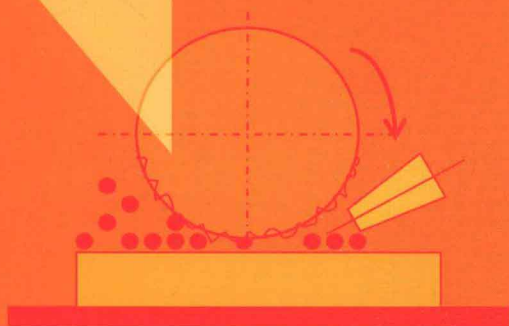


李长河 修世超 编著
卢秉恒 主审

磨粒、磨具 加工技术与应用

MOLI MOJU
JIAGONG JISHU YU YINGYONG

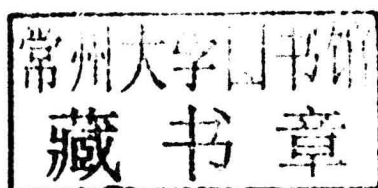


化学工业出版社

磨粒、磨具加工技术与应用

李长河 修世超 编著

卢秉恒 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以磨粒、磨具加工工艺为主线,汇集了编者多年来从事磨粒、磨具加工技术的最新成就和经验,结合国家的重大需求及国内外磨粒、磨具加工技术的最新发展趋势,在国家自然科学基金支持下开展的研究工作和参考国内外相关资料基础上编写而成。全书主要包括磨粒加工的历史及发展趋势、磨料与磨具、砂轮的整形与修锐、磨削液及供液方法、磨削加工表面质量、磨削加工精度、磨削加工过程的控制、常用磨削加工方法、高效率磨削、精密超精密磨粒加工、特种磨粒加工方法以及难加工材料的磨削加工等内容。

本书可作为广大机械加工、超硬材料加工企业及相关专业技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业教学参考用书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

磨粒、磨具加工技术与应用/李长河,修世超编著. —北京:化学工业出版社,2012.9

ISBN 978-7-122-15019-6

I. ①磨… II. ①李…②修… III. ①磨具-金属加工②磨粒-金属加工 IV. ①TG74②TG739

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第174647号

责任编辑:朱 彤

文字编辑:王 琪

责任校对:边 涛

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数545千字 2012年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

前言

磨粒加工是以硬质矿物质(磨料)颗粒作为切削工具进行材料去除的加工过程的统称。磨粒加工方法工艺适应性极强,工艺方法众多,如磨削、研磨、抛光、珩磨、超精加工、自由磨粒加工、复合磨粒加工等;应用范围广,可对金属、陶瓷、玻璃、石材、耐火材料、混凝土、骨骼、复合材料等各种材料进行加工,许多难加工材料目前只能用磨粒加工;可对平面、圆柱表面、球面、渐开线齿面、螺旋表面、自由曲面等各种表面实现荒、粗、精和超精加工等各种精度加工。磨粒加工机床是种类最多的机床,被广泛应用于机械制造、轻工、建筑、耐火材料等多种行业,目前已知的已超过3000种。磨粒加工是支撑国民经济各行业的重要加工方法。

由于磨粒和切屑尺寸细小,磨削力小,参加切削的磨粒众多,所以磨粒加工可以容易地获得高精度和低表面粗糙度表面,是精密加工的主要手段。特别是应用非常微细的磨粒,可以获得纳米级刀刃半径尺寸,从而可以实现极薄的微细切削和获得无缺陷表面,可以获得加工精度 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $R_a\ 0.008\sim 0.025\mu\text{m}$ 的加工表面,使之成为超精密加工的主要手段,在现代航空航天、精密机械和仪器、电子信息、尖端武器、小型和微型机械等高科技领域获得重要应用。

对一般材料而言,磨粒加工可能会遇到铣削、铰削、车削等方法强有力的竞争。但对诸如陶瓷、金属陶瓷复合材料、晶须加强材料以及高温超级合金之类的新一代材料而言,硬切削绝对不是磨粒加工的对手,而且必须用磨粒进行加工。例如,磨削是加工在喷气飞机发动机中使用的超级合金工件的唯一方法,也是加工半导体硅、陶瓷和玻璃制成的汽车和光学元件的唯一方法。

磨粒加工通常被习惯地认为仅是一种用于获得光洁零件表面和精确公差的精加工方法。确实,没有任何方法可以和磨粒加工在精密加工方面竞争,但磨粒加工并不局限于这一应用。实际上,许多磨料是消耗于重负荷磨削,它追求尽可能有效和迅速地去除材料,而不关心表面质量。磨削既能使用像纸一样只有 $20\mu\text{m}$ 厚的砂轮锯片精细地切割微电子电路硅片,也能在铸造工厂或钢厂在重负荷条件下以 220kW 的机器功率和 $1600\text{cm}^3/\text{min}$ 的去除率清理钢坯。

磨粒加工另一个有竞争力的实际应用领域是对特硬或脆的、其他方法不能有效加工的材料加工。在诸如切削刀具和轴承环等淬硬钢零件的生产中,磨粒加工可容易地完成退火钢或淬硬钢加工,而其他方法就受到限制。对陶瓷、硬质合金、玻璃等非金属脆性材料则唯一地依靠磨粒加工。

磨粒加工尽管在工业中很重要,但仍常得不到应有重视。用精磨去除同样体积的材料经常被认为比其他加工方法成本高,它的应用是不得已的。当然,随着近净形精密铸造和锻造技术使材料去除余量的不断减少,磨粒加工作为无须车削和铣削而一次直接成型的方法将更为经济。

本书由李长河、修世超编著,卢秉恒主审。本书第1、3、8、10、11、12章由李长河教授编写,第2、4、5、6、7、9章由修世超教授编写。全书由李长河教授统稿和定稿。另外,晁彩霞、韩振鲁、刘明贺、李晶尧参加了部分内容的编写工作。在编写过程中,还得到了编者所在院校和化学工业出版社的大力支持,在此表示诚挚感谢!

本书承蒙中国工程院院士、西安交通大学卢秉恒教授主审。卢院士提出许多宝贵建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平和时间有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者
2012年8月

目录

第1章 磨粒加工的历史及发展趋势	1
1.1 磨粒加工及其历史	1
1.1.1 磨粒加工的定义及在国民经济中的重要地位	1
1.1.2 磨粒加工的历史	2
1.2 磨削加工的特点和磨削过程	6
1.2.1 磨削加工的特点	6
1.2.2 磨削加工的分类	7
1.2.3 磨削加工的基本参数	8
1.2.4 磨削过程	9
1.3 磨削加工的力和热	10
1.3.1 磨削力	10
1.3.2 磨削热和磨削温度	11
1.4 磨削加工的发展趋势	12
1.4.1 磨削加工机理研究的发展趋势	12
1.4.2 磨削加工向数控化、自动化、智能化及虚拟化方向发展	13
1.4.3 磨削加工新工艺的发展	13
1.4.4 硬脆材料磨削技术的发展	15
1.4.5 磨料、磨具的研究和开发	16
1.5 磨削是否会被硬切削替代	17
1.5.1 硬切削工艺	17
1.5.2 硬切削会取代磨削加工吗	18
1.6 国家科技重大专项在磨削方面解决的重点问题和相关的研究进展	19
1.6.1 解决的重点问题	19
1.6.2 研究进展	20
第2章 磨料与磨具	21
2.1 普通磨料	21
2.1.1 普通磨料品种及代号	21
2.1.2 普通磨料粒度、粒度组成及标记	21
2.1.3 刚玉系磨料	26
2.1.4 陶瓷微晶刚玉磨料	27
2.1.5 碳化物系磨料	28
2.2 超硬磨料	28
2.2.1 超硬磨料品种及代号	28
2.2.2 超硬磨料的应用特点	30
2.3 固结磨具	31
2.3.1 普通磨料磨具	31
2.3.2 超硬磨料磨具	42
2.4 涂附磨具	58
2.5 磨具特性参数的选择	59
2.5.1 磨具的构成及特性	59
2.5.2 选择磨具特性参数的一般性原则	59
2.5.3 磨具特性参数选择方法的不足与发展趋势	61
第3章 砂轮的整形与修锐	63
3.1 砂轮磨损的形式及原因	63
3.1.1 砂轮磨损形式	63
3.1.2 砂轮磨损原因	64
3.1.3 砂轮磨损的表征	66
3.2 砂轮磨损的测量方法	66
3.2.1 用台阶法测量砂轮磨损量	67
3.2.2 用仿形法测量砂轮磨损量	67
3.2.3 用空气量规传感器测量砂轮磨损量	67
3.2.4 用砂轮周围空气流特征测量砂轮磨损量	68
3.2.5 用随机过程分析法测量砂轮磨损量	68
3.3 砂轮地貌的测量方法	68
3.3.1 轮廓测量仪法	68
3.3.2 复印法	69

3.3.3	光截法	70	3.5.1	电解在线修锐法	76
3.3.4	激光功率谱法	71	3.5.2	电火花放电修锐法	78
3.3.5	电镜观察法	71	3.5.3	激光修锐法	78
3.3.6	测力计法和热电偶法	72	3.5.4	软弹性修锐法	79
3.3.7	光反射法	72	3.5.5	超声波振动修锐法	79
3.4	普通磨料砂轮的修整	73	3.5.6	研磨修锐法	80
3.4.1	砂轮修整的作用	73	3.5.7	游离磨粒修锐法	80
3.4.2	车削修整法	73	3.6	砂轮的平衡	81
3.4.3	滚压修整法	74	3.6.1	砂轮的静态平衡	81
3.4.4	磨削修整法	74	3.6.2	砂轮的动态平衡	83
3.5	超硬磨料砂轮的修整	76	3.6.3	砂轮的动平衡	85

第4章 磨削液及供液方法 86

4.1	磨削液的作用、要求和种类	86	4.3.1	磨削砂轮气流场的产生	92
4.1.1	磨削液的作用	86	4.3.2	磨削砂轮气流场的影响	93
4.1.2	磨削液的种类及性能	87	4.4	磨削液的供液方法	93
4.1.3	磨削液添加剂的种类及作用	90	4.5	磨削液射流特性及有效注入技术	96
4.1.4	磨削液的要求	91	4.5.1	磨削液射流速度分布场研究	97
4.2	磨削液的动压作用与影响	92	4.5.2	磨削区气流场对有效磨削液的影响	98
4.2.1	流体动压润滑的基本理论	92	4.5.3	有效磨削液的计算与分析	98
4.2.2	磨削液的动压作用与影响	92	4.5.4	提高有效磨削液比例的途径	99
4.3	磨削砂轮气流场及对磨削液的影响	92	4.6	磨削液的过滤	102

第5章 磨削加工表面质量 104

5.1	表面质量概念	104	5.4.4	避免烧伤的措施	114
5.2	磨削表面质量对零件使用性能的影响	104	5.4.5	磨削表层烧伤的测量方法	115
5.3	磨削表面粗糙度与波纹度	105	5.5	表面加工硬化和表面残余应力	115
5.3.1	表面粗糙度	105	5.5.1	表面加工硬化	115
5.3.2	波纹度	111	5.5.2	表面残余应力	116
5.4	磨削表面和次表面的金相组织变化	112	5.6	磨削表面裂纹和预应力磨削	120
5.4.1	磨削表面金相组织特点	112	5.6.1	磨削表面裂纹	120
5.4.2	磨削烧伤的概念及分类	113	5.6.2	预应力磨削	121
5.4.3	磨削烧伤对零件工作性能的影响	114	5.7	残余应力与裂纹的测量	122
			5.8	其他磨削表面缺陷	122
			5.9	磨削表面完整性指标综合作用及评价	122

第6章 磨削加工精度 124

6.1	磨削误差的来源	124		影响机理	125
6.2	工艺系统受力变形对加工精度的影响	125	6.2.2	减少工艺系统受力变形的措施	125
6.2.1	工艺系统受力变形对加工精度的影响				

6.3 磨削温度及工艺系统受热变形对加工精度的影响	126	6.4 工件和砂轮工作状态对加工精度的影响	127
6.3.1 磨削温度及工艺系统受热变形对加工精度的影响机理	126	6.5 工艺系统几何精度对加工精度的影响	127
6.3.2 控制磨削温度和工艺系统受热变形的措施	126	6.5.1 机床成形运动误差的影响	127
		6.5.2 机床传动链误差的影响	128

第7章 磨削加工过程的控制 129

7.1 磨削加工循环及其控制	129	7.3.4 磨削模型	133
7.1.1 磨削加工的自动化特点	129	7.3.5 磨削加工的虚拟与仿真	135
7.1.2 磨削加工自动循环过程	129	7.4 磨削过程智能控制	136
7.1.3 自动切入过程的控制	130	7.5 磨削过程监测与控制	136
7.2 磨削过程参数优化	130	7.5.1 磨削过程信息监测	137
7.2.1 磨削过程优化的概念	130	7.5.2 磨削过程信息智能监控技术	138
7.2.2 磨削过程特点与目标函数的设置	131	7.6 磨削尺寸自动测量	138
7.3 磨削过程虚拟与仿真	132	7.7 数控磨削	139
7.3.1 系统仿真的概念	132	7.7.1 数控磨床概述	139
7.3.2 磨削加工仿真流程	133	7.7.2 数控磨削加工工艺	140
7.3.3 磨削仿真数据输入流程	133	7.8 机器人磨削	141

第8章 常用磨削加工方法 142

8.1 平面磨削	142	8.3.5 内圆磨削的方法	161
8.1.1 平面磨床的类型	142	8.3.6 内圆磨削常见的缺陷与消除措施	162
8.1.2 平面磨削形式及特点	143	8.3.7 磨削加工实例	163
8.1.3 平面磨削常用方法	144	8.4 无心磨削	165
8.1.4 平面磨削常见的缺陷与消除措施	145	8.4.1 无心磨削的特点	165
8.1.5 平面磨削加工实例	146	8.4.2 导轮倾角、转速与工件转速的关系	165
8.2 外圆磨削	147	8.4.3 无心外圆磨削的成圆分析	166
8.2.1 外圆磨削的形式	148	8.4.4 无心磨削的方法	167
8.2.2 外圆磨削砂轮的选择	148	8.4.5 无心磨削的用量	171
8.2.3 工件的装夹	149	8.4.6 无心外圆磨床的调整	171
8.2.4 外圆磨削的方法	151	8.4.7 无心磨削常见的缺陷及消除措施	173
8.2.5 外圆磨削常见的缺陷与消除措施	153	8.4.8 无心外圆磨削加工实例	175
8.2.6 轴类零件磨削加工实例	155	8.5 齿轮磨削	175
8.3 内圆磨削	157	8.5.1 齿轮磨削方法和特点	175
8.3.1 内圆磨削的特点	157	8.5.2 砂轮的选择和平衡	176
8.3.2 内圆磨削的形式	158	8.5.3 磨削余量的确定	177
8.3.3 砂轮的选择	158	8.5.4 磨齿误差产生原因与消除	
8.3.4 工件的装夹	159		

方法	177	8.7.5 加工实例	185
8.5.5 加工实例	178	8.8 花键轴磨削	188
8.6 成形磨削	180	8.8.1 磨削矩形花键的方法	188
8.6.1 成形砂轮磨削法	180	8.8.2 花键轴磨削时砂轮的选择	188
8.6.2 仿形磨削法(靠模法)	180	8.8.3 花键轴磨削时的注意事项	189
8.6.3 成形夹具磨削法	180	8.8.4 花键轴磨削常见的质量问题及防止措施	189
8.6.4 成形展成磨削法	181	8.8.5 花键轴磨削加工实例	190
8.6.5 数控加工方法	181	8.9 螺纹磨削	191
8.6.6 成形砂轮的修整	181	8.9.1 螺纹磨削方法	191
8.6.7 磨削加工实例	182	8.9.2 砂轮的选择与修整	192
8.7 刀具磨削	183	8.9.3 螺纹磨削产生的误差及消除方法	194
8.7.1 刃磨刀具的基本原则	183	8.9.4 加工实例	195
8.7.2 刃磨刀具常用机床附件	183		
8.7.3 刃磨刀具砂轮的选择	184		
8.7.4 刃磨刀具的缺陷及消除措施	185		

第9章 高效率磨削 198

9.1 高效率磨削基本原理	198	应用	207
9.2 重负荷磨削	198	9.6.4 超高速磨削在难加工材料磨削加工中的应用	207
9.3 高速强力外圆磨削	199	9.7 快速点磨削	209
9.3.1 高速强力外圆磨削的原理及特点	199	9.7.1 快速点磨削相关技术与机床特点	209
9.3.2 高速强力外圆磨削设备及关键技术	199	9.7.2 快速点磨削的材料去除机理	212
9.4 缓进给磨削	199	9.7.3 快速点磨削的应用特点	212
9.4.1 缓进给磨削原理	199	9.8 砂带磨削	213
9.4.2 缓进给磨削的技术特点	200	9.8.1 砂带磨削的特点	214
9.4.3 缓进给磨削设备及关键技术	200	9.8.2 砂带磨削的应用	214
9.5 高效深切磨削	201	9.8.3 砂带磨削方式	215
9.5.1 高效深切磨削的原理及应用特点	201	9.8.4 砂带磨削的关键技术及参数选择	216
9.5.2 高效深切磨削对机床的技术要求	202	9.8.5 强力砂带磨削	220
9.6 高速与超高速磨削	202	9.9 超硬磨料砂带磨削	222
9.6.1 高速与超高速磨削的原理及特点	202	9.9.1 超硬磨料砂带结构与特性	222
9.6.2 高速和超高速磨削的关键技术	203	9.9.2 超硬磨料砂带的分类	223
9.6.3 超高速磨削在高效率磨削中的		9.9.3 金刚石砂带磨削的应用	223
		9.9.4 CBN 砂带磨削的应用	223
		9.9.5 超硬磨料砂带的发展趋势	223

第10章 精密超精密磨粒加工 224

10.1 精密超精密磨粒加工技术的内涵	224	10.1.1 精密超精密磨粒加工技术的	
----------------------------------	-----	---------------------	--

界定	224	10.5.2 在线电解修锐镜面磨削实现 条件	231
10.1.2 几个重要概念	224	10.5.3 在线电解修锐镜面磨削效果 ...	232
10.1.3 精密超精密磨粒加工特点	225	10.6 双端面精密磨削技术	232
10.1.4 精密超精密磨粒加工方法及其 分类	225	10.6.1 双端面精密磨削加工机理	232
10.2 精密磨削加工	225	10.6.2 双端面精密磨削加工装置	232
10.2.1 精密磨削加工机理	225	10.7 珩磨	233
10.2.2 精密磨削加工影响因素	225	10.7.1 珩磨的工作原理	233
10.2.3 精密磨削的工艺参数	226	10.7.2 珩磨头	233
10.3 超精密磨削加工	227	10.7.3 珩磨油石的选择	234
10.3.1 超精密磨削加工机理	227	10.7.4 珩磨工艺参数的选择	235
10.3.2 超精密磨削加工影响因素	227	10.7.5 珩磨常见的工件缺陷、产生原因 及解决方法	237
10.3.3 超精密磨削的工艺参数	228	10.8 研磨	239
10.4 镜面磨削	228	10.8.1 研磨的加工机理	239
10.4.1 镜面磨削的定义	228	10.8.2 研磨加工的特点	240
10.4.2 镜面磨削表面的形成机理	228	10.8.3 研磨加工的分类	240
10.4.3 实现镜面磨削的工艺方法	229	10.8.4 研磨加工的实现条件	240
10.4.4 实现镜面磨削磨床应具备的 条件	229	10.8.5 研磨工艺参数	242
10.4.5 镜面磨削的工艺参数	229	10.8.6 研磨时常见的缺陷及产生 原因	242
10.5 在线电解修锐超精密镜面磨削 技术	230	10.9 抛光	242
10.5.1 在线电解修锐镜面磨削的 特点	230	10.9.1 抛光的加工原理	243
		10.9.2 抛光加工实现的条件	243

第11章 特种磨粒加工方法 245

11.1 特种磨粒加工技术概述	245	11.4.1 磁性流体研磨的工作原理	253
11.1.1 特种磨粒加工的定义	245	11.4.2 磁性流体研磨的特点	253
11.1.2 特种磨粒加工的特点	245	11.4.3 磁性流体研磨的应用	253
11.2 磁力研磨	245	11.5 磁流变抛光	253
11.2.1 磁力研磨的工作原理	245	11.5.1 磁流变抛光的原理	253
11.2.2 磁力研磨加工的特点	247	11.5.2 磁流变抛光的特点	254
11.2.3 磁力研磨加工的应用	247	11.5.3 磁流变抛光的应用	254
11.2.4 五自由度并联机器人磁力研磨 加工实例	247	11.5.4 磁流液的组成成分	254
11.2.5 磁力研磨加工关键技术	250	11.5.5 磁流变抛光关键技术	255
11.3 磁力悬浮研磨	251	11.6 磨料流加工	255
11.3.1 磁力悬浮研磨的原理	251	11.6.1 磨料流加工的原理	255
11.3.2 磁力悬浮研磨的特点	252	11.6.2 磨料流加工的特点	255
11.3.3 加工实例——磁力悬浮研磨加工 陶瓷球	252	11.6.3 磨料流加工的应用	255
11.3.4 磁力悬浮研磨关键技术	253	11.6.4 磨料流加工去除速度和精度 ...	256
11.4 磁性流体研磨	253	11.6.5 磨料流加工关键技术	256
		11.7 弹性发射加工	256
		11.7.1 弹性发射加工的原理	256

11.7.2 弹性发射加工的特点	257	特点	263
11.7.3 弹性发射加工的效果	257	11.12.3 砂轮约束磨粒喷射加工的	
11.8 浮动抛光	257	应用	263
11.8.1 浮动抛光的工作原理	257	11.12.4 砂轮约束磨粒喷射加工关键	
11.8.2 浮动抛光材料去除机理	258	技术	263
11.8.3 浮动抛光速度	258	11.12.5 砂轮约束磨粒喷射加工	
11.8.4 浮动抛光的应用	258	实例	263
11.9 动压浮起平面研磨	259	11.13 磨粒喷射加工	265
11.9.1 动压浮起平面研磨的原理	259	11.13.1 工作原理	265
11.9.2 动压浮起平面研磨的特点	259	11.13.2 加工装置	265
11.9.3 动压浮起平面研磨的应用	259	11.13.3 磨粒喷射加工的分类	265
11.10 水合抛光	259	11.13.4 磨粒喷射加工的特点	266
11.10.1 水合抛光的工作原理	259	11.13.5 磨粒喷射加工的应用	266
11.10.2 水合抛光的特点	260	11.13.6 主要工艺参数	267
11.10.3 水合抛光的应用	260	11.13.7 磨粒喷射加工关键技术及发展	
11.11 化学机械抛光	260	方向	267
11.11.1 化学机械抛光材料去除		11.14 电解磨削	267
机理	260	11.14.1 电解磨削的工作原理	267
11.11.2 化学机械抛光的特点	261	11.14.2 电解磨削加工的特点	268
11.11.3 化学机械抛光的应用	261	11.14.3 电解磨削的应用	268
11.11.4 化学机械抛光关键技术	261	11.15 超声波加工	268
11.11.5 化学机械抛光加工装置	261	11.15.1 工作原理	268
11.12 砂轮约束磨粒喷射加工	262	11.15.2 超声波加工的特点及应用	268
11.12.1 砂轮约束磨粒喷射加工的		11.16 电泳磨削技术	269
原理	262	11.17 精密超精密特种磨粒加工技术研究	
11.12.2 砂轮约束磨粒喷射加工的		热点	270

第12章 难磨削加工材料的磨削加工..... 271

12.1 难磨削加工材料的类型及磨削加工特点	271	12.3.3 钛合金磨削的参数选择	280
12.1.1 难磨削加工材料的类型	271	12.3.4 钛合金磨削加工实例	283
12.1.2 难磨削加工材料磨削加工的特点	272	12.4 高温合金的磨削加工	284
12.1.3 改善难磨削加工材料磨削性能的措施	272	12.4.1 高温合金的种类	284
12.2 不锈钢的磨削加工	272	12.4.2 高温合金磨削的特点	285
12.2.1 不锈钢的种类	272	12.4.3 高温合金磨削的参数选择	286
12.2.2 不锈钢磨削的特点	273	12.4.4 高温合金磨削加工实例	288
12.2.3 不锈钢磨削的参数选择	273	12.5 工程陶瓷的磨削加工	291
12.2.4 不锈钢磨削加工实例	278	12.5.1 工程陶瓷的性能和特点	291
12.3 钛合金的磨削加工	279	12.5.2 陶瓷磨削的参数选择	293
12.3.1 钛合金的种类	279	12.5.3 陶瓷磨削加工实例	295
12.3.2 钛合金磨削的特点	280	12.6 玻璃的磨削加工	300
		12.6.1 熔融石英玻璃的磨削	300
		12.6.2 光学玻璃的磨削	301
		12.7 玛瑙的磨削	301

12.8 新高速钢的磨削加工	301	12.10 球墨铸铁的磨削加工	305
12.8.1 新高速钢磨削加工的特点	302	12.10.1 球墨铸铁材料及其磨削加工的特点	305
12.8.2 新高速钢磨削加工时砂轮的选择	303	12.10.2 球墨铸铁磨削加工时砂轮的选择	305
12.8.3 新高速钢磨削加工时磨削用量和磨削液的选择	304	12.10.3 球墨铸铁磨削加工的工艺条件	306
12.9 钢结硬质合金的磨削加工	304	12.11 铜、铝合金的磨削加工	306
12.9.1 钢结硬质合金的性能及其磨削加工的特点	304	12.11.1 铜、铝合金磨削的特点	306
12.9.2 钢结硬质合金磨削加工时砂轮的选择	305	12.11.2 铜、铝合金磨削时砂轮的选择	307
12.9.3 钢结硬质合金磨削加工时的磨削用量和磨削液	305	12.11.3 铜、铝合金磨削加工的工艺条件	307

第1章

磨粒加工的历史及发展趋势

1.1 磨粒加工及其历史

1.1.1 磨粒加工的定义及在国民经济中的重要地位

1.1.1.1 磨粒加工的定义

磨粒加工 (abrasive process) 是以硬质矿物质 (磨料) 颗粒作为切削工具进行材料去除的加工过程的统称。其中, 应用最广泛的是以砂轮或砂带为工具进行材料去除的固定磨粒加工工艺方法, 其中砂轮磨削 (grinding)、珩磨 (honing) 属于固结磨具加工, 砂带磨削 (belt grinding) 属于涂附磨具加工。另外, 磨粒加工还包括研磨 (lapping)、抛光 (polishing)、磨粒喷射加工 (abrasive jet machining)、磨料流加工 (abrasive flow machining) 等多种游离磨粒加工工艺方法。磨粒加工的分类如图 1-1 所示。

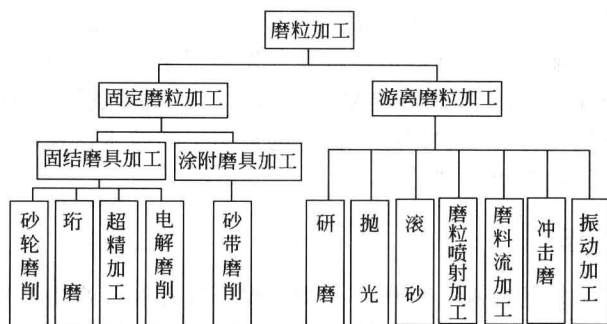


图 1-1 磨粒加工分类

1.1.1.2 磨粒加工在国民经济中的重要地位

磨粒加工与其他加工方法相比具有不可比拟的优越性, 因而在国民经济和现代高科技产业中具有极其重要的地位。

(1) 磨料尤其是金刚石和立方氮化硼 (CBN) 磨料具有非常高的硬度, 因此, 可以加工各种高硬度材料, 尤其是光学玻璃、工程陶瓷和功能陶瓷、半导体材料等硬脆材料。在高科技产业广泛应用的今天, 磨粒加工成为非常重要的加工手段。

(2) 由于磨粒和切屑尺寸细小, 磨削力小, 参加切削的磨粒众多, 所以磨粒加工可以容易地获得高精度和低表面粗糙度表面, 是精密加工的主要手段。特别是应用非常微细的磨粒, 可以获得纳米级刀刃半径尺寸, 从而可以实现极薄的微细切削和获得无缺陷表面, 可以获得加工精度 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $R_a\ 0.008\sim 0.025\mu\text{m}$ 的加工表面, 使它又是超精密加工的主要手段,

在现代航空航天、精密机械和仪器、电子信息、尖端武器、小型和微型机械等高科技领域获得重要应用。

(3) 近年来,随着超硬磨料磨具、数控磨削、新型磨削液和砂轮修整技术、磨削过程多传感器智能控制、高速/超高速磨削、高效率磨削等先进技术的广泛应用,磨粒加工日益成为一种集高加工精度和高效率于一体的、工具具有半永久性的、过程稳定的、粗一半精—精加工集成的短工艺流程的加工方法。它在质量稳定性要求很高的大批量生产,如汽车、工具、机床等工业行业中获得越来越广泛的应用,并且因其实现的短工艺流程也推动了机械加工工艺的变革,使其在机械制造领域具有更加重要的地位。

(4) 磨粒加工方法工艺适应性极强。它方法众多,如磨削、研磨、抛光、珩磨、超精加工、自由磨粒加工、复合磨粒加工等;应用范围广,可对金属、陶瓷、玻璃、石材、耐火材料、混凝土、骨骼、复合材料等各种材料进行加工,许多难加工材料目前只能用磨削加工;可对平面、圆柱表面、球面、渐开线齿面、螺旋表面、自由曲面等各种表面实现荒、粗、精和超精加工等各种精度加工。所以,磨粒加工机床是种类最多的机床,被广泛应用于机械制造、轻工、建筑、耐火材料等多种行业,目前已知的已超过 3000 种。所以,磨粒加工也是支撑国民经济各行业的重要加工方法。

目前,工业发达国家的磨床在金属切削机床总数中已占 25% 以上。1998 年,我国磨床拥有量也占到机床总拥有量的 13% 左右。1997 年,欧洲机床展览会期间的调查表明,25% 的被调查企业认为磨削是他们应用的最主要加工技术,磨床的占有比例高达 42%。近年,由于超硬磨料磨具的应用,高速、大功率、精密机床及数控技术发展,新型磨削液和砂轮修整等相关技术的发展,高速/超高速磨削和高效率磨削技术应用,磨削自动化和智能化等技术的发展,使磨粒加工在机械制造领域具有更加重要的地位。

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,先进陶瓷、单晶硅、人工晶体等硬脆材料的机械加工成本占制品总成本的 30%~75%,有些甚至达到 90%,是影响其推广应用的关键因素。如何高质量、高效率磨削加工硬脆材料也是世界各发达国家高度重视的问题。在这一需求推动下,在世界范围内更加强了磨削理论基础和应用研究,新的磨粒加工方法和先进磨粒加工技术、工具与装备不断涌现,将磨粒加工这一古老的加工工艺技术迅速推向新高度,并且成为先进加工制造工艺与装备的重要组成部分。

1.1.2 磨粒加工的历史

磨粒加工始于磨料矿物的发现,发展于人类为保证生存和提高生活质量而制造的磨具和机床的发展。从原始人类发现在砂岩上可以磨砺燧石工具开始,然后用磨料将石头磨成饮食工具。用于建造埃及金字塔的巨大石块也是用原始磨料工具锯切成一定尺寸,并且用砂岩磨光它们的表面,这是磨粒加工最早始于石器时代的应用。

金属的磨粒加工始于公元前 2000 年的古埃及,后来中东地区开始用磨粒锋锐工具和光整饰品。

人类从最早认识石英砂粒、燧石和砂岩这些磨料开始,后来逐渐发现金刚砂、石榴石和金刚石等天然磨料。金刚砂是含有氧化铝和氧化铁的不纯刚玉。在古希腊和古罗马也用金刚砂作为磨料,包含氧化铝和硅酸盐矿物的燧石磨料在古代也被使用。金刚石开采始于公元前 800~公元前 600 年的印度,直到 19 世纪仍是金刚石的主要产地。用金刚石粉末作为磨料的最早报告来自 17 世纪的比利时,用它来切割金刚石和用于钟表制造中的精细抛光。到了 19 世纪初,含有大量氧化铝晶体的天然刚玉才被使用。刚玉是硬度仅次于金刚石的天然材料,特别适合作为磨料。刚玉这一名称最先用于印度的红宝石和蓝宝石,只是那些透明度差或有缺陷的天然金

刚石和刚玉才用来作为磨料。

砂轮最先随着金属时代的出现始于古埃及。第一块砂轮由砂岩削成一定形状，在原始磨坊上转动以磨碎谷粒。早期砂轮由人力驱动旋转并主要用于工具的刃磨。尽管早在公元前1世纪罗马人就使用水轮为动力，但直到中世纪末期才使用水力驱动砂轮。

中世纪至工业革命时期，磨料被用来磨砺和抛光工具、武器和铠甲。早期磨床的概念出现在达·芬奇的绘画之中，是用固体黏结磨料而制成的砂轮，它使用的磨料主要是金刚砂和天然刚玉，也可能用过金刚石，使用的结合剂是树脂胶。至1880年，树脂胶结合剂砂轮才传入西方。19世纪中叶，在英格兰发明了氯化物结合剂砂轮，在美国和法国出现了橡胶结合剂砂轮。19世纪下半叶出现了和天然结合剂性质一样的硅酸盐结合剂。在这一时期的重要发展是，自19世纪20年代诺顿公司大量生产了陶瓷结合剂砂轮。而树脂结合剂砂轮则是继酚甲醛树脂发明之后至1923年才出现。用于金刚石砂轮的金属结合剂出现于19世纪40年代初，而金属砂轮的思想则可追溯到17世纪末用带金刚石粉末的铸铁盘来抛光宝石的比利时。

19世纪下半叶是工业化制造陶瓷、橡胶和树脂结合剂砂轮的开始。这一时期砂轮技术的发展成为推动磨床发展的动力。随着工业化进程的加快，对磨床和砂轮的需求增加。在19世纪60年代，为制造锯机零件Brown & Sharpe公司制造出了第一台现代磨床。19世纪90年代自行车的普及又使磨削能加工淬硬的精密轴承和齿轮。19世纪末期开始出现碳化硅和氧化铝人造磨料，生产碳化硅和氧化铝的工厂都位于尼亚加拉瀑布附近，以得到充足的电力供应，至今这一地区仍是北美磨料工业的中心。

至20世纪初，已开始用人造氧化铝和碳化硅磨料及陶瓷、橡胶、树脂胶及氯化物结合剂制作砂轮。加上1923年出现的树脂结合剂砂轮，形成了至今仍在使用的丰富的磨具系列。这一发展也正是磨床的进步和磨削加工更广泛使用的体现。具有互换性的汽车零件和其他设备的大批量生产也是依赖磨粒加工。砂轮技术的更新发展则是依赖改善磨料组织和处理、生产更好和更均匀的结合剂，以及开发新型氧化铝磨料。

20世纪，金刚石和立方氮化硼（CBN）超硬磨料的发现值得给予特殊的注意。1930年，首次生产出含天然金刚石磨料的树脂结合剂砂轮，在10年后，又出现了陶瓷和金属结合剂的金刚石砂轮。金刚石磨具消费的迅速增长，主要是因为磨削碳化钨切削刀具的需要。直至20世纪40年代初，磨削碳化物还是金刚石磨具消费的唯一重要因素，现在基本还是这样。1955年，通用电气（General Electric）公司宣布在高压下成功地制造出了人造金刚石。但在两年前瑞典就已经制造出了人造金刚石。20世纪50年代后期，即开始了人造金刚石磨料的商业生产。金刚石磨料，不管是天然的还是人造的，都被广泛地应用于包括硬质合金、陶瓷、金属、玻璃、纤维增强复合材料等各种材料的磨削。但由于可以引起过快磨损的石墨化倾向，它不适于磨削铁族金属。为了寻找金刚石的替代物，1957年，通用电气公司使用与制造人造金刚石相似的高压过程首次成功地制造出了立方氮化硼（CBN）。但直至1969年才主要为了铁族类金属的加工而开始商业生产。CBN是已知硬度仅次于金刚石的超硬材料。目前，磨削技术正朝着更有效地应用超硬磨料的方向发展。

磨粒加工的发展阶段有以下四个。

(1) 磨粒加工发展的第一阶段 我国是采用磨粒加工方法最早的国家之一，如在古代科学巨著《天工开物》中就有“切、磋、琢、磨”的成语，而其中“磨”就是指的磨粒加工。其实人类最早使用磨削要追溯到原始社会，在母系社会，人们就已经开始使用最简单的石器，而这些最简单的石器是用简单的石头之间互相摩擦得来的。人们用这些最简单的工具捕猎、耕种。那时人们的衣着虽然简单，但仍然要有刃器的辅助，这也离不开磨削。北魏时一个叫崔亮的人创造了水磨，用来加工粮食；晋代时刘景宣创造了可同时运行八盘天然岩石磨盘的石磨；唐朝时又出现了陶磨及磨碾，这些磨具均在山西长治县“王琛”墓中出土。经过专家考察在宋朝也

早存在九转速的磨碾；13世纪时，即在元朝时，中国人已开始用天然树胶将贝壳粉粘在羊皮纸上制成摩擦工具，这是世界上已知的最早的涂附磨具。几乎与此同时，在地中海沿岸的意大利人也开始使用简单的涂附磨具。说起指南针，谁都知道，可谁又能想到，那也是磨削得来的制品呢！以上所述不仅说明了我国是最早制造陶瓷材料、机械传动的国家，而且也是最早采用对金属及非金属材料进行磨削加工的国家之一，从最原始一直持续到19世纪的初期，可视为磨削加工历史发展的第一阶段。这一阶段的特点是利用的磨料磨具及机械都较简单。

(2) 磨粒加工发展的第二阶段（1840年至1900年前后）这一阶段出现了新的特点，即随着工业的发展，被加工材料的硬度越来越高，原来简单的磨料磨具满足不了新的发展需要，于是人们就开始寻求硬度更高的物质来做磨料，先后找到了天然刚玉、黄宝石、天然金刚石等材料，人们把这些天然材料破碎后和陶土混合，烧成具有一定形状的磨具，以此来磨削加工。可以说，开始使用硬度较高的天然磨料是这一时期的普遍特点。但是所有天然磨料的产量都不集中，数量有限，质量不统一，和飞速猛进的工业越来越不适应。

(3) 磨粒加工发展的第三阶段（19世纪的后期到20世纪初）这一时期的主要特点是出现并使用人造磨料。1893年美国卡不伦登公司的E. G. 艾奇逊利用电阻炉发明了SiC人造磨料，这是人类历史上最早出现的人造磨料，以后又有人用电弧炉发明了人造刚玉磨料。这些人工合成磨料的出现意义是重大的，结束了人类只能利用天然磨料而不能利用人造磨料的历史。从此，工业方面开始得到了大批价格比较低廉而质量比较稳定、产量又稳步增加的人造磨料的磨削工具，从而推动了被磨材料加工迅速增长。当然，另一方面，磨削加工的发展也促进了磨料磨具的迅速发展。该阶段又可分为以下几个时期。

① 1900年至1920年左右 这一时期，出现了除无心磨床以外的所有磨床，这促使汽车、军工、电机工业有了很大发展。

② 1920年至1949年前后 在20世纪20年代以后，磨床机械开始由机械传动发展到液压传动，还在磨削过程中实现了部分自动化，在这一时期，无心磨床设计成功，开始投入使用，这一时期一个非常重要的现象就是对于磨削过程的研究，由开始的经验方法转入理论分析，即开始了对磨削理论的研究。

③ 1950年至1980年前后 在国际上，英国、法国、美国、德国、意大利以及前苏联对人造磨料进行普遍研究，并且进行了工业化生产，因而磨料及磨具较前一时期有了很大提高，工业发达国家磨床所占的比重已达机床总量的10%，而且还在不断上升。在国内，一批具有影响力的重要项目的建成投产，如第二砂轮厂、第三砂轮厂、第四砂轮厂、第五砂轮厂、第六砂轮厂、第七砂轮厂的建成投产，说明了我国的磨料磨具行业也在不断发展壮大。

④ 改革开放前后（1978年前后至1990年前后）我国的磨料磨具为了和世界同步，在以下几个方面进行了研究或改进：a. 提高磨床的精度；b. 提高磨削的自动化程度；c. 高速研磨；d. 高精度和高光洁度；e. 强力磨削；f. 宽砂轮和多砂轮的磨削；g. 提高磨床的加工生产率；h. 试制发展了特殊磨削或成形磨削；i. 超硬磨料磨具。超硬材料如人造金刚石和立方氮化硼目前被称为世界上最硬的物质。金刚石的用量，以每加工百万吨钢铁所用的金刚石的量来表示这个国家的工业发展水平，美国和日本及主要西方国家的用量均超过了18万~20万克拉/100万吨钢，美国是世界上金刚石用量最大的国家。而我国则是2.4万克拉/100万吨钢，这一差距是显而易见的。

20世纪60年代天然金刚石约2500万克拉，数量不是很大，这是因为金刚石的生产成本太大，一般的金刚石矿中，须处理6~8t矿石才能得到1克拉的金刚石，有的甚至250t的矿石才能得到1克拉的金刚石，可见金刚石为什么如此昂贵。天然金刚石的低产量及高成本促使人们走上了发展人造金刚石之路。我国是在60年代中期开始试制与发展人造金刚石，60年代世界人造金刚石的产量为1000万克拉，今天，中国人造金刚石的产量已达5000万克拉（约合

1 万吨), 而全世界人造金刚石的产量就无法估计, 这些人造金刚石主要用于工业。人造金刚石及其制品的发展大大促进了特殊用途的磨削加工的要求, 人造金刚石不受资源限制, 制造成本从发明的那天起就不断下降, 品种在逐渐增多, 质量在不断提高, 这样就极大地开辟了人造金刚石磨料的使用前景。不仅在固结磨具上, 而且普遍地使用在涂附磨具上, 如牙科用金刚石砂带, 精密仪器上用金刚石砂带等。立方氮化硼是超硬磨料的另一种类型, 其性能与人造金刚石磨料相似, 还具有一些独特的优点, 如耐热性方面优于人造金刚石。立方氮化硼比人造金刚石发展稍后, 是 70 年代前后试制研究的, 也可以说是后起之秀。立方氮化硼到 90 年代初期全世界工业生产大国有较大发展, 如前苏联立方氮化硼的产量已发展到 5000 多万克拉。我国立方氮化硼也是在 80 年代末期或 90 年代初期试制和发展的新型产品, 但速度较慢, 其原因在于工艺与技术还远远落后于其他工业发达的国家, 因而它的推广和使用还受到一定的限制。

在发展人造金刚石磨具和立方氮化硼超硬磨料的同时, 人造金刚石和立方氮化硼的磨具这两种超硬磨料的磨具也得到相应发展, 人造金刚石磨具发展更快。目前, 人造金刚石磨具已发展成为一个较为完整、成熟和自成体系的加工技术领域。人造金刚石磨具制品包括电镀金刚石内圆切割锯片、什锦锉、磨头, 人造金刚石圆锯片、框架锯片, 人造金刚石修整笔, 石材用金刚石磨具, 金刚石筒形砂轮, 加工铁氧用金刚石磨具, 金刚石修整滚轮, 还有金刚石或立方氮化硼与硬质合金复合片磨具等品种系列, 而且还在继续完善、补充与提高。

(4) 磨粒加工发展的第四阶段 (20 世纪 90 年代后期至现在) 进入 90 年代, 磨料磨具行业的生产、销售、科研都发生了很大的变化, 主要表现为品种日趋多样化、专业化, 竞争也前所未有的日趋激烈。高速/超高速、高效率、自动化、数控化、智能化、超精密等是当前先进磨粒加工工艺技术的主要内容, 也是先进加工制造工艺与装备的重要学科前沿。

普通磨削的砂轮线速度一般为 $30 \sim 35 \text{ m/s}$, 砂轮线速度超过 45 m/s 即为高速磨削 (high speed grinding, HSG), 砂轮线速度超过 150 m/s 称为超高速磨削 (super-high speed grinding), 但在欧美也将其统称为高速磨削。普通磨削的单位材料去除率不足 $10 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$, 与普通车削、铣削相去甚远。所以, 提高磨粒加工效率一直是人们不懈追求的目标。根据磨屑去除机理, 材料磨除率可以表示成磨屑平均断面积、磨屑平均长度和单位时间内参与切削的磨粒数三者的乘积。因此, 如果要提高磨削效率可以采取以下措施: ①可以采用高速和超高速及宽砂轮磨削来增加单位时间作用的磨粒数; ②采用深切磨削以增大磨屑长度; ③采用重负荷等强力磨削方式以增大磨屑平均断面积。单独或综合采用这些方法从而使单位材料去除率较普通磨削有较大提高的工艺技术均为高效率磨粒加工技术。它主要包括强力磨削和强力珩磨、缓进给深磨、高速重负荷荒磨、高速/超高速磨削、高效深切磨削、砂带磨削、硬脆/难加工材料高效率磨削、高效率研磨和抛光等。其中高速与超高速磨削、缓进给深切磨削、高效深切磨削、砂带磨削和重负荷荒磨技术的发展最为引人注目。

磨粒加工是一种影响因素复杂的加工过程, 过去主要靠人的技艺来参与控制, 过程稳定性和再现性差, 曾被认为是“黑色的加工技术”。近年来, 随着对砂轮特性与磨削机理的研究和认识不断深入及计算机信息技术与自动化技术的飞速进步, 人们开始利用数据库、计算机优化、仿真、传感器、人工智能等最新现代科技成果来评价、预测、仿真、优化和控制磨粒加工过程, 实现了数控化、自动化、智能化、虚拟化, 使磨粒加工成为一种可自动控制、稳定、适于批量化、高效率加工的绿色先进工艺技术, 即先进磨粒加工工艺。

相应地, 磨粒加工装备为适应高速/超高速、高效率、高精度和数控自动化的要求, 采用了超高速、大功率主轴系统、砂轮自动平衡、砂轮数控精密修整、精密微量进给、高效率精密过滤系统、高压大流量冷却系统、在线精密测量、多传感器融合、合理机床布局、电主轴和直线导轨、高刚度、高稳定性机床结构、高热稳定性、高抗吸振性、高力学性能的先进机床材料、高性能数控系统、全数字化精密伺服驱动、智能化控制等多种新技术, 使之成为高速/超

高速、高效率、高精度和先进的磨粒加工装备。

可以说,高速/超高速、精密/超精密、高效、先进,代表了这一时期磨粒加工工艺与装备的技术发展和进化的主要方向,也是磨粒加工基础与应用研究的热点和前沿。

1.2 磨削加工的特点和磨削过程

1.2.1 磨削加工的特点

磨削加工实际是多刃同时切削的加工工艺,磨削加工的进给量较小,切削力通常也不大,但磨削速度较高(30~120m/s),因此,磨削区域的温度通常都较高,可高达800~1000℃,容易引起工件表面局部烧伤,磨削加工热应力会使工件变形,甚至使工件表面产生裂纹;同时,因为磨削加工过程中会产生大量的金属磨屑和砂轮砂末,会影响加工工件的表面粗糙度等。磨削加工应用范围很广,通常作为零件(特别是淬硬零件)精加工工序,可以获得很高的加工精度和表面质量,可以用于铸锭、钢坯的粗加工、切割加工等。

1.2.1.1 磨削属多刃、微刃切削

磨削用的砂轮是由许多细小坚硬的磨粒用结合剂黏结在一起经焙烧而成的疏松多孔体。这些锋利的磨粒就像铣刀的切削刃,在砂轮高速旋转的条件下,切入零件表面,故磨削是一种多刃、微刃切削过程。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,磨粒数为60~1400颗/cm²。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,有效磨粒数约占砂轮表面总磨粒数的10%~50%。

1.2.1.2 磨刃的前角多是负前角

砂轮表面有大量的磨粒,其形状、大小和分布为不规则的随机状态,参加切削的切削刃数随具体条件而定。磨粒刃端面的圆弧半径较大,切削时呈负前角切削,一般前角 $\gamma_g = -85^\circ \sim -15^\circ$ 。

1.2.1.3 磨削力比值较大

由于磨粒切削时呈负前角切削,所以法向磨削力 F_n 大于切向磨削力 F_t 。一般法向磨削力 F_n 与切向磨削力 F_t 之比在3~14之间,远大于其他加工方法。

1.2.1.4 加工尺寸精度高,表面粗糙度值低

磨削的切削厚度极薄,每个磨粒的切削层厚度可小到微米,故磨削的尺寸精度可达IT5~IT6,表面粗糙度 R_a 值达0.1~0.8 μm 。高精度磨削时,尺寸精度可超过IT5,表面粗糙度 R_a 值不大于0.012 μm 。

1.2.1.5 磨削温度高

在磨削过程中,由于切削速度很高,在极短的时间内产生大量的切削热,在磨削区产生高温有时会超过1000℃。同时,高温的磨屑在空气中发生氧化作用,产生火花。在如此高温下,将会使零件材料性能改变而影响质量。因此,为减少摩擦和迅速散热,降低磨削区温度,及时冲走磨屑,以保证零件表面质量,磨削时需使用大量切削液。

1.2.1.6 砂轮有自锐性

当作用在磨粒上的切削力超过磨粒的极限强度时,磨粒就会破碎,形成新的锋利棱角进行磨削;当此切削力超过结合剂的黏结强度时,钝化的磨粒就会自行脱落,使砂轮表面露出一层新鲜锋利的磨粒,从而使磨削加工能够继续进行。砂轮的这种自行推陈出新、保持自身锋利的性能称为自锐性。砂轮有自锐性可使砂轮连续进行加工,这是其他刀具没有的特性。

1.2.1.7 加工材料广泛

由于磨料硬度极高,故磨削不仅可加工一般金属材料,如碳钢、铸铁等,还可加工一般刀