

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.09.008

# Q345 钢表面激光熔覆高熵合金涂层及其耐蚀耐磨性能研究

付娅琦<sup>1\*</sup>, 杨林<sup>1</sup>, 孟伟娜<sup>1</sup>, 罗芷晴<sup>2</sup>, 安熙诺<sup>2</sup>

(1. 安阳职业技术学院 机电工程学院, 河南 安阳 455000; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了提升 Q345 钢的表面耐蚀性和耐磨性, 采用激光熔覆的方法在 Q345 钢基体表面制备了不同  $x$  值的  $\text{AlCoCrFeNiMo}_x(\text{TiC})_{1.6-x}$  ( $x=0, 0.4, 0.8, 1.2$  和  $1.6$ ) 高熵合金涂层。研究了不同  $x$  值时激光熔覆涂层的物相组成、显微形貌、硬度、耐蚀性和耐磨性能。结果表明:  $x$  值会对激光熔覆涂层的物相组成和显微形貌造成明显影响,  $x=0.8$  时激光熔覆涂层中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相和  $\text{TiC}$  相细小且分布均匀,  $x=1.2$  时激光熔覆涂层中会出现  $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$  相。Q345 钢基体表面激光熔覆涂层的硬度明显高于 Q345 钢基体,  $x=1.2$  时激光熔覆涂层的平均显微硬度最大 ( $1\,167.6\text{ HV}$ ); 摩擦系数、磨痕宽度-深度和磨损率的测试结果表明  $x=0.8$  时激光熔覆涂层具有最小的平均摩擦系数、磨痕深度和磨损率。极化曲线和电化学阻抗谱的测试结果保持一致, 即激光熔覆涂层的耐蚀性从高至低顺序为:  $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6 >$  基体, 激光熔覆涂层的耐蚀性都优于 Q345 钢基体。  $x=0.8$  时 Q345 钢基体表面激光熔覆涂层具有最佳的耐蚀性和耐磨性。

**关键词:** 激光熔覆; 高熵合金涂层;  $x$  值; 显微组织; 耐蚀和耐磨性能

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

## Research on laser cladding high entropy alloy coating on the surface of Q345 steel and its corrosion and wear resistance

Fu Yaqi<sup>1\*</sup>, Yang Lin<sup>1</sup>, Meng Weina<sup>1</sup>, Luo Zhiqing<sup>2</sup>, An Xiluo<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve the surface corrosion resistance and wear resistance of Q345 steel,  $\text{AlCoCrFeNiMo}_x(\text{TiC})_{1.6-x}$  ( $x=0, 0.4, 0.8, 1.2$ , and  $1.6$ ) high entropy alloy coatings with different  $x$  values were prepared on the surface of Q345 steel substrate by laser cladding method. The phase composition, microstructure, hardness, corrosion resistance, and wear resistance of laser cladding coatings were studied under different  $x$  values. The results indicate that the value of  $x$  has a significant impact on the phase composition and microstructure of laser cladding coatings. When  $x=0.8$ , the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiC}$  phases in the laser cladding coating are small and evenly distributed, while when  $x=1.2$ , the  $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$  phase appears in the laser cladding coating. The hardness of the laser cladding coating on the surface of Q345 steel

收稿日期: 2025-03-15 修回日期: 2025-04-22

通信作者: 付娅琦(1985—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为 3D 打印技术, email: 408282292@qq.com

基金项目: 河南省科技攻关项目(232102310092)

引用信息: 付娅琦, 杨林, 孟伟娜, 等. Q345 钢表面激光熔覆高熵合金涂层及其耐蚀耐磨性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(9): 54-60.

Fu Yaqi, Yang Lin, Meng Weina, et al. Research on laser cladding high entropy alloy coating on the surface of Q345 steel and its corrosion and wear resistance[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(9): 54-60.

substrate is significantly higher than that of Q345 steel substrate, and the average microhardness of the laser cladding coating is the highest at  $x=1.2$  (1 167.6 HV); The test results of friction coefficient, wear scar width depth, and wear rate indicate that the laser cladding coating has the smallest average friction coefficient, wear scar depth, and wear rate when  $x=0.8$ . The polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy test results are consistent, that is, the corrosion resistance of laser cladding coatings from high to low is in the order of  $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6 > \text{substrate}$ , and the corrosion resistance of laser cladding coatings is better than that of Q345 steel substrate. When  $x=0.8$ , the laser cladding coating on the surface of Q345 steel substrate has the best corrosion resistance and wear resistance.

**Keywords:** laser cladding; high entropy alloy coating;  $x$  value; microstructure; corrosion resistance and wear resistance

激光熔覆作为一种先进的表面改性和修复技术,通过高能激光束将粉末或丝材熔化并沉积在基体表面,形成具有良好力学性能、耐腐蚀性能等优异性能的涂层<sup>[1]</sup>,在航空航天、能源、机械制造、海洋工程和汽车工业等领域都有着广泛应用,目前激光熔覆涂层的研究主要集中在成分设计、工艺优化(激光功率、激光扫描速度等)、微观结构和性能提升等方面<sup>[2-4]</sup>。其中,高熵合金(如等原子比AlCoCrFeNi、FeCoNiCuCr等)涂层因其独特的多主元设计和优异的综合性能(如高强度、高硬度、耐腐蚀性和耐磨性),在激光熔覆技术中展现出良好的应用前景,通过在高熵合金中添加不与高熵合金发生化学反应的陶瓷颗粒(TiC、TiN、WC等)和高熔点合金元素(Mo、Nb、V等)可进一步提升激光熔覆涂层的耐蚀和耐磨性能<sup>[5-7]</sup>,能够显著增强金属零部件的耐磨性、耐腐蚀性、耐高温性和疲劳强度等,同时也可用于修复金属受损部件。然而,当原位陶瓷相TiC以及Mo元素加入AlCoCrFeNi等高熵合金涂层中时,Mo/TiC的成分配比以及二者的相互协同作用对激光熔覆涂层微观组织和力学性能的影响规律及其作用机理并不清楚<sup>[8-11]</sup>。在此基础上,本文选择量大面广的Q345钢为基体材料,通过激光熔覆方法在Q345钢基体表面制备了不同Mo/TiC成分配比的AlCoCrFeNiMo<sub>x</sub>(TiC)<sub>1.6-x</sub>( $x=0, 0.4, 0.8, 1.2$ 和 $1.6$ )高熵合金涂层,在前期激光工艺参数优化的前提下,考察了 $x$ 值对高熵合金涂层物相组成、微观结构和耐蚀耐磨性能的影响,结果可为高性能激光熔覆高熵合金涂层的制备及工业化应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验基材为Q345钢板(厚度6 mm),实测主要元

素化学成分(质量分数)为0.18% C、1.27% Mn、0.36% Si、0.008% P、0.003% S,余量为Fe。激光熔覆所用的粉末材料为纯度(质量分数)99.92% Al(半径 $r=0.143\ 2\ \mu\text{m}$ )、99.93% Cr(半径 $r=0.124\ 9\ \mu\text{m}$ )、99.91% Fe(半径 $r=0.124\ 1\ \mu\text{m}$ )、99.94% Co(半径 $r=0.125\ 1\ \mu\text{m}$ )、99.95% Ni(半径 $r=0.124\ 6\ \mu\text{m}$ )、99.90% Mo(半径 $r=0.136\ 3\ \mu\text{m}$ )、99.92% Ti(半径 $r=0.146\ 2\ \mu\text{m}$ )和石墨粉末,粉末粒径在80~160  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2 涂层制备

采用线切割的方法将Q345钢板加工成60 mm×60 mm×5 mm的样件,表面采用砂纸打磨、清水冲洗和无水乙醇超声清洗后吹干备用,在经过预处理的Q345钢板基体表面制备AlCoCrFeNiMo<sub>x</sub>(TiC)<sub>1.6-x</sub>( $x=0, 0.4, 0.8, 1.2$ 和 $1.6$ )高熵合金涂层。预先按照熔覆涂层的成分配比称量粉末并混合均匀后,在Q345钢板基体表面铺设厚度1 mm的熔覆粉末,采用FC-WQC型高速激光熔覆设备进行激光熔覆处理。在前期工艺优化的基础上,设定激光功率为1 200 W、激光扫描速率选择15 mm/s,此外,控制离焦量为30 mm、搭接率为25%,整个激光熔覆过程中采用12 L/min流量的氩气进行保护。

### 1.3 测试方法

激光熔覆层的物相分析采用布鲁克D8 DISCOVER型X射线衍射分析仪进行,选用铜靶K $\alpha$ 辐射,工作电压和工作电流分别设定为30 mA和20 kV,扫描速率为2 °/min;采用TESCAN AMBER X 2型扫描电子显微镜及其附带能谱仪对激光熔覆涂层的显微形貌和磨损形貌,以及微区成分进行表征;激光熔覆涂层试样经过线切割、磨抛后在Wilson® VH1102型显微硬度计上进行测试,加载载荷为1.96 N、保持载荷时间15 s,结果取3点平均值;采用MPX-3型销盘摩擦磨损试验机对Q345钢基体

和激光熔覆涂层进行干滑动摩擦磨损试验,摩擦副为 $\Phi 4$  mm GCr6硬质合金球,往复速度为4 m/min、载荷20 N、往复摩擦时间为0.5 h,并采用基恩士vhx-7000三维光学显微镜表征磨损深度、宽度等,计算磨损率<sup>[12]</sup>;采用普林斯顿P3000A型电化学工作站测试极化曲线和电化学阻抗谱,标准三电极体系<sup>[13]</sup>,扫描速率为0.5 mV/s、频率范围为0.01~10<sup>5</sup> Hz,测试温度为室温,腐蚀介质为质量分数3.5% NaCl溶液。

## 2 结果与分析

图1为Q345钢基体表面激光熔覆涂层的X射线衍射分析结果。当 $x=0$ 、0.4和0.8时,Q345钢基体表面激光熔覆涂层都主要由TiC、BCC固溶体相组成;当 $x$ 增加至1.2时,除TiC、BCC相外,激光熔覆涂层中还出现了 $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$ 相;继续增加 $x$ 值至1.6时,激光熔覆涂层中除BCC相和 $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$ 相外,还新增了FCC(NiCrCoMo)相。可见,随着 $x$ 值从0增加至1.6(Mo元素含量增加),Q345钢基体表面激光熔覆涂层中TiC含量逐渐减小,并逐渐形成了 $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$ 相和FCC(NiCrCoMo)相。

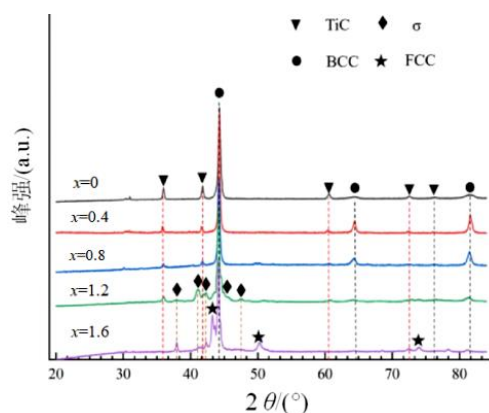
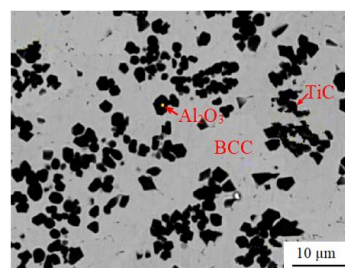


图1 Q345钢基体表面激光熔覆涂层的XRD图谱

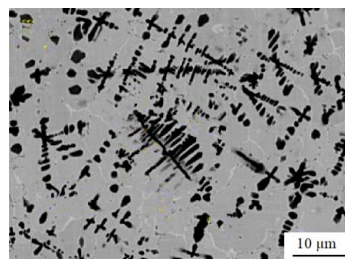
Fig.1 XRD pattern of laser cladding coating on Q345 steel substrate surface

图2为不同 $x$ 值时Q345钢基体表面激光熔覆涂层的显微形貌。当 $x=0$ 时,Q345钢基体表面激光熔覆涂层中可见黑色圆形相,能谱分析表明含(原子百分数)15.5% Al、1.0% Cr、2.5% Fe、5.9% Mo、19.6% Ti、10.9% C和44.6% O,其中Al:O原子百分比接近2:3,结合文献<sup>[14]</sup>可知其为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相(由于含量较少在XRD图谱中未检测到,其中O元素主要来自空气);形状不规则的黑色区域的能谱分析表明含(原子百分数)2.2% Al、1.1% Cr、1.6% Fe、6.0% Mo、44.2% Ti和44.9% C,其中Ti:C原子百分比接近1:

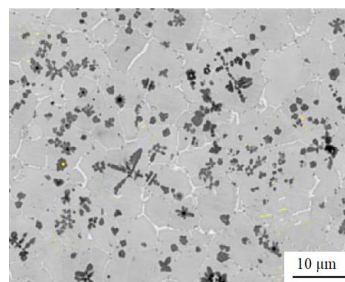
1,为TiC相,而灰色区域为BCC相,如图中箭头所示。当 $x=0.4$ 时,Q345钢基体表面激光熔覆涂层中除黑色颗粒状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相,还出现了针状或不规则形状TiC相以及灰色区域BCC相;当 $x$ 增加至0.8时, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相和TiC相都有所细化,分布较为均匀;当 $x=1.2$ 时,Q345钢基体表面激光熔覆涂层中新出现了富Mo和Fe的灰白色的 $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$ 相,黑灰色第二相(能谱分析表明各元素原子百分数为2.1% Al、0.6% Co、1.7% Cr、2.1% Fe、0.5% Ni、13.7% Mo、27.3% Ti、37.5% C和14.5% O)数量减少, $x=0.8$ 时出现的树枝晶由于溶质再分配而消失;当 $x=1.6$ 时,Q345钢基体表面激光熔覆涂层中出现了新的占主导的FCC(NiCrCoMo)相,其体积百分数约占77%。



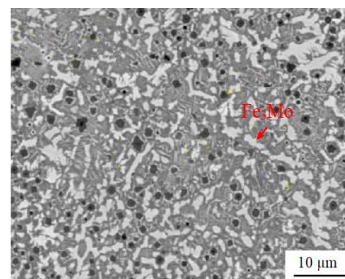
(a)  $x=0$



(b)  $x=0.4$



(c)  $x=0.8$



(d)  $x=1.2$

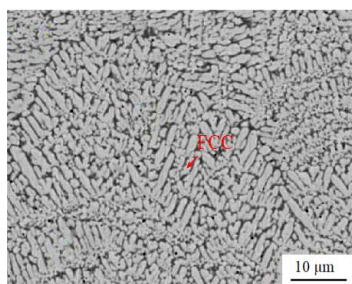
(c)  $x=1.6$ 

图 2 不同  $x$  值时 Q345 钢基体表面激光熔覆涂层的显微形貌

Fig.2 Microscopic morphology of laser cladding coating on the surface of Q345 steel substrate at different  $x$  values

图3为Q345钢基体表面激光熔覆涂层的硬度曲线。可见, Q345钢基体表面激光熔覆涂层的硬度明显高于Q345钢基体, 激光熔覆涂层的厚度约为1.1 mm。相同激光熔覆涂层深度下,  $x=1.2$ 时激光熔覆涂层的平均显微硬度最大(1 167.6 HV), 其次为 $x=0.8$ 时的激光熔覆涂层(1 005.6 HV), 而 $x=1.6$ 时激光熔覆涂层的平均显微硬度最小(950.0 HV), 这主要是因为 $x=1.6$ 时对硬度起主要作用的是固溶强化和少量含Mo相的颗粒强化<sup>[15]</sup>, 而 $x=1.2$ 时激光熔覆涂层中的第二相数量较多, 颗粒强化效果最好, 固溶强化和颗粒强化共同作用下熔覆层硬度最高<sup>[16]</sup>。 $x=0$ 时, 激光熔覆涂层中硬质TiC相的形成可以提升熔覆层的硬度, 主要强化机制是TiC颗粒的弥散强化, 而加入原子半径更大的Mo元素( $x=0.4\sim 1.6$ )后, 晶格畸变造成位错运动阻力增加而产生了固溶强化作用, 且 $x$ 越大则固溶强化效果越明显; 此外, 晶粒细化将有助于提高晶界对位错的阻碍作用, 在晶界强化作用下提升熔覆层的硬度, 多因素共同作用

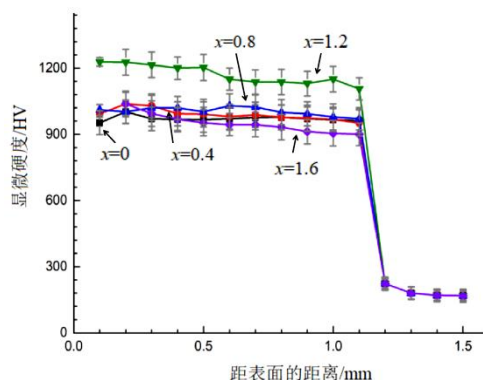
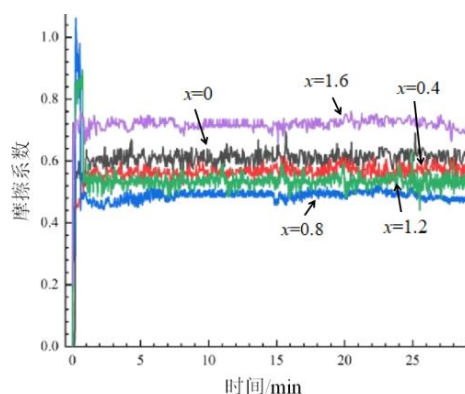


图 3 Q345 钢基体表面激光熔覆涂层的硬度曲线

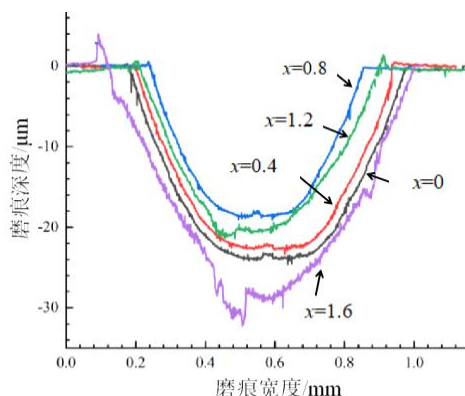
Fig.3 Hardness curve of laser cladding coating on Q345 steel substrate surface

下将造成激光熔覆涂层硬度差异。不同 $x$ 值时激光熔覆涂层的显微硬度波动幅度较小, 表明所选择的激光熔覆工艺参数是适宜的, 在激光熔覆过程中未形成明显微孔或者裂纹缺陷存在<sup>[17]</sup>。

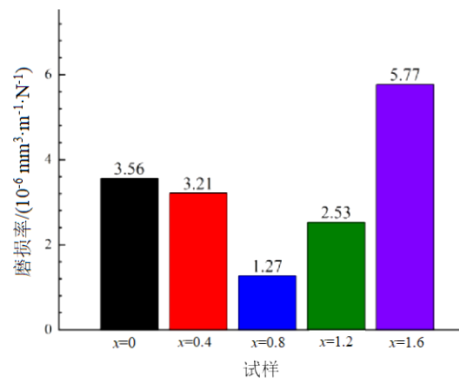
图4为Q345钢基体表面激光熔覆涂层的耐磨性能。从图4(a)的摩擦系数曲线可知,  $x=0$ 、0.4、0.8、1.2和1.6时激光熔覆层的摩擦系数曲线都较为平滑,  $x=1.6$ 时平均摩擦系数最大, 其次为 $x=0$ 的激光熔覆涂层, 而 $x=0.8$ 时平均摩擦系数最小; 从图4(b)



(a) 摩擦系数曲线



(b) 磨痕宽度-深度曲线



(c) 磨损率

图 4 Q345 钢基体表面激光熔覆涂层的耐磨性能

Fig.4 Wear resistance of laser cladding coating on Q345 steel substrate surface



中可见,不同 $x$ 值时激光熔覆涂层的磨痕宽度-深度曲线都呈“倒U型”的形状, $x=1.6$ 时激光熔覆涂层的磨痕深度最大, $x=0.8$ 时的磨痕深度最小;从图4(c)中可见, $x=0$ 时激光熔覆涂层的磨损率为 $3.56 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$ ,随着 $x$ 值从0增加至1.6,激光熔覆涂层的磨损率先减小后增大, $x=0.8$ 时激光熔覆涂层的磨损率最小,约为 $1.27 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$ 。摩擦系数曲线、磨痕宽度-深度曲线和磨损率柱状图的观察结果保持一致,即 $x=0.8$ 时激光熔覆涂层的耐磨性最好,具有最小的平均摩擦系数、磨痕深度和磨损率。

图5为Q345钢基体表面激光熔覆涂层的摩擦磨损形貌。当 $x=0$ 时,Q345钢基体表面激光熔覆涂层中可见较多的细小剥落坑,这主要与此时激光熔覆涂层中尺寸较大的TiC颗粒等较多,在摩擦磨损过程中会从基体中剥离而形成剥落坑有关<sup>[18]</sup>;当 $x$ 增加至0.8时,由于激光熔覆层中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相和TiC相细小且分布均匀,熔覆层在具有较高的硬度的同时具有良好的韧塑性<sup>[19]</sup>,熔覆层表面仅可见较小的剥落坑和较浅的划痕,耐磨性较好;当 $x=1.2$ 时,由于激光熔覆涂层中形成的 $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$ 相会降低熔覆层塑性,因此其虽然具有最高的硬度,但是耐磨性相较 $x=1.0$ 时仍然较差;当 $x$ 值增加至1.6时,熔覆层表面出现了较浅的梨沟、氧化碎片和尺寸较大的剥落坑,这主要与此时熔覆层硬度较低,抵抗摩擦磨损能力较弱有关<sup>[20]</sup>,推测其磨损机制为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。

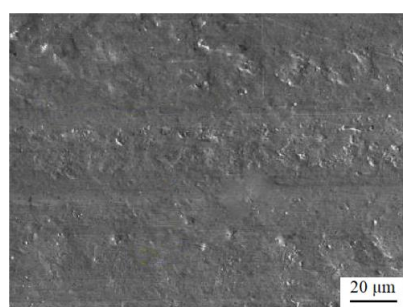
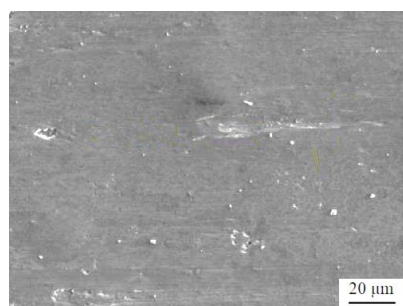
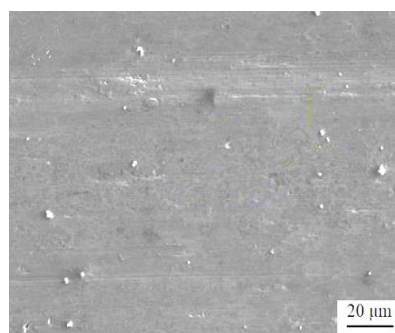
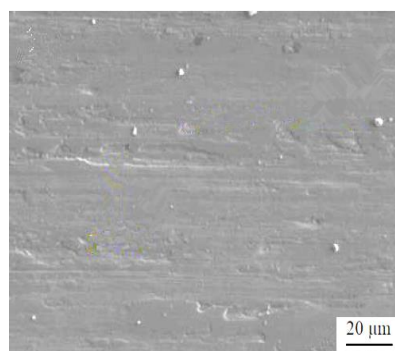
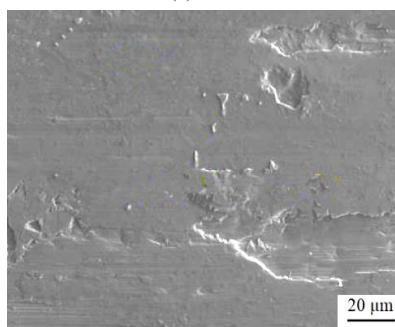
(a)  $x=0$ (b)  $x=0.4$ (c)  $x=0.8$ (d)  $x=1.2$ (e)  $x=1.6$ 

图5 Q345钢基体表面激光熔覆涂层的摩擦磨损形貌

Fig.5 Friction and wear morphology of laser cladding coating on Q345 steel substrate surface

图6为Q345钢基体表面激光熔覆涂层的电化学性能测试结果,表1中为相应的电化学参数拟合结果。从图6(a)的极化曲线中可知,相较于Q345钢基体,激光熔覆涂层的腐蚀电位都相对发生正向移动,腐蚀电位从大至小顺序为: $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6 > \text{基体}$ ,腐蚀电流密度从大至小顺序为:基体 $> x=1.6 > x=0 > x=0.4 > x=1.2 > x=0.8$ ,可见 $x=0.8$ 时激光熔覆涂层的腐蚀电位(热力学参数)最正、腐蚀电流密度(动力学参数)最小,根据腐蚀电位和腐蚀电流密度与耐蚀性能的对应关系可知<sup>[21]</sup>, $x=0.8$ 时激光熔覆涂层的耐蚀性最好,且激光熔覆涂层的耐蚀性都优于Q345钢基体。从图6(b)的电化学阻抗谱可知, $x=0.8$ 时激光熔覆涂层的容抗弧半径最大,且激

光熔覆涂层的容抗弧半径都大于Q345钢基体；此外，从电荷转移电阻的测试结果可知，Q345钢基体的电荷转移电阻为 $1.197 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，而不同 $x$ 值时激光熔覆涂层的电荷转移电阻都相对较大，电荷转移电阻从大至小顺序为： $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6$ 基体，可见，Q345钢基体和激光熔覆涂层的电荷转移电阻从大至小的顺序与腐蚀电位的顺序相同，而电荷转移电阻越大则表示其耐蚀性相对更

高<sup>[22]</sup>。由此可见，极化曲线的测试结果与电化学阻抗谱测试结果相吻合，即Q345钢基体和激光熔覆涂层的耐蚀性从大至小顺序为： $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6$ 基体，激光熔覆涂层的耐蚀性都优于Q345钢基体，这主要是因为激光熔覆涂层中含有助于提升耐蚀性的Mo、Ni等元素，尤其是当 $x=0.8$ 时，细小、均匀分布的第二相有助于减弱电偶腐蚀效应<sup>[23]</sup>，其耐蚀性要优于其他 $x$ 值的激光熔覆涂层。

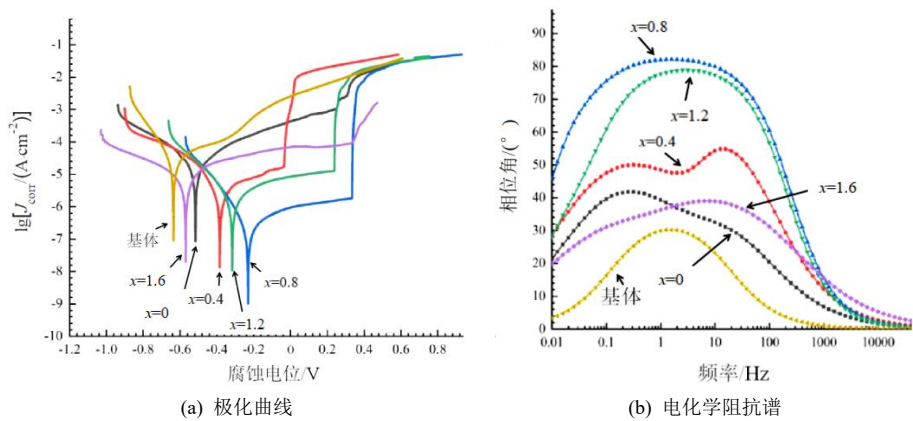


图 6 Q345 钢基体表面激光熔覆涂层的电化学性能

Fig.6 Electrochemical properties of laser cladding coating on Q345 steel substrate surface

表 1 Q345 钢基体表面激光熔覆涂层的电化学参数

Tab.1 Electrochemical parameters of laser cladding coating on Q345 steel substrate surface

| 基体和涂层<br>试样 | 腐蚀电位<br>/V | 腐蚀电流密度<br>/( $10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) | 电荷转移电阻<br>/( $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) | 钝化膜电阻<br>/( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) |
|-------------|------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Q345 钢基体    | -0.647     | 28.00                                                   | 0.119 7                                        | —                                        |
| $x=0$       | -0.528     | 15.50                                                   | 0.192 5                                        | —                                        |
| $x=0.4$     | -0.394     | 4.08                                                    | 0.926 1                                        | 96.03                                    |
| $x=0.8$     | -0.291     | 0.23                                                    | 19.520 0                                       | $5.29 \times 10^4$                       |
| $x=1.2$     | -0.356     | 3.52                                                    | 3.2000                                         | $2.30 \times 10^4$                       |
| $x=1.6$     | -0.582     | 19.10                                                   | 0.172 7                                        | 186.40                                   |

### 3 结 论

(1)  $x$ 值会对激光熔覆涂层的物相组成和显微形貌造成明显影响； $x=0.8$ 时激光熔覆涂层中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相和TiC相细小且分布均匀， $x=1.2$ 时激光熔覆涂层中出现了 $\sigma(\text{Fe}_3\text{Mo})$ 相， $x=1.6$ 时激光熔覆涂层中出现了新的FCC(NiCrCoMo)相。

(2) Q345钢基体表面激光熔覆涂层的硬度明显高于Q345钢基体，激光熔覆涂层的厚度约为1.1 mm；在相同激光熔覆涂层深度下， $x=1.2$ 时激光熔覆涂层的平均显微硬度最大(1 167.6 HV)， $x=1.6$ 时

激光熔覆涂层的平均显微硬度最小(950.0 HV)。摩擦系数曲线、磨痕宽度-深度曲线和磨损率柱状图的观察结果保持一致，即 $x=0.8$ 时激光熔覆涂层的耐磨性最好，具有最小的平均摩擦系数、磨痕深度和磨损率。

(3) Q345钢基体和激光熔覆涂层的腐蚀电位从大至小顺序为： $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6$ 基体，腐蚀电流密度从大至小顺序为：基体 $> x=1.6 > x=0 > x=0.4 > x=1.2 > x=0.8$ ，电荷转移电阻从大至小顺序为： $x=0.8 > x=1.2 > x=0.4 > x=0 > x=1.6$ 基体。激光熔覆涂层的耐蚀性都优于Q345钢基体。

## 参考文献

- [1] 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.
- [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] Chen T, Bi Z, Zhou J, et al. Oxidation behavior of lightweight Al<sub>0.2</sub>CrNbTiV high entropy alloy coating deposited by high-speed laser cladding[J]. Coatings, 2024, 14(9): 1104-1112.
- [4] 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.
- [5] 王海威, 肖文波. 高速激光熔覆 FeCoCrNiMn 高熵合金熔覆层组织及耐磨性研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 148-152.
- [6] 周文婷, 朱春霞, 李凡. 激光熔覆 FeCoCrNiMnNb 高熵合金涂层的组织及耐磨性[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(5): 105-110.
- [7] Li Y, Shi Y. Study on the dilution mechanism of laser-cladding AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2842(1): 12012-12019.
- [8] 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.
- [9] 牛超, 王科锋, 李恒, 等. 基于 PLC 控制的 Q345 钢表面激光熔覆涂层制备与性能研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(9): 56-63.
- [10] 张泽疆, 李新梅. 激光熔覆 CoCrFeNiSi<sub>x</sub> 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.
- [11] 张国建, 程西云, 纪秀林, 等. 激光熔覆不同层数 FeCoNiCr<sub>0.5</sub>Al<sub>0.2</sub> 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 表面技术, 2024, 53(21): 187-197.
- [12] Feng M, Lin T, Lian G, et al. The influence of WC content on the microstructure and properties of laser cladding CoCrFeMnNiSi<sub>1.6</sub> high-entropy alloy coatings[J]. Ceramics International, 2024, 50(24PC): 55286-55306.
- [13] 姚国林, 罗新宇, 陈子然. Q345B 钢表面激光熔覆工艺的 PLC 控制与涂层性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(12): 42-48.
- [14] Jiang B, Huang Z, Liu C, et al. Optimization of process parameters and microstructure of CoCrFeNiTiAl high-performance high-entropy alloy coating[J]. Metals, 2024, 14(12): 1384-1390.
- [15] 秦家庆, 靳丰硕, 韩娟, 等. Mo 含量对 Ti<sub>42.5</sub>Zr<sub>42.5</sub>Nb<sub>10</sub>Ta<sub>5</sub> 高熵合金组织和摩擦学行为影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2025, 53(1): 73-80.
- [16] 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]. 铸造工程, 2025, 49(1): 20-23.
- [17] 江迪, 张树玲, 吴苏瑞, 等. 激光熔覆 FeCrCoMn 高熵合金涂层的组织和摩擦学性能[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(11): 1460-1470.
- [18] 张泽疆, 李新梅, 朱春金, 等. 纳米 TiB<sub>2</sub> 对 CoCrFeNiSi 高熵合金涂层耐磨与耐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2025, 39(3): 191-199.
- [19] Yu D, Wang R, Wu C, et al. Wear, corrosion and cavitation erosion behavior of WC-reinforced FeCrNiMnAl ceramic-high entropy alloy composite coatings by laser cladding[J]. Ceramics International, 2024, 50(24PC): 55790-55800.
- [20] 李海浩, 杨岱昆, 张晨, 等. 激光熔覆 AlCoCrFeMo<sub>x</sub>Ni 高熵合金涂层的组织与性能研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2024, 47(3): 185-189.
- [21] Lin S P, Nie Z R, Huang H, et al. Annealing behavior of a modified 5083 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31(3): 1607-1612.
- [22] Luo F, Wang S, Shi W, et al. Corrosion resistance and wear behavior of CoCrFeNiMn@Gr high entropy alloy-based composite coatings prepared by laser cladding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 3769-3789.
- [23] Dong D, Liu G, Guo W, et al. The effect of heat-treatment on microstructure, wear resistance, and corrosion resistance of laser cladding AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> high entropy alloy coating[J]. Intermetallics, 2025, 180: 108693-108699.