

碳化硅基多级孔耐磨耐高温陶瓷制备与性能研究

朱清智¹ 杨文伟²

1.河南工业职业技术大学 河南 南阳 473000

2.南阳开元高温新材料有限公司 河南 南阳 473000

【摘要】：采用聚氨酯泡沫 - 石墨复合模板法，结合 SiC 晶须增韧制备毫米—微米—纳米多级孔 SiC 陶瓷，探究烧结温度、晶须掺量对材料物相、孔结构、力学、导热及高温耐磨性能的影响。结果表明：1650 °C、8 vol% SiC 晶须为最优工艺，试样孔隙率 48.1%，抗压强度 76.3 MPa，800 °C 磨损率低至 $9.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ，有效热导率 22.7 W/(m·K)。多级孔可缓冲热应力，SiC 晶须通过裂纹偏转、桥接、拔出实现协同增韧，显著提升高温耐磨稳定性，适用于高温过滤、热交换、摩擦密封等工况。

【关键词】：碳化硅；多级孔陶瓷；SiC 晶须；高温耐磨；热导率

DOI:10.12417/3041-0630.26.11.003

1 引言

碳化硅 (SiC) 陶瓷具备高熔点、高硬度、耐蚀导热优势，在航空、核能、高温工业领域应用前景广阔。单尺度多孔 SiC 存在韧性差、高温易剥落、导热难以调控等短板。多级孔结构结合 SiC 晶须可同步实现轻量化、抗热震与高温耐磨特性。现有研究对晶须增韧多级 SiC 的高温摩擦耦合机制研究不足，本文复合模板制备分级孔 SiC，系统揭示工艺-性能调控规律，为极端工况多孔陶瓷提供工艺依据。

2 实验部分

2.1 实验原料

β -SiC 微粉 (1.2 μm , 99.5%)、 β -SiC 晶须 (直径 0.4~0.6 μm , 长 6~10 μm)； Al_2O_3 - Y_2O_3 复合烧结助剂；25 PPI 聚氨酯泡沫、石墨粉造孔剂；PVA、聚丙烯酰胺分散剂。

2.2 样品制备

(1) 球磨配浆：SiC 基体分别添加 0/4/8/12 vol% SiC 晶须，球磨 24 h 得到稳定浆料；

(2) 泡沫浸渍、80°C 干燥；

(3) 550°C 保温 2 h 脱脂除模板；

(4) 氩气氛 1550/1600/1650/1700°C 保温 1 h 烧结。

2.3 测试表征

FE-SEM 微观形貌观测、XRD 物相分析、压汞法测孔径孔隙、万能试验机测抗压强度、激光闪射法测热导率、高温摩擦试验机评价 25~800°C 摩擦磨损性能。

3 结果与讨论

3.1 微观形貌与物相分析

从图 1 可知，从左至右试样总孔隙率依次降低，可直观观察样品外观变化：左侧试样孔隙发达，骨架镂空程度高；随着孔隙率不断减小，样品表面孔洞逐步减少，外形愈发致密，整体保持方块状，无明显变形开裂，反映复合模板法可制备不同孔隙等级的碳化硅多孔坯体。为泡沫浸渍成型后的素坯，基体呈浅米白色。左到右孔隙率逐步下降，左侧可清晰看到聚氨酯泡沫原始的蜂窝连通孔结构；随固相含量提高，泡沫孔洞被浆料逐步填充，样品外观趋于致密，素坯形貌完整，说明浆料浸渍工艺适配不同孔隙配比的坯体制备。



图 1 聚氨酯泡沫模板与烧结后多级孔 SiC 宏观光学照片

图 2 为 SiC 晶须原料微观形貌、晶体结构及尺寸统计，(a) 低倍 SEM 图像，展示原始 SiC 晶须整体分散状态，晶须呈一维棒状，存在少量颗粒杂质；(b) 高倍 SEM 图像，可见晶须为清晰六方棱柱形貌，表面光洁；(c) β -SiC 晶体结构示意图，展示(111)晶面与<111>生长方向；(d) SiC 晶须直径分布统计直方图，晶须直径主要集中于 0.2~0.6 μm 区间；(e) SiC 晶须长度分布统计直方图，晶须长度大多分布在 4~10 μm 范围。

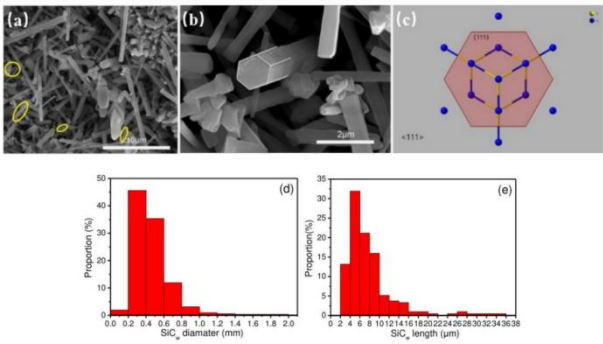


图 2 SiC 图晶须原始 SEM 形貌图

图 3 为不同烧结温度下 8 vol%SiC 晶须增韧多级孔 SiC 陶瓷断面 SEM 形貌，上排(a- c)为高倍局部形貌，下排(d- f)为整体断面形貌。1550 °C 烧结试样晶粒结合较弱，烧结颈细小，基体内部孔洞较多，晶须与基体界面结合较差；1600 °C 时颗粒间烧结颈逐步发育，致密度有所提升；1650 °C 条件下 SiC 颗粒烧结充分，烧结颈粗大，晶须均匀嵌于基体中，可观察到晶须拔出、裂纹偏转的增韧特征。随烧结温度升高，基体晶粒长大，内部孔隙逐步减少，界面结合状态得到改善。

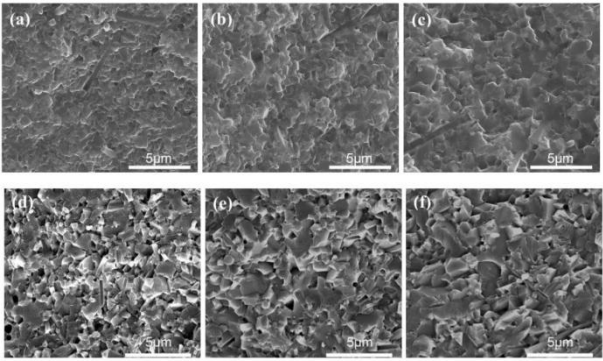


图 3 不同烧结温度下 8 vol%SiC 晶须增韧多级孔 SiC 断面 SEM

图 4 为不同 SiC 晶须添加量试样的 XRD 图谱，(a)低温烧结；(b)1650 °C 烧结；a: α - Al_2O_3 ，b: t-ZrO_2 ，c: β -SiC，d: m-ZrO_2 。图中由下至上晶须添加量依次为 0、3.0、5.0、7.0、10.0 vol%。低温条件(a)下可观察到单斜相氧化锆 (m-ZrO_2) 衍射峰；1650 °C 高温烧结后(b)， m-ZrO_2 峰消失，主要物相为 α - Al_2O_3 、四方相 t-ZrO_2 与 β -SiC。随着 SiC 晶须掺量提高， β -SiC 特征衍射峰强度逐步增大，无新杂质相生成，说明烧结过程中 SiC 晶须化学稳定性良好，未发生明显界面反应。

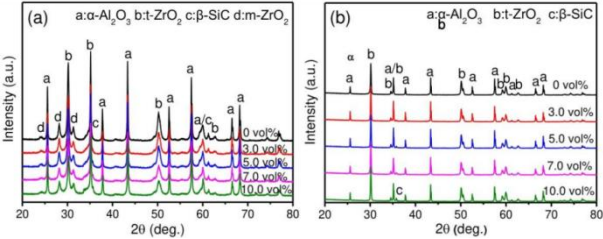


图 4 不同 SiC 晶须添加量多级 SiC 陶瓷 XRD 图谱

所有样品仅出现 β -SiC 衍射峰，无杂相。1650 °C 样品衍射峰尖锐，结晶度最优；低温样品结晶较差，1700 °C 晶粒明显粗化。多级孔结构由泡沫形成毫米大孔、石墨分解生成微米孔、晶界形成纳米孔构成；8 vol% 晶须均匀分散，超过 12 vol% 出现团聚缺陷。

3.2 孔隙、力学与热性能

表 1 列出 1550-1700 °C 烧结后试样的总孔隙率、抗压强度、室温热导率以及 800 °C 磨损率测试结果。随着烧结温度升高，试样烧结致密化程度提高，总孔隙率逐步降低，抗压强度与室温热导率持续增大；800 °C 磨损率先减小后增大，1650 °C 时磨损率达到最小值 $9.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$ ，高温耐磨性能最优；温度继续升高至 1700 °C，孔隙大量闭合，虽然强度进一步提升，但磨损率回升，高温耐磨性能出现下降。综合各项指标，1650 °C 为本实验的较优烧结温度。

表 1 不同烧结温度多级孔 SiC 陶瓷综合性能(8 vol%SiC 晶须)

烧结温度/°C	总孔隙率/%	抗压强度/MPa	室温热导率 W/(m · K)	800 °C 磨损率 /mm ³ · (N · m) ⁻¹
1550	66.2	42.6	14.5	2.76×10^{-5}
1600	57.4	61.2	18.3	1.53×10^{-5}
1650	48.1	76.3	22.7	9.2×10^{-6}
1700	32.5	84.1	34.2	1.88×10^{-5}

图 5 为 SiC 晶须含量对陶瓷力学性能的影响，横坐标为 SiC 晶须添加量 (vol%)，黑色曲线代表维氏硬度，红色曲线为断裂韧性，蓝色曲线为抗弯强度，图中误差棒代表测试数据离散程度。随着 SiC 晶须掺量增加，抗弯强度整体呈上升趋势；维氏硬度先小幅下降，在 5 vol% 附近达到谷值后回升；断裂韧性整体维持较高水平，在晶须含量较低时略有下降，随后逐步升高，10 vol% 时断裂韧性达到最大值。适量 SiC 晶须通过晶须桥接、拔出等增韧机制提升材料韧性与抗弯能力，但晶须添加过多容易引入内部缺陷，会带来性能波动。

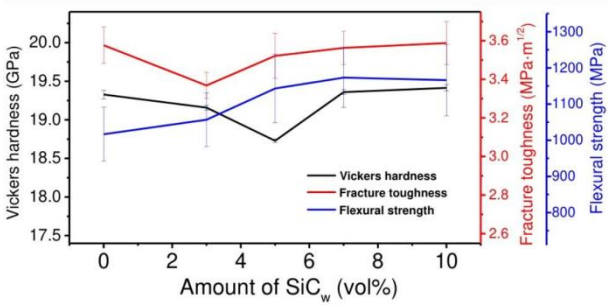


图 5 SiC 晶须添加量对多级 SiC 陶瓷力学性能曲线

图6为不同SiC晶须含量陶瓷的热扩散系数与热导率随温度变化,(a)热扩散系数;(b)热导率;ZAS-0~ZAS-10.0 vol%代表SiC晶须体积分数0-10.0 vol%。在0-1000℃测试区间内,所有试样的热扩散系数与热导率均随温度升高持续下降,温度升高加剧晶格声子散射,抑制热量传递。同一温度下,随着SiC晶须添加量增大,热扩散系数与热导率同步提升,ZAS-10.0 vol%试样具备最优导热性能。随着温度不断升高,不同晶须含量试样之间的导热性能差值逐步缩小,高温条件下SiC晶须对导热的提升效果被声子散射效应削弱。

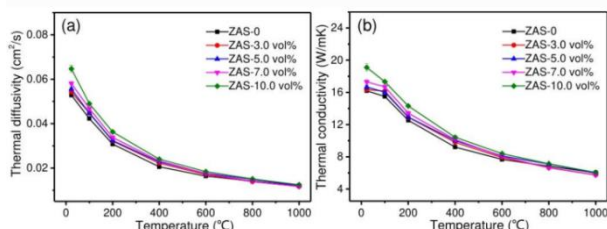


图6 不同SiC晶须含量多级SiC陶瓷热导率-温度曲线

3.3 高温摩擦磨损性能

图7为不同辐照剂量试样的纳米压痕测试结果,(a)纳米硬度;(b)弹性模量;横坐标为压入深度, Virgin代表未辐照原始试样, RT(1×10^{16}), RT(5×10^{16}), RT(1×10^{17})代表室温下不同离子辐照剂量,误差棒代表测试离散误差。在压

入深度较小时,各试样硬度、弹性模量数值波动大,存在明显压痕尺寸效应;随着压入深度增大,硬度与弹性模量逐渐趋于稳定。与未辐照试样对比,离子辐照之后试样的硬度与弹性模量整体上升,并且随辐照剂量提高,硬化效应愈加显著,高剂量辐照引入大量缺陷,造成材料辐照硬化现象。在最大剂量(1×10^{17})条件下,数据离散程度明显变大,表层损伤带来性能波动。

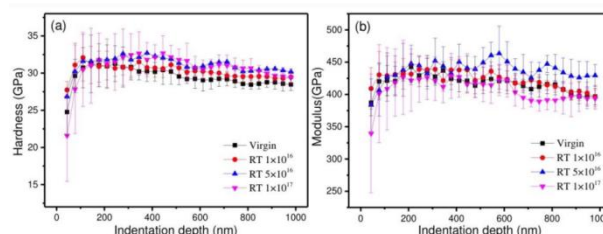


图7 25~800℃区间多级SiC陶瓷摩擦系数变化曲线

4 结论

聚氨酯泡沫+石墨复合模板可制备毫米-微米-纳米三级多级孔SiC陶瓷,最优工艺:1650℃烧结、8 vol%SiC晶须;烧结温度升高致密化提升,但1700℃微纳孔大量闭合,高温耐磨性能下降;SiC晶须通过裂纹偏转、桥接、拔出三重增韧机制显著提升高温耐磨性能;多级孔道形成声子散射中心,实现热导率区间可调,适配高温换热、耐磨密封工况。

参考文献:

- [1] 钱继宇,李强,于凯,等.多孔材料有效热导率的二维格子玻尔兹曼模拟方法[J].中国科学 E 辑,2004,47(6):716-724.
- [2] Lee S, Ha J H, Lee J, et al. Enhanced mechanical strength of talc-containing porous kaolin prepared by replica method[J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2021, 58(2): 123-133.
- [3] 牛丽娟. SiC晶须增韧 Al₂O₃基复合陶瓷的制备及其抗辐照性能[D]. 兰州大学, 2022.
- [4] Chung Y, Chan S S L, Yoshida K. Microstructure, thermal, and mechanical properties of hierarchical porous silicon carbide[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2025.
- [5] 阮景, 杨金山, 闫静. 碳化硅纳米线增强多孔 SiC 陶瓷的制备与力热性能[J]. 无机材料学报, 2024.
- [6] Studart A R, Gonzenbach U T. Processing routes to macroporous ceramics: A review[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(6): 1771-1789.
- [7] 仵康康. SiC晶须骨架增强复合材料摩擦磨损性能研究[J]. 复合材料学报, 2025.
- [8] Katoh Y, Snead L L. Irradiation swelling and thermal conductivity evolution of SiC ceramics[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010.