

引用格式: 刘亮, 常振东, 王志刚, 等. Sc_2O_3 掺杂 ZrO_2 热障涂层陶瓷材料热物理性能及高温性能研究[J]. 材料工程, 2025, 53(11): 182-188.

LIU Liang, CHANG Zhendong, WANG Zhigang, et al. Thermophysical properties and high temperature properties of Sc_2O_3 doped ZrO_2 thermal barrier coating ceramic materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 182-188.

Sc_2O_3 掺杂 ZrO_2 热障涂层陶瓷材料 热物理性能及高温性能研究

Thermophysical properties and high temperature
properties of Sc_2O_3 doped ZrO_2 thermal barrier
coating ceramic materials

刘 亮^{1,2}, 常振东^{2*}, 王志刚³, 牟仁德², 蔡 妍²,
谢 敏³, 彭 晓¹, 舒小勇¹

(1 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063; 2 中国航发
北京航空材料研究院, 北京 100095; 3 内蒙古科技大学
材料科学与工程学院, 内蒙古 包头 014010)

LIU Liang^{1,2}, CHANG Zhendong^{2*}, WANG Zhigang³, MU Rende²,
CAI Yan², XIE Min³, PENG Xiao¹, SHU Xiaoyong¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong
University, Nanchang 330063, China; 2 AECC Beijing Institute of
Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3 School of
Materials Science and Engineering, Inner Mongolia
University of Science and Technology,
Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

摘要: 质量分数为 8% Y_2O_3 部分稳定的氧化锆 (8YSZ) 是目前航空发动机涡轮叶片常用的热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 面层材料, 但其在 1200 °C 以上高温相变诱发的体积变化易导致涂层开裂失效。采用 Sc_2O_3 作为稳定剂, 使用固相合成法制备了摩尔分数为 8% Sc_2O_3 -92% ZrO_2 陶瓷 (8SSZ), 对比研究了 8SSZ 与传统 8YSZ 陶瓷材料的热膨胀系数、热导率以及高温相与晶粒的热稳定性等热物理性能。结果表明: 试样经马弗炉 1400 °C 热处理后, 热膨胀仪测得 8SSZ 的热膨胀系数 (CTE) 为 $(8.91\sim 10.7)\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, 与 8YSZ 材料相当; 热导率测试仪测得 8SSZ 的热导系数为 2.59 W/(m·K), 较 8YSZ 降低了约 20%; X 射线衍射仪 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 等分析表明, 8SSZ 在 1400 °C 保持 500 h 无相变, 高温相稳定性比 8YSZ 的高, 但仍然存在晶粒长大过快的问题。

关键词: 热障涂层; Sc_2O_3 ; 相稳定性; 热导率; 晶粒长大

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000155 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000155

中图分类号: TQ174.75; TB3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0182-07

Abstract: 8% (mass fraction) Y_2O_3 partially stabilized zirconia (8YSZ) is a currently commonly-used top-coat material for thermal barrier coatings (TBCs) applied to turbine blades in aero-engines. However, its volume change induced by high-temperature phase transitions above 1200 °C can easily lead to cracking and failure of TBCs. Sc_2O_3 is employed as an alternative stabilizer to fabricate 8% Sc_2O_3 -92% ZrO_2 (mole fraction) ceramics (8SSZ) *via* a solid-state synthesis method. The thermophysical properties of 8SSZ and conventional 8YSZ, including thermal expansion coefficient (CTE), thermal conductivity, and high-temperature phase/grain stability, are systematically compared. The results show that after heat treatment at 1400 °C in a muffle furnace, the CTE of 8SSZ measured by a dilatometer ranges from $8.91\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ to

$10.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, which is comparable to that of 8YSZ. Thermal conductivity tests reveal that 8SSZ exhibits a thermal conductivity of $2.59 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, approximately 20% lower than that of 8YSZ. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) results demonstrate that 8SSZ maintains phase stability without phase transitions after 500 h at $1400 \text{ }^\circ\text{C}$, outperforming 8YSZ in high-temperature phase stability. However, 8SSZ still exhibits the issue of excessive grain growth.

Key words: TBC; Sc₂O₃; phase stability; thermal conductivity; grain growth

为满足航空发动机不断提高推重比以及燃烧室进气口温度的需求,具有隔热、抗氧化腐蚀作用的热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs)在提升发动机涡轮叶片的使用寿命方面发挥越来越重要的作用^[1-3]。质量分数为 6%~8% 的 Y₂O₃ 部分稳定的 ZrO₂(YSZ)是目前使用最为广泛的热障涂层陶瓷面层材料,但是 YSZ 在 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下长期服役时易发生严重的相变及烧结问题,相变带来的体积变化最终会导致涂层失效,烧结则导致热导率升高^[4-5]。因此 YSZ 逐渐不能满足更高性能发动机叶片热障涂层的使用需求,对现有的 YSZ 材料进行改进成为国内外热障涂层材料重点研究方向之一。目前常用的改进方法是掺杂新的稀土氧化物,此时稀土元素将占据 ZrO₂ 晶格中部分 Zr⁴⁺ 的位置^[6]。目前常被用于掺杂使用的稀土氧化物主要有 Sc₂O₃^[7]、La₂O₃^[8]、Yb₂O₃^[9]、CeO₂^[10] 等。

而 Sc 与 Y 同属一个主族,其外层电子结构相似,因此 Sc₂O₃ 常被用于替代 Y₂O₃ 共掺杂来稳定氧化锆。而 Sc 在所有稀土元素中具有最小的原子质量及原子半径,所以 Sc 的引入所制备的 ScYSZ 相比于 YSZ 具有更优异的力学以及热物理性能^[6,11],同时得益于 Sc 更小的离子半径,其进入 ZrO₂ 晶格时所引起的晶格畸变较小从而保持稳定的四方结构^[12]。同时基于 Sc₂O₃-ZrO₂ 二元相图,Sc₂O₃ 的含量在 5%~9% (摩尔分数,下同)时,陶瓷材料能在低温到高温下保持四方相结构^[13]。此外,有学者研究表明,掺杂 Sc 的 YSZ 具有更好的耐钙镁铝硅酸盐(CMAS)腐蚀^[14]以及含钒的 Na₂SO₄ 熔融盐热腐蚀^[15]。因此 Sc₂O₃ 被认为是用于改性 ZrO₂ 最有潜力的稀土氧化物之一。但目前针对单一 Sc₂O₃ 掺杂改性 ZrO₂ 的高温相稳定性以及热物理性能的研究相对较少。鉴于此,本研究通过固相合成法合成了摩尔分数为 8% 的 Sc₂O₃-ZrO₂(8SSZ)陶瓷材料,重点研究了 Sc 掺杂对 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的高温相稳定性以及对热物理性能的影响,并与传统 8YSZ 进行比较。同时研究了 8SSZ 的晶粒生长行为,讨论了这一问题对 8SSZ 作为新型热障涂层陶瓷材料的影响并提出解决方向。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

采用固相合成法制备了 Sc₂O₃ 掺杂 ZrO₂ 陶瓷材料,合成步骤如下:将 99.9% Sc₂O₃、ZrO₂ 粉末使用马弗炉在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 3 h。随后加入去离子水倒入球磨罐中以 65 r/min 的速度球磨 24 h,之后加入适量去离子水,确保浆料中固体质量分数达到 40%,并采用 2700 r/min 的高转速进行 3 h 的高能球磨。将所获得的浆料干燥后使用不同大小的模具在 200 MPa 的压力下压制不同尺寸的陶瓷块,最后进行 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温烧结得到实验所需的热障涂层陶瓷材料。

1.2 实验方法

相稳定性研究使用 KSL-1400X-A2 型箱式马弗炉将所制的陶瓷试片在 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气气氛下保温 50、100、150、200、300、500 h,升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,保温后空冷至室温。使用 D8 ADVANCE X 射线衍射仪对实验后的陶瓷材料进行物相组成分析,使用 Cu 靶 K α 1 射线,波长 $\lambda=0.154 \text{ nm}$,电压 40 kV,电流 40 mA,扫描速度 $6 \text{ }^\circ/\text{s}$,根据衍射峰强度使用式(1),(2)计算样品中的单斜相(monoclinic, m 相)含量。使用 TESCAN CLARA GMH 场发射电子显微镜对打磨抛光后的样品表面进行观察。

$$\frac{M_m}{M_{c,t/t'}} = 0.82 \frac{I_m(111) + I_m(\bar{1}11)}{I_{c,t/t'}} \quad (1)$$

$$\frac{M_c}{M_{t/t'}} = 0.88 \frac{I_c(400)}{I_c(004) + I_{t/t'}(400)} \quad (2)$$

式中: M_m 、 M_c 、 $M_{t/t'}$ 分别表示 m 相、c 相、t/t' 的摩尔分数; I 表示各衍射峰的积分强度。

使用 LFA 467 HyperFlash 闪射法导热仪测试样品在 25、200、400、600、800、1000、1200 $^\circ\text{C}$ 下的热扩散系数 D ,执行 ASTM E—1461 标准进行测试,重复三次以获得平均值绘制热导率随温度变化曲线。热导率由式(3)计算得出:

$$\lambda = DC_p \rho \quad (3)$$

式中: C_p 为比热容; ρ 为材料密度。

使用 DIL 402 Expeditis Supreme 水平推杆式热膨

胀仪对样品的热膨胀系数进行测定。升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,采用 Al_2O_3 基线标样,重复三次以获得平均值。陶瓷材料的热膨胀系数 α 可由式(4)得出:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad (4)$$

式中: ΔL 为样品长度变化; L_0 为样品初始长度; ΔT 为样品温度变化量。

使用MIPAR软件对SEM所拍摄得到的材料微观形貌照片进行晶粒尺寸的测量。

2 结果与分析

2.1 Sc_2O_3 掺杂 ZrO_2 物相分析

图1为上述过程合成的8SSZ及8YSZ陶瓷材料的XRD图谱。XRD图谱表明8SSZ只在 $2\theta=30^{\circ}$ 、 35° 、 50° 、 60° 、 63° 、 74° 出现衍射峰,与标准PDF卡片PDF# 50-1089较为一致,其中并未出现 Sc_2O_3 的衍射峰,表明所制备的8SSZ陶瓷样品只含有单一的 t' - ZrO_2 相, Sc_2O_3 已完全溶入 ZrO_2 晶格,形成亚稳态四方相的固溶体。而在8YSZ陶瓷样品中,不仅出现了和8SSZ一样的衍射峰,还在 28° 以及 31° 附近出现了微量的 $(\bar{1}11)$ 以及 (111) 晶面的单斜相衍射峰。通过式(1)计算得出,m相含量为17.8%。这可能是由于在 $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烧

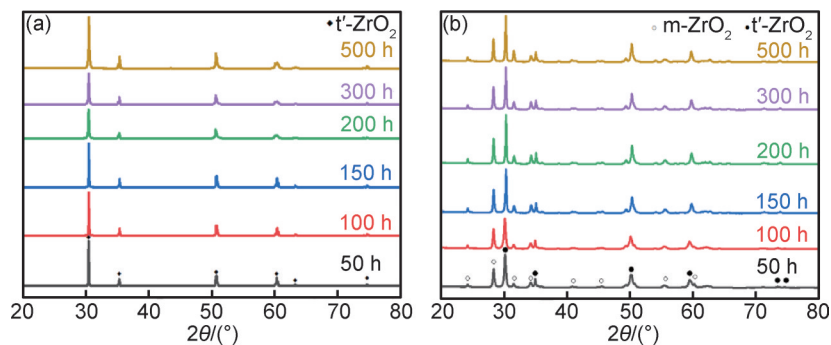


图2 8SSZ(a)及8YSZ(b)在 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烧结不同时间的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of 8SSZ(a) and 8YSZ(b) sintered at $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ for different time

由图2(a)可以看出,在烧结500 h后,8SSZ陶瓷材料仍保持单一的亚稳态四方相,其四方度($c/\sqrt{2}a$,其中晶胞参数 $a=3.596\text{ nm}$, $c=5.111\text{ nm}$)为 $1.0049 < 1.010$,并未出现 m 相的衍射峰,说明在 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下8SSZ能保持至少500 h不发生相变。由图2(b)可以得出,8YSZ材料烧结50 h后 m 相的衍射峰强度明显增大,出现了 $2\theta=24^{\circ}$ 、 34° 、 41° 、 45° 、 55° 、 74° 、 75° 的单斜相特征峰,并随烧结时间增加,衍射峰的强度也不断增强。由式(1)计算得出的 m 相含量如图3所示,

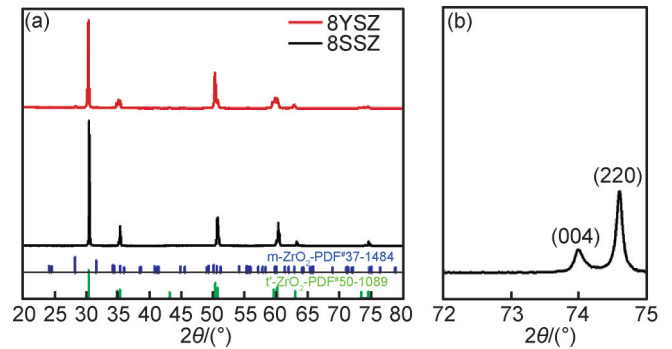


图1 8YSZ及8SSZ的XRD图谱(a)及8SSZ在 72° ~ 75° 的局部衍射图谱(b)

Fig.1 XRD patterns of 8YSZ and 8SSZ (a), and an enlarged view of XRD pattern for 8SSZ in the 72° ~ 75° range (b)

结所导致的相变。 m 相由于在高温下容易向四方相 t 转变并伴有约3.5%的体积变化,这容易造成涂层在服役过程中产生裂纹致使涂层脱落,所以在热障涂层材料设计中需控制 m 相的含量^[16]。而8SSZ在相同的制备条件下并未出现 m 相并保持单一的亚稳态四方相 t' , 72° ~ 75° 中的衍射图谱表示其并未出现立方相 c (400)晶面的衍射峰,表明其具有更好的高温相稳定性。为验证8SSZ的高温相稳定性,使用马弗炉在 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对所制备的样品进行不同时间烧结。为更直观地观察相变行为,对烧结后的样品进行XRD检测,烧结后的XRD图谱如图2所示。

8YSZ的 m 相含量在前100 h上升速度快,由17.8%上升至57.4%,200 h后 m 相含量增长趋势趋于平稳维持在70%左右。由此可得,8SSZ相较于8YSZ具有更高的相稳定性,这是由于 Sc_2O_3 或 Y_2O_3 在掺杂进入 ZrO_2 晶格的过程中导致部分 Zr^{4+} 被 $\text{Sc}^{3+}/\text{Y}^{3+}$ 所取代,改善了 ZrO_2 中氧空位的形成^[1],而 Sc^{3+} 的半径(0.087 nm)小于 Y^{3+} (0.1019 nm),因此 Sc_2O_3 中的 Sc^{3+} 与 O^{2-} 的距离(0.215 nm)小于 Y_2O_3 中 Y^{3+} 与 O^{2-} 之间的距离(0.225 nm),随着离子之间的距离减小,原子间吸引

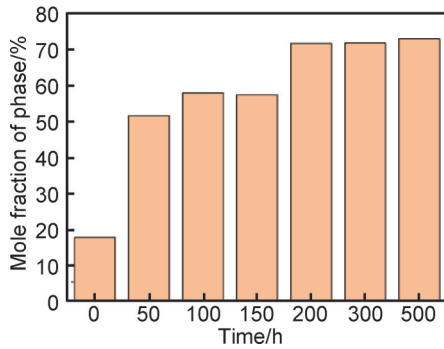


图 3 8YSZ 在 1400 °C 下烧结不同时间的 m 相的含量

Fig.3 m phase content of 8YSZ sintered at 1400 °C for different time

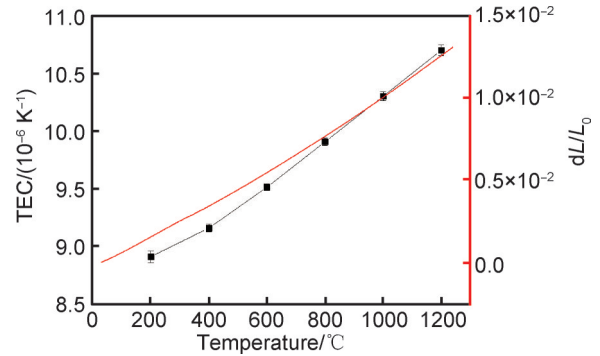


图 4 8SSZ 热膨胀系数及线变化率随温度变化曲线

Fig.4 Thermal expansion coefficient (TEC) and linear change rate curves of 8SSZ as a function of temperature

力增强,离子扩散和迁移难度增加,因此 Sc₂O₃ 作为稳定剂具有更好的高温相稳定作用^[17]。

2.2 Sc₂O₃ 掺杂 ZrO₂ 陶瓷材料热物理性能分析

2.2.1 热膨胀系数

图 4 为 8SSZ 的热膨胀系数 (thermal expansion coefficient, TEC) 及线变化率随温度变化曲线,由图可见其热膨胀系数随温度升高而线性增大,说明该陶瓷样品相稳定性能优异,具有稳定的晶体结构^[18]。在目前所使用的经典热障涂层体系中,8YSZ 的热膨胀系数在 200~1000 °C 为 $(8.92\sim 11.20)\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ^[19],而本研究所制备的 8SSZ 热膨胀系数在此温度区间的范围为 $(8.91\sim 10.7)\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,与传统 8YSZ 材料相当,作为热障涂层陶瓷面层材料具有较好的匹配性。

2.2.2 热导率

8YSZ 以及 8SSZ 的热扩散系数如图 5(a) 所示,两者的热扩散系数都随温度上升而下降。8YSZ 的热扩散系数由 25 °C 时的 1.054 mm²/s 下降到 1200 °C 时的

0.642 mm²/s,同样条件下 8SSZ 的热扩散系数由 0.791 mm²/s 下降到 0.580 mm²/s。热导率遵循先降低后升高的趋势,1200 °C 时 8YSZ 热导率为 3.28 W/(m·K),8SSZ 的热导率为 2.59 W/(m·K),明显低于 8YSZ,下降幅度约 20%。根据绝缘固体的热导率理论,热传递取决于声子散射^[20],声子的散射可以减小其平均自由程从而降低材料热导率,由式(5)声子平均自由程与原子质量之间的关系式^[21]可以得出声子平均自由程和置换与被置换的质量差 ΔM 成反比,即 ZrO₂ 中 Zr 与 Sc/Y 之间的质量差。由于 $\Delta M_{Zr/Sc}$ (约为 42.26 g/mol) 大于 $\Delta M_{Zr/Y}$ (约为 2.31 g/mol),因此 Sc₂O₃ 所掺杂的 8SSZ 的热导率低于传统 8YSZ。

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{c\alpha^3\omega^4}{2\pi v^4} \left(\frac{\Delta M}{\bar{M}} \right) \quad (5)$$

式中: τ_p 为平均自由程; c 为置换原子的浓度; α^3 为原子平均体积; v 为声子速度; \bar{M} 与 ΔM 分别为置换与被置换原子的平均质量以及质量差。

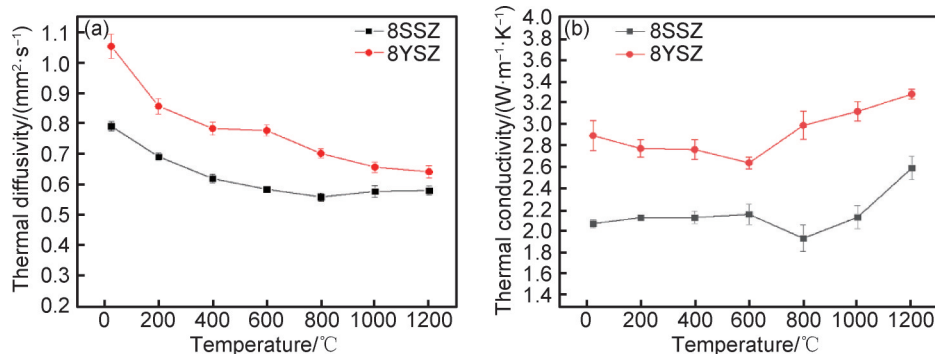


图 5 陶瓷材料的热扩散系数(a)及热导率曲线(b)

Fig.5 Thermal diffusivity (a) and thermal conductivity curves (b) of ceramic materials

2.3 晶粒生长

图 6 为 8SSZ 在原始状态以及热处理 50~500 h 后 SEM 观察的微观组织形貌,右上角为其晶粒尺寸分

布,由图可见晶粒表面气孔数量较少,说明孔隙率较低,结构致密,晶粒展现出不规则多边形形貌。由晶粒尺寸分布图表明晶粒总体呈单峰态,符合正态分

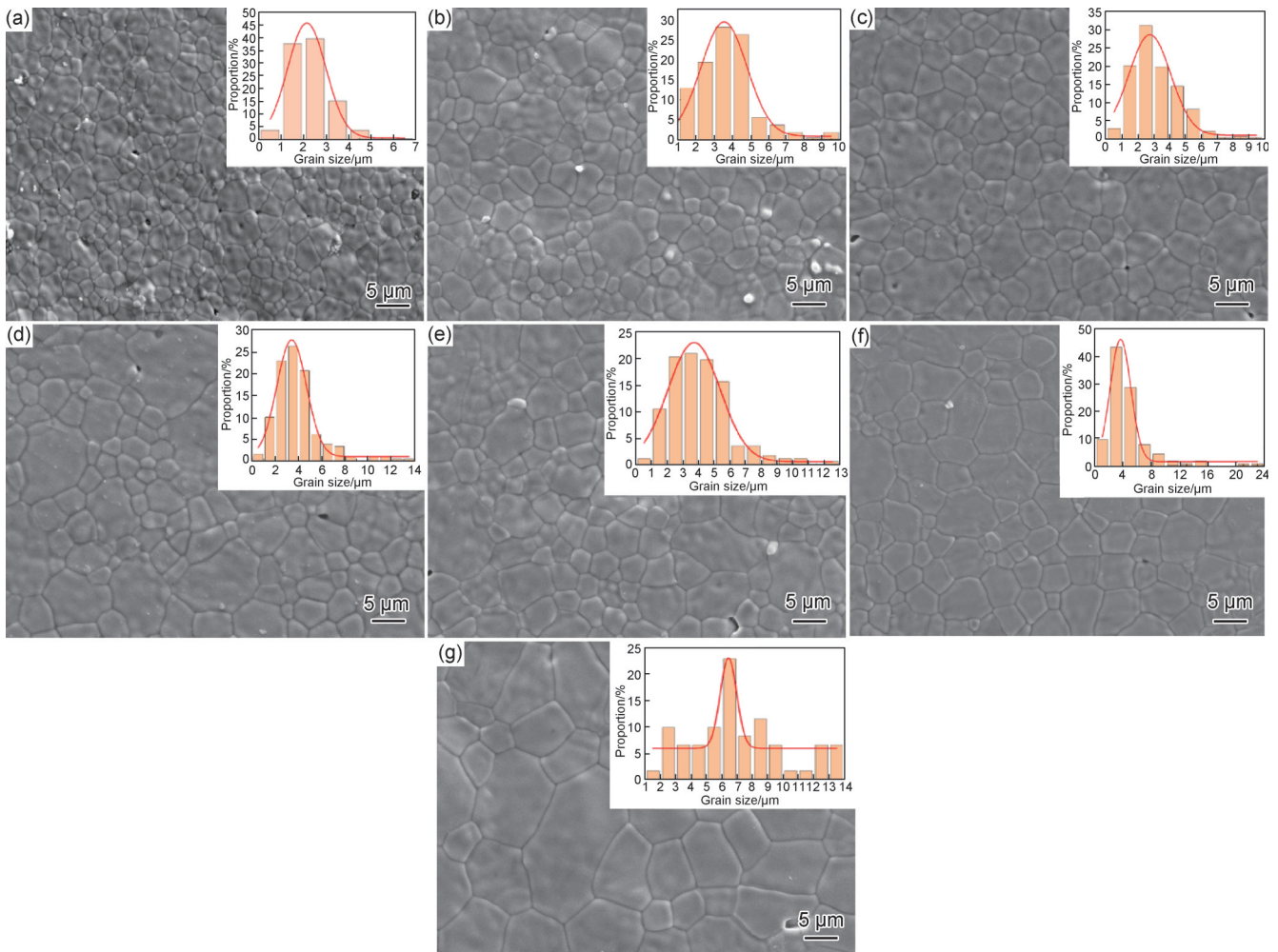


图6 8SSZ在1400 °C热处理后晶粒表面形貌及晶粒尺寸分布
(a)0 h;(b)50 h;(c)100 h;(d)150 h;(e)200 h;(f)300 h;(g)500 h

Fig.6 Grain surface morphologies and size distributions of 8SSZ after heat treatment at 1400 °C
(a)0 h;(b)50 h;(c)100 h;(d)150 h;(e)200 h;(f)300 h;(g)500 h

布。8YSZ在1400 °C晶粒热处理后表面形貌如图7所示,8YSZ晶粒尺寸分布较为均匀,由于其尺寸区间分布较小,故未绘制晶粒尺寸分布图。8YSZ和8SSZ材料经热处理50~500 h后晶粒生长情况对比见图8,由图可见,随着热处理时间增加晶粒平均尺寸不断增加,8SSZ材料晶粒尺寸由原始状态的2.30 μm增长至500 h的7.05 μm,增长率超200%;而8YSZ材料晶粒增长趋势较为平缓,原始状态下晶粒平均尺寸为0.65 μm,热处理500 h后晶粒平均尺寸为1.35 μm,增长了约100%。说明仅引入Sc₂O₃单一稳定剂的条件下,ZrO₂基块体材料的晶粒尺寸长大趋势明显。有研究表明,热障涂层在长期的高温服役下所产生的热应力诱导开裂与热导率的上升和晶粒长大有关^[22]。因此低的晶粒生长速度符合热障涂层体系的长寿命使用需求,而8SSZ的晶粒生长速度较快,需要进一步改进以确保其长期服役的能力。

3 结论

(1)使用固相合成法制备的8SSZ由单一的亚稳态四方相组成,在1400 °C下保持500 h无相变,较8YSZ具有更加优异的高温相稳定性。

(2)8SSZ在室温至1200 °C的热膨胀系数为 $(8.91\sim 10.7)\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,与8YSZ相当,可与目前所使用的热障涂层体系相匹配。

(3)室温至1200 °C范围内,8SSZ材料的热导率明显低于8YSZ;1200 °C时8SSZ热导率为2.59 W/(m·K),相较于8YSZ的3.28 W/(m·K),下降幅度约20%。

(4)经1400 °C/500 h热处理后,8SSZ材料晶粒尺寸由初始态的2.30 μm增长至7.05 μm,增长率超200%,该材料在高温下晶粒快速长大的特性可能限制其在热障涂层体系中的应用。

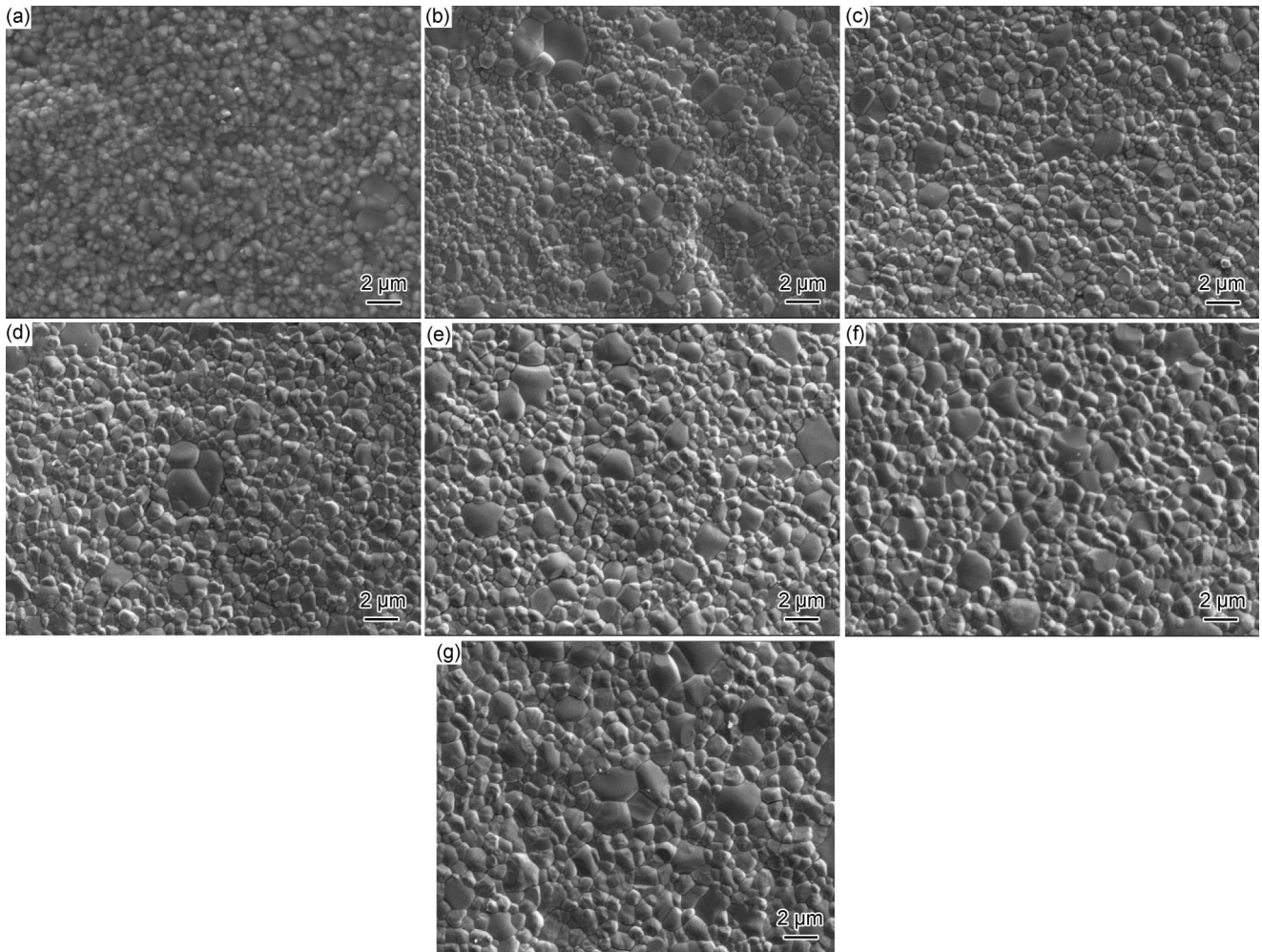


图 7 8YSZ 在 1400 °C 晶粒热处理后表面形貌

(a) 0 h; (b) 50 h; (c) 100 h; (d) 150 h; (e) 200 h; (f) 300 h; (g) 500 h

Fig.7 Grain surface morphologies of 8YSZ after heat treatment at 1400 °C

(a) 0 h; (b) 50 h; (c) 100 h; (d) 150 h; (e) 200 h; (f) 300 h; (g) 500 h

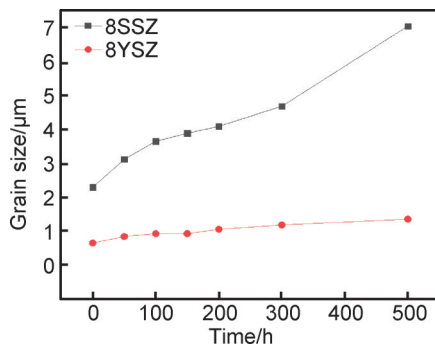


图 8 陶瓷材料在热处理不同时间后的平均晶粒尺寸

Fig.8 Average grain size of ceramic materials after varying heat treatment time

参考文献

[1] ZU J H, GAO Y, LIU D, et al. Preparation and high-temperature performance of Sc₂O₃-Y₂O₃ co-stabilized ZrO₂ thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2024, 50(11): 20460-20472.
 [2] SUN L, GUO H, PENG H, et al. Phase stability and thermal

conductivity of ytterbia and yttria co-doped zirconia[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2013, 23(4): 440-445.
 [3] DONG Y S, YAN C L, LI J, et al. Study on thermal shock resistance of Sc₂O₃ and Y₂O₃ co-stabilized ZrO₂ thermal barrier coatings [J]. Ceramics International, 2023, 49(12): 20034-20040.
 [4] RONCALLO G, BARBARESCHI E, CACCIAMANI G, et al. Effect of cooling rate on phase transformation in 6-8wt% YSZ APS TBCs [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 412: 127071.
 [5] 郭洪波, 官声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(增刊2): 18-26.
 GUO H B, GONG S K, XU H B. Research progress on thermal barrier coating technology for advanced aero engines [J]. Materials China, 2009, 28(Suppl 2): 18-26.
 [6] 魏晓东, 侯国梁, 赵荻, 等. 氧化物掺杂 YSZ 热障涂层的最新研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 92-103.
 WEI X D, HOU G L, ZHAO D, et al. Recent research progress on oxide-doped YSZ thermal barrier coatings [J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 92-103.

- [7] DONG Y S, JIANG Z C, LI J, et al. Effect of Sc_2O_3 doping on YSZ TBCs: morphologies, phase composition, mechanical properties, and high-temperature oxidation resistance [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 475: 130134.
- [8] MUTHUCHAMY A, NAGARAJUN, AGRAWAL D K, et al. Effect of La_2O_3 addition and sintering mode on the mechanical properties and microstructural evolution on an 8YSZ ceramic alloy [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(3): 3668-3674.
- [9] SONG X, DING Y, ZHANG J, et al. Preparation, thermophysical properties, and thermal shock resistance of Yb_2O_3 -doped YSZ coatings [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(7): 11304-11319.
- [10] DONG T S, KONG L C, FU B G, et al. Effect of CeO_2 doping on high temperature oxidation resistance of YSZ TBCs [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(24): 36450-36459.
- [11] FAN W, WANG Z Z, BAI Y, et al. Improved properties of scandia and yttria co-doped zirconia as a potential thermal barrier material for high temperature applications [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(13): 4502-4511.
- [12] JEON H, LEE I, OH Y. Changes in high-temperature thermal properties of modified YSZ with various rare earth doping elements [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(6): 8177-8185.
- [13] FAN W, BAI Y, WANG Z, et al. Effect of point defects on the thermal conductivity of Sc_2O_3 - Y_2O_3 co-stabilized tetragonal ZrO_2 ceramic materials [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(7): 2389-2396.
- [14] FAN W, BAI Y, LIU Y F, et al. Corrosion behavior of Sc_2O_3 - Y_2O_3 co-stabilized ZrO_2 thermal barrier coatings with CMAS attack [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(12): 15763-15767.
- [15] LIU H F, XIONG X, LI X B, et al. Hot corrosion behavior of Sc_2O_3 - Y_2O_3 - ZrO_2 thermal barrier coatings in presence of Na_2SO_4 + V_2O_5 molten salt [J]. *Corrosion Science*, 2014, 85: 87-93.
- [16] 吴煦, 牟仁德, 王开军. 三元共掺杂对 YSZ 热障涂层热物理性能的影响 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39(2): 49-54.
- WU X, MU R D, WANG K J. The influence of trivalent co-doping on the thermophysical properties of YSZ thermal barrier coatings [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(2): 49-54.
- [17] WANG Z Z, BAI Y, FAN W, et al. Effect of Sc substitution on thermophysical properties of tetragonal ScYSZ: molecular dynamics simulation [J]. *Computational Materials Science*, 2020, 174: 109478.
- [18] 冉书明. 热障涂层用新型复合氧化物的制备及其热物理性能 [J]. *机械工程材料*, 2022, 46(7): 27-31.
- RAN S M. Preparation and thermophysical properties of new composite oxides for thermal barrier coating [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2022, 46(7): 27-31.
- [19] 刘电超, 金国, 井勇智, 等. 稀土氧化物掺杂对 YSZ 热障涂层热物理性能影响的研究进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37(24): 108-113.
- LIU D C, JIN G, JING Y Z, et al. Research progress on the effects of rare earth oxides doping on thermophysical properties of YSZ thermal barrier coatings [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(24): 108-113.
- [20] SUN L, GOU H, PENG H, et al. Influence of partial substitution of Sc_2O_3 with Gd_2O_3 on the phase stability and thermal conductivity of Sc_2O_3 -doped ZrO_2 [J]. *Ceramics International*, 2013, 39(3): 3447-3451.
- [21] WANG J, SUN J, JING Q, et al. Phase stability and thermophysical properties of ZrO_2 - CeO_2 - TiO_2 ceramics for thermal barrier coatings [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(7): 2841-2850.
- [22] ZHAO Z, XIANG H, DAIF Z, et al. $(\text{La}_{0.2}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Eu}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$: a novel high-entropy ceramic with low thermal conductivity and sluggish grain growth rate [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(11): 2647-2651.

基金项目: 国家科技重大专项项目 (J2019-Ⅶ-0010-0150)

收稿日期: 2025-03-18; 录用日期: 2025-04-26

通讯作者: 常振东 (1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为热障涂层材料研究与工艺开发, 联系地址: 北京市 81 信箱 5 分箱 (100095), E-mail: changzhendong2007@126.com

(本文责编: 齐书涵)