

等离子喷涂熔滴快速撞击基体非稳态凝固行为研究进展

陈书赢, 马国政, 王海斗, 何鹏飞, 徐滨士, 王海军, 刘明

(装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 涂层成形过程中的缺陷含量、残余应力、沉积效率、组织结构及力学性能等指标均会随着工艺参数与基体预处理状态的不同而发生显著变化, 因而需要从更加微观的角度深入理解等离子喷涂涂层的微观构筑过程, 即单个熔滴的铺展凝固现象。本研究分别从熔滴凝固的类型与机理、不同因素对熔滴凝固过程的影响及凝固斑点形态的定量表征方法 3 个方面详细综述了等离子喷涂熔滴撞击基体快速凝固过程的研究现状。结果表明, 熔滴的铺展形态主要可以分为 5 类, 包括圆盘型、破碎型、放射型、花瓣型及气泡型, 影响铺展过程的因素主要包括熔滴特性(速度、温度、粒径、材料属性、熔化状态等)与基体状态(表面粗糙形貌、表面化学状态、吸附物及冷凝物、界面润湿性及接触热阻等) 2 大类, 综合采用一系列参数对熔滴铺展几何形态进行表征, 可实现熔滴沉积质量的定量评价。

关键词: 等离子喷涂; 凝固机理; 形貌表征; 铺展类型

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3564-06

随着等离子喷涂技术自身的飞速发展以及喷涂粉末制备工艺的日趋成熟, 目前已能够将多种金属、陶瓷、金属陶瓷及其它复合材料制备为性能优于基体的耐高温、耐磨损、耐腐蚀及各类功能涂层(防垢杀菌涂层、超疏水防覆冰涂层、隐身吸波涂层、压电智能传感涂层等)^[1-6]。大量的喷涂实践表明, 涂层内部的缺陷含量(孔隙、氧化夹杂、微裂纹等)、残余应力、沉积效率、力学性能(结合强度、内聚强度、弹性模量、显微硬度等)、组织结构等都会随着熔滴沉积质量或基体状态的不同而发生显著变化, 直接影响到涂层的服役性能及寿命^[7-12]。而目前的涂层工艺优化过程较为繁杂, 大多是在经验范围内选取若干组参数, 随后根据人工神经网络^[13,14]、田口试验^[15]、正交试验^[16]、完全析因设计^[17]等方法确定最优喷涂参数, 无法从根本上解释涂层产生不同变化的原因。这也直接导致了涂层体系创新速度缓慢, 新材料从研发到投入使用需要经历较长的周期。

从微观角度来看, 等离子喷涂涂层是由喷涂粒子经等离子弧加热熔化之后, 以较高的速度撞击基体并迅速铺展凝固、粒子之间相互搭接、逐层堆垛所形成的, 因而喷涂熔滴的铺展凝固现象是涂层成形过程中最基本的理化行为。为此, 从 20 世纪 90 年起, 许多学者逐渐研究内容转向涂层的微观构筑过程^[18-20], 深入研究了单个熔滴凝固行为对涂层成形过程中的物相转变、缺陷生

长及残余应力等演变规律的影响。本研究则分别从熔滴基本铺展形态与机理、不同因素对熔滴铺展凝固行为的影响、熔滴铺展类型的表征及预测等方面详细介绍了国内外近 20 年来关于等离子喷涂熔滴非稳态凝固过程的研究进展。

1 熔滴基凝固类型与机理

1.1 基本类型与机理

熔滴的凝固行为是一个发生在微米级空间尺度、亚微秒级时间尺度上的物理现象, 比如真空等离子喷涂 Ti6Al4V 熔滴在 Ti 基体上的冷却速度为 10^6 °C/s, 完全凝固所需时间仅为 0.4 μ s, 固化后的厚度约为 3 μ m^[21]。因而, 熔滴撞击基体随后铺展凝固的现象可以简单描述为高温高速粒子动量、热量消散的过程, 其基本铺展类型主要包括 3 类, 即均匀铺展、破碎铺展、指状铺展。

(1) 均匀铺展。当熔滴以合适的温度与速度撞击基体之后, 熔滴/基体能够较好地润湿, 其冷却速度与扁平化过程能够较好地配合, 表面张力及整体热量降低限制了残余动量向四周的快速传递, 因而整个铺展过程较为均匀, 熔滴的动能与热能稳步消散, 其过程示意图如图 1a 所示^[22], 最终形成如图 2a 所示的圆盘状凝固形貌^[23,24], 边缘常伴随有明显的因扩散导致的

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51535011); 国家自然科学基金面上项目(51675531)

作者简介: 陈书赢, 男, 1990 年生, 博士生, 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072, 电话: 010-66718475, E-mail: small_csy@163.com

波纹。

(2) 破碎铺展。图 1b 为破碎铺展的原理示意图，当熔滴的凝固速度较慢或以较高的热焓及动能撞击基体之后，仍然具有较高的残余动量，同时由于熔滴的剩余热量较高或润湿不佳导致较慢的冷却速度，使其表面张力及凝固效果不足以有效阻碍处于熔融状态熔滴的扩散，从而使得部分区域在铺展过程中与熔滴主体剥离产生反弹飞溅现象，形成许多散布在熔滴撞击位置周围的小熔滴，如图 2b 所示。

(3) 指状铺展。这类铺展的效果介于均匀铺展和破碎铺展之间，当熔滴的凝固速度非常快或熔融状态不佳时，撞击基体的首层熔滴迅速凝固成形，而后续处于半熔状态的部分仍然具有较高的残余动量，当这部分熔滴喷射出凝固边缘时，又会由于较高的表面张力及冷却速度而受到限制，从而迅速凝固产生一些指状物，形成如图 2c 所示的辐射状形貌。

1.2 其它类型与机理

除了以上 3 种基本的铺展类型，在实际铺展中，并非所有熔滴铺展前在紊乱的等离子射流中都熔化成动能及热能均匀分布的球形或椭球形，且铺展时还会受到基体表面状态的影响，因而会产生一些如图 3 所示的不规则形状^[25]，但同时未发生破碎或产生指状

物，通常将这类凝固形貌统称为花瓣型。

当基体表面预热温度不高存在大量吸附物或熔滴温度较高降低熔滴表面张力时，会在熔滴/基体界面处形成大量气孔。随着熔滴扁平化过程的推进，气孔不断积聚迁移，最终形成如图 4a 所示的形貌。图 4b 为局部放大形貌^[26]。可以看出，熔滴表面伴随有大量的微小气孔，同时在接近中心位置产生了较大的由于小气孔汇集而导致的

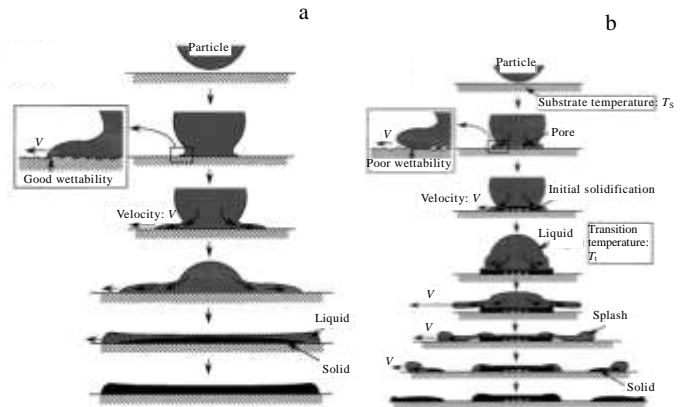


图 1 熔滴铺展机理示意图

Fig.1 Schematic of droplets flattening: (a) steadily spreading and (b) fragmented spreading^[22]

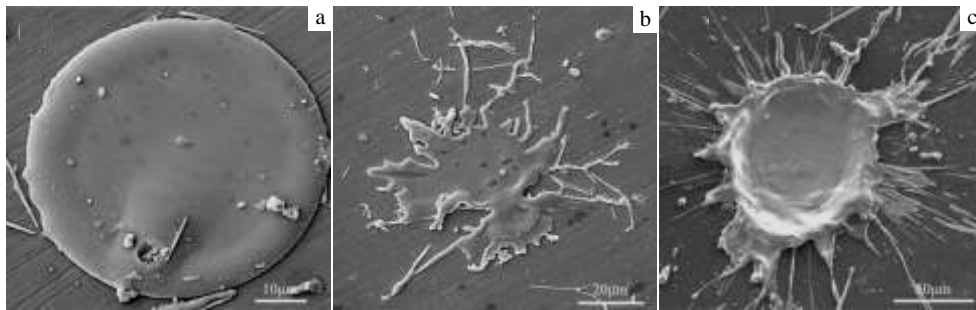


图 2 熔滴基本铺展类型

Fig.2 Fundamental types after droplets solidification: (a) disk-like type, (b) fragmented type, and (c) finger-like type^[23,24]

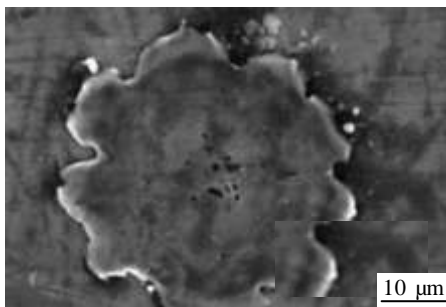


图 3 花瓣状铺展形貌

Fig.3 Flower-like shape morphology^[25]

2 不同因素对熔滴凝固过程的影响

在实际喷涂过程中，影响熔滴凝固过程的因素有很多，主要包括 2 类：(1) 熔滴特性，包括温度、速度、粒径、热物性质等；(2) 基体状态，包括预热温度、表面形貌、化学状态、热物性质、材料属性等^[27,28]。前者决定了熔滴自身的几何结构及热力学状态，后者决定了熔滴在基体表面沉积过程中润湿程度、接触热阻及应力分布情况。

2.1 粒子特性影响

熔滴自身的理化特性是影响其凝固过程的根本因

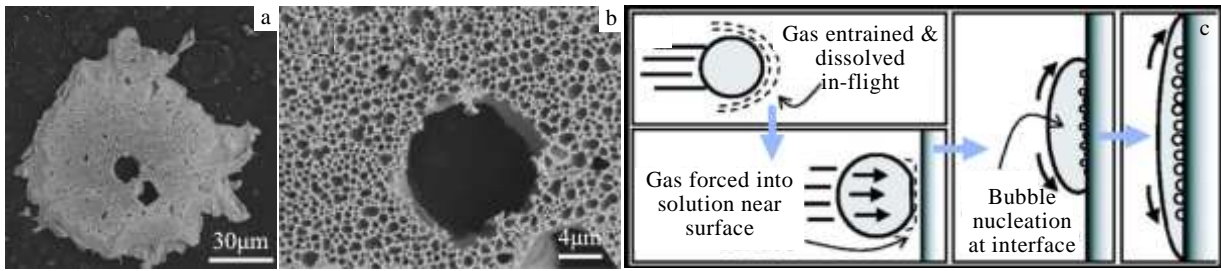


图 4 气泡状铺展形貌

Fig.4 Morphologies of bubble-like splat: (a) the whole morphology, (b) enlarged morphology, and (c) schematic diagram^[26]

素, 熔滴初始熔化程度及速度的差异直接决定其沉积质量^[29-32]。Li 等采用综合了熔滴温度、速度特性的雷诺系数(R_e)及熔融指数(MI)研究了 ZrO_2 粒子在基体上的铺展状态。结果表明, 较好的熔化状态是熔滴沉积的关键环节, 熔滴的破碎程度随着 R_e 的增加而增大, 具备不同 MI 的熔滴发生破碎时的机理则各不相同^[31]。

图 5 分别为微米级 Al_2O_3 粉末与纳米结构团聚 $Al_2O_3-TiO_2$ (AT13) 粉末的单个熔滴铺展形貌^[33]。可以看出微米级 Al_2O_3 熔滴表面形成了明显的柱状晶结构, 边缘存在由于骤冷导致的翘曲现象, 同时在熔滴内部存在明一些热裂纹, 而纳米结构团聚的粉形成的熔滴能够与打底层较好地结合, 熔滴边缘未发生翘曲现象, 内部也不存在热裂纹, 这可能是由于熔滴内部形成的非晶相在一定程度上吸收了冷却过程中产生的应力^[33]。Yang 等通过 3 种工艺制备出具有不同结构的 AT13 粉末, 通过对涂层显微结构的分析证明了微米级的粉末在喷涂过程中极易产生层状结构、形成粗大的柱状晶, 而纳米级粉末制备的涂层则未发现明显的层状结构, 且晶粒尺寸较小^[34]。Vicent 等也证明纳米级粉末所制备的 AT13 涂层具有更为优异的摩擦学性能^[35]。

喷涂粒子常由于制备工艺与材料特性之间的差别而在内部产生不同的密实程度, 总得来看, 相比金属粉末, 陶瓷粉末内部更为疏松, 常伴随有气孔等结构缺陷, 因而在熔滴铺展过程中极易产生气泡迁移及破碎, 在熔滴凝固后形成闭气孔或开气孔^[36,37]。K. Anup 等研究了 CNT 强化 Al_2O_3 陶瓷熔滴的铺展形态, 发现随着 CNT 含量的增加, 熔滴的铺展半径逐渐增大且铺展形态趋于规则的圆盘, 这主要是因为 CNT 能够有效增加熔滴的比热及黏度系数, 使得熔滴在获得较好铺展程度的同时又能够减少边缘指状析出现象的发生^[38]。

2.2 基体状态影响

在获得较好沉积质量的熔滴之后, 合理控制基体状态也是一个非常重要的环节。化学状态影响熔滴/基体的界面传热效果, 而表面形貌则直接影响到熔滴撞击基

体及铺展过程中的应力分布状态, 粗糙峰一方面增大了熔滴沿径向铺展过程的阻力, 促进飞溅现象的发生; 另一方面, 纳米级的特征峰可以降低熔滴/基体之间的接触角, 提高润湿程度, 增大接触面积^[39-42]。

基体预热温度对熔滴铺展凝固的影响机理主要可以概括为以下 3 点: (1) 降低二者之间的初始温差, 减小了撞击基体首层熔滴的凝固速度, 因而 Fukumoto 等定义了转变温度 T_s , 当基体温度低于 T_s 时, 熔滴易发生飞溅, 而当基体温度高于 T_s 时, 熔滴均匀铺展。 T_s 随着基体导热系数的增加而增大, 同时也受到基体表面状态等多种因素的影响^[43-45]。(2) 去除了基体表面的吸附物, 增加了熔滴/基体界面接触面积, 降低了熔滴/基体界面热阻, 因而熔滴的整体冷却速度更快, 易形成较为精细的晶粒^[46]。(3) 在基体表面形成氧化层, 降低熔滴铺展过程中骤冷现象的发生概率, 使熔滴能够更好地渗透到基体表面的微孔中, 促进涂层与基体之间的元素扩散, 提高熔滴/基体结合强度并降低涂层孔隙率^[47,48]。

3 凝固粒子形貌定量表征

3.1 近圆度及离心率

从以上分析可以发现, 熔滴的凝固形貌在很大程度上能够反应其凝固机理, 因而为了减小熔滴凝固形貌判断的效率及精度, 需要采用一些定量表征的方法^[49-52]。表 1 为表征熔滴凝固形貌及程度常用的特征值, 其中 C 、 S 、 V 、 h 分别为凝固熔滴的周长、面积、体积、厚度。近圆度(η)的计算公式如表所示, 用于描述熔滴凝固形貌的近圆化程度, 当凝固熔滴为规则的圆形时, 近圆度取最大值($\eta=1$), 并随着形貌复杂程度的增加逐渐减小。

图 6 为不同喷涂角度下熔滴的铺展形貌。可以发现随着喷涂角度的增加, 凝固形貌逐渐由圆形转向椭圆形, 因而需要采用离心率(δ)来描述凝固熔滴形貌的椭圆化程度。以铺展熔滴相距最远两点的连线段为长

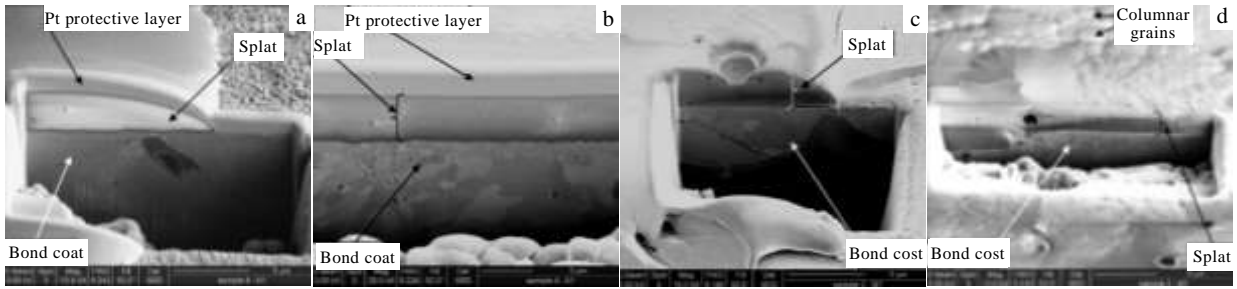


图 5 熔滴铺展截面形貌

Fig.5 Cross-sectional morphologies of splats: (a) edge of AT13, (b) center of AT13, (c) edge of Al₂O₃, and (d) center of Al₂O₃^[33]

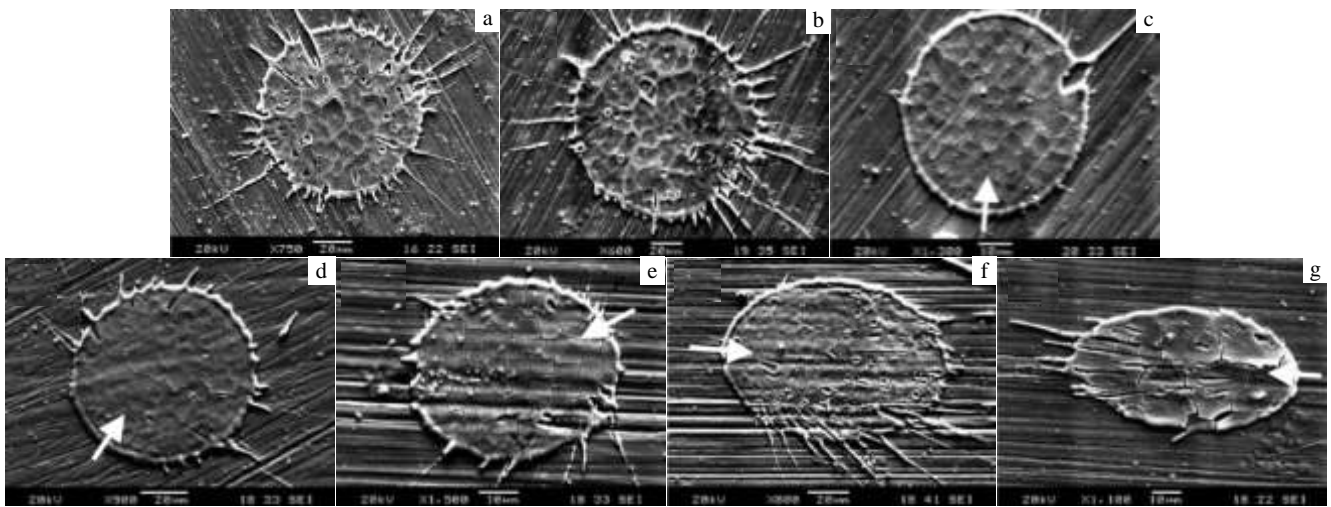


图 6 不同喷涂角度熔滴铺展形貌

Fig.6 Morphologies of splat by different spray angles: (a) 0°, (b) 10°, (c) 20°, (d) 30°, (e) 40°, (f) 50°, (g) 60°^[53]

轴作一个刚好能将熔滴均包含在内的椭圆，该椭圆的半短轴(*b*)与半长轴(*a*)比值即为离心率。当 *a*=*b* 时，将熔滴完全包络的为圆形，此时离心率取最大值($\eta=1$)，而随着 η 的逐渐减小，熔滴的铺展形态更加趋近于细长形^[53]。

3.2 铺展系数

铺展系数是描述熔滴撞击基体之后铺展程度的参量，其计算方法如表 1 所示^[54]，其中 *D* 为熔滴撞击基体前的直径，*d* 为凝固斑点的直径，铺展系数与铺展程度随着凝固半径的增大而增加。由于熔滴撞击前的直径无法直接测量，因而需要假设撞击前后熔滴体积守恒，并且为规则的球形，从而得到熔滴直径的估算方法为：

$$D = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (1)$$

表 1 凝固斑点几何形态特征参数

Table 1 Characteristic parameters of geometrical morphology of splat^[54]

Parameters	Variables
Perimeter	<i>C</i>
Volume	<i>V</i>
Circularity	$\eta=4\pi S/C^2$
Flattening degree	$\zeta=d/D$
Area	<i>S</i>
Depth	<i>h</i>
Eccentricity	$\delta=b/a$
Solidity	$\varepsilon=S/A$

3.3 固化指数

固化指数主要用于描述单个熔滴凝固后所得铺展形态的不规则程度，其计算原理为：将凝固熔滴边界的突出点首尾相连，形成一个闭合的包络线，则熔滴

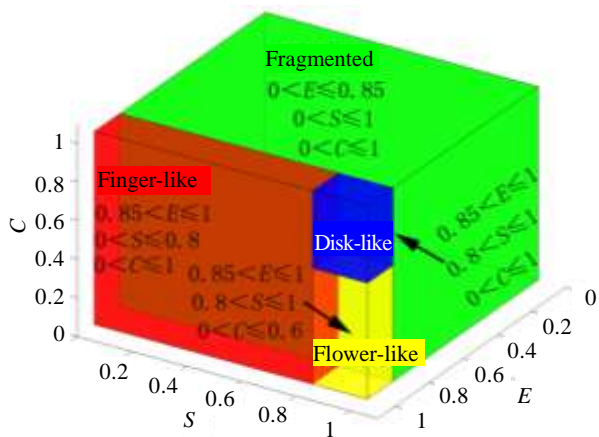


图 7 熔滴铺展类型判断阈值

Fig.7 Threshold value of droplet flattening type^[55]

的固化指数(ϵ)为凝固熔滴面积(S)与包络线所含面积(A)的比值。Mulero 等基于计算机视觉技术及数学形态学原理,对熔滴铺展形态 SEM 照片进行分割,提取了单个凝固熔滴的近圆度、离心率及固化指数,并提出了综合 3 个参数判定熔滴凝固类型的方法,各参数取值范围与熔滴凝固类型如图 7 所示^[55]。

4 结 语

1) 熔滴的基本铺展类型包括均匀铺展、指状铺展及破碎铺展,对应的熔滴凝固形貌分别为圆盘型、放射型及破碎型,同时在实际沉积过程中还会出现由于熔滴热力学性能局部分布不均或基体状态的影响而导致的花瓣形形貌以及由于粉末自身结构或沉积过程中气体渗入而导致的气泡形形貌。

2) 熔滴铺展类型的影响因素总体来说主要分为 2 类,即熔滴特性(包括温度、速度、粒径、热物性质等)及基体状态(包括预热温度、表面形貌、化学状态、热物性质、材料属性等)。因而充分考虑各种因素的影响,选择合适的熔滴沉积质量与基体预处理状态是制备高质量涂层的重要环节。

3) 熔滴的凝固形貌在很大程度上能够反应其沉积机理及质量,因而通过综合采用近圆度、离心率、铺展系数、固化指数等一系列参数表征熔滴的凝固形貌对定量判定熔滴的沉积类型具有重要意义。

参考文献 References

[1] Maniya A, Ali D, Rolf W *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2016, 291: 348
 [2] Wu Q F, Huang J, Li H. *Materials Letters*[J], 2015, 141: 100
 [3] Tian J J, Yao S W, Luo X T *et al.* *Acta Materialia*[J], 2016,

110: 19
 [4] Wang C H, Wang Y, Fan S *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 649: 1182
 [5] Wang Li, Habibi M H, Jeffrey I E *et al.* *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2014, 34: 3941
 [6] Wen Z H, Bai Y, Yang J F *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2015, 281: 62
 [7] Radek M, Gabriele B, Jan M *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2015, 268: 58
 [8] Bobzin K, Bagcivan N, Petkovic I. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 1620
 [9] Martin B, Nadine R, Georg M *et al.* *Wear*[J], 2015, 328-329: 369
 [10] Yang G J, Li C X, Hao S *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 235: 841
 [11] Sebastiani M, Bolelli G, Lusvardi L *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2012, 206: 4872
 [12] Edin E B, Mousab H, Bandyopadhyay P P *et al.* *Acta Materialia*[J], 2009, 57: 5921
 [13] Choudhury T A, Hosseinzadeh N, Berndt C C. *Surface & Coatings Technology*[J], 2011, 205: 4886
 [14] Choudhury T A, Berndt C C, Man Z H. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*[J], 2015, 45: 57
 [15] Bertrand G, Bertrand P, Roy P *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2008, 202: 1994
 [16] Fang J C, Xu W J, Zhao Z Y *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2007, 201: 5671
 [17] Forghani S M, Ghazali M J, Muchtar A *et al.* *Ceramic International*[J], 2013, 39: 3121
 [18] Montavon G, Sampath S, Berndt C C *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 1997, 91: 107
 [19] Fauchais P, Fukumoto M, Vardelle A *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2004, 13(3): 337
 [20] Wenzelburger M, Escribano M, Gadow R. *Surface and Coatings Technology*[J], 2004, 180-181: 429
 [21] Salimijazi H, Raessi M, Mostaghimi J *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2007, 201(18): 7924
 [22] Fukumoto M, Huang Y. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 1999, 8(3): 427
 [23] Pakseresht A H, Rahimpour M R, Vaezi M R *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2015, 324: 797
 [24] Xing Y Z, Li X H, Wang Q *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2015, 283: 234
 [25] Brossard S, Munroe P R, Tran A T T *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 204: 1599
 [26] Qu M. *Thesis for Doctorate*[D]. New York: Stony Brook University, 2008
 [27] Sanjeev C, Pierre F. *Journal of Thermal Spray Technology* [J], 2009, 18(2): 148
 [28] Christoulis D K, Pantelis D I, Dave N D *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 485: 119
 [29] Benramoul L, Abdellah H A. *Applied Surface Science*[J],

- 2011, 258: 962
- [30] Cizek J, Dlouhy I, Siska F. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2014, 23(8): 1339
- [31] Li L, Anirudha V, Sanjay S *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2006, 15(1): 97
- [32] Sabiruddin K, Bandyopadhyay P P, Giovanni B *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 450
- [33] Bolelli G, Sabiruddin K, Lusvarghi L *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 205: 363
- [34] Yang Y, Wang Y, Tian W *et al.* *Materials and Design*[J], 2015, 65: 814
- [35] Vicent M, Bannier E, Benavente R *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 220: 74
- [36] Lu Y P, Jiao Y, Wang J H *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2012, 206: 3550
- [37] Li H, Ng B S, Khor K A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2004, 52: 445
- [38] Anup K K, Arvind A. *Surface & Coatings Technology*[J], 2011, 206: 338
- [39] Li H, Costil S, Liao H L *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2006, 200: 5435
- [40] Brossard S, Munroe P R, Tran A T T *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2010, 204: 2647
- [41] Dong S J, Song B, Liao H L *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2015, 268: 46
- [42] Raessi M, Mostaghimi J, Bussmann M. *Thin Solid Films*[J], 2006, 506-507: 133
- [43] Tran A T T, Hyland M M, Qiu T *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2008, 17(5-6): 637
- [44] Yang E J, Luo X T, Yang G J *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2015, 274: 37
- [45] Yang E J, Luo X T, Yang G J *et al.* *Ceramics International*[J], 2016, 42: 853
- [46] Fukumoto M, Nishioka E, Matsubara T. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2002, 11(1): 69
- [47] Yang Kun, Fukumoto M, Toshiaki Y *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2013, 214: 138
- [48] Syed A A, Denoirjean A, Hannover B *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2005, 200: 2317
- [49] McDonald A, Lamontagne M, Moreau C *et al.* *Thin Solid Films*[J], 2006, 514: 212
- [50] McDonald A, Moreau C, Chandra S. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2007, 50: 1737
- [51] Rajeev D, McDonald A G, Sanjeev C. *Surface & Coatings Technology*[J], 2007, 201: 7789
- [52] Rajeev D, Sanjeev C. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2005, 48: 5625
- [53] Kang C W, Ng H W. *Surface & Coatings Technology*[J], 2006, 200: 5462
- [54] Zhang H, Wang X Y, Zheng L L *et al.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2001, 44: 4579
- [55] Mulero M A, Zapata J, Vilar R *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2015, 278: 1

Status Quo of Unstable Solidification Process of Plasma Sprayed Droplets Impinging to Substrate

Chen Shuying, Ma Guozheng, Wang Haidou, He Pengfei, Xu Binshi, Wang Haijun, Liu Ming

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: As is known, phases, defects, residual stress, deposition efficiency and mechanical properties of plasma sprayed coatings depend dramatically on the fabrication parameters and substrate pretreatment state. In other words, slight changes might lead to distinguished differences between coatings. Therefore, it is of great importance to perform researches on the formation process of plasma sprayed coatings microscopically. Basically, plasma sprayed coatings are constituted of enormous molten or semi-molten droplet, which are heated and accelerated by plasma torch. Hence, the flattening and solidification behavior of single droplet after impacting on the substrate are the most elementary process of the formation of coatings. The factors influencing the flattening and solidification behavior can be divided into two categories, namely, droplet properties: velocity, temperature, size, material properties, molten status, etc; substrate status: roughness, preheated temperature, surface chemistry status, deposition of adsorbates and condensates, wetting properties and interfacial thermal contact resistance between droplet and substrate, etc. With different droplet properties and substrate conditions, the droplets might spread into five different types, i.e., disk-like, fragmented, finger-like, flower-like and bubble-like. Each type represents specific deposition mechanism and quality. Therefore, a series of parameters can be used to quantitatively characterize the morphologies of splats, such as perimeter, area, volume, depth, circularity, eccentricity, solidity and flattening degree.

Key words: plasma spray; solidification mechanism; morphology characterization; spreading type

Corresponding author: Wang Haidou, Ph. D., National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, P. R. China, Tel: 0086-10-66718475, E-mail: wanghaidou@aliyun.com