

# 碳钢弯管段流动加速腐蚀问题分析与研究

程俊杰<sup>1</sup>, 王宏铭<sup>1</sup>, 潘代龙<sup>2</sup>, 司晓东<sup>2\*</sup>, 董云山<sup>2</sup>

(1. 宁夏京能宁东发电有限责任公司, 宁夏 银川 751400;

2. 江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏 镇江 212100)

**[摘要]** 弯管是化工及电力管道中容易失效的构件之一。本文通过电化学测量研究了碳钢弯管段不同入口流速(1 m/s, 2 m/s 和 3 m/s)下腐蚀电流密度的分布情况,并基于稳态传质电化学腐蚀结合电偶腐蚀理论建立了碳钢弯管段肘部流动加速腐蚀预测模型。试验结果表明,碳钢弯管段的腐蚀电流密度最大值出现在弯管段的最外侧,这说明弯管外侧的弯曲部位更容易发生穿孔。此外,弯管段的电偶腐蚀密度分布与试验结果和电厂实际统计情况相一致,验证了该模型的准确性。研究结果可为电力、化工等工业输运管道的设计优化和运行监测提供有效依据。

**[关键词]** 流动速腐蚀; 弯管; 电偶腐蚀; 预测模型; 碳钢; 腐蚀电流密度

**[中图分类号]** TG174

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2024)01-0008-07

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.01.002

## 0 引言

流动加速腐蚀(FAC)是化学溶解和溶解产物传质过程共同作用的结果<sup>[1-3]</sup>。在这类腐蚀中,保护性氧化膜溶解于流体中,氧化膜将变得越来越薄,失去保护作用,严重时将使巨大的经济损失和严重的人员伤亡。

近年来,研究学者提出了许多预测和计算FAC速率的新方法<sup>[4-7]</sup>。Gu等<sup>[8]</sup>提出了一种基于高斯分布的条件扩展方法,建立了一个三层反向传播神经网络模型(BPNN)来预测特征腐蚀参数。经试验证明,该模型具有较高的预测精度和推广性能。Nash等<sup>[9]</sup>提出了一种利用管道表面温度测量来监测FAC引起的管壁变薄的诊断模型。与当前管道检测方法相比,该技术具有易使用性和低成本的优

势。Ajmal等<sup>[10]</sup>和Zhong等<sup>[11]</sup>利用CFD模拟和阵列电极技术,分别对90°弯管和异径管的FAC速率分布进行了研究,并发现腐蚀速率分布与流速和壁面剪切应力的分布十分吻合,即流速越高或壁面剪切应力越高,局部腐蚀速率越高。虽然这些方法能够较好地改善FAC情况,但无法解释实际弯管外弯侧先于内弯侧穿孔的现象。因此,继续深入研究各因素对FAC的影响,并提出有效预测FAC速率的模型至关重要。

本文基于稳态传质电化学腐蚀理论与一维电偶腐蚀模型,提出了一种预测碳钢弯管段FAC特征的方法。分别计算了不同速率下弯管段肘部横截面的FAC速率,模拟结果与试验及核电厂现场管道统计结果相符,证明该模型可以有效评估由氧浓度差引起的电偶腐蚀。

## 1 试验方法

试验采用自设计高温循环回路FAC试验系统和阵列电极技术,通过电化学测量了不同流速下20号碳钢弯管段FAC速率。循环回路FAC试验系统中,溶液温度为120℃。高温水箱中的压力为2MPa。管道入口流速分别设置为1 m/s、2 m/s和3 m/s。溶液在常温下的pH值为9.3,向溶液中通入氮气并开启加热装置,溶解氧浓度约为3.1 mg/L。利用电化学工作站进行电化学测量,电化学阻抗谱图的频率

**[收稿日期]** 2023-11-26

**[第一作者]** 程俊杰(1986—),男,甘肃天水人,中级工程师,大学本科,主要从事电厂热力管道安全防护工作。

**[通信作者]** 司晓东(1990—),男,河南驻马店人,讲师,博士,主要从事管道安全防护技术。

**[基金项目]** 江苏省双创博士项目(JSSCBS20210994);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB430015);中国博士后科学基金第73批面上资助项目(2023M732564)。

**[引用格式]** 程俊杰,王宏铭,潘代龙,等. 碳钢弯管段流动加速腐蚀问题分析与研究[J]. 有色设备,2024,38(1):8-14.

范围为  $10^{-1} \sim 10^5$  Hz, 正弦电压激励信号的幅值为 10 mV。弯管试验段装置和结构如图 1 所示。阵列

电极从弯管段的入口至出口分别标记为 A5 ~ A1 (内弯侧) 和 B7 ~ B1 (外弯侧)。

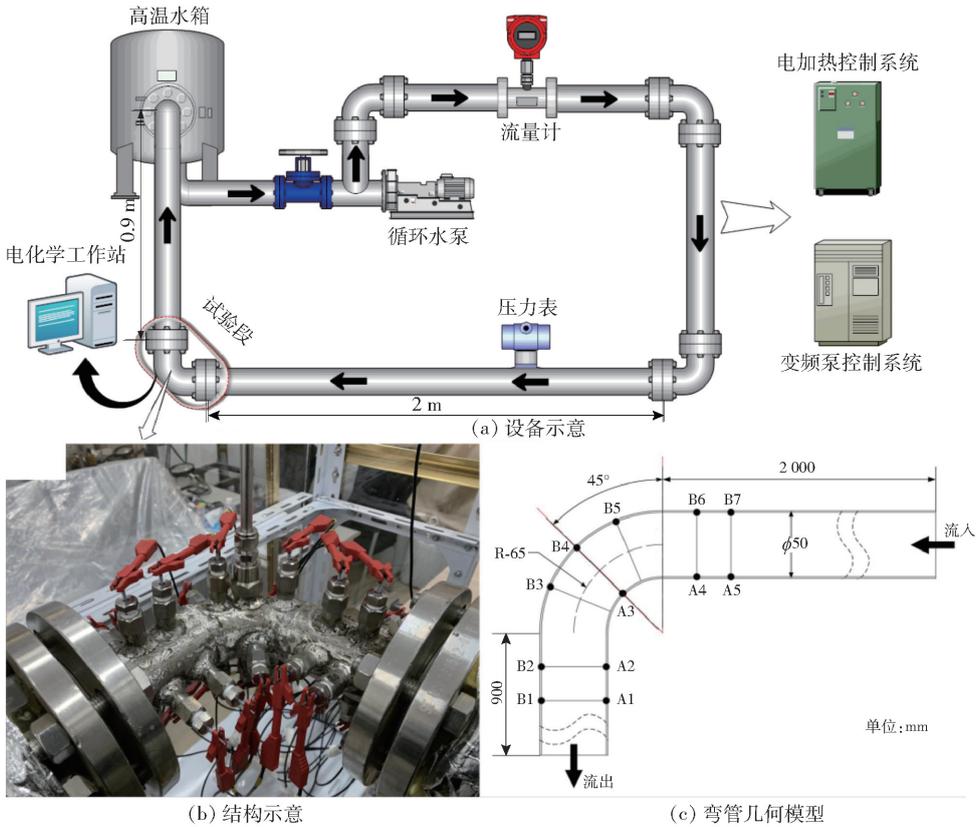
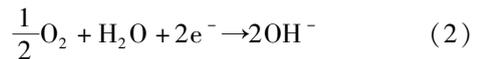


图 1 弯管试验段装置及结构示意图

## 2 FAC 预测模型

介质中溶解氧含量在蒸汽冷凝水管间较低, 腐蚀速率可通过主体溶液到达管道壁面溶解氧的浓度来确定。由于阴极极化电阻大于阳极极化电阻, 整个极化过程由阴极控制。当流体流经管道时, 会在壁面处形成较大速度梯度的流体边界层。因流体边界层的存在, 主体溶液中的溶解氧向管壁的传质过程会受到影响。在边界层外, 由于流体对流混合良好, 氧气分布是均匀的。在边界层内, 流体受到黏性力的影响, 具有较大的速度梯度。管道表面溶解氧的浓度为零, 这是因为当溶解氧到达表面时会发生还原反应生成  $\text{OH}^-$  离子。管道内发生电化学腐蚀时, 在管道内表面会发生阳极反应和阴极反应。管道壁的某些区域是阳极区域, 而其他一些区域则是阴极区域。在阳极处, 金属基体失去电子并被氧化为  $\text{Fe}^{2+}$  离子,  $\text{Fe}^{2+}$  溶解于溶液中导致基体局部损失<sup>[12-13]</sup>。而在阴极处, 氧气接受电子并被还原为

$\text{OH}^-$  离子, 见式(1)和(2)。当反应达到平衡时, 阳极与阴极电流密度相等, 总电流密度为零。



电化学腐蚀过程的控制步骤主要分为电化学反应控制和传质过程控制。在不同的控制步骤下, 腐蚀速率的计算方法也会有所不同。当电化学反应系数大于传质系数时, 表明电化学腐蚀系统由溶解氧传质来控制。腐蚀速率与传质系数密切相关:

$$I_{\text{corr}} = nFK_1C_b \quad (3)$$

式中:  $I_{\text{corr}}$  为电化学腐蚀电流密度,  $\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $n$  为发生腐蚀反应转移的电子数;  $F$  为法拉第常数,  $96\,500 \text{ C}/\text{mol}$ ;  $K_1$  为传质系数,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $C_b$  为到达管道壁的溶解氧浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ 。

传质系数可由下式计算:

$$K_1 = 0.646 \left( \frac{d\nu\rho}{\mu} \right)^{1/2} \left( \frac{\mu}{\rho D_d} \right)^{1/3} \left( \frac{D_d}{d} \right) \quad (4)$$

式中： $d$  为管道的特征长度， $m$ ； $u$  为流体的速度， $m/s$ ； $\rho$  为流体的密度， $kg/m^3$ ； $\mu$  为流体的动力黏度， $Pa \cdot s$ ； $D_d$  为气体在水中的扩散系数， $m^2/s$ 。

根据 Hayduk 和 Minhas<sup>[20]</sup> 提出的气体在水中扩散系数的计算公式：

$$D_d = (1.25 V_A^{-0.19} - 0.365) (10^{-8}) \mu_w^{9.58/V_A^{-1.12}} T^{1.52} \quad (5)$$

式中： $V_A$  为溶解氧的摩尔体积， $cm^3/mol$ ； $\mu_w$  为水的动力粘度， $mPa \cdot s$ ； $T$  为绝对温度， $K$ 。

当电化学反应系数与溶解氧的传质系数相差较小时，腐蚀电流密度可表示为：

$$I_{corr} = \frac{nFK_1K_2C_b}{nFK_1 + K_1K_2\delta_0 + K_2D_d\delta_B} \quad (6)$$

式中： $K_2$  为电化学反应系数， $m/s$ ； $\delta_0$  为扩散层的厚度， $m$ ； $\delta_B$  为流体边界层的厚度， $m$ 。

电化学反应系数与扩散层厚度可分别由式(7)和(8)计算：

$$K_2 = nFk_0 \exp \left( -\frac{n\alpha F \Delta E}{RT} \right) \quad (7)$$

$$\delta_0 = 3 \left( \frac{1}{S_c} \right)^{1/3} \delta_B \quad (8)$$

式中：电化学反应速率， $m/s$ ； $\alpha$  为反应平衡常数； $\Delta E$  为活化能， $V$ ； $R$  为理想气体常数； $S_c$  为施密特数。

根据溶解氧传质控制的吸氧动力学方程，其腐蚀电位为：

$$E_{corr} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \left( 1 - \frac{I_{corr}}{I_d} \right) \quad (9)$$

式中： $I_d$  为极限扩散电流密度， $A/cm^2$ 。在阳极和阴极极化曲线相互交叉时，交叉点横坐标的腐蚀电流密度即为溶解氧的极限扩散电流密度。

经典的 FAC 模型无法解释弯管段外弯侧的腐蚀速率高于内弯侧的现象。当流体进入弯管后，由于离心力作用的影响，会在流场中形成与主流方向垂直的二次环流，称为迪恩涡。迪恩涡的涡核向弯管外弯侧移动。在弯管内弯侧，流体速度最大，加强了传质过程；而在外弯侧，流速相对较小，传质较内弯处弱。根据稳态传质和壁面剪切应力理论，内弯侧的腐蚀速率应大于外弯侧。然而实际情况却恰恰相反，外弯侧比内弯侧更早失效<sup>[14-15]</sup>。这表明弯管段除了吸氧腐蚀外，还存在其他类型的腐蚀，即电偶腐蚀（也称为氧浓差电偶腐蚀）。

管道是天然的电子导电层，而管道壁面始终有

一层流体覆盖。这层流体充当离子导电层，构成了电偶腐蚀系统。在该系统中，弯管内弯侧的流体流速相对较快，压力低，溶解氧浓度高，因此作为电偶腐蚀系统的阴极；而弯管外弯侧的流体流速相对较慢，压力高，溶解氧浓度低，因此也作为电偶腐蚀系统的阴极。电子从管道阳极迁移到阴极，并带有负电荷，因此电流与电子迁移的方向相反。反之， $Fe^{2+}$  离开管道，在流体中携带一个正电荷，产生从阳极流向流体的电流。同时， $OH^-$  离开阴极，在流体中带着负电荷，产生从流体返回阴极的电流。因此，管道内的电子迁移引起的电流与离子迁移引起的电流连接在一起，形成了一个类似于典型电池的电路。电偶腐蚀可以加速外弯侧的腐蚀速率，而内弯侧则经历自身的腐蚀过程。将弯管肘部截面简化为一维模型，如图 2 所示。该模型在直角坐标系中，将弯管的内弯处定义为  $O$  点，外弯处定义为  $b$  点， $O$  点到  $b$  点的距离等于图中  $A$  点到  $B$  点的弧长。

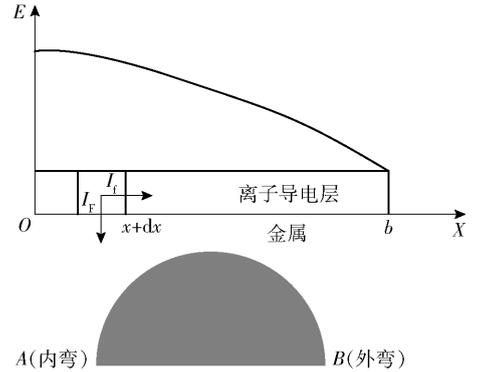


图 2 一维电偶腐蚀模型

在弯管电偶腐蚀系统中，所有管道壁面覆盖着一层流体。弯管在吸氧腐蚀作用后形成了氧浓差电偶腐蚀系统。其任何位置作为系统的起点或终点时，都存在相应的腐蚀电流密度  $I_{corr}$  和腐蚀电位  $E_{corr}$ 。这样的电偶腐蚀系统可以称为开端腐蚀电偶。对于电偶腐蚀系统，存在法拉第电流密度 ( $I_F$ )，流动电流密度 ( $I_j$ )，腐蚀电位 ( $E^x$ ) 和离子导电层电位 ( $\phi$ )。法拉第电流密度  $I_F$  和流动电流密度  $I_j$  的方向分别与材料表面垂直和平行。法拉第电流密度 ( $I_F$ ) 是指穿过离子导电层进入管道表面的电流密度，可表示为：

$$I_F = -\frac{\phi}{R_p} \quad (10)$$

式中： $R_p$  为材料的极化阻抗， $\Omega \cdot cm^2$ 。

流动电流密度  $I_f$  是指离子导电层中靠流动的介质传导的电流密度, 其表达式为:

$$I_f = -\frac{1}{R_s} \frac{d\phi}{dx} \quad (11)$$

式中,  $R_s$  为溶液阻抗,  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 其值与溶液电阻率有关; 离子导电层电位  $\phi$  是指构成电偶腐蚀系统任意点电位与开路电位的差值。

总电偶腐蚀电流密度  $i_F$  (单位,  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) 可通过流动电流密度  $I_f^b$  减去流动电流密度  $I_f^0$  获得, 表达式为:

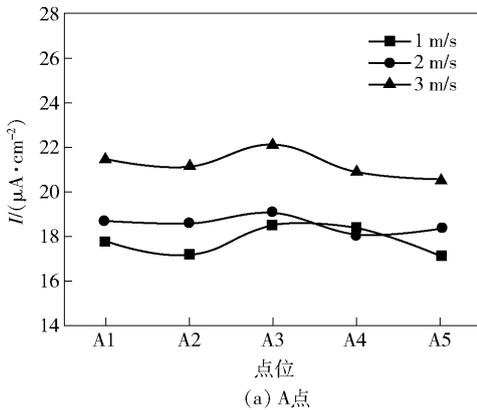
$$i_F = I_f^b - I_f^0 \quad (12)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 计算步骤

采用预测模型计算弯管段 FAC 速率并进行实验验证, 分为以下步骤:

1) 使用计算流体力学软件 Fluent 计算不同入口流速 (1 m/s、2 m/s、3 m/s) 弯管内的速度分布, 选



择弯管肘部横截面作为研究对象。

2) 根据弯管段在不同流速下内弯和外弯侧的速度值, 利用式(3)或式(6)计算得到 A 点和 B 点的腐蚀电流密度  $I_{\text{corr}}$ , 联立式(9)计算开路电位  $E_{\text{corr}}^0$  和  $E_{\text{corr}}^b$ 。

3) 使用式(10) ~ (12) 计算不同流速下电偶腐蚀电流密度  $i_F$ , 并与试验结果进行比较。

#### 3.2 试验结果

首先通过实验获得弯管段内、外弯处工作电极的电化学阻抗谱图, 见文献[16]并使用等效拟合电路<sup>[17]</sup>处理阻抗谱图。然后, 根据 Stern-Geary 方程<sup>[18]</sup>求得不同流速下阵列工作电极的腐蚀电流密度, 结果如图 3 所示。从图中可以观察到, 随着流速的增加, 对应位置处工作电极的腐蚀电流密度逐渐增加。在不同流速下, 最大的腐蚀电流密度均出现在外弯侧 (B4)。因此可以得出, 弯管外弯侧比内弯侧的腐蚀更加严重。外弯侧属于 FAC 高危区, 这与电厂的实际统计情况一致<sup>[19]</sup>。

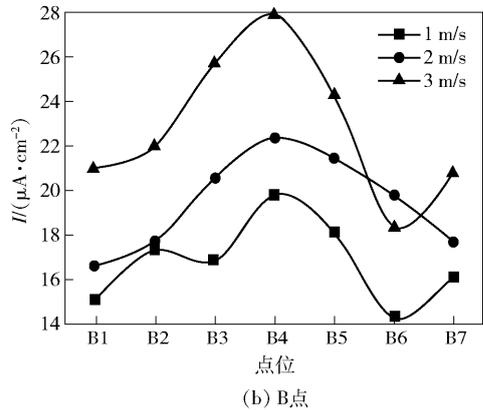


图 3 不同流速下弯管试验段阵列工作电极腐蚀电流密度

#### 3.3 Fluent 计算

首先, 使用 ANSYS 软件中的 Geometry 模块建立弯管 3D 模型。采用 Realizable  $k-\varepsilon$  (RKE) 湍流模型求解 Navier-Stokes 方程, 近壁区域使用非平衡壁

面函数准确预测二次流问题, velocity-inlet 为入口边界条件, 流速分别为 1 m/s、2 m/s、3 m/s, 出口边界条件设定为 pressure-outlet, 具体工况参数如表 1 所示。

表 1 工况参数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/ $\text{MPa}$	流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	介质	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	溶解氧浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
120	2	1~3	水	34.9	3.1

不同流速下弯管段  $45^{\circ}$  横截面的速度分布云图如图 4 所示, 从图中可以看出, 当入口流速分别为 1 m/s 增加至 3 m/s 时, 弯管内弯侧对应的最大速度

值分别为 1.22 m/s、2.47 m/s 和 3.8 m/s; 在外弯侧的最小速度值分别为 0.59 m/s、1.21 m/s 和 1.82 m/s。

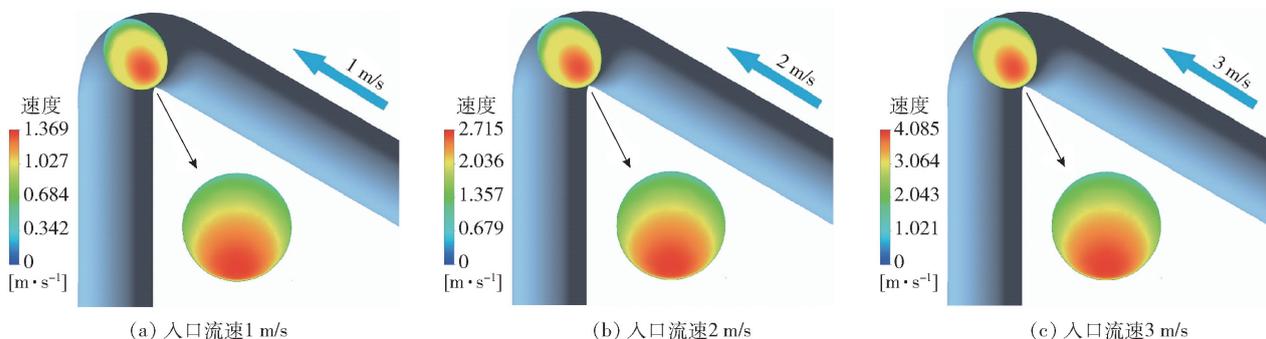


图 4 不同流速下弯管 45°横截面速度分布

### 3.4 腐蚀速率计算

计算某一腐蚀系统的腐蚀速率时,首先需要确定相应的腐蚀控制步骤,再进行后续腐蚀速率的计算。根据电化学反应理论和传质特征,电化学反应过程的控制步骤主要分为电化学反应控制和传质过程控制。判定电化学反应控制步骤的方法有很多,本文通过电化学反应系数和传质系数的关系进行判定。根据式(4)计算得到不同流速下的传质系数  $K_1^1 = 9.98 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、 $K_1^2 = 1.41 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  及  $K_1^3 = 1.73 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,据式(7)计算得到不同流速下电化学反应系数  $K_2^1 = 1.91 \text{ m/s}$ 、 $K_2^2 = 1.91 \text{ m/s}$  及  $K_2^3 = 1.91 \text{ m/s}$ ,式中,  $\alpha = 0.3$ ,  $k_0 = 1e-6$ ,  $\Delta E = -0.341 \text{ V}$ 。结果显示  $K_2 > K_1$ ,因此,电化学反应过程控制步骤由溶解氧传质控制。

在弯管段 45°横截面上,沿着管壁从外弯侧到内弯侧依次选取 10 个观测点。这些观测点具有不同的流速、腐蚀电位和腐蚀电流密度。由式(4)和式(3)计算出这 10 个观测点的传质系数和自腐蚀电流密度,如图 5 和 6 所示。

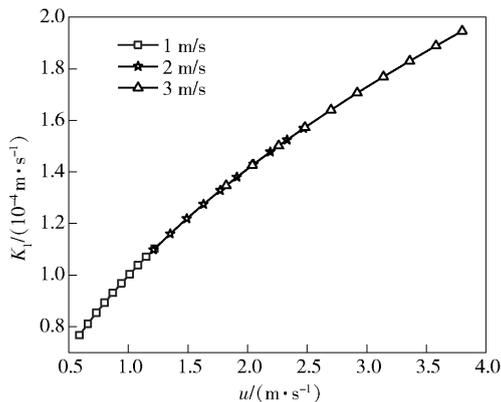


图 5 不同流速下弯管 45°横截面观测点传质系数

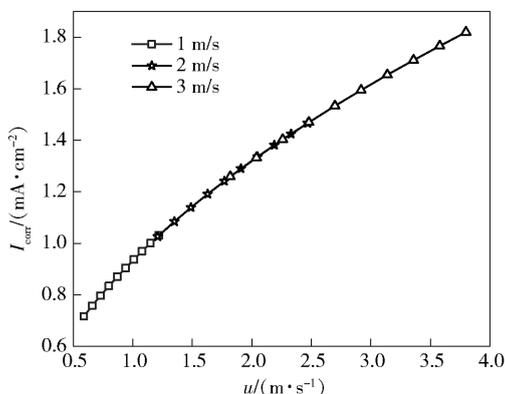


图 6 不同流速下弯管肘部横截面观测点自腐蚀电流密度

侧到内弯侧的传质系数和腐蚀电流密度呈线性增加。并且,入口流速越大,传质系数和腐蚀电流密度越大。这是因为流速增加导致流体边界层减薄,传质边界层也相应减薄,使主体溶液中的溶解氧能够更容易扩散到管壁,从而减小了阻力,最终导致腐蚀速率增加。计算结果显示,弯管内弯侧应该先于外弯侧失效。然而实际情况与计算结果相反。这表明在弯管段不仅存在传质控制下的吸氧腐蚀,还存在其他类型的腐蚀,即氧浓差电偶腐蚀。

根据一维电偶腐蚀计算模型,计算不同流速下弯管肘部横截面观测点的电偶腐蚀电流密度随流速的变化关系如图 7 所示。从图中可知,电偶腐蚀电流密度随着流速的增加整体呈线性降低趋势。并通过试验结果的对比,发现内弯侧的理论计算结果与试验数据吻合较好,而外弯侧的理论值与试验数据有一定偏差。这是因为本模型电化学反应过程中采用的相关计算参数由日本原子能机构依据其国家碳钢管测量得到,而本试验依据国内 20 号碳钢管为实验材料获得,国内和国外碳钢材料成分存在一定的

从图中可以看出,随着流速的增加,从弯管外弯

偏差,故而两者结果存在少许偏差。然而,理论结果与试验结果都表明弯管外弯侧的腐蚀速率更大,而内弯侧的腐蚀速率更小,验证了 FAC 预测模型的可靠性。在低流速区域,电偶腐蚀电流密度  $i_f$  比自腐蚀电流密度  $I_{corr}$  大 2 个数量级,这表明弯管段的流动加速腐蚀过程不仅仅是溶解氧传质控制下的吸氧腐蚀,还存在不同流速区域形成的氧浓差电偶腐蚀。当形成该体系后,阳极(低速区)、阴极(高速区)以及管道内壁面附着的溶液层(离子导电层)构成了一个带外电路的原电池,因此弯管外弯侧(阳极)腐蚀反应的方向发生变化,从而加速了电偶腐蚀系统阳极区的腐蚀速率,抑制了阴极区的腐蚀反应。

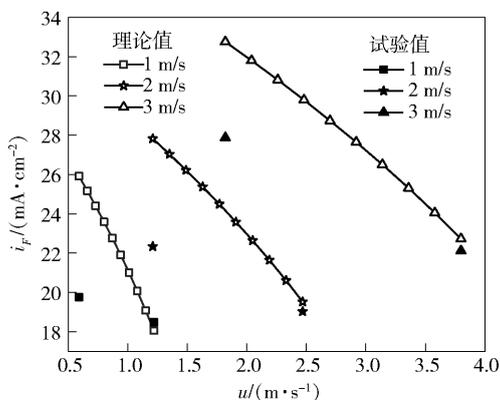


图7 不同流速下弯管肘部横截面观测点电偶腐蚀电流密度

此外,当管道入口流速增大时,腐蚀系统整体的腐蚀速率增加。这是因为在主体溶液中,由于流体对流混合充分,氧浓度分布均匀;在靠近管道表面时,由于流体边界层的影响,流体中溶解氧浓度逐渐降低;在管道表面,氧的浓度为  $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,因为当其到达表面就被还原为  $\text{OH}^-$  离子。因此,在边界层中溶解氧氧浓度分布是一条在金属表面为 0 连接到边界层表面的直线。直线表示氧是通过流体边界层中的扩散而转移的,转移速率  $N$  如下式所示:

$$N = D_d \left( \frac{dC_b}{dX} \right) \quad (13)$$

式中: $X$  为距离金属表面的距离,  $\text{m}$ 。当溶解氧的扩散系数  $D_d$  为常数时,  $N$  与  $(dC_b/dX)$  成正比。随着流速从  $1 \text{ m/s}$  增加至  $3 \text{ m/s}$ ,流动边界层厚度在逐渐减小,使直线斜率更陡,溶解氧的极限扩散电流密度逐渐增加。因此,管道整体的腐蚀速率随流体速度的增加而增加。

## 4 结论

本文基于稳态传质电化学腐蚀理论和一维电偶腐蚀模型相耦合,提出了一种预测碳钢弯管段 FAC 速率新模型,得到结论如下。

1) 弯管段内弯侧和外侧构成氧浓差电偶腐蚀体系,电偶腐蚀电流密度与流速呈反比关系。

2) 弯管肘部的电偶腐蚀电流密度值与试验数据吻合较好,主体溶液中溶解氧的传递速率与流动加速腐蚀速率相关,验证了传质-电偶腐蚀耦合 FAC 预测模型的准确性。

3) 弯管段腐蚀电流密度  $i_f$  在低速区比吸氧腐蚀电流密度  $I_{corr}$  大两个数量级,弯管外侧容易先于内侧发生穿孔,与实际弯管失效情况相一致。

### [参考文献]

- [1] YANG L, ZHANG D, FAN H, et al. In-situ electrochemical testing and fluid dynamics simulation of pipeline defects under flow accelerated corrosion[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2024, 150: 111048.
- [2] WANG Y, Li L, LYU Z, et al. Flow-Accelerated Corrosion Damage in a Steam Pipe Girth Weld[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(8): 3796-3808.
- [3] HU Y, XIN L, HONG C, et al. Microstructural Understanding of Flow Accelerated Corrosion of SA106B Carbon Steel in High-Temperature Water with Different Flow Velocities[J]. *Materials*, 2023, 16(11): 3981.
- [4] UTANO HARA Y, MURASE M. Influence of flow velocity and temperature on flow accelerated corrosion rate at an elbow pipe[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2019, 342: 20-28.
- [5] SI X, SI H, LI M, et al. Investigation of corrosion behavior at elbow by array electrode and computational fluid dynamics simulation[J]. *Materials and Corrosion*, 2020, 71(10): 1637-1650.
- [6] MOREIRA R M, ALMEIDA T C, BANDEIRA M C E, et al. Evaluation of Flow Accelerated Corrosion in Typical Recovery Boiler Environments of Energy Production Industries[J]. *Materials Research*, 2022, 25(10): 143-161.
- [7] SI X, ZHANG R, XU Q, et al. Effects of local velocity components on flow-accelerated corrosion at 90° elbow[J]. *Materials Research Express*, 2018, 6(1): 016557.
- [8] GU Y, WANG M, JIN H. Predictive study of flow-accelerated corrosion characteristic parameters based on the neural network[J]. *Corrosion*, 2022, 78(8): 751-764.

- [9] NASH C, KARVE P, ADAMS D. Diagnosing nuclear power plant pipe wall thinning due to flow accelerated corrosion using a passive, thermal non-destructive evaluation method: Feasibility assessment via numerical experiments[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 386: 111542.
- [10] AJMAL T S, ARYA S B, UDUPA K R. Effect of hydrodynamics on the flow accelerated corrosion (FAC) and electrochemical impedance behavior of line pipe steel for petroleum industry[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 174: 42–53.
- [11] ZHONG X, SHANG T, ZHANG C, et al. In situ study of flow accelerated corrosion and its mitigation at different locations of a gradual contraction of N80 steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 824: 153947.
- [12] 陆晓峰, 朱晓磊, 凌祥. 一种预测异径管流动加速腐蚀速率的新模型[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(6): 431–435.
- [13] ZHU X, LU X, LING X. A novel method to determine the flow accelerated corrosion rate in the elbow[J]. Materials and Corrosion, 2013, 64(6): 486–492.
- [14] KIM J W, LEE S H, PARK C Y. Experimental evaluation of the effect of local wall thinning on the failure pressure of elbows[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239: 2737–2746.
- [15] SI X, ZHOU K, ZHANG R, et al. Experimental and numerical investigation of flow-accelerated corrosion in 90° elbow[J]. Materials Research Express, 2018, 5(6): 066536.
- [16] 潘代龙, 司晓东, 吕金洪. 流速对碳钢弯管段流动加速腐蚀速率的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(5): 1064–1070.
- [17] LIU H, GU T, ASIF M, et al. The corrosion behavior and mechanism of carbon steel induced by extracellular polymeric substances of iron-oxidizing bacteria[J]. Corrosion Science, 2017, 114: 102–111.
- [18] 潘代龙, 司晓东, 张静, 等. 碳钢弯管段在不同温度下流动加速腐蚀性能试验研究[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 110–115.
- [19] TING K, MA Y P. The evaluation of erosion/corrosion problems of carbon steel piping in Taiwan PWR nuclear power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 191(2): 231–243.

## Analysis and research on flow-accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline

CHENG Junjie, WANG Hongming, PAN Dailong, SI Xiaodong, DONG Yunshan

**Abstract:** The elbow is one of the components that are prone to failure in chemical and power pipelines. This study investigates the distribution of corrosion current density in carbon steel elbow sections under different inlet velocities (1 m/s, 2 m/s, and 3 m/s) through electrochemical measurements. Based on steady-state mass transfer electrochemical corrosion combined with galvanic corrosion theory, a prediction model for accelerated corrosion in the flow of carbon steel elbow sections is established. The experimental results show that the maximum corrosion current density of carbon steel elbow sections occurs on the outer side of the elbow, indicating that the curved part on the outer side of the elbow is more prone to perforation. In addition, the distribution of galvanic corrosion density in elbow sections is consistent with the experimental results and statistical data from power plants, validating the accuracy of the model. The research findings can provide effective basis for the design optimization and operation monitoring of industrial transport pipelines in the power and chemical industries.

**Key words:** flow-accelerated corrosion; elbow; galvanic corrosion; prediction model; carbon steel; corrosion current density

