

异种金属结构电偶腐蚀的边界元仿真及验证

王安东¹ 陈跃良¹ 黄海亮¹ 邢少华² 赵红君¹

(1. 海军航空工程学院青岛校区航空机械系, 青岛, 266041;

2. 中船重工 725 所海洋腐蚀与防护国防重点实验室, 青岛, 266101)

摘要:海军某型航空装备在海洋环境下长时间服役后,铸铝合金壳体与海军黄铜导轨接触,导致电偶腐蚀。为研究不同条件对其电偶腐蚀的影响,基于 Nernst-Plank 方程和边界元方法,以结构几何形状、材料极化数据和电解液性质为输入,建立了裸露电偶电极的仿真模型,探索了模型有效性和可靠性的实验室验证方法。结果表明,同一环境下,ZL115-T5 铸铝合金电位低于 C41500 海军黄铜电位,在电偶腐蚀中充当阳极;随着电解液浓度、结构表面液膜厚度增大,电偶腐蚀将愈加剧烈;裸露电极电偶电流及表面电位的实测值和仿真值吻合较好,所建立的电偶腐蚀边界元模型有效、可靠。

关键词:异种金属;电偶腐蚀;边界元;仿真

中图分类号:V252.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)S-0062-07

Boundary Element Simulation and Verification of Galvanic Corrosion of Dissimilar Metal Structures

WANG Andong¹, CHEN Yueliang¹, HUANG Hailiang¹, XING Shaohua², ZHAO Hongjun¹

(1. Department of Aerospace Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute Qingdao Campus, Qingdao, 266041, China;

2. Marine Corrosion and Protection State Key Laboratory, China Shipbuilding Industry Corporation 725 Ins., Qingdao, 266101, China)

Abstract: After a long period of service in the marine environment of a naval aviation equipment, the aluminum alloy shell would connect with the naval brass rail, thus leading to galvanic corrosion. Effects of different conditions on the galvanic corrosion are studied based on the Nernst-Plank equation and the boundary element method. The geometry of structures, the polarization data of materials and the property of electrolytes are regarded as the input data and galvanic models are established for the bare electrode. The laboratory verification method for the validity and reliability of the model is explored here. The result shows that, the self-corrosion potential of ZL115-T5 aluminum alloy is lower than that of C41500 navy brass under the same condition, which plays the role of anode in galvanic corrosion. With the increase of electrolyte concentration and film thickness, the galvanic corrosion will be more intense. The test value and simulation value of the galvanic current and surface potential on the bare electrode agree well with each other, indicating that the corrosion boundary element model is effective and reliable.

Key words: dissimilar metal; galvanic corrosion; boundary element; simulation

腐蚀仿真是一种正在逐步兴起的腐蚀研究手段,实质是通过数学方法对结构腐蚀损伤进行数值

计算^[1],优势在于周期短、费用低、工作量小,且可预判可能服役环境对结构腐蚀的影响,提前制定有

收稿日期:2017-05-15;修订日期:2017-06-20

通信作者:陈跃良,男,教授,博士生导师,E-mail:cy10532@sina.com。

引用格式:王安东,陈跃良,黄海亮,等.异种金属结构电偶腐蚀的边界元仿真及验证[J].南京航空航天大学学报,2017,49(S):62-68. WANG Andong, CHEN Yueliang, HUANG Hailiang, et al. Boundary element simulation and verification of galvanic corrosion of dissimilar metal structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 62-68.

效措施,防患于未然。国外对于腐蚀仿真的研究起步较早,先后有有限差分法^[2-5]和有限元法^[6,7]得以应用,但研究对象均是一些简单结构,这是因为在求解三维问题时,前者精度不高,后者过程复杂,且二者均要对结构进行全区域网格划分,这对计算机性能和模型输入参数精度的要求较高,故限于当时技术水平,二者在工程领域的应用并不广泛。后来,在三维位势问题和无限域问题处理上有显著优点的边界元法崭露头角。Danson 等^[8]率先使用该方法描述了某海洋平台在海水中的腐蚀行为; Bardal 等^[9]运用边界元法研究了电解液流速对电偶腐蚀电流密度分布的影响;Fu 等^[10]基于边界元法,仿真了阴极保护下小型海洋平台表面的电位分布。后来,文献[11-14]又陆续使用边界元法对装、设备的阴极保护系统或防护涂层的效率开展了仿真研究。

国内也有部分将边界元法应用于腐蚀工程领域的实例,但为数不多,基本用于解决海洋平台、海底运输管线等阴极保护系统效率的相关问题^[15-19],并未有涉及航空装备的电偶腐蚀,更不用说带涂层结构的电偶腐蚀。海军某型航空装备在海洋环境

下服役时,结构表面易有盐沉积,遇潮湿空气后形成电解液膜,因此基体铸铝合金(牌号 ZL115-T5)常会发生严重腐蚀,尤其在基体表面涂层因刮、擦、磕、碰产生损伤时,铸铝合金裸露,与海军黄铜(牌号 C41500)导轨直接接触,更为电偶腐蚀提供了有利条件。在上述背景下,为填补国内在此方面的研究空白,本文将基于边界元方法,初步建立铸铝合金和海军黄铜的电偶腐蚀模型,对结构腐蚀行为进行仿真计算,并探索、提出可用于模型有效性和可靠性验证的实验室测量方法。

1 试 验

1.1 试件制备

ZL115-T5 铸铝合金^[20]与 C41500 海军黄铜^[21]的化学组分见表 1。首先制备用于验证性试验的两类平板试件,尺寸均为 105 mm×90 mm×10 mm,分别由该型装备的壳体和导轨经线切割得到,保留了原材料的加工表面。其次制备用于电化学测量的试样,对上述两种平板试件线切割得尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 小样,具体制备方法见文献[22]。

表 1 ZL115-T5 铸铝合金和 C41500 海军黄铜的化学组分

Tab. 1 Chemical composition of ZL115-T5 cast aluminum alloy and C41500 navy brass

wt %

ZL115	Si	Mg	Zn	Sb	Al	Impurities							
						Fe		Other			Total		
						S	J	Cu	Sn	Pb	Mn	S	J
	4.8-6.2	0.40-0.65	1.2-1.8	0.10-0.25	Balance	0.30	0.30	0.10	0.01	0.05	0.1	0.8	1.0
C41500	Cu		Ni	Fe	Pb	Zn	As	Impurities					
	Sn												
	69.0~71.00	0.8~1.3						0.5	0.1	0.05	Balance	0.03~0.05	0.3

1.2 动电位极化

使用 PARSTAT 4000 电化学综合测试仪测量 ZL115-T5 铸铝合金和 C41500 海军黄铜的极化曲线。采用经典三电极体系,参比电极为饱和甘汞电极,对电极为铂电极,工作电极为电化学试样;扫描范围为±250 mV,扫描速率 0.5 mV/s。测量环境是浓度为 0.05 mol/L 和 0.10 mol/L 的中性 NaCl 溶液(恒温 24 ℃)。

1.3 电偶腐蚀仿真

1.3.1 仿真流程

电偶腐蚀的边界元仿真分三步:前处理、数学模型计算和后处理,具体流程见图 1^[23],主要原理就是对基于 Nernst-Planck 方程的线性代数方程组进行求解。

1.3.2 仿真方案

裸露电偶电极。图 2 为表面处于裸露状态的电偶腐蚀电极系统^[24]。仿真中两极的面积比始终

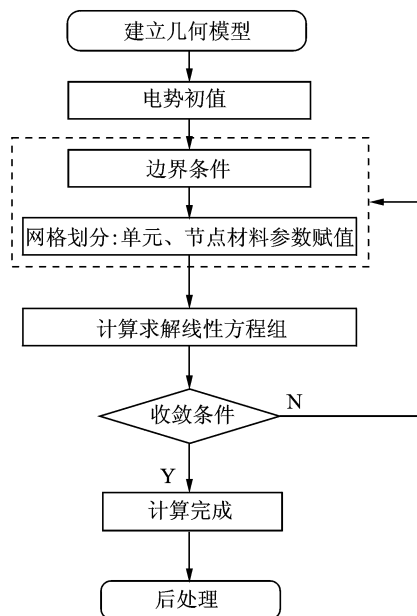


图 1 腐蚀模型计算流程图

Fig. 1 Flowchart of corrosion model solution

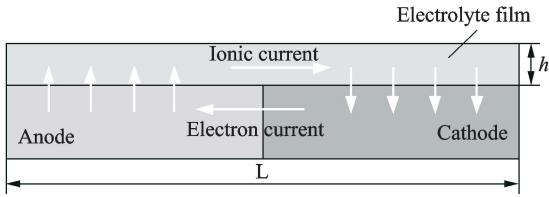


图2 裸露电极电偶腐蚀

Fig. 2 Galvanic corrosion of bare electrode

为1:1,尺寸105 mm×90 mm×10 mm,直接接触,且被电解液膜覆盖,构成完整电化学回路。电解液为一定浓度的中性NaCl溶液,恒温24℃,以液膜形式附着在电极表面,厚度可变,但有。该仿真目的在于研究电解液浓度和液膜厚度对电偶腐蚀的影响,仿真方案见表2。

表2 裸露电极仿真方案

Tab. 2 Simulation plan of bare electrode

Specimen number	Status	Chloride ion concentration/ (mol·L ⁻¹)	Conductivity/ (μs·cm ⁻¹)	Electrolyte film thickness/ μm
L-01	Bare	0.05	4 980	13
L-02	Bare	0.05	4 980	45
L-03	Bare	0.1	9 600	13
L-04	Bare	0.1	9 600	45

1.4 验证试验

验证试验测量装置图见图3。为方便测量流过两极间的电偶腐蚀总电流,仅以裸露电极的电偶腐蚀为例。测量中,两极会被一个有良好绝缘性的缝隙(使用具有绝缘性能的航空密封胶阻隔,宽1 mm)隔开。试验条件同裸露电极电偶腐蚀仿真条件。需测数据为电偶腐蚀总电流和电极表面的电位分布*V*。

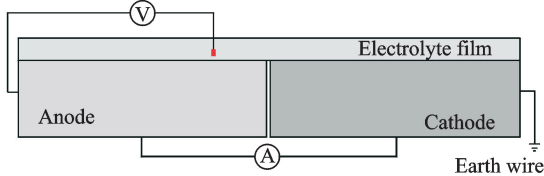


图3 测量装置图

Fig. 3 Schematic measurement equipment

验证试验难点在于制备电极表面一定厚度的电解液膜。制备液膜的理论基础是Nusselt模型^[25],即静止水蒸气在竖直平壁上层流膜状冷凝换热的理论模型,此模型同时适用于有倾斜角度的平壁(倾斜角应能保证平壁表面的冷凝物仅依靠自身重力作用便能流淌)。液膜制备装置见图4,其局部厚度可根据式(1)计算

$$\delta = \frac{4\mu_L k_L z(T_{\text{sat}} - T_w)}{\rho_L(\rho_L - \rho_G)g \sin\alpha \cdot h_{LG}} \quad (1)$$

式中, T_{sat} 为饱和水蒸气的温度; T_w 为对应的水温; ρ_L 为液态水密度, ρ_G 为饱和时水蒸气密度; μ_L 为水的黏性; g 为重力加速度; α 是平板倾斜角; h_L 为水的热传导率; h_{LG} 为液态水变为水蒸气所吸收的热量。通过改变电极基体倾斜角度 α ,可获得不同厚度的电解液膜。试验中,使用光学光谱仪实现膜厚在线测量,应保证其在13~45 μm间变化。

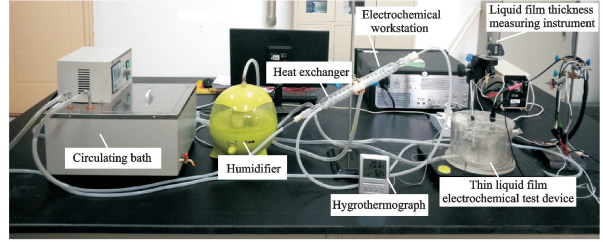


图4 薄液膜电化学测量系统工作原理图

Fig. 4 Work principle of electrochemical measurement system for thin electrolyte film

2 结果与分析

2.1 极化曲线

图5是两种材料在不同浓度电解液中的极化曲线。经对比可知,当电解液的浓度增加时,铸铝合金的极化数据变化剧烈,其自腐蚀电位(经典Tafel拟合)由-584.701 mV负移至-743.139 mV,变化量

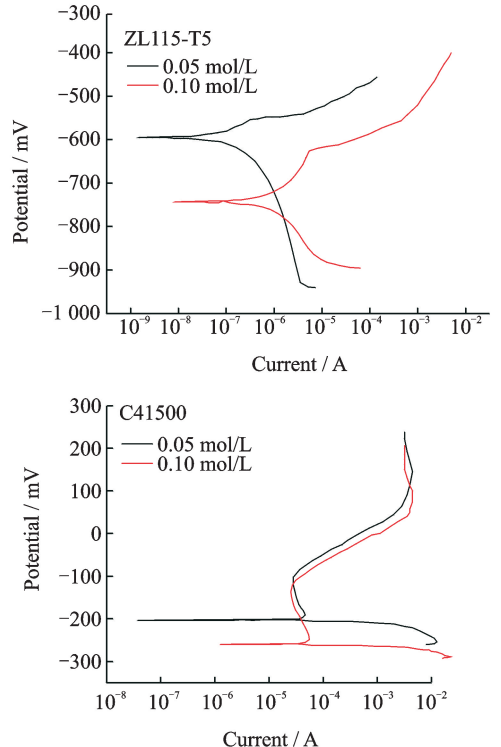


图5 不同电解液浓度下两种材料的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of two materials under different concentrations

达 -158.438 mV ;自腐蚀电流则由 $0.182\mu\text{A}$ 增加至 $4.307\mu\text{A}$,增量为 $4.125\mu\text{A}$ 。可见,铸铝合金活性随浓度的升高而增加,耐蚀性降低。相同条件下,海军黄铜极化曲线变化并不明显,其阴极极化曲线较短且平缓,阳极极化曲线较长且陡峭,且具有明显“钝化-活化-钝化”区,说明其极化过程为阳极控制,在电解液中表面会生成钝化膜,具有良好的耐蚀性。

2.2 仿真结果

2.2.1 仿真云图

裸露电极网格划分见图6,在不影响计算精度的情况下,对裸露电极的网格划分相对简单。由图6可知边界元仿真的优越性,即无需对电极整体进行网格划分,只需要对参与电极反应的电极表面进行网格划分和计算即可。限于篇幅,在此仅呈现条件相对恶劣的L-02号和L-04号电极(图7)电位和电流分布的仿真云图。

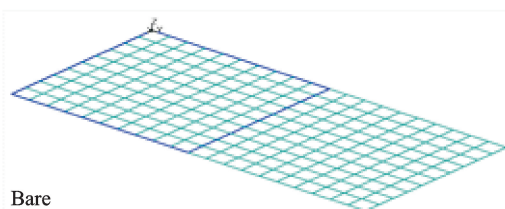


图6 裸露电极的网格划分结果

Fig.6 Meshing of two bare electrodes

2.2.2 裸露电极

根据仿真云图,得到L-01号~L-04号电极表面电流密度沿电偶电极横向轴线的分布情况,以轴线中点为原点,向阴极方向为正,向阳极方向为负,见图8。可见,在铸铝合金和海军黄铜偶合后,铸铝合金被阳极极化,电位发生正向移动,距离海军黄铜越近,极化越严重,电偶腐蚀电流密度也越大;海军黄铜被阴极极化,电位负向移动,距离铸铝合金越近的部分极化也越严重。

图8中L-01号和L-02号电极的电偶腐蚀总电流分别为 $0.052, 0.12\text{ mA}$ 。保持电解液电导率 $4980\mu\text{S/cm}$ 不变,液膜厚度由 $13\mu\text{m}$ 增至 $45\mu\text{m}$,电偶电流变化率达到 131% ;同样的,对于L-03号和L-04号电极,保持电解液电导率 $9600\mu\text{S/cm}$ 不变,液膜厚度由 $13\mu\text{m}$ 增至 $45\mu\text{m}$ 时,电偶电流由 0.087 mA 增至 0.18 mA ,变化率达到 107% 。这是因为,电解液膜厚度的增加会使可游离的离子数增多,有利于电偶腐蚀中离子电流的流动,从而加剧腐蚀的发展。而且,液膜厚度增加使得电极表面电流密度分布变得相对平滑、均匀,直至距离原点 40 mm 以外的位置,其值才逐渐降为零,即液膜厚度由 $13\mu\text{m}$ 增至 $45\mu\text{m}$ 时,电极表面电偶腐蚀区域宽度从 40 mm 增至 80 mm ,可见液膜厚度的增加

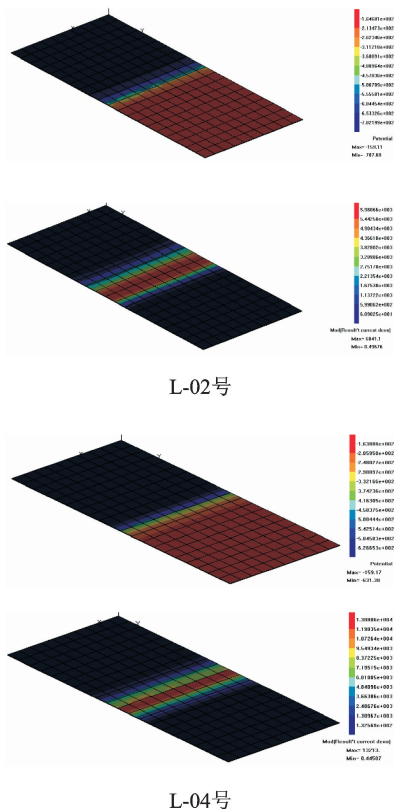


图7 L-02号和L-04号试件电偶腐蚀仿真云图(左:电位,右:电流密度)

Fig.7 Cloud picture of galvanic corrosion of No. L-02 and L-04 (left the potential and right the current density)

会使电偶腐蚀的发生范围更加广泛,作用更加剧烈。

对比L-01号和L-03号电极,保持液膜厚度为 $13\mu\text{m}$ 不变,电解液电导率由 $4980\mu\text{S/cm}$ 增至 $9600\mu\text{S/cm}$,电偶电流由 0.052 mA 增至 0.087 mA ,增幅 67% ;当与原点距离超过 20 mm 后,腐蚀电流密度逐渐减小为零。同样,对比L-02号和L-04号电极,保持液膜厚度为 $45\mu\text{m}$ 不变,电偶电流由 0.12 mA 增至 0.18 mA ,增幅 50% ;而当与原点距离超过 40 mm 后,电偶电流方逐渐降至零。可见,随着电解液浓度的增加,电偶腐蚀的范围更广,程度也会更加剧烈。这是因为介质浓度增加使得活性离子数量增多,更有利于离子电流的流动,表现便是电解液的腐蚀性变强了。

综上,电解液浓度和液膜厚度的变化均会改变电偶腐蚀的程度和作用范围,且影响显而易见。二者的作用机理相同,均是增加了电极系统中的活性离子数量。在本次仿真中,以电偶电流为依据,对四种条件下的腐蚀程度进行排序,可得 $L-04 > L-02 > L-03 > L-01$ 。该结果不仅能够说明电解液浓度和液膜厚度的增加均有利于电偶腐蚀的发生、发展,还能证明在所选用条件范围内,相较于浓度

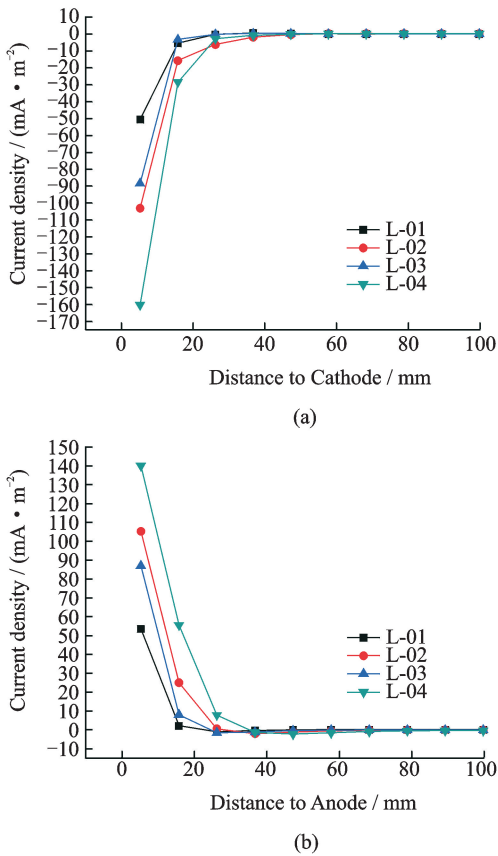


图8 L-01号到L-04号电极表面电流密度分布

Fig. 8 Distribution of current density on No. L-01 to L-04 electrodes

来说,液膜厚度对于电偶腐蚀的影响更加强烈。这就要求,在该型装备服役时,应尽量保持其所处的环境清洁、干燥,避免结构表面形成电解液膜,以抑制甚至抑止电偶腐蚀。

3 模型验证

3.1 总腐蚀电流

对于电偶腐蚀总电流,以液膜厚度为变量,在

表3 裸露电极表面电位分布的实测值和仿真值

Tab. 3 Test value and simulation value of surface potential distribution of bare electrode

Potential/ mV	Electrode											
	L-01				L-02				L-03			
	Anode		Cathode		Anode		Cathode		Anode		Cathode	
	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
5	-584.3	-596.41	-215.3	-207.84	-541.9	-547.56	-271.3	-263.93	-560.1	-570.23	-230.7	-231.78
15	-674.8	-682.99	-167.4	-163.14	-632.5	-636.55	-188.6	-183.07	-613.3	-618.89	-172.4	-169.95
25	-695.2	-705.13	-160.5	-160.28	-676.3	-679.22	-170.5	-161.77	-625.3	-630.07	-163.1	-160.35
35	-699.5	-708.24	-156.0	-161.02	-686.8	-679.70	-166.0	-159.47	-626.6	-631.97	-162.3	-160.71
45	-700.0	-707.51	-156.3	-161.26	-694.3	-704.82	-165.4	-160.21	-627.0	-631.70	-161.3	-161.44
55	-701.8	-706.69	-156.4	-161.31	-698.3	-707.03	-165.3	-160.82	-627.1	-631.19	-160.7	-161.74
65	-702.0	-706.24	-156.2	-161.32	-699.5	-707.38	-165.4	-161.10	-627.5	-630.84	-160.6	-161.84
75	-702.3	-706.05	-156.2	-161.33	-701.0	-707.20	-165.4	-161.20	-627.6	-630.66	-160.3	-161.88
85	-704.2	-705.99	-156.2	-161.33	-701.2	-706.99	-165.3	-161.24	-627.3	-630.57	-160.2	-161.88
95	-705.1	-706.02	-156.2	-161.34	-701.3	-706.89	-165.4	-161.23	-627.5	-630.54	-160.2	-161.87
105	-703.4	-706.02	-156.2	-161.33	-701.4	-706.95	-165.4	-161.24	-627.3	-630.57	-160.3	-161.88

每个固定厚度下,间隔 60 s 记录一次电流数据,连续记录 5 组并求出均值,作为该厚度下的腐蚀总电流。将实测值与仿真值对比,见图 9。图中,腐蚀总电流的实测值和仿真值吻合较好;电解液浓度一定时,液膜厚度的增加使得腐蚀电流增大,说明液膜厚度增加有利于电流流动,加剧了电偶腐蚀;而液膜厚度一定时,腐蚀总电流也会随电解液浓度的增加而增大。上述结论与仿真结论时相一致的。

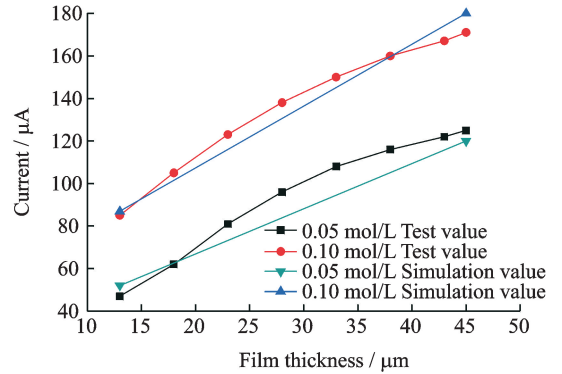


图9 腐蚀总电流实测值与仿真值对比

Fig. 9 Comparison of test value and simulation value of corrosion current

3.2 电偶电位

表 3 为电极表面电位分布的实测值(T)与仿真值(S)。限于篇幅,仅列举了 L-01 号到 L-03 号电极的电位数据。实测值是分别在阳极、阴极表面,距离原点每 10 mm 处测量一次电位数据得到的。可以看出,阳极和阴极表面电位变化剧烈,尤其是靠近接触面的区域,这种趋势更为明显。经对比可知,电位实测值和仿真值的变化规律基本一致,二者间误差并不大,在数值上二者能够较好地吻合,说明所建立的边界元模型有效、可靠。

4 结 论

(1) ZL115-T5 铸铝合金的腐蚀行为对电解液浓度变化敏感,随电解液浓度的增大,其发生腐蚀的倾向也越来越大;C41500 海军黄铜的阳极化过程有明显“钝化-活化-钝化”区域,说明其腐蚀行为受电解液性质的影响不大,本身耐蚀性较好。

(2) 基于边界元方法建立了处于不同电解液浓度和液膜厚度下的裸露电极的电偶腐蚀模型,并对边界元模型求解、计算。结果表明:电解液浓度和液膜厚度的增加均会加剧电偶腐蚀,相比较而言,液膜厚度对其影响更为强烈。

(3) 探索了边界元模型的实验室验证方法;实测量了验证性数据,得到了二者偶合后的电偶电位和腐蚀总电流实测值;利用两类实测数据对仿真模型可靠性进行了验证。结果表明:仿真值和实测值均吻合较好,证明建立的电偶腐蚀边界元模型有效、可靠,可应用于海军装备结构电偶腐蚀研究中。

参考文献:

- [1] CHEN D, MAHADEVAN S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2008, 30(3): 227-238.
- [2] MILLS T B, HONEYCUTT K. Managing damage in the wing: modeling the interaction of exfoliation with static and fatigue loads [C] // Third Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft. Albuquerque, New Mexico: [s. n.], 1999.
- [3] SMYRL W H, NEWMAN J. Current and potential distributions in plating corrosion systems [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1976, 123(10): 1423-1432.
- [4] DOIG P, FLEWITT P E J. A finite difference numerical analysis of galvanic corrosion for semi-infinite linear coplanar electrodes [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1979, 126(12): 2057-2063.
- [5] YAN J F, PAKALAPATI S N R, NGUYEN T V, et al. Mathematical modeling of cathodic protection using the boundary element method with a nonlinear polarization curve [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1992, 139(7): 1932-1936.
- [6] BEEK G H M, LIGTELIJN J T H. Numerical determination of potential distributions and current densities in multi-electrode systems [J]. *Corrosion/NACE*, 1981, 37(9): 522-530.
- [7] KASPER R G, APRIL M G. Electrochemical finite element analysis of partially protected marine structures [J]. *Corrosion*, 1983, 39: 5(5): 181-188.
- [8] DANSON D J, WARNE M A. Current density/voltage calculations using boundary element techniques. NACE[C] // Conference. Los Angeles, USA: [s. n.], 1983.
- [9] BARDAL E, JOHNSEN R, GARTLAND P O. Prediction of galvanic corrosion rates and distribution by means of calculation and experimental models [J]. *Corrosion-Houston Tx-*, 1984, 40(12): 628-633.
- [10] FU J W, CHAN S K. A finite element method for modeling localized corrosion cells [J]. *Corrosion-Houston Tx-*, 1984, 40(10): 540-544.
- [11] DEGIORGI V G. Corrosion basics and computer modeling in industrial application of the BEM [J]. *Computational Mechanics Publication*, Southampton, 1992.
- [12] TRDAN U, GRUM J. Evaluation of corrosion resistance of AA6082-T651 aluminium alloy after laser shock peening by means of cyclic polarisation and EIS methods [J]. *Corrosion Science*, 2012, 59: 324-333.
- [13] WARKUS J, RAUPACH M, GULIKERS J. Numerical modeling of corrosion—Theoretical backgrounds. *Materials and Corrosion*, 2006, 57(8): 614-617.
- [14] LOHNER H, POUPON C, BENEKE M. Understanding and prediction of surface protection materials and processes properties [C] // Proc of Deutscher Luft und Raumfahrt Kongress. Hamburg, Germany, 2010: 1123-1127.
- [15] 解福瑶, 郑勤红, 刘蕾蕊. 二维静电场分析的边界元场强计算问题 [J]. *云南师范大学学报*, 1996, 16(4): 37-42.
XIE Fuyao, ZHENG Qinrong, LIU Qiangrui, et al. The BEM electric field intensity computation problems of 2D electrostatic field analysis [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 1996, 16(4): 37-42.
- [16] 解福瑶, 郑勤红, 钱双平. 三维静电场分析的边界元场强计算问题 [J]. *云南师范大学学报*, 1997, 17(2): 18-23.
XIE Fuyao, ZHENG Qinrong, QIAN Shuangping, et al. The BEM electrical field intensity computation problems of 3D electrostatic field analysis [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 1997, 17(2): 18-23.
- [17] CAO Shengshan, WANG Qingzhang, ZHANG Manping. Numerical modeling for offshore platform cathodic protection local system [J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 1995: 247-252.
- [18] 梁旭巍, 孟宪锐. 油田区域性阴极保护计算机辅助优化设计研究 [J]. *天津纺织工学院学报*, 1998, 17(5): 90-94.
LIANG Xuwei, MENG Xianji. Study on the computer assistant optimization design for the regional cathodic protection system [J]. *Journal of Tianjin In-*

- stitute of Textile Science and Technology, 1998, 17(5): 90-94.
- [19] 梁旭巍, 庄新国. 减少阴极保护系统灵敏度分析计算量的方法[J]. 天津纺织工学院学报, 1999, 18: 70-73.
LIANG Weixu, ZHUANG Xinguo. A method to reduce the computation of the sensitivity analysis of the cathodic protection system [J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 1999, 18: 70-73.
- [20] 刘志超, 常崇礼. 新型高强度耐腐蚀铸造铝合金[J]. 材料工程, 1990(4): 6-8.
LIU Zhichao, CHANG Chongli. A new type of casting aluminium alloy with high strength and corrosion resistance [J]. Material Engineering, 1990(4): 6-8.
- [21] 陈杰, 郑弃非, 孙霜青, 等. 海军黄铜 HSn62-1 的长期大气腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 577-582.
CHEN Jie, ZHENG Qifei, SUN Shuangqing, et al. Long term atmospheric corrosion behavior of naval brass HSn62-1 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 577-582.
- [22] 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): 265-273.
CHEN Yueliang, WANG Zhefu, BIAN Guixue, et al. Study on equivalent conversion of galvanic corrosion about typical aluminum and titanium alloy in NaCl solution with different concentrations [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 265-273.
- [23] JIA J X, ATRENS A, SONG G, et al. Simulation of galvanic corrosion of magnesium coupled to a steel fastener in NaCl solution [J]. Materials & Corrosion, 2005, 56(7): 468-474.
- [24] MANDEL M, KRÜGER L. FE-simulation of galvanic corrosion susceptibility of two rivet joints verified by immersion tests [J]. Materials Today Proceedings, 2015, 2: S197-S204.
- [25] 李勇, 阎昌琪, 李汶蔚, 等. 竖直管内蒸汽完全冷凝换热特性的理论研究[J]. 原子能科学技术, 2012(1): 26-31.
LI Yong, YAN Changqi, LI Wenwei, et al. Heat transfer characteristics of complete condensation in vertical tube [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(1): 26-31.