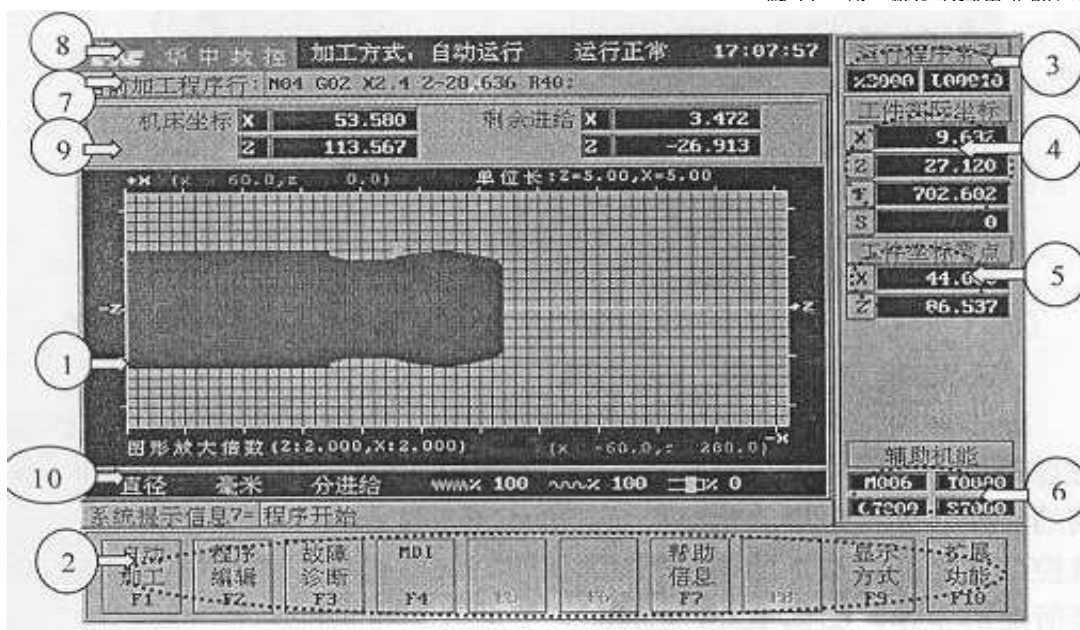


图 11-29 HNC-21T 的软件操作界面

⑥辅助机能 自动加工中的 M、S、T 代码。

⑦当前加工程序行 当前正要或将要加工的程序段。

⑧当前加工方式、系统运行状态及当前时间 其中系统工作方式根据机床控制面板上相应按键的状态可在自动（运行）、单段（运行）、手动（运行）、增量（运行）、回零、急停、复位等之间切换。系统运行状态在“运行正常”和“出错”间切换。系统时钟指当前系统时间。

⑨机床坐标、剩余进给 机床坐标为刀具当前位置在机床坐标系下的坐标。剩余进给为当前程序段的

终点与实际位置之差。

⑩直径/半径编程、公制/英制编程、每分进给/每转进给、快速修停调、进给修调、主轴修调

操作界面中最重要的一块是菜单命令条。系统功能的操作主要通过菜单命令条中的功能键 F1~F10 来完成。由于每个功能包括不同的操作，菜单采用层次结构，即在主菜单下选择一个菜单项后，数控装置会显示该功能下的子菜单，用户可根据该子菜单的内容选择所需的操作。

二、回机床参考点与手动操作

（一）回机床参考点

在前面已经讲到，机床坐标系是机床上固有的坐标系，它通常以主轴中心线与主轴端面或工作台的侧面交点为机床坐标原点。机床刚开机后，工件、刀具与所定义的机床坐标原点的相对位置关系是随机的，数控系统无法预知它们之间的相对位置关系。因此在进行自动加工前，首先必须通过机床回参考点操作，使机床各坐标轴返回一固定参考点，以建立机床坐标系，确定其原点，该点在机床的具体位置应在其使用说明书上注明。

机床回参考点的具体操作过程是，将机床操作面板上的操作方式选择开关设置为返回参考点方式。然后操作各个坐标轴的控制按键即可实现返回参考点动作，返回参考点的运动速度由机床生产家在机床参数中设定。数控系统在机床运动之前检查所选择的运动方向，如果按相反方向的按钮，则数控系统不动作。当达到参考点后，该点的机床位置相对于机床坐标零点的坐标值即在 CRT 上显示出来，并作为机床坐标系的实际位置值。

（二）手动操作

数控机床在对工件、刀具进行装夹和测量以及在机床维护保养（如清理铁屑、加油）等一些工作中，往往需要通过手动操作来调整机床各坐标轴的相对位置。另外，对某些零件的加工过程中，有时也采用暂停指令，中间通过手动插入，来对工件进行检测、位置调整等。

三、数控机床的对刀与刀具补偿

由于数控机床所用的刀具各种各样，尺寸也极不统一。这样在实际加工时，数控系统在进行刀具轨迹插补运算前，需先根据当前所用刀具的尺寸和具体安装位置，即当前刀具的补偿值，进行轨迹偏移计算。

当刀具不同，其补偿值也不同，而轨迹的偏移量也随此变化，即使刀具插补轨迹按各刀具的补偿值偏移相应的量，这样就可以使得不同的刀具在切削时，加工出同一个轨迹，所谓数控机床的对刀就是确定其刀具的补偿值，其目的是通过数控系统内的刀具轨迹自动偏移计算，来简化数控加工程序的编制，使得编程时不必考虑各把刀具的尺寸与其安装位置。对刀的方法按所用数控机床的类型不同也各有所区别，一般可分为机外对刀和机内对刀两大类。

第五节 常用数控机床的编程及应用实例

数控编程就是按照机床规定的程序格式，逐行写出刀具每一运动行程，然后打出纸带或用手动数据输入（MDI）数控系统的作业。数控编程时，编程人员必须对所用机床和数控系统用于编程中的各种指令和代码非常熟悉；编程人员还必须对零件进行工艺分析，合理规定切削用量。本节主要介绍华中世纪星系列数控装置手工编程的一些内容。

一、数控车床

（一）华中世纪星 HNC-21T 车削数控装置编程说明

前面已介绍了数控编程中的 G、M、S、T、F 等指令，华中世纪星 HNC-21T 车削数控装置的 S、T、F 指令的使用与前面介绍的内容相同，G、M 指令的使用也如表 11-3 和表 11-4 所示，只是该系统用了更多的标准中未指定的指令功能。

华中世纪星 HNC-21T 车削数控装置的 G 功能指令如表 11-5 所示，M 指令功能见表 11-6。

表 11-5 HNC-21T 数控装置准备功能一览表

注：00 组中的 G 代码是非模态的，其他组的 G 代码是模态的。

表 11—6 HNC-21T/ HNC-21M 数控装置 M 指令代码及功能

代码	模态	功能说明	代码	模态	功能说明
M00	非模态	程序停止	M03	模态	主轴正转起动

G 代码	组	功能	参数(后续地址字)	G 代码	组	功能	参数(后续地址字)
G00	01	快速定位	X, Z	G58	11	零点偏置	
G01	01	直线插补	X, Z	G59	11	零点偏置	
G02	01	顺圆插补	X, Z, I, K, R	G65	00	宏指令简单调用	P, A~Z
G03	01	逆圆插补	X, Z, I, K, R	G71	06	外径/内径车削复合循环	X, Z, U, W, P, Q, R
G04	00	暂停	P	G72	06	端面车削复合循环	X, Z, U, W, P, Q, R
G20	08	英寸输入		G73	06	闭环车削复合循环	X, Z, U, W, P, Q, R
G21	08	毫米输入		G76	06	螺纹切削复合循环	X, Z, U, W, P, Q, R
G28	00	返回参考点	X, Z	G80	01	内/外径车削固定循环	X, Z, I, K
G29	00	由参考点返回	X, Z	G81	01	端面车削固定循环	X, Z, I, K
G32	01	螺纹切削	X, Z	G82	01	螺纹切削固定循环	X, Z, I, K
G40	09	刀具半径补偿		G90	13	绝对值编程	
G41	09	左刀补	D	G91	13	增量值编程	
G42	09	右刀补	D	G92	00	工件坐标系设定	X, Z
G52	00	局部坐标系设定	X, Z	G94	14	每分钟进给	
G54	11	零点偏置		G95	14	每转进给	
G55	11	零点偏置		G36	16	直径编程	
G56	11	零点偏置		G37	16	半径编程	
G57	11	零点偏置					

M02	非模态	程序结束	M04	模态	主轴反转起动
M30	非模态	程序结束并返回程序起点	M05	模态	主轴停止转起
M98	非模态	调用子程序	M06	非模态	换刀
M99	非模态	子程序结束	M07	模态	切削液打开
			M09	模态	切削液停止

1. 有关单位的设定

(1) 尺寸单位选择

格式：G20

G21

说明：

G20：英制输入制式。

G21：公制输入制式；

两种制式下线性轴、旋转轴的尺寸单位如表 11—7 所示。

表 11—7 尺寸输入制式及其单位

	线性轴	旋转轴
英制 G20	英寸	度
公制 G21	毫米	度

G20、G21 为模态功能，可相互注销，G21 为缺省值。

(2) 进给速度单位的设定 G94、G95

格式：G94[F_]；

G95[F_]；

说明：

G94：每分钟进给；

G95：每转进给。

G94 为每分钟进给。对于线性轴，F 的单位依 G20/G21 的设定而为 mm/min 或 in/min；对于旋转轴，F 的单位为度/min。

G95 为每转进给, 即主轴转一周时刀具的进给量。F 的单位依 G20/G21 的设定而为 mm/r 或 in/r。这个功能只在主轴装有编码器时才能使用。

G94、G95 为模态功能, 可相互注销, G94 为缺省值。

2. 线性进给及倒角 G01

(1) 线性进给

格式: G01 X_Z_F_;

说明:

X、Z: 线性进给终点, 在 G90 时为终点在工件坐标系中的坐标; 在 G91 时为终点相对于起点的位移量;

F: 合成进给速度。

G01 指令刀具以联动的方式, 按 F 规定的合成进给速度, 从当前位置按线性路线 (联动直线轴的合成轨迹为直线) 移动到程序段指令的终点。

G01 是模态代码, 可由 G00、G02、G03 或 G32 功能注销。

(2) 倒角

倒角控制机能可以在两相邻轨迹程序段之间插入直线倒角或圆弧倒角, 它只能在自动方式下起作用。在指定直线插补 (G01) 或圆弧插补 (G02, G03) 的程序段尾,

输入 C_, 便插入倒角程序段;

输入 R_, 便插入倒圆程序段。

C 后的数值表示倒角起点和终点距假想拐角交点的距离, R 后的值表示倒角圆弧的半径。

假想拐角交点是未倒角前两相邻轨迹程序段的交点。

3. 螺纹切削

格式: G32 X_Z_R _ E _P_F_

说明:

X、Z: 螺纹终点, 在 G90 时为螺纹终点在工件坐标系中的坐标; 在 G91 时为螺纹终点相对于螺纹起点的位移量;

F: 螺纹导程, 即主轴每转一圈, 刀具相对于工件的进给值;

R、E: 螺纹切削的退尾量, R 表示 Z 向退尾量; E 为 X 向退尾量, E 为正表示沿 X 正向回退, 为负表示沿 X 负向回退。使用 R、E 可免去退刀槽。R、E 可以省略, 表示不用回退功能;

P: 主轴基准脉冲处距离螺纹切削起始点的主轴转角。

使用 G32 指令能加工圆柱螺纹、锥螺纹和端面螺纹。

注意:

1) 在螺纹切削过程中进给修调无效;

2) 在没有停止主轴的情况下, 停止螺纹的切削是非常危险的, 因此螺纹切削时进给保持功能无效, 如果按下进给保持按键, 刀具在加工完螺纹后停止运动;

3) 螺纹的粗加工和精加工都是沿同一刀具轨迹重复进行的, 从粗加工到精加工, 主轴的转速必须保持恒定。否则, 螺纹的导程就将发生改变。

(二) 编程实例

加工实例如图 11-30 所示, 工件毛坯为 $\Phi 32\text{mm}$ 的铝棒。

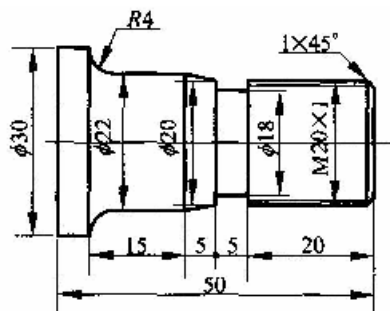


图 11-30 零件图

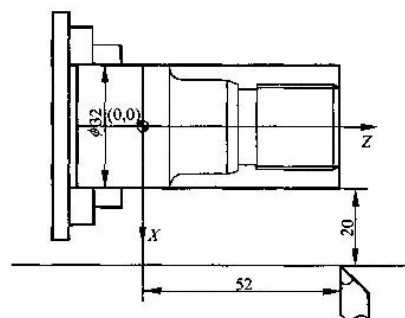


图 11-31 编程原点和刀具起点

1. 工艺分析

(1) 毛坯装夹

以三爪卡盘夹紧 $\Phi 32\text{mm}$ 的毛坯, 因毛坯长度不长, 可以不用顶尖。

(2) 刀具选择

选用 90° 高速钢外圆车刀，装在 1 号刀架上；选用 60° 的螺纹刀，装在 3 号刀架上；选用宽度为 5mm 的槽刀，装在 4 号刀架上。

(3) 加工步骤和进给量

采用外圆车刀多次循环进刀切削，每次进刀量为 0.5mm（直径值），再用切断刀切槽，最后车螺纹。

2. 编程说明

①确定编程原点、对刀点和刀具起点，如图 11—31 所示。

②采用直径编程。

③采用子程序方法编写圆弧、直线程序，调用 20 次子程序，每次进给 0.5mm。

3. NC 程序（表 11—8）。

表 11—8

程序	注释
%9999	
G92 X36 Z52	确定坐标系
M06 T0101	换 1 号刀
M03	主轴转动
G91 G01 X-20.5 F300	加工毛胚
G01 Z-52	
X 2	
G01 Z52	
G01 X-2.5	
Z-52	
Z2.5	
G00 Z52	
G01 X-2.5	
M98 O1004 L20	调用子程序加工零件外形
G91 G01 X0.5	倒角加工
G80 X0 Z-1.5 I-1.5	
G80 X0 Z-2 I-2	
G90 G00 X36 Z52	
Z100	
T0100	
M06 T0404	换 4 号刀
G91 G00 Z-73	退刀槽加工
X-31	
G01 X-2.5	
X2.5	
X-3	
X3	
X-3.5	
X3.5	
X-4	
X4	
G90 G00 X36 Z52	
Z100	
T0400	
M06 T0303	换 3 号刀
G90 G01 X15 Z52	螺纹加工
G82 X9.4 Z28 F1	
G82 X9.2 Z28 F1	
G90 G00 X36 Z52	
Z100	
T0300	

M06 T0404	换 4 号刀
G91 G00 Z-105	切断工件
G90 G01 X26 Z300	
X30	
X20	
X25	
X15	
X20	
X10	
X15	
X5	
X10	
X-3	
G90 G00 X36 Z52	
T0400	
M05	
M02	
O1004	子程序（外形加工）
G91 G01 X-0.5	
Z-25	
X2 Z-5	
Z-11	
G02 X8 Z-4 R4	
G01 X2	
G00 Z45	
G01 X-12	
M99	

二、数控铣床

（一）华中世纪星 HNM—21M 铣削数控装置常用编程指令

华中世纪星 HNM—21M 铣削数控装置的 G 功能指令如表 11—9 所示，M 指令功能见表 11—6。其编程指令与前面介绍的基本相同，下面仅对一些特殊指令作进一步的说明。

11—9 HNM—21M 铣削数控装置准备功能一览表

G 代码	组	功能	参数(后续地址字)	G 代码	组	功能	参数(后续地址字)
G00	01	快速定位	X, Y, Z, 4TH [注 1]	G57	11	工作坐标系 4 选择	
G01	01	直线插补	X, Y, Z, 4TH	G58	11	工作坐标系 5 选择	
G02	01	顺圆插补	X, Y, Z, I, J, K, R	G59	11	工作坐标系 6 选择	
G03	01	逆圆插补	X, Y, Z, I, J, K, R	G60	00	单方向定位	X, Y, Z, 4TH
G04	00	暂停	P	G61	12	精确停止校验方式	
G07	16	虚轴指定	X, Y, Z, 4TH	G64	12	连续方式	
G09	00	准停校验		G65	00	子程序调用	P, A~Z
G17	02	XY 平面选择	X, Y	G68	05	旋转变换	X, Y, Z, P
G18	02	ZX 平面选择	X, Z	G69		旋转取消	
G19	02	YZ 平面选择	Y, Z	G73	06	深孔钻削循环	X, Y, Z, P, Q, R, I, J, K
G20	08	英寸输入		G74	06	逆攻丝循环	同上
G21	08	毫米输入		G76	06	精镗循环	同上
G22	08	脉冲当量		G80	06	固定循环取消	同上
G24	03	镜像开	X, Y, Z, 4TH	G81	06	定心钻循环	同上
G25	03	镜像关		G82	06	钻孔循环	同上
G28	00	返回参考点	X, Y, Z, 4TH	G83	06	深孔钻循环	同上
G29	00	由参考点返回	X, Y, Z, 4TH	G84	06	攻丝循环	同上
G40	09	刀具半径补偿		G85	06	镗孔循环	同上
G41	09	左刀补	D	G86	06	镗孔循环	同上
G42	09	右刀补	D	G87	06	反镗循环	同上
G43	10	刀具长度正向补偿	H	G88	06	镗孔循环	同上
G44	10	刀具长度负向补偿	H	G89	06	镗孔循环	同上
G49	10	刀具长度补偿取消		G90	13	绝对值编程	
G50	04	缩放关		G91	13	增量值编程	
G51	04	缩放开	X, Y, Z, P	G92	00	工件坐标系设定	X, Y, Z, 4TH
G52	00	局部坐标系设定	X, Y, Z, 4TH	G94	14	每分钟进给	
G53	00	直接机床坐标系编程		G95	14	每转进给	
G54	11	工作坐标系 1 选择		G98	15	固定循环返回起始点	
G55	11	工作坐标系 2 选择		G99	15	固定循环返回到 R 点	
G56	11	工作坐标系 3 选择					

注：(1) 4TH 指的是 X、Y、Z 之外的第 4 轴，可用 A、B、C 等命名；

(2) 00 组中的 G 代码是非模态的，其他组的 G 代码是模态的。

1. 镜像功能 G24, G25

当工件相对于某一轴具有对称形状时，可以利用镜像功能和子程序，只对工件的一部分进行编程，而能加工出工作的对称部分，这就是镜像功能。当某一轴的镜像有效时，该轴执行与编程方向相反的运动。

格式：G24 X_Y_Z_A_

M98 P_

G25 X_Y_Z_A_

说明：

G24：建立镜像；

G25：取消镜像；

X, Y, Z , A: 镜像位置。
G24、G25 为模态指令，可相互注销，G25 为缺省值。

2. 缩放功能 G50, G51

格式: G51 X_Y_Z _P_
M98 P_
G50

说明:

- G51: 建立缩放;
- G50: 取消缩放;
- X、Y、Z: 缩放中心的坐标值;
- P: 缩放倍数。

G51 既可指定平面缩放，也可指定空间缩放。

在 G51 后，运动指令的坐标值以 (X, Y, Z) 为缩放中心，按 P 规定的缩放比例进行计算。

在有刀具补偿的情况下，先进行缩放，然后才进行刀具半径补偿、刀具长度补偿。

G51、G50 为模态指令，可相互注销，G50 为缺省值。

3. 旋转变换 G68, G69

格式: G17 G68 X_Y_ P_
G18 G68 X_ Z _P_
G19 G68 X_Y_Z _P_
M98 P_
G69

说明:

- G68: 建立旋转;
- G69: 取消旋转;
- X、Y、Z: 旋转中心的坐标值;
- P: 旋转角度，单位是 (°)， $0 \leq P \leq 360^\circ$ 。

在有刀具补偿的情况下，先旋转后刀补（刀具半径补偿、长度补偿）；在有缩放功能的情况下，先缩放后旋转。

G68、G69 为模态指令，可相互注销，G69 为缺省值。

(二) 编程举例

例 1: 如图 11—32 所示。立铣刀直径 $\Phi 20\text{mm}$ ，程序见表 11—10。

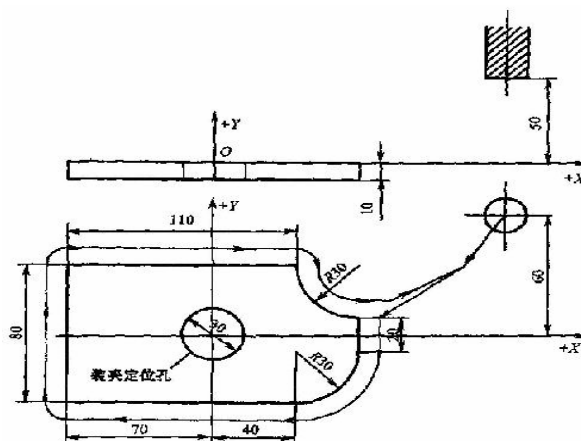


图 11—32

表 11—10 加工程序

程 序	注 释
%0001	程序代号

N01 G00 G90 X120. Y60. Z50.	绝对值输入, 快速进给到 X120 Y60 Z50
N02 X100. Y40 M13 S500	快速进给到 X100 Y40, 切削液开, 主轴正转, 转速 500r / min
N03 Z-11.	快速向下进给到 Z-11
N04 G01 G41 X70. Y10. H012 F100	直线插补到 X70 Y10, 刀具半径左补偿 H012=10mm, 进给速度 100mm/s
N05 Y-10.	直线插补到 X70 Y-10
N06 G02 X40. Y-40. R30.	顺圆插补到 X40 Y-40, 半径为 30mm
N07 G01 X-70.	直线插补到 X-70 Y-40
N08 Y40.	直线插补到 X-70 Y40
N09 X40.	直线插补到 X40 Y40
N10 G03 X70. Y10. R30	逆圆插补到 X70 Y10, 半径为 30mm
N11 G01 X85.	直线插补到 X85 Y10
N12 G00 G40 X100. Y40.	快速进给到 X100 Y40, 取消刀具半径补偿
N13 X120. Y60. Z50	快速进给到 X120 Y60 Z50
N14 M30	程序结束, 系统复位

例 2: 如图 11-33 所示。立铣刀直径 $\Phi 20\text{mm}$, 程序见表 11-11。

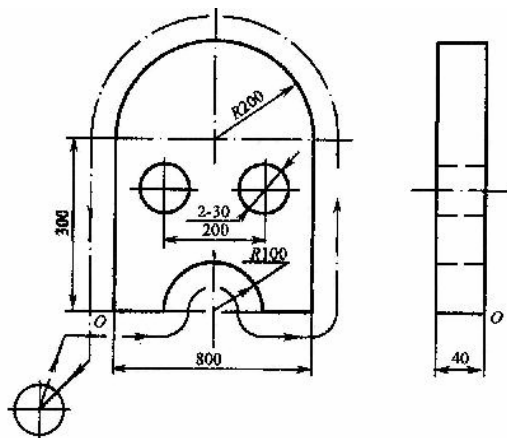


图 11-33

表 11-11 加工程序

程 序	注 释
%1000	程序代号
N010 G90 G54 G00 X-50.0 Y-50. 0	G54 加工坐标系, 快速进给到 X-50 Y-50
N020 S800 M03	主轴正转, 转速 800r / min
N030 G43 G000 H12	刀具长度补偿 H12=20
N040 G01 Z-20.0 F300	Z 轴工进至 Z=-20
N050 M98 P1010	调用子程序 O1010
N060 Z-45.0 F300	Z 轴工进至 Z=-45
N070 M98 P1010	调用子程序 O1010
N080 G49 G00 Z300.0	Z 轴快移至 Z=300mm
N090 G28 Z300.0	Z 轴返回参考点
NI00 G28 X0 Y0	X、Y 轴返回参考点
NI10 M30	主程序结束
O1010	子程序代号
N010 G42 G01 X-30.0 Y0 F300 H22 M08	切削液开, 直线插补至 X-30Y0, 刀具半径右补偿 H22=10mm

N020 X100.0	直线插补至 $x=100\ y=0$
N030 G02 X300.0 R100	圆弧插补至 $x=300\ y=0$
N040 G01 X400.0	直线插补至 $x=400\ y=300$
N050 Y300.0	直线插补至 $x=400\ y=300$
N060 G03 X0 R200.0	逆圆插补至 $x=0\ y=300$
N070 G01 Y-30.0	直线插补至 $x=0\ y=-30$
N080 G40 G01 X-50.0 Y-50.0	直线插补至 $X=-50\ y=-50$ 取消刀具半径右补偿
N090 M09	切削液关
N100 M99	子程序结束并返回主程序

复习思考题

1. 数控机床主要由哪几部分组成？
2. 常用的数控机床有几类？它们分别应用于哪类零件的加工？
3. 数控机床的大致工作过程是怎样的？
4. 数控编程方法有几种？在什么情况下需要借助计算机辅助编程？
5. 数控系统由哪几个部分组成？各部分的基本功能是什么？
6. 数控系统有哪些特点？可执行什么功能？
7. 数控系统中，软硬件有何关系？
8. 何为刀具半径补偿？何为刀具长度补偿？
9. 列举出几种典型的 CNC 系统。
10. 确定机床坐标系有哪些原则？确定的一般方法是什么？
11. 什么叫机床原点？什么叫工件原点？它们之间有何关系？
12. 程序段格式有哪些？
13. 什么是准备功能指令和辅助功能指令？它们的作用如何？
14. M00、M02、M30 的区别是什么？
15. 为什么在编程时要先确定对刀点的位置？选定对刀点的原则是什么？确定对刀点的方法有哪些？
16. 如图 11-34 所示工件，需要进行精加工，其中 $\Phi 85\text{mm}$ 外圆不加工（毛坯为 $\Phi 85\text{mm} \times 340\text{mm}$ 棒材，材料为 45 钢），试编写出加工程序。

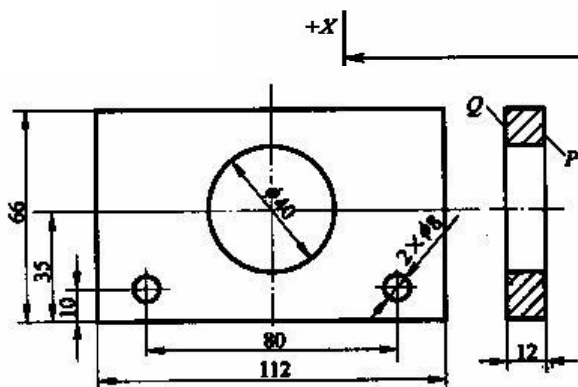


图 11-35 盖板毛坯

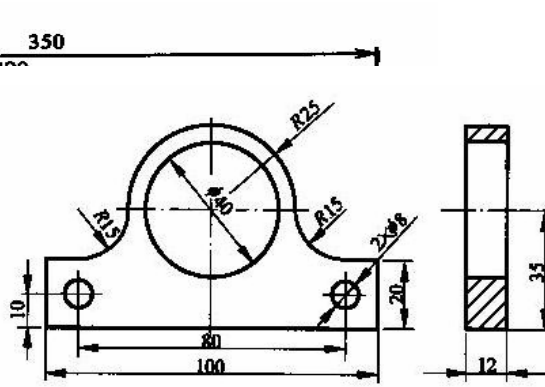


图 11-36 盖板零件

17. 某盖板毛坯零件尺寸如图 11-35 所示，材料为铝板。欲加工出如图 11-36 所示盖板外轮廓，试编写出加工程序。

第十二章 特种加工

第一节 概 述

自上世纪 50 年代以来,特别是近二十年,由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的急需,不仅新产品更新换代日益加快,而且产品要求具有很高的强度重量比和性能价格比,并正在朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此,各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如,各种难切削材料的加工;各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工;薄壁、弹性元件等低刚度、特殊零件的加工等。对此,采用传统加工方法十分困难,甚至无法加工。于是人们一方面通过研究高效加工的刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具可靠性和在线刀具监测系统、开发新型切削液、研制新型自动机床等各种途径,进一步改善切削状态,提高切削加工水平,并解决了一些问题;另一方面,则冲破传统加工方法的束缚,不断地探索寻求新的加工方法。于是一种本质上区别于传统加工的特种加工便应运而生。后来,由于新颖制造技术的进一步发展,人们就从广义上来定义特种加工,即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆的非传统加工方法统称为特种加工(NTM, Non-Traditional Machining)。它是一种涉及多学科、学科交叉融合的先进制造技术,具有传统加工所无可比拟的特点。

特种加工的特点:

(1) 适应性强,加工范围广,一般不受工件材料的机械物理性能的限制,可以加工任何硬、软、脆、热敏、耐腐蚀、高熔点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料;

(2) 多数特种加工不需要工具,有的即使采用工具,也不直接与工件接触,且几乎不承受加工作用力。因此,工具材料的硬度可低于工件材料的硬度;

(3) 可在加工过程中实现能量转换或组合,便于实现控制和操作自动化,故适于加工二维或三维复杂型面、微细表面、微小孔、窄缝、低刚度零件;

(4) 不存在加工中的机械应变或大面积的热应变,可获得较低的表面粗糙度,其热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小,尺寸稳定性好;

(5) 两种或两种以上不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工,其综合加工效果明显,且便于推广应用;

(6) 特种加工对简化加工工艺、变革新产品的设计及零件结构工艺性等产生积极的影响。特种加工可以解决传统加工难以或无法加工的难题,在加工范围、加工质量、生产率及经济性方面,显示了许多优越性和独到之处,而且其自身的加工工艺及机床设备等方面也都得到了迅速发展。

特种加工的分类:

特种加工的分类还没有明确的规定,常见的特种加工方法有电火花加工、电火花线切割加工、电解加工、超声加工、激光加工、电子束加工等。

在发展过程中也形成了某些介于常规机械加工和特种加工工艺之间的过渡性工艺。例如在切削过程中引入超声振动或低频振动切削,在切削过程中通以低电压大电流的导电切削、加热切削以及低温切削等。这些加工方法是在切削加工的基础上发展起来的,目的是改善切削的条件,基本上还属于切削加工。

在特种加工范围内还有一些属于减小表面粗糙度值或改善表面性能的工艺,前者如电解抛光、化学抛光、离子束抛光等,后者如电火花表面强化、镀覆、刻字,激光表面处理、改性,电子束曝光,离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模集成电路生产发展的需要,上述提到的电子束、离子束加工,就是近年来提出的超精微加工,即所谓原子、分子单位的加工方法。

此外,还有一些不属于尺寸加工的特种加工,如液中放电成形加工、电磁成形加工、爆炸成形加工及放电烧结等等。

第二节 电火花加工

电火花加工又称放电加工(Electrical Discharge Machining 简称 EDM),是一种利用电、热能量进行加工的方法。它是在加工过程中,利用工具和工件两极间脉冲放电时局部瞬时产生的高温把金属腐蚀去除来对工件进行加工的一种方法。因放电过程中可见到火花,故称之为电火花加工,日本、英、美称之为放电加工,前苏联称电蚀加工。

一、电火花加工的原理及特点

1. 基本原理

电火花加工的原理是基于工具和工件（正、负电极）之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属，以达到对零件的尺寸、形状及表面质量预定的加工要求。

图 12-1 所示为电火花加工原理示意图。工件 1 与工具 4 分别与脉冲电源 2 的两输出端相联接。自动进给调节装置 3（此处为电动机及丝杆螺母机构）使工具和工件间经常保持一很小的放电间隙，当脉冲电压加到两极之间，便在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿介质，在该局部产生火花放电，瞬时高温使工具和工件表面都蚀除掉一小部分金属，各自形成一个小凹坑，如图 12-2 所示。其中图 12-2 a) 表示单个脉冲放电后的电蚀坑，图 12-2 b) 表示多次脉冲放电后的电极表面。经连续不断地重复放电，工具电极不断地向工件进给，就可将工具的形状复制在工件上，加工出所需要的零件，整个加工表面将由无数个小凹坑所组成。

2. 电火花加工的特点

(1) 主要优点

1) 适合于难切削材料的加工。由于加工中材料的去除是靠放电时的电热作用实现的。材料的加工性主要取决于材料的导电性及其热学特性，如熔点、比热容、热导率、电阻率等，而几乎与其力学性能（硬度、强度等）无关。这样可以突破传统切削加工对刀具的限制，可以实现用软的工具加工硬韧的工件。目前电极材料多采用纯铜（俗称紫铜）或石墨，因此工具电极较容易加工。

2) 可以加工特殊及复杂形状的零件。由于加工中工具电极和工件不直接接触，没有机械加工的切削力，因此适宜加工低刚度工件及微细加工。由于可以将工具电极的形状复制到工件上，因此特别适用于复杂表面形状工件的加工。

3) 直接利用电能加工，便于实现过程的自动化。加工条件中起重要作用的电参数容易调节，能方便地进行粗、半精、精加工各工序，简化工艺过程。

(2) 电火花加工的局限性

1) 主要用于加工金属等导电材料，但在一定条件下也可以加工半导体和非导体材料。

2) 一般加工速度较慢。因此通常安排工艺时多采用切削来去除大部分余量，然后再进行电火花加工以求提高生产率，但最近已有新的研究成果表明，采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工，其生产率甚至可不亚于切削加工。

3) 存在电极损耗。由于电极损耗多集中在尖角或底面，影响成形精度。但近年来粗加工时已能将电极相对损耗比降至 0.1% 以下，甚至更小。

4) 小角部半径有限制。一般电火花加工能得到的最小角部半径等于加工间隙（通常为 0.02~0.3mm），若电极有损耗或采用平动或摇动加工则角部半径还要增大。

二、电火花加工的应用

(一) 冲模的电火花加工

冲模采用电火花加工工艺比机械加工有如下优点：

(1) 可以在工件淬火后进行加工，避免了热处理变形的影响。

(2) 冲模的配合间隙均匀，刃口耐磨，提高了模具质量。

(3) 不受材料硬度的限制，可以加工硬质合金等冲模，扩大了模具材料的选用范围。

(4) 对于中、小型复杂的凹模可以不用镶拼结构，而采用整体式，简化了模具的结构，提高了模具强度。

1. 冲模的电火花加工工艺方法

冲模的尺寸精度主要靠工具电极来保证，因此，对工具电极的精度和表面粗糙度都应有一定的要求。如冲模的尺寸为 L_2 ，工具电极相应的尺寸为 L_1 ，火花间隙值为 S_L （图 12-3），则

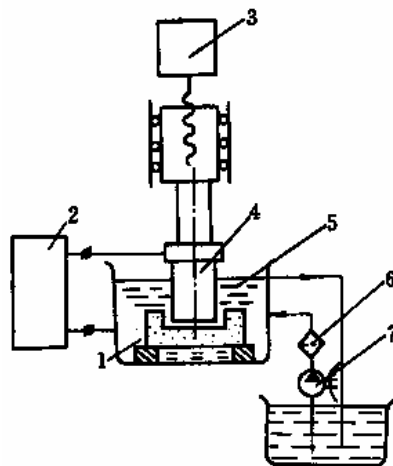


图 12-1 点火花加工原理示意图
1-工件 2-脉冲电源 3-自动进给调节装置

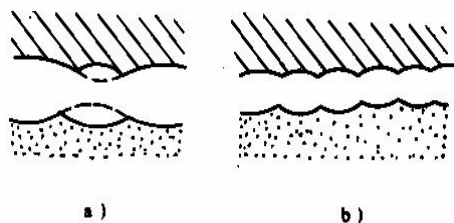


图 12-2 点火花加工表面局部放大图

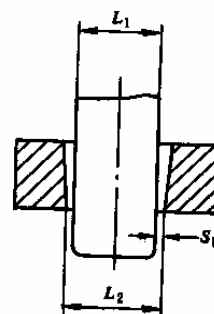


图 12-3 冲模的电火花加

$$L_2 = L_1 + 2S_L$$

其中火花间隙值 S_L 主要决定于脉冲参数与机床的精度，只要加工规准选择恰当，保证加工的稳定性，火花间隙值的误差是很小的，因此，只要工具电极的尺寸精确，用它加工出的凹模也是比较精确的。

对冲模，配合间隙是一个很重要的质量指标，它的大小与均匀性都直接影响冲模的质量及模具的寿命，在加工中必须给予保证。达到配合间隙的方法有很多种，电火花穿孔加工常用“钢打钢”直接配合法。此法是直接用钢凸模作为电极直接加工凹模，加工时将凹模刃口端朝下形成向上的“喇叭口”，加工后将工件翻过来使“喇叭口”向下作为凹模，电极也倒过来把损耗部分切除或用低熔点合金浇铸作为凸模。

2. 工具电极

(1) 电极材料的选择 凸模一般选优质高碳钢 T8A、T10A 或铬钢 Cr12、GCr15，硬质合金等。应注意凸、凹模不要选用同一种钢材型号，否则电火花加工时更不易稳定。

(2) 电极的设计 由于凹模的精度主要决定于工具电极的精度，因而对它有更严格的要求，要求工具电极的尺寸精度和表面粗糙度比凹模高一级，一般精度不低于 IT7，表面粗糙度小于 $Ra1.25 \mu m$ ，且直线度、平面度和平行度在 100mm 长度上不大于 0.01mm。

工具电极应有足够的长度，若加工硬质合金时，由于电极损耗较大，电极还应适当加长。

(3) 电极的制造 冲模电极的制造，一般先经普通机械加工，然后成型磨削。目前，直接用电火花线切割加工电极获得广泛应用。

3. 工件的准备

电火花加工前，工件（凹模）型孔部分要加工预孔，并留适当的电火花加工余量。余量的大小应能补偿电火花加工的定位、找正误差及机械加工误差。一般情况下，单边余量为 0.3~1.5mm 为宜，并力求均匀。对形状复杂的型孔，余量要适当加大。

4. 电规准的选择及转换

所谓电规准是指电火花加工过程中一组电参数，如电压、电流、脉宽、脉间等。电规准选择正确与否，将直接影响着模具加工工艺指标。应根据工件的要求、电极和工件的材料、加工工艺指标和经济效果等因素来确定电规准，并在加工过程中及时地转换。

冲模加工中，常选择粗、中、精三种规准。对粗规准的要求是：生产率高，工具电极的损耗小。主要采用较大的电流，较长的脉冲宽度。

中规准用于过渡性加工，以减少精加工时的加工余量，提高加工速度，中规准采用的脉冲宽度一般为 10~100 微秒。

精规准用来最终保证模具所要求的配合间隙、表面粗糙度、刃口斜度等质量指标，并在此前提下尽可能地提高其生产率。故应采用小的电流，高的频率、短的脉冲宽度（一般为 2~6 微秒）。粗规准和精规准的正确配合，可以适当的解决电火花加工时的质量和生产率之间的矛盾。

(二) 型腔模的电火花加工

型腔模包括锻模、压铸模、胶木模、塑料模、挤压模等。它的加工比较困难，主要因为均是盲孔加工，工作液循环和电蚀产物排除条件差，工具电极损耗后无法靠主轴进给补偿精度，金属蚀除量大，其次是加工面积变化大，加工过程中电规准的变化范围也较大，并由于型腔复杂，电极损耗不均匀，对加工精度影响很大。因此，对型腔模的电火花加工，既要求蚀除量大，加工速度高，又要求电极损耗低，并保证所要求的精度和表面粗糙度。

型腔模电火花加工主要有单电极平动法、多电极更换法和分解电极加工法等。

(1) 单电极平动法 单电极平动法在型腔模电火花加工中应用最广泛。它是采用一个电极完成型腔的粗、中、精加工的。首先采用低损耗（ $\theta < 1\%$ ）、高生产率的粗规准进行加工，然后利用平动头作平面小圆运动，按照粗、中、精的顺序逐级改变电规准。与此同时，依次加大电极的平动量，以补偿前后两个加工规准之间型腔侧面放电间隙差和表面微观不平度差，实现型腔侧面仿型修光，完成整个型腔模的加工。

(2) 多电极更换法 多电极更换法是采用多个电极依次更换加工同一个型腔，每个电极近年来国外广泛采用像加工中心那样具有电极库的 3~5 坐标数控电火花机床，事先把复杂型腔分解为简单表面和相应的简单电极，编制好程序，加工过程中自动更换电极和转换规准，实现复杂型腔的加工。加工时必须把上一规准的放电痕迹去掉。一般用两个电极进行粗、精加工就可满足要求。当型腔的精度和表面质量要求很高时，才采用三个或更多个电极进行加工。要求多个电极的一致性、制造精度高，更换电极时要求定位装夹精度高，因此一般只用于精密型腔的加工，例如盒式磁带、收录机、电视机等机壳的模具，都是用多个电极加工出来的。

(3) 分解电极法 分解电极法是单电极平动加工法和多电极更换加工法的综合应用。它工艺灵活性强，仿形精度高，适用于尖角窄缝、沉孔、深槽多的复杂型腔模具加工。根据型腔的几何形状，把电极分

解成主型腔和副型腔分别制造。先加工出主型腔，后用副型腔电极加工尖角、窄缝等部位的副型腔。此方法的优点是可以根据主、副型腔不同的加工条件，选择不同的加工规准，有利于提高加工速度和改善加工表面质量、同时还可以简化电极制造，便于修整电极。缺点是更换电极是主型腔和副型腔电极之间要求有精确的定位。

（三）小孔电火花加工

小孔加工也是电火花穿孔成型加工的一种应用。小孔加工的特点是：①加工面积小，深度大，直径一般为 $\phi 0.05 \sim \phi 2\text{mm}$ ，深径比达 20 以上；②小孔加工均为盲孔加工，排屑困难。

小孔加工由于工具电极截面积小，容易变形；不易散热，排屑又困难，因此电极损耗大。工具电极应选择刚性好、容易矫直、加工稳定性好和损耗小的材料，如铜钨合金丝、钨丝、铜丝、钢丝等。加工时为了避免电极弯曲变形，还需设置工具电极的导向装置。

为了改善小孔加工时的排屑条件，使加工过程稳定，常采用电磁振动头，使工具电极丝沿轴向振动，或采用超声波振动头，使工具电极端面有轴向高频振动，进行电火花超声波复合加工，可以大大提高生产率。如果所加工的小孔直径较大，允许采用空心电极（如空心不锈钢管或铜管），则可以用较高的压力强迫冲油，加工速度将会显著提高。

电火花高速小孔加工工艺是近年来新发展起来的。其工作原理是采用管状电极，加工时电极作回转和轴向进给运动，管电极中通入 $1 \sim 5\text{MPa}$ 的高压工作液（去离子水、蒸馏水、乳化液或煤油）。由于高压工作液能迅速将电极产物排除，且能强化火花放电的蚀除作用，因此这一加工方法的最大特点是加工速度高，一般小孔加工速度可达 60mm/min 左右，比钻孔速度还要快。这种加工方法最适合加 $0.3 \sim 3\text{mm}$ 左右的小孔且深径比可超过 100。

（四）异形小孔的电火花加工

电火花加工不但能加工圆形小孔，而且能加工多种异形小孔，图 12-4 为喷丝板异形孔的几种孔形。

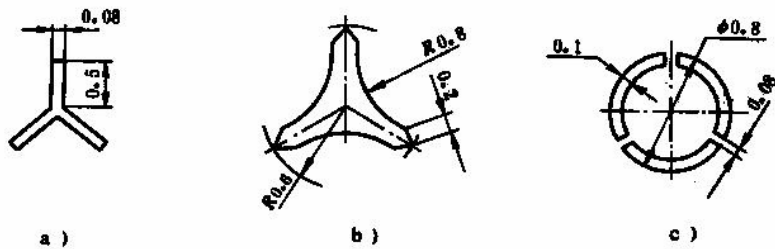


图 12-4 喷丝板异形孔的几种孔形
1-三叶形 2-变形三角形 3-中空形

第三节 电火花线切割加工

电火花线切割加工（Wire Cut EDM，简称 WEDM）是在电火花加工基础上于上世纪 50 年代最早在前苏联发展起来的一种新的工艺形式，是用线状电极（钢丝或钼丝）靠火花放电对工件进行切割，故称为电火花线切割，有时简称线切割。

一、电火花线切割加工原理

电火花线切割加工的基本原理是利用移动的细金属导线（钢丝或钼丝）作电极。对工件进行脉冲火花放电、切割成形。

根据电极丝的运行速度，电火花线切割机床通常分为两大类。一类是高速走丝电火花和切割机床（WEDM—HS），这类机床的电极丝作高速往复运动，一般走丝速度为 $8 \sim 10\text{m/s}$ ，这是我国生产和使用的主要机种，也是我国独创的电火花线切割加工模式；另一类是低速走丝电火花线切割机床《WEDM—LS》，这类机床的电极丝作低速单向运动，一般走丝速度低于 0.2m/s ，这是国外生产和使用的主要机种。

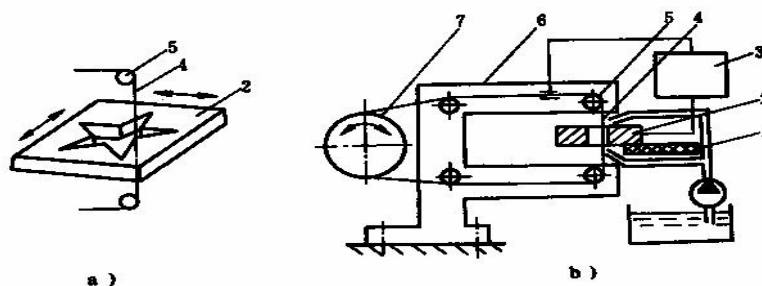


图 12-5 电火花线切割原理

1-绝缘底板 2-工件 3-脉冲电源 4-钼丝 5-导向轮 6-支架 7-储丝筒

图 12-5 a)、b) 为高速走丝电火花线切割工艺及装置的示意图。利用细钼丝 4 作工具电极进行切割，贮丝筒 7 使钼丝作正反向交替移动，加工能源由脉冲电源 3 供给。在电极丝和工件之间浇注工作液介质，工作台在水平面两个坐标方向按预定的控制程序，根据火花间隙状态作伺服进给移动，从而合成各种曲线轨迹，把工件切割成形。

二、电火花线切割加工的特点

电火花线切割加工过程的工艺和机理，与电火花穿孔成形加工既有共性，又有特性。

1. 电火花线切割加工与电火花成形加工的共性

(1) 线切割加工的电压、电流波形与电火花加工的基本相似。

(2) 线切割加工的加工机理、生产率、表面粗糙度等工艺规律，材料的可加工性等也都与电火花加工的基本相似，可以加工硬质合金等一切导电材料。

2. 线切割加工相对于电火花加工的不同特点

(1) 由于电极工具是直径较小的细丝，故脉冲宽度、平均电流等不能太大，加工工艺参数的范围较小，属中、精密级正极性电火花加工，工件常接电源正极。

(2) 采用水或水基工作液，不会引燃起火，容易实现安全无人运转，但由于工作液的电阻率远比煤油小，因而在开路状态下，仍有明显的电解电流。电解效应稍有益于改善加工表面粗糙度。

(3) 一般没有稳定电弧放电状态。因为电极丝与工件始终有相对运动，尤其是快速走丝电火花线切割加工，因此，线切割加工的间隙状态可以认为是由正常火花放电、开路 and 短路这三种状态组成，但往往在单个脉冲内有多种放电状态，有“微开路”、“微短路”现象。

(4) 电极与工件之间存在着“疏松接触”式轻压放电现象。只有电极丝和工件之间保持一定的轻微接触压力，才形成火花放电。可以认为，在电极丝和工件之间存在着某种电化学产生的绝缘薄膜介质，当电极丝被顶弯所造成的压力和电极丝相对工件的移动摩擦使这种介质减薄到可被击穿的程度，才发生火花放电。放电发生之后产生的爆炸力可能使电极丝局部振动而脱离接触，但宏观上仍是轻压放电。

(5) 省掉了成形的工具电极，大大降低了成形工具电极的设计和制造费用，缩短了生产准备时间，加工周期短，这对新产品的试制是很有意义的。

(6) 由于电极丝比较细，可以加工微细异形孔、窄缝和复杂形状的工作。由于切缝很窄，且只对工件材料进行“套料”加工，实际金属去除量很少，材料的利用率很高，这对加工、节约金属有重要意义。

(7) 由于采用移动的长电极丝进行加工，使单位长度电极丝的损耗较少，从而对加工精度影响比较小，特别在低速走丝线切割加工时，电极丝一次性使用，电极丝损耗对加工精度的影响更小。

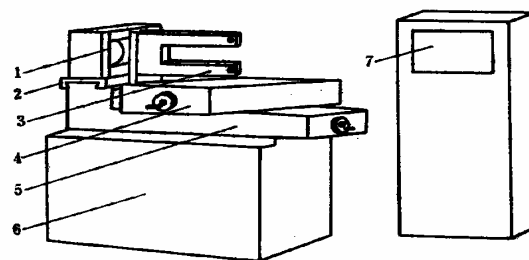


图 12-6 高速走丝线切割加工设备组成

1. 卷丝筒 2. 走丝溜板 3. 丝架 4. 上滑板 5. 下滑板
6. 床身 7. 电源、控制柜

三、电火花线切割加工设备

电火花线切割加工设备主要由机床本体、脉冲电源、控制系统、工作液循环系统和机床附件等几部分组成。图 12-6 和图 12-7 分别为高速和低速走丝线切割加工设备组成图。本书以讲述高速走丝线切割为主。

(一) 机床本体

机床本体由床身、坐标工作台、运丝机构、丝架、工作液箱、附件和夹具等几部分组成。

1. 床身部分 床身一般为铸件、是坐标工作台、绕丝机构及丝架的支承和固定基础。

2. 坐标工作台部分 电火花线切割机床最终都是通过坐标工作台与电极丝的相对运动来完成对零件加工的。为保证机床精度，对导轨的精度、刚度和耐磨性有较高的要求。一般都采用“十”字滑板、滚动导轨和丝杆传动副将电动机的旋转运动变为工作台的直线运动，通过两个坐标方向各自的进给移动，可合成获得各种平面图形曲线轨迹。

3. 走丝机构 走丝系统使电极丝以一定的速度运动并保持一定的张力。在高速走丝机床上，一定长度的电极丝平整地卷绕在贮丝筒上（参考图 12-6），丝张力与排绕时的拉紧力有关（为提高加工精度、近来已研制出恒张力装置），贮丝筒通过联轴节与驱动电动机相连。为了重复使用该段电极丝，电动机由专门的换向装置控制作正反向交替运转。

4. 锥度切割装置 为了切割有落料角的冲模和某些有锥度（斜度）的内外表面，有些线切割机床具有锥度切割功能。

(二) 脉冲电源

电火花线切割加工脉冲电源与电火花成形加工所用的在原理上相同，不过受加工表面粗糙度和电极丝允许承载电流的限制，线切割加工脉冲电源的脉宽较窄（ $2\sim 60\mu s$ ），单个脉冲能量、平均电流（ $1\sim 5A$ ）一般较小，所以线切割总是采用正极性加工。脉冲电源的形式品种很多，如晶体管矩形波脉冲电源、高频分组脉冲电源、并联电容型脉冲电源和低损耗电源等。

(三) 工作液循环系统

在线切割加工中，工作液对加工工艺指标的影响很大，如对切割速度、表面粗糙度、加工精度等都有影响。低速走丝线切割机床大多采用去离子水作工作液，只有在特殊精加工时才采用绝缘性能较高的煤油。高速走丝线切割机床使用的工作液是专用乳化液，目前供应的乳化液有很多种、各有其特点。

工作液循环装置一般由工作液泵、液箱、过滤器、管道和流量控制阀等组成。对高速走丝机床，通常采用浇注式供液方式，而对低速走丝机床，近年来有些采用浸泡式供液方式。

四、点火花线切割加工的应用

电火花线切割的应用十分广泛，已经显示出愈来愈重要的作用。目前，主要用于以下几个方面：

(1) 加工各种模具 如凸模、凹模，固定板、卸料板等大、中、小型冲模和粉末冶金模、挤压模、弯曲模、镶拼型腔模、弯曲模、拉丝模、波纹板成形模等。

(2) 加工成形工具 如加工带锥度型腔的电极、微细复杂形状的电极和各种样板、成形刀具等。

(3) 加工微细孔、槽、窄缝、异形孔、喷丝板、射流元件、激光器件、品种多数量少的难加工微型零件等的微细孔、窄缝、槽等。

(4) 各种稀有、贵金属材料 and 难加工金属材料的加工和切割。

(5) 从几何造型的角度来看，电火花线切割加工方法适宜于加工各种由直线组成的直纹曲面。如圆锥面、单叶双曲面、螺旋面、双曲抛物面以及各种二维曲面。图 12-8 是电火花线切割加工的几种直纹曲面。

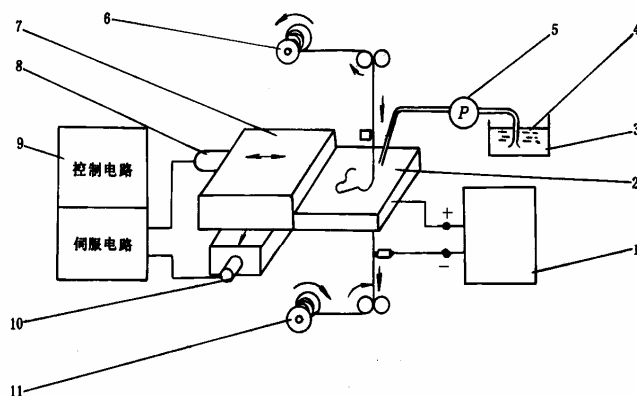


图 12-7 低速走丝线切割加工设备组成

1. 脉冲电源 2. 工件 3. 工作液箱 4. 去离子水 5. 泵 6. 放丝卷筒
7. 工作台 8. 轴电动机 9. 数控装置 10. 轴电动机 11. 收丝卷筒

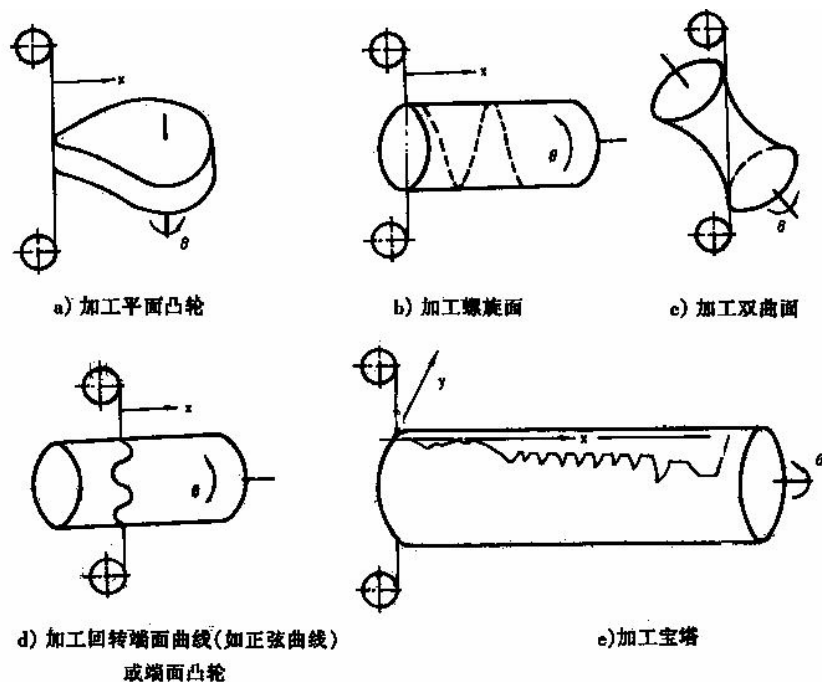


图 12-8 电火花线切割加工的几种直纹曲面

(6) 同时切割凹凸模 利用电火花线切割机床的锥度切割功能,可一次加工出达到所需配合间隙的一副冲裁模的工艺方法,称为同时切割凹凸模(Simultaneous Punch and Die Cutting)。此种方法适于加工使用次数不多的冲裁模,尤其是冲裁薄板的小间隙精密冲模。

第四节 其它特种加工方法简介

一、激光加工

激光加工是利用光的能量经过透镜聚焦后在焦点上达到很高的能量密度,靠光热效应来加工各种材料的。

(一) 激光加工的基本原理

太阳光是非单色光,能量密度不大,经凸镜聚焦后,只能达到几毫米直径的光斑,焦点附近的温度仅有 300°C 左右,能量密度也不高,所以太阳光还不能加工工件。激光则不同,激光是单色光,强度高、相干性和方向性好,通过一系列光学系统,可将激光束聚焦成光斑直径小到几微米、能量密度高达 $10^8 \sim 10^{10} \text{W}/\text{cm}^2$,能产生 10^4°C 以上的高温,并能在千分之几秒甚至更短的时间内使任何可熔化、不可分解的材料熔化、蒸发、气化而达到加工目的。

可以认为,激光加工是以激光为热源对工件材料进行的热加工。其加工过程大体分为如下几个阶段:激光束照射工件材料,工件材料吸收光能;光能转变为热能使工件材料无损加热;工件材料被熔化、蒸发、气化并溅出去除或破坏;作用结束与加工区冷凝。

1) 光能的吸收及其能量转化

激光束加工是一个高速熔化、气化的过程。光能传至工件表面时,工件材料吸收光能有一个瞬态过程。开始时,即使工件表面很粗糙,反射光也都是较高的(尤其是金属材料);当工件表面材料的温度逐渐上升,高温下表面被氧化或成熔融状态之后,反射率便逐渐降低,吸收率迅速增加。激光的功率密度愈高,这一过程作用时间就愈短。此间,光能转换为热能。

2) 工件材料的加热

光能转换成热能的过程就是工件材料的加热。激光束在很薄($0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$)的金属表层内被吸收,使金属中自由电子的热运动能增加,并在与晶格碰撞中的极短时间内($10^{-11} \sim 10^{-10} \text{s}$)将电子的能量转化为晶格的热振动能,引起工件材料温度的升高,同时按热传导规律向周围或内部传播,改变工件材料表面或内部各加热点的温度。

3) 工件材料的熔化气化及去除

在足够的功率密度的激光束照射下,工件材料表面才能达到熔化、气化的温度,从而使工件材料气化蒸发或熔融溅出,达到去除的目的。

4) 工件加工区的冷凝

激光辐射作用停止后, 工件加工区材料便开始冷凝, 其表层将发生一系列变化, 形成特殊性能的新表面层。

(二) 激光束加工的特点

(1) 激光束加工不需要加工工具, 不存在工具损耗、无机械加工变形、加工速度快、热影响区小, 通过调节光束能量、光斑直径及光束移动速度, 来实现各种加工, 包括微细加工、自动化加工。

(2) 激光的功率密度高, 几乎可以加工所有的可熔化、不可分解的金属、非金属材料; 透明材料(如玻璃)只要采取一些色化和打毛措施, 也可加工。

(3) 可透过透明介质(如玻璃)、惰性气体或空气对工件加工。这在某些特殊情况下(如真空管内的焊接加工)便显得十分重要和方便了。

(4) 激光束易于导向、聚焦和发散, 可与数控机床、机器人等结合, 构成各种灵活的加工系统, 有利于对传统加工工艺、传统的机床、设备的改造。

(5) 激光束加工是一种热加工, 影响因素很多, 故加工精度难以保证和提高。此外, 激光对人体有害、须采取相应防护对策。

(三) 激光加工工艺及应用

几十年来, 激光加工以其自身和结合多种技术的特点, 得到迅速的发展及广泛地工业应用。目前, 激光束加工的主要应用有打孔、切割、焊接、金属表面的激光强化等。

(1) 激光束打孔

激光束加工的主要应用领域之一, 就是对几乎任何材料的小孔、窄缝等进行微细加工和精密加工。目前, 在生产上已应用于火箭发动机和柴油机的燃料喷嘴加工。化学纤维喷丝头打孔, 钟表及仪表中的宝石轴承打孔, 金刚石拉丝模加工, 集成电路碳化钨引线小孔加工等方面。例如, 钟表行业加工宝石轴承小孔: $\phi 0.12 \sim 0.18\text{mm}$ 、深 $0.6 \sim 1.2\text{mm}$, 采用工件自动传送, 激光束自动连续打孔, 每秒钟可加工 12 个孔。

(2) 激光束切割

激光束切割采用连续或重复脉冲工作方式, 切割过程中激光束边照射, 边与工件作相对移动。生产上, 一般都是移动工件, 若是直线切割, 还可借助于柱面透镜将激光束聚焦成线, 以提高切割速度。

激光束切割的切缝窄、切割边缘质量好、噪声小, 几乎无切割残渣。激光束切割速度快, 成本也不高。激光束切割的热切口区小。由于激光辐射能以极小的惯性快速偏移, 又能切割任意形状, 因此, 激光束可用于各种材料的切割。例如, 采用同轴吹氧工艺切割金属材料, 可提高切割速度和切口质量; 切割纸张、木材等易燃材料时, 可采用同轴吹保护气体(二氧化碳、氩气、氮气等), 能防止烧焦和切口缩小; 采用喷水切割塑料时, 切缝宽可控制在 0.025mm 以下, 且切口平直、光洁; 切割陶瓷、玻璃、石英等脆性材料时, 采用热应力切割; 对布料、纸张还可作分层切割, 切口边沿光滑质量好, 制衣时可不再拷边。

新的激光切割技术不断出现, 如水冷激光切割、高功率 CO_2 激光切割、红外、紫外双波激光切割等, 这些新技术有些已应用于工业生产。

(3) 激光束焊接

激光束焊接是利用激光束聚焦到工件表面, 使辐射作用区表面的金属“烧熔”粘合而形成焊接接头。因此, 激光束焊接所需要的能量密度较低(一般为 $10^4 \sim 10^6 \text{W} / \text{cm}^2$), 通常可采用减小激光输出功率来实现。如果加工区域不需限制在微米级的小范围内, 也可通过调节焦点位置来减小工件被加工点的能量密度。

由于激光束焊接具有: 激光焊接过程极为迅速; 激光束不与被焊材料接触, 也不产生焊渣; 可焊接同种金属, 也可焊接异种金属等特点, 所以其发展很快、应用广泛, 已成为目前工业激光应用的第三大领域。例如在汽车制造业, 车身部件及其组装均已采用激光束焊接逐步取代传统的电阻点焊; 汽车上各种材料、厚度的车门框等都采用激光束焊接。在电子工业, 采用 YAG 激光器焊接显像管电子枪, 并用于生产线上; 集成电路引线、继电器、微机键盘字键等采用激光束焊接均已获得成功。

(4) 激光强化

金属表面的激光强化是一项高新技术, 激光强化可使金属工件表面显著地提高硬度、强度、耐磨性、耐蚀性、高温性等性能, 从而提高产品质量, 延长产品使用寿命、降低产品成本, 具有明显的经济效益。激光强化包含激光淬火、激光涂覆、激光合金化、激光冲击硬化、激光非晶化和微晶化等。

目前, 激光强化已在汽车、机车、机床与工具、模具与刀具、军工等许多工业部门应用与开发, 被称之为激光束加工应用的第二代。

二、电子束和离子束加工

(一) 电子束加工

电子束加工 (EBM, Electron Beam Machining) 是利用能量密度很高的高速电子流, 在一定真空度的加工舱中使工件材料熔化、蒸发和汽化而予以去除的高能束加工。随着微电子技术、计算机技术等的发展, 大量的元器件需要进行微细、亚微米乃至毫微米加工, 目前比较适合的加工方法就是电子束加工, 其他的加工方法则比较困难、甚至难以实现。

1、电子束加工的基本原理

电子束加工是在真空条件下, 利用电流加热阴极发射电子束, 带负电荷的电子束高速飞向阳极, 途中经加速极加速, 并通过电磁透镜聚焦使能量密度高度集中, 可以把 1kW 或更高的能量集中到直径为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 的斑点内 (参见图 12-9), 获得高达 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 的能量密度。如此高的能量密度可使任何材料被冲击部分的温度, 在百万分之一秒时间内升高到几千摄氏度以上, 热量还来不及向周围扩散时, 就把局部材料瞬时熔化、汽化直到蒸发去除。

电子束加工的物理过程, 可以这样认为, 当入射的电子束与工件表面的原子相互作用时, 将冲击能量转换成热能, 加热被照射部位, 温度迅速升高到熔点或沸点以上, 使材料局部熔化、蒸发或成雾状粒子飞散、喷射出去。随着孔不断变深, 电子束照射点亦不断深入, 由于孔的内侧壁对电子束产生“壁聚焦”, 所以, 加工点可达到很深, 从而打出很细很深的微孔。

2、电子束加工的特点

(1) 由于电子束能够极其微细地聚焦, 甚至能聚焦到 $0.1\mu\text{m}$, 所以加工面积可以很小, 是一种精密微细的加工方法。

(2) 电子束能量密度很高, 使照射部分的温度超过材料的熔化和汽化温度, 去除材料主要靠瞬时蒸发, 是一种非接触式加工。工件不受机械力作用, 不产生宏观应力和变形。加工材料范围很广, 对脆性、韧性、导体、非导体及半导体材料都可加工。

(3) 电子束的能量密度高, 因而加工生产率很高, 例如, 每秒钟可以在 2.5mm 厚的钢板上钻 50 个直径为 0.4mm 的孔。

(4) 可以通过磁场或电场对电子束的强度、位置、聚焦等进行直接控制, 所以整个加工过程便于实现自动化。特别是在电子束曝光中, 从加工位置找准到加工图形的扫描, 都可实现自动化。在电子束打孔和切割时, 可以通过电气控制加工异形孔, 实现曲面弧形切割等。

(5) 由于电子束加工是在真空中进行, 因而污染少, 加工表面不氧化, 特别适用于加工易氧化的金属及合金材料, 以及纯度要求极高的半导体材料。

(6) 电子束加工需要一整套专用设备和真空系统, 价格较贵, 生产应用有一定局限性。

3、电子束加工装置

电子束加工装置的基本结构如图 12-10 所示, 它主要由电子枪、真空系统、控制系统和电源等部分组成。

(1) 电子枪 电子枪是获得电子束的装置。它包括电子发射阴极、控制栅极和加速阳极等。阴极经电流加热发射电子, 带负电荷的电子高速飞向带高电位的阳极, 在飞向阳极的过程中, 经过加速极加速, 又通过电磁透镜把电子束聚焦成很小的束斑。

(2) 真空系统 真空系统是为了保证在电子束加工时维持 $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 的真空度。真空系统一般由机械旋转泵和油扩散泵或涡轮分子泵两级组成, 先用机械旋转泵把真空室抽至 $1.4 \sim 0.14\text{Pa}$, 然

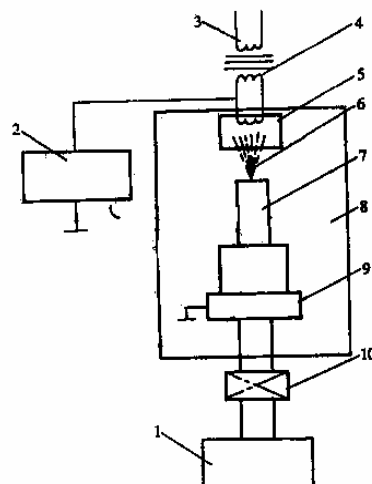


图 12-9 电子束装置原理示意图
1-变速装置 2-高压电源 3-交流总电源
4-钨制灯丝 5-电子枪组件 6-聚焦电子束
7-工件 8-真空室 9-工作台 10-轴

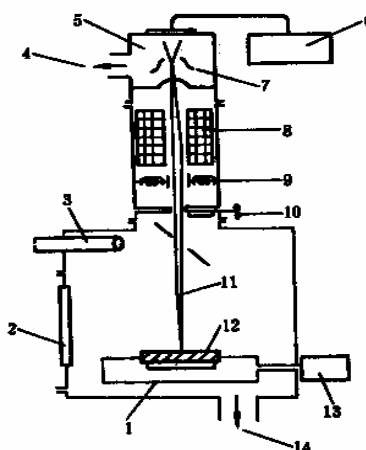


图 12-10 电子束加工装置结构示意图
1-移动工作台 2-带窗真空室门窗 3-观察筒
4-抽气 5-电子枪 6-加速电压控制
7-束流强度控制板 8-束流聚焦控制
9-束流位置控制 10-更换工件用截止阀
11-电子束 12-工件 13-驱动点动机 14-抽气

后由油扩散泵或涡轮分子泵油至 $0.014 \sim 0.00014 \text{ Pa}$ 的高真空度。

(3) 控制系统和电源 电子束加工装置的控制系统包括束流聚焦控制、束流位置控制、束流强度控制以及工作台位移控制等。

4、电子束加工的应用

电子束加工按其功率密度和能量注入时间的不同,可用于打孔、切割、蚀刻、焊接、热处理和光刻加工等。

(1) 高速打孔 电子束打孔已在生产中实际应用,目前最小直径可达 $\phi 0.003 \text{ mm}$ 左右。例如喷气发动机套上的冷却孔,机翼的吸附屏的孔,不仅孔的密度可以连续变化,孔数达数百万个,而且有时还可改变孔径。

在人造革、塑料上用电子束打大量微孔,可使其具有如真皮革那样的透气性。电子束打孔还能加工小深孔,如在叶片上打深度 5 mm 、直径 $\phi 0.4 \text{ mm}$ 的孔,孔的深径比大于 $10:1$ 。

(2) 加工型孔及特殊表面 图 12-11 为电子束加工的喷丝头异型孔截面的一些实例。为了使人造纤维具有光泽、松软有弹性、透气性好,喷丝头的异型孔都是特殊形状的。

电子束可以用来切割各种复杂型面,切口宽度为 $6 \sim 3 \mu\text{m}$, 边缘表面粗糙度可控制在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

电子束不仅可以加工各种直的型孔和型面,而且也可以加工弯孔和曲面。

(3) 刻蚀 在微电子器件生产中,为制造多层固体组件,可利用电子束对陶瓷或半导体材料刻出许多微细沟槽和孔来,如在硅片上刻出宽 $2.5 \mu\text{m}$, 深 $0.25 \mu\text{m}$ 的细槽,在混合电路电阻的金属镀层上刻出 $40 \mu\text{m}$ 宽的线条。还可在加工过程中对电阻值进行测量校准,这些都可用计算机自动控制完成。

电子束刻蚀还可用于制板,在铜制印刷滚筒上按色调深浅刻出许多大小与深浅不一的沟槽或凹坑,其直径为 $70 \sim 120 \mu\text{m}$, 深度为 $5 \sim 40 \mu\text{m}$, 小坑代表浅色,大坑代表深色。

(4) 焊接 电子束焊接是利用电子束作为热源的一种焊接工艺。电子束焊接一般不用焊条,焊接过程在真空中进行,因此焊缝化学成分纯净,焊接接头的强度往往高于母材。

电子束焊接可以焊接难熔金属如铜、钼等。也可焊接钛、铝、铀等化学性能活泼的金属。对于普通碳钢、不锈钢、合金钢等各种金属也能用电子束焊接。它可焊接很薄的工件,也可焊接几百毫米厚的工件。电子束焊接还能完成一般焊接方法难以实现的异种金属焊接。如铜和不锈钢的焊接,钢和硬质合金的焊接,铬、镍和铝的焊接等。

(5) 热处理 电子束热处理也是把电子束作为热源,但适当控制电子束的功率密度,使金属表面加热而不熔化,达到热处理的目的。电子束热处理的加热速度和冷却速度都很高,在相变过程中,奥氏体化时间很短,只有几分之一秒乃至千分之一秒,奥氏体晶粒来不及长大,从而能获得一种超细晶粒组织,可使工件获得用常规热处理不能达到的硬度,硬化深度可达 $0.3 \sim 0.8 \text{ mm}$ 。

(二) 离子束加工

离子束加工是将惰性气体电离,并使正离子加速、集束和聚焦到处于一定真空条件下的工件加工部位上,依靠机械冲击作用去除材料的高能束加工。随着核物理和空间科学技术的发展,离子束加工应运而生,并已成为一项大有前途的微细加工技术,其应用范围正在不断拓宽、不断创新。

1、离子束加工的基本原理

离子束加工的原理与电子束加工类似,也是在真空条件下,将氦等惰性气体,通过离子源产生离子束并经过加速、集束聚焦后,投射到工件表面的加工部位,以实现去除材料的加工。所不同的是离子的质量比电子的质量大千万倍。例如最小的氢离子,其质量是电子质量的 1840 倍,氦离子的质量是电子质量的 7.2 万倍。因为离子的质量大,所以在同样的电场中加速较慢,速度较低。但是,一旦加速到较高的速度时,离子束比电子束具有更大的能量。

2、离子束加工的特点

1) 控制精确 离子束可通过离子光学系统进行聚焦扫描,使微离子束的聚焦光斑直径在 $1 \mu\text{m}$ 以内进行加工,同时离子束流密度和离子的能量可精确控制,以获得精密的加工效果。例如,控制注入深度和浓度,抛光时可一层一层地将工件表面的原子抛掉,从而加工出无缺陷的光整表面,其精度可控制在亚微米级。

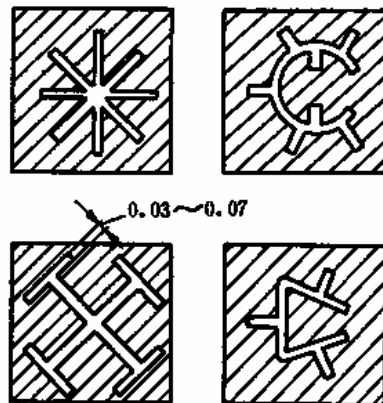


图 12-11 电子束加工的喷丝头异形孔

2) 对材料的适应性强 离子束加工是依靠离子撞击工件表面的原子而实现的,是一种微观作用,其宏观作用力极小,加工应力、变形也极小,故对脆性、极薄、半导体、高分子等各种材料、低刚度工件进行微细加工。

3) 污染少 因为离子束加工是在较高真空中进行的,所以污染少,特别适合易氧化的金属、合金材料及半导体材料的精密加工。但是,要增加抽真空装置,不仅投资费用较大,而且维护也麻烦。

3、离子束加工装置

离子束加工装置可分为:离子源系统、真空系统、控制系统、电源系统。其中,电源系统与电子束加工装置不同,其余系统均类似。

离子源(又称离子枪)的作用是产生离子束流。其基本工作原理是将气态原子注入离子室,然后使气体原子经受高频放电、电弧放电、等离子体放电或电子轰击被电离成等离子体,并在电场作用下将正离子从离子源出口引出而成为离子束。根据离子产生的方式和用途,离子源有多种型式。常用的有考夫曼型离子源、双等离子体离子源、高频放电离子源。

4、离子束加工的应用

离子束加工的应用范围正在日益扩大、不断创新。目前用于改变零件尺寸和表面物理力学性能的离子束加工有:用于从工件上作去除加工的离子刻蚀加工;用于给工件表面添加的离子镀膜加工;用于表面改性的离子注入加工等。

(1) 刻蚀加工 离子刻蚀是从工件上去除材料,是一个撞击溅射过程。当离子束轰击工件,入射离子的动量传递到工件表面的原子,传递能量超过了原子间的键合力时,原子就从工件表面撞击溅射出来,达到刻蚀的目的。

离子刻蚀用于加工陀螺仪空气轴承和动压马达上的沟槽,分辨率高,精度、重复一致性好。加工非球面透镜能达到其它方法不能达到的精度。

离子束刻蚀应用的另一个方面是刻蚀高精度的图形,如集成电路、声表面波器件、磁泡器件、光电器件和光集成器件等微电子器件亚微米图形。

离子束刻蚀还用来致薄材料,用于致薄石英晶体振荡器和压电传感器。致薄探测器探头,可以大大提高其灵敏度,如国内已用离子束加工出厚度为 $40\mu\text{m}$ 并且自己支撑的高灵敏探测器头。用于致薄样品,进行表面分析,如用离子束刻蚀可以致薄月球岩石样品,从 $10\mu\text{m}$ 致薄到 10nm 。能在 10nm 厚的 Au-Pa 膜上刻出 8nm 的线条来。

(2) 镀膜加工 离子镀膜加工有溅射沉积和离子镀两种。离子镀时工件不仅接受靶材溅射来的原子,还同时受到离子的轰击,这使离子镀具有许多独特的优点。

离子镀膜附着力强、膜层不易脱落。用离子镀的方法对工件镀膜时,其绕射性好,使基板的所有暴露的表面均能被镀覆。离子镀可在金属或非金属表面上镀制金属或非金属材料,各种合金、化合物、某些合成材料、半导体材料、高熔点材料均可镀覆。

离子镀技术已用于镀制润滑膜、耐热膜、耐蚀膜、耐磨膜、装饰膜和电气膜等。如在表壳或表带上镀氯化钛膜,这种氯化钛膜呈金黄色,它的反射率与 18K 金镀膜相近,其耐磨性和耐腐蚀性大大优于镀金膜和不锈钢,其价格仅为黄金的 $1/60$ 。离子镀装饰膜还用于工艺美术品的首饰、景泰蓝等,以及金笔套、餐具等的修饰上,其膜厚仅 $1.5\sim 2\mu\text{m}$ 。

(3) 离子注入加工 离子注入是向工件表面直接注入离子,它不受热力学限制,可以注入任何离子,且注入量可以精确控制,注入的离子是固溶在工件材料中,含量可达 $10\%\sim 40\%$,注入深度可达 $1\mu\text{m}$ 甚至更深。

离子注入在半导体方面的应用,在国内外都很普遍,它是用硼、磷等“杂质”离子注入半导体,用以改变导电型式(P型或N型)和制造PN结,制造一些通常用热扩散难以获得的各种特殊要求的半导体器件。

离子注入改善金属表面性能方面的应用正在形成一个新兴的领域。利用离子注入可以改变金属表面的物理化学性能,可以制得新的合金,从而改善金属表面的抗蚀性能、抗疲劳性能、润滑性能和耐磨性能等。

离子注入还能改善金属材料的抗氧化性能、耐磨性能、硬度、润滑性能。

三、超声加工

超声加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中或干磨料中,产生磨料的冲击,抛磨、液压冲击及由此产生的气蚀作用来去除材料,以及利用超声振动使工件相互结合的加工方法。

1、超声加工的基本原理和特点

(1) 超声加工的基本原理

超声加工是利用工具端面作超声频振动,通过磨料悬浮液加工脆硬材料的一种成型方法。加工原理如图 12-12 所示。加工时,在工具 1 和工件 2 之间加入液体(水或煤油等)和磨料混合的悬浮液 3,并使工具以很小的力 F 轻轻压在工件上。超声换能器 6 产生 16000HZ 以上的超声频纵向振动,并借助于变幅杆把振幅放大到 0.05~0.1mm 左右,驱动工具端面作超声振动,迫使工作液中悬浮的磨粒以很大的速度和加速度不断地撞击、抛磨被加工表面,把被加工表面的材料粉碎成很细的微粒,从工件上被打击下来。虽然每次打击下来的材料很少,但由于每秒钟打击的次数多达 16000 次以上,所以仍有一定的加工速度。与此同时,工作液受工具端面超声振动作用而产生的高频、交变的液压正负冲击波和“空化”作用,促使工作液钻入被加工材料的微裂缝处,加剧了机械破坏作用。所谓空化作用,是指当工具端面以很大的加速度离开工件表面时,加工间隙内形成负压和局部真空,在工作液体内形成很多微空腔,当工具端面以很大的加速度接近工件表面时,空泡闭合,引起极强的液压冲击波,可以强化加工过程。此外,正负交变的液压冲击也使悬浮工作液在加工间隙中强迫循环,使变钝了的磨粒及时得到更新。

由此可见,超声加工是磨粒在超声振动作用下的机械撞击和抛磨作用以及超声空化作用的综合结果,其中磨粒的撞击作用是主要的。

既然超声加工是基于局部撞击作用,因此就不难理解,越是脆硬的材料,受撞击作用遭受的破坏愈大,愈易超声加工。相反,脆性和硬度不大的韧性材料,由于它的缓冲作用而难以加工。根据这个道理,人们可以合理选择工具材料,使之既能撞击磨粒,又不致使自身受到很大破坏,例如用 45 钢作工具即可满足上述要求。

2、超声加工的特点

1) 适合于加工各种硬脆材料,特别是不导电的非金属材料,例如玻璃、陶瓷(氧化铝、氮化硅等)、石英、锗、硅、玛瑙、宝石、金刚石等。对于导电的硬质金属材料如淬火钢、硬质合金等,也能进行加工,但加工生产率较低。

2) 由于工具可用较软的材料、做成较复杂的形状,故不需要使工具和工件作比较复杂的相对运动,因此超声加工机床的结构比较简单,只需一个方向进给,操作和维修方便。

3) 由于去除加工材料是靠极小磨料瞬时局部的撞击作用,故工件表面的宏观切削力很小,切削应力、切削热很小,不会引起变形及烧伤,表面粗糙度也较好,可达 $Ra\ 1\sim0.1\ \mu m$,加工精度可达 0.01~0.02mm,而且可以加工薄壁、窄缝、低刚度零件。

3、超声加工设备及其组成部分

超声加工设备又称超声加工装置,它们的功率大小和结构形状虽有所不同,但其组成部分基本相同,一般包括超声发生器、超声振动系统、机床本身和磨料工作液循环系统。其主要组成如下:

(1) 超声发生器 超声发生器也称超声波或超声频发生器,其作用是将工频交流电转变为有一定功率频的超声频电振荡,以提供工具端面往复振动和去除被加工材料的能量。

(2) 声学部件 声学部件的作用是把高频电能转变为机械能,使工具端面作高频率小振幅的振动以进行加工。

(3) 机床 超声加工机床一般比较简单,包括支撑声学部件的机架及工作台,使工具以一定压力作用在工件上的进给机构,以及床体等部分。

(4) 磨料工作液及其循环系统 简单的超声波加工装置,其磨料是靠人工输送和更换的,即在加工前将悬浮磨料的工作液浇注堆积在加工区,加工过程中定时抬起工具并补充磨料。效果较好而又最常用的工作液是水,为了提高表面质量,有时也用煤油或机油作工作液。磨粉常用碳化硼,碳化硅或氧化铝等。

4、超声加工的应用

超声加工从上世纪 50 年代开始实用性研究以来,其应用日益广泛。随着科技和材料工业的发展,新技术、新材料将不断涌现,超声加工的应用也会进一步拓宽,发挥更大的作用。目前,生产上多用于以下几个方面:

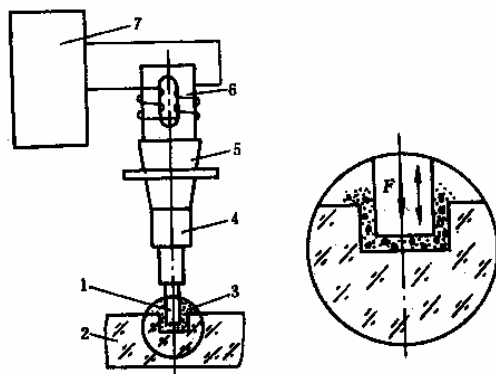


图 12-12 超声加工原理图

1—工具 2—工件 3—磨料悬浮液 4、5—变幅杆

(1) 成形加工 超声加工适于加工各种硬脆材料的圆孔、型孔、型腔、沟槽、异形贯通孔、弯曲孔、微细孔、套料等。

(2) 切割加工 超声精密切割半导体、铁氧体、石英、宝石、陶瓷、金刚石等硬脆材料，比用金刚石刀具切割具有切片薄、切口窄、精度高、生产率高、经济性好的优点。

(3) 焊接加工 超声焊接是利用超声频振动作用，去除工件表面的氧化膜，使新的本体表面显露出来，并在两个被焊工件表面分子的高速振动撞击下，摩擦发热、亲和粘接在一起。其不仅可以焊接尼龙、塑料及表面易生成氧化膜的铝制品等，还可以在陶瓷等非金属表面挂锡、挂银、涂覆熔化的金属薄层。

(4) 超声清洗 超声清洗主要用于几何形状复杂、清洗质量要求高的中、小精密零件，特别是工件上的深小孔、微孔、弯孔、盲孔、沟槽、窄缝等部位的精清洗。

四、电解加工

电解加工是利用金属在电解液中产生阳极溶解的原理去除工件材料的特种加工。自上世纪 50 年代开始研究并用于生产以来，至今已成为电化学加工中发展较快、应用较广泛的加工方法之一。

1、电解加工的基本原理

电解加工是在电抛光的基础上。经过改革而发展起来的。电抛光时，工件和工具之间的距离较大，电解液静止不动，故通过的电流密度很小（一般为 $0.01 \sim 5 \text{ A/cm}^2$ ），金属切除率很低，只能对工件表面进行抛光亦能改变零件的原有形状尺寸。而电解加工则不同。图 12-13 所示为电解加工原理示意图。加工时，在工件和工具之间接上直流电源，工件接电源的正极（阳极），工具接电源的负极（阴极），在工件和工具之间保持较小的间隙约 $0.1 \sim 0.8 \text{ mm}$ ，在间隙中间通过高速流动的电解液。

在工件和工具之间施加一定的外加电压时，工件表面的金属材料就不断地产生阳极溶解；这些溶解的产物被高速流动的电解液及时冲走，使阳极溶解能够不断地进行。

2、电解加工与其他加工方法相比，具有下述主要特点

(1) 电解加工的主要优点

1) 加工型面的生产率高 电解加工型孔、型腔或外型表面，可以一次进给直接成形，可以取代好几道切削加工工序，同时进给速度可快达 $0.3 \sim 15 \text{ mm/min}$ ，因此，生产率高。

2) 能加工各种硬度和强度的工件 电解加工与工件材料的硬度和强度没有直接联系，只要是金属材料，不受其硬度、强度、韧性的限制。

3) 工具阴极基本上没有损耗 工具阴极材料本身不参与电极反应，同时工具材料又是抗腐蚀性良好的不锈钢或黄铜材，所以除产生火花短路等特殊情况下，工具阴极基本上没有损耗，可长期使用。

4) 表面质量好 电解加工表面不会产生毛刺，也没有残余应力及变形层，对材料的强度和硬度均无影响。表面粗糙度较低，一般可达 $Ra 1.25 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ，平均加工精度 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，电解微细加工钢材的精度为 $\pm 10 \sim 70 \mu\text{m}$ 。

(2) 电解加工的主要缺点和局限性

1) 加工精度难以严格控制 由于电解加工中，影响加工误差的因素较多，如阴极的设计、制造和修正及阴极本身的精度控制，工件的几何形状和工件材料的金相组织、碳化物分散状态的控制等。

2) 设备的初始投资大 电解加工设备要求具有良好的刚性、抗腐蚀性和密封性。因此，一般结构较笨重。材料昂贵，附属设备较多，占地面积较大，致使设备投资大。单件小批加工时成本偏高。

3) 电解液对设备的腐蚀严重 电解加工中采用的电解液，特别是高浓度的 NaCl 水溶液，对设备的腐蚀十分严重，尤其是泵的锈蚀问题，更为突出。

4) 电解产物的处理困难 电解加工的电解产物中有些含有六价铬离子等有害成分，有些则与食盐水混杂在一起，排入下水道，不仅影响环境，而且对人体有害。

3、电解加工工艺及其应用

电解加工在各种花键孔、深孔、内齿轮、链轮、叶片、异形零件及模具等方面获得了广泛的应用。

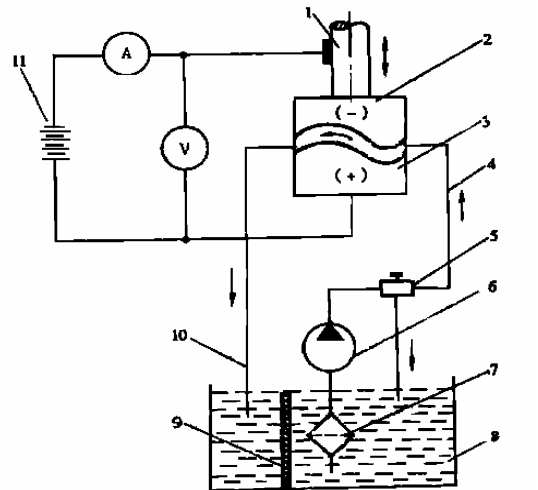


图 12-13 电解加工原理示意图

1—进给轴 2—工具阴极 3—工件阳极 4—电解液输送管道
5—调节阀 6—电解液泵 7—过滤器 8—电解液 9—过滤网
10—电解液回收管道 11—直流电源

(1) 深孔扩孔加工 深孔扩孔加工按阴极的运动形式,可分为固定式和移动式两种。固定式即工件和阴极间没有相对运动。移动式加工通常多采用卧式,阴极在零件内孔作轴向移动。移动式阴极较短,精度要求较低,制造容易,可加工任意长度的工件而不受电源功率的限制。

(2) 型孔加工 在生产中往往会遇到一些形状复杂、尺寸较小的四方、六方、椭圆、半圆等形状的通孔和不通孔,机械加工很困难,如采用电解加工,则可以大大提高生产效率及加工质量。型孔加工一般采用端面送给法,为了避免锥度,阴极侧面必须绝缘。

(3) 型腔加工 多数锻模为型腔模,因为电火花加工的精度比电解加工易于控制,目前大多采用电火花加工,但由于它的生产率较低,因此对锻模消耗量比较大、精度要求不太高的煤矿机械、汽车拖拉机等制造厂,近年来逐渐采用电解加工。

(4) 套料加工 用套料加工方法可以加工等截面的大面积异形孔或用于等截面薄形零件的下料。如异形零件,如用常规的铣削方法加工将非常麻烦,而采用套料阴极则可很方便的进行套料加工。

(5) 叶片加工 叶片采用机械加工困难较大、生产率低、加工周期长。而采用电解加工,则不受叶片材料硬度和韧性的限制,在一次行程中就可加工出复杂的叶身型面,生产率高,表面粗糙度很小。

(6) 电解倒棱去毛刺 机械加工中去毛刺的工作量很大,而电解倒棱去毛刺可以大大提高工效和节省费用。

(7) 电解刻字 电解刻字则可以在那些常规的机械刻字不能进行的表面上刻字。利用同样的原理,改变电解液成分并适当延长放电时间,就可实现在工件表面刻印花纹,或制成压花轧辊。

(8) 电解抛光 电解抛光也是利用金属在电解液中的电化学阳极溶解对工件表面进行腐蚀抛光的,它只是一种表面光整加工方法,用于改善工件的表面粗糙度和表面物理力学性能,而不用于对工件进行形状和尺寸加工。

复习思考题

1. 什么叫特种加工?常用的特种加工方法有哪些?
2. 电火花加工有何特点?适于加工哪些零件表面?
3. 简述电火花加工原理?
4. 简述电火花加工和线切割加工的异同?
5. 简述电解加工的特点及其应用范围?
6. 电解加工原理是什么?
7. 简述激光加工原理及应用范围。
8. 简述电子束加工的基本原理?
9. 超声加工是如何进行的?
10. 试述超声加工的特点及应用。

参考文献

1. 邓文英主编. 金属工艺学. 第三版. 上、下册. 北京: 高等教育出版社, 1991
2. 张力真, 徐允长主编. 金属工艺学实习教材. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1991
3. 清华大学金属工艺学教研组编. 金属工艺学实习教材. 北京: 高等教育出版社, 1982
4. 袁嘉祥主编. 金属工艺学实习教材. 重庆: 重庆大学出版社, 1998
5. 贺锡生主编. 金工实习. 南京: 东南大学出版社, 1996
6. 孔庆华 黄午阳主编. 制造技术基础. 上海: 同济大学出版社, 2000
7. 曹光廷主编. 材料成型加工工艺及设备. 北京: 化学工业出版社, 2001
8. 吕广庶 张远明主编. 工程材料及成形技术基础, 北京: 高教出版社, 2001
9. 傅水根主编. 机械制造工艺基础. 北京: 清华大学出版社, 1998. 12
10. (日) 千千岩键编著. 机械制造概论. 吴桓文译. 重庆: 重庆大学出版社, 1993
11. 卢秉恒主编. 机械制造技术基础. 北京: 机械工业出版社, 1999
12. 刘恩福, 杨松林编. 工程 CAD 基础及应用. 北京: 机械工业出版社, 1998
13. 刘文剑, 常伟, 金天国等编著. CAD/CAM 集成技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000
14. 杨海成主编. 计算机辅助制造工程. 西安: 西北工业大学出版社, 2001
15. (德) 施普尔, 克劳舍著. 虚拟产品开发技术. 宁汝新等译. 北京: 机械工业出版社, 2000
16. 刘宏增, 黄靖远编著. 虚拟设计. 北京: 机械工业出版社, 1999
17. 沈其文编. 材料成型工艺基础. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999
18. 王贵明. 数控实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
19. 李佳. 数控机床及应用. 北京: 清华大学出版社, 2001
20. 王爱玲, 沈兴全等. 现代数控编程技术及应用. 北京: 国防工业出版社, 2002
21. 杜君文, 邓广敏. 数控技术. 天津: 天津大学出版社, 2002
22. 刘雄伟等. 数控加工理论与编程技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
23. 复旦大学等编. 数字程序控制线切割机床. 北京: 国防工业出版社, 1977
24. 王志尧著. 电火花线切割工艺. 北京: 原子能出版社, 1987
25. 刘晋春等主编. 特种加工. 北京: 机械工业出版社, 1999
26. 孟少农主编. 机械加工工艺手册, 第 2 卷. 北京: 机械工业出版社, 1991
27. 刘晋春, 陆纪培主编. 特种加工. 长春: 吉林人民出版社, 1981
28. 刘晋春, 陆纪培主编. 特种加工. 北京: 机械工业出版社, 1987
29. 金庆同主编. 特种加工. 北京: 航空工业出版社, 1988
30. 陈传梁主编. 特种加工技术. 北京: 北京科学技术出版社, 1989
31. 集群编. 电解加工. 北京: 国防工业出版社, 1973
32. 朱企业等编. 激光精密加工. 北京: 机械工业出版社, 1990
33. [日]微细加工技术编辑委员会编. 微细加工技术. 朱怀义等译. 北京: 科学出版社, 1983
34. 杨建新. 放电加工理论及应用. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
35. 李明辉. 放电加工理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1989.
36. 《电解加工》编译组. 电解加工. 北京: 国防工业出版社, 1977..
37. 王家金等. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992.
38. 蒋欣荣. 微细加工技术. 北京: 国防工业出版社, 1990.
39. 袁哲俊等. 金属切削理论与技术的新进展. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
40. 孔庆华. 特种加工. 上海: 同济大学出版社, 1997
41. 张学仁主编. 数控电火花线切割加工技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000