doi:10.3969/j.issn.1674-7127.2024.03.004

热障涂层材料(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 高熵陶瓷的力-热学性质研究

刘若愚[1],薛桂宇[2],陈琳[2],李克[1],张陆洋[2],王建坤[2],
吕亮[1],王乐[1],殷倩楠[1],冯晶[2]

(1. 中国航发南方工业有限公司,湖南 株洲 412000;
2. 昆明理工大学 材料科学与工程学院,昆明 650093)

摘要: 稀土钽酸盐 RE_3TaO_7 和铌酸盐 RE_3NbO_7(RE 代表稀土元素)具有高热膨胀系数、低热导率和优异的高温稳定性等特点,被广泛作为热障涂层材料进行研究。研究了(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 高熵陶瓷的硬度、断裂韧性、热膨胀系数和热导率等关键力-热学性质,通过高熵效应实现对其性能的优化。结果显示,相较于单稀土 RE_3TaO_7 和 RE_3NbO_7 陶瓷,(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 高熵陶瓷的硬度、弹性模量和热膨胀系数进一步提高,同时热导率进一步降低,并且其热导率随温度的变化出现类玻璃态特征。相较于传统的氧化钇稳定氧化锆陶瓷,(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 高熵陶瓷具有高工作温度(达到1 500 ℃)、低热导率(1.78 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,900 ℃)和高热膨胀系数($10.87 \times 10^{-6}$ K^{-1},1 500 ℃)的优势。高熵陶瓷的设计和制备可以进一步优化 RE_3TaO_7 和 RE_3NbO_7 材料的力热学性质。

关键词: 热障涂层;稀土钽酸盐;高熵陶瓷;热导率;力学性质

中图分类号: TG174.442　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1674-7127(2024)03-0028-08

Mechanical and Thermal Properties of High-entropy Ceramics (SmEuGd) ($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$) O_7 as Thermal Barrier Coatings

LIU Ruoyu[1], XUE Guiyu[2], CHEN Lin[2], LI Ke[1], ZHANG Luyang[2], WANG Jiankun[2], LÜ Liang[1], WANG Le[1], YIN Qingnan[1], FENG Jing[2]

(1. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China;
2. Faculty of Materials Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Rare-earth tantalats RE_3TaO_7 and niobates RE_3NbO_7 (RE = rare-earth) have characteristics of high thermal expansion coefficients (TECs), low thermal conductivity, and excellent high-temperature stability, subsequently, they are widely studied as thermal barrier coatings. The key force-thermal properties such as hardness, fracture toughness, thermal expansion coefficient and thermal conductivity of (SmEuGd) (Ta0.5Nb0.5) O_7 ceramics were studied, and their properties were optimized by high entropy effect. The results show that compared with single-rare-earth RE_3TaO_7 and RE_3NbO_7 ceramics, (SmEuGd) ($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$) O_7 exhibits higher TECs, hardness and modulus, when its thermal conductivity is further reduced, and displays amorphous

收稿日期: 2024-06-17

第一作者: 刘若愚(1993-),男,博士,工程师。E-mail:931801509@qq.com
薛桂宇(2000-),男,硕士研究生。E-mail:746722634@qq.com
通信作者: 陈琳(1991-),男,博士,特聘教授。E-mail:1106846650@qq.com

behavior. Compared with traditional ytrria-stablized zirconia (YSZ), (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 has higher working temperatures (1 500 ℃), lower thermal conductivity (1.78 W·m^{-1}·K^{-1}, 900 ℃), and higher TECs (10.87×10^{-6} K^{-1}, 1 500 ℃). It is proved that the thermal and mechanical properties of RE_3TaO_7 and RE_3NbO_7 can be further optimized via high-entropy engineering.
Key words: thermal barrier coatings; rare-earth tantalates; high-entropy ceramics; thermal conductivity; mechanical properties

0　引言

陶瓷热障涂层(Thermal barrier coatings,TBCs)主要用在航空发动机和燃气轮机燃烧室的高温合金零件表面,提供隔热降温的作用[1-5]。因此,热障涂层材料应具备低热导率和耐高温的特性。为了提高热障涂层与合金基底的结合强度,使用 *M*CrAlY (*M*=Ni,Co)作为中间黏结层,通过大气等离子喷涂的方式依次在合金零件表面制备黏结层和陶瓷层[3-4,6-7]。此外,陶瓷热障涂层还应具备高热膨胀系数、高硬度、高断裂韧性和优异的高温稳定性,从而保证其能在高温(≥1 000 ℃)服役环境下长期稳定服役。传统的热障涂层材料为氧化钇稳定氧化锆(Yttria-stabilized zirconia,YSZ),其具备高硬度(≥10 GPa)、高韧性(3.5~4.5 MPa·$m^{1/2}$)、高热膨胀系数(10×10^{-6} K^{-1},1 200 ℃)和较低的热导率(2.5 W·m^{-1}·K^{-1},1 000 ℃)等优势[2,8]。但是 YSZ 在温度超过 1 200 ℃后将发生相变,同时伴随着 3%~5%的体积变化导致涂层失效,因此 YSZ 的工作温度通常低于 1 200 ℃[9-10]。为了满足先进航空发动机的热防护需求,必须开发工作温度更高、隔热降温梯度更大及服役寿命更长的新型陶瓷热障涂层材料。

稀土钽酸盐($RETaO_4$、RE_3TaO_7 和 $RETa_3O_9$,RE 代表稀土元素)陶瓷普遍具有高熔点、优异的高温稳定性和低热导率的特点,近年来它们被广泛作为热障涂层材料进行研究[1,11-14]。其中,RE_3TaO_7 陶瓷具有最低的热导率(1.0~2.1 W·m^{-1}·K^{-1},25~900 ℃),因此作为热障涂层使用时能够提供优异的隔热降温梯度[11]。随着稀土离子半径的减小,RE_3TaO_7 发生由正交相到立方相的结构转变,其中正交相的 RE_3TaO_7(RE=La,Pr,Nd,Eu,Gd,Dy)陶瓷断裂韧性最高值可达 2.4 MPa·$m^{1/2}$,明显高于立方相的 RE_3TaO_7(RE=Y,Er,Yb)陶瓷(~1.0 MPa·$m^{1/2}$),因此更适合作为热障涂层[11,15]。科研人员对正交相 RE_3TaO_7 的力-热学性质进行了系统研究,结果显示晶体结构类型和化学键结合强度是影响其力-热学性质的主要因素,由此可知可以通过调控化学键结合强度实现对性质的优化。

近年来,高熵陶瓷设计和制备成为优化材料性能的最热门方法之一[16-20]。为了进一步优化 RE_3TaO_7 的性质,设计并制备了(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 高熵陶瓷(high-entropy ceramics,HECs),对其硬度、断裂韧性、热膨胀系数和热导率等关键性能进行了研究。初步探究通过高熵陶瓷的设计和制备优化正交相 RE_3TaO_7 性能的可能性。

1　试验过程与方法

1.1　材料制备

试验使用的 RE_2O_3(RE=Sm,Eu,Gd)、Ta_2O_5 和 Nb_2O_5 粉末来自山东亿化商城,所有粉末粒径小于 20 μm(图 1),纯度大于 99.99%。上述粉体根据(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 化学式称量,通过球磨机将其混合均匀,球磨介质为无水乙醇,球磨子为氧化锆球,球磨时间 12 h,球磨转速为 300 r/min。球磨结束后将混合粉末取出,置于烘箱在 100 ℃保温 12 h 获得干燥粉末。称取大约 1.2 g 的粉体通过压片机压成直径 12 mm、厚度 1.5 mm 的圆片,最终置于高温炉在 1 700 ℃保温 10 h 制备得到致密的(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 块体陶瓷。

1.2　材料结构表征

使用 X 射线衍射仪(X-Ray Diffraction,XRD,MiniFlex 600,Rigaku,Japan)进行 XRD 测试,通过 XRD 精修获得晶格参数,并计算理论密度(ρ_0)。通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy,SEM,EVO 180,Zeiss,Germany)对试样的形貌进行观察。使用能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer,EDS,Quantax 200,Bruker,Germany)对元素分布进行测试。

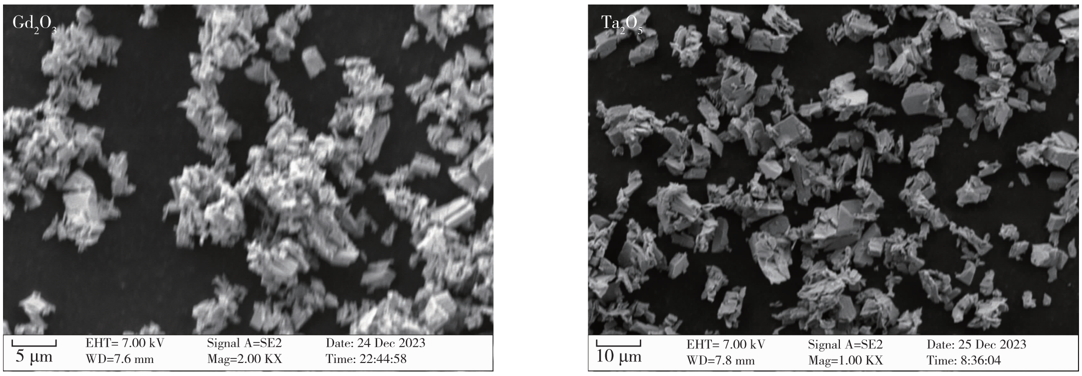

图1　Gd_2O_3 和 Ta_2O_5 的粉末形貌

Fig. 1　Microstructures of Gd_2O_3 and Ta_2O_5 powders

1.3　材料性能测试

使用显微维氏硬度计(HMV-G-FA，Shimadzu，Japan)测试硬度(H)和断裂韧性(K_{IC})，根据压痕的对角线长度(d)、裂纹长度(L)、载荷(P)和弹性模量(E)计算得到硬度和断裂韧性[21]，如公式(1)和公式(2)所示：

$$H=0.464\frac{P}{d^2} \tag{1}$$

$$K_{IC}=0.018\sqrt{\frac{E}{H}}\cdot\frac{P}{L^{1.5}} \tag{2}$$

使用纳米压痕(iMicro，iNano，USA)单点测试的连续刚度模型测试得到弹性模量，所用载荷为100 mN，保荷时间为10 s。

使用热膨胀仪(DIL 402，Netzsch，Germany)对热膨胀系数(Thermal expansion coefficients，TECs)进行测试，将试样加工成2 mm×1 mm×10 mm的长方体，并将试样上下两端打磨平整后进行测试。热膨胀系数可由高温(T_2)下的热膨胀系数($TECs_{T2}$)由高温下的长度(d_{T2})与室温(T_1=30 ℃)时的长度差比上温度差(T_2-T_1)计算得到，如公式(3)所示：

$$TECs_{T2}=\frac{d_{T2}-d_{T1}}{T_2-T_1} \tag{3}$$

热导率(k)与其密度(ρ)、气孔率(φ)、热容(Heat Capacity，C_P)和热扩散系数(α)有关，其中热容通过Neumann-Kopp定律计算得到，热扩散系数通过激光热导仪(LFA 457，Netzsch，Germany)进行测试。根据公式(4)计算得到材料的热导率：

$$k=\frac{\alpha\times\rho\times C_P}{1-4\varphi/3} \tag{4}$$

2　试验结果

2.1　晶体结构

图2显示烧烧结得到的(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7试样XRD衍射峰与Gd_3TaO_7的PDF卡片38-1409的标准峰一一对应，证明所制备的(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7保持了正交相的晶体结构，其空间群为C2221。另外，通过XRD衍射峰位置获得(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的晶体结构参数，具体结果如表1所示。(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的晶胞参数为：a=10.588 Å、b=7.504 Å、c=7.541 Å，晶胞体积为599.199 $Å^3$(1 Å =0.1 nm)。相较于La_3TaO_7，(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷具有更小的晶胞体积。这是由于Ta和Nb具有相同的离子半径，因此高熵RE_3TaO_7的晶胞体积主要是由RE^{3+}离子半径决定的[11,15]。

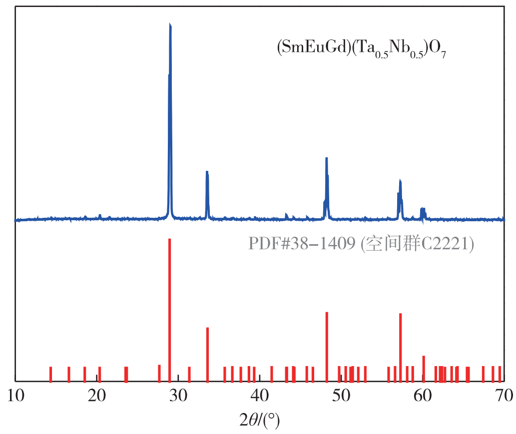

图2　高熵陶瓷(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的XRD图谱

Fig. 2　XRD patterns of high-entropy ceramics (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7

2.2　显微组织

图3显示(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的显微组织及元素分布情况，其晶粒尺寸均小于10 μm，大部分晶粒的尺寸小于5 μm，未发现明显的裂纹和气

孔,说明制备的材料致密性良好。利用阿基米德排水法测试得出的材料致密度为 97.2%,扫描电镜下的测试结果与该致密度一致。通过 EDS 面扫描测试元素的分布情况,可以看到不同的稀土元素、钽和铌元素的分布是相对均匀的,没有发现明显的偏析情况。这与 XRD 结果一致,即稀土元素在晶格中占据同一个位置,钽和铌元素占据同一个位置,形成的是单相结构的材料。较高的致密度和细小的晶粒有利于提高材料的硬度、弹性模量和断裂韧性。

表 1　(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷(HECs)的晶体结构参数与 RE_3TaO_7(RE=La,Eu,Gd,Dy)比较

Table 1　Comparison of lattice parameters between (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7(HECs) and other RE_3TaO_7(RE=Eu,Gd,Dy) ceramics

试样	RE^{3+}/nm	a/Å	b/Å	c/Å	V/Å^3	ρ_0/(g·cm^{-3})
HECs	0.106	10.588	7.504	7.541	599.199	7.857
La_3TaO_7	0.116	11.179	7.628	7.760	661.722	7.125
Eu_3TaO_7	0.107	10.674	7.535	7.590	610.453	8.151
Gd_3TaO_7	0.105	10.625	7.514	7.546	602.685	8.432
Dy_3TaO_7	0.103	10.529	7.444	7.487	586.815	8.836

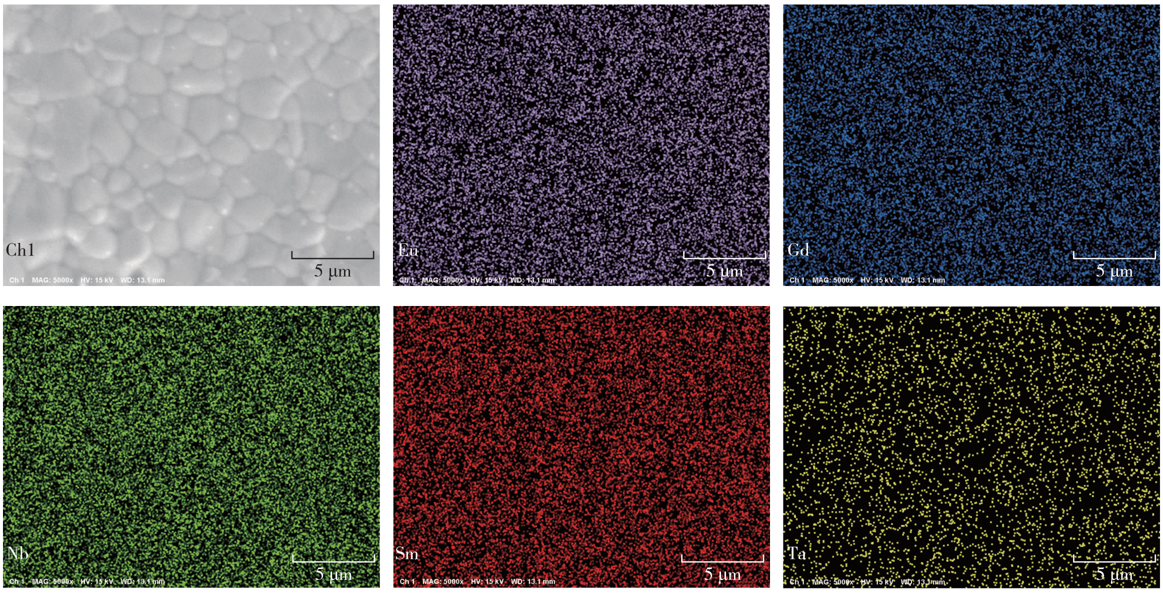

图 3　高熵陶瓷(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的显微结构与元素分布

Fig. 3　Microstructures and elemental distributions of high-entropy ceramics (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7

2.3　热学性质

图 4 显示(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的热容随着温度的升高不断增大,这与单稀土 RE_3TaO_7 的情况一致,在 25～900 ℃热容为 0.337～0.439 J·g^{-1}·K^{-1}。(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的热扩散系数随着温度的升高首先不断下降,在 800 ℃时热扩散系数达到最小值(0.484 mm^2/s),在 800 ℃以上时热扩散系数略微增大,这说明在高温下热导率可能出现增大的情况。

图 5 显示 25～900 ℃时(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷具有类玻璃热导率。随着温度的升高,(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的热导率没有发生明显变化,维持在 1.65～1.82 W·m^{-1}·K^{-1}。在 25 ℃时,(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的热导率仅仅是 8YSZ 的 59.4%;在 900 ℃时,(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的热导率相较于 8YSZ 下降 25.8%,这说明其作为热障涂层使用时将具有更优异的隔热降温梯度[1,11-12,14,22-23]。

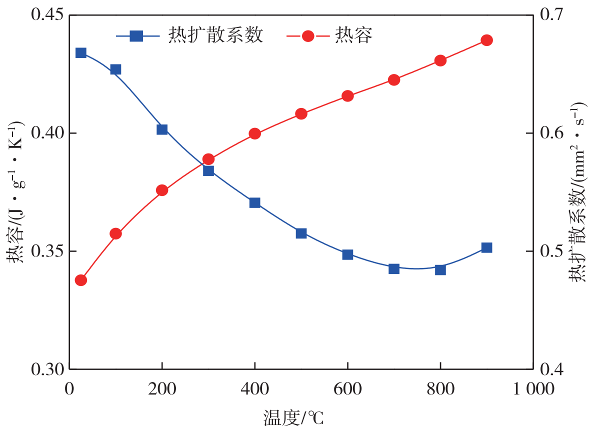

图 4　高熵陶瓷 $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 的热容与热扩散系数

Fig. 4　Heat capacity and thermal diffusivity of high-entropy ceramics $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$

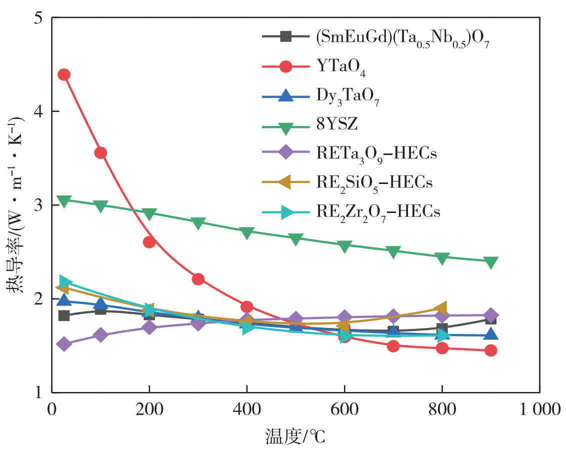

图 5　高熵陶瓷 $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 的热导率与其他材料的比较[1,11-12,14,22-23]

Fig. 5　Thermal conductivity of high-entropy ceramics $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ compared with other oxides[1,11-12,14,22-23]

在 $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷中出现类玻璃热导率的原因主要有以下三个方面：

1）在正交相 RE_3TaO_7 的晶格中，Sm—O、Eu—O 和 Gd—O 键具有不同的结合强度，结合强度的差异将增强声子散射，降低热导率[11]；

2）高熵效应将在晶格中产生严重的晶格畸变和原子质量、离子半径及电负性的无序性，这些因素都是有效的声子散射源[12]；

3）$(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷的晶格是长程有序的，但是高熵材料中由于原子错排将出现短程无序的情况，长程有序结合短程无序的特点可能导致类玻璃热导率的产生[24]。在单稀土 RE_3TaO_7 陶瓷中热导率随着温度的升高是先下降的，并且个别试样的热导率在高温下出现明显增大的现象，这是由于辐射传热导致的[11]。通过 $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷的制备有效抑制了高温热辐射，因此在 900 ℃时其仍旧保持了较低的热导率（1.78 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$）。

图 6 显示随着温度升高，$(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷的长度不断增大，其热膨胀率与温度成正相关，在 100～1 500 ℃温度范围内斜率基本保持不变，这说明其具有良好的高温稳定性。$(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷的热膨胀系数随着温度的升高不断增大，在 1 500 ℃时热膨胀系数为 10.87×10^{-6} K^{-1}。$(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷的热膨胀系数高于 La_3TaO_7 和 Gd_3TaO_7，并且克服了 Sm_3TaO_7 在 942 ℃发生相变的缺陷[11,25]。

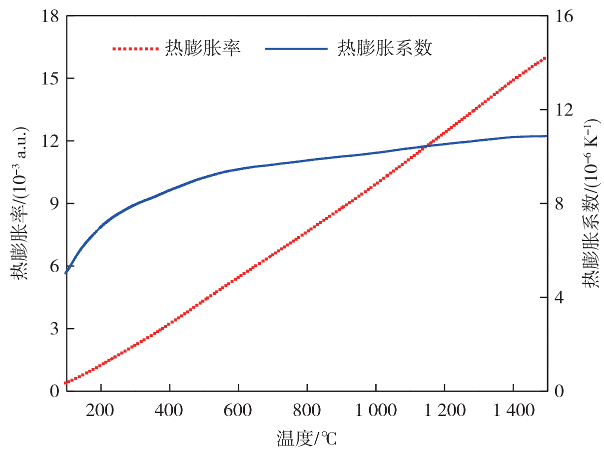

图 6　高熵陶瓷 $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 的热膨胀率和热膨胀系数

Fig. 6　Thermal expansion performance of high-entropy ceramics $(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$

图 7 显示 7YSZ 在 1 200 ℃时的热膨胀系数为 10.54×10^{-6} K^{-1}，随着温度的进一步升高 7YSZ 将发生相变导致热膨胀系数和晶胞体积的明显变化，因此其工作温度低于 1 200 ℃[26-28]。由此可见，$(SmEuGd)(Ta_{0.5}Nb_{0.5})O_7$ 高熵陶瓷相较于 7YSZ 具有更高的热膨胀系数和工作温度。$RETa_3O_9$ 和 RE_2SiO_5 的高熵陶瓷热膨胀系数较低，分别为 7.21×10^{-6} K^{-1} 和 5.32×10^{-6} K^{-1}，因此并不适合作为热障涂层材料使用。

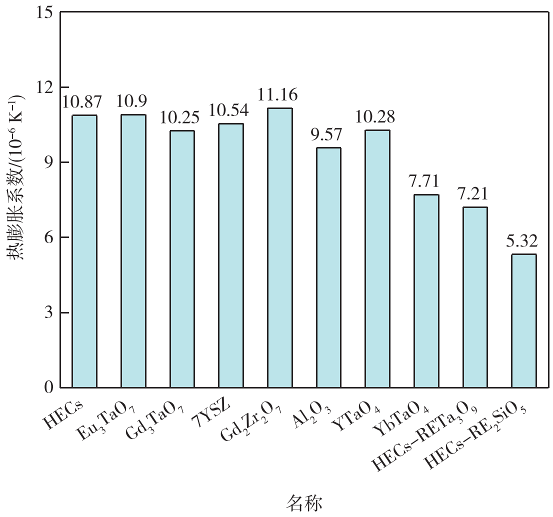

图 7　高熵陶瓷(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的热膨胀系数和其他氧化物陶瓷比较[17,25-28]

Fig. 7　Comparison of TECs between high-entropy ceramics (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 and other oxides[17,25-28]

2.4　力学性质

高的硬度和断裂韧性有利于热障涂层材料抵抗高速粒子冲击并抑制裂纹的产生和扩展。利用维氏硬度测试能得到(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的硬度和断裂韧性。图 8 显示(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的硬度为 9.7 GPa，明显高于 La_3TaO_7 和 Pr_3TaO_7，而与 7YSZ (9.9 GPa)接近。这是由于(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷具有更小的晶胞体积，晶格内原子间距离较小，更短的化学键长度，这意味着更强的化学键结合强度。因此，(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的硬度和Gd_3TaO_7相差较小。

图 9 显示 7YSZ 的断裂韧性为 4.4 MPa·$m^{1/2}$，这是其作为热障涂层材料被广泛使用的主要原因之一[21,29-30]。单稀土 RE_3TaO_7 的断裂韧性为 1.1～2.4 MPa·$m^{1/2}$，(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的断裂韧性为 1.7 MPa·$m^{1/2}$，高熵陶瓷的制备并没有明显提高断裂韧性。所制备的高熵陶瓷是单相材料，没有在引入额外的增韧机制，因此其断裂韧性没有发生明显的变化。第二相的引入能够有效提高材料的断裂韧性，因此在后续的研究中可以通过引入不同的第二相提高 RE_3TaO_7 的断裂韧性，如 $RETaO_4$ 和 YSZ 等。值得注意的是，通过超声反射法测试得到(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷的弹性模量为 212.1 GPa，明显高于正交相的单稀土 RE_3TaO_7(RE＝La，Pr，Nd)陶瓷(120～150 GPa)。因此，(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷具有较高的硬度和弹性模量，但是其断裂韧性还需要进一步提高。

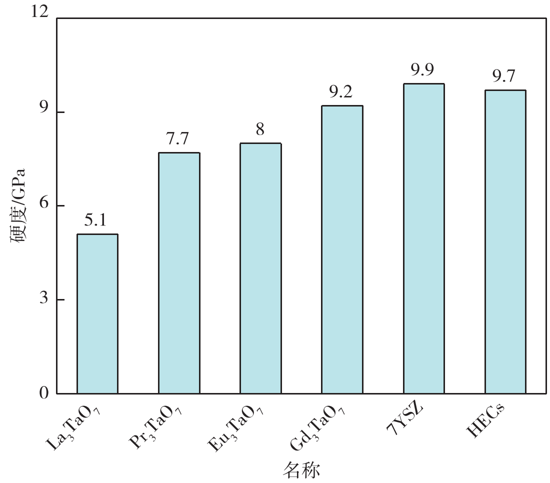

图 8　高熵陶瓷(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的硬度与其他材料比较[11,21,29]

Fig. 8　Hardness of (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 HECs compared with other materials[11,21,29]

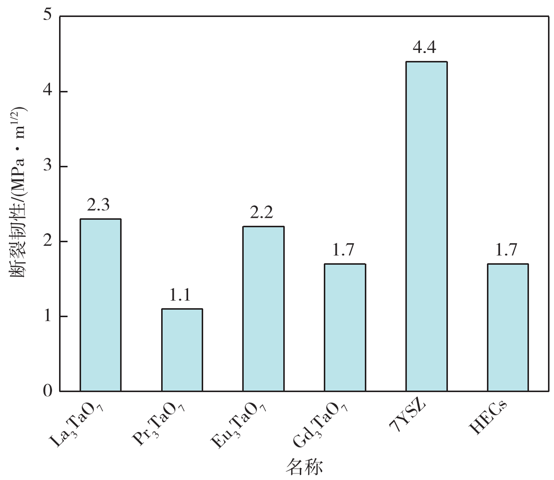

图 9　高熵陶瓷(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7的断裂韧性与其他材料比较[11,21,29]

Fig. 9　Fracture toughness of (SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7 HECs compared with other materials[11,21,29]

3　结论

1) 通过高温固相法成功制备了正交相的(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷，通过 XRD 可以获得其晶格参数和晶胞体积等参数；SEM 和 EDS 面扫描的测试结果表明所制备的高熵陶瓷具有微米级别的晶粒，同时各种元素分布均匀，没有明显的元素偏析。

2)(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷在100～1 500 ℃没有发生相变,在1 500 ℃时具有较高的热膨胀系数($10.87\times10^{-6}\ K^{-1}$),相较于7YSZ和$YTaO_4$等材料其具有高工作温度和高热膨胀系数的特点,在热障涂层和可磨耗封严涂层等领域具有应用前景。

3)(SmEuGd)($Ta_{0.5}Nb_{0.5}$)O_7高熵陶瓷具有高硬度(9.7 GPa)和高弹性模量(212.1 GPa)的特点,但是断裂韧性较低(1.7 MPa·$m^{1/2}$)。因此,后续的工作可以通过引入第二相进一步对其断裂韧性进行优化,以期获得综合性能更优的RE_3TaO_7陶瓷材料。

参考文献

[1] CHEN L,LI B H,FENG J. Rare-earth tantalates for next-generation thermal barrier coatings[J]. Progress in Materials Science,2024,144:101265. DOI:10.1016/j.pmatsci.2024.101265.

[2] 胡晓蕾,郭丹,刘建明,等. 孔隙率对YSZ涂层性能的影响[J]. 热喷涂技术,2023,15(1):45-52.
HU X L,GUO D,LIU J M,et al. Effect of porosity on properties of YSZ coating[J]. Thermal Spray Technology,2023,15(1):45-52.

[3] 邹兰欣,常辉,高明浩,等. 地面重型燃气轮机及其热障涂层的研究进展与发展趋势[J]. 中国表面工程,2024,37(1):19-41.
ZOU L X,CHANG H,GAO M H,et al. Research progress and development trend of ground heavy duty gas turbine and its thermal barrier coatings[J]. China Surface Engineering,2024,37(1):19-41.

[4] 赵娟利,杨岚,张成冠,等. 热障涂层材料研究进展[J]. 现代技术陶瓷,2020,41(3):148-170.
ZHAO J L,YANG L,ZHANG C G,et al. Recent progress in thermal barrier coatings[J]. Advanced Ceramics,2020,41(3):148-170.

[5] PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature Materials,2016,15:804-809.

[6] ZHOU X,WANG J S,YUAN J Y,et al. Calcium-magnesium-alumino-silicate induced degradation and failure of $La_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$/YSZ double-ceramic-layer thermal barrier coatings prepared by electron beam-physical vapor deposition[J]. Journal of the European Ceramic Society,2018(4),38:1897-1907.

[7] LI G R,LIU T,LUO X T,et al. Tailoring sintering-resistant thermal barrier coatings by considering critical healing width of two-dimensional interlamellar pores[J]. Journal of Advanced Ceramics,2023,12(7):1317-1330.

[8] YANG S J,SONG W J,DINGWELL D B,et al. Surface roughness affects metastable non-wetting behavior of silicate melts on thermal barrier coatings[J]. Rare Metals,2022,41(2):469-481.

[9] CAO Z,AN S L,SONG X W. Effect of erbium doping on phase composition,mechanical and thermal properties of ZrO_2-based ceramics[J]. Journal of Rare Earths,2022,40(10):1628-1634.

[10] BAHTTACHARYA J,VEN A V D. Mechanical in stabilities and structural phase transitions:the cubic to tetragonal transformation[J]. Acta Materialia,2008,56(16):4226-4232.

[11] CHEN L,HU M Y,WANG J K,et al. Dominant mechanisms of thermo-mechanical properties of weberite-type RE_3TaO_7(RE=La,Pr,Nd,Eu,Gd,Dy) tantalates toward multifunctional thermal/environmental barrier coating applications[J]. Acta Materialia,2024,270:119857. DOI:10.1016/j.actamat.2024.119857.

[12] CHEN L,HU M Y,ZHENG X D,et al. Characteristics of ferroelastic domains and thermal transport limits in HfO_2 alloying $YTaO_4$ ceramics[J]. Acta Materialia,2023,251:118870. DOI:10.1016/j.actamat.2023.118870.

[13] CHEN L,JIANG Y H,CHONG X Y,et al. Synthesis and thermophysical properties of $RETa_3O_9$(RE=Ce,Nd,Sm,Eu,Gd,Dy,Er) as promising thermal barrier coatings[J]. Journal of the American Ceramic Society,2018,101(3):1266-1278.

[14] CHEN L,LI B H,GUO J,et al. High-entropy perovskite $RETa_3O_9$ ceramics for high-temperature environmental/thermal barrier coatings[J]. Journal of Advanced Ceramics,2022,11(4):556-569.

[15] YANG J,PAN W,HAN Y,et al. Mechanical properties,oxygen barrier property,and chemical stability of RE_3NbO_7 for thermal barrier coating[J]. Journal of the American Ceramic Society,2020,103(4):2302-2308.

[16] 张晓燕,刘馨玥,闫金华,等. 钙钛矿型($La_{0.2}Li_{0.2}Ba_{0.2}Sr_{0.2}Ca_{0.2}$)$TiO_3$高熵氧化物陶瓷的制备及性能研究[J]. 无机材料学报,2021,36(4):379-385.
ZHANG X Y,LIU X Y,YAN J H,et al. Preparation and property of high-entropy ($La_{0.2}Li_{0.2}Ba_{0.2}Sr_{0.}2Ca_{0.2}$)$TiO_3$ perovskite ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials,2021,36(4):379-385.

[17] 任贝,刘宇峰,孟子茜,等. 非等摩尔比Sr(Ti,Zr,Y,Sn,Hf)$O_{3-\sigma}$高熵钙钛矿氧化物的制备及电学性能研究[J]. 现代技术陶瓷,2023,44(5/6):497-508.
REN B,LIU Y F,MENG Z Q,et al. Preparation and electrical properties study of non-equimolar

Sr(Ti,Zr,Y,Sn,Hf)$O_{3-\sigma}$ high-entropy perovskite oxide[J]. Advanced Ceramics,2023,44(5/6):497-508.

[18] LI C,DENG Y T,YANG L P,et al. An active and stable hydrogen electrode of solid oxide cells with exsolved Fe-Co-Ni nanoparticles from $Sr_2FeCo_{0.2}Ni_{0.2}Mo_{0.6}O_{6-\delta}$ double-perovskite[J]. Advanced Powder Materials, 2023,2(4):100133. DOI:10.1016/j.apmate.2023.100133.

[19] LIU Y C,JIA D C,ZHOU Y,et al. $Zn_{0.1}Ca_{0.1}Sr_{0.4}Ba_{0.4}ZrO_3$: a non-equimolar multicomponent perovskite ceramic with low thermal conductivity[J]. Journal of the European Ceramic Society,2020,40(15):6272-6277.

[20] MA M D, HAN Y J, ZHAO Z S, et al. Ultrafine-grained high-entropy zirconates with superior mechanical and thermal properties[J]. Journal of Materiomics, 2023,9(2):370-377.

[21] 崔金平,赵威,黄雪娟,等.可靠评价 Y-ZrO_2及 Y-ZrO_2/Al_2O_3陶瓷断裂韧性研究进展[J].现代技术陶瓷,2022,43(5/6):369-387.

CUI J P, ZHAO W, HUANG X J, et al. Research progress on reliable evaluation of fracture toughness of Y-ZrO_2 and Y-ZrO_2/Al2O_3 ceramics[J]. Advanced Ceramics,2022,43(5/6):369-387.

[22] CHEN Z L, TIAN Z L, ZHENG L Y, et al. $(Ho_{0.25}Lu_{0.25}Yb_{0.25}Eu_{0.25})_2SiO_5$ high-entropy ceramic with low thermal conductivity,tunable thermal expansion coefficient,and excellent resistance to CMAS corrosion[J]. Journal of Advanced Ceramics,2022,11(8):1279-1293.

[23] WEI Z Y, MENG G H, CHEN L, et al. Progress in ceramic materials and structure design toward advanced thermal barrier coatings[J]. Journal of Advanced Ceramics,2022,11(7):985-1068.

[24] WRIGHT A J,WANG Q Y,YEH Y T,et al. Short-range order and origin of the low thermal conductivity in compositionally complex rare-earth niobates and tantalates[J]. Acta Materialia,2022,235:118056. DOI:10.1016/j.actamat.2022.118056.

[25] CHEN L, WU P, FENG J. Optimization thermophysical properties of TiO_2 alloying Sm_3TaO_7 ceramics as promising thermal barrier coatings[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology,2019,16(1):230-242.

[26] CHEN L, HU M Y, GUO J, et al. Mechanical and thermal properties of $RETaO_4$ (RE = Yb, Lu, Sc) ceramics with monoclinic-prime phase[J]. Journal of Materials Science & Technology,2020,52:20-28.

[27] CHEN L,LUO K R,LI B H,et al. Mechanical property enhancements and amorphous thermal transports of ordered weberite-type RE_3 Nb/TaO_7 high-entropy oxides[J]. Journal of Advanced Ceramics,2023,12(2):399-413.

[28] XIANG H M,XING Y,DAI F Z,et al. High-entropy ceramics:present status,challenges,and a look forward[J]. Journal of Advanced Ceramics,2021,10(3):385-441.

[29] ZHAO M,REN X R,YANG J,et al. Thermo-mechanical properties of ThO_2-doped Y_2O_3 stabilized ZrO_2 for thermal barrier coatings[J]. Ceramics International, 2016,42(1):501-508.

[30] 龚江宏.陶瓷材料脆性断裂的显微结构效应[J].现代技术陶瓷,2021,42(5/6):287-428.

GONG J H. Microstructural effects in brittle fracture of ceramics[J]. Advanced Ceramics, 2021, 42(5/6): 287-428.