

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.04.005

## A356 铝合金的表面改性与耐磨及耐蚀性能研究

禹露<sup>1\*</sup>, 许培鑫<sup>2</sup>, 罗志翔<sup>2</sup>

(1. 河南地矿职业学院 智能制造学院, 河南 郑州 451464;

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 A356 铝合金的表面耐磨耐蚀性能, 采用等离子喷涂的方法在 A356 铝合金基体表面制备了 4 种高熵合金涂层 (FeCoCrNi 和 FeCoCrNi+Mn/Cu/Ti), 对比分析了各等离子喷涂涂层的物相组成、显微形貌、硬度、耐磨和耐蚀性能。结果表明 4 种等离子喷涂涂层中都可见面心立方固溶体和氧化物的衍射峰。在 FeCoCrNi 中加入 Cu/Ti 后, 涂层中还出现了 Cu/Ti 的衍射峰。4 种等离子喷涂涂层厚度都介于 210~300  $\mu\text{m}$ , 涂层与基体界面以机械结合为主。4 种等离子喷涂涂层的硬度、平均摩擦系数都高于 A356 铝合金基体, 磨损率从低至高顺序为: FeCoCrNi (涂层 I) < FeCoCrNiTi (涂层 IV) < FeCoCrNiMn (涂层 II) < FeCoCrNiCu (涂层 III) < 基体。相较 A356 铝合金基体, 涂层的腐蚀电位发生正向移动, 腐蚀电流密度和点蚀电位减小, Nyquist 圆弧半径、阻抗模值  $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$  和电荷转移电阻  $R_{ct}$  增大。4 种等离子喷涂涂层的耐蚀性能都优于 A356 铝合金基体, 且涂层 IV 的耐腐蚀性能最好。

**关键词:** A356 铝合金; 等离子喷涂; FeCoCrNi 涂层; 表面改性; 耐磨性; 耐腐蚀性

**中图分类号:** TG146.2      **文献标识码:** A

## Study on surface modification and wear and corrosion resistance of A356 aluminum alloy

Yu Lu<sup>1\*</sup>, Xu Peixin<sup>2</sup>, Luo Zhixiang<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering, Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 451464, 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 A356 aluminum alloy, four kinds of high entropy alloy coatings (FeCoCrNi and FeCoCrNi+Mn/Cu/Ti) were prepared on the surface of A356 aluminum alloy by plasma spraying. The phase composition, microstructure, hardness, wear resistance and corrosion resistance of plasma spraying coatings were compared and analyzed. The results show that the four kinds of plasma spraying coatings all have the diffraction peaks of face centered cubic solid solution and oxide, when the element Cu/Ti is added to FeCoCrNi, the Cu/Ti diffraction peaks also appear in the coatings. The thickness of the four plasma spraying coatings is between 210  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$ , and the interface between the coating and the substrate is mainly mechanical. The hardness and average friction coefficient of the four plasma spraying coatings are higher than that of A356 aluminum alloy substrate, the order of wear rate from low to high is: FeCoCrNi (coating I) < FeCoCrNiTi (coating IV) < FeCoCrNiMn (coating II) < FeCoCrNiCu (coating III) < substrate. Compared with A356 aluminum alloy substrate, the corrosion potential of coating shifted forward, and the corrosion current density and pitting potential decreased, the Nyquist arc radius, impedance modulus

收稿日期: 2023-06-09

修回日期: 2023-07-20

作者简介: 禹露 (1986—), 女, 本科, 讲师, 研究方向: 汽车材料开发与应用研究, email: chinailove2022@126.com

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目 (182102610014); 河南科技智库调研课题 (HNKJZK-2024-39B)

$|Z|_{0.01\text{ Hz}}$  and charge transfer resistance  $R_{ct}$  increased. The corrosion resistance of the four plasma spraying coatings is better than that of A356 aluminum alloy substrate, and the corrosion resistance of coating IV is the best.

**Keywords:** A356 aluminum alloy; plasma spraying; FeCoCrNi coating; surface modification; wear resistance; corrosion resistance

A356 铝合金由于具有较高的比强度、良好的塑性和冲击韧性等,而被广泛应用于汽车、航空航天、船舶和电子等领域,但其硬度低、耐磨性和耐蚀性相对较差等缺点,仍然在一定程度上制约了其更广泛应用<sup>[1]</sup>。如作为汽车轮毂使用时,其在潮湿性复杂环境下的抗腐蚀性能不足、行驶过程中受到异物碰撞或者冲击会造成磨损等<sup>[2-3]</sup>。采用表面改性技术可以在不改变原有材料固有性能的基础上,通过表面处理赋予材料新的表面性能,如提高表层硬度、耐磨性和耐蚀性等<sup>[4]</sup>。目前的表面改性技术较多,如渗氮、激光处理、微弧氧化、气相沉积等,虽然这些改性技术可以在一定程度上改善表层性能,但同时也存在改性成本高、工艺复杂、综合性能不足等问题<sup>[5-7]</sup>。等离子喷涂技术是一种以等离子电弧作为热源,通过惰性气体保护,将表层金属粉末加热至熔融或半熔融状态,并沉积在金属基体表面,使金属表层获得高硬度、高耐磨、强耐蚀等特性的表面改性技术,具有工艺简单、涂层组织细小等特点<sup>[8]</sup>,目前已有采用等离子喷涂技术在金属表面制备高硬、高耐磨陶瓷涂层的研究报道,但关于在铝合金表面制备硬度高、抗腐蚀和抗摩擦的高熵合金涂层鲜有报道<sup>[9]</sup>。为了满足汽车轮毂等对 A356 铝合金表面高硬度、高耐磨和良好耐蚀性能的要求,本文采用等离子喷涂的方法在 A356 铝合金基体表面制备 FeCoCrNi-X (X=Mn、Cu、Ti) 高熵合金涂层(由 5 种或 5 种以上等量或大约等量金属形成的合金涂层),对比分析了不同高熵合金涂层的物相组成、显微形貌、硬度、耐磨性和耐蚀性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验基材为汽车轮毂用 A356 铝合金,主要元素化学成分(质量分数)为: 6.84%Si、0.30%Mg、0.11%Fe、0.12%Ti、0.005%Cu、0.006%Mn、0.005%Zn,余量为 Al。等离子喷涂所用粉末原料包

括: 纯度 99.9 wt.% 的 FeCoCrNi 气雾化粉、纯度 99.9 wt.% 的 FeCoCrNiMn 气雾化粉、纯度 99.6 wt.% 的单质 Cu 粉和纯度 99.7 wt.% 的单质 Ti 粉。

### 1.2 等离子喷涂改性

在 EU55-V-200 型混料机中将原子比 1:1 的 FeCoCrNi: Cu 或 FeCoCrNi: Ti 粉末混合 12 h, 获得均匀的 FeCoCrNiCu 和 FeCoCrNiTi 粉(粒度 36 ~ 54  $\mu\text{m}$ ), 混粉后放入真空干燥箱中干燥 2 h, 真空密封备用。预先用 400~1200# 砂纸将 A356 铝合金表面进行逐级打磨, 清水和酒精清洗后吹干; 采用喷砂机对经过打磨后的 A356 铝合金基体进行喷砂处理, 以增加基体材料的表面粗糙度; 采用 AT3000 型等离子喷涂系统对喷砂处理后的 A356 铝合金基体进行等离子喷涂, 电弧电压和电流分别为 60 V、600 A, 喷涂距离 80 mm、喷枪移动速度 180 mm/s, 送粉速率 70 g/min, 保护气为高纯氩气(0.5 MPa), 分别制备了 4 种涂层: FeCoCrNi(涂层 I)、FeCoCrNiMn(涂层 II)、FeCoCrNiCu(涂层 III) 和 FeCoCrNiTi(涂层 IV)。

### 1.3 测试与表征

等离子喷涂涂层的物相分析采用德国 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行分析, Cu 靶  $K\alpha$  辐射, 扫描步距 2  $^\circ/\text{min}$ , 电压、电流分别为 20 kV、100 mA; 采用奥林巴斯 GX51 光学显微镜和日立 S-4800 型扫描电子显微镜对显微形貌进行观察, 并用附带能谱仪进行微区成分测试; 硬度测试采用 HMV-5 型显微硬度计进行测试, 载荷 200 g, 保持载荷时间 10 s; 室温摩擦磨损试验采用 UMT-5 型摩擦磨损试验机进行测试, 载荷 10 N, 摩擦磨损时间为 1800 s, 对磨球为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球, 以磨损率  $\eta$  作为评价耐磨性的指标:

$$\eta = \frac{V}{FL} \quad (1)$$

式中:  $V$ 、 $F$  和  $L$  分别为磨损体积( $\text{mm}^3$ )、法向载荷(N)和磨损距离(m)。室温电化学性能测试采用普林斯顿 PAR2273 型电化学工作站(综合测试系统)进行, 工作电极、对电极和参比电极分别为被测

试样( $1\text{ cm}^2$ )、Pt 片和饱和甘汞电极,扫描速度  $0.2\text{ mV/s}$ ,阻抗谱测试频率范围为  $0.01\sim 10^5\text{ Hz}$ 。

## 2 结果与分析

图 1 为 A356 铝合金表面等离子喷涂涂层的 X 射线衍射分析结果。对于涂层 I 和涂层 II,都可见 FCC(面心立方)固溶体和氧化物(涂层 I 主要为  $\text{CrO}$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,涂层 II 加入 Mn 后形成新的  $\text{MnO}_2$  和  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ) 的衍射峰,未见因各元素之间发生反应而形成的脆性金属间化合物的衍射峰,且在高熵合金中加入 Mn 元素后,FCC 固溶体和氧化物的衍射峰有向小角度偏移的特征,这主要与 Mn 的加入促进了晶格畸变,使晶格常数变大有关<sup>[10]</sup>;对于涂层 III,除 FCC 固溶体和氧化物(主要为 Cr 的氧化物  $\text{CrO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 的衍射峰外,还出现了 Cu 的衍射峰,可见 Cu 元素的加入并未与 FeCoCrNi 发生化学反应而形成新的金属间化合物<sup>[11]</sup>;对于涂层 IV,除 FCC 固溶体和氧化物(主要为  $\text{CrO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,以及  $\text{TiO}$  和  $\text{TiO}_2$ ) 衍射峰外,还出现了 BCC(体心立方)固溶体和 Ti 的衍射峰,可见 Ti 的加入并没有完全固溶,大部分仍然以单质或氧化物形式存在,这主要是因为 Ti 的熔点相对其它元素高,以及 Ti 的原子半径相对其他元素较大,固溶量相对较小有关<sup>[12]</sup>。

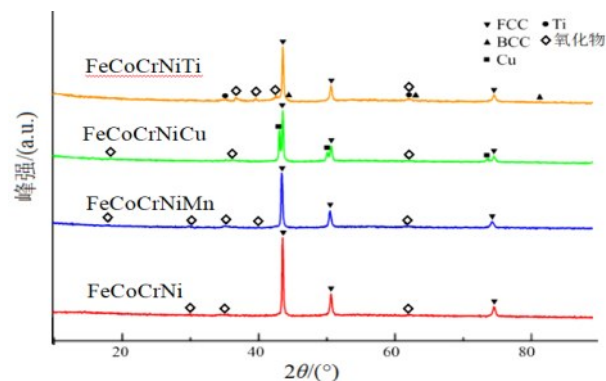


图 1 A356 铝合金表面等离子喷涂涂层的 XRD 谱图  
Fig.1 XRD spectrum of plasma spraying coating on A356 aluminum alloy

图 2 为 A356 铝合金表面等离子喷涂涂层的截面形貌。从图 2 可见,涂层与基体界面较为清晰,上层灰色区域为涂层,下层黑色区域为 A356 铝合金基体,涂层与基体界面结合处呈机械咬合状,表明涂层与基体间主要以机械结合为主;4 种涂层的厚度都介于  $210\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ ,涂层中可见尺寸不等、形状不规则的孔洞,这主要与等离子喷涂工艺参数(如喷涂距离、功率等)以及喷涂粉末自身的物化性能有关,可通过工艺参数优化设置合理参数进行改进和消除<sup>[13]</sup>。

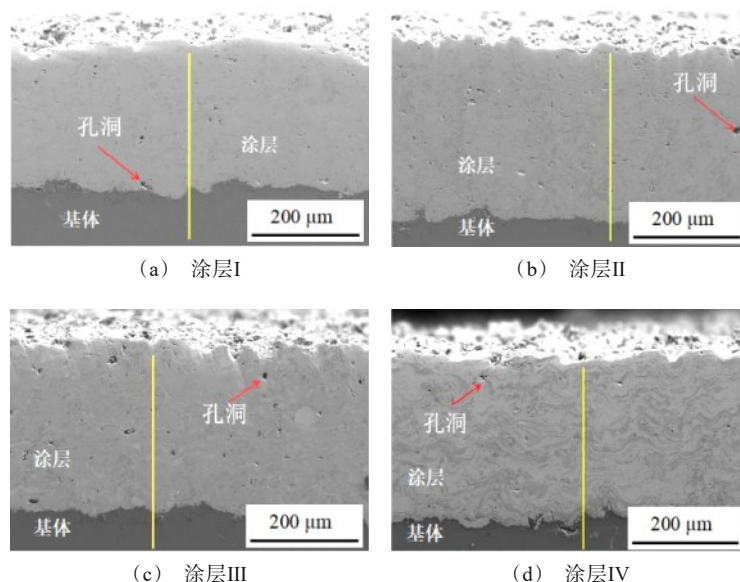


图 2 A356 铝合金表面等离子喷涂涂层的截面形貌

Fig.2 Cross section morphology of plasma sprayed coating on A356 aluminum alloy surface



进一步对涂层截面进行高倍显微形貌观察,结果如图3所示。4种等离子喷涂涂层中都可可见颜色不同的区域,其中白色区域A和灰黑色包围的白色区域B的能谱分析结果不含O,分别对应FeCoCrNi和贫Cr区,灰色区域C和灰色区域D都含O,分别对应FeCoCrNi氧化物、Cr氧化物( $\text{CrO}$ 和 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )。涂层II中还出现了黑色区域E,主要为Mn氧化物( $\text{MnO}_2$ 和 $\text{Mn}_2\text{O}_3$ )和Cr氧化物;涂层III中含O的黑色

区域E较少,这主要是因为此时Cu主要以单质形式存在(见图1),Cu的氧化物较少;涂层IV中黑色区域E为Ti的氧化物( $\text{TiO}$ 和 $\text{TiO}_2$ ),近黑色区域的深灰色区域G主要含Ti,不含O,为Ti单质。高倍显微形貌与图1的X射线衍射结果相吻合,即高熵合金涂层中单独添加的合金元素主要以单质和氧化物形式存在。

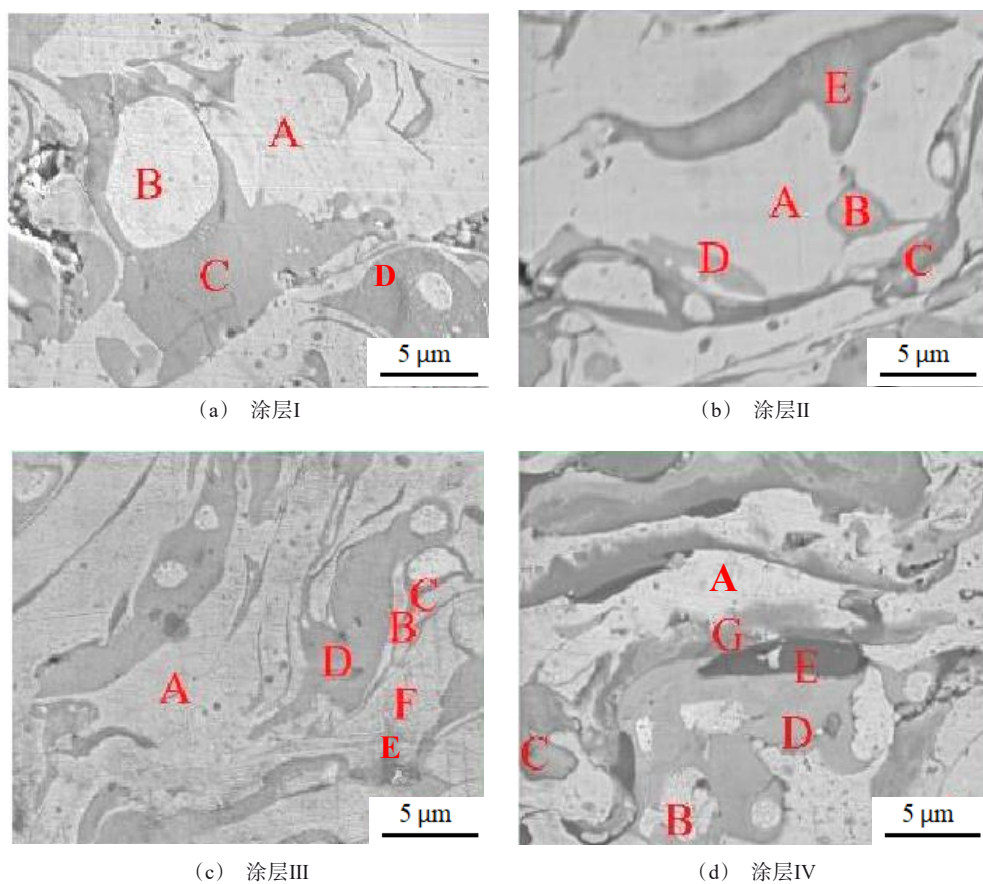


图3 A356铝合金表面等离子喷涂涂层截面的高倍显微形貌

Fig.3 High power microscopic morphology of plasma spraying coating section on A356 aluminum alloy surface

图4为A356铝合金表面等离子喷涂涂层截面的元素线扫描分析结果(位置如图2中黄色线条所示)。从图4可见,等离子喷涂涂层中除原始成分外,还含有O元素;涂层与A356铝合金基体的界面结合处存在薄层Al元素过渡区,这主要是因为A356铝合金基体自身较低的熔点,使得等离子喷涂过程中,在接触表面高温作用下发生微区熔化而形成薄层冶金结合的过渡层<sup>[14]</sup>,因此,在涂层/基体界

面结合处还存在薄层冶金结合。此外,涂层IV中还可可见Ti元素峰强波动较大,表明涂层中含有较多的Ti单质或Ti的氧化物。

图5为A356铝合金基体和表面涂层的硬度测试结果。从表面硬度测试结果看,A356铝合金基体硬度为56 HV,而等离子喷涂涂层的硬度都高于A356铝合金基体,且涂层硬度从高至低顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III;从涂层截面硬度分布

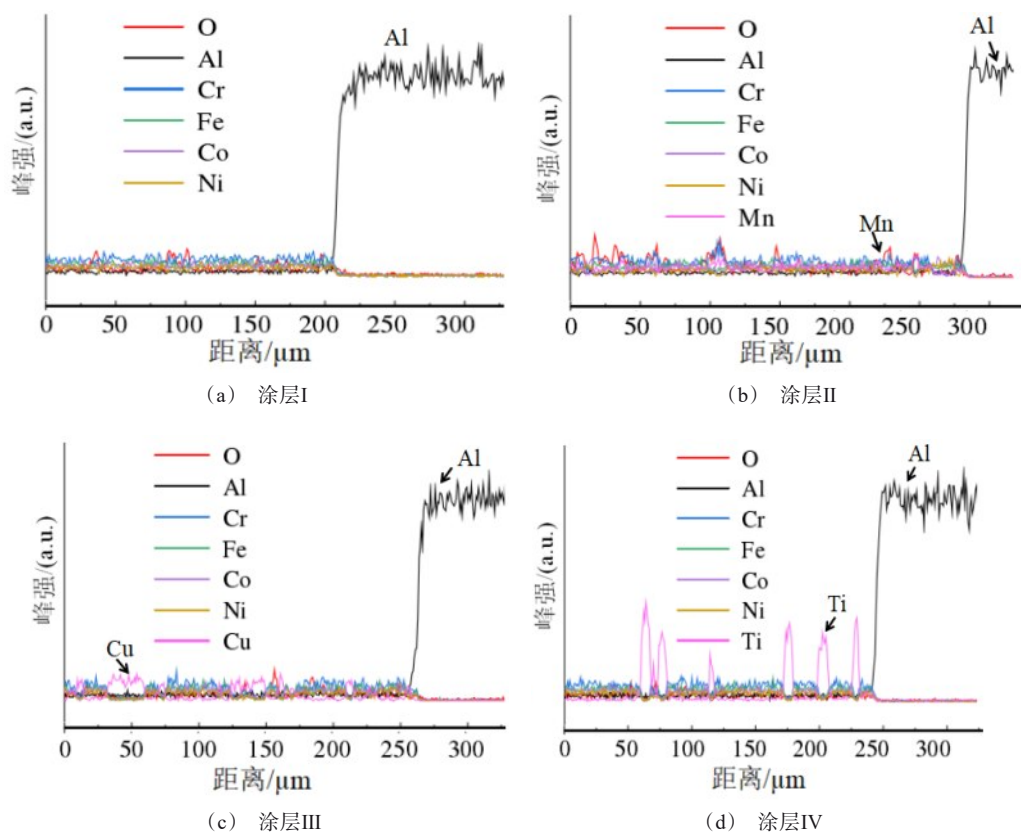


图 4 A356 铝合金表面等离子喷涂涂层截面的元素线扫描

Fig.4 Element line scanning of plasma spraying coating section on A356 aluminum alloy surface

曲线中可见(间隔  $50\ \mu\text{m}$  打点进行测试), 4 种涂层在截面的硬度分布均匀, 在离表面相同距离下, 涂层的硬度从高至低顺序为: 涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III, 与涂层表面硬度变化趋势相同。在高熵合金 FeCoCrNi 中添加 Mn 元素, 等离子喷涂涂层的硬度有所降低, 这主要与局部 Mn-Ni 偏析, 降低了层错能而产生软化有关; 添加 Cu 元素会使得等离子喷涂涂层硬度下降, 这主要是因为涂层中 Cu 主要以单质形式存在, 自身较低的硬度会使得涂层整体抵抗变形的能力减弱<sup>[14]</sup>; 添加 Ti 元素能够提升等离子喷涂涂层的硬度, 这主要是因为涂层中均匀分布的 Ti 氧化物硬质颗粒可以起到强化作用, 且 Ti 元素的固溶还可以起到固溶强化作用<sup>[15]</sup>。

图 6 为 A356 铝合金基体和表面涂层的摩擦磨损性能测试结果。从摩擦系数曲线可知, 在摩擦开始阶段(磨合期), 摩擦系数波动较大, 当摩擦系数到达峰值后, 随着摩擦磨损时间延长, 摩擦系数逐渐趋于稳定, 磨损进入稳定磨损期; A356 铝合金基体、涂

层I、涂层II、涂层III和涂层IV的平均摩擦系数分别为 0.456、0.752、0.764、0.803 和 0.783, 等离子喷涂涂层的平均摩擦系数明显高于 A356 铝合金基体, 这主要是因为涂层的摩擦系数与涂层组织结构以及内部孔隙缺陷等有关, 且由于硬质氧化物颗粒会在磨损过程中脱落, 表面粗糙度的变化也会使得摩擦系数升高。从磨损率测试结果看, A356 铝合金基体的磨损率为  $1.51\ \text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ , 而 4 种等离子喷涂涂层的磨损率相较 A356 铝合金基体低 2 个数量级, 涂层磨损率从低至高顺序为: 涂层I<涂层IV<涂层II<涂层III。由此可见, 4 种等离子喷涂涂层的耐磨性都优于 A356 铝合金, 且涂层I的耐磨性最好, 这主要是因为等离子喷涂涂层的硬度较高, 而一般情况下硬度越高的材料抵抗摩擦磨损的能力更强<sup>[16]</sup>, 但是硬度与耐磨性并不会完全呈线性对应关系, 如涂层IV虽然具有最高的硬度, 但是由于涂层中的硬质单质 Ti 及其氧化物在摩擦磨损过程中会发生脱落, 其磨损率反而更高。

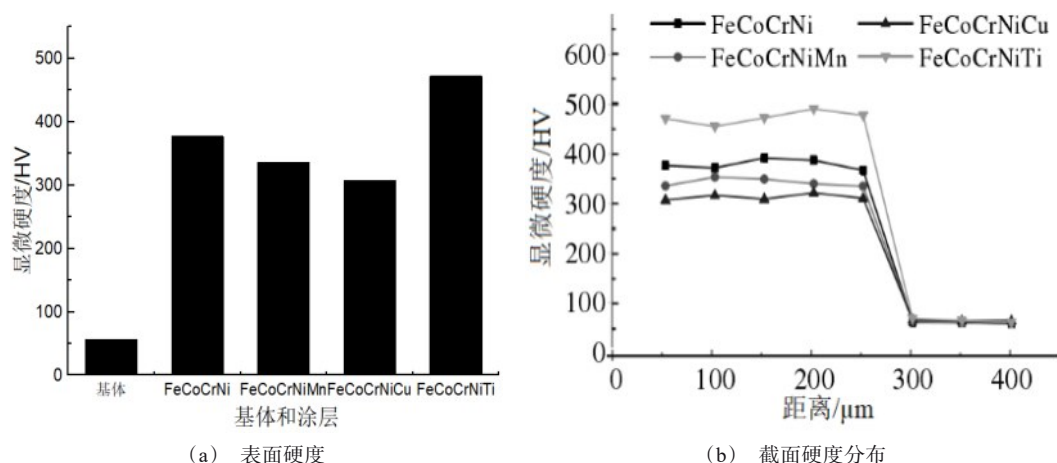


图5 A356铝合金基体和表面涂层的硬度及分布

Fig.5 Hardness of A356 aluminum alloy substrate and surface coating

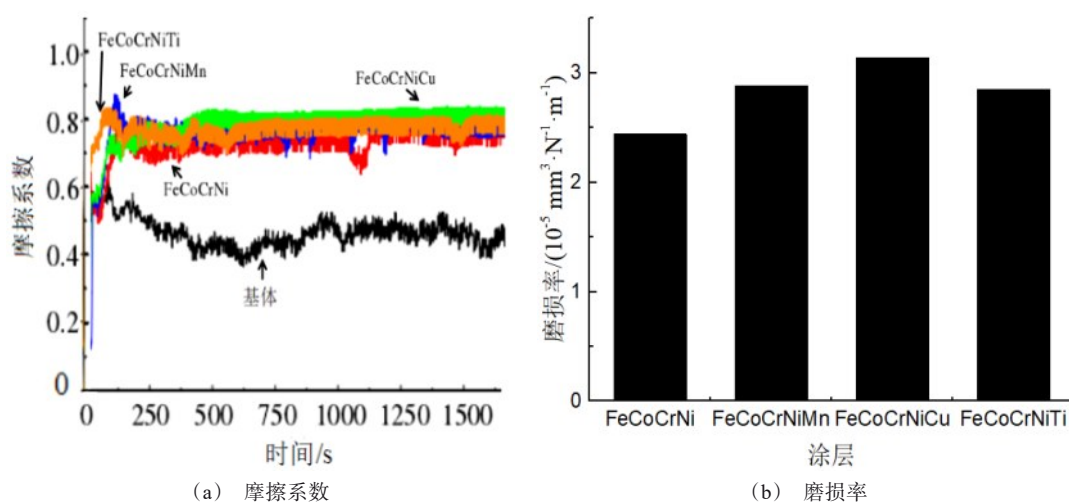


图6 CPE A356铝合金基体和表面涂层的摩擦磨损性能

Fig.6 Friction and wear properties of A356 aluminum alloy matrix and surface coating

图7为A356铝合金基体和表面涂层的极化曲线。表1为电化学拟合结果,分别列出了腐蚀电位、腐蚀电流密度、腐蚀速率、点蚀电位和钝化区范围测试结果。从图7和表1可见,相较A356铝合金基体,4种等离子喷涂涂层的腐蚀电位都发生正向移动、腐蚀电流密度减小,根据热力学参数腐蚀电位和动力学参数腐蚀电流密度与材料耐腐蚀性之间的关系可知<sup>[17]</sup>,腐蚀电位越正,则腐蚀倾向越小;腐蚀电流密度越小,则腐蚀速率越低。由此可见,4种等离子喷涂涂层的耐腐蚀性能都优于A356铝合金基体,且耐腐蚀性能从高至低顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III>A356铝合金基体。从点蚀电位和钝

化区宽度上看,4种等离子喷涂涂层的点蚀电位都低于A356铝合金基体,钝化区宽度都大于A356铝合金基体(0 V),表明涂层表面能够形成致密稳定的钝化膜,抵抗Cl<sup>-</sup>侵蚀的能力强于基体<sup>[18]</sup>,而A356铝合金基体的极化曲线中未出现明显钝化区,形成钝化膜能力较弱,抵抗Cl<sup>-</sup>侵蚀的能力较弱,耐腐蚀性会相对涂层较差。

图8为A356铝合金基体和表面涂层的电化学阻抗谱图。图9为对应的等效电路图。表2为等效电路拟合结果,分别拟合得到溶液电阻、钝化膜电阻和电荷转移电阻。其中,CPE<sub>1</sub>和CPE<sub>2</sub>为常相位角元件。

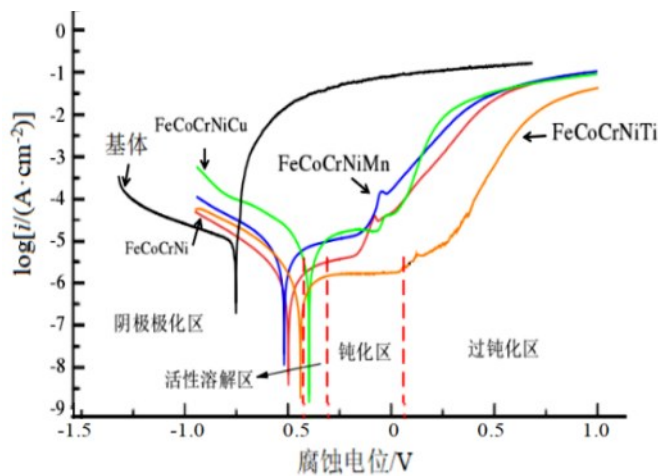


图7 A356 铝合金基体和表面涂层的极化曲线

Fig.7 Polarization curve of A356 aluminum alloy substrate and surface coating

表 1 A356 铝合金基体和表面涂层的电化学拟合结果

Tab.1 Electrochemical fitting results of A356 aluminum alloy substrate and surface coating

试样	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(A·cm <sup>-2</sup> )	点蚀电位/V	钝化区范围/V
基体	-0.75	1.66×10 <sup>-5</sup>	-0.75	0
涂层I	-0.50	7.76×10 <sup>-7</sup>	-0.16	0.266
涂层II	-0.52	2.74×10 <sup>-6</sup>	-0.15	0.295
涂层III	-0.40	4.08×10 <sup>-6</sup>	-0.06	0.253
涂层IV	-0.44	6.02×10 <sup>-7</sup>	-0.05	0.390

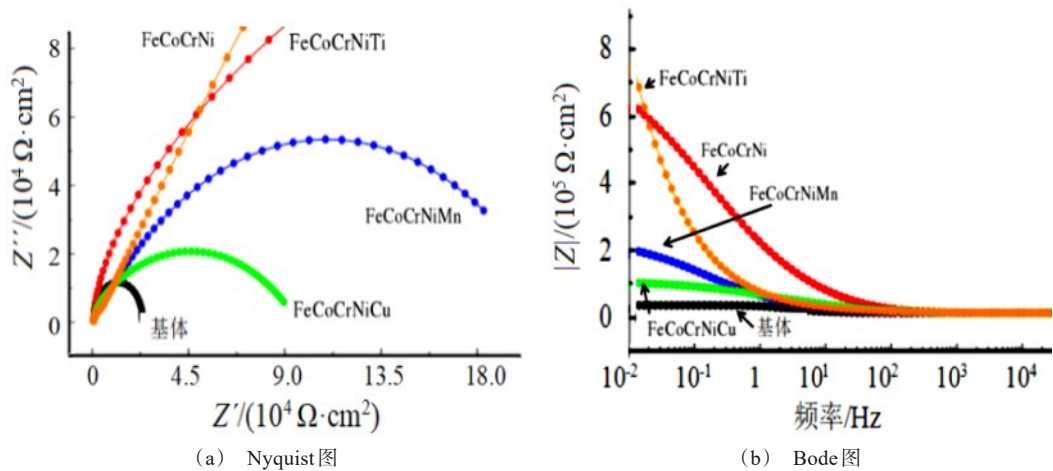


图8 A356 铝合金基体和表面涂层的电化学阻抗谱图

Fig.8 Electrochemical impedance spectrogram of A356 aluminum alloy matrix and surface coating

从图 8(a)Nyquist 图中可见,A356 铝合金基体和等离子喷涂涂层都可见高频区半径不等的半圆弧,且 4 种涂层的圆弧半径都大于 A356 铝合金基体。涂层圆弧半径从大至小顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III>A356 铝合金基体,而圆弧半径

越大,则电极界面阻抗越大,耐腐蚀性越高<sup>[19]</sup>。因此,等离子喷涂涂层的耐腐蚀性能都优于 A356 铝合金基体,且涂层IV的耐腐蚀性能最好。从图 8(b)和表 2 可知,4 种等离子喷涂涂层的 $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$ 和电荷转移电阻 $R_{ct}$ 都高于 A356 铝合金基体,且 $|Z|_{0.01\text{ Hz}}$ 和 $R_{ct}$ 从



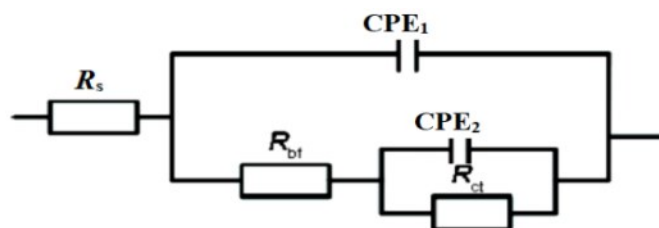


图9 等效电路图

Fig.9 Equivalent circuit diagram

表2 A356铝合金基体和表面涂层的电化学阻抗谱等效电路拟合结果

Table 2 Equivalent circuit fitting results of electrochemical impedance spectroscopy for A356 aluminum alloy matrix and surface coating

材料	溶液电阻 $R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	钝化膜电阻 $R_{bf}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	电荷转移电阻 $R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
基体	8.50	3.72	$3.51 \times 10^4$
涂层I	12.39	$1.92 \times 10^4$	$2.87 \times 10^3$
涂层II	19.43	$7.85 \times 10^5$	$2.30 \times 10^5$
涂层III	14.66	$5.64 \times 10^3$	$9.20 \times 10^4$
涂层IV	18.68	$3.67 \times 10^3$	$2.82 \times 10^6$

大至小顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III>A356铝合金基体,表明等离子喷涂涂层钝化膜的活化位点数量少于A356铝合金基体<sup>[20]</sup>。 $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$ 和 $R_{ct}$ 的变化趋势与图8(a)的圆弧半径变化趋势保持一致,进一步证明等离子喷涂涂层的耐腐蚀性能优于A356铝合金基体,且涂层耐腐蚀性能从高至低顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III,电化学阻抗谱测试结果与极化曲线测试结果相吻合。这主要是因为等离子喷涂涂层在腐蚀过程中能够快速钝化并形成致密钝化膜,有效抑制外界腐蚀性介质元素Cl<sup>-</sup>等的侵蚀,而Ti的加入,会相较其它涂层形成更致密稳定的钝化膜,并对基体起到保护作用<sup>[21]</sup>,因此,涂层的耐蚀性相对基体更好,且涂层IV具有最佳耐腐蚀性能。

### 3 结论

(1)4种等离子喷涂涂层中都可见FCC固溶体和氧化物衍射峰。在FeCoCrNi涂层中加入Cu或Ti后,涂层中还出现了Cu或Ti的衍射峰,表明涂层中存在单质Cu或单质Ti。4种等离子喷涂涂层厚度都介于210~300 μm,涂层中可见少量尺寸不等、形状不规则的孔洞;涂层与基体界面处主要以机械结合为主,同时存在薄层冶金结合过渡区。

(2)4种等离子喷涂涂层的硬度、平均摩擦系数都高于A356铝合金基体,且涂层硬度从高至低顺序

为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III。4种等离子喷涂涂层的磨损率相较A356铝合金基体低2个数量级,涂层磨损率从低至高顺序为:涂层I<涂层IV<涂层II<涂层III。

(3)相较A356铝合金基体,4种等离子喷涂涂层的腐蚀电位都发生正向移动、腐蚀电流密度减小。4种等离子喷涂涂层的点蚀电位都低于A356铝合金基体、钝化区宽度都大于A356铝合金基体(0 V)。Nyquist图中4种等离子喷涂涂层的圆弧半径都大于A356铝合金基体,且圆弧半径从大至小顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III>A356铝合金基体;4种等离子喷涂涂层的 $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$ 和电荷转移电阻 $R_{ct}$ 都高于A356铝合金基体,且 $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$ 和 $R_{ct}$ 从大至小顺序为:涂层IV>涂层I>涂层II>涂层III>A356铝合金基体。等离子喷涂涂层的耐蚀性能都优于A356铝合金基体,且涂层IV的耐腐蚀性能最好。

### 参考文献

- [1] 何芳,庄林忠,何国元,等. 汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展[J]. 铸造, 2021, 70(4): 431-437.
- [2] 杜忠泽,芮星,王强,等. 铝合金汽车发动机缸体内壁表面改性的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 336-340.
- [3] 李家威,路东柱,王玉平,等. 铝合金轮毂在典型大气环境中的腐蚀及其防护措施[J]. 材料保护, 2023, 56(5): 180-190.



- [4] 韩冰源, 高祥涵, 杜文博, 等. 铝合金基材表面耐磨性能强化研究现状[J]. 材料导报, 2023, 37(10): 161-168.
- [5] 李倩, 文灵有, 谭亚宁, 等. 铝合金耐磨性能改善方法综述[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(11): 4093-4102.
- [6] 汪昊, 李庆达, 刘爱莲, 等. 不同方法制备的微弧氧化涂层摩擦磨损特性的研究现状[J]. 材料保护, 2023, 56(3): 124-134.
- [7] 王强, 李楠, 周留成, 等. 超音速激光沉积制备 7075/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层的显微组织及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(4): 1403-1409.
- [8] 杜伟, 韩冰源, 崔方方, 等. 发动机活塞用 ZL109 铝合金表面等离子喷涂镍基合金涂层的耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2022, 46(11): 26-32.
- [9] 张晏云, 杨泽慧, 陈永楠, 等. 铝合金表面  $\text{MoS}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层制备及减摩性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(4): 1356-1362.
- [10] 李立, 李忠盛, 丛大龙, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-P-SiC}$  复合涂层组织与性能的研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 112-118.
- [11] Reza S M, Moslem G, Najmeh A, et al. Surface pretreatments of AA5083 aluminum alloy with enhanced corrosion protection for cerium-based conversion coatings application: combined experimental and computational analysis[J]. *Molecules*, 2021, 26(24): 7413-7420.
- [12] 王云壮, 秦青丰, 王京成, 等. 7×××系高强铝合金耐磨涂层的制备与性能[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(24): 1778-1785.
- [13] 陈玲玲, 闫成旗. 铝合金表面机械球磨 Ni-Al-Mo 复合涂层的制备及其摩擦特性研究[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(1): 8-13.
- [14] 黄绎, 李跃, 吴春春, 等. 2024 铝合金表面  $\text{SiO}_2$  陶瓷涂层制备及其耐腐蚀行为[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(6): 915-922.
- [15] Tahir N, Asghar A, Shahbaz A, et al. Enhancing anticorrosion resistance of aluminum alloys using femtosecond laser-based surface structuring and coating[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(4): 644-652.
- [16] 施渊吉, 黎军硕, 郭训忠, 等. 等离子体电解氧化 7075 铝合金的干滑动磨损性能及显微组织[J]. 材料保护, 2021, 54(1): 121-126.
- [17] 和豪涛, 王晨, 李金辉, 等. 汽车用 AZ91 镁合金的表面激光改性研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(5): 41-50.
- [18] 于志刚, 王亮亮, 王小龙. 6A16 铝合金车身表面 TiC/MAO 涂层的组织及耐蚀性能分析[J]. 材料保护, 2021, 54(8): 109-113.
- [19] 赵旭, 王晓军, 崔熙, 等. 铝合金表面等离子喷涂镍基涂层的耐磨损腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(7): 81-86.
- [20] 李丽萍, 周吉成, 刘元伟, 等. 超疏水铝表面的一步法电化学制备及其耐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2021, 54(6): 117-121.
- [21] Liu D B, Zhang B F, Song W. Improving the anti-corrosion and anti-wear performance of anodic coating on the surface of AA 5052 via hydro-thermal treatment[J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1447-1452.