

研究论文

双相不锈钢管固液两相流动腐蚀的数值模拟

刘景军 林玉珍 田兴玲 雍兴跃 李效玉
(北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘 要 在碳钢流动腐蚀数值模拟的基础上, 针对管道流动体系, 对固液两相流条件下双相不锈钢的流动腐蚀进行了数值模拟。模拟了固液两相流体动力学过程和双相不锈钢腐蚀动力学过程, 模拟计算得到的腐蚀速率与实测值基本一致, 表明建立的两相不锈钢流动腐蚀的综合数学模型是正确的, 揭示了两相流中双相不锈钢的流动腐蚀机理, 并进行了实验验证。两相流中双相不锈钢流动腐蚀的加剧主要是由于颗粒相的存在会大大强化液相流体的流体力学因素, 导致钝化膜内传质速度加快所致。计算结果同时也表明, 对于表面覆盖有钝化膜的材料数值模拟, 建立合理的流动腐蚀动力学模型是数值计算方法应用成功与否的关键。

关键词 双相不锈钢 两相流 流动腐蚀 数值模拟 实验验证

中图分类号 TG 172

文献标识码 A

文章编号 0438-1157 (2004) 03-0408-06

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW INDUCED CORROSION OF DUPLEX STAINLESS STEEL IN LIQUID-PARTICLE TWO-PHASE IN-PIPE FLOW

LIU Jingjun, LIN Yuzhen, TIAN Xingling, YONG Xingyue and LI Xiaoyu

(Institute of Materials Sciences and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract On the basis of numerical simulation of flow induced corrosion of carbon steel in two-phase flow, the flow induced corrosion of duplex stainless steel in liquid-particle two-phase in-pipe flow was numerically studied. The results showed that, by numerically simulating liquid-particle two-phase flow kinetic process and duplex stainless steel corrosion kinetics, the corrosion rates of duplex stainless steel were computed and the numerical corrosion rates were well in agreement with measured ones. This illustrates that the established corrosion overall model for duplex stainless steel in two-phase fluid is correct and at the same time its flow induced corrosion mechanism is uncovered and verified by tests. The presence of particle phase in fluid greatly strengthens hydrodynamic factor, leading to faster mass transfer process in passive film of duplex stainless steel than liquid single-phase, and causing serious erosion-corrosion. The modeled results also show that the ability to simulate corrosion of materials with surface passive film to some extent depends on their corrosion kinetics process tested by experiments.

Keywords duplex stainless steel, two-phase flow, flow induced corrosion, numerical simulation, test verification

2002-11-15 收到初稿, 2003-06-30 收到修改稿。

联系人及第一作者: 刘景军, 男, 33岁, 讲师, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50101002)。

Received date: 2002-11-15.

Corresponding author: LIU Jingjun, PhD candidate. **E-mail:** liujingjun@mail.buct.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50101002).

引 言

我国研制开发的 0Cr25Ni6Mo3CuN 双相不锈钢具有优良的耐应力腐蚀、耐孔蚀、耐流动腐蚀等局部腐蚀能力，已用于上海金山石化总厂的海水换热器，具有广泛的应用前景^[1]。但由于双相不锈钢表面覆盖有钝化膜，流动引起的腐蚀过程十分复杂，特别是在含有第 2 相固体颗粒条件下，腐蚀规律和机理尚不十分清楚。目前，已有学者对单相流中碳钢的流动腐蚀过程进行了数值模拟计算，取得了一些有价值的结果^[2~4]。为了进一步研究双相不锈钢在固液两相流中的腐蚀，除了需要实验研究表面覆盖有钝化膜材料的腐蚀动力学过程外，还需要研究流体中含有第 2 相固体颗粒时对流体传质效应、表面切应力效应等流体运动动力学过程的影响，特别是固体颗粒的运动以及固体颗粒的切削磨损作用对腐蚀的影响。

本文的工作重点是在两相流中碳钢磨损腐蚀数值模拟的基础上^[4]，建立两相流中双相不锈钢腐蚀的综合数学模型，进行模拟计算与结果分析，着重讨论两相流对双相不锈钢腐蚀的影响，并对双相不锈钢的腐蚀速率进行模拟与预测。这有助于深入研究双相不锈钢流动腐蚀的机理，将实验研究提高到一个新的水平。

1 实验方法

研究材料为 0Cr25Ni6Mo3CuN 双相不锈钢（热处理条件为 1050 ℃ 固溶 + 500 ℃ 2 h 时效强化）。介质为 3.5% NaCl 水溶液 + 5.0% 河砂，其粒度为 350~400 μm。实验腐蚀速率的测定采用失重法。模拟装置为管流式流动模拟实验装置，其流动结构示意图参见文献 [5]。

2 固液两相流流动模型的建立

2.1 流体力学与液相传质模型

在管流体系中，采用二维圆柱坐标系 (x, r) 时，与碳钢的流动腐蚀类似，双相不锈钢在固液两相流中与腐蚀过程相关的流体流动过程可用统一的流体运动守恒方程表示^[4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \Phi) &= \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r}) + S_{\Phi} + S_p \quad (1) \\ P_K &= \mu_{\text{eff}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ f_{\mu} &= [1 - \exp(-0.0165 Re_y)]^2 \left(1 + \frac{20.5}{Re_T} \right) \\ f_1 &= 1 + \left(\frac{0.05}{f_{\mu}} \right)^3 \\ f_2 &= 1 - \exp(-Re_T^2) \\ Re_y &= (\rho y / \sqrt{K}) / \mu \\ Re_T &= \rho K^2 / \mu \epsilon \end{aligned}$$

式中 Φ 为广义自变量， $\Phi = u, v, c, m, K, \epsilon, \dots$ ； Γ_{Φ} 为扩散系数； S_{Φ} 为流体源项； S_p 为颗粒源项，其数学处理见表 1。考虑到需要模拟计算管流中材料近壁处的流场、浓度场，采用基于求解 Reynolds 时均方程的湍流统观模拟方法 (RANS)^[6,7] 以及 Launder 和 Spalding^[8] 的 $K-\epsilon$ 两方程湍流黏度模型 (EVM) 对流体湍流运动进行修正。

采用有限控制容积法对模拟流道结构中的流体流动的控制方程 (1) 进行离散化处理，并用 SIMPLER 算法进行数值求解，对流动结构中固液两相流的流场、浓度场的分布进行模拟，在此基础上对流体流动产生的表面切应力 τ 及传质系数 k 进行计算^[4]。

Table 1 Values of S_p in conservation equations

Φ	S_p
u	$\langle S_{pu_i} \rangle = -\theta \rho_p \left[\left(1 + \frac{\rho}{2\rho_p} \right) \left\langle \frac{d\tilde{u}_{pi}}{dt} \right\rangle - \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g_i - \frac{3.0844}{\rho_p d_p} \sqrt{\mu \rho} \left\langle (\tilde{u}_j - \tilde{u}_{vj}) \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \left(\left \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right \right)^{-1/2} (1 - \delta_{kj}) \delta_{ki} \right\rangle \right]$
v	$\langle S_{pv_i} \rangle = -\theta \rho_p \left[\left(1 + \frac{\rho}{2\rho_p} \right) \left\langle \frac{d\tilde{v}_{pi}}{dt} \right\rangle - \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g_i - \frac{3.0844}{\rho_p d_p} \sqrt{\mu \rho} \left\langle (\tilde{u}_j - \tilde{u}_{vj}) \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \left(\left \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right \right)^{-1/2} (1 - \delta_{kj}) \delta_{ki} \right\rangle \right]$
K	$\langle S_{pK} \rangle = \langle u'_{pi} S_{pu_i} \rangle = \langle \tilde{u}_{pi} S_{pu_i} \rangle - \langle \tilde{u}_{pi} \rangle \langle S_{pu_i} \rangle$
ϵ	$\langle S_{pe} \rangle = C_3 \frac{\epsilon}{K} \langle S_{pK} \rangle$

Note: $C_3 = 1.9$.

2.2 颗粒冲刷模型

由于 Lagrange 单颗粒随机轨道模型能够较准确地预报分散颗粒的扩散运动轨道且较直观地解释离散颗粒对过流部件壁面的切削磨耗作用, 采用该模型对两相流中固相颗粒运动轨迹进行模拟. 根据在两相流中固体颗粒运动时所受作用力的平衡及能量守恒原理, 单颗粒随机轨道模型可以表示为^[9,10]

$$\frac{d\tilde{u}_{pi}}{dt} = \frac{u_i - u_{pi}}{\tau_p} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) g_i + \frac{\rho}{2\rho_p} \frac{d}{dt} (u_i - u_{pi}) + \frac{3.0844}{\rho_p d_p} \sqrt{\rho \mu} (u_j - u_{pj}) \left| \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right|^{-1/2} (1 - \delta_{ij}) \delta_{ki} \quad (2)$$

对式 (1)、式 (2) 进行求解, 模拟一定数量 (>1000) 颗粒的运动轨道, 在此基础上计算不同流速条件下固体颗粒和材料表面之间的碰撞频度、碰撞速度、碰撞角度等与流动腐蚀有关的颗粒相流体力学参数的平均量. Bergevin^[11] 认为固体颗粒的切削磨耗量与材料的屈服强度和临界冲击速度有关. 基于 Finne 提出的经 Bergevin 修正的固体颗粒对材料表面产生的切削磨耗量方程模拟在不同流速条件下双相不锈钢的切削磨耗量^[4].

3 固/液两相流中双相不锈钢流动腐蚀模型的建立

3.1 腐蚀的动力学模型

实验研究表明^[1,12], 双相不锈钢在两相流中的腐蚀比单相流中严重得多, 其腐蚀的加剧主要是由于流体力学因素与腐蚀电化学因素间的交互作用所引起的协同效应所致. 对电化学腐蚀作用程度的测定发现, 流动腐蚀主要由电化学因素引起, 同时极化曲线的测定表明双相不锈钢的腐蚀动力学过程中阳极自钝化过程控制, 而阴极为溶解氧的扩散过程, 但阴极氧的极限扩散电流比阳极的维钝电流大得多, 腐蚀主要受阳极钝化过程控制.

假设双相不锈钢表面钝化膜在流体中的溶解是一个稳态过程, 阴极氧在流体中的扩散传质过程也处于稳态, 且腐蚀阴、阳极反应中存在耦合共轭关系^[13]. 考虑到直接模拟计算阳极钝化过程的困难, 根据二者之间的关系模拟计算阴极氧还原反应, 以计算双相不锈钢的腐蚀速率. 根据文献 [12], 双相不锈钢在固液两相流中电化学腐蚀速率 (ΔV) 计算公式推导如下.

当介质层流运动时

$$\Delta V_1^- = M \frac{k_f \frac{D}{c_{O_2}^b - c_{O_2}^w} \left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}}{k_f + \frac{D}{c_{O_2}^b - c_{O_2}^w} \left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}} c_{O_2}^b \quad (3)$$

一旦介质处于湍流运动状态, 双相不锈钢的流动腐蚀速率变化为

$$\Delta V_1^- = \frac{M}{U} \frac{k_f \frac{c_{\mu}^{1/4} K_s^{1/2}}{\ln(E x_s^+) / k_L} (v_s - v_w) \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{-2/3}}{k_f + \frac{c_{\mu}^{1/4} K_s^{1/2}}{U \ln(E x_s^+) / k_L} (v_s - v_w) \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{-2/3}} c_{O_2}^b \quad (4)$$

3.2 双相不锈钢流动腐蚀的综合数学模型

在实际工况条件下, 流体中流动腐蚀的总失重等于流体中腐蚀电化学因素与流体力学因素间协同效应量, 即: $V^- = \Delta V_{\text{协}}$. 虽然双相不锈钢比碳钢耐蚀, 硬度较高, 两相流中流体对双相不锈钢表面的切削磨耗作用较小, 但也不可忽略. 因此, 协同效应量 $\Delta V_{\text{协}}$ 为

$$\Delta V_{\text{协}}^- = \Delta V_1^- + \Delta V_2^- \quad (5)$$

式中 ΔV_1 为协同效应引起的腐蚀量 (以金属离子形式失重); ΔV_2 为协同效应引起的磨耗量 (以金属原子形式失重), ΔV_2 式的推导见文献 [4].

(1) 层流条件下流动腐蚀速率的计算: 将式 (3) 及 ΔV_2 式代入式 (5), 推导出公式 (6).

当 $\alpha \leq 18.5^\circ$ 时

$$V^- = M \frac{k_f \frac{D}{c_{O_2}^b - c_{O_2}^w} \left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}}{k_f + \frac{D}{c_{O_2}^b - c_{O_2}^w} \left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}} c_{O_2}^b + \frac{m(\tilde{U} \sin \alpha - \tilde{U}_{cr})}{2p} \left[\tilde{U} \cos \alpha - \frac{3}{2} (\tilde{U} \sin \alpha - \tilde{U}_{cr}) \right] \quad (6a)$$

当 $\alpha \geq 18.5^\circ$ 时

$$V^- = M \frac{k_f \frac{D}{c_{O_2}^b - c_{O_2}^w} \left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}}{k_f + \frac{D}{c_{O_2}^b - c_{O_2}^w} \left(\frac{dc}{dx}\right)_{x=0}} c_{O_2}^b + \frac{m(\tilde{U} \sin \alpha - \tilde{U}_{cr})^2 \cos^2 \alpha}{12p \sin^2 \alpha} \quad (6b)$$

(2) 湍流条件下流动腐蚀速率的计算: 将式 (4) 及 ΔV_2 式代入式 (5), 推导出公式 (7).

当 $\alpha \leq 18.5^\circ$ 时

$$V^- = \frac{M}{U} \frac{k_f \frac{c_{\mu}^{1/4} K_s^{1/2}}{\ln(E x_s^+) / k_L} (v_s - v_w) \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{-2/3}}{k_f + \frac{c_{\mu}^{1/4} K_s^{1/2}}{U \ln(E x_s^+) / k_L} (v_s - v_w) \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{-2/3}} c_{O_2}^b + \frac{m(\tilde{U} \sin \alpha - \tilde{U}_{cr})}{2p} \left[\tilde{U} \cos \alpha - \frac{3}{2} (\tilde{U} \sin \alpha - \tilde{U}_{cr}) \right] \quad (7a)$$

当 $\alpha \geq 18.5^\circ$ 时

$$V = \frac{M}{U} \left[k_f \frac{c_\mu^{1/4} K_s^{1/2}}{\ln(E x_s^+) / k_L} (v_s - v_w) \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)^{-2/3} + \frac{m(\tilde{U} \sin \alpha - \tilde{U}_{cr})^2 \cos^2 \alpha}{12 \rho \sin^2 \alpha} \right]^{-2/3} c_{O_2}^b + \quad (7b)$$

其中

$$M = \frac{M_{Fe} Z_c}{M_{O_2} Z_a}$$

可见，双相不锈钢在两相流中的腐蚀速率计算公式较为复杂，不但与液相流体中的传质有关，而且与钝化膜内的传质相关。

4 结果与讨论

4.1 流体力学参数与腐蚀的关系

为了研究流体流动过程对双相不锈钢腐蚀的影响，对方程 (1) 进行求解，模拟计算所得到的表面切应力 τ 、传质系数 k 二者与其实测腐蚀速率之间的关系如图 1 所示。由图可知，随着表面切应力、传质系数的增大，双相不锈钢腐蚀速率迅速增大，二者与腐蚀速率之间基本上呈直线函数关系。这表明，与单相流中相比，由于第 2 相固体颗粒的加入，引起了流体流场和浓度场的改变，流体力学作用和传质过程大大强化，导致流体力学因素与腐蚀电化学因素之间的协同效应量增大，尤其是在高流速条件下颗粒还可能对金属材料表面起冲刷作用（冲击速度、冲击角度以及冲击频度），导致双相不锈钢流动腐蚀加剧。

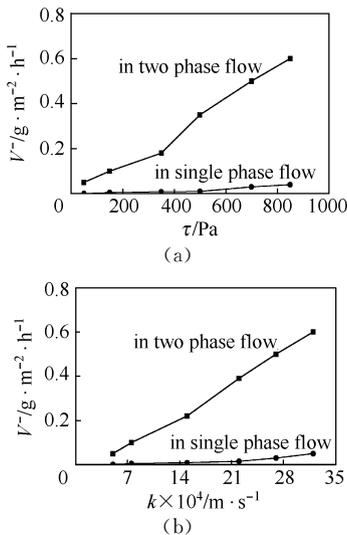


Fig. 1 Relation between surface shear stress or mass transfer coefficient in two-phase liquid-particle flow and erosion corrosion rates

4.2 传质系数与表面切应力的关系

为了进一步研究流体流动对双相不锈钢腐蚀的加剧作用，模拟计算了两相流中液相传质系数 k_L 、双相不锈钢钝化膜中的传质系数 k_f ，二者与表面切应力 τ 之间的关系如图 2 所示。由图可知，与双相不锈钢在单相流中的腐蚀相比，两相流中的 k_L 和 k_f 远大于单相流中的值，且随着 τ 的增大 k_L 、 k_f 都迅速增加，但 k_f 的增大程度比 k_L 大。这表明，在固液两相流中，随着流体力学因素加强，介质处于强烈的湍流运动状态，导致两相流中的湍流动能 K 、湍流耗散率 ϵ 显著增大（见图 3），使流动腐蚀

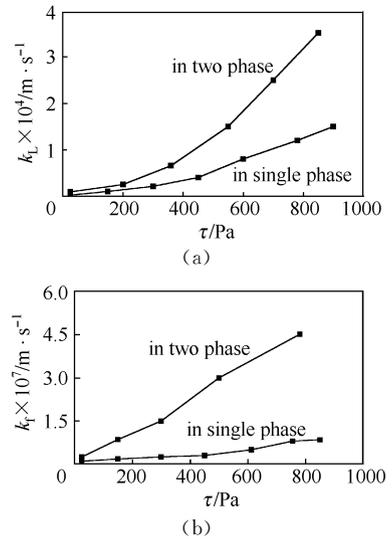


Fig. 2 Relationship of mass transfer coefficient in two-phase liquid-particle flow and in passive film at surface of duplex stainless steel

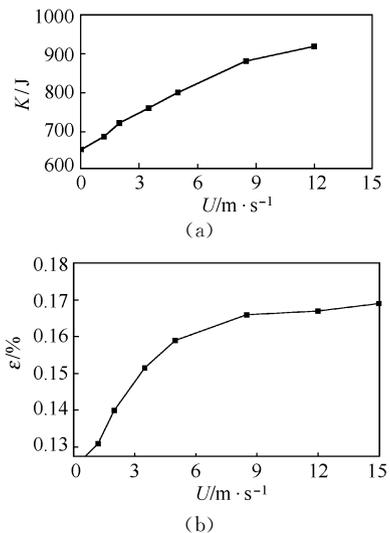


Fig. 3 Influence of flow velocity on kinetic energy of turbulence (K) and dissipation of kinetic energy of turbulence (ϵ) in two-phase liquid-particle flow

过程中的动量和质量传递效应强化, 导致流体边界层中的传质系数 (k_L) 迅速增大; 而相界膜中的传质系数 (k_f) 比 k_L 小 1~2 个数量级. 这说明了氧在膜中的传递比在流体边界层中困难得多.

4.3 流动腐蚀速率数值计算与实测结果的比较

对式 (6) 和式 (7) 进行求解, 模拟计算得到的两相流不锈钢腐蚀速率与实测值随流速的变化示于图 4, 两相流中材料的总失重与模拟计算得到的切削磨耗量之间的关系示于图 5. 由图 4 可见, 在相同的流速条件下模拟计算得到的腐蚀速率与实测值基本一致, 这就证明了在单相流基础上引入固相颗粒运动理论建立的固液两相流中双相不锈钢流动腐蚀的综合模型是正确的, 开发的相应程序软件是合理的. 固相颗粒的加入使流体力学作用明显强化, 并与电化学因素之间产生协同效应, 引起的腐蚀量 (以离子形式失重) 急剧增大强化, 造成双相不锈钢流动腐蚀的加剧. 但其流动腐蚀的协同效应中电化学腐蚀失重在总腐蚀失重中一直占主导地位, 固相颗粒的纯磨耗作用很小 (见图 5), 但随着流速的上升纯磨耗失重率增大, 在高流速阶段固体颗粒引起的磨耗量将不可忽视.

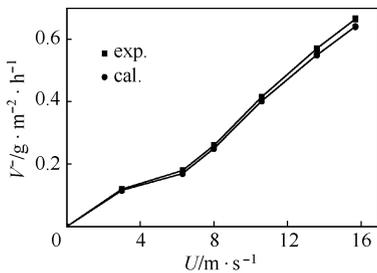


Fig. 4 Comparison of numerical corrosion rates of duplex stainless steel with measured ones

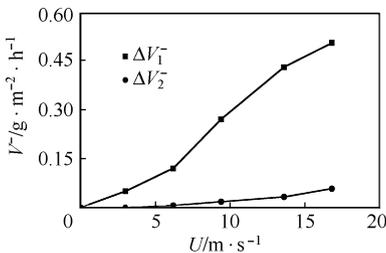


Fig. 5 Comparison of corrosion component (ΔV_1^-) and wear component (ΔV_2^-) under various velocities

4.4 腐蚀协同效应机理的实验验证

为了用实验方法进一步验证双相不锈钢在两相流中的流动腐蚀的协同效应机理, 采用外加阴极电流法研究在抑制腐蚀电化学因素条件下双相不锈钢

流动腐蚀降低的程度, 控制比双相不锈钢自腐蚀电位负 300 mV 条件下测定施加阴极电流后双相不锈钢流动腐蚀速率的大小, 其随流速的变化情况示于图 6. 可以看出, 在实验流速范围内, 在不同流速条件下施加阴极电流后流动腐蚀速率均显著降低, 在高流速条件下, 其腐蚀速率降低的程度达 90% 以上. 这表明, 施加阴极电流后, 由于抑制了腐蚀电化学因素, 从而大幅度削弱了腐蚀电化学因素与流体力学因素间的协同效应, 导致腐蚀显著降低. 这证明两相流中双相不锈钢流动腐蚀加剧的协同效应中电化学腐蚀量在总腐蚀失重中一直占主导地位, 固相颗粒的纯磨耗作用很小.

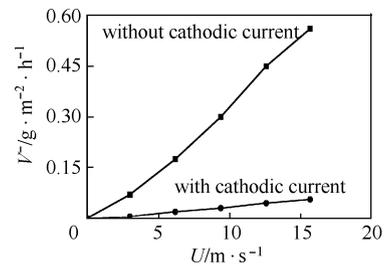


Fig. 6 Comparison of duplex stainless steel erosion corrosion rates with and without cathodic current protection in various velocities

5 结 论

(1) 数值计算的结果表明, 在两相流条件下, 颗粒相的存在会大大强化液相流体的流体力学因素, 导致膜内传质速度加快. 同时其与腐蚀电化学因素之间的交互作用引起的协同效应使腐蚀量增大, 造成双相不锈钢流动腐蚀的加剧.

(2) 两相流中双相不锈钢腐蚀速率的计算值与实测值基本一致, 说明所建立的两相流中流动腐蚀模型是正确的, 开发的程序软件是合理的. 验证了两相流中双相不锈钢的腐蚀主要是由于流体力学作用与电化学因素交互作用引起的协同效应强化所致, 其中腐蚀电化学因素仍然起主导作用.

(3) 对于表面覆盖有钝化膜的材料, 在固液两相流的数值模拟研究中建立正确的双相不锈钢流动腐蚀动力学模型是数值计算方法在双相不锈钢流动腐蚀研究中应用成功与否的关键.

符 号 说 明

c ——浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

D ——扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

- d_p ——颗粒直径, m
- g, g_i ——分别为重力加速度及其在 i 方向的分量, $m \cdot s^{-2}$
- K ——湍流动能, J
- k ——传质系数, $m \cdot s^{-1}$
- k_f, k_L ——分别为双相不锈钢膜中传质系数、两相流中液相传质系数, $m \cdot s^{-1}$
- M ——相对原子质量
- m ——颗粒冲击质量, kg
- p ——材料屈服强度, Pa
- r ——坐标轴位置, m
- t ——时间, s
- U ——流体主体流速, $m \cdot s^{-1}$
- U_{cr} ——临界颗粒冲刷速度, $m \cdot s^{-1}$
- u, v ——分别为流体在 x, r 方向的流动速度分量, $m \cdot s^{-1}$
- u_i, u_j ——分别为流体在 i, j 方向的瞬态速度分量, $m \cdot s^{-1}$
- u_{pi}, u_{pj} ——分别为固体颗粒在 i, j 方向的瞬态速度分量, $m \cdot s^{-1}$
- x ——坐标轴位置, m
- Z ——阴、阳极反应电荷转移数
- α ——碰撞角, ($^\circ$)
- δ_{ij} ——Kronecker 符号
- ϵ ——湍流动能耗散率, %
- μ ——流体动力学黏度, $m \cdot s^{-1}$
- μ_{eff} ——有效黏度, $m \cdot s^{-1}$
- ρ ——流体密度, $kg \cdot m^{-3}$
- ρ_p ——固体颗粒密度, $kg \cdot m^{-3}$
- τ ——表面切应力, Pa
- τ_p ——颗粒定性时间, s

上、下角标

- b——介质
- s——节点处
- w——试样表面

References

- Liu Jingjun (刘景军), Lin Yuzhen (林玉珍), Yong Xingyue (雍兴跃), Wu Jiu (吴玖), Han Junyuan (韩俊媛). Erosion-corrosion of Duplex Stainless Steel with Different Heat Treatment in Flowing 3.5% NaCl Solution. *J. Corrosion Science and Protection Technology*, 2002, **14** (3): 129
- Lin Yuzhen (林玉珍), Liu Jingjun (刘景军), Yong Xingyue (雍兴跃), Li Huanwen (李焕文), Cao Chunan (曹楚南). Application of Numerical Method to Study of Flow-induced Corrosion (I) Metal Corrosion under Laminar Condition. *J. Chin. Soc. Corros. Protect.* (中国腐蚀与防护学报), 1999, **19** (1): 1
- Yong Xingyue (雍兴跃), Liu Jingjun (刘景军), Lin Yuzhen (林玉珍), Li Huanwen (李焕文), Cao Chunan (曹楚南). Application of Numerical Method to Study of Flow-induced Corrosion (II) Metal Corrosion under Turbulent Condition. *J. Chin. Soc. Corros. Protect.* (中国腐蚀与防护学报), 1999, **19** (1): 8
- Liu Jingjun (刘景军), Lin Yuzhen (林玉珍), Tian Xingling (田兴玲), Yong Xingyue (雍兴跃), Li Xiaoyu (李效玉). Numerical Simulation of Flow Induced Corrosion of Carbon Steel in Liquid/Solid Two-phase Loop Flow System. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, **55** (2): 231
- Liu Jingjun (刘景军), He Zhipeng (贺志鹏), Su Yulong (苏育龙), Lin Yuzhen (林玉珍). Study for Erosion-Corrosion of Carbon Steel in Flowing 3.5% NaCl Solution with Flow Loop Simulating Apparatus. In: Development and Application of Surface & Anti-corrosion Technology in 21 Century, Shanghai, 2000. 135
- Lam C K, Bremhorst K. A Modified Form of the $k-\epsilon$ Model for Predicting Wall Turbulence. *ASME Trans. J. of Fluids Eng.*, 1981, **103**: 456—458
- Nesic S, Postlethwaite. A Predictive Model for Localized Erosion-Corrosion. *J. Corrosion*, 1991, **47** (8): 583—584
- Wang Y, Postlethwaite J, Bergtrom D J. Modelling Mass Transfer Entrance Lengths in Turbulent Pipe-flow with Application to Small Cathodes for Measuring Local Mass Transfer Rates. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1996, **26**: 471—479
- Crowe C T, Sharma M P, Stock D E. The Particle-source-in Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows. *ASME Trans. J. Fluids Eng.*, 1977, **102**: 325
- Chen X Q, Pereira J C F. Computation of Particle Dispersion in Turbulent Liquid Flows Using an Efficient Lagrangian Trajectory Model. *J. Numerical Methods in Fluids*, 1998, **26**: 345—360
- Bergevin K. Effect of Slurry Velocity on the Mechanical and Electrochemical Components of Erosion-Corrosion in Vertical Pipes; [thesis]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1984
- Yong Xingyue (雍兴跃), Lin Yuzhen (林玉珍), Liu Jingjun (刘景军). Flow Induced Corrosion Kinetics Model of Duplex Stainless Steel in Flow Loop System. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2002, **53** (8): 787
- Cao Chunan (曹楚南). Corrosion Electrochemistry, Thesaurus of Corrosion and Protection (腐蚀电化学——腐蚀与防护全书). Beijing: Chemistry Industry Press, 1994. 150