

飞机用铝合金-CFRP 搭接结构的 电偶腐蚀预测研究

卞贵学, 张好君, 王安东, 陈跃良, 张勇

(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 通过有限元仿真, 预测飞机复合材料-铝合金搭接试件可能产生的腐蚀部位和腐蚀深度。**方法** 采用动电位极化的方法, 测得温度为 40 ℃ 的 5% NaCl 溶液中铝合金和复合材料两种材料的极化曲线。以极化曲线及其拟合的电化学动力学参数作为边界条件, 建立电偶腐蚀仿真模型。通过模型计算, 分别得到两种材料的腐蚀预测结果, 将其结果与实验室腐蚀试验结果进行对比。**结果** 电偶试件模型预测得到的电偶电位值与实验测量得到的电偶电位值对比误差为 4.2%。搭接试件的腐蚀部位为偶接处 3 mm 内, 其腐蚀分布与搭接件电偶腐蚀模型预测的电位分布规律基本一致, 腐蚀深度的预测值和腐蚀实验的实测值对比误差为 12.5%。**结论** 该研究的仿真预测结果与试验结果在一定程度上具有一致性, 证明了仿真模型的正确性。

关键词: 飞机; 铝合金; 复合材料; 搭接结构; 电偶腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.009

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0058-08

Prediction of Galvanic Corrosion of Aluminium Alloy-CFRP Lapped Structure in Aircraft

BIAN Gui-xue, ZHANG Hao-jun, WANG An-dong, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong

(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

ABSTRACT: The paper aims to predict corrosion position and corrosion depth of aluminum alloy-CFRP lapped specimen by finite element simulation. The potentiodynamic polarization method was used to measure the polarization curves of aluminium alloy and composite materials in 5% NaCl solution at 40 ℃. Taking polarization curve and its fitting electrochemical kinetic parameters as boundary conditions, a simulation model of galvanic corrosion was established. The corrosion prediction results of the two materials were obtained by the model calculation, and the results were compared with the corrosion test results in the laboratory. The error of galvanic potential between the predicted and measured values was 4.2%. The corrosion site of the lapped specimen was within 3 mm of the coupling, and its corrosion distribution was basically consistent with the potential distribution law predicted by the electric couple corrosion model of the lapped specimen. The comparison error between the predicted corrosion depth and the measured value of the corrosion experiment was 12.5%. The experimental results are consistent

收稿日期: 2015-03-21; 修订日期: 2015-04-15

Received: 2015-03-21; **Revised:** 2015-04-15

基金项目: “十二五”科技支撑计划项目 (2011BAK10B05, 2012BAD29B05); 山东省高等学校“青创科技计划”资助项目 (2020KJA014)

Fund: “12th Five Year Plan” Science and Technology Support Project (2011BAK10B05, 2012BAD29B05); “Green Innovation Science and Technology Plan” of Colleges and Universities in Shandong Province (2020KJA014)

作者简介: 卞贵学 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为结构强度、腐蚀防护与控制等。

Biography: BIAN Gui-xue (1981—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: structural strength, corrosion protection and control.

通讯作者: 陈跃良 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为再制造工程。

Corresponding author: CHEN Yue-liang (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: remanufacturing engineering.

with the simulation results, proving the correctness of the simulation model.

KEY WORDS: aircraft; aluminum alloy; composite; overlap structure; galvanic corrosion

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 是现代飞机实现轻量化的主要材料, 因此其用量成为衡量飞机先进性的重要指标之一。CFRP 的大量应用加剧了机体结构中“大阴极小阳极”的不利局面, 尤其对于长时间服役于“高温、高湿、高盐”海洋环境中的飞机来说, 其结构表面极易形成薄的电解液膜, 致使发生严重的电偶腐蚀^[1-4]。

国外 Kim^[5]、Mandel 等^[6]研究了除某种特定环境外铝合金-CFRP 体系在不同服役环境中的电偶腐蚀行为, 并得到一些有益结论, 为 CFRP 的工程应用提供了一定参考。随着计算机技术的日益成熟, 腐蚀预测逐渐成为腐蚀领域的研究热点, 其优点在于模型适用能力强, 方便根据实际服役环境进行扩展。国内的 Yin Li^[7]、陈跃良^[8-10]、张勇^[10]等分别针对电偶腐蚀的宏微观行为开展了仿真预测模型研究, 建立了相应的仿真模型, 但从仿真对象来看, 只有少部分走出了试片模型建立阶段, 而对于机体搭接结构仿真较少。

文中以飞机蒙皮与梁连接部位的铝合金-CFRP 构件为对象, 以电化学测量和实验室腐蚀试验为手段, 建立相应电偶腐蚀模型, 预测电偶腐蚀行为, 获得了电偶腐蚀规律, 并加以验证, 以期在防腐蚀方面

为新结构设计和旧结构维护提供一定指导。

1 试验

1.1 材料

7050 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝, T7351 的热处理增强了其抗腐蚀断裂性。CCF300/BA9916-II 复合材料层合板采用热压罐成形工艺, 对称铺层, 铺层角度为[45/0/-45/90/45/02-45/90]S。其中, 单位面积的 CCF300 碳纤维质量为 134.5 g/m², BA9916 树脂的质量分数为 33%±2%。

1.2 试件

试验件主要分为三类: 一是极化试件, 主要用于测量材料在某种环境下的极化曲线; 二是电偶试件, 主要用于铝合金和复合材料电偶腐蚀参数测量的试件; 三是铝合金和复合材料搭接试验件, 参考飞机某部位实际结构设计, 主要用于电偶腐蚀预测实验验证与分析。

1) 将 7050-T7351 铝合金板材和 CCF300/BA9916-II 复合材料板材均切割成大小为 10 mm×10 mm×2 mm 小样, 极化试件的具体制作流程参照文献[11]。制备完成的极化试件如图 1 所示。

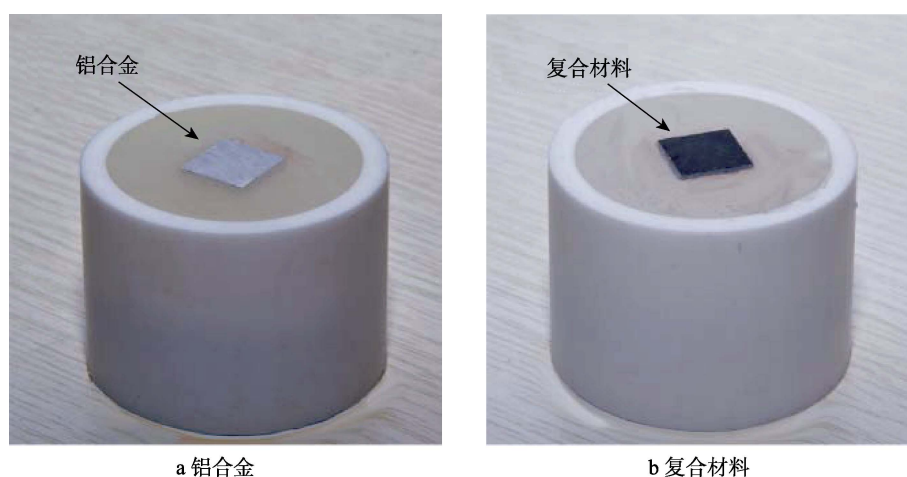


图 1 极化试件

Fig.1 Polarized specimens: a) aluminium alloy; b) compound material

2) 电偶试件具体制作流程参照文献[11]。制备完成的电偶试件如图 2 所示。在制作极化试件和电偶试件时, 应不断测量导线与小样之间电阻, 始终保持通路状态。制作完成后, 除油清洗, 放入干燥皿中备用。

3) 为准确模拟连接部位铝合金和复合材料的电

偶腐蚀, 设计并制作了如图 3 所示的 7050-T7351 铝合金板材和 CCF300/BA9916-II 复合材料板材经 8 颗塑料螺栓(M3.0)固定形成的铝合金-CFRP 搭接试件。搭接试件的考核区域裸露, 非考核区域喷涂 QH-15 防腐环氧底漆+QFS-15 面漆, 并使用 HM119 密封胶填角密封。

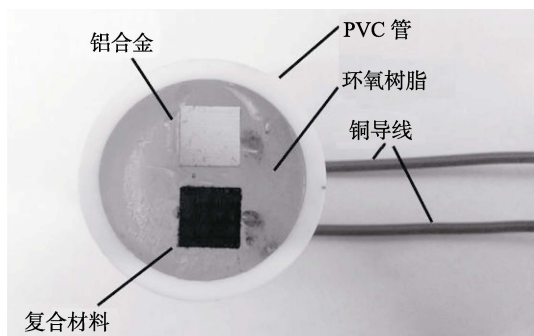


图2 电偶试件
Fig.2 Galvanic specimen

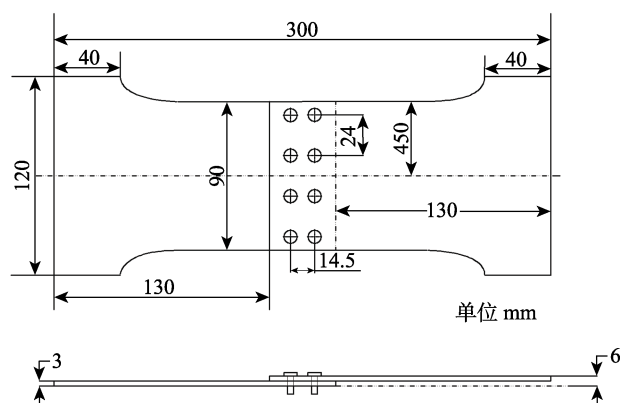


图3 搭接试件的尺寸
Fig.3 Dimension of lapped specimen

1.3 电化学试验

电化学测量的主要设备为 PARSTAT 4000 电化学工作站,采用经典三电极体系,电解液为 5% NaCl 溶液。测量中使用 HH-2 数显水浴锅,保持电解液恒温 35℃。7050-T7351 铝合金和 CCF300/BA9916-II 复合材料的动电极化区间分别为 -0.5~0.5 V (vs Ref, 下同) 和 -0.2~0.8 V,扫描速率均为 1 mV/s。测量电偶参数时,铝合金接工作电极,CFRP 接地线,测量时长为 7200 s,采点间隔为 10 s。

1.4 腐蚀试验

在 DK-600 型电热恒温箱中注入 5 L 去离子水,将特制玻璃槽置于恒温箱中,向槽中注入 4 L 的 5% NaCl 溶液,设置恒温 35℃。待温度恒定后,将橡胶支架置于玻璃槽中,将搭接试件考核区域朝上置于支架上,盖上箱盖,开始试验。每间隔 120 h 取出观察,并拍摄宏观形貌照片,共进行 240 h。在试验过程中,应保证 NaCl 溶液无对流,且液面没过考核面 5 cm。

2 电偶腐蚀仿真

2.1 基本原理

建模原理采用有限元法^[12-15]。在电解质溶液中取一正方体为微小单元,假设带电粒子 i 从 x 、 y 、 z 三个

方向通过微小单元,其传输的总通量 N_i (mol/(m²·s)) 满足 Nernst-Planck 方程:

$$N_i = -z_i u_i F c_i \nabla \varphi - D_i \nabla c_i + c_i v \quad (1)$$

式中: D_i 为第 i 种带电粒子的扩散系数, m/s; z_i 为电荷数; c_i 为粒子浓度, mol/m³; F 为法拉第常数, $F=96485$ C/mol; φ 为电解质溶液电势, V; u_i 为迁移率, mol·s/kg; v 为溶液流动的速度, m/s。

假设在溶液状态下,电解质溶液始终保持为均质稳态电中性,可不考虑对流影响及电解质扩散等因素的影响,即通量梯度 $\nabla \cdot N_i = 0$, 则 Nernst-Planck 方程可简化成电位的 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

电极表面所进行电极反应的电流即可看法拉第电流且符合欧姆定律:

$$i_l = -\sigma_l \nabla \varphi \quad (3)$$

式中: σ_l 是电解质的电导率 (S/m)。

2.2 几何建模

根据电偶试件的几何构型,考虑到只有工作面暴露于电解质中,其余面均被环氧树脂绝缘封装,建立了电偶试件的几何模型,如图 4 所示。参照搭接试件的几何构型和尺寸,对铝合金和复合材料搭接件进行几何建模。所得几何模型及网格划分结果如图 5 所示。

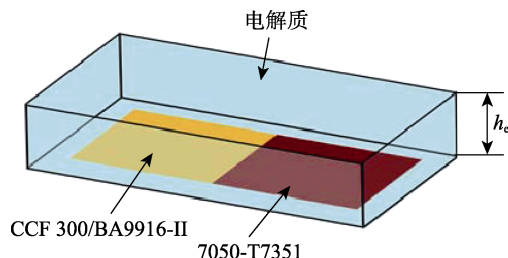


图4 电偶试件的几何模型
Fig.4 Geometric model of galvanic specimen

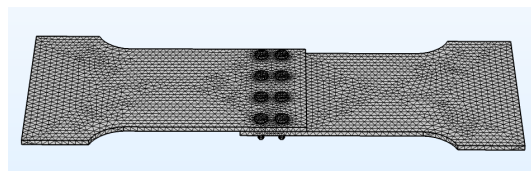


图5 搭接试件的几何模型及网格划分
Fig.5 Geometric model and mesh generation of lapped specimens

2.3 边界条件

腐蚀数值仿真技术的最大优势在于以材料自身在对应环境中的腐蚀数据(即极化曲线)为基础,以公式化的腐蚀发生和发展原理为手段进行仿真计算。通过电化学试验测得的 7050-T7351 铝合金和 CCF300/BA9916-II 复合材料的极化曲线如图 6 所示。可见,前者的自腐蚀电位低于后者近 0.7 V,在电偶腐蚀中

将作为阳极被加速腐蚀。

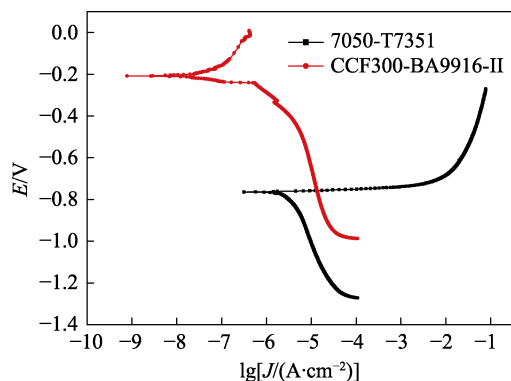


图 6 7050-T7351 铝合金和 CCF300/BA9916-II CFRP 的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of 7050-T7351 aluminum alloy and CCF300/BA9916-II CFRP

在仿真过程中,取极化曲线的插值函数作为边界条件。考虑到 2.1 节所述,求解域为电解质域,加之搭接试件的考核区域裸露,而非考核区域绝缘密封,因此,在赋予边界条件时,非考核区域定义为绝缘,直接将极化数据赋予考核区域即可,这样与实际的浸润腐蚀试验条件相一致。

3 结果分析及对比

3.1 电偶试验和仿真结果

7050-T7351 铝合金和 CCF300/BA9916-II 复合材料的偶接试件在 5% NaCl 溶液中的电偶电位及电偶电流随时间的变化曲线如图 7 所示。可见,电偶电位和电偶电流在前 2500 s 逐渐降低,表明随着电解液中 O_2 的逐渐消耗,电偶腐蚀的剧烈程度有所下降。在测量的后半阶段,电偶电位和电偶电流则出现反复性波动,这与 CFRP 的吸湿行为有关,吸湿量大, O_2 便随水分子抵达碳纤维界面,致使 CFRP 所提供的用于阴极反应的场地增大,因此两个电偶参数显示出较大的波动性。

根据电偶试件构型和实际试验条件,建立模型并仿真得到了电偶腐蚀中电偶试件表面的电偶电位及电偶电流密度的分布情况如图 8 所示。可见,相对于各自的自腐蚀电位,7050-T7351 铝合金的电位升高了约 40 mV,而 CCF300/BA9916-II 复合材料的电位则降低了约 600 mV。二者表面分布着阳极电流和阴极电流,表明其表面分别发生阳极溶解反应和阴极吸氧反应。电偶参数在两试块之间区域变化较大,距离越远,变化越小。对表面电偶电位分布求均值,得到电偶电位的仿真值为 -715 mV,接近 7050-T7351 铝合金的点蚀电位 -700 mV,表明电偶腐蚀将提高铝合金的点蚀敏感性。试验测量得到的电偶电位值约为 -747 mV,仿真值和试验值相差 32 mV,误差为 4.2%,二者吻合较好。

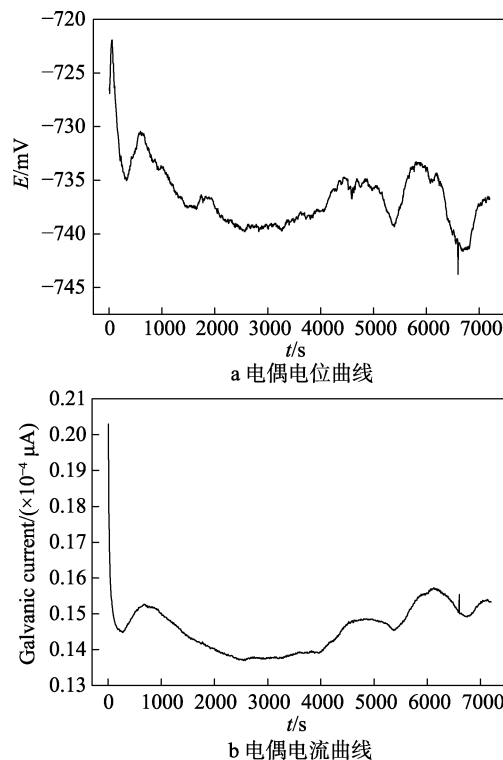


图 7 电偶试件电偶电位和电偶电流变化的试验结果
Fig.7 Test results of changes in (a) galvanic potential and (b) galvanic current of galvanic specimens

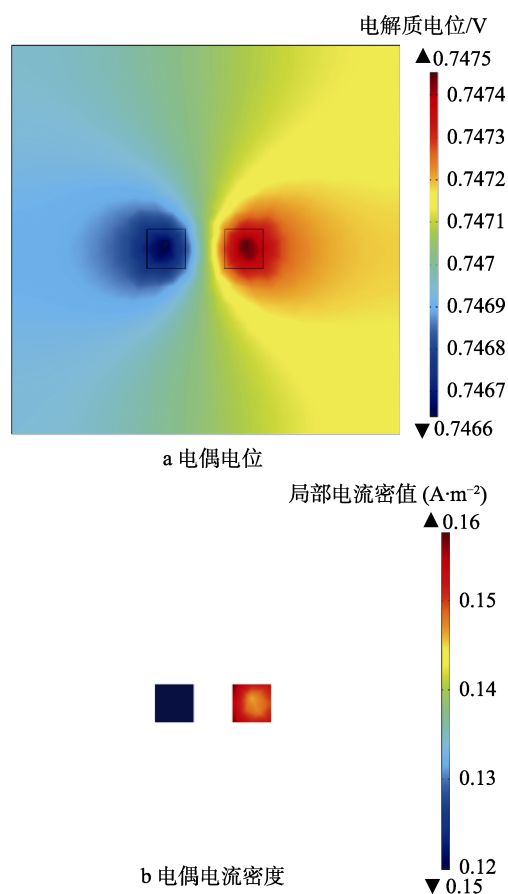


图 8 电偶试件电偶电位和电偶电流密度的仿真结果
Fig.8 Simulation results of (a) galvanic potential and (b) galvanic current density of galvanic specimen

3.2 腐蚀试验和仿真结果对比分析

浸润腐蚀试验 0、120、240 h 后, 搭接试件的宏观形貌如图 9 所示。由图 9 可见, 在浸泡过程中, 搭接部位出现了大量的白色絮状难溶性腐蚀产物。由于 CFRP 的老化过程并无难溶腐蚀产物产生, 因此可以

判断腐蚀产物来自于铝合金的腐蚀, 且成分应为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。这表明相较于其他部位, 搭接位置的电偶腐蚀最为剧烈。在浸润试验中, CFRP 一侧无明显变化, 而铝合金一侧表面出现点蚀, 浸润时间越长, 点蚀数量越多, 蚀坑密度越大, 腐蚀越严重。

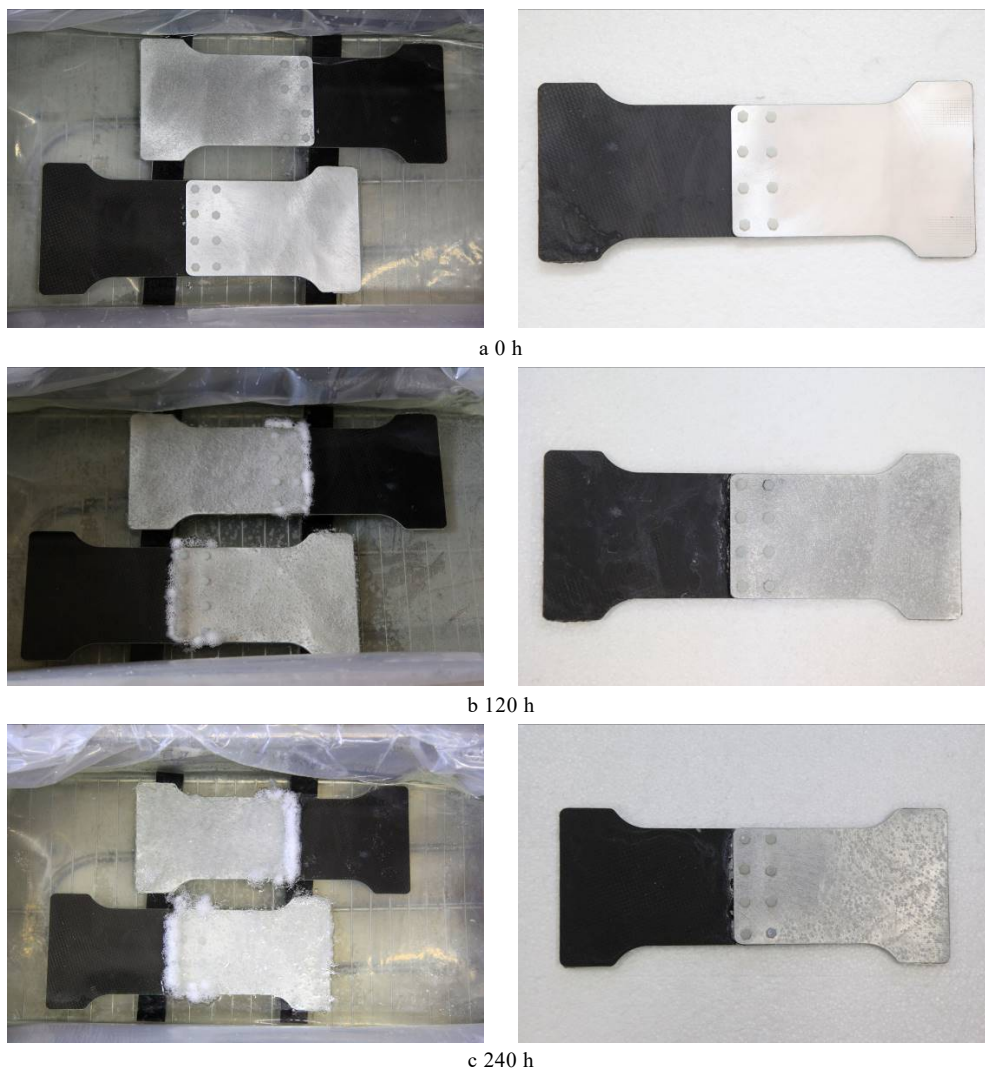


图 9 不同浸润周期下搭接试件的宏观腐蚀形貌

Fig.9 Macroscopic corrosion morphology of lapped specimens under different full immersion cycles

浸润腐蚀试验 0、120、240 h 后, 搭接试件的微观形貌如图 10 所示。其中, 图 10a—c 左侧所示为铝合金与 CFRP 接触位置, 右侧所示为铝合金一侧距接触线 3 mm 范围内的位置。左侧图中, 在初始状态时, 接触位置的铝合金表面完好, 仅有一些打磨造成的轻微划痕; 120 h 后, 铝合金一侧出现明显腐蚀; 240 h 后, 该位置腐蚀加重, 原有蚀坑扩展, 并与其他蚀坑连接, 形成更大更明显的蚀坑。右侧图中, 在初始状态时, 铝合金表面完好无蚀坑; 在 120 h 后, 铝合金表面出现少量蚀坑, 密度和单个蚀坑面积均较小; 在 240 h 后, 蚀坑数量、密度和单个蚀坑面积均明显增大。

经预测得到的搭接试件表面的电位和电流密度分布云图如图 11 所示。在图 11a 所示的搭接试件考核区域表面电位分布中, CFRP 为阴极, 发生阴极极化, 电位均值由 26 mV 负移至 -730 mV, 变化量达 756 mV; 铝合金为阳极, 发生阳极极化, 电位的均值由 -865 mV 正移至 -731 mV, 变化量为 134 mV。局部放大发现, 在铝合金板与 CFRP 板的接触位置, 电位变化十分剧烈, 表明此处电偶腐蚀倾向显著, 这与搭接试件腐蚀试验所展现的规律一致。由于非考核区域绝缘密封, 因此电位分布基本一致, 几乎无任何变化, 受电偶腐蚀的影响也很小。

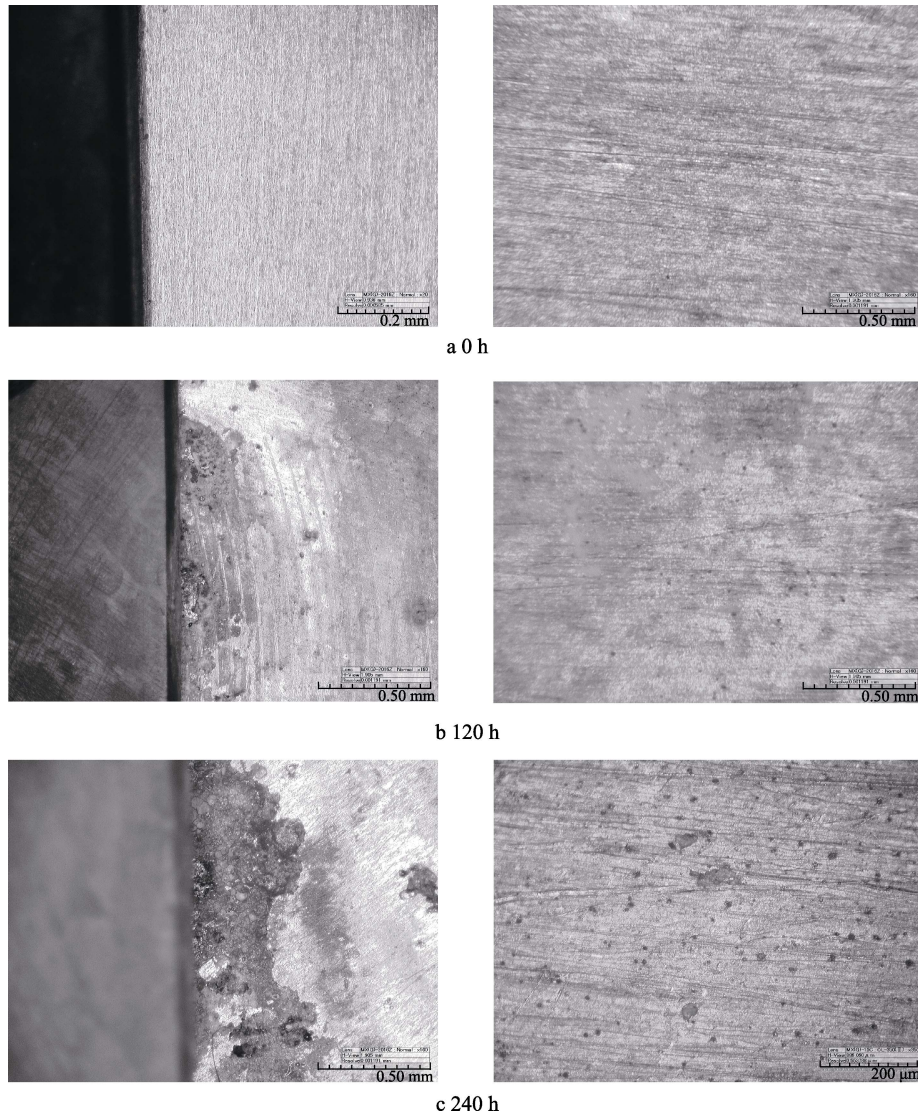


图 10 不同浸润周期下搭接试件的微观腐蚀形貌

Fig.10 Microscopic corrosion morphology of lapped specimens under different full immersion cycles

由图 11b 可知, 铝合金板表面分布着阳极电流, CFRP 板表面分布着阴极电流。局部放大后发现, 电流密度在搭接区变化剧烈, 其分布规律与搭接件表面电位分布规律基本一致。CFRP 表面的电流密度最大, 局部高达 0.15 A/m^2 , 均值为 0.02164 A/cm^2 。7050-T7351 板上的电流密度由搭接区向两端对称递减, 两端最小为 $2.76 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, 距离搭接区越近, 电流密度越高, 最大为 0.02079 A/cm^2 , 均值为 0.001554 A/cm^2 。相对于自腐蚀电流密度, 电偶腐蚀导致铝合金板的电流密度提高近 366 倍, 足见电偶腐蚀对于阳极金属破坏强烈。可据此预测, 腐蚀将首先从搭接件中表面电位较高、电流密度较大的位置开始。

通过光学显微镜测得到腐蚀坑基本形貌和深度如图 12 所示。测量区域为搭接区域, 随机测量 5 次, 并求均值, 得到腐蚀深度为 $33.61 \mu\text{m}$ 。根据法拉第第二定律 (见式 (4)), 基于电偶腐蚀仿真得到的搭接件表面的电偶电流密度进行腐蚀深度的折算, 得到

腐蚀深度的仿真值应为 $29.4 \mu\text{m}$ 。二者的相对误差为 12.5%, 吻合相对较好。

$$d = \frac{v}{\rho} = 3.28 \times 10^3 \frac{M}{n\rho} J_{\text{corr}} \quad (4)$$

式中: d 为腐蚀深度, mm/a ; v 为腐蚀速率, $\text{g/(m}^2\text{h)}$; ρ 为金属的密度, g/cm^3 ; M 为金属的克原子量, g ; n 为金属的原子价; J_{corr} 是腐蚀电流密度, $\mu\text{A/cm}^2$ 。

4 结论

1) 铝合金和复合材料电偶试件模型预测与试验测得电偶电位值的误差为 4.2%。预测结果表明, 预测的铝合金和复合材料电偶电位与 7050-T7351 铝合金的点蚀电位接近, 铝合金与复合材料偶接将提高铝合金的点蚀敏感性, 与腐蚀实验中偶合试验件铝合金出现大量的点蚀结果吻合。

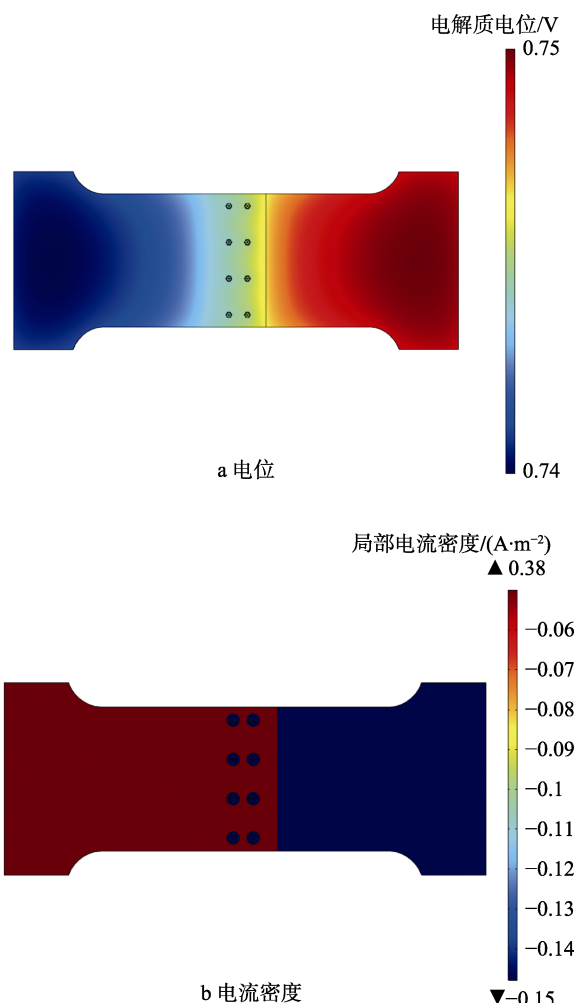


图 11 搭接试件表面电位和电流密度分布仿真结果
Fig.11 Simulation results of (a) surface potential and (b) current density distribution on lapped specimen

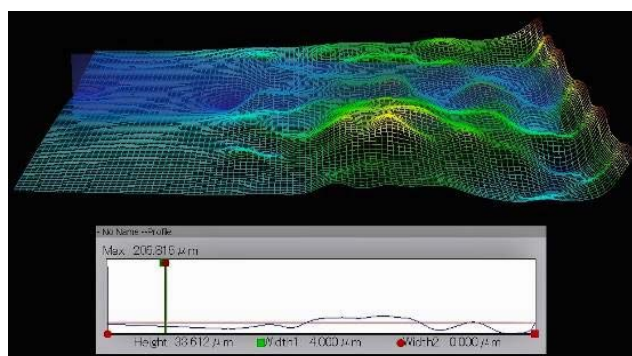


图 12 搭接区域腐蚀深度的实测值
Fig.12 Measured value of corrosion depth in overlap zone

2) 铝合金和复合材料搭接试件模型预测的搭接区边缘(即偶合部位)的电位差为 1.9×10^{-4} V, 在搭接试件电位分布变化速率中最高, 并向两端递减。电偶腐蚀预测的部位和腐蚀倾向与搭接试件腐蚀试验所展现的规律一致。腐蚀深度预测值为 $29.4 \mu\text{m}$, 腐蚀实验后, 腐蚀深度的实测值为 $33.6 \mu\text{m}$, 误差为 12.5%。预测结果与试验结果在一定程度上一致, 证明了腐蚀预测模型的准确性。

参考文献:

- [1] 黄桂桥, 郁春娟, 李兰生. 海水中钢的电偶腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(1): 46-53.
HUANG Gui-qiao, YU Chun-juan, LI Lan-sheng. Study on Galvanic Corrosion of Steel Couples in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2001, 21(1): 46-53.
- [2] 曾荣昌, 陈君, 张津. 镁合金电偶腐蚀研究及其进展[J]. 材料导报, 2008, 22(1): 107-109.
ZENG Rong-chang, CHEN Jun, ZHANG Jin. Research and Progress of Galvanic Corrosion of Magnesium Alloys[J]. Materials Review, 2008, 22(1): 107-109.
- [3] 杜敏, 郭庆锑, 周传静. 碳钢/Ti 和碳钢/Ti/海军黄铜在海水中电偶腐蚀的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 263-266.
DU Min, GUO Qing-kun, ZHOU Chuan-jing. Galvanic Corrosion of Carbon Steel/Titanium and Carbon Steel/Titanium/Naval Brass in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(5): 263-266.
- [4] 郭庆锑, 杜敏. 钛/碳钢在海水中电偶腐蚀的研究[J]. 海洋湖沼通报, 2005(4): 23-30.
GUO Qing-kun, DU Min. A Study of Galvanic Corrosion of Carbon Steel and Titanium in Seawater[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2005(4): 23-30.
- [5] HWANG W S, KIM H W. Galvanic Coupling Effect on Corrosion Behavior of Al Alloy-matrix Composites[J]. Metals & Materials International, 2002, 8(6): 571-575.
- [6] MANDEL M, KRÜGER L. Electrochemical Corrosion Studies and Pitting Corrosion Sensitivity of a Self-pierce Rivet Joint of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP)—Laminate and EN AW-6060-T6[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2012, 43(4): 302-309.
- [7] YIN L, JIN Y, LEYGRAF C, et al. A FEM Model for Investigation of Micro-galvanic Corrosion of Al Alloys and Effects of Deposition of Corrosion Products[J]. Electrochimica Acta, 2016: 192: 310-318.
- [8] 陈跃良, 王晨光, 张勇, 等. 钛-钢螺栓搭接试件涂层腐蚀失效分析及影响[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3528-3534.
CHEN Yue-liang, WANG Chen-guang, ZHANG Yong, et al. Coating Corrosion Failure Analysis and Influence of Titanium-steel Bolted Lap Joints[J]. Acta Astronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3528-3534.
- [9] 卞贵学, 陈跃良, 黄海亮, 等. 飞机用钛-钢搭接件腐蚀仿真预测与验证研究[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 172-179.
BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, HUANG Hai-liang, et al. Corrosion Prediction and Verification of Titanium-Steel Lap Joints for Aircrafts[J]. Surface Technology, 2018, 47(10): 172-179.
- [10] 张勇, 陈跃良, 王晨光. 模拟沿海大气环境下铝合金搭接试件电偶腐蚀行为研究[J]. 材料导报, 2016, 30(10):

- 152-155.
ZHANG Yong, CHEN Yue-liang, WANG Chen-guang. Study on Galvanic Corrosion of Aluminum Alloy Related Joint in Simulated Coastal Wet Atmosphere[J]. Materials Review, 2016, 30(10): 152-155.
- [11] 王安东, 陈跃良, 卞贵学. CF8611/AC531 复合材料性质及其与 7B04 铝合金接触腐蚀的电化学研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(1): 91-99.
WANG An-dong, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue. Electrochemical Study on Property of CF8611/AC531 Composite and Its Contact Corrosion with 7B04 Aluminum Alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 91-99.
- [12] 崔进起, 于晓勇, 郭泽荣. 基于 ANSYS 有限元法的长输油气腐蚀管道剩余强度与剩余寿命研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(10): 56-59.
CUI Jin-qi, YU Xiao-yong, GUO Ze-rong. Study of Residual Strength and Remaining Life for the Long-distance Oil and Gas Corroded Pipeline Based on ANSYS[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(10): 56-59.
- [13] 徐强, 万正权. 含坑点腐蚀的壳体有限元方法[J]. 船舶力学, 2010, 14(1): 84-93.
XU Qiang, WAN Zheng-quan. Finite Element Method of Pitting Corrosive Shell[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(1): 84-93.
- [14] 宋成立, 淡勇. 基于有限元法的埋地管道阴极保护研究[J]. 全面腐蚀控制, 2013(10): 42-45.
SONG Cheng-li, DAN Yong. Study on Cathodic Protection of Buried Pipeline Based on Finite Element Method[J]. Total Corrosion Control, 2013(10): 42-45.
- [15] 王在峰. 海洋钢阴极保护的有限元计算[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.
WANG Zai-feng. The Application of Finite Element Method in Calculating Cathodic Protection Fields of Steel in Marine Environment[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(The Institute of Oceanology), 2005.