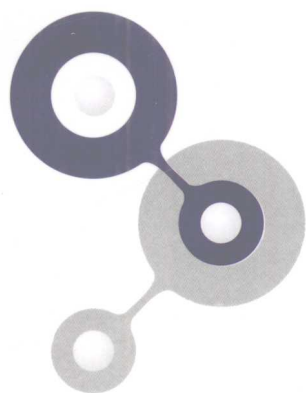




高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材



机械制造基础

主编 周桂莲 付平
主审 高进



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材

机械制造基础

主 编 周桂莲 付 平

参 编 曹同坤 李向荣 李 丽

周建强

主 审 高 进

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书是根据教育部机械基础课程教学指导分委会有关“工程材料及机械制造基础系列课程改革指南”的精神,参考国外教材的特点,并结合作者多年来的理论和实践教学的经验编写而成的。

本书共8章,内容包括机械加工基础知识、金属切削加工方法与设备、典型表面加工方法的分析、机械加工工艺过程的基础知识、特种加工、数控机床加工技术、先进制造技术和机械制造业的环境保护等。本书精选了目前仍在广泛应用的现代制造行业的常规工艺和技术上较为成熟的、应用范围较宽或发展前景看好的“三新”(即新材料、新技术、新工艺)内容,对特种加工、数控加工、先进制造技术作了介绍。

本书取材新颖,结构紧凑,文字简练,图文并茂,概念清晰,重点突出。

本书可作为高等院校机械类、近机类各专业的教材(学时数可根据需要调整),也可作为机械制造工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/周桂莲,付平主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.2

高等学校机械设计制造及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2192 - 0

I. 机… II. ①周… ②付… III. 机械制造—高等学校—教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 209487 号

策 划 毛红兵

责任编辑 孟秋黎 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 14.5

字 数 335千字

印 数 1~4000册

定 价 21.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2192 - 0/TH · 0102

XDUP 2484001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦 力 王建中 巨永锋 孙 强 陈在平 李正明
吴 斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高 嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策 划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

本书是根据 2008 年教育部机械基础课程教学指导分委会有关“工程材料及机械制造基础系列课程改革指南”精神,结合机械工程大背景下机械制造学科的快速发展趋势与高等教育的改革精神,以教育部本课程改革指南为指导,由青岛科技大学、山东轻工业学院、青岛农业大学、吉林建筑工程学院等高校长期从事机械制造基础课程体系教学和工程实践训练教学的具有丰富理论和实践教学经验的教师,以科学性、先进性、系统性、实用性为目标进行编写的,内容安排上注重学生获取知识、分析问题、解决工程技术问题的实践能力、综合素质与创新能力的培养。

本书是一部面向 21 世纪、建立在原《金属工艺学》教材基础上、力图把传统与先进制造工艺基础联系在一起的宽口径、涉及不同学科的教材,内容涉及机械加工基础知识、金属切削加工方法与设备、典型表面加工方法的分析、机械加工工艺过程的基础知识、特种加工、数控机床加工技术、先进制造技术、机械制造业的环境保护等多方面知识,具备了基础性、实践性、趣味性和跨学科的知识结构。同时,在内容的编写上,对于目前仍广泛应用于现代机械制造业的常规工艺进行了精选保留,对过时的内容予以淘汰,增加了技术上较为成熟的、应用范围较宽或发展前景看好的“三新”(即新材料、新技术、新工艺)内容,如增加了特种加工、数控加工、先进制造技术的比重,增加了机械制造业的环境保护。本书体现了常规制造技术与现代制造技术、材料科学和现代信息技术的密切交叉与融合,也体现了制造技术的历史传承和未来发展趋势,为学生的进一步学习及今后从事机械产品设计和加工制造方面的工作奠定了基础。

在编写过程中力求取材新颖,联系实际,结构紧凑,文字简练,直观形象,图文并茂。

本书内容安排有一定的灵活性,在保证教学基本要求的前提下,各院校在安排课程内容时,可结合自己学校的情况来选择决定。

本书由周桂莲、付平任主编,第 1 章由付平编写,第 2 章由付平、周桂莲编写,第 3 章由周桂莲编写,第 4 章由周桂莲、付平编写,第 5 章由曹同坤编写,第 6 章由李向荣、周桂莲编写,第 7 章由李丽编写,第 8 章由付平、周建强编写。全书由周桂莲、付平统稿。

本书由山东轻工业学院高进教授主审,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,书中难免有不当之处,诚请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2008 年 10 月

目 录

第 1 章 机械加工基础知识	1
1.1 切削运动及切削要素	1
1.1.1 零件表面的形成	1
1.1.2 切削运动	2
1.1.3 切削用量	2
1.1.4 切削层参数	4
1.2 切削刀具	5
1.2.1 刀具切削部分的组成	5
1.2.2 刀具几何角度参考系	6
1.2.3 刀具的标注角度	6
1.2.4 刀具工作角度	9
1.2.5 刀具材料	10
1.2.6 刀具结构	12
1.3 切削过程及控制	13
1.3.1 切屑的形成及类型	13
1.3.2 积屑瘤	15
1.3.3 切削力和切削功率	16
1.3.4 切削热和切削温度	19
1.3.5 刀具磨损和刀具寿命	21
1.3.6 切削用量的选择	23
1.4 工件材料的切削加工性能	24
1.4.1 衡量材料切削加工性能的指标	24
1.4.2 常用材料的切削加工性能	25
1.4.3 改善工件材料切削加工性能的途径	26
复习思考题	26
第 2 章 金属切削加工方法与设备	29
2.1 金属切削机床的基本知识	29
2.1.1 机床的分类	29
2.1.2 金属切削机床的型号	29
2.2 车削加工	31
2.2.1 车刀	32
2.2.2 车床及其附件	32
2.2.3 车削的基本工艺	43
2.2.4 车削的工艺特点	52

2.3 铣削 52

2.3.1 铣刀 54

2.3.2 铣床及其附件 55

2.3.3 铣削的基本工艺 58

2.3.4 铣削的工艺特点 62

2.4 钻削与铰削 62

2.4.1 钻孔 62

2.4.2 扩孔 68

2.4.3 铰孔 69

2.5 刨削、插削、拉削和镗削 70

2.5.1 刨削 70

2.5.2 插削 75

2.5.3 拉削 76

2.5.4 镗削 79

2.6 磨削 81

2.6.1 磨具 82

2.6.2 磨床 86

2.6.3 磨削的基本工艺 89

2.6.4 磨削的工艺特点 93

2.7 精整加工和光整加工 94

2.7.1 研磨 94

2.7.2 珩磨孔 96

2.7.3 超级光磨 97

2.7.4 抛光 98

复习思考题 99

第3章 典型表面加工方法的分析 100

3.1 外圆面的加工 100

3.1.1 外圆面的技术要求 100

3.1.2 外圆面加工方案的分析 100

3.2 孔的加工 101

3.2.1 孔的技术要求 101

3.2.2 孔加工方案的分析 102

3.3 平面的加工 103

3.3.1 平面的技术要求 103

3.3.2 平面加工方案的分析 103

3.4 成型面的加工 104

3.5 螺纹的加工 105

3.5.1 螺纹的技术要求 105

3.5.2 螺纹加工方法的分析 105

3.6 齿轮齿形的加工 111

3.6.1 铣齿 112

3.6.2 滚齿 113

3.6.3 插齿	114
3.6.4 齿形的精加工	116
复习思考题	120
第4章 机械加工工艺过程的基础知识	122
4.1 基本概念	122
4.1.1 生产过程和工艺过程	122
4.1.2 机械加工工艺过程的组成	122
4.1.3 生产纲领和生产类型	125
4.2 工件的安装和夹具	127
4.2.1 工件的安装	127
4.2.2 机床夹具的分类和组成	127
4.2.3 基准及其选择	129
4.2.4 工件在夹具中的定位	131
4.3 零件机械加工工艺规程的制定	133
4.3.1 机械加工工艺规程的内容及作用	133
4.3.2 制定工艺规程的原则	133
4.3.3 制定工艺规程的步骤	134
4.4 零件的切削结构工艺性分析	142
复习思考题	148
第5章 特种加工	149
5.1 电火花加工	150
5.1.1 电火花加工的原理及特点	150
5.1.2 电火花加工的基本工艺规律	152
5.1.3 电火花加工的应用范围	157
5.2 电解加工	161
5.2.1 电解加工基本原理及特点	161
5.2.2 电解加工的基本工艺规律	163
5.2.3 电解加工的应用	166
5.3 超声波加工	167
5.3.1 超声波加工的原理和特点	167
5.3.2 超声波加工的基本工艺规律	168
5.3.3 超声波加工的应用	169
5.4 高能束加工	171
5.4.1 激光加工	171
5.4.2 电子束和离子束加工	173
复习思考题	176
第6章 数控机床加工技术	177
6.1 数控机床的概念及组成	177
6.1.1 数控机床的定义	177

6.1.2 数控加工技术的相关概念	177
6.1.3 数控机床的组成	177
6.2 数控机床的特点和应用	178
6.2.1 数控机床的特点	178
6.2.2 数控机床的应用	179
6.2.3 数控机床的分类	179
6.3 数控加工工艺设计	181
6.4 数控机床坐标系	183
6.4.1 机床坐标系	183
6.4.2 编程坐标系	185
6.4.3 加工坐标系	185
6.5 数控车床	186
6.5.1 数控车削的基本特征与加工范围	186
6.5.2 数控车床的结构	186
6.5.3 数控车床的主要加工对象	186
6.6 数控铣床	187
6.6.1 数控铣床的主要加工对象	187
6.6.2 数控铣床的类型	187
6.7 加工中心	187
6.7.1 加工中心的特点	187
6.7.2 加工中心的用途	188
6.7.3 加工中心的结构	188
6.7.4 自动交换装置	189
6.7.5 加工中心的加工范围	190
6.8 数控编程实例	190
复习思考题	191
第7章 先进制造技术	192
7.1 计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术	192
7.1.1 CAD/CAM 基本概念	192
7.1.2 CAD/CAM 系统的组成	192
7.1.3 CAD/CAM 系统的工作过程	193
7.2 计算机辅助工艺过程设计(CAPP)	194
7.2.1 CAPP 的基本概念	194
7.2.2 成组技术	194
7.2.3 CAPP 的功能及组成	196
7.3 柔性制造技术(FM)	197
7.3.1 FM 技术的概念	197
7.3.2 FMS 的组成	197
7.3.3 FMS 的主要功能	197
7.4 计算机集成制造系统(CIMS)	198
7.4.1 CIMS 的概念	198
7.4.2 CIMS 的组成	198

7.4.3 CIMS 的发展	199
复习思考题	203
第 8 章 机械制造业的环境保护	204
8.1 概述	204
8.2 机械工业的环境污染	205
8.3 环境保护技术	206
8.3.1 工业废气的防治	206
8.3.2 工业废水的防治	211
8.3.3 工业固体废物污染的防治	214
8.3.4 工业噪声的防治	217
复习思考题	219
参考文献	220

第 1 章 机械加工基础知识

切削加工是使用切削工具(刀具、磨具和磨料),通过工具和工件的相对运动把工件上多余的材料层切除,使工件获得规定的几何参数(尺寸、形状、位置)和表面质量的加工方法。机器上的零件除极少数是采用精密铸造或精密锻造等无屑加工的方法获得的以外,绝大多数都是靠切削加工的方法获得的,因此,切削加工在机械制造业中占有十分重要的地位。由于切削加工一般是在常温下进行的,因此也常称为冷加工。

切削加工之所以获得广泛的应用,是因为它与其他一些加工方法比较,具有以下优点:

(1) 加工精度高。切削加工可以根据要求达到不同的精度和表面粗糙度,可以获得很高的加工精度和很低的表面粗糙度。现代切削加工技术已经可以达到尺寸公差 IT12~IT3 的精度,表面粗糙度 R_a 值可达到 25.000~0.008 μm 。

(2) 适用面广。切削加工可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、塑料和橡胶等。它们的尺寸从小到大不受限制,重量可以达数百吨。目前世界上最大的立式车床可加工直径为 26 m 的工件。

切削加工分为机械加工(简称机工)和钳工两大类。

机工是指通过各种金属切削机床对工件进行的切削加工,其加工方式有车削、钻削、铣削、刨削和磨削等,所用的机床分别为车床、钻床、铣床、刨床和磨床等。

钳工是指通过工人手持工具进行的切削加工,其基本操作有划线、锯削、锉削、钻孔、攻螺纹、套螺纹、刮削、机械装配和设备修理等。钳工用的工具简单,操作灵活、方便,它可以完成机械加工所不能完成的某些工作。钳工的劳动强度大、生产率低,但在机械制造和修配中仍占着一定地位,随着生产的发展,钳工机械化的内容也越来越丰富。

1.1 切削运动及切削要素

1.1.1 零件表面的形成

零件表面的形状虽然有些很复杂,但主要是由基本表面和成型面组成的。基本表面包括外圆面、内圆面(孔)、平面。成型面包括螺纹、齿轮的齿形和沟槽等。外圆面和孔是以某一直线为母线,以圆为轨迹作旋转运动所形成的表面;平面是以某一直线为母线,以另一直线为轨迹作平移运动所形成的表面;成型面是以曲线为母线,以圆或直线为轨迹作旋转或平移运动所形成的表面。上述这些表面可分别用图 1-1 所示的相应加工方法来获得。

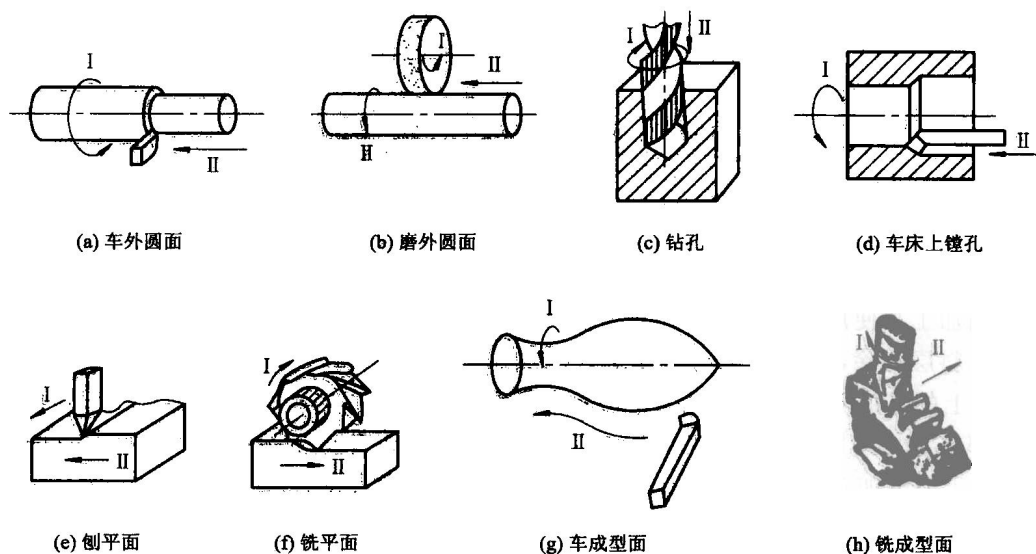


图 1-1 零件不同表面加工时的切削运动

1.1.2 切削运动

无论在哪一种机床上进行切削加工，刀具和工件间必须有一定的相对运动，即切削运动。切削运动可以是旋转运动或直线运动，也可以是连续运动或间歇运动。

根据在切削中所起的作用不同，切削运动(如图 1-1 所示)分为主运动(图中 I)和进给运动(图中 II)。

1) 主运动

主运动是使刀具和工件之间产生相对运动，促使刀具接近工件而实现切削的运动，如图 1-2 中工件的旋转运动即为主运动。主运动只有一个，其速度最高；消耗功率最大。主运动的形式有旋转运动和往复运动(由工件或刀具进行)两种，如车削、铣削、磨削加工时的主运动是旋转运动；刨削、插削加工时工件或刀具的主运动是往复直线运动。

2) 进给运动

进给运动是由机床或人力提供的保证切削连续进行的刀具与工件之间的运动，如图 1-2 所示车刀的移动。进给运动有连续和断续两种类型。当主运动为旋转运动时，进给运动是连续的，如车削、钻削；当主运动为直线运动时，进给运动是断续的，如刨削、插削等。进给运动可能是 1 个或多个。

1.1.3 切削用量

在机械加工中，工件上同时形成三个表面，即待加工表面、过渡表面(加工表面)和已加工表面，如图 1-2 所示。

切削用量(cutting conditions)包括切削速度 v_c 、进给量 f (或进给速度 v_f)和背吃刀量 a_p 三要素。

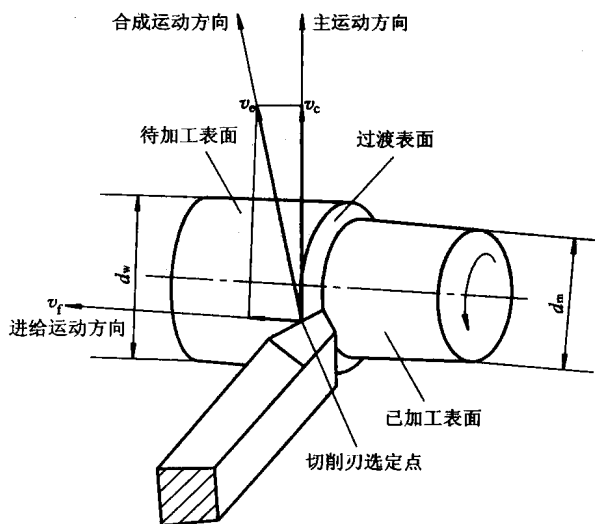


图 1-2 切削运动和加工表面

1. 切削速度 v_c

切削刃上选定点相对于工件主运动的瞬时速度，即刀具和工件在主运动方向的相对位移称为切削速度。

若主运动为旋转运动(如车削、钻削、镗削、铣削和磨削加工等)，切削速度一般为其最大线速度。

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad \text{m/s 或 m/min}$$

式中： d 为工件(或刀具)的直径，单位为 mm； n 为工件(或刀具)的转速，单位为 r/s 或 r/min。

若主运动为往复直线运动(如刨削、插削等)，则以其平均速度作为切削速度，即

$$v_c = \frac{2L n_r}{1000} \quad \text{m/s 或 m/min}$$

式中： L 为往复行程长度，单位为 mm； n_r 为主运动每秒或每分钟的往复次数，单位为 str/s 或 str/min。

2. 进给量 f

刀具在进给运动方向上相对于工件的位移量称为进给量(feed rate)。不同的加工方法由于所用刀具和切削运动形式不同，进给量的表述和度量方法也不相同。

当主运动是回转运动时，进给量指工件或刀具每回转一周，两者沿进给方向的相对位移量；当主运动是直线运动时，进给量指刀具或工件每往复直线运动一次，两者沿进给方向的相对位移量。

用单齿刀具(如车刀、刨刀等)加工时，当主运动是回转运动时，进给量指每转进给量，即工件或刀具每回转一周两者沿进给方向的相对位移量；当主运动是直线运动时，进给量指每行程进给量，即刀具或工件每往复直线运动一次两者沿进给方向的相对位移量。

用多齿刀具(如铣刀、钻头等)加工时，进给运动的瞬时速度称进给速度，以 v_f 表示。

刀具每转或每行程中每齿相对工件进给运动方向上的位移量，称每齿进给量。

f_z 、 f 、 v_f 之间有如下关系：

$$v_f = fn = f_z zn$$

式中： n 为刀具或工件转速，单位为 r/s 或 r/min； z 为刀具的齿数。

3. 背吃刀量 a_p

在通过切削刃上选定点并垂直于该点主运动方向的切削层尺寸平面中，垂直于进给运动方向测量的切削层尺寸，称为背吃刀量，以 a_p 表示，车外圆时：

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2}$$

式中： d_w 、 d_m 分别为工件待加工和已加工表面直径，单位为 mm。

1.1.4 切削层参数

切削层是指切削过程中，由刀具切削部分的一个单一动作（如车削时工件转一圈，车刀主切削刃移动一段距离）所切除的工件材料层。它决定了切屑的尺寸及刀具切削部分的载荷。

切削层的尺寸和形状通常是在切削层尺寸平面中测量的，如图 1-3 所示。

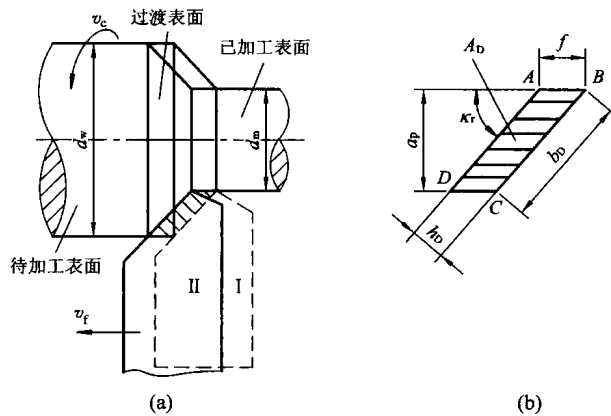


图 1-3 车削时切削层尺寸

1. 切削层公称横截面积 A_D

在给定瞬间，切削层的实际断面面积称为切削层公称截面积，以 A_D 表示，单位为 mm^2 。

2. 切削层公称宽度 b_D

切削层公称宽度是指沿主切削刃测量的切削层尺寸反映了切削刃参加切削的工作长度，以 b_D 表示，单位为 mm。

3. 切削层公称厚度 h_D

切削层公称厚度是指切削层公称横截面积与其公称宽度之比，以 h_D 表示，单位为 mm。

由定义可知，切削层参数 A_D 、 b_D 和 h_D 之间的关系如下：

$$A_D = b_D h_D \quad \text{mm}^2$$

因 A_D 不包括残留面积，而且在各种加工方法中 A_D 与进给量和背吃刀量的关系不同，

所以 A_D 不等于 f 和 a_p 的积。只有在车削加工中，当残留面积很小时才能近似地认为它们相等，即

$$A_D \approx fa_p \text{ mm}^2$$

1.2 切削刀具

切削加工过程中，直接完成切削工作的是刀具。刀具切削性能的好坏，取决于构成刀具的几何参数、结构及刀具切削部分的材料。

1.2.1 刀具切削部分的组成

切削刀具的种类繁多，形状各异，但不管它们的结构多么复杂，切削部分的结构要素和几何角度都有着许多共同的特征。各种多齿刀具，就其一个刀齿而言，都相当于一把车刀的刀头，所以研究切削刀具时总是以车刀为例。

车刀(turning tools)由工作部分和非工作部分构成，车刀的工作部分即切削部分，非工作部分就是车刀的柄部(或刀杆)。

车刀切削部分(如图 1-4)由下列要素组成：三面、两刃、一尖。

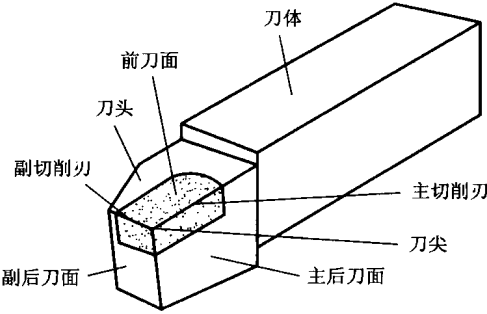


图 1-4 外圆车刀

1. 刀面

前刀面：刀具上切屑流过的表面。

主后刀面：在切削过程中，刀具与工件正在被切削加工的表面(过渡表面)相对的刀面。

副后刀面：在切削过程中，刀具与工件已切削加工的表面相对的刀面。

2. 刀刃

主切削刃：前刀面与主后刀面在空间的交线，担负着主要切削任务。

副切削刃：前刀面与副后刀面在空间的交线，仅在靠刀尖处担负着少量的切削任务，起一定修光作用。

3. 刀尖

刀尖指主切削刃与副切削刃的连接处相当少的一部分切削刃。实际刀具的刀尖并非绝对尖锐，为了增加刀尖的强度与耐磨性，一般在刀尖处磨出一小段直线或圆弧形的过渡刃，分别称为修圆刀尖和倒角刀尖。

1.2.2 刀具几何角度参考系

刀具要从工件上切除余量,就必须使它的切削部分具有一定的切削角度。用于定义和规定刀具角度的各基准坐标面,称为参考系。其中,用于定义刀具设计、制造、刃磨和测量几何参数时用的参考系称为刀具静止参考系;用于规定刀具进行切削加工时几何参数的参考系称为刀具工作参考系。工作参考系与静止参考系的区别在于用实际的合成运动方向取代假定主运动方向,用实际的进给运动方向取代假定进给运动方向。

刀具静止参考系(如图 1-5 所示)由基面、切削平面、正交平面和假定工作平面组成。

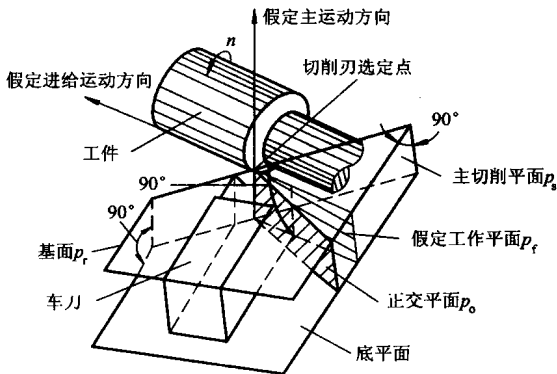


图 1-5 刀具静止参考系的平面

- (1) 基面：过切削刃选定点，垂直于该点假定主运动方向的平面，以 p_r 表示。
- (2) 切削平面：过切削刃选定点，与切削刃相切并垂直于基面的平面，主切削平面以 p_s 表示。
- (3) 正交平面：过切削刃选定点，同时垂直于基面和切削平面的平面，以 p_o 表示。
- (4) 假定工作平面：过切削刃选定点，垂直于基面并平行于假定进给运动方向的平面，以 p_f 表示。

1.2.3 刀具的标注角度

在刀具静止参考系中定义的角度称为刀具的标注角度。

车刀的标注角度是在车刀设计、制造、刃磨及测量时必须考虑的主要角度，如图 1-6 所示。

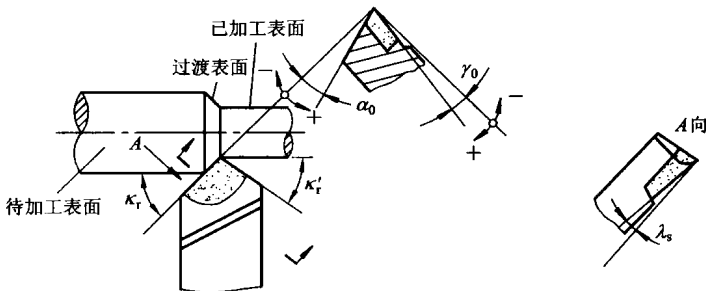


图 1-6 车刀的主要角度

(1) 主偏角 κ_r : 在基面中测量的主切削平面与假定工作平面间的夹角。

(2) 副偏角 κ'_r : 在基面中测量的副切削平面与假定工作平面间的夹角。

主偏角主要影响切削层截面的形状和参数,影响切削分力的变化,并和副偏角一起影响已加工表面的粗糙度;副偏角有减小副后刀面与已加工表面间摩擦的作用。

当背吃刀量和进给量一定时,主偏角愈小,切削层公称宽度愈大而公称厚度愈小,即切下宽而薄的切屑,如图 1-7 所示。这时,主切削刃单位长度上的负荷较小,并且散热条件较好,有利于提高刀具的寿命。

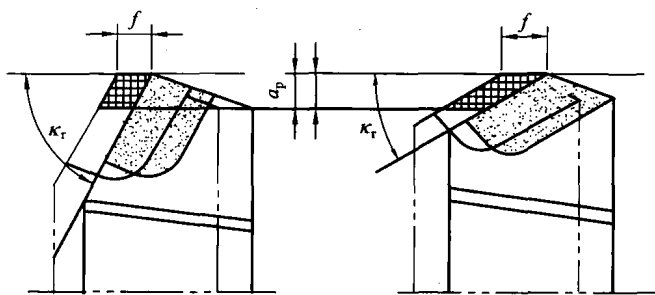


图 1-7 主偏角对切削层参数的影响

由图 1-8 可以看出,当主、副偏角小时,已加工表面残留面积的高度 h_c 亦小,因而可减小表面粗糙度的值,同时刀尖强度和散热条件较好,有利于提高刀具寿命。但是,当主偏角减小时,背向力将增大。若加工刚度较差的工件(如车细长轴),则容易引起工件变形并可能产生振动。

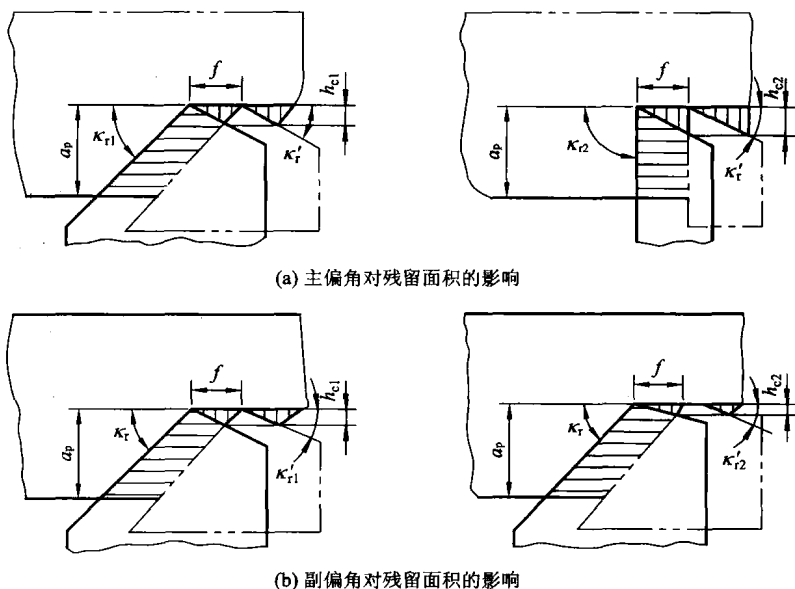


图 1-8 主、副偏角对残留面积的影响

主、副偏角应根据工件的刚度及加工要求选取合理的数值。一般车刀常用的主偏角有 45° 、 60° 、 75° 、 90° 等几种;副偏角为 $5^\circ \sim 15^\circ$,粗加工时取较大的值。