

偏心异径管下游管道流动加速腐蚀数值模拟研究

马建平¹ 程俊杰¹ 陶鑫¹ 司晓东² 董云山²

(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] 偏心异径管是电力、石油、化工等工业管道系统中常见的构件之一,其内部流动受到管径变化的影响,容易出现流动加速腐蚀问题。本文基于计算流体力学模拟,研究了偏心异径管在不同孔径比($\varepsilon = 0.4 \sim 0.7$)和不同速率($1 \sim 7$ m/s)下的流体动力学特征,并结合 Sanchez-Caldera 模型分析了偏心异径管下游管道流动加速腐蚀速率分布特征。结果表明,偏心异径管下游易失效位置位于小孔径侧;在入口流速 3 m/s 条件下,随着孔径比增大,偏心异径管下游管道流动加速腐蚀敏感位置上移;在孔径比为 0.6 条件下,随着入口流速增大,流动加速腐蚀速率显著增大,流速变化对下游管道流动加速腐蚀敏感位置无影响。

[关键词] 偏心异径管; 传质系数; 流动加速腐蚀; 数值模拟

[中图分类号] TG174 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)03-0099-06

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.03.017

0 前言

偏心异径管是指截面形状与常规圆管不同的管道构件,其特点是管道的直径或壁厚在轴线上发生变化。这种管道构件可以有效地减小流体在管道中的流动阻力,同时能够实现流量的均匀分配,具有广泛的应用价值。在发电设备中,偏心异径管可用于

热交换器、蒸汽发生器、涡轮机等设备中,以提高设备的性能和效率。随着电力行业的不断发展,电厂管道系统的安全运行问题日益凸显。偏心异径管作为一种特殊的管道构件,由于其独特的结构和功能,在电厂中得到了广泛应用。然而,由于流动加速腐蚀(Flow-Accelerated Corrosion, FAC)等原因,偏心异径管易遭受腐蚀破坏,给电厂的安全生产和运行带来重大隐患^[1-2]。

由于 FAC 导致的火电和核电厂汽水管道的破裂事故不断发生,产生了严重的人员伤亡和巨大的经济损失。例如,1986 年 Surry 核电站 2 号机组和 2004 年 Mihama 核电站 3 号机组因管道泄漏,发生了多人受伤甚至死亡的事故^[3]。因此,开展流动加速腐蚀的研究,对于确保电厂管道的安全运行和生产具有重要性和紧迫性。

国内外对流动加速腐蚀的研究从未停止。在核电应用较早的国家,如美国、法国和德国等,已经开发了相应的监测软件,这些软件有效降低了 FAC 事故率。流动加速腐蚀的主要影响因素可以分为三部分:流体动力学因素^[3-4]、环境因素^[5]和材料因素^[6-7]。目前,潘代龙^[8-9]和张凌翔^[10]等对碳钢弯管段的 FAC 问题进行了实验和数值模拟研究,并得出了弯管段 FAC 易失效位置位于弯管段最外侧的

[收稿日期] 2024-01-10

[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(2023M732564)。

[作者简介] 马建平(1978—),男,宁夏平罗人,本科,工程师,主要从事安全防护技术研究。

[通讯作者] 司晓东(1990—),男,博士,主要从事管道安全防护技术研究。

[引用格式] 马建平,程俊杰,陶鑫,等. 偏心异径管下游管道流动加速腐蚀数值模拟研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(3):99-104.

MA Jianping, CHENG Junjie, TAO Xin, et al. Numerical simulation study on flow-accelerated corrosion of downstream pipeline in eccentric reducer[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(3): 99-104.

结论。周克毅^[11-12]和彭翊^[13]等利用计算流体力学软件研究了节流孔板下游管道的 FAC 速率,并给出了不同条件下孔板下游管道 FAC 分布特征。张勇^[14]和陆晓峰^[15]等分析了同心异径管的 FAC 分布规律,并结合电化学模型进行了有效解释。然而,我国核电起步较晚,迄今为止还没有开发出有效的 FAC 预测软件,并且对于不同几何形状的管道 FAC 敏感区域的研究仍然不充分。因此,研究能够有效表征不同几何形状管道的 FAC 预测模型,对于后续开发精准的 FAC 监测系统和减少 FAC 事故发生率尤为重要。

本文基于流体动力学模拟和 Sanchez-Caldera

模型,研究了不同孔径比和入口流速下偏心异径管下游管道的流体动力学特征和 FAC 速率分布特征。可应用于核电、火电、化工等工业输运管道的设计优化、运行监测和检修维护策略制定。

1 流动加速腐蚀模型

流动加速腐蚀是化学与传质过程共同作用的结果。目前,在全挥发处理工艺下,流动加速腐蚀主要分为三个过程,如图 1 所示:①金属基体表面生成含铁组分过程;②含铁组分一部分转化为氧化膜,另一部分通过氧化膜扩散至主体溶液;③氧化膜表面溶解的含铁组分扩散至主体溶液。

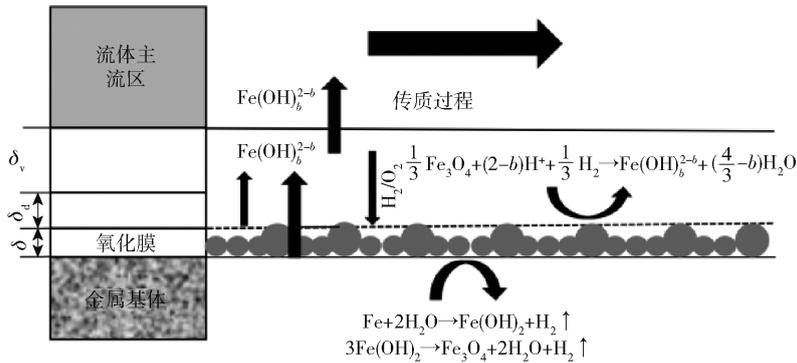


图1 流动加速腐蚀机理图

Sanchez-Caldera^[16]通过研究这三个过程,建立了全挥发处理工艺下的 FAC 预测模型。

$$FAC \text{ rate} = \frac{C_{eq} - C_{\infty}}{\frac{1}{K^*} + \frac{(1-f)\delta}{\theta D} + \frac{1}{k}} \quad (1)$$

式中: C_{eq} 为含铁组分的溶解度, mol/L; C_{∞} 为主体溶液中含铁组分的浓度, mol/L; $K^* = 2.348 \times 10^{14} \exp(-17788/RT)$, 为金属基体电化学反应速率常数(其中 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 为理想气体常数; T 为绝对温度, K); f 为含铁组分转化成氧化膜的比例, Berge^[17]结合实验认为 $f = 0.5$; δ 为氧化膜厚度, 一般认为温度低于 $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 氧化膜非常薄, 可以忽略不计, 温度为 $75 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 氧化膜厚度为 5 nm , 温度为 $100 \sim 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 氧化膜厚度为 $1 \text{ }\mu\text{m}$; θ 为氧化膜孔隙率, 温度低于 $149 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\theta = 0.05\%$, 温度为 $149 \sim 176 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\theta = 6.75 \times 10^3 - 1.48 \times 10^5 T^{[16]}$; $D = 2.5 \times 10^{-15} T/\mu$ (T 为绝对温度, K; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$), 为含铁组分的扩散系数, m^2/s ; k 为含铁组分向主体溶液扩散的传质系数, m/s 。

由于流体主体溶液中铁组分含量极少, 可以忽略不计, 即 $C_{\infty} = 0$ 。因此, 可以简化方程(1)为式

(2)。

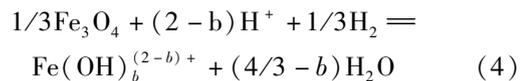
$$FAC \text{ rate} = \frac{C_{eq}}{\frac{1}{K^*} + \frac{\delta}{2\theta D} + \frac{1}{k}} \quad (2)$$

其中, 传质系数可结合剪切应力表示为式(3)。

$$k = \frac{\tau}{\nu \rho} \left(\frac{\mu}{\rho D} \right)^{-2/3} \quad (3)$$

式中: τ 为壁面剪切应力, Pa; ν 为截面平均速率, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在还原性条件下, 一般氧化膜的溶解化学方程式见式(4)。



式中, $b = 0, 1, 2, 3$ 。

根据氧化膜溶解化学方程可以得到氧化膜溶解各过程的反应平衡常数 K_b 。

$$K_b = \frac{[\text{Fe}(\text{OH})_b^{(2-b)+}]}{[\text{H}^+]^{(2-b)}[\text{H}_2]^{1/3}} \quad (5)$$

K_b 可以由 Berge 实验测得的实验常数得出^[18]。因此, 通过氧化膜溶解各过程的平衡常数可获得含铁组分的溶解度 C_{eq} 。

$$C_{\text{eq}} = \{K_0 10^{-2\text{pH}} + K_1 10^{-\text{pH}} + K_2 + K_3 10^{\text{pH}}\} [H_2]^{1/3} \quad (6)$$

实验中测得的 H_2 浓度为 $7.8 \times 10^{-4} \sim 3.25 \times 10^{-3}$ mol/L, 本文模拟计算 H_2 浓度为 1×10^{-3} mol/L。

2 数值模拟

偏心异径管几何示意图如图2所示, 流体从小口径端进入。具体参数如下: $D = 150$ mm, 过渡段长度为 140 mm, 孔径比 $\varepsilon = d/D$ 分别为 0.7、0.6、0.5 和 0.4; 入口流速分别为 1 m/s、3 m/s、5 m/s 和 7 m/s, 温度为 150 °C, 压力为 2 MPa, pH_{25} 为 9.0, 上游管道和下游管道的长度均为 10 倍管径, 以保证流体达到充分发展状态。采用 Realizable $k-\varepsilon$ 方程求解湍流方程, 并在近壁面采用壁面加强函数。速度入口为入口边界条件, 压力出口为出口边界条件。

本文分别研究了入口流速为 3 m/s 条件下不同孔径比偏心异径管下游管道流动加速腐蚀分布, 以及孔径比为 $\varepsilon = 0.6$ 条件下不同入口流速对管道下游流动加速腐蚀的影响。

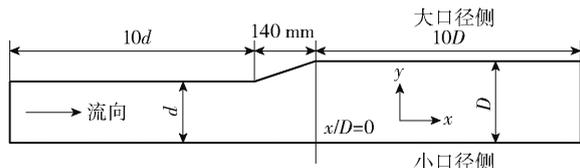


图2 偏心异径管几何示意图

3 结果与讨论

3.1 孔径比的影响

图3为入口流速 3 m/s 条件下不同孔径比偏

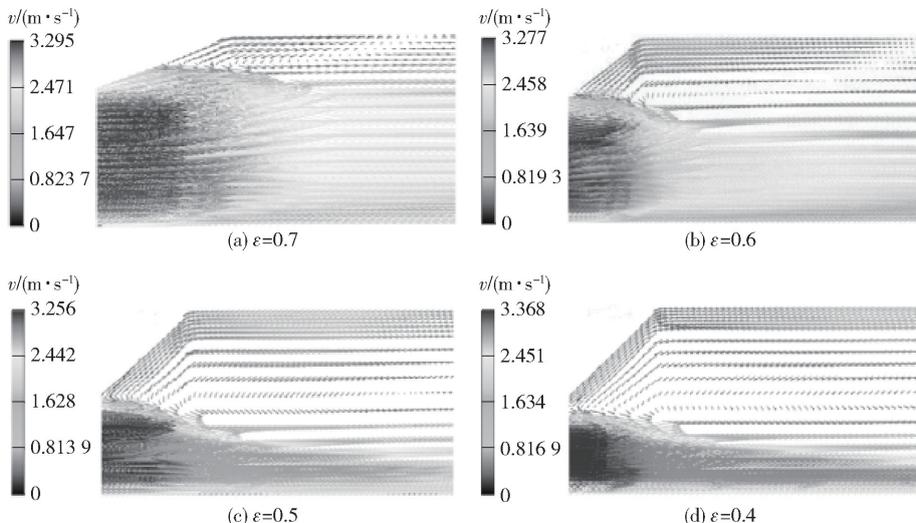


图3 不同孔径比偏心异径管横截面流场矢量图

异径管下游管道流场矢量图。从图3中可以看出, 不同孔径比偏心异径管下游管道均出现了“旋涡”特征。这是因为该区域存在流体的旋转运动, 而这种旋转运动是由于流体受到了不同速度和方向的作用力所产生的, 从而形成了旋涡结构。此外, 孔径比对于速度的影响并不明显。

图4为不同孔径比偏心异径管下游湍动能分布。由图4可知, 随着孔径比的增大, 湍动能逐渐减小; 管道下游区域的湍动能达到最大值。这是由于孔径比的变化引起湍动的形成和增强, 从而增加湍动能的产生。此外, 下游管道附近出现的二次流也提高了湍动能。

图5为不同孔径比偏心异径管大口径侧和小口径侧的剪切应力的变化。由图5可知, 在大口径侧, 下游管道的剪切应力总体呈现先增大后减小, 然后再增大的趋势。同时, 随孔径比的增大, 剪切应力最大值位置也沿流动方向上移。在小口径侧, 从异径管端口至 $x = 6D$ 位置区域, 随着孔径比的增大, 剪切应力逐渐减小; 当流体经过 $x = 6D$ 位置进入下游区域时, 流体已充分发展, 剪切应力趋向平缓。这是因为流体经过偏心异径管在下游区域形成“旋涡”, 在“旋涡”附近靠近壁面处, 速度梯度增大, 致使剪切应力增大; 当流体达到充分发展状态时, 靠近壁面处的速度梯度基本维持不变, 所以剪切应力趋向平缓。

图6为不同孔径比偏心异径管道下游传质系数的变化。传质系数的变化与剪切应力变化类似。随着孔径比增大, 大口径侧传质更加剧烈, 且传质迟缓区域的位置逐渐上移。在小口径侧, 由于 $\varepsilon = 0.7$ 管

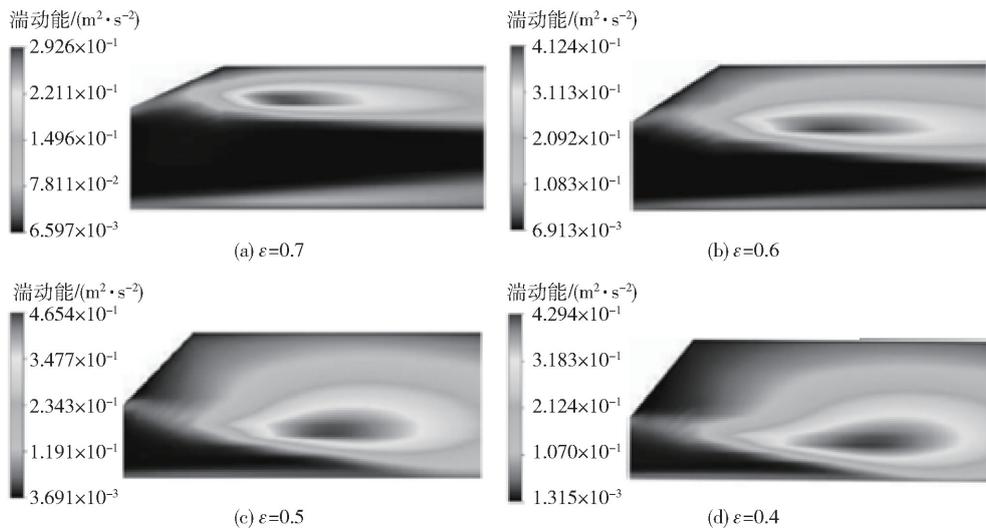
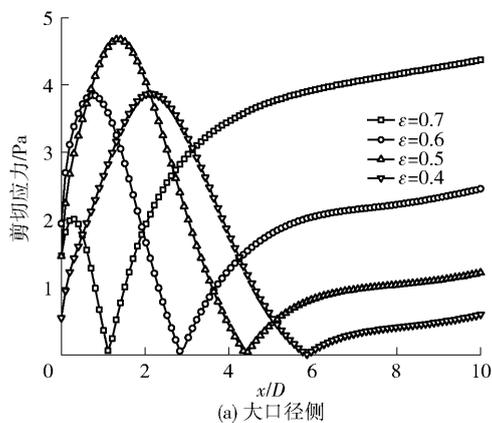
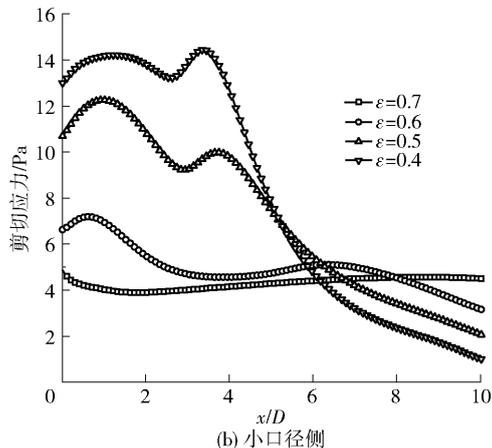


图4 不同孔径比偏心异径管横截面湍动能图

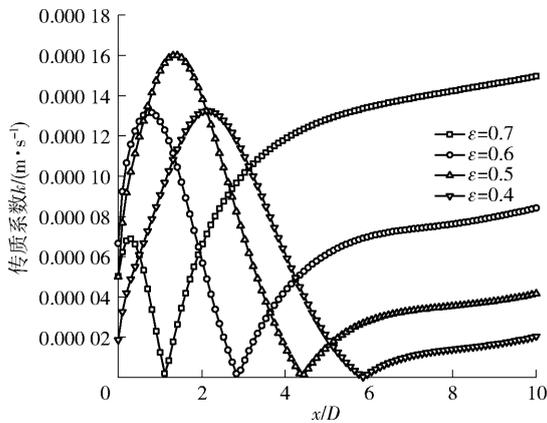


(a) 大口径侧

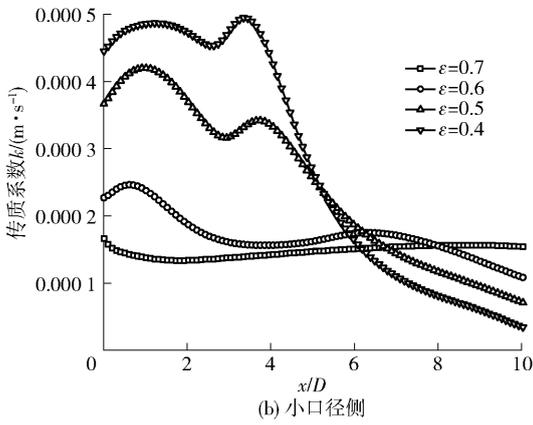


(b) 小口径侧

图5 不同孔径比偏心异径管剪切应力



(a) 大口径侧



(b) 小口径侧

图6 不同孔径比偏心异径管传质系数

道下游“旋涡位置”靠近大口径侧,所以湍动的生成和加剧位置离小口径侧较远,小口径侧受到湍流波动较小,因此小口径侧传质过程基本保持一致。

图7为不同孔径比异径管下游区域流动加速腐蚀速率的变化。由图7可知,在大口径侧,当 ϵ 分别为0.4、0.5、0.6和0.7时,流动加速腐蚀敏感区域

分别位于 $2.2D$ 、 $1.3D$ 、 $0.7D$ 和 $0.2D$,流动加速腐蚀速率最小区域位于 $5.7D$ 、 $4.4D$ 、 $2.8D$ 和 $1.1D$ 。此外,随着孔径比增大,大口径侧管道易失效位置上移。在小口径侧,当 ϵ 分别为0.5、0.6和0.7时,流动加速腐蚀敏感区域分别为 $3.2D$ 、 $0.9D$ 和 $0.5D$,同样呈现敏感位置上移的现象。当 $\epsilon=0.4$ 时,由于传质过程在小口径侧基本保持一致,所以流动加速

腐蚀同样呈现出类似特征。此外,小口径侧的流动加速腐蚀速率高于大口径侧,说明小口径侧更容易失效,成为流动加速腐蚀事故高发区,这与现场实际失效管道的统计结果相符^[18]。

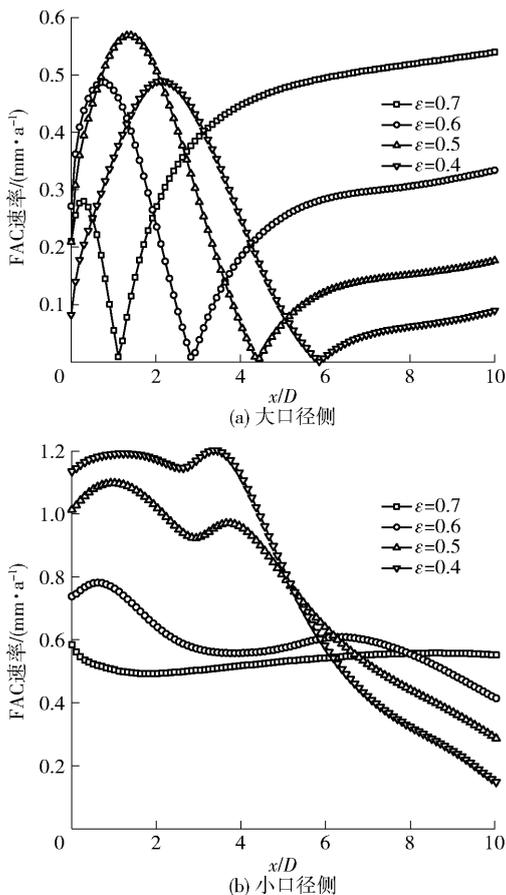


图7 不同孔径比偏心异径管流动加速腐蚀速率

3.2 入口流速的影响

给定孔径比为 $\varepsilon=0.6$ 时,不同入口流速下管道下游的流动加速腐蚀速率如图8所示。由图8可知,随着入口流速的增加,流动加速腐蚀速率显著提高,并且小口径侧的流动加速腐蚀速率较大。入口流速的变化不会影响流动加速腐蚀的敏感位置和最小位置。对于大口径管道,流动加速腐蚀敏感和迟缓位置分别位于 $1.3D$ 和 $4.4D$;而小口径侧流动加速腐蚀的敏感位置位于 $0.9D$ 。

4 结论

基于计算流体力学模拟结合 Sanchez - Caldera 模型,分别探讨了不同孔径比和不同入口流速下偏心异径管下游管道流动加速腐蚀的分布特征。结论如下:

1) 给定入口流速,随着孔径比增大,流动加速

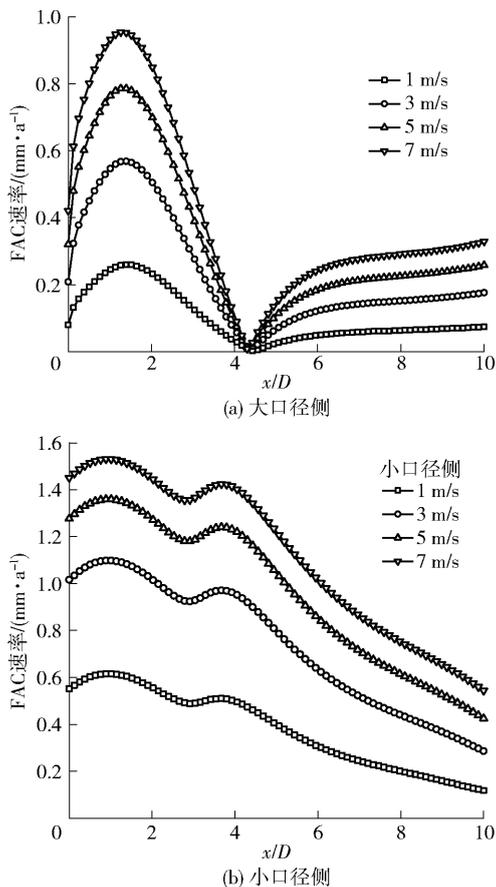


图8 不同入口速率偏心异径管流动加速腐蚀速率
腐蚀敏感位置上移;大口径侧流动加速腐蚀敏感位置位于 $0.2D \sim 2.2D$;小口径侧敏感位置位于 $0.5D \sim 3.2D$ 。

2) 给定孔径比,随着入口流速增大,流动加速腐蚀速率显著增大,且流速改变不影响流动加速腐蚀敏感位置,大口径侧和小口径侧敏感位置分别位于 $1.3D$ 和 $0.9D$ 。

3) 下游管道小口径侧的流动加速腐蚀较大口径侧敏感,小口径侧更容易出现管道失效情况。

[参考文献]

- [1] 肖卓楠, 吴佳森, 张天睿, 等. 温度对碳钢管道流动加速腐蚀失效影响的数值模拟[J]. 材料保护, 2020, 53(4): 35 - 40.
- [2] 肖卓楠, 白冬晓, 张天睿, 等. 孔板管道流动加速腐蚀受温度影响的数值模拟[J]. 化工进展, 2019, 38(S1): 27 - 32.
- [3] SI X D, ZHANG R, XU Q, et al. Effects of local velocity components on flow-accelerated corrosion at 90° elbow [J]. Materials Research Express, 2019, 6: 016557.
- [4] 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.
- [5] 孙海生, 郝开开, 常春梅. 管道内壁凸起诱发的流体加速腐蚀模拟计算[J]. *石油化工设备*, 2014, 43 (4): 36–39.
- [6] KIM S, KIM G, SONG S W, et al. Effects of Cr and Mo contents on the flow-accelerated corrosion behavior of low alloy steels in the secondary side of pressurized water reactors [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, 585: 154652.
- [7] ZENG L, LV T, CHEN H, et al. Flow accelerated corrosion of X65 steel gradual contraction pipe in high CO₂ partial pressure environments [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(8), 104935.
- [8] 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]. 2022, 51 (7): 110–115.
- [9] 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]. 2023, 43(5): 1064–1070.
- [10] 张凌翔, 周克毅, 徐奇, 等. 90°弯管流动加速腐蚀的实验和数值模拟[J]. *化工学报*, 2018, 69(12): 5173–5181.
- [11] 宗凌风, 周克毅, 黄军林, 等. 核电机组二回路碳钢给水管道的节流孔板下游流动加速腐蚀数值模拟研究[J]. *发电设备*, 2022, 36(2): 75–82.
- [12] 林彤, 周克毅, 司晓东. 电厂孔板下游流动加速腐蚀模拟研究[J]. *热力发电*, 2019, 48(3): 14–21.
- [13] 彭翊, 韩睿璇, 陈耀东. 孔板管道下游流动加速腐蚀速率数值模拟研究[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49 (1): 77–82.
- [14] 张勇, 卢秋羽, 邢雷, 等. 三相流在渐变管内的流动特性研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2018, 47(6): 6–8.
- [15] 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, 440.
- [16] SANCHEZ-CALDERA L E, GRIFFITH P, RABINOWICZ E. The mechanism of corrosion-erosion in steam extraction lines of power stations [J]. *Transactions of the ASME*, 1988, 110(2): 180–184.
- [17] BERGE P, DUCREUX J, SAINT-PAUL P. Effects of chemistry on corrosion-erosion of steels in water and wet steam [C] // *Proceedings of 2nd International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, Bournemouth, UK, 1980.
- [18] TING K. The evaluation of intergranular stress corrosion cracking problems of stainless steel piping in Taiwan BWR-6 nuclear power plant [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1999, 191: 245–254.

Numerical Simulation Study on Flow-Accelerated Corrosion of Downstream Pipeline in Eccentric Reducer

MA Jianping¹, CHENG Junjie¹, TAO Xin¹, SI Xiaodong², DONG Yunshan²

(1. Ningxia Jingneng Ningdong Power Generation Co., Ltd., Yinchuan 751400, China;

2. School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: The eccentric reducer is one of the common components in industrial pipeline systems such as electricity, petroleum, and chemicals. The internal flow of eccentric reducers is influenced by changes in pipe diameter, which can lead to issues with flow-accelerated corrosion. Based on computational fluid dynamics simulation, the fluid dynamic characteristics of eccentric reducers at different aperture ratios ($\varepsilon = 0.4 \sim 0.7$) and velocities ($1 \sim 7$ m/s) were investigated. The Sanchez-Caldera model was used to analyze the distribution of flow acceleration corrosion rates in downstream pipelines of eccentric reducers. The results show that the location prone to failure in the downstream of eccentric reducers is on the side with the small aperture. Under the condition of inlet flow rate of 3 m/s, as the ratio increases, the sensitive position for flow acceleration corrosion in downstream pipelines moves upwards. Under the condition of pore size ratio of 0.6, the flow accelerated corrosion rate increases significantly with the increase of inlet flow rate, changes in flow velocity have no effect on the sensitive position for flow-acceleration corrosion in downstream pipelines.

Key words: eccentric reducer; mass transfer coefficient; flow-accelerated corrosion; numerical simulation