



湿热盐雾交替下航空发动机用38CrMoAlA钢腐蚀损伤行为及其对力学性能的影响

杨丽媛 李刘媛 黄开明 刘富兵 朱金阳 詹中伟

Corrosion-damage behavior of 38CrMoAlA steel under alternating hot-humid/salt-fog conditions and its effect on mechanical properties for aircraft-engine applications

YANG Liyuan, LI Liuyuan, HUANG Kaiming, LIU Fubing, ZHU Jinyang, ZHAN Zhongwei

引用本文:

杨丽媛, 李刘媛, 黄开明, 刘富兵, 朱金阳, 詹中伟. 湿热-盐雾交替下航空发动机用38CrMoAlA钢腐蚀损伤行为及其对力学性能的影响[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(8): 1616–1625. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.10.17.003

YANG Liyuan, LI Liuyuan, HUANG Kaiming, LIU Fubing, ZHU Jinyang, ZHAN Zhongwei. Corrosion-damage behavior of 38CrMoAlA steel under alternating hot-humid/salt-fog conditions and its effect on mechanical properties for aircraft-engine applications[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(8): 1616–1625. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2024.10.17.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.10.17.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

航空发动机阻燃钛合金力学性能预测及成分优化

Predicting the mechanical properties and composition optimization of a burn-resistant titanium alloy for aero-engines
工程科学学报. 2022, 44(6): 1036 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.12.001>

钢纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能与损伤机制

Mechanical properties and damage mechanism of steel fiber reinforced cemented tailings backfill
工程科学学报. 2025, 47(2): 234 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.04.08.004>

15Ni15Cr ODS钢的微观结构与力学性能

Microstructure and mechanical properties of 15Ni15Cr oxide dispersion strengthened austenitic steel
工程科学学报. 2023, 45(1): 107 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.07.28.001>

甲酸浓度对316L不锈钢腐蚀钝化活化转变行为的影响

Concentration effects of formic acid on the corrosion behavior of 316L stainless steel from passivation to activation
工程科学学报. 2022, 44(8): 1379 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.03.24.005>

PH13-8Mo不锈钢在半乡村大气环境中长周期腐蚀行为

Corrosion behavior of PH13-8Mo stainless steel after long-term exposure to semi-rural atmosphere
工程科学学报. 2021, 43(3): 400 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.11.08.001>

有压热闷渣微粉对环氧涂料的性能影响

Effect of pressed-heat and stuffy slag powder on the properties of epoxy coating
工程科学学报. 2024, 46(8): 1403 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.10.19.001>

湿热–盐雾交替下航空发动机用 38CrMoAlA 钢腐蚀损伤行为及其对力学性能的影响

杨丽媛¹⁾, 李刘媛²⁾, 黄开明²⁾, 刘富兵³⁾, 朱金阳³⁾✉, 詹中伟¹⁾

1) 北京航空材料研究院航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095 2) 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002

3) 北京科技大学国家材料服役安全科学中心, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: zhujinyang@ustb.edu.cn

摘要 在高温、高湿、高盐雾的海洋环境中, 38CrMoAlA 钢作为常用发动机传动轴材料, 面临严重的腐蚀风险. 针对某航空发动机鼓风传动轴的服役条件, 进行了多周期湿热(7 d)与盐雾(中性 4 d、酸性 3 d)交替腐蚀模拟试验. 对不同周期的宏观形貌进行对比, 采用失重法计算腐蚀速率, 并对力学样品进行室温拉伸和疲劳极限测试. 使用扫描电子显微镜(SEM)表征腐蚀产物的微观形貌和力学断口, 元素成分分析采用能谱(EDS), 并测量腐蚀坑深度. 结果表明, 湿热–盐雾交替环境显著加速了 38CrMoAlA 钢的腐蚀行为, 盐雾中的 Cl⁻ 是腐蚀加剧的主要原因, 经过 5 个周期后, 基体被致密的铁氧化物覆盖, 表面出现大量腐蚀坑, 腐蚀损伤显著降低了材料的抗拉强度、疲劳极限和塑性变形能力, 其机理在于点蚀和孔蚀引发的应力集中效应, 中值疲劳极限降低约 70%, 腐蚀坑的深度及分布对疲劳裂纹的萌生和扩展具有决定性影响.

关键词 38CrMoAlA 钢; 湿热; 酸性盐雾; 腐蚀; 力学性能

分类号 TQ323.8

Corrosion-damage behavior of 38CrMoAlA steel under alternating hot-humid/salt-fog conditions and its effect on mechanical properties for aircraft–engine applications

YANG Liyuan¹⁾, LI Liuyuan²⁾, HUANG Kaiming²⁾, LIU Fubing³⁾, ZHU Jinyang³⁾✉, ZHAN Zhongwei¹⁾

1) AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, Beijing 100095, China

2) AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China

3) National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: zhujinyang@ustb.edu.cn

ABSTRACT 38CrMoAlA steel is widely used in critical components, such as blower drive shafts of aircraft engines, because of its remarkable mechanical properties and surface hardening potential. However, its performance in harsh marine environments, characterized by high temperatures, humidity, and salt spray, remains a notable concern. In such environments, the steel is highly susceptible to severe corrosion, which can undermine its structural integrity and operational reliability. This study systematically investigates the corrosion behavior and corrosion-induced mechanical degradation of 38CrMoAlA steel under simulated service conditions that imitate the extreme environmental exposure of an aircraft-engine blower drive shaft operating in marine settings. To replicate the harsh conditions, a multicycle accelerated corrosion test is designed, consisting of alternating exposure to wet heat and salt spray across a series of cycles. In particular, specimens were subjected to 7 d of wet heat followed by 4 d of neutral salt spray and then 3 d of acidic salt spray. A variety of evaluation methods were employed for the assessment of material degradation, including comparison of

macroscopic surface morphologies at different stages of corrosion cycles, weight loss measurements to calculate corrosion rates, and mechanical testing to determine the effect of corrosion on tensile strength, fatigue life, and fracture toughness at room temperature. Scanning electron microscopy (SEM) was employed to gain insights into microstructural changes associated with corrosion products and fracture surfaces. The examination results revealed that corrosion pits induced by salt spray and wet heat exposure resulted in notable alterations at the microstructural level. The presence of corrosion pits not only contributed to localized material degradation but also facilitated crack initiation and propagation. Energy-dispersive spectroscopy was performed to analyze the elemental composition of the corrosion products, helping further elucidate the chemical mechanisms underlying the corrosion process. A laser confocal microscope was used to quantify the depth and distribution of corrosion pits, providing detailed data on the extent of localized corrosion damage. The results of this study revealed significant corrosion damage to 38CrMoAlA steel after exposure to accelerated wet heat and salt spray cycles. Corrosion pits were notably deep, particularly after the third test cycle, with the maximum pit depth measured to be $\sim 506 \mu\text{m}$. After completing five cycles, the corrosion rate reached a steady state at $\sim 1.47 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, indicating that corrosion occurred slowly as corrosion products accumulated on the steel surface. Despite this stabilization in corrosion rate, the mechanical properties of the steel showed severe degradation. Notably, the tensile strength decreased by 11%, the yield strength by 64%, the elongation at break by 12%, and the reduction of area by 30%. The mechanical degradation observed in this study can be primarily attributed to the stress concentration effects caused by corrosion pits, which notably reduced the effective load-bearing area of the steel. Moreover, corrosion pits served as initiation sites for cracks that propagated during loading, resulting in premature failure of the material. SEM imaging of the fracture surfaces revealed numerous intergranular cracks surrounding corrosion pits, with these cracks rapidly expanding under loading conditions. This progression of crack growth, combined with the loss of load-bearing capacity due to pitting, severely impaired the steel's ability to withstand cyclic loading, further expediting the failure of the material. The findings of this study provide a comprehensive understanding of the corrosion mechanisms and associated mechanical degradation of 38CrMoAlA steel under marine environmental conditions. The observed deterioration underscores the importance of developing advanced protective strategies to (a) mitigate the effects of corrosion and (b) extend the operational life of critical components such as aircraft-engine blower drive shafts. The data from this investigation offer valuable insights that can inform future material selection and development of more effective protective coatings and corrosion-resistant treatments. Ultimately, these findings contribute to ensuring the long-term durability and reliability of aircraft components exposed to harsh and corrosive marine environments, enhancing their performance and safety in real-world applications.

KEY WORDS 38CrMoAlA steel; hot and humid; acidic salt spray; corrosion; mechanical properties

航空发动机作为航空器的核心部件,其性能直接关系到飞行安全和整体运行效率。航空发动机中的鼓风传动轴作为关键传动装置,承担着动力传输的关键任务。鼓风传动轴在飞行过程中常常面临着高温、湿热、盐雾等复杂环境的严苛考验。除了要求具备高强度和良好的疲劳性能外,它还需要具有较高的耐腐蚀性,尤其在海洋气候中,湿热、盐雾和海水的交替作用对材料的腐蚀性和力学性能造成了显著影响^[1-3]。长期暴露于这些环境条件下,材料表面易发生腐蚀反应,形成腐蚀坑、裂纹等缺陷,进而导致其力学性能下降,缩短部件的使用寿命^[4-6]。因此,如何提升航空发动机关键部件在海洋环境下的抗腐蚀性能和力学性能,成为了亟待解决的技术难题。

38CrMoAlA 钢作为一种合金结构钢,因其优异的强度、硬度、耐磨性和良好的表面处理性能,被广泛应用于航空领域。特别是在经过表面渗氮处理后,38CrMoAlA 钢的抗疲劳性能和耐磨损性得到显著提升。然而,尽管其力学性能优越,现有

研究表明,在湿热盐雾交替环境下,尤其是海洋环境的复合腐蚀作用下,38CrMoAlA 钢的耐腐蚀性能和力学性能仍然面临严峻挑战。海洋环境中的盐雾、湿气以及气温波动,会引发严重的腐蚀反应,尤其是在具有局部电化学反应的地方,腐蚀坑和裂纹易于形成,影响了材料的承载能力^[7-8]。在此类环境下,材料的腐蚀和力学性能退化不仅影响航空发动机的安全性,还可能导致组件的提前失效。

现有关于 38CrMoAlA 钢的研究主要集中在其力学性能的优化以及表面处理工艺的研究,特别是在常规大气环境中的应用和使用寿命评估。然而,关于该材料在海洋环境,尤其是湿热盐雾交替作用下的腐蚀性变化及其对力学性能的影响研究尚属较少。已有研究表明,海洋环境中的盐雾腐蚀作用会导致 38CrMoAlA 钢的表面发生严重腐蚀,形成腐蚀坑,并可能引发裂纹扩展。湿热环境与盐雾环境交替作用会加速材料腐蚀过程,导致材料表面形成更为复杂的腐蚀产物,影响钢材的耐久性与疲劳性能^[9-13]。此外,腐蚀引起的材料表面损

伤,如腐蚀坑和裂纹,会导致局部应力集中,从而降低材料的抗疲劳性能和抗拉强度,增加航空发动机故障的风险^[14-16].

因此,深入研究 38CrMoAlA 钢在海洋环境下的腐蚀行为及其对力学性能的影响,尤其是在湿热盐雾交替环境中的表现,具有重要的理论意义和工程应用价值.本研究通过模拟湿热盐雾交替环境,系统地探讨了 38CrMoAlA 钢在此环境中的耐腐蚀性能变化规律及其对力学性能的影响,分析材料的腐蚀失效机理,并为航空发动机鼓风传动轴的选材、设计以及防腐保护措施提供理论依

据和实践指导.

1 试样制备与试验方法

本试验使用 38CrMoAlA 钢材加工成圆片状腐蚀模拟试样(直径 80 mm,厚度 4.5 mm)和棒状力学试样(如图 1),所有试样均进行统一编号和标识.腐蚀模拟试样和拉伸试样每个周期采用 3 件平行试样,疲劳极限试样每周期采用 16 件平行试样.加工后的试样依次用去离子水和无水乙醇清洗表面,再用冷风吹干,随后记录试样的外观、质量和尺寸.

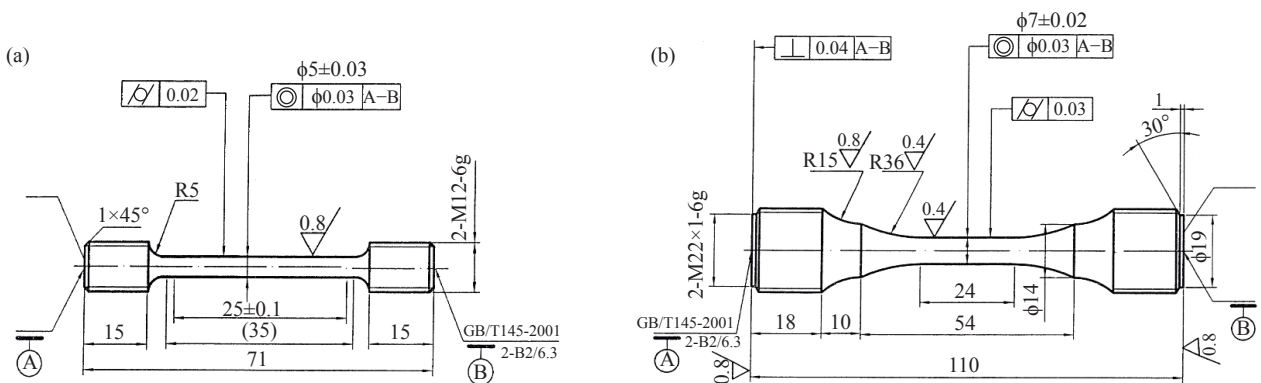


图 1 38CrMoAlA 力学试样. (a) 拉伸试棒; (b) 高频轴向疲劳试棒 (单位: mm)

Fig.1 38CrMoAlA mechanical specimens: (a) tensile specimen; (b) high-frequency axial fatigue specimen (unit: mm)

湿热试验依据 GJB 150.9A—2009 标准进行,相对湿度控制在 $95\%\pm 5\%$,温度为 $(43\pm 2)^\circ\text{C}$,试验持续 7 d.盐雾试验参照 GJB 150.11A—2009 标准,温度控制在 $(35\pm 2)^\circ\text{C}$,盐雾溶液为 $5\%\pm 0.1\%$ NaCl 溶液,沉降量保持在 $1\sim 2\text{ mL}\cdot(80\text{ cm}^2\cdot\text{h})^{-1}$.中性盐雾试验为期 4 d,溶液 pH 控制在 6.5~7.5;酸性盐雾试验为期 3 d,通过稀硫酸将溶液 pH 调节至 3.5~4.5.

腐蚀模拟试样和力学试样均进行湿热-盐雾交替试验,每 1 个循环为 1 周期(下文中使用周期数进行区分).通过扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)表征腐蚀产物的形貌和成分.腐蚀产物依据 ASTM G1-03 标准清除,采用失重法计算腐蚀速率,并通过激光共聚焦显微镜测定腐蚀深度.

湿热-盐雾交替试验前后的拉伸试样均按 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》进行拉伸测试,测得室温下的抗拉强度(σ_b)、屈服强度($\sigma_{p0.2}$)、延伸率(δ)和断面收缩率(ψ)等典型值.对于试验前后的疲劳试样,按照 GB/T 26077—2021《金属材料疲劳试验轴向应变控制方法》标准,在室温下开展疲劳试验.疲劳极限通过

升降法测定,试验应力比为-1.每个周期测试 16 根试样,其中有效试样数量不少于 10 根,疲劳极限测定基于 10^7 次循环.

2 试验结果与讨论

2.1 38CrMoAlA 钢腐蚀模拟试验

2.1.1 腐蚀宏观形貌

图 2 是 38CrMoAlA 钢经过不同湿热-盐雾交替试验周期后的宏观形貌,从图中可以发现,未腐蚀的样品表面光滑,呈现出金属的自然颜色.经过 1 周期试验后,样品形貌发生明显变化,表面覆盖了一层黑红相间的腐蚀产物,颜色多为黑色,少量红棕色,腐蚀产物疏松,只有很小区域还未腐蚀;试验 3 周期后,腐蚀产物更加密集,明显增厚,表面出现均匀的氧化层.第 5 周期后,腐蚀进一步加剧,腐蚀产物层更加致密,颜色多为砖红色,表面出现凸起,表明样品局部发生了深度腐蚀.

2.1.2 腐蚀速率

采用失重法计算出各周期试样的平均腐蚀速率,按照 ASTM G46—94 标准,通过表面等高线图观察去除腐蚀产物后的试样表面轮廓,选取腐蚀

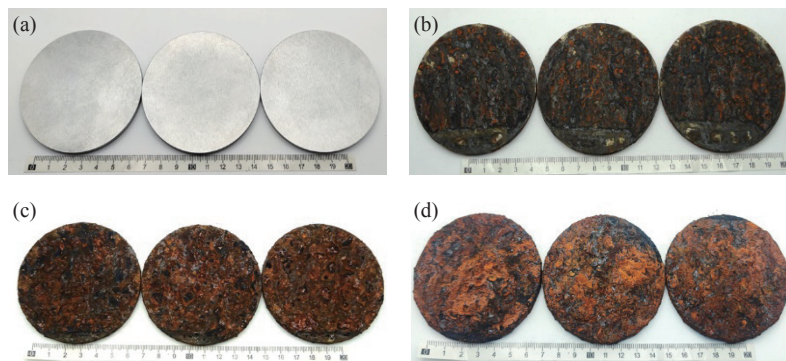


图2 38CrMoAlA 钢经过不同试验周期后的宏观形貌. (a) 试验前; (b) 1 周期; (c) 3 周期; (d) 5 周期

Fig.2 Macroscopic morphology of 38CrMoAlA after different test cycles: (a) before the experiment; (b) after 1 cycle; (c) after 3 cycles; (d) after 5 cycles

最严重的 10 个局部腐蚀坑的深度来计算局部腐蚀速率. 38CrMoAlA 钢的平均腐蚀速率在试验初期呈现快速增加的趋势(图 3 黑色线), 腐蚀快速发生, 随后第 3、5 周期腐蚀速率有增加, 但增幅逐渐趋于平缓. 而局部腐蚀速率(图 3 红色线)与平均腐蚀速率趋势相反, 前期先快速下降, 第 3、5 周期后腐蚀速率减缓. 这表明材料在早期的腐蚀过程中, 基体表面快速腐蚀, 基体元素扩散迅速, 很快覆盖了整个试样. 由于初期表面基体暴露较多, 腐蚀产物较为疏松, 导致腐蚀环境中的离子可以进一步渗透到材料内部, 造成更深入的腐蚀. 到第 5 周期时, 腐蚀产物逐渐变得致密, 形成一层保护膜, 阻碍了传质过程, 从而减缓了腐蚀速率, 说明此时腐蚀已趋于稳定^[17]. 根据 ASTM G217 标准, a =局部腐蚀率/平均腐蚀速率, 若 $a>2$, 说明材料腐蚀严重, 服役失效风险较高. 本试验 3 周期以后, $a<2$, 说明在这个环境下, 材料服役性能良好.

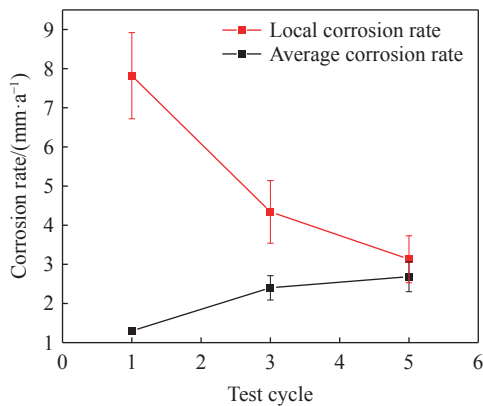


图3 38CrMoAlA 各试验周期后的腐蚀速率

Fig.3 Corrosion rate of 38CrMoAlA after each test cycle

2.1.3 腐蚀微观形貌及成分分析

图 4 是 38CrMoAlA 钢各试验周期的表面 SEM 图和 EDS 结果, 第 1 周期的 SEM 图显示, 腐蚀较轻, 局部有腐蚀坑, 尺寸较小, 整体结构保持完整,

放大图为腐蚀产物的微观形貌, 呈叶片或者针状. 第 3 周期, 腐蚀明显加剧, 表面覆盖了大量的腐蚀产物, 尤其是在晶粒边界处, 腐蚀加深, 材料表面变得更加粗糙, 放大图显示出针状或片状的腐蚀产物, 与第 1 周期一样, 表明腐蚀产物成分并无变化. 试验 5 周期后, 材料表面存在明显的孔洞和剥落现象, 腐蚀产物更加致密光滑, 局部有明显鼓包, 说明腐蚀已经深入到材料内部. 从 EDS 结果显示, 这三个周期腐蚀产物成分较为单一, 主要为 Fe、O 元素聚集, 结合原子比, 腐蚀产物应该是 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 的混合物, 并没有出现其他腐蚀产物.

2.1.4 腐蚀坑深度

图 5 是 38CrMoAlA 腐蚀产物去除后的三维形貌图, 第 1 周期的样品表面较为粗糙, 有明显腐蚀痕迹, 表面整体结构较为完整, 局部腐蚀深度可达 $285.5\text{ }\mu\text{m}$. 第 3 周期后, 腐蚀加剧, 表面更为粗糙, 凹坑分布密集, 局部有大腐蚀坑, 深度可达 $506.37\text{ }\mu\text{m}$. 第 5 周期后, 腐蚀进一步加剧, 表面结构残缺, 基体受到了严重腐蚀, 相比第 3 周期, 腐蚀坑深度增幅较小, 但腐蚀坑面积明显增大, 也表明前期腐蚀迅速, 随着腐蚀产物膜的逐渐致密, 阻碍了腐蚀性离子向基体传送的通道, 从而起到一定的保护作用.

2.2 38CrMoAlA 钢力学性能试验结果

2.2.1 腐蚀宏观形貌

38CrMoAlA 钢力学试样经过不同周期的湿热和盐雾交替腐蚀试验后, 其外观和腐蚀程度发生了显著变化(如图 6 和 7). 原始试样表面光滑, 金属光泽明显. 1 周期后, 这些试样表面开始出现少量的腐蚀, 呈现出棕褐色的氧化层, 表明开始有轻微的氧化, 腐蚀较为均匀, 尚未出现深层次的锈蚀或大面积的剥落. 主要集中在中部颈缩区域, 这部分是试样受力最大的区域. 3 周期表面腐蚀更加严重, 腐蚀产物较厚, 局部出现剥落, 试样表面呈现

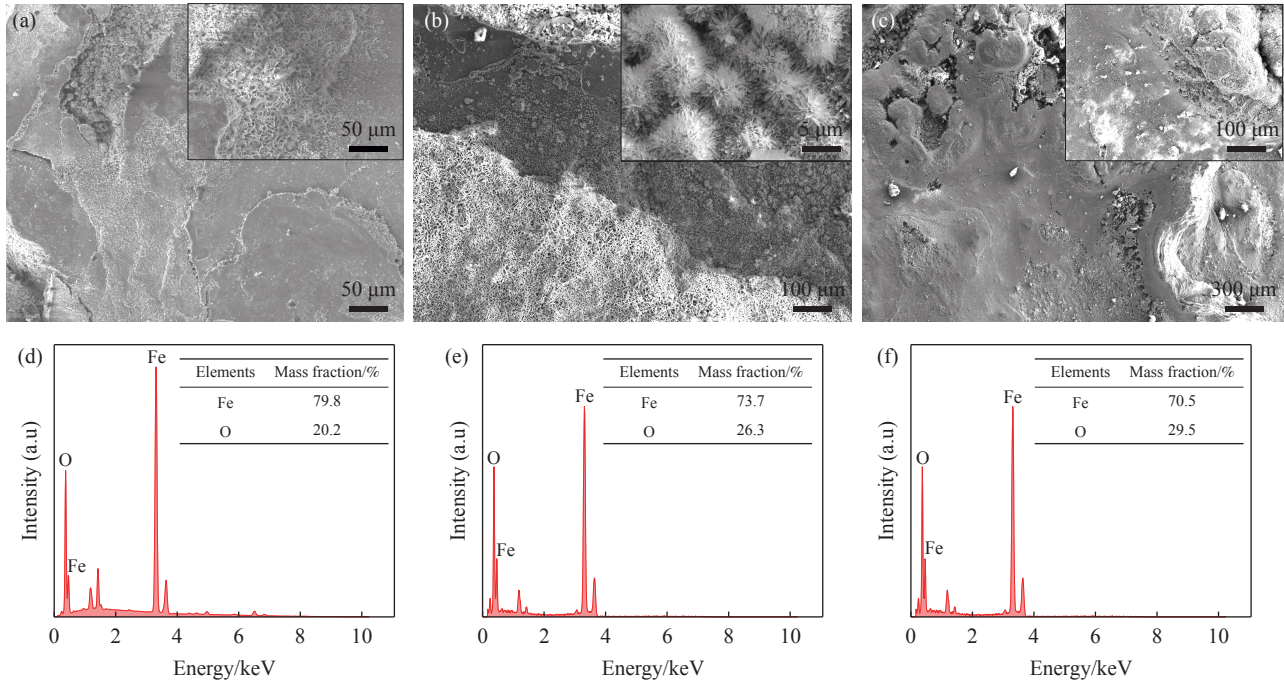


图 4 38CrMoAlA 不同试验周期后的表面 SEM 图 (a, b, c 分别为 1, 3, 5 周期) 及 EDS 结果 (d, e, f 分别为 1, 3, 5 周期)

Fig.4 SEM images (a, b, and c represent 1, 3, and 5 cycles, respectively) and EDS results (d, e, and f represent 1, 3, and 5 cycles, respectively) after different test cycles of 38CrMoAlA

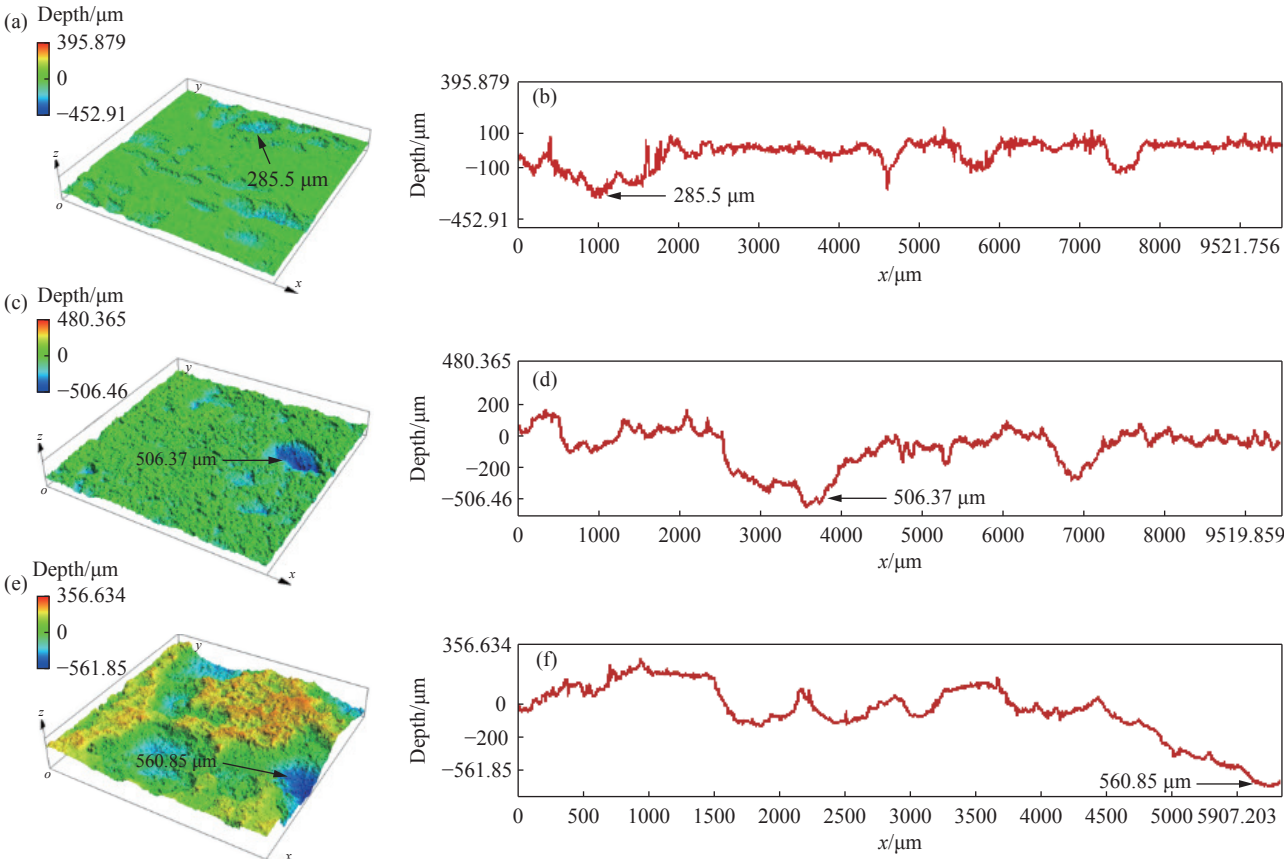


图 5 不同循环周期 38CrMoAlA 腐蚀产物去除后的三维形貌图. (a, b) 1 周期; (c, d) 3 周期; (e, f) 5 周期

Fig.5 Three-dimensional morphology of 38CrMoAlA after removing corrosion products with different cycles: (a, b) 1 cycle; (c, d) after 3 cycles; (e, f) after 5 cycles

明显的腐蚀坑. 颈缩区域腐蚀明显加剧, 氧化物沉积较多. 金属表面开始出现局部深层的腐蚀痕迹, 腐蚀产物开始累积. 5 周期表面严重腐蚀, 出现大量氧化物, 特别是中部的颈缩区域. 腐蚀产物呈现出较厚的红褐色层, 已经进入了深层腐蚀, 金属结构遭到严重破坏, 表面完全被氧化物覆盖.

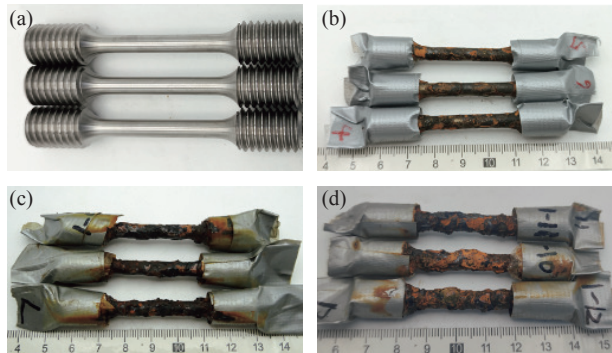


图 6 38CrMoAlA 拉伸试样不同试验周期后的宏观形貌. (a) 试验前; (b) 1 周期; (c) 3 周期; (d) 5 周期

Fig.6 Macroscopic morphology of the 38CrMoAlA tensile specimen after different test cycles: (a) before the experiment; (b) after 1 cycle; (c) after 3 cycles; (d) after 5 cycles

2.2.2 拉伸试验结果及断口分析

图 8 是 38CrMoAlA 钢不同试验周期后的拉伸

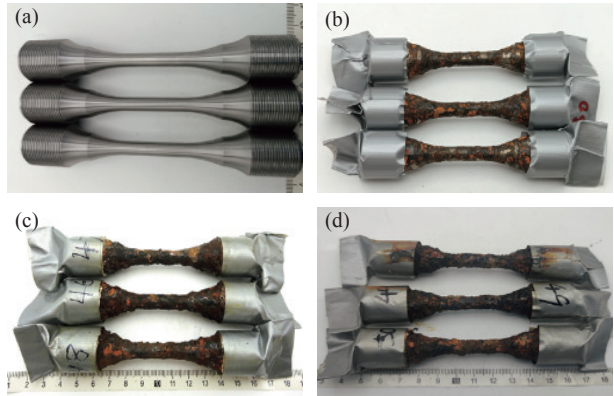


图 7 38CrMoAlA 疲劳试样不同试验周期后的宏观形貌. (a) 试验前; (b) 1 周期; (c) 3 周期; (d) 5 周期

Fig.7 Macroscopic morphology of the 38CrMoAlA fatigue sample after different test cycles: (a) before the experiment; (b) after 1 cycle; (c) after 3 cycles; (d) after 5 cycles

试验结果, 图中分别展示了应力-应变曲线、抗拉强度/屈服强度、断面伸长率和断面收缩率随周期变化的趋势. 应力-应变曲线中 0 周期曲线最高, 表示材料未试验前具有较高的抗拉强度和塑性. 随着周期增加, 曲线逐渐向下移动, 尤其在 5 周期时, 明显表现出抗拉强度和塑性的大幅下降. 这表明湿热和盐雾试验对材料的性能产生了显著的负

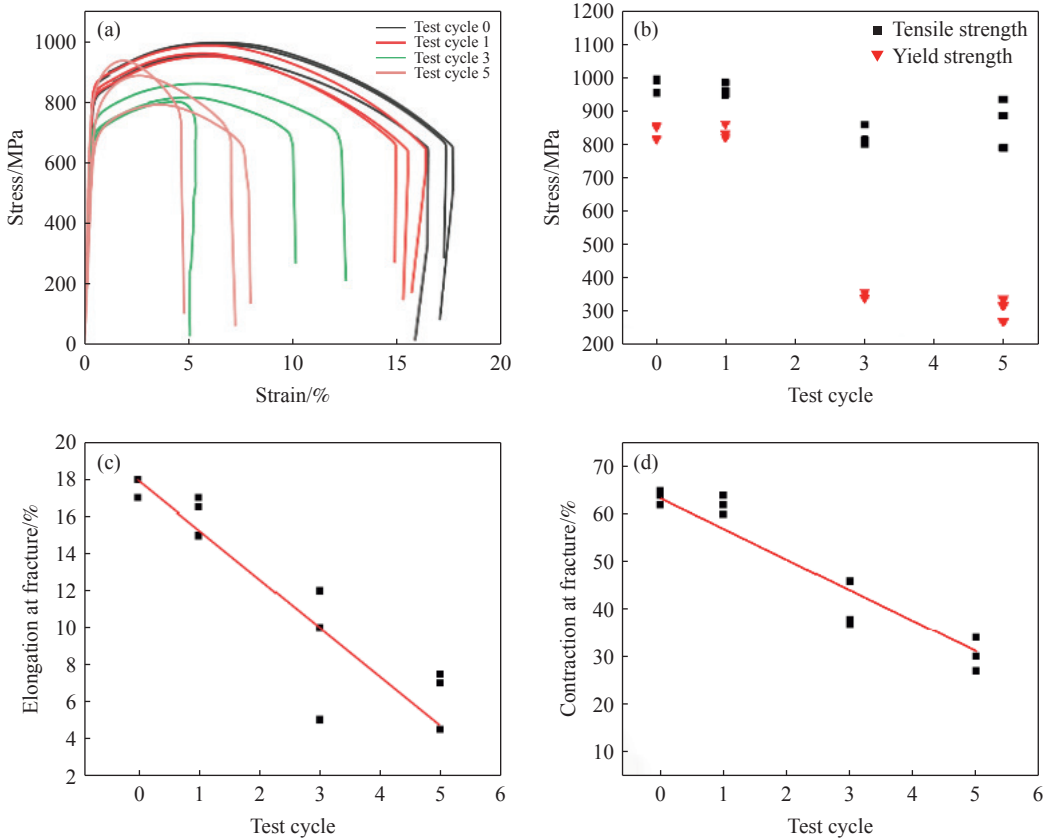


图 8 38CrMoAlA 拉伸试验结果. (a) 应力-应变曲线; (b) 抗拉/屈服强度值; (c) 断面伸长率; (d) 断面收缩率

Fig.8 38CrMoAlA tensile test results: (a) stress-strain curve; (b) tensile/yield strength value; (c) elongation at fracture; (d) contraction at fracture

面影响. 图 8(b)是对应的各周期的强度值, 随着周期增加, 抗拉强度从 980 MPa 下降到 870 MPa, 屈服强度从 842 MPa 逐步下降到 307 MPa, 屈服强度的减少意味着材料的弹性变形能力减弱, 更容易发生永久性变形. 断面伸长率是材料拉伸到断裂时, 长度增加的百分比. 从图 8(c)可以看出, 原始样品断面伸长率较高, 约为 18%, 表明材料具有良好的延展性. 随着周期增加, 断面伸长率显著下降, 至 5 周期时降到约 6%, 表明材料的塑性严重下降, 经过处理后材料变得更加脆弱. 原始样品的断面收缩率约为 63%, 这表示材料在断裂前有较大的塑性变形能力, 试验 5 周期后仅为 33% 左右. 这意味着材料的塑性和韧性明显降低, 受试验后更加脆性化.

从这些数据可以看出, 38CrMoAlA 钢在经过多周期的湿热和盐雾试验后, 其力学性能大幅下

降, 尤其是在第 5 周期后, 材料的强度和塑性损失尤为显著. 这意味着这种材料在苛刻环境下使用时, 其耐腐蚀性能和使用寿命需要格外关注.

原始样品的拉伸断口截面没有凹坑(图 9(a)), 为典型韧窝断裂, 属微孔聚集型断裂, 实验中, 在拉应力的作用下, 呈近似圆形的等轴韧窝. 这些韧窝随着外力的逐渐增大, 彼此连接至一定程度后产生内缩颈, 进而形成内裂纹, 从而最终导致断裂^[18-19]. 1 周期试验后(图 9(b)), 试样表面出现了轻微腐蚀坑, 作为裂纹源, 在应力作用下, 导致此处应力更容易集中, 形成裂纹并进一步扩展, 第 3、第 5 周期后(图 9(c)和(d)), 发生了深层腐蚀, 基体表面出现多处大而深的腐蚀坑, 腐蚀产物发生剥落, 基体外径减小, 导致的材料的抗拉强度和屈服强度大幅减小, 断面伸长率和收缩率同时减小, 最终导致材料更容易失效断裂.

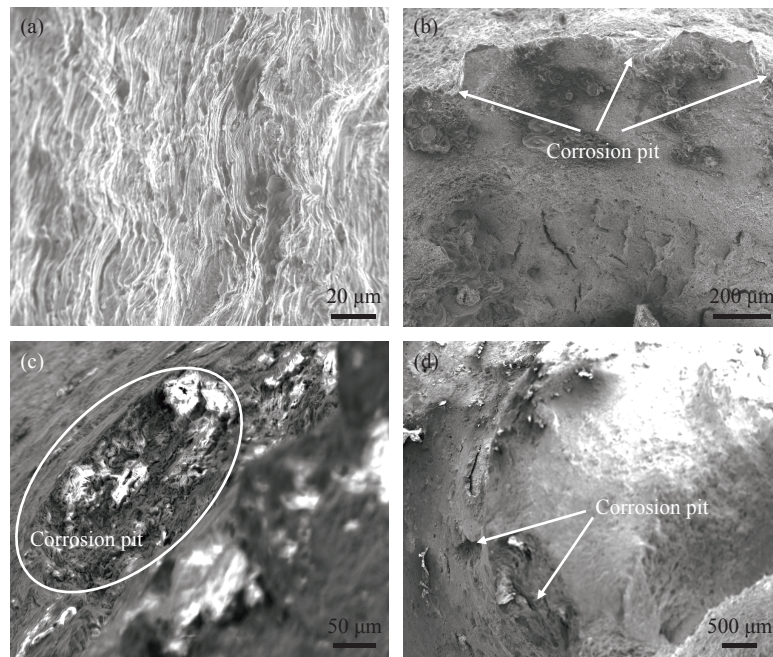


图 9 38CrMoAlA 不同试验周期拉伸断口形貌. (a) 试验前; (b) 1 周期; (c) 3 周期; (d) 5 周期

Fig.9 Morphology of tensile fractures of 38CrMoAlA after different test cycles: (a) before the experiment; (b) after 1 cycle; (c) after 3 cycles; (d) after 5 cycles

2.2.3 疲劳试验结果及断口分析

图 10 是采用升降法测试材料的疲劳极限结果. 根据钢种的抗拉强度和屈服强度来确定初始应力强度, 将初始应力强度作为第 1 根试样的加载应力, 若第 1 根试样通过设定的循环次数 (10^7 次), 则提高第 2 根试样的加载应力, 若第 2 根试样在 10^7 循环次数前断裂, 则降低第 3 根试样加载应力, 并继续试验. 升降的应力水平数 i 一般 4 级左右, 中值疲劳极限 σ 如式(1)所示.

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m V_i \sigma_i \quad (1)$$

式中: n 为有效试样总个数; m 为升降应力水平级数; V_i 为第 i 级应力水平的试验次数; σ_i 为第 i 级应力水平; $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

在 0 周期中, 试样的应力波动较大, 应力在 750 MPa 以上样品均破断, 750 MPa 以下样品均通过测试, 根据式(1)计算得中值疲劳极限为 752.27 MPa, 标准差 17.5 MPa. 在 1 周期中, 多数试样的应

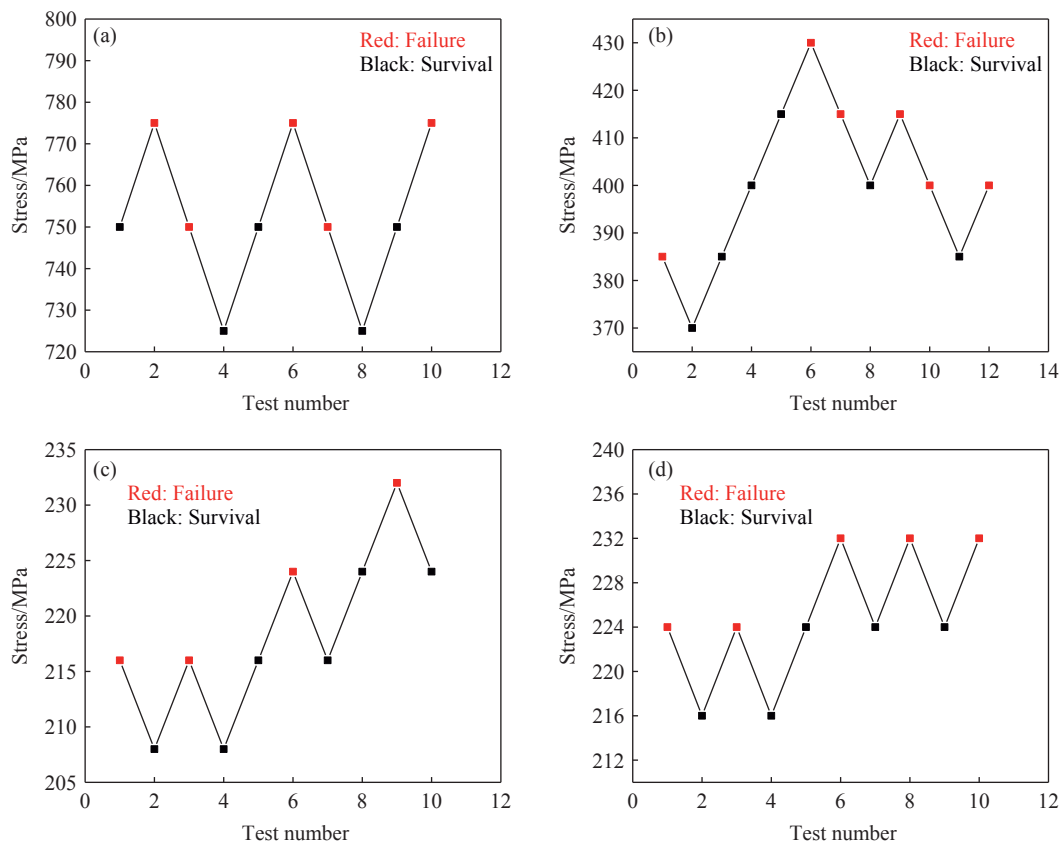


图 10 38CrMoAlA 各周期疲劳极限测试升降图。(a) 试验前;(b) 1 周期;(c) 3 周期;(d) 5 周期

Fig.10 Fatigue limit tests of lifting chart in each cycle of 38CrMoAlA: (a) before the experiment; (b) after 1 cycle; (c) after 3 cycles; (d) after 5 cycles

力波动较小,应力在 410 MPa 以上样品破断,380 MPa 以下样品能达到疲劳极限,中值疲劳极限为 400 MPa,标准差 16.9 MPa。试验 3 周期后,中值疲劳极限为 225 MPa,相比前周期再次明显下降,而试验 5 周期后,中值疲劳极限为 218 MPa,相比 3 周期后,变化不大,因为试样表面腐蚀产物增厚,腐蚀速率减慢。从周期对比来看(如图 11),38CrMoAlA 钢未经腐蚀试验的中值疲劳极限较高,但随着测试周期增加,试样的中值疲劳极限逐渐下降,从 752 MPa 降到了 218 MPa,说明经过腐蚀后,对材料造成了严重损伤,大幅降低了材料的疲劳极限。

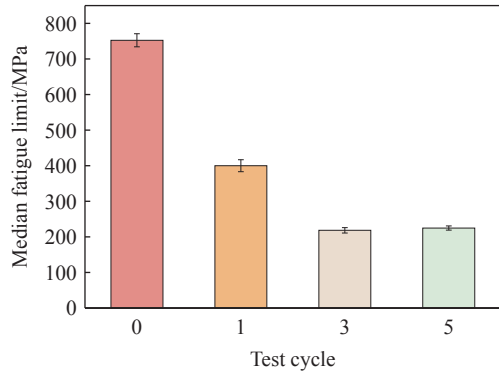


图 11 38CrMoAlA 各周期中值疲劳极限趋势图

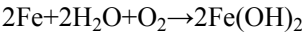
Fig.11 38CrMoAlA's median fatigue limit trend chart for each period

图 12 所示,原始试样疲劳断口呈明显的辐射状裂纹形貌,裂纹从断口中心向外延伸。这种辐射状的裂纹扩展通常是疲劳裂纹扩展的典型特征,这表明该试样经历了多次循环应力作用。在该图中可以看到裂纹路径清晰,这表明未试验前为均匀的裂纹扩展^[20-21]。1 周期后,呈一个粗糙、不规则的断裂面,表面有明显的孔洞和凹陷区域,这是腐蚀坑或孔洞。腐蚀坑的存在会导致局部应力集中,进一步加速裂纹的萌生和扩展。经过腐蚀后,材料的疲劳强度明显降低。腐蚀产物可能在断裂过程中积聚在某些区域,导致局部的材料剥落,形成明显的腐蚀坑。图中的孔洞应该是腐蚀后材料剥蚀的结果,这也是腐蚀加速疲劳断裂的典型现象。

腐蚀不仅会加速裂纹的萌生和扩展,还通过形成腐蚀坑等缺陷大幅降低了材料的疲劳极限。在实际应用中,需特别注意该材料在腐蚀环境中的使用寿命,并采取相应的防护措施以延缓腐蚀过程,提升材料的疲劳寿命。

2.2.4 腐蚀损伤分析

38CrMoAlA 钢在湿热-盐雾环境的交替试验中,湿热环境促进了金属表面的水化与氧化反应:



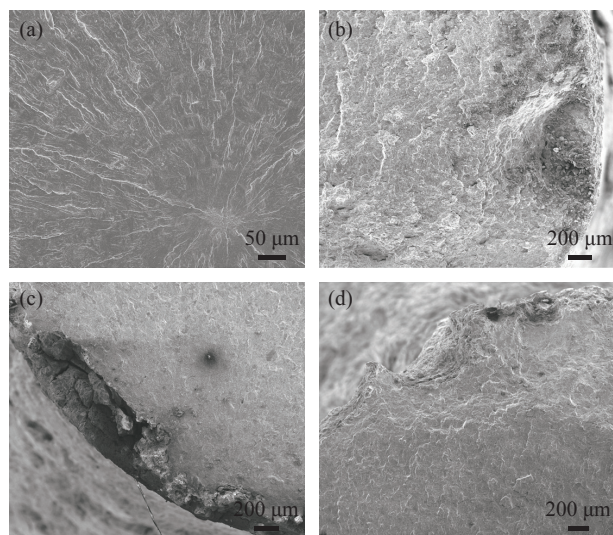
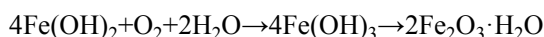
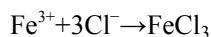


图 12 38CrMoAlA 各周期疲劳极限断口形貌. (a) 试验前; (b) 1 周期; (c) 3 周期; (d) 5 周期

Fig.12 Fracture morphology of fatigue limit in each cycle of 38CrMoAlA: (a) before the experiment; (b) after 1 cycle; (c) after 3 cycles; (d) after 5 cycles



腐蚀坑从均匀分布逐渐转向局部集中, 这种现象是由于 Cl^- 在局部区域的富集导致的. 盐雾环境下 Cl^- 对氧化膜的破坏作用加剧了孔蚀的扩展^[22-24]:



从腐蚀机理角度分析, Cl^- 通过破坏金属表面的氧化膜进入基体内部, 形成局部活化点, 这些活化点逐渐发展为深坑, 最终引发孔蚀和裂纹扩展. 氧化膜的再生成速率无法覆盖金属的裸露区域, 使得腐蚀在局部加速.

38CrMoAlA 钢经过试验后力学性能下降, 其主要归因于腐蚀坑引发的应力集中效应, 以及孔蚀和裂纹扩展降低了金属的有效承载面积. 特别是在断口分析中, 腐蚀坑是加载过程中扩展裂纹的起始部位, SEM 显示腐蚀坑周围形成大量沿晶裂纹, 裂纹在加载过程中迅速扩展, 导致试样早期失效^[23,25]. 此外, 加上点蚀造成的承载能力损失, 严重降低了材料承受循环载荷的能力, 进一步加速了材料的失效.

3 结论

(1) 湿热-盐雾交替环境显著加速了 38CrMoAlA 钢的腐蚀行为, 盐雾中的 Cl^- 是腐蚀加剧的主要原因.

(2) 腐蚀损伤显著降低了材料的抗拉强度、疲劳极限和塑性变形能力, 其机理在于点蚀和孔蚀引发的应力集中效应.

(3) 腐蚀坑的深度及分布对疲劳裂纹的萌生和

扩展具有决定性影响.

参 考 文 献

- [1] Le L, Sofi M, Lumantarna E. The combined effect of stress and corrosion on mild steel. *J Constr Steel Res*, 2021, 185: 106805
- [2] Zhang C T, Zhu H J, Zhu L. Effect of interaction between corrosion and high temperature on mechanical properties of Q355 structural steel. *Constr Build Mater*, 2021, 271: 121605
- [3] Wang Z F, Liu J R, Wu L X, et al. Study of the corrosion behavior of weathering steels in atmospheric environments. *Corros Sci*, 2013, 67: 1
- [4] LeBozec N, Jönsson M, Thierry D. Atmospheric corrosion of magnesium alloys: Influence of temperature, relative humidity, and chloride deposition. *Corrosion*, 2004, 60(4): 356
- [5] Wu B, Ibrahim M Z, Raja S, et al. The influence of reinforcement particles friction stir processing on microstructure, mechanical properties, tribological and corrosion behaviors: A review. *J Mater Res Technol*, 2022, 20: 1940
- [6] Chen Z Y, Nie S D, Han W B, et al. A study on static properties of high-performance steel after corrosion damage. *J Constr Steel Res*, 2023, 207: 107970
- [7] Zang X S, Sun X T. Contact fatigue properties and failure characters of nitriding 38CrMoAlA. *Mater Mech Eng*, 1993, 17(2): 22
(臧鑫士, 孙希桐. 38 CrMoAlA 氮化钢的接触疲劳性能及其破坏性征. 机械工程材料, 1993, 17(2): 22)
- [8] Ahmed A A, Mhaede M, Wollmann M, et al. Effect of micro shot peening on the mechanical properties and corrosion behavior of two microstructure Ti-6Al-4V alloy. *Appl Surf Sci*, 2016, 363: 50
- [9] Song Z Y. *Adaptability Study of High-Temperature Microstructure and Mechanical Properties of 65Mn and 38CrMoAlA Steels* [Dissertation]. Shenyang: Northeastern University, 2010
(宋宗尧. 65Mn 及 38CrMoAlA 钢的高温组织与力学性能的适应性研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2010)
- [10] Wang C, Zeng Y P, Xie X S. Influence of characteristic inclusion parameters on crack initiation and propagation in ultra-high strength steels for aerospace application under tensile and low cyclic fatigue loading. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(5): 557
(王冲, 曾燕屏, 谢锡善. 拉伸与低周疲劳载荷作用下夹杂物特征参数对航空用超高强度钢中裂纹萌生与扩展的影响. 北京科技大学学报, 2009, 31(5): 557)
- [11] Wang B, Sun S H, Guo M W, et al. Study on pressurized gas nitriding characteristics for steel 38CrMoAlA. *Surf Coat Technol*, 2015, 279: 60
- [12] Wang B, Lv Z Q, Zhou Z A, et al. Combined effect of rapid nitriding and plastic deformation on the surface strength, toughness and wear resistance of steel 38CrMoAlA. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2015, 89: 012046
- [13] Li N, Zhang W F, Xu H, et al. Corrosion behavior and mechanical

- properties of 30CrMnSiA high-strength steel under an indoor accelerated harsh marine atmospheric environment. *Materials (Basel)*, 2022, 15(2): 629
- [14] Wang J, Sun L Y, Ma H C, et al. Comparative study on mechanical and corrosion fatigue properties of high-strength bridge steels produced by TMCP and intercritical quenching & tempering process. *Mater Sci Eng A*, 2022, 853: 143771
- [15] Li F K, Cui C J, Ma R J, et al. An experimental study on the corrosion behaviors and mechanical properties of Q345qD steel in neutral salt spray environment considering stress state. *Dev Built Environ*, 2023, 15: 100214
- [16] Li Z L, Xiao K, Dong C F, et al. Atmospheric corrosion behavior of low-alloy steels in a tropical marine environment. *J Iron Steel Res Int*, 2019, 26(12): 1315
- [17] Cai J X, Sun L Y, Ma H C, et al. Corrosion characteristics of Q690qE high-strength bridge steel in simulated coastal-industrial environment and its influence on mechanical and corrosion fatigue behaviors. *Constr Build Mater*, 2022, 341: 127830
- [18] Chen Y W, Li M J, Su T, et al. Mechanical degradation and corrosion characterization of riveted joints for CFRP/Al stacks in simulated marine environments. *Eng Fail Anal*, 2022, 137: 106382
- [19] Li D L, Fu G Q, Zhu M Y. Corrosion characteristics of low-carbon steel in hot and humid industrial-marine atmosphere. *Chin J Eng*, 2017, 39(5): 739
- (李东亮, 付贵勤, 朱苗勇. 低碳钢在湿热工业海洋大气中的腐蚀特征. 工程科学学报, 2017, 39(5): 739)
- [20] Bai Y F, Zhao H D. Tensile properties and fracture behavior of partial squeeze added slow shot die-cast A356 aluminum alloy. *Mater Des*, 2010, 31(9): 4237
- [21] Chen Y Y, Tzeng H J, Wei L I, et al. Corrosion resistance and mechanical properties of low-alloy steels under atmospheric conditions. *Corros Sci*, 2005, 47(4): 1001
- [22] Gao M Y, Wang H T, Song Y W, et al. Corrosion behavior on carbon steel in a simulated soil solution under the interaction effect of chloride and bicarbonate ions. *J Mater Res Technol*, 2022, 21: 3014
- [23] Li N, Yan X J, Liu X R, et al. Mechanical properties evolution of the 7B04-T74 aluminum alloy in the marine atmosphere. *Metals*, 2022, 12(12): 2173
- [24] Zhang S H, Hou L F, Du H Y, et al. A study on the interaction between chloride ions and CO₂ towards carbon steel corrosion. *Corros Sci*, 2020, 167: 108531
- [25] Fan L, Liu M, Wang Y L, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Ce doped TiN films. *Appl Surf Sci*, 2022, 575: 151770