# Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO 共掺对钇稳定氧化锆材料热物理性 能的影响

## 舒焕烜<sup>1,2</sup>,牟仁德<sup>2</sup>,陆峰<sup>2</sup>,王开军<sup>1</sup>,朱道飞<sup>1</sup>

(1.昆明理工大学 冶金与能源学院, 昆明 650093; 2.北京航空材料研究院, 北京 100095)

## Influence of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO Co-doping on Thermal Physical Properties of Zirconia-based Ceramic Materials

SHU Huan-xuan<sup>1,2</sup>, MU Ren-de<sup>2</sup>, LU Feng<sup>2</sup>, WANG Kai-jun<sup>1</sup>, ZHU Dao-fei<sup>1</sup>

 Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology University, Kunming 650093, China; 2.Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the influence of  $Gd_2O_3$ -NiO co-doping on thermal physical properties of zirconia-based ceramic materials. **Methods**  $Gd_2O_3$ -NiO co-doped YSZ(contain 3.5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mol fraction)(GN-YSZ)was prepared by solid phase synthesis method .The crystal structure and phase composition of the GN-YSZ were studied by XRD analysis. The microstructure was analyzed by SEM. The thermal diffusivities of ceramic materials were tested by laser-flash method. The infrared transmittance was studied by infrared transmittance instrument. **Results** The results showed that after  $Gd_2O_3$ -NiO co-doping of YSZ, the content of monoclinic phase(M) was decreased, the thermal conductivity in the temperature range of room temperature to 1300 °C was reduced, and the infrared transmittance of ceramics materials in the wavelength range of 2.5  $\mu$ m was also

• 57 •

收稿日期: 2016-02-13; 修订日期: 2016-03-18

Received: 2016-02-13; Revised: 2016-03-18

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA034403)

Foundation: Supported by the National High Technology Plan(863 Plan)(2015AA034403)

作者简介: 舒焕烜(1988—),男,湖南怀化人,硕士研究生,主要研究方向为新型热障涂层陶瓷材料。

Biography: SHU Huan-xuan(1988—), Male, from Huaihua, Hunan, Master graduate student, Research focus: new ceramic materials for thermal barrier coatings.

reduced. **Conclusion** The influencing mechanism of doping oxides on the thermal physical property of YSZ was that co-doping with  $Gd_2O_3$  and NiO resulted in lattice distortion and content variation of monoclinic phase(M), tetragonal phase(T) and cubic phase(C) in YSZ. The influencing mechanism of the radioactive heat transfer was that doping transition metallic NiO led to an optical absorption at the particular wavelengths. That was why transition metallic elements such as Ni<sup>2+</sup> site could effectively reduce the transmittance of GN-YSZ ceramics at short wavelengths, while reduce infrared radioactive heat transfer at high temperature.

KEY WORDS: Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; NiO; solid phase synthesis; infrared transmittance; thermal conductivity; YSZ

随着发动机推力和效率的提升,发动机涡轮前的温度需不断提高,也将导致通过光子传热(辐射)的比例增加。目前,已经得到实际应用的热障涂层陶瓷层材料是质量分数为 6%~8%的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>部分稳定的氧化锆(YSZ)<sup>[1-5]</sup>,然而 6%~8%YSZ 在1250 ℃时 90%的入射辐射波长位于 0.3~2.8 μm范围内,YSZ 通常对波长在 0.3~5 μm 内的 90%热辐射几乎不起阻挡作用<sup>[6]</sup>。因此对于将来高动力、高效率的航空发动机来说,寻求具有耐高温、高隔热、低辐射传热、综合性能更好的新型陶瓷材料是先进航空发动机迅速发展的迫切要求,也是目前热障涂层领域的研究热点<sup>[3-9]</sup>。目前,新型的热障涂层材料主要包括稀土锆酸盐 Ln<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、镁基铝酸镧<sup>[10]</sup>、氧化物掺杂 YSZ 等。

目前,对于稀土锆酸盐 Ln<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、镁基铝酸镧 等新型热障涂层材料主要集中于降低声子在材料 中的传热研究,而关于高温下降低辐射传热的研究 鲜有报道。在 YSZ 中掺杂氧化物对降低热导率有 两方面的贡献:一方面是减弱声子在材料中的传 输, YSZ 中引入添加剂后, 会在晶格中产生原子级 缺陷及应力场,这些缺陷包括不同质量的原子、空 穴以及间隙原子, 它们可有效地散射声子, 减小声 子的平均自由程,从而降低声子传热;另一方面是 降低了辐射传热,掺杂还能改变热障涂层材料的色 度,使之成墨绿色或灰色,从而减少可见光及近红 外光范围内的辐射传热。Zhu 等[11]发现稀土氧化物 掺杂的 YSZ 涂层具有更低的热导率和更长的热循 环寿命。Tamarin 等<sup>[12]</sup>发现通过添加二价过渡金属 氧化物, 热障涂层的高温热导率可降低 30%~ 40%

文中采用高温固相反应的方法制备 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 NiO 共掺 YSZ 陶瓷基材料,研究了 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO 共 掺对 YSZ 的相组成、显微结构、热扩散系数、热 导率和红外透过率的影响,并探讨了 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 掺杂对 YSZ 的影响机理。

## 1 实验

### 1.1 样品的制备

采用高温固相反应法制备 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 共掺 YSZ 陶瓷材料(GN-YSZ),实验原料为 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9%),NiO(99.9%),Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99.99%),ZrO<sub>2</sub> (99.98%),各试样的具体组成见表 1。采用高能 球磨机(KQM-S)将配好的粉末混合均匀,置于箱式 电阻炉(SX2-12-16)中,以 5 ℃/min 的速率升温至 1500 ℃,保温 15 h,得到 GN-YSZ 粉末。

表 1 GN-YSZ 成分配比方案

Table 1 Composition of GN-YSZ

Sample	$\mathrm{ZrO}_2$	$Y_2O_3$	$\mathrm{Gd}_2\mathrm{O}_3$	NiO	
YSZ	95.5	4.5	0	0	
G-YSZ	95.5	3.5	1	0	
N-YSZ	92.5	3.5	0	4	
GN-YSZ-1	91.5	3.5	1	4	
GN-YSZ-2	93.5	3.5	1	2	

将 GN-YSZ 粉末试样放入直径为 15 mm 的模 具中预成形,然后利用冷等静压机在 200 MPa 下成 形。将冷等静压成形的陶瓷片样品置于箱式电阻炉 中,以 2.5 ℃/min 的升温速率加热至 1500 ℃,并 保温 20 h,随炉冷却至室温,制得陶瓷材料。

#### 1.2 性能表征及测试

采用 X 射线衍射仪(Regaku D/Max 2200PC, CuK<sub>a1</sub>射线,  $\lambda$ =1.5418 A°, 扫描速度为 6 (°)/min, 步长为 0.02°)分析各种陶瓷材料的晶体结构。根据 衍射峰的强度<sup>[13]</sup>计算样品中单斜相(M)相对于四 方相(T)和立方相(C)物质的量比为:

%

$$\frac{M_{\rm M}}{M_{\rm CT}} = 0.82 \frac{I_{\rm M}(111) + I_{\rm M}(111)}{I_{\rm CT}(111)} \tag{1}$$

式中: *M* 为物质的量; *I* 为衍射峰强度; 下标 M, T, T', C 分别代表 ZrO<sub>2</sub>中的 M 相、T 相、非 相变的 T 相和 C 相。

采用扫描电子显微镜观察陶瓷材料的表面形 貌, 仪器型号为荷兰飞利浦公司生产的 QUANTA-400型, *U*=40 kV, 放大倍数为 5000倍。 采用式(2)计算陶瓷材料的热导率:

$$K = \alpha C_{\rm p} \rho \tag{2}$$

式中: K 为热导率;  $\alpha$  为热扩散系数;  $C_p$  为比 热容;  $\rho$  为密度。

采用激光热导仪 (LFA457, NETZSCH, Germany)测试 GN-YSZ 陶瓷材料的热扩散系数  $\alpha$ 。 根据  $\rho=m/V$  计算陶瓷材料的密度  $\rho$ (根据排水法测 量 V);根据 Neumann-Kopp 定律<sup>[14]</sup>计算 GN-YSZ 陶瓷材料的比热容  $C_{\rm n}$ :

$$C_{pGN-YSZ} = n_1 C_{pGd_2O_3} + n_2 C_{pNiO} + n_3 C_{pY_2O_3} + n_4 C_{pZrO_2}$$
(3)

式中: n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub>, n<sub>4</sub>分别为 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>的摩尔比。

由于试样在烧结的过程中不能完全致密,存在 一定的空隙,因此,使用完全致密材料的热导率 $\lambda_0$ 修正测定的热导率 $\lambda$ ,二者满足如下的关系<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\lambda}{\lambda_o} = 1 - \frac{4}{3}\varphi \tag{4}$$

式中: φ为孔隙率。

采用傅里叶红外光谱仪(VERTEX 70 FT-IR spectrometer)测定陶瓷材料的红外透过率, 仪器的 测量范围为 4000~400 cm<sup>-1</sup>(对应的波长范围为 2.5~25 μm)。

## 2 实验结果与讨论

#### 2.1 陶瓷材料的物相分析

各陶瓷材料样品的 XRD 分析图谱如图 1 所示。 可以看出,各种陶瓷材料中都存在一定含量的 M 相、T 相和 C 相,且未发现 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 的衍射 峰,说明 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 在 1500 ℃的固相反应温度 下已经完全固溶到 YSZ 晶格中,形成 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 共掺稳定的 GN-YSZ 陶瓷材料。当 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 的共掺到 YSZ 中, GN-YSZ 陶瓷材料中 M 相衍射 峰的强度相对于 YSZ 有了一定的减弱, 说明陶瓷 材料中 M 相的含量降低, 而 T 相、C 相的含量增 加。根据 XRD 图谱中各相的衍射峰强度, 按公式 (1)计算陶瓷材料中 M 相的含量。分析结果显示, 与大气等离子喷涂(APS)或者电子束物理气相沉 积(EB-PVD)方法制备出的 YSZ 涂层相比, YSZ 陶瓷材料中的 M 相含量相对较高,原因可能是陶 瓷材料在制备过程(随炉冷却)没有实现高温淬火。 采用 APS 或 EB-PVD 方法制备 YSZ 涂层时, YSZ 粉末在高温淬火时,冷却速度过快而阻碍了成分的 调整, T 相较完整地保存下来,导致 M 相的含量 较低<sup>[16]</sup>。



图 1 GN-YSZ 的 XRD 衍射图谱

## Fig.1 The XRD spectra of GN-YSZ

#### 2.2 陶瓷材料显微结构的分析

从图 2 可见, YSZ 中掺杂 NiO 后的试样 N-YSZ, GN-YSZ-1, GN-YSZ-2, 陶瓷材料在 1500 ℃表现出良好的致密性和烧结性能,没有晶 界及规则形状的颗粒; 而没有掺杂 NiO 的试样 YSZ, G-YSZ 的陶瓷材料基本上以规则颗粒的形式 存在,粒径尺寸大约为 2 µm 左右。这是由于在 YSZ 中掺杂 NiO 后, Ni<sup>+</sup>半径(0.69 nm)小于 Zr<sup>4+</sup>半径 (0.84 nm), 且电负性相当,则 NiO 取代 ZrO<sub>2</sub>促 进了萤石结构的形成<sup>[17]</sup>,使得体系表面能和化学势 下降,从而增强烧结驱动力,促进陶瓷材料的致密 化。由此可知,掺杂 NiO 有利于降低 ZrO<sub>2</sub>的烧结 温度。





c N-YSZ

图 2 GN-YSZ 陶瓷块材的显微结构 Fig.2 SEM microphotographs of GN-YSZ ceramic materials

#### 2.3 陶瓷材料的热物理性能

采用激光热导仪测试 YSZ, N-YSZ, G-YSZ, GN-YSZ-1, GN-YSZ-2 各陶瓷材料的热扩散系数  $\alpha$ ,测试结果如图 3 所示。可以看出, YSZ 在室温 至 1300 ℃范围内的热扩散系数为 0.68~0.95 mm<sup>2</sup>/s,同时掺杂 NiO 和 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>后在室温至 1300 ℃ 范围内的热扩散系数为 0.59~0.85 mm<sup>2</sup>/s,表明 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 共掺导致 YSZ 的热扩散系数降低。 这是由于 Gd<sup>3+</sup>, Ni<sup>+</sup>的离子半径与 Zr<sup>4+</sup>的离子半径 不同,当Gd<sup>3+</sup>,Ni<sup>+</sup>离子固溶到ZrO<sub>2</sub>晶格时,将引 起晶格的畸变,晶格振动的非谐性程度变大,对声 子的散射增强,从而降低了声子平均自由程,因此, 掺杂氧化物后二氧化锆的热扩散系数得到了一定 的降低。改变 NiO 的含量对热扩散系数没有特别 显著的影响,主要原因是由于金属氧化物的声子平 均自由程一般比晶粒小。在整个的测试温度范围 内,当温度低于 700 ℃时,陶瓷材料的热扩散系 数逐渐减小; 当温度达到 700 ℃左右时, 热扩散 系数的值达到最小; 当温度高于 700 ℃后, 随着 温度的升高,热扩散系数呈现逐渐增大的趋势。一 般来说,当测试温度相对较低时,陶瓷材料的热传 导主要为晶格间非谐振作用产生的声子传导,热扩

散系数或热导率与温度成反比,即温度升高,热扩 散系数或热导率下降;在高温下,由辐射产生的光 子热传导作用增大,热扩散系数或热导率随温度升 高而增大[18]。因此,受声子热传导和辐射光子热传 导因素的综合影响, 随测试温度升高, 陶瓷材料的 热扩散系数表现为先减小再增大。





根据 Neumann-Kopp 定律, GN-YSZ 陶瓷材料 的比热容 C<sub>p</sub>可看作 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 ZrO<sub>2</sub>比 热容按比例的加和。根据公式(3)计算得到 YSZ, G-YSZ, N-YSZ, GN-YSZ-1, GN-YSZ-2 等陶瓷材 料的块材比热容 C<sub>p</sub>,如图 4 所示。各陶瓷材料的

热容相差不大,原因是由于掺杂氧化物的含量相对 较小。



图 4 GN-YSZ 陶瓷材料的热容 Fig.4 Heat capacity of GN-YSZ ceramic materials

各陶瓷材料完全致密的热导率按公式(3),(4) 计算,计算结果如图 5 所示。可以看出,各陶瓷材 料在室温至 1300 ℃的热导率先降低后升高,且在 700 ℃时热导率最低,热导率的变化规律和热扩散 系数的规律差不多。其主要原因是由于各陶瓷材料 热导率是热容、密度和热扩散系数的乘积,而各陶 瓷材料的密度和热容相差不大。各陶瓷材料中,共 掺 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 的 GN-YSZ-1,GN-YSZ-2 陶瓷材 料的热导率相比其他陶瓷材料,在室温至 1300 ℃ 每个温度对应的热导率要低。各陶瓷材料制备条件 完全相同,导致其热导率降低的主要原因可能是掺 杂 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 引起 ZrO<sub>2</sub>中各相含量变化和晶格 畸变<sup>[19]</sup>。



图 5 GN-YSZ 材料的热导率 Fig.5 Thermal conductivity of GN-YSZ ceramic materials

## 3 陶瓷材料的红外透过率

各陶瓷材料的红外透过率如图 6 所示,各陶瓷 材料在短波长 2.5~5 µm 的红外透过率整体的变化 趋势为逐渐升高,但是出现了一个峰,这主要与陶 瓷材料的结构中分子的振动有关。掺杂 NiO 的陶 瓷材料 GN-YSZ-1, GN-YSZ-2, N-YSZ 在短波长 2.5~5 μm 的红外透过率分别为 0.8429~0.9165, 0.8200~0.8880, 0.8597~0.9204。没有掺杂 NiO 的 陶瓷材料 G-YSZ, YSZ 在短波长 2.5~5 μm 的红外 透过率分别为 0.8660~0.9715, 0.8675~0.9933。掺 杂过渡金属 NiO 后的陶瓷材料在短波长的 2.5~5 um 的红外透过率与没有掺杂 NiO 的陶瓷材料相比 有了一定的降低,可能跟电子 d-d 轨道的变化有关。 根据配位场理论, 过渡金属的 5 个 3d 轨道在缺少 配体的情况下,分离出 3 个低能轨道(t<sub>2g</sub> 轨道) 和 2 个高能轨道(eg 轨道)。当电子在低能轨道和高 能轨道之间跃迁时,过渡金属阳离子在氧化锆结构 材料中伴随着能量的转变,将导致光对特定波长选 择性地吸收<sup>[20]</sup>,因此掺杂过渡金属元素 Ni 能够有 效地降低陶瓷材料在短波长的红外透过率,从而降 低高温下涂层的辐射传热。





## 4 结论

1) 与 YSZ 相比,单独掺杂 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 的 M 相含量变化不大,共掺 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 后,GN-YSZ 中 M 相含量明显减少,T 相和 C 相含量增加,且共 掺 1%Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 2%NiO 陶瓷材料的 M 相含量最少。

2) 共掺 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 NiO 后 GN-YSZ 的热导率为 1.94~2.32 W/(m·K),相比传统的 YSZ 材料的热导 率有了一定的降低。

3)在 YSZ 中掺杂过渡金属 NiO 后,可以有效 地降低陶瓷材料在短波长 2.5~5 μm 的红外透过率, 减少热障涂层对红外辐射传热的透过性,降低辐射 传热。

#### 参考文献:

- MILLER R A. Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines History and Directions[J]. Therm Spray Technol, 1997, 6(1): 35–42.
- [2] 徐惠彬, 宫声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7—12. XU Hui-bin, GONG Sheng-kai, LIU Fu-shun. Recent Development in Materials Design of Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7—12.
- [3] TIAN Y S, CHEN C Z, WANG D Y, et al. Recent Developments in Zirconia Thermal Barrier Coatings[J]. Surf Rev Lett, 2005, 12(3): 369–378.
- [4] CHWA S O, OHMORI A. Microstructures of ZrO<sub>2</sub>-8wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coatings Prepared by a Plasma Laser Hybrid Spraying Technique[J]. Surf Coat Technol, 2002, 153(2/3): 304—312.
- [5] 李嘉,谢铮,何箐,等. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>热障涂
   层材料的热物理性能[J].表面技术,2015,44(9):18—22.

LI Jia, XIE Zheng, HE Jing, et al. Thermophysical Properties of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Thermal Barrier Coating Material[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 18–22.

- [6] NICHOLLS J R, LAWSON K J, RICKERBY D S, et al. Advanced Processing of TBC's for Reduced Thermal Conductivity[C]// NATO Workshop on Thermal Barrier Coatings. Aalborg, Denmark, 1998: 301–402
- [7] LEHMANN H, PITZER D, PRACHT G, et al. Effects of Doping on Thermal Conductivity of Pyrochlore Oxides for Advanced Thermal Barrier Coatings[J]. J Am Ceram Soc, 2003, 86: 1338–1344.
- [8] WU J, WEI X, PADTURE N P, et al. Low Thermal Conductivity Rare-earth Zirconates for Potential Thermal Barrier Coating Applications[J].J Am Ceram Soc, 2002, 85: 3031–3035.
- [9] WU J, PADTURE N P, KLEMENS P G, et al. Thermal Conductivity of Ceramics in the ZrO<sub>2</sub>-GdO<sub>1.5</sub> System[J]. Mater Res, 2002,17: 3193—3200.

- [10] 谢敏, 宋希文, 赵鸣, 等. 镁基铝酸镧的合成及其热物 理性能研究[J]. 中国稀土学报, 2010(28): 302—305.
  XIE Min, SONG Xi-wen, ZHAO Ming, et al. A Study on Preparation and Thermophysical Properties of LaM-Al<sub>11</sub>O<sub>19</sub>[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010(28): 302—305.
- [11] ZHU D, MILLER R A. Thermal Conductivity and Sintering Behavior of Advanced Thermal Barrier Coatings[J]. Ceram Eng Sci Proc, 2002, 23: 457–468.
- TAMARIN Y A, KACHANOV E B, ZHERZDEV S V. Tnermophysical Properties of Ceramic Layers in TBC-EB
   [J]. Materials Science Forum, 1997, 254: 949–956.
- [13] MILLER R A, SMIALEK J L, GARLICK P G Phase Stability in Plasma-sprayed, Partially Stabilized Zirconia-yittria[J]. Advances in Ceramics, 1981(3): 241–253.
- [14] BARIN I. Thermochemical Data of Pure Substances[M].3nd Edtion. Weinheim: VCH, 1993.
- [15] WU J, WEI X Z, PADTURE N P, et al. Low Thermal Conductivity Rare Earth Zirconates for Potential Thermal Barrier Coating Applications[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002, 85: 3031—3035.
- [16] 曹学强. 热障涂层材料[M]. 北京: 科学出版社, 2007:
   172.
   CAO. Yua ging Materials of Thermal Parrier Cost

CAO Xue-qiang. Materials of Thermal Barrier Coatings[M]. Beijing: Science Publishing House, 2007: 172.

- [17] WROBEL G, PIECH M, DARDONA S, et al. Seedless Synthesis and Thermal Decomposition of Single Crystalline Zince Hydroxytannate Cubes[J]. Crystal Growth Design, 2009, 9(9): 4456—4460.
- [18] 牟仁德. 热障涂层隔热性能研究[D]. 北京: 北京航空 材料研究院, 2007.
  MU Ren-de. Research on Heat Insulation of Thermal Barrier Coating[D]. Beijing: Beijing Aeronautical Materials, 2007.
- [19] 张丹华, 王璐, 郭洪波, 等. 多元稀土氧化物掺杂二氧 化锆基陶瓷材料的热物理性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 179—184.
  ZHANG Dan-hua, WANG Lu, GUO Hong-bo, et al. Thermophysical Properties of Multiple Rare Earth Oxide Co-doped Zirconia-based Ceramic Materials[J]. Acta

Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2): 179-184.

[20] LIU Hong-zhi, OUYANG Jia-hu, LIU Z G et al. Thermo-Optical Properties of LaMAI 11 O 19 (M=Mg, Mn, Fe) Hexaaluminates for High-temperature Thermal Protection Applications[J]. The American Ceramic Society, 2011, 94(10): 3195—3197.