

# 基于边界元方法的缓蚀剂对结构电偶腐蚀 缓蚀效果研究

孙宏岩

(海军航空工程应用所, 北京 100071)

**摘要:** **目的** 研究 THFS-10 软膜缓蚀剂和 THFS-15 长效硬膜缓蚀剂在海洋环境下对于海军某型装备结构电偶腐蚀的缓蚀效果。**方法** 采用等效浸泡测量法, 得到 ZL115-T5 铸铝合金、30CrMnSiA 钢以及 C41500 海军黄铜在不同条件下的极化曲线和交流阻抗谱。以此为边界条件, 基于边界元方法, 对涂覆缓蚀剂后结构的电偶腐蚀行为进行仿真, 对比分析两种缓蚀剂对该异种金属连接结构电偶腐蚀的缓蚀效果。**结果** THFS-15 能够显著减轻上述三种不同材料偶合时的电偶腐蚀, THFS-10 则在一定程度上加速了三者之间的电偶腐蚀。**结论** 根据仿真结果, 给出了 THFS-10 和 THFS-15 两种缓蚀剂的具体使用建议和注意事项。

**关键词:** 边界元; 缓蚀剂; 电偶腐蚀; 缓蚀效果

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.021

**中图分类号:** TJ07; TG174.42 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)02-0116-07

## Effect of Corrosion Inhibitor on Galvanic Corrosion of Structures Based on Boundary Element Method

SUN Hong-yan

(Naval Aeronautical Engineering Application Institute, Beijing 100071, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the inhibition effect of THFS-10 pial corrosion inhibitor and THFS-15 long-term epidural corrosion inhibitor on the galvanic corrosion of a certain naval equipment structure in the marine environment. **Methods** The equivalent soaking measurement method was used to obtain polarization curves and AC impedance spectroscopies of ZL115-T5 cast aluminum alloy, 30CrMnSiA steel and C41500 Navy brass in different conditions. Based on the boundary condition and the boundary element method, the galvanic corrosion behavior of the structure which was overlaid by the corrosion inhibitor was simulated. The effect of the two inhibitors on the galvanic corrosion of this dissimilar metal connecting structure was obtained by contrasting and analyzing the result of simulation. **Results** THFS-15 could significantly reduce the galvanic corrosion of the three kinds of different materials, but the galvanic corrosion between these three materials was accelerated to a certain extent when THFS-10 was used. **Conclusion** According to the simulation results, some specific usage suggestions and notes of THFS-10 and THFS-15 were given out.

**KEY WORDS:** boundary element; corrosion inhibitor; galvanic corrosion; corrosion inhibition

收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2015-12-07

Received: 2015-11-11; Revised: 2015-12-07

作者简介: 孙宏岩(1962—), 女, 北京人, 高级工程师, 主要研究方向为海洋环境与海军装备性能。

Biography: SUN Hong-yan(1962—), Female, from Beijing, Senior engineer, Research focus: marine environment and naval equipment performance.

在海洋环境下,当海军某型装备壳体表面由于涂层损伤而导致基体金属裸露时,基体金属就会与其他部位金属接触会发生电偶腐蚀<sup>[1]</sup>。为减小甚至避免结构的电偶腐蚀损伤,必须采取及时有效的腐蚀防护与控制措施。在腐蚀部位喷涂缓蚀剂具有操作简单、方便易用、维护场地不限、人员无需特殊培训等优点,可作为腐蚀防控措施的首选<sup>[2]</sup>。为了深入研究常用的THFS-10软膜缓蚀剂和THFS-15长效硬膜缓蚀剂的作用机理及其对结构电偶腐蚀的缓蚀作用,文中将选取某型装备的典型结构,基于边界元方法,根据实测所得不同材料的极化曲线,对表面涂覆缓蚀剂后异种金属连接结构的电偶腐蚀行为进行边界元仿真研究<sup>[3]</sup>。

## 1 边界元法仿真的基本原理

边界元法是继有限差分法和有限元法之后一种新兴的数值计算方法。该方法以问题控制微分方程的基本解为基础,建立边界积分方程,通过离散、插值等手段,获得边界问题中未知数的方程,求解这些方程以得到所需物理量<sup>[4]</sup>。电偶腐蚀的边界元仿真是基于稳定状态、均匀条件下一定体积电解液的电中性原理,依此对位势分布问题进行求解。

Laplace方程和Poisson方程为常见的两个典型位势问题控制方程。Laplace方程的形式为:

$$\nabla^2 U = 0$$

式中: $U$ 为位势函数, $\nabla^2$ 为Laplace算子。当边界条件给定时,该问题就成为了Laplace定解问题<sup>[5]</sup>。

在实际工程应用中,Laplace方程定解问题一般少于Poisson方程定解问题。Poisson方程指在所研究的域内分布着依赖于场点内已知函数的源函数 $b(x)$ ,可表示为:

$$\nabla^2 U = b(x)$$

一定条件下,通过引入特解或变量变换可将Poisson方程转化为Laplace方程。在电偶腐蚀的边界元模型中输入相应的极化数据后,电极上会产生非线性边界条件,可用三维Poisson方程求解相关数据。其中,电位分布可由大量的节点数据确定,电流密度等则可直接由边界条件计算得出。据此得到的各解均为近似解,解的精度取决于网格划分的精度。在理想的稳定状态、均匀条件下,求解的控制方程为:

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (1)$$

其中:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$j = -\sigma \nabla V_e(x)$$

式中: $\nabla$ 为三维梯度算子; $j$ 为电流密度; $\sigma$ 为电解液的电导率; $V_e(x)$ 为电解液中的点位分布, $x \in R^3$ 。该方程的积分域 $\Omega$ 即是电解液存在的区域,根据其周围的所有表面,包括阳极、阴极和绝缘区域,可定义边界 $\Gamma = \partial \Omega$ 。

求解过程中,应用于电极边界条件的方程的一般形式为:

$$j_n = -\sigma \frac{\partial V_e}{\partial n} = f(\Delta V) \quad (2)$$

式中: $j_n$ 为沿电解液膜厚度方向 $\hat{n}$ 穿过表面的电流密度; $\Delta V$ 是穿过金属和电解液接触面的极化电位, $\Delta V = V_e - V_m$ , $V_m$ 为金属电位。

极化曲线是对材料典型极化特性的描述,可用来确定边界条件。Butler-Volmer方程中规定,函数 $f$ 通常包含非线性指数因子 $\Delta V$ ,且认为其是线性函数的集合。将极化数据作为一个输入,就是要将非线性边界条件分配给相应电极。求解时假设未与电解液膜直接接触的其他所有面都良好绝缘,即 $j_n = 0$ 。

使用标准 $\nabla$ 求解时,液膜会被看做三维物体(即需考虑厚度),这会增加计算耗时,提高计算成本。文献[6]的研究表明,当液膜厚度远小于电极尺寸时,沿厚度方向的电位为常数。文中的液膜厚度满足上述条件,这使得运用二维算子(忽略厚度)进行求解成为可能。此时,电中性方程(1)变形为:

$$h \nabla_{2D}(-\sigma \nabla_{2D} V_e) = -f(\Delta V) \quad (3)$$

式中: $\nabla_{2D}$ 为沿 $x$ 轴、 $y$ 轴的二维操作; $h$ 为液膜厚度; $f(\Delta V)$ 为电极极化数据。假如表面涂层完整,则可认为绝缘,此时 $f(\Delta V)$ 为0。如此,便可将边界元模型的三维求解转化为二维求解,减少了计算量,缩短了计算时间,节约了计算成本,还使得运用该方法仿真大型复杂结构的电偶腐蚀成为可能。

## 2 基于边界元的结构电偶腐蚀仿真

### 2.1 结构的选择

以某装备壳体上的检视口盖结构及其周围部分基体作为研究对象。该口盖为螺钉托板螺母连接口盖<sup>[7]</sup>。口盖结构的模拟图及实物如图1所示。在图1a的模拟图中,条状物为C41500海军黄铜导轨,不规则区域内为涂层受到损伤而裸露的ZL115-T5铸铝合金基体,图1b为该结构的实物图。该口盖在日常的装备检视和维护中,需要频繁打开与关闭,相较于其他部

位,该结构的涂层受到损伤的概率更大,即该部位发生电偶腐蚀的可能性也更大。



图1 装备口盖结构

Fig.1 Structure of hatch cover of the equipment

### 2.2 结构的边界元建模

在对口盖结构建模之前,需进行简化处理。影响电偶腐蚀中电位和电流分布的主要因素是不同材料间的接触面积,而非接触部位的形状,故可将图1中的

圆形紧固螺栓、圆形口盖、不规则的涂层破损简化为规则的方形。相较于整个壳体尺寸来说,检视口盖和导轨的尺寸很小,故在建模时可将所研究的部分壳体视为没有弯曲度的平面。虽然海水为无限域体,但只有一定范围内的海水会参与到结构的电偶腐蚀中,故可将充当腐蚀介质的部分海水简化为规则长方体<sup>[8]</sup>。经过这样的简化,不会影响到仿真结果的准确性。简化后,可得到如图2所示的数字化模型<sup>[9]</sup>。部位名称及用材见图2a,具体尺寸在此不做说明。

### 2.3 边界条件的确定

结构涂层损伤后,喷涂缓蚀剂将作为腐蚀防控的首选措施。那么,在对涂覆缓蚀剂后的口盖结构进行仿真时,如何有效地确定边界条件呢?文中采用了等效浸泡测量法。该方法是将适量缓蚀剂加入腐蚀溶液中,将电极小样浸泡一定时长,再进行电化学测量,以此代替在电极小样表面直接涂覆缓蚀剂后测量。其优点是可在不影响准确性的情况下,避免涂覆缓蚀剂后电极小样工作面导电性能变差而导致无法测量的情况。

在该口盖结构中,涂层完好区域良好绝缘,可认为不发生腐蚀,即边界条件为电流密度等于0。涂层破损处如舱体、口盖、导轨和紧固件等部位,应根据装备的服役环境,在考虑缓蚀剂的情况下,确定三种结构材料(ZL115-T5铸铝合金壳体、C41500海军黄铜导

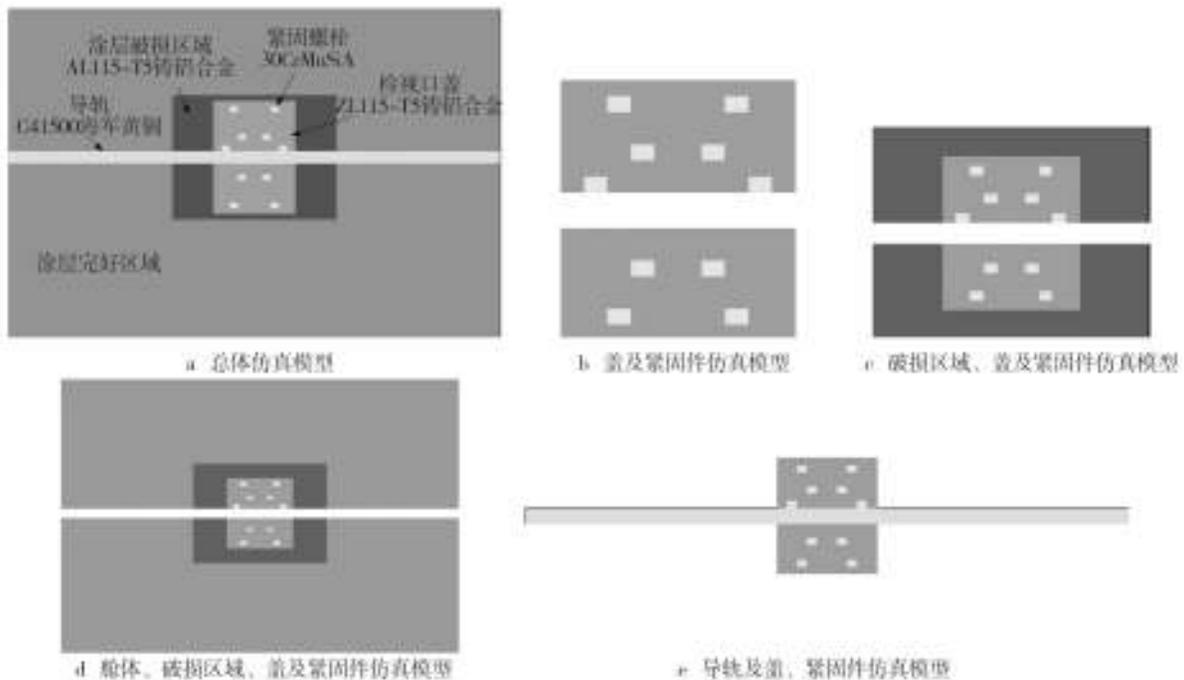


图2 结构电偶腐蚀数值仿真模型

Fig.2 Numerical simulation model of galvanic corrosion of the structure

轨和30CrMnSiA钢螺栓)在以下三种介质中的电化学性质:自然海水(即结构裸露);自然海水+THFS-10软膜缓蚀剂(即结构表面涂覆THFS-10);自然海水+THFS-15长效硬膜缓蚀剂(即结构表面涂覆THFS-15)。

### 2.3.1 极化曲线

在制备好测量用电极小样(工作面尺寸为10 mm × 10 mm<sup>[10]</sup>),并完成上述所需电解液的配置后,需先将这些电极小样分别浸泡在不同的腐蚀介质中30~50 min,等待电位稳定后再测量极化曲线。需要注意的是,禁止将不同材料的电极小样浸入同一种溶液中<sup>[11]</sup>。测量采用经典的标准三电极体系,使用饱和

甘汞电极为参比电极,扫描范围为-0.25~0.25 V,扫描速率为0.5 mV/s<sup>[12]</sup>。

测量后,可得在三种不同介质中三种材料各自的极化曲线如图3所示。对比图3a和3b可知,加入THFS-10软膜缓蚀剂后,三种材料的自腐蚀电位均负向移动,阴极的塔菲尔斜率也均有所减小。这说明THFS-10软膜缓蚀剂主要抑制了阴极还原反应,是一种阴极型缓蚀剂。对比图3a和图3c可知,加入THFS-15长效硬膜缓蚀剂后,ZL115-T5铸铝合金极化曲线无太大变化,其余两种材料的自腐蚀电位正向移动,三者之间的电位差明显减小,发生电偶腐蚀的倾向(驱动力)减小。

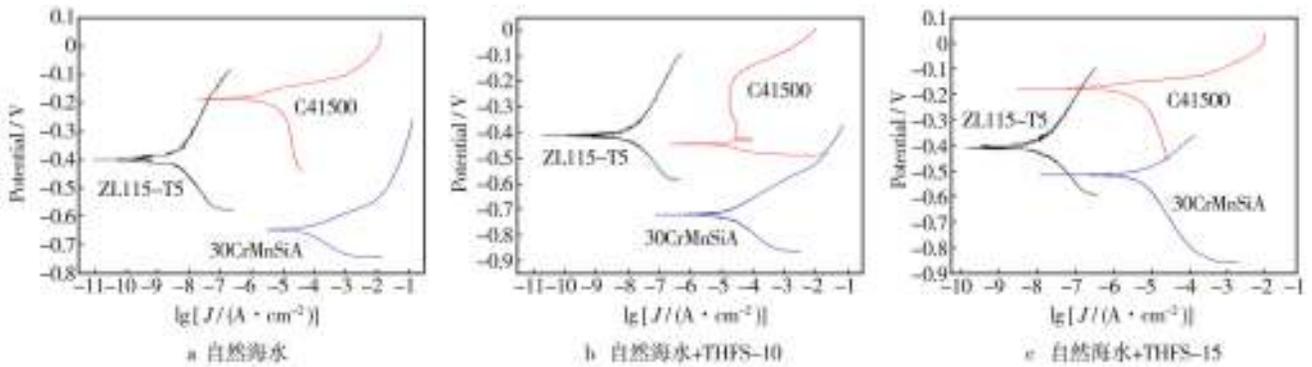


图3 三种材料在三种介质中的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of the three materials in three different media

### 2.3.2 交流阻抗谱

测量前,先将已经制备好的三种材料的电极小样置于三种不同介质中浸泡30~50 min。测量采用经典的标准三电极体系,以饱和甘汞电极为参比电极<sup>[13]</sup>。测量时,将电极电势的振幅限制在10 mV以内,电极小样和电解液禁止重复使用<sup>[14]</sup>。由此得到三种材料在三种不同介质下的交流阻抗谱如图4所示。

从图4a可以看出,在海水中,ZL115-T5铸铝合金的表面阻抗较大,这说明其自身的耐蚀性本就较好,在加入两种缓蚀剂后,表面阻抗的变化比较微弱。图4b中,在自然海水中加入THFS-10后,C41500海军黄铜的阻抗半径急剧增大,即是说其表面电阻在不断的增大<sup>[15]</sup>。结合图3b可知,此介质中,该型黄铜的腐蚀速率与腐蚀电流仍然较大。这表明THFS-10并不能

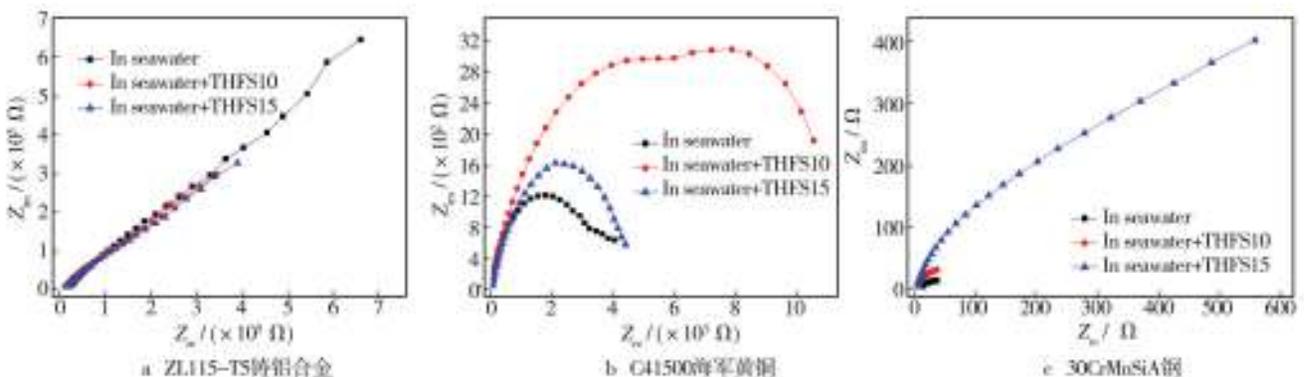


图4 三种材料在三种介质中的交流阻抗谱

Fig.4 EIS of the three materials in three different media

有效提高海军黄铜的抗腐蚀能力,而加入THFS-15后,C41500海军黄铜的阻抗半径有所增大,且其腐蚀

电流有所减小,这表明THFS-15能够提高该型海军黄铜的抗腐蚀能力。由图4c可知,缓蚀剂的加入使得30CrMnSiA钢的阻抗半径明显增大,说明表面电阻在增大,腐蚀发生的阻力也随之增大。结合图3,可知加入缓蚀剂后,钢的腐蚀电流减小,说明两种缓蚀剂均能够提高30CrMnSiA钢的耐腐蚀性<sup>[6]</sup>。

### 2.4 电偶腐蚀仿真结果分析

在海洋环境下,口盖结构在裸露状态、涂覆THFS-10、涂覆THFS-15后的电偶腐蚀电位和电流仿真结果见表1,其中阳极电流为负值,此时材料发生加速腐蚀。三种情况下电偶电位分布分别如图5—7所示。

表1 结构腐蚀电位及电流仿真结果

Table 1 Simulation results of structure corrosion potential and current

状态	自腐蚀电位/mV			电偶电位/mV			电偶电流/mA		
	钢	铝	铜	钢	铝	铜	钢	铝	铜
自然海水	-646	-400	-183	-592~-593	-569~-579	-572~-584	-21.17	0.42	20.75
THFS-10	-719	-407	-443	-534~-539	-496~-521	-490~-508	-41.84	0.08	41.76
THFS-15	-515	-411	-175	-336~-157	-331~-334	-330~-333	-5.14	-0.03	5.17

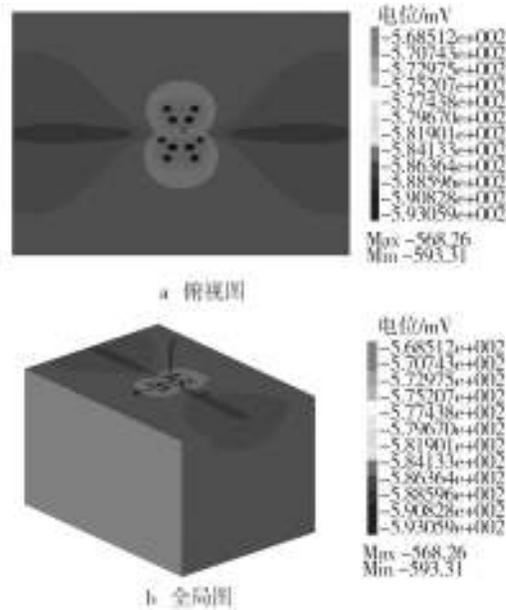


图5 在自然海水中裸露结构的电偶电位分布

Fig.5 Galvanic potential distribution of bare structure in natural seawater

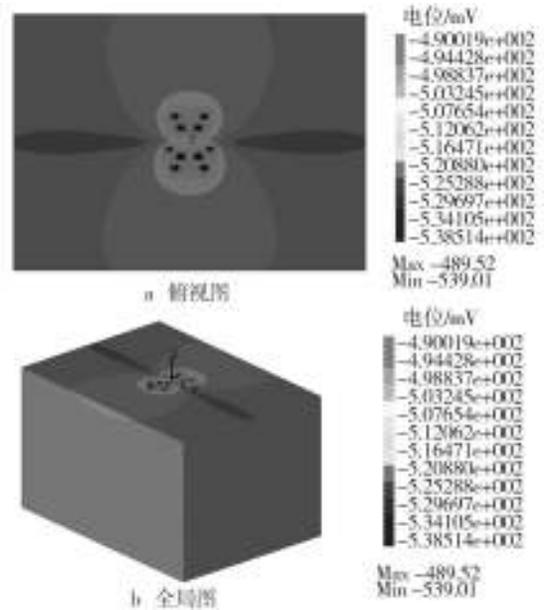


图6 涂覆THFS-10后结构电偶电位分布

Fig.6 Galvanic potential distribution of structure in seawater + THFS-10

由图3所示的极化曲线可知,ZL115-T5铸铝合金在三种情况下的极化电流极小,非常容易极化,说明很小的电流即可使得ZL115-T5铸铝合金电位发生较大变化。因此,在所研究的结构中,电偶腐蚀将主要发生在30CrMnSiA钢和C41500海军黄铜之间。30CrMnSiA钢为阳极加速腐蚀,而C41500海军黄铜为阴极得到一定保护。

根据仿真结果可知,在自然海水中,三种材料组成的电偶对,30CrMnSiA钢为阳极,阳极溶解电流为21.17 mA,换算得到电流密度为0.794 mA/cm<sup>2</sup>,阳极极化电位达54 mV;ZL115-T5铸铝合金为阴极,但阴极电流只有0.42 mA,阴极极化电位约为174 mV,说明该

种材料易极化,对30CrMnSiA钢电偶加速效应较小;C41500海军黄铜为阴极,阴极极化电流达20.75 mA,阴极极化电位约为395 mV,这是造成30CrMnSiA钢加速腐蚀的主要原因。

当三种材料偶合并涂覆THFS-10软膜缓蚀剂后,C41500海军黄铜阴极极化电流显著增加,导致结构体电偶腐蚀加剧。此时,30CrMnSiA钢为阳极,溶解电流为41.84 mA,换算成电流密度为1.57 mA/cm<sup>2</sup>,阳极极化电位达182 mV,相对于自然海水状态,电偶腐蚀明显加剧;ZL115-T5铸铝合金为阴极,由于缓蚀剂作用,阴极电流只有0.08 mA,阴极极化电位约为101 mV,同样对30CrMnSiA钢的电偶加速效应较小;C41500海军

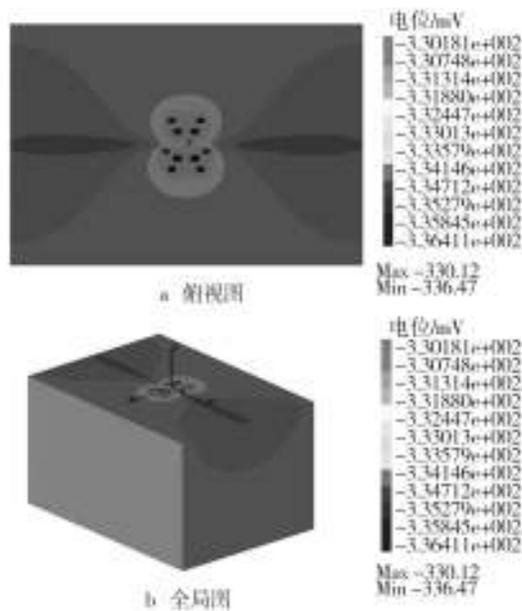


图7 涂覆THFS-15后结构电偶电位分布

Fig.7 Galvanic potential distribution of structure in seawater + THFS-15

黄铜为阴极,由于在THFS-10作用下,相同极化电位下阴极极化电流增加,更加耐极化,阴极极化电流达41.76 mA,阴极极化电位约为56 mV,这是造成30CrMnSiA钢加速腐蚀的主要原因。

当三种材料偶合并涂覆THFS-15长效硬膜缓蚀剂后,C41500海军黄铜阴极极化电流减小,电偶腐蚀电流显著减小。30CrMnSiA钢为阳极,阳极溶解电流为5.14 mA,换算成电流密度为0.193 mA/cm<sup>2</sup>,阳极极化电位达179 mV,相对于自然海水状态,电偶腐蚀明显减小;ZL115-T5铸铝合金为阳极,阳极电流只有0.03 mA,阴极极化电位约为78 mV,电偶腐蚀速率非常小;C41500海军黄铜为阴极,由于在THFS-15的作用,相同极化电位下阴极极化电流减小,更易极化,阴极极化电流为5.17 mA,阴极极化电位约为56 mV。

### 3 结论

采用等效浸泡测量法,得到在海洋环境下ZL115-T5铸铝合金、C41500海军黄铜和30CrMnSiA钢在表面涂覆THFS-10软膜缓蚀剂和THFS-15长效硬膜缓蚀剂后的极化曲线和交流阻抗谱。以实测结果为基础,对比分析了两种缓蚀剂对于三种材料的缓蚀机理及缓蚀效果。结果表明:THFS-10软膜缓蚀剂是一种阴极型缓蚀剂,对于ZL115-T5铸铝合金的缓蚀效果较好;THFS-15则对C41500海军黄铜和

30CrMnSiA钢的腐蚀有较好的抑制作用。

基于边界元方法,以所测三种材料在不同情况下的极化曲线为边界条件,进行了三者偶合时电偶腐蚀的仿真模拟。结果表明:在自然海水中,30CrMnSiA钢、ZL115-T5铸铝合金和C41500海军黄铜组成的三电偶对,30CrMnSiA钢为阳极,加速腐蚀,C41500海军黄铜是造成30CrMnSiA钢电偶腐蚀的主要原因,腐蚀速率达0.794 mA/cm<sup>2</sup>;添加THFS-15可显著减小三者偶合时的电偶腐蚀速率,而添加THFS-10会在一定程度上加剧电偶腐蚀。

考虑到基于边界元的电偶腐蚀仿真结果,针对THFS-10和THFS-15在实际中的使用提出以下几点建议。

1) 在铸铝合金壳体和黄铜偶合的部位,缓蚀剂既可以使用THFS-10,也可以使用THFS-15;在ZL115-T5铸铝合金壳体、C41500海军黄铜导轨、30CrMnSiA钢紧固件三者有可能偶合的部位,只能使用THFS-15长效硬膜缓蚀剂。

2) 在该型装备的使用过程中,尽量避免30CrMnSiA钢与C41500海军黄铜直接接触;若无法避免这种接触,可通过添加THFS-15缓蚀剂加以控制。

### 参考文献:

- [1] 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, 1999.
- [2] 宋永欣,党坤,池华芳,等. 电解法处理船舶压载水对压载舱金属腐蚀的影响[J]. 大连海事大学学报, 2005, 31(3): 45—61.  
SONG Yong-xin, DANG Kun, CHI Hua-fang, et al. Study on Effect of Metal Corrosion of Ballast Tank Caused by Ballast Water Treatment of Seawater Electrolysis[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2005, 31(3): 45—61.
- [3] 余建星,王广东,王亮,等. 船舶金属腐蚀失效与防护研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(1): 40—57.  
YU Jian-xing, WANG Guang-dong, WANG Liang, et al. The Study on Ship Metal Corrosion Invalidation and Protection[J]. Ocean Technology, 2005, 24(1): 40—57.
- [4] 杜艳霞,张国忠,李健. 阴极保护电位分布的数值计算[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(1): 53—58.  
DU Yan-xia, ZHANG GUO-zhong, LI Jian. Numerical Calculation of Cathodic Protection Potential Distribution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(1): 53—58.
- [5] 王玮玮. 三维位势和弹性问题的多极边界元法研究[D]. 秦

- 皇岛:燕山大学,2006.
- WANG Wei-wei. Study on the Multi Pole Boundary Element Method for the Three Dimensional Potential and Elasticity Problems[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [6] AMAYA K, AOKI S. Effective Boundary Element Methods in Corrosion Analysis[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2003, 27(3): 507—519.
- [7] 田志定, 武兴伟. 船舶海水管系电偶腐蚀及其防护措施[J]. 船舶, 2012, 23(5): 52—56.
- TIAN Zhi-ding, WU Xing-wei. Galvanic Couple Corrosion and Countermeasures for Sea Water Piping[J]. Ship and Boat, 2012, 23(5): 52—56.
- [8] BIRBILIS N, BUCHHEIT R G. Investigation and Discussion of Characteristics for Intermetallic Phases Common to Aluminum Alloys as a Function of Solution pH[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155: 117—126.
- [9] CHEN G S, LIAO C M, WAN K C, et al. Pitting Corrosion and Fatigue Crack Nucleation, Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth[J]. American Society for Testing and Materials, 1997, 1298: 18—33.
- [10] 郑凯, 李红艺, 韩玉华. 电化学工作站在金属腐蚀实验教学中的应用[J]. 山东化工, 2014, 43(9): 129—130.
- ZHENG Kai, LI Hong-yi, HAN Yu-hua. Application of Electrochemistry Station During Performing the Experiments on Metallic Corrosion and Protection[J]. Shandong Chemical Industry, 2014, 43(9): 129—130.
- [11] JEFF D. Smart Sensor Hub for Aircraft Corrosion Monitoring [J]. Luna Innovations Incorporated, 2006, 18(8): 7—169.
- [12] EINAR Bardal, ROY Johason. Rerolay Garrland[J]. Corrosion, 1984, 40(12): 628—633.
- [13] ALMEIDA J R M, Effects of Distilled Water and Saline Solution on the Interlaminar Shear Strength of an Aramid/Epoxy Composite[J]. Composites, 1991, 22(6): 448—550.
- [14] DEGIORGI V G. Corrosion Basics and Computer Modeling in Industrial Application of the BEM[M]. Southampton: Computational Mechanics Publication, 1992.
- [15] VARGEL C. Corrosion of Aluminium[J]. Metal Science and Technology, Amsterdam, 2004, 48(23): 546—550.
- [16] WARKUS J, RAUPACH M, GULIKERS J. Numerical Modeling of Corrosion—Theoretical Backgrounds[J]. Materials and Corrosion, 2006, 57(8): 614—617.

(上接第91页)

- WU Feng-hua, WANG De-fu, JIANG Chuan-xian. Research on Algorithm of Relative Humidity Measurement Precision with Dry-and-Wet Bulb[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 81—83.
- [8] 陈云生, 杨冬甫, 何芬. 风速4.6 m/s柱状水银温度计相对湿度查算表的编制[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 83—86.
- CHEN Yun-sheng, YANG Dong-fu, HE Fen. The Write of Relative Humidity Table of Wind Speed of 4.6 m/s and Column Mercurial Thermometer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 83—86.
- [9] 陈云生. 寻求湿度系数与风速关系的数学表达式[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 37—40.
- CHEN Yun-sheng. Mathematical Formula for Resolving the Relation between A and V[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 37—40.
- [10] KISI O, KIM S, SHIRI J. Estimation of Dew Point Temperature Using Neuro-fuzzy and Neural Network Techniques[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 114(3-4): 365—373.
- [11] NISHIDA K, YOKOI Y, ASA M, et al. Quantitative Estimation of Water Vapor Distribution in Low-humidity Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Humidity Test Paper[J]. Journal of Power Sources, 2013, 234: 111—118.
- [12] 陈云生. 干湿球法测量相对湿度的测量不确定度讨论[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 65—69.
- CHEN Yun-sheng. Discussion on the Uncertainty of Measurement of Relative Humidity with Dry and Wet Bulb Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 65—69.
- [13] BERNING T. The Dew Point Temperature as a Criterion for Optimizing the Operating Conditions of Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(13): 10265—10275.
- [14] ROSNER D E, ARIAS-ZUGASTI M. Soret- 'shifted' Dew-point Temperatures for Surfaces Exposed to Hydrocarbon Vapors Dilute in Compressed Nitrogen[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(15): 3962—3969.
- [15] 赵曦晶, 汪立新, 何志昆, 等. 基于改进模糊推理的光纤陀螺温度漂移建模[J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 15—21.
- ZHAO Xi-jing, WANG Li-xin, HE Zhi-kun, et al. Based on Improved Fuzzy Reasoning of Fiber Optic Gyro Temperature Drift Modeling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 15—21.