

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.06.011

Q345 钢表面激光熔覆高熵合金涂层及其性能

肖元昭¹, 李攀¹, 路忠响², 肖喜娜³

(1. 河南职业技术学院 智能制造学院, 河南 郑州 450046; 2. 郑州恒达智控科技股份有限公司, 河南 郑州 450000;
3. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了提升工程装备用 Q345 钢的表面耐磨和耐蚀性能, 采用激光熔覆的方法在 Q345 钢表面制备 WC 增强 CoCrFeNiMo 高熵合金涂层, 研究了 WC 质量分数(0~24%)对激光熔覆涂层相组成、涂层形貌和耐磨和耐蚀性能的影响。结果表明: 0% 和 4%WC 涂层由 FCC 固溶体+ σ 相组成, 8%~24% WC 涂层中还出现了 WC、W₂C 和 Co₄W₂C 相。0~24% WC 的高熵合金涂层中都未见明显裂纹或者孔洞等缺陷, WC 含量增加会使得激光熔覆涂层中等轴晶比例增多。加入 WC 后涂层的显微硬度平均值都高于不含 WC 涂层, 且显微硬度会随着 WC 含量增加而逐渐提高。添加 WC 的激光熔覆涂层平均摩擦系数(0.606~0.665)和磨损失重(2.24~4.38 mg)都小于未添加 WC 的涂层, 且激光熔覆涂层的平均摩擦系数和磨损失重随着 WC 含量的增加呈现先减小后增大。含 WC 的激光熔覆涂层的耐蚀性都高于不含 WC 的涂层。Q345 钢表面激光熔覆高熵合金涂层中适宜的 WC 添加量为 20%, 此时涂层具有较高的硬度、最佳的耐磨和耐蚀性。

关键词: 激光熔覆; CoCrFeNiMo; 耐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TQ110; TG174.4 **文献标志码:** A

Laser cladding high entropy alloy coating on surface of Q345 steel and its properties

XIAO Yuanzhao¹, LI Pan¹, LU Zhongxiang², XIAO Xina³

(1. Intelligent Manufacturing College, Henan Vocational College of Technology, Zhengzhou 450046, China; 2. Zhengzhou Hengda Intelligent Control Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Materials and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the surface wear and corrosion resistance of Q345 steel, CoCrFeNiMo high entropy alloy coatings with different WC contents were prepared on the surface of Q345 steel by laser cladding. The influence of WC content on the phase composition, microstructure, wear and corrosion resistance of the laser cladding coating were studied. The results show that the 0% and 4% WC coatings are composed of FCC solid solution and σ phase, while WC, W₂C, and Co₄W₂C phases are also present in the 8% to 24% WC coatings. No obvious defects such as cracks or holes are observed in coatings with different WC contents. As the WC content increased from 0% to 24%, the proportion of dendritic crystals in the laser cladding coating continues to decrease and the proportion of equiaxed crystals continues to increase. The average microhardness of the coating after adding WC is higher than that of the coating without WC, and the microhardness of the laser cladding coating gradually increases with the increase of WC content. The average friction coefficient (0.606~0.665) and wear weight loss

收稿日期: 2025-07-28 修回日期: 2025-08-17

通信作者: 肖元昭(1985—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为机械设计制造及自动化, e-mail: yuanzhao85@sina.com

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102210530)

引用信息: 肖元昭, 李攀, 路忠响, 等. Q345 钢表面激光熔覆高熵合金涂层及其性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(6): 89-95.
XIAO Yuanzhao, LI Pan, LU Zhongxiang, et al. Laser cladding high entropy alloy coating on surface of Q345 steel and its properties[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(6): 89-95.

(2.24~4.38 mg) of the laser cladding coating with added WC are both lower than those of the coating without WC, and with increasing of WC content, the average friction coefficient and wear weight loss of the laser cladding coating first decrease and then increase. The polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy test results are consistent, indicating that the corrosion resistance of the laser cladding coating containing WC is higher than that of the coating without WC, and the 20% WC coating has the best corrosion resistance. The optimal amount of WC is 20%, at which point the laser cladding coating has high hardness, the best wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: laser cladding; CoCrFeNiMo; corrosion resistance; wear resistance

高熵合金涂层(如CoCrFeNiMo、AlCoCrNiFe等)具有高强度、高硬度及良好的抗断裂能力和抗腐蚀性能等,近年来在工程结构用钢、高端装备用特种合金等的涂层制备中应用较为广泛,可以很大程度上改善基体材料的表面性能,延长工程装备等的服役寿命^[1]。如,国内外学者采用激光熔覆技术制备的CoCrFeNiMo高熵合金涂层已展现出优异的性能(硬度为450~550 HV, 腐蚀电流密度为2.1~3.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)^[2],但目前的研究多聚焦于基础合金体系的成分优化和制备工艺等方面,对第二相(如WC作为硬质增强相)加入后对高熵合金涂层组织性能的影响规律和作用机制尚未系统揭示^[3],且传统方法制备出的WC颗粒增强高熵合金涂层还常出现WC偏聚导致微裂纹(磨损率波动达35%)等问题^[4-5],很大程度上限制了WC增强高熵合金涂层在重大装备和重大工程中应用。Q345钢作为海洋工程装备的关键结构材料,在复杂工况环境(海浪、潮汐、腐蚀、磨损)下面临严重的磨损与腐蚀失效问题,尤其是随着海洋工程装备服役环境日益严苛,亟需在Q345钢表面开发出具有良好耐蚀和耐磨性能的高熵合金涂层^[6-8]。本文尝试设计了0~24%梯度WC含量的CoCrFeNiMo涂层体系,在前期优化的激光熔覆工艺参数的基础上,系统研究WC含量对激光熔覆CoCrFeNiMo涂层各项组织与性能的影响,以期为高端装备及工程结构用材的高熵合金涂层制备及应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

激光熔覆基材为热轧Q345钢板,主要元素质量分数为:0.19% C、0.23% Si、0.010% P、0.003% S、1.68% Mn、0.11% V、0.03% Nb、0.009% Ni,余量为Fe。激光熔覆粉末原料包括等CoCrFeNiMo高熵合金粉末和WC粉末(原子数分数为24.87% W+75.13% C)。

1.2 激光熔覆

预先采用线切割方法将Q345钢板加工成450 mm×100 mm×8 mm,表面清洗除油后吹干备用;按照质量分数配比将激光熔覆粉末预先在RH-DW-04T型烘箱中进行78 °C保温4 h的烘干处理,然后在SYH-50型混粉机中进行充分混合均匀,得到WC含量(质量分数,下同)为0~24%的WC+CoCrFeNiMo混合粉末。采用XL-F3000激光熔覆机(同轴气动送粉)在经过180 °C预热的Q345钢基体表面制备防腐耐磨涂层,根据前期工艺优化结果选定激光功率为0.48 kW、激光扫描速率为1 120 mm/min、离焦量为10 mm,激光熔覆保护气为高纯氩气(流量为3.8 L/min),激光熔覆粉末的送粉速率设定为0.5 r/min。

1.3 测试方法

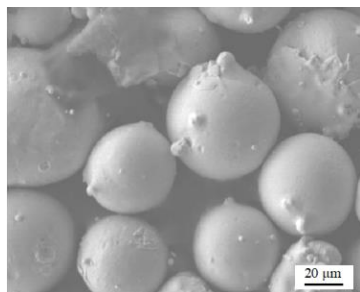
采用帕纳科锐影(Empyrean)X射线衍射仪对激光熔覆涂层进行物相分析,管压和管流分别设置为35 kV和30 mA(铜靶),扫描速率为2°/min;采用SUPRA 40型高分辨率场发射扫描电子显微镜观察原料粉末和激光熔覆涂层的显微形貌并用附带能谱仪测试微区成分;使用FALCON5000型显微维氏多功能硬度计对涂层显微硬度进行测试,载荷0.3 kg、加载时间为15 s,结果取3点平均值;使用T92型多功能摩擦磨损试验机对激光熔覆涂层进行室温摩擦磨损试验,对磨材料为 $\Phi 6$ mm的GCr15钢球,转速为380 r/min、摩擦磨损时间设定为40 min、施加载荷15 N,记录摩擦曲线并计算磨损失重^[9]。使用Autolab PGSTAT302N型电化学工作站进行电化学性能测试,腐蚀介质为质量分数3.5% NaCl溶液,测试采用标准三电极体系^[10],被测试样工作面积为10 mm×10 mm,扫描速率为1 mV/s,频率范围为0.01~10⁵ Hz。

2 结果与分析

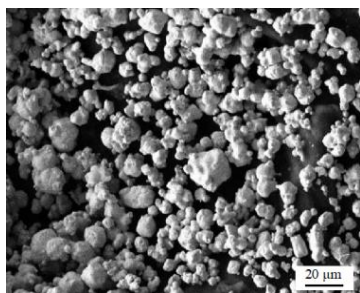
2.1 粉末原始形貌

图1为CoCrFeNiMo高熵合金粉末和WC粉末的

微观形貌。可见, CoCrFeNiMo高熵合金粉末主要呈类球形, 粒径分布在48~110 μm ; WC粉末为不规则颗粒状, 粒径分布在8~14 μm 。



(a) CoCrFeNiMo



(b) WC

图1 CoCrFeNiMo 高熵合金粉末和 WC 粉末的 SEM 形貌
Fig.1 SEM images of CoCrFeNiMo high entropy alloy powder and WC powder

2.2 涂层的相结构和微观形貌

图2为Q345钢表面激光熔覆高熵合金涂层的X射线衍射分析结果。对于不含WC(0%)的涂层, 主要物相为A1型晶体结构的面立方FCC相(固溶体)和D8₆晶体结构的 σ 相; 在加入少量WC后, “高熵效应”^[11]作用下, 含4% WC的涂层与不含WC的涂层的XRD图谱相似、物相组成相同, 仍然由FCC+ σ 相组成, 4% WC涂层中未检测到WC相可能与此时含量较低有关; 继续增加WC含量, 涂层中开始出现WC(8%时出现)、 W_2C 和 $\text{Co}_4\text{W}_2\text{C}$ (12%时开始出现)新相, 且WC含量越高, XRD图谱中FCC、 σ 相衍射峰强度逐渐减弱, 而含W相衍射峰强度逐渐增强, 这主要是因为WC的加入会在激光熔覆高温作用下与高熵合金发生化学反应而形成 W_2C 和 $\text{Co}_4\text{W}_2\text{C}$ 相^[12], 且WC加入量越大形成的碳化物含量越高。

图3为激光熔覆WC增强高熵合金涂层表面的扫描电镜显微形貌。对比分析可知, 未添加WC以及添加不同含量WC的激光熔覆涂层中的树枝晶和等轴晶都较为细小, 且涂层中没有发现明显裂纹、孔洞等缺陷。当WC含量从0增加至24%时, 激光熔覆

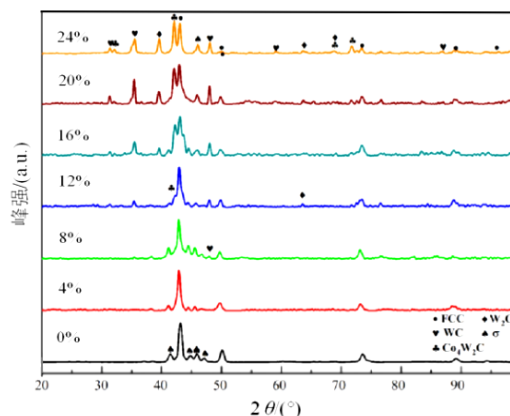


图2 Q345 钢表面激光熔覆高熵合金涂层的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of laser cladding high entropy alloy coatings on Q345 steel

涂层中树枝晶比例在不断减小, 而等轴晶比例在不断增加, 且涂层组织随着WC加入量的增加不断细化, 这主要是因为一方面熔覆过程中, 未溶解的WC颗粒(熔点高达2 870 $^{\circ}\text{C}$)在熔池中充当非自发形核基底, 为激光熔池提供大量形核位点^[13], 且WC含量增加, 熔池内形核点密度上升, 有助于促进细小等轴晶的形成; 另一方面, WC在高温熔池中部分分解并参与反应形成 W_2C 和 $\text{Co}_4\text{W}_2\text{C}$ 相, 有助于钉扎晶界并抑制晶粒长大^[14]; 此外, WC部分分解释放的W、C元素在固液界面前富集, 形成局部成分过冷, 会促使组织向细小等轴晶转变^[15]。

进一步对激光熔覆WC增强高熵合金涂层中WC颗粒的微观形貌进行观察, 结果如图4所示。对比分析可知, WC含量为4%~24%的涂层中的WC颗粒都会发生不同程度的熔解和热分解, 在微观形貌上表现为WC颗粒发生了开裂或者局部凹陷, 颗粒周围出现了块状或者不规则形状的白色/灰色组织, 在WC含量为24%时涂层中WC颗粒周围还出现了树枝状组织。能谱分析表明, 位置1处的块状组织中W/C原子比接近1:1; 位置2处不规则形状的灰白色组织中W/C原子比接近2:1; 位置3处树枝状灰白色组织中W、C和Co元素原子比接近4:2:1。结合图2的XRD图谱可知, 位置1处块状组织为WC相, 位置2处为 W_2C 相, 位置3处为 $\text{Co}_4\text{W}_2\text{C}$ 相。这主要是因为WC增强相在激光熔覆高温作用下会发生元素扩散以及热分解^[16], 造成WC颗粒自身发生开裂或凹陷, 部分分解的WC还会与C、Co等元素发生反应而形成 W_2C 相和 $\text{Co}_4\text{W}_2\text{C}$ 相, WC颗粒及周围组织的形态差异会进一步影响WC增强高熵合金涂层的耐磨和耐蚀性能。

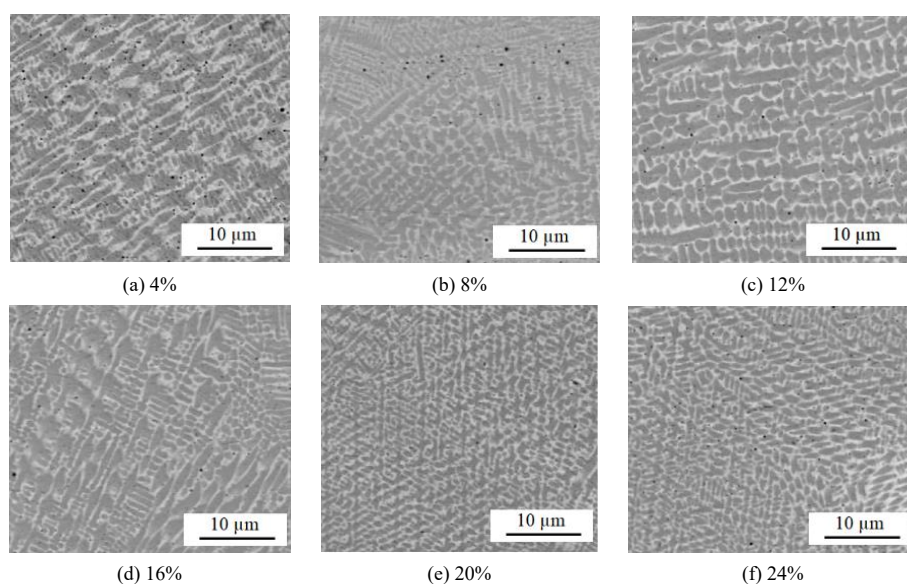


图3 激光熔覆 WC 增强高熵合金涂层表面的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of WC enhanced high entropy alloy coating surface by laser cladding

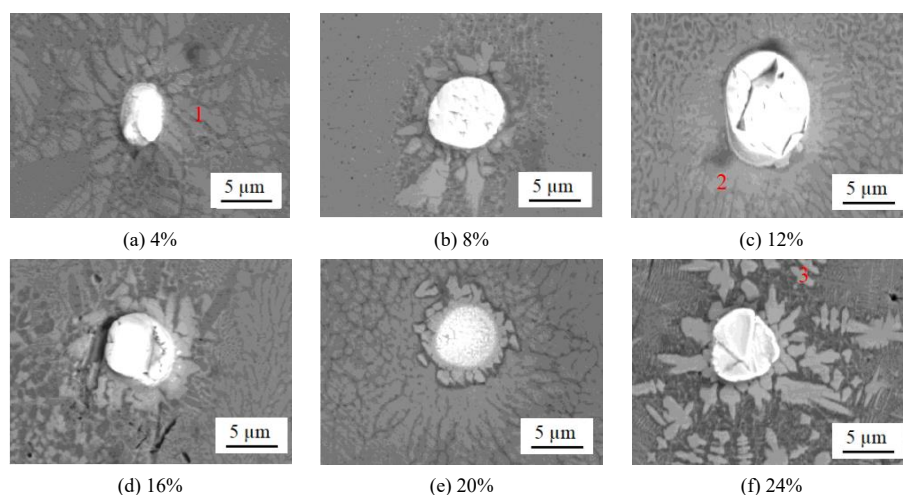


图4 激光熔覆 WC 增强高熵合金涂层中 WC 颗粒的微观形貌

Fig.4 Microscopic morphologies of WC particles in WC enhanced high entropy alloy coating

2.3 涂层的硬度、耐磨性和耐蚀性

图5为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的硬度曲线,表1为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的显微硬度平均值测试结果,其中距离为0以下的位置为激光熔覆涂层底部以下位置的基体。可见,不同WC含量的高熵合金涂层的硬度都高于基体,且在涂层相同位置处,涂层的硬度曲线呈现梯度分布特征,具体表现在WC含量越高则高熵合金涂层的硬度越大;此外,涂层的硬度曲线整体波动幅度较小,这表明激光熔覆涂层组织整体较为均匀^[17]。加入WC后高熵合金涂层的硬度平均值都高于不含WC涂层,当WC含量从0增加至24%时,激光熔覆涂层的

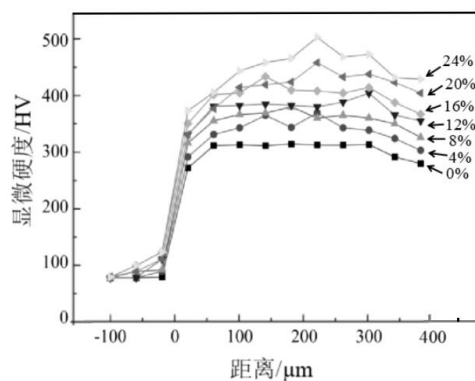


图5 激光熔覆 WC 增强高熵合金涂层的硬度曲线

Fig.5 Hardness curves of WC enhanced high entropy alloy coatings

表1 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的显微硬度和磨损失重

Tab.1 Microhardness and wear loss of WC enhanced high entropy alloy coatings

WC 含量	显微硬度平均值/HV	磨损失重/mg
0%	303.5	4.59
4%	336.2	4.38
8%	356.2	3.55
12%	377.3	2.96
16%	400.3	2.78
20%	414.7	2.24
24%	431.8	2.48

显微硬度平均值从303.5 HV逐渐提高至431.8 HV, 增加幅度为42.27%。这主要是因为WC自身具有较高的硬度, 且加入后还会在激光熔覆涂层中形成 W_2C 和 Co_4W_2C 硬质相以及起到细化晶粒作用, 涂层硬度会由于第二相强化和细晶强化而提高^[18]。

图6为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的摩擦曲线, 磨损失重测试结果列于表1。激光熔覆WC增强高熵合金涂层在初始摩擦磨损阶段的摩擦系数波动幅度都较大, 这主要是由于此时摩擦磨损还处于磨合阶段, 磨损量增长较快; 随着摩擦磨损时间的延长, 摩擦逐渐进入稳定磨损阶段, 摩擦曲线整体较为平稳。添加WC的激光熔覆涂层的平均摩擦系数(0.606~0.665)都小于未添加WC的涂层(0.691)、磨损失重(2.24~4.38 mg)都小于未添加WC

的涂层(4.59 mg), 且激光熔覆涂层的平均摩擦系数和磨损失重会随着WC含量增加而先减后增。整体而言, WC增强高熵合金涂层并不是WC含量越高越好, 在WC添加量为20%时激光熔覆涂层具有最佳的耐磨性, 而继续增加WC含量会造成涂层中WC过分解(强化作用减弱)或者局部脱落^[19], 抵抗摩擦磨损的能力减弱的同时磨损量增加。

图7为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的磨损形貌。对于未添加WC的涂层, 磨损形貌中可见磨损产生高温而形成的氧化物、局部微裂纹(随着磨损的进行后期会发生剥落)和沿着磨损方向分布的粘着物; 添加WC的激光熔覆涂层中都未见微裂纹的存在, 且当WC含量较低时(4%~16%), 激光熔覆涂层中可见氧化物和粘着物, 表现为粘着磨损和氧化磨

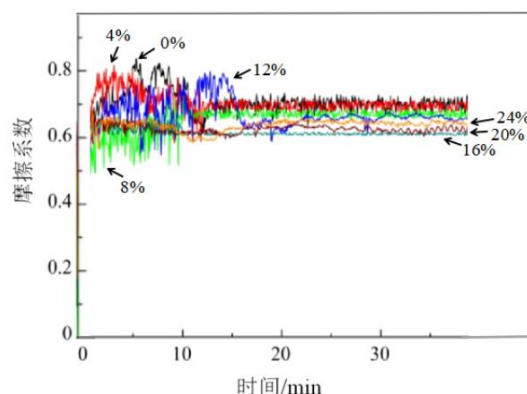


图6 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的摩擦曲线
Fig.6 Friction curves of WC enhanced high entropy alloy coatings

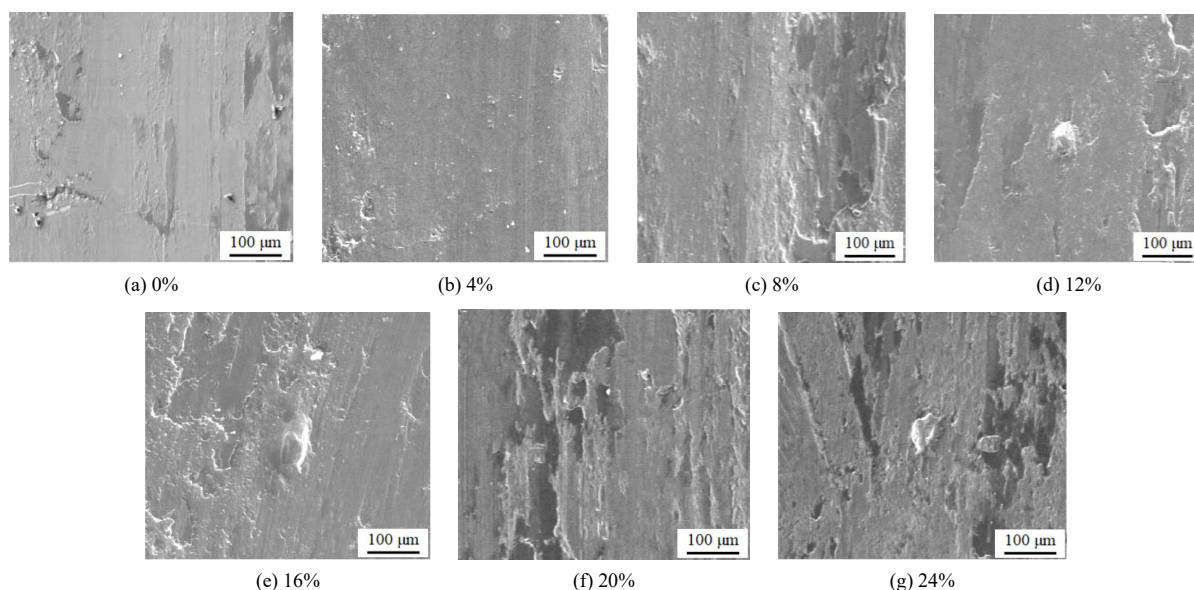


图7 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的磨损形貌

Fig.7 Worn morphology of WC enhanced high entropy alloy coating by laser cladding

损,而当WC含量达到20%及以上时,激光熔覆涂层中可见局部剥落、梨沟和WC颗粒破碎现象,此时涂层中由于产生磨粒磨损而使得磨损失重有所增加。磨损形貌的观察结果与磨损失重测试结果保持一致,即添加WC的激光熔覆涂层在磨损过程中不会产生微裂纹而使得磨损失重小于未添加WC的涂层,但是并不是WC含量越高越好,当WC含量达到20%及以上时,激光熔覆涂层中会由于WC颗粒剥落以及破碎等现象而使得磨损失重增大,适宜的WC添加量为20%。

图8为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的极化曲线,表2为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的腐蚀电位(E)和腐蚀电流密度(I_{cor})拟合结果。可见,相较于不含WC的涂层,加入WC后涂层的极化曲线都发生了正向移动;从热力学参数-腐蚀电位(E 越正则腐蚀倾向越小)和动力学参数-腐蚀电流密度(I_{cor} 越小则腐蚀速率越低)的测试结果可知,随着WC含量从0增加至24%,激光熔覆WC增强高熵合金涂层的 E

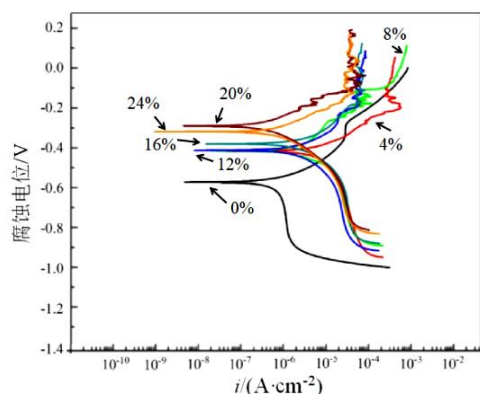


图8 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的极化曲线

Fig.8 Polarization curves of WC enhanced high entropy alloy coatings

表2 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters of WC enhanced high entropy alloy coatings

WC 含量	腐蚀电位/ V	腐蚀电流密度/ ($\times 10^{-6} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	电荷转移电阻/ ($\times 10^4 \Omega\cdot\text{cm}^2$)
0%	-0.569 6	9.31	0.23
4%	-0.415 5	8.72	0.69
8%	-0.413 3	6.59	1.93
12%	-0.410 3	4.12	2.34
16%	-0.379 0	3.94	3.20
20%	-0.289 0	0.57	19.63
24%	-0.318 3	0.79	11.38

先正移后负移, I_{cor} 先减后增, 20% WC增强激光熔覆涂层的 E 最正、 I_{cor} 最小, 分别为-0.289 V和 $0.57 \times 10^{-6} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。由此可见, 含WC的激光熔覆涂层的耐腐蚀性都高于不含WC的涂层, 且耐蚀性从高至低顺序为: 20%>24%>16%>12%>8%>4%>0%。由此可见, 在高熵合金涂层中添加WC有助于提升激光熔覆涂层的耐蚀性, 且WC含量为20%时涂层具有最佳的耐蚀性, 这主要与此时涂层组织较为细小、均匀等有关^[20]。

图9为激光熔覆WC增强高熵合金涂层的电化学阻抗图谱, 电荷转移电阻测试结果列于表2。从图9(a)可知, 添加WC的激光熔覆涂层容抗弧半径都高于未添加WC的涂层, 且激光熔覆涂层的容抗弧半径随着WC含量增加而先增后减, 容抗弧半径最大值在WC含量为20%时取得; 从图9(b)可知, 未添加WC涂层的电荷转移电阻为 $0.23 \times 10^4 \Omega\cdot\text{cm}^2$, 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的电荷转移电阻从大至小顺序为: 20%>24%>16%>12%>8%>4%>0%, 添加WC的激光熔覆涂层的电荷转移电阻都高于不含WC涂层, 而电荷转移电阻与耐蚀性正相关, 电荷转移电阻越大则电荷转移过程受阻越大, 腐蚀速率会相对较低, 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的耐蚀

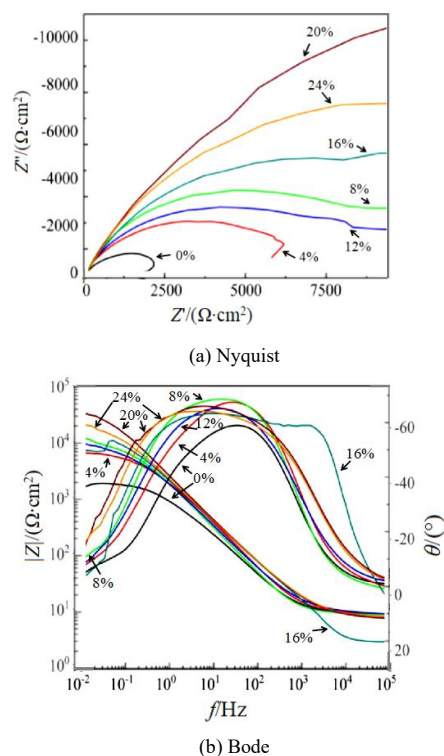


图9 激光熔覆WC增强高熵合金涂层的电化学阻抗图谱

Fig.9 Electrochemical impedance spectra of WC enhanced high entropy alloy coatings

性会相对较好。结合图8可知,极化曲线与电化学阻抗谱测试结果保持一致,即含WC涂层的耐蚀性都高于未添加WC涂层,激光熔覆WC增强高熵合金涂层的耐蚀性会随着WC含量增加而先增后减,这主要是因为一方面WC自身具有较高的化学稳定性,另一方面WC加入可以细化涂层组织并有助于在涂层表面形成保护膜而对腐蚀性介质产生屏蔽作用^[21];但是WC含量并不是越高越好,过高的WC含量会造成高熵合金占比减少,高熵合金中较好耐蚀性元素(Cr、Mo、Ni)含量减少,涂层抵抗腐蚀性介质元素侵蚀的能力减弱;此外,过高的WC含量会使得涂层中第二相含量增多,组织均匀性下降而在局部产生原电池效应^[22],造成激光熔覆WC增强高熵合金涂层耐蚀性下降。

3 结论

(1) 不含WC(0%)和含4% WC的涂层由FCC+ σ 相组成,含WC 8%~24%的涂层中还出现了WC、W₂C和Co₄W₂C相,且激光熔覆WC增强高熵合金涂层中碳化物含量会随着WC含量增加而提高。未添加WC以及添加不同含量WC的激光熔覆涂层中的树枝晶和等轴晶都较为细小,且涂层中未见明显裂纹或者孔洞等缺陷存在。

(2) WC含量为4%~24%的涂层中的WC颗粒都会发生不同程度的熔解和热分解,在微观形貌上表现为WC颗粒发生了开裂或者局部凹陷,颗粒周围出现了块状或者不规则形状的白色/灰色组织。

(3) 加入WC后的涂层的显微硬度平均值都高于不含WC的涂层,当WC含量从0增加至24%时,激光熔覆涂层的显微硬度平均值从303.5 HV逐渐提高至431.8 HV。添加WC的激光熔覆涂层的平均摩擦系数(0.606~0.665)都小于未添加WC的涂层(0.691)、磨损失重(2.24~4.38 mg)都小于未添加WC的涂层(4.59 mg),且激光熔覆WC增强高熵合金涂层的平均摩擦系数和磨损失重会随着WC含量增加而先减后增。含WC的激光熔覆涂层的耐腐蚀性都高于不含WC的涂层,且耐蚀性从高至低顺序为:20%>24%>16%>12%>8%>4%>0%。

参考文献

[1] 韩冰源,孙一麟,韩国峰,等. AlCoCrFeNi 系高熵合金涂层的耐磨性能强化现状[J]. 中国表面工程, 2025,

38(2): 99-114.

- [2] 夏兴川,张恩宽,丁俭,等. 激光熔覆难熔高熵合金涂层研究进展[J]. 金属学报, 2025, 61(1): 59-76.
- [3] 李泽邦,曾宇阳,徐猛,等. 激光熔覆 WC 增强金属基涂层的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(12): 1697-1705.
- [4] 赵义阳,詹凤琪,张传舰,等. 激光熔覆 TiN-TiB 增强 FeCoCrNiMn 高熵合金涂层微观结构和耐磨性能研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60(3): 48-51.
- [5] GAO W B, FENG M Y, CHEN C R, et al. Microstructure evolution, wear resistance and corrosion resistance of CoCrCu_{0.5}FeNiSi_x high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 5539-5558.
- [6] 宣强,马国政,康嘉杰,等. 耐磨耐蚀高熵合金涂层性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(24): 196-205.
- [7] LI S, NIE F H, DING J Y, et al. Influence of laser power on CoCrFeNiMo high-entropy alloy coating microstructure and properties[J]. Materials, 2025, 18(11): 2650-2650.
- [8] 董天顺,刘建辉,马庆亮,等. 激光重熔对等离子喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(3): 125-133.
- [9] 吴文宁,孙文磊,杨玉林,等. WC 含量对激光熔覆 CoCrFeNiTi 高熵合金涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(9): 2642-2652.
- [10] 王庆田,满蛟,王俊成,等. WC 含量对 AlCrFe₂Ni₂Mo_{0.9} 高熵合金涂层组织及耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(2): 282-291.
- [11] ZHU J, ZHAO S H, CHENG Y X, et al. Microstructural evolution and high-temperature wear resistance of novel TiC cermet coatings with CoCrFeNiMo_{0.1} high-entropy alloy binder fabricated by laser powders directed energy deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1033: 181370-181377.
- [12] 杨金玉,刘军,徐晓冰. 车用不锈钢表面激光熔覆 CoCrFeNi-NbC 复合涂层的组织及耐磨性[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(6): 70-75.
- [13] 张国建,程西云,纪秀林,等. 激光熔覆不同层数 FeCoNiCr_{0.5}Al_{0.2} 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 表面技术, 2024, 53(21): 187-197.
- [14] 张泽疆,李新梅. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的耐磨和耐蚀性能[J]. 材料研究学报, 2024, 38(10): 741-750.

下转 112 页