

# 层流介质中金属板腐蚀电位分布研究\*

张建春,王向军

(海军工程大学 电气工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘要:**为了研究流动介质中产生的静电场,结合电化学和流体力学相关知识建立层流介质中金属板模型,利用贝塞尔函数展开及其逆运算推导出在三层介质中基于点电荷模型的腐蚀电位解析表达式,同时计算出金属板产生的电场。运用推导出的解析表达式计算出在流动介质中任意场点处金属板随不同流速产生的腐蚀电位,并通过实验验证结果的正确性。结果表明,对层流条件下电化学反应产生的电流密度所建模型的结果与实验测量数据吻合度较高,同时电场分布也会随着流体流速及层流方向上长度的变化而发生变化。

**关键词:**层流;三层介质;点电荷;电流密度;腐蚀电位;电场强度;金属板

**中图分类号:** TN95    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-2486(2018)06-157-08

## Corrosion potential distribution research of metal plate in laminar flow

ZHANG Jianchun, WANG Xiangjun

(Department of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to study the electrostatic field in the flowing medium, the model of metal plate in the laminar flow was built on the basis of the related knowledge of electrochemistry and fluid mechanics, and the analytic expression of corrosion potential based on point charge source in the three-layered media model was deduced by using the expansion of Bessel function and its inverse operation, then the expression of electric field was obtained in the meantime. The corrosion potential of metal plate varying from different flow rates at arbitrary seawater depth was calculated by the listed expression. The simulation result was tested and verified through experiment. The result shows that the model in current density generated in the electrochemical reaction under laminar flow conditions is in better agreement with the experimental data, and the electric field distribution changes with the flow velocity and the length of the laminar flow direction.

**Key words:** laminar flow; three-layered media; point charge source; current density; corrosion potential; electric field strength; metal plate

在海水中,不同属性的金属之间会发生电化学腐蚀形成电势差,并在电解质中产生腐蚀电流和电场,如船体周围产生的电场。当前对因电化学腐蚀产生电场分布的建模主要以电偶极子、有限元作为主要研究方法,并将电解质假设为静止状态<sup>[1-6]</sup>。当前针对静电场的仿真是基于等效源进行计算,比如利用电偶极子或电流元能够得出介质中电场的分布趋势,但得出的结果与实际流动情况下产生的静电场符合度不高,因为在实际的环境下,介质是流动的,同时可能存在多种流动状态,如层流、湍流、紊流等。文献[7-9]中对金属铁的腐蚀实验结果表明电位的大小会因海水的流动速度及状态的不同而发生变化。

为了研究层流状态下的电解质中腐蚀电位与流速的关系,从理论出发推导得出电场的分布情况,本文从简单模型分析并得出流动条件下的腐

蚀电位。

### 1 金属板在层流海水中的建模

将两块金属板用导线连接,使其在两金属板上分别发生氧化还原反应。为了便于求解计算,令流体流向与电极表面平行且在坐标原点开始接触金属板表面,两金属板表面扩散层互不干扰。其扩散层及边界层厚度如图1(a)所示。

由于黏度系数的存在,根据流体边界层理论可知<sup>[10]</sup>,在边界层内流体的速度是随着金属板边界层厚度增加方向而逐渐增大的,如图1(b)所示。当异相接触发生电化学反应时,在相表面会发生物质的传递,传递时产生的扩散层厚度一般会小于边界层厚度<sup>[10-11]</sup>。

#### 1.1 金属板表面净电流密度推导

电解质为定常流动的稀溶液,由于扩散层处

\* 收稿日期:2017-08-31

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(41476153)

作者简介:张建春(1990—),男,河北沧州人,博士研究生,E-mail:hbzjctj@163.com;

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

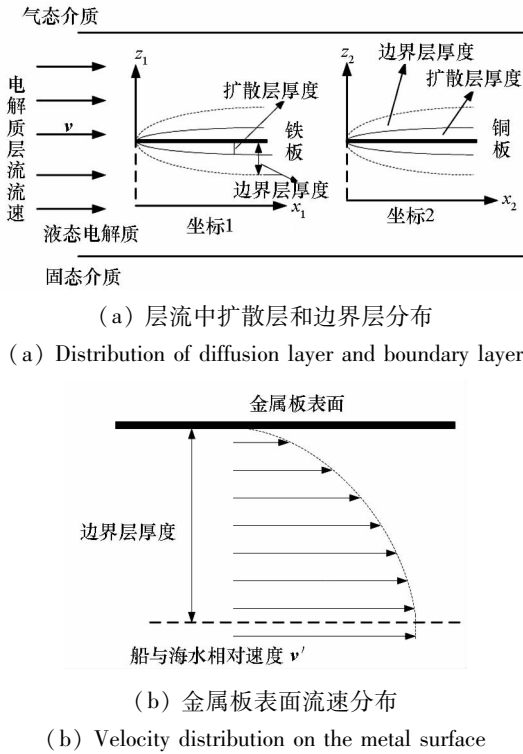


图 1 流动海水中的腐蚀模型

Fig. 1 Corrosion model in flowing seawater

于黏性边界层内部,所以扩散层内流体的速度应按黏性边界层内的速度规律分布。根据黏性边界层方程的布劳修斯解可得,靠近金属表面的速度<sup>[11]</sup>为

$$u_x = v \left[ 0.332\kappa - \frac{0.028}{12}\kappa^4 + O(\kappa^4) \right] \quad (1)$$

其中,  $\kappa = z(\nu\rho/\eta x)^{1/2}$ ,  $\eta$  为电解质的黏度系数,  $\rho$  为电解质密度,  $\nu$  为介质流速。在流体力学中认为当  $u_x = 0.99v$  时的  $z$  值即为边界层的厚度,即  $\delta_{边} \approx 0.3(\eta x/\nu\rho)^{-1/2}$ 。

由于铁的电极电位较铜的低,在金属板上会发生氧化反应,铜板上会使海水中的氧发生还原反应,且海水静止时电场强度会对水分子及离子的扩散产生较大影响<sup>[12-13]</sup>。在固、液两相间反应物的传质过程主要是由对流、扩散、电迁移三种情况引起的,每一种传质包括其中一种或多种<sup>[14]</sup>。当三种情况同时作用时产生的净电流密度<sup>[15]</sup>为

$$I = \frac{nF}{\lambda_i} \Pi_i = \frac{nF}{\lambda_i} \left[ D_i \left( \frac{dc_i}{dz} \right) + E_x u_i^0 c_i + v_x c_i \right] + I_0 \quad (2)$$

其中:  $\Pi_i = \Pi_{扩散} + \Pi_{电迁} + \Pi_{对流}$  为  $i$  物质的流量;  $\lambda_i$ 、 $n$  分别为电化学反应中  $i$  物质的反应数及电子转移个数;  $D_i$  为氧的扩散系数;  $v_x$  为介质流速的  $x$  分量大小;  $F = 96\,500$  为法拉第常数;  $c_i$  为  $i$  粒子的浓度;  $E_x$  为  $i$  粒子所受外加电场的  $x$  分量;  $u_i^0$  为

该粒子的“淌度”,一般取 1;  $I_0$  为两金属板在静态海水中腐蚀电位达到稳定时金属板表面产生的净电流密度,其值不受速度的影响。

在计算由于扩散作用产生的物质的流量时,首先应知道扩散层的厚度。根据文献<sup>[16]</sup>所提到的 Fick 定律知,当层流介质中反应物质的传质过程达到稳态对流扩散时,即在  $z = \delta_{扩散}$  处,  $v_z (\partial c_i / \partial z) = D_i (\partial^2 c_i / \partial z^2)$ , 其中  $v_z \approx (\eta/\rho\delta_{边}^3) z^2$  为与金属板垂直的流速分量,这是由  $du_x/dx \neq 0$  引起的,再利用近似表达式  $\frac{\partial c_i}{\partial z} \approx \frac{c_i^0 - c_i^s}{\delta_{扩散}}$ ,  $\frac{\partial^2 c_i}{\partial z^2} \approx \frac{c_i^0}{\delta_{扩散}^2}$  最终可推出

$$\delta_{扩散} \approx (D_i \rho / \eta)^{1/3} \delta_{边} = D_i^{1/3} \left( \frac{\eta}{\rho} \right)^{1/6} x^{1/2} v^{-1/2} \quad (3)$$

在扩散层内时,由于扩散层厚度很小,可将扩散层内的反应物浓度看作均匀分布。在扩散层中,物质的传递是由于金属板使反应物反应,使得金属板表面与扩散层溶液中的物质浓度形成浓度差而发生扩散,这种扩散主要是由于热动力学导致的<sup>[16]</sup>。可将三种传质方式下产生的净电流密度表达式简化为

$$I_{传} \approx \frac{nF}{\lambda_i} \left[ D_i \left( \frac{c_i^0 - c_i^s}{\delta_{扩散}} \right) + v c_i(z) \right] \approx \frac{nF}{\lambda_i} \left[ D_i^{2/3} v^{1/2} \left( \frac{\eta}{\rho} \right)^{-1/6} x^{-1/2} (c_i^0 - c_i^s) + v c_i(z) \right] \quad (4)$$

其中:  $D_i$  为  $i$  离子的扩散系数,  $c_i^0$  为溶液中的  $i$  离子浓度,  $c_i^s$  为金属板表面的  $i$  离子浓度,  $c_i(z)$  为扩散层内距离金属板表面  $z(0 < z < \delta_{扩散})$  时的  $i$  离子浓度。

物质在金属表面发生电化学反应时,其反应过程主要是在金属板表面进行的,这种情况会使扩散层中的反应粒子浓度产生浓度差。因此电极表面扩散层中的反应粒子的浓度分布主要以扩散作用为主,对流传质方式下的反应粒子浓度在扩散层中的分布可以忽略对流的影响。在扩散层内  $i$  离子浓度的分布可认为是呈线性分布<sup>[16]</sup>, 则

$$c_i(z) = \frac{c_i^0 - c_i^s}{\delta_{扩散}} z = D_i^{-1/3} \left( \frac{\eta}{\rho} \right)^{-1/6} x^{-1/2} v^{1/2} z (c_i^0 - c_i^s) \quad (5)$$

结合式(4)、式(5)并代入式(2),可得净电流密度表达式

$$I(x, v) \approx \frac{nF}{\lambda_i} \left[ D_i^{2/3} v^{1/2} (\eta/\rho)^{-1/6} x^{-1/2} (c_i^0 - c_i^s) + D_i^{-1/3} (\eta/\rho)^{-1/6} x^{-1/2} v^{3/2} z (c_i^0 - c_i^s) \right] + I_0 \quad (6)$$

## 1.2 流动介质中基于金属板的建模处理方法

当腐蚀反应只发生在金属表面时,对图 1 中

的金属板表面进行微分化处理,将其等效为无限个小正方形组成,每个小正方形单元可等效为位于其中心位置的点电荷。以铜板为例,场点位于 $(x,y,z)$ 处,每个 $x$ 方向上的切面模型及各层介质中的介电常数 $\epsilon$ 和电导率 $\sigma$ 如图2所示,其中海水深度坐标为 $z=D$ ( $D$ 为介质溶液的深度)。

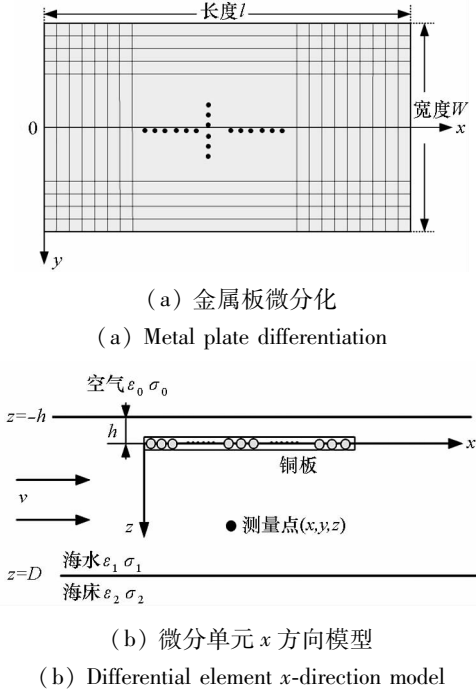


图2 金属板表面处理模型  
Fig.2 Metal plate model

将金属板沿 $x$ 方向分成 $l/dx$ 份, $l$ 为金属板的长度,当 $dx$ 无限小时,在 $x = ndx$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots, l/dx$ )处电流大小为金属板单位面积上的电流密度。每一部分可按直流电流元来处理, $I$ 为该电流元的电流密度, $dx$ 大小为电流元长度,方向为电流方向。

由于流速的存在,介质中参加电化学反应的物质随着流动方向而进行传递,并且金属板表面扩散层的厚度随着 $x$ 方向而逐渐增加,氧相对较难达到金属表面,从而使反应电流密度逐渐减小,因此电流密度会随着流动方向而逐渐减小。由电流元与点电荷之间的关系得

$$I dx = I dx e_x = \frac{dq}{dt} dx e_x = \frac{dx}{dt} dq e_x = u_x dq e_x \quad (7)$$

其中, $e_x$ 表示 $x$ 方向的单位矢量。

在流动介质没有外加电场的环境下,介质呈电中性,因此可不考虑电迁移的情况,电荷运动速度 $u$ 与扩散层厚度 $\delta_{j^*}$ 处的速度 $u_x|_{z=\delta_{j^*}}$ 相等,则

$$dq e_x = \frac{I dx}{u_x|_{z=\delta_{j^*}}} e_x = I' dx e_x \quad (8)$$

其中: $u_x|_{z=\delta_{j^*}} \approx 0.332 v D_i^{1/3} (\eta/\rho)^{-1/3}$ ,  $I'(x, v) \approx \frac{nF(c_i^0 - c_i^s)}{0.332 \lambda_i} \left(\frac{\eta}{\rho}\right)^{1/6} x^{-1/2} (D_i^{1/3} v^{-1/2} + D_i^{-2/3} v^{1/2} z)$ 。

电流密度 $I$ 不包括时间参数,因此在处理时可等效静电电荷进行处理。假设每个静电荷是相互独立的,将每一个 $dq$ 作为金属板上不同位置处的电荷进行求解,其电荷量为 $Q = I' dx$ ,共分解为 $l/dx$ 个电荷,进而金属板在海水中任意场点处产生的电位等于这些电荷的叠加,即

$$\varphi = \sum_{k=0}^{W/dy} \sum_{n=1}^{l/dx} \varphi_n \quad (9)$$

其中, $k$ 表示金属板宽度上的第 $k$ 个微分单元。

### 1.3 流动介质中的电位推导

在直角坐标系中,设第 $n$ 个点电荷位于 $(x_0, y_0, 0)$ 处,利用汉克尔变换对 $1/R$ 进行Sommerfeld积分公式展开<sup>[17-18]</sup>得

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}} \\ &= \int_0^\infty e^{-k|z|} J_0(kr) dk \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ , $R$ 为金属板第 $n$ 个点电荷到测量点的位置。当在圆柱坐标中时,也可对 $1/R$ 进行Sommerfeld积分公式展开。 $J_0(kr)$ 是关于 $r$ 的0阶贝塞尔函数。

式(10)右端满足拉普拉斯方程,点电荷在三层介质中产生的电位可分别表示为

$$\begin{cases} \varphi_{n1} = \frac{Q}{4\pi\sigma_0} \int_0^\infty A(k) J_0(kr) e^{-kz} dk \\ \varphi_{n2} = \frac{Q}{4\pi\sigma_1} \left[ \int_0^\infty J_0(kr) e^{-k|z|} dk + \int_0^\infty B_1(k) J_0(kr) e^{-kz} dk + \int_0^\infty B_2(k) J_0(kr) e^{kz} dk \right] \\ \varphi_{n3} = \frac{Q}{4\pi\sigma_2} \int_0^\infty C(k) J_0(kr) e^{-kz} dk \end{cases} \quad (11)$$

其中: $A(k)$ 、 $B_1(k)$ 、 $B_2(k)$ 、 $C(k)$ 是待定系数; $Q$ 表示所求微分单元点电荷模型的电荷量。式(11)满足下列边界条件<sup>[19]</sup>:

- 1) 分界面两边电位连续  $\varphi_j|_r = \varphi_{j+1}|_r$ ;
- 2) 分界面电流密度法向分量连续  $\sigma_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} \Big|_r = \sigma_{j+1} \frac{\partial \varphi_{j+1}}{\partial z} \Big|_r$ 。

其中, $\sigma_j$ 表示在介质层 $j$ ( $j=0,1,2$ )中的电导率,其中空气的电导率 $\sigma_0$ 为0, $\Gamma$ 表示 $z = -h$ 及 $z = D$ 的分界面。

由边界条件可得一组系数方程

$$\begin{cases} \frac{1}{\sigma_0} A(k) e^{kh} = \frac{1}{\sigma_1} [e^{-kh} + B_1(k) e^{kh} + B_2(k) e^{-kh}] \\ -A(k) e^{kh} = -e^{-kh} - B_1(k) e^{kh} + B_2(k) e^{-kh} \\ \frac{1}{\sigma_1} [e^{-kD} + B_1(k) e^{kD} + B_2(k) e^{-kD}] = \frac{1}{\sigma_2} C(k) e^{-kD} \\ -e^{-kD} - B_1(k) e^{-kD} + B_2(k) e^{kD} = -C(k) e^{-kD} \end{cases} \quad (12)$$

可求得

$$\begin{cases} A(k) = \frac{(\gamma_{12}/\gamma_{01})(e^{-2kh} - 1)e^{-2k(D+h)} + \gamma_{12}(1 - e^{2kh})e^{-2k(D+h)}}{1 + (\gamma_{12}/\gamma_{01})e^{-2k(D+h)}} \\ B_1(k) = -\frac{e^{-2kh} + (\gamma_{12}/\gamma_{01})e^{-2k(D+h)}}{1 + (\gamma_{12}/\gamma_{01})e^{-2k(D+h)}} \\ B_2(k) = \frac{\gamma_{12}(e^{2kh} - 1)e^{-2k(D+h)}}{1 + (\gamma_{12}/\gamma_{01})e^{-2k(D+h)}} \\ C(k) = \frac{\gamma'(1 - e^{-2kh})}{1 + (\gamma_{12}/\gamma_{01})e^{-2k(D+h)}} \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\gamma_{01} = \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)}{(\sigma_0 + \sigma_1)}$ ,  $\gamma_{12} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{(\sigma_1 + \sigma_2)}$ ,  $\gamma' = \frac{2\sigma_2}{(\sigma_1 + \sigma_2)}$ 。

因为空气中的电导率  $\sigma_0 = 0$ , 则  $\gamma_{01} = -1$ 。

可将式(13)中的系数简化为

$$\begin{cases} A(k) = \frac{\gamma_{12}(1 - e^{-2kh})e^{-2k(D+h)} + \gamma_{12}(1 - e^{2kh})e^{-2k(D+h)}}{1 - \gamma_{12}e^{-2k(D+h)}} \\ B_1(k) = \frac{\gamma_{12}e^{-2k(D+h)} - e^{-2kh}}{1 - \gamma_{12}e^{-2k(D+h)}} \\ B_2(k) = \frac{\gamma_{12}(e^{2kh} - 1)e^{-2k(D+h)}}{1 - \gamma_{12}e^{-2k(D+h)}} \\ C(k) = \frac{\gamma'(1 - e^{-2kh})}{1 - \gamma_{12}e^{-2k(D+h)}} \end{cases} \quad (14)$$

由  $|\gamma_{12}e^{-2k(D+h)}| < 1$  可对式(14)中的分母进行展开

$$\frac{1}{1 - \gamma_{12}e^{-2k(D+h)}} = \sum_{m=0}^{\infty} (\gamma_{12}e^{-2k(D+h)})^m \quad (15)$$

将式(15)代入式(11)可求得电解质中的腐蚀电位

$$\begin{aligned} \varphi_{n2} = & \frac{Q}{4\pi\sigma_1} \left[ \int_0^{\infty} J_0(kr) e^{-k|z|} dk + \right. \\ & \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{\infty} (\gamma_{12}e^{-2k(D+h)})^m (\gamma_{12}e^{-k[2(D+h)+z]} - e^{-k(2h+z)}) J_0(kr) dk + \\ & \left. \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{\infty} (\gamma_{12}e^{-2k(D+h)})^m \gamma_{12}(e^{-k(2D-z)} - e^{-k[2(D+h)-z]}) J_0(kr) dk \right] \end{aligned} \quad (16)$$

式(16) 等号右边中括号内第一项为点电荷电位;第二、三项包括无穷项和,根据式(10)的逆运算可得第  $m$  项的积分为

$$\int_0^{\infty} \gamma_{12}^m e^{-2mk(D+h)} (\gamma_{12}e^{-k[2(D+h)+z]} - e^{-k(2h+z)}) J_0(kr) dk = \frac{\gamma_{12}^{m+1}}{R_1} - \frac{\gamma_{12}^m}{R_2} \quad (17)$$

$$\int_0^{\infty} \gamma_{12}^{m+1} e^{-2mk(D+h)} (e^{-k(2D-z)} - e^{-k[2(D+h)-z]}) J_0(kr) dk = \frac{\gamma_{12}^{m+1}}{R_3} - \frac{\gamma_{12}^{m+1}}{R_4} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + [2(m+1)(D+h)+z]^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + [2m(D+h)+2h+z]^2} \\ R_3 &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + [2m(D+h)+2D-z]^2} \\ R_4 &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + [2(m+1)(D+h)-z]^2} \end{aligned}$$

将式(17)、式(18)代入式(16)可得由图2(b)模型中点电荷在场点处产生的电位为

$$\varphi_n(x_0, v) = \frac{I'(x_0, v) dx}{4\pi\sigma_1} \left[ \frac{1}{R} + \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_{12}^m \left( \frac{\gamma_{12}}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{\gamma_{12}}{R_3} - \frac{\gamma_{12}}{R_4} \right) \right] \quad (19)$$

由式(9)即可求得金属板在流动介质中任意场点  $(x, y, z)$  处的电位

$$\varphi = \sum_{k=0}^{W/dy} \sum_{n=1}^{L/dx} \varphi_{n2} = \sum_{k=0}^{W/dy} \sum_{n=1}^{L/dx} \varphi_{n2}(ndx, v) \quad (20)$$

利用式(21)即可求出介质中电场的空间分布

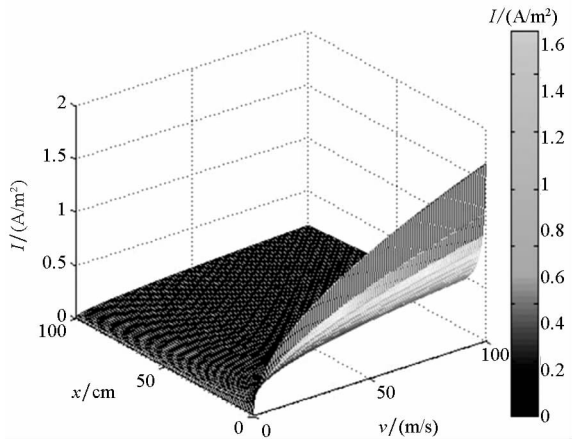
$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{cases} \quad (21)$$

由此得到了流动介质中以金属板作为研究对象的腐蚀电流密度及电位的表达式。

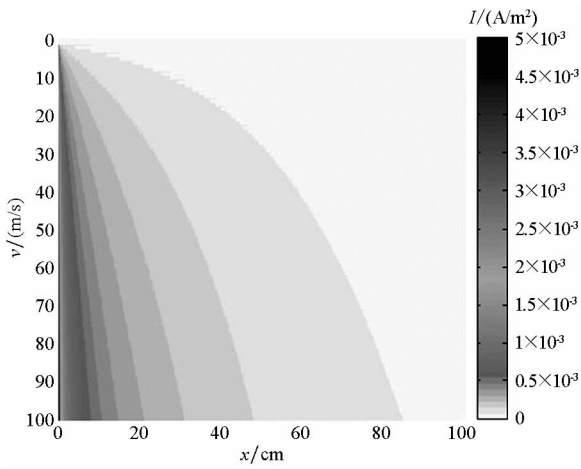
## 2 实例仿真

### 2.1 腐蚀电流密度在金属板表面的分布

由前文可知,当  $z=0$  时便可求出铜板上电流密度的分布情况。假设氧在金属表面反应率为 90%, 在  $z=0$  处的氧浓度  $c_i^0 = 10\% c_i^0$ , 金属板长度为  $l=1$  m, 宽度为  $W=0.2$  m。金属板分别位于电解质溶液中深  $h=5$  m 处。净电流密度随流体流速在金属板表面  $x$  方向不同位置处的分布情况如图 3 所示。



(a) 空间分布  
(a) Distribution in space



(b) 等值线分布  
(b) Contour distribution

图3 金属板表面电流密度分布

Fig. 3 Current density distribution on the metal surface

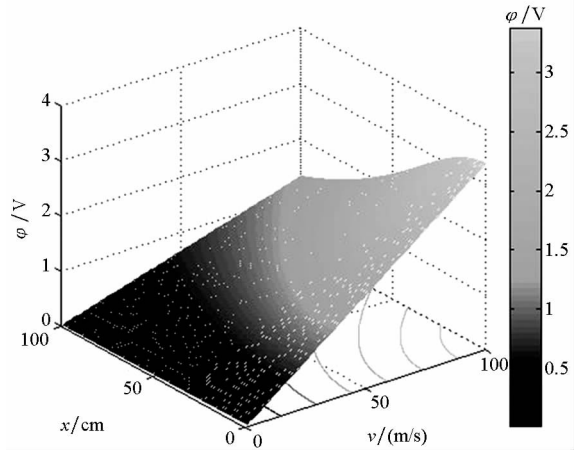
在图3中可看到,当 $x=0$ 时产生的电流密度随速度的变化是最明显的,随着 $x$ 值的逐渐增加,受到速度的影响越来越小,电流密度逐渐减小。产生图3的情况主要是因为流体的流速导致扩散层的厚度发生变化, $x=0$ 处的扩散层厚度相对金属板的其他位置的厚度最小,利于介质中氧的传递;随着 $x$ 的增加,在金属板表面产生的扩散层厚度会随之增大,导致反应物的传递过程难度增加,而抑制氧的传递速度不利于电化学反应的进行,将导致还原反应速率减小,产生的反应电荷量减小,从而间接地影响电流密度的分布<sup>[19]</sup>。这也进一步说明金属板表面电化学反应产生的电流密度会因电解质的流动速度及金属板上的位置变化而发生变化,当海水速度为0时,电流密度达到最小但不为0。

从图3中还可以看出,当电解质溶液速度为0、介质处于静止状态时,金属板表面仍然有电流

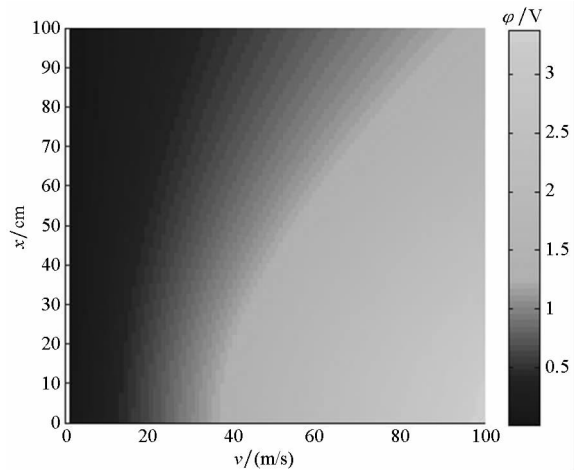
密度存在,这主要是由在式(2)中金属板电化学反应达到稳定后产生的外电流密度 $I_0$ 导致的。

### 2.2 腐蚀电位在层流流体中的分布

设电解质电导率为4 S/m,固态介质电导率为0.4 S/m,电解质深度为500 m。假设电解质电导率不随速度的变化而变化,当测量点位于(0 m,0 m,100 m)处时,根据式(20)对金属板不同位置随不同流速在流动介质中产生的电位进行仿真分析,结果如图4所示。由图4可看出,在金属板某一固定长度处产生的腐蚀电位会随着流体流速的增加而逐渐增加,其主要原因在于:当流体速度增加时,流体与金属板之间产生的边界层厚度会减小,进而导致扩散层的厚度减小,氧离子更加容易到达金属表面,加快腐蚀反应。



(a) 金属板电位空间分布  
(a) Potential space distribution of plate



(b) 金属板电位等值线分布  
(b) Plate potential contour distribution

图4 海水中的金属板腐蚀电位分布

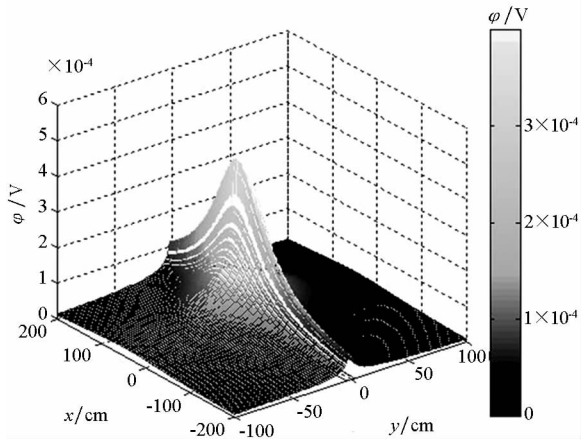
Fig. 4 Plate corrosion potential distribution on the sea

仿真结果表明腐蚀电位会随电解质的流速及金属板上的不同位置而发生变化。当金属板在电解质中的腐蚀达到平衡时,较小的流速对金属板

产生的电位并无太大影响。这主要取决于金属表面产生的扩散层厚度。

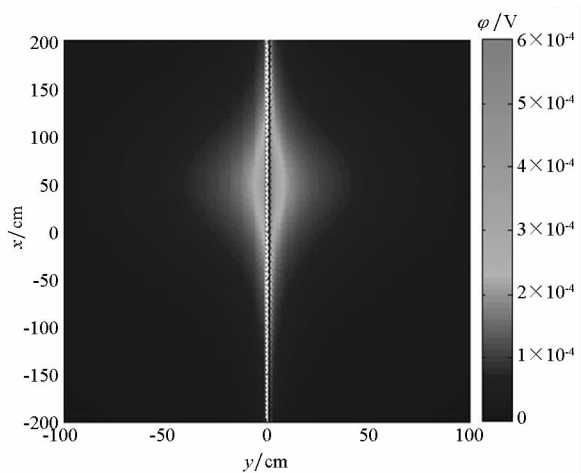
### 2.3 电场强度在层流中的空间分布

当介质流速  $v = 50 \text{ m/s}$  时,根据式(20)计算深度  $z = 50 \text{ m}$  的平面上电位的空间分布,如图 5 所示。



(a) 电位空间分布

(a) Potential space distribution



(b) 电位等值线

(b) Contour of potential

图 5 腐蚀电位空间分布

Fig. 5 Corrosion potential space distribution

在某一深度平面下产生的电位是以金属板为轴线呈对称分布的,并且金属板近处所产生的电位最大,这是符合实际情况的。金属板在  $y = 0$  平面上产生的电位较其他  $y$  平面大的原因是金属板模型是由多个等效电荷组成进行理论计算的,每个等效电荷距离计算点  $R$  大小不同。

图 6~8 是金属板在介质流速  $v = 50 \text{ m/s}$  时平面  $z = 50 \text{ m}$  上产生的电场强度三个分量。在建模时金属板位于  $x$  上,因此在仿真中会出现  $E_x$  相对  $y = 0$  平面对称、 $E_y$  相对  $x = 0$  平面对称的现象。从仿真结果可得腐蚀电场在空间中的分布存

在对称性,并且  $E_x, E_y, E_z$  的空间分布各不相同。但无论哪个向量,其峰值均存在其对称面处。

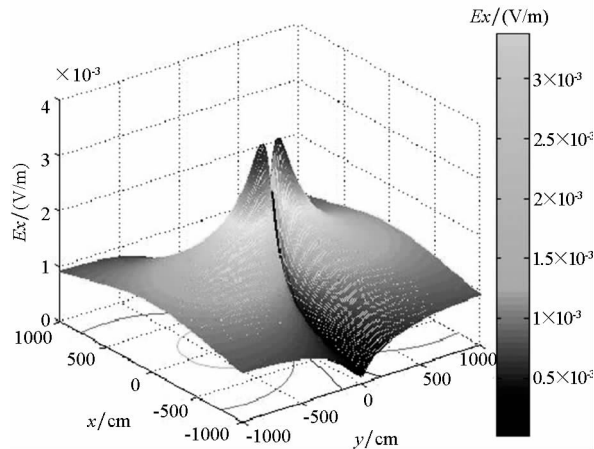


图 6 电场强度  $E_x$  空间分布

Fig. 6  $E_x$  space distribution

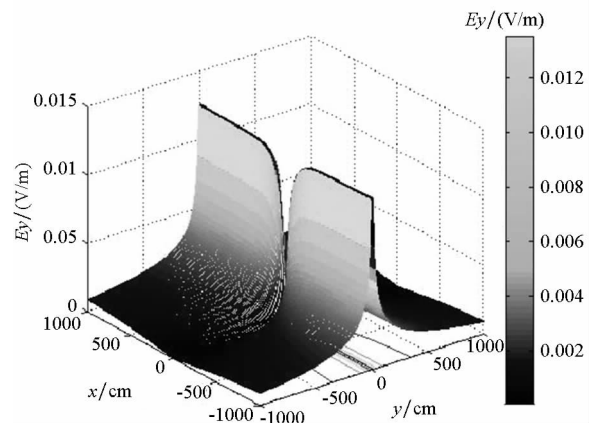


图 7 电场强度  $E_y$  空间分布

Fig. 7  $E_y$  space distribution

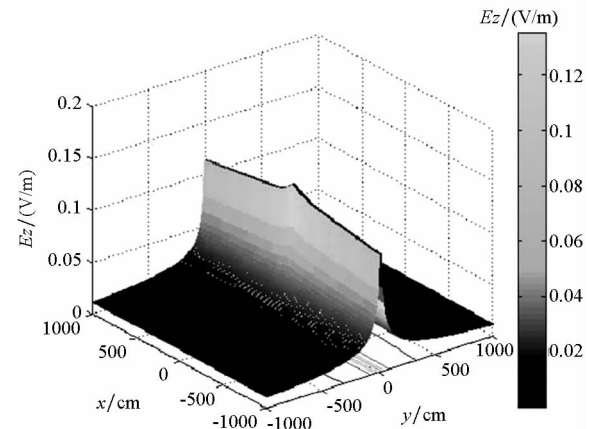


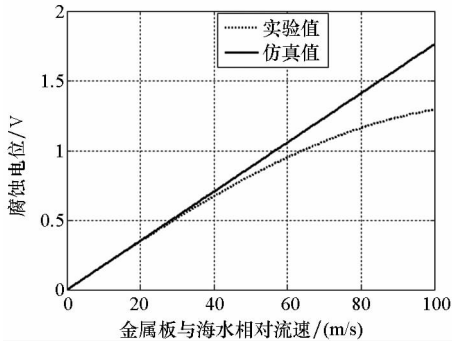
图 8 电场强度  $E_z$  空间分布

Fig. 8  $E_z$  space distribution

### 3 实验对比

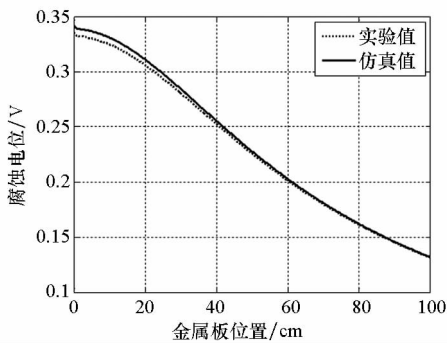
实验过程中,利用工业盐在  $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的水池中配制成电导率为  $4 \text{ S/m}$  的模拟海水,水深  $2 \text{ m}$ 。为了与仿真条件相同,实验条件成比例缩

小,将金属板放置于水深0.02 m处。金属板选用由武汉钢铁生产的型号为AH32的钢板及型号为GB1176的铜板,规格均为厚5 mm、宽1 m、长1 m,两金属板用导线连接,导线及焊接处防水效果良好。实验中利用水泵装置实现盐水流速,该设备具有可控性。腐蚀电位实验结果与仿真结果对比如图9所示。



(a) 金属板75 cm处腐蚀电位随流速变化对比图

(a) Comparison of corrosion potential versus velocity on 75 cm of metal plate



(b) 流速5 m/s腐蚀电位对比图

(b) Corrosion potential comparison on 5 m/s

图9 实验与仿真对比

Fig. 9 Experiment and simulation comparison

由图9(a)看出,当速度较小时实验结果与仿真结果拟合程度较好,当流速达到30 m/s时计算值偏离实验值。其主要原因是在实验过程中,当水速达到30 m/s后,海水表面出现兴波,并在盐水中出现湍流,破坏层流条件。为了进一步观察金属板不同位置处的电位分布,实验在盐水流速为5 m/s的条件下进行,结果如图9(b)所示,从图看出,实验与仿真结果基本一致,误差在3%左右,说明了仿真结论的正确性。

## 4 结论

实验及仿真结果表明,金属板在流动介质中产生的腐蚀电流密度、表面电位分布以及电场分布均会受到流速的影响,在研究近场时金属板表

面位置在固定流动速度下实验结果与仿真数据拟合度较好,但仍存在误差。同时,电场分布关于金属板呈对称分布,峰值出现在金属板附近,与腐蚀电流密度的结论一致。

在实验过程中,由于实现层流的条件较难以及实验条件的限制,并未进行电场方面的对比。

## 参考文献(References)

- [1] 熊露,姜润翔,龚沈光. 浅海中船舶轴频电场建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(1): 98-103.  
XIONG Lu, JIANG Runxiang, GONG Shenguang. Ship modeling method of shaft-ELFE in shallow sea [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(1): 98-103. (in Chinese)
- [2] 程锐,姜润翔,龚沈光. 船舶轴频电场等效源强度计算方法[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(2): 138-143.  
CHENG Rui, JIANG Runxiang, GONG Shenguang. Calculation method of vessel shaft rate electric field equivalent source magnitude [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(2): 138-143. (in Chinese)
- [3] King R W P. The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region: supplement [J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(12): 7987.
- [4] 刘文宝,王向军,嵇斗. 基于电偶极子模型的舰船静电场深度换算[J]. 空军雷达学院学报, 2010, 24(6): 435-438.  
LIU Wenbao, WANG Xiangjun, JI Dou. Conversion of static electric field depth of ships based on electric dipole model [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010, 24(6): 435-438. (in Chinese)
- [5] 陈聪,李定国,龚沈光. 舰船静态电场深度换算方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(6): 719-722.  
CHEN Cong, LI Dingguo, GONG Shenguang. The method of the extrapolation of the static electric field of ships [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(6): 719-722. (in Chinese)
- [6] McGrath J N, Tighe-Ford D J, Hodgkiss L. Scale modeling of a ship's impressed-current cathodic protection system [J]. Corrosion Prevention & Control, 1985, 14(4): 36-39.
- [7] 郑玉贵,姚治铭,柯伟. 流体力学因素对冲刷腐蚀的影响机制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(1): 36-40.  
ZHENG Yugu, YAO Zhiming, KE Wei. Review on the effects of hydrodynamic factors on erosion corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(1): 36-40. (in Chinese)
- [8] 林中南,马海涛,王来,等. 纯铁在流动海水中的电化学腐蚀行为[J]. 材料保护, 2009, 42(7): 14-17.  
LIN Zhongnan, MA Haitao, WANG Lai, et al. Electrochemical corrosion behavior of pure iron in flowing seawater [J]. Journal of Materials Protection, 2009, 42(7): 14-17. (in Chinese)
- [9] 雍兴跃,林玉珍. 流动腐蚀研究的新进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 32-34.  
YONG Xingyue, LIN Yuzhen. Progress in study on flow induced corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(1): 32-34. (in Chinese)

- [10] Ferziger J H. Computational methods for fluid dynamics [M]. Germany: Springer, 2012.
- [11] Tang A, Bao J, Skyllas-Kazacos M. Thermal modeling of battery configuration and self-discharge reactions in vanadium redox flow battery [J]. Journal of Power Sources, 2012, 216(5): 498 - 501.
- [12] 王有元, 杨涛, 田苗, 等. 电场对绝缘纸中水分扩散特性的影响 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 195 - 203.  
WANG Youyuan, YANG Tao, TIAN Miao, et al. Impact of electric field on the moisture diffusion properties of insulation paper [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 195 - 203. (in Chinese)
- [13] 薛丽莉. 水性环氧涂层/碳钢体系腐蚀电化学行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
XUE Lili. Investigation on corrosion electrochemical behavior of waterborne epoxy coating/carbon steel system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [14] 傅献彩. 物理化学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
FU Xiancai. Physical and chemistry [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 戴干策, 陈敏恒. 物理化学流体动力学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.  
DAI Gance, CHEN Minheng. Physico-chemical hydrodynamics [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1965. (in Chinese)
- [16] 查全性. 电极过程动力学导论 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1987: 85 - 135.  
ZHA Quaxing. Electrode process kinetics introduction [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1987: 85 - 135. (in Chinese)
- [17] 奚定平, 奚华林. 点电荷在三层介质中势的物理解释与光学类比 [J]. 大学物理, 1996, 15(11): 1 - 4.  
XI Dingping, XI Hualin. Physical description of potential by a point charge in three layer of dielectrics [J]. College Physics, 1996, 15(11): 1 - 4. (in Chinese)
- [18] 雷银照. 关于电磁场解析方法的一些认识 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 11 - 25.  
LEI Yinzha. Reviews of analytical methods for electromagnetic fields [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 11 - 25. (in Chinese)
- [19] Vanderlinde J. Classical electromagnetic theory [M]. 2th ed. UK: Springer, 2005.