

磨削技术 理论与应用

GRINDING Technology

theory and applications of
machining with abrasives

[美] S.马尔金 著

蔡光起 巩亚东 宋贵亮 译



NEUPRESS
东北大学出版社

磨削技术理论与应用

Grinding Technology Theory and Applications of
Machining with Abrasives

[美] S. 马尔金 著
蔡光起 巩亚东 宋贵亮 译

东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

磨削技术理论与应用/[美]马尔金(Malkin, S.)著;蔡光起, 巩亚东, 宋贵亮译. —沈阳: 东北大学出版社, 2002.8

ISBN 7-81054-776-3

I. 磨… II. ①马… ②蔡… ③巩… ④宋… III. 磨削-基本知识
IV. TG58

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 044040 号

辽宁省版权局著作权合同登记章 06-2002 年第 085 号

Copyright, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, SUA.

出 版 者: 东北大学出版社

(邮编: 110004 地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号)

出 版 人: 李鹤兴

印 刷 者: 沈阳市政二公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

开 本: 787mm×960mm 1/16

字 数: 277 千字

印 张: 15

出版时间: 2002 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2002 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘淑芳

责任出版: 杨华宁

封面设计: 唐敏智

定 价: 28.00 元

垂询电话: 024—83680267 (社务办)

83687331 (市场部)

E-mail: neuph@neupress.com

024—83680265 (传 真)

83687332 (出版部)

http://www.neupress.com

译者前言

磨削是应用广泛的制造工艺技术之一。但由于磨削过程的复杂性，它和切削相比，是一种需要更多操作者的经验和技艺、而难以定量地描述的加工方法。过去的关于磨削理论的著述，大多以论文集或综述的形式，是各种观点的罗列或摘集。美国 Massachusetts 州立大学 S.Malkin 教授的这本书，是第一部在 447 篇参考文献和作者本人的丰富研究成果基础上，用统一的理论体系，完整、系统地论述磨削原理的奠基性专著。该书取材广泛可靠，内容新颖丰富，叙述简明深刻。既适用于磨削理论学术研究界、大学本科生及研究生教学，又适用于机械制造工程师作实用的理论依据，解决实际工程问题。该书自在英国 ELLIS HORWOOD 有限公司出版以来，分别在英国、美国、澳大利亚、加拿大、新加坡和印度等地发行，后来又经修订再版，影响很大。译者几年前就曾准备将它译成中文出版，但由于各种原因，至今才如愿以偿。我们衷心希望这个中译本能对我国磨削技术研究和加工水平的提高发挥重要推动作用。

本译本前言及第 1, 2, 3 章由蔡光起翻译，第 4, 5, 6, 7 章由宋贵亮翻译，第 7, 8, 9, 10 章由巩亚东翻译。全书经蔡光起校阅，博士研究生蔡蕊和冯宝富在许多具体工作上给予了帮助。

译 者

2002 年 2 月

作者简介

斯蒂芬·马尔金 [Stephen Malkin] 教授自 1986 年起在马萨诸塞州立大学任教，任机械和工业工程教授。他在麻省理工学院获机械工程学士（1963 年）、硕士（1965 年）和博士（1968 年）学位后，于 1968 年在得克萨斯州立大学开始他的教学生涯。1973 年改在纽约州立大学任教，后又曾在以色列工业大学任教。他曾发表 150 多篇论文，在加工和磨削过程研究方面国际知名。他还活跃在美国、欧洲和亚洲的工业界，在提高生产率和零件精度的加工技术实际应用方面作出贡献。现在是美国机械工程师学会（ASME）名誉会员，制造工程师学会（SME）名誉会员，国际生产工程研究学会（CIRP）正式会员和北美制造研究协会（NAMRT）会员。他还在 1993 年因撰写与机床有关的出色论文获 ASME 的 Blackall 奖，以及因其在制造工程技术推广方面的突出贡献而获 1996 年 SME 金奖。

前 言

机械制造是当今一项重要的商业活动，工业发达国家在该领域使用了最先进的技术展开竞争和防止经济衰退。除矿业、农业和国际旅游业外，工业化国家的财富积累主要是靠制造业，并仍在努力发展和完善现代工艺制造技术。在美国，由国防部国家科学基金组织和新成立的国家制造科学中心等集中开展该领域的研究，并在科学分析研究方面获得重大进展，正逐渐取代过去沿用的以实验为主的研究方法。本书即力图在磨削加工工艺方面提供一个系统的分析科学基础。磨削研究在过去的40年中已形成能提供实践依据的初步基础，现在则是到了提出统一的科学分析理论体系的时候了。该书可供研究人员及现场工程师使用，以及作为高年级大学生或研究生的教学参考书。凡是学过四年机械生产工程大学课程的学生都能理解本书的专业内容。

我从25年前作研究生开始一直对机械制造和磨削加工感兴趣，觉得把包括塑性力学、材料学、机械学、摩擦学、热传导、控制和最优化等这样广泛的学科结合在一起形成磨削理论是一个挑战，它激励我更专心致志地投身于磨削研究之中。在这一历程中，我有幸在学习工作过的大学里结识了许多优秀的老师、同事和学生。在为磨床、磨具制造厂或磨削作业进行工艺咨询的过程中，我从许多工程师同行那里学到了丰富的实践经验。

我还十分感谢出版商霍伍德先生的支持，以及马萨诸塞大学的斯蒂芬小姐、米歇尔小姐、以色列工业大学的斯蒂瑞尔小姐和卡尔玛小姐为本书所作的画图和打字工作。

谨以本书献给鼓励我从事这一工作的父亲，可惜他未能活着目睹它的完成。另外，如果没有我妻子麦考比特和我儿子们的支持，本书也将难以面世。

S. 马尔金

于马萨诸塞州埃姆海斯特

1988年12月

名词术语中英对照

- Active cutting point 有效切刃
Adaptive control 适应控制
Adaptive controlled constraint (ACC) 约束适应控制
Adaptive controlled optimization (ACO) 适应控制优化
Adiabatic shearing 绝热剪切
Aluminum oxide 氧化铝
Angle grinding 角度磨削
Arc length of contact 接触弧长
Artificial diamond 人造金刚石
Average cross-sectional area 平均截面积
Bond fracture 结合剂断裂
Brake-controlled truing 制动轮式整形
Bursting speed 破裂速度
Centerless grinding 无心磨削
Chip-formation energy 成屑能
Compliance 柔度
Contact pressure 接触压力
Continuous infeed 连续切入进给
Continuous rotary dressing 连续滚轮修整
Controlled-force grinding 控制力磨削
Creep feed grinding 缓进给磨削
Critical deep 临界切深
Critical rake 临界前角
Crush dressing 挤压修整
Crystal structure 结晶组织
Cubic boron nitride (CBN) 立方氮化硼
Cumulative cutting points density 累积切刃密度
Cumulative number of cutting points 累积切刃数

- Cumulative radial distribution 径向累积分布
Curvature different (砂轮与切削路径) 曲率半径差
Cut-off grinding 切断磨削
Cutting path 切削路径
Cutting path length 切削路径长度
Cutting point space 切刃间距
Cylindrical grinding 外圆磨削
Difficult-to-grind steel 难磨钢
Discrete infeed 断续进给
Down grinding 顺磨
Dressing cost 修整成本
Dressing interval 修整间隔
Dressing lead 修整导程
Dressing pass 修整行程
Dressing tool 修整器
Dynamic cutting points density 动态切刃密度
Effective equivalent wheel diameter 砂轮有效当量直径
Elastic deflection 弹性变形
Elastic modulus 弹性模量
Electroplated wheel 电镀砂轮
Equivalent wheel diameter 砂轮当量直径
Excitation frequency 激振频率
Face grinding 端面磨削
Fatigue life 疲劳寿命
Fatigue strength 疲劳强度
fiber-reinforced composites 纤维增强复合材料
Film boiling 薄膜沸腾
Forced convection 强制对流
Forced vibration 受迫振动
Friability index 脆性指数
Friction coefficient 摩擦系数
Grain depth of cut 磨粒切深
Grain fracture 磨粒破碎
Grinding cycle 磨削循环

- Grinding debris 磨屑
 Grinding deflection 磨削(受力)变形
 Grinding fluid 磨削液
 Grinding force 磨削力
 Grinding mechanism 磨削机理
 Grinding power 磨削功率
 Grinding ratio 磨削比
 Grinding temperature 磨削温度
 Grinding wheel 砂轮
 Grinding zone 磨削区
 Heat affected zone 热影响区
 Heat flux 热流强度
 Heat source 热源
 Heavy duty grinding 重负荷磨削
 Helical-groove grinding 螺旋槽磨削
 Inclined heat-source 倾斜热源
 Infeed angle 切入角
 Infrared radiation sensor 红外辐射传感器
 Intelligent control 智能控制
 Internal grinding 内圆磨削
 Kinematic contact length 动态接触长度
 Knoop hardness 努氏硬度
 Machine-power capacity 机床功率能力
 Machine-tool-economics 机床经济学
 Machining cost 加工成本
 Maximum cross-sectional area 最大截面积
 Maximum temperature 最大温升
 Melting energy 熔化能
 Metal bond 金属结合剂
 Net power 净功率
 Normal force 径向力
 Nucleate boiling 成核沸腾
 Off-line computerized optimization 离线计算机优化
 Optimal loci 最优轨迹

Part loading and unloading cost 工件装卸成本

Peak residual stress 峰值残余应力

Periodic rotary dressing 定期滚轮修整

Phase diagram 相图

Plow energy 耕犁能

Plunge grinding 切入磨削

Power-safety factor 功率安全因子

Pressurized shoe 增压器

Profile (form) grinding 轮廓(成形)磨削

Projected view 投影面

Quasi-steady-state 准静态

Regeneration vibration 再生振动

Regeneration wave 再生波纹

Removal rate 去除率

Residual stress 残余应力

Resin bond 树脂结合剂

Resonant frequency 共振频率

Rotary dressing 滚轮修整

Scratch depth 刻划深度

Scratch width 刻划宽度

Self-excited vibration 自激振动

SEM 扫描电镜

Sharp process 锐化过程

Shear strain 剪切应变

Shear stress 剪切应力

Silicon carbide 碳化硅

Size effect 尺寸效应

Sliding energy 摩擦能

Snagging 钢坯修磨

Spark-out grinding 无火花磨削

Specific grinding energy 比磨削能

Static contact length 静态接触长度

Steel billet 钢坯

Straight oil 非水溶性油

- Superabrasives 超硬磨料
Surface finish 表面抛光
Surface grinding 平面磨削
Surface roughness 表面粗糙度
Surface scale 表面氧化皮
Tangential force 切向力
Temperature rise 温升
Thermal conductivity 热传导率
Thermal damage 热损伤
Thermal diffusivity 热扩散率
Transient behavior 瞬变特性
Traverse grinding 往复磨削
Undeformed chip thickness 未变形切屑厚度
Up grinding 逆磨
Vibration suppression 振动抑制
Vitrified bond 陶瓷结合剂
Water-based soluble oil 水基可溶性油
Wear flat 磨钝平面
Wheel consumption cost 砂轮消耗成本
Wheel dressing 砂轮修整
Wheel topography 砂轮地貌
Wheel truing 砂轮整形
Wheel wear 砂轮磨损
Wheel-workpiece contact length 砂轮-工件接触长度
Workpiece burn 工件烧伤
Workpiece velocity 工件速度

目 录

名词术语中英对照

1 绪 论	1
2 砂轮组成及特性	9
3 磨削几何学和动力学	33
4 砂轮修整及表面形貌	60
5 磨削机理	84
6 磨削温度及热损伤	114
7 表面形貌及精度	137
8 砂轮磨损	159
9 磨削受力变形、磨削循环、形状误差和振动	182
10 磨削过程最优化、适应控制和智能磨削	201

1 绪 论

1.1 磨削过程

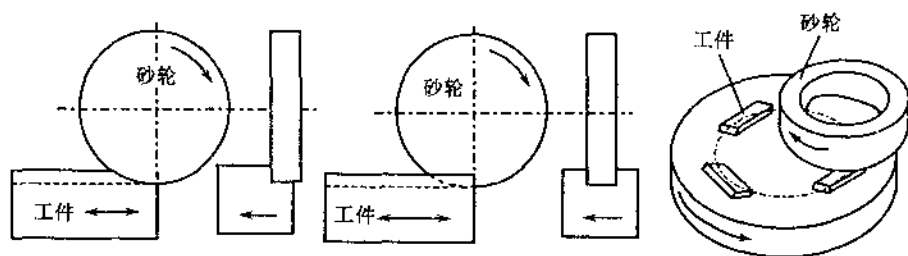
磨削是用硬磨料颗粒作为切削工具进行的加工过程的统称。史前人类就发现将他们的工具在砂岩上磨擦可以使其锋利,这大概是最早出现的磨削过程。如果没有用磨削使工具成形和锋利的方法,我们可能还生活在石器时代。

现在,磨削是在工业化国家的制造业中占加工成本约 20%~25% 的一种主要加工方法。我们知道,没有磨削是不可想像的。几乎我们使用的每种东西都在其制造过程中经过磨削,或是制造设备使用了经过磨削的零件。没有磨削我们如何磨砺车刀、铣刀和钻头呢?如何制造机器和车辆的轴承呢?又如何制造出磁头和计算机磁盘驱动器零件呢?

在各种加工方法中,磨削用的切削工具是独一无二的。砂轮和磨削工具通常由两种材料构成——叫做磨粒的起切削作用的磨料细颗粒和把无数磨粒粘接在一起成为固体的较软的粘接剂。史前人类的磨削工具是天然砂岩,它的磨料砂粒由硅酸盐基体结合在一起。而现在的砂轮是把人造磨料磨粒用合适的材料粘合在一起而制造成的。每一个磨粒就是一个可能的微小切削工具。磨削过程就是由这些成千上万个磨粒微小切削刃共同连续完成的。

磨削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削在精密加工方面竞争,但磨削并不局限这一应用。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。

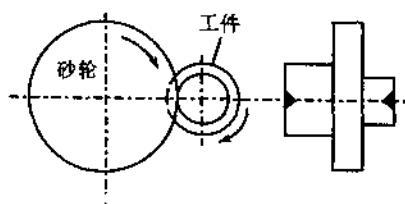
根据砂轮形状与工件砂轮运动学的不同,磨削作业有许多不同的形式。常见的一些平面、外圆和内圆磨削方式见图 1.1。更复杂的磨床则用于一些其他形状的加工,诸如任何方法均能应用于精加工、大去除量加工或介于两者之间的各种加工要求。



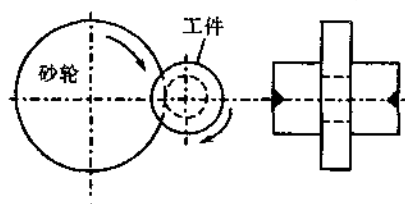
(a) 卧轴往复平磨

(b) 卧轴切入平磨

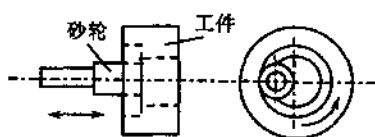
(c) 立轴转台平磨



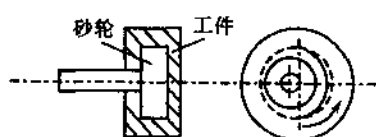
(d) 外圆往复磨削



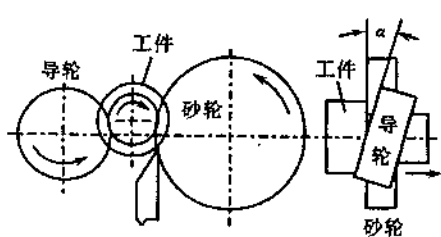
(e) 外圆切入磨削



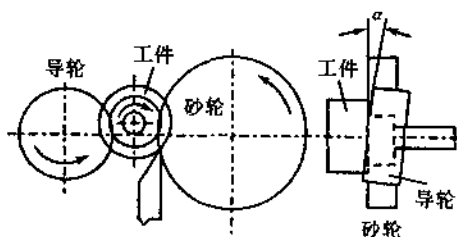
(f) 内圆往复磨削



(g) 外圆切入磨削



(h) 无心纵磨



(i) 无心切入磨

图 1.1 若干平面、外圆和内圆磨削方法的示意图^[1]

磨削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火钢零件的生产中,磨削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只能惟一地依靠磨粒加工。

磨削尽管在工业中很重要,但仍常得不到应有的重视。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,磨削作为无须车削和铣削而一次直接成型的方法将更为经济。

在通常使用的所有加工方法中,磨削无疑是所知最少和最受忽视的。这一情况的出现原因在于磨削过程太复杂,不容易弄清楚。因为切刃数量多、几何形状不规则、磨削速度高、每个磨粒的磨削切深小且不一致,任何要分析磨削机理的企图都是没有希望的。而从砂轮喷射出的磨削火花流更增加了人们的神秘感。

不过,近35年来磨削已成为广泛研究的对象。由于大量切刃参与作用,可以由一个典型的“平均”磨粒来描述这一过程。它大大方便了对实验结果的分析 and 解释。和其他加工过程一样,磨削也已从“实践手艺”变为了“应用科学”。但大部分工程师们没有察觉这一进步,仍然存在对磨削的神秘感。正因为如此,本书才要给出磨削理论和实际应用一个综合的介绍。

1.2 磨削过程的历史发展

磨削技术史始于磨料矿物的发现,发展于人类为保证其生存和高生活质量而需要的制造产品的磨具和机床的发展。在此我们简要介绍其历史发展过程,以帮助我们综观和展望磨削技术的发展。更详细的内容则可参阅文献[2~7]。

事情从发现在砂岩上可以磨砺其燧石工具的原始人类开始。稍后,在发明陶瓷之前,就用磨料将石头磨成饮食工具。这是在仅仅磨砺用途之外的为获得要求形状的加工过程的最早方法。用于建造埃及金字塔的巨大石块也是用原始磨床被锯切至一定尺寸,并用砂岩磨光它们的表面。

金属的磨削始于公元前2000年的古埃及,和金属时代的开始相一致。在这一时间的中东,磨削技艺对磨锐工具和饰品制作有很高价值。

史前人类大概仅认识石英砂粒、燧石和砂岩这些磨料。古代被认识的重要天然磨料还有金刚砂、石榴石和金刚石。金刚砂是含有大约等量的氧化铝和氧化铁的不纯刚玉。在圣经([耶利米书]17:1)中提及的用于雕琢的

硬石(希伯来语为 Shamir)大概就是金刚砂。在古希腊和古罗马也知道用金刚砂作磨料。包含有各种氧化铝和硅酸盐矿物的燧石磨料也大概在古代就被认识了。金刚石开采据信始于公元前 800~600 年的印度,它直到 19 世纪仍是金刚石的主要产地。用金刚石粉末作磨料的最早报告来自 17 世纪的比利时,那时用它来切割金刚石和用于钟表制造中的精细抛光。只是到了 19 世纪初叶,含有大量氧化铝晶体的天然刚玉才被认识。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开始而出现于古埃及。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。早期砂轮大概由人力驱动旋转并主要用于工具的刃磨。尽管早在公元前一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于约 1500 年的达·芬奇的绘画之中。一些这样的机器大概是由水轮集中动力装置驱动。他描绘的砂轮是表面固定有连续的金刚砂磨料的带幅木制轮子。这些磨床在被达·芬奇描绘在画中之前已经有 300~400 年的历史了。

直到 19 世纪初为了手工磨削宝石,才在印度制造出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,使用的结合剂则是树脂胶。至 1880 年,树脂胶结合剂砂轮才传入西方。19 世纪中叶,在英格兰发明了氮氧化物结合剂砂轮,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晚至 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,而金属磨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。

由此可见,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使用这些工具的磨床发展的动力。随着工业革命进程,对磨床和砂轮的需求增加了。在 19 世纪 60 年代,为制造锯机零件 Brown & Sharpe 公司制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。尽管碳化硅这一化合

物被合成出来还要早些,但一般认为碳化硅磨料是由 E.G.Acheson 于 1891 年发明的,至今仍主要使用与 Acheson 同样的熔融冶炼方法来生产它。碳化硅磨料曾被认为是硅碳砂[carborundum],这一名称至今还偶然被当做碳化硅的同义词使用。1895 年 Acheson 成立了硅碳砂公司,他的合伙人把这一磨料的生产扩大到很大的规模。在稍后的 1897 年,C.B.Jacobs 在电炉中冶炼铝土而得到人造氧化铝磨料。诺顿公司 1901 年获得该专利权,并随着与今天使用的电炉非常相似的 Higgins 电炉的发明而于 1904 年开始了熔融氧化铝磨料的大规模商业生产。这些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,已开始了用人造氧化铝和碳化硅磨料及陶瓷、橡胶、树脂胶及氮氧化物结合剂制作的砂轮。连同在较晚的 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。自不必说,这一发展也正是磨床的进步和磨削加工更广泛使用的反映。具有零件互换性的汽车和其他设备的大批量生产也是依赖磨削加工。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。

在 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,接着在 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惟一重要因素,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出了人造金刚石。但在瑞典两年半前实际上就制出了人造金刚石。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,通用电气公司 1957 年使用与制造人造金刚石相似的高压过程首次成功地制出了立方氮化硼(CBN)。但直至 1969 年才主要为了铁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。

1.3 本书的内容

尽管磨削作为一种加工方法非常重要,但很少有这方面的书籍。许多