

水平弯管含砂分散泡状流冲蚀机理分析

彭文山¹, 邢少华¹, 曹学文², 侯健¹, 胥锐³, 韩明一⁴

(1.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;
2.中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 3.惠州兴盛石化仓储有限公司, 广东 惠州 516081; 4.廊坊中油朗威工程项目管理有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: **目的** 揭示水平弯管含砂分散泡状流的冲蚀机理。**方法** 构建气液固多相流冲蚀实验环道, 研究管道内流体流动状态及管道三维冲蚀速率。采用显微分析方法研究管道冲蚀形貌, 并提出基于 VOF 模型和 DPM 模型耦合的瞬态冲蚀仿真方法。实验与仿真相结合分析管道内部气液分布、颗粒运动对冲蚀形貌的影响。**结果** 弯管冲蚀最严重区域出现在弯头出口处 ($\theta=90^\circ$), 而冲蚀最严重位置则出现在该截面 $\varphi=45^\circ$ 以及 $\varphi=90^\circ$ 两个位置上。仿真可知整个弯管冲蚀严重的区域边界呈现出较为均匀的抛物线形状。砂粒对弯管的冲蚀作用主要以冲击变形和微切削摩擦为主, 砂粒的直接冲击碰撞导致试样表面产生密集冲蚀坑, 冲蚀坑周围有基体材料外翻形成的“唇片”。分散泡状流中的固体颗粒大部分分散在液相中, 弯头处滞止区使得弯头处截面的含液率及颗粒含量大于上下游直管段截面。气体的存在改变了砂粒在管道中的运动状态, 大大加剧了弯管的冲蚀。**结论** 水平弯管含砂分散泡状流冲蚀严重区域、冲蚀形貌与管道内部气液分布及砂粒运动直接相关, 多相流冲蚀瞬态仿真方法可准确地预测管道冲蚀。

关键词: 砂粒; 冲蚀; 弯管; 分散泡状流; 实验; VOF 模型

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)04-0237-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.034

Analysis of Sand Erosion Mechanism of Horizontal Pipe Bend under Dispersed Bubble Flow

PENG Wen-shan¹, XING Shao-hua¹, CAO Xue-wen², HOU Jian¹, XU Kun³, HAN Ming-yi⁴

(1.State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute (LSMRI), Qingdao 266237, China; 2.College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3.Huizhou Xingsheng Petrochemical Storage Co., Ltd, Huizhou 516081, China; 4.China Petroleum Longway Engineering Project Management Co., Ltd, Langfang 065000, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the erosion mechanism of horizontal pipe bend under dispersed bubble flow. A gas-liquid-solid multiphase flow erosion experimental loop was constructed to study the flow state in the pipe bend and the three-dimensional erosion rate of the pipe bend. Microscopic analysis was used to study the erosion morphology of pipe bend. An erosion simulation method based on the coupling of VOF model and DPM model was proposed. Experiment and simulation were combined to analyze the influence of gas-liquid distribution and particle motion on the erosion morphology of the pipe bend. The most severe erosion area of the pipe bend appeared at the exit of the elbow ($\theta=90^\circ$), and the most severe erosion location occurred in the two positions of the section at $\varphi=45^\circ$ and $\varphi=90^\circ$. The simulation results indicated that the edge of the severe

收稿日期: 2018-08-29; 修订日期: 2018-10-17

Received: 2018-08-29; Revised: 2018-10-17

作者简介: 彭文山 (1987—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护及多相流管道冲蚀。邮箱: pengwenshan1386@126.com

Biography: PENG Wen-shan (1987—), Male, Doctor, Engineer, Research focus: marine corrosion and protection, and multiphase flow pipe erosion. E-mail: pengwenshan1386@126.com

erosion area showed a more uniform parabolic shape. The effect of sand on the pipe bend erosion was mainly based on impact deformation and micro-cutting friction. The direct impact collision of the sand caused dense erosion pits on the surface of the sample, and there were lips formed by the outward turning of the base material around the erosion pits. The solid particles in the dispersed bubble flow were mostly entrained in the liquid phase. The stagnation zone at the elbow made the cross-section liquid content and particle content of the cross section at the elbow larger than that at the cross section of the upstream and downstream straight pipes. The presence of gas changed the movement of the sand in the pipeline, greatly increasing the erosion of the pipe bend. The severe erosion area and erosion profile of the horizontal pipe bend under dispersed bubble flow are directly related to the gas-liquid distribution inside the pipeline and the sand movement. Multiphase flow erosion transient simulation can accurately predict pipeline erosion.

KEY WORDS: sand; erosion; pipe bend; dispersed bubble flow; experiment; VOF model

海上油气田的开发及海洋混输管网的不断应用,使得混输问题日益受到关注,混输管道中包含油、气、水、砂等多种介质,流型多变,砂粒运动对管道内壁造成严重冲蚀磨损,弯管、阀门、三通等经长时间磨损,极易失效破坏^[1-2]。研究管道冲蚀机理并提出准确的多相流冲蚀预测方法,对于预测管道最严重冲蚀位置,保障管道输送安全意义重大。水平管气液两相流中,泡状流是常见的流型^[3]。国外学者进行了多相流管道冲蚀实验,获得较多乳沫状流、段塞流以及环状流冲蚀数据^[4-9],仅发现 Birchenough 等人^[10]获得的一组竖直弯管中分散泡状流实验数据。仿真方面,管道的冲蚀与管内颗粒运动直接相关,而多相流体系中,颗粒空间分布随机性大,要准确仿真冲蚀,需计算气体-液体-颗粒-管道壁面之间的多向作用,研究非常复杂。Tulsa 大学 E/CRC 中心^[11]将气液两相对颗粒的作用等效为一相,计算含砂分散泡状流的冲蚀,计算结果偏小,且并不能反映管内颗粒的真实运动状态。为解决这一问题,少数学者采用基于多相流模型和离散相模型耦合的瞬态计算方法计算冲蚀,由于该方法设置复杂,计算消耗大,仅发现该方法仿真乳沫状流和环状流^[12-14],未见分散泡状流瞬态冲蚀仿真。国外实验获得的数据主要为最大冲蚀速率,实验

装置在表征整个弯管不同局部区域的冲蚀机理方面表现出了很大的局限性,无法获取整个弯头以及弯头附近直管段不同部位的冲蚀速率及三维冲蚀形貌。基于此,本文设计气液固多相流冲蚀实验系统,获取分散泡状流弯管整个弯头及弯头附近直管段不同部位的冲蚀速率及三维冲蚀形貌,并提出一种基于 VOF 模型和 DPM 模型耦合的冲蚀仿真方法,二者结合研究管道内部气液流动变化、颗粒分布对于弯管不同部位的冲蚀影响,深入揭示含砂分散泡状流弯管的冲蚀机理。

1 实验过程

1.1 实验装置

设计气液固多相流冲蚀环道,主要包括以下模块:压缩机及缓冲罐、流量及压力采集系统、水箱及搅拌装置、耐腐蚀泵(带变频器)、气液混合段、流量采集模块、流速采集模块、测试弯管、可视化管道和气液分离装置,如图 1 所示。透明水箱盛装实验用介质,水箱内壁均布 2 个挡板,上方设搅拌器。可视化管道直径(D)为 40 mm,测试弯管上游可视化直管段长度为 $200D$,下游为 $25D$,下游管道进入水箱之前安装有气液分离器,保证气液两相分离。

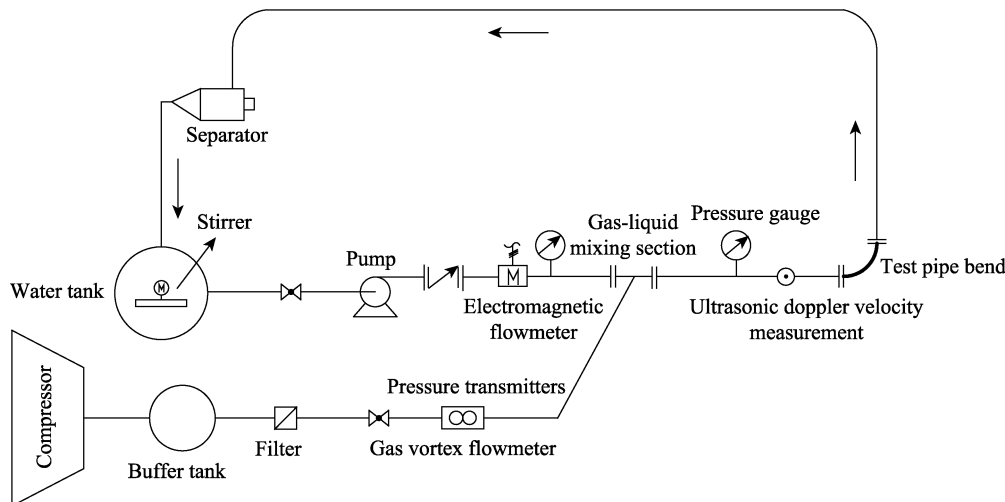


图 1 气液固多相流冲蚀实验环道示意图

Fig.1 Diagram of erosion test loop for gas-liquid-solid multiphase flow

为测量弯管的三维冲蚀速率和冲蚀形貌,设计可拆卸式的水平弯管,管径为 40 mm,弯径比为 1.5,两端通过螺栓与前后实验管道相连接。实验弯管内壁设有 36 个凹槽用于放置试样。试样的长度、宽度及厚度尺寸与凹槽相配,保证试样安装后,不影响管道内部介质的流动状态,并且试样粘贴固定后,试样表面与弯管内侧壁面平齐(图 2)。图 3 为试样沿着环向和轴向的安装角度,其中 φ 为管道横截面环向角, θ 为管道弯曲轴向角。11 代表位于轴向位置为距弯头入口一倍管径 ($-D$)、环向角 $\varphi=45^\circ$ 处的试样。



图 2 测试弯管及试样安装图
Fig.2 Installation diagram of the test bend and sample

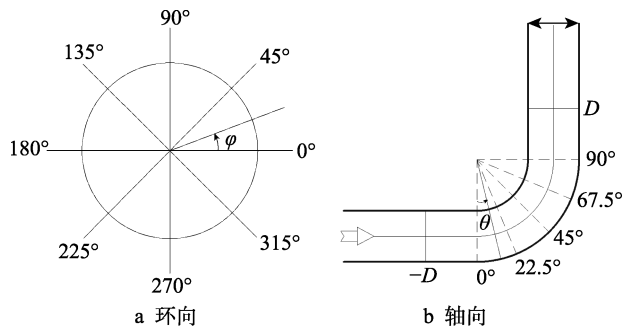


图 3 测试弯管环向和轴向角度示意图
Fig.3 Schematic diagram of circumferential angle (a) and axial angle (b) of the bend

1.2 实验介质与材料

实验用试样的材质为 316L 不锈钢,其化学成分见表 1。实验用水为去离子水,实验用砂为石英砂,将石

英砂除杂、酸洗、干燥后,用筛子筛选出粒径为 280~315 μm 之间的石英砂,待用,砂粒带有棱角。水箱中砂粒质量分数约为 2% (4 kg 砂/200 L 水),每次实验前将石英砂加入水箱,实验过程中搅拌器持续搅拌,保证水箱中去离子水与石英砂搅拌均匀,由泵输送进入实验环道。

表 1 316L 不锈钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of 316L stainless steel wt%

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	N
0.022	0.46	1.2	0.001	0.028	10.07	16.05	2.03	0.046

1.3 实验方法

实验前,试样工作面经 240[#]~1000[#]水砂纸依次打磨,清洗干燥,测量试样质量和尺寸,并记录。用 704 硅胶将试样逐一涂封在测试弯管凹槽内,将测试弯管的内拱和外拱组装粘合起来,放置至少 24 h,使得硅胶充分固化。实验结束后,将试样清理干净并干燥,用天平称量。每次实验连续进行 22 h,为减小实验误差,进行平行实验,取两次实验结果的平均值作为最终的冲蚀速率。每次实验后更换溶液和石英砂。

测试方法包括失重法和表面观察,由于试样表面积较小,用失重法计算得到的平均冲蚀速率作为该位置的最终冲蚀速率。试样表面观察主要是通过显微技术来研究金属表面的形貌,并测量最大坑深。失重法是通过测量试样冲蚀前后的质量变化来计算冲蚀速率的方法,计算公式如下:

$$ER = \frac{1}{3\,600\,000} \times \frac{w_0 - w_1}{S \cdot t \cdot \rho_w} \tag{1}$$

式中: ER 为试样冲蚀速率 (m/s); m_0 为实验前试样质量 (g); m_1 为冲蚀后试样质量 (g); S 为试样的工作面积 (m^2); t 为冲蚀进行的时间 (h); ρ_w 为管材密度 (kg/m^3)。

表 2 为实验工况参数,其中 D 为管道直径, R/D 为弯径比, V_{SG} 为气体表观流速, V_{SL} 为液体表观流速, d_p 为砂粒直径(数值计算过程中, d_p 设定为 300 μm), ρ_l 、 ρ_g 、 ρ_p 分别为液体密度、气体密度、砂粒密度, HV 为管壁维氏硬度。

表 2 实验工况参数
Tab.2 Values of parameters in erosion experiment

D/mm	R/D	$V_{SG}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{SL}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$d_p/\mu\text{m}$	$\rho_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	HV
40	1.5	1.42	4.09	300	992.3	2.329	7980	2650	1.67

2 结果与分析

2.1 弯管表面冲蚀速率分布

分散泡状流下弯管冲蚀速率分布如图 4 所示,分散泡状流条件下,弯管冲蚀较严重区域出现在弯头出

口处(试样 61、62),试样 62 位置处冲蚀速率达到 $105.25 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 。对比文献[15]中相同管道参数及砂粒参数液固两相流实验结果,虽然二者液相表观流速相同,但是分散泡状流下弯管的最大冲蚀速率是液固两相流实验的 4.8 倍,说明气体的存在改变了砂粒在管道中的运动状态,大大加剧了弯管的冲蚀。

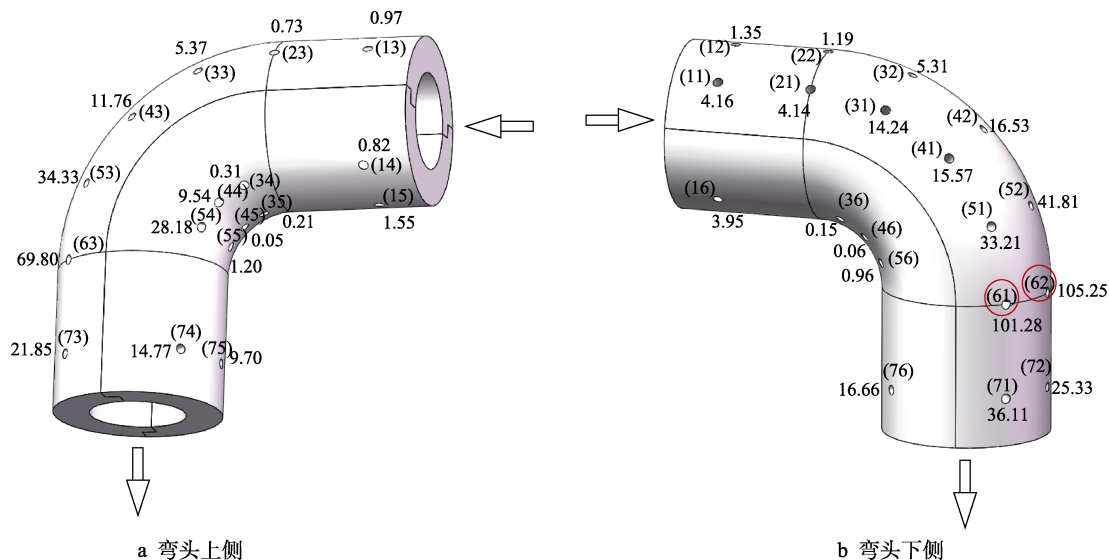
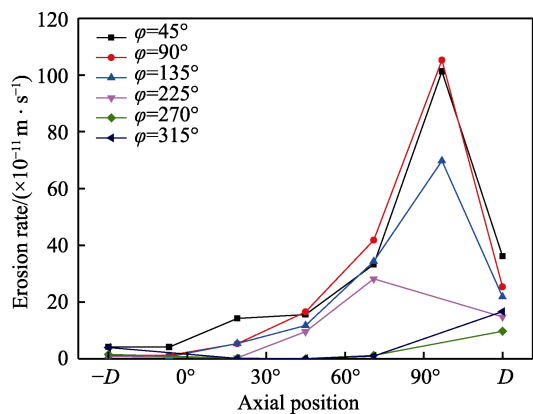
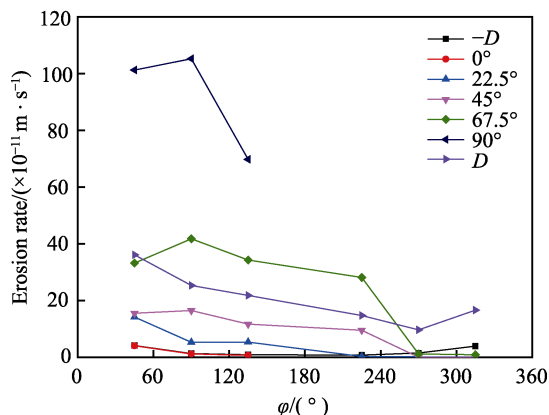
图4 分散泡状流下弯管冲蚀速率分布图 ($\times 10^{-11} \text{ m/s}$)

Fig.4 Erosion rate distribution of the pipe bend under dispersed bubble flow ($\times 10^{-11} \text{ m/s}$):
a) top of the pipe bend; b) bottom of the pipe bend

弯管沿轴向方向的冲蚀速率变化如图 5a 所示, 在弯管外拱区域 ($\varphi=45^\circ$ 、 90° 和 135°), 随着轴向角



a 沿管道轴向冲蚀速率分布



b 沿管道环向冲蚀速率分布

图5 分散泡状流下弯管冲蚀速率变化曲线

Fig.5 Erosion rate curve of the pipe bend under dispersed bubble flow: a) erosion rate along the axial direction of the pipe bend, b) erosion rate along the circumferential direction of the pipe bend

度的增大, 冲蚀速率呈现先增大后减小的趋势, 在 $\varphi=90^\circ$ 处达到最大值。而在弯管内拱区域 ($\theta=270^\circ$ 和 315°), 随着轴向角度的增加, 冲蚀速率一直增大, 在距离弯头出口一倍管径位置最大。 $\varphi=45^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 两条曲线上的冲蚀速率明显高于弯管其他曲线上的冲蚀速率, 即弯管外拱中心线和管底之间的区域冲蚀最严重。在 $\varphi=225^\circ$ 曲线上, θ 大于 67.5° 以后, 冲蚀速率开始下降, 可初步断定, 弯管该区域不受二次流影响。

弯管不同截面沿环向方向的冲蚀速率变化如图 5b 所示, 随着环向角度的增大, 冲蚀速率逐渐减小, 最小冲蚀速率出现在 $\varphi=270^\circ$ 位置处, 而在 $\varphi=270^\circ$ 与 $\varphi=315^\circ$ 弯管范围内, 冲蚀速率有略微增大的趋势, 这主要是由于 $\varphi=315^\circ$ 位置比较接近管底, 由于重力作用, 使得砂粒在该处含量较高, 导致冲蚀严重。 $\theta=90^\circ$ 环向上各试样的冲蚀速率明显高于其他环向位置, 即弯头出口处截面上的冲蚀最严重。

2.2 弯管表面冲蚀形貌

典型试样宏观冲蚀形貌如图 6 所示, 在这几个试样表面均出现明显的冲蚀坑点, 试样 44、54、55 上的冲蚀坑较少, 在试样 32 表面, 坑点呈密集分布, 由冲蚀显微形貌可以看出 (图 7), 试样表面的冲蚀坑周围存在明显的唇片, 这主要是由于砂粒冲击试样表面以后, 使得基体材料损伤并由坑内侧向外翻出, 基体材料在坑点周围聚积。图 6 中试样 54 表面并未表现出明显的冲蚀轨迹, 而是在表面有分散的冲蚀坑点, 说明分散泡状流中颗粒冲蚀并无二次流驱动特征, 而是表现为冲击变形及微切削摩擦, 冲击变形导致冲蚀坑产生, 微切削摩擦造成试样减薄。由图 7 可知, 试样 32 表面唇片明显高于试样表面, 另外, 由

于砂粒冲击具有明显的方向性，因此冲蚀坑以及唇片也具有方向性，冲蚀坑有沿着流体流动方向发展的趋势。由试样 62 显微形貌可以看出，试样 62 表面较大

冲蚀坑数量明显少于试样 32，部分砂粒在轴向角较小位置与管壁发生碰撞后，能量变小，到达试样 62 位置处不足以产生较大冲蚀坑。

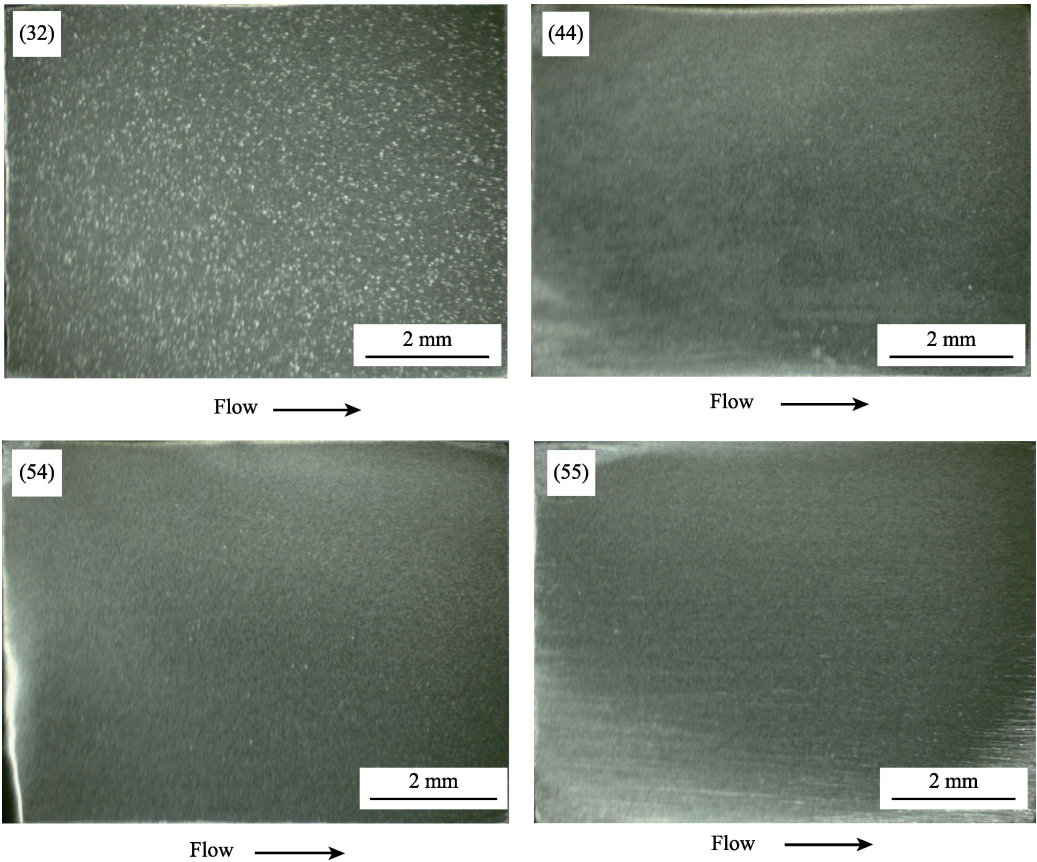


图 6 典型试样表面宏观冲蚀形貌图
Fig.6 Macroscopic erosion morphology of typical samples

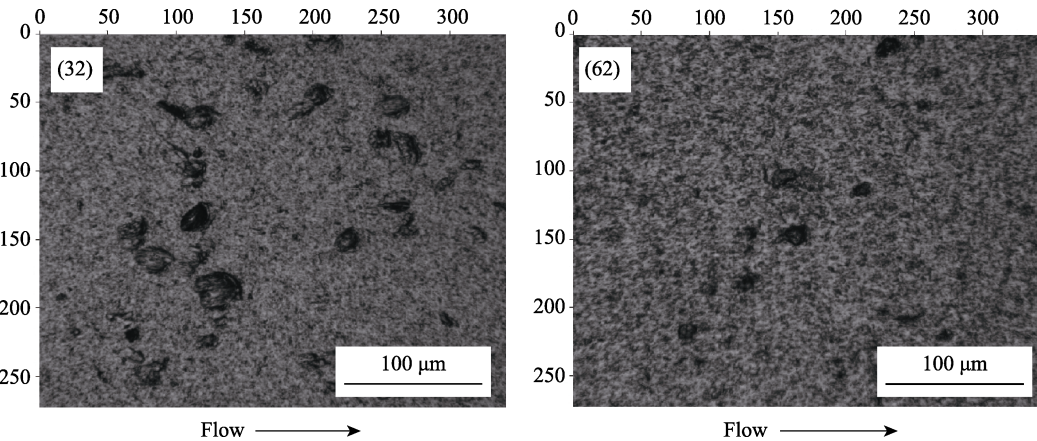


图 7 典型试样表面显微冲蚀形貌图
Fig.7 Microscopic erosion morphology of typical samples

3 分散泡状流冲蚀仿真

由于实验方法较难观察管道内部气液分布以及砂粒运动情况，为进一步研究管道内部气液两相分布、固体颗粒运动状态以及二者与管道冲蚀形貌之间的关系，对含砂分散泡状流冲蚀进行仿真。管道内为气液固三相流，气液两相为连续相，由于固体颗粒所

占体积分数较小，采用离散相模型（DPM）进行固体颗粒的计算。使用标准 $k-\varepsilon$ 模型求解管道内部流场，并采用 VOF 模型仿真分散泡状流，在 VOF 模型中考虑表面张力的影响，表面张力模型是 Brackbill 等人^[16]提出的连续表面力模型（CSF）。VOF 模型和 DPM 模型耦合完成颗粒轨迹计算，根据颗粒运动信息进一步完成冲蚀求解。

3.1 冲蚀计算

在分散泡状流中存在气液两相,单位质量固体颗粒在两相流中受到曳力、浮力、附加质量力、压力梯度力作用,固体颗粒的受力方程参考文献[17],在进行冲蚀速率计算时使用了广岛大学 Oka 等人^[18-19]提出的冲蚀模型,该模型考虑了较多冲蚀影响的因素,具有较广的适应范围,模型形式如下:

$$ER = 1.0 \times 10^{-9} \rho_w k_0 F(\alpha) (HV)^{k_1} \left(\frac{u_p}{u_c} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_c} \right)^{k_3} \quad (2)$$

$$F(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} [1 + HV(1 - \sin \alpha)]^{n_2} \quad (3)$$

式中, ρ_w 是管材密度 (kg/m^3); HV 是管材维氏硬度; d_c 为参考直径 (m); u_c 为参考颗粒速度 (m/s); k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 n_1 、 n_2 、 d_c 、 u_c 为常数,具体数值见文献[17]。

3.2 数值模型建立

3.2.1 网格划分

进行分散泡状流冲蚀计算时,为提高 VOF 模型与 DPM 模型耦合计算的稳定性,面网格采用规则四边形网格,整个三维弯管体网格采用六面体网格,弯管横截面网格划分如图 8 所示。三维弯管模型网格总数为 489 000。

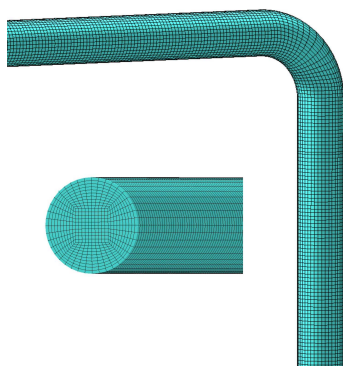


图 8 计算模型及网格划分
Fig.8 Calculation model and grid division

3.2.2 边界及计算设置

入口边界采用速度进口,设置为气液混合速度,出口为压力出口边界。DPM 模型中进口和出口处采用逃逸 (Escape) 条件,壁面采用反弹 (Reflect) 条件,颗粒相的射流采用面射流源,从进口边界面上抛撒惯性颗粒,颗粒的初始速度与流体进口速度相同。为计算碰撞后固体颗粒速度,壁面设置恢复系数来描述颗粒碰撞前后速度的变化,采用 Grant 和 Tabakoff^[20]提出的随机颗粒-壁面碰撞反弹模型的恢复系数。

在满足收敛的条件下,为提高精度,对动量、湍流动能和湍流耗散率都使用 QUICK 格式,压力-速度耦合采用 PISO 方式,压力离散采用 PRESTO! 方式,体积分数离散采用 Geo-Reconstruct 方式,时间步长

为 0.001 s,总的计算时间为 8 s,计算总共喷射入管道的颗粒数目为 4 000 000 个。在颗粒轨迹追踪过程中,仅考虑气液两相相对固体颗粒运动的影响,不考虑颗粒对气液两相的影响,即单向耦合计算。

3.3 数值结果分析

3.3.1 网格准确性验证

为了检验计算设置及网格的准确性,针对表 2 中水平弯管分散泡状流下颗粒冲蚀实验,对管道内的气液两相分布进行了对比验证,计算结果与实验结果如图 9 所示。由图 9 可知,气液两相在弯头处分布是不均匀的,气液两相流经弯头区域时,由于离心力作用,在弯管外拱侧液相含量较多,而在内拱侧气泡聚积成较大气泡,出现两个气体含量较高的区域 (A、B),与数值计算结果对应,因此使用该网格来计算分散泡状流的流动是准确可行的。

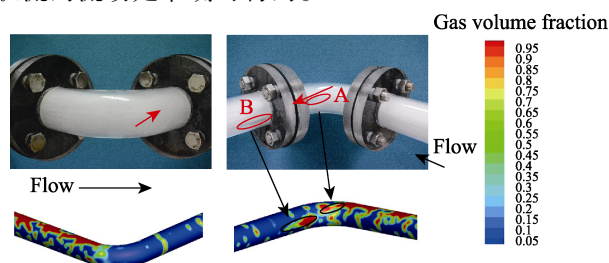


图 9 弯头处气液两相分布及砂粒运动轨迹
Fig.9 Gas-liquid phases distribution and sand trajectories at the elbow

3.3.2 弯管冲蚀形貌分析

基于 VOF 和 DPM 瞬态冲蚀计算过程中,随着时间的增加,冲蚀量一直增大,因此冲蚀速率的大小为冲蚀量随时间变化的大小,选取冲蚀仿真过程中冲蚀量随时间变化最快的计算结果为最大冲蚀速率。冲蚀速率的单位可以有如下转换方式:

$$ER = \frac{\Delta ER}{\rho_w \cdot \Delta t} \quad (4)$$

式中: ΔER 为冲蚀量 (kg/m^2); ρ_w 为管壁密度 (kg/m^3); Δt 为冲蚀时间 (s)。

对表 2 中的冲蚀工况进行分析,冲蚀仿真结果如图 10 所示,仿真计算得到最大冲蚀速率为 $9.386 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{s}$,而实验值为 $1.0525 \times 10^{-9} \text{ m}/\text{s}$,吻合较好。分散泡状流下冲蚀最严重位置出现在弯头出口处 (90° 处),冲蚀主要集中在弯管外拱靠近管底处,冲

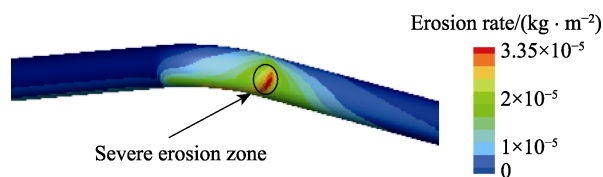
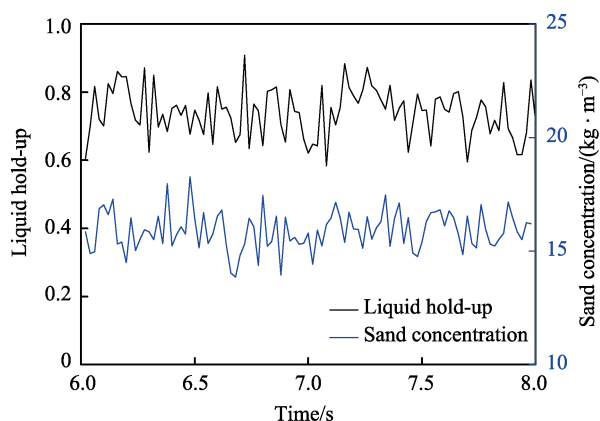


图 10 瞬态模型计算弯管冲蚀形貌
Fig.10 Erosion profile of the pipe bend by the transient erosion model

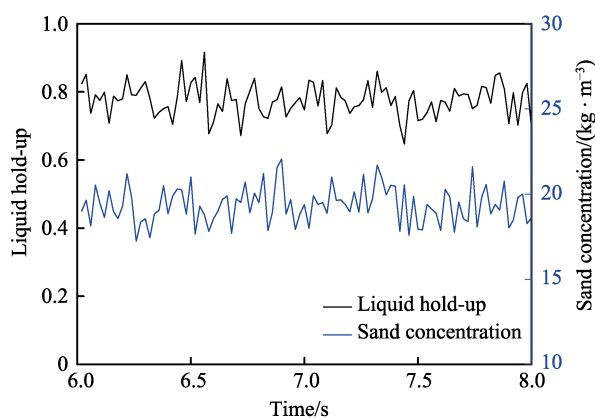
蚀区域边界呈现出较为均匀的抛物线形状,与实验结果一致。同液相冲蚀结果相比^[15],虽然两种工况下液相表观流速相同,但是分散泡状流下的冲蚀形貌更加平滑。

3.3.3 管内截面气液分布与颗粒含量

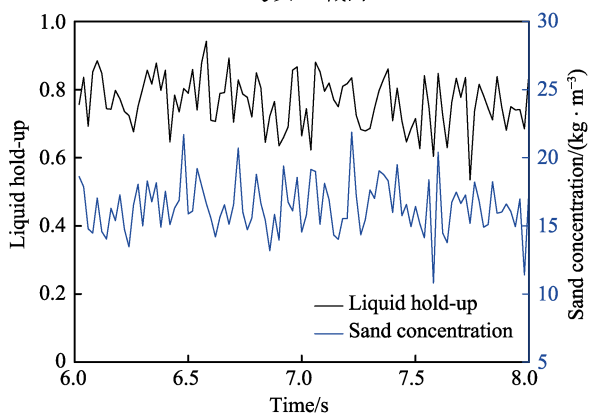
在上游直管段、弯头 45° 截面以及下游直管段选取三个截面,监测分析管道不同位置流动状态对冲蚀的影响。管道三个监控截面处截面含液率与截面颗粒含量的对应关系如图 11 所示。截面含液率的峰值变



a 弯管上游直管段截面



b 弯头45°截面



c 弯管下游直管段截面

图 11 水平管不同截面含液率与颗粒含量关系
Fig.11 Cross-sectional averaged liquid hold-up vs particle mass concentration: a) Cross section of the upstream straight pipe; b) 45° cross section of the elbow; c) Cross section of the downstream straight pipe

化情况与截面颗粒含量的峰值变化比较接近,当截面含液率较高时,截面的颗粒含量也相对较高,由此说明管道中的固体颗粒大部分分散在液相之中。对于不同截面,其截面含液率及截面颗粒含量波动范围是不同的,如图 11 所示。

由图 12 可知,下游直管段截面的截面含液率波动幅度要大于上游直管段截面处及弯头截面处,主要是由于在上游直管段中,气液两相流动比较平稳,颗粒在管道中分布较均匀。气液两相流经弯头后,在弯头外拱侧以及下游直管段外侧液相含量明显增大,而在弯管内拱气相含量明显增大,气泡与液体掺混更加剧烈,导致截面颗粒含量的波动较大。由于弯头靠近外拱区域的液相比比例较高,颗粒在碰撞到管壁之前必须穿越该区域的液体,固体颗粒进入该区域后,与大量液体进行交互计算,如图 13 所示,液相密度及黏度比气相大得多,进入该区域后颗粒速度减小,形成滞止区,造成弯头处颗粒运动减缓,含砂量变大。另外,颗粒在弯头处发生碰撞,改变了颗粒运动路径,使得下游颗粒的运动轨迹变得复杂,导致弯头处截面颗粒含量的平均水平略大于上游以及下游直管段,如图 14 所示。

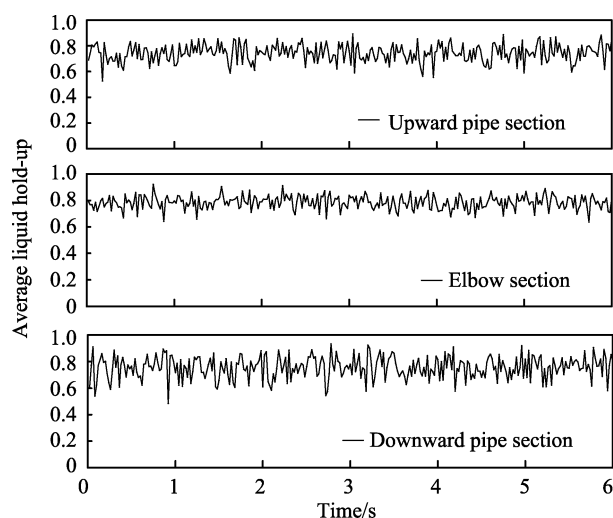


图 12 管道不同截面处截面含液率
Fig.12 Cross-sectional averaged liquid hold-up at different pipe sections

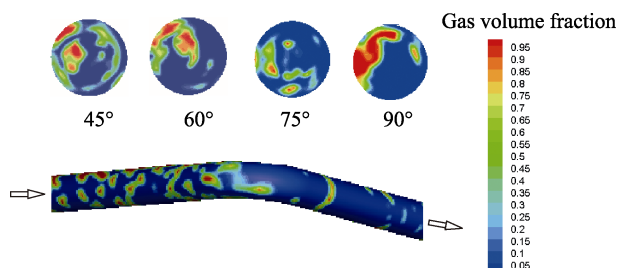


图 13 瞬态模型计算弯管冲蚀云图及气液分布
Fig.13 Gas-liquid distribution of the pipe bend by the transient erosion model

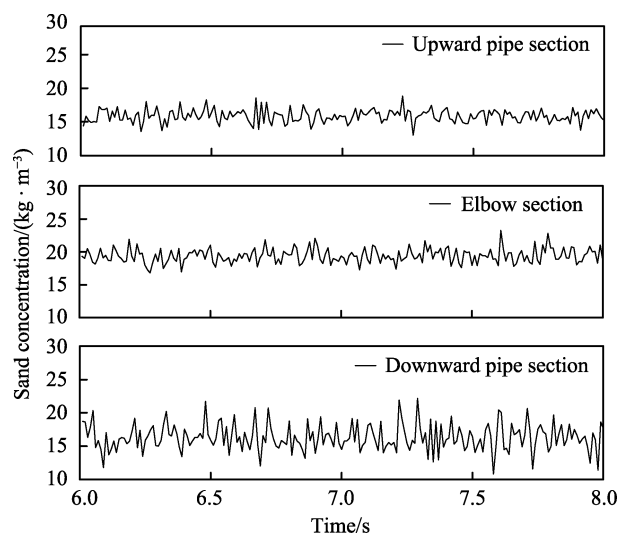


图 14 管道不同位置处截面颗粒含量
Fig.14 Cross-sectional particle mass concentration at different positions

4 结论

1) 分散泡状流条件下, 弯管冲蚀最严重区域出现在弯头出口处 ($\theta=90^\circ$), 而冲蚀最严重位置则出现在该截面 $\varphi=45^\circ$ 以及 $\varphi=90^\circ$ 两个位置上。仿真进一步可知, 冲蚀主要集中在弯管外拱靠近管底处, 其边界呈现出较均匀的抛物线形状。

2) 砂粒对弯管的冲蚀作用主要以冲击变形和微切削摩擦为主, 砂粒的直接冲击碰撞导致试样表面产生密集冲蚀坑, 冲蚀坑周围有基体材料外翻形成的“唇片”, 微切削摩擦造成试样减薄。

3) 基于 VOF 和 DPM 模型的 CFD 冲蚀计算方法可仿真含固体颗粒分散泡状流的瞬态冲蚀过程, 获得气液分布、颗粒运动与管道三维冲蚀形貌之间的关系, 分散泡状流中的固体颗粒大部分分散在液相中, 弯头处滞止区使得弯头处截面的截面含液率及颗粒含量大于上下游直管段截面。气体的存在改变了砂粒在管道中的运动状态, 大大加剧了弯管的冲蚀。

参考文献:

- [1] 王思邈, 刘海笑, 张日, 等. 海底管道沙粒侵蚀的数值模拟及侵蚀公式评价[J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 49-59. WANG Si-miao, LIU Hai-xiao, ZHANG Ri, et al. Numerical simulations of sand erosion in pipelines and evaluations of solid particle erosion equations[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(1): 49-59.
- [2] 钱东良. 番禺 35-2 海底输气管道冲蚀规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. QIAN Dong-liang. Erosion study on Panyu 35-2 submarine gas pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [3] 李长俊, 贾文龙. 油气管道多相流[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015. LI Chang-jun, JIA Wen-long. Oil and gas pipeline multiphase flow[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [4] SALAMA M M. An alternative to API 14E erosional velocity limits for sand-laden fluids[J]. Journal of energy resources technology, 2000, 122(2): 71-77.
- [5] BOURGOYNE Jr A T. Experimental study of erosion in diverter systems due to sand production[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Singapore: Society of Petroleum Engineers, 1989.
- [6] VIEIRA R E, KESANA N R, MCLAURY B S, et al. Sand erosion in multiphase flow for low-liquid loading and annular conditions[C]//ASME 2012 international mechanical engineering congress and exposition. Blanco: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 2445-2454.
- [7] KESANA N R, GRUBB S A, MCLAURY B S, et al. Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow[J]. Journal of energy resources technology, 2013, 135(3): 032905.
- [8] KESANA N R, THRONEBERRY J M, MCLAURY B S, et al. Effect of particle size and liquid viscosity on erosion in annular and slug flow[J]. Journal of energy resources technology, 2014, 136(1): 012901.
- [9] PARSI M, VIEIRA R E, KESANA N, et al. Ultrasonic measurements of sand particle erosion in gas dominant multiphase churn flow in vertical pipes[J]. Wear, 2015, 328: 401-413.
- [10] BIRCHENOUGH P M, DAWSON S G B, LOCKETT T J, et al. Critical flow rates working party[J]. AEA Technology, 1995, 64: 354.
- [11] CHEN X, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. A comprehensive procedure to estimate erosion in elbows for gas/liquid/sand multiphase flow[J]. Journal of energy resources technology, 2006, 128(1): 70-78.
- [12] PARSI M, AGRAWAL M, SRINIVASAN V, et al. CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2015, 27: 706-718.
- [13] ZAHEDI P, ZHANG J, ARABNEJAD H, et al. CFD simulation of multiphase flows and erosion predictions under annular flow and low liquid loading conditions[J]. Wear, 2017, 376: 1260-1270.
- [14] PARSI M, KARA M, AGRAWAL M, et al. CFD simulation of sand particle erosion under multiphase flow conditions[J]. Wear, 2017, 376: 1176-118.
- [15] 曹文文, 彭文山, 胥锐, 等. 双金属复合管内衬层液固两相流冲蚀机理[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 739-746. CAO Xue-wen, PENG Wen-shan, XU Kun, et al. Erosion mechanism of liquid-solid two-phase flow at inner liner of bimetallic composite tube[J]. Oil & gas storage and transportation, 2017, 36(6): 739-746.
- [16] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of computational physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [17] PENG W, CAO X. Numerical simulation of solid particle erosion in pipe bends for liquid-solid flow[J]. Powder technology, 2016, 294: 266-279.
- [18] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation[J]. Wear, 2005, 259(1/6): 95-101.
- [19] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. Wear, 2005, 259(1/6): 102-109.
- [20] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. Journal of aircraft, 1975, 12(5): 471-478.