

岛礁环境对吊耳疲劳性能影响研究

吴洋^{1,2}, 王玲^{1,3*}, 胡涛^{1,3}, 李茜^{1,3}, 孙有美^{1,3}, 秦艳军^{1,2}, 张先勇^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.黑龙江漠河大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 黑龙江 漠河 165303; 3.弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究吊耳在岛礁环境下的腐蚀特征及其对疲劳性能的影响。**方法** 通过开展吊耳试验件的岛礁自然环境试验, 测试其不同在试验周期的疲劳性能, 分析断口形貌、元素含量变化, 研究腐蚀对吊耳抗疲劳性能的影响。**结果** 在1 a的岛礁自然环境试验中, 吊耳的腐蚀部位主要为表面镀层, 并且呈非均匀腐蚀特征。随着试验时间的延长, 吊耳平均疲劳断裂循环次数呈下降趋势, 疲劳断口的韧性断裂特征减弱, 并且氢含量有所增加。吊耳内部存在MnS夹杂物, 位于韧窝底部。**结论** 吊耳表面点蚀坑、内部MnS夹杂物对疲劳载荷作用下裂纹的萌生和生长起到促进作用, 降低了其抗疲劳性能, 应加强腐蚀防护和质量控制。

关键词: 吊耳; 岛礁环境; 腐蚀; 夹杂物; 变幅载荷; 疲劳性能

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0127-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.01.017

Effect of Island-Reef Environment on Fatigue Performance of Lifting Lug

WU Yang^{1,2}, WANG Ling^{1,3*}, HU Tao^{1,3}, LI Qian^{1,3}, SUN Youmei^{1,3}, QING Yanjun^{1,2}, ZHANG Xianyong^{1,3}

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station for Atmospheric Environmental Material Corrosion in Mohe, Heilongjiang Mohe 165303, China; 3. CSGC Key Laboratory of Ammunition Storage Environmental Effects, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to study the corrosion characteristic of lifting lugs in island-reef environments and its effect on fatigue performance. By natural environment test of the lifting lug used for a missile in a typical island-reef environment, the fatigue performance of the lifting lug were tested by a variable amplitude fatigue test. At the same time, the fracture corrosion morphology and element content were analyzed to study the effect of the island-reef environment on the fatigue performance. The results showed that: after one year of natural environment test, corrosion occurred to the zinc-nickel layer on the lifting lug surface, which showed the characteristics of non-uniform corrosion. During the test period, as the time prolonged, the average fatigue fracture cycle times of the lug decreased, the ductile fracture characteristics of the fatigue fracture surface weakened, and the hydrogen content increased. MnS inclusions were found in the inner part of the lifting lug and located at the bottom of the ligament. The pitting pits on the surface of the lifting lug and the inclusion of MnS inside the lug can promote the initiation and growth of the crack under fatigue loading, and reduce the fatigue resistance of the lug. Therefore, the corrosion and quality

收稿日期: 2023-09-03; 修订日期: 2023-11-12

Received: 2023-09-03; Revised: 2023-11-12

基金项目: 国防科技工业技术基础科研项目 (JSHS2017209B001)

Fund: The Nation Defense Technology Foundation Project (JSHS2017209B001)

引文格式: 吴洋, 王玲, 胡涛, 等. 岛礁环境对吊耳疲劳性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 127-134.

WU Yang, WANG ling, HU Tao, et al. Effect of Island-Reef Environment on Fatigue Performance of Lifting Lug[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 127-134.

*通信作者 (Corresponding author)

control must be strengthened to improve the corrosion fatigue performance of lifting lugs.

KEY WORDS: lifting lug; island-reef environment; corrosion; inclusion; variable amplitude loading; fatigue performance

吊耳是装备和工程应用中的一种重要连接结构,对吊装设备的连接安装和可靠安全使用至关重要。在实际使用过程中,吊耳结构会受到多种自然环境因素和载荷的综合作用,如机载吊挂结构会受到飞机飞行以及挂飞振动等带来的疲劳载荷,以及温度、湿度、腐蚀介质等耦合累积作用,发生腐蚀或腐蚀疲劳,造成吊耳结构强度、疲劳寿命下降,甚至断裂,严重影响设备的使用和安全。

目前的研究主要集中于吊耳在常规载荷、振动载荷作用下的疲劳性能、寿命预测和结构强度验证等方面^[1-14]。如石鑫等^[15]研究了导弹接头吊耳在常规载荷和振动环境共同作用下的疲劳性能,并基于 2 种载荷下金属疲劳失效特性和疲劳损伤综合计算,建立了可用于 2 种载荷共同作用下疲劳性能预测的方法。张翼等^[16]研究了导弹吊挂在随机振动载荷下的疲劳性能,结果表明,吊挂的耳片根部、吊挂底座与导弹连接处等是应力响应较大的部位。相关研究对吊耳结构在载荷作用下的疲劳寿命预测、薄弱部位确定、结构优化起到了很好的支撑作用,但是针对吊耳受到服役环境影响以及腐蚀对疲劳性能影响的研究较少,特别是严酷岛礁环境下,环境引起的腐蚀与载荷作用造成的吊耳疲劳性能劣化,不同于单项载荷作用下的损伤破坏。摸清吊耳在岛礁环境中的腐蚀特征及其对疲劳性能的影响,为其强度验证和防护提供支撑,是关系到吊挂结构连接结构强度和安全的因素。因此,研究岛礁环境对吊耳腐蚀性能的影响十分必要。本文以某型产品用吊耳为研究对象,研究了其在我国典型岛礁自然环境条件下的腐蚀特性,并利用变幅疲劳载荷试验分析研究了腐蚀损伤对吊耳疲劳性能的影响,可为吊挂结构岛礁环境适应性评价、设计防护提供参考。

1 试验

1.1 试验件

试验件为某产品用吊耳,材料为 40CrNiMoA 合金钢,表面为锌镍防护层,厚度约 7 μm (见图 1),样品的规格尺寸与产品实际使用状态一致。

1.2 自然环境试验

结合吊耳的实际使用状态,参照 GJB 8893.3—017《军用装备自然环境试验方法 第 3 部分:棚下大气自然环境试验》,在我国典型岛礁(永兴岛)开展吊耳试验件的海洋大气自然环境试验,试验检测周期为 0.5、1 a。

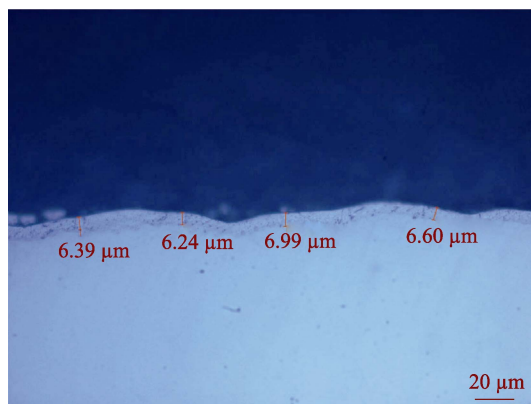


图 1 吊耳截面形貌

Fig.1 Cross-sectional morphology of lifting lugs

1.3 性能测试

1) 疲劳载荷测试。将岛礁自然环境试验不同时间后的吊耳试验件取回,采用疲劳试验机对试验件进行疲劳试验,直至吊耳断裂,记录其断裂时间(循环次数)以及断裂位置。其中,疲劳载荷试验根据吊耳实际使用条件下遭受变化载荷的特点,采用变幅载荷疲劳试验谱,如图 2 所示。

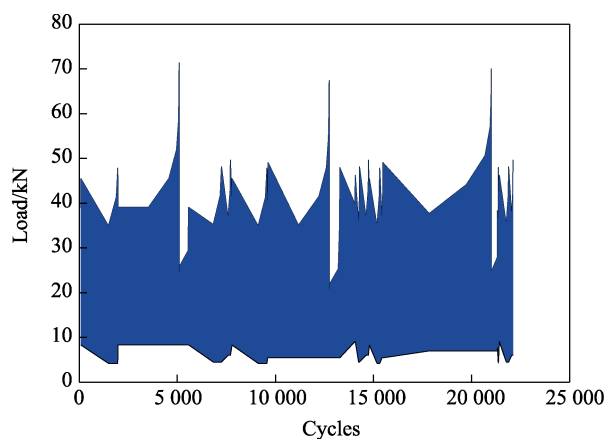


图 2 疲劳试验载荷谱

Fig.2 Fatigue test load spectrum

2) 腐蚀形貌及元素分析。采用 FEI Quanta 250 扫描电子显微镜 (SEM) 和 Keyence VK-X250 激光共聚焦显微镜 (LSCM) 观察吊耳表面的微观形貌、疲劳断口微观形貌。采用能谱仪观测吊耳试验前后的元素及其含量变化。

3) 氢含量测试。采用美国 RHEN602 定氢仪,按照 GB/T 223.82《钢铁 氢含量的测定 惰性脉冲熔融热导法》测定吊耳疲劳断口附近截取试样的氢含量。

2 结果与讨论

2.1 宏观腐蚀特征

吊耳试验件在岛礁海洋大气环境下暴露不同时间后的宏观形貌如图 3 所示。可以看出, 试验前, 吊耳试验件表面较为平整, 且镀层较为光亮; 在岛礁海

洋大气环境暴露 0.5 a, 其表面金属光泽下降, 并且局部附有灰白色腐蚀产物; 暴露 1 a, 试验件表面的金属光泽进一步下降, 表面腐蚀面积和腐蚀产物均有所增加。对比试验件不同部位的腐蚀程度可知, 吊耳试验件上半部的耳环部位 (特别是图 3c 中箭头 A 所示的水平部位) 的腐蚀程度要高于其侧面部位 (如图 3c 中箭头 B 所示的螺纹部位)。



图 3 吊耳在永兴岛大气环境下暴露不同时间后的宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphologies of lifting lug after exposure on Yongxin Island for different periods

从吊耳试验件在岛礁大气环境暴露后的腐蚀特征和程度可知, 吊耳表面在海洋大气环境棚下暴露 0.5 a 即出现较明显的腐蚀, 并且随着时间延长而不断加剧。结合试验环境特征以及试验件的材料工艺, 分析认为, 试验环境属于岛礁环境, 该环境地区年均温度约 27 °C, 年均相对湿度约 82%, 是典型的热带海洋岛礁气候^[15]。暴露于这种高温、高湿、高盐雾的海洋大气环境中的吊耳, 表面易形成薄液膜^[17]。同时, 大气中腐蚀介质 (如氯离子) 不断沉积于吊耳表面, 并溶入液膜中, 而吊耳表面的锌镍层相对于吊耳基材为阳极性保护层, 会优先发生腐蚀, 并生成灰白色腐蚀产物。虽然试验件表面未出现明显的红棕色产物, 表明吊耳试验件基材尚未发生明显腐蚀, 但由于镀层厚度较薄, 随着试验时间的延长, 试验件表面镀层会不断腐蚀消耗, 使得其厚度减薄, 对基材的腐蚀防护作用将会下降。此外, 由于吊耳在自然环境试验过程中处于悬挂状态, 相对于吊耳侧面和底面部位, 大气中的水汽、污染物等能更多地沉积并附着于吊耳中的平面部位 (如图 3c 中箭头 A 所示部位), 使得这些部位的腐蚀相对其他部位更严重。

2.2 表面腐蚀形貌

吊耳试验前后的表面形貌及能谱测试结果如图 4 所示。从图 4 可知, 试验件表面锌镍层的 Zn 含量较高, 检测到的少量 Cr、Mo、Mn 等元素主要来自于吊耳基体。在岛礁环境中试验 0.5 a 的吊耳表面出现不均匀腐蚀, 其中部分区域 (图 4 中 B 处) 表面较为粗糙, 部分区域 (图 4 中 A 处) 较为光滑平整, 分析认为是表面镀层局部发生腐蚀, 并生成了较为疏松

的腐蚀产物。能谱测试结果表明, B 处的氧含量较 A 处明显增加, 也证实了吊耳表面镀层发生了局部腐蚀, 生成了含氧腐蚀产物。

2.3 疲劳性能

按照给出的疲劳载荷谱, 对岛礁自然环境试验后的吊耳试验件进行疲劳试验, 在岛礁环境暴露不同时间试验件的平均疲劳断裂循环次数如图 5 所示。从图 5 可知, 随着吊耳试验件在岛礁环境暴露时间的延长, 其疲劳断裂循环次数整体呈下降趋势。暴露 0.5 a 后, 吊耳的疲劳断裂循环次数为 187 376~470 415, 平均断裂循环次数为 316 550; 暴露 1 a 后, 吊耳的疲劳断裂循环次数为 182 334~393 134, 平均断裂循环次数为 252 090, 均低于未经暴露试验吊耳的断裂循环次数。从吊耳的疲劳断裂时间可知, 吊耳的疲劳断裂循环次数具有分散性, 表明其抗疲劳稳定性较差, 可能与其批次或制备质量有关。同时, 随着在岛礁环境暴露时间的延长, 吊耳的疲劳断裂循环次数或时间降低, 表明岛礁环境下吊耳表面的腐蚀对其抗疲劳性能已产生了影响。

暴露于海洋大气环境不同时间的吊耳, 其疲劳断裂特征和位置基本一致。在海洋大气环境试验 1 a, 吊耳的疲劳断裂宏观形貌如图 6 所示。可以看出, 吊耳断裂位置主要集中在耳环中间部位和内孔圆角处, 并且断裂端口较为平整。分析认为, 在疲劳试验过程中, 吊耳底部螺纹处固定, 耳环处通过圆柱状连接件连接, 会受到拉伸载荷, 使得耳环内孔圆角处 (A 所示部位) 和中间部位 (B 所示部位) 容易产生应力集中^[11], 成为薄弱部位而发生断裂。

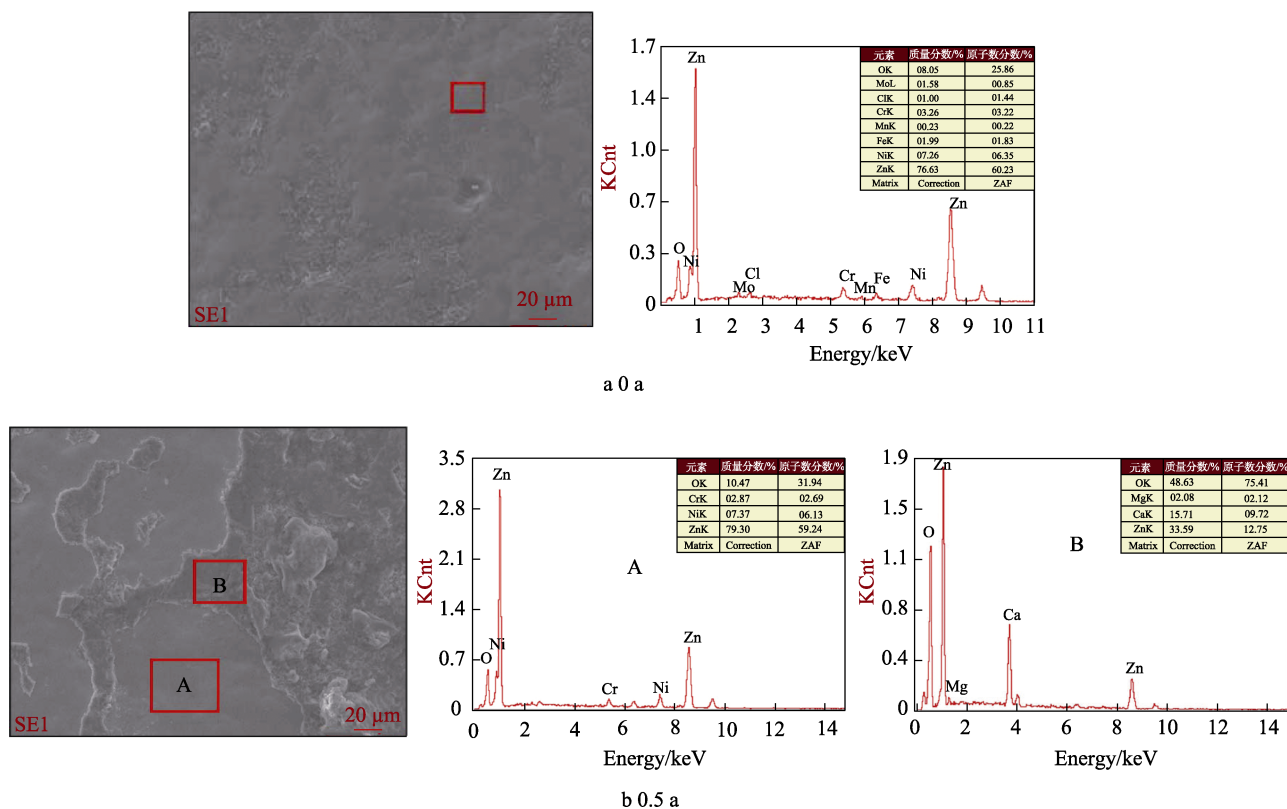


图4 吊耳试验件试验不同时间后的表面形貌及成分

Fig.4 Surface morphologies and components of lifting lugs after different periods of test

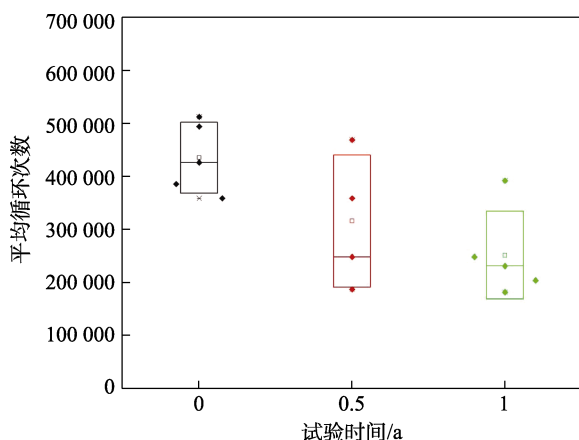


图5 吊耳试验件永兴岛暴露不同时间后的平均疲劳断裂循环次数

Fig.5 Cycle numbers of fatigue fracture of lifting lugs on Yongxing Island after different periods of exposure

2.4 疲劳断口形貌

采用扫描电镜观察了吊耳试验件疲劳断裂后的断口形貌,如图7所示。可以看出,未开展暴露试验的试验件,其疲劳断口形貌出现韧窝,表现为韧性断裂特征;岛礁暴露0.5 a的试验件,疲劳断口有少量的微裂纹,韧窝变浅,并且数量减少,表明韧性断裂特征减弱;暴露1 a的试验件,断口边缘有转向解理断裂的趋势,并且疲劳断口存在的微裂纹有所增多,这可能与试样中氢含量有关。

进一步放大观察吊耳的断口形貌,发现韧窝的底部有条状或球状的颗粒物,如图8和图9所示。可以看出,试验前后,吊耳的断口形貌中均存在颗粒物,并且其面扫描分析结果显示主要为MnS夹杂物。表明吊耳试验件内部存在一定的夹杂等缺陷,分析认为吊耳为铸造结构,在铸造过程中产生了夹杂、气孔等缺陷,而这些缺陷会促进裂纹形核,降低其疲劳性能。

2.5 海洋环境对吊耳疲劳性能影响分析

在高温、高湿和高盐雾的岛礁环境下,吊耳表面的镀层在富含氯离子的薄液膜条件下发生电化学反应,锌首先被氧化生成灰白色腐蚀产物。由于吊耳的异型结构特征,以及表面平整度存在差异等原因,使其表面的薄液膜分布、空气中氯离子沉降量不均匀,导致吊耳表面腐蚀也呈非均匀特性,这与观测到的吊耳表面腐蚀形貌特征一致。吊耳表面优先发生腐蚀的



图6 吊耳试验件疲劳试验后的断裂宏观形貌

Fig.6 Fracture macroscopic morphology of lifting lug after fatigue test

局部区域, 腐蚀产物和盐分的堆积对空气中的水分等具有一定的吸附作用, 加剧了该区域的腐蚀。随着试验时间的增加, 进一步发展为腐蚀坑形核。采用激光共聚焦显微镜观测吊耳在岛礁环境试验前后的腐蚀深度, 结果如图 10 所示。可以看出, 试验前, 吊耳表面高度落差较小, 且口径较宽。分析其原因主要是, 吊耳及其镀层的粗糙度和平整度存在差异。岛礁暴露 1 a 的吊耳, 表面蚀坑口部直径较小, 且深度增大, 表明吊耳表面发生腐蚀, 并形成了点蚀坑。

随着试验时间的延长, 吊耳表面的点蚀坑深度增加, 腐蚀产物层逐渐变得致密, 在点蚀坑的尖端区域

和腐蚀产物层的底部区域会趋近于闭塞状态。在近封闭区域由于缺少 O_2 , 金属离子发生水解反应, 该反应生成的 H^+ 导致局部区域酸化, H^+ 与金属发生电化学反应生成 $H^{[18-19]}$ 。生成的 H 部分在表面聚集, 部分继续往金属内部渗透。在吊耳试验件疲劳断口附近取样, 并测定其氢含量。在岛礁棚下暴露不同时间后, 吊耳断口处的氢含量测试对比结果如图 11 所示。可以看出, 吊耳中的氢含量随着试验时间的延长有所增多, 初始状态吊耳中, 氢的质量浓度为 0.9 mg/L 左右, 试验 1 a 后, 氢的质量浓度约 1.3 mg/L, 证明了腐蚀反应过程中有氢持续生成。

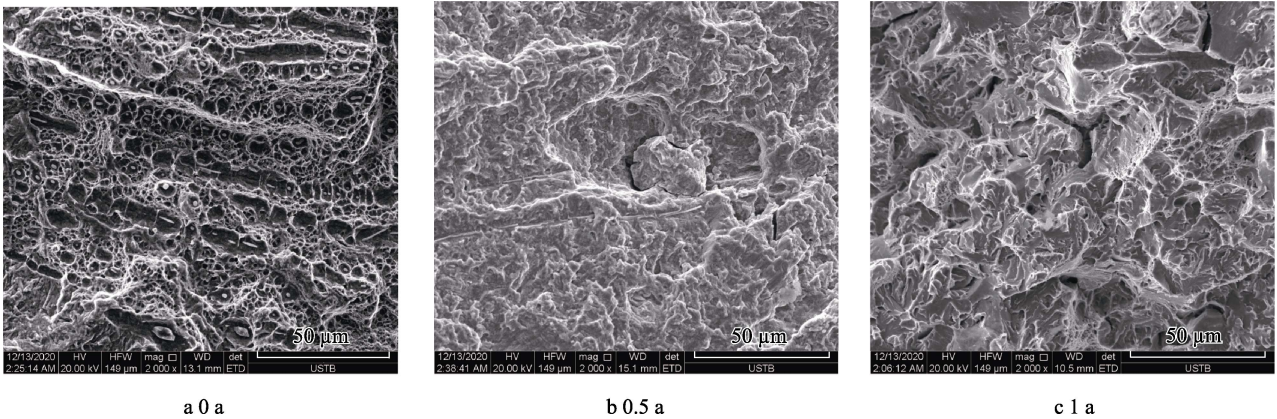


图 7 吊耳永兴岛暴露不同时间后的疲劳断口形貌
Fig.7 Fatigue fracture morphology of lifting lugs on Yongxin Island after different periods of exposure

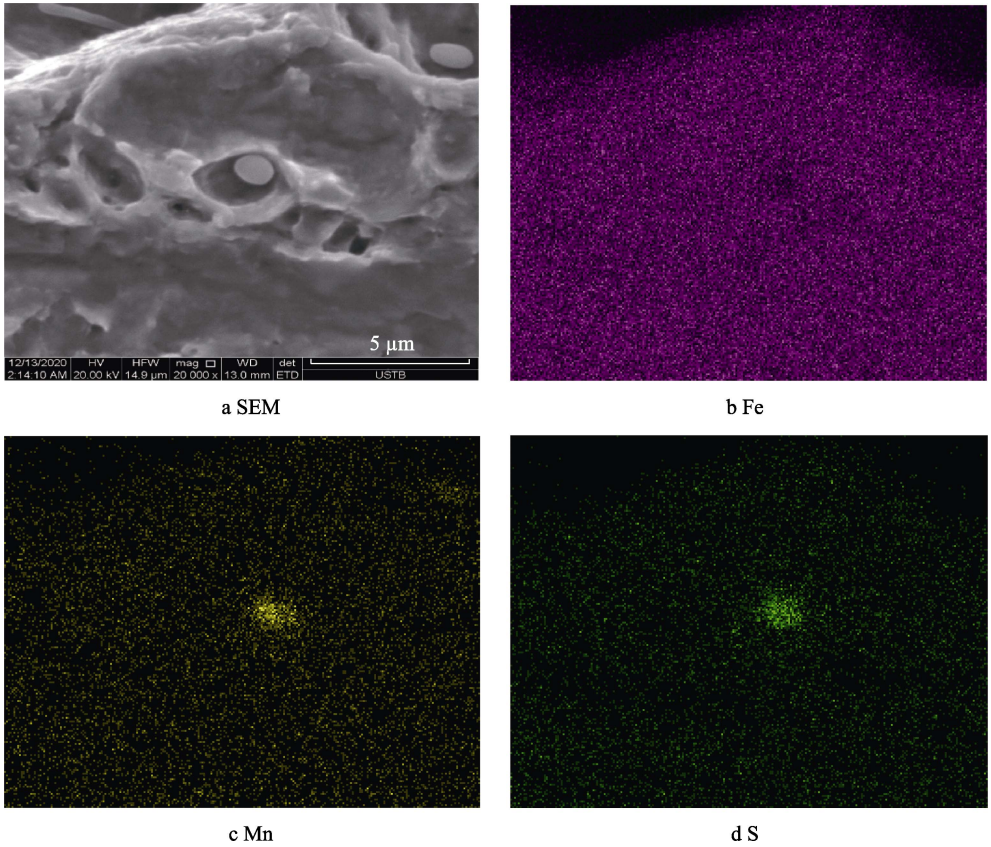


图 8 未暴露吊耳试验件断面的微观形貌及元素分布
Fig.8 Cross-sectional microstructure and element distribution of unexposed lifting lugs

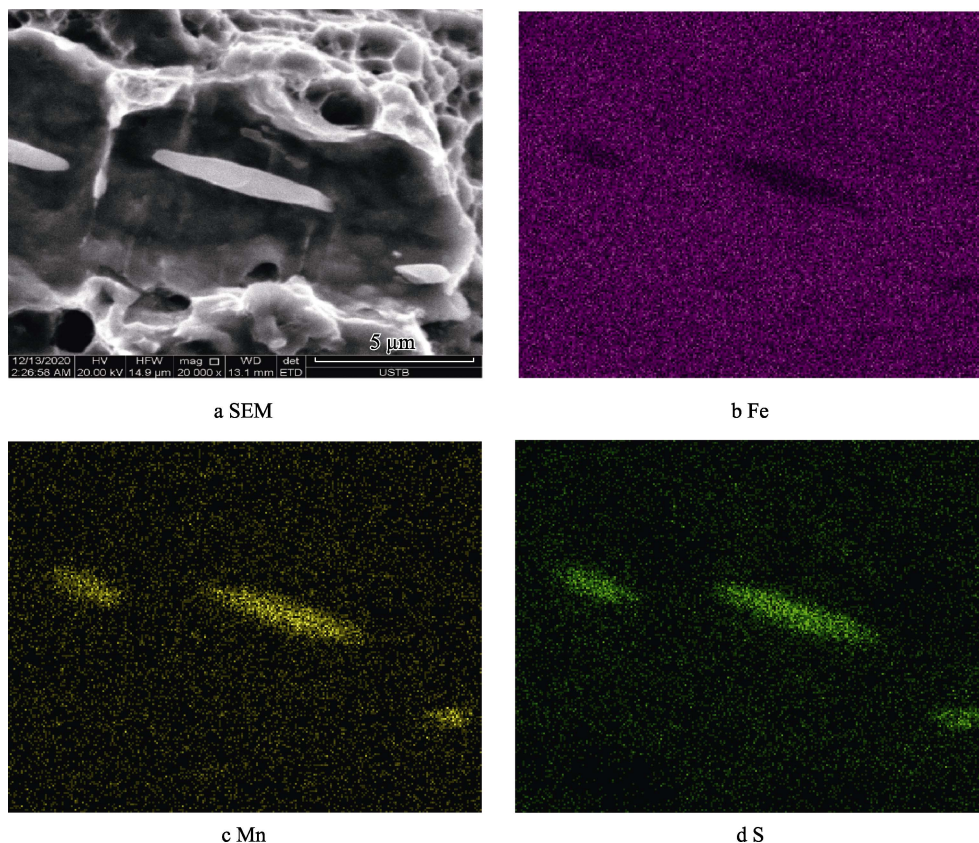


图9 在永兴岛暴露1 a吊耳试验件断面的微观形貌及元素分布

Fig.9 Cross-sectional microstructure and element distribution of lifting lugs after 1 a of exposure on Yongxing Island

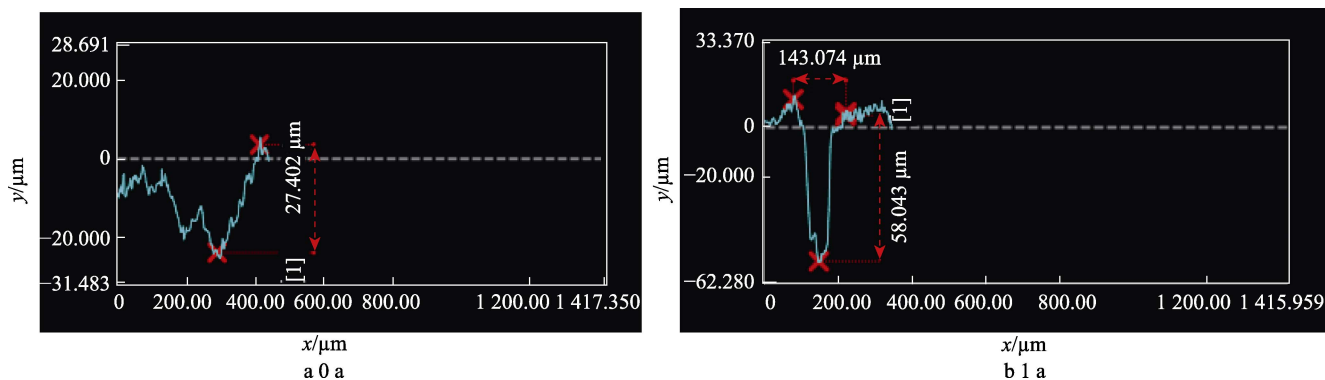
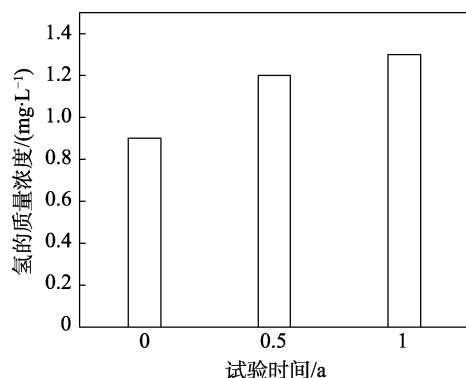


图10 吊耳试验件岛礁环境试验前后的腐蚀深度

Fig.10 Corrosion depth of lifting lugs in Yongxing island-reef environment after different periods of exposure

图11 在永兴岛暴晒不同时间后吊耳试验件的氢含量
Fig.11 Hydrogen content of lifting lugs on Yongxing Island after different periods of exposure

相关研究表明,金属材料腐蚀坑处很容易形成应力集中^[20-23],诱导裂纹的萌生。随着暴露时间的延长,吊耳表面的点蚀程度会逐渐增大,裂纹萌生的难度也会降低,在变幅疲劳载荷作用下,吊耳疲劳断裂的循环次数和时间也会下降。同时,腐蚀反应过程中,H的聚集对疲劳作用下吊耳裂纹的萌生与扩展均有一定的促进作用^[24],即随着氢含量的增加,吊耳的耐疲劳性能降低。此外,从吊耳疲劳断口形貌可知,吊耳基体材料中含有一定量的MnS夹杂物。研究表明,一定含量和尺寸的MnS夹杂物有利于改善材料的力学性能,但当MnS夹杂物的尺寸超过一定的限度,会成为裂纹起始源,并诱导裂纹的扩展^[25-27]。吊耳内

部的 MnS 夹杂物位于韧窝的底部,说明吊耳基体材料中的 MnS 夹杂物也对裂纹的扩展起到了一定的促进作用。基于此,在吊耳的实际使用过程中,应做好其表面腐蚀防护,同时可进一步优化基体材料,如去除或者减少 MnS 夹杂物等。

3 结论

1) 在严酷岛礁环境下,吊耳试验件表面呈非均匀腐蚀特征,有点蚀的发生,其平均疲劳断裂循环次数随试验时间的延长呈下降趋势,表面锌镍层的腐蚀防护作用有限。

2) 吊耳试验件表面形成的点蚀坑、内部 MnS 夹杂物和腐蚀过程中产生的氢,对疲劳载荷作用下裂纹的萌生和生长有促进作用,影响吊耳的抗疲劳性能和寿命,应得到重视,并从腐蚀防护和材料组织优化方面提高其抗疲劳性能。

参考文献:

- [1] 郭迅,郭强岭.空空导弹振动试验条件分析[J].装备环境工程,2012,9(3):99-103.
GUO X, GUO Q L. Analysis of Vibration Test Condition of Air-to-Air Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 99-103.
- [2] 王东升,李翀,李健,等.基于数据匹配的机载外挂装备部件振动试验优化设计方案[J].航天器环境工程,2020,37(2):191-196.
WANG D S, LI C, LI J, et al. Optimized Vibration Test Scheme for Airborne Plug-in Equipment Component Test Based on Data Matching[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(2): 191-196.
- [3] 李记威,房雷,周建军,等.某空空导弹发动机装药挂飞振动疲劳寿命分析[J].弹箭与制导学报,2016,36(1):89-92.
LI J W, FANG L, ZHOU J J, et al. Fatigue Life Analysis for a Solid Rocket Motor of Air-to-Air Missile under Hanging Flight Vibration[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(1): 89-92.
- [4] 刘长春,刘莹,储建恒,等.航空发动机辅助安装吊耳结构优化及试验验证[J].航空发动机,2015,41(5):58-61.
LIU C C, LIU Y, CHU J H, et al. Optimization and Experimental Validation of Rear-Mount Structure for an Aeroengine Auxiliary Installation System[J]. Aeroengine, 2015, 41(5): 58-61.
- [5] 王俊然,程市,曾超,等.基于有限元仿真的发动机吊耳强度分析[J].内燃机与动力装置,2020,37(6):13-17.
WANG J R, CHENG S, ZENG C, et al. Simulation of Engine Lug Strength Based on Finite Element Analysis[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2020, 37(6): 13-17.
- [6] 刘道庆,吴超,陈亮.飞机腐蚀疲劳典型部位地面停放局部环境谱及当量折算[J].飞机设计,2011,31(5):15-17.
LIU D Q, WU C, CHEN L. Ground Parking Local Environment Spectrum & Equivalence Converting of Aircraft Typical Parts[J]. Aircraft Design, 2011, 31(5): 15-17.
- [7] 吴省均,陈跃良,张勇,等.腐蚀条件下高强度钢超高周疲劳性能及损伤机理研究进展[J].材料导报,2023,37(12):152-162.
WU X J, CHEN Y L, ZHANG Y, et al. Research Progress on very High Cycle Fatigue Performance and Damage Mechanism of High Strength Steel under Corrosion Condition[J]. Materials Reports, 2023, 37(12): 152-162.
- [8] WANG B W, XIE L Y, SONG J X, et al. Failure Behavior of Aerial Bomb Lifting Lug under Variable Amplitude Loading: Failure Analysis and Life Prediction[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105000.
- [9] 钟杰华,史锐,李晶,等.一种箭体吊具的结构强度有限元分析[J].机械,2017,44(7):58-61.
ZHONG J H, SHI R, LI J, et al. Intensity Finite Element Analysis of a Lifting-Device of Rocket Body[J]. Machinery, 2017, 44(7): 58-61.
- [10] 吕国儿,何俊生,汤群益,等.基于多尺度有限元模型的海上变电站管轴式吊耳强度分析[J].中国海洋平台,2022,37(6):96-100.
LYU G E, HE J S, TANG Q Y, et al. Strength Analysis of Lifting Trunnion for Offshore Substations Based on Multiple-Scale Finite Element Model[J]. China Offshore Platform, 2022, 37(6): 96-100.
- [11] 王俊然,曾超,程市,等.基于发动机吊耳材料非线性的有限元仿真研究[J].柴油机设计与制造,2021,27(1):11-15.
WANG J R, ZENG C, CHENG S, et al. Finite Element Simulation of Engine Lug Strength with the Material Nonlinear[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2021, 27(1): 11-15.
- [12] 张浩,张合金,翟悦,等.机载外挂真空容器的吊环设计及拓扑优化[J].真空,2022,59(5):86-90.
ZHANG H, ZHANG H J, ZHAI Y, et al. Design and Topology Optimization of Lighting Ring Applied to Airborne External Vacuum Chamber[J]. Vacuum, 2022, 59(5): 86-90.
- [13] 王云霞,杨乐,富婷婷.机载固体火箭发动机壳体吊耳加强结构强度计算与试验研究[J].强度与环境,2015,42(6):17-22.
WANG Y X, YANG L, FU T T. Calculation and Experimental Study on the Strength of the Shell Lug Strengthening Structure of the Airborne Solid Rocket Motor[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(6): 17-22.
- [14] 赵融,肖军,梁子豪,等.浅谈激光熔覆技术在机载导弹吊挂上的应用[J].装备制造技术,2019(1):18-21.
ZHAO R, XIAO J, LIANG Z H, et al. Preliminary Research about Application of Laser Cladding Technology

- on Airborne Missile Hanging[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(1): 18-21.
- [15] 石鑫, 吴富强, 罗齐文, 等. 常规载荷与振动环境共同作用下导弹接头吊耳的疲劳寿命计算[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(1): 57-64.
- SHI X, WU F Q, LUO Q W, et al. Fatigue Life Calculation of Missile Lug under Conventional Load and Vibration Environment[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(1): 57-64.
- [16] 张翼, 杨晨, 罗杨阳. 随机振动载荷下导弹吊挂疲劳寿命分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(11): 1675-1679.
- ZHANG Y, YANG C, LUO Y Y. Fatigue Life Analysis of Missile Hanging in Random Vibration Load[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(11): 1675-1679.
- [17] 吴护林, 张伦武, 苏艳, 等. 轻质材料环境适应性数据手册: 铝合金、钛合金及防护工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- WU H L, ZHANG L W, SU Y. Environmental Worthiness Data Handbook of Light Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [18] LI Y, YOU Y, LV X W. Comparative Study on the Crack Growth Behaviours of E690 Steel and Heat-Affected Zone Microstructures under Cathodic Potential in Artificial Seawater Based on Mechano-Electrochemical Effect at Crack Tip[J]. Corrosion Science, 2022, 198: 110103.
- [19] LI Y, LIU Z Y, WU W, et al. Crack Growth Behaviour of E690 Steel in Artificial Seawater with Various pH Values[J]. Corrosion Science, 2020, 164: 108336.
- [20] 崔腾飞, 高蒙, 胡建清, 等. 海洋环境对直升机基础产品腐蚀行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 19-25.
- CUI T F, GAO M, HU J Q, et al. Effect of Marine Environment on Corrosion Behavior of Helicopter Foundation Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 19-25.
- [21] 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): 359-364.
- WEI X Q, LI H, PU Y B, et al. Study on Dynamic Corrosion-Fatigue Coupling Failure Mechanical of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 359-364.
- [22] 王歧山, 何川, 陈旭. 金属工程材料腐蚀疲劳行为研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(1): 222-230.
- WANG Q S, HE C, CHEN X. Research Progress of Corrosion Fatigue Behavior of Metal Engineering Materials[J]. Materials Reports, 2023, 37(1): 222-230.
- [23] 张丹峰, 谭晓明, 陈跃良. 海洋环境下飞机结构腐蚀疲劳研究现状[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 5-8.
- ZHANG D F, TAN X M, CHEN Y L. Research Progress of Corrosion Fatigue of Aircraft Structure under Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 5-8.
- [24] 李守英, 胡瑞松, 赵卫民, 等. 氢在钢铁表面吸附以及扩散的研究现状[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 15-21.
- LI S Y, HU R S, ZHAO W M, et al. Hydrogen Adsorption and Diffusion on Steel Surface[J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 15-21.
- [25] 时圳演, 张言, 董立谨, 等. 微观组织结构对镍基 825 合金力学性能和硫化物应力腐蚀开裂的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 141-151.
- SHI Z Y, ZHANG Y, DONG L J, et al. Effect of Microstructure on Mechanical Properties and Sulfide Stress Corrosion Cracking of Incoloy 825[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 141-151.
- [26] 张敬蕊, 胡庆利, 高建锋, 等. 硫化锰混合夹杂物对管线钢氢致开裂的影响[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(8): 9-12.
- ZHANG J R, HU Q L, GAO J F, et al. Effect of Manganese Sulfide Mixed Inclusions on Hydrogen Induced Cracking of Pipeline Steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Physical Testing), 2022, 58(8): 9-12.
- [27] 郑浩, 刘丽华, 张中武. 热加工对硫化物及氧化物夹杂的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13168-13176.
- ZHENG H, LIU L H, ZHANG Z W. Effects of Hot Processing on Sulfide and Oxide Inclusions[J]. Materials Reports, 2021, 35(13): 13168-13176.