

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.011

微弧氧化膜对铝锡合金焊缝的防护性能

孙林¹, 殷波², 卞钦¹

(1. 江苏联合职业技术学院宜兴分院 信息学院, 江苏 宜兴 214206; 2. 武汉科技大学 先进耐火材料全国重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要: 为了提高铝锡合金焊缝的耐腐蚀性以满足较为苛刻的使用要求, 在添加氟锆酸钾的电解液中对铝锡合金焊缝进行微弧氧化。采用 XRD、SEM、测厚仪和电化学工作站表征微弧氧化膜的物相、形貌、厚度和耐腐蚀性, 进而评估其对铝锡合金焊缝的防护性能。结果表明: 微弧氧化膜完全覆盖铝锡合金焊缝, 添加氟锆酸钾的微弧氧化膜物相组成与常规微弧氧化膜不同, 为 α -Al₂O₃、 γ -Al₂O₃ 和 ZrO₂。改变氟锆酸钾浓度不会影响微弧氧化膜的多孔结构, 但添加适量氟锆酸钾能降低其孔隙率, 明显改善其平整度和致密性, 进而提高耐腐蚀性。添加 12 g/L 氟锆酸钾可以制备出较平整致密的微弧氧化膜, 孔隙率仅为 2.21%, 厚度达 14.2 μ m。与常规微弧氧化膜相比, 该微弧氧化膜具有更好的耐腐蚀性, 对铝锡合金焊缝起到良好的防护作用。

关键词: 微弧氧化; 氟锆酸钾; 耐腐蚀性

中图分类号: TQ153.6; TG174.4

文献标志码: A

Protective performance of micro-arc oxidation films on Al-Sn alloy welded zone

SUN Lin¹, YIN Bo², BIAN Qin¹

(1. Information Department, Jiangsu Union Technical Institute Yi Xing Campus, Yixing 214206, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Refractories, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to enhance the corrosion resistance of Al-Sn alloy weld zone to meet demanding application requirements, micro-arc oxidation was performed on the weld zone in an electrolyte containing potassium fluorozirconate. The phase, morphology, thickness and corrosion resistance of micro-arc oxidation film were characterized using XRD, SEM, thickness gauge and electrochemical workstation. Subsequently, the protective performance of the micro-arc oxidation film on Al-Sn alloy weld zone was evaluated. The results show that micro-arc oxidation film completely covers the Al-Sn alloy weld zone. The phase composition of the micro-arc oxidation film prepared by adding potassium fluorozirconate is α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃ and ZrO₂, which is different from conventional micro-arc oxidation film. Changing the concentration of potassium fluorozirconate does not affect the porous structure of micro-arc oxidation film, but adding an appropriate amount of potassium fluorozirconate can reduce the porosity of micro-arc oxidation film, significantly improve the flatness and density, and thereby enhance the corrosion resistance. A relatively flat and dense micro-arc oxidation film is prepared in an electrolyte containing 12 g/L potassium fluorozirconate, with a porosity of only 2.21% and a thickness of 14.2 μ m. Compared with

收稿日期: 2025-05-30

修回日期: 2025-09-18

通信作者: 孙林(1984—), 男, 硕士, 高级讲师, 研究方向为电子技术与材料、表面改性, e-mail: Union_edu@126.com

基金项目: 江苏省教育学会“十四五”规划课题(22A05QTWX352)

引用信息: 孙林, 殷波, 卞钦. 微弧氧化膜对铝锡合金焊缝的防护性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 73-79.

SUN Lin, YIN Bo, BIAN Qin. Protective performance of micro-arc oxidation films on Al-Sn alloy welded zone[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 73-79.

conventional micro-arc oxidation film, this micro-arc oxidation film exhibits better corrosion resistance and provides better protection for the Al-Sn alloy weld zone.

Keywords: micro-arc oxidation; potassium fluorozirconate; corrosion resistance

铝锡合金是将铝元素与锡元素按照一定比例混合形成的合金,因密度低、延展性好、结构稳定、导电导热性以及抗氧化性优异,广泛应用于电子、海洋工程、包装和航空航天等领域^[1]。虽然掺杂锡元素使铝锡合金同样具有较好的耐蚀性,但铝锡合金在焊接过程中因成分差异、夹渣和冷却不均匀等问题,焊缝区域易出现应力集中,成为腐蚀的薄弱区域^[2-3]。当处在盐雾或含有酸碱性质介质的环境中,铝锡合金焊缝区域易发生点蚀和电偶腐蚀,随着腐蚀程度加重,会降低铝锡合金构件的可靠性。开发针对铝锡合金焊缝的防护措施,对保证铝锡合金构件的可靠性,以满足较为苛刻的使用要求具有重要意义。

阳极氧化^[4]、电沉积^[5]、钝化^[6]、磷化^[7]等技术因具有膜层的结合力不够、环境耐受性不理想等缺陷无法用于铝锡合金焊缝防护。微弧氧化是一种利用热力学、电化学和等离子体共同作用,在铝、镁、钛及其合金表面原位生成一层陶瓷氧化膜的技术。微弧氧化膜与基体呈冶金结合,化学稳定性和耐蚀性优异^[8-10],因此适用于铝锡合金焊缝防护。

在微弧氧化过程中,通过调整电解液成分有望改善微弧氧化膜的形貌结构,从而提高其耐蚀性。氟锆酸钾是一种在表面处理行业中常用的化合物,可用作添加剂改善电解液的性能。庄俊杰^[11]和韩东等^[12]研究发现,在电解液中添加适量氟锆酸钾能改善镁合金表面微弧氧化膜的致密性,进而提高膜的耐蚀性。铝锡合金焊缝的特性与镁合金不同,具体差异体现在化学成分、熔点、组织结构等方面,目前尚无针对铝锡合金焊缝进行微弧氧化实验研究。本文在添加氟锆酸钾的电解液中对铝锡合金焊缝进行微弧氧化,并研究氟锆酸钾对铝锡合金焊缝表面微弧氧化膜的物相、形貌、厚度以及耐蚀性的影响。

1 实验

1.1 铝锡合金焊接

裁切两块200 mm×10 mm×3 mm的铝锡合金板,其化学成分为4.5 wt.% Sn、2.0 wt.% Cu、1.0 wt.% Si、Al余量。沿着铝锡合金板的长度方向双边打坡口,然后使用铝焊条以端面平齐的方式进行对焊。

焊后自然冷却,沿着垂直于焊缝的方向等间距裁切,制备10个铝锡合金焊接试样。

1.2 微弧氧化膜的制备

用砂纸打磨焊接试样,清除焊渣。随后将试样浸入丙酮中超声波除油,然后用去离子水清洗试样,随即浸入硅酸盐基础电解液中(主要成分:硅酸钠10 g/L,氢氧化钠3 g/L)。搅拌均匀后向基础电解液中添加氟锆酸钾,调节浓度分别为4、8、12和16 g/L。采用单极性脉冲电源进行微弧氧化实验,以焊接试样为阳极,不锈钢板为阴极,两者的面积比约为1:2。设置相同的工艺条件(电压400 V、脉冲频率500 Hz、占空比20%、温度35℃、时间40 min),在焊接试样表面制备5种微弧氧化膜,微弧氧化膜命名如下:常规氧化膜(氟锆酸钾0 g/L)、改性氧化膜I(氟锆酸钾4 g/L)、改性氧化膜II(氟锆酸钾8 g/L)、改性氧化膜III(氟锆酸钾12 g/L)、改性氧化膜IV(氟锆酸钾16 g/L)。

1.3 表征与测试

借助D8 Quest Eco型XRD仪测微弧氧化膜的衍射图谱,导入Jade软件中分析物相。仪器采用Cu靶,扫描速率5°/min,角度范围30°~90°。

选取焊缝区,先对其进行溅射喷金,然后借助Sigma 360型SEM分析焊缝区及其表面微弧氧化膜的形貌。另将放大5 000倍的微弧氧化膜形貌图导入Matlab软件中预处理,然后转换成二值化图像将所有孔洞分离。根据图像自带标尺计算孔洞处像素点数量,得到孔洞总面积。将孔洞总面积与图像面积相除得到孔隙率,进而分析微弧氧化膜的致密性^[13-14]。

采用VHX-7000型超景深三维显微镜观察微弧氧化膜的三维表面形貌,同时测量面粗糙度 S_a 。采用分辨率为0.1 μm的ED400型涡流测厚仪测量微弧氧化膜的厚度,将试样平放在桌面随机选5个点测量,结果取平均值。

通过电化学实验测试微弧氧化膜的耐蚀性,评估其对铝锡合金焊缝的防护性能。采用Parstat 2273型电化学工作站,工作电极为环氧树脂封装的微弧氧化后铝锡合金焊接试样,辅助电极和参比电极分别为铂电极和饱和甘汞电极。施加10 mV正弦电压信号测量阻抗谱,频率范围 $10^5 \sim 10^2$ Hz。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图1为5种微弧氧化膜的XRD图谱。常规氧化膜的物相是 α - Al_2O_3 和 γ - Al_2O_3 ，而添加不同浓度氟锆酸钾制备的微弧氧化膜的物相均为 α - Al_2O_3 、 γ - Al_2O_3 和 ZrO_2 ，表明氟锆酸钾参与了微弧氧化过程。氟锆酸钾在碱性电解液中会与氢氧根反应生成 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ ，如式(1)和式(2)所示， $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 表面易吸附电荷，会在电场作用下迁移至阳极附近，参与微弧氧化过程并在火花放电阶段分解形成 ZrO_2 ，如式(3)所示^[15]，最终被微弧氧化膜包覆，因此添加氟锆酸钾的微弧氧化膜含有 ZrO_2 相。

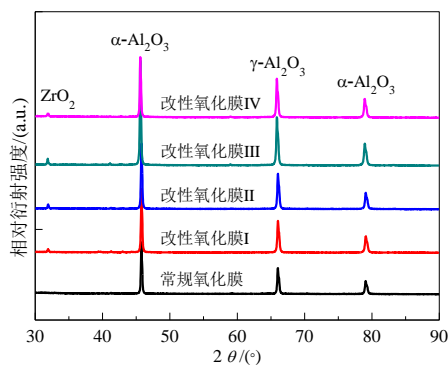
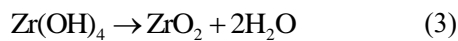
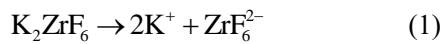


图1 5种微弧氧化膜的XRD图

Fig.1 XRD patterns of five micro-arc oxidation films

2.2 形貌分析

图2为铝锡合金焊缝区及5种微弧氧化膜的微观形貌。图2(a)为铝锡合金焊缝区的微观形貌，可以看出焊缝区无微裂纹、气孔等缺陷，融合区(虚线框标示区域)清晰。图2(b)~(f)为5种微弧氧化膜的微观形貌。对比发现，5种微弧氧化膜完全覆盖焊缝区，都具有多孔结构，但孔洞直径不等。这与微弧氧化过程中放电阶段能量分布不均、形成的熔融物填充放电通道的能力存在差异有关。常规氧化膜表面粗糙，孔洞数量多并且平均孔径较大。改性氧化膜I的表面状况与常规氧化膜相比无明显改善，也存在较多孔洞，表明添加少量氟锆酸钾难以改善微弧氧化膜的形貌结构。

氟锆酸钾浓度增加到12 g/L时，改性氧化膜II(图2(d))和改性氧化膜III(图2(e))表面的孔洞普遍变小，且数量减少。另外，微弧氧化膜表面凸起程度降低，趋于平整。由此表明添加适量氟锆酸钾能改善微弧氧化膜的形貌结构，提高致密性。原因是氟锆酸钾能提高电解液的电导率，减小其电阻^[16]，增强整体放电强度，单位时间内生成的熔融物增多。从放电通道中涌出的熔融物在电解液的冷淬作用下凝固，沉积在放电通道周围逐渐形成微凸起，尚未涌出的熔融物在放电通道内冷却凝固，逐渐填充通道，使微弧氧化膜表面的孔洞变小且数量减少。另一方面，氟锆酸钾在电解液中离解生成的 F^- 能促进熔融物流动，有利于熔融物较均匀地填充放电通道^[17]，从而改善微弧氧化膜的形貌结构，提高致密性。

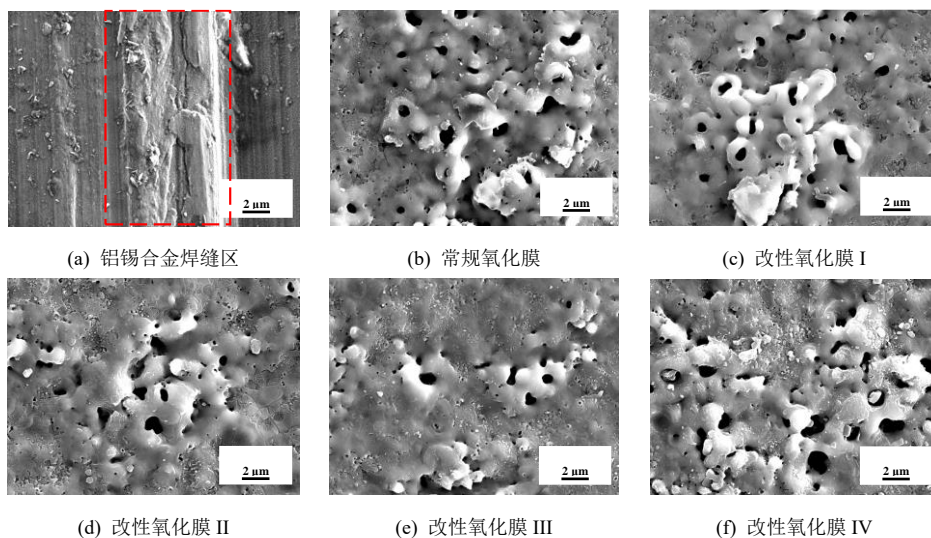


图2 铝锡合金焊缝区及5种微弧氧化膜的微观形貌

Fig.2 Microstructure of Al-Sn alloy welded zone and five micro-arc oxidation films

当氟锆酸钾浓度在一定范围内增加,较高的电解电导率使单位时间内生成更多熔融物,加之电解液中F⁻浓度升高能调控熔融物流动状态,有利于熔融物较均匀地填充放电通道,因而微弧氧化膜表面变得平整、孔洞变小并且数量减少,致密性提高。如图2(e)所示,改性氧化膜III表面孔洞较少,平均孔径也较小,其平整度和致密性最好。然而,当氟锆酸钾浓度增加到16 g/L,改性氧化膜IV(图2(f))的形貌结构与改性氧化膜III相比劣化,表面变得粗糙,还形成更大的孔洞(直径接近2 μm)。这是由于氟锆酸钾的浓度超过临界值时,火花放电呈现局部高强度的特点,单位时间内生成的熔融物量增多,在电解液的冷淬作用下外层熔融物可能优先冷却凝固,而内部仍处于熔融状态,由于凝固不均匀导致形成不规则凸起。此外,氟锆酸钾的浓度超过临界值时电解液的电导率过高,使局部电流密度骤增,放电瞬间的能量增加,可能击穿微弧氧化膜的薄弱区

域,从而形成尺寸更大的放电通道。同时,剧烈放电过程中伴随着熔融物喷溅现象,大量熔融物从放电通道中喷出抛入电解液中,残留的少量熔融物凝固后起到的填充效果有限,导致改性氧化膜IV表面形成尺寸更大的孔洞。

为了更直观地呈现微弧氧化膜表面的孔洞分布状况,将黑白二值化图像转换成伪彩色二值化图像,见图3。图中黑色填充区域是孔洞,可以看出,常规氧化膜和改性氧化膜I~IV表面的孔洞都呈现无规律分布,并且孔洞尺寸存在差异。

图4为5种微弧氧化膜的孔隙率。由图4可知,常规氧化膜、改性氧化膜I~III的孔隙率依次降低,从4.94%降至2.21%,进一步表明添加适量氟锆酸钾能提高微弧氧化膜的致密性。而改性氧化膜IV的孔隙率与改性氧化膜III相比明显升高,进一步表明氟锆酸钾浓度超过临界值时会使微弧氧化膜的致密性变差。

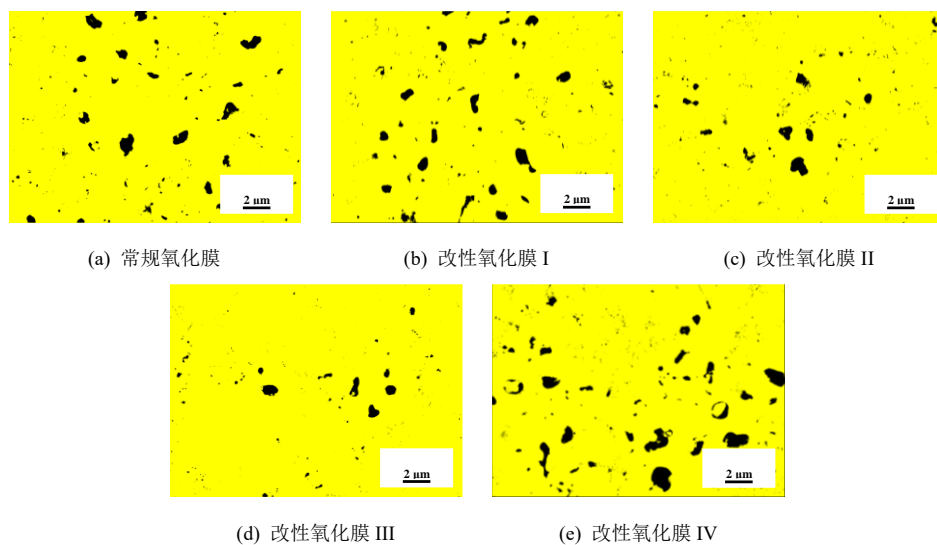


图3 5种微弧氧化膜的伪彩色二值化图像

Fig.3 Pseudo-color binary images of five micro-arc oxidation films

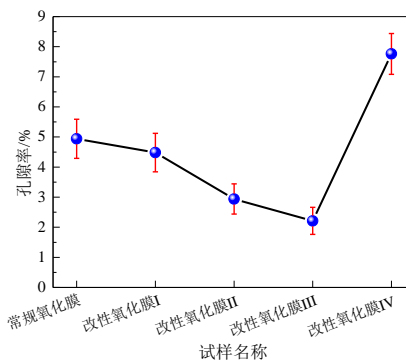


图4 5种微弧氧化膜的孔隙率

Fig.4 Porosity of five micro-arc oxidation films

图5为5种微弧氧化膜的三维表面形貌。可以看出,5种微弧氧化膜表面都存在凸起与凹陷区域。凸起区域呈现褐色和黄色,凹陷区域则呈蓝色和深蓝色,颜色越深意味着凸起或凹陷程度越重。由于微弧氧化膜具有多孔结构,孔洞直径不等并且无规律分布形成凹陷区域。放电阶段产生的熔融物凝固后堆积在孔洞周围,逐渐形成凸起区域。对比发现,常规氧化膜(图5(a))、改性氧化膜I(图5(b))和改性氧化膜IV(图5(e))的表面凸起或凹陷程度最重, S_a分别为0.97、0.92和1.05 μm。改性氧化膜II(图5(c))和改

性氧化膜III(图5(d))的表面凸起或凹陷程度较轻, S_a 分别为0.48和0.42 μm , 明显低于常规氧化膜、改性氧化膜I和改性氧化膜IV。由此证实, 改性氧化膜II

和改性氧化膜III的平整度较好, 间接反映这两种微弧氧化膜的致密性较好, 其中改性氧化膜III的平整度和致密性最好。

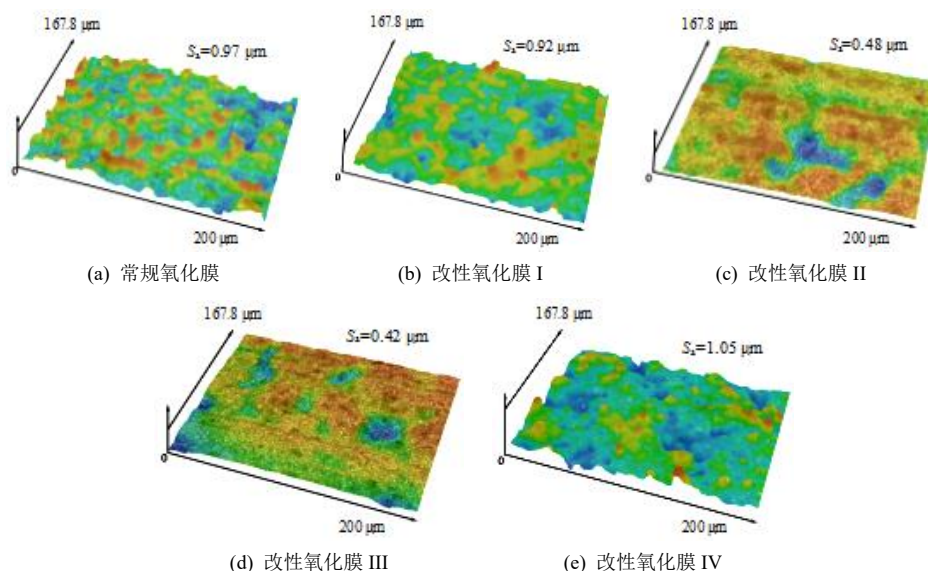


图5 5种微弧氧化膜的三维表面形貌

Fig.5 Three-dimensional surface morphology of five micro-arc oxidation films

2.3 厚度分析

图6为5种微弧氧化膜的厚度。由图6可以看出, 常规氧化膜的厚度为11.3 μm 。与常规氧化膜相比, 改性氧化膜I、II、III的厚度依次增加, 改性氧化膜III的厚度达到14.2 μm 。由于添加适量氟锆酸钾能提高电解液的电导率, 使整体放电强度增强, 单位时间内生成的熔融物量增多。同时, 添加适量氟锆酸钾时离解生成的F⁻起到调控熔融物流动状态的作用, 有利于熔融物较均匀地凝固沉积, 因而微弧氧化膜逐渐增厚。然而, 改性氧化膜IV的厚度与改性氧化膜III相比明显降低, 甚至低于常规氧化膜。原

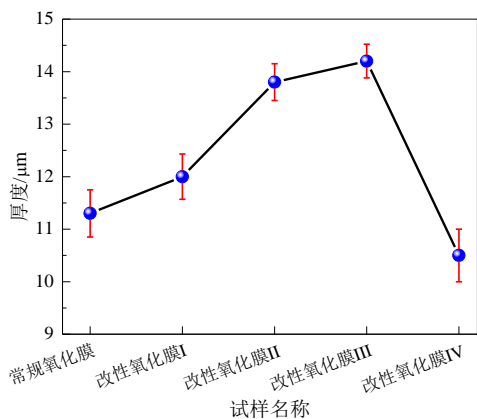


图6 5种微弧氧化膜的厚度

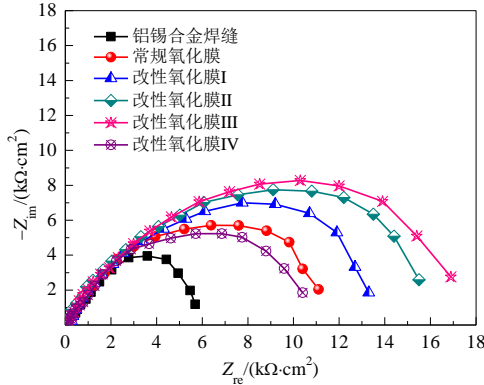
Fig.6 Thickness of five micro-arc oxidation films

因是电解液中氟锆酸钾的浓度超过临界值时, 游离状态的F⁻浓度过高, 高温下F⁻热运动加剧, 更易渗进微弧氧化膜内部引发较严重腐蚀, 从而加速微弧氧化膜的溶解损耗。另外, 氟锆酸钾的浓度超过临界值时离解生成大量F⁻, 可能与金属离子形成络合物进而破坏电解液中离子浓度的动态平衡, 导致放电过程不稳定。剧烈放电过程中伴随着熔融物喷溅现象, 大量熔融物被抛入电解液中, 残留的少量熔融物凝固后难以使微弧氧化膜持续增厚。

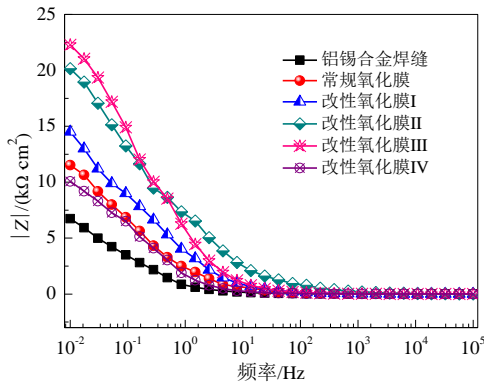
2.4 防护性能分析

图7为铝锡合金焊缝和5种微弧氧化膜的阻抗谱。从图7(a)看出, 铝锡合金焊缝和5种微弧氧化膜的Nyquist谱都呈现单一容抗弧。但与铝锡合金焊缝相比, 改性氧化膜I~III均具有较大的容抗弧半径。而常规氧化膜和和改性氧化膜IV的容抗弧半径相对较小。由容抗弧半径可以评价微弧氧化膜的耐蚀性, 普遍认为容抗弧半径越大, 微弧氧化膜的耐蚀性越好^[18-19]。从图7(b)看出, 随着频率从 10^5 Hz降低至 10^{-2} Hz, 铝锡合金焊缝和5种微弧氧化膜的阻抗模值($|Z|$)呈现相似的变化趋势, 但低频阻抗模值($|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$)存在明显差异。低频区的阻抗模值可以反映微弧氧化膜阻挡腐蚀介质的能力, 与微弧氧化膜的耐蚀性相关^[20]。普遍认为 $|Z|_{0.01 \text{ Hz}}$ 越大, 微弧氧化膜的耐蚀性越好。常规氧化膜、改性氧化膜I~IV的

$|Z|_{0.01\text{ Hz}}$ 依次为 1.15×10^4 、 1.45×10^4 、 2.01×10^4 、 2.23×10^4 和 $1.01 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，与铝锡合金焊缝相比分别增大约 4 800、7 700、13 400、15 600 和 3 400 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。



(a) Nyquist 谱



(b) Bode 谱

图 7 铝锡合金焊缝和 5 种微弧氧化膜的阻抗谱

Fig.7 Impedance spectra of Al-Sn alloy welded zone and five micro-arc oxidation films

综上，改性氧化膜III的耐蚀性最好，常规氧化膜和改性氧化膜IV的耐蚀性较差。研究发现， Cl^- 具有很强的吸附性和穿透性，极易吸附在膜层表面的缺陷位置，引发电化学腐蚀^[21]。微弧氧化膜属于多孔结构的膜层，孔洞会成为 Cl^- 及其它腐蚀介质快速渗透的通道。减少孔洞能阻碍 Cl^- 及其它腐蚀介质的渗透，从而抑制微弧氧化膜发生局部腐蚀。常规氧化膜和改性氧化膜IV表面粗糙，凸起与凹陷处可能形成电位差，形成微区电偶腐蚀，且粗糙表面容易积聚 Cl^- 及其它腐蚀介质，致使局部形成高浓度腐蚀环境，加剧局部腐蚀。另外，常规氧化膜和改性氧化膜IV表面的孔洞较大且数量多，加速了腐蚀介质渗透。而改性氧化膜III的表面孔洞较少，致密性好于其他4种氧化膜，能有效阻碍 Cl^- 及其它腐蚀介质渗透，增大其与基体接触的难度，降低腐蚀倾向。

此外，其表面较平整，不易积聚腐蚀介质形成高浓度腐蚀环境，较大程度抑制了微区电偶腐蚀和局部腐蚀。

用图8所示的等效电路模拟铝锡合金焊缝和5种微弧氧化膜的腐蚀过程。微弧氧化膜实质是由疏松多孔层和致密阻挡层构成的双层膜^[22]，因而等效电路中对多孔层和阻挡层的电阻及电容进行细分。图8中 R_s 表示阻抗谱测试使用的溶液电阻， R_p 和 R_b 分别表示多孔层电阻和阻挡层电阻， CPE_p 、 CPE_b 是常相位角元件。 CPE_p 与 R_p 构成的回路对应微弧氧化膜的多孔层， CPE_b 与 R_b 构成的回路则对应微弧氧化膜的阻挡层。

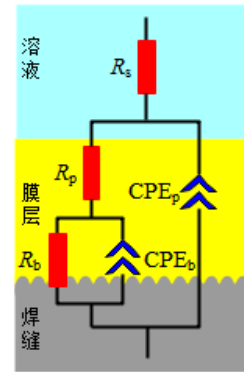


图 8 等效电路

Fig.8 Equivalent circuit

图9为铝锡合金焊缝和5种微弧氧化膜的阻挡层电阻。从图9可以看出，常规氧化膜、改性氧化膜I~IV的阻挡层电阻都高于铝锡合金焊缝，但是存在明显差异。阻挡层电阻高低可以反映阻挡层在反应过程中阻碍离子迁移能力的强弱，根据阻挡层电阻可以评价微弧氧化膜的耐蚀性。普遍认为阻挡层电阻越高，微弧氧化膜的耐蚀性越好^[23-24]。

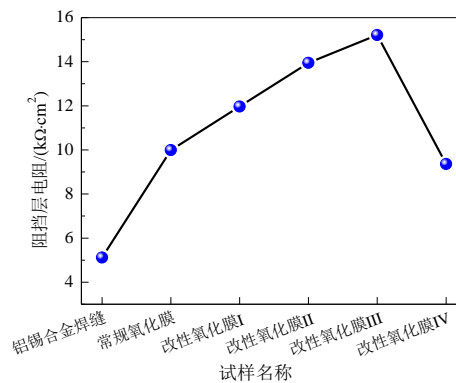


图 9 铝锡合金焊缝和 5 种微弧氧化膜的阻档层电阻

Fig.9 Barrier layer resistance of Al-Sn alloy welded zone and five micro-arc oxidation films

3 结论

(1) 添加适量氟锆酸钾可使微弧氧化膜增厚, 表面趋于平整并且致密性提高, 表现出良好的耐蚀性。电解液中添加12 g/L氟锆酸钾可制备出较平整致密的微弧氧化膜, 其耐蚀性明显好于常规微弧氧化膜, 对铝锡合金焊缝起到良好的防护作用。但氟锆酸钾浓度超过临界值会造成微弧氧化膜的形貌结构劣化并且变薄, 耐蚀性变差。

(2) 改变氟锆酸钾浓度不会影响微弧氧化膜的多孔结构和物相组成, 添加氟锆酸钾制备的微弧氧化膜都含有 α - Al_2O_3 、 γ - Al_2O_3 和 ZrO_2 相, 与常规微弧氧化膜不同。

参考文献

- [1] 孔令明, 阚洪敏, 陈硕, 等. 铝锡合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(10): 840-846.
- [2] EI-BEDIWI A B, EI-BEDIWI N A, ABDULLAH M M. Electrochemical corrosion behavior, microstructure, mechanical and thermal performance of tin-aluminum based bearing alloys[J]. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 2016, 2(2): 833-842.
- [3] VENUGOPAL A, VELUCHAMY P, RAJA V S, et al. X-Ray photoelectron spectroscopic study of the oxide film on an aluminum-tin alloy in 3.5% sodium chloride solution[J]. Corrosion, 1997, 53(10): 808-812.
- [4] 许志龙, 何林玥, 于乃川, 等. 典型阳极氧化铝合金在热带海洋大气环境下的腐蚀行为研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(20): 48-57.
- [5] 孙垂康, 贾卫平, 周绍安, 等. 超声辅助脉冲电沉积 Ni-TiN 复合镀层的结合力和耐蚀性[J]. 材料保护, 2021, 54(4): 80-85.
- [6] 许姣姣. 钝化膜对镀锡板漆膜结合力的影响[J]. 梅山科技, 2016(6): 22-24.
- [7] 李文超. 冷轧钢表面磷化膜和硅烷膜的制备及性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2016.
- [8] GAO Y X, CHEN Y N, XIAO S, et al. Effects and mechanism of Zn on the structure and corrosion resistance of microarc oxidation coatings on aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2024, 659: 159909.
- [9] CHEN X Y, WANG H, LIU C C, et al. Influence of additives on the macroscopic color and corrosion resistance of 6061 aluminum alloy micro-arc oxidation coatings[J]. Materials, 2024, 17(11): 2621.
- [10] GUO Z Y, SONG J F, WANG G Q, et al. Enhancing the tribological and corrosion properties of 2A12 aluminum alloy via micro-arc oxidation and paraffin sealing[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 712: 136476.
- [11] 庄俊杰, 宋仁国, 项南, 等. 氟锆酸钾对 AZ31 镁合金微弧氧化膜层的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(9): 157-164.
- [12] 韩东, 连勇, 张津. K_2ZrF_6 对镁合金微弧氧化膜抗点燃性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 55-63.
- [13] 江海霞, 陈俐蔓, 韩东, 等. 电解液 pH 对 7075 铝合金表面微弧氧化膜层腐蚀性能影响研究[J]. 稀有金属, 2024, 48(12): 1692-1701.
- [14] 王俊, 冯军, 金凡亚, 等. 铝合金微弧氧化复合电解液的优化研究[J]. 材料保护, 2024, 57(6): 131-138.
- [15] 夏伶俐, 韩建民, 李卫京, 等. 添加 K_2ZrF_6 对钛合金微弧氧化膜层组织结构的影响[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(2): 114-118.
- [16] 吴旭冉, 贾志军, 马宏运, 等. 电化学基础(III)-双电层模型及其发展[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(2): 152-156.
- [17] 董海荣, 马颖, 王晟, 等. 氟化钾对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜的生长及微观结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(1): 249-254.
- [18] 李一, 于文凯, 刘宽, 等. 电解液中 $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ 浓度对 2A12 铝合金微弧氧化膜耐蚀性的影响研究[J]. 稀土, 2023, 44(6): 135-140.
- [19] 李若灿, 段体岗, 马力, 等. 阳极氧化膜和微弧氧化膜对 5A06 铝合金海水腐蚀及力学性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(8): 58-69.
- [20] JIA N, YANG E H, ZHU J Y, et al. Improved corrosive resistance of micro-arc-oxidation coating on 6063 aluminum alloy by co-doping with graphite and sodium tungstate[J]. Materials, 2025, 18(4): 767.
- [21] 蔡定洲, 陈向林, 吴昊曦, 等. 硝酸根离子对 U-0.79Ti 合金腐蚀行为的抑制作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(1): 101-108.
- [22] 吴瑜, 李月樵, 洪伟, 等. 镁合金微弧氧化膜致密化技术研究进展[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(11): 76-85.
- [23] CHEN Y N, WU L, YAO W H, et al. Growth behavior and corrosion resistance of graphene oxide/mgAl layered double hydroxide coating grown on micro-arc oxidation film of magnesium alloys[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2023, 117: 319-332.
- [24] 赵晴, 周永峰, 周海飞, 等. α - Al_2O_3 微粒对铸造 Al-Si 合金微弧氧化膜耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 120-126.