

基于 Dean 涡效应的弯管冲蚀机理分析

吕文超, 陈培红, 徐 亮

(江苏航运职业技术学院 轮机工程学院, 江苏 南通 226010)

摘 要:冲刷腐蚀是船舶管路损伤失效的重要原因,而管道内介质的流动速度是影响冲刷腐蚀速率的关键因素。基于数值模拟方法,对 90°弯管不同位置的液相介质速度分量进行了计算与分析,发现管道冲刷腐蚀速率并非由介质流动合速度决定,而是由与管道轴向垂直的横截面内的速度分量(Dean 涡强度)决定。横截面内的 Dean 涡强度越大,介质与壁面金属基材之间的传质过程越快,越容易导致管道冲刷腐蚀加速。

关键词:冲刷腐蚀;弯管;Dean 涡;数值计算

中图分类号:U664.84

文献标志码:A

文章编号:2097-0358(2022)1-0053-06

0 引言

金属腐蚀是船舶管路系统普遍存在的现象,是引发管道损伤的重要原因,它不仅给我国经济发展造成巨大损失,而且严重威胁船舶平稳运行。在船舶管道运行过程中,内部的液相介质含有的腐蚀性组分与管道基材发生传质与电子转移,导致管道腐蚀。管内介质的流动能够加速传质过程,并破坏管道表面生成的金属氧化膜,使金属基材重新暴露于腐蚀环境中,引起腐蚀自循环过程,这一现象被称为冲刷腐蚀。弯管具有曲率半径,导致内部流场特性剧烈变化^[1],更容易遭受冲刷腐蚀的影响,形成壁厚减薄、穿孔泄漏等损伤失效。

国内外学者对弯管冲刷腐蚀过程进行了大量的理论与实验研究,并提出了相应的腐蚀预测模型。Berge 等研究了管道腐蚀的电化学过程,提出了冲刷腐蚀速率预测模型,指出冲刷腐蚀速率主要由腐蚀性组分的浓度差决定。^[2]Bouchacourt M 等对 Berge 模型进行了修正,提出了 MIT 模型,强调腐蚀产物膜对于冲刷腐蚀具有抑制作用,但并未给出该抑制作用的定量表达式。^[3]Bai M 等通过实验发现,流体介质的速度对于管道冲刷腐蚀速率具有重要影响,是表征冲刷腐蚀的关键特性参数。^[4]Tian J 进一步指出,冲刷腐蚀过程具有临界速度,当介质速度低于临界速度时,冲刷腐蚀受电化学反应控制,当介质速度高于临界速度时,冲刷腐蚀受流动过程控制。^[5]Kim 等认为,管道基材与腐蚀性组分发生电化学反应后,在其表面生成一层致密的腐蚀产物膜,在流体剪切的作用下,该产物膜被破坏,引起腐蚀加剧。^[6]Gao M 等对碳钢管道内表面的腐蚀产物膜进行了微观分析,并给出了内外两层产物膜的结构与元素组成。^[7]Wei Li 通过实验进一步测得流体流动过程中所产生的壁面剪切力小于 100 Pa,说明单纯依靠流体剪切作用不足以破坏壁面腐蚀产物膜的结构(腐蚀产物膜分子间结合力通常为 106 Pa)。^[8]此外,部分学者采用其他流动特性参数对管道冲刷腐蚀过程进行表征,如雷诺数^[9]、湍流强度^[10-12]、传质系数^[13]等,并提出了相应的冲刷腐蚀预测方法。对于管道冲刷腐蚀中的电化学反应过程,Zeng L 等学者采用阵列电极技术对弯头部位的腐蚀电流进行监测,通过腐蚀电流的大小与分布规律对弯管冲刷腐蚀速率与高风险区域进行预测。^[14-16]Fujiawara 等对流体介质与管道壁面之间腐蚀性组分的传质过程进行了研究,认为金属阳离子向流体介质中的扩散过程是制约管道冲刷腐蚀速率的关键因素。^[17]另外,Xu Y 等基于腐蚀性组分的传质过程分析,采用传质系数对管道冲刷腐蚀进行表征和预测。^[18-20]近年来,随着计算流体力学技术的发展,一些商用仿真软件(如 ANSYS Fluent 等)被广泛用于计算管内流场域的特性分布,通过采用合适的湍流模型与求解方法,能够准确地对流场特性参数(速度、压力、浓度等)进行计算,为

收稿日期:2021-12-27

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(21KJD470001);南通市基础研发项目(JCZ21003)

作者简介:吕文超(1987—),男,江苏南通人,江苏航运职业技术学院轮机工程学院讲师,博士。

管道冲刷腐蚀研究提供了一种有效方法。然而,输运介质流经弯管区域时,在曲率半径的影响下,速度分布与流动状态发生剧烈变化,导致管道冲刷腐蚀机理难以描述。本文采用 Fluent 软件对弯管中的介质流动状态参数进行计算,分析介质速度在弯管中的分布与变化规律,从而揭示弯管区域内的冲刷腐蚀机理,为工程实践提供理论指导。

1 物理模型与控制方程

1.1 物理模型

本研究采用文献[14]中的弯管结构与尺寸,通过 Solidworks 构建三维物理模型。该弯管包括入口直管段、弯头以及出口直管段三部分,尺寸如表 1 所示。采用 ANSYS 前处理软件 ICEM 对弯管物理模型进行网格划分,结果如图 1 所示。网格类型为 O 型,网格节点总数为 1 782 687。管道近壁面区采用局部加密的方法,以满足合适的 y^+ 值。网格无关性验证结果表明,该网格密度足以满足计算要求。

计算过程中,入口边界条件为速度入口,出口边界条件为压力出口,壁面采用无滑移条件。介质在入口的初始速度为 3.4 m/s,经计算,管内为湍流状态。采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,湍流强度设置为 5%。采用 SIM-PLEC 方法计算压力与速度耦合方程,计算精度为二阶迎风格式。

表 1 弯管物理模型与流动条件

入口直管段/m	出口直管段/m	内径/m	曲率半径/m	流动介质	流动速度/(m·s ⁻¹)
1.925	0.925	0.05	0.075	Water	3.4

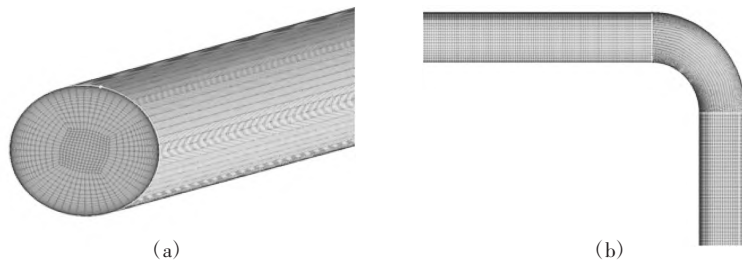


图 1 直管与弯管部位的网格结构

1.2 控制方程

流体介质在管道中流动时,遵循连续性方程和动量方程,分别如式(1)、式(2)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

其中, ρ 为流体介质密度; \vec{U} 为流体速度; p 为流体压强; S_M 为应力源项; 应力张量 τ 的表达式如下所示:

$$\tau = \mu (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U}) \quad (3)$$

对于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,湍动能 k 及其耗散率 ε 分别如式(4)、式(5)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G_k + G_b - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

其中, G_k 为主流速度梯度产生的湍动能; G_b 为浮力产生的湍动能; Y_M 为可压缩湍流波动膨胀度与总的耗散率的比值; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为计算常数; σ_k 和 σ_ε 为湍流普朗特数; S_k 和 S_ε 为源项。

2 计算结果与讨论

流体介质为水,采用速度入口边界条件,速度为 3.4 m/s,流动方向如图 2 所示。分别在入口直管段 $X =$

1 m、 $X = 1.5$ m 处与出口直管段 $Y = 0.3$ m、 $Y = 0.6$ m 处以及弯头部位选取截面, 在弯头 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内等间距地选取 10 个截面, 定义为 Slice 1—10, 相邻截面间隔角度为 10° 。

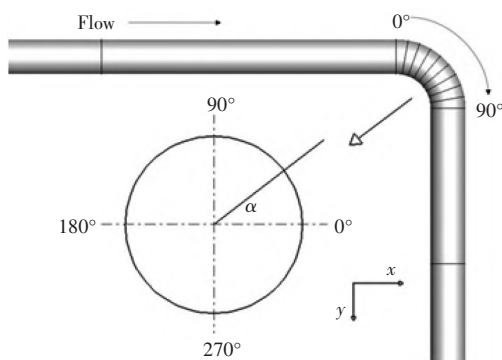


图2 弯管部位横截面示意图

2.1 近壁面合速度分布

流体介质中的腐蚀性粒子与金属基材之间持续传质, 在金属基材表面形成双电层。^[21]该双电层厚度极小, 通常位于流体近壁面边界层内。流动边界层的传质过程主要受该区域内的速度分布的影响。因此, 在距壁面 1.5 mm ($R = 0.0485$ m) 处, 选取各周向区域液相介质的合速度, 结果如图 3 所示。

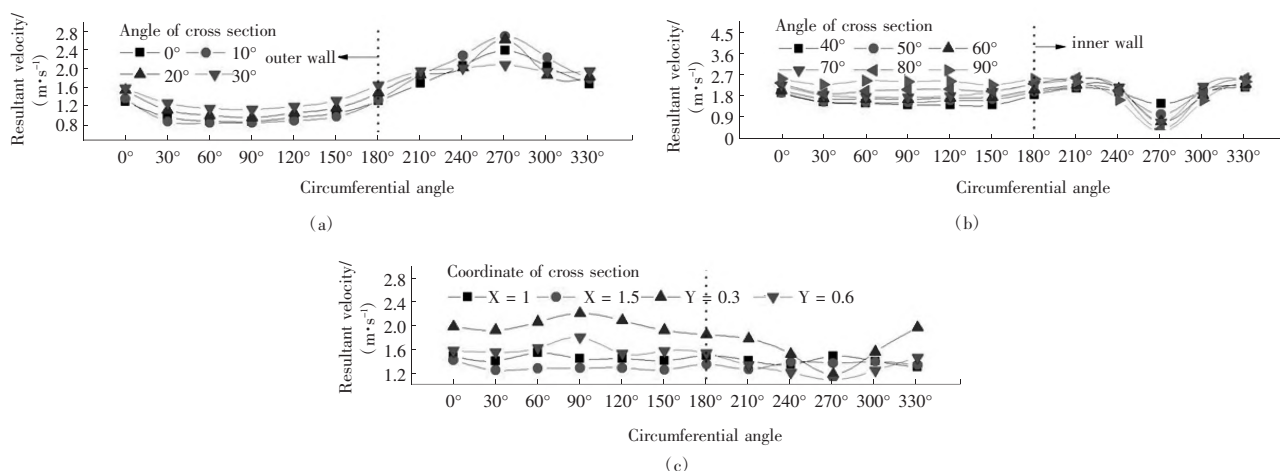


图3 各截面壁面处合速度分布

图中分别表示轴向角为 0° (Slice 1)、 10° (Slice 2)、 20° (Slice 3)、 30° (Slice 4)、 40° (Slice 5)、 50° (Slice 6)、 60° (Slice 7)、 70° (Slice 8)、 80° (Slice 9)、 90° (Slice 10) 以及直管段 $X = 1$ m、 $X = 1.5$ m、 $Y = 0.3$ m、 $Y = 0.6$ m 处截面内不同周向位置的流体速度。由计算结果可知, 在弯头部位 Slice 1—4 区域内, 管道外侧壁面合速度为 $0.84 \sim 1.65$ m/s, 而内侧壁面合速度为 $1.67 \sim 2.68$ m/s, 外侧壁面速度明显小于内侧壁面速度, 合速度最大值位于管道最内侧区域 ($\alpha = 270^\circ$)。Slice 5—10 区域内, 管道外侧壁面合速度为 $1.39 \sim 2.53$ m/s, 而内侧壁面合速度为 $0.26 \sim 2.43$ m/s, 对于特定横截面, 其外侧壁面速度大于内侧壁面速度, 且最内侧 ($\alpha = 270^\circ$) 区域合速度最低。在该区域, 合速度最大值位于 Slice 10 横截面外侧区域。对于入口直管段部位 ($X = 1$ m、 $X = 1.5$ m), 其合速度变化较小, 为 $1.30 \sim 1.51$ m/s, 且内、外侧壁面处合速度基本相同。对于出口直管段部位 ($Y = 0.3$ m、 $Y = 0.6$ m), $Y = 0.3$ m 截面壁面处合速度为 $1.20 \sim 2.21$ m/s, $Y = 0.6$ m 截面壁面处合速度为 $1.10 \sim 1.81$ m/s。在出口直管段区域, 管道外侧壁面合速度大于内侧壁面处合速度。由此可见, 直管段区域近壁面边界层内的流体合速度与弯头部位合速度并无太大差别, 且部分直管段部位壁面合速度大于弯头部位壁面合速度。

2.2 近壁面法向速度分布

流体介质经过弯头区域时, 受到离心力的作用, 在垂直于主流方向的截面内产生二次流动, 形成对称分布的涡旋 (Dean 涡)。^[22]Dean 涡能够改变流体介质与管道壁面之间的传质过程, 从而影响冲刷腐蚀速率。

Dean 涡的形成是因为在截面内产生了垂直于主流方向的法向速度。因此,对弯头区域 Slice 1—10 内的法向速度进行分析,结果如图 4 所示。

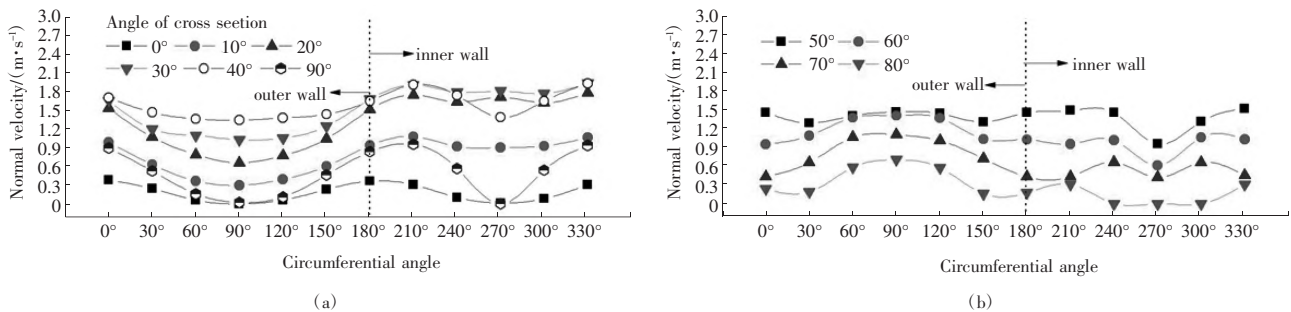


图 4 弯头各横截面壁面处法向速度分布

由图 4 可知,在 Slice 1 截面内,不同周向区域内流体法向速度基本相同,为 0.11~0.32 m/s,且内、外壁面处法向速度差异较小。在 Slice 2—5 截面内,随着截面倾斜角度逐渐增加,近壁面处流体法向速度逐渐增加,且弯管内侧区域的流体法向速度大于外侧区域的流体法向速度,导致弯管内侧壁面处的腐蚀性组分传质速度大于外侧壁面。在 Slice 6—9 截面,随着截面倾斜角度逐渐增加,流体在近壁面处的法向速度逐渐降低,且弯管内侧壁面处的法向速度逐渐小于弯管外侧。Slice 10 截面近壁面处的法向速度小于 Slice 2—9 截面,仅比 Slice 1 截面近壁面处的法向速度稍大。在整个弯头部位,Slice 4 和 Slice 5 截面壁面处的法向速度达到极大值,为 1.89 m/s,而 Slice 1 和 Slice 10 截面壁面处的法向速度达到极小值,为 0.11 m/s。流体介质的法向速度越大,腐蚀性粒子沿着管道径向的传质过程越强,从而导致管道冲刷腐蚀速率越大。文献[16]采用阵列电极技术对弯管不同区域的冲刷腐蚀速率进行测试,结果显示在轴向角度为 30°~40°区间的管道冲刷腐蚀速率达到极大值。

图 5 为直管段 $X = 1\text{ m}$ 、 $X = 1.5\text{ m}$ 、 $Y = 0.3\text{ m}$ 、 $Y = 0.6\text{ m}$ 处横截面近壁面处的流体法向速度。由图 5 可知,在入口直管段 $X = 1\text{ m}$ 、 $X = 1.5\text{ m}$ 区域,近壁面处的流体法向速度非常微小,约为 0.001 m/s。在出口直管段 $Y = 0.3\text{ m}$ 、 $Y = 0.6\text{ m}$ 区域,近壁面处的流体法向速度较大,且呈现明显的对称性,在最外侧区域 ($\alpha = 90^\circ$) 和最内侧区域 ($\alpha = 270^\circ$) 达到极小值。 $Y = 0.3\text{ m}$ 处横截面近壁面处的法向速度为 0.013~0.286 m/s, $Y = 0.6\text{ m}$ 处截面壁面处的法向速度为 0.001~0.154 m/s。可见, $Y = 0.3\text{ m}$ 截面内的流体法向速度比 $Y = 0.6\text{ m}$ 截面处流体法向速度大。

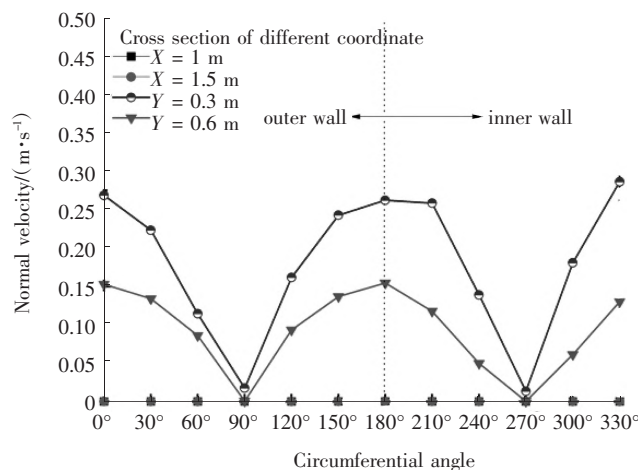


图 5 直管段横截面法向速度分布

2.3 弯管截面 Dean 涡分布

流体介质在弯管区域横截面内产生 Dean 涡,对介质中的腐蚀性粒子与金属基材之间的传质过程产生重要影响。采用流线示踪法,对 Slice 1—10 截面流场域内的质点速度分布进行统计和分析,结果如图 6 所示。

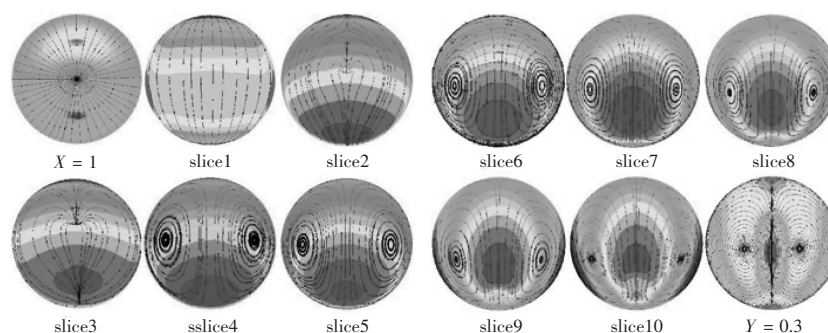


图6 各横截面流线分布规律

由图6可知,介质流经弯头部位时,在离心力作用下形成的Dean涡通常具有左右对称的涡旋(通常为2个),导致管内流体的轴向速度与法向速度发生较大变化,进而改变了弯头部位流体介质的速度场、浓度场、压力场与温度场分布^[23]。在横截面倾斜角度为 0° (Slice 1)时,流体速度方向为轴向,法向速度非常微小,且分布在流场左右两侧,此时管中无明显Dean涡形成。当截面倾斜角度大于 30° (Slice 4—10)时,弯管横截面开始出现典型的双核Dean涡,且涡核对称分布于管道中部区域。随着截面倾斜角度继续增加,Dean涡的涡核逐渐向弯管内侧移动。另外,当截面倾斜角度小于 30° 时,流体介质受到离心力和重力的耦合作用,截面内法向速度较大区域逐渐向弯管内侧移动;当截面倾斜角度大于 30° 时,截面内法向速度较大区域逐渐向弯管外侧移动。

由直管段的管道横截面流线图可知,在入口直管段,管内无Dean涡形成。当流体离开弯头部位,进入出口直管段,离心力作用消失,Dean涡强度逐渐降低,导致截面法向速度逐渐降低。在 $Y = 0.3$ m截面处,由于受到弯头部位Dean涡效应的影响,截面处的对称涡核稍偏向管道内侧。在 $Y = 0.6$ m截面处,对称涡核已位于管道截面中心线位置。因此,通过入口直管段、弯头、出口直管段部位截面法向速度的对比,可以发现流场在弯头部位,由于Dean涡效应,截面法向速度最大,出口直管段部位的截面法向速度次之,而入口直管段部位的截面法向速度最小。

3 结束语

管道冲刷腐蚀是液相流体冲刷与化学腐蚀的耦合过程,介质流动状态对于冲刷腐蚀速率具有重要影响。在液相介质流动过程中,壁面附近的合速度在直管段部位与弯头部位并无太大差别,且部分直管段的壁面合速度大于弯头部位的壁面合速度。流体介质流经弯头部位时,在离心力作用下产生对称分布的Dean涡,使得管道内壁面产生较大的法向速度。管道基材表面的金属阳离子与液相流体溶液中的腐蚀性阴离子在近壁面区域的传递过程主要受流体法向速度影响。弯管轴向角度为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 区间内流体介质所受Dean涡流动作用较强,从而产生较大的法向速度,导致该区域内腐蚀性粒子传质过程增强,冲刷腐蚀速率达到极大值。该结论对于船舶管路系统冲刷腐蚀高风险区域预测具有重要的理论意义。

参考文献:

- [1]EL-GAMMAL M, MAZJAR H, COTTON J S, et al. The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow[J]. Nuclear Engineering & Design, 2010(6):1589-1598.
- [2]SYDBERGER T, LOTZ U. Relation between mass transfer and corrosion in a turbulent pipe flow[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1982(2):276-283.
- [3]JIANG S, F CHAI, SU H, et al. Influence of Chromium on the Flow-accelerated Corrosion Behavior of Low Alloy Steels in 3.5% NaCl Solution[J]. Corrosion science, 2017(6):217-227.
- [4]BAI M, REDDY L, HUSSAIN T. Experimental and thermodynamic investigations on the chlorine-induced corrosion of HVOF thermal sprayed NiAl coatings and 304 stainless steels at 700°C [J]. Corrosion Science, 2018(5):147-57.
- [5]TIAN J, HUANG HL, PAN ZQ, ZHOU H. Effect of flow velocity on corrosion behavior of AZ91D magnesium alloy at elbow of loop system[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016(11):2857-2867.
- [6]KIM H J, KIM K H. Intuitional experiment and numerical analysis of flow characteristics affected by flow accelerated corrosion in

- elbow pipe system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016(3):183–188.
- [7]GAO M, PANG X, GAO K. The growth mechanism of CO₂ corrosion product films[J]. Corrosion Science, 2011(2):557–568.
- [8]WEI L, POTS BFM, BROWN B, KEE KE, NESIC S. A direct measurement of wall shear stress in multiphase flow—Is it an important parameter in CO₂ corrosion of carbon steel pipelines?[J]. Corrosion Science, 2016(9):35–45.
- [9]STRATMANN M, BOHNENKAMP K, ENGELL HJ. An electrochemical study of phase-transitions in rust layers[J]. Corrosion Science, 1983(9):969–985.
- [10]SCAPINO L, ZONDAG H A, BAEL J V, et al. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale[J]. Applied Energy, 2017(8):920–948.
- [11]BLATT W, KOHLEY T, LOTZ U, HEITZ E. The Influence of Hydrodynamics on Erosion-Corrosion in Two-Phase Liquid-Particle Flow[J]. CORROSION, 1989(10):793–804.
- [12]李恩田,张建伟,周昊,等.不同 NaCl 浓度对油气集输管道用钢冲刷腐蚀协同作用的影响[J].表面技术,2020(5):289–284.
- [13]EL-GAMMAL M, AHMED WH, CHING CY. Investigation of wall mass transfer characteristics downstream of an orifice[J]. Nuclear Engineering & Design, 2012(2):353–360.
- [14]ZHANG GA, ZENG L, HUANG HL, GUO XP. A study of flow accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline by array electrode and computational fluid dynamics simulation[J]. Corrosion Science, 2013(12):334–341.
- [15]ZENG L, ZHANG GA, GUO XP. Erosion - corrosion at different locations of X65 carbon steel elbow[J]. Corrosion Science. 2014 (4):318–330.
- [16]ZENG L, SHUANG S, GUO XP, ZHANG GA. Erosion-corrosion of stainless steel at different locations of a 90° elbow[J]. Corrosion Science, 2016(10):72–83.
- [17]FUJIWARA K, DOMAE M, YONEDA K, INADA F. Model of physico-chemical effect on flow accelerated corrosion in power plant[J]. Corrosion Science, 2011(6):3526–3533.
- [18]XU Y, TAN M Y. Visualising the dynamic processes of flow accelerated corrosion and erosion corrosion using an electrochemically integrated electrode array[J]. Corrosion Science, 2018(5):438–443.
- [19]RANI HP, DIVYA T, SAHAYA RR. CFD study of flow accelerated corrosion in 3D elbows[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014(1): 344–351.
- [20]WANG J, SHIRAZI SA. A CFD based correlation for mass transfer coefficient in elbows[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2001(9):1817–1822.
- [21]LIU J, LIN Y, LI X. Numerical simulation for carbon steel flow - induced corrosion in high - velocity flow seawater[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2008(2):66–72.
- [22]江嘉铭,吴文杰,黄淑龙,等.正弦型波纹管二次流强化换热模拟研究[J].热力发电,2020(9):46–51.
- [23]赵树,陈榴,戴韧.栅前端壁射流抑制二次流的数值研究[J].动力工程学报,2021(5):380–386.

(责任编辑:张利)

Analysis of Erosive Corrosion Mechanism of Elbow Pipe Based on Dean Vortex Effect

LV Wen-chao, CHEN Pei-hong, XU Liang

(School of Marine Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: Erosive corrosion is an important cause of damage and failure of ship pipelines, and the flow velocity of the medium in the pipeline is a key factor affecting the rate of erosive corrosion. Based on numerical simulation method, the velocity components of the liquid medium at different positions of the 90° elbow pipe are calculated and analyzed, and it is found that the erosive corrosion rate of the pipeline is not determined by the combined velocity of the medium flow, but determined by velocity component (i.e. the Dean vortex strength) in the cross section perpendicular to the axial direction of the pipeline. The greater the Dean vortex strength in the cross section, the faster the mass transfer process between the medium and the metal substrate on the wall, and the easier to accelerate the erosive corrosion of the pipeline.

Key words: erosive corrosion; elbow pipe; Dean vortex; numerical calculation