

基于岸基与远洋移动平台的 7B04 铝合金 腐蚀行为比较研究

张凯^{1,2,3}, 李迪凡^{1,3}, 文邦伟¹, 沈蕾芳¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.环境效应与防护重庆市重点实验室, 重庆 400039;
3.海南万宁大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 海南 万宁 571500)

摘 要:目的 研究动态海洋大气环境与静态海洋大气环境对 7B04 铝合金腐蚀行为的影响。方法 采用 7B04 铝合金, 分别在远洋船舶移动平台和万宁站海洋平台开展 1 年户外大气暴露试验, 利用腐蚀形貌、腐蚀失重、力学性能表征 7B04 铝合金在海洋大气环境中的腐蚀规律和行为。结果 经过 1 年的户外大气暴露试验, 在动态和静态两种海洋大气环境作用下, 7B04 铝合金的腐蚀类型均为点蚀, 且远洋船舶移动平台 7B04 铝合金的腐蚀程度更严重。在远洋船舶移动平台开展动态自然环境试验的 7B04 铝合金腐蚀速率为 $67.4 \mu\text{m/a}$, 在万宁站海洋平台开展静态自然环境试验的 7B04 铝合金腐蚀速率为 $16.6403 \mu\text{m/a}$, 远洋船舶移动平台 7B04 铝合金的腐蚀速率约为万宁站海洋平台的 4 倍。远洋船舶移动平台试验 7B04 铝合金的拉伸强度、规定塑性延伸强度和断后伸长率保留率分别为 91%、87.5%和 54.3%。结论 7B04 铝合金在远洋船舶移动平台和万宁站海洋平台的腐蚀类型均为点蚀, 远洋船舶移动平台的动态海洋大气腐蚀性强于静态海洋大气, 且对 7B04 铝合金力学性能的降低主要体现在断后伸长率方面, 可显著加速 7B04 铝合金的腐蚀。

关键词: 动态自然环境试验; 海洋大气; 7B04 铝合金; 腐蚀行为; 点蚀

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)01-0405-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.01.037

Comparative Research on Corrosion Behaviors of 7B04 Aluminium Alloy on the Ocean-going Ship Platform and Offshore Platform

ZHANG Kai^{1,2,3}, LI Di-fan^{1,3}, WEN Bang-wei¹, SHEN Lei-fang¹

(1.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;
2.Chongqing Key Laboratory of Environmental Effect and Protection, Chongqing 400039, China;
3.Wanning Hainan Branch of National Observation & Research Station for Materials Corrosion
in Atmospheric Environment, Wanning 571500, China)

ABSTRACT: In order to study the influence of dynamic and static marine atmosphere on the corrosion behaviors of 7B04 aluminum alloy, measured the corrosion morphology, corrosion weight loss and mechanical property of 7B04 aluminum alloy after 1-year outdoor atmospheric exposure on the ocean-going ship platform and offshore platform of Wanning station. The results showed that: 1) Under dynamic and static marine atmosphere, pitting corrosion occurred on the surface of 7B04 aluminum alloy,

收稿日期: 2020-04-21; 修订日期: 2020-12-16

Received: 2020-04-21; Revised: 2020-12-16

作者简介: 张凯 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境试验与环境适应性评价。邮箱: zhangkai205124@163.com

Biography: ZHANG Kai (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: environment test and environment adaption evaluation. E-mail: zhangkai205124@163.com

引文格式: 张凯, 李迪凡, 文邦伟, 等. 基于岸基与远洋移动平台的 7B04 铝合金腐蚀行为比较研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 405-412.
ZHANG Kai, LI Di-fan, WEN Bang-wei, et al. Comparative research on corrosion behaviors of 7B04 aluminium alloy on the ocean-going ship platform and offshore platform[J]. Surface technology, 2021, 50(1): 405-412.

and the corrosion on the ocean-going ship platform was more serious than that on offshore platform of Wanning station. 2) The corrosion rate of 7B04 aluminum alloy in the dynamic natural environment test on the ocean-going ship platform was $67.4 \mu\text{m/a}$, and that in the static natural environment test on the offshore platform of Wanning station was $16.6403 \mu\text{m/a}$, so the corrosion rate of 7B04 aluminum alloy under dynamic marine atmosphere on ocean-going ship platform is about 4 times that under static marine atmosphere on the offshore platform of Wanning station. 3) The retention rate of tensile strength, specified plastic elongation strength and percentage elongation after fracture of 7B04 aluminum alloy on the ocean-going ship platform were 91%, 87.5% and 54.3%, respectively. Therefore, the percentage elongation after fracture among the mechanical properties of 7B04 aluminum alloy is reduced the most, which can significantly accelerate the corrosion of 7B04 aluminum alloy.

KEY WORDS: dynamic natural environmental test; marine atmosphere; 7B04 aluminum alloy; corrosion behavior; pitting corrosion

动态自然环境试验^[1]是指在船舶、车辆和飞机等移动平台上, 凭借其运动, 改变材料及产品试验的环境条件, 加速环境对材料、工艺、结构及产品性能和功能的作用。目前, 以美国为代表的军事强国已广泛借助航母、飞机和军用汽车等移动平台, 在全世界范围内针对各类军用材料、涂层等开展了大量动态自然环境试验^[2-8]。

铝合金由于其低密度(仅为钢的 1/3)、高强度的特性, 已广泛作为关键承力结构应用于航空、航天和汽车等行业的各型产品中。通过加入适量合金元素, 可使铝合金强度得到显著提高, 而且还可通过热处理改善性能。7B04 铝合金是在 7A04 基础上开发的一种高纯高强铝合金, 与美国的 7075 铝合金相当^[9], 属 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 具有硬度高、抗拉强度高、热处理强化效果好、断裂韧度和抗裂纹扩展性能优良等优点, 且退火和淬火状态下塑性中等, 是超硬铝中使用较久、较广的一种合金, 适用于制造工作温度不超过 125°C 的各种重要受力件(如壁板、隔框、梁、接

头、支柱和卡座等关键件及重要件^[10-11])。但在海洋大气环境的作用下, 7B04 铝合金极易发生腐蚀, 表面难以形成致密保护膜^[12-21], 且应力腐蚀倾向明显^[22-23]。

动态自然环境试验技术作为一种模拟装备真实服役环境的试验技术, 能够更真实地反映装备在不同气候类型、地域、海域环境条件下的运输、调防、训练、使用等实际环境, 但在国内鲜有采用该技术进行材料、工艺、结构及产品环境适应性研究的案例。因此, 本文针对 7B04 铝合金, 在跨洋船舶和万宁试验站海洋平台分别开展了为期 1 年的动态自然环境试验和静态自然环境试验, 以期掌握 7B04 在两种试验环境下的腐蚀行为和规律, 验证动态自然环境试验方法的可行性与必要性。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料为 7B04 铝合金, 其化学成分含量见表 1。

表 1 7B04 铝合金材料成分表
Tab.1 Composition list of 7B04 aluminum alloy materials

Element	Cu	Mg	Mn	Zn	Si	Fe	Ti	Ca	Al
Content	3.8~4.3	1.7~2.3	0.4~0.9	<0.1	<0.2	<0.3	<0.1	<0.1	Bal.

wt. %

试样种类有腐蚀质量损失试样(100 mm×50 mm×3 mm)、哑铃状拉伸试样和平板涂层试样(100 mm×50 mm×3 mm), 其中哑铃状拉伸试样尺寸参照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分 室温试验方法》, 具体尺寸如图 1 所示。所用 7B04 铝合金样品的表面状态有阳极氧化+封闭处理和阳极氧化+涂漆处理 2 种。阳极氧化工艺流程包括: 第一步, 按照碱洗、清水清洗和酸洗的程序完成样品表面除油处理; 第二步, 对样件进行阳极氧化处理; 第三步, 用活水冲洗样件表面; 第四步, 将样件放置在 50°C 烘箱中, 进行干燥处理; 第五步, 经干燥处理后的样件, 在 $100\sim 110^\circ\text{C}$ 水溶液中, 水浴处理 30 min, 完成样件的封闭处理。阳极氧化参数详见表 2, 涂漆工艺详见表 3。

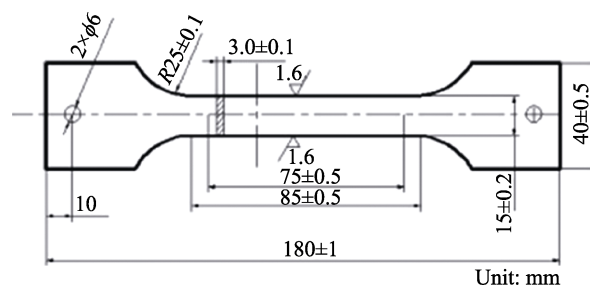


图 1 7B04 铝合金拉伸试样示意图
Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen of 7B04 aluminum alloy

7B04 铝合金阳极氧化试样在试验前, 先用无水乙醇清洗掉试样表面的油污, 之后用去离子水清洗, 最后用无水乙醇脱水, 干燥后放入干燥器内待用。

表 2 7B04 铝合金试样阳极氧化工艺
Tab.2 Anodic oxidation process of 7B04 aluminum alloy samples

Process	Parameters of anodic oxidation	Process	Parameters of anodic oxidation
Voltage/V	about 18	Temperature/℃	20
Current/(A·dm ⁻²)	0.8~1	Time/min	20~25

表 3 7B04 铝合金试样表面涂层防护体系
Tab.3 Coating protection system of 7B04 aluminum alloy samples

Process ID	Coating	Thickness /μm	Preparation process
T1	Primer Zinc yellow acrylic polyurethane primer (TB06-9)	20~25	Spray 1 layer, control thickness at 20~25 μm and dry naturally for 4 hours
	Finishing coat Polyurethane matt enamel (TS70-1)	20~25	Spray 1 layer, control thickness at 20~25 μm, let stand for 2 hours and dry 1 hour under 120 ℃ in oven
T2	Primer Zinc yellow acrylic polyurethane primer (TB06-9)	20~25	Spray 1 layer, control thickness at 20~25 μm and dry naturally for 4 hours
	Finishing coat Polyurethane enamel (TB04-16)	20~25	Spray 1 layer, control thickness at 20~25 μm, let stand for 2 hours and dry 1 hour under 120 ℃ in oven
T3	Primer Zinc yellow acrylic polyurethane primer (H06-101H)	25~30	Spray 1 layer, control thickness at 25~30 μm and dry naturally for 4 hours
	Finishing coat Polyurethane enamel (TB04-16)	20~25	Spray 1 layer, control thickness at 20~25 μm, let stand for 2 hours and dry 1 hour under 120 ℃ in oven
T4	Primer Zinc yellow acrylic polyurethane primer (H06-101H)	25~30	Spray 1 layer, control thickness at 25~30 μm and dry naturally for 4 hours
	Finishing coat Polyurethane matt enamel (TS70-1)	20~25	Spray 1 layer, control thickness at 20~25 μm, let stand for 2 hours and dry 1 hour under 120 ℃ in oven

1.2 动态自然环境暴露试验

动态自然环境暴露试验在远洋船舶移动平台的露天甲板上开展，样品安装在专用试验架上，各类 7B04 铝合金试样与水平呈 45°，大气暴露试验方法参照 Q/CD 3318—2015《移动平台动态大气环境试验方法》和 GB/T 14165—2008《金属和合金大气腐蚀试验 现场试验的一般要求》执行。远洋船舶航线主要为中国沿海—中东和非洲航线。试验装置示意图和样品投试情况详见图 2、图 3。

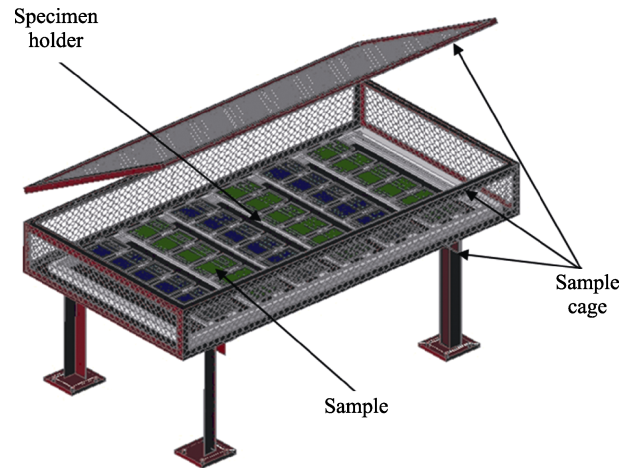


图 2 试验装置示意图
Fig.2 Schematic diagram of test installation



图 3 远洋船舶移动平台样品投试情况
Fig.3 Photo of sample putting on ocean-going ship platform

1.3 静态自然环境暴露试验

静态自然环境暴露试验在海南万宁试验站海洋平台大气暴露场开展，气候类型为湿热海洋环境，试样安装在朝南 45°的试样架上，参照 GB/T 14165—2008《金属和合金大气腐蚀试验 现场试验的一般要求》执行。样品投试情况见图 4。



图 4 海洋平台暴露场样品投试情况
Fig.4 Photo of sample exposure on offshore platform

1.4 试样检测与分析

采用 Nikon 相机记录样品试验前后的腐蚀形貌。采用 XRD (日本 Rigaku Dmax 2500 型 X 射线粉末衍射仪) 进行腐蚀产物相结构分析。参照 HB 5257—1983《腐蚀试验结果的重量损失测定和腐蚀产物的清除》称取试样的失重。拉伸强度、规定塑性延伸强度和断后伸长率的测量参照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分 室温试验方法》执行, 弹性模量的测量参照 GB/T 22315—2008《金属材料 弹性模量和泊松比试验方法》执行。

2 结果及分析

2.1 腐蚀形貌分析

图 5 为 7B04 铝合金阳极氧化样品在远洋船舶移动平台 (动态) 和海南万宁站海洋平台 (静态) 两种环境下暴露 1 年的表面宏观形貌。由图中可知, 两种试验方式下的样品的腐蚀形态略有不同, 在静态试验的 7B04 铝合金表面有大量白色腐蚀产物和点蚀坑,

正反面腐蚀形貌有较大不同, 正面趋于均匀腐蚀, 反面以点蚀为主^[24-25]。在动态试验的 7B04 铝合金表面布满密集的腐蚀麻点, 有黄色腐蚀产物产生, 且伴随有黑色腐蚀坑出现, 正反面腐蚀形貌较为一致, 但正面点蚀坑数量显著多于反面。对比两平台下的 7B04 铝合金样品的腐蚀形貌可发现, 在海洋大气环境下, 7B04 铝合金经阳极氧化封闭处理后, 主要的腐蚀类型为点蚀, 且远洋船舶移动平台试验样品的点蚀程度大于海南万宁站海洋平台试验样品。

7B04 铝合金经阳极氧化和涂漆工艺处理制得的 4 种涂层体系样品, 在远洋船舶移动平台和万宁海洋平台两种环境下暴露 1 年的表面宏观形貌如图 6 所示。从图中可知, 在海南万宁站海洋平台暴露 1 年后, 4 种涂层样品表面基本完整, 仅出现少量点蚀坑, 无涂层起泡和脱落现象出现。而在远洋船舶移动平台开展暴露试验的 4 种涂层体系样品, 其表面泛黄, 除 T1 涂层样品有少量点蚀孔出现, T2、T3 和 T4 涂层体系样品均发生严重点蚀, 穿透涂层到达 7B04 铝合金基材。由此可见, 远洋船舶移动平台海洋大气的腐蚀性更大。

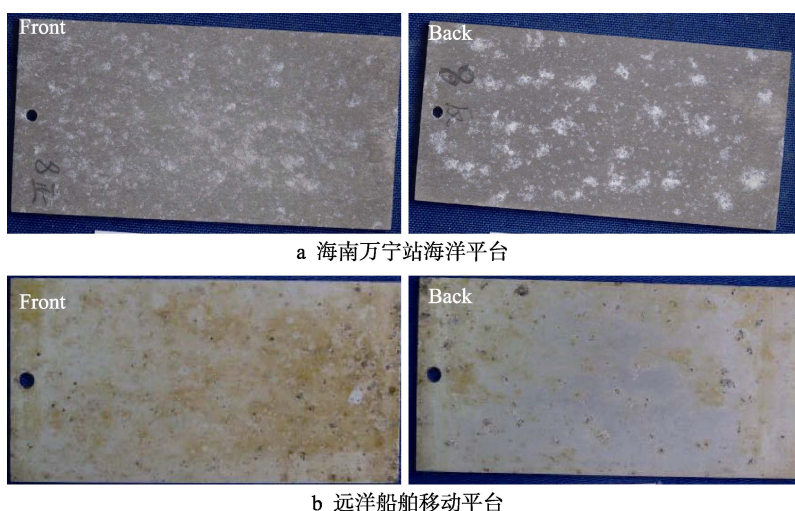


图 5 7B04 阳极氧化 (封闭) 样品自然环境试验 1 年的宏观形貌

Fig.5 Macroscopic morphology of the anodized 7B04 aluminum alloy in 1 year of nature environment test: a) offshore platform of Wanning station; b) ocean-going ship platform

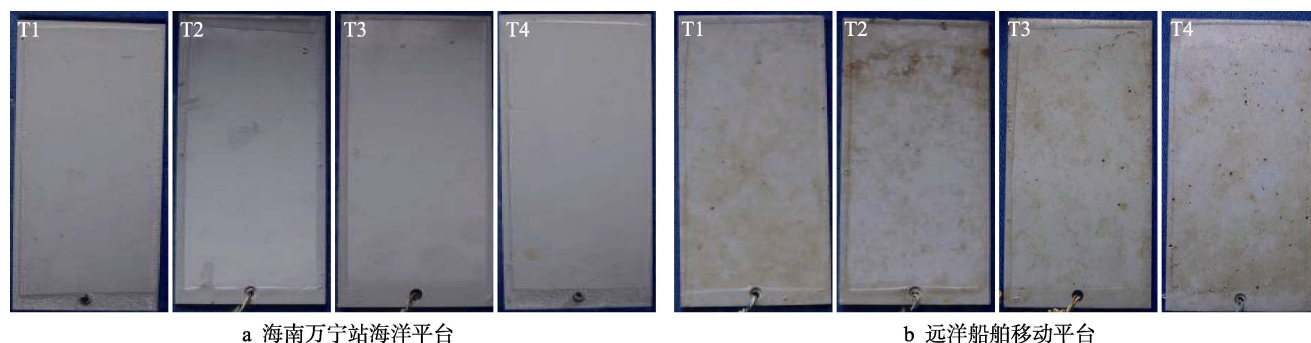


图 6 7B04 阳极氧化+涂漆样品自然环境试验 1 年的宏观形貌

Fig.6 Macroscopic morphology of the anodized and painted 7B04 aluminum alloy after 1 year of nature environment: a) offshore platform of Wanning station; b) ocean-going ship platform

2.2 腐蚀产物成分分析

为进一步确定两种环境中 7B04 铝合金的腐蚀产物, 分别将两种环境下暴露 1 年的 7B04 铝合金表面生成的腐蚀产物用干净的刻刀刮下, 采用日本 Rigaku Dmax 2500 型 X 射线粉末衍射仪对腐蚀产物进行物相分析。图 7 分别为 7B04 铝合金在两种环境暴露 1 年后的腐蚀产物的 XRD 图谱。从图中可知, 两种试验环境下的腐蚀产物衍射峰都具有基体铝(111)、(200)、(220)和(311)晶面产生的强衍射峰, 而在万宁站海洋平台试验的 7B04 铝合金样品, 其腐蚀产物还出现单斜晶三水化合物 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 产物的衍射峰,

但未见 AlCl_3 衍射峰, 表明腐蚀产物以 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为主, 但远洋船舶移动平台试验样品未观察到相关衍射峰的出现。

根据文献[26]报道可知, 当铝合金表面薄液膜中有 Cl^- 存在时, Cl^- 通过竞争吸附, 将逐渐取代 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 中的 OH^- , 生成具有可溶性的 AlCl_3 , 此外, 在万宁户外暴露的铝合金因只有少量的氯离子进入到腐蚀产物层, 导致表面腐蚀产物层中并没有大量的氯化物存在, 因此未检测到 AlCl_3 的存在。但是远洋船舶上, 由于水雾湿度大, 同时携带大量的 Cl^- , 导致腐蚀产物中 Al 主要以 AlCl_3 的形式存在, 以至于未观察到 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 等腐蚀产物的衍射峰。

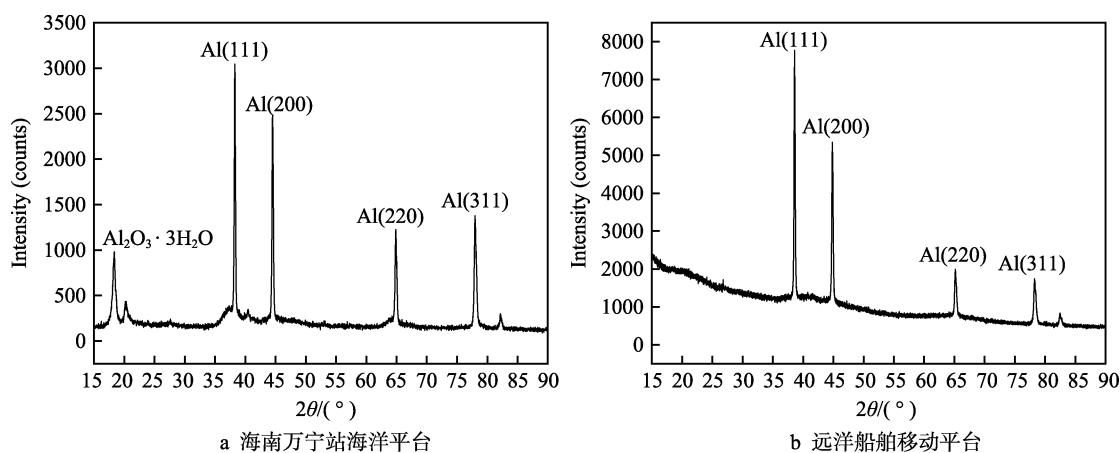


图 7 7B04 铝合金表面腐蚀产物的 XRD 图谱

Fig.7 XRD result for corrosion product of 7B04 aluminum alloy samples: a) offshore platform of Wanning station; b) ocean-going ship platform

2.3 腐蚀变化规律

图 8 为 7B04 铝合金在两种海洋大气环境中分别暴露 6 个月、9 个月和 1 年的腐蚀率。从图中可知, 在远洋船舶移动平台上的试验样品的腐蚀率始终高于万宁站海洋平台的试验样品, 其中 7B04 铝合金在远洋船舶移动平台暴露 1 年的腐蚀率为 $67.37 \mu\text{m}/\text{a}$, 是海南万宁站海洋平台环境户外大气暴露腐蚀率的

4.1 倍, 且 7B04 铝合金在远洋船舶移动平台的腐蚀率比万宁站海洋平台的腐蚀率的变化速率更大, 加速腐蚀效果显著。

针对不同试验环境及暴露时间样品的腐蚀率数据进行回归分析可发现, 7B04 铝合金在海洋大气环境下的腐蚀率变化规律满足幂函数关系 (式(1)):

$$y = A \cdot t^n \quad (1)$$

式中: y 为腐蚀深度; t 为暴露时间; A 为第一年腐蚀损失; n 为拟合参数。

远洋船舶移动平台拟合结果为 $y = 0.6215 \times t^{1.88}$, 万宁站海洋平台拟合结果为 $y = 0.0097 \times t^{2.99}$ 。通常情况下, n 值一般处于 0.4~1.0 之间, 在两种环境中的 n 值均大于 1, 表明海洋大气环境对 7B04 的腐蚀有加速的作用。

海洋大气环境中导致铝合金腐蚀的主要环境因素有温度、相对湿度和腐蚀介质 (盐雾)。当相对湿度大于某一临界值时, 将在铝合金表面形成连续的水膜, 且空气湿度越大, 水膜稳定存在的时间越长。另外, 海洋大气中的海盐吸附于铝合金表面后, 会吸收空气中的水分, 在铝合金表面形成稳定的电解质溶液, 且由于 Cl^- 半径很小, 可以很容易地穿过铝合金

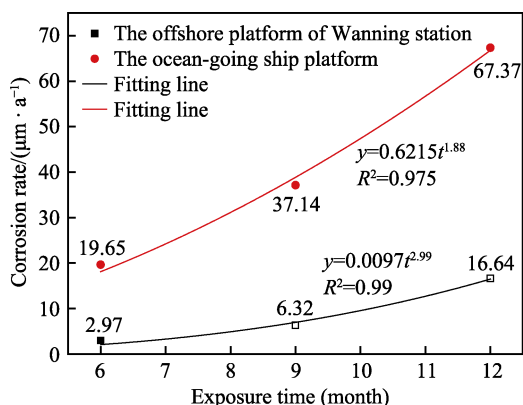


图 8 7B04 阳极氧化 (封闭) 样品腐蚀率幂函数拟合图
Fig.8 Fitting curve of the corrosion rate of the anodized 7B04 aluminum alloy samples

表面的氧化膜,加速铝合金基材的腐蚀,导致该保护膜破坏,失去保护性,从而进一步加速铝合金的腐蚀破坏^[27-30]。根据对该远洋船舶平台航迹分析可知,该远洋船舶主要往返于东海、南海、西太平洋、印度洋和大西洋,试验周期内平均气温在 23~30 ℃ 之间,平均相对湿度在 83%~87%之间,与万宁站相当;但其经历的最大温差为 35 ℃,且由于该远洋船舶在跨洋航行中经常经历大风大浪,这会导致远洋船舶移动平台的盐雾浓度更高。

在温度和相对湿度量值水平相当的情况下,盐雾浓度越高,铝合金腐蚀程度将越大,这与腐蚀率测量结果一致。由此可见,远洋船舶移动平台试验样品的高腐蚀率是由于远洋船舶航行过程中经历了更高的盐雾浓度所致。

2.4 力学性能变化规律

图 9 为经阳极氧化封闭处理后的 7B04 铝合金在两种平台环境下开展 1 年期自然环境暴露试验后的力学性能变化规律。力学性能指标有拉伸强度、规定塑性延伸强度、断后伸长率和弹性模量。从图中可知,经自然环境暴露试验后,7B04 铝合金的 4 种力学性能指标均有一定程度的下降,且在远洋船舶移动平台开展试验的样品力学性能下降更多。

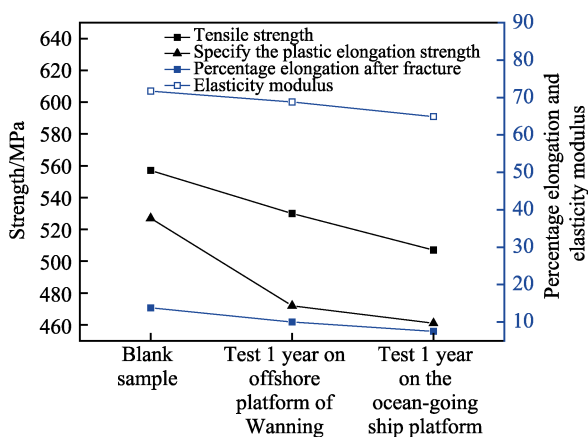


图 9 7B04 铝合金在两种试验环境下暴露 1 年的力学性能变化曲线

Fig.9 Changing curves of mechanical properties of 7B04 aluminum alloy exposed for 1 year in two test environments

两种试验环境下,7B04 铝合金的 3 种力学性能指标的变化率详见表 4。虽然两种环境均导致 7B04 铝合金的力学性能下降,但根据 3 种力学性能的保留率之比可以看出,在远洋船舶移动平台环境下,7B04 铝合金的断后伸长率显著降低,而 7B04 铝合金的强度下降差别不是特别大。由此可见,远洋船舶移动平台环境主要显著降低了 7B04 铝合金的塑性。

结合腐蚀形貌和力学性能分析结果,7B04 铝合金在两种海洋大气环境中的主要腐蚀类型均为点蚀,点蚀的发生导致 7B04 铝合金的断后伸长率显著下

表 4 7B04 铝合金力学性能保留率

Tab.4 Mechanical retention rate of 7B04 aluminum alloy samples

Test environment	Tensile strength	Percentage elongation after fracture	Specified plastic elongation strength
Offshore platform of Wanning	95.2	72.5	89.6
Ocean-going ship platform	91.0	54.3	87.5
Retention ratio/%	1.05	1.34	1.03

降,从而导致远洋船舶移动平台试验样品的断后伸长率远小于万宁站海洋平台试验样品,也进一步验证了腐蚀形貌分析获得的“远洋船舶移动平台试验样品的点蚀程度更大,点蚀坑更多、更深”这一结论。同时,力学性能的变化规律也印证了远洋船舶移动平台的海洋大气环境对铝合金的腐蚀作用更加强烈。

3 结论

1) 7B04 铝合金在远洋船舶移动平台和万宁站海洋平台两种海洋大气环境中的腐蚀类型均为点蚀。

2) 基于远洋船舶移动平台开展的海洋大气动态自然环境暴露试验对 7B04 铝合金的腐蚀加速效果更为显著,7B04 铝合金的点蚀程度相较于静态自然环境暴露试验的样品更严重。

3) 暴露 1 年,远洋船舶移动平台海洋大气环境对 7B04 铝合金的腐蚀率和力学性能的影响相较于万宁站海洋平台海洋大气环境更为显著,且对力学性能的降低主要反映在断后伸长率方面。

参考文献:

- [1] 朱玉琴,陈源,张燕,等. 国内外动态自然环境试验技术发展现状[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 93-99. ZHU Yu-qin, CHEN Yuan, ZHANG Yan, et al. Current status of dynamic natural environmental test techniques at home and abroad[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(6): 93-99.
- [2] KETCHAM S J. Shipboard exposure testing of aluminum alloy aboard USS ranger[J]. Metal progress, 1981, 119(4): 38-44.
- [3] JANKOWSKY E J. Shipboard exposure testing—USS America[R]. Warminster: Naval Air Development Center, 1982.
- [4] JOSEPH Kozol, EDWIN Tankins. Aircraft carrier exposure tests of cast magnesium alloys[R]. Warminster: Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 1993.
- [5] EDWIN T, JOSEPH K, LEE E W. Shipboard exposure testing of aircraft materials aboard USS ranger[J]. The

- journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1994, 47(9): 17.
- [6] EDWIN T, JOSEPH K, LEE EUI W. The shipboard exposure testing of aircraft materials[J]. The journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1995, 47(9): 40-44.
- [7] EDWIN T, JOSEPH K, LEE EUI W. Shipboard exposure testing of aircraft materials[R]. Warminster: Aerospace Materials Division, Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 1994.
- [8] LEE EUI W, WILLIAM E F. Materials for the carrier environment[R]. Patuxent River: Aerospace Materials Division Naval Air Systems Command, 2004.
- [9] 朱立群, 谷岸, 刘慧丛, 等. 典型高强铝合金材料的点蚀坑前缘特征的研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(6): 61-66.
- ZHU Li-qun, GU An, LIU Hui-cong, et al. Study on characters of corrosion advancing edge of typical high strength aluminum alloys[J]. Journal of aeronautical materials, 2008, 28(6): 61-66.
- [10] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第 2 卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- Editor Committee of *China aeronautical materials handbook*. China aeronautical materials handbook (2nd Ed) [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [11] 杨守杰, 杨霞. 高强度铝合金的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2010, 20(5): 47-52.
- YANG Shou-jie, YANG Xia. Progress in high-strength aluminum alloy research[J]. Powder metallurgy industry, 2010, 20(5): 47-52.
- [12] 刘明, 蔡健平, 孙志华, 等. 7B04 铝合金海洋性大气腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 163-166.
- LIU Ming, CAI Jian-ping, SUN Zhi-hua, et al. Study on corrosion of 7B04 aluminum alloy in marine atmosphere [J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 163-166.
- [13] 崔继红, 蔡建平, 贾成广. 盐雾环境下高强度铝合金的点蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(3): 197-202.
- CUI Ji-hong, CAI Jian-ping, JIA Cheng-guang. Pitting corrosion of high strength aluminum alloys in salt spray test[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(3): 197-202.
- [14] 苏艳, 李凌杰, 舒畅, 等. 高强铝合金海洋大气环境剥层腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 180-182.
- SU Yan, LI Ling-jie, SHU Chang, et al. Research on corrosion characters and mechanism of 7B04 aluminum alloy in marine atmosphere environment[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(6): 180-182.
- [15] 王刚, 金平, 谭晓明, 等. 海洋环境下 7B04 铝合金腐蚀损伤演化规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 338-342.
- WANG Gang, JIN Ping, TAN Xiao-ming, et al. Research on corrosion damage environment rule of 7B04 aluminum alloy under ocean environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(4): 338-342.
- [16] 高蒙, 孙志华, 刘明, 等. 7B04 铝合金在 NaCl 沉积与 SO₂ 环境下的大气腐蚀行为[J]. 环境技术, 2016(5): 9-13.
- GAO Meng, SUN Zhi-hua, LIU Ming, et al. Atmospheric corrosion behavior of 7B04 aluminum alloy in the presence of NaCl and SO₂[J]. Environmental technology, 2016(5): 9-13.
- [17] 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 Chen-guang, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Corrosion behavior of 7B04 aluminum alloy in simulated oceanic atmosphere[J]. Journal of aeronautical materials, 2017, 37(1): 59-64.
- [18] 刘治国, 颜光耀, 吕航. 7B04 铝合金服役环境下点蚀表面损伤特征研究[J]. 环境技术, 2017(5): 46-49.
- LIU Zhi-guo, YAN Guang-yao, LV Hang. Research on pitting corrosion damage characteristics of 7B04 aluminum alloys in service environment[J]. Environmental technology, 2017(5): 46-49.
- [19] 孙强. 模拟海洋环境下 7B04 铝合金电偶腐蚀预测及验证[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(4): 203-208.
- SUN Qiang. Prediction an verification of galvanic corrosion of 7B04 aluminum alloy under simulated marine environment[J]. Failure analysis and prevention, 2018, 13(4): 203-208.
- [20] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 7050 高强铝合金在我国四种典型大气环境下腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 49-53.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, SU Yan, et al. Corrosion behavior of 7050 high-strength aluminum alloy in four typical atmospheric environments in China[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(4): 49-53.
- [21] 杨小奎, 张伦武, 胡滨, 等. 7475 高强铝合金在海洋和乡村大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 262-267.
- YANG Xiao-kui, ZHANG Lun-wu, HU Bin, et al. Corrosion behavior of 7475 high-strength aluminum alloy in marine and rural atmosphere environments[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 262-267.
- [22] 刘远勇. 7B04 铝合金应力腐蚀研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- LIU Yuan-yong. Study on stress corrosion of 7B04 aluminum alloy[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [23] 孙志华, 刘明辉, 张晓云, 等. 时效制度对 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金应力腐蚀敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(4): 232-236.
- SUN Zhi-hua, LIU Ming-hui, ZHANG Xiao-yun, et al. Effect of tempered conditions on the stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(4): 232-

- 236.
- [24] 苏艳. 7B04 高强铝合金与防护涂层在海洋大气环境中的腐蚀行为[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
SU Yan. Corrosion behavior research of 7B04 high-strength aluminum alloy and its protective coating in marine atmospheric environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [25] 徐火平, 刘慧丛, 朱立群, 等. 盐雾环境中高强铝合金点蚀行为与暴露面积的关系[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4): 59-64.
XU Huo-ping, LIU Hui-cong, ZHU Li-qun, et al. Relation between pitting corrosion behavior and exposed area of high strength aluminum alloys in neutral salt spray[J]. Journal of aeronautical materials, 2010, 30(4): 59-64.
- [26] 马腾, 王振尧, 韩薇. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 155-161.
MA Teng, WANG Zhen-yao, HAN Wei. A review of atmospheric corrosion of aluminum and aluminum alloys [J]. Corrosion science and protection technology, 2004, 16(3): 155-161.
- [27] 孙秋霞. 材料腐蚀与防护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 64-66.
SUN Qiu-xia. Material corrosion and protection[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 64-66.
- [28] 周和荣, 李晓刚, 董超芳. 铝合金及其氧化膜大气腐蚀行为与机理研究进展[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 1-9.
ZHOU He-rong, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang. Review of atmospheric corrosion behavior and mechanism of aluminum alloys and its anodic film[J]. Equipment environment engineering, 2006, 3(1): 1-9.
- [29] 郭初蕾. 新型铝合金在典型环境中的大气腐蚀行为研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2013.
GUO Chu-lei. The atmospheric corrosion behavior of new aluminum alloys in typical environment[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2013.
- [30] 王彬, 苏艳. 铝合金大气腐蚀行为及其防腐措施研究进展[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 64-68.
WANG Bin, SU Yan. Research progress in atmospheric corrosion behavior and anticorrosion measures of aluminum alloy[J]. Equipment environment engineering, 2012, 9(2): 64-68.

(上接第 382 页)

- [21] WANG Shu-yan, XIA Yong-ping, LIU Li, et al. Effect of duty cycle on microstructure and corrosion resistance of MAO coatings fabricated on AZ91D magnesium alloy in an optimized dual electrolyte[J]. Advanced materials research, 2013, 668(57): 779-783.
- [22] AN Ling-yun, MA Ying, LIU Yun-po, et al. Effects of additives, voltage and their interactions on PEO coatings formed on magnesium alloys[J]. Surface and coatings technology, 2018, 354: 226-235.
- [23] BALA S, LIANG J, BALAJEE R G, et al. Effect of pulse frequency on the microstructure, phase composition and corrosion performance of a phosphate-based plasma electrolytic oxidation coated AM50 magnesium alloy[J]. Applied surface science, 2010, 256(12): 3928-3935.
- [24] 马颖, 詹华, 马跃洲, 等. 电参数对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜层微观结构及耐蚀性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1467-1473.
MA Ying, ZHAN Hua, MA Yue-zhou, et al. Effects of electrical parameters on microstructure and corrosion resistance of micro-arc oxidation coatings on AZ91D magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1467-1473.
- [25] 刘鹏. 两种电源模式下镁合金微弧氧化电参数交互作用对比研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
LIU Peng. Effect of electrical parameters interaction of micro-arc oxidation coatings on magnesium alloys under two power supply[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [26] 剡晓旭. 电参数及其交互作用对纯铝微弧氧化膜结构和性能的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
YAN Xiao-xu. Effects of electrical parameters and their interaction on microstructure and property of MAO coatings on pure aluminium[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
- [27] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 124-159.
LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experiment design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 124-159.
- [28] 马颖, 冯君艳, 马跃洲, 等. 镁合金微弧氧化膜耐蚀性表征方法的对比研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(6): 442-448.
MA Ying, FENG Jun-yan, MA Yue-zhou, et al. Comparative study on characterization of corrosion resistance of micro-arc oxidation coating on magnesium alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(6): 442-448.