

等离子喷涂中雷诺数对熔滴扁平化行为的影响

陈丹¹, 王玉¹, 白宇¹, 王运会², 赵蕾¹, 付倩倩¹, 王海军³, 韩志海¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049; 2. 清华大学 工程力学系, 北京 100084; 3. 装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要: 采用狭缝法收集不同工艺条件(雷诺数)下的氧化钇部分稳定的二氧化锆(YSZ)扁平粒子, 采用扫描电子显微镜(SEM)及三维激光显微镜观察形貌, 同时采用 Fluent 流体力学软件模拟不同雷诺数下 YSZ 熔滴的铺展和凝固过程, 研究雷诺数对扁平粒子形貌的影响规律。实验及计算结果表明: 当欧氏数大于 0.2 时, 雷诺数对 YSZ 熔滴的扁平化行为具有重要的影响作用, 熔滴飞溅的临界雷诺数为 450 ± 20 , 即当雷诺数小于 450 ± 20 时, 熔滴呈圆盘状且不发生飞溅, 反之熔滴发生飞溅。对于粒径相同的 YSZ 熔滴, 超音速等离子喷涂(SAPS)获得的熔滴扁平率约为普通等离子喷涂(APS)工艺的 1.3 倍。

关键词: 等离子喷涂; YSZ 熔滴; 扁平粒子; 雷诺数

中图分类号: TG174 文献标识码: A

Effect of Reynolds Number of Molten Particle on Splat Formation in Plasma Spraying

CHEN Dan¹, WANG Yu¹, BAI Yu¹, WANG Yun-Hui², ZHAO Lei¹, FU Qian-Qian¹,
WANG Hai-Jun³, HAN Zhi-Hai¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Qinghua University, Beijing 100084, China; 3. Armoring Soldiers Project Academy, Beijing 100072, China)

Abstract: Effect of Reynolds number on the flattening behavior of in-flight particles was investigated by slit method. Molten 6wt%-8wt% yttria-stabilized zirconia (YSZ) particles with different Reynolds numbers were collected. The morphology of splats was examined using scanning electron microscope (SEM) and 3D laser microscope. Meanwhile, the behavior of spreading, heat transfer and solidification of YSZ droplets with different Reynolds numbers were simulated by CFD software Fluent. The results show that the flattening behavior of molten particles is significantly influenced by Reynolds number when Ohnesorge number exceeds 0.2. The splat tends to splash with the increase of Reynolds number. At a lower Reynolds number, the splats exhibit a regular disc-shape. However, when Reynolds number reaches 450 ± 20 , splats begin to splash. In addition, for the original molten particles with the same diameters, the flattening ratio of molten particles in supersonic atmospheric plasma spraying (SAPS) is approximately 1.3 times as much as that in atmospheric plasma spraying (APS).

Key words: plasma spraying; molten YSZ particle; splat; Reynolds number

收稿日期: 2014-04-24; 收到修改稿日期: 2014-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51202187); 中国博士后科学基金(2014T70916)

National Natural Science Foundation of China (51202187); National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (2014T70916)

作者简介: 陈丹(1990-), 女, 硕士研究生. E-mail: dandan0408@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 白宇, 讲师. E-mail: byxjtu@gmail.com

随着航空工业的发展,对航空发动机的使用温度要求越来越高,其热端部件(主要是燃气室内壁及涡轮叶片)的服役环境越来越苛刻。目前,航空发动机涡轮叶片材料主要为镍基高温合金,对该类材料的研究已经十分深入,但也达到了其使用极限。因此,热障涂层(TBCs)的开发及应用越来越受到人们的重视。研究表明,使用厚度在 100~500 μm 范围内的氧化钇部分稳定的氧化锆(YSZ)热障涂层,结合叶片内部的冷却系统,可以使高温合金的表面温度下降 100~300 $^{\circ}\text{C}$,确保高温合金可在高于其熔点温度(约为 1300 $^{\circ}\text{C}$)下使用,并且极大地提高了航空发动机的热效率^[1-2]。此外,热障涂层还可以有效地减轻合金基体因高温氧化、腐蚀或者磨损带来的损伤程度,保证了涡轮叶片的工作稳定性,提高了航空发动机的综合性能。TBCs 的制备方法主要有普通大气等离子体喷涂(APS)及电子束辅助物理气相沉积(Electron Beam Physical Vapor Deposition, EB-PVD)。与 EB-PVD 相比,APS 沉积涂层具有沉积效率高、涂层热导率低的特点,但其涂层内部层状结构之间会存在裂纹等缺陷,易在服役过程中出现裂纹扩展、涂层剥落等现象。因此,在保证低热导率的前提下,如何提高 APS-YSZ 服役寿命是目前研究的重点。

超音速等离子喷涂(Supersonic atmospheric plasma spray, SAPS)是指在传统非转移型等离子弧基础上,通过对高压、高速等离子气体进一步强力压缩和加速而获得的高能量密度、加长的扩展等离子弧,可获得数倍于音速的超音速等离子体射流来进行喷涂的方法。与普通等离子喷涂(喷涂粒子速度约 180~300 m/s)相比,超音速等离子射流的高能量密度能够瞬间熔化高熔点喷涂材料,并能迅速加速熔

融粒子突破声障至 380~900 m/s 的超音速水平,获得了与传统 APS 工艺相比,性能更为优异的 YSZ 涂层^[3-8]。由于等离子喷涂涂层从本质上来讲,是由一系列熔滴经过撞击、扁平铺展、快速凝固后堆积而形成的,因此熔滴撞击基板前的飞行状态(速度、温度及质量)及基板温度是影响其扁平后形貌的主要因素。为此,本工作采用 SAPS 及 APS 两种喷涂工艺以得到大范围的粒子飞行速度及温度,以熔滴撞击基板前、可以定量表征熔滴飞行状态的雷诺数为研究对象,通过单个扁平粒子的实验收集及数学模拟,分析不同雷诺数下 YSZ 熔滴的铺展和凝固过程,研究雷诺数对熔滴铺展凝固后形貌的影响规律。

1 实验方法

1.1 实验原料及喷涂过程

实验采用质量分数为 6%~8%的 YSZ 团聚粉为原料,为缩小粉体的粒度分布,对原始粉末进行过筛处理,选用的筛号分别为+44 μm 及-61 μm ,过筛处理后的粉体形貌如图 1 所示。采用普通等离子喷涂(型号: Sluzer Metco 9M)及高效能超音速大气等离子体喷涂(型号: HEPJ II),工艺参数如表 1 所示。

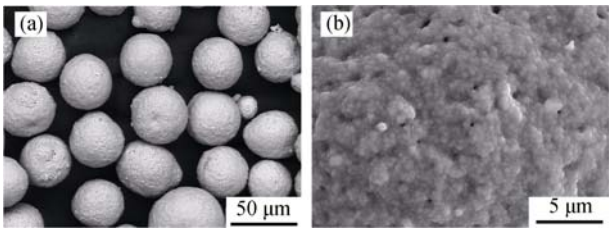


图 1 过筛后的原始粉体形貌
Fig. 1 Morphologies of the original powder after sieving
(a) Macroscopic morphology; (b) Surface morphology of a single particle

表 1 喷涂工艺参数
Table 1 Spraying parameters

Spray methods	Ar /slpm	H ₂ /slpm	Power P/kW	Voltage U/V	Current I/A	Spray distance D/mm	Feed rate /(g·min ⁻¹)	Temperature T/ $^{\circ}\text{C}$	Velocity v/(m·s ⁻¹)
SAPS	70.5	22	68.6	138	497	110	35	2919.0±2.0	505.0±3.8
SAPS	75.0	21	58.5	124	472	90	35	2813.9±2.5	484.5±9.3
SAPS	60.3	15	44.5	125	356	90	35	2685.4±2.7	464.5±3.0
SAPS	75.0	21	58.5	124	472	80	35	2680.0±14.7	544.5±13.5
SAPS	75.0	21	58.5	124	472	100	35	3066.4±10.1	544.2±13.0
SAPS	75.0	21	58.5	124	472	120	35	3196.4±10.1	584.4±28.0
APS	32.9	8.225	44.0	67.6	650	90	38.4	2804.4±5.4	224.0±5.1
APS	42.3	10.575	44.0	71.4	611	90	38.4	2740.2±3.7	231.0±4.2
APS	51.7	12.925	44.0	75.6	585	90	38.4	2683.6±4.5	233.3±3.6
APS	47.0	11.750	48.0	74.0	650	80	38.4	2680.0±3.3	238.5±3.1
APS	47.0	11.750	48.0	74.0	650	100	38.4	2934.1±4.2	244.0±3.1
APS	47.0	11.750	48.0	74.0	650	120	38.4	2804.7±5.1	226.5±2.3

Note: slpm: standard liters per minute

1.2 单个扁平粒子的实验收集及观察

为了保证精度并方便观测, 采用抛光后的不锈钢基体(尺寸 40 mm×10 mm×3 mm)前放置“V”形狭缝(宽度约为 1 mm)的方法收集不同工艺参数下的单个扁平粒子(如图 2 所示), 实验过程采用 Spray Watch 2i(Osier, Finland)系统在线监测等离子体射流中熔滴的飞行速度及表面温度。基体背面通过压缩空气冷却, 控制基体温度在 150℃ 左右(采用红外测量仪测量)。采用扫描电子显微镜(SEM, VEGAII XMU, Tescan, Czech Republic)及彩色三维激光显微镜(Color 3D Laser Scanning Microscope, KEYENCE, Japan)观察扁平粒子形貌并计算扁平粒子体积。然后, 采用图像法, 即 Image-Pro Plus 图像分析软件统计 YSZ 涂层的截面 SEM 图片(1000 倍)中的孔隙率。最后, 采用拉伸法对涂层进行结合强度的测试, 仪器为万能材料拉伸试验机(Instron1196, USA), 测试过程中参照 ASTM C633-79 标准, 所用粘接剂为固体胶膜(FM-1000, USA)。

1.3 熔滴扁平化过程数值模拟

采用 Fluent 流体力学软件建立等离子喷涂 YSZ 熔滴扁平化过程中流动、传热和凝固的二维数学模型, 将熔滴视为不可压缩自由表面的瞬态流动。因此, 对于整个熔滴变形过程可联立求解粘性不可压缩流体力学方程进行计算。采用流体体积分数法 (VOF) 追踪熔滴的瞬态自由表面^[9-11], 所求解的输运方程如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (F\vec{u}) = 0 \quad (1)$$

其中 \vec{u} 是流体速度, F 是计算区域内每个网格的流体体积分数。当 $F=1$ 时, 网格充满目标流体; 当 $F=0$ 时,

网格不含目标流体; 当 $0 < F < 1$ 时, 网格含有自由表面。同时采用凝固和熔化模型追踪凝固界面。由流体中的固体分数 f_s 控制凝固界面, 通常假设:

$$0 \leq f_s \leq 1 \quad (2)$$

当熔滴完全凝固时 ($f_s \rightarrow 1$), 能量方程可以表达如下:

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla H \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T_p) \quad (3)$$

其中 λ 为热导率, H 为热焓值, 取决于凝固程度并认为与温度 T_p 呈线性关系。

$$H = c_p T_p + (1 - f_s) L \quad (4)$$

其中 T_p 是熔滴温度, c_p 是比热容, L 是熔化潜热。

本工作主要针对 YSZ 熔滴碰撞基体沉积过程中的流动、传热和凝固进行研究, 计算不同雷诺数下 YSZ 熔滴是否飞溅的情况。整个计算模型如图 3 所示, 不仅要考虑熔滴形态的变化, 还要考虑温度场和凝固状态的变化, 因此计算区域不仅包括熔滴所在的流体区域, 还包括基体所在的固体区域。并且流体区域既包括熔滴, 又包括熔滴周围的空气, 区别在于流体体积分数不同。流体区域和固体区域之间有一个没有厚度但有接触热阻的壁面条件, 通过这个壁面进行流体-固体的传热耦合, 该壁面称为双边壁面。并且整个计算区域的流动和传热始终保持轴对称。因此, 可将计算区域简化为二维轴对称模型, 计算时只需计算一半, 另一半结果通过轴对称得到。模拟过程中采用的参数如表 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 雷诺数对 YSZ 熔滴飞溅的影响

在三维激光显微镜中测量熔滴扁平后的体积(三维激光显微镜以激光作为光源对样品进行逐层扫描和成像, 再利用计算机进行图像处理得到测量值), 假设飞行熔滴为理想球状, 可反推求出熔滴原

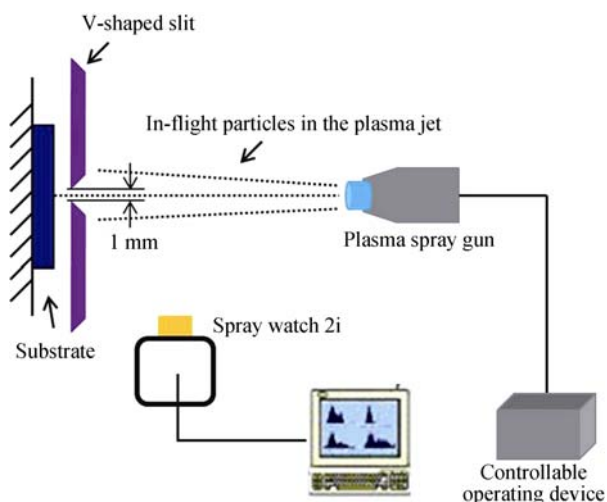


图 2 狭缝法收集单个扁平粒子的实验装置图

Fig. 2 Experimental apparatus of collecting splats by slit method

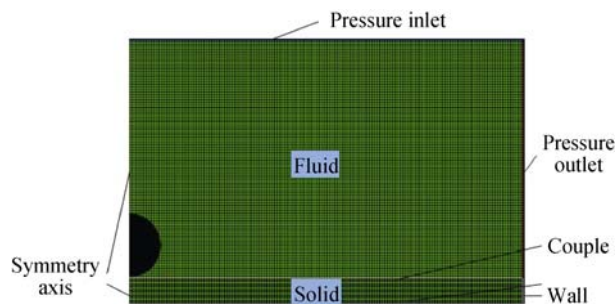


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

表 2 YSZ 和不锈钢基体的物性参数^[12-18]

Table 2 Properties of YSZ and stainless steel substrate^[12-18]

Property of YSZ	Value	Property of YSZ	Value
Density	5890 kg/m ³	Solidus temperature	2923.13 K
Specific heat	713 J/(kg·K)	Liquidus temperature	3023.13 K
Thermal conductivity	2.32 W/(m·K)	Thermal contact resistance	10 ⁻⁶ m ² ·K/W
Viscosity	0.008 kg/(m·s)	Surface tension	0.43 N/m
Molecular weight	123	Property of substrate	Value
Standard state enthalpy	-11.006×10 ⁸ J/mol	Density	8400 kg/m ³
Reference temperature	298.15 K	Specific heat	575 J/(kg·K)
Melting heat	7.07×10 ⁵ J/kg	Thermal conductivity	18.779 W/(m·K)

始直径 d , 从而计算出单个熔滴的雷诺数、韦伯数和欧氏数, 计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{5}$$

$$We = \frac{\rho d v^2}{\sigma} \tag{6}$$

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}} \tag{7}$$

其中 ρ 为熔滴密度, kg/m³; v 为熔滴速度, m/s; d 为熔滴直径, m; μ 为熔滴动力粘度, Pa·s; σ 为熔滴的表面张力, N/m。对于 YSZ 熔滴^[14],

$$\mu = 0.0097 \exp\left(\frac{4620}{T}\right) \tag{8}$$

其中 T 为温度, K。

图 4 是不同雷诺数下扁平粒子的典型形貌, 从图 4 中可以看出: 图(a)雷诺数较小(207.4)时, 扁平粒子呈现圆盘状, 边缘规整, 无离开粒子的飞溅碎片; 而图(b)雷诺数较大(692.0)时, 扁平粒子边缘出现飞溅, 并且有大量飞溅碎片脱离粒子。表 3 为选取的不同工艺下 YSZ 扁平粒子的各项参数, 其中粒径小于原始过筛后的粒径可能是由于团聚粉体在等

离子体射流飞行过程中发生了破碎现象。

研究表明, 熔滴撞击基板后, 底部和边缘优先凝固, 中心处仍具有较大的动能克服粘性力从底部已凝固层喷射出来形成飞溅^[19]。在 SEM 下仔细观察未飞溅和飞溅的 YSZ 扁平粒子边缘, 发现飞溅的粒子呈多层铺展。这是由于熔滴在铺展过程中, 雷诺数较大时, 熔滴的动能相对于粘性力足够大, 难以瞬间完全凝固, 当底部和边缘优先凝固时, 上层未凝固区仍具有足够大的动能克服粘性力冲出底部凝固层逐层喷射出来形成飞溅, 如图 5 所示; 而雷诺数较小时, 熔滴的动能不足以克服粘性力喷射出来, 可以瞬间完全凝固。

采用 Fluent 流体力学软件模拟了上述工艺条件下 YSZ 熔滴铺展、传热和凝固的扁平化过程。其形变凝固过程如图 6 和图 7 所示。模拟结果较好地验证了实验结果, 即当雷诺数为 430 时, YSZ 熔滴虽未发生飞溅, 但已接近飞溅。铺展结束时熔滴形貌图和凝固图一致, 最高温度已降至凝固点以下, 说明 YSZ 熔滴在铺展结束时已完全凝固, 不会发生飞溅。而当雷诺数为 549 时, YSZ 熔滴发生飞溅。铺展结束时熔滴形貌图和凝固图不完全一致, 熔滴只

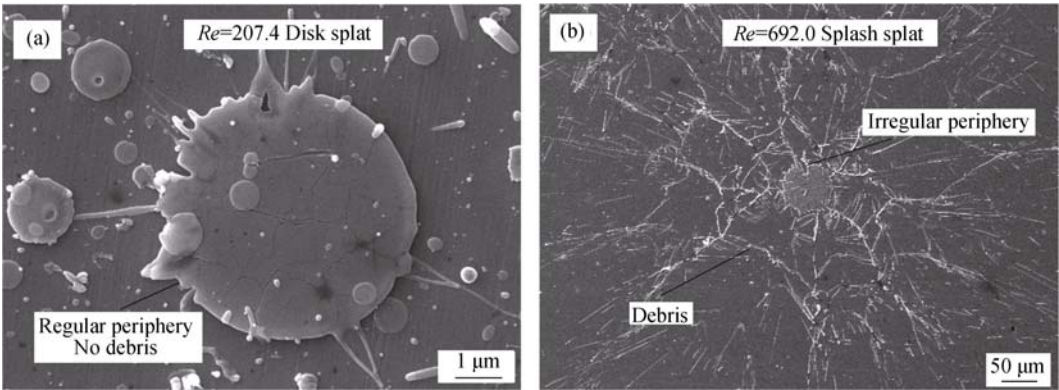


图 4 不同雷诺数下扁平粒子形貌

Fig. 4 Morphologies of splats at different Reynolds numbers (Re)
(a) $Re=207.4$; (b) $Re=692.0$

表 3 不同工艺下 YSZ 扁平粒子各项参数
Table 3 Parameters of YSZ splats in different spraying processes

Sample	Spray methods	Temperature /°C	Velocity /(m·s ⁻¹)	Original diameter /μm	Re	We	Oh	Splashing or not
1	SAPS	2680.0	544.5	6.0	414.7	2.44×10 ⁴	0.376	No
2	SAPS	2680.0	544.5	7.5	518.4	3.05×10 ⁴	0.337	Yes
3	SAPS	3066.4	544.2	6.8	563.5	2.76×10 ⁴	0.294	Yes
4	SAPS	3066.4	544.2	5.0	414.1	2.03×10 ⁴	0.342	No
5	SAPS	3196.4	584.4	5.0	469.0	2.34×10 ⁴	0.326	No
6	SAPS	3196.4	584.4	6.4	600.3	2.99×10 ⁴	0.288	Yes
7	APS	2680.0	238.5	14.5	439.0	1.13×10 ⁴	0.241	Yes
8	APS	2934.1	244.0	16.5	578.4	1.35×10 ⁴	0.200	Yes
9	APS	2934.1	244.0	15.6	546.8	1.27×10 ⁴	0.206	No
10	APS	2804.7	226.5	17.9	549.0	1.26×10 ⁴	0.204	Yes

有底层和边缘凝固, 并且最高温度未降至凝固点以下, 说明 YSZ 熔滴在铺展结束时只有底层和边缘凝固, 导致热量和速度较大的中心流体冲出底部凝固层从而形成飞溅。

欧氏数的物理意义在于表征粒子粘性力与表面张力的相对大小。研究表明: 当 $Oh>0.1$ 时, 熔滴的粘性力相对于表面张力较大^[20]。本实验收集的扁平粒子的欧氏数均大于 0.2, 因此, 飞溅的本质在于动能克服粘性力, 此时可以采用雷诺数来表征 YSZ 熔滴是否发生飞溅的临界情况。实验和模拟结果表明: 当 $Re<450\pm20$ 时, YSZ 熔滴不发生飞溅; 当 $Re>450\pm20$ 时, YSZ 熔滴发生飞溅。

2.2 雷诺数对 YSZ 熔滴扁平率的影响

不同学者通过理论分析、实验研究和数值模拟三种方法分别得到了等离子喷涂过程中扁平率与雷诺数间的数值关系^[14, 21-23]。本工作采用图像处理软件 Image-Pro Plus 测出粒子扁平后的直径 D 。利用扁平率计算公式求出扁平率。

$$\zeta = \frac{D}{d} \tag{9}$$

图 8 为本次实验计算所获得的扁平率与雷诺数间的数量关系图, 可以看出, SAPS 实验数据和刘氏模型较为吻合, 即 $\zeta=1.04Re^{0.2}$ 。而 APS 接近于

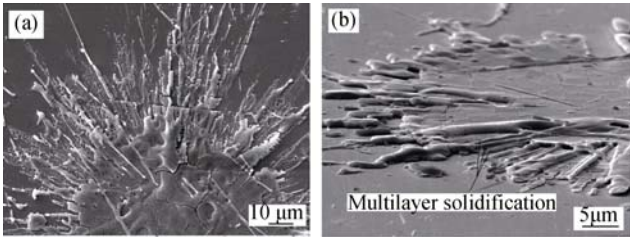


图 5 飞溅粒子边缘形貌照片
Fig. 5 Periphery morphologies of splashing splat
(a) Overhead view; (b) Side view

Yoshida 和 Bertagnolli 模型。此外, 将同等粒径的熔滴在 APS 和 SAPS 两种工艺下的扁平率作对比, 发

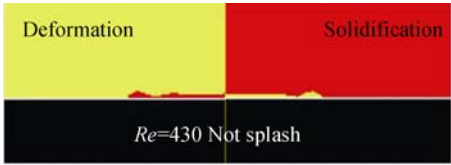


图 6 $Re=430$ 时 YSZ 熔滴形变(左)和凝固(右)图
Fig. 6 Deformation (left) and solidification (right) of YSZ droplet at $Re=430$



图 7 $Re=549$ 时 YSZ 熔滴形变(左)和凝固(右)图
Fig. 7 Deformation (left) and solidification (right) of YSZ droplet at $Re=549$

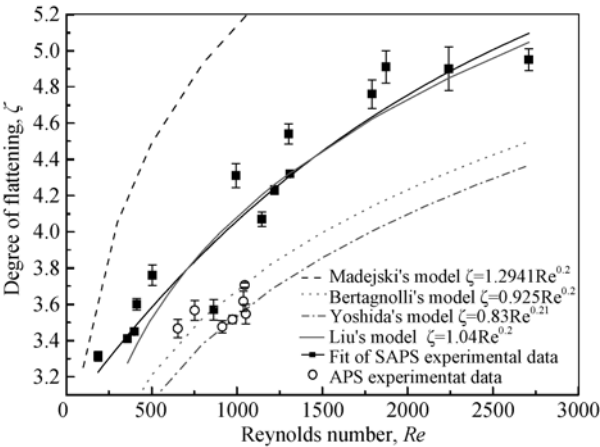


图 8 扁平率与雷诺数间的数量关系图
Fig. 8 Quantitative relationship between the degree of flattening and Reynolds number

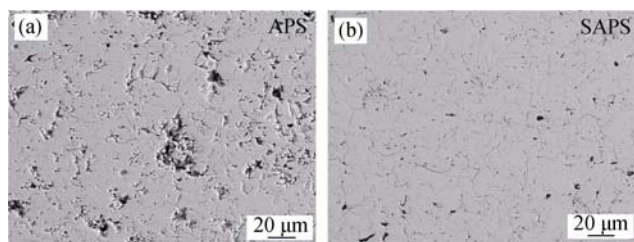


图 9 (a)APS 和(b)SAPS 工艺制备的 YSZ 涂层截面形貌照片
Fig. 9 Cross-section morphologies of YSZ coatings by (a) APS and (b) SAPS spraying processes

现 SAPS 工艺获得的扁平粒子的扁平率约为 APS 工艺获得的扁平粒子的 1.3 倍。扁平率的提高有效地增加了扁平粒子之间的结合面积,减少了由于扁平粒子之间未完全搭接形成的孔隙数量,利于提高涂层的致密性^[7]。图 9 示意了 APS 和 SAPS 两种工艺制备 YSZ 涂层的截面形貌图,通过图像法测得两者的孔隙率分别为 9.16%和 2.85%。

采用相同粉体制备的 YSZ 陶瓷层厚度为 250 μm 时,CoNiCrAlY 合金粘结层为 80 μm 时,APS-TBCs 中陶瓷层/粘结层界面结合强度为(35 \pm 4) MPa, SAPS-TBCs 中陶瓷层/粘结层界面结合强度为(51 \pm 4) MPa。

3 结论

1) 当欧氏数(Oh)大于 0.2 时,雷诺数对等离子喷热熔滴扁平化过程中的形貌有着重要的影响。随着雷诺数的增大,熔滴形貌会从不飞溅过渡到飞溅状态,溶滴发生飞溅的临界雷诺数(Re)约为 450 \pm 20;

2) 模拟结果表明:当雷诺数较小时,熔滴在铺展结束时已完全凝固,不会发生飞溅;当雷诺数较大时,熔滴在铺展结束时只有底层和边缘凝固,中心还具有较大的能量和动量冲出底部优先凝固层形成飞溅;

3) 粒径相同时, SAPS 工艺获得的扁平粒子的扁平率约为 APS 工艺的 1.3 倍,所得到的涂层的孔隙率降低了 68.9 %。

参考文献:

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*, 2002, **296**(5566): 280–284.
- [2] PEREPEZKO J H. The hotter the engine, the better. *Science*, 2009, **326**(5956): 1068–1069.
- [3] HAN Z H, XU B S, WANG H J, *et al.* A comparison of thermal shock behavior between currently plasma spray and supersonic plasma spray $\text{CeO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ graded thermal barrier coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2007, **201**(9/10/11): 5253–5256.
- [4] DU L Z, XU B S, DONG S J, *et al.* Sliding wear behavior of the supersonic plasma sprayed WC-Co coating in oil containing sand. *Surf. Coat. Technol.*, 2008, **202**(15): 3709–3714.

- [5] ZHANG X C, XU B S, TU S T, *et al.* Effect of spraying power on the microstructure and mechanical properties of supersonic plasma-sprayed Ni-based alloy coatings. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**(20): 6318–6326.
- [6] ZHANG X C, XU B S, WU Y X, *et al.* Porosity, mechanical properties, residual stresses of supersonic plasma-sprayed Ni-based alloy coatings prepared at different powder feed rates. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**(13): 3879–3889.
- [7] BAI Y, HAN Z H, LI H Q, *et al.* Structure-property differences between supersonic and conventional atmospheric plasma sprayed zirconia thermal barrier coatings. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, **205**(13/14): 3833–3839.
- [8] BAI Y, HAN Z H, LI H Q, *et al.* High performance nanostructured ZrO_2 based thermal barrier coatings deposited by high efficiency supersonic plasma spraying. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(16): 7210–7216.
- [9] YOKOI K. Numerical studies of droplet splashing on a dry surface: triggering a splash with the dynamic contact angle. *Soft Matter*, 2011, **7**(11): 5120–5123.
- [10] PASANDIDEH-FARD M, PERSHIN V, SCHANDRA. Splat shapes in a thermal spray coating process: simulations and experiments. *J. Therm. Spray Technol.*, 2002, **11**(2): 206–217.
- [11] BOBZIN K, BAGCIVAN N, PARKOT D. Simulation of PYSZ particle impact and solidification in atmospheric plasma spraying coating process. *Surf. Coat. Technol.*, 2010, **204**(8): 1211–1215.
- [12] XIONG H B. Melting and oxidation behavior of in-flight particles in plasma spray process. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, **48**(25/26): 5121–5133.
- [13] LI L. Particle characterization and splat formation of plasma sprayed zirconia. *J. Therm. Spray Technol.*, 2006, **15**(1): 97–105.
- [14] BERTAGNOLL M. Modeling of particles impacting on a rigid substrate under plasma spraying conditions. *J. Therm. Spray Technol.*, 1995, **4**(1): 41–49.
- [15] KANG C W. Numerical and experimental investigations of splat geometric characteristics during oblique impact of plasma spraying. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(24): 10363–10372.
- [16] BRANDON J R. Phase stability of zirconia-based thermal barrier coatings. Part I. Zirconia-yttria alloys. *Surf. Coat. Technol.*, 1991, **46**(1): 75–90.
- [17] ANDRE M. Thermal contact resistance between plasma-sprayed particles and flat surfaces. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, **50**(9/10): 1737–1749.
- [18] PASANDIDEH-FARD M. On the Spreading and solidification of molten particles in a plasma spray process: effect of thermal contact resistance. *Plasma Chem. Plasma Process.*, 1996, **16**(1): 83s–98s.
- [19] FUKUMOTO M, HUANG Y. Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface. *J. Therm. Spray Technol.*, 1999, **8**(3): 427–432.
- [20] ZHAO W T, WU J H, BAI Y, *et al.* Melting refining mechanisms in supersonic atmospheric plasma spraying. *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2012, **32**(6): 1227–1242.
- [21] MADEJESKI J. Solidification of droplets on a cold surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1976, **19**: 1009–1013.
- [22] YOSHIDA T, OKADA T, HAMATAMI H, *et al.* Integrated fabrication process for solid oxide fuel cells using novel plasma spraying. *Plasma. Sources Sci. Technol.*, 1992, **1**: 195–201.
- [23] LIU H, LAVERNIA E, RANGEL R. Numerical simulation of impingement of molten Ti, Ni, and W droplets on a flat substrate. *J. Therm. Spray Technol.*, 1993, **2**(4): 369–378.