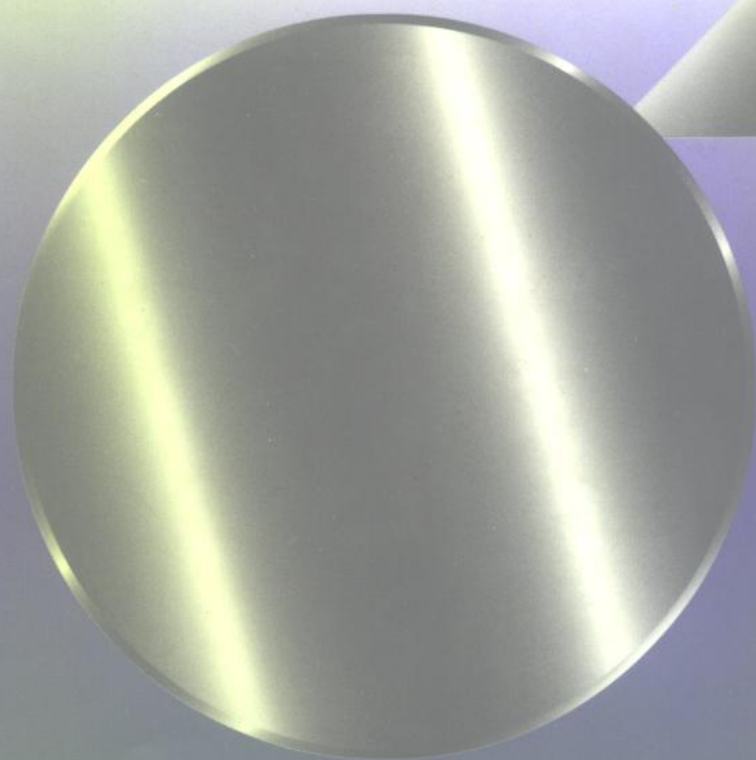


难加工材料的磨削

Grinding of Difficult-to-cut Materials

任敬心 康仁科 史兴宽 编著



国防工业出版社

难加工材料的磨削

Grinding of Difficult-to-cut Materials

任敬心 康仁科 史兴宽 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

难加工材料的磨削/任敬心等编著. - 北京:国防工业出版社, 1999.2

ISBN 7-118-01996-8

I. 难… II. 任… III. 难加工材料切削-磨削 IV. TG580.699

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 25523 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 16¼ 426 千字
1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月北京第 1 次印刷
印数:1-2000 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

前 言

随着科学技术和工业的发展,人们对机械产品及其零部件使用性能的要求越来越高,例如,要求材料比强度高,耐高温,热强度高,能承受复杂应力以及耐腐蚀等,为此,许多零件采用新型材料制造。在这些新型材料中,许多是难加工材料,例如高温合金、钛合金、超高强度钢、不锈钢以及高温结构陶瓷等。它们具有一系列优良的物理机械性能,因此在航空、航天、航海、石油、化工等工业部门中得到了广泛的应用。

所谓难加工材料系指切削(磨削)加工性比较差的材料。通常采用相对切削加工性系数 K_r 表示材料的相对切削加工性,即 $K_r = v_{60}/(v_{60})$, 式中, (v_{60}) 为在刀具寿命定为 60min, 切削 $\sigma_b = 0.637\text{GPa}$ 的 45 钢(以该材料为基准)时所允许的切削速度; v_{60} 为在刀具寿命定为 60min, 切削某种材料所允许的切削速度。凡 $K_r > 1$ 的材料,其切削加工性比 45 钢好; $K_r < 1$ 的材料,其切削加工性比 45 钢差。一般认为 $K_r < 0.5$ 时,属难加工材料。钴基高温合金的 $K_r = 0.05 \sim 0.15$, 镍基高温合金的 $K_r = 0.08 \sim 0.2$, 铁基高温合金的 $K_r = 0.15 \sim 0.3$; 钛合金的 $K_r = 0.25 \sim 0.38$; 奥氏体及马氏体不锈钢的 $K_r = 0.5 \sim 0.7$, 沉淀硬化不锈钢的 $K_r = 0.3 \sim 0.4$; 超高强度钢的 $K_r = 0.2 \sim 0.45$ 。难加工材料在磨削时的显著特点是磨削力大,磨削温度高,磨削表面粗糙度差,加工表面层形成较大的残余拉应力,砂轮寿命低,磨削比很低,而且极易发生磨削烧伤。由于磨削加工表面完整性差,因而降低了材料的疲劳寿命。

为了提高难加工材料的磨削加工性和表面完整性,近 20 年来,我国在难加工材料的磨削技术方面进行了广泛的研究,这些研

究主要集中在以下方面,如难加工材料的磨削机理;难加工材料的磨削加工性;难加工材料的磨削加工表面完整性;适用于难加工材料磨削的磨削液;立方氮化硼(CBN)新型超硬磨料砂轮在难加工材料磨削中的应用;砂轮修整及其对砂轮磨削性能的影响;难加工材料的缓进磨削和低应力磨削;难加工材料合理磨削参数及砂轮的选择等。将这些宝贵的研究成果和技术数据编纂成书,必将有助于提高难加工材料的磨削技术水平。

本书以西北工业大学所取得的难加工材料磨削研究成果为基础,吸取了国内外有关院校、工厂和研究所的研究成果和先进经验。黄奇、徐庆中、张智龙、陈玉华、罗先义、孟庆国、邵超、郭新安、徐庆九、刘红星、杨威、杨茂奎、李雅卿、王西彬、胡红梅、滕霖以及吴小玲等同志曾参加过与本书有关的难加工材料磨削加工技术的研究工作,他们卓有成效的研究工作对本书的编写帮助很大。特别值得怀念的是华定安教授,他为西北工业大学难加工材料磨削的研究工作奠定了基础,做出了无私的、巨大的奉献。趁本书出版之机,还要衷心感谢周文亚教授、韩淑媛副教授、王西彬博士、陈明博士、徐西鹏博士及唐建设博士等,他们在难加工材料磨削技术方面的研究成果以及所提供的技术资料和图片对本书的编写大有裨益。本书编写过程中,得到西北工业大学科研处及飞行器制造工程系领导的大力支持与帮助。原京庭副主任对本书的编写也起到了很大的推动作用,陈景蕙、夏力农和吴小玲等同志为整理书稿和插图付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢。

本书所涉及到的难加工材料的磨削研究内容,有许多得到了科研基金的资助,其中,钛合金磨削曾得到国家自然科学基金及航空科研基金的资助;高温合金、超高强度钢及高温结构陶瓷的磨削曾得到航空科研基金的资助,上述研究还得到了航空工业总公司航空工艺研究中心切削研究系统的资助。在此表示诚挚的谢意。

参加本书编写的有任敬心(第一、二、三、五章)、康仁科(第四章)及史兴宽(第六章)。由于水平有限,书中难免有误和不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

符号说明	1
第一章 磨削原理	4
§ 1-1 磨削特点	4
§ 1-2 磨削过程与磨削要素	8
§ 1-3 磨削力	19
§ 1-4 磨削温度	31
§ 1-5 磨削加工表面变质层	44
§ 1-6 砂轮钝化与砂轮修整	73
第二章 钛合金磨削	98
§ 2-1 钛合金材料特性及磨削特点	98
§ 2-2 磨削钛合金的砂轮磨损	103
§ 2-3 磨削钛合金的磨削力	118
§ 2-4 磨削钛合金的磨削温度	129
§ 2-5 钛合金磨削加工表面完整性	141
§ 2-6 磨削钛合金的磨削液	156
§ 2-7 立方氮化硼(CBN)砂轮磨削钛合金	176
§ 2-8 钛合金的缓进磨削	187
§ 2-9 钛合金磨削用量及砂轮参数的选择	205
第三章 高温合金磨削	219
§ 3-1 高温合金材料特性及磨削特点	219
§ 3-2 高温合金的磨削力和磨削温度	223
§ 3-3 磨削高温合金的砂轮磨损	240
§ 3-4 高温合金磨削加工表面完整性	245

§ 3-5	高温合金的缓进给磨削	282
§ 3-6	高温合金磨削用量及砂轮参数的选择	300
第四章	超高强度钢的磨削	310
§ 4-1	超高强度钢的性能和磨削特点	310
§ 4-2	超高强度钢的磨削力和磨削温度	314
§ 4-3	超高强度钢的磨削烧伤及其判别方法	324
§ 4-4	超高强度钢磨削表面完整性	337
§ 4-5	超高强度钢低应力无烧伤磨削的措施	357
§ 4-6	超高强度钢磨削用量及砂轮参数选择	360
第五章	不锈钢磨削	369
§ 5-1	不锈钢材料特性及磨削特点	369
§ 5-2	磨削不锈钢的砂轮磨损	372
§ 5-3	磨削不锈钢的磨削力	382
§ 5-4	不锈钢磨削加工表面完整性	391
§ 5-5	不锈钢磨削用量及砂轮参数的选择	407
第六章	高温结构陶瓷磨削	423
§ 6-1	高温结构陶瓷的性能及磨削特点	423
§ 6-2	高温结构陶瓷的磨削过程及磨削表面的 微观形貌	428
§ 6-3	高温结构陶瓷的磨削力	442
§ 6-4	高温结构陶瓷的磨削温度	456
§ 6-5	高温结构陶瓷的磨削用量及砂轮选择	473
§ 6-6	高温结构陶瓷的几种新磨削方法	483
参考文献		499

CONTENTS

Direction of Symbol	1
Chapter1 Principle of Grinding	4
§ 1-1 Characteristic of Grinding	4
§ 1-2 Grinding Process and Grinding Factors	8
§ 1-3 Grinding Force	19
§ 1-4 Grinding Temperature	31
§ 1-5 Damaged Layer of Ground Surface	44
§ 1-6 Wear and Dressing of Grinding Wheel	73
Chapter2 Grinding of Titanium Alloy	98
§ 2-1 Properties and Grindability of Titanium Alloy	98
§ 2-2 Wear of Grinding Wheel in Grinding Titanium Alloy	103
§ 2-3 Grinding Force of Titanium Alloy	118
§ 2-4 Grinding Temperature of Titanium Alloy	129
§ 2-5 Ground Surface Integrity of Titanium Alloy	141
§ 2-6 Grinding Fluid of Titanium Alloy	156
§ 2-7 Grinding Titanium Alloy With CBN Wheel	176
§ 2-8 Creep Feed Grinding of Titanium Alloy	187
§ 2-9 Selection of Grinding Parameters and Grinding Wheels in Grinding Titanium Alloy	205
Chapter3 Grinding of Superalloy	219
§ 3-1 Properties and Grindability of Superalloy	219
§ 3-2 Grinding Force and Grinding Temperature of	

Superalloy	223
§ 3-3 Wear of Grinding Wheel in Grinding Superalloy	240
§ 3-4 Ground Surface Integrity of Superalloy	245
§ 3-5 Creep Feed Grinding of Superalloy	282
§ 3-6 Selection of Grinding Parameters and Grinding Wheels in Grinding Superalloy	300
Chapter4 Grinding of Ultrahigh-strength steel	310
§ 4-1 Properties and Grindability of Ultrahigh-strength Steel	310
§ 4-2 Grinding Force and Grinding Temperature of Ultrahigh-strength Steel	314
§ 4-3 Grinding Burn and Methods of Distinguishing Burn in Grinding Ultrahigh-strength Steel	324
§ 4-4 Ground Surface Integrity of Ultrahigh-strength Steel	337
§ 4-5 Measures of Low Stress and Nonburn Grinding Ultrahigh-strength Steel	357
§ 4-6 Selection of Grinding Parameters and Grinding Wheels in Grinding Ultrahigh-strength Steel	360
Chapter5 Grinding of Stainless Steel	369
§ 5-1 Properties and Grindability of Stainless Steel	369
§ 5-2 Wear of Grinding Wheel in Grinding Stainless Steel	372
§ 5-3 Grinding Force of Stainless Steel	382
§ 5-4 Ground Surface Integrity of Stainless Steel	391
§ 5-5 Selection of Grinding Parameters and Grinding Wheels in Grinding Stainless Steel	407
Chapter6 Grinding of High-temperature Structural Ceramics	423

§ 6-1 Properties and Grindability of High-temperature Structural Ceramics	423
§ 6-2 Grinding Process of High-temperature Structural Ceramics and Microtopography of the Ground Surface	428
§ 6-3 Grinding Force of High-temperature Structural Ceramics	442
§ 6-4 Grinding Temperature of High-temperature Structural Ceramics	456
§ 6-5 Selection of Grinding Parameters and Grinding Wheels in Grinding High-temperature Structural Ceramics	473
§ 6-6 New Grinding Techniques of High-temperature Structural Ceramics	483
References	499

符 号 说 明

A_c	接触面积
a	热扩散系数
a_f	平面磨削横向进给量
a_p	磨削深度
a_{eq}	当量磨削厚度
a_g	未变形磨屑厚度
$\bar{a}_g$	未变形平均磨屑厚度
$a_{g\max}$	未变形最大磨屑厚度
a_d	砂轮修整深度
b	磨削宽度
b_s	砂轮宽度
$\bar{b}_g$	磨粒平均切削宽度
c	比热容
d_s	砂轮直径
d_w	工件直径
d_e	砂轮当量直径
E	弹性模量
e_s	比磨削能
F_g	单颗磨粒的磨削力
F_n	法向磨削力
F_t	切向磨削力
F'_n	单位宽度法向磨削力
F'_t	单位宽度切向磨削力

f	频率
f_a	轴向进给量
f_r	径向进给量
f_d	砂轮修整进给量
G	磨削比
HB	布氏硬度
HRA	洛氏 A 标度硬度
HRC	洛氏 C 标度硬度
HV	已加工表面显微硬度
HV'	金属基体显微硬度
K	刚度
l_s	砂轮与工件接触长度
l_w	工件磨削长度
N	冷作硬化程度
N_d	砂轮动态有效磨粒数
N_s	砂轮单位面积静态有效磨粒数
N_e	磨削功率
n_s	砂轮转速
n_w	工件转速
$\bar{p}$	磨粒磨钝平面与工件表面的平均压强
$\bar{p}_m$	粘附平面与工件表面的平均压强
Q	热量
q	磨削接触区的总发热功率;砂轮与工件的速度比
q_d	砂轮与修整器的速度比
R_a	加工表面粗糙度(轮廓算术平均偏差)
R_z	加工表面粗糙度(微观不平度十点高度)
R_w	传入工件热量的百分比
T	砂轮耐用度
t	磨削时间

V_w	金属切除体积
V'_w	单位宽度金属切除体积
V_s	砂轮损耗体积
v_f	轴向进给速度
v_s	砂轮速度
v_w	工件速度
v_r	径向进给速度
W_w	磨屑质量
W_s	砂轮损耗质量
Z_w	金属切除率
Z'_w	单位宽度金属切除率
γ_g	磨粒前角
δ	磨粒粘附物的平均厚度
θ	磨削温度;磨粒顶锥半角
λ	热导率
λ_s	砂轮磨粒间距
λ_{sl}	砂轮连续磨粒间距
μ	摩擦系数
ρ	密度;磨粒钝圆半径
σ	残余应力
σ_b	抗拉强度
σ_s	材料屈服极限
τ	剪应力;时间常数
ψ	砂轮与工件接触角

第一章 磨削原理

磨削是一种精密加工方法,能获得很高的加工精度和表面粗糙度,通常可达 IT-1 至 IT-2 级精度,表面粗糙度可达 $R_a 0.8 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 。随着超精密磨削的发展与应用,加工精度超过 IT-1 级,表面粗糙度超过 $R_a 0.01 \mu\text{m}$ 。另外,由于采用了高速磨削、强力磨削、重负荷磨削、砂带磨削等,磨削加工效率很高。在当今的钛合金、高温合金、超高强度钢、不锈钢及高温结构陶瓷等难加工材料的磨削中,特别在成形表面的加工中,磨削是一种非常有效的加工方法。

§ 1-1 磨削特点

磨削时所用的砂轮是由磨粒、结合剂和气孔组成的。若用 P_k 、 P_b 及 P_p 分别代表磨粒、结合剂和气孔体积所占砂轮体积的百分率,则

$$P_k + P_b + P_p = 100\% \quad (1-1)$$

制造砂轮时,调整磨粒、结合剂和气孔体积的百分率,就会得到不同性能的砂轮。

由于制造砂轮用的磨粒晶体的生长机理不同和制粒过程的破碎方法不同,磨粒的形状是很不规则的。另外,由于砂轮结构和制造工艺方面的原因,磨粒在砂轮中的位置分布是随机的。因此,磨削与其它加工方法相比,有很多特点。

1. 砂轮表面上同时参加切削的有效磨粒数不确定

图 1-1 示出砂轮表层磨粒的空间分布。图中, xy 坐标平面即