

# 铜覆钢和镍铬复合铝铜合金接地极土壤腐蚀的对比研究

江炜楠<sup>1,\*</sup>, 朱正<sup>2</sup>, 刘洋<sup>2</sup>, 江龙华<sup>2</sup>, 周学杰<sup>3</sup>, 陈志坚<sup>3</sup>

1. 池州电力规划设计院, 池州 247099
2. 国网安徽省电力有限公司池州供电公司, 池州 247000
3. 中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司, 武汉 430030

**摘要:** [目的] 对比研究传统接地材料铜覆钢和新型接地材料镍铬复合铝铜合金的土壤腐蚀行为。[方法] 通过室内土壤腐蚀加速试验, 考察了上述两种材料在酸性土和盐碱土中的腐蚀特征, 利用电化学阻抗谱(EIS)和极化曲线分析了它们在土壤腐蚀模拟液中的电化学行为, 采用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对腐蚀表面形貌和成分进行了表征。[结果] 与铜覆钢相比, 镍铬复合铝铜合金在土壤腐蚀加速试验 30 d 后腐蚀轻微。在酸性土模拟液和盐碱土模拟液中浸泡 30 d 后, 镍铬复合铝铜合金的电荷转移电阻分别是铜覆钢电荷转移电阻的 2.9 倍和 4.3 倍, 腐蚀电流密度也都更小。[结论] 镍铬复合铝铜合金具有比铜覆钢更强的耐蚀性。

**关键词:** 镍铬复合铝铜合金; 铜覆钢; 土壤腐蚀; 接地; 电化学

**中图分类号:** TG172.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X(2026)04-0151-08

## Comparative study on soil corrosion of copper-clad steel and nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy grounding electrodes

JIANG Weinan<sup>1,\*</sup>, ZHU Zheng<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, JIANG Longhua<sup>2</sup>, ZHOU Xuejie<sup>3</sup>, CHEN Zhijian<sup>3</sup>

1. Chizhou Electric Power Planning and Design Institute, Chizhou 247099, China
2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Chizhou Power Supply Company, Chizhou 247000, China
3. China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co., Ltd., Wuhan 430030, China

**Abstract:** [Objective] To compare the soil corrosion behavior of the traditional copper-clad steel and the novel nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy for grounding applications. [Method] The corrosion characteristics of the two materials in acidic soil and saline-alkali soil were studied through accelerated indoor soil corrosion tests. Their electrochemical behavior in simulated soil solutions was analyzed by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and polarization curve measurements. The morphology and composition of the corroded surfaces were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS). [Result] Compared with copper-clad steel, the nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy showed only slight corrosion after 30 days of accelerated soil corrosion testing. After 30 days of immersion in simulated acidic soil solution and saline-alkali soil solution, the charge transfer resistance of the nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy was 2.9 times and 4.3 times that of the copper-clad steel, respectively, while its corrosion current density was also lower. [Conclusion] The nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy exhibits superior corrosion resistance to the copper-clad steel.

**Keywords:** nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy; copper-clad steel; soil corrosion; grounding; electrochemistry

接地系统主要通过埋设在地下的接地极将电流导入大地, 实现电压的稳定与平衡, 在电力网络中发挥着至关重要的作用<sup>[1-3]</sup>。由于接地极长期处于地下环境中, 其受潮湿、温度变化及电化学反应的影响, 面临严峻的腐蚀问题, 导致接地极的断裂和失效, 从而危及人身安全并引发经济损失, 这一问题已成为电力行业亟待解决的难题<sup>[4-6]</sup>。目前使用的接地材料包括铜、碳钢、镀锌钢等多种类型。尽管铜具有优良的耐腐蚀性能, 但其价格昂贵且易造成土壤污染<sup>[1,7]</sup>; 碳钢具备较好的导电性, 但其耐蚀性较差<sup>[1,8-9]</sup>; 镀锌钢虽然具备一定的阳极保护效果, 但其锌层耗尽后, 基体钢的腐蚀情况会加剧, 也无法满足长期使用的要求<sup>[10-12]</sup>。

**收稿日期:** 2025-04-11 **修回日期:** 2025-12-10

**基金项目:** 国网安徽省电力有限公司池州供电公司科技项目 (B312R024000B)。

**通信作者:** 江炜楠 (1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网、配网设计规划。

**引用格式:** 江炜楠, 朱正, 刘洋, 等. 铜覆钢和镍铬复合铝铜合金接地极土壤腐蚀的对比研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 151-158.

JIANG W N, ZHU Z, LIU Y, et al. Comparative study on soil corrosion of copper-clad steel and nickel-chromium-clad aluminum-copper alloy grounding electrodes [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 151-158.

因此,开发一种经济实惠且具备良好耐腐蚀性能和优异导电性的接地材料,对于保障电力系统接地极的安全性和持久性具有重要意义。

镍铬合金凭借其优异的耐蚀性广泛应用于各个行业。其表面形成的钝化膜能够有效延缓氧化过程,延长材料使用寿命<sup>[13-15]</sup>。铝铜合金不仅比青铜类合金具有更高的强度、硬度等力学性能,而且具备与铜相当的低电阻率,能够高效地传导电流,降低接地极的接地电阻<sup>[16]</sup>。通过将两种合金复合使用,接地装置有望同时实现高导电性与低腐蚀性的协同优化,突破传统接地极材料性能局限。

镍铬复合铝铜合金是一种创新型接地网材料,采用特殊的覆层结构设计,外层为镍铬合金,内芯为铝铜合金。这种结构赋予其优越的电气性能、力学特性及耐腐蚀能力。该材料在耐土壤腐蚀、故障电流传导等方面的表现均优于传统电力接地材料的要求,确保了长期使用中的可靠性与安全性。

目前,针对接地金属材料在酸性土和盐碱土中的腐蚀行为研究较少,本文利用室内模拟加速实验和电化学测量技术,研究传统铜覆钢和新型镍铬复合铝铜合金在酸性土和盐碱土中的腐蚀行为特征,借助扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对表面腐蚀进行表征分析,并对其腐蚀过程进行讨论,为接地材料的合理选材和防护提供科学依据。

## 1 实验

铜覆钢和镍铬复合铝铜合金试样的直径均为 16 mm。铜覆钢的表层含铜量大于 99.9%(质量分数,下同),还含有微量的 Fe 和 S(均不超过 0.005%)。镍铬复合铝铜合金的体积电阻率小于  $4.3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,其表层镍铬合金的成分为: Fe $\leq$ 70%, Si $\leq$ 1%, P $\leq$ 0.045%, Cr 20%~22%, C $\leq$ 0.07%, Ni 8.5%~10.5%, S $\leq$ 0.03%。

将两种材料机械加工成高度 10 mm 和 50 mm 的圆柱状试样,前者在金属芯上焊接一定长度的铜导线后用环氧树脂将两端圆面封装起来,用于电化学测试,而后者直接用环氧树脂将两端圆面封装,用于室内模拟土壤腐蚀加速试验。环氧树脂固化后用酒精清洗试样,吹干后备用。

试验土壤为两种实际土壤,酸性土取自安徽池州城区,盐碱土取自新疆尉犁大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站。将 5 g 土壤加入 30 mL 去离子水中,参照 NY/T 1121-2006 农业行业土壤检测系列标准测得两种土壤的离子组成见表 1,主要检测设备有 883 Basic IC Plus 离子色谱仪、S220-K 台式多参数测量仪、ICAP 7400 电感耦合等离子体发射光谱仪。

表 1 土壤的离子组成结果  
Table 1 Ionic composition of soil samples

		单位: g/kg						
土壤性质	来源地	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
酸性土	池州	0.009 2	0.014 2	0.023 4	0.003 5	0.009 5	0.046 0	0.014 1
盐碱土	尉犁	0.017 9	0.130 9	0.072 8	0.030 6	0.176 2	0.346 3	0.009 4

室内模拟土壤腐蚀加速试验参照中关村材料试验技术联盟标准 T/CSTM 00046.4-2018《低合金结构钢腐蚀试验 第 4 部分:模拟土壤环境腐蚀试验》进行,土壤选用池州酸性土和尉犁盐碱土,土壤经自然风干,粉碎研磨后通过 20 目筛,将过筛后的土样装入洁净的器皿,在 105 °C 下烘干 6 h,冷却后称重,加入蒸馏水配制成含水量 20%的土壤介质,然后进行室内土壤腐蚀试验,温度 70 °C,时间 30 d。

试验结束后将试样取出,用毛刷清理浮土,再用相机拍照,观察宏观腐蚀形貌。然后使用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪对腐蚀产物进行物相分析;使用日立 GSM-6510A 型扫描电镜及其附带的能谱仪进行微观形貌观察及元素成分分析。根据国标 GB/T 16545-2015《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》进行除锈,铜覆钢采用由 50 g 氨基磺酸加去离子水配成的 1 000 mL 溶液在室温下除锈,5 min 后取出试样;镍铬复合铝铜合金采用由 100 mL 硝酸加去离子水配成的 1 000 mL 溶液在 60 °C 下除锈,20 min 后取出试样。

采用 PARSTAT 2273 型电化学工作站进行电化学测试,为保证试验可重复性,介质为酸性土壤腐蚀模拟溶液(含 NaCl 0.048 g/L、CaCl<sub>2</sub> 0.017 g/L、KNO<sub>3</sub> 0.039 g/L、NaHCO<sub>3</sub> 0.015 g/L、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.027 g/L 和

MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.017 g/L, pH = 4.4~4.6) 和盐碱土壤腐蚀模拟溶液(含 NaCl 3.17 g/L、CaCl<sub>2</sub> 0.244 g/L、KNO<sub>3</sub> 0.216 g/L、NaHCO<sub>3</sub> 0.146 g/L、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2.53 g/L 和 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.670 g/L, pH = 9.2~9.4)。测试均采用三电极体系, 工作电极为待测试样(暴露面积均为 4 cm<sup>2</sup>), 辅助电极为石墨电极, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。先将工作电极置于土壤腐蚀模拟液中进行 2 000 s 的开路电位测试。电化学阻抗谱测试在开路电位下进行, 频率从 100 kHz 至 10 mHz, 交流信号幅值为 10 mV, 测试数据采用 ZSimpWin 软件进行拟合。动电极化曲线测试的扫描速率为 1 mV/s, 电位范围(相对于开路电位)是-0.2~0.3 V。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面形貌及成分

图 1 给出了铜覆钢、镍铬复合铝铜合金在不同土壤加速腐蚀试验 30 d 后除锈前后的宏观形貌。铜覆钢上的铜在酸性土中腐蚀后表面出现黑色腐蚀产物, 除锈后腐蚀形貌可判断为均匀的全面腐蚀。在盐碱土中铜表面变为黑色并附有少量泥土, 除锈后可看到表面有少量腐蚀痕迹。镍铬复合铝铜合金在酸性土中表面无明显变化, 在盐碱土中失去光泽, 但表面平整, 无泥土附着, 除锈后未见明显腐蚀。

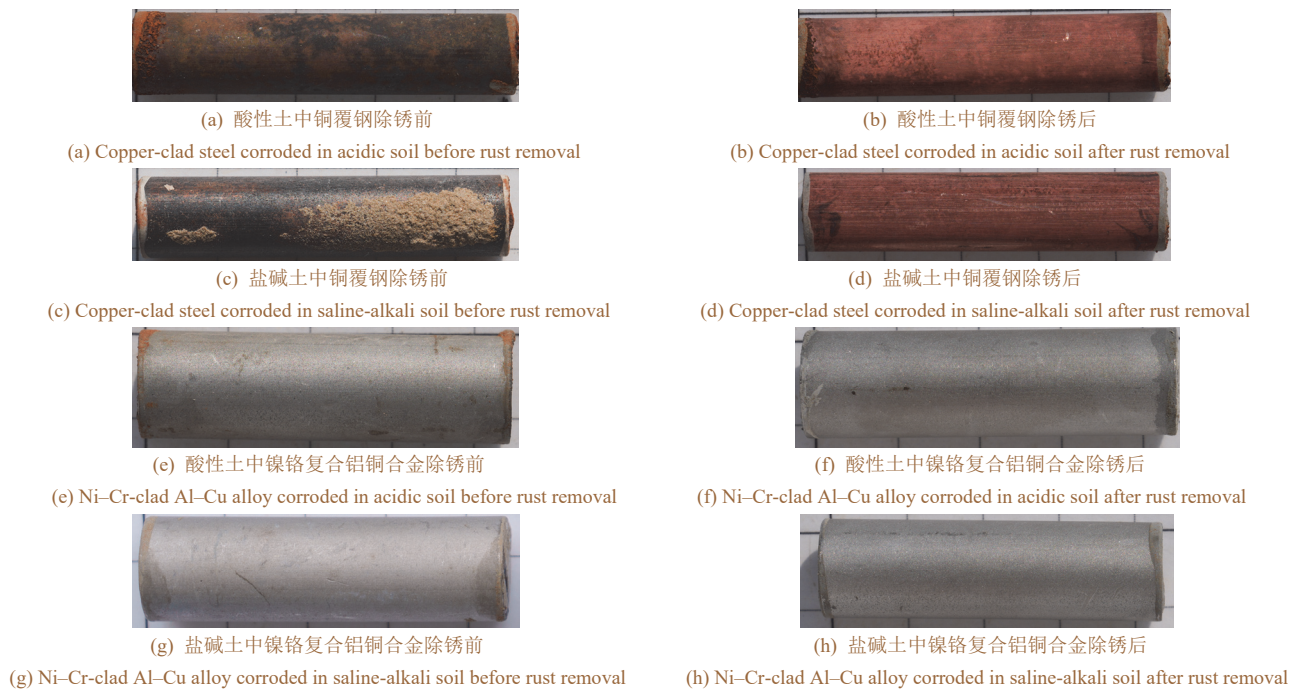
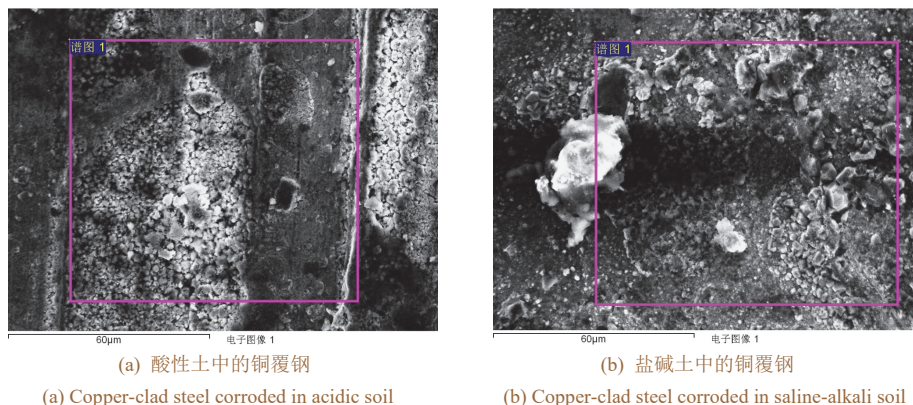
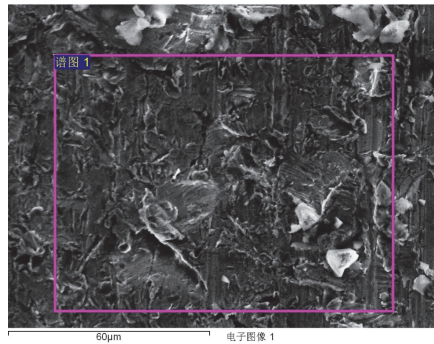


图 1 经不同土壤加速腐蚀试验 30 d 的接地电极在除锈前后的宏观形貌

Figure 1 Macroscopic morphologies of grounding electrodes subjected to 30 days of accelerated corrosion testing in different soils before and after rust removal

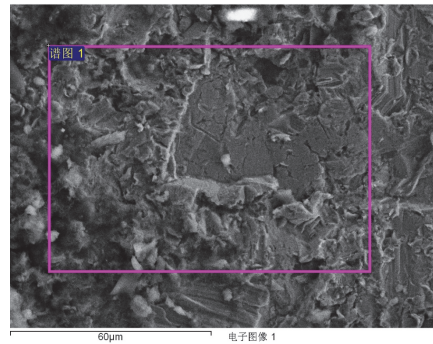
图 2 和图 3 分别给出了铜覆钢和镍铬复合铝铜合金在不同土壤加速腐蚀试验 30 d 后的 SEM 与 EDS 表征结果。铜覆钢上的铜在酸性土中腐蚀后表面出现裂纹状腐蚀产物, 在盐碱土中则形成了块状的腐蚀产物, EDS 结果表明其表面含有 Cu、Ca、Si、O 等元素, 其中 Ca、Si 可能来源于土壤介质中。镍铬复合铝铜合金在酸性土中表面出现片状物, 在盐碱土中表面更加平整。盐碱土 EDS 结果中出现的 Mg 主要来源于土壤。





(c) 酸性土中的镍铬复合铝铜合金

(c) Ni-Cr-clad Al-Cu alloy corroded in acidic soil

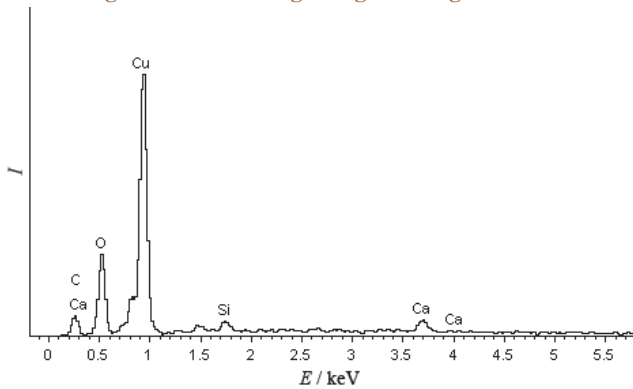


(d) 盐碱土中的镍铬复合铝铜合金

(d) Ni-Cr-clad Al-Cu alloy corroded in saline-alkali soil

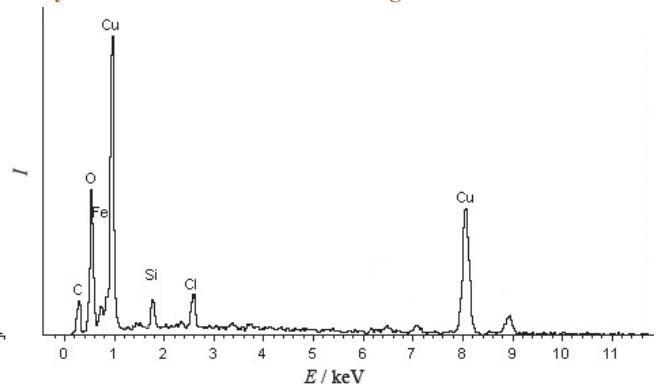
图 2 接地电极在不同土壤中加速腐蚀试验 30 d 后的 SEM 图像

Figure 2 SEM images of grounding electrodes after 30 days of accelerated corrosion testing in different soils



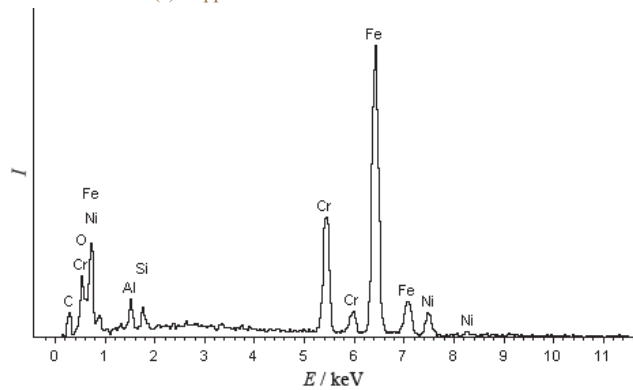
(a) 酸性土中的铜覆钢

(a) Copper-clad steel corroded in acidic soil



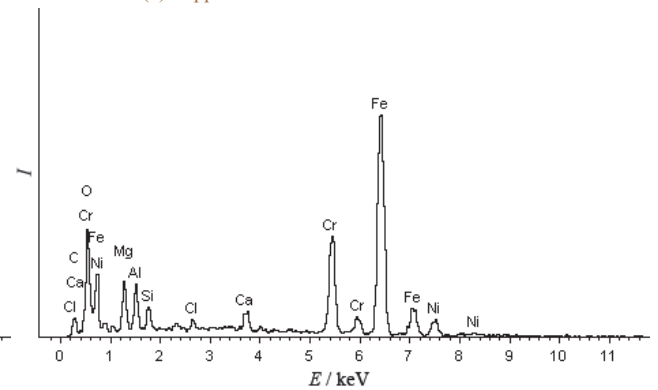
(b) 盐碱土中的铜覆钢

(b) Copper-clad steel corroded in saline-alkali soil



(c) 酸性土中的镍铬复合铝铜合金

(c) Ni-Cr-clad Al-Cu alloy corroded in acidic soil



(d) 盐碱土中的镍铬复合铝铜合金

(d) Ni-Cr-clad Al-Cu alloy corroded in saline-alkali soil

图 3 接地电极在不同土壤中加速腐蚀试验 30 d 后的 EDS 谱图

Figure 3 EDS spectra of grounding electrodes after 30 days of accelerated corrosion testing in different soils

## 2.2 电化学阻抗谱

图 4 给出了铜覆钢和镍铬复合铝铜合金在不同土壤腐蚀模拟溶液中腐蚀前后的 EIS 测量结果。Nyquist 图都具有典型的单一容抗弧特征，其中心在实轴以下，说明电化学过程控制整个反应的速率。半圆在实轴上的弦长对应于电极的电荷转移电阻  $R_{ct}$ ，其值越大，说明耐蚀性越好。从图 4a 和图 4c 中都可以看出铜覆钢的容抗弧半径远小于镍铬复合铝铜合金，表明镍铬复合铝铜合金的极化电阻更大，镍铬复合铝铜合金的镍铬外表面给内部金属提供了良好的保护，能够有效抑制基体金属腐蚀的萌生和发展，有着较强的耐蚀性。

从图 4b 和图 4d 中可以看到，不同土壤腐蚀试验后相位角均减小，表明不同材料表面的钝化膜稳定性降低。镍铬复合铝铜合金在盐碱土模拟液中浸泡后的相位角小于  $30^\circ$ ，表明它受到了严重的腐蚀，导致表面钝化膜被破坏，腐蚀过程以电荷转移为主导。而铜覆钢在酸性土模拟液中浸泡的相位角小于  $40^\circ$ ，在盐碱土模拟液中浸泡后的相位角小于  $50^\circ$ ，也说明它的腐蚀以电荷转移过程为主导。铜覆钢的高相位角范围比镍铬复合铝铜合金窄，表明铜覆钢表面腐蚀产物膜的稳定性和保护性相对较差。

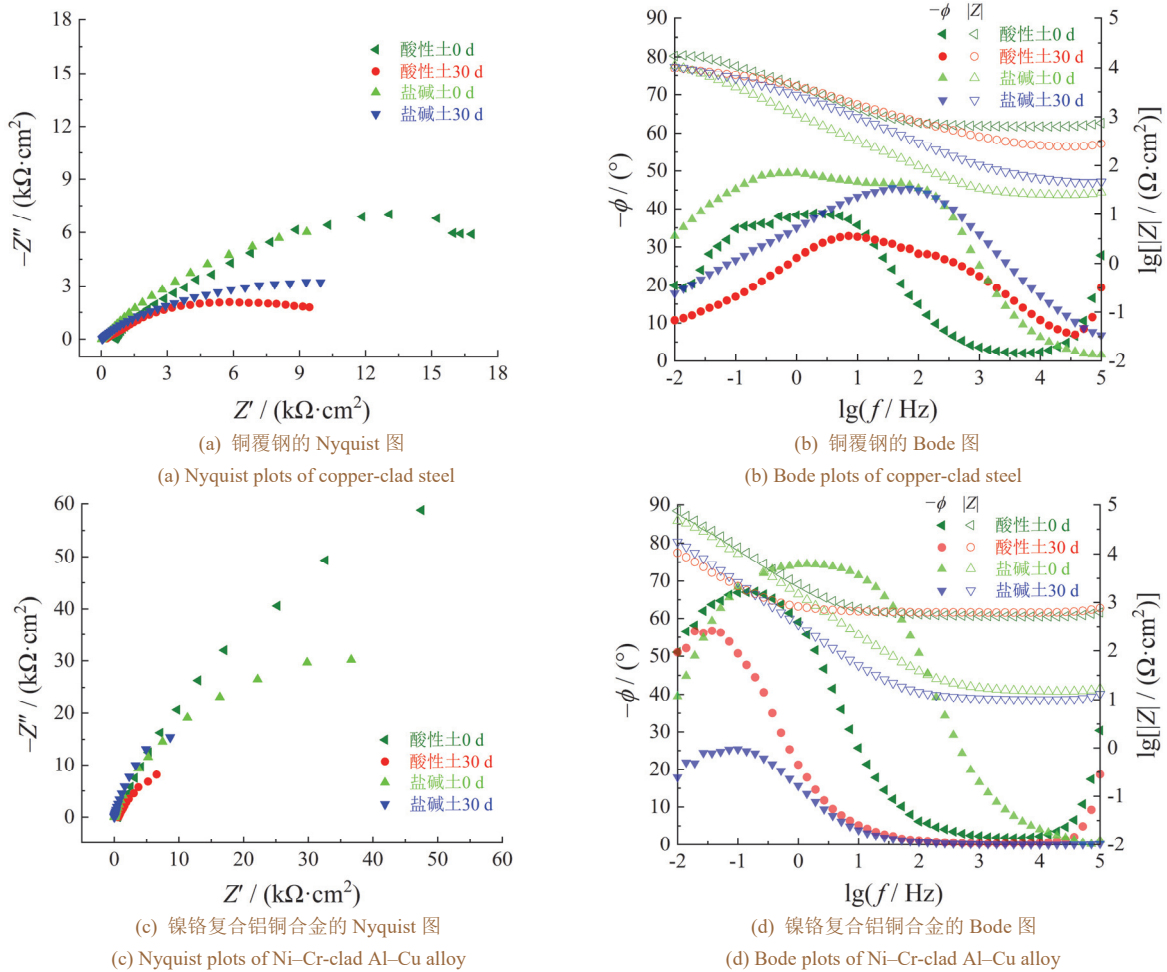


图4 接地电极在酸性土和盐碱土壤腐蚀模拟溶液中的EIS谱图

Figure 4 EIS plots of different grounding electrodes in simulated acidic soil solution and saline-alkali soil solution

为了得到更为精确的电荷转移电阻,采用 $R(QR)$ 等效电路(如图5所示)在ZSimpWin软件中对EIS数据进行拟合, $R_s$ 为土壤模拟液电阻, $R_{ct}$ 为电荷转移电阻, $Q_r$ 表示界面电容(由于电极表面的弥散效应,采用常相位角元件 $Q$ 代替纯电容 $C$ )。拟合结果见表2。

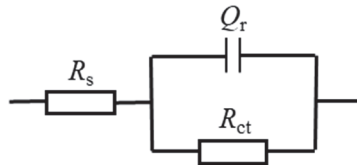


图5 电化学阻抗谱的等效电路

Figure 5 Equivalent circuit for fitting the EIS plots

表2 电化学阻抗谱的拟合结果

Table 2 Fitting results of EIS plots

试验材料	土壤类型	试验时间/d	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_r / (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^n)$	$n$	$R_{ct} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
铜覆钢	酸性土	0	622.7	0.000 085	0.589 8	$2.43 \times 10^4$
		30	215.5	0.000 082	0.460 4	$1.23 \times 10^4$
	盐碱土	0	22.2	0.000 293	0.586 6	$2.40 \times 10^4$
		30	37.5	0.000 116	0.533 3	$1.12 \times 10^4$
镍铬复合铝铜合金	酸性土	0	536.4	0.000 106	0.798 3	$2.16 \times 10^5$
		30	639.7	0.000 749	0.776 2	$3.56 \times 10^4$
	盐碱土	0	15.5	0.000 126	0.859 9	$1.41 \times 10^5$
		30	10.7	0.000 576	0.863 6	$4.91 \times 10^4$

在相同的土壤模拟液中,未试验的镍铬复合铝铜合金的 $R_{ct}$ 远大于铜覆钢,表明镍铬复合铝铜合金表面有更致密的钝化膜,耐蚀性更强。试验30 d后,铜覆钢的 $R_{ct}$ 在两种模拟液中均变小,酸性土模拟液中

减小 49%，盐碱土模拟液中减小 53%，发生了较严重的腐蚀；镍铬复合铝铜合金的  $R_{ct}$  在酸性土模拟液和盐碱土模拟液中则分别减小 84%和 65%，尽管腐蚀现象不明显，但耐蚀性显著下降。试验后镍铬复合铝铜合金的  $R_{ct}$  依然大于铜覆钢，在酸性土模拟液中是铜覆钢的 2.9 倍，在盐碱土中是铜覆钢的 4.3 倍，表明镍铬复合铝铜合金的耐蚀性更好。

### 2.3 极化曲线

图 6 给出了在两种土壤腐蚀模拟溶液中浸泡 30 d 前后的极化曲线测试结果。在两种模拟液中，铜覆钢的腐蚀电位 ( $\phi_{corr}$ ) 均比镍铬复合铝铜合金的腐蚀电位更正，但腐蚀电流密度 ( $j_{corr}$ ) 更大，表明铜覆钢的腐蚀更快。试验后各材料的极化曲线均向右上方移动，电位正移，说明阴极反应过程被加速。在盐碱土腐蚀模拟溶液中，氯离子含量较高，对镍铬合金的侵蚀破坏较强，导致其极化曲线波动较大。

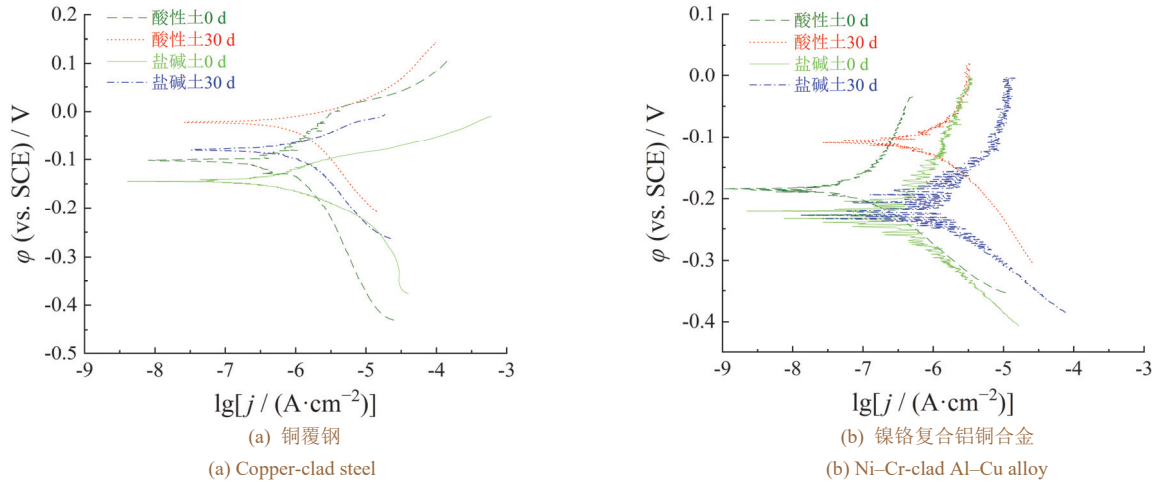


图 6 不同接地材料在酸性土和盐碱土腐蚀模拟溶液中的极化曲线

Figure 6 Polarization curves of different grounding electrodes in simulated acidic soil solution and saline-alkali soil solution

对图 6 的数据进行 Tafel 拟合，结果见表 3。所有试样在试验后均发生腐蚀电位正移、腐蚀电流密度增大的现象，表明试验后材料的稳定性降低，易发生腐蚀。另外，同周期同溶液中镍铬复合铝铜合金的腐蚀电流密度小于铜覆钢，表明镍铬复合铝铜合金的耐蚀性更好。这与 EIS 测试结果一致。

表 3 极化曲线的 Tafel 拟合结果

Table 3 Tafel fitting results of polarization curves

试验材料	试验时间/d	酸性土模拟液		盐碱土模拟液	
		$j_{corr} / (\mu A \cdot cm^{-2})$	$\phi_{corr} (vs. SCE) / V$	$j_{corr} / (\mu A \cdot cm^{-2})$	$\phi_{corr} (vs. SCE) / V$
铜覆钢	0	0.762	-0.103	0.567	-0.142
	30	0.978	-0.022	1.450	-0.080
镍铬复合铝铜合金	0	0.179	-0.184	0.458	-0.229
	30	0.807	-0.109	1.270	-0.214

### 2.4 机理探讨

结合测试结果可知，在腐蚀过程中，铜覆钢的铜表面发生了均匀的全面腐蚀，形成了以铜化合物为主的红锈和黑锈，铜作为阳极失去电子而最终生成铜的氧化物，其腐蚀机理<sup>[17-18]</sup>如式(1)和式(2)所示。



在酸性土中，铜覆钢的腐蚀产物中含有少量红色的  $Cu_2O$ ，在盐碱土中的腐蚀产物则以黑色的  $CuO$  为主。 $CuO$  的晶体结构为单斜结构，较松散，膜层较厚，但易产生裂纹或孔隙，对铜的保护性较差<sup>[19-20]</sup>。在电化学过程中，表现为电荷转移电阻较小，电流密度较大。

镍铬复合铝铜合金中的 Cr 含量较高，会在表面形成一层  $Cr_2O_3$  钝化膜，提高局部耐蚀性，刚浸泡时电荷转移阻抗较大，腐蚀电流密度较低。

在土壤模拟腐蚀液中经过一段时间浸泡后，土壤中的侵蚀性离子(如  $Cl^-$ )会在铜覆钢表面吸附，破坏表面的钝化膜，使基体暴露，导致铁的腐蚀，初步反应<sup>[15, 21-23]</sup>如下：



生成的  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  进一步被氧化为  $\text{FeOOH}$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。  $\text{FeOOH}$  本身不稳定，会继续被氧化，脱水后转化为  $\text{Fe}$  的两种氧化物—— $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，反应<sup>[24]</sup>如式(6)至(8)所示。



对于镍铬复合铝铜合金而言，随着试验的进行，其表面钝化膜的完整性被破坏，电荷转移电阻减小，电流密度增大，耐蚀性降低。

### 3 结论

本文对比了作为接地材料的镍铬复合铝铜合金和铜覆钢在不同土壤模拟腐蚀液中的腐蚀行为，得到如下结论：

1) 铜覆钢在土壤中腐蚀更严重，镍铬复合铝铜合金表面未附着土壤，腐蚀轻微。

2) 在相同的土壤腐蚀模拟液中，与铜覆钢相比，镍铬复合铝铜合金虽腐蚀电位较负，但腐蚀电流密度更低，电荷转移电阻更大。在土壤模拟腐蚀液中浸泡 30 d 后，镍铬复合铝铜合金的电荷转移电阻是铜覆钢的三四倍左右。

综上所述，镍铬复合铝铜合金的耐蚀性更好。

#### 参考文献：

- [1] 高义斌, 杜晓刚, 王启伟, 等. 铜在电网接地工况下的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43 (2): 435-440.  
GAO Y B, DU X G, WANG Q W, et al. Corrosion behavior of copper in a simulated grounding condition in electric power grid [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (2): 435-440.
- [2] 高智悦, 姜波, 樊志彬, 等. 典型接地材料在碱性土壤模拟液中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43 (1): 191-196.  
GAO Z Y, JIANG B, FAN Z B, et al. Corrosion behavior of typical grounding materials in artificial alkaline soil solution [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (1): 191-196.
- [3] 刘欣, 裴锋, 田旭, 等. 接地材料室内外土壤腐蚀试验的相关性与评价方法[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42 (3): 15-19, 27.  
LIU X, PEI F, TIAN X, et al. Correlation and evaluation method of indoor and outdoor soil corrosion experiments of grounding materials [J]. Corrosion & Protection, 2021, 42 (3): 15-19, 27.
- [4] 吕广宁. 变电站接地网腐蚀分析及改造应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
LU G N. Study on the corrosion analysis and reconstruction of substation grounding grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [5] 刘军. 杂散电流对变电站接地装置腐蚀的影响及其仿真研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.  
LIU J. Research of stray current corrosion on substation grounding device and its simulation [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [6] 樊磊, 李波, 张有佳, 等. 变电设施用钢与 7 系铝合金的盐雾腐蚀及力学性能衰减研究[J]. 材料保护, 2023, 56 (10): 130-138.  
FAN L, LI B, ZHANG Y J, et al. Study on salt spray corrosion and decay of mechanical properties of steels for substation facilities and 7xxx aluminum alloy [J]. Materials Protection, 2023, 56 (10): 130-138.
- [7] 田旭, 裴锋, 刘欣, 等. 铜覆钢在酸性土壤中的交流电腐蚀行为研究[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (3): 1-9.  
TIAN X, PEI F, LIU X, et al. Alternating current corrosion behavior of copper-clad steel in acidic soil [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (3): 1-9.
- [8] 陈云翔, 林德源, 范晓磊, 等. 铜/锌在不同 pH 土壤模拟液中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43 (2): 28-33, 61.  
CHEN Y X, LIN D Y, FAN X L, et al. Galvanic corrosion behavior of copper/zinc in simulated soil solution with different pH values [J]. Corrosion & Protection, 2022, 43 (2): 28-33, 61.
- [9] LU X, LIU Y W, LIU M R, et al. Corrosion behavior of copper T2 and brass H62 in simulated Nansha marine atmosphere [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35 (9): 1831-1839.
- [10] 赵骞, 张洁, 李乐民, 等. 安徽省电网用镀锌钢的大气腐蚀及其影响规律[J]. 材料保护, 2024, 57 (5): 191-198.  
ZHAO Q, ZHANG J, LI L M, et al. Study on the atmospheric corrosion of galvanized steel in the Anhui Province power grid and its influence law [J]. Materials Protection, 2024, 57 (5): 191-198.
- [11] 郝文魁, 陈新, 徐玲玲, 等. 电网碳钢、镀锌钢大气腐蚀等级图绘制研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43 (4): 795-802.  
HAO W K, CHEN X, XU L L, et al. Drawing of atmospheric corrosion map of carbon steel and galvanized steel for power grid [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43 (4): 795-802.
- [12] 周梦鑫, 王震宇. 四种接地材料在土壤中的氧浓差宏电池腐蚀行为[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (3): 24-33.  
ZHOU M X, WANG Z Y. Macrocell corrosion behaviors of four grounding materials induced by oxygen concentration difference in soil [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (3): 24-33.
- [13] 张贵泉, 孙雅萍, 苏尧, 等. 氯离子对电站常用金属材料腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42 (4): 14-18.  
ZHANG G Q, SUN Y P, SU Y, et al. Influence of chlorine ion on corrosion behavior of metal materials used in power plants [J]. Corrosion & Protection, 2021, 42 (4): 14-18.
- [14] GUO M X, TANG J R, GU T Z, et al. Corrosion behavior of 316L stainless steels exposed to salt lake atmosphere of western China for 8 years [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2021, 34 (4): 555-564.
- [15] EGUCHI K. Quantitative analysis of initiation site of pitting corrosion

- on type 304 austenitic stainless steel [J]. Corrosion Science, 2023, 221: 111312.
- [16] 王晓欢. 输变电铜铝过渡金具电偶腐蚀行为研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2022.  
WANG X H. Galvanic corrosion of copper-aluminum transition fittings in power transmission and transformation behavioral research [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022.
- [17] PEI Z B, ZHANG D W, ZHI Y J, et al. Towards understanding and prediction of atmospheric corrosion of an Fe/Cu corrosion sensor via machine learning [J]. Corrosion Science, 2020, 170: 108697.
- [18] CORNETTE P, ZANNA S, SEYEUX A, et al. The native oxide film on a model aluminium-copper alloy studied by XPS and ToF-SIMS [J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108837.
- [19] DÍAZ I, CANO H, LOPESINO P, et al. Five-year atmospheric corrosion of Cu, Cr and Ni weathering steels in a wide range of environments [J]. Corrosion Science, 2018, 141: 146-157.
- [20] SHI Y N, FU D M, ZHOU X Y, et al. Data mining to online galvanic current of zinc/copper Internet atmospheric corrosion monitor [J]. Corrosion Science, 2018, 133: 443-450.
- [21] KONG D C, DONG C F, WEI S L, et al. About metastable cellular structure in additively manufactured austenitic stainless steels [J]. Additive Manufacturing, 2021, 38: 101804.
- [22] FU J W, LI F, SUN J J, et al. Effect of crystallographic orientations on the corrosion resistance of Fe-17Cr ferritic stainless steel [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2019, 841: 56-62.
- [23] 于盼盼, 王智慧, 程石, 等. 微量稀土元素对奥氏体不锈钢耐海水点蚀性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36 (11): 1471-1483.  
YU P P, WANG Z H, CHENG S, et al. Effect of trace rare earth elements on spot corrosion resistance of austenitic stainless steel in seawater [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36 (11): 1471-1483.
- [24] GUO M X, TANG J R, PENG C, et al. Effects of salts and its mixing ratio on the corrosion behavior of 316 stainless steel exposed to a simulated salt-lake atmospheric environment [J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 276: 125380.

【编辑：温靖邦】