

文丘里管冲刷腐蚀数值模拟

杨鸿麟, 吴玉国, 蒋硕硕, 刘萌

(辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113006)

摘要: **目的** 预防液固两相流冲刷腐蚀对管道内表面性能的影响, 特别是在发生冲刷腐蚀可能性较大的变径管处。**方法** 基于计算流体力学和流固耦合原理, 通过 CFD 中流固耦合技术, 利用标准 $k-\varepsilon$ 涡流进行数值分析与离散相模型 (DPM) 进行流场分析。探究冲蚀角度、流体速度、固体颗粒粒径、颗粒质量流量对文丘里管冲刷腐蚀行为的影响规律, 预测变径管处发生冲刷腐蚀行为的位置及严重程度。**结果** 文丘里管收缩角度从 10° 增加至 70° 时, 最大冲蚀率先增加到 $3.82 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而在 45° 降到最小, 后再次增加至 $6.23 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 入口流速从 8 m/s 增加至 20 m/s 时, 最大冲蚀率从 $9.44 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 $5.09 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 冲刷固体颗粒粒径从 $6.25 \mu\text{m}$ 增加至 $300 \mu\text{m}$ 时, 最大冲蚀率从 $8.32 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 减小 $7.64 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 质量流量从 0.002 kg/s 增加到 0.008 kg/s 时, 最大冲蚀率从 $8.41 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 $4.21 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。**结论** 冲刷腐蚀行为随着冲蚀角度增大, 先增强后减弱, 再增强; 随流速增大而显著增强; 随着粒径增大而逐渐减弱; 随着质量流量的增大而增强。在文丘里管的收缩段 (节流区) 最易发生冲刷腐蚀行为, 且管道下半部冲刷腐蚀行为更严重。应采用收缩角为 45° 的文丘里管、控制流体速度、减少小粒径颗粒及降低质量流量, 来抑制冲刷腐蚀行为。

关键词: 安全; 颗粒; 冲刷腐蚀; 文丘里管; 液固两相流; 最大冲蚀率

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)10-0193-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.026

Numerical Simulation of Erosion Prediction in Venturi

YANG Hong-lin, WU Yu-guo, JIANG Shuo-shuo, LIU Meng

(School of Petroleum and Gas Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113006, China)

ABSTRACT: The work aims to prevent the influence of liquid-solid two-phase flow erosion on the inner surface of pipe performance, especially in the reducer where erosion is likely to occur. Based on computational fluid dynamics (CFD) and fluid-solid interaction theory, numerical simulation and discrete-phase model (DPM) were used to analyze the flow field by the standard $k-\varepsilon$ eddy current through the CFD technique. The influences of erosion angle, fluid velocity, particle size of solid particles and particle mass flow on the erosion behavior of venturi tube were investigated, and the location and severity of erosion at the tube was predicted. As contraction angle of venturi tube increased from 10° to 70° , the maximum erosion rate increased to

收稿日期: 2018-03-30; 修订日期: 2018-07-02

Received: 2018-03-30; Revised: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51046002); 辽宁省教育厅科学研究项目 (L2015306)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51046002), Liaoning Provincial Department of Education Scientific Research Project (L2015306)

作者简介: 杨鸿麟 (1994—), 女, 硕士研究生, 从事油气储运技术方向的研究。

Biography: YANG Hong-lin (1994—), female, Master, Research focus: technical direction of the oil and gas storage and transportation.

通讯作者: 吴玉国 (1977—), 男, 博士, 教授, 从事油气储运技术方向的研究。邮箱: wyg0413@126.com

Corresponding author: WU Yu-guo (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: technical direction of the oil and gas storage and transportation. E-mail: wyg0413@126.com

$3.82 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and then increased to $6.23 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ when the angle decreased to 45° . As the inlet flow rate increased from 8 m/s to 20 m/s, the maximum erosion rate increased from $9.44 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ to $5.09 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. As the particle size of scouring solids increased from $6.25 \mu\text{m}$ to $300 \mu\text{m}$, the maximum erosion rate decreased from $8.32 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ to $7.64 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. As the mass flow rate increased from 0.002 kg/s to 0.008 kg/s, the maximum erosion rate increased from $8.41 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ to $4.21 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The scour corrosion behavior increases with the increase of erosion angle and then decreases and increases again. With the increase of flow velocity, the erosion increases significantly, but gradually decreases with the increase of particle size. Moreover, the erosion also increases with the increase of mass flow rate. The erosion behavior is most likely to occur in the contraction section (throttle zone) of venturi tube, and the erosion behavior of the lower part of the pipeline is more serious. In order to reduce the scour corrosion behavior, we should design the venturi tube with 45° throat angle, control the fluid velocity, reduce the passing of small particle size particles and decrease the mass flow.

KEY WORDS: safety; particle; venture; liquid-solid two-phase flow; maximum erosion rate

液固两相流冲刷腐蚀受到国内外的广泛关注。在石油天然气生产集输工艺流程中,从疏松出砂稠油层、稀稠油井、粉细砂岩井等各类出油井中开采的油品会含有固体颗粒,颗粒被夹带在载流体中^[1],会导致管道、阀门、扼流圈、T型接头、弯头和管道中测量设备的内壁产生反复的颗粒冲击,进而降低了管道内表面性能,甚至报废^[2]。冲刷腐蚀造成了5000亿美元以上的损失,占经济生产总值的5%^[3]。B K Gandhi^[4]、Desale^[5]、Oka^[6]在研究液-固冲刷腐蚀的参数依赖性时,发现冲刷腐蚀与冲蚀角度、固体颗粒性质、流体性质等因素密切相关。为了管道系统的安全,对其冲刷腐蚀预测研究迫在眉睫。孙飞^[7]、Vieira R E^[8]等人对液固两相流中固体颗粒冲蚀破坏位置进行预测,得出冲蚀破坏区域均为输送方向发生变化处。而在石油天然气等行业中,文丘里管作为不可或缺的测量元件,结构简单,应用广泛,一直是研究热点^[9-11]。Charrière B^[12]研究在二维文丘里配置数值单流体非稳态RANS模拟,结果与收缩比、流向速度、壁压和壁压波动的实验数据进行对比,结果较好。许多学者对文丘里管进行了CFD模拟压降预测,如Majid Ali^[13]、B Akta^[14]等对不同节流比、收缩角、扩张角、喉段长度的文丘里管中,粉煤密相气力输送系统高压、高浓度煤粉进行了研究,得到了流动特征和压差特性,还对多相流通过文丘里管时的空蚀侵蚀进行了数值预测。

但国内外研究中缺少对不同规模的文丘里管液固两相流流动特性全面、深入的认识,结构参数变化如何影响含固体颗粒流体流经文丘里管的流动特征及冲刷腐蚀特性,还不十分明确。目前并未对文丘里管液固两相冲蚀磨损进行研究。由于渐缩机理,通过文丘里管的流体中携带固体颗粒时,文丘里管很容易受到冲刷腐蚀。鉴于文丘里管在集输工艺中起着至关重要的作用,本文运用DPM模型,主要针对冲击角度、固体颗粒粒径、流速和固体的质量流量等因素进行研究,并在实际工况中选取八种不同结构参数的文丘里管进行研究。考虑多重影响因素的共同作用,找

出了最佳的抗冲蚀结构参数,可供管道系统安全进行参考。

1 计算模型

1.1 数学模型及冲蚀率的计算方法

考虑到连续相的体积分数和流-固体相互作用力,连续载流体流动方程由体积平均连续性和动量方程组成,分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla(\alpha_f \rho_f u_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f u_f) + \nabla(\alpha_f \rho_f u_f u_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla(\alpha_f \tau f) + \alpha_f \rho_f g - f_{\text{drag}} \quad (2)$$

由于文丘里管内的流动通常是湍流,因此采用标准的 $k-\varepsilon$ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f k) + \nabla(\alpha_f \rho_f u_f k) = \nabla(\alpha_f \Gamma_k \nabla k) + \alpha_f G - \alpha_f \rho_f \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \varepsilon) + \nabla(\alpha_f \rho_f u_f \varepsilon) = \nabla(\alpha_f \Gamma_\varepsilon \nabla \varepsilon) + \alpha_f \frac{\varepsilon}{k} (c_1 G - c_2 \rho_f \varepsilon) \quad (4)$$

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p g + F_{\text{drag}} + F_{\text{vm}} + F_{\text{pg}} + F_{\text{sl}} + F_b + F_m \quad (5)$$

式中: F_{drag} 、 F_{vm} 、 F_{pg} 、 F_{sl} 、 F_b 和 F_m 分别代表阻力、虚拟质量力、压力梯度力、Saffman升力、Basset力和Magnus力;下标f表示流体相。文献[15]认为,阻力在流体对颗粒的作用力中起主要作用,因此本文只关注重力和阻力。

采用欧拉(Eulerian)多相流计算模型^[16],定义主相为水,第二相为固体球形颗粒,颗粒密度 $\rho = 1500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。计算冲蚀率时,采用离散相模型(DPM)来追踪颗粒运动轨迹。CFD软件中的冲刷腐蚀公式为:

$$R = \sum_{n=1}^N \frac{m_p C(d_p) g(\alpha) v_p^n}{A_{\text{cell}}} \quad (6)$$

式中： R 为管壁的磨损速率 ($\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)； N 为碰撞固体颗粒数； m_p 为固体颗粒的质量流量 (kg/s)； $C(d_p)$ 为固体颗粒直径的函数； α 为固体对管壁碰撞角度； v_p^n 为颗粒相对于壁面的速度 (m/s)； A_{cell} 为壁面计算单元的面积 (m^2)； $g(\alpha)$ 为侵入函数，见式 (7) [17]。

$$g(\alpha) = 2.69\alpha + 1.61\alpha^2 - 8.84\alpha^3 + 7.33\alpha^4 - 1.85\alpha^5 \quad (7)$$

恢复系数是当固体颗粒与管壁发生碰撞时，碰撞前后速度分量的比值。恢复系数的改变是因为存在能量转移和能量损失 [18]，方程形式为：

$$\begin{cases} \varepsilon_N = 0.993 - 0.0307\alpha + 4.75 \times 10^{-4}\alpha^2 - 2.61 \times 10^{-6}\alpha^3 \\ \varepsilon_T = 0.988 - 0.029\alpha + 6.43 \times 10^{-4}\alpha^2 - 3.56 \times 10^{-6}\alpha^3 \end{cases} \quad (8)$$

1.2 计算模拟

经学者研究发现，石油运输系统与水力发电厂等的管道中多采用直径 0.1 m 的管径 [19]，本文对其进行几何建模。其中，令文丘里管模型的横截面直径 $D=0.1$ m。为确保几种模型的节流效果相同，管径比均为 0.5；为保证模拟的准确性，进出口直管段的长度为 $10D$ ，如图 1 所示。研究中，分别取收缩角 α 为 $10^\circ \sim 70^\circ$ 进行模拟，获得文丘里管的优化结构，参数见表 1。

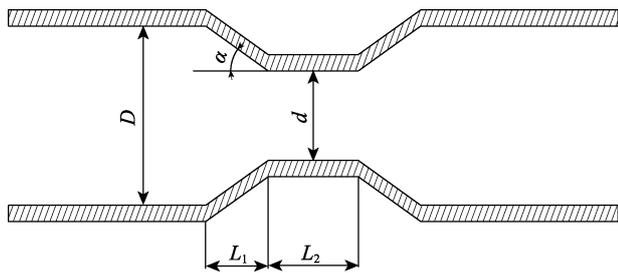


图 1 文丘里管的结构模型
Fig.1 Venturi tube structure model

表 1 文丘里管结构参数
Tab.1 Venturi tube structure parameters

Groups	Angle $\alpha/(\circ)$	L_1/mm
1	10	143.969
2	20	73.0951
3	30	50.0000
4	40	38.8931
5	45	35.3553
6	50	32.6352
7	60	28.8675
8	70	26.6044

1.3 边界条件

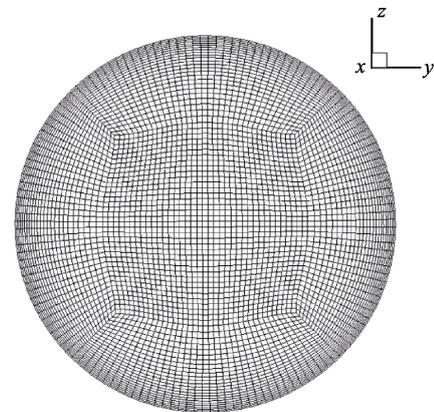
本文中的湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型，并采用 velocity-inlet 作为入口边界条件，将液相入口湍流强度定义为 2.93%，入口水力直径为 100 mm。采用

outflow 作为出口边界条件，其他管面设置为标准的无滑移壁面。计算时，压力速度耦合选择 SIMPLE 算法，控制方程组均采用一阶迎风差分格式。

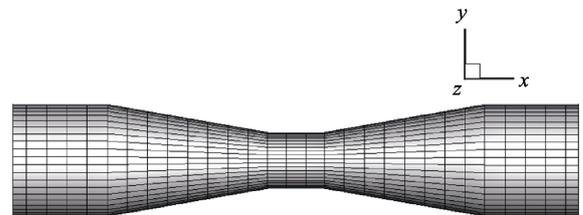
1.4 网格划分及无关性检验

选择六面体网格类型，采用分块划分的方法，将几何模型划分成 5 块，管壁为关键模拟流场，边界层的网格需要尽可能细化 [20]，以便在 FLUENT 中计算，从而有效提高计算精度。网格划分见图 2。

用管道的最大磨损率作为衡量网格准确性的依据，进行网格无关性检验，既可保证计算精度，又能最大程度地节省计算时间。总网格数为 7.19×10^4 和 2.23×10^7 时的最大磨损率基本一致，故本文采用总数为 7.19×10^4 的网格。



a 入口处网格划分



b 收缩段网格划分

图 2 网格划分示意图

Fig.2 Meshing schematic: a) meshing at the entrance, b) meshing of constricted segments

1.5 模型验证

计算冲刷腐蚀渗透率，并与 Blatt [21] 实验数据进行对比，来验证计算模型的正确性。Blatt 研究在直径比为 0.5 的突缩管道中流动的冲刷腐蚀问题，其中砂粒径为 $400 \mu\text{m}$ ，载流体是 60°C 的水。图 3 显示了本模型在不同流速下预测的渗透率 (mm/a) 和 Battle 等实验测量数据的比较结果，比较了管材为 X10Cr13、固体颗粒浓度为 0.1% 的液固两相流，可以看出，数据显示出良好的一致性，验证了本文数值模拟模型预测冲刷腐蚀的精确性。

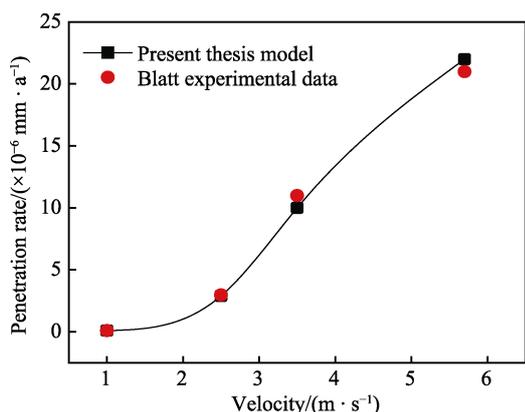


图 3 实验对比结果

Fig.3 The results between experiment and simulation

2 计算结果与分析

2.1 冲击角度对冲刷腐蚀的影响

油品集输管道中，会设计不同对策和输送方案。输送计算工艺差异较大，采用文丘里管的结构也不相同。为更好地研究冲击角度对冲刷腐蚀的影响规律，采用的文丘里管节流比为 0.5，收缩角为 10°、20°、30°、40°、45°、50°、60°、70°。条件为：固体颗粒粒径 6.25 μm，质量流量 0.002 kg/s。冲刷腐蚀程度通过最大冲蚀率 (Max_e) 衡量，数值仿真绘制如图 4。

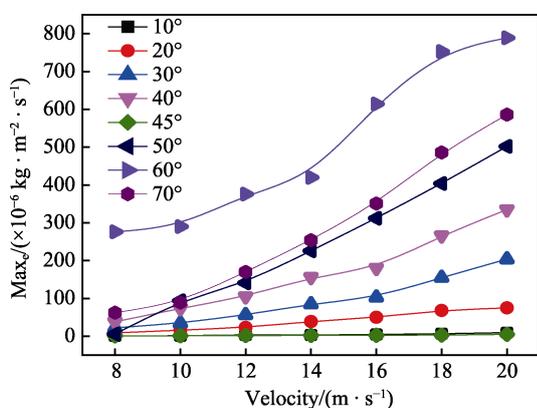


图 4 不同角度时随速度变化的最大冲蚀率

Fig.4 The maximum rate of erosion vs different velocities under different angles

图 4 为不同文丘里管承受的冲刷腐蚀行为随速度变化的规律。文丘里管流量内部的冲刷腐蚀率先随两相流冲击角度的增大而增大，达到一个峰值 (40° 浮动) 后，随着冲击角度的增大而减小，随即达到第一个极小值 (45°)，之后又随着冲击角度的增大而增大。在 60° 时一直处于各角度中的最高值状态，而 70° 时随着速度的增大，最大冲蚀率的增长速率最大；45° 时文丘里管内的冲蚀最小，且增长速率最小。其中 60° 的文丘里管内的液固流经文丘里管的冲蚀率最大。

在不同冲击角度时，颗粒对管道造成的冲刷腐蚀

机理有所不同。冲击角度较大时，颗粒主要对管道产生形变作用；冲击角度较小时，颗粒主要对管壁产生切削作用。颗粒冲击壁面分为实际冲击角度和名义冲击角度，若内部颗粒的冲击角度和液固磨损相接近，则作用在管壁上的有效冲击角度最小。颗粒随流体的收缩角度变大，跟随性变差，而当收缩角为 45° 时，刚好满足冲刷腐蚀角度的最优值。结果表明，在工程中采用 45° 文丘里管进行流量测量、节流时，冲刷腐蚀量小，保护管道更加方便，具有较好的工程应用价值。

2.2 颗粒粒径对冲刷腐蚀的影响

在集输工艺中，不同油田开采出的原油组分差异较大，含有的颗粒粒径不尽相同，管道壁面会承受不同粒径颗粒的冲击。为更好地研究颗粒粒径对冲刷腐蚀的影响规律，本文采用粒径为 6.25、25、50、100、200、300 μm 颗粒为研究对象，保持流体液相速度为 8 m/s，固体颗粒质量流量为 0.002 kg/s，数值仿真结果如图 5。

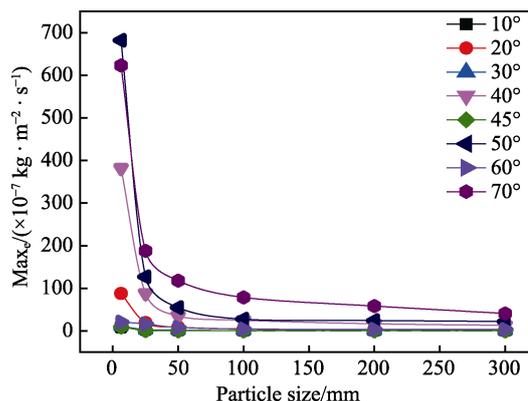


图 5 不同角度下随粒径变化的最大冲蚀率

Fig.5 Different particle diameter vs maximum rate of erosion under different angles

图 5 为不同收缩角的文丘里管承受的冲刷腐蚀行为随固体颗粒粒径变化的规律，可知随着颗粒粒径的增大，文丘里管承受的冲刷腐蚀程度减弱。对于不同角度的文丘里管，曲线整体呈下降趋势，不同角度下降的程度不同。最大冲刷腐蚀速率随着固体颗粒粒径的增大而减小，直到大于某固定值后，固体颗粒粒径对管道的冲刷腐蚀速率几乎无影响，即随着颗粒粒径的增大，冲刷腐蚀越不易破坏管道。

图 6 为 45° 文丘里管在 8 m/s 条件下，不同固体颗粒冲刷壁面发生的冲刷腐蚀行为的云图，表明冲刷腐蚀发生在文丘里管收缩和喉部之间的交汇处，且冲刷腐蚀位置逐渐缩小，即随着粒径的增大，冲刷腐蚀行为为减弱。

图 5 和图 6 分别给出了最大冲蚀速率和冲蚀位置分布情况。颗粒受到惯性力、曳力等因素的影响，其中，惯性力维持颗粒沿切向运动，曳力保持颗粒和流

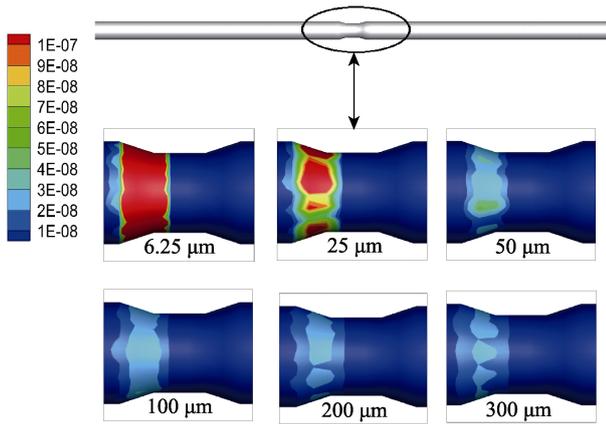


图 6 不同粒径下的最大冲蚀率云图
Fig.6 Erosion rate contour of different particle sizes

体运动方向一致，使得颗粒不撞击壁面，固体颗粒粒径越小，主相流体对于固体颗粒的携带作用越好，大量粒子撞击壁面。虽然大颗粒冲击管道壁面时会有更大的动量，但主相流体对颗粒的携带作用下降。本节保持固体颗粒质量流量不变，因此粒径增大，导致冲击管壁面的颗粒数目减少，即造成冲刷腐蚀速率随着粒径的增大而减小，发生冲刷腐蚀行为的面积逐渐缩小。

2.3 速度对冲刷腐蚀的影响

不同体系中输送的液体不同，运输速度也有所不同。依据 2.2 节工况条件，针对 45°文丘里管内速度大小对冲刷腐蚀的影响规律，进行仿真计算。

图 7 为不同颗粒尺寸条件下速度对冲刷腐蚀速率的变化规律，可知最大磨损量随着液体速度的增大而增大。粒径为 6.25 μm 时，冲蚀磨损率随着速度的增大，增长最大，冲刷腐蚀远比其他粒径下变化显著。其他粒径下，在低速时增加不明显，当到达一定速度时才发生微小变化。由于低流速所产生的曳力很小，不足以携带粒径较大的颗粒，使得一小部分颗粒随液体撞击到文丘里管壁上，冲刷动能保持不变，所以冲刷腐蚀行为很弱。

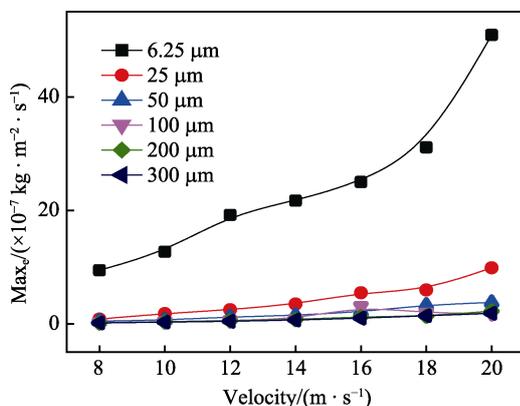


图 7 不同粒径下随速度变化的最大冲蚀率
Fig.7 The maximum erosion wear rate at different inlet velocities and different particle sizes

图 8 为粒径 25 μm 时，45°文丘里管在 7 种不同速度下的冲刷腐蚀率分布云图，可以看出冲刷腐蚀依次增大，且冲刷腐蚀位置也逐渐扩大，即随着速度的增大，冲刷腐蚀越严重。其冲刷腐蚀机理为：当流速增大时，液体对颗粒的曳力增大，动能随之增大。在颗粒的连续冲刷作用下，随着湍流动能的增大而增大的进口速度导致粒子撞击频率显著上升，致试件的冲刷腐蚀率增大。

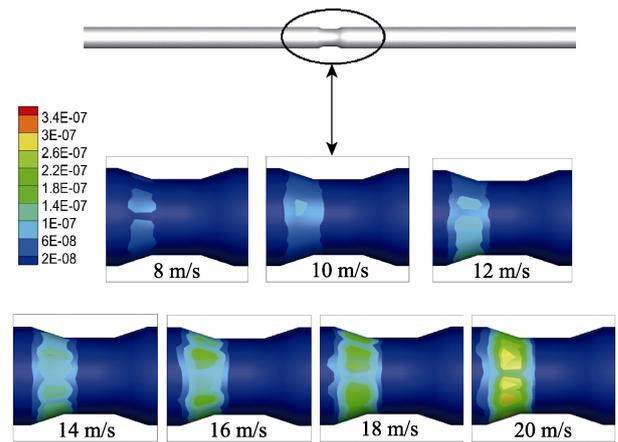


图 8 不同速度下最大冲蚀率云图
Fig.8 Erosion rate contour of different velocities

2.4 质量流量对冲刷腐蚀的影响

在液固两相流冲刷腐蚀中，颗粒的质量流量也是影响磨损率的一个重要因素，针对收缩角为 45°的文丘里管，对质量流量为 0.002、0.003、0.005、0.008 kg/s，粒径大小为 25 μm 的固体颗粒分别进行模拟。

图 9 为冲刷腐蚀行为随固体颗粒质量流量的变化规律，在不同冲刷速度下，试件的冲蚀磨损率随着固体质量流量的增大而整体增加。固体质量流量由 0.002 kg/s 增至 0.008 kg/s 时，磨损率变化比较明显，总磨损率趋势可近似看成线性增长。这是因为不同冲刷速度下，随着固体质量流量的增加，单位时间内冲击文丘里管表面的颗粒数量显著增加，即颗粒对试件表面冲击的总能量增加，所以磨损率也会增加。

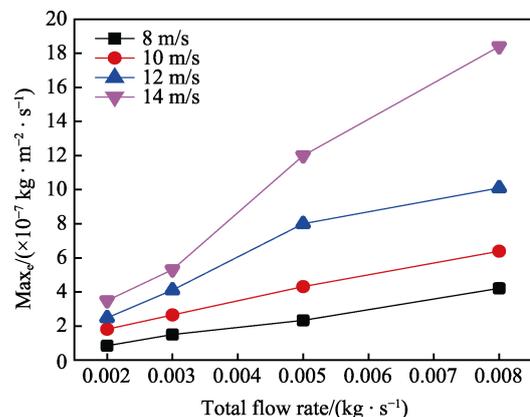


图 9 不同质量流量下的最大冲蚀率
Fig.9 Different particle flow rate vs maximum rate of erosion

粒径为 25 μm 时, 45°文丘里管在 4 种不同质量流量下的冲蚀磨损率云图如图 10 所示, 采用 ZY 坐标轴显示视图, 来显示发生冲刷腐蚀的位置及发生冲刷腐蚀的情况。可以看出冲刷腐蚀位置逐渐扩大, 冲刷腐蚀依次增加, 即随着速度的增加, 冲刷腐蚀越来越严重, 且下方更加严重。当流体为高速度、低质量流量时, 惯性力占主导地位, 冲蚀严重区域为正对来流方向的区域; 当流体为低速度、高质量流量时, 曳力占主导地位, 冲蚀严重区域为接近收缩口区域附近, 流体会在重力作用下, 对文丘里管底部进行破坏, 应及时补救。

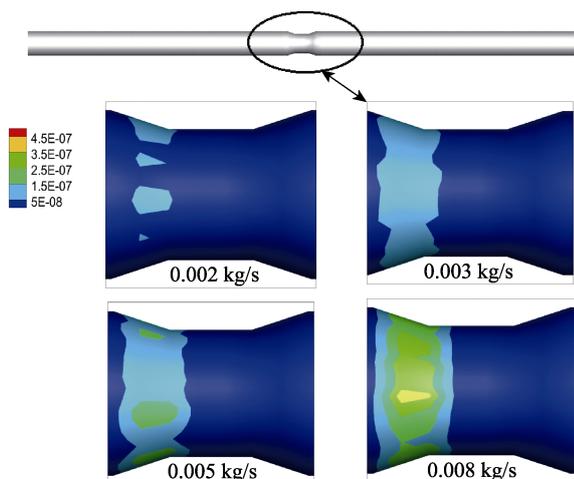


图 10 不同质量流量的最大冲蚀率云图

Fig.10 Erosion rate contour of different mass flow

3 结论

1) 最大冲蚀率随着收缩角的增大而先增大再减小, 而在 45°时, 冲刷腐蚀率出现极小值, 而后再次呈现增大趋势, 因而工程实践中应多采用收缩角为 45°。

2) 在不同文丘里管中, 最大冲蚀率随着固体颗粒粒径的增大而减小, 即颗粒越小对管道伤害反而更严重。

3) 液体速度与冲刷腐蚀量满足一定的指数关系, 冲蚀速度越大, 冲刷腐蚀行为越严重。

4) 液体中颗粒质量流量增大, 管件表面的冲蚀率随之增大, 会加快管道冲刷腐蚀行为的破坏程度。所以降低液固两相流中颗粒质量流量可以有效降低管道冲刷腐蚀损害。

综上所述, 流动介质为液固两相流时, 应该综合管道的防磨性能、空间局限性等方面进行考虑。收缩角应考虑 45°为宜, 并且尽量减小液固两相流速度, 控制固体颗粒粒径, 降低颗粒质量流量。这些可为实际工程中预测和预防文丘里管的冲刷腐蚀失效提供一定的参考。工作于不同工况下的文丘里管内部都不同程度地存在冲蚀现象, 故应采取一定的机械结构优化设计手段, 控制来流, 以降低管道冲刷腐蚀破坏行为。

参考文献:

- [1] PARSİ M, NAJMI K, NAJAFIARD F, et al. A Comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications[J]. Journal of natural gas science & engineering, 2014, 21: 850-873.
- [2] KHANOUKI H A, ZAHEDI P, SHIRAZI S A, et al. Erosion modeling in high concentration slurry flow[C]// ASME 2017 fluids engineering division summer meeting. Singapore: [s. n.], 2017: 152-163.
- [3] 刘二勇, 曾志翔, 赵文杰. 海水环境中金属材料腐蚀磨损及耐磨防腐一体化技术的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 149-157.
- [4] LIU Er-yong, ZENG Zhi-xiang, ZHAO Wen-jie. Corrosive wear and integrated anti-wear & anti-corrosion technology metallic materials in seawater[J]. Surface technology, 2017, 46(11): 149-157.
- [5] GANGHI B K, SINGH S N, SESHADRI V. Study of the parametric dependence of erosion wear for the parallel flow of solid-liquid mixtures[J]. Technology international, 1999, 32(5): 275-282.
- [6] DESALE G R, GANDHI B K, JAIN S C. Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy(AA 6063)[J]. Wear, 2009, 266(11): 1066-1071.
- [7] OKA Y I, MIHARA S, YOSHIDA T. Impact-angle dependence and estimation of erosion damage to ceramic materials caused by solid particle impact[J]. Wear, 2009, 267(1-4): 129-135.
- [8] 孙飞, 冯永保, 胡宇, 等. 基于 CFD 的伺服滑阀冲蚀磨损特性分析[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 84-90.
- [9] SUN Fei, FENG Yong-bao, HU Yu, et al. CFD-based characteristic analysis of erosion wear of servo slide valve[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 84-90.
- [10] VIEIRA R E, PARSİ M, ZAHEDI P, et al. Ultrasonic measurements of sand particle erosion under upward multiphase annular flow conditions in a vertical-horizontal bend[J]. International journal of multiphase flow, 2017, 93: 48-62.
- [11] ZHANG J X. Analysis on the effect of venturi tube structural parameters on fluid flow[J]. Aip advances, 2017, 7(6): 99-103.
- [12] TOMOV P, KHELLADI S, RAVELET F, et al. Experimental study of aerated cavitation in a horizontal venturi nozzle[J]. Experimental thermal & fluid science, 2016, 70: 85-95.
- [13] NIEDZWIEDZKA A, SOBIESKI W. Experimental investigations of cavitating flows in a venturi tube[J]. Technical sciences, 2016, 19(2): 151-164.
- [14] CHARRIERE B, DECAIX J. A comparative study of cavitation models in a venturi flow[J]. European journal of mechanics B: Fluids, 2015, 49: 287-297.
- [15] ALI M, YAN C Q, SUN Z N, et al. CFD simulation of prediction of pressure drop in venturi scrubber[J]. Applied mechanics & materials, 2012, 166-169: 3008-3011.

- [14] AKTAS B, PONKRATOV D. Time accurate numerical cavitation erosion prediction of multiphase flow through a venturi[C]//Symposium of marine propulsion. London: [s. n.], 2017: 187-190.
- [15] PANDYA D, DENNIS B, RUSSELL R. An improved computational fluid dynamics(CFD) model for erosion prediction in oil and gas industry applications[C]//ASME 2014 international conference on ocean, offshore and arctic engineering. Shanghai: [s. n.], 2014: 638-643.
- [16] MANSOURI A, ARABNEJAD H, SHIRAZI S A, et al. A combined CFD experimental methodology for erosion prediction[J]. *Wear*, 2015, s332-333: 1090-1097.
- [17] MCLAURY B S, SHIRAZI S A, VISWANATHAN V, et al. Distribution of sand particles in horizontal and vertical annular multiphase flow in pipes and the effects on sand erosion[J]. *Journal of energy resources technology*, 2011, 133(2): 023001.
- [18] KIM J H, JUNG U H, KIM S, et al. Uncertainty analysis of flow rate measurement for multiphase flow using CFD[J]. *Acta mechanica sinica*, 2015, 31(5): 698-707.
- [19] SGROOT O L, NORILER D, WIGGERS V R, et al. Cyclone optimization by complex method and CFD simulation[J]. *Powder technology*, 2015, 277: 39.
- [20] LSEC X Z, ICMSE C. Adaptive quadri lateral and hexahedral finite element methods with hanging nodes and convergence analysis[J]. *Journal of computational mathematics*, 2010, 28(5): 621-644.
- [21] BLATT W, KOHLEY T, LOTZ U, et al. The influence of hydrodynamics on erosion-corrosion in two-phase liquid-particle flow[J]. *Corrosion*, 1989, 45(10): 793-804.