

环境试验与观测

7A04 和 2A97 在典型气候环境中的性能演变规律研究

杨玉萍, 刘剑, 赵宏坤, 刘艳芳, 王冲文, 戈帆, 罗瑞, 肖建军, 杨品杰

(云南北方光电仪器有限公司, 昆明 650114)

摘要: **目的** 研究湿热海洋、湿热雨林、暖湿酸雨典型气候环境对 7A04 和 2A97 铝合金性能的影响。**方法** 通过对 7A04 和 2A97 铝合金试样进行户外暴露试验, 结合外观形貌观察、力学性能检测、化学成分分析等手段, 研究 7A04 和 2A97 在典型气候环境中的性能演变规律。**结果** 对于 7A04 铝合金, 经过 2 a 的湿热海洋气候环境试验后, 表面出现均匀腐蚀, 抗拉强度、伸长率下降, 硬度无变化; 经过 2 a 的湿热雨林气候环境试验后, 外观形貌、抗拉强度、硬度无变化, 伸长率下降; 经过 2 a 的暖湿酸雨气候环境试验后, 表面出现点蚀, 抗拉强度、硬度无变化, 伸长率下降。对于 2A97 铝合金, 经过 2 a 的湿热海洋气候环境试验后, 表面由点蚀发展为局部腐蚀, 抗拉强度、伸长率下降, 硬度无变化; 经过 2 a 的湿热雨林气候环境试验后, 外观形貌、抗拉强度、伸长率、硬度无变化; 经过 2 a 的暖湿酸雨环境试验后, 外观形貌、硬度无变化, 抗拉强度、伸长率下降。**结论** 湿热海洋和暖湿酸雨气候环境对 7A04 和 2A97 易造成腐蚀, 而湿热雨林气候环境对 7A04 和 2A97 不易造成腐蚀, 2A97 的耐蚀性优于 7A04。

关键词: 典型气候环境; 铝合金; 外观形貌; 抗拉强度; 伸长率; 硬度

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0132-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.021

Research the Performance Evolution of 7A04 and 2A97 in
Typical Climatic Environment

YANG Yu-ping, LIU Jian, ZHAO Hong-kun, LIU Yan-fang, WANG Chong-wen,
GE Fan, LUO Rui, XIAO Jian-jun, YANG Pin-jie

(Yunnan North Photoelectric Instrument Co., Ltd, Kunming 650114, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the effects of typical climate conditions such as hot and humid ocean, humid rain forest and warm wet acid rain on properties of 7A04 and 2A97. Through outdoor exposure test of 7A04 and 2A97 aluminum alloy sample was carried out. Appearance observation, mechanical property testing, chemical composition analysis were combined to study the performance evolution of 7A04 and 2A97 in typical climatic environment. After two years' testing under hot and humid ocean, the surface of 7A04 appeared uniform corrosion, the tensile strength and elongation decreased, the hardness did not

收稿日期: 2021-05-15; 修订日期: 2021-07-10

Received: 2021-05-15; Revised: 2021-07-10

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSHS2016209B001)

Fund: Supported by the Nation Defense Technology Foundation Project (JSHS2016209B001)

作者简介: 杨玉萍 (1982—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验与观测。

Biography: YANG Yu-ping (1982—), Female, Senior engineer, Research focus: environmental testing and observation.

引文格式: 杨玉萍, 刘剑, 赵宏坤, 等. 7A04 和 2A97 在典型气候环境中的性能演变规律研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 132-138.

YANG Yu-ping, LIU Jian, ZHAO Hong-kun, et al. Research the performance evolution of 7A04 and 2A97 in typical climatic environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 132-138.

changed; After two years' testing under hot and humid rain forest, the appearance, the tensile strength and the hardness did not changed, the elongation decreased; After two years' testing under warm wet acid rain, the surface appeared pitting corrosion, the tensile strength and hardness did not changed,the elongation decreased. After two years' testing under hot and humid ocean, the surface of 2A97 developed from pitting corrosion to local corrosion, the tensile strength and elongation decreased, the hardness did not changed; After two years' testing under hot and humid rain forest, the appearance, the tensile strength, the elongation and hardness did not changed; After two years' testing under warm wet acid rain, the appearance and hardness did not changed, the tensile strength and elongation decreased. 7A04 and 2A97 are easy to be corroded by hot and humid ocean and warm wet acid rain climate environment, while 7A04 and 2A97 are not easy to be corroded by hot and humid rain forest climate environment 2A97 has better corrosion resistance than 7A04.

KEY WORDS: typical climatic environment; aluminum alloy; appearance; tensile strength; elongation; hardness

铝及铝合金具有密度小、电导热能力强、成形加工性好以及物理化学综合性能优异等一系列优点，在航空、能源、食品、电子、交通等领域得到广泛的应用，已经成为工业生产中用量仅次于钢铁的第二大金属材料^[1-4]。7A04 属于 Al-Zn-Mg-Cu 系高强度铝合金，用于制造飞机机体（如蒙皮、结构支撑件以及需要承重的结构部件）和运载火箭箭体结构^[5-10]。2A97 属于 Al-Cu-Li 系新型铝锂合金，具有强度高、刚度、韧性好等特点，受到广泛关注，应用在飞机典型结构部位^[11-12]，用其取代常规铝合金，可使构件质量降低 10%~15%，刚度提高 15%~20%^[13]。但铝合金的耐蚀性较差，极易发生点蚀、晶间腐蚀等局部腐蚀。铝合金腐蚀严重时，会造成构件失效，从而影响到飞机整机的服役寿命。随着航空铝合金服役环境日益复杂，高强铝合金遭遇腐蚀性的环境越来越多^[14-18]，因此研究铝合金在典型气候环境中的性能演变规律对于指导实际应用具有重要意义。以 7A04、2A97 分别为高强铝合金、新型铝合金的代表，开展其在自然环境下的户外暴露试验，得到的数据直观、可靠。通过对二者的各性能参数以及环境适应性进行对比分析，可以获得不同类铝合金之间的腐蚀特征和规律，为材料的环境适应性设计和防护提供数据支撑。

金属材料在自然大气环境中因气候或环境因素的作用而引起的金属变质、甚至破坏的现象称为金属的大气腐蚀^[13]。在干净的大气环境中，当达到一定相对湿度后，大气中的水蒸气在金属表面凝聚或吸附成水膜，这是金属发生大气腐蚀的主要原因^[19-23]。由此文中选择在万宁湿热海洋、西双版纳湿热雨林、江津暖湿酸雨三种典型气候中开展直接暴露试验。暴露 0.5、1、1.5、2 a 后，采用宏观测试方法观察两种铝合金外观形貌，采用拉伸试验机和布氏硬度计测试样品的抗拉强度、断后伸长率和硬度，分析 7A04 和 2A97 在不同典型气候环境中的性能演变规律。

1 试验

1.1 材料

试验材料选用铝合金挤压棒材 7A04 和 1.5 mm 厚铝锂合金冷轧薄板 2A97，化学成分（以质量分数计）见表 1。试样按 GB/T 228 制成标准圆形（直径 10 mm）和矩形（12.5 mm×1.5 mm）拉伸试验试样，以及圆形（直径 50 mm）和矩形（50 mm×50 mm）试块，如图 1 和图 2 所示。

表 1 7A04 和 2A97 化学成分
Tab.1 Chemical composition of 7A04 and 2A97

化学元素	Cu	Mn	Mg	Zn	Li	Fe	Si	%
7A04	1.4~2.0	0.20~0.6	1.8~2.8	5.0~7.0	—	≤0.50	≤0.50	
2A97	2.0~3.2	0.20~0.6	0.25~0.50	0.17~1.0	0.8~2.3	≤0.15	≤0.15	

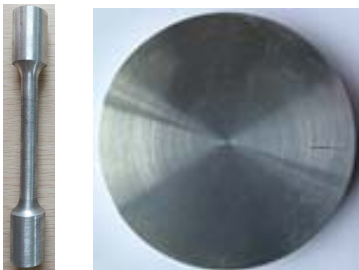


图 1 7A04 试样
Fig.1 Sample of 7A04



图 2 2A97 试样
Fig.2 Sample of 2A97

1.2 典型环境户外暴露试验

将 7A04 和 2A97 试样直接暴露在万宁湿热海洋、西双版纳湿热雨林和江津暖湿酸雨典型气候环境下开展自然环境试验,按 0.5、1、1.5、2 a 的周期进行周期取样和性能检测。

1.3 性能检测

每周试验结束后,取回 5 件拉伸试样和 2 件试块进行外观形貌观察及抗拉强度、断后伸长率、硬度等性能的检测。其中检测拉伸性能时,保留试样的表面腐蚀状态,不进行酸洗。对试样尺寸进行人工检测后,采用电子拉力试验机进行拉伸性能检测。7A04 硬度性能检测时,对样品表面进行车削以达到硬度性能检测表面粗糙度要求;2A97 硬度性能检测时,不进行加工,保留原始表面状态。

2 结果与讨论

2.1 形貌观察

7A04 和 2A97 铝合金样品在不同典型环境条件下暴露不同时间后的表面宏观形貌如图 3 和图 4 所示。可以看出,7A04 和 2A97 在湿热海洋气候环境下的腐蚀较为严重,在暖湿酸雨气候环境下的腐蚀次

之,在湿热雨林气候环境下的腐蚀最小,随着暴露时间的延长,腐蚀情况趋于严重。7A04 在湿热海洋气候环境下暴露后,腐蚀产物逐渐覆盖整个表面;在暖湿酸雨气候环境下暴露后,呈现点蚀;在湿热雨林气候环境暴露后,表面附着苔藓类物质或灰尘,未出现明显腐蚀。2A97 在湿热海洋气候环境下暴露后,呈现点蚀;在暖湿酸雨和湿热雨林气候环境下暴露后,表面未出现明显腐蚀产物,附着苔藓类物质或灰尘。从外观形貌看,在相同气候环境相同暴露时间后,7A04 比 2A97 腐蚀严重。

2.2 抗拉强度测试数据分析

7A04 和 2A97 在不同典型气候环境不同暴露周期后,抗拉强度测试数据见表 2。可以看出,7A04 经过 2 a 的湿热海洋、湿热雨林、暖湿酸雨气候环境暴露试验后,抗拉强度变化较小,说明各典型气候环境虽然对 7A04 表面产生了腐蚀,但腐蚀主要集中在表面,未严重影响其抗拉强度。2A97 经过 2 a 的湿热雨林、暖湿酸雨气候环境暴露试验后,抗拉强度变化也较小,说明湿热雨林气候环境、暖湿酸雨气候环境对 2A97 的抗拉强度影响不大。在经过 2 a 的湿热海洋气候环境暴露试验后,抗拉强度下降约 9%,说明 2 a 的湿热海洋气候环境暴露试验已经造成了 2A97 抗拉强度的劣化。

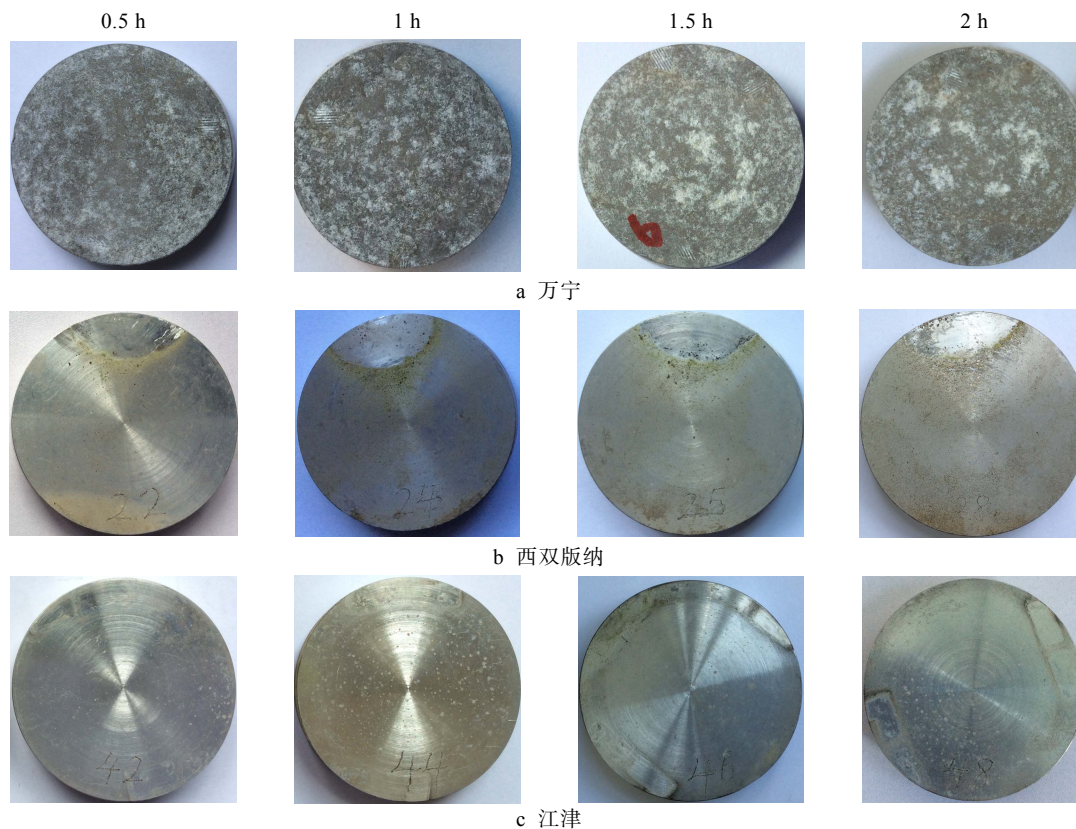


图3 7A04 不同典型气候环境下不同暴露周期后表面宏观形貌

Fig.3 Macro photos of 7A04 after different exposure cycles in different typical climatic environments: a) Wanning; b) Xishuangbanna; c) Jiangjin

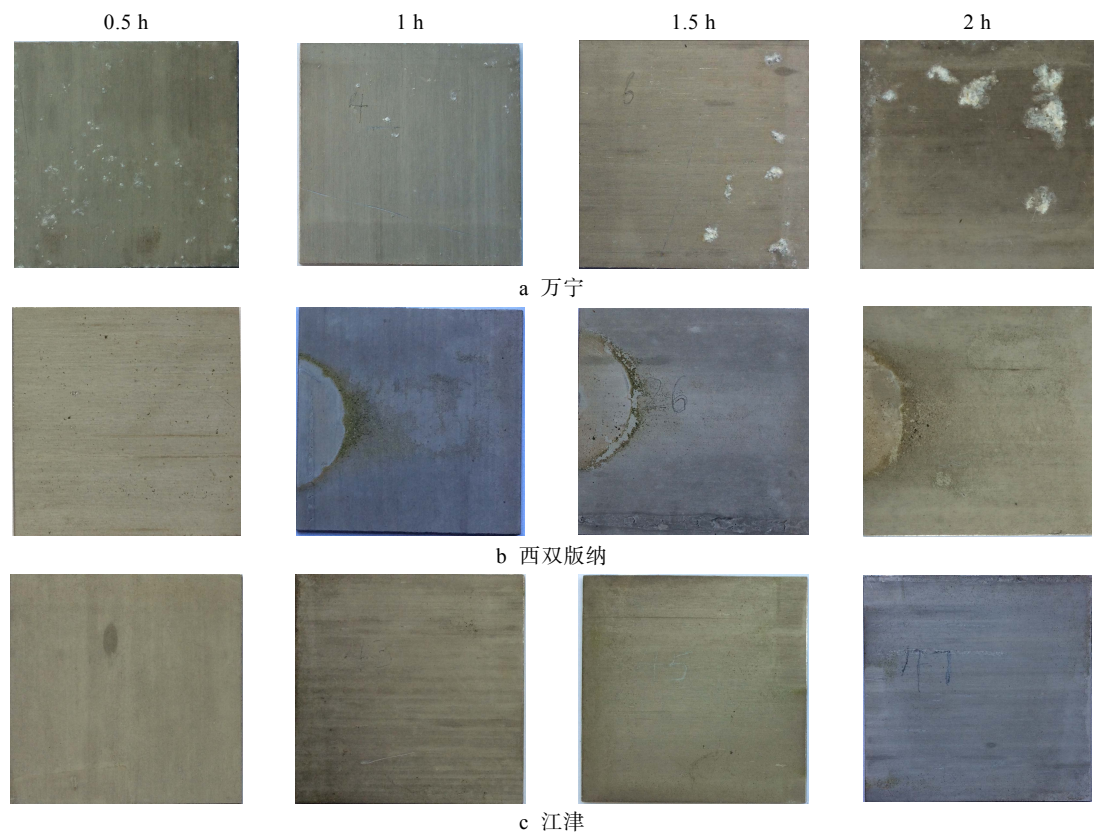


图 4 2A97 不同典型气候环境下不同暴露周期后表面宏观形貌
Fig.4 Macro photots of 2A97 after different exposure cycles in different typical climatic environments: a) Wanning; b) Xishuangbanna; c) Jiangjin

表 2 7A04 和 2A97 抗拉强度平均值
Tab.2 Average tensile strength of 7A04 and 2A97

						MPa
材料牌号	气候环境	初始	0.5 a	1 a	1.5 a	2 a
7A04	湿热海洋	637	640	626	645	619
	湿热雨林	637	640	623	638	628
	暖湿酸雨	637	638	649	623	652
2A97	湿热海洋	481	462	456	458	438
	湿热雨林	481	485	488	490	484
	暖湿酸雨	481	465	482	484	461

2.3 断后伸长率测试数据分析

7A04 和 2A97 在不同典型气候环境暴露不同周期后，断后伸长率测试数据见表 3。可以看出，经过 0.5 a 的湿热海洋气候环境试验后，7A04 和 2A97 的断后伸长率出现了不同程度的下降，7A04 下降约 24%，2A97 下降约 43%。0.5~2 a 的试验期间，二者的断后伸长率保持稳定，未出现明显下降，腐蚀处于稳定阶段。经过 1.5 a 的湿热雨林气候环境试验后，7A04 的断后伸长率基本未发生变化，直到暴露 2 a 后，断后伸长率出现下降，下降约 24%，而 2A97 的依然保持不变。经过 1 a 的暖湿酸雨气候环境试验后，7A04 的断后伸长率下降约 17%，随后保持稳定；而

2A97 在暴露 1.5 a 前，断后伸长率基本没发生变化，暴露 2 a 后出现下降，下降约 33%。从断后伸长率数据分析，2A97 的耐蚀性比 7A04 强。

2.4 布氏硬度测试数据分析

7A04 和 2A97 在不同典型气候环境不同暴露周期后，布氏硬度测试数据见表 4。可以看出，经过 2 a 的湿热海洋、湿热雨林、暖湿酸雨气候环境暴露试验后，7A04 和 2A97 的硬度基本未发生变化。

2.5 分析讨论

由外观形貌可以看出，7A04 和 2A97 经过湿热海洋气候环境直接暴露试验后，在腐蚀初期主要表现为

表 3 7A04 和 2A97 断后伸长率平均值
Tab.3 Average elongation of 7A04 and 2A97 after fracture

材料牌号	气候环境	初始	0.5 a	1 a	1.5 a	2 a
7A04	湿热海洋	8.9	6.8	7.6	6.7	6.6
	湿热雨林	8.9	9.5	9.0	9.0	6.8
	暖湿酸雨	8.9	8.2	8.8	7.4	7.2
2A97	湿热海洋	15	8.5	8.1	6.6	7.2
	湿热雨林	15	15	16	13	14
	暖湿酸雨	15	14	14	13	10

表 4 7A04 和 2A97 硬度 (HB) 平均值
Tab.4 Average hardness of 7A04 and 2A97

材料牌号	气候环境	初始	0.5 a	1 a	1.5 a	2 a
7A04	湿热海洋	171	173	178	181	172
	湿热雨林	171	176	179	184	169
	暖湿酸雨	171	171	183	169	170
2A97	湿热海洋	119	125	132	126	120
	湿热雨林	119	125	122	118	121
	暖湿酸雨	119	122	126	120	115

典型的点腐蚀特征,随着暴露试验时间的延长,点蚀逐渐长大,临近的点蚀坑相互连接,不断扩展。到 2 a 后,7A04 样品表面点蚀已全部连接成片,2A97 样品表面局部区域点蚀也成片发展。该试验结果与北京科技大学邢士波等人关于“7A04 铝合金在西沙海洋大气中的腐蚀行为研究”以及北京航空材料研究院骆晨等人关于“热带海洋大气环境中 2A97 铝锂合金的初期腐蚀机理研究”结果一致。根据邢士波等人的研究成果,7A04 铝合金在高盐雾大气环境中试验后,该材料中含有的第二相 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 、 $(\text{Al,Cu})_6(\text{Fe,Cu})$ 相对铝基体的电位要正,在局部腐蚀中作为阴极加速其周围基体的腐蚀; MgZn_2 相对铝基体的电位更负,作为阳极会优先发生腐蚀溶解。高盐雾大气环境中的 Cl^- 会加速铝合金表面氧化膜的破裂,从而加速腐蚀^[3]。根据骆晨等人的研究成果,2A97 在热带海洋大气环境中试验后,材料中含有 2 种尺寸较大金属间化合物,分别是 θ 相 (Al_2Cu) 和 α 相 (Al-Cu-Fe-Mn-Si)。铝基体和 θ 相、 α 相之间建立起微电偶对,Cu、Fe、Mn 等比 Al 的电极电位正, θ 相、 α 相充当局部阴极,粒子周围的 Al 充当阳极,发生阳极溶解。试验初期,许多 θ 相粒子处已经萌生局部腐蚀, α 相粒子及其周边区域未发生腐蚀现象。随着直接暴露试验时间的延长, α 相粒子也发生局部腐蚀^[24]。

3 结论

1) 7A04 铝合金在万宁湿热海洋气候环境试验 2 a 后,表面腐蚀产物随暴露时间的延长不断增多,整个表面出现均匀腐蚀,抗拉强度、伸长率下降,硬度无

变化。

2) 7A04 铝合金在西双版纳湿热雨林气候环境试验 2 a 后,表面附着苔藓类物质或灰尘,未出现明显腐蚀,抗拉强度、硬度无明显变化;试验 1.5 a 后,伸长率出现下降。

3) 7A04 铝合金在江津暖湿酸雨气候环境试验 2 a 后,表面出现点蚀,抗拉强度、硬度无明显变化;试验 1.5 a 后,伸长率出现下降。

4) 2A97 铝合金在万宁湿热海洋气候环境试验 2 a 后,表面腐蚀产物随暴露时间的延长不断增多,由点蚀逐步发展成局部腐蚀,抗拉强度、伸长率下降,硬度无变化。

5) 2A97 铝合金在西双版纳湿热雨林气候环境暴露试验 2 a 后,表面附着苔藓类物质或灰尘,未出现明显腐蚀,抗拉强度、伸长率、硬度无明显变化。

6) 2A97 铝合金在江津暖湿酸雨气候环境试验 2 a 后,表面未出现明显腐蚀,抗拉强度、伸长率出现下降,硬度无明显变化。

7) 2A97 铝合金在湿热海洋、湿热雨林、暖湿酸雨气候环境中的耐蚀性优于 7A04。

参考文献:

- [1] 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 technology protection, 2004, 16(3): 155-161.
- [2] 赵全成,罗来正,黎小锋,等. 两种典型大气环境下

- 7A85 铝合金的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 70-75.
- ZHAO Quan-cheng, LUO Lai-zheng, LI Xiao-feng, et al. Corrosion behavior of 7A85 aluminum alloy in two typical atmospheric environments[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(7): 70-75.
- [3] 邢士波, 李晓刚, 李丽, 等. 7A04 铝合金在西沙海洋大气中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(9): 796-799.
- XING Shi-bo, LI Xiao-gang, LI Li, et al. Corrosion behavior of 7A04 aluminium alloy in Xisha marine atmosphere[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(9): 796-799.
- [4] 周和荣, 马坚, 陆启凯, 等. 典型铝合金在江津自然大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(3): 10-14, 29.
- ZHOU He-rong, MA Jian, LU Qi-kai, et al. Corrosion study of aluminum alloys in Jiangjin atmospheric environment[J]. Equipment environmental engineering, 2009, 6(3): 10-14, 29.
- [5] 周和荣, 姚望, 刘鹏洋, 等. 周期凝露和二氧化硫环境对 7A04 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(5): 359-368.
- ZHOU He-rong, YAO Wang, LIU Peng-yang, et al. Effect of cyclic condensation and sulfur dioxide on corrosion behavior of 7A04 aluminum alloy[J]. Chinese journal of materials research, 2017, 31(5): 359-368.
- [6] LI X G, ZHANG D W, LIU Z Y, et al. Share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527: 441.
- [7] DONG C F, SHENG H, AN Y H, et al. Corrosion of 7A04 aluminum alloy under defected epoxy coating studied by localized electrochemical impedance spectroscopy[J]. Progress in organic coatings, 2010, 67(3): 269-273.
- [8] 周和荣, 马坚, 李晓刚, 等. 表面沉积氯化钠的 7A04 铝合金在模拟环境中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 974-980.
- ZHOU He-rong, MA Jian, LI Xiao-gang, et al. Corrosion behavior of 7A04 aluminum alloy deposited with sodium chloride in simulated environment[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2009, 19(5): 974-980.
- [9] 韩薇, 王振尧, 于国才, 等. 铝在含 SO_2 湿润/干燥环境中的腐蚀规律[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 631-634.
- HAN Wei, WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, et al. Corrosion of aluminum in wet/dry environment containing SO_2 [J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2003, 13(3): 631-634.
- [10] 周和荣, 马坚, 李晓刚, 等. 高强铝合金在不同 SO_2 模拟环境中的腐蚀行为及相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(6): 446-452.
- ZHOU He-rong, MA Jian, LI Xiao-gang, et al. Corrosion behaviors and relativity of high strength aluminum alloy in different simulated SO_2 environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2011, 31(6): 446-452.
- [11] 潘岍, 骆晨, 汤智慧, 等. 2A97 铝合金硫酸阳极氧化搅拌摩擦焊对接结构件在热带岛礁海洋大气环境暴露初期的失效行为[J]. 环境技术, 2020, 38(2): 25-29, 45.
- PAN Qiao, LUO Chen, TANG Zhi-hui, et al. The degradation behaviors of 2A97 aluminum alloy sulfuric acid anodized specimens made by friction stir welding during the early stages of exposing to marine atmosphere at an island located in tropical area[J]. Environmental technology, 2020, 38(2): 25-29, 45.
- [12] 骆晨, Sergiu P. Albu, 孙志华, 等. 硼酸-硫酸阳极氧化 2A97Al-Cu-Li 合金在热带海洋大气环境中的初期腐蚀机理[J]. 材料工程, 2016, 44(9): 8-15.
- LUO Chen, ALBU S, SUN Zhi-hua, et al. Mechanism of early stage corrosion for boric-sulfuric acid anodized 2A97Al-Cu-Li alloy under tropical marine atmosphere[J]. Journal of materials engineering, 2016, 44(9): 8-15.
- [13] 吴护林, 张伦武, 苏艳, 等. 轻质材料环境适应性数据手册--铝合金钛合金及防护工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- WU Hu-lin, ZHANG Lun-wu, SU-yan, et al. Environmental worthiness data handbook of light materials: Aluminium alloys, titanium alloys and protection technologies[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2020.
- [14] 李慧艳, 方月华, 肖葵, 等. 7A04 和 2A12 铝合金在吐鲁番干热大气环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(11): 1098-1101.
- LI Hui-yan, FANG Yue-hua, XIAO Kui, et al. Corrosion behavior of 7A04 and 2A12 aluminum alloys in hot and dry atmosphere environment in Turpan[J]. Corrosion & protection, 2014, 35(11): 1098-1101.
- [15] 郑弃非, 孙霜青, 温军国. 铝及铝合金在我国的大气腐蚀及其影响因素分析[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(6): 359-363.
- ZHENG Qi-fei, SUN Shuang-qing, WEN Jun-guo. Atmospheric corrosion and its influencing factors of aluminum and aluminum alloys[J]. Corrosion & protection, 2009, 30(6): 359-363.
- [16] 李涛, 吴立凡, 李相前, 等. Cl^- 浓度对 2A12 铝合金电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(4): 256-260.
- LI Tao, WU Li-fan, LI Xiang-qian, et al. Effect of Cl^- concentration on the electrochemical behaviors of 2A12 aluminum alloy[J]. Corrosion & protection, 2011, 32(4): 256-260.
- [17] 卞贵学, 张好君, 王安东, 等. 飞机用铝合金-CFRP 搭接结构的电偶腐蚀预测研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 58-65.
- BIAN Gui-xue, ZHANG Hao-jun, WANG An-dong, et al. Prediction of galvanic corrosion of aluminium alloy-CFRP lapped structure in aircraft[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(5): 58-65.
- [18] 周和荣, 李晓刚, 董超芳, 等. 7A04 铝合金在薄液膜下腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(8): 880-887.
- ZHOU He-rong, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, et al. Corrosion of aluminum alloy 7A04 under thin electrolyte

- layers[J]. Journal of university of science and technology Beijing, 2008, 30(8): 880-887.
- [19] 王光雍, 王海红, 李兴濂, 等. 自然环境的腐蚀与防护: 大气·海水·土壤[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- WANG Guang-yong. Corrosion and protection in natural environment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1997: 18-20.
- [20] STRATMANN M, STRECKEL H. On the atmospheric corrosion of metals which are covered with thin electrolyte layers—II. Experimental results[J]. Corrosion science, 1990, 30(6-7): 697-714.
- [21] ELOLA A S, OTERO T F, PORRO A. Evolution of the pitting of aluminum exposed to the atmosphere[J]. Corrosion, 1992, 48(10): 854-863.
- [22] DE LA FUENTE D, OTERO-HUERTA E, MORCILLO M. Studies of long-term weathering of aluminium in the atmosphere[J]. Corrosion science, 2007, 49(7): 3134-3148.
- [23] 高蒙, 孙志华, 刘明, 等. 固体颗粒沉积对 7B04 铝合金初期大气腐蚀行为的影响[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 160-165.
- GAO Meng, SUN Zhi-hua, LIU Ming, et al. The influence of deposition of solid particles on the initial atmospheric corrosion of 7B04 aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(5): 160-165.
- [24] 骆晨, 王强, 孙志华, 等. 热带海洋大气环境中 2A97 铝锂合金的初期腐蚀机理[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(2): 49-54.
- LUO Chen, WANG Qiang, SUN Zhi-hua, et al. Corrosion mechanism of 2A97 Al-Li alloy in early stage under tropical marine atmosphere[J]. Corrosion & protection, 2015, 36(2): 49-54.