复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 1 期 2 月 2009 年
Vol. 26 No. 1 February 2009

文章编号：1000-3851(2009)01-0096-07

掺杂纳米 CeO_2 对 $ZrO_2-Y_2O_3$ 热障涂层隔热性能的影响

宫文彪[1,2]，白 晶[1]，刘 威[1]，孙大千*[2]，王文权[2]

（1. 长春工业大学 材料科学与工程学院，长春 130032；2. 吉林大学 材料科学与工程学院，长春 130025）

摘 要： 以纳米 ZrO_2-8 wt%Y_2O_3（YSZ）和在纳米 ZrO_2-8 wt%Y_2O_3 中分别掺杂 25 wt%和 50 wt%纳米 CeO_2 团聚处理后作为隔热层材料，NiCrAlY（Ni－25Cr－5Al－0.5Y，wt%）作为粘结层材料，用等离子喷涂（APS）方法在 GH30 高温合金表面制备三种材料体系的热障涂层（TBC）。通过扫描电镜（SEM）和 X 射线衍射仪（XRD）对掺杂了 25 wt%纳米 CeO_2 涂层的微观组织结构进行分析研究，测定了三种材料涂层在室温和 300、500、700℃时的热导率，并在相同边界条件下测试了它们的隔热性能。结果表明：掺杂纳米 CeO_2 涂层组成相为稳定的 t 相（t-ZrO_2、t-$Zr_{0.82}Y_{0.18}O_{1.91}$、t-$Zr_{0.82}Ce_{0.18}O_2$）和 c 相（c-$CeO_2$），涂层中存在闭合的孔隙和微裂纹；掺杂纳米 CeO_2 能够降低涂层的热导率，并且隔热性能随 CeO_2 含量的增加而提高。对于 400 μm 厚的 $CeO_2/ZrO_2-Y_2O_3$ 涂层（CYZ，掺杂 25 wt%CeO_2）对基体产生的温降比纳米 YSZ 涂层提高了 10.7%，当 CeO_2 的含量从 25 wt%提高到 50 wt%时，隔热性能也提高了 7.1%。

关键词： 纳米材料；热障涂层；等离子喷涂；显微组织；隔热性能

中图分类号： TB 383 **文献标志码：** A

Effect of doped nano-CeO_2 on thermal insulation properties of $ZrO_2-Y_2O_3$ thermal barrier coatings

GONG Wenbiao[1,2], BAI Jing[1], LIU Wei[1], SUN Daqian*[2], WANG Wenquan[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The agglomerated powders consisting of nano ceramic particles (ZrO_2-8 wt%Y_2O_3, YSZ) and doped respectively with 25 wt% and 50 wt% nanoscale CeO_2 in the nano-YSZ were used as insulation top materials, and NiCrAlY (Ni－25Cr－5Al－0.5Y, wt%) alloy was used as the bonding coating. Thermal barrier coatings of the three kinds of materials were prepared on the GH30 high temperature alloy surface by an atmospheric plasma spray (APS) process. The morphology and microstructures of the coating doped with 25 wt% CeO_2 in the nano-YSZ powders were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The thermal conductivity of the three kinds of coatings were measured at room-temperature and 300, 500 and 700℃. Thermal insulation property of the as-received coatings was also examined under the same edge conditions. The results show that a relatively stable t-phase(t-ZrO_2、t-$Zr_{0.82}Y_{0.18}O_{1.91}$、t-$Zr_{0.82}Ce_{0.18}O_2$)and c-phase (c-$CeO_2$) form and the closed pores and microcracks are also observed in the coating. Moreover, the thermal barrier coatings doped with nano-CeO_2 reduce the thermal conductivity and accordingly, the thermal insulation property can be developed with the amount of CeO_2 increased. For $CeO_2/ZrO_2-Y_2O_3$ coating (CYZ, doped with 25 wt% CeO_2) with 400 μm thickness, the temperature drop of the matrix alloys increases by 10.7% compared to nano-YSZ coating. As the mass fraction of CeO_2 increased from 25 wt% to 50 wt%, the thermal insulation property increases by 7.1%.

Keywords: nanometer materials; thermal barrier coatings; plasma spray; microstructures; thermal insulation properties

收稿日期： 2008-01-10；**收修改稿日期：** 2008-06-23

基金项目： 总装备部武器预研基金(51461020201JW1301)

通讯作者： 孙大千，教授，博士生导师，研究方向为先进材料的焊接与连接 E-mail：psdq@sina.com

热障涂层（Thermal barrier coatings，简称TBC）通常是指沉积在金属表面、具有良好隔热效果的陶瓷涂层，其主要作用是用来降低在高温环境下工作的热端零部件基体温度，使其免受高温氧化、腐蚀或者磨损[1-3]。目前广泛使用的 TBC 材料是（质量分数 6%～8%）Y_2O_3 部分稳定的 ZrO_2 陶瓷材料（简称 YSZ）。

随着航空燃气轮机向高流量比、高推重比、高进气口温度的方向发展，燃烧室中的温度和压力不断提高，新一代超音速飞机的飞行速度将达到或超过 5 马赫，航空发动机的进气口温度也将达到 1700℃，工作温度大大超过了 Ni 基高温合金的使用温度极限[4-5]，而目前使用的 YSZ 隔热材料工作温度不超过 1200℃。因此，寻找在高温条件下隔热性能更好、更可靠的新型 TBC 材料和涂层体系成为近年来 TBC 领域研究的热点。研究者多采用在传统的 YSZ 中掺杂二价过渡金属氧化物 HfO_2、SiO_2、La_2O_3 和 CeO_2 等来提高涂层的性能，其中掺杂 CeO_2 的涂层表现出了良好的综合性能。如，日本大阪国家研究所（ONRI）的 Kazuo[6]、韩国汉城大学的 Chio[7]、浦相工业大学的 Park[8]、汉阳大学的 Lee[9]、美国军用装备研究室的 Huang[10] 和曹学强[11]等专门研究了在 YSZ 中掺杂 CeO_2 涂层的性能。结果表明，在组织的稳定性、涂层的耐热腐蚀和隔热性能等方面均优于传统 YSZ 涂层，在新一代发动机上具有潜在的应用价值。但上述研究均为在微米粉末的 YSZ 中掺杂 CeO_2，对在纳米 YSZ 材料中掺杂纳米 CeO_2 作为涂层材料的研究还少有报道。

本文中采用在纳米 YSZ 中掺杂不同质量分数的纳米 CeO_2 作为热障涂层材料，用等离子喷涂技术制备了三元纳米材料 $CeO_2/ZrO_2-Y_2O_3$ 热障涂层（以下简记为 CYZ），分析了涂层的组织结构，并在同样的边界条件下测试比较了未掺杂纳米 CeO_2 的纳米 YSZ 涂层和纳米 CYZ 涂层的隔热性能。

1 实验方法

1.1 实验材料

试验用基体材料为抚顺特种钢材有限公司提供的 GH30 高温合金，化学成分为（wt%）：C≤0.12，Si≤0.08，Mn≤0.70，Cr：19～22，Ni≤75，Ti：0.15～0.35，Al≤0.15，Fe≤1.0；试样尺寸为 100 mm×100 mm×4 mm；粘结层材料为 Ni-25Cr-5Al-0.5Y；陶瓷层材料为广州有色金属研究院提供的粒度范围为 30～50 nm 的 CeO_2 和 15～50 nm 的 ZrO_2-8 wt% Y_2O_3。试验采取在纳米 YSZ 中分别掺杂 25 wt% 和 50 wt% 的 CeO_2，由武汉材料保护研究所团聚成适合等离子喷涂的球形粉末（松装密度为 0.78 g/cm^3，流动性为 50 g/38 s）。

1.2 涂层制备

喷涂设备为 GP-80 型等离子喷涂系统。喷涂前用 16# 棕刚玉对 GH30 合金表面进行喷砂粗化处理。喷枪安装在可编程控制的 Motoman 机器手上，喷涂参数见表 1。粘结层厚度为 120 μm，陶瓷层厚度分别为 200 和 400 μm。为比较掺杂纳米 CeO_2 后涂层的隔热性能，用相同的工艺团聚并制备了纳米 ZrO_2-8 wt% Y_2O_3 二元结构的 TBC 涂层。

表 1 APS 喷涂工艺参数

Table 1 Plasma spraying parameters

Process parameters	Bond coating	Ceramic coating
Current/A	530	570
Voltage/V	50	55
Argon/min^{-1}	44	48
Helium/min^{-1}	5	7
Powder feed rate/(g·min^{-1})	30	22
Spray distance/mm	120	100
Spray speed/(mm·s^{-1})	35	30
Coating thickness/μm	120	200，400

1.3 性能测试与表征

用 JEOL-5600LV 扫描电镜（SEM）和 D/max 2500 型 X 射线衍射仪（XRD，CuK_α）分析涂层的组织结构，试样用 IFB3018 型水射流切割机切取并研磨抛光。涂层隔热性能测试方法由沈阳飞机制造公司提供，见图 1[12]。带有涂层的试样和没有涂层的高温合金同时固定在加热体为 Mo-Si 棒的高温电炉炉门处，陶瓷层面向炉内高温端。用 Pt-Rh 热电偶作为温度传感器，1 只热电偶置于炉内，测量 TBC 试样表面温度 T_0；另外 2 只热电偶置于炉外，分别同时测量有 TBC 涂层和没有涂层的试样背面低温端温度 T_1、T_2。3 只热电偶分别与 3 台 $X-Y$ 函数记录仪连接实时采集温度数据并传给计算机。试验在没有对流风的房间内进行，环境温度为 23℃，电炉加热速率为 45℃/min，当炉温升至 450℃时启动记录仪开始测量并记录温度数据，炉

温达到 1350℃且 T_1、T_2 稳定时，测试结束。带有 TBC 涂层的试样温降为 T_0-T_1；没有涂层的试样温降为 T_0-T_2；则涂层的隔热性能表达式为 $\Delta T=T_2-T_1$。3 种材料制备的陶瓷涂层的热导率由瑞士 HOT DISK 公司 AB 实验室测定。

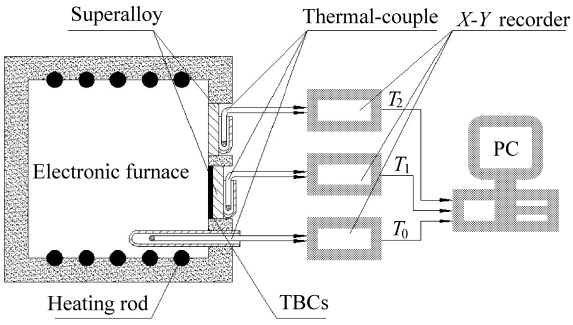

图 1　隔热性能试验示意图

Fig. 1　Schematic diagram of thermal barrier property test

2　结果与讨论

2.1　涂层的组织结构

图 2(a)为等离子喷涂 CYZ 热障涂层截面的 SEM 背散射电子形貌，从图中可以看到陶瓷层，即隔热层、NiCrAlY 粘结层和高温合金基体三部分。陶瓷层存在一些不规则的闭合孔洞，由文献[13]，团聚的纳米颗粒经过等离子弧时部分较大颗粒只是表层被熔化，内部仍是团聚时的多孔隙结构，在撞击基体时熔化的外壳对孔隙填充不足，将未熔化的团聚体颗粒和这种孔隙覆盖住形成孔洞，后来沉积的颗粒不断覆盖，成为闭合孔洞，使得整个涂层无贯穿性开孔。陶瓷涂层性能与孔洞的数量、形状、分布密切相关。孔洞的存在可使陶瓷密度减小、热导率降低、热震性能提高。但孔洞也是应力集中区，可能直接成为裂纹，使陶瓷层强度降低。若陶瓷层孔洞过多，易连接形成贯穿性孔洞，在高温条件下外界气体易于达到面层/粘结层的界面，导致粘结层表面氧化膜生长加快，热应力增大，涂层容易开裂剥离。掺杂纳米 CeO_2 的 CYZ 涂层的孔隙均匀、近似圆球型，对降低热导率有利，并可降低应力集中、提高抗热震性能。

图 2(b)为 CYZ 陶瓷层的高倍 SEM 背散射电子形貌，由图可以看出，陶瓷层中分布有大量细小的微裂纹和灰白色条带状组织。微裂纹的形成是由于冷却过程中应变能超过陶瓷层应变容限时产生的一种应力释放现象[14-16]，裂纹无明显的方向性，这主要是由于纳米陶瓷涂层晶粒的细化和韧性的提高所致。涂层中大量的晶界使得裂纹形成时不断地改变方向。另外，未熔的纳米粒子也诱导裂纹偏转，起到补强增韧作用[17]。这些微裂纹和孔隙分布在 TBC 涂层中有利于散射晶格波、降低涂层的热导率、提高隔热性能和抗热震性能，以及降低热循环过程中由于粘结层热膨胀系数不同所带来的应变[18-19]。涂层中分布的少量灰白色条带状组织，参考文献[20]并结合本文中的试验条件，这种组织的形成可能是由于两方面原因：(1) 在等离子焰流中存在较大的温度梯度，少量处于等离子焰流边缘的大颗粒团聚体陶瓷颗粒没有被加热到熔点，仍保持原始的团聚态，高速撞击后铺展形成条带状结构；(2) 纳米团聚体粉末颗粒中成分不均匀使得其通过等离子弧时的熔化程度不同。这两种情况都会使其背散射电子像的颜色不同于其它部分。

图 3 为掺杂 25 wt%纳米 CeO_2 团聚体粉末的 XRD

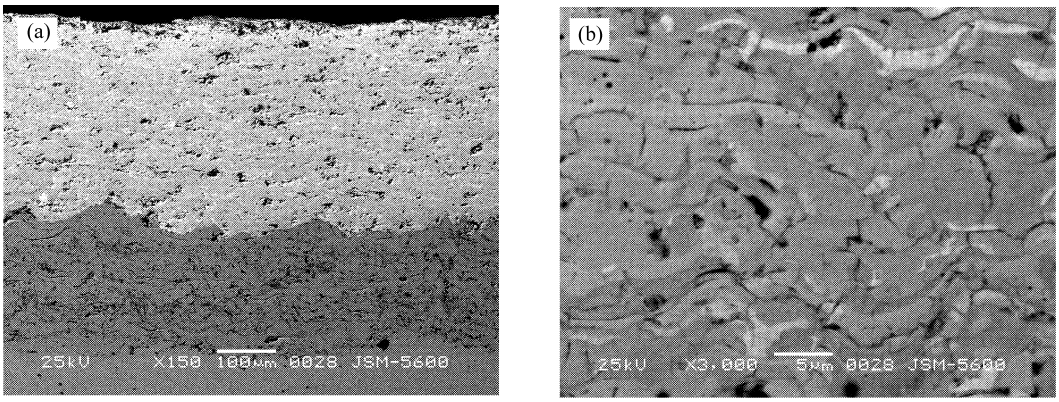

图 2　掺杂 25 wt% CeO_2 的 CYZ 热障涂层的截面背散射电子像

Fig. 2　Backscattered electron cross-section micrographs of CYZ coatings doped with 25 wt% CeO_2

分析结果，可见团聚后的粉末由四方相 t-ZrO_2、立方相 c-CeO_2、少量斜方相 m-ZrO_2 和立方结构的 (Ce、Zr)O_2 组成。图 4 为制备的掺杂 25 wt%纳米 CeO_2 的 CYZ 涂层 XRD 分析结果。经过等离子高温加热后，团聚体颗粒熔化部分快速冷却后生成了新相 t-$Zr_{0.82}Y_{0.18}O_{1.91}$、t-$Zr_{0.82}Ce_{0.18}O_2$，其中具有 t 相结构的 $Zr_{0.82}Ce_{0.18}O_2$ 是由于 CeO_2 具有立方晶体结构，喷涂时高温下与稳定的四方相 ZrO_2 形成了固溶体。经过高温等离子焰流后未见斜方相，这和文献[9]作者用掺杂微米级 CeO_2 粉末的试验结果一致。主要是因为稀土 CeO_2 为较强的酸性氧化物并且在涂层中的含量较高，对 t 相具有较强的稳定作用[9]，表明纳米 CeO_2 的加入可抑制 m-ZrO_2 的生成。经过高温焰流后的粒子沉积形成的涂层主要由稳定的 t 相和 c 相组成(见图 4)。

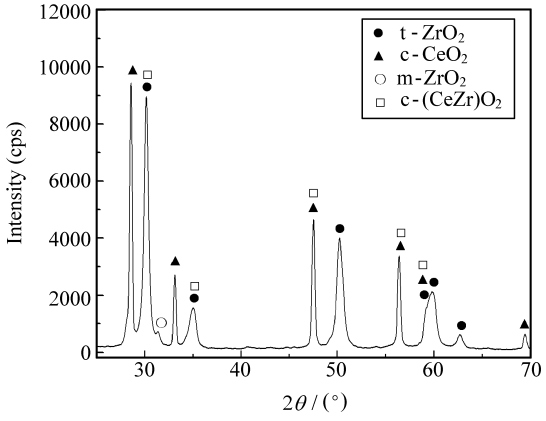

图 3　掺杂 25 wt%CeO_2 团聚体粉末的 X 射线衍射结果

Fig. 3　XRD patterns of the agglomerated powders doped with 25 wt%CeO_2

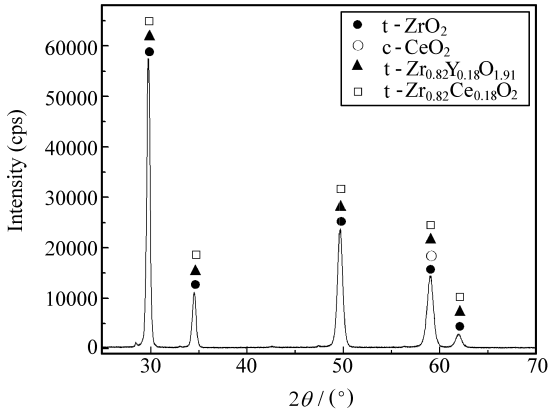

图 4　掺杂 25 wt%CeO_2 涂层的 X 射线衍射结果

Fig. 4　XRD patterns of the coating doped with 25 wt%CeO_2

2.2　涂层热导率

涂层材料的热导率最终决定热障涂层的隔热性能。一般认为，热导率与涂层材料的组织结构、孔隙、温度等有密切的关系。表 2 是 3 种纳米材料制备的涂层在室温和 300、500、700℃时的热导率测定值。从测定结果可以看出，3 种材料中含50 wt%纳米 CeO_2 的 CYZ 涂层热导率最低，并且都有一个共同的趋势，即热导率随温度上升而升高。对于纳米材料热障涂层热导率升高的原因可能有以下几个方面：(1) 长时间的高温加热会导致晶粒发生长大，晶界数量随之减少，因此由晶界引起的声子散射作用下降；(2) 晶格中氧空位浓度由于加热过程中应力松弛而减小，降低了对声子的散射；(3) 喷涂态涂层中含有大量的纳米微孔，可以有效地降低涂层的传热速度，当这些微孔随着纳米晶粒的长大而逐渐消失或相互连接成较大的微米孔隙时，会增加涂层内部的对流传热，引起热导率上升；(4) 涂层内应力的下降，在等离子喷涂过程中熔化液滴撞击到基体表面或先前沉积的涂层快速凝固，由此使涂层内部能够产生逐步累积的收缩应力，而在加热过程中，晶粒的长大为准“自由”过程，应力大的地方晶粒长大较慢或原子发生迁移，造成局部应力的下降，进而减少了由应力场引起的声子散射，也使声子的平均自由程增加、热导率升高。综上所述，晶界、氧空位、微孔隙以及内应力的变化都将引起声子平均自由程的增加，从而导致热导率逐渐发生变化，隔热能力降低。这也是用纳米材料制备的热障涂层在长期高温使用过程中需要解决的一个问题。

表 2　3 种材料涂层的热导率值

Table 2　Thermal conductivity measurements at different temperatures

Coating materials	λ/(W·(m·K)$^{-1}$)			
	25℃	300℃	500℃	700℃
CYZ(25 wt%CeO_2)	0.069	0.078	0.098	0.32
CYZ(50 wt%CeO_2)	0.051	0.067	0.088	0.26
YSZ	0.138	0.450	0.500	0.55

本试验中制备的 CYZ 和 YSZ 涂层的热导率均低于文献[21]报道的 APS 制备的传统 8YSZ-TBC 的 0.8～1.1 W/(m·K)；也低于文献[10]用常规 25 wt%CeO_2 粉末掺杂 8YSZ 涂层的热导率 (0.49 W/(m·K))，并且随着纳米 CeO_2 量的增加，

热导率值也相应较低。这证明采用掺杂纳米 CeO_2 的材料对改善涂层的隔热性能具有重要的作用。但是本试验与德国学者 Wilden 教授提出的 CeO_2 新型热障涂层材料的热导率随温度升高按指数规律下降的结果不符[22]，可能与材料体系不同有关。掺杂纳米 CeO_2 后，由于 CeO_2 的分子量较大，并且在高温下固溶于 $ZrO_2-Y_2O_3$ 中形成了具有复杂晶体结构的 $t-Zr_{0.8}Ce_{0.18}O_2$ 相，它们均增加了对声子的散射作用，对降低材料的热导率有一定的贡献。

2.3　涂层的隔热性能

图 5(a)、5(b)分别为 200、400 μm 厚度的 YSZ 涂层的隔热性能测试曲线，在 1350℃、T_1 和 T_2 达到稳定状态时，200 μm 厚度的 YSZ 涂层产生的温降 $\Delta T=78$℃，400 μm 厚度的 YSZ 涂层产生的温降 $\Delta T=140$℃。

为比较掺杂纳米 CeO_2 的热障涂层对隔热能力的影响，用相同的工艺条件分别制备了 25 wt%CeO_2 和 50 wt%CeO_2 含量的涂层，涂层厚度分别为 200 和 400 μm。图 6(a)、6(b)分别为 25 wt%CeO_2 含量、厚度为 200 和 400 μm 的 CYZ 涂层的隔热效果测试曲线；图 7(a)、7(b)分别为 50 wt%CeO_2 含量、厚度为 200 和 400 μm 的 CYZ 涂层的隔热效果测试曲线，它们的测试边界条件与 YSZ 相同。在 1350℃、T_1 和 T_2 达到稳定状态时，两种不同 CeO_2 含量的 200 μm 厚度的 CYZ 涂层产生的温度降分别为 $\Delta T_{25\%}=92$℃和 $\Delta T_{50\%}=145$℃；400 μm 厚度的 CYZ 涂层产生的温度降分别为 $\Delta T_{25\%}=155$℃和 $\Delta T_{50\%}=166$℃。在相同的涂层厚度和测试的边界条件下，25 wt%纳米 CeO_2 含量、厚度为200 μm的 CYZ 涂层的隔热能力比同厚度的 YSZ 提高了 14℃；50 wt%纳米 CeO_2 含量、400 μm 厚度的 CYZ 涂层比 YSZ 涂层提高了 26℃。

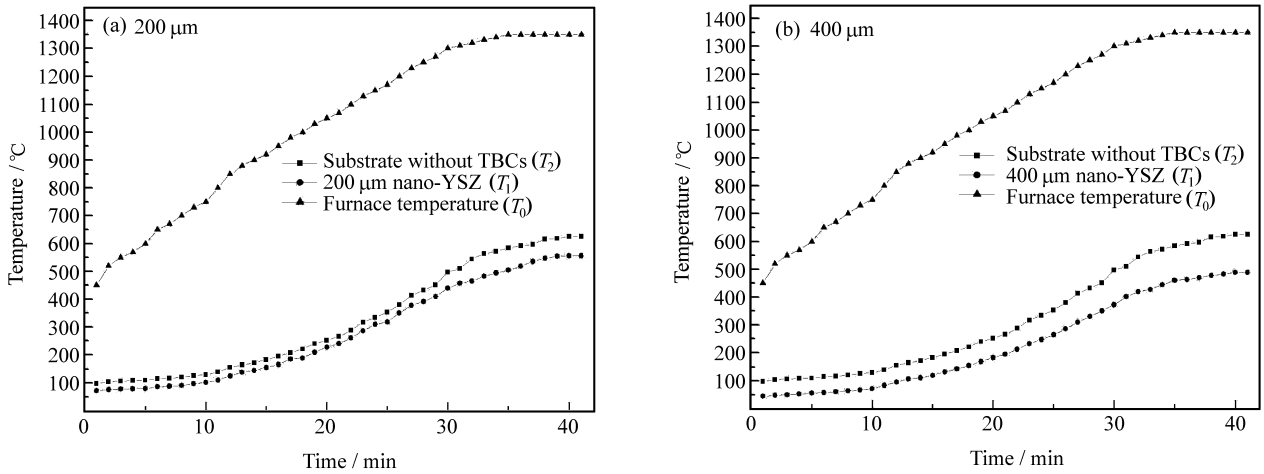

图 5　纳米 YSZ 涂层隔热曲线

Fig. 5　Thermal insulation property curves of YSZ for two coatings

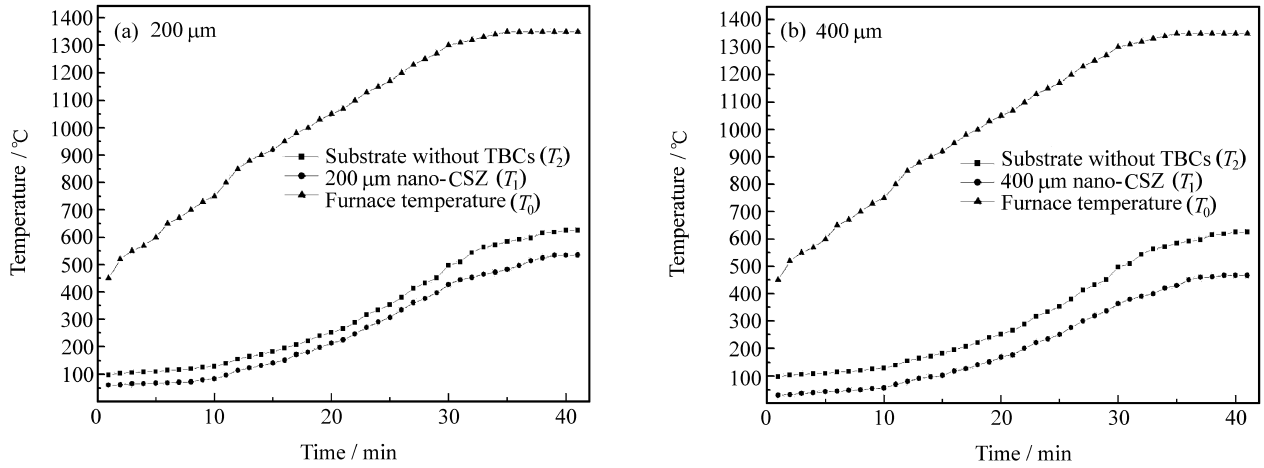

图 6　CYZ 涂层(25 wt%CeO_2)隔热曲线

Fig. 6　Thermal insulation property curves of CYZ for two coatings(25 wt%CeO_2)

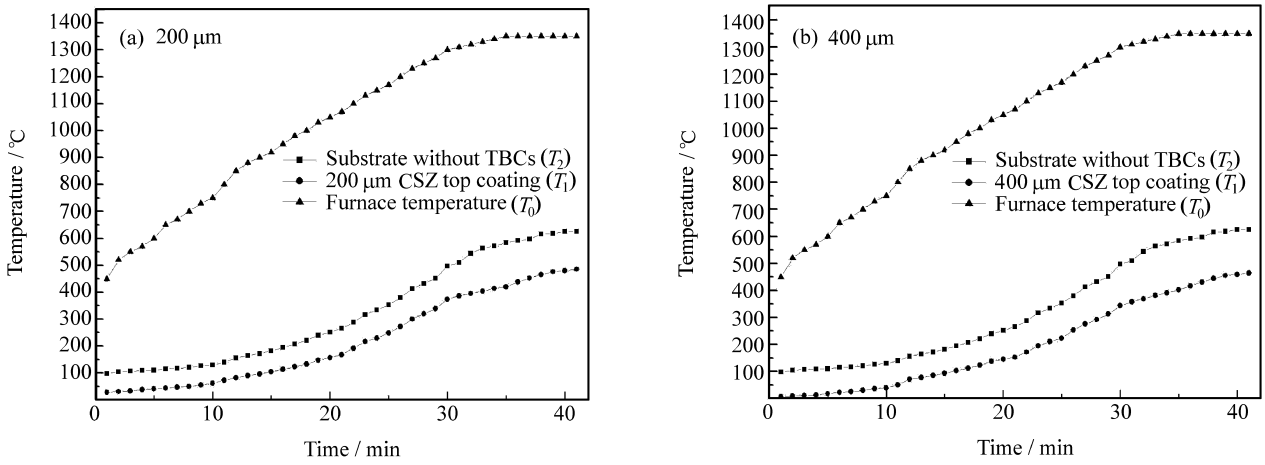

图 7　CYZ 涂层(50 wt%CeO_2)隔热曲线

Fig. 7　Thermal insulation property curves of CYZ for two coatings(50 wt%CeO_2)

从上面的隔热试验结果可以看出，在相同的制备工艺条件和测试条件下，同厚度的 YSZ 涂层的隔热效果不如 CYZ 涂层，因此可以推断涂层的隔热能力和掺杂的纳米 CeO_2 有关。对于 Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 陶瓷涂层，因为 Y 原子对 Zr 原子的取代作用，使材料中产生很多空位，这些空位的间距和单胞的尺寸是一个数量级别，它和声子的波长相差不多，因而这些空位可以大量地散射声子，随着掺杂的纳米 CeO_2 量增加，Ce 原子也参与对 Zr 原子的取代，这从涂层的相结构中有 t-$Zr_{0.82}Ce_{0.18}O_2$ 可以确定。因此，Ce 原子对 Zr 原子的取代增加了空位数量，使得相同厚度的 CYZ 涂层隔热能力高于 YSZ 涂层。

此外，材料中包含大原子量或大离子半径的元素时能够阻碍声子传输，涂层中元素的原子量间差异越大，这种作用越强[23-24]。CYZ 涂层的隔热能力高于 YSZ 涂层，也部分地依赖于 Ce 原子具有较大的原子量(140)和较大的离子半径(1.27 Å)，而 Y 原子量为 88，离子半径为 0.89 Å。Ce^{4+} 和 Y^{3+}、Zr^{4+}(0.92 Å)半径差异会改变化学键的长度，促使晶格中产生弹性应变场，从而也会促进声子散射，提高 CYZ 涂层的隔热能力[9, 25]。

3　结　论

(1) 掺杂纳米 CeO_2 的涂层中的组成相主要为 t-ZrO_2、c-CeO_2、t-$Zr_{0.82}Y_{0.18}O_{1.91}$ 和 t-$Zr_{0.82}Ce_{0.18}O_2$，未见原团聚粉末中的 m-ZrO_2，涂层中存在均匀的微裂纹和闭合的孔隙。

(2) 掺杂纳米 CeO_2 可降低 $ZrO_2-Y_2O_3$ 涂层的热导率，并且随 CeO_2 掺杂量的提高这种作用趋势也增加；但涂层热导率随温度提高也在增加。

(3) 在相同边界条件下，纳米 YSZ-TBC 和纳米 CYZ-TBC 涂层的隔热性能随涂层厚度的增加而增加，它们对基体合金产生的温降依次增大，对于 400 μm 厚的 CYZ 涂层(掺杂 25 wt%CeO_2)对基体产生的温降比纳米 YSZ 提高了 10.7%，并且随 CeO_2 的含量从 25 wt%提高到 50 wt%，隔热性能也相应地提高了 7.1%。

参考文献：

[1] Nusair Khan A, Lu J. Behavior of air plasma sprayed thermal barrier coatings, subject to intense thermal cycling [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 37-43.

[2] Guo Hongbo, Gong Shengkai, Khor K A, Xu Huibin. Effect of thermal exposure on the microstructure and properties of EB-PVD gradient thermal barrier coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 168(1): 23-29.

[3] Chen H, Ding C X. Nanostructured zirconia coating prepared by atmospheric plasma spraying [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 150(1): 31-36.

[4] 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)：7-10.
Xu Huibin, Gong Shengkai, Liu Fushun. Recent development in materials design of thermal barrier coatings for gas turbine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7-10.

[5] Cao X Q, Vassen R, Stoever D. Ceramic materials for thermal barrier coatings [J]. Journal of European Ceramic Society, 2004, 24(1): 1-10.

[6] 邓世均. 热障涂层的最新发展[J]. 材料保护，2003，36(3)：5-7.

Deng Shijun. Evolution of thermal barrier ceramic coatings [J]. Materials Protection, 2003: 36(3): 5-7.

[7] Chio Hanshin, Kim Hyungjun, Lee Changhee. Phase evolution of plasma sprayed ceria and yttria stabilized zirconia thermal barrier coating [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(4): 1359-1361.

[8] Park S Y, Kim J H, Kim M C, Song H S, Park C G. Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion [J]. Surface Coatings and Technology, 2005, 190(2/3): 357-365.

[9] Lee C H, Kim H K, Choi H S, Ahn H S. Phase transformation and bond coat oxidation behavior of plasma-sprayed zirconium thermal barrier coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 124(1): 1-12.

[10] Huang P J, Swab J J, Patel P J, Chu W S. Evaluation of CeSZ thermal barrier coatings for diesels [C]// Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference. Materials Park, OH, Canada: ASM International, 2000: 1179-1182.

[11] Cao X, Vassen R, Fischer W. Lanthanum-cerium oxide as a thermal barrier-coating material for high-temperature applications [J]. Advanced Materials, 2003, 15(17): 1438-1442.

[12] Gong W B, Sha C K, Sun D Q, Wang W Q. Microstructures and thermal insulation capability of plasma-sprayed nanostructured ceria stabilized zirconia coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 3109-3115.

[13] 宫文彪，孙大千，孙喜兵，刘　威. 等离子喷涂纳米团聚体粉末的熔化特性研究 [J]. 材料热处理学报，2007，28(4)：125-129.
Gong Wenbiao, Sun Daqian, Sun Xibing, Liu Wei. Study on melting characteristics of plasma-sprayed nanometer agglomerated powders [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(4): 125-129.

[14] Qian G, Nakamura T, Berndt C C. Effects of thermal gradient and residual stresses on thermal barrier coating fracture [J]. Mechanics of Materials, 1998, 27: 91-110.

[15] Levit M, Grimberg I, Weiss B Z.. Residual stresses in ceramic plasma-sprayed thermal barrier coatings: Measurement and calculation [J]. Materials Science & Engineering A, 1996, 206(1): 30-38.

[16] Teixeira V, Andritschky M, Fischer W. Analysis of residual stresses in thermal barrier coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92(93): 209-216.

[17] 徐滨士. 纳米表面工程[M]. 北京：化学工业出版社，2003：21-23.

[18] Klemens P G, Gell M. Thermal conductivity of thermal barrier coatings [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 245(2): 143-149.

[19] Pawlowski L, Lombard D, Fauchais P. Structure-thermal properties-relationship in plasma sprayed zirconia coatings [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1985, 3(6): 2494-2500.

[20] Goberman D, Sohn Y H, Shaw L. Microstructure development of Al_2O_3-13 wt% TiO_2 plasma sprayed coatings derived from nanocrystalline powders [J]. Acta Materialia, 2002, 50(5): 1141-1152.

[21] 宫声凯，邓　亮，毕晓方，徐惠彬. 陶瓷热障涂层的隔热效果研究 [J]. 航空学报，2000，21(4)：25-29.
Gong Shengkai, Deng Liang, Bi Xiaofang, Xu Huibin. Thermal barrier effect of ceramic thermal barrier coatings [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(4): 25-29.

[22] Wild J, Wank M. New TBC system for high temperature applications [C]// Proceedings of ITSC'98. Nice: [s. n.], 1998.

[23] Almeida D S, Silva C R M, Nono M C A, Cairo C A A. Thermal conductivity investigation of zirconia co-doped with yttria and niobia EB-PVD TBCs [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 443(1/2): 60-65.

[24] Matsumotoa M, Aoyama K, Matsubar H, Takayama K. Thermal conductiveity and phase stability of plasma sprayed ZrO_2-Y_2O_3-La_2O_3 coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 194(1): 31-35.

[25] Clarke David R. Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163/164: 67-74.