

TA15表面激光熔化沉积WC-CoCr涂层耐磨耐蚀性能研究

李旭勇¹ 黄 勇¹ 吴 宁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(LMD)技术在TA15合金上制备了WC-CoCr涂层,利用X射线衍射仪、带能谱仪的扫描电镜、显微硬度计、摩擦磨损试验机 and 电化学工作站研究了激光功率对涂层微观结构、显微硬度、耐磨性和耐蚀性的影响。结果表明,涂层中颗粒状TiC和瓣状W均匀分布,随激光功率增加,涂层中金属相含量(质量分数,下同)降低,陶瓷相含量增加。1 200 W制备的涂层具有最佳的耐磨耐蚀性能,摩擦因数为0.32,比磨损率为 $1.95 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,腐蚀电位为 -0.33 V ,腐蚀电流密度为 $9.89 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$,主要原因为涂层中陶瓷相含量最高,磨损过程中亚表层中陶瓷相和金属相的重新分布有效减轻粘着磨损,且耐腐蚀的富Ti相体积分数最高,有利于涂层在电化学腐蚀过程中形成 TiO_2 钝化保护膜。

关键词 激光熔化沉积;WC-CoCr涂层;微观组织;耐磨耐蚀性

中图分类号 V261.8;TB333;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250140

Wear and Corrosion Resistance of WC-CoCr Coatings on TA15 by Laser Melting Deposition

LI Xuyong¹, HUANG Yong¹, WU Ning¹, 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-CoCr coatings were manufactured on TA15 by laser melting deposition (LMD) technology. The effects of laser power on the microstructure, microhardness, wear resistance and corrosion resistance of the coating were investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscopy with energy spectrometer, microhardness tester, tribometer and electrochemical workstation. The results indicate that the coating is characterized by a uniform distribution of granular TiC and petal W. As laser power rises, the content of metal phase is decreased while the content of ceramic phase is increased. The coating manufactured by 1 200 W exhibits desirable wear and corrosion resistance, where the friction coefficient is 0.32, specific wear rate is $1.95 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, corrosion potential is -0.33 V , and corrosion current density is $9.89 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. During the wear process, the redistribution of ceramic and metallic phases in subsurface effectively diminishes the adhesive wear due to the highest content of ceramic phase, and the highest volume fraction of corrosion-resistant Ti-rich phase is beneficial for the coating to form a protective TiO_2 passivation film during electrochemical corrosion.

Key Words: Laser Melting Deposition, WC-CoCr Coatings, Microstructure, Wear and Corrosion Resistance

钛合金因具有低密度、高比强度、良好的高温性能和耐腐蚀性等被广泛用于航空航天和军工等领域^[1-2]。TA15合金(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)是一种近 α 型钛合金,具有低密度、高比强度和良好的耐腐蚀性等优良特性,常用作轴承钢,涡轮叶轮等航空零件^[3-4],特别是在沿海地区,TA15合金经常用作飞机起落架和直升机尾

轴的关键部件。这些部件的承载表面受到高速摩擦的磨损以及海洋环境下的腐蚀,限制了其进一步应用^[5]。因而,在航空零件表面添加防护镀层,提升其耐磨耐蚀性能具有积极意义。

金属陶瓷硬质合金由碳化物骨架和金属粘接剂组成,具有超高的硬度和耐磨性,是作为表面防护涂层的

收稿日期:2025-03-27;修订日期:2025-06-11

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:李旭勇,男,1985年出生,高级工程师,E-mail:605218644@qq.com

引用格式:李旭勇,黄勇,吴宁,等. TA15表面激光熔化沉积WC-CoCr涂层耐磨耐蚀性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(4):612-618.

LI X Y, HUANG Y, WU N, et al. Wear and corrosion resistance of WC-CoCr coatings on TA15 by laser melting deposition[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 612-618.

理想材料^[6]。近年来被广泛报道的 WC-CoCr 涂层是一种耐磨耐蚀性能兼顾的金属陶瓷层,目前多采用热喷涂技术制备^[7-9],但涂层依然存在孔隙率高、与基体结合强度差的问题。激光增材制造(LAM)作为新兴的粉末冶金技术具有绿色环保、设计自由、能够“近净尺寸”成形等特点^[10]。激光增材制造是非平衡凝固过程,其制备的涂层具有致密性高,晶粒细小等结构特征^[11]。相比于热喷涂技术,激光增材制造技术制备的 WC-CoCr 金属陶瓷层的工艺参数优化及性能研究也是许多科学研究关注的焦点。MIAO H 等^[12]利用激光熔覆技术在合金钢上制备了 WC-12Co 复合涂层,发现高激光功率下 WC-12Co 复合粉末与液态不锈钢基体和 Co 相部分熔融,进而产生了由层状 WC 和人字形的 M_3W_3C ($M=Fe, Co$) 新型碳化物。这类共晶碳化物提高了 WC 与基体相结合强度,使涂层的耐磨性明显提高。YOU A P 等^[13]在 Ti-6Al-4V 合金上使用激光熔覆制备了 WC-CoCr 涂层。磨损试验表明,WC-CoCr 涂层中因存在大量 WC 和 W_2C 陶瓷相导致其耐磨性相比于钛合金大幅提升。

本研究采用以同轴送粉为技术特征的激光熔化沉积技术(LMD)在 TA15 钛合金上增材制造 WC-CoCr 涂层,研究激光功率对 WC-CoCr 涂层微观组织和耐磨耐蚀性能的影响,旨在为后续制备具有高耐磨性和高耐蚀性的 WC-CoCr 硬质合金涂层提供参考。

1 试验材料及方法

选用 TA15 钛合金作为基材,其成分见表 1。采用商用 WC-CoCr 粉末作为原材料,粉末粒径为 15~53 μm ,粉末成分(质量分数,下同)为:WC 为 86%、Co 为 10%、Cr 为 4%。将 TA15 钛合金加工成 7 mm×7 mm×2 mm 的试样,经打磨、清洗、烘干后备用。采用激光 3D 打印机(LMD8060)在 TA15 合金上制备 WC-CoCr 涂层,激光功率分别为 800、1 000 和 1 200 W,激光光斑直径为 $\phi 2$ mm,扫描速度为 800 mm/min,粉末进给速率为 0.12 r/min,搭接量为 50%,高纯氩气(保护气体)流速为 20 L/min。采用 D8 advanced-A25(XRD) X 射线衍射仪对 LDM 制备的涂层进行物相分析,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,并使用配备的能量色散 X 射线能谱分析仪(EDS)对试样进行成分分析。采用 HVD-10AP 显微维氏硬度计进行硬度测量,施加载荷为 9.8 N,保载时间为 15 s,对每个试样重复试验 10 次,去除最大值和最小值后取平均值。采用 HT-1000 球-盘磨损试验机对试样进行干磨损试验,试样尺寸为 $\phi 30$ mm×10 mm,摩擦副选用直径为

$\phi 5$ mm 的 Si_3N_4 陶瓷球,载荷为 20 N,试样台转速为 500 r/min,磨损时间为 50 min,摩擦轨迹半径为 5 mm。采用扫描电镜分析磨损形貌和化学成分。通过 JB-5C 轮廓仪得到涂层磨损后的截面轮廓,进而测量磨损体积损失,其中剖面轮廓面积是在摩擦轨迹上随机选择 10 个位置并取其平均值得到。将磨损体积损失除以施加的载荷和总滑动距离得出涂层的比磨损率。采用 REF3000-32117 电化学工作站进行了室温下在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学测试[动电位极化和电化学阻抗谱(EIS)]。使用三电极体系,对电极为 10 mm×10 mm 的铂片,参比电极为饱和甘汞电极。试样尺寸为 7 mm×7 mm×3 mm。将工作电极与试样连接,测量开路电位,使其在 1 800 s 内达到相对稳定的电位。然后,进行电化学阻抗谱(EIS),交流频率范围为 0.01~10 000 Hz。以 0.1 mV/s 的扫描速率进行动电位极化测试,重复 3 次。

表 1 TA15 合金的名义成分
Tab.1 Nominal composition of TA15 alloy %

w_B				
Al	Zr	Mo	V	Ti
5.5~7.0	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	余量

2 试验结果与讨论

2.1 金属陶瓷涂层组织结构

图 1 为不同激光功率下沉积 WC-CoCr 涂层表面 XRD 图谱。可以看到,涂层主要由 W、TiC 和 $TiWC_2$ 相组成。激光熔化部分基体形成熔池,基体中的 Ti 元素扩散至涂层内形成 TiC 和 $TiWC_2$ 的陶瓷析出相。另外,W 相的峰强随功率增大而减小,而其余各峰强度没有明显变化,3 条曲线均没有出现典型的 WC 特征峰,说明 WC 在熔池中脱 C 程度高,由于高温合金熔液在熔池中的侵蚀,WC 颗粒分解成游离的 W、C 原子,并与 Ti 合金基体中的 Ti 元素相互扩散,最后,以 TiC 和 $TiWC_2$ 的形式析出^[14]。

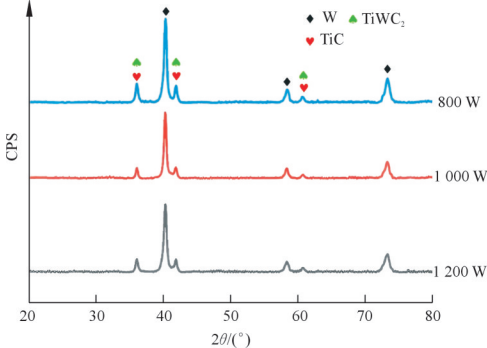


图 1 TA15 基材上不同功率制备的 WC-CoCr 涂层 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of WC-CoCr coatings fabricated on TA15 titanium alloy with different powers

图 2 为不同功率 TA15 合金上激光沉积 WC-CoCr 涂层扫描截面形貌。可以看出,涂层与基体结合良好,涂层内部没有出现裂纹及孔洞。表 2 为不同功率下涂层厚度测量结果。由表 2 可知,随激光功率增加,涂层厚度增加,组织变得更均匀。由于熔池中 Marangoni 对流作用,涂层内高熔点碳化物快速形核、长大并均匀分布^[15]。表 3 为 TA15 上涂层截面各位置元素含量。可以看出,黑色区域富 Ti(箭头 A),深灰色和浅灰色区域主要存在 W 元素和 Ti 元素,其中浅灰色区域 W 含量更

高(箭头 B、C),白色区域富集大量 W 元素(箭头 D)。结合 XRD 和 EDS 结果表征,黑色相应为 TiC,深灰色相为 TiWC₂,浅灰色为(W,Ti),白色相应为 W。Ti 和 W 在熔池中存在一定的固溶潜力,这反映在背散射图像上为两种不同的衬度。Al、V 和 Ti 元素扩散到涂层内导致涂层成分与粉末成分存在一定差异。随着激光功率的增加,黑色颗粒相变得稀疏,深灰色相增加,浅灰色的(W,Ti)相多分布在白色 W 相周围。熔池中 WC 的分解以及析出相的形成存在以下 4 个阶段。

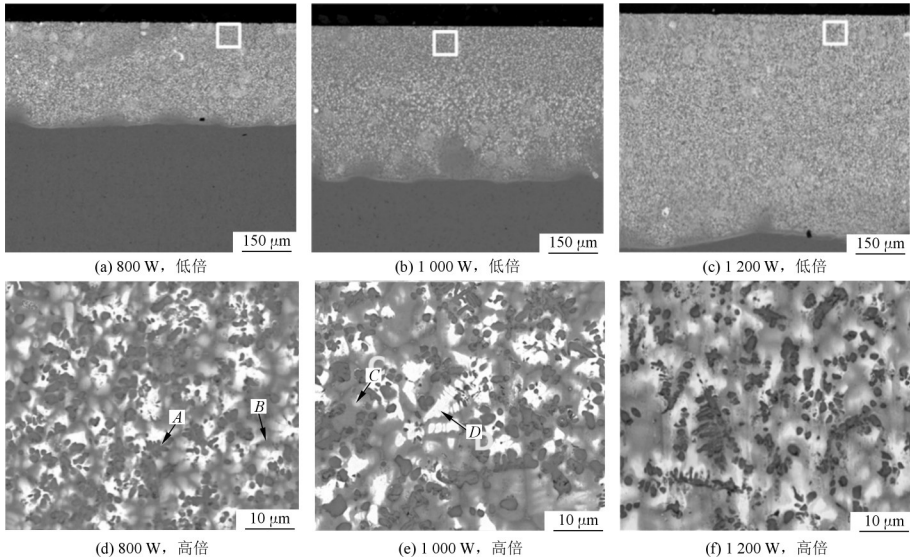


图 2 不同功率 TA15 合金上激光沉积 WC-CoCr 涂层扫描截面形貌

Fig.2 Cross-sectional morphologies of WC-CoCr coatings laser deposited on TA15 titanium alloy with different powers

表 2 不同功率下涂层厚度

Tab.2 Thickness of coatings with different powers

功率/W	厚度/ μm
800	330.3
1 000	484.7
1 200	672.5

表 3 TA15 上涂层截面各位置元素含量

Tab.3 Element contents of coatings on TA15 at different positions

位置	x_B					
	Ti	W	Cr	Co	V	Al
A	86.27	12.78	0	0	0	0.95
B	48.70	46.49	0	0	2.62	2.19
C	62.73	24.74	2.77	2.80	3.31	3.65
D	6.17	82.15	7.29	4.39	0	0

首先 WC 完全脱碳^[16-17]:



而后游离的 C 与基体中扩散到涂层中的一部分 Ti 结合:



另一部分 Ti 加游离的 C 和 W 发生反应:



2.2 WC-CoCr 涂层硬度及耐磨性

不同激光功率下沉积的 WC-CoCr 涂层的维氏硬度值见图 3。可以看出,600、800 和 1 000 W 下制备的金属陶瓷层的硬度(HV)均明显高于 TA15 钛合金(约 300),硬度(HV₁)分别为 898.7、902.2 和 909.5。激光功率提升导致金属相含量降低,使得涂层的显微硬度略有提高。而陶瓷相 TiC 和 TiWC₂相含量增加不明显导致涂层硬度没有大幅度提升。根据 Archard 公式,涂层硬度会在一定程度上影响涂层的耐磨性能^[18]。

$$W = \frac{kFL}{H} \tag{5}$$

式中, W 为磨损量; k 为磨损系数; F 为法向载荷; L 为相对滑动距离; H 为材料的硬度。因此,涂层硬度与耐磨性呈线性相关,在相同磨损机制下,高硬度材料通常具有更好的耐磨性能。

不同激光功率沉积 WC-CoCr 涂层及 TA15 的室温摩擦因数(COF)曲线见图 4。可以看出,TA15 基材的摩擦因数最大,在 0.40~0.55 区间波动。1 200 W 涂层的摩擦因数最小,为 0.30~0.35; 1 000 W 涂层的摩擦因数次之,在 0.35~0.40 之间; 800 W 涂层的摩擦因数更

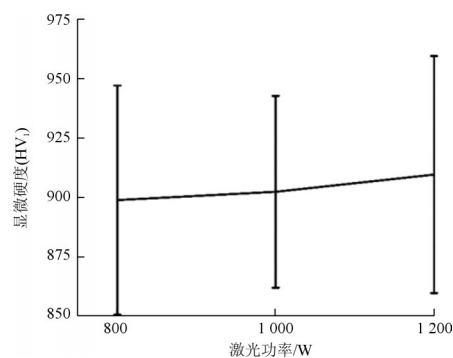


图3 不同功率制备涂层的表面硬度

Fig.3 Surface hardness of coatings manufactured with different laser powers

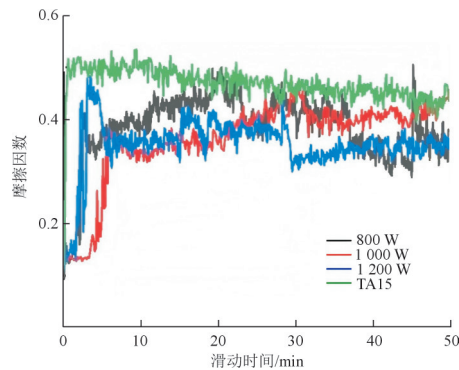


图4 20 N载荷下WC-CoCr涂层和TA15基材的摩擦因数曲线

Fig.4 Friction coefficient curves of WC-CoCr coatings and TA15 substrate under 20 N load

大,为0.30~0.50之间。3条摩擦因数曲线在稳定区间都存在较大波动,说明磨损过程中不断地有材料的剥落,摩擦副对涂层的粘着作用强,导致对磨层不稳定。

涂层磨损后的磨痕剖面形貌曲线见图5。可以看出,3种涂层和TA15的磨损凹坑宽度均约为2 mm,但凹坑深度有较大区别,3种金属陶瓷涂层磨痕深度明显

低于TA15基材。1 200 W涂层磨痕深度最浅,深度约为100 μm ;1 000 W涂层磨痕深度居中,约为120 μm ;800 W涂层的磨痕深度最深,约为180 μm ,而TA15的磨痕深度达到190 μm 。通过计算剖面面积获得比磨损率,见图5b,其变化规律与凹坑深度相同,比磨损率从小到大依次为:1 200 W涂层 $[1.9\times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$ 、1 000 W涂层 $[2\times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$ 、800 W涂层 $[3.7\times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$ 和TA15基材 $[4.2\times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$ 。磨损结果表明,陶瓷相的引入导致WC-CoCr涂层耐磨性优于TA15基材的耐磨性能,对比WC-CoCr涂层耐磨性能的差异性,通过对磨损表面的观察,进一步分析其磨损机制。

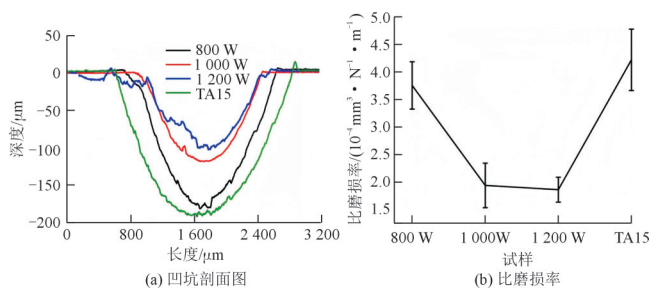


图5 20 N下WC-CoCr涂层和TA15基材的凹坑剖面图和相应的比磨损率

Fig.5 Pit profile of WC-CoCr coatings and TA15 substrate under 20 N load as well as corresponding specific wear rate

图6为不同激光功率下沉积的WC-CoCr涂层磨损后表面形貌图。磨损表面的磨粒碎屑和犁沟形貌表明涂层主要发生磨粒磨损和粘着磨损,磨痕内残留氧化物岛屿表明磨损过程中生成的热量导致了轻微的金属氧化。由图6可知,800 W涂层磨痕表面具有严重的磨痕形貌,表面多坑多孔,存在细小的裂纹。1 000 W涂层磨

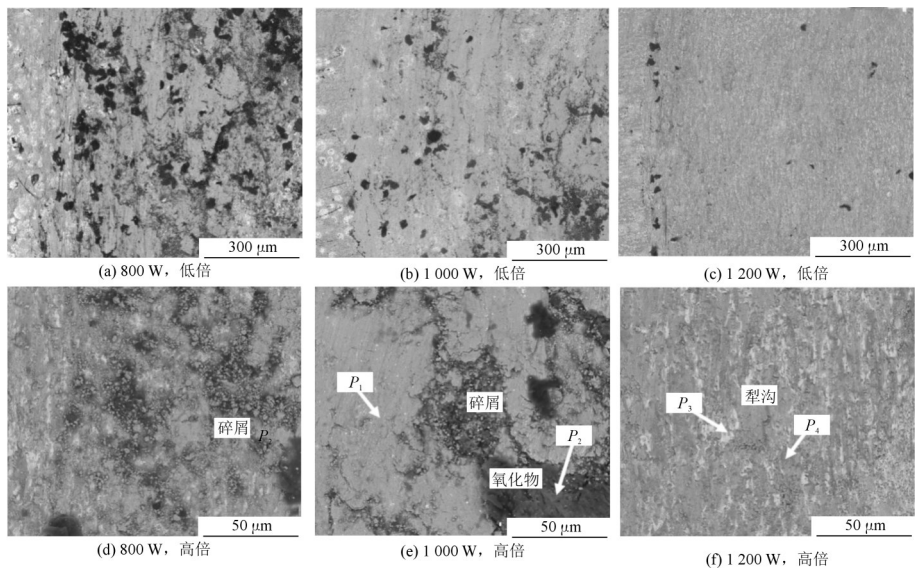


图6 TA15上不同功率沉积的WC-CoCr涂层磨损轨迹形貌

Fig.6 Wear tracks of WC-CoCr coatings on TA15 manufactured with different laser powers

痕表面也存在剥落坑及孔洞,同时存在一些犁沟条纹。1 200 W 涂层磨痕表面有少量孔洞,除能看到少量白色颗粒外,其余都是明显的犁沟状磨痕。由高倍形貌可知,800 W 的磨损轨迹上发现大量氧化物聚集,孔洞、小坑多为材料被移除后形成。1 000 W 的磨损轨迹上能看到大面积剥落坑和小部分犁沟,剥落坑内部存在碎屑、磨粒以及氧化物岛屿。1 000、1 200 W 涂层磨痕 EDS 结果见表 4。对比 P_1 、 P_2 两处,可见 P_1 区域 Ti 含量明显高于 P_2 区域,而 P_2 中 W、Co 含量较高。高倍下 1 200 W 的磨损轨迹是典型的犁削形貌,犁沟内没有看到氧化物岛屿的形成,磨痕内几乎没有剥落坑,相分布相较于初始涂层表面发生明显变化,犁沟表面 P_3 处 W 含量相对较高, P_4 处 Ti、Al、Co、V 和 O 元素含量相对较高。说明在磨损过程中,表层中的 W 和 TiC 颗粒发生了重新分布,磨损后的表面成分更加均匀^[19],导致磨粒磨损和粘着磨损减轻。

表 4 TA15 上 CoCr-WC 涂层磨损轨迹各处元素含量

Tab.4 Element content of CoCr-WC coatings on TA15 at wear tracks

点	x_B						%
	O	Al	Ti	V	Co	W	
P_1	9.97	2.43	46.82	1.82	4.14	34.82	
P_2	44.2	0.82	6.93	—	12.85	35.16	
P_3	5.32	1.20	23.45	—	2.42	67.62	
P_4	10.82	4.28	54.91	2.55	12.95	14.5	

Si_3N_4 小球与 WC-CoCr 涂层对磨的磨损过程是:①涂层表面微凸体被快速去除。②随着滑动时间的增长,界面处的热积累导致氧化磨损的发生,形成大量氧化物岛屿。③摩擦副通过粘着磨损的形式使材料发生剥落,表面形成典型的犁沟形貌。④滞留在磨损轨迹内的微凸体,氧化物和碳化物磨粒等还会引起磨粒磨

损^[20]。1 200 W 涂层陶瓷相最多,且磨损后涂层的表层的金属和陶瓷颗粒均匀再分布,使其涂层表面具有高硬度,在磨损过程中通过粘着去除的体积很少,因此涂层具有最好的耐磨性。

2.3 WC-CoCr 涂层电化学性能

图 7 为 WC-CoCr 涂层和 TA15 基材在 NaCl 溶液中的动电位极化曲线图、奈奎斯特图以及拟合电路。由图 7a 可知,800 W 涂层具有最低的自腐蚀电位,为 -0.41 V,TA15 基材次之,为 -0.39 V,1 000 和 1 200 W 曲线的自腐蚀电位相近,分别为 -0.32 V 和 -0.33 V。对应的自腐蚀电流依次为 9.66×10^{-7} 、 8.2×10^{-7} 、 7.53×10^{-7} 和 9.89×10^{-8} A/cm²。一般来说,自腐蚀电位反映热力学特性,用来评估腐蚀倾向,自腐蚀电流密度反映动力学特征,用来评估反应速度。可见 1 200 W 涂层发生腐蚀最困难,腐蚀速率也更慢。另外,TA15、1 000 W 和 1 200 W 涂层均存在明显的钝化区间,这表明腐蚀表面均形成致密的钝化膜。从图 7b 可看出,WC-CoCr 涂层的奈奎斯特图形状呈半圆形,代表电荷转移机制。通常情况下,半圆形的半径越大,频率越低,周期越长,表明电化学反应速度越慢,腐蚀越好^[11]。1 200 W 的奈奎斯特图的半圆直径最大,其次是 1 000 W、TA15 及 800 W。采用等效电路 R{Q[R(QR)]} 拟合 EIS,结果见图 7c,其中 R_s 和 R_t 分别为溶液电阻和钝化膜电阻; R_{ct} 为电荷转移电阻;恒定相位元件(CPE₁和 CPE₂)分别为无源层和伪双层的容量,表 5 为相关部件的参数,其中, Y_0 为 CPE 的容量; n 为偏离理想电容的程度。电荷转移电阻(R_t)和钝化膜电阻(R_{ct})之和越大,涂层耐蚀性越好。1 200 W 涂层的 $R_t + R_{ct}$ 最大($72\,515 \Omega \cdot \text{cm}^2$),而 800 W 涂层的 $R_t + R_{ct}$ 最小($14\,625 \Omega \cdot \text{cm}^2$),与动电位极化测试结果一致。

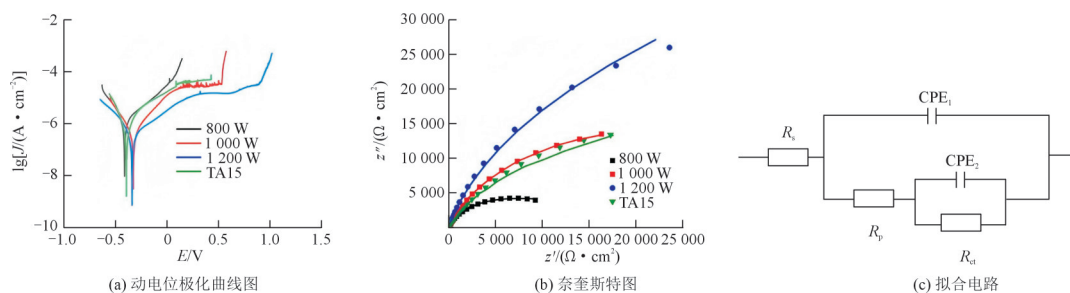


图 7 WC-CoCr 涂层和 TA15 基材在 NaCl 溶液中的动电位极化曲线图、奈奎斯特图以及拟合电路

Fig.7 Potentiodynamic polarization curves, Nyquist plot and equivalent circuit of WC-CoCr coatings and TA15 substrate in 3.5% NaCl solution

电化学测试结果表明,随激光功率增加,WC-CoCr 涂层耐蚀性增强。这是由于随激光功率增加,涂层内抗腐蚀的富 Ti 相增加,有利于涂层在电化学腐蚀过程中形成具有保护性的 TiO_2 钝化膜,涂层耐蚀性提高。

另外,陶瓷相的析出会引入更多界面,其中界面反应更容易在颗粒状的 TiC 与金属相的界面处发生,从而降低涂层的耐蚀性,这说明了 800 W 时制备的涂层耐蚀性低于 TA15 基材的原因。高功率下涂层内存在更多

表5 TA15及WC-CoCr涂层阻抗谱等效电路参数

Tab.5 Equivalent circuit parameters for impedance spectra of TA15 and WC-CoCr coatings

合金	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Y_{01}/(\times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2})$	n_1	$R_t/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Y_{02}/(\times 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{s}^n \cdot \text{cm}^{-2})$	n_2	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
800 W	6.5	204.8	0.8	6 559	358.7	0.6	8 066
1 000 W	6.1	446.9	0.7	8.3	143.8	0.8	36 980
1 200 W	6	3 774	0.9	5	136.4	0.8	72 510
TA15	5.9	7.4	0.8	3 865	6.2	0.7	31 880

TiWC₂陶瓷相,而颗粒状TiC数量变少,对涂层耐蚀性的降低作用变小,导致1 000 W和1 200 W涂层耐蚀性高于TA15基材。

对于涂层钝化膜的成分分析,通过XPS分析元素价态,选取了耐蚀性能最好的1 200 W涂层和耐蚀性能最差的800 W涂层用作XPS测试。通过对每种元素分峰拟合,结果见图8和图9。采集得到的金属及其所属的原子轨道有W 4f, Ti 2p, Co 2p和Cr 2p。拟合后800 W涂层的元素光谱图显示,W 4f显示了4个峰,分别在31.05、33.1、35.06和37.3 eV。位于4f 7/2轨道和4f 5/2轨道,分别代表了W、WO₂和WO₃。Ti 2p可以在453.78、459.78、458.14和463.96 eV位置拟合。Co 2p显示了4个峰,分别为780.85、786.7、796.65和802.76 eV。Cr 2p同样显示了4个峰,分别为576.27、578.24、585.38

和587.5 eV。1 200 W涂层的XPS结果显示W同样可以拟合成4个峰,分别位于30.07、32.59、35.18和37.22 eV。Ti 2p显示了3个峰分别位于453.69、458.12和463.82 eV。Co 2p显示了4个峰,分别为779.86、784.45、794.5和800 eV。Cr 2p只拟合出两个微弱的峰,分别为585.49和576.75 eV。钝化膜一般为双层结构,外层由氢氧化物组成,内层为金属氧化物。800 W涂层氢氧化物含量虽然高于1 200 W涂层,但钝化膜的保护性主要受内层影响,对比表面金属及其化合物含量,1 200 W涂层所形成的钝化膜TiO₂和WO₃占比更高,且在水溶液中TiO₂形成较薄的致密钝化膜,这也解释了1 200 W涂层具有更长的钝化区间,而WO₃的出现可能是电流耦合可以在陶瓷相和金属相W之间形成,W电位较低而遭受阳极氧化。

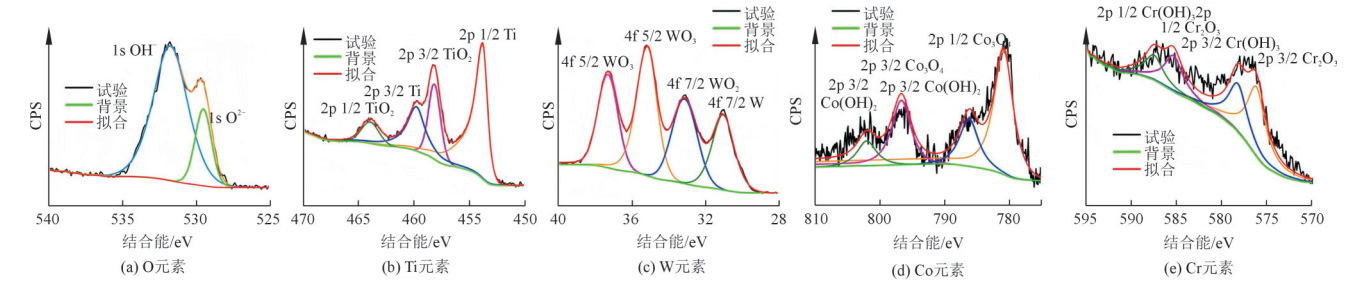


图8 800 W制备的WC-CoCr涂层中各元素的光谱图

Fig.8 XPS spectra of elements in WC-CoCr coating manufactured at 800 W

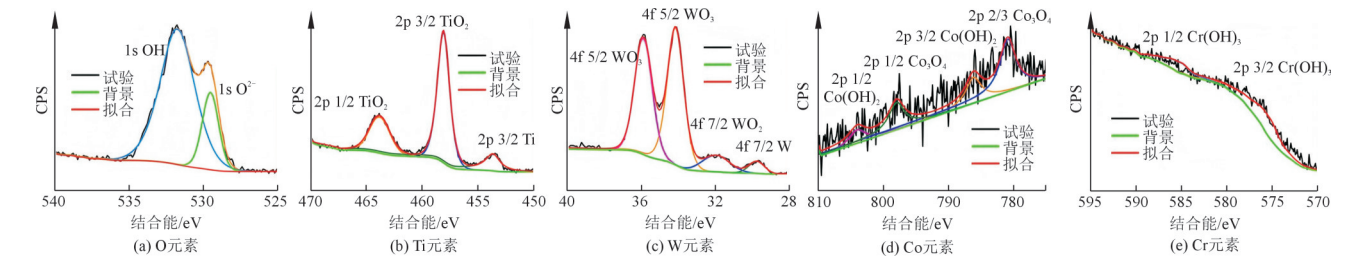


图9 1 200 W制备的WC-CoCr涂层中各元素的光谱图

Fig.9 XPS spectra of elements in WC-CoCr coating manufactured at 1 200 W

3 结 论

(1)TA15基材上制备WC-CoCr涂层,涂层内分布白色片状的W相,黑色颗粒状TiC相及灰色的TiWC₂相。

(2)WC-CoCr涂层耐磨性均优于TA15基材,涂层与Si₃N₄对磨副磨损的主导机制为粘着磨损和磨粒磨

损。随激光功率增加,涂层内金属相减少,陶瓷相增加,硬度提高。涂层亚表层组织在磨损后均匀分布导致高硬度涂层具有优异的耐磨性。

(3)1 000 W和1 200 W功率制备涂层耐蚀性优于TA15基材,WC-CoCr涂层耐蚀性随功率增加而提高,涂层在电化学腐蚀过程中能够形成致密的钝化膜。1 200 W制备的涂层中抗腐蚀的富Ti相更多,形成更致

密的钝化膜,同时受陶瓷相的界面反应影响小,具有最佳的耐蚀性。

参 考 文 献

- [1] TARZIMOZHADAM Z, SANDLÖBES S, PRADEEP K G, et al. Microstructure design and mechanical properties in a near- α Ti-4Mo alloy[J]. Acta Materialia, 2015, 97: 291-304.
- [2] ZHANG X S, CHEN Y J, HU J L. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [3] LU Y, GUAN W, YE Y, et al. Wear characteristics of PVD coated carbide tools in milling of TA15 titanium alloy[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 108 058.
- [4] SUN Z C, YANG H, HAN G J, et al. A numerical model based on internal-state-variable method for the microstructure evolution during hot-working process of TA15 titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(15): 3 464-3 471.
- [5] LU H F, MIAO Q, LIANG W P, et al. High-temperature tribological behaviors of a Cr-Si co-alloyed layer on TA15 alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(2): 846-855.
- [6] KRESSE T, MEINHARD D, BERNTHALER T. Hardness of WC-Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 75: 287-293.
- [7] BOLELLI G, BONFERRONI B, COLETTA G, et al. Wear and corrosion behaviour of HVOF WC-CoCr/CVD DLC hybrid coating systems deposited onto aluminium substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(17-18): 4 211-4 220.
- [8] 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 and Coatings Technology, 2013, 225: 547-575.
- [9] OZKAVAK H V, SAHIN S, SARAC M F Z, et al. Wear properties of WC-Co and WC-CoCr coatings applied by HVOF technique on different steel substrates[J]. Materials Testing, 2020, 62: 1 235-1 242.
- [10] ZHOU Z Y, PENG X, LÜ W Y, et al. Ultra-high temperature oxidation resistant refractory high entropy alloys fabricated by laser melting deposition: Al concentration regulation and oxidation mechanism[J]. Corrosion Science, 2023, 224: 111 537.
- [11] 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]. Materials Science and Technology, 2023, 58: 10 148-10 165.
- [12] MIAO H, TANG J C, CHEN X G, et al. Microstructure and properties of WC-12Co composite coatings manufactured by laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1 017-1 030.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王涛, 孟琨, 王长宏, 等. WC颗粒对激光沉积Ni25涂层耐磨性增强机制影响研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(9): 1 057-1 060.
- [16] YUAN J H, QING Z, JING H, et al. Decarburization mechanisms of WC-Co during thermal spraying: Insights from controlled carbon loss and microstructure characterization[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 142: 165-171.
- [17] SURESH BABU P, BASU B, SUNDARARAJAN G. Abrasive wear behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings: Influence of decarburization and abrasive characteristics[J]. Wear, 2010, 268: 1 387-1 399.
- [18] HAN Z, ZHANG Y, KE L. Friction and wear behaviors of nano-structured metals[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2008, 24(4): 483-494.
- [19] ALIDOKHT S A, CHROMIK R R. Sliding wear behavior of cold-sprayed NI-WC composite coatings: Influence of WC content[J]. Wear, 2021, 477(1-2): 203 792.
- [20] BONNY K, BAETS P D, VLEUGELS J, et al. Reciprocative sliding wear of ZrO_2 -TiCN composites against Co-WC cemented carbide[J]. Wear, 2008, 265(11): 1 767-1 775.

(编辑:刘晨辉)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金
领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态
及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家
最新研究成果)



特种铸造及有色
合金杂志
(文章动态时刻关注)