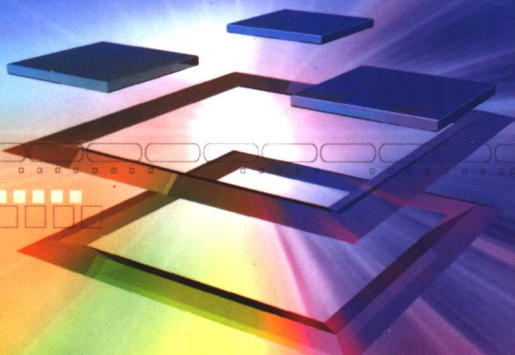


Theory & Technology of Engineering Ceramic Machining

工程陶瓷 加工的理论与技术

田欣利 于爱兵 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

工程陶瓷加工的 理论与技术

Theory & Technology of Engineering
Ceramic Machining

田欣利 于爱兵 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

工程陶瓷加工的理论与技术 / 田欣利, 于爱兵编著.
北京: 国防工业出版社, 2006. 7

ISBN 7-118-04544-6

I. 工... II. ①田... ②于... III. 陶瓷—生产工艺
IV. TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 052072 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9¼ 字数 234 千字

2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄宁				
主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡镛			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜		

前 言

工程陶瓷由于其高硬度、防腐耐磨、耐高温、质量轻等特性在航空航天、石油勘探、化工、国防等工业领域的应用越来越广泛,如压电陶瓷晶体技术的飞跃为精密工程的发展提供了技术平台;铁氧体陶瓷磁性材料的开发,引发了电脑硬件的革命;高温结构陶瓷技术的不断进步给发动机、冶金、石油化工等诸多传统老工业领域注入了空前的活力;新型陶瓷刀具、工模具材料的不断涌现,为机械制造业创造了前所未有的生机。可以预见,许多机械设备上的关键零部件用陶瓷替代金属已成为一种不可逆转的发展趋势。但陶瓷由于其硬脆特性决定的加工难度大、加工效率低、成本高已成为阻碍工程陶瓷进一步广泛应用的“瓶颈”。自 20 世纪 80 年代以来,对加工理论和技术的研究在国内外一直处于热点状态。

近年来,加工理论上的研究成果不断涌现,如揭示陶瓷磨削机理和内在规律的研究从早期的压痕断裂力学到现在的连续损伤力学理论和可加工性的定量评价;从单纯裂纹扩展规律到脆塑转变机制、塑性域延性磨削机理以至到纳米加工的分子动力学仿真等。加工技术的发展也很快,近年来陆续出现了许多高质量加工和高效率、低成本加工的技术和工艺。从金刚石砂轮磨削到镜面磨削、ELID 超精密磨削以及纳米加工;从传统的切削、磨削加工到包括激光加工、电火花加工、超声振动加工、高压磨料水射流加工以及加热辅助切削在内的现代加工技术,从单项加工技术到声、光、电、化学能组合的复合加工技术。研究方法逐渐从假设推论、理论建模、定性分析发展到现在的理论分析与实验验证相结合、工艺试验

与模拟仿真相结合、多学科融合与技术创新相结合。

虽然关于硬脆材料、难加工材料的加工技术的专著偶有问世,但令人遗憾的是,到目前为止国内还没有一本系统介绍工程陶瓷加工理论和技术的论著。本书正是在这种情况下应运而生的,把陶瓷加工先进的理论与技术展现出来,供陶瓷材料加工领域的有关研究学者和科技人员参考。本书的部分内容是由两位作者在博士、博士后研究工作期间以及多年在该领域从事科研工作辛勤耕耘的结果。

本书在概要总结了近年来陶瓷加工领域国内外的研究现状和最新进展的基础上,较全面地介绍了工程陶瓷加工的基本原理、基础理论和关键技术。本书共分5章。内容主要包括陶瓷加工概论、陶瓷加工的基本原理、陶瓷加工的表面完整性、加工过程对陶瓷性能的影响、陶瓷材料的加工技术等。第一、三、四章由田欣利编写,第二、五章由于爱兵编写。

本书既可以作为陶瓷材料和机械制造专业的研究人员和工程技术人员参考,又可作为相关专业的研究生、本科生的选修或参考教材。

由于编者水平有限,同时陶瓷加工的前沿研究领域发展很快,书中不妥之处恳请读者和专家批评指正。

目 录

第 1 章 陶瓷加工概论	1
1.1 工程陶瓷的特性与应用	1
1.1.1 工程陶瓷材料的特性	1
1.1.2 工程陶瓷材料的应用	3
1.2 常用工程陶瓷材料及其制备	8
1.2.1 常用工程陶瓷材料	8
1.2.2 工程陶瓷材料的制备	11
1.3 工程陶瓷的加工方法与特点	13
1.3.1 加工方法	13
1.3.2 磨削加工的特点	17
1.4 工程陶瓷加工理论与技术的发展历程	21
1.4.1 切削加工	21
1.4.2 磨削加工	22
1.4.3 特种加工与复合加工	25
1.5 工程陶瓷加工技术的研究现状与发展趋势	27
参考文献	31
第 2 章 陶瓷加工的基本原理	33
2.1 陶瓷材料的可加工性	33
2.1.1 陶瓷材料的可加工性评价方法	33
2.1.2 陶瓷材料可加工性的模糊综合评价	36
2.1.3 陶瓷材料可加工性的层次分析法综合 评价	41

2.2	陶瓷材料的切削机理	47
2.2.1	基于线弹性断裂力学的理论分析	48
2.2.2	裂纹的扩展	52
2.2.3	基于弹塑性断裂力学的理论分析	53
2.3	陶瓷材料的磨削机理——力学分析	56
2.3.1	陶瓷材料的压痕断裂力学	57
2.3.2	陶瓷材料的单金刚石颗粒磨削应力分析 ...	73
2.3.3	弹性常数与磨削方式对材料去除的影响 ...	75
2.3.4	陶瓷磨削中的材料破碎去除	78
2.3.5	有限元分析	82
2.3.6	连续损伤力学分析	86
2.4	陶瓷材料的磨削机理——试验研究	89
2.4.1	刻划试验	89
2.4.2	磨削试验	100
2.5	陶瓷材料的精密加工机理	107
2.5.1	脆塑转变机制	107
2.5.2	塑性域切削加工	114
2.5.3	精密磨削机理	117
2.6	陶瓷材料的纳米加工机理	132
2.6.1	纳米加工的分子动力学仿真	133
2.6.2	脆塑转变的分子动力学仿真	137
2.6.3	单晶硅纳米切削分子动力学仿真	139
2.6.4	单晶硅纳米磨削分子动力学仿真	144
	参考文献	146
第3章	陶瓷加工的表面完整性	151
3.1	陶瓷加工表面残余应力	151
3.1.1	磨削表面残余应力的测试	152
3.1.2	残余应力的产生机理	159

3.1.3	磨削表面残余应力的理论模型	168
3.2	陶瓷加工表面变质层	172
3.2.1	电镜分析	172
3.2.2	X射线衍射谱线与俄歇能谱分析	173
3.2.3	玻璃态化合物(玻璃相)的产生机理	174
3.2.4	微晶的形成与结构模型的建立	176
3.2.5	表面变质层的细观—微观分析	179
3.3	陶瓷磨削表面材料相变	183
3.3.1	相变机理	183
3.3.2	磨削表面的相变分布	184
3.3.3	磨削应力诱发马氏体相变	185
3.4	陶瓷磨削表面粗糙度	187
	参考文献	192
第4章	加工过程对陶瓷性能的影响	195
4.1	磨削对断裂强度的影响	195
4.1.1	磨削残余应力对断裂强度的影响	195
4.1.2	表面粗糙度对断裂强度的影响	200
4.1.3	后期热处理对断裂强度的恢复作用	201
4.2	磨削残余应力对弯曲强度的影响	207
4.3	磨削过程对表面/亚表面损伤的影响	209
4.3.1	表面损伤的预测	210
4.3.2	磨削对本征缺陷和表面微裂纹的影响	215
4.3.3	机床刚度对磨削表面损伤的影响	222
4.4	陶瓷加工对表面耐磨性的影响	225
	参考文献	229
第5章	陶瓷材料的加工技术	232
5.1	陶瓷材料的磨削技术	232
5.1.1	磨削加工	232

5.1.2	珩磨加工	237
5.1.3	ELID 超精密加工	250
5.2	金刚石工具技术	252
5.2.1	金刚石工具	253
5.2.2	金刚石砂轮的修整	257
5.3	陶瓷材料的磨削机床	261
5.3.1	陶瓷磨床	262
5.3.2	陶瓷精密磨床	268
参考文献		275

CONTENT

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Properties and applications of engineering ceramics	1
1.1.1	Properties of ceramics	1
1.1.2	Applications of ceramics	3
1.2	Engineering ceramics and their fabrication	8
1.2.1	Engineering ceramic materials	8
1.2.2	Fabrication of engineering ceramics	11
1.3	Machining methods and characteristics	13
1.3.1	Machining methods	13
1.3.2	characteristics of ceramic grinding	17
1.4	History of ceramic machining theory and technology	21
1.4.1	Cutting	21
1.4.2	Grinding	22
1.4.3	Special machining and composite machining	25
1.5	Developments of engineering ceramic machining	27
	References	31
Chapter 2	Principles of Ceramic Machining	33
2.1	Mechanical properties and machinability of engineering ceramics	33

2. 1. 1	Machinability evaluation of ceramics	33
2. 1. 2	Fuzzy composite evaluation of ceramic machinability	36
2. 1. 3	AHP composite evaluation of ceramic machinability	41
2. 2	Cutting mechanism of engineering ceramics	47
2. 2. 1	Theory based on linear elastic fracture mechanics	48
2. 2. 2	Propagations of cracks	52
2. 2. 3	Theory based on elastic-plastic fracture mechanics	53
2. 3	Grinding mechanism of engineering ceramics- analysis of mechanics	56
2. 3. 1	Indentation fracture mechanics of ceramics	57
2. 3. 2	Grinding stress analysis of single point diamond grinding	73
2. 3. 3	Effect of elastics constants and grinding mode on material removal	75
2. 3. 4	Crushing removal during ceramics grinding	78
2. 3. 5	Analysis with finite element method	82
2. 3. 6	Analysis with continuum damage mechanics	86
2. 4	Grinding mechanism of engineering ceramics- research of experiments	89
2. 4. 1	Scratching experiments	89
2. 4. 2	Grinding experiments	100

2. 5	Precision machining mechanism of engineering ceramics	107
2. 5. 1	Mechanism of brittle ductile transition	107
2. 5. 2	Ductile-regime cutting	114
2. 5. 3	Mechanism of precision grinding	117
2. 6	Nano-machining mechanism of engineering ceramics	132
2. 6. 1	Molecular dynamics simulation of nano-machining	133
2. 6. 2	Molecular dynamics simulation of brittle ductile transition	137
2. 6. 3	Molecular dynamics simulation of nano-cutting of single crystal silicon	139
2. 6. 4	Molecular dynamics simulation of nano-grinding of single crystal silicon	144
	References	146
Chapter 3	Surface Integrity of Ceramic Machining	151
3. 1	Residual stresses of ground surfaces	151
3. 1. 1	Measuring of ceramic ground surfaces ...	152
3. 1. 2	Generation mechanism of residual stresses	159
3. 1. 3	Theoretical model of residual stresses for grinding surfaces	168
3. 2	Deterioration layer of ceramic machining surfaces	172
3. 2. 1	Analysis with electronic microscope	172
3. 2. 2	Analysis with X-rays diffraction and AES	173

3. 2. 3	Generation of glassy substrate	174
3. 2. 4	Micro crystal generation and structural model of deterioration	176
3. 2. 5	Meso-micro analysis of surface deterioration layer	179
3. 3	Phase transition of ceramic ground surface	183
3. 3. 1	Mechanism of phase transition	183
3. 3. 2	Distribution of phase transition on ground surface	184
3. 3. 3	Stress-induced martensitic transformation ...	185
3. 4	Roughness of ceramic ground surface	187
	References	192
Chapter 4 Effect of Machining Operations on Ceramic		
	Properties	195
4. 1	Effect of grinding on rupture strength	195
4. 1. 1	Effect of residual stresses on rupture strength	195
4. 1. 2	Effect of surface roughness on rupture strength	200
4. 1. 3	Recovery of rupture strength by heat treatment	201
4. 2	Effect of grinding residual stresses on bending strength	207
4. 3	Effect of grinding on surface/sub-surface damages	209
4. 3. 1	Forecast of surface damage	210
4. 3. 2	Effect of grinding on intrinsic defaults and surface micro-cracks	215

4. 3. 3	Effect of machine stiffness on ground surface damage	222
4. 4	Effect of grinding on surface wearability	225
	References	229
Chapter 5	Grinding Machining of Ceramics	232
5. 1	Grinding technology of ceramics	232
5. 1. 1	Grinding	232
5. 1. 2	Honing	237
5. 1. 3	ELID ultra-precision machining	250
5. 2	Diamond tool technology	252
5. 2. 1	Diamond tool	253
5. 2. 2	Dressing of diamond wheel	257
5. 3	Grinder for ceramic machining	261
5. 3. 1	Grinder	262
5. 3. 2	Precision grinder	268
	References	275