

舱外设备箱体模拟海洋大气环境中的加速腐蚀试验与结果分析

朱玉琴^{1,2*}, 李佳蒙^{1,2}, 代璐^{1,2}, 王莞^{1,2}, 张薇¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.环境效应与防护重庆重点实验室, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究模拟海洋大气环境对舱外设备箱体腐蚀行为的影响, 为快速评价舱外设备箱体原材料、原结构、原表面技术状态改进优劣提供技术和方法支撑。**方法** 根据 XX 舱外设备箱体实际服役环境剖面、腐蚀损伤状况, 制定含海水模拟、湿热、维护保养及检查阶段等 3 个模块的实验室模拟海洋大气环境加速谱, 运用外观、扫描电镜 (SEM)、金相显微镜、X 射线能谱 (EDS) 等表征技术, 研究设备箱体在 12 个循环周期的宏微观形貌和腐蚀产物元素含量分布, 并对标准金属铝和钢的同步实验室试验与 XX 近海户外自然环境下的腐蚀效应进行对比。**结果** 12 个循环周期结束后, 底座铝合金严重腐蚀, 呈现明显的晶间腐蚀, 并产生大量腐蚀产物, 腐蚀产物主要含有 O、Na、Al、Si、Cl、Ca、Mn、Fe 等元素, 其腐蚀形貌及程度与实际服役 5 a 的底座一致。标准金属铝和钢加速试验 120 d 的腐蚀效应分别等效 XX 近海大气试验 4.65 a 和 10.57 a。**结论** 海水模拟、湿热、维护保养及检查阶段等 3 个模块的实验室模拟循环试验能较好地模拟 XX 舱外设备箱体经历的环境, 其腐蚀与实际服役环境下的腐蚀程度相近, 实现了基于短期内完成 3~5 a 的海洋运行验证。

关键词: 舱外设备箱体; 模拟海洋大气环境; 腐蚀损伤; 加速性

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0096-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.013

Accelerated Corrosion Test and Result Analysis of Extracurricular Equipment Box in Simulated Marine Atmospheric Environment

ZHU Yuqin^{1,2*}, LI Jiameng^{1,2}, DAI Lu^{1,2}, WANG Wan^{1,2}, ZHANG Wei¹

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2. Chongqing Key Laboratory for Environmental Effect and Protection, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the impact of simulated marine atmospheric environment on the corrosion behavior of extravehicular equipment cabin, in order to provide technical and methodological support for quickly evaluating the improvement of raw materials, structures, and surface technical conditions of extravehicular equipment cabin. Based on the actual service environment profile and corrosion damage status of the equipment box outside the XX cabin, a laboratory simulated marine atmospheric environment acceleration spectrum was developed with three modules: seawater simulation,

收稿日期: 2023-10-17; 修订日期: 2023-11-27

Received: 2023-10-17; Revised: 2023-11-27

引文格式: 朱玉琴, 李佳蒙, 代璐, 等. 舱外设备箱体模拟海洋大气环境中的加速腐蚀试验与结果分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 96-104.

ZHU Yuqin, LI Jiameng, DAI Lu, et al. Accelerated Corrosion Test and Result Analysis of Extracurricular Equipment Box in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 96-104.

*通信作者 (Corresponding author)

humid heat, maintenance and inspection stage. Characterization techniques such as appearance, scanning electron microscopy (SEM), metallographic microscopy, and X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to study the macroscopic and microscopic morphology of the equipment box and the distribution of corrosion product element content over 12 cycle periods, and compare the corrosion effects of standard metal aluminum and steel through synchronous laboratory tests and outdoor natural environments near XX offshore. After 12 cycles, the aluminum alloy on the base was severely corroded, presenting obvious intergranular corrosion and producing a large amount of corrosion products composed of O, Na, Al, Si, Cl, Ca, Mn, and Fe elements, and their corrosion appearance and degree were similar to the base after 5 years of service. After 120 days of cyclic testing, the corrosion effects of standard metal aluminum and steel were equivalent to those of 4.65 and 10.57 years of XX offshore atmospheric test. In the laboratory simulated marine atmospheric environment cycling test of three modules, namely seawater simulation, humidity and heat, maintenance and inspection, the corrosion degree of the equipment box outside the cabin is similar to that in the actual service environment, achieving a short-term completion of 3-5 years of marine operation verification.

KEY WORDS: cabin equipment box; simulating marine atmospheric environment; corrosion damage; acceleration

近年来,我国机载装备和舰载装备在沿海、岛礁上使用,出现环境损伤的情况越来越多^[1-4]。如何在实验室模拟海洋加速环境下重现这些装备结构产品的主要腐蚀损伤形态,完成短时间验证,同时验证总成品和分机级产品优化改进后的防腐措施显得迫在眉睫。

刘元海等^[5-7]进行了典型大气环境加速腐蚀试验环境谱研究,给出了各环境模块参数确定方法及加速谱构成。张泰峰等^[8-10]研究了海洋环境下材料结构产品的腐蚀行为。但如何根据装备实际服役剖面和损伤形态,在实验室海洋加速环境下重现装备主要的腐蚀损伤形态,并根据自然环境试验进行腐蚀效应等效耐受腐蚀时间目前鲜有报道。本文针对 XX 某舱外设备的实际服役剖面和损伤状态,制定该舱外设备模拟海洋大气环境的实验室加速循环试验谱,开展 12 周期的循环试验,从宏观层次深入揭示舱体底座的失效行为与原因,并根据标准金属的腐蚀深度判定其加速性,为其典型装备防护工艺优化验证提供依据。

1 试验

1.1 样品

舱外设备是采用铸造和焊接结合的箱体结构,组成包括壳体、底座、天线罩、维修孔口、电缆进线口等部件装配形成的外壳结构,具体结构如图 1 所示。其中,箱体尺寸为 884 mm×906 mm×1 192 mm,试验件安装在试验托架上。箱体为铸铝 ZL114A,其余外露结构件为铝板 5A06,表面微弧氧化处理,喷 TB06-9 丙烯酸底漆、TH06-23 环氧云铁中间漆及 TS96-61 氟聚氨酯面漆。底座与底板的结合面缝隙,一半用聚氨酯填充,一半用阻尼脂填充。

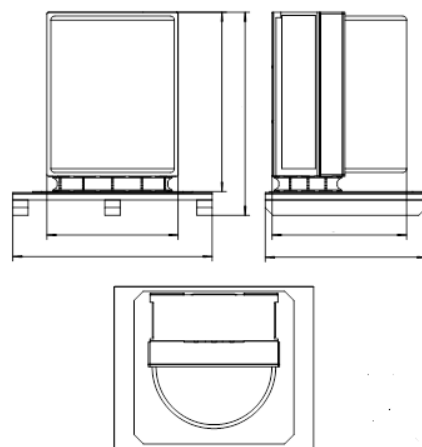


图 1 箱体结构
Fig.1 Cabin structure

1.2 循环试验方法

针对被试品的服役环境剖面^[11]、腐蚀损伤状况及试验目的,参照 GJB 150.9A^[12]和 GJB 150.11A^[13],建立实验室加速环境谱。本试验谱由 3 部分组成,分别为海水模拟阶段、湿热阶段、维护保养及检查阶段(见图 2)。其中,海水模拟阶段、湿热阶段、维护保养及检查阶段依次经历 1 次为 1 个循环周期,依据环境等效原理,3 个循环周期等效海洋大气环境户外 1 a,试验共 12 个循环周期,则等效海洋大气环境户外 4 a。考虑到维护保养及检查阶段中间时间可能的延迟性及试验环境量值极值确定原则,本试验达到目的是 12 个循环周期等效海洋大气环境户外 3~5 a。

在保证腐蚀机理一致的前提下,为了提高加速倍率,在第 9 周期后,对加速环境谱进行了调整,将海水模拟阶段的静置时间从 5 h 减小至 2 h,其他试验条件不变。同时,在相同环境下放置钢、铝 2 种标准金属,通过整个试验周期的标准金属加速性来判定整个试验谱的加速性。

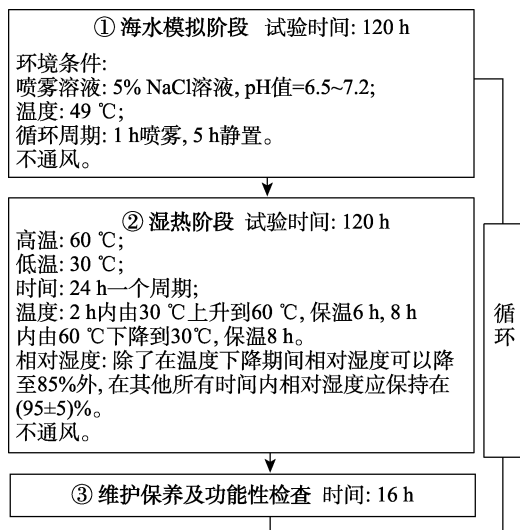


图2 加速环境谱

Fig.2 Acceleration environmental spectrum

2 结果与讨论

2.1 箱体底座腐蚀后的宏微观形貌

2.1.1 宏观形貌

在1~7周期试验中,箱体底座基本完好。第8周期试验后,箱体底座涂阻尼脂侧面,以及箱体背面底座出现大量腐蚀产物。在后续试验中,腐蚀产物逐渐增多,见图3~4。

第12周期试验结束后,去除底座腐蚀产物,发现铝合金腐蚀严重,如图5~6所示。

阻尼脂容易干涸,形成裂缝,溶液进入裂缝,使底座涂层破坏,铝合金腐蚀。铝合金和托盘钢板的腐蚀产物堆积在铝合金表面,容易吸附溶液。同时,腐蚀产物隆起,高于底座与钢板的界面,阻碍溶液排出。因此,沿阻尼脂填充的界面发生严重的腐蚀。



图3 箱体底座腐蚀检查位置

Fig.3 Location for corrosion inspection of cabin base



图4 试验结束后箱体底座形貌

Fig.4 Morphology of cabin base after the test



图5 试验结束后箱体背面底座形貌(去除腐蚀产物)

Fig.5 Morphology of cabin base on the back after the test (after removal of corrosion product)

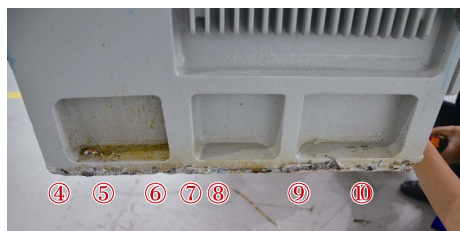


图6 试验结束后箱体底座涂阻尼脂侧形貌(去除腐蚀产物)

Fig.6 Morphology of the side of the cabin coating with damping grease after the test (after removal of corrosion product)

2.1.2 底座腐蚀后的微观形貌

对1、2、3号位置取样,进行微观表征,如图7~9所示。

箱体采用的铝合金牌号为ZL114A,为铝-硅-镁系高强度铸造铝合金。根据GB/T 1173, ZL114A铝合金的主要成分见表1。

与ZL104铝合金相似, ZL114A铝合金具有高含量的Si元素,在基体内部形成了大量的共晶硅。从

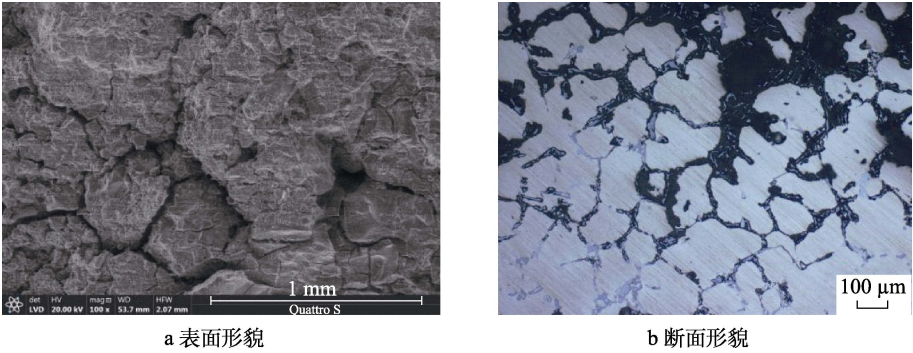


图 7 1 号位置腐蚀微观形貌

Fig.7 Microscopic morphology of corrosion at position 1: a) surface morphology; b) cross-sectional morphology

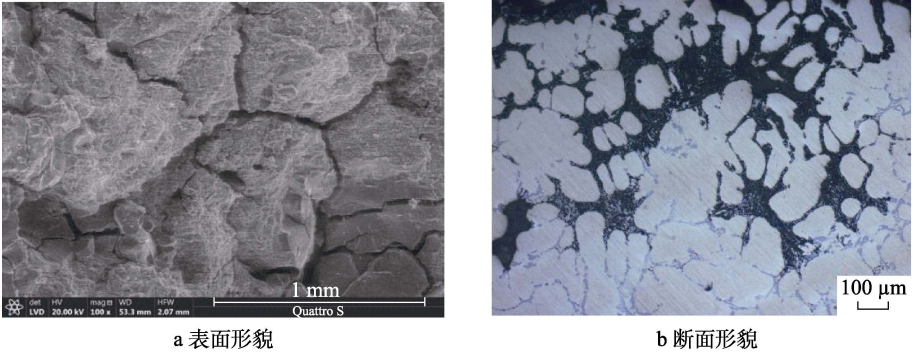


图 8 2 号位置腐蚀微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of corrosion at position 2: a) surface morphology; b) cross-sectional morphology

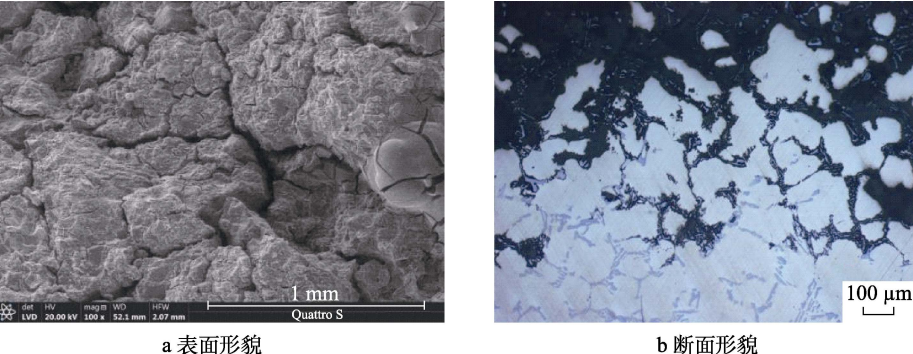


图 9 3 号位置腐蚀微观形貌

Fig.9 Microscopic morphology of corrosion at position 3: a) surface morphology; b) cross-sectional morphology

表 1 ZL114A 铝合金化学成分 (质量分数, %)

Tab.1 Chemical composition of ZL114A (mass fraction, %)

Si	Mg	Ti	Be	Al
6.5~7.5	0.45~0.75	0.10~0.20	0~0.07	余量

图 7~9 可见, 1、2、3 号位置的腐蚀形貌相似。铝合金基体向内部腐蚀的过程中, 共晶硅周围的铝合金基体优先腐蚀溶解, 形成的腐蚀通道沿着共晶硅表面不断向基体内部延伸, 导致铝合金基体一边溶解, 一边被分割。在宏观上表现为, 靠近基体表面的铝合金变得疏松, 在外力作用下容易散落成颗粒, 而铝合金基体溶解产生的 Al^{3+} 沿着腐蚀通道向外迁移, 在基体外表面形成腐蚀产物。箱体底座长期积存溶液, 并且溶液流动大, 容易带走 Al^{3+} , 对铝合金腐蚀阳

极反应的去极化作用明显, 对铝合金溶解起到了加速作用^[14-20]。

2.2 箱体底座腐蚀产物 X 射线能谱分析

从图 4 中可以发现, 1、2、3 号位置的腐蚀产物均由灰色和棕黄色腐蚀产物组成。由于腐蚀产物中非晶体含量较高, 无法采用 XRD 进行物相分析, 取 2 种颜色的腐蚀产物进行 X 射线能谱分析^[21-24]。

1 号位置腐蚀产物的 X 射线能谱见图 10~图 11, 腐蚀产物的元素含量见表 2。

表 2 中, 1 号位置灰色腐蚀产物主要含有 O、Na、Al、Si、Cl、Mn、Fe 元素; 棕黄色腐蚀产物主要含有 O、Na、Al、Cl、Ti、Fe 元素。箱体材料为 ZL114A 铝合金, 主要成分中不含 Fe 元素, 托盘与箱体的接

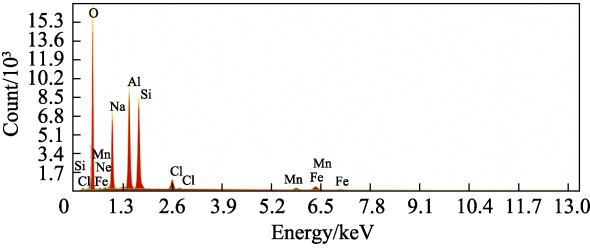


图 10 1 号位置灰色腐蚀产物 X 射线能谱
Fig.10 X-ray energy spectrum of gray corrosion products at position 1

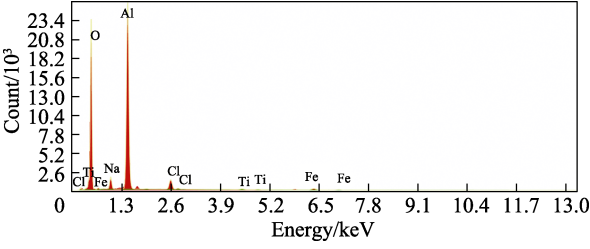


图 11 1 号位置棕黄色腐蚀产物 X 射线能谱
Fig.11 X-ray energy spectrum of brownish yellow corrosion products at position 1

表 2 1 号位置腐蚀产物元素含量
Tab.2 Element content of corrosion product at position 1

黑灰色腐蚀产物			棕黄色腐蚀产物		
元 素	质量分数 /%	原子数分数 /%	元 素	质量分数 /%	原子数分数 /%
O	41.75	54.52	O	51.33	64.5
Na	19.18	17.43	Na	4.38	3.83
Al	17.31	13.40	Al	38.97	29.04
Si	16.22	12.07	Cl	3.32	1.88
Cl	2.30	1.35	Ti	0.5	0.21
Mn	1.05	0.40	Fe	1.49	0.54
Fe	2.19	0.82			

触面为钢板，而试验过程中海水模拟阶段使用的溶液为 NaCl 溶液，湿热阶段使用的溶液为纯水。因此，推测腐蚀产物中的元素来源于铝合金中的 Al、Si、Ti 等元素，托盘钢板中的 Fe、Mn 元素，以及 NaCl 溶液中的 Na、Cl 元素。

2 号位置腐蚀产物的 X 射线能谱见图 12~图 13，腐蚀产物的元素含量见表 3。

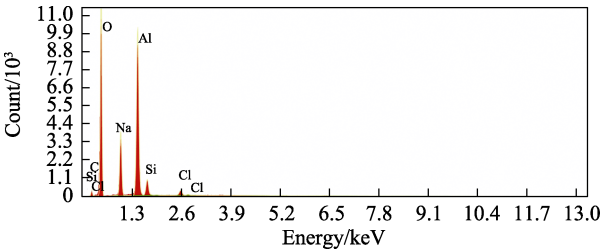


图 12 2 号位置灰色腐蚀产物 X 射线能谱
Fig.12 X-ray energy spectrum of gray corrosion products at position 2

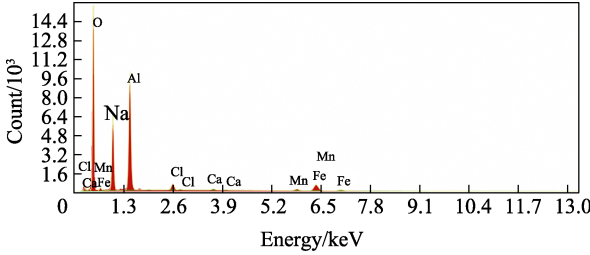


图 13 2 号位置棕黄色腐蚀产物 X 射线能谱
Fig.13 X-ray energy spectrum of brownish yellow corrosion products at position 2

表 3 2 号位置腐蚀产物元素含量
Tab.3 Element content of corrosion product at position 2

灰色腐蚀产物			棕黄色腐蚀产物		
元 素	质量分数 /%	原子数分数 /%	元 素	质量分数 /%	原子数分数 /%
O	50.53	62.17	O	44.32	57.22
Na	16.23	13.89	Na	22.57	20.28
Al	28.66	20.91	Al	24.81	18.99
Si	3.32	2.32	Cl	1.66	0.97
Cl	1.25	0.70	Ca	0.49	0.25
			Mn	1.11	0.42
			Fe	5.04	1.86

从表 3 中可以看出，2 号位置灰色腐蚀产物主要含有 O、Na、Al、Si、Cl 元素；棕黄色腐蚀产物主要含有 O、Na、Al、Cl、Ca、Mn、Fe 元素。推测腐蚀产物中的元素来源于铝合金中的 Al、Si 元素，托盘钢板的 Fe、Mn、Ca 元素，以及 NaCl 溶液中的 Na、Cl 元素。

3 号位置腐蚀产物的 X 射线能谱见图 14~图 15，腐蚀产物的元素含量见表 4。

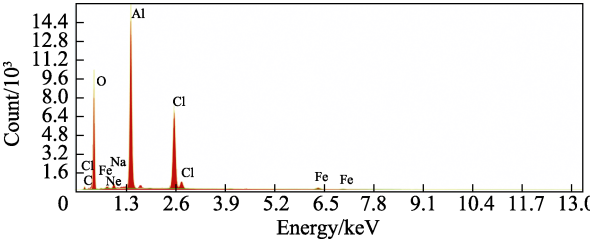


图 14 3 号位置灰色腐蚀产物 X 射线能谱
Fig.14 X-ray energy spectrum of gray corrosion products at position 3

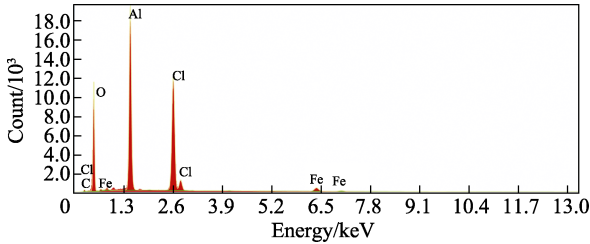


图 15 3 号位置棕黄色腐蚀产物 X 射线能谱
Fig.15 X-ray energy spectrum of brownish yellow corrosion products at position 3

表 4 3 号位置腐蚀产物元素含量

Tab.4 Element content of corrosion product at position 3

灰色腐蚀产物			棕黄色腐蚀产物		
元 素	质量分数 /%	原子数分数 /%	元 素	质量分数 /%	原子数分数 /%
O	45.92	61.39	O	42.55	59.15
Na	1.75	1.62	Al	27.55	22.72
Al	30.16	23.91	Cl	27.16	17.04
Cl	20.88	12.59	Fe	2.75	1.10
Fe	1.29	0.50			

表 4 中,3 号位置灰色腐蚀产物主要含有 O、Na、Al、Cl、Fe 元素;棕黄色腐蚀产物主要含有 O、Al、Cl、Fe 元素。推测腐蚀产物中的元素来源于铝合金中的 Al 元素,托盘钢板中的 Fe 元素,以及 NaCl 溶液中的 Na、Cl 元素。

通过对上述 3 处位置腐蚀产物能谱分析,推测腐蚀产物大部分为箱体铝合金腐蚀产生,少量为托盘钢板腐蚀产生。

2.3 加速试验与实际服役后腐蚀损伤形态对比

对比加速试验 12 个循环周期后箱体设备底座腐蚀形貌和在实际服役环境下服役 5 a 后该箱体的底座形貌,见图 16~17。



图 16 加速试验后的底座形貌
Fig.16 Morphology of the base after accelerated test



图 17 实际服役 5 a 后的底座形貌
Fig.17 Morphology of the base after actual service of 5 years

加速试验后的底座形貌与实际服役 3~5 年的底座形貌相似,底座涂层大部分发生破坏,铝合金腐蚀严重,产生大量腐蚀产物。箱体底座直接与托盘钢板接触,之间存在缝隙,盐溶液进入缝隙后不容易排出,涂层长期受到盐溶液侵蚀。渗入涂层的介质在环境应力的联合作用下,可促使微裂纹尖端扩展,甚至产生开裂。随着介质抵达铝合金基体,将使铝合金发生化学或电化学反应,反应生成物体积大于被溶解的金属体积,使涂层从基体上分离,引起涂层鼓泡。当泡内压力达到某一临界值时,将使涂层破裂,从而引起全面的失效。随着试验进行,底座被 Cl⁻ 渗透的面积逐渐扩大,腐蚀面积增大,涂层破坏面积增大。

2.4 标准金属加速性分析

在本加速试验各试验周期中,标准金属铝、钢的平均腐蚀深度见表 5。XX 近海大气环境中,标准金属铝、钢的平均腐蚀深度见表 6。

标准金属试样在腐蚀过程中形成的腐蚀深度-时间曲线是一个腐蚀深度逐渐增大,斜率(腐蚀速率)逐渐增大或减小的过程,通常采用经验公式幂函数 $y=ax^b$ 进行拟合。式中,系数 a 、 b 与腐蚀速率相关,当腐蚀速率逐渐增大时, $b>1$; 当腐蚀速率逐渐减小时, $b<1$ ^[25]。

表 5 经过各周期试验后标准金属的平均腐蚀深度

Tab.5 Average corrosion depth of standard metal after each cycle of test

材料	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
铝	0.98	1.06	1.06	1.19	1.97	4.35	5.32	6.26	4.01	4.92	5.30	8.64
钢	23.45	40.17	43.03	57.96	100.98	187.15	205.55	217.42	258.51	313.12	328.11	497.40

表 6 XX 近海大气环境下标准金属的腐蚀深度

Tab.6 Corrosion depth of standard metal in XX offshore atmospheric environment

腐蚀时间/d	铝的腐蚀深度/ μm	钢的腐蚀深度/ μm
30	1.39	—
60	1.61	10.34
90	1.34	13.81
120	1.35	21.16
150	2.16	21.45
372	3.55	52.94

2.4.1 铝的加速性分析

通过表 5、表 6 数据绘制本加速试验中和 XX 近海大气环境中铝的腐蚀深度-时间曲线,采用幂函数 $y=ax^b$ 进行拟合,见式(1)~式(2)。

$$y_{A1} = 0.034\ 94 \cdot t_1^{1.115\ 31}, r^2=0.782 \tag{1}$$

$$y_{A2} = 0.165\ 73 \cdot t_2^{0.508\ 68}, r^2=0.763 \tag{2}$$

式中: y_{A1} 为加速试验中铝的腐蚀深度, μm ; y_{A2} 为 XX 近海大气环境下铝的腐蚀深度, μm ; t_1 为加速

试验时间, d; t_2 为 XX 近海大气环境试验时间, d。
根据式 (1)、式 (2), 取不同的腐蚀深度, 计算得到相应的加速试验和 XX 近海大气环境所需时间, 见表 7。

表 7 XX 近海大气环境和加速试验中铝达到相同腐蚀深度所需时间

Tab.7 Time required for aluminum to reach the same corrosion depth in XX offshore atmospheric environment and accelerated test

腐蚀深度/ μm	加速试验所需时间/d	XX 近海大气试验所需时间/d
0.2	4.78	1.45
0.5	10.87	8.77
1	20.23	34.24
2	37.67	133.77
5	85.66	810.30
10	159.47	3 165.41

取 XX 近海大气试验时间 t_2 为 1 095 d (3 a) 和 1 825 d (5 a), 计算达到相同腐蚀深度时, 加速试验所需时间, 见表 8。

表 8 XX 近海大气试验 1 095 d (3 a)、1 825 d (5 a) 与加速试验等效时间

Tab.8 Equivalent time of 1 095 d (3 a) and 1 825 d (5 a) for XX offshore atmospheric environment and accelerated test

XX 近海大气试验时间/d	腐蚀深度/ μm	加速试验所需时间/d
1 095	5.83	98
1 697	7.28	120
1 825	7.56	124

以加速试验时间 t_1 为横坐标, 以达到相同腐蚀深度的 XX 近海大气环境试验时间 t_2 与加速试验时间 t_1 的比值 t_2/t_1 为纵坐标作图, 见图 18。

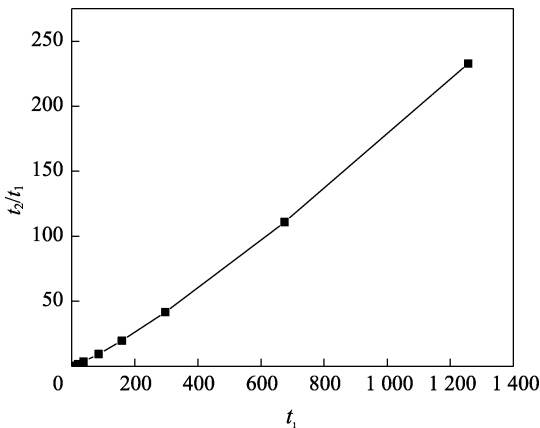


图 18 铝的加速转换因子-加速试验时间 t_B 曲线
Fig.18 t_B curve of aluminum acceleration conversion factor and accelerated test time

对图 18 进行回归分析, 得到加速转换因子 (A_{SF}) 随加速试验时间 t_1 的变化规律, 见式 (3):

$$A_{SF} = 0.046\ 87 \cdot t_1^{1.192\ 56},\ r^2=1 \tag{3}$$

式中: A_{SF} 为加速试验相对于 XX 近海大气试验的加速倍率。

2.4.2 钢的加速性分析

通过表 5~表 6 数据绘制本加速试验中和 XX 近海大气环境中钢的腐蚀深度-时间曲线, 采用幂函数 $y=ax^b$ 进行拟合, 见式 (4)、式 (5)。

$$y_{S1} = 0.192\ 05 \cdot t_1^{1.616\ 35},\ r^2=0.952 \tag{4}$$

$$y_{S2} = 0.246\ 23 \cdot t_2^{0.906\ 98},\ r^2=0.990 \tag{5}$$

式中: y_{S1} 为加速试验中钢的腐蚀深度, μm ; y_{S2} 为 XX 近海大气环境下钢的腐蚀深度, μm ;

根据式 (4)、式 (5), 取不同的腐蚀深度, 计算得到相应的加速试验和 XX 近海大气环境所需时间, 见表 9。

表 9 XX 近海大气环境和加速试验中钢达到相同腐蚀深度所需时间

Tab.9 Time required for steel to reach the same corrosion depth in XX offshore atmospheric environment and accelerated test

腐蚀深度/ μm	加速试验所需时间/d	XX 近海大气试验所需时间/d
10	11.53	59.38
20	17.71	127.51
50	31.22	350.19
100	47.94	751.98
200	73.61	1 614.76
500	129.76	4 434.66

取 XX 近海大气试验时间 t_2 为 1 095 d (3 a) 和 1 825 d (5 a), 计算达到相同腐蚀深度时, 加速试验所需时间, 见表 10。

表 10 XX 近海大气试验 1 095 d (3 a)、1 825 d (5 a) 与加速试验等效时间

Tab.10 Equivalent time of 1 095 d (3 a) and 1 825 d (5 a) for XX offshore atmospheric environment and accelerated test

XX 近海大气试验时间/d	腐蚀深度/ μm	加速试验所需时间/d
1 095	140.61	59
1 825	223.48	79
3 858	440.66	120

以加速试验时间 t_1 为横坐标, 以达到相同腐蚀深度的 XX 近海大气环境试验时间 t_2 与加速试验时间 t_1 的比值 t_2/t_1 为纵坐标作图, 见图 19。

对图 19 进行回归分析, 得到加速转换因子随加速试验时间 t_1 的变化规律, 见式 (6)。

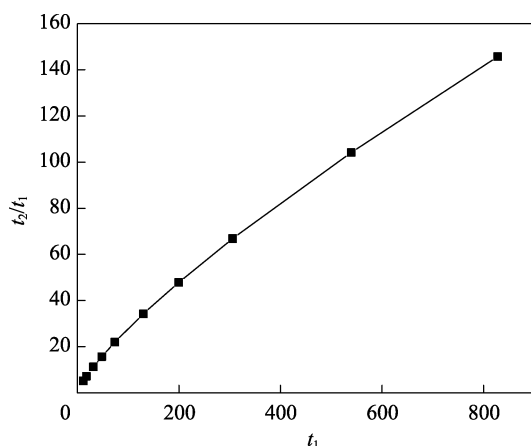


图 19 钢的加速转换因子-加速试验时间 t_1 曲线
Fig.19 t_1 curve of steel acceleration conversion factor and accelerated test time

$$A_{SF} = 0.76033 \cdot t_1^{0.78212}, r^2=1 \quad (6)$$

从图 18~19 和式 (3)、式 (6) 中可以看出, 加速试验的初始加速倍率较小, 随试验时间增加, 加速倍率增大。对于铝, 加速试验 98 d, 等效 XX 近海大气试验 3 a; 加速试验 120 d, 等效 XX 近海大气试验 4.65 a。对于钢, 加速试验 59 d, 等效 XX 近海大气试验 3 a; 加速试验 79 d, 等效 XX 近海大气试验 5 a; 加速试验 120 d, 等效 XX 近海大气试验 10.57 a。

3 结论

1) 加速试验后铝合金呈现明显的晶间腐蚀, 铝合金腐蚀严重, 并产生大量腐蚀产物。

2) 加速试验后的设备箱体底座形貌与实际服役 5 a 的底座形貌相似, 底座涂层大部分发生破坏。

3) 通过对比铝、钢 2 种标准金属在本加速试验和 XX 近海大气环境中的腐蚀深度, 铝、钢加速试验 120 d 的腐蚀效应分别等效 XX 近海大气试验 4.65 a 和 10.57 a, 说明该加速试验谱的制定能够满足实际运行 3~5 a 的加速倍率要求。

参考文献:

- [1] 张梦龙, 赵志敏. 东南海域岛礁环境对武器装备的影响及对策研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 20-25.
ZHANG M L, ZHAO Z M. The Influence and Countermeasures Study of Weapon Equipment Influenced by Island-Reef Environment in the Southeastern Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 20-25.
- [2] 曲晓燕, 邓力. 舰载武器海洋环境适应性分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 138-142.
QU X Y, DENG L. Analysis of the Environmental Worthiness of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4): 138-142.
- [3] 柳爱利, 寇方勇. 海洋环境对舰载导弹贮存可靠性影响分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(3): 285-288.
LIU A L, KOU F Y. Analysis of Storage Reliability of Shipborne Missiles in Marine Environment[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(3): 285-288.
- [4] 方书甲. 海洋环境对海军装备性能的影响分析[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(2): 5-10.
FANG S J. Analysis of the Ocean Environment Influences on the Performance of the Navy Equipment[J]. Ship Science and Technology, 2004, 26(2): 5-10.
- [5] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48-52.
LIU Y H, REN S Y. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48-52.
- [6] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO P F, SU X Q, WU J S. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [7] 栗晓飞, 张琦, 傅耘. 依托特定地域气象资料编制环境谱的尝试[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 63-66.
LI X F, ZHANG Q, FU Y. The Attempt of Establishing the Environment Spectrum Based on the Meteorological of Special Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 63-66.
- [8] 张泰峰, 王德, 李旭东, 等. 不同海域下 7B04 铝合金铆接结构的腐蚀行为对比研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(8): 1283-1287.
ZHANG T F, WANG D, LI X D, et al. Comparative Study on Corrosion Behavior of 7B04 Aluminum Alloy Riveted Structure under Different Sea Areas[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(8): 1283-1287.
- [9] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 7B04 铝合金在模拟海洋大气环境下的腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2017, 37(1): 59-64.
WANG C G, CHEN Y L, ZHANG Y, et al. Corrosion Behavior of 7B04 Al-Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(1): 59-64.
- [10] 刑士波. 严酷海洋大气环境中铝合金加速腐蚀试验方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2013.
XING S B. Study on Accelerated Corrosion Test Methods of Aluminum Alloy in Severe Marine Atmosphere Environment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2013.
- [11] 施建荣, 王晓侠, 党弦. 装备全寿命环境剖面与任务剖面[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 18-20.

- SHI J R, WANG X X, DANG X. On Environmental Profile and Mission Profile of Materiel Life Cycle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 18-20.
- [12] GJB 150.9A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第9部分: 湿热试验[S].
GJB 150.9A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel Part 9: Damp Heat Test[S].
- [13] GJB 150.11A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第11部分: 盐雾试验[S].
GJB 150.9A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel Part 11: Salt Fog Test[S].
- [14] LEYGRAF C, GRAEDEL T E. Atmospheric Corrosion[M]. New York: Wiley-Interscience, 2000.
- [15] ZHANG Y, FENG X H, HUANG Q Y, et al. Effect of the Microstructure Parameters on the Corrosion Characteristics of Mg-Zn-Ca Alloy with Columnar Structure[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(5): 1709-1720.
- [16] LIU D J, TIAN G, JIN G F, et al. Characterization of Localized Corrosion Pathways in 2195-T8 Al-Li Alloys Exposed to Acidic Solution[J]. Defence Technology, 2023, 25: 152-165.
- [17] CHENG C L, LE Q C, CHEN L, et al. Understanding on Corrosion Mechanism of Oxidized AZW800 Alloy in 3.5wt% NaCl Solution[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(5): 1740-1753.
- [18] 李晓刚, 董超芳, 肖葵, 等. 西沙海洋大气环境下典型材料腐蚀/老化行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LI X G, DONG C F, XIAO K, et al. Corrosion/Aging Behavior and Mechanism of Typical Materials in Xisha Marine Atmospheric Environment[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [19] 侯健, 张彭辉, 郭为民. 船用铝合金在海洋环境中的腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 59-63.
HOU J, ZHANG P H, GUO W M. Study on Corrosion of Aluminum Alloys for Ship Applications in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 59-63.
- [20] 黄领才, 刘慧丛, 谷岸, 等. 沿海环境下服役飞机铝合金零件的表面涂层破坏与腐蚀[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1144-1149.
HUANG L C, LIU H C, GU A, et al. Failure and Corrosion of Coating on Aluminum Alloy Parts Used on Airplanes Serving in Coastal Environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1144-1149.
- [21] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料应用与开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
LIU J A, XIE S S. Application and Development of Aluminum Alloy Material[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [22] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CAO C N. Natural Environment Corrosion of China Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [23] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册-第8卷-橡胶 密封剂[M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
China Aviation Materials Handbook Editorial Committee. China Aeronautical Materials Handbook[M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [24] 赵朋飞, 文磊, 郭文莹, 等. 高强铝合金循环盐雾加速腐蚀行为与机理研究[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 260-268.
ZHAO P F, WEN L, GUO W Y, et al. Accelerated Corrosion Behavior and Mechanism of High-strength Aluminum Alloy by Cyclic Salt-Spray Test[J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 260-268.
- [25] Q/CD 3270—2013, 海洋大气环境与实验室模拟加速环境腐蚀等效评价试验规范[S].
Q/CD 3270—2013, Test Specification for Equivalent Evaluation of Corrosion in Marine Atmospheric Environment and Laboratory Simulated Accelerated Environment[S].