

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.12.006

Q345B 钢表面激光熔覆工艺的 PLC 控制与涂层性能研究

姚国林^{1*}, 罗新宇², 陈子然²

(1. 河南农业职业学院 机电工程学院, 河南 郑州 451450; 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 钢的表面耐磨性和耐蚀性能, 采用可编程逻辑控制器 (PLC) 控制激光熔覆工艺, 以 F60 合金粉作为熔覆材料, 制备了无 Y_2O_3 的涂层和添加 Y_2O_3 的涂层, 对比分析了两种涂层的物相组成、显微组织、硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能。结果表明, 无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层中都含有 α -(Fe, Cr)、 α -Fe、 $(Fe, Cr)_7C_3$ 、 γ -(Fe, Cr) 和 CrFeB 相, 且添加 Y_2O_3 涂层中还出现了 Y_2O_3 相; 两种涂层都与 Q345 钢基体结合良好; 添加 Y_2O_3 涂层的晶粒尺寸和二次枝晶臂间距都小于无 Y_2O_3 涂层, 且添加 Y_2O_3 涂层枝晶区域的 Fe 和 B 元素含量低于无 Y_2O_3 涂层; 相同涂层距离处, 添加 Y_2O_3 涂层的硬度都高于无 Y_2O_3 涂层, 且都明显高于基体; 无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的耐磨性和耐蚀性都优于 Q345 钢基体, 且添加 Y_2O_3 涂层的耐蚀性和耐磨性高于无 Y_2O_3 涂层, 这主要与涂层中存在 $(Fe, Cr)_7C_3$ 和 CrFeB 等硬质相、添加 Y_2O_3 涂层的晶粒和二次枝晶臂间距更加细小等有关。

关键词: Q345B 钢; 激光熔覆; Y_2O_3 涂层; 显微组织; 性能

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

Study on laser cladding technology on Q345B steel surface controlled by PLC and it's coating property

Yao Guolin^{1*}, Luo Xinyu², Chen Ziran²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the surface wear resistance and corrosion resistance of Q345 steel, Y_2O_3 free coating and Y_2O_3 added coating were prepared using laser cladding process controlled by programmable logic controller (PLC). The phase composition, microstructure, hardness, wear resistance and corrosion resistance of the two coatings were compared and analyzed. The results show that both Y_2O_3 free coatings and Y_2O_3 added coatings contain α -(Fe, Cr), α -Fe, $(Fe, Cr)_7C_3$, γ -(Fe, Cr) and CrFeB phases. Y_2O_3 phase also appears in the Y_2O_3 added coating. Both coatings have good bonding with Q345 steel matrix. The grain size and secondary dendrite arm spacing of Y_2O_3 added coating are smaller than those of Y_2O_3 free coating. The content of Fe and B elements in the dendrite area of Y_2O_3 added coating is lower than that of Y_2O_3 free coating. At the same coating distance, the hardness of the Y_2O_3 added coating is higher than that of the Y_2O_3 free coating, and are significantly higher than that of the substrate. The wear resistance and corrosion resistance of the Y_2O_3 free coating and the Y_2O_3 added coating are better than those of Q345 steel substrate. The corrosion resistance and wear resistance of the Y_2O_3

收稿日期: 2023-02-01

修回日期: 2023-02-14

作者简介: 姚国林(1974—)男, 硕士, 副教授, 主要从事材料加工等方面研究, email: 865778269@qq.com

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(212102210395)

added coating are higher than those of the Y_2O_3 free coating, which is mainly related to the existence of hard phases such as $(Fe, Cr)_7C_3$ and $CrFeB$ in the coating, and the finer grain and secondary dendrite arm spacing of the Y_2O_3 added coating.

Keywords: Q345B steel; laser cladding; Y_2O_3 coating; microstructure; property

Q345 钢作为低合金钢中的典型代表,由于具有中等强度、良好的塑性和焊接性能等,在压力容器、船舶、桥梁和特种设备的机械零部件中有着广泛应用,在应用于保障设备可靠运行的关键部件时,Q345 钢部件往往需要进行表面强化处理,以提高其耐磨性、耐蚀性等^[1]。常用的钢制零部件的表面改性技术主要包括火焰喷涂、气相沉积、堆焊和激光表面改性技术等^[2],其中,激光熔覆作为一种在基材表面添加熔覆粉末,利用高能密度激光束在设定扫描路径下将粉末熔化,与基体产生冶金结合而形成熔覆层的新型表面改性技术,具有熔覆层稀释率低、涂层与基体结合力强、工艺参数易于自动化控制等优点^[3],可用于金属零部件的表面修复以及表面性能改善等方面,且新的激光熔覆层可以在不影响原始基体材料性能的同时,提高表面耐磨性和耐蚀性等^[4]。在激光熔覆过程中,由于熔池温度高、冷却速度快,熔覆层中成分偏析较为严重,且易于产生气孔、微裂纹等缺陷^[5],通过在熔覆材料中加入稀土 La、Ce、Y 等及其氧化物的方法,有助于降低裂纹敏

感性、净化熔池等^[6],是提高熔覆层成形质量的有效手段。目前,表面激光熔覆方面的研究多集中在镍基、钴基熔覆层的制备工艺参数优化,以及对熔覆层进行后续热处理、超声滚压和冲击强化等方面^[7-9],以 F60 合金粉作为熔覆材料在 Q345 低合金钢表面制备耐磨、耐蚀铁基涂层的研究报道较少,同时加入稀土 Y_2O_3 粉末对铁基熔覆层的改性效果也不清楚,这方面的研究将有助于含稀土的铁基熔覆层的开发及在低合金钢表面改性中的应用。

1 材料与方法

1.1 试验原材料

试验用基体材料为 Q345 低合金钢(尺寸为 150 mm×150 mm×10 mm),激光熔覆材料为采用气雾法制备的 Fe60 合金粉(平均粒径 98 μm)和稀土 Y_2O_3 粉末(平均粒径 98 μm)。采用电感耦合等离子发射光谱法测得基体和熔覆粉末的化学成分如表 1 所示。

表 1 基材和熔覆粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of base material and cladding powder

	wt. %									
材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	B	Fe
Q345	0.18	0.28	1.38	0.010	0.003	0.16	0.15	0.06	-	余量
Fe60	0.62	0.67	-	-	-	14.6	0.59	-	1.02	余量

1.2 激光熔覆

为了对比 Y_2O_3 粉末对铁基涂层的影响,激光熔覆制备了 2 种涂层:无 Y_2O_3 涂层(Fe60)和添加 Y_2O_3 涂层(Fe60+1 wt.% Y_2O_3)。Fe60 + Y_2O_3 复合粉末在行星式球磨机中均匀混粉,研磨球为 Φ 6 mm 氧化锆球,球料比 2:1、转速 380 r/min,球磨时间设定为 120 min;球磨混合均匀后转入真空干燥箱中,进行 80 ℃保温 120 min 的干燥处理,然后真空保存备用。

在配备用连续激脉冲光器、同轴激光熔覆头、送粉器、PLC 控制系统的激光熔覆平台上,对 Q345B 低合金钢板进行表面激光熔覆^[10],送粉方式为同步

送粉,采用 PLC 控制前期优化的激光熔覆工艺参数:激光功率 1100 W,激光扫描速度 350 mm/min,送粉速率 5 g/min,光斑直径 3 mm,熔覆层搭接率 45%,离焦量 12 mm,保护气高纯氩气的流量为 8 L/min。

1.3 测试方法

采用德国 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对涂层物相进行分析,铜靶 $K\alpha$ 辐射,电压为 20 kV、电流 15 mA,扫描速度 2 °/min;线切割金相试样,磨抛后采用体积比 1:3 硝酸:盐酸溶液腐蚀,清水冲洗和吹干后,在 Leica DM6 型光学显微镜和 TESCAN

Maia3 型扫描电子显微镜上观察;采用 Wilson 402MVD 型显微硬度计进行硬度测试,载荷 300 g,保持载荷时间 15 s,取 3 点平均值作为结果;采用 MPX-2000A 型盘销式摩擦磨损试验机进行室温摩擦磨损性能测试,对磨球为三氧化二铝陶瓷球,加载 50 N,转速 300 r/min,磨损时间为 0.5 h,记录摩擦系数曲线,并计算磨损率^[11];采用普林斯顿 VersaSTAT 4 型电化学工作站进行电化学性能测试,标准三电极体系(被测试样为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,Pt 为辅助电极),腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液,温度为室温,测试基体和涂层的极化曲线。

2 结果与分析

图 1 为 Q345B 钢表面涂层的 X 射线衍射图谱。对于无 Y_2O_3 涂层,主要物相为 α -(Fe,Cr)、 α -Fe、(Fe,Cr)₇C₃、 γ -(Fe,Cr) 和 CrFeB 相;对于添加 Y_2O_3 的涂层,除含有无 Y_2O_3 涂层的物相外,复合涂层中还出现了 Y_2O_3 衍射峰。此外,相较而言,添加 Y_2O_3 涂层的衍射峰相对无 Y_2O_3 涂层有少量向右偏移特征,衍射峰半宽高有所增大,根据谢乐公式^[12]:

$$D = \frac{k\lambda}{B\cos\theta} \quad (1)$$

式中: D 、 k 、 λ 、 B 和 θ 分别为晶粒尺寸、Scherrer 常数、波长、衍射峰半宽和衍射角。可见,衍射峰半宽高增大,则涂层的晶粒越小,表明添加 Y_2O_3 涂层的晶粒尺寸相对无 Y_2O_3 涂层更加细小,这主要与 Y_2O_3 加入有助于提高激光熔覆涂层熔池的形核率,以及抑制凝固过程中的晶粒长大有关^[13]。

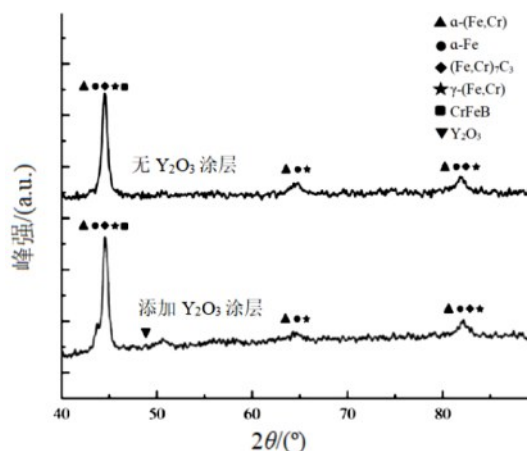


图1 Q345B 钢表面涂层的 XRD 图谱

Fig.1 XRD spectrum of Q345B steel surface coating

图 2 为 Q345B 钢表面无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的显微组织,分别列出了涂层上部、中部和底部的显微组织。对比涂层上部组织可知,无 Y_2O_3 涂层中存在少量等轴晶和枝晶,而添加 Y_2O_3 涂层中主要为细小等轴晶;对比涂层中部组织可知,无 Y_2O_3 涂层中可见网状分布的粗大树枝晶,而添加 Y_2O_3 涂层中可见少量树枝晶和等轴晶;对比涂层底部组织可知,无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的底部都可见胞状晶、柱状晶,与基体相连的界面区域未见气孔、微裂纹等缺陷存在,涂层与基体结合良好。相较而言,添加 Y_2O_3 涂层中等轴晶相对较多且更加细小,这主要是因为一方面稀土 Y 元素自身具有良好的表面活性而有助于增强熔池润湿性,降低固-液界面自由能的同时,促进形核;另一方面,添加 Y_2O_3 后 Y 易于在固液前沿的界面处富集,抑制柱状晶生长的同时,会对晶粒产生拖拽作用而阻碍晶粒长大^[14]。两方面共同作用下,使得添加 Y_2O_3 涂层的晶粒得到细化。

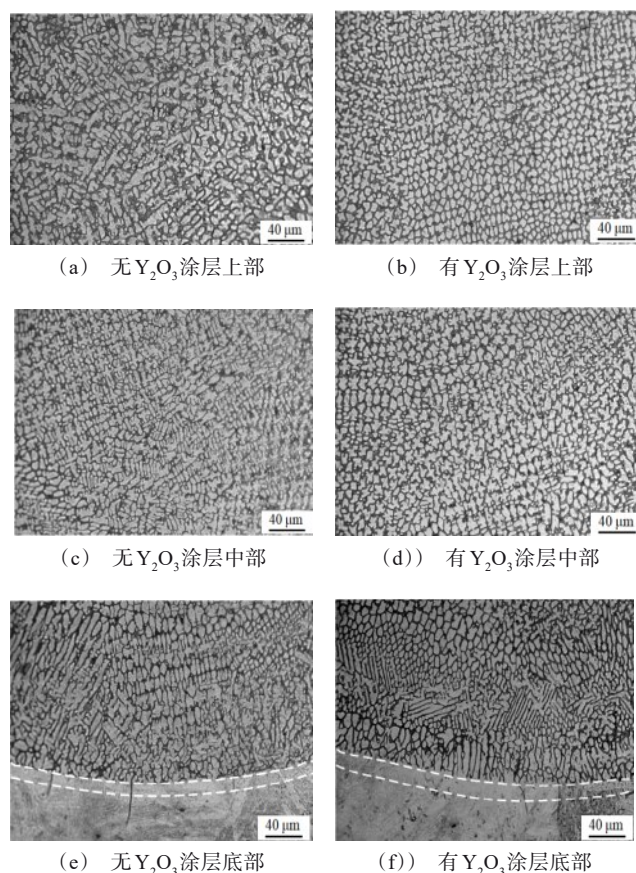


图2 Q345B 钢表面无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的显微组织

Fig.2 Microstructure of Q345B steel surface with Y_2O_3 free coating and Y_2O_3 added coating

图 3 为无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的显微形貌。表 2 为图 3 的局部区域能谱分析结果。相较于无 Y_2O_3 涂层,添加 Y_2O_3 涂层的层状共晶和枝晶间距更加细密,这主要与 Y_2O_3 的加入有助于细化组织有关。枝晶间(区域 A、区域 C)和枝晶(区域 B)位置都主要含有 C、Si、Cr、Fe、Ni 和 B 元素,而枝晶区域 D 位置除上述几种元素外,还含有一定含量的 Y 元素。

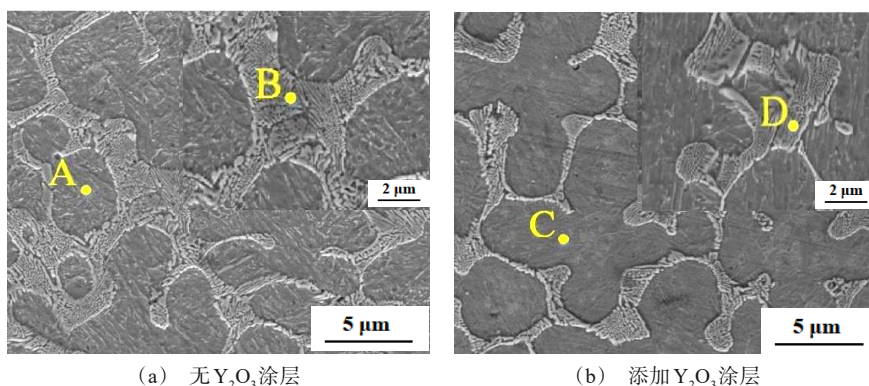


图 3 无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的显微形貌

Fig.3 Micromorphology of Y_2O_3 free coating and Y_2O_3 added coating

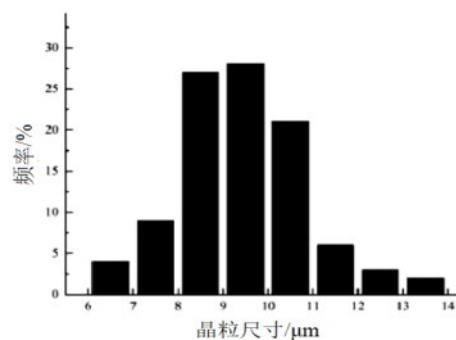
表 2 图 3 的局部区域能谱分析结果

Tab.2 Energy spectrum analysis results of local areas in Fig.3

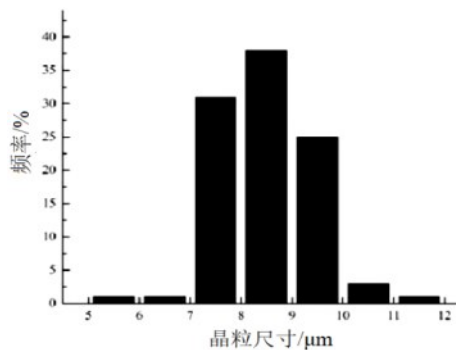
位置	C	Si	Cr	Fe	Ni	B	Y
区域 A	3.86	0.87	12.19	80.70	1.12	1.04	-
区域 B	4.27	0.57	17.27	72.76	3.06	1.85	-
区域 C	3.54	0.83	13.65	79.77	1.07	0.92	-
区域 D	6.37	0.50	18.17	71.42	1.63	1.52	0.18

进一步对涂层的晶粒尺寸和二次枝晶臂间距进行统计分析,图 4 为无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的晶粒尺寸直方图,表 3 为相应的二次枝晶臂间距测量结果。可见,无 Y_2O_3 涂层的晶粒尺寸主要分布在 8~11 μm ,平均晶粒尺寸为 9.56 μm ;添加 Y_2O_3 涂层的晶粒尺寸主要分布在 7~10 μm ,平均晶粒尺寸为 8.62 μm 。对涂层中 5 个区域进行二次枝晶臂间距测量,无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的二次枝晶臂间距平均值分别为 3.57 μm 和 3.01 μm 。可见,添加 Y_2O_3 涂层的晶粒尺寸和二次枝晶臂间距都小于无 Y_2O_3 涂层,这主要与 Y_2O_3 的加入有助于细化涂层组织有关^[16],测试结果与图 1 的 XRD 图谱和图 2 的显微组织观察结果相吻合。

此外,对比分析可知,两种涂层的枝晶区域的 C、Cr、Ni 和 B 元素含量都高于枝晶间区域,且添加 Y_2O_3 涂层枝晶区域的 Fe 和 B 元素含量低于无 Y_2O_3 涂层,这主要是因为涂层中 C、Cr 和 Ni 等元素更易于在枝晶处富集,且添加 Y_2O_3 涂层的晶粒更加细小、晶界更多,促使 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 和 CrFeB 相更弥散地分布在熔池内部^[15]而降低了枝晶区域 Fe 和 B 元素含量。



(a) 无 Y_2O_3 涂层



(b) 添加 Y_2O_3 涂层

图 4 涂层的晶粒尺寸直方图

Fig.4 Grain size histogram of coatings

表3 涂层的二次枝晶臂间距测量结果

Tab.3 Measurement results of secondary dendrite arm spacing of coatings

涂层	μm					平均值
	区域1	区域2	区域3	区域4	区域5	
无 Y_2O_3 涂层	4.27	3.83	3.47	3.04	3.24	3.57
添加 Y_2O_3 涂层	3.25	3.16	2.96	2.77	2.92	3.01

图5为无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的硬度分布曲线。从图5可见,自涂层表面至基体进行硬度打点,硬度会随着离表面距离增加而先基本保持不变(涂层),随后快速下降(热影响区HAZ),直至在基体区域保持稳定的特征。在涂层中离表面相同位置处,添加 Y_2O_3 涂层的硬度都高于无 Y_2O_3 涂层,这主要是因为一方面, Y_2O_3 的加入有助于提高形核率,细化晶粒组织而起到细晶强化作用;另一方面, Y_2O_3 自身也具有较高的硬度^[17],两方面共同作用,涂层硬度会有所提高。

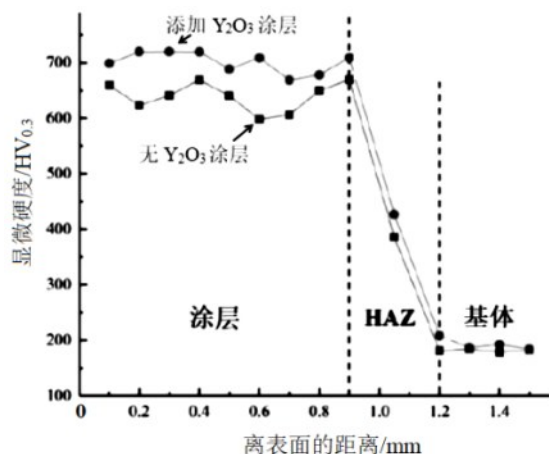


图5 涂层的硬度分布曲线

Fig.5 Hardness distribution curves of coatings

图6为基体和涂层的摩擦系数曲线,平均摩擦系数和磨损率统计结果见表4。基体和涂层的摩擦系数都会随着滑动时间延长而先快速增大,随后趋于稳定。无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的摩擦系数都小于 Q345 钢基体,且相同滑动时间下,基体和涂层的摩擦系数从低至高顺序为:添加 Y_2O_3 涂层<无 Y_2O_3 涂层<基体。从平均摩擦系数和磨损率测试结果看,基体和涂层的平均摩擦系数从低至高顺序为:添加 Y_2O_3 涂层<无 Y_2O_3 涂层<基体,磨损率从低至高顺序为:添加 Y_2O_3 涂层<无 Y_2O_3 涂层<基体。由此可

见,无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的耐磨性能都高于 Q345 钢基体,且添加 Y_2O_3 涂层的耐磨性高于无 Y_2O_3 涂层。这主要是因为涂层中 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 和 CrFeB 等硬质相的存在有助于提升涂层的耐磨性^[18],且添加 Y_2O_3 涂层的晶粒和二次枝晶臂间距相对无 Y_2O_3 涂层更加细小,耐磨性会相对较高。

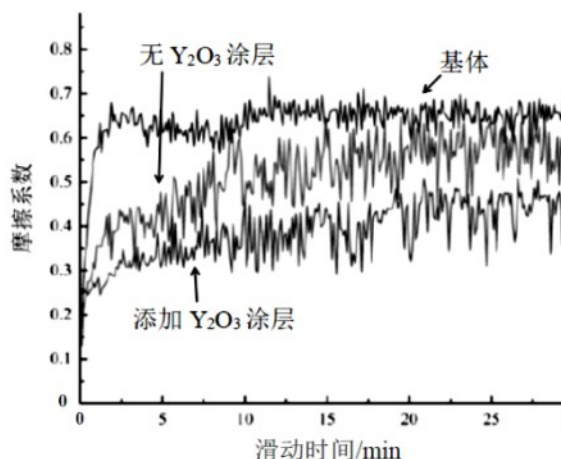


图6 基体和涂层的摩擦系数曲线

Fig.6 Friction coefficient curves of substrate and coating

表4 基体与涂层的平均摩擦系数和磨损率

Tab.4 Average friction coefficient and wear rate of substrate and coating

试样	平均摩擦系数	磨损率/ $(10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
基体	0.655	4.37
无 Y_2O_3 涂层	0.534	3.52
添加 Y_2O_3 涂层	0.324	2.47

图7为基体和涂层的极化曲线,表5为极化曲线拟合结果。Q345 钢基体的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 -0.621 V 和 $3.32 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; 无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的腐蚀电位都相对 Q345 钢基体发生正向移动,腐蚀电流密度相对基体减小。根据热力学参数腐蚀电位、动力学参数腐蚀电流密度与材料耐腐蚀性之间的对应关系可知,腐蚀电位越正,则材料的腐蚀倾向越小;腐蚀电流密度越小,则腐蚀速率越低^[19]。由此可见,无 Y_2O_3 涂层和添加 Y_2O_3 涂层的耐蚀性都优于 Q345 钢基体,且添加 Y_2O_3 涂层的耐蚀性要高于无 Y_2O_3 涂层。这主要是因为涂层中存在的 $\alpha-(\text{Fe}, \text{Cr})$ 、 $\gamma-(\text{Fe}, \text{Cr})$ 固溶体,有助于在腐蚀过程中产生钝化膜,对基体起到保护作用^[20],且添加 Y_2O_3 涂层的晶粒更加细小、晶界更多, $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 和

CrFeB 相更弥散地分布在熔池内部,有助于促进 Cr 元素扩散,并形成钝化膜^[21]而提高耐腐蚀性。

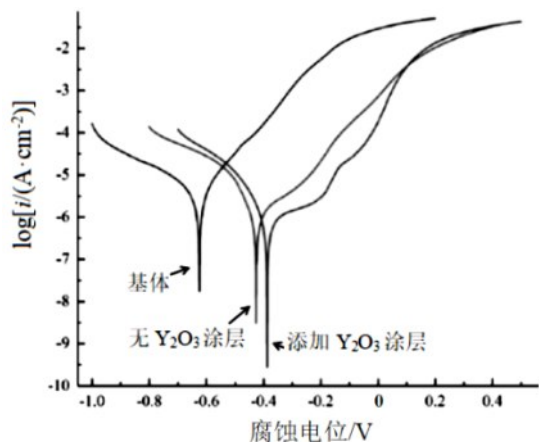


图 7 基体和涂层的极化曲线

Fig.7 Polarization curves of substrate and coatings

表 5 基体与涂层的极化曲线拟合结果

Tab.5 Polarization curve fitting results of substrate and coatings

试样	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/ (A·cm ⁻²)
基体	-0.621	3.32×10^{-6}
无 Y ₂ O ₃ 涂层	-0.429	5.12×10^{-7}
添加 Y ₂ O ₃ 涂层	-0.392	2.29×10^{-7}

3 结论

1) 无 Y₂O₃ 涂层和添加 Y₂O₃ 涂层中都含有 α -(Fe, Cr)、 α -Fe、(Fe, Cr)₇C₃、 γ -(Fe, Cr) 和 CrFeB 相,且添加 Y₂O₃ 涂层中还出现了 Y₂O₃ 相。无 Y₂O₃ 涂层和添加 Y₂O₃ 涂层的底部都可见胞状晶、柱状晶,与基体相连的界面区域未见气孔、微裂纹等缺陷存在,涂层与基体结合良好。

2) 无 Y₂O₃ 涂层的晶粒尺寸主要分布在 8 ~ 11 μm ,平均晶粒尺寸为 9.56 μm ,二次枝晶臂间距平均值为 3.57 μm ;添加 Y₂O₃ 涂层的晶粒尺寸主要分布在 7~10 μm ,平均晶粒尺寸为 8.62 μm ,二次枝晶臂间距平均值为 3.01 μm ;添加 Y₂O₃ 涂层的晶粒尺寸和二次枝晶臂间距都小于无 Y₂O₃ 涂层。

3) 在涂层中离表面相同位置处,添加 Y₂O₃ 涂层的硬度都高于无 Y₂O₃ 涂层;基体和涂层的平均摩擦系数和磨损率从低至高顺序为:添加 Y₂O₃ 涂层<无 Y₂O₃ 涂层<基体。无 Y₂O₃ 涂层和添加 Y₂O₃ 涂层的耐

蚀性都优于 Q345 钢基体,且添加 Y₂O₃ 涂层的耐腐蚀性要高于无 Y₂O₃ 涂层。

参考文献

- [1] 王岩,屈栋,魏瑛康,等. 17-4PH 马氏体沉淀硬化不锈钢表面防护技术研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(10): 13-24.
- [2] 冯凯,郭彦兵,冯育磊,等. 激光熔覆高强韧铁基涂层精细组织调控与性能研究[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 513-528.
- [3] 范哲超,陆明,丰洪微. PLC 控制激光焊接 2524 铝合金接头的组织研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(5): 63-67.
- [4] 衡钊,舒林森. 激光功率对 27SiMn 钢激光熔覆力学性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 118-126.
- [5] Shu Y F, Fan S L, Xiong C W. Welding process of dissimilar metals controlled by PLC and it's microstructure and properties[J]. Results in Physics, 2018, 11: 853-860.
- [6] 张梁,林晨,刘佳,等. 稀土 La₂O₃ 含量对激光熔覆 304L 涂层的影响[J]. 应用激光, 2021, 41(5): 968-973.
- [7] 王晓蓉. 基于 PLC 控制的 1420 铝合金电子束焊接接头的组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(23): 193-197.
- [8] 朱志凯,黄江,吴腾,等. 激光功率对 Q235 碳素钢表面激光熔覆 Fe60 涂层性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2023, 47(2): 83-86.
- [9] 赵奕斌,张栢枫,张瑞阳,等. 激光熔覆工艺参数对 Ti/SiC 复合涂层显微硬度和磨损性能的影响[J]. 应用激光, 2022, 42(3): 36-42.
- [10] Jiang H Y, Zhao X Y, Wang D, et al. Effects of Y₂O₃ addition on the microstructure and static lead-bismuth eutectic thermal corrosion behaviors of FeCrAlTiC-xY₂O₃ laser clade coatings[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1759-1759.
- [11] 曹旺萍,李银标,王振宇. 45 钢表面激光熔覆钴基涂层组织与磨损性能研究[J]. 应用激光, 2022, 42(2): 41-47.
- [12] Wang X H, Liu S S, Zhang M, et al. Effect of rare earth oxide on the microstructure and wear properties of in situ-synthesized ceramics-reinforced Fe-based laser cladding coatings[J]. Tribology Transactions, 2020, 63(2): 345-355.
- [13] 韩成府,许培鑫,马伟伟,等. H13 钢激光熔覆 Ni60A/WC 复合涂层的硬度及耐磨性研究[J]. 材料保护, 2021, 54(12): 90-96.
- [14] Liu C L, Ye J X, Niu S B. Automatic welding system design for transformer station grounding steel based on PLC[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 504(1): 12099-12106.

- [15] 刘佳, 林晨, 徐欢欢, 等. 稀土 Y_2O_3 对激光熔覆 Ni 基 WC 熔覆层的组织与性能影响[J]. 应用激光, 2021, 41(5): 948-954.
- [16] Chen J H, Xu P, Tian J Y, et al. Effects of solid solution treatment on the microstructure and wear resistance of a laser cladding Fe-Mn-Si/WC/ Y_2O_3 shape memory alloy (SMA) composite coating[J]. Lasers in Engineering, 2020, 47(1-3): 113-123.
- [17] 曹四龙, 王凌倩, 周健松. 激光熔覆 NiCrMo 和 NiCrBSi 涂层的微观组织及摩擦学性能研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 1-8.
- [18] 姜弘毅, 赵信毅, 李天庆, 等. 激光熔覆 35.8Fe-20%Ti-20%Al-24%Cr-0.2% Y_2O_3 涂层组织与性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19):287-296.
- [19] Lin S P, Nie Z R, Hui H, et al. Annealing behavior of a modified 5083 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2010, 31(3): 1607-1612.
- [20] 廖金雄, 陈金友. 激光表面强化对 40CrNiMo 钢组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2021, 54(5): 144-149.
- [21] Gao Z, Bu H, Feng Y, et al. Strengthening mechanism of Y_2O_3 nanoparticles on microstructure and mechanical properties of the laser additive manufacturing joint for large thickness TC₄ titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 71: 37-55.