

# 基于粒子飞行特性及铺展行为的 WC-10Co4Cr 涂层 孔隙形成机理研究

陈书赢, 马国政, 何鹏飞, 刘喆, 刘明, 邢志国, 王海斗, 王海军

(陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 采用超音速等离子喷涂设备制备 WC-10Co4Cr 涂层, 通过调整喷涂功率得到了具有不同孔隙结构特征的涂层, 以液氮为冷却介质收集不同熔化状态下的飞行粒子, 并通过镜面钢收集熔滴撞击铺展之后所形成的扁平粒子, 采用扫描电子显微镜观察涂层、收集的飞行粒子及扁平粒子形貌, 采用透射电镜观察涂层显微组织结构。结果表明: 随着喷涂功率的增大, 涂层的大孔隙含量逐渐降低, 而当喷涂功率上升到 60 kW 时, 涂层内部出现较多的热裂纹, 涂层的显微硬度则随着功率的增加而先增大后减小, WC 扁平粒子主要有四种类型, 包括熔化不佳、破碎型、气泡型及花瓣型, 孔隙的形成主要是由于“遮蔽效应”、微区气体作用、熔滴不充分润湿及气孔迁移等。

**关键词:** 等离子喷涂; WC 涂层; 飞行粒子; 熔滴; 孔隙; 扁平粒子

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Pore Formation Mechanism of WC-10Co4Cr Coatings Based on Collected In-flight Particles and Individual Splat

CHEN Shu-Ying, MA Guo-Zheng, HE Peng-Fei, LIU Zhe, LIU Ming,  
XING Zhi-Guo, WANG Hai-Dou, WANG Hai-Jun

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

**Abstract:** The supersonic plasma spray equipment was utilized to fabricate WC-10Co4Cr coatings. Four spraying parameters with different spraying powers were employed to obtain coatings with different porous structure. The liquid nitrogen was used to freezing in-flight particles with different molten status. The individual splat was deposited on mirror polished stainless steel at preheating temperature of about 200°C. The scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the morphologies of coating, raw spraying powder, freezing particle, and individual splat. The field emission microscopy (FEM) was utilized to observe the microstructure of coating, while the energy dispersive spectrometer (EDS) was used to analyze the composition. The results show that with increment of spraying power, the large size pores kept decreasing. With 60 kW spraying power, a few thermal cracks appeared within the coating due to the heat accumulation. Micro hardness of the coatings increased firstly and then decreased with the increment of spraying power. Solidified morphologies of individual splat could be distinguished as four types, namely, partially melted type, fragmented type, bubble-like type, as well as flower-like type. Pores within the WC-10Co4Cr were mainly formed by shadowing effect of solidified coatings and substrate, gas effect of the micro valley, insufficient wetting of droplet, as well as the pore migration within the liquid phase of the splat.

**Key words:** plasma spray; WC coatings; in-flight particles; molten droplets; pores; splat

收稿日期: 2017-11-03; 收到修改稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(51675531, 51535011); 北京市自然科学基金(3172038)

National Natural Science Foundation of China (51675531, 51535011); Natural Science Foundation of Beijing (3172038)

作者简介: 陈书赢(1990-), 男, 博士研究生. E-mail: chenshuying90@163.com

通讯作者: 王海斗, 研究员. E-mail: wanghaidou@aliyun.com; 马国政, 助理研究员. E-mail: magz0929@163.com

等离子喷涂技术具有射流中心温度高, 加速效果明显和对工件热影响小等优点, 广泛用于制备耐腐蚀、耐磨、绝缘和封严等多种涂层<sup>[1-3]</sup>。WC 作为重要的硬质合金, 硬度高与耐磨性好, 非常适用于替代电镀硬铬技术, 强化零件表面的综合服役性能。然而, 由于纯 WC 润湿性差, 脆性较大, 无法直接用于喷涂, 因而一般的喷涂材料体系中都会加入与 WC 相容性较好的 Co 元素, 从而显著增加涂层的韧性及其与基体的结合强度, 如 WC-17Co、WC-12Co 和 WC-10Co4Cr 等<sup>[4-7]</sup>。

在 WC 涂层制备过程中, 辅助气体成分( $H_2$ , He)、喷涂功率、主气流量等参数均会对涂层的脱碳行为及孔隙率产生不同程度的影响, 最终决定涂层显微硬度及断裂韧性之间的差异<sup>[8-10]</sup>。关于 WC 涂层的脱碳过程, 许多学者从不同角度展开了大量的研究, 例如 WC 颗粒尺寸的减小会加剧其脱碳程度, 涂层中  $W_2C$  含量将明显增加, 在提高涂层硬度的同时降低其韧性, 而双峰结构的涂层则能够同时具备较高的硬度和韧性<sup>[11]</sup>。然而, 除了脱碳程度会对涂层的力学性能产生较大的影响, 涂层的孔隙含量与形态之间的差异也是影响其性能的重要因素, 但目前关于 WC 涂层孔隙形成机理研究的工作较少。

从微观角度来看, WC 涂层是由大量喷涂粒子经射流加热加速之后撞击基体逐层堆积形成的, 因而涂层的成形过程可以分为两个阶段, 即粒子在射流中的传热、传质与加速, 以及熔滴撞击基体之后铺展凝固形成涂层。在飞行粒子收集方面, 目前国内主要是以低熔点介质淬冷高温高速粒子, 最大程度保留粒子飞行过程的状态, 以便分析粒子在飞行过程中的受热加速、气氛反应和形态变化等行为, 常见冷却介质包括蒸馏水、液氮和液氩等<sup>[12-14]</sup>。在熔滴撞击基体方面, 则主要采用表面光洁度较高的基材收集单个扁平粒子, 通过对熔滴沉积状态的研究, 建立工艺参数、粒子飞行特性及涂层质量之间的关系, 最终实现工艺过程的科学优化<sup>[15-16]</sup>。本工作通过对液氮收集的飞行粒子、单个扁平粒子及涂层组织结构与力学性能的分析, 系统研究了 WC 涂层孔隙结构的微观成形机理。

## 1 实验方法

### 1.1 喷涂粉末及涂层制备

实验采用团聚烧结法制备 WC-10Co4Cr 粉末, 形状为近球形(如图 1 所示), 具有较好的流动性, 平均粒径为  $29 \mu m$ , 可以确保喷涂过程的均匀送粉, 从图 1(b)可以看出, 粉末呈现团聚导致的不规则形

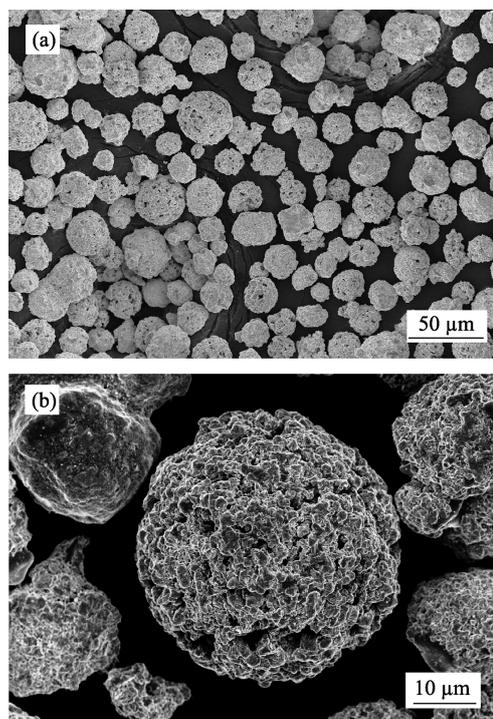


图 1 喷涂粉末的(a)整体形貌和(b)高倍形貌照片  
Fig. 1 (a) Overall morphology and (b) magnification morphology of spraying particles

貌。Co 元素的主要作用是作为粘结相, 提高 WC 粉末的润湿性和涂层的韧性, Cr 元素则可以适当提高涂层的硬度与耐腐蚀性能。

基材材质为 45 号钢, 尺寸为  $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。喷涂之前, 在丙酮溶液中进行超声清洗 10 min, 随后采用白刚玉砂砾粗化处理至平均粗糙度为  $R_a=6.5 \mu m (\pm 2.3 \mu m)$ , 最后采用超音速等离子喷枪将基体预热至  $100^\circ C (\pm 20^\circ C)$ , 喷涂工艺参数如表 1 所示。

### 1.2 飞行粒子与扁平粒子收集

以液氮为冷却介质, 通过淬冷的方法收集处于高速熔融状态的飞行粒子, 其工装实物图如图 2 所示, 收集过程中, 喷枪距工装入口 100 mm 的距离, 路径为左右往复运动, 速度为 60 mm/s。单个扁平粒子的收集过程示意图如图 3 所示, 挡板表面的孔径为 1 mm、间隔为 10 mm 的圆孔点阵, 以尽量减

表 1 WC-10Co4Cr 涂层工艺参数  
Table 1 Spraying parameters of plasma sprayed WC-10Co4Cr coatings

Parameters	1	2	3	4
Flow of Ar/(L·min <sup>-1</sup> )	140	140	140	140
Spraying power/kW	45	50	55	60
Spraying distance/mm	100	100	100	100
Powder feeding rate/(g·min <sup>-1</sup> )	50	50	50	50

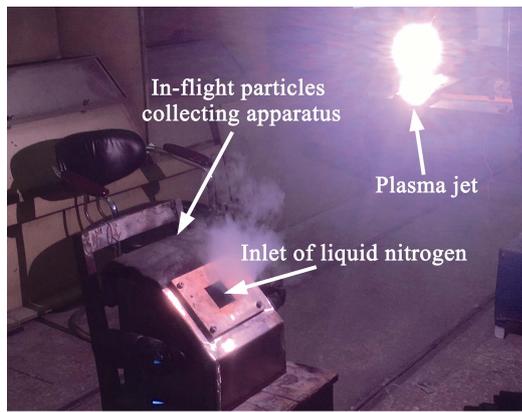


图 2 飞行粒子液氮淬冷收集工装  
Fig. 2 Liquid nitrogen quenching device of in-flight particles

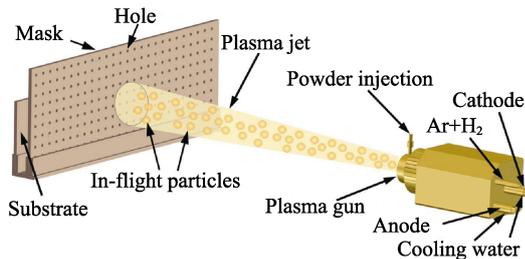


图 3 单个扁平粒子收集过程示意图  
Fig. 3 Schematic of individual splat collecting process

少熔滴铺展时相互之间搭接、堆垛, 得到单个扁平粒子的形貌, 基体为  $R_a=0.01 \mu\text{m}$  的镜面钢, 尺寸为  $50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 喷枪移动速度为  $75 \text{ mm/s}$ 。

### 1.3 组织结构与形貌表征

采用 Nova NanoSEM450 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察涂层截面、喷涂粉末、液氮收集的喷涂粒子和扁平粒子形貌; 采用 JEOL-2010 型透射电子显微镜 (TEM) 观察涂层纳米尺度微观结构形貌; 采用 Oxford X-Max 型能谱仪 (EDS) 分析选区成分。采用 HMV-2 型显微硬度仪测定涂层深度方向上的硬度, 加载载荷为  $300 \text{ g}$ , 持续时间为  $15 \text{ s}$ , 加载过程中确保每个压痕之间的距离不小于 3 倍的压痕对角线长度, 以减小压痕之间的相互影响, 每个试样随机测量 16 个位置。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层组织性能

图 4 为不同喷涂功率制备的涂层显微硬度测试结果, 可以看出, 当喷涂功率小于  $50 \text{ kW}$  时, 涂层的平均显微硬度均小于  $950 \text{ HV}_{0.3}$ ; 而当喷涂功率为  $55 \text{ kW}$  时, 涂层的平均显微硬度达到最大值  $1280 \text{ HV}_{0.3}$ ; 当喷涂功率继续增大到  $60 \text{ kW}$  时, 涂层的平均显微硬度降低到  $1084 \text{ HV}_{0.3}$ 。

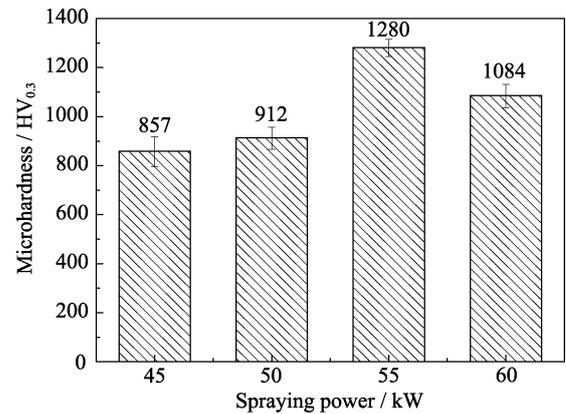


图 4 不同喷涂功率制备的涂层平均显微硬度  
Fig. 4 Average micro-hardness of coatings fabricated with different spraying powers

图 5 为不同喷涂功率制备的 WC 涂层的截面形貌, 可以看出, 涂层内的孔隙主要包含两种类型: 一是形状不规则、尺寸较大的孔隙, 在熔滴铺展堆垛时, 由于不完全润湿或是“遮蔽效应”等机理所形成的; 二是形状为规则近圆形、尺寸较小的孔隙, 主要为粒子飞行过程中环境气氛所裹挟的气体、自身脱碳反应产生的气体、粉体内原生孔隙、不规则基体(或成形涂层)表面微区气体渗入熔滴内部所产生的气体。随着喷涂功率的增大, 涂层内的孔隙率整体呈现显著下降的趋势, 并且大孔隙数量逐渐减少, 而小孔隙的含量则逐渐增加, 并且当功率上升到  $60 \text{ kW}$  时, 涂层内部出现一些热裂纹, 这可能是由于熔滴热焓较高, 沉积过程中累积了较多热量所导致的。

根据文献可知, WC 涂层在制备过程中脱碳的原因主要有三种<sup>[17-19]</sup>: 与  $\text{O}_2$  发生反应、WC 自身受热分解以及溶于 CoCr 液相中形成固溶体。

这些复杂反应的产物中包括大量脆性较高的  $\text{W}_2\text{C}$  和 W-Co 复合碳化物等相, 降低涂层整体力学性能。图 6 为涂层透射形貌图, 从图 6(a) 中可以看出, 涂层内部存在大量 WC 硬质颗粒, 这些 WC 晶粒的尺寸主要呈现两种不同的分布状态, 一类是直径在  $350 \text{ nm}$  以上, 尺寸较大的晶粒, 另一类是尺寸小于  $60 \text{ nm}$  的小尺寸晶粒。通过 EDS 分析可以发现, 涂层内部的非晶区域富集大量 Co、Cr 元素, 同时含有少量的 C、W 元素。当喷涂粒子在射流中加热时, Co、Cr 合金区域首先熔化, 随后 WC 逐渐溶于 CoCr 液相之中, 相比 W 元素而言, C 元素在 CoCr 液相之中的溶解度更高, 因而处于熔滴表面的 C 元素极易与环境气氛中的 O 元素结合, 从而导致 C 元素的流失。在随后的冷却过程中, 熔点较高的 W 元素极易作为异质元素, 促进少量非晶相的形成。从图 6(b)

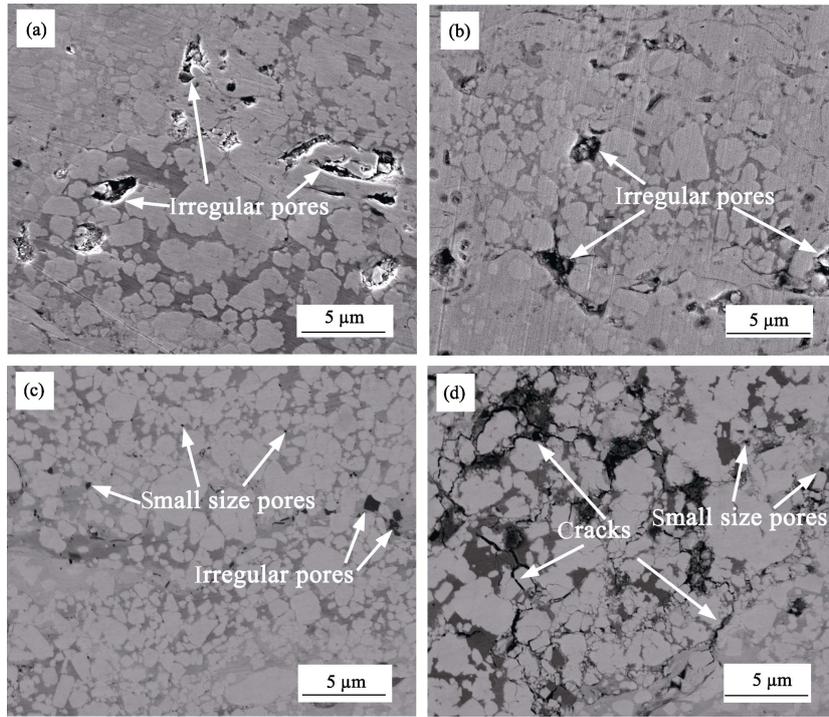


图 5 不同喷涂功率制备的 WC 涂层截面形貌

Fig. 5 Cross-sectional morphologies of WC coatings fabricated with different spraying powers (a) 45 kW; (b) 50 kW; (c) 55 kW; (d) 60 kW

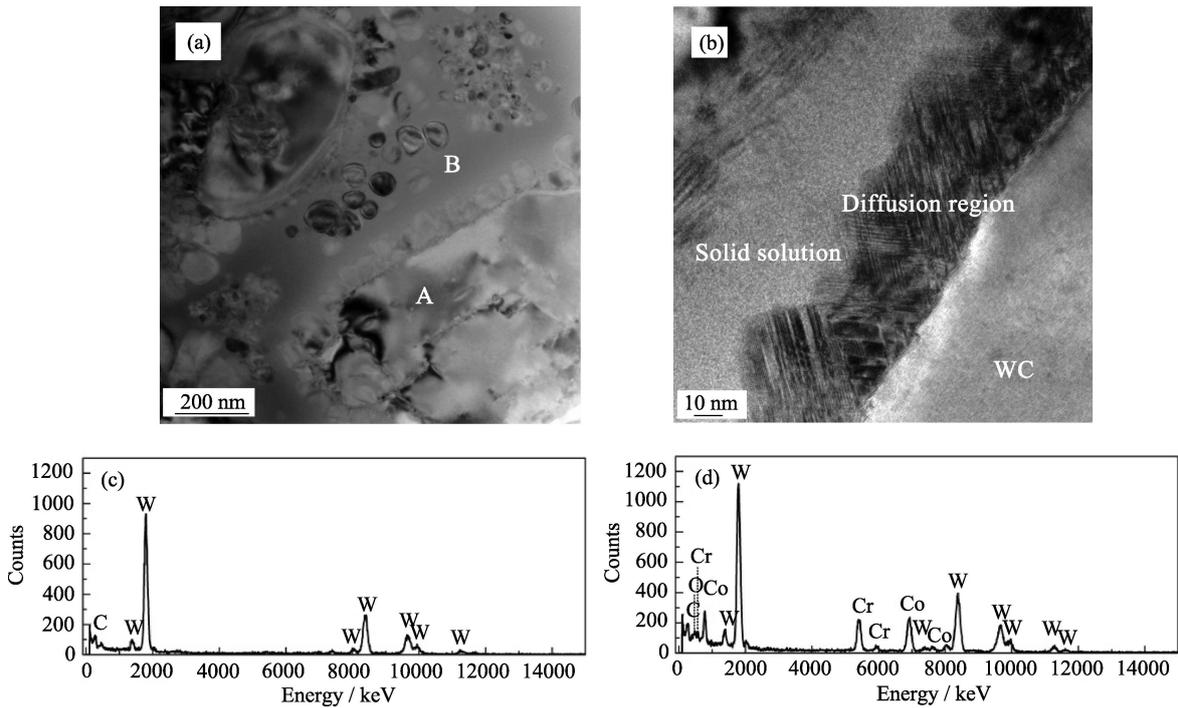


图 6 涂层中(a) WC 晶粒及非晶形貌和(b) WC 扩渗形貌, (c) A 区域和(d) B 区域的 EDS 能谱图

Fig. 6 TEM morphologies of (a) WC grain and amorphous phase and (b) diffusion of WC in coating, with EDS analysis of point A (c) and point B (d) in (a)

中可以发现, WC 粒子边缘存在有一些过渡区域, 说明在喷涂粒子受热过程中, C、W 元素逐渐溶于 CoCr 液相之中, 并在随后的快速冷却过程中形成固溶体。

## 2.2 飞行粒子形貌

图 7 为液氮淬冷收集的 WC 飞行粒子表面形貌。从图 7(a)及其放大形貌图(b)中可以看出, 经过等离子射流的加热作用之后, 喷涂粒子表面颗粒状

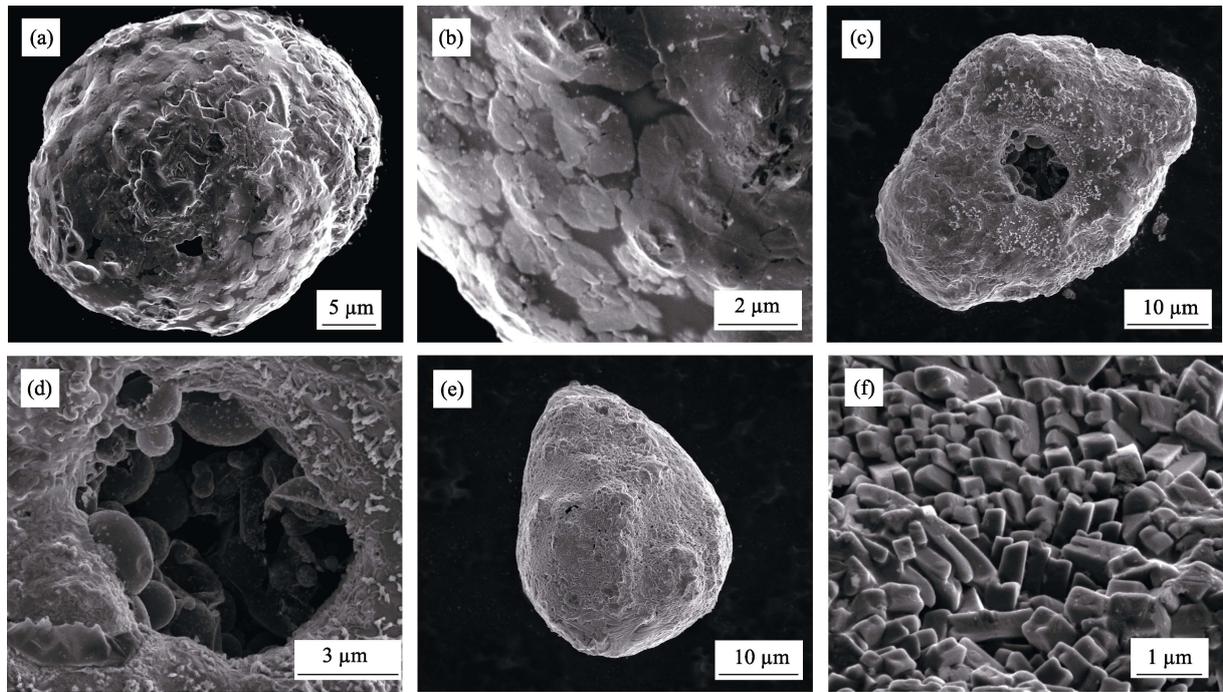


图 7 收集到粒子的典型表面形貌照片

Fig. 7 Surface morphologies of typical collected particles

(a) Overall and (b) magnified morphologies of fully melted particle; (c) Overall and (d) magnified morphologies of particle with pore; (e) Overall and (f) magnified morphologies of partially melted particle

的形貌基本消失, 形成更为平整的形貌。由图 7(b) 中还可以发现, 收集的 WC 粒子表面有两种衬度不同的区域, 分别为 Co、Cr 元素富集区域和 C、W 元素富集区域。图 7(c) 为典型的开孔 WC 粒子, 这主要产生于粉体烧结过程, 由部分粒子内残留的大量孔隙所导致的。从图 7(d) 的高倍放大形貌图中可以看出, 孔隙底部的材料呈现出明显的球状结构, 说明该区域的熔化程度较好, 可见适当的孔隙结构能够增加喷涂粒子的比表面积, 促进粒子的加热熔化过程。图 7(e) 为熔化状态欠佳的粒子形貌, 从其高倍形貌(图 7(f))可以看出, 粒子表面存在大量棱角分明的晶粒, 这可能是由于粒子熔化程度不高, 元素扩散程度较低, 并且在液氮中迅速冷却形成的。

图 8(a) 为 WC 原始粉末的截面形貌, 可以看出粉末的边缘不规则程度较高, 存在一些闭孔结构, 从图 8(b) 的高倍放大形貌图中可以看出, 原始粒子的 WC 多呈现一些尖锐的边缘。而从图 8(c)~(f) 中可以看出, 随着粒子熔化程度的增加, WC 颗粒边缘逐渐圆润, 且逐渐细化。图 8(e) 为功率在 60 kW 下收集的喷涂粒子, 从其形貌中可以看出, 在粒子内部存在尺寸较大的孔隙, 且均匀分布有一些小尺寸的孔隙, 这些孔隙可能是由于粒子熔化程度较高, C 元素与溶于 Co 相之中的 O 元素发生反应所形成的, 从图 8(f) 的高倍放大形貌中可以看出, 较高的熔化

状态使得粒子内元素扩散较为充分, 因而在液氮淬冷过程中形成了大量细小的 WC 颗粒。

### 2.3 熔滴铺展机理

通常, 飞行粒子的铺展类型包括: 熔化不佳、破碎型、气泡型、花瓣型、圆盘型及放射型<sup>[15, 20-21]</sup>。图 9 为不同喷涂功率下 WC 熔滴典型铺展形貌, 可以看出, 扁平粒子中并未发现规则的圆盘形形貌。图 9(a) 为 45 kW 条件下典型熔化不佳的扁平粒子形貌, 可以看出扁平粒子堆积在一起, 铺展程度较差, 呈现大量颗粒团聚的堆垛状态, 扁平粒子表面及周围存在大量未熔硬质颗粒, 这主要是由于当喷涂功率为 45 kW 时, 射流的整体热焓较低, 使得大量粒径较大或未飞入射流中心区域的粒子难以达到最佳的熔化状态, 因而在撞击基体之后难以有效扩展。熔化不佳的扁平粒子极易在涂层内产生不规则的大孔隙, 一方面熔化不佳的粒子撞击基体或成形涂层之后难以有效润湿撞击位置; 另一方面, 粒子铺展程度低, 容易形成粗糙表面, 产生“遮蔽效应”等, 为后续熔滴有效润湿凝固涂层增加困难<sup>[22]</sup>。从图 10(a) 的扁平粒子截面形貌中也可以看出, 在粒子内部存在大量不规则的孔隙, 并且厚度非常不均匀。

图 9(b) 是喷涂功率为 60 kW 时所形成的破碎型扁平粒子, 可以看出, 该类扁平粒子是以熔滴的撞击位置为中心, 形成向四周溅射的形貌。这主要是

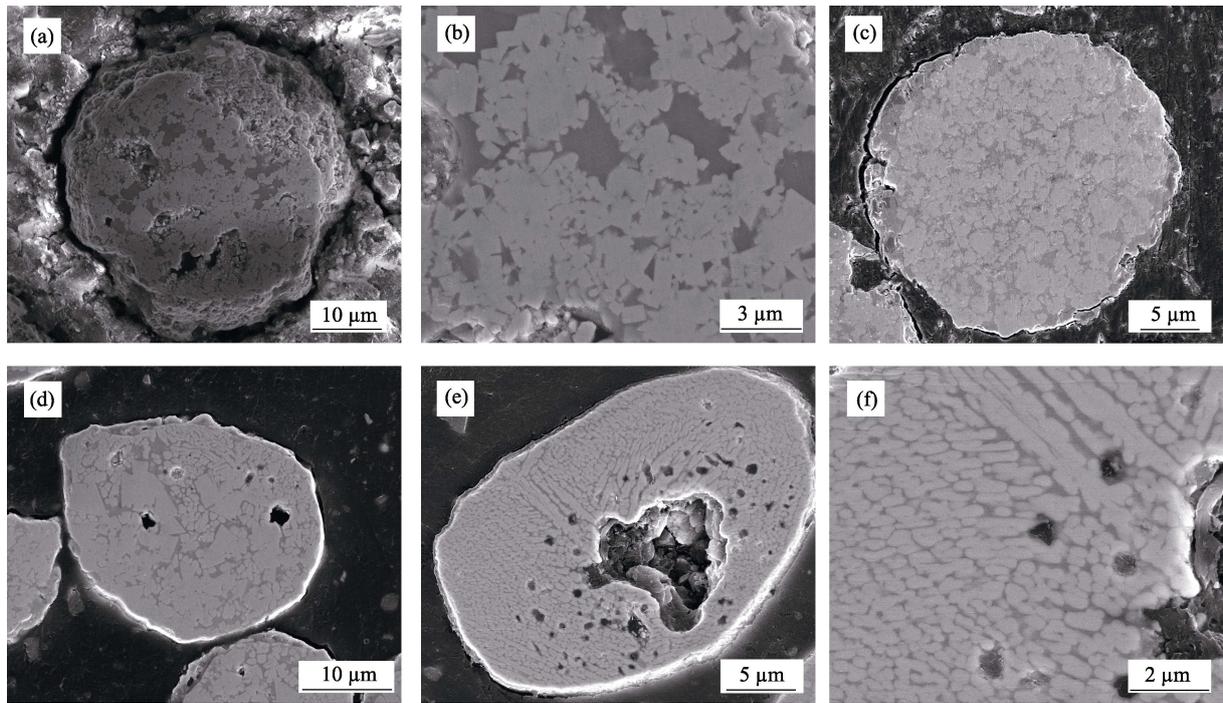


图 8 WC 粒子截面形貌照片

Fig. 8 Cross-sectional morphologies of WC particles

(a) Overall and (b) magnified morphologies of original spray particle; Particles collected by liquid nitrogen with dense structure (c), small-size pores (d) and large-size pores (e, f)

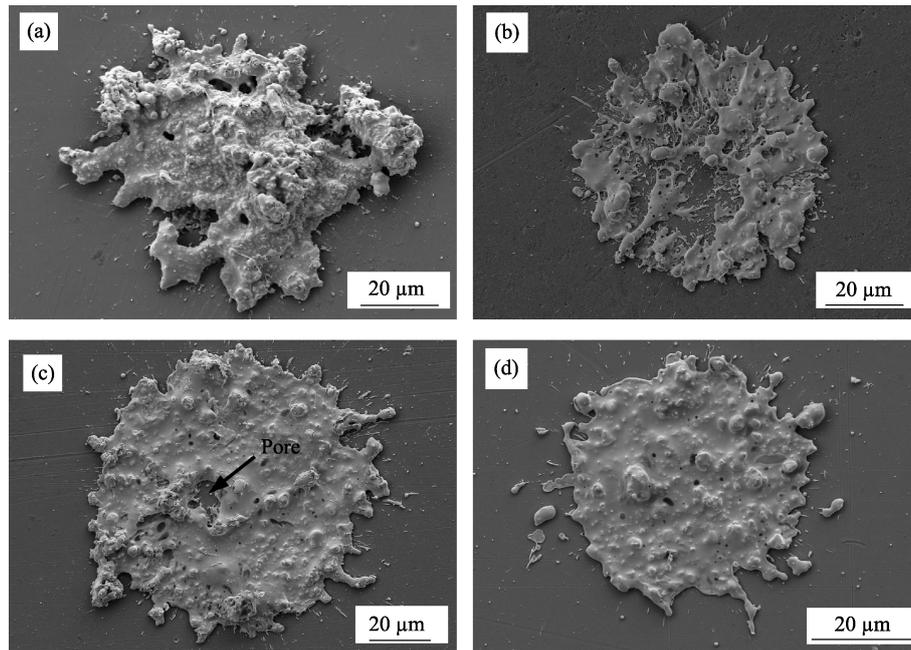


图 9 (a)熔化不佳(45 kW), (b)破碎型(60 kW), (c)气泡型(50 kW), (d)花瓣型(55 kW)的单个扁平粒子形貌

Fig. 9 Individual splat morphologies of (a) partially melted type, (b) fragmented type, (c) bubble-like type and (d) flower-like type obtained at 45 kW, 50 kW, 55 kW and 60 kW

因为射流温度较高, 喷涂粒子温度较高, 撞击基体之后冷却过程较慢, 有充足的动量向四周传递; 另外, 从图 7(b)及图 8 的粒子形貌图中可以看出, 部分喷涂粒子在制粉过程中不可避免地产生大量孔隙, 包括一些开孔与闭孔, 从而使得熔滴在撞击基体之

后发生破碎, 产生大量飞溅的小熔滴夹杂在涂层内, 影响涂层的组织连续。此外, 由于熔滴的熔化状态较高, 粉体内由于反应而产生的气体极易在 Co-Cr 液相内迁移, 产生一些规则的小气孔。在较高的喷涂功率下, 破碎型扁平粒子含量较高, 极易造成

热量累积, 产生热裂纹。

图 9(c)为气泡型扁平粒子形貌, 可以发现在其内部存在较大的气泡状形貌。这主要是由于熔滴在撞击基体过程中, 内部气泡受到较强压力发生破碎而形成的。这些气体, 如前所述, 一部分产生于制粉过程; 另一部分产生于熔滴飞行过程中的反应及裹挟射流气氛所形成的。气泡型铺展粒子会直接在涂层内形成闭气孔, 而开气孔则会形成微小凹坑, 在后续熔滴撞击时产生较强的反向气压, 阻碍后续熔滴的铺展润湿行为。

图 9(d)为典型的花瓣型扁平粒子, 可以看出其内部没有明显的气泡, 并且表面存在较多凸起的颗粒, 边缘形貌不规则。这主要是由于粒子处于较好的熔化状态, 铺展过程比较均匀, 不会产生飞溅的现象, 但熔滴内物质与动能的不均匀分布使其在铺展过程中产生了不规则凝固边缘。圆润的凸起颗粒则可能是由于 WC 的熔点较高, 因而在熔滴内部随机分布一些处于半熔状态的 WC 颗粒, 在随后撞击基体的过程中不能充分进行扁平化, 从而形成被 CoCr 包覆的硬质凸起颗粒。从图 10(b)可以看出, 粒子扁平化程度较高, 厚度均匀, 且内部不存在明显的气孔, 有助于形成较为平整的表面, 是较为理

想的铺展类型。因此, 在工艺参数优化过程中需要调整喷涂功率, 使喷涂粒子充分熔化, 减少熔化不佳型扁平粒子的含量, 从而减少涂层内大孔隙与热裂纹。

### 3 结论

1) 涂层内大孔隙的含量随着喷涂功率的增大而逐渐减少, 当喷涂功率达到 60 kW 时, 涂层内出现一些热裂纹。涂层的显微硬度随着功率的增加先增大后减小, 当喷涂功率为 55 kW 时, 达到最大显微硬度 1280 HV<sub>0.3</sub>。

2) 随着喷涂功率的提高, WC-10Co4Cr 粒子的熔化程度逐渐增加, 粒子表面的微凸体形貌逐渐被平整化的形貌取代, 内部的 WC 尖角状边缘逐渐消失, 转换为一些细小、圆润的颗粒。

3) 喷涂粒子的基本铺展类型包括四类: 熔化不佳、破碎型、气泡型和花瓣型。喷涂功率较低时, 熔化不佳的扁平粒子含量较高, 因而涂层中存在大量尺寸较大的孔隙。随着喷涂功率的增加, 花瓣型和气泡型的含量增加, 涂层中的大孔隙含量显著降低。当喷涂功率上升到 60 kW 时, 破碎型扁平粒子含量增加, 造成较多的热量累积产生热裂纹, 并且易诱发“二次铺展”、促进气孔迁移, 在涂层内形成尺寸较小的孔隙。

### 参考文献:

- [1] CHEN S Y, WANG H D, XU B S, *et al.* Law of rolling contact fatigue life of thermal spray coatings: a review. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, **50(8)**: 23–33.
- [2] YU F L, BAI Y, WU X Y, *et al.* Corrosion resistance and anti-wear property of nickel based abrasion resistant coating deposited by plasma spraying. *Journal of Inorganic Materials*, 2016, **31(7)**: 687–693.
- [3] ZHANG X F, ZHOU K S, ZHANG J F, *et al.* Structure evolution of 7YSZ thermal barrier coating during thermal shock testing. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, **30(12)**: 1261–1266.
- [4] WANG Z P, CHENG T T, DING K Y. Effect of particle-density on the performance of WC-10Co-4Cr coating. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47(24)**: 63–68.
- [5] SONG C Q, LIN T S, HE P, *et al.* Process and properties of supersonic plasma sprayed WC-17Co coating. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, **37(11)**: 35–38.
- [6] LI W Q, LIN T S, SONG C Q, *et al.* Properties of supersonic plasma sprayed WC-17Co nano-coating. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, **46(3)**: 807–811.
- [7] WANG H J, CAI J, HAN Z H. Study on erosion wear of WC-Co coatings prepared by supersonic plasma spray and HVOF spray. *Journal of Materials Engineering*, 2005, **4**: 50–54.
- [8] RAYÓN E, BONACHE V, SALVADOR M D, *et al.* Hardness and Young's modulus distributions in atmospheric plasma sprayed WC-Co coatings using nanoindentation. *Surface & Coatings*

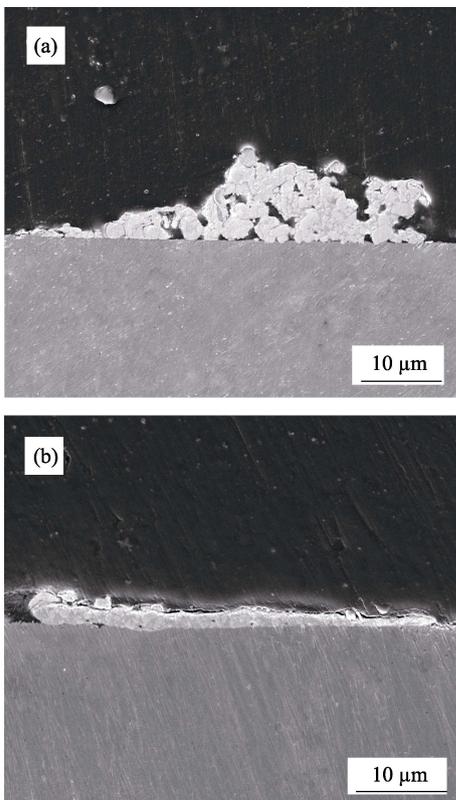


图 10 (a)熔化不佳和(b)花瓣型的扁平粒子截面形貌照片  
Fig. 10 Cross-sectional morphologies of individual splat  
(a) partially melted type and (b) flower-like type

- Technology*, 2011, **205(17/18)**: 4192–4197.
- [9] DU S M, JIN J J, HU C H, *et al.* Influence of critical parameter on microstructure and properties of WC coatings by plasma spraying. *Tribology*, 2015, **35(4)**: 362–367.
- [10] HAN Z H, XU B S, WANG H J, *et al.* Analysis of microstructure of WC-12Co coatings prepared by the three kinds of supersonic thermal spraying processes. *China Surface Engineering*, 2005, **18(3)**: 23–27.
- [11] MA N, CHENG Z X, WU H T, *et al.* Effects of structure of feed-stock powders on the microstructure and properties of HVOF sprayed WC-Co coatings. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, **12**: 3219–3223.
- [12] BAI Y, ZHAO L, WANG Y, *et al.* Fragmentation of in-flight particles and its influence on the microstructure and mechanical property of YSZ coating deposited by supersonic atmospheric plasma spraying. *Journal of Alloys & Compounds*, 2015, **632**: 794–799.
- [13] NIRANATLUMPONG P, SUKONKHET C, NINON K. Loss of Y from NiCrAlY powder during air plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 2015, **280**: 277–281.
- [14] ZHAN Q, YU L, YE F, *et al.* Quantitative evaluation of the decarburization and microstructure evolution of WC-Co during plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 2012, **206(19/20)**: 4068–4074.
- [15] MULERO M A, ZAPATA J, VILAR R, *et al.* Automated image inspection system to quantify thermal spray splat morphology. *Surface & Coatings Technology*, 2015, **278**: 1–11.
- [16] CHEN S Y, MA G Z, WANG H D, *et al.* Comparison of solidity and fractal dimension of plasma sprayed splat with different spreading morphologies. *Applied Surface Science*, 2017, **409**: 277–284.
- [17] YUAN J, ZHAN Q, HUANG J, *et al.* Decarburization mechanisms of WC-Co during thermal spraying: insights from controlled carbon loss and microstructure characterization. *Materials Chemistry & Physics*, 2013, **142(1)**: 165–171.
- [18] HE J, SCHOENUNG J M. A review on nanostructured WC-Co coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2002, **157(1)**: 72–79.
- [19] YANG T, WANG H B, SONG X Y, *et al.* Corrosion resistance of HVOF-sprayed nano- and micron-structured WC- $\eta$  coatings against molten zinc. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, **32(8)**: 806–812.
- [20] FAUCHAIS P, VARDELLE A, VARDELLE M, *et al.* Knowledge concerning splat formation: an invited review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, **13(3)**: 337–360.
- [21] CHANDRA S, FAUCHAIS P. Formation of solid splats during thermal spray deposition. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, **18(2)**: 148–180.
- [22] CHEN S Y, WANG H D, MA G Z, *et al.* Fractal and statistical properties of the geometrical structure of natural pores within plasma sprayed coatings. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64(24)**: 97–104.