

# Ca<sup>2+</sup>、Y<sup>3+</sup>共掺杂CeO<sub>2</sub>对其发射率性能影响

曾祥雄<sup>1,2</sup>, 徐国跃<sup>1,2</sup>, 刘宁<sup>1,2</sup>, 李卫<sup>1,2</sup>, 孟雪<sup>1,2</sup>, 尤玲丽<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏南京 210016;

2. 江苏省先进无机功能复合材料协同创新中心, 江苏南京 210016)

**摘要:** 本文通过共沉淀法, 以草酸为沉淀剂, Ca<sup>2+</sup>、Y<sup>3+</sup>共掺杂CeO<sub>2</sub>来降低其高温下红外发射率, 并且Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>粉体发射率最低, 最小值为0.271。再用两种不同沉淀剂KOH及NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>分别合成Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>粉体, 所得结果可知, KOH为沉淀剂所合成的Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>粉体发射率最低, 最低值为0.223。通过γ射线辐照处理Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>粉体, 可使其最低发射率由0.271降至0.187。

**关键字:** 红外发射率; 共掺杂; 共沉淀法; 沉淀剂; γ射线辐照

中图分类号: TQ629

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)01-0027-05

## Effects of the Infrared Emissivity of CeO<sub>2</sub> Co-doping with Ca<sup>2+</sup> and Y<sup>3+</sup>

ZENG Xiangxiong<sup>1,2</sup>, XU Guoyue<sup>1,2</sup>, LIU Ning<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, MENG Xue<sup>1,2</sup>, YOU Lingli<sup>1,2</sup>

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Advanced Inorganic Function Composites, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, oxalate co-precipitation method is used to reduce the infrared emissivity under high temperature of CeO<sub>2</sub> co-doping with Ca<sup>2+</sup> and Y<sup>3+</sup>. The synthetic powder that has the lowest infrared emissivity is Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>, and the lowest infrared emissivity is 0.271. In order to effectively reduce the infrared emissivity of Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>, the oxalate is changed to KOH. Then, the lowest infrared emissivity of Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub> is reduced to 0.223. Moreover, the pretreatment of Gamma irradiation is added to the synthetic powder Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.15</sub>Ca<sub>0.05</sub>O<sub>2-δ</sub>. The lowest infrared emissivity can be reduced from 0.271 to 0.187 by Gamma irradiation.

**Key words:** infrared emissivity, co-doping, co-precipitation, precipitator, Gamma irradiation

## 0 引言

在现代航空航天技术的发展中, 高温红外隐身材料在航空军事方面已有部分应用。但是其红外隐身效果还需进一步提高, 主要是由于现有的高温红外隐身材料还不能到达应用的需求<sup>[1-3]</sup>。特别是发动机的热端部件的红外隐身的发展, 有迫切的需求, 如现有发动机喷管采取喷涂耐高温的低发射率材料降低红外辐射, 从而实现高温下红外隐身。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律及维恩位移定理可知: 为了实现飞机发动机红外隐身, 需降低物体的工作温度, 或降低其红外发射率, 现在主要是通过降低红外发射率来实现红外隐身<sup>[4]</sup>。

对于降低材料于高温下的红外发射率问题, 国内已在这方面有一定的研究并取得一定的成果, 如蒋勇

等<sup>[5]</sup>通过高温固相法合成的(Ce<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>1.9</sub>)<sub>0.97</sub>(MgO)<sub>0.03</sub>粉体在600℃下的红外发射率可降低至0.255, 王笃功等<sup>[6]</sup>通过柠檬酸络合法制备的8YSZ粉体在600℃下可降至0.288。尽管这些研究在降低材料高温下的发射率有一定进展, 但是这些材料制备成涂层时, 其高温下发射率将升高至0.3以上, 不能很好地满足实际应用。

通过对现有的耐高温低红外发射率材料研究进展可知, 材料的高温下发射率还不是较低, 还需进一步降低以满足实际应用。由基尔霍夫定律可知: 红外不透明材料的透射率为0, 红外发射率( $\varepsilon$ )、吸收率( $\alpha$ )及反射率( $\rho$ )有以下关系<sup>[7]</sup>:

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho \quad (1)$$

由式(1)可知, 提高材料的反射率, 可降低其发射

收稿日期: 2016-08-16; 修訂日期: 2016-12-28。

作者简介: 曾祥雄(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究功能涂层材料。E-mail: zengxx910920@163.com。

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NS2014058); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51403102);

江苏省自然科学基金项目(BK20140811)。

率。在光学理论中，材料的电导率与折射率、反射率存在如下关系<sup>[8]</sup>：

$$n^2 = \frac{\mu}{2} \left\{ \left( \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{4\sigma^2}{\nu^2}} \right) + \varepsilon \right\} \quad (2)$$

$$\rho = \left( 1 - \frac{2}{n+1} \right)^2 \quad (3)$$

式中： $\sigma$ 为电导率； $\mu$ 为磁导率； $\rho$ 为反射率； $\nu$ 为普朗克常数； $\varepsilon$ 为介电常数。由式(2)和(3)可知，通过提高材料电导率可降低其红外发射率。由我们前期研究结果得出，本文中 CeO<sub>2</sub> 作为耐高温低发射率材料的基础，通过掺杂来提高 CeO<sub>2</sub> 电导率从而降低其发射率。由 Hideaki 等<sup>[9-11]</sup>研究可知，在所有可通过掺杂提高 CeO<sub>2</sub> 电导率的元素中，碱金属元素及稀土元素最佳，并且 Ca<sup>2+</sup> 离子掺杂是碱金属中最佳的，同时鉴于稀土元素中 Y<sup>3+</sup> 效果不错并成本最低，所以选择了 Ca<sup>2+</sup>、Y<sup>3+</sup> 共掺杂 CeO<sub>2</sub> 以降低其发射率。并通过选择不同的共掺杂合成方法，探究其对 CeO<sub>2</sub> 发射率的影响，从而选出适合合成工艺。并采取  $\gamma$  射线辐照粉体方法来进一步降低其发射率，并取得明显效果。最终，得到高温下最低发射率的粉体及处理工艺，并探究对发射率具体影响机理。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

六水硝酸亚铈，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；四水硝酸钇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；四水硝酸钙，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；草酸，南京化学试剂有限公司；NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>，南京化学试剂有限公司；KOH，南京化学试剂有限公司；无水乙醇，南京化学试剂有限公司；去离子水，实验室自制。

### 1.2 材料的合成及处理

首先，利用共沉淀法合成低发射率粉体： $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$ ， $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$ ， $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.1}\text{Ca}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ ， $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.05}\text{Ca}_{0.15}\text{O}_{2-\delta}$ ， $\text{Ce}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$ 。具体实验步骤为：①将硝酸亚铈等原料按配比称量并加入无水乙醇做溶剂均匀混合。②以草酸为沉淀剂，配制相对过量的草酸溶液，然后硝酸盐溶液中逐滴加入草酸溶液并沉淀。③抽滤，并用无水乙醇洗涤沉淀，最后，烘干前驱体。④热分解前驱体，以 4°C/min 的升温速率升温至 600°C 保温 4h，随炉冷却，最终得到合成粉体。

通过选择不同的沉淀剂合成粉体，选择  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  为合成粉体，再分别以 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> 及 KOH 为沉淀剂合成掺杂粉体，具体操作与以草酸

为沉淀剂合成方法一致。从而最终得到以 3 种不同沉淀剂合成的粉体。

利用 <sup>60</sup>Co $\gamma$  射线辐照处理筛选的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  粉体，50kGy 辐照强度辐照掺杂粉体 56h，然后测定合成粉体在 <sup>60</sup>Co 源  $\gamma$  射线辐照前后的红外发射率，最后对比辐照前后的发射率变化，并记录其变化趋势。

### 1.3 测试及表征

1) 采用中科院上海技术物理研究所研制的 IR-2 双波段发射率测量仪和 CB-2 型精密温度控制仪测试粉体 3~5 μm 波段高温红外发射率，测试温度范围从 25°C 至 600°C。

2) 对于合成粉体的结构及物相分析，将采用 BRUKER D8 Advanced 型 X 射线衍射仪进行分析，运行功率为 40kV/30mA, CuK $\alpha$  辐射，运行速度为 5°/min，测试的角度范围为 5°~80°。

3) 微观形貌分析：采用德国蔡司 SIGMA 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 分析样品的微观形貌。

4) 粉体的电导率由 Hesse 高温电导率仪测得，测试时的加温速率为 10°C/min，测试温度范围从 25°C 至 600°C。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 测试及分析

利用草酸为沉淀剂，Ca<sup>2+</sup>、Y<sup>3+</sup> 共沉淀法掺杂 CeO<sub>2</sub> 所得低发射率样品的 XRD 图谱如图 1 所示，将所得 XRD 图谱与 JCPDS 卡片 01-072-7943 对比可知，各合成粉体的各主衍射峰完全与 CeO<sub>2</sub> 的主衍射峰位置相吻合，都只有萤石结构的 CeO<sub>2</sub> 相，氧化钇和氧化钙的物相不存在，即得出所合成粉体掺杂完全，无其他杂相。但是，各掺杂粉体的晶体结构都有一定畸变，晶体尺寸有一定的变大，需进一步分析。

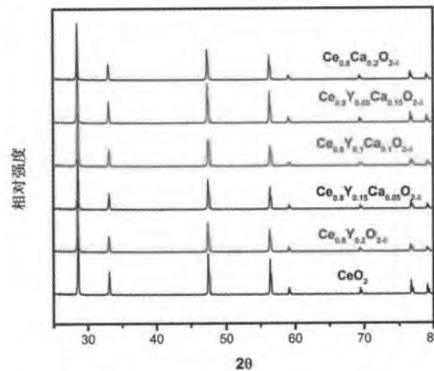


图 1 草酸为沉淀剂  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$  掺杂  $\text{CeO}_2$  所得样品 XRD 图  
Fig.1 The XRD patterns of  $\text{CeO}_2$  co-doping with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Y}^{3+}$  by oxalate co-precipitation

晶体尺寸  $D$  可以通过 Scherrer 公式可知:

$$D = \frac{\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4)$$

式中:  $K$  为 Scherrer 常数;  $\beta$  为积分半高宽;  $\lambda$  为 X 射线波长;  $\theta$  为衍射角。而各样品的晶格常数将可通过下式计算:

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (5)$$

式中:  $d = (\lambda / 2 \sin \theta)$  为晶体面间距, 由式(4)、(5)计算可得各样品的晶体尺寸及晶格常数如表 1 所示, 随着  $\text{Ca}^{2+}$  掺杂量的增加, 晶体尺寸也随之增大, 而且各掺杂粉体的主衍射峰相对  $\text{CeO}_2$  都有一个向左偏移, 由于掺杂粒子的进入晶体发生了晶格畸变。主要是因为掺杂离子半径  $\text{Ca}^{2+}(0.112\text{nm}) > \text{Y}^{3+}(0.1019\text{nm}) > \text{Ce}^{4+}(0.097\text{nm})$ , 从而使得  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Y}^{3+}$  替代  $\text{Ce}^{4+}$  进入  $\text{CeO}_2$  晶体中, 晶体尺寸变大<sup>[12]</sup>。并且晶体尺寸变大, 晶界减少, 使得红外光在传播中的吸收减弱, 进一步使得掺杂样品的发射率降低。

表 1 关于  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2-x}\text{Ca}_x\text{O}_{2-\delta}$  样品晶体结构参数

Table 1 Calculated properties of the  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2-x}\text{Ca}_x\text{O}_{2-\delta}$  series

成分	晶体尺寸/nm	晶格常数 $a$
$\text{CeO}_2$	63.2	5.4082
$\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$	64	5.4129
$\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$	67.3	5.4180
$\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.1}\text{Ca}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$	68.7	5.4191
$\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.05}\text{Ca}_{0.15}\text{O}_{2-\delta}$	71.3	5.4258
$\text{Ce}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$	71.8	5.4269

通过草酸、 $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  及 KOH 三种沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  的 XRD 图谱如图 2 所示, 与 JCPDS 卡片 01-072-7943 对比可知, 以  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  及 KOH 为沉淀剂合成的粉体与草酸合成的一样没有其他相的杂峰, 都只有萤石结构的  $\text{CeO}_2$  相, 从而可进一步得出  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  及 KOH 为沉淀剂合成粉体中无外来杂质,

掺杂完全。其中, 三者的主衍射峰相对  $\text{CeO}_2$  而言都向左偏移, 但 KOH 沉淀合成的样品向左偏移量最小, 即晶面间距增大量最小, 并且其半宽高最窄。

## 2.2 SEM 测试及分析

所合成的部分粉体进行 SEM 测试, 测试的结果如图 3 所示, 图 3(a)为  $\text{CeO}_2$ , 图 3(b)为草酸沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$ , 图 3(c)为 KOH 沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$ , 其中  $\text{CeO}_2$  粉体颗粒结构都较杂乱, 外形不规则, 表面不平整, 大小不一。但所合成的粉体颗粒相对较规则, 草酸为沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  颗粒大小差不多, 形状均匀偏球形, 而 KOH 为沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  粉体的颗粒都呈片状, 更加光亮平整, 晶体缺陷少, 使得粉体的发射率降低。

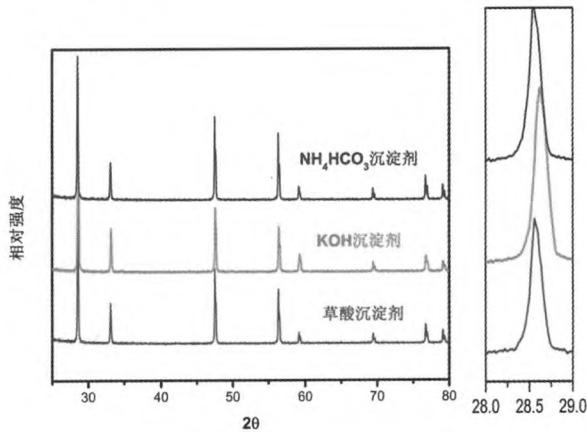


图 2 草酸、 $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  及 KOH 为沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  的 XRD 图

Fig.2 The XRD patterns of  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  by co-precipitation

同时, 由于颗粒除了表面对光线的散射外, 还有边缘散射, 颗粒形貌变规整, 使其总边缘长度增大, 相应的增加了总边缘散射, 提高了散射系数, 从而引起粉体发射率降低<sup>[13-14]</sup>。

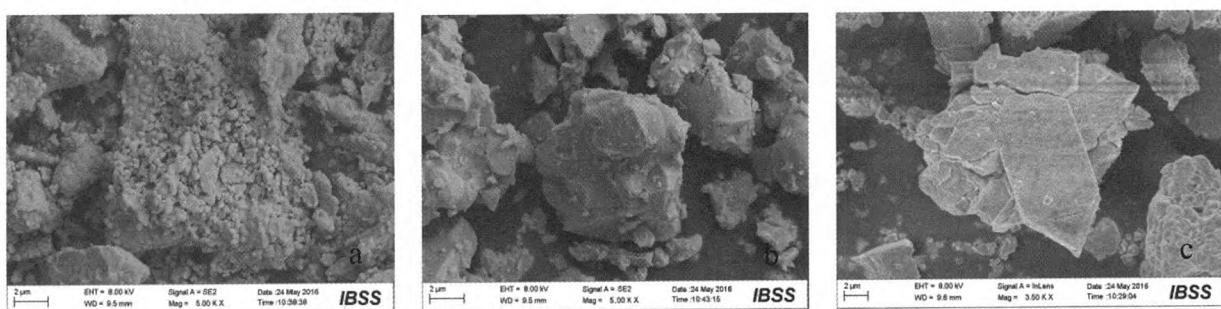


图 3 样品 SEM 图

Fig.3 SEM images of samples

### 2.3 样品的红外发射率测试及分析

通过草酸为沉淀剂共沉淀法,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$ 掺杂  $\text{CeO}_2$  所得各粉体 3~5  $\mu\text{m}$  波段红外发射率测试结果如图 4 所示, 首先, 随着测试温度的升高各样品的红外发射率随之降低并在 600℃ 到达最低, 从而有利于高温应用。并且各掺杂粉体的发射率都要低于  $\text{CeO}_2$  发射率, 从测试结果可以看出,  $\text{Y}^{3+}$  离子的掺杂对降低发射率的效果要优于  $\text{Ca}^{2+}$  的掺杂, 并且,  $\text{Ca}^{2+}$  离子单掺杂  $\text{CeO}_2$  所得粉体  $\text{Ce}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$  发射率降低的是最少的。所有合成的粉体中  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  在 600℃ 的发射率最低为 0.271。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$  掺杂  $\text{CeO}_2$  所得各粉体的电导率如图 5 所示, 且  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  的电导率最大。所有掺杂粉体发射率的降低可能是由于粉体的电导率的提高, 但是由于  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{Y}^{3+}$  的离子半径不一样, 不同含量的两种离子的掺杂使得  $\text{CeO}_2$  的晶体的晶格畸变程度不一样, 掺杂  $\text{Ca}^{2+}$  离子过量的样品晶体尺寸偏大, 使得发射率有所升高。

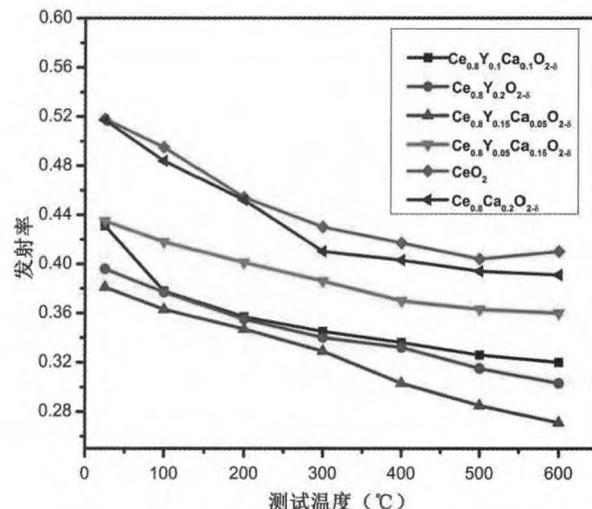


图 4  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$  掺杂  $\text{CeO}_2$  所得各样品红外发射率

Fig.4 The infrared emissivity of  $\text{CeO}_2$  co-doping with  $\text{Ca}^{2+}$  And  $\text{Y}^{3+}$

由草酸、KOH 及  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  分别为沉淀剂所合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  的发射率如图 6 所示, 可知, 3 种不同沉淀剂所合成的粉体的发射率也不同, 其中 KOH 沉淀剂合成的粉体的发射率最低, 其在 600℃ 最低发射率为 0.223, 而  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  为沉淀剂所合成粉体发射率最高, 草酸的居中。可能是由于合成过程中, KOH 为沉淀剂时, 所得到的粉体形状呈片状更易降低对红外光的吸收, 从而使得合成的粉体发射率降低。

由于半导体材料的载流子的运动特性将影响其对近红外光的吸收, 对所合成的发射率最低粉体进行辐照处理, 用  ${}^{60}\text{Co}$  源  $\gamma$  射线 50kGy 剂量辐照  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  粉体与未辐照的发射率如图 7 所示,

可以看出,  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  粉体经辐照之后, 其发射率有明显的降低, 在 600℃ 最低发射率点的发射率由未辐照的 0.271 降至 0.187, 辐照处理对降低发射率有明显效果。其可能原因是合成的粉体为半导体, 经辐照后, 其自由载流子随温度的升高, 载流子的迁移率提高, 降低了对近红外光的吸收, 从而降低粉体的发射率。

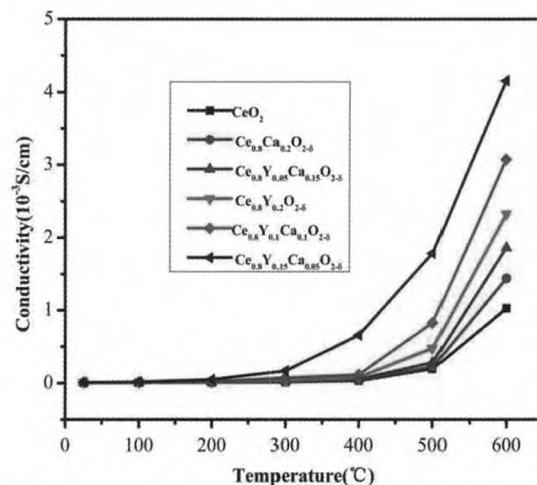


图 5  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$  掺杂  $\text{CeO}_2$  所得各样品电导率从 25℃ 至 600℃

Fig.5 Electrical conductivity of  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2-x}\text{C}_{\text{x}}\text{O}_{2-\delta}$  from 25°C to 600°C

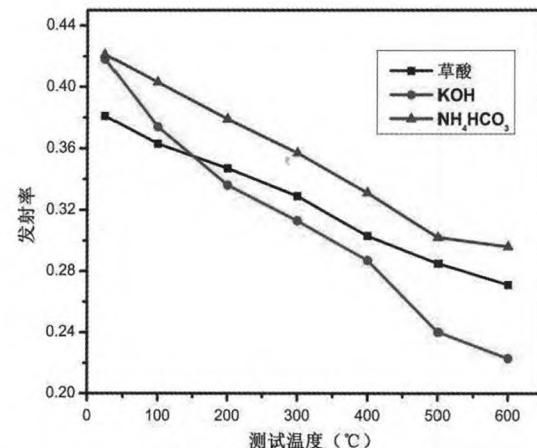


图 6 不同沉淀剂合成的  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  的发射率

Fig.6 The infrared emissivity of  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  co-precipitation by different precipitators

### 3 结论

1) 利用  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$  共掺杂  $\text{CeO}_2$  所得粉体的发射率都低于  $\text{CeO}_2$  的发射率, 并且所有的合成粉体中  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  的发射率最低, 600℃ 时, 最低发射率为 0.271。

2) 通过草酸、KOH 及  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  分别作为沉淀剂合成  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  中, 以 KOH 为沉淀剂合成粉体的发射率最低, 其最低发射率为 0.223。

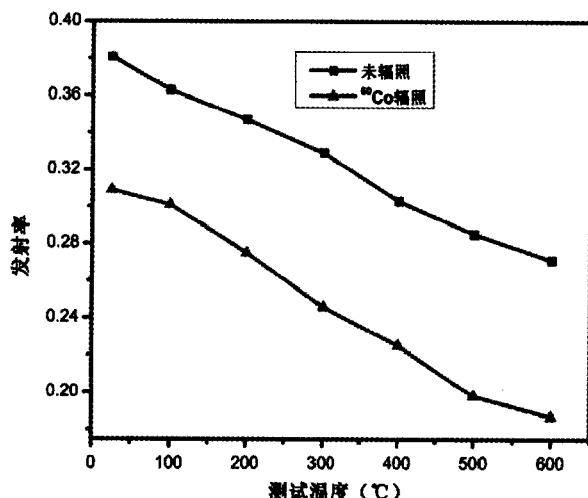


图 7  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  粉体辐照与未辐照的发射率

Fig.7 The infrared emissivities of  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$  irradiated and non-irradiated

3) 利用  ${}^{60}\text{Co}$  源  $\gamma$  射线 50kGy 剂量辐照处理  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.15}\text{Ca}_{0.05}\text{O}_{2-\delta}$ , 可以使其发射率大幅度下降, 600°C 最低发射率由 0.271 降至 0.187。

## 参考文献:

- [1] Zueco J, Alhama F. Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, **101**(1):73-86.
- [2] 吕俊伟, 李海燕, 朱敏, 等. 飞机的红外隐身技术[J]. 现代防御技术, 2006, **36**(4): 92-95.  
Lu Junwei, Li Haiyan, Zhu Min, et al. The infrared stealth technology of plane[J]. *Modern Defence Technology*, 2006, **36**(4): 92-95.
- [3] Lews C F. Materials keep a low profile[J]. *Materials Engineering*, 1988, **6**(3): 37.
- [4] 吴剑锋, 何广军, 赵玉芹. 飞机尾向的红外辐射特性计算[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, **7**(6): 26-28.  
Wu Jianfeng, He Guangjun, Zhao Yujin. The Calculation for Strength of Infrared Radiation in the Opposite Direction of the Airplane[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2007, **7**(6): 26-28.
- [5] 蒋勇. 氧化铈基 3-5μm 波段耐高温低发射率涂料的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- Jiang Yong. Research on the Ceria-based low infrared emissivity coatings in 3-5μm wave band with high temperature resistance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [6] 王笃功. 3-5μm 波段 YSZ 系抗热震耐高温低发射率涂层的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
Wang Dugong. Research on the YSZ system low infrared emissivity coatings in 3-5μm wavelengths with high temperature resistant and thermal shock resistance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [7] S. Enoch, J. J. Simon, L. Escoubas, Z. Elalmy. Simple layer-by-layer photonic crystal for the control of thermal emission[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(26): 101-105.
- [8] R. Siegle, J.R. Howell. *Thermal radiation heat transfer*. McGraw-Hill Book Company[M]. 1972:1-7.
- [9] HideakiInaba, Hiroaki Tagawa. Ceria-based solid electrolytes[J]. *Solid State Ionics*, 1996, **83**:1-16.
- [10] K. P. Padmasree, R. A. Montalvo-Lozano. Electrical conduction and dielectric relaxation process in  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{1.9}$  electrolyte system[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**: 8584-8589.
- [11] Suparna Banerjee, Parukuttyamma Sujatha Devi. Understanding the effect of calcium on the properties of ceria prepared by a mixed fuel process[J]. *Solid State Ionics*, 2008, **179**: 661-669.
- [12] R. A. Montalvo-Lozano, K.P. Padmasree. Effect of  $\text{Ca}^{2+}$  or  $\text{Mg}^{2+}$  additions on the electrical properties of yttria doped ceria electrolyte system[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, **525**: 184-190.
- [13] 徐文兰, 沈学础. 含片状粒子涂层的热辐射[J]. 红外与毫米波学报, 1996, **15**(2): 151-155.  
Xu Wenlan, Shen Xuechu. With flake coating of thermal radiation particles[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 1996, **15**(2): 151-155.
- [14] 蒋勇, 徐国跃, 郭腾超, 等. 热处理对氧化铈粉体 3~5μm 波段红外发射率的影响[J]. 红外技术, 2011, **33**(12): 699-703.  
Jiang Yong, Xu Guoyue, Guo Tengchao. Effects of Heat Treatment on the Infrared Emissivity of Cerium Oxide in 3-5 μm Waveband[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(12): 699-703.