

流速和弯曲角度对弯头腐蚀行为影响仿真研究

郑斐^{1,2}, 邢少华², 何华³, 高荣杰¹, 许立坤²

(1.中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 2.中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266237; 3.大连船舶重工集团设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116000)

摘要: **目的** 研究不同弯度的铜镍合金管道在海水冲刷下的腐蚀规律, 为弯头腐蚀控制奠定基础。**方法** 以铜镍合金在海水中的极化曲线作为边界条件, 通过 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟 30°、45°和 90°三种弯头在不同流速下的腐蚀行为。**结果** 流体进入弯头后, 内侧流速明显加快, 外侧流速减小, 导致内管壁腐蚀严重。内侧局部强腐蚀区随弯曲角度的增大而后移, 相应的腐蚀速率也会增加。同时, 随着入口流速的增加, 弯头管壁的腐蚀速率会加快, 但不改变弯头内的最大腐蚀部位。**结论** 弯头腐蚀速率与流速、弯曲角度密切相关。流速越高, 弯曲角度越大, 管壁的腐蚀速率越大。

关键词: 弯头; 腐蚀; 弯曲角度; 流速

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.06.004

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)06-0018-06

Simulation Study on Influence of Flow Velocity and Bending Angle on Corrosion Behavior of Elbow

ZHENG Fei^{1,2}, XING Shao-hua², HE Hua³, GAO Rong-jie¹, XU Li-kun²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang ship Material Research Institute, Qingdao 266237, China; 3. Dalian Shipbuilding Industry Group Engineering and Research Institute Co., Ltd, Dalian 116000, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the corrosion law of copper-nickel alloy pipes with different curvature under seawater scouring, to lay a foundation for elbow corrosion control. The corrosion behavior of three elbows of 30°, 45° and 90° at different flow rates was simulated by the $k-\varepsilon$ turbulence model using polarization curves of copper-nickel alloy as boundary conditions. After the fluid entered the elbow, the flow velocity of inner side was obviously accelerated, and that of outer side was reduced, resulting in serious corrosion of the inner pipe wall. The corresponding corrosion rate increased with the increase of the bending angle; and at the same time, the serious corrosion zone moved backward. Meanwhile, as the inlet flow rate increased, the corrosion rate of the elbow wall was increased, but the maximum corrosion location within the elbow was not changed. The elbow corrosion rate is closely related to the flow rate and bending angle. The higher the flow rate and the greater the bending angle, the greater the corrosion rate of the tube wall.

KEY WORDS: elbow; corrosion; bending angle; flow rate

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2019-12-03

Received: 2019-11-06; Revised: 2019-12-03

作者简介: 郑斐(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护。

Biography: ZHENG Fei (1994—), Female, Master's degree, Research focus: marine corrosion and protection.

通讯作者: 邢少华(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护。

Corresponding author: XING Shao-hua (1981—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: marine corrosion and protection.

与钢质管路相比,铜镍合金管路具备更好的耐蚀和防生物污损特性,被广泛用于海水发电厂冷却管路、船舶海水管路、海水淡化处理装置等^[1-5]。由于流动海水的强腐蚀性以及管路自身结构的原因,会影响管路的使用寿命,局部腐蚀穿孔时有发生,严重威胁着装置的安全可靠运行^[6-7]。

弯头处容易形成湍流,特别是高流速状态,局部流速显著增加,导致局部腐蚀速率增加,是海水管路系统经常发生腐蚀泄漏的薄弱环节^[8-11]。由于二次流的存在,使弯头不同部位的局部腐蚀速率存在显著差异,常规电化学测试仅能获得弯头平均腐蚀速率,难以测得局部腐蚀速率的变化。国内外研究者利用试验或者数值模拟的方法得到弯头内部流速场和压力场的分布,分析弯曲角度、弯径比和入口流速对管道内表面的影响^[12-18]。Ikarashi Yuya 等人^[12]采用平面和立体粒子图像测速技术研究了不同弯径比对 90°弯管内的流速和湍流强度的影响,结果表明,流速和湍流强度随着弯径比的增加而增加。Liang Guang-chuan 等人^[13]通过试验和仿真模拟研究了油砂浆液在 X65 管道中的流动过程,获得了不同冲击角度下的流速和剪切力分布,得出冲击角大约为 45°时冲刷腐蚀最严重的结论。邱立杰等人^[14]利用 FLUENT 软件模拟不同入口流速下弯管的内部流场和压力场的分布,指出速度的最大值都出现在弯管的内壁面,压力的最大值出现在弯管的外壁面。

目前弯头内部局部腐蚀以流速场或者压力场仿真分析为主,流速、弯曲角度对弯头腐蚀影响鲜见报道,导致对弯头腐蚀规律认识不清,特别是局部部位的冲刷腐蚀行为,制约了管路弯头腐蚀控制,影响管路系统的可靠性。文中采用试验与仿真相结合的研究手段,建立了弯头流动海水腐蚀仿真模型,仿真计算了不同弯曲角度和不同流速下弯头内部腐蚀速率的分布云图,分析了弯曲角度、流速和空间位置对弯头腐蚀速率影响,对控制弯头流动海水腐蚀具有重要的指导意义。

1 材料与试验方法

试验所用的铜镍合金材料为 B10,材料的化学成分(质量分数)为: Ni 10%, Fe 1.16%, Mn 0.63%, Si 0.075%, Sn 0.05%, Zn 0.05%, S 0.01%, Cu 余量。将 B10 材料加工成直径为 10 mm 的试样,经环氧树脂封装后,用 400、800、1000、1500 目的砂纸逐步打磨至表面光滑,安装在试样夹持装置上。动态海水腐蚀测试装置如图 1 所示,旋转阀门通过观察流量计来控制管道内的流速变化,用导线将试样、参比电极和辅助电极与 Ivium-N-Sart 型电化学工作站相连接,测试流动环境下金属材料的腐蚀曲线。

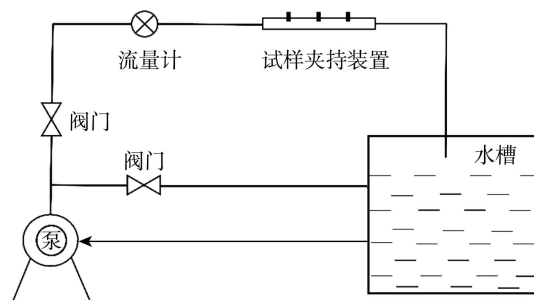


图 1 动态海水腐蚀测试装置

Fig.1 Dynamic seawater corrosion test device

试验所用介质为天然海水,工作环境温度为 25 °C,溶解氧含量为 4.2 mg/L, pH 值为 8.0。测试 B10 试样在 1、3、5 m/s 流速下的开路电位和动电位极化曲线。开路电位(open circuit potential, OCP)测试时间为 7200 s,每隔 2 s 取一个点。极化曲线测试扫描速率为 0.333 mV/s,扫描范围为 -0.5~0.5 V(vs. OCP),所用参比电极为氯化银电极,辅助电极为碳棒,工作电极为 0.785 cm² 的 B10 试样。

2 多物理方程和边界条件

2.1 模型建立

通过 Comsol 软件建立的弯管仿真模型如图 2 所示,弯管弯度分别设置为 30°、45°、90°,为了更好地表述,将管道划分为上游直管段、弯曲段和下游直管段三个部分^[19]。管道直径(D)设置为 54 mm,上下游管长均为 15 D ,保证海水在进入弯头前,管道内流体达到稳定。为了提高计算的收敛性,在网格划分时,选用更利于收敛的四边形和六面体网格,网格剖分如图 3 所示。

2.2 控制方程及边界条件

由于文中研究流速和弯曲角度对腐蚀影响,仿真

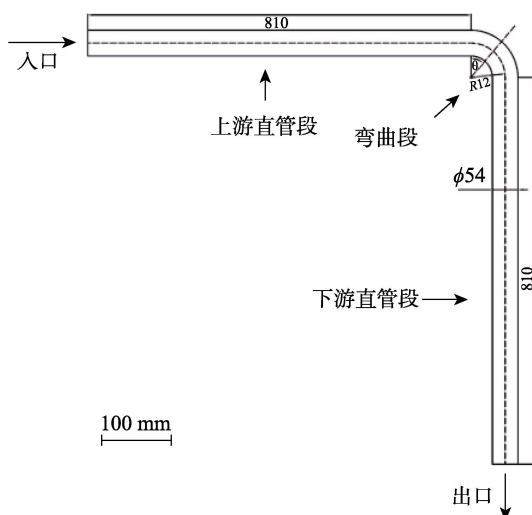
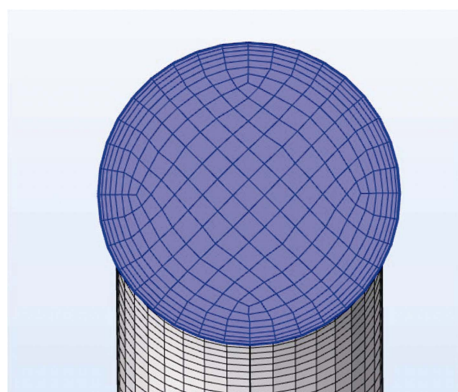
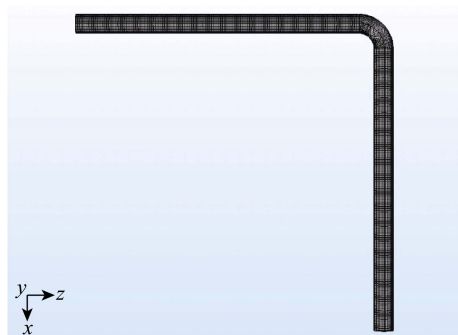


图 2 弯管仿真模型

Fig.2 Bend simulation model



a 面网格



b 体网格

图3 网格划分

Fig.3 Grid generation: a) face mesh; b) volume grid

模拟过程中忽略重力的影响。入口边界的流速分别为 1、3、5 m/s，出口压力为 0，管道壁面采用无滑移边界，近壁区使用标准壁面函数^[20-21]。海水为不可压缩流体，采用“RANS $k-\varepsilon$ ”湍流模型计算弯头内部流速分布。模型控制方程包括 Navier-Stokes 方程(1)，连续方程(2)和 $k-\varepsilon$ 湍流模型方程。

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (2)$$

式中： ρ 为海水密度， kg/m^3 ； p 为流体的时均压力， N/m^2 ； F 为应力， N ； u 为管道内的流速， m/s ； μ 为动力黏度， $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ 。

$k-\varepsilon$ 湍流模型中的湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 由方程(3)和(4)确定。

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

动能生成项 P_k 为：

$$P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)] \quad (5)$$

$k-\varepsilon$ 双方程模型的常数分别为： $C_\mu=0.09$ ， $C_{\varepsilon 1}=1.44$ ， $C_{\varepsilon 2}=1.92$ ， $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。其中， σ_k 和 σ_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流 prandtl 数。

对不同流速下 B10 极化曲线进行 Tafel 分析，得

到不同流速下 B10 材料腐蚀电流密度。根据式(6)计算腐蚀速率 v_{corr} ，利用 Comsol Multiphysics 软件中“插值”将腐蚀速率与流速拟合曲线（见式(7)），作为整个管道腐蚀分布的边界条件。

$$v_{\text{corr}} = 0.327 \times \frac{M_{\text{corr}}}{n\rho} \quad (6)$$

$$v_{\text{corr}} = f(u) = 0.00882 - 0.00108u + 0.00897u^2 + 0.0017u^3 - 0.0005u^4 \quad (7)$$

3 结果和讨论

3.1 试验结果

B10 合金在洁净海水中不同流速下的动电位极化曲线如图 4 所示。可以看出，在不同的流速下，B10 在海水中的腐蚀电位逐渐负移，电流密度逐渐增加。这说明流速越高，B10 腐蚀速率越快。流速为 1 m/s 时，B10 材料表面形成较为致密的氧化层薄膜，阻碍氯离子向电极表面扩散，因此具有较小的腐蚀速率。随着流速的增加，传质扩散速度增加，B10 溶解速率大于表面成膜速度，导致 B10 材料表面难以形成致密的氧化物保护膜，腐蚀速率显著增加。在数值模拟中，将测量得到的极化电流密度利用式(6)换算成等效的腐蚀速率，作为管道腐蚀变化的边界条件。

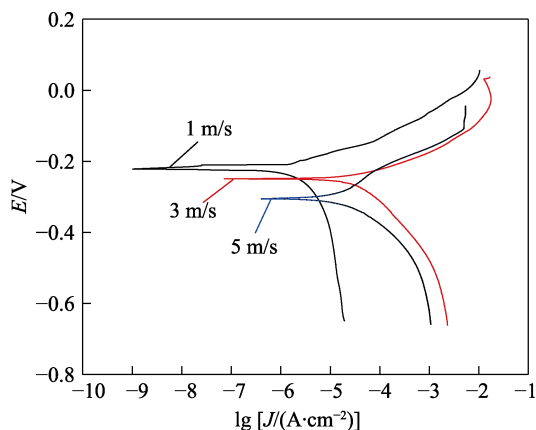


图4 不同流速下的极化曲线

Fig.4 polarization curve at different flow rates

3.2 流速对弯头腐蚀影响

不同流速下，30°、45°和 90°弯头腐蚀情况的分布如图 5 所示。仿真结果表明，随着流速的增加，弯头腐蚀速率增加，内部腐蚀速率分布越不均匀。海水入口直管段，海水未受到弯曲段的影响，但由于边界层作用，横截面上中间流速较大，管壁流速较小。弯头入口处，腐蚀速率由内弯向外弯逐渐减小，内侧腐蚀速率大，外侧腐蚀速率较小。弯头出口处，恰好相反，外侧腐蚀速率大于内侧腐蚀速率。

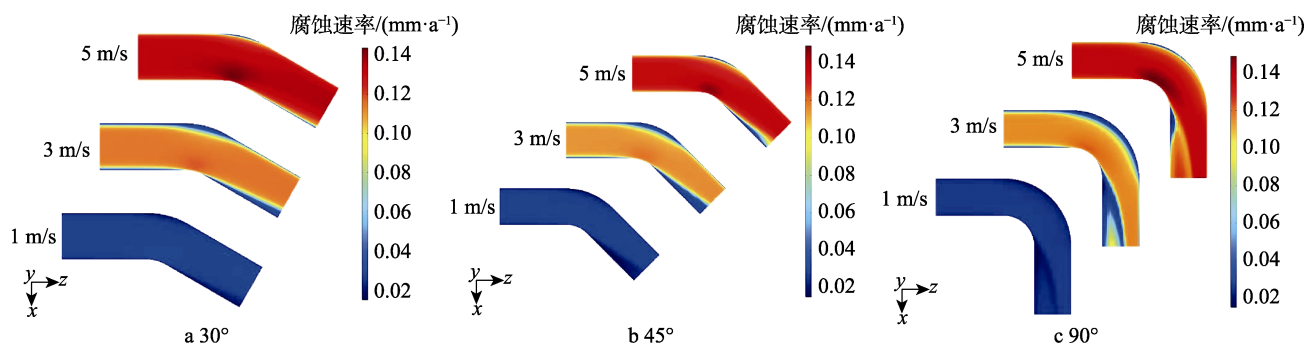


图 5 管道的腐蚀分布云图
Fig.5 Corrosion distribution cloud chart of pipeline

弯头内、外侧的腐蚀速率沿弯曲角度 θ 的分布如图 6 所示。由图 6 可知, 流速越高, 弯头的腐蚀变化越剧烈, 且内外侧呈现不同的变化趋势。内侧的腐蚀速率比外侧变化明显, 且局部腐蚀速率更大。在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 弯头处, 内侧腐蚀急剧增加, 外侧腐蚀较小, 是因为

海水流动方向急剧转变, 弯头内侧海水能量几乎为 0, 又受到相近海水的带动作用, 使得流速急剧增加, 腐蚀也随之增加。 $10^\circ \sim 15^\circ$ 弯头处, 腐蚀速率已经增长到最大值, 外侧基本保持不变, 随后不同的弯头表现出不同的变化趋势。

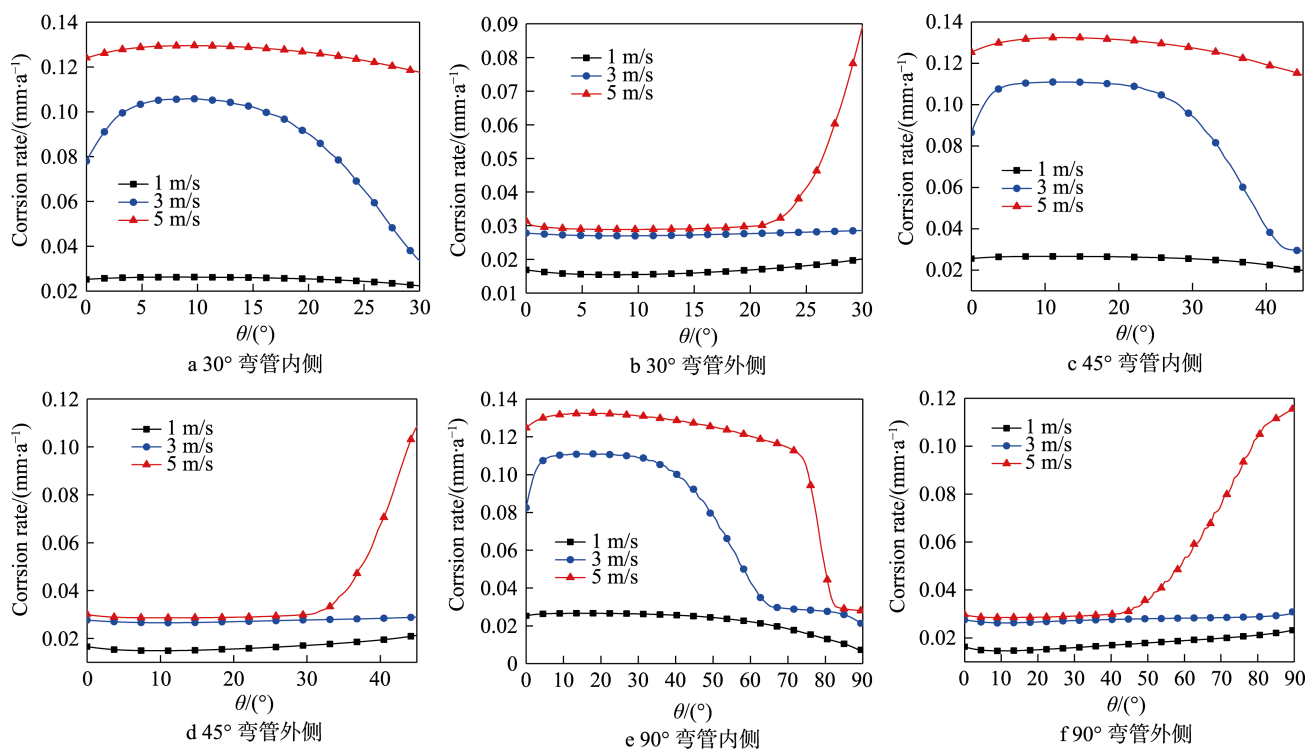


图 6 内、外侧的腐蚀速率沿 θ 的分布

Fig.6 Distribution of corrosion rate along θ inside and outside: a) inside of 30° bend; b) outside of 30° bend; c) inside of 45° bend; d) outside of 45° bend; e) inside of 90° bend; f) outside of 90° bend

低流速和高流速条件下, 30° 和 45° 弯头内侧腐蚀速率基本保持平稳。在 3 m/s 流速下, 流速随角度发生较大变化, 腐蚀严重部位 (超过 0.1 mm/a) 位于弯头内侧的入口部分, 分别占整个弯头内侧的 43% 和 57% 。流速对 90° 弯头内侧腐蚀速率的影响比 30° 和 45° 弯头显著, 在 3 m/s 、 5 m/s 流速下, $0^\circ \sim 5^\circ$ 部位腐蚀速率急剧增加, 10° 左右达到平稳后, 持续到 35° 。这是因为海水在通过 90° 弯头时, 由于受到外侧海水的横向压力, 使得海水在管道中沿着管壁轴向流动的同时, 还向弯管径方向流动, 形成二次流。二次流加强

了海水扰动, 使得流动速度增加, 腐蚀速率增加。 $35^\circ \sim 90^\circ$ 内侧流速逐渐降低, 腐蚀速率逐渐减小。

外侧的腐蚀速率先减小后增大, 1 m/s 、 3 m/s 条件下, 弯头外侧腐蚀速率变化不大, 最大值和最小值的差值在 0.01 mm/a 左右。当海水流速达到 5 m/s 时, 沿弯头外侧管壁的流速增加, 腐蚀速率变大, 且随着弯曲角度的增大, 出口腐蚀速率也逐渐提高。

3.3 弯曲角度对腐蚀影响

由图 5 和图 6 可知, 弯曲角度对弯头腐蚀速率有

较大影响,主要腐蚀区域发生在弯头内侧入口和外侧出口处,但内侧的腐蚀更严重。内侧的局部腐蚀速率受流速和弯度的共同影响,5 m/s 时,30°、45°、90°弯头最大腐蚀速率分别为 0.1295、0.1324、0.1325 mm/a,相对于直管段入口管壁的腐蚀速率分别增加了 43.9%、47.1%、47.2%。同时,30°、45°、90°管道的最大腐蚀速率值分别出现在 9°、12°、15°,表明弯度越大,峰值越大,且越往后移,但流速对最大腐蚀速率位置无影响。图 7 表明,在同一流速下,小弯度的管道具有较小的腐蚀峰值,而 45°和 90°弯管具有较大的腐蚀峰值。

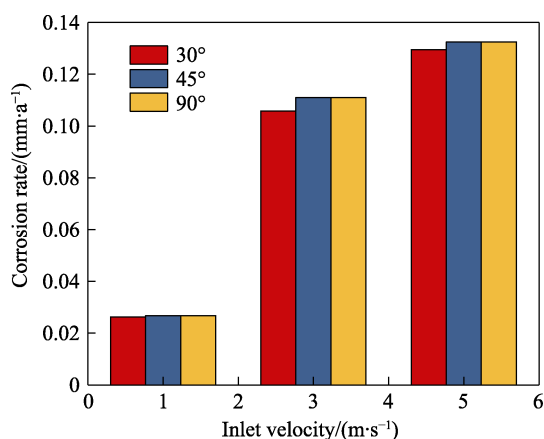


图 7 不同弯度下的最大腐蚀速率

Fig.7 Maximum corrosion rate at different bending degrees

海水流进弯头后,由于管道内压力的影响,使得外侧的流速降低,腐蚀速率减小。从图 6 中可以看出,内侧出口和外侧入口的腐蚀速率较低,30°和 45°弯头的最小值均出现在外侧 9°附近,而 90°弯头内侧出口的腐蚀远低于外侧入口的腐蚀速率,所以 90°弯头的最小值出现在内侧出口处。

不同弯度下的最小腐蚀速率如图 8 所示,可以看出,弯曲角度对于最小腐蚀值有显著的影响。随着弯曲角度的增加,最小腐蚀速率减小。流速越低,弯曲

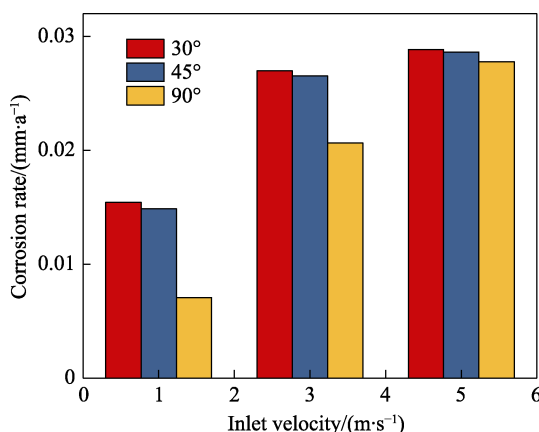


图 8 不同弯度下的最小腐蚀速率

Fig.8 Minimum corrosion rate at different bending degrees

角度对最小腐蚀速率影响越大。由图 8 可以看出,1 m/s 流速下,90°弯管的腐蚀速率最小值为 7.05×10^{-3} mm/a。

4 结论

1) 弯头内腐蚀最严重部位与流速无关,主要与弯头类型有关,30°、45°和 90°弯头的最大腐蚀速率值分别位于内侧 9°、12°和 15°处,最小腐蚀速率值则分别出现在外侧 9°附近和内侧出口处。

2) 弯头最大腐蚀速率随着弯曲角度的增加而增加,管道入口流速为 5 m/s 时,30°、45°、90°弯头最大腐蚀速率分别为 0.1295、0.1324、0.1325 mm/a,相对入口管壁的腐蚀速率分别增加了 43.9%、47.1%、47.2%。

3) 30°、45°、90°弯头腐蚀速率均随着流速的增加而增加,且流速会对弯头内部腐蚀速率分布造成明显影响,流速越高,腐蚀速率分布越不均匀。

参考文献:

- [1] 张智强, 郭泽亮, 雷竹芳. 铜合金在舰船上的应用[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(5): 43-46.
ZHANG Zhi-qiang, GUO Ze-liang, LEI Zhu-fang. Applications of Copper Alloy in Shipbuilding[J]. Development and Application of Materials, 2006, 21(5): 43-46.
- [2] 刘天娇, 陈惠鹏, 张卫方, 等. B10 铜镍合金海水加速腐蚀行为[J]. 材料工程, 2017, 45(5): 31-37.
LIU Tian-jiao, CHEN Hui-peng, ZHANG Wei-fang, et al. Accelerated Corrosion Behavior of B10 Cu-Ni Alloy in Seawater[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(5): 31-37.
- [3] MA Ai-li, JIANG Sheng-li, ZHENG Yu-gui, et al. Correlation between Microstructure and Corrosion Behavior of Two 90Cu10Ni Alloy Tubes[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014, 27(4): 730-738.
- [4] KHAN A F, PATIL A P. Combined Effect of Chloride and pH on Corrosion Resistance of Cu-10Ni Alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2008, 61(2): 225-229.
- [5] 迟长云, 李宁, 薛建军, 等. 温度对 B30 铜镍合金在海水中电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(11): 772-774.
CHI Chang-yun, LI Ning, XUE Jian-jun, et al. Effect of Temperature on Electrochemical Behavior of B30 Cu-Ni Alloy in Seawater[J]. Corrosion and Protection, 2009, 30(11): 772-774.
- [6] 朱娟, 张乔斌, 陈宇, 等. 冲刷腐蚀的研究现状[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(3): 199-210.
ZHU Juan, ZHANG Qiao-bin, CHEN Yu, et al. Progress of Study on Erosion-corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(3): 199-210.
- [7] 陈艳, 黄威, 董彩常. 海水管路冲刷腐蚀数值模拟研究

- 现状[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 48-53.
- CHEN Yan, HUANG Wei, DONG Cai-chang. Research Status of Numerical Simulation of Erosion Corrosion in Seawater Pipeline[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 48-53.
- [8] SOLNORDAL C B, WONG C Y, BOULANGER J. An Experimental and Numerical Analysis of Erosion Caused by Sand Pneumatically Conveyed Through a Standard Pipe Elbow[J]. Wear, 2015, 336-337: 43-57.
- [9] EL-GAMMAL M, MAZHARA H, COTTONA J S, et al. The Hydrodynamic Effects of Single-phase Flow on Flow Accelerated Corrosion in a 90-degree Elbow[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(6): 1589-1598.
- [10] 隋佳利. 铜合金偶合加速腐蚀行为及防污性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- SUI Jia-li. Study on the Accelerated Galvanic Corrosion Behavior and Antifouling Performance of Copper Alloy[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [11] LIN C H, FERNG Y M. Predictions of Hydrodynamic Characteristics and Corrosion Rates Using CFD in the Piping Systems of Pressurized-Water Reactor Power Plant[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 65: 214-222.
- [12] IKARASHI Yuya, UNO Taku, YAMAGATA Takayuki, et al. Influence of Elbow Curvature on Flow and Turbulence Structure Through a 90° Elbow[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 339: 181-193.
- [13] LIANG Guang-chuan, PENG Xing-yu, Xu Lu-yao, et al. Erosion-Corrosion of Carbon Steel Pipes in Oil Sands Slurry Studied by Weight-Loss Testing and CFD Simulation[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(10): 3043-3048.
- [14] 邱立杰, 张国福, 郝明. 基于FLUENT的弯管内部流场的数值模拟[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2013, 33(1): 48-52.
- QIU Li-jie, ZHANG Guo-fu, HAO Ming. Numerical Simulation of Internal Flow Field in Bend Duct Based on FLUENT[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2013, 33(1): 48-52.
- [15] RANI H P, DIVYA T, SAHAYA R R, et al. CFD Study of Flow Accelerated Corrosion in 3D Elbows[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 69: 344-351.
- [16] BURSTEIN G T, SASAKI K. Effect of Impact Angle on the Slurry Erosion-corrosion of Stellite6 and SS316[J]. Wear, 2014, 320: 143-151.
- [17] STACK M M, CORLETT N, TURGOOS S. Some Thoughts on Modelling the Effects of Oxygen and Particle Concentration on the Erosion-corrosion of Steels in Aqueous Slurries[J]. Wear, 2003, 255(1-6): 225-236.
- [18] IKARASHI Yuya, TAGUCHI Shoichi, YAMAGATA Takayuki, et al. Mass and Momentum Transfer Characteristics in and Downstream of 90 Elbow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 107: 1085-1093.
- [19] 饶永超, 常凯, 王树立, 等. 90°弯管内流体流动特点数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学学报), 2016, 28(3): 65-69.
- RAO Yong-chao, CHANG Kai, WANG Shu-li, et al. Numerical Simulation of Fluid Flow Characteristic in 90° Bend Pipe[J]. Journal of ChangZhou University(Natural Science Edition), 2016, 28(3): 65-69.
- [20] 郭婷婷, 李少华, 许忠. 两种近壁湍流模式对横向紊动射流尾流场的影响[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2006, 21(1): 20-25.
- GUO Ting-ting, LI Shao-hua, XU Zhong. On the Two Near-wall Turbulence Models for Simulating Turbulent Jets' Wake in Crossflow[J]. Journal of Hydrodynamics A, 2006, 21(1): 20-25.
- [21] 施卫东, 董颖, 马新华, 等. 流道截面形状对旋涡泵内部流动影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 21-23.
- SHI Wei-dong, DONG Ying, MA Xin-hua, et al. Numerical Simulation of the Effect of Channel Section Shape on the Inner Flowing of Vortex Pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 21-23.