

2A12 铝合金动态腐蚀-疲劳耦合失效机理研究

魏小琴^{1,2}, 李晗², 蒲亚博², 赵鹏飞³, 王辉², 朱蕾²

(1.中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039;
3.航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: **目的** 针对某飞机吊挂结构用 2A12 铝合金开展预腐蚀后的动态腐蚀-疲劳耦合试验, 很快发生断裂行为, 寻找失效原因并提出解决措施。**方法** 利用自制的卧式动态腐蚀-疲劳试验装置, 开展 2A12 铝合金预腐蚀后的腐蚀-疲劳协同试验直至样品断裂。同时, 对比开展 2A12 铝合金腐蚀与疲劳交替试验, 分析断口腐蚀形貌、元素含量、价态变化, 获得 2A12 铝合金在两种试验方法下的腐蚀疲劳机理。**结果** 2A12 铝合金主要由铝基体以及弥散分布其中的多种合金强化相组成。当有预裂纹时, 2A12 铝合金在腐蚀与疲劳交替作用下, 很快发生疲劳断裂, 且裂纹几乎贯穿整个断面, 在整个裂纹附近存在较多的腐蚀产物 Al_2O_3 。2A12 铝合金在预腐蚀后, 基体与其表面的氧化膜之间形成腐蚀电池, 初期的点蚀孔快速发展成明显腐蚀坑并产生大量腐蚀产物 Al_2O_3 , 腐蚀坑底部由于应力集中现象而成为裂纹源, 在动态腐蚀-疲劳耦合作用下快速萌生裂纹并呈放射状扩展, 很快发生疲劳断裂行为, 同时裂纹扩展区无腐蚀产物。**结论** 2A12 铝合金用作飞机吊挂结构件时, 必须进行表面防腐处理, 避免形成腐蚀坑, 减缓吊挂结构发生腐蚀-疲劳断裂进程。

关键词: 铝合金; 腐蚀; 疲劳; 疲劳断裂; 失效机理

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0359-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.035

Study on Dynamic Corrosion-Fatigue Coupling Failure Mechanical of 2A12 Aluminum Alloy

WEI Xiao-qin^{1,2}, LI Han², PU Ya-bo², ZHAO Peng-fei³, WANG Hui², ZHU Lei²

(1.School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

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

3.Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: 2A12 aluminum alloy used for a suspension structure of an aircraft adopts a dynamic corrosion-fatigue coupling test after pre-corrosion, and the fracture behavior soon occurs. It was necessary to find the failure reason and propose solutions. Using the self-made horizontal dynamic corrosion-fatigue test device, carry out the corrosion fatigue test after the 2A12 aluminum alloy pre-corrosion until the sample breaks. At the same time, 2A12 aluminum alloy corrosion and fatigue alternate test were carried out to analyze the fracture corrosion morphology, element content, and valence changes. Corrosion fatigue

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2020-12-09

Received: 2020-12-03; Revised: 2020-12-09

基金项目: 国防技术基础项目

Fund: Supported by the Defense Technology Basic Project

作者简介: 魏小琴 (1981—), 女, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为装备环境适应性。

Biography: WEI Xiao-qin (1981—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: equipment environmental adaptability.

引文格式: 魏小琴, 李晗, 蒲亚博, 等. 2A12 铝合金动态腐蚀-疲劳耦合失效机理研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 359-365.

WEI Xiao-qin, LI Han, PU Ya-bo, et al. Study on dynamic corrosion-fatigue coupling failure mechanical of 2A12 aluminum alloy[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 359-365.

mechanism of 2A12 aluminum alloy was obtained under two test conditions. 2A12 aluminum alloy was composed of an aluminum matrix and a variety of dispersed alloy strengthening phases. When there was a pre-crack, the 2A12 aluminum alloy would quickly undergo fatigue fracture under the alternate action of corrosion fatigue, and the crack almost penetrated the entire section, and there were many corrosion products near the crack, aluminum oxide. After 2A12 aluminum alloy was pre-corroded, a corrosion cell was formed between the substrate and the oxide film on its surface. The initial pitting corrosion pitted and produced a large number of corrosion products. The bottom of the corrosion pit became the source of cracks due to stress concentration. Under the synergistic effect of corrosion fatigue, cracks were gradually initiated and expanded radially, fatigue fracture behavior occurred quickly, and there was no corrosion product at the crack propagation zone. Therefore, when 2A12 aluminum alloy was used as an aircraft suspension structure, the surface must be treated with anti-corrosion to avoid the formation of corrosion pits, and then slow down corrosion fatigue fracture process.

KEY WORDS: 2A12 aluminum alloy; corrosion; fatigue; fatigue fracture; failure mechanism

2A12 铝合金经热处理强化处理后,在组织中析出 Al_6CuMg 等金属间化合物,具有强度高、密度小、力学性能、加工性能良好、耐腐蚀性能等优点,常制成各类飞机结构材料,广泛用于航空领域。我国东南沿海地区主要的气候特征是高温、高湿、高盐雾,当飞机在该地区起飞或降落时,2A12 铝合金结构件(如各种连接接头、铆钉孔、紧固件、吊挂等)在飞机振动/冲击作用下,会发生腐蚀疲劳,结构件断裂韧性降低,严重影响飞机的飞行安全。

国内外已对 2A12 铝合金在盐雾环境中的腐蚀行为、腐蚀规律开展相关研究^[1-6],也对铝合金在预腐蚀后的疲劳行为或腐蚀-疲劳交替作用下的断裂行为开展了大量工作,积累了很多试验数据与经验,形成了较完备的理论^[7-25]。但是由于现有的疲劳试验机不配备大气腐蚀装置,大多只配置高低温环境试验箱,或是自制的盛装固定浓度腐蚀溶液的简易盒子,缺乏模拟动态变化的大气腐蚀环境的腐蚀-疲劳专用试验设备,不能同时开展动态大气腐蚀试验与动态疲劳试验,无法获取动态腐蚀-疲劳耦合作用下的腐蚀疲劳数据,难以准确评价真实多变大气环境下铝合金的腐蚀疲劳行为。

本文利用自行研发的动态腐蚀-疲劳试验装置,开展 2A12 铝合金在预腐蚀后的腐蚀-疲劳耦合试验,研究腐蚀-疲劳协同作用下的断裂失效行为,并与腐蚀-疲劳交替试验的断裂机理进行对比,揭示铝合金预腐蚀后的腐蚀-疲劳耦合失效机理,并针对性地提出减缓腐蚀疲劳断裂措施,提高 2A12 铝合金的使用寿命。

1 试验

1.1 样品

试验样品为 2A12 铝合金,其抗拉强度 σ_b 为 420 MPa,屈服强度 σ_s 为 275 MPa。采用 GB/T 3075—2008 推荐的 T₄ 状态进行热处理。将其加工为圆形截面棒状试样,试样总长为 150 mm,其中试验段直径

为 8 mm、长度为 30 mm,两端圆弧段长度各 30 mm,两端夹持段直径为 16 mm、长度各 30 mm。试样形状、尺寸见图 1。

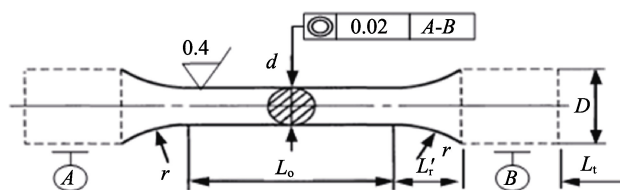


图 1 2A12 铝合金棒状试样尺寸
Fig.1 2A12 aluminum alloy rod sample size

1.2 方法

利用自行研制的卧式动态腐蚀-疲劳试验装置(见图 2),采取预腐蚀后的腐蚀-疲劳协同试验方式(即预腐蚀 5 d 后,同时开展大气腐蚀和动态疲劳试验),直至试件发生断裂破坏。作为对照组,采取腐蚀-疲劳交替试验方式(腐蚀 5 d→疲劳 5 万周次→腐蚀 5 d→疲劳 5 万周次→…),直至试件发生断裂破坏。

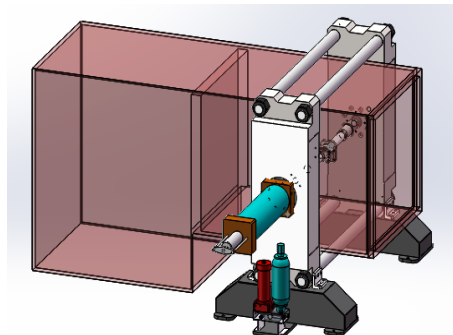


图 2 自制卧式动态腐蚀-疲劳试验装置
Fig.2 Homemade horizontal corrosion-fatigue test device

腐蚀试验为干湿交替的循环盐雾试验(模拟飞机吊挂结构在沿海地区的大气服役环境),参照 GB/T 20854—2007《金属和合金的腐蚀 循环暴露在盐雾、“干”和“湿”条件下的加速试验》,和 GB/T 24195—2009《金属和合金的腐蚀 酸性盐雾、“干燥”和“湿润”

条件下的循环加速腐蚀试验》。试验谱为：在 40 ℃、pH 值为 4 的盐雾气氛（5%NaCl、0.05%Na₂SO₄、0.05%CaCl₂ 混合溶液，质量分数，全文同）中腐蚀 4 h，然后在 60 ℃、相对湿度为 20%的环境下干燥 4 h，单次循环试验总时间为 8 h，腐蚀 5 d 相当于运行 15 次干湿交替的循环盐雾试验；动态疲劳试验为低应力循环作用下的疲劳试验，采用拉-拉载荷控制，最大应力水平为 16 kN，应力幅 σ_a 为 7.2 kN，应力比 $R=0.1$ ，频率为 1 Hz，载荷波形为正弦波。

1.3 检测方法

- 1) 化学成分分析。采用全谱直读等离子体发射光谱仪，参照 GB/T 20975.25—2008《铝及铝合金化学分析方法第 25 部分：电感耦合等离子体原子发射光谱法》分析铝合金的金相组织。
- 2) 金相组织分析。采用德国卡尔蔡司公司 Observer.A1m 型数字倒置式材料显微镜，参照 JB/T 6289—2005《内燃机铸造铝活塞金相检验》和 JB/T 7946.1—2017《铸造铝合金金相铸造铝硅合金变质》，分析铝合金样品的金相组织。
- 3) 腐蚀形貌分析。在铝合金断口附近取样，采用 Quanta200 环境扫描电镜，观察腐蚀疲劳样品断口微观形貌。

4) 元素价态分析。采用美国 Thermo 公司 ESCALAB250 型 X 射线光电子能谱仪（XPS），分析铝合金原始样、腐蚀疲劳样表面铝元素价态。测量条件：激发源单色化的 AlK α （1486.6 eV），激发功率 150 W，分析室真空度 4.0×10^{-8} Pa，全扫描范围 0~1200 eV，分析器透过能 50 eV，采用固定通过能量模式。

2 结果与讨论

2.1 疲劳断裂结果分析

针对不同预处理的铝合金样品，分别开展腐蚀-疲劳交替试验、预腐蚀后的腐蚀-疲劳协同试验。腐蚀疲劳断裂结果见表 1。

对比 3 种试验方法，对于无预制裂纹的正常样品而言，开展腐蚀-疲劳交替试验，不易发生腐蚀疲劳断裂现象，但样品在预腐蚀后同时开展腐蚀和疲劳试验，迅速发生腐蚀疲劳断裂，说明腐蚀与疲劳的协同老化效应十分明显。

2.2 化学成分分析

分析 2A12 铝合金化学成分，结果见表 2。

表 1 2A12 铝合金腐蚀疲劳断裂结果
Tab.1 2A12 aluminum alloy corrosion fatigue fracture results

Sample	Number	Test method	Test spectrum	Fatigue times	Result
Pre-cracked aluminum alloy	1	Corrosion fatigue alternate test	Corrosion for 5 days, fatigue 50,000 times	35 003	Fracture
Normal aluminum alloy	3	Corrosion fatigue alternate test	Corrosion for 5 days, fatigue 50,000 times (repeat 4 times)	200 000	No break
Normal aluminum alloy	4	Corrosion fatigue coupling test	Corrosion in advance for 5 days, and then corrosion fatigue at the same time	11 763, 14 863, 38 506, 42 221	Fracture

表 2 2A12 铝合金各化学成分
Tab.2 Mass percentage of each chemical composition of 2A12 aluminum alloy

Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Cr	Ni	Ti
92.308	0.12	4.36	0.76	1.72	0.55	0.13	0.024	0.002	0.026

2.3 金相组织分析

在 2A12 铝合金正常位置取样，用 4%（体积分数）的硝酸酒精腐蚀后，在光学显微镜下观察显微组织并对其进行评定，结果见图 3。从图 3 可以看出，2A12 铝合金正常区域组织为 α （Al）基体，其中弥散分布大量长条状或不规则圆球状的合金强化相。

2.4 断口形貌对比分析

2.4.1 腐蚀-疲劳交替试验中预裂纹下腐蚀疲劳断裂失效

在腐蚀-疲劳交替试验过程中，2A12 铝合金样品存在预裂纹时，在腐蚀 5 d、疲劳 35 003 次后发生断

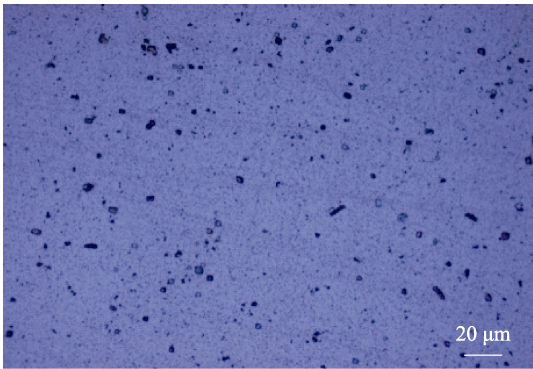


图 3 2A12 铝合金金相组织
Fig.3 2A12 aluminum alloy metallographic structure

裂, 结果见图 4。从微观形貌看, 腐蚀疲劳断裂样品的断口分为裂纹源区、疲劳裂纹扩展区及快速断裂区, 裂纹自裂纹源处呈放射状向芯部扩展, 断面存在较深的纵向扩展二次裂纹。裂纹源位于表面, 并被腐蚀产物层覆盖, 腐蚀产物层呈龟裂状态, 说明裂纹源存在腐蚀坑或腐蚀裂纹 (见图 5)。疲劳裂纹扩展区断面平齐, 微观形貌可见垂直裂纹扩展方向的疲劳辉纹, 为典型疲劳断裂特征 (见图 6)。二次裂纹几乎贯穿整个断面, 二次裂纹附近存在较多腐蚀产物 (见图 7)。快速断裂区断口主要为撕裂形貌 (见图 8)。

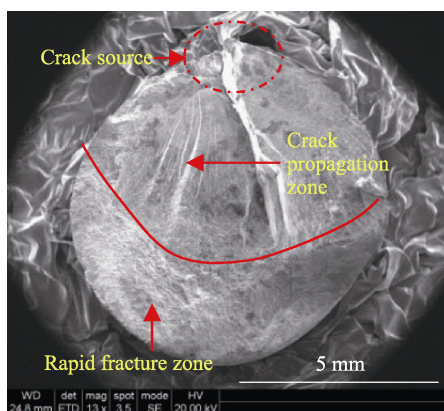


图 4 预裂纹后的断口裂纹形貌 (13×)

Fig.4 Fracture crack morphology after pre-crack

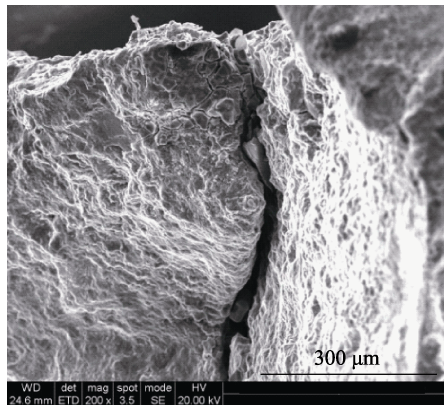


图 5 预裂纹后的断口裂纹源形貌 (200×)

Fig.5 Fracture crack source morphology after pre-crack

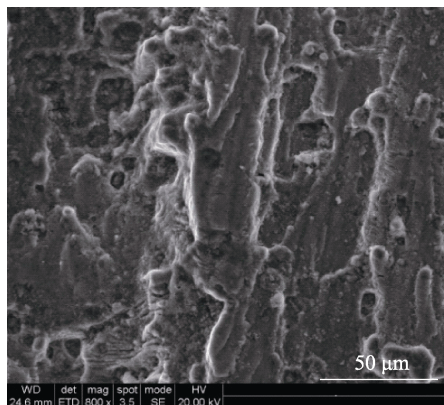


图 6 预裂纹后的断口裂纹扩展区形貌 (800×)

Fig.6 Fracture crack propagation zone morphology after pre-crack

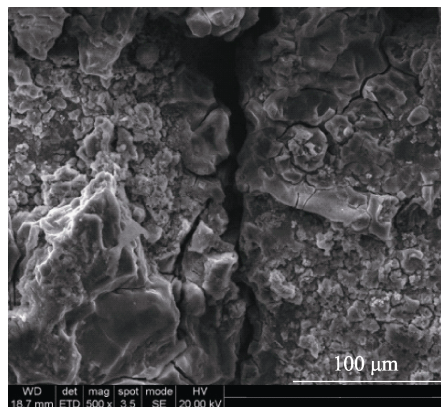


图 7 预裂纹后的断口二次裂纹形貌 (500×)

Fig.7 Fracture secondary crack morphology after pre-crack

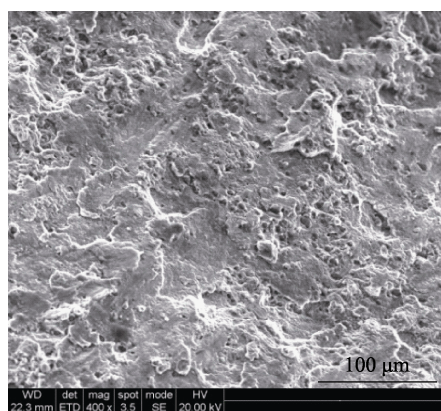


图 8 预裂纹后的断口快速断裂区形貌 (500×)

Fig.8 Fracture rapid fracture zone after pre-crack

对断口表面进行能谱分析, 发现断口裂纹源主要元素包括 O、Al、Ca、Na, 其含量见表 3。结果表明, 断口裂纹源的腐蚀产物主要为 Al_2O_3 , 同时含少量的盐雾沉积离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 。

表 3 断口裂纹源的元素含量

Tab.3 Mass percentage of Fracture crack source

Test method	wt%			
	O	Na	Al	Ca
Corrosion fatigue alternate test after pre-crack	61.58	5.45	30.10	2.86
Corrosion fatigue synergy test after pre-corrosion	60.89	4.47	32.36	2.28

2.4.2 预腐蚀后腐蚀-疲劳协同试验的断口形貌分析

在 2A12 铝合金腐蚀疲劳断口位置取样, 观察断口整体形貌 (见图 9)。从图 9 可以看出, 该铝合金腐蚀疲劳断口由裂纹源区、疲劳裂纹扩展区及快速断裂区组成。其中断面粗糙, 裂纹起始于两个位置, 标记为 A 裂纹源、B 裂纹源。两个裂纹源均可见扇形疲劳扩展区, 总的疲劳扩展区较小, 其中 A 裂纹源扇形疲劳扩展区相对较大, B 裂纹源扇形疲劳扩展区相对较小。

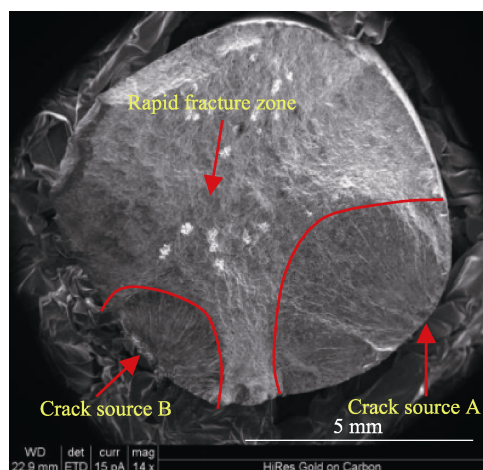


图 9 预腐蚀后的断口形貌 (14×)

Fig.9 Fracture crack morphology after pre-corrosion

分析裂纹源,发现 A、B 裂纹源均位于表面,且见明显腐蚀坑。从图 10 的 A 腐蚀坑微观形貌可以看出,其表面被腐蚀产物层覆盖,腐蚀产物层呈龟裂状态,A 腐蚀坑处存在疏松腐蚀产物,腐蚀坑深度约为 0.41 mm。从图 11 可知,B 裂纹源处也有明显的腐蚀坑,疲劳裂纹在腐蚀坑底部萌生并呈放射状扩展,腐蚀坑处存在疏松腐蚀产物,腐蚀坑深度约为

0.23 mm。

对断口裂纹源进行能谱分析(见表 3),与腐蚀疲劳交替试验类似,断口裂纹源处的腐蚀产物主要为 Al_2O_3 ,同时含有少量的盐雾沉积离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 。

以往研究表明,腐蚀坑处极易引起应力集中现象,疲劳裂纹在腐蚀坑底部萌生并呈放射状扩展。疲劳裂纹扩展区断面平齐,微观形貌可见垂直裂纹扩展方向的疲劳辉纹,为典型疲劳断裂特征(见图 12),快速断裂区断口主要为撕裂形貌见图 13。

自然条件下,2A12 铝合金表层会自发形成一层氧化膜,分为与基体相连的致密层以及外部的疏松层,其连续地覆盖在铝合金表面,阻碍了大气中的腐蚀介质与基体直接接触,具有一定的保护作用。因此,在铝合金表面, Al_2O_3 和 Al 共存,见图 14a。

2A12 铝合金在受到预腐蚀作用时,水分、盐雾在铝合金表面形成富含 Cl^- 的电解质液膜,随后由于 Cl^- 对氧化膜的破坏作用,氧化膜上会形成点蚀源,随之发展成点蚀孔。点蚀孔内暴露出的铝合金基体与氧化膜在电解液中共同形成腐蚀电池,铝合金表面出现的电化学反应为见式(1)~(2)。

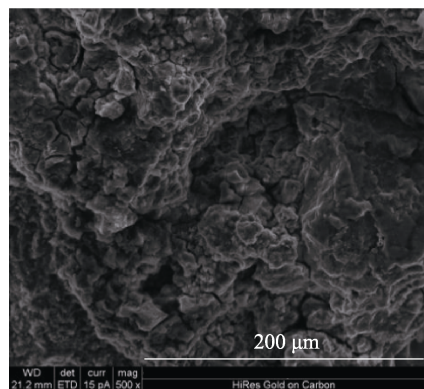
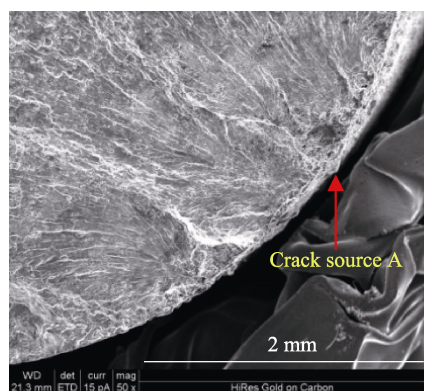
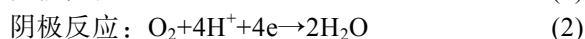
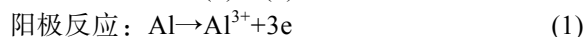


图 10 预腐蚀后的 A 裂纹源断口形貌
Fig.10 Fracture crack source A morphology after pre-corrosion

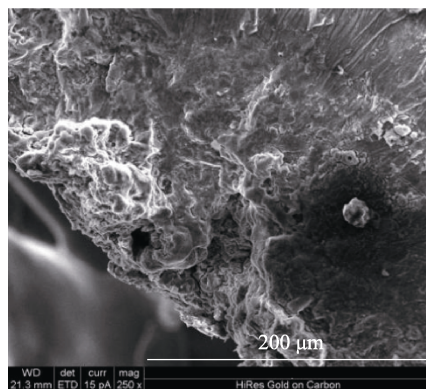
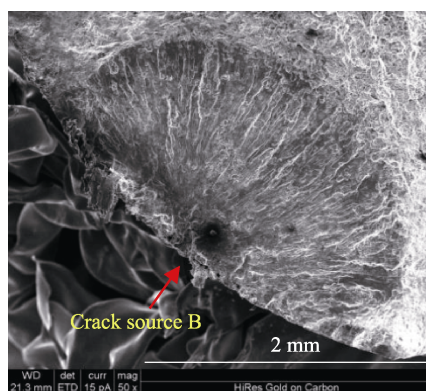


图 11 预腐蚀后的 B 裂纹源断口形貌
Fig.11 Fracture crack source B morphology after pre-corrosion

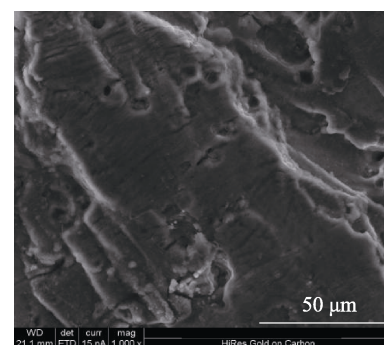


图 12 预腐蚀后的疲劳扩展区断口形貌

Fig.12 Fracture crack propagation zone morphology after pre-corrosion

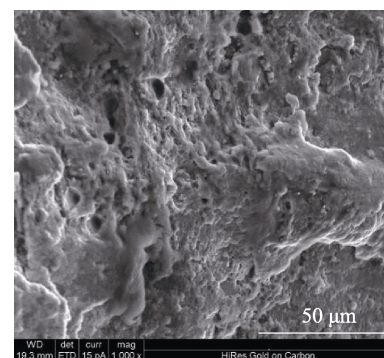


图 13 预腐蚀后的断口快速断裂区形貌

Fig.13 Fracture rapid fracture zone after pre-corrosion

由此,点蚀孔中形成的小阳极大阴极的电化学状态加速了铝合金基体的溶解,点蚀孔快速发展形成较

大较深的点蚀坑,形成图7和图8中较为明显的腐蚀坑,并形成大量腐蚀产物 Al_2O_3 , 见图14b。

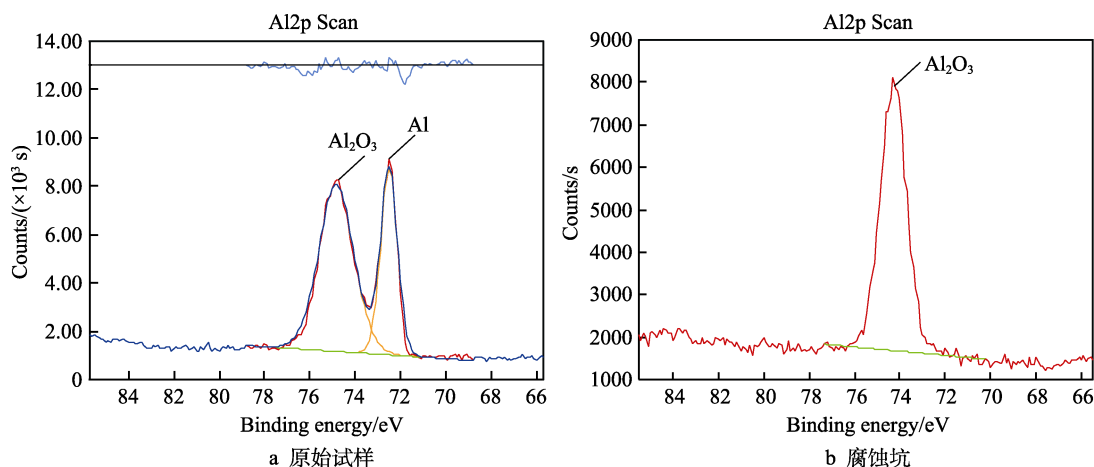


图14 2A12 铝合金表面铝元素价态分析

Fig.14 Aluminum element valence state on aluminum alloy surface: a) original sample, b) corrosion pit

2.4.3 对比分析

当2A12 铝合金存在预裂纹时,在腐蚀-疲劳交替作用下很快发生疲劳断裂,且裂纹几乎贯穿了整个断面,在整个裂纹附近均存在较多腐蚀产物 Al_2O_3 。当2A12 铝合金不存在原始裂纹、非金属夹杂、疏松等原始缺陷时,在腐蚀-疲劳交替作用下,样品不会很快发生腐蚀疲劳断裂现象。当2A12 铝合金预腐蚀后,其表面很快出现多个腐蚀坑,存在较多腐蚀产物 Al_2O_3 , 腐蚀坑底部在腐蚀-疲劳协同作用下,由于应力集中现象,在最大应力处萌生裂纹并呈放射状扩展,很快发生疲劳断裂行为,故在裂纹扩展区尚未来得及形成腐蚀产物。

3 结论

1) 2A12 铝合金不存在原始缺陷时,在腐蚀与疲劳交替作用下,不易发生腐蚀疲劳断裂,但在预腐蚀的腐蚀-疲劳耦合作用下,却很快发生腐蚀疲劳断裂。

2) 2A12 铝合金在预腐蚀后的腐蚀-疲劳耦合作用下,样品表面有多个腐蚀坑,腐蚀坑底部由于应力集中现象,在最大应力集中点处萌生裂纹并呈放射状扩展,很快发生疲劳断裂行为,故在裂纹扩展区未出现腐蚀产物,而是在裂纹源处形成较多腐蚀产物 Al_2O_3 。

参考文献:

[1] 李一. 2A12 铝合金在沿海大气环境中的腐蚀行为及防护措施研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
LI Yi. Studies of corrosion behavior and protective measures of 2A12 aluminum alloy in coastal atmospheric environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics

and Astronautics, 2017.

- [2] 李涛, 冯海涛, 李晓刚, 等. 2A12 铝合金在含 Cl^- 环境中的腐蚀行为和规律研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(3): 43-48.
LI Tao, FENG Hai-tao, LI Xiao-gang, et al. Corrosion behavior of 2A12 aluminum alloy in Cl^- containing solution[J]. Materials science and technology, 2011, 19(3): 43-48.
- [3] 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 environmental engineering, 2012, 9(2): 64-68.
- [4] OESCH S, FALLER M. Environmental effects on materials: The effect of the air pollutants SO_2 , NO_2 , NO and O_3 on the corrosion of copper, zinc and aluminium. A short literature survey and results of laboratory exposures[J]. Corrosion science, 1997, 39(9): 1505-1530.
- [5] BLÜCHER D B, SVENSSON J E, JOHANSSON L G. Influence of ppb levels of SO_2 on the atmospheric corrosion of aluminum in the presence of NaCl [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005, 152(10): B397.
- [6] 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.
- [7] 张海威, 何宇廷, 范超华, 等. 2A12 铝合金不同方法腐蚀疲劳的寿命及断口形貌[J]. 机械工程材料, 2012, 36(5): 26-28, 32.
ZHANG Hai-wei, HE Yu-ting, FAN Chao-hua, et al. Fatigue life and fracture morphology of 2A12 aluminum alloy

- corroded by different methods[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2012, 36(5): 26-28, 32.
- [8] 张正贵, 周兆元, 刘长勇. 高强度铝合金构件腐蚀疲劳失效分析[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2008, 28(1): 48-52. ZHANG Zheng-gui, ZHOU Zhao-yuan, LIU Chang-yong. Corrosion fatigue fracture failure analysis of high-strength aluminum alloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2008, 28(1): 48-52.
- [9] 帅刚, 邱骥, 王红美, 等. 铝合金 TIG 焊接接头喷射式微弧氧化腐蚀疲劳性能研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(12): 110-115. SHUAI Gang, QIU Ji, WANG Hong-mei, et al. Corrosion fatigue properties of aluminum alloy TIG welded joint treated by spraying micro-arc oxidation[J]. *Surface technology*, 2015, 44(12): 110-115.
- [10] 李晓虹, 何宇廷, 张腾, 等. 腐蚀/疲劳交替作用下 2A12-T4 铝合金的损伤特性[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(6): 62-66. LI Xiao-hong, HE Yu-ting, ZHANG Teng, et al. Damage characteristics of 2A12-T4 aluminum alloy under alternating action of corrosion and fatigue[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2015, 39(6): 62-66.
- [11] 蔡剑, 刘道新, 叶作彦, 等. 腐蚀与交变载荷循环作用对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2015, 35(1): 61-68. CAI Jian, LIU Dao-xin, YE Zuo-yan, et al. Influence of cyclic action of corrosion and alternate load on fatigue life of 2A12-T4 aluminum alloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2015, 35(1): 61-68.
- [12] MENAN F, HÉNAFF G. Synergistic action of fatigue and corrosion during crack growth in the 2024 aluminium alloy[J]. *Procedia engineering*, 2010, 2(1): 1441-1450.
- [13] MENAN F, HÉNAFF G. Influence of frequency and exposure to a saline solution on the corrosion fatigue crack growth behavior of the aluminum alloy 2024[J]. *International journal of fatigue*, 2009, 31(11-12): 1684-1695.
- [14] 崔腾飞. 应力与环境因素耦合对铝合金耐久性能的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2017. CUI Teng-fei. Effect of stress and galvanic factors on the durability of aluminum alloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [15] MONTOYA P, DÍAZ I, GRANIZO N, et al. An study on accelerated corrosion testing of weathering steel[J]. *Materials chemistry and physics*, 2013, 142(1): 220-228.
- [16] PAPADOPOULOS M P, APOSTOLOPOULOS C A, ZERVAKI A D, et al. Corrosion of exposed rebars, associated mechanical degradation and correlation with accelerated corrosion tests[J]. *Construction and building materials*, 2011, 25(8): 3367-3374.
- [17] 殷晓强. 交变荷载和腐蚀环境耦合作用下梁疲劳性能试验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2015. YIN Xiao-qiang. Experimental study on fatigue performance of beams under alternating load coupling with corrosive environment[D]. Beijing: North China University of Technology, 2015.
- [18] 李旭东, 刘治国, 贾明明. 基于两参数 Weibull 模型的预腐蚀 2A12 铝合金材料裂纹萌生寿命评估[J]. *环境技术*, 2013, 31(5): 9-12. LI Xu-dong, LIU Zhi-guo, JIA Ming-ming. Evaluation of fatigue initial life for 2A12 aluminum alloy with pre-corrosion using two parameter weibull model[J]. *Environmental technology*, 2013, 31(5): 9-12.
- [19] 张腾, 何宇廷, 高潮, 等. 长期大气腐蚀对 2A12-T4 铝合金结构疲劳性能的影响[J]. *航空学报*, 2015, 36(7): 2444-2456. ZHANG Teng, HE Yu-ting, GAO Chao, et al. Effect of long-term atmospheric corrosion on fatigue behavior of 2A12-T4 aluminum structures[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2015, 36(7): 2444-2456.
- [20] 王安东, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机用高强度铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(20): 95-103. WANG An-dong, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, et al. Research progress on corrosion fatigue of high strength aluminum alloy of aircraft[J]. *Aeronautical manufacturing technology*, 2017, 60(20): 95-103.
- [21] 黄小光. 腐蚀疲劳点蚀演化与裂纹扩展机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. HUANG Xiao-guang. Mechanism study of pit evolution and crack propagation for corrosion fatigue[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [22] 张有宏, 吕国志, 李仲, 等. 铝合金结构腐蚀疲劳裂纹扩展与剩余强度研究[J]. *航空学报*, 2007, 28(2): 332-335. ZHANG You-hong, LYU Guo-zhi, LI Zhong, et al. Investigation on corrosion fatigue crack growth and residual strength of aluminum alloy structure[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2007, 28(2): 332-335.
- [23] KROMMENHOEK M, SHAMMA M, MORSE K. Processing, characterization, and properties of aluminum-carbon nanotube open-cell foams[J]. *Journal of materials science*, 2017, 52(7): 3927-3935.
- [24] 李旭东, 穆志韬, 刘治国. 预腐蚀铝合金贯穿疲劳裂纹扩展行为的统一表征模型[J]. *腐蚀与防护*, 2015, 36(7): 648-651. LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo. Unified characterization model for prior-corrosion fatigue short crack propagation behavior of aluminum alloy[J]. *Corrosion & protection*, 2015, 36(7): 648-651.
- [25] 沈海军. 高强度铝合金腐蚀疲劳机理与腐蚀疲劳全寿命工程模型[D]. 西安: 西北工业大学, 2000. SHEN Hai-jun. Corrosion fatigue mechanism of high strength aluminum alloy and full-life engineering model for corrosion fatigue[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000.