



工程陶瓷先进加工与 质量控制技术

Advanced Machining and Quality Control
Technology for Engineering Ceramics

田欣利 徐西鹏 袁巨龙 张保国 邓朝晖 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助 山 川

工程陶瓷先进加工与质量控制技术

田欣利 徐西鹏 编著
袁巨龙 张保国 邓朝晖

国防工业出版社

内 容 简 介

本书在概要总结工程陶瓷材料加工特性以及传统加工技术的基础上,较全面地介绍了近年来国内外新发展起来,有关工程陶瓷的先进加工与质量控制的基本原理和关键技术。本书共分8章,包括工程陶瓷材料及其加工特性,工程陶瓷的传统加工技术概述,工程陶瓷的金刚石刀具高效加工新技术,工程陶瓷的光整加工与超精密加工,工程陶瓷的辅助能量法加工,工程陶瓷的高能束流加工,工程陶瓷的电加工,工程陶瓷加工的质量检测与控制新技术。

本书读者对象为陶瓷材料(或无机非金属材料)和机械制造专业的本科生、研究生,以及从事相关专业的研究人员和工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

工程陶瓷先进加工与质量控制技术/田欣利等编著. —北京:国防工业出版社,2014.5
ISBN 978-7-118-09308-7

I. ①T... II. ①田... III. ①陶瓷-工程材料-加工-质量控制 IV. ①TB321

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第070579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)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售



*
开本 787×1092 1/16 印张 25 1/4 字数 598 千字
2014年5月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 88.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777
发行传真: (010)88540755

发行邮购: (010)88540776
发行业务: (010)88540717

编委会名单

田欣利 张保国 吴志远 (装甲兵工程学院)

唐修检 郭 昉 王健全

徐西鹏 沈剑云 (华侨大学)

袁巨龙 吕冰海 (浙江工业大学)

林 彬 林 滨 张晓峰 (天津大学)

于爱兵 (宁波大学)

邓朝晖 (湖南科技大学)

主 审

艾 兴 (山东大学)

于思远 (天津大学)

前 言

工程陶瓷材料由于其优异的耐磨损、耐腐蚀、抗高温、低密度等性能,在工业领域得到了广泛的应用,并被公认为 21 世纪最有活力的新型材料之一。另一方面,由于陶瓷的硬脆特性,使其成为典型的难加工材料,从而成为阻碍其发展的“瓶颈”。陶瓷加工技术是陶瓷制造的关键技术,近年来由于需求驱动,使得该技术发展很快。特别是近十余年来,在传统金刚石砂轮磨削技术的基础上,国内外新发展起来的很多先进加工技术,如辅助电极法电火花加工绝缘陶瓷技术、激光及电子束、离子束等高能束流加工技术,以及超声加工技术等,这些陶瓷加工新技术的出现无疑对于推动陶瓷加工技术的进步具有重要的意义。为了满足工业界对陶瓷零件高精度、高表面质量、高效率 and 低成本加工技术的迫切需求,有必要及时总结近年来陶瓷加工新技术的最新研究和应用成果,旨在为工程陶瓷材料加工行业的科技人员提供参考,也可作为高等院校机械制造和陶瓷材料专业的高年级学生及研究生的教科书或参考书。

本书为国内外第一部系统、全面地阐述近 20 年来国内外涌现出来,并有广阔应用前景的陶瓷加工与质量控制先进技术的专著。编著者均为从事多年陶瓷加工的研究与教学工作,并在国内具有较大影响的中青年专家。书中的很多内容都是几位作者多年的研究成果,包括已获得多项国家发明专利,其中有相当一部分成果已应用于生产。本书主要阐述了近年来国内外在陶瓷加工领域所取得的最新学术成果,以陶瓷加工的新理论、新技术、新工艺以及应用为主要内容,内容丰富、层次分明、特色突出。

本书共分 8 章,内容包括:工程陶瓷材料及其加工特性,工程陶瓷的传统加工技术概述,工程陶瓷的金刚石刀具高效加工新技术,工程陶瓷的光整加工与超精密加工,工程陶瓷的辅助能量法加工,工程陶瓷的高能束流加工,工程陶瓷的电加工,工程陶瓷加工的质量检测与控制新技术等。本书由田欣利、徐西鹏、袁巨龙、张保国、邓朝晖编著,负责全书的构思和编审。参加编写的有田欣利(第 1 章,第 3 章 4、8 节,第 6 章第 2 节,第 7 章 2、3、4、5 节,第 8 章 3、4、5、6 节,吴志远、唐修检、郭昉、王健全参与了编写工作)、徐西鹏、沈剑云(第 3 章 2、5、6、7 节)、林彬、张晓峰(第 3 章第 3 节,第 5 章第 1 节,第 7 章第 1 节)、袁巨龙、吕冰海(第 4 章,第 6 章第 3 节)、邓朝晖(第 3 章第 1 节)、于爱兵(第 2 章)、林滨

(第8章1、2节)、张保国(第5章2、3、4节,第6章第1节)。

山东大学艾兴院士、天津大学于思远教授对本书进行了严格与细致的审阅,提出了很多宝贵的意见,在此表示衷心感谢。

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

2013年12月

目 录

第 1 章 工程陶瓷材料及其加工特性	1
1.1 工程陶瓷材料的应用	1
1.1.1 在发动机中的应用	1
1.1.2 在轴承中的应用	2
1.1.3 在冶金和化工行业中的应用	3
1.1.4 在切削刀具行业中的应用	4
1.1.5 在国防领域中的应用	6
1.1.6 在航空航天领域中的应用	8
1.2 工程陶瓷材料	8
1.2.1 分类与特点	8
1.2.2 常用工程陶瓷材料	9
1.2.3 工程陶瓷材料的制备	18
1.3 工程陶瓷材料的力学性能	23
参考文献	26
第 2 章 工程陶瓷的传统加工技术概述	27
2.1 工程陶瓷材料的加工机理	27
2.1.1 陶瓷材料的切削机理	27
2.1.2 陶瓷磨削机理的理论分析	33
2.1.3 陶瓷磨削机理的实验研究	38
2.2 工程陶瓷的切削加工技术	44
2.2.1 工程陶瓷材料的切削特性	44
2.2.2 可切削陶瓷材料的切削特性	47
2.2.3 可切削陶瓷材料的车削加工	49
2.2.4 可切削陶瓷材料的钻削加工	51
2.3 工程陶瓷的磨削加工技术	52

2.3.1	工程陶瓷材料的磨削特性	52
2.3.2	金刚石砂轮	61
2.3.3	金刚石砂轮的修整	67
2.3.4	陶瓷磨削机床	70
	参考文献	72
第3章	工程陶瓷的金刚石刀具高效加工新技术	73
3.1	工程陶瓷高速磨削技术	73
3.1.1	高速磨削现象的解释	73
3.1.2	工程陶瓷高速磨削的磨削力	74
3.1.3	工程陶瓷高速磨削的磨削热分配	78
3.1.4	工程陶瓷高速磨削的磨削温度	79
3.1.5	工程陶瓷高速磨削的表面形貌	84
3.1.6	工程陶瓷高速磨削的表面粗糙度	86
3.1.7	工程陶瓷高速磨削的表面/亚表面损伤及砂轮磨损	87
3.2	工程陶瓷的在线电解修整磨削	89
3.2.1	在线电解修整(ELID)磨削技术	89
3.2.2	工程陶瓷 ELID 磨削	92
3.3	工程陶瓷大背吃刀量缓进给磨削	94
3.3.1	工程陶瓷杯形砂轮大背吃刀量缓进给端面磨削	94
3.3.2	工程陶瓷平形砂轮大背吃刀量缓进给磨削	100
3.4	小砂轮轴向缓进给磨削工程陶瓷技术	103
3.4.1	小砂轮轴向缓进给磨削加工原理和特点	103
3.4.2	小砂轮轴向缓进给磨削用小砂轮和加工装置	103
3.4.3	小砂轮轴向缓进给磨削机理分析	104
3.5	金刚石切割陶瓷新技术	106
3.5.1	金刚石切割加工技术概述	106
3.5.2	陶瓷外圆切割技术	107
3.5.3	金刚石线锯切割陶瓷技术	111
3.6	工程陶瓷孔加工新技术	115
3.6.1	金刚石薄壁钻的种类及其性能参数	116
3.6.2	钻削加工过程及加工质量	118
3.6.3	钻头非均匀磨损及打滑现象	121
3.7	砂轮平衡技术及表面磨粒的检测	122
3.7.1	砂轮平衡技术	122

3.7.2	砂轮表面磨粒的检测	125
3.8	陶瓷高效磨削液技术	132
3.8.1	磨削液种类和应用特点	132
3.8.2	陶瓷专用磨削液的评价方法	134
3.8.3	陶瓷磨削液研究现状	137
	参考文献	139
第4章	工程陶瓷的光整加工与超精密加工	142
4.1	工程陶瓷的研磨与抛光加工技术	142
4.1.1	工程陶瓷的研磨加工技术	142
4.1.2	工程陶瓷的抛光加工技术	143
4.1.3	研磨与抛光的主要工艺因素	145
4.2	工程陶瓷的非接触抛光	151
4.2.1	弹性发射加工	152
4.2.2	动压浮离抛光	154
4.2.3	浮动抛光	155
4.2.4	切断、开槽及端面抛光	160
4.2.5	非接触化学抛光	160
4.3	工程陶瓷的界面反应抛光	162
4.3.1	机械化学固相反应	162
4.3.2	水合反应	163
4.3.3	界面反应抛光原理	164
4.3.4	机械化学抛光	164
4.3.5	水合抛光	166
4.3.6	胶态 SiO_2 抛光	168
4.4	工程陶瓷的磁场辅助光整加工技术	169
4.4.1	磁性磨料研磨加工	170
4.4.2	磁流体抛光	174
4.4.3	磁流变加工	177
4.5	陶瓷球的精密加工技术	181
4.5.1	精密陶瓷球概述	181
4.5.2	陶瓷球的基本加工过程	182
4.5.3	陶瓷球的加工方式	183
4.5.4	陶瓷球加工工艺	187
4.6	工程陶瓷的超精密磨削	195

参考文献	204
第 5 章 工程陶瓷的辅助能量法加工	206
5.1 超声辅助加工技术.....	206
5.1.1 超声加工技术的发展历程	206
5.1.2 超声加工的原理和特点	207
5.1.3 超声加工设备及其组成部分	210
5.1.4 超声加工的应用	214
5.2 工程陶瓷的激光加热辅助切削技术.....	216
5.2.1 激光加热辅助切削的原理与特点	217
5.2.2 激光加热辅助切削陶瓷的形式	217
5.2.3 激光加热辅助切削工程陶瓷机理	221
5.2.4 影响工程陶瓷激光加热辅助切削的参数	224
5.2.5 研究进展	225
5.3 微波加热辅助切削技术.....	227
5.3.1 微波的基本概念	227
5.3.2 微波加热及其特点	228
5.3.3 微波在陶瓷加工中的应用	229
5.4 工程陶瓷的其他热源辅助切削技术.....	232
参考文献	234
第 6 章 工程陶瓷的高能束流加工	236
6.1 工程陶瓷的激光加工.....	236
6.1.1 激光加工特点及激光器	236
6.1.2 激光加工工程陶瓷的原理	237
6.1.3 激光加工工程陶瓷的应用	241
6.2 高压磨料水射流加工.....	246
6.2.1 概述	246
6.2.2 高压磨料水射流切割技术	248
6.2.3 高压磨料水射流抛光技术	252
6.2.4 高压磨料水射流铣削技术	257
6.2.5 高压磨料水射流的其他应用	259
6.3 硅微细加工.....	260
6.3.1 微细加工概述	260
6.3.2 硅微细加工技术	262

6.3.3	光刻加工技术	266
6.3.4	LIGA 技术及准 LIGA 技术	269
6.3.5	准分子激光微细加工技术	273
	参考文献	275
第 7 章	工程陶瓷的电加工	278
7.1	电火花加工陶瓷技术	278
7.1.1	概述	278
7.1.2	工程陶瓷的电火花加工技术	279
7.1.3	陶瓷电火花加工的后处理	292
7.1.4	陶瓷电火花的复合加工与高速加工	293
7.2	电极引弧微爆炸加工技术	296
7.2.1	加工系统的研制	296
7.2.2	加工工程陶瓷的实验	298
7.2.3	加工工程陶瓷的机理	300
7.2.4	加工变质层性能与可加工性	304
7.3	双电极同步伺服电火花机械复合磨削加工	307
7.3.1	工作原理与特点	308
7.3.2	各种参数的影响规律探讨	309
7.3.3	加工 Al_2O_3 陶瓷温度场数值模拟	310
7.4	电火花诱导可控烧蚀磨削陶瓷技术	312
7.5	等离子弧切割陶瓷技术	314
7.5.1	等离子弧切割的基本概念	314
7.5.2	等离子弧切割陶瓷技术	315
	参考文献	320
第 8 章	工程陶瓷加工的质量检测与控制新技术	322
8.1	工程陶瓷加工表面形貌测量分析技术	322
8.2	工程陶瓷磨削表面损伤的图像检测与评价	333
8.2.1	表面损伤的图像检测方法	333
8.2.2	工程陶瓷表面的加工损伤	334
8.2.3	损伤图像检测的关键技术	336
8.2.4	工程陶瓷表面加工损伤检测与评价	342
8.3	工程陶瓷加工表面与内部缺陷的无损检测	349
8.3.1	目视检测	350

8.3.2	表面渗透检测	351
8.3.3	超声波检测	352
8.3.4	射线检测	357
8.3.5	工业 CT 检测	361
8.3.6	其他无损检测技术	364
8.4	声发射在线检测	368
8.4.1	声发射技术原理及特征	368
8.4.2	声发射信号采集系统	369
8.4.3	声发射数据处理	370
8.4.4	声发射技术在陶瓷加工中的应用	372
8.5	边缘碎裂	375
8.5.1	边缘碎裂的产生过程	376
8.5.2	边缘碎裂的研究现状	377
8.6	工程陶瓷预应力磨削	381
8.6.1	预应力加工的基本概念	381
8.6.2	工程陶瓷预应力磨削加工	384
8.6.3	工程陶瓷三维周向包封磨削加工	387
	参考文献	389

第 1 章 工程陶瓷材料及其加工特性

1.1 工程陶瓷材料的应用^[1,2]

长期以来,陶瓷留给人们的最深印象就是“硬而脆”,“硬”的直接体现就是加工困难,在此方面,经过半个多世纪该领域科技工作者的艰苦努力,加工效率和加工成本都有显著改善。对“脆”而言,现在的陶瓷材料也与几十年前不能同日而语了。今天,以高性能 SiC、Si₃N₄、部分增韧氧化锆以及各种增韧陶瓷、陶瓷基复合材料为代表的新型陶瓷的快速发展,特别是陶瓷基复合材料(CMC),基本克服了一般陶瓷的脆性,其力学性能逐渐与硬质合金材料接近。工程陶瓷的用途也日益广泛,不仅工业运用越来越普遍,甚至用到了过去根本无法想象的固体火箭发动机的内衬、喷管等关键部件上。因此不仅改变了人们对陶瓷的传统认识,而且正在不断地向人们充分展示作为新一代工程材料得天独厚的优势,使其成为未来工业领域的重要结构材料。

1.1.1 在发动机中的应用

早在 20 世纪 60 年代,美国等发达国家就开始重视汽车排放问题,如 CO、HC、NO_x 等有害气体及微粒对大气环境的影响,随后的石油危机又迫使人们寻求节约汽车燃料消耗的方法。因此,许多国家已把工程陶瓷材料应用于发动机作为重要的工程目标,并取得了很好的经济效益。

美国、日本、德国、英国、中国等国家先后开始陶瓷发动机的研制与开发工作。目前已产业化的陶瓷发动机零件主要有涡轮增压器转子、电热塞、摇臂镶块、排气口内衬、预燃烧室镶块、氧化铝纤维增强的铝合金连杆与铝合金活塞等。另外还有部分陶瓷零件也在逐渐进入实用化,如挺杆、活塞销、活塞、气门、气门导管、气门座、喷油嘴针阀等。福特、五十铃、丰田、戴姆勒-本茨、斯坦福研究所等部门已成功制造了数十种陶瓷发动机关键零部件,并且大多已实用化。日产柴油机公司生产的氮化硅陶瓷挺柱,价格与烧结合金挺柱相当,但耐磨性更好,在 20 世纪 80 年代中期就已批量生产并应用于重型卡车发动机上。由于陶瓷材料的密度是一般钢铁的 1/2,用其制造发动机配气机构的大部分部件可以简化缸盖部分的冷却系统,从而降低成本。五十铃公司生产的四缸 2L 陶瓷柴油发动机,质量仅为 140kg,减轻了约 30%。

涡轮增压器转子是满足陶瓷部件实用化条件的典型例子。因为涡轮增压器不是发动机主体的机构部件,即使陶瓷转子万一损坏也不会造成致命的事故。日本 NHK 公司研制的气压烧结合氮化硅增压陶瓷转子,于 1985 年 10 月首先成功应用在日产汽车“Fairlady Z”上,其主要优点是惯性小,加速响应性能得到改善。日本的陶瓷涡轮转子主要用于国内轿车,现在大约有 1/4 采用增压技术的轿车都已装上了陶瓷转子。美国的陶瓷转子主要应用于重型卡车发动机中,其不但能加快响应,而且可以减少烟雾和微粒排放。

活塞陶瓷化的主要优点是:活塞顶以及燃烧室的陶瓷化,可以实现部分或全绝热,从而取消冷却系统并且回收废气能量以降低油耗;降低活塞的温度以及改善排放等。到目前为止,陶瓷的活塞化形式主要有两种方式:一是采用陶瓷镶块;二是采用陶瓷涂层。日本三井造船公司在二冲程柴油机活塞上应用陶瓷涂层,活塞顶温度下降了 $80 \sim 130^{\circ}\text{C}$ 。日立造船在一个 400mm 缸径活塞上采用双层陶瓷结构,活塞顶外面用氮化硅承受热应力,下面采用较薄的氧化锆起绝热作用,此活塞的绝热度达 57% 。福特公司采用全陶瓷活塞。克莱斯勒公司研制轻型组合活塞,其头部用陶瓷制造。

陶瓷气门可以解决高温热载荷下的气门烧损问题,且由于密度小可使配气机构正常工作转速上限提高,从而可提高发动机的充气系数和功率。德国奔驰公司从 1982 年开始与德国和日本的陶瓷厂家合作研制陶瓷气门,该公司把陶瓷气门用在 M104 发动机中,在 1991—1993 年间运行了 1130万 km ,充分验证了陶瓷气门的可靠性。有几辆全部装了陶瓷气门的汽车已经行驶了 16万 km 以上,其中只有一个气门损坏,经更换后仍继续使用。

陶瓷电热塞是第三代发动机电热塞,其起动性能和点火稳定性比金属电热塞优越,在日本已使用多年。第三代电热塞是发热体全部用导电陶瓷制造的全陶瓷电热塞。使用可靠性更加提高,现已大量生产。陶瓷电热塞不仅可以缩短柴油机的起动时间,还可以使柴油机在低温下易于起动,金属电热塞的最低起动温度约为 -30°C ,而快速起动型陶瓷电热塞即使在 -36°C 都能顺利起动。采用陶瓷电热塞还可以减轻柴油机冒白烟,降低柴油机怠速噪声,它的推广应用将带来很大的经济效益。日本 Denso 公司年产量为 120 万件,主要用于丰田公司生产的汽车。美国 DDC 公司已开发成功用于甲醇发动机和其他重型发动机的陶瓷电热塞。

陶瓷挺柱是日产柴油机车公司研究开发的关键零件,并从 1993 年开始在系列产品上正式应用。该挺柱由三部分组成:气氛烧结氮化硅陶瓷圆片、活性焊接层和刚性挺柱。这种结构要求陶瓷片直接焊在钢制挺柱上,由于陶瓷的线膨胀系数比钢小得多,因而必须选择适当成分的合金钢,并利用其马氏体相变来减少收缩时与陶瓷间的差异。试验表明采用陶瓷挺柱后挺柱和凸轮轴的磨损量都大为降低。日本 NGK 火花塞陶瓷公司制造这种陶瓷挺柱并供货给日产柴油机车公司,用于 4t 载货汽车柴油机。

陶瓷活塞销可减小往复惯量,又因其变形小可减少销孔的应力。由于陶瓷的硬度高,陶瓷活塞销与金属基复合材料的连杆和活塞一起使用时,可因其优良的摩擦性能而提高活塞的耐磨性。

我国政府高度重视陶瓷发动机的研制与开发工作,自 20 世纪 80 年代起将该项研究列入国家“七五”、“八五”、“九五”科技攻关计划,近年来国家“863”、国家“973”项目持续资助陶瓷材料在汽车发动机上应用技术的开发,不断有新的成果出现,发展前景看好。

1.1.2 在轴承中的应用

对金属轴承来说,要求工作时润滑剂必须将相互运动的表面完全隔离以避免严重磨损。若轴承在不充分润滑的条件下工作则对摩擦副材料的要求极高,首先要求高硬度和低附着磨损,此外所承受的循环交变载荷要求材料具有均匀的组织结构。陶瓷的高硬度和耐磨性可完全满足上述要求。目前在无润滑运转的真空泵、水润滑的压缩机、高速涡轮机、无菌操作装饮料的设备、食品称量系统、制药、化学工业和半导体制造中用的排风扇、

芯片制造中的机械手、氮泵和氢泵、赛车传动系统等机械装置中陶瓷轴承的应用非常普遍。

陶瓷轴承可分为全陶瓷轴承和混合陶瓷轴承。全陶瓷轴承是指轴承全部是由陶瓷材料构成,而混合陶瓷轴承是指轴承中的一部分(如滚动体、外圈、内圈等)是由陶瓷材料制成,其余由传统的钢材制成。其中混合陶瓷轴承使用得更为普遍。根据使用环境、工况等因素,综合确定陶瓷材料种类。大多数陶瓷轴承为氮化硅,少数条件下使用氧化锆和碳化硅。

在加工技术中,为了提高生产率必须提高转速,如铣削加工中心主轴或磨削加工中心主轴,其转速决定着整个机床的生产效率。在这些主轴上使用陶瓷轴承则能显示其独特的优越性。与常规轴承相比,混合陶瓷轴承因其氮化硅球或滚子较轻以及具有很高的耐磨性,从而显著提高了极限转速。与相同类型的钢制轴承相比,最大转速可提高25%~30%。

带钢采用连续式镀锌,要求镀膜表面质量很高。从约500℃热熔融液体中工作的辊子支承的现有技术水平来看,目前使用滑动轴承达不到令人满意的耐用度。采用大型氮化硅滚子轴承进行试验,证明了其具有引导精度高、旋转阻力小的优点,从而保证良好的产品质量。

对化学泵和搅拌器来说,使用其输出腔完全密封的磁力传动装置来驱动密封泵中的泵转子,主要问题是泵转子轴承置于腐蚀介质中,并且必须在无润滑条件下工作。实践证明陶瓷轴承完全能胜任。此外,发酵设备中搅拌器的轴承必须能够经受高温蒸汽处理,在此使用全陶瓷轴承,可以不用润滑剂,显示了其出色的抗热冲蚀的能力。

在现代铁路机车车辆中,由于陶瓷轴承所具有的电绝缘性而被应用于主电动机中,陶瓷轴承避免了常规主电动机用轴承的电蚀损伤,满足了轴承的维修简化和长期免维护的要求。

立式轴流水泵中的轴承处于含砂水磨的工作环境,因此要求轴承材料必须具有抗粘性、耐磨等性能。采用了陶瓷轴承后,实现了无水润滑,在含砂水磨条件下具有优异的耐磨性能。上海河流污水治理二期工程的主泵就应用了陶瓷轴承,此外,上海大桥泵站主泵立式抽芯轴流泵、台州电厂四期工程立式抽芯混流泵、扬州第二发电厂循环水泵、广东韶关厂循环水泵等均采用了氮化硅陶瓷轴承,使用效果良好。

有机硅室温搅拌釜中的物料在反应过程中形成了黏度较大的聚合物,使得搅拌装备在运转中所需的功率较大。1993年吉化电石厂首次在搅拌釜中使用氮化硅陶瓷轴承。由于该轴承可在200℃以上的高温中长期运转,且具有较高的耐磨性,对物料不会产生污染,所以使用寿命提高了十几倍,并延长了设备的运转周期,效果显著。在密封磁力传动泵中采用氮化硅陶瓷轴承,满足了密封磁力传动泵泄漏小、可靠性高、免维护、使用寿命长的要求。2003年6月著名电脑商富士康采用纳米陶瓷轴承技术制造了系列电脑散热风扇,不仅噪声大大降低,而且使用寿命显著提高。

1.1.3 在冶金和化工行业中的应用

氧化物陶瓷如 Al_2O_3 和 ZrO_2 的特点是化学稳定性好、抗氧化性强、熔融温度高等。特别是 ZrO_2 陶瓷耐热性好,质量热容和热导率小,可作为连续铸锭的耐高温材料,也适用

于做电炉发热体和炉膛耐火材料。化工行业用的陶瓷材料以氧化铝、莫来石为主,具有优异的耐腐蚀性能,使用温度为 $-15 \sim 100^{\circ}\text{C}$,冷热骤变温差不大于 50°C ,广泛使用于石油化工、制药、冶炼、化纤等行业中。卡车和轻型车辆用的各种罐装的催化转换器的基板、化工上用的催化器和催化器支撑体,其中最具商业潜力的无机陶瓷膜市场近年来高速增长。除电子陶瓷外,陶瓷催化器和催化器支撑体占有超过 10 亿美元的市场份额,加上陶瓷膜和过滤器,其工业产值已由 1999 年的 15 亿美元增加到 2004 年的 19 亿美元。

陶瓷阀门具有以下优点:提高设备运行系统的安全性和稳定性,从而减少了工人维修量;提高管路的密封性,对环境保护起到了推进作用。20 世纪 70 年代起,日本就开始批量生产陶瓷球阀,此后 20 多年来,美国、德国、澳大利亚、芬兰等国家也已陆续批量生产和使用陶瓷阀门。

陶瓷泵的优点是优异的耐腐蚀、耐磨损及抗气蚀性,适用于多种腐蚀介质特别是液体中同时存在磨损与腐蚀介质;由于陶瓷密封介质不易变形,因此密封性好,不易发生泄漏事故;维修方便,检修时仅需更换部分金属部件。为此,国内沈阳水泵研究所、宜兴化工陶瓷泵厂及葫芦岛特种耐磨泵厂等企业,在制造陶瓷泵方面做了多年的努力,成效显著。传统的油田钻井泵缸套基本都采用复合型双金属缸套,寿命较短,约在 $300 \sim 800\text{h}$,而氧化铝陶瓷的线膨胀系数和钢接近,陶瓷缸套的寿命可达 $4000 \sim 5000\text{h}$ 。尽管陶瓷缸套的价格较贵,但其性价比较高,寿命长,因此在海洋钻井、中硬岩层钻井、超深井钻井时,仍有较大的市场。

换热器是一种在工业中普遍使用于热量传递的节能设备,广泛应用于石油、化工、冶金、电力、轻工等行业的工艺设备。在炼油、化工装备中,换热器占总设备的 40% 左右。莫来石的比热容和密度较大,价格也较便宜,因而在换热器市场有一定的应用,碳化硅材料由于具有很好的抗侵蚀性、抗氧化性和高的强度,以及优良的抗热振性,一般作为陶瓷换热器的首选材料。

陶瓷内衬在球磨机、砂磨机或搅拌磨筒体中应用广泛。在精细化工领域,对杂质含量的限制非常严格,这就要求搅拌磨筒壁必须耐磨。陶瓷研磨罐内壁一般采用氧化铝陶瓷,而陶瓷管道内衬有的使用拼装氧化铝陶瓷片,近年来采用自蔓延高温合成技术制备陶瓷管内衬的技术也有了长足的发展。陶瓷内衬复合钢管具备了金属管材和陶瓷的共同优点,适用于管道输送中的各种恶劣环境。其主要优点是工艺简单、投资少、能耗低、陶瓷层厚度小以及具有优异的耐磨性、耐高温和耐蚀性等,因此具有很好的发展前景。

1.1.4 在切削刀具行业中的应用

工程陶瓷切削刀具的出现和发展,把切削加工技术提升到一个新的高度。陶瓷刀具是 20 世纪 50 年代发展起来的,刀具材料硬度达 $93\text{HRA} \sim 94\text{HRA}$,抗弯强度 $800 \sim 1000\text{MPa}$,能在 $1200 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 的高温下正常切削。由于陶瓷刀具具有优良的切削性能,即高的硬度、红硬性和耐磨性,特别是在高速切削和干切削时表现出了优异的切削性能,是一类极具发展前途的刀具材料。各种新型陶瓷刀具材料的研制成为各国竞相研究的重点。目前主要应用的陶瓷刀具材料是 Al_2O_3 系陶瓷刀具、 Si_3N_4 系陶瓷刀具以及近年发展起来的功能梯度陶瓷刀具材料等。

据报道,几个发达国家陶瓷刀具的生产数量占可转位刀片的比例:美国 3% ~ 5%,日

本7%~9%,德国6%~8%,英国、法国、瑞典等国也在大力推广应用。我国已在20多个行业的几百家工厂推广使用,并取得了显著的经济效益。如“一汽”在加工含硼和含磷的汽车缸套时,已经实现了全部陶瓷刀具化,从而对提高工效和保证产品的质量起到了重要作用。

目前,陶瓷刀具主要是氧化铝基、氮化硅基等两种类型。

1. 氧化铝基陶瓷刀具

氧化铝基陶瓷刀具是20世纪60年代研制成功并于70年代投入使用的,也是目前国内使用最多的陶瓷刀具材料之一。国内山东大学于20世纪80年代开始研制氧化铝—碳化物系列复合材料陶瓷刀具以来,成效显著,其力学性能已达到了国际先进水平。该材料刀具具有较高的耐磨性能以及切削刀刃的稳定性,特别适用于高速切削,充分发挥其热硬性的特长。目前主要用于灰铸铁和钢的精车,可以获得很好的表面质量。如瑞典Sandvik公司推出的CC650陶瓷刀具和德国Widia公司生产的Widalox陶瓷刀具均属于这一类,用其加工冷硬铸铁轧辊、淬硬高强度钢、硅锰钢、工具钢和不锈钢时,刀具后刀面磨损很小,表面粗糙度数值低。目前,对于多相氧化铝复合刀具材料的研究已经涉及各种氧化物、氮化物、碳化物和硼化物陶瓷,并且在材料性能和应用方面都取得了较大的进展。在氧化铝中添加氧化锆利用其相变增韧机制,可进一步提高氧化铝陶瓷刀具材料断裂韧性和强度。目前瑞典的CC620、德国的SN60和SN80、美国的CerMaxt460等刀具牌号均为氧化锆相变增韧氧化铝陶瓷刀具。

2. 氮化硅基陶瓷刀具

20世纪70年代中期,清华大学在世界上最早探索用氮化硅陶瓷作为金属切削刀具的材料取得了成功,实现了用热压氮化硅陶瓷刀具对多种难加工材料进行加工,并在20世纪80年代初得到推广应用。与氧化铝陶瓷刀具相比,氮化硅陶瓷刀具可以进行高速切削,耐磨性能更好,特别是在车削灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁等方面的效果更为显著;其次,抗冲击性能优越,特别适宜于半精车、精车以及半精铣和精铣。其后开发的氮化硅/碳化钛复合陶瓷刀具,由于TiC的引入又进一步提高了刀具材料的硬度和耐磨性。与硬质合金刀具相比耐用度可提高几十倍,切削速度可提高近10倍。近年开发的晶须增韧氮化硅陶瓷刀具,在氮化硅基体中加入一定量的碳化硅晶须可以有效地提高陶瓷刀具的断裂强度。湖南长沙工程陶瓷公司生产的SW21晶须增韧氮化硅复合陶瓷刀具,可应用于切削淬火钢、高锰钢、高铬钢以及轴承钢等。

目前,氮化硅基陶瓷刀具的崩刃率为2%~4%,与硬质合金刀具相当,因此可以放心地在数控生产线上应用,但其缺点是磨加工性能差。氮化硅基陶瓷刀具的推广应用,可达到节约工时、电力、减少机床专用台数的显著效果。

3. 新型陶瓷刀具

目前正在开发但具有广阔应用前景的几种新型陶瓷刀具包括梯度陶瓷刀具、陶瓷—硬质合金复合刀片以及粉末表面涂层陶瓷刀具等。

(1) 梯度功能陶瓷刀具是指组分、结构以及物理力学性能呈现合理的梯度变化的陶瓷刀具。通过梯度结构层的合理设计,使刀具表面具有最大的热导率,这有利于降低刀具内的温度梯度以及热应力梯度,以提高抵抗热磨损和热破损的能力;同时使刀具表层具有最小的线性膨胀率,因此在刀具制备的过程中在表面形成压应力,以抵消切削过程中产生