

## Sm<sub>2</sub>Y<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>TaO<sub>7</sub> 陶瓷材料的热物理性能

刘保福, 朱金矿

(平顶山工业职业技术学院, 资源开发学院, 平顶山 467000)

**摘要** : 以高纯度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为原材料, 采用高温烧结方法制备了 Sm<sub>2</sub>Y<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>TaO<sub>7</sub> 系列陶瓷材料, 对其晶体结构、显微组织、元素组成、热导率和热膨胀性能进行了系统研究。结果表明, 除 Sm<sub>2</sub>Y<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>TaO<sub>7</sub> 具有焦绿石结构之外, 其余三种氧化物均具有单一的萤石晶体结构。其块体材料相对致密度均在 90% 以上, 晶界清晰, 各元素摩尔比与其化学式基本一致。由于 Al<sup>3+</sup> 和 Y<sup>3+</sup> 之间较大的离子半径和原子量差别, 增大了对声子的散射, 其热传导性能随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加而降低。虽然 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量增加降低了其热膨胀系数, 其大小与 YSZ 基本相当, 所制备陶瓷在室温至 1400 °C 范围内具有良好的相稳定性。

**关键词** : 高温热防护涂层; 稀土钽氧化物; 热导率; 热膨胀系数

中图分类号 : TQ174.75

文献标志码 : A

文章编号 : 1001-9642(2024)04-0017-06

## Thermophysical Properties of Sm<sub>2</sub>Y<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>TaO<sub>7</sub> Ceramics

LIU Bao-fu, ZHU Jin-kuang

(School of Resource Development, Pingdingshan Polytechnic College, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract** : The high-purity Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were utilized as raw materials to prepare the Sm<sub>2</sub>Y<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>TaO<sub>7</sub> series ceramic materials through a high-temperature sintering method. Their crystal structure, microstructure, elemental composition, thermal conductivity, and thermal expansion properties were systematically studied. The results indicate that except for Sm<sub>2</sub>Y<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>TaO<sub>7</sub>, which has a pyrochlore structure, the other three oxides exhibit a single fluorite crystal structure. The relative density of the obtained dense samples exceeded 90%, displaying clear grain boundaries, and the molar ratios of elements were consistent with their chemistry formulas. Because of the large disparities in ionic radius and atomic weight between Al<sup>3+</sup> and Y<sup>3+</sup>, phonon scattering is amplified; nevertheless, as the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration increases, the thermal conductivity of Sm<sub>2</sub>Y<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>TaO<sub>7</sub> falls. Although an increase in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration reduces the thermal expansion coefficient, the value remains equivalent to YSZ. Additionally, the prepared ceramics exhibit excellent phase stability at the temperature range from room temperature to 1400 °C.

**Keywords** : High-temperature thermal-protection coating; Rare-earth tantalum oxide; Thermal conductivity; Thermal expansion coefficient

## 0 引言

随着先进涡轮航空发动机燃烧室服役温度日益提升及环境的持续苛刻, 对先进涡轮发动机燃烧室内部关键热端部件表面热防护能力要求逐渐提高<sup>[1]</sup>。从目

前的文献报道可知, 未来发动机燃烧室服役温度要超过 1500 °C。在这样高的温度下, 现役的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 部分稳定 ZrO<sub>2</sub> (简称 YSZ) 热障涂层, 由于 ZrO<sub>2</sub> 所固有的相变以及高温烧结收缩严重等缺点, 很难在 1200 °C 以

收稿日期 : 2023-05-09

上长期服役<sup>[2, 3]</sup>。所以, 开发具有良好隔热性能(热导率小于  $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、与基体结合良好(热膨胀系数大于  $9 \times 10^{-6}/\text{K}$ )及良好高温晶格稳定性的新型氧化物, 以取代主流的 YSZ, 就显得十分重要, 也是克服 YSZ 热障涂层缺点的最佳途径<sup>[4, 5]</sup>。

在已经报道的新型热障涂层用陶瓷材料中, 化学式为  $\text{RE}^{3+}_2\text{B}_1^{3+}\text{TaO}_5$  (RE 代表三价稀土元素, B 代表三价金属离子) 已经逐步引起学者的关注。如  $\text{La}_2\text{AlTaO}_7$  具有良好的热绝缘性能和良好的高温相稳定性, 但对应高温热防护涂层的抗热冲击性能较低<sup>[6]</sup>。 $\text{RE}_2\text{FeTaO}_7$  (RE=Y, Eu, Gd, Dy) 陶瓷材料的热膨胀系数与  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  基本相当, 而其热导率在  $1.5 \sim 2.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  之间, 同时这几种氧化物具有较高的硬度和断裂韧性<sup>[7]</sup>。 $1200^\circ\text{C}$  下的  $\text{Sm}_2\text{LaTaO}_7$  和  $\text{Gd}_2\text{LaTaO}_7$  的热导率约为  $0.93 \sim 1.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 其热膨胀系数分别为  $10.47 \times 10^{-6}/\text{K}$  和  $10.36 \times 10^{-6}/\text{K}$ <sup>[8]</sup>。 $\text{RE}_2\text{CrTaO}_7$  (Y, Dy, Yb) 氧化物的热膨胀系数在  $9.3 \times 10^{-6} \sim 10.8 \times 10^{-6}/\text{K}$  之间, 其热导率在  $1.005 \sim 0.868 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  之间<sup>[9]</sup>。随着  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  含量的增加,  $\text{Nd}_2\text{AlTaO}_7$  逐渐由钨美铝钠石结构转变为焦绿石结构, 其良好的隔热性能主要归因于氧空位引起的声子散射<sup>[10]</sup>。这些研究实例充分表明, 该类氧化物的热物理性能确实能满足热障涂层的需求。然而, 该类氧化物热物理性能的研究依然处于初级阶段, 元素掺杂取代  $\text{B}^{3+}$  离子对该类氧化物热导率和热膨胀等性能的影响报道较少。

以  $\text{Sm}_2\text{YTaO}_7$  为基础, 用  $\text{Al}^{3+}$  部分取代其中的  $\text{Y}^{3+}$ , 形成  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  系列固溶体。采用高温固相反应法制备相应的致密块体材料, 对其显微组织、晶体结构、热导率、热膨胀性能等进行了研究。

## 1 材料表征及性能分析

以高纯度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  为原材料, 采用高温固相反应法制备  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  系列氧化物。首先将选取的原材料在  $200^\circ\text{C}$  下热处理 2 h, 以除去原材料粉末所吸附的水蒸气或  $\text{CO}_2$ 。而后根据配平的化学反应方程式精确计算所需要的每一种原材料的质量, 并依据计算结果用万分之一分析天平准确称量每一种原材料粉末。称取的原始粉末在玛瑙研钵中经充分研磨后人工过筛, 用金属模具在陶瓷粉末压片机上压制成预制坯体, 其中坯体分  $\Phi 12.7 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$  两种类型。采用高温烧结法将压制坯体在  $1600^\circ\text{C}$  下常压热处理 600 min, 从而获得块体样品。

合成致密块体样品的晶体结构用 X 射线衍射仪

(XRD, D8 Advance, German) 分析, 样品的显微形貌用扫描电子显微镜 (SEM, Sigma 500, Zeiss, Germany) 观察, 并用电子能谱仪分析样品的元素构成。用阿基米德排水法测试块体的真实密度 ( $\rho$ ), 根据纽曼-科普定律计算合成氧化物的比热 ( $C_p$ )<sup>[11]</sup>, 用激光脉冲法 (LFA 427, Netzsch, Germany) 测试样品的热扩散系数 ( $\lambda$ ), 根据方程 (1) 计算获得样品的热导率 ( $k$ ), 用方程 (2) 最终得到样品的本征热导率 ( $k_0$ ), 其中公式 (2) 中的  $\phi$  为样品的气孔率, 用于排除样品中的气孔含量对热导率的影响<sup>[12]</sup>。用高温热膨胀仪 (STA449F3, Netzsch, Germany) 研究样品的热膨胀性能, 升温速度为  $10 \text{ K}/\text{min}$ , 测试过程中用惰性气体保护。

$$k = C_p \times \rho \times \lambda \quad (1)$$

$$\frac{k}{k_0} = 1 - \frac{4}{3}\phi \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 相组成

图 1 是合成  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  系列氧化物的 XRD 图谱。很明显, 每个氧化物的 XRD 结果均有 8 个比较明显的衍射峰, 而且在  $2\theta$  角为  $35^\circ \sim 50^\circ$  范围内均不存在两个微弱的衍射峰。化学式为  $\text{RE}_2^{3+}\text{B}_1^{3+}\text{TaO}_5$  的氧化物也属于  $\text{A}_2^{3+}\text{B}_2^{4+}\text{O}_7$  的范畴, 而  $\text{A}_2^{3+}\text{B}_2^{4+}\text{O}_7$  主要呈现焦绿石和萤石两种晶体结构, 而在  $2\theta$  角为  $35^\circ \sim 50^\circ$  范围内存在两个比较微弱的衍射峰是焦绿石晶格的典型标志<sup>[10, 13]</sup>。但对于  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_7$  而言, 在  $2\theta$  角为  $14.5^\circ$  和  $28.8^\circ$  的地方, 存在两个超晶格衍射峰, 这也是焦绿石结构的标志。因而, 除  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_7$  具有焦绿石晶格之外 (如图 1 中字母 P 所指), 所合成

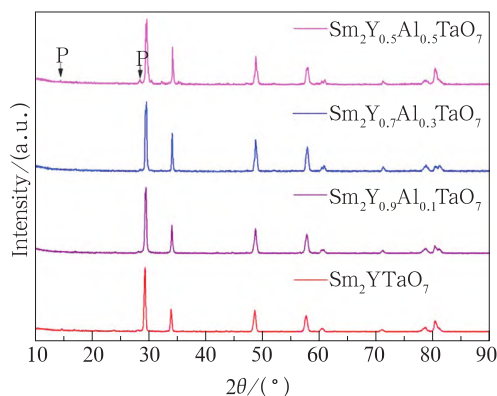


图 1  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD patterns of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$

的其余  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  系列氧化物具有单一的萤石晶体结构。

对于  $\text{RE}_2^{3+}\text{B}_1^{3+}\text{TaO}_5$  的氧化物，其晶体结构也可以仿照  $\text{A}_2^{3+}\text{B}_2^{4+}\text{O}_7$  离子半径比进行定性判断其晶体结构类型。对于  $\text{A}_2^{3+}\text{B}_2^{4+}\text{O}_7$  氧化物，一般认为其 A 位与 B 位离子半径比  $R_A/R_B$  小于 1.46 大于 1.38 时容易形成稳定的焦绿石结构，而小于 1.38 时倾向于形成缺陷萤石结构<sup>[14,15]</sup>。对于  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  系列氧化物，其离子半径比可以通过公式 (3) 予以估算，其中  $r(\text{Sm}^{3+})$ 、 $r(\text{Y}^{3+})$ 、 $r(\text{Al}^{3+})$  和  $r(\text{Ta}^{5+})$  分别代表  $\text{Sm}^{3+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Ta}^{5+}$  的有效离子半径。计算表明，该系列氧化物的离子半径比依次为 1.27( $x=0$ )、1.31( $x=0.1$ )、1.39( $x=0.3$ ) 和 1.48( $x=0.5$ )。很明显， $x=0.5$  的氧化物  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_7$  倾向于形成焦绿石结构，其余则易于形成萤石晶体结构，这与氧化物的 XRD 图谱分析结果一致。

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{2r(\text{Sm}^{3+})}{xr(\text{Al}^{3+}) + (1-x)r(\text{Y}^{3+}) + r(\text{Ta}^{5+})} \quad (3)$$

2.2 显微组织与元素组成

图 2 是  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  块体样品的显微形貌照片。很明显，合成氧化物致密块体的显微形貌比较相似，其中  $\text{Sm}_2\text{YTaO}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{TaO}_7$  的晶粒尺寸

相差比较大，其较大晶粒尺寸约为  $4 \sim 5 \mu\text{m}$ ，较小的晶粒尺寸约为  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ，而  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{TaO}_7$  和  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_7$  的晶粒尺寸相对比较均匀，大小约为  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ，这表明  $\text{Al}^{3+}$  的引入有利于晶粒大小的均匀化。由图 2 还可以看出，各个氧化物的晶界比较洁净，无第二相或未反应物存在。而且其显微组织比较致密，计算表明，其相对致密度分别是  $\text{Sm}_2\text{YTaO}_7(92.2\%)$ 、 $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{TaO}_7(93.3\%)$ 、 $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{TaO}_7(92.6\%)$  和  $\text{Sm}_2\text{Y}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_7(94.3\%)$ ，即其相对致密度均在 90% 以上。

图 3 是  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  系列氧化物的 EDS 能谱图，其分析时取的是整个显微视窗范围。由图可知，四种氧化物的元素组成与各自的化学式完全一致，表 1 是四种氧化物各元素之间的摩尔比。由表可知，四种氧化物各组成元素之间的摩尔比与各自的化学式基本接近，表明在合成过程中，无元素损失现象，各种氧化物均成功合成。

表 1  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  固溶体的元素原子比  
Tab.1 Atomic ratios of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  solid solutions

化学式	Sm	Y	Al	Ta	O
$x=0$	21.3	8.4	0	10.8	59.5
$x=0.1$	17.7	7.7	1.8	9.8	65.5
$x=0.3$	19.7	4.7	3.1	10.4	62.1
$x=0.5$	20.8	2.6	4.7	10.3	61.6

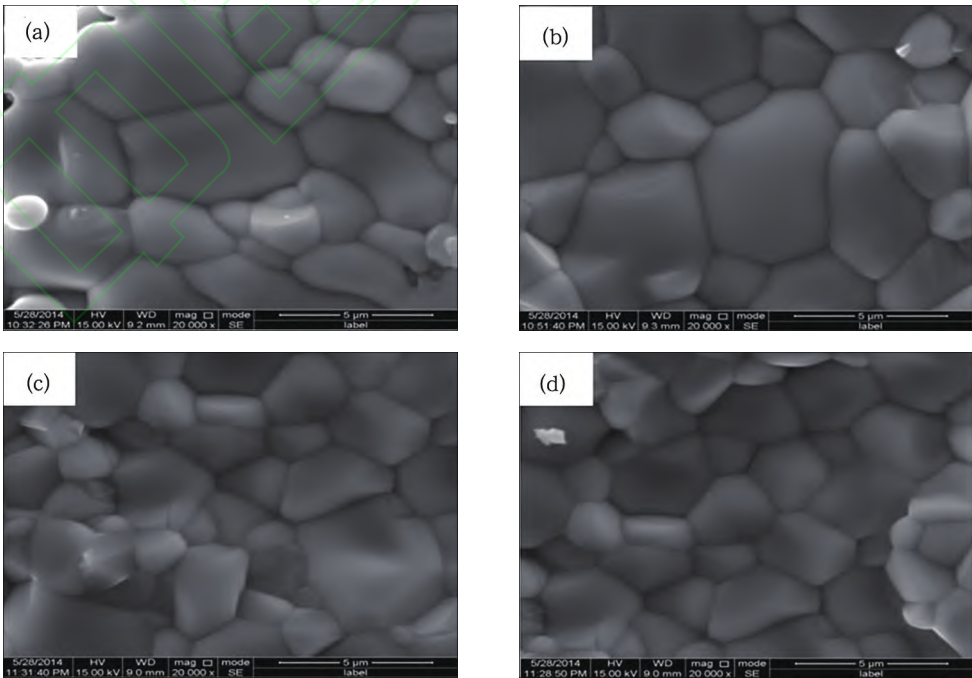


图 2  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  的显微形貌 (a)  $x=0$  (b)  $x=0.1$  (c)  $x=0.3$  (d)  $x=0.5$   
Fig.2 Micromorphology of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  (a)  $x=0$ , (b)  $x=0.1$ , (c)  $x=0.3$ , (d)  $x=0.5$



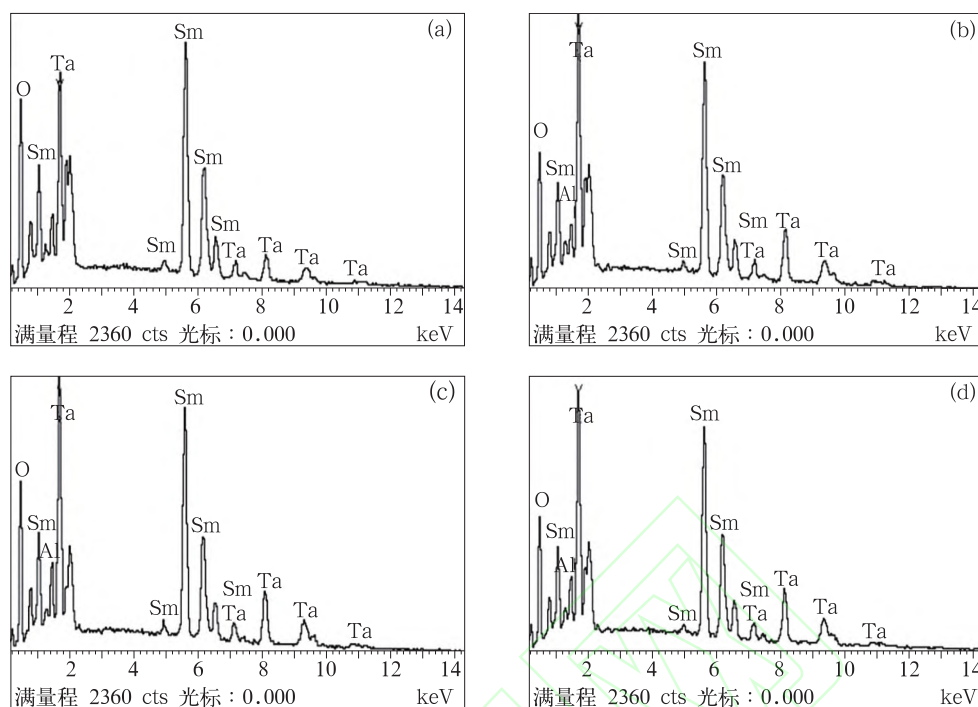


图3  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  的元素构成 (a)  $x=0$  (b)  $x=0.1$  (c)  $x=0.3$  (d)  $x=0.5$   
Fig.3 Element composition of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  (a)  $x=0$ ; (b)  $x=0.1$ ; (c)  $x=0.3$ ; (d)  $x=0.5$

## 2.3 热导率

采用纽曼科普定律计算得到的  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  陶瓷材料不同温度下的比热见图4。很明显,该系列氧化物在不同温度下的比热均与温度成正比,而且随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加,其比热值逐渐增加。四种不同氧化物的比热容拟合公式如方程(4)~(7)所示。

$$C_p(\text{Sm}_2\text{YTaO}_7)=0.37424+0.00006T-5292.168781/T^2 \quad (4)$$

$$C_p(\text{Sm}_2\text{Y}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{TaO}_7)=0.3763+0.00006T-5346.83572/T^2 \quad (5)$$

$$C_p(\text{Sm}_2\text{Y}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{TaO}_7)=0.38165+0.00007T-5732.16036/T^2 \quad (6)$$

$$C_p(\text{Sm}_2\text{Y}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{TaO}_7)=0.38681+0.00007T-6037.3/T^2 \quad (7)$$

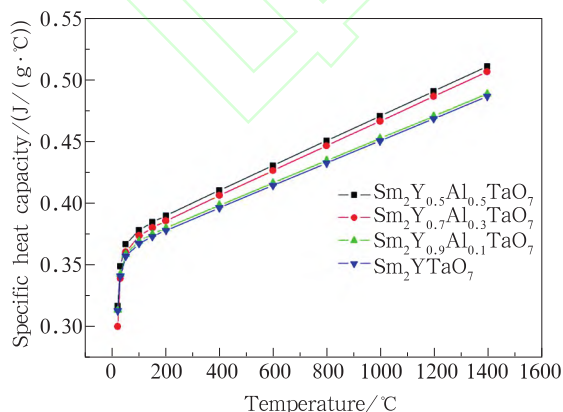
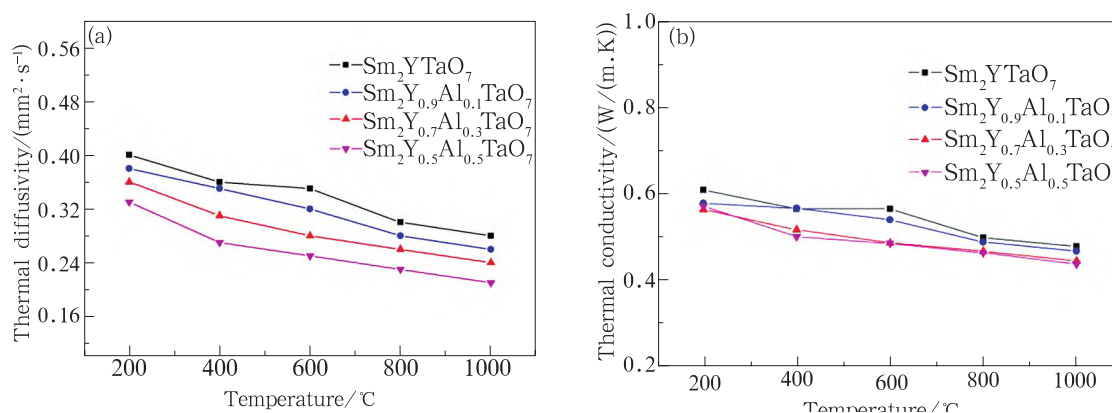


图4  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  氧化物不同温度下的比热  
Fig.4 Specific heat capacity of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  oxides at different temperatures

图5(a)是  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  的热扩散系数。由图可知,该系列陶瓷的热扩散系数在200~1000℃范围内与温度成反比,具有典型的声子导热机理<sup>[16]</sup>。而且该系列陶瓷材料的热扩散系数与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量成反比,其中  $x=0$  时其热扩散系数处在0.3~0.28  $\text{mm}^2/\text{s}$  之间,  $x=0.1$  时的热扩散系数位于0.28~0.256  $\text{mm}^2/\text{s}$  之间,  $x=0.3$  时的热扩散系数位于0.26~0.24  $\text{mm}^2/\text{s}$  之间,  $x=0.5$  时的热扩散系数位于0.23~0.21  $\text{mm}^2/\text{s}$  之间。该系列氧化物的最终热导率见图5(b)。由图可知,其热导率也与温度成反比,其中  $x=0$  时的热导率位于0.496~0.476  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  之间,  $x=0.1$  时的热导率位于0.485~0.466  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  之间,  $x=0.3$  时的热导率位于0.464~0.462  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  之间,  $x=0.5$  时的热导率位于0.46~0.435  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  之间。很明显,

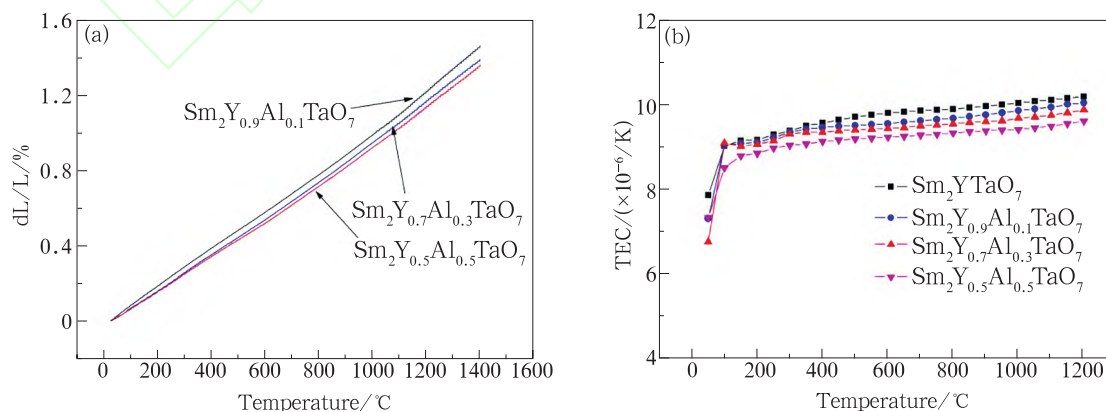
图 5  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  的隔热性能参数 (a) 热扩散系数 (b) 热导率Fig.5 Thermal insulation property parameters of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  (a) thermal diffusivity and (b) thermal conductivity

四种氧化物的热导率虽然比较接近,但仍然随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而降低。根据声子导热理论,在氧化物晶体结构中引入外来离子后,外来原子与基质原子之间离子半径差别会在晶格中引入畸变场,原子质量之间的差别也会加剧声子的散射,从而降低声子的平均自由程,因而能够引起氧化物晶格热导率的下降。 $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{Y}^{3+}$  的有效离子半径分别是 0.051 nm 和 0.09 nm,原子量分别是 26.98 和 88.91,较大的离子半径和原子量差别,有效的加剧了该系列固溶体的声子散射,因而其热传导性能随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而降低。该系列氧化物的热导率全部低于  $2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,即满足热障涂层对热导率的要求。

## 2.4 热膨胀性能

采用高温热膨胀仪测试得到的  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  陶瓷材料的热膨胀性能见图 6。可知该系列陶瓷材料的热

膨胀率在该温度范围内是平滑的曲线,这表明在该温度范围内所有氧化物未出现任何相变,即表现出良好的相稳定性能,有利于延长高温涂层的工作寿命。图 6(b) 是该系列氧化物热膨胀系数。随着温度升高其热膨胀系数逐渐增大,这是由于随着温度的升高,原子间平均距离逐渐增加,从而使得材料的线性热膨胀系数随温度升高而增加。该系列氧化物在  $1200^\circ\text{C}$  的线性热膨胀系数分别是  $10.2 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $10.05 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $9.89 \times 10^{-6}/\text{K}$  和  $9.62 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,均大于 YSZ 的  $9.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,满足热障涂层对热膨胀系数的要求。而且其热膨胀系数随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而降低,这是由于  $\text{Al}^{3+}$  的半径比较小,其部分取代  $\text{Y}^{3+}$  会降低原子间的平均距离,其晶格能会增加,因而其线性热膨胀系数与  $\text{Al}^{3+}$  含量成反比<sup>[17]</sup>。

图 6  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  的热膨胀参数 (a) 热膨胀率 (b) 热膨胀系数Fig.6 Thermal expansion parameter of  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  (a) thermal expansion rate and (b) thermal expansion coefficient

### 3 结论

(1) 采用高温烧结技术, 获得了致密度在 90% 以上的  $\text{Sm}_2\text{Y}_{1-x}\text{Al}_x\text{TaO}_7$  陶瓷材料, 除  $\text{Sm}_2\text{Al}_{0.5}\text{Y}_{0.5}\text{TaO}_7$  具有焦绿石结构之外, 其余三种氧化物均具有萤石结构。块体材料的晶界比较清晰, 元素组成及各元素之间的摩尔比均与各自的化学式基本一致。

(2) 该系列氧化物表现出典型的声子导热机制, 其

热导率均低于现役的 YSZ 陶瓷, 满足热障涂层的要求。由于  $\text{Al}^{3+}$  与  $\text{Y}^{3+}$  之间较大的离子半径和原子量差别, 加剧了氧化物的声子散射, 其热传导性能随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加而降低。

(3) 该系列氧化物在室温至 1400 °C 范围内表现出良好的相稳定性, 虽然随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量增加其热膨胀系数逐渐降低, 但依然满足热障涂层的要求。

### 参考文献:

- [1] Huang JB, Chu X, Yang T, et al. Achieving high anti-sintering performance of plasma-sprayed YSZ thermal barrier coatings through pore structure design [J]. Surf. Coat. Technol., 2022, 435: 128259
- [2] Luo LR, Chen Y, Zhou M, et al. Progress update on extending the durability of air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Ceram. Int., 2022, 48: 18021–18034.
- [3] Xue ZL, Zhu Y, Yu HY, et al. Nano-agglomerated powder and thermal shock cycling property of 8YSZ nano-structured thermal barrier coating[J]. Surf. Coat. Technol., 2022, 433: 128173.
- [4] Mondal K, Downey L.N. III, C.M., et al. Recent advances in the thermal barrier coatings for extreme environments[J]. Mater. Sci. Energy Technol., 2021, 4: 208–210.
- [5] Ye FX, Meng FW, Yuan YH, et al. A potential  $\text{ZrO}_2$  doped scandium tantalite ceramics for thermal/environmental barrier coating material[J]. Mater. Chem. Phys., 2021, 270: 124786.
- [6] Wang JS, Chen MD, Wang YH, et al. Preparation and thermo-physical properties of  $\text{La}_2\text{AlTaO}_7$  ceramic for thermal barrier coating application[J]. Mater. Chem. Phys., 2022, 289: 126465.
- [7] Zhang Q, Chen L, Song P, et al. Potential thermal barrier coating materials:  $\text{RE}_2\text{FeTaO}_7$  ( $\text{RE}=\text{Y}, \text{Eu}, \text{Gd}$ ),  $\text{Dy}$ ) compounds[J]. J. Alloys Compds., 2021, 855: 157408.
- [8] Chen XG, Su ZH, Wang F, et al. Structural and thermophysical performances of  $\text{Sm}_2\text{LaTaO}_7$  and  $\text{Gd}_2\text{LaTaO}_7$  oxides[J]. Ceram. Int., 2018, 44: 17571–17574.
- [9] Jia L, Wen TP, Tian C, et al. Preparation and thermophysical properties of  $\text{RE}_2\text{CrTaO}_7$  ( $\text{Y}, \text{Sm}, \text{Dy}, \text{Yb}$ ) ceramics for thermal barrier coating applications[J]. Ceram. Int., 2022, 48: 23814–23820.
- [10] Zhang Q, Lu K, Wang SH, et al. Synthesis and thermophysical performances of  $(\text{Nd}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{AlTaO}_7$  oxides for heat-insulation coating applications[J]. Ceram. Int., 2020, 46: 26754–26759.
- [11] Zhao ZF, Chen H, Xiang HM, et al. High entropy defective fluorite structured rare-earth niobates and tantalates for thermal barrier applications[J]. J. Adv. Ceram., 2020, 9: 303–311.
- [12] Zou L, Li F, Liu JX, et al. High-entropy thermal barrier coating of rare-earth zirconate: a case study on  $(\text{La}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Sm}_{0.2}\text{Eu}_{0.2}\text{Gd}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  prepared by atmospheric plasma spraying[J]. J. Eur. Ceram. Soc., 2020, 40: 5731–5739.
- [13] Martinez LMT, Gomez MAR, Torres MZF, et al. Synthesis by two method and crystal structure determination of a new pyrochlore-related compound  $\text{Sm}_2\text{FeTaO}_7$ [J]. Mater. Chem. Phys., 2012, 133: 839–844.
- [14] Shlyakhtina AV, Belov DA, Pigalakiy KS, et al. Synthesis, properties and phase transition of pyrochlore- and fluorite-like  $\text{Ln}_2\text{RMO}_7$  ( $\text{Ln}=\text{Sm}, \text{Ho}$ ;  $\text{R}=\text{Lu}, \text{Sc}$ ;  $\text{M}=\text{Nb}, \text{Ta}$ ) [J]. Materials Research Bulletin, 2014, 49: 625–632.
- [15] Hinatsu Y, Doi Y. Structures and magnetic properties of new fluorite-related quaternary rare earth oxides  $\text{LnY}_2\text{TaO}_7$  and  $\text{LaLn}_2\text{RuO}_7$  ( $\text{Ln}=\text{rare earths}$ ) [J]. J. Solid State Chem., 2016, 233: 37–43.
- [16] Wu J, Wei XZ, Padture NP, et al. Low thermal conductivity rare earth zirconates for potential thermal barrier coating applications[J]. J. Am. Ceram. Soc., 2002, 85: 3031–3035.
- [17] Wang JX, Li LP, Campbell BJ, et al. Structure thermal expansion and transport properties of  $\text{BaCe}_{1-x}\text{Eu}_x\text{O}_{3-\delta}$  oxides[J]. Mater. Chem. Phys., 2004, 86(1): 150–155.