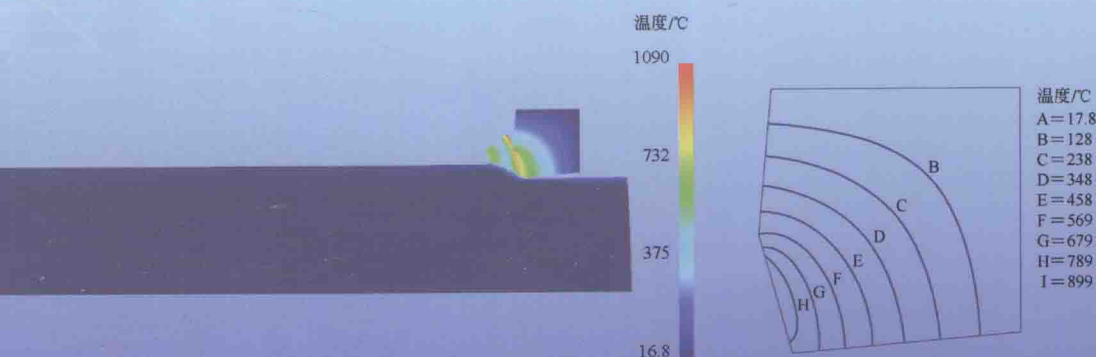


Oxide Ceramic Tools
and Simulative Cutting

氧化物陶瓷刀具 与仿真切削

马伟民 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

氧化物陶瓷刀具与仿真切削

Oxide Ceramic Tools and Simulative Cutting

马伟民 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 简 介

先进陶瓷刀具在国内外数控加工及机械制造领域被誉为 21 世纪绿色环保加工的首选刀具。本书针对陶瓷刀具的发展历史与现状,较全面地总结和评述了陶瓷刀具的应用背景;结合作者多年研究,重点介绍了氧化物陶瓷刀具材料的烧结与致密化、组织性能与相变行为、切削性能与耐用度诊断;构建切削模型,基于仿真切削优选陶瓷刀具最佳切削条件(切削速度 v_c 、进给量 f 、切削深度 a_p);提出用仿真技术建立陶瓷刀具数据库。本书内容体现了陶瓷材料、机械加工、模拟仿真等多学科领域的融通和互补,是一部极具参考价值的专业著作。

本书内容涉及材料科学、机械加工、计算机仿真等学科交叉领域,可供材料、机械、计算机领域研究人员及科技人员阅读,也可作为相关专业研究生和高校师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

氧化物陶瓷刀具与仿真切削/马伟民著. —北京:

冶金工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5024-6705-0

I. ①氧… II. ①马… III. ①陶瓷刀具—金属切削

IV. ①TG711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 236713 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6705-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 16 印张; 309 千字; 240 页

69.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

陶瓷刀具是 21 世纪先进制造技术最重要的刀具材料之一。陶瓷刀具具有很高的强度、韧性、耐磨性、抗疲劳性、热容性以及低固溶度和优异的抗氧化性等特点,在 1200℃ 的高温下仍能进行切削,其硬度与 200 ~ 600℃ 的硬质合金刀具相当,在 1100℃ 的抗压强度相当于钢在室温的抗压强度,同时还有优良的抗粘结性能、较低的摩擦系数等特性。基体中添加各种碳化物、氮化物、硼化物等制造的各类陶瓷刀具,在高速切削某些难加工材料,特别是加热切削方面,包括涂层刀具在内的高速钢、硬质合金刀具都无法与之相比。陶瓷刀具可代替硬质合金刀具进行粗加工、精加工,切削淬硬钢及铸铁的耐用度是后者的 3 倍以上,切削速度能提高 5 倍之多,而价格却与硬质合金相当。在数控加工及机械制造领域用于高速、高效、低成本的无冷却液干式切削加工,被誉为 21 世纪绿色环保加工的首选刀具。

发达国家机械加工大都属高速、高精度加工,对高性能刀具的需求量极大。如日本在 1970 年陶瓷刀具年需求量占刀具总量的 1%,1983 年上升到 5%,最近几年已占到 18% ~ 35%。据美国加工领域专家估计,进入 21 世纪,陶瓷刀片销售量以每年 16% 的增长率上升。世界各国陶瓷刀片生产数量占可转位刀具的比例约为:美国 15% ~ 25%,俄罗斯 10% ~ 20%,日本 18% ~ 35%,德国 23% ~ 38%,其中白色陶瓷刀片在国外用量较大,特别是在日本和德国,广泛用于数控机床及 CNC 加工中心。在世界范围年产陶瓷刀片总值约 300 亿美元,而中国占 0.5%,仅有 20 多个品种。据中国机械工业协会国家刀具研究所统

计数据表明,目前我国拥有各种金属切削、铣削机床及加工中心约400万台,陶瓷刀具生产厂家主要有北京紫光高技术陶瓷有限公司、成都工具研究所、株洲钻石公司等,仅北京紫光公司生产陶瓷刀具约13个品种,年产20万片,远不能满足市场需求。现在国内汽车加工生产线上基本全部使用陶瓷刀具,国内需年进口陶瓷刀具约计1500万片,可见先进陶瓷刀具具有广泛的市场前景。

在现代化机械加工过程中,提高加工效率和工件表面质量的最有效的方法是提高切削速度。在欧、美、日等国家和地区,加工低碳合金钢的切削速度已达 $8 \sim 10\text{m/s}$,加工铸铁的速度已达 $10 \sim 16\text{m/s}$ 。据预测,在不久的将来,加工低碳合金钢的切削速度将提高到 $10 \sim 13\text{m/s}$,加工铸铁的速度将达到 $16 \sim 25\text{m/s}$ 。在如此高的切削速度下,切削温度将会相当高,部分加工领域用高速钢、硬质合金刀具已不能满足工艺要求,因此陶瓷刀具成为令人瞩目的焦点。

一般而言,陶瓷刀具材料相对其他种类刀具的韧性和强度较低、制造成本较高、使用不当易造成耐用度及可靠性差等问题,受限于使用陶瓷刀具的发展。尽管我国陶瓷刀具材料开发已经取得了大量的研究成果,并已实现向生产力的转化,但是距离国外的先进水平还有一定距离。

本书针对一种陶瓷刀具材料的制备、性能、应用及切削条件的仿真进行了较全面的阐述,内容涉及材料、机械及计算机领域的学科交叉,并对陶瓷刀具材料制备技术、性能理论、加工工艺及仿真切削进行及时总结,为工程领域研发陶瓷刀具新材料提供了理论与实践的借鉴,对促进先进陶瓷材料的科技进步具有重大意义。国内近二十年里关于陶瓷刀具方面的书籍较少,作者结合沈阳市科技攻关计划项目成果以及对氧化物陶瓷刀具的研究与教学实践,参考大量国内外有价值的文献,对氧化物陶瓷刀具与仿真切削的研究进行了全面系统的总结,

撰写成本书,希望本书能为相关领域科研人员、教学人员提供参考和借鉴。

本书共分12章,第1章概述陶瓷刀具发展,第2章介绍氧化物陶瓷刀具材料类型及性能,第3章介绍氧化物陶瓷刀具材料研究方法,第4~6章分别介绍 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料烧结致密化与显微组织、力学性能及强韧化和抗热震性能,第7章阐述切削加工中的仿真技术基础理论及应用,第8章构建 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具与加工材料的切削模型,第9、10章基于1045 淬火钢进行粗、半精、精加工仿真,第11章基于H13 模具钢进行粗、半精、精加工仿真切削,第12章对氧化物陶瓷刀具仿真切削的应用进行展望。附录中对陶瓷刀具仿真切削中的常用材料进行了汇总,中英文词汇对照将便于读者做进一步研究时查阅外文文献。

英国赫瑞瓦特大学(Heriot-Watt University)马澜硕士、博士生马雷及硕士生陈响参加了部分章节的编写。在此,向提供文献支持的专家学者以及沈阳市科技局给予研究内容的连续资助(项目编号:F10-053-2-00;项目编号:1053090-2-05),表示衷心感谢!

陶瓷刀具与仿真切削是一门新兴的交叉学科技术,本书权且作为阶段性研究成果奉献给读者,以便与学术界同仁和工程应用领域的技术人员开展进一步的研究和探讨。由于作者水平所限,本书不妥之处,敬请读者批评指正。

马伟民

2014年7月于沈阳化工大学

目 录

1 陶瓷刀具材料发展概况	1
1.1 陶瓷刀具的种类及发展状况	1
1.1.1 Al_2O_3 - 碳化物陶瓷刀具	1
1.1.2 Al_2O_3 - 碳化物 - 金属陶瓷刀具	2
1.1.3 添加氮化物、硼化物的 Al_2O_3 陶瓷刀具	2
1.1.4 增韧的 Al_2O_3 陶瓷刀具	2
1.1.5 添加锰钛的 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具	3
1.1.6 Al_2O_3 - 金属 - 氮化物陶瓷刀具	3
1.1.7 Si_3N_4 系陶瓷刀具	3
1.1.8 Sialon 陶瓷刀具	3
1.1.9 梯度复相陶瓷刀具	4
1.1.10 有机改性陶瓷刀具	4
1.1.11 CBN - TiN 复合陶瓷刀具	4
1.1.12 $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{FeAl})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷基复合刀具	5
1.1.13 TiB_2 复合陶瓷刀具材料	5
1.1.14 涂层刀具材料	5
1.2 陶瓷刀具材料的增韧机理	6
1.2.1 颗粒弥散增韧补强机理	6
1.2.2 纤维增韧机理	7
1.2.3 应力诱导相变增韧	7
1.2.4 显微裂纹增韧	8
1.2.5 残余应力增韧	8
1.2.6 相变增韧机理	9
1.2.7 协同增韧机理	9
1.3 先进陶瓷刀具的应用	10
1.3.1 复合 Si_3N_4 陶瓷刀具的应用	10
1.3.2 复合 TiCN 金属陶瓷刀具的应用	11
1.4 国外陶瓷刀具的应用	11
1.4.1 氧化物陶瓷类	12

1.4.2 混合陶瓷类	12
1.4.3 赛隆陶瓷类	12
1.5 先进陶瓷刀具发展趋势	13
2 氧化物陶瓷刀具材料类型及性能	15
2.1 氧化铝和氧化锆材料特性	15
2.2 氧化锆增韧陶瓷的性能及结构	16
2.2.1 ZrO_2 的晶体结构特征	16
2.2.2 ZrO_2 的稳定化及二元相平衡	18
2.2.3 四方(t) - ZrO_2 到单斜(m) - ZrO_2 的相变特征	20
2.3 ZrO_2 增韧陶瓷的种类及增韧原理	21
2.3.1 四方多晶氧化锆增韧陶瓷(TZP)	21
2.3.2 部分稳定氧化锆增韧陶瓷(PSZ)	21
2.3.3 弥散四方多晶氧化锆增韧陶瓷(TZC)	22
2.3.4 氧化锆陶瓷的增韧原理	22
2.4 氧化锆陶瓷的晶粒尺寸与增韧机制	25
2.4.1 冷却过程 t $\rightarrow$ m 相变的临界晶粒尺寸	25
2.4.2 应力诱导下 t $\rightarrow$ m 相变的临界粒径	26
2.4.3 t $\rightarrow$ m 相变诱发微裂纹的临界直径	26
2.5 氧化锆陶瓷发展过程存在的不足	27
2.6 氧化锆增韧 Al_2O_3 陶瓷的研究概况	28
2.6.1 弥散未稳定 ZrO_2 的 ZTA 陶瓷	29
2.6.2 含(弥散)部分稳定 ZrO_2 的 ZTA 陶瓷	29
2.6.3 混合结构的 ZTA 陶瓷	32
2.6.4 ZTA 共晶体陶瓷	32
2.7 ZTA 陶瓷存在的不足及发展方向	32
3 氧化物陶瓷刀具材料制备方法	35
3.1 陶瓷刀具材料的发展过程	35
3.2 陶瓷刀具材料研究的现状	37
3.3 陶瓷刀具的制造方法	39
3.4 陶瓷刀具的切削性能	41
3.4.1 陶瓷刀具的切削磨损机理	41
3.4.2 陶瓷刀具的磨损形态	42
3.5 氧化物陶瓷刀具材料的制备	45

3.5.1 粉体制备	45
3.5.2 复合粉体制备	47
3.5.3 真空烧结工艺	47
3.6 陶瓷刀具材料力学性能测试	47
3.6.1 线收缩率及相对密度	47
3.6.2 维氏硬度测试方法	49
3.6.3 抗弯强度及断裂韧性	51
3.6.4 提高断裂韧性测量精度的方法	53
3.6.5 抗热震性能	55
3.6.6 力学性能数据分析	55
3.7 陶瓷刀具材料的微观组织及相分析	55
3.7.1 扫描电镜 (SEM) 观察试样表面和断口形貌	55
3.7.2 相组成计算	55
3.8 陶瓷刀具材料的切削性能试验方法	56
3.8.1 切削试验方法	56
3.8.2 切削用量及耐用度	57
3.8.3 切削用量的选择及对耐用度的影响	57
3.8.4 进给量的选定	59
4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (3Y) 刀具材料烧结致密化与显微组织	60
4.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料的烧结致密化	60
4.1.1 ZrO_2 含量和烧结温度对致密化的作用	60
4.1.2 ZrO_2 中 Y_2O_3 含量对烧结致密化的作用	61
4.1.3 能谱分析 Al_2O_3 与 ZrO_2 (Y_2O_3) 的作用机制	63
4.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料的显微组织	64
4.2.1 Al_2O_3 的显微组织	64
4.2.2 烧结温度对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 刀具材料显微组织影响	64
4.3 ZrO_2 含量对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 刀具材料显微组织影响	71
4.3.1 ZrO_2 (2Y) 含量对晶粒尺寸影响	71
4.3.2 ZrO_2 (3Y) 含量对晶粒尺寸影响	72
4.3.3 ZrO_2 (Y_2O_3) 含量与晶粒尺寸的关系	72
4.4 ZrO_2 含量对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 刀具材料断口组织形貌影响	74
4.4.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (2Y) 的断口组织形貌	74
4.4.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (3Y) 的断口组织形貌	76

5	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料力学性能及强韧化机理	78
5.1	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料的力学性能	78
5.1.1	烧结温度对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 刀具材料抗弯强度影响	78
5.1.2	ZrO_2 含量对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 刀具材料断裂韧性影响	78
5.2	ZrO_2 中 Y_2O_3 含量对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 刀具材料力学性能影响	80
5.2.1	影响刀具材料强度和韧性的主要因素	80
5.2.2	ZrO_2 (Y_2O_3) 含量对刀具材料硬度的影响	81
5.2.3	ZrO_2 中 Y_2O_3 含量对刀具材料强度和韧性的影响	82
5.3	Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料的可靠性分析	83
5.4	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料的强韧化与相变行为	86
5.4.1	ZrO_2 (Y_2O_3) 在 Al_2O_3 基体中的相变条件及晶粒尺寸影响	86
5.4.2	ZrO_2 (Y_2O_3) 含量对相变增韧机制的作用	89
5.4.3	ZrO_2 (2Y) 含量对应力诱导相变增韧的影响	89
5.4.4	ZrO_2 (3Y) 含量对应力诱导相变增韧的影响	91
5.5	其他增韧机制	93
6	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具材料的抗热震性能	97
6.1	刀具材料的热震损伤行为	97
6.1.1	刀具材料的热震残留强度	97
6.1.2	刀具材料的热震断口形态	98
6.2	刀具材料抗热震因子及断裂功计算	102
7	仿真技术在切削加工中的应用	105
7.1	仿真技术在切削中应用基础	105
7.1.1	仿真技术的发展	105
7.1.2	仿真技术在切削中研究现状	106
7.1.3	仿真分析选择	108
7.2	数值模拟方法	108
7.2.1	有限差分法	108
7.2.2	有限元法	109
7.2.3	拉格朗日法	109
7.2.4	欧拉法	110
7.2.5	模拟切削方法对比	110
7.3	Deform2D 简介	110
7.3.1	Deform2D 的模块结构	111

7.3.2	Deform2D 的主要功能	111
7.4	金属切削变形及有限元的基本理论	112
7.4.1	金属切削层的变化规律	112
7.4.2	刀面与刀尖和已加工表面间的挤压与摩擦	113
7.4.3	切屑变形的变化规律	115
7.4.4	加工变形与传热问题的基本理论	115
7.4.5	热力耦合分析方法	117
7.4.6	热力耦合控制方程	118
8	构建 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 刀具与加工材料的切削模型	119
8.1	干式切削加工热力耦合分析过程	119
8.1.1	三维到二维切削模型的转化	120
8.1.2	模拟方法	120
8.1.3	瞬态切削几何模型	122
8.1.4	稳态切削几何模型	124
8.1.5	材料的本构方程	124
8.1.6	接触模型	125
8.1.7	摩擦模型	126
8.1.8	分离准则	127
8.2	基于仿真切削的基本要求及条件	129
8.2.1	刀具的几何参数	129
8.2.2	工件的几何参数	129
8.2.3	有限元模型和边界条件	129
8.2.4	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 陶瓷刀具的物理参数	130
8.2.5	工件材料的选择及物理参数	130
8.2.6	工件的 Johnson - Cook 模型物理参数	130
8.2.7	仿真模拟过程	131
9	实际半精加工切削 1045 淬火钢与仿真切削对比	132
9.1	实际半精加工 1045 淬火钢的切削性能及耐用度	132
9.1.1	陶瓷刀具切削 1045 淬火钢的实际意义	132
9.1.2	氧化物陶瓷刀具的性能特点	132
9.1.3	合理的选择陶瓷刀片几何形状及参数	133
9.1.4	陶瓷刀具负倒棱在切削中的作用机理	134
9.1.5	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) 陶瓷刀具切削的耐磨性能	137

9.1.6	陶瓷刀具的失效形式和磨损机理	138
9.1.7	一元线性回归对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (3Y) 陶瓷刀具耐用度的评价	141
9.2	基于 1045 淬火钢半精加工仿真切削及稳态温度场和应力场	144
9.2.1	半精加工仿真参数选取	144
9.2.2	1045 淬火钢半精加工的瞬态仿真切削	146
9.2.3	仿真切削过程中的切屑形成	146
9.2.4	1045 淬火钢半精加工稳态仿真切削	148
9.2.5	不同切削速度下 1045 淬火钢半精加工的稳态温度场	148
9.2.6	不同切削速度下 1045 淬火钢半精加工的稳态应力场	150
9.2.7	不同进给量下 1045 淬火钢半精加工的稳态温度场和应力场	151
9.2.8	不同切削用量对刀刃处应力梯度、温度梯度影响	154
10	基于 1045 淬火钢粗、精加工的仿真切削	156
10.1	基于 1045 淬火钢粗加工仿真切削及稳态温度场和应力场	156
10.1.1	粗加工仿真切削参数选取	156
10.1.2	不同切削速度下 1045 淬火钢粗加工的稳态温度场	157
10.1.3	不同切削速度下 1045 淬火钢粗加工的稳态应力场	159
10.1.4	不同进给量下 1045 淬火钢粗加工的稳态温度场和应力场	161
10.1.5	不同切削用量对刀刃处应力梯度、温度梯度影响	164
10.2	基于 1045 淬火钢精加工仿真切削及稳态温度场和应力场	166
10.2.1	精加工仿真切削参数选取	166
10.2.2	不同切削速度下 1045 淬火钢精加工的稳态温度场	167
10.2.3	不同切削速度下 1045 淬火钢精加工的稳态应力场	169
10.2.4	不同进给量下 1045 淬火钢精加工的稳态温度场和应力场	171
10.2.5	不同切削用量对刀刃处应力梯度、温度梯度影响	174
11	基于 H13 模具钢粗、半精、精加工的仿真切削	177
11.1	H13 模具钢粗加工的仿真切削及稳态温度场和应力场	177
11.1.1	粗加工仿真切削参数选取	177
11.1.2	不同切削速度下 H13 模具钢粗加工的稳态温度场	178
11.1.3	不同切削速度下 H13 模具钢粗加工的稳态应力场	180
11.1.4	不同进给量下 H13 模具钢粗加工的稳态温度场和应力场	182
11.1.5	不同切削用量对刀刃处应力梯度、温度梯度影响	186
11.2	H13 模具钢半精加工仿真切削及稳态温度场和应力场	187
11.2.1	半精加工仿真切削参数选取	187

11.2.2	不同切削速度下 H13 模具钢半精加工的稳态温度场	187
11.2.3	不同切削速度下 H13 模具钢半精加工的稳态应力场	190
11.2.4	不同进给量下 H13 模具钢半精加工的稳态温度场和应力场 ...	192
11.2.5	不同切削用量对刀刃处应力梯度、温度梯度影响	195
11.3	H13 模具钢精加工仿真切削及稳态温度场和应力场	197
11.3.1	精加工仿真切削参数选取	197
11.3.2	不同切削速度下 H13 模具钢精加工的稳态温度场	198
11.3.3	不同切削速度下 H13 模具钢精加工的稳态应力场	201
11.3.4	不同进给量下 H13 模具钢精加工的稳态温度场和应力场	203
11.3.5	不同切削用量对刀刃处应力梯度、温度梯度影响	206
12	氧化物陶瓷刀具仿真切削的应用与展望	208
12.1	仿真切削模型的构建与优选切削参数	208
12.2	建立数字化陶瓷刀具库的展望	209
附 录		210
附表 1	常用材料特性表	210
附表 2	各国常用金属材料对照表	212
附表 3	硬度对照表	215
中英文词汇对照表		220
索 引		225
参考文献		229

1 陶瓷刀具材料发展概况

先进陶瓷刀具材料的出现,是人类首次通过运用先进陶瓷材料改革机械切削加工的一场技术革命的成果。20 世纪初,德国和英国就已开始寻求陶瓷刀具取代传统碳素工具钢刀具。先进陶瓷刀具材料以其高的耐磨性能、耐热性能、化学稳定性,为高速切削领域提高加工生产率起着重要的作用。目前各种高强度、高硬度、耐腐蚀、耐磨损和耐高温的难切削新材料已占国际上加工总数的 50% 以上,传统的硬质合金刀具对大多新材料的加工难以胜任,最重要的是,构成高速钢与硬质合金刀具的主要成分 W、Co 等在全球范围内日益枯竭,从而导致价格上涨,在很大程度上促进了陶瓷刀具的研制与推广。而陶瓷刀具的主要原料 Al、Si 是地壳中最丰富的成分,因此进入 21 世纪在高速切削加工领域先进陶瓷刀具的应用前景十分广泛。

1.1 陶瓷刀具的种类及发展状况

早在 1905 年德国人就开始了 Al_2O_3 陶瓷作为切削刀具的研究,1912 年英国首获 Al_2O_3 陶瓷刀具专利,是第一代陶瓷刀具。这类陶瓷刀具材料中的 Al_2O_3 的含量占 99% 以上,通过添加微量助烧剂(如 MgO 、 NiO 、 Cr_2O_3 、 TiO_2 等),经热压烧结而成(俗称白陶瓷)。纯 Al_2O_3 陶瓷抗弯强度较低,抗冲击能力差,切削过程中容易产生微崩刀,但高温性能很好,适用于小进给量半精加工铸铁和钢材。我国生产的这类陶瓷牌号有 P1,成分为 99% 的 Al_2O_3 ,1% 的 MgO ;日本的 W80 等都属于这类陶瓷。但由于其抗弯强度低,使用日益减少。

1.1.1 Al_2O_3 - 碳化物陶瓷刀具

Al_2O_3 - 碳化物陶瓷刀具是在 Al_2O_3 中添加一定的碳化物(如 TiC 、 WC 、 TaC 、 NbC 、 Mo_2C 、 Cr_3C_2)可以提高陶瓷的强度和抗冲击性;其中以添加 TiC 的 Al_2O_3 - TiC 陶瓷应用最多,其添加 TiC 的比例为 30% ~ 60% (有的为 5% ~ 10%),通过热压烧结而成。目前,热压陶瓷刀具的平均硬度可达 HRA93.5 ~ 94.5,抗弯强度可达 0.9 ~ 1GPa,适用于高速粗、精加工耐磨铸铁、淬硬钢及高强度钢等难加工材料,可以实现淬硬钢的以车代磨或以铣代磨^[2]。我国生产的 M16、SG3、SG4、SG5 属这类陶瓷刀具。其中,后两种还加入了 WC 成分;M16 陶瓷含 60% ~ 70% 的 Al_2O_3 ,30% ~ 40% 的 TiC ,外加 0.5% 的 MgO ,采用热压

工艺制成。

1.1.2 Al_2O_3 - 碳化物 - 金属陶瓷刀具

Al_2O_3 - 碳化物 - 金属陶瓷刀具在 Al_2O_3 中除添加碳化物外, 还添加少量粘结金属 (Ni、Mo、Co、W 等), 热压烧结而成 (又称金属陶瓷)。由于加了金属, 提高了 Al_2O_3 与碳化物的联结强度, 改善了使用性能, 适用于加工淬火钢、合金钢、锰钢、冷硬铸铁、镍基和钴基合金以及非金属材料 (如纤维玻璃、塑料夹层材料等), 是目前精加工冷硬铸铁轧辊的最佳材料。由于其抗热震性能的改善, 可用于间断切削及使用切削液的场合。我国生产的 M4、M5、M6、M8 - 1、LT35、LT55、AG2 和 AT6 等, 都属于这类陶瓷刀具。

1.1.3 添加氮化物、硼化物的 Al_2O_3 陶瓷刀具

在 Al_2O_3 中添加氮化物的 Al_2O_3 - 氮化物组合陶瓷刀具, 具有较好的抗热震性, 其基本性能和加工范围与 Al_2O_3 - 碳化物 - 金属陶瓷刀具相当, 更适于间断切削。但其抗弯强度和硬度比 Al_2O_3 - TiC 金属陶瓷刀具低, 有待进一步研究改善。在 Al_2O_3 中添加 TiB_2 作为粘结剂制成的陶瓷刀具, 由于其组织成分为细晶粒的 Al_2O_3 及连续的 TiB_2 粘结相, 保持了硼化物的“三维连续性”, 因此具有极好的耐冲击性和耐磨性。

1.1.4 增韧的 Al_2O_3 陶瓷刀具

增韧的 Al_2O_3 陶瓷是指在 Al_2O_3 基体中添加增韧或增强材料。目前常用的增韧方法主要有 ZrO_2 相变增韧、晶须增韧及第二相颗粒弥散增韧等。

ZrO_2 相变增韧是利用 ZrO_2 在 1150°C 左右发生相变的体积变化中, 在基体中诱导出许多裂纹, 从而吸收其主裂纹尖端的大部分能量, 达到增韧目的。

晶须增韧是利用晶须的加强棒作用, 常用的晶须有 SiC 晶须和 Si_3N_4 晶须^[3]。SiC 晶须有一定的纤维结构, 具有强度高、硬度高、导热性好及抗热震性好等许多优点, SiC 晶须在加强 Al_2O_3 基体的同时, 还可使应力在基体内分散。因此, 非常适合加工镍基耐热合金和低速加工铸铁及非金属脆性材料。 Si_3N_4 晶须加入到 Al_2O_3 基体中, 可以提高陶瓷的抗热冲击性, 适合切削硬度为 HRC45 的镍铬铁耐热合金材料。这类陶瓷刀具使用较多的国产牌号有: 湖南冷水江陶瓷工具厂的 AW9、山东工业大学的 JX - 1 等。

第二相颗粒弥散增韧是利用弥散第二相颗粒来阻碍位错的滑移和攀移, 阻止裂纹扩展, 达到增韧目的。由于第二相颗粒周围会产生残余, 引起裂纹偏转或裂纹被钉扎, 提高材料抗断裂性, 从而使 Al_2O_3 陶瓷的韧性明显提高^[4]。

1.1.5 添加锰钛的 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具

在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MnO} - \text{TiO}_2$ 系中加入一定量的 ZrO_2 可以起到增韧效果。随着 ZrO_2 的含量增加,韧性提高越明显,且没有峰值出现。但 MnO 与 TiO_2 的总量不能超过 4.5%。添加锰钛的 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷刀具具有较高的韧性和一定的耐磨性,有很高的应用价值。

1.1.6 Al_2O_3 - 金属 - 氮化物陶瓷刀具

Al_2O_3 - 金属 - 氮化物陶瓷刀具由于含有氮化物,且有金属粘结补强,因而有优良的耐磨性(摩擦系数很低)与导热性,高的强度、韧性与红硬性,切削性能优异。最适合切削加工高硬度淬火钢、高强度优质钢、不锈钢以及各种合金钢与碳钢,还适合切削加工普通铸铁、高硬度的各种合金及铸铁。这种陶瓷刀具的抗弯强度为 1200 ~ 1300 MPa,硬度为 HV1800 ~ 1900,断裂韧性 K_{IC} 为 5 ~ 6 MPa · m^{1/2},故可用于上述材料的连续精、粗车削和精铣,也可断续精、粗车削与铣削。

1.1.7 Si_3N_4 系陶瓷刀具

Si_3N_4 系复合陶瓷刀具材料以高纯度的 Si_3N_4 粉末为原料,添加 Y_2O_3 、 MgO 、 ZrO_2 和 HfO_2 等烧结剂或强化相 SiCw 、 SiCp 烧结而成,具有高的硬度、耐磨性、耐热性、化学稳定性和良好的耐热冲击性能。其韧性、热稳定性和抗热裂性比 Al_2O_3 基陶瓷刀具好,更适合加工铸铁和铸铁合金,还能适用于淬硬钢、冷硬铸铁等高硬度材料的精加工和半精加工。近几年在强化相 SiCw 、 SiCp 及其他碳化物增韧 Si_3N_4 基陶瓷刀具的研究应用上比较成功, $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{TiC} - \text{Co}$ 复合陶瓷的韧性和抗弯强度高于 Al_2O_3 基陶瓷,硬度却不降低,具有较好的耐热冲击性能,切削性能优于硬质合金及一些陶瓷刀具,适合切削冷硬铸铁、合金冷硬铸铁及淬硬钢等材料。

1.1.8 Sialon 陶瓷刀具

目前许多国家竞相开发一种新型 Si_3N_4 基陶瓷刀具——赛隆(Sialon)刀具^[5]。赛隆刀具是英国 Lucas Ayalon 公司研制成功的一种单相陶瓷刀具,以 Si_3N_4 为硬质相, Al_2O_3 为耐磨相,并添加少量的助烧剂 Y_2O_3 经热压烧结而成,有很高的强度和韧性(抗弯强度可达 1200 MPa,硬度达 HV1800),其冲击强度接近于涂层硬质合金刀具,已成功应用于铸铁和高温合金等难加工材料的加工。目前国际上 Sialon 陶瓷材料的研究非常活跃,在改进制备工艺以及进行复相、超

细颗粒、自增韧刀具材料等的研制方面已有较好的成果。 α -Sialon 为等轴晶,具有较高的硬度和耐磨性能; β -Sialon 为柱状晶,断裂韧性和热传导能力相对较好;($\alpha + \beta$)-Sialon 复相陶瓷刀具综合了两相的优点,切削性能更优异,重载条件下其耐磨性能要优于单相陶瓷刀具。

1.1.9 梯度复相陶瓷刀具

功能梯度材料应用于刀具的情况近几年才有所发展。将功能梯度的设计思想引入到陶瓷刀具材料的制造过程,为提高刀具的性能尤其是抗热冲击性能提供了一个新的方法。

层状分布压制的陶瓷刀具,通过控制成分组成使得材料的表层和内层具有不同的热膨胀系数和导热系数,在烧结冷却过程中外层内的残余应力为压应力,可有效抵消作业过程中刀面所受的拉应力,从而提高刀具的切削能力^[6]。单向热压成型的功能梯度刀具 FG-1 ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$)、FG-2 ($\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{W}, \text{Ti})\text{C}$), 均比匀质材料的抗热冲击性能要好,使用寿命有较大程度的提高。

通过表面氮化处理可制备 Ti (C, N) 基功能梯度刀具材料。金属陶瓷在表面氮化处理时,表面 N 的活度较高,促使富 W、Mo 的环形相的不断溶解, W、Mo 原子向材料内部扩散, Ti 原子向材料表面扩散,形成成分梯度,且由于环形相的溶解,聚积长大的大颗粒分解为小颗粒,使得晶粒细化,提高了材料表面的硬度,降低了材料表面与金属之间的摩擦系数。瑞典的研究者首先研究了金属陶瓷的表面氮化处理技术,研究发现,在高速轴向干车削钢时,刀具的表面抗塑性变形力相对于表面有涂层的同样材料提高了大约 50%, 韧性也有所提高。氮化处理可充分提高前刀面的扩散磨损和后刀面的磨蚀磨损能力。

1.1.10 有机改性陶瓷刀具

有机改性陶瓷^[7]是一个全新的概念,它又称为聚合陶瓷或有机改性硅酸盐,是由无机盐和聚合物以分子或原子尺度混合而得的复合材料,因而它也是一种纳米复合材料。它与传统的复合材料不同:一是复合尺度很小,达到纳米水平;二是复合材料中相之间以化学键结合。所以,其性能也是传统材料所不具备的。由于有机改性陶瓷刀具的制备温度低,最终产物均匀性好,性能优良,已普遍受到人们的关注,其优良的性能和潜在的用途尚有待于进一步开发。

1.1.11 CBN - TiN 复合陶瓷刀具

Hara 和 Yazu 研制的新型 CBN - TiN 复合刀具材料,被证明是一种极好的用来加工模具钢和弹簧钢的刀具材料^[8]。Xiao Zhengrong 等在 CBN - TiN 系刀具材料中加入少量 Al, 热压烧结 CBN - TiN - Al 复合刀具材料的硬度最高可达