

文章编号:1673-9981(2019)04-0287-08

PS-PVD 等离子射流特性和 YSZ 粉末蒸发行为的光谱诊断^{*}

张 岩^{1,2}, 邓畅光², 毛 杰², 邓子谦², 罗志伟¹

1. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 广东省新材料研究所, 现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东 广州 510650



摘 要:采用 PS-PVD 工艺在不同送粉速率下沉积 YSZ 陶瓷涂层, 通过光学发射光谱(OES)对不同送粉速率下的等离子射流特性进行诊断, 同时分析光谱发射强度分布并计算出等离子射流平均温度及电子密度值, 结合射流照片以及涂层微观结构研究不同送粉速率下 YSZ 粉末在射流中的加热蒸发行为。研究结果表明:少量粉末通入后几乎全部被加热蒸发, 大量处于高激发态甚至发生电离, 射流温度较低但保持着较高电子密度;气相状态下涂层沉积速率很低, 涂层多为单根柱状晶且宽大, 直接由纳米柱状晶组成;增大粉末送粉速率, 射流高温区发生宽化, 粉末蒸发量提高, 但射流的能量不再足以蒸发所有粉末, 会存在少量未融颗粒。气相、团簇甚至熔融粒子共同作用下的混合相沉积使得沉积效率迅速增大。表面扩散较不充分, 单根柱状晶尺寸变窄, 在固体颗粒与阴影效应的共同作用下产生分支。

关键词: OES; PS-PVD; 热障涂层; YSZ 粉末蒸发; 等离子射流特性

中图分类号: TG174.453

文献标识码: A

等离子喷涂-物理气相沉积(Plasma spray-physical vapor deposition, PS-PVD)融合了 APS 与气相沉积技术的优势^[1-3], 可以沉积出具有优异热循环性能的柱状涂层, 成为最具有潜力的先进涂层制备技术之一^[4]。大功率的 O3CP 喷枪, 其功率可高达 180 kW、电流可达 3000 A、气体通量超过 200 L/min, 在大功率真空泵下腔室可实现 100~200 Pa 的动态压强, 等离子射流长度超过 2000 mm、直径为 200~400 mm^[5]。通过工艺参数的调节, 可实现喷涂致密结构、羽毛柱状结构和混合结构的涂层。

气相沉积制备出羽毛柱状结构热障涂层是当前研究的重点, 通过使用大功率喷枪和小颗粒团聚粉末来提高粉末气化量, 这是目前实现羽毛柱状热障涂层的主要途径, 即采用 O3CP 喷枪和纳米团聚

7YSZ 粉末进行涂层制备^[6]。为掌握羽毛柱状结构的制备条件, 众多学者^[7-8]借助光学发射光谱(Optical Emission Spectroscopy, OES)对等离子射流特性进行诊断来辅助研究, 包括不同等离子气体、不同轴距^[9]、不同功率及不同基体温度^[10-11]对涂层结构与性能的影响。虽然羽毛柱状结构的沉积机制至今还不能下定论, 但其主要受表面扩散与阴影效应等因素的影响已基本被认同^[12]。

G. MAUER 通过模拟计算得出, 在相应喷涂参数下 57% 的粉末在喷枪内实现了蒸发并消耗了喷枪净功率的 64%^[13]。等离子气体(Ar/He)量为 35/60 L/min, 其焓值足以使粒度为 0.92 μm 的颗粒完全气化^[14], 而现实 7YSZ 粉末($d_{50}=10 \mu\text{m}$)并不能完全蒸发。这是因为射流喷出后首先经历膨胀/

收稿日期:2019-12-05

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上基金(51771059), 广东省重点领域计划(2019B010936001), 国家科技重大专项(2017-VI-0010-0081), 广东省科技计划项目(2017A070701027, 2014B070705007), 广东省科学院项目(2019GDASYL-0104022, 2018GDASCX-0950)

作者简介:张岩(1993-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为耐高温涂层制备与诊断, E-mail:15613200473@163.com.

通讯作者:毛杰(1979-), 男, 湖南常德人, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为先进高温功能涂层, E-mail:maojie@gdinn.com.

压缩区域,会出现明显的能动转换现象,温度急剧下降,加热能力持续降低,但粉末滞留时间长,仍有蒸发粉末现象发生^[15]. 大功率与小颗粒团聚粉末问题解决后,合适的送粉速率对粉末的有效蒸发至关重要^[16].

G. MAUER 研究发现,当使用 Ar/He 等离子气体时 Zr 峰强度随着送粉速率的增加而增加,当送粉速率超过 20 g/min 时光谱测量强度的增加变缓甚至开始下降^[17]. ZrO₂ 从固态加热到气态需要的热值为 1058.5 kJ/mol,送粉速率为 20 g/min 时完全气化需要 172.1 kJ/min,而 120 kW 的等离子喷枪可以提供 7200 kJ/min 的能量. 因此不同送粉速率下 7YSZ 粉末的蒸发及送粉后等离子射流特性的改变需要进一步研究.

为了研究 YSZ 粉末在 PS-PVD 等离子射流中的加热蒸发行为,应用光学发射光谱(OES)对喷距 1000 mm 处不同送粉速率下的等离子射流特性进行诊断,对比射流宏观照片,分析粉末的加热行为. 然后对涂层微观结构进行表征,对粉末有效蒸发行为的分析进行佐证.

1 评估方法及实验方法

1.1 评估方法

采用 OES 诊断系统对喷距 1000 mm 处等离子射流进行光谱诊断,首先光谱发射强度可以直观地表示粉末蒸发量. 根据射流径向光谱强度分布并结合等离子射流特性计算及射流照片,可以初步推断出不同送粉速率下 YSZ 粉末在射流中的加热行为的差异. 对于所有材料,蒸气压是饱和条件下蒸气和液相平衡时的分压,是关于温度的函数,粉末蒸发的必要条件是其饱和蒸气压高于等离子体射流压力(默认等于腔室压力 150 Pa). 对不同送粉参数下涂

层的沉积状态和微观结构进行表征,结合光谱诊断下的粉末蒸发行为对涂层沉积行为进行深入解释.

1.2 等离子射流特性计算

通过光谱可以计算出等离子体温度和电子密度值 N_e . 等离子射流温度的计算采用玻尔兹曼绘图法,计算的合理性依赖于局部热力学平衡(LTE)假设,在这种假设下体系具有统一的温度. 通过对多谱线辐射强度的对比可以得出原子激发温度,认为等同于电子温度和各重粒子(原子和离子)温度,即等离子射流温度. 不同的送粉量下采用相同的载气量会导致射流径向温度分布出现不对称问题,所以光谱的处理均没有进行 Abel 转换,计算得到的温度称为等离子平均温度. 研究表明,等离子射流在特定位置时满足 LTE 条件. 等离子体电离度超过 1%,stark 展宽就占据主导地位,所以可以通过 stark 展宽效应计算等离子射流电子密度 N_e . 处于 LTE 中的临界电子密度值约为 $7.2 \times 10^{14} \sim 8.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ^[15]. 选择谱线为 696.7 nm(宽化效果最明显)的 Ar 等离子气体计算电子密度,公式如下:

$$\log N_e = 1.452 \log \Delta\lambda + 14.017.$$

(1)

其中: N_e 是电子密度值,单位 cm^{-3} ; $\Delta\lambda$ 是谱线半高宽值(FWHM),单位 nm.

1.3 实验方法

所有的喷涂实验是在瑞士 Oerlikon-Metco 的 MulticoatTM PS-PVD 系统上完成,陶瓷层材料为 Oerlikon-Metco 开发的 7YSZ 团聚粉末(Metco 6700,粉末粒径为 1~30 μm). 为提高结合强度,喷涂前要对金属粘结层进行喷砂处理(粗糙度控制在 2 μm 左右). 为了提高涂层抗氧化能力,通过等离子射流来回扫射对粘结层进行预氧化,预制热生长氧化物(TGO)层. 将基体预热至 900 $^{\circ}\text{C}$ 后进行 7YSZ 陶瓷涂层沉积. 具体喷涂参数列于表 1.

表 1 PS-PVD 制备陶瓷层的工艺参数
Table 1 Parameters of ceramic coatings prepared by PS-PVD

方案	参数							
	Ar/He 等离子气体 /(L · min ⁻¹)	电流 /A	总功率 /kW	压强 /Pa	送粉速率 /(g · min ⁻¹)	喷涂距离 /mm	喷涂遍数 /次	载气 Ar /(L · min ⁻¹)
方案 A	35/60	2600	120	150	5	1000	900	2×10
方案 B	35/60	2600	120	150	10	1000	600	2×10
方案 C	35/60	2600	120	150	20	1000	400	2×10

实验用的发射光谱仪为 IHR550(HORIBA, 美国),光栅选择 1200 gr/mm(630 nm),滤光片选用 LP320,光谱仪配有 1024×1024 CCD 阵列.采用 Nove-Nano-430(FEI, 美国)场发射电子显微镜对涂层微观结构进行表征.

2 结果与讨论

2.1 OES 诊断

原子发射光谱仪可以探测到 300~1000 nm 波长之间的等离子体发光光谱,图 1 为相同检测条件下不同送粉状态下的光谱图,并进行了元素谱线标注.图 1(a)为等离子气体的光谱图,图 1(b)~(d)分

别为方案 A,B 和 C 的光谱图.从图 1(a)可以清晰地看出,Ar 与 He 谱线的存在.从图 1(b)~图 1(d)可见:在 350~550 nm 波长范围内检测到大量 Zr 和 Y 的谱线,说明 YSZ 粉末已经实现了蒸发;谱线发射强度可以反映蒸发量,将 YSZ 粉末蒸发区域同比例放大,可以明显看出随着送粉速率的增加 Zr 和 Y 谱线发射强度不断增强,说明 20 g/min 送粉速率下 YSZ 粉末蒸发量最大.仔细观察图 1 中 587.56 nm 处的 He 谱线发现,随着送粉速率的增加,He 谱线发射强度逐渐降低,表明射流中处于激发态的 He 粒子(包括原子或离子)数量在下降,而 Ar 谱线几乎不受影响.这说明 YSZ 粉末的通入改变了射流特性,且与通入的粉末量有关系.

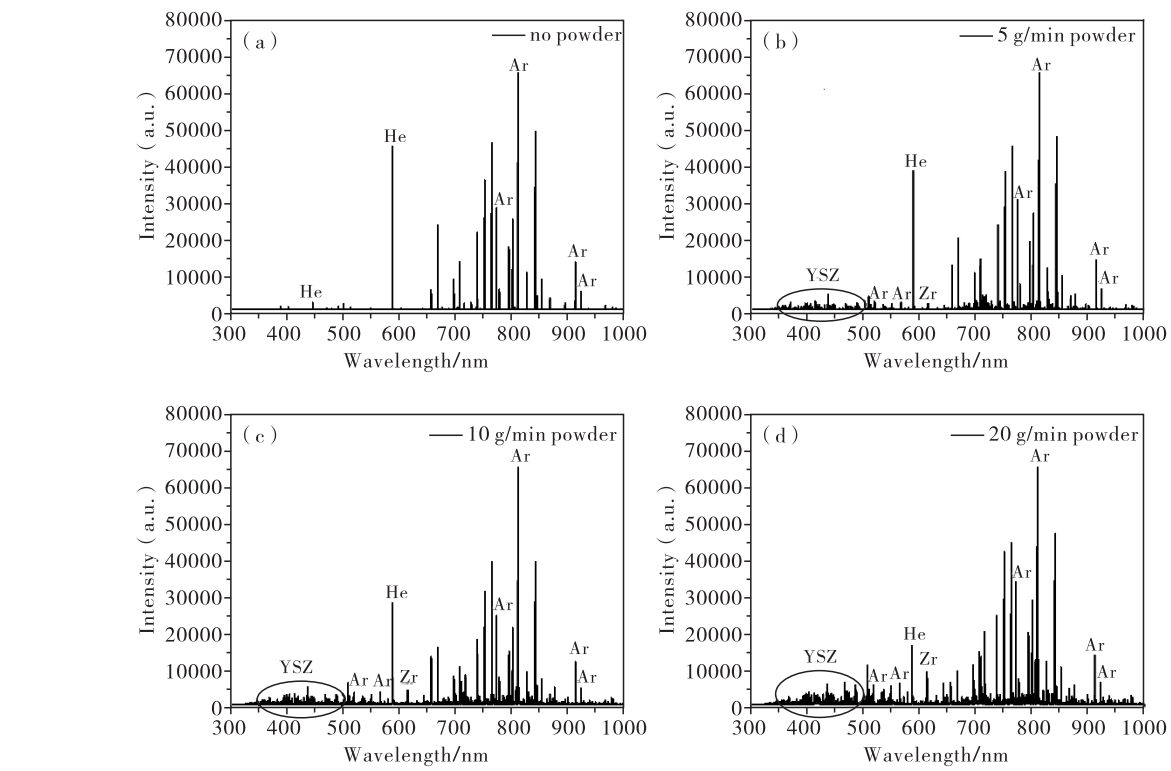


图 1 等离子射流光谱图
(a)等离子气体 Ar/He 为 35/60(L/min);(b)送粉速率 5 g/min;(c)送粉速率 10 g/min;(d)送粉速率 20 g/min
Fig. 1 OES spectrum of the plasma jet
(a)Plasma gases Ar/He=35/60 (L/min); (b) powder feeding rate 5 g/min; (c) powder feeding rate 10 g/min; (d) powder feeding rate 20 g/min

图 2 为 1000 mm 喷距下射流径向光谱发射强度的分布,通过移动 OES 系统收光装置与射流中线的位置分步测得.通常 Abel 转换被用于构筑等离子射流空间特性^[18],径向发射强度分布的表征有利于研究射流中所有等离子气体的空间特性.已知 Ar

原子的激发能要小于 He 原子,更容易达到激发态,所以 He 对温度变化的敏感程度更高.图 2(a)为 Abel 转换后等离子气 Ar/He 为 35/60(L/min)的光谱强度径向数值分布.从图 2(a)观察到:He 谱线强度主要集中在中心,沿径向不断减小,射流温度值

从中心向四周逐渐减小,说明射流中心温度最高且 He 气多分布在射流中心;而 Ar 谱线分布于径向 30~90 mm 之间,表明 Ar 的分布并没有集中在射流中心. 图 2(b)为粉末通入后光谱强度的径向数值分布. 从图 2(b)可见,粉末通入后 He 谱线最值分布

外移且数值趋于平均,而 Zr 谱线峰值集中在中心位置,推论为粉末被载气送入到了射流中心导致蒸发吸收了能量所致;而 Ar 气变化不明显,说明粉末蒸发对射流轴向中部的影响不大. 分析结果与 G. Mauer^[17]在文献中的描述一致.

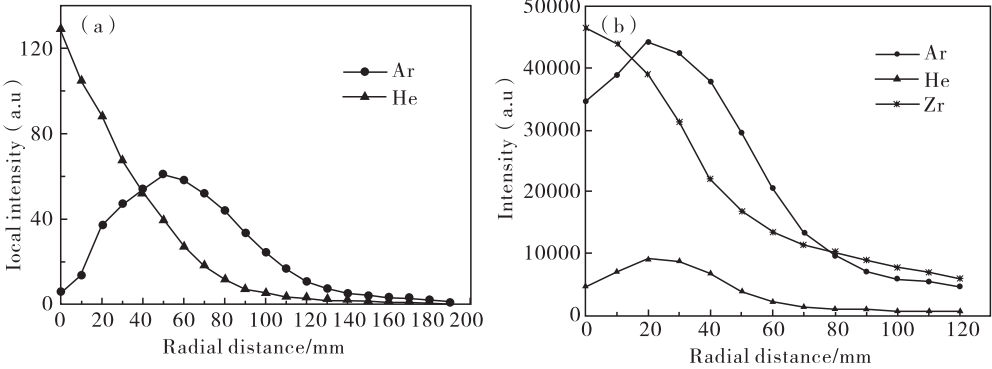


图 2 光谱发射强度径向分布(1000 mm 轴距)

(a) 等离子气体 Ar/He 为 35/60(L/min);(b)YSZ 粉末送入后(送粉量 20 g/min)

Fig. 2 Radial distribution of spectral emission intensity (stand-off distance 1000 mm)

(a) plasma gases Ar/He=35/60 (L/min); (b) injected into YSZ powder (powder feeding rate 20 g/min)

2.2 等离子射流特性

结合光谱对射流特性进行计算,可以得出等离子射流电子密度值与温度. 图 3 展示了不同送粉速率下谱线的拟和与计算出的电子密度值. 从图 3 可见,电子密度值均为 1015 数量级,大于 LTE 中的临界电子密度值,可以认为喷嘴 1000 mm 处等离子射流满足 LTE 条件;送粉速率为 5 g/min 时的电子密度最高,表明射流中拥有更多的电子,而 20 g/min 时的电子密度最低. 这是由于粉末蒸发会吸收射流能量,能量降低会导致电子与离子的结合,从而使电子密度降低.

运用玻尔兹曼绘图法计算等离子射流温度. 查询 NIST 数据库找出几组典型的 Ar 谱线参数(420 nm 左右,550 nm 左右和 800 nm 左右的区段),结合光谱测出的辐射强度值计算得出离散型点分布,线性拟合计算射流温度. 图 4 展示了计算结果,温度分别为 2343.14,2642.33 和 2532.51 K. 从图 4 可见,当送粉速率为 5 g/min 时计算得到的射流温度值最低,这是因为图 4(a)中高的能级差对应的数值较低,说明射流中处于低激发态的粒子最少. 结合最大的电子密度值,可知通入少量粉末后射流中的等离子体有足够的能量去撞击粉末粒子至高激发态,甚至将粉末电离,所以通入较少粉末时等离子射流温

度值的计算误差较大,导致算出的温度值最低. 送粉速率增加至 10 g/min 后射流能量不再支持粉末粒子发生电离,计算出的温度较合理.

图 5 为不同送粉速率下的等离子射流照片,亮色区域为射流高温区,外围为低温区. 从图 5 发现:不同量的粉末送入后等离子射流产生一些差异. 少量粉末(5 g/min)送入后射流高温区迅速聚集中心,而射流外围最宽大;随着送粉速率的增大,射流尺寸变小但高温区发生宽化.

结合光谱测量与等离子射流特性计算结果对 YSZ 粉末蒸发行为进行初步阐述. YSZ 粉末通入等离子射流后,射流发生聚集,分为高温区和低温区. 载气可以将大部分粉末送至高温区,吸收射流能量发生蒸发. 光谱径向强度分布说明射流中 He 主要聚集在中心,粉末通入中心后,He 谱线发射强度大幅减小,说明温度降低. 当粉末以 5 g/min 的送粉速率通入时,粉末几乎全部送入到射流中心并聚集在高温区,射流能量足以将大量粉末粒子(分子或离子)送至高激发态甚至电离,中心能量被大量消耗,所以此时射流温度较低,但可以维持高的电子密度值. 当送粉速率增至 10 g/min 时,相同载气下不能将所有粉末送至射流中心,所以射流高温区发生宽化现象,粉末中被激发的粒子多分布在低激发态,虽

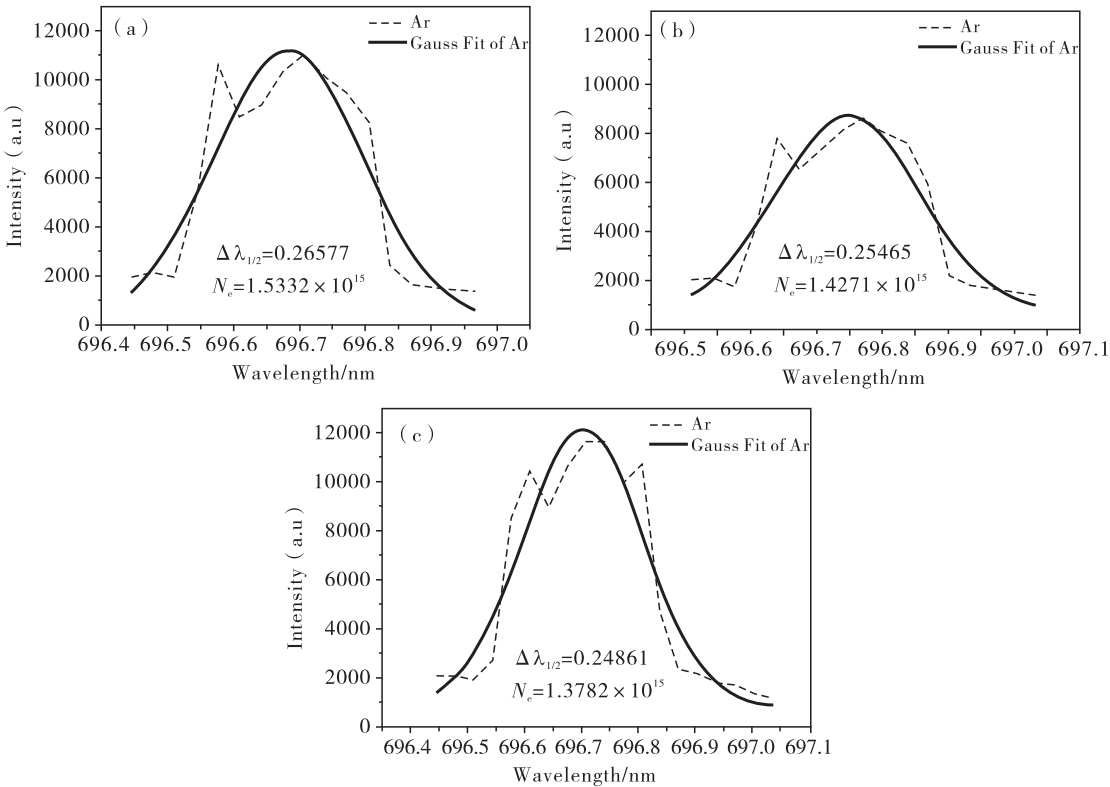


图 3 不同送粉速率下 Ar 谱线拟合与电子密度计算
(a)5 g/min;(b)10 g/min;(c)20 g/min

Fig. 3 The fitting of Ar spectral line and calculation of electron number density at different powder feeding rates

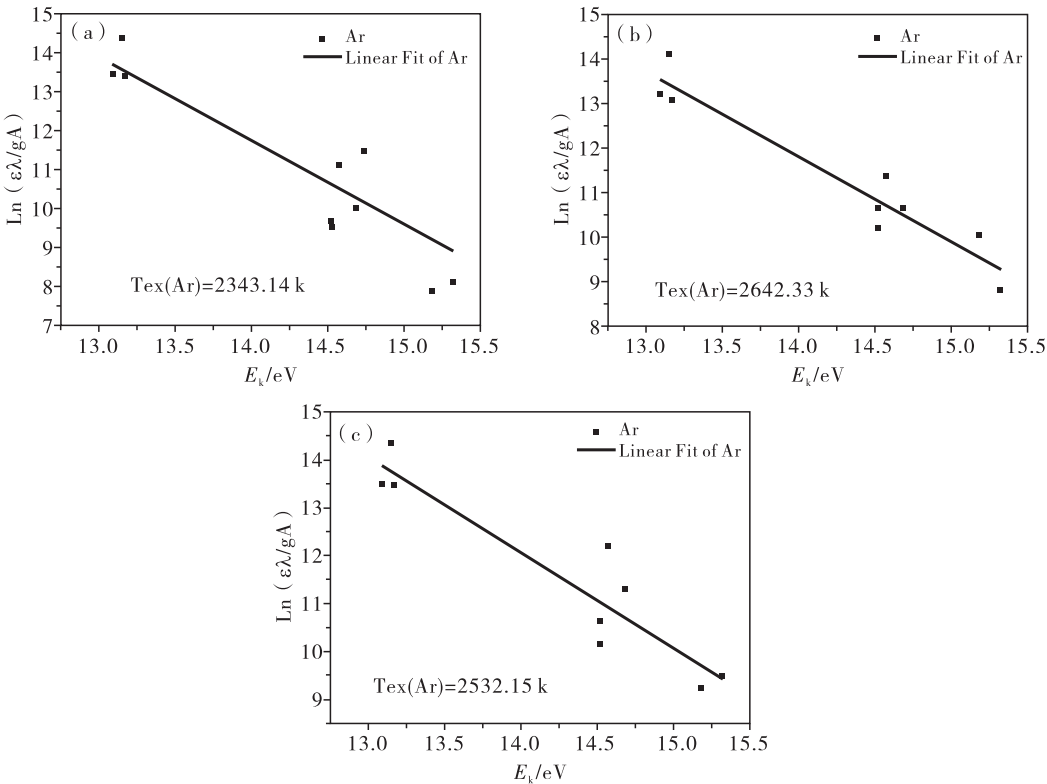


图 4 不同送粉速率下的等离子射流温度
(a)5 g/min;(b)10 g/min;(c)20 g/min

Fig. 4 The temperature of plasma jet at different powder feeding rates

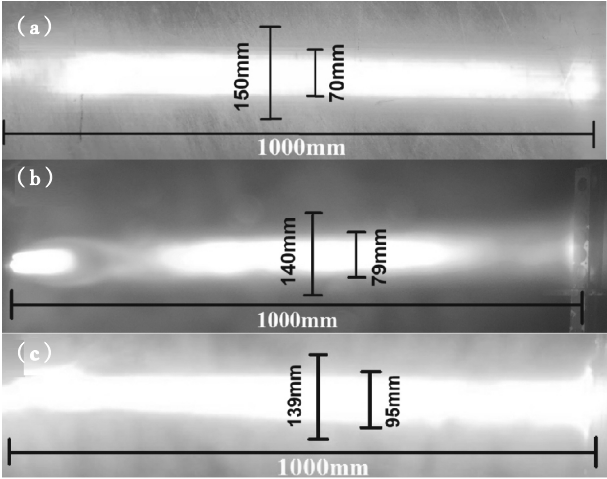


图5 不同送粉速率下的等离子射流照片
(a)5 g/min;(b)10 g/min;(c)20 g/min

Fig.5 Photographs of plasma jets at different powder feeding rates

然同时间有更多的粉末吸收能量,但吸收的能量更多用于蒸发甚至熔化,很少用于电离,所以会出现射流温度最高但电子密度低于前者的结果.送粉速率进一步增加,粉末蒸发量虽然进一步增大,但蒸发比例却持续降低,射流能量只能支撑更少的粉末激发和电离,所以此时的温度与电子密度均持续减小.

2.3 涂层的微观结构

图6为三种不同送粉速率下的涂层微观形貌图.从图6(a)和图6(d)分别为5 g/min的送粉速率下涂层的截面及表面形貌图可以看出,涂层多为单根柱状晶,柱状晶直接由纳米柱状晶组成,且单根柱状晶较粗大,此时涂层的沉积速率为3.4 μm/min.结合粉末的加热行为可知,此时射流中裹挟着高能量和过饱和的气相粒子,沉积为气相沉积,沉积涂层中气相沉积柱状晶主要受表面扩散与阴影效应的影响.由于射流中心温度高且射流中几乎不存在未融颗粒,所以柱状晶完全由气相沉积生成,沉积速率非常低,表面扩散可以充分进行,所以柱状晶较为宽大且几乎不存在分支.从图6(b)和图6(e)为10 g/min的送粉速率下涂层的截面与表面形貌图可以看出,此时柱状晶的沉积速率增加至10.8 μm/min,单根柱状晶尺寸较前者变小但分支众多.根据此条件下射流的特性可知,此时除了气相沉积外还存在夹杂着部分团簇甚至未融颗粒等混合沉积方式,所以沉积速率很高.阴影效应与固体颗粒的共同作用使得柱状晶出现分支.随着,在从图6(c)和6(f)为送粉速率20 g/min下涂层的截面与表面形貌图可见,此时柱状晶的沉积速率高达17.4 μm/min,柱状晶分

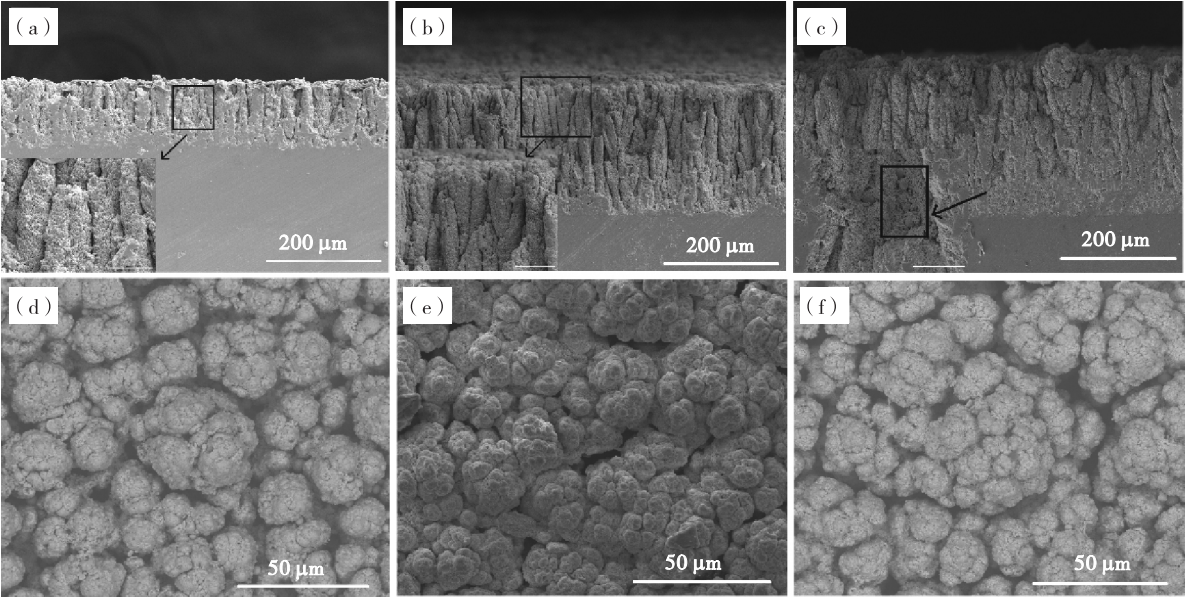


图6 YSZ涂层微观形貌图

(a)和(d)送粉速率5 g/min下的截面及表面图;(b)和(e)送粉速率10 g/min下截面及表面图;(c)和(f)送粉速率20 g/min下截面及表面图

Fig.6 The microstructure of YSZ coatings

(a) and (d) Cross section and surface micrographs with a powder feeding rate of 5 g / min; (b) and (e) Cross section and surface micrographs with a powder feeding rate of 10 g / min; (c) and (f) Cross section and surface micrographs with a powder feeding rate of 20 g / min

支更多且间隙中出现大量未融颗粒. 与上述对20 g/min送粉速率的等离子射流特性分析与粉末加热行为一致.

3 结 论

研究YSZ粉末在等离子射流中的加热蒸发行为对解释涂层微观结构的生成至关重要. 通过光学发射光谱(OES)对通入粉末后的等离子射流特性进行诊断,结合射流照片以及涂层的微观结构,发现:通入少量YSZ粉末后射流高度聚集,几乎所有的粉末被加热蒸发,大量粒子处于高激发态甚至电离态,射流温度较低但可以保持较高的电子密度,蒸发的粉末实现气相沉积,沉积速率很低,涂层多为单根柱状且较为宽大,直接由纳米柱状晶组成;粉末送粉速率增至10 g/min甚至更大时,部分粉末不能送至射流中心,射流高温区发生宽化;随着单位时间通入的粉末增加,实现蒸发的粉末数量在增加,但射流的能量不足以蒸发所有粉末,出现部分未融颗粒;气相、团簇甚至熔融粒子共同作用下的混合沉积形式使得沉积效率迅速增大,表面扩散不再充分,单根柱状晶尺寸变窄,同时在固体颗粒与阴影效应的共同作用下产生分支.

参考文献:

- [1] HOSPACH A, MAUER G, VAßEN R, et al. Columnar-structured thermal barrier coatings (TBCs) by thin film low-pressure plasma spraying (LPPS-TF) [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(1-2): 116-120.
- [2] NIESSEN K V, GINDRAT M, REFKE A. Vapor phase deposition using plasma spray-PVDTM [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(1-2): 502-509.
- [3] ZHU L, ZHANG N, SUN F, et al. Thin yttria-stabilized zirconia coatings deposited by low-energy plasma spraying under very low pressure condition [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, 20(5): 1118-1124.
- [4] ZHANG X, LIU M, ZHANG X F, et al. Research progress of high temperature protective coatings by plasma spray-physical vapor deposition [J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(5): 39-53.
- [5] GAO L H, WEI L L, GUO H B, et al. Deposition mechanisms of yttria-stabilized zirconia coatings during plasma spray physical vapor deposition [J]. *Ceramics International*, 2016, 42: 5530-5536.
- [6] CHEN Q Y, PENG X Z, YANG G J, et al. Characterization of plasma jet in plasma spray-physical vapor deposition of YSZ using a < 80 kW shrouded torch based on optical emission spectroscopy [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24(5): 1038-1045.
- [7] MAUER G, VAßEN R. Plasma spray-PVD: plasma characteristics and impact on coating properties [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 406: 012005.
- [8] LI C, GUO H B, GAO L H, et al. Microstructures of yttria-stabilized zirconia coatings by plasma spray-physical vapor deposition [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24(3): 534-541.
- [9] GAO L, GUO H B, WEI L L, et al. Microstructure, thermal conductivity and thermal cycling behavior of thermal barrier coatings prepared by plasma spray physical vapor deposition [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 276: 424-430.
- [10] ZHANG X F, ZHOU K S, DENG C M, et al. Gas-deposition mechanisms of 7YSZ coating based on plasma spray-physical vapor deposition [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 36(3): 697-703.
- [11] DENG Z Q, ZHANG X F, ZHOU K S, et al. 7YSZ coating prepared by PS-PVD based on heterogeneous nucleation [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 39(4): 820-825.
- [12] HE W, MAUER G, SOHN Y J, et al. Investigation on growth mechanisms of columnar structured YSZ coatings in plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD) [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39: 3129-3138.
- [13] HE W, MAUER G, GINDRAT M, et al. Investigations on the nature of ceramic deposits in plasma spray-physical vapor deposition [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(1-2): 83-92.
- [14] MAUER G. Plasma characteristics and plasma-feedstock interaction under PS-PVD process conditions [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2014, 34(5): 1171-1186.
- [15] LIU M J, ZHANG M, ZHANG Q, et al. Evaporation of droplets in plasma spray-physical vapor deposition based on energy compensation between self-cooling and plasma heat transfer [J]. *Journal of Thermal Spray*

- Technology, 2017, 26: 1641-1650.
- [16] LIU M J, ZHANG M, ZHANG Q, et al. Gaseous material capacity of open plasma jet in plasma spray-physical vapor deposition process [J]. Applied Surface Science, 2018, 428: 877-884.
- [17] MAUER G, HOSPACH A, VAßEN R. Process development and coating characteristics of plasma spray-PVD [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 220(15): 219-224.
- [18] ZHANG N, SUN F, ZHU L, et al. Electron temperature and density of the plasma measured by optical emission spectroscopy in VLPPS conditions [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20: 1321-1327.

Spectral diagnosis of PS-PVD plasma jet characteristics and evaporation behavior of YSZ powder

ZHANG Yan^{1,2}, DENG Changguang², MAO Jie², DENG Ziqian², LUO Zhiwei¹

1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Guangdong Institute of New Materials, National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, The Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China

Abstract: The PS-PVD process was used to spray YSZ ceramic coatings at different powder feed rates with using optical emission spectroscopy (OES) to diagnose the plasma jet characteristics including analysis of spectral emission intensity distribution and calculation of plasma jet average temperature and electron density. Combined with the jet photographs and the coating microstructure to study the heating and evaporation behavior of YSZ powder in plasma jet at different powder feed rates. The results show that a small amount of powder is almost completely heated and evaporated after passing in, a large amount of that is in a highly excited state or even ionized. The jet temperature is low but the electron density is maintained. The vapor deposition rate is very low in the gas phase and the coating is mostly composed of a single columnar crystal, which are wide and directly composed of nano-columnar crystals. Increasing the powder feed rate, the high temperature region of the jet is widened with more powder evaporating. However, the energy of the jet is no longer sufficient to evaporate all the powder, and some unmelted particles will appear in the jet. The mixed deposition with vapor phase, clusters and even molten particles makes the deposition efficiency increase rapidly. The surface diffusion is difficult to make the size of the single columnar crystal narrow. Under the influence of solid particles and shadowing, columnar crystals generate a large number of branches.

Key words: optical emission spectroscopy; plasma spray-physical vapor deposition; thermal barrier coatings; YSZ powder evaporation; plasma jet characteristics