

飞机用钛-钢搭接件腐蚀仿真预测与验证研究

卞贵学, 陈跃良, 黄海亮, 张勇, 王安东, 张柱柱, 吴省均

(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, 预测飞机用钛-钢搭接件腐蚀部位和腐蚀深度。**方法** 采用动电位极化, 测得温度为 40 °C、pH=4.0 的 5%NaCl 溶液中 TC18 钛合金、30CrMnSiNi2A 高强度钢和 30CrMnSiNi2A 镀锌钢三种材料的极化曲线。以极化曲线及其拟合的电化学动力学参数作为边界条件, 建立异种材料搭接件电偶腐蚀仿真模型。通过模型计算分别得到镀锌层完好和镀锌层完全破坏后的表面电位分布和局部电流密度分布, 并与实验室腐蚀试验结果进行对比。**结果** 腐蚀前期, 镀锌钢紧固件表面优先发生腐蚀, 表面镀锌层腐蚀从点蚀开始, 并慢慢扩大, 逐渐由局部腐蚀发展成均匀腐蚀; 直到第 5 周期镀锌层基本完全破损, 紧固件 30CrMnSiNi2A 基材裸露, 30CrMnSiNi2A 由初始时的阴极极性转变为阳极极性, 并与 TC18 钛合金形成新的电偶对, 腐蚀在钢板表面迅速扩展。将第 3 周期和第 7 周期腐蚀试验后搭接区的腐蚀形貌分别与镀锌层完好和镀锌层完全破损的仿真电位分布结果进行对比, 可以看出, 腐蚀形貌与低电位区的几何形状基本类似。根据法拉第定律, 结合电流密度分布, 预测腐蚀区域腐蚀深度, 并与第 3 周期和第 7 周期腐蚀试验结果进行对比分析, 结果发现, 模型预测的腐蚀深度与第 3 周期和第 7 周期腐蚀试验结果相吻合。**结论** 试验结果与仿真结果具有较好的一致性, 从而证明了仿真模型的正确性。

关键词: 电偶腐蚀; 腐蚀仿真; 搭接件; 异种金属; 腐蚀形貌; 局部电流密度分布; 电位分布

中图分类号: TG172.2; V252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0172-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.023

Corrosion Prediction and Verification of Titanium-Steel Lap Joints for Aircraft

BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, HUANG Hai-liang, ZHANG Yong,
WANG An-dong, ZHANG Zhu-zhu, WU Xing-jun

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

ABSTRACT: The work aims to use finite element simulation to predict the corrosion site and corrosion rate of titanium-steel lap joints for aircraft. Polarization curves of TC18 titanium alloy, 30CrMnSiNi2A high strength steel and 30CrMnSiNi2A galvanized steel were measured by potentiodynamic polarization in 5%NaCl solution at 40 °C and with pH=4.0. The simulation model of galvanic corrosion for lap joints was established with the polarization curve and its fitted electrochemical kinetic parameters as boundary conditions. The surface potential and local current density distribution under perfect and completely damaged state of galvanized layer were obtained through the model calculation, and the simulation results were compared with the experimental results. The corrosion occurred on the surface of galvanized steel fasteners preferentially at the early stage. Corrosion of zinc layer started from pitting corrosion and expanded slowly, and gradually developed from local corrosion to uniform

收稿日期: 2018-03-14; 修订日期: 2018-05-20

Received: 2018-03-14; Revised: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51375490)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51375490)

作者简介: 卞贵学 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为结构强度、腐蚀防护与控制等。邮箱: bianguixue@163.com

Biography: BIAN Gui-xue (1982—), Male, Doctorate, Lecturer, Research focus: structural strength, corrosion protection and control. E-mail: bianguixue@163.com

corrosion. After five cycles, the zinc layer was completely broken and 30CrMnSiNi2A of fastener was exposed and changed from the cathodic polarity to the anode polarity. 30CrMnSiNi2A and TC18 formed a new couple pair and corrosion expanded rapidly on the surface of the steel plate. The corrosion morphology of lap area after third cycle and seventh cycle corrosion test was compared with the results of simulated potential distribution of intact galvanized layer and completely damaged zinc coating. The corrosion morphology was basically similar to that of low potential region of potential distribution. According to Faraday's law and current density distribution, the corrosion depth of corroded area was predicted and compared with the result of corrosion test after third cycle and seventh cycle corrosion test, the predicted corrosion depth of simulation model is agreement with the result of corrosion test after third cycle and seventh cycle corrosion. The experimental results are consistent with the simulation results, thus proving the correctness of the simulation model.

KEY WORDS: galvanic corrosion; corrosion simulation; lap joints; heterogenous metal; corrosion morphology; local current density distribution; potential distribution

飞机设计过程中需综合考量强度、质量等方面, 难免会出现不同部位应用不同材料的问题。在飞机上, 异种材料的连接常采用搭接形式, 即利用紧固件将两种或两种以上金属偶接。由于降雨、降雪等外在因素的影响, 这些结构表面常常会形成积水, 这为异种材料电偶腐蚀的发生提供了电解质条件。目前, 国内外关于电偶腐蚀的研究较多。Pan Y 等^[1]分别研究了复合材料 (CFRP) 与不同镁合金 (AZ31、LZ91、LZ141) 在盐溶液中的电偶腐蚀行为, 并探究了表面微弧氧化对腐蚀的影响。Håkansson E 等^[2]研究了腐蚀产物沉积对 CFRP 外包铝高压电缆 CFRP 与纯铝之间电偶腐蚀的影响。Schneider M 等^[3]研究了 3.5% NaCl 水溶液中金属与 SiC 基陶瓷电偶腐蚀, 发现腐蚀速率主要受陶瓷电阻影响。国内金属所赵林等^[4]利用自制的模拟试验装置模拟了实海潮差, 检测了在潮差区内 AH32 长尺试样的电偶电流和电极电位变化情况。北科大李君等^[5]用电化学法和浸泡法研究了 Q235-304L 电偶对分别在 3 种浓度的 Na_2S 溶液中的电偶腐蚀行为; 肖葵等^[6]利用开尔文探针研究了 AZ91D 镁合金与 H62 铜合金试样在盐雾加速试验中的电偶腐蚀规律。海洋大学张晓梅^[7]对深海低温环境中的铜合金电偶腐蚀行为进行了研究, 陈兴伟^[8]也对电偶腐蚀影响因素研究进展进行了综述。

由以上可以看出, 目前国内外关于电偶腐蚀的研究停留在不同的腐蚀环境、不同材料间电偶腐蚀机理角度, 很难对工程应用提供方便有效的参考。近年来随着计算机仿真技术的进步, 腐蚀仿真逐渐成为了研究的热点, 国内陈跃良^[9]、张勇^[10-11]等, 国外 Litao Yin^[12]、Okada N^[13]、Murer N^[14]、Palani S^[15]等, 分别针对腐蚀仿真进行了相关研究, 也建立了相关仿真模型, 研究了宏观电偶和微电偶腐蚀。但总结目前的腐蚀仿真研究成果来看, 大多相关研究仅停留在试片级的模型建立, 对于飞机上搭接件等结构件的仿真研究较少。

本研究根据飞机某结构部件设计并制作了模拟搭接件, 分别测量了搭接件各材料的极化曲线, 并以

此作为边界条件, 仿真计算了镀锌钢锌层完好和镀层完全破损后的搭接件表面电位和局部电流分布, 将仿真结果与试验结果进行对比, 从而验证仿真的准确性。模型的提出可以有效地从腐蚀防护的角度为飞机设计过程中异种金属选材及编制防护手册提供指导, 减少腐蚀试验成本和时间。

1 试验

1.1 试验准备

模拟搭接件设计如图 1 所示, 搭接件搭接区选用裸露的 30CrMnSiNi2A 高强钢和 TC18 钛合金, 采用六角螺栓双排连接, 螺栓、螺母、垫圈选用镀锌 30CrMnSiNi2A, 锌镀层约为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。TC18 钛合金和 30CrMnSiNi2A 高强钢成分如表 1 所示, 均未进行表面处理。

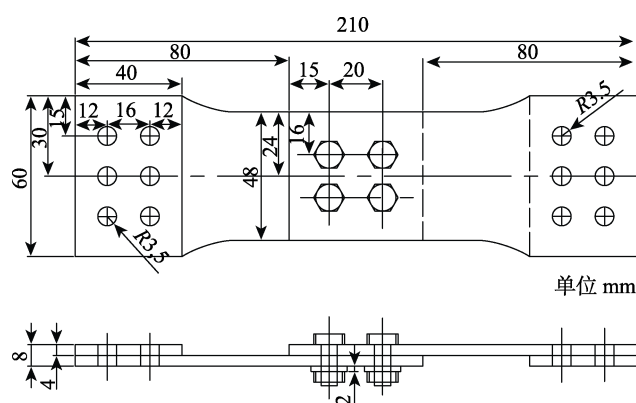


图 1 搭接件实物图
Fig.1 Physical map of lap joints

本研究选取试验件中间钢-钛搭接处为试研究区。为避免夹持端材料缝隙等因素对试验结果的影响, 采用环氧树脂将非试验区域 (夹持端) 进行封装, 然后将试件按 “ZJ-01” 至 “ZJ-05” 的形式进行逐一编号, 如图 2 所示。

表 1 试验材料成分
Tab.1 Test of material components

Materials	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Fe	Zr	Al	Mo	V	Ti	Cu
30CrMnSiNi2A	0.29	1.01	1.14	0.001	0.019	1.10	1.56	Bal.	—	—	0.01	0	0.013	0.07
TC18	0.03	0.11	—	—	—	1.02	—	1.03	0.01	5.29	5.25	5.30	Bal.	—

wt%

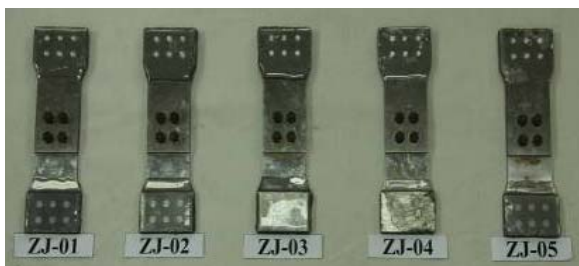


图 2 试验件封装与编号
Fig.2 Encapsulation and numbering of test parts

1.2 腐蚀试验

将试件置入 5%NaCl 溶液 (pH=4.0, $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 内。在腐蚀过程中,为防止溶解氧浓度等因素导致腐蚀溶液不均匀,每隔 3.5 h 将溶液充分搅拌一次,若溶液颜色明显发黄或至多经过 7 h,更换一次溶液,以排除腐蚀产物可能对试验结果产生的影响。另外,在腐蚀试验过程中,需对腐蚀溶液每隔 3.5 h 取一次样,测量其 pH 值,确保溶液 pH 始终保持在 4.0 ± 0.2 的范围内。试验每 7 h 为 1 个周期,共进行 7 个周期。

2 电偶腐蚀仿真建模

2.1 电偶腐蚀模型

假设钢-钛搭接零件间紧密贴合,故不存在缝隙腐蚀。基于稳态腐蚀电场建立搭接件的电偶腐蚀模型,采用四面体网格分别对求解域进行划分。对紧固件、钢-钛结合处及倒角边缘的网格进行了细化,其表面边界网格划分情况如图 3 所示。模型溶液电导率利用 DDSJ-308A 电导率仪测得,值为 7.7 S/m 。

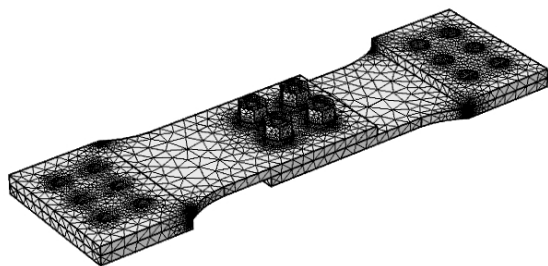


图 3 搭接件网格划分
Fig.3 Grid division of lap joints

2.2 仿真原理

电极附近的物质传递满足 Nernst-Planck 方程^[12,16]:

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

式(1)中: D_i 为第 i 种带电粒子的扩散系数 (m^2/s); c_i 为粒子浓度 (mol/m^3); z_i 为电荷数; F 为法拉第常数 (96485 C/mol); u_i 为迁移率 ($\text{mol}\cdot\text{s}/\text{kg}$); ϕ 为电解质溶液电势 (V); U 为溶液流动速度 (m/s)。

在静止条件下,即在不搅拌或没有密度梯度的静止溶液中,溶液的对流速度 $U=0$,假设电极表面离子浓度与本体溶液浓度相同,而在本体溶液中,浓度梯度一般较小,故总电流主要是由电迁移完成^[17-18],式(1)可简化为:

$$N_i = -z_i F u_i c_i \nabla \phi \quad (2)$$

将法拉第定律(式(3))和高斯定理(式(4))代入(2)式,可得电位的 Laplace 方程(式(5))。故电极表面电位可以通过求解方程(5)得到,局部电流分布也可由法拉第定律(式(3))计算得到。

$$I = F \sum_i z_i N_i \quad (3)$$

$$\nabla \cdot I = 0 \quad (4)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5)$$

2.3 边界条件

利用动电位极化方法获得三种材料的极化曲线,如图 4 所示,对极化曲线利用 Cview 进行拟合,得到电动力学参数如表 2。由于 TC18 钛合金、30CrMnSiNi2A 镀锌钢是材料体系中电位最高和最低的材料,故体系中 TC18 作阴极,30CrMnSiNi2A 镀锌钢作阳极,选用其电动力学参数作为边界条件。电位居中的 30CrMnSiNi2A 由于其极性不确定,故选取其整条极化曲线的插值函数作为边界条件。

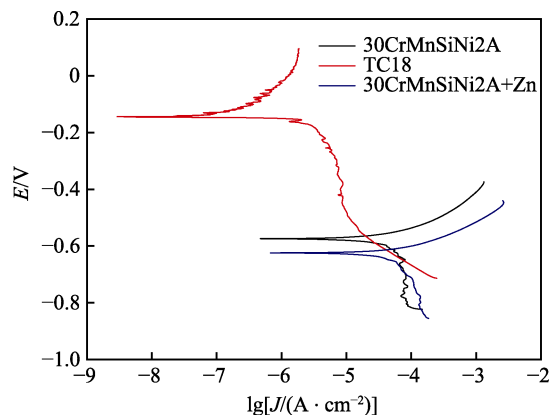


图 4 极化曲线
Fig.4 Polarization curves

表 2 电化学动力学参数
Tab.2 Electrochemical kinetic parameters

材料	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\beta_{\text{a}}/\text{mV}$	$\beta_{\text{c}}/\text{mV}$
TC18	-148.5	0.14		-841.62
30CrMnSiNi2A	-573.6	56.23	127.29	
30CrMnSiNi2A 紧固件	-625.7	63.1	138.71	

3 计算结果与实验结果对比

3.1 腐蚀形貌

3.1.1 宏观腐蚀形貌

图 5—图 7 和表 3 为加速腐蚀 3、5、7 个周期后钢-钛搭接件的宏观腐蚀形貌和腐蚀形貌细节。可以看出，试验前期，腐蚀主要发生在紧固件及其周边，30CrMnSiNi2A 钢板材腐蚀轻微；直到第 5 个周期后，紧固件表面镀锌层基本完全破坏，搭接件的 30CrMnSiNi2A 钢板材腐蚀才逐渐加重；到第 7 个周期时，30CrMnSiNi2A 板件腐蚀已较严重。说明在腐蚀前期，30CrMnSiNi2A 镀锌钢的锌镀层与 30CrMnSiNi2A 板件、TC18 钛合金构成电偶对，镀锌钢作阳极，加速腐蚀，30CrMnSiNi2A 和 TC18 作阴极，腐蚀受到抑制；当镀锌层完全破坏后，紧固件 30CrMnSiNi2A 裸露，搭接件中 30CrMnSiNi2A 极性由原来的阴极转变为阳极，腐蚀迅速加重。



图 5 第 3 周期钢-钛搭接件宏观腐蚀形貌图
Fig.5 Macroscopic corrosion morphology of steel-titanium lap joints in the third cycle: a) front, b) back



图 6 第 5 周期钢-钛搭接件宏观腐蚀形貌图
Fig.6 Macroscopic corrosion morphology of steel-titanium lap joints in the fifth cycle: a) front, b) back

























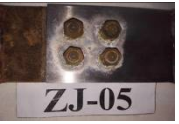







图 7 第 7 周期钢-钛搭接件宏观腐蚀形貌图
Fig.7 Macroscopic corrosion morphology of steel-titanium lap joints in the seventh cycle: a) front, b) back

3.1.2 微观腐蚀形貌

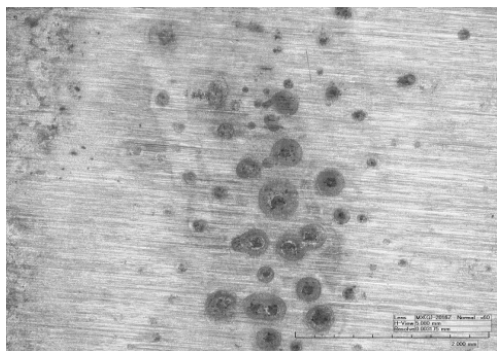
为进一步研究钢-钛搭接件的电偶腐蚀，采用 KH-7700 体视显微镜观察了不同腐蚀周期后试验件的微观腐蚀形貌，第 3、5、7 周期后 30CrMnSiNi2A 紧固件和板材的微观腐蚀形貌如图 8—图 10 所示。可以看出，腐蚀前期(加速腐蚀前 3 周期)，30CrMnSiNi2A 紧固件腐蚀较重，发生了大面积点蚀，而 30CrMnSiNi2A

表 3 30CrMnSiNi2A-TC18 搭接件各周期腐蚀宏观形貌细节图
Tab.3 Detail diagram of corrosion macromorphology for lap joints in each cycle

		ZJ-01	ZJ-02	ZJ-03	ZJ-04	ZJ-05
第 3 周期	正面					
	反面					
第 5 周期	正面					
	反面					
第 7 周期	正面					
	反面					

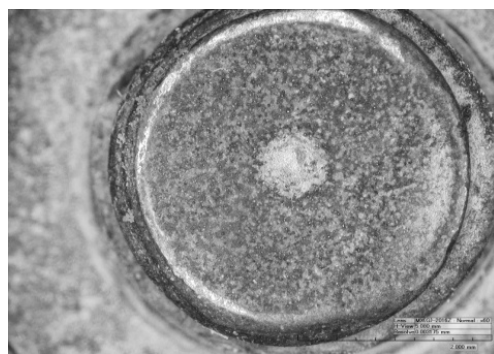


a 30CrMnSiNi2A 紧固件

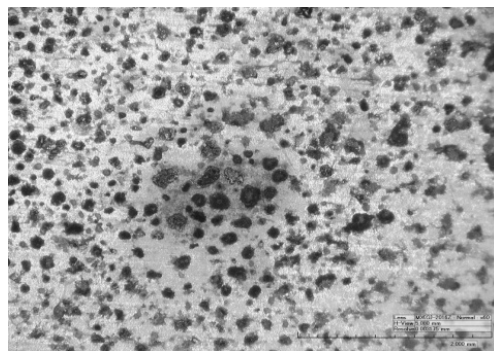


b 30CrMnSiNi2A 板材

图 8 第 3 周期钢-钛搭接件微观腐蚀形貌图
Fig.8 Micro corrosion morphology of steel-titanium lap joints in the third cycle: a) 30CrMnSiNi2A fasteners, b) 30CrMnSiNi2A plates



a 30CrMnSiNi2A 紧固件

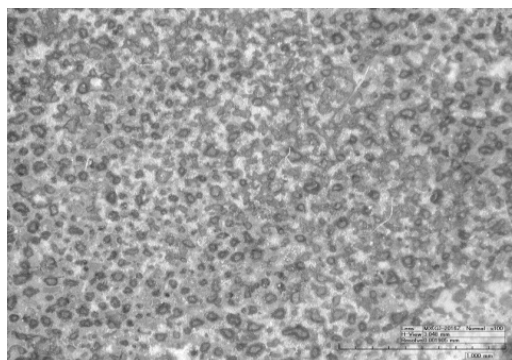


b 30CrMnSiNi2A 板材

图 9 第 5 周期钢-钛搭接件微观腐蚀形貌图
Fig.9 Micro corrosion morphology of steel-titanium lap joints in the fifth cycle: a) 30CrMnSiNi2A fasteners, b) 30CrMnSiNi2A plates



a 30CrMnSiNi2A 紧固件



b 30CrMnSiNi2A 板材

图 10 第 7 周期钢-钛搭接件微观腐蚀形貌图
Fig.10 Micro corrosion morphology of steel-titanium lap joints in the seventh cycle: a) 30CrMnSiNi2A fasteners, b) 30CrMnSiNi2A plates

板材点蚀较为轻微,如图 8 所示。腐蚀试验进行到第 5 周期时,30CrMnSiNi2A 紧固件进一步腐蚀,由大面积点蚀发展为均匀腐蚀,锌层基本完全破坏,30CrMnSiNi2A 由原来的阴极极性变为阳极极性,腐蚀迅速加剧,也出现了大面积的点蚀,如图 9 所示。腐蚀进行到第 9 个周期时,30CrMnSiNi2A 紧固件外表面腐蚀形貌与第 5 周期时相差不大,而 30CrMnSiNi2A 板材点蚀密度进一步增大,向均匀腐蚀方向发展,如图 10 所示。

3.2 仿真结果

利用本研究构建的稳态腐蚀模型分别对锌层完好和锌层完全破损的搭接件电位分布和局部电流分布进行仿真,仿真结果如图 11 和图 12 所示。由图 11a 试验件表面电位分布可以看出,搭接件耦合电位大约为 $-592\sim-589.5$ mV,30CrMnSiNi2A 镀锌钢及其周围区域电位最低,TC18 和 30CrMnSiNi2A 板件电位较高。结合图 11b 局部电流分布可以看出,30CrMnSiNi2A 紧固件电流为正值,为搭接件阳极,TC18 和 30CrMnSiNi2A 板件为阴极。由图 12a 可以看出,当镀锌层完全破损后,搭接件耦合电位升高,大约在 $-566.1\sim-567$ mV 之间。由图 12b 可知,紧固件和钢板耦合电流均为正值,故二者同时充当阳极,TC18 钛合金作阴极。

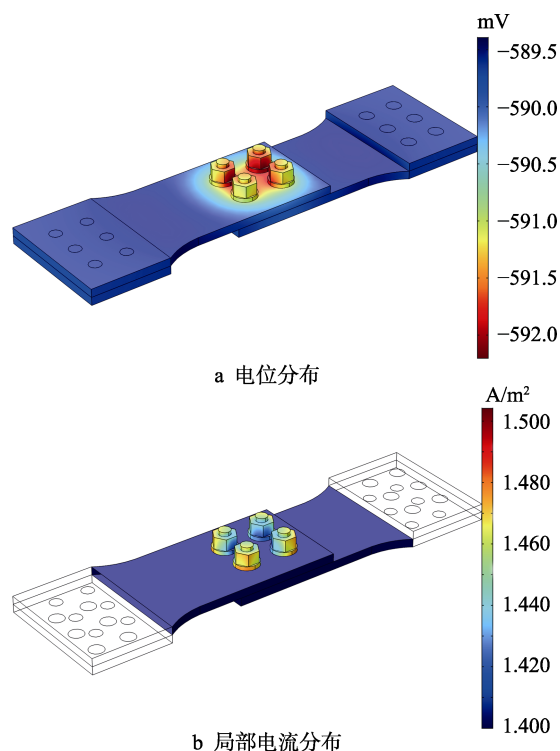


图 11 钢-钛搭接件仿真结果(锌层完好)
Fig.11 Simulation results of steel-titanium lap joints (perfect galvanized layer): a) potential distribution, b) local current distribution

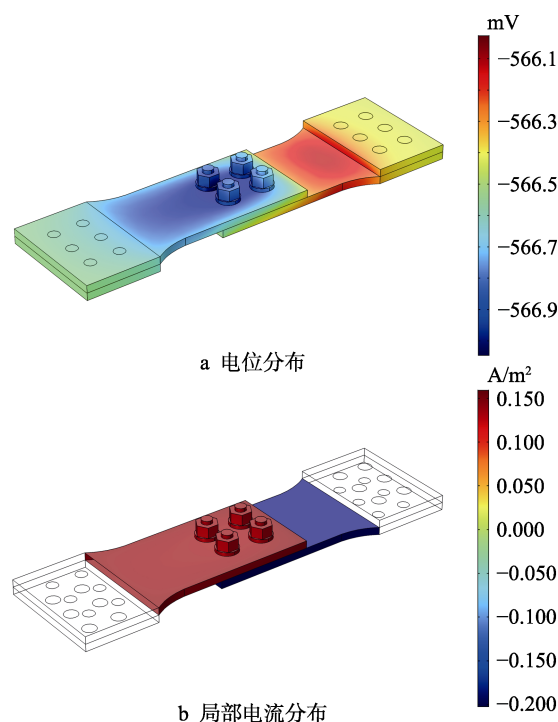


图 12 钢-钛搭接件仿真结果(锌层完全破损)
Fig.12 Simulation results of steel-titanium lap joints (complete breakage of galvanized layer): a) potential distribution, b) local current distribution

3.3 仿真与试验对比

将第 3 周期和第 7 周期搭接区腐蚀形貌与镀锌层

完好和镀锌层完全破损的仿真电位分布结果进行对比(图 13 和图 14),可以看出,第 3 个周期,紧固件及其周边腐蚀较严重,但钢板腐蚀较轻,腐蚀区域与仿真得到的电位较低区域较为一致。到了第 7 周期,紧固件的镀锌层完全破损后,钢板腐蚀迅速加剧,蔓延至整个钢板,而搭接区钛合金表面紧固件及其周边腐蚀进一步加剧,这也与仿真得到的低电位区域几何形状较为一致,证明了仿真模型的正确性。

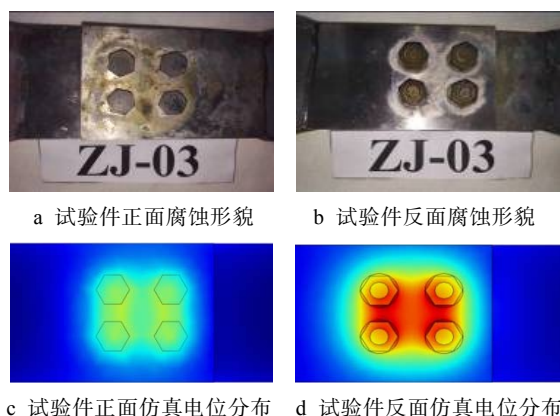


图 13 第 3 周期试验与仿真对比

Fig.13 Comparison between simulation and test results after 3 cycles: a) corrosion morphology of front of test piece, b) corrosion morphology of back of test piece, c) simulated potential distribution of front of test pieces, d) simulated potential distribution of back of test pieces

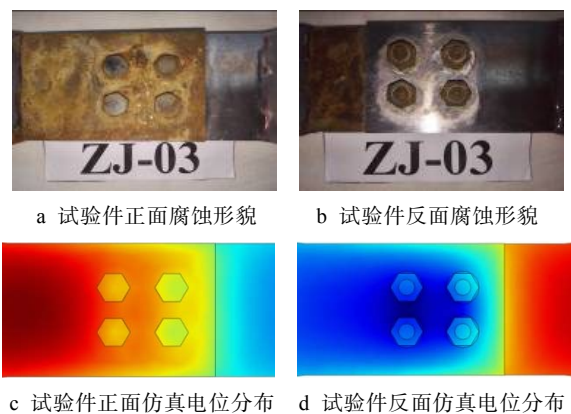


图 14 第 7 周期仿真与试验对比

Fig.14 Comparison between simulation and test results after 7 cycles: a) corrosion morphology of front of test piece, b) corrosion morphology of back of test piece, c) simulated potential distribution of front of test pieces, d) simulated potential distribution of back of test pieces

根据法拉第定律(式(6))得到式(7):

$$i = \frac{Q}{t} = \frac{nF \frac{\Delta m}{S}}{t} = \frac{nF \rho \Delta h}{Mt} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta h}{t} = \frac{i \cdot M}{nF \rho} \quad (7)$$

式中: $\frac{\Delta h}{t}$ 反映腐蚀深度随时间的变化; i 为局部

电流密度; n 为化学当量系数,这里主要是铝合金发生反应,故 $n=3$; M 为相对分子质量; ρ 为铝合金密度。

由法拉第定律和仿真得到的局部电流密度分布计算得到第 5 周期和第 7 周期腐蚀深度,如图 15 所示。

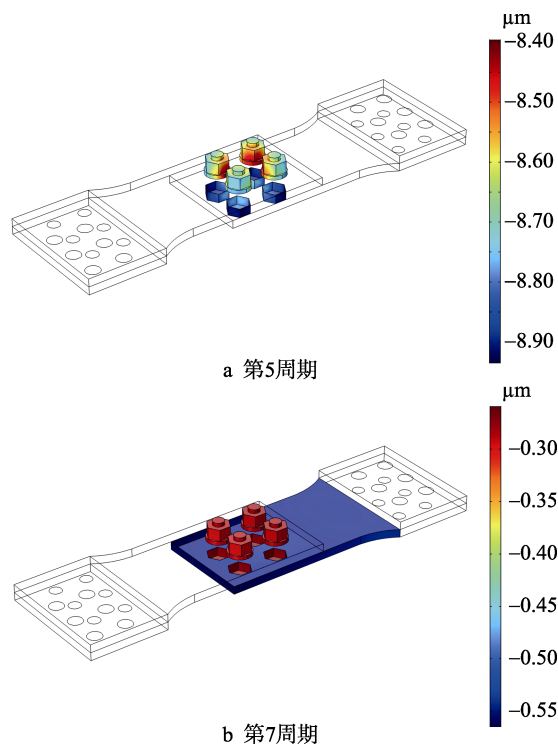


图 15 腐蚀深度预测

Fig.15 Prediction of corrosion depth: a) after five cycles, b) after seven cycles

可以看出,5 个周期后,8 μm 镀锌层腐蚀完全,紧固件 30CrMnSiNi2A 基材裸露,30CrMnSiNi2A 由初始时的阴极极性转变为阳极极性,并与 TC18 钛合金形成新的电偶对,腐蚀在钢板表面迅速扩展。由第 7 周期腐蚀深度的预测可以看出,紧固件腐蚀相对于板材腐蚀较轻,这与 3.1.2 小节中微观腐蚀形貌结果相一致。

4 结论

1) 腐蚀试验前期,腐蚀主要集中在紧固件表面,镀锌层由局部点蚀逐渐扩散,最终呈均匀腐蚀趋势;到第 5 周期后,紧固件表面镀锌层完全破损,钢板表面腐蚀迅速加重;到第 7 周期,钢板表面基本被褐色腐蚀产物覆盖。

2) 基于稳态腐蚀电场构建搭接件电偶腐蚀模型,模拟了镀锌层完好和镀锌层完全破损时搭接件电位或局部电流分布,并与试验得到的腐蚀情况进行对比,证明了仿真模型的正确性。

3) 第 5 周期结束时,预测的腐蚀深度大致在 8.4~8.9 μm,大于镀锌钢锌层厚度,说明镀锌钢底材 30CrMnSiNi2A 在第 5 周期结束时已完全裸露。5 周

期后, 紧固件裸露的 30CrMnSiNi2A 和 30CrMnSiNi2A 板材及 TC18 钛合金板材构成新的电偶对。第 7 周期, 紧固件的预测腐蚀深度明显小于板材腐蚀深度, 与腐蚀试验结果一致。

参考文献:

- [1] PAN Y, WU G, CHENG X, et al. Galvanic corrosion behaviour of carbon fibre reinforced polymer/magnesium alloys coupling[J]. Corrosion science, 2015, 98: 672-677.
- [2] HÅKANSSON E, HOFFMAN J, PREDECKI P, et al. The role of corrosion product deposition in galvanic corrosion of aluminum/carbon systems[J]. Corrosion science, 2017, 114: 10-16.
- [3] SCHNEIDER M, KREMMER K, LÄMMEL C, et al. Galvanic corrosion of metal/ceramic coupling[J]. Corrosion science, 2014, 80(3): 191-196.
- [4] 赵林, 穆鑫, 董俊华, 等. AH32 长尺试样在模拟海洋潮差区腐蚀行为的电偶电流研究[J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1445-1453.
ZHAO Lin, MU Xin, DONG Jun-hua, et al. Study on the galvanic current of corrosion behavior for AH32 long-scale specimen in simulated tidal zone[J]. Acta metallurgica sinica, 2017, 53(11): 1445-1453.
- [5] 李君, 董超芳, 李晓刚, 等. Q235-304L 电偶对在 Na_2S 溶液中的电偶腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 308-314.
LI Jun, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Galvanic corrosion behaviors of Q235-304L couple Na_2S solution [J]. Journal of chinese society for corrosion and protection, 2006, 26(5): 308-314.
- [6] 肖葵, 董超芳, 李晓刚, 等. 采用开尔文扫描探针技术研究镁合金偶接铜合金的电偶腐蚀规律[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(8): 1023-1028.
XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Galvanic corrosion evaluation of magnesium alloys coupled with brass alloys studied by scanning Kelvin probe technology[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(8): 1023-1028.
- [7] 张晓梅, 郭为民, 张慧霞, 等. 模拟深海低温环境中铜合金的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(12): 1161-1165.
ZHANG Xiao-mei, GUO Wei-min, ZHANG Hui-xia, et al. Galvanic corrosion behavior of copper alloys in simulated deep-sea low temperature environment[J]. Corrosion & protection, 2015, 36(12): 1161-1165.
- [8] 陈兴伟, 吴建华, 王佳, 等. 电偶腐蚀影响因素研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(4): 363-366.
CHEN Xing-wei, WU Jian-hua, WANG Jia, et al. Progress in research on factors influencing galvanic corrosion behavior[J]. Corrosion science and protection technology, 2010, 22(4): 363-366.
- [9] 陈跃良, 王哲夫, 卞贵学, 等. 不同浓度 NaCl 溶液下典型铝/钛合金电偶腐蚀当量折算关系[J]. 航空学报, 2017, 38(3): 260-268.
CHEN Yue-liang, WANG Zhe-fu, BIAN Gui-xue, et al. Equivalent conversion of galvanic corrosion of typical aluminum-titanium alloy in NaCl solution with different concentrations[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2017, 38(3): 260-268.
- [10] 张勇, 陈跃良, 王晨光. 模拟沿海大气环境下铝合金搭接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 joints in simulated coastal wet atmospheric[J]. Materials review, 2016, 30(10): 152-155.
- [11] ZHANG Y, CHEN Y L, FAN W J, et al. Study on the galvanic corrosion of aluminum alloy single bolted lap joints in simulated atmospheres[J]. Materials and corrosion, 2017, 68(10): 1107-1115.
- [12] 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.
- [13] OKADA N. Numerical analysis of galvanic corrosion under a thin electrolyte film[J]. Zairyo-to-Kankyo, 2012, 61(10): 376-383.
- [14] MURER N, OLTRA R, VUILLEMIN B, et al. Numerical modelling of the galvanic coupling in aluminium alloys: A discussion on the application of local probe techniques[J]. Corrosion science, 2010, 52(1): 130-139.
- [15] PALANI S, HACK T, DECONINCK J, et al. Validation of predictive model for galvanic corrosion under thin electrolyte layers: An application to aluminium 2024-CFRP material combination[J]. Corrosion science, 2014, 78(1): 89-100.
- [16] BOTTE V, MANSUTTI D, PASCARELLI A. Numerical modeling of iron corrosion due to an acidic aqueous solution [J]. Applied numerical mathematics, 2005, 55(3): 253-263.
- [17] GUSEVA O, SCHMUTZ P, SUTER T, et al. Modelling of anodic dissolution of pure aluminium in sodium chloride[J]. Electrochimica acta, 2009, 54(19): 4514-4524.
- [18] WANG Y, YIN L, JIN Y, et al. Numerical simulation of micro-galvanic corrosion in al alloys: Steric hindrance effect of corrosion product[J]. Journal of the electrochemical society, 2018, 164(14): C1035-C1043.