

## 等离子喷涂热障涂层的隔热性分析

周 洪, 李 飞, 何 博, 陆燕玲, 王 俊, 孙宝德

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

**摘 要:** 采用大气等离子喷涂方法制备不同类型的氧化钇部分稳定氧化锆热障涂层: 传统涂层、纳米团聚粉末制备的纳米涂层和空心球粉末制备的空心球涂层。通过扫描电镜、透射电镜、压汞仪和激光脉冲法观察和测试各种涂层的组织形貌、空隙分布和导热系数, 并在相同条件下测试各种涂层的隔热性能。结果表明: 纳米涂层空隙率最低, 内部孔洞细小。空心球涂层组织相对疏松, 内部层片更薄, 有最高的空隙率和最大的平均空隙大小。传统涂层介于二者之间。纳米涂层和传统涂层均表现出双态空隙大小分布。涂层的导热系数均随着温度的上升而升高。传统涂层的热导率最高, 纳米涂层与空心球涂层的热导率相接近。纳米涂层具有最好的隔热性能, 空心球涂层接近纳米涂层的隔热效果。隔热效果与涂层厚度呈线性关系。随着厚度增加, 导热系数低的纳米涂层和空心球涂层的隔热效果增长幅度高于传统涂层。

**关键词:** 热障涂层; 大气等离子喷涂; 纳米; 空心球粉末; 隔热性能

中图分类号: TG 156.99

文献标识码: A

## Analyses on thermal barrier effects of zirconia based thermal barrier coatings

ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, LU Yan-ling, WANG Jun, SUN Bao-de

(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Different zirconia based thermal barrier coatings (TBCs) were fabricated by air plasma spraying including the conventional TBCs, the nanostructured TBCs from the reconstituted nanoparticles (the nano-coatings) and the special TBCs from the hollow spherical powder (the HSP coatings). The microstructures and properties of the different coatings were studied by transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP). Laser flash technique was used to examine the thermophysical properties of the different coatings. Thermal barrier effects for all the specimens were tested by a self-made device under the same conditions. The results reveal that the nanostructured TBC with the smallest micropores has the lowest porosity, whereas the HSP coatings show a relatively looser microstructure with the largest porosity and thinnest splats. Both the conventional coatings and the nano-coatings present a typical bimodal pore size distribution. In general, the thermal conductivities of all the coatings increase slightly with increasing temperatures. The conventional coating has the highest thermal conductivity among all the coatings. The thermal conductivity of the HSP coatings is similar to that of the nano-coatings. The nano-coatings show the best thermal barrier effect and the HSP coatings also present a good thermal barrier effect. The thermal barrier effect is proportional to the TBC's thickness. With the increasing thickness of coatings, the thermal barrier effect increases more for the coatings with low thermal conductivity than that with high thermal conductivity.

**Key words:** thermal barrier coatings; air plasma spraying; nanostructure; hollow spherical powder; thermal barrier effect

随着航空发动机、燃气轮机向着高流量比、高推重比、高进口温度方向发展, 燃烧室温度和压力也

在不断升高。当前先进燃气轮机中燃气的温度已接近 2 000 °C, 超出了多数高温合金的工作范围<sup>[1-3]</sup>。提

高材料使用温度的方法主要有合金化技术和热障涂层技术,但是现有的高温合金和冷却技术难以满足不断提高的设计要求。热障涂层技术通过在基体表面涂覆高温隔热防护涂层,可用来降低基体的工作温度。热障涂层材料要求具有难熔、化学惰性、相稳定和低热导、低密度、高热反射率等重要物理化学特征。热障涂层的应用不仅可以提高基体抗高温腐蚀能力,进一步提高发动机工作温度,而且可以减少燃油消耗,提高效率,延长热端部件的使用寿命<sup>[4-6]</sup>。有文献报道,目前先进的热障涂层可使高温燃气与金属基体表面之间产生高达170℃的隔热温降<sup>[7]</sup>。美国几乎所有的陆用和船用燃气轮机都已经采用了热障涂层技术。专家预测,在未来10年中,热障涂层技术的使用将达到12%的年增长率,其中在发动机部件中的应用将达到25%的年增长率,具有非常广阔的应用前景<sup>[8]</sup>。为提高热障涂层的使用温度和延长其使用寿命,人们对热障涂层的陶瓷隔热材料、粘结层材料、涂层结构、制备工艺和涂层失效机理等进行了广泛研究<sup>[9-10]</sup>。热障涂层的隔热性和涂层的使用寿命一样,都是热障涂层性能评价的重要指标。隔热性能直接关系到部件的使用温度,同时也影响到热障涂层热循环的热作用<sup>[11-12]</sup>。纳米热障涂层和空心球热障涂层由于其潜在的优异性能,相关的研究和制备正成为热障涂层新的研究方向。目前关于纳米热障涂层和空心球热障涂层材料隔热性能的研究较少有文献报道。本文作者采用等离子喷涂方法制备传统热障涂层、纳米热障涂层和空心球热障涂层;对不同涂层的组织、热学性能进行观察和测试,并分析各种热障涂层的隔热性能差异,为不同类型涂层的实际应用提供实验依据。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

表1 大气等离子喷涂工艺参数

Table 1 Plasma spraying parameters for coatings

Parameter	Current/ A	Voltage/ V	Primary gas, Ar/ (L·min <sup>-1</sup> )	Primary gas, N <sub>2</sub> / (L·min <sup>-1</sup> )	Secondary gas, H <sub>2</sub> / (L·min <sup>-1</sup> )	Powder feeding rate/ (g·min <sup>-1</sup> )	Torch traverse speed/ (mm·s <sup>-1</sup> )	Substrate rotation speed/ (r·min <sup>-1</sup> )	Stand off distance/ mm
NiCrAlY	480	65	37		5	50	10	126	100
Conventional YSZ	500	75		37	5	15	6	126	60
HSP-YSZ	480	75		37	5	25	6	126	60
Nano-YSZ	480	75		37	2	15	6	126	60

采  $d$  25 mm×10 mm 的钛合金圆片(Ti-6.6Al-3.61Mo-1.69Zr-0.28Si, %)作为基体材料。大气等离子喷涂前,试样表面进行喷砂处理(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 粒度: 0.125 mm, 0.6 MPa),然后丙酮除油,超声波清洗。中间层材料为 Ni-20Cr-6Al-Y 粉末(中国农科院表面研究所),粒度分布范围为 10~100 μm; 隔热陶瓷喷涂粉末成分为 ZrO<sub>2</sub>-8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(中国农科院表面研究所),包含 3 种类型:传统微米级粉末(Conventional YSZ),粒度分布为 38.5~63 μm; 纳米团聚粉末(Nano-YSZ),纳米粉末的平均粒度约为 20 nm,团聚后喷涂用颗粒的粒度分布为 20~75 μm; 空心球粉末(HSP-YSZ),粒度分布为 38.5~63 μm。采用 DH-80 大气等离子喷涂设备在试样表面分别喷涂厚度为 0.1 mm 的中间层和厚度分别为 0.2、0.3 和 0.4 mm 的表层陶瓷材料。等离子喷涂工艺参数列于表 1。

### 1.2 组织观察与性能检测

隔热陶瓷涂层的组织形貌采用场发射扫描电镜(FESEM, Model FEI Sirion 200, USA)和透射电镜(TEM, Model JEM-2010, Japan)进行观察;涂层内部的空隙率采用压汞法进行测试(MIP, Poresizer9320, Micromeritics instrument corporation, USA)。空隙率测试之前将剥落下来的陶瓷涂层表面稍微打磨平整,避免因表面粗糙而产生的误差;热扩散系数采用激光脉冲法进行测定。喷涂后涂层的密度利用阿基米德定律进行测试,计算式为

$$\rho = \left( \frac{m_0}{m_1 - m} \right) \times \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

式中  $m_0$  为干燥涂层的质量;  $m$  为浸入水中的质量;  $m_1$  为从水中取出,表面拭干后的涂层质量。涂层的热导率根据下式计算得到:

$$K = \alpha \cdot \rho \cdot c \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为材料的热扩散系数;  $\rho$  为涂层密度;  $c$  为材

料的比热容<sup>[13-14]</sup>。

### 1.3 隔热试验

隔热试验中, 隔热效果指无涂层试样与有涂层试样之间的温度差别,  $\Delta T = T_0 - T_n$  ( $T_0$  为无涂层试样内部温度,  $T_n$  为有涂层试样内部温度)。隔热性能试验在自行设计的测试台架上完成, 如图 1 所示。采用氧乙炔火焰作为高温热源进行加热。试样在涂层表面下方 3 mm 处的基体内沿径向开有  $d 4 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$  的盲孔, 以安置热电偶, 用来测试涂层表面下方中心处的温度值。高温火焰对试样涂层表面加热过程中, 每 5 s 间隔记录一次试样基体内的温度, 直至温度变化波动很小, 基本处于热平衡状态, 绘制温度随时间的变化曲线。在相同的加热条件下, 针对不同类型的热障涂层和不同厚度的热障涂层的隔热性能进行测试。

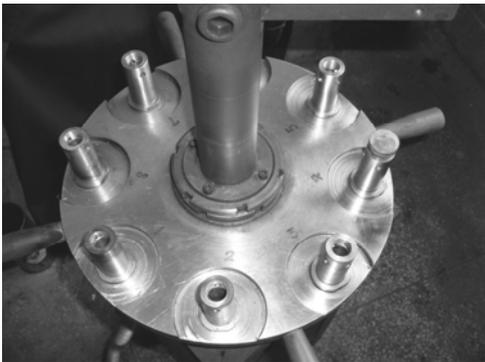


图 1 隔热性能试验台架

Fig.1 Device for thermal barrier test

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层的组织形貌

经大气等离子喷涂后, 各种类型涂层的组织形貌如图 2 所示。由图 2 可见, 各种类型的涂层均存在明显的孔洞、裂纹等缺陷, 以及等离子喷涂的典型层片状组织相貌。传统涂层中, 孔洞呈不规则形状, 内部含有大量的显微裂纹和层片界面。片层厚度约为  $2 \mu\text{m}$ , 内为柱状晶组织。层片之间局部接触, 界面明显, 片层间和片层内部都存在有孔洞。空心球形陶瓷粉末与实心陶瓷粉末相比, 具有流动性好、熔化特性好、沉积率高等优点。喷涂后可见, 空心球涂层内部分布有更多的孔洞, 孔洞的形状亦呈不规则形态, 大小分布不均匀, 存在一些较大的孔洞, 有利于提高涂层的隔热性能。空心球涂层的片层厚度约  $1 \mu\text{m}$ , 薄于传统涂层, 因而在相同厚度条件下, 空心球涂层具有更多

的层间界面, 由于层与层之间的接触热阻存在, 因而增加了隔热性能, 并且层间界面加剧了声子的散射作用, 可导致材料的导热系数降低。纳米涂层内的孔洞细小, 分布均匀, 孔洞界面圆滑, 内部显微裂纹细小且均匀分布。从断裂面观察, 纳米涂层中分布着多种晶粒形貌, 存在着原始纳米组织颗粒、等轴晶粒和柱状晶粒, 如图 3 所示。纳米涂层中未熔原始纳米团聚颗粒内部组织较为疏松, 存在许多纳米级空隙。此外, 纳米组织的存在可显著增加晶界的数量, 而晶界一方面对声子具有散射作用, 另一方面, 晶界由于相邻晶粒的位相不同, 晶界原子排列远较晶粒内部不规则和疏松, 且易于聚集杂质, 导致本身的导热系数比晶粒内部低。纳米涂层内的柱状晶粒组织与传统涂层、空心球涂层内的有所不同, 片层间界面不再明显, 柱状晶粒彼此深入, 组织更加致密, 空隙和显微裂纹稀少, 这对涂层内部的结合力有显著的提高作用。等轴晶组织在传统涂层和空心球涂层未观察到, 其大小均匀, 约为  $2 \mu\text{m}$ , 分布在片层内部, 片层边缘则为更加细小的柱状晶组织。一般工作状态下, 层片内的柱状晶组织平行于热流方向, 有利于热量的传导。相比较而言, 等轴晶增加了晶界的曲折性, 可提高涂层的隔热性。纳米涂层中更多的晶界数量和更加显微细小的空隙以及等轴晶组织对于降低热导率的作用带来积极的影响。

### 2.2 涂层的空隙率

涂层中空隙的形成在热喷涂过程中是不可避免的。影响涂层空隙率的因素很多, 喷涂粉末形貌状态、工艺参数的控制等都直接影响空隙大小和分布。试验过程中, 3 种类型的涂层制备工艺相似。空隙的存在降低涂层内部强度, 但可以增加涂层的隔热性能。通过压汞法测得的 3 种类型涂层中, 传统涂层的空隙率为 15.08%, 平均空隙直径为  $1.549 \mu\text{m}$ ; 纳米涂层空隙率为 13.82%, 平均空隙直径为  $0.3819 \mu\text{m}$ ; 空心球涂层的空隙率达到 21.74%, 平均空隙直径为  $1.877 \mu\text{m}$ 。空心球形粉末可明显提高涂层的空隙率, 使得涂层具有最高的空隙率和最大的平均空隙大小; 纳米涂层的空隙率最低, 并且空隙更加细小; 传统涂层介于二者之间。各种涂层的空隙分布如图 4 所示。从图 4 可知, 纳米涂层和传统涂层均表现出双态空隙大小分布, 即由一些离散分布的较大的空隙和大量均匀分布的细小显微空隙组成。较大的空隙主要由喷涂过程中卷入的空气滞留在涂层内部形成, 以及分布在层片搭接处的孔洞组成。显微空隙主要包括显微裂纹和分布在片层间隙及片层内部的细小孔洞。纳米涂层显微空隙主要

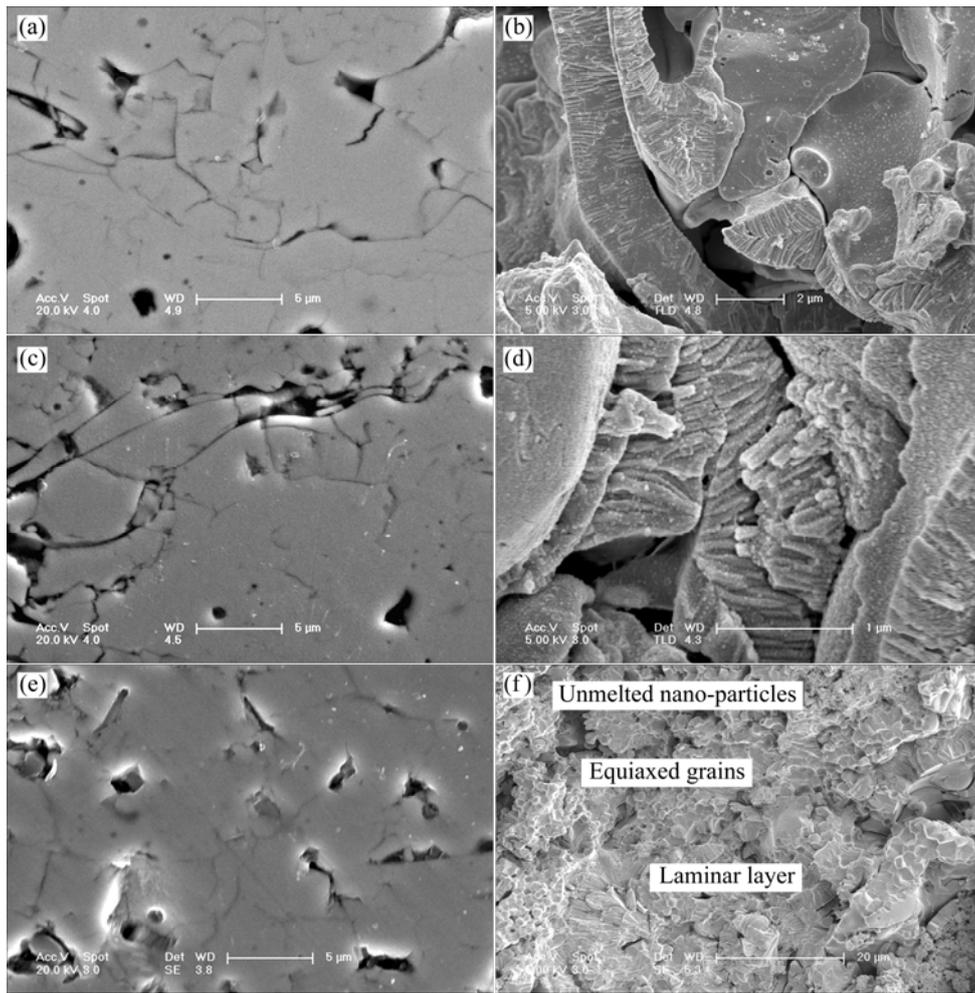


图2 各种涂层的组织形貌

Fig.2 SEM morphologies of different coatings: (a), (c), (e) Polished cross sections; (b), (d), (f) Fractured cross sections; (a), (b) Conventional coatings; (c), (d) HSP coatings; (e), (f) Nano-coatings

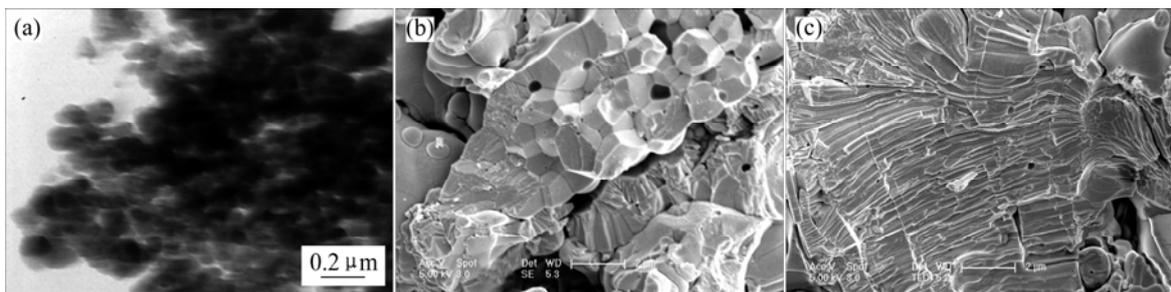


图3 纳米涂层中的显微组织

Fig.3 Microstructures of nanostructured coatings: (a) TEM image of initial nanostructure; (b) Equiaxed grains; (c) Columnar grains

分布在  $0.4 \mu\text{m}$  左右, 而传统涂层中的显微空隙主要分布在  $2 \mu\text{m}$  左右。比较可知, 纳米涂层的空隙率低, 因而组织更为致密; 空隙更加细小, 分布相对更加均匀。空心球涂层中的空隙分布并不呈现出明显的双态性, 在大空隙直径范围其累积增长速率较为平缓, 因而大空隙的大小分布较为宽泛, 而显微空隙的大小分

布主要集中在  $1 \mu\text{m}$  左右。采用空心球粉末制备热障涂层, 可提高涂层的空隙率, 显著降低涂层的平均热导率。

### 2.3 涂层的热导率

不同类型涂层的热扩散系数与热导率随温度变化

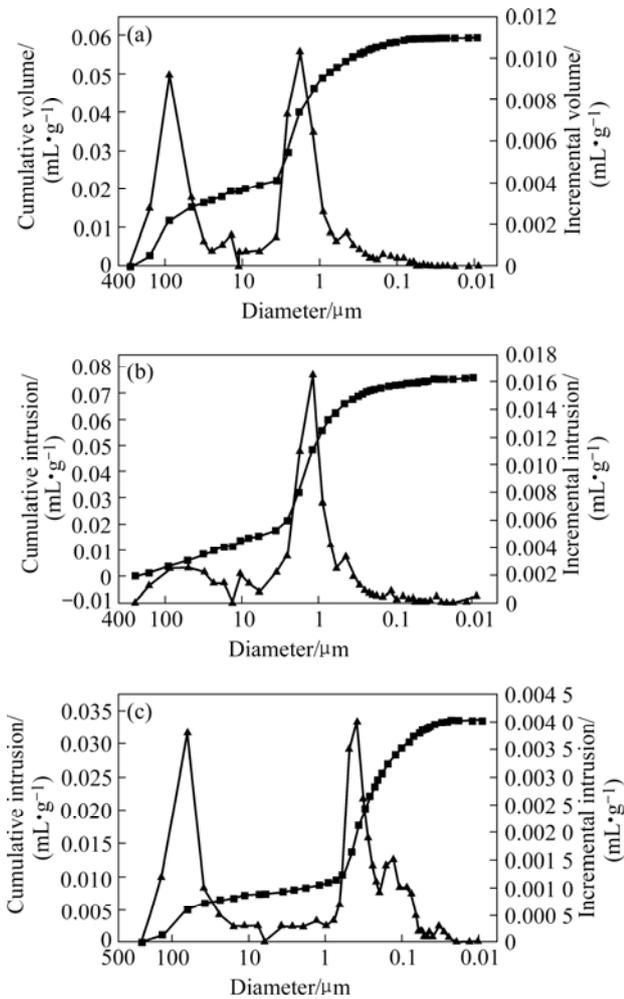


图 4 各种涂层的空隙分布

Fig.4 Porosity distributions of different coatings: (a) Conventional coatings; (b) HSP coatings; (c) Nanostructured coatings

曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 各种涂层的变化规律基本相似。涂层的热扩散系数随温度的变化基本以 800 °C 为界线, 在 800 °C 之前, 涂层的热扩散系数随温度的升高逐渐下降; 800 °C 以后, 随温度升高逐渐增加。通过式(2)计算得到的导热系数则随着温度上升略有升高。传统涂层的热导率最高, 在 1.25~1.8 W/(m·K)之间变化。纳米涂层与空心球涂层的热导率相接近, 但纳米涂层热导率相对更低一些, 其热导率在 0.67~1.22 W/(m·K)之间变化。空心球涂层的热导率在 0.75~1.22 W/(m·K)之间变化。

等离子喷涂涂层实际上为基体和气相的混合组织。热量将以传导、对流、和辐射 3 种方式同时在涂层内传递, 因此应当以有效导热系数  $\lambda_c$  的概念来表述其导热性能<sup>[13-14]</sup>。

$$\lambda_c = f(\lambda_{sc}, \lambda_{tp}, \lambda_{gp}, \lambda_{cp}) \quad (3)$$

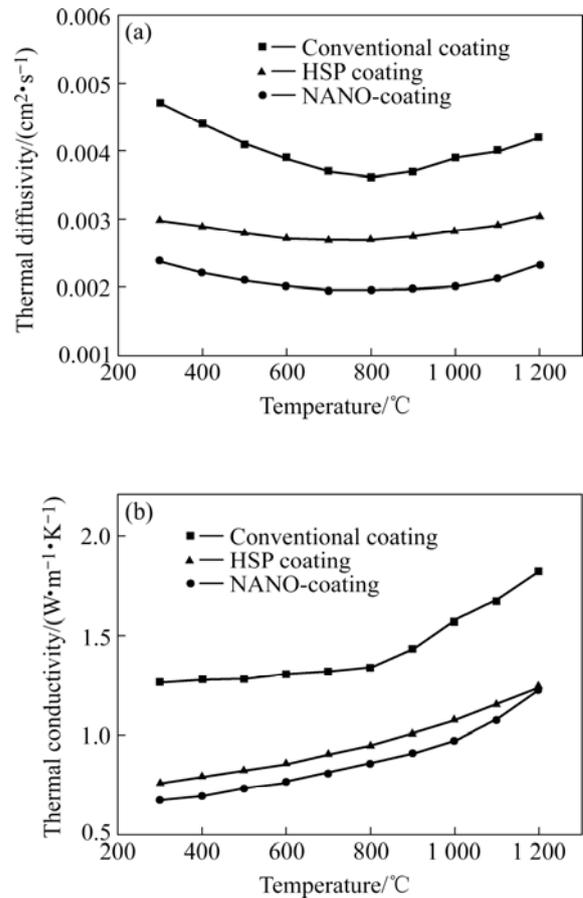


图 5 各种涂层的热扩散系数与热导率

Fig.5 Thermal diffusivity (a) and thermal conductivity (b) of different coatings as function of temperature

式中  $\lambda_{sc}$  为涂层固相导热因子, 其载体为声子;  $\lambda_{tp}$  为气孔的辐射导热因子, 其载体为光子;  $\lambda_{gp}$  和  $\lambda_{cp}$  分别为气孔中的气相导热因子和对流导热因子, 其载体为分子。

不同载体所对应的导热系数具有相同的数学表达式, 即

$$\lambda = c_v \cdot v \cdot l / 3 \quad (4)$$

式中  $c_v$ 、 $v$ 、 $l$  分别为不同导热载体的单位体积热容、平均速度和平均自由程。

Kingery 等<sup>[15]</sup>的研究表明, 陶瓷材料中气孔的  $\lambda_{gp}$  和  $\lambda_{cp}$  值均随气孔平均直径的减小而减小。大气等离子喷涂涂层中气孔很小, 因此,  $\lambda_{gp} + \lambda_{cp}$  贡献也很小, 可以忽略。

气孔的辐射导热因子  $\lambda_{tp}$  可表示为

$$\lambda_{tp} = 4G \cdot d \cdot \varepsilon \cdot \sigma T^3 \quad (5)$$

式中  $G$  为气孔几何因子;  $\varepsilon$  为热发射率;  $d$  为孔径;  $\sigma$  为史蒂芬-波耳兹曼常数。

显然, 等离子喷涂涂层的  $\lambda_c$  与温度的关系由方程  $\lambda_c = f(\lambda_{sc}, \lambda_{rp})$  中各项随温度的变化规律以及等离子喷涂涂层特有的层状结构所确定。需要指出, 在 800 K 以下光子对  $\lambda_c$  的贡献很小; 但在 800 K 以上, 由于它随温度的三次方成比例增大, 光子导热贡献明显增大, 使得在 800 K 以上导热和导温系数增加。因此, 多种因素的综合作用决定了等离子喷涂涂层的热导率随温度的变化, 在不同温区内将以不同的幅度变化。

各种类型涂层表现出来的热导率差异与涂层内的组织结构和空隙率相关。气孔能够引起声子的散射, 并且气孔内的气体导热系数很低, 因此气孔总是降低材料的导热能力, 并且随着气孔尺寸的减小, 气体分子运动的平均自由程逐渐接近甚至大于气孔的尺寸, 从而导致导热系数的进一步降低。空心球涂层由于具有较高的空隙率, 而拥有比传统涂层低的导热系数。纳米涂层由于具有更小的气孔尺寸, 并且近于球形的气孔降低气孔的几何因子, 导致气孔辐射导热系数下降; 加上更多的晶界数量, 降低了涂层的导热率, 因而拥有比传统涂层更低的热导系数。

## 2.4 涂层隔热实验结果

涂层隔热效果实验结果如图 6 所示。从图 6(a) 可看出, 各试样均在 3 min 左右达到稳定热流状态; 无涂层保护的试样在加热过程中升温最快, 传统涂层试样次之, 接下来是空心球涂层试样和纳米涂层试样。各种涂层中, 纳米涂层具有最好的隔热性能, 对应于纳米涂层最低的热导系数值。隔热试验结果与热导率测试结果总体趋势相吻合。涂层的隔热效果随时间的变化如图 6(b) 所示, 各种涂层的隔热效果随时间的增加而逐渐增大, 并趋于平衡。3 种涂层试样的隔热效果在 60 s 左右均出现回落现象, 对应的温度在 600 °C 左右, 其原因可能是快速加热产生的隔热效果惯性, 使得在初始阶段具有快速上升效果, 一定时间后, 上升惯性回落, 造成隔热效果下降; 另外, 由于涂层中存在微裂纹和气孔, 微裂纹是热量传导的一个障碍, 将引起声子的严重散射。由于高温加热时, 微裂纹的闭合, 可能引起隔热性能的滞后现象, 造成隔热效果在一定时间后产生回落。此外, 当温度在 600 °C 以上时, 由于气孔的辐射导热导致涂层导热系数上升, 也使得隔热效果下降。由于短时间内涂层内在的隔热能力没有完全释放出来, 随着加热时间推移, 涂层隔热效果继续上升直至达到稳定热流状态。从图 6(c) 可以

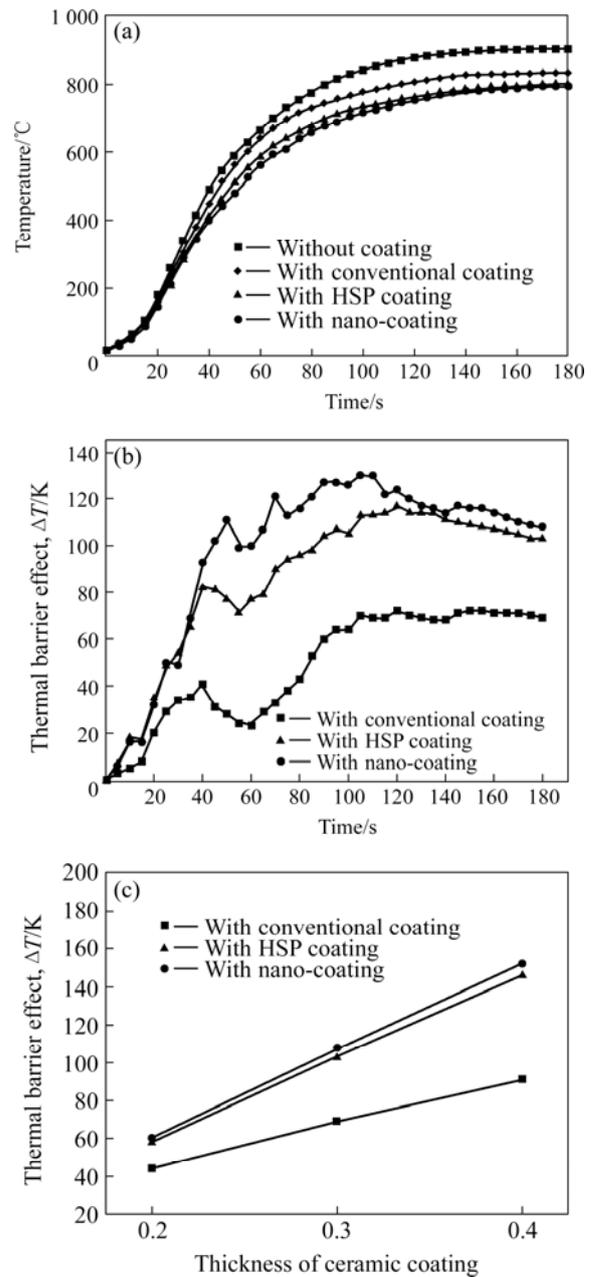


图 6 各种涂层隔热效果测试结果

**Fig.6** Thermal barrier effects of different coatings: (a) Variations of temperatures in substrates with time during heating; (b) Curves of thermal barrier effects with time; (c) Curves of thermal barrier effects with coating thickness

看出, 隔热效果与涂层厚度基本呈线性关系, 随着涂层厚度的增加, 隔热性能成比例增加。导热系数低的纳米涂层和空心球涂层隔热效果优于传统涂层, 但是, 随着厚度增加, 传统涂层、纳米涂层和空心球涂层的隔热效果并不是保持平行的增长趋势。导热系数低的纳米涂层和空心球涂层的隔热效果增长幅度要高于传统涂层, 其厚度越大, 产生的隔热效果越显著。

### 3 结论

1) 大气等离子喷涂制备的热障涂层中,纳米涂层包含原始纳米组织、等轴晶粒和柱状晶组织,层间柱状晶粒彼此深入,组织较为致密。空心球涂层组织相对疏松,内部分布有更多的孔洞,孔洞的形状亦呈不规则形态,大小分布不均匀,层片比传统涂层薄。

2) 纳米涂层的空隙率最低,并且空隙更加细小;空心球涂层具有最高的空隙率和最大的平均空隙大小;传统涂层介于二者之间。纳米涂层和传统涂层均表现出双态空隙大小分布。

3) 涂层的导热系数随着温度的上升,略有升高。传统涂层的热导率最高;纳米涂层与空心球涂层的热导率相接近,但纳米涂层热导率相对更低一些。

4) 纳米涂层具有最好的隔热性能,空心球涂层接近纳米涂层的隔热效果。各种涂层的隔热效果随时间的增加而逐渐增大,但在60 s左右出现回落现象。隔热效果与涂层厚度基本呈线性关系,随着涂层厚度的增加,隔热性能成比例增加。

### REFERENCES

- [1] 李建葆,周益春. 新材料科学及其实用技术[M]. 北京:清华大学出版社,2004:464-476.  
LI Jian-bao, ZHOU Yi-chun. New materials science and its practical technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 464-476.
- [2] Miller R A. Thermal barrier coatings for aircraft engines: History and directions[J]. J Thermal Spray Technology, 1997, 6(1): 35-42.
- [3] Miller R A. Current status of the thermal barrier coatings—An overview[J]. Surface and Coatings Technology, 1987, 30(1): 1-11.
- [4] Goward G W. Progress in coatings for gas turbine airfoils [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108-109(1): 73-79.
- [5] 周洪,李飞,何博,王俊,孙宝德. 热障涂层材料研究进展[J]. 材料导报,2006,20(10): 40-43.  
ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, WANG Jun, SUN Bao-de. Research progress in materials for thermal barrier coatings[J]. Materials Review, 2006, 20(10): 40-43.
- [6] 史国栋,陈贵清,梁军,杜善义. 热障涂层热导率的研究进展[J]. 材料导报,2006,20(10): 44-47.  
SHI Guo-dong, CHEN Gui-qing, LIANG Jun, DU Shan-yi. Research on materials thermal conductivity of thermal barrier coatings[J]. Materials Review, 2006, 20(10): 44-47.
- [7] Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for Gas-turbine engine application[J]. Science, 2002, 296: 280-284.
- [8] 周宏明,易丹青,余志明,肖来荣. 热障涂层的研究现状与发展方向[J]. 材料导报,2006,20(3): 4-7.  
ZHOU Hong-ming, YI Dan-qing, YU Zhi-ming, XIAO Lai-rong. Research status and development tendency of thermal barrier coatings[J]. Materials Review, 2006, 20(3): 4-7.
- [9] ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, WANG Jun, SUN Bao-de. Air plasma sprayed thermal barrier coatings on titanium alloy substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201: 7360-7367.
- [10] 柯培玲,武颖娜,王启民,宫骏,孙超,闻立时. 爆炸喷涂空心球形氧化锆热障涂层的抗热冲击性能[J]. 金属学报,2004,40(11): 1179-1182.  
KE Pei-ling, WU Ying-na, WANG Qi-min, GONG Jun, SUN Chao, WEN Li-shi. Thermal fatigue behaviors of thermal barrier coatings deposited by detonation gun with hollow spherical powder[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(11): 1179-1182.
- [11] 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]. 航空材料学报,2000,21(S4): S25-S29.  
GONG Sheng-kai, DENG Liang, BI Xiao-fang, XU Hui-bin. Thermal barrier effect of ceramic thermal barrier coatings[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(S4): S25-S29.
- [12] 朱健,胡传顺,尤国武,周旭辉,秦华. 燃气轮机叶片热障涂层隔热效果计算[J]. 石油化工高等学校学报,2003,16(4): 44-47.  
ZHU Jian, HU Chuan-shun, YOU Guo-wu, ZHOU Xu-hui, QIN Hua. Calculation of the effect of thermal barrier coatings of vane[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2003, 16(4): 44-47.
- [13] 奚同庚. 无机材料热物性学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981:36-58.  
XI Tong-geng. Thermophysical properties of inorganic materials[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981: 36-58.
- [14] 吴仁清,刘振群. 无机功能材料热物理[M]. 广州:华南理工大学出版社,2003:136.  
WU Ren-qing, LIU Zheng-qun. Thermophysical properties of inorganic functional materials[M]. Guangzhou: South China University of Science and Technology Press, 2003: 136.
- [15] Kingery W D. Property measurement at elevated temperature[M]. New York: John Wiley and Sons, 1959: 139.

(编辑 陈爱华)