

环境试验与观测

# 四种典型大气环境下 7B50 铝合金 的腐蚀行为研究

钟勇<sup>1</sup>, 苏艳<sup>1</sup>, 罗来正<sup>1</sup>, 吴洋<sup>1,2</sup>, 杨华明<sup>1,3</sup>, 陈喜栋<sup>1,4</sup>, 赵全成<sup>1,5</sup>,  
吴帅<sup>1</sup>, 朱玉琴<sup>1</sup>, 舒畅<sup>1</sup>, 滕俊鹏<sup>1</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.黑龙江漠河大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 黑龙江 漠河 165300; 3.西藏拉萨大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 拉萨 850100;  
4.海南大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 海南 万宁 571522;  
5.甘肃敦煌大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:** **目的** 研究湿热海洋、干热沙漠、寒冷乡村、暖温高原四种典型大气环境对 7B50 铝合金腐蚀行为的影响。**方法** 采用户外大气自然环境暴露试验, 通过宏观腐蚀形貌分析、金相显微形貌分析、腐蚀深度分析和拉伸性能分析, 对比研究 7B50-T7751 和 7B50-T77511 两种铝合金在不同大气环境中的腐蚀行为和规律。**结果** 暴露试验周期为 3 a 时, 7B50-T7751 铝合金在湿热海洋大气环境中腐蚀严重, 局部最大腐蚀深度为 166  $\mu\text{m}$ , 抗拉强度和断后伸长率分别下降了 5% 和 25%; 在干热沙漠大气环境下腐蚀较重, 局部最大腐蚀深度为 44  $\mu\text{m}$ ; 在寒冷乡村、暖温高原大气环境下未见明显腐蚀。7B50-T77511 铝合金在四种典型大气环境下均表现出明显腐蚀, 局部最大腐蚀深度分别为 141、80、42、29  $\mu\text{m}$ 。**结论** 两种 7B50 铝合金在典型大气环境中表现出不同的耐蚀性, 在微观上均表现为点蚀和晶间腐蚀的混合腐蚀, 具有明显的晶间腐蚀和剥蚀倾向。两种铝合金暴露在相同大气环境中时, 7B50-T7751 板材耐蚀性较 7B50-T77511 型材略好。

**关键词:** 7B50 铝合金; 7B50-T7751; 7B50-T77511; 大气环境; 暴露试验; 腐蚀行为

**中图分类号:** TG172      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9242(2021)11-0143-08

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.020

收稿日期: 2021-03-11; 修订日期: 2021-05-14

Received: 2021-03-11; Revised: 2021-05-14

基金项目: 科技委创新特区项目 (19-Hxxx-ZT-033-03-008-01); 技术基础项目 (HDH59020201)

Fund: Supported by the Innovation Zone Project of Science and Technology Commission (19-Hxxx-ZT-033-03-008-01) and Technology Foundation Project (HDH59020201)

作者简介: 钟勇 (1990—), 男, 工程师, 主要研究方向为装备环境工程。

Biography: ZHONG Yong (1990—), Male, Engineer, Research focus: equipment environmental engineering.

引文格式: 钟勇, 苏艳, 罗来正, 等. 四种典型大气环境下 7B50 铝合金的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 143-150.

ZHONG Yong, SU Yan, LUO Lai-zheng, et al. Corrosion behavior of 7B50 aluminum alloy in four typical atmospheric environments[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 143-150.

## Corrosion Behavior of 7B50 Aluminum Alloy in Four Typical Atmospheric Environments

ZHONG Yong<sup>1</sup>, SU Yan<sup>1</sup>, LUO Lai-zheng<sup>1</sup>, WU Yang<sup>1,2</sup>, YANG Hua-ming<sup>1,3</sup>, CHEN Xi-dong<sup>1,4</sup>,  
ZHAO Quan-cheng<sup>1,5</sup>, WU Shuai<sup>1</sup>, ZHU Yu-qin<sup>1</sup>, SHU Chang<sup>1</sup>, TENG Jun-peng<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Material Corrosion in Mohe, Mohe 165300, China; 3. National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Material Corrosion in Lhasa, Lhasa 850100, China; 4. Hainan National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Environment and Material Corrosion, Wanning 571522, China; 5. National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Environment and Material Corrosion in Dunhuang, Dunhuang 736200, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to research the corrosion behavior of 7B50 aluminum alloy in four typical atmospheric environments: damp hot ocean, dry-heat desert, cold countryside and warm plateau. The corrosion behaviors and rules of 7B50-T7751 and 7B50-T77511 aluminum alloys in different atmospheric environments were investigated and compared by test the macroscopic corrosion morphology, the metallographic microscope, the corrosion depth and the tensile strength of the material. After exposed for 3 years, the corrosion of 7B50-T7751 aluminum alloy was serious in damp hot ocean atmospheric environment, the local maximum corrosion depth was 166  $\mu\text{m}$ , the tensile strength and elongation after fracture decreased by 5% and 25%, respectively. And the corrosion was second in dry-heat desert atmospheric environment, the local maximum corrosion depth was 44  $\mu\text{m}$ . And no obvious corrosion was found in cold countryside and warm plateau atmosphere environment. However, when exposed to the damp hot ocean, dry-heat desert, cold countryside and warm plateau atmospheric environment, the 7B50-T77511 aluminum alloy showed obvious corrosion. The local maximum corrosion depths were 141, 80, 42 and 29  $\mu\text{m}$ , respectively. The corrosion resistance of 7B50 aluminum alloy in typical atmospheric environment is different, it mainly presents the mixed corrosion of pitting corrosion and intergranular corrosion, and it has obvious tendency of intergranular corrosion and denudation. And the corrosion resistance of 7B50-T7751 plate is slightly better than that of 7B50-T77511 profile when exposed to the same atmospheric environment.

**KEY WORDS:** 7B50 aluminum alloy; 7B50-T7751; 7B50-T77511; atmospheric environment; exposure test; corrosion behavior

7B50 合金属于铝-锌-镁-铜系,是可热处理强化的新型高性能铝合金。7B50 合金是在 7050 合金的基础上提高合金中的铜元素含量及 Zn/Mg 比(锌在 7B50 合金中的质量分数比在 7050 合金中高 0.3%),优化合金元素含量(Ti 在 7B50 合金中的质量分数比在 7050 合金中高 0.04%,另含有质量分数为 0.0002%~0.002%的 Be 以提高氧化膜的致密性,减轻或防止熔炼时镁的烧损)研发出来的,具有较高的综合性能,已在航空航天工程领域得到应用<sup>[1-2]</sup>。与 7050 合金相比,7B50 合金的沿板材厚度方向的抗拉强度提高约 5%,断裂韧度提高约 10%,强度和断裂韧度的综合匹配性更优。该合金与美国的 7150 铝合金相近,主要有 T74、T77 等时效状态。其中,T74 状态为过时效处理,具有良好的抗剥落腐蚀性能;T77 状态为回归时效处理,具有高的抗应力腐蚀开裂性能及抗剥落腐蚀性能。总体来看,7B50 铝合金具有密度低、加工性能优良、力学性能好、耐腐蚀性能好等优点,可

应用于飞机整体框、梁、接头等主承力结构。

目前,针对 7B50 铝合金的研究主要集中在均匀化处理、组织结构、加工制造、本征力学性能等方面,对其腐蚀性能的研究十分有限。刘维等<sup>[3]</sup>研究了再时效对过时效 7B50 合金力学性能和腐蚀性能的影响,指出 7B50 合金在双极过时效和再时效的峰值点具有最高的抗剥落腐蚀性能和最低的应力腐蚀敏感性。Xu Xing-chen 等<sup>[4-6]</sup>分析了超声轧制对 7B50-T7751 铝合金表面完整性及腐蚀疲劳行为的影响,研究了氯化钠溶液中预腐蚀对 7B50-T7751 铝合金力学性能的影响,指出 7B50-T7751 合金中粗大且不连续分布的晶界降低了晶间腐蚀和氢脆敏感性。肖代红等<sup>[7]</sup>研究了微量 Ag 对 7B50 铝合金的组织与腐蚀性能的影响,发现微量 Ag 的添加影响了铸态合金的组织,降低了挤压态合金的再结晶程度,同时也降低了时效态合金的抗剥落腐蚀性能。孙擎擎等<sup>[8-10]</sup>研究了大气污染物、氯离子浓度、温度、外加应力、氨基酸等对 7B50 铝

合金电化学腐蚀性能的影响, 获取了 7B50 铝合金在不同腐蚀介质中的电化学腐蚀行为。上述对 7B50 铝合金腐蚀现象的研究主要集中在实验室水溶液环境中, 对自然环境下的腐蚀性能研究的报道极少, Zhao Qi-yue 等<sup>[11]</sup>开展了工业海洋和北方半乡村大气环境户外暴露试验, 研究了 7B50 铝合金在硫酸阳极氧化处理后的腐蚀行为和腐蚀机理。

对回归再时效处理后的 7B50-T7751 和 7B50-T77511 两种铝合金试样在湿热海洋、干热沙漠、寒冷乡村、暖温高原四种典型大气环境下的腐蚀行为进行对比研究, 探讨了 7B50 铝合金在不同大气环境中的耐蚀性差异, 剖析了 7B50 铝合金的腐蚀特征及规律, 为该类合金的推广应用和超高强铝合金及其防护

工艺的研发改进提供了基础数据支撑。

## 1 试验

### 1.1 试样

原材料为 7B50-T7751 轧制板材和 7B50-T77511 挤压型材, 由西南铝业(集团)有限责任公司生产, 其化学成分见表 1。7B50 铝合金 T7751 状态和 T77511 状态的区别主要在于, 前者适用于加工成按规定量进行拉伸的板材、轧制或精整的棒材及模锻件、锻环、轧制环(拉伸后不再进行矫直), 后者适用于加工成按规定量进行拉伸的挤压棒材、型材、管材、拉制管材(拉伸后可略微矫直)。

表 1 7B50 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of 7B50 aluminum alloy

											$\omega\%$
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Be	Ti	Zr	Al	
0.12	0.15	1.8~2.6	0.10	2.0~2.8	0.04	6.0~7.0	0.000~0.002	0.10	0.08~0.16	Bal.	

试验前, 采用机械加工方式将 7B50-T7751 轧制板材和 7B50-T77511 挤压型材各自分别加工成平板试样和棒状拉伸试样两种类型。平板试样尺寸为 100 mm×50 mm×(2.7~3.0) mm, 用于宏观腐蚀形貌分析、金相显微形貌分析和腐蚀深度分析。棒状拉伸试样按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》的有关规定制备(平行段直径  $d=5.0$  mm), 用于抗拉强度  $R_m$  和断后伸长率  $A$  的测试。

### 1.2 试验方法

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》和 GJB 8893—2017《军用装备自然环境试验方法》的相关规定, 采用户外大气自然环境暴露试验方法, 在湿热海洋大气环境的海南试验站、干热沙漠大气环境的甘肃敦煌试验站、寒冷乡村大气环境的黑龙江漠河试验站、暖温高原大气环境的西藏拉萨试验站开展户外大气自然环境暴露试验。试样受试面朝南, 与水平面呈 45°角安装于试样架上, 直接经受户外大气环境的综合作用, 对比研究两种 7B50 铝合金试样在不同大气环境中的腐蚀特征和性能演变规律。

### 1.3 试样检测与分析

1) 宏观腐蚀形貌分析。试验过程中持续目视观察试样的宏观腐蚀形貌, 在四种试验环境中, 每种铝合金分别固定 3 件平行样, 用于宏观腐蚀形貌观测。

2) 金相显微分析和腐蚀深度分析。按照 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》的相关规定, 采用 Observe.A1m 型金相显微镜对试验前后试样的

金相显微组织和腐蚀深度进行观察, 在试验周期为 0、0.5、1、2、3 a 时取样检测, 每次取 1 件试样, 在试样腐蚀明显处检测 2~6 个点。在四种环境的不同周期中, 每种铝合金分别固定 1 件平行样, 用于金相显微分析和腐蚀深度分析。

3) 拉伸性能。按照 GB/T 228.1—2010 的相关规定, 采用 MTS 880 电液伺服材料试验机, 测试试验前后试样的抗拉强度  $R_m$  和断后伸长率  $A$ , 在试验周期为 0、0.5、1、2、3 a 时取样检测, 每次检测 5 件平行样。

## 2 结果与讨论

### 2.1 7B50 铝合金微观组织结构

图 1 是 7B50-T7751 和 7B50-T77511 铝合金的典型显微组织。7B50-T7751 和 7B50-T77511 铝合金的金相显微组织均表现为  $\alpha$ -Al 基体+强化相, 晶粒沿压延方向拉长。然而, 两种铝合金的强化相尺寸、分布和形状明显不同, 前者组织存在混晶现象, 晶粒较细, 强化相分布相对均匀, 局部呈带状; 后者晶粒较粗, 强化相沿晶界析出呈细小粒状。两种铝合金的微观组织结构与其宏观腐蚀性能密切相关, 特别是由于晶界处强化相的电化学活性与基体存在一定差异, 可能导致 7B50-T77511 铝合金更易发生晶间腐蚀、剥蚀等局部腐蚀现象<sup>[12,13]</sup>。

### 2.2 7B50 铝合金腐蚀特征分析

7B50-T7751 和 7B50-T77511 两种铝合金试样暴露在四种典型大气环境下 0.5~3 a 的宏观腐蚀形貌如图 2、图 3 所示, 主要环境参数见表 2。

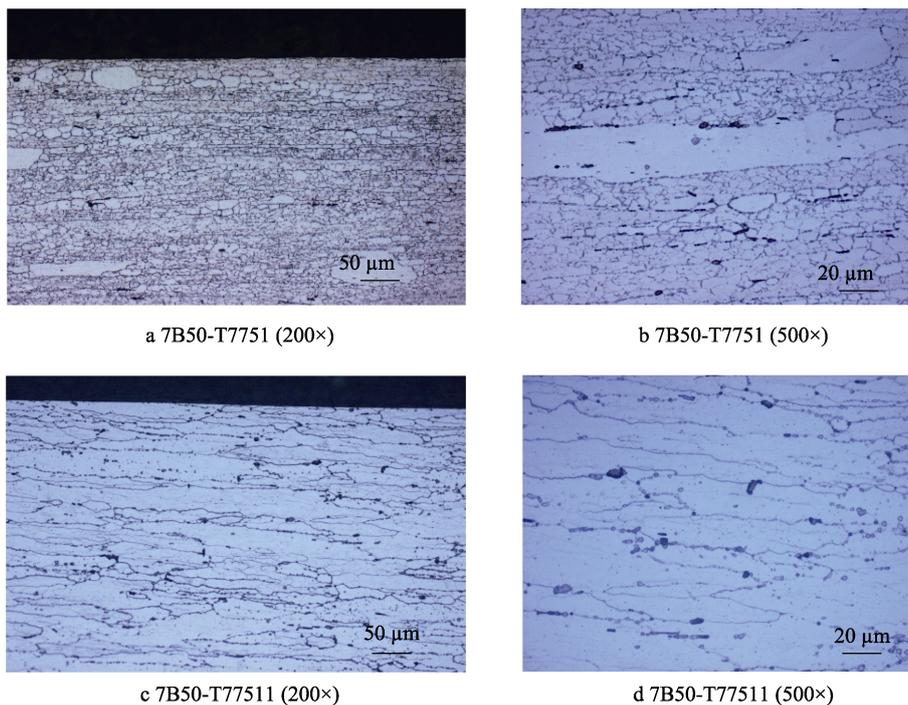


图1 7B50-T7751 和 7B50-T77511 铝合金典型显微组织  
Fig.1 Microstructures of 7B50-T7751 and 7B50-T77511 alloys



图2 7B50-T7751 铝合金在典型大气环境中的宏观腐蚀形貌  
Fig.2 Macrocorrosion morphology of 7B50-T7751 aluminum alloy in typical atmospheric environment



图3 7B50-T77511 铝合金在典型大气环境中的宏观腐蚀形貌  
Fig.3 Macrocorrosion morphology of 7B50-T77511 aluminum alloy in typical atmospheric environment

表2 四个试验站的主要环境参数

Tab.2 Main environmental parameters of four test sites

试验站名称	环境类型	年平均温度/℃	年平均相对湿度/%	年平均氯离子沉积量/ ( $\text{mg} \cdot (100 \text{ cm}^2)^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )
海南	湿热海洋大气环境	24.6	86	0.35
敦煌	干热沙漠大气环境	10.8	41	0.06
漠河	寒冷乡村大气环境	-1.8	66	—
拉萨	暖温高原大气环境	4.5	55	0.006

备注：漠河站大气中  $\text{Cl}^-$  含量极低，不检测该项参数。

定期目视检查发现，7B50-T7751 板材暴露于湿热海洋大气环境中表现为中度点蚀(试样表面 50%以上面积出现明显腐蚀，腐蚀点连成片状趋势明显)、伴随着灰白色腐蚀产物(见图 2a); 在干热沙漠环境中表现为大量密集黑色腐蚀斑(见图 2b); 在寒冷乡村和暖温高温环境中暴露 3 年腐蚀不明显(故图 2 中没有放置 7B50-T7751 铝合金在漠河站和拉萨站的宏观腐蚀形貌照片)。然而，7B50-T77511 型材暴露于湿热海洋大气环境中则表现为重度点蚀(腐蚀遍布试样表面，目视腐蚀向纵深发展趋势明显)，伴随着灰白色腐蚀产物(见图 3a); 在干热沙漠环境中与 7B50-T7751 相同，表现为大量密集黑色腐蚀斑(见图 3b); 在寒冷乡村和暖温高温环境中暴露 3 a，只出现轻微点蚀和少量腐蚀黑斑(因宏观照片在较小尺寸下难以显现局部腐蚀细节，故图 3 中没有放置 7B50-T77511 铝合金在漠河站和拉萨站的宏观腐蚀形貌照片)。宏观腐蚀形貌对比表明，7B50 铝合金在湿热海洋大气环境的海南站腐蚀最为严重，敦煌站次之，在寒冷乡村和暖温高温环境中较为轻微。7B50-T7751 板材和 7B50-T77511 型材在相同典型大气环境中的耐蚀性也表现出一定差异，前者耐蚀性相对略好。

由表 2 环境参数数据得知，海南站具有典型的“高温、高湿、高盐”环境特征，对 7B50 铝合金具有较大的腐蚀危害。由于相对湿度高、氯离子含量高，铝合金表面易形成电解液膜，导致点蚀发生，加之氯离子对铝合金氧化膜和腐蚀产物的穿透、吸附作用<sup>[14-16]</sup>，铝合金表面生成的腐蚀产物膜较为疏松，对基体的保护作用较弱，随暴露时间的延长，腐蚀

逐渐由点成面，不断向纵深发展。敦煌站虽然年均相对湿度特别低(仅为 41%)，但大气中年均氯离子沉积量比漠河站和拉萨站要高出不少(这与敦煌站所处的盐碱地环境有关)，氯离子的存在促进了敦煌站 7B50 铝合金表面点蚀的发生，导致其腐蚀程度明显比漠河站和拉萨站严重。但由于铝合金表面难以形成有效的连续薄液膜，所以从宏观形貌上看，7B50 铝合金在敦煌站的腐蚀速率比海南站慢。漠河站和拉萨站大气较为洁净，年均温度和相对湿度均不高，大气腐蚀性相对较弱，对 7B50 铝合金的腐蚀影响较为轻微。

图 4 和图 5 给出了 7B50-T7751 板材和 7B50-T77511 型材在四种典型大气环境下暴露 0.5~3 a 的金相显微形貌，其局部最大腐蚀深度如图 6 所示。由图 4—图 6 得知，当 7B50-T7751 板材暴露在湿热海洋大气环境时，试样微观形貌可见典型的点蚀和晶间腐蚀特征(见图 4a)，暴露 3 a 后局部最大腐蚀深度为 166  $\mu\text{m}$ (见图 6a); 在干热沙漠环境中，其微观形貌局部可见点蚀和晶间腐蚀特征(见图 4b)，暴露 3 a 后局部最大腐蚀深度为 44  $\mu\text{m}$ (见图 6a); 在寒冷乡村和暖温高原环境中，试样暴露 3 a 后未检出有腐蚀情况发生(故没有金相显微形貌照片)。7B50-T77511 型材暴露于四种大气环境中的微观形貌均可见点蚀、晶间腐蚀特征(见图 5a—5d，寒冷乡村和暖温高原环境中仅局部可见)，暴露 3 a 后四个站的局部最大腐蚀深度分别为 141、80、42、29  $\mu\text{m}$ (见图 6b)。另外，海南站和敦煌站试样的微观形貌同时表现出明显的剥蚀特征(见图 5a、5b)。7B50 铝合金金相显微形

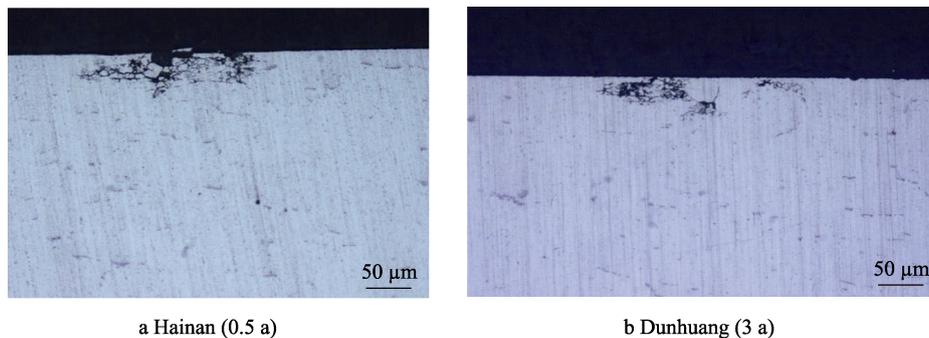


图 4 7B50-T7751 铝合金在典型大气环境中的金相显微形貌

Fig.4 Metallographic micrograph of 7B50-T7751 aluminum alloy in typical atmospheric environment

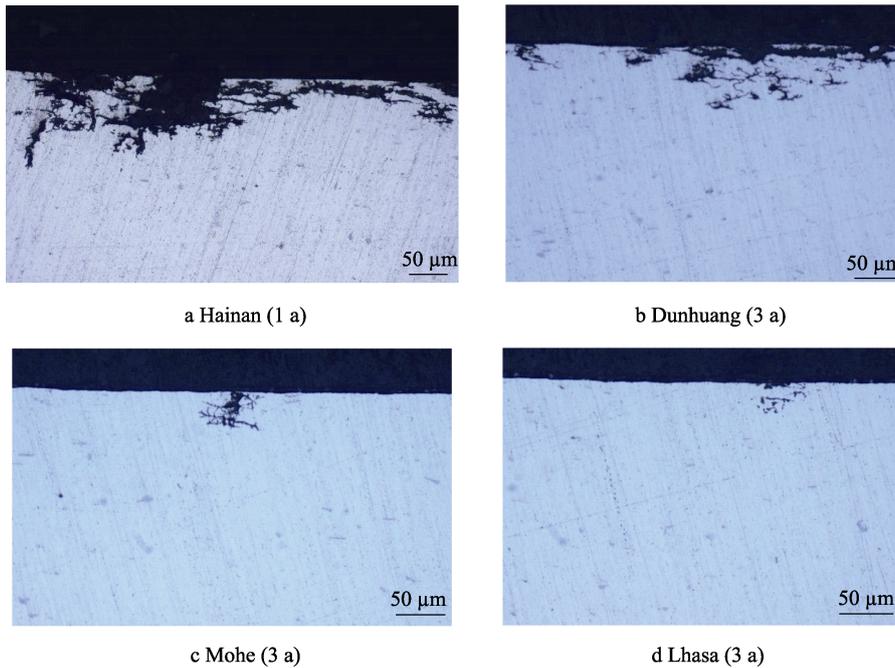


图5 7B50-T77511 铝合金在典型大气环境中的金相显微形貌  
Fig.5 Metallographic micrograph of 7B50-T77511 aluminum alloy in typical atmospheric environment

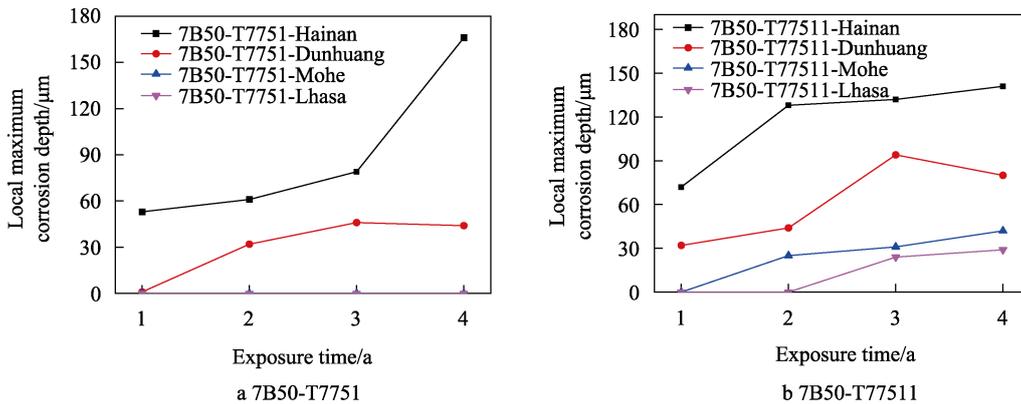


图6 7B50-T7751 和 7B50-T77511 铝合金在典型大气环境中的局部最大腐蚀深度

Fig.6 Histogram of local maximum corrosion depth of 7B50-T7751 and 7B50-T77511 aluminum alloy in typical atmospheric environment

貌和局部最大腐蚀深度的变化印证了其宏观腐蚀形貌结果，也表明两种 7B50 铝合金在典型大气环境中的腐蚀特征基本一致，均主要表现为点蚀和晶间腐蚀的混合腐蚀，且随着暴露时间的延长，沿晶网状裂纹向基体内部不断延伸，发生晶间腐蚀甚至剥蚀的倾向愈发明显<sup>[17-18]</sup>。

### 2.3 腐蚀对 7B50 铝合金力学性能的影响

7B50-T7751 和 7B50-T77511 两种铝合金在四种典型大气环境中暴露试验后的拉伸性能变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知，7B50-T7751 铝合金在四种典型大气环境中暴露 3 a 试验周期，仅湿热海洋大气环境下的抗拉强度下降了 5%，其余三种环境中的抗拉强度无明显变化；断后伸长率方面，暖温高原环境

下变化较小，其余三种环境下下降较多，湿热海洋、干热沙漠和寒冷乡村大气环境下分别下降了 25%、17%、12%。7B50-T77511 铝合金在四种典型大气环境中暴露 3 a 试验周期，其抗拉强度和断后伸长率均表现出一定程度的先升后降（这一现象的产生原因还有待进一步分析），断后伸长率的变化更为明显。与 0.5 a 试验周期相比，在四种大气环境下暴露 3 a 后的断后伸长率分别下降了 33%、15%、9%、21%，抗拉强度方面则仅湿热海洋大气环境下有小幅下降（与 0.5 a 相比下降了约 4%）。7B50 铝合金力学性能的对比表明，环境腐蚀作用对 7B50 铝合金断后伸长率的影响比对抗拉强度的影响更为明显，这可能是由于材料表面形成的大量点蚀坑在承受应力时容易产生应力集中，降低了材料的韧性<sup>[19-20]</sup>。

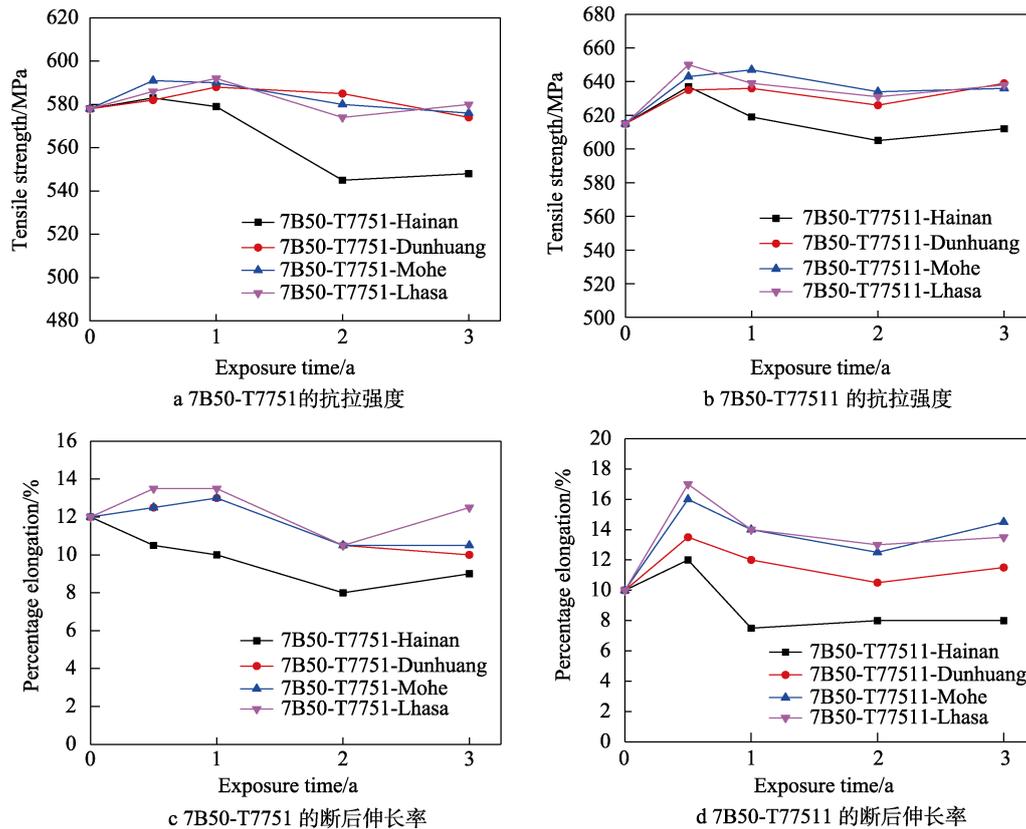


图 7 7B50-T7751 和 7B50-T77511 铝合金在典型大气环境中的拉伸性能变化曲线

Fig.7 Changing curve of tensile property of 7B50-T7751 and 7B50-T77511 aluminum alloy in typical atmospheric environment: a) tensile strength of 7B50-T7751; b) tensile strength of 7B50-T77511; c) elongation after fracture of 7B50-T7751; d) elongation after fracture of 7B50-T77511

### 3 结论

1) 7B50 铝合金在湿热海洋大气环境中腐蚀最为严重, 干热沙漠环境次之, 在寒冷乡村和暖温高温环境中腐蚀较为轻微。7B50-T7751 板材和 7B50-T77511 型材暴露在相同大气环境中时, 前者的耐蚀性相对略好。

2) 7B50 铝合金在四种典型大气环境中均主要表现为点蚀和晶间腐蚀的混合腐蚀, 具有明显晶间腐蚀和剥蚀倾向性。

3) 暴露试验周期为 3 a 时, 7B50-T7751 铝合金在湿热海洋大气环境和干热沙漠大气环境中的局部最大腐蚀深度分别为 166  $\mu\text{m}$  和 44  $\mu\text{m}$ ; 7B50-T77511 铝合金在四种典型大气环境中的局部最大腐蚀深度分别为 141、80、42、29  $\mu\text{m}$ 。

4) 暴露试验周期为 3 a 时, 7B50-T7751 铝合金的抗拉强度在湿热海洋大气环境中下降了 5%, 在其余三种环境中无明显变化; 断后伸长率在湿热海洋、干热沙漠和寒冷乡村大气环境下分别下降了 25%、17%、12%。7B50-T77511 铝合金的抗拉强度和断后伸长率均表现出一定程度的先升后降, 与 0.5 a 试验周期相比, 断后伸长率分别下降了 33%、15%、9%、21%, 在湿热海洋大气环境下的抗拉强度下降了约 4%。

### 参考文献:

- [1] 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: 152-159.  
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: National Defense Industry Press, 2020: 152-159.
- [2] 徐星辰, 刘道新, 奥妮, 等. 7B50-T7751 铝合金在模拟海洋环境中的力学性能退化行为[C]//2017 第四届海洋材料与腐蚀防护大会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2017: 2-12.  
XU Xing-chen, LIU Dao-xin, AO Ni, et al. Mechanical property degradation behavior of 7B50-T7751 aluminum alloy in simulated marine environment[C]//Proceedings of 2017 4th marine materials corrosion and protection conference. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017: 2-12.
- [3] 刘维, 陈康华, 陈送义, 等. 再时效对过时效 7B50 合金力学及腐蚀性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2600-2607.  
LIU Wei, CHEN Kang-hua, CHEN Song-yi, et al. Effect of re-aging on mechanical and corrosion properties of over-aging 7B50 alloy[J]. Journal of Central South University(science and technology), 2016, 47(8): 2600-2607.

- [4] XU Xing-chen, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Mechanical and corrosion fatigue behaviors of gradient structured 7B50-T7751 aluminum alloy processed via ultrasonic surface rolling[J]. *Journal of materials science & technology*, 2020, 40: 88-98.
- [5] XU Xing-chen, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Influence of ultrasonic rolling on surface integrity and corrosion fatigue behavior of 7B50-T7751 aluminum alloy[J]. *International journal of fatigue*, 2019, 125: 237-248.
- [6] XU Xing-chen, LIU Dao-xin, AO Ni, et al. Effects of pre-corrosion on mechanical properties of 7B50-T7751 aluminum alloy in sodium chloride solution[J]. *Materials and corrosion*, 2018, 69(7): 870-880.
- [7] 肖代红, 吴先哲, 朱哲民, 等. 微量 Ag 对 7B50 铝合金的组织与腐蚀性能影响[C]//Lw2013 第五届铝型材技术(国际)论坛论文集. 北京: 中国有色金属学会, 2013: 175-179.  
XIAO Dai-hong, WU Xian-zhe, ZHU Zhe-min, et al. Effect of minor Ag on microstructure and properties of 7B50 aluminum alloys[C]//Proceedings of Lw2013 5<sup>th</sup> aluminum profile technology(international) forum. Beijing: The Nonferrous Metals Society of China, 2013: 175-179.
- [8] 孙擎擎, 陈启元, 陈康华. 氯离子浓度、温度和外加应力对 7B50 铝合金电化学腐蚀性能的影响[C]//2014 海洋材料腐蚀与防护大会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2014: 331-336.  
SUN Qing-qing, CHEN Qi-yuan, CHEN Kang-hua. The effect of concentration of chloride ion, temperature and applied stress on the electrochemical corrosion behaviour of 7B50 Al alloy[C]//Proceedings of 2014 marine materials corrosion and protection conference. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014: 331-336.
- [9] 孙擎擎, 孙睿吉, 陈送义, 等. 大气污染物对 7B50 铝合金电化学腐蚀性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 575-581.  
SUN Qing-qing, SUN Rui-ji, CHEN Song-yi, et al. Effect of atmospheric pollutants on electrochemical corrosion behaviour of 7B50 aluminium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 575-581.
- [10] 杨标标, 孙擎擎, 孙睿吉, 等. 氨基酸对 7B50 铝合金在 1 mol/L NaCl+0.1 mol/L HCl 溶液中缓蚀性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(11): 2990-2999.  
YANG Biao-biao, SUN Qing-qing, SUN Rui-ji, et al. Effect of inhibition properties of several amino acids on corrosion property of 7B50 aluminium alloy in 1 mol/L NaCl+0.1 mol/L HCl[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(11): 2990-2999.
- [11] ZHAO Qi-yue. Corrosion behavior of anodized 7B50 aluminum alloy in different atmospheric environments[J]. *International journal of electrochemical science*, 2019: 8228-8242.
- [12] ZHANG Xin-ming, YE Ling-ying, LIU Ying-wei, et al. Formation mechanism of gradient-distributed particles and their effects on grain structure in 01420 Al-Li alloy[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(2): 147-152.
- [13] 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 aluminium alloy in marine and rural atmosphere environments[J]. *Surface technology*, 2019, 48(1): 262-267.
- [14] 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 environmental engineering*, 2006, 3(1): 1-9.
- [15] 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.
- [16] 王玲, 赵全成, 杨万均. 海洋大气环境对铝合金电连接器壳体腐蚀及电气性能影响[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(5): 85-89.  
WANG Ling, ZHAO Quan-cheng, YANG Wan-jun. Effects of marine atmospheric environment on corrosion and electrical performance of aluminum alloy electrical connector shell[J]. *Equipment environmental engineering*, 2019, 16(5): 85-89.
- [17] 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.
- [18] 苏艳, 肖勇, 苏虹, 等. 7B04-T6 铝合金微观组织及其对腐蚀行为的影响[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2012, 24(6): 458-462.  
SU Yan, XIAO Yong, SU Hong, et al. Effect of microstructure on corrosion behavior of 7B04-T6 aluminum alloy[J]. *Corrosion science and protection technology*, 2012, 24(6): 458-462.
- [19] 苏艳, 张伦武, 钟勇. 5A90 铝锂合金显微组织及海洋大气环境腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(3): 260-266.  
SU Yan, ZHANG Lun-wu, ZHONG Yong. Marine atmospheric corrosion behavior of 5A90 Al-Li alloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(3): 260-266.
- [20] 冯朝辉, 陆政, 苏海, 等. 5A90 铝锂合金显微组织及力学性能的研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(12): 52-56.  
FENG Zhao-hui, LU Zheng, SU Hai, et al. Study of the microstructure and tensile properties of 5A90 aluminum lithium alloy[J]. *Journal of Hunan University (natural science edition)*, 2011, 38(12): 52-56.