

硬膜缓蚀剂对钛合金紧固件电偶腐蚀的防护作用研究

刘恕骞^{1*}, 文茂¹, 王善岭¹, 许斌², 罗丹², 王茂川², 钟勇²

(1. 成都飞机设计研究所, 成都 610500; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 目的 研究 YTF-3 硬膜缓蚀剂对由 TC4 螺栓、不锈钢螺母、7050 铝合金及 TC4 钛合金夹层板组成的组件电偶腐蚀的影响作用。方法 利用硬膜缓蚀剂对钛合金紧固件和夹层板进行整体腐蚀防护处理, 并通过盐雾加速腐蚀试验。将齿轮槽螺栓与无耳托板自锁螺母安装连接后, 进行自然环境加速腐蚀试验, 腐蚀后对螺栓螺母以及夹层板的腐蚀情况进行拍照检查, 采用图像处理方式对腐蚀情况进行评价, 并通过室温拉伸试验对钛合金螺栓腐蚀前后的力学性能情况进行对比分析。结果 经过腐蚀试验后, TC4 螺栓和铝合金组件刷涂缓蚀剂区域比未刷涂缓蚀剂区域的平均腐蚀面积要小。不锈钢螺母与 TC4 钛合金组件刷涂缓蚀剂区域出现明显褶皱和破损现象。对比了试验前后钛合金螺栓的最大拉断载荷, 发现降幅仅为 0.5%。结论 铝合金夹层板会遭受电偶腐蚀, 而 YTF-3 缓蚀剂可以有效隔绝腐蚀介质渗入固定间隙, 大幅缓解电偶腐蚀, 而钛合金螺栓在加速腐蚀试验中并未发生明显的腐蚀, 并且力学性能无明显改变。

关键词: 钛合金; 铝合金; 紧固件; 电偶腐蚀; 缓蚀剂; 腐蚀防护

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)03-0032-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.005

Protective Effect of Hard Film Corrosion Inhibitor on Galvanic Coupling Corrosion of Titanium Alloy Fasteners

LIU Shuqian^{1*}, WEN Mao¹, WANG Shanling¹, XU Bin², LUO Dan², WANG Maochuan², ZHONG Yong²

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610500, China;

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

ABSTRACT: The work aims to study the effect of YTF-3 hard-film corrosion inhibitor on the galvanic coupling corrosion of the assembly consisting of TC4 bolts, stainless steel nuts, 7050 aluminum alloy and TC4 titanium alloy sandwich plate. The hard film corrosion inhibitor was utilized for the overall corrosion protection treatment of titanium alloy fasteners and sandwich plates, the salt spray accelerated corrosion test was carried out to the fasteners and sandwich plates. In the test, the gear groove bolts and the self-locking nuts without lug pallets were installed and connected to carry out the natural environment accelerated corrosion test, and the corrosion of the bolts and nuts as well as the sandwich plate was photographed and examined and evaluated by the image processing method. The mechanical properties of the titanium alloy bolts before and after the corrosion were comparatively analyzed by the room temperature tensile test. After the corrosion test, the average corrosion area of TC4 bolts

收稿日期: 2023-09-25; 修订日期: 2023-12-29

Received: 2023-09-25; Revised: 2023-12-29

引文格式: 刘恕骞, 文茂, 王善岭, 等. 硬膜缓蚀剂对钛合金紧固件电偶腐蚀的防护作用研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 32-38.

LIU Shuqian, WEN Mao, WANG Shanling, et al. Protective Effect of Hard Film Corrosion Inhibitor on Galvanic Coupling Corrosion of Titanium Alloy Fasteners[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 32-38.

*通信作者 (Corresponding author)

and aluminum alloy assemblies with brushed corrosion inhibitor area was smaller than that of the unbrushed corrosion inhibitor area. Stainless steel nuts and TC4 titanium alloy assemblies with brush-coated corrosion inhibitor areas showed obvious wrinkles and breakage. The maximum pull-off load of titanium alloy bolts before and after the test was compared and found to have decreased by only 0.5%. Aluminum alloy sandwich plate will suffer galvanic coupling corrosion, and YTF-3 corrosion inhibitor can effectively isolate the corrosive medium penetration into the fixed gap, significantly alleviating the galvanic coupling corrosion, while titanium alloy bolts in the accelerated corrosion test do not have obvious corrosion, and the mechanical properties of the mechanical properties are not significantly changed.

KEY WORDS: titanium alloy; aluminum alloy; fastener; galvanic coupling corrosion; corrosion inhibitor; corrosion protection

钛合金紧固件因其强度高、密度低、抗疲劳、耐腐蚀、无磁性等优点, 在船舶等领域中被广泛使用^[1-5]。在多数应用情形下, 钛合金紧固件会与异种材料连接, 如铝合金、钢铁等^[6-9]。在大气和海洋环境中, 钛合金表面会生成致密的氧化膜, 使其电化学活性降低。此时钛合金紧固件和被固定件之间会发生电偶腐蚀, 导致被固定件腐蚀速率被大幅加快, 最终引起固定失效^[10-11]。

目前解决钛合金紧固件电偶腐蚀常用途径: 一是减小钛合金与被固定材料之间的电化学活性差异, 如对钛合金紧固件进行电镀镉、镀铝、涂铝; 二是增大钛合金紧固件和被固定件间的电阻, 如涂覆有机、无机涂层, 或者在安装中使用湿底漆或弹性密封胶^[12-16]。这些方法存在成本高、工艺复杂、影响紧固效果等缺点。硬膜缓蚀剂是一种由成膜剂、缓蚀剂、溶剂和助剂等多种物质组成的缓蚀剂, 它具有很强的渗透性和水分置换能力, 可以进入极小的缝隙或孔内, 将其中的水分和盐置换出来, 并覆盖一层保护性膜层, 从而起到防腐效果^[17-18]。由于其独特的缓蚀作用机制, 硬膜缓蚀剂对铝合金、镁合金、锌、镉、铜、黄铜等金属材料均有良好的缓蚀效果。

本研究提出利用硬膜缓蚀剂对紧固件组件进行整体腐蚀防护处理, 通过盐雾加速腐蚀试验、腐蚀形貌观察、力学性能测试等手段, 研究了 YTF-3 硬膜缓蚀剂对由 TC4 螺栓、不锈钢螺母与 7050 铝合金夹板以及钛合金夹板分别组成的紧固件组件电偶腐蚀的影响作用。

1 试验

1.1 材料

试验中使用国产齿轮槽 100°沉头 TC4 钛合金螺栓, 螺母采用国产无耳托板自锁不锈钢螺母, 夹层板选用 2 块厚度分别为 6、13 mm 的 7075 铝合金板(表面采用阳极氧化外加富锌黄底漆处理)或 2 块厚度分别为 6、13 mm 的 TC4 钛合金板(未进行表面处理), 以下分别称为 LL 试样和 TT 试样。试样尺寸及装配形式如图 1 和图 2 所示。

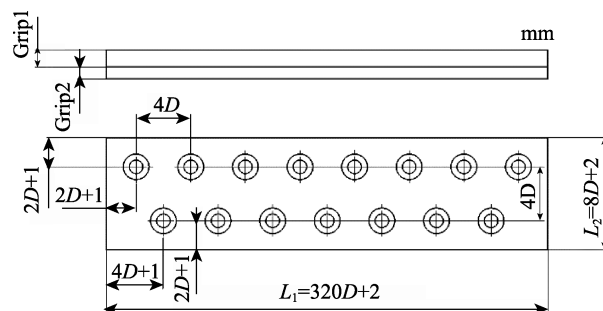


图 1 试样的结构与尺寸

Fig.1 Structure and size of sample

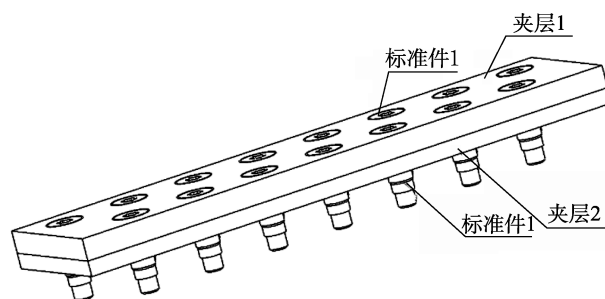


图 2 试样装配示意图

Fig.2 Assembly diagram of sample

1.2 方法

本研究采用盐雾加速腐蚀试验分别对一个 LL 试样(含 15 个螺栓螺母)和一个 TT 试样(含 15 个螺栓螺母)的电偶腐蚀行为进行测试, 加速试验图谱如图 3 所示。在加速试验中, 每 7 d 为 1 个循环, 总共进行 10 个循环, 即试验总时间为 70 d。1 个试验循环由 2 步试验组成, 第一步试验持续 6 d, 试验条件: 温度为 70 °C, 相对湿度为 95%~100%, 喷酸性盐雾溶液(NaCl 质量分数为 5%, pH=4.0~5.0); 第二步试验持续 1 d, 试验条件: 温度为 50 °C, 相对湿度为 0%~40%, 不喷洒盐雾。

当试验周期达到 5 个循环(35 d)时, 先检查试样腐蚀情况, 随后将试样分为左、中、右 3 个部位(如图 4 所示), 左侧部分使用清水去除表面盐渍和锈迹, 中间和右侧部分不做处理, 待试样全部晾干至干燥状态后, 使用 YTF-3 硬膜缓蚀剂对试验件左边部分进行缓蚀保护。具体操作流程: 先用软毛刷将缓蚀剂均匀

刷涂于试样上半部分, 室温干燥 30 min 后刷涂第二遍, 随后在室温下干燥 72 h 后即可。完成以上流程后, 取出右侧部分螺栓进行力学拉伸试验, 继续开展后续 5 个循环的加速腐蚀试验 (35 d)。

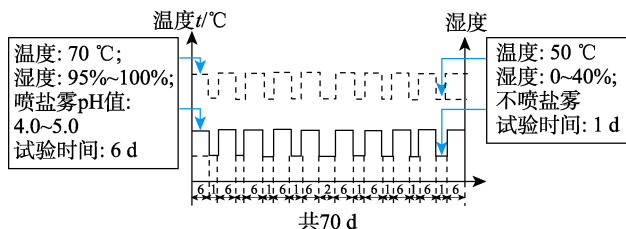


图3 加速腐蚀试验图谱
Fig.3 Accelerated corrosion test graph

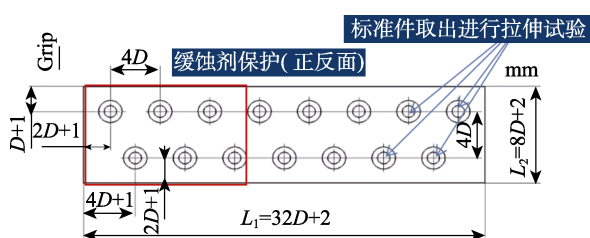


图4 刷涂缓蚀剂位置
Fig.4 Position with the brushed corrosion inhibitor

在加速腐蚀试验中, 定期取出试样使用 Nikon D50 数码相机进行拍照记录, 并采用图像处理方式, 计算腐蚀、起泡区域的面积, 评价等效扩展长度。采用微机控制电子万能试验机对经过加速腐蚀试验后的螺栓开展室温拉伸试验, 拉伸时采用位移控制的

方式, 加载速率为 5 mm/min, 并采用 Quantro 扫描电镜观察分析断口形貌。

2 结果及分析

2.1 腐蚀试验结果

2 类试样经不同循环试验周期的宏观形貌如图 5 所示。从图 5 可以看到, 试验前 LL 试样和 TT 试样的涂层和螺栓螺母外观状态完好, 没有任何肉眼可见的缺陷。从图 5b 可知, 随着试验时间的延长, LL 试样经 5 个循环试验后, 紧邻螺母附近的铝合金发生严重腐蚀, 产生大量的氧化铝。由于氧化铝体积远比原始铝合金体积大, 因此大量的氧化铝腐蚀产物顶破锌黄底漆膨胀而出; 白色腐蚀产物外圈涂层有明显鼓泡现象, 表明涂层下方也发生了腐蚀; 远离螺栓、螺母区域涂层未破损, 无白色腐蚀产物生成。LL 试样螺栓、螺母未见明显腐蚀现象。这是因为铝合金板与钛合金螺栓之间由于电位差形成了电偶腐蚀, 导致作为阳极的铝合金板在循环试验中发生了腐蚀, 生成氧化铝的白色腐蚀产物^[19]。TT 试样经 5 个循环试验后, 螺母表面生成了明显棕褐色锈蚀产物, 这说明铁基的不锈钢螺母发生了腐蚀, 且在试验过程中顺沿螺母流至涂层表面, 但钛合金层合板表面涂层未发生明显破损现象。这是因为钛合金板与不锈钢螺母由于电位差形成了电偶腐蚀, 螺母作为阳极先发生腐蚀, 生成棕色腐蚀产物^[20]。

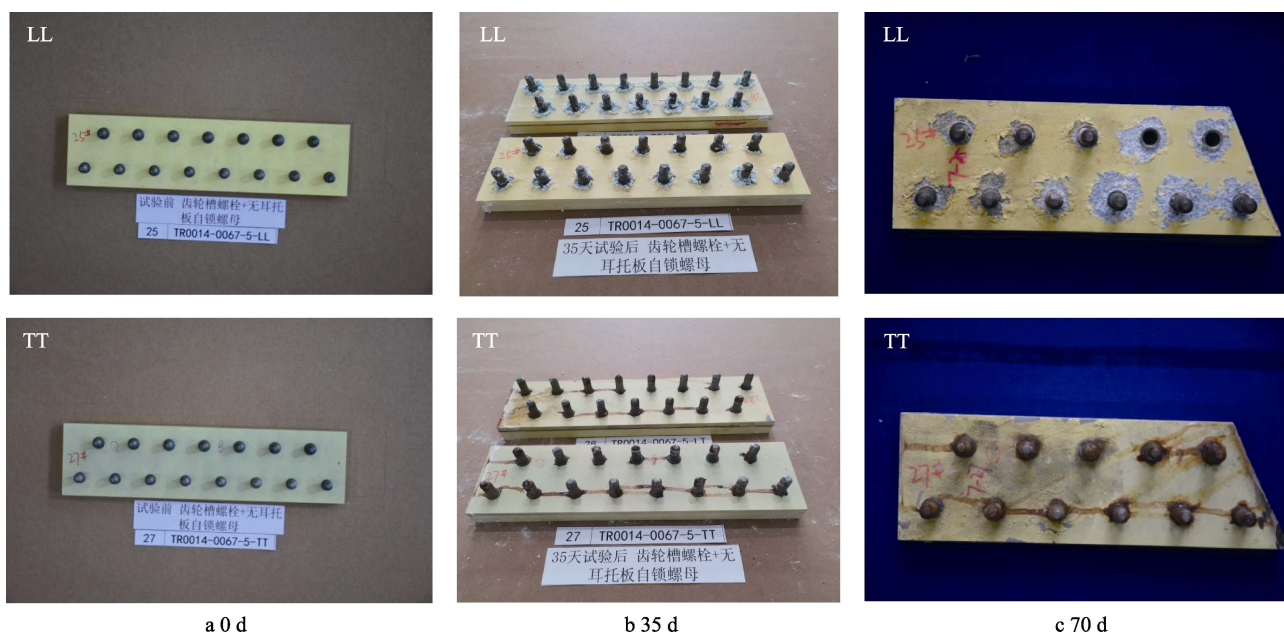


图5 试样不同试验周期结束后外观
Fig.5 Appearance of samples after different test cycles

刷涂硬膜缓蚀剂后, 继续试验 5 个循环后 (70 天) 的外观形貌如图 5c 所示。对螺母附近腐蚀与起

泡区域进行了标记, 共划分了 11 个区域, 其中 1[#]~3[#]、6[#]~8[#]区域为刷涂硬膜缓蚀剂区域, 4[#]、5[#]、9[#]~11[#]区

域为未刷涂硬膜缓蚀剂区域。从图 5c 中可知, 试样刷涂硬膜缓蚀剂区域涂层光泽较暗, 旧腐蚀区域灰暗色, 无明显新白色腐蚀产物生成; 而未刷涂缓蚀剂区域, 有明显新白色腐蚀产物生成。试样刷涂硬膜缓蚀剂未腐蚀区域涂层除色泽较暗外, 其余无变化, 表明硬膜缓蚀剂、锌黄底漆、阳极氧化膜的匹配性较好。TT 试样表面刷涂硬膜缓蚀剂区域锌黄底漆涂层有大量褶皱形成, 且表面多处出现破损现象, 表明硬膜缓蚀剂、锌黄底漆与钛合金的匹配性较差。这是由于锌黄底漆与光亮钛合金表面的附着力较差, 硬膜缓蚀剂在锌黄底漆固化过程中会产生较大内应力, 最终引发褶皱生成^[21]。

图 5c 中 LL 试样螺母附近标记区域对应面积见表 1 和表 2, 刷涂缓蚀剂区域的平均腐蚀面积为 5.75 cm², 从螺母中心起扩展的平均等效半径为 15.0 mm; 未刷涂缓蚀剂区域的腐蚀面积为 7.45 cm², 平均等效半径为 16.4 mm。6[#]与 9[#]腐蚀区域的外观如图 6 所示。6[#]区域腐蚀面积为 6.57 cm², 腐蚀的最大

扩展长度为 19.1 mm, 最短扩展长度为 4.0 mm; 9[#]区域腐蚀面积为 8.94 cm², 腐蚀的最大扩展长度为 16.7 mm, 最短扩展长度为 6.4 mm。综上所述, 未刷涂硬膜缓蚀剂区域在后续试验过程中发生了腐蚀扩展, 而刷涂硬膜缓蚀剂能隔绝了外界腐蚀介质的渗入, 有效缓解腐蚀的发生与扩展, 具有较好的防护效果。

表 1 螺母附近刷涂缓蚀剂区域腐蚀面积
Tab.1 Corrosion area near the nut where the corrosion inhibitor is applied

腐蚀区域编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	均值
腐蚀面积/cm ²	3.51	4.79	3.14	8.37	8.12	6.57	5.75

表 2 螺母附近未刷涂缓蚀剂区域腐蚀面积
Tab.2 Corrosion area near the nut where the corrosion inhibitor is not applied

试验件编号	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#] +11 [#]	均值
腐蚀面积/cm ²	7.31	5.12	8.94	15.88	7.45

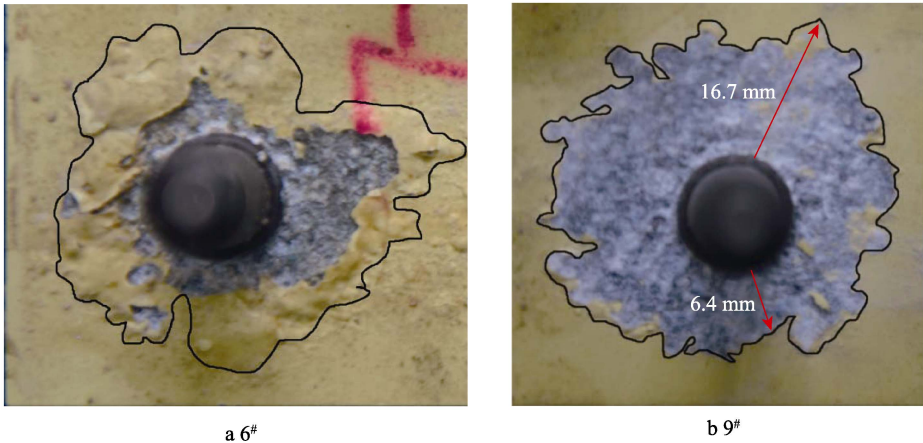


图 6 LL 试样 6[#]与 9[#]腐蚀区域宏观形貌
Fig.6 Macro morphology of 6[#] and 9[#] corrosion areas of sample LL

2.2 腐蚀后力学性能影响分析

钛合金螺栓经过不同时长腐蚀加速试验后的力-位移曲线见图 7a, 最大拉断载荷见图 7b。可以看到, 钛合金螺栓经过腐蚀试验 35 d 后, 最大拉断载荷为 47.6 kN, 试验 70 d 后为 47.4 kN, 降幅仅为 0.5%。这说明钛合金螺栓的力学性能在腐蚀加速试验中未发生明显损失。

钛合金螺栓拉伸断口微观形貌如图 8 所示。可以看到, 螺栓断口裂纹起始于螺纹根部, 断口边缘 A 区域微观形貌为细小撕裂韧窝的韧性断裂, 韧窝开口指向裂纹扩展方向; 断口裂纹源附近 B 区域微观形貌为细小撕裂韧窝的韧性断裂, 韧窝开口指向裂纹扩展方向; 断口芯部 C 区域微观形貌为韧窝的韧性断裂。这说明钛合金螺栓断裂机制为韧性断裂, 并未受到腐蚀试验的影响而发生脆性断裂^[22-24]。

2.3 腐蚀形貌分析

试验过程中, 铝合金上涂层渐进损伤至腐蚀发生扩展的进程如图 9 所示。铝合金夹层板制孔前喷涂锌黄底漆, 即螺栓、螺母与夹层板孔连接界面无防护涂层保护, 在试验过程中, 腐蚀介质容易从连接孔隙进入连接界面, 发生电偶腐蚀。铝合金阳极氧化层表面的锌黄底漆厚度较薄, 且涂层中存在着宏观和微观缺陷, 如毛细孔、基料与颜料的界面空隙、单体交联后结构中的孔隙等^[25], 如图 9a 所示。随着试验的进行, 连接孔隙附近缝隙及涂层中的各种缺陷会导致腐蚀介质如 H₂O、O₂、Cl⁻等穿透涂层进入界面^[26]。当使用钛合金螺栓、不锈钢螺母和钛合金夹板固定后, 形成多电极电偶腐蚀对, 活性相对较高的不锈钢会充当阳极, 腐蚀速率被加快, 而将夹板更换为活性较高的铝合金后, 阳极则变化至铝合金, 导致铝合金腐蚀

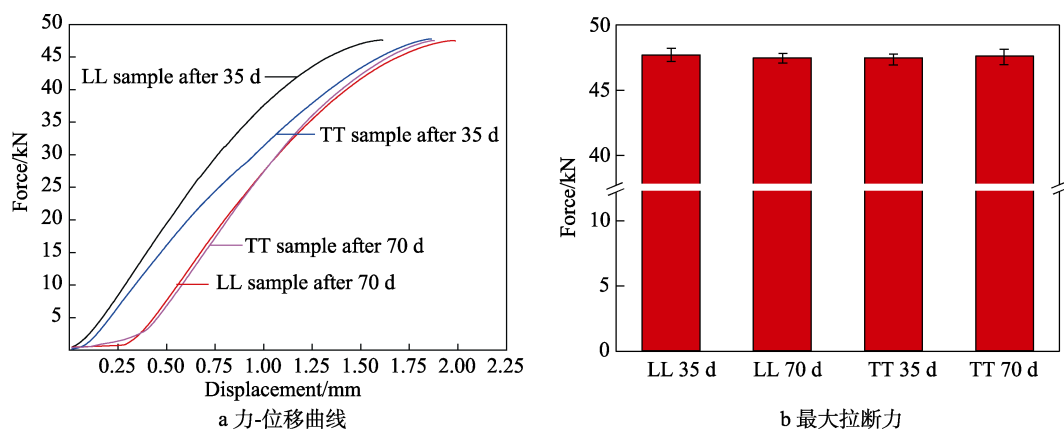


图7 螺栓拉伸力学性能

Fig.7 Tensile mechanical property of bolts: a) force-displacement curve; b) maximum tensile strength

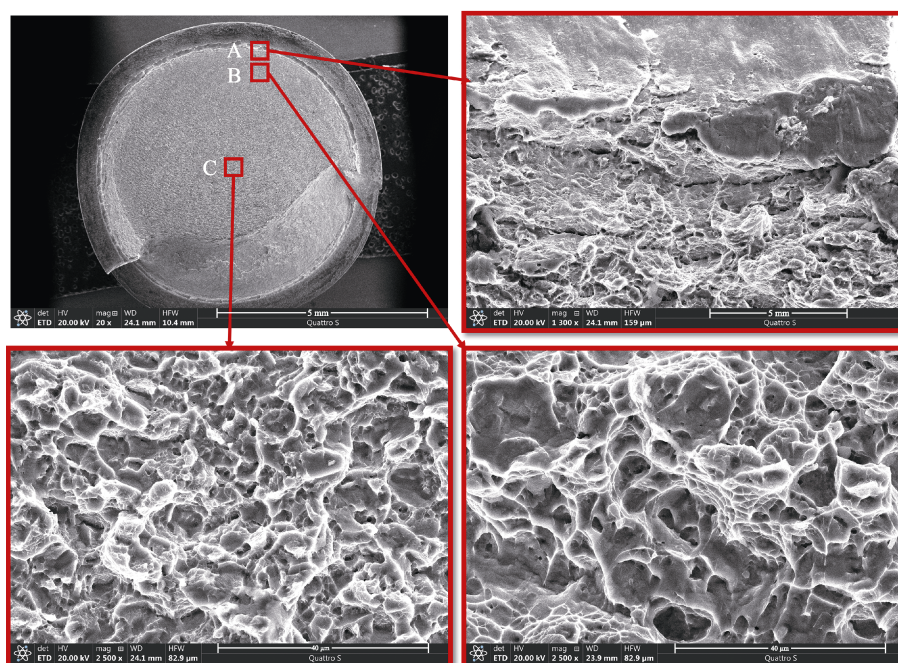


图8 螺栓拉伸断口形貌形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology of bolts

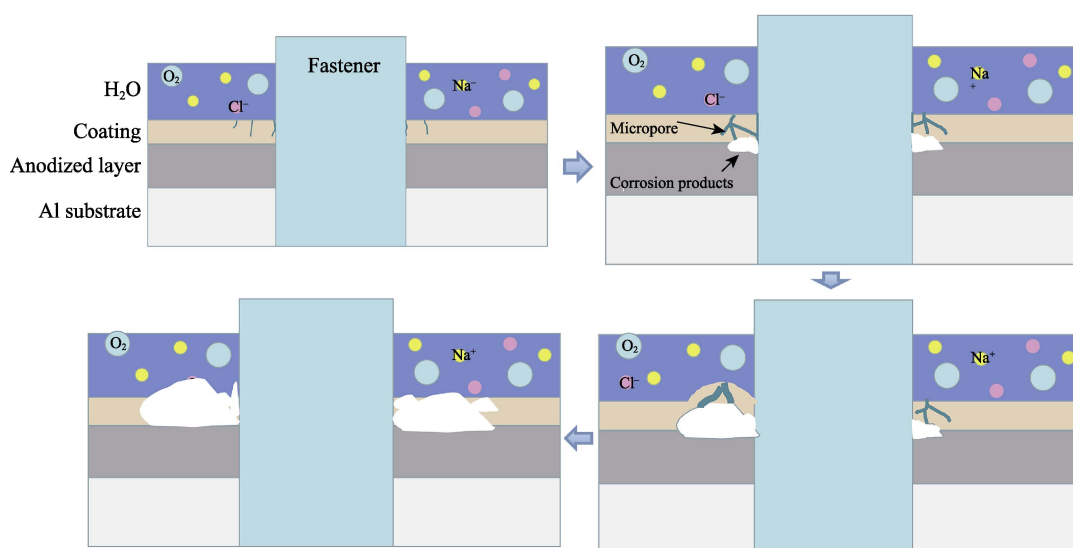


图9 连接件涂层渐进损伤至腐蚀发生扩展的示意图

Fig.9 Schematic diagram of gradual damage to the coating and the development of corrosion

加速^[27],这可以从铝合金与钛合金接触界面产生了大量腐蚀产物得到验证(见图9b)。当腐蚀产物逐渐增多,会对涂层产生了较大的内应力,致使涂层发生鼓泡现象,涂层的防护性能进一步劣化^[28],如图9c所示。最后涂层发生了彻底破坏,腐蚀产物与外界接触,即可明显观察到白色腐蚀产物,如图9d所示。

3 结论

1) 由钛合金螺栓、不锈钢螺母和铝合金夹层板组成的固定件,经过盐雾加速试验后,螺栓、螺母和夹层板间形成电偶腐蚀对,导致铝合金夹层板被严重腐蚀。

2) 由钛合金螺栓、不锈钢螺母和钛合金夹层板组成的固定件经过盐雾加速试验后,螺栓、夹层板和螺母间形成电偶腐蚀对,导致不锈钢螺母被严重腐蚀。

3) YTF-3 硬膜缓蚀剂可以在已发生腐蚀的铝合金表面或铝合金上镀锌底漆上固化形成生成一层保护膜,该膜层可以有效隔绝腐蚀介质渗入,阻止电偶腐蚀的发生。

4) 钛合金螺栓耐腐蚀性能优异,无论是与铝合金或钛合金组成电偶腐蚀对后,抗拉性能均无明显变化。

参考文献:

- [1] 曲璇中. 钛合金双耳托板自锁螺母的研制[J]. 稀有金属材料与工程, 1996, 25(4): 51-54.
QU X Z. Development of Self-Locking Nut for Titanium Alloy Double-Ear Supporting Plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1996, 25(4): 51-54.
- [2] 余永平. 钛合金轻型双耳托板自锁螺母研制[J]. 紧固件技术, 1995(4): 5-8.
YU Y P. Development of Titanium Alloy Light Duty Self-locking Nuts With Double Lug Bracket[J]. Fasteners Technology, 1995(4): 5-8.
- [3] 郑建锋. 提高疲劳寿命的托板自锁螺母选项研究[J]. 中国科技信息, 2016(17): 46-47.
ZHENG J F. Study on Self-Locking Nut Options of Pallet to Improve Fatigue Life[J]. China Science and Technology Information, 2016(17): 46-47.
- [4] 张庆玲, 王庆如, 李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析[J]. 材料工程, 2007, 35(1): 11-14.
ZHANG Q L, WANG Q R, LI X W. Materials Selection Analysis for Titanium Alloy Fasteners in Aviation Industry[J]. Journal of Materials Engineering, 2007, 35(1): 11-14.
- [5] 师俊峰, 韩珍梅. 航空紧固件钛合金材料的应用现状[J]. 机械管理开发, 2020, 35(5): 258-259.
SHI J F, HAN Z M. Application Status of Titanium Alloy Material for Aviation Fasteners[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(5): 258-259.
- [6] 解辉, 武兴伟, 刘斌, 等. 钛合金/其他金属在海洋环境中的电偶腐蚀行为的研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(4): 155-166.
XIE H, WU X W, LIU B, et al. Research Progress in the Galvanic Corrosion Behavior of Titanium Alloy/other Metals in Marine Environment[J]. Materials Protection, 2022, 55(4): 155-166.
- [7] 刘建华, 吴昊, 李松梅, 等. 高强合金与钛合金的电偶腐蚀行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 124-127.
LIU J H, WU H, LI S M, et al. Galvanic Corrosion Behavior between Titanium Alloy and High-Strength Alloys[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 124-127.
- [8] 郭娟. 紧固件材料与偶对材料在海水间浸下电偶腐蚀研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
GUO J. The Galvanic Corrosion Research between Fastener Materials and Coupled Materials on the Condition of Cyclic Immersion[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [9] 李兵, 刘剑, 蒲正海, 等. 钛合金阀体件“一模多件”铸造工艺优化设计[J]. 精密成形工程, 2023, 15(1): 86-93.
LI B, LIU J, PU Z H, et al. Optimization Design of “One Mold Multi-Parts” Casting Process for Titanium Alloy Valve Body[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(1): 86-93.
- [10] 曹文健, 汤智慧, 原玲, 等. 钛合金紧固件用铝涂层抗电偶腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 116-120.
CAO W J, TANG Z H, YUAN L, et al. Behaviour of Galvanic Corrosion Resistance of Aluminum Coating on Titanium Alloy Fastener[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 116-120.
- [11] 张晓云, 汤智慧, 孙志华, 等. 钛合金的电偶腐蚀与防护[J]. 材料工程, 2010, 38(11): 74-78.
ZHANG X Y, TANG Z H, SUN Z H, et al. Galvanic Corrosion and Protection between Titanium Alloy and other Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(11): 74-78.
- [12] 刘鹏, 江社明, 李远鹏, 等. 高强度紧固件用涂层的耐腐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(12): 886-892.
LIU P, JIANG S M, LI Y P, et al. Corrosion Resistance of Coatings for High-Strength Fastening Parts[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(12): 886-892.
- [13] 王贵琴, 黄晓群. 常用紧固件的耐蚀性研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2008, 18(6): 7-8.
WANG G Q, HUANG X Q. Erosion Resistance Research for Normal Fastening Piece[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2008, 18(6): 7-8.
- [14] 郑建锋, 王旭. 民用飞机钛合金紧固件表面处理的应用与研究[J]. 上海涂料, 2012, 50(5): 17-20.
ZHENG J F, WANG X. The Application and Research of the Surface Treatment for Civil Aircraft Titanium Alloy Fasteners[J]. Shanghai Coatings, 2012, 50(5): 17-20.

- [15] 徐良. 航空钛合金紧固件铝涂层性能规范研究[J]. 航空标准化与质量, 2012(1): 32-36.
XU L. The Specification of Aluminum Pigmented Coating for Aerospace Titanium Alloy Fasteners[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2012(1): 32-36.
- [16] 房昺, 张鹏飞, 原玲, 等. 钛合金紧固件用铝涂层的性能与应用[J]. 涂料工业, 2013, 43(5): 17-22.
FANG B, ZHANG P F, YUAN L, et al. Properties and Application of Al-Based Coatings for Titanium Alloy Fasteners[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(5): 17-22.
- [17] 姜国杰, 杨勇进, 王强, 等. YTF-3 飞机硬膜缓蚀剂应用研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 19-23.
JIANG G J, YANG Y J, WANG Q, et al. Application Research on YTF-3 Aircraft Corrosion Inhibitor with Hard Film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 19-23.
- [18] 鲁礼菊, 曹瑶琴, 孙祚东, 等. TFHS-15 硬膜缓蚀剂在直升机上的应用研究[J]. 直升机技术, 2016(4): 21-24.
LU L J, CAO Y Q, SUN Z D, et al. Application Research on TFHS-15 Hard Film Corrosion Inhibitor in Helicopters[J]. Helicopter Technique, 2016(4): 21-24.
- [19] UMEDA J, NAKANISHI N, KONDOH K, et al. Surface Potential Analysis on Initial Galvanic Corrosion of Ti/Mg-Al Dissimilar Material[J]. Materials Chemistry and Physics, 2016, 179: 5-9.
- [20] ARTHANAREESWARI M, SANKARA NARAYANAN T S N, KAMARAJ P, et al. Polarization and Impedance Studies on Zinc Phosphate Coating Developed Using Galvanic Coupling[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2012, 9(1): 39-46.
- [21] FENG Z C, FRANKEL G S. Galvanic Test Panels for Accelerated Corrosion Testing of Coated Al Alloys: Part 2—Measurement of Galvanic Interaction[J]. Corrosion, 2014, 70(1): 95-106.
- [22] SRIDHAR N, NIKHILESH C. 4D Microstructural Characterization of Corrosion and Corrosion-Fatigue in a Ti-6Al-4V / AA 7075-T651 Joint in Saltwater Environment[J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 825: 141886.
- [23] DHANYA M S, JALAJA K, MANWATKAR S K, et al. Metallurgical Analysis of Failed Ti₆Al₄V Nut Used in Payload Adaptor Assembly[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(6): 2209-2213.
- [24] JHA A K, SINGH S K, SWATHI KIRANMAYEE M, et al. Failure Analysis of Titanium Alloy (Ti₆Al₄V) Fastener Used in Aerospace Application[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1457-1465.
- [25] ARTHANAREESWARI M, KAMARAJ P, TAMILSELVI M. Anticorrosive Performance of Zinc Phosphate Coatings on Mild Steel Developed Using Galvanic Coupling[J]. Journal of Chemistry, 2013, 2013: 673961.
- [26] DANIEL E F, WANG C G, LI C, et al. Synergistic Effect of Crevice Corrosion and Galvanic Coupling on 304SS Fasteners Degradation in Chloride Environments[J]. NPJ Materials Degradation, 2023, 7(1): 11.
- [27] MORAN A, JENNINGS J, NEE H, et al. Coating Breakdown and Galvanically Accelerated Crevice Corrosion of Aluminum Alloys 2024 and 7075 at Cadmium-Plated Steel Fasteners[J]. CORROSION, 2019, 75(5): 484-498.
- [28] ZHANG H, ZHENG S H, YANG L, et al. Investigation of Fracture Performance and Interface Stress Behavior of Zn-Zn-Al Multilayer Coating-304 Stainless Steel Substrate System[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(3): 3.