

环境效应与防护

气液固多相流对法兰接缝处的腐蚀行为研究

杨廷, 兰国霖

(中国石油管道局工程有限公司 第三工程分公司, 郑州 450000)

摘要: **目的** 揭示不同条件下法兰接缝处的腐蚀速率。**方法** 基于流动动力学数值模拟软件, 分析法兰接缝处的流场变化、不同因素的电化学腐蚀速率和冲刷腐蚀速率。**结果** 在文中的研究条件下, 随着接缝深度的增加, 法兰接缝处的流速分布分为 0~0.6 mm 和 0.6~5 mm 两个阶段, 在法兰接缝表面均存在明显的压力梯度层和温度梯度层。同时随着固体杂质质量流量的增大, 法兰处腐蚀速率呈直线增大, 当其质量流量大于 4 kg/s 时, 其腐蚀速率达到最大值; 而含砂流体流速与腐蚀速率基本符合正态分布规律。**结论** 对于气液固多相流条件下法兰处的腐蚀, 主要是由于电化学腐蚀和冲刷腐蚀相互作用产生的, 并且其冲刷腐蚀速率远远大于电化学腐蚀速率。

关键词: 法兰接缝; CFD; 流场; 电化学腐蚀; 冲刷腐蚀

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.018

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)09-0099-06

Corrosion Behavior of Gas-Liquid-Solid Multiphase Flow on Flange Joints

YANG Ting, LAN Guo-lin

(NO.3 Engineering Branch Company, China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd, Zhengzhou, 450000, China)

ABSTRACT: Objective To explore the corrosion rate in crevice of flange joints. **Methods** Based on CFD numerical simulation software, this paper studied the corrosion rate of flange joints, including the flow field, electrochemical and erosion corrosion rate. **Results** The velocity distribution at the flange joint in the above study conditions can be divided into two stages of 0-0.6 mm and 0.6-5 mm in the direction of joint depth, and there were obvious pressure gradient layer and temperature gradient layer on the surface of the flange joint. Meanwhile, with the increase of the mass flow rate of solid impurities, the corrosion rate at the flange increased linearly; and when the mass flow rate was greater than 4 kg/s, the corrosion rate reached the maximum. The velocity of sand-containing fluid and corrosion rate are normally distributed. **Conclusion** Therefore, the corrosion of flange joints under the gas-liquid-solid multiphase flow condition is mainly caused by the interaction of electrochemical corrosion and erosion corrosion, and its erosion corrosion rate is much higher than the electrochemical corrosion rate.

KEY WORDS: flange joint; CFD; flow field; electrochemical rate; erosion rate

在油田分离器入口处通常会使用法兰与来油管道相连, 如图 1 所示。由于法兰处存在缝隙结构^[1], 通常通过安装法兰垫片来保证其密封性, 但同时也会在垫片和管壁之间产生一定的空隙, 这部分空隙会导致介质的积聚, 使其壁面及周围的法兰平面发生电化学腐蚀^[2]。法兰盘平面与管壁所形成的尖角易受到油

田气液固多相流的冲刷^[3], 在电化学腐蚀和冲刷腐蚀的共同作用下, 极易产生泄露问题。若不能及时处理流体的泄露, 在其冲刷作用下缺陷会迅速扩大, 使得法兰失效破坏, 最终可能导致该分离器的停产, 并造成巨大的经济损失。

造成法兰缝隙处腐蚀的因素很多, 其腐蚀机理复

杂^[4]。现场腐蚀检测技术在管道内检测方面已经取得了较为广泛的应用,但不同技术仍然存在本质上的缺陷。因此,近年来,很多研究者借助于计算流体力学(CFD)的计算机仿真技术,对流体的流动状况和腐蚀情况进行数值模拟,以分析管道内的腐蚀行为,再结合现场技术,可以更准确地得到内部腐蚀状况,以便更有针对性地做出防腐措施^[5]。该次研究主要针对影响法兰缝隙处腐蚀的不同因素进行分析,对缝隙处流体的多相流动和传质进行了数值模拟,进而得出法兰缝隙处腐蚀的基本规律。

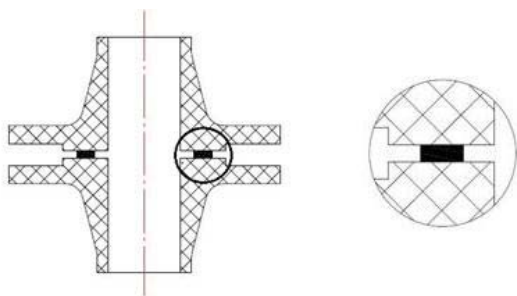


图1 法兰密封示意

1 计算模型

1.1 基本模型

在文中主要采用了 Fluent 中的三种模型:湍流标准 $k-\varepsilon$ 模型、离散相模型和电化学模型。

1) 湍流标准 $k-\varepsilon$ 模型^[6]。在所选用的标准 $k-\varepsilon$ 模型中,加入了低雷诺数、剪切流传播及流体可压缩性的影响,其表达式由湍流动能方程 k (方程 1) 和扩散方程 ε (方程 2) 组成:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

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

式中: G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能; G_b 为由浮力产生的湍流动能; Y_M 为在可压缩湍流中过度扩散产生的波动; μ_t 为湍流速度, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.99$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2) 离散相模型。离散相杂质粒子运动轨道是根据拉式坐标下颗粒运动的微分方程来求解的,其颗粒的作用力平衡方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{24\rho_p d_p^2} (u - u_p) +$$

$$\frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d(u - u_p)}{dt} \quad (3)$$

式中: u 为连续相速度, m/s; u_p 为颗粒速度, m/s; ρ_p 为颗粒密度, kg/m³; d_p 为颗粒直径; g 为重力加速度, m/s²; Re 为相对雷诺数; C_D 为曳力系数。

在 DPM 模型下,可以监视杂质粒子对壁面的冲蚀情况,其腐蚀速率为:

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (4)$$

式中: R_{erosion} 为腐蚀速率; $N_{\text{particles}}$ 为颗粒数量; m_p 为颗粒质量流量, kg/s; $C(d_p)$ 为颗粒直径的函数; $f(\alpha)$ 为侵入角的函数; v 为颗粒相对于壁面的速度, m/s; $b(v)$ 为相对速度的函数; A_{face} 为壁面上单元表面积。

3) 电化学模型。当电解质和电极相遇时,其表面会发生电化学反应,阳极反应产生电子,阴极反应消耗电子。电化学反应的一般形式为:

$$\sum_{k=1}^N v'_{k,r} M_k^z \leftrightarrow \sum_{k=1}^N v''_{k,r} M_k^z + \left(\sum_{k=1}^N (v''_{k,r} - v'_{k,r}) z_k \right) e \quad (5)$$

式中: M_k 为固体或液体的物质的量; N 为反应物总数量; $v'_{k,r}$, $v''_{k,r}$ 为物质 k 分别作为反应物和产物的化学计量系数; Z_k 为 k 物质的电荷量; e 为电子。

在 ANSYS Fluent 中,法拉第界面处的电荷转移反应速率可以由巴特勒-伏尔摩方程确定,其方程为:

$$i_{F,r} = i_{0,r} \prod_{k=1}^N \left(\frac{Y_{k,r}}{Y_{k,r}^{\text{ref}}} \right)^{Y_{k,r}} \left[\exp\left(\frac{\alpha_{a,r} \beta_{a,r}}{RT} \right) - \exp\left(\frac{-\alpha_{c,r} \beta_{c,r}}{RT} \right) \right] \quad (6)$$

或者由塔菲尔斜率确定:

$$i_{F,r} = i_{0,r} \prod_{k=1}^N \left(\frac{Y_{k,r}}{Y_{k,r}^{\text{ref}}} \right)^{Y_{k,r}} \left[\exp\left(\frac{2.303 \eta_r}{RT} \right) - \exp\left(\frac{-2.303 \eta_r}{RT} \right) \right] \quad (7)$$

式中: $i_{F,r}$ 为法拉第电流密度, A/m²; $i_{0,r}$ 为交换电流密度, A/m²; N 为参加反应的化学物质总数; $Y_{k,r}$ 为物质 k 的质量分数; $Y_{k,r}^{\text{ref}}$ 为物质 k 的参考质量分数; $\alpha_{a,r}$ 为阳极电荷转移系数; $\alpha_{c,r}$ 为阴极电荷转移系数; $\beta_{a,r}$ 为阳极反应的塔菲尔斜率, V; $\beta_{c,r}$ 为阴极反应的塔菲尔斜率, V; R 为通用气体常数, J/(kmol·K); T 为温度, K; η_r 为过电位, V。 η_r 可通过式 (8) 计算:

$$\eta_r = \varphi_{\text{ed}} - \varphi_{\text{el}} - E_{\text{eq},r} \quad (8)$$

式中: φ_{ed} 、 φ_{el} 为电解液电位和电极电位; $E_{\text{eq},r}$ 为平衡电位。

式 (6) 中第一项为阳极反应的速率,第二项为阴极反应的速率。这两个值的差值为净反应速率。反

应方向取决于过电位方向。如果过电位为正, 则整个反应向阳极反应方向移动, 如果为负, 则沿阴极反应方向移动。

1.2 模型假设条件与边界条件

1) 假设条件: 管道内流体各相之间不存在化学反应; 流体的流动是连续的, 不考虑段塞流等非连续情形; 流体流经所建模型的入口截面时, 每一相在入口截面上都是均匀分布的; 流体的入口速度方向垂直于入口截面; 在冲刷腐蚀和电化学腐蚀的模拟中, 无热量交换; 在 DPM 模型中, 假设颗粒的形状为圆球形, 忽略颗粒因碰撞所产生的结合与破坏。

2) 初始条件: 在所研究的区域内, 速度场、温度场和压力场在边界上均设为常向量。

3) 边界条件: 入口边界设置为速度入口; 出口边界设置为压力出口, 数值大小为分离器的工作压力; 壁面设置为壁面边界, 无滑移; 模型的下边界设置为对称边界; 温度场的边界条件是四周壁面的温度为环境温度。

1.3 法兰接缝处几何模型

根据图 1 所示结构, 选取一个宽为 3 mm、高为 6 mm 的矩形来模拟法兰接缝。考虑到管道对接缝处的相互作用, 因此在管道的径向截面上选取了一部分作为研究对象, 其管道径向截面所选取的矩形宽 20 mm、长 60 mm。在 ANSYS fluent 的 geometry 里

建立法兰接缝处的几何模型, 如图 2 所示。进行网格划分时, 需综合考虑所需的运算时间及接缝处的精度, 文中所选取的网格为 0.5 mm 的四边形标准网格。

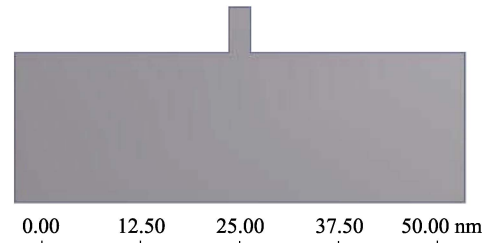


图 2 法兰接缝处的几何模型

2 结果与讨论

在模型所定义的流场压力 (0.4 MPa, 表压) 和流场温度 (40 °C) 的条件下, 各参数数值见表 1。

2.1 流场分析

文中主要针对油田后期的高含水问题, 综合考虑不同油气田的原油性, 选取油气水三相腐蚀介质, 其体积比为 7:2:1。分别设置重力加速度为 9.8m/s^2 、0 和 -9.8m/s^2 表示法兰接缝下方、水平和上方的位置。根据现场实验现象发现, 在法兰接缝的深处, 液相的总体积比近似于 100%, 也就是说法兰接缝深处的主要物质是油和水。

表 1 数值计算基本参数

参数	数值	参数	数值
油密度	900 kg/m ³	水密度	1034 kg/m ³
油动力黏度	0.075 Pa·s	水动力黏度	4.5×10^{-4} Pa·s
油导热系数	0.14 W/(m·K)	水导热系数	0.6 W/(m·K)
天然气密度	3.738 kg/m ³	水比热容	4182 J/(kg·K)
天然气动力黏度	1.23×10^{-5} Pa·s	杂质粒子平均密度	1500 kg/m ³
天然气导热系数	0.029 W/(m·K)	杂质粒子直径	200 μm
天然气比热容	2500 J/(kg·K)	钢管密度	7850 kg/m ³

在研究接缝处的电化学腐蚀和冲刷腐蚀前, 对其流场特征进行了分析。设置其进口速度为 5 m/s, 出口表压为 0.4 MPa, 壁面恒温为 20 °C, 接缝处 (与法兰盘间距为 0.5 mm) 的流速、压力和温度分布如图 3 所示。

从流体流速矢量分布可以看出, 由于法兰接缝的存在, 该点处产生了旋流。在管道环向方向上, 该点处流体速度方向发生了改变, 其速度标量在与接缝垂直的方向上最大, 与设置流体流速基本相同。对于流速沿接缝深度的变化规律, 如图 4 所示。主要分为两个明显的阶段: 第一阶段为接缝深度 0~0.6 mm, 第

二阶段为接缝深度 0.6~5 mm。可以看出, 第一阶段速度的减小程度明显大于第二阶段。这也主要是由于旋流的存在, 对缝隙口处的速度影响较大而对缝隙内部的影响较小造成的。

对于压力分布来说, 在法兰接缝靠近分离器的法兰盘拐点处, 与法兰盘其他位置相比, 压力较大, 最大值为 4.03 MPa (表压)。对于温度分布来说, 在流场温度确定的条件下, 管道内流体的温度分布较为均匀, 但在靠近壁面的区域, 会出现温度边界层, 其温度会迅速减小接近至壁面温度。同时在法兰接缝处, 随着接缝深度的增加, 温度也逐渐减小。

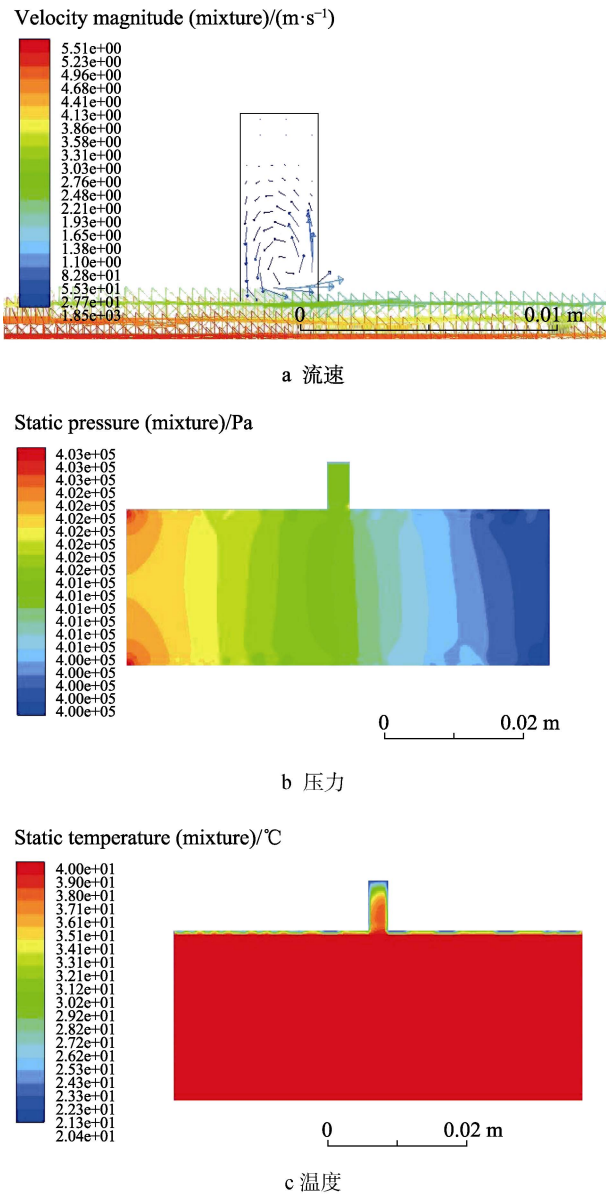


图3 法兰接缝处的流场分布

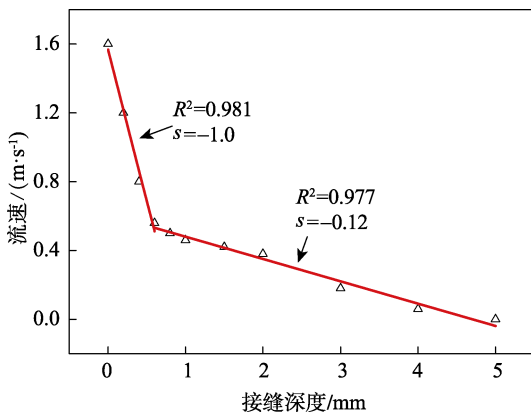


图4 流速随缝隙深度的变化曲线（入口速度为5 m/s）

2.2 电化学腐蚀

法兰接缝处的电化学腐蚀速率如图5所示,可以看出,在接缝的边缘处存在着很大的电化学腐蚀速率

梯度层。越靠近缝隙外侧,其电化学腐蚀速率越大,其最大腐蚀速率为0.375 mm/a。主要是由于缝隙内流体停滞,使得接缝内外氧气含量不同造成的。由于法兰接缝处的闭塞特性,缝隙内介质迁移困难,缝隙内的氧气被消耗殆尽后,形成缝内为阳极、缝外为阴极的氧浓差电池:阳极 $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$, 阴极 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 。同时由于缝隙内的正电荷过剩,会吸引缝外的阴离子(如 Cl^-)的进入,以维持电荷平衡。缝隙内高浓度的氯化物发生水解,导致缝隙内介质严重酸化,进而加速阳极溶解。阳极溶解又会引起更多的氯离子迁入,氯化物水解又会导致介质酸化,阳极继续溶解,往复循环。

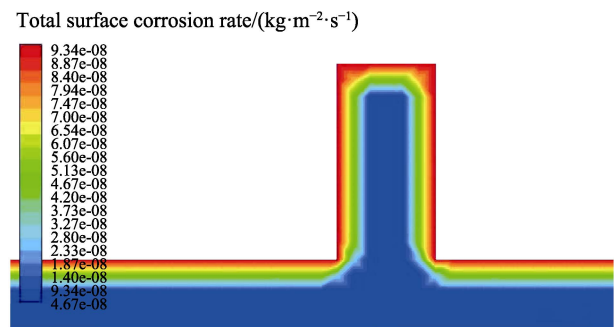


图5 法兰接缝处的腐蚀速率

2.3 冲刷腐蚀

管道内的固体杂质冲击管壁,使管壁处表面膜减薄、破坏,加速管壁与流体的反应,造成冲刷腐蚀。在管道结构突然变化的位置,例如弯头、法兰处,冲刷腐蚀对该处的管壁会造成较大的伤害^[7]。假设固体杂质为沙砾,其密度为 1500 kg/m^3 、直径为 $200 \mu\text{m}$ 、质量流量为 1 kg/m^3 ,以 2 m/s 的速度沿 x 方向入射,流体以相同的速度进入研究区域,得到的颗粒运动轨迹如图6所示。

由图4和图5可以看出,有一部分固体杂质会冲击到靠近分离器侧法兰的拐点处,其中有少量的杂质会进入接缝。从图5可以看出,冲刷腐蚀最严重的部分在靠近分离器侧法兰盘的拐点处,腐蚀速率为 0.904 mm/a ,远远大于单纯电化学腐蚀。

事实上,在法兰处的腐蚀是冲刷腐蚀和电化学腐蚀共同作用的结果。在法兰处,湍流腐蚀占主导作用,由于结构的突变,一部分的法兰壁面会直接受到流体的冲击,造成新鲜基体的裸露,进而引发更严重的腐蚀^[8]。为了使缝隙处能进入更多的流体,使缝隙处流体的流动效果更加明显,便于观察固体颗粒对法兰的冲蚀,假设流体与水平面呈一定角度进入研究区域。将流体 x 方向的速度设为 4 m/s , y 方向的速度设为 2 m/s ,杂质颗粒以 4 m/s 水平入射,其他条件不变,得到如图7所示的固体杂质直流流量与腐蚀速率的关系曲线。

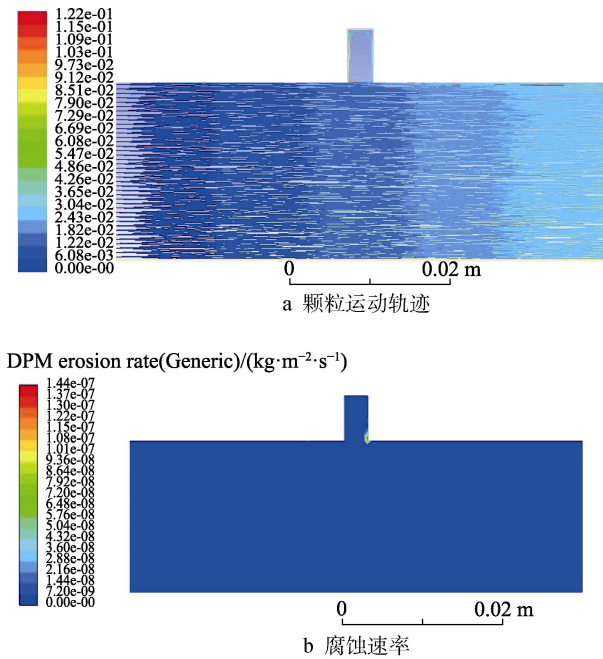


图 6 法兰接缝处的腐蚀速率和颗粒运动轨迹

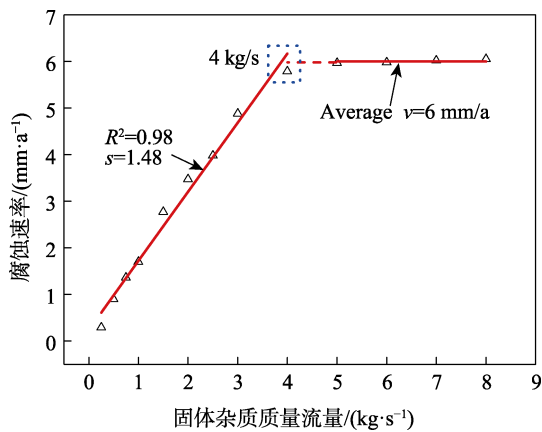


图 7 颗粒质量流量与腐蚀速率的关系

从图 7 可以看出，随着固体杂质质量流量的增大，法兰处腐蚀速率呈直线增大。当其质量流量大于 4 kg/s 时，其腐蚀速率达到最大值，且不再随着质量流量的增大而发生变化。这主要是因为，在较小的质量流量时，随着质量流量的增大，其固体杂质与法兰接触和碰撞的次数也增大，当增大到一定程度时，由于法兰接缝处空间位置的闭塞特性，其固体杂质与法兰的碰撞次数不再发生变化，因此其腐蚀速率不再变化。

不同含砂流体流速与腐蚀速率的关系如图 8 所示，可以看出，腐蚀速率先增加后减小，基本符合正态分布规律。这主要是因为，在一定的流速范围内，随着流速的增大，砂砾进入到缝隙处越来越多，造成的碰撞也就越来越大，其腐蚀速率也就越来越大。当腐蚀速率增大到一定程度时，由于液体的携砂特性，其砂砾迅速滑过缝隙，随着流速增大，其进入缝隙的数量就越小，因此其腐蚀速率也就越小。从图 9 可以看

出，当流速为 3 m/s 时，基本没有砂砾进入到缝隙中。

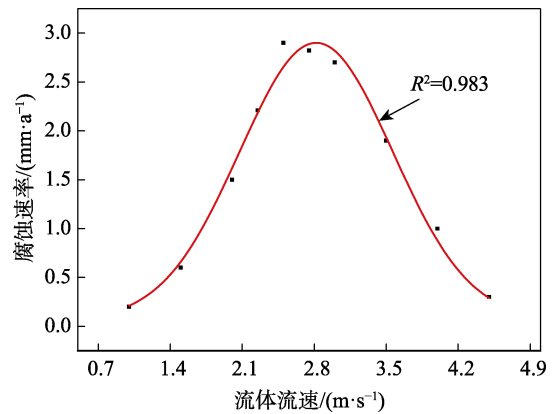


图 8 含砂流体流速与腐蚀速率的关系

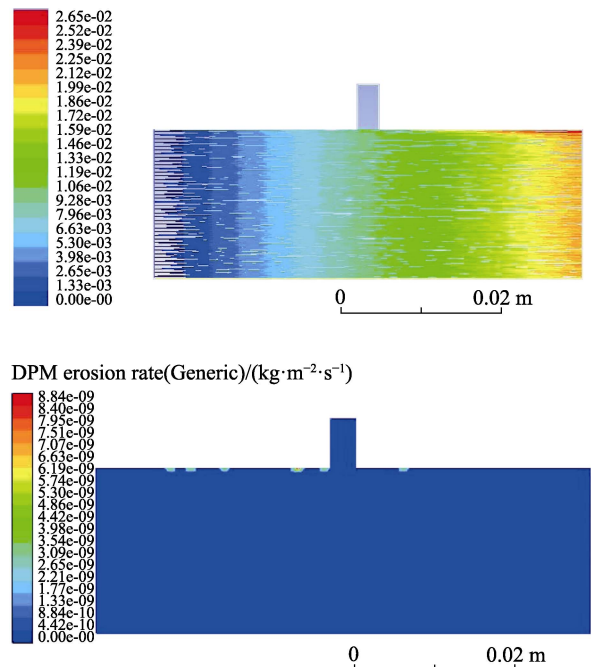


图 9 流速为 3 m/s 的杂质颗粒轨迹

4 结论

基于流体动力学计算方式，针对法兰接缝的腐蚀行为进行了研究，主要得到以下结论。

1) 法兰接缝处的流速主要分为两个明显的阶段：第一阶段为接缝深度 0~0.6 mm，第二阶段为接缝深度 0.6~5 mm。对于压力分布来说，在法兰接缝处靠近分离器的法兰盘拐点处压力最大，为 4.03 MPa (表压)。同时存在温度边界层，其温度会迅速减小至接近壁面温度。

2) 在法兰接缝的边缘处存在着较大的电化学腐蚀速率梯度层，其最大腐蚀速率为 0.375 mm/a，其原因可通过闭塞电池的自催化原理来解释。

3) 冲刷腐蚀最严重的部分在靠近分离器侧法兰盘的拐点处，腐蚀速率为 0.904 mm/a，其腐蚀为冲刷

腐蚀与电化学腐蚀相互作用的过程。

4) 随着固体杂质质量流量的增大, 法兰处腐蚀速率呈直线增大。当其质量流量大于 4 kg/s 时, 其腐蚀速率达到最大值, 且不再随着质量流量的增大而发生变化, 这主要是由于法兰接缝处的空间特性造成的。含砂流体流速与腐蚀速率基本符合正态分布规律, 这主要是因为当流速过大时, 砂砾基本不会进入到接缝处。

参考文献:

- [1] 刘丽, 王煦, 任呈强, 等. 油管与接箍接头的缝隙腐蚀评价[J]. 压力容器, 2011, 28(12): 1-4.
- [2] 李焱周. 应力和缝隙耦合作用下 N80 碳钢腐蚀行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [3] EL-GAMMAL M, MAZHAR H, COTTON J S, et al. The Hydrodynamic Effects of Single-phase Flow in Flow Accelerated Corrosion in a 90-degree Elbow[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(6): 1589-1598.
- [4] 张皓玥, 王津梅. 金属缝隙腐蚀的成因及实验验证[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 204-207.
- [5] ZhANG H, TAN Y Q, YANG D M, et al. Numerical Investigation of the Location of Maximum Erosive Wear Damage in Elbow: Effect of Slurry Velocity, Bend Orientation and Angle of Elbow[J]. Power Technology, 2012, 217: 467-476.
- [6] VIERIA R E, MANSOURI A, MCLAURY B S, et al. Experimental and Computational Study of Erosion in Elbows due to Sand Particles in Air Flow[J]. Power Technology, 2016, 288: 339-353.
- [7] 蔡峰, 柳伟, 樊兴华, 等. 流体喷射条件下金属材料充数腐蚀的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(5): 521-527.
- [8] NSOESIE S, LIU R, CHEN K Y, et al. Analytical Modeling of Solid-particle Erosion of Stellite Alloys in Combination with Experimental Investigation[J]. Wear, 2014, 209(1-2): 226-232.
- [9]