

磁铅石型稀土六铝酸盐热障涂层材料的制备与性能

许茗奕^{1*}, 熊 瑛², 王 博², 张艺馨², 陈文博³, 曹学强³

(1. THL 贵州先进功能涂层创新中心, 贵州 550000; 2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043; 3. 武汉理工大学 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 磁铅石型稀土六铝酸盐 $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (RMA, R = La, Pr, Nd, Sm, Gd) 因其高熔点、低热导率和优异的抗烧结性能, 成为服役温度超过 1300 °C 的潜在热障涂层材料。为揭示稀土离子取代对材料结构与性能的影响规律, 采用固相反应法合成不同稀土离子取代的 RMA 粉体, 并通过放电等离子烧结 (SPS) 制备致密陶瓷块体。结合不同测试手段, 系统分析了稀土离子半径变化对晶体结构、晶粒生长、热物理及红外辐射性能的作用机理。结果表明, 所有样品均呈六方磁铅石型结构, 晶胞参数及体积随稀土离子半径减小而收缩, 晶粒生长速率整体提高。RMA 陶瓷的热扩散系数和热导率随温度升高而降低, 热导率最低为 3.19~2.86 W/(m·K) (25~1000 °C), 平均热膨胀系数为 $8.22 \times 10^{-6} \sim 8.70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (200~1300 °C)。不同稀土离子取代对热物理性能影响有限, 然而, 材料在 3~5 μm 波段的红外发射率差异显著。其中, PrMA 样品平均红外发射率最高 (0.746), 而 LaMA 样品最低 (0.493)。本研究揭示了稀土离子取代对磁铅石型六铝酸盐热-辐射性能的影响, 为设计在高温服役条件下兼具低热导率与高红外辐射性能的热障涂层材料提供了科学依据。

关键词: 热障涂层; $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$; 晶粒生长速率; 热物理性能; 红外辐射性能

中图分类号: TB306 **文献标志码:** A

Fabrication and Properties of Magnetoplumbite-type Rare-Earth Hexaaluminate Thermal Barrier Coating Materials

XU Mingyi^{1*}, XIONG Ying², WANG Bo², ZHANG Yixin², CHEN Wenbo³, CAO Xueqiang³

(1. Guizhou Advanced Functional Coatings Innovation Center of THL, Guiyang 550000, China; 2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Corporation Ltd., Shenyang 110043, China; 3. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Magnetoplumbite-type rare-earth hexaaluminate $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (RMA, R = La, Pr, Nd, Sm, Gd) have emerged as promising candidates for next-generation thermal barrier coatings (TBCs) capable of operating at temperatures exceeding 1300 °C, owing to their high melting points, low thermal conductivity, and remarkable sintering resistance. To elucidate the influence of rare-earth ion substitution on the structural and functional properties, a series of single rare-earth cation substituted RMA ceramics were synthesized *via* a solid-state reaction route and densified using spark plasma sintering (SPS). Their phase composition, microstructure, thermophysical, and infrared radiative properties were systematically characterized by different measurements. All samples crystallize in a hexagonal magnetoplumbite-type structure, with both lattice parameters and unit cell volumes exhibiting a gradual contraction as the rare-earth ionic radius decreases. The grain growth rate generally increases with a reduction in ionic radius. The thermal diffusivity and conductivity of RMA ceramics decrease with increasing temperature, reaching a minimum of 3.19–2.86 W/(m·K) in the temperature range of 25–1000 °C. The average

收稿日期: 2025-10-02; 收到修改稿日期: 2025-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(92360304); 国家自然科学基金青年项目(52302109); 湖北省自然科学基金青年项目(2023AFB075); 国家自然科学基金重点支持项目(92060201)

National Natural Science Foundation of China(92360304); National Natural Science Foundation of China(52302109); Natural Science Foundation of Hubei Province, China(2023AFB075); National Natural Science Foundation of China(92060201)

作者简介: 许茗奕(1996-), 男, 博士研究生. E-mail: xumingyi96925@163.com

XU Mingyi (1996-), male, PhD candidate. E-mail: xumingyi96925@163.com

thermal expansion coefficients vary from 8.22×10^{-6} to $8.70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ between 200 °C and 1300 °C, indicating comparable thermo-physical across different compositions. In contrast, notable differences appear in the 3–5 μm infrared band, where PrMA exhibits the highest average emissivity (0.746) and LaMA exhibits the lowest (0.493), reflecting the critical role of rare-earth cation electronic structure in radiative behavior. This work elucidates the coupled thermal-radiative modulation mechanism induced by rare-earth ion substitution in magnetoplumbite-type hexaaluminates, offering valuable insights for the design of high-temperature TBC materials that combine low thermal conductivity with high infrared radiative performance.

Keywords: thermal barrier coatings; $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$; grain growth rate; thermo-physical properties; infrared radiation properties

热障涂层(Thermal Barrier Coating, TBCs)在先进航空发动机和燃气轮机热端部件的保护中发挥了重要作用,其主要功能是通过降低热端部件的表面温度来提高构件的运行效率并延长服役寿命。因此,在高温服役环境下提供有效的热防护是热障涂层的一项关键性能。

对于热障涂层的隔热陶瓷层,其热量传输主要通过晶格振动(声子输运)和热辐射(光子传输)进行。迄今为止,大量研究致力于降低材料的声子输运效率和开发低晶格热导率的新材料。然而,随着涡轮前入口燃气温度的不断升高,热辐射在热量传递中的贡献愈发显著。常用的热障涂层材料 Y_2O_3 稳定的 $\text{ZrO}_2(\text{YSZ})$ 对于 6 μm 以下红外波段的红外辐射呈现半透明特性。根据 Planck 黑体辐射定律和 Wien 位移定律,1000 °C 时,黑体以热辐射形式发出能量。超过 90% 的电磁辐射波长集中在 2~14 μm 波段,其中 76% 的电磁辐射波长在 6 μm 以下。研究表明,提高涂层的红外发射率可有效降低涂层表面温度,减少传递至基体的热量,从而增强整体隔热效果^[1]。因此,开发具有低热导率和高红外辐射能力的热障涂层材料已成为研究热点。

高红外发射率且化学稳定性优良的红外辐射陶瓷已广泛应用于工业炉和高超音速飞行器等高温热交换领域^[2-5]。现有材料如尖晶石^[6]、聚合物前驱体^[7]以及非氧化物材料如 SiC ^[8] 和 MoSi_2 ^[9] 等,但其抗热震性和抗氧化性差,难以满足热障涂层应用要求。稀土六铝酸盐 $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}(\text{RMA}, \text{R}=\text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd})$ 是一种 MgO 掺杂的磁铅石型结构稀土六铝酸盐材料,具有高熔点、优异的化学稳定性及独特的片状晶粒结构,赋予材料良好的断裂韧性。例如 LaMA 的断裂韧性可达 $3.07 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 接近传统热障涂层材料 $\text{YSZ}(4.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ ^[10-12]。我们前期研究表明,通过大气等离子喷涂制备的磁铅石型 RMA 涂层经 1600 °C $\times$ 100 h 热处理后仍保持优异的抗烧结性能,显示出未致密烧结特征^[1],因此可作为新型高温热障涂层候选材料。其中,LaMA 是研究最广泛的稀土六铝酸盐材料。掺杂稀土已成为提高材料红外发射率的有效手段^[13],而稀土氧化物因其独特的电子结构和物理化学性质,被称为现代工业不可或缺的“工业维生素”,在热障涂层材料的设计中发挥了重要作用^[14]。例如,多组元稀土掺杂的 YSZ 和烧绿石型热障涂层材料的性能均得到改善^[15-16]。

尽管稀土六铝酸盐作为潜在热障涂层材料已获得广泛关注,但关于不同稀土离子取代对其晶体结构、热物理及红外辐射行为的系统研究尚显不足。本研究选取不同轻稀土离子对磁铅石型 RMA 进行取代,系统探讨稀土离子半径对材料晶体结构、晶粒生长速率、热物理性能及红外发射特性的影响,旨在为高温服役条件下低热导率与高红外辐射性能兼具的热障涂层材料设计提供科学依据。

1 实验方法

1.1 材料制备

采用传统固相反应法制备磁铅石稀土六铝酸盐粉体。将市售的稀土氧化物和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉末(纯度 $\geq 99.999\%$)在 1000 °C 热处理 1 h 以去除结晶水。然后,按照设计摩尔配比混合稀土

氧化物、MgO 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，并湿法球磨 24 h。浆料在烘箱中干燥，得到的干燥粉末在 1550 °C 下保温 12 h 得到 RMA 粉体。

采用放电等离子烧结(Spark Plasma Sintering, SPS)技术制备陶瓷块体。升温速率设定为 100 °C/min，升温至 1400 °C 后施加 20 MPa 压力，并保持 10 min，然后降温得到致密的陶瓷块体。

1.2 性能表征

采用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance, $\text{CuK}\alpha$ 辐射, $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)分析 RMA 陶瓷样品的物相组成，扫描范围 $2\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$ ，步长 0.02° 。使用扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-7500F)观察陶瓷微观结构及晶粒形貌，并通过 Image J 软件统计分析晶粒宽度。通过 X 射线光电能谱(XPS, Thermo Scientific ESCALAB 250Xi)测定部分样品的稀土价态及表面化学状态。

采用激光闪光法(LFA 427, Netzsch)测量 RMA 陶瓷的热扩散系数，测试温度范围 25~1000 °C。通过热膨胀仪(DL 402SE, Netzsch)测试热膨胀系数，测量温度范围为 25~1400 °C。

使用双波段红外辐射率测试仪(IR-2)测定 RMA 陶瓷在 3~5 μm 及 8~14 μm 波段的红外发射率。样品经过研磨抛光以确保表面光滑，测试过程中逐步升温并记录不同温度下的发射率，以评估稀土离子单取代对红外辐射性能的影响。

2 结果与分析

2.1 物相组成与显微结构

图 1(a)为 $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (RMA)致密陶瓷的 XRD 图谱，从图中可以看到，五种陶瓷材料均呈六方磁铅石型结构，对应标准 PDF 卡片(JCPDS 77-1429, LaMA)。根据 XRD 图谱和 Bragg 衍射定律，随着单取代稀土离子的半径减小，RMA 的晶胞参数和体积相应减小，如图 1(b)所示。晶胞参数 a 从 5.593 $\text{\AA}$ 减小至 5.578 $\text{\AA}$ ，晶胞参数 c 从 21.948 $\text{\AA}$ 减小至 21.827 $\text{\AA}$ ，晶胞体积由 594.529 $\text{\AA}^3$ 减小至 588.149 $\text{\AA}^3$ 。如表 1 所示，所有陶瓷的致密度均超过 90%，满足后续热物理性能表征的需求。

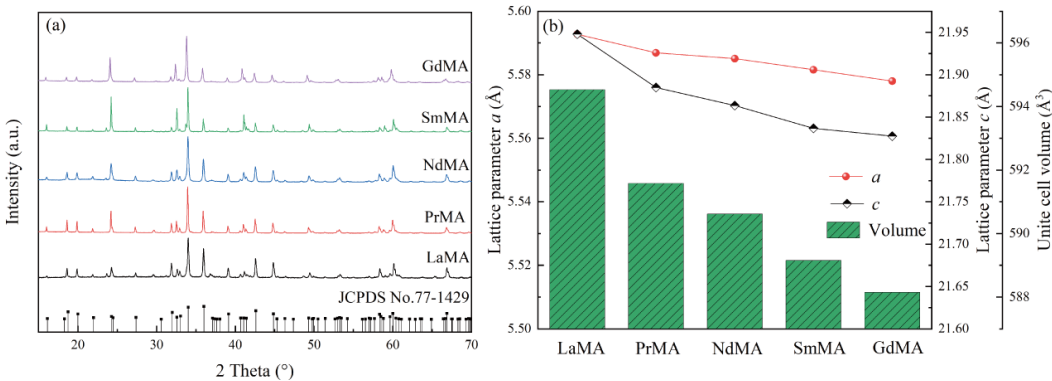


图 1 RMA 陶瓷块体的 XRD 图谱(a)及晶胞参数(b)

Fig. 1 XRD patterns (a) and lattice parameters (b) of RMA ceramic bulks

表 1 RMA 陶瓷的密度与致密度

Table 1 Density and relative density of RMA ceramic bulks

Samples	Theoretical density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Archimedes' density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Relative density
---------	--	--	------------------

LaMA	4.268	4.063	95.20%
PrMA	4.300	4.295	99.88%
NdMA	4.326	4.183	96.69%
SmMA	4.371	4.039	92.40%
GdMA	4.418	4.106	92.94%

图 2 展示了 1500 °C×1 h 热侵蚀后陶瓷的表面形貌，可以明显看到，稀土六铝酸盐的晶粒呈现典型的片状或板面状晶特征。对于磁铅石型稀土六铝酸盐材料，其晶体镜面层中的稀土离子(R^{3+})能够有效抑制晶体沿 c 轴方向的生长，促使晶体优先沿着 a 轴和 c 轴方向生长，最终形成高长宽比的片状晶，此特点赋予材料优异的抗烧结性^[17]。为了评估不同稀土离子取代对于晶粒形貌的影响，采用 Image J 随机选取每种试样 50 个晶粒进行宽度统计，结果如图 2(f)所示。除了 SmMA 以外，各试样的平均晶粒宽度基本随稀土离子半径的减小而增大，宽度由 0.57 μm 增至 0.78 μm ，LaMA 陶瓷的平均晶粒宽度最小，而 SmMA 陶瓷的平均晶粒宽度最大，达 1.10 μm 。

RMA 的晶体结构由镁铝尖晶石层和中间镜面层组成，后者主要由 REO_{12} 四面体组成。镜面层中稀土离子的大小影响其沿 c 轴和 $a(b)$ 轴方向的扩散速率，促使材料形成片状晶。除此以外，根据晶体生长周期键链理论(PBC)，RMA 在(0001)面上的不同附着能决定其晶体生长速率和晶粒形貌，附着能越低，晶体在该面的生长速率越慢。附着能的大小取决于该平面内所有原子的键能总和^[18]。对于磁铅石型稀土六铝酸盐 RMA，其(0001)面晶体生长速率主要取决于稀土离子与氧的化学键键能之和。化学键长越长，键能总和越低。因此，随着稀土离子半径减小，RE-O 键能随之升高，导致晶体在(0001)面上的生长速率越高，RMA 晶粒宽度呈现增大趋势。

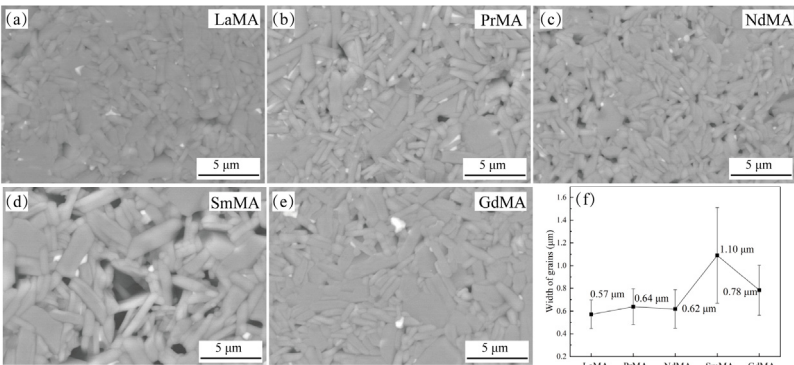


图 2 热侵蚀后陶瓷((a)LaMA, (b)PrMA, (c)NdMA, (d)SmMA, (e)GdMA)的表面形貌及其(f)平均晶粒宽度
 Fig. 2 Surface morphologies of ceramics ((a) LaMA, (b) PrMA, (c) NdMA, (d) SmMA, (e) GdMA) and corresponding average width of grains after thermal etching (f)

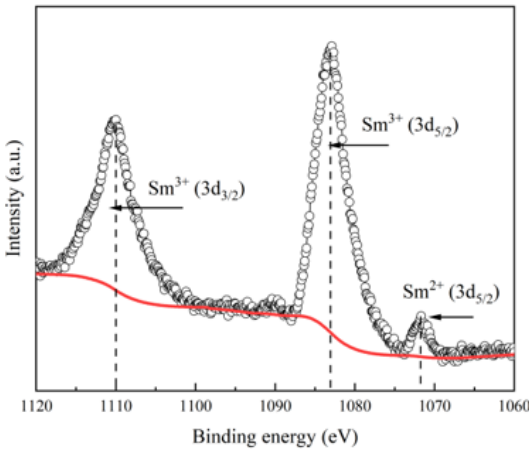


图 3 SmMA 陶瓷中 Sm3d 的 XPS 图谱

Fig. 3 Sm3d XPS spectra of the SmMA ceramic

图 3 为 SmMA 陶瓷中 Sm3d 的 XPS 谱图，图中位于 1083.0 和 1109.8 eV 的谱峰归属于 $\text{Sm}^{3+}3d$ ，而位于 1072.0 eV 的谱峰归属于 $\text{Sm}^{2+}3d$ ^[19-20]。这一结果表明， Sm^{3+} 和 Sm^{2+} 共存于 SmMA 陶瓷中， Sm^{2+} 促进了氧空位的生成。而氧空位显著影响晶粒生长，如纳米 YSZ 粉体表面的氧空位有助于降低晶粒生长的激活能^[21-22]。另外， Sm^{2+} 半径比 Sm^{3+} 半径大 20 pm，这种尺寸差异可能导致晶体镜面层的密排结构发生变化^[20]，进而促使晶体从磁铅石结构向 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 结构转变。这些因素共同促进了晶粒的生长，从而使 SmMA 的晶粒宽度最大。

2.2 热物理性能

图 4(a)展示了 RMA 陶瓷的热膨胀系数(CTE)与温度的关系。随着温度升高，RMA 陶瓷的热膨胀系数不断增大。通过计算热膨胀系数变化曲线的积分面积与对应温度区间长度的比值，得到 RMA 陶瓷在不同温度区间的平均热膨胀系数。计算结果如图 4 (b)所示，RMA 在 200~1300 °C 温度范围内的平均热膨胀系数分别为 8.32×10^{-6} 、 8.70×10^{-6} 、 8.45×10^{-6} 、 8.45×10^{-6} 和 $8.22 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，这些结果表明不同稀土离子对于材料热膨胀系数的影响不大。

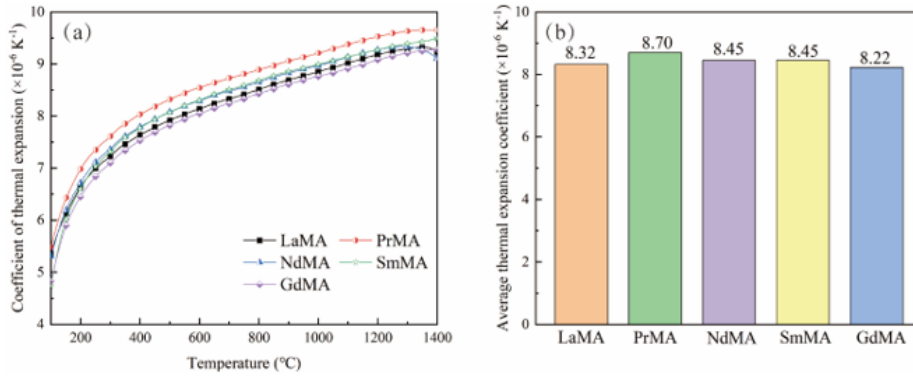


图 4 RMA 热膨胀系数随温度变化曲线(a)和平均热膨胀系数(b)

Fig. 4 (a) Temperature-dependent thermal expansion coefficient and (b) average thermal expansion coefficient of RMA ceramics

图 5 为不同稀土离子取代的 $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (RMA, R = La, Pr, Nd, Sm 和 Gd) 陶瓷的热容、热扩散系数和热导率随温度变化的曲线。热容的计算遵循 Neumann-Kopp 定律，通过组元氧化物的热容相加而得出^[23]。从图 5(a)可以看出，RMA 的热容随着温度升高而逐渐增大。由于相对原子质量相近，RMA 用不同稀土离子取代后的热容变化趋势相似。图 5 (b)为 RMA 陶瓷的热扩散系数随温度的变化曲线，RMA 的热扩散系数随温度升高而降低。在中低温阶段(25~600 °C)，RMA 呈现出强温度依赖性，热扩散系数显著降低，而 600 °C 以上，其热扩散系数对温度依赖性不明显，降低趋势变缓。从图 5(c)观察到除 SmMA 外，试样热导率和热扩散随温度的变化趋势相似。在整个温度范围内，除了 SmMA 以外，试样的热扩散系数相近，变化基本遵循 $1/T$ 的规律，表明非简谐性的声子散射机制在这些陶瓷的热传导中占据主导作用^[24]。基于图 3 结果，SmMA 陶瓷中 Sm^{2+} 和氧空位作为点缺陷，增强点缺陷-声子散射，因而表现出最低的热扩散系数(0.99~0.59 mm^2/s)和热导率(3.19~2.86 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)。

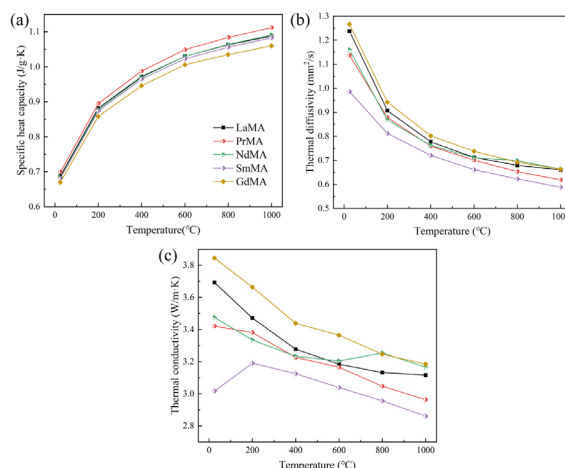


图 5 RMA 陶瓷热容(a)、热扩散系数(b)和热导率(c)随温度的变化

Fig. 5 (a) Heat capacity, (b) thermal diffusivity and (c) thermal conductivity of RMA ceramics

2.3 红外辐射性能

采用 IR-2 设备针对不同稀土离子取代的六铝酸盐陶瓷的红外发射率进行测量，以研究稀土离子代对稀土六铝酸盐红外发射率的影响。图 6(a)展示了稀土六铝酸盐陶瓷在 8~14 μm 波段的红外发射率随温度的变化曲线。样品该波段的红外发射率在 0.834~0.930 范围内波动，且未表现出与不同稀土离子取代的明显相关性。这一现象可用晶体材料的红外吸收机制进行解释，即材料在 8~14 μm 波段的红外辐射吸收需要满足两个基本条件：(1)材料中的化学键或配位多面体的振动频率与红外辐射频率相匹配；(2)该振动模式能够引起偶极矩的变化。稀土六铝酸盐在 25~600 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的平均红外发射率如图 6(b)所示，试样在该波段的红外发射率非常接近，最大仅相差约 6.2%。磁铅石结构的 RMA 晶体主要由 $[\text{LaO}_{12}]$ 十四面体、 $[\text{AlO}_6]$ 八面体、 $[\text{AlO}_4]$ 四面体和 $[\text{MgO}_4]$ 四面体组成，其在该波段的振动吸收主要来自配位多面体的伸缩振动^[25]，稀土氧化物在 $\text{R}_2\text{O}_3\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 体系仅占 7.14 mol%，不同稀土离子(La-Gd)在质量和半径上的差别对晶格结构影响轻微，因此稀土离子对于材料在 8~14 μm 波段的红外发射率影响有限。

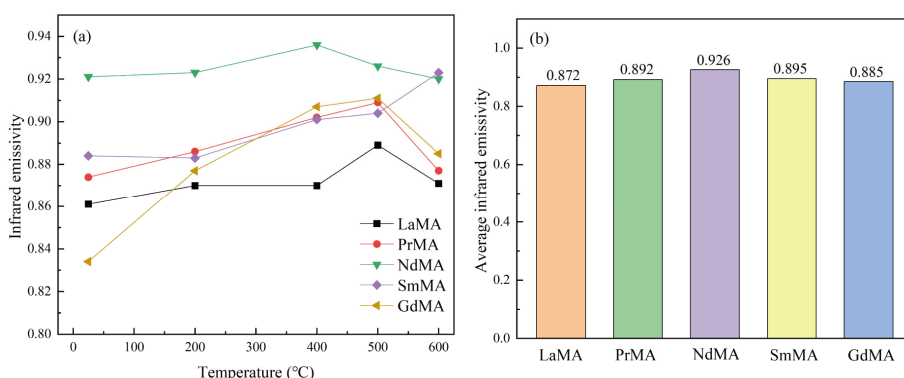


图 6 RMA 陶瓷在 8~14 μm 红外发射率随温度变化(a)和该波段的平均红外发射率(b)

Fig. 6 (a) Temperature-dependent infrared emissivity and (b) the average emissivity in the range of 8~14 μm of RMA ceramics

图 7 为 RMA 陶瓷在 3~5 μm 的红外发射率随温度的变化曲线。从图中观察到，样品的红外发射率均随温度升高而增大，且不同试样间的红外发射率差异显著。其中，LaMA 陶瓷在该波段的红外发射率最低，其值从 0.460（室温）上升至 0.553（600 $^{\circ}\text{C}$ ），平均发射率为

0.493。相比之下, PrMA 陶瓷的红外发射率最高, 其值从 0.716(室温)上升至 0.807(600 °C), 平均发射率达到 0.746。比 LaMA 陶瓷的红外发射率提高了 51.3%。

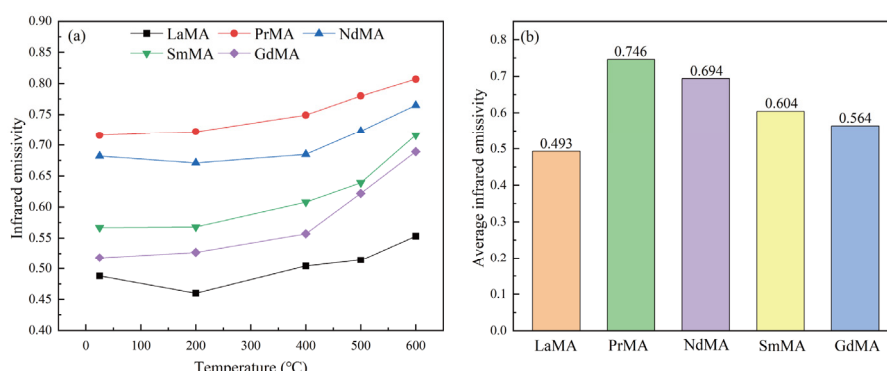


图 7 RMA 陶瓷在 3~5 μm 的红外发射率随温度变化(a)和该波段的平均红外发射率(b)

Fig. 7 (a) Temperature-dependent infrared emissivity and (b) the average emissivity in the range of 3–5 μm of RMA ceramics

图 8 为不同稀土氧化物在 3~5 μm 的红外发射率随温度的变化曲线。从图中可以看出, 稀土氧化物在该波段的红外发射率大小关系为: $\text{Pr}_6\text{O}_{11} > \text{Nd}_2\text{O}_3 > \text{Sm}_2\text{O}_3 > \text{Gd}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ 。

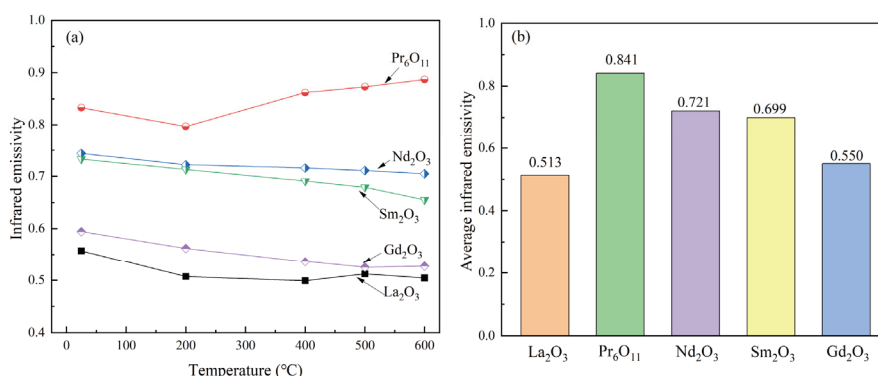


图 8 稀土氧化物在 3~5 μm 的红外发射率随温度的变化(a)和该波段的平均红外发射率(b)

Fig. 8 (a) Temperature-dependent infrared emissivity and (b) the average emissivity in the range of 3–5 μm of rare-earth oxides

稀土氧化物在 3~5 μm 波段的发射率主要源于稀土离子的本征吸收和自由载流子吸收^[26]。 La^{3+} 的电子构型可以表示为 $[\text{Xe}]4d^05s^2$, 其电子跃迁主要对应 5s 和 5p 轨道之间的能级变化, 且这些跃迁位于紫外范围, 因此其氧化物红外发射率最低。 Gd^{3+} 的电子构型为 $[\text{Xe}]4f^7$, 其 4f 轨道电子属于半充满状态, 电子排布相对简单, 自旋与轨道的耦合相对较弱, 因而能级结构相对简单。而对于 Pr^{3+} , Nd^{3+} 和 Sm^{3+} 而言, 其能级结构非常复杂, 自旋-轨道耦合和晶体场效应共同决定, 具体的影响机制仍需进一步研究。基于前期研究, Pr^{3+} 在红外波段存在多个吸收峰, 使得 Pr_6O_{11} 常被用作高红外发射率填料^[27-28]。稀土氧化物在该波段红外发射率与相应稀土离子取代的稀土六铝酸盐的发射率变化规律一致, 表明磁铅石型稀土六铝酸盐在 3~5 μm 波段的红外发射率与稀土离子的能级结构有关。

3 结论

本工作系统研究了不同稀土离子取代对磁铅石型稀土六铝酸盐 $\text{RMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (RMA, R = La, Pr, Nd, Sm, Gd) 晶体结构、晶粒生长行为、热物理性能及红外辐射特性的影响规律。主要

结论如下:

1)所有样品均保持六方磁铅石结构,随着稀土离子半径减小,晶胞参数与体积逐渐收缩,晶粒生长速率增加。其中,SmMA 样品中 Sm^{2+} 及其诱导的氧空位加速晶粒长大,晶粒宽度增加最显著;

2)RMA 陶瓷在热物理性质上表现相近,热容随温度升高逐渐增大,热扩散系数和热导率基本呈现随温度升高而降低的趋势。其中,SmMA 陶瓷表现出最低的热扩散系数($0.99\sim 0.59\text{ mm}^2/\text{s}$)和热导率($3.19\sim 2.86\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)。

3)在红外辐射性能方面,各样品在 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段发射率相近,但在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 短波红外区差异显著。PrMA 样品平均发射率最高,达 0.746,而 LaMA 样品最低,仅为 0.493,此差异主要源于稀土离子能级结构及电子跃迁特性。

本研究首次揭示了稀土离子取代对磁铅石型六铝酸盐短波红外辐射性能的影响机制,为高温热障涂层材料中兼具低热导率与高红外辐射能力的新型陶瓷体系设计提供了科学依据与实验支撑。

参考文献:

- [1] XU M Y, CHEN W B, LU X R, *et al.* Effect of high-temperature infrared emissivity on thermal cycling performance of magnetoplumbite-type thermal barrier coatings under thermal gradient condition. *Journal of the European Ceramic Society*, 2024, **44**: 448.
- [2] PURWAR A, BASU B. Thermo-structural design of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ -based thermal protection system for hypersonic space vehicles. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, **100**: 1618.
- [3] SZIROCZAK D, SMITH H. A review of design issues specific to hypersonic flight vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 2016, **84**: 1.
- [4] TAN W, PETORAK C A, TRICE R W. Rare-earth modified zirconium diboride high emissivity coatings for hypersonic applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, **34**(1): 1.
- [5] VAN WIE D M, DREWRY D G, KING D E, *et al.* The hypersonic environment: Required operating conditions and design challenges. *Journal of Materials Science*, 2004, **39**(19): 5915.
- [6] WANG G Y, SANG S B, WANG Q H, *et al.* Infrared radiation property and enhancement mechanism of MgCr_2O_4 doped with NiO prepared at different temperature. *Ceramics International*, 2024, **50**(1, Part A): 9.
- [7] MANDAL J, FU Y, OVERVIG A C, *et al.* Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. *Science*, 2018, **362**(6412): 315.
- [8] MU Y, YAN L W, LIU P S, *et al.* High-temperature-resistant ZrO_2 coating with SiC-whisker-enhanced interfacial bonding strength and improved emissivity for flexible silica fibre fabric. *Ceramics International*, 2023, **49**(4): 6825.
- [9] SHAO G F, WU X D, CUI S, *et al.* High emissivity $\text{MoSi}_2\text{-TaSi}_2$ -borosilicate glass porous coating for fibrous ZrO_2 ceramic by a rapid sintering method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **690**: 63.
- [10] GADOW R, LISCHKA M. Lanthanum hexaaluminate—novel thermal barrier coatings for gas turbine applications—materials and process development. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **151-152**: 392.
- [11] SAI RAM Y N V, TARASANKA C, PRABAKARAN J. Preparation and characterization of lanthanum hexa aluminate powders for high temperature applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, **39**: 1472.
- [12] LU X R, YUAN J Y, XU M Y, *et al.* Improvement on thermophysical and mechanical properties of $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ magnetoplumbite by Nd_2O_3 and Sc_2O_3 co-doping. *Ceramics International*, 2021, **47**(20): 28892.
- [13] XU M Y, YUAN J Y, LU X R, *et al.* Infrared radiation and thermal cyclic performance of a high-entropy rare-earth hexaaluminate coating prepared by atmospheric plasma spraying. *Ceramics International*, 2022, **48**(18): 26003.

- [14] 牛璐玥. 稀土及过渡金属离子掺杂氧化物发光玻璃的制备及性能研究. 济南: 齐鲁工业大学硕士学位论文, 2019.
- [15] HUANG Y, DONG S J, LÜ K Y, *et al.* Compatibility of low thermal conductivity and high infrared emissivity of plasma-sprayed $\text{Sm}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ and $\text{Pr}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2023, **457**: 129312.
- [16] YIN J H, ZHOU T, ZHANG M, *et al.* Exploring the mechanism of infrared emissivity control in YSZ-based ceramics doped with Yb_2O_3 . *Optical Materials*, 2024, **157**: 116107.
- [17] CHEN X L, ZHANG Y F, ZHONG X H, *et al.* Thermal cycling behaviors of the plasma sprayed thermal barrier coatings of hexaaluminates with magnetoplumbite structure. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, **30(7)**: 1649.
- [18] 陈小龙. 磁铅石型稀土六铝酸盐热障涂层材料. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所博士学位论文, 2012.
- [19] BRUNCKOVA H, KANUCHOVA M, KOLEV H, *et al.* XPS characterization of SmNbO_4 and SmTaO_4 precursors prepared by sol-gel method. *Applied Surface Science*, 2019, **473**: 1.
- [20] ZHANG J F, ZHONG X H, CHENG Y L, *et al.* Thermal-shock resistance of $\text{LnMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}$) with magnetoplumbite structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **482(1-2)**: 376.
- [21] CHEN S G, YIN Y S, WANG D P, *et al.* Reduced activation energy and crystalline size for yttria-stabilized zirconia nano-crystals. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **267(1-2)**: 100.
- [22] SATYAJIT SHUKLA S S, RASHMI V, SRI B. Reduced activation energy for grain growth in nanocrystalline yttria-stabilized zirconia. *Nano Letters*, 2003, **3**: 397.
- [23] LEITNER J, VOŇKA P, SEDMIDUBSKÝ D, *et al.* Application of Neumann-Kopp rule for the estimation of heat capacity of mixed oxides. *Thermochimica Acta*, 2010, **497(1-2)**: 7.
- [24] ZHOU X, SONG W J, YUAN J Y, *et al.* Thermophysical properties and cyclic lifetime of plasma sprayed $\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$ for thermal barrier coating applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, **103(10)**: 5599.
- [25] LIU H Z, LIU Z-G, OUYANG J H, *et al.* Influences of lattice vibration and electron transition on thermal emissivity of Nd^{3+} doped $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ hexaaluminates for metallic thermal protection system. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**: 161903.
- [26] DONG S J, ZHANG F N, LI N, *et al.* Thermal radiation and cycling properties of (Ca, Fe) or (Sr, Mn) co-doped $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, **40(5)**: 2020.
- [27] BELANÇON M P, MARCONI J D, ANDO M F, *et al.* Near-IR emission in Pr^{3+} single doped and tunable near-IR emission in $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped tellurite tungstate glasses for broadband optical amplifiers. *Optical Materials*, 2014, **36(6)**: 1020.
- [28] LIU S P, MA Z, LIU Y B, *et al.* Infrared radiative performance and ablation resistance of coatings sprayed with Pr_6O_{11} core-shell-structured $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ powders. *Ceramics International*, 2025, **51(3)**: 3879.