

网络优先数字出版时间: 2015-09-02

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20150902.1042.002.html>

即热式热水器底部加强板阴极保护系统电场数值模拟^{*}

Numerical Simulation for Electric Field of Cathodic Protection of the Bottom Strengthening Plate of Instant Water Heater

王在峰^{1,2,3}, 张杰¹, 侯保荣¹, 孙虎元¹, 宋积文³, 陈胜利³

WANG Zai-feng^{1,2,3}, ZHANG Jie¹, HOU Bao-rong¹, SUN Hu-yuan¹, SONG Ji-wen³, CHEN Sheng-li³

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国海洋石油总公司, 北京 100027)

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. China National Offshore Oil Corporation, Beijing, 100027, China)

摘要:【目的】为给即热式热水器的底部加强板添加外加电流阴极保护系统, 并获得均匀的电场分布。【方法】利用有限元法对两种型号即热式热水器底部加强板, 在不同辅助阳极排布方式下的阴极保护电场进行数值模拟。【结果】在与钢条垂直方向, 当辅助阳极位于热水器内胆高度的 $4/9$ 处时, 底板电位开始达到均匀分布。在与钢条平行方向, 当阳极在热水器内胆长度的 $11/18$ 到 $13/18$ 的范围内, 底板左右两端电位分布较均匀。随着辅助阳极数量的增加, 底板表面的电位分布更为均匀, 但对底板的电位数值变负未有太大的影响。将求解的平面空间分层并折算成直线, 以辅助阳极所在的位置为中心, 阳极两边均出现电位自衰减现象。【结论】采用 2 个辅助阳极较为经济。阳极的最佳位置区间为一个顶点坐标固定的长方形域。可根据衰减曲线, 通过调节辅助阳极的电位, 使离阳极最远的两个末端的电位达到保护要求。

关键词: 阴极保护 有限元法 电位分布

中图分类号: TG174.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2015)03-0192-05

Abstract: 【Objective】Aiming to design the impressed current cathodic protection system for the bottom steel plate of a constant water heater and to obtain the uniform electric field distribution. 【Methods】The finite element method was used to calculate electric field from cathodic protection of the strengthening plate based on different arrangements of auxiliary anodes. 【Results】When the auxiliary anodes being vertical to the steel bar were placed at $4/9$ of the heater height, the potential began to be uniformly distributed. When the anode being parallel to the steel bar were placed at $11/18$ to $13/18$ of the heater length, the potential distribution of left and right ends was more uniform. With the increase of the number of auxiliary anodes, the potential distribution was more uniform, but little impact on the value of the steel bar was found. Converting the solving region into a straight line, the auxiliary anode was in the center of the line. There was a self-

收稿日期: 2015-06-10

修回日期: 2015-06-21

作者简介: 王在峰(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋腐蚀与防护研究。

^{*} 中国科学院知识创新工程领域前沿项目及国家自然科学基金项目(20973097)资助。

attenuation curve, through adjusting the potential of auxiliary anodes, the potential of the two farthest ends of the anode reached the protection requirement.

attenuating phenomenon about potential. **【Conclusion】** So two auxiliary anodes were enough and economic. The anodes were preferably placed in a rectangular shape with specific coordinates. According to the attenuating curve, potentials of two ends can be adjusted to meet the requirement of standard.

Key words: cathodic protection, finite element method, potential distribution

0 引言

【研究意义】大型船舶与海洋结构物为增强防腐能力,一般都需进行阴极保护系统的防护。某些家用电器也有必要施加阴极保护系统,例如,某即热式热水器底部采用钢板加强抗冲击强度,其余5个容器壁均采用陶瓷保温。为防止底板的腐蚀穿孔,也必须对底板施加阴极保护系统。由于罐内空间狭小,为方便阴极保护系统的安装,需选择外加电流阴极保护系统对底板进行保护。施加良好的阴极保护系统以后,可以使底板的电位极化到合理的保护区间,降低底板的腐蚀,延长底板的使用寿命。同时良好和均匀的保护电位,可以防止铁锈的产生,保证热水的质量和品质。在传统的阴极保护工程设计中,大多采用实际测量或经验估计来获得保护电位分布。而近年来,有限元法已被证明是计算阴极保护场中电位、电流密度分布的有效方法。**【前人研究进展】**目前已有部分关于采用有限元法进行腐蚀分析的报道:笔者曾利用有限元法分析钢样阴极保护^[1,2], John W Fu等^[3,4]对腐蚀原电池进行有限元分析,还对蒸汽发生器在化学清洗过程中的腐蚀进行仿真模拟。R. S. Munn等^[5]对有限元法计算阴极保护的方法和算例进行讨论分析。Rolf等^[6]对阴极保护的管线做了有限元分析和计算。上述研究均采用有限元法对腐蚀电化学场进行建模和计算,弥补了传统的经验估算法的精度缺陷,能够给出整个场域内的电位分布,可实现对整体域内的电位预测。**【本研究切入点】**以上只研究了干净的钢表面,并只测量其极化曲线作为边界条件。这会产生较大的计算误差,将严重影响到模拟结果的正确性。本文所研究的对象为热水器底部加强板的阴极保护,不同于普通的阴极保护系统。底部钢板始终处于热水环境中,反复烧开的热水会在钢表面累积大量的水垢。带水垢的钢板表面所测得的边界条件必然不同于常温下情况。为保证数值模拟结果的正确性,不能简单借用之前文献中常温下实验和模拟计算的结果。必须针对热水环境,测量底板在热水中和水垢状态下的边界条件,并利用此特殊环境下的边界条件进行有限元计算分析。**【拟解决的关键问题】**对热水环

境下的有限元模型进行推导和分析,提出热水环境下的边界条件的处理方法和实验测量方法。再基于数学模型和实验条件,通过数值仿真对两种型号即热式热水器在4种不同情况下的电位分布规律进行分析。

1 实验模型及计算方法

1.1 热水器基本物理模型

选择两种型号(1型和2型)热水器,均为立方体,1型热水器内胆尺寸为9 cm×9 cm×9 cm,2型热水器内胆尺寸为18 cm×18 cm×18 cm。热水器内胆的底面为加强钢板,钢板材质为Q235钢,其余5个面为陶瓷材质。在热水器内部施加外加电流阴极保护,辅助阳极材料为线状钛阳极。1型热水器阳极长度为9 cm,2型热水器阳极长度为18 cm,阳极直径忽略不计。阳极平行于底板放置。此热水器中热水的电导率经过测定,平均值为232 μS/cm。热水流速忽略不计。相对于饱和甘汞电极,底板的保护电位需比-850 mV更负,为防止过保护,阳极的电位强制控制在-1000 mV。

1.2 热水器电场的有限元数学模型

考虑到此种热水器是立体对称的,可将三维坐标转化为二维坐标来讨论。假设腐蚀介质(热水)是均匀的。不考虑时间轴,只考虑空间坐标轴,即在某一个时刻认为阴极保护系统达到了瞬时稳定状态。则在平面坐标中,阴极保护系统的电场满足以下的方程^[7~10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial Y^2} = 0, \text{域内}, \\ E = E_0, \text{边界 } \Gamma_1 \text{ 上}, \\ \frac{\partial E}{\partial n} = \frac{i(E)}{\sigma}, \text{边界 } \Gamma_2 \text{ 上}. \end{cases} \quad (1)$$

Γ_1 为第一类边界条件,此类边界条件中的数值一般为常数。在外加电流的阴极保护电场中,辅助阳极表面的电位 E 可看成常数 $E_0 = -1 \text{ V}$ (相对于饱和甘汞电极),即辅助阳极表面可归入为第一类边界条件。 Γ_2 为第二类边界条件, $i(E)$ 为热水环境下底板的极化曲线。钢在阴极保护下,表面将发生极化,表面电位不再是常数,此时必须将电位和电流密

度的关系曲线引入边界条件。

为求解方程(1),选其中任意一个垂直于底部钢板的平面(也可以是两端的陶瓷面)进行分析,此时钢板在此平面中简化成了一条钢条线。将整个热水介质区域及钢条表面进行网格剖分,把以上方程转化成求其演化函数的极小值的数学问题。

$$f(E) = \sum_1^M f^e(E), \tag{2}$$

$$f^e(E) = \frac{1}{2} \iint_{\Delta} [(\frac{\partial E}{\partial X})^2 + (\frac{\partial E}{\partial Y})^2] dXdY +$$

$$\int_{S_2^e} \frac{i(E)}{\sigma} E dS_2^e. \tag{3}$$

e 是剖分后的一个单元单位,没有其它解题含义。将此平面包含的热水介质和 4 条边界线进行剖分,假定共剖分出 M 个单元和 n 个节点。(2)式的最小值需综合考虑所有节点:

$$\sum_1^M \frac{\partial f^e(E)}{\partial E_n} = 0. \tag{4}$$

对于热水介质中部分,(4)式中某一个节点可化为以下形式:

$$\frac{\partial f^e(E)}{\partial E_i} = \frac{\partial}{\partial E_i} \frac{1}{2} \iint_{\Delta} [(\frac{\partial E}{\partial X})^2 + (\frac{\partial E}{\partial Y})^2] dXdY. \tag{5}$$

而对于 1 个钢条线和 3 个陶瓷线的部分,(4)式的推导就比较特殊,将第二类边界条件归并后,可化成如下的形式:

$$\frac{\partial}{\partial E_i} \int_{\Gamma_2^e} \frac{i(E)}{\sigma} E dS_2^e = \frac{A}{\sigma} \int_{\Gamma_2^e} \left[\begin{aligned} & Be^{B(N_i E_i + N_j E_j + N_m E_m)} \\ & (N_i E_i + N_j E_j + N_m E_m) N_i \\ & + e^{B(N_i E_i + N_j E_j + N_m E_m)} N_i \end{aligned} \right] d\Gamma_2^e. \tag{6}$$

综合考虑和归并第一类和第二类边界条件后,将各单元整合归并,可得到一矩阵式的有限元模型:

$$[O] [E] = [B]. \tag{7}$$

1.3 热水器阴极保护电场数值模拟的边界条件

因为热水器的温度在不断变化,不同温度下必然测得不同的极化曲线,即不同温度下会计算预测出不同的电场结果。所以采用最大保守法测量边界条件。试片为 Q235 钢,尺寸为 1 cm×1 cm,试片在 100℃ 热水浴中反复加热和冷却 10 次,每次加热时间为 2 h,冷却时间为 3 d。每次冷却完毕后,更换新鲜水体,以利于形成水垢。所用水为自来水。最后将试片周围用环氧树脂封装,做成工作电极。在加热水浴中,采用动电位扫描法,从 10℃ 开始测量,

至 100℃,每隔 10℃ 测量一次极化曲线。之后对这些极化曲线进行比较,取同样极化电位下电流密度最小的极化曲线,即把极化曲线图上最底部的一条极化曲线作为最终的边界条件。并拟合出以下的边界条件公式:

$$i(E) = 0.457e^{-0.00367E}. \tag{8}$$

将(8)式代入矩阵式进行求解。

1.4 热水器阴极保护电场分类计算

构造出数学模型及得出边界条件后,分别研究和计算两种型号的热水器电场规律。

1) 1 型热水器计算

将 1 型热水器任意一个垂直于底部钢板的平面,进行剖分,部分剖分如图 1 所示。

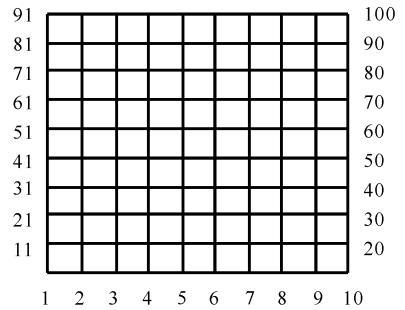


图 1 热水器网格单元编号

Fig. 1 The number of grid unit of water heater

1/10 为钢条,1/91,10/100,91/100 3 条边为陶瓷边。每个网格均为边长为 1 cm 的正方形。计算 1 型热水器在 3 种情况下电位变化规律:第 1 种情况,辅助阳极沿 5/95 这条线远离钢条,求解钢条的电场规律;第 2 种情况,辅助阳极沿 11/20 这条线变化,求解钢条的电场规律;第 3 种情况,辅助阳极由 2 个、3 个、4 个增加时,求解钢条的电场规律。

2) 2 型热水器计算

2 型热水器的单元剖分顺序和剖分网格大小与 1 型相同,按逆时针顺序节点编号为 1/18/307/324。计算点 1~324 电场规律作为第 4 种电场规律。

2 结果与分析

2.1 第 1 种情况下电场规律

当阳极由点 5、点 15、点 25 直到点 95 逐渐远离钢条表面时,即在图 1 中从 5 点开始,平行于陶瓷壁 10/100 线从下向上做直线运动,此时钢表面沿 1/10 方向的电位变化情况如图 2 所示。

从图 2 可看出,在阳极逐渐远离钢条且从下向上的移动过程中,根据阳极位置的不同共生成 10 条钢条的电位曲线。从点 5 到点 95,钢表面电位曲线

逐渐平滑,每条曲线总体电位越来越正,钢板沿 1/10 方向,在 5 cm 处最负的电位尖点逐渐消失。这是因为随着阳极远离钢板,阳极对钢板极化作用逐渐变弱,导致底板电位越来越正。根据电场的手电筒照射原则,当手电筒远离时光圈逐渐变大,光强度变得分散而均匀。同理当阳极远离时,钢条表面电位逐渐均匀,最负的电位尖点逐渐消失。从点 45 开始以后所有的曲线均较平滑,所以阳极在点 45、55、64、75、85、95 均可取得均匀的电场分布。此时阳极距钢条的垂直距离大于等于 4 cm。即大于等于热水器内胆高度的 4/9。

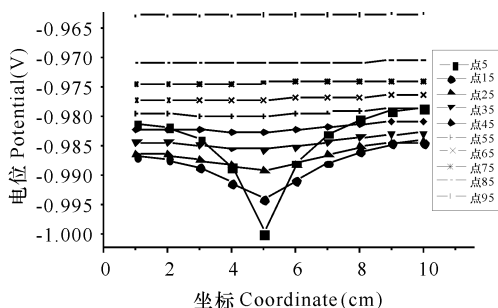


图2 辅助阳极远离钢条时电位变化

Fig. 2 Potential change as anode moving away from steel surface

2.2 第2种情况下电场规律

而当阳极平行于与钢板移动时,如沿点 21、22、23 直到点 30 平行移动时,钢条沿 1/10 方向电位分布曲线则如图 3 所示。

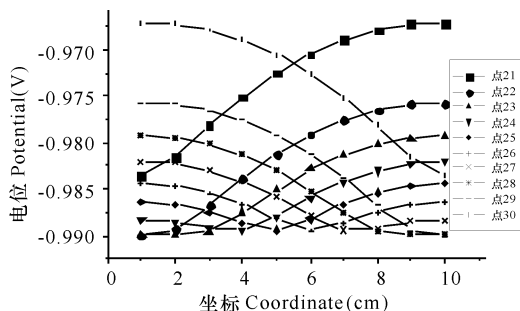


图3 阳极沿与钢条平行线移动时的电位变化

Fig. 3 Potential change as anode moving along steel

从图 3 可以看出,从点 21 到 30,随着阳极从左到右移动,在钢条表面共产生 10 条不同的电位曲线。点 21~25 的曲线遵从电位逐渐变负的趋势,点 26~30 的曲线遵从电位逐渐变正的趋势,而且两组曲线呈对称分布。在阳极平行于钢条移动时,阳极对钢条的极化会随阳极位置不同而变化。当阳极在点 21~25,即阳极在钢条左半区时,对左半区极化影响大,从图 3 的点 21~25 5 条曲线上看出,钢条左半区(5.5 cm 之前)电位普遍较负,右半区电位则

较正。而当阳极在点 26~30 时,即阳极在钢条右半区时,对右半区极化影响大,从图 3 的点 26~30 5 条曲线上看出,钢条右半区电位较负,左半区电位较正。又因为在阳极移动过程中左半区的物理模型与右半区完全对称,所以产生的电位曲线也呈对称分布。相对而言,阳极在点 25、26 整个钢条表面电位曲线较平滑,而阳极在其余 8 个点时,电位分布很不均匀。此时阳极在距离中间点 0.5 cm 的范围内。即热水器内胆长度的 11/18 到 13/18 的范围内。

2.3 第3种情况下电场规律

当阳极数量由 2 个、3 个、4 个增加时,4 个阳极分别在点 25、28、30 和 78。通过计算给出 1/10/100/91 面(底面面向观察者最近的为点 91,并按 1/10/100/91 逆时针顺序排列)及钢条 1/10 线电位变化情况(图 4)。

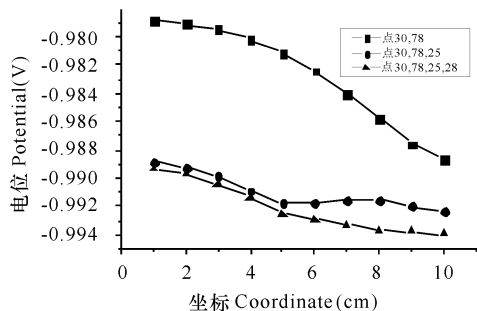


图4 阳极数量增加时的电位变化

Fig. 4 Potential change as increasing anode number

根据阴极保护原理,较多的阳极数量可以获得更加均匀的电位分布,由图 4 看出钢表面电位随阳极个数的增加逐渐变负,且分布趋于均匀,图 5、6、7 反映出阳极由 2 个、3 个、4 个数量增加时,1/10/100/91 面上电位分布趋于均匀。同时从图 5~7 可以看出 1/10/100/91 面上电位变的越来越负,这是

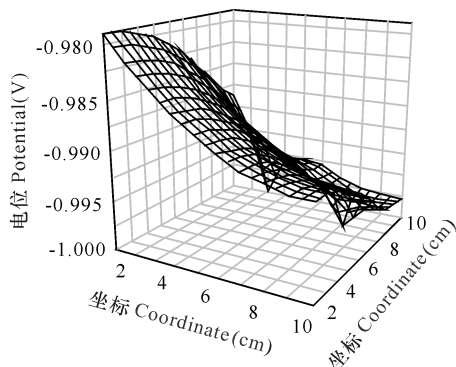


图5 2个阳极时 1/10/100/91 面电位分布

Fig. 5 Potential distribution of two anodes

由于阳极作用叠加导致极化加强的结果。图5~7中的电位负尖点即为阳极位置处强制电位($E_0 = -1V$)。从图4看出,只采用2个阳极时,最正的电位曲线也在 $-0.97V$,已经达到标准要求,没有必要用3个或者4个阳极。

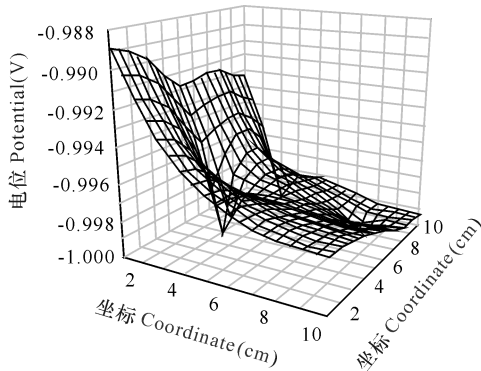


图6 3个阳极时1/10/100/91面电位分布

Fig. 6 Potential distribution of three anodes

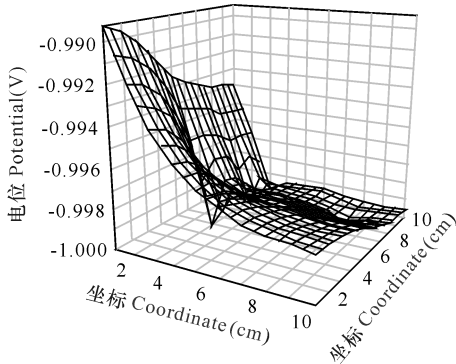


图7 4个阳极时1/10/100/91面电位分布

Fig. 7 Potential distribution of four anodes

2.4 第4种情况下电场规律

2型热水器,当阳极位置在点54时,将整个1/18/307/324电位按照点1~324直线绘出(图8)。

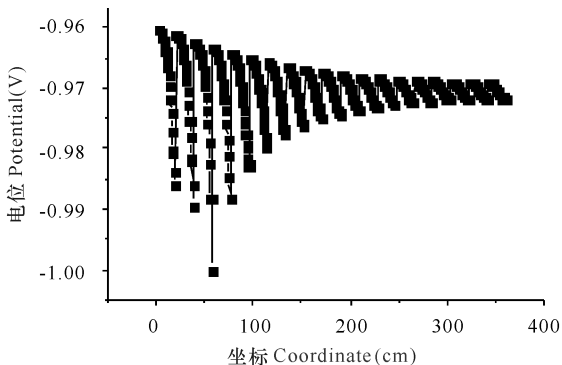


图8 自衰减图

Fig. 8 Automatic attenuation phenomenon

由图8可以看出,越远离钢条表面电位分布越均匀,即同样间隔内电位变化越小(称为自衰减现象)。这是由于离钢表面较远的地方受钢极化影响

小,电位变化小,靠近钢表面部分由于钢极化造成电位变化大。再根据自衰减曲线可判断两端的电位分布。

3 结论

利用有限元法对两种型号(1型和2型)即热式热水器底部加强板在不同辅助阳极排布方式下的电位分布规律进行分析,发现以下规律:

1)1型号的热水器,在与钢条垂直方向,当辅助阳极在离底板4cm高度时,即内胆高度的4/9时,底板电位开始达到均匀分布。

2)1型号的热水器,在与钢条平行方向,当阳极在距离中间点0.5cm范围内,即热水器内胆长度的11/18到13/18的范围内,底板左右两端电位分布较均匀。

3)1型号的热水器,随着辅助阳极数量的增加,底板表面的电位分布更为均匀,但对底板的电位数值变负未有太大的影响,因此采用2个辅助阳极较经济。

4)2型号的热水器,将底板的平面空间分层并折算成直线,以辅助阳极所在的位置为中心,阳极两边均出现电位自衰减现象,可根据此衰减曲线,通过调节辅助阳极的电位,调节两个末端的最正电位值达到保护要求。

参考文献:

- [1] 王在峰,孙虎元,孙立娟.海水中A3钢样阴极保护电化场的二维有限元计算[J].海洋科学,2006,30(7):38-42.
Wang Z F, Sun H Y, Sun L J. The application of 2-D finite element method in calculating cathodic protection fields of steel in marine environment[J]. Marine Sciences, 2006, 30(7): 38-42.
- [2] 孙虎元,王在峰,孙立娟.海洋用A3钢阴极保护电场的三维有限元建模[J].海洋科学,2005,29(7):50-54.
Sun H Y, Wang Z F, Sun L J. Simulation of 3D electrical protection field of A3 steel in ocean. [J]. Marine Sciences, 2005, 29(7): 50-54.
- [3] John W F, Siu-Kee C. Finite element determination of galvanic corrosion during chemical cleaning of steam generator[J]. Materials Performance, 1986(3):33-40.
- [4] John W F. A finite element analysis of corrosion cells [J]. Corrosion, 1982, 38(5): 295-296.

(下转第201页 Continue on page 201)

聚乙烯渔网材料上的柔韧性和附着力表现均较好的基体树脂。扫描电镜表征可作为聚乙烯类渔网防污涂料基体树脂筛选、性能评价及配方设计的有力工具。

参考文献:

- [1] Braithwaite R A, McEvoy L A. Marine biofouling on fish farms and its remediation[J]. *Advances in Marine Biology*, 2004, 47: 215-252.
- [2] Fitridge I, Dempster T, Guenther J, et al. The impact and control of biofouling in marine aquaculture: A review[J]. *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 2012, 28(7): 649-669.
- [3] 黄立, 严涛, 吴民, 等. 网衣防污涂料中增塑剂对附着力的影响[J]. *中国涂料*, 2014, 29(4): 63-65.
Huang L, Yan T, Wu M, et al. Influence of plasticizers on adhesion of antifouling coatings for fish-cage netting[J]. *China Coatings*, 2014, 29(4): 63-65.
- [4] Fay F, Linossier I, Langlois V, et al. SEM and EDX analysis: Two powerful techniques for the study of antifouling paints[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2005, 54(3): 216-223.
- [5] 刘苏静, 马星, 栾永胜, 等. KH-570 改性纳米 TiO₂ 复合丙烯酸防污涂料性能研究[J]. *涂料工业*, 2015, 45(7): 14-18.
Liu S J, Ma X, Luan Y S, et al. Property of acrylic composite antifouling coatings based on nano-TiO₂ modified with KH-570[J]. *Paint & Coatings Industry*,

2015, 45(7): 14-18.

- [6] Braithwaite R A, Carrascosa M C C, McEvoy L A. Biofouling of salmon cage netting and the efficacy of a typical copper-based antifoulant[J]. *Aquaculture*, 2007, 262(2): 219-226.
- [7] Bellotti N, del Amo B, Romagnoli R. Assessment of tannin antifouling coatings by scanning electron microscopy[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77(9): 1400-1407.
- [8] Pérez M, Sánchez M, Stupak M, et al. Antifouling activity of celastroids isolated from *Maytenus* species, natural and sustainable alternatives for marine coatings[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(18): 7655-7659.
- [9] Pérez M, García M, Stupak M, et al. Synthesis and characterization of ferric sorbate and aluminum sorbate as antifouling pigments for marine paints[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(9): 3570-3577.
- [10] 李旭朝, 肖玲, 于雪艳, 等. 深水网箱用水性防污涂料的研制[J]. *特种涂料与涂装专刊*, 2007, 10(9): 34-39.
Li X Z, Xiao L, Yu X Y, et al. Development of waterborne anti-fouling coatings for offshore cages[J]. *Monograph on Special Paint and Coatings*, 2007, 10(9): 34-39.

(责任编辑:尹 闯)

(上接第 196 页 Continue from page 196)

- [5] Munn R S, Devereux O F. Numerical modeling and solution of galvanic corrosion systems: Part 2: Finite element formulation and descriptive example[J]. *Corrosion*, 1991, 47(8): 617-622.
- [6] Rolf G Kasper, Martin Gapril. Electro-galvanic finite element analysis of partially protected marine structures[J]. *Corrosion*, 1983, 39(5): 181-188.
- [7] Fleck R N. MSc Thesis. Numerical Evaluation of Current Distribution in Electrical Systems[D]. California: University of California, 1964.
- [8] Sale J P. The Evaluation of Anode Configuration for the Internal Cathodic Protection of Pipes[C]. Houston:

Conference on Corrosion and Protection of Pipes and Pipelines, 1990.

- [9] Strommen R D. Computer Modelling of Cathodic Protection Systems Utilised in CP Monitoring[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 1983.
- [10] Doig P, Flewitt P E J. A finite difference numerical analysis of galvanic corrosion[J]. *J of Electrochem Soc*, 1979, 126(12): 2057-2063.

(责任编辑:尹 闯)