



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

材料加工原理及工艺学

无机非金属材料 and 金属材料分册

Principles and Technologies of Materials Processing
Inorganic Non-metallic and Metallic Materials

● 巴学巍 由园 主编

濱工業大學出版社



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

材料加工原理及工艺学

无机非金属材料 and 金属材料分册

Principles and Technologies of Materials Processing
Inorganic Non-metallic and Metallic Materials

● 巴学巍 由园 主编

哈爾濱工業大學出版社

内容提要

本书阐述了材料加工的基本原理和主要工艺方法,主要包括陶瓷、玻璃、晶体材料、粉体等无机非金属材料的加工原理及加工技术;金属材料的热处理、铸造、压力加工焊接和切削加工原理及切削加工过程。

本书内容完整、系统,可作为无机非金属材料 and 金属材料专业本科生及研究生教材,也可供从事材料加工、开发和应用研究的工程技术人员参考。

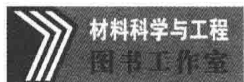
图书在版编目(CIP)数据

材料加工原理及工艺学. 无机非金属材料 and 金属材料分册/巴学巍, 由园主编. —哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2017. 4

ISBN 978 - 7 - 5603 - 6259 - 5

I. ①材… II. ①巴… ②由… III. ①无机非金属材料-加工原理 ②无机非金属材料-生产工艺 ③金属材料-加工原理 ④金属材料-生产工艺 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 254697 号



材料科学与工程
图书工作室

责任编辑 何波玲

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨久利印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.5 字数 421 千字

版 次 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 6259 - 5

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

材料科学与工程是综合利用现代科学技术成就、多学科交叉、知识密集的一门科学。材料加工是实现材料应用的主要工艺过程。本书阐述了材料加工的基本原理和主要工艺方法,内容包括陶瓷、玻璃、人工晶体、无机粉体等无机非金属材料的加工原理及加工技术;金属材料的铸造、压力加工、热处理、焊接和切削加工原理及切削加工过程。

本书在编写中注重以下两点:

①内容的完整性。书中比较全面地吸收了无机非金属材料、金属材料和复合材料类等相关图书的精华,同时注意补充最新的科技成果。

②原理阐述注重理论联系实际。在各章节内容中以加工方法为主线注重各种材料加工的内在联系。

本书共 10 章,第 1~4 章由齐齐哈尔大学巴学巍编写,第 5~10 章由齐齐哈尔大学由园编写。全书由巴学巍统稿。

本书得到“齐齐哈尔大学 2015 年度重点研究生教材建设项目计划”支持,在此编者深表感谢。

由于作者水平所限,书中难免有不足之处,衷心希望广大读者批评指正。

编 者

2017 年 1 月

目 录

| | |
|----|---|
| 绪论 | 1 |
|----|---|

第一篇 无机非金属材料加工原理及工艺学

| | |
|------------------|-----|
| 第1章 陶瓷加工工艺原理 | 7 |
| 1.1 陶瓷的定义与分类 | 7 |
| 1.2 可加工陶瓷 | 9 |
| 1.3 陶瓷加工技术 | 11 |
| 第2章 玻璃加工技术 | 56 |
| 2.1 玻璃加工预处理工艺及设备 | 56 |
| 2.2 玻璃的热弯与钢化 | 65 |
| 2.3 玻璃的镀膜 | 74 |
| 2.4 夹层玻璃 | 83 |
| 第3章 晶体材料加工技术 | 93 |
| 3.1 晶体的基本知识 | 93 |
| 3.2 晶体的切割与研磨 | 97 |
| 3.3 晶体的定向 | 111 |
| 3.4 晶体的抛光 | 115 |
| 第4章 粉体加工技术 | 127 |
| 4.1 粉体的分散 | 127 |
| 4.2 粉碎 | 134 |
| 4.3 矿物粉体的表面改性 | 141 |
| 4.4 分级 | 145 |
| 4.5 混合 | 149 |
| 4.6 造粒 | 154 |

第二篇 金属材料加工原理及工艺学

| | |
|----------------|-----|
| 第5章 金属材料学基础 | 165 |
| 5.1 金属材料的主要性能 | 165 |
| 5.2 金属的晶体结构与结晶 | 171 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第6章 钢的热处理 | 181 |
| 6.1 概述 | 181 |
| 6.2 钢在加热时的组织转变 | 183 |
| 6.3 钢在冷却时的组织转变 | 184 |
| 6.4 钢的退火和正火 | 188 |
| 6.5 钢的淬火 | 194 |
| 6.6 钢的回火 | 195 |
| 第7章 金属液态成形(铸造) | 199 |
| 7.1 金属液态成形工艺原理 | 199 |
| 7.2 砂型铸造 | 207 |
| 7.3 铸件结构工艺性 | 211 |
| 第8章 金属塑性成形(压力加工) | 217 |
| 8.1 金属塑性成形工艺原理 | 217 |
| 8.2 金属的锻造 | 220 |
| 第9章 焊接 | 235 |
| 9.1 概述 | 235 |
| 9.2 金属焊接成形工艺原理 | 235 |
| 9.3 常用焊接成形方法 | 239 |
| 9.4 常用金属材料的焊接 | 246 |
| 9.5 焊接结构的工艺性 | 248 |
| 第10章 切削加工 | 255 |
| 10.1 切削运动与切削要素 | 255 |
| 10.2 金属切削刀具 | 257 |
| 10.3 金属切削加工过程 | 262 |
| 参考文献 | 272 |

绪 论

1. 材料在国民经济中的地位及作用

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的物质,是人类赖以生存和发展的物质基础。20世纪70年代,人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。80年代新技术革命。又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料与国民经济建设、国防建设和人民生活密切相关。

材料是工业发展的基础,是现代社会经济的先导,是人类社会现代文明的重要标志。纵观人类利用材料的历史可以清楚地看到,每种重要材料的发现与利用,都把人类支配自然的能力提高到一个新水平。材料科学的每次重大突破,都会引起生产技术的革命,大大加快社会发展的进程,并给社会生产和人们生活带来巨大变化。因此,材料也是人类历史发展过程的重要标志。

2. 材料的分类及基本情况

材料的分类方法有多种,若按照材料的使用性能分类,可分为结构材料与功能材料两类。结构材料的使用性能主要是力学性能;功能材料的使用性能主要是光、电、磁、热、声等性能。从材料的应用对象来看,它又可分为建筑材料、信息材料、能源材料、航空航天材料等。在通常情况下,以材料所含的化学物质的不同将材料分为四类:金属材料、无机非金属材料、高分子材料及由此三类材料相互组合而成的复合材料。本书主要介绍无机非金属材料 and 金属材料的材料加工方面的知识。

(1) 无机非金属材料。

传统的无机非金属材料又称为硅酸盐材料,它主要包括陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料四大类,而这几大类材料就其化学组成和结构来观察均属硅酸盐类。随着科学技术的高速发展,在传统硅酸盐材料技术的基础上,一大批具有各种功能(机、电、声、光、热、磁、铁电、压电和超导等)和特性的材料相继出现,突破了传统意义上的四大类材料。一些新领域如人工晶体材料、非晶态材料、先进陶瓷材料(包括功能和结构)、无机涂层材料、碳材料、超硬材料和无机复合材料的相继涌现,逐步发展成为现今在材料科学研究前沿领域中处于最活跃、最具活力的新型无机非金属材料科学与工程,从而赋予无机非金属材料与工程以新的、更广泛的科学含义和内容。

无机非金属材料已经被广泛地应用于航空航天、新能源产业、信息功能产业、交通运输、生物与医疗、环境保护、国防工业等诸多领域。

无机非金属材料的加工是保证其合理正确使用的一个必要处理过程,尽管材料的净尺

寸成型技术已经有所发展,例如3D打印技术等,但是,许多材料仍然离不开加工。陶瓷、晶体、玻璃等块体材料需要加工处理成应用所需要的尺寸和形状;粉体材料则涉及分散、表面改性、分级、造粒等处理才可以发挥其良好的性能。与之相适应的加工理论、加工工艺和加工设备等已经发展成为重要的技术支撑。

(2) 金属材料。

人类文明的发展和社会的进步与金属材料密切相关,继石器时代之后相继出现了青铜器时代、铁器时代和钢时代,均以金属材料的应用为其时代的显著标志。种类繁多的金属材料已成为人类社会发展的重要物质基础。

进入21世纪以来,我国金属加工行业的迅猛发展在很大程度上得力于各项重大工程建设的展开。例如,从西气东输长输管线高效焊接工艺到三峡工程中机组关键部件的加工技术,从2008年北京奥运会“鸟巢”钢结构焊接工程到2010年上海世博会“阳光谷”的复杂异形箱形钢结构体系的制造,从长兴岛等世界级造船基地的建设到海洋工程装备制造,以及国产大飞机项目的启动、全国范围的高速铁路建设等。

金属材料通常分为黑色金属、有色金属和特种金属材料。

①黑色金属又称钢铁材料,包括含碳小于0.02%(质量分数)的工业纯铁,含碳2%~4%(质量分数)的铸铁,含碳小于2%(质量分数)的碳钢,以及各种用途的结构钢、不锈钢、耐热钢、高温合金、精密合金等。广义的黑色金属还包括铬、锰及其合金。

②有色金属是指除铁、铬、锰以外的所有金属及其合金,通常分为轻金属、重金属、贵金属、半金属、稀有金属和稀土金属等,有色合金的强度和硬度一般比纯金属高,并且电阻大、电阻温度系数小。

③特种金属材料包括不同用途的结构金属材料 and 功能金属材料。其中有通过快速凝固工艺获得的非晶态金属材料,以及准晶、微晶、纳米晶金属材料等;还有隐身、抗氢、超导、形状记忆、耐磨、减振阻尼等特殊功能合金以及金属基复合材料等。

在现代制造业中,高铁、汽车、轮船、机床和仪器仪表等大多数是由金属零件加工装配而成。将金属材料加工成零件是机械制造的基本过程,需要经过冶炼、铸造、塑性变形、切削加工、焊接等工艺过程。

对于大多数零件来说,其形状复杂或精度和表面质量要求较高,单一的生产方法往往难以满足其要求,通常要先进行铸造或塑性变形等方法将原材料制成毛坯,再进行各种切削加工才能制成零件的成品。

金属对各种加工工艺方法所表现出来的适应性称为工艺性能,主要有以下四个方面:

①可铸性:反映金属材料熔化浇铸成为铸件的难易程度,表现为熔化状态时的流动性、吸气性、氧化性、熔点,铸件显微组织的均匀性、致密性,以及冷缩率等。

②可锻性:反映金属材料在压力加工过程中成型的难易程度,例如将材料加热到一定温度时其塑性的高低(表现为塑性变形抗力的大小),允许热压力加工的温度范围大小,热胀冷缩特性以及显微组织、机械性能有关的临界变形的界限、热变形时金属的流动性、导热

性能等。

③可焊性:反映金属材料在局部快速加热,使结合部位迅速熔化或半熔化(需加压),从而使结合部位牢固地结合在一起而成为整体的难易程度,表现为熔化时的吸气性、氧化性、导热性、热胀冷缩特性、塑性以及与接缝部位和附近用材显微组织的相关性、对机械性能的影响等。

④切削加工性能:反映用切削工具(例如车削、铣削、刨削、磨削等)对金属材料进行切削加工的难易程度。

第一篇 无机非金属材料 加工原理及工艺学

第1章 陶瓷加工工艺原理

1.1 陶瓷的定义与分类

1.1.1 陶瓷的概念

陶瓷是人们日常生活和工作中经常使用的一类无机非金属材料。狭义的陶瓷是指原料经过混合、成型、烧结等工艺而得到的制品。一般包括日用陶瓷制品和建筑陶瓷、电瓷等。广义上的陶瓷则除了传统陶瓷之外,还包括玻璃、水泥、搪瓷、耐火材料、粉体材料等。

随着科学技术的发展进步,陶瓷材料经历了从简单到复杂、从粗糙到精细、从无釉到施釉、从低温到高温的过程。随着生产力的发展和技术水平的提高,各个历史阶段赋予陶瓷的涵义和范围也随之发生变化。现代先进陶瓷材料种类繁多,功能各异,但是其基本生产工艺与传统陶瓷相同。先进陶瓷也称为特种陶瓷、精细陶瓷、新型陶瓷。由于生产方法和使用要求的不同,先进陶瓷采用的原料已不再使用或很少使用黏土等传统陶瓷原料,而已扩大到化工原料和合成矿物,甚至是非硅酸盐、非氧化物原料,组成范围也延伸到无机非金属材料的范围中,并且出现了许多新的工艺。

1.1.2 陶瓷的分类

陶瓷的分类方法有许多种,由于各个国家和地区的陶瓷工业的发展历史不同,目前还没有完全一致的分类。陶瓷的分类方法主要有根据吸水率、陶瓷的物理化学性能、陶瓷的化学成分以及用途等分类。

按陶瓷概念和用途分类,可将陶瓷制品分为两大类:普通陶瓷和特种陶瓷。普通陶瓷可分为日用陶瓷(包括艺术陈列陶瓷)、建筑卫生陶瓷、化工陶瓷、化学瓷、电瓷及其他工业用陶瓷。特种陶瓷是用于各种现代工业和尖端科学技术所需的陶瓷制品。特种陶瓷又分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。结构陶瓷主要是用于耐磨损、高强度、耐热冲击、高硬度、高刚性、低热膨胀性和隔热等陶瓷材料,又称为工程陶瓷;功能陶瓷包括光学功能、电学功能、磁功能、生物功能等陶瓷材料。

我国日用陶瓷分类标准(GB 5001—85)见表1.1。日用陶瓷按其胎体特征分为陶器与瓷器。

表 1.1 日用陶瓷分类

| 性能及特征 | 陶器 | 瓷器 |
|---------|-----------------|---------------------------|
| 吸水率 / % | 一般大于 3 | 一般不大于 3 |
| 透光性 | 不透光 | 透光 |
| 胎体特征 | 未玻化或玻化程度差, 断面粗糙 | 玻化程度高、结构致密, 断面细腻, 呈石状或贝壳状 |
| 敲击声 | 沉闷 | 清脆 |

陶器按其特征分为粗陶器、普通陶器和细陶器, 见表 1.2。

表 1.2 日用陶器分类

| 名称 | 粗陶器 | 普通陶器 | 细陶器 |
|----|------------------------|--|---|
| 特征 | 吸水率一般大于 15%, 不施釉, 制作粗糙 | 吸水率一般不大于 12%, 断面颗粒较粗, 气孔较大, 表面施釉, 制作不够精细 | 吸水率一般不大于 15%, 断面颗粒细, 气孔较小, 结构均匀, 施釉或不施釉, 制作精细 |

瓷器按其特征分为炻瓷器、普通瓷器和细瓷器, 见表 1.3。

表 1.3 日用瓷器分类

| 名称 | 炻瓷器 | 普通瓷器 | 细瓷器 |
|----|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 特征 | 吸水率一般不大于 3%, 透光性差, 通常胎体较厚, 呈色, 断面呈石状, 制作较精细 | 吸水率一般不大于 1%, 有一定透光性, 断面呈石状或贝壳状, 制作较精细 | 吸水率一般不大于 0.5%, 透光性好, 断面细腻, 呈贝壳状, 制作精细 |

特种陶瓷分类方法见表 1.4。

表 1.4 特种陶瓷分类方法

| 类别 | | 实例 | 用途 |
|------|---------|---------------------------------|-------------------|
| 结构陶瓷 | 氧化物陶瓷 | Al_2O_3 | 真空器件、电路基板、磨料磨具、刀具 |
| | | MgO | 坩埚、热电偶保护管、炉衬材料 |
| | | BeO | 散热器件、高温绝缘材料、防辐射材料 |
| | | ZrO_2 | 高温绝缘材料、耐火材料 |
| | | SiC | 耐磨材料、高温机械部件 |
| | 非氧化物陶瓷 | TiC | 切削刀具 |
| | | B_4C | 耐磨材料 |
| | | Si_3N_4 | 发动机部件、切削刀具 |
| | | AlN | 高温机械部件 |
| | | BN | 耐火材料、耐磨材料 |
| | | TiN | 耐热耐磨材料 |
| | | Sialon | 高温机械部件 |
| | | ZrB_2 、 TiB_2 | 陶瓷基体中的添加剂或第二相 |
| | | MoSi_2 | 高温发热体 |
| | 陶瓷基复合材料 | C/SiC | 热交换机、发动机喷嘴等高温结构部件 |

续表 1.4

| 类别 | 实例 | 用途 | |
|------|---|---|---------------|
| 功能陶瓷 | Al_2O_3 , Si_3N_4 , $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ | 绝缘材料 | |
| | | TiO_2 , CaTiO_3 | 电容器 |
| | 铁电陶瓷 | BaTiO_3 , PbTiO_3 | 压电材料 |
| | | PLZT, PbTiO_3 | 热释电材料 |
| | 敏感陶瓷 | ZnO , TiO_2 | 湿度计 |
| | | V_2O_5 | 温度继电器 |
| | | SnO_2 | 气体报警器 |
| | 导电陶瓷 | $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ | 电池隔膜材料 |
| | | LaCrO_3 | 发热体、高温电极材料 |
| | | ZrO_2 | 氧气传感器 |
| | 超导陶瓷 | YBaCuO | 超导线圈、磁悬浮材料 |
| | 磁性陶瓷 | NiFe_2O_4 | 磁光存储器、表面波器件 |
| | 生物陶瓷 | $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ | 人工骨骼、牙齿 |
| | 光学陶瓷 | Al_2O_3 | 高压钠灯灯管、红外光学材料 |
| | | $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, Y_2O_3 , Sc_2O_3 | 固体激光物质 |

1.2 可加工陶瓷

可加工陶瓷材料通常是指,在常温状态下可由普通切削刀具(如高速钢、硬质合金及普通砂轮等)加工出具有一定尺寸要求、形状精度及表面质量的陶瓷材料。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,在陶瓷内部产生弱结合面,实现陶瓷材料的可加工性。

1.2.1 可加工陶瓷材料分类

按材料成分不同,可加工陶瓷可分为可加工玻璃陶瓷、氧化物可加工陶瓷和非氧化物可加工陶瓷。

(1) 可加工玻璃陶瓷。

玻璃陶瓷材料是研制最早也是目前应用较广的可加工陶瓷材料。玻璃陶瓷是通过玻璃晶化而制得的微晶体和玻璃相均匀分布的多晶材料。可加工玻璃陶瓷的成分组成通常为 $\text{R}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{F}$ 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、熔融法和溶胶-凝胶法。熔融法是常用制备方法之一,其主要制作工艺过程为:配料→研磨→混料→煅烧→浇注→晶化热处理,其中化学成分配比对玻化过程和晶化过程有明显影响,是

云母玻璃陶瓷材料可加工性的主要影响因素。可加工玻璃陶瓷材料的弯曲强度一般在 100 MPa 左右,断裂韧性为 $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,硬度在 4 GPa 左右,通过工艺改进和相变增韧,弯曲强度达 500 MPa,断裂韧性达 $3.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。玻璃陶瓷材料以其独有的电性能和良好的生物活性广泛应用于航空航天、电子以及生物医学领域。但由于玻璃陶瓷内部存在玻璃相,在高温状态下(尤其温度高于 $800 \text{ }^\circ\text{C}$)出现玻璃相软化或晶粒粗大现象,使得可加工玻璃陶瓷不适合作为高温工程材料。

(2) 氧化物可加工陶瓷。

在氧化物陶瓷材料(如 Al_2O_3 , ZrO_2 , $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)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。氧化物之间的结合较弱,材料的加工与去除是通过两相间弱连接界面处裂纹的形成而完成的。这种材料具有良好的高温稳定性,可达到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温。采用烧结法制备材料的一般工艺过程是:配料→混料→注浆→烧结。通过组分设计和结构剪裁,可获得细粒度的复相陶瓷材料。另外,作为生物陶瓷的 $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 本身不具备可加工性,通过添加稀土磷酸盐 DyPO_4 ,用普通刀具便可实现材料的钻削和切削加工,材料具有可加工性。

(3) 非氧化物可加工陶瓷。

目前,研制开发了多种非氧化物可加工陶瓷材料。其中原位增韧 $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ 体系被认为是最有吸引力的 SiC 基陶瓷体系之一。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 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$,属立方晶系,是目前所知的抗蠕变性能最好的氧化物材料。 SiC/C 体系的层状复合陶瓷,由于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。如 SiC/C 复合陶瓷材料断裂韧性从基体的 $3.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 提高到 $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,抗弯强度亦有所提高。

1.2.2 可加工陶瓷应用领域及市场前景

可加工陶瓷材料可以用车、铣、钻等传统金属加工方法进行精密加工,同时具有无机非金属材料物理和化学性能,如耐高温、耐酸碱、绝缘等。此外,还具备良好的机械强度和抗冲击性,优良的热震性,卓越的介电性能等。由于可加工陶瓷具有很多优良的综合性能,能满足高精度技术要求,无须模具设计及制作,大大缩短研制周期,可以加速工程进展,节省研制费用,因此深受广大科研、教学和设计部门的欢迎。它特别适合精密仪器、医疗设备、电真空器件、电子束曝光机、纺织机械、传感器、质谱仪和能谱仪等仪器。对于一些薄壁的线圈骨架,精密仪器的绝缘支架,形状复杂等精度要求高的器件,可加工玻璃陶瓷更为适用,它可加工成任意形状。它比氮化硼强度高,放气率低,比聚四氟乙烯耐温度,不变形,不变质,经久耐用,比氧化铝瓷加工性更好,生产周期短,合格率高,设计人员可任意制作所需尺寸的产品。可加工陶瓷抗热冲击性能非常好,从 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 急冷至 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 不破碎, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 急冷到 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 强度不变化。可加工陶瓷的优良性能使其在航空航天、电子基片、耐高温绝缘骨架、离子镀膜、真空镀膜、离子显微镜、离子加速器、激光器和医疗设备等领域得到了广泛应用。

1.3 陶瓷加工技术

1.3.1 陶瓷的加工特征

大部分的陶瓷是晶体材料或者是粉末经压缩成形烧结而成的,而不能通过类似金属铸造或塑性加工的方法来成形。但是,高温加工在本质上不易获得高精度的制品,因此,要制造出高精度、高表面质量的功能陶瓷元件,必须进行超精密加工。

如何高效地将毛坯制造成所期望的精度和质量的产品是加工的目标,因此,就期望有高效高精度的加工技术。通常,加工精度高的加工方法往往使材料的去除速度慢,生产率低。因此,高精度产品加工的生产成本也急剧上升。但加工精度提高后,产品的功能和附加值也相应提高。在实际生产中,应在不断提高加工精度的同时降低生产成本。

陶瓷材料因其结构的敏感性,经过表面加工后特性会降低。因此,在陶瓷加工中,不仅要保证高加工精度和生产率,更重要的是不损坏加工面的性能。特别是单晶材料,不能破坏其表面的结晶构造。金属加工利用的是材料的塑性变形及破坏现象,而对陶瓷来说几乎没有变形就达到了破坏应力,即脆性破坏。由于金属与陶瓷在材料机械性能方面的不同,所以在加工陶瓷时不能完全采用金属的加工技术。

若在陶瓷表面用金刚石压头划个刻痕,陶瓷材料会因拉伸应力而发生脆性破坏,在材料表面残留无数微裂纹。但若在磨削及抛光时将加工单位减小,那么就转变为因位移而产生的塑性变形破坏方式来进行加工。若将加工单位进一步减小至分子或原子级单位,这时材料的化学性能将支配加工,就可能进行无损伤及塑性变形加工。与金属材料相比,陶瓷的超精密加工具有以下特征。

(1) 弹性系数高。

陶瓷材料为脆性材料,刚性好,在弹性变形范围内产生断裂破坏。因此,与相同尺寸和形状的金属材料相比,陶瓷材料弹性变形小,适合于超精密加工。另外,陶瓷精密零件在使用时,零件变形小,易于保持精度。

在加工过程中,加工力作用在工件与刀具之间,使得机床、工件、夹具等产生挠曲变形,而导致刀具刀尖的轨迹与期望值不一致。虽然陶瓷弹性系数高,但大多数的功能陶瓷电子产品为小体积的薄形件,刚性较差,易造成加工精度的降低。例如,硅基片、水晶、铌酸锂及蓝宝石片等的直径比厚度大得多。像这种低刚度工件,不仅要考虑加工力引起的材料变形,还必须考虑安装变形的问题。抛光后,工件的平面度很大程度上取决于使用真空吸盘或粘贴方法是否良好。

(2) 硬度高。

硬度高、耐磨性好是陶瓷材料的特性之一。加工后的陶瓷零件抗磨损性好,适合于作为精密滑动部件。因为陶瓷材料硬度高,所以去除量很小,导致加工效率低,但易于得到表面粗糙度小、加工变质层也较浅的加工件。陶瓷比一般的金属硬,导热性差,加工点附近的温度容易上升,刀具的磨损较大。因此,加工陶瓷的刀具材质受到限制。

随着刀具的磨损,不仅引起刀具几何形状的变化,而且由于刀具磨损使加工阻力和加工热增加,进而产生了各种加工误差。过大的加工阻力在陶瓷材料表面产生裂纹及缺陷,降低