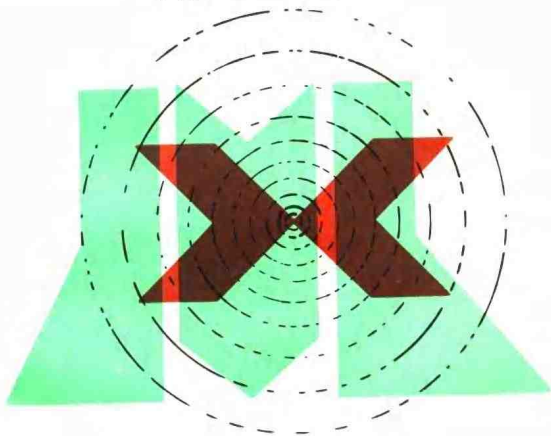


高等教材

磨削原理

任敬心 华定安 主编



西北工业大学出版社

高等学校教材

磨 削 原 理

任敬心 华定安 主编

1977 123

西北工业大学出版社



B 530343

内 容 简 介

本书对磨削机理作了较深入的分析,论述了磨削循环、磨削过程模型、静态及动态磨削参数、磨削力、磨削温度、砂轮磨损、砂轮修整、磨削液及磨削加工零件的表面完整性等,还从理论及应用方面分析了高效磨削加工。根据作者的研究成果及国内外研究现状,对钛合金、高温合金及不锈钢等难加工材料的磨削加工也进行了分析。

本书可作为高等学校本科生及研究生教材或教学参考书,也可供在机床制造业、汽车及拖拉机制造业、飞机及发动机制造业、船舶制造业、纺织机械制造业及其他各类机器制造业中从事机械加工的工程技术及研究人员阅读。

高 等 学 校 教 材

磨 削 原 理

主 编 任敬心 华定安

责任编辑 郑文治

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

开本 787×1092毫米 1/16 19.25印张 448千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数 1—3000册

ISBN 7-5612-0042-0/TH·3(课) 定价:3.20元



前 言

磨削是一种精密加工方法。超硬磨料砂轮的应用及磨削技术的发展,使磨削加工精度及磨削加工效率不断提高,也使磨削加工的能力和范围日益扩大。在某些方面,已成为与车、铣、刨等切削加工相竞争的加工方法。

随着机械产品性能、寿命和可靠性要求的不断提高,不仅对零件尺寸和形状精度有较高的要求,而且对零件表面完整性也有较高的要求。为了满足工业发展的需要,出现了高光度、高精度磨削、超精密级磨料加工、高效磨削以及低应力磨削等。

航空、航天等工业部门中,诸如钛合金、高温合金、铝锂合金、钨钼合金、工程陶瓷等难加工材料的应用,给磨削加工带来了较多的困难,亟待解决难磨材料的磨削加工性问题。

当前,磨削技术正向着扩大和推广超硬磨料磨具、提高磨削效率、开发高精度和超精密级加工以及提高自动化程度的方向发展。

超硬磨料的出现是磨削技术领域中的技术革命。目前已广泛地采用了金刚石及立方氮化硼砂轮,不仅用于刀具、螺纹、丝杠、导轨等的加工,而且用来磨削难加工材料。用陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削钛合金可大幅度提高磨削比,并改善零件表面完整性,磨削后零件表层生成压应力。用金刚石砂轮磨削工程陶瓷也可获得满意的结果。为了适应新型工程陶瓷的磨削,日本东芝公司研制了新型涂层金刚石砂轮。使用超硬磨料砂轮时,必须解决砂轮的整形与修锐中的问题。

近二十多年来,高效磨削有了很大的发展,出现了高速磨削、深切缓进给磨削、高速重负荷磨削、砂带强力磨削等高效磨削方法。国外已普遍采用 $45\sim 50\text{m/s}$ 的高速磨削; $60\sim 80\text{m/s}$ 的高速磨床已经用于生产,国内外业已进行过 120m/s 的高速磨削试验。高速深切快进磨削技术已被采用,这种磨削技术往往是既提高砂轮速度,加大进给速度,又同时采用 CBN 超硬磨料砂轮,效率极高。例如西德阿亨大学采用陶瓷结合剂 CBN 砂轮,砂轮速度为 120m/s ,以 2m/min 的进给速度一次成形磨削 $\phi 50\text{mm}$ 麻花钻沟槽,单位砂轮宽度金属切除率达 $150\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ 。深切缓进给磨削可有效地解决难加工材料成形表面的加工问题,例如燃气轮机、航空发动机高温合金叶片榫槽、滚动轴承沟槽、花键槽等的加工。为了解决缓进给磨削时的磨削表面烧伤及保持砂轮成型精度的问题,英国布里斯托大学首先开发了连续修整磨削技术。英国罗尔斯·罗伊斯公司采用这一新技术磨削航空发动机叶片。生产率比一般缓进磨削高二倍以上,砂带磨削也已发展为一种高效磨削加工方法。单位宽度金属切除率可达 $400\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ 。当然,砂带磨削还可获得高的加工精度,例如加工电动机转子时,加工精度可控制在 $3\sim 7$ 微米范围内。另外,砂带磨削还可高效去除毛刺。

由于 CNC (MNC)、DNC 等集成制造系统的发展,对磨削加工提出了适应性控制的要求,要求在加工过程中根据输出量的变化自动调节各项磨削参数,保证预定的加工要求。适应控制磨削中的关键是要在磨削过程中检测磨削力、功率、砂轮径向磨损量或磨削表面粗糙度等。不管是切削效能适应性控制,还是几何适应性控制,都要使用精确可靠的传感器,例如美国威斯康星大学的约束适应性控制系统 (ACC),使用的是涡流式电感传感器,磨

削尺寸精度可控制在 5 微米以内；又如美国 Cincinnati Milacron 公司所属的 Heald 公司采用恒磨削力控制系统磨削轴承内环，磨削尺寸分散范围为 7 微米，不圆度在 1.9 微米以内。

随着激光技术及大规模集成电路的发展，使精密磨削加工向着超精密级方向发展。兰宝石单晶体的超精研，硅片及其它单晶材料的超精研、光学玻璃的超精加工等均属此类。粘弹性流动加工、喷射加工等自由磨粒加工方法已用于硬脆材料加工或镜面抛光。国外采用了磁悬浮研磨抛光技术，用 4 微米微细磨粒对丙烯酸树脂进行精密加工，获得 $R_a < 0.4$ 微米的极光滑表面。我国决定在“七五”期间发展纳米（ 10^{-9} 米）级特高精度机床，必将进一步推动磨削加工技术的发展。

磨削技术的发展为磨削理论研究提出了新课题。近十几年来，国内外对静、动态磨削输入参数、静、动态磨削力、磨削温度、砂轮磨损、砂轮修整、砂轮表面地貌、磨削液及其作用、磨削零件表面完整性等进行了系统的研究，对磨削参数、砂轮特性参数以及砂轮修整参数对磨削性能的影响也作了深入的研究，使磨削理论更加完整，具有指导意义，可预测磨削力、磨削温度、磨削表面粗糙度及磨削残余应力等。磨削理论研究促进了磨削技术的发展，为提高产品质量、提高生产率及降低成本奠定了基础。

作者根据当前磨削理论的研究现状及磨削技术的发展编写了此书。书中既系统阐述了磨削基本理论，又论述了高效磨削加工及难加工材料加工中的若干问题。

本书第一、六、八、九章由任敬心编写，第三章由华定安编写，第二、五章由周文亚编写，第四、七章由黄奇编写。任敬心、华定安任主编。张智龙、康仁科、徐庆中同志为书稿、插图做了很多工作。

书稿完成后，由西安交通大学乐兑谋教授审阅，提出了很多宝贵的修改意见，在此谨致衷心谢意。

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正，不胜感激。

作者

1987 年 8 月于西安

符 号 表

A	面积	K	磨削系统刚度
α	导热系数	l_a	砂轮与工件接触长度
a_{eq}	当量磨削厚度	l_w	工件磨削长度
a_p	磨削深度	N	冷作硬化程度
a_{pe}	实际磨削深度	N_t	砂轮单元长度静态有效磨刀数
a_g	未变形磨屑厚度	N_s	砂轮单位面积静态有效磨刀数
$\bar{a}_g$	未变形平均磨屑厚度	N_d	动态有效磨刀数
a_{gmax}	未变形最大磨屑厚度	N_e	磨削功率
a_d	砂轮修整深度	n_s	砂轮速度
b_s	砂轮宽度	n_w	工件速度
b	磨削宽度	P_K	磨料占砂轮体积的百分率
b_g	磨粒平均切削宽度	P_F	气孔占砂轮体积的百分率
c	比热容	P_B	结合剂占砂轮体积的百分率
d_s	砂轮直径	$\bar{p}$	磨粒磨钝平面与工件表面的平均接触压强
d_w	工件直径	$\bar{p}_m$	粘附平面与工件表面的平均接触压强
d_n	砂轮当量直径	Q	热量
E	弹性模量	q	磨削区总发热量; 砂轮与工件的速度比
e_s	比磨削能	q_d	点热源发热强度
F_n	法向磨削力	q_g	线热源发热强度
F_t	切向磨削力	q_m	面热源发热强度
F'_n	单位宽度法向磨削力	R_a	加工表面粗糙度(轮廓算术平均偏差)
F'_t	单位宽度切向磨削力	R_z	加工表面粗糙度(显微不平度十点高度)
f_r	径向进给量(双行程进给量为 mm/dst, 单行程进给量为 mm/st); 横向进给量	T	砂轮耐用度
f_a	轴向进给量	t	磨削时间
f_d	砂轮修整进给量	V_w	金属切除体积
f_g	单颗磨粒的磨削力	V'_w	单位宽度金属切除体积
G	磨削比	V_s	砂轮损耗体积; 砂轮体积
HV	已加工表面显微硬度	V_K	磨粒体积
HV'	金属基体显微硬度	V_B	结合剂体积
HB	布氏硬度值		
HRA	洛氏A标度硬度值		
HRC	洛氏C标度硬度值		

V_p	气孔体积	θ	磨削温度, 磨粒顶圆锥半角
V_b	结合剂桥断面面积	A_w	工件切除参数
v_s	砂轮速度	A_s	砂轮切除参数
v_w	工件速度	λ	导热系数
v_r	径向切入速度	λ_s	磨刃间距
W_w	磨屑重量	λ_{sl}	连续磨刃间距
W_s	砂轮损耗重量	μ	摩擦系数
W_g	损耗磨粒的重量	ν	泊松比
Z_w	金属切除率	ρ	密度
Z_w^l	单位宽度金属切除率	σ	残余应力
Z_s	砂轮损耗率	σ_b	抗拉强度
γ	比重	σ_{bb}	抗弯强度
γ_g	磨粒前角	σ_{bc}	抗压强度
AA	一颗磨粒的平均磨钝顶面积	τ	剪应力, 剪切强度
δ	磨粒粘附物的平均厚度	τ_p	时间常数
ε	应变; 切向磨削力与法向磨削力比值	ψ	砂轮与工件接触角

目 录

第一章 磨削过程与磨削参数	(1)
§ 1-1 磨削特点	(1)
§ 1-2 磨削过程分析	(5)
§ 1-3 外圆切入磨削的磨削循环	(9)
§ 1-4 外圆纵向磨削过程的特征	(12)
§ 1-5 砂轮与工件的接触长度	(16)
§ 1-6 砂轮有效磨刃数	(22)
§ 1-7 未变形切屑厚度	(25)
§ 1-8 当量磨削厚度 a_{eq}	(30)
参考文献	(34)
第二章 磨削力	(35)
§ 2-1 磨削力数学模型	(35)
§ 2-2 磨削力的测量与经验公式	(42)
§ 2-3 动态磨削力	(46)
§ 2-4 磨削力的尺寸效应	(51)
参考文献	(53)
第三章 磨削温度	(54)
§ 3-1 磨削温度的计算	(54)
§ 3-2 磨削温度测量	(78)
§ 3-3 影响磨削温度的因素	(87)
参考文献	(90)
第四章 砂轮磨损	(91)
§ 4-1 砂轮磨损形式及原因	(91)
§ 4-2 砂轮磨损特征	(101)
§ 4-3 砂轮耐用度	(105)
§ 4-4 砂轮磨削性能的评定指标	(116)
§ 4-5 砂轮磨损测量方法	(123)
参考文献	(128)
第五章 砂轮修整	(130)
§ 5-1 普通磨料砂轮的修整	(130)
§ 5-2 超硬磨料砂轮的修整	(148)
参考文献	(158)
第六章 磨削液	(159)
§ 6-1 磨削液的特性	(159)

§ 6-2 磨削液的效应	(171)
§ 6-3 磨削液的供给方法	(176)
参考文献	(181)
第七章 磨削加工零件的表面完整性	(182)
§ 7-1 磨削表面粗糙度	(182)
§ 7-2 磨削残余应力	(191)
§ 7-3 磨削表层的硬化与烧伤	(208)
§ 7-4 磨削表面完整性参数间的综合影响及改善措施	(214)
参考文献	(220)
第八章 高效磨削	(222)
§ 8-1 高速磨削	(222)
§ 8-2 缓进磨削	(238)
参考文献	(253)
第九章 难加工材料磨削	(254)
§ 9-1 钛合金磨削	(254)
§ 9-2 高温合金磨削	(273)
§ 9-3 不锈钢磨削	(279)
参考文献	(287)
附 录	(288)
A-1 误差函数 $\text{erf}(p)$ 表	(288)
A-2 特殊函数 $\psi(p)$ 表	(289)
A-3 贝塞尔函数表	(290)
A-4 特殊函数 $i(p, \xi)$ 表	(291)
A-5 国内外磨料品种代号对照表	(293)
A-6 主要国家磨料粒度尺寸对照表(一)	(294)
A-7 主要国家磨料粒度尺寸对照表(二)	(295)
A-8 主要国家磨具硬度代号对照表	(296)
A-9 主要国家磨具组织号对照表	(297)
A-10 主要国家磨具结合剂代号对照表	(298)
A-11 主要国家金刚石磨具结合剂代号对照表	(298)
A-12 主要国家磨具形状尺寸及特性标志方法	(298)

第一章 磨削过程与磨削参数

磨削过程与切削过程有很大差别。车削的总切削能几乎全部转变为热量，约有90%的切削能消耗于切屑中，仅5%的切削能消耗于工件表面上，使工件表面生成一定的残余应力，而磨削则不然，大约70~80%的总切削能消耗于工件上，使被加工表面层有明显的塑性变形，形成较大的表层残余应力。

磨削时的输入条件（磨床——静、动刚度、动态特性；工件——几何形状、材料性能；砂轮——特征、地貌、形状、修整条件；磨削用量——砂轮速度、工件速度、进给量；磨削液）对磨削过程有很大的影响，产生若干磨削现象，例如砂轮磨损、磨削力、磨削温度、颤振等，从而决定了输出条件（工件精度、表面完整性、磨削效率及磨削成本等）。分析研究磨削过程与磨削现象，对改进磨削工艺、提高磨削生产能力及改善零件加工表面完整性有重要意义。

为了研究磨削加工中输入条件与输出条件之间的关系，还必须研究静态与动态磨削参数，例如砂轮与工件的接触弧长、砂轮有效磨粒数、未变形磨屑厚度等。

§ 1-1 磨 削 特 点

磨削特点在很大程度上取决于所用的工具——砂轮。磨削用的砂轮是由磨粒、结合剂及气孔组成的，也就是说砂轮的体积是这三者之和，即

$$V_s = V_K + V_B + V_P \quad (1-1)$$

式中 V_s ——砂轮的体积；
 V_K ——磨粒体积；
 V_B ——结合剂体积；
 V_P ——气孔体积。

若用 P_K 、 P_B 及 P_P 分别代表磨粒、结合剂及气孔体积所占砂轮体积的百分率，则

$$P_K + P_B + P_P = 100\%$$

图 1-1 示出砂轮中磨粒、结合剂和气孔三元结构。磨粒、结合剂和气孔的体积百分率随砂轮粒度和硬度的要求而异。图中标出了砂轮可以制造的极限范围，即

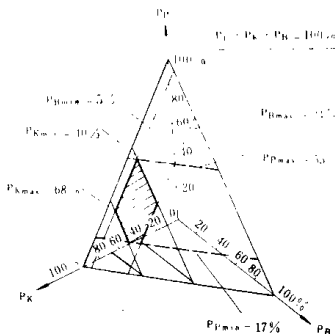


图 1-1 砂轮中磨粒、结合剂和气孔三元结构图

$$\begin{aligned}
P_{Kmax} &= 68\%; & P_{Kmin} &= 40\% \\
P_{Bmax} &= 24\%; & P_{Bmin} &= 5\% \\
P_{Pmax} &\approx 55\%; & P_{Pmin} &= 17\%
\end{aligned}$$

在此范围之外，应采用特殊工艺制造砂轮。

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，磨粒的形状是很不规则的。磨粒形状不易测量，可用形状系数 K_ϕ 表示^[1]

$$K_\phi = \frac{\varphi_p}{\varphi_i} = \frac{W_p}{W_i} \quad (1-2)$$

式中 φ_p ——磨粒的实际形状；
 φ_i ——近似规则的几何形状；
 W_p ——磨粒实际重量，
 W_i ——与磨粒材料相同的球体重量。

棕刚玉和黑碳化硅的形状系数比白刚玉和绿色碳化硅的大，这说明它们更近似于椭球的形状。从宏观上看，磨粒形状可分别以长(l)，宽(b)，高(h)表示，如图 1-2, a 所示。磨粒切削刃的特征参数为顶锥角 2θ 及尖端圆弧半径 ρ_θ ，如图 1-2, b 所示，其大小与磨粒尺寸有一定关系。图 1-3^[1] 示出氧化铝磨粒顶锥角 2θ 、尖端圆弧半径 ρ_θ 与磨粒尺寸 b 的关系。实际上每颗磨粒有多个顶尖，因而有多个顶锥角。按统计规律知顶锥角在 80° 到 145° 之间变动。顶锥角小于 90° 的磨粒尖角所占比例增多，表示以正前角切削的磨粒的概率加大，所以，顶锥角 2θ 所占的比例是非常重要的，它关系到磨粒的切削性能。 $2\theta < 90^\circ$ 所占百分比与磨粒尺寸有关，见图 1-3。

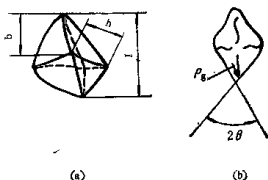


图 1-2 磨粒的形状

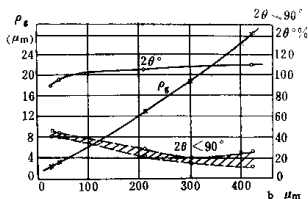


图 1-3 2θ 、 ρ_θ 、及 $2\theta < 90^\circ$ 的百分比与磨粒尺寸的关系

用统计方法证实了以下规律：

1. 2θ 随磨粒尺寸增大而增大，在磨粒尺寸 $b = 20 \sim 70 \mu\text{m}$ 范围内， 2θ 从 90° 增至 100° ，而在磨粒尺寸 $b = 70 \sim 420 \mu\text{m}$ 范围内， 2θ 从 100° 增至 110° ；
2. ρ_θ 随磨粒尺寸增大而增大，在 $b = 30 \sim 420 \mu\text{m}$ 范围内， ρ_θ 几乎是线性地从 $3 \mu\text{m}$ 增至 $28 \mu\text{m}$ ；
3. 刚玉磨料的顶锥角 2θ 和尖端圆弧半径 ρ_θ 要比碳化硅磨料大些，见表 1-1。

表 1-1 磨粒顶角 2θ 及尖端磨弧半径 ρ_g

粒 度 号	2θ		ρ_g	
	刚 玉	碳 化 硅	刚 玉	碳 化 硅
36	110	107	35	30
60	108	104	18	16
80	108	104	13	8

另外, 由于砂轮结构及制造工艺方面的原因, 磨粒在砂轮中的位置分布是随机的, 在 x 、 y 、 z 坐标空间内的分布状态如图 1-4 所示^[3]。图中, xy 坐标平面即砂轮外层工作平面。沿平行于 yz 坐标平面所截取的磨粒轮廓图即所谓砂轮工作表面形貌图。由图中可以看出磨粒切削刃间距 λ_s 及磨粒切削刃尖端距砂轮表面的距离 z_s 均不一定相等, 因而在磨削过程中有的切削刃是有效的, 而有的切削刃则是无效的; 即使是有效切削刃, 其切削截面积的大小也不会相同。

根据上述分析, 可将磨削特点归纳如下:

1. 由于在不同粒度和硬度的砂轮上, 每平方米砂轮表面上的磨粒数约为 60~1400 颗^[1], 所以砂轮工作磨粒数较多。但是, 工作磨粒中仅有一部分起切削作用,

另一部分只在工件表面上划出沟痕, 还有一部分仅与工件表面摩擦。根据砂轮特性及工作条件的不同, 有效磨粒数约占砂轮表面总磨粒数的 10~50%。

2. 磨刀的前角 γ_g 是负前角, 一般, $\gamma_g = -15^\circ \sim -60^\circ$ 。根据 H. Opitz 等人的研究结果^[4]知, 刚玉砂轮经修整后的平均磨刀前角 $\gamma_g = -80^\circ$, 经过一段磨削后 ($V_w = 500 \text{ mm}^3/\text{mm}$), 由于机械-热磨损的缘故, 使磨刀前角的中值变动为 $\gamma_g = -85^\circ$ (图 1-5), 而且磨刀前角的分散范围减小。这样大的负前角仍能切出连续型切屑。图 1-6 为使用白刚玉砂轮 (GB 60 ZR₁A) 在 $v_s = 30 \text{ m/s}$ 、 $v_w = 8 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 0.01 \text{ mm}$ 条件下磨 45 号钢时所得的磨屑型式, 由该图可见磨屑型式有细长切屑、挤裂状连续型切屑及被高温熔成的球状屑。图 1-7 为使用绿色碳化硅砂轮 (TL 46R₁A) 在 $v_s = 30 \text{ m/s}$ 、 $v_w = 8 \text{ m/min}$ 、 $a_p = 0.01 \text{ mm}$ 条件下磨削 TC9 钛合金时所得的磨屑型式, 由该图可见, 磨屑呈片状, 挤裂较严重。

3. 一颗磨粒切下的切屑体积很小, 切屑厚度大约为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ mm}$, 切下的切屑体积也不过 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ mm}^3$, 这比铣削时铣刀盘的每个刀齿所切下的切屑体积小得多, 约为铣削时的 $1/40000 \sim 1/50000$ 。根据尺寸效应原理, 在磨粒切屑厚度非常小的情况下, 单位磨

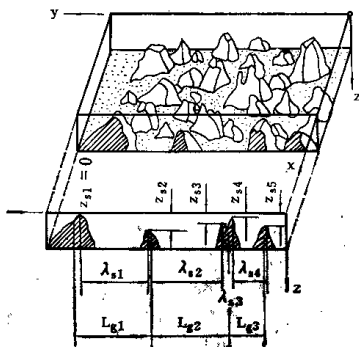


图 1-4 砂轮工作表面磨粒空间图

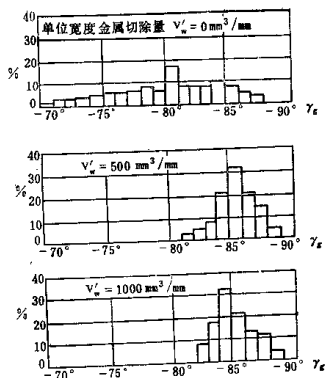


图 1-5 磨粒前角的分布范围

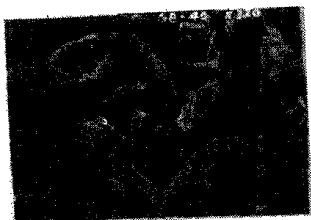


图 1-6 用GB 60 ZR1A 砂轮磨削 45 号钢的磨屑扫描电镜图 (X320)



图 1-7 用 TL46R1A 砂轮磨削 TC9 钛合金的磨屑扫描电镜图 (X160)

削力很大。由实验得出磨削、微量铣削及车削条件下的单位剪切能 e （切屑内部剪切所需的能量）与切屑厚度 a 的关系如图 1-8 所示^[5]。由图中可见，切屑厚度愈小，单位剪切能愈大。单位磨削能 e_s 与磨屑厚度 a_g 的关系如下

$$e_s = \frac{k}{a_g} \quad (1-3)$$

式中 k ——常数。

4. 磨削速度 v_s 很高，一般 $v_s = 15 \sim 80$ m/s，因此，磨粒与被加工材料的接触时间极

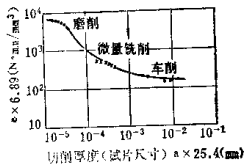


图 1-8 单位剪切能 e 与切屑厚度 a 的关系 (15Mn 合金结构钢)

短,约为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{S}$ 。在极短时间内产生的大量磨削热使磨削区产生高温($400 \sim 1000^\circ\text{C}$),因而工件易烧伤,产生有害的残余拉应力,甚至产生裂纹。另外,磨削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(法向磨削力 F_n 与切向磨削力 F_t 之比)值较大,一般 $F_n/F_t \approx 3$,而车削的 F_n/F_t 值只有 0.5 左右。

§ 1-2 磨削过程分析

一、磨粒切削刃的磨削模型

磨粒切削刃的磨削模型如图 1-9^[6]所示,它经历了滑擦(弹性变形)、耕犁(塑性变形)及切削(形成切屑,沿磨粒前面流出)的过程,使工件表面形成热应力与变形应力。磨粒在切削表面上的滑擦、耕犁和切削与磨粒状况和被加工材料性质有关。

上述的三个过程与砂轮速度有关,砂轮速度愈大,弹塑性区就愈小。弹塑性区还与每颗磨粒的实际磨削量有关。磨削过程中,由于磨粒是由结合剂弹性支持的,在磨削力的作用下会发生退让,使砂轮与工件的实际接触曲线不同于理论接触曲线,另外,磨削后的工件表面还会发生弹性恢复,使最终形成的表面生成曲线也不同于实际的砂轮与工件的接触曲线,这些均影响磨粒磨削时的弹、塑性接触区,如图 1-10 所示。

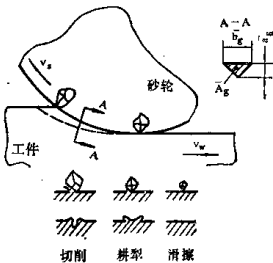


图 1-9 磨粒切削刃的磨削模型

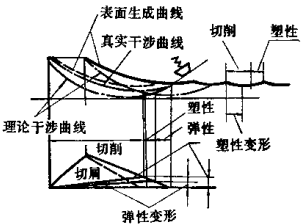


图 1-10 磨粒的弹性退让与弹塑性接触区

R.S.Hahn 和 R.P.Lindsay 通过试验得出了单位磨削宽度法向力 F'_n ($F'_n = F_n/b$, b 为磨削宽度) 与切入进给量 f_r (磨削深度 a_p) 间的关系^[7], 见图 1-11, 该图进一步阐明了磨削过程的滑擦、耕犁和切削三个阶段。在图示条件下, 当单位磨削宽度法向力 $F'_n < 0.6 \text{KN/m}$ 时, 只产生滑擦, 并不切除金属; 当 F'_n 在 $0.6 \sim 2.6 \text{KN/m}$ 范围内, 起耕犁作用, 使工件材料向磨粒两旁隆起, 见图 1-9; 而当 $F'_n > 2.6 \text{KN/m}$ 时, 开始形成切屑, 砂轮以高的金属切除率切削。磨料与工件材料改变, 上述的临界单位磨削宽度法向力也将改变。

研究结果表明,上述三个磨削阶段与磨削时的切削厚度的大小有关。磨粒的切削厚度在临界切削厚度 $a_{p\min}$ 以下时,磨粒只在工件表面上滑擦,不形成切屑。临界切削厚度 $a_{p\min}$ 是能够产生切削作用的最小切入量,它与磨削速度、工件材料及磨刀状况等有关,而与磨料种类无关。临界切削厚度 $a_{p\min}$ 可参见表1-2^[8]。

由表1-2可见,材料韧性愈大, $a_{p\min}$ 愈大,表征材料生成切屑能力的 k 值愈大。显然, k 值愈小愈好。磨削速度增高, k 值减小,也就是说,即便磨粒尖端圆弧半径 ρ_g 值较大的钝磨粒也能在高速下生成切屑。

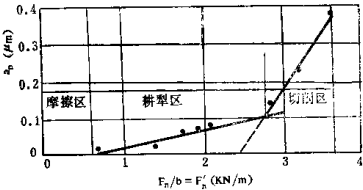


图 1-11 单位磨削宽度法向力 F'_n 与磨削深度 a_p 的关系
(内圆磨、横磨、平面磨中碳铬钼钢, HRC 53~55, $d_e=53.08\text{mm}$, GB80Z18A, $v_s=39\text{m/s}$, $v_w=2.74\text{m/s}$)

表 1-2 磨粒的临界切削厚度 $a_{p\min}$

工 件 材 料	$\rho_g(\mu\text{m})$	$a_{p\min}(\mu\text{m})$	$k = \frac{a_{p\min}}{\rho_g}$
淬硬的碳钢(0.4%C)	6	1.5	0.25
青 铜	6	2	0.30
铸 铁	6	3	0.50
退火的碳钢(0.4%C)	6	4	0.67
硅铝合金	6	5	0.83
铜	6	5	0.83
黄 铜	6	7	1.17

二、磨削过程的模型

图1-12为外圆切入磨削过程的模型。图中, K_{ws} 、 K_{as} 分别代表磨削时工件支架系统刚度及砂轮架系统刚度, K_{ws} 代表工件和砂轮的合成系统刚度。磨削时,当砂轮架以一定径向进给速度 v_r 切入时,从工件上切除材料,使工件以 v_w 的速度减小,同时,砂轮也有一定的磨损,使砂轮以 v_s 的速度减小,三者的关系为

$$v_r = v_w + v_s \quad (1-4)$$

由于砂轮磨损速度 v_s 工件直径减小速度 v_w 相比十分微小,所以当砂轮架弹性位移达到稳定状态之后,可视 v_w 基本上与砂轮架径向进给速度 v_r 相等。

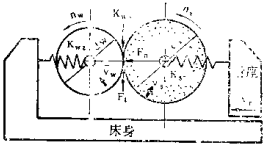


图 1-12 外圆切入磨削过程的模型

磨削过程中, 金属切除率 Z_w 及砂轮损耗率 Z_s 分别为

$$Z_w = \pi d_w b v_w \quad \text{mm}^3/\text{s} \quad (1-5)$$

$$Z_s = \pi d_s b v_s \quad \text{mm}^3/\text{s} \quad (1-6)$$

式中 d_w ——工件直径, mm;
 d_s ——砂轮直径, mm;
 b ——磨削宽度, mm。

金属切除率 Z_w 和砂轮损耗率 Z_s 取决于砂轮与工件接触区的法向磨削力 F_n 。图 1-13 及图 1-14 分别示出易磨材料及难磨材料的 Z_w 和 Z_s 与 F_n 的关系。由图中可见, 磨削易磨材料及难磨材料时均存在一个“临界磨削力” F_{n0} ; 在达到 F_{n0} 之前, 磨削过程只有滑擦, 而无切削作用。还可看出, 易磨材料的临界磨削力小于难磨材料的临界磨削力。对于某些易磨材料, 临界磨削力 $F_{n0} = 0$ 。

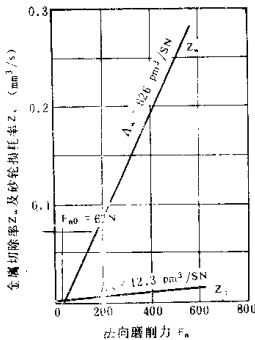


图 1-13⁽¹⁾ 易磨材料金属切除率 Z_w 和砂轮损耗率 Z_s 与法向磨削力 F_n 的关系 (内圆、切入平面磨削中碳铬铜钢, 砂轮 GB702A, 砂轮当量直径 $d_e = 737\text{mm}$, $v_s = 61\text{m/s}$, $v_w = 0.254\text{m/s}$)

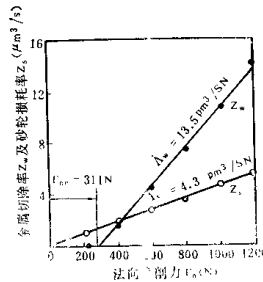


图 1-14 难磨材料金属切除率 Z_w 和砂轮损耗率 Z_s 与法向磨削力 F_n 的关系 (切入平面磨削钨系高速钢 W8Cr4Mo5V4, HRC65, 砂轮 GB802A, $v_s = 61\text{m/s}$, $v_w = 1.78\text{m/s}$)

如图 1-13 及图 1-14 所示, 在切削作用区内, 金属切除率 Z_w 和砂轮损耗率 Z_s 与法向磨削力 F_n 之间呈线性关系, 因此可写成

$$Z_w = A_w(F_n - F_{n0}) \quad \text{pm}^3/\text{sN} \quad (1-7)$$

$$Z_s = A_s(F_n - F_{n0}) \quad \text{pm}^3/\text{sN} \quad (1-8)$$

式中 A_w 及 A_s 分别代表工件与砂轮的切除参数, 其意义是工件、砂轮在单位时间内法向磨

(1) 图 1-13 中, $A_w = 626\text{pm}^3/\text{sN} = 626 \times 10^{-12}\text{m}^3/\text{sN}$, 即 p 为 10^{-12} 的符号。

削力的作用下, 工件被切除、砂轮被损耗的体积。

将式(1-5)及(1-6)代入式(1-7)及(1-8)后得

工件直径变化速度

$$\bar{v}_w = \frac{A_w(F_n - F_{n0})}{\pi d_w b} \quad (1-9)$$

砂轮直径变化速度

$$\bar{v}_s = \frac{A_s(F_n - F_{n0})}{\pi d_s b} \quad (1-10)$$

磨削时, 希望 $\bar{v}_w$ 较大, 而 $\bar{v}_s$ 较小, 也就是说希望工件切除参数 A_w 较大, 而砂轮损耗参数 A_s 较小。

由式(1-9)可得

$$(F_n - F_{n0}) = \frac{\pi d_w b \bar{v}_w}{A_w}$$

由于 $\bar{v}_w$ 近似地等于砂轮架的径向进给速度 v_r , 故可将上式写成

$$F_n - F_{n0} = \frac{\pi d_w b v_r}{A_w}$$

将上式代入式(1-10)后得

$$\bar{v}_s = \left[\frac{A_w}{A_s} \frac{d_s}{d_w} \right] \bar{v}_w \quad (1-11)$$

根据式(1-4)也可将上式写成

$$\bar{v}_s = \frac{v_r}{1 + \left[\frac{A_s}{A_w} \frac{d_w}{d_s} \right]} \quad (1-12)$$

式(1-11)反映了磨削过程中某一定值 $\bar{v}_w$ 下的砂轮磨损速度, 人们把比值 A_w/A_s 称作磨削比 G , 即

$$G = \frac{A_w}{A_s} \quad (1-13)$$

对于易磨材料, 磨削比较大, 例如 $G = 50$, 此时, 在稳定状态下磨削, 所以工件切除速度 $\bar{v}_w$ 与磨床径向进给速度 v_r 十分接近。对于难磨材料, 磨削比很小, 例如 $G = 3$, 此时, 砂轮损耗速度 $\bar{v}_s$ 较大, 工件切除速度 $\bar{v}_w$ 与磨床径向进给速度 v_r 相差较多, 所以 $\bar{v}_w$ 值必须按式(1-12)计算。

即使采用同一砂轮磨削同样的材料, 磨削比 G 也可能不是常数, 它受磨削条件的支配, 亦即受法向磨削力的支配。图 1-15^[9] 示出用单晶刚玉砂轮(GD60Z₁7A)回 转 平 磨 GCr15、HRC60 时, $\bar{v}_w(Z_s)$ 、 $\bar{v}_s(Z_s)$ 和 G 与单位宽度法向磨削力 F'_n 间的关系曲线。由图中可见, 工件切除速度 $\bar{v}_w$ 与单位宽度法向磨削力 F'_n 呈线性关系, 而砂轮损耗速度 $\bar{v}_s$ 却不与单位宽度法向磨削力 F'_n 呈线性关系, 图中示出了三个不同斜率的直线段, 这三个直线段代表了一条曲线。因此, 不同单位宽度法向磨削力 F'_n 的磨削比 G 是不等的。砂轮与工件间作用的法向力愈大, 砂轮损耗加剧, 磨削比愈低。但并非所有材料的磨削均是如此, 如图 1-16^[9] 所示, 在用 GD70Z₁6A 砂轮内圆磨削高温合金 GH145 时, 在某一单位宽度法向磨削力的条件下, 磨削比 G 最大。这就是说当把 F'_n 控制在某一范围内时, 磨削效果最好。