

制造工艺丛书

# 磨削加工 工艺及应用

郭隐彪 杨 炜 王振忠 主编



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

制造工艺丛书

# 磨削加工工艺及应用

郭隐彪 杨 炜 王振忠 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

# 前 言

在机械加工的各种方法中,磨削加工精度和加工效率高,往往作为终精加工的手段,而随着工业发展,磨削加工应用越来越广泛。根据磨削加工工艺和对象的不同,已形成的加工形式有:使用固定磨粒加工的各种砂轮磨削、砂带磨削、研磨、珩磨,以及使用自由磨粒加工的各种研磨、抛光、磨粒喷射加工。磨削中使用砂轮的种类也相当多,磨粒种类、磨粒粒度、结合剂的种类、组织硬度、磨粒在砂轮表面的分布特征,造就了磨削加工比切削加工具有更多不确定因素和工艺复杂性。

近年来,随着各种工程材料对加工质量要求的不断提高,精密、超精密磨削加工和装备技术获得较大的突破,国外已成功开发出分辨力达 1nm 的实用化磨床和相配套的磨削加工工艺技术。

本书以磨削加工工艺及精密磨削应用为内容,以当前加工技术发展和创新需要为主线,为高等院校教学和相关工程技术人员提供有价值的参考素材。全书分 7 章,系统地讲述磨削加工工艺、精密磨削和研磨加工方法、加工设备和工艺实验结果。第 1 章对磨削加工特点、分类及其技术发展趋势进行了简洁阐述;第 2 章介绍磨削加工参数、磨削力及磨削温度检测方法、磨料磨具选择和使用、磨削液供给及过滤、砂轮磨损等相关基础知识;第 3 章从加工方法、机床结构特点等方面介绍平面、外圆、内圆、无心、成形、工具磨削工艺;第 4 章论述磨削砂轮动平衡和超硬磨料砂轮精密修整技术;第 5 章介绍先进光学非球面元件的精密磨削技术;第 6 章介绍精密研磨加工技术;第 7 章论述磨削加工中的一般测量和高精度测量评价技术。

根据国防工业出版社的出版计划,组织编写了《磨削加工工艺及应用》一书。本书由厦门大学郭隐彪、杨炜、王振忠负责编写。成都光学精密工程中心许乔博士、王健博士、吴遥工程师提供帮助,厦门大学微纳米加工与检测实验室黄浩博士、柯晓龙、潘日、杨峰等研究生参与图表制作编辑。此外,在本书的编写过程中借鉴了国内外同行的资料与文献,并得到了国防工业出版社的大力支持,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在错误及疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2010 年 8 月于厦门大学

# 目 录

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 第1章 磨削加工技术概述..... 1                   |  |
| 1.1 磨削加工特点..... 1                     |  |
| 1.2 磨削加工分类..... 3                     |  |
| 1.3 磨削加工技术发展趋势..... 6                 |  |
| 1.3.1 磨料磨具研究 ..... 7                  |  |
| 1.3.2 磨削工艺发展 ..... 7                  |  |
| 1.3.3 磨削理论的研究 ..... 9                 |  |
| 1.3.4 磨床设备..... 10                    |  |
| 1.3.5 磨削关键配套技术..... 11                |  |
| 第2章 磨削加工基本知识 ..... 13                 |  |
| 2.1 磨削基本参数 ..... 13                   |  |
| 2.1.1 磨削运动和磨削用量 ... 13                |  |
| 2.1.2 磨削过程基本参数..... 14                |  |
| 2.1.3 磨削力..... 17                     |  |
| 2.1.4 磨削功率..... 23                    |  |
| 2.1.5 磨削热与磨削温度..... 24                |  |
| 2.2 磨料磨具选择和使用 ..... 30                |  |
| 2.2.1 普通磨料磨具..... 30                  |  |
| 2.2.2 超硬磨料磨具..... 38                  |  |
| 2.2.3 磨料磨具的合理<br>选择和使用方法..... 41      |  |
| 2.3 磨削液 ..... 47                      |  |
| 2.3.1 磨削液的作用..... 47                  |  |
| 2.3.2 磨削液的种类..... 47                  |  |
| 2.3.3 磨削液的供给方法..... 49                |  |
| 2.3.4 磨削液的合理选用..... 52                |  |
| 2.3.5 磨削液的过滤方法..... 54                |  |
| 2.4 砂轮磨损 ..... 56                     |  |
| 2.4.1 砂轮磨损与寿命..... 56                 |  |
| 2.4.2 砂轮磨损的原因分析 ... 59                |  |
| 2.4.3 砂轮磨损的检测方法 ... 61                |  |
| 第3章 磨削加工工艺与方法 ..... 66                |  |
| 3.1 平面磨削 ..... 66                     |  |
| 3.1.1 平面磨削形式..... 66                  |  |
| 3.1.2 平面磨削方法..... 68                  |  |
| 3.1.3 平面磨床..... 69                    |  |
| 3.1.4 平面磨削注意事项..... 69                |  |
| 3.1.5 常见的工件缺陷、产生<br>原因及解决方法..... 73   |  |
| 3.2 外圆磨削 ..... 75                     |  |
| 3.2.1 外圆磨削形式..... 75                  |  |
| 3.2.2 外圆磨削方法..... 76                  |  |
| 3.2.3 外圆磨床..... 78                    |  |
| 3.2.4 外圆磨削注意事项..... 80                |  |
| 3.2.5 常见的工件缺陷、产生<br>原因及解决方法..... 87   |  |
| 3.3 内圆磨削 ..... 89                     |  |
| 3.3.1 内圆磨削形式..... 89                  |  |
| 3.3.2 内圆磨削方法..... 90                  |  |
| 3.3.3 内圆磨床..... 91                    |  |
| 3.3.4 内圆磨削注意事项..... 92                |  |
| 3.3.5 常见的工件缺陷、产生<br>原因及解决方法..... 94   |  |
| 3.4 无心磨削 ..... 96                     |  |
| 3.4.1 无心磨削形式..... 96                  |  |
| 3.4.2 无心磨削方法..... 97                  |  |
| 3.4.3 无心磨削注意事项..... 98                |  |
| 3.4.4 无心磨削磨床 ..... 101                |  |
| 3.4.5 常见的工件缺陷、产生<br>原因及解决方法 ..... 101 |  |
| 3.5 成形磨削..... 103                     |  |

|       |                         |     |       |                          |     |
|-------|-------------------------|-----|-------|--------------------------|-----|
| 3.5.1 | 凸轮磨削 .....              | 103 | 5.1.1 | 光学非球面类型 .....            | 157 |
| 3.5.2 | 花键轴磨削 .....             | 104 | 5.1.2 | 光学非球面的<br>加工技术 .....     | 159 |
| 3.5.3 | 齿轮磨削 .....              | 106 | 5.1.3 | 非球面磨削加工<br>方式 .....      | 160 |
| 3.5.4 | 螺纹磨削 .....              | 110 | 5.2   | 微小非球面磨削 .....            | 163 |
| 3.6   | 工具磨削 .....              | 111 | 5.2.1 | 微小非球面磨削<br>技术 .....      | 163 |
| 3.6.1 | 工具磨削原理 .....            | 111 | 5.2.2 | 微小型非球面<br>磨削控制 .....     | 164 |
| 3.6.2 | 工具磨床 .....              | 113 | 5.2.3 | 数控编程及软件<br>开发 .....      | 169 |
| 3.7   | 精密和超精密磨削 .....          | 114 | 5.2.4 | 微小型非球面磨削<br>砂轮修整技术 ..... | 173 |
| 3.7.1 | 精密和超精密<br>磨削机理 .....    | 114 | 5.3   | 大口径轴对称非球面磨削<br>技术 .....  | 174 |
| 3.7.2 | 塑性域超精密<br>磨削加工 .....    | 115 | 5.3.1 | 均匀磨损加工控制 ..              | 175 |
| 3.7.3 | 超精密磨削的<br>技术系统 .....    | 117 | 5.3.2 | 振动对磨削表面<br>影响 .....      | 180 |
| 第4章   | 磨削砂轮平衡与修整 .....         | 121 | 5.4   | 非轴对称自由曲面磨削 .....         | 184 |
| 4.1   | 砂轮平衡 .....              | 121 | 5.4.1 | 自由曲面磨削<br>加工法 .....      | 184 |
| 4.1.1 | 静平衡 .....               | 121 | 5.4.2 | 自由曲面磨削加工<br>两轴联动算法开发 ..  | 188 |
| 4.1.2 | 动平衡 .....               | 124 | 5.4.3 | 非轴对称自由曲面<br>磨削实例 .....   | 190 |
| 4.2   | 砂轮修整 .....              | 128 | 第6章   | 精密研磨加工技术 .....           | 194 |
| 4.2.1 | 普通砂轮修整 .....            | 128 | 6.1   | 研磨加工方法 .....             | 194 |
| 4.2.2 | 超硬磨料砂轮修整 ..             | 133 | 6.2   | 超精密平面研磨技术 .....          | 198 |
| 4.3   | 杯形砂轮修整技术 .....          | 134 | 6.2.1 | 研磨轮样式对研磨<br>轨迹的影响 .....  | 199 |
| 4.3.1 | 杯形砂轮修整器<br>修整特性 .....   | 134 | 6.2.2 | 研磨加工特性 .....             | 203 |
| 4.3.2 | 杯形砂轮修整器<br>修整方式 .....   | 137 | 6.3   | 超声波椭圆振动研磨 .....          | 205 |
| 4.3.3 | 圆弧金刚石砂轮的<br>杯形砂轮修整原理 .. | 140 | 6.3.1 | 超声波椭圆振动<br>研磨方法 .....    | 205 |
| 4.3.4 | 二轴杯形砂轮<br>修整器 .....     | 144 | 6.3.2 | 超声波椭圆振动<br>研磨实例 .....    | 207 |
| 4.4   | ELID 修整 .....           | 146 |       |                          |     |
| 4.5   | 接触放电修整 .....            | 149 |       |                          |     |
| 4.5.1 | 接触放电修整原理 ..             | 150 |       |                          |     |
| 4.5.2 | 单脉冲电火花放电<br>去除机理 .....  | 151 |       |                          |     |
| 4.6   | 激光修整 .....              | 154 |       |                          |     |
| 第5章   | 精密磨削光学自由曲面 .....        | 157 |       |                          |     |
| 5.1   | 先进光学制造技术 .....          | 157 |       |                          |     |

|       |                         |     |       |                        |     |
|-------|-------------------------|-----|-------|------------------------|-----|
| 6.4   | 电气黏性(ER)流体研磨 .....      | 209 | 7.1.3 | 圆度误差测量 .....           | 223 |
| 6.4.1 | ER 效果 .....             | 210 | 7.2   | 表面粗糙度测量 .....          | 226 |
| 6.4.2 | 研磨加工实例 .....            | 213 | 7.2.1 | 表面粗糙度评定<br>基准及参数 ..... | 226 |
| 6.5   | 磁性流体研磨 .....            | 215 | 7.2.2 | 表面粗糙度测量<br>方法 .....    | 229 |
| 6.5.1 | 磁流体密封方式<br>辅助研磨方法 ..... | 215 | 7.3   | 在位测量 .....             | 231 |
| 6.5.2 | 磁性研磨方法 .....            | 216 | 7.3.1 | 在位测量系统 .....           | 231 |
| 第 7 章 | 磨削加工中的测量 .....          | 218 | 7.3.2 | 数据处理 .....             | 232 |
| 7.1   | 形状和位置误差测量 .....         | 218 | 7.3.3 | 测量坐标系补偿 .....          | 233 |
| 7.1.1 | 直线度测量 .....             | 218 | 7.4   | 纳米表面测量技术 .....         | 237 |
| 7.1.2 | 平面度测量 .....             | 222 | 参考文献  | .....                  | 242 |

# 第 1 章 磨削加工技术概论

## 1.1 磨削加工特点

磨削加工是利用磨料、磨具去除零件材料的加工方法,是金属切削加工中一种重要方式。通常的磨具如砂轮、砂带,都是由无数磨粒辅以相应结合剂黏结而成,其结构如图 1-1 所示。每一颗磨粒相当于一个微小切削刃,砂轮可以看作是具有无数个微小切削刃的铣刀,磨削过程是一个多刀多刃的高速切削过程。由于磨粒的特殊形状、尺寸以及在砂轮工作表面分布的随机特征等,造成了磨削过程与一般切削过程的不同。

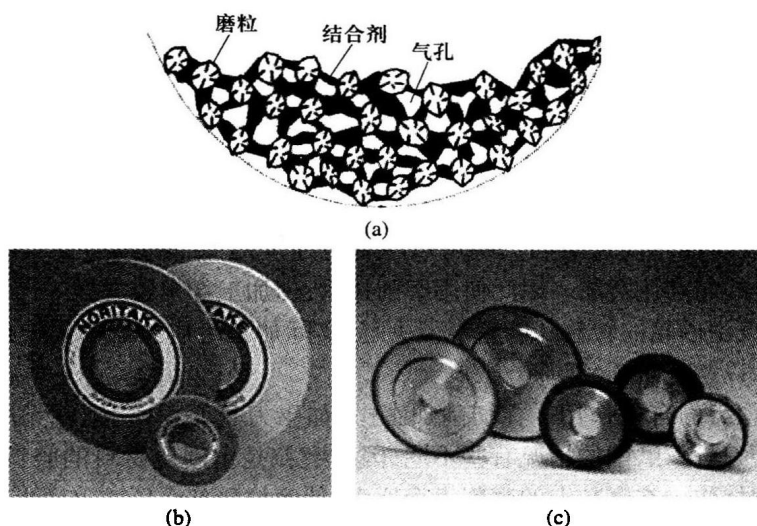


图 1-1 砂轮结构示意图

(a) 砂轮结构; (b) 普通砂轮; (c) 超硬砂轮。

通常磨削加工与切削加工相比有以下特点。

(1) 砂轮切削刃是非常硬的矿物质磨粒。对于切削加工,原则上切削工具的硬度要比工件的硬度高。因此砂轮的磨粒应具有很高的硬度。目前被广泛使用的砂轮磨粒有刚玉磨粒、碳化硅磨粒、金刚石磨粒和 CBN 磨粒。

(2) 砂轮表面上同时参与切削的有效磨粒数不确定。砂轮工作表面的磨粒数很多,据统计规律,不同粒度和硬度的砂轮,每平方厘米的磨粒数为 60 颗 ~ 1400 颗。但是在实际磨削过程中,仅有一部分磨粒起切削作用,另一部分磨粒只在工作表面刻划出沟痕,还有一部分磨粒仅与工件表面滑擦。根据砂轮的特性及工作条件不同,有效磨粒占砂轮表面总磨粒数的 10% ~ 50%。

(3) 磨粒切削刃的前角多为负前角。在通常的切削加工过程中,切削刃的前角  $\gamma$  为正角,如图 1-2(a) 所示。在磨削过程中,由于磨粒的不规则形状及磨粒破碎使磨粒切削刃产生负

前角,如图 1-2(b)。目前对于有色金属或其他有延展性的零件材料可以采用切削加工,而对工具钢、光学玻璃、结构陶瓷、半导体硅晶片等脆硬性材料大多采用磨削加工。

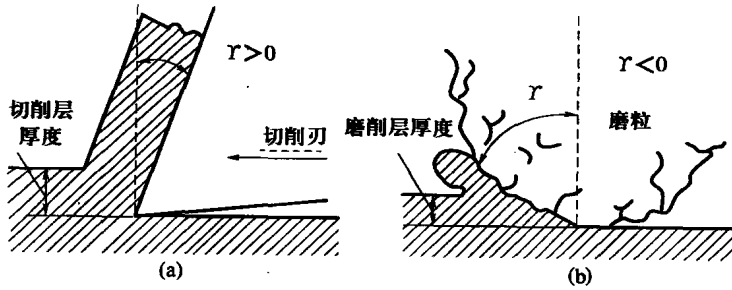


图 1-2 切削和磨削工具前角的比较  
(a) 切削; (b) 磨削。

(4) 砂轮是由很多微小的切削刃组成的多刃工具。磨削得到的切屑非常细小,一般磨削的磨削层厚度从  $1\mu\text{m}$  ~  $10\mu\text{m}$ ,精密超精密磨削的磨削层厚度还要小。因此,使用磨削加工得到的精度和表面粗糙度要优于切削加工。在机械加工的各种方法中,往往以磨削作为终精加工的手段,即用磨削的方法加工出所要求的尺寸精度及形位精度。由于磨削加工工具砂轮是用磨料的许多微小切削刃进行切削,所排出的切屑也极其微小,所以加工精度高。而且由于砂轮是多刃工具,同时参与切削的切削刃很多,虽然排出的切屑很小,但加工效率很高。

(5) 磨粒切削的速度非常快。在一般磨削中,砂轮的线速度  $15\text{m/s}$  ~  $30\text{m/s}$ ,比车床等切削加工快几倍。现阶段超高速磨削大约可以达到该速度的 10 倍,即可以实现砂轮线速度为  $150\text{m/s}$  ~  $300\text{m/s}$  的超高速磨削。因此使用磨削技术,使加工像橡胶那样弹性很大的材料成为可能。砂轮线速度由砂轮的转数和砂轮半径决定,实际加工时应注意不能使用磨床指定规格直径以外的砂轮,以避免出现危险。

(6) 磨粒切削刃的自锐作用。在切削加工中,如果刀具磨损,切削就无法正常地进行下去,必须重新刃磨刀具。磨削的情况有些不同,因为磨粒是由硬质材料的磨粒尖端形成的,当磨粒的微刃变钝时,作用在磨粒上的磨削力会增大,使磨粒局部受压破碎而生成新的锐利的切削刃或整粒脱落露出新的磨粒切削刃。这就是磨粒切削刃的自锐作用,也称为磨粒切削刃的自我再生作用。充分利用磨粒切削刃的自锐作用,能有效延长砂轮的寿命。

(7) 切屑尺寸很小,单位磨削力很大。一颗磨粒切下的切屑体积很小,切屑厚度为  $10^{-4}\text{mm}$  ~  $10^{-2}\text{mm}$ ,切下的切屑体积也不过  $10^{-5}\text{mm}^3$  ~  $10^{-3}\text{mm}^3$ 。根据尺寸效应原理可知,在磨粒切屑厚度非常小的情况下,单位磨削力很大。磨削钢料时,单位磨削力在  $70000\text{MPa}$  ~  $200000\text{MPa}$ ,而其他切削加工方法的单位切削力在  $7000\text{MPa}$  以下。

(8) 磨削温度很高,易产生工件表面烧伤。磨削时,砂轮速度很高,因此磨粒与被加工材料的接触时间极短,为  $10^{-6}\text{s}$  ~  $10^{-4}\text{s}$ 。所产生的磨削热使磨削区域形成高温 ( $400^\circ\text{C}$  ~  $1000^\circ\text{C}$ )。在磨削加工中工件表面易烧伤,并因热应力和相变应力使被加工表面的极薄层产生较大的残余应力,所以必须使用大量的水溶性磨削液进行冷却。

(9) 应用范围广。磨削中使用的磨料磨具形式多样,如砂轮是由磨粒与结合剂组成的多孔质的回转工具。考虑到制作砂轮的磨粒种类、磨粒粒度、结合剂的种类、组织硬度等,砂轮的种类也相当多。根据不同的被加工材料材质和加工精度可选择最适宜的砂轮和磨削条件进行加工,故磨削的应用范围很广。从软金属到淬火钢、不锈钢、高速钢、合金工具钢及耐热钢等难



加工金属材料,又扩展到各种非金属材料,尤其是半导体、玻璃、陶瓷等硬脆非金属材料的精密和超精密磨削,几乎所有的材料均可利用磨削加工。

## 1.2 磨削加工分类

根据加工对象的工艺目的和要求不同,磨削加工已发展为多种加工形式的加工工艺。通常按照工具类型进行分类,可分为使用固定磨粒加工及使用自由磨粒加工两大类,如图 1-3 所示。

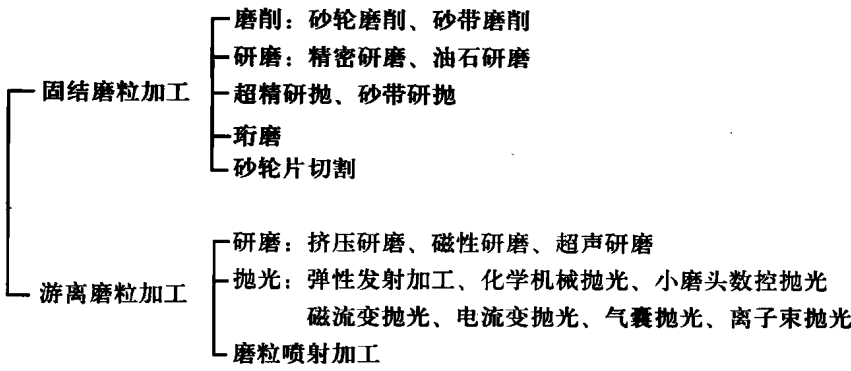


图 1-3 按磨具分类的磨削加工方法

通常所说“磨削”主要是指用砂轮或砂带进行去除材料加工的工艺方法。它是应用广泛的高效精密的终加工工艺方法。

以下介绍下其他以单一方式划分的较常见的磨削加工分类。

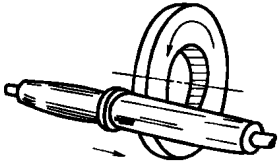
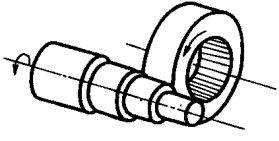
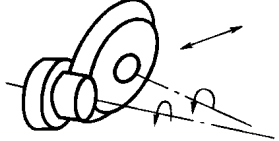
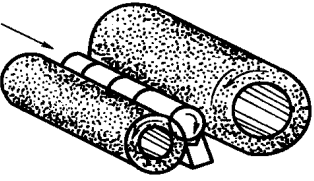
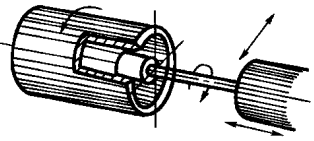
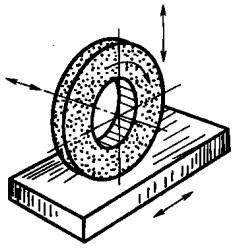
- (1) 按砂轮工作表面类型划分,可分为周边磨削、端面磨削、成形磨削等。
- (2) 按磨削表面形状划分,可分为外圆磨削、内圆磨削、平面磨削、螺纹磨削、齿轮磨削、导轨磨削、深孔磨削等。
- (3) 按被磨削表面质量划分,按被磨削表面的精度和粗糙度可分为普通磨削、精密磨削、超精密磨削、镜面磨削等。
- (4) 按不同磨削用量划分,可分为普通磨削、高速磨削、强力磨削、恒压力磨削等。
- (5) 按进给方式划分,可分为纵向磨削、横向切入磨削、斜切入磨削、缓进给磨削等。
- (6) 按零件装夹方式划分,可分为顶尖磨削、卡盘磨削、无心磨削等。
- (7) 按其他特种要求划分,可分为宽砂轮磨削、多片砂轮磨削、电解磨削、砂带磨削、金刚石砂轮磨削等。

以按砂轮工作表面类型划分为例来说明具体的磨削加工实例,如表 1-1 所列。

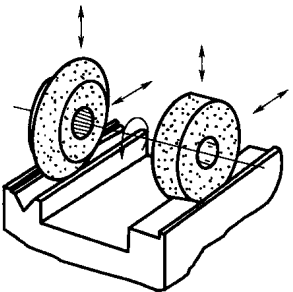
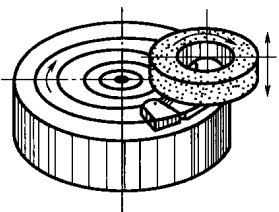
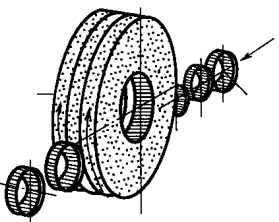
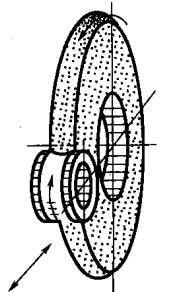
磨削加工方法虽然众多,但从磨削区的基本情况来看,大致分为两类:

- (1) 恒压力磨削。所谓恒压力磨削是指控制切入压力为定值的磨削,即通过对磨头采用加重、杠杆、人力、液压、气动等方式来控制砂轮对工件的压力。如砂轮架、砂轮切割机、钢锭粗磨机等均采用这种形式。
- (2) 定进给磨削。所谓定进给磨削是指控制切入进给速度为恒值的磨削。加工时,砂轮以选定的进给率垂直于磨削表面作切入进给。现在使用的磨床大多采用这种进给方式。

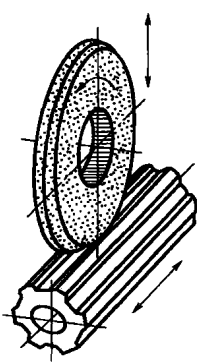
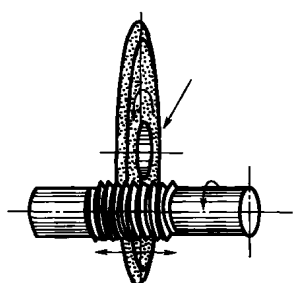
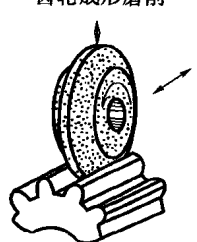
表 1-1 按砂轮工作表面划分的磨削方式

| 磨削方法 | 简图                                                                                                 | 砂轮运动                         | 工件运动               |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| 周边磨削 | <p>外圆纵磨</p>       | 1. 旋转<br>2. 横进给              | 1. 旋转<br>2. 纵向往复移动 |
|      | <p>外圆横向切入磨削</p>   | 1. 旋转<br>2. 横进给              | 旋转                 |
|      | <p>周面外圆斜切入磨削</p>  |                              | 旋转                 |
|      | <p>无心外圆磨削</p>   | 旋转                           | 由导轮带动旋转并轴向移动       |
|      | <p>内圆纵磨</p>     | 1. 旋转<br>2. 横进给<br>3. 纵向往复运动 | 旋转                 |
|      | <p>平面磨削</p>     | 1. 旋转<br>2. 垂直进给<br>3. 横进给   | 纵向往复移动             |

(续)

| 磨削方法  | 简图                                                                                                | 砂轮运动             | 工件运动             |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| 周边磨削  | <p>导轨磨削</p>      | 1. 旋转<br>2. 垂直进给 | 纵向往复移动           |
| 端面磨削  | <p>平面磨削</p>      | 1. 旋转<br>2. 垂直进给 | 旋转               |
| 双端面磨削 | <p>双端面磨削</p>   | 旋转               | 沿导向板移动           |
| 成形磨削  | <p>轴承滚道磨削</p>  | 旋转               | 1. 旋转<br>2. 横向进给 |

(续)

| 磨削方法 | 简图                                                                                            | 砂轮运动                        | 工件运动               |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 成形磨削 | 花键磨削<br>     | 1. 旋转<br>2. 垂直进给            | 1. 纵向往复移动<br>2. 分度 |
|      | 螺纹磨削<br>    | 1. 旋转<br>2. 横向进给            | 1. 旋转<br>2. 纵向移动   |
|      | 齿轮成形磨削<br> | 1. 旋转<br>2. 往复移动<br>3. 垂直进给 | 分度                 |

### 1.3 磨削加工技术发展趋势

磨削加工已成为机械制造中重要的加工工艺。磨削技术随着应用领域要求不断发展,在机械加工中起着非常重要的作用,其主要原因如下。

(1) 加工精度高。由于磨削具有其他加工方法无法比拟的特点,如砂轮上参与切削的磨粒多,切削刃多且几何形状不同;仅在较小的局部产生加工应力;磨具对断续切削、工件硬度的变化较不敏感;砂轮可实现在线修锐等,因而可使加工件获得很高的加工精度。

(2) 加工效率高。如缓进给深磨,一次磨削深度可达  $0\text{mm} \sim 25\text{mm}$ ,如将砂轮修整成与工件表面相适应的形状,一次便可磨出所需的工件形状。砂轮线速度进一步提高后,其加工效率则更高。

(3) 工程材料不断发展。许多材料(如陶瓷材料、玻璃材料等)在工业中的应用不断扩大,有些材料只能采用磨削加工,需要有新的磨削技术及磨削工艺与之相适应。

(4) 新的磨料磨具。如人造金刚石砂轮、CBN 砂轮的出现,扩大了磨削加工的应用范围。

随着机械产品精度、可靠性和寿命的要求不断提高,高硬度、高强度、高耐磨性、高功能性的新型材料的应用增多,给磨削加工提出了许多新问题,诸如材料的磨削加工性及表面完整性、超精密磨削、高效磨削和磨削自动化等问题亟待解决。当前,磨削加工技术正朝着使用超硬磨料磨具,开发精密及超精密磨削、高速、高效磨削工艺,研制高精度、高刚度的数控磨床及高自动化程度的计算机辅助制造软件系统的方向发展。

### 1.3.1 磨料磨具研究

磨料磨具作为制造业、材料加工等领域的不可缺少和替代的加工工具,被比作为工业的“牙齿”。当前磨料磨具研究主要有,针对磨具物理结构改进,使单位时间内作用工件磨粒数增多、使磨削平均长度增长、使磨削接触面增大,改变了单位时间磨除量,有效提升了效率;超硬磨具应用,改善金属粉末、金属氧化物或金刚石磨粒、CBN 磨粒等超硬材料,制成优良磨具;开发新型磨料磨具,如微米级多晶组成陶瓷微晶磨料、含微细金刚石磨粒球壳磨料、超精抛光用聚酯薄膜带、性能优异的单层电镀和高温钎焊等新磨具。

纵观磨削领域发展,未来磨削加工将对磨料磨具提出更高要求,从目前现状来看,超硬制品可以较好满足这些新磨削需要。如金刚石砂轮是磨削硬质合金、光学玻璃、陶瓷等硬脆材料的最佳磨具,CBN 磨料具有良好热稳定性、硬度高、耐磨性好等特性,故其磨具磨削加工时线速度高、磨削效率高、磨具寿命也高,特别适宜加工高速钢、轴承钢、不锈钢、冷激铸铁等黑色金属材料。由于金刚石和 CBN 磨料在加工材料适应方面的互补性,使由它们所构成的磨具可加工范围覆盖了各种高硬、高脆、高强韧性材料。此外,满足各种需要的陶瓷结合剂砂轮、大气孔高速砂轮以及金刚石锯片等都将随着技术进步而扩大应用范围,成为磨削加工主流产品。

在将来,磨料磨具的研究方向主要是:新型磨料磨具的研制及制备工艺研究,砂轮机基材料及制造技术的开发、设计及优化,新型结合剂的研究,超硬超微细磨料磨具的研究。

### 1.3.2 磨削工艺发展

随着高科技产品的不断涌现,零件加工精度和表面完整性越来越高,传统磨削正在向超精密磨削、超精密研磨和抛光等方向发展。同时开发了增大单位时间内作用的磨粒数(如高速磨削、超高速磨削、砂带磨削等)、增大磨屑平均断面积(如各种重磨削)及增大磨屑平均长度(如缓进给深磨、立轴平磨)等许多高效率磨削技术;发展了磨料喷射加工、黏弹性磨料流挤压珩磨、整体成形磨削,磁力研磨、磁流体精密研磨、低应力磨削、极低速度磨削、电泳磨削、超声波辅助磨削等一大批新磨削加工工艺技术。重负荷荒磨、超高速磨削、砂带磨削和高效深磨技术是近年世界磨削技术发展的突出方面。

#### 1. 精密磨削和超精密磨削

目前,在工业发达国家中,一般工厂能稳定掌握的加工精度是  $1\mu\text{m}$ ,与此相应,通常精密磨削是指加工精度在  $0.1\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$ ,加工表面粗糙度在  $Ra0.02\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$  之间的加工技术。超精密磨削的加工精度高于  $0.1\mu\text{m}$ ,表面粗糙度  $Ra \leq 0.025\mu\text{m}$ 。用金刚石砂轮进行磨削和用超微细磨粒进行研磨和抛光是实现精密及超精密加工的主要途径。

超精密磨削是一项系统工程,影响超精密磨削的因素很多,如超精密磨削机理、被加工材

料、砂轮的动平衡与修整、超精密机床、工件的定位与装夹、检测与误差补偿、工作环境的净化与冷却、人的操作水平等。

例如,砂轮的修整,为获得镜面磨削效果并缩短研磨抛光加工时间,日本物理化学研究所 H. Ohmori(大森整)等人提出了金属结合剂砂轮的在线电解修整(Electrolytic In-Process Dressing, ELID)磨削新方法,获得磨削表面粗糙度优于  $Ra0.005\mu\text{m}$ 。

又如超精密磨床,为提高运动精度,多采用液体或气体静压支承方式主轴及导轨;为防止工件表面出现裂纹,砂轮线速度取值  $20\text{m/s} \sim 30\text{m/s}$ ;为能作镜面磨削,主轴回转精度提高到  $N \times 10^{-1}\mu\text{m}$ 。此外,还需要砂轮修整及平衡装置、机械电气性能稳定的运动系统等。为了提高机床的热稳定性,机床普遍采用温控装置。有的机床还有振动监视系统,消除由于弹性振动而产生的工件表面磨削痕迹。

## 2. 超精密研磨与抛光

研磨与抛光都是利用研磨剂使工件与研具之间通过相对复杂的轨迹而获得高质量、高精度的加工方法。目前精密研磨抛光可以加工出  $Ra0.01\mu\text{m} \sim 0.002\mu\text{m}$  的镜面。近年来,在传统研磨抛光技术的基础上,出现了许多新型的精密和超精密游离磨粒加工方法,如弹性发射加工、磁性研磨、超声研磨、化学机械抛光、小磨头数控抛光、机器人抛光、磁流变抛光、电流变抛光、气囊抛光、离子束抛光等,富有创造性,它们模糊了研磨和抛光的概念,取得研磨的高精度、抛光的高效率和低表面粗糙度,形成了研抛加工的新方法。

研抛技术的发展主要集中于研抛工具之上,工具的创新进而带来机床控制和加工机理上的改变。如弹性发射加工时研具与工件互不接触,通过微粒子冲击工件表面,对物质的原子结合产生弹性破坏,以原子级的加工单位去除工件材料,从而获得无损伤的加工表面。用超细颗粒的  $\text{ZrO}_2$ (氧化锆)微粉进行弹性发射游离磨精加工芯片,可实现纳米级加工,加工精度达  $0.1\mu\text{m} \sim 0.001\mu\text{m}$ ,表面达到镜面。而像小磨头数控抛光,它是利用数控系统控制一个比被加工工件小得多的研磨头或抛光头在工件表面上移动,通过控制磨头与工件间的相对运动速度、压力以及磨头在表面某一区域的停留时间实现对材料去除量的控制。由于计算机数据处理速度快、控制准确、记忆可靠,因此,可以极大提高工作效率及加工质量,降低对操作人员技术的依赖性,具有广阔的应用前景。

## 3. 超高速磨削

高速磨削是指磨削速度,也就是砂轮线速度为  $45\text{m/s} \sim 150\text{m/s}$  的磨削,而砂轮线速度高于  $150\text{m/s}$ ,即为超高速磨削。在高速超高速磨削加工过程中,在保持其他参数不变的条件下,随着砂轮速度的大幅度提高,单位时间内磨削区的磨粒数增加,每个磨粒切下的切屑厚度变小,则高速超高速磨削时每颗磨粒切削厚度变薄。这导致每个磨粒承受的磨削力大大变小,总磨削力也大大降低。超高速磨削时磨粒在磨削区上的移动速度和工件的进给速度均大大加快,加上应变率响应的温度滞后的影响,会使工件表面磨削温度有所降低,因而能越过容易发生磨削烧伤的区域,而极大扩展了磨削工艺参数的应用范围。

超高速磨削可以大幅度提高磨削效率,明显降低磨削力,延长砂轮寿命和改善表面粗糙度,同时能实现硬脆性材料的延性域磨削,对高塑性等难磨削材料也有良好的磨削效果。德国早已推出了砂轮线速度  $140\text{m/s} \sim 160\text{m/s}$  的 CBN 磨床,德国 Aachen 大学已经完成了砂轮线速度  $500\text{m/s}$  为目标的超高速磨削试验,日本也研制了  $160\text{m/s} \sim 260\text{m/s}$  的超高速外圆磨床。

## 4. 高速重负荷磨削

高速重负荷磨削又称为荒磨、粗磨,主要用于粗加工。它是以快速去除加工余量为目的的

磨削方法,对磨削加工精度与表面质量要求不高。目前应用的砂轮速度已普遍达到  $80\text{m/s} \sim 120\text{m/s}$ ,磨削力达  $10\text{kN} \sim 12\text{kN}$ ,磨削功率  $100\text{kW} \sim 300\text{kW}$ ,最高材料磨除率可达  $100\text{kg/h} \sim 500\text{kg/h}$ ,而且机床实现了自动化,大大提高了生产率。主要用于钢坯的粗磨。

### 5. 砂带磨削

砂带是一种用黏结剂将磨料粘结在柔软的基体上的一种磨具。砂带磨削工艺不仅能进行微量切除,又可进行高效磨削,磨除率、磨削面积大,强力砂带磨削工艺能一次切下  $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$  厚的金属层,加工效率比普通磨削高 5 倍  $\sim 10$  倍以上,是一种大切深高效去除的加工方法。由于它属于弹性磨削,有利于解决工件表面烧伤和工件变形等问题。

### 6. 缓进给磨削

缓进给磨削采用增大磨削深度,并降低进给速度,从而形成砂轮与工件有较大的接触面积和高的速度比,实现高的材料去除率,在沟槽磨削、成形磨削、平面磨削和外圆磨削中都有应用。通常磨削深度在  $0.5\text{mm} \sim 30\text{mm}$  范围内,工件移动进给速度在  $10\text{mm/min} \sim 300\text{mm/min}$  范围内变化。由于磨削深度大,砂轮与工件的接触弧长比普通磨削大几倍至几十倍,磨削力、磨削功率和磨削热大幅度增加,故要求机床刚度好、功率大,并设有高压大流量的切削液喷射冷却系统,以便有效地冷却工件,冲走磨屑。缓进给磨削大多采用陶瓷结合剂的大气孔、松组织的超软普通磨料砂轮,以保证良好的自锐性、足够的容屑空间和避免工件表面烧伤。

### 7. 高效深切磨削

高效深切磨削技术是集高砂轮线速度 ( $100\text{m/s} \sim 250\text{m/s}$ )、高进给速度 ( $0.5\text{m/min} \sim 10\text{m/min}$ ) 和大切深 ( $0.1\text{mm} \sim 30\text{mm}$ ) 为一体的高效率磨削技术,被誉为“现代磨削技术的高峰”。高效深磨可直观地看出是缓进给磨削和超高速磨削的结合。其加工表面粗糙度与普通磨削相当,但材料去除率却比普通磨削高 100 倍  $\sim 1000$  倍。结合 CBN 砂轮和数控技术,可使单位宽度砂轮上的材料去除率高达  $2000\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s} \sim 3000\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ 。

### 8. 单点磨削工艺技术

德国 Junker 公司研究开发的单点磨削工艺技术是将车、铣切削加工的概念用于磨削加工,在 CNC 磨床上使用  $4\text{mm} \sim 6\text{mm}$  宽的钎焊 CBN 薄砂轮和超高砂轮线速度 ( $120\text{m/s} \sim 180\text{m/s}$ ,高的可达  $200\text{m/s} \sim 250\text{m/s}$ ),相对工件径向倾斜一个角度,砂轮与工件实现点接触磨削,避免了宽砂轮的线接触磨削。点磨削的磨削比大,砂轮寿命长,修整频率低,材料去除率高,比切入磨削有更大柔性,磨削温度低,甚至可以实现干磨削。

## 1.3.3 磨削理论的研究

通过对磨削机理的研究,揭示各种磨削过程、磨削现象的本质,找出其变化规律,例如,磨削力、磨削功率、磨削热及磨削温度的分布、切屑的形成过程、磨削烧伤、磨削表面完整性等的影响因素和条件;不同工件材料(特别是难加工材料和特殊功能材料)和磨削条件的最佳磨削参数;磨具的磨损,新型磨具材料的磨削性能等。通过磨削机理研究,才能确定最佳的磨削参数。

在精密及超精密磨削、高速高效磨削的机理和磨削工艺方面,针对不同的工件材料(如玻璃和陶瓷等)国内外开展了一些研究,尚未形成完整的理论体系。下一步研究的重点有:磨削过程,磨削现象,磨削工艺参数优化,不同材料的磨削机理,磨削过程的计算机模拟和仿真的研究。

### 1.3.4 磨床设备

磨床是实现磨削加工的首要基础条件,随着现代工业技术和高性能科技产品对机械零件的加工精度、表面粗糙度、表面完整性、加工效率和批量化质量稳定性的要求越来越高,对磨床的精度、刚度等提出更高要求,磨床装备技术亦获得了新的突破。

#### 1. 数控技术的发展和普及

随着数控技术的进步,数控磨床的比重不断提高,五轴联动数控系统也得到了广泛应用。同时数控系统生产厂商以提高生产效率、控制精度、节省空间的模块化设计等为目的,提供用户全面解决方案,与机床制造商共同开发适用的系统,开发复合了适应自身机床的工作程序,从而可以进一步提高加工应用。现有不少磨床生产厂已积极推广数控系统的二次开发应用,并与数控系统商共同开发出具有企业特色的数控系统,既符合磨床工艺发展的特点,又有利于提升企业品牌。

#### 2. 磨床功能得到扩展

例如,平面磨床的发展不再局限于平面的磨削,已延拓到了表面的磨削,成形磨削方式广泛应用,得到厂商和用户的大力推崇、开发及认可,磨削精度也越来越高。随着高科技的发展,高精度、超精密成形磨床应用范围也越来越广。其结构布置形式以高刚性、T字布置为主。立柱全移动式布局和工作台固定式布局,突破了传统的工作台移动形式,实现了平磨布局形式的一大创新。此类机床的纵向和横向运动均由立柱或磨头完成,具有总体刚性好、磨削效率高、占地面积小,能实现一机多用等优点。这种全新布局的平磨给平磨制造技术注入一股新的活力,大大提高了平面磨削加工在金属切削加工中的地位。

#### 3. 精密和超精密磨床

超精平磨垂直、横向最小进给量  $0.1\mu\text{m}$  的超精机床在国际上已相当普遍,日本  $0.01\mu\text{m}$  的超精平磨也已投入实际使用,如长濑公司超精平磨用于成形磨削导光板,也可以进行超精密非球面、平面以及成形加工,精度可达  $0.4\mu\text{m}/1500\text{mm}$ 。在一定条件下磨削铝、铜材料时,最高磨削精度可达  $0.001\mu\text{m} \sim 0.01\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m} \sim 10\text{nm}$ )。该公司超精密磨床  $\text{N}^2\text{C}-53\text{U}-\text{plus}$  可用于轴类、非轴类工件的超精密成形加工,也可进行镜面磨削加工,是世界上最高精度的磨床之一。岗本公司开发的超精密磨床  $\text{UPG84NC}$ ,采用可变控制静电导轨,其最高精度为:基准面的准直度为前后方向  $0.4\mu\text{m}/800\text{mm}$ ,左右方向为  $0.5\mu\text{m}$  以下/ $1000\text{mm}$ ;上下、前后轴的最小设定单位  $10\text{nm}$ ,分辨率  $2\text{nm}$ ,可用于光学仪器等超精密部件的加工。

#### 4. 复合化的成套成线产品

成套成线磨床产品制造水平有了新的提高,两台及两台以上机床根据零件加工工艺路线以及工厂布置,将几台甚至几十台机床联合,利用输送线形成某一零件或某件零件加工线(FMS),或集成磨削、测量等多种不同的工艺过程,此种加工方式在日本企业中是比较常见的。这些高复合化的产品不但降低了生产成本,还满足了在全球范围内都愈加严格的环保要求。现在很多公司已不局限于提高提供性能优越的单台机床,而是帮助用户考虑了在其加工过程中面临的所有问题,实际上是将诸多优越性能和完善特点进行有效整合,提供用户全套的工艺解决方案。提供成套成线产品、提供生产线专用配套产品将是磨床发展的又一趋势。

#### 5. 专机产品开发

发展专机产品为满足用户特殊零件的加工要求,生产特定的磨床日益为用户所接受。如为直线滚动导轨磨削加工开发专用磨床、长濑铁工所、岗本工作机械都有此类机床,而且精度



较高。为航空航天、光学仪器、测量仪等行业特定零件加工而开发的专用磨床,如长滩铁工所的 SGC 系列磨床,是为三菱重工制造的专用磨床,高度达 12m,且精度较高(相当于高精密级)。岗本工作机械为大型液晶生产企业制造的超精密机床(用于超精密加工液晶用感光装置的框架,XY 工作台加工和液晶喷涂装置用 T 模、玻璃基盘支持夹具等为代表的大型液晶关联零件),如其 UPG 系列机床。

## 6. 技术创新

技术创新是技术进步的源泉,各著名磨床生产厂都注重技术创新。静压导轨、静压轴承的应用,直线电机、直线导轨的应用都为各类磨床的发展提供了丰富的精密功能部件,使机床的结构、精度、功能等可根据实际需求有机地结合在一起,为用户提供高精度高规格的产品。功能部件因机床的布局变化而发展,功能部件因机床的发展而齐全强大。如瑞士 MAEGERLE 磨床公司小巧的龙门式结构平磨。

## 7. 注重环保及注意细节

在机床的设计中更加注意环保,防止油、冷却液、磨屑的污染,尽量减少油液及冷却液的用量。静压导轨的应用,大大减少了工作台驱动效率,降低了能耗。在细节方面更加人性化,操作简单,省时省力并减少误操作率,降低噪声,防止冷却液飞溅等。

### 1.3.5 磨削关键配套技术

一个完整的磨削加工过程,应该包括的关键技术有:磨削加工机床、加工工具、加工工艺控制方法、砂轮修整及动平衡技术、与加工精度相适应的测量方法及误差补偿、加工环境控制(包括恒温、隔振、洁净控制等)。此外,加工监控、计算机辅助制造软件系统等也是提高加工精度、效率以及提高自动化程度的必要措施。

#### 1. 砂轮修整

在磨削过程中,砂轮由于磨钝和磨损,需要进行及时修整,特别是对超硬磨料砂轮而言,更需要定期进行修整以保持磨粒的形状和锐利性。普通砂轮修整比较容易且修整精度要求不高,已有的主要方法包括采用单颗粒金刚石笔修整法、采用挤压轮的滚压修整法、采用金刚石滚轮的磨削修整法。

超硬磨料砂轮的修整,通常分为修形和修锐两个工序,修形是对砂轮进行微量切削,使砂轮表面达到所要求的几何形状精度,并使磨料尖端细微破碎,形成锋利磨刃。修锐是去除磨粒间的结合剂,使磨粒间有一定的容屑空间,并使磨粒突出结合剂之外,形成切削刃。针对不同机床、砂轮及工件类型,单晶金刚笔、金刚石滚轮、电火花修整、ELID 在线电解修整、杯形修整、激光修锐技术等被提出并加以应用。

#### 2. 砂轮动平衡

砂轮是磨床磨削加工必要工具,要实现磨削的高精度和光洁度,必须防止在磨削加工过程中砂轮所产生的振动。因此,在磨削逐渐向高精度化、高自动化和高效化发展的过程中,砂轮动平衡也成为一项不可缺少的关键技术,对于精密和超精密加工显得尤为重要。

目前国外在这一领域的研究已达到了很高的水平。美国 Schmitt 公司其动平衡主导产品系列有 SBS、SHS 磨床砂轮在线动平衡系统,包括外装式、内置式、机械式、液力式、环式、接触式及非接触式等;此外还有 SBS 便携式现场平衡校正仪、SBS 半自动磨床砂轮在线动平衡系统等,广泛应用于机床、汽车及零部件、航天、船舶、轴承、钢铁、电子制造等领域。德国 Dittel 公司同样是专业提供精密和超精密磨床动平衡技术和产品的厂家。