

# 金属材料腐蚀疲劳研究进展

符朝旭<sup>1</sup>, 黎小锋<sup>2</sup>, 罗来正<sup>1</sup>

(1.中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039; 2.重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

**摘要:** 首先归纳了金属材料的腐蚀疲劳裂纹萌生机理和扩展机制, 从材料自身因素、外界力学因素和环境因素三方面分析了腐蚀疲劳影响因素, 简要介绍了环境腐蚀-疲劳载荷交互试验和环境腐蚀-疲劳载荷协同试验研究现状及重要性, 并展望了金属材料腐蚀疲劳今后研究的重要方向, 为金属材料腐蚀疲劳的试验开展、机理探索和工程应用奠定基础。

**关键词:** 金属材料; 腐蚀疲劳; 交互/协同试验

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.016

**中图分类号:** TJ04; G172

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)07-0071-05

## Research Progress on Corrosion Fatigue of Metal Materials

FU Zhao-xu<sup>1</sup>, LI Xiao-feng<sup>2</sup>, LUO Lai-zheng<sup>1</sup>

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

**ABSTRACT:** The crack initiation mechanism and extension mechanism of corrosion fatigue were summarized in this paper. The influence factors of corrosion fatigue were analyzed from material itself, external mechanical factors and environmental factors. The research status and importance of environmental corrosion-fatigue load interactive test and environmental corrosion-fatigue load cooperative test were briefly introduced. And the research direction of corrosion fatigue of metal materials was prospected. It lays a foundation for corrosion fatigue test, mechanism exploration and engineering application of metal materials in future.

**KEY WORDS:** metallic materials; corrosion fatigue; interactive/synergistic test

飞机、车辆及船舶等装备金属材料在自然环境服役过程中, 一方面承受自然界中高温、高湿、高盐雾、强太阳辐射和频繁的干/湿交替作用等多种环境因素的腐蚀综合影响, 另一方面遭受反复的拉伸、压缩、弯曲和扭转等疲劳载荷影响。这种环境腐蚀和疲劳载荷协同/交互作用导致装备结构或构件因开裂或断裂提前失效的现象称为腐蚀疲劳<sup>[1]</sup>, 而环境腐蚀和交变载荷协同/交互作用远大于环境腐蚀和疲劳载荷单独作用的简单迭加<sup>[2-3]</sup>, 极易造成装备关键结构件和部分功能件提前失效, 严重威胁装备的可靠安全服役。

例如, 美国空军 F-4 飞机在使用过程中, 发现平尾摇臂出现腐蚀裂纹现象, 导致美国 1600 架 F-4 飞机和其他国家 600 多架 F-4 飞机的全面停飞检查<sup>[4]</sup>。中国台湾华航一架波音 747 飞机由于尾翼产生腐蚀疲劳裂纹, 在飞往香港途中坠入南海, 导致 225 人丧生<sup>[5]</sup>。

腐蚀疲劳断裂已成为装备服役过程中一种常见的失效行为, 因其危害性、破坏性通常无法提前预测, 装备一旦发生腐蚀疲劳断裂, 其结果通常是灾难性的, 这种危害已经越来越受到业界的广泛关注<sup>[6-9]</sup>。

Haigh 于 1917 年率先在海水中观察到钢索的腐蚀疲

收稿日期: 2019-02-11; 修订日期: 2019-02-16

作者简介: 符朝旭 (1987—), 男, 海南万宁人, 工程师, 主要研究方向为环境试验与环境适应性评价。

通讯作者: 罗来正 (1983—), 男, 江西玉山人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验与环境适应性评价。

劳现象。Mcadam 于 1926 年首次提出了“腐蚀疲劳”概念,并发表了相关学术论文。“腐蚀疲劳”概念一经发表,就被广大研究者认同与接受,随之开展了大量的材料及构件腐蚀疲劳研究工作<sup>[10-11]</sup>。数十年来,国内外学者分别从腐蚀疲劳影响因素、腐蚀疲劳试验、腐蚀疲劳机理等多个方面对金属材料开展了大量腐蚀疲劳研究工作。这些研究工作极大地推动了腐蚀疲劳试验开展、腐蚀疲劳机理探索及工程应用等,研究成果对装备金属材料及结构的设计选材、研制及定型、定/延寿和维护维修等具有重要指导意义。

## 1 腐蚀疲劳机理

### 1.1 腐蚀疲劳裂纹萌生机理

关于腐蚀疲劳裂纹萌生机理目前主要有以下几种理论。

1) 局部腐蚀理论。该理论认为,在交变载荷和腐蚀环境的交互或协同作用下,材料表面会形成腐蚀坑,在腐蚀坑的底部和边缘等部位产生应力集中,促进材料表面的腐蚀疲劳源提前生成。这种理论通常适合于发生局部腐蚀的铝合金材料,但不能解释表面没有腐蚀坑仍发生腐蚀疲劳的现象,具有一定的局限性。

2) 形变活化理论,也称为阳极滑移溶解模型。主要涉及三种过程:阳离子的液体扩散、裂纹保护性氧化膜破裂和裸金属表面溶解。该理论认为,在交变载荷作用下,金属材料晶体产生滑移变形,滑移变形区域的活化能高于未发生变形的区域。变形区域和未变形区域与环境腐蚀介质共同组成腐蚀原电池,变形区域和未变形区域分别为阳极和阴极,阳极区域因持续受到腐蚀,不断发生溶解,最终形成疲劳裂纹。该理论目前主要用于解释高强钢的腐蚀疲劳问题,在高等铝等材料腐蚀疲劳中应用很少<sup>[12-13]</sup>。

3) 表面钝化膜破坏理论。该理论认为,金属材料在交变载荷作用下,材料表面同样发生晶体滑移,腐蚀环境中金属表面形成的腐蚀产物阻止了晶体的可逆滑移,造成金属表面位错,导致金属表面钝化膜破裂,并在滑移台阶处形成无膜的微小阳极区,阳极区域快速溶解,直到钝化膜被重新修复为止。这种“滑移-膜破裂-溶解-成膜”的重复过程,逐步形成了腐蚀疲劳裂纹。该理论未考虑渗氢作用等情况,因此其广泛性也值得怀疑<sup>[14]</sup>。

4) 吸附理论。该理论认为,金属材料与腐蚀环境接触时,金属表面会吸附活性物质,其表面能降低,金属表面的键和强度被削弱,金属的力学性能被弱化。当金属遭受交变应力作用时,表面滑移带的产生和微裂纹的扩展更容易进行,由此导致腐蚀疲劳发生。

由于腐蚀疲劳裂纹萌生与金属材料自身及腐蚀环境均密切相关,不同的金属材料在不同腐蚀环境中可能有不同的裂纹萌生机理。因此,目前还没有一种

完善的、通用的理论可准确地解释任何金属材料的腐蚀疲劳过程。

### 1.2 腐蚀疲劳扩展机制

腐蚀疲劳裂纹扩展时裂纹尖端的反应过程如图 1 所示。当金属材料暴露于腐蚀环境中,腐蚀介质首先迁移到裂纹尖端,与裂纹尖端新鲜金属表面发生局部电化学反应。该反应最简单的情况是阳极溶解与阴极放氢,反应可能产生的有害物质氢吸附于金属表面。反应的速度、氢还原的量以及氢在裂纹尖端还原后成为吸附氢将控制这个扩散过程。随着裂纹尖端和金属滑移导致位错不断出现,吸附氢沿着位错带或晶界迁移扩散,进入裂纹尖端前沿区域的吸附氢向高应力区富集,引起材料的局部损伤(如氢脆)。裂纹尖端处电化学反应产生的腐蚀产物,一方面会向外析出产生 Wedge 效应,另一方面腐蚀产物容易堆积在裂纹尖端部位,改变裂纹尖端局部应力状态,引起裂纹的闭合效应。

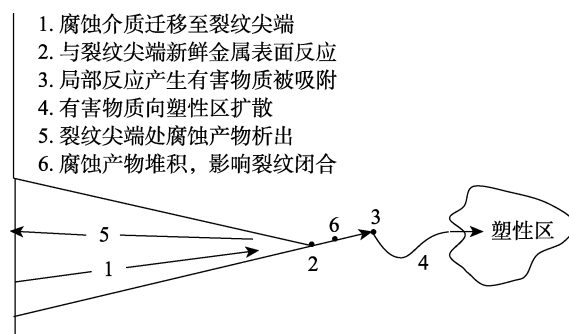


图 1 金属发生腐蚀疲劳时裂纹尖端的行为过程

目前,用来描述金属材料腐蚀疲劳裂纹扩展过程的模型主要有叠加模型和竞争模型。Wei 等<sup>[15]</sup>认为,腐蚀疲劳裂纹扩展过程是一个由交变载荷和环境腐蚀的叠加过程,叠加模型为:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{cf} = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \left(\frac{da}{dN}\right)_c + \left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC}$$

式中:  $\left(\frac{da}{dN}\right)_c$  为循环载荷与腐蚀环境交互/协同作用对裂纹扩展的作用。

Austen 等<sup>[16]</sup>认为,腐蚀疲劳中交变载荷和环境腐蚀均对裂纹扩散起作用,二者并非简单的叠加关系,而是一个竞争关系。即发展较快的一个过程代表腐蚀疲劳裂纹扩展整个过程,竞争模型为:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{cf} = \max \left[ \left(\frac{da}{dN}\right)_f, \left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC} \right]$$

## 2 腐蚀疲劳影响因素

腐蚀疲劳影响因素主要包括材料自身因素、外界力学因素和环境因素三大类<sup>[17]</sup>。其中,材料自身因素

是指材料的成分、热处理及其自身结构的几何尺寸等;力学因素是指疲劳载荷最大应力、应力比、载荷加载频率及加载波形等;环境因素包括温度、湿度、腐蚀介质、干湿交替频率等。

## 2.1 材料自身因素影响

金属材料的成分、热处理方法及组织结构等特性是腐蚀疲劳的内在影响因素,对腐蚀疲劳裂纹萌生与扩展影响至关重要。若金属材料含有杂质,会造成应力集中,增加材料腐蚀疲劳发生的概率,改变材料裂纹扩展速率。陈亚军等<sup>[18]</sup>研究了固溶时效热处理对 GH6149 合金腐蚀疲劳性能影响,分析了材料的组织、显微硬度与交替腐蚀疲劳和间歇疲劳之间的关系。王正<sup>[19]</sup>通过研究发现,临界区热处理能大幅度提高钢的腐蚀疲劳裂纹扩展门槛值,主要是由于临界热处理可以减轻晶间杂质的偏析,从而导致裂纹扩展速率的降低。Jones 等<sup>[20]</sup>通过研究发现,7050 铝合金表面析出相和腐蚀坑存在竞争关系,并成为腐蚀疲劳裂纹源,而且铝合金的金相组织改变了腐蚀偏离的扩展方向。

## 2.2 力学因素影响

对金属材料腐蚀疲劳性能影响最为显著的力学因素是加载频率和应力比。加载频率决定了腐蚀介质与裂尖材料的持续作用时间。一般来说,在给定的加载循环次数下,加载频率越低,腐蚀介质与裂尖材料作用越充分,裂纹扩展速率增大,材料腐蚀疲劳寿命越低。这主要是因为腐蚀介质对裂尖材料作用时间越长,裂纹张开时间增长,腐蚀介质对裂纹的影响效果更显著<sup>[21]</sup>。Kawai 分别在 0.05、0.5、5 Hz 三种频率下,研究了 3% NaCl 腐蚀介质下,不同加载频率对 13CrPH 不锈钢裂纹扩展速率的影响。结果表明,加载频率对裂纹扩展速率的影响大小是:0.05 Hz > 0.5 Hz > 5 Hz。因此,腐蚀疲劳试验过程中,加载频率不能太高。

应力比是交变载荷的最小值和最大值之比,也是腐蚀疲劳裂纹扩展的重要因素。Daniel<sup>[22]</sup>通过研究发现,铝合金腐蚀疲劳过程中,应力比越大,腐蚀疲劳裂纹扩展门槛值越小,且应力比主要影响 A 区和 C 区的裂纹扩展速率。韩恩厚等<sup>[23]</sup>通过研究发现,ZG20SiMn 和 SM50B-Zc 低合金钢腐蚀疲劳试验过程中,应力比越大,材料裂尖应变和应变速率越小,并导致低合金钢氢和氢脆敏感性增大。因此,腐蚀疲劳试验过程中,应力比越低,腐蚀疲劳裂纹扩展速率越大;应力比越大,裂纹扩展速率越小,当应力比接近 1 时,腐蚀疲劳转为应力腐蚀破坏。

## 2.3 环境因素影响

腐蚀介质成分和浓度、溶液 pH 和温度、电位、空气湿度和干/湿交替频率等环境因素均对材料腐蚀疲劳存在较大影响。Agar 等<sup>[24]</sup>研究了在不同腐蚀介

质中 LC4-CS 铝合金的裂纹扩展行为,不同腐蚀介质对铝合金腐蚀疲劳影响程度依次是:3.5% NaCl 溶液 > 3.5% NaCl 盐雾 > 3.5% NaCl 盐雾+SO<sub>2</sub> > 潮湿空气 (RH > 90%) > 室温空气。另外,李鹏等<sup>[25]</sup>研究了 A7N01S-T5 铝合金在 3.5% NaCl 和 5% NaCl 溶液中腐蚀疲劳 S-N 曲线,结果表明,相同腐蚀环境下,腐蚀介质浓度越大,腐蚀疲劳发生时间越早。

藏启山等<sup>[26]</sup>通过研究发现,在相同溶液和应力下,当 pH 从 2.5 增加到 7 时,疲劳寿命也随之增加,但这种增加非常缓慢;当 pH 在 7~10 之间时,疲劳寿命基本不变;当 pH 大于 12 后,疲劳寿命急剧增加。该结果表明,酸性溶液对材料寿命有害。主要是由于 pH 较小时,一方面阴极上氢去极化被加快,腐蚀和裂纹萌生加速;另一方面,pH 值改变会影响裂尖金属膜的生成。pH 值高于 12 后,金属表面会生成 Fe(OH)<sub>2</sub> 保护膜,这种膜在碱性条件下比较稳定。

Gerberich 研究了温度对人造海水中低碳钢腐蚀疲劳性能的影响,结果表明,当温度由 15 °C 上升到 35 °C 时,低碳钢疲劳寿命下降约 1/2;当溶液温度进一步升高至沸点时,低碳钢的疲劳寿命有所增加。这主要是由于温度升高一方面降低了溶液电阻,加速了阴极和阳极形成过程,有利于腐蚀电化学反应的发生;另一方面,温度进一步升高会降低溶液的含氧量,溶液难以形成大面积的阴、阳极区域,不利于腐蚀的发生。

## 3 腐蚀疲劳试验技术

### 3.1 环境腐蚀-疲劳载荷交互试验技术

环境腐蚀-疲劳载荷交互试验是根据一定的循环周期,对金属材料开展环境腐蚀试验和交变载荷疲劳试验的交互/循环试验。通常包括以下两种形式:1) 实验室环境下,对金属材料开展实验室模拟环境腐蚀试验,腐蚀试验结束后,进行交变载荷疲劳试验,并按一定周期进行循环;2) 自然环境下,对金属材料开展自然暴露试验,暴露试验结束后,在实验室环境下进行交变载荷疲劳试验,并按一定周期进行循环。

目前,受试验能力限制,国内外环境腐蚀-疲劳载荷交互试验主要集中于实验室环境腐蚀-疲劳载荷交互试验方面的腐蚀疲劳研究。为了掌握实验室环境下不同环境介质对铝合金腐蚀疲劳的影响程度,AGAR S 等<sup>[27-29]</sup>分别对 LC4-CS 和 LY12-Z 等铝合金开展了腐蚀疲劳试验研究,研究结果表明,环境介质会显著降低高强铝合金的疲劳寿命,环境介质对高强铝合金疲劳寿命影响排序大致如下:海水 > 盐雾 > 潮湿空气 > 干燥空气。为了研究腐蚀与疲劳的交替顺序对铝合金的寿命影响,陈跃良等<sup>[30]</sup>在实验室对 LY12CZ 铝合金开展了“预腐蚀-疲劳”及“疲劳-腐蚀-疲劳”等两类试验,研究发现后者试验中的试验件寿

命更长,且随疲劳寿命的增加而呈降低趋势。张有宏等<sup>[31]</sup>研究了 3.5% NaCl 腐蚀溶液中不同频率对 LY12-CZ 铝合金紧固件疲劳寿命的影响,结果表明,随着频率的增加,LY12-CZ 铝合金紧固件的腐蚀疲劳裂纹扩展速率逐渐降低。

相对于实验室环境腐蚀-疲劳载荷交互试验而言,因为受各种条件限制,自然环境腐蚀-疲劳载荷交互试验研究相对较少。王晴晴等<sup>[32]</sup>首先对 7475 铝合金在海南暴露 1 年,然后在实验室对自然环境腐蚀后的 7475 铝合金进行疲劳试验,结果表明,海洋大气腐蚀显著降低 7475 铝合金的疲劳寿命。上官晓峰等<sup>[33]</sup>将 30CrMnSiNi2A 钢分别在海南和青岛暴露 1 年,研究了海洋大气环境腐蚀后 30CrMnSiNi2A 钢疲劳寿命及断口形貌。

### 3.2 环境腐蚀-疲劳载荷协同试验技术

环境腐蚀-疲劳载荷协同试验是指金属材料在试验过程中,同时受到环境腐蚀和疲劳载荷的双重作用。通常也有两种形式:1) 实验室环境下,将疲劳试验设备疲劳载荷加载部位增加“环境小盒”,这种“环境小盒”通常只模拟一种环境条件,如湿度、温度或腐蚀溶液,实现实验室模拟腐蚀环境与疲劳载荷的协同作用;2) 自然环境下,开发可施加疲劳载荷的试验设备,并安装于户外环境中,在户外环境中对试样开展疲劳试验,实现自然环境腐蚀-疲劳载荷的协同作用。

针对实验室环境腐蚀-疲劳载荷协同试验,沈海军等<sup>[34]</sup>利用“环境小盒”,对 7475-T761 和 LY12CZ 两种铝合金开展了“3.5%NaCl 腐蚀环境体系-疲劳载荷”协同试验,研究了实验室环境腐蚀-疲劳载荷协同作用对两种铝合金的腐蚀疲劳裂纹萌生和扩展行为的影响。张伦武等<sup>[40]</sup>利用自行设计的恒载荷大气应力腐蚀装置,在海南万宁试验站对 7A52 铝合金和 25CrMnSiA 等材料开展了海洋大气环境-恒载荷协同应力腐蚀研究,但其采用的载荷是恒载荷,而并不是腐蚀疲劳试验需要的交变载荷。

由于自然环境腐蚀-疲劳载荷协同试验需要在户外安装疲劳载荷试验设备,而如何保证疲劳载荷试验设备可靠、长久使用是需要解决的首要问题。为了突破气候环境-疲劳载荷协同试验技术,研究自然环境腐蚀与疲劳载荷协同作用对装备材料及结构的影响,罗来正等<sup>[2-3,35]</sup>先后在海南万宁海洋大气环境下,首次研发了海洋气候户外环境-拉、压、弯、扭疲劳载荷协同试验设备及试验方法;在黑龙江漠河寒冷低温环境下,成功研制了高寒气候户外环境-拉、压、弯疲劳载荷协同试验设备。这些协同试验设备及试验方法的成功研发,为材料及结构的自然环境腐蚀-疲劳载荷协同试验及验证提供了必要的基础平台及新的技术手段。

## 4 结语

金属材料在服役工况下会遭受腐蚀疲劳破坏,但目前的研究主要集中在腐蚀性能或疲劳性能,关于腐蚀疲劳方面研究较少,尤其是腐蚀环境-交变载荷协同作用下金属材料的腐蚀疲劳研究更是少见。

今后金属材料腐蚀疲劳研究可能并应该从以下几个方面取得进展:自然环境下,装备实际服役腐蚀环境-交变载荷协同作用下金属材料的腐蚀疲劳性能变化规律及腐蚀疲劳机理研究;腐蚀环境-交变载荷协同作用对金属材料腐蚀疲劳性能的影响;建立更符合实际情况的腐蚀疲劳裂纹扩展寿命预测模型;从腐蚀疲劳机制、寿命预测模型、影响因素等出发,分别建立适合于不同类别金属的腐蚀疲劳机制及寿命预测模型;研究并获取金属腐蚀类型、腐蚀深度等与腐蚀疲劳裂纹扩展之间的关系。

### 参考文献:

- [1] 肖纪美. 应力作用下的金属腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990.
- [2] 罗来正, 肖勇, 王晓辉, 等. 海洋气候环境-拉、压、弯载荷耦合试验设备及试验方法: 中国, CN 109115593A[P].
- [3] 罗来正, 肖勇, 王晓辉, 等. 一种海洋气候环境-扭转载荷耦合试验装置及试验方法: 中国, CN 109163986A [P].
- [4] 文邦伟, 胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. 装备环境工程, 2006, 2(3): 83-87.
- [5] 刘思宏. 舰载机典型机构腐蚀疲劳可靠性分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
- [6] WEI R P, LI C, HARLOW D G, et al, Probability Modeling of Corrosion Fatigue Crack Growth and Pitting Corrosion[J]. Fatigue in New and Aging Aircraft, 1998(1): 197-214.
- [7] WANG Q Y, PIDAPARTI R M, PALAKAL M J. Comparative Study of Corrosion-fatigue in Aircraft Materials[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001, 39(2): 325-330.
- [8] 常红, 韩恩厚, 王俭秋, 等. 飞机蒙皮涂层对 LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳寿命的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1): 34-42.
- [9] 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.
- [10] PIDAPARTI R M, JAYANTI S, SOWERS C A, et al, Classification, Distribution, and Fatigue Life of Pitting Corrosion for Aircraft Materials[J]. Journal of Aircraft, 2002, 39(3): 486-492.
- [11] ZAMBER J E, HILLBERRY B M. Probabilistic Approach to Predict Fatigue Lives of Corroded 2024-T3[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999, 37(10): 1131-1137.

- [12] FU Y, XIONG J, SHENOI R A. New Models for Depicting Corrosion Fatigue Behavior and Calendar Life of Metallic Structural Component[J]. Archive Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 231(2): 207-222.
- [13] WANG L, HUI L, ZHOU S, et al. Effect of Corrosive Environment on Fatigue Property and Crack Propagation Behavior of Al 2024 Friction Stir Weld[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(11): 2830-2837.
- [14] 路民旭, 郑修麟, 秦熊浦. 腐蚀疲劳力学-化学模型研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1991, 11(3): 197-208.
- [15] WEI R P, SIMMONS G W. Recent Progress in Understanding Environment Assisted Fatigue Crack Growth[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17: 235-247.
- [16] AUSTEN I M, MCLNTYRE P. Corrosion Fatigue of High Strength Steel in Low Pressure Hydrogen Gas[J]. Metal Science, 1979, 13(7): 420-428.
- [17] WEI R P, SOEIDEL M O. Phenomenological Aspects of Corrosion Fatigue, Critical Introduction; Corrosion Fatigue: Chemistry[J]. Mechanics and Microstructure, 1972, 9(2): 379-380.
- [18] 陈亚军, 张长田, 张汛涛, 等. 固溶+时效对GH4169合金交替腐蚀疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(8): 158-162.
- [19] 王正. 临界区热处理对腐蚀疲劳抗力的影响[J]. 郑州工学院学报, 1984(2): 21-25.
- [20] JONES K, HOEPPNER D W. The Interaction between Pitting Corrosion, Grain Boundaries, and Constituent Particles during Corrosion Fatigue of 7050-T6 Aluminum Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(4): 686-692.
- [21] 王浦全, 崔广椿. 加载频率对腐蚀疲劳裂纹扩展速率影响的研究[J]. 机械强度, 1992, 11(1): 74-76.
- [22] DANIEL K. Enhanced Model of Partial Crack Closure for Correlation of R-ratio Effects in Aluminum Alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 95-102.
- [23] 韩恩厚, 韩玉梅, 郑宇礼, 等. 应力比和频率对低合金钢腐蚀疲劳裂纹扩展机理的影响[J]. 金属学报, 1993, 29(5): 223-228.
- [24] AGAR S, GRUM J. Evaluation of the Residual Stresses and Corrosion Resistance of Shot-peened 7075 Aluminum Alloy under Different States[J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2016, 53(3/4): 335.
- [25] 李鹏, 吴仁涛, 徐晓龙, 等. 腐蚀介质对 7N01 铝合金焊接接头腐蚀疲劳性能的影响[J]. 中国铁路, 2014(10): 38-41.
- [26] 臧启山, 刘慷, 马敏雅, 等. 频率、pH值和温度对A537海洋用钢腐蚀疲劳性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1989, 1(2): 10-14.
- [27] AGAR S, GRUM J. Evaluation of the Residual Stresses and Corrosion Resistance of Shot-peened 7050 Aluminum Alloy under Different States[J]. International Journal of Material technology, 2016, 53(3/4): 335.
- [28] SU X Y, CAO D G. Corrosion Fatigue Crack Growth of Aluminum Alloy LY12-CZ and LC4-CS in Various Environments[J]. Material Engineering, 1991, 12(1): 48-51.
- [29] HUI L, ZHOU S, XU L, et al. Influence of Corrosion Environment on Corrosion Fatigue Property of Pre-corroded Aluminum Alloy[J]. Material Engineering, 2015, 43(2): 73-78.
- [30] CHEN Y L, BIAN G X, YI L, 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): 70-76.
- [31] 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.
- [32] 王晴晴, 上官晓峰. 海洋大气腐蚀对 7475 铝合金疲劳性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(4): 859-866.
- [33] 上官晓峰, 姜松, 王晴晴. 海洋大气中 30CrMnSiNi2A 钢接触腐蚀疲劳性能研究[J]. 西安工业大学学报, 2014, 34(2): 152-159.
- [34] 沈海军, 郭万林, 吕国志. 飞机谱载下铝合金铆窝孔结构腐蚀疲劳研究[J]. 力学学报, 2003, 35(1): 21-25.
- [35] 张伦武, 郑林, 朱蕾, 等. 7A52 铝合金及 20CrMnSiA 钢焊接件海洋大气应力腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 109-115.
- [36] 罗来正, 王晓辉, 未来, 等. 一种高寒气候环境-拉、压、弯载荷耦合试验装置: 中国, CN 106370532A[P].