



Preparation and infrared radiation characterization of Ni doped lanthanum aluminate coatings

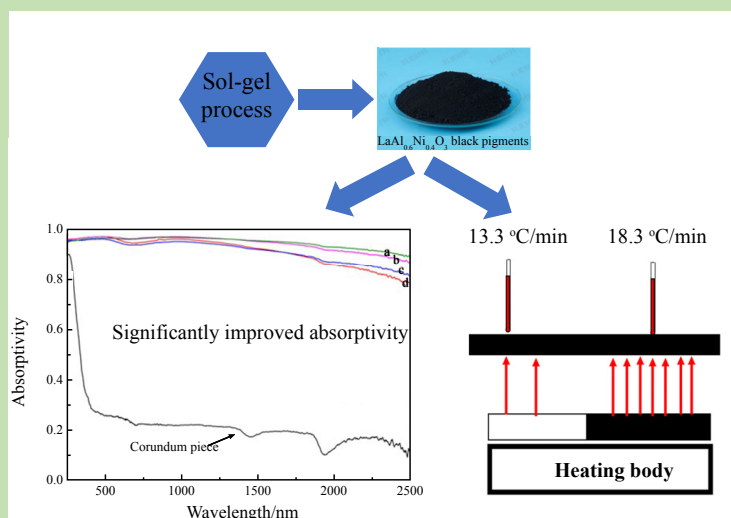
Pengfei LIU¹, Weihua LU¹, Zhao HAN^{1,2,3*}, Yixiang CHEN³, Jiangtao LI³

1. School of Metallurgy Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

2. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling, Ministry of Education, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

3. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Ni ion doped LaAlO_3 -based infrared radiation materials were synthesized with lanthanum nitrate, aluminum nitrate, and nickel nitrate as starting materials via sol-gel method. Infrared radiation coatings were then prepared on the surface of alumina ceramic substrate by spraying process with inorganic binders of aluminium dihydrogen phosphate, aluminum sol, silica sol and sodium silicate, respectively. The thermal stability of the powder was analyzed by thermogravimetry-differential thermal analyzer. The XRD, ultraviolet-visible-near-infrared spectrophotometer and dual-band IR-2 emissivity



tester were used to study the crystalline phase, reflectance and the 3~5 μm infrared emissivity of powder and coatings, respectively. The thermal shock resistance of the coatings were tested by air cooling. In addition, the effects of the binders on the phase composition, thermal stability and infrared emissivity of the coatings were also investigated. The results showed that Ni ion doping improved the performance of infrared absorption of LaAlO_3 coatings, the infrared emissivity as high as 0.94 in the spectral region of 3~5 μm , which was 161% higher than that of LaAlO_3 . The coatings had the least impurity phase in case of aluminum sol as binder and at the same time the coatings had the highest infrared emissivity and the best thermal shock resistance. The infrared emissivity of the coatings was as high as 0.95 and 0.93 in the band of 0.76~2.5 and 3~5 μm respectively. Furthermore, the coatings also had good thermal shock resistance, it's did not appear significantly peeling failure phenomenon after 50 thermal shocks. The coatings had a significant effect on enhanced radiation heat transfer, and the experimental energy saving rate reached 31.7%. This new type of high emissivity infrared radiation coatings had promising application in the field of thermal energy saving.

Key words: infrared radiation; emissivity; coating; thermal radiation; energy-saving

收稿日期: 2018-01-03, 修回日期: 2018-03-20, 网络发表: 2018-05-29, Received: 2018-01-03, Revised: 2018-03-20, Published online: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51372255); 钢铁冶金新技术国家重点实验室开放研究项目(编号: 201601)

作者简介: 刘鹏飞(1993-), 男, 安徽省六安市人, 硕士研究生, 冶金工程专业, E-mail: liupengfei.vip@outlook.com; 韩召, 通讯联系人, E-mail: authan@163.com.

引用格式: 刘鹏飞, 卢卫华, 韩召, 等. 镍掺杂铝酸镧涂层的制备及其红外辐射性能. 过程工程学报, 2018, 18(6): 1261-1266.
Liu P F, Lu W H, Han Z, et al. Preparation and infrared radiation characterization of Ni doped lanthanum aluminate coatings (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(6): 1261-1266, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217439.

镍掺杂铝酸镧涂层的制备及其红外辐射性能

刘鹏飞¹, 卢卫华¹, 韩召^{1,2,3*}, 陈义祥³, 李江涛³

1. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002

2. 安徽工业大学冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室, 安徽 马鞍山 243002

3. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190

摘 要: 采用溶胶-凝胶法合成了 Ni^{2+} 掺杂的 LaAlO_3 基红外辐射材料 $\text{LaAl}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{2.89}$ (LANO), 以其为辐射基料, 利用喷涂工艺在氧化铝陶瓷片表面制备红外辐射涂层, 考察了磷酸二氢铝、铝溶胶、硅溶胶和钠水玻璃 4 种粘结剂对涂层物相组成、热稳定性和红外辐射性能的影响. 结果表明, 以 LANO 为辐射基料、铝溶胶为粘结剂时, 涂层红外辐射性能最佳, 3~5 μm 波段红外发射率达 0.93; 所制涂层具有良好的抗热震性能, 50 次热震后涂层未明显剥落失效; 涂层具有显著的强化辐射传热效果, 节能率达 31.7%.

关键词: 红外辐射; 发射率; 涂层; 热辐射; 节能

中图分类号: TQ174

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)06-1261-06

1 前言

红外辐射涂层是一种新型的功能陶瓷涂层, 在高温炉窑中常被涂敷于耐火材料基底上, 可有效提高炉窑的辐射加热效率, 同时使炉窑温度分布更均匀. 涂敷在基体表面的红外辐射涂层可有效保护基体, 延长炉窑的工作寿命^[1-4].

近年来, 红外辐射涂层的研究取得了较大进展, 已报道的红外辐射涂层在 8~14 μm 波段发射率已达 0.9 以上. 由韦恩位移定律可知, 当温度大于 1000 $^{\circ}\text{C}$ 时, 76% 以上的热辐射能量集中在 1~5 μm 波段, 但目前的红外辐射涂层在此波段发射率仍较低^[5,6], 且存在与基体结合强度弱、抗热震性能差等缺陷^[7,8], 严重制约着其在热工装备节能领域的应用. 针对红外辐射涂层在高温氧化气氛下的不足, 开发在 3~5 μm 波段具有高发射率且抗热震、抗氧化性能良好的红外辐射涂层很有必要^[9,10].

本研究组^[11]报道了一种镍离子掺杂的铝酸镧基红外辐射材料 $\text{LaAl}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{2.89}$ (LANO), 其 3~5 μm 波段发射率高达 0.93, 但未对涂层制备和性能及其与基体的结合强度进行系统研究. LANO 中的主要组分 LaAlO_3 的化学组成和热膨胀系数与现有热工装备中常用的高铝质陶瓷耐火材料的匹配性良好, 故推测以 LANO 为涂层基料, 有望在陶瓷基底上制备出在 3~5 μm 波段发射率较高且抗热震性良好的红外辐射涂层. 本研究以 LANO 为辐射基料, 分别以磷酸二氢铝、铝溶胶、硅溶胶和钠水玻璃为粘结剂, 在氧化铝陶瓷表面制备了高发射率红外辐射涂层, 探讨了不同粘结剂对涂层红外辐射性能和抗热震性能的影响.

2 实验

2.1 样品制备

采用溶胶-凝胶法制备 LANO. 分析纯试剂硝酸镧、硝酸铝和硝酸镍(国药集团化学试剂有限公司), 柠檬酸(国药集团化学试剂有限公司)为辅助酸. 制备流程见图 1. 制备过程: 按 $\text{LaAl}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_3$ 的金属离子化学计量比将 $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 加入适量的去离子水中配成溶液. 将乙二醇(国药集团化学试剂有限公司)和柠檬酸按质量比 1.2:1.0 加入适量去离子水配成溶液. 将两种溶液按质量比 1:1 混合, 在 HH-2 数显恒温水浴锅(常州天瑞仪器有限公司)中 80 $^{\circ}\text{C}$ 下持续搅拌至溶液变成黏稠的膏状物, 置于电子万用电炉(上海科创实业发展有限公司)中持续加热, 得前驱体粉末. 将前驱体粉末在玛瑙研钵中研磨, 过 400 目(38 μm)筛, 在 1200 $^{\circ}\text{C}$ 空气气氛下预烧. 预烧后粉末用台式

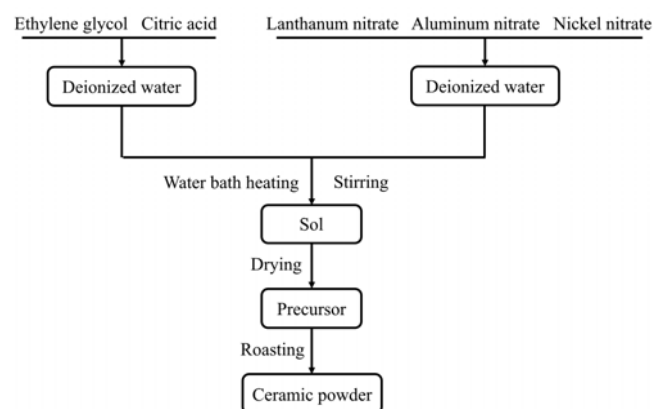


图 1 LANO 粉体的制备流程

Fig.1 Preparation path of LANO powder

粉末压片机(天津市思创精实科技发展有限公司)在 120 MPa 下压制成片, 再于 1500 °C 空气气氛下焙烧 2 h, 得 LANO, 研磨成粉末备用。

将粘结剂磷酸二氢铝($\text{AlH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 广东汕头西陇化工有限公司)、铝溶胶($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 上海依夫实业有限公司)、硅溶胶($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, 郑州祥之达化工)和钠水玻璃($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 青岛优索化学科技有限公司)分别与去离子水按质量比 1:10 配成溶胶, 按粉体/溶液质量比 4:6 加入过筛后的 LANO 粉体配成浆料, 喷涂在处理好的氧化铝陶瓷片(苏州茜玛克特种陶瓷有限公司)表面。涂层在 110 °C 鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)中烘干, 1200 °C 热处理 2 h, 随炉冷却后即得红外辐射涂层。

2.2 样品表征

用 Setsys Evolution 18 型热重-差热分析仪(TG-DTA, 法国塞塔拉姆公司)分析 LANO 试样的热稳定, 高纯氮气(南京特种气体厂有限公司)流量 30 mL/min, 升温速率 20 °C/min, 从室温升温至 1600 °C。用 Bruker D8 型 X 射线粉末衍射仪(XRD, 德国布鲁克公司)分析样品的物相组成, $\text{CuK}\alpha$ 辐射源, 扫描速率 6°/min。用 Hitachi U4100 型紫外-可见-近红外分光光度计(UV-Vis-NIR, 日本日立公司)测定样品在 250~2500 nm 的光谱吸收率。用 IR-2 型双波段发射率测量仪(上海技术物理研究所)检测样品的红外发射率, 测定波段为 3~5 μm 。在 1100 °C 下采用空冷方法检测涂层的抗热震性能, 用自制的碳化硅电热管对涂层的热辐射性能进行评价。

3 结果与讨论

3.1 热重-差热分析

图 2 为 LANO 合成过程的热重-差热曲线。从图可以看出, LANO 合成过程主要可分为 4 个阶段: 第 1 阶段室温至 300 °C, 有明显失重和吸热, 为 La_2O_3 吸附的

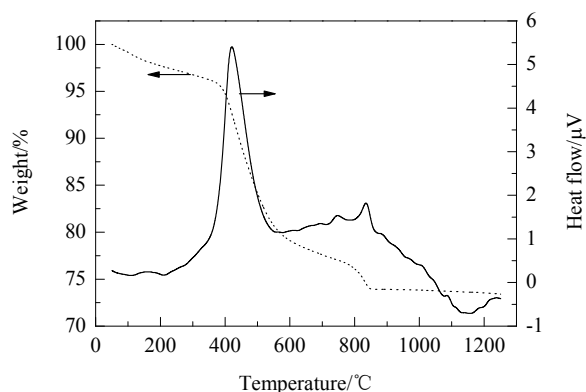


图 2 LANO 的热重-差热曲线
Fig.2 TG-DTA curves of LANO

空气中的水蒸气逸出; 第 2 阶段 400~600 °C, 有明显失重和强烈放热, 是乙二醇、柠檬酸与 NO_3^- 发生剧烈氧化还原反应所致; 第 3 阶段 600~1000 °C, 主要是 LANO 固溶体形成过程, 伴随放热; 第 4 阶段 1000~1200 °C, 主要是 LANO 晶粒长大过程, 伴随吸热, LANO 晶粒长大和晶格中微量氧元素逸出及氧空位形成, 促进钙钛矿结构形成^[12-14], 与文献^[11]一致。LANO 的化学式为 $\text{LaAl}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{2.89}$ ^[11], 表达式中氧缺失就是此阶段氧元素逸出所致。

3.2 粉体的物相分析

图 3 为粉体的 XRD 谱。与标准衍射卡片(JCPDS 70-4098)对比可确定 LaAlO_3 和 LANO 为斜方钙钛矿结构。LANO 中仅有微弱的杂质相, 表明大部分 Ni^{2+} 掺杂进入了 LaAlO_3 晶格内。LANO 的衍射峰比 LaAlO_3 整体向左偏移, 这是由于离子半径较大的 Ni^{2+} (0.069 nm) 占据离子半径较小的 Al^{3+} (0.054 nm) 的晶格位置, 使晶面间距增大, 晶格畸变程度增大, 导致衍射峰向左移动^[15]。LANO 中极少量的杂质相为 Ni^{2+} 过饱和与试样中的 La 和 O 元素形成的 LaNiO_3 相, 与文献^[16]类似。

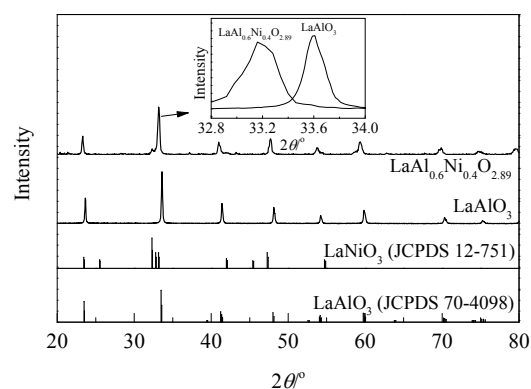


图 3 粉体的 XRD 谱
Fig.3 XRD patterns of powders

3.3 粉体的吸收光谱

图 4 为 LaAlO_3 和 LANO 的吸收光谱。从图可以看出, LaAlO_3 的吸收率远小于 LANO, 表明 Ni^{2+} 掺杂后, LaAlO_3 在近红外区域的吸收率显著增加。这主要有两方面原因^[16-19]: 一是 Ni^{2+} 和氧空位形成的杂质能级使 LaAlO_3 带隙变窄, 增大了自由载流子浓度, 增强了杂质能级吸收和自由载流子吸收; 二是 Ni^{2+} 掺杂使 LaAlO_3 带隙中出现了一个激活能仅需 0.03 eV 的 $\text{Ni}^{3+} \leftrightarrow \text{Ni}^{2+}$ 小极化子吸收带, 其吸收边为 41.3 μm , 位于中红外区域, 极大拓宽了 LaAlO_3 基红外辐射材料的红外吸收范围。

Ni^{2+} 掺杂使 LaAlO_3 粉体在 3~5 μm 近红外波段的发射率从 0.42 提高到了 0.92, 提高了 161%。LANO 在近

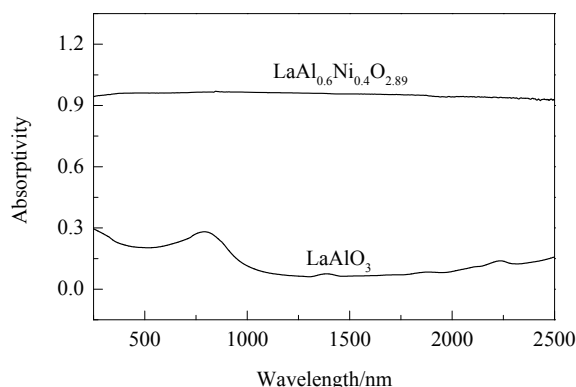


图 4 粉体的吸收光谱

Fig.4 Infrared absorption spectrum of powders

红外波段的发射率较高, 为 0.94, 主要原因是 Ni^{2+} 离子掺杂引起了陶瓷内 $\text{Ni}^{3+} \leftrightarrow \text{Ni}^{2+}$ 小极化子跃迁吸收, 增强了 LANO 的红外辐射性能, 比高温氧化物陶瓷^[20]的发射率高. Ni^{2+} 掺杂的 LaAlO_3 在近红外波段具有优异的热辐射性能, 有望成为新型的红外辐射节能材料, 在热工装备节能领域发挥重要作用, 对节能减排有积极意义.

3.4 涂层的物相分析

以 LANO 为辐射基料, 分别采用 4 种不同的粘结剂制备了红外辐射涂层, 其 XRD 谱如图 5 所示. 从图可以看出, 所制涂层的物相均以 LANO 为主, 且均出现了部分杂相. 铝溶胶和钠水玻璃为粘结剂所制涂层中杂相含量较少, 而磷酸二氢铝和硅溶胶为粘结剂所制涂层中杂相含量较多. 氧化物中阳离子得失电子的能力与其电负性直接相关, 可根据氧化物中阳离子的电负性确定氧化物的碱/酸性强弱^[21,22], 由此确定碱性 $\text{La}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$, 因此 LANO 中的 La_2O_3 更易与碱性更弱的 SiO_2 发生化学反应. 同理, 碱性较强的 La_2O_3 与酸性粘结剂磷酸二氢铝也易发生化学反应, 而辐射基料在中性粘结剂(Al_2O_3)和碱性粘结剂(Na_2SiO_3)中具有较高的化学稳

定性, 因此, 相应涂层中杂相含量较少.

3.5 涂层的红外辐射性能

LANO 涂层样品在 1200°C 保温 2 h 后的近红外波段吸收曲线如图 6 所示. 从图可以看出, 随波长增加, 涂层的红外吸收率降低程度稍有不同, 可能是不同粘结剂生成的杂质相不同所致, 与 XRD 分析结果非常吻合. 对铝溶胶所制涂层 $0.76 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 近红外波段曲线积分, 得其红外吸收率为 0.95, 远大于刚玉片的吸收率 0.18.

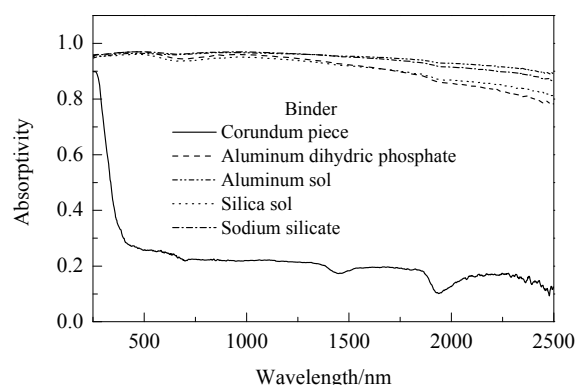


图 6 不同粘结剂所制 LANO 涂层的红外吸收谱

Fig.6 Infrared absorption spectra of LANO coatings prepared with different binders

为评价 LANO 涂层在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射性能, 测定了其发射率. 用中性和碱性粘结剂铝溶胶和钠水玻璃所制涂层红外辐射性能较好, 发射率分别为 0.93 和 0.91, 而用酸性粘结剂磷酸二氢铝和硅溶胶所制涂层红外辐射性能较差, 发射率分别为 0.78 和 0.88. 根据涂层物相组成(图 5)推测, 原因在于中性和碱性粘结剂与辐射基料 LANO 化学相容性较好, 涂层中产生的杂相较少, 而酸性粘结剂易与 LANO 反应生成较多的杂相, 杂相对 LANO 的电子跃迁和自有载流子吸收有明显的抑制作用, 会影响涂层的红外辐射性能^[19,23].

3.6 涂层的抗热震性能

为研究涂层的抗热震性能, 将其在 1100°C 下保温 10 min 后进行空冷热震, 冷却到室温后观察涂层的脱落情况, 重复 50 次. 图 7 是所制涂层热震前后的实物照片, 可以看出, 用铝溶胶为粘结剂制备的涂层热震后基本保持了原貌, 未观察到开裂或脱落现象; 用磷酸二氢铝、硅溶胶和钠水玻璃为粘结剂制备的涂层热震后边缘部位出现轻微脱落, 而涂层内部基本保持完好. 表明用铝溶胶为粘结剂制备的涂层比另 3 种粘结剂制备的涂层具有更好的抗热震性能. 主要原因在于, 铝溶胶经高温固化后, 其化学组成和物相结构与涂层基体一致, 而另 3 种粘结剂的化学组成和物相结构与涂层基体差异较大, 容易产生界面失配并由此导致脱落.

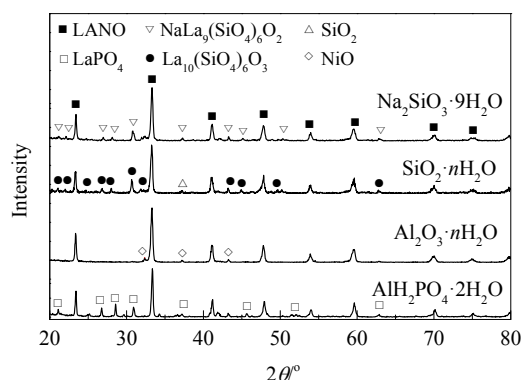


图 5 粘结剂对涂层物相组成的影响

Fig.5 Effect of binder on phase composition of coating

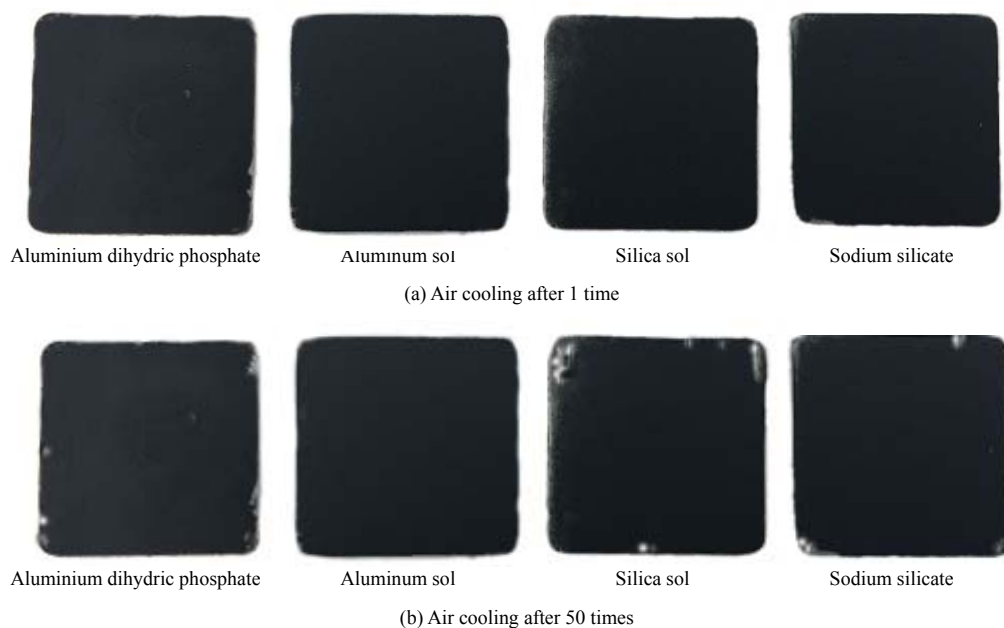


图 7 不同粘结剂所制 LANO 涂层的抗热震性能

Fig.7 Thermal shock resistance of LANO coatings prepared with different binders

3.7 涂层热辐射性能测试

为评价 LANO 涂层的辐射加热效果,进行了辐射加热对比实验,实验室自建的实验装置如图 8 所示. 用铝溶胶为粘结剂,在陶瓷管内外壁涂覆 LANO 涂层. 用有无涂层的陶瓷管对石墨管辐射加热. SiC 通电发热,以辐射形式将热量传给陶瓷管内壁涂层,内壁涂层以传导形式将吸收的热量传给外壁涂层,外壁涂层以辐射形式将石墨管加热. 以石墨管升温速度和最终稳定温度表征 LANO 涂层的红外辐射性能.

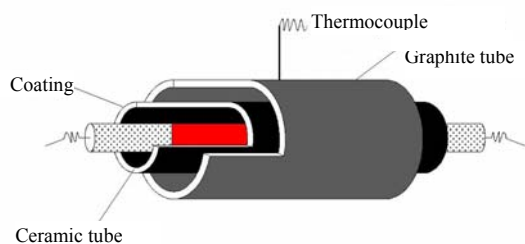


图 8 加热管示意图

Fig.8 Schematic diagram of heating pipe

SiC 发热体在恒定功率下加热, 比较有无涂层的陶瓷管加热石墨管的升温速度及最终平衡温度, 结果如图 9 所示. 由图可知, 无涂层的陶瓷管加热时, 石墨管从初温 25°C 升至最终平衡温度 358°C 所需时间为 25 min , 平均升温速率为 $13.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$; 有涂层的陶瓷管加热时石墨管从初温 25°C 升至最终平衡温度 446°C 需 23 min , 平均升温速率为 $18.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 比无涂层陶瓷管升温速率提高了 31.7% , 最终平衡温度提升了 92°C . 在恒定功率下,

与无涂层陶瓷管相比, 有涂层的陶瓷管加热时石墨管升温快, 最终达到的平衡温度高, 表明 LANO 高发射率涂层具有优异的热辐射性能, 节能效果较好.

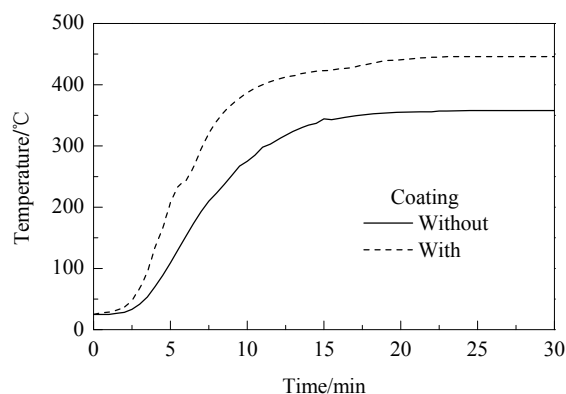


图 9 恒定功率加热石墨管的升温速率

Fig.9 Heating rate of graphite tube heating by ceramic tube with or without coating under constant power

4 结 论

采用溶胶-凝胶法制备了 Ni^{2+} 掺杂的 LaAlO_3 基红外辐射材料 $\text{LaAl}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{2.89}$ (LANO), 以其为基料, 采用 4 种不同的粘结剂在氧化铝基板表面制备了红外辐射涂层, 研究了涂层的红外辐射性能与抗热震性能, 得到以下结论:

(1) 所制 LANO 在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段的发射率高达 0.94, 比纯 LaAlO_3 提高了 161%.

(2) 以铝溶胶为粘结剂所制涂层在 $0.76\sim 2.5$ 和 $3\sim 5$

μm 波段的红外发射率分别为0.95和0.93.

(3) LANO涂层具有优异的热辐射性能,节能效果较好.

参考文献

- [1] Robert S, Stephebn D. High-emissivity coating technology improves annealing furnace efficiency [J]. *Iron Amp Steel Technology*, 2007, 4(5): 319–324.
- [2] Kleeb T, Olver J. High-emissivity coatings for energy savings in industrial furnaces [J]. *Industrial Heating*, 2007, 74(6): 57–61.
- [3] 白皓, 王苗, 苍大强, 等. 高炉热风炉用高发射率涂料的节能效果及机理分析 [J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(7): 915–921.
Bai H, Wang M, Cang D Q, et al. Energy-saving effect and mechanism analysis of high emissivity coatings for bf hot blast stoves [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32(7): 915–921.
- [4] 冯胜山, 鲁晓勇, 许顺红. 高温红外辐射节能涂料的研究现状与发展趋势 [J]. *工业加热*, 2007, 36(1): 10–15.
Feng S S, Lu X Y, Xu S H. Research status and development of infrared radiation energy saving coatings used in high temperature [J]. *Industrial Heating*, 2007, 36(1): 10–15.
- [5] Lu L, Fan X A, Zhang J, et al. Evolution of structure and infrared radiation properties for ferrite-based amorphous coating [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2014, 316: 82–87.
- [6] Shen X, Li L, Wu X, et al. Infrared emissivity of Sr doped lanthanum manganites in coating form [J]. *J. Alloys Compd.*, 2011, 509(31): 8116–8119.
- [7] 王晓, 侯佩民, 徐元浩, 等. 红外辐射涂料的现状及其发展方向 [J]. *上海涂料*, 2012, 50(7): 31–34.
Wang X, Hou P M, Xu Y H, et al. The current situation and development direction of infrared radiant coatings [J]. *Shanghai Coating*, 2012, 50(7): 31–34.
- [8] 樊希安, 张坚义, 陆磊, 等. 堇青石-铁氧体基复合节能涂层的结构与红外辐射性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(7): 891–896.
Fan X A, Zhang J Y, Lu L, et al. Microstructure and infrared radiation properties of cordierite-ferrite based energy-saving composite coating [J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(7): 891–896.
- [9] He X D, Li Y B, Wang L D, et al. High emissivity coatings for high temperature application: progress and prospect [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(17): 5120–5129.
- [10] Tucker R, Ward J. Identifying and quantifying energy savings on fired plant using low cost modelling techniques [J]. *Appl. Energy*, 2012, 89(1): 127–132.
- [11] 卢卫华, 刘鹏飞, 韩召, 等. 镍离子掺杂对铝酸镧红外辐射性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(3): 371–377.
Lu W H, Liu P F, Han Z, et al. Effect of Ni^{3+} doping on infrared radiation properties of lanthanum aluminate [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(3): 371–377.
- [12] Povoden-karadeniz E, Grundy A N, Chen M, et al. Thermodynamic assessment of the La-Fe-O system [J]. *J. Phase Equilib. Diffus.*, 2009, 30(4): 351–366.
- [13] Wærnhus I, Vullu P E, Holmestad R, et al. Electronic properties of polycrystalline LaFeO_3 : part I. experimental results and the qualitative role of schottky defects [J]. *Solid State Ionics*, 2005, 176(37/38): 2783–2790.
- [14] 翁端, 丁红梅, 徐鲁华, 等. 锶和铈对 LaMnO_{3+x} 稀土纳米钙钛矿材料性能的影响 [J]. *中国稀土学报*, 2001, 19(4): 338–342.
Weng D, Ding H M, Xu L H, et al. Effect of strontium and cerium on performances of nanometer LaMnO_{3+x} rare earth perovskite [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2001, 19(4): 338–342.
- [15] Han Z, Li X W, Ye J K, et al. Significantly enhanced infrared emissivity of LaAlO_3 by Co-doping with Ca^{2+} and Cr^{3+} for energy-saving applications [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2015, 98(8): 2336–2339.
- [16] Han Z, Liu J, Li X W, et al. Ca^{2+} -doped LaCrO_3 : a novel energy-saving material with high infrared emissivity [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2014, 97(9): 2705–2708.
- [17] Choi M, Janotti A, Walle C G V D, et al. Native point defects in LaAlO_3 : a hybrid functional study [J]. *Phys. Rev. B: Condens. Matter*, 2013, 88(21): 214117(1–8).
- [18] Ouellette D G, Moetakef P, Cain T A, et al. High-density two-dimensional small polaron gas in a delta-doped mott insulator [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3284–3284.
- [19] Stefanidis G D, Van Gem K M, Heynderickx G J, et al. Evaluation of high-emissivity coatings in steam cracking furnaces using a non-grey gas radiation model [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 137(2): 411–421.
- [20] 孙家跃, 杜海燕, 石春山. 标度二元氧化物酸碱性质的新方法 [J]. *化学通报*, 1991, (2): 19–22.
Sun J Y, Du H Y, Shi C S. A new method for scaling acid-base properties of binary oxides [J]. *Chemistry*, 1991, (2): 19–22.
- [21] 董元簏, 王海川. 冶金物理化学 [M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2012: 100–106.
Dong Y C, Wang H C. *Metallurgical physical chemistry* [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2012: 100–106.
- [22] Dhahri A, Horchaniil-naifer K, Benedetti A, et al. Combustion synthesis and photoluminescence of Eu^{3+} doped LaAlO_3 nanophosphors [J]. *Opt. Mater.*, 2012, 34(11): 1742–1746.