



机电制造基础系列教材

○ ○ ○
全国高等教育教材建设委员会重点课题
北京市普通高等学校教育教学改革试点项目
『十五』北京市精品教材项目

主 编 傅水根

副主编 张学政 马二恩

机械制造工艺基础

(第二版)

清华大学出版社

机电制造基础系列教材

机械制造工艺基础

(第二版)

主 编 傅水根

副主编 张学政 马三恩

江苏工业学院图书馆
藏书章

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是按照教育部颁布的课程教学基本要求和重点院校课程改革指南的精神编写的。这次作为北京市立项的重点精品教材予以修订,将1998年第一版出版以来课程改革中的理念和教学经验渗透其中,在内容和体系方面均有新的突破和创新。清华大学音像出版社将同时出版与书中插图相对应的幻灯片和《录像集锦》光盘,以及可供选用的电教片。

本书共十一章,主要内容有:切削加工工艺基础、特种加工工艺基础、特型表面的加工、常见表面加工方案选择、数控加工技术、零件表面处理技术、其他新技术新工艺、零件的结构工艺性、零件的制造工艺过程、微细加工与集成电路制造、新世纪的生产系统与环境保护等。它是多年来生产与科研实践的结晶,是长期教学经验的积淀。本书条理清楚,逻辑分明,实例较多,图文并茂,内容详实得当。

本书是高等工科院校机械制造冷加工部分的讲课教材。也可供电视大学、职工大学、函授大学选用,或作为工程技术人员和技术工人的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺基础 / 傅水根主编. —2版. —北京:清华大学出版社,2004

(机电制造基础系列教材)

ISBN 7-302-08354-1

I. 机… II. 傅… III. 机械制造工艺—高等学校—教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 025168 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 魏荣桥

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印 张: 16.75 字 数: 394 千字

版 次: 2004 年 6 月第 2 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08354-1/TH·122

印 数: 1~5000

定 价: 26.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

前 言

本书是根据教育部颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》和《重点高等工科院校金工系列课程改革指南》编写的,是全国高等教育教材建设专业委员会的重点课题《机械加工工艺基础教材改革研究》和北京市教委教育教学改革跨校重点项目《金工课程改革研究与实践》成果的体现,也是清华大学多年课程教学改革与实践的经验总结。这次作为北京市立项的重点精品教材予以修订,又将1998年第一版出版以来课程改革中的理念和教学经验渗透其中,除了根据工程技术的综合化倾向,新增加了第十章微细加工与集成电路制造外,第九章零件的制造工艺过程也充实了新内容。总体来说,修订后的本书在内容和体系方面均有新的突破与创新。

《机械加工工艺基础》是我国高等工科院校中贯彻工艺教育的一门重要的技术基础性课程。本教材在课程内容和体系上进行了力度较大的改革,除了大幅度地增加新技术、新工艺外,还力图从认识论的高度把握各章节间的相互关系,使之不仅在内容精选上适应21世纪培养高素质、创造性人才的需要,而且有利于学生学习、掌握和运用。

本书具有如下主要特色:

1. 从21世纪培养具有高素质、创造性复合型人才的需要出发,不仅注重学生独立获取知识能力的培养,而且注重综合素质和创新性思维的培养。
2. 对机械制造中的常规工艺方法精心取舍,合理吸收本学科成熟的新材料、新技术、新工艺、制造系统,以及部分前沿知识,大幅度地更新教学内容,建立起新的教材体系。
3. 力求正确处理实习、实验、讲课三者内容之间的关系,尽可能做到既有机衔接,又避免简单重复。
4. 从机电一体化综合发展和学科交叉与融合的趋势,充实了制造工艺过程的重要内容,新增了微细加工和集成电路制造,并依然保留了环境保护方面的内容。
5. 书中名词术语采用国家最新标准,插图做了更新,且全部采用计算机绘图。
6. 每章后附有主要参考文献和供选用的教学电视片目录,并备有与书中插图相对应的教学幻灯片(清华大学音像出版社出版)。
7. 在选取教材内容时,本书有意模糊冷热加工的界限,同时吸收了作者的科研和教学研究成果。

参加本书编写的教师有:张学政(第一、四章和第七章第一节)、傅水根(第二、五、七、九章第一节、十、十一章)、马二恩(第三、九章)、李生录(第六章和第七章第二节)、卢达溶(第九章第四节)。傅水根教授主编、张学政教授和马二恩研究员副主编,北京工业大学王永波教授主审。刘宣玮、裴文中、钟淑苹等绘制全书插图。

在编写过程中,得到全国高等教育教材建设专业委员会和北京市教委的大力支持,同时

吸收了许多教师对编写工作的宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢。

在编写中,还参考了国内外大量教材、手册、学术杂志和论文,所用参考文献均已列入各章之后,在此对有关出版社和作者表示衷心感谢。

由于编者水平和经验有限,又由于是一次教学改革的尝试,尽管做了很大努力,但书中难免有错误和欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 3 月 6 日

目 录

第一章 切削加工工艺基础	1
第一节 切削加工概述	1
一、切削加工的分类、特点、作用和发展方向	1
二、零件的种类及组成	3
三、机床的切削运动	5
四、切削加工的阶段	7
第二节 刀具与刀具切削过程	9
一、刀具	9
二、刀具切削过程	16
三、刀具切削过程中的物理现象	17
第三节 磨具与磨削过程	19
一、磨具	19
二、磨削过程	22
第四节 普通刀具切削加工方法综述	24
一、车削加工	24
二、钻削加工	25
三、镗削加工	30
四、铣削加工	31
五、刨削加工	31
六、插削加工	33
七、拉削加工	34
第五节 磨削加工方法综述	37
一、普通磨削	37
二、无心磨削	38
三、高效磨削	39
四、砂带磨削	41
第六节 精密加工方法综述	42
一、刮削	42
二、宽刀细刨	43
三、研磨	43
四、珩磨	45
五、低粗糙度磨削	46

六、超精加工	46
七、抛光	47
第七节 加工精度和表面质量	48
一、加工精度	48
二、表面质量	50
第二章 特种加工工艺基础	52
第一节 特种加工概述	52
一、特种加工的产生与发展	52
二、特种加工方法的分类	53
三、特种加工对机械制造工艺技术产生的影响	53
第二节 电火花加工	54
一、电火花加工的原理与特点	54
二、电火花加工的基本工艺规律	56
三、电火花加工的应用范围	60
第三节 电解加工	66
一、电解加工的原理与特点	66
二、电解加工的基本工艺规律	67
三、电解加工的应用范围	69
第四节 超声波加工	71
一、超声波加工的原理与特点	71
二、超声波加工的基本工艺规律	72
三、超声波加工的应用范围	73
第五节 激光加工	74
一、激光加工的原理与特点	74
二、激光加工的应用范围	75
第六节 电子束和离子束加工	77
一、电子束加工	77
二、离子束加工	78
第七节 复合加工	80
一、电解磨削	80
二、超声电解复合抛光	80
三、超声电火花复合抛光	81
四、超声激光复合加工	81
第三章 特型表面的加工	83
第一节 螺纹加工	83
一、概述	83
二、车螺纹	86

三、铣螺纹	94
四、攻螺纹和套螺纹	95
五、磨螺纹	95
六、滚压螺纹	96
七、电火花加工螺纹	97
第二节 齿形加工	98
一、概述	98
二、圆柱齿轮精度简介	100
三、铣齿	101
四、插齿和滚齿	103
五、齿形精加工	108
第三节 成形面加工	112
一、概述	112
二、成形面的加工方法	112
第四章 常见表面加工方案选择	117
第一节 常见表面的加工方案	117
一、外圆加工方案	117
二、内圆加工方案	118
三、锥面加工方案	120
四、平面加工方案	120
五、螺纹加工方案	121
六、齿形加工方案	123
第二节 选择表面加工方案的依据	124
一、根据表面的尺寸精度和表面粗糙度 R_a 值选择	124
二、根据表面所在零件的结构形状和尺寸大小选择	125
三、根据零件热处理状况选择	126
四、根据零件材料的性能选择	127
五、根据零件的批量选择	128
第三节 表面加工方案选用实例	129
一、齿轮轴加工实例	129
二、法兰盘加工实例	130
三、柱塞套加工实例	132
四、V形铁加工实例	133
五、支架加工实例	134
六、齿轮锻模加工实例	135
第五章 数控加工技术	137
第一节 成组技术	137

一、成组技术的基本原理	137
二、零件分类编码	138
三、成组技术的应用	139
第二节 数控加工技术	140
一、概述	140
二、数控机床加工	141
三、柔性制造单元和柔性制造系统	146
四、计算机集成制造系统	147
五、智能制造技术与智能制造系统	150
第六章 零件表面处理技术	152
第一节 概述	152
第二节 表面强化处理	153
一、表面机械强化	153
二、表面电火花强化	155
三、表面激光强化	156
第三节 表面电镀与氧化处理	159
一、电镀	159
二、表面氧化处理	161
第七章 其他新技术新工艺	164
第一节 直接成形技术	164
一、爆炸成形	164
二、液压成形	164
三、旋压成形	166
四、喷丸成形	167
第二节 少无切削加工	167
一、滚挤压加工	167
二、滚轧成形加工	167
第三节 胶接技术	169
一、胶接的基本原理	169
二、胶粘剂的组成与分类	169
三、胶接工艺	170
四、胶接接头设计	171
五、胶接技术应用举例	174
第四节 水射流切割技术	175
一、水射流切割原理	175
二、水射流切割特点	176
三、水射流切割的应用	176

第五节 快速激光原型制造技术	177
一、快速激光原型制造技术的基本原理	177
二、快速激光原型制造的技术后盾	179
三、快速激光原型制造技术的特点和应用	180
第六节 精密加工和超精密加工技术	180
一、精密加工和超精密加工概念	180
二、精密加工和超精密加工方法	181
 第八章 零件的结构工艺性	185
第一节 零件结构工艺性概念	185
第二节 零件结构的切削加工工艺性	186
第三节 零件结构的装配工艺性	197
 第九章 零件的制造工艺过程	202
第一节 零件加工工艺的基本知识	202
一、工艺过程的有关概念	202
二、工件的安装	204
三、六点定位原理	206
四、基准	208
五、定位基准的选择原则	209
第二节 零件加工工艺的制定	211
一、制定零件加工工艺的内容和要求	211
二、制定零件加工工艺的步骤	211
第三节 典型零件加工工艺过程	213
一、轴类零件的加工过程	213
二、盘套类零件的加工过程	217
三、支架箱体类零件的加工过程	220
四、切削加工与特种加工综合工艺例题	222
第四节 工艺设计及工艺管理中的技术经济分析	224
一、机械零件加工工艺成本	225
二、降低工艺成本的途径	226
三、加强工艺管理	231
 第十章 微细加工与集成电路制造	234
第一节 微细加工技术	234
一、微细加工	234
二、纳米技术	236
第二节 硅片的制备	237
一、电子级硅(EGS)的生产	237

二、晶体的生长	237
三、硅片的制备	238
第三节 集成电路制造	239
一、集成电路制造工艺概述	239
二、基本的制造工艺技术	240
第十一章 新世纪的生产系统与环境保护	248
第一节 新世纪的生产系统	248
一、并行工程(concurrent engineering——CE)	249
二、精良生产(lean production——LP)	251
三、敏捷制造	252
第二节 环境保护	254
一、全球性的环境问题	254
二、机械工业的环境污染问题	255
三、认真宣传和推行 ISO 14000 系列环境管理国际标准	256

第一章 切削加工工艺基础

导学

本章是本教材强调的两个基础之一,具体内容可分为两部分:切削原理基本知识和切削加工方法综述。基本知识部分主要介绍机床切削运动、刀具角度、刀具材料、切削过程、切削变形区、切削力、切削热、积屑瘤以及磨具特性和磨削过程的特点等,加工方法综述部分简介除特型表面加工以外的各种切削加工方法。

在学习切削原理基本知识时,应着重弄清楚它们对切削加工的影响,以及如何减少其不利影响。其中刀具角度是一个难点,只要求理解各个角度的实际含义、作用和大致取值范围即可。在学习切削加工方法综述时,要着重掌握各种切削加工方法的工艺特点和应用范围,必要时要配合使用金工实习教材,复习实习有关内容。

本课程属于工艺性的技术基础课,具有很强的实践性和实用性。希望同学注意理论联系实际,关心国内外工艺现状及发展动向,不断积累工艺理论知识和实践经验,为毕业后工作打下坚实的工艺基础,争取为改变我国的工艺落后面貌,填补更多的工艺空白做出自己的贡献。

第一节 切削加工概述

一、切削加工的分类、特点、作用和发展方向

1. 切削加工的分类

切削加工是利用切削工具从工件上切去多余材料的加工方法。通过切削加工,使工件变成符合图样规定的形状、尺寸和表面粗糙度等技术要求的零件。切削加工分为机械加工和钳工加工两大类。

机械加工(简称机工)是利用切削过程产生的机械力对各种工件进行加工的方法。它一般是通过工人操纵机床进行加工的,其方法有车削、钻削、镗削、铣削、刨削、拉削、磨削、珩磨、超精加工和抛光等。

钳工加工(简称钳工)一般在钳台上以手工工具为主,对工件进行加工的各种加工方法。钳工的工作内容一般包括划线、锯削、錾削、锉削、刮削、研磨、钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹、套螺纹、机械装配和设备修理等。对于有些工作,机械加工和钳工加工并没有明显的界限,例如钻孔和铰孔,攻螺纹和套螺纹,二者均可进行。随着加工技术的发展和自动化程度的提高,目前钳工加工的部分工作已被机械加工所替代,机械装配也在一定范围内不同程度地实现机械化和自动化,而且这种替代现象将会越来越多。尽管如此,钳工加工永远也不会被机械加工完全替代,将永远是切削加工中不可缺少的一部分。这是因为,在某些情况下,钳工加工不仅比机械加工灵活、经济、方便,而且更容易保证产品的质量。

2. 切削加工的特点和作用

切削加工具有如下主要特点:

(1) 切削加工的精度和表面粗糙度的范围广泛,且可获得很高的加工精度和很低的表面粗糙度。目前,切削加工的尺寸公差等级为 IT12~IT3,甚至更高;表面粗糙度 R_a 值为 $25\sim 0.008\mu\text{m}$ 。其范围之广,尺寸精密程度和表面平整程度之高,是目前其他加工方法难于达到的。

(2) 切削加工零件的材料、形状、尺寸和重量的范围较大。切削加工多用于金属材料的加工,如各种碳钢、合金钢、铸铁、有色金属及其合金等,也可用于某些非金属材料的加工,如石材、木材、塑料、复合材料和橡胶等。对于零件的形状和尺寸一般不受限制,只要能在机床上实现装夹,大都可进行切削加工,且可加工常见的各种型面,如外圆、内圆、锥面、平面、螺旋纹、齿形及空间曲面等。切削加工零件重量的范围很大,重的可达数百吨,如葛洲坝一号船闸的闸门,高 30 余米,重 600 吨;轻的只有几克,如微型仪表零件。

(3) 切削加工的生产率较高。在常规条件下,切削加工的生产率一般高于其他加工方法。只是在少数特殊场合,其生产率低于精密铸造、精密锻造和粉末冶金等方法。

(4) 切削过程中存在切削力,刀具和工件均须具有一定的强度和刚度,且刀具材料的硬度必须大于工件材料的硬度。

正是因为前三个特点和生产批量等因素的制约,在现代机械制造中,目前除少数采用精密铸造、精密锻造以及粉末冶金和工程塑料压制成形等方法直接获得零件外,绝大多数机械零件要靠切削加工成形。因此,切削加工在机械制造业中占有十分重要的地位,目前占机械制造总工作量的 40%~60% 左右。它与国家整个工业的发展紧密相连,起着举足轻重的作用。完全可以说,没有切削加工,就没有机械制造业。

正是因为上述第四个特点,限制了切削加工在细微结构和高硬高强等特殊材料加工方面的应用,从而给特种加工留下了生存和发展的空间。

3. 切削加工的发展方向

随着科学技术和现代工业日新月异的飞速发展,切削加工也正朝着高精度、高效率、自动化、柔性化和智能化方向发展,主要体现在以下三方面:

(1) 加工设备朝着数控技术、精密和超精密、高速和超高速方向发展。数控技术、精密和超精密加工技术将进一步普及和应用。普通加工、精密加工和超精密加工的精度可分别达到 $1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$ 和 $0.001\mu\text{m}$ (毫微米,即纳米),向原子级加工逼近。

(2) 刀具材料朝超硬刀具材料方向发展。目前我国常用刀具材料是高速钢和硬质合金,将逐步跨入超硬刀具材料的应用时代,陶瓷、聚晶金刚石 (PCD) 和聚晶立方氮化硼 (PCBN) 等超硬材料将被普遍应用于切削刀具,使切削速度可高达每分钟数千米。

(3) 生产规模由目前的小批量和单品种大批量向多品种变批量的方向发展,生产方式由目前的手工操作、机械化、单机自动化、刚性流水线自动化向柔性自动化和智能自动化方向发展。

21 世纪的切削加工技术必将面临未来自动化制造环境的一系列新的挑战,它必然要与计算机、自动化、系统论、控制论及人工智能、计算机辅助设计与制造、计算机集成制造系统等高新技术及理论相融合,向着精密化、柔性化和智能化方向发展,并由此推动其他各新兴学科在切削理论和技术中的应用。

二、零件的种类及组成

1. 零件的种类

切削加工的具体对象不是机械产品本身,而是组成机械产品的各种零件。零件虽然随其功用、形状、尺寸和精度诸因素的不同而千变万化,但按其结构一般可分为6类,即轴类(图1-1)、盘套类(图1-2)、支架箱体类(图1-3)、六面体类(图1-4)、机身机座类(图1-5)和特殊类零件(图1-6)。其中轴类零件、盘套类零件和支架箱体类零件是常见的3类零件。由于每一类零件不仅结构类似,而且加工工艺也有许多共同之处,因此将零件分类有利于学习和掌握各类零件加工的工艺特点。

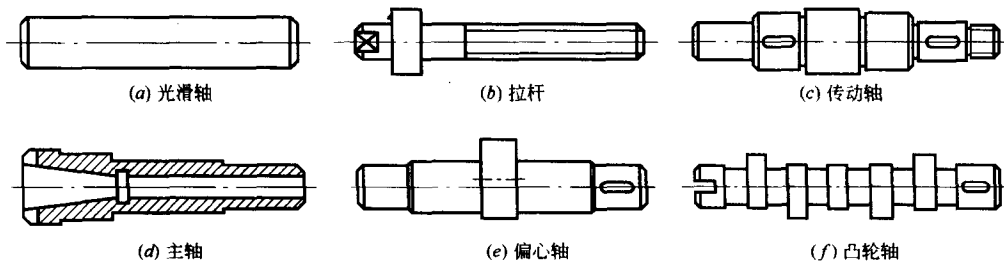


图 1-1 轴类零件

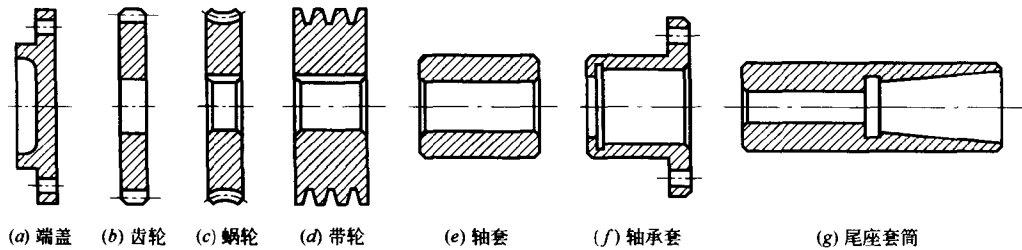


图 1-2 盘套类零件

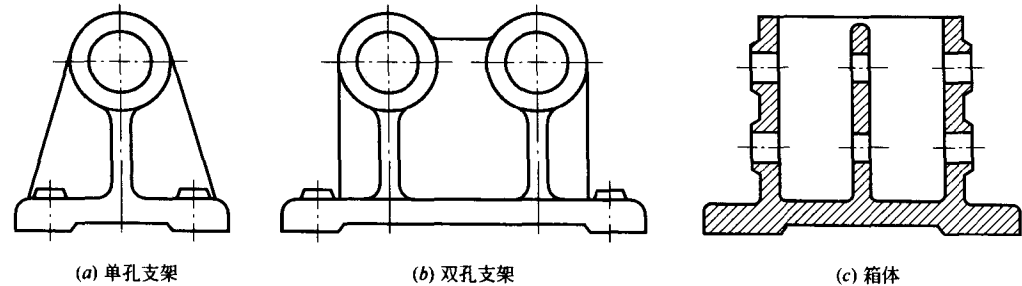


图 1-3 支架箱体类零件

2. 组成零件的表面

切削加工的对象虽然是零件,但具体切削的却是零件上的一个个表面。组成零件常见的表面有外圆、内圆、锥面、平面、螺纹、齿形、成形面以及各种沟槽等。图1-7所示的心轴体

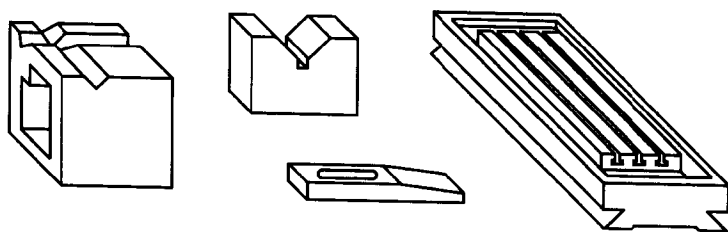


图 1-4 六面体类零件

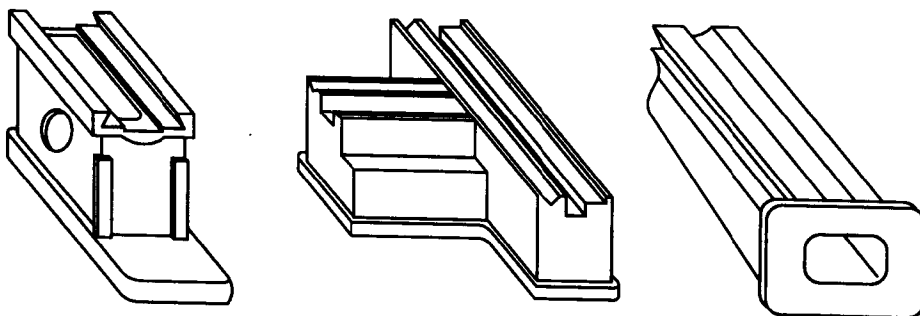


图 1-5 机身机座类零件

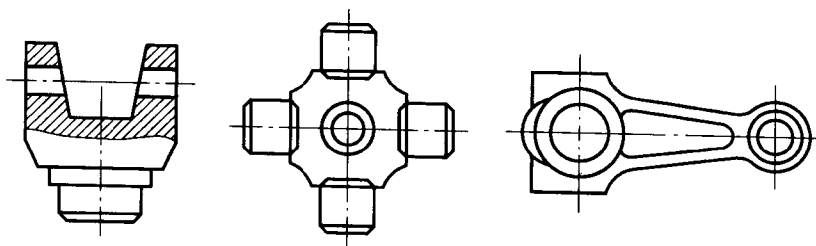


图 1-6 特殊类零件

零件就是由外圆、内圆、外锥面、内锥面、外螺纹、内螺纹、直角槽、回转槽、轴肩平面和端平面等组成。切削加工的目的之一就是要用各种切削方式在毛坯上加工出这些表面。

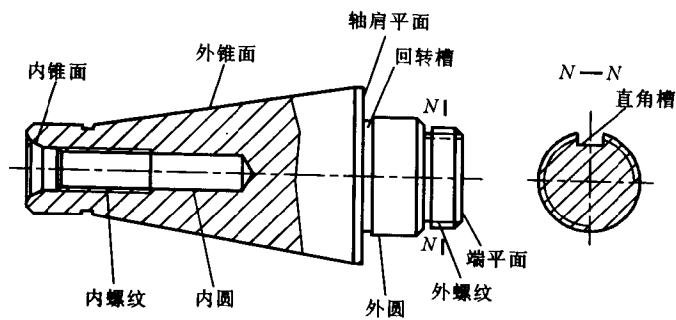


图 1-7 心轴体零件

三、机床的切削运动

1. 机床的切削运动

要进行切削加工,刀具与工件之间必须具有一定的相对运动,以获得所需表面的形状,这种相对运动称为切削运动。机械加工的切削运动由机床提供。切削运动根据其功用不同可分为主运动和进给运动。

主运动 主运动是由机床或人力提供的主要运动,它促使刀具和工件之间产生相对运动,从而使刀具前刀面接近工件。

进给运动 进给运动是由机床或人力提供的运动,它使刀具与工件之间产生附加的相对运动,加上主运动,即可不断地切除切屑,得到具有所需几何特征的表面。

普通机床的主运动一般只有一个。与进给运动相比,它的速度快,消耗机床功率多。进给运动可以是一个或多个。常见机床的切削运动见表 1-1。除了主运动和进给运动以外,机床还有吃刀、退刀和让刀等辅助运动。在普通机床上,辅助运动多为手动。

表 1-1 常见机床的切削运动

机床名称	主运动	进给运动	机床名称	主运动	进给运动
卧式车床	工件 旋转运动	车刀纵向、横向、斜向 直线移动	龙门刨床	工件 往复移动	刨刀横向、垂向、斜 向间歇移动
钻床	钻头 旋转运动	钻头轴向移动	外圆磨床	砂轮 高速旋转	工件转动,同时工件 往复移动,砂轮横向 移动
卧铣、立铣	铣刀 旋转运动	工件纵向、横向直线移 动(有时也作垂直方向 移动)	内圆磨床	砂轮 高速旋转	工件转动,同时工件 往复移动,砂轮横向 移动
牛头刨床	刨刀 往复移动	工件横向间歇移动或 刨刀垂向、斜向间歇 移动	平面磨床	砂轮 高速旋转	工件往复移动,砂轮 横向、垂向移动

2. 切削用量三要素

切削用量是切削过程中的切削速度、进给量和吃刀量的总称。由于它们是切削过程中不可缺少的因素,所以又称为切削用量三要素。

切削速度 它是切削刃选定点相对于工件的主运动的瞬时速度,用 v_c 表示,单位为 m/s 或 m/min。当主运动为旋转运动时,切削速度可用下列公式计算:

$$\left. \begin{aligned} v_c &= \frac{\pi d n}{1000 \times 60} \text{ (m/s)} \\ \text{或} \quad v_c &= \frac{\pi d n}{1000} \text{ (m/min)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 d ——切削刃选定点处工件或刀具的直径,mm;

n ——工件或刀具的转速,r/min。

当主运动为直线往复移动时(如刨削加工),切削速度可用下列公式近似计算:

$$\left. \begin{aligned} v_c &= \frac{2Ln_r}{1000 \times 60} \text{ (m/s)} \\ v_c &= \frac{2Ln_r}{1000} \text{ (m/min)} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

或

式中 L ——行程长度, mm;

n_r ——冲程次数, str/min。

进给量 刀具在进给运动方向上相对工件的位移量, 可用刀具和工件每转或每行程的位移量来表述和度量。进给量用 f 表示, 车、钻、镗、铣削时, 单位为 mm/r; 刨、插削时为 mm/str。对于铣削, 还有每齿的进给量 (mm/z) 和每分钟的进给量 (mm/min, 即进给速度 v_f)。

背吃刀量 吃刀量有背吃刀量、侧吃刀量和进给吃刀量之分, 本书只介绍背吃刀量。背吃刀量是在垂直于进给运动方向上测量的主切削刃切入工件的深度, 用 a_p 表示, 单位为 mm。背吃刀量又称切削深度 (简称切深)。

切削用量 v_c 、 f 、 a_p 反映的是机床主运动、进给运动和吃刀辅助运动的大小, 是它们在每次走刀中进行量化所选定的具体数值。图 1-8 所示的是车外圆、车锥面、刨直槽和钻孔的工艺简图, 它不仅表示出夹具 (有时可不表示出)、工件和刀具, 而且表示出切削运动和切削用量 v_c 、 f 、 a_p 。

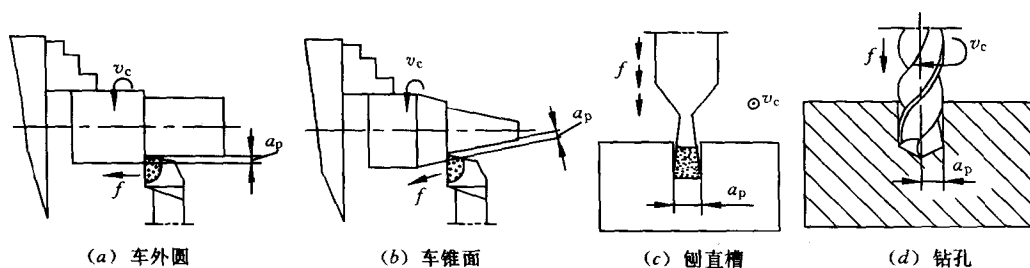


图 1-8 工艺简图

3. 零件表面的成形方法

切削加工的一个重要目的是获得零件上的各种表面。零件表面的成形方法常见的有轨迹法、成形法和展成法三种。

轨迹法 轨迹法是利用非成形刀具, 在一定的切削运动下, 由刀尖轨迹获得零件所需表面的方法。例如一般的车削、铣削、刨削等, 大多是轨迹法, 如图 1-9 所示。

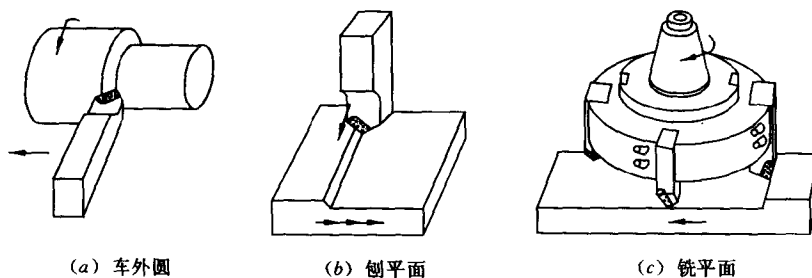


图 1-9 轨迹法