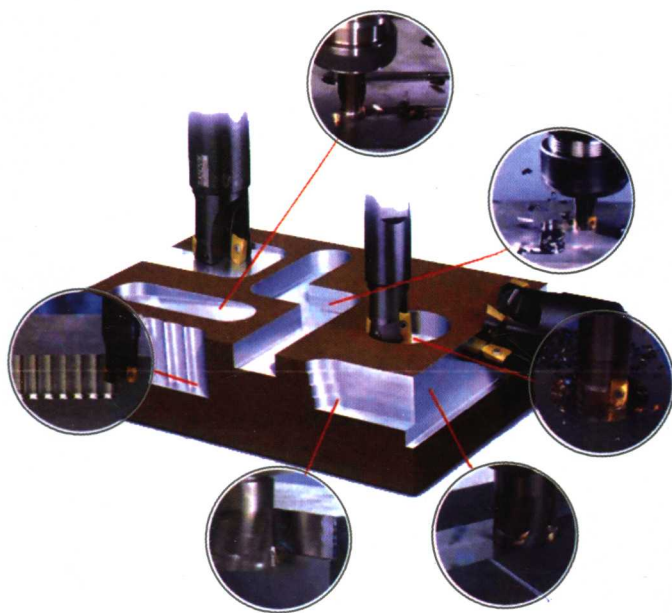


# 制造技术

Manufacturing Technology

杨坤怡 主编 杜全兴 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 制造技术

杨坤怡 主编  
杜全兴 主审

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

制造技术/杨坤怡主编. —北京:国防工业出版社,  
2005.8

ISBN 7-118-04127-0

I. 制... II. 杨... III. 金属切削-工艺-  
IV. TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 099865 号

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$  498 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:29.00 元

---

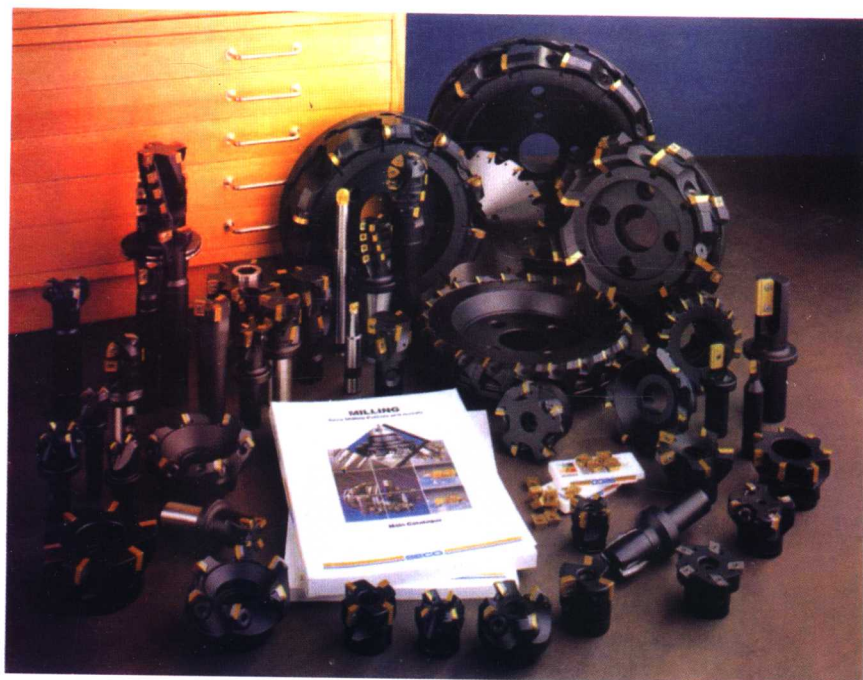
(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

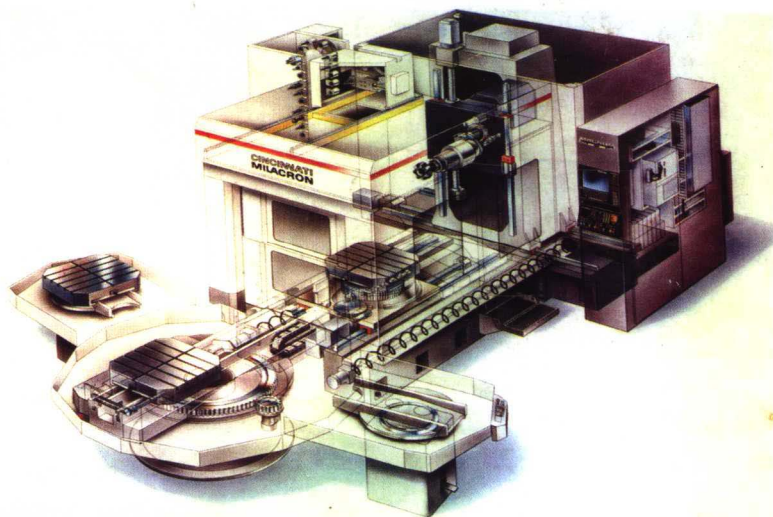
发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764



**CINCINNATI MILACRON** 辛辛那提·米拉克龙国际公司



**MAGNUM800H 卧式加工中心**

# 前 言

目前我国制造业正处于飞速发展的新阶段,企业在市场上为赢得一席之地,纷纷在人才市场抢夺制造技术专门人才,掌握新的制造工艺和技术的专门人才成为这些企业赢得市场的制胜法宝。

制造技术是应用最为广泛的各类机电产品的主要加工技术。随着材料科学、计算机科学和传感器技术的发展,特别是近二十年来,数控技术的广泛应用,传统的制造模式向柔性化、自动化、数字化的方向发展,制造技术出现了许多新的特点,从学科发展的角度来看,主要是制造技术已成为一门综合技术。如何将制造技术中的机床、刀具、夹具、工艺以及几何精度质量标准与检测等内容反映到教学实践中,除考虑前几年所进行的课程内容整合之外,还要考虑使读者面对现代化企业生产环境,了解和掌握切削加工的关键技术和所涉及的诸多知识内容。经过几年教学改革实践,我们将自己的经验和教授专家们的意见融入到本书中,使本书既注重制造基础知识,又有对新技术、新工艺及新设备的全面介绍。

本书的特色主要有以下几个方面:

- 以金属切削理论为基础,以零件切削加工与机器装配工艺为主线,向读者介绍金属切削加工原理、机械制造装备(刀具、夹具、量具及机床)、质量控制理论与方法、工艺规程,新工艺、新技术(特种加工、数控加工)及制造技术的最新发展动向。
- 从制造的角度阐述几何精度标准(包括尺寸精度、形位精度与表面粗糙度)及测量方法等关系机器质量的内容。
- 增加机器装配工艺,将尺寸链等内容融入机械制造工艺部分,引导学生从整体的高度分析局部的具体问题。
- 从现代制造企业的现状和发展出发,以数控机床为主,传统机床为辅,精选各章的内容。
- 从制造信息集成的观念出发,阐述刀具、机床、夹具的原理、分类与选用。
- 注重深入浅出,删除或精简原同类教材中陈旧的工艺内容及与《机械制造工程实践》、《数控技术》和《机械制造装备设计》等课重复的内容,减轻学生的课业负担。

本书的编写教师及负责编写工作如下:第1章、第3章的第1节~第7节及第7章由杨坤怡编写,第2章由曾东红编写,第3章的第8节~第11节由张吉辉编写,第4章由宋小欣编写,第5章由张剑编写,第6章由马术文编写。

在本书的编写过程中,杜全兴教授、周茹忠教授、许明恒教授、闫开印教授及杜海若教

#### IV

授均提出了宝贵意见,杜全兴教授还在百忙中审阅了全书。研究生曹永颜参加了本书第7章的资料收集及本书的第3章和第5章插图的收集与编辑工作。在此一并表示衷心的感谢!

诚恳希望广大读者对本书中的错误和不足之处提出批评指正。

编者  
2005.8

# 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第 1 章 金属切削基本理论     | 1  |
| 1.1 切削运动           | 1  |
| 1.2 工件上的加工表面       | 1  |
| 1.3 切削用量三要素        | 2  |
| 1.4 刀具的几何角度        | 3  |
| 1.5 刀具材料           | 6  |
| 1.6 常用金属切削刀具结构     | 10 |
| 1.7 可转位刀片的选择       | 11 |
| 习题与思考题             | 13 |
| 第 2 章 切削过程与控制      | 15 |
| 2.1 切削过程及切屑类型      | 15 |
| 2.1.1 切屑的形成及变形区的划分 | 15 |
| 2.1.2 切屑的类型与切屑控制   | 17 |
| 2.1.3 前刀面上的摩擦与积屑瘤  | 19 |
| 2.2 切削力            | 22 |
| 2.2.1 切削力的来源与切削分力  | 22 |
| 2.2.2 切削功率与计算      | 23 |
| 2.2.3 切削力经验公式      | 23 |
| 2.2.4 单位切削力        | 24 |
| 2.3 切削热和切削温度       | 25 |
| 2.3.1 切削热          | 25 |
| 2.3.2 切削温度         | 26 |
| 2.4 刀具磨损和耐用度       | 28 |
| 2.4.1 刀具磨损的形式      | 28 |
| 2.4.2 刀具磨损的阶段和原因   | 28 |
| 2.4.3 刀具耐用度与寿命     | 30 |
| 2.4.4 刀具的破损        | 32 |
| 2.5 工件材料的切削加工性     | 32 |
| 2.5.1 切削加工性的指标     | 32 |
| 2.5.2 刀具几何参数的合理选择  | 34 |
| 2.6 切削液            | 36 |
| 2.7 切削用量的选择        | 37 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 习题与思考题 .....               | 40        |
| <b>第3章 金属切削机床与刀具 .....</b> | <b>41</b> |
| 3.1 机床概述 .....             | 41        |
| 3.1.1 机床的诞生和发展 .....       | 41        |
| 3.1.2 机床的分类与型号 .....       | 43        |
| 3.2 工件加工表面及其形成方法 .....     | 45        |
| 3.3 机床的机械传动 .....          | 48        |
| 3.3.1 机床上常用的机械传动方式 .....   | 48        |
| 3.3.2 机床的传动系统图与传动链 .....   | 52        |
| 3.3.3 机床传动原理图 .....        | 53        |
| 3.3.4 典型机床的机械传动系统分析 .....  | 54        |
| 3.4 数控机床控制原理 .....         | 59        |
| 3.4.1 数控系统 .....           | 59        |
| 3.4.2 数控机床的控制方式 .....      | 61        |
| 3.4.3 光电编码器原理 .....        | 64        |
| 3.5 普通车床与数控车床 .....        | 64        |
| 3.5.1 普通车床 .....           | 66        |
| 3.5.2 数控车床 .....           | 69        |
| 3.5.3 数控机床的应用 .....        | 71        |
| 3.6 孔加工机床与刀具 .....         | 72        |
| 3.6.1 钻床 .....             | 72        |
| 3.6.2 麻花钻 .....            | 73        |
| 3.6.3 钻削特点 .....           | 76        |
| 3.6.4 其他孔加工刀具 .....        | 76        |
| 3.6.5 镗床 .....             | 79        |
| 3.7 铣床与铣刀 .....            | 81        |
| 3.7.1 铣床的功用和类型 .....       | 81        |
| 3.7.2 铣削加工 .....           | 83        |
| 3.7.3 铣刀 .....             | 85        |
| 3.7.4 铣削要素和切削层参数 .....     | 87        |
| 3.7.5 铣削力及功率 .....         | 90        |
| 3.8 齿轮加工机床 .....           | 94        |
| 3.8.1 滚齿及插齿原理与方法 .....     | 95        |
| 3.8.2 滚齿机的组成与传动 .....      | 101       |
| 3.8.3 剃齿、珩齿、磨齿及应用 .....    | 105       |
| 3.8.4 弧齿锥齿轮加工原理 .....      | 106       |
| 3.9 加工中心 .....             | 109       |
| 3.9.1 加工中心的种类与组成 .....     | 109       |
| 3.9.2 自动化加工中的刀具 .....      | 111       |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3.9.3 用加工中心加工弧齿锥齿轮简介 .....   | 113 |
| 3.10 磨床与砂轮 .....             | 114 |
| 3.10.1 砂轮 .....              | 114 |
| 3.10.2 磨削原理 .....            | 117 |
| 3.10.3 磨床 .....              | 119 |
| 3.10.4 磨削加工方法 .....          | 120 |
| 3.11 其他种类机床 .....            | 124 |
| 3.11.1 刨床 .....              | 124 |
| 3.11.2 插床 .....              | 126 |
| 3.11.3 拉刀与拉床 .....           | 126 |
| 习题与思考题 .....                 | 128 |
| <b>第4章 几何精度标准与检测</b> .....   | 131 |
| 4.1 概述 .....                 | 131 |
| 4.2 有关术语及定义 .....            | 131 |
| 4.2.1 有关互换性基本概念 .....        | 131 |
| 4.2.2 有关尺寸的术语和定义 .....       | 132 |
| 4.2.3 有关尺寸偏差、公差的术语及定义 .....  | 132 |
| 4.2.4 有关孔轴和配合的术语及定义 .....    | 133 |
| 4.2.5 基准制 .....              | 135 |
| 4.2.6 标准公差 .....             | 136 |
| 4.2.7 基本偏差 .....             | 136 |
| 4.2.8 配合 .....               | 142 |
| 4.2.9 未注公差尺寸的极限偏差 .....      | 142 |
| 4.2.10 获得加工尺寸精度的方法 .....     | 142 |
| 4.3 光滑圆柱结合的精度设计 .....        | 143 |
| 4.3.1 基准制的选择 .....           | 143 |
| 4.3.2 公差等级的选择 .....          | 143 |
| 4.3.3 配合的选择 .....            | 144 |
| 4.4 形位公差与误差及其检测 .....        | 147 |
| 4.4.1 形位公差的符号及代号 .....       | 147 |
| 4.4.2 形位公差的研究对象——几何要素 .....  | 148 |
| 4.4.3 形位公差的标注方法 .....        | 149 |
| 4.4.4 形位误差和形位公差 .....        | 152 |
| 4.5 公差原则及公差要求 .....          | 170 |
| 4.5.1 有关公差原则及公差要求的基本概念 ..... | 170 |
| 4.5.2 独立原则 .....             | 172 |
| 4.5.3 相关要求 .....             | 173 |
| 4.5.4 形位公差的选择 .....          | 177 |
| 4.5.5 公差原则的选择 .....          | 179 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.5.6 形位公差的检测原则 .....       | 179 |
| 4.5.7 形位公差的选用和标注实例 .....    | 180 |
| 4.6 表面粗糙度 .....             | 181 |
| 4.6.1 表面粗糙度的实质 .....        | 181 |
| 4.6.2 表面粗糙度对零件使用性能的影响 ..... | 181 |
| 4.6.3 表面粗糙度的评定标准 .....      | 181 |
| 4.6.4 表面粗糙度的选用 .....        | 183 |
| 4.6.5 表面粗糙度的标注 .....        | 184 |
| 4.6.6 表面粗糙度的检测 .....        | 186 |
| 习题与思考题 .....                | 186 |
| <b>第5章 特种加工与精密加工</b> .....  | 190 |
| 5.1 电火花加工的机理、特点及分类 .....    | 190 |
| 5.1.1 电火花加工的机理 .....        | 190 |
| 5.1.2 电火花加工的特点及分类 .....     | 193 |
| 5.1.3 电火花加工中的基本工艺规律 .....   | 195 |
| 5.1.4 电火花成形加工 .....         | 198 |
| 5.1.5 电火花穿孔成形加工 .....       | 201 |
| 5.2 电解加工 .....              | 205 |
| 5.2.1 电解加工的机理、特点 .....      | 205 |
| 5.2.2 电解液 .....             | 207 |
| 5.2.3 电解加工的基本设备 .....       | 207 |
| 5.3 超声加工 .....              | 208 |
| 5.3.1 超声加工的机理和特点 .....      | 208 |
| 5.3.2 超声加工的设备及构成 .....      | 209 |
| 5.3.3 超声加工的工艺参数及应用 .....    | 210 |
| 5.4 激光加工 .....              | 211 |
| 5.4.1 激光加工的机理、特点 .....      | 211 |
| 5.4.2 激光加工的基本设备 .....       | 212 |
| 5.4.3 激光加工的基本工艺规律 .....     | 213 |
| 5.4.4 激光加工的应用 .....         | 215 |
| 5.5 电子束离子束加工 .....          | 215 |
| 5.5.1 电子束加工 .....           | 215 |
| 5.5.2 离子束加工 .....           | 217 |
| 5.6 复合加工 .....              | 219 |
| 5.6.1 电解机械复合加工 .....        | 219 |
| 5.6.2 超声放电加工 .....          | 222 |
| 5.6.3 超声电解复合加工 .....        | 223 |
| 5.7 水射流切割 .....             | 224 |
| 5.7.1 水射流切割的基本原理和特点 .....   | 224 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 5.7.2      | 水射流切割设备 .....           | 225        |
| 5.7.3      | 水射流切割工艺参数和应用 .....      | 226        |
| 5.8        | 精密加工 .....              | 227        |
| 5.8.1      | 研磨 .....                | 227        |
| 5.8.2      | 珩磨 .....                | 228        |
| 5.8.3      | 抛光 .....                | 230        |
| 5.8.4      | 超精加工 .....              | 230        |
|            | 习题与思考题 .....            | 231        |
| <b>第6章</b> | <b>机械制造工艺过程设计</b> ..... | <b>233</b> |
| 6.1        | 机械加工工艺过程概述 .....        | 233        |
| 6.1.1      | 生产过程与工艺过程 .....         | 233        |
| 6.1.2      | 工艺过程的组成 .....           | 233        |
| 6.1.3      | 设计工艺过程的技术依据 .....       | 235        |
| 6.1.4      | 制订工艺规程的步骤 .....         | 237        |
| 6.2        | 零件的工艺性分析 .....          | 237        |
| 6.2.1      | 零件的加工工艺性分析 .....        | 237        |
| 6.2.2      | 零件的加工工艺分析 .....         | 240        |
| 6.3        | 典型表面的加工方案 .....         | 241        |
| 6.3.1      | 外圆表面加工 .....            | 241        |
| 6.3.2      | 内孔表面加工 .....            | 244        |
| 6.3.3      | 平面加工 .....              | 246        |
| 6.4        | 零件的机械加工工艺路线设计 .....     | 249        |
| 6.4.1      | 加工方法的选择 .....           | 249        |
| 6.4.2      | 基准的选择 .....             | 250        |
| 6.4.3      | 加工阶段的划分 .....           | 255        |
| 6.4.4      | 工序的集中与分散 .....          | 255        |
| 6.4.5      | 热处理和辅助工序的安排 .....       | 256        |
| 6.5        | 机床工序设计 .....            | 257        |
| 6.5.1      | 设备和工装的选择 .....          | 257        |
| 6.5.2      | 加工余量的确定 .....           | 258        |
| 6.5.3      | 工序尺寸的确定 .....           | 260        |
| 6.6        | 尺寸链 .....               | 262        |
| 6.6.1      | 尺寸链的基本概念 .....          | 262        |
| 6.6.2      | 工艺尺寸换算 .....            | 265        |
| 6.7        | 工件的安装与机床夹具基础 .....      | 269        |
| 6.7.1      | 工件的安装 .....             | 269        |
| 6.7.2      | 机床夹具概述 .....            | 269        |
| 6.7.3      | 工件的定位 .....             | 271        |
| 6.7.4      | 工件的夹紧 .....             | 276        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 6.8 加工工艺过程的生产率与技术经济分析 .....  | 282        |
| 6.8.1 时间定额 .....             | 282        |
| 6.8.2 提高劳动生产率的途径 .....       | 282        |
| 6.8.3 技术经济分析 .....           | 283        |
| 6.9 装配工艺基础 .....             | 285        |
| 6.9.1 装配精度和装配尺寸链 .....       | 285        |
| 6.9.2 保证装配精度的方法 .....        | 286        |
| 6.9.3 装配工艺规程设计 .....         | 291        |
| 6.10 典型零件的加工工艺分析 .....       | 293        |
| 6.10.1 轴的加工工艺分析 .....        | 293        |
| 6.10.2 箱体的加工工艺分析 .....       | 299        |
| 6.10.3 圆柱齿轮的加工工艺分析 .....     | 304        |
| 6.11 计算机辅助工艺过程设计(CAPP) ..... | 307        |
| 6.11.1 CAPP 概述 .....         | 307        |
| 6.11.2 CAPP 系统的类型 .....      | 307        |
| 习题与思考题 .....                 | 309        |
| <b>第7章 先进制造技术</b> .....      | <b>313</b> |
| 7.1 微细加工技术 .....             | 313        |
| 7.1.1 制造技术自身微细加工的极限 .....    | 313        |
| 7.1.2 微细加工出现的历史背景 .....      | 313        |
| 7.1.3 微细加工的概念及特点 .....       | 314        |
| 7.1.4 微细加工方法 .....           | 315        |
| 7.2 高速切削 .....               | 316        |
| 7.2.1 高速切削技术的历史背景 .....      | 316        |
| 7.2.2 高速切削技术的内涵和范围 .....     | 318        |
| 7.2.3 高速切削的优点 .....          | 319        |
| 7.2.4 高速切削技术的发展和展望 .....     | 320        |
| 7.3 CIMS 技术 .....            | 321        |
| 7.3.1 CIM 与 CIMS 的基本概念 ..... | 321        |
| 7.3.2 CIMS 的组成 .....         | 322        |
| 7.3.3 CIM/CIMS 的新发展 .....    | 323        |
| 7.3.4 我国 CIMS 的特点 .....      | 324        |
| 7.4 先进制造生产模式 .....           | 326        |
| 7.4.1 刚性自动化制造模式 .....        | 326        |
| 7.4.2 柔性自动化制造模式 .....        | 326        |
| 7.4.3 计算机集成制造模式 .....        | 326        |
| 7.4.4 敏捷制造模式 .....           | 327        |
| 7.4.5 智能制造模式 .....           | 328        |
| 7.4.6 绿色制造模式 .....           | 330        |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 7.5 虚拟制造与网络制造 ..... | 331 |
| 7.5.1 虚拟制造 .....    | 331 |
| 7.5.2 网络制造 .....    | 333 |
| 参考文献 .....          | 335 |

# 第 1 章 金属切削基本理论

金属切削刀具(tool)和工件(workpiece)按一定规律作相对运动,通过刀具上的切削刃切除工件上多余的(或预留的)金属,从而使工件的几何形状、尺寸精度及表面质量都合乎预定要求,这样的加工称为金属切削加工(metal cutting machining)。在金属切削加工过程中,起着主要作用的基本要素是:切削运动、切削用量和刀具。

## 1.1 切削运动

### 1. 主运动

主运动是使工件与刀具产生相对运动以进行切削的最基本的运动。金属切削机床中,主运动是唯一的,并且速度最高,消耗功率最大。如外圆车削时工件的回转运动(见图 1-1(a))和刨削时刀具的直线往复运动(见图 1-1(b))。

### 2. 进给运动

进给运动是使金属层不断投入切削,从而加工出完整表面所需的运动。如外圆车削时车刀的纵向连续直线运动(见图 1-1(a))和平面刨削时工件的间歇直线运动(见图 1-1(b))。

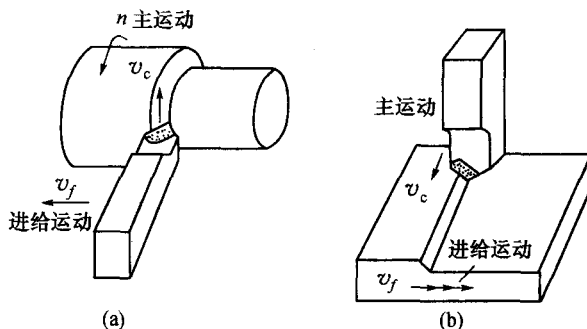


图 1-1 主运动与进给运动  
(a) 车外圆; (b) 刨平面。

## 1.2 工件上的加工表面

在切削加工过程中,工件上的金属层不断地被刀具切除而变成切屑,同时在工件上形成新表面。在新表面的形成过程中,工件上有三个不断变化着的表面,如图 1-2 所示。

(1) 待加工表面 工件上有待切除金属层的加工表面。

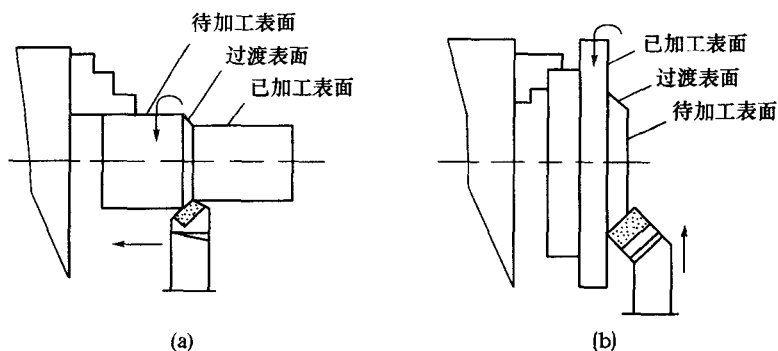


图 1-2 工件上的加工表面

(a) 车外圆; (b) 车端面。

(2) 已加工表面 工件上经刀具切除金属层后产生的新表面。

(3) 加工表面(过渡表面) 主切削刃正在切削的表面,它是待加工表面和已加工表面之间的表面。

### 1.3 切削用量三要素

切削速度  $v_c$ 、进给量  $f$ 、切削深度  $a_p$ ,称为切削用量三要素。

#### 1. 切削速度 $v_c$

在单位时间内,刀具(或工件)沿主运动方向的相对位移。

旋转运动(见图 1-2(a)):

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000 \times 60} \quad (\text{m/s}) \quad (1-1)$$

式中  $d$ ——刀具(或工件)的最大直径(mm);

$n$ ——刀具(或工件)的转速(r/min)。

式中的  $v_c$  为工件的切线方向的线速度,显然,在切削速度  $v_c$  相同的情况下,工件直径越大,则转速  $n$  越小。

往复运动(见图 1-2(b)):

$$v_c = \frac{2Ln}{1000 \times 60} \quad (\text{m/s}) \quad (1-2)$$

式中  $L$ ——牛头刨床滑枕或龙门刨床工作台工作行程(mm);

$n$ ——牛头刨床滑枕或龙门刨床工作台单位时间往复的次数(次/分)。

由于牛头刨床滑枕移动进刀慢、退刀快,式(1-2)中的  $v_c$  仅为滑枕移动的平均速度。

#### 2. 进给量 $f$

主运动在每行程(或每转)内,工件与刀具之间沿进给运动方向的相对位移。当主运动是旋转运动时,用工件每转的刀具位移量来表示,单位为 mm/r;当主运动是往复直线运动时,用每行程的位移量来表示,单位为毫米/行程。

对于多齿刀具(如钻头、铣刀等)还有每齿进给量  $f_z$ 。它是刀具每个刀齿每转相对于

工件在进给运动方向的位移量,单位为  $\text{mm}/z$  ( $z$ ——刀具的齿数)。刀具移动速度  $v_f$ 、进给量  $f$  及每点进给量  $f_z$  三者之间有如下关系

$$v_f = n \cdot f = f_z \cdot z \cdot n \quad (\text{mm}/\text{min}) \quad (1-3)$$

### 3. 切削深度(背吃刀量) $a_p$

工件已加工表面与待加工表面间的垂直距离,即在垂直于进给运动的方向上测量的主切削刃切入工件的深度,单位为  $\text{mm}$ 。 $a_p$  的大小直接影响主切削刃的工作长度,反映了切削负荷的大小。例如:外圆车削的切削深度

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (\text{mm})$$

式中  $d_w$ ——工件待加工表面的直径( $\text{mm}$ );

$d_m$ ——工件已加工表面的直径( $\text{mm}$ )。

而对于钻孔,切削深度  $a_p = d_m/2$  ( $\text{mm}$ )。

## 1.4 刀具的几何角度

### 1. 刀具切削部分结构要素

金属切削刀具的种类繁多、形状各异,但就其切削部分而言,都可视为外圆车刀切削部分的演变。因此可以用外圆车刀(见图 1-3)的切削部分(即刀头)为例来介绍刀具工作部分的一般术语,这些术语也适用于其他金属切削刀具。因此外圆车刀的切削部分是各种刀具切削部分的基本形态。

刀具切削部分结构要素可总结为:三面、两刃、一尖。三面即:

- (1) 前刀面 切屑流经的表面。
- (2) 主后刀面 与加工表面相对的表面。
- (3) 副后刀面 与已加工表面相对的表面。

两刃即:

- (1) 主切削刃 前刀面与主后刀面的交线(在切削中起主要作用)。
- (2) 副切削刃 前刀面与副后刀面的交线。

一尖即:刀尖,刀尖有尖形、圆形和倒棱形三种(见图 1-4)。

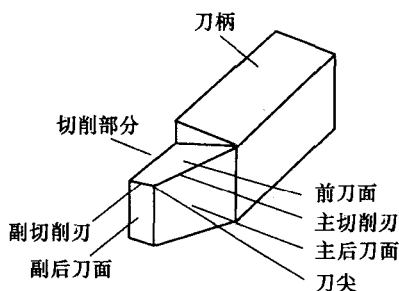


图 1-3 刀具切削部分结构要素

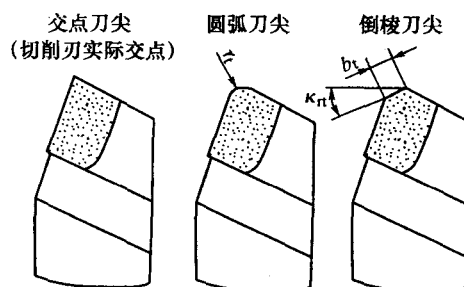


图 1-4 刀尖形状