

GYSZ-NiCr₂O₄复相陶瓷材料的高温稳定性及隔热能力研究

张琦^{1,2}, 马壮^{1,2}, 王森源^{1,2}, 刘玲^{1,2}, 柳彦博^{1,2}, 高祥³, 王冬⁴

(1. 北京理工大学, 北京 100081)

(2. 北京理工大学重庆创新中心, 重庆 401120)

(3. 西安北方庆华机电有限公司, 陕西 西安 710000)

(4. 空装驻北京地区第二军事代表室, 北京 100037)

摘要: 针对目前热障涂层光子导热较高的问题, 设计了 Gd 掺杂 YSZ-NiCr₂O₄ 复相陶瓷材料 (GYSZ-NCO), 并对其烧结参数、热稳定性及热导率进行了分析。结果表明, 在烧结温度为 1600 °C 时可获得四方相 GYSZ 材料, 且 GYSZ-NCO 系列材料在 1500 °C 下具有较高的热稳定性, 保温 300 h 无相变发生, 加入 NiCr₂O₄ 后, GYSZ 材料热导率在高温下无明显回升, 表现出了优良的抗光子导热能力, GYSZ-5%NCO 材料热导率最低, 在 1200 °C 时仅为 2.23 W/(m·K)。

关键词: 热障涂层; 光子导热; 高温稳定性

中图分类号: TQ174.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)04-1432-07

随着航空发动机技术的不断发展, 其内部热端部件温度也不断升高。预计推重比为 20 时发动机的进口温度将达到 2000 K 以上^[1-4]。因此, 热障涂层在先进航空发动机中的隔热作用愈发重要^[5-10]。有文献指出, 热障涂层可使高温合金的使用温度提高 100 °C 以上, 还可使发动机进口温度提高 100~300 °C, 并且发动机功率也将提高 20% 左右^[11-12]。

随着热障涂层服役温度的增加, 其内部光子导热现象越来越受到关注^[13]。光子导热的本质是因固体中分子、原子和电子的振动、转动等运动状态的改变, 辐射出频率较高的电磁波在介质中传播的导热过程。由于光子导热的存在, 陶瓷材料的热导率通常在高温时会出现明显的上升现象。此外, 光子热导率与温度的三次方成正比, 因此, 光子导热在高温下不可忽视, 有文献指出, 在 1250 °C 时, 有 10% 的热流通过光子导热穿过传统热障涂层直接作用于高温合金基体^[14]。

目前广泛使用的热障涂层材料是 YSZ (Y₂O₃ 部分稳定 ZrO₂)^[15-18], 由于 YSZ 在高温下较高的光子热导率, 导致其难以进行有效防护, 降低了涂层在高温下的隔热能力, 难以满足热障涂层在更高温度下的使用要求。针对这一问题, 向热障涂层材料中添加抑制光子传递的第二相材料是一种有效的解决思路, 研究表明^[19], 在高

温下, 材料对光子的吸收和反射均能起到隔热效果, 高光子吸收-高隔热结构的隔热能力明显高于传统低热导结构。

本研究选用了 Gd₂O₃ 掺杂的 YSZ(GYSZ)材料为研究目标, 向其中添加不同比例的高吸收率 NiCr₂O₄ 材料 (NCO), 制备出一系列 GYSZ-NiCr₂O₄ 复相陶瓷材料 (GYSZ-NCO), 并对其制备工艺、高温稳定性及热导率进行分析。

1 实验

1.1 GYSZ 粉体制备

GYSZ 粉体制备方法如下: 选取 500 nm 粒径的纯度 99.9% 的 Gd₂O₃、Y₂O₃ 及 ZrO₂ 粉进行混合并加入适量的无水乙醇制备成混合液, 并以 400 r/min 的转速球磨 6 h, 保证其混合均匀, 混合液经旋蒸后继续在鼓风干燥箱中烘干 24 h, 以保证去除全部的溶剂, 将混合粉体分别以 1500 和 1600 °C 烧结 10 h。冷却后进行破碎、过筛, 获得粒径符合要求的 GYSZ 材料。

1.2 NiCr₂O₄ 粉体制备

NiCr₂O₄ 粉体制备方法如下: 选取粒径为 500 nm 的分析纯 NiO、Cr₂O₃ 粉体按照化学计量比混合, 并以 400 r/min 转速球磨 6 h, 保证其混合均匀, 经旋蒸后继

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金 (52073029)

作者简介: 张琦, 男, 1995 年生, 博士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, E-mail: zhangqi19950725@qq.com

续在鼓风干燥箱内放置 24 h 保证其彻底干燥, 将干燥后的粉体加热至 1200 °C 并保温 4 h, 冷却后进行破碎、过筛, 获得粒径符合要求的 NiCr₂O₄ 粉体。

1.3 GYSZ-NCO 材料制备

本研究制备了 GYSZ-NCO 系列复相陶瓷烧结试样以评价其本征性能。按照 NiCr₂O₄ 体积分数为 0%、5%、10%、15%、20% 配置 GYSZ-NCO 混合粉体, 将 GYSZ-NCO 混合粉体进行球磨、旋蒸, 保证其混合均匀, 采用干压法制备烧结胚体, 干压压力为 20 MPa, 再将坯体进行冷等静压, 压力为 200 MPa, 最后将坯体放置于马弗炉中进行常压烧结, 烧结温度为 1600 °C, 保温时间为 10 h。

1.4 材料性能表征

将 GYSZ-NCO 材料在马弗炉中加热至 1500 °C 并保温 100、200 和 300 h, 考察其高温稳定性, 通过 X 射线衍射仪对其物相进行分析; 采用场发射扫描电子显微镜对样品的微观结构进行观察; 采用激光热导仪对样品的热扩散系数进行测试, 利用纽曼-柯普定律计算材料的热容, 采用式 (1) 和式 (2) 计算出各样品的热导率;

$$\kappa = C_p \lambda \rho \quad (1)$$

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = 1 - \frac{4}{3} \Phi \quad (2)$$

其中, κ 为非致密材料热导率, C_p 为材料热容, λ 材料热扩散系数, ρ 为材料密度, κ_0 为致密材料热导率, Φ 为材料孔隙率。

2 结果与讨论

2.1 相结构与显微组织

图 1a 为 2 种不同烧结温度制得的 GYSZ 的 XRD 图谱。为了便于比较分析, 将 27°~33° 和 72°~76° 图谱进行放大观察, 其结果如图 1b 和图 1c 所示, 可以发现, 1500 °C 下合成的 GYSZ 材料中不仅存在 c-ZrO₂ 相, 还存在 m-ZrO₂, 这表明存在部分未固溶稀土离子的 ZrO₂ 晶格, 这部分晶格在降温后并不能保持高温下的 t 相或 c 相。m-ZrO₂ 的出现, 会导致升降温过程因相变产生体积变化, 从而影响材料的使用。烧结温度为 1600 °C 时, 仅有 t-ZrO₂ 相的特征峰出现, 因此, 本研究后续样品均选择 1600 °C 为烧结温度。

图 2 为 NiCr₂O₄ 材料的 XRD 图谱, 可以看到, 合成的 NiCr₂O₄ 为单相结构, 与标准峰匹配良好, 并未出现

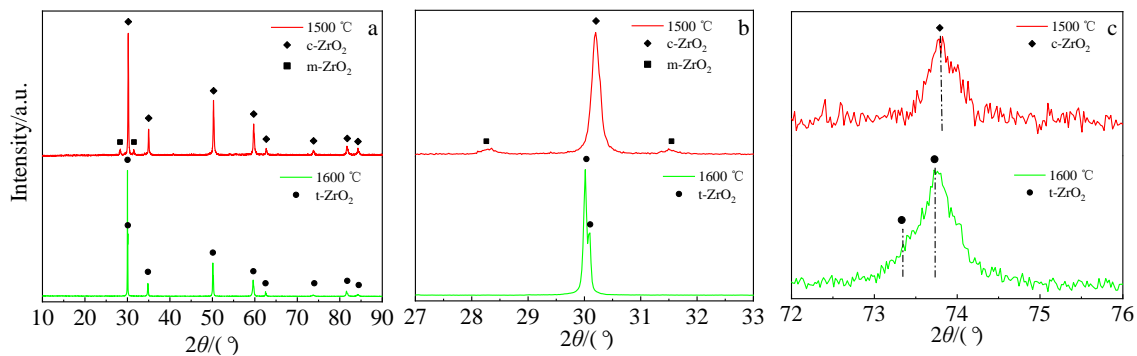


图 1 不同烧结温度制备的 GYSZ 材料的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of GYSZ materials prepared at different synthesis temperatures: (a) 10°~90°; (b) 27°~33°; and (c) 72°~76°

未反应的 NiO 相、Cr₂O₃ 相以及其他反应产物。

图 3a 为制备的系列 GYSZ-NCO 复相陶瓷材料的 XRD 图谱, 为了便于比较分析, 将 27°~33° 和 72°~76° 图谱进行放大观察, 结果分别如图 3b 和图 3c 所示, 从图中可以看出, GYSZ-NCO 复相陶瓷材料为 t-ZrO₂ 相组成, 并未检测到 NiCr₂O₄ 相的特征峰, 这是由于表面的 NiCr₂O₄ 在高温烧结过程中易分解挥发所致, 为了证明 NiCr₂O₄ 相的存在, 对 20%NCO 材料的截面进行了 XRD 检测, 其结果如图 4 所示, 可以看出, 在截面处出现了明显的 NiCr₂O₄ 峰, 证明了高温烧结后材料内部仍存有一定的 NiCr₂O₄ 相。

图 5a~5e 为 GYSZ-NCO 系列材料的微观组织形貌,

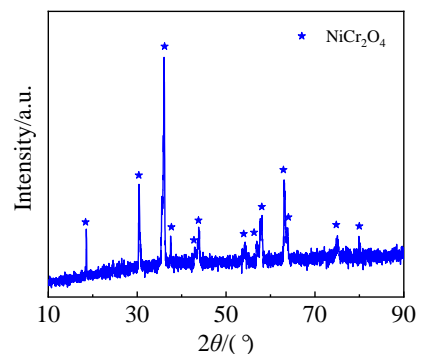


图 2 NiCr₂O₄ 材料的 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of NiCr₂O₄

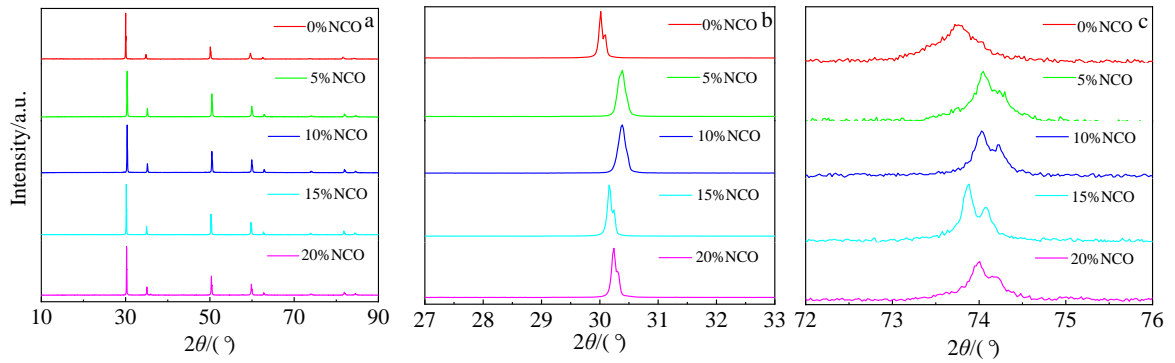


图 3 GYSZ-NCO 系列材料表面处的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns on the surface of GYSZ-NCO series materials: (a) 10°~90°, (b) 27°~33°, and (c) 72°~76°

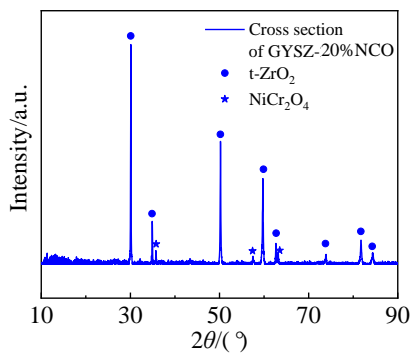


图 4 GYSZ-20%NCO 材料截面处的 XRD 图谱

Fig.4 XRD pattern at the cross section of GYSZ-20%NCO

可以看出，制备的 GYSZ-NCO 材料相对较为致密，但也存在一定数量的孔隙，这是无压烧结的典型形貌。由图 5b~5e 可以看出，在掺杂 NiCr_2O_4 后，可以观测到 NiCr_2O_4 颗粒在 GYSZ 材料中弥散分布，通过 Image Pro Plus 软件对图中第二相颗粒含量进行计算，其结果如表 1 所示。可以看出，各材料中第二相含量均与设计结果相近，并略低于设计含量，这主要是由于 NCO 材料在高温过程中部分挥发导致的。此外，可以看出 NCO 颗粒在 1~5 μm 范围内，细小的第二相颗粒可以提供大量的晶界，有利于热导率的降低。

2.2 GYSZ-NCO 材料的高温相稳定性

GYSZ-NCO 材料进行高温考核试验后的 XRD 图谱

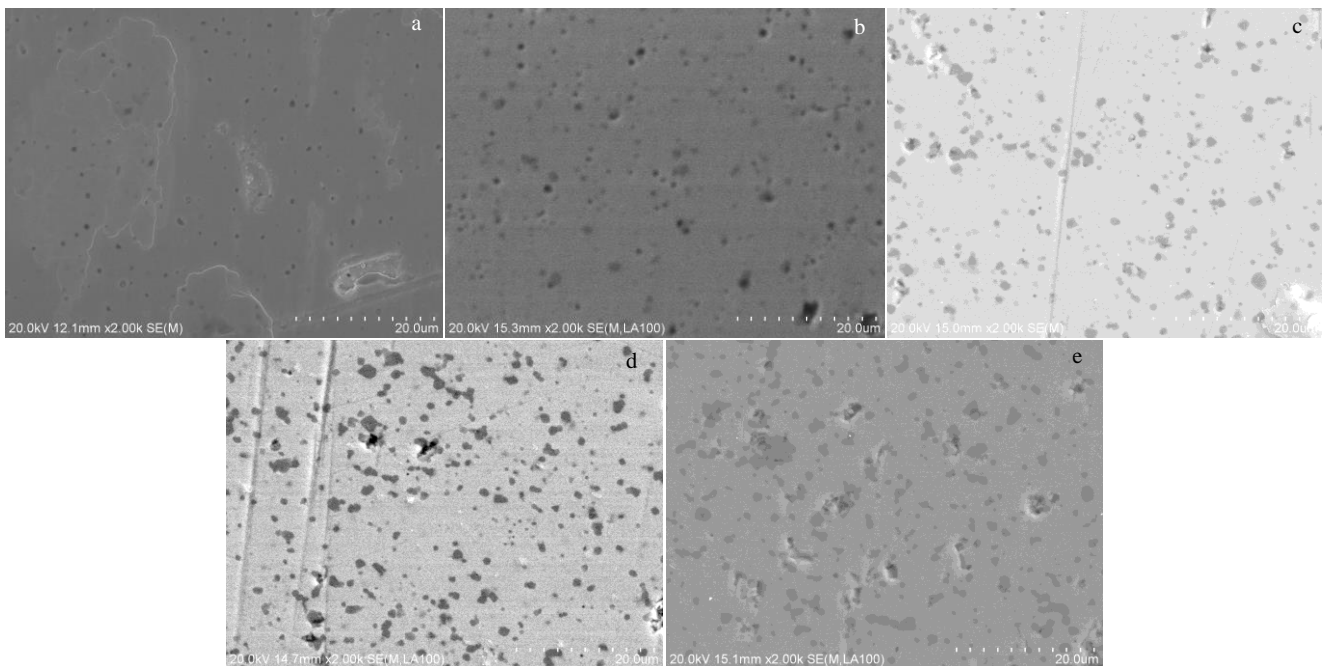


图 5 GYSZ-NCO 系列材料的 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphologies of GYSZ-NCO series materials: (a) 0%NCO, (b) 5%NCO, (c) 10%NCO, (d) 15%NCO, and (e) 20%NCO

表 1 GYSZ-NCO 系列材料中第二相含量

Table 1 Second phase content in GYSZ-NCO series material (%)

Material	5%NCO	10%NCO	15%NCO	20%NCO
Content	2.97	9.45	13.46	17.02

如图 6 所示。可以看到, 经过 1500 °C 考核 100、200 和 300 h 后, 材料的物相仍保持合成时的状态, 仍为 t-ZrO₂ 相, 表明 GYSZ-NCO 材料具有优异的高温稳定性, 可以适用于更高的工作温度。此外, 由图 6c、6f 和 6i 可知, 其不同晶面间的峰强比发生的变化, 证明在长时间的高温

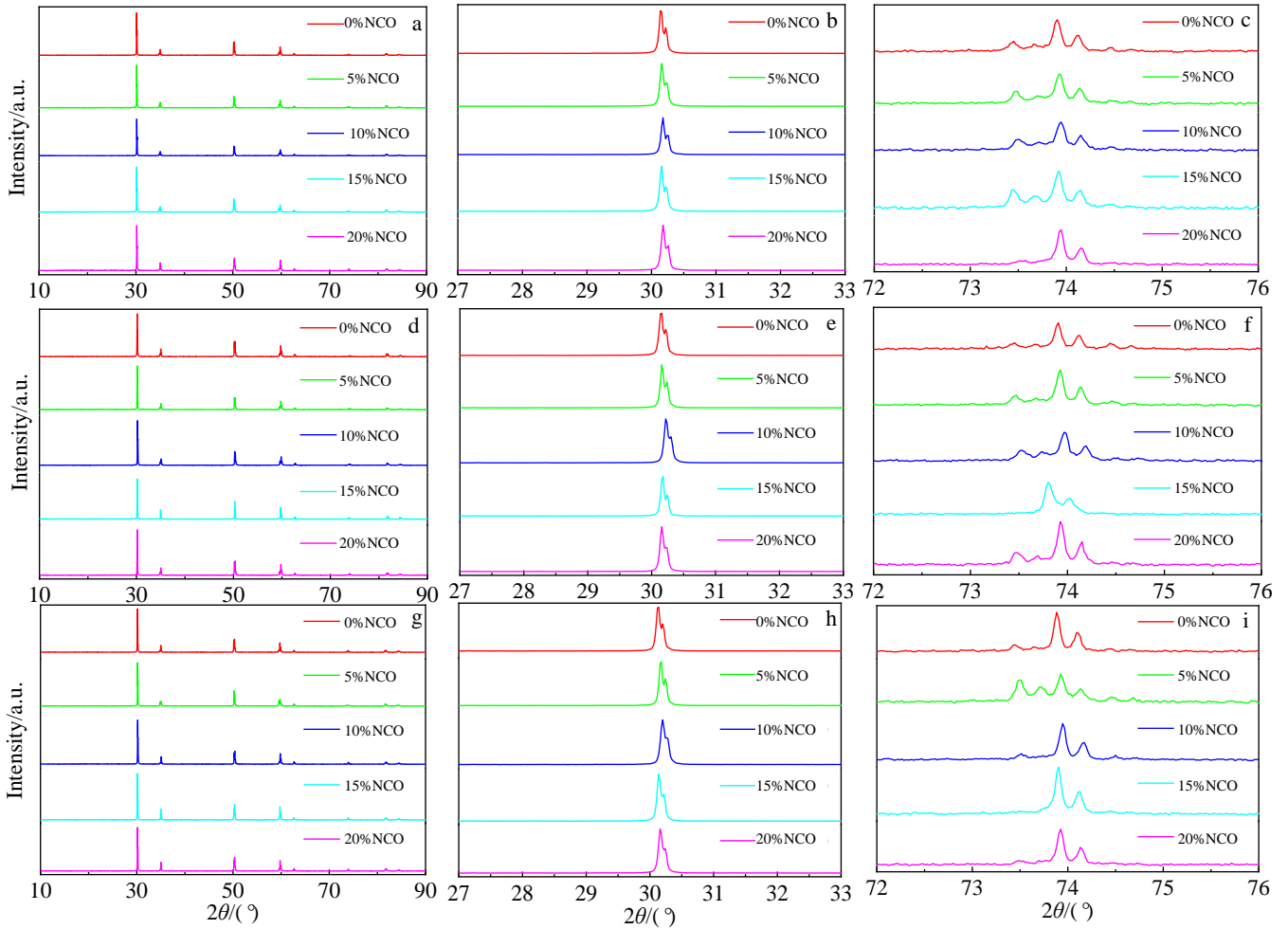


图 6 GYSZ-NCO 系列材料经不同时间热考核后的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of GYSZ-NCO series materials after thermal examination for 100 h (a-c), 200 h (d-f), and 300 h (g-i)

考核过程中, GYSZ-NCO 材料出现了定向生长现象。

GYSZ 的高温稳定性主要得益于其稀土氧化物含量较高, 由于稀土阳离子化合价与 Zr⁴⁺ 不匹配, 为了保持电中性, 晶体中出现大量氧空位, 引起了晶格畸变, 并促进了 t 相的形成并抑制其向 m 相的转变^[20]。此外, Gd³⁺ 的离子半径大于 Y³⁺, 大离子半径的稀土元素使 ZrO₂ 的晶格畸变更严重, 抑制 t→m 相变的发生^[21]。有文献指出, Gd₂O₃-ZrO₂ 具有较低的 c 相和 c+t 相的相界浓度^[22], 这也是 GYSZ 具有优异高温稳定性的原因之一。此外, 对于加入 NiCr₂O₄ 第二相的样品, NiCr₂O₄ 颗粒在 GYSZ 晶界处产生钉扎效果, 抑制晶粒的体积增大^[23],

而 ZrO₂ 的 t→m 相变存在临界尺寸效应, 小晶粒尺寸对其高温相稳定性有利^[24]。因此, 也对 GYSZ 的 t→m 相变起到抑制作用。

经过 300 h 高温稳定性考核后的样品微观组织形貌如图 7a~7e 所示, GYSZ-NCO 材料经过长时间保温后出现了明显的晶粒长大现象, 晶粒间的孔隙得到填充, 减少了晶界处的孔隙。随着 NiCr₂O₄ 含量的增加, 其考核后的孔隙数也有所增加, 这是由于内部 NiCr₂O₄ 在高温下部分挥发导致, 图 7f 为高温稳定性考核后 GYSZ-NCO 材料中 NiCr₂O₄ 颗粒形貌, 由图可知, NiCr₂O₄ 颗粒与考核前形貌基本相同, 未出现明显的晶粒长大现象。

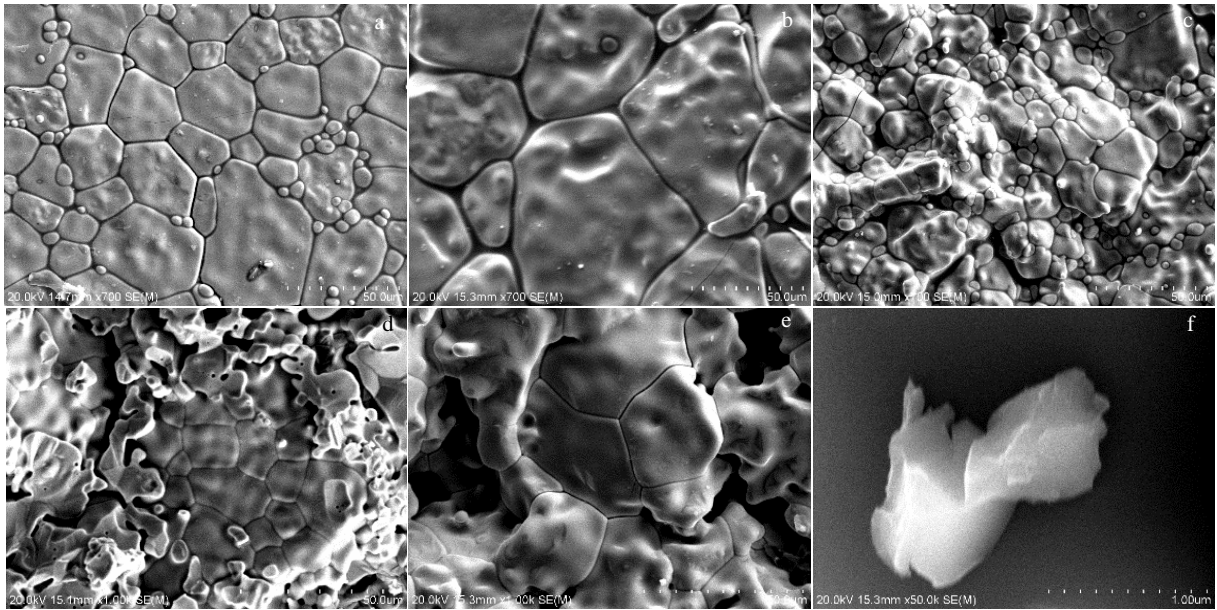


图 7 GYSZ-NCO 系列材料热考核后的 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphologies of GYSZ-NCO series materials after thermal examination: (a) 0%NCO, (b) 5%NCO, (c) 10%NCO, (d) 15%NCO, and (e) 20%NCO; (f) NiCr₂O₄ grains

2.3 GYSZ-NCO 材料的热导率

组成 GYSZ-NCO 复相陶瓷材料的氧化物的热容由式(3)计算得出:

$$C_p = A_1 + A_2 \times 10^{-3} T + A_3 \times 10^5 T^{-2} + A_4 \times 10^{-6} T^2 + A_5 \times 10^8 T^{-3} \quad (3)$$

式中, C_p 为摩尔定压热容, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 为常数, 可在文献[25]中查询, T 为温度。由式 (3) 计算出单相材料的热容后, 根据纽曼-柯普公式计算得到 GYSZ-NCO 复相陶瓷材料的热容 (C_p), 如图 8 所示:

GYSZ-NCO 材料的热容随着温度的升高而升高, 且在高温时升高速率降低, 符合无机非金属材料的热容变化规律。且随着 NiCr₂O₄ 掺杂量的增加, 其热容也随之增加, 这是由于 NiCr₂O₄ 本身的热容较高, 导致 GYSZ-NCO 复相陶瓷材料的热容随着 NiCr₂O₄ 加入量而增加。

图 9 为经孔隙率公式修正后的 GYSZ-NCO 系列材

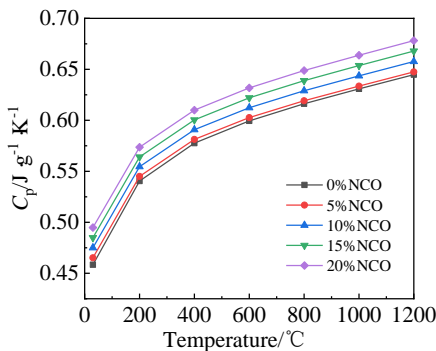


图 8 GYSZ-NCO 系列材料的热容曲线

Fig.8 Heat capacity curves of GYSZ-NCO series materials

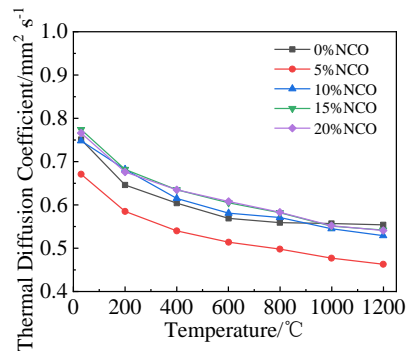


图 9 GYSZ-NCO 系列材料的热扩散系数曲线

Fig.9 Thermal diffusivity curves of GYSZ-NCO series materials

料的热扩散系数, 热扩散系数是表示相同温度梯度下, 热量传递速率的参数。由图可知, 5%NCO 含量附近的 GYSZ-NCO 复相陶瓷材料具有较低的热扩散系数, 当 NiCr₂O₄ 量进一步增加时, 其热扩散系数与 GYSZ 相当, 甚至略有上升。此外, 在 1200 °C 时, 掺杂 NiCr₂O₄ 材料的热扩散系数均小于 GYSZ。这是由于在高温下, 陶瓷材料的光子导热不可忽视, NiCr₂O₄ 由于其具有较高的吸收率及发射率, 可以有效降低材料的平均光子自由程, 进而起到降低光子导热的效果, 因此, 其在高温下的热扩散系数小于未掺杂的 GYSZ 材料。

图 10 为计算得出的 GYSZ-NCO 系列致密复相陶瓷材料的热导率。与热扩散系数相比, 热导率可以更综合

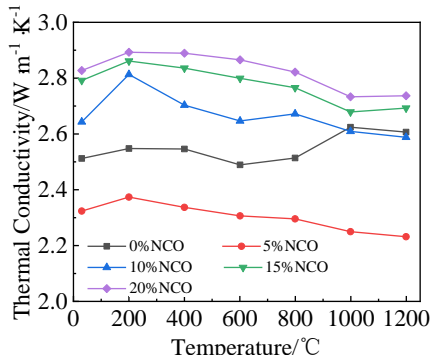


图10 GYSZ-NCO 系列材料的热导率曲线

Fig.10 Thermal conductivity curves of GYSZ-NCO series materials

的考量材料的热传导性能。由图可知,与热扩散系数相似,GYSZ-5%NCO 复相陶瓷材料的热导率较低,在1200 °C时仅为2.23 W/(m·K),明显低于未掺杂 GYSZ 材料(2.6 W/(m·K)),随着掺杂量的增加,复相陶瓷材料的热导率反而升高,且高于 GYSZ 材料,这种现象是由2个原因共同作用产生的:第二相的加入会引入大量异质界面,异质界面增强了载流子的散射作用,对热传递起到一定的抑制作用,且随着第二相含量的增加,异质界面数增加,对声子散射作用加剧,对热传递的抑制作用加强^[26-28];此外,NiCr₂O₄的本征热导率为3.3~3.5 W/(m·K),远大于 GYSZ 材料,对于第二相均匀分布的复相材料而言,其热导率遵循式(4)^[29-30]:

$$\lambda = \lambda_c \frac{1 + 2v_d \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_d}\right) / \left(\frac{2\lambda_c}{\lambda_d} + 1\right)}{1 - v_d \left(1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_d}\right) / \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_d} + 1\right)} \quad (4)$$

式中, λ 为复相材料热导率, λ_c 为主相材料热导率, λ_d 为第二相材料热导率, v_d 是第二相的体积分数。因此,当NiCr₂O₄含量增加时,复相陶瓷材料的热导率也会受其本征热导率影响呈现增加趋势。当NiCr₂O₄添加量为5%左右时,其对声子的散射作用起到主要作用,其热导率最低;随着添加量的继续增大,NiCr₂O₄的本征热导率对复相陶瓷材料的影响起主要作用,导致其热导率升高。

此外,从图中可知,未掺杂的 GYSZ 热导率在800 °C出现明显的升高,表明其对抗光子导热能力较弱。而 GYSZ-NCO 系列材料在高温下并未出现热导率升高现象,这表明其对光子导热具有较强的阻隔作用,即其抗光子导热作用较强,也就是其对热辐射有较强的阻隔能力。

3 结论

1) 通过固相反应法合成了系列 GYSZ-NCO 系列复

相陶瓷材料,所得材料均为 t-ZrO₂ 相,且在1500 °C下保温300 h无相变,具有优良的高温稳定性。

2) 当NiCr₂O₄体积分数为5%时,且由于其对声子的散射作用,其热导率最低,为2.23 W/(m·K),由于NiCr₂O₄本身的高热导率,GYSZ-NCO 材料的热导率随着NiCr₂O₄体积分数的增加而增加。

3) 由于 GYSZ-NCO 系列复相陶瓷材料中高吸收率NiCr₂O₄的存在,可以抑制由于光子导热而引起 GYSZ 材料的热导率回升现象,表现出了优异的高温隔热性能。

参考文献 References

- [1] Lin Yuzhen(林宇震), Xu Quanhong(许全宏), Liu Gaoen(刘高恩). *Gas Turbine Combustor(燃气轮机燃烧室)*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008
- [2] Yin Hong(尹洪), Wang Wenping(王文萍), Ren Jing(任静) *et al. Journal of Engineering Thermophysics(工程热物理学报)*[J], 2012, 33(2): 4
- [3] Wei Haiyang(卫海洋), Xu Min(徐敏), Liu Xiaoxi(刘晓曦). *Aerospace Technology(空天技术)*[J], 2012(2): 4
- [4] Tang Hua(汤华). *Tactical Missile Technology(战术导弹技术)*[J], 2016(3): 77
- [5] Cao Xueqiang, Robert Vassen, Werner Fischer *et al. Advanced Materials*[J], 2010, 15(17): 1438
- [6] Meier S M, Gupta D K, Sheffler K D. *JOM*[J], 1991, 43(3): 50
- [7] Cao Xuan(曹玄), Ma Zhuang(马壮), Liu Yanbo(柳彦博) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(6): 1134
- [8] Liu Ling, Wang Fuchi, Ma Zhuang *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(10): 2785
- [9] Wang Jing(王璟), Bai Shuxin(白书欣), Li Shun(李顺) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(5): 824
- [10] Ren Xiaoxue(任晓雪), Jiang Peng(江鹏), Fan Xueling(范学领) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(12): 3703
- [11] Maricocchi A, Bartz A, Wortman D. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1997, 6(2): 193
- [12] Padture N P, Gell M, Jordan E H. *Science*[J], 2002, 296(5566): 280
- [13] Nicholls J R, Lawson K J, Johnstone A *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2002, 151-152: 383
- [14] Gong Wenbiao(宫文彪). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Changchun: Jilin University, 2007
- [15] Thakare J G, Pandey C, Mahapatra M M *et al. Metals and Materials International*[J], 2020, 27(7): 1947

- [16] Hu Zhen(胡 祯), Li Zhengxian(李争显), Liu Lintao(刘林涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(11): 2851
- [17] Wang Ziyuan(王子媛), Zhao Meng(赵 蒙), Yang Jun(杨 军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(2): 688
- [18] Nicholls J R. *MRS Bulletin*[J], 2003, 28(9): 659
- [19] Ma Zhuang, Zhang Qi, Liu Ling *et al. Journal of Advanced Ceramics*[J], 2020, 9(4): 454
- [20] Chen Dong(陈 东). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016
- [21] Lin Yuhang(蔺宇航). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanning: Guangxi University, 2018
- [22] Sun Leilei, Guo Hongbo, Peng Hui *et al. Ceramics International*[J], 2013, 39(3): 3447
- [23] Hu Gengxiang(胡赓祥), Cai Xun(蔡 珣), Rong Yonghua(戎咏华). *Fundamentals of Materials Science*(材料科学基础)[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2010
- [24] Shi Qingyun(石清云). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Changsha: Hunan University, 2019
- [25] Ye Dalun(叶大伦), Hu Jianhua(胡建华). *Practical Handbook of the Thermodynamic Data for Inorganic Substances*(实用无机物热力学数据手册)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002
- [26] Wu Huazhong(吴华忠), Li Hua(李 华), Xu Qingyan(徐清艳). *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐通报)[J], 2009, 28(3): 521
- [27] Chen Dong, Wang Quansheng, Liu Yanbo *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2021, 50(6): 1890
- [28] Wang Qi(王 琦), Wang Han(王 涵), Li Sen(李 森) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(2): 629
- [29] Zhu Dezhi(朱德智), Qi Longfei(戚龙飞), Ding Xia(丁 霞). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(2): 614
- [30] The South China University of Technology(华南工学院). *Physical Properties of Ceramic Materials*(陶瓷材料物理性能)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1980

Study on High Temperature Stability and Thermal Insulation Ability of GYSZ-NiCr₂O₄ Composites

Zhang Qi^{1,2}, Ma Zhuang^{1,2}, Wang Senyuan^{1,2}, Liu Ling^{1,2}, Liu Yanbo^{1,2}, Gao Xiang³, Wang Dong⁴

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120, China)

(3. Xi'an North Qinghua Electromechanical Co., Ltd, Xi'an 710000, China)

(4. The Second Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100037, China)

Abstract: In view of the high photonic thermal conductivity of thermal barrier coatings, a Gd-doped YSZ-NiCr₂O₄ composite (GYSZ-NCO) was designed, and its sintering parameters, thermal stability and thermal conductivity were analyzed. The results show that tetragonal GYSZ can be obtained when the sintering temperature is 1600 °C. The GYSZ-NCO series materials have high thermal stability at 1500 °C, and no phase transition occurs after holding for 300 h. After adding NiCr₂O₄, the thermal conductivity of GYSZ does not rebound significantly at high temperature, showing excellent thermal conductivity against photons. GYSZ-5%NCO material has the lowest thermal conductivity, which is only 2.23 W/(m K) at 1200 °C.

Key words: thermal barrier coatings; photonic thermal conductivity; high temperature stability

Corresponding author: Liu Ling, Ph. D., Associate Professor, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, E-mail: richard@bit.edu.cn