

# 重腐蚀环境下不同表面技术处理铝导电部件的长期稳定性与适用性评估

樊志彬<sup>1</sup>, 杜宝帅<sup>1</sup>, 陈慕<sup>2</sup>, 万涛<sup>2</sup>, 慈文斌<sup>1</sup>, 黄振宁<sup>1</sup>, 张博颐<sup>1</sup>, 金义杰<sup>2</sup>, 贾丹<sup>2,\*</sup>

1. 国网山东省电力公司, 济南 250000

2. 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]为解决 1050 铝合金导线在腐蚀环境中的防护难题, 明确化学氧化、阳极氧化及防腐脂 3 种表面处理工艺对 1050 铝合金耐蚀性的调控效果, 从而为工程中不同服役场景下的工艺选型提供依据。[方法]1050 铝合金经上述 3 种工艺处理后, 采用电化学阻抗谱(EIS)和动电位极化曲线测量来表征初期耐蚀性, 通过 480 h 盐水浸泡试验和中性盐雾(NSS)试验来评价长期稳定性, 并结合超景深显微镜来分析膜层的微观腐蚀形貌。[结果]相比于原始铝合金, 阳极氧化样品在 3.5% NaCl 溶液中的低频(0.01 Hz)阻抗模值 $|Z|_{0.01}$ 提高了 4 个数量级, 腐蚀电流密度降低了 6 个数量级, 腐蚀电位正移了 0.20 V, 而化学氧化和防腐脂样品的 $|Z|_{0.01}$ 则提高了 2 个数量级, 腐蚀电流密度降低了 2~3 个数量级, 腐蚀电位正移了 0.01~0.02 V。阳极氧化后的 1050 铝合金在 NSS 试验 96 h 后无腐蚀现象, 而化学氧化和防腐脂处理后的 1050 铝合金分别在 NSS 试验 96 h 和 48 h 后发生了腐蚀。防腐脂处理后在 1050 铝合金表面得到的薄膜在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 480 h 的过程中会发生溶胀, 使耐蚀性下降, 而化学氧化和阳极氧化的 1050 铝合金在浸泡后仍具有良好的耐蚀性。但由于化学氧化处理后得到的薄膜厚度不均, 薄弱处在浸泡后有腐蚀坑产生。阳极氧化膜在 1050 铝合金表面分布均匀, 因此其防护性能最持久。[结论]3 种表面处理技术均能提高 1050 铝合金的耐蚀性, 提升幅度的排序为: 阳极氧化 > 化学氧化 > 防腐脂。改善 1050 铝合金耐蚀性较佳的方法为阳极氧化。本研究明确了 3 种工艺的防护边界, 为铝合金构件表面处理工艺的选择提供了实验支撑。

**关键词:** 铝合金; 导电部件; 防腐脂; 化学氧化; 阳极氧化; 耐蚀性

**中图分类号:** TG174.451; TG178

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X(2026)04-0143-08

## Evaluation of long-term stability and applicability of different surface treatment technologies for aluminum conductive components in highly corrosive environments

FAN Zhibin<sup>1</sup>, DU Baoshuai<sup>1</sup>, CHEN Ao<sup>2</sup>, WAN Tao<sup>2</sup>, CI Wenbin<sup>1</sup>, HUANG Zhenning<sup>1</sup>, ZHANG Boyi<sup>1</sup>, JIN Yijie<sup>2</sup>, JIA Dan<sup>2,\*</sup>

1. State Grid Shandong Electric Power Company, Ltd., Jinan 250000, China

2. China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co., Ltd., Wuhan 430030, China

**Abstract:** [Objective] To address the corrosion protection challenge of 1050 aluminum alloy wires in corrosive environments, the control effects of three surface treatment processes, i.e. chemical oxidation, anodization, and anticorrosion grease coating, on the corrosion resistance of 1050 aluminum alloy were clarified, so as to provide a basis for process selection under different service conditions in engineering applications. [Method] After being treated by the said three processes, the initial corrosion resistance of 1050 aluminum alloy specimens was characterized by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization curve measurement. The long-term stability of the specimens was evaluated by 480-hour saline immersion tests and neutral salt spray (NSS) tests. The microscopic corrosion morphologies of the films on different specimens were analyzed using an ultra-depth-of-field microscope. [Result] Compared with the untreated aluminum alloy, the anodized specimen exhibited an increase in the low-frequency (0.01 Hz) impedance modulus  $|Z|_{0.01}$  by four orders of magnitude in 3.5% NaCl solution, a decrease in corrosion current density by six orders of magnitude, and a positive shift in corrosion potential of 0.20 V. For the chemically oxidized and anticorrosion grease-coated specimens,  $|Z|_{0.01}$  increased by two orders of magnitude, corrosion

**收稿日期:** 2025-09-18 **修回日期:** 2025-11-12

**基金项目:** 国网山东省电力公司科技项目“输变电工程关键导电部件腐蚀机理及耐蚀性能提升技术研究及应用”(520626230114); 国家自然科学基金(52205231)。

**第一作者:** 樊志彬(1987-), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电工新材料开发。

**通信作者:** 贾丹(1986-), 女, 博士, 正高级工程师, 研究方向为表面材料摩擦学。

**引用格式:** 樊志彬, 杜宝帅, 陈慕, 等. 重腐蚀环境下不同表面技术处理铝导电部件的长期稳定性与适用性评估[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 143-150.

FAN Z B, DU B S, CHEN A, et al. Evaluation of long-term stability and applicability of different surface treatment technologies for aluminum conductive components in highly corrosive environments [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 143-150.

current density decreased by two to three orders of magnitude, and corrosion potential shifted positively by 0.01-0.02 V. After 96 hours of NSS testing, the anodized 1050 aluminum alloy showed no sign of corrosion, whereas the chemically oxidized and anticorrosion grease-coated specimens exhibited corrosion after 96 hours and 48 hours, respectively. The thin film formed on the anticorrosion grease-coated specimen swelled during 480 hours of immersion in 3.5% NaCl solution, leading to a decline in corrosion resistance. In contrast, the chemically oxidized and anodized specimens maintained good corrosion resistance after immersion. However, due to the uneven film thickness, corrosion pits appeared at weak areas of chemically oxidized specimen after immersion. The anodic oxide film was uniformly distributed on the 1050 aluminum alloy surface, thus providing the most durable protection. **[Conclusion]** All three surface treatment techniques improve the corrosion resistance of 1050 aluminum alloy, with the order of enhancement being anodization > chemical oxidation > anticorrosion grease coating. Anodization is the preferred method for improving the corrosion resistance of 1050 aluminum alloy. This study clarifies the protection boundaries of the three processes, providing experimental support for the selection of surface treatment processes of aluminum alloy components.

**Keywords:** aluminum alloy; conductive component; anticorrosion grease; chemical oxidation; anodization; corrosion resistance

铝合金因密度低、比强度高、加工性能优异,广泛应用于建筑装饰、电子器件、轨道交通及海洋工程等领域<sup>[1-3]</sup>。然而,铝合金表面易形成疏松的自然氧化膜(厚度仅 2~5 nm),在腐蚀环境中易被穿透,导致基材发生点蚀、晶间腐蚀等失效行为,严重缩短构件的使用寿命<sup>[4-6]</sup>。例如,建筑领域的 6063 铝合金型材、电子领域的 1050 铝合金导线,在户外或高湿环境下常因腐蚀而导致铝合金结构强度下降、导电性能劣化。对于电力行业而言,亟需通过表面处理来提升铝导电部件的耐蚀性<sup>[7-8]</sup>。

目前,铝合金常用的表面防护技术包括化学氧化、阳极氧化、防腐脂涂覆等<sup>[9-11]</sup>,各工艺的防护机制与适用场景存在显著差异。化学氧化是通过将基材浸入弱酸性或碱性氧化液(如铬酸盐、磷酸盐、无铬转化液)中,通过化学反应生成薄而致密的氧化膜(厚度 0.5~4.0 μm),具有操作简单、成本低的优势,但膜层致密性差,长期耐蚀性有限<sup>[12-14]</sup>;阳极氧化是铝合金在电解作用下生成厚度和硬度都可控的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜(厚度 5~20 μm),膜层致密度高且可通过封闭处理进一步提升耐蚀性,是当前中长效防护的主流技术,但工艺能耗较高<sup>[15-17]</sup>;防腐脂通过涂覆形成物理隔离层,可快速实现短期防护,然而在盐雾吸湿作用下易发生溶胀、破损,长期稳定性差<sup>[18-19]</sup>。

现有研究多聚焦单一处理工艺对某一牌号铝合金耐蚀性的影响,例如吴轩璇等<sup>[20]</sup>研究了 2024 铝合金镧改性三价铬化学氧化膜和六价铬化学氧化膜经热老化处理后在盐水和盐雾环境下的耐腐蚀性能,考察了热老化温度对镧改性三价铬和阿洛丁化学氧化膜耐腐蚀性能的影响规律。郝成罡等<sup>[21]</sup>利用钛白粉厂废弃的 FeOOH 粉末为原料,十六烷基三甲氧基硅烷(HDTMS)作为改性剂,以湿法球磨工艺制备了 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>超疏水微米粉末,再配合环氧树脂,通过喷涂在 5083 铝合金表面构建稳定且耐腐蚀的超疏水涂层,探究了涂层的疏水性、微观形貌、力学性能和耐蚀性。张海燕等<sup>[22]</sup>采用直流叠加脉冲在 7A19 铝合金表面制备了氧化膜,探究电流密度与氧化时间对膜层各项性能的影响,发现氧化膜可以明显延长 7A19 超高强度铝合金在盐雾加速腐蚀环境下的耐腐蚀性能。然而系统性对比不同表面技术(如化学氧化、阳极氧化、防腐脂)处理后铝合金耐蚀性的研究较少,尤其缺乏不同处理工艺下电化学性能、长期稳定性和微观形貌三者之间的关联分析,难以直接为实际工程中工艺选择提供参考。

基于此,本文以 1050 铝合金为研究对象,通过化学氧化、阳极氧化和防腐脂 3 种工艺处理,结合电化学测试、盐雾试验及微观表征,系统探究不同处理工艺对 1050 铝合金耐蚀性的影响规律,旨在为铝合金构件在不同服役周期(短期临时防护、长期户外防护)下的表面处理工艺选型提供数据支撑与理论依据。

## 1 实验

### 1.1 材料与试剂

实验所用的 1050 铝合金基材均为冷轧板材(厚度 2 mm),按国标 GB/T 3190-2022《变形铝及铝合金化学成分》的要求,其主要化学成分(以质量分数计)为:Al≥99.5%,Si≤0.25%,Mg≤0.05%,Fe≤0.40%,Cu≤0.05%,Mn≤0.05%,其他 0.15%。同时制备 1050 铝合金的导线样品(直径 2 mm),用于模拟电力行业的实际应用场景。一般样品切割为 15 mm×15 mm 的试片,导线样品截取 100 mm 长。

实验所用试剂均为分析纯(AR级),购自国药集团化学试剂有限公司,包括氢氧化钠(NaOH)、硝酸(HNO<sub>3</sub>,质量分数65%~68%)、硫酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,质量分数95%~98%)、铬酸酐(CrO<sub>3</sub>)、磷酸(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,质量分数85%)、重铬酸钾(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)和氯化钠(NaCl)。防腐脂为FS-301型工业级铝用防护脂,购自某新材料科技有限公司。实验用水为去离子水。

## 1.2 样品制备

所有样品均经预处理、表面处理和后处理三步制备。

### 1.2.1 预处理

为去除样品表面的油污、氧化皮及杂质,确保表面处理膜层均匀结合,预处理步骤如下:

- 1) 除油。将样品浸泡于50 g/L NaOH溶液中,(25±1)°C下处理15 min,去除表面油污与自然氧化膜。
- 2) 酸洗。取出除油样品后用去离子水冲洗3次,然后浸泡于10%(体积分数)硝酸溶液中,(25±1)°C下处理5 min,中和残留碱液并活化基材表面。
- 3) 水洗与干燥。酸洗后用去离子水超声清洗样品10 min,最后置于(60±2)°C的鼓风干燥箱中干燥30 min,备用。

### 1.2.2 表面处理

采用3种工艺对预处理后的样品进行表面处理,工艺参数基于前期探索实验优化确定。

- 1) 化学氧化:采用铬酸盐-磷酸盐体系,氧化液由30 g/L CrO<sub>3</sub>、50 mL/L磷酸和10 mL/L硫酸组成,于(60±2)°C浸泡20 min,处理后用去离子水冲洗3次,60°C干燥30 min。
- 2) 阳极氧化:以样品为阳极,铅板为阴极,采用硫酸体系电解液(180 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>),电流密度1.5 A/dm<sup>2</sup>,温度(20±1)°C,氧化时间40 min。氧化后进行封闭处理,即浸泡于(95±2)°C的50 g/L K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>溶液中30 min,最后用去离子水冲洗、60°C干燥。
- 3) 防腐脂涂覆:采用刷涂法,将防腐脂均匀涂覆于样品表面,控制干膜厚度为(80±5)μm(用湿膜梳测量),涂覆后置于25°C的通风环境中固化24 h,最后采用干膜测厚仪测量涂层厚度。

同时设置未处理的“空白样品”作为对照。每组实验均准备3个平行样,以减少实验误差。

## 1.3 性能表征与测试方法

### 1.3.1 电化学测试

采用CHI660E型电化学工作站进行电化学测试,电解液为3.5% NaCl溶液,测试温度为(25±1)°C。三电极体系中,铝合金样品为工作电极(测试面积1 cm<sup>2</sup>),饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂片为对电极。待开路电位稳定后测量电化学阻抗谱(EIS),频率从100 kHz至0.01 Hz,扰动电压幅值为10 mV。极化曲线测试的电位范围是从相对于开路电位-500 mV扫描至相对于开路电位+500 mV,扫描速率为0.5 mV/s。采用CorrView软件对测试数据进行拟合,并通过塔菲尔外推法开展数据分析。

### 1.3.2 长期稳定性测试

浸泡试验:将样品置于3.5% NaCl电解液中,分别在浸泡0、24、72、168、336和480 h时进行EIS测试,分析样品的腐蚀行为,评价膜层长期防护稳定性。

中性盐雾(NSS)试验:依据国标GB/T 10125-2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》进行,采用5% NaCl溶液,pH 6.5~7.2,喷雾压力0.07~0.10 MPa,温度(35±2)°C,每80 cm<sup>2</sup>的盐雾沉降量1~2 mL/h。定期观察样品的表面腐蚀形貌(每12 h记录1次),以样品表面出现5%以上腐蚀斑为失效标准,记录盐雾失效时间。

### 1.3.3 形貌分析

采用KEYENCE VHX-6000超景深显微镜观察腐蚀后1050纯铝的表面微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 初期电化学性能比较

1050铝合金在3种不同表面技术处理后的初期EIS测量结果如图1所示。一般来说,Nyquist图中

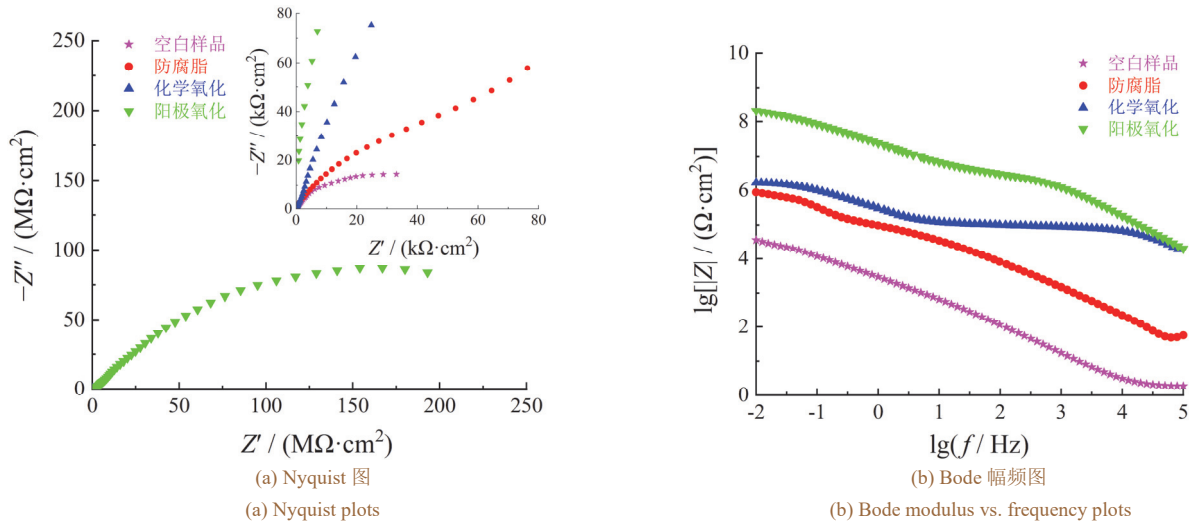


图1 不同处理方式下 1050 铝合金样品的 EIS 谱图

Figure 1 EIS plots of 1050 aluminum alloy treated by different methods

半圆的直径越大,样品的耐蚀性越强<sup>[23]</sup>。从图 1a 可知,3 种不同技术处理后 1050 铝合金样品的 Nyquist 曲线半圆直径从大到小的排序为:阳极氧化 > 化学氧化 > 防腐脂 > 原始样品。另外,阳极氧化样品的半圆直径远远大于其他方式处理的样品。从图 1b 可知,原始样品的阻抗模值最小,且随频率( $\lg f$ )升高呈快速下降趋势,说明铝合金直接暴露的情况下,腐蚀介质易穿透其表面的天然氧化膜与基体反应,耐蚀性极差;防腐脂处理后样品的阻抗模值显著高于原始样品,但远低于化学氧化和阳极氧化的样品,且随频率升高,阻抗模值下降幅度较大,说明防腐脂能物理隔离腐蚀介质,但防护能力弱于氧化膜;化学氧化处理后样品的阻抗模值进一步增大,容抗弧延伸更远,且在频率变化中的稳定性优于防腐脂,表明化学氧化膜对腐蚀介质的阻挡能力优于防腐脂;阳极氧化处理后,样品的阻抗模值最大,且从低频到高频的宽频率区间内持续维持高模值,说明阳极氧化膜不仅对腐蚀介质的阻挡能力突出,还能在复杂环境下长期稳定发挥保护作用,其耐蚀性显著优于其他处理技术。Bode 图中 0.01 Hz 时的阻抗模值 ( $|Z|_{0.01}$ ) 可直接反映样品耐蚀性, $|Z|_{0.01}$  越大则样品耐蚀性越好<sup>[23]</sup>, $|Z|_{0.01}$  的大小顺序为:阳极氧化 > 化学氧化 > 防腐脂 > 原始样品。相比于原始铝合金,阳极氧化铝合金的 $|Z|_{0.01}$  提高了 4 个数量级,大大增强了铝合金的耐蚀性,化学氧化和防腐脂的 $|Z|_{0.01}$  与原始铝合金相比提高了 2 个数量级。从上述实验结果可知,3 种表面处理技术均可有效提高 1050 铝合金的耐蚀性,阳极氧化对 1050 铝合金耐蚀性的提升最大,其次为化学氧化,防腐脂的防护能力最弱。因此,提高 1050 铝合金耐蚀性的较佳技术为阳极氧化。

腐蚀电流密度和腐蚀电位可直接评价样品的耐蚀性。一般来说,腐蚀电流密度越小,腐蚀电位越正,样品的耐蚀性就越好<sup>[24]</sup>。1050 铝合金经表面处理后的极化曲线如图 2 所示,根据 Tafel 外推法可计算得到腐蚀电流密度与腐蚀电位。原始样品、防腐脂涂覆样品、化学氧化样品和阳极氧化样品的腐蚀电流密度分别为  $1.86 \times 10^{-6}$ 、 $8.71 \times 10^{-8}$ 、 $2.19 \times 10^{-9}$  和  $4.47 \times 10^{-12}$  A/cm<sup>2</sup>,腐蚀电位则分别为 -0.50、-0.48、-0.47 和 -0.30 V。

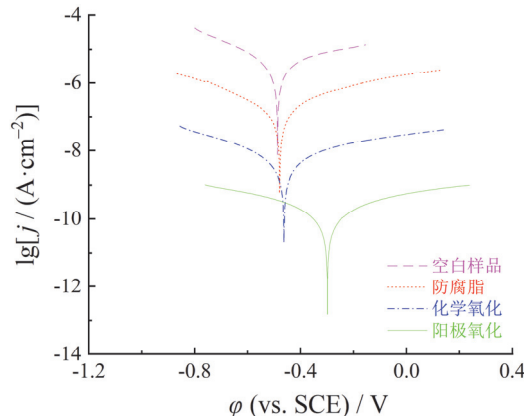


图2 不同技术处理的 1050 铝合金样品在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Figure 2 Potentiodynamic polarization curves measured in 3.5% NaCl solution for 1050 Al alloy treated by different methods

相比于原始铝合金, 阳极氧化处理令其腐蚀电流密度降低了约 6 个数量级, 腐蚀电位正移了 0.20 V, 化学氧化和防腐脂处理后虽然腐蚀电位只是略有正移, 但腐蚀电流密度降低了 2~3 个数量级。由此可见, 3 种技术均可提高铝合金的耐蚀性, 其中阳极氧化的提升效果最佳, 这与 EIS 测试得到的结论一致。

## 2.2 长期稳定性与衰减行为

### 2.2.1 浸泡试验

为考察 3 种表面处理技术对 1050 铝合金长期耐蚀性的影响, 分别将浸泡不同时间后的样品进行了 EIS 测试, 结果如图 3 所示。随着浸泡时间的延长, 所有样品的耐蚀性能均下降。浸泡初期(24 h 内), 表面处理层的防腐性能较好; 浸泡 72 h 和 168 h 后, 腐蚀介质缓慢渗透表面处理层, 破坏其完整性, 防护能力逐渐减弱; 浸泡 480 h 后, 阻抗模值大幅减小, 此时表面处理层的结构被腐蚀介质严重破坏, 防护作用

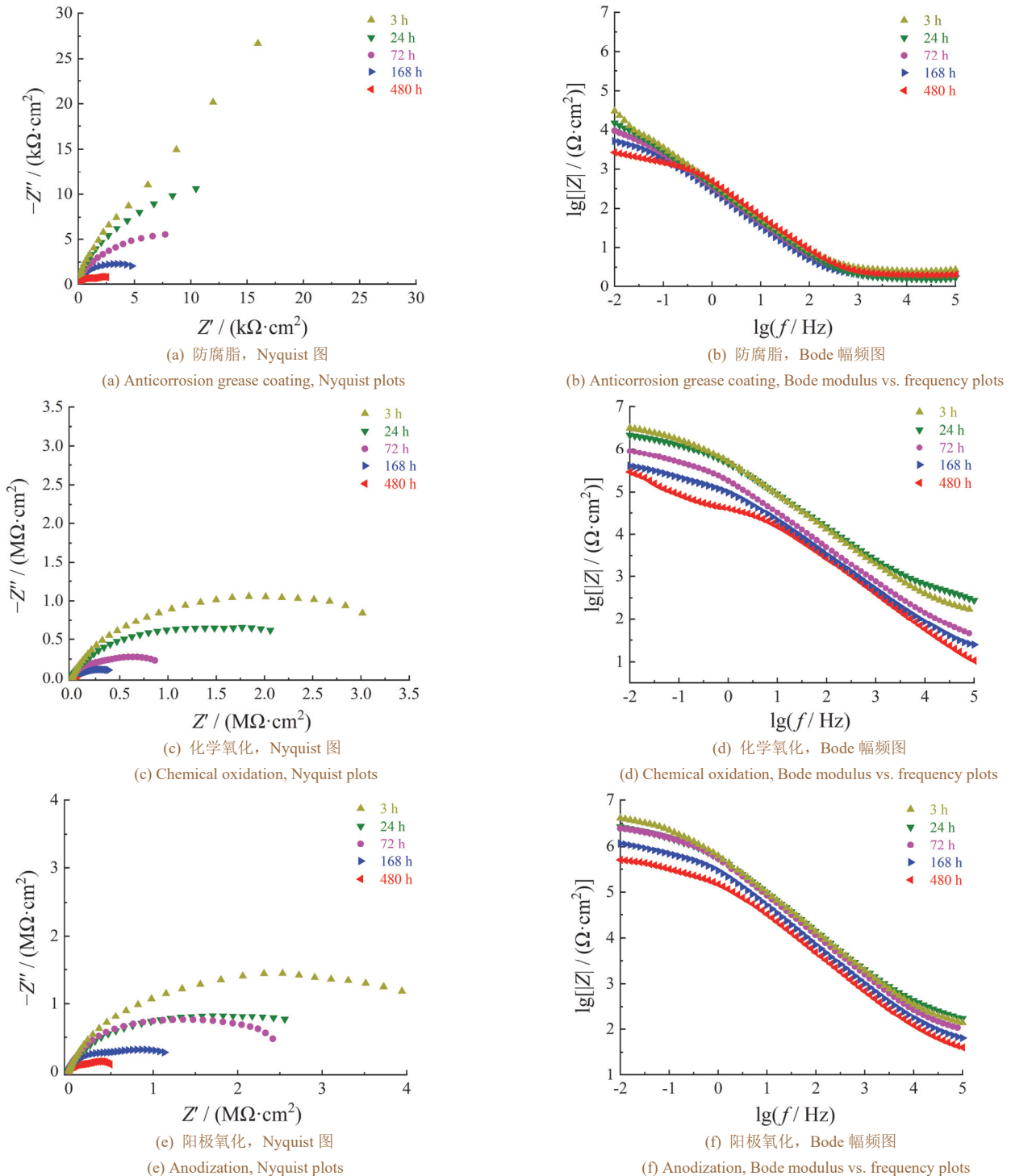


图 3 不同技术处理的 1050 铝合金在 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间后的 EIS 谱图

Figure 3 EIS plots of 1050 Al alloy treated by different methods after immersion in 3.5% NaCl solution for different time

大幅失效,防腐效果显著降低。浸泡 480 h 后,防腐脂处理样品的 Nyquist 曲线半圆直径和低频阻抗模值下降幅度较大,  $|Z|_{0.01}$  下降至  $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$  量级,而化学氧化和阳极氧化处理样品的 Nyquist 曲线半圆直径和低频阻抗模值下降较为缓慢,化学氧化处理样品的  $|Z|_{0.01}$  保持在  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$  量级,仍维持较高水平,阳极氧化后样品的  $|Z|_{0.01}$  也保持在  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$  量级,仍具有较高的耐腐蚀性能。以上结果表明防腐脂处理样品在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 480 h 后,耐蚀性会大大降低,化学氧化处理样品的防腐性能比防腐脂处理的样品更好,而阳极氧化处理样品的防腐性能最佳,说明阳极氧化处理样品能长期维持较好的耐蚀性,稳定性较强。因此,阳极氧化处理能赋予铝合金较强的耐蚀性和稳定性。

### 2.2.2 盐雾试验

为了更直观地研究 3 种表面处理技术对 1050 铝合金的耐腐蚀性能的影响,考察了经不同时间盐雾试验后样品表面的形貌。如图 4 所示,防腐脂处理样品在 NSS 试验 48 h 后出现点蚀现象(见圈示部分),腐蚀区域约占样品表面的 25%,说明此时防腐脂涂层已失效,随后点蚀区域向外扩张,使得腐蚀区域不断扩展,在 72 h 后出现了大面积的锈蚀区域,锈蚀面积约为 75%,96 h 后其表面几乎全被腐蚀,腐蚀区域面积约占 95%。经化学氧化技术处理后的样品表面在 NSS 试验 96 h 后出现点蚀现象(见圈示部分),腐蚀区域面积约占样品的 4%左右,此时化学氧化涂层未失效,但已发生腐蚀。阳极氧化样品表面在 NSS 试验 96 h 后未出现腐蚀现象,表面仍保持整洁光亮,说明涂层尚未失效。以上结果表明阳极氧化后的样品表面耐蚀性最佳,化学氧化技术相比于防腐脂技术,更能提高铝合金的耐蚀性。

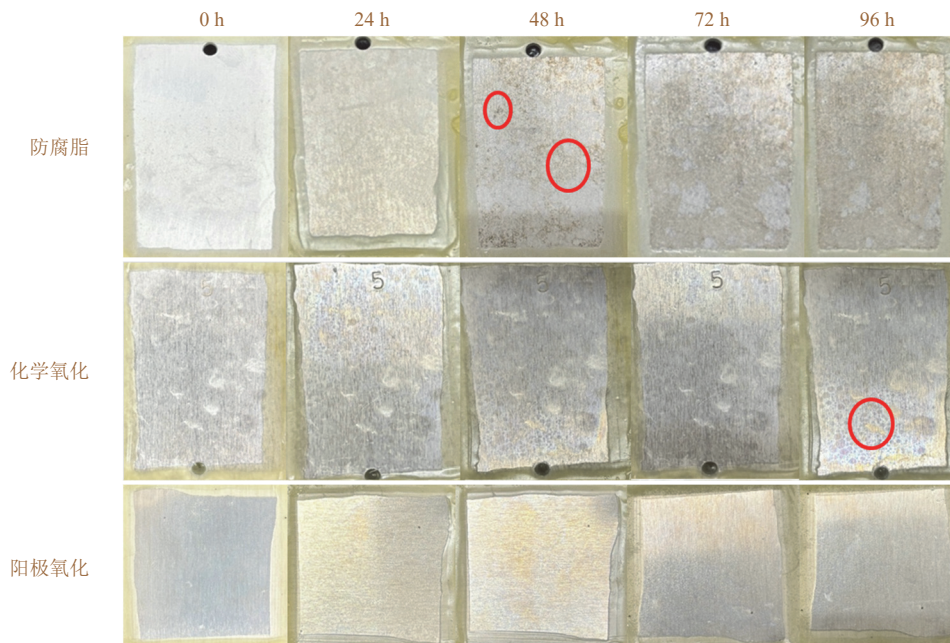


图 4 经不同技术处理的 1050 铝合金样品在中性盐雾试验后的外观

Figure 4 Appearance of 1050 Al alloy specimens treated by different methods after NSS test

3 种不同处理技术的 1050 铝导线经 NSS 测试 120 h 后的表面宏观形貌如图 5 所示。相比于初始铝导线,涂覆防腐脂的铝导线经 120 h 中性盐雾测试后,表面涂层出现了溶胀现象,存在大片的白色区域;化学氧化样品的表面在中性盐雾测试后出现了凹坑,且存在小片的白色区域;而经阳极氧化处理后的样品在中性盐雾试验后仅出现极小的白色区域,且表面形貌与初始样品无明显差别,未见明显的腐蚀迹象。因此,在 3 种所研究的表面处理技术中,阳极氧化技术最能提高铝合金的耐蚀性,化学氧化技术的防腐性能相比防腐脂技术又更好一些。

### 2.3 1050 铝合金的腐蚀微观形貌

为了深入探究 1050 铝合金经过中性盐雾腐蚀 96 h 后的腐蚀形貌与腐蚀深度,采用超景深显微镜对其进行观察,结果如图 6 所示。采用防腐脂技术处理后的薄膜产生了溶胀现象,表面高度不一,分布着诸多由于溶胀而鼓起的气包,并伴随着腐蚀现象产生。采用化学氧化技术处理后的表面存在明显的腐蚀坑,腐蚀坑宽约为  $100 \mu\text{m}$ ,长度约为  $50 \mu\text{m}$ 。从相应的三维图可知,化学氧化产生的薄膜左侧较厚,右侧较薄,



图 5 不同技术处理的 1050 铝导线经中性盐雾试验 120 h 后的外观

Figure 5 Appearance of 1050 Al wires treated by different methods after 120 hours of NSS test

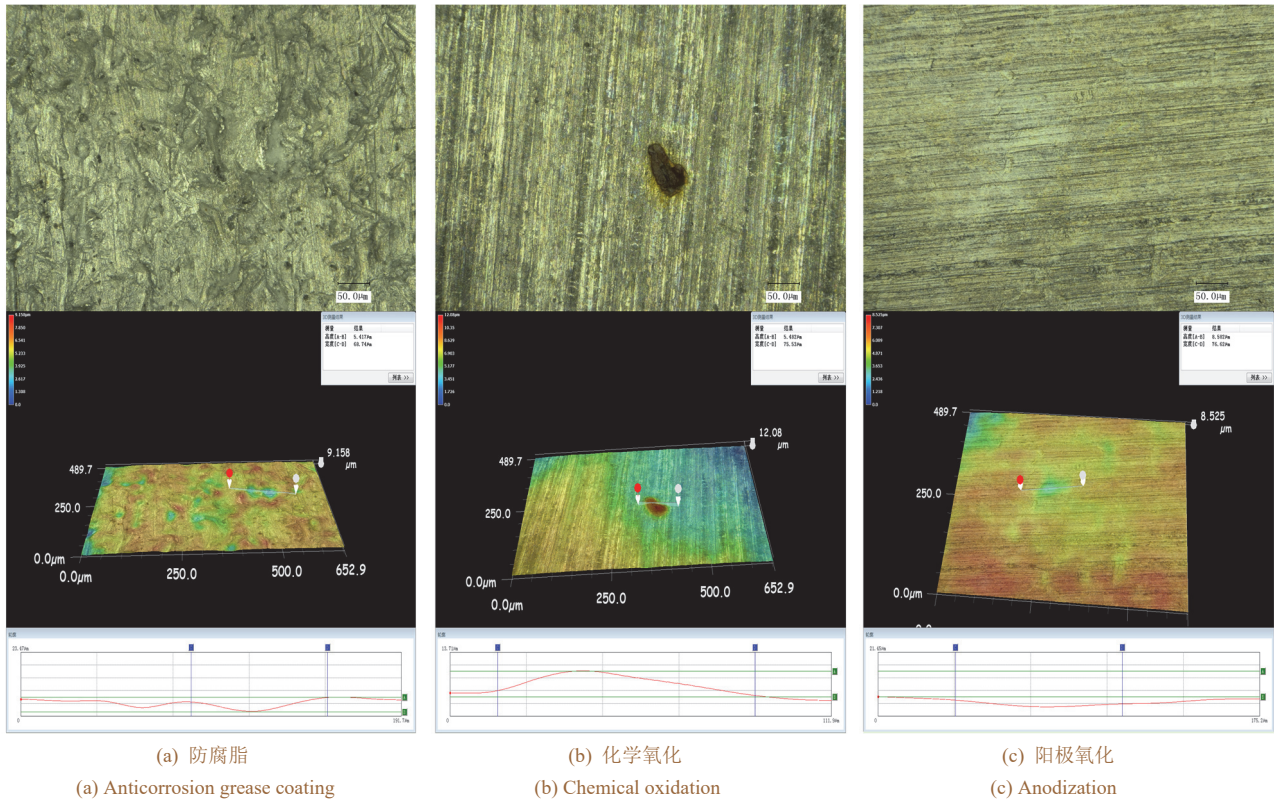


图 6 不同技术处理样品的表面三维图像

Figure 6 Three-dimensional images of the surfaces of specimens treated by different methods

厚度差较为明显,因此膜层较薄的区域先发生了腐蚀,腐蚀深度约为  $5.48\ \mu\text{m}$ 。阳极氧化处理后的表面未发生锈蚀,其表面薄膜致密,高度分布也较为均匀。综上,防腐脂处理后的薄膜在腐蚀环境中会发生溶胀现象,从而导致防腐性能大幅下降;化学氧化处理后的薄膜厚度分布不均,较薄处的薄膜易被腐蚀;而经阳极氧化处理的薄膜厚度均一且致密,在腐蚀环境中不易被破坏,具有较好的耐蚀性。因此,相比于防腐脂与化学氧化处理,阳极氧化可更有效地增强 1050 铝合金的耐腐蚀性能。

### 3 结论

研究了 3 种表面处理技术对 1050 铝合金耐蚀性的影响,它们能在不同程度上提高 1050 铝合金的耐蚀性,提升幅度及耐久性的顺序为:阳极氧化 > 化学氧化 > 防腐脂。改善 1050 铝合金耐蚀性较佳的方法是阳极氧化。

观察了不同技术处理后 1050 铝合金表面腐蚀形貌。化学氧化处理后的薄膜厚度不均匀, 表面有腐蚀坑产生; 防腐脂处理后的薄膜会发生溶胀现象, 使 1050 铝合金耐蚀性能下降; 阳极氧化处理后的 1050 铝合金表面薄膜分布均匀, 无溶胀与腐蚀现象产生。

### 参考文献:

- [1] LI G, QU W Y, LUO M, et al. Semi-solid processing of aluminum and magnesium alloys: status, opportunity, and challenge in China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (11): 3255-3280.
- [2] 戴卫兵, 张册, 郭辰光, 等. 微弧氧化涂层对铝合金疲劳性能影响与改进途径研究进展[J]. 表面技术, 2025, 54 (17): 18-32.  
DAI W B, ZHANG C, GUO C G, et al. Research progress on influence of micro-arc oxidation coatings on fatigue property of aluminum alloys and improvement approaches [J]. Surface Technology, 2025, 54 (17): 18-32.
- [3] 陈超, 高义皓, 任柏桥, 等. 铝合金激光-电弧复合焊接技术的研究进展[J]. 航空制造技术, 2025, 68 (9): 47-60.  
CHEN C, GAO Y H, REN B Q, et al. Research progress of laser-arc hybrid welding technology for aluminum alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68 (9): 47-60.
- [4] 刘聪, 李雪伍, 雷勇杰, 等. 5A02 铝合金表面微纳结构的制备及防腐行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (9): 2875-2880.  
LIU C, LI X W, LEI Y J, et al. Fabrication of micro-nano structures on 5A02 Al alloy substrate surface and their anti-corrosion property [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (9): 2875-2880.
- [5] LI X W, WANG H X, SHI T, et al. Efficient preparation and anticorrosion mechanism of superhydrophobic 7075 aviation aluminum alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (1): 6-10.
- [6] 倪莹莹, 柯楠, 陈灵明, 等. 铝合金表面多级涂层的制备及防腐和抗污性能研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22 (6): 66-74.  
NI Y Y, KE N, CHEN J M, et al. Preparation of multistage coating on aluminum alloy and corresponding anti-corrosion and anti-biofouling properties [J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22 (6): 66-74.
- [7] EHSAN M A, KUMAR A M, SULEIMAN R K, et al. Development of trimetallic cobalt-nickel-vanadium oxide anticorrosion coatings for the protection of AA2024 Al alloy specimens against sodium chloride solutions [J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 313: 128696.
- [8] XU J P, YAN D D, ZOU T T, et al. Strong modification of double-pulsed femtosecond laser to reinforce anticorrosion of Al alloy surface [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111800.
- [9] LIU S Y, DONG Z J, WANG X Z, et al. Different acid doped polyaniline waterborne epoxy coatings: anticorrosion and passivation performance on 5083 Al alloy [J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 173: 107182.
- [10] DAI L B, LI W F, ZHANG G G, et al. Anti-corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation coating formed on high Si content Al alloy by sectionalized oxidation mode [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2017, 167: 012063.
- [11] GNEDENKOV S V, SINEBRYUKHOV S L, ZAVIDNAYA A G, et al. Composite hydroxyapatite-PTFE coatings on Mg-Mn-Ce alloy for resorbable implant applications via a plasma electrolytic oxidation-based route [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014, 45 (6): 3104-3109.
- [12] 王成, 江峰, 林海潮, 等. 铝合金铈盐转化膜的研究[J]. 电镀与涂饰, 2001, 20 (1): 24-26.  
WANG C, JIANG F, LIN H C, et al. Study of cerium conversion coatings on aluminum alloy [J]. Electroplating & Finishing, 2001, 20 (1): 24-26.
- [13] VAJO J J, ADJORLOLO A A, BADAIEVA E A, et al. Chromium-free coating for Al alloy corrosion protection based on a novel Ti/Mg oxyfluoride [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2024, 171 (7): 071501.
- [14] BECKER M. Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys [J]. Corrosion Reviews, 2019, 37 (4): 321-342.
- [15] KU C A, WU C C, HUNG C W, et al. Influence of normal-to-high anodizing voltage on AAO surface hardness from 1050 aluminum alloy in oxalic acid [J]. Micromachines, 2024, 15 (6): 683.
- [16] PHAM H V, KWON D, KIM J, et al. Formation behavior of anodizing films on various aluminum alloys in oxalic acid solution [J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 315: 128953.
- [17] MORKS M F, HAMDY A S, FAHIM N F, et al. Growth and characterization of anodic films on aluminum alloys in 5-sulfosalicylic acid solution [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200 (16/17): 5071-5076.
- [18] YASAKAU K A, KUZNETSOVA A, MALTANAVA H M, et al. Corrosion protection of zinc by LDH conversion coatings [J]. Corrosion Science, 2024, 229: 111889.
- [19] SHEN Y H, WANG Y S, LIN J H, et al. Study on anti-wear and friction-reducing compounding additives in lithium greases [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2023, 75 (5): 546-553.
- [20] 吴轩璇, 王宁涛, 王利华, 等. 热老化温度对铝合金化学氧化膜耐蚀性影响研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47 (1): 22-28.  
WU X X, WANG N T, WANG L H, et al. Effect of thermal aging temperature on the corrosion resistance of chemical oxide film on aluminum alloy [J]. Plating and Finishing, 2025, 47 (1): 22-28.
- [21] 郝成罡, 王仲民, 李吉刚, 等. 5083 铝合金表面  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基超疏水防腐复合涂层的制备及性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44 (4): 16-23.  
HAO C G, WANG Z M, LI J G, et al. Preparation and properties of superhydrophobic and anticorrosive  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composite coating on 5083 aluminum alloy surface [J]. Electroplating & Finishing, 2025, 44 (4): 16-23.
- [22] 张海燕, 贾鹏翔, 杜东兴. 超高强度铝合金硬质阳极氧化工艺及其耐盐雾腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22 (8): 14-23.  
ZHANG H Y, JIA P X, DU D X. Hard anodizing process of super-high strength aluminum alloy and its salt spray corrosion resistance [J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22 (8): 14-23.
- [23] WAN T, WANG X L, WANG B, et al. Effect of methyl methacrylate/nitrile rubber/graphene oxide on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy-based coating [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140 (18): e53800.
- [24] CHEN S M, LI B, XIAO R G, et al. Design an epoxy coating with TiO<sub>2</sub>/GO/PANI nanocomposites for enhancing corrosion resistance of Q235 carbon steel [J]. Materials, 2021, 14 (10): 2629.

【编辑: 温靖邦】