

# 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展

李斌<sup>1,2</sup>, 董丽虹<sup>2</sup>, 王海斗<sup>2</sup>, 周永欣<sup>1</sup>, 高冲<sup>3</sup>

(1.西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2.陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 3.沈阳工业大学 机械工程学院, 沈阳 110870)

**摘要:** 铝合金因具有高的比强度、比模量, 好的加工性能及焊接性能, 在航空航天领域应用广泛。而腐蚀疲劳是造成航空航天材料失效的重要原因之一, 因其危害性高、破坏性强且难以提前预测等特点, 受到了广泛关注。铝合金腐蚀疲劳问题一直是飞机日历寿命研究中的重点问题, 随着可重复使用航天器理念的提出, 多次空天往返和地面修复过程也使腐蚀疲劳问题在可重用航天器上不可忽视。综述了近年来航空航天铝合金腐蚀疲劳的研究现状, 从航空铝合金腐蚀疲劳机理的角度, 归纳了腐蚀疲劳裂纹萌生和扩展机制。从腐蚀疲劳环境模拟和腐蚀环境等效两方面, 介绍了目前主要的实验室腐蚀疲劳试验技术。分别从材料因素、环境因素和力学因素, 分析对腐蚀疲劳裂纹扩展及寿命的影响。重点关注了腐蚀疲劳交替形式下疲劳寿命的特点。提出了在多因素共同影响下的腐蚀疲劳裂纹扩展、损伤演化和寿命预测, 以及加速腐蚀环境的当量等效。试验与模拟的有机结合, 是今后铝合金腐蚀疲劳的重要发展方向。

**关键词:** 航空航天; 铝合金; 腐蚀疲劳; 腐蚀机制; 环境模拟; 协同/交替试验

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)07-0106-13

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.07.010

## Research Progress on Corrosion Fatigue of Aerospace Aluminum Alloy

LI Bin<sup>1,2</sup>, DONG Li-hong<sup>2</sup>, WANG Hai-dou<sup>2</sup>, ZHOU Yong-xin<sup>1</sup>, GAO Chong<sup>3</sup>

(1. School of Materials Sciences and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. National Key Lab for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**ABSTRACT:** Aluminum alloys are widely used in the aerospace field due to their high specific strength, specific modulus, good workability and welding performance. Corrosion fatigue is one of the important reasons for the failure of aerospace materials. It has attracted wide attention because of its high harmfulness, strong destructiveness and difficulty in predicting in advance. The corrosion fatigue of aluminum alloy has always been a key issue in the study of aircraft calendar life. With the concept of reusable spacecraft, multiple air-to-air round trips and ground repair processes have made corrosion fatigue problems on reusable

收稿日期: 2020-07-13; 修订日期: 2020-12-05

Received: 2020-07-13; Revised: 2020-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51535011)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51535011)

作者简介: 李斌 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展与寿命预测。

**Biography:** LI Bin (1996—), Male, Master, Research focus: corrosion fatigue crack growth and life prediction of aluminum alloy.

通讯作者: 董丽虹 (1972—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为材料无损检测与再制造后的寿命预测。

**Corresponding author:** DONG Li-hong (1972—), Female, Doctor, Associate researcher, Research focus: non-destructive testing and remanufacturing life prediction.

引文格式: 李斌, 董丽虹, 王海斗, 等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 106-118.

LI Bin, DONG Li-hong, WANG Hai-dou, et al. Research progress on corrosion fatigue of aerospace aluminum alloy[J]. Surface technology, 2021, 50(7): 106-118.

spacecraft not to be ignored. Overviews the research status of corrosion fatigue of aerospace aluminum alloys in recent years, summarize the mechanism of corrosion fatigue crack initiation and propagation from the perspective of corrosion fatigue mechanism of aviation aluminum alloys, introduces the main laboratory corrosion fatigue test technology from two aspects of corrosion fatigue environment simulation and corrosion environment equivalent. It analyze the effects of material factors, environmental factors and mechanical factors on corrosion fatigue crack growth and life, focusing on the characteristics of fatigue life under the alternate form of corrosion fatigue. It is proposed that corrosion fatigue crack growth, damage evolution and life prediction under the combined influence of multiple factors, as well as the equivalent equivalent of accelerated corrosion environment, and the organic combination of test and simulation are important development directions for aluminum alloy corrosion fatigue in the future.

**KEY WORDS:** aerospace; aluminum alloy; corrosion fatigue; corrosion mechanism; environmental simulation; pre-corrosion fatigue; alternating corrosion fatigue; collaborative/alternating test

铝合金作为一种强韧性高、耐蚀性好、加工性及焊接性能好的轻质合金,广泛用于航空航天领域,由于其优良的综合性能,成为飞机蒙皮和框架以及航天器主结构的首选材料<sup>[1-3]</sup>,主要作用是承受和传递载荷<sup>[4]</sup>。目前我国大多数飞机都存在“飞少停多”的现象,其中军用飞机日历寿命 95%以上时间均为地面停放状态,地面腐蚀作用远高于空中疲劳,是影响军用飞机日历寿命的主要因素<sup>[5-7]</sup>。与军机相比,民机地面停放时间最高可占到 60%<sup>[8]</sup>,以 x7 和 x8 型飞机为例,其地面停放时间占服役期间的 95%以上,腐蚀问题对飞机寿命产生严重影响。考虑不同地域的影响,长期处于沿海停放状态的飞机,腐蚀损伤占主导地位,服役状态接近预腐蚀疲劳过程。而对于经常高空作业的军机和经常起停的民机,需要考虑高空腐蚀疲劳和地面腐蚀之间交替作用的影响,服役过程可认为是“腐蚀+腐蚀疲劳”交替的结果。当忽略高空飞行时产生的微小腐蚀损伤时,认为飞机在机场停放时腐蚀损伤占主导,在高空飞行时疲劳损伤占主导,其服役过程接近“腐蚀+疲劳+腐蚀+疲劳+…”交替过程。在航天器一次服役过程中,地面试验和组装过程接触腐蚀环境时间短,太空环境下铝合金几乎不发生腐蚀<sup>[9]</sup>,随着航天器可重用技术的发展<sup>[10]</sup>,在航天器多次重用过程中,除了交变载荷造成的疲劳问题外,还面临多次地面维修、试验、组装过程中受到的腐蚀问题。与飞机的腐蚀疲劳不同,可重用航天器服役过程不存在高空腐蚀影响,更符合“腐蚀-疲劳”交替过程。

随着航空航天事业的不断发展,高强度的 2xxx 系(2A12、2024、2219、2090 等)和超高强度的 7xxx 系(7050、7075、7A04、7055 等)铝合金是航空航天工业中应用范围最广、使用量最大的合金,主要应用在机翼、机身蒙皮、翼梁上下缘条、压力舱和整流罩等部位<sup>[11]</sup>。同时还有部分 5xxx 系(5A06、5456、5086、5B70 等)防锈铝合金,由于具有良好的焊接性、疲劳性和耐海洋大气腐蚀性,常被用作飞机发动机、齿轮箱、支架结构和航天器整体壁板等<sup>[12]</sup>,以及

少量的 6xxx 系(6A02、6013 等)和 8xxx 系(8091 等)铝合金,用于制造飞机发动机零件。而腐蚀主要集中在机身蒙皮、机翼前梁腹、翼梁上下缘条、机身长桁外部蒙皮铆钉处、尾部框条等部位,这些也是腐蚀疲劳失效的危险部位<sup>[5]</sup>。

腐蚀疲劳失效是构件在腐蚀环境和交变载荷协同/交互作用下所产生的一种常见失效形式。它不仅仅是单纯的腐蚀作用和疲劳影响的叠加,在腐蚀因素和疲劳应力交互下产生的协同作用,比两者任何一种单独作用影响更大<sup>[13-15]</sup>。数十年来,国内外学者开展大量腐蚀疲劳试验研究,对探究航空航天铝合金腐蚀疲劳机理、腐蚀疲劳影响因素及疲劳寿命变化等方面做出了突出贡献。近年来,又发现了铝合金在腐蚀疲劳交替作用下疲劳寿命的独有特征。本文将从铝合金的腐蚀疲劳机理出发,介绍目前主要的腐蚀疲劳试验技术,归纳分析影响腐蚀疲劳的主要因素和腐蚀疲劳交替下疲劳寿命的特点,并对铝合金腐蚀疲劳未来发展趋势进行展望。

## 1 铝合金腐蚀疲劳机理

### 1.1 腐蚀疲劳裂纹萌生机理

在腐蚀环境下,疲劳裂纹的萌生是一个复杂的过程,与腐蚀环境、力学因素、材料因素等密切相关,其中腐蚀环境具有重要影响,目前研究发现的腐蚀疲劳机理多以腐蚀因素为主,主要有以下几种:

1) 局部腐蚀理论。裂纹通常是在腐蚀环境和循环载荷协同作用下萌生,由材料表面形成的腐蚀坑及局部缺陷引起的应力集中造成的<sup>[16-17]</sup>。目前认为局部腐蚀中点蚀形成的腐蚀坑对铝合金疲劳裂纹萌生过程起着重要作用<sup>[18-19]</sup>,而腐蚀作用对高应力循环区域疲劳寿命影响不明显,但在低应力区域明显<sup>[20]</sup>。该理论适用于对点蚀比较敏感,发生局部腐蚀的铝合金材料,具有一定的局限性,而对于点蚀不敏感的铝合金材料未发生局部腐蚀也能产生腐蚀疲劳过程<sup>[21]</sup>。

2) 阳极溶解-膜破裂理论。铝合金表面钝化膜在外力作用下破裂。有氧化膜保护部分和局部裸露部分在腐蚀环境下构成了原电池, 裸露区作为阳极不断被溶解, 直至氧化膜被修复, 然后不断重复膜破裂-阳极溶解-膜修复的过程, 从而引起疲劳裂纹萌生。

3) 表面吸附理论。腐蚀环境中的铝合金表面会吸附活性物质, 使其表面能降低, 表面强度下降, 机械性能降低。此时受到循环应力作用, 容易造成疲劳破坏。氢原子在吸附铝合金表面后, 会向内部扩散造成氢脆破坏。

## 1.2 腐蚀疲劳裂纹扩展机理

在腐蚀疲劳过程中, 以光滑试样为例, 裂纹萌生寿命仅占腐蚀疲劳总寿命 10%, 而裂纹扩展寿命则占到 90%。所以腐蚀疲劳试样的使用寿命以腐蚀疲劳扩展寿命为主。腐蚀疲劳扩展机理与萌生机理存在部分相似, 主要有三种腐蚀疲劳裂纹扩展理论: 1) 形变活化促进阳极溶解机理; 2) 氢脆机理; 3) 表面能下降模型。

早期人们认为铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展以阳极溶解理论为主, 阳极溶解机制解释了周期性暴露的裂纹尖端的局部阳极溶解, 会加速腐蚀疲劳的裂纹扩展, 如图 1 所示。阳极溶解机理取决于裂纹尖端处保护膜的破裂, 以及随后新暴露的新鲜金属表面的再钝化。腐蚀疲劳裂纹的扩展速率将由裸露表面的阳极溶解速率、再钝化速率、氧化膜破裂速率、反应物向溶解表面的传质速率来控制。

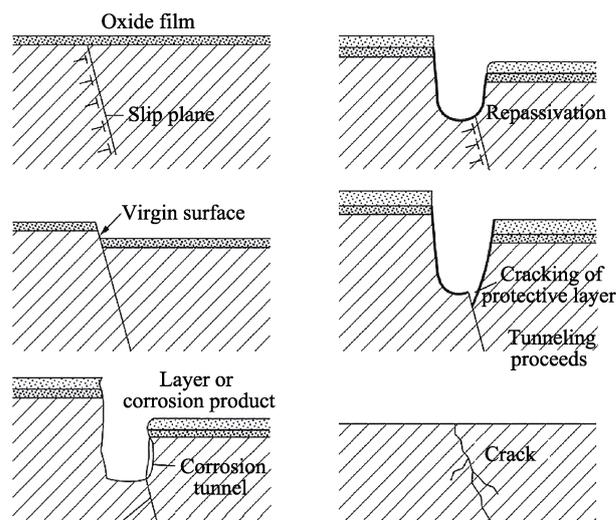


图 1 形变活化腐蚀促进阳极溶解原理<sup>[22]</sup>  
Fig.1 Schematic diagram of deformation activated corrosion promoting anode dissolution<sup>[22]</sup>

进一步研究发现, 基体中铝发生阳极溶解会生成氢。图 2 给出了应力作用下发生氢致开裂裂纹扩展的过程: a) 裂纹尖端应力集中, 并引起位错运动; b) 在应力作用下, 氢与位错的相互作用, 以及氢原子的扩散, 使裂纹尖端氢浓度增高; c) 当裂纹尖端的氢浓度达到临界值时, 发生氢脆, 使尖端裂纹向前扩展, 然后重复此过程。目前对于腐蚀疲劳裂纹扩展, 人们越来越倾向于氢脆机理, 但关于氢是如何扩散进入材料内部, 引发氢脆破坏的, 还需从合金氢致开裂的微观机理上进行探究。

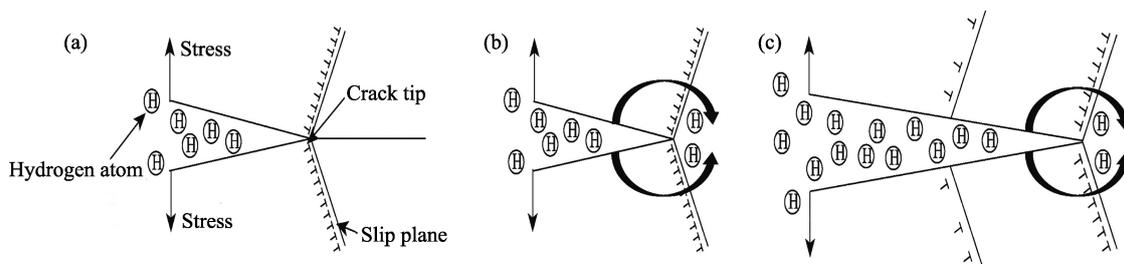


图 2 氢致开裂裂纹尖端示意<sup>[23]</sup>  
Fig.2 Schematic diagram of crack tip for hydrogen-induced cracking<sup>[23]</sup>

表面能下降模型与裂纹萌生机理中的吸附理论相似, 该模型与氢脆机理都属于环境导致材料本身的疲劳性能发生变化, 但表面能下降模型应用范围较小, 吸附的活性粒子对材料的作用机理也尚不清楚<sup>[24]</sup>。

材料的腐蚀疲劳裂纹萌生和扩展机制均与腐蚀环境有着密切关系, 而裂纹的萌生受局部腐蚀中点蚀产生腐蚀坑的影响较大。阳极溶解机理和氢致开裂理论对裂纹扩展均有较大影响。在阳极溶解主导的腐蚀疲劳中, 裂纹扩展是交变应力和材料表面在腐蚀介质中发生化学反应溶解的过程。在氢致开裂主导的腐蚀疲劳中, 由于氢原子扩散进入基体, 使基体发生氢脆, 在交变应力作用下产生脆性裂纹, 并发生扩展。

这两种机理并非独立存在, 而是处于两者共存、相互竞争的状态。同时, 研究发现腐蚀疲劳裂纹扩展机理不是单独存在的, 往往以某一机理为主、多种机理复合存在<sup>[25]</sup>。

## 2 腐蚀疲劳实验技术

由于材料在真实服役环境中的失效过程极为漫长, 很难在实际腐蚀环境下进行疲劳研究。因此, 有必要建立在实验室条件下的加速腐蚀疲劳试验方法, 包括实际服役环境与实验室腐蚀环境的等效和腐蚀疲劳环境的模拟。

## 2.1 腐蚀疲劳环境的模拟

目前, 对于腐蚀疲劳主要以三种耦合形式进行模拟:

1) 腐蚀疲劳同步实验技术, 即腐蚀环境和交变载荷同时作用, 直至发生破坏, 所得试验数据是疲劳因素和环境因素协同作用的结果。该类实验操作较为复杂, 如图 3 所示, 一般需要在疲劳试验机上自制腐蚀环境盒, 建立腐蚀疲劳环境条件, 以便实现材料在腐蚀介质下的疲劳耐久性试验和裂纹状态检测。黄小光等<sup>[26]</sup>利用“环境小盒”研究了 LY12CZ 铝合金在 3.5%NaCl 腐蚀疲劳协同下, pH 变化对腐蚀疲劳裂纹扩展的影响, 发现中性环境时, 裂纹扩展以阳极溶解机制为主导, 但随着 pH 的降低, 这种主导作用逐渐被析氢反应代替, 酸性环境下的氢离子使得裂尖材料发生氢脆, 腐蚀疲劳裂纹扩展速率将大幅提高。王驰全等<sup>[27]</sup>研究了 2 种航空铝合金 (2E12-T3、7050-T7451) 在 3.5%NaCl 腐蚀疲劳协同下的疲劳寿命, 发现随着应力水平降低, 腐蚀与疲劳载荷的协同作用增强, 疲劳性能下降更明显。

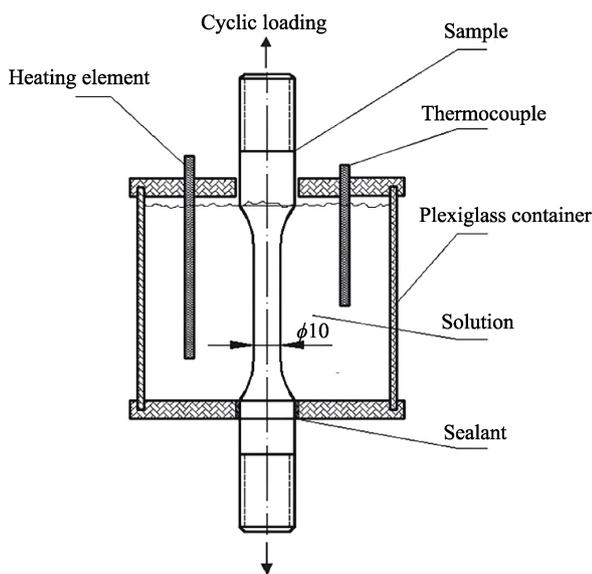


图 3 疲劳试样和“环境小盒”示意图<sup>[20]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of fatigue samples and “environmental box”<sup>[20]</sup>

2) 预腐蚀疲劳实验技术, 即先腐蚀成核后, 再增加疲劳载荷, 直至疲劳失效。据资料显示<sup>[5-7]</sup>, 我国军用飞机疲劳加载时间不到日历时间的 5%, 而 95%以上时间处于停飞状态, 且高空腐蚀环境对疲劳强度的影响较小。针对这类飞机一般采用先地面腐蚀、后空中疲劳的模式, 即采用预腐蚀疲劳实验技术。但在飞机沿海飞行任务多, 疲劳加载时间较长的情况下, 就需要考虑腐蚀疲劳交替作用。研究已发现预腐蚀造成的损伤会加速疲劳失效过程。黄炎峰等<sup>[28]</sup>研究了不同预腐蚀时间下, 7075-T6 铝合金腐蚀坑特征及

疲劳裂纹扩展, 随着腐蚀时间的增加, 腐蚀坑表面尺寸增加, 通常会与相邻的腐蚀坑汇聚形成凹坑簇, 应力水平较高时, 存在多个裂纹从单个坑或凹坑簇萌生, 并扩展。Liu 等<sup>[29]</sup>对 2024-T62 铝合金进行预腐蚀疲劳试验, 发现预腐蚀对疲劳 S-N 曲线和疲劳裂纹萌生行为有显著影响, 但对裂纹扩展行为没有影响。许良等<sup>[30]</sup>指出由于预腐蚀损伤的存在, 预腐蚀后的裂纹萌生寿命仅占总寿命的 20%以下, 疲劳寿命急剧下降。Sankaran 等<sup>[31]</sup>采用循环盐雾法对 7075-T6 铝合金进行预腐蚀实验, 发现点蚀会使疲劳寿命降低为原来的 1/6~1/8。

在针对飞机用高强铝合金腐蚀疲劳的研究中, 还有基于有限元模拟对腐蚀疲劳寿命的预测研究。Medina-Pérez 等<sup>[32]</sup>将腐蚀试验与有限元结合, 研究了预腐蚀机翼的疲劳寿命, 准确评估了预腐蚀飞机机翼的疲劳寿命。Cerit 等<sup>[33]</sup>基于有限元分析研究了半椭圆形腐蚀点处的应力分布, 得到凹坑纵横比 ( $a/2c$ ) 是影响应力集中系数 (SCF) 的主要参数, 同时发现高强度铝合金局部 (点蚀) 腐蚀处的应力集中, 是疲劳裂纹形核的潜在原因。胡平等<sup>[34]</sup>采用弹塑性损伤本构方程和弹塑性损伤演化模型, 来评估疲劳损伤, 提出了一种连续损伤力学方法, 并改进了凹坑演化模型, 同时利用 ABAQUS 数值模拟, 有效预测了铝合金的腐蚀疲劳寿命。吕胜利等<sup>[35]</sup>利用 AFGROW 软件模拟了各种腐蚀损伤和腐蚀坑深度对试样剩余疲劳寿命的影响, 预测了腐蚀坑引起的应力和裂纹成核位点, 建立了一种有效可靠的预测腐蚀标本疲劳寿命的工程方法。目前, 在飞机铝合金的腐蚀疲劳研究中, 预腐蚀疲劳实验技术的应用广泛而全面。

3) 腐蚀-疲劳交替实验技术, 是指材料在一定的循环周期下进行环境腐蚀和载荷疲劳的交互实验。腐蚀和疲劳两者之间的交互作用, 会导致材料的疲劳性能发生变化。目前, 学者们<sup>[36]</sup>普遍认为飞机在沿海机场停放时, 几乎不受疲劳载荷作用, 是腐蚀损伤占主导; 而飞机在空中服役时, 高空腐蚀环境造成的损伤也可以忽略不计, 疲劳损伤占主导。由此认为对于沿海环境下, 高空飞行任务多的军机和频繁起停的民机, 服役过程经受腐蚀和疲劳交替作用, 即“腐蚀+疲劳+腐蚀+疲劳+...”循环过程。第一次交替过程可以等同于预腐蚀疲劳过程, 但一般比预腐蚀导致的腐蚀损伤影响要小, 之后结构受到腐蚀损伤后, 再遭受疲劳作用, 两者以一定周期依次交替。此交替形式也符合可重用航天器多次空天往返及地面修复过程中受到的腐蚀疲劳作用。陈跃良等<sup>[37]</sup>为了研究腐蚀与疲劳的交替顺序对铝合金的寿命影响, 将“腐蚀-疲劳”和“疲劳-腐蚀-疲劳”试验下的 LY12CZ 铝合金疲劳寿命作对比, 发现后一种条件下的疲劳寿命更长, 且增幅随预疲劳寿命的增加而降低, 但腐蚀与疲劳交替顺序对疲劳寿命影响无明显差别。

目前,在铝合金腐蚀疲劳耦合形式的研究中,预腐蚀疲劳居多,尤其是针对预腐蚀产生的点蚀、腐蚀坑对裂纹萌生扩展和疲劳寿命的影响,而对于腐蚀疲劳协同和交替方面还需进一步研究。在复杂交互形式下,多影响因素下的裂纹发展机制尚不明确,对疲劳寿命影响规律仍无统一论。

## 2.2 腐蚀环境的等效

自然环境暴露试验下能获得真实、可靠、直观的腐蚀数据,但受试验周期长、成本高、不易实现的限制。为了在试验中获得准确、快速的腐蚀疲劳试验数据,实验室加速腐蚀方法的研究意义重大。用较短的时间达到实际服役环境中数月乃至数年的腐蚀效果,这就要求编制加速腐蚀当量环境谱,具体原则如下<sup>[38-39]</sup>:

1) 必须遵循疲劳关键部位局部腐蚀损伤相等原则;

2) 必须能再现实际结构的关键部位在实际服役环境中产生的腐蚀损伤形式、特征以及腐蚀产物组分;

3) 确定腐蚀时间与实际腐蚀时间的加速当量关系,即在同一可靠度条件下,相同腐蚀深度对应的实际腐蚀时间和实验室加速腐蚀时间的比值;

4) 加速腐蚀当量环境谱应尽量简化,以保证腐蚀试验环境易于实现。

加速腐蚀当量关系是实验室环境与实际环境联系的“纽带”,但当量腐蚀时间的确定仍是国内外研究的一个技术难题。目前加速腐蚀当量关系确立方法有:

1) 以金属腐蚀电流  $I_c$  相等为准则的当量折算法;

2) 基于腐蚀损伤相等,则疲劳强度(寿命)相同的疲劳强度对比法;

3) 以腐蚀损伤相同为准则的腐蚀程度对比法。

但前两种方法在工程上难以测定实际结构腐蚀电流  $I_c$  和结构关键部位疲劳寿命,且两者在时间和经费上消耗大,难以广泛应用。因此,腐蚀程度对比法在确定加速腐蚀当量关系的实际应用中有可行。

张胜等<sup>[40]</sup>基于万宁试验场环境对 2024-T4 铝合金试样进行了 7、12、20 年的暴露测试,之后进行了大气预腐蚀疲劳试验,以试样厚度为腐蚀损伤的特征量,根据腐蚀损伤特征量相等的原则,确定加速度当量关系,提出了一种模拟沿海大气腐蚀的实验室加速腐蚀测试方法,但确定的加速当量关系只适用于发生剥落腐蚀后。刘成臣等<sup>[41]</sup>对 2A12 材料进行海洋环境自然暴露试验和实验室加速腐蚀试验,以点蚀形成的腐蚀坑深分布规律,衡量腐蚀程度的一致性,获得了腐蚀程度在 95%置信度下,加速腐蚀时间和自然暴露时间的当量关系。腐蚀环境的等效重点是建立腐蚀当量环境谱,当量腐蚀关系的确定,必须要有大量的加速模拟试验数据及结构关键部位的腐蚀损伤试验数据,再进行理论分析推导,并建立数学模型得出,实验周期较长,难度较大。

## 3 腐蚀疲劳影响因素

### 3.1 材料因素

不同材料的成分、组织、热处理状态不同,其耐蚀性也不同,直接导致耐腐蚀疲劳性不同。研究发现,当 5xxx 的 Al-Mg 合金中 Mg 含量大于 3.5% 时,沿晶界析出  $\beta$  相 ( $Al_3Mg_2$ ) 作为阳极优先溶解,容易产生晶间腐蚀和应力腐蚀倾向<sup>[42]</sup>。同时,铝合金中 Zn、Fe、Cu、Sn 等元素的存在,也会降低合金的耐蚀性,对于不含 Cu 元素的 7xxx 系列合金 (Al-Zn-Mg),其具有较好的耐蚀性。在 Al-Mg-Si 合金 A6061 中,Sn 含量为 0.03% 时,可以细化晶界,提高耐蚀性。然而,Sn 含量较高 (0.4%) 时,会形成阳极  $Mg_2(Si,Sn)$  相,发生严重的腐蚀<sup>[43]</sup>。但随着 Sc、Zr 元素的加入,具有细化晶粒及再结晶的促进作用,对合金晶间腐蚀和剥落腐蚀有很好地抑制作用,但 Sc、Zr 元素复合合金化对腐蚀疲劳性能的影响还需进一步研究。

与 2xxx 和 7xxx 系列可热处理强化合金相比,3xxx 和 5xxx 系列不可热处理强化合金一般具有更高的耐蚀性<sup>[44]</sup>。2024 铝合金中存在的  $Al_2CuMg$  和  $Al_2Cu$  金属化合物能很好地改善其机械性能,但增加了发生局部腐蚀的可能,主要是因为引起了晶间腐蚀的敏感性<sup>[45]</sup>,通常需要进行人工时效或表面处理来提高耐蚀性能。Moutarlier 等<sup>[46]</sup>发现 2024 铝合金经过阳极氧化后,在 NaCl 溶液中的耐蚀性明显提高。Gadpale 等<sup>[47]</sup>发现 2014 铝合金在较低的时效温度和较短的时效时间下,具有较高的耐蚀性,这是因为其析出相在基体中均匀分布。Niu 等<sup>[48]</sup>分析了 2024 和 7075 铝合金搅拌摩擦焊异种焊接的剥落腐蚀性能,发现 2024 铝合金具有最佳的耐蚀性能,最大腐蚀深度比 7075 母材小约 0.6 mm。2024 铝合金搅拌侧中不连续分布的晶界析出物和无析出物区,可降低前进侧的晶间腐蚀程度。同时指出晶粒大小不同,晶间腐蚀敏感性也不同,焊接接头前进侧的细小再结晶晶粒表现出比母材更高的晶间腐蚀敏感性。

Holtz 等<sup>[49]</sup>研究发现 5083-H131 铝合金腐蚀疲劳性能与晶界析出相有关。McMahon 等<sup>[50]</sup>研究了不同成分 (AA5083 和 AA5456) 的两种合金在回火状态 (-H131、-H116 和 -SHTQ) 下的腐蚀敏感性,对于恒定的 -H116 高温,富含 Mg 的 AA5456 对晶间应力腐蚀的敏感性低于 AA5083。因 2xxx 和 7xxx 系铝合金具有较低的耐蚀性,目前腐蚀疲劳的主要研究集中在此类合金中,在 6xxx 和 8xxx 铝合金方面研究较少。Kairy 等<sup>[51]</sup>研究了时效处理下 Cu 含量对 6xxx 系铝合金亚稳态点蚀行为的影响。得出过时效处理会形成较大的析出物,抗点蚀性最大。通过在 0.1 mol/L NaCl 溶液下的电化学测试,发现随 Cu 含量的增加,点蚀速率降低。由于 Li 元素的化学性质活泼,铝锂合金

在复杂环境下的腐蚀敏感性较高。目前,大量研究致力于通过合金化<sup>[52-53]</sup>和热处理<sup>[54-55]</sup>,来改变析出相的种类和分布,从而改善合金的腐蚀敏感性。AA8090-T81 合金在海水中易遭受孔蚀破坏,且显微组织的不均匀性将增加其孔蚀敏感性,而 AA2090Al-Li 合金在进行时效处理时,组织中会存在晶界析出的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相,亚晶界及位错处析出的  $\text{Al}_2\text{CuLi}$  相,沿晶界及亚晶界边缘形成贫 Cu 的无沉淀带 (PFZ), PFZ 组织对其腐蚀性能有很大的影响<sup>[56]</sup>。成分影响组织,组织决定性能,不同成分的材料具有不同的耐蚀性,添加元素的差别也会导致耐蚀性变化,而材料的组织、析出相、热处理等都会影响腐蚀敏感性变化,不同材料的腐蚀疲劳性各有特点,还需要进行广泛的研究。

## 3.2 环境因素

### 3.2.1 介质及浓度的影响

航空航天用铝合金所处腐蚀环境具有明显的地域特征。内陆环境下存在潮湿大气、工业大气对材料的影响;沿海环境下存在海洋大气和海水对材料的影响。由于海洋大气和海水形成的是具有高含氧量、高盐雾的腐蚀环境<sup>[57]</sup>,对材料疲劳性能影响尤为强烈。在实验室模拟海洋环境试验中,常采用质量分数为 3%~3.5%的 NaCl 溶液加以模拟<sup>[58]</sup>。学者们<sup>[59-60]</sup>研究

发现不同腐蚀介质对 7xxx 系铝合金腐蚀疲劳寿命的影响顺序为“油箱积水>盐水>盐雾>潮湿空气>实验室空气”,并发现了腐蚀介质中  $\text{Cl}^-$  的存在会加剧试样的应力集中效应。此外,不同腐蚀介质对疲劳裂纹扩展速率的影响也不同,7xxx 系铝合金在 3.5%NaCl 腐蚀环境比空气中的裂纹扩展速率提高了 1 倍。在低  $\Delta K$  范围内,LY12-CZ 在盐水中的裂纹扩展速率是空气中的 3 倍,并随着  $\Delta K$  的增加,影响逐渐减弱。Prabhu 等<sup>[61]</sup>评估了 6xxx 系 Al-Mg-Si 合金分别在不同浓度的  $\text{H}_3\text{PO}_4$  和 NaOH 溶液中的腐蚀行为,发现与  $\text{H}_3\text{PO}_4$  溶液相比,NaOH 溶液中的腐蚀速率明显更高,并且腐蚀速率随着酸、碱的浓度和温度的升高而增加。腐蚀介质浓度对裂纹扩展速率影响显著。图 4 为 LY12-CZ 铝合金在 3.5%NaCl 溶液和 5.0%NaCl 溶液下的断裂形态,以形成的条纹尺寸来比较裂纹扩展速率, Yang 等<sup>[62]</sup>发现在 5.0%NaCl 溶液下的疲劳裂纹扩展速率比 3.5%NaCl 溶液下的裂纹扩展速率快约 4~6 倍,说明腐蚀液浓度增加,氯离子对钝化膜破坏增加,不同浓度下同种腐蚀介质对裂纹扩展速率影响很大。另外研究还发现,腐蚀液作用时间越长,对铝合金表面损伤越大,腐蚀液流速越快,腐蚀介质更容易全面作用在材料表面,且由于溶液流动冲刷作用,容易将腐蚀产物从材料表面剥离,疲劳寿命越短。

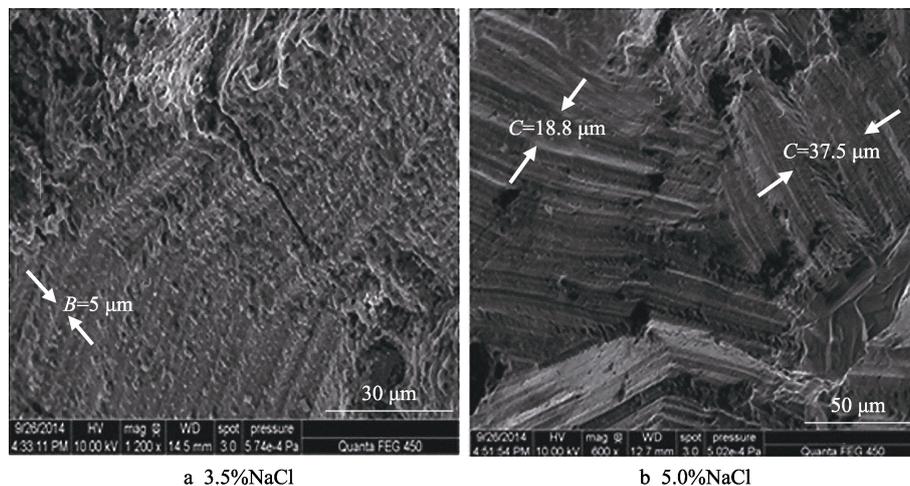


图 4 LY12-CZ 铝合金在不同介质浓度下的断裂形态<sup>[62]</sup>

Fig.4 Fracture morphologies for LY12-CZ aluminium alloy at the different medium concentrations<sup>[62]</sup>

### 3.2.2 温湿度的影响

环境温度与湿度的变化都会影响高强铝合金的腐蚀疲劳寿命。在高湿度环境下,水蒸气和氧含量较高,容易在材料表面发生反应,生成原子氢,在循环载荷作用下引发氢脆,加速裂纹扩展速率。随着湿度的降低,裂纹扩展速率降低,在空气和潮湿空气中的裂纹扩展实验(实验室进行)证明了这一点<sup>[63]</sup>。较高的温度会提高介质活性,加速腐蚀介质在试样表面的化学反应,加速腐蚀坑的形成,促进裂纹萌生。在高的腐蚀温度下,高强铝合金腐蚀疲劳寿命会降低,如

图 5 所示,腐蚀温度由 25 °C 升高到 75 °C 时,合金平均疲劳寿命均降低,且温度越高,平均疲劳寿命降低越多<sup>[64]</sup>。

### 3.2.3 pH 值影响

高强铝合金在  $2 < \text{pH} < 10$  范围内发生点蚀的现象普遍存在,随着 pH 值增大,腐蚀疲劳裂纹的萌生数量和扩展速率均有所降低,而在 pH 值低于 2 或高于 10 时,一般会发均匀腐蚀<sup>[65-66]</sup>。航天铝合金 7075 在不同 pH 值下的裂纹扩展速率变化如图 6 所示,随着 pH 值的降低,溶液腐蚀性增强,合金的临界应力

强度因子降低, 裂纹扩展速率提高, 加速了腐蚀疲劳的破坏。在酸性腐蚀环境中, pH 值的降低会造成氢离子浓度增加, 促进高强铝合金表面钝化膜的溶解, 导致氢脆或通过金属阳极溶解促进裂纹扩展<sup>[67]</sup>; 在中性腐蚀环境下, 疲劳裂纹扩展加速作用是以阳极溶解为主导; 碱性腐蚀环境下, 溶液中由于氧化还原反应的发生, 生成  $Al(OH)_3$  等氢氧化物沉淀, 形成钝化膜, 抑制裂纹尖端阳极溶解, 裂纹扩展速率降低。生海等<sup>[68]</sup>发现 2024-T351 铝合金在 pH=5~7 的 NaCl 溶液中, 其表面可生成稳定的氧化膜, 在 pH=3 的 NaCl 溶液中, 铝合金表面难以形成稳定存在的氧化膜, 基体金属与腐蚀液直接接触发生溶解。实验室研究海洋环境影响时的 pH 值一般取 2~7。

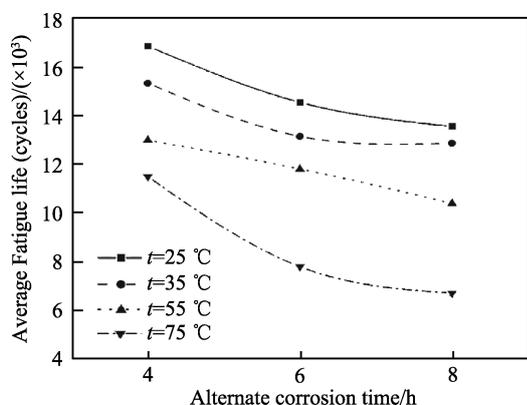


图5 不同交替腐蚀时间和腐蚀温度下的平均寿命<sup>[64]</sup>  
Fig.5 The average life under different alternate corrosion time and corrosion temperatures<sup>[64]</sup>

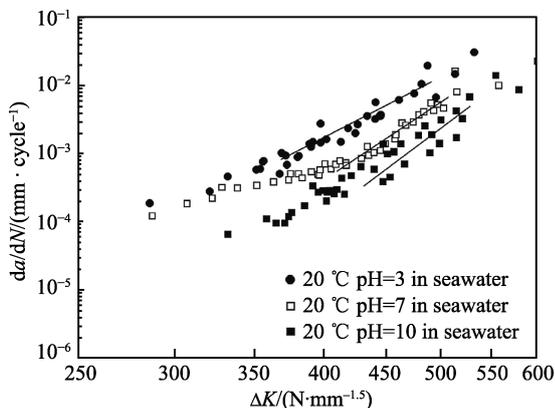


图6 不同 pH 值海水中的 7075 合金的裂纹扩展速率与应力强度因子的关系<sup>[69]</sup>  
Fig.6 Relationship between crack growth rates and stress intensity factor range of the 7075 alloy in seawater at three pH values<sup>[69]</sup>

### 3.3 力学因素

#### 3.3.1 应力比的影响

应力比对腐蚀疲劳裂纹扩展速率有着显著影响, 一般来说, 随着应力比的提高, 裂纹扩展速率提高。李春艳等<sup>[70]</sup>测定了不同应力比下 ( $R=0.1、0.3、0.5$ ) 的  $da/dN-\Delta K$  曲线, 发现随着  $R$  值的增加, 疲劳

裂纹门槛值逐渐减小。Sabelkin 等<sup>[71]</sup>研究了 3.5% 盐水环境下 7075-T6 铝合金中腐蚀坑向裂纹的转变过程, 发现在相同腐蚀环境中, 裂纹萌生周期会随着施加的疲劳应力增加而减小。Liu 等<sup>[72]</sup>对 2024-T62 铝合金在不同应力比下的预腐蚀实验进行了研究, 发现在实验室空气中,  $R=-1$  时存在小裂纹效应, 而  $R=0.06$  时不存在; 在 3.5%NaCl 溶液下,  $R=-1、0.06$  时, 均未出现小裂纹效应, 说明预腐蚀下的小裂纹效应不明显。但在  $R=0.06$  时, 不同腐蚀介质对裂纹扩展影响基本相同。腐蚀疲劳裂纹扩展速率有着明显的门槛特征, 由 Paris 公式可知, 其随着应力强度因子  $\Delta K$  的增加而增大, 但当  $\Delta K$  接近门槛值时, 裂纹扩展速率随应力比的增大而不断升高。当在高  $\Delta K$  水平区域, 不同应力比下的裂纹扩展速率相差不大。可以认为, 应力比主要影响近门槛值区域的腐蚀疲劳裂纹扩展。

#### 3.3.2 加载频率影响

加载频率的高低对裂纹扩展速率有着重要影响, 但对其影响机理还需进一步验证。人们普遍认为, 较低频率更有利于腐蚀环境和循环载荷之间的协同作用, 容易促进裂纹扩展<sup>[73-74]</sup>。在 1~10 Hz 下, 加载频率越低, 腐蚀疲劳裂纹扩展速率越高<sup>[69]</sup>, 解释为加载频率的降低使得腐蚀时间相对延长, 腐蚀产生的氢由裂纹尖端向内部扩散充分而造成氢脆, 加速裂纹扩展。但实验发现当频率低于 1 Hz 时, 其裂纹扩展速率明显低于较高频率, 并且在 0.1 Hz 和 1 Hz 之间几乎未发现裂纹扩展的差异。Menan 等<sup>[75]</sup>学者发现还存在负频率依赖性, 即 Al-Cu-Mg 合金在盐溶液中的裂纹扩展速率随频率降低而降低, 并且在 Al-Zn-Mg 合金中也观察到了类似的效果。由此提出了两种假设: 一种是低频下形成的裂纹闭合效应, 腐蚀引起的闭合效应在该频率范围内达到饱和; 另一种是钝化膜的产生与阳极溶解和/或氢脆机理之间的竞争作用<sup>[76]</sup>。李旭东等<sup>[77]</sup>提出了加载频率对航空铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响模型, 实验验证仅适用于稳态扩展区, 对于接近瞬断区的裂纹扩展评估结构偏低。Shafiq 等<sup>[78]</sup>还证明了在较低的负载频率下, 腐蚀疲劳裂纹扩展速率随加载频率的增加而减小, 频率对裂纹扩展的影响与材料耐腐蚀性能息息相关。因此, 频率作为关键因素, 它对腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响尚未澄清, 需要针对多种不同材料开展研究, 揭示其对腐蚀疲劳裂纹行为的作用机理。

#### 3.3.3 加载波形影响

波形作为频率和应力强度因子范围 ( $\Delta K_i$ ) 的函数, 主要从频率和保载时间上影响铝合金的腐蚀疲劳性能。加载波形包括正弦波、三角波、方波、锯齿波等。不管波形如何, 在高应力区保载时间越长, 裂纹扩展速率 (FCGRs) 都会增加, 腐蚀环境下还易诱发应力腐蚀加速失效过程。Menan 等<sup>[79]</sup>研究了 2024 铝合金在正弦波和锯齿波下的裂纹扩展速率 (FCGRs)

的变化,如图 7 所示,发现频率为 1 Hz 时,在负锯齿波下的 FCGRs 与在高频下测得的 FCGRs 相似,高于在正弦信号下同频率测得的 FCGRs。而不考虑周期持续时间,在正锯齿波下,相同频率下的传播比正

弦波形慢。匡林等<sup>[80]</sup>对未腐蚀试件按高-低加载顺序进行疲劳试验,发现其临界累积损伤小于 1;而在低-高加载顺序下,临界累积损伤大于 1。但预腐蚀后试件的疲劳损伤累积规律则呈现出相反的规律。

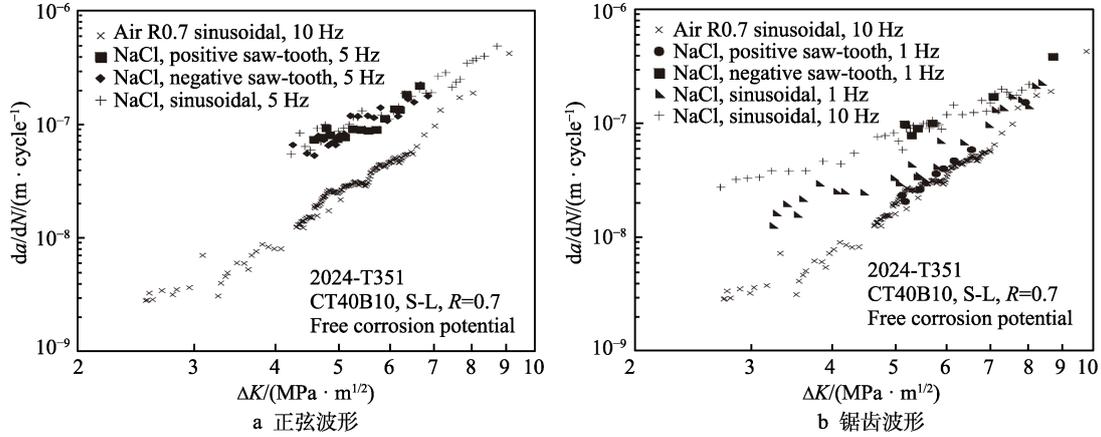


图 7 正弦波形和锯齿波形在空气和盐水溶液中的疲劳裂纹扩展速率<sup>[79]</sup>  
Fig.7 Fatigue crack propagation rates for waveforms sinusoidal and saw-tooth in saline solution<sup>[79]</sup>

### 3.4 交替因素

腐蚀疲劳影响最复杂的就是腐蚀环境和循环应力之间的交互作用,这种交互作用是指腐蚀环境与交变载荷疲劳之间的相互作用,即在一定的周期内进行交替。多次交替情况下,需要考虑腐蚀疲劳损伤累积特点。疲劳损伤随着施加的载荷循环而累积增加,导致材料随腐蚀时间而破坏。姚卫星等<sup>[81]</sup>提出了基于 LY12-CZ 铝合金在交替腐蚀或循环载荷下的累积疲劳损伤规则,获得了在腐蚀时间、载荷水平和循环周次的不同组合下,与试验结果良好吻合的剩余疲劳寿命。李晓虹等<sup>[82]</sup>对 2A12 铝合金的腐蚀疲劳交替试验损伤行为进行了研究,腐蚀和疲劳的耦合作用会加剧疲劳寿命的降低。腐蚀疲劳交替过程越频繁,对试样的损伤越严重。

在诸多影响因素中,单位腐蚀时间和单位疲劳周次对腐蚀疲劳交替过程的影响尤为重要。而腐蚀交替频数影响试样的单次腐蚀时间,在总腐蚀时间一定的情况下,腐蚀疲劳交替频数越高,相对腐蚀时间越短,疲劳在交替过程中占主导地位,疲劳寿命相对较高。崔腾飞等<sup>[83]</sup>对 7B04-T6 铝合金进行等效实验,实验室周期浸润加速腐蚀 192 h (当量等效于外场暴露 12 个月),以此模拟外场腐蚀 2、3、6、12 个月情况,并分别进行了 1 次、2 次、4 次和 6 次的腐蚀疲劳交替频数试验,如图 8 所示 ( $n$  代表交替频数),研究证明了腐蚀疲劳交替频数增加,疲劳寿命相对增加。这是因为交替频数决定腐蚀时间,腐蚀时间越长,越容易导致应力集中,从而促进疲劳加载阶段微裂纹的萌生和扩展,为下一次腐蚀提供了更多的腐蚀通道,导致更严重的破坏。陈跃良等<sup>[84]</sup>研究发现腐蚀疲劳交替寿命可能超过总的疲劳寿命,这意味着交替试验可

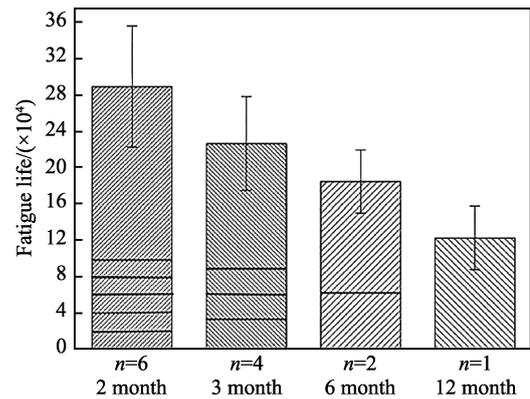


图 8 腐蚀/疲劳交替频数对疲劳寿命的影响<sup>[83]</sup>  
Fig.8 Influence of corrosion/fatigue alternate frequency on fatigue life<sup>[83]</sup>

提高疲劳寿命。

陈亚军等<sup>[84]</sup>研究了 7075-T651 航空铝合金在恒定单位疲劳周次  $n$  和不同单位腐蚀时间  $t$  下,腐蚀交替多轴疲劳行为的影响规律,当交替过程中疲劳周次一定,随着交替频数的增加,总腐蚀时间越长。图 9 为试样表面形貌随交替频数改变的变化,当  $t=6$  h 时,在腐蚀和多轴疲劳载荷的不断交替下,损伤累积加剧,之前的腐蚀损伤会加速疲劳裂纹萌生与扩展。腐蚀时间增长后,腐蚀损伤占主导地位,大大降低疲劳寿命,直至累积损伤达到最大值,发生断裂失效。

当单位腐蚀时间与疲劳周次在交替过程中同时变化时,张海威等<sup>[85]</sup>提出以飞行强度=疲劳循环周次/腐蚀天数,来定义加载模式对 LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳交替寿命。如图 10 所示,飞行强度越大,表明疲劳因素影响越大,腐蚀影响较小,在相同的飞行强度下,单次疲劳周次越大,腐蚀疲劳寿命越高。同时,腐蚀疲劳交替下疲劳寿命均大于预腐蚀疲劳寿命。而

当单次腐蚀时间和疲劳周次成比例变化时,无法简单地判断腐蚀或疲劳的损伤程度,需要比较两者的影响

程度和主导地位。目前关于腐蚀疲劳交替作用下对寿命影响规律方面还没有得到一定的规律。

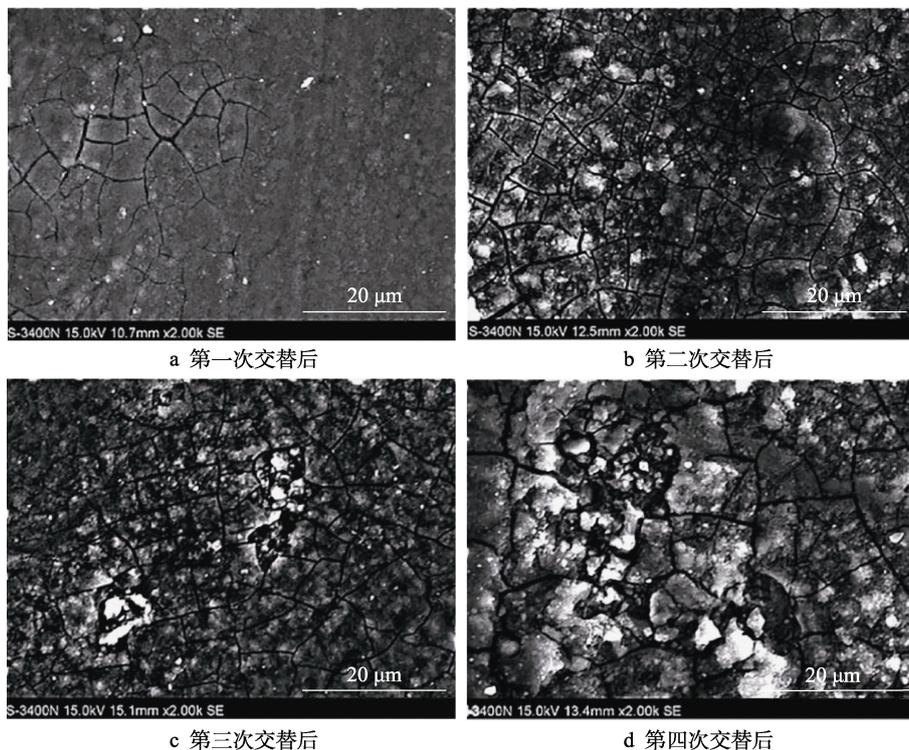


图9 7075-T651 铝合金试样表面形貌随交替频数改变的变化<sup>[84]</sup>

Fig.9 Changes of the surface morphology of 7075-T651 aluminum alloy specimen with the change of alternating frequency<sup>[84]</sup>: a) after the first alternation; b) after the second alternation; c) after the third alternation; d) after the fourth alternation

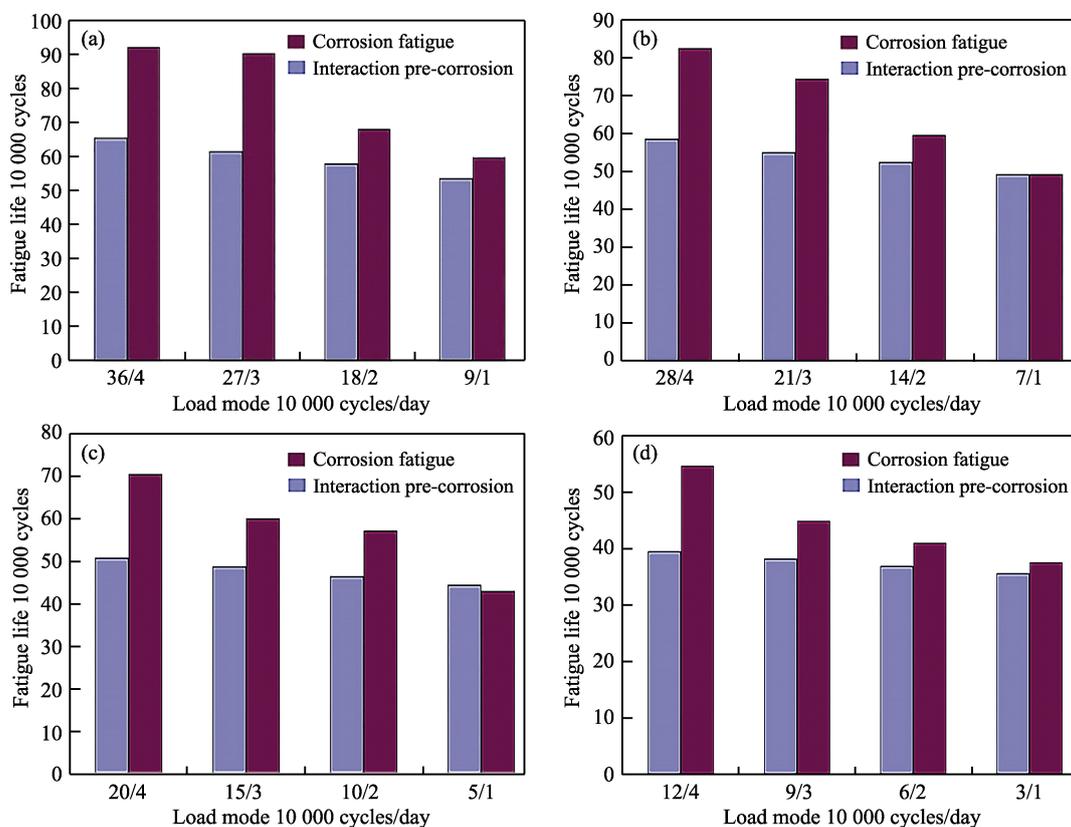


图10 不同飞行强度的疲劳寿命<sup>[85]</sup>

Fig.10 Fatigue life of different flight strengths<sup>[85]</sup>

## 4 结论与展望

本文主要综述了近年来航空航天铝合金腐蚀疲劳的研究现状。腐蚀疲劳是一个极为复杂的问题, 影响因素复杂多变。目前的研究多集中在预腐蚀疲劳方面, 关于对腐蚀-疲劳协同/交替作用下的腐蚀疲劳问题的研究还处于起步阶段, 对腐蚀-疲劳协同作用下的裂纹萌生、扩展机制机理、疲劳性能影响、疲劳寿命等方面的研究还有待进一步探索, 仍有以下几个方面需进一步研究:

1) 腐蚀-疲劳协同/交替作用下的疲劳行为变化规律及相关机制机理。腐蚀疲劳的研究是要准确获得在确定诸多影响因素、不同腐蚀疲劳机制、不同裂纹形式下的疲劳寿命预测, 建立能够有效预测腐蚀疲劳寿命的模型。

2) 腐蚀时间的当量等效。在腐蚀疲劳实验研究中, 通常在加速腐蚀环境下进行试验, 但是自然环境下的实际腐蚀时间与实验室建立的腐蚀时间之间没有成熟的等效关系, 难以确保实验室加速腐蚀研究中试验结果的可信度。

3) 腐蚀疲劳损伤演化。腐蚀疲劳的损伤演化是一个极其复杂的问题, 对材料和环境具有很高的依存性, 需要开展大量实验进行腐蚀疲劳损伤演化模型的研究。

4) 数值模拟与实验研究有机结合。利用模拟仿真技术, 将理论与实践相结合, 即将数值模拟与实验研究有机结合起来, 对铝合金腐蚀疲劳问题的研究意义重大。

### 参考文献:

- [1] GUÉRIN M, ALEXIS J, ANDRIEU E, et al. Corrosion-fatigue lifetime of aluminium-copper-lithium alloy 2050 in chloride solution[J]. *Materials & design*, 2015, 87: 681-692.
- [2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials & design*, 2014, 56: 862-871.
- [3] 施丽铭, 杨鹏, 周志勇, 等. 国内外航天器密封舱主结构材料的选用[J]. *航天器工程*, 2013, 22(5): 136-141.  
SHI Li-ming, YANG Peng, ZHOU Zhi-yong, et al. Material selection of primary structure for sealed module of spacecraft in China and other countries[J]. *Spacecraft engineering*, 2013, 22(5): 136-141.
- [4] 王惠芬, 杨碧琦, 刘刚. 航天器结构材料的应用现状与未来展望[J]. *材料导报*, 2018, 32(S1): 395-399.  
WANG Hui-fen, YANG Bi-qi, LIU Gang. Application status and future prospect of materials for spacecraft structures[J]. *Materials review*, 2018, 32(S1): 395-399.
- [5] 陈群志, 房振乾. 飞机结构日历寿命及腐蚀防护研究应关注的问题[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(6): 72-77.  
CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian. Consideration on some calendar life and corrosion protection questions of aircraft structures[J]. *Equipment environmental engineering*, 2012, 9(6): 72-77.
- [6] 陈跃良, 张勇. 军用飞机结构日历寿命相关问题的思考[J]. *航空工程进展*, 2010, 1(4): 311-316.  
CHEN Yue-liang, ZHANG Yong. Considerations on the calendar life of military aircraft structures[J]. *Advances in aeronautical science and engineering*, 2010, 1(4): 311-316.
- [7] 陈群志, 吴志超. “飞-停”比对飞机使用寿命消耗的影响研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(1): 1-4.  
CHEN Qun-zhi, WU Zhi-chao. Effect of flying-grounding ratio on service life of aircraft[J]. *Equipment environmental engineering*, 2012, 9(1): 1-4.
- [8] 贺崇武, 马双双, 刘辉. 民用飞机防护体系加速试验谱研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(1): 41-44.  
HE Chong-wu, MA Shuang-shuang, LIU Hui. Study on accelerated test spectrum for civil airplane protection system[J]. *Equipment environmental engineering*, 2013, 10(1): 41-44.
- [9] COOPER R, UPADHYAYA H P, MINTON T K, et al. Protection of polymer from atomic-oxygen erosion using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atomic layer deposition coatings[J]. *Thin solid films*, 2008, 516(12): 4036-4039.
- [10] 李志杰, 果琳丽, 张柏楠, 等. 国外可重复使用载人飞船发展现状与关键技术研究[J]. *航天器工程*, 2016, 25(2): 106-112.  
LI Zhi-jie, GUO Lin-li, ZHANG Bai-nan, et al. Study on development status and key technologies of reusable manned spacecraft[J]. *Spacecraft engineering*, 2016, 25(2): 106-112.
- [11] RAMA KRISHNA L, MADHAVI Y, SAHITHI T, et al. Enhancing the high cycle fatigue life of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2019, 42(3): 698-709.
- [12] 朱资鉴. 新型航天用铝镁和铝锌镁合金材料概述[J]. *中国战略新兴产业*, 2018(4): 75.  
ZHU Zi-jian. Overview of aluminum-magnesium and aluminum-zinc-magnesium alloy materials for aerospace use [J]. *China strategic emerging industry*, 2018(4): 75.
- [13] WANG C Q, XIONG J J, SHENOI R A, et al. A modified model to depict corrosion fatigue crack growth behavior for evaluating residual lives of aluminum alloys[J]. *International journal of fatigue*, 2016, 83: 280-287.
- [14] DUQUESNAY D L, UNDERHILL P R, BRITT H J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading[J]. *International journal of fatigue*, 2003, 25(5): 371-377.
- [15] QUISPITUPA A, SHAFIQ B, SUÁREZ O M, et al. Corrosion fatigue of high-strength aircraft structural alloys[J]. *Journal of aircraft*, 2006, 43(3): 787-792.

- [16] EZUBER H, EL-HOUD A, EL-SHAWESH F. A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater[J]. *Materials & design*, 2008, 29(4): 801-805.
- [17] CHEN Ya-jun, LIU Chen-chen, ZHOU Jian, et al. Multiaxial fatigue behaviors of 2024-T4 aluminum alloy under different corrosion conditions[J]. *International journal of fatigue*, 2017, 98: 269-278.
- [18] DOS SANTOS J F, OLEA C A W, COELHO R S, et al. Metallurgy and weld performance in friction stir welding [M]. Amsterdam: Elsevier, 2010: 314-410.
- [19] CO N E C, BURNS J T. Effects of macro-scale corrosion damage feature on fatigue crack initiation and fatigue behavior[J]. *International journal of fatigue*, 2017, 103: 234-247.
- [20] YE Zuo-yan, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Corrosion fatigue behavior of 7A85 aluminum alloy thick plate in NaCl solution[J]. *Acta metallurgica sinica (english letters)*, 2015, 28(8): 1047-1054.
- [21] CHEN Ming-yang, DENG Yun-lai, TANG Jian-guo, et al. A study of the crystallographic pitting behavior of Al-0.54Mg-0.66Si aluminum alloy in acidic chloride solutions[J]. *Materials characterization*, 2019, 148: 259-265.
- [22] WOODTLI J, KIESELBACH R. Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking[J]. *Engineering failure analysis*, 2000, 7(6): 427-450.
- [23] CHEN X, GERBERICH W W. The kinetics and micro-mechanics of hydrogen assisted cracking in Fe-3 pct Si single crystals[J]. *Metallurgical transactions A*, 1991, 22(1): 59-70.
- [24] 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.
- [25] SHEN Lin, CHEN Hui, CHE Xiao-li, et al. Corrosion-fatigue crack propagation of aluminum alloys for high-speed trains[J]. *International journal of modern physics B*, 2017, 31(16-19): 1744009.
- [26] 黄小光, 王黎明, 曹宇光. LY12CZ 铝合金在人工海水中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(6): 95-98.  
HUANG Xiao-guang, WANG Li-ming, CAO Yu-guang. Corrosion fatigue crack growth behavior of LY12CZ aluminum alloy in artificial seawater[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2015, 39(6): 95-98.
- [27] 王池权, 熊峻江. 3.5%NaCl腐蚀环境下2种航空铝合金材料疲劳性能试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(11): 225-230.  
WANG Chi-quan, XIONG Jun-jiang. Relative tests on fatigue properties of aluminum alloys in 3.5% NaCl corrosion environment[J]. *Engineering mechanics*, 2017, 34(11): 225-230.
- [28] HUANG Yong-fang, YE Xu-bin, HU Ben-run, et al. Equivalent crack size model for pre-corrosion fatigue life prediction of aluminum alloy 7075-T6[J]. *International journal of fatigue*, 2016, 88: 217-226.
- [29] 刘建中, 陈勃, 叶序彬, 等. 含腐蚀预损伤铝合金 2024-T62 的疲劳断裂行为及基于断裂力学的寿命预测[J]. *航空学报*, 2011, 32(1): 107-116.  
LIU Jian-zhong, CHEN Bo, YE Xu-bin, et al. Fatigue and crack growth behavior of pre-corroded aluminum alloy 2024-T62 and its life prediction based on fracture mechanics[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2011, 32(1): 107-116.
- [30] XU Liang, YU Xiang, HUI Li, et al. Fatigue life prediction of aviation aluminium alloy based on quantitative pre-corrosion damage analysis[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(6): 1353-1362.
- [31] SANKARAN K K, PEREZ R, JATA K V. Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: Modeling and experimental studies[J]. *Materials science and engineering: A*, 2001, 297(1-2): 223-229.
- [32] MEDINA-PÉREZ R O, GARCÍA-GARCÍA V, PONCIANO-GUZMÁN J N, et al. Assessment of fatigue life of a pre-corroded aircraft wing under drag alternating load[J]. *Engineering failure analysis*, 2020, 115: 104671.
- [33] CERIT M, GENEL K, EKSI S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit[J]. *Engineering failure analysis*, 2009, 16(7): 2467-2472.
- [34] HU Ping, MENG Qing-chun, HU Wei-ping, et al. A continuum damage mechanics approach coupled with an improved pit evolution model for the corrosion fatigue of aluminum alloy[J]. *Corrosion science*, 2016, 113: 78-90.
- [35] LV Sheng-li, WANG Zhen-guo, XU Cheng-long, et al. Three-dimension reconstruction of pit corrosion damage morphology and digital simulation[J]. *Applied mechanics and materials*, 2010, 44-47: 4186-4190.
- [36] LI Chang-fan, HE Yu-ting, FENG Yu, et al. The reliability life of 7B04 aluminum alloy under alternate action of corrosion and fatigue[J]. *Mathematical problems in engineering*, 2016, 2016: 1-9.
- [37] 陈跃良, 卞贵学, 衣林, 等. 腐蚀和疲劳交替作用下飞机铝合金疲劳性能及断裂机理研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(20): 73-79.  
CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, YI Lin, et al. Research on fatigue characteristic and fracture mechanics of aluminum alloy under alternate action of corrosion and fatigue [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2012, 48(20): 73-79.
- [38] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(1): 48-52.  
LIU Yuan-hai, REN San-yuan. Study on equivalent accelerated corrosion test environment spectrum of typical marine atmosphere[J]. *Equipment environmental engineering*, 2011, 8(1): 48-52.
- [39] 刘成臣, 王浩伟, 杨晓华. 不同材料在海洋大气环境下的加速环境谱研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(2): 18-24.

- LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, YANG Xiao-hua. Study of accelerated corrosion test environment spectrum of different materials in marine atmospheric environment[J]. *Equipment environmental engineering*, 2013, 10(2): 18-24.
- [40] ZHANG Sheng, ZHANG Teng, HE Yu-ting, et al. Effect of coastal atmospheric corrosion on fatigue properties of 2024-T4 aluminum alloy structures[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2019, 802: 511-521.
- [41] 刘成臣, 王浩伟, 鲁国富. 2A12 铝合金当量加速腐蚀试验[J]. *腐蚀与防护*, 2014, 35(5): 458-461.  
LIU Cheng-chen, WANG Hao-wei, LU Guo-fu. Equivalent accelerated corrosion test of 2A12 aluminum[J]. *Corrosion & protection*, 2014, 35(5): 458-461.
- [42] MENG Chun-yan, ZHANG Di, ZHUANG Lin-zhong, et al. Correlations between stress corrosion cracking, grain boundary precipitates and Zn content of Al-Mg-Zn alloys[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2016, 655: 178-187.
- [43] HE Chuan, LUO Bing-hui, ZHENG Ya-ya, et al. Effect of Sn on microstructure and corrosion behaviors of Al-Mg-Si alloys[J]. *Materials characterization*, 2019, 156: 109836.
- [44] XHANARI K, FINŠGAR M. Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions: A review[J]. *Arabian journal of chemistry*, 2019, 12(8): 4646-4663.
- [45] DE BONFILS-LAHOVARY M L, LAFFONT L, BLANC C. Characterization of intergranular corrosion defects in a 2024 T351 aluminium alloy[J]. *Corrosion science*, 2017, 119: 60-67.
- [46] MOUTARLIER V, VIENNET R, GIGANDET M P, et al. Use of ultrasound irradiation during acid etching of the 2024 aluminum alloy: Effect on corrosion resistance after anodization[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2020, 64: 104879.
- [47] GADPALE V, BANJARE P N, MANOJ M K. Effect of ageing time and temperature on corrosion behaviour of aluminum alloy 2014[J]. *IOP conference series: Materials science and engineering*, 2018, 338: 012008.
- [48] NIU P L, LI W Y, LI N, et al. Exfoliation corrosion of friction stir welded dissimilar 2024-to-7075 aluminum alloys[J]. *Materials characterization*, 2019, 147: 93-100.
- [49] HOLTZ R L, PAO P S, BAYLES R A, et al. Corrosion-fatigue behavior of aluminum alloy 5083-H131 sensitized at 448 K (175 °C)[J]. *Metallurgical and materials transactions A*, 2012, 43(8): 2839-2849.
- [50] MCMAHON M E, STEINER P J, LASS A B, et al. The effect of temper and composition on the stress corrosion cracking of Al-Mg alloys[J]. *Corrosion*, 2017, 73(4): 347-361.
- [51] KAIRY S K, ROMETSCH P A, DAVIES C H J, et al. The influence of copper additions and aging on the microstructure and metastable pitting of Al-Mg-Si alloys[J]. *Corrosion*, 2015, 71(11): 1304-1307.
- [52] GUMBANN E, LEFEBVRE W, DE GEUSER F, et al. The effect of minor solute additions on the precipitation path of an AlCuLi alloy[J]. *Acta materialia*, 2016, 115: 104-114.
- [53] LI J F, BIRBILIS N, LIU D Y, et al. Intergranular corrosion of Zn-free and Zn-microalloyed Al-xCu-yLi alloys [J]. *Corrosion science*, 2016, 105: 44-57.
- [54] HUANG Jia-lei, LI Jin-feng, LIU Dan-yang, et al. Correlation of intergranular corrosion behaviour with microstructure in Al-Cu-Li alloy[J]. *Corrosion science*, 2018, 139: 215-226.
- [55] YE Zhi-hao, CAI Wen-xin, LI Jin-feng, et al. Impact of annealing prior to solution treatment on aging precipitates and intergranular corrosion behavior of Al-Cu-Li alloy 2050[J]. *Metallurgical and materials transactions A*, 2018, 49(6): 2471-2486.
- [56] TRAVERSO P, BECCARIA A M, POGGI G. Corrosion behaviour of aluminium-lithium alloy 8090-T81 in sea water[J]. *British corrosion journal*, 1995, 30(3): 227-232.
- [57] ZHANG Wei-fang, JIN Ting-zhu, LOU Wei-tao, et al. Mechanical properties and corrosion behavior of 5A06 alloy in seawater[J]. *IEEE access*, 2018, 6: 24952-24961.
- [58] AN J, CHEN J, GOU G, et al. Prediction of corrosion fatigue crack initiation behavior of A7N01P-T4 aluminum alloy welded joints[J]. *International journal of modern physics B*, 2017, 31(16-19): 1744034.
- [59] 马少华, 回丽, 周松, 等. 腐蚀环境对预腐蚀铝合金腐蚀疲劳性能的影响[J]. *材料工程*, 2015, 43(2): 91-95.  
MA Shao-hua, HUI Li, ZHOU Song, et al. Influence of corrosion environments on corrosion fatigue property of pre-corroded aluminum alloy[J]. *Journal of materials engineering*, 2015, 43(2): 91-95.
- [60] 周松, 王勇刚, 回丽, 等. 腐蚀预损伤与盐水环境对 7XXX 铝合金疲劳性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(14): 74-77.  
ZHOU Song, WANG Yong-gang, HUI Li, et al. Influence of pre-corrosion damage and saline environment on fatigue property of 7XXX aluminum alloy[J]. *Hot working technology*, 2016, 45(14): 74-77.
- [61] DEEPA P, PADMALATHA R. Corrosion behaviour of 6063 aluminium alloy in acidic and in alkaline media[J]. *Arabian journal of chemistry*, 2017, 10: S2234-S2244.
- [62] YANG H H, WANG Y L, WANG X S, et al. Synergistic effect of environmental media and stress on the fatigue fracture behaviour of aluminium alloys[J]. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2016, 39(10): 1309-1316.
- [63] NIEBUHR J, DORMAN S G, ARUNACHALAM S, et al. Effect of simulated accelerated atmospheric environment conditions on fatigue crack growth rates[J]. *Corrosion*, 2019, 75(5): 506-512.
- [64] CHEN Ya-jun, LIU Chen-chen, ZHOU Jian, et al. Effect of alternate corrosion factors on multiaxial low-cycle fatigue life of 2024-T4 aluminum alloy[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2019, 772: 1-14.

- [65] HUANG I W, BUCHHEIT R. Uniform corrosion dependence on temperature and pH of aluminum alloys 2024-T3[J]. ECS transactions, 2015, 66(17): 97-107.
- [66] CALABRESE L, BONACCORSI L, GALEANO M, et al. Identification of damage evolution during SCC on 17-4 PH stainless steel by combining electrochemical noise and acoustic emission techniques[J]. Corrosion science, 2015, 98: 573-584.
- [67] CUI T F, LIU D X, ZHANG X H, et al. Effect of pre-corrosion on the fatigue behavior of AA7B04 and life forecast[J]. Materials and corrosion, 2016, 67(11): 1152-1163.
- [68] 生海, 董超芳, 肖葵, 等. pH 值对 2024-T351 铝合金在 NaCl 溶液中电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(2): 107-110.  
SHENG Hai, DONG Chao-fang, XIAO Kui, et al. Effect of pH on electrochemical behavior of 2024-T351 aluminium alloy in NaCl solution[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(2): 107-110.
- [69] MENG Xiang-qi, LIN Zhuo-ying, WANG Fei-fei. Investigation on corrosion fatigue crack growth rate in 7075 aluminum alloy[J]. Materials & design, 2013, 51: 683-687.
- [70] 李春艳, 于风云, 黄一维, 等. 应力比对 6082T651 铝合金疲劳裂纹扩展行为影响[J]. 实验室科学, 2019, 22(1): 53-56.  
LI Chun-yan, YU Feng-yun, HUANG Yi-wei, et al. Influence stress ratio on fatigue crack propagation behavior of 6082T651 Al alloy[J]. Laboratory science, 2019, 22(1): 53-56.
- [71] SABELKIN V, PEREL V Y, MISAK H E, et al. Investigation into crack initiation from corrosion pit in 7075-T6 under ambient laboratory and saltwater environments[J]. Engineering fracture mechanics, 2015, 134: 111-123.
- [72] LIU J Z, CHEN B, YE X B, et al. Effect of pitting corrosion on fatigue and crack growth behavior of both aluminum alloy 2024-t62 and its panel[C]// Congress of the international council of the aeronautical sciences, Nice: [s. n.], 2010.
- [73] ROZALI S, MUTOH Y, NAGATA K. Effect of frequency on fatigue crack growth behavior of magnesium alloy AZ61 under immersed 3.5 mass% NaCl environment[J]. Materials science and engineering: A, 2011, 528(6): 2509-2516.
- [74] MENAN F, HENAFF G. Influence of frequency and waveform on corrosion fatigue crack propagation in the 2024-T351 aluminium alloy in the S-L orientation[J]. Materials science and engineering: A, 2009, 519(1-2): 70-76.
- [75] MENAN F, HENAFF 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.
- [76] ILMAN M N. Chromate inhibition of environmentally assisted fatigue crack propagation of aluminium alloy AA 2024-T3 in 3.5% NaCl solution[J]. International journal of fatigue, 2014, 62: 228-235.
- [77] 李旭东, 穆志韬, 贾明明. 加载频率对航空铝合金腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(7): 50-52.  
LI Xu-dong, MU Zhi-tao, JIA Ming-ming. Effect of loading frequency on corrosion fatigue crack growth rate of aerospace aluminum alloy[J]. Materials for mechanical engineering, 2014, 38(7): 50-52.
- [78] SHAFIQ B, AGARWALA V S. Corrosion fatigue in 7075-T6 aluminum: Life prediction issues for carrier based operations[J]. Journal of aircraft, 2004, 41(2): 393-398.
- [79] 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.
- [80] 匡林, 杨晓华, 张珂, 等. 预腐蚀铝合金腐蚀疲劳累积损伤规律研究[J]. 强度与环境, 2008, 35(4): 51-55.  
KUANG Lin, YANG Xiao-hua, ZHANG Ding, et al. Research on corrosion fatigue cumulative damage rules of pre-corrosive aluminum[J]. Structure & environment engineering, 2008, 35(4): 51-55.
- [81] YAO W X. A cumulative fatigue damage rule under the alternative of corrosion or cyclic loading[J]. Acta metallurgica sinica (English letters), 2007, 20(1): 65-71.
- [82] 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.
- [83] CUI Teng-fei, LIU Dao-xin, CAI Jian, et al. Effect of pre-corrosion and corrosion/fatigue alternation frequency on the fatigue life of 7B04-T6 aluminum alloy[J]. Journal of materials research, 2016, 31(24): 3869-3879.
- [84] 陈亚军, 刘辰辰, 王付胜. 预腐蚀和交替腐蚀作用下航空铝合金多轴疲劳行为及寿命预测[J]. 航空学报, 2019, 40(4): 222465.  
CHEN Ya-jun, LIU Chen-chen, WANG Fu-sheng. Multiaxial fatigue behavior and life prediction of aerospace aluminum alloy under pre-corrosion and alternate corrosion [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2019, 40(4): 222465.
- [85] ZHANG Hai-wei, HE Yu-ting, LIU Chao, et al. Effect of interactive periods to corrosion-fatigue life on LY12CZ alloy[J]. Applied mechanics and materials, 2011, 66-68: 96-101.