

等离子喷涂 WC-12Co 涂层抗冲刷磨损行为

梁存光, 李新梅, 张鹏飞

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: **目的** 探索 WC-12Co 复合涂层抗冲刷磨损的能力。**方法** 采用大气等离子喷涂 (APS) 方法在 Q235 钢基体上制备 WC-12Co 复合涂层。用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和能谱仪 (EDS), 对涂层微观形貌和相组成及成分进行分析。采用维氏显微硬度计表征了涂层的力学性能。采用自制的干砂型常温冲刷磨损试验机对涂层进行冲刷磨损实验。**结果** 所制备的涂层主要由 WC 以及少量的 W_2C 、 Co_3W_3C 和 Co_6W_6C 相组成。涂层以机械结合方式为主, 同时伴有微冶金结合。截面显微硬度高于粘结层, 其截面平均显微硬度为 $1169HV_{0.05}$ 。WC-12Co 涂层厚度为 $300\ \mu m$, 粘结层厚度为 $50\ \mu m$ 。在冲刷角为 60° 时涂层失重率最大, 为 $0.4788\ mg/g$; 在 30° 时涂层失重率最小, 为 $0.3696\ mg/g$ 。**结论** 在小角度 30° 冲刷时, 具有较好的抗塑性冲刷磨损能力; 在冲刷角为 60° 时出现最大的冲刷失重率, 抗冲刷磨损效果较差; 在大角度 90° 时, 有一定的抗脆性冲刷磨损性能。

关键词: 等离子喷涂; WC-12Co 涂层; 冲刷磨损; 显微硬度; 脱碳; 截面形貌

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0007-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.002

Erosion Wear Behavior of WC-12Co Coatings Prepared by APS

LIANG Cun-guang, LI Xin-mei, ZHANG Peng-fei

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

ABSTRACT: To study the erosion wear resistance of WC-12Co composite coatings. in this paper, WC-12Co composite coatings was prepared on Q235 steel substrate by atmospheric plasma spraying (APS) method. The microstructure, phase composition and erosion wear behavior of the obtained coatings were studied by using a variety of analytical techniques, such as XRD, SEM, EDS and self-made dry sand erosion wear tester. The mechanical properties of the coating were characterized by the Vivotorinox microhardness tester. showed that the coatings was mainly composed of WC, and a small amount of W_2C , Co_3W_3C and Co_6W_6C phase. The coatings was about $300\ \mu m$ thick, the bonding coatings was about $50\ \mu m$ thick, and the cross-sectional microhardness was $1169HV_{0.05}$ at a load of $0.5\ N$. The maximum mass loss of the coating is $0.4788\ mg/g$ at 60° degrees, and the minimum mass loss of the coating is about $0.3696\ mg/g$ at 30° degrees. the wear loss firstly increase then decrease with the growth of the erosion angle, and amounted to the maximum value when the erosion angle was 60° . The coatings mainly subjected to plastic wear at the small angle (30°) while it subjected to brittle one at the large angle (90°).

KEY WORDS: atmospheric plasma spraying; WC-12Co composite coating; erosion wear; micro-hardness; decarbonization; cross-sectional images

收稿日期: 2017-03-15; 修订日期: 2017-04-16

Received: 2017-03-15; Revised: 2017-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51561029)

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

作者简介: 梁存光 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LIANG Cun-guang (1991—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 李新梅 (1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面改性技术应用。

Corresponding author: LI Xin-mei (1971—), Female, Doctor, Professor, Research focus: application of material surface modification technology.

WC-Co 硬质合金具有高硬度、高强度和极好的耐磨性,已经被广泛应用于各种切削刀具、钻井钻头、采矿工具及其他各种机械耐磨零件^[1]。等离子喷涂制备的涂层中,WC 作为硬质相有很高的热硬性和优良的耐磨性能,Co 为粘结相,对 WC 具有很好的润湿性并使涂层具有较好的强度和韧性^[2]。由于 WC-Co 材料资源稀缺,若零部件整体采用 WC-Co 材料,价格十分昂贵^[3]。可以采用材料表面技术在普通材料表面制备 WC-Co 复合涂层,从而得到综合性能完好、价格便宜的复合材料^[4]。近年来的研究表明,热喷涂涂层在各行各业中的应用日趋广泛,但是服役期间的磨损和剥落仍是涂层失效的主要形式^[5]。而涂层的磨损和剥落失效涉及因素很多,许多因素都与涂层的力学性能有关。

冲刷磨损是指流体或带有磨蚀性固体颗粒的流体束,以一定的速度和角度对材料表面进行冲击所造成的磨损^[6]。在实际生产中,冲刷磨损在很大程度上导致设备失效和材料破坏,并且每年由于冲刷磨损造成了巨大的能源和材料的消耗和浪费。采用表面工程技术,特别是等离子喷涂技术对易磨损部件的表面或局部进行防护,可以显著提高材料的使用寿命,降低成本,节约能源^[7]。等离子喷涂制备的涂层以机械结合方式为主^[8],结合强度不高,涂层存在较大的孔隙率,容易出现氧化脱碳等问题,这些问题制约了等离子喷涂在制备 WC-Co 涂层方面的应用^[9]。文中采用大气等离子喷涂法在 Q235 钢基体上制备 WC-12Co 复合涂层,探索了涂层的力学性能及不同冲刷角度下涂层的抗冲刷磨损性能,以期为该涂层的工程应用提供实验依据和理论指导。

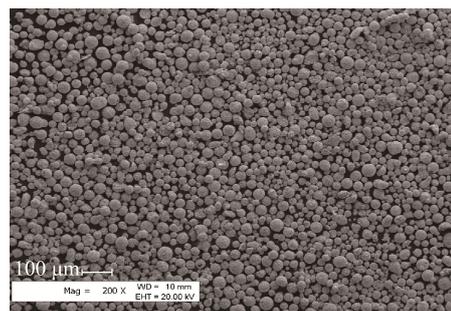
1 试验

1.1 材料

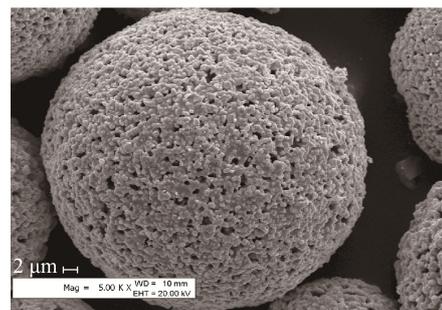
基体为 Q235 钢,尺寸 $\phi 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。粘结层选用 TiC-Ni(Al)粉末,粉末组成(质量分数)为 80%Ni+20%Al,其粒度为 61~120 μm ,流动性为 15.6 s/50 g,松装密度为 4.7 g/cm^3 ,由河北清河县艾盾喷涂焊材有限公司生产。涂层粉末 WC-12Co 粒度为 25~45 μm ,流动性为 20.1 s/50 g,松装密度为 4.4 g/cm^3 ,由北京矿冶研究总院生产。WC-12Co 粉末微观形貌如图 1 所示,粉末成分如表 1 所示。

1.2 喷涂及测试

喷涂前将基体表面打磨平整,超声波清洗净化 30 min,清除油污及铁锈,然后采用粒径为 0.5~1.0 mm 的棕刚玉喷砂粗化处理,喷砂粗化完毕后,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豪纳米



a 低倍



b 高倍

图 1 WC-12Co 粉末的微观形貌照片

Fig.1 Micro-structure of WC-12Co powder

表 1 WC-Co 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of WC-Co wt%

Material	Co	C	Fe	W
WC-12Co	12.1	5.5	1.0	81.4

材料喷涂有限公司所生产的 DH-2080 型等离子喷涂系统。喷砂及等离子喷涂实验参数如表 2 所示。

采用 LED-1430VP 型扫描电子显微镜观察涂层表面及截面形貌。涂层物相成分测定采用德国 BRUKER 公司生产的 D&Advance 型号衍射仪,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($^{\circ}$)/min,扫描范围为 20 $^{\circ}$ ~80 $^{\circ}$,步长为 0.02 $^{\circ}$ 。涂层成分测定采用 OXFORD-2000 型能谱仪。采用 HXD-1000TB 型视频显微硬度计对涂层截面进行显微硬度测定,从涂层表面至基体每隔 0.05 mm 取点,每个点测量 5 次取平均值,载荷为 5 N,加载时间为 15 s。

表 2 喷砂和等离子喷涂工艺参数

Tab.2 Parameters of grit-blasting and spraying

Process	Parameters	Values
Grit-blasting	Air pressure/MPa	0.7
	Blasting distance/mm	200
	Blasting angle/($^{\circ}$)	90
APS	Current/A	350
	Spray distance/mm	110
	Gun traverse speed/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	60
	Powder feeder rate/($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	60
	Argon volume flow/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	2500
	Hydrogen volume flow/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	100

冲刷磨损实验采用自制的干砂型常温冲刷磨损试验机进行，其工作原理如图 2 所示。采用空压机的压缩空气带动喷砂冲刷粒子喷射到基体表面，实现对基体试样的冲击。冲刷条件为常温大气环境，选用棕刚玉磨料，显微硬度 2000~2200 kg/mm²，粒径 45~75 μm，调节调压阀压力控制气流速度，冲刷角度（0°~90°）利用自制的冲刷夹具进行调节。采用精度为 0.1 mg 的 FA2004 电子天平称量试样的冲刷磨损失重。

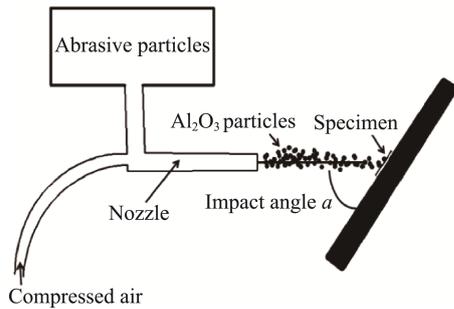


图 2 冲刷试验示意图
Fig.2 Schematic diagram of erosion tester

2 结果与讨论

2.1 涂层 X 射线衍射分析

图 3 为原始粉末 XRD 图谱，图 4 为 WC-12Co 涂层的 XRD 图谱，通过比较图 3 和图 4 可以看出，在 WC-12Co 涂层中，除了 WC 相之外，有部分 W₂C 和 Co₃W₃C 生成，还生成少量的 Co₆W₆C 相。通过 XRD 图谱比较发现，涂层中，Co 峰（2θ=44°，d=0.205 nm）出现左移和不同程度的宽化，表明粒子在飞行过程中，部分 WC 分解成 W 原子和 C 原子溶解到 Co 中，导致原子来不及析出，形成固溶体使得晶面间距变大，峰的位置发生偏移。WC 的分解氧化给涂层性能带来极大影响，WC 的轻微脱碳，只生成 W₂C 相，当脱碳严重时会有单质 W。在该参数下没有发现单质 W 的出现，通过 XRD 图谱可以看到只有极少量 Co₃W₃C 和 Co₆W₆C 非晶相。

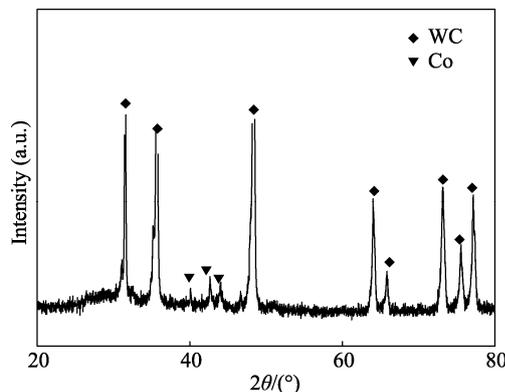


图 3 WC-12Co 粉末 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of WC-12Co powder

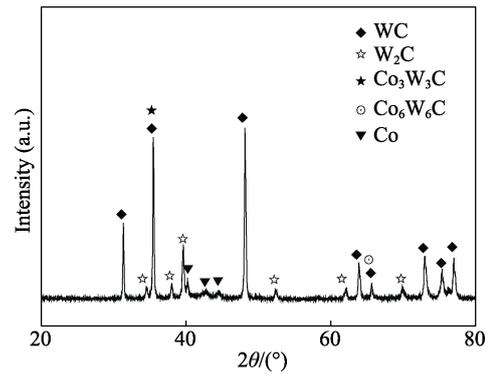
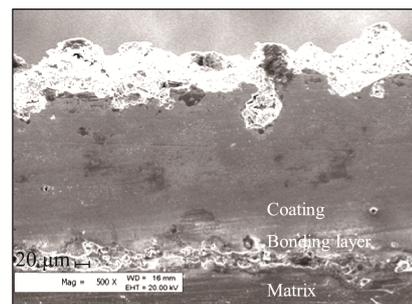


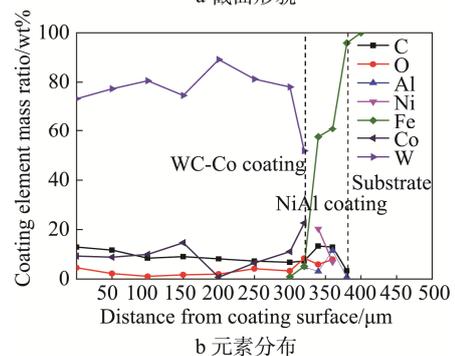
图 4 WC-12Co 涂层 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of WC-12Co coating

2.2 涂层截面显微组织分析

图 5 为 WC-12Co 涂层截面 SEM 形貌，可见基体、粘结层与涂层之间明显分层现象，WC-12Co 涂层厚度约为 300 μm，粘结层厚度约为 50 μm。结合界面清晰可见，界线平整有一定的起伏，形成锯齿状的互锁现象。从涂层截面元素含量随距离表面距离的变化曲线可以看出各元素分布的不同位置，在距离约 300 μm 以内时，C、Co 的含量（质量分数，全文同）在 10% 左右波动，涂层中 W 含量比较高，在 51.82%~89.16% 范围内，出现了微量的 Fe，含量仅为 0.91%。随着距离逐渐增大，W 元素消失，Fe 含量不断增大，在约 380 μm 处达到 95.83%，随后直至 100%，说明位置到达基体内部。其中，在约 300 μm 处出现 Al（含量 4.81%），随着距离的增大，含量先增大后减小并逐渐消失，在约 380 μm 处 Al 含量仅为 0.81%，同时 Ni 元素在这中间波动出现。



a 截面形貌

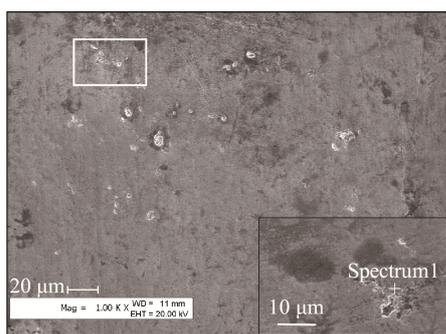


b 元素分布

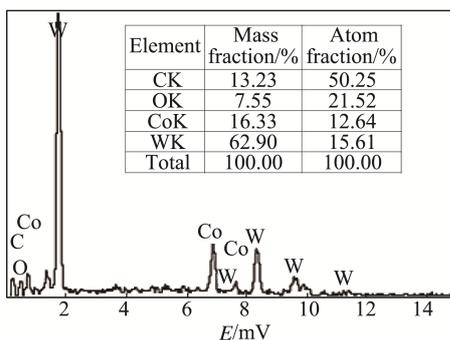
图 5 涂层截面形貌及对应位置的元素分布

Fig.5 Cross-sectional SEM images of coating and elements distribution of the corresponding position

由上述分析可知,金属元素W、Co、Fe、Ni、Al和非金属元素C存在不同程度的扩散现象,在基体、粘结层和涂层之间存在着一定的冶金结合方式。图6为WC-12Co涂层局部SEM形貌,涂层局部区域存在少量孔隙。对WC-12Co涂层截面处区域进行EDS分析,结果显示该区域中Co质量分数为16.33%,只有W和C、Co元素存在,白色组织为富Co区域,涂层组织分布不均匀。金属Co起到了浸润WC与其周围钴基合金结晶相的作用,可以改善WC与其周围金属结晶相的结合状态。



a 截面形貌



b 能谱图 (Spectrum 1)

图6 WC-12Co涂层截面形貌及能谱图

Fig.6 Cross-sectional SEM images of WC-12Co coating and EDS analysis

2.3 涂层力学性能测试

图7为涂层截面显微硬度变化曲线,可以看出涂层硬度明显高于基体,截面显微硬度值随着距涂层表

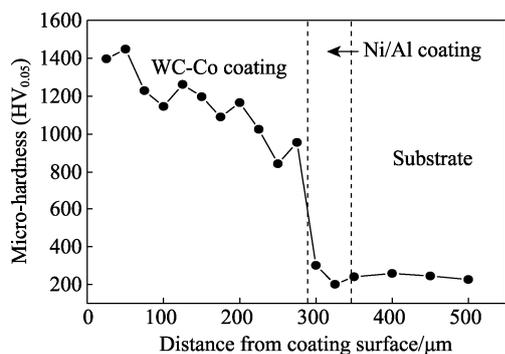


图7 涂层截面显微硬度变化曲线
Fig.7 Micro-hardness of cross section

面距离的增大而不断变小,WC-12Co涂层的截面平均硬度为1169HV_{0.05},涂层显微硬度值存在较大的波动。涂层中的粘结相Co和陶瓷硬质相WC分布不均匀及涂层致密性差异,是造成涂层硬度出现波动的主要原因。在距离300~350 μm之间,硬度值低且变化较大,原因是粘结层硬度较低,与WC-12Co涂层硬度相差较大,当距离到达350 μm以后时,硬度值趋近于稳定,与基体相当。

2.4 冲刷磨损机理探究

图8为不同冲刷角下WC-12Co复合涂层的失重率,可以看出随着冲刷角度的不断增大,涂层失重率表现出先增大后减小的趋势,在冲刷角为60°时,涂层失重率最大,为0.4788 mg/g;在30°时,涂层失重率最小,为0.3696 mg/g。

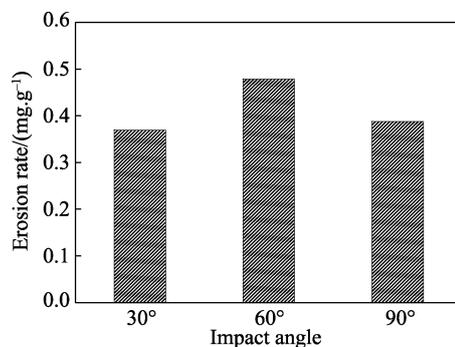


图8 不同冲刷角下WC-12Co复合涂层的冲刷率

Fig.8 Erosion rate of WC-12Co composite coating of different erosion angles

图9a为未冲刷涂层的表面形貌,可以看出涂层表面均匀,高温熔融的粉末高速撞击基体后,扁平化程度适中,凝固后堆叠在一起成层片状,粒子边缘有较好的铺展浸润效果,没有出现大量的凹坑,颗粒飞溅现象不明显,孔隙较小,涂层比较致密。由30°冲刷角下的冲刷磨损形貌(图9b)可以看出,与图9a相比,涂层表面的冲刷坑及硬质相剥落坑较多,部分区域有变形犁沟出现,凹坑内存在部分细小未熔合的WC颗粒,涂层表面受棕刚玉磨粒冲刷剥离,而使得层片状脱落痕迹较为明显。微观切削、犁沟变形和微观疲劳剥落是30°冲刷角下的冲刷磨损特征^[10]。由60°冲刷角下的冲刷磨损形貌(图9c)可以看出,涂层中小型凹陷增多,出现犁沟变形脊与扩展裂纹,嵌入涂层表面的残留磨粒增多。通过对局部的EDS(图9e)分析发现,涂层表面嵌入的颗粒物质是棕刚玉磨粒。在大冲击角(90°)作用下,涂层主要受到磨粒锤击作用的影响,没有明显的切削痕迹,但有显著的层状剥落痕迹及冲刷凹坑^[11]。在该冲刷角下,涂层主要表现为疲劳剥落特征^[12]。

文献[13]中,90°冲刷角下的失重率高于冲刷角为30°的失重率,与本文表现一致。通过对涂层的XRD

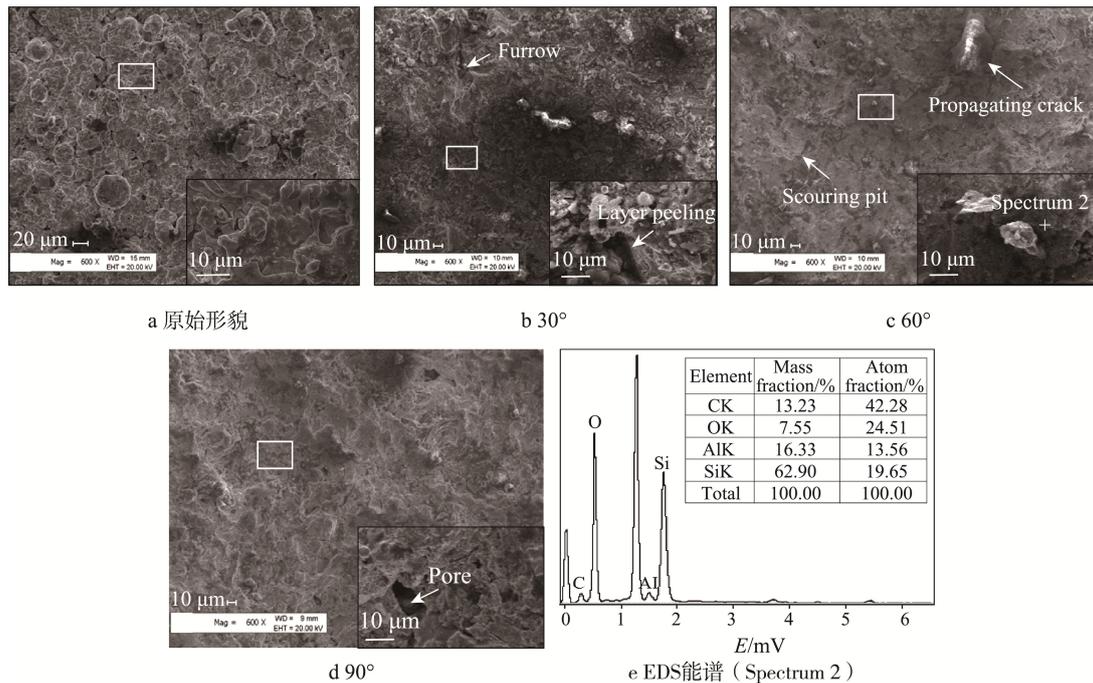


图 9 不同角度冲刷后涂层表面的冲刷磨损 SEM 形貌及能谱图

Fig.9 Erosion-corrosion morphology and EDS analysis of the coating under different impact angles

分析得到,涂层主要由 WC 及少量 W_2C 相组成。 W_2C 相硬度比 WC 相高^[14],由于等离子喷涂过程中温度较高,使 WC 发生氧化脱碳,产生的 W_2C 相提高了涂层的硬度,在一定范围内提高了涂层的抗冲刷磨损能力。同时还有极少量的 Co_3W_3C 和 Co_6W_6C 非晶相产生,非晶相的产生降低了涂层中 Co 对 WC 相的浸润作用,不利于提高涂层的抗冲刷磨损性能^[15]。这进一步说明分解氧化程度越高,涂层脱碳及氧化物夹杂越多,涂层致密性差,硬度降低,耐磨性能越差。通过对涂层截面硬度的比较发现,涂层截面处的硬度变化较大,主要由于涂层中的粘结相 Co 和陶瓷硬质相 WC 分布不均匀造成的,与图 6 能谱图和截面 SEM 形貌表现一致。白色微型区域为富 Co 区域,这些区域不仅影响了涂层的硬度和致密性,还降低了涂层的抗冲刷磨损能力。由于 Co 相的硬度较低,很容易被高速冲击的磨粒撞击而产生冲刷坑,同样也是裂纹源的高发区^[16]。

对于小冲刷角度 (30°),多角形冲刷磨粒切向分速度对涂层进行切削,产生犁削效应,如图 9b 中看到的犁沟以及由此形成的犁沟变形脊等。而在垂直方向,磨粒对涂层产生的锤击效应较弱,冲刷角为 90° 时,锤击效应表现更突出,有显著的层状剥落痕迹及冲刷凹坑。由于 Co 的加入,增加了涂层材料的韧性,使得 WC-Co 涂层介于塑性与脆性材料之间。结合塑性冲刷理论与脆性冲刷理论^[4,17]发现,在小角度 (30°) 冲刷时,涂层具有较好的抗塑性冲刷磨损能力;而在大角度 (90°) 时,有较好的抗脆性冲刷磨损性能。涂层在图 9b 与图 9c 中都发现有扩展裂纹的出现,并

且在 60° 冲刷角下,涂层中的裂纹较长。由于 60° 冲刷角下,产生的锤击效应较 30° 更为强烈,大量粒子连续冲击下容易形成疲劳裂纹源,裂纹沿涂层内部的亚表面或界面快速向涂层内部扩展,较大锤击效应对涂层产生脉动疲劳应力,使得涂层层表面萌生微裂纹,扩展至表面或者使片状涂层剥落^[13]。图 9d 为 90° 冲刷角下的冲刷磨损形貌。在大冲击角的作用下,涂层主要受到磨粒锤击作用的影响,没有明显的切削痕迹,但有显著的层状剥落痕迹及冲刷凹坑。冲刷颗粒正面高速冲击涂层表面,受到挤压形成凹坑和突出的唇片,冲刷粒子不断对突出的片状进行捶打,使得压痕周围出现畸变层,经过严重的塑性变形之后,变形层受到破坏剥落,造成涂层磨损的质量流失,这种涂层的片状剥落使冲刷角为 90° 的失重率高于 30° 的失重率。而冲刷角为 60° 时,在切削和锤击效应的双重作用下,涂层的失重率高于 90° 和 30° 的失重率。

3 结论

1) 大气等离子喷涂 WC-12Co 涂层较为致密,表面均匀粒子边缘有较好的铺展浸润效果,没有出现大量的凹坑,颗粒飞溅现象不明显。在 WC-12Co 涂层中,有少部分的 W_2C 以及极少量的 Co_3W_3C 和 Co_6W_6C ,涂层已经出现氧化脱碳现象。

2) 在等离子喷涂过程中,等离子弧的温度较高,等离子弧向飞行粉末颗粒的热量传递快,过热 WC 颗粒在高温条件下极易氧化脱碳,并生成其他的碳化物相,温度越高,粉末高温飞行停留的时间越长,脱碳

现象越严重。

3) 在小角度 30°冲刷时, 微观切削、犁沟变形和微观疲劳剥落是冲刷磨损的特征, 具有较好的抗塑性冲刷磨损能力; 在冲刷角为 60°时, 出现最大的失重率; 在大角度 90°时, 疲劳剥落为主要特征, 有较好的抗脆性冲刷磨损性能。说明 WC-12Co 复合涂层兼具抗塑性和脆性材料的磨损特性。

参考文献:

- [1] 王文昌, 盛天原, 孔德军, 等. 等离子喷涂 WC-12Co 涂层表面-界面性能[J]. 材料热处理学报, 2015(12): 190-196.
WANG Wen-chang, SHENG Tian-yuan, KONG De-jun. Surface and Interface Properties of WC-12Co Coating by Plasma Spraying[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015(12): 190-196.
- [2] 叶雄林, 马世宁, 李长青, 等. 超音速等离子喷涂 WC/Co 纳米结构涂层性能研究[J]. 中国表面工程, 2004(1): 31-34.
YE Xiong-lin, MA Shi-ning, LI Chang-qing, et al. Study on Properties of WC/Co Nanostructured Coatings Prepared by Supersonic Plasma Spraying[J]. China Surface Engineering, 2004(1): 31-34.
- [3] 傅迎庆, 周锋, 高阳, 等. 等离子喷涂 WC-Co 涂层的微观组织及硬度[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(S2): 731-734.
FU Ying-qing, ZHOU Feng, GAO Yang, et al. Microstructure and Hardness Properties of Low Power Plasma Sprayed WC-Co Cermet Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(S2): 731-734.
- [4] 姚梦佳, 李春福, 何俊波, 等. 抗冲蚀磨损涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2015(S2): 283-286.
YAO Meng-jia, LI Chun-fu, HE Jun-bo, et al. Progresses of Anti-erosion Coatings[J]. Materials Review, 2015(S2): 283-286.
- [5] ZHAO Xiao-qin, ZHOU Hui-di, CHEN Jian-min. Comparative Study of the Friction and Wear Behavior of Plasma Sprayed Conventional and Nano Structured WC-12%Co Coatings on Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering, 2006(A 431): 290-297.
- [6] CHEN Hui, GOU Guo-qing, TU Ming-jing, et al. Characteristics of Nano Particles and Their Effect on the Formation of Nano Structures in Air Plasma Spraying WC-17Co Coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2009(203): 1785-1789.
- [7] HEYDARZADEH S M, GHADAMI F. Comparative Tribological Study of Air Plasma Sprayed WC-12%Co Coating Versus Conventional Hard Chromium Electrodeposit[J]. Tribology International, 2010, 43(5/6): 882.
- [8] BONACHE V, SALVADOR M D, GARCÍA J C, et al. Influence of Plasma Intensity on Wear and Erosion Resistance of Conventional and Nanometric WC-Co Coatings Deposited by APS[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(3): 549-559.
- [9] 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(4): 111-117.
AN Lian-tong, SUN Cheng-qi, GAO Yang. Effects of Arc Voltage on Microstructure and Properties of WC-Co Coatings Prepared by Low Power Plasma Spraying[J]. China Surface Engineering, 2016(4): 111-117.
- [10] JANA B D, STACK M M. A Note on Threshold Velocity Criteria for Modelling the Solid Particle Erosion of WC/Co MMCs[J]. Wear, 2011, 270(7): 439-445.
- [11] ANTONOV M, VEINTHAL R, YUNG D L, et al. Mapping of Impact-abrasive Wear Performance of WC-Co Cemented Carbides[J]. Wear, 2015, 332: 971-978.
- [12] YUAN J, MA C, YANG S, et al. Improving the Wear Resistance of HVOF Sprayed WC-Co Coatings by Adding Sub-micron-sized WC Particles at the Splats' Interfaces[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 285: 17-23.
- [13] 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 Hai-jun, CAI Jiang, HAN Zhi-hai. 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.
- [14] 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.
- [15] SANTANA Y Y, LABARBERA-SOSA J G, 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.
- [16] ROY M. Solid Particle Erosion Behavior of WC Coating Obtained by Electrospark Technique and Detonation Spraying[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(6): 1028-1036.
- [17] BABU P S, BASU B, SUNDARARAJAN G. The Influence of Erodent Hardness on the Erosion Behavior of Detonation Sprayed WC-12Co Coatings[J]. Wear, 2011, 270(11): 903-913.