

可加工陶瓷加工技术及应用

马廉洁 巩亚东 于爱兵 王雷震 著



科学出版社

可加工陶瓷加工技术及应用

马廉洁 巩亚东 于爱兵 王雷震 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在总结可加工陶瓷材料加工特性的基础上,较全面地介绍了近年来国内外新发展的有关可加工陶瓷的加工技术及其评价的基本原理和关键技术。全书共7章,主要包括:可加工陶瓷切削过程的材料去除,可加工陶瓷切削过程的刀具磨损,可加工陶瓷磨削表面成形机理及材料去除过程,可加工陶瓷快速点磨削表面粗糙度,低膨胀微晶玻璃点磨削表面硬度,可加工陶瓷点磨削表面质量建模与优化。

本书可供机械制造、无机非金属材料专业的本科生、研究生以及从事相关专业研究的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

可加工陶瓷加工技术及应用/马廉洁等著. —北京:科学出版社,2017.3
ISBN 978-7-03-051877-4

I. ①可… II. ①马… III. ①陶瓷-生产工艺 IV. ①TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 035554 号

责任编辑:陈 婕 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年3月第一次印刷 印张:10

字数:210 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

可加工陶瓷切削过程具有如下特点:其一,形成粉末状切屑,前刀面受力很小,微观断裂的随机性较大,与金属的带状切屑不同;其二,弹性变形、塑性变形阶段极其微弱,几乎可以忽略,具有显著的脆性断裂特征;其三,切削变形区划分界限不够明显,能量耗散较为集中。

近年来,作者及其所在项目组主要成员对可加工陶瓷切削技术不断深入研究,初步构建了可加工陶瓷切削理论的基本框架,建立了表面粗糙度模型、表面硬度模型,提出了材料可加工性评价方法,开展了材料的微观断裂、材料去除、刀具磨损等系列化研究,应用动力学、断裂力学、运动学等理论,在理论建模、数值拟合、微观机理分析等方面取得了系列成果。

但是,可加工陶瓷加工技术还处于基础研究阶段,与之有关的切削变形区模型、成屑机理、加工表面成形机理、能量耗散机理、刀具-工件系统的动力学模型等基础研究,都有待深入展开。

因此,对可加工陶瓷现阶段的研究成果进行总结,为后续研究人员提供基本的实验结果、理论依据、研究思路是很有必要的。

本书共7章,第1章为绪论,第2章介绍可加工陶瓷切削过程中的材料去除,第3章介绍可加工陶瓷切削过程中的刀具磨损,第4章介绍可加工陶瓷磨削表面成形机理及材料去除过程,第5章介绍可加工陶瓷快速点磨削过程中的表面粗糙度,第6章介绍低膨胀微晶玻璃点磨削表面硬度,第7章介绍可加工陶瓷点磨削表面质量建模与优化。

限于作者水平,书中难免存在不足,敬请读者批评指正。

作 者

2016年9月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 可加工陶瓷	1
1.2 可加工陶瓷的应用与分类	1
1.2.1 可加工陶瓷的应用	1
1.2.2 可加工陶瓷的分类	2
1.3 可加工陶瓷的加工特性及加工工艺措施	4
1.3.1 可加工陶瓷的加工特性	4
1.3.2 改善可加工陶瓷材料机加工质量的途径	5
1.4 本书主要内容	5
参考文献	5
第2章 可加工陶瓷切削过程中的材料去除	7
2.1 $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷钻削加工中的材料去除	7
2.1.1 材料去除过程	7
2.1.2 材料去除的影响因素	9
2.1.3 材料去除机理	10
2.1.4 $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷的加工缺陷	13
2.2 氟金云母陶瓷钻削加工中的材料加工去除	14
2.2.1 材料去除过程	15
2.2.2 材料加工去除的影响因素	16
2.2.3 材料钻削加工表面	19
2.3 氟金云母陶瓷车削加工中的材料加工去除	21
2.3.1 材料去除过程	21
2.3.2 刀具材料对氟金云母陶瓷材料去除率的影响	22
2.3.3 刀具材料对氟金云母陶瓷车削表面质量的影响	23
2.3.4 材料车削表面	25
2.4 本章结论	27
参考文献	27
第3章 可加工陶瓷切削过程中的刀具磨损	29
3.1 $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷钻削加工中的刀具磨损	29

3.1.1 刀具磨损过程	29
3.1.2 刀具磨损机理	30
3.1.3 刀具磨损的影响因素	33
3.2 氟金云母陶瓷钻削加工中的刀具磨损	37
3.2.1 刀具磨损过程	37
3.2.2 刀具磨损形态	38
3.2.3 刀具磨损的主要原因	39
3.2.4 刀具磨损的影响因素	43
3.3 氟金云母陶瓷车削加工中的刀具磨损	47
3.3.1 刀具磨损过程	48
3.3.2 刀具磨损的影响因素	48
3.3.3 刀具磨损形态	53
3.3.4 刀具磨损的主要原因	55
3.4 本章结论	60
参考文献	62
第4章 可加工陶瓷磨削表面成形机理及材料去除过程	63
4.1 工程陶瓷材料断裂力学	63
4.1.1 Griffith 断裂强度理论	63
4.1.2 临界切削载荷	64
4.1.3 临界切削厚度	65
4.2 工程陶瓷材料强度的影响因素	65
4.2.1 材料气孔率对陶瓷材料强度的影响	66
4.2.2 晶粒尺寸对陶瓷材料强度的影响	66
4.2.3 晶界相对陶瓷材料强度的影响	68
4.2.4 温度对陶瓷材料强度的影响	68
4.3 工程陶瓷微观断裂与裂纹扩展	69
4.3.1 断裂韧性	69
4.3.2 裂纹扩展阻力	70
4.3.3 断裂韧性与裂纹扩展速率	72
4.4 可加工陶瓷材料去除机制	73
4.4.1 可加工陶瓷材料压痕仿真试验	73
4.4.2 可加工陶瓷材料去除与表面形成机制	74
4.5 点磨削可加工陶瓷微观断裂去除模式	75
4.5.1 脆-塑性微观断裂转变的临界条件	75
4.5.2 脆性断裂去除	77

4.5.3 脆-塑性共存断裂去除	79
4.5.4 塑性断裂去除	81
4.6 点磨削工艺参数对脆性材料塑性域断裂去除的影响	82
4.6.1 试验	82
4.6.2 砂轮速度	84
4.6.3 轴向进给速度	85
4.6.4 磨削深度	86
4.6.5 倾斜角	87
4.6.6 偏转角	88
4.7 本章结论	90
参考文献	90
第5章 可加工陶瓷快速点磨削过程中的表面粗糙度	92
5.1 快速点磨削技术理论基础	92
5.1.1 快速点磨削原理	92
5.1.2 外圆磨削最大未变形切屑厚度	93
5.1.3 快速点磨削当量尺寸	95
5.2 工程陶瓷快速点磨削试验	95
5.2.1 试验原理与方法	95
5.2.2 试验设备	96
5.3 试验结果与讨论	98
5.3.1 砂轮速度	98
5.3.2 工件进给速度	99
5.3.3 磨削深度	99
5.3.4 倾斜角	100
5.3.5 偏转角	100
5.4 氟金云母陶瓷点磨削表面粗糙度模型	101
5.4.1 Malkin 运动学模型	101
5.4.2 Snoeys 经验模型	102
5.4.3 磨屑厚度模型	102
5.4.4 点磨削表面粗糙度数学模型改进	103
5.5 氟金云母陶瓷点磨削表面粗糙度模型检验	107
5.5.1 标准差	107
5.5.2 相对极值差	108
5.5.3 模型验证	110
5.6 本章结论	111

参考文献	111
第 6 章 低膨胀微晶玻璃点磨削表面硬度	113
6.1 多晶材料的理论硬度	113
6.1.1 原子硬度	113
6.1.2 离子硬度	114
6.1.3 键硬度以及材料硬度	114
6.2 磨削表面硬度的影响因素	115
6.2.1 材料组分	115
6.2.2 显微组织及其相变	117
6.2.3 磨削工艺参数对微观表面硬度的影响	118
6.3 试验	118
6.3.1 试验目的及原理	118
6.3.2 试验材料及设备	118
6.3.3 试验结果与讨论	119
6.4 微晶玻璃点磨削表面显微硬度的多元回归分析	123
6.4.1 多元回归预测模型的建立	123
6.4.2 模型检验	126
6.4.3 回归系数的显著性检验	126
6.4.4 模型验证	127
6.5 本章结论	128
参考文献	128
第 7 章 可加工陶瓷点磨削表面质量建模与优化	130
7.1 磨削表面质量及其评价指标	130
7.1.1 表面质量与零件的使用性能	130
7.1.2 磨削表面质量评价指标	130
7.1.3 磨削表面质量的影响因素	131
7.2 算法简介	132
7.2.1 BP 神经网络算法原理	132
7.2.2 PSO 算法原理	134
7.2.3 PSO 算法改进 BP 神经网络	135
7.3 基于 PSO-BP 算法的氟金云母点磨削表面粗糙度单因素数值拟合	136
7.3.1 砂轮速度与表面粗糙度	136
7.3.2 进给速度与表面粗糙度	137
7.3.3 磨削深度与表面粗糙度	137
7.3.4 砂轮倾斜角与表面粗糙度	138

7.3.5 砂轮偏转角与表面粗糙度	139
7.4 基于 PSO 算法的表面粗糙度多元模型优化与检验	140
7.4.1 模型假设	140
7.4.2 模型求解	140
7.4.3 多元模型验证	141
7.5 基于 PSO-BP 算法的氟金云母点磨削表面硬度数值拟合	141
7.5.1 砂轮速度与表面硬度	141
7.5.2 进给速度与表面硬度	142
7.5.3 磨削深度与表面硬度	143
7.5.4 砂轮倾斜角与表面硬度	144
7.5.5 砂轮偏转角与表面硬度	144
7.6 基于 PSO 算法的表面硬度多元模型优化与检验	145
7.6.1 模型假设	145
7.6.2 模型求解	145
7.6.3 多元模型验证	146
7.7 基于 PSO 算法的双目标优化	147
7.8 本章结论	148
参考文献	148

第1章 绪 论

1.1 可加工陶瓷

先进陶瓷是随着材料科学的发展,在人们对材料结构和性能之间的关系有了进一步深刻认识之后,通过控制材料化学成分和微观结构(组织)而人工合成的一类材料^[1,2]。随着新技术的发展、各种增韧补强措施的涌现、原料粒度不断细化以及制备工艺的不断进步,工程陶瓷材料性能日益提高,成为一种新型材料,日益受到重视。工程陶瓷可分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类^[3,4]。陶瓷材料自身的化学键性能决定了其在常温下有很高的硬度和很大的脆性^[5,6]。这种脆硬特性导致其存在难加工、加工损伤大等问题。此外,陶瓷材料良好的耐磨性、耐腐蚀性、电绝缘性也给某些特种加工带来了困难。但是将陶瓷作为结构材料,特别是作为机械零件相互配合使用时,仍然需要对其进行加工。

陶瓷材料是典型的硬脆难加工材料,其加工难度较大、加工成本较高,而普通机械加工会导致其材料强度下降,从而限制其应用。因此,高效、精密、低成本的机械加工技术将促进陶瓷材料在各领域的广泛应用。

可加工陶瓷是一种备受瞩目的新型材料,目前正成为竞相研发的热点。在通常条件下,运用普通的机械加工装备、工艺流程,按照确定的精度要求,不损失材料原有的机械强度而加工出成品零件,具有这种性质的陶瓷材料称为可加工陶瓷^[7]。这种可加工陶瓷具有优良的化学稳定性、抗热冲击性、力学性能、电性能和耐腐蚀性能等,且不老化、不变形,其最突出的特性是可以进行切削加工^[8-10]。因此,可加工陶瓷特别适合用于军工、航空航天、精密仪器、医疗设备、汽车和核工程等领域^[11]。然而,可加工陶瓷与金属材料相比较,具有在切削加工中刀具磨损快、使用寿命低、工件表面加工质量较差、加工效率低^[12]等缺点。

因此,开展可加工陶瓷材料不同加工工艺下的材料去除率、刀具磨损、加工面质量、刀具受力、刀具温度以及表面硬度的研究,寻求高效率、低成本、高质量的加工技术与方案,是可加工陶瓷材料在工程应用中亟须解决的现实课题之一。

1.2 可加工陶瓷的应用与分类

1.2.1 可加工陶瓷的应用

通过近四十年的努力,人们对可加工陶瓷的制备过程、内部构造和可加工机制

有了一定的认识^[11]。国内外陶瓷工作者通过显微结构设计等方法来改善陶瓷材料的可加工性,取得了一定的进展,使得采用传统金属切削刀具来加工陶瓷成为可能,从而为根本上解决陶瓷的难加工问题提供了新途径^[5,13,14]。

可加工陶瓷材料的共同特点在于,通过控制和调整陶瓷的显微结构及晶界应力,在陶瓷基体中引入层状、片状或孔形结构等特殊的显微结构,使陶瓷内部产生弱结合面,实现陶瓷材料的可加工性。目前广泛应用的机理为“桥联”效应,因相互交错的晶粒或第二相粒子的拔出效应阻碍了裂纹的进一步扩展,所以材料的韧性是裂纹尺寸的增函数,即 T 曲线特性或 R 曲线特性。增强桥联效应的重要因素在于,控制微结构量级的弱界面,使主裂纹偏转并生成有效的相互交错结构,激发 R 曲线^[8,15,16]。

可加工陶瓷由于其独特的优良性能且可被加工成结构复杂的零部件,在航空航天、军工、核能、生物医学、机械、电子等领域具有广阔的应用前景。通过改善陶瓷材料的可加工性,逐步实现以传统金属切削刀具加工陶瓷,为解决陶瓷难加工问题提供了新途径。

1.2.2 可加工陶瓷的分类

1. 按照材料成分不同分类

按照材料成分的不同,可加工陶瓷可分为三大类:可加工玻璃陶瓷、可加工氧化物陶瓷、可加工非氧化物陶瓷。

(1) 可加工玻璃陶瓷。玻璃陶瓷是研制最早的、目前应用最广泛的可加工陶瓷材料。可加工玻璃陶瓷的成分组成通常为 $R_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-F$ 体系,其中 R 表示碱金属。常见的云母相结构有氟金云母、锂云母和四硅酸氟金云母,其中以氟金云母最为常见。云母玻璃陶瓷的主要制备方法有烧结法、熔融法和 sol-gel 法,其中熔融法是常用的制备方法之一。

(2) 可加工氧化物陶瓷。在氧化物陶瓷材料如 $Al_2O_3-ZrO_2-3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 中添加稀土磷酸盐,如 $LaPO_4-CePO_4$,形成稀土氧化物可加工陶瓷材料。稀土磷酸盐本身具有良好的可加工性,且与氧化物陶瓷具有良好的化学相容性,并可形成氧化物与磷酸盐晶粒之间的弱界面。弱界面处微裂纹的形成与连接是稀土氧化物复合陶瓷材料具有可加工性的主要因素^[16]。

(3) 可加工非氧化物陶瓷。通过原位法制备的含钇铝石榴石(YAG)的复相 YAG/SiC 陶瓷,其剪裁的显微结构包含长晶粒、弱界面和因热膨胀失配引起的高内应力。其中,钇铝石榴石分子式为 $Y_3Al_5O_{12}$,属立方晶系,是目前所知的抗蠕变性能最好的氧化物材料。由于 SiC/C 体系的层状复合陶瓷的界面层对裂纹的钝化与偏转,其断裂韧性与基体材料相比发生了很大变化^[17]。

2. 按照陶瓷材料显微结构特点不同分类

按照陶瓷材料显微结构特点的不同,可加工陶瓷分为五大类:层片状可加工陶瓷、多孔可加工陶瓷、内应力可加工陶瓷、软硬相可加工陶瓷、纳米可加工陶瓷。

(1) 层片状可加工陶瓷。适当选择材料配比和热处理工艺,使晶粒长大成柱状或针状等且具有大长径比的特征,可使陶瓷形成层状或片状的微观结构。在层与层之间、片与片之间存在着弱界面,有利于微裂纹形成、捕捉、扩展,同时抑制了长裂纹的形成与延伸,从而提高了陶瓷的强度及韧性^[18],使材料易于去除,保证了材料的可加工性。如云母玻璃陶瓷、h-BN、石墨—h-BN、AlN/BN、Si₃N₄/BN、SiC/石墨体系、Mn⁺¹AX_n、层状硅酸盐、羟基磷酸盐等都具有这种结构特点。

(2) 多孔可加工陶瓷。多孔陶瓷中孔隙的存在使其具有较低的弹性模量,因此该材料具有良好的可加工性。选择合理的孔隙率可使得陶瓷材料既具有较高的强度,又具备优良的可加工性。例如,可加工多孔 SiC 材料^[19],其抗弯强度和弹性模量分别为 200MPa 和 120GPa。以柱状 β -Si₃N₄ 晶粒在三维方向随机连接为特征的多孔 Si₃N₄ 陶瓷^[20,21],可用硬质合金刀具加工。多孔硅灰石(CaO·SiO₂)不但易于加工^[22],而且具有一定的强度,与可铸造的玻璃陶瓷结合,宜应用于牙齿修复中。

(3) 内应力可加工陶瓷。Padture 等^[3]通过研究指出,将弱界面、长晶粒以及内部应力引入 SiC 陶瓷的显微结构中制成非均相 SiC 陶瓷,可显著改善 SiC 的可加工性。非均相结构中对可加工性起关键作用的是存在于晶界区域的弱界面,它使具有微观非均相的陶瓷相对于单组分均相陶瓷更有利于材料损伤形成和去除^[23]。

Padture^[24]通过试验发现,在 SiC 烧结中添加 Al₂O₃ 和 Y₂O₃ (摩尔比为 3:5) 可生成第二相的 YAG, YAG 的热膨胀系数与 SiC 相差很大($\Delta\alpha=5.1\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),因此在材料热处理过程中,两相之间产生了很大的内应力,促进了弱界面的形成,这使得材料可在晶界区域形成晶间微裂纹,导致个别晶粒的移位,从而使其具有良好的可加工性。在复相材料制备过程中,当材料从制备时的高温冷却到基体的塑性形变可以忽略的温度时,便开始在第二相粒子中形成均匀应力,而在基体相中形成周期性应力场,并且以弹性应变能的形式储存起来。温度进一步下降时,弹性应变能不断升高,直到这种弹性应变能的积累超过了相界的断裂表面能时,就会在相界处产生自发型微裂纹。

(4) 软硬相可加工陶瓷。它是由高熔点氧化物(如 Al₂O₃、ZrO₂、莫来石、CeZrO₂)和稀土金属磷酸盐(如 LaPO₄、CePO₄)形成的两相复合物^[16]。研究发现,该类复合物都可以用传统的金属加工工具(WC)进行切割和钻孔。同时,单

LaPO_4 也具有可加工性。Davis 等设计该类可加工陶瓷时,基于稀土磷酸盐和氧化物之间存在的比较弱的键合作用,使两相之间形成弱的界面。而在两相弱界面处微裂纹的形成与连接是该类化合物易于去除材料或具有可加工性的主要原因。

(5) 纳米可加工陶瓷。20 世纪 90 年代初,由新原皓一等率先使用纳米级陶瓷颗粒作弥散相引入微米级陶瓷基体中,制成纳米复相陶瓷。纳米技术与纳米陶瓷的出现,为改善陶瓷材料强度、韧性、耐高温、可加工性,以及获得综合性能优异新型陶瓷材料的研究工作开辟了新途径。

1.3 可加工陶瓷的加工特性及加工工艺措施

1.3.1 可加工陶瓷的加工特性

与工程陶瓷相比,可加工陶瓷具有较好的可加工性,但与金属材料的切削加工过程存在显著差异,硬脆性仍然是可加工陶瓷材料难加工的主要因素之一。与金属材料相比,可加工陶瓷在加工过程中的加工效率低,刀具磨损很快,因而其机械加工成本很高,广泛应用受到限制。

(1) 刀具磨损快。可加工陶瓷材料的切削过程表明,在加工初期刀具迅速磨钝,刀具磨损较快。

(2) 表面质量差。可加工陶瓷零件硬度高、脆性大、形状复杂,因而其加工质量较差。存在易崩裂、掉角、破碎,被加工零件尺寸一致性差、加工面锥度大,表面粗糙度大等现象。形成这些现象的主要原因是,陶瓷材料的烧结工艺控制不好,造成材料质地不均匀;毛坯形状不规则造成基准面不规范;高硬度材料对刀具的反切削作用造成刀具快速磨损。

(3) 加工效率低。为避免过高的切削热和工件表面产生宏观裂纹,云母玻璃陶瓷的切削速度一般选择为铸铁切削速度的一半,并采用水基冷却液^[14]冷却。例如,为了防止钻削过程中钻头引入、切出时所造成的孔口崩边现象,往往采用双面钻孔或钻孔后双面磨削的工艺。很明显,为保证加工质量,无论采用降低切削速度还是增加加工工序的方案,其直接结果都是加工效率降低。

(4) 加工成本高。为保证加工质量、满足使用要求,可加工陶瓷在加工时,常采取多工序组合的复杂工艺路线或特种加工方法,因此机械加工成本较高。在改善陶瓷加工方面,为降低加工成本,中外学者在加工工具、加工技术和加工参数优化等方面进行了大量的研究工作。到目前,许多重要陶瓷部件制备的成本仍主要是精加工成本(约占整个部件制备费用的 70% 以上)^[25]。一些复杂形状的陶瓷部件的机械加工问题一直限制着陶瓷材料的广泛应用。

1.3.2 改善可加工陶瓷材料机加工质量的途径

(1) 合理选择加工工艺参数。对于可加工陶瓷,可以采用普通刀具和传统机械加工方法进行切削加工,工艺简单,加工效率高,但在加工时要特别注意合理选择加工方法、夹具、刀具材料、刀具角度、切削用量以及冷却方法等。针对不同的可加工陶瓷材料,如何选择合适的加工参数,关系到材料的加工质量。

(2) 改善材料加工性能。非氧化物陶瓷如 SiC 、 Si_3N_4 难以加工,并且其机械加工后常导致陶瓷材料的强度下降,影响材料的使用性能。复相陶瓷的研制成功使得非氧化物陶瓷变得易加工,而且不影响其性能。

(3) 设计材料显微结构增加沿晶断裂。可加工陶瓷材料的共同特点是在陶瓷基体中引入特殊的显微结构,如层状、片状或多孔结构等,在陶瓷内部产生弱结合面偏折主裂纹,加工时裂纹沿弱界面形成和连接。例如,对于稀土氧化物复合陶瓷材料,随着稀土磷酸盐含量的增加,该复合陶瓷材料的可加工性提高。去除其材料表面薄层可以发现,材料内部存在晶间断裂现象,在粒度范围($2\sim 5\mu\text{m}$)内存在位错,但无明显的深裂纹。

1.4 本书主要内容

本书共7章,分别介绍了可加工陶瓷切削过程的材料去除、可加工陶瓷切削过程的刀具磨损、可加工陶瓷磨削表面成形机理及材料去除过程、可加工陶瓷快速点磨削表面粗糙度、低膨胀微晶玻璃点磨削表面硬度、可加工陶瓷点磨削表面质量建模与优化。

参 考 文 献

- [1] 穆柏春,等. 陶瓷材料的强韧化[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [2] 金志浩,高积强,乔冠军. 工程陶瓷材料[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [3] Padture N P, Christopher C J, Xu H H K, et al. Enhanced machinability of silicon carbide via microstructural design[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78: 215~217.
- [4] Evans A G, Marshall D B. Wear mechanisms in ceramics[J]. Fundamentals of Friction and Wear of Materials, 1980: 439~452.
- [5] 周振军,刘家臣,杨正方,等. 可加工陶瓷研究现状[J]. 材料导报, 2001, 15(1): 33~36.
- [6] 田欣利,徐西鹏,袁巨龙,等. 工程陶瓷先进加工与质量控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [7] 马廉洁,于爱兵,韩建华,等. $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 可加工陶瓷材料钻削加工的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2004, 23(5): 106~108.
- [8] Xu H H K, Jahanmir S. Scratching and grinding of a machinable glass-ceramic with weak in-

- interfaces and rising T-Curve[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(2): 497~500.
- [9] Grossman D G. Machinable glass-ceramics based on tetra silicic mica[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1972, 55(9): 446~449.
- [10] Boccaccini A R. Machinability and brittleness of glass-ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 65: 302~304.
- [11] Lawn B R, Padture N P, Cai H, et al. Making ceramics "ductile" [J]. Science, 1994, 263: 1114~1116.
- [12] 于爱兵, 马廉洁, 谭业发. 氟金云母陶瓷钻削刀具磨损形态研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(1): 79~83.
- [13] 李永利, 乔冠军, 金志浩. 可切削加工陶瓷材料研究进展[J]. 无机材料学报, 2001, 16(2): 207~211.
- [14] 黄勇, 汪长安, 等. 高韧性复相陶瓷材料的仿生结构设计制备与力学性能[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2002, 21(3): 1~7.
- [15] 钱晓倩, 葛曼珍, 吴义兵, 等. 层状复合陶瓷强韧化机制及其优化设计因素[J]. 无机材料学报, 1999, 14(4): 520~526.
- [16] Davis J B, Marshall D B, Housley R M, et al. Machinable ceramics containing rare-earth phosphates[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(8): 2169~2175.
- [17] Clegg W J, Kendall K, Alford N M, et al. A simple way to make tough ceramics[J]. Nature, 1990, 347(10): 445~447.
- [18] 李永利, 乔冠军, 金志浩. 可加工性 BN/ Al_2O_3 陶瓷基复合材料的制备[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1179~1183.
- [19] Katsuaki S. Mechanical properties and microstructures of machinable silicon carbide[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(5): 1175~1181.
- [20] Kawai C, Yamakawa A, et al. Effect of porosity and microstructure on the strength of Si_3N_4 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(10): 2705~2708.
- [21] 乔冠军, 王永兰, 金志浩. 一种可切削玻璃陶瓷的压痕断裂特性[J]. 无机材料学报, 1995, 10(2): 169~174.
- [22] 乔冠军, 王永兰, 金志浩. 以 Ba 云母为主晶相的可切削玻璃陶瓷[J]. 无机材料学报, 1996, 11(1): 29~32.
- [23] Hockin H K X, Padture N P, Jananmir S. Effect of microstructure on material-removal mechanisms and damage tolerance in abrasive machining of silicon carbide[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(9): 2443~2448.
- [24] Padture N P. In situ-toughened silicon carbide[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 77(2): 519~523.
- [25] Yu A B, Zhong L J, Liu J C, et al. Machinability evaluation of $\text{Ce-ZrO}_2/\text{CePO}_4$ ceramics[J]. Key Engineering Materials, 2004, 259-260: 259~263.

第 2 章 可加工陶瓷切削过程中的材料去除

近年来,高性能陶瓷材料的应用不断扩大,现代高科技产业对陶瓷材料性能提出了更为苛刻的要求,特别是作为机械构件相互配合使用前,仍需机械加工。例如,零热膨胀的超精密加工机床主轴,高真空线性电子加速器、导弹、飞行器中的微波输能窗,激光陀螺仪、大型天文望远镜的镜片,与骨组织产生骨性结合的生物活性陶瓷等都属于可加工陶瓷。因此,对高性能玻璃陶瓷的高效、精密加工技术及相关装备的研究和开发,具有重要的意义^[1]。

可加工陶瓷虽然具有一定的可加工性,但陶瓷材料的硬脆特性使其难以加工,这与金属材料切削性能相比还有较大差别。目前,有关可加工陶瓷的研究大多集中在材料制备及性能方面,而关于材料加工去除、加工工艺及装备、工具材料和技术等方面的系统研究与报道尚不多见,关于玻璃陶瓷加工技术的研究报道较少,因此,开展有关可加工陶瓷材料加工技术方面的研究工作,探索大批量、低成本、高效率的加工技术,研究刀具快速磨损、提高加工效率、降低加工成本、减小加工损伤等问题是很有价值的,它们是可加工陶瓷机械加工研究中的重要现实价值的课题,也是可加工玻璃陶瓷工程应用中亟须解决的关键技术之一。本章通过硬质合金刀具和高速钢刀具对氟金云母可加工陶瓷材料的钻削和车削试验,分析材料加工去除特性,讨论刀具材料、冷却条件、切削速度、刀具角度等工艺参数对材料去除率的影响^[2]。

2.1 $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷钻削加工中的材料去除

2.1.1 材料去除过程

图 2.1 给出了硬质合金钻头(YG6X)加工 $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷和低碳钢时材料去除量随时间变化的对比曲线。由图可见其材料去除率(曲线斜率)很低。在加工初始阶段很短的一段时间内, $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷材料去除率比低碳钢的还高,但持续时间较短(仅相当于总加工时间的 2.5%),加工持续 80s 之后材料去除率迅速下降。同时也说明,在切削 $\text{ZrO}_2/\text{CePO}_4$ 陶瓷过程中,刀具磨损比较剧烈。

机械加工生产的基本要求是,获得较高的加工效率和较低的刀具磨损,以降低机械加工成本,提高生产效率。因此,要综合考虑材料去除与刀具磨损两方面的因

素,以考查材料的可加工性能和刀具性能。

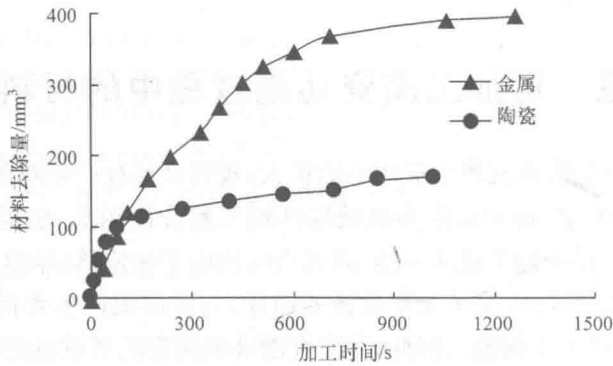


图 2.1 YG6X 钻头加工时材料去除量与加工时间关系

图 2.2 给出了材料去除率随刀具磨损量变化的关系曲线(简称 Q - VB 曲线)。由图 2.2(a)可知,无论使用高速钢钻头还是硬质合金钻头,25# 低碳钢的 Q - VB 曲线都是一次函数关系。由图 2.2(b)可知,因刀具材质的不同, $ZrO_2/CePO_4$ 陶瓷材料去除率产生了较大变化。高速钢钻头情况下的 Q - VB 曲线仍然是一次函数,随着刀具磨损量的增大,材料去除率的变化量极小,在加工过程中,以刀具磨损为主要特征,加工效率低。而硬质合金钻头情况下的 Q - VB 曲线是幂函数,刀具磨损的速度更快,刀具磨损量存在某一临界值 VB_{th} ,在未达到该值以前,材料去除率较大,切削过程以材料加工去除为主要表现;在超过该值以后,材料去除率较小,以刀具磨损为主要表现。以此为参照,钻削 $ZrO_2/CePO_4$ 陶瓷材料的去除过程可分为两个阶段:初期阶段为高效加工阶段,在该阶段,材料去除率较大,刀具磨损量较小;后期阶段为高磨损阶段,在该阶段,材料去除率较小,刀具磨损量较大。

