

# 多孔陶瓷的制备技术、结构调控及应用研究进展

朱田丽<sup>1</sup>, 王科秀<sup>2</sup>

(1. 汉口学院航空与智能制造学院, 935248163@qq.com; 2. 汉口学院航空与智能制造学院, wangkexiu1993@163.com)

**摘要:** 多孔陶瓷材料因其独特的结构特征和优异的物理化学性能, 在能源、环境、生物医学等领域展现出广阔的应用前景。从制备技术、结构调控及应用等方面对多孔陶瓷材料的研究情况进行梳理总结, 重点分析了不同制备方法的工艺特点与适用范围, 探讨了多孔结构调控的科学原理, 总结了多孔陶瓷在高温过滤、催化载体、生物医学等领域的应用现状。研究发现: 通过碳热还原法可制备孔径 0.28~1.00  $\mu\text{m}$  的 SiC 纳米线复合膜层; 采用 3D 打印技术可获得孔隙率 47.65%~55.33% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  多孔支架; 通过溶胶-凝胶浸渍法可使莫来石陶瓷强度提升 80%; 通过牺牲模板法实现了陶瓷孔径、窗口尺寸的精准控制, 制备的材料压缩强度达 28 MPa。

**关键词:** 多孔陶瓷; 结构调控; 性能表征

多孔陶瓷是一类具有三维连通或封闭孔道结构的先进陶瓷材料, 其孔径范围可从纳米级延伸至毫米级, 孔隙率通常在 30%~95% 之间。这类材料不仅保留了传统陶瓷耐高温、耐腐蚀、高强度的特点, 还因多孔结构而具备低密度、高比表面积、低热导率等独特性能。根据国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 的分类标准, 多孔陶瓷可按孔径大小分为三类: 微孔材料 (<2 nm)、介孔材料 (2~50 nm) 和大孔材料 (>50 nm)<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着制备技术的不断创新, 多孔陶瓷在多个领域展现出重要的应用价值。在环境治理方面, 多孔陶瓷膜可用于高温烟气除尘和污水处理; 在能源领域, 多孔陶瓷作为催化剂载体和固体氧化物燃料电池电极材料具有突出优势;

在生物医学工程中, 多孔陶瓷支架因其良好的生物相容性和可调控的力学性能成为骨组织工程的理想材料<sup>[2]</sup>。特别值得注意的是, 通过将纳米材料与传统多孔陶瓷复合, 可赋予材料光催化<sup>[3]</sup>、抗菌等新功能, 进一步拓展其应用范围。

多孔陶瓷研究取得了显著进展, 文章从制备方法、结构表征、性能调控和应用研究四个方面系统梳理多孔陶瓷的最新研究进展, 以为相关领域的研究提供参考。

## 1 多孔陶瓷的制备方法

### 1.1 传统制备工艺

#### 1.1.1 颗粒堆积法

颗粒堆积法是一种通过调控陶瓷粉末颗粒排列与堆积行为实现高致密度或可控孔隙结构

[收稿日期] 2025-03-31

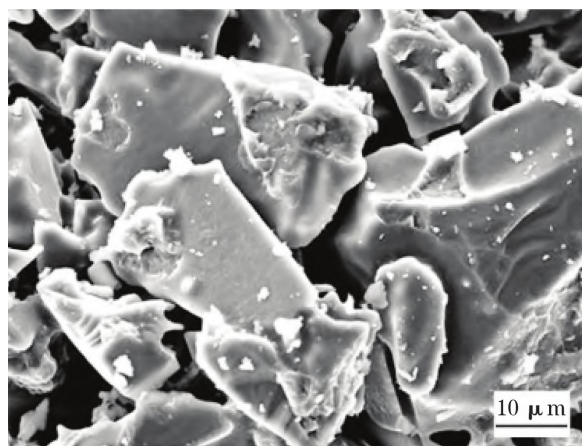
坯体制备的成型技术,通过添加造孔剂(如石墨、淀粉等)在烧结过程中形成孔隙,其核心在于通过粒度分级、分散剂添加及振动/离心等外力辅助优化颗粒堆积效率,适用于多孔陶瓷过滤膜、功能梯度材料及传统墙地砖等制品的规模化生产<sup>[4-6]</sup>。

潘进文等以石墨为造孔剂(添加的石墨的质量分数为15%),采用 $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CAC}$ 复合烧结助剂,在1450℃下制备了多孔SiC陶瓷。研究表明,烧结助剂含量对材料性能影响显著:当 $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CAC}$ 的质量分数为12.5%时,材料显气孔率为39.1%,弯曲强度达39.3 MPa,透气度为 $26.74\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[6]</sup>。通过SEM观察发现(图1),烧结助剂促进了玻璃-莫来石复相结合相的形成,同时在结合相中引入了直径1~10 μm的气泡,这些气泡随烧结助剂含量增加而长大<sup>[6]</sup>。

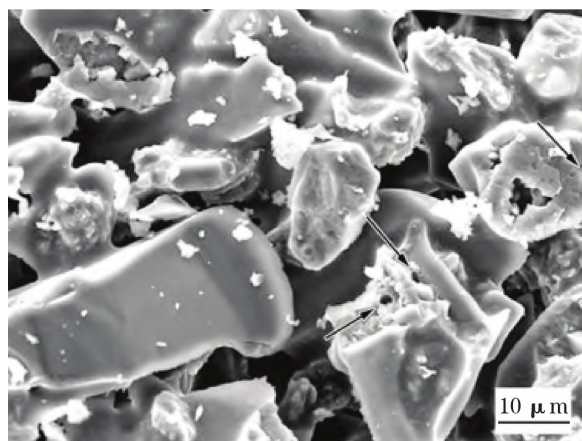
### 1.1.2 造孔剂法

造孔剂法是多孔陶瓷制备中最常用的传统工艺之一,核心原理是通过在陶瓷坯体中引入可移除的造孔物质(造孔剂),经烧结后造孔剂被去除,从而在陶瓷基体中留下规则或不规则的孔隙。张凌飞等采用碳热还原法在多孔SiC基体上生长SiC纳米线膜层,成功制备了亚微米孔径的复合陶瓷膜<sup>[7]</sup>。将2000目( $D_{50}=5.25\text{ }\mu\text{m}$ )的SiC粉与造孔剂球磨混合,压制成型后于2200℃烧结2h制得多孔基片;葡萄糖与硅溶胶按比例混合干燥后,与基片在1350~1550℃管式炉中反应4~8h,最后用5%氢氟酸酸洗24h。此过程主要是利用高温使SiC纳米线的形貌发生了一定的改变,实现颗粒间的结合,形成多孔碳化硅陶瓷基片<sup>[7]</sup>。高温下SiC颗粒表面原子获得足够能量,通过表面扩

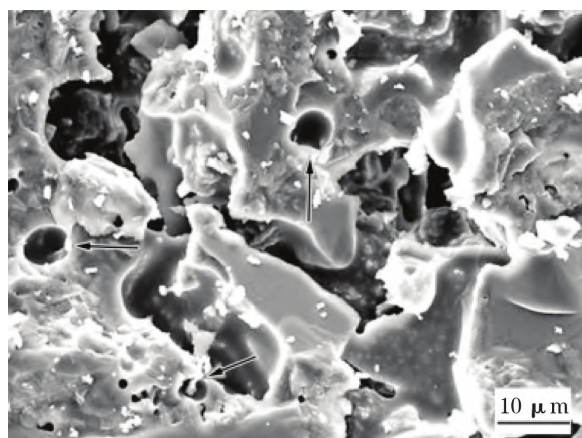
散、体积扩散等机制向颗粒间接触区域迁移,形成烧结颈并逐渐长大,使颗粒相互连接<sup>[8]</sup>。造孔剂在高温下或挥发或分解,留下孔隙,从而实现造孔。



a.  $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CAC}$  质量分数为 2.5% 的断面形貌



b.  $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CAC}$  质量分数为 10% 的断面形貌



c.  $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CAC}$  质量分数为 20% 的断面形貌

图1 不同 $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CAC}$ 含量的多孔SiC陶瓷的断面形貌<sup>[6]</sup>

以葡萄糖和硅溶胶为前驱体,在 1 450 °C 反应 6 h 后,基体表面形成了分布均匀的 SiC 纳米线膜层, SiC 粉与造孔剂经混合、烧结制成多孔 SiC 陶瓷基片,后续通过碳热还原法在其表面生长 SiC 纳米线,形成复合膜。相较于多孔 SiC 基片 2.33  $\mu\text{m}$  的孔径,复合膜平均孔径减小至 0.43  $\mu\text{m}$ ,且孔径分布在 0.28~1.00  $\mu\text{m}$  之间<sup>[7]</sup>,分布变窄。这种窄分布的亚微米孔径结构,能更有效地截留微小颗粒,显著提升复合膜的分离精度,使其在污水处理、精密过滤等领域更具应用价值。

XRD 分析表明(图 2),纳米线为 3C-SiC 结构,结晶良好,仅有少量因堆叠层错引起的弱衍射峰<sup>[7]</sup>。

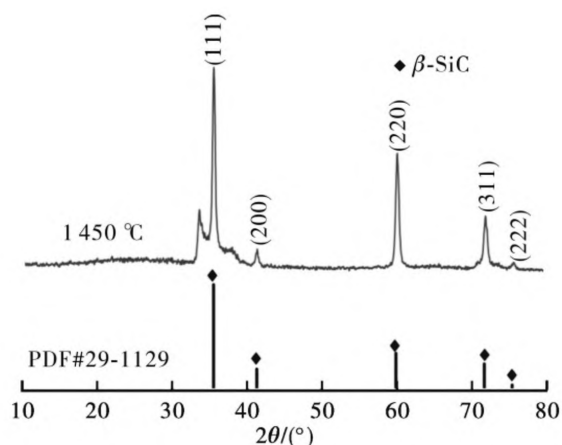


图 2 酸洗后的 SiC 纳米线 XRD 图<sup>[7]</sup>

## 1.2 新型制备技术

### 1.2.1 3D 打印技术

3D 打印技术为复杂结构多孔陶瓷的制备提供了新途径<sup>[1]</sup>,在陶瓷制造领域展现出巨大潜力,其通过光固化、熔融沉积、选择性激光烧结等工艺,突破了传统成型技术对复杂结构的限制。

Liu 等采用挤出式 3D 打印制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{B}_2\text{O}_3$  多孔支架,系统研究了陶瓷浆料固含量(陶瓷浆料中固体的质量分数为 66%~70%)和烧结

温度(1 500~1 600 °C)的影响<sup>[9]</sup>。结果表明,材料表现出较好的综合性能:弯曲强度 8.71~40.63 MPa,表观孔隙率 47.65%~55.33%<sup>[9]</sup>。通过调控打印路径设计仿骨小梁结构(trabecular-like),其压缩强度-孔隙率关系突破传统赫兹接触理论(Hertzian contact theory)预测值。Yang 等进一步结合磁场辅助成型,制备了多孔氧化铝陶瓷,氧化铝晶粒的 C 轴与磁场方向平行,形成了具有板状晶粒的多孔微结构。当烧结温度为 1 600 °C 时,多孔氧化铝陶瓷的孔隙率为 30.37%,相对密度达到 66.29%,多孔氧化铝生坯表现出线性收缩各向异性<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 溶胶-凝胶浸渍法

溶胶-凝胶浸渍法(Sol-Gel Impregnation)是一种基于溶胶-凝胶技术的材料制备方法,通过将多孔基材(如陶瓷、金属、纤维等)浸渍于溶胶中,使溶胶渗透到基材孔隙内,经干燥、热处理后形成均匀涂层或复合结构<sup>[11]</sup>。该技术广泛应用于功能涂层、复合材料、催化剂载体等领域,尤其适用于纳米级陶瓷膜的制备。

Bartonickova 等开发了一种结合直接发泡和溶胶-凝胶浸渍的两步法制备莫来石多孔陶瓷。制备过程包括泡沫制备、一次烧结、溶胶浸渍和二次烧结<sup>[11]</sup>。

#### 1) 泡沫制备

以胶体  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ (凝胶剂)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (骨料)为主,辅以硅微粉、表面活性剂,形成  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$  体系。通过直接发泡形成数百微米级大孔,开放多孔网络,气泡间连通性高。初始孔隙率 68.7%~82.7%,孔壁薄且含纳米级凝胶网络<sup>[11]</sup>。

#### 2) 一次烧结(1 500 °C)

$\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成莫来石,剩余刚玉和

方石英, MgO 挥发或固溶。大孔保留(数百微米),部分凝胶网络烧结收缩形成闭孔。开放孔减少,闭孔率增加,孔径分布变宽。形成针状莫来石骨架,孔壁由纳米  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  烧结结合,强度提升,热导率提升<sup>[11]</sup>。

### 3) 溶胶浸渍(硅溶胶/Si-Al 溶胶)

浸渍液含  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  溶胶,渗透孔壁后增加活性 Si/Al 组分。填充大孔间隙,孔壁增厚。部分开放孔转为闭孔,连通性降低但孔结构均匀性提升。溶胶凝胶化后形成纳米级  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  前驱体层包裹孔壁。为二次莫来石化提供反应物,增强后续烧结结合力<sup>[11]</sup>。

### 4) 二次烧结(1 500 °C)

莫来石含量增至 88.7%(二次反应),刚玉含量降至 6.5%,方石英含量 4.8%,形成更致密晶相。孔结构致密化,以闭孔为主,开放孔减少,孔壁由交织针状莫来石构成。针状莫来石贯穿孔壁,形成“鸟巢状”增强结构。如果将抗压强度提升至 19 MPa,热导率则略升至  $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ <sup>[11]</sup>。研究表明,浸渍处理后材料的机械强度从 10 MPa 提升至 19 MPa(提高 80%),通过 HT-XRD 和 TG-DTA 分析发现,二次莫来石化过程在 1 300 °C 左右开始显著进行,这是强度提升的主要原因<sup>[11]</sup>。

## 1.2.3 凝胶注模-牺牲模板法

凝胶注模-牺牲模板法是一种结合凝胶注模成型与模板移除技术的复合工艺,通过注浆成型的方式将可牺牲模板引入陶瓷生坯中,经凝胶固化、模板去除和烧结后,制备具有可控孔隙率、孔径分布及复杂孔道结构的多孔陶瓷材料<sup>[12]</sup>。该技术广泛应用于生物医学支架、催化剂载体、过滤膜等领域。引入的临时性模板主要分为有机模板和生物质模板两类。

1) 有机模板是指通过合成或人工设计的有机材料,如聚合物、胶体晶体、泡沫塑料等。这些材料通过物理或化学手段嵌入基体中,最终通过高温煅烧、化学溶解或溶剂萃取等方式去除,留下多孔结构<sup>[13]</sup>。

2) 生物质模板如木材、植物纤维等,通过碳化、煅烧或化学处理去除有机成分,保留其天然多孔结构。木材经碳化或脱木质素处理保留纤维素骨架,填充陶瓷前驱体煅烧后可得如具有仿生层状孔隙的木材衍生碳化硅陶瓷<sup>[14]</sup>。植物纤维(如棉花、麻)编织成网浸渍前驱体烧结后形成轻质多孔材料<sup>[15]</sup>,可用作隔热材料、催化剂载体。

Zhang 等提出了一种创新的协同工艺,凝胶注模-牺牲模板复合法,该方法包括以下步骤:1) 模板自组装:聚苯乙烯球通过振动自组装形成紧密堆积结构,堆积密度 69.3%;2) 浆料填充:采用高固含量(固体的体积分数为 30%~50%)氧化铝浆料填充模板间隙;3) 阶梯烧结:330 °C 脱脂后,在 1 650 °C 烧结后孔壁完全致密化(相对密度 98%)<sup>[16]</sup>。

该工艺通过调控浆料固含量与模板尺寸,实现了孔径(370~796  $\mu\text{m}$ )、窗口尺寸(20~90  $\mu\text{m}$ )的精准控制。当固体的体积分数为 50%、烧结温度 1 650 °C 时,材料压缩强度达 28 MPa<sup>[16]</sup>。

Du 等用松木粉模板制备了仿生多孔氧化铝陶瓷,制备的多孔陶瓷的显微结构(图 3),通过控制碳化温度(800 °C)和烧结工艺(1 550 °C 保温 2 h),获得了孔隙率 89.2%、过滤效率 95.2% 的高性能材料,其管状孔结构(孔径 4~12  $\mu\text{m}$ )显著提升了颗粒物捕获能力<sup>[17]</sup>。

## 1.2.4 先驱体转化法

先驱体转化法(Preceramic Polymer Pyrolysis)

是一种通过高分子先驱体(含目标无机元素的有机聚合物)热解转化,制备无机材料(如陶瓷、陶瓷基复合材料)的方法<sup>[18]</sup>。该技术打破了传统陶瓷制备依赖高温烧结、粉末成型的局限,尤其在新型陶瓷基复合材料、功能陶瓷制备中应用广泛。

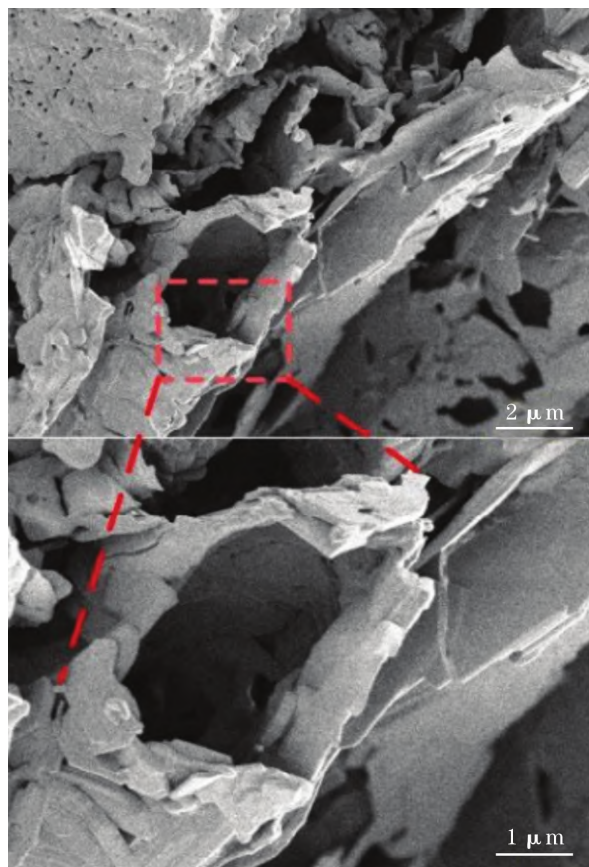


图3 生物质模板法制备的多孔氧化铝陶瓷显微结构<sup>[17]</sup>

先驱体转化法的制备过程如下:

1) 先驱体制备:合成含目标陶瓷元素(如Si、C、N等)的高分子先驱体,例如聚碳硅烷,制备SiC陶瓷的先驱体<sup>[19]</sup>、聚硅氮烷,制备Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷的先驱体<sup>[20]</sup>,通过分子设计调控先驱体结构与性能。

2) 成型加工:利用先驱体的可加工性(如可溶、可熔),通过浇铸、注塑、纺丝、涂层等方式成

型,制备复杂形状预制体,如纤维、薄膜、三维构件。

3) 热解转化:在惰性气氛(如氩气)中高温裂解,先驱体脱除有机基团,转化为无机陶瓷相。此过程伴随体积收缩、质量损失,但能形成高纯度陶瓷结构<sup>[21]</sup>。

4) 后处理(可选):部分材料需进一步高温烧结、渗碳/氮等处理,优化陶瓷致密度与性能<sup>[18]</sup>。

先驱体转化法在多孔非氧化物陶瓷制备中具有独特优势。李天昊等将钇和镁元素接枝到三甲硅基聚硅氮烷先驱体上,通过先驱体热解原位生成YSi<sub>3</sub>N<sub>5</sub>和Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>烧结助剂,成功制备了高纯多孔Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷<sup>[21]</sup>。该方法实现了烧结助剂在分子尺度的均匀分布,所得材料氧含量低于1.6%,碳含量小于0.1%。经放电等离子烧结(1450℃,45MPa)后,材料相对密度达99.4%,孔隙率30.6%,且孔隙主要为贯通孔。值得注意的是,该多孔陶瓷表现出优异的力学性能:纳米压痕硬度29.1GPa,弹性模量229.1GPa,维氏硬度2.51GPa<sup>[21]</sup>。

## 2 多孔陶瓷的结构表征与性能调控

### 2.1 多孔结构的表征技术

#### 2.1.1 显微结构分析

扫描电子显微镜(SEM)是观察多孔陶瓷微观形貌最常用的手段。张凌飞等通过场发射SEM研究了SiC纳米线/多孔SiC复合膜的形貌演变<sup>[7]</sup>。未酸洗样品表面存在大量珠状颗粒,经5%氢氟酸浸泡24h后,这些颗粒完全消失,纳米线表面变得光滑,直径分布更加均匀。能谱分析证实珠状物为SiO<sub>2</sub>,来源于碳热还原反应中SiO与CO的副反应<sup>[7]</sup>。

### 2.1.2 孔径分布测定

压汞法和泡压法是测定多孔陶瓷孔径分布的两种主要方法。潘进文等采用 AutoPore V 9600 全自动压汞仪研究了  $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CAC 添加量对多孔 SiC 陶瓷孔径分布的影响。随着烧结助剂含量从 2.5% 增加到 20%, 平均气孔径不断增大, 这与 SEM 观察到的气泡长大现象一致。气泡长大是氧化产气、液相流动和界面作用共同驱动的过程, 通过控制  $\rho$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CAC 加入量可调节气泡尺寸与分布, 优化多孔碳化硅陶瓷的强度、透气度及抗热震性。值得注意的是, 当烧结助剂质量分数为 12.5% 时, 材料表现出最窄的孔径分布和最适宜的透气性能<sup>[6]</sup>。

## 2.2 性能调控策略

### 2.2.1 力学性能优化

多孔陶瓷的力学性能主要受孔隙率、孔径分布和孔形貌影响。Li 等采用 EPS 模板结合凝胶注模法制备了大孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷, 系统研究了 EPS 模板加热时间和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  浆料固含量对性能的影响<sup>[22]</sup>。结果表明: 延长模板加热时间 (30 ~ 90 min) 可使大孔隙尺寸从 400  $\mu\text{m}$  减小至 300  $\mu\text{m}$ , 同时抗压强度从 12.1 MPa 提高到 15.3 MPa; 提高浆料固含量则可在保持平均孔径 320  $\mu\text{m}$  不变的情况下, 使抗压强度从 2.79 MPa 显著增加至 16.74 MPa<sup>[22]</sup>。

孔径与窗口尺寸协同效应: 小孔径 (370  $\mu\text{m}$ ) 与窄窗口尺寸 (20  $\mu\text{m}$ ) 可降低应力集中, 使压缩强度提升, 而弯曲强度主要受窗口尺寸影响, 与孔径无关<sup>[16]</sup>。

仿生结构设计: 受骨骼多级孔结构启发, Wegst 等提出引入纳米级微孔以分散应力, 但该策略在氧化铝陶瓷中尚未实现工程化应用<sup>[23]</sup>。Deng 等通过泡沫-凝胶注模法制备了孔隙率为

67.0% 的多孔莫来石陶瓷, 其分级孔结构使抗压强度提升至 41.3 MPa<sup>[24]</sup>, 为仿生设计提供了参考。

### 2.2.2 功能性能设计

通过组成和结构设计可赋予多孔陶瓷特殊功能。Hong 等将多孔 PZT 陶瓷嵌入 1-3 型 PZT-聚合物复合材料中, 显著提升了材料的静水压优值 (HFOM)。有限元分析表明, 当孔隙率达到 12% 时, 复合材料的  $d_{33}$  和  $d_{31}$  系数分别降低 15% 和 20%, 但由于  $d_{31}$  的下降更为显著, HFOM 值提升至  $4.050 \times 10^{-15}$  Pa<sup>[25]</sup>。这种性能优化使材料在水声传感器等领域具有重要应用价值。

## 3 多孔陶瓷的应用研究

### 3.1 吸附过滤材料

多孔陶瓷因其优异的吸附过滤性能, 被广泛应用到重金属离子吸附领域。刘丽艳等以二氧化锰改性硅藻土为原料, 泡沫浸渍工艺牺牲模板法制备多孔陶瓷用于吸附过滤处理含固体颗粒的重金属废水, 实验发现改性后硅藻土基多孔陶瓷对质量浓度为 10 mg/L 的含锌溶液中  $\text{Zn}^{2+}$  的去除率高达 71.23%<sup>[26]</sup>。

### 3.2 生物医学应用

多孔陶瓷在骨组织工程中展现出独特优势。Li 等制备的大孔  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷具有 320  $\mu\text{m}$  的平均孔径和 16.74 MPa 的抗压强度<sup>[22]</sup>, 与人体松质骨的力学性能相匹配。

### 3.3 能源与环境领域

Bai 等以地质聚合物为前驱体, 通过反应性乳液模板法在 1100  $^{\circ}\text{C}$  低温下制备了多孔 SiC/堇青石复合材料。该材料总孔隙率达 81.86%, 开孔孔隙率 79.78%, 抗压强度 1.96 MPa, 抗弯强

度 1.16 MPa<sup>[27]</sup>。研究表明, SiC 的高温氧化产生了 SiO<sub>2</sub> 原位结合相, 这是材料在低温下获得较高强度的关键因素<sup>[27]</sup>。这种材料在高温过滤和催化剂载体领域具有应用潜力。

#### 4 展望

多孔陶瓷以其可控的三维孔结构, 集成耐高温、高比表面积等特性, 在多领域展现关键应用价值。孔结构调控技术的手段有很多, 如造孔剂法、颗粒堆积法、3D 打印、生物模板法等。

未来研究应重点关注以下几个方向: 一是发展多尺度计算模拟方法, 实现多孔陶瓷结构-性能关系的精准预测; 二是开发绿色低碳的制备工艺; 三是探索多孔陶瓷在新能源、环境治理等新兴领域的应用。

#### 参考文献

- [1] ZHANG F, LI Z, XU M, et al. A review of 3D printed porous ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(8): 3351-3373.
- [2] 王思群.  $\beta$ -TCP 多孔生物陶瓷软骨组织工程支架的研发及应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009: 5.
- [3] ARAUJO S A R, LORETO A C, WERMUTH T B, et al. Porous ceramic supported TiO<sub>2</sub> nanoparticles: enhanced photocatalytic activity for Rhodamine B degradation[J]. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2020, 59(6): 230-238.
- [4] 孙朋, 李宇, 郭占成. 用不同粒度颗粒与添加造孔剂制备钢渣多孔陶瓷吸声材料[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(6): 753-764.
- [5] 王晓刚, 樊子民. 电致发热 SiC 多孔陶瓷制备工艺与性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2004, 23(6): 106-109.
- [6] 潘进文, 姜洪义.  $\rho$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合铝酸钙水泥烧结助剂对多孔碳化硅陶瓷性能的影响[J]. *耐火材料*, 2024, 58(5): 376-380.
- [7] 张凌飞, 王修涛, 雷煜, 等. SiC 纳米线/多孔 SiC 复合陶瓷膜的制备及其孔径特征[J]. *建材世界*, 2024, 45(4): 6-8.
- [8] 周小楠, 张建飞, 黄鑫, 等. 多孔重结晶碳化硅陶瓷的烧结颈结构调控与力学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(9): 1208-1213.
- [9] LIU J, TANG W, YANG L, et al. Fabrication of lightweight, high-strength Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Scaffolds with enhanced adsorption properties via extrusion-based 3D printing [J/OL]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2025, 45(5): 1-5 [2025-05-08]. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117161>.
- [10] YANG Z, YU J, LI C, et al. Preparation of textured porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics by slip casting in a strong magnetic field and its mechanical properties [J]. *Crystal Research & Technology*, 2015, 50(8): 645-653.
- [11] BARTONICKOVA E, SVEC J, DLABAJOVA L, et al. Tailoring microstructure and properties of porous mullite-based ceramics via sol-gel impregnation [J]. *Ceramics International*, 2025, 51(5): 5505-5513.
- [12] 刘远. 铝灰网状陶瓷/酚醛改性环氧树脂复合材料制备及性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023: 22-23.
- [13] 张凤春, 刘笑, 陈桂锭, 等. 有机模板孔径和烧结温度对 SiC 泡沫陶瓷结构和性能影响[J]. *陶瓷学报*, 2024, 45(3): 549-557.
- [14] 谭佳. 落叶松木质基多孔泡沫材料的制备及表面功能化改性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023: 1.
- [15] 余沁堃. 基于植物纤维模板的中空隔热陶瓷纤维的制备及表征[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 17-20.
- [16] ZHANG M, LI X, ZHANG M, et al. High-strength macro-porous alumina ceramics with regularly arranged pores produced by gel-casting and sacrificial template methods [J/OL]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(14): 10119-10129 [2025-05-08]. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03888-8>.

doi.org/10.1007/s10853-019-03576-8.

- [17] DU D F, SUN C W, GUO X R, et al. Preparation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  porous ceramics from the sacrificial biomass template method[J]. *Materials Science, Ceramics*, 2024, 68 (3): 409-419.
- [18] 杜贻昂, 张韵铂, 宋曲之, 等. 先驱体转化法制备氮化硼陶瓷纤维研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52 (9): 2875-2888.
- [19] 张冰玉, 王岭, 王晓猛, 等. 不同先驱体制备 C/SiC 复合材料及其浸渍行为[J]. *无机材料学报*, 2020, 35(9): 1017-1022.
- [20] 刘洪丽, 李树杰, 张昕, 等. 采用 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷先驱体连接反应烧结 SiC[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(9): 1469-1472.
- [21] 李天昊, 张健宁, 何流, 等. 含烧结助剂氮化硅陶瓷粉体的先驱体法制备及其烧结[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(9): 2767-2772.
- [22] LI F, LI J, ZHI Q, et al. Fabrication of macro-porous silicon nitride ceramics by bonded EPS ball template and gel-casting method[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(5): 6166-6173.
- [23] WEGST U G K, BAI H, SAIZ E, et al. Bioinspired structural materials[J]. *Nature materials*, 2015, 14 (1): 23-36.
- [24] DENG X, RAN S, HAN L, et al. Foam-gelcasting preparation of high-strength self-reinforced porous mullite ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(13): 4059-4066.
- [25] HONG I G, SHIN H Y, KIM J, et al. Improved hydrostatic piezoelectric property via incorporation of porous PZT ceramics into 1-3 type PZT-polymer composites: design to fabrication[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2025, 45(4): 117046.
- [26] 刘丽艳, 姜子健, 刘战剑. 二氧化锰改性硅藻土基多孔陶瓷吸附过滤性能研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2025, 58(4): 406-413.
- [27] BAI C, MA C, WANG X, et al. Low-temperature fabrication of porous SiC/cordierite composite ceramics from open-celled porous geopolymers[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(4): 4158-4167.

(责任编辑:王军辉)