

温度对舰船阴极保护和腐蚀静电场的影响*

徐庆林¹, 王向军¹, 张建春¹, 刘春阳¹, 苗海²

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 舰船试验和训练中心, 湖北 武汉 430033)

摘要:海水中氧溶解量和海水电导率是影响海水腐蚀性能的重要因素,而这两个因素主要取决于海水的盐度和温度。采用边界元法建立舰船外加电流阴极保护和腐蚀静电场模型,研究不同海水温度下氧溶解量、电导率及氧的扩散系数对舰船腐蚀防腐静电场的影响。结果表明,腐蚀电场峰值随着温度的升高而减小,当两对阳极输出电流分别为13.5 A和8 A时,船体和舵在低温处于过保护状态而在高温处于欠保护状态,螺旋桨和轴在不同温度下均能得到较好的保护。

关键词:海水温度;舰船;阴极保护;表面电位;腐蚀电场;边界元法

中图分类号:TM15 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)04-182-08

Influence of temperature on the cathodic protection and corrosion electrostatic field of ships

XU Qinglin¹, WANG Xiangjun¹, ZHANG Jianchun¹, LIU Chunyang¹, MIAO Hai²

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Center of Ship Test and Training, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Oxygen concentration and seawater conductivity are important factors affecting the corrosion behavior in seawater, and these two factors mainly depend on salinity and temperature of seawater. The model of impressed current cathodic protection and corrosion electrostatic field was established by using the boundary element method. The effects of oxygen concentration, seawater conductivity and diffusion coefficient of oxygen on the corrosion related electrostatic field of the ship at different seawater temperatures were studied. The results show that the peak value of the corrosion electrostatic field decreases with the increase of temperature. When the output current of the two pairs of anodes are 13.5 A and 8 A, respectively, the hull and the rudder are in over-protection at low temperatures and under-protection at high temperatures accordingly, but the propeller and the shaft get perfect protection at all temperatures.

Keywords: seawater temperature; ship; cathodic protection; surface potential; corrosion electric field; boundary element method

海水中强氧化性去极化剂氧气的存在及海水的强导电性,使得海洋工程结构受到严重的腐蚀^[1]。阴极保护和有机涂层相结合的方法是防止金属结构件海水腐蚀的有效手段^[2-3]。不合理的阴极保护设计会使得被保护体欠保护而未能实现防腐的目的,或者使得被保护体过保护而发生氢脆断裂^[4-6]。舰船的水下信号(主要包括声信号、磁场信号和电场信号)对其生存能力造成了极大的威胁^[7]。自第二次世界大战以来,声信号和磁场信号作为水下信号源被广泛地运用到海军作战中^[8],而腐蚀防腐产生的电场信号在水下探测、定位领域还没有广泛的运用。然而,随着水下电场探测技术的不断发展,腐蚀电场已成为新型水雷武器对舰船攻击

的信号源^[9]。为了提高海军舰艇的生存力,必须对舰船腐蚀防腐产生的电场进行抑制或者消除,而对这类电场在水下分布特征的分析,是开展上述研究的基础。

缩比模型法^[10](Physical Scale Modeling, PSM)和边界元法^[11](Boundary Element Method, BEM)是研究舰船阴极保护设计和水下电场分布的主要方法。基于BEM的舰船阴极保护研究主要包括以下内容:外加电流阴极保护(Impressed Current Cathodic Protection, ICCP)的阳极数量、位置和输出电流大小优化;牺牲阳极阴极保护(Sacrificial-Anode Cathodic Protection, SACP)的阳极数量和位置。国外早在20世纪80年代就开始将BEM应用于海洋工程结构的腐蚀及阴极保护

* 收稿日期:2018-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41476153)

作者简介:徐庆林(1991—),男,湖南永州人,博士研究生,E-mail: csuxql@163.com;

王向军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: wxjnue@hotmail.com

系统优化等问题^[12-13]的研究。国内 Wu 等^[14]利用 BEM 优化 ICCP 辅助阳极位置和输出电流大小来实现减小舰船腐蚀电场的目的,海军工程大学的陈聪^[15]、毛伟^[16]利用电偶极子分别建立了舰船腐蚀静电场和轴频电场模型。

海水温度随空间、时间的差异在一定范围内变化,而海水电导率、氧溶解量及氧扩散系数等影响腐蚀速度的因素均会随温度的变化而改变,因此,温度对腐蚀电场的影响是比较复杂的。目前,国内外关于海水温度对舰船腐蚀电场的研究鲜见报道。

1 腐蚀静电场建模

1.1 模型建立

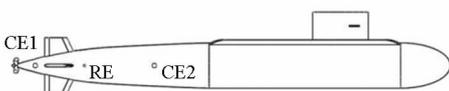
利用 Solidworks 2016 建立潜艇空间直角坐标系下的几何模型,以船艏向船艉为 X 轴正方向,龙骨向左舷为 Y 轴正方向,竖直向上为 Z 轴正方向,两对 ICCP 辅助阳极 (Counter Electrode, CE) 和一对参考电极 (Reference Electrode, RE) 对称分布于潜艇左右舷两侧,如图 1(a) 所示,潜艇外围建立 $300\text{ m} \times 200\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的长方体代表无限海水域,采用 COMSOL 仿真软件对潜艇表面和海水域进行网格剖分,潜艇剖分结果如图 1(b) 所示。设置三个插值函数 $\sigma(T)$ 、 $D_{\text{O}_2}(T)$ 和 $C_{\text{O}_2}(T)$ 来分析当温度参数化扫描时,电导率、氧扩散系数和氧溶解量的变化关系(温度分别取 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30\text{ }^\circ\text{C}$),最后使用电化学模块下的二次电流密度接口求解拉普拉斯方程(1)及静电场基本方程(2)得到不同温度下的潜艇表面电位及水下电场分布,式(3)为欧姆定律。

$$\nabla^2 \phi_1 = 0 \quad (1)$$

$$E = -\nabla \phi_1 \quad (2)$$

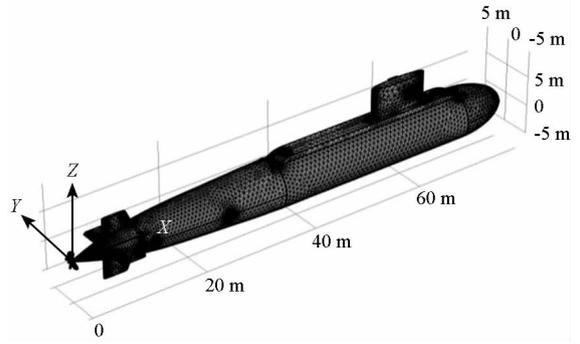
$$i_1 = \sigma_1 E \quad (3)$$

其中: ϕ_1 为电解质电位, V; i_1 为电解质电流密度, A/m^2 ; σ_1 为海水电导率, S/m ; E 为水下电场, V/m 。结合实际情况,将螺旋桨和轴视为未涂层而将船体及舵视为有机涂层包覆,模型中螺旋桨材料采用镍铝青铜 (Nickel Aluminum Bronze, NAB) 合金,轴采用 625 不锈钢合金,两种材料的电化学参数^[17]如表 1 所示。



(a) 辅助阳极和参考电极位置示意

(a) Position of counter electrode and reference electrode



(b) 潜艇边界元模型

(b) Boundary element model of submarine

图 1 潜艇几何模型及网格剖分

Fig. 1 Geometric model and meshing of submarine

表 1 NAB 和 625 合金电化学参数

Tab. 1 Electrochemical parameters of NAB and 625 alloy

符号	参数值	单位	描述
E_{eq_NAB}	-0.31	V	NAB 平衡电位
i_{0_NAB}	0.15	A/m^2	NAB 交换电流密度
$\beta_{_NAB}$	0.78		NAB 阳极传递系数
$\alpha_{_NAB}$	0.44		NAB 阴极传递系数
E_{eq_625}	-0.18	V	625 合金平衡电位
i_{0_625}	1.3×10^{-3}	A/m^2	625 合金交换电流密度
$\beta_{_625}$	0.45		625 合金阳极传递系数
$\alpha_{_625}$	0.57		625 合金阴极传递系数
$E_{eq_O_2}$	0.78	V	氧还原平衡电位
$i_{0_O_2}$	7.7×10^{-7}	A/m^2	氧交换电流密度
$A_{_O_2}$	-0.18		氧阴极塔菲尔斜率

1.2 边界条件

边界元法利用以下 4 个边界条件求解拉普拉斯方程^[18]:

Γ_1 表面:

$$\phi = \phi_0 \quad (4)$$

Γ_2 表面:

$$I = I_0 \quad (5)$$

Γ_{3a} 表面:

$$i_a = f_a(\phi_a) \quad (6)$$

Γ_{3c} 表面:

$$i_c = f_c(\phi_c) \quad (7)$$

海水域的边界 Γ 由 Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_{3a} 和 Γ_{3c} 四个边界构成, ϕ 和 I 分别表示海水电位和电流, ϕ_0 和 I_0 分别表示海水初始电位和初始电流, $f_a(\phi_a)$ 和 $f_c(\phi_c)$ 分别表示阳极极化曲线和阴极极化曲线,

i_a 和 i_c 分别为阳极和阴极的电流密度。将阳极设为恒电流边界, 两对阳极的输出电流分别为 13.5 A 和 8 A; 将螺旋桨和轴(阴极)设为恒电位边界, 恒电位仪的电位为 -0.85 V; 船体和舵涂覆有机涂层而处于绝缘状态, 由于无限远处的腐蚀电流密度为零, 故将海水边界也视为绝缘边界。海水电导率和氧溶解量是影响腐蚀电场的两个重要因素, 而这两个因素主要由海水温度和盐度决定。表 2 给出了盐度为 35‰ 的情况下, 电导率和氧溶解量与温度的关系^[19-20]。

表 2 盐度为 35‰ 时, 电导率和氧溶解量与温度的关系

Tab. 2 Relationship between conductivity or oxygen concentration and temperature when the salinity is 35‰

温度/℃	氧溶解量/(mL/L)	电导率/(S/m)
0	8.04	2.91
5	7.19	3.34
10	6.41	3.81
15	5.83	4.29
20	5.35	4.79
25	4.86	5.30
30	4.50	5.83

对于很稀的电解质溶液(溶质 A 和溶剂 B), 其扩散系数常用 Wilke-Chang 公式估算:

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-15} \times \frac{(\phi_B M_B)^{0.5} \cdot T}{\mu_B V_A^{0.6}} \quad (8)$$

式中: D_{AB} 为 A 在 B 中的扩散系数, m^2/s ; ϕ_B 为溶剂 B 的缔合参数($\phi_{\text{H}_2\text{O}} = 2.6$); M_B 为溶剂 B 的摩尔质量, g/mol ; T 为溶液温度, K ; μ_B 为溶剂 B 的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; V_A 为溶质 A 在正常沸点下的分子体积, 单位为 cm^3/mol , $V_A = 0.285 \times V_C^{1.048}$, $V_{\text{O}_2} = 73.4 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 。由上述分析可知, 氧在海水中的扩散系数与温度成正比, 即:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (9)$$

其中, D_2 和 D_1 分别为 T_2 和 T_1 温度下氧的扩散系数。

1.3 表面电位和 underwater 电场

假设海水深度为 100 m, 潜艇下潜深度为 50 m, 通过仿真得到了不同温度下(电导率、氧溶解量、氧扩散系数随之改变)潜艇表面电位和腐蚀电场分布。为了分析温度对腐蚀电场的影响, 选取 $Z = -16$ m 的平面进行观测。为了更直观地分析比较不同温度下腐蚀电场的分布, 在潜艇下方选取一条路径进行观测, 对其电场三分量和

总电场强度进行分析。由于潜艇关于 XOZ 平面对称且两对阳极均对称分布于左右舷, 所以腐蚀电流场在龙骨上产生的横向(Y 方向)电场分量 E_y 为 0, 故选择以点 $(-100 \text{ m}, 16 \text{ m}, -16 \text{ m})$ 和点 $(150 \text{ m}, 16 \text{ m}, -16 \text{ m})$ 为端点的路径作为观测对象。

2 结果与讨论

2.1 表面电位分布

船体表面电位是评价阴极保护效果的重要参数, 不同金属材料具有不同的最佳保护电位范围。本文求解得到了不同温度下(0 °C、 5 °C、 10 °C、 15 °C、 20 °C、 25 °C 和 30 °C)潜艇表面电位和螺旋桨表面电位的分布, 0 °C、 10 °C、 20 °C 和 30 °C 的潜艇表面电位分布如图 2 所示。由图可知, 在不同的温度下, 潜艇表面电位的最大值基本保持在 -0.41 V 左右, 且最大值均出现在螺旋桨和轴附近。表面电位的最小值出现在 ICCP 的辅助阳极处, 表面电位的最小值随着温度的改变而发生变化, 海水温度为 0 °C、 10 °C、 20 °C 和 30 °C 时, 潜艇表面电位的最小值分别为 -1.83 V、 -1.51 V、 -1.3 V 和 -1.15 V。电位随着温度的升高而增大, 但增加的幅度减小, 且随着温度的升高, 阳极附近电位较低的区域范围减小。除了螺旋桨、轴和阳极外, 潜艇其他部位的表面电位分布都很均匀, 但电位值随着温度的变化而发生较大的改变。表 3 列出了 7 个不同温度下参考电极处的表面电位值(参比 Ag/AgCl 电极), 船体电位随着温度升高而增大。邢少华等^[21] 提出高强钢($500 \sim 900$ MPa)的最佳保护电位范围为: $-0.89 \sim -0.79$ V, 因此, 当两对阳极的输出电流分别为 13.5 A 和 8 A 时, 潜艇在 15 °C、 20 °C、 25 °C 具有很好的保护效果; 在 0 °C、 5 °C、 10 °C 处于过保护状态, 船体结构存在氢脆断裂的风险, 应减小阳极输出电流以实现合理的保护; 在 30 °C 处于欠保护状态, 船体存在腐蚀的可能, 应增大阳极的输出电流以实现最佳保护。

当螺旋桨在海水中高速转动时, 海水与螺旋桨的相互作用会产生大量气泡, 由于海水对螺旋桨的冲刷作用及气泡的存在, 螺旋桨可能会产生严重的空泡腐蚀。螺旋桨点蚀会在表面形成大量的小凹坑, 小凹坑不仅会影响螺旋桨的正常运行, 而且在螺旋桨转动的时候会产生明显的噪音, 严重影响潜艇的隐身性能, 因此, 对于螺旋桨的防腐应极度关注。图 3 给出了螺旋桨和轴的表面电位分布, 由图可知, 螺旋桨和轴的表面电位在不同温

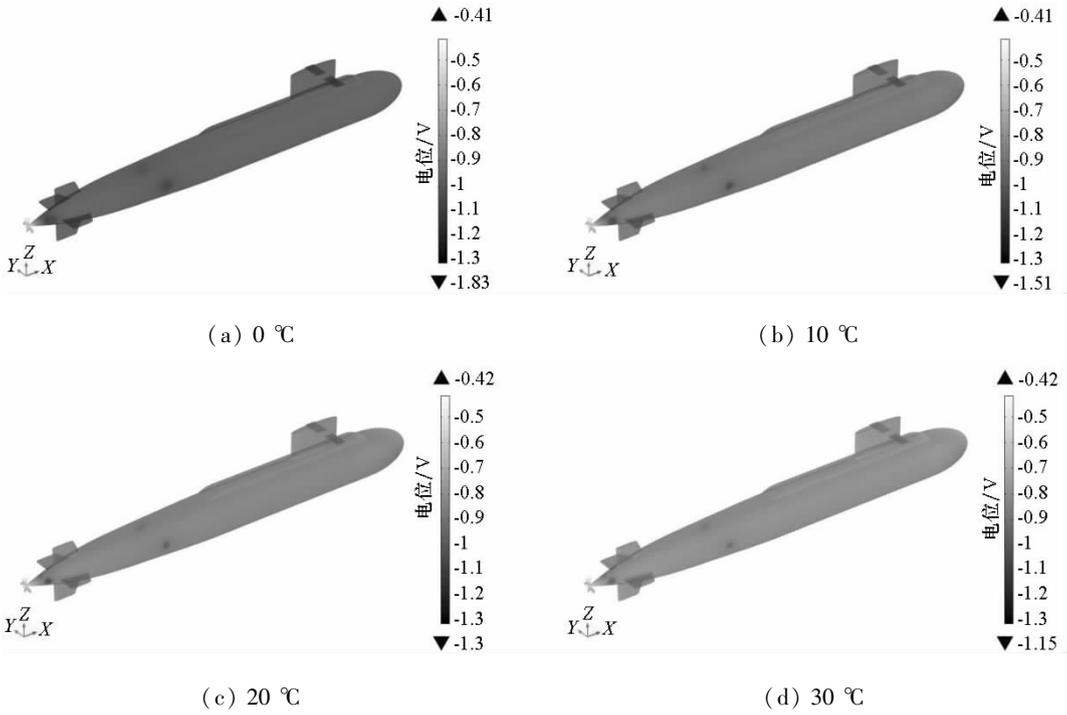


图2 不同温度下潜艇表面电位

Fig. 2 Potential of submarine at different temperatures

表3 潜艇在不同温度下参考电极处电位

Tab. 3 Potential of submarine at reference electrode under different temperatures

温度/°C	0	5	10	15	20	25	30
电位/V	-1.06	-0.98	-0.92	-0.87	-0.83	-0.80	-0.77

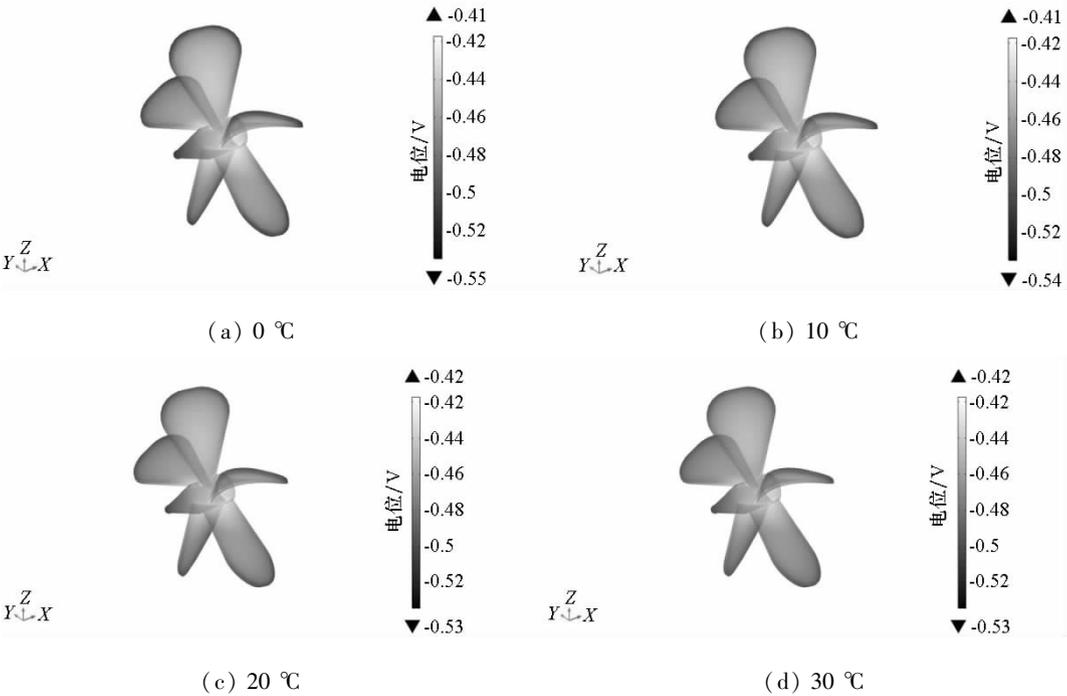


图3 不同温度下螺旋桨表面电位

Fig. 3 Potential of propeller at different temperatures

度下都具有较均匀的分布,都在 $-0.55 \sim -0.41 \text{ V}$ 范围内。电位最大值出现在螺旋桨和轴的连接处,这是因为螺旋桨和轴属于不同的金属材料,在电解质海水溶液中接触形成了电偶腐蚀。电位最小值出现在远离连接处的螺旋桨叶片边缘及轴尾部,但电位波动范围较小。根据 Hack^[17]测得的 NAB 合金及 625 不锈钢合金的极化曲线可知, NAB 合金的保护电位在 $-0.60 \sim -0.45 \text{ V}$ 之间,而 625 不锈钢合金的保护电位在 $-0.55 \sim -0.40 \text{ V}$ 之间。因此,当两对 ICCP 阳极的输出电流分别为 13.5 A 和 8 A 时,螺旋桨和轴在不同的温度下均能得到较好的保护。

2.2 电场分布

温度为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,潜艇以下 16 m 平面的电场三分量及总电场强度分布如图 4 所示。由图可知,电场三分量和总电场强度在不同温度下的面分布具有相同的分布特征,只是幅值随着温度的改变而有所变化。下面以 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的电场面分

布为例分析腐蚀电场的分布特征。电场三分量及总电场强度在艇体附近均有较大变化, X 分量关于 $Y=0$ 平面对称,最小值出现在阳极附近,在原点(螺旋桨位置)下方电场由正变为负,在阳极附近的前后两侧均出现电场分量的正峰值。 Y 分量关于 $Y=0$ 平面反对称分布,在左舷和右舷各出现一次最大值和一次最小值,正峰值和负峰值的大小基本相等。 Z 分量关于 $Y=0$ 平面对称,在纵向上有一个正峰值和一个负峰值,最大值出现在螺旋桨附近而最小值出现在艇体舭部。总电场强度也关于 $Y=0$ 平面对称,且其幅值出现在螺旋桨附近区域。综上所述,螺旋桨和 ICCP 阳极附近区域的电场值均会发生较大的波动,这是因为:一方面,螺旋桨和轴发生异种金属之间的电偶腐蚀;另一方面,由于船体和舵涂覆有机涂层而处于绝缘状态,阳极的输出电流全部通过海水流向螺旋桨和轴,较强的腐蚀电流和外加电流导致了电场的剧烈波动。

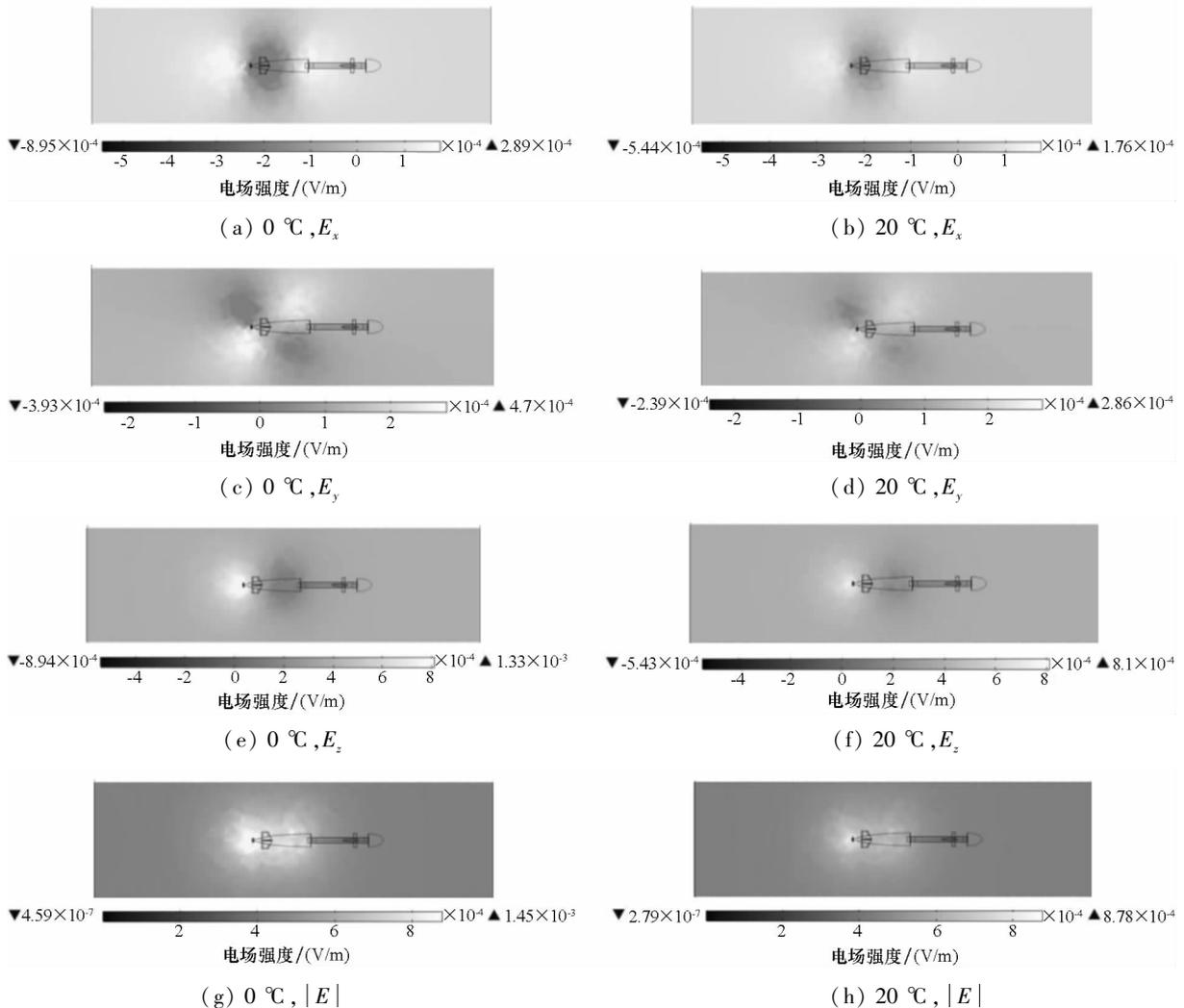


图 4 $Z = -16 \text{ m}$ 平面电场三分量及总电场强度分布

Fig. 4 Three-component electric field and total electric field intensity distribution at $Z = -16 \text{ m}$ plane

为了更直观地分析电场分布,对水下某路径的电场三分量及总电场强度进行观测,起点为(-100 m, 16 m, -16 m),终点为(150 m, 16 m, -16 m),其电场分布如图5所示。由图可知,不同温度下的电场三分量及总电场强度分布规律基本一致, E_x 在 $X = -15$ m和 $X = 37.5$ m附近有正峰值,而在 $X = 12.5$ m附近有负峰值; E_y 在 $X = -10$ m附近有负峰值而在 $X = 27.5$ m附近有正峰值; E_z 在 $X = -10$ m附近有正峰值而在 $X = 25$ m附近有负峰值; $|E|$ 的峰值出现在 $X = 20$ m附近。电场三分量及总电场强度幅值均随着温度升高而有所减小,不同温度下总电场强度幅值如表4所示。

2.3 温度对腐蚀电场影响的讨论

海水温度对舰船腐蚀电场的影响是比较复杂的,当温度变化时,电极反应速度、海水电导率和氧溶解量等环境因素都会随之改变,且温度变化会影响保护性钙质水垢的形成。由于吸氧腐蚀速度主要是由氧扩散的浓差极化步骤控制的,所以本文考虑三个主要因素(海水电导率、氧溶解量及氧扩散系数)随温度变化时对腐蚀电场的影响,对三个因素的讨论分别如下:

1) 电导率的影响:由表2知,当温度升高时,海水电导率增大,在船体电位差保持不变的情况下,海水电流密度增大。由于电导率增大的幅度大于电流密度增大的幅度,由式(3)可知,电场峰

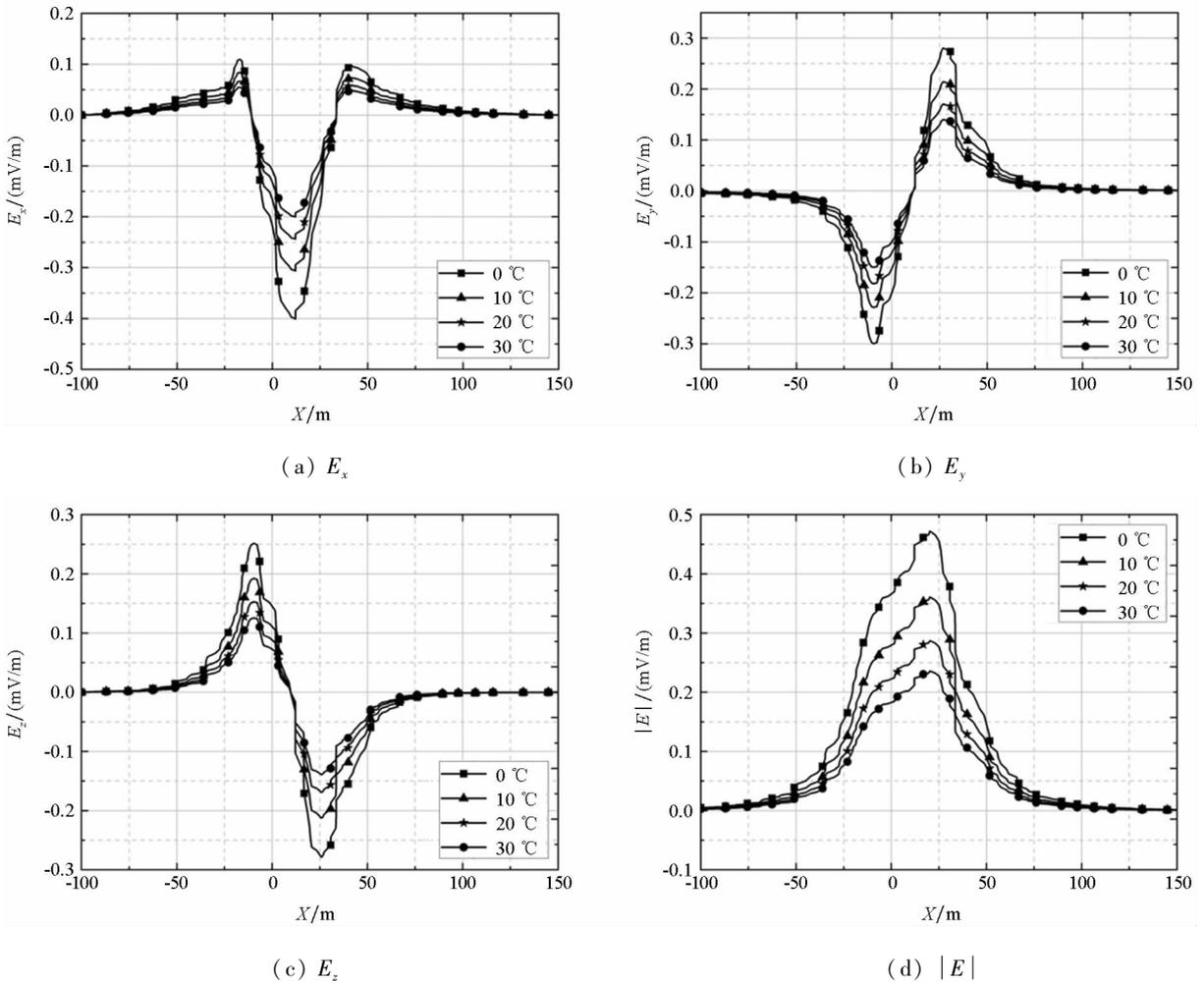


图5 X方向电场三分量及总强度大小

Fig. 5 Three-component and total intensity of electric field in X-direction

表4 不同温度下电场强度峰值

Tab. 4 Peak of electric field strength at different temperatures

温度/°C	0	5	10	15	20	25	30
$ E $ 幅值/(mV/m)	0.471	0.405	0.355	0.316	0.283	0.255	0.235

值减小。Schaefer 等^[22]的研究同样说明了腐蚀电场峰值随着海水电导率的增大而减小的结论。

2) 氧溶解量的影响: 由表 2 知, 当温度升高时, 氧溶解量降低。氧还原的极限扩散电流密度为:

$$i_{lim} = nFD_{O_2} \frac{C_{O_2}}{l} \quad (10)$$

式中: n 为阴极反应电子数; F 为法拉第常数, C/mol ; D_{O_2} 为氧在海水中的扩散系数, m^2/s ; C_{O_2} 为海水中氧的溶解量, mL/L ; l 为电极表面氧扩散层厚度, m 。所以, 氧溶解量降低会使得腐蚀电场峰值减小。Kim 等^[23]的研究也说明了腐蚀电场峰值随着海水中氧溶解量的降低而减小。

3) 氧扩散系数的影响: 由式(10)可知, 氧扩散系数也会影响腐蚀电场峰值, 但由式(9)可知, 当温度在所研究的温度范围内变化时, 氧扩散系数的变化不大, 故可忽略扩散系数的影响。

综上三个因素分析可知, 腐蚀电场峰值随着温度的升高而减小, 这与本文的仿真结果是一致的。

3 结论

利用边界元法建立潜艇腐蚀电场模型, 分析温度对潜艇表面电位和水下电场分布的影响, 主要结论如下:

1) 当两对阳极的输出电流分别为 13.5 A 和 8 A 时, 船体和舵在 15 °C、20 °C、25 °C 具有很好的保护效果, 在 0 °C、5 °C、10 °C 处于过保护状态, 而在 30 °C 处于欠保护状态, 螺旋桨和轴在不同的温度下均能得到较好的保护;

2) 当温度升高时, 海水电导率增大导致电场峰值减小, 氧溶解量降低导致电场峰值减小, 而氧扩散系数变化较小, 可忽略其对电场峰值的影响, 故电场峰值会随着温度的升高而减小;

3) 电场三分量和总电场强度在不同温度下具有相同的分布特征, 电场在螺旋桨和阳极附近有较大的波动。

参考文献 (References)

[1] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.
WEI Baoming. Theory and application of metal corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984. (in Chinese)

[2] 许立坤, 马力, 邢少华, 等. 海洋工程阴极保护技术发展评述[J]. 中国材料进展, 2014, 33(2): 106-113.
XU Likun, MA Li, XING Shaohua, et al. Review on cathodic protection for marine structures [J]. Materials China, 2014, 33(2): 106-113. (in Chinese)

[3] Huber T, Wang Y. Effect of propeller coating on cathodic protection current demand: sea trial and modeling studies[J]. Corrosion, 2012, 68(5): 441-448.

[4] Diaz E S, Adey R. Optimising the location of anodes in cathodic protection systems to smooth potential distribution[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(9): 591-598.

[5] Xing S H, Li Y, Song H Q, et al. Optimization the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 144-150.

[6] Abotalebi O, Kermanpur A, Shishesaz M R, et al. Optimizing the electrode position in sacrificial anode cathodic protection systems using boundary element method [J]. Corrosion Science, 2010, 52(3): 678-687.

[7] Holmes J J. Past, present, and future of underwater sensor arrays to measure the electromagnetic field signatures of naval vessels [J]. Marine Technology Society Journal, 2015, 49(6): 123-133.

[8] Schaefer D, Doose J, Rennings A, et al. Numerical analysis of propeller-induced low-frequency modulations in underwater electric potential signatures of naval vessels in the context of corrosion protection systems [C]//Proceedings of COMSOL Conference, 2009: 1-8.

[9] 李松, 石敏, 栾经德, 等. 舰船轴频电场信号特征提取与检测方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 220-224.
LI Song, SHI Min, LUAN Jingde, et al. The feature extraction and detection for shaft-rate electric field of a ship[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(2): 220-224. (in Chinese)

[10] Ditchfield R W, Mcgrath J N, Tighe-Ford D J. Theoretical validation of the physical scale modelling of the electrical potential characteristics of marine impressed current cathodic protection[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1995, 25(1): 54-60.

[11] Kim Y S, Ko S J, Lee S, et al. Analysis of underwater electromagnetic field reduction by mixed-type cathodic protection using the boundary element method[J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2017, 55(8): 591-599.

[12] Santana-Diaz E, Adey R. Computer simulation of the interference between a ship and docks cathodic protection systems[C]//Simulation of Electrochemical Processes, 2014: 3-14.

[13] Wang Y, Karisallen K J. Comparison of impressed current cathodic protection numerical modeling results with physical scale modeling data [J]. CORROSION, 2010, 66(10): 105001-105001-15.

[14] Wu J H, Xing S H, Liang C H, et al. The influence of electrode position and output current on the corrosion related electro-magnetic field of ship[J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(10): 902-909.

[15] 陈聪. 舰船电磁场的模型研究和深度换算[D]. 武汉: 海军工程大学, 2008.
CHEN Cong. Research on the modeling and the extrapolation of electromagnetic field of a ship [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2008. (in Chinese)

[16] 毛伟. 浅海环境下运动舰船轴频电磁场建模方法及传播规律研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2009.
MAO Wei. Research on modeling method of the moving ship SREM field and its propagation in shallow sea[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2009. (in Chinese)

- [17] Hack H P. Atlas of polarization diagrams for naval materials in seawater, CARDIVNSWC - TR - 61-94/44 [R]. Naval Surface Warfare Center, 1995.
- [18] Lan Z G, Wang X T, Hou B R, et al. Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2012, 36(5): 903-906.
- [19] 夏兰廷, 黄桂桥, 张三平. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
XIA Lanting, HUANG Guiqiao, ZHANG Sanping. Marine corrosion and protection of metallic materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [20] 王向军, 嵇斗. 舰船电场防护原理[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2016.
WANG Xiangjun, JI Dou. Electric field elimination principle of ship [M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2016. (in Chinese)
- [21] 邢少华, 李焰, 马力, 等. 深海工程装备阴极保护技术进展[J]. *装备环境工程*, 2015, 12(2): 49-53.
XING Shaohua, LI Yan, MA Li, et al. Research progress in cathodic protection technology for marine infrastructures in deep sea environment [J]. *Equipment Environment Engineering*, 2015, 12(2): 49-53. (in Chinese)
- [22] Schaefer D, Doose J, Pichlmaier M, et al. Comparability of UEP signatures measured under varying environmental conditions [C]// *International Marine Electromagnetics Conference*, 2013.
- [23] Kim Y S, Lee S K, Chung H J, et al. Influence of a simulated deep sea condition on the cathodic protection and electric field of an underwater vehicle [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 148: 223-233.

(上接第 113 页)

- [14] Liepmann H W. On the application of statistical concepts to the buffeting problem [J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1952, 19(12): 793-800.
- [15] Dryden H L, Schubauer G B, Mock W C J, et al. Measurements of intensity and scale of wind-tunnel turbulence and their relation to the critical Reynolds number of spheres; NACA-TR-581 [R]. USA: NASA Technical Reports Server, 1937.
- [16] Boswell R J, Miller M L. Unsteady propeller loading—measurement, correlation with theory, and parametric study [R]. Naval Ship Research and Development Center, 1968.
- [17] Paul B S, Uhlman J S. Development and validation of turbulence ingestion prediction capability of TONBROD [C]// *Proceedings of ASME Noise Control and Acoustics Division Conference*, NCAD2012-0109, 2012: 7-13.