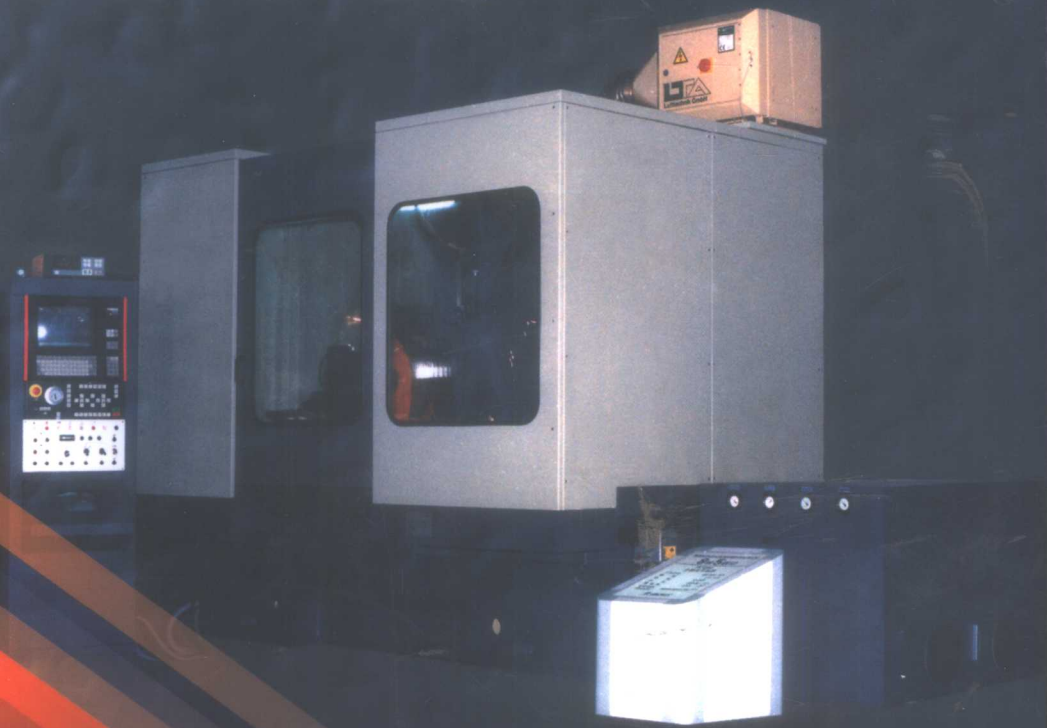


现代磨削技术

李伯民 赵波 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



现代磨削技术

李树刚 主编



机械工业出版社

现代磨削技术

主编 李伯民 赵 波

参编 (排名不分先后)

刘传绍 于松章 高国富

焦 锋 李 清



机械工业出版社

本书共分 15 章, 全面系统地论述和总结了磨削加工技术。书中既对传统磨削加工的实用技术作了介绍, 又对磨削领域的最新理论研究成果及新开发成功的先进磨削加工工艺技术作了重点论述。特别是在内容上突出了磨削加工技术的实用性。

本书第 1 章确立了磨削加工系统是一个系统的理念。其余各章分别论述了磨削原理、砂轮的磨损与修整, 磨削液的特性与选用; 普通磨料磨具的特性与选用, 超硬磨料磨具的特性与选用; 固结磨具磨削工艺、修整磨削工艺、砂带磨削工艺, 游离磨粒各种加工工艺方法; 高效与超精密磨削新工艺, 难加工材料的磨削工艺; 磨削工艺中的新技术、数控磨床技术, 磨削加工检测技术。

本书可用作广大从事机械加工, 特别是从事磨削加工的技术工人学习与培训用书; 机械制造各部门的工程技术人员的技术参考书; 也可用作大中专院校机械设计、制造及自动化专业师生学习工程技术的用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代磨削技术/李伯民, 赵波主编. —北京: 机械工业出版社,
2003.1

ISBN 7-111-11095-1

I. 现… II. ①李…②赵… III. 磨削—基本知识 IV. TG58

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 086296 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 季顺利 王天谏 版式设计: 霍永明 责任校对: 韩晶

封面设计: 姚毅 责任印制: 闫焱

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 34.5 印张 · 853 千字

0 001 - 3 000 册

定价: 48.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术的迅速发展,国民经济各部门所需求的多品种、多功能、高精度、高品质、高度自动化的技术装备的开发和制造,促进了先进制造技术的发展。磨削加工技术是先进制造技术中的重要领域,是现代机械制造业中实现精密加工、超精密加工最有效、应用最广的基本工艺技术。

当今,磨削加工技术的发展趋势是向着采用超硬磨料磨具,发展高速、高效、高精度磨削新工艺,装备 CNC 数控磨床的方向发展,但普通磨床及专用磨床、普通磨料磨具、传统磨削工艺仍占有重要地位。资料表明磨削加工量约占机械加工总量的 30%~40%。在金属切削机床的 11 个大类中,磨床的品种规格是最为繁多的一类,这正是为满足各种零件的不同材质、不同形面,不同的加工要求而开发的繁多磨削工艺方法所需要的结果。从加工工艺方法分类讲,磨削加工是一个大类。磨削是一个总称。磨削涵盖了固结磨具的各种工艺方法、游离磨粒加工的各种工艺方法及涂附磨具的各种工艺方法。各种工艺方法的材料去除机理、工艺原理及工艺装备构成了磨削加工技术的体系。

磨削加工工艺系统是一个系统工程。磨削加工过程中所受的影响因素繁多,加工过程中物理化学现象复杂。为提高磨削加工质量和磨削效率,满足机械制造业的需求,机械工程学科中的科研与工程技术人员、技术工人,运用多学科的基础理论和科学技术,探索和揭示磨削过程的机理和规律、研究和开发了各种磨削工艺方法及工艺装备,形成了多学科基础理论与科学技术融合与交叉的具有综合性的磨削加工技术。

磨削加工技术主要包括了磨削原理、材料去除机理、工艺原理与工艺方法、磨料磨具、磨削液、数控磨床,磨削质量的控制、计算机控制技术与编程技术、CAD/CAPP/CAM 集成技术、计算机仿真技术与软件技术、现代管理技术等。

为适应我国知识经济的发展和技术创新的需要,提高并拓宽从事磨削加工的技术工人、工程技术人员知识面,推动我国磨削事业的发展,作者编撰了《现代磨削技术》这本书。全书分为 15 章,涵盖了磨削加工技术的基本内容。突出了磨削加工技术的实用性与先进性。根据国内的实际需要,既对传统的磨削工艺技术作了必要的论述,又对先进磨削工艺技术及超精密磨削工艺技术作了较全面的介绍,将数控磨床、磨削数据库、计算机仿真技术等融入磨削著作中。选编了有用的图表及磨削工艺规范等技术数据,供读者方便选用。

本书由李伯民、赵波主编。第 1、8、11 章由李伯民编写;第 4、10 章由赵波编写;第 5 章由刘传绍编写;第 7、9 章由于松章编写;第 2、6 章由高国富编写;第 12、15 章由焦锋编写;第 3、13、14 章由李清编写。

由于编者水平有限,书中难免存在错误及疏漏之处,诚望广大读者批评指正,并致以衷心感谢。

编 者

2003 年 1 月

本书所用主要符号

A	接触面积	N_t	单位长度静态有效磨刃数
A_c	磨削层面积	n_s	砂轮线转速 (r/min)
a	热扩散率	n_w	工件线转速 (r/min)
a_p	磨削深度	P	功率
a_e	磨削层厚度	\bar{P}	磨粒钝平面与工件表面的平均接触压强
a_{eq}	当量磨削层厚度	Q	热量
a_{eg}	未变形磨屑厚度	q	砂轮与工件的速度比
a_g	磨屑厚度	q_d	砂轮与修整器的速度比
B	砂轮宽度	R_a	加工表面粗糙度 (轮廓算术平均偏差)
b	磨削宽度	R_z	加工表面粗糙度 (微观不平度十点高度)
\bar{b}_g	磨粒平均切削宽度	R_y	轮廓最大高度
C	热容	r_s	砂轮半径
C_e	磨刃密度, 为砂轮与工件接触单位面积上磨刃数	r_w	工件半径
d_s	砂轮直径	R	能量比例系数
d_w	工件直径	T	砂轮耐用度
d_{se}	砂轮当量直径	T_m	磨削机动时间
E	能量、弹性模量	t	磨削时间
E_e	比磨削能	V_w	金属磨除体积
F_n	法向磨削力	V'_w	单位宽度金属磨除体积
F_t	切向磨削力	v_s	砂轮速度
F_a	轴向磨削力	v_w	工件速度
F_p	单位磨削力	v_r	径向切入速度
F'_n	单位磨削宽度法向磨削力	W_w	磨屑重量
F'_t	单位磨削宽度切向磨削力	W_s	砂轮损耗重量
f	频率	Z_w	金属磨除率
f_r	径向进给量 (mm/min 或 mm/r)	Z'_w	单位时间内单位砂轮宽度上金属磨除率
f_a	轴向进给量或纵向进给量	ν	泊松比
G	切变模量	λ	热导率
G	磨削比	λ	波长
G_d	砂轮修整磨削比	λ_s	有效磨刃间距
g	重力加速度	λ_d	动态磨刃间距
k	刚度	μ	摩擦因数
k	传热系数	τ	切应力, 时间常数
l_c	砂轮与工件接触弧长	φ	摩擦角
l_s	未变形磨屑长度	ω	角频率
N_d	动态有效磨刃数	ρ	密度, 磨刃钝圆半径, 曲率半径
N_s	单位面积静态有效磨刃数	θ	温度, 角度

目 录

前言

本书所用主要符号

第 1 章 磨削加工技术概论 1

- 1.1 磨削加工技术发展概况 1
- 1.2 磨削加工方法与分类 2
- 1.3 磨削工艺系统 4
- 1.4 磨削加工技术发展趋势 5
 - 1.4.1 磨削理论与工艺研究深入发展 5
 - 1.4.2 磨床高速、高精度零部件单元制造技术 9
 - 1.4.3 磨削自动化和智能化 10
 - 1.4.4 磨削工艺过程监控与检测技术 11
 - 1.4.5 磨削加工软件技术 11

第 2 章 磨削原理 12

- 2.1 磨削过程的特点及切屑形成 12
 - 2.1.1 磨粒的切削刃形状与分布 12
 - 2.1.2 磨削的特点 13
 - 2.1.3 磨粒的切削作用与磨削过程 14
 - 2.1.4 磨屑的形成 16
 - 2.1.5 砂轮的有效磨刃数 16
- 2.2 表征磨削过程的磨削要素 18
 - 2.2.1 接触弧长和磨削长度 18
 - 2.2.2 磨粒磨削的磨屑厚度 22
 - 2.2.3 砂轮的当量直径 d_w 26
 - 2.2.4 磨削比 G (Grinding Ratio) 27
 - 2.2.5 被磨材料的磨除参数 28
- 2.3 磨削力 29
 - 2.3.1 磨削力的意义 29
 - 2.3.2 磨削力的理论公式 29
 - 2.3.3 磨削力的尺寸效应 34
 - 2.3.4 磨削力的测量与经验公式 38
- 2.4 磨削温度 44
 - 2.4.1 磨削热的产生与传散 45
 - 2.4.2 磨削区温度分布的理论解析 45
 - 2.4.3 断续磨削时工件表面层温度解析 56

第 3 章 磨料磨具及其选择使用 70

- 3.1 普通磨料与磨具 70
 - 3.1.1 普通磨具的结构与分类 70
 - 3.1.2 磨具用磨料 71
 - 3.1.3 磨料的粒度 73
 - 3.1.4 磨具的硬度 75
 - 3.1.5 磨具结合剂 78
 - 3.1.6 磨具的组织 79
 - 3.1.7 磨具形状尺寸 79
 - 3.1.8 磨具的强度 80
 - 3.1.9 磨具的静平衡度 80
- 3.2 普通磨料磨具的选择与使用 82
 - 3.2.1 磨料的选择 82
 - 3.2.2 磨料粒度选择 84
 - 3.2.3 磨具的硬度选择 85
 - 3.2.4 结合剂的选择 87
 - 3.2.5 磨具组织的选择 88
 - 3.2.6 磨具形状和尺寸的选择 88
 - 3.2.7 按各种磨削条件选择普通磨具 89
 - 3.2.8 按磨料对被磨削材料的适应性来选择磨具 90
 - 3.2.9 磨具的安全使用 90
- 3.3 超硬磨料及其磨具 95
 - 3.3.1 超硬磨料磨具的加工特点 95
 - 3.3.2 金刚石的性质 96
 - 3.3.3 超硬磨料立方氮化硼的性能 100
 - 3.3.4 超硬磨料磨具的特性 100
- 3.4 超硬磨料磨具特性的选择 103
 - 3.4.1 超硬磨料的选择 103
 - 3.4.2 超硬磨料的粒度选择 103
 - 3.4.3 超硬磨料磨具结合剂的选择 104
 - 3.4.4 浓度的选择 105
 - 3.4.5 超硬磨料磨具形状和尺寸的

2.4.4 缓进给强力磨削的温度分布特征 ... 62

2.4.5 磨削温度的测量 64

选择	106	影响	169
3.4.6 超硬磨料磨具的使用	106	5.4 磨削液的供给方法与效果	170
3.4.7 超硬磨料磨具的磨削用量选择	108	第6章 磨削加工表面质量	174
第4章 砂轮的磨损与修整	111	6.1 磨削加工表面质量的含义及其对使用性能的影响	174
4.1 砂轮的堵塞	111	6.1.1 表面质量的含义	174
4.1.1 砂轮堵塞的形貌	111	6.1.2 磨削表面粗糙度与磨削加工精度的关系	174
4.1.2 砂轮堵塞的形成机理	112	6.1.3 表面质量对零件使用性能的影响	174
4.1.3 影响砂轮堵塞的因素分析	114	6.2 磨削表面纹理	175
4.2 砂轮的磨损	116	6.2.1 磨削表面的创成机理	175
4.2.1 砂轮磨损形态与原因	116	6.2.2 磨削表面粗糙度的理论分析	176
4.2.2 砂轮磨损的特征	121	6.2.3 影响磨削加工表面粗糙度的因素	177
4.3 砂轮磨损的检测	124	6.2.4 磨削加工表面粗糙度的经验公式	177
4.4 普通磨料砂轮的修整	132	6.3 磨削表面层物理力学性能	178
4.4.1 普通磨料砂轮的修整方法与工具	132	6.3.1 磨削表面层加工硬化层的产生	178
4.4.2 单颗粒金刚石笔修整法	133	6.3.2 磨削表面金相组织变化——磨削烧伤	178
4.4.3 金刚石滚轮修整	133	6.3.3 表面层残余应力	180
4.5 超硬磨料砂轮的修整	138	6.4 磨削表面完整性参数综合影响及改善措施	182
4.5.1 超硬磨料砂轮的整形法	138	6.4.1 磨削表面缺陷	182
4.5.2 超硬磨料砂轮修整法	140	6.4.2 磨削表面完整性参数间关系	182
4.6 超硬磨料磨具修整技术的新进展	143	6.4.3 改善磨削加工零件表面完整性的措施	182
4.6.1 磨削修整法的改进——GC杯形砂轮研磨修整法	143	6.5 磨削加工中的振动	183
4.6.2 在线电解修整法 (ELID)	149	6.5.1 磨削加工中的颤振现象	183
4.6.3 简易的双电极在线修锐法	153	6.5.2 强迫颤振	184
4.6.4 弹性修整法	155	6.5.3 再生颤振	185
4.6.5 超声波振动修整法	158	第7章 固结磨具磨削工艺	187
4.6.6 激光修锐法	158	7.1 外圆磨削	187
第5章 磨削液	160	7.1.1 外圆磨削方式	187
5.1 磨削液的性能和效果	160	7.1.2 数控外圆磨床加工	190
5.1.1 磨削液的特性	160	7.1.3 外圆磨削的工件装夹	190
5.1.2 磨削液的效果	161	7.1.4 砂轮的安裝	191
5.2 磨削液的种类和组成	165	7.1.5 轴类零件磨削工艺	192
5.2.1 磨削液的种类	165	7.1.6 台阶轴磨削	192
5.2.2 磨削液的组成	165		
5.3 添加剂的种类和作用	167		
5.3.1 磨削液中的极压添加剂	167		
5.3.2 表面活性添加剂	168		
5.3.3 无机盐类	169		
5.3.4 磨削液中的添加剂对磨削效果的			

7.1.7 轴类零件的精度检验·····	193	7.8.3 螺纹磨削砂轮选择·····	225
7.1.8 外圆磨削的缺陷及消除方法·····	195	7.8.4 单线砂轮磨削用量·····	226
7.2 内圆磨削·····	195	7.8.5 淬硬梯形螺纹长丝杠和滚珠丝杠 磨削·····	226
7.2.1 内圆磨削的特点和应用·····	195	7.8.6 内螺纹磨削·····	229
7.2.2 内孔的磨削方法·····	196	7.9 花键轴磨削·····	231
7.2.3 砂轮的选择和安装·····	198	7.9.1 磨削矩形花键轴的方法·····	231
7.2.4 内孔的精度检验·····	200	7.9.2 花键轴磨削时砂轮选择·····	232
7.2.5 内孔磨削时的缺陷及消除方法·····	201	7.9.3 花键轴磨削时的注意事项·····	233
7.3 圆锥面磨削·····	202	第8章 高效及超精密磨削 ·····	234
7.3.1 圆锥面的磨削方法·····	202	8.1 高速磨削·····	234
7.3.2 圆锥的精度检验·····	204	8.1.1 高速磨削原理·····	234
7.3.3 圆锥面磨削的缺陷及消除方法·····	205	8.1.2 高速磨削砂轮·····	237
7.4 平面磨削·····	205	8.2 缓进给磨削·····	239
7.4.1 平面磨削方式·····	205	8.2.1 缓进给磨削机理·····	239
7.4.2 工件装夹·····	206	8.2.2 砂轮与工件接触弧长度及接触时 间·····	239
7.4.3 平行面的磨削·····	206	8.2.3 磨削力·····	240
7.4.4 翘曲平面的磨削·····	207	8.2.4 磨削温度·····	241
7.4.5 垂直平面与斜面的磨削·····	207	8.2.5 砂轮磨损·····	241
7.4.6 台阶与直角形槽的磨削·····	208	8.2.6 表面完整性·····	241
7.4.7 平面的精度检验·····	208	8.2.7 缓进给磨削中温升控制·····	242
7.4.8 平面磨削时的缺陷和消除方法·····	208	8.2.8 缓进给磨削过程中砂轮连续修 整·····	242
7.4.9 导轨的磨削·····	209	8.3 高效深切磨削 (HEDG)·····	243
7.5 无心磨削·····	210	8.3.1 高效深切磨削原理·····	244
7.5.1 无心磨削基本原理和磨削方法·····	210	8.3.2 HEDG 的磨削力·····	246
7.5.2 无心磨削的力学基础·····	211	8.3.3 HEDG 对机床的要求·····	247
7.5.3 工件成圆过程·····	213	8.4 精密、高精密和超精密磨削工艺·····	247
7.5.4 导轮曲面形状及修整·····	214	8.4.1 概述·····	247
7.5.5 无心磨削质量分析与控制·····	215	8.4.2 精密、高精密和超精密磨削磨料 磨具·····	248
7.6 成形磨削·····	217	8.4.3 精密、高精密和超精密磨削工艺 参数·····	250
7.6.1 成形砂轮磨削·····	217	8.4.4 精密、高精密和超精密磨削修整 用量·····	251
7.6.2 工件轨迹运动磨削法 (靠模 法)·····	217	8.4.5 精密、高精密和超精密磨削对机 床、环境要求·····	251
7.6.3 展成磨削法·····	217	8.5 镜面磨削加工工艺·····	252
7.6.4 数控加工方法·····	217	8.6 电解磨削·····	253
7.7 齿轮磨削·····	218	8.6.1 电解磨削的原理·····	253
7.7.1 磨齿加工原理·····	218		
7.7.2 磨齿工艺·····	221		
7.7.3 磨齿误差产生原因及消除方法·····	223		
7.8 螺纹磨削·····	223		
7.8.1 螺纹磨削特点和类型·····	223		
7.8.2 螺纹磨削工艺要点·····	224		

8.6.2 导电磨轮	254	9.6 砂带堵塞与磨损	284
8.6.3 电解液	256	9.6.1 砂带堵塞	284
8.6.4 电解磨削工艺	256	9.6.2 砂带磨损	286
8.7 ELID 镜面磨削法	258	第 10 章 精整加工技术	287
8.7.1 平形砂轮的 ELID 镜面磨削系 统	258	10.1 概述	287
8.7.2 CIFB 杯形砂轮外圆镜面磨削	258	10.1.1 精整加工的范畴及特点	287
8.8 其他高效磨削工艺简介	259	10.1.2 精整加工机理	287
8.8.1 快速短行程磨削	259	10.2 超精加工	287
8.8.2 大气孔宽砂轮磨削工艺	259	10.2.1 超精加工机理和特点	288
8.8.3 多砂轮磨削工艺	260	10.2.2 超精加工方式	289
8.8.4 恒压力(定力)磨削工艺	260	10.2.3 超精加工工艺参数	290
8.8.5 冷风磨削工艺	261	10.2.4 超精加工头和超精加工油石	291
8.8.6 单点磨削工艺	262	10.2.5 无心外圆超精加工	291
8.8.7 高速重负荷磨削工艺	262	10.2.6 轮式超精磨	293
第 9 章 涂附磨具磨削工艺技术	263	10.2.7 超精加工机运动方式	294
9.1 涂附磨具磨削加工工艺概述	263	10.3 普通珩磨	296
9.1.1 涂附磨具定义、构成及分类	263	10.3.1 珩磨加工特点及原理	297
9.1.2 涂附磨具制造	263	10.3.2 珩磨油石	299
9.1.3 砂带	264	10.3.3 珩磨头的结构形式	300
9.1.4 涂附磨具加工应用范围	264	10.3.4 平顶珩磨头	303
9.2 砂带磨削	265	10.3.5 珩磨头结构设计	306
9.2.1 砂带磨削机理与特点	265	10.3.6 珩磨夹具	308
9.2.2 砂带磨削方式	266	10.3.7 珩磨用量	309
9.2.3 接触轮材料、形状、硬度选择	267	10.4 超声波振动珩磨	312
9.2.4 张紧与调偏机构	269	10.4.1 超声波振动加工的工艺效果	313
9.2.5 砂带磨削工艺参数	269	10.4.2 超声波振动珩磨的磨削机理	314
9.2.6 砂带磨床	275	10.4.3 超声波振动珩磨装置结构	320
9.2.7 砂带磨削加工实例	277	10.4.4 超声波振动珩磨装置的设计 要点	322
9.3 超精密砂带磨削	280	10.5 超声波振动珩磨声学系统的局部共振设 计原理	329
9.3.1 砂带	280	10.5.1 超声波振动珩磨声学系统的局部共 振现象试验	329
9.3.2 超精密砂带磨削方式	280	10.5.2 油石座的长度参数变化对节点位置 的影响	331
9.3.3 超声波砂带磨削运动与机理	281	10.5.3 超声波振动珩磨系统的局部共振机 理	332
9.4 强力砂带磨削	282	10.5.4 超声波振动珩磨油石的等效硬度特 性	336
9.5 其他形状的涂附磨具与应用	283	第 11 章 游离磨粒加工技术	339
9.5.1 张页式涂附磨具	283		
9.5.2 卷状涂附磨具	283		
9.5.3 圆筒状卷绕砂布带	283		
9.5.4 砂盘	283		
9.5.5 方形砂片和十字形砂片	283		
9.5.6 砂布页轮	283		

11.1 概述	339	11.7.6 端面非接触镜面抛光	389
11.1.1 游离磨粒加工机理	339	11.7.7 “8”字流动抛光	389
11.1.2 超精密研磨及超精密抛光加工 环境	341	11.7.8 刷光表面光整加工	389
11.1.3 游离磨粒加工特点	342	11.8 复合抛光工艺	391
11.2 研磨	342	11.8.1 机械化学抛光 (Progressive Mechanical Aad Chemical Polishing; P-MAC)	391
11.2.1 研磨原理及过程	343	11.8.2 水合抛光 (Hydration Polishing)	392
11.2.2 研磨加工特点	344	11.8.3 胶质硅抛光	392
11.2.3 手工研磨与机械研磨	345	11.8.4 非接触化学抛光	392
11.2.4 研磨工具	345	11.9 硬脆材料的抛光	393
11.2.5 研磨剂	349	11.9.1 陶瓷的金刚石微粉抛光	393
11.2.6 研磨运动轨迹	352	11.9.2 硅片的机械化学复合抛光	395
11.2.7 研磨工艺参数	356	11.10 弹性发射 (EEM) 加工	396
11.2.8 研磨加工的应用	359	11.10.1 EEM 概念与加工原理	396
11.2.9 研磨机	364	11.10.2 EEM 加工装置及 NC 控制	396
11.3 研磨新工艺	366	11.10.3 EEM 加工结果	398
11.3.1 动压浮起平面研磨	366	第 12 章 硬脆材料与难加工材料磨 削	399
11.3.2 液中研抛	367	12.1 工程陶瓷磨削	399
11.3.3 液体结合剂砂轮研磨	367	12.1.1 工程陶瓷的种类及材料特性	399
11.3.4 磨粒胶片带研磨	368	12.1.2 工程陶瓷磨削机理	400
11.3.5 振动砂带研抛	369	12.1.3 工程陶瓷定压力磨削及定切深磨削 特性	406
11.4 超精研抛	369	12.1.4 加工条件对磨削特性的影响	407
11.4.1 超精研抛加工原理	369	12.1.5 工程陶瓷的镜面磨削	409
11.4.2 超精研抛特性及研抛加工特点	369	12.1.6 加工表面变质层的评价	411
11.4.3 超精研抛的四个阶段	370	12.1.7 工程陶瓷的复合加工	413
11.4.4 超精研抛轨迹方程	371	12.1.8 超声波振动磨削工程陶瓷	413
11.4.5 超精研抛区表与最佳研抛轨迹的 选择	373	12.2 玻璃的磨削	414
11.5 磁性研磨与电徒动研磨	374	12.2.1 熔融石英玻璃的磨削	414
11.5.1 磁性研磨	374	12.2.2 光学玻璃磨削	414
11.5.2 电场电徒动研磨 (Migration Polishing)	380	12.3 石材的磨削加工	414
11.6 磨粒喷射加工与磨料流动加工	380	12.3.1 大理石磨削表面形成机理	414
11.6.1 磨粒喷射加工	380	12.3.2 花岗石的磨削加工	417
11.6.2 磨料流动加工	382	12.3.3 蛇纹石的抛光	418
11.7 抛光 (Polishing)	384	12.4 钛合金磨削	418
11.7.1 抛光方式	385	12.4.1 钛合金性能及磨削特点	418
11.7.2 抛光机理	385	12.4.2 钛合金磨削特性	419
11.7.3 抛光剂	386		
11.7.4 浮动抛光 (Float Polishing)	387		
11.7.5 修饰加工	389		

12.4.3 磨削用量	421	范围	452
12.5 高温合金磨削	421	13.4.4 磨削加工准备工序系统框图	452
12.5.1 高温合金的种类及物理力学性能	421	第 14 章 数控磨床	453
12.5.2 高温合金磨削特点	422	14.1 数控磨床	453
12.5.3 砂轮选择	422	14.1.1 概述	453
12.5.4 磨削用量	422	14.1.2 MK1320 型数控外圆磨床	454
12.5.5 DZ4 高温合金磨削工艺优化	422	14.1.3 MK6030 型数控工具磨床	459
12.6 不锈钢磨削	425	14.1.4 数控坐标磨床	465
12.6.1 不锈钢的种类及物理力学特性	425	14.2 磨削加工中心 (GC) 简介	468
12.6.2 不锈钢磨削加工特点	426	14.2.1 磨削加工中心 (GC) 的定义及分类	468
12.6.3 砂轮选择	427	14.2.2 磨削加工中心的优点与特点	468
12.6.4 磨削用量	427	14.2.3 支撑 GC 高度化的技术	469
第 13 章 磨削工艺中的新技术	428	14.2.4 GC32 型磨削加工中心简介	469
13.1 数控磨削工艺	428	14.2.5 GC 在陶瓷加工中的应用	470
13.1.1 数控磨床及磨削加工中心磨削加工特点	428	14.2.6 车削—磨削 (L—G) 复合加工中心	472
13.1.2 数控加工工艺设计	430	14.3 典型数控系统	472
13.1.3 数控磨削用量	432	14.4 CNC 系统的软件	475
13.1.4 数控工艺创成过程	432	14.4.1 中断型结构型 CNC 软件总体结构	475
13.2 磨削数据库	433	14.4.2 输入数据的处理	476
13.2.1 磨削数据库的系统目标	433	14.4.3 进给速度的控制	478
13.2.2 磨削数据库的开发策略	433	14.5 数控磨床伺服系统	479
13.2.3 磨削数据库系统结构	434	14.5.1 直流主轴驱动系统	480
13.2.4 磨削工艺生成模块	435	14.5.2 交流主轴电动机伺服系统	480
13.2.5 设计文档	436	14.5.3 进给伺服系统	482
13.3 磨削加工的计算机仿真	438	14.6 数控磨床检测元件	485
13.3.1 系统仿真的概念	438	14.6.1 脉冲编码器	485
13.3.2 磨削加工仿真流程总图	438	14.6.2 光栅	485
13.3.3 磨削仿真数据输入流程图	439	14.6.3 磁栅 (R)	486
13.3.4 磨削模型	439	14.7 数控加工程序编制基础知识	487
13.3.5 输出流程图	443	14.7.1 程序编制的基本概念	487
13.3.6 细长轴 (筒) 磨削过程中受力变形计算机仿真	443	14.7.2 程序编制内容和方法	490
13.3.7 纳米磨削过程中分子动力学计算机仿真试验	446	14.7.3 程序编制方法	493
13.4 磨削加工的专家系统	450	14.7.4 自动程序编制	494
13.4.1 机械系统的特征	451	14.8 磨床夹具	495
13.4.2 专家型自律机械系统的基本概念	451	第 15 章 磨削中的精密测量技术	496
13.4.3 对象问题的设定和系统的适用		15.1 磨削中典型物理量的精密测量方法与仪器	496

15.1.1 常用硬度测量方法	496	15.2.5 气动量仪测量技术	525
15.1.2 磨削表面层显微硬度的测量方 法	499	15.3 纳米表面测量技术	529
15.1.3 磨削烧伤的判别与检测	500	15.3.1 纳米级测量方法简介	529
15.1.4 磨削残余应力的检测	507	15.3.2 Fabry-Perot 标准具的测量技术 ...	529
15.2 精密磨削表面的典型测量系统简介 ...	510	15.3.3 X 射线干涉测量技术	530
15.2.1 双频激光外差干涉仪及应用	510	15.3.4 扫描隧道显微测量技术	530
15.2.2 圆度仪及圆度测量	516	15.3.5 微观表面形貌的扫描探针测量和其 他扫描测量技术	535
15.2.3 三坐标测量机	517	参考文献	537
15.2.4 激光测量技术	522		

第 1 章 磨削加工技术概论

1.1 磨削加工技术发展概况

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,用磨料的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,更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,应用磨削技术逐渐形成。1901 年以后,相继发明人工熔炼的氧化铝(刚玉)、碳化硅磨料。20 世纪 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。

解放前,我国磨床工业及磨料工业几乎是一片空白。上海亚中机器厂(今上海第三机床厂)于 1944 年制造出我国第一台外圆磨床。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。20 世纪 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、机电一体化的磨床,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。

当今高速高效磨削、超高速磨削在欧洲、美国和日本等一些工业发达国家发展很快,如德国的 Aachen 大学、Bremm 大学、美国的 Connecticut 大学等,有的在实验室完成了 v_s 为 250m/s、350m/s、400m/s 的实验。据报道,德国 Aachen 大学正在进行目标为 500m/s 的磨削实验研究。在实用磨削方面,日本已有 $v_s = 200\text{m/s}$ 的磨床在工业中应用。

我国对高速磨削及磨具的研究已有多年的历史,在 70 年代末期便进行了 80m/s、120m/s 的磨削工艺实验;前几年,也计划开展 250m/s 的磨削研究(但至今尚未见到这方面的报道),所以说有些高速磨削技术还只是实验而已,尚未走出实验室,技术还远没有成熟,特别是超高速磨削的研究还开展得很少。在实际应用中,砂轮线速度 v_s 一般还是 45~60 m/s。

国内外都采用超精密磨削、精密修整、微细磨料磨具进行亚微米级以下切深磨削的研究,以获得亚微米级的尺寸精度。微细磨料磨削,用于超精密镜面磨削的树脂结合剂砂轮的

金刚石磨粒平均直径可小至 $4\mu\text{m}$ 。日本用激光在研磨过的人造单晶金刚石上切出大量等高性一致的微小切刃，对硬脆材料进行精密磨削加工，效果很好。超硬材料微粉砂轮超精密磨削主要用于磨削难加工材料，精度可达 $0.025\mu\text{m}$ 。日本开发了电解在线修整 (ELID) 超精密镜面磨削技术，使得用超细微 (或超微粉) 超硬磨料制造砂轮成为可能，可实现硬脆材料的高精度、高效率的超精密磨削。作平面研磨运动的双端面精密磨削技术，其加工精度、切除率都比研磨高得多，且可获得很高的平面度。电泳磨削技术也是一种新的超精密及纳米磨削技术。

随着磨削技术的发展，磨床在加工机床中也占有相当大的比例。据 1997 年欧洲机床展览会 (EMO) 的调查数据表明，25% 的企业认为磨削是他们应用的最主要的加工技术。磨床在企业中占机床的比例高达 42%，车床占 23%，铣床占 22%，钻床占 14%。我国 1949~1998 年，开发生产的通用磨床有 1800 多种，专用磨床有几百种，磨床的拥有量占金属切削机床总拥有量的 13% 左右。可见，磨削技术及磨床在机械制造业中占有极其重要的位置。

为什么磨削技术会不断地发展？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、工件硬度的变化不很敏感；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，一次磨削深度可达到 $0\sim 25\text{mm}$ ，如将砂轮修整成所需形状，一次便可磨出所需的工件形状。而当 v_s 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。

(5) 相关技术的发展 如砂轮制造技术、控制技术、运动部件的驱动技术、支撑技术等，促进了磨削技术及磨削装备的发展。

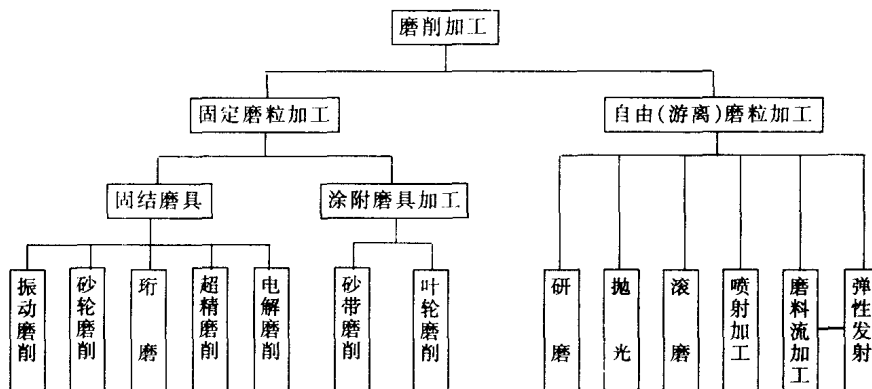
总之，磨削技术发展很快，在机械加工中起着非常重要的作用。目前，磨削技术的发展趋势是，发展超硬磨料磨具，研究精密及超精密磨削、高速高效磨削机理并开发其新的磨削工艺技术，研制高精度、高刚性的自动化磨床。

1.2 磨削加工方法与分类

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。

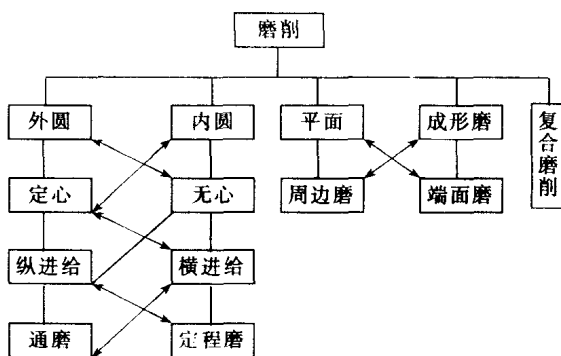
一般砂轮磨削方式根据加工对象、表面生成方法不同可分为外圆、内圆、平面及成形磨削方法。对旋转表面按工件夹紧和驱动方法，可分为定心磨削与无心磨削。按砂轮进给方法相对于加工表面的关系，可分为纵向进给与切入进给磨削。按磨削行程分为通磨与定程磨。按砂轮工作表面类型分为周边磨削、端面磨削及周边-端面磨削。数控磨床及磨削加工中心



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。

一般来讲，按砂轮线速度 v_s 的高低将磨削分为普通磨削 ($v_s < 45\text{m/s}$)、高速磨削 ($45 \leq v_s < 150\text{m/s}$)、超高速磨削 ($v_s \geq 150\text{m/s}$)。按磨削精度将磨削分为普通磨削、精密磨削 (加工精度 $1 \sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $R_a 0.2 \sim 0.1\mu\text{m}$)、超精密磨削 (加工精度 $< 0.1\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $R_a \leq 0.025\mu\text{m}$)。按磨削



效率将磨削分为普通磨削、高效磨削。高效磨削包括高速磨削、超高速磨削、缓进给磨削、高效深切磨削 (HEDG)、砂带磨削、快速短行程磨削和高速重负荷磨削。

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，即通过控制磨头重量、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。它是加工淬火钢、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。

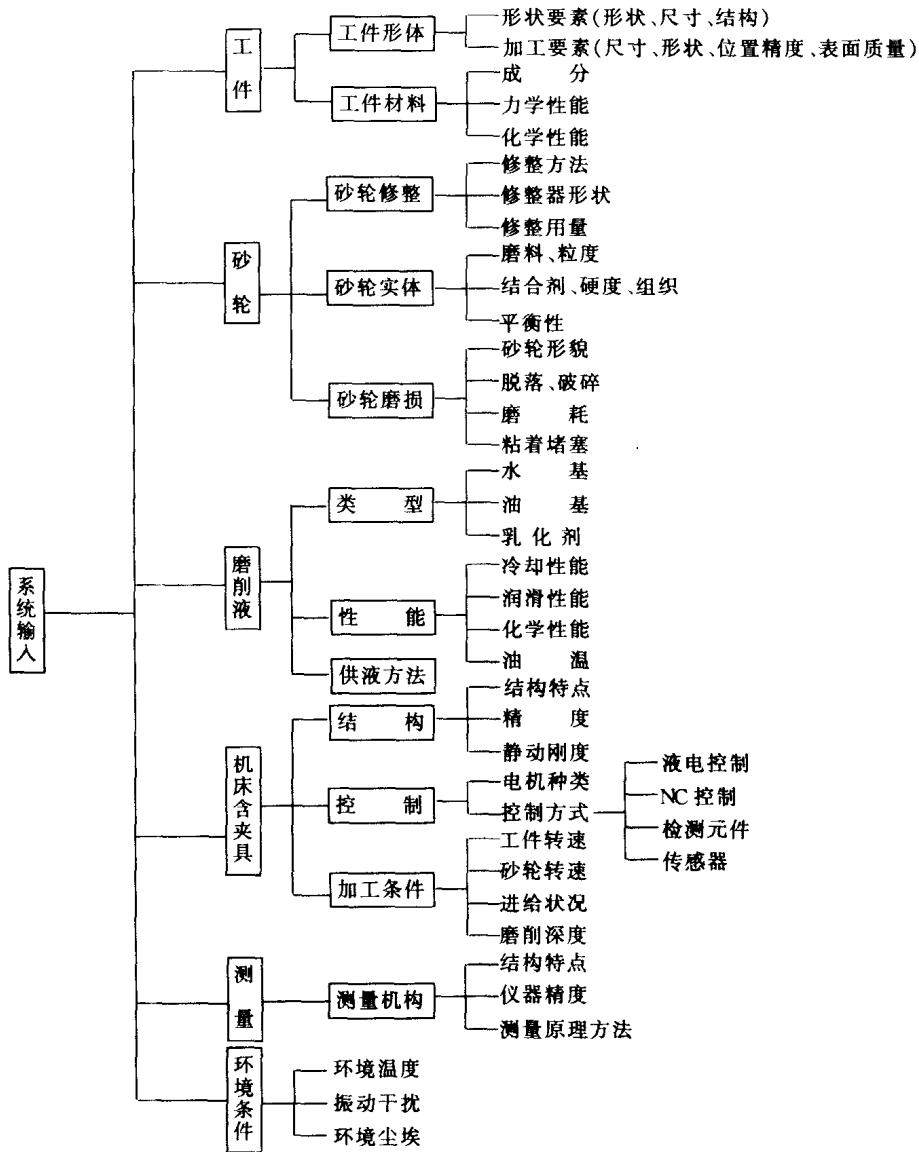


图 1-3 系统输入信息构成