

2024-T62 铝合金涂层外场腐蚀环境下 电化学性能研究

金涛^{1,2}, 何卫平¹, 廖圣智¹, 刘成臣¹, 王浩伟¹, 刁鹏²

(1. 中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035;
2. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天材料与服役教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 目的 评估自然暴露条件下涂层的耐蚀性能。方法 选取西沙热带海洋环境作为自然暴晒场, 开展 2024-T62 铝合金涂层(N1 和 N2)在湿热暴露、紫外照射、盐雾等综合腐蚀环境下的外场暴晒试验, 利用电化学测试方法对暴晒后涂层在 3.5%NaCl 溶液中浸泡不同时间的耐蚀性能进行研究。结果 铝合金涂层外场暴晒试验后, 电化学阻抗值下降, 综合腐蚀环境具有显明的加速作用。随着在 3.5% NaCl 溶液的浸泡时间增加, $C_{\text{coat}}-T$ 值不断增大, R_{coat} 值不断减小。结论 N1 铝合金涂层暴晒件电化学阻抗值较高, 具有较强的耐蚀性能。

关键词: 涂层; 腐蚀环境; 铝合金; 电化学阻抗; 耐蚀性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.002

中图分类号: TJ07; TG174.461 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)01-0008-06

Electrochemical Property for 2024-T62 Aluminum Alloy Surface Protective Coating in the Presence of Outfield Corrosion

JIN Tao^{1,2}, HE Weiping¹, LIAO Shenzhi¹, LIU Chengchen¹, WANG Haowei¹, DIAO Peng²

(1. China Special Vehicle Research Institute, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, Jingmen 448035, China; 2. Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: **Objective** To evaluate the corrosion resistance performance of the coating under the condition of natural exposure. **Methods** Field exposure experiments of 2024-T62 aluminum alloy coating (N1 and N2) under comprehensive corrosion conditions including wet and heat exposure, UV irradiation and salt spray were carried out, selecting the tropical marine environment in Xisha as the natural exposure field. Electrochemical methods were adopted to investigate the corrosion resistance of the exposed coatings after immersing in 3.5% NaCl for different time. **Results** The results showed that the electrochemical impedance of the coating after the field exposure decreased, indicating the significant accelerating effect of the comprehensive corrosion condition, $C_{\text{coat}}-T$ increased and R_{coat} decreased continuously with the elongation of immersion time in 3.5% NaCl. **Conclusion** The electrochemical impedance of the exposed N1 coating was relatively high, implying its strong corrosion resistance.

KEY WORDS: coating; corrosion condition; aluminum alloy; electrochemical impedance; corrosion resistance

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-09-08

Received: 2015-08-10; Revised: 2015-09-08

基金项目: 工信部民机专项科研技术项目(QK1212)

Fund: Supported by the Ministry of Industry and Information Technology Special Scientific Research Technology Support Program (QK1212)

作者简介: 金涛(1984—), 男, 安徽人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机结构的腐蚀防护与控制。

Biography: JIN Tao(1984—), Male, from Anhui, Ph.D., Senior engineer, Research focus: corrosion protection and control research of aircraft structure.

新一代飞机在海洋环境下使用时,将承受恶劣的海洋环境条件的影响,要经受盐雾、高低温、湿热、光照以及化学污染等有害环境要素的腐蚀作用。腐蚀是引起飞机结构强度下降的重要要素之一^[1-2],每年由腐蚀造成的经济损失十分巨大。铝合金本身具有良好的力学性能和电性能^[3],但其耐蚀性能差,其外表面需要通过防腐蚀处理或者涂覆层来保护,防止铝合金发生腐蚀致使其力学性能等降低^[4]。目前已有关于机体铝合金材料表面涂层失效的研究报道^[5-11],但已有的研究主要针对实验室加速模拟腐蚀试验,而对真实外场涂层失效行为的研究报道较少。

近年快速发展起来的电化学阻抗技术对涂层耐蚀性能检测起到了很大的推动作用,能够有效、原位、实时地现场无损检测涂层的耐蚀性能^[12-15]。主要针对自然腐蚀环境下铝合金涂层体系腐蚀失效,开展了2024-T62 铝合金涂层体系在湿热暴露、紫外照射、盐雾等综合腐蚀环境下的户外大气暴露试验。通过研究两种防腐蚀涂层体系户外大气暴露试验前后分别在3.5%NaCl溶液中的电化学阻抗谱变化,比较不同涂层体系在自然腐蚀环境下的耐蚀性能,筛选确定某型装备用防腐蚀涂层体系。

1 实验

1.1 试验件及试验条件

试验材料采用2024-T62 铝合金2.0厚薄板,其化学成分(以质量分数计)为:Cu 3.8%~4.9%,Mn 0.3%~1.0%,Mg 1.2%~1.8%,Cr 0.10%,Zn 0.25%,Al 余量。试验材料属于Al-Cu-Mg系列铝合金,高强度硬铝,常采用阳极氧化处理与涂漆方法或表面加包铝层以提高其抗腐蚀性能,主要用于制作各种高负荷的零件和构件,如飞机的龙骨梁零件、蒙皮、隔框、翼肋、翼梁、铆钉等。试验件主要选取腐蚀关键件,配以典型的防护体系,试验件表面处理采用铬酸阳极化,再进行铬酸盐封闭,N1 铝合金试验件涂层体系为新型纳米涂料(40~50 μm)与防腐底漆(8~12 μm)和蒙皮面漆(40~50 μm),N2 铝合金试验件涂层体系为防腐底漆(15~25 μm)和蒙皮面漆(40~50 μm)。试验件经过表面处理后,内表面喷涂TS70-60底漆,外表面喷涂TB06-9+TS96-71面漆,新型纳米涂料为有机-无机纳米聚硅氧烷涂料,固化条件为常温固化7天。

外场试验周期为3年,综合考虑腐蚀环境中的主要因素,参考湿热暴露、紫外照射、盐雾为典型的腐蚀

环境要素,选取西沙试验站永兴岛为外场自然暴露试验场。西沙试验站具有高温、高湿、高盐雾及强太阳辐射的恶劣气候特点,是我国热带海洋气候环境的典型代表,类似于美国CASS谱使用环境。CASS谱由美国空军制定并应用于某型飞机结构亚热带沿海地区服役环境条件下的涂层加速试验环境谱,可以真实地模拟飞机涂层在腐蚀环境下的涂层耐蚀性能,图1为2024-T62 铝合金涂层试验件西沙外场暴露试验。

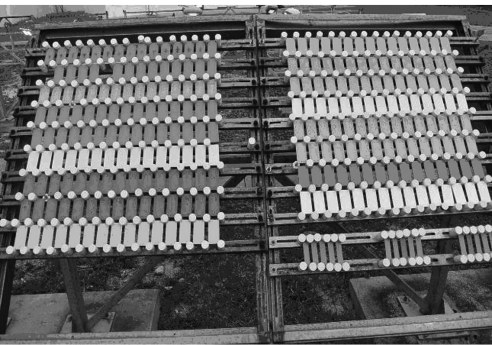


图1 2024-T62 铝合金涂层试验件外场暴露试验
Fig.1 Outfield exposure test of 2024-T62 aluminum alloy specimens

1.2 电化学阻抗测试

涂层耐蚀性能采用电化学阻抗方法测试,按照ASTM STP 866表面涂层电化学阻抗测试方法进行^[16],测试位置为试验件平整部分,每组试验件为3件,电化学阻抗测试装置如图2所示。电化学阻抗谱测量采用

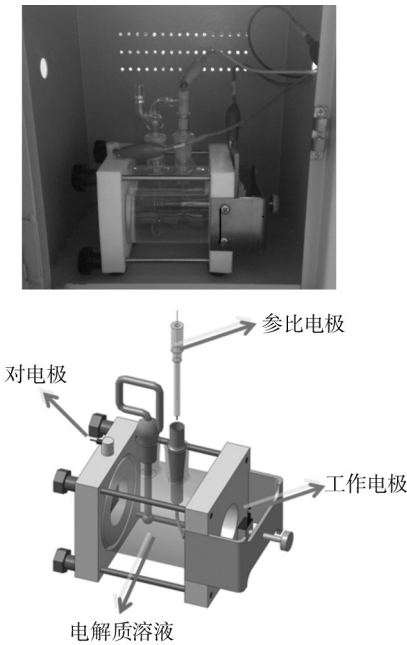


图2 试验装置
Fig.2 Picture of the experimental facility

CS350 电化学测量系统(武汉科斯特仪器公司),激励信号为幅值 10 mV 的正弦波信号,测量频率为 $10^5 \sim 10^{-1}$ Hz。电化学测量采用三电极工作体系,电解池为特制的聚四氟乙烯和玻璃材质,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为 Pt 电极,工作电极表面积为 2 cm^2 ,试验材料为 2024-T62 铝合金,实验中所涉及的电势均为相对于饱和甘汞电极电势。

所有电化学阻抗谱测试均在 3.5%NaCl 溶液中进行。测试之前,所用的试验件均经 3.5%NaCl 溶液浸泡处理,试验完成后相关试验数据采用 Zview 软件拟合得出。所用玻璃仪器均经 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 洗液充分浸泡处理,使用前用二次蒸馏水洗净并烘干。

2 结果与讨论

2.1 N1 试验件的电化学阻抗性能测试

对西沙试验站暴晒 3 年的试验件 N1 在 3.5%NaCl 溶液浸泡 5 天后的电化学阻抗谱进行了研究,其 Nyquist 图谱如图 3 所示。从图 3a 中可以看出,阻抗谱

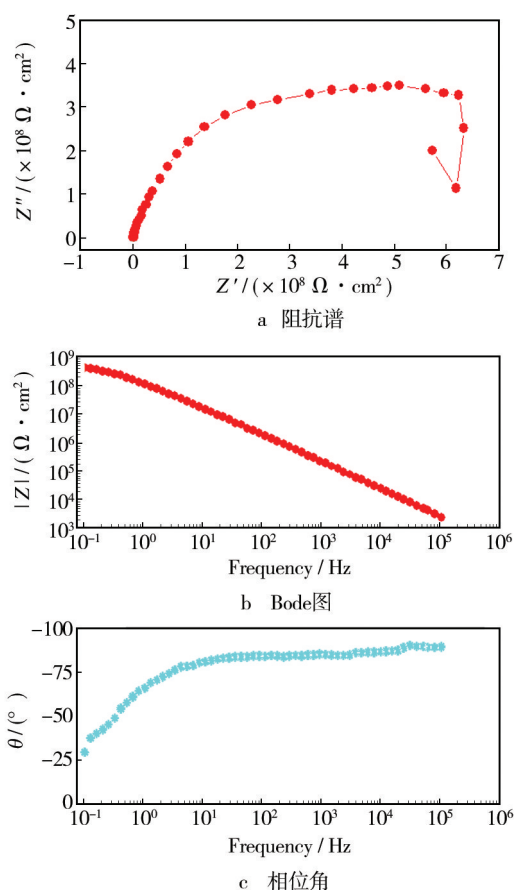


图3 N1 试验件 3.5%NaCl 溶液浸泡 5 天的 Nyquist 图

Fig.3 Nyquist plots of N1 specimen immersed in 3.5% NaCl for 5 days a: EIS; b: Bode; c: Phase angle

主要表现为单一容抗弧,低频部分出现乱点与电极/电解质界面性质的不均匀性以及界面电容的介质损耗相关。实际测量的高阻体系阻抗谱曲线在高频区较为稳定,低频区出现了少量的杂散点。这是由于涂层阻抗值过高,导致通过的电流极小,超出了监测极限,因而出现了较大幅度的振动。

从电化学 Nyquist 图上可以看出,试验件 N1 的 Bode 图上 $|Z|$ 与 f 在双对数坐标上表现为斜率近似为 -1 的直线,这是因为相位角频率曲线在较宽范围接近 -90° 。如图 3b, c 所示,电化学阻抗谱表现为一个时间常数特征,在 Nyquist 图上阻抗表现为单容抗弧特征。说明此时涂层体系完好,与基体形成了一个电容,涂层作为一个屏蔽层阻挡了腐蚀介质和铝合金基体的直接接触,铝合金基体不发生腐蚀, N1 涂层经过 3 年的西沙外场暴露试验后表现完好,具有较好的耐腐蚀性能。

根据阻抗谱具有单容抗弧的特点,利用 Zview 软件进行阻抗谱拟合,建立了相应高阻涂层的等效电路。图 4 为简化的等效电路图,其中 R_s 为溶液电阻, C_{coat} 表示双电层电容, R_{coat} 表示电荷转移电阻。阻抗 Z 如式(1)所示:

$$Z = R_s + 1 / \left(\frac{1}{R_{\text{coat}}} + j\omega C_{\text{coat}} \right) \quad (1)$$

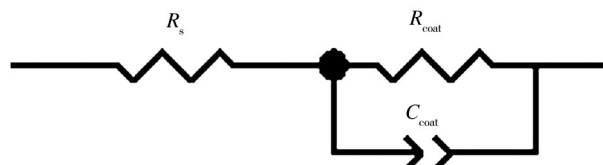


图4 电化学阻抗谱等效电路

Fig.4 Equivalent electrical circuit of EIS

N1 试验件 3 次测试结果等效电路图的解析结果见表 1。涂层具有一个较大的阻抗值,而电容值为很小的隔绝层,涂层阻抗均值为 $612 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$,涂层电容为 $1.31 \text{ nF}/\text{cm}^2$,拟合误差均小于 3%,因此可以忽略电容 C_{coat} 对阻抗的影响,阻抗 Z 可表示为式(2):

$$Z \approx R_s + R_{\text{coat}} \quad (2)$$

表 1 电化学阻抗谱参数

Table 1 Electrochemical parameters of EIS

Parameters	$C_{\text{coat}}-T/(\text{nF} \cdot \text{cm}^{-2})$	$C_{\text{coat}}-P$	$R_{\text{coat}}/(\text{M}\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1	1.462×10^{-9}	0.9341	612.1
2	1.227×10^{-9}	0.9456	607.9
3	1.213×10^{-9}	0.9238	616.4

2.2 溶液浸泡对N1 涂层体系耐腐蚀性能的影响

图5为N1 试验件在3.5% NaCl溶液中浸泡不同时间后测试所得Nyquist图,表2为拟合参数。涂层对溶液中水分吸收是影响其性能的主要因素之一^[17]。涂层在水溶液中浸泡时,水分不断地扩散至涂层,导致涂层电容增加,阻抗值减小。通过对N1 试验件在3.5% NaCl溶液中分别浸泡6,7,9,13天后,其电化学阻抗谱图依然表现为单容抗弧特征,并没有发生根本性的变化,阻抗数据为同一数量级,表明涂层体系依然完好,溶液浸泡没有根本改变涂层的耐腐蚀性能。从表2来看,试验件开始浸泡时,开路电位一直为正,且波动较大。浸泡5天后,开路电位(vs. SCE)降至-0.25 V。随着浸泡时间的增加,连续多天对试验件进行电化学阻抗测试,发现 $C_{\text{coat}}-T$ 值不断增大, R_{coat} 值不断减小,阻抗模值曲线和相位角曲线都有所下降(如图5b,c所

示)。说明随着在3.5% NaCl溶液中浸泡时间的增加,涂层的介电常数、比电导均将增大,增加了涂层表面的湿润度,提高了涂层导电性能。

表2 N1 试验件浸泡3.5%NaCl溶液不同时间的Nyquist谱拟合参数

Table 2 Impedance data fitting parameters of N1 specimen immersed in 3.5% NaCl for different time

时间/d	OCP(vs.SCE)/V	$C_{\text{coat}}-T/(\text{nF}\cdot\text{cm}^{-2})$	$C_{\text{coat}}-P$	$R_{\text{coat}}/(\text{M}\Omega\cdot\text{cm}^2)$
6	-0.205	1.457×10^{-9}	0.9357	607.0
7	-0.199	1.437×10^{-9}	0.9322	583.8
9	-0.206	1.425×10^{-9}	0.9319	540.1
13	-0.242	1.393×10^{-9}	0.9298	465.4

2.3 N1和N2 涂层体系的耐腐蚀性能比较

图6为两种不同涂层体系电化学阻抗谱图,表3为拟合参数。可以看出,N1 涂层体系试验件户外暴露试验前后,测试得其阻抗半径分别为591.72,540.15 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}^2$,阻抗半径数值未发生明显变化,阻抗谱表现为单容抗弧特征。由此可以说明涂层N1 具有较强的耐腐蚀性能,表明防护体系中涂覆40~50 μm 新型纳米涂料增强了涂层体系的抗腐蚀性能。

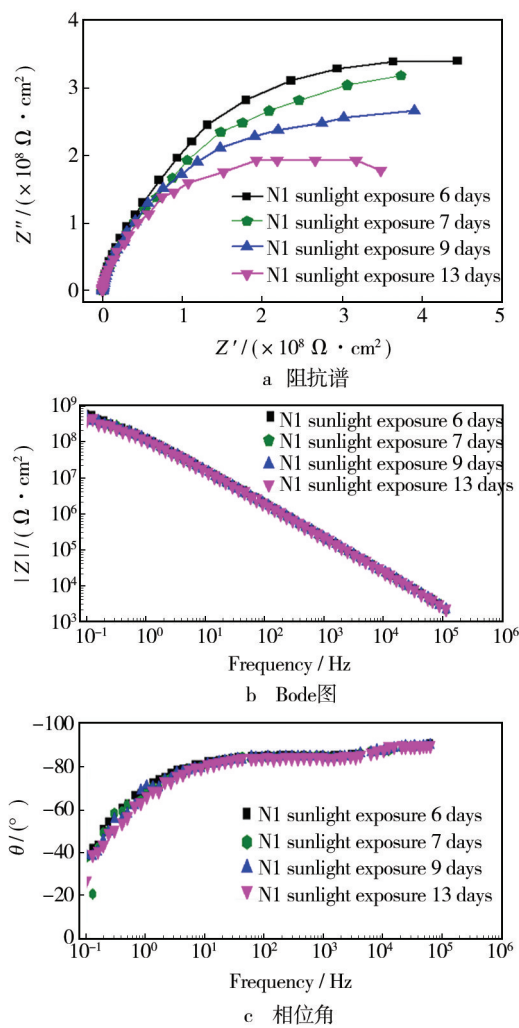


图5 N1 试验件浸泡3.5%NaCl溶液不同时间的Nyquist图
Fig.5 Nyquist plots of N1 specimen immersed in 3.5% NaCl for different time

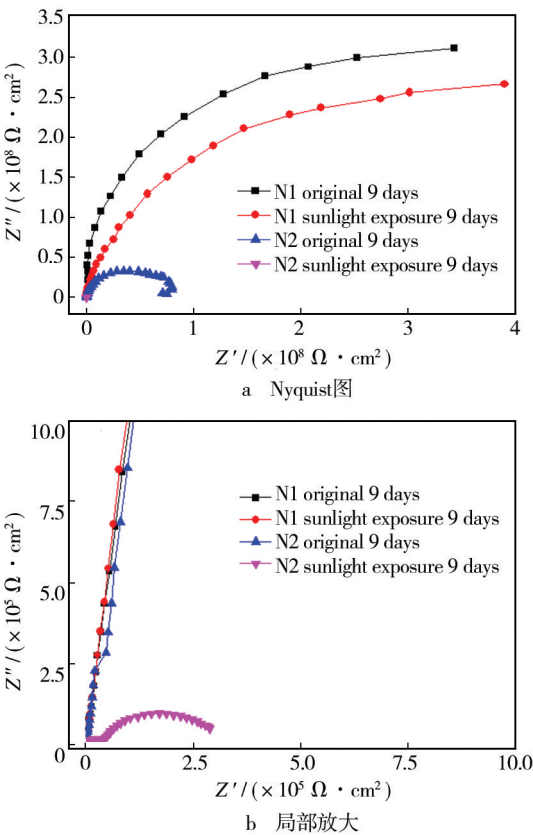


图6 N1和N2 试验件浸泡3.5%NaCl溶液9天时间的Nyquist图
Fig.6 Nyquist plots of N1 and N2 specimens immersed in 3.5% NaCl for 9 days

表3 电化学阻抗谱参数

Table 3 Electrochemical parameters of EIS

Parameters	$C_{\text{coat}}-T/(\text{nF} \cdot \text{cm}^{-2})$	$C_{\text{coat}}-P$	$R_{\text{coat}}/(\text{M}\Omega \cdot \text{cm}^2)$
N1 original	1.174×10^{-9}	0.9495	591.72
N1 sun sample	1.425×10^{-9}	0.9319	540.15
N2 original	1.127×10^{-9}	0.858	18.77
N2 sun sample	1.4423×10^{-8}	0.756	0.0422

图6b为局部放大图,图中显示N2涂层体系经过西沙暴露试验后,阻抗谱发生了较大变化,阻抗值明显减小。暴露后试验件的阻抗值出现2个时间常数,Nyquist图上出现了2个明显的容抗弧,高频区出现了1个容抗弧,低频区容抗弧表现为涂层性质的常数,高频区容抗弧为双电层充放电过程。新出现的容抗弧和时间常数说明溶液已经抵达金属/涂层体系,腐蚀介质由扩散迁移至金属基体表面并发生了电化学反应,腐蚀过程由介质通过涂层孔隙的扩散控制过程完全转变为金属基体腐蚀的电化学活化控制。原始件的涂层阻抗值由 $18.77 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 下降至 $0.0422 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$,

此时涂层的保护性能急剧下降甚至已经丧失,表明N2涂层体系经暴露试验后涂层发生了严重的腐蚀失效,从而导致了涂层阻抗下降。电化学阻抗方法可以在较宽的频率范围内对涂层体系进行测量,可得到不同频率下涂层电容、微孔电阻及涂层下基底腐蚀反应电阻、双电层电容等与涂层性能及涂层破坏过程有关的信息,适用于涂层破坏的动力学过程,涂层阻抗大小反应了涂层失效状态。此外,按照GB/T 1766—2008《色漆和清漆 涂层老化评级方法》标准检测了涂层起泡、开裂、剥落、粉化和失光等5项指标评定试件损伤/失效程度^[18]。N1和N2试验件户外暴露试验前后对比如图7所示,可以看出,N1试验件户外暴露试验后表面涂层未有明显的变化,N2试验件户外暴露试验后表面涂层有明显的起泡和开裂现象。表4为涂层起泡、开裂、剥落、粉化和失光等5项指标评定试件损伤/失效程度数据统计,从数据对比分析可以看出,N2试验件涂层经过外场暴露试验后涂层失效,进一步验证了电化学测试结果。由此表明N1试验件涂层体系的耐腐蚀性能优于N2试验件涂层体系。

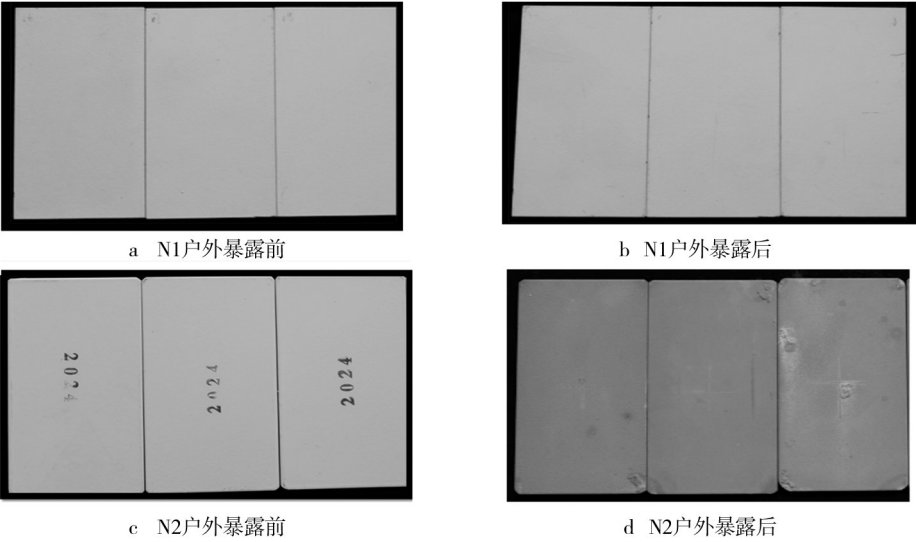


图7 N1和N2试验件户外暴露试验前后对比

Fig.7 Figures of N1 and N2 specimens before and after outdoor exposure test

表4 N1和N2试验件涂层失效参数

Table 4 Coating failure parameters of N1 and N2 specimens

序号	光泽	色差	起泡	开裂	脱落	备注
N1	9.5	4.5	0(S0)	0(S0)	0(S0)	0(S1)表示起泡分布为0级,起泡数量为1级,下同
	9.8	4.1	0(S0)	0(S0)	0(S0)	
	9.6	4.5	0(S0)	0(S0)	0(S0)	
N2	34.3	3.9	1(S1)	1(S1)	0(S0)	
	30.5	4	2(S2)	0(S0)	0(S0)	
	21.9	2.5	2(S2)	3(S2)	0(S0)	

3 结论

1) 利用电化学阻抗测试方法研究了西沙暴露试验件涂层体系耐蚀性能,并建立了高阻涂层等效电路,可简单等效为涂层阻抗和涂层电容的并联电路。N1试验件涂层体系经过西沙暴露试验,在3.5%NaCl溶液中浸泡5天时间后,涂层电化学阻抗值高达 $312.1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$,具有较强的耐蚀性能。

2) 随着在3.5% NaCl溶液中浸泡时间的增加,涂层的介电常数、比电导均增大,增加了涂层表面的湿润度,提高了涂层导电性能,但是涂层表现为单容抗弧特征,阻抗数据为同一数量级,表明涂层体系依然完好,溶液浸泡没有根本改变涂层的耐腐蚀性能。

3) 对比分析了N1和N2试验件西沙暴露试验前后涂层的耐腐蚀性能,交流阻抗曲线以及涂层电容和电阻的解析结果表明,N1试验件涂层体系优于N2试验件涂层体系的耐蚀性能。N2试验件暴露试验后Nyquist图上出现了2个明显的容抗弧,腐蚀介质由扩散迁移至金属基体表面并发生了电化学反应,腐蚀过程由介质通过涂层孔隙的扩散控制过程完全转变为金属基体腐蚀的电化学活化控制,说明N2的抗暴露能力明显弱于N1试验件涂层体系。

参考文献:

- [1] DOLLEY E J, LEE B, WEI R P. The Effect of Pitting Corrosion on Fatigue Life[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2000, 23: 555—560
- [2] 刘文琰,李玉海,贾国荣. 腐蚀条件下飞机结构使用寿命的评定与监控[J]. *北京航空航天大学学报*, 1996, 22(3): 259—263.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, JIA Guo-rong. Evaluation and Supervision of Service Life for Aircraft Structures under Corrosive Condition[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1996, 22(3): 259—263.
- [3] 严伟强,杨文忠. 3A21型铝合金高效复合型表面处理液的工艺研究[J]. *表面技术*, 2014, 43(1): 109—113.
YAN Wei-qiang, YANG Wen-zhong. Study of Efficient Compound Surface Pretreatment on 3A21 Aluminum Alloy[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(1): 109—113.
- [4] 苏景新,白云,关庆丰,等. 飞机蒙皮结构表面涂层失效的电化学阻抗分析[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2013, 33(3): 251—256.
SU Jing-xin, BAI Yun, GUAN Qing-feng, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis of Failure of Aircraft Surface Coating[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2013, 33(3): 251—256.
- [5] GRUNDMEIER G, SCHMIDT W, STRATMANN M. Corrosion Protection by Organic Coatings: Electrochemical Mechanism and Novel Methods of Investigation[J]. *Electrochimica Acta*, 2000(45): 2515—2533.
- [6] 胡吉明,张鉴清,曹楚南,等. 铝合金表面环氧涂层中水传输行为的电化学阻抗谱研究[J]. *金属学报*, 2003, 39(5): 544—49.
HU Ji-ming, ZHANG Jing-qing, CAO Chu-nan, et al. EIS Studies of Water Transport in Epoxy Coatings Coated on LY12 Aluminum Alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(5): 544—49.
- [7] ROY J, AGNEW S R, BRAY G H, et al. Environment-Exposure-dependent Fatigue Crack Growth Kinetics for Al-Cu-Mg/Li[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, A468—470: 88—97.
- [8] 常红,韩恩厚,王俭秋,等. 飞机蒙皮涂层对LY12CZ铝合金腐蚀疲劳寿命的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2006, 26(1): 34—36.
CHANG Hong, HAN En-hou, WANG Jian-qiu, et al. Influence of Coating of Covering Airplane on Corrosion Fatigue Life of Aluminum Alloys LY12CZ[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2006, 26(1): 34—36.
- [9] LEIDHERISER H J, WANG W, IGETOFT L. The Mechanism for the Cathodic Delamination of Organic Coatings from a Metal Surface[J]. *Progress in Organic Coatings*, 1983(11): 19—40.
- [10] 贺崇武,蔡新锁,李素强,等. 飞机典型连接件腐蚀及腐蚀疲劳试验研究[J]. *腐蚀与防护*, 2006, 27(3): 118—121.
HE Chong-wu, CAI Xin-suo, LI Su-qiang, et al. Corrosion and Corrosion Fatigue of Typical Aircraft Joints[J]. *Corrosion & Protection*, 2006, 27(3): 118—121.
- [11] ROBERT N M, SCHUESSLER R L. Predicting Service Life of Aircraft Coatings in Various Environments[J]. *Corrosion Science*, 1989(4): 17—21.
- [12] POELMAN M, OLIVER M G, AYARRE N, et al. Electrochemical Study of Different Ageing Tests for the Evaluation of a Cathaphoretic Epoxy Primer to Aluminum[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2005(54): 55—62.
- [13] HINDERLITER B R, CROLL S G, TALLMAN D E, et al. Interpretation of EIS Data from Accelerated Exposure of Coated Metals Based on Modeling of Coating Physical Properties[J]. *Electrochimica Acta*, 2006(51): 4505—4515.
- [14] JI W G, HU J M, LIU L, et al. Improving the Corrosion Performance of Epoxy Coatings by Chemical Modification with Silane Monomers[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201: 4789.

4 结论

1) 密封剂固化时间由48 h延长至168 h可以一定程度上改善紧固件连接结构涂层的密封开裂问题。

2) 针对某型飞机现有设计中密封剂的失效问题,可以采用局部密封设计形式、更换密封剂种类和将固化剂固化时间延长至168 h的方法解决。

参考文献:

- [1] 王春晖,蓝启城,何卫平,等. 典型连接件防腐密封剂在加速环境下的失效分析[J]. 装备环境工程,2013,10(3):47—50.
WANG Chun-hui, LAN Qi-cheng, HE Wei-ping, et al. Failure Analysis of Typical Adapting Piece Anticorrosion Sealant in Accelerated Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 47—50.
- [2] 张丹峰,谭晓明,陈跃良. 海洋环境下飞机结构腐蚀疲劳研究现状[J]. 装备环境工程,2009,6(2):5—8.
ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, CHEN Yue-liang. Research Progress of Corrosion Fatigue of Aircraft Structure under Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 5—8.
- [3] 胡建军,陈跃良,卞贵学,等. 飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J]. 腐蚀与防护,2011,32(11):900—904.
HU Jian-jun, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, et al. Corrosion of Aircraft Structure Material in Accelerated Simulating Environment and Service Environment[J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(11): 900—904.
- [4] 陈亚莉. 舰载机材料的特殊要求与选择特点[J]. 国际航空,2011(11):35—38.

- CHEN Ya-li. Selecting Suitable Materials for Carrier-based Aircraft[J]. International Aviation, 2011(11): 35—38.
- [5] 孙志华,汤智慧,李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程,2014,11(6):35—38.
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Selecting Suitable Materials for Carrier-based Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35—38.
- [6] COOKE G. A Study to Determine the Annual Cost of Corrosion Maintenance for Weapons Systems in the USAF[R]. NCI Information Systems, Inc, 1998.
- [7] AGARWALA V S. Corrosion Detection and Monitoring—a Review[C]// Proceedings of Corrosion 2000. Houston: NACE International, 2000.
- [8] 刘文廷,李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Evaluating Technology for the Calendar Life of Aircraft Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [9] 刘文廷,李玉海,陈群志,等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(1): 109—112.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated corrosion environmental spectrums for testing surface coatings of critical areas of flight aircraft structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109—112.
- [10] 李玉海,刘文廷,杨旭,等. 军用飞机结构日历寿命体系评定应用范例[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
LI Yu-hai, LIU Wen-ting, YANG Xu, et al. Application sample of evaluating the Calendar Life of Military Aircraft Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

(上接第13页)

- [15] JOHN M M, HA Q P. Electrochemical Impedance Spectroscopy; a Tool for Organic Coatings Optimizations[J]. Progress in Organic Coating, 1996, 27(3): 201—207.
- [16] ASTM STP 866—1985 (122), Electrochemical Impedance Tests for Protective Coatings[S].
- [17] PHILIPPE L V S, LYON S B, SAMMON C, et al. Validation of Electrochemical Impedance Measurements for Water Sorption

into Epoxy Coatings Using Gravimetry and Infrared Spectroscopy[J]. Corrosion Science, 2008, 50(3): 887—896.

- [18] 张勇,丁文勇,陈跃良,等. 有机涂层户外暴晒与加速试验对比研究[J]. 装备环境工程,2013,10(2):14—17.
ZHANG Yong, DING Wen-yong, CHEN Yue-liang, et al. Comparison Study on Outdoor Exposure and Accelerated Tests of Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(2): 14—17.