

文章编号: 1005-0523(2026)04-0120-7



铜基复合材料耐蚀性能提升: 界面强化研究

裴 锋, 贾路路, 田 旭, 刘 欣

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 铜基复合材料在复杂环境下(如酸性、碱性、高盐雾、高湿度)有严重腐蚀问题, 但传统盐雾试验耗时长且难以模拟多种腐蚀环境。基于此, 本研究通过调控铜合金中 Al 的配比(0、1%、3%、5%), 结合电化学阻抗谱等技术, 提出了一种快速评估铜基复合材料界面耐蚀特性的方法。此外, 在腐蚀介质中加入碳量子点(CDs), 研究其吸附膜对耐蚀性能的强化作用。结果表明, 含 5% Al 的合金耐蚀效果最佳, 腐蚀电流密度较纯铜降低约 70%。调控合金配比并结合碳量子点强化技术, 提供了一种优化金属耐蚀性能的新方法, 为复杂工况下的实际应用提供了理论与技术支持。

关键词: 铜基复合材料; 腐蚀; 碳点; 电化学; 形貌分析

中图分类号: U489

文献标志码: A

本文引用格式: 裴锋, 贾路路, 田旭, 等. 铜基复合材料耐蚀性能提升: 界面强化研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(4): 120-126.

Enhancing the Corrosion Resistance of Copper Matrix Composites: A Study on Interface Strengthening

Pei Feng, Jia Lulu, Tian Xu, Liu Xin

(Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co, Ltd, Nanchang 330096, China)

Abstract: Copper matrix composites have serious corrosion issues in complex environments (such as acidic, alkaline, high-salt-spray, high-humidity conditions), but the traditional salt spray tests are time-consuming and cannot effectively simulate diverse corrosive environments. To address this, a rapid evaluation method for interfacial corrosion resistance of copper matrix composites was proposed by adjusting the Al content (0, 1%, 3%, 5%) in the copper alloy and employing electrochemical impedance spectroscopy. In addition, carbon quantum dots (CDs) were added to the corrosive medium to study the enhancement of the corrosion resistance of the adsorbed film. The results show that the alloy containing 5% Al has the best corrosion resistance and the corrosion current density is reduced by about 70%. This study provides a novel strategy for optimizing metal corrosion resistance through compositional adjustment combined with carbon quantum dot strengthening, offering theoretical and technical support for practical applications under complex service conditions.

Key words: copper matrix composites; corrosion; carbon dots; electrochemistry; topography analysis

Citation format: Pei Feng, Jia Lulu, Tian Xu, et al. Enhancing the corrosion resistance of copper matrix composites: a study on interface strengthening[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(4): 120-126.

收稿日期: 2025-03-11

基金项目: 国网江西省电力有限公司科技项目(52182023001K)

在复杂工况(如酸性、碱性、高盐雾、高湿度环境)下,铜合金材料易受腐蚀,导致性能下降、设备失效,甚至引发重大经济损失。盐雾试验是评估金属材料耐蚀性能的常用方法,但测试周期长,且难以模拟多种腐蚀介质的实际环境^[1]。为此,本研究提出了一种结合铜合金配比调控、电化学快速评估和碳量子点(carbon quantum dots, CDs)强化技术的综合方法。通过调节铜合金中Al的配比,系统研究其对界面耐蚀性的影响规律。结合电化学阻抗谱、扫描电镜及三维光学表面检测技术,提出一种基于电化学阻抗技术快速评估铜基复合材料界面特性的方法,并探讨了CDs吸附膜对界面耐蚀性能的改善效果^[2-3]。

近年来,随着工业与交通运输技术的快速发展,铜基材料凭借其优异的导电性、导热性和抗腐蚀性能,在电子设备、轨道交通、高速铁路牵引变电所等领域得到了广泛应用。然而,在复杂环境工况下(如高盐雾、酸性、碱性和高湿度等),铜基材料的界面耐蚀性能面临严峻挑战。腐蚀不仅降低了材料的使用寿命,还对设备的运行稳定性和安全性构成了威胁,甚至导致巨大的经济损失。因此,提升铜基材料的耐蚀性能并开发快速、准确的性能评估技术,成为当前铜基材料的腐蚀行为及其界面耐蚀性能研究领域的热点。但多数工作仍局限于宏观性能的提升和传统方法的改进,而对其微观腐蚀机制的探索不足。

以合金化技术为例,张光伟等^[4]通过在铜基材料中添加Al、Mg等元素,显著提升了材料的耐蚀性能,Al的钝化作用能够在表面形成稳定的氧化铝保护层,从而有效减缓腐蚀速率。然而,这类研究主要集中在材料配方和成分优化方面,缺乏对腐蚀过程中界面微观变化的深入分析,尤其是不同合金配比下表界面特性的动态演化规律。此外,功能化涂层技术近年来也被广泛用于改善铜基材料的抗腐蚀性能,例如周健等^[5]在铜表面涂覆聚吡咯涂层,以阻隔腐蚀介质的侵入。然而,实际应用中,这类涂层在复杂环境下往往因高温、高湿或化学腐蚀作用而发生剥离,难以提供长期稳定的保护效果。此类方法虽然对性能改善具有一定贡献,但无法从根本上解决铜基材料在动态、多介质腐蚀环境中的适应性和耐久性问题。

在针对铜基材料耐蚀性能的研究中,还存在两

个主要不足:一是传统盐雾试验作为金属材料耐蚀性能的主要评价手段,尽管能够模拟一定的腐蚀环境,但耗时较长,且难以全面覆盖酸碱腐蚀、气体腐蚀等多种环境特性,限制了其适用范围;二是缺乏快速、高效的界面评估技术,尤其是在研究界面微观变化与耐蚀性能的关联性研究方面尚显不足。综上所述,铜基材料界面耐蚀性能的研究涉及材料学、电化学和表面工程等多学科交叉领域^[6]。通过整合新材料设计、电化学检测技术与表面改性方法,可为复杂工况下铜基复合材料的实际应用提供理论依据和技术支持。

本研究以提升铜基复合材料在复杂环境下的耐蚀性能为核心目标,提出了一种结合铜合金配比调控、电化学快速评估与CDs强化的综合方法。通过调节铜合金中Al的配比,探索Al含量对界面耐蚀特性的规律性影响,提供了合金成分优化的新视角。同时,对以CDs为核心的界面强化进行研究,研究其在铜基材料表面形成吸附膜的机制及其对界面性能的影响。此外,结合电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)、扫描电镜(SEM)及三维光学表面检测技术,开发了一种快速、精准的表界面特性评估手段,弥补了传统盐雾试验周期长、适用性受限的缺陷。研究不仅为提高铜基复合材料在复杂环境中的耐蚀性能提供了新的思路,也为实际工况下的材料保护设计提供了技术支持和理论指导。

1 实验部分

1.1 基体材料

实验所用铜合金材料由实验室制备,编号分别为Cu、Cu-1、Cu-2、Cu-3,对应Al含量为0、1%、3%、5%。试样尺寸为15 mm×15 mm×2 mm,用于制作工作电极,工作区域暴露面积控制为1 cm²,非工作区域用环氧树脂密封。在电化学测试前,试样表面依次使用600、800、1 000目和2 000目SiC砂纸进行打磨,直至表面呈镜面光泽。随后,用去离子水冲洗2~3次,接着在乙醇中脱脂5~10 min,再用去离子水冲洗2~3次。最后,试样置于干燥器中干燥约24 h备用。

1.2 溶液配制

红土壤样品采集自江西省科学院红壤生态实验站(位于南昌市东郊),并依据中国土壤腐蚀试验

标准(GB/T 24196—2009)进行处理。样品自然晾干后,研磨并通过20目筛网去除大颗粒。随后,将处理后的土壤置于110℃烘箱中干燥6 h,获得完全干燥的土壤样品。为制备25%含水率的红土壤溶液,按照下列公式计算需添加的去离子水质量

$$m_{\text{水}} = \frac{m_{\text{土}} \times \omega}{1 - \omega}$$

式中: $m_{\text{水}}$ 为需添加去离子水的质量; $m_{\text{土}}$ 为干土质量; ω 为目标含水率(25%即 $\omega=0.25$)。按计算结果将去离子水逐步加入干燥的土壤中,同时充分搅拌,直至溶液均匀无结块。最终制备的红土壤溶液密封存放于干净的容器中,置于阴凉、干燥处保存,以防止其与空气或杂质接触。

1.3 碳量子点(CDs)的制备

将12 g NaOH加入40 mL 乙醛溶液(质量分数为40%)中,充分搅拌均匀,随后加入1.0~1.5 mL 盐酸,在室温下持续搅拌3 d。将混合物通过孔径为20 μm 滤纸抽滤,收集下层溶液。随后,用截留分子量为1 000的透析袋(型号MD34)进行纯化,透析过程中每3 h更换一次去离子水。透析后的溶液在75℃干燥箱中干燥1 d,最后通过真空冷冻干燥制备得到棕色粉末状CDs样品。

1.4 材料性能测试与表征

采用CHI660C电化学工作站进行电化学阻抗谱(EIS)测试。在三电极系统中,试样用作工作电极,参比电极为饱和甘汞电极(Hg/HgCl₂),辅助电极为铂电极。通过恒温水浴保持溶液温度的稳定,并实时监控温度变化。在测试开始前,记录开路电位(open circuit potential, OCP),稳定0.5 h。EIS测

试的初始电位为OCP,频率范围为 10^{-2} ~ 10^5 Hz,正弦波电压幅值为5 mV。弱极化曲线测量在-250~+250 mV电位范围内(与腐蚀电位相比)进行,扫描速率为5 mV/s。测得的阻抗数据采用ZView软件进行拟合处理。为确保实验数据的可靠性,每组实验均重复测试3次,取平均值。

此外,将铜合金基材在腐蚀溶液中浸泡10 d后,使用JSM-7800F场发射扫描电子显微镜以及三维光学表面轮廓仪(由江西宝汇科技有限公司提供)对其腐蚀表面进行形貌表征和分析。

2 结果与讨论

2.1 电化学分析

图1(a)展示了不同Al含量铜合金在土壤溶液中的开路电位(OCP)变化趋势。可以观察到,所有样品的OCP在最初阶段迅速趋于稳定,表明电极表面逐渐形成稳定的电化学状态。纯铜(Cu)的OCP最低,而随着Al含量的增加(Cu-1、Cu-2、Cu-3),OCP逐步升高,尤其是Cu-3(含5%Al)OCP值最高,这表明Al的添加可以提高腐蚀电位。OCP的升高表明合金表面可能形成了更具保护性的氧化膜,减缓了腐蚀反应的发生。图1(b)为不同铜合金的极化曲线,可以看到,随着Al含量的增加,腐蚀电流密度(I_{corr})显著降低,表明Al元素在合金中对腐蚀行为具有显著的抑制作用。具体来说,Cu的腐蚀电流密度最高,而Cu-3的腐蚀电流密度最低,比Cu低70%。在阳极极化区域,曲线趋势表明Al的加入可能通过生成保护性氧化铝膜减少了金属的溶解。阴极区域则显示了Al的存在可能抑制了氧的还原

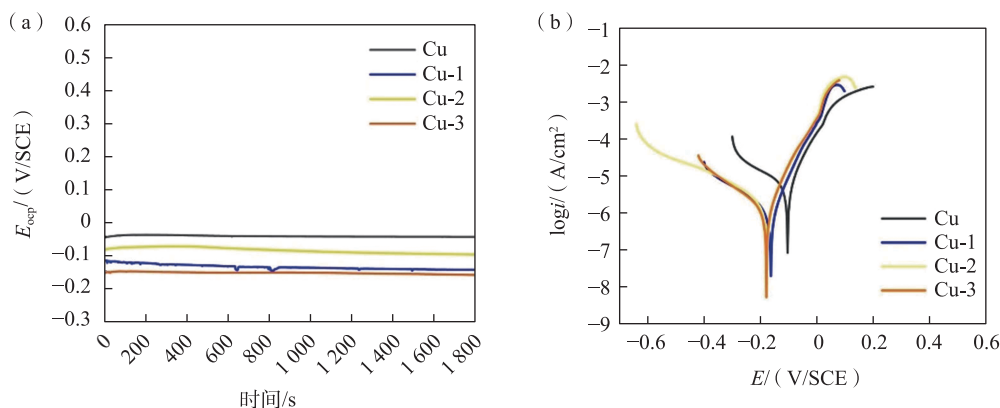


图1 不同铜合金在土壤溶液中的电化学状态分析:(a) 开路电位图;(b) 极化曲线图

Fig. 1 Electrochemical state analysis of different copper alloys in soil solution:

(a) the open-circuit potential plots; (b) polarization curves

反应。这些结果表明,随着Al含量的增加,铜合金的耐蚀性能逐渐提高。

图2(a)~图2(c)展示了同样的实验条件下,不同Al含量铜合金的电化学阻抗谱图(EIS),包括Nyquist图(图2(a))、Bode相位角图(图2(b))和Bode阻抗模图(图2(c))。从图2(a)可以看出,所有合金样品的阻抗图均呈现出明显的半圆特征,表明其电化学反应以电荷转移过程为主。随着Al含量的增加,半圆直径逐渐增大,尤其是Cu-3表现出最大的半圆直径,说明其电荷转移阻抗(R_{ct})显著提高。这表明Al含量的增加有助于增强腐蚀界面的耐腐蚀性能。半圆的增大可能与Al在腐蚀介质中生成的保护性氧化膜(如氧化铝层)有关,该氧化膜能够有效抑制金属离子的溶解以及腐蚀介质的渗透。图2(b)显示了不同合金样品的相位角随频率变化的特征。在中频范围内,Cu-3的相位角显著高于其他样品,表明其表面形成的保护膜具有更高的电化学稳定性。这种高相位角特征表明,Al含量的增加提高了腐蚀界面阻抗的容抗特性,即保护膜的电荷存储能力增强。此外,相位角曲线的平坦范围随Al含量的增加而变宽,这进一步反映出保护膜的连续性和致密性得到了改善。图2(c)中,Cu-3在低频范围内(约 10^{-2} Hz)的阻抗模值显著高于其他样品,这一现象表明Al含量增加后合金的腐蚀速率明显降低。阻抗模值越高,说明材料表面抗腐蚀能力越强。结合Nyquist图与相位角图的结果,可以推断Cu-3样品形成的保护膜在低频段有效阻隔了腐蚀介质的渗透,显著提高了耐蚀性。同时,在高频区域,Cu-3的阻抗模值也高于其他样品,进一步证明了Al的加入增强了界面的保护性能。

从OCP、Tafel和EIS三种测试结果可以综合得出以下结论,Al含量的增加对铜合金耐蚀性能的提升具有显著作用,尤其是Al含量为5%的Cu-3样品不仅降低了腐蚀反应的驱动力,还有效抑制了腐蚀反应的发生,并通过显著增大界面电荷转移电阻和低频阻抗模值,进一步提升了材料的整体耐蚀性能,优化铜合金的Al含量可以显著增强其在复杂腐蚀环境下的长期稳定性和使用寿命。

2.2 腐蚀形貌分析

通过对比分析在室温下土壤溶液中浸泡10 d后的铜及Cu-Al合金样品的表面形貌,进一步探讨了Al对铜合金抗腐蚀性能的影响。图3中SEM图像比较清楚地展示了Al对铜合金腐蚀行为的抑制作用。未添加Al的纯铜样品在酸性环境中暴露后,形成了大量的腐蚀凹坑及腐蚀产物沉积,这些腐蚀特征表明腐蚀介质已渗透到金属基底,导致显著的结构劣化。随着Al含量的增加(1%、3%、5%),合金的表面形貌逐渐改善。Cu-1和Cu-2的表面腐蚀痕迹明显减轻,腐蚀坑减少且较为分散,而Cu-3的表面最为光滑,无明显腐蚀坑,表明其耐蚀性能显著提升。这表明Al的加入能够有效减缓腐蚀过程,对铜基体提供了一定的保护作用。EDS分析揭示了样品表面的元素组成。纯铜样品表面含有高比例的氧(25.35%)和氯(Cl)等腐蚀性元素,表明腐蚀介质已经对铜基底造成显著影响。相比之下,含Al的铜合金表面氧元素含量显著降低(仅为3.50%),氯元素含量也明显减少(0.05%),这说明Al的引入形成了一层对腐蚀介质有阻隔作用的保护膜,有效减缓了腐蚀介质对金属基体的侵蚀。这种保护机制可能与Al在铜合金表面形成的

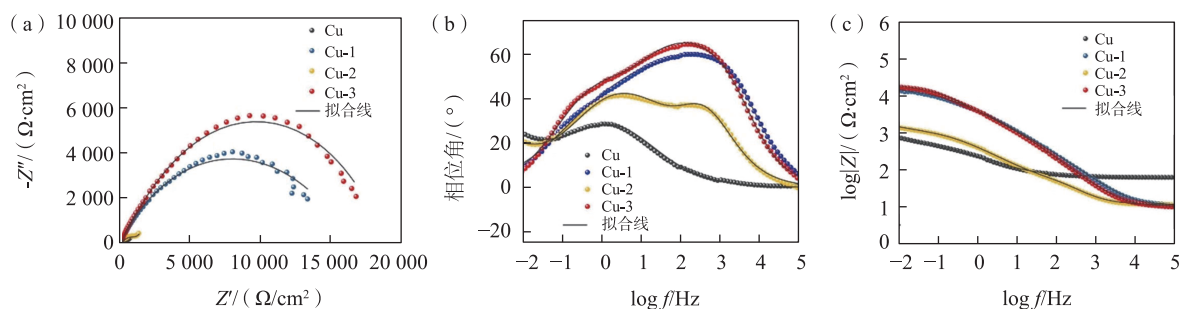


图2 不同铜合金土壤溶液中的电化学阻抗谱图:(a) 奈奎斯特图; (b), (c) Bode 阻抗模图
Fig. 2 Diagram of electrochemical impedance spectra of different alloys in soil solution:
(a) Nyquist diagram; (b), (c) Bode impedance mode plot

致密氧化膜有关,该氧化膜能够阻止氧气和氯离子的进一步渗透,从而减少了腐蚀反应的发生。

图3的三维光学轮廓图结合表面粗糙度参数 S_a ,清晰地揭示了Al含量对铜合金表面形貌的影响。结果显示,纯铜的表面粗糙度最高, S_a 值为 $0.842\text{ }\mu\text{m}$,表明其表面受到了显著的腐蚀,腐蚀痕迹较深且分布不均匀。随着Al含量的增加,表面粗糙度逐渐降低。图3(a)中Cu-1表面的粗糙度 S_a 值降至 $0.401\text{ }\mu\text{m}$,表面腐蚀痕迹减轻,但仍有部分区域表现出不均匀的腐蚀。进一步增加Al含量至3%和5%时,表面粗糙度分别为 $0.216\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.211\text{ }\mu\text{m}$,表明Cu-2和Cu-3的表面更加平整,腐蚀程度显著减轻。尤其是Cu-3,其表面表现出最佳的抗腐蚀性能,说明Al的加入对抑制表面腐蚀具有显著作用。

2.3 碳量子点增强铜合金界面性能机理分析

2.3.1 电化学阻抗谱分析

图4展示了Cu-3铜合金电极在不同浓度(0、25、50、100 mg/L)CDs增强的土壤溶液中电化学阻抗谱(EIS)测试结果,包括Nyquist图(图4(a))、Bode相位角图(图4(b))和Bode阻抗模图(图4(c))。从图4(a)可以看出,随着CDs浓度增加,阻抗弧半径逐渐增大,说明CDs的加入有效提高了Cu-3电极的腐蚀阻抗,抑制了腐蚀过程。未添加

CDs的空白对照组(Blank)表现出最小的阻抗弧,表明腐蚀较为严重。当CDs浓度为25 mg/L时,阻抗弧半径明显增加;浓度进一步提高至50 mg/L和100 mg/L时,阻抗弧进一步增大,100 mg/L下达到最大值。这表明高浓度CDs在电极表面形成了更致密的保护层,增强了铜合金的耐蚀性能。图4(b)表明,加入CDs后,系统的相位角随浓度增加而显著提高,尤其是在中低频范围内。相比空白样品,CDs浓度为100 mg/L时相位角的峰值最高,表明此浓度下的Cu-3电极表面保护层对腐蚀过程的阻抗最大。相位角的变化反映了电化学系统的时间常数增加,表明CDs提高了电荷转移阻抗,减缓了电极表面腐蚀反应。图4(c)中, $|Z|$ 值随CDs浓度的增加而显著提高,特别是在低频区域,表明CDs的加入增强了Cu-3电极的耐腐蚀性能。CDs浓度为100 mg/L的样品在整个频率范围内均表现出最高的阻抗模值,说明其表面保护性能最佳。低频区域阻抗的显著提高进一步证明了CDs在铜合金表面形成了更稳定且更致密的保护层,有效抑制了腐蚀反应。这些结果揭示了CDs作为腐蚀抑制剂的显著潜力,为其在实际工况下的应用提供了有力支持。

2.3.2 腐蚀表面分析

图5为Cu-3铜合金在浓度为25、50、100 mg/L CDs的土壤溶液中浸泡后的SEM图、EDS能谱和三维

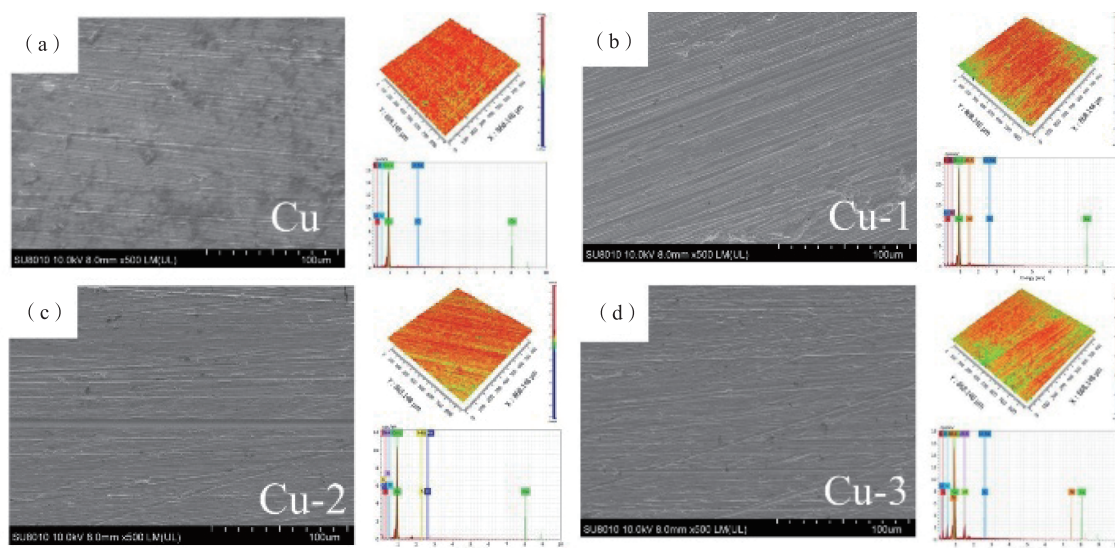


图3 不同合金在土壤溶液中浸泡10 d后的SEM图像,三维光学轮廓图和EDS分析:(a) 纯铜($S_a=0.842\text{ }\mu\text{m}$); (b) Cu-1($S_a=0.401\text{ }\mu\text{m}$); (c) Cu-2($S_a=0.216\text{ }\mu\text{m}$); (d) Cu-3($S_a=0.211\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 3 SEM, 3D optical profile and EDS analysis of different alloys after 10 d of immersion in soil solution: (a) pure copper ($S_a=0.842\text{ }\mu\text{m}$); (b) Cu-1 ($S_a=0.401\text{ }\mu\text{m}$); (c) Cu-2 ($S_a=0.216\text{ }\mu\text{m}$); (d) Cu-3 ($S_a=0.211\text{ }\mu\text{m}$)

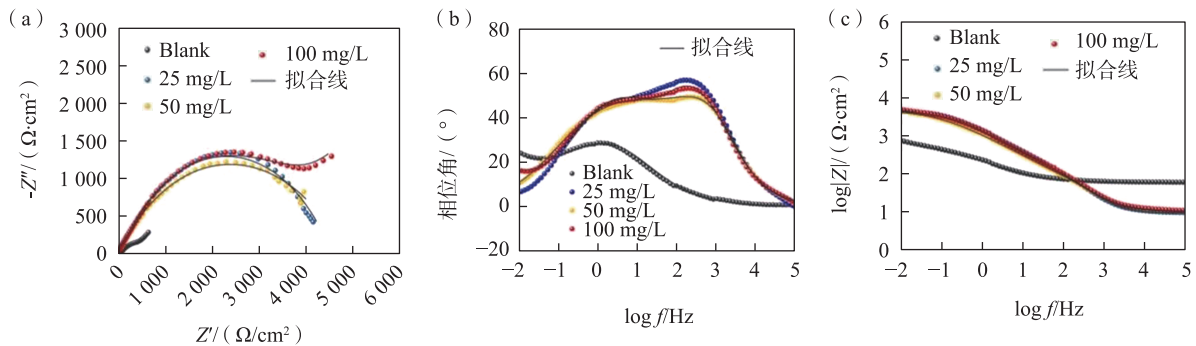


图4 Cu-3铜合金电极在不同浓度CDs土壤溶液中的电化学阻抗谱图:(a) Nyquist图;(b) Bode相位角图;(c) Bode阻抗模图
Fig. 4 Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) plots of the Cu-3 copper alloy electrode in soil solutions with different concentrations of CDs: (a) Nyquist plot; (b) Bode phase angle plot; (c) Bode impedance mode plot

光学轮廓图。Cu-3在未添加CDs的酸性环境中暴露后,腐蚀凹坑及腐蚀产物沉积明显。而添加CDs后,Cu-3的腐蚀表面随CDs浓度增加,腐蚀程度明显变轻,100 mg/L的CDs溶液对铜合金表面腐蚀抑制效果最优,表面结构仍然保持较为完整,仅出现少量的腐蚀斑点。图5中的SEM图像清晰地表明CDs的加入对铜合金腐蚀行为有显著的抑制作用。这可能是由于CDs的加入能够有效地在铜合金基体表面形成抑制薄膜减缓腐蚀过程,从而对铜基体提供了一定的保护作用。EDS分析揭示了Cu-3表面的元素组成。没有加入CDs的Cu-3表面氧氯

等腐蚀性元素含量较高,表明腐蚀介质已经对铜基底造成显著影响。相比之下,加入CDs后,铜合金表面氧氯元素含量显著降低。随着浓度的增加,CDs的吸附量增加,铜合金表面保护层更为稳定。

对比不加CDs的Cu-3基底表面粗糙度($S_a=0.211\ \mu\text{m}$)可以发现,随着CDs浓度增加,表面粗糙度明显降低。随着CDs浓度增加,图5(b)、图5(c)、图5(d)中合金表面粗糙度分别显示为0.208、0.189、0.155 μm 。这说明CDs的引入有效减少了腐蚀坑的形成,提升了合金表面的平整度。具体数据表明,CDs对于铜基复合材料表面的改性作用逐渐增强,

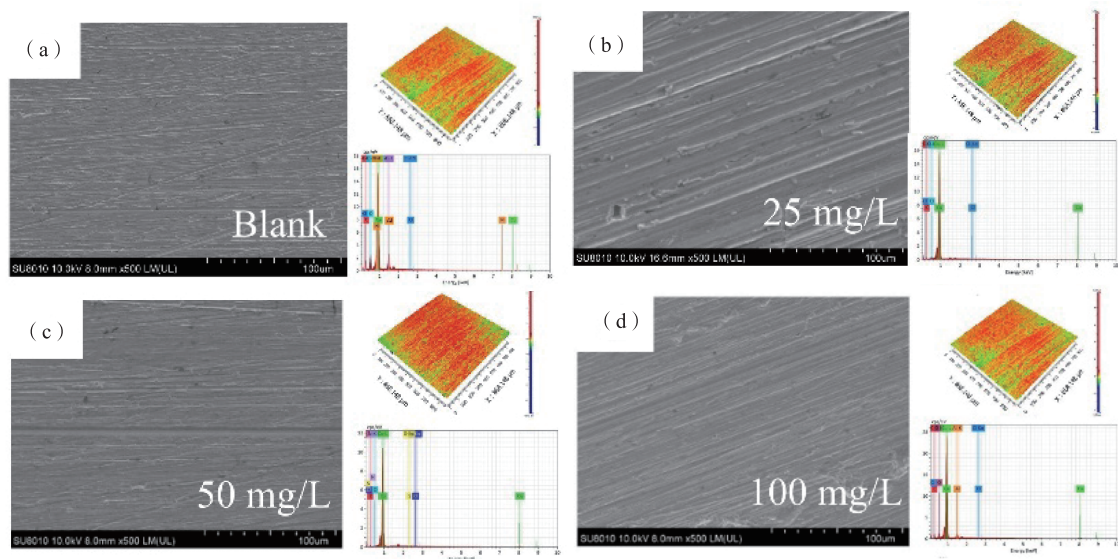


图5 Cu-3合金在不同CDs浓度的土壤溶液中浸泡10 d后的SEM图像,三维光学轮廓图和EDS分析:
(a) blank; (b) 25 mg/L; (c) 50 mg/L; (d) 100 mg/L

Fig.5 SEM images, 3D optical profile and EDS analysis of Cu-3 alloy after 10 d of immersion in soil solution with different CDs concentrations: (a) blank; (b) 25 mg/L; (c) 50 mg/L; (d) 100 mg/L

可以推测 CDs 可以通过在铜合金表面用化学和物理吸附相结合的方式形成更稳定、更致密的氧化膜来阻止腐蚀介质的渗透。

3 结论

通过电化学阻抗谱(EIS)、扫描电子显微镜(SEM)和三维光学表面检测分析等多种表征手段,系统评估了铜基复合材料界面特性,对其强化方式进行了探究。

1) 电化学阻抗谱测试表明,随 Al 含量和 CDs 浓度的增加,铜合金相较于纯铜表现出越来越高的耐蚀性,表明 Al 和 CDs 的引入能有效提升铜基合金的抗腐蚀性能,有效抑制腐蚀反应的进行。

2) 扫描电子显微镜(SEM)和三维光学表面检测分析发现,当铜基合金同时具有 5% Al 和 100 mg/L CDs 时,合金的耐蚀性能达到最佳。CDs 与含 Al 铜合金表面形成的氧化膜产生协同效应,进一步增强了材料的抗腐蚀能力和表面疏水性,从而减少了腐蚀性离子的渗透。

参考文献:

- [1] 于跃群. Fe-Mn-Si 记忆合金与 B10 镍铜合金在海水中的电化学腐蚀行为研究[D]. 大连:大连海事大学,2021.
Yu Yuequn. Electrochemical corrosion behavior of Fe-Mn-Si memory alloy and B10 nickel-copper alloy in seawater[D]. Dalian:Dalian Maritime University, 2021.
- [2] Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [3] 沈路力,彭叔森,王刚,等. 巯基有机硅溶胶-凝胶涂层对铜合金 H90 的腐蚀防护性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 30-36.

Shen Luli, Peng Shusen, Wang Gang, et al. Corrosion protection of copper alloy H90 by mercapto functionalized organosilicone sol-gel coating [J]. Surface Technology, 2018, 47(10): 30-36.

- [4] 张光伟,官珊丹,张建波,等. 铜镁、铜锡合金接触线的制备及组织性能研究[J]. 上海有色金属, 2015(2): 71-74.
Zhang Guangwei, Guan Shandan, Zhang Jianbo, et al. Preparation and organization performance of copper-magnesium and copper-tin alloy contact wire [J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2015(2): 71-74.
- [5] 周健,李宾,袁晓,等. 聚吡咯导电涂层的制备及其性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(7): 7051-7055.
Zhou Jian, Li Bin, Yuan Xiao, et al. Preparation and properties of polypyrrole conductive coatings [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(7): 7051-7055.
- [6] 孙宇海漩,贺春林,杨杰,等. 铜合金在海水中的腐蚀与防护研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(11): 874-883.
Sun Yuhaixuan, He Chunlin, Yang Jie, et al. Research progress on corrosion and protection of copper alloys in seawater[J]. Materials China, 2023, 42(11): 874-883.



通信作者:裴锋(1978—),男,正高级工程师,研究方向为电力设备的腐蚀与防护研究。E-mail:ra200101@sina.cn。

(责任编辑:李根)