

WUTP

现代陶瓷教科丛书

Advanced Ceramics Processing

# 先进陶瓷工艺学

---

主 编 刘维良  
副主编 喻佑华

武汉理工大学出版社  
Wuhan University of Technology Press

现代陶瓷教科丛书

Advanced Ceramics Processing  
先进陶瓷工艺学

主 编 刘维良  
副主编 喻佑华

武汉理工大学出版社  
Wuhan University of Technology Press

## 【内容简介】

本书为高等学校无机非金属材料专业的教科书。全书共分为 24 章,该书分章详细介绍了先进陶瓷主要制造工艺及设备,先进陶瓷主要品种、性能及用途。着重对先进陶瓷主要品种的化学组成、工艺过程与显微结构和性能之间的关系作了详细的讨论,并列举了典型应用实例。该书还综合了国内外无机非金属材料学科前沿的最新技术和科技成果。

本书除供高等学校无机非金属材料专业作为教材使用外,还可作为从事先进陶瓷的科研人员、工程技术人员、研究生等的工具书和参考文献。

## 图书在版编目(CIP)数据

先进陶瓷工艺学/刘维良主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2004. 8

ISBN 7-5629-2146-6

I. 先…

II. 刘…

III. 陶瓷-生产工艺

IV. TQ174. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005357 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:tiandq@mail.whut.edu.cn

印 刷:湖北省荆州市鸿盛印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:43.75

字 数:1080 千字

版 次:2004 年 8 月第 1 版

印 次:2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412

版权所有,盗版必究。

# 《现代陶瓷教科丛书》编审委员会

名誉主任 郭景坤 秦锡麟

主任委员 周健儿

副主任委员 肖任贤 曹春娥 江伟辉 蔡德民

委 员 (以姓氏笔画为序)

马光华 冯 青 朱小平 朱竹芳 江向平

刘维良 成 岳 何炳钦 陈雨前 邹晓松

张柏清 喻佑华 罗二平 罗贤海 胡国林

胡鸿豪 顾幸勇 章义来 黄 弘

秘 书 长 田道全

(总责任编辑)

## 总 序

在漫长的文明进程中,中国制瓷业的发展,不仅促进了中国古代手工业的繁荣,而且还促进了世界制瓷业的生成。它的产生、发展和繁荣,在带给我们美仑美焕陶瓷的同时,也为中国文化和经济史写下灿烂的篇章,这已是世所公认的事实。

在英文中,CHINA 既是“中国”的意思,也是瓷器的意思。虽说瓷器与国同名,但其正规的、系统的教育却起步很晚。直到 19 世纪末的“百日维新”后,一些陶瓷产区才开始了新型的陶瓷教育事业,如 1906 年创办的湖南醴陵陶瓷学堂、1909 年在江西饶州创办的中国陶业学堂等。由于受西方科技思想的影响,这些学堂注重数、理、化等基础课程和陶瓷技艺课程的教学,教师一般都是学识丰富、技艺精良及资历较深的教员、技师和工程师,其中不少接受过西方正规专业教育;毕业生主要担负着陶瓷工业试验和技术改良工作,教材大多由留日、留美的学者或教员自行编写。新中国成立后,陶瓷工业得到了迅速发展,对陶瓷人才的需求日益迫切,以往师徒世代相传技艺和凭经验管理企业的传统做法难于满足。1958 年 6 月一个为中国陶瓷工业培养和输送专门技术、设计人才的景德镇陶瓷学院应运而生。这是一所为我国系统培养陶瓷专门技术、艺术设计人才的惟一高等学府,它已经建设成为一所以陶瓷为特色,集工学、艺术、文学、经济等体系完整、实力雄厚的多科性的工科大学。特别是在陶瓷教育、科技领域等先后出版了一批具有较大影响的专业教材,为陶瓷科技、教育事业做出了积极贡献。

《现代陶瓷教科丛书》是景德镇陶瓷学院为满足新世纪陶瓷发展需要,汇集一大批在陶瓷学术界卓有成就的专家、学者经过二年多辛勤努力编撰而成的。它是目前国内一套不仅涵盖了陶瓷工艺、窑炉和陶瓷机械,还涵盖了建筑卫生陶瓷和陶瓷科技英语等多学科,较为完整的陶瓷类教育丛书。它的问世,有助于中国陶瓷产业的发展,为陶瓷科技与教育提供了理论和实践的参考。期望这套丛书,在促进陶瓷科技转化为生产力,为培育和造就更多陶瓷高级专门人才起到有力的推动作用。为此衷心地感谢景德镇陶瓷学院领导的指导支持和参与编写这套丛书的专家、学者们的热忱奉献,也缅怀为陶瓷科技、教育、产业做出巨大贡献的先人们,是他们留下的极为宝贵的知识遗产,为本丛书的编撰奠定了坚实的基础。与此同时,我们也感谢武汉理工大学出版社对这套丛书给予的大力支持,并对他们的敬业精神深表敬意。由于编写时间仓促,书中难免存在一些不足和错误,欢迎广大读者提出宝贵意见,以使这套丛书更趋完善。

《现代陶瓷教科丛书》编审委员会主任 周健儿

2004 年 8 月

## 前 言

本书是《现代陶瓷教科丛书》之一,根据高等学校无机非金属材料专业教学大纲而编写的教材。

随着高新技术高速发展的 21 世纪的到来,无机非金属材料学科的发展正在日新月异,为了使教学跟上 21 世纪时代发展的步伐,培养高质量的专业人才,使学生较全面地了解无机非金属材料学科的知识,我们按照科学性、先进性和系统性的原则,吸收了国内现有教材、有关书籍的有益内容,综合了国内外无机非金属材料学科的最新技术和科研成果,同时结合了景德镇陶瓷学院的科技成果以及专业教学实践,组织景德镇陶瓷学院的教授、博士编写成此书。

本书共 24 章,主要介绍了先进陶瓷(Advanced Ceramics)制备工艺过程及设备、结构陶瓷和功能陶瓷。本书除了有传统的“特种陶瓷工艺学”所介绍的内容外,还介绍了如纳米陶瓷、多孔陶瓷、低膨胀陶瓷、生物陶瓷、抗菌陶瓷、光学陶瓷、发光陶瓷、红外辐射陶瓷等无机非金属材料学科前沿方面的内容,因而具有时代的特色。

全书由景德镇陶瓷学院刘维良担任主编,景德镇陶瓷学院喻佑华担任副主编。编写人员及编写分工为:刘维良(绪论、第 1、2、5、8、9、17、18、21、22、23 章),喻佑华(第 3、7、14、16、20 章),景德镇陶瓷学院吴坚强(第 4、6、11、12、15 章),景德镇陶瓷学院刘阳(第 10、19 章),景德镇陶瓷学院江向平(第 13 章)。在统稿过程中,陈建华参与大量的编辑和整理工作。本书由轻工业陶瓷研究所江正廉高级工程师和景德镇陶瓷学院顾幸勇教授担任主审。

本书编写时间比较紧迫,编写资料的搜集尚欠详尽,加之编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,恳请专家和读者批评指正!

编 者

2004 年 6 月

# 目 录

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| <b>0 绪论</b> .....               | (1)  |
| 0.1 从普通陶瓷发展到先进陶瓷 .....          | (1)  |
| 0.2 先进陶瓷的分类、特性与用途 .....         | (2)  |
| 0.3 先进陶瓷材料科学与工程的研究内涵 .....      | (4)  |
| 0.4 先进陶瓷的发展前景 .....             | (6)  |
| <b>1 先进陶瓷粉体制备与性能表征及设备</b> ..... | (8)  |
| 1.1 机械粉碎加工粉体及设备 .....           | (8)  |
| 1.1.1 滚筒式球磨 .....               | (8)  |
| 1.1.2 振动磨 .....                 | (10) |
| 1.1.3 行星式研磨 .....               | (11) |
| 1.1.4 行星式振动磨 .....              | (11) |
| 1.1.5 搅拌球磨 .....                | (12) |
| 1.1.6 气流粉碎 .....                | (13) |
| 1.1.7 高能球磨 .....                | (15) |
| 1.2 粉体合成制备工艺 .....              | (17) |
| 1.2.1 固相法 .....                 | (17) |
| 1.2.2 液相法 .....                 | (20) |
| 1.2.3 气相法 .....                 | (31) |
| 1.3 粉体的物理性能及其表征 .....           | (45) |
| 1.3.1 粉体颗粒的表征 .....             | (45) |
| 1.3.2 粉体粒度测定方法 .....            | (47) |
| 1.3.3 颗粒形貌结构分析 .....            | (52) |
| 1.3.4 颗粒成分分析 .....              | (53) |
| 1.3.5 粉体晶态的表征 .....             | (55) |
| 1.3.6 纳米陶瓷的谱学表征 .....           | (55) |
| 1.3.7 坯体气孔分布 .....              | (57) |
| 思考题与习题 .....                    | (59) |
| <b>2 成型工艺及设备</b> .....          | (60) |
| 2.1 配料计算与制备 .....               | (60) |
| 2.1.1 配料计算 .....                | (60) |
| 2.1.2 坯料制备 .....                | (62) |
| 2.2 注浆成型法 .....                 | (64) |
| 2.2.1 石膏模注浆成型 .....             | (64) |
| 2.2.2 热压铸成型 .....               | (67) |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 2.3 可塑法成型           | (70)  |
| 2.3.1 塑化            | (70)  |
| 2.3.2 挤压成型工艺及设备     | (71)  |
| 2.3.3 轧膜成型工艺及设备     | (74)  |
| 2.4 模压成型            | (76)  |
| 2.4.1 造粒粉的制备工艺      | (76)  |
| 2.4.2 加压方式与压力分布     | (77)  |
| 2.4.3 模压成型工艺参数控制及特点 | (78)  |
| 2.4.4 干压成型设备        | (79)  |
| 2.5 等静压成型           | (81)  |
| 2.5.1 等静压成型方法       | (81)  |
| 2.5.2 等静压成型机        | (82)  |
| 2.5.3 热等静压成型法       | (83)  |
| 2.5.4 热等静压成型机       | (83)  |
| 2.6 流延成型法           | (84)  |
| 2.6.1 流延成型的料浆制备     | (84)  |
| 2.6.2 流延成型工艺        | (86)  |
| 2.6.3 流延成型机         | (87)  |
| 2.7 其他成型方法          | (89)  |
| 2.7.1 注射成型法         | (89)  |
| 2.7.2 原位凝固成型        | (92)  |
| 2.7.3 快速原型成型技术(RP)  | (95)  |
| 思考题与习题              | (97)  |
| 3 干燥与排塑工艺           | (99)  |
| 3.1 干燥              | (99)  |
| 3.1.1 水与坯料的结合形式     | (99)  |
| 3.1.2 干燥过程          | (99)  |
| 3.1.3 干燥方法          | (100) |
| 3.1.4 干燥速度          | (102) |
| 3.2 排塑              | (102) |
| 3.2.1 排塑的目的和作用      | (102) |
| 3.2.2 排塑过程中的物理化学变化  | (103) |
| 3.2.3 影响排塑过程的因素     | (103) |
| 3.2.4 排塑(蜡)温度制度     | (105) |
| 思考题与习题              | (106) |
| 4 烧结工艺及热工设备         | (107) |
| 4.1 先进陶瓷烧结机理        | (107) |
| 4.1.1 先进陶瓷烧结定义      | (107) |
| 4.1.2 烧结阶段          | (107) |



|       |                   |       |
|-------|-------------------|-------|
| 4.1.3 | 烧结的动力 .....       | (108) |
| 4.1.4 | 烧结过程中的物质传递 .....  | (109) |
| 4.1.5 | 添加剂对烧结的影响 .....   | (111) |
| 4.2   | 烧成制度 .....        | (117) |
| 4.2.1 | 升温过程 .....        | (118) |
| 4.2.2 | 最高烧结温度与保温时间 ..... | (118) |
| 4.2.3 | 降温方式 .....        | (119) |
| 4.3   | 影响烧结的主要因素 .....   | (120) |
| 4.3.1 | 原始粉料的粒度 .....     | (120) |
| 4.3.2 | 添加剂的作用 .....      | (120) |
| 4.3.3 | 烧结温度和保温时间 .....   | (121) |
| 4.3.4 | 盐类的选择及其煅烧条件 ..... | (122) |
| 4.3.5 | 气氛的影响 .....       | (123) |
| 4.3.6 | 成型压力的影响 .....     | (124) |
| 4.4   | 烧结方法 .....        | (124) |
| 4.4.1 | 常压烧结 .....        | (124) |
| 4.4.2 | 热压烧结 .....        | (124) |
| 4.4.3 | 热等静压(HIP) .....   | (125) |
| 4.4.4 | 反应热压烧结 .....      | (126) |
| 4.4.5 | 反应烧结(反应成型) .....  | (126) |
| 4.4.6 | 气氛烧结 .....        | (127) |
| 4.4.7 | 电火花烧结 .....       | (128) |
| 4.4.8 | 放电等离子烧结 .....     | (128) |
| 4.4.9 | 化学气相沉积法和溅射法 ..... | (130) |
| 4.5   | 热工设备 .....        | (131) |
| 4.5.1 | 间歇式窑炉 .....       | (131) |
| 4.5.2 | 连续式窑 .....        | (135) |
| 4.5.3 | 窑炉辅助设备 .....      | (136) |
|       | 思考题与习题 .....      | (139) |
| 5     | 陶瓷精加工 .....       | (140) |
| 5.1   | 陶瓷精加工机理 .....     | (140) |
| 5.1.1 | 陶瓷材料的结构性能特点 ..... | (140) |
| 5.1.2 | 陶瓷材料的加工机理 .....   | (140) |
| 5.1.3 | 磨削机理 .....        | (140) |
| 5.2   | 陶瓷精加工方法种类 .....   | (141) |
| 5.3   | 磨削加工及设备 .....     | (142) |
| 5.3.1 | 砂轮和磨料的选择 .....    | (142) |
| 5.3.2 | 磨削条件及工艺 .....     | (143) |
| 5.3.3 | 研磨 .....          | (143) |

|       |                          |       |
|-------|--------------------------|-------|
| 5.3.4 | 抛光                       | (144) |
| 5.3.5 | 粘弹性流动加工                  | (144) |
| 5.3.6 | 磨削加工设备                   | (145) |
| 5.3.7 | 研磨机床                     | (148) |
| 5.3.8 | 抛光机                      | (149) |
| 5.4   | 切割、打孔及设备                 | (149) |
| 5.4.1 | 切割工艺与切割机、切片机             | (149) |
| 5.4.2 | 打孔方法                     | (150) |
| 5.5   | 其他加工方法                   | (151) |
| 5.5.1 | 激光加工                     | (151) |
| 5.5.2 | 线切割加工                    | (152) |
| 5.5.3 | 化学研磨                     | (152) |
| 5.5.4 | 超声波加工                    | (152) |
| 5.5.5 | EMG 加工法                  | (153) |
| 5.5.6 | MEEC 加工法                 | (153) |
| 5.5.7 | 电子束加工                    | (153) |
|       | 思考题与习题                   | (154) |
| 6     | 金属化与封接                   | (155) |
| 6.1   | 陶瓷的金属化                   | (155) |
| 6.1.1 | 被银法                      | (155) |
| 6.1.2 | 烧结金属粉末法                  | (158) |
| 6.1.3 | 化学镀镍法                    | (160) |
| 6.1.4 | 活性金属法                    | (161) |
| 6.1.5 | 真空蒸镀                     | (162) |
| 6.2   | 陶瓷与金属封接                  | (162) |
| 6.2.1 | 烧结金属法封接                  | (162) |
| 6.2.2 | 活性金属法封接                  | (162) |
| 6.2.3 | 激光焊接                     | (163) |
| 6.3   | 陶瓷的封接形式                  | (164) |
| 6.3.1 | 对封                       | (164) |
| 6.3.2 | 压封                       | (164) |
| 6.3.3 | 穿封                       | (165) |
|       | 思考题与习题                   | (165) |
| 7     | 氧化物陶瓷                    | (166) |
| 7.1   | 氧化铝陶瓷                    | (166) |
| 7.1.1 | $Al_2O_3$ 的结晶形态与性能       | (166) |
| 7.1.2 | $Al_2O_3$ 原料的制备          | (167) |
| 7.1.3 | $Al_2O_3$ 的预烧            | (167) |
| 7.1.4 | 添加剂对 $Al_2O_3$ 陶瓷烧结性能的影响 | (168) |

|       |  |       |
|-------|--|-------|
| 7.1.5 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷的制造 .....       | (169) |
| 7.1.6 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷的性能与用途 .....    | (170) |
| 7.2   | 氧化镁陶瓷 .....                                      | (171) |
| 7.2.1 | MgO 原料的制备 .....                                  | (171) |
| 7.2.2 | MgO 陶瓷的制造 .....                                  | (172) |
| 7.2.3 | MgO 陶瓷的性能与应用 .....                               | (173) |
| 7.3   | 氧化铍陶瓷 .....                                      | (173) |
| 7.3.1 | BeO 陶瓷的制造工艺 .....                                | (173) |
| 7.3.2 | BeO 陶瓷的性能与应用 .....                               | (175) |
| 7.4   | 氧化锆陶瓷 .....                                      | (176) |
| 7.4.1 | ZrO <sub>2</sub> 的性质与晶型转变 .....                  | (176) |
| 7.4.2 | 稳定 ZrO <sub>2</sub> 与部分稳定 ZrO <sub>2</sub> ..... | (178) |
| 7.4.3 | ZrO <sub>2</sub> 陶瓷的制造 .....                     | (179) |
| 7.4.4 | ZrO <sub>2</sub> 陶瓷的性能与应用 .....                  | (179) |
| 7.4.5 | ZrO <sub>2</sub> 增韧陶瓷 .....                      | (180) |
| 7.5   | 二氧化硅陶瓷 .....                                     | (186) |
| 7.5.1 | 概述 .....   | (186) |
| 7.5.2 | SiO <sub>2</sub> 陶瓷的制造 .....                     | (186) |
| 7.5.3 | SiO <sub>2</sub> 陶瓷的性能与用途 .....                  | (187) |
| 7.6   | 氧化锡陶瓷 .....                                      | (187) |
| 7.6.1 | 概述 .....   | (187) |
| 7.6.2 | SnO <sub>2</sub> 陶瓷的制造 .....                     | (188) |
| 7.6.3 | SnO <sub>2</sub> 陶瓷的性能与用途 .....                  | (188) |
| 7.7   | 莫来石陶瓷 .....                                      | (188) |
| 7.7.1 | 概述 .....   | (188) |
| 7.7.2 | 莫来石陶瓷的制造工艺 .....                                 | (189) |
| 7.7.3 | 莫来石陶瓷的性能与用途 .....                                | (191) |
|       | 思考题与习题 .....                                     | (192) |
| 8     | 非氧化物陶瓷 .....                                     | (193) |
| 8.1   | 概述 .....   | (193) |
| 8.2   | 碳化物陶瓷 .....                                      | (193) |
| 8.2.1 | 碳化硅陶瓷 .....                                      | (193) |
| 8.2.2 | 碳化钛陶瓷 .....                                      | (198) |
| 8.2.3 | 碳化硼陶瓷 .....                                      | (198) |
| 8.2.4 | 其他碳化物陶瓷 .....                                    | (199) |
| 8.3   | 氮化物陶瓷 .....                                      | (200) |
| 8.3.1 | 氮化硅陶瓷 .....                                      | (200) |
| 8.3.2 | 氮化铝陶瓷 .....                                      | (207) |
| 8.3.3 | 氮化硼陶瓷 .....                                      | (209) |

|        |                           |       |
|--------|---------------------------|-------|
| 8.3.4  | 氮化钛陶瓷 .....               | (212) |
| 8.3.5  | 赛隆(Sialon)陶瓷 .....        | (213) |
| 8.4    | 硅化物陶瓷 .....               | (215) |
| 8.4.1  | 硅化物的结构 .....              | (215) |
| 8.4.2  | 硅化物粉末的制备方法 .....          | (215) |
| 8.4.3  | 硅化物的性质 .....              | (216) |
| 8.4.4  | 二硅化钼陶瓷 .....              | (216) |
| 8.5    | 硼化物陶瓷 .....               | (218) |
| 8.5.1  | 概述 .....                  | (218) |
| 8.5.2  | 硼化物粉料的制备 .....            | (218) |
| 8.5.3  | 硼化物陶瓷的制造工艺 .....          | (219) |
| 8.5.4  | 硼化物陶瓷的性能与用途 .....         | (219) |
| 8.5.5  | 硼化钴陶瓷 .....               | (220) |
|        | 思考题与习题 .....              | (222) |
| 9      | 纳米陶瓷 .....                | (223) |
| 9.1    | 概述 .....                  | (223) |
| 9.1.1  | 纳米陶瓷 .....                | (223) |
| 9.1.2  | 纳米陶瓷分类 .....              | (223) |
| 9.1.3  | 纳米颗粒四个效应 .....            | (224) |
| 9.1.4  | 纳米陶瓷材料的宏观物理性能 .....       | (225) |
| 9.2    | 纳米陶瓷的制造方法 .....           | (226) |
| 9.2.1  | 纳米粉体的制备方法 .....           | (226) |
| 9.2.2  | 纳米陶瓷素坯的成型 .....           | (226) |
| 9.2.3  | 纳米陶瓷的烧结 .....             | (231) |
| 9.3    | 纳米陶瓷的显微结构分析、表面分析和性能 ..... | (238) |
| 9.3.1  | 显微结构分析 .....              | (238) |
| 9.3.2  | 表面分析 .....                | (239) |
| 9.3.3  | 性能 .....                  | (240) |
| 9.4    | 纳米陶瓷的应用前景和展望 .....        | (243) |
|        | 思考题与习题 .....              | (246) |
| 10     | 低膨胀陶瓷 .....               | (247) |
| 10.1   | 堇青石陶瓷 .....               | (248) |
| 10.1.1 | 概况 .....                  | (248) |
| 10.1.2 | 堇青石陶瓷的制造工艺 .....          | (248) |
| 10.1.3 | 堇青石的性能和用途 .....           | (250) |
| 10.2   | 锂辉石陶瓷 .....               | (252) |
| 10.2.1 | 概述 .....                  | (252) |
| 10.2.2 | 锂辉石陶瓷的制造工艺 .....          | (253) |
| 10.2.3 | 锂辉石陶瓷的性能和用途 .....         | (254) |

|           |                           |       |
|-----------|---------------------------|-------|
| 10.3      | 钛酸铝陶瓷                     | (254) |
| 10.3.1    | 概述                        | (254) |
| 10.3.2    | 钛酸铝陶瓷的制造工艺                | (254) |
| 10.3.3    | 钛酸铝的性能与用途                 | (256) |
| 10.4      | 微晶陶瓷                      | (260) |
| 10.4.1    | 概述                        | (260) |
| 10.4.2    | 微晶陶瓷的制造工艺                 | (260) |
| 10.4.3    | 微晶陶瓷的性能与用途                | (261) |
|           | 思考题与习题                    | (262) |
| <b>11</b> | <b>绝缘陶瓷</b>               | (263) |
| 11.1      | 绝缘陶瓷的分类及性能要求              | (263) |
| 11.1.1    | 绝缘陶瓷的分类                   | (263) |
| 11.1.2    | 绝缘陶瓷的性能要求                 | (263) |
| 11.2      | 镁质绝缘陶瓷                    | (264) |
| 11.2.1    | 镁质瓷的种类                    | (264) |
| 11.2.2    | 滑石瓷                       | (266) |
| 11.2.3    | 镁橄榄石瓷                     | (270) |
| 11.2.4    | 镁尖晶石瓷                     | (271) |
| 11.2.5    | 堇青石绝缘瓷                    | (271) |
| 11.3      | 氧化铝质绝缘陶瓷                  | (272) |
| 11.3.1    | 概述                        | (272) |
| 11.3.2    | 氧化铝绝缘瓷的配方                 | (272) |
| 11.3.3    | 氧化铝绝缘瓷的制造工艺               | (274) |
| 11.3.4    | 氧化铝绝缘瓷的性能与用途              | (274) |
| 11.4      | 莫来石质绝缘瓷                   | (275) |
| 11.4.1    | 莫来石瓷的合成                   | (276) |
| 11.4.2    | 莫来石瓷的性能与用途                | (278) |
| 11.5      | 氮化物绝缘瓷                    | (278) |
| 11.5.1    | AlN 绝缘瓷                   | (278) |
| 11.5.2    | BN 绝缘瓷                    | (279) |
|           | 思考题与习题                    | (280) |
| <b>12</b> | <b>电容器陶瓷</b>              | (281) |
| 12.1      | 高频温度补偿型介电陶瓷               | (281) |
| 12.2      | 高频温度稳定型介电陶瓷               | (283) |
| 12.3      | 低频高介型介电陶瓷                 | (284) |
| 12.3.1    | BaTiO <sub>3</sub> 系及铁电材料 | (284) |
| 12.3.2    | SrTiO <sub>3</sub> 系      | (289) |
| 12.3.3    | 反铁电系                      | (290) |
| 12.4      | 半导体(低频)型介电陶瓷              | (290) |

|           |                 |              |
|-----------|-----------------|--------------|
| 12.4.1    | 表面层型介电陶瓷        | (290)        |
| 12.4.2    | 晶界层型介电陶瓷        | (290)        |
| 12.5      | 叠层(独石)电容器瓷      | (292)        |
| 12.5.1    | 叠层电容器电极材料       | (292)        |
| 12.5.2    | 叠层电容器材料         | (292)        |
| 12.5.3    | 叠层电容器结构特点及制造工艺  | (300)        |
| 12.6      | 微波介质陶瓷          | (302)        |
| 12.6.1    | 微波陶瓷的介电性能       | (303)        |
| 12.6.2    | 微波陶瓷的应用         | (305)        |
|           | 思考题与习题          | (308)        |
| <b>13</b> | <b>压电和热释电陶瓷</b> | <b>(309)</b> |
| 13.1      | 压电陶瓷的结构与压电性     | (309)        |
| 13.1.1    | 压电陶瓷的内部结构       | (309)        |
| 13.1.2    | 压电陶瓷的自发极化与电畴    | (313)        |
| 13.1.3    | 压电效应及压电效应表示式    | (319)        |
| 13.2      | 压电陶瓷的性能参数       | (325)        |
| 13.2.1    | 压电陶瓷的参数         | (325)        |
| 13.3      | 典型耦合压电陶瓷        | (331)        |
| 13.3.1    | 钛酸铅             | (331)        |
| 13.3.2    | 锆钛酸铅            | (332)        |
| 13.3.3    | 三元系压电陶瓷         | (335)        |
| 13.3.4    | 复合钙钛矿型压电陶瓷      | (335)        |
| 13.4      | 压电陶瓷的生产工艺       | (338)        |
| 13.4.1    | 压电陶瓷的主要工艺流程     | (338)        |
| 13.5      | 压电陶瓷的应用         | (340)        |
| 13.5.1    | 高压发生装置上的应用      | (341)        |
| 13.5.2    | 在电声等设备上的应用      | (342)        |
| 13.5.3    | 在计测仪器上的应用       | (343)        |
| 13.5.4    | 在水声设备中的应用       | (343)        |
| 13.5.5    | 在超声仪器上的应用       | (344)        |
| 13.5.6    | 压电滤波器的应用        | (344)        |
| 13.6      | 热释电陶瓷           | (344)        |
| 13.6.1    | 热释电陶瓷的结构和性能     | (344)        |
| 13.6.2    | 热释电陶瓷的主要应用      | (346)        |
| 13.6.3    | 几种典型的热释电陶瓷      | (347)        |
|           | 思考题与习题          | (348)        |
| <b>14</b> | <b>敏感陶瓷</b>     | <b>(349)</b> |
| 14.1      | 敏感陶瓷的分类及应用      | (349)        |
| 14.2      | 敏感陶瓷的结构与性能      | (351)        |

|        |                        |       |
|--------|------------------------|-------|
| 14.3   | 敏感陶瓷的半导化过程             | (352) |
| 14.3.1 | 化学计量比偏离                | (352) |
| 14.3.2 | 掺杂                     | (353) |
| 14.4   | 热敏陶瓷                   | (354) |
| 14.4.1 | 热敏电阻的基本参数              | (355) |
| 14.4.2 | 正温度系数热敏电阻              | (359) |
| 14.4.3 | NTC 电阻材料               | (365) |
| 14.4.4 | CTR 材料                 | (366) |
| 14.4.5 | 高温热敏电阻材料               | (367) |
| 14.4.6 | 低温热敏电阻材料               | (367) |
| 14.4.7 | 热敏电阻的应用                | (367) |
| 14.5   | 压敏陶瓷                   | (368) |
| 14.5.1 | 概述                     | (368) |
| 14.5.2 | 压敏陶瓷的基本特性              | (368) |
| 14.5.3 | 氧化锌压敏陶瓷                | (370) |
| 14.5.4 | 其他压敏陶瓷                 | (376) |
| 14.6   | 气敏陶瓷                   | (383) |
| 14.6.1 | 概述                     | (383) |
| 14.6.2 | 等温吸附方程                 | (384) |
| 14.6.3 | 气敏陶瓷的种类                | (386) |
| 14.6.4 | SnO <sub>2</sub> 系气敏元件 | (386) |
| 14.6.5 | ZnO 系气敏元件              | (392) |
| 14.6.6 | 氧化铁系气敏元件               | (393) |
| 14.6.7 | 接触燃烧式可燃气体气敏陶瓷          | (393) |
| 14.6.8 | 氧敏传感器陶瓷                | (394) |
| 14.7   | 湿敏陶瓷                   | (399) |
| 14.7.1 | 湿敏陶瓷的主要特性              | (399) |
| 14.7.2 | 湿敏陶瓷材料                 | (402) |
| 14.7.3 | 湿敏陶瓷的测量及应用             | (411) |
| 14.8   | 光敏陶瓷                   | (412) |
| 14.8.1 | 半导体的光电导                | (413) |
| 14.8.2 | 光电导材料工艺                | (416) |
| 14.8.3 | 光敏电阻瓷的特性               | (420) |
| 14.8.4 | 其他光敏材料                 | (421) |
| 14.8.5 | 太阳能电池                  | (424) |
|        | 思考题与习题                 | (429) |
| 15     | 磁性陶瓷                   | (430) |
| 15.1   | 材料的磁性                  | (430) |
| 15.1.1 | 顺磁性和抗磁性                | (430) |

|           |  |       |
|-----------|--|-------|
| 15.1.2    | 铁磁体和反铁磁体   | (431) |
| 15.1.3    | 磁畴和磁畴壁   | (431) |
| 15.1.4    | 磁化和磁滞  | (431) |
| 15.1.5    | 磁致伸缩常数和磁晶各向异性常数                                      | (433) |
| 15.2      | 铁氧体的晶体结构   | (433) |
| 15.2.1    | 尖晶石型铁氧体  | (433) |
| 15.2.2    | 磁铅石型铁氧体  | (434) |
| 15.2.3    | 石榴石型铁氧体  | (434) |
| 15.3      | 铁氧体的制造   | (434) |
| 15.3.1    | 多晶铁氧体的生产工艺   | (435) |
| 15.3.2    | 铁氧体薄膜的制备   | (437) |
| 15.4      | 铁氧体微观结构与性能   | (438) |
| 15.4.1    | 晶粒大小的影响  | (438) |
| 15.4.2    | 气孔的影响  | (439) |
| 15.5      | 铁氧体的类型及用途  | (439) |
| 15.5.1    | 软磁铁氧体  | (439) |
| 15.5.2    | 硬磁铁氧体  | (445) |
| 15.5.3    | 旋磁铁氧体  | (446) |
| 15.5.4    | 矩磁铁氧体  | (447) |
| 15.5.5    | 磁泡材料   | (448) |
| 15.5.6    | 磁光材料   | (448) |
| 15.5.7    | 压磁铁氧体  | (449) |
| 15.6      | 叠层电感元件   | (449) |
| 15.6.1    | 叠层电感材料   | (449) |
|           | 思考题与习题   | (452) |
| <b>16</b> | <b>导电陶瓷与超导陶瓷</b>                                     | (453) |
| 16.1      | 概述   | (453) |
| 16.2      | 高温发热元件和电极  | (453) |
| 16.2.1    | 碳化硅  | (453) |
| 16.2.2    | 二硅化钼   | (455) |
| 16.2.3    | 二氧化锡   | (455) |
| 16.2.4    | 二氧化锆   | (456) |
| 16.3      | 欧姆电阻导电陶瓷   | (456) |
| 16.3.1    | 薄膜欧姆电阻导电陶瓷   | (456) |
| 16.3.2    | 厚膜欧姆电阻导电陶瓷   | (457) |
| 16.4      | Na- $\beta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷       | (458) |
| 16.4.1    | Na- $\beta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷的导电机理  | (458) |
| 16.4.2    | Na- $\beta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷的制造工艺  | (459) |
| 16.4.3    | Na- $\beta$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 陶瓷的性能与用途 | (459) |



|                      |       |
|----------------------|-------|
| 16.5 氧化锆导电陶瓷         | (460) |
| 16.5.1 概述            | (460) |
| 16.5.2 氧化锆导电陶瓷的制造工艺  | (461) |
| 16.5.3 氧化铝导电陶瓷的性能与用途 | (461) |
| 16.6 铬酸钼导电陶瓷         | (462) |
| 16.6.1 概述            | (462) |
| 16.6.2 铬酸钼导电陶瓷的制造工艺  | (463) |
| 16.6.3 铬酸钼导电陶瓷的性能与用途 | (463) |
| 16.7 其他导电陶瓷          | (464) |
| 16.7.1 氧化钪导电陶瓷       | (464) |
| 16.7.2 氧化铈导电陶瓷       | (465) |
| 16.8 超导陶瓷            | (465) |
| 16.8.1 超导体           | (466) |
| 16.8.2 超导体的分类        | (467) |
| 16.8.3 超导陶瓷的晶体结构     | (467) |
| 16.8.4 超导理论          | (450) |
| 16.8.5 超导体的性质和测试     | (473) |
| 16.9 超导陶瓷的制造工艺       | (476) |
| 16.10 超导陶瓷的应用        | (478) |
| 16.10.1 在电力系统方面      | (478) |
| 16.10.2 在交通运输方面      | (478) |
| 16.10.3 在选矿和探矿方面     | (479) |
| 16.10.4 在环保和医药方面     | (479) |
| 16.10.5 在核实验和热核聚变方面  | (479) |
| 16.10.6 在电子工程方面      | (479) |
| 思考题与习题               | (480) |
| 17 生物陶瓷              | (481) |
| 17.1 概述              | (481) |
| 17.2 生物惰性陶瓷          | (483) |
| 17.2.1 氧化铝陶瓷         | (483) |
| 17.2.2 氧化铝单晶材料       | (487) |
| 17.2.3 玻璃陶瓷          | (489) |
| 17.2.4 其他陶瓷          | (491) |
| 17.3 生物活性陶瓷          | (494) |
| 17.3.1 生物活性玻璃        | (494) |
| 17.3.2 羟基磷灰石陶瓷       | (495) |
| 17.3.3 磷酸三钙陶瓷        | (499) |
| 17.3.4 生物复合活性材料      | (501) |
| 17.4 医用陶瓷            | (503) |