

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170516002

喷涂距离对等离子喷涂 WC-12Co 涂层抗冲蚀磨损性能的影响

梁存光, 李新梅

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 为提高 WC-12Co 涂层抗冲蚀磨损性能, 在 Q235 钢基体上采用大气等离子喷涂 (APS) 方法制备 WC-12Co 涂层, 研究了喷涂距离对粒子温度与速度、涂层组织结构、力学性能及抗冲蚀磨损性能的影响。结果表明: 喷涂距离对涂层质量影响较为明显, 喷涂距离为 130 mm 时涂层质量较好, 粒子速度与温度达到较好的配合, 涂层抗冲蚀磨损能力较强。喷涂距离为 120 mm 与 140 mm 时涂层抗冲蚀磨损能力较差。550 μm (30 目) 沙粒直径对涂层冲蚀磨损量大, 沙粒速度为 15.68 m/s 比 13.33 m/s 沙粒速度冲蚀磨损量大; 冲蚀角为 60° 时冲蚀磨损量最大, 30° 冲蚀磨损量最小。

关键词: 等离子喷涂; WC-12Co 涂层; 喷涂距离; 冲蚀磨损; 粒子扁平化

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)06-0111-11

Effects of Spraying Distance on Erosion Wear Behavior of WC-12Co Coatings Prepared by APS

LIANG Cun-guang, LI Xin-mei

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000)

Abstract: In order to improve the erosion resistance of coatings. WC-12Co composite coatings were prepared on Q235 steel by atmospheric plasma spraying (APS) method. The microstructure, mechanical properties and erosion resistance of the coatings under different spraying distance were studied. The results show that the spraying distance has an obvious influence on coating performance. When the spraying distance is 130 mm, the particle velocity and temperature matches well, and the quality and erosion resistance of the coatings are better than others. The corrosion resistance of the coatings sprayed by 120 mm and 140 mm is poor. The wear mass loss of the coating is the largest when the diameter of sand is 30 mesh. When the velocity of sand is 15.68 m/s, the wear mass loss of the coatings is larger than that of 13.33 m/s. The wear loss firstly increases, then decreases with the growth of the erosion angle, and attains the maximum value when the erosion angle is 60°.

Keywords: atmospheric plasma spraying; WC-12Co composite coating; the spraying distance; erosion wear; particle flattening

0 引言

近年来, 热喷涂技术已经被广泛应用于制备不同工况条件下材料表面的冲蚀磨损防护涂层, 主要利用其对基体热影响小、设备简单以及生产效率高等优点, 目前已取得了较好的效果^[1]。热喷

涂 WC-Co 涂层是一种在高温熔流作用下以 WC 作为硬质相, Co 作为粘结相形成的一种硬面涂层。由于 Co 对 WC 有很好的润湿性, 当温度升高到一定值时, WC 能溶解在 Co 中, 温度降低时又形成 WC 骨架^[2]。所以 WC 可用 Co 作为粘结相进行

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-09-28

网络出版日期: 2017-11-01 11:26; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20171101.1126.008.html>

通讯作者: 李新梅 (1971—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 材料表面改性技术应用; E-mail: lxmj2009@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51561029)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51561029)

引文格式: 梁存光, 李新梅. 喷涂距离对等离子喷涂 WC-12Co 涂层抗冲蚀磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 111-121.

LIANG C G, LI X M. Effects of spraying distance on erosion wear behavior of WC-12Co coatings prepared by APS[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 111-121.

高温烧结或复合,使得 WC-Co 涂层具备高硬度和良好柔性,使得材料表面有效推延冲蚀破坏的孕育期,抑制或减少冲蚀磨损破坏。

大气等离子喷涂 (APS) 过程涉及极为复杂的等离子电弧的传热与流动、粉末粒子与等离子射流之间以及熔融粒子与基体之间的相互作用,这使得涂层综合性能对喷枪类型、喷涂距离极为敏感^[3]。刘延宽^[2]等人运用 Fluent 软件对 HVOF 焰流进行仿真模拟,揭示喷涂过程中焰流速度、温度对粒子速度和温度的影响。文魁^[4]等人采用 Spray Watch3i 在线监测系统测量了 F6 大气等离子喷枪在不同喷嘴条件下产生的等离子射流中 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-3TiO}_2$ 粒子的温度和速度,研究了粒子的扁平化程度及涂层性能。在喷涂过程中,粒子速度与温度之间的关系是相互矛盾的^[5],在同等喷涂距离下,若要增加粒子的飞行速度,粒子加热的时间就会缩短,降低了粒子的温度;若要增加粒子的温度,粒子的速度就会降低。所以在喷涂过程中,需要获得较好的粒子温度与速度的配合(即合适的喷涂距离)才能获得高质量涂层。

WC-12Co 硬质涂层由于具有良好的耐磨耐腐蚀性能,被广泛应用到工业的各个方面。V-Bonache^[6]等人采用等离子喷涂制备微米结构与纳米结构粉末的 WC-Co 涂层,研究发现电流为 625 A 时,微米结构的 WC-Co 涂层在 45°冲蚀角下失重率大于 90°冲蚀角。王海军^[7]等人采用 HVOF 法制备 WC-Co 涂层,研究了冲蚀角 30°与 90°下 WC-Co 涂层的冲蚀磨损性能,研究发现冲蚀角为 90°时失重率大于 30°,其涂层的失效形式是涂层疲劳剥落。李阳^[8]等人利用 HVOF 法制备 WC-Co-Cr 涂层,分析了涂层孔隙和层状结构等缺陷对 15°、45°、75°和 90°攻角下的料浆冲蚀行为。目前,就不同工艺参数对等离子喷涂制备 WC-Co 涂层性能研究报道较多,主要集中于电流与主气流量方面;涂层抗冲蚀磨损性能研究主要集中于不同冲蚀角度对其的影响。文中以 Q235 钢为基体采用等离子喷涂制备 WC-12Co 涂层,研究不同喷涂距离对涂层显微组织、力学性能及抗冲蚀磨损能力的影响,通过测量不同喷涂距离下粒子速度与温度,揭示粒子温度与速度对涂层性能的影响,并探讨 WC-12Co 涂层冲蚀磨损的机理。

1 试验

1.1 涂层的制备

基体为 Q235 钢,粘结拉伸试验采用 $\phi 20\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 试样,冲蚀磨损试验采用 $30\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 试样。喷涂时粘结层选用 NiCr5Al 粉末,粒度为 25~45 μm ,其质量分数为:5%Al,余量为 NiCr。采用喷雾造粒获得 WC-12Co 球形团聚粉,粉末 SEM 形貌如图 1 所示。WC 颗粒通过 Co 黏结相团聚成球形,WC-12Co 粉末的粒度分布均匀、且表面光滑,流动性能较好。粒度 25~45 μm ,流动性 20.1 s/50 g,松装密度 4.4 g/cm^3 ,其组成(质量分数/%)为:88.0WC,12.0Co,喷涂前所有粉末进行烘干处理。喷砂及等离子喷涂参数见表 1。喷涂前将 Q235 基体表面打磨平整,超声波清洗净化 30 min,清除油污及铁锈,而后用粒径为 0.5~1.0 mm 棕刚玉喷砂粗化处理,喷砂后用过滤的洁净压缩空气将基体表面杂质和浮尘吹除,2 h 内完成等离子喷涂试验。涂层制备采用上海大

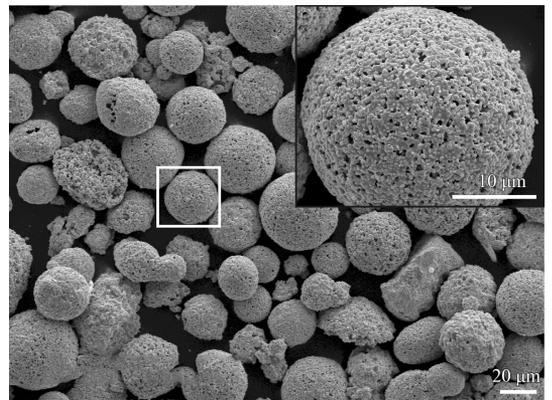


图 1 WC-12Co 粉末的微观形貌

Fig.1 Microstructure of WC-12Co powder

表 1 喷砂和等离子喷涂工艺参数

Table 1 Parameters of grit-blasting and spraying

Process	Parameters	Values
Grit-blasting	Air pressure / MPa	0.4
	Blasting distance / mm	200
	Blasting angle / (°)	90
APS	Current / A	350
	Gun traverse speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	60
	Powder feeder rate / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	60
	Argon volume flow / ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	2 500
	Hydrogen volume flow / ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	100

豪纳米材料喷涂有限公司生产的 DH-2080 型等离子喷涂系统, 圆柱形喷嘴内孔径为 6 mm。

1.2 涂层的分析与表征

采用 LED-1430VP 扫描电镜 (SEM) 观察涂层截面形貌。采用 D&Advance 型号衍射仪测定涂层物相成分, 其基本参数: 阳极靶为 Cu 靶, 管电压 40 kV, 管电流 30 mA, 扫描速度 $2^\circ/\text{min}$, 扫描范围为 $20^\circ\sim 80^\circ$, 步长为 0.02° 。涂层成分测定采用 OXFORD-2000 型能谱仪。Spray Watch 2i 热喷涂在线监测系统用于测量等离子射流中飞行粒子的温度和速度。孔隙率测定采用图像灰度法。采用 HXD-1000TB 维氏硬度仪对涂层显微硬度及韧性进行测定, 硬度及韧性均采用 0.5 kg 载荷。压痕韧性^[6]的计算方法如式 (1):

$$K_{IC} = \frac{0.113H \cdot D^{1/2}}{(1 + C_L/2D)^{3/2}} \quad (1)$$

式中, H 为涂层维氏硬度, GPa; D 为维氏压痕对角线长, μm ; C_L 为压痕四角延伸出的裂纹长之和, μm 。涂层的结合强度测定按照 GB/T 9793-2012 标准进行, 采用 E-7 胶将涂层试样与喷砂后的 Q235 钢对偶件粘接, 经 3 h 固化后, 通过万能材料试验机测定涂层的结合强度。冲蚀磨损试验采用自制的干砂型常温冲蚀磨损试验机进行, 选取新疆当地黄沙, 其成分与微观形貌如表 2 和图 2 所示, 沙粒形状不规则, 大部分呈尖角状。角度

表 2 沙粒的主要化学成分

Table 2 Chemical composition of sand

Element	O	Al	Si	Ca	Fe
Mass fraction / %	48.99	8.92	27.51	2.14	4.94



图 2 550 μm (30 目) 沙粒的微观形貌

Fig.2 Micro structure of sand of 550 μm (30 mesh)

($0^\circ\sim 90^\circ$) 利用自制的冲蚀夹具进行调节。采用型号 FA2004 精度为 0.1 mg 的电子天平称量试样的冲蚀磨损失重, 沙粒流量为 250 g/min, 每 4 min 测量一次, 计算得到单位面积上的失重量。

2 结果与分析

2.1 喷涂距离对涂层相结构的影响

图 3 为粉末与不同喷涂距离下涂层的 XRD 图谱。通过对比不同喷涂距离的涂层衍射结果可以看出, 4 种涂层的主要组成相为 WC 相, 并且涂层中都有一定量的 W_2C 相与脆硬相 Co_6W_6C 相^[9], 说明涂层中 WC 已经出现不同程度的氧化脱碳 ($2WC + O_2 \rightarrow W_2C + CO_2$; $2WC \rightarrow W_2C + CO$), 生成 W_2C 相。通过对比 W_2C 主峰 (101) 晶面 ($2\theta=39.6^\circ$, $d=0.227 \text{ nm}$) 与 WC 主峰 (100) 晶面 ($2\theta=35.7^\circ$, $d=0.251 \text{ nm}$) 的峰高比表 3 可以看出, 喷涂距离为 120 mm 涂层的 W_2C/WC 峰高比最大, 130 mm 与 140 mm 涂层的 W_2C/WC 峰高比最小。说明当喷涂距离为 120 mm 时脱碳行为最为严重, 喷涂距

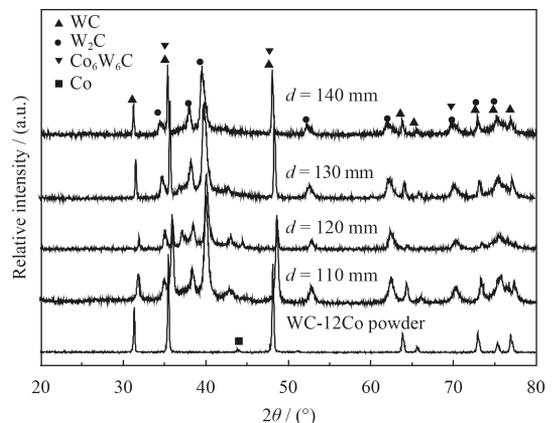


图 3 不同喷涂距离下涂层 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of WC-12Co coatings under different spraying distance

表 3 不同喷涂距离下涂层组织结构特征与力学性能

Table 3 Microstructural characteristics and mechanical properties of coatings under different spraying distance

Spraying distance / mm	110	120	130	140
XRD main peak height ratio of W_2C to WC/%	1.27	3.37	0.91	0.94
Porosity / %	3.91	11.73	4.04	7.33
Microhardness / $HV_{0.5}$	1 118	907	1 309	1 234
Thick of coating / μm	275	458	361	220
Bonding strength / MPa	22.65	20.32	26.16	12.38
Fracture toughness / $(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	4.38	2.87	9.03	1.23

离 130 mm 与 140 mm 时脱碳程度最轻。通过 EDS 分析不同喷涂距离下涂层 C 的质量分数分别为 9.54%, 4.67%, 12.23% 和 12.19%。喷涂距离为 120 mm 时涂层 C 的质量分数最低, 进一步说明 WC 氧化脱碳严重。

2.2 喷涂距离对涂层截面显微组织的影响

图 4 为不同喷涂距离的涂层截面 SEM 形貌。由图中可以看出, 喷涂距离为 120 mm 时, 涂层沉积厚度最大, 涂层厚度约为 458 μm (见表 3), 孔隙率为 11.73%, 且涂层内部存在一尺寸较大的孔洞。喷涂距离为 110 mm 和 130 mm 时, 涂层比较致密, 孔隙率分别为 3.91% 和 4.04%。喷涂距离为 110 mm 时, 涂层的沉积效率较 130 mm 时更低, 沉积厚度分别为 275 mm 和 361 mm, 二者沉积厚度均符合作者设计要求。喷涂距离为 140 mm 时, 涂层沉积效率最差, 涂层厚度约 220 mm 且孔隙率也较大。通过测量 4 种涂层不同位置的孔隙率看出, 涂层近表面处孔隙率较涂层内部孔隙率更大一些。

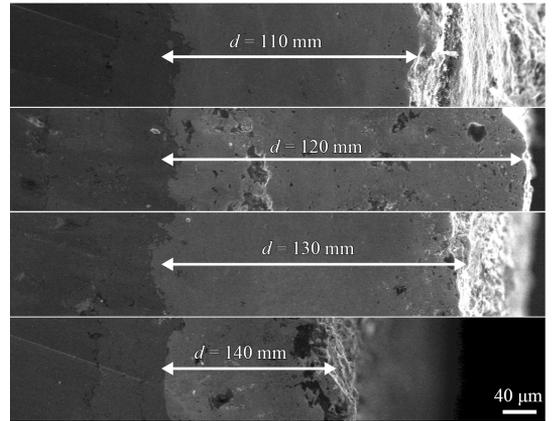


图 4 不同喷涂距离下涂层的截面 SEM 形貌

Fig.4 Cross-sectional SEM images of coatings under different spraying distance

2.3 喷涂距离对涂层力学性能的影响

通过不同距离下涂层结合强度和韧性 (见表 3) 的对比, 喷涂距离为 130 mm 时涂层韧性与涂层结合强度均最好, 喷涂距离为 140 mm 时涂层韧性与涂层结合强度较差。图 5 为不同距离下涂层的压痕裂纹扩展形貌喷涂距离为 110 mm 时, 涂

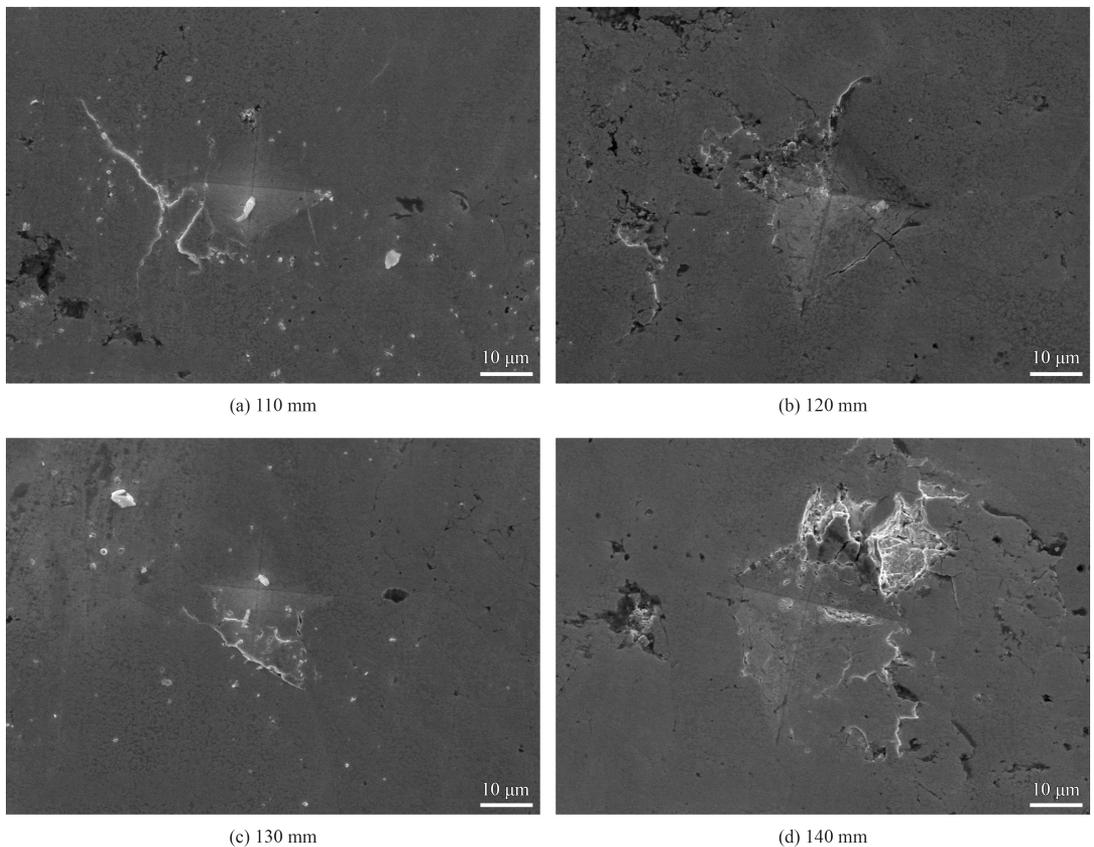


图 5 不同距离下涂层的压痕裂纹扩展形貌

Fig.5 SEM images of indentation crack propagation of coatings under different spraying distance

层较为致密, 但是脱碳程度相对较高, WC 的氧化脱碳使得涂层韧性有所下降。喷涂距离 120 mm 时涂层脱碳较为严重, 孔隙率较大, 在压头垂直载荷下涂层出现坍塌现象, 压痕周围细小裂纹较多(图 5(b)), 加之严重的脱碳, 涂层韧性下降较快。涂层孔隙率增大, 压痕对角线长度增加, 该喷涂距离下涂层的显微硬度最低(约 907 HV_{0.5})。喷涂距离为 130 mm 时, 涂层的压痕裂纹扩展形貌(图 5(c))中涂层扩展裂纹最少, 压痕面积较小, 涂层显微硬度可达 1 309 HV_{0.5}(表 3), 涂层韧性较好。通过对比涂层的结合强度(表 3)得知, 喷涂距离为 130 mm 时涂层扁平粒子间的结合力较大, 在压头垂直载荷作用下, 裂纹的扩展能力较弱, 从而使得该喷涂距离下涂层压痕裂纹数量较少。喷涂距离为 140 mm 时涂层力学性能最差, 随着喷涂距离的增大, 高温熔滴的速度大大降低, 粒子的动能不断减小, 这是导致涂层力学性能及组织结构均较差的原因。

2.4 涂层冲蚀磨损性能

图 6 为不同喷涂距离下涂层的冲蚀磨损量随冲蚀时间的变化曲线, 冲蚀磨损参数为冲蚀角 30°, 550 μm(30 目), 沙粒速度为 13.33 m/s。对比 4 种涂层的冲蚀磨损量, 喷涂距离 130 mm 时涂层抗冲蚀磨损能力最好, 110 mm 与 120 mm 次之, 喷涂距离 140 mm 时涂层耐冲蚀磨损能力最差。在冲蚀时间为 1~4 min 时间段内, 磨损量增长幅度较大, 4~8 min 内磨损量增长幅度减缓, 8 min 以后涂层冲蚀磨损量增长缓慢。喷涂距离为 130 mm 时涂层表现出优异的抗冲蚀磨损能

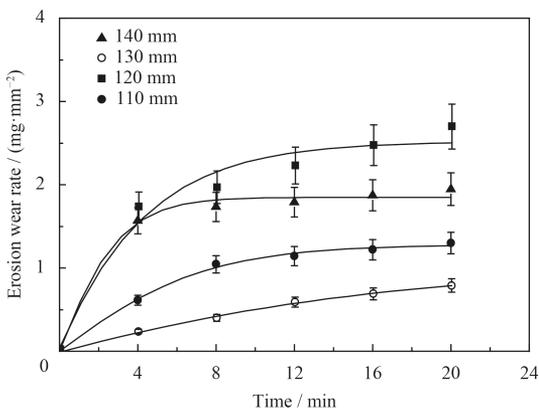


图 6 不同喷涂距离下涂层的冲蚀磨损量

Fig.6 Wear mass loss under different spraying distance

力, 主要是因为该参数下涂层组织致密, 涂层显微硬度、韧性以及结合强度较好。喷涂距离为 120 mm 时, 由于涂层孔隙率较大, 涂层脱碳严重, 主相 WC 的量减少, 而硬脆相 Co₆W₆C 增多, 从而使得涂层耐磨性下降。

图 7 为不同沙粒直径下涂层的冲蚀磨损量随冲蚀时间的变化曲线, 采用喷涂距离为 130 mm 时制备的涂层, 冲蚀角 90°, 沙粒速度为 13.33 m/s。通过 3 种不同沙粒直径下涂层冲蚀磨损量的对比, 0~12 min 时, 270 μm(50 目)沙粒冲蚀磨损量最大, 12 min 以后 550 μm(30 目)沙粒磨损逐渐增大, 20 min 时 270 μm(50 目)与 212 μm(70 目)沙粒冲蚀磨损量接近。由于涂层近表面处孔隙率大于涂层内部, 在 0~12 min 时 270 μm(50 目)沙粒能获得较大的冲蚀量, 随着近表面处孔隙率较大且疏松的涂层剥落以后, 冲蚀量也逐渐减缓。而 550 μm(30 目)沙粒能够持续获得较大动能, 与涂层相互撞击时对涂层产生的冲击力较大, 从而能获得较为平稳的冲蚀磨损率。

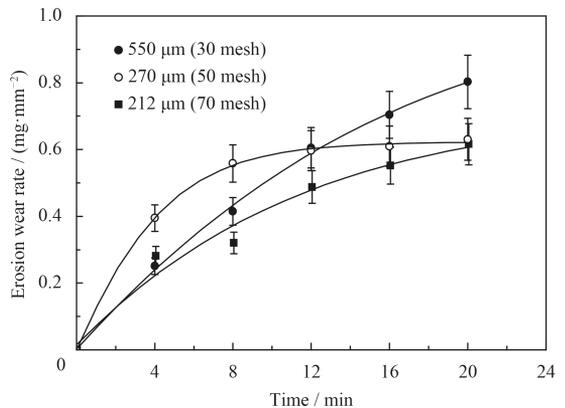


图 7 不同沙粒直径下涂层的冲蚀磨损量

Fig.7 Wear mass loss of coatings with different sand diameter

图 8 为不同沙粒速度下涂层的冲蚀磨损量随冲蚀时间的变化曲线, 基本参数为喷涂距离 130 mm, 冲蚀角 90°, 550 μm(30 目)。沙粒速度 15.68 m/s 时冲蚀磨损量大于速度为 13.33 m/s 时的磨损量。文献[14]中提出冲蚀磨损量与沙粒的速度存在如式(2)关系:

$$V = K v_0^n \quad (2)$$

式中: v_0 为粒子速度, m/s, n 为常数。在正向冲击条件下, 陶瓷材料 n 值约为 3。通过式(2)

得知, 涂层冲蚀磨损量随着沙粒速度的增大而增大, 与试验结果一致。资料表明, 沙粒的速度对涂层的冲蚀机理没有影响^[9]。

图 9 为不同冲蚀角度下涂层的冲蚀磨损量随冲蚀时间的变化曲线, 试验参数: 喷涂距离为 130 mm, 550 μm (30 目), 沙粒速度 13.33 m/s。在冲蚀到 20 min 时, 冲蚀角为 60°时冲蚀磨损量最大, 冲蚀角 90°时冲蚀磨损量次之, 冲蚀角为 30°时冲蚀磨损量最小。在 0~4 min 时, 30°与 90°冲蚀磨损量增长较为缓慢, 而冲蚀角为 60°时冲蚀磨损量增长较快。

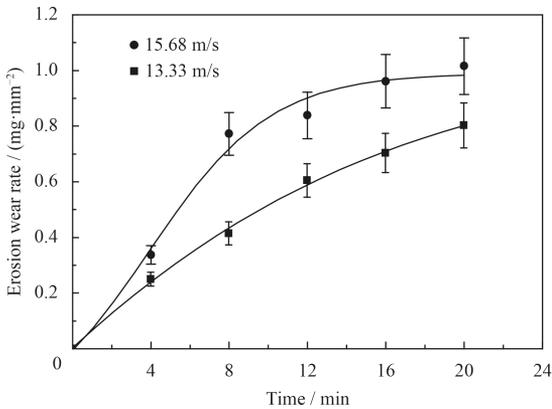


图 8 不同沙粒速度下涂层的冲蚀磨损量

Fig.8 Wear mass loss of coatings with different sand velocity

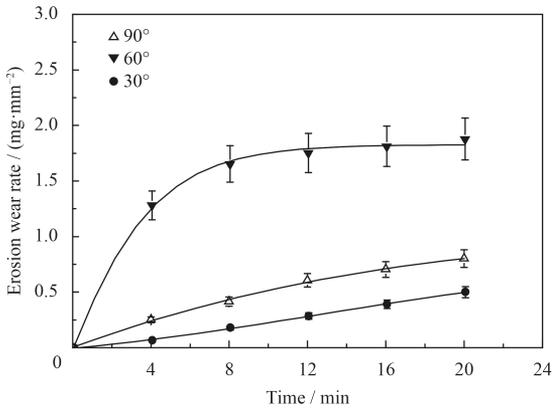


图 9 不同冲蚀角度下涂层的冲蚀磨损量

Fig.9 Wear mass loss of coatings with different erosion angles

3 讨论

图 10 为粒子速度与温度随喷涂距离变化曲线。由图看出粒子温度在 120 mm 处达到最大, 100~120 mm 之间温度增长较快, 120 mm 以后粒子温度缓慢降低。粒子速度在 100 mm 处最大约

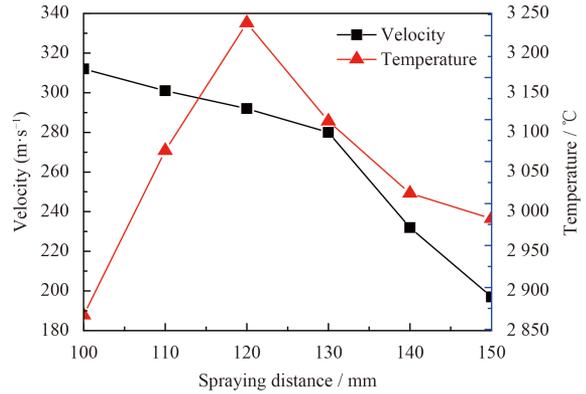


图 10 喷涂距离对飞行粒子温度与速度的影响

Fig.10 Effects of spray distance on in-flight particles temperature and velocity

为 315 m/s, 100~150 mm 之间粒子速度呈递减趋势, 140 mm 处粒子速度下降较快。WC 熔点为 2 776 °C, WC 在低于室温到 2 776 °C 的温度范围内都是稳定的。喷涂距离 110 mm 到 140 mm 的粒子温度都高于 2 776 °C, 理论上该范围内粒子可以完全熔化。但事实上 WC 并不能完全熔化, 受等离子射流向粉末粒子传热能力的大小及粉末粒子自身的热导率, 粒子在射流中停留时间较短(约 10^{-3} s)^[10]。

文献[5]中提出, 熔滴的飞行速度及温度是影响涂层的结构和性能的两个重要参数。在喷涂过程中, 喷涂粉末经历加速、熔化和撞击这 3 个过程, 高速飞行的高温熔融粒子在撞击基体或先沉积扁平粒子的瞬间, 具有良好的熔化和扁平状态是保证涂层具有高的致密结构和结合强度的重要因素^[11]。等离子焰流的速度与温度沿轴线截面呈高斯分布, 焰流中心速度、温度高^[12]。图 11 为不同喷涂距离下涂层表面形貌, 120 mm 处粒子温度最高且速度相对较大, 扁平化粒子基本全部熔化, 边缘呈溅射状。130 mm 粒子基本熔化, 粒子扁平化程度好, 边缘无溅射状。110 mm 与 140 mm 粒子未充分熔化, 110 mm 粒子熔化程度稍好于 140 mm 粒子, 可以看到扁平粒子中心有未熔化 WC 颗粒。

110 mm 粒子飞行速度快, 在等离子焰流中停留时间较短而没有完全熔化, 上层扁平粒子中未熔化 WC 颗粒对下层扁平粒子不断冲击作用, 致使涂层致密度较高, 没有明显孔隙。但由于涂层

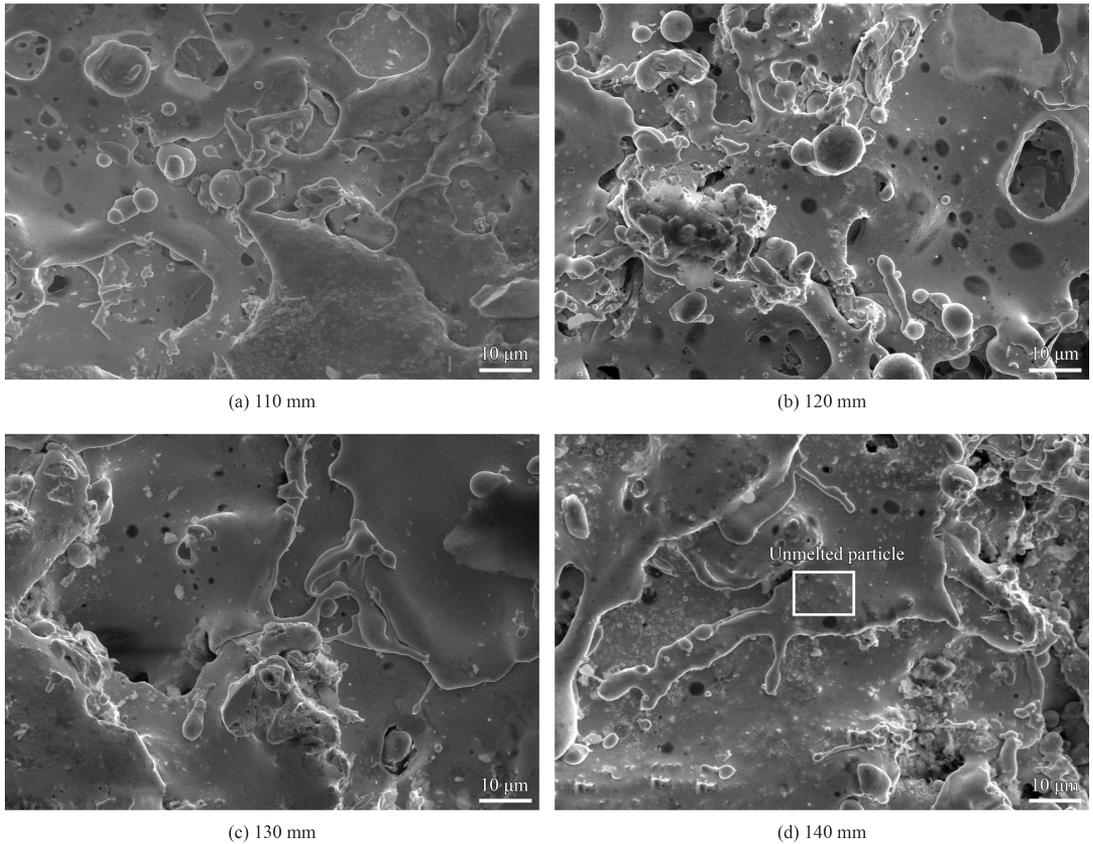


图 11 不同喷涂距离下涂层的表面形貌

Fig.11 Surface morphologies of coatings under different spraying distance

离喷嘴较近, 等离子焰流对涂层再次加热, 致使该距离下涂层氧化脱碳, 脆相 W_2C 增多, 柔韧相 Co 部分被消耗, 降低了涂层硬度与涂层韧性。120 mm 粒子边缘出现飞溅, 影响了其他高温熔滴的飞行路径和扁平化程度, 扁平粒子之间搭接不平整, 致使出现大量孔洞。根据 XRD 分析 (图 3) 得知 120 mm 涂层脱碳最为严重, 由于该距离处粒子温度最高, 粒子速度有所降低, 粒子在等离子焰流中加热时间变长, 使得 WC 严重脱碳, 涂层严重脱碳致使 W_2C 增多, 大量 Co 相被消耗产生 Co_6W_6C , 使得涂层硬度与韧性明显降低。130 mm 粒子扁平化程度较好, 边缘无明显飞溅, 扁平粒子之间搭接完好, 粒子充分熔化, 增加了熔滴的流动性, 可有效减小涂层的孔隙率。其原因是粒子温度和速度有所降低, 二者达到了一个良好的配合度, 结合强度达到最大。XRD 分析 130 mm 涂层氧化脱碳程度较轻, WC 与 Co 得到较好保留, WC 颗粒间的润湿性有极大改善, 这有助于增加 Co 黏结相与 WC 颗粒间的互扩散、固

熔, 使得粉末颗粒间的结合强度提高, 增加裂纹尖端临界应力场强度, 最终提高该距离下涂层的硬度与韧性。140 mm 时粒子温度与速度都降低较快, 粒子未充分熔化, 未熔化 WC 颗粒撞击基体后出现反弹, 降低了涂层沉积效率, 同时影响其他飞行粒子的路径, 减弱了未熔粒子的冲击作用, 致使涂层结合强度下降, 扁平粒子之间搭接程度较弱, 涂层孔隙率升高^[13]。虽然 140 mm 脱碳程度较轻, 涂层硬度适中, 但孔隙率的升高使得涂层断裂韧性下降。

图 12 为冲蚀角为 90° 时不同喷涂距离下涂层表面的冲蚀磨损形貌。从低倍 SEM 形貌可以看出, 喷涂距离为 120 mm 和 140 mm 有明显的剥落痕迹, 表面较为粗糙, 140 mm 时涂层表面有明显的剥落坑。喷涂距离为 110 mm 与 130 mm 涂层表面较为平整。通过对比不同喷涂距离的涂层高倍 SEM 形貌, 喷涂距离为 110 mm 和 130 mm 时, 涂层表面有沙粒撞击后发生的变形, 而在喷涂距离为 120 mm 和 140 mm 时并没有发现。可能是

110 mm 和 130 mm 涂层的韧性好、结合强度高
的缘故,减缓了沙粒对涂层的撞击作用,且涂层具
有低孔隙率,从而提高了涂层抗冲蚀磨损的能力。
喷涂距离为 140 mm 时涂层表面出现较大的
剥落坑,其原因是该涂层力学性能较差,孔隙率

较大导致抗冲蚀磨损能力变差。同时也说明说明
涂层抗冲蚀磨损能力主要取决于涂层孔隙率、显
微硬度、韧性及结合强度^[14]。

图 13 为不同冲蚀角度下(喷涂距离为 130 mm)
涂层表面的冲蚀磨损形貌。从 30°冲蚀角下的冲蚀

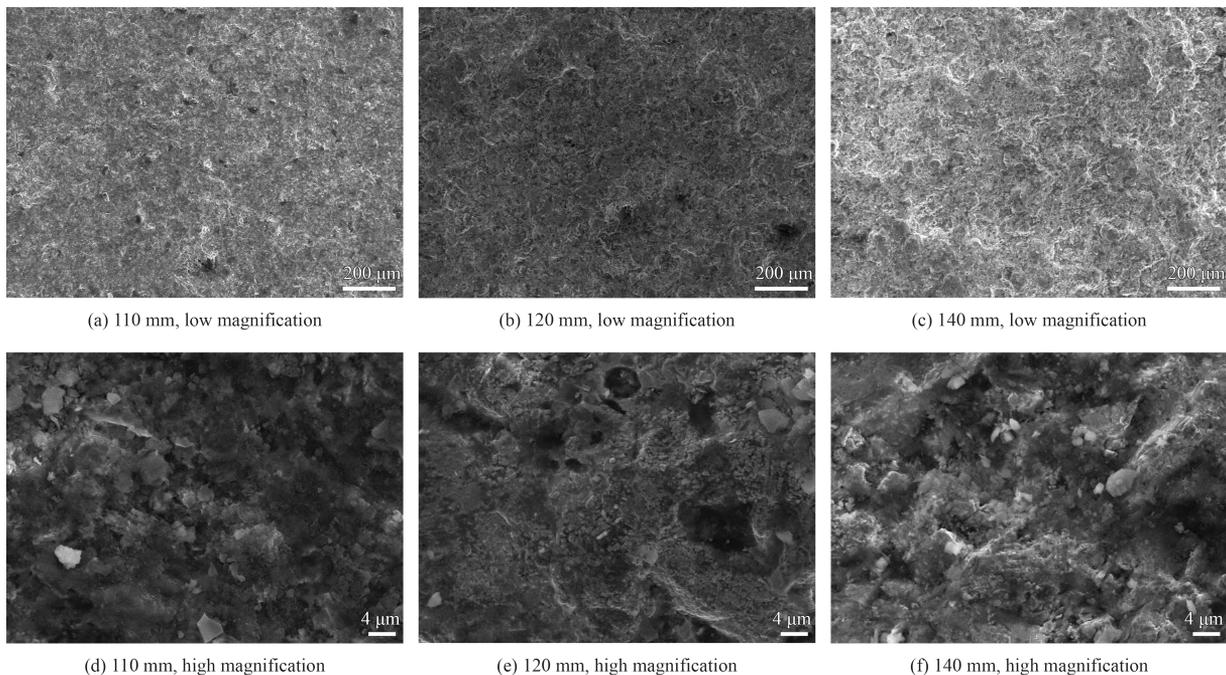


图 12 不同喷涂距离下涂层表面的冲蚀磨损 SEM 形貌

Fig.12 Erosion-corrosion SEM morphologies of coatings under different spraying distance

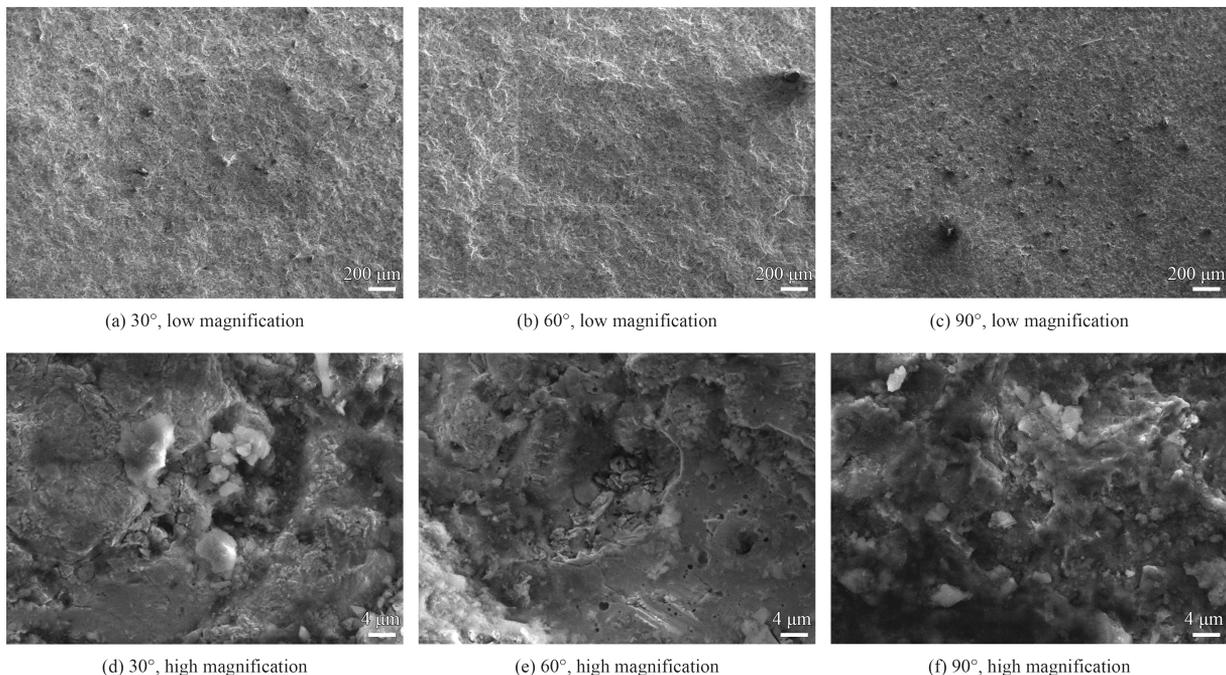


图 13 不同冲蚀角度下涂层表面的冲蚀磨损 SEM 形貌

Fig.13 Erosion-corrosion SEM morphologies of coatings under different impact angles

磨损形貌图 13(a)(d) 可以看出, 涂层片状脱落痕迹较为明显, 表面嵌入沙粒较少。涂层表面的冲蚀坑及硬质相剥落坑较多, 部分区域有变形犁沟出现^[15], 凹坑内存在部分细小未熔合的 WC 颗粒。分析原因是涂层在冲蚀磨损初期, 高速形状不规则沙粒以低角度冲击到涂层表面, 高速沙粒与涂层中包裹 WC 的韧性相 Co 相互撞击, 不规则沙粒将粘结相挤向两侧, 形成犁沟; 高速沙粒与硬质相 WC 相互撞击时, 动能较小的沙粒被反弹出去; 而动能较大的沙粒则不断撞击 WC, 使得硬质相 WC 与粘结相 Co 相对滑动, 发生塑性变形形成唇片或变形脊^[16]。冲蚀过程继续进行, 由于塑性变形形成的唇片被沙粒切削脱落, W 颗粒失去粘结相 Co 的包裹而裸露出来。随着冲蚀的加剧, 裸露的 WC 颗粒被高速沙粒撞击而剥落, 致使涂层冲蚀磨损。图 14(a)(b)(c) 为 30° 涂层冲蚀表面 EDS 面扫描分析, 质量分数: 7.77%C, 2.20%O, 32.80%Co, 57.33%W。Co 元素明显增多, W 元素降低, 其他元素变化不大, 说明部分 WC 颗粒被冲蚀剥落, 与冲蚀机理分析结果一致。所以微观切削、犁沟变形和微观疲劳剥落是 30° 冲蚀角下的冲蚀磨损特征^[17]。由于 WC-12Co 涂层表面硬度较高, 抗低角度冲蚀能力强, 涂层

冲蚀磨损率低, 说明涂层具有较好的抗低角度冲蚀磨损能力。

在 90° 冲蚀角下的冲蚀磨损形貌图 13(c)(f) 可以看出, 涂层主要受到磨粒锤击作用的影响, 涂层没有明显的切削痕迹, 有显著的层状剥落痕迹, 表面较为平整。图 14(d)(e)(f) 为 90° 涂层冲蚀表面 EDS 面扫描分析, 质量分数: 12.23%C, 4.55%O, 16.32%Co, 66.90%W, 4 种元素含量变化基本没有变化。冲蚀颗粒正面高速冲击涂层表面, 受到挤压形成突出的唇片 (图 13(f)), 冲蚀粒子不断对突出的片状进行捶打, 涂层周围出现畸变层, 经过严重的塑性变形之后, 涂层次表面形成脉动循环应力, 促使裂纹不断扩展, 直至裂纹贯通使得涂层破坏剥落造成涂层质量流失, 主要表现为疲劳剥落^[18-19]。

从 60° 冲蚀角下的冲蚀磨损形貌 (图 13(b)(e)) 可以看出, 涂层中小型凹陷增多, 涂层片状脱落痕迹明显, 表面嵌入沙粒较少。冲蚀坑 (图 13(e)) 明显较 30° 时增大, 周围由于涂层剥落而出现明显的分层现象, 在切削和锤击效应的双重作用下^[20-21], 涂层表面受到沙粒垂直撞击的力度增大, 涂层失效形式介于 30° 与 90° 之间, 致使涂层的失重率高于 90° 和 30° 的失重率。

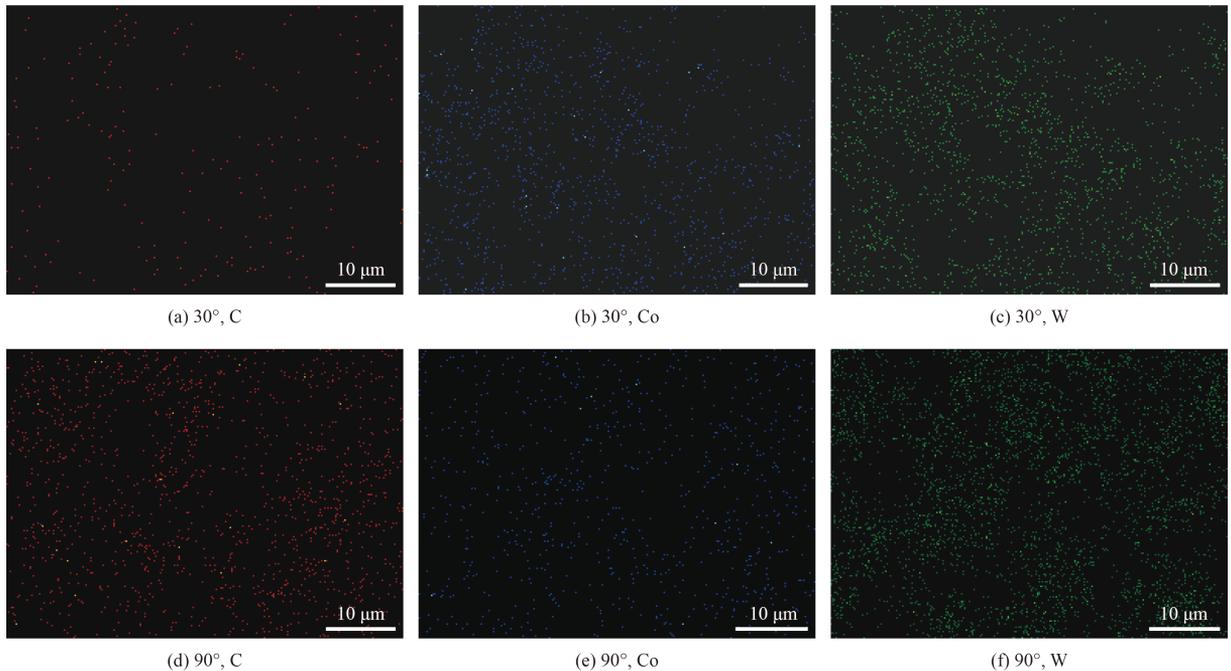


图 14 冲蚀表面 EDS 面扫描分析

Fig. 14 EDS spectrum and elemental mapping images of coatings

4 结 论

(1) 在等离子喷涂 WC-12Co 涂层中, 喷涂距离对涂层显微组织结构及力学性能影响较大。综合比较不同喷涂的涂层组织及力学性能, 喷涂距离为 130 mm 时涂层质量较好, 喷涂距离为 120 mm 与 140 mm 时涂层质量较差。

(2) 高速飞行的高温熔融粒子在撞击基体或先沉积扁平粒子的瞬间, 具有良好的熔化和扁平状态是保证涂层质量良好的重要因素。选择合适的喷涂距离能够保证较好的粒子温度与速度的配合, 提高涂层抗冲蚀磨损能力。

(3) 冲蚀时间在 0~4 min 内, 涂层冲蚀磨损量增长较快, 8 min 以后磨损量缓慢增长。涂层抗冲蚀磨损能力主要取决于涂层孔隙率、显微硬度、韧性及结合强度。喷涂距离为 130 mm 时涂层的抗气固两相流冲蚀磨损能力更好。550 μm (30 目) 沙粒对涂层冲蚀磨损量最大, 270 μm (50 目) 与 212 μm (70 目) 沙粒对涂层冲蚀量基本一致; 随着沙粒速度增大, 磨损量逐渐增大。

(4) 在冲蚀角为 60° 时冲蚀磨损量最大, 90° 次之, 小角度 30° 冲蚀磨损量最小; 在小角度 30° 冲蚀时, 微观切削、犁沟变形和微观疲劳剥落是冲蚀磨损的特征, 涂层具有较好的抗塑性冲蚀磨损能力; 在大角度 90° 时, 疲劳剥落为主要特征, 涂层有较好的抗脆性冲蚀磨损性能。

参考文献

- [1] 安连彤, 孙成琪, 高阳. 电弧电压对低能等离子喷涂 WC-Co 涂层组织及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 111-117.
AN L T, SUN C Q, GAO Y. Effects of arc voltage on microstructure and properties of WC-Co coatings prepared by low power plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 111-117 (in Chinese).
- [2] 刘延宽, 王志平, 丁坤英. WC-17Co 粉末尺寸对粒子飞行状态与涂层性能的影响分析[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 76-81.
LIU Y K, WANG Z P, DING K Y. Effect of particle size on the in-flight characteristics and the WC-17Co coating properties[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 76-81 (in Chinese).
- [3] 韩志海, 王海军, 白宇, 等. 喷涂粒子在等离子体射流中的加热历程及熔化状态研究[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(2): 35-43.
HAN Z H, WANG H J, BAI Y, et al. The study of heat process and molten state of sprayed particles in plasma jet[J].

Thermal Spray Technology, 2012, 4(2): 35-43 (in Chinese).

- [4] 文魁, 刘敏, 余志明, 等. 喷嘴形状对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-3TiO}_2$ 粒子扁平化及其涂层性能的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 49-55.
WEN K, LIU M, YU Z M. Influence of the type of nozzle on particle flattening and coating[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(4): 49-55 (in Chinese).
- [5] 文魁. 大气等离子喷涂飞行粒子与涂层性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 31-50.
WEN K. The study of particle and coating properties by atmospheric plasma spraying[D]. Changsha: China South University, 2012: 31-50 (in Chinese).
- [6] BONACHE V, SALVADOR M D, GARCIA J C, et al. Study of erosion behaviour of conventional and nanostructured WC-12Co coatings sprayed by atmospheric plasma[J]. Key Engineering Materials, 2010, 867(423): 35-40.
- [7] 王海军, 蔡江, 韩志海. 超音速等离子与 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层的冲蚀磨损性能研究[J]. 材料工程, 2005(4): 50-54.
WANG H J, CAI J, HAN Z H. Study on erosion wear of WC-Co coatings prepared by supersonic plasma spray and HVOF spray[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(4): 50-54 (in Chinese).
- [8] 李阳, 刘阳, 段德莉, 等. HVOF 热喷 WC-Co-Cr 涂层在不同攻角下的料浆冲蚀行为[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 11-18.
LI Y, LIU Y, DUAN D L. Slurry erosion behavior of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings at different impingement angle[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(6): 11-18 (in Chinese).
- [9] 傅迎庆, 周峰, 高阳, 等. 等离子喷涂 WC-Co 的微观组织及硬度[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 731-734.
FU Y Q, ZHOU F, GAO Y, et al. Microstructure and hardness properties of low power plasma sprayed WC-Co cermet coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 731-734 (in Chinese).
- [10] 周伍喜, 李玉玺, 李松林, 等. 喷涂距离对超音速火焰喷涂 WC10Co4Cr 涂层沉积效率及耐磨粒磨损性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(2): 217-223.
ZHOU W X, LI Y X, LI S L, et al. Effect of spray distance on deposition efficiency and abrasive wear properties of WC10Co4Cr coating sprayed by high velocity oxygen fuel spray[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 18(2): 217-223 (in Chinese).
- [11] 郭华锋, 田宗军, 黄因慧. 等离子喷涂 WC-12Co/NiCrAl 复合涂层的摩擦磨损特性[J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 33-39.
GUO H F, TIAN Z J, HUANG Y H. Tribological properties of WC-12Co/NiCrAl composite coating prepared by plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(1): 33-39

- (in Chinese).
- [12] FENG W R, ZHOU H. Spraying distance dependence of microhardness on HVOF WC-Co coatings[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1335(291): 113-116.
- [13] WANG L J, CHEN H, LIU Y, et al. Effects of Cr on microstructure and hardness of HVOF-sprayed WC-Co coating[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1380(317): 301-306.
- [14] 马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. *兰州理工大学学报*, 2005, 31(1): 21-25.
MA Y, REN J, LI Y D, et al. Development of research on erosion of materials[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2005, 31(1): 21-25 (in Chinese).
- [15] ROY M. Solid particle erosion behavior of WC coating obtained by electrospark technique and detonation spraying[J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(6): 1028-1036.
- [16] SANTANA Y Y, LA B S, BENCOMO A, et al. Influence of mechanical properties of tungsten carbide-cobalt thermal spray coatings on their solid particle erosion behaviour[J]. *Surface Engineering*, 2012, 28(4): 237-243.
- [17] LIU Y, HANG Z, CHEN H, et al. Erosion-corrosion property of CeO₂-modified HVOF WC-Co coating[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(4): 815-822.
- [18] WANG G, XING C, TAO F, et al. Enhancement in the corrosion resistance of WC coatings by adding a Fe-based alloy in simulated seawater[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 305(15): 62-66.
- [19] GENG Z, LI S, Duan D L. Wear behavior of WC-Co HVOF coatings at different temperatures in air and argon[J]. *Wear*, 2015, 330-331: 348-353.
- [20] SURESH BABU P, BIKRAMJIT B, SUNDARARAJAN G. The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings[J]. *Wear*, 2011, 270(11-12): 903-913.
- [21] KONG D J, SHENG T Y. Wear behaviors of HVOF sprayed WC-12Co coatings by laser remelting under lubricated condition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 86-91.

(责任编辑: 王文宇)

• 本刊讯 •

ITSC 2018 国际热喷涂大会暨展览会将在美国奥兰多举行

由美国金属学会-热喷涂学会 (ASM International-TSS), 国际焊接研究所 iiw 和德国焊接学会-DVS 联合主办的 ITSC 2018 国际热喷涂大会暨展览会将于 2018 年 5 月 7-10 日在美国奥兰多举行, 同期举办 2018 航空航天材料暨展览会。

论文征集主题包括: 基本原理/研发、热喷涂应用、用于航空航天工业的先进涂层 (与 AeroMat 航材联合专题研讨会)。请登录 www.asminternational.org/itsc, 在线提交。初稿提交截止日期: 2017 年 12 月 31 日终稿 (PDF 格式), 提交截止日期: 2018 年 2 月 28 日。论文摘要 (用英文书写), 并提供有关作者和联名作者的必要信息。

第七届年度欧瑞康-美科年轻专业人才选拔与资助 ITSC2018 和 Orelikon Metco 年轻专业人才选拔与资助将在 2018 年 4 类专题论文集范围内遴选。

联系电话: 440-338-5422; E-mail: christina.sandoval@asminternational.org

(本刊编辑部 供稿)