

# 实用磨削技术

李伯民 赵波等 编著

机械工业出版社

SHIYONG  
MUOXIAO  
JISHU

几  
或

9 400000

士



数据加载失败，请稍后重试！

TG 680.6  
L19

386974

# 实用磨削技术

李伯民 赵波等编著



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

根据近十多年国内外磨削理论研究和磨削加工工艺技术发展的最新成就,采用磨削理论与实践相结合原则编著而成《实用磨削技术》。

本书着重对磨削理论、超硬磨料磨具的修整技术、高效精密磨削工艺、砂带磨削、超声波振动珩磨、磨粒加工、工程陶瓷等难加工材料的磨削新工艺技术及计算机在磨削加工中的应用(CNC、GC 和计算机仿真和专家系统等)内容作了较深入的论述。

本书可作为机械制造工程技术人员的专业书籍和大专院校机制工专业的本科生、研究生的教学参考教材,也可作为机制专业职工的技术培训教材。

0V84/30

图书在版编目(CIP)数据

实用磨削技术/李伯民、赵波等编著. —北京:机械工业出版社,1996.4  
ISBN 7-111-04972-1



I. 实… I. ①李… ②赵… Ⅱ. 磨削-工艺  
IV. TG580

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 22565 号

出版人 马九荣 北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037

责任编辑:季顺利 封面设计:王洪流

北京市通县马头印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

1996年4月第1版·1996年4月第1次印刷

787mm×1092mm1/16·18.75印张·476千字·291页

印数:0 001—2500册

定价 26.00元

## 前 言

磨削是现代机械制造业中进行精密加工、超精密加工的重要工艺技术。近年来世界磨削技术的发展趋势是：超硬磨料+高效磨削工艺+CNC磨床系统。磨削工艺技术的发展有力地推动了磨削理论的深入研究；磨削理论的深入研究又大大地促进了现代磨削工艺技术的飞速发展。磨削理论和磨削工艺技术的相互促进，为提高制件的产品质量、提高磨削的生产率以及降低生产成本奠定了良好的基础。为促进我国磨削技术的发展，我们编著了《实用磨削技术》一书，以飨读者。

本书根据80年代以来国内外磨削理论研究的新成果及实用的新工艺技术，力求做到先进性、科学性和实用性。广泛搜集了近十多年来科技信息资料及论著并结合作者教学与科研实践编著而成。历时三载。

本书第一、十、十一、十二、十四章由华北工学院李伯民编著，第二、四、六、九、十三章由焦作工学院赵波编著，第五、七章由焦作工学院刘传绍编著，第三、八章由焦作大学肖亨云编著。全书由李伯民、赵波主编。编著过程中，赵学良、李梦群、李虹、黄莉、苏晓武、史晓娟、高国富等为整理书稿及插图付出了辛勤劳动，在此致以衷心地感谢。

由于水平有限，经验不足，书中难免存在错误疏漏之处，诚恳希望广大读者批评指正，不胜感激。

编 者

1996年2月于太原

## 本书所用主要符号

$A$	接触面积	$P$	功率
$A_c$	切削层面积	$\bar{P}$	磨粒钝平面与工件表面的平均接触压强
$a$	热扩散系数	$Q$	热量
$a_p$	磨削深度	$q$	砂轮与工件的速度比
$a_{eq}$	当量磨削厚度	$q_d$	砂轮与修整器的速度比
$a_{eg}$	未变形切屑厚度	$R_a$	加工表面粗糙度(轮廓算术平均偏差)
$B$	砂轮宽度	$R_z$	加工表面粗糙度(微观不平度十点高度)
$b$	磨削宽度	$R_y$	轮廓最大高度
$\bar{b}_g$	磨粒平均切削宽度	$r_s$	砂轮半径
$C$	热容	$r_w$	工件半径
$C_c$	磨刃密度,为砂轮与工件接触单位面积上磨刃数	$R$	热量分配比例系数
$d_s$	砂轮直径	$T$	砂轮耐用度
$d_w$	工件直径	$T_m$	磨削机动时间
$d_{se}$	砂轮当量直径	$t$	磨削时间
$E$	能量、弹性模量	$V_w$	金属切除体积
$E_r$	比磨削能	$V'_w$	单位宽度金属切除体积
$F_n$	法向磨削力	$v_s$	砂轮速度
$F_t$	切向磨削力	$v_w$	工件速度
$F_a$	单位磨削力	$v_r$	径向切入速度
$F_p$	轴向磨削力	$W_w$	磨屑质量
$F'_n$	单位磨削宽度法向磨削力	$W_s$	砂轮损耗质量
$F'_t$	单位磨削宽度切向磨削力	$Z_w$	金属切除率
$f$	频率	$Z'_w$	单位时间内单位宽度上金属切除率
$f_r$	径向进给量	$\nu$	泊松比
$f_a$	轴向进给量	$\lambda$	热导率
$G$	切变模量	$\lambda$	波长
$G$	磨削比	$\lambda_s$	有效磨刃间距
$G_d$	砂轮修整磨削比	$\lambda_d$	动态磨刃间距
$g$	重力加速度	$\mu$	摩擦因数
$k$	刚度	$\tau$	切应力,时间常数
$k$	传热系数	$\varphi$	摩擦角
$l_c$	砂轮与工件接触弧长	$\omega$	角频率
$l_s$	未变形切屑长度	$\rho$	密度、磨刃钝圆半径、曲率半径
$N_d$	动态有效磨刃数	$\theta$	温度、角度
$N_s$	单位面积静态有效磨刃数		
$N_l$	单位长度静态有效磨刃数		

# 目 录

## 前言

### 本书所用主要符号

<b>第 1 章 磨削技术概论</b> .....	(1)
1.1 磨削技术概况 .....	(1)
1.2 磨削加工方法分类 .....	(1)
1.3 磨削工艺系统 .....	(2)
1.4 磨削加工技术发展趋势 .....	(4)
<b>第 2 章 磨削机理与磨削参数</b> .....	(8)
2.1 磨削过程与切屑的形成 .....	(8)
2.2 磨屑的几何学关系.....	(17)
2.3 表示可磨削性的参数.....	(31)
<b>第 3 章 磨削力</b> .....	(34)
3.1 磨削力的意义.....	(34)
3.2 磨削力的理论公式.....	(34)
3.3 磨削力的尺寸效应.....	(40)
3.4 磨削力的测量与经验公式.....	(45)
<b>第 4 章 磨削温度</b> .....	(54)
4.1 磨削热的产生与传散.....	(54)
4.2 磨削区温度分布的理论解析.....	(55)
4.3 断续磨削时工件表面层温度解析.....	(67)
4.4 缓进给强力磨削的温度分布特征.....	(76)
4.5 磨削温度的测量.....	(78)
<b>第 5 章 砂轮的磨损与检测</b> .....	(84)
5.1 砂轮的堵塞.....	(84)
5.2 砂轮的磨损.....	(89)
5.3 砂轮磨损的检测.....	(98)
<b>第 6 章 砂轮的修整</b> .....	(106)
6.1 普通磨料砂轮的修整 .....	(106)
6.2 超硬磨料砂轮的修整 .....	(116)
6.3 超硬磨料磨具修整技术的进展 .....	(122)
<b>第 7 章 磨削液</b> .....	(150)
7.1 磨削液的性能和效果 .....	(150)
7.2 磨削液的种类和组成 .....	(155)
7.3 添加剂的种类和作用 .....	(159)
7.4 磨削液的供给方法与效果 .....	(162)
<b>第 8 章 磨削加工表面质量</b> .....	(166)
8.1 磨削加工表面质量的含义及其对使用性的影响 .....	(166)

8.2	磨削表面纹理 .....	(167)
8.3	磨削表面层物理力学性能 .....	(172)
8.4	磨削表面完整性参数综合影响及改善措施 .....	(176)
<b>第9章</b>	<b>固结磨具磨削</b> .....	(178)
9.1	普通磨削 .....	(178)
9.2	无心磨削 .....	(181)
9.3	成形磨削 .....	(186)
9.4	螺纹磨削 .....	(187)
9.5	齿轮磨削 .....	(188)
9.6	珩磨 .....	(190)
9.7	超声波振动珩磨 .....	(194)
<b>第10章</b>	<b>涂附磨具磨削</b> .....	(209)
10.1	涂附磨具磨削加工概述 .....	(209)
10.2	砂带磨削 .....	(211)
10.3	超精密砂带磨削 .....	(221)
10.4	强力砂带磨削 .....	(224)
<b>第11章</b>	<b>自由磨粒加工</b> .....	(226)
11.1	研磨 .....	(226)
11.2	抛光 .....	(236)
11.3	弹性发射(EEM)加工 .....	(239)
<b>第12章</b>	<b>高效及超精密磨削</b> .....	(242)
12.1	高速磨削 .....	(242)
12.2	缓进给磨削 .....	(246)
12.3	高效深切磨削(HEDG) .....	(249)
12.4	快速短行程磨削 .....	(253)
12.5	精密磨削及超精密磨削 .....	(254)
<b>第13章</b>	<b>硬脆材料及难加工材料磨削</b> .....	(258)
13.1	工程陶瓷磨削 .....	(258)
13.2	钛合金磨削 .....	(266)
13.3	高温合金磨削 .....	(270)
13.4	不锈钢磨削 .....	(271)
<b>第14章</b>	<b>计算机在磨削加工中的应用</b> .....	(274)
14.1	NC、CNC磨床 .....	(274)
14.2	磨削加工中心(GC)简介 .....	(277)
14.3	磨削加工的计算机仿真 .....	(280)
14.4	磨削加工的专家系统 .....	(285)
<b>参考文献</b>	.....	(288)



# 第 1 章 磨削技术概论

## 1.1 磨削技术概况

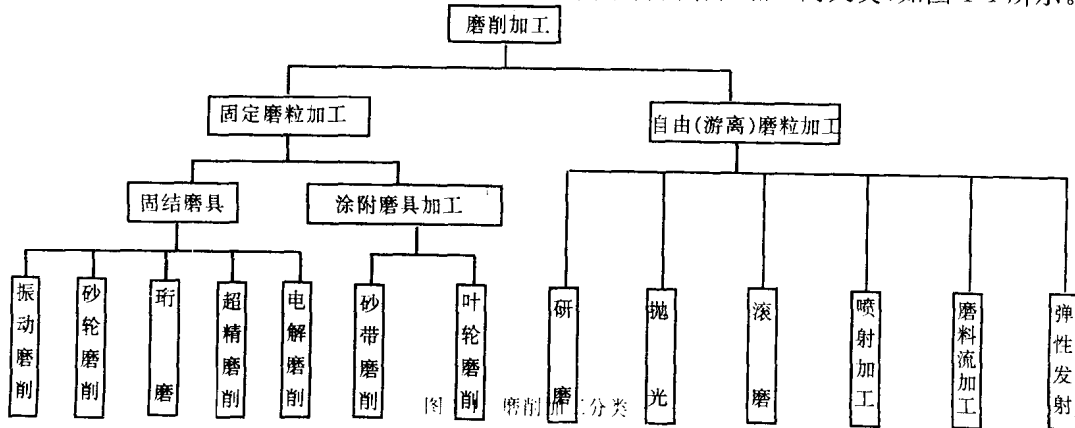
磨削加工是利用磨料去除材料的加工方法。用磨料去除材料的加工是人类最早使用的生产技艺方法。远在石器时代,已开始使用磨料研磨加工各种贝壳、石头及兽骨等,用于生活和狩猎工具。青铜器出现以后,磨料加工技术得到了进一步的发展,用来制造兵器及生产工具,用磨料研磨铜镜已达到镜面的要求。铁器的出现,使磨料加工成为一种普遍的工艺技巧得到应用。

18 世纪中期出现第一台外圆磨床,用石英石、石榴石等天然磨料敲凿成磨具,进而用天然磨料和粘土烧结成砂轮,随后又研制成功平面磨床,应用磨削技术形成。1901 年以后,相续发明人工熔炼的氧化铝(刚玉)、碳化硅磨料。40 年代末期,人造金刚石问世。1957 年研制成功立方氮化硼。超硬磨料人造金刚石砂轮与立方氮化硼砂轮的应用及磨削技术的发展,使磨削加工精度及加工效率不断提高,磨削加工应用范围日益扩大。

解放以前,我国磨床工业及磨料工业几乎是一片空白。解放后,我国相继建立了现代化的磨床、磨料磨具制造厂及专业研究所,造就了一大批从事磨床设计制造、磨料磨具研究、制造的专业科学技术队伍。1955 年以前,试制并生产了黑、绿色碳化硅和白、棕色的刚玉,陆续开发了各种磨具。1963 年成功地合成出我国第一颗人造金刚石,1966 年投入批量生产。接着,1967 年研制成功立方氮化硼,1974 年投入批量生产。80 年代高品位级的人造金刚石、优质立方氮化硼相继面世。与此同时,我国磨床工业经历了 50 年代初的测绘、仿制阶段,50 年代末期开始自行设计。改革开放推动了磨床工业的巨大发展。现在我国已能设计制造高精度、高效率、机电一体化磨床,形成品种比较齐全的磨床产品,装备了国民经济各部门的制造业,并出口 60 多个国家和地区。

## 1.2 磨削加工方法分类

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 1-1 所示。



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。

一般砂轮磨削方式根据加工对象、表面生成方法不同可分为外圆、内圆、平面及成形磨削方法。对旋转表面按工件夹紧和驱动方法,可分为定心磨削与无心磨削。按砂轮进给方法相对于加工表面的关系,可分为纵向进给与切入进给磨削。按磨削行程分为通磨与定程磨。按砂轮工作表面类型分为周边磨削、端面磨削及周边-端面磨削。数控磨床及磨削加工中心上常用复合磨削工艺方法。上述磨削方式和方法,可根据具体生产条件与表面生成方式将各种方法结合。常用的结合方式如图 1-2 所示。

图 1-2 所示结合方式基本上也适用于砂带磨削。各种砂带磨削,可分别实现内、外圆回转体表面、平面、曲面等表面加工。

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:

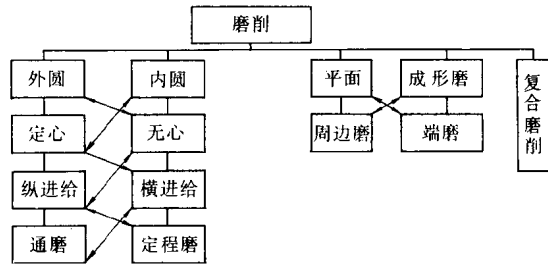


图 1-2 砂轮磨削方式和方法

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。即通过控制磨头质量、杠杆、人力、液压、气动及电器系统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。外圆、内圆磨削时,在砂轮宽度大于或等于磨削表面的宽度的情况下,采用连续的径向切入进给,称为切入磨削。切入磨削是一种高效率的磨削方式。在砂轮宽度小于磨削表面宽度的情况下,工件还要作纵向进给运动,每行程或双行程砂轮作径向切入进给一次,称为纵向磨削。平面磨削时,砂轮宽度大于或等于磨削表面宽度,工件每作一次或往复一次纵向行程,砂轮作一次切入进给。磨削表面较宽时,除工件纵向行程外,还要作横向进给,对整个表面磨出后,砂轮才再次作切入进给。

磨削广泛用来加工普通黑色金属材料、非金属硬脆材料。是加工淬硬钢、各种高强度和高硬度合金、碳纤维塑料、玻璃、工程陶瓷等材料的有效工艺手段。

### 1.3 磨削工艺系统

磨削加工中的磨床、磨具、工件、夹具和量具等构成磨削工艺系统。从系统工程信息论及控制论观点出发,磨削工艺系统由输入⇒磨削过程⇒输出组成。磨削工艺系统主要构成要素是信息流、物流及能量流的集成。任务是:

- (1) 将毛坯转变成具有一定尺寸、形状、位置精度及表面质量性能的零件。
- (2) 尽可能使磨削过程在最佳条件下运行,提高加工效率和降低生产成本。

要实现磨削加工两项根本目标,必须认真考察系统的输入信息、磨削过程规律(物理、化学、力学现象的规律)及磨削的输出结果。

系统输入信息构成如图 1-3 所示。

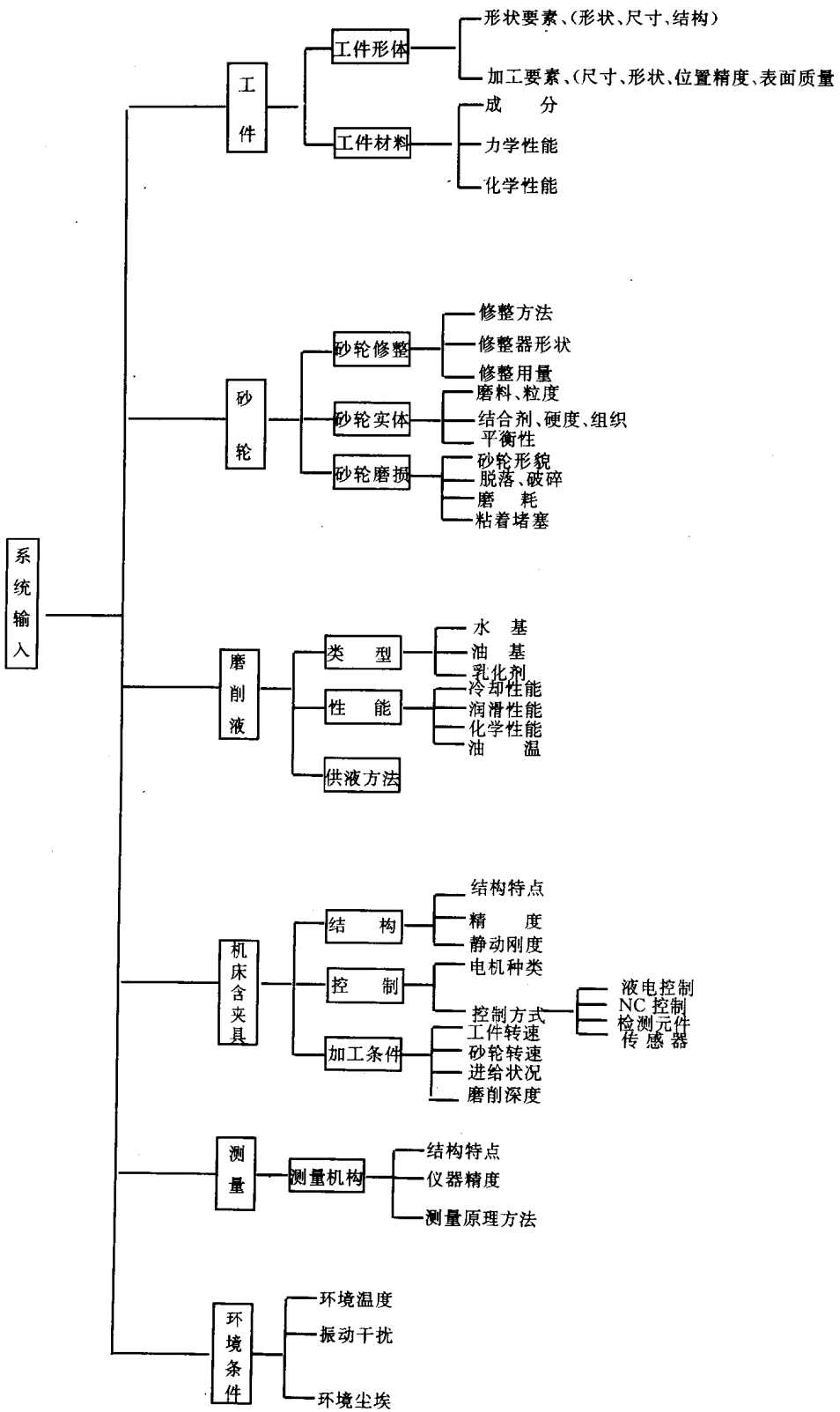


图 1-3 系统输入信息构成图

在系统的输入各因素影响综合地反映在磨削过程中,在整个磨削区中产生物理的、化学冶金及力学的现象。如图 1-4 所示。磨削过程中产生的各种现象及其变化规律的识别和判定,是评价磨削加工工艺能力参数的指标。

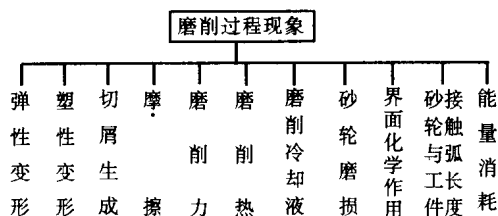


图 1-4 磨削过程现象框图

磨削工艺系统的输出为磨削结果信息如图 1-5 所示。磨削结果是评价磨削加工质量的指标。

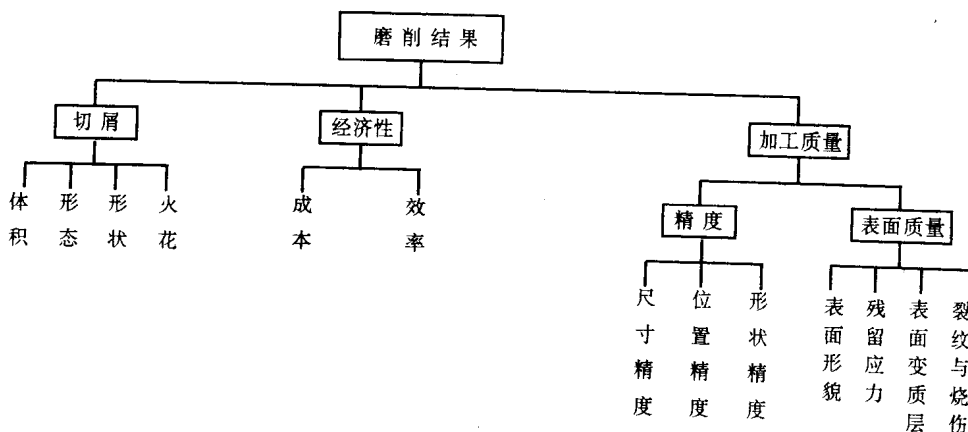


图 1-5 磨削结果框图

磨削过程是一个复杂过程,受众多的输入因素影响,产生各种物理、力学现象。所以磨削过程的研究,是一个跨学科的问题。对于磨削的研究,大致有两种方式,一是传统的研究方法,从切削理论和摩擦学等方面,来研究磨削过程的各种物理现象,探讨磨削原理及加工规律;二是近年来发展起来的应用数理统计、控制论、信息论、计算机、力学、机械学、切削学等科学,研究系统输入和系统输出的关系。讨论输入参数的变化对磨削过程各现象及磨削加工结果的影响规律,建立数学模型,寻求最优的加工效果。如采用模式识别,计算机仿真、专家系统、人工智能对磨削加工过程进行研究,取得许多研究成果。但由于磨削过程的复杂性与多样性,磨削领域有许多问题尚未被认识和定论,甚至有些问题还存在不同观点和看法。

## 1.4 磨削加工技术发展趋势

磨削加工是机械制造中重要的加工工艺。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,亟待解决。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。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、高效磨削工艺及研制高精度、高刚度的自动化磨床的方向发展。

#### 1.4.1 精密及超精密磨削

当前精密加工是指被加工零件加工精度达 $1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度为 $R_a 0.2 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 的加工技术;超精密加工当前是指被加工零件的尺寸精度小于 $0.1 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度 $R_a \leq 0.025 \mu\text{m}$ ,机床定位精度的分辨率和重复精度小于 $0.01 \mu\text{m}$ 的加工技术。超精密磨削正从微米、亚微米( $1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ )加工技术向纳米级( $10^{-2} \sim 10^{-3} \mu\text{m}$ )的加工技术发展。磨具磨削及磨粒加工是进行精密及超精密加工的主要途径。使用氧化铝、碳化硅、立方氮化硼、金刚石等磨粒制成的砂轮、砂带对黑色金属、硬脆材料、非金属材料进行磨削加工,加工精度可达 $1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度达 $R_a 0.10 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 。用超细 $\text{ZrO}_2$ (氧化锆)微粉的弹性发射游离磨粒加工芯片,可实现纳米级加工,加工精度达 $0.1 \sim 0.001 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度达镜面。超精研磨、抛光、磁流体抛光、砂带研抛、超精研抛等游离磨粒加工方法,精密电解磨削及研磨、抛光、精密超声研磨、机械化学研磨、化学机械抛光等复合加工工艺方法,都是实现精密及超精密加工、镜面加工的有效工艺技术。日本日兴公司开发的 COMMEC 新型复合磨削法,在一台机床上把机械加工、电加工、化学加工有机地结合起来,发挥各加工方法的长处,对工件施加最佳加工能量,达到最优加工条件。

#### 1.4.2 高效磨削

普通磨削的砂轮速度常在 $30 \sim 35 \text{m/s}$ 左右,磨除率为 $1 \sim 50 \text{mm}^3/\text{s}$ 。为了提高磨削效率及磨削质量,采用高速磨削、缓进给(蠕动)磨削、高效深切磨削、砂带磨削等高速高效磨削工艺。

1. 高速磨削(HSG——High Speed Grinding) 把砂轮线速度大于 $45 \text{m/s}$ 的磨削叫做高速磨削。现在高速磨削砂轮线速度 $v_s$ 达 $60 \sim 250 \text{m/s}$ ,工件进给速度 $v_w$ 为 $1000 \sim 10000 \text{m/min}$ 。在 $v_s = 60 \sim 120 \text{m/s}$ ,使用普通砂轮时,每毫米砂轮宽度的磨除率可提高到 $500 \sim 1000 \text{mm}^3/\text{s}$ ;  $v_s = 120 \sim 250 \text{m/s}$ ,使用CBN(立方氮化硼)砂轮磨除率可达 $2000 \text{mm}^3/\text{s}$ 。阿亨(Aachen)工科大学,进行砂轮线速度 $500 \text{m/s}$ 为目标的超高速磨削试验,对使用的砂轮与磨削等进行综合研究。一般认为,高速磨削(HSG)工艺不适于加工大平面或圆柱形表面精加工,主要用于沟槽和缺口件磨削及切入磨削。但西德、日本的研究表明,提高磨削速度明显改善了工件质量,磨削力降低,形成了较小的尺寸误差及形状公差,提高了加工精度。日本研制的超高速( $v_s = 160 \sim 260 \text{m/s}$ )外圆磨床,使用CBN砂轮,获得圆度误差为 $1 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度 $R_a 1.2 \mu\text{m}$ 的磨削效果。

2. 缓进给磨削(蠕动磨削)(CFG——Creep Feed Grinding) 为适应高硬度、高韧性材料的表面及沟槽等的加工,德国ELB磨床公司首创了缓进给磨削方法,其特点是增大磨削深度,降低进给速度进行磨削。磨削深度在 $0.5 \sim 30 \text{mm}$ ,纵向进给速度在 $10 \sim 300 \text{mm/min}$ 范围内变化,其加工精度达 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度达 $R_a 0.4 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。缓进给磨削在平面磨削技术仍占主导地位。缓进给磨削中实现了砂轮的连续修整技术。

3. 高效深切磨削(HEDG——High Efficiency Deep Grinding) 在高速磨削与缓进给磨削的基础上形成高效深切磨削工艺。它是以加大磨削深度、提高砂轮速度及工件进给速度,获得高的磨除率及高的磨削精度的磨削工艺。高效深切磨削的砂轮速度 $v_s = 60 \sim 120 \text{m/s}$ ,甚至更高。工件进给速度 $v_w = 1000 \sim 2500 \text{mm/min}$ ,磨削深度 $a_p$ 达 $0.1 \sim 30 \text{mm}$ 。HEDG技术被认为是“现代磨削技术的高峰”。

4. 砂带磨削 砂带磨削不仅能进行微量切除,又可进行大余量高效磨削。砂带磨除率高,磨削面积大,砂带深磨能一次切下 $3 \sim 5 \text{mm}$ 厚的金属层,所以砂带磨削的应用不断扩大。

5. 快速短行程磨削 德国ELB公司开发成功的快速短行程磨削是在往复磨削采用比常

规高得多的速度,它的行程比常规短得多的磨削方法。一般其行程速度可达 $3.8\text{m/s}$ ,往复运动频率可达 $400$ 双行程/ $\text{min}$ 。该磨削方法与缓进给磨削相比是事物的另一极端,是一种具有更高磨削效率和精度的新磨削工艺。它适合于短工件( $10\text{mm}$ 左右)的磨削加工。

6. 高速重负荷磨削 高速重负荷磨削又称修磨、粗磨或荒磨,它是以快速去除加工余量为目的的磨削加工。对磨削表面质量、加工精度要求不高。其磨削速度为 $60\sim 80\text{m/s}$ ,法向磨削力达 $2.5\sim 5\text{kN}$ ,金属磨除率达 $100\text{kg/h}$ 。主要用于钢坯的粗磨(修磨),磨除金属量占钢坯质量的 $3\%\sim 7\%$ 。可见其在磨削加工中占有重要地位。

#### 1.4.3 磨削自动化

随着机械制造业向着FMS(柔性制造系统)、CIMS(计算机集成制造系统)、IMS(智能制造系统)高度自动化方向的迅速发展,对磨削加工提出了自动化的要求。CNC车床、CNC铣床及其加工中心已普及20余年,而NC、CNC磨床仅有10年左右的历史。80年代是数控磨床迅速发展的时期,90年代将是数控(NC、CNC)磨床真正进入普及实用时期。80年代后期瑞士斯都德公司(Sluder)开发了S45-6型磨削中心(GC),美、日、德、瑞士等国相继成功开发了外圆磨削中心(EGC),内圆磨削中心(IGC)、坐标磨削中心(JGC)、无心磨削中心(CGC)、平面磨削中心(SGC)、工具磨削中心(TGC)。CNC磨床具有砂轮与工件自动交换装置(ATC、AWC)及AMM,可实现FMS化。90年代初期日本公布了关于磨削加工智能化研究成果。磨床的高速化与智能化,对磨床结构设计制造提出了新要求和新课题。当前主要技术动向是:用有限元算法、模态分析、CAD及CAE技术对磨削机床进行动、静刚度研究,优化磨床结构,解决振动及达到高稳定性的磨削加工。发展静压、动压技术,采用油轴承、空气轴承及磁轴承,解决磨床主轴高速化及高精密化。利用静动压导轨、直线导轨、静动压丝杠,解决导轨及进给机构的高速化与高精密化。注重热变形对策研究,排除或降低热源,抑制热产生,隔离及防止热扩散。从材料及结构上抑制热变形,并从系统上进行控制与补偿。均是当前磨削自动化研究中的主要技术动向。

#### 1.4.4 磨削理论研究

磨削理论研究是磨削技术发展的基础。磨削技术的发展为磨削理论研究提供了机遇和新课题。近十几年来,从事磨削工程的专业人员,对磨削工艺系统众多因素和现象进行了大量的深入研究,取得了丰硕成果。

1. 磨削机理研究 根据弹塑性力学、断裂力学、摩擦学、切削学、计算机等基础科学,研究磨粒切削机理、切屑的形成、磨削力、磨削热与磨削温度分布及磨削区接触弧长等问题,通过理论分析,建立模型,试验考察,模拟与仿真,探讨其变化的内在规律。

2. 对磨削工具——砂轮的研究 磨料磨具行业主要研究新型磨料、超硬超微磨料磨具特性和新型磨具开发等问题。从事磨削工艺的科技人员研究的重点集中在砂轮磨损、砂轮地貌、磨损监测与控制、砂轮修整技术及智能化磨削工具上。目前日本对金属结合剂金刚石砂轮的电解在线修整(ELID)已经商业化。同时,为监测砂轮寿命,采用“中性网络”和“模糊推理”等技术,将AE传感器置于砂轮的金属毂上,这样既可监测磨削过程,又可监测修整过程,通过研究AE传感器得到的信号的动态分量还可探测工具产生的振动等。有效地研究砂轮的磨损,提高使用寿命,对砂轮磨削性能做出合理的评价,仍是今后磨削砂轮研究的一个方向。

3. 磨削工艺条件的优化研究 砂轮速度、工件速度、进给速度、磨削深度及磨削液等是考察磨削过程中诸现象及磨削结果的重要参数。对磨削用量参数进行单因素、多因素实验,建立数学模型优化合理的磨削参数并总结出规律,仍是指导工业生产的一种常用方法。

4. 磨削表面完整性研究 现代机械产品对零件表面质量要求愈来愈高,要求极低的粗糙

度、残余应力及表面变质层。具体为纳米级加工,材料去除为原子,分子之间分离,表面为镜面,几乎没有变质层及残留应力。磨削表面的波纹、振纹、残余应力、加工硬化层、烧伤及裂纹等缺陷是磨削加工中常见质量问题。分析缺陷产生原因,进行监控,采取抑制与防止措施,提高磨削表面完整性,是磨削技术中重点研究的内容之一。

5. 磨削工艺过程监控与检测技术研究 实现磨削 CNC 控制和智能化,对磨削过程进行监控是一个重要问题。解决磨削过程的信号识别、信号采集、数据处理、反馈与补偿、传感器敏感元件、专家系统、智能系统和软件设计等技术,是实现监控所必须的技术问题。由于磨削过程的复杂性,对其进行监控要比其他加工方法要困难的多。这正是 CNC 磨床发展较晚的原因。日本已开发出 GKBS 磨削加工智能化处理系统。在砂轮磨损监测方面,国内已研究出声发射监控系统。汉诺威大学用 32mW 连续波激光管、位置光敏检测器和镜头的新的光学测量方法,评价砂轮形貌对磨削过程稳定性及砂轮微观特征信息及状态进行在线判断。但目前磨削过程监控系统在实用性方面仍存在一定的差距。

对磨削加工尺寸、形状及位置精度、表面质量进行检测分为离线与在线检测,表面粗糙度的评价与检测是研究重点。对超精密磨削及游离磨粒加工方法获得的低粗糙度与镜面的离线检测已发展到非接触式测量。主要方法有:电子显微镜(SEM)、隧道扫描电子显微镜(STM)光学式非接触测量(光学式外差干涉法、条纹扫描干涉法、激光散射法等)。高精度高质量的磨削表面的在线自动检测要比车、铣等加工方法困难的多。关键在于信号识别、采集及传感器技术。弹性发射(EEM)加工法是通过光识别表面、光敏发光谱实现自动检测。

#### 1.4.5 软件技术开发

高性能的 CNC 磨床配有齐备的软件系统。对磨削加工情报信息处理及数据输入、磨削方式及顺序、磨削条件、砂轮修整条件有自动选定,磨削加工过程状态监控及补偿等问题在软件开发中都要给予合理地解决。各国都在努力开发专家系统(ES)软件,知识获取是开发专家系统软件的“瓶颈”。专家系统软件为实现磨削智能化奠定了基础。

## 第2章 磨削机理与磨削参数

磨削时,磨床上相应的机构控制着砂轮,使它与工件接触,逐渐切除工件与砂轮相互干涉的部分,形成被磨表面。影响磨削加工过程的因素很多,使得对磨削机理的研究比对切削机理的研究变得更加困难和复杂。为了实现磨削过程的最优控制,就必须研究磨削加工中输入参数和输出参数之间的相互关系,也就是必须研究磨削加工过程的物理规律——磨削机理。

为了描述磨削机理,必须找出一些能明确表征输入或输出条件的主要参数。表征输入条件的参数有:磨刃几何参数、有效磨粒(刃)数、切屑厚度、切屑宽度、接触弧长和砂轮当量直径等。表征输出的主要参数有:材料去除率、砂轮耗损率、磨削比、磨削力比、功率消耗和磨削比能、加工精度以及表面完整性指标等。其中,磨刃几何参数、有效磨刃数、切屑厚度、切屑宽度和磨削比等比较重要,称之为磨削基本参数。

### 2.1 磨削过程与切屑的形成

#### 2.1.1 磨粒的切削刃形状与分布

由于制造砂轮用的磨粒晶体的生长机理不同或制粒过程的破碎方法不同,磨粒的形状一般是很不规则的。从宏观上看,磨粒的形状近似于多棱锥体形状,可以分别用长( $l$ )、宽( $b$ )、高( $h$ )和楔角( $\theta$ )表示,如图 2-1a 所示。在磨粒切削刃的几何特征研究中,常根据刀具切削部分的几何参数定义,来确定磨粒切削刃的几何参数。几何参数包括:磨刃的前角  $\gamma_r$  后角  $\alpha_r$ ,顶锥角  $2\theta$  和磨刃钝圆半径  $r_r$  (如图 2-1b 所示)及容屑槽(磨粒和结合剂的孔隙)的结构参数。它们影响着砂轮的锋锐程度、切削能力和容屑能力。

事实上,磨削时每颗磨粒有多个顶尖,因而会出现多个顶锥角。按统计规律知,顶锥角  $2\theta$  在  $80^\circ \sim 145^\circ$  之间变动。若顶锥角小于  $90^\circ$  的磨粒尖角所占比例增多,表示以正前角切削的磨粒概率增大。所以,顶锥角  $2\theta$  所占的比例是非常重要的。它关系到磨粒的切削性能。研究表明,顶锥角  $2\theta$  所占的比例及磨刃钝圆半径  $r_r$  的大小均与磨粒的尺寸有关,如图 2-2 所示。

由图可见, $2\theta$  随磨粒宽度  $b$  及  $r_r$  增大而略有增大。在  $b = 20 \sim 70\mu\text{m}$  范围内, $2\theta$  从  $90^\circ$  增至  $100^\circ$ ; 在  $b = 70 \sim 420\mu\text{m}$  范围内, $2\theta$  从  $100^\circ$  增至  $110^\circ$ ;  $r_r$  随磨粒尺寸  $b$  及  $2\theta$  增大而增大,在  $b = 30 \sim 420\mu\text{m}$  范围内, $r_r$  几乎是线性地从  $3\mu\text{m}$  增至  $28\mu\text{m}$ 。由统计规律可知:一般情况下刚玉磨粒的顶锥角  $2\theta$  和磨刃钝圆半径  $r_r$  比碳化硅磨粒大些,且随着磨粒尺寸的变化具有相同的变化规律。

磨粒在砂轮中的分布是随机的,这主要是由于砂轮的结构及制造工艺方面的原因所决定。磨粒在砂轮工作表面的空间分布状态如图 2-3 所示。图中, X-Y 坐标平面即砂轮外层工

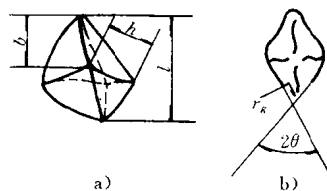


图 2-1 磨粒的形状

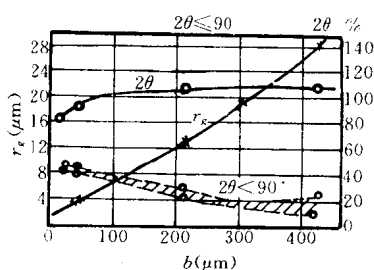


图 2-2 氧化铝磨粒的  $2\theta$ 、 $r_r$  及  $2\theta < 90^\circ$  的百分比与磨粒尺寸的关系



作表面,沿平行于Y-Z坐标平面所截取的磨粒轮廓图即为砂轮的工作表面形貌图(亦称为砂轮的地貌)。由图可以看出,磨粒有效磨刃间距 $\lambda$ 和磨粒切削刃尖端距砂轮表面的距离均不一定相等,因而在磨削过程中有的切削刃是有效的,而有的切削刃是无效的。即使是有效切削刃,其切削截面积的大小也不会相同。

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。磨削的特点可归纳如下:

(1) 砂轮工作表面的磨粒数很多,相当于一把密齿刀具。据统计规律,不同粒度和硬度的砂轮,每平方厘米的磨粒数约为60~1400颗。但是,在磨削过程中,仅有一部分磨粒起切削作用。另一部分磨粒只在工件表面刻划出沟痕,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,有效磨粒约占砂轮表面总磨粒数的10%~50%。

(2) 磨刃的前角多是负前角,一般前角 $\gamma_g = -15^\circ \sim -60^\circ$ 。由研究可知,刚玉砂轮经修整后的平均磨刃前角 $\bar{\gamma}_g = -80^\circ$ 。用刚玉砂轮磨削,当单位砂轮宽度金属切除率 $Z'_w$ 达:500mm<sup>3</sup>/(mm·s)后,再测量其前角,可发现前角发生了变化(如图2-4所示),此时 $\gamma_g = -85^\circ$ ,且随着 $Z'_w$ 的增加,负前角数值的分散范围变小。

(3) 一颗磨粒切下的切屑体积很小。切屑厚度大约为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ mm,切下的体积不大于 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ mm<sup>3</sup>,约为铣削时每个刀齿所切下体积的1/4000~1/5000。根据尺寸效应原理[详见第3章],在磨粒切屑厚度非常小时,单位切削力很大。由实验得出磨削、微量铣削及微量车削条件下的切屑厚度 $a_g$ 与单位磨削能 $E_r$ (切屑内部剪切所需的能量)的关系如图2-5所示。由图可知,切屑厚度愈小,单位磨削能愈大。单位磨削能 $E_r$ 与切屑厚度 $a_g$ 的关系如下:

$$E_r = \frac{k}{a_g} \quad (2-1)$$

式中  $k$ ——常数。

(4) 磨削速度很高。一般砂轮速度 $v_s = 15 \sim 80$ m/s。因此,磨粒与被加工材料的接触时间极短,约为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ s。在极短时间内产生大量磨削热使磨削区产生高温(400~1000℃)。因而磨削淬硬钢工件易烧伤、产生残余应力及裂纹。此外,磨削区的高温也会使磨粒本身发生物理化学变化,造成氧化磨损和扩散磨损等,减弱了磨粒的切削性能。

(5) 磨削加工的力比值(法向磨削力 $F_n$ 与切向磨削力 $F_t$ 之比)较大。一般 $F_n/F_t = 3 \sim 14$ ,而车削力比值只有0.5左

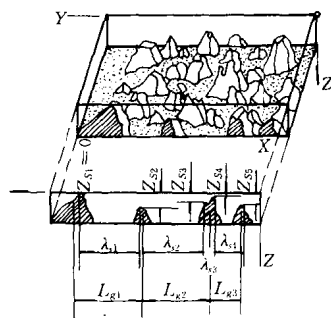


图 2-3 砂轮工作表层磨粒空间分布图

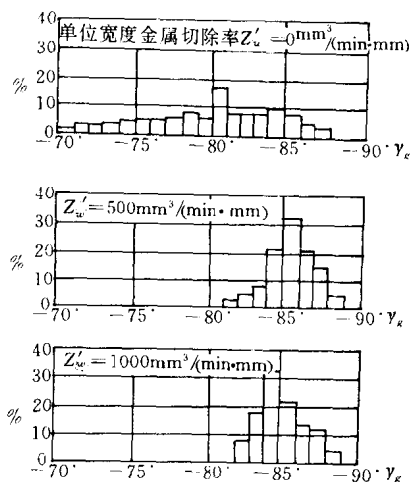


图 2-4 砂轮表面磨粒切削前角的分布范围及变化

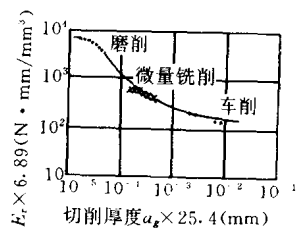


图 2-5 单位磨削能 $E_r$ 与切屑厚度 $a_g$ 的关系(15Mn合金钢)