

激光熔化沉积 WC-Co 和 WC-CoCr 涂层的耐磨耐蚀性能

李 琼¹ 张东升¹ 徐雪源¹ 李昊男²

(1. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330096; 2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘 要 采用激光熔化沉积技术在 30CrMnSiNi2A 表面制备了 WC-Co 和 WC-CoCr 涂层, 利用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS)、维氏显微硬度计、摩擦磨损试验机和电化学工作站等对涂层的物相组成、微观组织、成分分布、力学性能及耐蚀性能进行分析。结果表明, WC-Co 和 WC-CoCr 涂层内均析出 M_3W_3C ($M=Co, Fe$) 相, 前者为树枝状, 后者呈网络状。WC-CoCr 涂层具有更好的耐磨耐蚀性能, 主要原因为涂层更致密、网络状结构的 M_3W_3C 能有效阻碍位错运动, 添加 Cr 元素使得电化学腐蚀过程中形成含 Cr_2O_3 的致密钝化膜。

关键词 激光熔化沉积; WC-CoCr 涂层; 耐磨性能; 耐蚀性能

中图分类号 TB333; TG335.86

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250138

Wear and Corrosion Resistance of WC-Co and WC-CoCr Coatings Manufactured by Laser Melting Deposition

LI Qiong¹, ZHANG Dongsheng¹, XU Xueyuan¹, LI Haonan²

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330096; 2. School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: WC-Co and WC-CoCr coatings were manufactured on 30CrMnSiNi2A by laser melting deposition. The phase composition, microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of coatings were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), hardness tester, tribometer and electrochemical workstation. The results indicate that M_3W_3C ($M=Co, Fe$) phase is precipitated in both of WC-Co and WC-CoCr coatings, where the former is dendritic and the latter is network. WC-CoCr coating exhibits the satisfied wear and corrosion resistance. The main reason is that the compact coating and network-like M_3W_3C can effectively inhibit dislocation movement, and Cr addition enables the formation of a dense Cr_2O_3 -containing passive film during the electrochemical corrosion.

Key Words: Laser Melting Deposition, WC-CoCr Coating, Wear Resistance, Corrosion Resistance

30CrMnSiNi2A 是一种高强度马氏体钢, 因其综合力学性能较好, 常用作飞机起落架、直升机尾轴、发动机外壳等航空航天零件, 而国防需求的发展对飞机适海性要求也越来越高^[1-2]。在海洋环境下, 飞机零部件需具备优异的耐磨耐蚀性, 目前多采用电镀硬铬作为防护镀层。但电镀硬铬技术存在 Cr^{6+} 有剧毒、镀层内微裂纹不可避免、工艺慢和镀层修复性差等问题^[3], 因此亟需寻找一种新的耐磨、耐蚀涂层。

WC-Co 金属陶瓷具有高的硬度和优良的耐磨性被广泛应用, 而在粘接相中添加 Cr 能够提高涂层致密性, 显著提高 WC 金属陶瓷的耐蚀性能^[4]。目前 WC-

CoCr 涂层常用热喷涂技术, 如超音速火焰喷涂 (HVOF)^[5-6]、等离子喷涂 (APS)^[7] 等, 其制备的涂层耐磨耐蚀性能已经超过传统硬铬镀层, 但涂层还存在内部含有气孔、与基体结合强度低等问题^[8-9]。PICAS J A 等^[10] 使用 HVOF 技术制备了低气孔率 ($<1\%$) 的 WC-CoCr 金属陶瓷层, 在电化学试验中, 气孔等缺陷是腐蚀萌生和扩展的重要位置。另外, OZKAVAK H V 等^[11] 报道了 WC-Co 金属陶瓷层在磨损过程中裂纹源往往出现在气孔等缺陷处。

基于此, 亟需探索应用典型的 WC-CoCr 粉末实现致密无孔隙涂层的制备方法。激光增材制造 (LAM) 采

收稿日期: 2025-03-26; 修订日期: 2025-06-24

基金项目: 江西省航空材料表面技术工程中心开放基金资助项目 (EB202301429)

第一作者: 李琼, 女, 1986 年出生, 高级工程师, E-mail: 419775952@qq.com

引用格式: 李琼, 张东升, 徐雪源, 等. 激光熔化沉积 WC-Co 和 WC-CoCr 涂层的耐磨耐蚀性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 694-699.

LI Q, ZHANG D S, XU X Y, et al. Wear and corrosion resistance of WC-Co and WC-CoCr coatings manufactured by laser melting deposition [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 694-699.

用高精度逐点扫描、逐行堆积、逐层成型的加工方式,可实现复杂构件的快速成形。得益于其极高的冷却速率,该工艺制备的复合材料在成分分布均匀性、晶粒细化程度及相结构尺寸控制等方面,较传统冶金合金具有显著优势^[12-13],能够获得卓越性能的金属陶瓷层。LIU S F 等^[14]利用激光选区熔化(SLM)制备了致密的 WC-Co 增强的 GCr15 轴承钢,WC-Co 颗粒和基体之间具有良好的界面反应,陶瓷相的引入使轴承钢硬度及耐磨性大幅提升。田宪华等^[15]利用激光熔覆技术在 45 钢表面制备了 WC-CoCr 涂层,WC 颗粒在熔池中通过形成硬质碳化物($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 和 W_2C)有效减少了涂层的氧化磨损和粘着磨损,显著增强了涂层的耐磨性能。激光熔化沉积(LMD)是以同轴送粉为技术特征的激光增材制造技术,粉末由保护气通过同轴和异轴进料喷嘴直接输送至激光熔池,大幅提高了粉末利用率^[16]。因此,使用 LMD 工艺有望获得具有优异耐磨耐蚀性的 WC 金属陶瓷层。

LMD 过程中, Cr_2O_3 的结合自由能小于 CO/CO_2 的结合自由能,导致碳氧化物含量降低,因此 Cr 的添加有望提高涂层的致密性^[17]。本研究通过激光熔化沉积技术制备 WC-Co 和 WC-CoCr 涂层,观察涂层微观结构,测试涂层的耐磨性和耐蚀性,并与硬铬镀层性能比较,以期 LMDWC-CoCr 涂层取代电镀硬铬层提供参考。

1 试验材料及方法

基体材质为 30CrMnSiNi2A,其成分见表 1。选用 WC-Co 和 WC-CoCr 球形粉末为原材料,粉末质量分数 $\geq 99.99\%$,含氧量 $\leq 0.015\%$,粉末实际成分见表 2。

表 1 30CrMnSiNi2A 基板的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 30CrMnSiNi2A steel substrate

w _B							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Fe
0.27~0.34	0.90~1.20	1.00~1.30	≤ 0.020	≤ 0.020	0.90~1.20	1.40~1.80	余量

表 2 WC-Co 和 WC-CoCr 粉末的化学成分

Tab.2 Chemical composition of WC-Co and WC-CoCr powders

合金	w _B		
	Co	Cr	W
WC-Co	11.88	0	88.12
WC-CoCr	9.74	3.89	86.37

采用 LDM8060 型激光熔化沉积设备,激光功率为 1 000 W,扫描速度为 1 000 mm/min,扫描间距为 1 mm,保护气流量为 17 L/min。对于 WC-Co 涂层,送粉盘转速为 0.14 r/min,送粉保护气流量为 8 L/min,光

斑直径为 2.5 mm;对于 WC-CoCr 涂层,送粉盘转速为 0.12 r/min,送粉保护气流量为 7 L/min,光斑直径为 2 mm。沉积后试样尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm。使用电火花数控机床将试样进一步切割成 5 mm×5 mm×3 mm 的试样块。用金刚石砂纸将小试样块打磨至 2 000 目并使用金刚石悬浮液进行镜面抛光。采用 D8 advanced-A25 X 射线衍射(XRD)仪对磨抛后的涂层表面进行物相分析,采用 Cu K α_1 靶材,扫描步长为 0.02°,扫描范围为 20°~80°,扫描速率为 5 (°)/min。采用 Nova Nano SEM450 场发射扫描电镜(SEM)对试样截面进行显微组织观察,并使用其配备的能量色散 X 射线能谱分析仪对试样进行成分分析。使用 HVD-10AP 数显显微维氏硬度计对涂层进行显微硬度测试,载荷为 9.8 N,保荷时间为 15 s,每个涂层测试 10 次并取其平均值误差。采用 HT-1000 高温摩擦磨损试验机测试涂层室温耐磨性能,摩擦副为 $\phi 5$ mm 的 ZrO_2 球,载荷为 20 N,摩擦副转速为 500 r/min,磨损时间为 60 min。用粗糙度轮廓仪(JB-6C)测量磨损后涂层剖面轮廓,计算比磨损率,绘制误差棒。采用 CS 系列电化学工作站(恒电位/恒电流仪)进行电化学试验,辅助电极为铂片,参比电极为饱和甘汞电极,工作电极为测试涂层,在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液环境中进行。开路电位(OCP)测试时间为 1 800 s(如果电位没达到稳定仍需继续测试),采样频率为 5 Hz(0.1 s),涂层露出面积为 0.49 cm²;电化学阻抗光谱(EIS)测试的频率范围为 100 kHz~1 mHz,在开路电位附近施加 5 mV (rms) 的正弦波。动电位极化测试的初始电位设为开路电位以下 0.25 V,正向扫描速度为 1 mV/s,频率为 5 Hz。当电流密度超过 10⁻⁴ A/cm 时测试自动停止。利用 Axis Ultra DLD 型 X 射线光子光谱仪(XPS)对电化学测试后两种涂层表面形成的钝化膜进行表征。

2 试验结果及分析

2.1 涂层组织结构

沉积态 WC-Co 和 WC-CoCr 涂层的 XRD 图谱见图 1。可以看出,WC-Co 和 WC-CoCr 涂层的陶瓷相为 $\text{M}_3\text{W}_3\text{C}$ ($\text{M}=\text{Co}, \text{Fe}$)、WC 和 W_2C ,其中 $\text{M}_3\text{W}_3\text{C}$ 相含量最高,说明 WC 在熔池内脱碳形成 W_2C , W_2C 进一步脱碳向熔池中释放游离的 W 原子和 C 原子,其与涂层内的 Co 和从基体扩散至涂层内的 Fe 形成 $\text{M}_3\text{W}_3\text{C}$,而由于部分基体熔化形成熔池,导致涂层的主要金属相为 $\alpha\text{-Fe}$ 。WC-CoCr 展现出更尖锐的 $\text{M}_3\text{W}_3\text{C}$ 峰,表明其在熔池中的结晶度更好。

两种涂层的截面形貌见图 2。可以看出,WC-Co 和 WC-CoCr 涂层厚度约为 320 μm 和 230 μm 。WC-

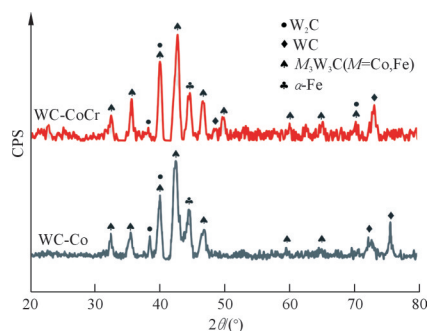


图1 WC-Co和WC-CoCr涂层的XRD图谱

Fig.1 XRD patterns of WC-Co and WC-CoCr Coatings

Co涂层存在纵向裂纹,组织分布不均匀,涂层内部随

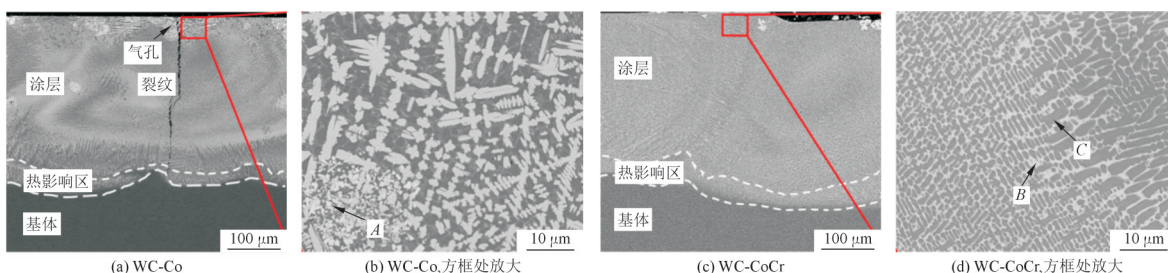


图2 两种涂层的截面形貌

Fig.2 Cross-sectional morphologies of coatings

WC-Co和WC-CoCr涂层内存在3种衬度物相,能谱结果见表3。灰色相的点A为 M_3W_3C ,黑色相的点B为Fe固溶体,白色小颗粒点C的为WC和 W_2C 。涂层成分与粉末成分存在差异的主要原因为基材被熔化导致涂层内出现大量Fe。根据WC的脱碳机制和Fe-W-C反应体系, M_3W_3C 共晶碳化物在熔池中依附WC生长,并以树枝状和网络形状析出,反应过程为^[18-20]:



表3 两种涂层截面各位置元素含量

Tab.3 Chemical compositions of coatings on two coatings at different positions %

点	x_B			
	Fe	W	Co	Cr
A	9.57	90.43	—	—
B	49.8	38.5	5.5	6.2
C	95	4.5	—	1.5

2.2 涂层显微硬度

图3为两种涂层的显微硬度。可以看出,WC-Co和WC-CoCr涂层显微硬度(HV_1)分别为902.76和943.14。WC-CoCr涂层硬度略高,这是由于Cr的添加能够降低粉末的熔点,熔池内熔化的粉末颗粒数量更多^[11],导致涂层中陶瓷相含量增加。另外, M_3W_3C ($M=Co, Fe$)网络的广泛分布,阻碍位错运动和晶界迁移,起

机分布未熔的WC颗粒,界面质量较差。这是由于金属相和陶瓷相的热膨胀系数差异较大,快速凝固导致涂层内应力较大,气孔成为裂纹的源头。涂层与基体界面处 M_3W_3C ($M=Co, Fe$)呈网状分布,而涂层顶部呈树枝状分布(见图2b),同样存在一定的开裂倾向。而WC-CoCr涂层整体具有 M_3W_3C 网络状分布特点,涂层内未熔WC较少,这类具有对称性网络状的组织结构能够很好地缓解应力集中,因此没有裂纹、气孔等微观缺陷,涂层与基体具有良好的冶金结合。图2d右侧网格尺寸偏大是由于该区域处于熔化沉积的搭接区,存在一定温度梯度,晶粒沿垂直于熔池方向向内生长。

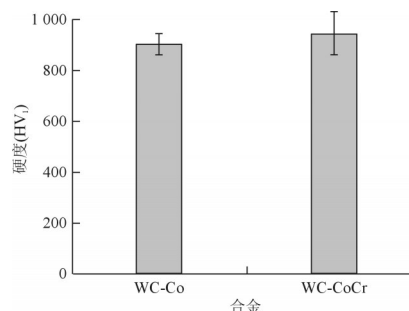


图3 两种涂层的维氏硬度

Fig.3 Vickers hardness of coatings

到强化作用。

2.3 涂层耐磨性

两种涂层对磨 ZrO_2 的摩擦因数曲线和磨损率见图4。由图4a可以看出,WC-Co和WC-CoCr涂层曲线的摩擦因数分别为0.58~0.62和0.54~0.58,WC-CoCr涂层摩擦因数始终小于WC-Co涂层。两条摩擦因数曲线的磨合阶段和稳定阶段持续相同的时间,但进入

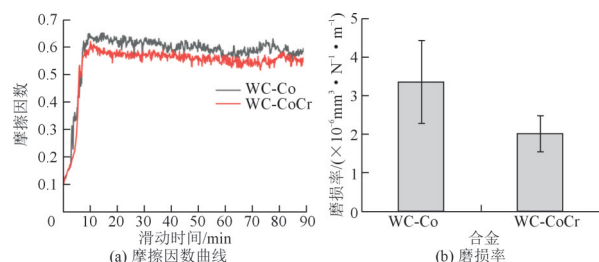


图4 两种涂层的摩擦因数曲线和磨损率

Fig.4 Friction coefficient curves and wear rates of two coatings

稳定阶段后 WC-CoCr 涂层摩擦因数的波动幅度略小于 WC-Co 涂层。说明 WC-CoCr 涂层形成的对磨层更稳定,这是由于 WC-CoCr 粉末熔点更低,组织均匀分布,陶瓷相与金属相粘附力更强,延展性基体可以更好地承受这类网络状硬质碳化物^[11]。由图 4b 可见, WC-CoCr 涂层具有更好的耐磨性能。

涂层磨损后的表面形貌见图 5。可以看出, WC-Co 和 WC-CoCr 涂层磨痕宽度分别为 1 mm 和

800 μm。图 5b 显示 WC-Co 涂层磨损表面有粗大的裂纹,这可能与涂层的致密性有关,磨损导致裂纹的延长和聚集。此外,还能观察到一些碎屑和氧化物颗粒。图 5d 显示 WC-CoCr 涂层内部的网络状组织发生轻微变形,细小网格区域塑性变形小,大网格变形程度大甚至被压缩相连。磨损表面附着的氧化物岛屿区域出现细微裂纹,说明网络内的 Fe 基相更易氧化并被磨损移除。

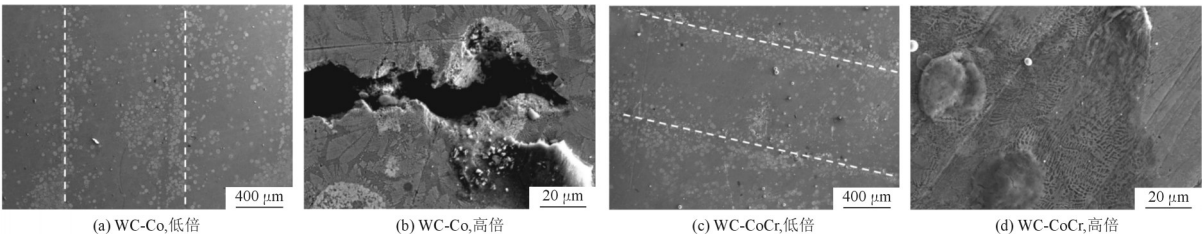


图 5 两种合金涂层的磨损形貌
Fig.5 Worn morphologies of the coatings

图 6 为 WC-Co 和 WC-CoCr 的对磨副表面形貌, EDS 结果见表 4。可以看到, WC-Co 的对磨副磨损程度更深,图 6a 中小球周围有大量裂纹,还存在材料表面剥落形成的大面积剥落坑,相比而言,图 6c 中小球周围裂纹少、剥落坑面积小。由表 4 可知,摩擦副表面检测来自涂层中的 Fe 和 W 等元素,并且区域 1 中 Fe、W 含量更高,说明相比于 WC-CoCr 涂层,WC-Co 涂层的

磨损更为严重。这是因为 WC-CoCr 涂层的致密性更好,陶瓷相均匀分布,金属相与陶瓷相间良好结合,涂层表面存在更多原位析出的 M_3W_3C ($M=Co, Fe$) 相。另外,其特殊网络状结构 M_3W_3C 类似晶界一样包裹住金属软相,能够更好地阻碍位错运动,释放内应力^[21]。当表层 M_3W_3C 被拉出或发生断裂后,下一层的 M_3W_3C 会立刻暴露出来并阻碍应力继续向下传播。

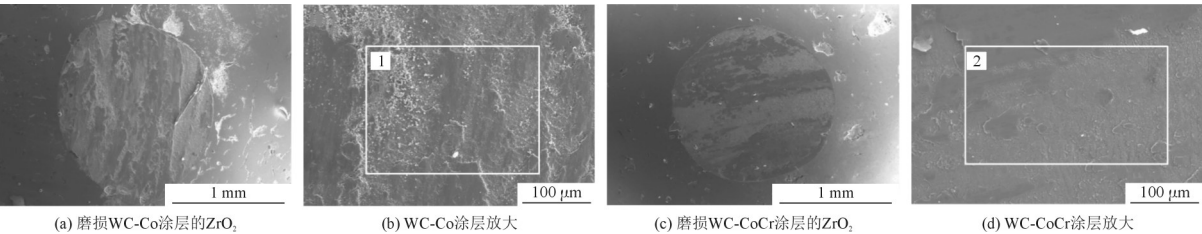


图 6 WC-Co 和 WC-CoCr 的对磨副表面形貌
Fig.6 Worn morphologies of WC-Co and WC-CoCr counterparts

表 4 摩擦副表面各位置元素含量

Tab.4 Chemical compositions of counterparts at different positions

区域	x_B				
	Fe	W	O	C	Zr
1	15.41	7.62	27.67	9.71	39.59
2	7.49	3.55	29.04	9.93	49.99

2.4 涂层耐蚀性

图 7 为两种涂层在 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学极化曲线和奈奎斯特图,图 8 为交流阻抗的 Bode 图。一般来说,自腐蚀电位反映热力学特性,用来评估腐蚀倾向,自腐蚀电流密度反应动力学特征,用来评估反应速度^[22]。图 7a 中可以看出, WC-CoCr 涂层具有更高的自腐蚀电位 (−0.64 V) 和更低的自腐蚀电流密度

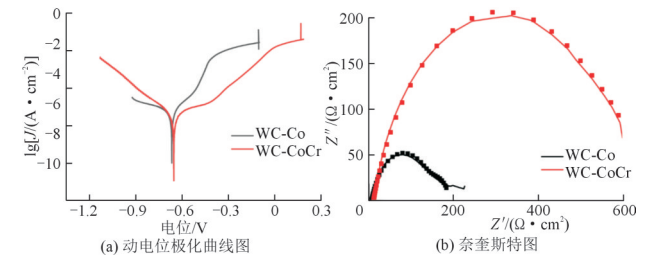


图 7 两种涂层的动电位极化曲线和奈奎斯特图
Fig.7 Potentiodynamic polarization curves and Nyquist plot of coatings

($4.04 \times 10^{-6} A/cm^2$),并且 WC-CoCr 的钝化区间更长,这是由于 Cr 的添加可以形成更为致密稳定的 Cr_2O_3 钝化膜^[23]。从图 7b 可以看出, WC-CoCr 涂层具有更大的阻抗值。由图 8 可知, WC-CoCr 涂层阻抗值始终高于 WC-Co 涂层,相位角与频率的 Bode 图显示 WC-CoCr

涂层的峰最宽,这表明 WC-CoCr 涂层具有更好的耐蚀性能^[23]。采用等效电路拟合 EIS,拟合结果见图 8a,其中 CPE₁和 CPE₂为常相位角原件, R_s 、 R_f 和 R_{ct} 分别表示溶液电阻、钝化膜电阻和电荷转移电阻,并列出了相关部件的参数,见表 5。 $R_{ct}+R_f$ 能够直观反应涂层的耐蚀

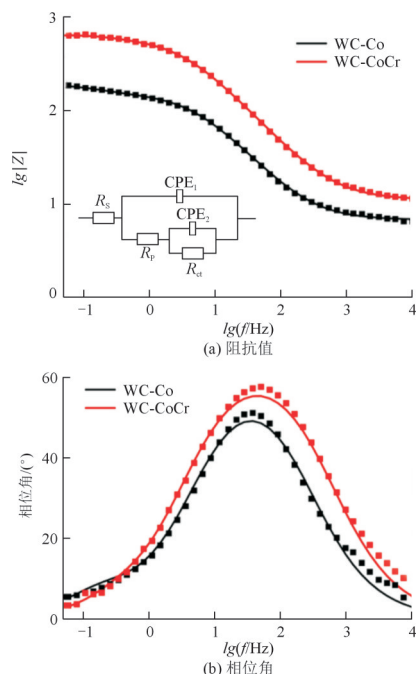


图8 WC-Co和 WC-CoCr涂层的 Bode图

Fig.8 Bode plot of WC-Co and WC-CoCr coatings

表5 WC-Co及 WC-CoCr涂层阻抗谱等效电路参数

Tab.5 Equivalent circuit parameters for impedance spectra of WC-Co and WC-CoCr coatings

合金	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Y_{01}/(\times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2})$	n_1	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Y_{02}/(\times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2})$	n_2	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
WC-Co	6.7	4.8	0.8	147.7	282.5	0.8	40
WC-CoCr	10	1.2	0.4	13.1	1.1	0.8	655.9

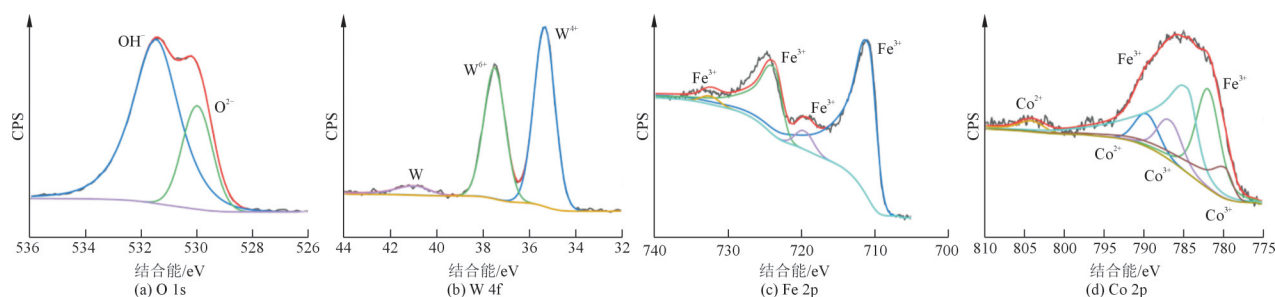


图9 WC-Co涂层的 XPS 光谱

Fig.9 XPS spectra of WC-Co coating

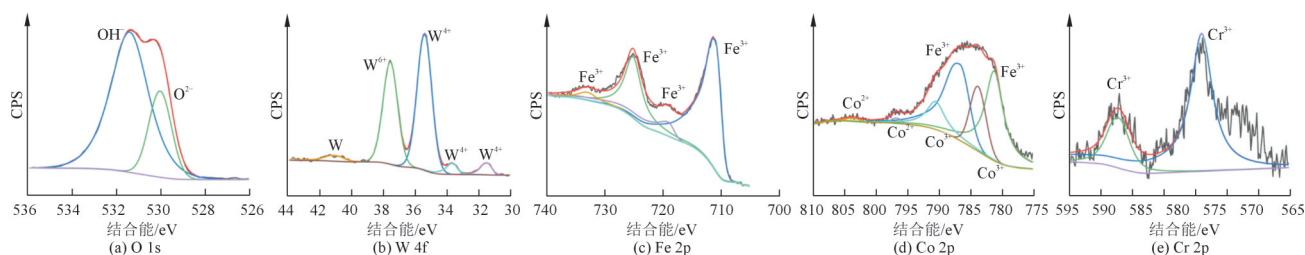


图10 WC-CoCr涂层的 XPS 光谱

Fig.10 XPS spectra of WC-CoCr coating

性能,WC-CoCr涂层的 $R_{ct}+R_f$ 明显高于 WC-Co 涂层,这与动电位极化曲线结果相一致。

两种金属陶瓷层的 XPS 结果分别见图 9 和图 10。可以看出, O 光谱均可以分峰拟合成为 O^{2-} (位于 530 eV 处)和 OH^- (位于 531.6 eV 处)的特征峰。WC-Co 涂层表面钝化膜的金属成分包括 W 4f, Fe 2p 和 Co 2p, 而 WC-CoCr 涂层所形成的钝化膜金属成分多了 Cr 2p。值得注意的是,由于钝化膜中 Co 含量较低,在 Co 特征峰附近发现了 Fe 的俄歇峰,因此 Co 2p 分峰拟合后出现 6 个特征峰。WC-Co 涂层的 W 4f 显示了 3 个峰,代表 W^{4+} , W^{6+} 和 W, 分别位于 35.3、37.5 和 40.9 eV。Fe 2p 可以在 711.5、719.8、724.2 和 732.8 eV 等 4 个位置拟合,均代表 Fe^{3+} 。Co 2p 在 780.1、787.3、790 和 804.2 eV 位置拟合 4 个峰,分别代表 Co^{3+} 和 Co^{2+} 。WC-CoCr 涂层的 W 4f 分峰拟合成 5 个峰,同样代表 W^{4+} 、 W^{6+} 和 W, 分别位于 31.5、33.6、35.5、37.6 和 41.0 eV。Fe 2p 与 Co 2p 的分峰拟合相似。Cr 2p 显示了 2 个峰代表 Cr^{3+} , 位置分别在 576.9 和 588.5 eV。这表明 WC-CoCr 涂层形成的钝化膜中存在 Cr_2O_3 , 并对耐蚀性提高起到积极作用。电化学测试结果表明, WC-CoCr 涂层具有更好的耐蚀性能,一方面 Cr 可以形成含 Cr_2O_3 保护性更好的钝化膜,另一方面 WC-CoCr 涂层致密无缺陷,腐蚀难以向内部传递^[24-25]。

3 结 论

(1) 30CrMnSiNi2A 钢表面激光熔覆沉积制备的 WC-Co 涂层顶部为树枝状的 M_3W_3C ($M=Co, Fe$) 和颗粒状 WC 弥散分布, 界面处呈网络状的 M_3W_3C ; 而 WC-CoCr 涂层为网络状 M_3W_3C 均匀分布。

(2) 相较于 WC-Co 涂层, WC-CoCr 涂层具有更好的耐磨性, 其显微硬度 (HV_1) 和比磨损率分别为 943.14 和 $2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 这归因于 WC-CoCr 涂层特殊网络状结构的 M_3W_3C 能阻碍位错运动, 起到强化作用。

(3) WC-CoCr 涂层耐蚀性优于 WC-Co 涂层, 其腐蚀电位为 -0.64 V 、腐蚀电流密度为 $4.04 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。这是因为 WC-CoCr 涂层更致密, 且添加 Cr 元素可以在电化学腐蚀过程中形成含 Cr_2O_3 的致密钝化膜。

参 考 文 献

- [1] CHEN Z X, ZHOU H M, ZHU Z M, et al. Laser cladding remanufacturing of aircraft landing gear based on 30CrMnSiNi2A steel[J]. Optik, 2023, 283: 170 902.
- [2] 陈滋鑫, 周后明, 徐采星, 等. 基于 30CrMnSiNi2A 钢的飞机起落架激光熔覆再制造[J]. 表面工程与再制造, 2021, 46(6): 45-52.
- [3] 王浩军, 胡生双, 郝江华, 等. 超音速火焰喷涂工艺代替电镀硬铬工艺的可行性研究[J]. 中国科技信息, 2020(14): 84-85.
- [4] CHO J E, HWANG S Y, KIM K Y, Corrosion behaviour of thermal sprayed WC cermet coatings having various metallic binders in strong acidic environments[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2 653-2 662.
- [5] 关远涛, 肖细军, 翟甲友, 等. A-100 钢超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层性能研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(6): 10-13.
- [6] 徐一, 于修水, 蒋穹, 等. 超音速等离子喷涂 WC10Co4Cr 涂层干湿条件下的摩擦磨损性能研究[J]. 中国钨业, 2019, 34(5): 54-58.
- [7] YAMAN B, MANDAL H. Wear performance of spark plasma sintered Co/WC and cBN/Co/WC composites[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2014, 42: 9-16.
- [8] VENTER A M, OLADIJO O P, V LUZIN L A, et al. Performance characterization of metallic substrates coated by HVOF WC-Co[J]. Thin Solid Films, 2013, 549: 330-339.
- [9] BOLELLI G, BERGER L M, BÖRNER T, et al. Tribology of HVOF- and HVOF-sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 265: 125-144.
- [10] PICAS J A, RUPÉREZ E, PUNSET M, et al. Influence of HVOF spraying parameters on the corrosion resistance of WC-CoCr coatings in strong acidic environment[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 225: 47-57.
- [11] OZKAVAK H V, SAHIN S, SARAC M F, et al. Wear properties of WC-Co and WC-CoCr coatings applied by HVOF technique on different steel substrates[J]. Materialprüfung: Werkstoffe und Bauteile, Forschung Prüfung Anwendung, 2020, 62(12): 1 235-1 242.
- [12] FRAZIER, WILLIAM E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2014, 23(6): 1 917-1 928.
- [13] LI N, LIU W, WANG Y, et al. Laser additive manufacturing on metal matrix composites: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1-16.
- [14] LIU S F, LI Y Z, WANG Y, et al. High wear resistance WC-Co reinforced GCr15 bearing steel composite prepared via selective laser melting (SLM)[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 109: 105 988.
- [15] 田宪华, 刘亚, 王磊, 等. 激光熔覆 WC/CoCr 复合涂层微观组织与耐磨性研究[J]. 科技创新导报, 2021, 36: 38-41.
- [16] GU D D, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2013, 57(3): 133-164.
- [17] KANG H W, DONG Z H, ZHANG W, et al. Laser melting deposition of a porosity-free alloy steel by application of high oxygen-containing powders mixed with Cr particles[J]. Vacuum, 2019, 159: 319-323.
- [18] YOU A P, WANG N, CHEN Y N, et al. Effect of linear energy density on microstructure and wear resistance of WC-Co-Cr composite coating by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 454: 129 185.
- [19] XIAO Q, SUN W L, YANG K X, et al. Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC-Fe composite coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 420(9): 127 341.
- [20] YANG J X, MIAO X H, WANG X B, et al. Influence of Mn additions on the microstructure and magnetic properties of FeNiCr/60% WC composite coating produced by laser cladding[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2014, 46: 58-64.
- [21] DI R F, ZHANG J Q, QIAN Z, et al. Effect of WC-12Co on the mechanical and wear performance of laser melting deposition nickel-based alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108 094.
- [22] ZHOU Z Y, CUI T Y, GUO H B, et al. Laser additively manufacturing of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNiTi}_{0.5}$ high-entropy alloys with increased resistances to corrosion 3.5% NaCl and oxidation at 1 000 °C[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58: 10 148-10 165.
- [23] 杨鹏宇, 冯光明, 李继强, 等. H13 钢激光熔覆 Fe 基涂层组织与耐蚀性能[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(5): 514 007.
- [24] LIU J, LIU H, CHEN P J, et al. Microstructural characterization and corrosion behaviour of AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 361: 63-74.
- [25] MA G L, ZHAO Y, CUI H Z, et al. Addition Al and/or Ti induced modifications of microstructures, mechanical properties, and corrosion properties in CoCrFeNi high-entropy alloy coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34: 1 087-1 102.

(编辑: 刘晨辉)