

航空航天装备

# 高强铝合金在极寒环境下的腐蚀行为 与室内外相关性研究

崔腾飞<sup>1</sup>, 成洁楠<sup>2</sup>, 宋健<sup>1</sup>, 崔中雨<sup>3\*</sup>

(1.中国直升机设计研究所标准材料部, 江西景德镇 333000; 2.天津渤海化工集团有限责任公司, 天津 300040; 3.中国海洋大学材料科学与工程学院, 山东青岛 266100)

**摘要:** **目的** 实现直升机极寒环境适应性的快速验证, 解决极寒环境考核困难的问题。**方法** 建立符合极寒环境的铝合金加速试验环境谱, 通过腐蚀质量损失、扫描电镜、激光共聚焦等测试方法, 对加速试验和室外暴露试验后的高强铝合金腐蚀行为进行对比和分析。**结果** 2024、7075 铝合金在极寒大气环境下的腐蚀速率分别为 14.52、10.75 g/(m<sup>2</sup>·a), 腐蚀产物均由 AlOOH 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成。**结论** 表面润湿时间和盐粒子的沉积是导致铝合金腐蚀的主要因素, 同时冻融循环现象加速了腐蚀过程。

**关键词:** 铝合金; 极寒环境; 加速腐蚀; 大气腐蚀; 室内外相关性; 腐蚀机理

中图分类号: TG172.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0061-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.006

## Accelerated Corrosion Behavior of High Strength Aluminum Alloy in Simulated Polar Atmosphere

CUI Tengfei<sup>1</sup>, CHENG Jienan<sup>2</sup>, SONG Jian<sup>1</sup>, CUI Zhongyu<sup>3\*</sup>

(1. Standard Materials Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jiangxi Jingdezhen 333000, China; 2. Tianjin Bohai Chemical Industry Group Co., Ltd., Tianjin 300040, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to achieve rapid verification of the adaptability of helicopters to polar atmosphere and solve the problem of difficult assessment in polar atmosphere. The accelerated test environment spectrum of aluminum alloy was established according to the polar atmosphere, and the corrosion behavior of high strength aluminum alloy after accelerated test and outdoor exposure test was compared and analyzed by means of corrosion loss, scanning electron microscope and laser confocal microscope test. The corrosion rates of 2024 and 7075 aluminum alloys in polar atmosphere were 14.52 g/(m<sup>2</sup>·a) and 10.75 g/(m<sup>2</sup>·a), respectively, and the corrosion products were composed of AlOOH and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Surface wetting time and deposition of salt particles are the main factors leading to corrosion of aluminum alloy, and the freeze-thaw cycle phenomenon accelerates the corrosion process.

**KEY WORDS:** aluminium alloy; polar atmosphere; accelerated corrosion; atmospheric corrosion; indoor and outdoor correlation; corrosion mechanism

收稿日期: 2024-08-28; 修订日期: 2024-10-01

Received: 2024-08-28; Revised: 2024-10-01

引文格式: 崔腾飞, 成洁楠, 宋健, 等. 高强铝合金在极寒环境下的腐蚀行为与室内外相关性研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 61-68.  
CUI Tengfei, CHENG Jienan, SONG Jian, et al. Accelerated Corrosion Behavior of High Strength Aluminum Alloy in Simulated Polar Atmosphere and Its Indoor and Outdoor Correlation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 61-68.

\*通信作者 (Corresponding author)

随着直升机使用范围越来越广泛,直升机在各种环境下的适应性能力,尤其是极端环境下的使用性能,是保障任务完成的关键。然而极寒独特的环境不仅使得装备材料的更换与维修困难,其引起的材料腐蚀、断裂形式与机理的改变可能导致装备的过早失效,从而引发灾难性事故<sup>[1]</sup>。铝合金因其优异的综合性能被广泛应用于航空领域,这主要归因于铝合金具有一系列理想的物理和机械特性,包括高强度、轻质、良好的耐腐蚀性和优异的加工性能,这些特性使得铝合金成为直升机一些关键部件制造的理想材料<sup>[2-3]</sup>。然而对于铝合金在极寒环境下的腐蚀行为国内外相关研究较少,这增加了对其在极寒实际应用中的不确定性<sup>[4]</sup>。Morcillo 等<sup>[5]</sup>研究表明,在寒冷的冰层下会存在一层浓盐层,在这层薄液膜下,电化学腐蚀依然存在。Rosales 等<sup>[6]</sup>在 Jubany 试验站的大气暴露实验中得出结论,金属在极寒仍然发生腐蚀,并且冰层下的试样表面会形成液态水单分子层。崔中雨等<sup>[7]</sup>研究表明,即使在夏季阶段,较低的温度也会使金属表面冰雪存在凝-融过程,导致液膜长时间存在,且加速了局部腐蚀。

在研究铝合金大气环境腐蚀时,通过加速腐蚀实验可以在相对较短的时间内模拟长期暴露环境下的腐蚀过程,是一种快速评价材料性能的有效方式<sup>[8-9]</sup>。国内外陆续建立了针对多个使役环境的铝合金加速试验谱,如涵盖盐雾、湿热、紫外等模块的热带海洋加速腐蚀试验,涵盖应力作用的飞机用构件的加速试

验谱等<sup>[10]</sup>。孙晓光等<sup>[11]</sup>通过循环盐雾加速腐蚀试验研究了 6082 铝合金-碳纤维复合材料的腐蚀行为,结果表明,铝合金腐蚀速率是未连接试样的 13 倍。汪凤琴等<sup>[12]</sup>研究了 7B04 铝合金在南海急速腐蚀试验环境中腐蚀与疲劳性能的内在联系,研究发现铝合金及其螺接件经室内加速腐蚀试验后发生的腐蚀行为出现了明显差异,7B04 铝合金试样表面发生的腐蚀行为以点蚀为主,而螺接件的腐蚀行为更加复杂。但是针对极寒环境,目前还鲜有相关文献报道。

本文通过结合极寒自然环境因子谱并利用腐蚀电流法进行当量折算,编制符合极寒环境的铝合金加速试验环境谱,将加速试验和室外暴露试验后的高强铝合金进行对比和分析,考核加速试验谱的合理性,分析极寒大气环境下高强铝合金的腐蚀机理,为极寒地区铝合金腐蚀评价提供依据。

## 1 试验

### 1.1 选材

为验证环境谱的合理性,室内外试验材料均为 2024、7075 高强铝合金,其化学成分见表 1。室外暴露试验地点为极寒大气试验场,试样尺寸为 100 mm×50 mm×3 mm。室内加速试验为 40 mm×30 mm×2 mm 尺寸试样,每种材料准备 4 块平行试样,其中 3 块用于质量损失测试,1 块用于锈层形貌表征及产物组成测试。

表 1 材料化学成分组成(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of the materials (mass fraction, %)

牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2024	0.50	0.50	3.80~4.90	0.30~0.90	1.20~1.80	0.10	0.25	0.15	Bal.
7075	0.40	0.50	1.20~2.00	0.30	2.10~2.90	0.18~0.28	5.10~6.10	0.20	Bal.

### 1.2 方法

根据极寒自然环境因子谱的研究结果<sup>[13]</sup>,极寒自然环境因子谱的编制依据和试验过程如下:首先统计分析极寒环境大气环境数据,分析统计温度、湿度、降雪等环境条件的强度、频率及时间比例,形成各单项环境要素谱,如温度谱、相对湿度谱、雪谱、温度-相对湿度谱;然后对单项环境要素谱进行归并,形成极地自然环境谱;筛选腐蚀主要环境诱因,通过电化学折算法建立低合金钢环境当量折算系数表,建立加速腐蚀环境谱以实现极寒大气环境的仿真模拟。相关地区 1 a 内不同环境条件作用时间见表 2,大气环境下的腐蚀可分为潮湿空气、冻融循环、低温冰冻 3 个阶段。随后利用电偶型腐蚀电流传感器在电化学工作站的零阻模式下进行电化学测试。阳极为过去铝合金,阴极为钛合金。通过电化学工作站持续监测电化学腐蚀过程中的电流变化。

表 2 不同环境条件作用时间  
Tab.2 Acting time under different environmental conditions

模块	潮湿空气	冻融天次	低温冰冻
作用时间/d	163	30	172
时间比例/%	44.7	8.2	47.1

在试验开始时,选择在盐雾箱内预沉积 30 min 盐粒子,以达到 1 a 内的盐沉积过程。

1) 潮湿空气:温度为-10、0、10 ℃,相对湿度为 50%、70%、90%,腐蚀时间为 1 h,以 10 ℃、5%NaCl 盐雾条件为腐蚀电量折算基准进行当量折算,温度选择 10 ℃是由于南极度夏期间最高温度为 10 ℃。采用电偶电流密度的测试方法,铝合金在不同环境的累积电量随时间的变化结果如图 1 所示,可以看出,腐蚀电量呈线性增长。以盐雾条件下的腐蚀电流为基准可获得当量折算系数,见表 3。

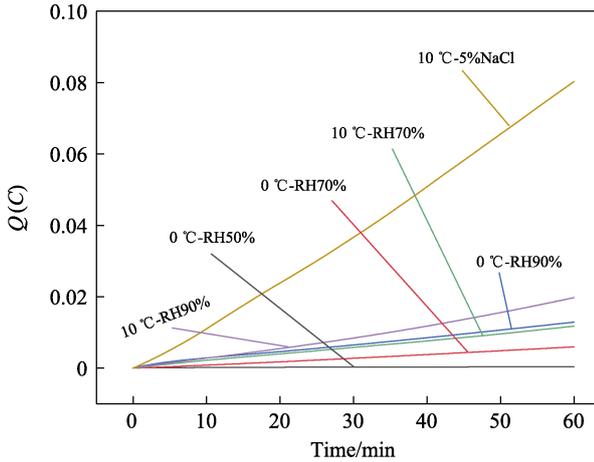


图 1 铝合金在不同环境下电偶腐蚀过程的累积电量随时间变化结果

Fig.1 Variation of accumulated charge with time during galvanic corrosion process of aluminum alloys under different environments

表 3 铝合金温湿度当量折算系数

Tab.3 Equivalent conversion factors of aluminum alloy temperature and humidity

相对湿度/%	温度/°C		5%NaCl, 10 °C
	-10	0	
50	0	0.002 6	—
70	0	0.071 7	0.067 0
90	0	0.150 0	0.289 0

2) 中低温冻融循环: 根据调查冻融主要发生在夏季, 温度为-5~5 °C, 设定 4 h 为 1 个冻融周期, 经 -10 °C 低温冷冻 2 h 后, 升高温度至 10 °C 保温, 直至 1 个冻融周期结束。

3) 低温冰冻: 以-20 °C 为冷冻条件, 根据冷冻时间占 1 a 天气的占比计算所需要的试验时间。

根据表 2 中当量折算系数, 计算 5%NaCl、10 °C 盐雾作用时间为:  $t_{\text{盐雾}}=t_1 \times a_1 + t_2 \times a_2 + \dots \approx 4 \text{ d}$ 。大气冻融次数为 30 次, 计算得冻融循环所需时间  $t_{\text{冻融}}=2 \text{ d}$ 。根据自然环境谱<sup>[13]</sup>, 冰冻环境在实际 1 a 大气环境的占比天数为 47.1%, 计算得低温冰冻所需时间  $t_{\text{冰冻}} \approx 4 \text{ d}$ 。根据所计算出加速试验环境天数形成如图 3 所示的铝合金极寒环境室内加速环境谱, 可用来模拟极寒自然大气环境一年的腐蚀行为。

将室内加速试验 1 周期后的试样和自然环境暴露后的试样放入标准除锈溶液 (50 mL 磷酸加蒸馏水配置成 1 000 mL 溶液), 随后把暴露后试样放置于除锈液中超声加热至 80 °C 除锈 5~10 min。除锈完成后, 计算其质量损失速率及腐蚀速率。

$$c_m = \frac{(w_0 - w_m)}{S} \tag{1}$$

式中:  $w_0$  为腐蚀之前的质量, g;  $w_m$  为除去腐蚀产物之后的质量, g;  $S$  为铝合金试样表面积,  $\text{m}^2$ ;  $c_m$  为铝合金单位面积内的质量损失,  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

因此, 铝合金在自然大气环境下暴露不同周期后的质量损失速率为:

$$v_m = \frac{c_m}{t_m / 365} \tag{4}$$

式中:  $t_m$  为腐蚀时间, d;  $v_m$  为质量损失速率,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。特别说明, 由于加速腐蚀试验 1 周期的腐蚀量等同于在自然大气环境下暴露 1 a 的腐蚀量, 为了增加合理性, 其腐蚀时间为 1 a。

此外, 使用 Canon 6D 相机对铝合金表面形貌进行拍摄分析, 再用钢锯切割成约 10 mm×10 mm×3 mm 的小试样。使用扫描电子显微镜 (ZEISS Gemini SEM 300) 对除锈前后的试样表面微观形貌进行观察, 并采用 EDS 对锈层截面化学组成进行分析。使用 X 射

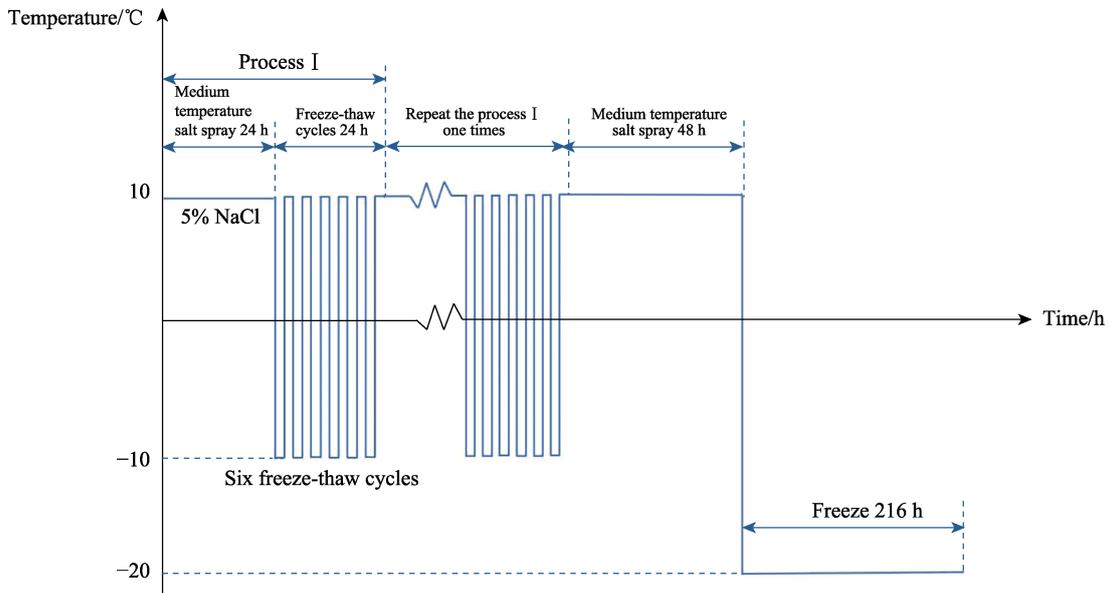


图 2 等效试验站 1 a 加速腐蚀试验环境谱

Fig.2 Environmental spectrum of accelerated corrosion test in equivalent test station 1 a

线衍射分析锈层物相组成。使用激光共聚焦显微镜分析除锈后试样表面三维轮廓。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀速率分析

2024、7075 这 2 种高强铝合金室内加速试验和自然环境暴露试验的腐蚀速率对比如图 3 所示。2024 铝合金加速试验腐蚀后和自然环境暴露后的腐蚀速度分别为 15.98、14.52 g/(m<sup>2</sup>·a)，二者的相关性达到 90.2%；7075 铝合金加速试验腐蚀后和自然环境暴露后的腐蚀速度分别为 11.59、10.75 g/(m<sup>2</sup>·a)，二者的相关性达到 92.2%，说明 2 种铝合金的室内外腐蚀速度都具有高度的相关性。Manuel 等<sup>[5]</sup>研究发现，在极寒地区，铝合金的腐蚀速率比在温带或热带气候对应的其他等效海洋大气中发现的腐蚀速率甚至更高，极寒大气环境中的铝腐蚀因试验地点而异，可能与沉积在金属表面的盐有关。通常以 1 a 后的腐蚀速率作为对材料在该环境下腐蚀性能的代表性评估，有研究发现，2024 铝合金在盐湖环境下暴露 1 a 后的腐蚀速率约为 17.5 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[14]</sup>，7B50 铝合金在青岛和北京暴露 1 a 后的腐蚀速率分别是 26.69、2.97 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[15]</sup>，7A09 铝合金在江津试验场暴露 1 a 后的腐蚀速率为 7.53 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[16]</sup>。大部分情况下，随着腐蚀的进行，由于铝合金表面产生的腐蚀产物在一定程度上起到了保护的作用，进一步减缓了金属溶解和腐蚀反应的发生<sup>[17]</sup>。

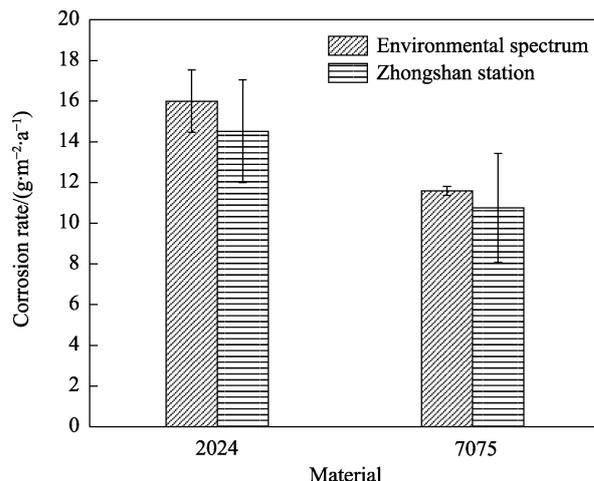
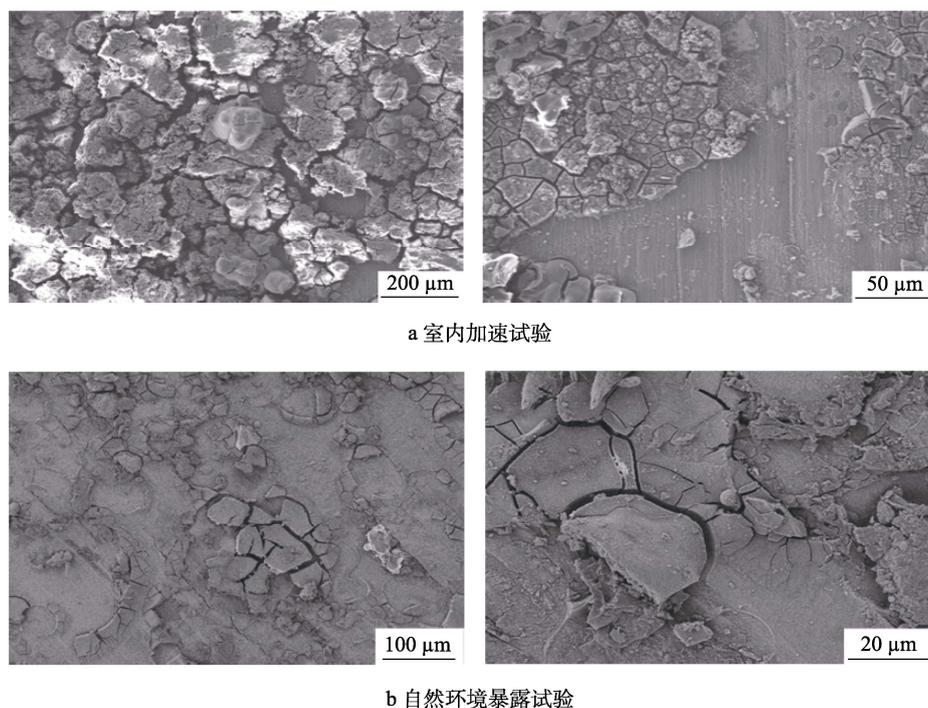


图 3 2024、7075 铝合金室内加速试验 1 周期和自然环境暴露试验 1 a 的腐蚀速率对比  
Fig.3 Corrosion rate of 2024 and 7075 aluminum alloys after indoor accelerated test for 1 cycle and outdoor exposure test for 1 year

### 2.2 腐蚀产物形貌分析

2024 高强铝合金在室内加速试验和自然环境暴露试验后的腐蚀产物表面微观形貌如图 4 所示。2024 铝合金在 2 种不同腐蚀试验后，腐蚀产物表面均有明显的微裂纹现象，腐蚀产物层分布较为松散，腐蚀产物在干湿循环中受到了脱水作用的影响，一些产物由于结构松散、无黏结或受到应力作用而脱落。这种脱水作用和脆弱的产物结构导致腐蚀产物收缩和内应力增加，从而引发微裂纹的形成<sup>[18-19]</sup>。



a 室内加速试验

b 自然环境暴露试验

图 4 2024 铝合金室内加速试验和自然环境暴露试验腐蚀产物微观形貌  
Fig.4 Microstructure of corrosion products of 2024 aluminum alloy after indoor accelerated test and outdoor exposure test:  
a) indoor accelerated test; b) outdoor exposure test

7075 高强铝合金在室内加速试验和自然环境暴露试验后的的腐蚀产物表面微观形貌如图 5 所示。7075 铝合金在室内外 2 种不同腐蚀试验后, 腐蚀产物表面相较于 2024 铝合金覆盖性较好, 但表面依然有裂纹出现。

基于激光共聚焦数据, 对高强铝合金的腐蚀区域深度进行统计, 并整理。2024、7075 高强铝合金室内加速试验和自然环境暴露试验后的局部腐蚀深度

如图 6 所示, 铝合金局部腐蚀深度 (平均值) 是导致其力学性能降低的关键因素。2024 铝合金在室内加速试验和自然环境暴露试验后, 其局部腐蚀平均深度分别为 2.33、2.86  $\mu\text{m}$ , 7075 铝合金在室内加速试验和自然环境暴露试验后的局部腐蚀平均深度分别为 4.4、4.0  $\mu\text{m}$ , 2 种铝合金在室内外的局部腐蚀深度同样保持了高度的相关性。

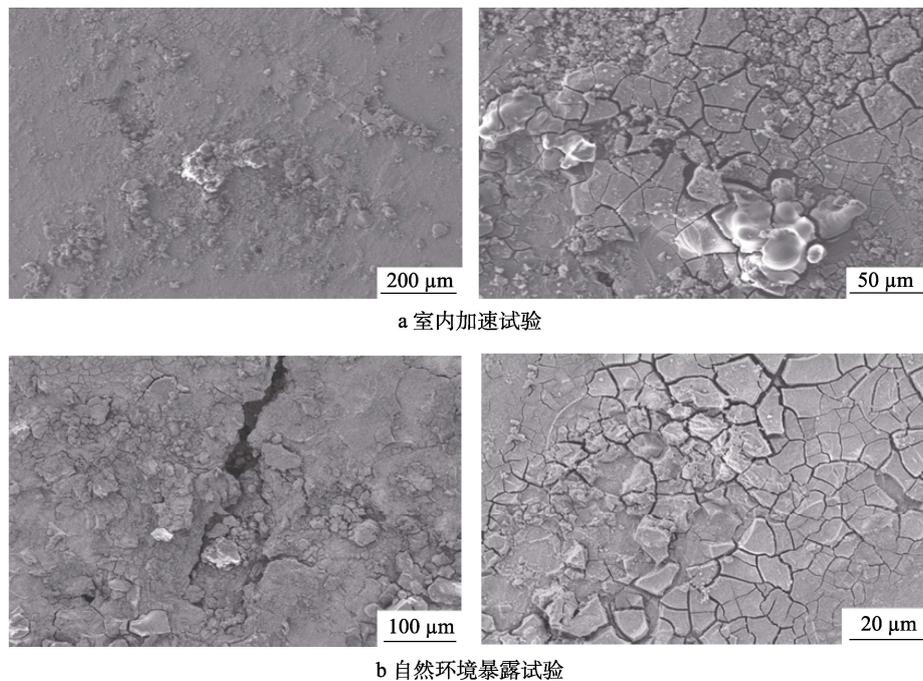


图 5 7075 铝合金室内加速试验和自然环境暴露试验腐蚀产物微观形貌

Fig.5 Microstructure of corrosion products of 7075 aluminum alloy after indoor accelerated test and outdoor exposure test: a) indoor accelerated test; b) outdoor exposure test

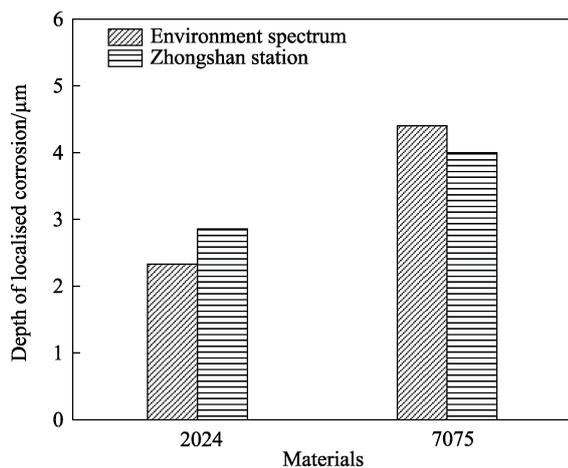


图 6 2024 和 7075 铝合金室内加速试验 1 周期和自然环境暴露试验 1 a 后的局部腐蚀深度

Fig.6 Localized corrosion depth of 2024 and 7075 aluminum alloys after indoor accelerated test for 1 cycle and outdoor exposure test for 1 year

### 2.3 腐蚀产物成分分析

2024、7075 高强铝合金室内加速试验和自然环

境暴露试验后的腐蚀产物 XRD 定量分析结果如图 7 所示。可以看出, 2 种铝合金的腐蚀产物相对较为简单, 腐蚀产物均由  $\text{AlOOH}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成。2024 铝合金在 2 种环境条件下的腐蚀产物中均为  $\text{AlOOH}$  占比高, 7075 铝合金在 2 种环境条件下腐蚀产物中均为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  占比高。铝合金在大气中与氧气发生氧化反应, 生成氧化铝, 这是主要的反应路径之一。由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜热力学的不稳定性, 随着时间延长, 该薄膜会通过水合反应转化为羟基氧化铝 ( $\text{AlOOH}$ ), 即水合氢氧化铝<sup>[20-21]</sup>。

2024、7075 铝合金在 2 种环境条件下腐蚀产物相关性研究结果如图 8 所示。铝合金腐蚀产物由  $\text{AlOOH}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成, 以其中含量最高的腐蚀产物的占比 (质量分数) 进行计算。2024 铝合金在室内加速腐蚀和自然环境暴露试验后,  $\text{AlOOH}$  的占比分别为 83.9% 和 89.0%, 7075 铝合金室内加速腐蚀和自然环境暴露试验后  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的占比分别为 84.7% 和 92.7%。由此可见, 这 2 种铝合金的腐蚀产物都具有高度的相关性。

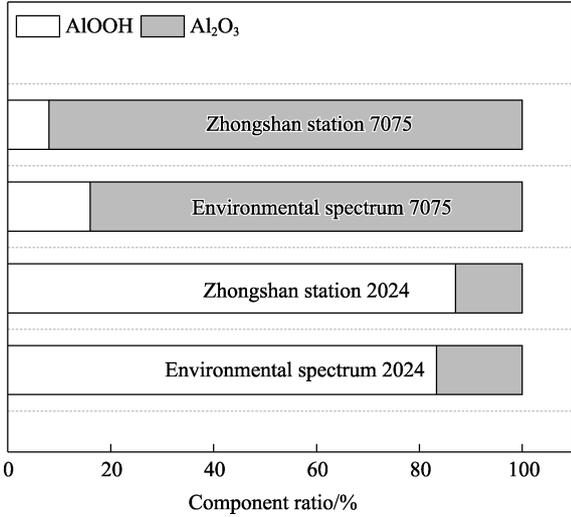


图7 2024和7075铝合金室内加速试验和自然环境暴露试验腐蚀产物定量分析结果

Fig.7 Quantitative analysis of corrosion products of 2024 and 7075 aluminum alloys after indoor accelerated test and outdoor exposure test

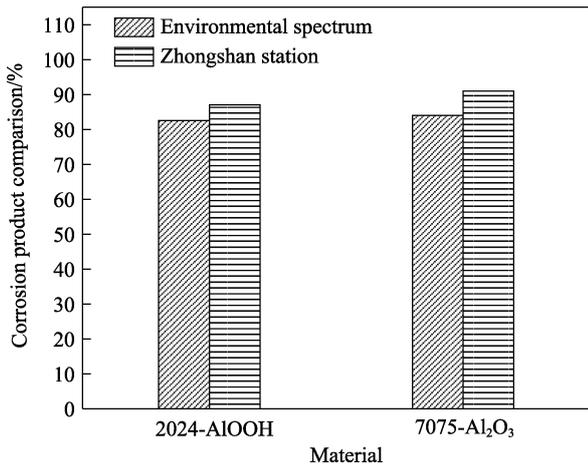


图8 2024和7075铝合金室内加速试验1周期和室外暴露试验1a后腐蚀产物相关性分析结果

Fig.8 Correlation analysis results of corrosion products of 2024 and 7075 aluminum alloys after indoor accelerated test for 1 cycle and outdoor exposure test for 1 year

### 2.5 铝合金在极寒大气环境下腐蚀行为及机理分析

暴露于极寒大气环境下，环境因素对铝合金的作用影响如图9所示。环境与温带和热带地区相比具有显著差异，理论研究证明，仅低于0℃的温度不足以消除腐蚀，即使在-20℃的温度下，电化学过程仍在进行。影响大气腐蚀速率的2个重要因素是气溶胶氯化物（来自海洋环境的富含盐分的雪）和表面润湿时间（TOW）。其他气象因素如极寒环境中的极端风速、降水形式等可能导致金属表面的冰晶和雪形成，这些都会对金属腐蚀的速率和形式产生影响。近年来，由于气候变化，环境温度不断上升，影响了金属样品顶

部的雪层。融化的雪/冰层维持潮湿较长时间，这导致金属表面形成不同厚度的潮湿冰/雪层。夏季长时间的阳光照射也会使金属样品的表面温度超过环境温度，导致露水形成和凝结，进而导致较长的TOW，从而导致腐蚀发生<sup>[22-23]</sup>。

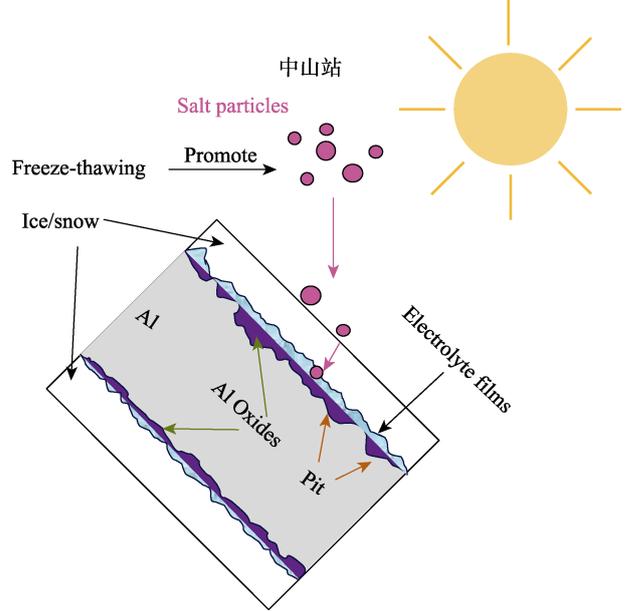


图9 极寒大气环境因子对铝合金的影响  
Fig.9 Effect of polar atmospheric environmental factors on aluminum alloys

铝合金在极寒大气环境下的腐蚀过程如图10所示。暴露初期，暴露初期，基体表面由于和氧有较大的亲和力而形成一层附着力强、连续性好的耐腐蚀氧化膜，为铝基体提供良好的保护。由于降水少，环境中沉积的盐粒中含有腐蚀性的氯离子，这种活性阴离子优先附着在氧化膜上，导致局部的氧化保护膜被破坏。金属表面的冰层下存在一层薄液膜，使得Cl<sup>-</sup>大量聚集，并且持续稳定地吸附到铝合金表面<sup>[24]</sup>。点蚀过程首先发生在钝化膜表面及其周边，这种大面积且较为完整的薄膜充当大阴极。当这个薄膜因为沉积在金属表面的盐粒子中的氯离子侵蚀破损时，铝合金表面细微处变得裸露，暴露在外部环境中，这种细微的缺陷处充当小阳极<sup>[25]</sup>。吸附在金属表面的腐蚀性溶液充当电解液，其电化学反应如下：



随着腐蚀的进行，腐蚀产物层进一步形成并生长，Cl<sup>-</sup>在腐蚀产物层/金属界面处聚集，导致冰点降低，且Cl<sup>-</sup>自催化的酸化反应使得局部酸化形成γ-AlOOH氧化膜，随后又被Al(OH)<sub>3</sub>所覆盖。少量的Cl<sup>-</sup>会直接进入腐蚀产物层，与Al(OH)<sub>3</sub>中的OH<sup>-</sup>进行竞争吸附。随着暴露时间的增长，Cl<sup>-</sup>逐渐取代氢氧化铝中的OH<sup>-</sup>，形成AlCl<sub>3</sub>，加剧了腐蚀过程，见式(7)~(9)。

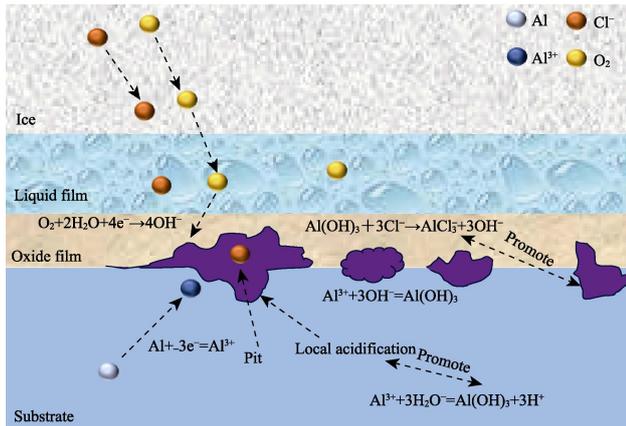
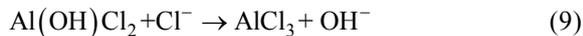
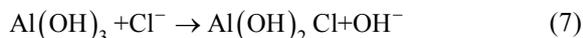


图 10 铝合金在极寒大气环境下腐蚀过程  
Fig.10 Corrosion process of aluminum alloy in polar atmosphere



在寒冷的气候条件下,水分因温度变化而形成冰层,随后在温度升高时再次融化,在铝合金长期的暴露时间下,这种循环的冻融过程产生显著的影响。材料表面或微结构中的第二相粒子可以作为点蚀的起始点,在冻融循环的影响下,这些局部区域可能因为热应力或物理损伤而变得更加活跃。冰层的形成和融化过程中氯离子因为水分子的迁移而浓缩,当氯离子渗入到点蚀区域后,随着温度的降低,水分结冰形成冰晶,这种冰晶的形成引起局部膨胀,加剧了点蚀处的应力集中现象。最初独立的点蚀坑逐渐扩大,当相邻的点蚀坑相互扩展并连接时,它们可以形成更大的腐蚀区域。这种扩展通常首先在表面下的微观尺度上发生,特别是在晶界这样的结构上。材料内部存在的晶界弱区,如晶界偏聚的腐蚀敏感元素或晶界附近硬化相的分解,使晶界成为腐蚀的优先路径,冻融循环促进了晶界处的微小位移和应力变化。由于晶界的腐蚀速率通常比相邻的晶粒更快,当点蚀坑沿着晶界迅速发展,便形成了晶间腐蚀<sup>[26]</sup>。

### 3 结论

1) 2024、7075 高强铝合金在自然极寒环境下暴露 1 a 的腐蚀速度分别为 14.52、10.75 g/(m<sup>2</sup>·a),表现出明显的腐蚀现象。2024、7075 高强铝合金室内加速试验和室外暴露试验后的腐蚀产物均由 AlOOH 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成。

2) 在极寒环境下,铝合金仍然发生不可忽视的腐蚀。表面润湿时间和盐粒子的沉积是导致铝合金腐蚀的主要因素。其中,冰层下存在的薄液膜为铝合金的腐蚀提供了必要的湿润环境。极寒环境下出现的冻融循环现象,会导致铝合金表面冰层的形成和融化,

加速盐粒子的溶解和渗透。

3) 高强铝合金加速试验谱的试验周期为 10 d,折算为加速倍率为 36.5 倍。由自然环境相关性分析得出,室内加速腐蚀试验谱与自然环境曝露试验具有很好的相关性,2 类材料在腐蚀速度、主要腐蚀产物、局部腐蚀深度 3 个指标上的室内外相关性均超过 80%。高倍率的加速试验谱可以在相对较短时间内模拟自然极寒大气环境下对金属的环境影响,为极寒环境材料适用性评估提供依据。

### 参考文献:

- [1] 崔腾飞, 吴建国, 成洁楠, 等. 直升机腐蚀原因分析及全寿命周期防护技术[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 66-73.  
CUI T F, WU J G, CHENG J N, et al. Corrosion Causes and Full Life Cycle Protection Technology of Helicopters[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 66-73.
- [2] DAN Z H, MUTO I, HARA N. Effects of Environmental Factors on Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys under Constant Dew Point Conditions[J]. Corrosion Science, 2012, 57: 22-29.
- [3] DURSUN T, SOUTIS C. Recent Developments in Advanced Aircraft Aluminium Alloys[J]. Materials & Design (1980-2015), 2014, 56: 862-871.
- [4] CHU W L, DANG N L, KOK Y Y, et al. Heavy Metal Pollution in Antarctica and Its Potential Impacts on Algae[J]. Polar Science, 2019, 20: 75-83.
- [5] MORCILLO M, CHICO B, DE LA FUENTE D, et al. Atmospheric Corrosion of Reference Metals in Antarctic Sites[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 40(3): 165-178.
- [6] ROSALES B, FERNÁNDEZ A. Parameters Controlling Steel and Copper Corrosion Nucleation and Propagation in Antarctica[C]// Proceedings of Northern Area Western Region Conference. Anchorage: [s. n.], 2001.
- [7] 崔中雨, 葛峰, 王昕. 几种苛刻海洋大气环境下的海工材料腐蚀机制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 403-409.  
CUI Z Y, GE F, WANG X. Corrosion Mechanism of Materials in Three Typical Harsh Marine Atmospheric Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 403-409.
- [8] 郝美丽, 曹学军, 封先河, 等. 铝合金室内加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相关性[J]. 兵器材料科学与工程, 2006, 29(5): 28-31.  
HAO M L, CAO X J, FENG X H, et al. Investigation on Interrelation of Indoor Accelerated Corrosion Testing and Atmospheric Exposure Testing of LY12 Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2006, 29(5): 28-31.
- [9] 赵朋飞, 郭文营, 陶阳, 等. 含镀层合金钢循环盐雾加

- 速腐蚀行为与机理研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 236-246.
- ZHAO P F, GUO W Y, TAO Y, et al. Accelerated Corrosion Behavior and Mechanism of Coated Alloy Ateel by Cyclic Salt-Spray Test[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 236-246.
- [10] 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 Y Q, LI J M, DAI L, 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.
- [11] 孙晓光, 陈志坚, 王睿, 等. 循环盐雾环境中碳纤维复合材料-6082 铝合金螺栓连接结构中铝合金的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(4): 26-32.
- SUN X G, CHEN Z J, WANG R, et al. Corrosion Behavior of Al Alloy of Carbon-Fiber-Composite and 6082 Aluminum Alloy Bolt Connection Structure in Circulating Salt Spray Environment[J]. Corrosion & Protection, 2024, 45(4): 26-32.
- [12] 汪凤琴, 苏艳, 钟勇, 等. 7B04 铝合金及其螺接件的微观腐蚀机制及耐久性研究[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 181-193.
- WANG F Q, SU Y, ZHONG Y, et al. Microscopic Corrosion Mechanism and Durability of 7B04 Aluminum Alloy and Its Screw Joint[J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 181-193.
- [13] 冷文俊, 崔中雨, 王昕, 等. 低合金高强钢极地环境加速腐蚀试验谱编制与研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(3): 31-36.
- LENG W J, CUI Z Y, WANG X, et al. Preparation and Study of Accelerated Corrosion Test Spectrum of Low Alloy High Strength Steel in Polar Environment[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(3): 31-36.
- [14] WANG B B, WANG Z Y, HAN W, et al. Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloy 2024-T3 Exposed to Salt Lake Environment in Western China[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 63-70.
- [15] ZHAO Q Y, ZHAO J B, GUO C, et al. Corrosion Behavior of Anodized 7B50 Aluminum Alloy in Different Atmospheric Environments[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(8): 8228-8242.
- [16] WANG L, WANG B, LUO L Z, et al. Atmospheric Corrosion Behavior of 7A09 Aluminum Alloy Exposed to an Industrial Environment[J]. Materials and Corrosion, 2020, 71(12): 1971-1979.
- [17] SZKLARSKA-SMIALOWSKA Z. Pitting Corrosion of Aluminum[J]. Corrosion Science, 1999, 41(9): 1743-1767.
- [18] LIAO J S, HOTTA M. Atmospheric Corrosion Behavior of Field-Exposed Magnesium Alloys: Influences of Chemical Composition and Microstructure[J]. Corrosion Science, 2015, 100: 353-364.
- [19] LIAO J S, HOTTA M, MOTODA S I, et al. Atmospheric Corrosion of Two Field-Exposed AZ31B Magnesium Alloys with Different Grain Size[J]. Corrosion Science, 2013, 71: 53-61.
- [20] XUE W, WANG Y X, WU S, et al. Influence of Impurity Content on Corrosion Behavior of Al-Zn-Mg-Cu Alloys in a Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. Corrosion Science, 2024, 237: 112319.
- [21] LIU S Y, LI Z P, GAO J S, et al. Enhancing Corrosion Resistance of AZ31B Magnesium Alloy Substrate in 3.5 % NaCl Solution with Al-Si Coating Prepared by Cold Metal Transfer-Based Wire Arc Additive Manufacturing[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19(9): 100763.
- [22] LONG G X, YUAN Y G, XIN G F, et al. Experimental Based Time-Dependent Reliability Assessment of Corrosion Initiation for PC Girders in Frozen Marine Environment[J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 133461.
- [23] ZHANG Q C, LIU X, JIANG Y S, et al. Superamphiphobic Organosilane-Grafted Attapulgite as an Effective Corrosion-Resistant and Anti-Icing Coating for Aluminum Alloy[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 696: 134405.
- [24] LIAO C M, OLIVE J M, GAO M, et al. In-Situ Monitoring of Pitting Corrosion in Aluminum Alloy 2024[J]. Corrosion, 1998, 54(6): 451-458.
- [25] FOLEY R T. Localized Corrosion of Aluminum Alloys—A Review[J]. Corrosion, 1986, 42(5): 277-288.
- [26] MA H, TANG J X, GENG P H, et al. Effect of Grain Orientation Angles and Compressive Parameters on the Deformation Characteristics and Corrosion Property of 6061 Al Alloy[J]. Materials Characterization, 2024, 213: 114006.