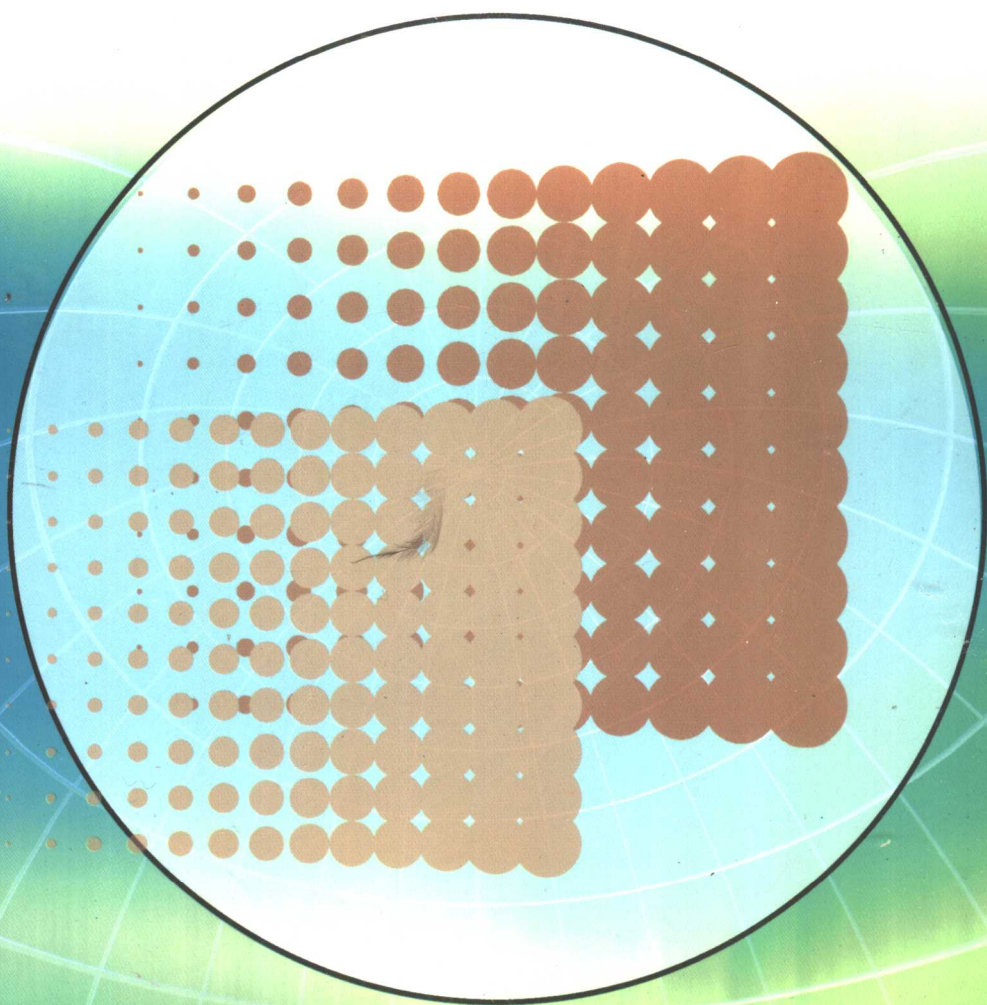


DUOKONG TAOCI  
SHIYONG JISHU

# 多孔陶瓷 实用技术

罗民华 编著



中国建材工业出版社

# 多孔陶瓷实用技术

罗民华 编著

中国建材工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

多孔陶瓷实用技术/罗民华编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2006.3

ISBN 7-80227-020-0

I. 多... II. 罗... III. 陶瓷-无机材料-基本知识 IV. TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 004278 号

## 多孔陶瓷实用技术

罗民华 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 23.5

字 数: 567 千字

版 次: 2006 年 3 月第 1 版

印 次: 2006 年 3 月第 1 次

定 价: 48.00 元

---

网上书店: [www.ecool100.com](http://www.ecool100.com)

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010)88386906

# 前言

多孔陶瓷是陶瓷的一个类别,它不仅具有普通陶瓷的化学稳定性好、刚度高、耐热性好等优良特性,还有更多的因其孔洞结构而具有的性能,如密度小、质量轻、比表面积大、导热系数小等等。由于其具有独特的化学、力学、热学、光学、电学等方面的性能,多孔陶瓷已经成为一类具有巨大应用潜力的材料。目前的应用领域已经涉及到环保、能源、航空航天、冶金、石油化工、建筑、生物医学、原子能、电化学等领域。用于分离过滤、吸声隔音、载体、隔热、换热、传感器、曝气、电极、生物植入、蓄热等许多场合。所有的应用产生了巨大的经济效益和社会效益。

或许具体的例子可以更好地说明多孔陶瓷孔结构的“妙处”。以下这些应用从不同的角度利用多孔陶瓷的孔结构,所起到的作用有些出人意料。

如:由无机盐和陶瓷基构成的显热/潜热复合储能材料(Composite Energy Storage Materials,即CESM),具有多孔结构,无机盐分布在陶瓷基体超微多孔网络中,当温度高于无机盐的熔点时,无机盐熔化而吸收潜热,但因毛细张力而不流出。由CESM构成的储热系统,可同时利用熔盐的潜热和陶瓷与无机盐材料的显热储存热能,因而它既有潜热储能密度大,且能量输出稳定和显热储能元件可与换热流体直接接触换热的优点,又克服了潜热存储系统成本高和熔盐腐蚀的缺点。CESM可用于太阳能高温利用和余热回收,当替代耐火砖时,其蓄热量提高2~2.5倍。

又如:为保持高速公路路面的良好状况,对已损坏路面的修复正受到高度关注。在一些发达国家,应用修补机对高速公路进行修补的修复技术已相当成熟,机械化、自动化的操作,既快速,又经济、实效,且修复后的修补面和原来的路面结合紧密,表面平整一致(这是国内传统的修补技术所无法比拟的)。而这一切都离不开修补机上所装配的一种对路面加热的装置,该装置就是让一定压力、流量和流速的可燃气体在其内置的耐火多孔陶瓷材料中燃烧,并通过被加热耐火材料的热辐射来烘烤公路修补面,这样修补的路面非常平整。

为了能够达到高速公路修补机施工技术的要求,对加热砖的性能要求如下:

(1) 透气量适中,以保证可燃气体能够进入制品内部,并能在其内部燃烧,以达到通过加热制品,使热量辐射到地面来达到烘烤的目的。若透气量过小,则可燃气体进入制品困难,不能产生足够的燃烧;透气量过大,则火焰易从制品内窜出,形成对路面的明火加热,易造成路面受热不均。

(2) 热震稳定性好。由于该加热装置属于间歇性操作,故提高热震稳定性才能提高其使用寿命。

(3) 体积密度要小,也就是制品要轻,以便于设备的移动。

(4) 要有足够的强度,以抵抗机械力的作用。

对加热砖的性能指标要求如下:透气度  $160\mu\text{m}$ ,热震稳定性(1100℃水冷)  $\geq 10$  次,体

积密度 $\leq 1.3\text{g/cm}^3$ , 常温耐压强度 $\geq 4\text{MPa}$ , 耐火度 $\geq 1750^\circ\text{C}$ 。

再如, 俄罗斯专家开发出一种新型多孔陶瓷材料, 用该材料制成的压力变换器可以大大提高医用便携式超声诊断仪的诊断精度。

超声诊断仪的诊断精度主要取决于其“心脏”部件——压力变换器的工作性能。压力变换器由多孔材料制成, 材料内部小孔的大小、形状和分布状况会影响压力变换器的超声测量效果。俄罗斯国立罗斯托夫大学研究人员利用专门的数学方法计算出小孔的最佳大小、形状和分布状况, 并利用他们自己开发出的材料合成技术, 向锆钛酸铅溶液中充入气泡, 从而得到了理想的用来制造压力变换器的多孔陶瓷材料。

实验证明, 利用这种陶瓷材料制成的压力变换器, 可以使便携式超声诊断仪的诊断精度达到与庞大而昂贵的台式诊断仪精度相近的效果。

从这三个例子中, 读者可以体会到多孔陶瓷孔结构的妙用。还有更多的实例将在各个相应的章节中介绍。

本书共分十章: 前四章系统地介绍了多孔陶瓷的概念、各种类别、制备技术、性能测试、孔结构表征; 后六章分别较全面地介绍了多孔吸声隔音陶瓷、绝热和超绝热多孔陶瓷、多孔陶瓷载体、多孔过滤陶瓷、生物多孔陶瓷、多孔陶瓷传感器。全书着重介绍了各种实用技术特别是制备技术。

在本书中关于孔的描述有孔隙、气孔、孔洞、孔穴、细孔、微孔、宏孔、大孔等。这些词汇基本含义都相同, 是指相对于多孔陶瓷中的固相而言, 包含在材料中的气相。它们也有差别, 这些差别很容易根据词汇本身理解, 相信读者可以根据不同的文献语境体会到其中的区别。本书尽可能地保留了所引用文献的提法。

本书虽然想尽可能地全面介绍多孔陶瓷, 然而由于多孔陶瓷应用范围广泛, 限于篇幅本书不可能面面俱到。如目前已经应用非常普遍的多孔陶瓷膜, 因这方面的书籍已经很多, 所以在本书中没有进行全面介绍, 只是在多孔过滤陶瓷中涉及到一些。同样, 多孔陶瓷分子筛也有专门的书籍介绍, 本书基本没有涉及。此外, 多孔陶瓷用作蓄热材料、换热材料、多孔陶瓷辐射板、储氢材料、电化学膜以及与其他材料的复合多孔材料等等, 他们的性能、制备方法等限于篇幅, 本书也不再详细介绍。如果以后有机会的话再整理出来介绍给大家。

在编著本书的过程中, 参阅了国内外几百篇学术论文、书籍、公开的专利以及网上的资料, 在此谨向这些作者表示衷心的感谢。另外, 非常感谢郝旭君、陈百远、王安根、张凯、何海峰、张山川、支楠、常伟等同学, 他们分别参与了多孔陶瓷传感器、多孔吸声隔音陶瓷、多孔陶瓷孔结构的表征、多孔陶瓷的性能、绝热及超绝热多孔陶瓷、多孔生物陶瓷、多孔过滤陶瓷、多孔陶瓷载体等部分的编写工作。

多孔陶瓷的广泛应用涉及的知识面相当宽广, 不仅仅需要材料方面的知识, 还需要诸如生物医学、无机和有机化学、流体力学、食品学、电子电工学等方面的相关知识。作者在试图全面、系统地介绍多孔陶瓷时不免要涉足自己不熟悉的专业领域, 限于自身的知识面和学识水平, 其中不妥之处在所难免, 还望各位读者批评指正。

作者

2005年10月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 多孔陶瓷概述 .....          | 1  |
| 1.1 多孔陶瓷的应用实例 .....         | 1  |
| 1.1.1 日常生活中用到的多孔陶瓷 .....    | 1  |
| 1.1.2 工业环保等领域中多孔陶瓷的作用 ..... | 3  |
| 1.1.3 应用于农业的多孔陶瓷 .....      | 10 |
| 1.2 研究开发多孔陶瓷的意义 .....       | 11 |
| 1.3 多孔陶瓷的定义 .....           | 12 |
| 1.4 多孔陶瓷材料的类型 .....         | 13 |
| 1.4.1 多孔陶瓷按材质的分类 .....      | 13 |
| 1.4.2 多孔陶瓷按孔径的分类 .....      | 13 |
| 1.4.3 多孔陶瓷按孔形态结构的分类 .....   | 15 |
| 1.5 多孔陶瓷材料的性能 .....         | 16 |
| 第 2 章 多孔陶瓷的性能及其测量技术 .....   | 17 |
| 2.1 多孔陶瓷的力学性能 .....         | 17 |
| 2.1.1 多孔陶瓷的力学模型和相对密度 .....  | 17 |
| 2.1.2 多孔陶瓷的弹性行为 .....       | 20 |
| 2.1.3 多孔陶瓷的断裂韧性及其测试技术 ..... | 21 |
| 2.1.4 多孔陶瓷的抗压强度 .....       | 23 |
| 2.1.5 多孔陶瓷的拉伸强度 .....       | 24 |
| 2.1.6 多孔陶瓷的塑性形变 .....       | 26 |
| 2.1.7 多孔陶瓷的抗弯强度 .....       | 28 |
| 2.2 多孔陶瓷的热学性能 .....         | 29 |
| 2.2.1 多孔陶瓷的动态热机械性能 .....    | 29 |
| 2.2.2 多孔陶瓷的高温蠕变 .....       | 30 |
| 2.2.3 多孔陶瓷的热膨胀系数 .....      | 34 |
| 2.2.4 多孔陶瓷的导热系数 .....       | 36 |
| 2.2.5 多孔陶瓷的高温抗弯强度 .....     | 40 |
| 2.2.6 多孔陶瓷的抗热震性能 .....      | 42 |
| 2.3 多孔陶瓷的光学性能 .....         | 43 |
| 2.3.1 陶瓷的光学性能 .....         | 43 |

|            |                            |           |
|------------|----------------------------|-----------|
| 2.3.2      | 长余辉光致发光多孔陶瓷材料 .....        | 44        |
| 2.3.3      | 多孔硅发光材料 .....              | 45        |
| 2.3.4      | 多孔氧化铝发光材料 .....            | 46        |
| 2.4        | 多孔陶瓷的电学性能 .....            | 47        |
| 2.4.1      | 多孔陶瓷的电阻率 .....             | 47        |
| 2.4.2      | 多孔陶瓷的介电常数 .....            | 48        |
| 2.4.3      | 多孔陶瓷的介电强度 .....            | 48        |
| 2.4.4      | 多孔陶瓷的损耗因子 .....            | 49        |
| 2.5        | 多孔陶瓷的渗透性能 .....            | 49        |
| 2.5.1      | 测试原理 .....                 | 49        |
| 2.5.2      | 透气度的测试 .....               | 50        |
| 2.5.3      | 测试方法 .....                 | 50        |
| <b>第3章</b> | <b>多孔陶瓷的制备技术 .....</b>     | <b>54</b> |
| 3.1        | 一般多孔陶瓷的制备工艺过程 .....        | 54        |
| 3.1.1      | 原料加工、配料 .....              | 54        |
| 3.1.2      | 多孔陶瓷的成型 .....              | 55        |
| 3.1.3      | 多孔陶瓷的干燥 .....              | 57        |
| 3.1.4      | 多孔陶瓷的烧成 .....              | 57        |
| 3.1.5      | 具体制备工艺实例 .....             | 57        |
| 3.2        | 原料加工工艺及配料中的造孔技术 .....      | 58        |
| 3.2.1      | 颗粒堆积形成气孔结构 .....           | 58        |
| 3.2.2      | 添加气体发泡剂形成多孔结构 .....        | 60        |
| 3.2.3      | 添加造孔剂造孔工艺 .....            | 64        |
| 3.2.4      | 本身含有气孔的配料 .....            | 66        |
| 3.2.5      | 盐析法工艺 .....                | 71        |
| 3.3        | 成型工艺中的造孔技术 .....           | 71        |
| 3.3.1      | 挤压成型造孔 .....               | 71        |
| 3.3.2      | 模板法制备多孔陶瓷（有机泡沫浸渍成型法） ..... | 74        |
| 3.3.3      | 溶胶-凝胶法 .....               | 80        |
| 3.3.4      | 利用纤维构架成多孔结构 .....          | 82        |
| 3.3.5      | 凝胶注模工艺 .....               | 90        |
| 3.3.6      | 机械搅拌法 .....                | 92        |
| 3.3.7      | 热压法 .....                  | 93        |
| 3.3.8      | 水热-热静压工艺 .....             | 93        |
| 3.3.9      | 部分梯度孔隙材料的成型 .....          | 93        |
| 3.4        | 干燥工艺中的造孔技术 .....           | 95        |
| 3.4.1      | 超临界干燥 .....                | 95        |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| 3.4.2 升华干燥工艺 .....                              | 96         |
| 3.5 烧成工艺中的造孔技术 .....                            | 98         |
| 3.5.1 烧成对孔隙结构的影响因素 .....                        | 98         |
| 3.5.2 泡沫玻璃的烧成技术 .....                           | 98         |
| 3.5.3 自蔓延高温合成 (SHS) 工艺 .....                    | 99         |
| 3.5.4 脉冲电流烧结 .....                              | 101        |
| 3.5.5 微波加热工艺 .....                              | 101        |
| 3.6 其他的造孔工艺技术 .....                             | 102        |
| 3.6.1 热解法制备木材多孔陶瓷 .....                         | 102        |
| 3.6.2 化学气相渗透或沉积 (CVI、CVD) 制备多孔陶瓷 .....          | 104        |
| 3.6.3 原位反应法制备 SiC 多孔陶瓷 .....                    | 104        |
| 3.6.4 利用分子键构成气孔 .....                           | 107        |
| 3.6.5 阳极氧化法 .....                               | 107        |
| 3.6.6 相变造孔 .....                                | 107        |
| 3.6.7 腐蚀法产生微孔、中孔 .....                          | 108        |
| 3.6.8 等离子喷涂工艺 .....                             | 108        |
| 3.7 复合造孔工艺 .....                                | 108        |
| 3.7.1 颗粒堆积与造孔剂、发泡剂的复合造孔 .....                   | 109        |
| 3.7.2 溶胶-凝胶与有机泡沫浸渍成型法复合造孔 .....                 | 110        |
| 3.7.3 微孔梯度膜 .....                               | 111        |
| 3.7.4 壁流式蜂窝陶瓷过滤体 .....                          | 111        |
| 3.7.5 阳极氧化与超临界干燥结合制备多孔硅 .....                   | 114        |
| 3.8 制备工艺对多孔陶瓷结构与性能的影响 .....                     | 115        |
| 3.8.1 制备工艺对 SiC 多孔陶瓷的影响 .....                   | 115        |
| 3.8.2 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 多孔陶瓷 ..... | 118        |
| 3.8.3 硅藻土基多孔陶瓷 .....                            | 119        |
| <b>第 4 章 多孔陶瓷孔结构的表征技术 .....</b>                 | <b>122</b> |
| 4.1 直接观测法 .....                                 | 122        |
| 4.1.1 经验法估计气孔率 .....                            | 122        |
| 4.1.2 称重计算法测气孔率 .....                           | 123        |
| 4.1.3 断面图法分析气孔率、孔径及其分布 .....                    | 124        |
| 4.2 显微法 .....                                   | 125        |
| 4.2.1 显微镜的选择 .....                              | 125        |
| 4.2.2 扫描电镜 .....                                | 126        |
| 4.2.3 透射电镜 .....                                | 128        |
| 4.2.4 其他电子显微技术 .....                            | 128        |
| 4.2.5 显微分析实例 .....                              | 129        |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 4.3    | 压汞法                    | 134 |
| 4.3.1  | 压汞法的测试原理               | 134 |
| 4.3.2  | 测试范围                   | 134 |
| 4.3.3  | 孔径分布的测定                | 135 |
| 4.3.4  | 比表面积测定                 | 135 |
| 4.3.5  | 气孔率的测定                 | 136 |
| 4.3.6  | 压汞法的测试步骤               | 136 |
| 4.3.7  | 压汞法的测试误差问题             | 137 |
| 4.3.8  | 压汞法的测试实例               | 137 |
| 4.4    | 气体吸附法                  | 139 |
| 4.4.1  | 测量原理                   | 139 |
| 4.4.2  | 测量吸附平衡等温线的主要方法         | 139 |
| 4.4.3  | 测试                     | 140 |
| 4.5    | 排除法                    | 140 |
| 4.5.1  | 排除法的分类                 | 141 |
| 4.5.2  | 排除法测定孔径分布的原理           | 141 |
| 4.5.3  | 测试实例                   | 142 |
| 4.6    | 蒸汽渗透法                  | 149 |
| 4.6.1  | 基本原理                   | 149 |
| 4.6.2  | 实验条件选择                 | 150 |
| 4.6.3  | 孔径分布函数的求取              | 150 |
| 4.6.4  | 测试实验装置                 | 151 |
| 4.7    | 小角度散射法                 | 151 |
| 4.8    | 热孔计法 (thermoporometry) | 152 |
| 4.9    | 核磁共振法                  | 152 |
| 4.10   | 分形维数法                  | 153 |
| 4.10.1 | 分形与孔结构                 | 153 |
| 4.10.2 | 分形维数的几种定义方法            | 154 |
| 4.10.3 | 分形维数的测定                | 155 |
| 4.10.4 | 无机微孔膜分形性及分形维数的测定       | 156 |
| 第5章    | 绝热及超绝热多孔陶瓷             | 161 |
| 5.1    | 绝热材料的分类                | 161 |
| 5.2    | 多孔绝热陶瓷中的热传导            | 162 |
| 5.2.1  | 热传导的基本原理               | 162 |
| 5.2.2  | 绝热多孔陶瓷中热传导的基本原理        | 163 |
| 5.2.3  | 影响绝热多孔陶瓷导热系数的因素        | 164 |
| 5.3    | 多孔绝热陶瓷的生产工艺            | 166 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 5.3.1 耐火黏土和硅藻土绝热材料的生产工艺 .....  | 166        |
| 5.3.2 微孔硅酸钙绝热制品的生产工艺 .....     | 168        |
| 5.3.3 泡沫玻璃和泡沫陶瓷的生产工艺 .....     | 170        |
| 5.3.4 陶瓷纤维绝热材料的生产工艺 .....      | 170        |
| 5.4 绝热材料的优化设计 .....            | 173        |
| 5.5 超级绝热多孔陶瓷 .....             | 174        |
| 5.5.1 超级绝热材料的概念 .....          | 174        |
| 5.5.2 真空绝热材料 .....             | 174        |
| 5.5.3 纳米级绝热材料 .....            | 176        |
| 5.6 绝热材料存在的问题及其发展 .....        | 184        |
| 5.6.1 目前我国绝热材料存在的主要问题及原因 ..... | 184        |
| 5.6.2 绝热材料及其技术的主要发展方向 .....    | 185        |
| <b>第6章 多孔吸声隔音陶瓷</b> .....      | <b>188</b> |
| 6.1 多孔陶瓷吸声隔音机理 .....           | 188        |
| 6.1.1 声音 .....                 | 188        |
| 6.1.2 吸声与隔音的理论基础 .....         | 189        |
| 6.1.3 多孔吸声隔音陶瓷的结构和吸声隔音机理 ..... | 189        |
| 6.1.4 影响吸声性能的因素 .....          | 190        |
| 6.2 吸声材料的制备工艺 .....            | 192        |
| 6.2.1 有机前驱体浸渍法 .....           | 192        |
| 6.2.2 发泡法 .....                | 194        |
| 6.2.3 粒状树脂堆积法 .....            | 198        |
| 6.2.4 微波加热制备工艺 .....           | 199        |
| 6.2.5 冷冻干燥制备工艺 .....           | 199        |
| 6.2.6 湿法工艺和发泡工艺制备岩棉吸声板 .....   | 200        |
| 6.2.7 离心喷吹法制玻璃棉 .....          | 201        |
| 6.2.8 摆锤法 .....                | 202        |
| 6.3 吸声性能的测试 .....              | 203        |
| 6.3.1 吸声性能的评价 .....            | 203        |
| 6.3.2 吸声性能测试 .....             | 205        |
| 6.4 各种多孔吸声隔音陶瓷 .....           | 211        |
| 6.4.1 无机纤维吸音材料 .....           | 211        |
| 6.4.2 泡沫吸音材料 .....             | 212        |
| 6.4.3 吸声建筑材料 .....             | 214        |
| <b>第7章 多孔陶瓷载体</b> .....        | <b>216</b> |
| 7.1 催化剂与载体的相互作用 .....          | 216        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.1.1 多孔陶瓷与催化剂的结合 .....      | 216 |
| 7.1.2 催化剂组分与载体间的反应 .....     | 217 |
| 7.1.3 催化剂组分与载体晶型结构间的关系 ..... | 218 |
| 7.1.4 蜂窝状载体和涂层 .....         | 218 |
| 7.1.5 催化元素的离子进入载体晶格 .....    | 218 |
| 7.2 催化剂载体的物理性质及其控制 .....     | 219 |
| 7.2.1 催化剂载体的物理性质 .....       | 219 |
| 7.2.2 载体物理性质的控制 .....        | 221 |
| 7.2.3 其他有关问题 .....           | 223 |
| 7.3 氧化铝催化剂载体 .....           | 225 |
| 7.3.1 氧化铝的特性与作用 .....        | 225 |
| 7.3.2 氧化铝的制备 .....           | 226 |
| 7.3.3 氧化铝载体的成型 .....         | 229 |
| 7.3.4 氧化铝载体的孔隙 .....         | 230 |
| 7.3.5 氧化铝载体的物化性质 .....       | 231 |
| 7.4 非氧化铝型催化剂载体 .....         | 233 |
| 7.4.1 二氧化硅 .....             | 233 |
| 7.4.2 硅藻土 .....              | 235 |
| 7.4.3 二氧化钛 .....             | 236 |
| 7.4.3 其他 .....               | 237 |
| 7.5 汽车尾气催化剂载体 .....          | 237 |
| 7.5.1 汽车排放物的种类及其危害 .....     | 237 |
| 7.5.2 越来越严格的汽车尾气排放标准 .....   | 238 |
| 7.5.3 催化剂载体技术的发展 .....       | 239 |
| 7.5.4 汽车尾气净化载体的制备 .....      | 243 |
| 7.5.5 汽车尾气催化剂载体的结构与性能 .....  | 248 |
| 7.5.6 汽车尾气催化剂载体的消声作用 .....   | 249 |
| 7.5.7 非蜂窝状的汽车尾气催化剂载体 .....   | 250 |
| 7.6 固定化酶载体 .....             | 250 |
| 7.6.1 酶和酶的固定化方法 .....        | 250 |
| 7.6.2 微孔陶瓷固定化酶载体 .....       | 252 |
| 7.6.3 固定化酶反应器 .....          | 254 |
| 7.6.4 固定化酶和载体的应用与展望 .....    | 255 |
| 7.7 其他载体 .....               | 255 |
| 7.7.1 药物载体的研制 .....          | 255 |
| 7.7.2 抗菌载体 .....             | 256 |
| 7.7.3 香味载体 .....             | 260 |
| 7.7.4 纳米二氧化钛载体及其制备技术 .....   | 262 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 7.7.5 分子筛载体及其制备技术 .....     | 263        |
| <b>第8章 多孔过滤陶瓷</b> .....     | <b>266</b> |
| 8.1 多孔陶瓷的过滤机理及性能 .....      | 266        |
| 8.1.1 多孔陶瓷的过滤机理 .....       | 266        |
| 8.1.2 物理化学性能 .....          | 267        |
| 8.1.3 过滤性能 .....            | 268        |
| 8.1.4 多孔陶瓷孔道直径实验方法 .....    | 269        |
| 8.1.5 多孔材料过滤精度表征方法 .....    | 270        |
| 8.1.6 影响渗透性能的因素 .....       | 273        |
| 8.2 用于熔融金属过滤的多孔陶瓷 .....     | 274        |
| 8.2.1 泡沫陶瓷过滤器 .....         | 275        |
| 8.2.2 其他用于熔融金属多孔陶瓷 .....    | 276        |
| 8.2.3 多孔陶瓷过滤机 .....         | 277        |
| 8.3 水过滤多孔陶瓷 .....           | 278        |
| 8.3.1 用于水净化的多孔陶瓷 .....      | 278        |
| 8.3.2 用于海水淡化的多孔陶瓷 .....     | 279        |
| 8.3.3 用于脱水的多孔陶瓷 .....       | 280        |
| 8.4 气体过滤用的多孔陶瓷 .....        | 280        |
| 8.4.1 用于汽车尾气净化的多孔陶瓷 .....   | 280        |
| 8.4.2 用于柴油机尾气的微粒捕集器 .....   | 281        |
| 8.4.3 用于工业废气过滤的多孔陶瓷 .....   | 281        |
| 8.4.4 用于发电厂的多孔陶瓷过滤器 .....   | 282        |
| 8.4.5 用于空气净化多孔陶瓷 .....      | 283        |
| 8.5 用于食品医药过滤的多孔陶瓷 .....     | 284        |
| 8.6 用于曝气的多孔陶瓷 .....         | 288        |
| 8.7 用于电化学、燃料电池的多孔陶瓷 .....   | 290        |
| 8.8 由过滤体组装成过滤装置 .....       | 291        |
| <b>第9章 多孔生物陶瓷</b> .....     | <b>295</b> |
| 9.1 生物陶瓷 .....              | 296        |
| 9.1.1 植入陶瓷和生物工艺学陶瓷 .....    | 296        |
| 9.1.2 植入陶瓷按与组织的反应水平分类 ..... | 296        |
| 9.1.3 植入陶瓷按材质的分类 .....      | 297        |
| 9.1.4 多孔生物陶瓷 .....          | 297        |
| 9.2 羟基磷灰石与磷酸三钙 .....        | 297        |
| 9.2.1 羟基磷灰石 .....           | 297        |
| 9.2.2 磷酸三钙 .....            | 301        |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.3 多孔生物陶瓷的孔隙与性质 .....                                                      | 303        |
| 9.3.1 孔隙与机体软硬组织长入及新骨生成 .....                                                | 303        |
| 9.3.2 孔隙率与力学性质 .....                                                        | 304        |
| 9.3.3 孔隙与生物陶瓷降解性 .....                                                      | 305        |
| 9.4 多孔生物陶瓷的制备 .....                                                         | 306        |
| 9.4.1 添加造孔剂工艺 .....                                                         | 306        |
| 9.4.2 发泡工艺 .....                                                            | 307        |
| 9.4.3 有机泡沫浸渍工艺 .....                                                        | 309        |
| 9.4.4 原位反应合成 $\text{CaO} - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ 系生物陶瓷 ..... | 311        |
| 9.4.5 构建高贯通多孔生物陶瓷 .....                                                     | 311        |
| 9.4.6 其他方法 .....                                                            | 313        |
| 9.4.7 复合多孔生物陶瓷的制备 .....                                                     | 314        |
| 9.5 多孔生物陶瓷的性能及其测试 .....                                                     | 317        |
| 9.5.1 物理化学性能及其测试 .....                                                      | 317        |
| 9.5.2 生物学性能及其试验 .....                                                       | 319        |
| 9.6 多孔生物陶瓷的应用实验 .....                                                       | 320        |
| 9.6.1 多孔型羟基磷灰石/骨诱导蛋白复合人工骨的临床应用 .....                                        | 320        |
| 9.6.2 多孔双向羟基磷灰石 (CPC) 的临床应用 .....                                           | 321        |
| 9.6.3 新型生物材料 CFRC 的应用 .....                                                 | 322        |
| 9.6.4 多孔 $\beta$ -TCP/BMP 复合人工骨 .....                                       | 323        |
| 9.6.5 聚磷酸钙生物陶瓷及其应用 .....                                                    | 323        |
| 9.6.6 多孔陶瓷组织工程化人工软骨修复动物软骨缺损 .....                                           | 324        |
| 9.7 多孔生物陶瓷的发展方向 .....                                                       | 324        |
| <b>第 10 章 多孔陶瓷传感器 .....</b>                                                 | <b>326</b> |
| 10.1 多孔陶瓷传感器类型 .....                                                        | 326        |
| 10.1.1 按材料分类 .....                                                          | 326        |
| 10.1.2 按应用方法分类 .....                                                        | 327        |
| 10.1.3 以其输出信号为分类标准 .....                                                    | 327        |
| 10.2 多孔陶瓷传感器的工作原理 .....                                                     | 328        |
| 10.2.1 多孔陶瓷作为湿敏和气敏元件的工作原理 .....                                             | 328        |
| 10.2.2 压敏 .....                                                             | 333        |
| 10.2.3 作为其他敏感元件的工作原理 .....                                                  | 334        |
| 10.3 气敏传感器 .....                                                            | 334        |
| 10.3.1 气敏传感器的应用 .....                                                       | 335        |
| 10.3.2 多孔陶瓷气敏传感器选择性和灵敏度的控制 .....                                            | 340        |
| 10.4 湿度传感器 .....                                                            | 346        |
| 10.4.1 单氧化物半导体多孔陶瓷传感器 .....                                                 | 346        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 10.4.2 钙钛矿型氧化物半导体陶瓷湿敏传感器 ..... | 348 |
| 10.4.3 多孔陶瓷湿敏传感器的应用 .....      | 349 |
| 10.5 多功能传感器 .....              | 351 |
| 10.5.1 多孔陶瓷光湿敏传感器 .....        | 352 |
| 10.5.2 多孔陶瓷力敏传感器 .....         | 353 |
| 10.5.3 湿度 - 温度传感器 .....        | 354 |
| 10.5.4 湿度 - 气体传感器 .....        | 355 |
| 10.5.5 温度 - 湿度 - 气体传感器 .....   | 355 |
| 10.5.6 热 - 湿 - 气多功能敏感器 .....   | 356 |
| 10.6 多孔陶瓷传感器的未来发展方向 .....      | 357 |
| 10.6.1 纳米技术与多孔陶瓷传感器 .....      | 357 |
| 10.6.2 信息综合技术 .....            | 358 |
| 参考文献 .....                     | 360 |

# 第1章 多孔陶瓷概述

在介绍本书之前我们先来了解一下在日常生活、工业、农业、环境保护等领域已经应用的多孔陶瓷。

从这些应用实例出发，引出了研究开发多孔陶瓷的意义；然后本章再对多孔陶瓷进行定义，面对各种各样的多孔陶瓷的定义，作者进行了综合比较，提出了较为科学的定义。为了进一步对多孔陶瓷有个整体的了解，接着介绍了多孔陶瓷的各种类型，最后介绍多孔陶瓷的性能，以引出第2章多孔陶瓷的性能及其测试。

## 1.1 多孔陶瓷的应用实例

### 1.1.1 日常生活中用到的多孔陶瓷

让我们先来看看日常生活中用到的多孔陶瓷。

#### (1) 漂亮的“香瓶”

轻质微孔陶瓷瓶是一种具有很好的内吸与散发功能的新型多孔陶质产品。它能将各种液体、低黏度膏体较快地内吸于陶瓷基体内，然后通过表面均匀分布的显微气孔缓慢地散发到空气中。目前欧美及日本等国广泛用来存放各种香料以对空间环境进行净化，其效果显著，倍受欢迎。这种微孔陶瓷瓶可以做成各种形状，作为装饰品使用（如图1-1所示）。

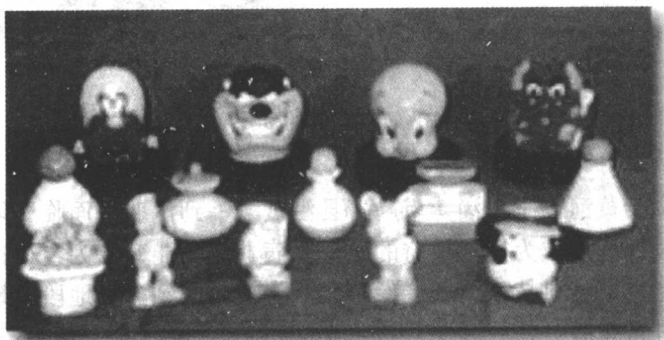


图1-1 作为装饰品的微孔陶瓷瓶

多孔陶瓷可以作为液体蚊香及香精油的吸收器，图1-2中瓶中间插入的那根就是吸满了液体的多孔陶瓷。

#### (2) 鱼缸里的多孔陶瓷

在喜欢养鱼的家庭中，或者在酒店、餐厅养鱼处，经常要对鱼缸里的水充入氧气，充入氧气的曝气装置里就有多孔陶瓷，如图1-3所示。这种用于曝气装置的多孔陶瓷既可以适

用于淡水的曝气，也可以适用于海水的曝气。

### (3) 变废为宝的多孔砖

在提倡环保、陶瓷生产绿色化的呼声下，一种环保型透水砖应运而生。它利用煤矸石及工业尾矿、建筑垃圾及陶瓷废料等作为集料，加入粘结剂和成孔剂烧结而成，由于具有防滑、耐磨、吸声以及超强的透水功能，下雨时可迅速大量地吸收保存水分，以后再慢慢蒸发以保湿降温，解决了城市地表硬化与水分流失的问题。

一直是河床堵塞大问题的黄河淤沙现在变废为宝，成为盖起幢幢高楼的新材料。据报道，山东淄博市首创的河沙煤矸石烧制节能砖新技术，目前已在高青县全面推广，其烧制的“烧结黄河淤沙多孔砖”全面应用于居住工程。

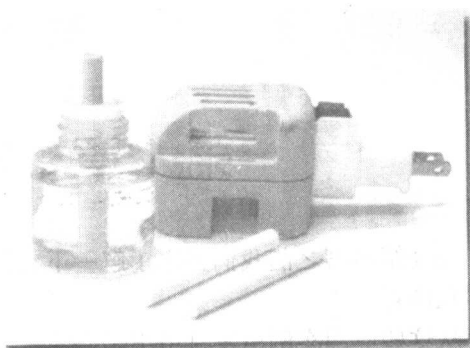


图 1-2 用于液体蚊香器的多孔陶瓷

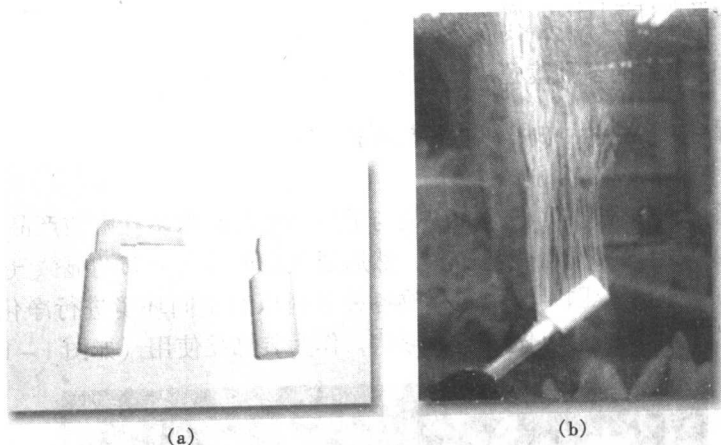


图 1-3 曝气装置的多孔陶瓷

(a) 外形；(b) 使用情况

据了解，由于位于黄河下游，淄博市高青县沿黄段一到汛期便面临严峻的防汛考验，大量河沙由于无法及时处理而成为当地政府的一块心病。能不能变废为宝，让其在工程建设中发挥作用？淄博市建委部分科技人员和老专家于今年初多次到沿黄地段实地考察，他们采取多组泥沙实验样品进行化验分析，并结合该市煤矸石制砖的生产工艺和高青县粉煤灰利用的现状，利用煤矸石粉和粉煤灰作为燃料，掺加 80% 黄河淤沙，于今年初试制成功了“烧结黄河淤沙多孔砖”。

实验表明，这种砖强度高、空心率大、导热系数低，是代替实心黏土砖的理想产品。目前，在淄博市建委科技人员的指导下，高青县建设局已对烧结黏土砖的砖厂进行了技术改造，并投入 200 万元购置了新型制砖设备，一个现代化的制砖生产线已初步建成并投产。淄博市建委也正式批准该县今年新建设的所有居住工程，全部按照“节能型黄河淤沙多孔砖”进行结构设计。采用这项新技术后，按高青县年建设用砖 5000 万块标砖计算，每年可节省

172.8 万立方米黏土，至少可节省耕地 600 亩。

#### (4) 具有调节功能的健康瓷砖

最近日本 INAX 公司研制开发出一种名为“EIKOKALATTO”的健康瓷砖，它不仅降低了有害化学成分的含量，而且更具有调节室内湿度的作用。

这种瓷砖是利用富含矿物质且有微细小孔的黏土作为原料烧制而成的，当室内温度过高时，这些小孔便会适当吸收水分并储存在瓷砖的内部，等到湿度下降时再缓慢挥发，从而达到有效控制室内湿度及温度的作用。虽然该产品比普通砖的成本稍高，由于其对自然环境和人体健康有保护作用，所以市场前景很被看好。

### 1.1.2 工业环保等领域中多孔陶瓷的作用

多孔陶瓷在工业方面的应用就更广泛了，下面列举的是一些典型的事例。

#### (1) 消声器

在城市生活中，噪音是一种重要的污染。走在城市的街道上，可以听到来自于汽车排气管、飞机飞行以及空调压缩机工作等造成的各种让人心烦的噪声，而这一切其实都可以通过应用多孔陶瓷得以缓解，甚至消除。多孔陶瓷具有丰富的孔隙，当声波传播到多孔陶瓷上时，在网状的孔隙内引起空气的振动，进而通过空气与多孔陶瓷基体之间的摩擦，声波的能量转变成热能而被消耗，从而达到消除噪声的效果。现在已经得到应用的多孔陶瓷包括安装在汽车排气管中间的蜂窝状多孔陶瓷，用来减少汽车排气管的噪音。一些新型建筑材料也广泛采用多孔泡沫陶瓷作为墙体材料，实践证明可以达到非常好的隔音效果，在住宅、影剧院、医院等需要隔离噪音的场所具有广阔的应用前景。

多孔陶瓷作为吸声材料，可以应用在地铁、高速公路两侧、大型公共场所、影视院等场所。目前用作吸声材料的多孔陶瓷有：①无机纤维吸声材料，如玻璃棉、矿物棉和岩棉等。这类材料不仅具有良好的吸声性能，而且具有质轻、不燃、不腐、不易老化、价格低廉等特性。但因为易折断形成粉尘散逸而污染环境，吸潮后其吸声性能就会大大减弱等缺点，正在被逐渐取代。②泡沫吸声材料，如吸声泡沫玻璃、吸声陶瓷、吸声泡沫混凝土等。③吸声建筑材料，如吸声粉刷、微孔吸声砖、陶瓷吸声板、珍珠岩吸声板等。

#### (2) 过滤与分离

各种废气、城市生活污水和工业废水都需要进行相应的过滤和分离才能排放到自然环境中，多孔陶瓷则扮演着“环境净化使者”的角色。废气和废液中常常含有一些有毒有害的物质，比如汽车尾气和发电厂烟气中的烟尘，半导体工业废水中的重金属元素等都是重要的环境污染源，如果不加以处理，则会造成酸雨、河流和土壤的污染等严重后果。使用多孔陶瓷，让废气或废液通过多孔的陶瓷体，其中的有害物质颗粒物就会被拦截或者吸附在多孔结构中，而净化后的气体或液体就可以排放到自然界中了。

这方面的一个典型应用就是柴油机尾气过滤。在城市中，大量公交车都是采用柴油机发动的，但是柴油因为燃烧不完全，在尾气中存在大量的微细碳粒，这也就是我们常常看到的公交车行驶中排放的“黑烟”，这些颗粒物如果被人体吸入就会产生各种呼吸道疾病。柴油车尾气颗粒物过滤的途径是让尾气通过一种“壁流式”的蜂窝陶瓷，这种材料通过一定的模具挤出成型获得类似于马蜂窝一样的结构，但是蜂窝结构的孔道分别在两端被一隔一地堵