

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.03.004

# 溶液前驱体等离子喷涂热障涂层的高温稳定性

汪瑞军<sup>1,2</sup>, 王世兴<sup>1,2</sup>, 鲍曼雨<sup>1,2</sup>, 李 宏<sup>3</sup>, 王伟平<sup>1,2</sup>

(1. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院 表面工程技术研究所, 北京 100083; 3. 空军驻北京地区军事代表室, 北京 100061)

**摘 要:** 以锆盐和钇盐水溶液为原料, 采用溶液前驱体等离子喷涂(SPPS)技术制备了氧化钇部分稳定氧化锆(7YSZ)热障涂层, 利用 X 射线衍射仪(XRD)、拉曼光谱(Raman)和扫描电镜(SEM)研究了 SPPS 涂层在 1 200~1 400 °C 下的相结构和微观结构稳定性。结果表明: 沉积态 SPPS 涂层为亚稳四方相( $t'$ ), 在 1 200 °C 和 1 300 °C 时未发生亚稳四方相( $t'$ )向单斜相( $m$ )的转变, 在 1 400 °C 热处理 100 h 后出现了少量单斜相。在 1 200~1 400 °C 下, SPPS 涂层发生了不同程度的烧结现象; 随热处理温度升高, SPPS 涂层晶粒长大速率增加, 在 1 200、1 300 和 1 400 °C 热处理 100 h 后, 最大晶粒尺寸分别约为 350、700 和 1 100 nm。同时, 在 1 400 °C 下热处理 100 h 后, 涂层中仍然存在大量 1  $\mu\text{m}$  的微孔, 表明其具有较好的微孔保持能力。

**关键词:** 溶液前驱体; 等离子喷涂; 热障涂层; 微观结构

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)03-0023-07

## Thermal Stability of Thermal Barrier Coatings Prepared by Solution Precursor Plasma Spraying

WANG Rui-jun<sup>1,2</sup>, WANG Shi-xing<sup>1,2</sup>, BAO Man-yu<sup>1,2</sup>, LI Hong<sup>3</sup>, WANG Wei-ping<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Golden Wheel Special Machine Co., Ltd., Beijing 100083; 2. Institute of Surface Engineering Technology, Chinese Academy of Agriculture Mechanization Sciences, Beijing 100083; 3. Air Force Representative Office Stationed at Beijing, Beijing 100061)

**Abstract:** Thermal barrier coatings were produced by solution precursor plasma spraying(SPPS) that used aqueous solution of zirconium and yttrium salt as raw materials. Thermal stability of the phase and the microstructure of SPPS coatings at 1 200-1 400 °C were characterized by XRD, Raman and SEM. The results show that as-sprayed SPPS coatings are composed of metastable tetragonal ( $t'$ ). The phase transition of metastable tetragonal to monoclinic does not occur at 1 200 °C and 1 300 °C. Some monoclinic phase appears in SPPS coatings after heat treatment at 1 400 °C for 100 h. SPPS coatings are sintered after heat treatment at 1 200-1 400 °C. Growth rate of the grain size of SPPS coatings increases with the increase of the treatment temperature. The maximal grain size are 350, 700 and 1 100 nm after exposure for 100 h at 1 200, 1 300 and 1 400 °C, respectively. Many micro pores with diameters of about 1  $\mu\text{m}$  are retained after exposure for 100 h at 1 400 °C. It means that the SPPS coatings have the ability to reserve micro pore at high temperature.

**Keywords:** solution precursor; plasma spray; thermal barrier coatings; microstructure

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2015-04-23

通讯作者: 汪瑞军(1967—), 男(汉), 研究员, 博士; 研究方向: 表面工程技术; Tel: (010) 6488 2277; E-mail: wangruijun@sina.com

网络出版日期: 2015-05-07 17:16; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150507.1716.005.html>

引文格式: 汪瑞军, 王世兴, 鲍曼雨, 等. 溶液前驱体等离子喷涂热障涂层的高温稳定性 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 23-29.  
Wang R J, Wang S X, Bao M Y, et al. Thermal stability of thermal barrier coatings prepared by solution precursor plasma spraying [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 23-29.

## 0 引言

热障涂层广泛应用于航空发动机和地面燃机热端部件,可以提高发动机的工作温度和效率、延长发动机热端部件的寿命<sup>[1-3]</sup>。传统大气等离子喷涂(Conventional air plasma spray, CAPS)和电子束物理气相沉积(Electron beam physical vapor deposition, EB-PVD)是制备热障涂层的主要技术。CAPS涂层由大量扁平化粒子不断堆积而形成层状结构,层与层之间存在大量孔隙及界面,该界面具有较低的韧性和结合力,在服役过程中为裂纹萌生位置。EB-PVD涂层为柱状晶结构,具有高应变容限,因此,相对CAPS涂层来说,EB-PVD涂层具有更高寿命<sup>[4]</sup>。通过热喷涂工艺控制,采用CAPS技术可制备出具有垂直裂纹结构热障涂层,使热障涂层应变容限和寿命得到提高,然而,只有在涂层孔隙率小于12%时才可制备出垂直裂纹<sup>[5]</sup>,导致涂层热导率显著提高<sup>[6]</sup>。

近年来,采用溶液前驱体等离子喷涂(Solution precursor plasma spray, SPPS)技术制备的热障涂层消除了CAPS制备的热障涂层中存在的明显的层状缺陷,同时,在高孔隙率下,涂层中垂直裂纹得以保留,从而可提高涂层的隔热性能和应变容限,表现出较高地热循环寿命<sup>[7-9]</sup>。

热障涂层由基体、粘结层、陶瓷层及介于粘结层和陶瓷层之间的热生长氧化物(Thermally grown oxide, TGO)构成。在高于1 200 ℃的连续加热、冷却过程中,7YSZ(质量分数为7%~8%  $Y_2O_3$  部分稳定  $ZrO_2$ )陶瓷层将发生四方相(t)到单斜相(m)的相变,该相变过程伴随有3%~5%的体积膨胀<sup>[10]</sup>,同时,还伴随有陶瓷层烧结现象,在不考虑TGO生长的条件下,相变和烧结均产生热应力,是导致热障涂层失效的两个关键因素<sup>[11]</sup>,且在烧结过程中,涂层中大量孔隙消失,导致涂层隔热性能降低。SPPS技术与CAPS技术相似,只是以锆盐和钇盐水溶液组成的溶液前驱体替代喷涂粉末,通过在等离子射流中形成陶瓷粉末并沉积在基体上形成涂层。

文中通过高温热处理的方式,研究了不同温度下SPPS涂层的相结构和微观结构,评判了SPPS涂层在高温下相结构和微观结构的稳定性,以期SPPS涂层的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试样制备

根据7YSZ中 $ZrO_2$ 和 $Y_2O_3$ 重量比,将一定量钇盐加入锆盐水溶液中,采用电磁搅拌使钇盐充分溶解,形成7YSZ溶液前驱体,将该溶液前驱体通过二流式雾化喷嘴送入等离子射流,溶液前驱体在等离子射流中经过溶剂挥发、溶质析出、熔化等一系列变化过程后,形成7YSZ并沉积在基体上构成SPPS涂层。为比较SPPS涂层高温相结构稳定性,以纳米结构团聚粉末为原料,制备了CAPS涂层,SPPS和CAPS涂层均采用DH-80等离子喷涂系统制备,喷涂功率45 kW,喷涂距离80 mm,送粉速率25 g/min。

为评判SPPS和CAPS涂层高温稳定性,在经过喷砂处理的304不锈钢基体上制备厚度约为500  $\mu\text{m}$ 的涂层,将喷涂试样浸泡在稀盐酸溶液中,使涂层从基体剥离,用自来水冲洗剥离的涂层,然后将其浸泡在去离子水中以便去除涂层中残留的 $Cl^-$ ,最后将剥离的涂层在110 ℃下保温10 h以去除水分。在大气环境下,将烘干的涂层在1 200~1 400 ℃下热处理100 h,分析SPPS和CAPS涂层的高温稳定性。

### 1.2 分析测试方法

采用理学D/MAX-RB型X射线衍射仪(XRD)测试沉积态和热处理后涂层的相结构,测试条件为:Cu靶 $K\alpha(\lambda=0.154\ 056\ \text{nm})$ ,管电压为40 kV,管电流40 mA,扫描速度6°/min。由于Raman光谱对涂层中产生单斜相更加敏感,因此,也采用RM2000型Raman光谱对沉积态和热处理后涂层进行相结构表征。采用日立S-4800型场发射扫描电镜(SEM)观察涂层微观结构,分析热处理过程中涂层表面和截面形貌的变化情况。

## 2 分析与讨论

### 2.1 SPPS涂层的微观组织

图1为从304不锈钢基体上剥离的SPPS涂层的微观组织。由图可知:涂层约500  $\mu\text{m}$ 厚,在SPPS涂层中均匀分布有贯穿整个涂层厚度的垂直裂纹,裂纹密度约为7个/mm。在图1(b)中未观察到类似CAPS涂层中产生的层间裂纹,涂层中均匀分布有大量孔隙,且存在大量尺寸小于1  $\mu\text{m}$ 的孔隙。

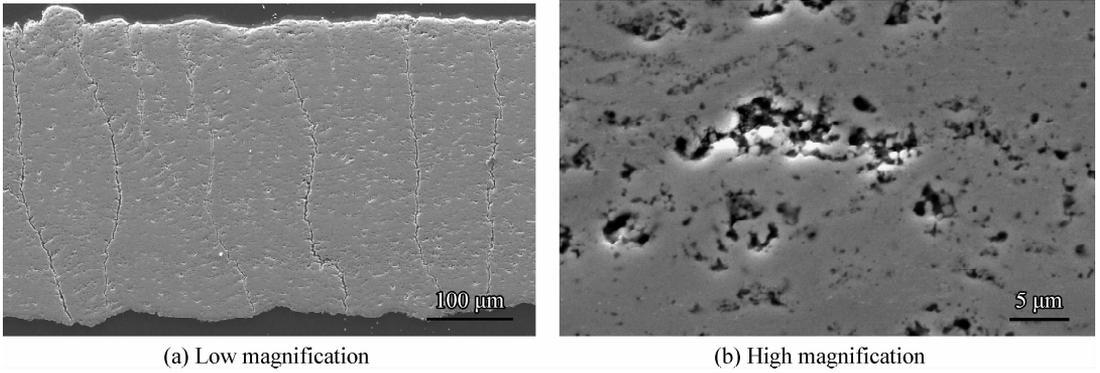


图 1 沉积态 SPPS 涂层的形貌

Fig.1 Morphologies of the as-sprayed SPPS coatings

### 2.2 SPPS 涂层相结构的稳定性

SPPS 技术以溶液前驱体为喷涂原料,溶液前驱体在等离子射流中经过溶剂挥发、溶质析出、熔化、凝固等一系列过程后,在基体上形成 SPPS 涂层,上述变化过程对 SPPS 涂层结构存在显著影响。

图 2 为沉积态 SPPS 涂层及其在 1 200、1 300 和 1 400 °C 热处理 100 h 后的 XRD 图谱。由图 2 可知:沉积态 SPPS 涂层衍射峰尖锐,无明显宽化现象,说明在沉积态下 SPPS 涂层结晶良好,大部分溶液前驱体在等离子射流中经过了充分的物理化学变化,沉积态 SPPS 涂层为亚稳四方相( $t'$ )结构。在 1 200 °C 和 1 300 °C 热处理 100 h 后,SPPS 涂层未发生亚稳四方相  $t'$  向单斜相  $m$  的转变,在 1 400 °C 热处理 100 h 后产生少量单斜相  $m$ 。

由于亚稳四方相  $t'$ 、四方相  $t$  和立方相  $c$  在 (400)( $2\theta$  约为 74°) 衍射面处存在明显分裂现象,因此,在图 2(b) 中显示了 71°~77° 范围内 XRD

图谱。由图可知:热处理温度对 SPPS 涂层相组成存在明显影响,在 1 200 °C 热处理 100 h 后,涂层主要由高  $Y_2O_3$  含量的四方相  $t_2$  和少量低  $Y_2O_3$  含量的四方相  $t_1$  组成;随着热处理温度升高,涂层中低  $Y_2O_3$  含量的四方相  $t_1$  增加,高  $Y_2O_3$  含量的四方相  $t_2$  降低,同时伴随有立方相  $c$  形成,如图 2(b) 中 1 300 °C 对应的曲线所示,SPPS 涂层由  $t_1 + t_2 + c$  相组成。在 1 400 °C 下热处理 100 h 后,涂层中出现大量立方相  $c$ ,且低  $Y_2O_3$  含量的四方相  $t_1$  的含量进一步增加,同时也形成了单斜相  $m$ ,涂层相组成为  $t_1 + c + m$ 。

采用 CAPS 和 EB-PVD 技术制备的 7YSZ 涂层在高温下热处理后,也观察到了亚稳四方相  $t'$  向高  $Y_2O_3$  含量四方相  $t_2$ 、低  $Y_2O_3$  含量四方相  $t_1$ 、立方相  $c$  及单斜相  $m$  的变化过程<sup>[12-14]</sup>。因此,SPPS 涂层与 CAPS 和 EB-PVD 涂层具有相似相变过程,说明在 SPPS 涂层制备过程中, $Y_2O_3$  固溶于  $ZrO_2$  晶格中,形成了  $Y_2O_3$  部分稳定  $ZrO_2$ 。

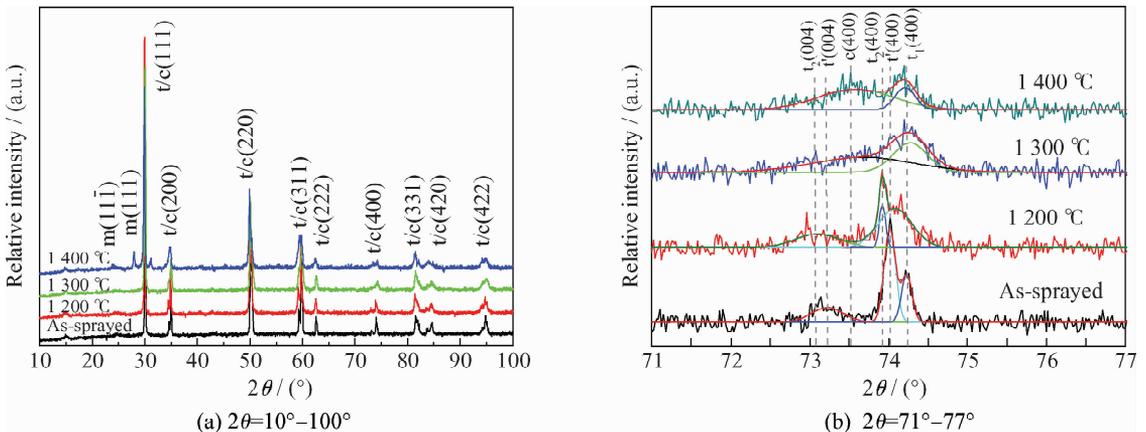


图 2 不同温度热处理后 SPPS 涂层的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of the SPPS coatings after heat treatment under different temperatures

相比 XRD 来说, Raman 光谱对 YSZ 涂层中的单斜相 *m* 更加敏感, 对沉积态 SPPS 涂层及其在 1 200、1 300 和 1 400 °C 热处理 100 h 后进行 Raman 分析, 见图 3。由图可知: 沉积态和 1 300 °C 以下热处理涂层的 Raman 图谱中各峰均为四方相振动模式, 1 400 °C 热处理的涂层对应 Raman 光谱在 170~190  $\text{cm}^{-1}$  处出现单斜相振动模式对应的峰, 说明 SPPS 涂层在 1 400 °C 热处理后产生了单斜相 *m*, 这与 XRD 检测结果一致。相比热处理态涂层, 沉积态涂层在 263  $\text{cm}^{-1}$  和 465  $\text{cm}^{-1}$  处存在明显宽化和不对称现象, 随热处理进行, 148、263 和 465  $\text{cm}^{-1}$  处峰明显变尖锐和对称, 这种现象与晶体中  $\text{Y}^{3+}$  离子有序化而形成富  $\text{Y}_2\text{O}_3$  区域有关<sup>[15]</sup>。

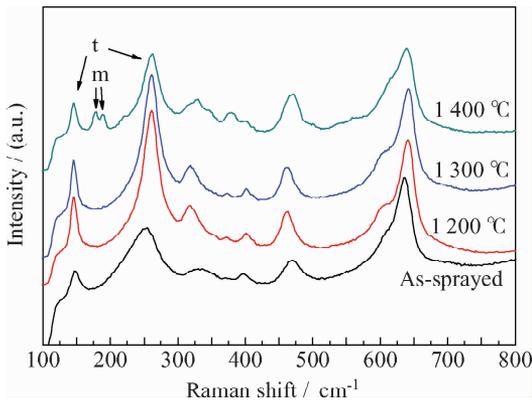


图 3 不同温度热处理后 SPPS 涂层的 Raman 谱图  
Fig. 3 Raman spectra of the SPPS coatings after heat treatment under different temperatures

图 4 为 CAPS 涂层和 SPPS 涂层在 1 400 °C 热处理 100 h 后的 XRD 谱图。由图可知: 热处理后, CAPS 涂层中也出现少量单斜相(*m*), 如箭头所示。采用 R. A. Miller<sup>[10]</sup> 提出的公式计算了 CAPS 涂层和 SPPS 涂层中单斜相的摩尔分数, 如下式所示:

$$\frac{M_m}{M_{c,t}} = 0.82 \frac{I_m(111) + I_m(111)}{I_{c,t}(111)} \quad (1)$$

$M_m$  和  $M_{c,t}$  分别表示单斜相和四方相或立方相所占摩尔分数,  $I_m$  和  $I_{c,t}$  分别表示对应衍射峰的强度。结果表明, 经过 1 400 °C 热处理 100 h 后 CAPS 涂层和 SPPS 涂层中单斜相的摩尔分数均为 17%, CAPS 和 SPPS 涂层具有相近的相稳定性。

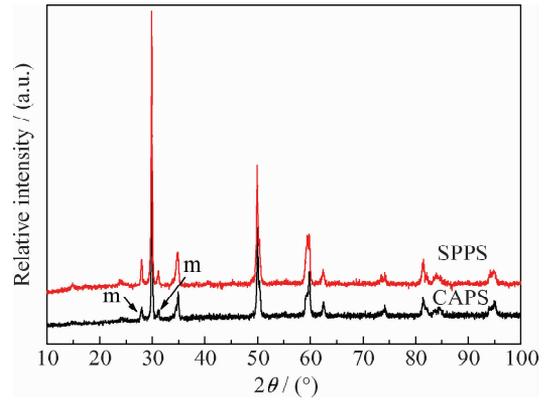


图 4 CAPS 和 SPPS 涂层在 1 400 °C 热处理 100 h 后的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the CAPS and SPPS coatings after heat treatment 100 h at 1 400 °C

### 2.3 SPPS 涂层微观组织的稳定性

图 5 为沉积态及在不同温度热处理 100 h 后 SPPS 涂层的表面形貌。在沉积态下(图 5(a)), 涂层表面未观察到明显晶粒, 有大量直径小于 300 nm 的球形粒子。由于溶液前驱体在等离子射流中需要经过溶剂挥发、溶质析出、熔化、凝固等一系列过程后才能形成 SPPS 涂层, 而这些过程与溶液前驱体在等离子射流中的飞行轨迹有关<sup>[16]</sup>。因此, 这种细小的球形粒子可能为未送入等离子射流高温区的溶液前驱体经过溶质析出形成的。同时, 由于等离子射流温度梯度大, 且直径约 300 nm 的粒子携带热量少, 即使其在等离子射流中已完全熔化, 但在等离子射流低温区域也会发生重新凝固, 因此这些球形粒子也可能是粒子重新凝固后形成的。

同时, 在涂层表面可观察到一些丝状物存在(图 5(a)箭头所示), 这可能由分布在等离子射流边缘物理化学变化过程中不完全的溶液前驱体沉积到基体上形成, 由于溶液前驱体具有一定的粘度, 且随着溶剂挥发粘度将增加, 因此, 等离子射流边缘的溶液前驱体在剪切力作用下形成细丝状, 最终沉积在基体上, 形成丝状物。Aurélien<sup>[17]</sup> 等人也在其研究中也观察到经历不同变化过程的溶液前驱体在基体上形成的粒子形态: 反应完全的溶液前驱体在基体上形成直径小于 4  $\mu\text{m}$  扁平化粒子; 反应不完全的溶液前驱体形成结构疏松的“团簇”。

SPPS 涂层在高温热处理后, 涂层中晶粒逐

渐长大,在 1 200 °C 时晶粒较小,晶粒边界不明显,随着处理温度升高,涂层中晶粒长大速率增加,在 1 300 °C 和 1 400 °C 时可明显观察到晶界。在沉积态时 SPPS 涂层晶粒尺寸约为 60~70 nm,

在 1 200、1 300 和 1 400 °C 处理 100 h 后,晶粒尺寸长大到约 350、700 和 1 100 nm,分别为沉积态时晶粒尺寸的 5、10 和 20 倍,长大速率分别约为 3、7 和 10 nm/h。

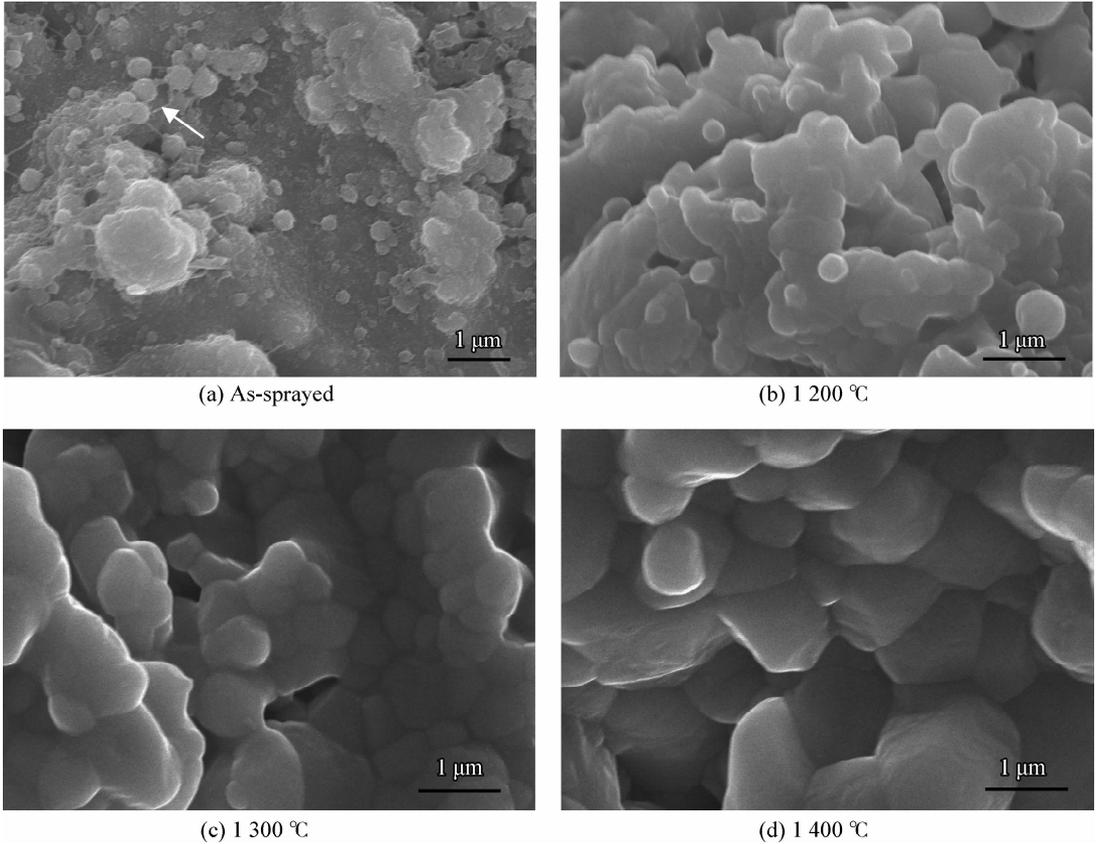


图 5 不同温度热处理后 SPPS 涂层的表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of the SPPS coatings after heat treatment under different temperatures

随着热处理温度升高,SPPS 涂层烧结现象加剧,然而在不同温度热处理后,SPPS 涂层截面形貌及孔隙状态相近,因此,文中仅对比了沉积态 SPPS 涂层和 1 400 °C 热处理 100 h 后涂层的截面形貌,如图 6 所示。

通常,采用 CAPS 制备的 YSZ 涂层中存在大量层状间隙或微裂纹<sup>[18]</sup>,且 CAPS 涂层中绝大部分孔隙尺寸大于 10 μm(图 6(c))。而 SPPS 涂层中未观察到传统等离子喷涂制备的 YSZ 涂层中明显存在的横向层状间隙或微裂纹(图 6(a)),SPPS 涂层中均匀分布有大量尺寸小于 2 μm 的微孔隙,同时伴随有少量的直径约为 10 μm 的孔隙。沉积态涂层中,直径约为 10 μm 的孔隙边缘有大量毛刺状物质,这些大尺寸孔隙的形成与 SPPS 涂层制备过程中分布在等离子射流边缘的物理化学变化过程不完全的溶液前驱体沉积在涂

层中有关<sup>[19]</sup>。SPPS 涂层在高温下热处理 100 h 后,均发生了不同程度烧结现象,相比沉积态涂层,孔隙边缘变得更加光滑(图 6(b))。涂层中孔隙有变圆的趋势,但涂层中均匀分布于致密区的大量微孔(1 μm)仍然得以保留,表明 SPPS 涂层具有较好的孔隙保持能力。Kβaner H 等人<sup>[20]</sup>研究表明,这种微孔不仅可降低涂层热导率,而且作为散射中心,可以显著提高波长为 0.5~2.5 μm 范围内近红外线的反射,降低该范围内射线透射,从而在一定程度上降低了 YSZ 涂层半透明度,提高了 SPPS 涂层的隔热能力。而 CAPS 涂层在 1 400 °C 热处理 100 h 后,涂层中绝大部分孔隙闭合(图 6(d)),涂层孔隙率显著降低。相比 CAPS 涂层来说,SPPS 涂层具有更好的微孔保持能力和抗烧结性能。研究表明<sup>[21-22]</sup>,YSZ 的纯度显著影响其抗烧结能力,降低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub>

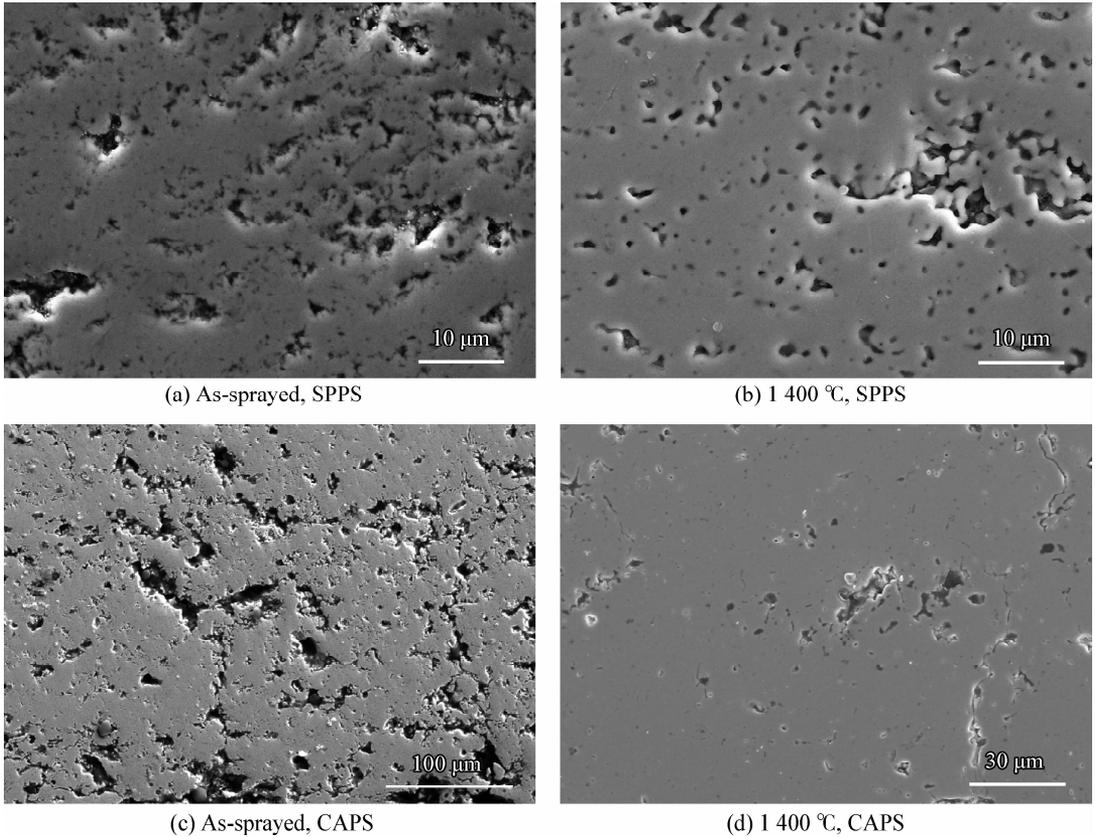


图 6 沉积态和 1 400 °C 热处理 100 h 的 SPPS 和 CAPS 涂层截面形貌

Fig. 6 Cross section morphologies of the SPPS and CAPS coatings of as-sprayed and heat treatment at 1 400 °C for 100 h

杂质的含量可大大提高其抗烧结性能和相稳定性。SPPS 涂层相对较高的抗烧结能力有待进一步研究。

### 3 结 论

(1) 沉积态 SPPS 涂层为亚稳定四方相( $t'$ )，随热处理温度升高，在 1 400 °C 热处理 100 h 后，SPPS 涂层中产生亚稳四方相向单斜相( $m$ )转变。

(2) 随热处理温度升高，SPPS 涂层晶粒长大速率增加，沉积态时晶粒尺寸约 50 nm，在 1 400 °C 热处理 100 h 后长大到约 1 100 nm。

(3) SPPS 涂层具有较好的微孔保持能力，在 1 400 °C 热处理 100 h 后，涂层中仍然有大量直径小于 1  $\mu\text{m}$  微孔存在。

### 参考文献

[1] Miller R A. Current status of thermal barrier coatings—an overview [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1987, 30 (1): 1-11.  
[2] Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coat-

ings for gas - turbine engine applications [J]. *Science*, 2002, 296: 280-284.

- [3] Feuerstein A, Knapp J, Taylor T, et al. Technical and economical aspects of current thermal barrier coating systems for gas turbine engines by thermal spray and EBPVD: a review [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(2): 199-213.  
[4] Bose S, DeMasi-Marcin J. Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at pratt-whitney [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1997, 6(1): 99-104.  
[5] Taylor T A. Thermal barrier coating for substrate and process for producing it [P]. US: 5073433, 1991.  
[6] Bolcavage A, Feuerstein A, Hitchman N. Thermal conductivity evaluation and comparison of APS low density and dense vertically segmented advanced thermal barrier coatings [C]. Lugacheider E. *International Thermal spray 2005*, Thermal spray connects: Explore its surfacing potential, Basel, Switzerland: ASM International, 2005, 944-949.  
[7] Xie L D, Ma X Q, Jordan E H, et al. Deposition of thermal barrier coatings using the solution precursor plasma spray process [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39 (5): 1639-46.

[8] 王世兴,汪瑞军,李宏,等. 溶液先驱体等离子喷涂涂层微观结构影响因素研究 [J]. 热喷涂技术, 2012, 4: 6-10, 14. Wang S X, Wang R J, Li H, et al. Research on influencing factors of solution precursor plasma sprayed coatings microstructure [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012(4): 6-10, 14 (in Chinese).

[9] Jadhav A, Padture N P, Wu F, et al. Thick ceramic thermal barrier coatings with high durability deposited using solution-precursor plasma spray [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 405(1/2): 313-320.

[10] Miller R A, Smialek J L, Garlick R G. Phase stability in plasma-sprayed, partially stabilized zirconia-yttria [C]. Heuer A H and Hobbs L W. Advances in Ceramics, Science and Technology of Zirconia I. Columbus, OH: American Ceramic Society, 1981, 3: 241-253.

[11] Thorbton J. Thermal barrier coatings [J]. Materials Forum, 1998, 22: 159-181.

[12] Brandont J R, Taylor R. Phase stability of zirconia-based thermal barrier coatings part I. zirconia-yttria alloys [J]. Surface & Coatings Technology, 1991, 46: 75-90.

[13] Schulz U. Phase transformation in EB-PVD yttria partially stabilized zirconia thermal barrier coatings during annealing [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83 (4): 904-910.

[14] Lughi V, Clarke D R. High temperature aging of YSZ coatings and subsequent transformation at low temperature [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200: 1287-91.

[15] Lughi V, Clarke D. R. Transformation of electron-beam physical vapor-deposited 8wt% yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2005, 88(9): 2552-8.

[16] 曾子元,王世兴,汪瑞军. 溶液先驱体飞行轨迹对涂层微观结构影响规律研究 [J]. 热喷涂技术, 2011, 3(2): 52-56. Zeng Z Y, Wang S X, Wang R J. Effect of solution precursor trajectory on coating microstructures [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 3(2): 52-56 (in Chinese).

[17] Joulia A, Bolelli G, Gualtieri E, et al. Comparing the deposition mechanisms in suspension plasma spray (SPS) and solution precursor plasma spray (SPPS) deposition of yttria-stabilised zirconia (YSZ) [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34: 3925-40.

[18] Vaßen R, Kaßner H, Mauer G, et al. Suspension plasma spray: process characteristics and applications [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1/2): 219-225.

[19] Guo H B, Vaßen R, Stover D. Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coatings with high segmentation crack density [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 186: 353-363.

[20] Kaßner H, Stuke R, Vaßen R, et al. Influence of microstructure on thermal and optical properties of suspension plasma sprayed (SPS) and atmospheric plasma sprayed (APS) coatings [C]. Lugscheider E. International Thermal Spray Conference & Exposition (ITSC), Dusseldorf: Verlag fur Schweißen und Verwandte Verfahren, 2008: 585-589.

[21] Paul S, Cipitria A, Golosnoy I O, et al. Effects of impurity content on the sintering characteristics of plasma-sprayed zirconia [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(5/6): 798-803.

[22] Xie L, Dorfman M R, Cipitria A, et al. Properties and performance of high-purity thermal barrier coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16 (5/6): 804-808.

(责任编辑:黄艳斐)

• 本刊理事单位介绍 •

上海僖舜莱机电设备制造有限公司

上海僖舜莱机电设备制造有限公司专业从事辊类堆焊修复和预保护工作,以及喷涂、纳米刷镀等表面处理工作,生产过程节能环保,广泛服务于钢铁冶金、水泥、电力等行业,产品修复后使用寿命比新品提高数倍。在钢铁行业,主要针对冷热支承轧辊、工作辊、矫直辊、连铸辊、开坯辊、型钢辊等数十种轧辊进行修复。在水泥行业,开展对辊压机挤压辊的修复,修复后使用寿命达 8 000 小时以上,同时对立磨辊/盘瓦、耐磨板均可实现在线、离线堆焊修复。在电力行业,主要对煤磨辊/盘瓦进行修复。针对实际工作条件,可采用不同的耐磨药芯焊丝及硬面堆焊修复工艺。公司不仅对耐磨、耐腐蚀、耐高温、耐冲击等方面产品堆焊修复,其喷涂还广泛应用于防腐领域。公司同全军装备维修表面工程研究中心开展技术合作,成立“材料表面工程示范应用基地”。