



新形态创新型系列教材

机械制造技术

JIXIE ZHIZAO JISHU

主 编 李 力 彭 进 陈 振

副主编 李俊颖 王 磊 孙照龙

 电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械制造技术 / 李力, 彭进, 陈振主编. -- 成都:
成都电子科大出版社, 2026. 1. -- ISBN 978-7-5770
-1190-5

I. TH16

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024WQ6174 号

机械制造技术

JIXIE ZHIZAO JISHU

李 力 彭 进 陈 振 主 编

策划编辑 唐祖琴

责任编辑 陈姝芳

责任校对 刘亚莉

责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 廊坊市颖新包装装潢有限公司

成品尺寸 210 mm × 285 mm

印 张 15

字 数 446 千字

版 次 2026 年 1 月第 1 版

印 次 2026 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-1190-5

定 价 59.80 元

版权所有，侵权必究

前言

PREFACE

机械制造技术是机械设计制造及其自动化专业的核心课程之一，旨在培养学生掌握机械制造的基本理论、工艺方法以及解决实际工程问题的能力。随着制造业的快速发展和技术的不断革新，机械制造领域对应用型人才的需求日益增加。为适应新时代对机械专业人才培养的要求，本书在总结作者多年教学经验、吸收行业最新技术成果的基础上，结合其他院校宝贵建议的基础上编写而成。

本书以“夯实基础、注重应用、强化实践、紧跟前沿”为编写理念，内容涵盖机械制造技术的基本知识、典型零件工艺设计、机械装配工艺基础等。通过引入企业真实案例和工程实例，将理论知识与实际应用紧密结合，帮助学生更好地理解机械制造技术的核心概念和方法，培养其分析和解决实际问题的能力。

本书以企业真实零件为例进行讲解，缩短学校与企业的距离；通过设置综合应用实例，贯通课堂知识与工程实践；采用工程实例照片增强学生的感性认识，并加深其对理论知识的理解；内容深入浅出，贴合学生的基本知识水平和专业能力培养要求。

此外，本书融合了新时代思政教育，介绍了我国机械制造领域的科研创新和绿色发展，从而提升学生的政治素养，激发学生的民族自豪感与使命感，培养更多服务于国家建设的能工巧匠。

本书既可作为各类院校机械类、非机械类专业的机械工程训练教材，也可供相关工程技术人员参考。

在本书的编写过程中，编者参考了国内外相关文献和资料，在此向各位专家、学者致以诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正，以便再版时进一步完善。

目 录

CONTENTS

| | | |
|------------|---------------------|-------|
| 第一章 | 机械制造技术基本知识 | / 001 |
| 第一节 | 制造与制造技术 | / 002 |
| 第二节 | 机械制造过程概述 | / 006 |
| 第三节 | 制定机械加工工艺规程的步骤和方法 | / 011 |
| 第四节 | 数控加工工艺规程文件 | / 015 |
| 第二章 | 万向节滑动叉工序设计分析 | / 019 |
| 第一节 | 万向节滑动叉概括 | / 020 |
| 第二节 | 工序 10: 钻中心孔 | / 022 |
| 第三节 | 工序 20: 粗车小头外圆 | / 034 |
| 第四节 | 工序 30: 钻花键底孔 | / 070 |
| 第五节 | 工序 40: 调质处理 | / 087 |
| 第六节 | 工序 50: 镗花键底孔 | / 099 |
| 第七节 | 工序 60: 车小头端面、倒内角孔 | / 108 |
| 第八节 | 工序 70: 车大头台阶孔、倒角 | / 123 |
| 第九节 | 工序 80: 拉花键 | / 131 |
| 第十节 | 工序 90: 钻两耳孔 | / 151 |
| 第十一节 | 工序 100: 精车外圆、倒角、切槽 | / 157 |
| 第十二节 | 工序 110: 半精镗、精镗两耳孔 | / 171 |



| | | |
|-------------|---------------------------|--------------|
| 第十三节 | 工序 120: 车两耳外侧面、车卡簧槽、扩两耳外侧 | / 182 |
| 第十四节 | 工序 130: 钻油杯孔、攻丝 | / 186 |
| 第十五节 | 工序 140: 去毛刺 | / 193 |
| 第十六节 | 工序 150: 压堵盖 | / 200 |
| 第三章 | 其他典型结构工艺设计 | / 207 |
| 第一节 | 盘、套类零件工艺设计 | / 208 |
| 第二节 | 箱体零件加工工艺 | / 216 |
| 第四章 | 机械装配工艺基础 | / 225 |
| 第一节 | 装配基础 | / 226 |
| 第二节 | 保证装配精度的工艺方法 | / 229 |
| 参考文献 | | / 234 |

第二章

万向节滑动叉工序设计分析

学习目标

通过本章学习，学生可对万向节滑动叉工序有一个整体概念，学会设计万向节滑动叉工艺过程及制定各工序卡片。

学习重难点

万向节滑动叉工序加工工艺过程卡片及各工序卡片的制定。

思政目标

培养科学精神、创新精神和实践能力；培养质量意识和成本意识，提升责任意识和职业道德素养。



第一节

万向节滑动叉概括

汽车底盘传动轴上的万向节滑动叉（图 2-1）位于传动轴的端部。它的主要作用一是传递扭矩，使汽车获得前进的动力；二是当汽车后桥钢板弹簧处在不同的状态时，由本零件调整传动轴的长短及其位置。零件的两个叉头部位上有两个 $\phi 39^{+0.027}_{-0.010}$ mm 的孔，用以安装滚针轴承并与十字轴相连，起万向联轴节的作用。零件 $\phi 65$ mm 外圆，内为 $\phi 50$ mm 花键孔与传动轴端部的花键轴相配合，用于传递动力。汽车底盘传动轴上的万向节滑动叉工艺过程卡片见表 2-1 所列。

根据产品质量要求和企业实际生产条件，制定其加工工艺过程卡片及各工序卡片。表 2-2 所列为汽车底盘传动轴上的万向节滑动叉的刀具卡片。

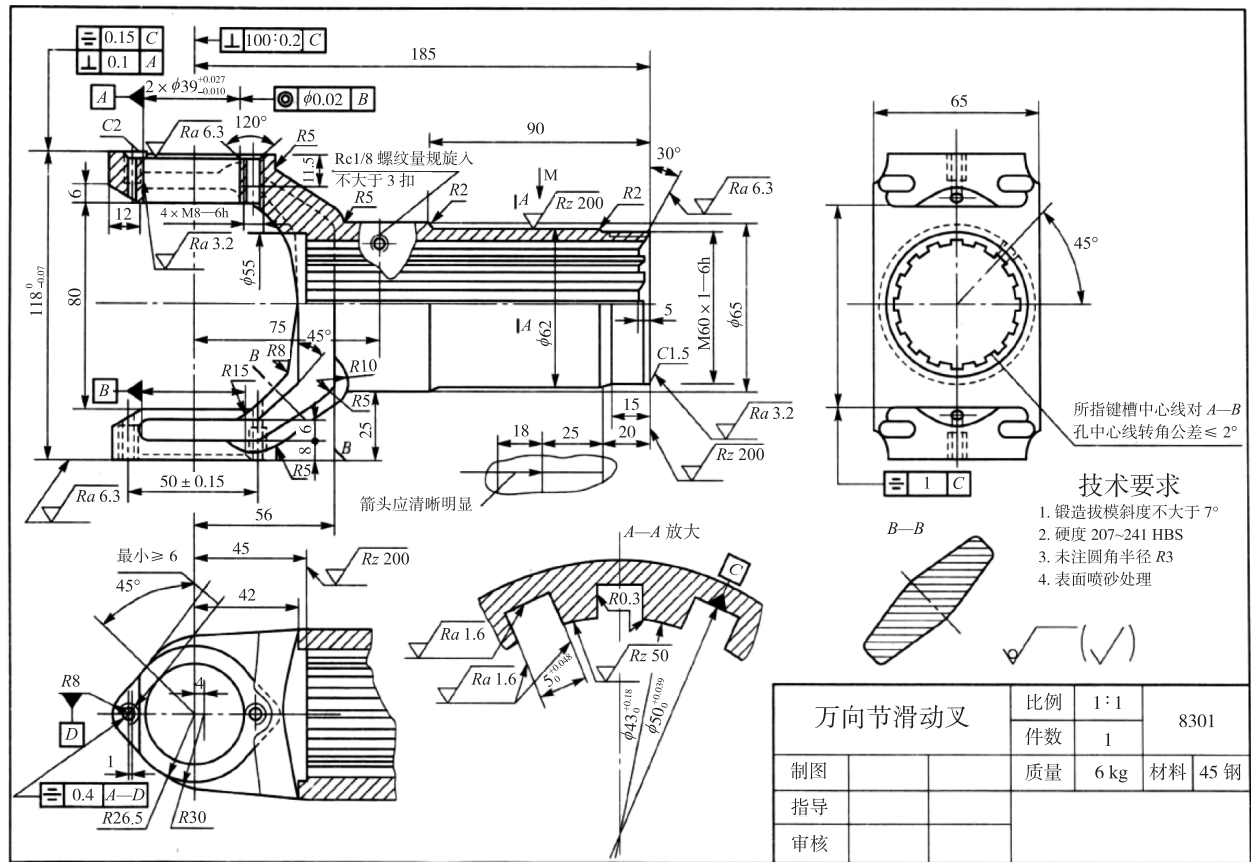


图 2-1 汽车底盘传动轴上的万向节滑动叉零件图



表 2-2 汽车底盘传动轴上的万向节滑动叉的刀具卡片

| 产品名称或代号 | | 万向节 | 零件名称 | 滑动叉 | 零件图号 | 2201021E0 |
|---------|-----|----------------------|------|--|------|------------------------------|
| 序号 | 刀具号 | 刀具规格名称 | 数量 | 加工表面 | | 备注 |
| 1 | | A6.3 中心钻 | 1 | 中心孔 | | 工序 10 |
| 2 | | YT15 车刀 | 1 | 粗车 $\phi 53$ mm 外圆, 车小头端面、倒内孔角, 车大头台阶孔、倒角, 车两耳外侧 | | 工序 20、工序 60、 工序 70、工序 120 |
| 3 | | $\phi 33$ mm 麻花钻头 | 1 | 钻花键底孔 | | 工序 30 |
| 4 | | BT40 镗刀 | 1 | 镗花键底孔 | | 工序 50 |
| 5 | | M35 成型拉刀 | 1 | 花键 | | 工序 80 |
| 6 | | $\phi 30$ mm 麻花钻头 | 1 | 钻耳孔 $2-\phi 30_{0}^{+0.3}$ mm | | 工序 90 |
| 7 | | 螺钉紧压式可换 刀片外圆车刀 | 1 | 精车外圆、倒角、切槽 | | 工序 100 |
| 8 | | BT40 复合镗刀 | 1 | 半精镗、精镗两耳孔 | | 工序 110 |
| 9 | | 切槽刀 | 1 | 车卡簧槽、扩两耳外侧 | | 工序 120 |
| 10 | | $\phi 5$ mm 麻花钻头 | 1 | 钻油杯孔 | | 工序 130 |
| 11 | | $\phi 7$ mm 麻花钻头 | 1 | 倒油杯孔角 | | 工序 130 |
| 12 | | M6 丝锥 | 1 | 油杯孔攻丝 | | 工序 130 |
| 编制 | | | 审核 | | 批准 | 共 页 |
| | | | | | | 第 页 |

第二节

工序 10: 钻中心孔

工序 10 (钻中心孔) 为钳工加工, 在热工部进行, 采用 Z4012B 台钻, 用专用钻中心孔夹具进行加工。中心钻规格为 A6.3, 台钻主轴转速为 630 r/min, 进给量为 0.05 mm/r, 切削深度为 3.15 mm, 采用专用的中心孔检测工具进行检测, 见表 2-3 所列。



表 2-3 工序 10: 钻中心孔加工工序卡片

| × × 传动轴有限公司 | | 机械加工工序卡片 | | | 零件图号 | 版本号 | A | | | | |
|--|---|--|---------------------|------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------|--------------|------|-----------|------|
| | | 工序号 | 10 | 零件名称 | 2201021E0 | 共 15 页 | 第 2 页 | | | | |
| | | 工序名称 | 钳工 | 产品名称 | 滑动叉 | | | | | | |
| | | 材料牌号 | 45 GB / T 699—2015 | | | | | | | | |
| | | 毛坯种类 | 锻件 | | | | | | | | |
| | | 设备名称 | 台钻 | | | | | | | | |
| | | 设备型号 | Z40128 | | | | | | | | |
| | | 夹具名称 | 钻中心孔夹具 | | | | | | | | |
| | | 夹具编号 | | | | | | | | | |
| 检验项目 | | 中心孔 | | | | | | | | | |
| 精度 | | A6.3/φ13.2 | | | | | | | | | |
| 测量工具 | | 中心孔检具 | | | | | | | | | |
| 首检 | | 频次 手段 | ° △ | | | | | | | | |
| 自检 | | 频次 手段 | 2 件 / 次 2/D ○ | | | | | | | | |
| 巡检 | | 频次 手段 | 2 件 / 次 2/D △ | | | | | | | | |
| 特性分类 | | B | | | | | | | | | |
| 特性符号 | | | | | | | | | | | |
| 反应计划 | | 隔离、返工 | | | | | | | | | |
| 1. 检验频次 全: 全数检验 m/N: N 检 n 件 N/D: 每班检 N 次 | | 2. 控制手段 ○: 不记录 △: 检验记录 □: 控制图 X-R | | 3. 特性分类 A: 关键 B: 重要 C: 一般 | | 4. 首件检验 %: 1. 每班开始工作 2. 更换产品时 | | | | | |
| 工步号 | 1 | 工步内容 | 钻中心孔 | 切削工具 | A6.3 中心钻 | 主轴转速 / (r/min) | 630 | 进给量 / (mm/f) | 0.05 | 切削深度 / mm | 3.15 |
| 设计 | | 审核 | | 会签 | | 批准 | | 日期 | | | |

大多数的机械零件上都存在内孔表面。根据孔与其他零件的相对连接关系的不同，孔有配合孔与非配合孔之分；根据孔的几何特征，孔也有通孔、盲孔、阶梯孔、锥孔等区别；按其形状，孔还有圆孔和非圆孔等。

一、钻削加工

在实体工件上加工出孔，采用钻削加工；对已有孔进行扩大尺寸并提高精度及光度，采用铰削、镗削加工；对孔进行精加工，生产中主要采用磨削；而进一步提高孔的表面质量，还需采用精细镗、研磨、珩磨、滚压等光整加工方法。

在钻床上以钻头的旋转作为主运动，钻头向工件的轴向移动作为进给运动，在实体工件上加工出孔为钻削。其中，麻花钻最为常用。由于麻花钻存在结构问题，采用麻花钻钻孔时的轴向力很大，定心能力较差，孔易引偏；加工中摩擦严重，加之冷却润滑不便，表面较为粗糙。因此，麻花钻钻孔的精度不高，一般为 IT12~IT13，表面粗糙度 R_a 为 6.3~12.5 μm ，生产效率也不高。因此，钻孔主要用于 $\phi 80\text{ mm}$ 以下孔径的粗加工，如加工精度、粗糙度要求不高的螺钉孔、油孔，或者对精度、粗糙度要求较高的孔做预加工。生产中为提高孔的加工精度、生产效率和降低生产成本，广泛使用钻模、多轴钻或组合机床进行孔的加工。

深孔的加工难度较大，主要表现在刀具刚性差、导向难、排屑难、冷却润滑难等方面，有效地解决以上加工问题，是保证深孔加工质量的关键。在一般情况下，对于深径比为 5~20 的普通深孔，在车床或钻床上用加长麻花钻加工；对于深径比达 20 以上的深孔，在深孔钻床上用深孔钻加工。当孔径较大、孔加工要求较高时，可在深孔镗床上加工。

当工件上已有预孔（如铸孔、锻孔或已加工孔）时，可采用扩孔钻进行孔径扩大的加工，称扩孔。扩孔亦属钻削范围，但精度、质量在钻孔的基础上均有所提高，一般扩孔精度达 IT10~IT12，表面粗糙度 R_a 为 3.2~6.3 μm ，故扩孔除可用于较高精度的孔的预加工外，还可使一些要求不高的孔达到加工要求。加工孔径一般不超过 100 mm。

二、钻削加工设备

钻削除可以在车床、镗床、钻床、组合机床和加工中心进行外，在多种情况下，尤其当生产批量较大时，在钻床上进行。

（一）钻床

钻床是进行孔加工的主要机床之一。钻床的主运动是主轴的旋转运动，主轴向工件的移动为进给运动，加工中的工件不动。钻床的种类较多，依其钻轴位置分为立式与卧式两种，依其工作钻轴数目分为单轴式及多轴式两类。在一般工厂，用以钻孔的钻床多为单轴立式，主要有立式钻床、台式钻床、摇臂钻床、特种钻床等。此外，常用钻床还有深孔钻床、中心孔钻床、数控钻床等。

1. 立式钻床

立式钻床如图 2-2 所示，钻孔直径在 25 mm 以下时使用，亦可用于铰孔、攻螺纹及镗孔。立式钻床包括头座、机柱、床台及底座，其运动大致分为速度传动机构及进刀传动机构。

速度传动机构：钻床动力由头座内的齿轮系或皮带轮组改变其心轴速度，钻头装于心轴的轴孔内，随心轴转动。

进刀传动机构：钻头转动一周时，钻头进入工件内称为进刀，进刀方式除可由手工操作外，也可由自动进刀机构获得自动进刀，其进刀深度可由标示牌上的刻度获得。

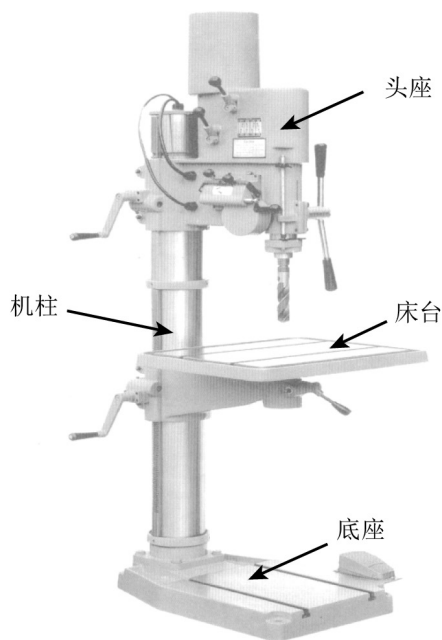


图 2-2 立式钻床

2. 台式钻床

台式钻床为小型工件制作及学生实习所用的一种钻床，常用于小孔（ $\phi 13\text{ mm}$ 以下）的钻孔，装置于工作台上使用，包括头座、机柱、床台、底座四部分，如图 2-3 所示。台式钻床的心轴依靠马达与心轴之间的 V 形塔轮皮带的交换面而转动变化，进刀为手工操作，进刀深度由两个调整螺帽控制，进刀接受的阻力极易被察觉，操作灵敏，故亦称“灵敏钻床”。

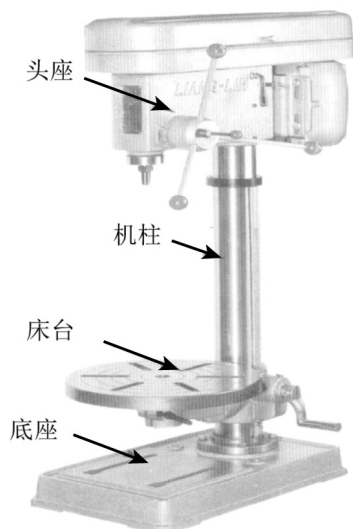


图 2-3 台式钻床

3. 摇臂钻床

图 2-4 为摇臂钻床的一种，用于庞大工件上的圆孔钻削。其应用范围颇为广泛，使用方便，心轴头座系沿旋臂左右移动，旋臂可沿机柱上下、水平旋转至任何位置，钻削工具可以迅速在相当大的面积范围内定位，因此，在进行大型工件钻孔时常有代替立式镗床的趋势。摇臂钻床依旋臂的长度来区分。

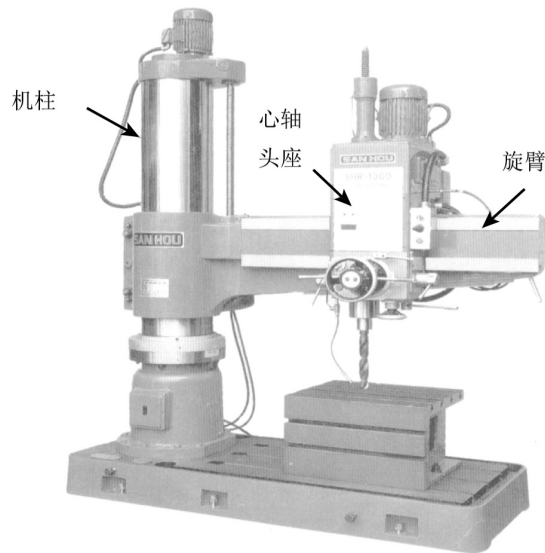


图 2-4 摇臂钻床

4. 特种钻床

因适合生产需求而特别设计的钻床称为特种钻床。特种钻床通常指的是用于特殊加工需求或具有特殊功能的钻床，如深孔钻床（图 2-5）、数控钻床（图 2-6）等。

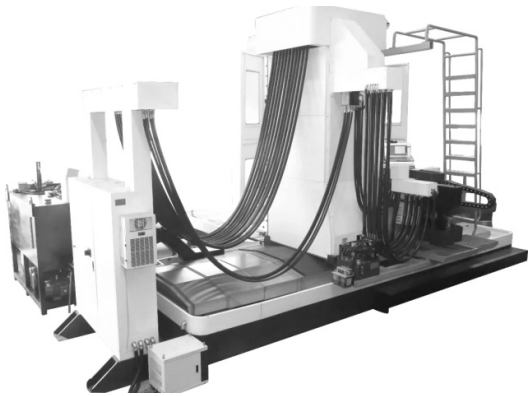


图 2-5 深孔钻床



图 2-6 数控钻床

(二) 钻削刀具

孔加工刀具的种类很多，从单刃到多刃，从适应粗加工到适应精加工，从加工通孔到加工盲孔，从加工小孔到加工大孔，从加工浅孔到加工深孔，各具特色，但多数为定尺寸刀具。

孔加工刀具依构造分类，可分为整体式钻头（钻顶、钻身、钻柄由同一材料整体制造而成）和端焊式钻头（钻顶部位由碳化物焊接而成）；依钻柄分类，可分为直柄钻头（钻头直径在 13.0 mm 以下，皆采用直柄）和锥柄钻头（钻头柄为锥度状，一般其锥度均采用莫氏锥度）；依用途分类，可分为麻花钻、群钻、硬质合金钻、可转位浅孔钻、深孔钻、扩孔钻、铰钻、中心钻。下面重点介绍按用途分类的几种孔加工工具。

1. 麻花钻

麻花钻是孔加工刀具中应用最广泛的刀具。麻花钻由柄部、颈部和工作部分组成。麻花钻一般用



高速钢 (W18Cr4V 或 W9Cr4V2) 制成, 淬火后的硬度为 62~68 HRC。麻花钻的工作部分由切削部分和导向部分组成。

麻花钻是通过相对固定轴线的旋转切削以钻削工件圆孔的工具。麻花钻因容屑槽呈螺旋状, 形似麻花而得名。麻花钻的螺旋槽有 2 槽、3 槽或更多槽, 但以 2 槽最为常见。麻花钻可被夹持在手动、电动的麻花钻手持式钻孔工具, 或者在钻床、铣床、车床乃至加工中心上使用。钻头材料一般为高速工具钢或硬质合金。

(1) 标准麻花钻的切削角度如图 2-7 所示。

①基面: 麻花钻主切削刃上任一点的基面是通过该点且垂直于该点切削速度方向的平面。

②切削平面: 麻花钻主切削刃上任一点的切削平面, 是由该点的切削速度方向与该点切削刃的切线所构成的平面。

③正交平面: 通过主切削刃上任一点并垂直于基面和切削平面的平面。

(2) 麻花钻钻孔加工的特点。

①麻花钻的直径受孔径的限制, 螺旋槽导致钻芯更细、钻头刚度低; 仅有两条棱带导向, 孔的轴线容易偏斜; 横刃导致定心困难, 轴向抗力增大, 钻头容易摆动。因此, 钻出孔的形位误差较大。

②麻花钻的前刀面和后刀面都是曲面, 沿主切削刃各点的前角、后角各不相同, 横刃的前角达 -55° , 切削条件很差; 切削速度沿切削刃的分配不合理, 强度最低的刀尖的切削速度最大, 所以磨损严重。因此, 使用麻花钻加工的孔精度低。

③钻头主切削刃全刃参加切削, 刃上各点的切削速度又不相等, 容易形成螺旋形切屑, 排屑困难。因此, 切屑与孔壁挤压摩擦, 常常划伤孔壁, 加工后的表面粗糙度很高。

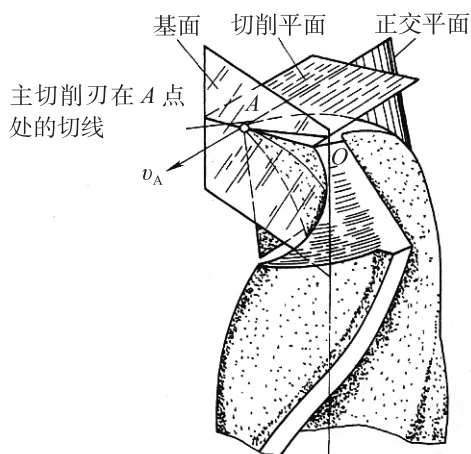


图 2-7 标准麻花钻的切削角度

(3) 标准麻花钻的缺点。

①标准麻花钻主切削刃上各点的前角数值内外相差太大。钻头外缘处主切削刃的前角约为 $+30^\circ$; 而接近钻心处, 前角约为 -30° , 近钻心处的前角过小, 造成切屑变形大, 切削阻力大; 而近外缘处的前角过大, 在加工硬材料时, 切削刃强度不足。

②横刃的前角是很大的负值, 为 $-60^\circ \sim -54^\circ$, 从而产生很大的轴向力, 钻头易抖动, 导致不易定心。

③与其他类型的切削刀具相比, 标准麻花钻的主切削刃很长, 不利于分屑与断屑。

④刃带处副切削刃的副后角为零值, 造成副后刀面与孔壁间的摩擦加大, 切削温度上升, 钻头外缘转角处的磨损较大, 已加工表面的粗糙度恶化。

以上缺陷常使麻花钻磨损快, 严重影响钻孔效率与已加工表面质量的提高。



(4) 标准麻花钻的修磨。

为改善标准麻花钻的切削性能，提高钻削效率和延长刀具寿命，通常要对其切削部分进行修磨。

①四句口诀。这里用四句口诀来指导刃磨过程，效果较好。

口诀一：刃口摆平轮面靠。这是钻头与砂轮相对位置的第一步。这里的“刃口”是主切削刃，“摆平”是指被刃磨部分的主切削刃处于水平位置。“轮面”是指砂轮的表面。“靠”是慢慢靠拢的意思，此时钻头还不能接触砂轮。

口诀二：钻轴斜放出锋角。这里是指钻头轴心线与砂轮表面之间的位置关系。“锋角”即顶角 $118^\circ \pm 2^\circ$ 的一半，约为 60° 。这个位置很重要，直接影响钻头顶角大小、主切削刃形状和横刃斜角。

口诀一和口诀二都是指钻头刃磨前的相对位置，二者要统筹兼顾，不要为了摆平刃口而忽略摆好斜角，或为了摆好斜放轴线而忽略摆平刃口，在实际操作中往往会出现这些错误。此时，钻头在位置正确的情况下准备接触砂轮。

口诀三：由刃向背磨后面。这句口诀是指从钻头的刃口开始沿着整个后刀面缓慢刃磨，这样便于散热和刃磨。在稳定巩固口诀一、二的基础上，此时钻头可轻轻接触砂轮，进行少量的刃磨，刃磨时要观察火花的均匀性，要及时调整压力大小，并注意钻头的冷却。当冷却后重新开始刃磨时，要继续摆好口诀一、二的对应位置，这一点往往在初学时不易掌握，常常会不由自主地改变其位置的正确性。

口诀四：上下摆动尾别翘。这个动作在钻头刃磨过程中也很重要，往往有人在刃磨时把“上下摆动”变成了“上下转动”，使钻头的另一主刀刃被破坏。同时，钻头的尾部不能高翘于砂轮水平中心线以上，否则会使刃口磨钝，无法切削。

②刃磨方法。两手的握法：右手握住钻头的中部，左手握住钻头的尾部。钻头主切削刃与砂轮外轮缘相切摆平，钻头的轴心线与砂轮圆柱母线在平面内的夹角等于 59° ，刃磨部分的主切削刃处于水平位置，如图 2-8 所示。

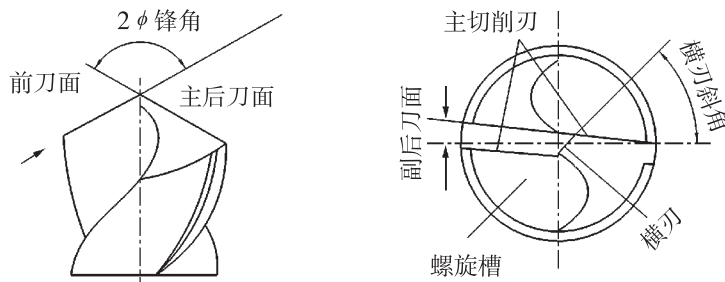


图 2-8 麻花钻切削部分

使主切削刃处于略高于砂轮水平中心平面处（比水平中心高 $5\sim 10\text{ mm}$ ），先接触砂轮，如图 2-9 所示。右手缓慢地使钻头绕自己的轴心由下向上转动（约为 35° ），同时施加适当的刃磨压力，这样可磨到整个后面，左手配合做缓慢同步下压运动，下压的速度及幅度随要求的后角大小而变。

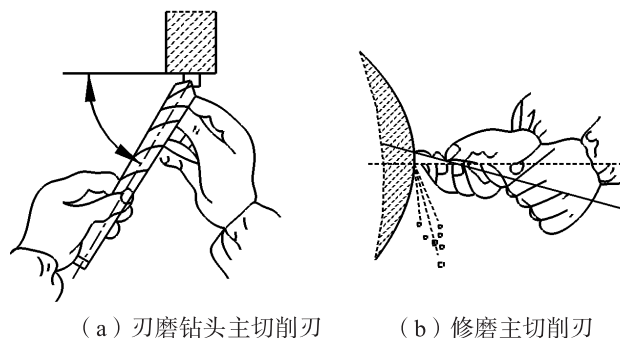


图 2-9 麻花钻刃磨

为保证钻头中心处磨出较大的后角，还应做适当的右移运动。刃磨时，两手动作的配合要协调自然，不断反复，两后面经常轮换，直至达到刃磨要求。对于钻头的冷却，钻头刃磨压力不宜过大，并要求经常将其浸入水中冷却，以防止因过退火而降低硬度。

③修磨后的检查。检查方法有两种：一种是用角度样板检验，另一种是用目测检验。检验项目有 6 个，即锋角、切削刃、偏角、刃斜角、刃面、钻头角度的检查。

④刃磨时应注意的问题。刃磨前应注意选择平整无裂缝的氧化铝（白色）砂轮，长期未使用的砂轮机应做空转检验；要求操作人员在刃磨时必须戴防护眼镜；刃磨时严禁正对砂轮；刃磨时不能用力过猛；平稳刃磨，均匀磨换砂轮，注意操作安全；对于麻花钻的刃磨，操作人员要经过较长期的实践，才可较好地掌握刃磨的技巧和技能。

2. 群钻

群钻是针对标准麻花钻工作中存在的不足，总结长期生产经验而采取多种修磨措施形成的钻头结构，如图 2-10 所示。群钻的主要结构特征：将两主切削刃接近钻心处磨成圆弧内刃，以提高该处刃刃的锋利性；将横刃磨窄、磨尖，改善其切削性能并提高定心性，同时降低横刃尖高，以保证刀尖具备足够的强度和刚度；在外刃上开出分屑槽，以利于排屑；磨窄刃带以减少刀具与孔壁的摩擦。由此，形成了“三尖七刃锐当先，月牙弧槽分两边，一侧外刃再开槽，横刃磨低窄又尖”的格局。与标准麻花钻相比，采用群钻加工孔可明显降低轴向力，提高定心能力，提高钻削加工精度、表面质量及钻头的耐用度。目前，群钻因工作材料、加工孔径而异，实现了标准化、系列化。

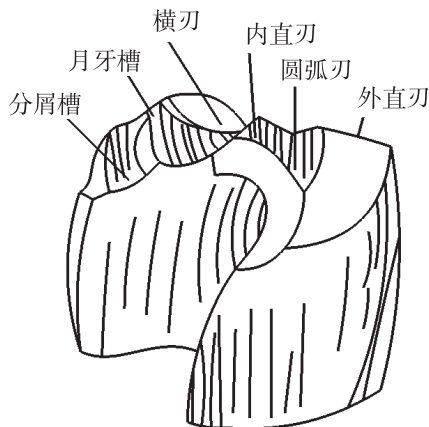


图 2-10 群钻

3. 硬质合金钻

加工硬脆材料如合金铸铁、玻璃、淬硬钢等难切削材料时，可使用硬质合金钻头。硬质合金钻头的直径较小时，可做成整体结构；直径较大时（大于 6 mm），可做成镶嵌结构，如图 2-11 所示。

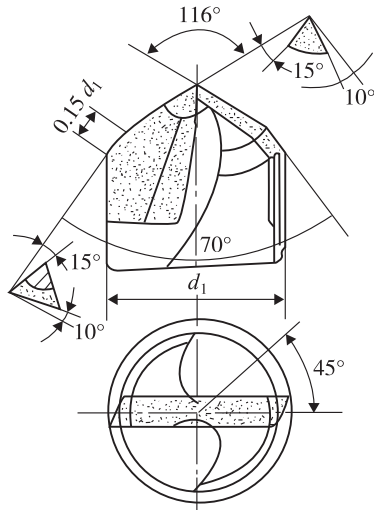


图 2-11 镶片硬质合金钻头

4. 可转位浅孔钻

可转位浅孔钻是 20 世纪 70 年代末出现的钻头，如图 2-12 所示。它适合在车床上加工直径为 20~60 mm、长径比小于 3 的中等直径浅孔。对于直径在 60 mm 以上的浅孔，可用硬质合金可转位式套料浅孔钻加工。可转位浅孔钻还可用于镗孔或车端面，并可实现高速切削。



图 2-12 可转位浅孔钻

5. 深孔钻

针对深孔加工中的困难，深孔钻只有从结构上解决好定心、导向、排屑、冷却及刀具刚度问题，才能适应深孔加工的要求。深孔钻按排屑方式分为外排屑和内排屑两类：外排屑的深孔钻有枪钻、深孔扁钻和深孔麻花钻等；内排屑的深孔钻因所用的加工系统不同，分为 BTA 深孔钻、喷射钻和 DF 深孔钻。

(1) 枪钻。枪钻只有一个切削部分，最早用于加工枪管，如图 2-13 所示。钻削时，切削液从钻杆中间进入，经钻头头部的小孔喷射到切削区，然后带着切屑从钻头的 V 形沟槽中排出。枪钻适用于加工孔径为 2~20 mm、孔深与孔径之比大于 100 的深孔。枪钻常用高速钢或硬质合金制造。

(2) BTA 深孔钻如图 2-14 所示。切削液从钻杆与孔壁的间隙处送入，靠切削液的压力将切屑从钻杆的内孔中排出。BTA 深孔钻适用于钻削孔径在 6 mm 以上、孔深与孔径之比小于 100 的深孔，其生产效率比枪钻高 3 倍以上。

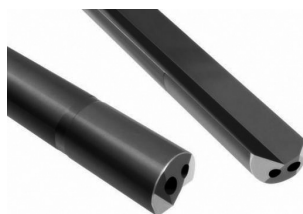


图 2-13 枪钻



图 2-14 BTA 深孔钻



(3) 喷射钻是一种多刃内排屑深孔钻，有内、外两层钻管，大部分切削液从内、外钻管的间隙中进入切削区，然后连同切屑进入内管，如图 2-15 所示；另一小部分切削液则由内管尾端的月牙形孔进入内管，产生喷射效应，形成低压区，帮助抽吸切屑。喷射钻不要求严格的切削液密封装置，适用于钻削直径在 18 mm 以上、孔深和孔径比小于 100 的深孔。

(4) DF 深孔钻。这种钻头融合了 BTA 深孔钻和喷射钻的优点，采用单管，排屑靠推压和抽吸的双重作用，提高了排屑能力，可钻削孔径在 8 mm 以上的深孔，如图 2-16 所示。



图 2-15 喷射钻



图 2-16 DF 深孔钻

6. 扩孔钻

扩孔钻一般用于孔的半精加工或终加工，用于铰或磨前的预加工或毛坯孔的扩大，有三四个刃带，无横刃，前角和后角沿切削刃的变化小，加工时的导向效果好，轴向抗力小，切削条件优于钻孔。常见的扩孔钻如图 2-17 所示。



(a) 可转位扩孔钻



(b) 锥柄高速钢扩孔钻



(c) 镗孔去毛刺扩孔钻



(d) 扩孔钻套



(e) 可调扩孔钻



(f) 开口器

图 2-17 常见的扩孔钻

7. 镗钻

镗钻是一种用以镗锥形埋头孔的钻，也称“埋头钻”“倒角刀”，如图 2-18 所示。镗钻主要用于对孔的端面进行平面、柱面、锥面及其他型面加工。在已加工的孔上加工圆柱形沉头孔、锥形沉头孔和端面凸台时，都使用镗钻。

镗钻主要分为柱形镗钻、锥形镗钻、端面镗钻四种。柱形镗钻起主要切削作用的是端面刀刃，螺旋槽的斜角就是它的前角。镗钻前端有导柱，导柱直径与工件已有孔为紧密的间隙配合，以保证良好的定心和导向。这种导柱既可拆，也可把导柱和镗钻做成一体。锥形镗钻的锥角按工件锥形埋头孔的要求不同，有 60°、75°、82°、90°、100°、110°、120°等。其中，90°的锥角用得最多。端面镗钻可以保证孔的端面与孔中心线的垂直度。当已加工的孔径较小时，为了使刀杆保持一定强度，可使刀杆头部的一段直径与已加工孔为间隙配合，以保证良好的导向作用。镗钻是标准工具，由专业厂生产，可根据镗孔的种类选用，也可以用麻花钻改磨成镗钻。



图 2-18 总钻

8. 中心钻

中心钻用于孔加工的预制精确定位，引导麻花钻进行孔加工，减少误差。中心钻适用于轴类等零件端面上的中心孔加工。中心孔是轴类工件在顶尖上安装的定位基面。中心孔的 60° 锥孔与顶尖上的 60° 锥面相配合；里端的小圆孔，为保证锥孔与顶尖锥面配合贴切，可存储少量润滑油（黄油）。

(1) 中心钻的类型。

中心钻主要有四类：不带护锥的 A 型中心钻适用于不需要多次装夹或不保留中心孔的工件，如图 2-19 (a) 所示；B 型中心钻带 120° 护锥角，适用于多次装夹的工件，如图 2-19 (b) 所示；C 型中心钻可以减少中心孔与顶尖的接触面积，减少摩擦，提高定位精度，如图 2-19 (c) 所示；钻孔定中心的 R 型中心钻的尾部一般都带莫氏锥度，如图 2-19 (d) 所示。

加工直径 d 为 $2 \sim 10 \text{ mm}$ 的中心孔时，通常采用不带护锥的中心钻（A 型）；对于工序较多、精度要求较高的工件，为了避免 60° 定心锥被损坏，一般采用带护锥的中心钻（B 型）。

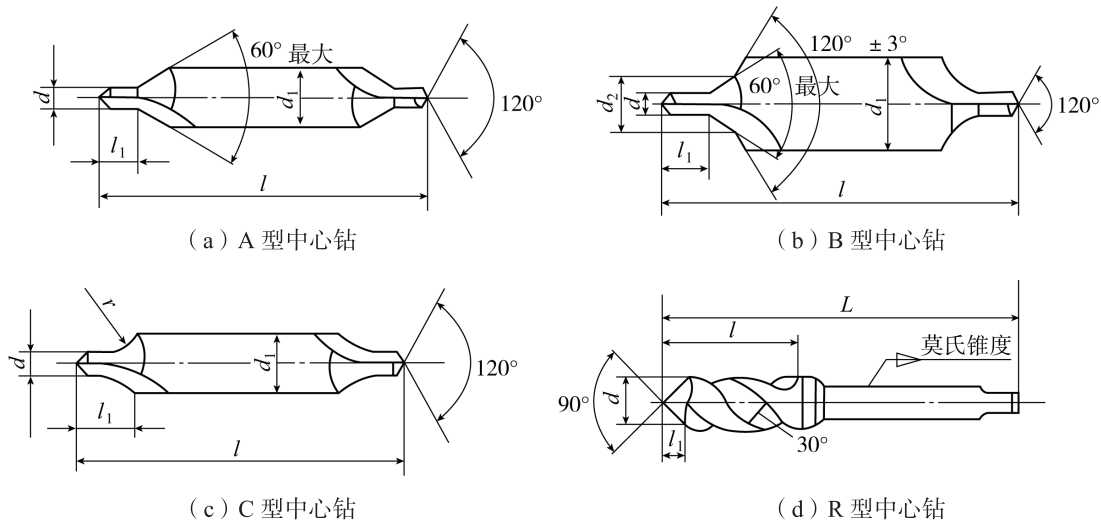


图 2-19 中心钻的四种类型

中心钻应符合国家标准 GB/T 6078—2016《中心钻》。

(2) 中心钻的装夹。

首先，根据加工需要选择合适的中心钻，根据机床尾座套筒锥度选择带莫氏锥柄的钻夹；其次，用钻夹头钥匙逆向旋转夹头外套，三爪张开，装中心钻于三爪之间，伸出长度为中心钻长度的 $1/3$ ，用钻夹头钥匙顺时针方向转动钻夹头外套，三爪夹紧中心钻，如图 2-20 所示；最后，擦净钻夹头柄部和尾座锥孔，沿尾座套筒轴线方向将钻夹头锥柄部分稍用力插入尾座套筒锥孔中（注意扁尾方向）。

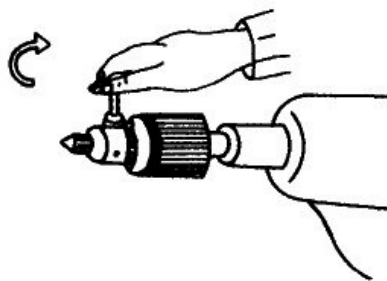


图 2-20 装夹中心钻

(3) 使用中心钻时应注意的问题。

用户必须根据被加工零件的孔型及直孔尺寸合理选用中心钻的型号。被加工工件的硬度在 170~200 HB 之间最宜。刀具在使用前, 必须洗净防锈油脂, 以免切屑粘在刀刃上影响切削性能。被加工工件表面应平直, 不得有砂眼或硬质点, 以免刀具受损伤。钻孔前的中心钻应达到所需的位置精度。根据加工对象选择不同的切削液, 冷却应充分。在加工时出现异常情况应立即停止, 查清原因后方可加工; 注意刃口的磨损情况并及时修复; 刀具使用后要清洗上油, 并妥善保管。



实训练习

中心钻的形状和作用及综合练习

一、组织教学

- (1) 集合, 点名, 记考勤。
- (2) 检查工作服是否穿戴整齐, 强调安全问题。

二、任务引入

了解中心钻的形状、作用。

三、任务分析

车外圆、平面、台阶和钻中心孔任务分析如图 2-21 所示。

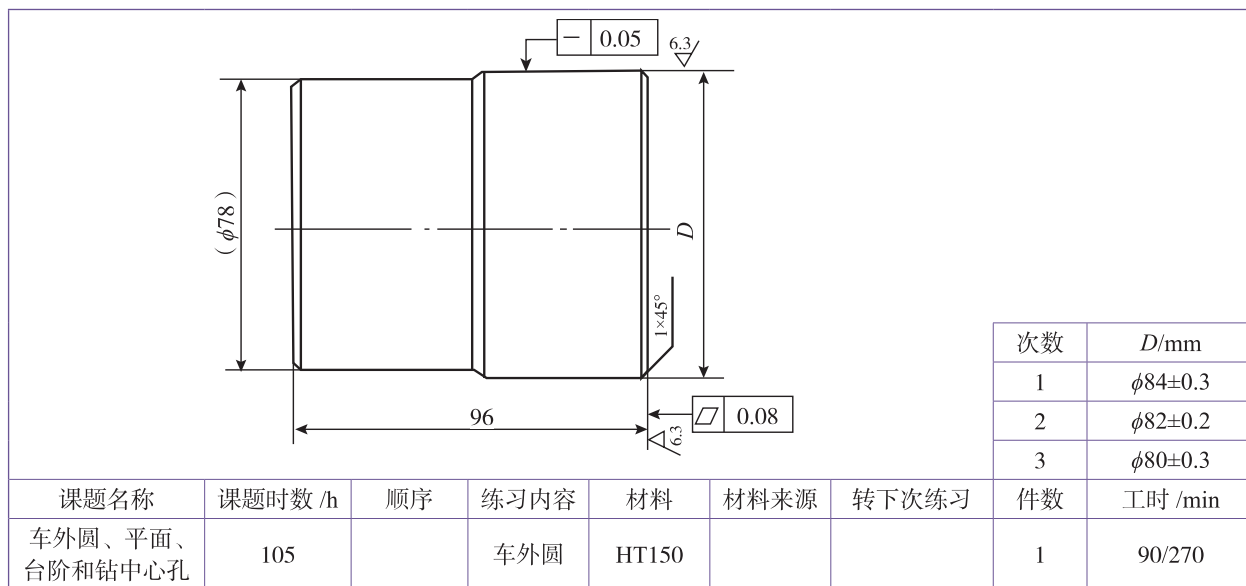


图 2-21 车外圆、平面、台阶和钻中心孔任务分析



四、任务实施

根据学生车削练习的情况,对学生车综合件加工方法中出现的错误给予纠正,并就车削的要点重复复习,布置课后学习内容。

五、任务评价

通过讲解使学生养成良好的实习习惯以及掌握车削台阶轴的方法。

通过提问的方式使学生牢记内容,达到学以致用效果。润滑保养车床及实习安全是实习教学的重要环节,要加强教育,在平时的教学中应适时提醒学生。

提醒学生准备工作服、卡尺、防护镜、书、笔记本和笔。

六、钻床操作规程

- (1) 工作前必须穿好工作服,扎好袖口,不准戴围巾,严禁戴手套,女工的发辫应挽在帽子内。
- (2) 要检查设备上的防护、保险、信号装置。机械传动部分、电气部分要有可靠的防护装置。工、卡具应完好,否则不准开动。
- (3) 钻床的平台要紧固,工件要夹紧。钻小件时,应用专用工具夹持,防止被加工件带起旋转,不准用手拿着或按着钻孔。
- (4) 手动进刀一般按逐渐增压和减压的原则进行,以免用力过猛造成事故。
- (5) 调整钻床速度、行程、装夹工具和工件,以及擦拭钻床时,要停车进行。
- (6) 钻床开动后,不准接触运动着的工件、刀具和传动部分。禁止隔着机床转动部分传递或拿取工具等物品。
- (7) 钻头上绕长屑时,要停车清除长屑,禁止用嘴吹、手拉等方式,应使用刷子或铁钩予以清除。
- (8) 凡两人或两人以上在同一台机床工作时,必须有一人负责安全,统一指挥,防止发生安全事故。
- (9) 发现异常情况时应立即停车,请有关人员进行检查。
- (10) 工作完毕后,关闭机床总闸,擦净机床,清扫工作地点。

第三节

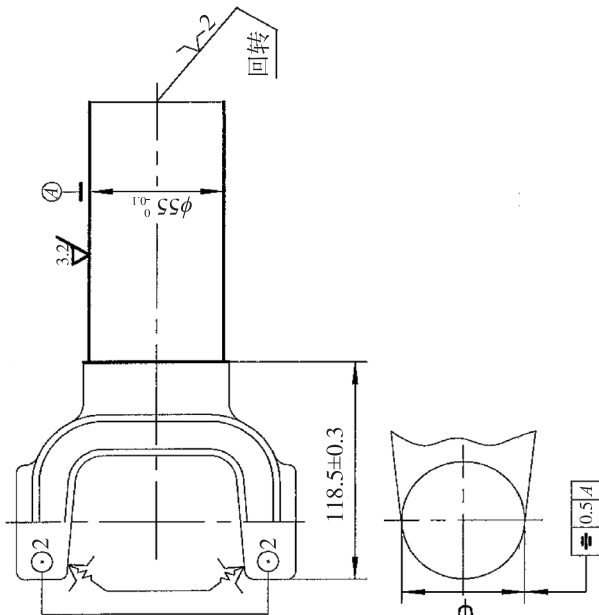
工序 20: 粗车小头外圆

工序 20(粗车小头外圆)在热工部采用数控车床(CAK6150P)进行加工,为车工工种,刀具采用 YT15 车刀,机床主轴转速为 600 r/min,进给量为 0.2 mm/r,切削深度为 1 mm,见表 2-4 所列。采用外圆粗车夹具夹持,工件加工尺寸为 $\phi 55_{-0.1}^0$ mm,长度为 (118.5 ± 0.3) mm,对称度为 0.5,采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺检验。



表 2-4 工序 20: 粗车小头外圆工序卡片

| ×× 传动轴有限公司 | | 机械加工工序卡片 | | | | 产品型号 | 零件图号 | 2201021E0 | 版本号 | A |
|--|--|-------------|------------------------------------|----|-------------------------------------|------|------|-----------|-----|---|
| | | 产品名称 | 滑动叉 | | 共 15 页 | 零件名称 | | 第 3 页 | | |
| 工序号 | 20 | | | | | | | | | |
| 工序名称 | 车工 | | | | | | | | | |
| 材料牌号 | 45 GB/T 699—2015 | | | | | | | | | |
| 毛坯种类 | 锻件 | | | | | | | | | |
| 设备名称 | 数控车床 | | | | | | | | | |
| 设备型号 | CAK6150P | | | | | | | | | |
| 夹具名称 | 粗车外圆夹具 | | | | | | | | | |
| 夹具编号 | | | | | | | | | | |
| 检验项目 | 直径 | 长度 | 对称度 | | | | | | | |
| 精度 | $\phi 55_{-0.1}^0$ | 118.5±0.3 | 0.5 | | | | | | | |
| 测量工具 | 游标卡尺 (0.02) | 游标卡尺 (0.02) | 专用检具 | | | | | | | |
| 首检 | 频次 | ∅ | ∅ | | | | | | | |
| | 手段 | △ | △ | | | | | | | |
| 自检 | 频次 | 2件/次 4/D | 2件/次 4/D | | | | | | | |
| | 手段 | ○ | ○ | | | | | | | |
| 巡检 | 频次 | 2件/次 4/D | 2件/次 4/D | | | | | | | |
| | 手段 | △ | △ | | | | | | | |
| 特性分类 | B | B | B | | | | | | | |
| 特性符号 | | | | | | | | | | |
| 反应计划 | | | 隔离、返工 | | | | | | | |
| 1. 检验频次 全: 全数检验 n/N; N 检 n 件 N/D: 每班检 N 次 | 2. 控制手段 ○: 不记录 △: 检验记录 □: 控制图 X-R | | 3. 特性分类 A: 关键 B: 重要 C: 一般 | | 4. 首件检验 %: 1. 每班开始工作 2. 更换产品时 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| 设计 | | 审核 | | 批准 | | 日期 | | | | |
| | | | | | | | | | | |

6.3
其余

一、数控车床

数控车床又称“CNC 车床”，即计算机数字控制车床，是目前国内使用量最大、覆盖面最广的一种数控机床，约占数控机床总数的 25%。数控机床是集机械、电气、液压、气动、微电子和信息等多项技术于一体的机电一体化产品，是机械制造设备中具有高精度、高效率、高自动化和高柔性化等优点的工作母机。

数控机床的技术水平高低及其在金属切削加工机床产量和总拥有量的百分比是衡量一个国家国民经济发展水平和工业制造整体水平的重要标志之一。数控车床是数控机床的主要品种之一，它在数控机床中占有非常重要的位置，几十年来，一直受到世界各国的普遍重视并得到了迅速的发展。数控车床配有旋转刀架或旋转刀盘，在零件加工过程中由程序自动选用刀具和更换刀位，可加工直线圆柱、斜线圆柱、圆弧和各种螺纹、槽、蜗杆等复杂工件；车削加工中心可以把车削、铣削、螺纹加工、钻削等功能集中在一台设备上，使其具有多种工艺手段。因此，采用数控车削加工可以大大提高产品质量，保证加工零件的精度，减轻劳动强度，为新产品的研制和改型换代节省大量的时间和费用，提高企业产品的竞争能力。

（一）数控车床的分类

数控车床按主轴相对于水平面的位置分为立式数控车床（图 2-22）和卧式数控车床（图 2-23）两种类型。立式数控车床用于回转直径较大的盘类零件的车削加工。卧式数控车床用于轴向尺寸较长或小型盘类零件的车削加工。卧式数控车床按功能可进一步分为经济型数控车床、普通数控车床和车削加工中心。

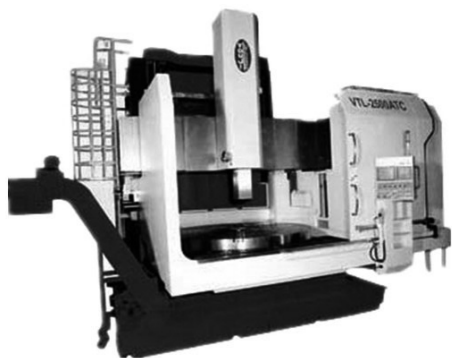


图 2-22 立式数控车床



图 2-23 卧式数控车床

1. 经济型数控车床

经济型数控车床是采用步进电动机和单片机对普通车床的车削进给系统进行改造后形成的简易型数控车床，如图 2-24 所示。经济型数控车床的成本较低，但其自动化程度和功能性都比较差，且车削加工精度也不高，适用于要求不高的回转类零件的车削加工。

2. 普通数控车床

普通数控车床是根据车削加工要求在结构上进行专门设计，配备通用数控系统而形成的数控车床，如图 2-25 所示。普通数控车床的数控系统功能强，且自动化程度和加工精度也比较高，适用于一般回转类零件的车削加工。这种数控车床可同时控制两个坐标轴，即 X 轴和 Z 轴。

3. 车削加工中心

车削加工中心是在普通数控车床的基础上，增加了 C 轴和动力头，更高级的机床还带有刀库，可控制 X 、 Z 和 C 三个坐标轴，联动控制轴可以是 (X, Z) 、 (X, C) 或 (Z, C) ，如图 2-26 所示。由



于增加了 C 轴和铣削动力头，这种数控车床的加工功能大大增强，除可以进行一般车削外，还可以进行径向和轴向铣削、曲面铣削、中心线不在零件回转中心的孔和径向孔的钻削等加工。



图 2-24 经济型数控车床

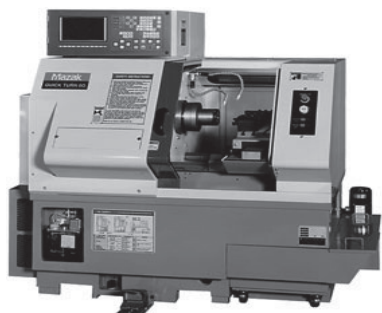


图 2-25 普通数控车床（卧式）

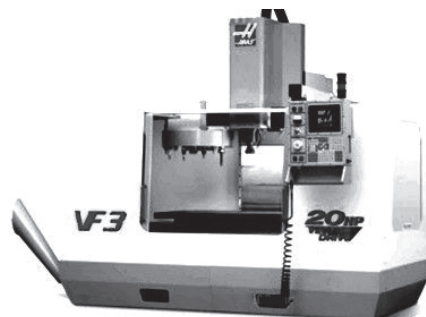


图 2-26 车削加工中心

（二）数控车床的组成

数控车床由数控程序、输入装置、数控装置、伺服系统、辅助控制装置、检测反馈装置及机床本体等组成，如图 2-27 所示。

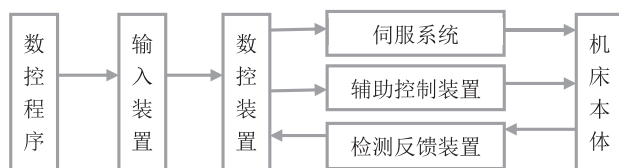


图 2-27 数控车床的组成

实际上，数控程序并非数控机床的物理组成部分，但从逻辑上讲，数控车床加工过程必须按数控程序的规定进行，数控程序是数控车床加工的一个重要环节，因此常将数控程序视为数控车床的一个组成部分。

1. 输入装置

输入装置的作用是将数控程序和各种参数、数据传送并存入数控装置内。常用的输入方式为穿孔纸带、穿孔卡、磁带、磁盘等。近年来，穿孔纸带及穿孔卡已极少使用。也有一些数控机床采用操作面板上的按钮和键盘将数控程序直接输入，或者通过串行接口将计算机上编写的数控程序输入数控装置。随着计算机辅助设计与计算机辅助制造（CAD/CAM）技术的发展，在 CAD/CAM 集成系统中，数控程序可不需要任何载体而直接输入数控装置。

2. 数控装置

数控装置是数控车床的核心。它的基本任务是接受控制介质上的数字化信息，按照规定的控制算法进行插补运算，把它们转换为伺服系统能够接收的指令信号，然后将结果由输出装置传送到各坐标控制的伺服系统，控制数控车床的各个部分进行规定的、有序的动作。数控装置一般由专用（或通用）计算机、输入输出接口板及可编程序控制器（PLC）等组成。可编程序控制器主要用于对数控车床辅助功能、主轴转速功能和刀具功能的控制。

3. 伺服系统

伺服系统是数控车床的执行机构，由伺服驱动电路和伺服驱动装置两大部分组成。

伺服驱动电路的作用是接收数控装置的指令信息，并按指令信息的要求控制执行部件的进给速度、方向和位移。指令信息是以脉冲信息体现的，每一脉冲使机床移动部件产生的位移量叫脉冲当量。



伺服驱动装置主要由主轴电动机、进给系统的功率步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机等组成，后两者均带有光电编码器等位置测量元件。

4. 辅助控制装置

为了提高生产率、加工精度等，数控机床还配备许多辅助控制装置，如自动换刀装置、自动工作台交换装置、自动对刀装置、自动排屑装置等。它的作用是接收数控装置输出的指令信号，经必要的编译、逻辑判断、功率放大后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件，以完成各种规定的动作。

5. 检测反馈装置

检测反馈装置也称“反馈元件”，通常安装在车床的工作台上或滚珠丝杠上，作用相当于普通车床上的刻度盘或人的眼睛。检测反馈装置可以将工作台的位移量转换成电信号，并且反馈给 CNC 系统。CNC 系统可将反馈值与指令值进行比较，如果两者之间的误差超过某一个预先设定的数值，就会驱动工作台向消除误差的方向移动。在工作台移动的同时，检测反馈装置向 CNC 系统发出新的反馈信号，CNC 系统再进行信号的比较，直到误差值小于设定值为止。

6. 机床本体

机床本体是数控车床的主体，是用于完成各种切削加工的机械部分，包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件，如刀架、主轴箱、尾座、导轨及其传动部件等。数控车床与普通车床不同，它的主运动和各个坐标轴的进给运动都是由单独的伺服电动机驱动的，所以它的传动链短，结构比较简单。

为了保证数控车床的快速响应特性，在数控车床上还普遍采用精密滚珠丝杠副和直线滚动导轨副。在车削加工中心上还配备有刀库和自动换刀装置。同时，数控车床还有一些良好的配套设施，如冷却、自动排屑、自动润滑、防护和对刀仪等，以利于充分发挥数控车床的功能。此外，为了保证数控车床的高精度、高效率和高自动化加工，数控车床的其他机械结构也产生了很大的变化。

（三）数控车床的加工对象

1. 精度要求高的零件

由于数控车床的刚性好、制造精度高，并且能方便地进行人工补偿和自动补偿，所以能加工精度要求较高的零件，甚至可以以车代磨。数控车床刀具的运动是通过高精度插补运算和伺服驱动束实现的，并且工件的一次装夹可完成多道工序的加工，因此提高了加工工件的形状精度和位置精度。

2. 表面粗糙度低的回转体

数控车床能加工出表面粗糙度低的零件，不仅是因为车床的刚性和制造精度高，还由于它具有恒线速度切削功能。使用数控车床的恒线速度切削功能，就可选用最佳线速度来切削端面，这样切出的表面粗糙度既低又一致。

3. 超精密、超低表面粗糙度的零件

轮廓精度要求超高和表面粗糙度超低的零件适用于在高精度、高功能的数控车床上进行加工。超精加工的轮廓精度可达 $0.1\ \mu\text{m}$ ，表面粗糙度可达 $0.02\ \mu\text{m}$ ，超精加工所用数控系统的最小设定单位应达到 $0.01\ \mu\text{m}$ 。超精车削零件的材质以前主要是金属，现已扩大到塑料和陶瓷。

4. 表面形状复杂的回转体零件

由于数控车床具有直线和圆弧插补功能，部分车床数控装置还有某些非圆曲线插补功能，所以可



以车削由任意直线和平面曲线组成的形状复杂的回转体零件和难以控制尺寸的零件，如具有封闭内成型面的壳体零件。

5. 带一些特殊类型螺纹的零件

数控车床不但能车任何等节距的直、锥和端面螺纹，而且能车增节距、减节距，以及要求等节距、变节距之间平滑过渡的螺纹和变径螺纹。数控车床可利用精密螺纹切削功能，采用机夹硬质合金螺纹车刀，使用较高的转速，车削精度较高的螺纹。

二、数控车削加工工艺处理

加工工艺分析是前期准备工作，工艺分析将直接影响到工艺制定是否合理，而工艺制定是否合理对程序编制、车床加工效率和零件的加工精度都有重要的影响。

（一）确定工件的加工部位和具体内容

确定被加工工件需在本机床上完成的工序内容及其与前后工序的联系；工件在本工序加工之前的情况，如铸件、锻件或棒料、形状、尺寸、加工余量等；前道工序已加工部位的形状、尺寸或本工序需要前道工序加工出的基准面、基准孔等。为了便于编制工艺及程序，应绘制出本工序加工前的毛坯图及本工序加工图。

（二）确定工件的装夹方式与设计夹具

根据已确定的工件加工部位、定位基准和夹紧要求，选用或设计夹具。数控车床多采用三爪自定心卡盘夹持工件，轴类工件还可采用尾座顶尖支持工件。由于数控车床的主轴转速极高，为便于工件夹紧，多采用液压高速动力卡盘。还可使用软爪夹持工件，软爪弧面由操作者随机配制，可获得理想的夹持精度。通过调整油缸压力，可改变卡盘夹紧力，以满足夹持各种薄壁和易变形工件的特殊需要。为减少细长轴加工时的受力变形，提高加工精度，以及在加工带孔轴类工件内孔时，可采用液压自动定心中心架，其定心精度可达 0.03 mm。

（三）确定加工方案

1. 确定加工方案的原则

加工方案又称“工艺方案”，数控车床的加工方案包括制定工序、工步及走刀路线等内容。在数控车床加工过程中，由于加工对象的复杂多样，特别是加工对象的轮廓曲线的形状及位置千变万化，加上材料不同、批量不同等多方面因素的影响，在对具体零件制定加工方案时，应该进行具体分析和区别对待，灵活处理。只有这样，才能使所制定的加工方案合理，从而达到质量优、效率高和成本低的目的。制定加工方案的一般原则：先粗后精，先近后远，先内后外，程序段最少，走刀路线最短，以及特殊情况特殊处理。

2. 确定加工路线与加工余量的关系

在数控车床还未达到普及使用的条件下，一般应把毛坯件上过多的余量，特别是含有锻、铸硬皮层的余量安排在普通车床上进行加工。必须用数控车床加工时，则要注意程序的灵活安排。安排一些子程序对余量过多的部位先做一定的切削加工：确定对大余量毛坯进行阶梯切削时的加工路线，以及分层切削时刀具的终止位置。

3. 确定车螺纹时的主轴转速

数控车床加工螺纹时，因其传动链的改变，原则上其转速只要能保证主轴每转一周时，刀具沿主进给轴（多为 Z 轴）方向位移一个螺距即可，不应受到限制。但数控车床加工螺纹时，会受到以下几



方面的影响。

(1) 螺纹加工程序段中指令的螺距(导程)值,相当于以进给量(mm/r)表示的进给速度 F ,若将车床的主轴转速选择得过高,则其换算后的进给速度(mm/min)必定大大超过正常值。

(2) 刀具在其位移的始/终,都将受到伺服驱动系统升/降频率和数控装置插补运算速度的约束,由于升/降频率特性满足不了加工需要等原因,可能因主进给运动产生的“超前”和“滞后”而导致部分螺牙的螺距不符合要求。

(3) 车削螺纹必须通过主轴的同步运行功能实现,即车削螺纹需要有主轴脉冲发生器(编码器)。当车床主轴转速选择得过高时,通过编码器发出的定位脉冲(主轴每转一周时所发出的一个基准脉冲信号)将可能因“过冲”(特别是当编码器的质量不稳定时)而导致工件螺纹产生乱扣。

因此,车螺纹时,主轴转速的确定应遵循以下几个原则。

(1) 在保证生产效率和正常切削的情况下,宜选择较低的主轴转速。

(2) 当螺纹加工程序段中的导入长度 δ_1 和切出长度 δ_2 比较充裕时,即螺纹进给距离超过图样上规定螺纹的长度较大时,可选择适当高一些的主轴转速。

(3) 当编码器所规定的允许工作转速超过机床所规定的主轴最大转速时,则可选择尽量高一些的主轴转速。

(4) 通常情况下,车螺纹时的主轴转速($n_{螺}$)应按其车床或数控系统说明书中规定的计算式进行确定,其计算式为

$$n_{螺} \leq n_{允}/L \quad (2-1)$$

式中, $n_{允}$ 为编码器允许的最高工作转速(r/min); L 为工件螺纹的螺距(或导程,mm)。

4. 确定切削用量与进给量

在编程时,编程人员必须确定每道工序的切削用量。选择切削用量时,一定要充分考虑影响切削的各种因素,正确地选择切削条件,合理地确定切削用量,以有效地提高机械加工质量和产量。

影响切削条件的因素包括:车床、工具、刀具及工件的刚性;切削速度、切削深度、切削进给率;工件精度及表面粗糙度;刀具预期寿命及最大生产率;切削液的种类、冷却方式;工件材料的硬度及热处理状况;工件数量;车床的寿命。在上述因素中,切削速度、切削深度、切削进给率为影响切削条件的主要因素。

切削速度快慢直接影响切削效率。若切削速度过慢,则切削时间会加长,刀具无法发挥其功能;若切削速度太快,虽然可以缩短切削时间,但是刀具容易产生高热,影响刀具的寿命。决定切削速度的因素很多,概括起来主要有以下六种。

(1) 刀具材料。刀具材料不同,允许的最高切削速度也不同。高速钢刀具的耐高温切削速度不到50 m/min,碳化物刀具的耐高温切削速度可达100 m/min以上,陶瓷刀具的耐高温切削速度可高达1 000 m/min。

(2) 工件材料。工件材料的硬度高低会影响刀具切削速度,同一刀具加工硬材料时的切削速度应降低,而加工较软材料时的切削速度可以提高。

(3) 刀具寿命。刀具使用时间(寿命)要求长,则应采用较低的切削速度;反之,可采用较高的切削速度。

(4) 切削深度与进刀量。切削深度与进刀量大,切削抗力也大,切削热会增加,故切削速度应降低。

(5) 刀具的形状。刀具的形状、角度的大小、刃口的锋利程度都会影响切削速度的选取。



(6) 冷却液使用。机床刚性好、精度高，使用冷却液可提高切削速度；反之，则需降低切削速度。

在上述影响切削速度的诸因素中，刀具材料的影响最为主要。

切削深度主要受车床刚度的制约，在车床刚度允许的情况下，切削深度应尽可能大，如果不受加工精度的限制，可以使切削深度等于零件的加工余量，这样可以减少走刀次数。主轴转速要根据车床和刀具允许的切削速度来确定，可以用算法或查表法来选取。进给量 f (mm/r) 或进给速度 F (mm/min) 要根据零件的加工精度、表面粗糙度、刀具和工件材料来选取。最大进给速度受车床刚度、进给驱动及数控系统的限制。程序员在选取切削用量时，一定要根据车床说明书的要求和刀具耐用度选择适合车床特点及刀具最佳耐用度的切削用量。当然也可以凭经验，采用类比法去确定切削用量。不管用什么方法选取切削用量，都要保证刀具的耐用度能完成一个零件的加工，或保证刀具耐用度不低于一个工作班次，最小也不能低于半个班次的时间。

三、切削过程

切削时，在刀具切削刃切割和刀面推挤的作用下，使被切削的金属层产生剪切滑移，最后脱离工件变为切屑，这个过程称为切削过程。

(一) 切削过程中的运动

切削运动是指在切削过程中刀具相对于工件的运动，即在切削过程中，刀具和工件应具备形成零件表面的基本运动。如图 2-28 所示，按其在切削过程中所起的作用，可分为主运动和进给运动。

(1) 主运动。直接切除工件上的切削层，加工中心使之转变为切屑，以形成工件新表面的主要运动称为主运动，如车削时工件的回转运动、铣削时铣刀的回转运动、钻削时钻头的旋转运动。

(2) 进给运动。使新的切削层不断投入切削的运动称为进给运动。进给运动又可分为横向进给运动和纵向进给运动，如车削端面时车刀的运动为横向进给运动、车削外圆时车刀的运动为纵向进给运动。

(3) 合成切削运动。当主运动与进给运动同时进行，这两个运动的合成运动称为合成切削运动。摇臂钻床刀具切削刃上选定点相对于工件的瞬时合成运动方向称为合成切削运动方向，加工中心的速度称为合成切削速度，该速度的方向与过渡表面相切。

(二) 切削过程中形成的表面

工件在切削过程中形成了三个不断变化着的表面，即待加工表面、过渡表面、已加工表面，如图 2-29 所示。

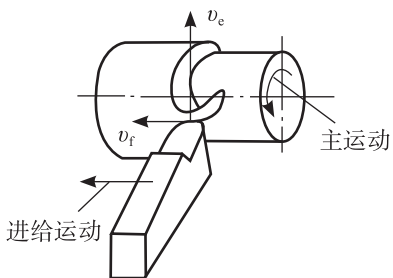


图 2-28 切削运动

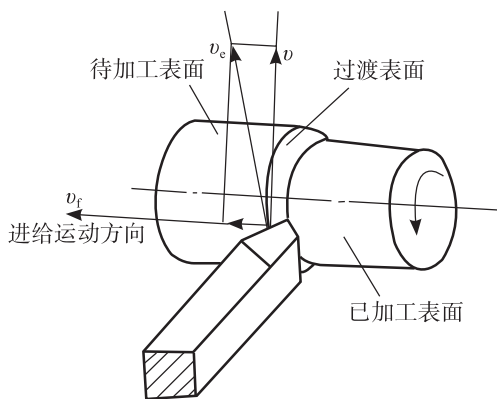


图 2-29 切削加工时工件上形成的表面



- (1) 待加工表面是指将被切去金属层的表面。
- (2) 过渡表面是指刀刃正在切削的表面。
- (3) 已加工表面是指工件上经切削后产生的新表面。

(三) 切削用量与切削层参数

1. 切削用量

切削用量是切削时各种参数的总称，包括切削速度、进给量和切削深度（背吃刀量），又称“切削三要素”。切削用量是车床调整的依据，对加工质量和效率有重要影响。

(1) 切削速度 v_c 。单位时间内工件和刀具沿主运动方向的相对位移称为切削速度，单位为 m/s 。计算切削速度时，应选取刀刃上速度最高的点进行计算。

(2) 进给量 f 。工件或刀具转一周（或每往复一次），两者沿进给运动方向上的相对位移量称为进给量，单位是 mm/r （或 $mm/双行程$ ）。

(3) 切削深度 a_p 。刀具切削刃与工件的接触长度在同时垂直于主运动和进给运动方向上的投影值，称为切削深度，单位是 mm 。

2. 切削层参数

切削刃在一次走刀中从工件上切下的一层材料称为切削层，也就是相邻两个加工表面之间的一层金属。外圆车削时的切削层，就是工件转一转，主切削刃移动一个进给量 f 所切除的一层金属，如图 2-30 所示。切削层的截面尺寸参数称为切削层参数。切削层参数的大小反映了切削刃所载荷的大小，直接影响加工质量、生产率和刀具的磨损等。

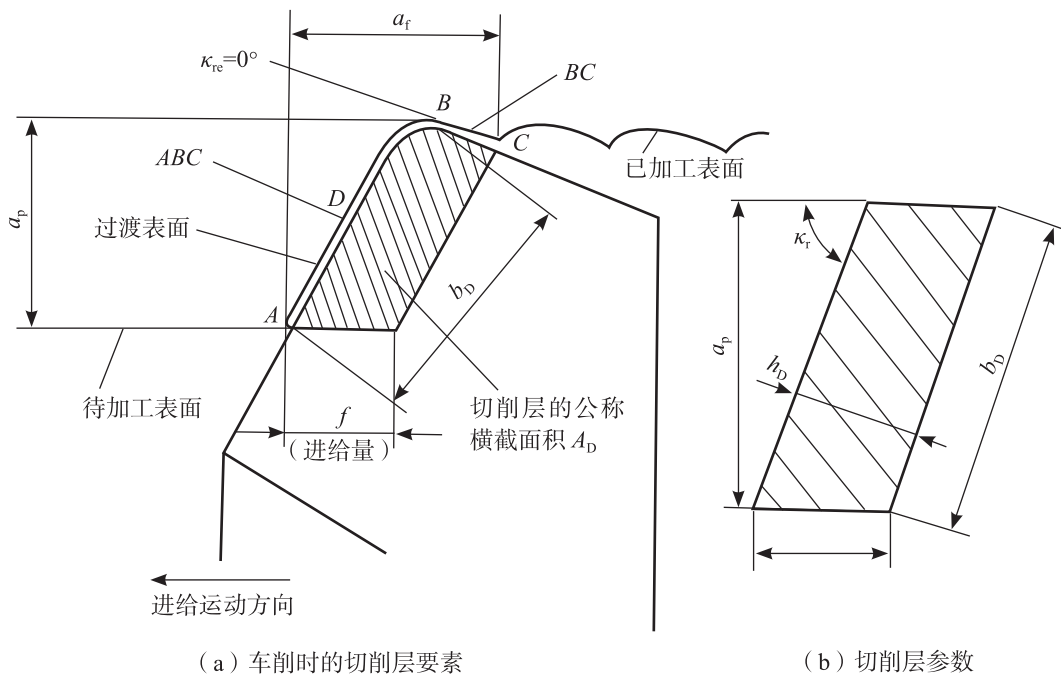


图 2-30 车削时的切削层要素与切削层参数

- (1) 切削层公称厚度 h_D 。垂直于过渡表面度量的切削层尺寸称为切削层公称厚度。
- (2) 切削层公称宽度 b_D 。沿过渡表面度量的切削层尺寸称为切削层公称宽度。
- (3) 切削层公称横截面积 A_D 。切削层在切削层尺寸度量平面内的横截面积称为切削层公称横截面积。



四、车刀

(一) 刀具的基本结构

虽然金属切削刀具种类繁多，但其切削部分的几何形状与参数却有共性，均可以转化为外圆车刀。外圆车刀的切削部分的组成如图 2-31 所示，总体上由刀头和刀体组成。刀体的主要作用是将刀具安装到刀架上，刀头是参与切削的部分，由三面、两刃、一尖组成。

(1) 前面：刀具上切屑流过的表面，又称“前刀面”。

(2) 主后面：刀具上与过渡表面相对的表面。

(3) 副后面：刀具上与工件已加工表面相对的表面。

(4) 主切削刃：前刀面与主后刀面的交线。

(5) 副切削刃：前刀面与副后刀面的交线。

(6) 刀尖：主切削刃与副切削刃连接处的那一小部分切削刃。

(二) 刀具的基本角度

1. 正交平面参考系

刀具要从工件上切除材料，就必须具有一定的切削角度。切削角度决定了刀具切削部分各表面之间的相对位置。为了确定和测量刀具的角度，常采用正交平面参考系，如图 2-32 所示。正交平面参考系由基面、切削平面和正交平面组成，各平面定义如下。

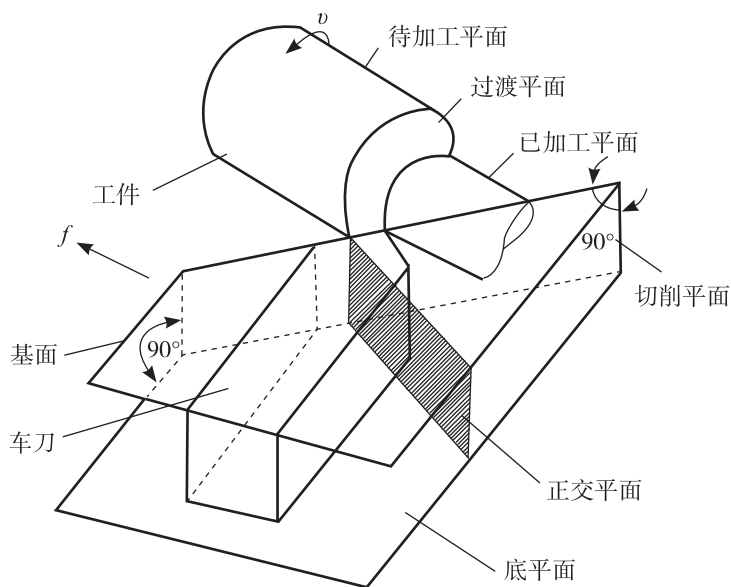


图 2-32 确定切削角度的正交平面参考系

(1) 基面：通过主切削刃上某一指定点，并与该点切削速度方向相垂直的平面。

(2) 切削平面：通过主切削刃上某一指定点，并与工件加工表面相切的平面，切削平面垂直于该

点的基面。

(3) 正交平面：通过主切削刃上某一指定点，并与主切削刃在基面上的投影相垂直的平面，正交平面同时垂直于该点基面和切削平面。

2. 刀具基本角度标注

在刀具标注角度参考系中测得的角度称为刀具的标注角度，如图 2-33 所示。标注角度应标注在刀具的设计图中，用于刀具制造、刃磨和测量。在正交平面参考系中，刀具的主要标注角度有 5 个，其定义如下。

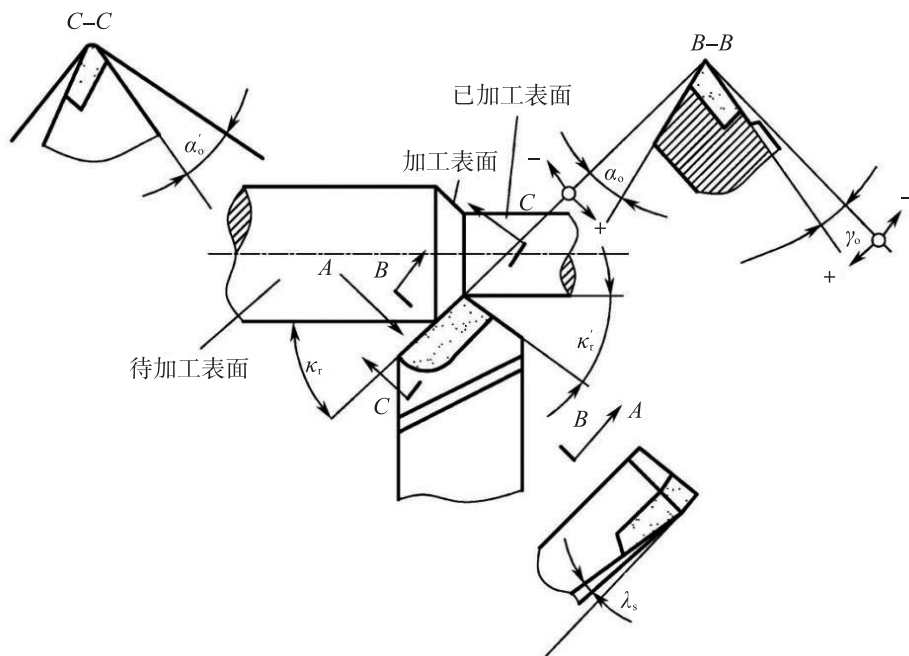


图 2-33 刀具的标注角度

(1) 前角 γ_0 是指在正交平面内测量的前刀面与基面之间的夹角。前刀面在基面之下时的前角为正值，前刀面在基面之上时的前角为负值。

(2) 后角 α_0 是指在正交平面内测量的主后刀面与切削平面之间的夹角，一般为正值。

(3) 主偏角 κ_r 是指在基面内测量的主切削刃在基面上的投影与进给运动方向之间的夹角。

(4) 副偏角 κ_r' 是指在基面内测量的副切削刃在基面上的投影与进给运动反方向之间的夹角。

(5) 刃倾角 λ_s 是指在切削平面内测量的主切削刃与基面之间的夹角。在主切削刃上，刀尖为最高点时的刃倾角为正值，刀尖为最低点时的刃倾角为负值。主切削刃与基面平行时的刃倾角为零。

要完全确定车刀切削部分所有表面的空间位置，还需标注副后角 α_0' ，副后角确定副后刀面的空间位置。

五、金属切削刀具的材料

根据数控加工的特征，数控刀具应具有高的切削效率、高的精度和重复定位精度、高的可靠性和耐用度，能够实现刀具尺寸的预调和快速换刀，具有完善的模块式工具系统等特点。

(一) 刀具材料的性能要求

数控刀具与普通机床上所用的刀具相比，有许多不同的要求，只有达到这些要求，才能使数控机床真正发挥效率。



(1) 较好的刚性(尤其是粗加工刀具),精度高,抗振及热变形小;具有很高的切削效率,如车床和车削中心的主轴转速都在 8 000 r/min 以上,加工中心的主轴转速一般在 15 000~20 000 r/min,还有 40 000~60 000 r/min,硬质合金刀具切削速度可达 500~600 m/min,陶瓷刀具可达 800~1 000 m/min。

(2) 良好的互换性,便于快速换刀,如数控机床采用人工换刀,则使用快换夹头。对于有刀库的加工中心,则实现自动换刀。

(3) 有很高的可靠性和耐用度,寿命高,切削性能稳定、可靠。为了保证产品质量,在数控机床对刀具实行强迫换刀或由数控系统对刀具寿命进行管理,因此,刀具工作的可靠性已上升为选择刀具的关键指标。为满足数控加工的要求,刀具材料应具有高的切削性能和耐用度。刀具材料不仅切削性能要好,还须具备稳定的性能。同一批刀具在切削性能和刀具寿命方面不得有较大的差异,以免在无人看管的情况下,因刀具先期磨损和破损而造成加工工件的大量报废甚至损坏机床。刀具应有很高的精度和重复定位精度,一般为 3~5 μm 或者更高。

(4) 要求刀具尺寸可以实现预调,便于尺寸调整,以减少换刀调整时间,提高加工效率。

(5) 刀具应能可靠地断屑或卷屑,以利于切屑的排除。

(6) 刀具应系列化、标准化,以利于编程和刀具管理。

(7) 应有在线监控及尺寸补偿系统。

(二) 常用的刀具材料

为满足加工需要,刀具材料应具备高的硬度和耐磨性,足够的强度和韧性,高的耐热性与化学稳定性,有锻造、焊接、热处理、磨削加工等良好的工艺性,导热性好,有利于切削热传导,降低切削区温度,延长刀具寿命,便于刀具的制造,资源丰富,价格低廉。常用的刀具材料主要有以下几种。

1. 高速钢

高速钢是一种加入较多钨、钼、铬、钒等合金元素的高合金钢。高速钢热处理后的硬度可达 62~66 HRC,抗弯强度约为 3.3 GPa,有较高的热稳定性、耐磨性、耐热性,切削温度在 500~650 $^{\circ}\text{C}$ 时仍能进行切削。由于热处理变形小、能锻易磨,所以高速钢特别适用于制造结构和刃型复杂的刀具,如成型车刀、铣刀、钻头、切齿刀、螺纹刀具和拉刀等。

(1) 高速钢的分类。

按用途分,高速钢可分为通用高速钢和高性能高速钢;按制造工艺分,高速钢可分为熔炼高速钢、粉末冶金高速钢和表面涂层高速钢;按基本化学成分分,高速钢可分为钨系和钼系。

(2) 常用高速钢的牌号与性能。

①通用型高速钢。W6Mo5Cr4V2 钢简称“W6”或“6542”,是钨钼系通用型高速钢的代表钢号。它是含有多种合金元素的高合金钢,属莱氏体型钢种,具有高硬度、高耐磨性、高热硬性、高淬透性和足够的塑性和韧性,并有良好的铸、锻、焊和机械加工性能,因而它在工具钢中占有极其重要的地位。它的化学成分(%)为 C: 0.80~0.90、Si: 0.20~0.45、Mn: 0.15~0.40、Cr: 3.80~4.40、Mo: 4.50~5.50、W: 5.50~6.75、V: 1.75~2.20。它的主要用途:制造车、铣、钻、滚、拉、剃、铰、锯片、丝锥等切削工具及木工刀具,冲、挤压、滚等冷加工模具,大型及热塑成型模具,冲头、顶针、搓丝工具,以及高温弹簧、轴承、耐热耐磨的针阀、叶片、心轴等机械零件。而 W18Cr4V 由于钨价高、热塑性差、碳化物分布不均匀等原因,目前国内外已很少采用。常见通用型高速钢代号成分及特性用途见表 2-5 所列。



表 2-5 常见通用型高速钢代号成分及特性用途

| 钢号 | 代号 | 主要成分(平均值)/% | | | | | | 特性 | 主要用途 |
|-------------|-----|-------------|-------|------|------|------|------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | | C | W | Mo | Cr | V | Si | | |
| W18Cr4V | W18 | 0.75 | 18.00 | — | 4.10 | 1.10 | — | W 系代表钢号。耐磨、可磨削性好, 不易氧化脱 C, HRC>62 | 世界早期通用: 车刀、拉刀、钻头、铣刀等 |
| W9Mo3Cr4V | W9 | 0.82 | 9.00 | 3.00 | 4.10 | 1.50 | — | W-Mo 系, 可磨削性、热塑性好, 易改锻改轧 | 代替 W18、M2 制造车刀、槽铣刀、立铣刀等刀具 |
| W7Mo4Cr4V | W7 | 0.83 | 7.00 | 4.00 | 4.00 | 1.65 | — | W-Mo 系, 类似 W9, 克服了 W9 裂纹敏感性, HRC>62 | 代替 W9 制造车刀、钻头、铣刀、锯条等 |
| W6Mo5Cr4V2 | M2 | 0.85 | 6.10 | 5.00 | 4.10 | 2.00 | — | W-Mo 系代表钢号, 综合性能优异, HRC>62 | 世界广泛应用于制造各种刀具、钻头、绞刀、铣刀、锯等 |
| W5Mo4Cr4VSi | W5 | 0.95 | 5.00 | 1.05 | 4.10 | 1.20 | 1.00 | W-Mo 系, 属低合金高性能类、经济型, HRC>62 | 可代替部分 M2 使用, 制造各种刀具 |
| W4Mo3Cr4VSi | W4 | 0.93 | 4.00 | 3.00 | 4.10 | 1.50 | 0.75 | W-Mo 系, 属低合金高性能类、经济型, HRC>62 | 适用于铣制各种刀具, 如钻头、立铣刀等 |
| W2Mo9Cr4V2 | M7 | 1.02 | 1.80 | 8.60 | 4.10 | 1.90 | — | Mo 系代表钢号, 热硬度及可磨削性优异, HRC>62 | 制造丝锥、板牙、锯条、钻头、刀片的良好材料 |
| W2Mo5Cr4V | W2 | 0.95 | 1.70 | 5.00 | 4.10 | 1.30 | — | 属低合金高性能类、成本低、经济型, HRC>62 | 适于制造车、铣、钻、滚、拉、铰、锯片、丝锥等切削工具及木工刀具 |

②高性能高速钢。高性能高速钢是指在通用型高速钢中增加碳、钒、钴、铝等合金元素, 使其常温硬度可达 67~70 HRC, 进一步提高耐磨性与热稳定性。高性能高速钢可以用于加工不锈钢、高温合金钢、耐热钢和高强度钢等难加工材料, 典型牌号有 M42、501。这是通过改变高速钢的化学成分, 提高性能而发展起来的新品种, 具有更高的硬度、热硬性, 当切削温度达 650 °C 时, 硬度仍可保持在 60 HRC 以上, 耐用性为普通高速钢的 1.5~3 倍, 适用于制造加工高温合金、不锈钢、钛合金、高强度钢等难加工材料的刀具。

高性能高速钢主要有 4 种, 分别为高碳系高速钢、高钒系高速钢、含钴系高速钢和铝高速钢。

a. 高碳系高速钢。它的牌号为 9W18Cr4V, 因含碳量高 (0.9%), 故硬度、耐磨性及热硬性都比较好。用高碳系高速钢制造的刀具在切削不锈钢、耐热合金等难加工材料时, 寿命显著提高, 但其抗弯强度为 3 000 MPa, 冲击韧性较低, 热处理工艺要求严格。

b. 高钒系高速钢。它的牌号有 W12Cr4V4Mo 及 W6Mo5Cr4V3 (美国牌号为 M3), 含钒量达 3%~4%, 使耐磨性大大提高, 但随之带来的是可磨性变差。高钒系高速钢的使用及发展还需要依赖于磨削工艺及砂轮技术的发展。

c. 含钴系高速钢。它的牌号为 W2Mo9Cr4VCo8 (美国牌号为 M42), 含钒量不高 (1%), 含钴量高 (8%), 钴能促使碳化物在淬火加热时更多地溶解在基体内, 利用高的基体硬度来提高耐磨性。这种高速钢的硬度、热硬性、耐磨性及可磨性都很好, 热处理硬度可达 67~70 HRC, 但也可采取特殊



热处理方法, 得到 67~68 HRC 硬度, 使含钴系高速钢的切削性能 (特别是间断切削) 得到改善, 提高冲击韧性。含钴系高速钢可制成各种刀具, 用于切削难加工材料时的效果很好, 又因其磨削性能好, 可制成复杂刀具, 国际上应用很普遍。但中国钴资源缺乏, 含钴系高速钢的价格昂贵, 为普通高速钢的 5~8 倍。

d. 铝高速钢。它的牌号有 W6Mo5Cr4V2Al、W6Mo5Cr4V5SiNbAl 等, 主要通过加入铝 (Al)、硅 (Si)、铌 (Nb) 元素来提高热硬性、耐磨性。它适合中国的资源情况, 其价格较低, 热处理硬度可达到 68 HRC, 热硬性也不错。但是这种钢易氧化及脱碳, 其可塑性、可磨性稍差, 仍需改进。

在国际市场上, 高性能高速钢的使用量已经超过普通高速钢 25%~30%。按照通常的国际标准, 只有含钴量在 2% 以上的高速钢才称为高性能高速钢, 代号为 HSS-E。其他如铝高速钢等, 虽然性能较普通高速钢有所提高, 但尚未有证据表明可以达到钴高速钢的同等性能。

③粉末冶金高速钢。粉末冶金高速钢是用粉末冶金方法制造的高速钢, 它是一种粉末冶金材料。首先用高压水或氮气雾化法制取高速钢粉末, 由于每一个钢水液滴高速冷凝成粉末颗粒, 所以粉末颗粒中消除了成分偏析。再将粉末压制烧结成零件, 通过热锻、热挤等压制成型或型材。这样制得的粉末冶金高速钢中无元素偏析, 具有细小碳化物均匀分布的细晶粒显微组织, 从而获得良好的热加工性、磨削性、热处理时的尺寸稳定性。与相同成分的铸锻高速钢比较, 粉末冶金高速钢还具有较均匀的硬度、较高的强度和韧性、较长的使用寿命。粉末冶金高速钢的牌号有瑞典的 ASP23、ASP30、ASP60, 以及美国的 CPM10V、CPMRex76、CPMRex42、CPMRex25、CPMRex20、CPMT15 等。国内粉末冶金高速钢的牌号有 FT15 (W12Cr4V5Co5)、FR71 (W10Mo5Cr4V2Co12)、PVN (W12Mo3Cr4V3N)、GF1 (W18Cr4V)、GF2 (W6Mo5Cr4V2)、GF3 (W10Mo5Cr4V3Co9)。

粉末冶金高速钢具有良好的力学性能, 适合制造间断切削条件下易崩刃的刀具、强度高而切削刃又必须锋利的刀具, 如插齿刀、滚刀、铣刀, 以及高压动载荷下使用的刀具。它的碳化物偏析小, 晶粒细, 可磨性好, 适合制造大尺寸刀具、精密刀具、复杂刀具。这类材料的高温热硬度高, 又适合制造难加工材料所用的刀具, 确实是不可多得的刀具材料。粉末冶金高速钢的生产过程较复杂, 造价较高, 中国钢厂提供的品种较少, 市场用量也很少。

高速钢材料的刀具是最常用的刀具, 价格便宜, 但易磨损, 易损耗, 进口的高速钢刀具含有 Co、Mn 等合金, 较耐用, 精度也高, 如 LBK、YG 等。

2. 硬质合金

硬质合金是由高硬度和高熔点的金属碳化物 (碳化钨 WC、碳化钛 TiC、碳化钽 TaC、碳化铌 NbC 等) 和金属黏结剂 (Co、Mo、Ni 等) 用粉末冶金工艺制成的。硬质合金刀具的常温硬度为 89~93 HRA, 化学稳定性好, 热稳定性好, 耐磨性好, 耐热性达 800~1 000 °C。硬质合金刀具允许的切削速度比高速钢刀具快 5~10 倍。硬质合金以其优良的性能被广泛用作刀具材料, 大多数车刀、端铣刀等均由硬质合金制造。常用硬质合金的牌号及其性能如下。

(1) 钨钴类硬质合金 (WC+Co), 代号为 YG, 属 K 类。合金中的含钴量越高, 韧性越好, 适用于粗加工, 反之用于精加工。YG (K) 类硬质合金有较好的韧性、磨削性、导热性, 适用于加工产生崩碎切屑及有冲击载荷的脆性金属材料。

(2) 钨钛钴类硬质合金 (WC+TiC+Co), 代号为 YT, 属 P 类。它以 WC 为基体, 添加 TiC, 用 Co 作黏结剂烧结而成。合金中的 TiC 含量提高, Co 含量就低, 其硬度、耐磨性和耐热性进一步提高, 但抗弯强度、导热性特别是冲击韧性明显下降, 适用于精加工。

(3) 钨钛钽 (铌) 类硬质合金 (WC+TiC+TaC / NbC+Co), 代号为 YW, 属 M 类。它在 YT (P) 类硬质合金中加入 TaC 或 NbC, 这样可提高抗弯强度、疲劳强度、冲击韧性、抗氧化能力、耐磨性和



高温硬度等。它既适用于加工脆性材料，又适用于加工塑性材料。

每一类中的各个牌号分别以一个 01~50 之间的数字表示从最高硬度到最大韧性之间的一系列合金，以供各种被加工材料在不同切削工序及加工条件时选用。根据需要使用，在两个相邻的分类代号之间，可插入一个中间代号，如在 P10 和 P20 之间插入 P15、在 K20 和 K30 之间插入 K25 等，但不能多于一个。在特殊情况下，P01 分类代号可再细分，即在其后再加一位数字，并以小数点隔开，如 P01.1、P01.2 等，以便在这一小组做精加工时能进一步区分不同程度的耐磨性与韧性。

硬质合金的应用分类、分组代号、标记色、用途和牌号对照等见表 2-6 所列。

表 2-6 硬质合金的应用分类、分组代号、标记色、用途和牌号对照

| 应用分类分组代号 | 标记色 | 适用范围 | 合金牌号 |
|----------|-----|---|-----------|
| P01 | 蓝色 | 钢、铸钢 | YT30、YN10 |
| P10 | | 钢、铸钢 | YT15 |
| P20 | | 钢、铸钢、长切屑可锻铸铁 | YT14 |
| P30 | | 钢、铸钢、长切屑可锻铸铁 | YT5 |
| P40 | | 钢、含砂眼和气孔的铸钢 | |
| P50 | | 钢、含砂眼和气孔的铸钢 | |
| K01 | 红色 | 特硬灰口铸铁、肖氏硬度高于 85 的冷硬铸铁、高硅铝合金、淬硬钢、高耐磨塑料、硬纸板、陶瓷 | YG3X |
| K10 | | 灰口铸铁、短切屑可锻铸铁、淬硬钢、硅铝合金、铜合金、塑料、玻璃、硬橡胶、硬纸板、陶瓷、石料 | YG6X、YG6A |
| K20 | | 灰口铸铁、铜、黄铜、铝 | YG6、YG8N |
| K30 | | 低硬度灰口铸铁、低强度钢、压缩木料 | YG8N、YG8 |
| K40 | | 软木或硬木、有色金属 | |
| M10 | 黄色 | 钢、铸钢、锰钢、灰口铸铁、合金铸铁 | YW1 |
| M20 | | 钢、铸钢、锰钢、灰口铸铁、奥氏体钢 | YW2 |
| M30 | | 钢、铸钢、灰口铸铁、奥氏体钢、高耐温合金 | |
| M40 | | 低碳易切钢、低强度钢、有色金属、轻合金 | |

硬质合金材料的刀具耐高温、耐磨损、能加工高硬度材料（如烧焊过的模），但是这种材料制造的刀具较钝。由于硬质合金材料的刀具耐高温，转速通常会比较高，加工效率及质量都比高速钢刀具要好，但是在低转速时容易产生崩刃现象。

3. 涂层刀具材料

在切削加工中，刀具性能对切削加工的效率、精度、表面质量有着决定性的影响。刀具性能的两个关键指标——硬度和强度（韧性）之间似乎总是存在着矛盾，硬度高的材料往往强度和韧性低，而要提高韧性往往是以硬度的下降为代价的。在较软的刀具基体上涂覆一层或多层硬度高、耐磨性好的金属或非金属化合物薄膜（如 TiC、TiN、Al₂O₃ 等）而成的涂层刀具，较好地解决了刀具存在的硬度和强度之间的矛盾，是切削刀具发展的一次革命。

目前，常用的涂层方法是化学气相沉积（CVD）法和物理气相沉积（PVD）法，其他方法如等离子喷涂、火焰喷涂、电镀、溶盐电解等还存在较大的应用局限性。

CVD 法是利用金属卤化物的蒸气、氢气和其他化学成分，在 950~1 050 ℃ 的高温下进行分解、热合等气、固反应，或者利用化学传输作用，在加热基体表面形成固态沉积层的一种方法。CVD 法的



工艺要求高,而且由于氯的侵蚀及氢脆变形,涂层易碎裂,基体断面强度下降,涂层硬质合金时还易产生脱碳现象而形成 n 相。近年来,中、低温CVD法和PCVD法(等离子增强化学气相沉积法)开发成功,改善了原有CVD工艺。

PVD法具有起步晚、发展快、温度低($300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)等特点,但涂层的均匀性不如CVD法,涂层与基体结合得不太牢固,涂层硬度比较低,涂层的优越性未得到充分体现。PVD法的工艺要求比CVD法高,设备更复杂,涂层循环周期长。目前,常用的PVD法有低压电子束蒸发法(LVEE)、阴极电子弧沉积法(CAD)、三极管高压电子束蒸发法(THVEE)、非平衡磁控溅射法(UMS)、离子束协助沉积法(IAD)和动力学离子束混合法(DIM),其主要差别在于沉积材料的气化方法以及产生等离子体的方法不同,从而使得成膜速度和膜层质量存在差异。

常用的涂层材料有碳化物、氮化物、碳氮化物、氧化物、硼化物、硅化物、金刚石及复合涂层八大类、数十个品种。在这些涂层材料中,用得最多的是TiC、TiN、 Al_2O_3 、金刚石以及复合涂层,涂层厚度随刀具材料不同而异。

(1) TiC涂层。此涂层刀具材料的硬度高、耐磨性好、抗氧化性好,切削时能产生氧化钛膜,减小摩擦及刀具磨损,适用于低速切削及磨损严重的场合。

(2) TiN涂层。此涂层刀具材料在高温时能产生氧化膜,与铁基材料的摩擦系数较小,抗黏结性能好,并能有效降低切削温度,适用于产生融合和磨损的切削。

(3) TiC-TiN复合涂层。第一层涂TiC,与刀具基体黏牢不易脱落。第二层涂TiN,减少表面层与工件间的摩擦。

(4) TiC- Al_2O_3 复合涂层。第一层涂TiC,与刀具基体黏牢不易脱落。第二层涂 Al_2O_3 ,可使刀具表面具有良好的化学稳定性和抗氧化性能。

目前,单涂层刀片已很少应用,大多采用TiC-TiN复合涂层或TiC- Al_2O_3 -TiN三复合涂层。利用涂层技术制作各种刀片,刀片内部是合金材料制成的,刀片外又有涂层,不仅耐用,价格也便宜,加工钢料最好用这种刀。利用刀片制作可换刀片、刀具可以节约大量的刀柄材料,同时易于刀具的模块化、系统化,有利于数控加工的需要。

4. 其他刀具材料

(1) 陶瓷刀具材料。

陶瓷刀具材料具有高硬度、高耐磨性、与金属的亲合力小、化学稳定性好等特点,在国内外被广泛地应用于切削加工淬火钢、合金钢、各种难切削的铸铁、镍基高温合金等材料,其切削效率是硬质合金的3倍以上,特别是对于一些难切削材料,有优良的切削特点。早在20世纪初,德国与英国已经开始寻求采用陶瓷刀具取代传统的碳素工具钢刀具。陶瓷材料因其高硬度与耐高温特性成为新一代的刀具材料,但陶瓷也由于脆性导致应用受到局限。因此,如何克服陶瓷刀具材料的脆性,提高它的韧性,成为近百年来研究陶瓷刀具的主要课题。陶瓷的应用范围在相关研究的推进下日益扩大。截至目前,用作陶瓷刀具的材料包括氧化铝陶瓷、氧化铝-金属系陶瓷、氧化铝-碳化物系陶瓷、氧化铝-碳化物金属陶瓷、氧化铝-氮化物金属陶瓷及氮化硼陶瓷。其中,氧化铝-碳化物系陶瓷刀具拥有抗弯强度高、耐热冲击性等优越特性。

①氧化铝陶瓷刀具。氧化铝陶瓷刀具材料中采用纯 Al_2O_3 陶瓷及以 Al_2O_3 为主且添加少量其他元素的陶瓷材料,如MgO、NiO、 SiO_2 、 TiO_2 和 Cr_2O_3 等。添加物有利于提高 Al_2O_3 的抗弯强度,但刀具的高温性能有所降低,因此还是以纯 Al_2O_3 陶瓷材料为佳。它是纯度在99.9%以上的 Al_2O_3 添加0.1%~0.15%的玻璃氧化物(MgO、NiO、 TiO_2 、 Cr_2O_3),采用冷压或热压制成的,如牌号P1(AM),硬度为96.5 HRN,抗弯强度为500~550 MPa,它的高温性能比较低。氧化铝陶瓷刀具最适用于高速



切削硬而脆的金属材料，如冷硬铸铁或淬硬钢；也用于大件机械零部件切削及高精度零件的切削加工。氧化铝陶瓷刀具在短、小零件，钢件的断续切削及 Mg、Al、Ti 及 Be 等单质材料及其合金材料切削加工时的效果较差，容易使刀具出现扩散磨损，或发生剥落与崩刃等缺陷。

②氧化铝-金属系陶瓷刀具。氧化铝-金属系陶瓷刀具材料是在 Al_2O_3 中增添 10% 以下的金属 (Cr、Co、Mo、W、Ti、Fe 等) 构成金属陶瓷。由于它的蠕变强度低、抗氧化性能差，很少采用。为提高 Al_2O_3 陶瓷刀具的韧性，材料中引入 10% 以下的金属元素，由此形成 Al_2O_3 金属陶瓷，这样材料密度、抗弯强度及硬度均有提高，但由于氧化铝-金属系陶瓷刀具的抗蠕变强度低、抗氧化性差，后来的推广使用情况不佳。

③氧化铝-碳化物系陶瓷刀具。氧化铝-碳化物系陶瓷刀具材料是在 Al_2O_3 中添加百分之几到百分之几十的碳化物，如 Mo_2C 、WC、TiC、TaC、NbC 和 Cr_3C_2 等，以改善 Al_2O_3 陶瓷刀具的性能。氧化铝-碳化物系陶瓷刀具的硬度达 94.5~95.3 HRA，抗弯强度达 800~1 180 MPa。当 TiC 含量为 30% 时，陶瓷刀具的耐用度显著提高，而热裂纹深度也较小。目前，国际上生产热压 Al_2O_3 -TiC 陶瓷刀具均采用此配方。 Al_2O_3 -TiC 陶瓷刀具的抗弯强度、耐热冲击性等均优于 Al_2O_3 陶瓷刀具。常见牌号有 M16 (T8)、AT6、SG3、SG4 等。

④氧化铝-碳化物金属陶瓷刀具。氧化铝-碳化物金属陶瓷刀具是在氧化铝-碳化物陶瓷中添加金属 (Mo、Ni 等)，以提高氧化铝与碳化物之间的连接强度，从而提高其使用性能。这类陶瓷刀具最适用于加工淬硬钢、合金钢、锰钢、冷硬铸铁、铸钢、镍基或镍铬合金、镍基和钴基合金等，另外还可用于非金属材料，如纤维玻璃、塑料夹层及陶瓷材料的切削加工。由于氧化铝-碳化物金属陶瓷刀具的抗热振性能良好，故可适用于铣削、刨削、反复短暂切削或其他间断切削等，亦可采用切削液进行湿式切削等，常用牌号有 M4、M5 (T1)、M6、LT35、LT55 等。

⑤氧化铝-氮化物金属陶瓷刀具。氧化铝-氮化物金属陶瓷刀具材料的基本性能及加工范围与氧化铝-碳化物金属陶瓷刀具材料相当，不过由于以氮化物取代碳化物，因此它具有更好的抗热振性能，更适用于间断切削。但是其抗弯强度与硬度都比添加 TiC 的金属陶瓷低一些，对它的研究与深度开发仍在深化。

⑥氮化硼陶瓷刀具。氮化硼陶瓷刀具材料为黏合性立方晶氮化硼陶瓷 (CBN)，压力为 7~8 GPa，在 2 300~2 400 °C 超高温高压下烧结 10 min 后制成。采用氮化硼材料制成的陶瓷刀具，在对硬度很高的铸铁进行切削加工时，根据不同条件，与含有其他结合材料的 CBN 烧结体相比较，其使用时间可延长 10 倍以上，成为一种可断续切削的材料。氮化硼陶瓷刀具的优点是硬度高，耐磨性、耐高温性能好，有良好的化学稳定性和抗氧化性，与金属的亲合力小，抗黏结和抗扩散能力强；其缺点是脆性大，抗弯强度低，冲击韧性差，易崩刃，所以使用范围受到限制。氮化硼陶瓷刀具可用于钢、铸铁类零件的车削、铣削加工。

随着特种陶瓷材料研究与开发工作的不断深入，陶瓷刀具在金属切削加工领域中的应用不断扩展。随着航空、航天工业的发展，必须满足提高 Ti 合金和 Ni 基高温合金等工件材料切削效率的要求，特种陶瓷刀具材料将会作出更大的贡献。

(2) 金刚石刀具材料。

金刚石是碳的同素异形体，在高温、高压下由石墨转化而成，是目前人工制造出的最坚硬物质。由于金刚石刀具材料的硬度极高，耐磨性好，切削刃口锋利，刃部表面摩擦系数较小，不易产生黏结或积屑瘤，既可用于加工硬质合金、陶瓷等硬度达 65~70 HRC 的材料，也可用于加工高硬度的非金属材料，如石材、压缩木材、玻璃等，还可用于加工有色金属，如铝硅合金材料以及复合难加工材料的精加工或超精加工。金刚石刀具材料的缺点是热稳定性差、强度低、脆性大、对振动敏感，只宜微



量切削，与铁有强烈的化学亲和力，不能用于加工钢材。可以制成切削刀具的金刚石材料有天然单晶金刚石、人造单晶金刚石、人造聚晶金刚石复合片、CVD 金刚石膜等。

①天然单晶金刚石。天然单晶金刚石是一种各向异性单晶体。它的硬度达 9 000~10 000 HV，是自然界中最硬的物质。这种材料的耐磨性极好，用其制成的刀具在切削中可长时间保持尺寸稳定，因而有很长的刀具寿命。刃口可以加工到极其锋利，可用于制作眼科和神经外科手术刀，加工隐形眼镜曲面，切割光导玻璃纤维，加工黄金、白金首饰花纹。天然单晶金刚石最重要的用途是高速超精加工有色金属及其合金，如铝、黄金、巴氏合金、铍铜、紫铜等。用天然金刚石制作超精加工刀具，其刀尖圆弧部分在 400 倍显微镜下观察无缺陷，用于加工铝合金多面体反射镜、无氧铜激光反射镜、陀螺仪、录像机磁鼓等。表面粗糙度 Ra 可达到 0.01~0.025 μm 。天然金刚石材料的韧性很差，且抗弯强度很低，仅为 0.2~0.5 GPa。天然单晶金刚石的热稳定性差，温度达到 700~800 $^{\circ}\text{C}$ 时就会失去硬度，温度再高就会碳化。另外，它与铁的亲和力很强，一般不适于加工钢铁。

②人造单晶金刚石。这种材料的硬度略逊于天然单晶金刚石，其他性能都与天然金刚石不相上下。由于经过人工制造，人造单晶金刚石的解理方向和尺寸变得可控和统一。随着高温高压技术的发展，人造单晶金刚石的最大尺寸已经可以做到 8 mm。这种材料有相对较好的一致性和较低的价格，所以受到广泛关注。作为替代天然单晶金刚石的新材料，人造单晶金刚石的应用将会有大发展。

③人造聚晶金刚石复合片。人造聚晶金刚石 (PCD) 是在高温高压下将金刚石微粉加溶剂聚合而成的多晶体材料。在一般情况下，制成以硬质合金为基体的整体圆形片，称为聚晶金刚石复合片。根据金刚石基体厚度的不同，复合片有 1.6 mm、3.2 mm、4.8 mm 等不同规格。而聚晶金刚石厚度一般在 0.5 mm 左右。根据需要可用激光或线切割把聚晶金刚石复合片切成不同尺寸和角度的形状，制成车刀、镗刀和铣刀等。

PCD 硬度比天然金刚石低 (HV 在 6 000 左右)，但抗弯强度比天然单晶金刚石高很多。另外，通过调整金刚石微粉粒度和浓度，使 PCD 制品的机械、物理性能发生改变，以适应不同材质、不同加工环境的需要，为刀具用户提供了多种选择。

PCD 刀具比天然金刚石刀具的抗冲击和抗振性能高出很多。与硬质合金相比，PCD 刀具的硬度高出 3~4 倍，耐磨性和寿命高 50~100 倍，切削速度可加快 5~20 倍，表面粗糙度 Ra 可达到 0.05 μm ，切削效率高，加工精度稳定。

PCD 刀具同天然单晶金刚石刀具一样，不适合加工钢和铸铁。这种刀具主要用于加工有色金属及非金属材料，如铝、铜、锌、金、银、铂及其合金，以及陶瓷、碳纤维、橡胶、塑料等。PCD 刀具还可用于加工木材和石材。PCD 刀具特别适合加工高硅铝合金，因此在汽车、航空、电子、船舶工业中得到了广泛应用。

④ CVD 金刚石膜。CVD 金刚石膜是一种用化学气相沉积法制成的金刚石材料，作为刀具材料，其硬度高于 PCD。由于不含金属结合剂，CVD 金刚石膜有很高的热传导率和抗高温氧化性能。但目前生产的 CVD 材料的韧性比较差，它不能用线切割方式进行切割加工，故使用上受到了一定限制。由于 CVD 金刚石膜没有切磨方向性，磨加工工艺性较差，极难磨出与天然单晶金刚石和人造单晶金刚石一样的锋利刃口。

(3) 立方氮化硼。

立方氮化硼 (CBN) 是由六方氮化硼在高温、高压下加入催化剂转化而成的，有单晶体和多晶结构两种。它有很高的硬度及耐磨性，热稳定性好，化学惰性大，具有良好的透红外性和较宽的禁带宽度等优异性能。它的硬度仅次于金刚石，但热稳定性远高于金刚石，与铁系金属在 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 时不易起化学反应，导热性好，摩擦系数低，因此可用于高温合金、冷硬铸铁、淬硬钢等难加工材料的加工。

应当指出的是，加工一般材料时大量使用的仍是普通高速钢及硬质合金，只有在加工难加工材料时才考虑选用新牌号合金或高性能高速钢，在加工高硬度材料或精密加工时才考虑选用超硬材料。

六、现代刀具系统

（一）模块化刀具系统

在数控机床上要加工多种工件，并完成工件上多道工序的加工，因此使用的刀具品种、规格和数量较多。为了减少刀具的品种规格，有必要发展柔性制造系统和加工中心使用的工具系统。工具系统一般为模块化组合结构，在一个通用的刀柄上可以装多种不同的刀具，使数控加工中的刀具品种规格大大减少，同时也便于刀具的管理。发展模块化刀具系统的主要优点：减少换刀停机时间，延长生产加工时间；加快换刀及安装速度，提高小批量生产的经济性；提高刀具的标准化和合理化的程度；提高刀具的管理及柔性加工的水平；提高刀具的利用率，充分发挥刀具的性能；有效地消除刀具测量工作的中断现象，可采用线外预调。模块化刀具系统已发展形成了三大系统，即车削刀具系统、钻削刀具系统和镗铣刀具系统。

1. 车削刀具系统

数控车床一般使用标准的机夹可转位刀具。机夹可转位刀具的刀片和刀体都有标准，刀片材料采用硬质合金、涂层硬质合金以及高速钢。数控车床机夹可转位刀具类型有外圆刀具、外螺纹刀具、内圆刀具、内螺纹刀具、切断刀具、孔加工刀具（包括中心孔钻头、镗刀、丝锥等）。常规车削刀具为长条形方刀体或圆柱刀柄。方形刀体一般用槽形刀架螺钉紧固方式固定，圆柱刀柄用套筒螺钉紧固方式固定，它们与机床刀盘之间的连接是通过槽形刀架和套筒接杆来连接的。在模块化车削工具系统中，刀盘的连接以齿条式柄体连接为多，而刀头与刀体的连接是插入快换式系统。它既可以用于外圆车削，又可用于内孔镗削，也适用于车削中心的自动换刀系统。数控车床使用的刀具从切削方式上分为圆表面切削刀具、端面切削刀具和中心孔类刀具三类。

2. 钻削刀具系统

钻削刀具系统主要用于数控车床加工中心，也可用于数控镗铣加工中心。它的结构和连接形式有多种，如直柄、直柄螺钉紧定、锥柄、螺纹连接、模块式连接（圆锥或圆柱连接）等。

3. 镗铣刀具系统

镗铣刀具系统有刀柄和刀体分离的模块式以及整体式两种。

（二）可转位刀片及其代码

在数控机床加工中，人们常用的刀具大多为可换刀片式，下面简要介绍可转位刀片及其代码。ISO标准和我国标准规定了可转位刀片型号的含义。可转位刀片的型号共用10个号位的内容来表示主要参数的特征。按照规定，任何一个型号刀片都必须用前7个号位，后3个号位在必要时才使用。但对于车刀刀片，第10号位属于标准要求标注的部分。不论有无第8、9两个号位，第10号位都必须用短横线“-”与前面号位隔开，并且其字母不得使用第8、9两个号位已使用过的字母。当只使用其中一位时，则写在第8号位上，中间无须空格。现对第10个号位的具体内容作如下说明。

第1个号位表示可转位刀片的形状，用一位大写英文字母表示。第1个号位主要有等边等角的形状 [H（正六边形，刀尖角为 120° ）、O（正八边形，刀尖角为 135° ）、P（正五边形，刀尖角为 108° ）、S（正方形，刀尖角为 90° ）、T（正三角形，刀尖角为 60° ）]、等边不等角的形状 [C（菱形，刀尖角为 80° ）、D（菱形，刀尖角为 55° ）、E（菱形，刀尖角为 75° ）、M（菱形，刀尖角为 86° ）、V（菱形，刀尖角为 35° ）、W（六边形，刀尖角为 80° ）]、等角不等边的矩形L（ 90° ）、不等边不等角的六边形



F (最小角 82°)、不等边不等角的平行四边形 [A (85°)、B (82°)、K (55°)]、圆形 R 等型号。可转位刀片的形状如图 2-34 所示。

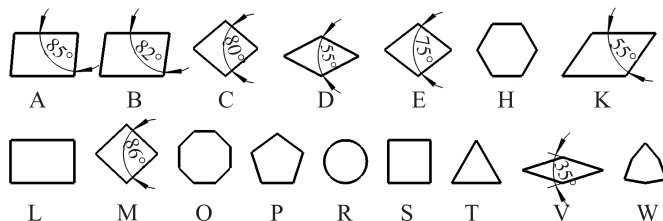


图 2-34 可转位刀片的形状

第 2 个号位表示可转位刀片的法后角，用大写英文字母表示，主要有 A、B、C、D、E、F、G、N、P 等型号，如图 2-35 所示。

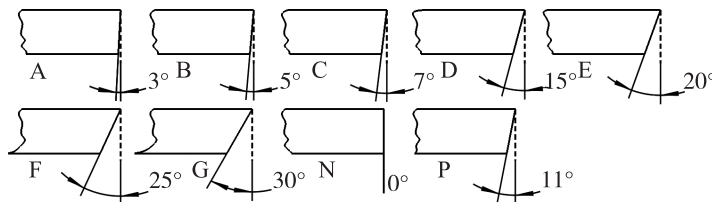


图 2-35 可转位刀片的法后角

第 3 个号位表示可转位刀片的尺寸精度，用大写英文字母表示，主要有刀片内切圆直径、内切圆与刀尖距离、刀片厚度三个方面，共 11 种型号，如图 2-36 所示。刀具各种型号的误差等级及允许偏差范围见表 2-7 所列。

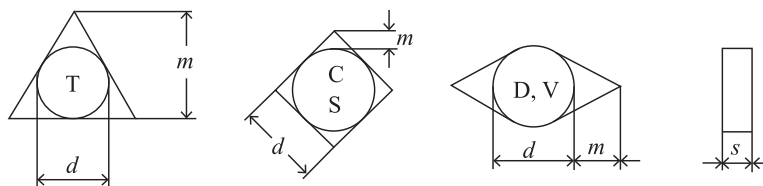


图 2-36 可转位刀片的尺寸精度

表 2-7 刀具各种型号的误差等级及允许偏差范围

单位: mm

| 序号 | 刀片内切圆直径 d | 内切圆与刀尖距离 m | 刀片厚度 s |
|----|------------------------|------------------------|----------------------|
| A | ± 0.025 | ± 0.005 | ± 0.025 |
| C | ± 0.025 | ± 0.013 | ± 0.025 |
| E | ± 0.025 | ± 0.025 | ± 0.025 |
| G | ± 0.025 | ± 0.025 | $\pm 0.05 \sim 0.13$ |
| H | ± 0.013 | ± 0.013 | ± 0.025 |
| J | $\pm 0.05 \sim 0.15^*$ | ± 0.005 | ± 0.025 |
| K | $\pm 0.05 \sim 0.15^*$ | ± 0.013 | ± 0.025 |
| L | $\pm 0.05 \sim 0.15^*$ | ± 0.013 | ± 0.025 |
| M | $\pm 0.05 \sim 0.15^*$ | $\pm 0.08 \sim 0.20^*$ | ± 0.013 |
| N | $\pm 0.05 \sim 0.15^*$ | $\pm 0.08 \sim 0.20^*$ | ± 0.025 |
| U | $\pm 0.05 \sim 0.15^*$ | $\pm 0.13 \sim 0.38^*$ | $\pm 0.05 \sim 0.13$ |

注: 有 * 通常用于有修光刃的可转位刀片。

第 4 个号位表示可转位刀片的前刀面及中心孔型号，用大写英文字母表示，主要有 A (有圆形固



定孔、无断屑槽)、B (单面有 $70^\circ \sim 90^\circ$ 固定沉孔、无断屑槽)、C (双面有 $70^\circ \sim 90^\circ$ 固定沉孔、无断屑槽)、F (无固定孔、双面有断屑槽)、G (有圆形固定孔、双面有断屑槽)、H (单面有 $70^\circ \sim 90^\circ$ 固定沉孔、单面有断屑槽或断屑台)、J (双面有 $70^\circ \sim 90^\circ$ 固定沉孔、双面有断屑槽)、M (有圆形固定孔、单面有断屑槽或断屑台)、N (无固定孔、无断屑槽)、Q (双面有 $40^\circ \sim 60^\circ$ 固定沉孔、无断屑槽)、R (无固定孔、单面有断屑槽)、T (单面有 $40^\circ \sim 60^\circ$ 固定沉孔、单面有断屑槽)、U (双面有 $40^\circ \sim 60^\circ$ 固定沉孔、双面有断屑槽)、W (单面有 $40^\circ \sim 60^\circ$ 固定沉孔、无断屑槽)、X (其他尺寸, 需加说明) 等, 如图 2-37 所示。

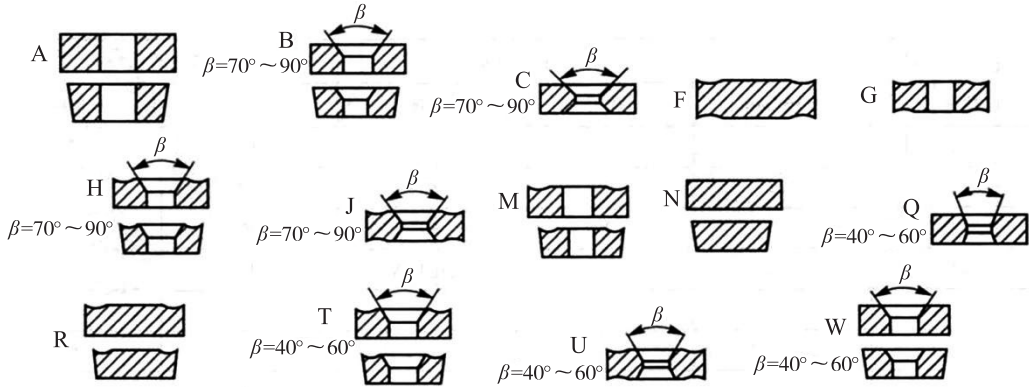


图 2-37 各种刀片的前刀面及中心孔型号

第 5 个号位表示可转位刀片刃口长度的整数值, 用两位数字表示。若切削刃长度为 15.875 mm, 则数字表示为 15, 舍去小数部分; 若切削刃长度为 7.94 mm, 则数字表示为 07, 以此类推, 各种型号刀片刃口长度表示的位置图 2-38, l 表示边长, d 表示半径。

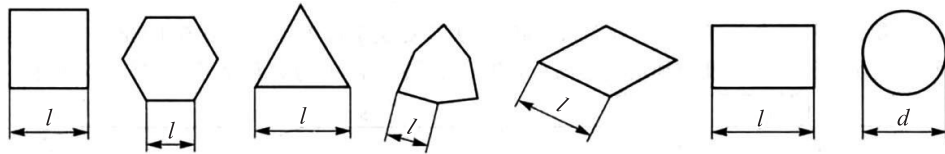


图 2-38 各种型号刀片刃口长度表示的位置

第 6 个号位表示可转位刀片的厚度, 用两位数字表示, 主要有 02 ($S=2.38$ mm)、03 ($S=3.18$ mm)、T3 ($S=3.97$ mm)、04 ($S=4.76$ mm)、05 ($S=5.56$ mm)、06 ($S=6.35$ mm)、07 ($S=7.94$ mm)、09 ($S=9.52$ mm) 等几种类型, 图 2-39 为 4 种刀片的截面形状。

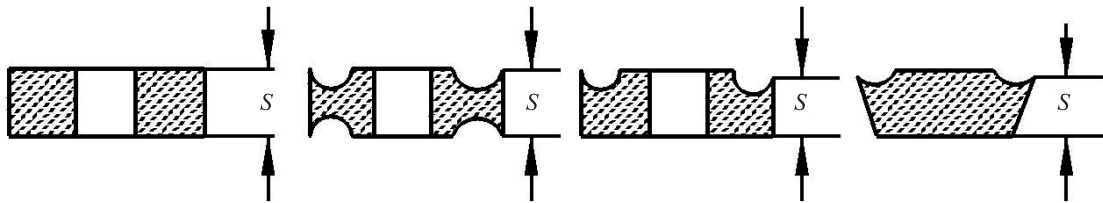


图 2-39 4 种刀片的截面形状

第 7 个号位若用两位数字表示时, 表示可转位刀片的刀尖圆弧半径; 若用两个字母表示时, 前一个字母表示可转位刀片主偏角, 后一个字母表示修光刃后角, 如图 2-40 所示。刀尖圆弧半径、主偏角、修光刃后角代号见表 2-8 所列。

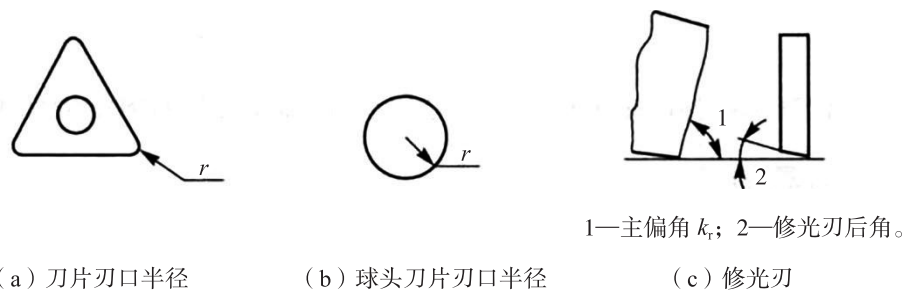


图 2-40 刀片刃口半径、主偏角修光刃表达形式

表 2-8 刀尖圆弧半径、主偏角、修光刃后角代号

| 刀尖圆弧半径 | | 主偏角 k_r | | 修光刃后角 | |
|--------|-------|-----------|--------------|-------|--------------|
| 代号 | 半径/mm | 代号 | 角度/ $^\circ$ | 代号 | 角度/ $^\circ$ |
| 02 | 0.2 | A | 45 | A | 3 |
| 04 | 0.4 | D | 60 | B | 5 |
| 08 | 0.8 | E | 75 | C | 7 |
| 12 | 1.2 | F | 85 | D | 15 |
| 16 | 1.6 | P | 90 | E | 20 |
| 24 | 2.4 | Z | 其他角度 | F | 25 |
| | | | | G | 30 |
| | | | | N | 0 |
| | | | | P | 11 |
| | | | | Z | 其他后角 |

第 8 个号位表示刃口形状，用大写英文字母表示，主要有 E（倒圆切削刃）、F（尖锐切削刃）、S（负倒棱加倒圆切削刃）、T（负倒棱切削刃）等几种型号，如图 2-41 所示。

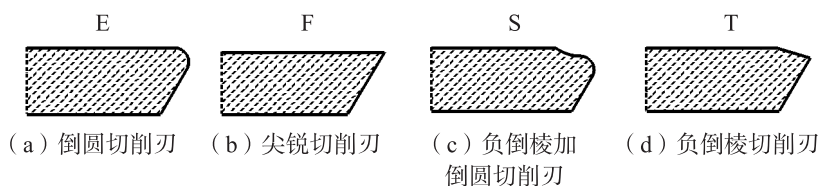


图 2-41 刃口形状

第 9 个号位表示刀片切削方向，用大写英文字母表示，主要有 R（右切）、L（左切）、N（左右切）3 种类型，如图 2-42 所示。

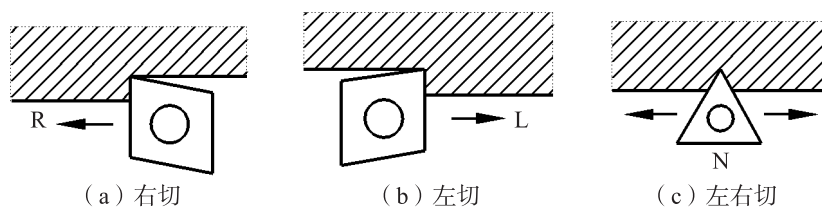


图 2-42 刀片切削方向类型

第 10 个号位在 ISO 标准中为厂家备用号位，可以标注刀片断屑槽型号代码或代号。

（三）典型刀具系统种类及特征

1. 整体式刀具系统

目前，我国的加工中心采用 TSG 整体式刀具系统，如图 2-43 所示。整体式刀具系统的柄部有直柄（3 种规格）和锥柄（4 种规格）两种，共包括 16 种不同用途的刀柄。

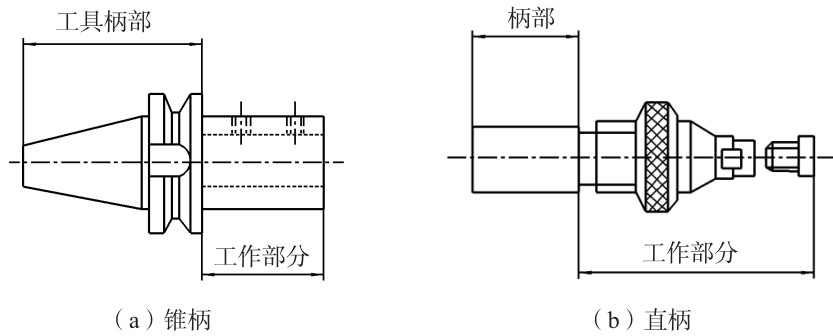


图 2-43 整体式刀具系统

整体式刀具系统的主要特点是刀体采用整体式结构，与机床的连接、定位采用 7:24 锥柄，结构稳定。大规格 50 号、60 号锥柄适用于重型切削机床，小规格 30 号锥柄适用于高速轻切削机床。应用该系统可完成钻、扩、铰、镗、铣和攻螺纹等多种切削加工，是一套非常完善的加工刀具系统。图 2-44 为 TSG 整体式刀具系统常见刀具。



图 2-44 TSG 整体式刀具系统常见刀具

2. 模块式刀具系统

模块式刀具系统主要由刀片（刀具）、刀柄（或柄体）、主轴组成，或者由刀片（刀具）、工作头、连接杆、主柄、主轴组成，如图 2-45 所示。模块之间的连接采用单圆柱定心，径向销钉锁紧，端面摩擦传递扭矩。连接结构一端为孔，另一端为轴，两者插入后通过锁紧螺钉锁紧，形成一个刚性刀杆。这种模块式结构的定位精度高，装卸方便，连接刚性好，传递扭矩大。它的最大特点就是可根据加工需要，通过中间模块的连接调整刀具的长度，中间模块可进行多节连接。刀头模块有钻、扩、铰、镗、铣和攻丝等多种加工功能。该系统既适用于重型切削，又适用于轻型切削场合。

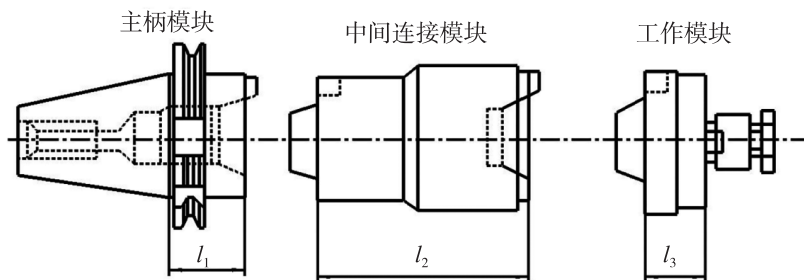


图 2-45 模块式刀具系统组成



目前,我国的加工中心采用的 TMG21 工具系统结构如图 2-46 所示。铣镗类工具系统常用在加工中心上,常见的加工中心刀具库如图 2-47 所示。

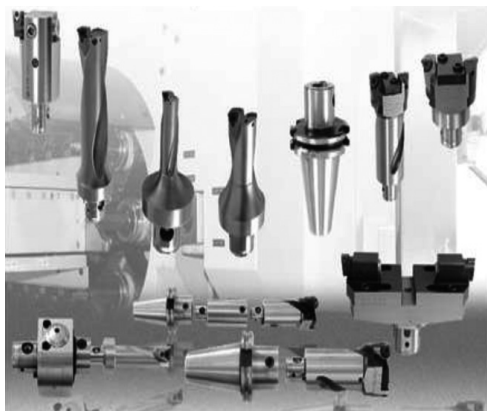
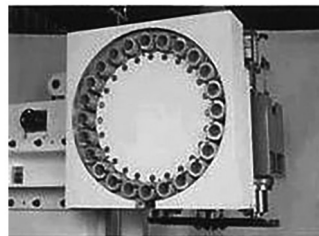
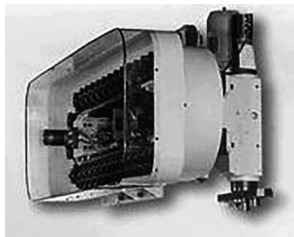
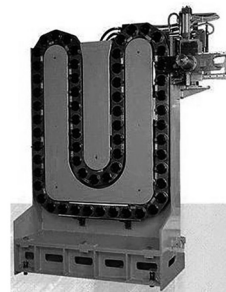


图 2-46 TMG21 工具系统



(a) 20 把刀的无臂式 ATC 刀具库 (b) 24 把刀的有臂式 ATC 刀具库



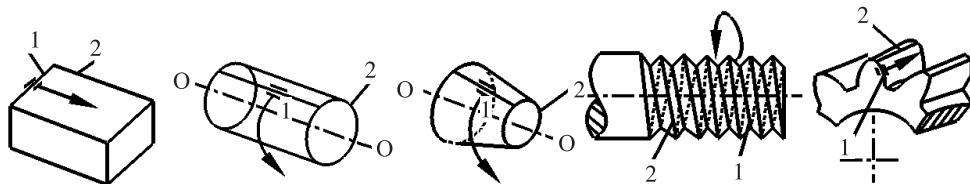
(c) 32 把刀的有臂式刀具库 (d) 60 把刀的有臂式刀具库

图 2-47 常见的加工中心刀具库

七、金属切削加工过程中的主要现象及基本规律

(一) 零件表面的切削加工成形方法

在切削加工过程中,机床上的刀具和工件按一定的规律做相对运动,通过刀具对工件毛坯的切削作用,切除毛坯上的多余金属,从而得到所要求的零件表面形状。机械零件的任何表面都可以看作一条线(称为母线)沿另一条线(称为导线)运动的轨迹。成形方法如图 2-48 所示,平面是由一条直线(母线)沿另一条直线(导线)运动而形成的;圆柱面和圆锥面是由一条直线(母线)沿着一个圆(导线)运动而形成的;普通螺纹的螺旋面是由“Λ”形线(母线)沿螺旋线(导线)运动而形成的;直齿圆柱齿轮的渐开线齿廓表面是渐开线(母线)沿直线(导线)运动而形成的;等等。



1—母线; 2—导线。

图 2-48 成形方法

母线和导线统称为发生线。切削加工中,发生线是由刀具的切削刃与工件间的相对运动得到的。一般情况下,由切削刃本身或与工件相对运动配合形成一条发生线(一般是母线),而另一条发生线则完全是由刀具和工件之间的相对运动得到的。这里,刀具和工件之间的相对运动都是由机床来提供的。

机床在加工过程中,必须形成一定形状的发生线(母线和导线),才能获取所需的工件表面形状。因此,机床必须完成一定的运动,这种运动称为表面成形运动。此外,还有多种辅助运动。

1. 表面成形运动

表面成形运动按其组成情况不同,可分为简单成形运动和复合成形运动两种。



如果一个独立的成形运动是由单独的旋转运动或直线运动构成的，则此成形运动称为简单成形运动。例如，用车刀车削外圆柱面时，如图 2-49 (a) 所示，工件的旋转运动 B_1 产生圆导线，刀具纵向直线运动 A_2 产生直线母线，即加工出圆柱面。运动 B_1 和 A_2 是两个相互独立的表面成形运动，因此用车刀车削外圆柱时属于简单成形运动。

如果一个独立的成形运动是由两个以上的旋转运动或（和）直线运动按某种确定的运动关系组合而成的，则此成形运动称为复合成形运动。例如，用螺纹车刀车削螺纹表面时，如图 2-49 (b) 所示，工件的旋转运动 B_{11} 和车刀的直线运动 A_{12} 按规定做相对运动，形成螺旋线导线，三角形母线（由刀刃形成，不需成形运动）沿螺旋线运动，形成了螺旋面。形成螺旋线导线的两个简单运动 B_{11} 和 A_{12} ，由于螺纹导程限定而不能彼此独立，它们必须保持严格的运动关系，从而 B_{11} 和 A_{12} 这两个简单运动组成了一个复合成形运动。

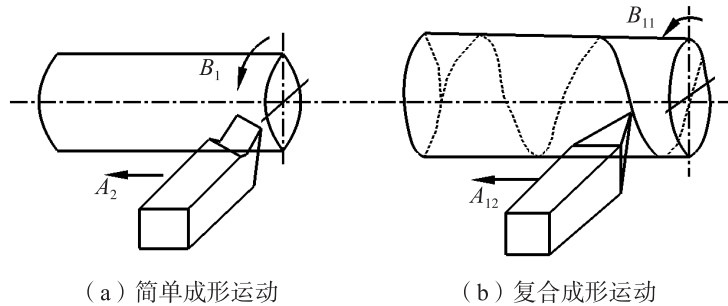


图 2-49 成形运动的组成

2. 辅助运动

机床在加工过程中还需一系列辅助运动，其功能是实现机床的各种辅助动作，为表面成形运动创造条件。它的种类很多，如进给运动前后的快进和快退，调整刀具和工件之间正确相对位置的调位运动，切入运动，分度运动，工件夹紧、松开等操纵控制运动。

(二) 金属切削加工过程中的变形

1. 切屑层金属的变形

切削层金属形成切屑的过程就是其在刀具的作用下发生变形的过程。切削层金属的变形大致可划分为三个区域，金属切削过程中的滑移线和流线示意图如图 2-50 所示。

(1) 第一变形区。从 OA 线开始发生塑性变形，到 OM 线，金属晶粒的剪切滑移基本完成。 OA 线和 OM 线之间的区域（图 2-50 中的 I 区）称为第一变形区，又称“基本变形区”。

(2) 第二变形区。切屑沿前刀面排出时，进一步受到前刀面的挤压和摩擦，使靠近前

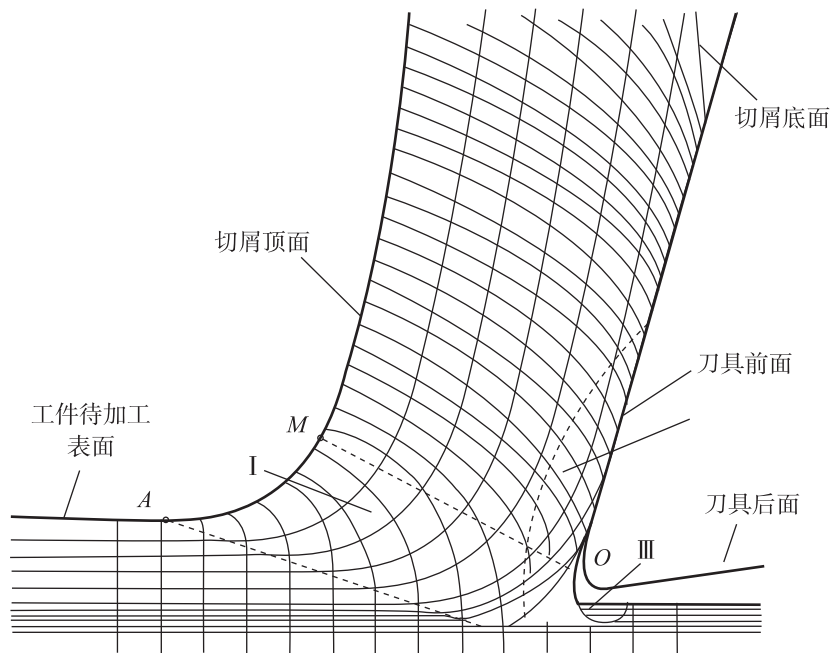


图 2-50 金属切削过程中的滑移线和流线示意图



刀面处的金属纤维化，基本上和前刀面平行。这一区域（图 2-50 中的 II 区）称为第二变形区。

（3）第三变形区。已加工表面受到切削刃钝圆部分和后刀面的挤压和摩擦，造成表层金属纤维化与加工硬化。这一区域（图 2-50 中的 III 区）称为第三变形区。

切屑的形成可以用图 2-51 形象地说明。被切削金属层好比一叠卡片（阴影平行四边形的 1'，2'，3'，……），刀具切入时，卡片之间发生滑移，被移动到 1，2，3，……的位置，卡片之间的滑移方向就是剪切面。

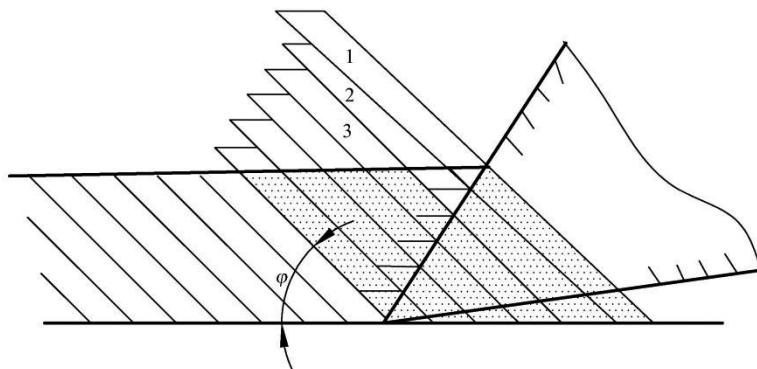


图 2-51 切屑形成过程示意图

三个变形区汇集在切削刃附近，此处的应力比较集中而复杂。金属的切削层就在此处与工件基体发生分离，形成切屑。

2. 前刀面的挤压与摩擦及其对切削变形的影响

（1）切削变形程度。

切削变形程度有三种不同的表示方法：变形系数、相对滑移和剪切角。

①前角增大时，剪切角随之增大，变形减小。这表明增大刀具前角可减少切削变形，对改善切削过程有利。

②摩擦角增大时，剪切角随之减小，变形增大。提高刀具刃磨质量、采用润滑性能好的切削液可以减小前刀面和切屑之间的摩擦因数，有利于改善切削过程。

（2）影响切屑变形的因素。

①工件材料。工件材料强度越高，切屑和前刀面的接触长度越短，导致切屑和前刀面的接触面积减小，前刀面上的平均正应力 σ_{av} 增大，前刀面与切屑间的摩擦因数减小，摩擦角 β 减小，剪切角 φ 增大，变形系数 ζ 将随之减小。

②刀具前角。增大刀具前角 γ_0 ，剪切角 φ 将随之增大，变形系数 ζ 将随之减小。但 γ_0 增大后，前刀面倾斜程度加大，切屑作用在前刀面上的平均正应力 σ_{av} 减小，使摩擦角 β 和摩擦因数 μ 增大，从而导致 φ 减小。由于后一方面的影响较小， ζ 还是随 γ_0 的增大而减小。

③切削速度 v_c 。在无积屑瘤产生的切削速度范围内，切削速度 v_c 越大，变形系数 ζ 越小。这主要是因为塑性变形的传播速度较弹性变形慢，切削速度越快，切削变形越不充分，导致变形系数下降。此外，提高切削速度还会使切削温度增高，切屑底层材料的剪切屈服强度 σ_s 因温度的增高，从而略有下降，导致前刀面摩擦因数 μ 减小，使变形系数 ζ 下降。

④切削层公称厚度 h_D 。在无积屑瘤的切削速度范围内，切削层公称厚度 h_D 越大，变形系数 ζ 越小。

（三）积屑瘤的形成及其对切削过程的影响

1. 积屑瘤的形成

在切削速度不快而又能形成带状切屑的情况下，加工一般钢料或铝合金等塑性材料时，常在刀具前刀面切削处有着一块剖面呈三角状的硬块，如图 2-52 所示。它的硬度很高，通常是工件材料硬度的 2~3 倍，这块附着在前刀面上的金属称为积屑瘤。

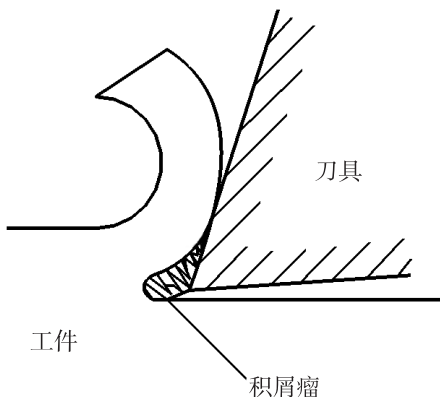


图 2-52 积屑瘤

切削时，切屑与前刀面接触处发生强烈摩擦，当接触面达到一定温度，同时又存在较高压力时，被切材料会黏结（冷焊）在前刀面上。连续流动的切屑从黏在前刀面上的底层金属上流过时，如果温度与压力适当，切屑底部材料也会被阻滞在已经“冷焊”在前刀面上的金属层上黏成一体，使黏结层逐步长大，形成积屑瘤。积屑瘤的产生及其成长与工件材料的性质、切削区的温度分布和压力分布有关。塑性材料的加工硬化倾向越强，越易产生积屑瘤；切削区的温度和压力很低时，不会产生积屑瘤，温度太高时，由于材料变软，也不易产生积屑瘤。

2. 积屑瘤对加工的影响

（1）保护刀具。积屑瘤包围着切削刃，加工中心同时覆盖着一部分前刀面，由于积屑瘤是材料剧烈变形强化后的产物，其硬度高达金属母体的 2~3 倍，故能代替切削刃和前刀面进行切削，所以切削刃和前刀面都得到了积屑瘤的保护，减少了刀具的磨损。

（2）增大实际前角。有积屑瘤的车刀，实际前角可增大至 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，因而减少了切屑的变形，降低了切削力。

（3）影响工件表面质量和尺寸精度。由于积屑瘤总是极不稳定的，时生时灭，时大时小，在切削过程中，摇臂钻床的一部分积屑瘤被切屑带走，一部分嵌入工件已加工表面，加工中心使工件表面形成硬点和毛刺，表面粗糙度值变大。

当积屑瘤大到切削刃之外时，使刀尖的实际位置发生了变化，改变了切削深度，影响了工件的尺寸精度。因此，在精加工时，应设法避免积屑瘤的产生。

3. 影响积屑瘤的主要因素

影响积屑瘤的主要因素是工件材料、切削速度、进给量、前角和切削液等，其中，切削速度对产生积屑瘤的影响最大。因此，重点分析切削速度对积屑瘤的影响。

在中等切削速度（15~30 m/min）时，切削温度约为 300°C ，切屑底层金属塑性变形增大，切屑与前刀面的接触面积增大，因而这时的摩擦因数最大，最易产生积屑瘤。加工中心高速（70 m/min 以上）或低速（5 m/min 以下）切削时，会使切削温度高于或低于 300°C ，摩擦因数降低，从而使积屑瘤减小。由此可知，将切削速度控制在小于 5 m/min 或大于 70 m/min 的范围内是减小积屑瘤的重要措施。



此外，增大前角、减小进给量、减小前刀面表面粗糙度值和注入充分的切削液冷却，都可减少积屑瘤的产生。

(四) 切屑

1. 切屑形成过程

切削塑性金属时，当工件受到刀具的挤压后，摇臂钻床切削层金属在 OA 始滑移面以左发生弹性变形，在 AOM 区域内产生塑性变形，在 OM 终滑移面上，应力和塑性变形达到最大值，切削层金属被挤裂而破坏，如图 2-50 所示。越过 OM 面，切削层金属要沿前刀面方向排出，在前刀面的挤压、摩擦过程中进一步变形，使切削层金属的底部挤压伸长，造成切削层金属的卷曲，继而终因剪应力超过其强度极限，便沿剪切面与工件母体分离成为切屑沿前刀面排出。这是一个动态过程，随着刀具不断向前运动， AOM 区域也不断前移，切屑源源不断流出，切屑层各点金属均要经历弹性变形、塑性变形、挤裂和切离四个阶段。

2. 切屑类型

金属切削时，由于工件材料、刀具几何形状和切削用量等加工条件的不同，切屑的变形程度也会随之改变，所形成的切屑形状也各异，一般有四种基本形态，如图 2-53 所示。

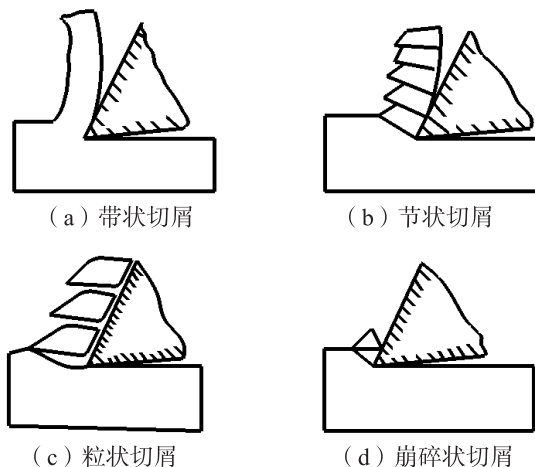


图 2-53 切屑类型

(1) 带状切屑。带状切屑呈连绵不断的带状或螺旋状，加工中心与前刀面接触的内表面光滑，外摇臂钻床表面呈毛茸状，且在放大镜下可观察到剪切面条纹。一般在加工塑性材料（软钢、铝等），采用较大的前角、较小的切削深度、较快的切削速度时，会形成带状切屑。由于切削力变化小，切削过程稳定，因而已加工表面的表面粗糙度值较小。但带状切屑过长会影响机床正常工作和工人人身安全，因而要采取断屑措施。

(2) 节状切屑。节状切屑是连续的，它和带状切屑的不同之处在于其外表呈锯齿形，内表面有时有裂纹。由于切削层变形和加工硬化大，在 OM 终滑移面上，靠近切屑外表面处的应力达到材料的强度极限而形成节状切屑。当采用小的前角、大的切削深度和慢的切削速度加工塑性较差的材料时，加工中心会形成挤裂状切屑（节状切屑）。

(3) 粒状切屑。切削塑性很大的材料（如铅、紫铜）时，摇臂钻床切屑容易在前刀面上黏结，而不易流出，产生很大变形，超过材料强度极限，使切屑不能连续而呈分离的颗粒状，这就会形成粒状切屑。在产生节状和粒状切屑的过程中，切削力有较大的波动，尤其是粒状切屑，在形成过程中会产生振动而使加工表面粗糙。粒状切屑较少见。



(4) 崩碎状切屑。切削脆性材料（如铸铁、黄铜）时，形成不规则的片状或粒状切屑。切削时，在切削刃和前刀面附近的金属还未经过明显塑性变形，就被挤裂断或脆断而形成不规则的崩碎切屑，因而已加工表面的表面粗糙度值变大。工件材料越脆硬，刀具前角越小，切削深度越大，越容易形成此类切屑。

3. 切屑的收缩现象

被切金属经过塑性变形后，形成的切屑长度比切削层长度短，厚度比切削层厚，这种现象称为切屑的收缩现象。切屑收缩得越严重，表明切削过程中的金属变形大，尤其塑性变形越剧烈，切削时消耗的能量也越多。

(五) 切削力

1. 切削力的来源

金属切削时，刀具切入工件，使被加工材料发生变形并成为切屑所需的力，称为切削力。切削力来源于以下三个方面。

- (1) 克服被加工材料对弹性变形的抗力。
- (2) 克服被加工材料对塑性变形的抗力。
- (3) 克服切屑对前刀面的摩擦力和刀具后刀面对过渡表面与已加工表面之间的摩擦力。

2. 切削合力及其分解

上述各力的总和形成作用在刀具上的合力 F_r （国标为 F ）。为了实际应用，以车削为例， F_r 可分解为相互垂直的 F_x （国标为 F_f ）、 F_y （国标为 F_p ）和 F_z （国标为 F_c ）三个分力，如图 2-54 所示。

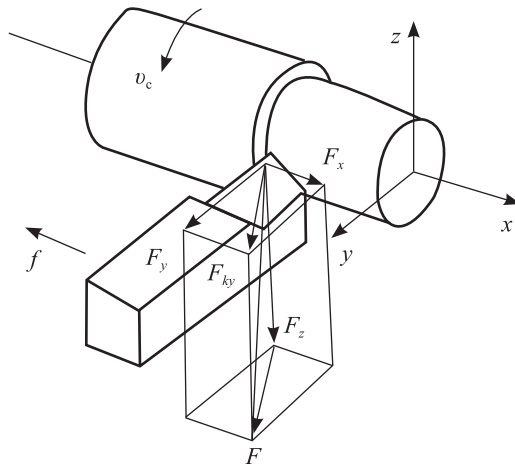


图 2-54 切削合力与分力

(1) F_z ——主切削力或切向力。它切于过渡表面并与基面垂直。 F_z 是计算车刀强度、设计机床零件、确定机床功率所必需的。

(2) F_x ——进给抗力、轴向力或走刀力。它是处于基面内并与工件轴线平行、与走刀方向相反的力。 F_x 是设计进给（走刀）机构、计算车刀进给功率所必需的。

(3) F_y ——切深抗力或背向力、径向力、吃刀力。它是处于基面内并与工件轴线垂直的力。 F_y 用来确定与工件加工精度有关的工件挠度，计算机床零件和车刀强度，它与工件在切削过程中产生的振动有关。



3. 切削功率

(1) 单位切削力。

单位切削力 p 是指切除单位切削层面积所产生的主切削力，可用式 (2-2) 表示。

$$p = \frac{F_z}{A_D} = \frac{F_z}{a_p f} = \frac{F_z}{h_D b_D} \quad (2-2)$$

式中, A_D 为切削面积 (mm^2); a_p 为切削深度 (mm); f 为进给量 (mm/s); h_D 为切削厚度 (mm); b_D 为切削宽度 (mm)。

单位切削力 p 可查手册获得, 利用单位切削力来计算主切削力较为简易直观。

(2) 切削功率。

消耗在切削过程中的功率称为切削功率 P_m (国标为 P_0)。切削功率为 F_z 和 F_x 所消耗的功率之和, 因 F_y 方向没有位移, 所以不消耗功率。切削功率的计算见式 (2-3)。

$$P_m = \left(F_z \times v_c + \frac{F_x \times n_w \times f}{1000} \right) \times 10^{-3} \quad (2-3)$$

式中, P_m 为切削功率 (kW); F_z 为切削力 (N); v_c 为切削速度 (m/s); F_x 为进给力 (N); n_w 为工件转速 (r/s); f 为进给量 (mm/s)。

在式 (2-3) 中, 等号右侧的第二项是消耗在进给运动中的功率, 它相对于 F 所消耗的功率来说, 一般很小 ($1\% \sim 2\%$), 可以略去不计, 于是有

$$P_m = F_z \times v_c \times 10^{-3} \quad (2-4)$$

按式 (2-4) 求得切削功率后, 如要计算机床电动机的功率 (P_E) 以便选择机床电动机时, 还应考虑到机床传动效率。

$$P_E \geq \frac{P_m}{\eta_m} \quad (2-5)$$

式中, η_m 为机床的传动效率, 一般取 $0.75 \sim 0.85$, 大值适用于新机床, 小值适用于旧机床。

(3) 单位切削功率。

单位切削功率 P_s 是指单位时间内切除单位体积金属所消耗的功率。

4. 切削力的测定

在实际生产中, 切削力的大小一般由实验结果建立起来的经验公式计算。在需要较为准确地知道某种切削条件下的切削力时, 还需进行实际测量。随着测试手段的现代化, 切削力的测量方法有了很大的发展, 在很多场合下已经能很精确地测量切削力, 切削力的测量成了研究切削力的行之有效的手段。目前, 采用的切削力测量手段如下。

(1) 测定机床功率, 计算切削力。用功率表测出机床电动机在切削过程中所消耗的功率 P_E 后, 可按式 (2-6) 计算出切削功率 P_m 。

$$P_m = P_E \times \eta_m \quad (2-6)$$

在切削速度 v_c 已知的情况下, 利用 P_m 即可求出切削力 F 。通过这种方法只能粗略估算切削力的大小, 不够精确。当要求精确知道切削力的大小时, 通常采用测力仪直接测量。

(2) 用测力仪测量切削力。测力仪的测量原理是利用切削力作用在测力仪的弹性元件上所产生的变形, 或者作用在压电晶体上产生的电荷经过转换后, 读出 F_z 、 F_x 、 F_y 的值。在自动化生产中, 还可利用测力传感装置产生的信号优化和监控切削过程。按工作原理, 测力仪可以分为机械、液压和电气测力仪。目前, 常用的是电阻应变片式测力仪。



5. 切削力的经验公式和切削力的估算

目前,人们已经积累了大量的切削力实验数据,对于一般加工方法,如车削、孔加工和铣削等,已建立起了可直接利用的经验公式。

测力实验的方法有单因素法和多因素法,通常采用单因素法,即固定其他实验条件,在切削时分别改变切削深度 a_p 和进给量 f ,并从测力仪上读出对应切削力数值,然后经过数据整理求出它们之间的函数关系式。

通过切削力实验建立的车削力实验公式,其一般形式为

$$\begin{cases} F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot K_{F_c} \\ F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \cdot K_{F_p} \\ F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \cdot K_{F_f} \end{cases} \quad (2-7)$$

式中, C_{F_c} , C_{F_p} , C_{F_f} 为与工件、刀具材料有关的系数; x_{F_c} , x_{F_p} , x_{F_f} 为切削深度 a_p 对切削力的影响指数; y_{F_c} , y_{F_p} , y_{F_f} 为进给量 f 对切削力的影响指数; K_{F_c} , K_{F_p} , K_{F_f} 为考虑切削速度、刀具几何参数、刀具磨损等因素影响的修正系数。

需要注意的是,切削力实验公式是在特定的实验条件下求出来的。在计算切削力时,如果切削条件与实验条件不符,需乘一个修正系数 K_F ,它是包括了许多因素的修正系数乘积。修正系数也是由实验方法求出的。

(六) 切削力的影响因素

实践证明,切削力的影响因素很多,主要有工件材料、切削用量、刀具几何参数、刀具材料、刀具磨损状态和切削液等。

1. 工件材料

- (1) 工件的硬度或强度提高,剪切屈服强度 σ_s 增大,切削力增大。
- (2) 工件的塑性或韧性提高,切屑不易折断,切屑与前刀面的摩擦增大,切削力增大。

2. 切削用量

(1) 切削深度(背吃刀量) a_p 、进给量增大,切削层面积增大,变形抗力和摩擦力增大,切削力增大。由于 a_p 对切削力的影响比进给量对切削力的影响大,所以在实践中,当需切除一定量的金属层时,为了提高生产率,采用大进给切削比大切深切削省力、省功率。

(2) 切削速度。加工塑性金属时,切削速度对切削力的影响规律如同对切削变形的影响,它们都是通过积屑瘤与摩擦的作用造成的。切削脆性金属时,因为变形和摩擦均较小,故切削速度改变时的切削力变化不大。

3. 刀具几何参数

(1) 前角:前角增大,变形减小,切削力减小。

(2) 主偏角:主偏角 κ_r 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内增大,由切削厚度 h_D 的影响起主要作用,使主切削力 F_z 减小;主偏角 κ_r 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增大,刀尖处圆弧和副前角的影响更为突出,故主切削力 F_z 增大。

一般地, κ_r 在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 范围内,主偏角 κ_r 增大,主切削力 F_z 增大。 κ_r 增大,使 F_y 减小、 F_x 增大。在车削轴类零件,尤其是细长轴时,为了减小切深抗力 F_y 的作用,往往采用较大的主偏角 ($\kappa_r > 60^\circ$) 的车刀切削。



(3) 刃倾角 λ_s : λ_s 对 F_z 的影响较小, 但对 F_x 、 F_y 的影响较大。 λ_s 由正向负转变, 则 F_x 减小、 F_y 增大。从切削力观点分析, 切削时不宜选用过大的负刃倾角 λ_s 。特别是在工艺系统刚度较差的情况下, 往往因负刃倾角 λ_s 增大了切深抗力 F_y 的作用而产生振动。

4. 其他因素

- (1) 刀具棱面: 应选较小宽度, 使 F_y 减小。
- (2) 刀具圆弧半径: 圆弧半径增大, 切削变形、摩擦增大, 切削力增大。
- (3) 刀具磨损: 后刀面磨损增大, 刀具变钝, 与工件的挤压、摩擦增大, 切削力增大。

(七) 切削热和切削温度

切削热与切削温度是切削过程中产生的又一重要物理现象。切削时做的功, 可转化为等量的热。切削热除少量散逸在周围介质外, 其余均传入刀具、切屑和工件中, 并使它们的温度升高, 引起工件变形, 加速刀具磨损。因此, 研究切削热与切削温度具有重要的实用意义。

1. 切削热的产生和传导

切削热是由切削功转变而来的。切削热的产生和传导如图 2-55 所示, 其中包括剪切区变形功形成的热 Q_p 、切屑与前刀面摩擦功形成的热 Q_{yf} 、已加工表面与后刀面摩擦功形成的热 Q_{af} 。因此, 切削时共有三个发热区域, 即剪切面、切屑与前刀面接触区、后刀面与已加工表面接触区, 三个发热区与三个变形区相对应。因此, 切削热的来源就是切屑变形功和前、后刀面的摩擦功。

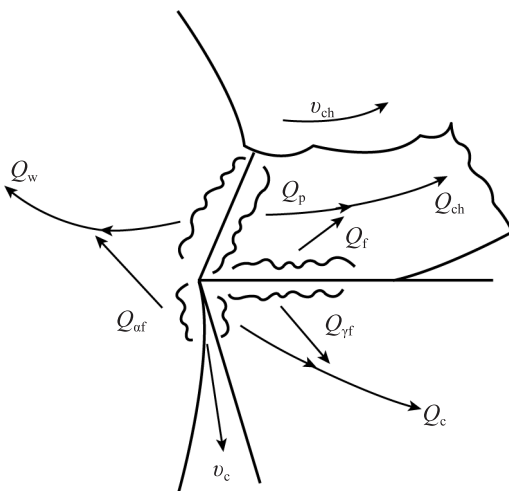


图 2-55 切削热的产生和传导

产生总的切削热 Q , 分别传入切屑 Q_{ch} 、刀具 Q_c 、工件 Q_w 和周围介质 Q_f 。切削热的形成及传导关系为

$$Q_p + Q_{yf} + Q_{af} = Q_{ch} + Q_w + Q_c + Q_f \quad (2-8)$$

切削塑性金属时, 切削热主要由剪切区变形热和前刀面摩擦热形成; 切削脆性金属时, 则后刀面摩擦热占的比例较高。

2. 切削温度的计算与测量

尽管切削热是切削温度上升的根源, 但直接影响切削过程的却是切削温度, 切削温度一般指切削区域的平均温度 θ 。

通过切削区域产生的变形功、摩擦功和热传导, 可以近似推算出切削温度值。切削温度是由切削时消耗总功形成的热量引起的, 单位时间内产生的热等于消耗的切削功率。切削温度的测量方法很多, 主要介绍以下两种。



(1) 自然热电偶法。自然热电偶法主要用于测定切削区域的平均温度。

(2) 人工热电偶法。人工热电偶法用于测量刀具、切屑和工件上指定点的温度，用它可求得温度分布场和最高温度的位置。

3. 影响切削温度的主要因素

根据理论分析和大量的实验研究可知，切削温度主要受切削用量、刀具几何参数、工件材料、刀具磨损和切削液的影响。分析各因素对切削温度的影响，主要从这些因素对单位时间内产生的热量和传出的热量的影响入手。如果产生的热量大于传出的热量，那么这些因素将使切削温度增高；如果某些因素使传出的热量增大，那么这些因素将使切削温度降低。

(1) 切削用量的影响。切削用量是影响切削温度的主要因素。通过测温实验可以找出切削用量对切削温度的影响规律。切削速度对切削温度的影响最大，随切削速度的提高，切削温度迅速上升。进给量对切削温度的影响次之。而切削深度变化时，散热面积和产生的热量亦作相应变化，故切削深度对切削温度的影响很小。

(2) 刀具几何参数的影响。切削温度 θ 随前角 γ_0 的增大而降低。这是因为前角增大时，单位切削力下降，使产生的切削热减少。但前角大于 20° 后，前角对切削温度的影响减小，这是因为楔角变小而使散热体积减小。主偏角 κ_r 减小时，使切削宽度 b_D 增大、切削厚度 h_D 减小。因此，切削变形和摩擦增大，切削温度升高。但当切削宽度 b_D 增大后，散热条件改善。由于散热起主要作用，故随着主偏角 κ_r 减小，切削温度下降。

负倒棱 b_{γ_1} 在 $(0\sim 2)f$ 范围内变化，刀尖圆弧半径 r_c 在 $0\sim 1.5\text{ mm}$ 范围内变化，基本上不影响切削温度。负倒棱宽度及刀尖圆弧半径的增大会使塑性变形区的塑性变形增大，但这两者都能使刀具的散热条件有所改善，传出的热量也有所增加，两者趋于平衡，所以对切削温度的影响很小。

(3) 工件材料的影响。工件材料的强度（包括硬度）和导热系数对切削温度的影响是很大的。由理论分析可知，单位切削力是影响切削温度的重要因素，而工件材料的强度（包括硬度）直接决定了单位切削力，所以工件材料强度（包括硬度）增大时，产生的切削热增多，切削温度升高。工件材料的导热系数则直接影响切削热的导出。

(4) 刀具磨损的影响。在后刀面的磨损值达到一定数值后，对切削温度的影响增大；切削速度越快，影响就越显著。合金钢的强度大、导热系数小，所以切削合金钢时，刀具磨损对切削温度的影响就比切削碳素钢时大。

(5) 切削液的影响。切削液对切削温度的影响与切削液的导热性能、比热容、流量、浇注方式，以及本身的温度有很大的关系。从导热性能来看，油类切削液不如乳化液，乳化液不如水基切削液。

4. 切削温度对工件、刀具和切削过程的影响

切削温度高是刀具磨损的主要原因，它限制了生产率的提高；切削温度还会使加工精度降低，使已加工表面产生残余应力和其他缺陷。

(1) 切削温度对工件材料强度和切削力的影响。切削时的温度虽然很高，但是切削温度对工件材料硬度及强度的影响并不是很大。剪切区域的应力影响不显著。

(2) 对刀具材料的影响。适当地提高切削温度，对提高硬质合金的韧性是有利的。

(3) 切削温度对工件尺寸精度的影响。在加工过程中，如果切削温度控制不当，工件受热膨胀后可能导致工件尺寸超出预定范围。



(八) 刀具的磨损与破损、刀具寿命及刀具状态监控

1. 刀具磨损的形态

切削金属时, 刀具一方面切下切屑, 另一方面刀具本身也要发生损坏。刀具损坏的形式主要有磨损和破损两类。前者是连续的逐渐磨损, 属正常磨损; 后者包括脆性破损(如崩刃、碎断、剥落、裂纹破损等)和塑性破损两种, 属非正常磨损。

刀具磨损后, 工件加工精度降低, 表面粗糙度增大, 并导致切削力加大、切削温度升高, 甚至产生振动, 不能继续正常切削。因此, 刀具磨损直接影响加工效率、质量和成本。刀具正常磨损的形式有以下几种, 如图 2-56 所示。

(1) 前刀面磨损。前刀面磨损是指切屑沿前刀面流出时, 在刀具前刀面上经常会磨出一个月牙洼。

(2) 后刀面磨损。加工脆性材料时, 由于形成崩碎切屑, 一般出现后刀面的磨损; 切削塑性材料时, 当切削速度较慢、切削厚度较薄时, 容易产生后刀面的磨损。

(3) 边界磨损(前、后刀面同时磨损)。在中等切削速度和进给量的情况下, 切削高熔点金属时, 经常会发生前刀面月牙洼磨损和主刀面磨损兼有的磨损形式。

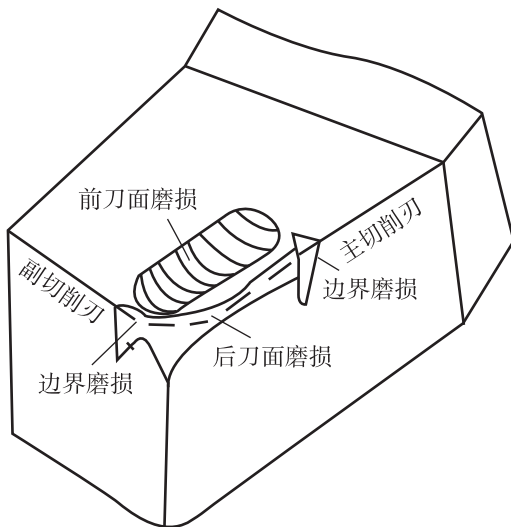


图 2-56 刀具磨损

2. 刀具磨损的原因

从对温度的依赖程度来看, 刀具正常磨损的原因主要是机械磨损和热、化学磨损。机械磨损是由工件材料中硬质点的刻划作用引起的, 热、化学磨损则是由黏结(刀具与工件材料接触到原子间距离时产生的结合现象)、扩散(刀具与工件两摩擦面的化学元素互相对对方扩散、腐蚀)等引起的。

(1) 磨粒磨损。在切削过程中, 刀具上经常被一些硬质点刻出深浅不一的沟痕。磨粒磨损对高速钢作用较明显。

(2) 黏结磨损。刀具与工件材料接触到原子间距离时产生的结合现象, 称黏结。黏结磨损就是由接触面滑动在黏结处产生剪切破坏造成的。低、中速切削时, 黏结磨损是硬质合金刀具的主要磨损原因。

(3) 扩散磨损。切削时, 在高温作用下, 接触面间的分子活动能量大, 造成了合金元素相互扩散置换, 使刀具材料的机械性能降低, 若再经摩擦作用, 刀具容易被磨损。扩散磨损是一种化学性质的磨损。

(4) 相变磨损。当刀具上最高温度超过材料相变温度时，刀具表面的金相组织发生变化，如马氏体组织转变为奥氏体，使硬度下降，磨损加剧。因此，工具钢刀具在高温时均属于此类磨损。

(5) 氧化磨损。氧化磨损是一种化学性质的磨损。

刀具磨损是由机械摩擦和热效应两方面因素作用造成的。在低、中速范围内，磨粒磨损和黏结磨损是刀具磨损的主要原因。通常情况下，拉削、铰孔和攻丝加工时的刀具磨损主要属于这类磨损。在使用中等以上切削速度加工时，热效应使高速钢刀具产生相变磨损，使硬质合金刀具产生黏结、扩散和氧化磨损。

3. 刀具磨损过程、磨钝标准及刀具寿命

(1) 刀具磨损过程。随着切削时间的延长，刀具磨损增加。根据切削实验，可得如图 2-57 所示的刀具正常磨损过程的典型磨损曲线。该图分别以切削时间和后刀面磨损量 V_B （或前刀面月牙洼磨损深度 K_T ）为横坐标与纵坐标。从图 2-57 可知，刀具磨损过程可分为三个阶段：初期磨损阶段、正常磨损阶段和急剧磨损阶段。

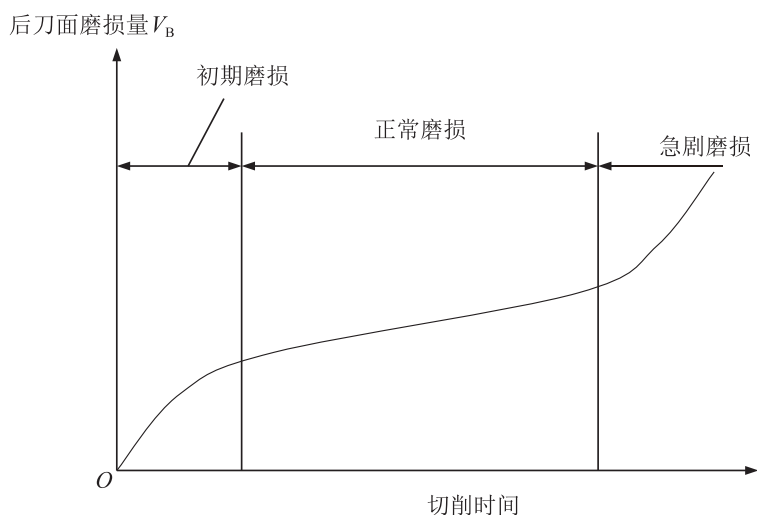


图 2-57 刀具正常磨损过程的典型磨损曲线

(2) 刀具磨钝标准。刀具磨损到一定限度就不能继续使用，这个磨损限度称为磨钝标准。规定以 $1/2$ 切削深度处后刀面上测定的磨损带宽 V_B 值作为刀具的磨钝标准。

(3) 刀具的耐用度（刀具寿命）。一把新刀（或重新刃磨过的刀具）从开始切削至磨损量达到磨钝标准为止所经历的实际切削时间，称为刀具的耐用度，用 T 表示，又称“刀具寿命”。

4. 刀具破损

刀具破损和刀具磨损一样，也是刀具失效的一种形式。在一定的切削条件下使用刀具时，如果它经受不住强大的应力（切削力或热应力），就可能发生突然损坏，使刀具提前失去切削能力，这种情况就称为刀具破损。破损是相对于磨损而言的，从某种意义上讲，破损可认为是一种非正常的磨损。刀具破损有早期和后期（加工到一定时间后的破损）两种。刀具破损的形式分脆性破损和塑性破损两种。硬质合金和陶瓷刀具在切削时，在机械和热冲击作用下，经常发生脆性破损。脆性破损又分为崩刃、碎断、剥落、裂纹破损。

（九）影响刀具耐用度 T 的因素

1. 切削用量

切削用量对刀具耐用度 T 的影响规律如同对切削温度的影响。



切削速度 v_c 、切削深度（背吃刀量） a_p 、进给量增大，使切削温度提高，刀具耐用度 T 下降。切削深度对刀具耐用度的影响最大，进给量其次，切削深度的影响最小。

2. 工件材料

- (1) 工件硬度或强度提高，使切削温度提高，刀具磨损加大，刀具耐用度 T 下降。
- (2) 工件材料的延伸率越大或导热系数越小，切削温度越高，刀具耐用度 T 下降。

3. 刀具几何角度

- (1) 前角对刀具耐用度的影响呈“驼峰形”。
- (2) 主偏角 κ_r 减小时，使切削宽度 b_D 增大，散热条件改善，故切削温度下降，刀具耐用度 T 提高。

4. 刀具材料

刀具材料的高温硬度越高、越耐磨，刀具耐用度 T 越高。

实训练习

刀具角度刃磨及测量

一、实训目的和要求

- (1) 了解刀具刃磨的安全操作规程。
- (2) 掌握刀具刃磨的基本内容。
- (3) 掌握刀具角度测量的基本方法。

二、实训设备及器件

此实训项目的实训设备及器件包括普通车刀、万能角度尺、直尺、圆规、砂轮机。

三、课时安排

4 学时。

四、实验（实训）步骤及要求

- (1) 开机前对砂轮机进行全面细致的检查，包括电源、砂轮安装等确认无误后方可操作。
- (2) 砂轮机通电后，检查各开关、按钮和按键是否正常、灵活、有无异常现象。
- (3) 认识刀具结构（图 2-58）。

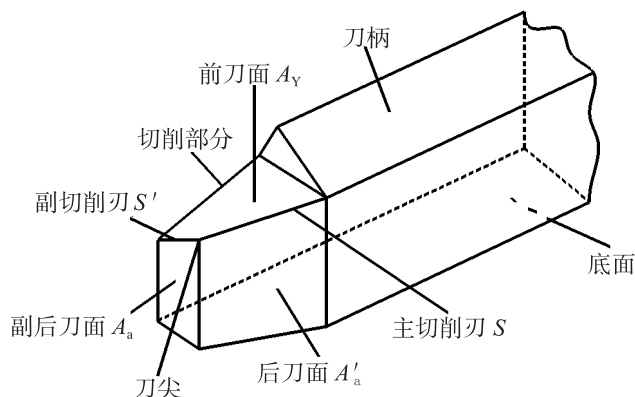


图 2-58 刀具结构



(4) 正确测量刀具角度，绘制刀具角度图形（图 2-59），并对所得结果进行检查。

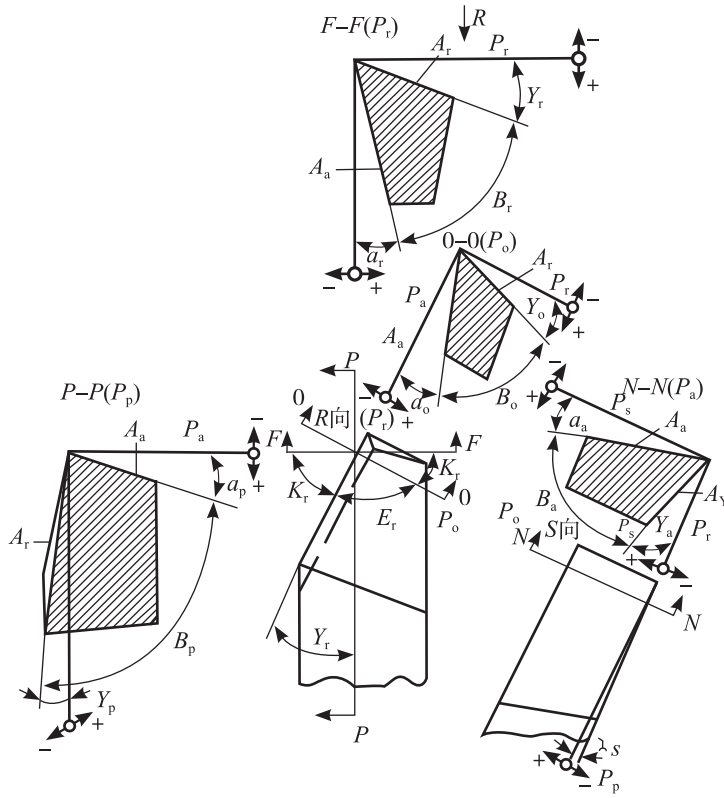


图 2-59 刀具角度

五、实验（实训）分析与总结

通过本次实训的学习，学生应该学会刃磨普通车刀的基本要素，学会分辨刀具的各个表面，能够测量刀具的各个角度，并且能够用图形表达刀具的各个角度。

六、评分标准

- (1) 能够识别刀具的各个角度（30分）。
- (2) 能够刃磨出刀具的基本角度（30分）。
- (3) 能够测绘刀具的各个角度（40分）。

第四节

工序 30：钻花键底孔

工序 30（钻花键底孔）是在热工部采用 Z5150A/Z5163B 两种型号的钻床进行钻削加工，钻 $\phi 33_{-0.33}^{+0.33}$ mm 的底孔，孔深 150.5 mm，孔的深径比 ≥ 4 ，为深孔钻削，采用的机床转速为 510 r/min，进给量为 0.305 mm/r，采用专用的钻花键底孔夹具，见表 2-9 所列。