



国防科技图书出版基金

工程陶瓷高效低成本 加工新技术与强度控制

High Efficiency and Low Cost Machining
for Engineering Ceramics
and Product Strength Control

田欣利 吴志远 唐修检 王龙 王望龙 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

工程陶瓷高效低成本加工 新技术与强度控制

High Efficiency and Low Cost Machining for Engineering
Ceramics and Product Strength Control

田欣利 吴志远 唐修检 王龙 王望龙 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

工程陶瓷高效低成本加工新技术与强度控制 / 田欣
利等编著. —北京:国防工业出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 10490 - 5

I. ①工... II. ①田... III. ①陶瓷 - 工程材料 - 生产
工艺 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 245951 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 字数 298 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

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

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

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。可以预见,在不久的将来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。虽然近年来涌现出很多先进和精密的陶瓷加工技术,使陶瓷加工行业有了更多加工方法的选择,但工业界对陶瓷零件大批量生产中的高效率 and 低成本需求越来越迫切,特别是使用者在面对昂贵的陶瓷零件而“望洋兴叹”的时候,人们都期待能尽快降低陶瓷的加工成本。因此,陶瓷加工效率低、成本高已成为阻碍工程陶瓷进一步广泛应用的“瓶颈”。本书正是为了满足这种实际需求,总结了近年来陶瓷高效经济型加工新技术的最新研究成果,旨在为硬脆材料特别是工程陶瓷材料加工行业的科技人员提供参考,同时也可作为高等院校机械制造和无机非金属材料专业的高年级学生及研究生的教科书或参考书。

本书中的多数内容是几位作者多年的研究成果,同时也精选了一些国内外该领域学者近年来涌现出来的新技术,在此也向这些学者致谢。本书以陶瓷高效经济型加工的新方法、新技术和新工艺为主线,辅之以加工机理、模拟仿真和实验验证等研究内容,特别是增加了对陶瓷加工过程中经常出现的也是最令人头疼的如加工裂纹、崩边等缺陷,从而导致陶瓷零件损伤的机理分析,以及陶瓷加工强度控制和恢复技术等内容的最新研究成果。本书主线清晰、内容新颖、特色突出。

本书共分5章,主要内容包括:工程陶瓷材料及其加工特性、基于金刚石刀具的陶瓷高效低成本加工新技术、工程陶瓷高效低成本非传统加工新技术、工程陶瓷加工的边缘损伤及其控制技术、工程陶瓷磨削强度控制与恢复技术等。本书由田欣利、吴志远、唐修检、王龙、王望龙编著。天津大学于思远教授对本书进行了严格审阅,在此表示衷心的感谢。

本书的部分研究内容受到四项国家自然科学基金的直接资助,资助号分别为51075399、51475474、512755527、51105378等,在此特别致谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处恳请读者和专家批评指正。

作者

2015年5月

目 录

第 1 章 工程陶瓷材料及其加工特性	1
1.1 工程陶瓷材料	1
1.2 结构陶瓷材料	2
1.3 工程陶瓷的加工方法与特点	5
1.3.1 加工方法	6
1.3.2 磨削加工的特点	11
1.4 工程陶瓷加工技术的研究现状与发展展望	14
参考文献	18
第 2 章 基于金刚石刀具的陶瓷高效低成本加工新技术	19
2.1 小砂轮大切深轴向进给磨削陶瓷技术	19
2.1.1 加工原理与特点	19
2.1.2 砂轮磨损分析	20
2.1.3 工件的表面形貌	21
2.1.4 工件材料的损伤层形成机理	25
2.2 基于边缘碎裂效应的切割-推挤式加工陶瓷技术	27
2.2.1 加工原理与特点	27
2.2.2 单晶压头挤压破碎模拟的实验研究	29
2.2.3 实验研究和理论分析	34
2.3 粗磨粒金刚石砂轮高效磨削陶瓷技术	42
2.3.1 概述	42
2.3.2 试验条件与方法	43
2.3.3 磨削用量对陶瓷表面粗糙度的影响	43
2.3.4 磨削用量对陶瓷表面形貌的影响	45
2.4 高速深磨加工陶瓷技术	45
2.4.1 概述	45
2.4.2 比磨削能随 $h_{\max}$ 的变化情况及特征分析	47

2.4.3	磨削能形成及分配机制分析	49
2.5	陶瓷高效磨削液技术	52
2.5.1	磨削液概述	52
2.5.2	陶瓷专用磨削液的效能评价	54
2.5.3	基于润滑性能的陶瓷专用磨削液成分设计	56
2.5.4	陶瓷磨削过程中的堵塞及其防护	61
	参考文献	64
第3章	工程陶瓷高效低成本非传统加工新技术	65
3.1	辅助电极法电火花加工陶瓷技术	65
3.1.1	加工原理	65
3.1.2	加工装置与条件	66
3.1.3	加工特性	67
3.2	电极引弧微爆炸加工技术	72
3.2.1	概述	72
3.2.2	加工过程的观察与机理分析	76
3.2.3	材料去除过程的观察与分析	80
3.3	高能量电容单脉冲放电高效加工陶瓷技术	84
3.3.1	加工原理	84
3.3.2	试验结果分析	85
3.3.3	加工表面形貌分析	92
3.4	喷雾电化学放电加工陶瓷技术	93
3.4.1	概述	94
3.4.2	单晶硅加工试验	96
3.4.3	氧化铝加工试验	98
3.5	双电极同步伺服电火花机械复合磨削陶瓷技术	100
3.5.1	工作原理与特点	101
3.5.2	加工参数的影响规律	102
3.5.3	加工 Al_2O_3 陶瓷温度场数值模拟	103
3.6	电解电火花铣削加工单晶硅技术	105
3.6.1	加工原理	106
3.6.2	实验结果与分析	107
3.7	超声振动辅助磨削脉冲放电高效复合加工陶瓷技术	108
3.7.1	概述	108

3.7.2	复合加工工艺	112
3.7.3	试验验证	113
3.8	超声 ELID 复合磨削陶瓷材料	114
3.8.1	加工原理	114
3.8.2	模型的建立	114
3.8.3	仿真分析	117
	参考文献	118

第4章 工程陶瓷加工的边缘损伤及其控制技术 120

4.1	陶瓷磨削加工的边缘碎裂研究	120
4.1.1	产生机理与理论模型	120
4.1.2	准静态单晶压痕试验	126
4.1.3	力学特性	129
4.1.4	声发射特征	131
4.1.5	能量特征	144
4.1.6	损伤机理	147
4.1.7	损伤预报	150
4.2	陶瓷套料孔加工出口崩边的有限元分析	153
4.2.1	问题的提出	153
4.2.2	有限元模型	154
4.2.3	断裂过程仿真分析	155
4.3	旋转超声辅助陶瓷孔加工崩边的有限元分析	156
4.3.1	有限元模型	157
4.3.2	有限元仿真分析	159
4.4	超声辅助平面磨削陶瓷边缘损伤的研究	160
4.4.1	边缘损伤试验研究	160
4.4.2	提高陶瓷磨削边缘质量的措施	163
4.5	单向夹紧预应力磨削陶瓷技术	164
4.5.1	控制原理	164
4.5.2	离散元模拟	165
4.5.3	加工方法与试验	167
4.6	周向包封预应力加工陶瓷技术	169
4.6.1	原理及加工试验	169
4.6.2	机理分析	171

4.6.3	磨削试验	174
4.6.4	表面残余应力测试	175
4.7	激光加热辅助引弧微爆炸加工陶瓷技术	176
4.7.1	加工原理	176
4.7.2	激光工艺参数及对强度的影响	176
4.7.3	加工参数对边缘崩碎的影响	178
4.8	硬脆材料旋转超声辅助钻孔崩边的控制策略	180
4.8.1	构建分析模型	180
4.8.2	崩边机理	181
4.8.3	控制策略	183
	参考文献	185

第5章 工程陶瓷磨削强度控制与恢复技术 187

5.1	磨削参数对陶瓷断裂强度的影响	187
5.1.1	磨削试验方案设计	187
5.1.2	磨削参数对强度的影响规律	188
5.2	磨削缺陷对陶瓷断裂强度的影响	191
5.2.1	磨削缺陷的应力集中效应	192
5.2.2	考虑磨削缺陷的断裂强度	194
5.2.3	磨削表面/亚表面缺陷检测	196
5.3	磨削表面完整性对陶瓷断裂强度的影响	199
5.3.1	磨削表面微观形貌对断裂强度的影响	199
5.3.2	磨削表面纹理特征对断裂强度的影响	201
5.3.3	磨削表面残余应力与断裂强度的关系	204
5.4	基于加工参数的陶瓷磨削强度控制与预测	207
5.4.1	磨削强度控制	207
5.4.2	磨削强度预测	209
5.5	退火处理恢复陶瓷磨削强度技术	210
5.5.1	退火处理恢复强度试验	211
5.5.2	退火处理表面的显微组织分析	212
5.5.3	退火处理表面的X射线衍射分析	214
5.5.4	退火处理表面的残余应力测试	215
5.6	激光表面加热恢复陶瓷磨削强度技术	216
5.6.1	激光加热参数对磨削强度的影响	216

5.6.2	激光加热恢复磨削强度的机理	219
5.7	表面抛光恢复陶瓷磨削强度技术	222
5.7.1	表面抛光试验	223
5.7.2	表面抛光处理的强度恢复机理	224
5.7.3	抛光时间对磨削强度的影响	225
5.8	弹性覆层喷丸恢复陶瓷磨削强度技术	226
5.8.1	弹性覆层喷丸试验	226
5.8.2	弹性覆层喷丸强化效果的影响因素分析	228
5.8.3	弹性覆层喷丸的陶瓷强度恢复机理	231
	参考文献	233

CONTENTS

Chapter 1	Engineering ceramics and their processing characteristics	1
1.1	Engineering ceramics	1
1.2	Structural ceramics	2
1.3	Machining methods and their characteristics for engineering ceramics	5
1.3.1	Machining methods	6
1.3.2	Characteristics of grinding	11
1.4	Present situations and the development trends about the machining technology of engineering ceramics	14
	References	18
Chapter 2	New high efficiency and low cost machining technologies for engineering ceramics based on diamond tools	19
2.1	New grinding technology for engineering ceramics with a small grinding wheel under large depth and creep – feed in axial	19
2.1.1	Machining principles and their characteristics	19
2.1.2	Wear analysis of grinding wheel	20
2.1.3	Grinding surface morphologies	21
2.1.4	Formation mechanisms for the damage layer of the workpiece material	25
2.2	Cutting and extruding processing technology of ceramics based on edge chipping	27
2.2.1	Machining principles and their characteristics	27
2.2.2	Experimental study on edge chipping based on single indentation	29
2.2.3	Experimental study and theoretical analysis	34
2.3	High efficiency grinding technology for ceramics using coarse diamond grinding wheel	42
2.3.1	Summary	42

2.3.2	Experimental conditions and method	43
2.3.3	Effect of grinding parameters on the ceramic surface roughness	43
2.3.4	Effect of grinding parameters on the ceramic surface morphologies	45
2.4	High – speed deep grinding technology for engineering ceramics	45
2.4.1	Summary	45
2.4.2	Effect of hmax on the change regulars and features of specific grinding energy	47
2.4.3	Analysis on the formations and distribution mechanisms for grinding energy	49
2.5	High efficient grinding fluid technology for engineering ceramics	52
2.5.1	Grinding fluid summary	52
2.5.2	Effective evaluations of the special grinding fluid for engineering ceramics	54
2.5.3	Composition design of ceramic grinding fluid based on lubrication performances	56
2.5.4	Jams and protections during the process of grinding for engineering ceramics	61
References		64

Chapter 3 Non – traditional high efficiency and low cost machining technologies for engineering ceramics

3.1	Electrical discharge machining assisted auxiliary electrode for nonconductive engineering ceramics	65
3.1.1	Machining principles	65
3.1.2	Machining devices and conditions	66
3.1.3	Machining characteristics	67
3.2	Micro – detonation of striking arc machining technology for engineering ceramics	72
3.2.1	Summary	72
3.2.2	Observations of machining process and their mechanism Analysis	76
3.2.3	Observations and analysis of the material removal process	80
3.3	High energy capacitor and single pulse discharge machining	

technology for insulating engineering ceramics	84
3.3.1 Machining principles	84
3.3.2 Analysis of test results	85
3.3.3 Analysis of surface morphologies	92
3.4 Mist –jetting electrochemical discharge machining technology for engineering ceramics	93
3.4.1 Summary	94
3.4.2 Silicon processing experiment	96
3.4.3 Alumina processing experiment	98
3.5 Grinding technology for non – conductive engineering ceramics assisted electrical discharge with synchronous servo double electrodes	100
3.5.1 Machining principles and their characteristics	101
3.5.2 Effect of processing parameters	102
3.5.3 Numerical simulations of the temperature field in the processing of Al_2O_3 ceramics	103
3.6 Machining technology of monocrystalline silicon by electrochemical discharge milling	105
3.6.1 Machining principles	106
3.6.2 Experimental results and analysis	107
3.7 Ultrasonic vibration machining technology assisted grinding and electrical discharge	108
3.7.1 Summary	108
3.7.2 Composite processing technology	112
3.7.3 Experimental verification	113
3.8 Ultrasonic ELID composite grinding technology	114
3.8.1 Machining principles	114
3.8.2 Establishment of the model	114
3.8.3 Simulation analysis	117
References	118

Chapter 4 Edge chipping and its control technology of engineering ceramic during the process of machining

120

4.1 Study on edge chipping of engineering ceramics during the process of machining	120
4.1.1 Formation mechanism and its theoretical model	120

4.1.2	Quasi static indentation experiment by single crystal	126
4.1.3	Mechanical properties	129
4.1.4	Acoustic emission characteristics	131
4.1.5	Energy characteristics	144
4.1.6	Damage mechanism of edge chipping	147
4.1.7	Prediction of edge chipping	150
4.2	Finite element analysis of exit edge chipping for ceramic trepanning hole	153
4.2.1	Introduce	153
4.2.2	Finite element model	154
4.2.3	Analysis of fracture process simulation	155
4.3	Finite element analysis of ceramic edge chipping in rotary ultrasonic machining	156
4.3.1	Finite element model	157
4.3.2	Analysis of finite element simulation	159
4.4	Study on edge chipping of engineering ceramics in the process of grinding assisted ultrasonic vibration	160
4.4.1	Experimental study on edge chipping	160
4.4.2	Measures to improve the edge quality of engineering ceramics in grinding	163
4.5	Pre – stressed grinding technology from one – way clamp for engineering ceramics	164
4.5.1	Control principles	164
4.5.2	Discrete element simulation	165
4.5.3	Machining method and experimental study	167
4.6	Pre – stressed grinding technology with circumferential wrapping for engineering ceramics	169
4.6.1	Principle and machining experiment	169
4.6.2	Mechanism analysis	171
4.6.3	Grinding experiment	174
4.6.4	Surface residual stress test	175
4.7	Micro – detonation of striking arc machining assisted laser	176
4.7.1	Machining principle	176
4.7.2	Effect of laser processing parameters on the strength	176
4.7.3	Effect of processing parameters on the edge chipping	178
4.8	Control method to edge chipping of brittle and hard materials in	

the drilling assisted rotary ultrasonic	180
4.8.1 Analysis model	180
4.8.2 Mechanism of edge chipping	181
4.8.3 Controlling methods	183
References	185

Chapter 5 Controlling and recovering technologies of engineering

ceramics fracture strength after grinding	187
5.1 Effect of grinding parameters on ceramic fracture strength	187
5.1.1 Experiment design of Grinding	187
5.1.2 Effect of grinding parameters on the strength of engineering ceramics	188
5.2 Effect of grinding defects on ceramic fracture strength	191
5.2.1 Stress concentration effect of grinding defects	192
5.2.2 Effect of grinding defects on fracture strength	194
5.2.3 Defect detection of surface / sub surface after grinding	196
5.3 Effect of surface integrity on ceramic fracture strength	199
5.3.1 Effect of grinding surface microstructure on fracture strength	199
5.3.2 Effect of grinding surface texture characteristics on fracture strength	201
5.3.3 Relationship between grinding surface residual stress and fracture strength	204
5.4 Control of ceramic grinding strength based on machining parameters	207
5.4.1 Grinding strength control	207
5.4.2 Grinding strength prediction	209
5.5 Recovery technology of ceramic grinding strength by Annealing treatment	210
5.5.1 Annealing treatment to recovery strength test	211
5.5.2 Analysis of surface microstructure after annealing treatment	212
5.5.3 X ray diffraction analysis of the surface after annealing treatment	214
5.5.4 Surface residual stress test after annealing treatment	215
5.6 Strength recovery technology of ceramics by Laser heating	216