

高等学校试用教材

磨削原理

华中工学院 诸兴华 主编

0.1

机械工业出版社

本书在“金属切削原理”教材磨削内容的基础上,进一步系统介绍磨削加工近十多年来的研究成果。着重阐明磨削理论和研究方法的新进展、新工艺、新磨料磨具和磨削液的开发。

全书共分十章,主要介绍磨削加工特点、磨料磨具的新发展;砂轮和磨削的基本参数;磨削过程的力学特征及热效应;砂轮磨损机理和修正方法;磨削液;磨削加工的表面质量和经济性;高效磨削和精密磨削等。

本书是机械制造专业学生和研究生“磨削原理”课程教材。也可供有关工程技术人员参考。

磨 削 原 理

华中工学院 诸兴华 主编

责任编辑:高文龙

封面设计:田淑文

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $9\frac{1}{2}$ · 字数 222 千字

1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,500 · 定价:1.65元

ISBN 7-111-00141-9/TH·30(课)

前 言

本书根据1984年5月机械制造(冷加工类)教材编审委员会刀具教材编审组第三次编委(扩大)会议审查通过的《磨削原理》教材编写大纲编写而成;全书共分:绪论,磨削基本参数,磨削过程的力学基础,磨削热,砂轮耗损与修整,磨削加工中的化学效应及磨削液,磨削表面质量,磨削加工的经济性与优化,高效磨削,精密与镜面磨削等十个部分。本书在《金属切削原理》教材所介绍的磨削加工一般知识的基础上,较系统地介绍了近十余年来磨削加工的研究成果,着重阐明磨削理论和研究方法的新进展,帮助学生掌握磨削基本规律,扩大眼界,开拓思路。

本书经刀具教材编审组组织,由诸兴华(华中工学院)同志主编,张幼楨(南京航空学院)、郑焕文(东北工学院)两同志主审,参加编写人员按所编写各章顺序有诸兴华(绪论、磨削基本参数、砂轮耗损与修整等章)、上海交通大学顾永清和庄其昌(磨削过程的力学基础、磨削热等二章)、浙江大学郑善良(磨削加工中的化学效应及磨削液一章)、南京工学院丁瑞莲(磨削表面质量一章)、黄仁(磨削加工的经济性与优化一章)、华中工学院黄奇葵(高效磨削一章)和南京工学院时修荣(精密与镜面磨削一章)等同志。

本书在初审和定稿讨论中,刀具教材编审组刘培德、张幼楨、楼希翱、钟寿民、肖诗纲等编委及参加会议的各同志提出了许多宝贵的修改意见,在此,我们谨致衷心的感谢。

本书于1986年10月经机械制造(冷加工类)教材编审委员会刀具教材编审组第五次编委(扩大)会议审查通过,供本专业大学生作选修课教材或作研究生教学参考书使用,也可供从事机械制造专业的科技人员参考。

由于编者水平有限,编写时间也较为仓促,书中缺点错误在所难免。为了提高本书的质量,切望读者率直批评指正,以便再版时加以改进,不胜感激之至。

编 者

1986年12月于深圳

本书所用符号的说明

A_c	切削面积	d_w	工件直径
A_m	切屑平均断面积	E	弹性模量
A_w	被磨工件的表面积	E_w	工件材料的弹性模量
a_c	切削厚度	F	总磨削力
a_{ch}	切屑厚度	F_a	轴向磨削力
a_d	砂轮修整深度	F_f	作用于磨粒切刃上的磨削力
a_k	磨粒切削深度	F_n	法向磨削力
a_{gc}	磨粒切削厚度	F'_n	砂轮单位宽度上的法向磨削力
a_{gc_e}	当量磨粒切削厚度	$(F_n)_{\text{总}}$	作用在磨粒上的法向接触压力
a_{gw}	磨粒切削宽度	$(F_n)_s$	作用在磨粒上的法向磨削力
a_k	材料的冲击韧性值	F_x	进给方向的抗力
a_p	磨削深度, 切削深度	F_y	切深方向的抗力
a_w	切削宽度	F_z	主切削力
b	工件的磨削宽度	F_p	单位磨削力 (作用在单位面积上的)
b_s	砂轮宽度	f_a	轴向进给量
C	每个工件的工序成本	f_d	砂轮修整进给量
C_{ch}	机床的调整工时费用	f_r	径向切入进给量
C_{ct}	与更换砂轮工时 (t_{st}) 有关的费用	G	磨削比; 材料的剪切弹性模量
C_s	与砂轮上磨粒分布的密度和形状有关的系数	G_s	砂轮的粒度号
C_g	磨削时砂轮消耗的费用	H	已加工表面的显微硬度
C_{gd}	修整砂轮时砂轮材料消耗的费用	H_0	金属基体的显微硬度
C_L	与装卸工件有关的辅助工时所占的工序成本	h_s	硬化层深度
C_r	砂轮的容屑系数	I	惯性矩
C_t	在磨削过程中直接消耗于磨削加工的总工时的费用	l_g	磨粒间隔距离
C_{td}	修整砂轮时修整器消耗的费用	l_k	磨粒切刃与工件的接触弧长度
C_w	与磨削时间 (t_w) 有关的工序成本	N_0	单位时间内参加磨削的磨粒数
C_{01}	与直接消耗在磨削过程中总的辅助工时有关的费用	N_{eff}	砂轮表面上的单位有效磨粒数
C_{02}	平均分摊在每个工件上的其他辅助工时以及工具、材料消耗等有关费用	N_g	砂轮上单位面积里的磨粒数
C_1	砂轮架快速趋近的工时费用	N_t	砂轮上同时参加切削的有效磨粒数
c	比热容	N_w	动态的有效磨粒数
d	直径	n_s	砂轮的转速
d_g	磨粒的平均直径	n_w	工件的转速
d_s	砂轮直径	P_g	砂轮电动机的功率消耗
d_{eq}	砂轮等效直径	$\bar{p}$	磨粒切刃顶面与工件间的平均接触压强
		Q	能通量 (单位面积上通过的能量)
		Q'	单位砂轮宽度上的金属切除量
		Q_t	总热量
		q	砂轮与工件的线速度比, 单位面积内所含的热量

q'	单位时间内单位面积上的热流	v_w	工件表面线速度
$\bar{q}$	磨削区内传入工件里的平均热流强度	Z	金属切除率, 单位时间内的金属切除量
q_s	传入切屑的热量	Z'	摊分在砂轮单位宽度上的金属切除率
q_A	修整滚轮与砂轮的线速度比 (或称修整速比)	Δz	在垂直砂轮表面的Z方向上的深度
Ra_w	工件上被磨表面的粗糙度	α	工件导温系数
r_β	磨粒刃锋圆半径; 刀具的刀刃钝圆半径	γ	磨粒顶角的半角 (半顶角)
T	砂轮耐用度; 刀具耐用度	δ	材料的延伸率
t_c	磨粒与工件的接触时间	θ_A	磨粒磨削点的温度
t_{ch}	机床调整所需时间	θ_m	工件上任意点 $m(x, z)$ 处的温升
t_{cl}	磨削时与更换砂轮有关的时间 (平均摊在每个工件上的)	θ_w	工件表层的平均温升
t_L	装卸工件的时间	θ_{wa}	被磨工件表面与外界空气的温差
t_r	放热时间	λ	X射线的波长; 工件导热系数
t_{a0}	清磨 (无火花磨削) 时间	μ	摩擦系数; 泊松比
t_{wt}	修整砂轮所需时间	σ_a	轴向残余应力
t_w	磨削时间、磨削加工机动工时	σ_r	径向残余应力
U_s	剪切面上单位时间消耗的功	σ_t	切向残余应力
u	比能	σ_{-1}	弯曲疲劳极限
u_c	比磨削能, 磨下单位体积材料时所消耗的能量	σ_{-1p}	拉压疲劳极限
V_s	砂轮磨损体积	τ_0	剪应力
V_w	工件材料磨除体积	τ_{-1}	扭转疲劳极限
v	切削速度	A, E	无因次参数
v_c	经济切削速度	A_w	被磨材料的切除参数
v_f	进给速度	ψ_g	砂轮的磨粒率 (砂轮中含磨粒体积的百分率)
v_s	砂轮线速度	ψ_p	砂轮的空隙率 (砂轮中空隙所占体积的百分率)

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 磨削加工发展简史	1
§ 1-2 磨削加工的特点	3
§ 1-3 磨削加工的基本类型及其运动关系	5
§ 1-4 磨料、磨具及其新发展	6
一、磨料	7
二、磨具	11
三、磨料磨具的新发展	12
第二章 磨削基本参数	15
§ 2-1 砂轮切削部分的几何参数和有效磨刃数	16
一、砂轮切削部分的几何参数	16
二、容屑槽的结构参数	18
三、有效磨粒数的确定	20
四、影响有效磨粒数的因素	24
§ 2-2 切削层的尺寸	25
一、切屑厚度	26
二、当量磨削厚度	28
§ 2-3 表征砂轮与工件干涉量的参数	30
一、砂轮与工件的接触状况	30
二、砂轮与工件的接触弧长	31
三、砂轮的等效直径	32
四、磨削时砂轮与工件接触状态的变化	33
§ 2-4 表示可磨削性的参数	33
一、磨削比 C	33
二、被磨材料的切除参数 A	34
第三章 磨削过程的力学基础	37
§ 3-1 磨粒切入过程和作用力	37
一、磨粒切入过程	37
二、磨粒上的作用力	38
§ 3-2 磨削时的变形和比能	38
§ 3-3 磨削力及其分力	40
一、磨削力的理论计算	40
二、磨削力的经验公式	45
三、磨削分力间的比例关系	46
§ 3-4 磨削力的测量	46
第四章 磨削热	49

§ 4-1 磨削热的产生及其影响	49
§ 4-2 工件表面的平均温度	50
§ 4-3 磨削区温度场的理论分析	51
§ 4-4 磨削区温度场的实验研究方法	57
一、热电偶测温法	57
二、热电偶的标定	59
三、利用红外辐射测温法	60
第五章 砂轮耗损与修整	62
§ 5-1 磨粒的磨损	62
§ 5-2 砂轮的耗损	62
§ 5-3 砂轮磨损的测量	63
§ 5-4 砂轮耐用度的判定	65
§ 5-5 砂轮的修整技术	65
第六章 磨削加工中的化学效应及磨削液	68
§ 6-1 磨粒与工件材料的化学反应	68
§ 6-2 磨料与大气及磨削液的化学反应	69
§ 6-3 磨削液的基本要求	70
§ 6-4 油性磨削液	71
§ 6-5 乳化液	72
§ 6-6 透明水溶性磨削液	72
§ 6-7 固态磨削剂	73
§ 6-8 磨削液的供液方法	74
第七章 磨削表面质量	76
§ 7-1 概述	76
§ 7-2 磨削表面层形成的物理基础	76
一、磨削表面层的特征	76
二、磨削表面层的形成	78
§ 7-3 磨削表面质量的影响因素分析	79
一、表面宏观状态	79
二、表面粗糙度	80
三、表面层微观金相组织及其硬度	80
四、表面层残余应力	81
§ 7-4 磨削表面质量的测定	83
一、X射线测定法	84
二、机械测定法	85
§ 7-5 磨削表面质量对零件使用性能的影响	88
一、抗磨损性(耐磨性)	88
二、抗腐蚀性	89
三、抗疲劳性能(疲劳极限)	89
第八章 磨削加工的经济性与优化	93
§ 8-1 磨削加工的成本分析	93
一、磨削循环与成本分析	93

二、单件工序成本计算方法	94
三、综合成本分析的概念	99
§ 8-2 磨削工艺参数优化与经济性分析	100
一、正交设计实验方法简述	100
二、实验结果分析	102
三、实验结果的经济效益分析	104
§ 8-3 磨削过程优化与自适应控制	105
一、磨削过程优化的概念	105
二、磨削过程特点与目标函数的设置问题	106
三、自适应控制的概念	108
第九章 高效磨削	110
§ 9-1 高速磨削	110
一、高速磨削的特点	110
二、采用高速磨削的条件	112
§ 9-2 深切缓进给磨削	114
一、深切缓进给磨削的特点	114
二、进行深切缓进给磨削的条件	116
§ 9-3 砂带磨削	117
一、砂带磨削的特点	118
二、复杂型面的砂带磨削	120
三、砂带磨削用量的选择	120
四、砂带磨削用的接触轮	121
§ 9-4 高速重负荷磨削	122
第十章 精密与镜面磨削	126
§ 10-1 概述	126
一、精密与镜面磨削的意义	126
二、精密与镜面磨削发展概况	126
§ 10-2 精密与镜面磨削机理	127
一、微刃的形成与切削作用	127
二、磨削过程中微刃的破坏与变化	128
三、镜面的形成	129
§ 10-3 精密与镜面磨削的砂轮选择及其修整	129
一、砂轮的选择	129
二、精密与镜面磨削时砂轮修整对加工表面粗糙度的影响	131
§ 10-4 精密与镜面磨削用量选择	133
一、砂轮线速度 v_s 的选择	133
二、工件线速度 v_w 的选择	134
三、工作台轴向进给量 f_a 的选择	135
四、磨削深度 a_p 的选择	135
五、光磨（无火花磨削）次数的选择	137
§ 10-5 精密与镜面磨削时的机床性能要求及其影响	137
§ 10-6 精密与镜面磨削的常见缺陷	138
参考文献	141

第一章 绪 论

磨加工 (Abrasive Process) 是泛指用有硬质磨粒的工具进行加工的过程。这种加工方法历史悠久, 早在公元前两万年以前的旧石器时代就已经存在, 它是人类劳动智慧的结晶。自古以来, 这种加工方法不仅广泛被应用, 而且一直在发展着。最早, 使用的是天然磨料磨具, 以后发展到使用人造磨料和磨具。近 20 多年来, 由于新磨料、新磨具的发展, 在磨削加工中出现了不少能经济地切除大量金属的方法, 它可达到车、铣类切削加工时的切除率, 称为磨除加工 (Abrasive Machining)。

广义的磨加工 (Abrasive Process) 包括下列加工方式。

1. 砂轮磨削 (Grinding), 简称磨削;
2. 砂带磨削 (Coated-Abrasive Belt Machining);
3. 磨除加工 (Abrasive Machining);
4. 珩磨 (Honing);
5. 研磨 (Lapping);
6. 光整加工 (Finishing 或 Super Finishing), 包括: 超精光整 (Super Finishing)、抛光 (Polishing)、振动光整 (Vibratory Finishing) 和滚筒光整 (Barrel Finishing) 等。

磨削 (Grinding) 系指用砂轮、砂瓦等固结磨具进行加工的过程, 是机械加工的重要方法。本世纪 60 年代以来磨削技术发展较快, 新磨料、磨具和新型磨削液的开发, 精密磨削、镜面磨削、控制力磨削、高速磨削、宽砂轮磨削、大切深磨削等新工艺的应用, 使磨削不仅是一种精密加工方法, 而且也是一种高效加工方法。取得这些进步的关键在于磨削理论研究工作巨大进展。本课程主要讲授磨削过程的基本原理。

随着机器性能的改进和提高, 对机械零件表面质量的要求也愈高, 促使磨削工序增加。在一般机器制造厂中磨削工序平均占切削加工中的 20~30%, 而在个别部门 (例如轴承厂等), 磨床可能达到切削机床的 70%。本世纪以来, 磨削加工的发展集中表现在寻求高效加工方法 (包括一般磨削和精密磨削) 及其所用的工具和装备; 同时, 从理论上力求揭开磨削过程的实质, 寻求强化和控制磨削过程的最佳方案。

§ 1-1 磨削加工发展简史

从当前掌握磨削先进技术的情况看来, 美国、苏联、联邦德国、英国和日本等国家都居于前列。但溯及历史, 在两万年以前的旧石器时代, 却是中国的古北京人和印度尼西亚的爪哇人最先掌握了磨削加工过程; 那时, 他们用石头来磨砺石制和木制工具。到公元前 2100 年, 在埃及产生了第一台古老的外圆磨床, 它使用砂石做的砂轮磨削加工青铜工具和装饰品。公元前 1500 年, 中国和美索不达米亚开始使用磨石轮, 但在机器制造上使用人造砂轮则是 19 世纪初期的事。据报道, 1823 年在美国, Isaac Pike 制成了砂石磨轮; 以后, 在欧

美各国和日本、苏联兴建了很多磨料磨具制造工厂。由于中国造纸术在世界上发展最早，在公元 1225 年就使用砂带抛光青铜物件，据报导，当时的砂带是用天然胶将捣碎的海贝壳粘在纸上制成的。公元 1275 年马可波罗 (Marco Polo) 访问中国时，将砂带技术传去欧洲。

磨料的发展经历了较长的时期^[1]，最早发展的人造磨料是碳化硅，Acheson 在 1901 年发明了冶炼碳化硅磨料的生产工艺。同年稍后一些时间 C. B. Jacobs 创造了用电炉生产氧化铝磨料的方法，直到 1904 年 Higgins 发明新的冶炼炉后，氧化铝才成为商品生产，供应市场。在美国 1934 年 R. R. Ridgeway 首次生产了碳化硼磨料。1938 年美国又发明了单晶刚玉，它使精密磨削得到了较快的发展。1950 年后出现了锆刚玉、烧结刚玉和含少量其它金属元素的刚玉磨料新品种。到 1960 年美国的通用电气公司 (General Electric Co.) 首先创造了工业生产人造金刚石，随后又发展了立方氮化硼新型超硬磨料。人造磨料的开发促使磨削加工技术 (包括磨具和磨床等) 迅速发展。

工业生产用的磨床最早出现在美国的 Brown & Sharp 公司^[2]，他们早在 19 世纪 60 年代就发展了一种自用的外圆磨床，随后发展了平面磨床；但直到 20 世纪 20 年代里才又发展了无心磨床。以后，由于工具和轴承工业、汽车工业、飞机工业的发展，应用磨削加工愈为广泛，磨床新品种也日益增多。近十多年来程序控制和计算机控制的磨床已得到了迅速发展，具有自适应控制系统的磨床也相继出现。促使磨削加工从单一地掌握技艺的阶段进到掌握技艺和磨削理论后综合应用的新时期。

解放前我国工业非常落后，基本上可以说没有机器制造业，更谈不上磨削加工的研究和发展。解放后，在党和人民政府领导下，经过六个五年计划的建设，我国不仅兴建了百余个磨料磨具制造厂和数十个磨床制造厂，还建立了磨料磨具磨削专业研究所和开展了磨削加工的科学研究工作，取得了很多成果。概括起来，磨削加工技术建国以来取得了以下几个方面的成就。

(一) 磨料磨具工业发展很快，通用磨料磨具方面已能满足国内需要，不少品种已进入国际市场。

刚玉类磨料已发展到十多个品种，特别是近年来加强了对磨料整形和处理工艺的研究工作，取得了很多可喜的成果。碳化物系列磨料，除碳化硅、碳化硼以外还发展了碳硅硼等新品种。人造金刚石和立方氮化硼磨料已有商品生产。磨具制品方面增加了很多新品种。60 m/s 陶瓷结合剂的高速砂轮已能批量生产，120 m/s 陶瓷结合剂的高速砂轮已研制成功。重负荷磨削用砂轮试制成功后已初步用于钢坯修磨和大铸件清理工作。大孔隙砂轮已投入生产，为发展缓进给深切磨削新工艺创造了良好条件。渗有致冷添加剂的砂轮已初步开发，为耐热合金磨削提供了新的磨具。人造金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮发展也很快，初步满足了国防工业和工具制造工业的需要。随着高分子材料的发展和新聚合物的不断出现，树脂结合剂的新品种不断增加，促进了磨具品种的发展。

(二) 磨削原理和磨削新技术的研究取得了不少成果

自从 1956 年 12 月全国工具科学研究院召开了“磨料、磨具、磨削加工科学研究工作座谈会”以后，我国磨削加工方面的研究工作在国家科学技术发展规划的指导下逐渐发展起来，有关专业研究所和高等院校与工厂协同开展了磨削科研工作。1963 年 12 月第一机械工业部在郑州召开会议，组成了全国磨料磨具行业技术委员会，统筹规划了行业的科技工作，进一步加强了厂、所、校的结合，促进我国磨削科研工作的发展。概括起来在下列几个方面

作出了贡献。

1. 磨料磨具的合理使用：合理制定磨削用量和砂轮修正规范。
2. 磨削过程和磨削力、磨削热、磨粒磨损等现象的基本理论问题、磨削液的作用。
3. 磨削加工精度及其分析，提高各种精密零件的磨削水平。
4. 磨削表面质量及其测量分析方法的研究，镜面磨削和超精加工技术的发展。
5. 高效磨削技术的发展。高速磨削、多砂轮磨削、宽砂轮磨削、控制力磨削、重负荷磨削、缓进给深磨法、间断磨削法、金刚石砂轮磨削和立方氮化硼砂轮磨削等新技术的应用。
6. 磨削加工自动化技术和自适应控制系统的开发。在轴承、动力机械和汽车等制造行业在大力发展自动测量技术、数控技术和生产自动线的基础上开展了计算机控制系统和自适应控制系统的研究和应用。

(三) 发展了门类比较齐全的磨床品种和系列，不仅满足了我国机械工业发展的需要，还部分出口外销到其它国家。

§ 1-2 磨削加工的特点

磨削 (Grinding) 从本质上看属于切削加工，但与车、铣等切削加工方法相比较，却有如下特点。

1. 砂轮表面上砂粒形成的刃口形状和刀刃分布均处于随机状态

一般的切削工具上，刀刃形状是确定的；而磨削时砂轮表面上每颗磨粒的形状则不是确定的，参加切削工作的磨粒的刃口形状也是不确定的，且它在砂轮表面上的分布是随机的。

2. 每一个磨粒切下切屑的厚度很薄

在切削加工中，除铰削和拉削时精切刀刃所处的切削情况外，一般最小的切削厚度都大于 0.02mm ，磨削时一般的切削厚度则小到微米以下，与其他切削加工相比则相差几十倍甚至数百倍；所以，磨削加工可以获得高光洁的表面。可是，如此小的切削厚度会使其比切削力非常大，比能很高，对加工表面层的影响也比较大。

3. 磨削速度比一般切削速度高得多

切削加工中用硬质合金刀具切削时，一般的切削速度 $v \leq 200\text{m/min}$ ，用陶瓷刀具切削时速度为 $v \leq 400\text{m/min}$ ；而用砂轮磨削时一般的磨削速度为 $v = 2000 \sim 3000\text{m/min}$ ，它约为切削加工的十倍。

4. 砂轮有自砺作用

在切削加工中，如果刀具磨损了，切削就无法正常地进行下去，刀具必须重新磨砺。磨削的情况则不同，因为砂轮上的切削刃是由硬质材料的磨粒尖端形成的，当磨粒的锋刃变钝时，作用在磨粒上的力增大，使磨粒局部被压碎形成新的锋刃或者整粒脱落露出新的磨粒锋刃来工作。这种重新获得锋锐刀刃的作用称为自砺作用 (Self-dressing)。

5. 磨粒切削时具有较大的负前角

用砂轮磨削时磨粒上的切刃参数 (如图 1-1 所示) 包括：磨刃的切削角 δ_s 和前角 γ_s ，磨刃顶尖角 ϵ_s ，刃口钝圆半径 r_{ps} ，以及参加工作的有效磨粒数 G 。它们都影响着砂轮的锋锐程度和切削能力。过去，有人^[3]曾在显微镜下测量磨粒顶尖角 ψ_s 的大小，多为 $90^\circ \sim$

120°；因此，认为磨粒切削的前角 $\gamma_g = -15^\circ \sim -60^\circ$ 。有人[4]曾从砂轮修正后的表面上测量磨粒锋刃的前角大小，统计后认为 $\gamma_g = -80^\circ$ 。总之，这些结果说明，磨粒切削上的前角是负值的，其绝对值远大于一般切削刀具所用的负前角。

6. 磨削区的温度很高

砂轮磨削区的温度是指砂轮与工件接触区内的表面温度，也有人称之为磨削点温度。实际测量得的磨削区温度非常高，加工钢件时常达 1000℃ 以上，切下的切屑熔融后是球粒状。高温的切屑飞出时强烈的氧化产生磨削火花

(Grinding Spark)。但是高温区毕竟发生在微小的接触弧表面上(磨削点上)，且它又以极高的速度向周围传散，所以对工件表层来说它的温度并不太高。倘若磨削过程中形成的热量聚集在工件表面上不能迅速传散，愈积愈多，就会使工件表面层温度升高，导致工件表面层变质，影响工件表面质量。

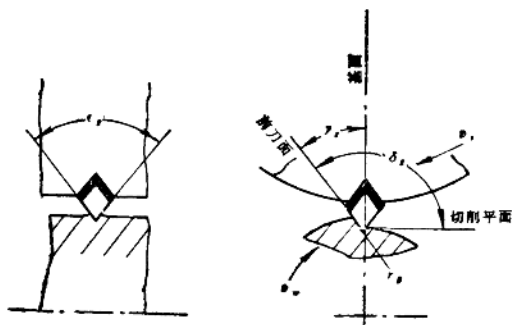


图1-1 砂轮的磨削参数

磨削方法	磨削工件的回转表面		磨削工件的
	外圆磨削	内圆磨削	周边平磨
切入式磨削 (横磨)			
	无心磨削	无心磨削	

§ 1-3 磨削加工的基本类型及其运动关系

磨削是机械加工的主要方法之一，通常按加工工件表面的形式和工作特点来分类。其基本类型分述如下。

1. 工件回转表面的磨削

(1) 外圆磨削

1) 工件有中心支承的外圆磨削，分别有纵向进给的和切入进给的两种。

2) 工件无中心支承的外圆磨削，分别有纵向进给的和切入进给的两种。

(2) 内圆磨削

1) 工件有中心支承的内圆磨削，分别有纵向进给的和切入进给的两种。

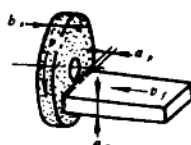
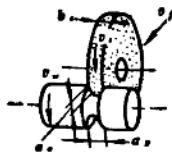
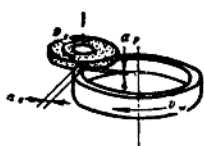
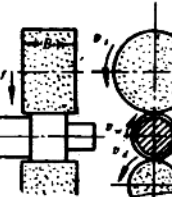
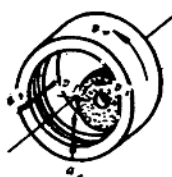
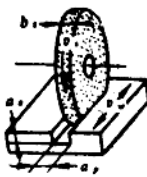
2) 工件无中心支承的内圆磨削，分别有纵向进给的和切入进给的两种。

2. 工件平型表面的磨削

(1) 用砂轮周边磨削平面的方法，简称周边平磨。

(2) 用砂轮端面磨削平面的方法，简称端面平磨。

3. 成形面磨削

平 型 表 面	磨 削 工 件 的 成 型 表 面		
端 面 平 磨	外 圆 磨 削	内 圆 磨 削	平 面 磨 削
			
			

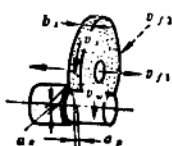
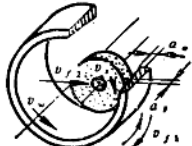
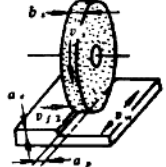
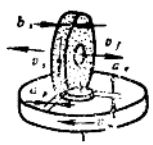
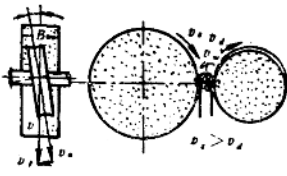
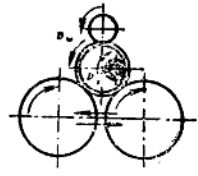
磨削对象 磨削方法	磨削工件的回转表面		磨削工件的
	外圆磨削	内圆磨削	周边平磨
普通式磨削 (纵磨)			
			
	无心磨削	无心磨削	
			
展成法磨削			

图1-2 磨削加工的运动关系

(1) 按仿形法磨削成形表面。

(2) 按切入法磨削成形表面。

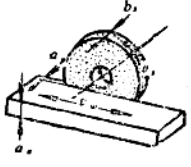
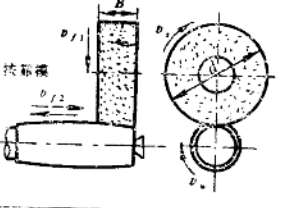
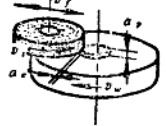
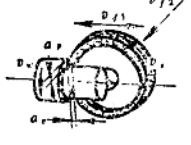
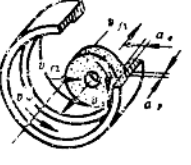
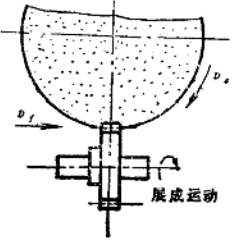
(3) 按展成法磨削成形表面。

上述各种磨削加工的运动关系，如图1-2所示。

§ 1-4 磨料、磨具及其新发展

磨料磨具是推动磨削加工技术发展极为活跃又十分关键的一个方面。过去，刚玉和碳化

(续)

平 型 表 面		磨 削 工 件 的 成 型 表 面		
端 面 平 磨	外 圆 磨 削	内 圆 磨 削	平 面 磨 削	
				
				
				
				

基本类型及其运动关系

硅等人造磨料的出现使磨削发展成为精密机械加工的主要方法，近代人造金刚石和立方氮化硼问世，标志着磨削发展的新阶段。今后，随着新工程材料的发展和磨削机理研究工作的深化，将会不断涌现新的磨削技术和开发新的磨料和磨具品种。

一、磨料 (Abrasives)

它是磨削、研磨和抛光加工所用工具中起切削作用的材料，是制造磨具的主要原料，也可以游离状态使用于某些研磨和抛光工作。常用的磨料多为硬质非金属材料，除要求具有较高硬度外，还要求强度适当、具有良好的抗破碎性和自锐性，在高的磨削温度下还要能保持原有的硬度和强度，以及与被加工材料不易产生化学反应。

磨料颗粒的粗细以粒度 (Grain Size) 表示, 它表征磨粒尺寸范围及其中的粗细颗粒的比例, 以粒度号表示。磨料多为粒径小于 1mm 的颗粒, 基本粒径小于 63μm 的一般称为微粉。磨料粒度的粗细, 对被磨工件的表面质量和加工效率影响很大。不同粒度普通磨料的应用范围参见表 1-1。

表1-1 不同粒度普通磨料的应用范围

磨料粒度	基本颗粒尺寸范围 (μm)	应用范围
14~30	1700~600	磨钢板、铸件打毛刺、切割钢板等
36~54	600~300	一般的平面磨削、外圆磨削和无心磨削
60~100	300~125	精磨及刀具刃磨
120~W28	125~20	精密磨削、螺纹磨及珩磨
W20及更细	20以及更细尺寸	镜面磨削、精细研磨及抛光

磨料有天然磨料和人造磨料两大类。其主要特征和应用范围载于表 1-2 和表 1-3。

表1-2 常用的天然磨料

名称	主要成分	莫氏硬度	密度 kg/cm³	外观特征	应用范围
硅石(砂)	SiO ₂	7	2.60~2.66	有玻璃至油脂的光泽, 透明至不透明, 白或浅黄色	制造砂布(纸), 并可直接用于研磨、抛光木材、皮革、橡胶与塑料等
天然刚砂	Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ Fe ₃ O ₄	7~9	3.7~4.3	不透明细粒, 黑或灰黑色	制造砂布(纸), 并可直接用于研磨、抛光金属或玻璃
天然刚玉	Al ₂ O ₃	9	3.97~3.95	有光泽, 呈兰、黄、红、褐等色	制造砂布(纸), 并可直接用于研磨、抛光金属或玻璃
石榴石	铁铝 铁铝 锰铝 钙铝 钙铁 Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃ MgAl ₂ (SiO ₄) ₃ Mn ₂ Al ₂ (SiO ₄) ₃ Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃ Ca ₃ Fe ₂ (SiO ₄) ₃	6.5~7.5	3.15~4.30	深红、褐或黑色 深红至黑色 棕至红色 白、黄褐、玫瑰色 红褐色	制造砂布(纸), 并可直接用于研磨、抛光有色金属、木材、皮革、橡胶、塑料和玻璃
天然金刚石	C	10	3.47~3.56	颗粒小, 晶体有缺陷, 含杂质多。无色或呈白、黄、绿、以至褐色	制造砂轮, 磨头, 油石研磨剂等。用以加工硬质合金、石材等硬脆材料和作金刚石修正器

1. 天然磨料

天然磨料指直接由天然矿石制得的磨料, 有硅石 (砂)、天然刚砂、天然刚玉、石榴石和天然金刚石等。它们受自然生成条件的限制, 有的产量有限, 有的成分和性能难以控制, 因而不如人造磨料。

2. 人造磨料

人造磨料指以人工方法炼制或合成的磨料。应用较广的有刚玉、碳化硅、碳化硼、人造金刚石和立方氮化硼等。金刚石和立方氮化硼常被称为“超硬磨料”或“超硬材料”, 而刚

表1-3 常用的人造磨料

名 称	主要成分	维氏硬度 HV	密 度 kg/cm ³	适 用 加 工 对 象
刚 玉	Al ₂ O ₃	2000~2100	3.95	可制作各种磨具, 用于加工钢材
碳化硅	SiC	2840~3300	3.2	可制作各种磨具, 用于加工硬质合金、黄铜及非金属材料
碳化硼	B ₄ C	4150~5300	2.50	用于硬质合金、宝石等的研磨和抛光
立方氮化硼	BN	7300~10000	3.44~3.49	可制作各种磨具, 用于加工工具钢、不锈钢、镍及钴基合金等硬脆材料
人造金刚石	C	10000~11000	3.5	可制作各种磨具, 用于加工硬质合金、石材、光学玻璃等硬脆材料

玉、碳化硅等则称作“普通磨料”。

刚玉 (Fused Alumina) 是指以 α -Al₂O₃ 为主要成分的人造磨料, 其品种和用途如表 1-4 所示。棕刚玉是将氧化铝含量高的铝土矿石配入无烟煤或焦炭等炭素材料和铁屑, 在敞开式电弧炉中熔炼而成。加入炭素材料的作用是还原铝土矿石中的二氧化硅、氧化铁等。加铁屑的作用则是: 使它与已还原的硅铁等结成比重大于刚玉的铁合金渣沉于炉底, 便于排除; 且铁合金渣具有较高的感磁性能, 便于磁选后分离。炼得的溶液冷却成结晶块后, 再破碎加工成各种粒度的产品。若将炼得的熔液经快速冷却处理即形成微晶刚玉。若在炉料中加入黄铁矿, 炼得的熔块再经水解去除硫化铝后, 即得单晶体的 α -Al₂O₃ 结晶颗粒, 称为单晶刚玉。若在炉料中加入氧化锆含量高的矿石, 可炼得含 10~40% 氧化锆的锆刚玉。白刚玉是将含氧化钠低的用于电解制铝的铝氧 (氧化铝), 置于敞开式电弧炉中熔融, 冷却后形成的结晶块再破碎加工制成各种粒度的产品。炼制白刚玉时, 在炉料中加入适量的三氧化二铬则可得铬刚玉; 加入适量的氧化锆则得锆刚玉; 加入适量的氧化钒则得钒刚玉。烧结刚玉磨料是将含氧化铝高的铝土矿石或铝氧磨细至 10 μ m 以下, 加入适量的添加剂 (氧化锆、氧化镁等) 和粘结剂之后, 经过挤压、切断, 形成短的细棒 (约为 $\phi 1 \times 5$ mm) 烧结而成。

碳化硅 (Silicon Carbide) 是指以 SiC 为主要原料制成的人造磨料。纯碳化硅是无色透明晶体, 工业碳化硅则因杂质的种类和含量不同而呈浅黄、绿色、兰色乃至深黑色。透明度则随其纯度不同而异。理论上说碳化硅晶体的类型没有限制, 现已有 50 多个品种; 其中立方碳化硅称为 β -SiC, 其余六方的、菱形的晶系统称为 α -SiC。温度高达 2100℃ 以上时, β -SiC 将完全转变为 α -SiC; 温度达 2600℃ 以上时, 碳化硅将分解。碳化硅的工业制法是用优质石英与石油焦炭, 在电阻炉内炼制。炼得的碳化硅块, 经过破碎、酸碱洗、磁选和筛分 (或水选) 后制成各种粒度的产品。用作磨料的碳化硅基本品种是黑碳化硅和绿碳化硅, 它们均属 α -SiC。黑碳化硅含 SiC 约 98.5%, 其韧性略高于绿碳化硅, 多用于加工玻璃、陶瓷、石材和有色金属等抗拉强度低的材料。绿碳化硅较纯, 含 SiC 达 99% 以上, 富于自锐性, 多用于磨削硬质合金、钛合金和光学玻璃等; 也用于研磨汽缸套和精磨高速钢刀具。立方碳化硅是在冶炼黑碳化硅和绿碳化硅的结晶块中选得的黄绿色晶体, 也可以用特殊工艺制得, 它适用于制作超精磨轴承的磨具。

碳化硼 (Boron Carbide) 是以 B₄C 为主要成分的磨料, 密度为 2.5kg/m³, 熔点为 2350℃、硬度 (HV4150~5300) 低于金刚石等超硬材料而高于刚玉和碳化硅等常用磨料。