

基于实验和 CFD 模拟的煤气化黑水处理系统管道失效分析

单斌¹, 陈平¹, 乔小溪¹, 赵元琪²

(1.北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083;
2.中国能源宁夏煤业集团有限公司 煤制油气化厂, 银川 750411)

摘要: **目的** 分析煤气化黑水处理系统管道的失效行为, 明确失效特征, 分析失效机理及影响因素, 指导弯管的失效预防, 延长其服役寿命。**方法** 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对管道进行微观形貌检测, 并采用能量色散谱 (EDS) 和 X 射线衍射 (XRD) 对腐蚀产物进行检测分析, 最后通过计算流体动力学 (CFD) 仿真分析其流场情况。**结果** 失效管道内壁面有着明显的流水冲蚀形貌, 且布满小凹坑及疏松多孔的褐色腐蚀产物。EDS 结果显示, 腐蚀产物主要由 Fe、S 和 O 元素构成, XRD 进一步测得腐蚀产物多为 FeS、Fe₃O₄ 及 FeO 等。CFD 仿真结果与实际失效工况吻合, 二次流、粒径、速度以及斯托克斯数的变化对固体颗粒运动轨迹影响较大, 并进一步影响管道冲蚀的高危区位置。**结论** 管道失效的主要原因是黑水中的 H₂S 腐蚀和煤粉颗粒冲蚀的耦合作用, 其弯管区域外拱出口位置和下游水平管底部位置为主要高危区, 同时管道高危区位置受多种因素影响, 相应部位要提前做好预防准备, 实际工况中适当减小流速可以实现一定减磨防护作用。

关键词: 黑水处理系统; 管道失效; CFD; 腐蚀; 冲蚀

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0247-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.030

Failure Analysis of Pipeline in Coal Gasification Black Water Treatment System Based on Experiment and CFD Simulation

SHAN Bin¹, CHEN Ping¹, QIAO Xiao-xi¹, ZHAO Yuan-qi²

(1.School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2.Gasification Plant of Coal-based Oil and Gas, China Energy Ningxia Coal Industry Group Co., Ltd, Yinchuan 750411, China)

ABSTRACT: The work aims to study the failure behavior of pipeline in black water treatment system of coal gasification, so as to clarify the failure features, analyze the failure mechanism and influencing factors, provide measures for avoiding the failure and extend the service life. Scanning electron microscopy (SEM) was used to detect the morphology of the pipeline. Corrosion

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-09-14

Received: 2019-08-16; Revised: 2019-09-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51975042); 青年教学骨干人才培养计划资助 (2018JXGGRC)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51975042) and the Training Programs Funds for Young Teaching Talents of University of Science and Technology Beijing (2018JXGGRC)

作者简介: 单斌 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为管道多相流及计算机辅助技术。

Biography: SHAN Bin (1994—), Male, Master, Research focus: pipeline multiphase flow and computer aided technology.

通讯作者: 陈平 (1973—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦磨损与系统工程。邮箱: chenp@ustb.edu.cn

Corresponding author: CHEN Ping (1973—), Female, Doctor, Professor, Research focus: friction and wear and its system engineering. E-mail: chenp@ustb.edu.cn

products were analyzed by energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The flow field was simulated and analyzed through computational fluid dynamics (CFD). There were obvious water hoot morphologies in the inner wall surface of the failed pipeline, which was covered with small pits and brown loose porous corrosion products. EDS results showed that the surface elements were mainly Fe, S and O. The main corrosion products were FeS, Fe₃O₄ and FeO after further detected by XRD. CFD simulation was consistent with the actual ones well. The changes of secondary flow, particle size, velocity and Stokes number had a great influence on the trajectory of solid particles, and further affected the location of high-risk areas of pipeline erosion. The main reason for the failure of the pipeline is the coupling of H₂S in the black water corrosion and pulverized coal particle erosion. The outer arch exit position in the elbow area and the bottom horizontal tube bottom position are the main high-risk areas. The high-risk areas of pipeline are effected by many factors and should be prevented in advance accordingly. Besides, the proper reduction of fluid velocity in actual work can reduce the erosion and protect the pipeline.

KEY WORDS: black water treatment system; pipeline failure; CFD; corrosion; erosion

煤炭资源在我国储量丰富,长期以来一直是我国的主要能源来源^[1-2]。煤气化作为一种新型核心的煤化工技术,是煤炭高效清洁利用的重要方式^[3-4]。其中,黑水处理系统是煤气化工艺中不可缺的部分。该系统采用多级闪蒸工艺,能有效处理来自气化、湿洗以及除渣系统排放的洗涤水和渣水,同时回收黑水中的热量。由于黑水处理系统管道面临高压、高腐蚀性和高含固量的介质环境,使得管道减薄严重,服役寿命短,严重影响日常生产。因此,对黑水处理系统损坏管道进行失效分析并探究其失效机理,对管道失效预防维护以及寿命提升尤为重要。

近几年,通过实验^[5-9]和数值模拟^[10-14]研究管道在不同工况下的损伤,一直是许多学者关注的焦点。More 等^[6]通过宏微观检测手段分析了煤灰底灰浆管道在火电中的失效行为,发现管道泄漏归因于泥浆固体颗粒的冲击作用和管道内底面的沉积腐蚀。Shabani 等^[5]通过对管道腐蚀垢的成分检测、管道的金相成分分析、材料力学性能测试和显微形貌分析,发现管道冶金缺陷造成的残余应力会引起焊接头开裂,从而导致天然气管道失效。Zhu 等^[10]通过数值模拟的方法分析酸性水汽提塔顶部冷凝回流系统,结果发现,温度通过影响管道内部气液两相的平衡,从而导致管道遭受不同程度的腐蚀。Zhang 等^[11]基于冲蚀磨损试验,对管道的冲蚀数值仿真模型进行了修正,并将其用于水力压裂管道失效机理分析。综上所述,国内外学者对损坏管道的失效机理进行了大量研究,但是不同工况下的管道失效形式存在差异,无法归于同一种失效机理。因此,针对不同工况下的管道失效情况需要特定研究。

本文以煤气化黑水处理系统的中压闪蒸罐进入低压闪蒸罐角阀前 90°弯管为研究对象,通过实验检测失效试样,并数值模拟管道流场,研究揭示管道失效机理。其中,黑水处理系统管线分布如图 1 所示。

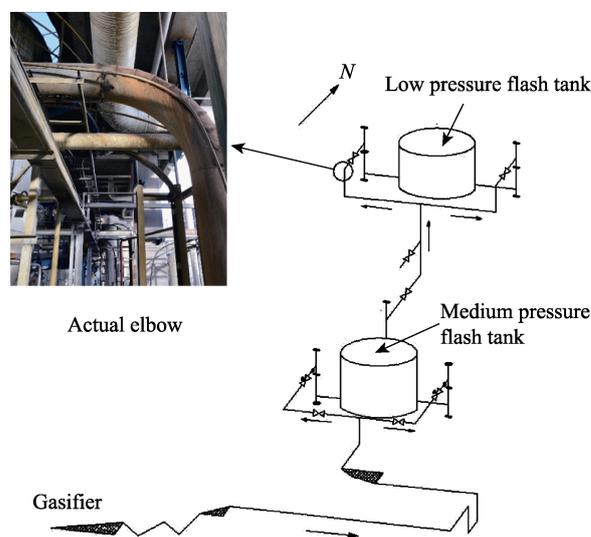


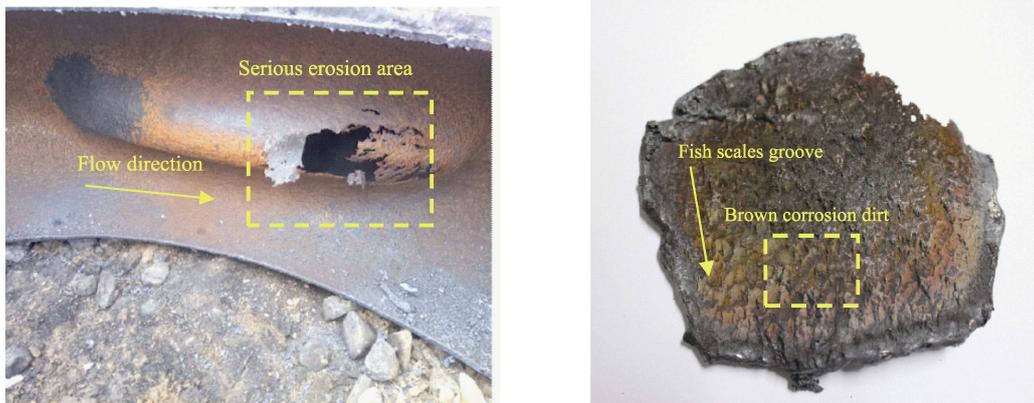
图 1 煤气化黑水处理系统管线分布图
Fig.1 Pipeline distribution map of black water treatment system in coal gasification

1 实验检测分析

失效管道的宏观形貌如图 2 所示。由图 2a 可以看出,失效管道出现严重的减薄和穿孔现象,失效管壁厚度在 1.0~5.0 mm 范围内(管壁初始厚度为 8.8 mm)。同时,失效管道内壁粗糙,呈现很明显的鳞片状沟槽,且整个管道内壁覆盖着褐色腐蚀产物(图 2b)。

1.1 微观形貌检测

采用扫描电子显微镜对失效管道内壁面进行检测,微观形貌如图 3 所示。首先可以看出管道内壁面存在明显的波浪状形貌,这是典型的流水冲刷痕迹(图 3a)。管道内壁面存在明显沿流动方向的浅坑组(图 3b),这是介质中的固体颗粒在流动过程中不断冲击壁面造成的。同时,管道内壁面上布满了龟裂纹,存在大量疏松的腐蚀渣和孔隙(图 3c 和图 3d),这可

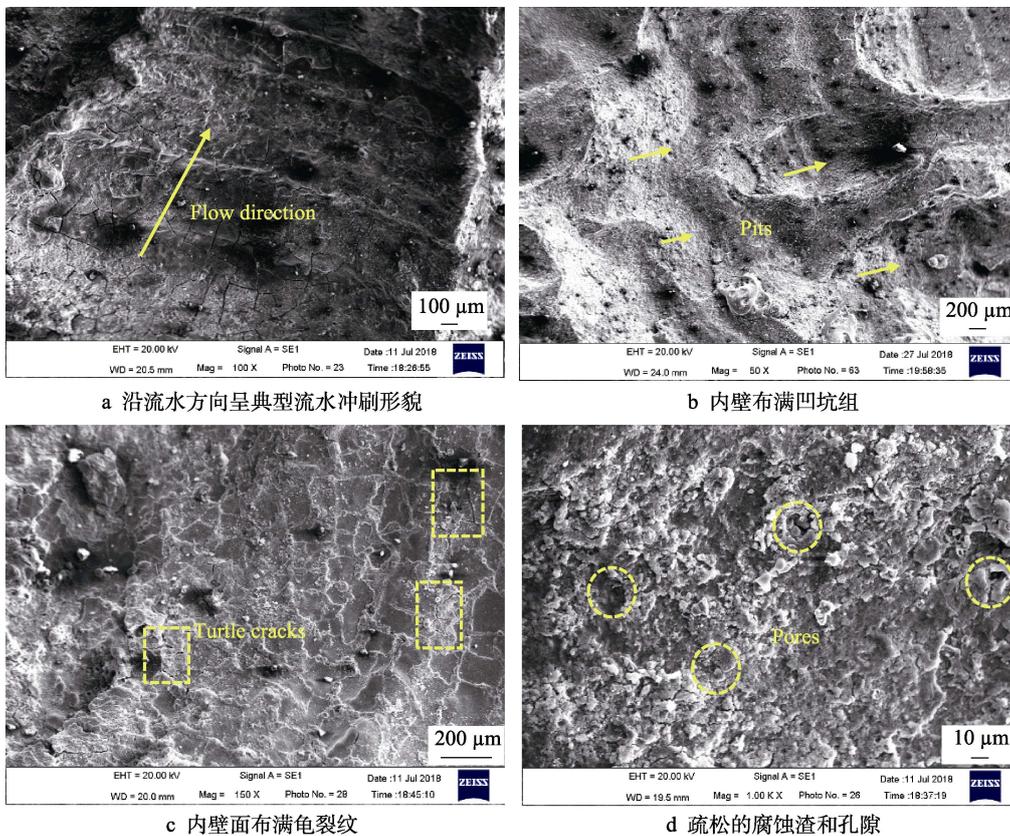


a 整体失效情况

b 管道内壁失效形貌

图 2 黑水处理系统管道失效情况

Fig.2 Pipeline failure in black water treatment system: a) overall failure appearance; b) failure morphology on inner wall of pipeline



a 沿流水方向呈典型流水冲刷形貌

b 内壁布满凹坑组

c 内壁面布满龟裂纹

d 疏松的腐蚀渣和孔隙

图 3 管道内壁面的微观形貌

Fig.3 Microscopic morphology on inner wall surface of the pipeline: a) typical flow washout morphology along the direction of the flow; b) inner wall of the pipeline covered with a pit group; c) inner wall covered with cracks in the turtle; d) loose corrosion slag and pores

归因于腐蚀性介质对管壁的腐蚀，使管壁变得疏松。

1.2 腐蚀产物分析

采用能量色散谱 (EDS) 对弯管内壁面腐蚀产物的元素进行鉴定，结果如图 4a 所示，可以看到图谱中有 S、Fe、Si、Mn 和 O 元素的峰，而 S 出现非常强的峰值，说明该测量点 S 含量较高。经分析，Si 和 Mn 是材料本身存在的一些元素，因此腐蚀产物中

的主要元素有 Fe、S 和 O。

为进一步确定腐蚀产物的成分，对腐蚀产物取样、研磨及筛选制成粉末，进行 X 射线衍射 (XRD) 分析 (衍射角在 1° ~ 100° 之间，角度阶跃为 0.02°)，利用标准粉末 X 射线衍射图谱图库进行物相匹配分析，结果如图 4b 所示。除去其中由于操作问题导致峰值过高的 Fe，腐蚀产物的主要成分为 FeS (主峰主要在 30°)、FeO (主要在 61°) 和 Fe_3O_4 (主要在 37°)。

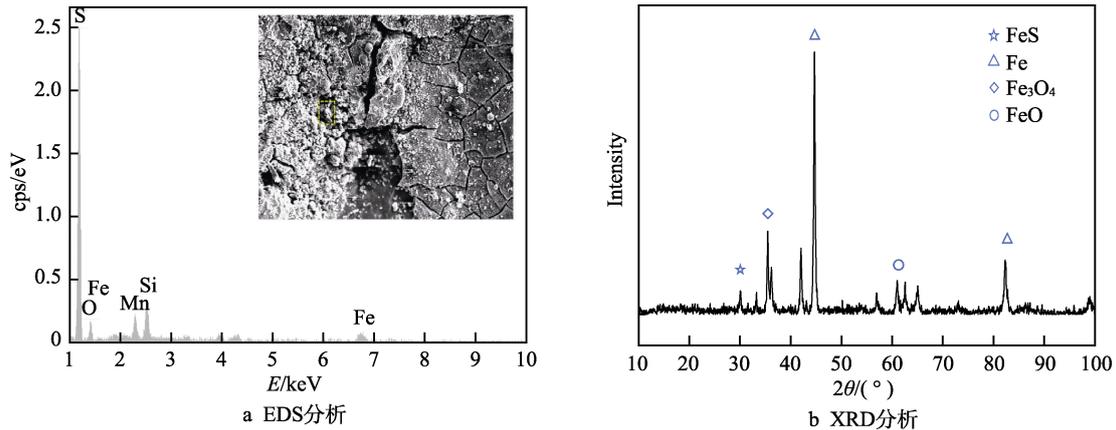


图4 腐蚀产物检测分析

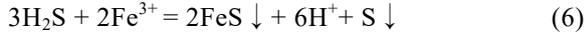
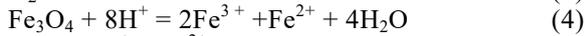
Fig.4 Analysis of corrosion products: a) EDS; b) XRD

Fe₃O₄ 和 FeO 主要是管道氧化生成, FeS 由黑水介质中的 H₂S 与铁及铁的氧化物 (主要是 FeO 和 Fe₃O₄) 反应而来, 而 H₂S 由原煤中的硫杂质在气化炉反应生成。

生成 H₂S 反应有:



生成 FeS 反应有:



由此可分析, 如图 5 金属管道最开始存在一层氧化皮, 但是在颗粒的切削和撞击下, 氧化膜破裂并逐步剥落, 露出新的基体材料。基体材料表面继续反应生成一层表面膜, 一方面是与来自黑水中的 H₂S 发生腐蚀反应生成的 FeS, 另一方面是在高温条件下会被氧化生成 FeO 和 Fe₃O₄, 同时生成的氧化膜也会进一步和 H₂S 反应。在流水的冲刷作用和颗粒频繁撞击下, 表面膜继续脱落, 露出基材。因此, 在这种腐蚀-冲蚀耦合循环作用下, 管壁逐渐减薄直至穿孔失效。

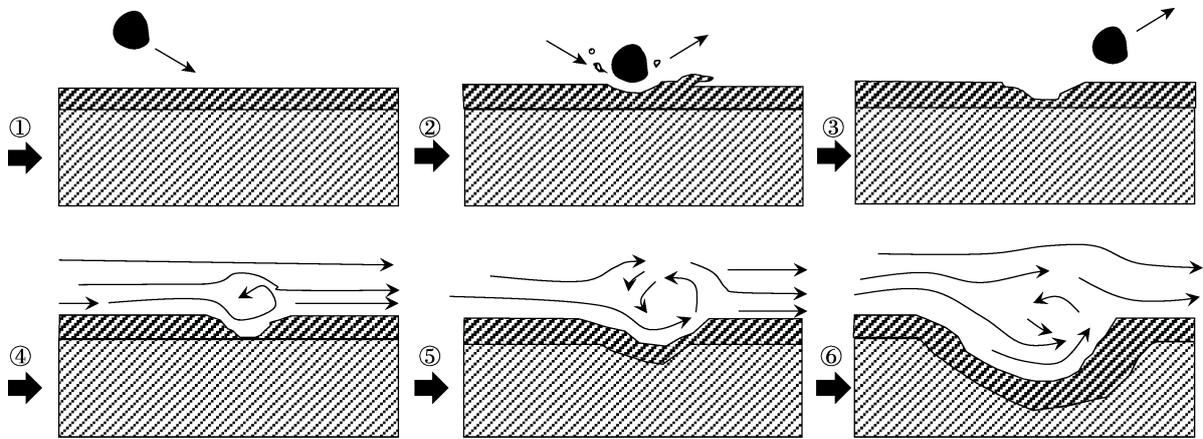


图5 管道失效机理示意图

Fig.5 Diagram for pipeline failure mechanism

2 数值模拟仿真分析

为了进一步研究黑水处理系统 90°弯管的失效位置分布, 利用商用软件 Fluent 对管道进行流体建模仿真, 研究分析流场对管道失效的影响。

2.1 数值模型建立

2.1.1 控制方程

1) N-S 方程。首先建立 CFD 固液两相流模型, 然后分析弯管的冲蚀模型, 黑水被视为连续相。采用

Navier-Stokes 方程(8)和(9):

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{S}_M \quad (9)$$

其中, ρ 为流体密度, v 为流体表面速度, p 为流体压力, μ 为流体动态黏度, S_M 为由固相引起的附加动量。选择标准 $k-\epsilon$ 模型作为计算的湍流模型。壁表面设定为没有相对滑动速度边界条件, 并且近壁表面区域通过标准壁函数方法建模。

2) 粒子运动方程。将粉煤颗粒作为离散相处理, 并用 DPM 模型模拟, 笛卡尔坐标系中固体粒子的运动方程可表示为:

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} = F_d(v - v_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{\text{other}} \quad (10)$$

其中, v_p 为粒子相速度, v 为混合相速度, ρ_p 为粒子相密度, $F_d(v - v_p)$ 为单位质量颗粒受到的曳力, $\frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 为重力项, F_{other} 为其他作用力 (如加速度、热泳力、速度梯度力等)。

3) 冲蚀磨损模型。离散相颗粒对管道壁面的冲蚀磨损模型为^[15]:

$$E = \sum_{z=1}^{N_p} \frac{m_d C(d_p) f(\theta) v_p^{n(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (11)$$

其中, E 为冲蚀磨损率, m_p 为颗粒质量, $f(\theta)$ 颗粒冲击角度的函数, $n(v)$ 为速度指数, $C(d_p)$ 为粒径函数, 采用文献[16]中得出的试验值 1.8×10^{-9} 。

2.1.2 几何结构

弯管几何结构如图 6 所示, 为保持观测区域流场稳定, 弯管在垂直和水平方向的长度分别设置为 1000 mm 和 1750 mm; 同时, 在弯管 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 和弯管出口 $1.5d$ 处标记 A、B、C、D、E、F 共 6 处的切面作为观察截面, 以分析流场内部情况。

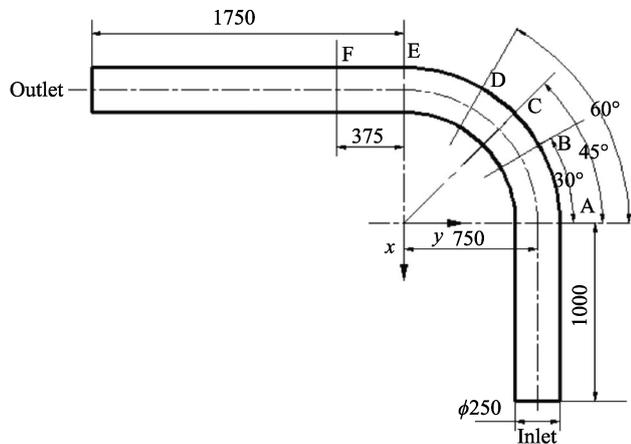


图 6 弯管几何结构
Fig.6 Structure of the elbow

2.1.3 网格划分及无关化验证

采取专业网格划分软件 ICEM 进行结构化网格划分, 在弯管部进行加密 (图 7), 并对网格进行了无关化验证, 采用的网格数量分别为 143 424、151 840、192 696, 通过提取管道壁面的最大磨损率进行分析, 结果由表 1 所示。结果显示, 随着网格数量的变化, 管道的最大磨损率变化较小, 误差绝对值在 3% 以内, 说明网格数量增加到一定数量, 对模拟结果的影响较小, 可视为达到网格无关性要求, 因此选择网格数量为 192 690。

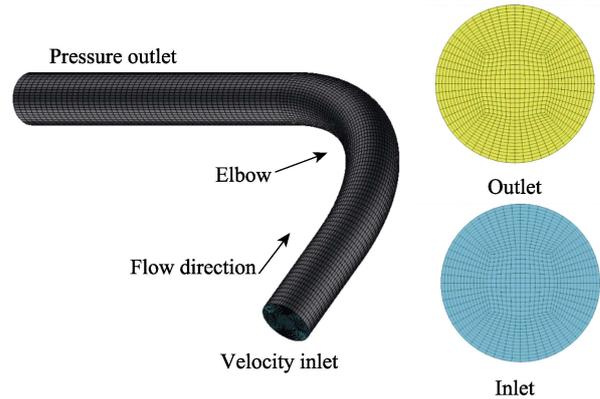


图 7 网格划分
Fig.7 Grid generation

表 1 网格无关性验证

Tab.1 Grid-independence verification

Grid number	Max erosion rate	Relative error
143 424	8.24×10^{-9}	2.94%
151 840	8.37×10^{-9}	1.41%
192 696	8.42×10^{-9}	

2.1.4 材料属性及边界条件

为模拟含固体颗粒的黑水介质工况, 将黑水液体视为牛顿流体, 作为连续相, 将流场内的煤粉颗粒假设为规则球体, 并作为离散相从管道入口均匀射入黑水连续相内; 同时, 忽略颗粒间碰撞导致的结合或破裂, 并认为离散相与连续相间无热量交换。计算域采用速度入口和压力出口 (出口压力为 0.5 MPa)。连续相和离散相介质相关属性及相应边界条件如表 2 所示。

表 2 连续相和离散相属性
Tab.2 Properties of the continuous phase and discrete phase media

Properties	Continuous phase	Discrete phase
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	851.633	1750
Volume fraction/%	96.5	3.5
Mixed flow velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1	1
Viscosity/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	12.9×10^{-5}	

2.2 弯管冲蚀机理分析

管道冲蚀云图如图 8 所示, 可以发现, 管道的弯管区和下游水平管的底部冲蚀特别严重。其中弯管外拱靠出口一侧的冲蚀最严重, 因此对弯管外拱中心沿弯曲方向的冲蚀情况进行提取, 结果如图 9 所示, 可以看到, 随角度的增加, 冲蚀现象逐渐加剧, 最严重的冲蚀位置发生在约 58.5° 处, 这与实际的弯管穿孔位置大致相同。

为了更好地分析管道冲蚀情况, 对管道的 A、B、C、D、E 和 F 部位周向方向的冲蚀情况进行提取,

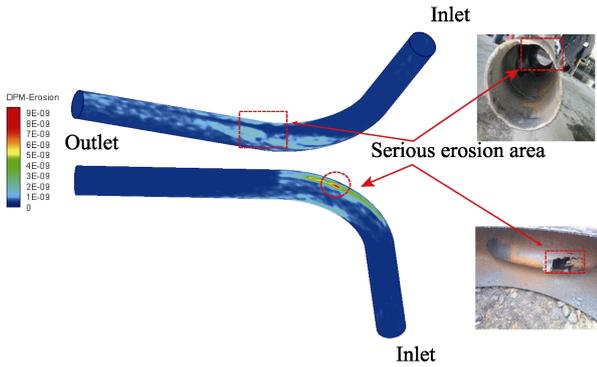


图8 弯管冲蚀云图
Fig.8 Cloud chart of pipeline erosion

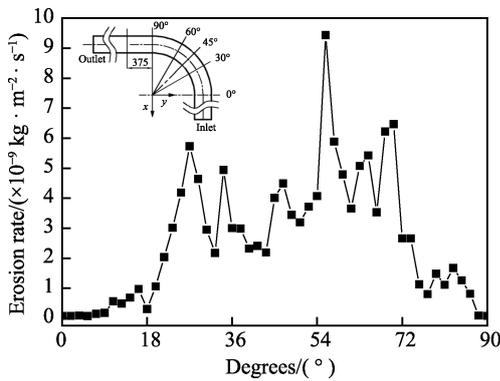


图9 弯管外拱中心线的冲蚀率
Fig.9 Erosion rate of the center line on the outer arch of the elbow

结果如图10所示。可以看到，在A部位，流体整体情况平缓，冲蚀并不严重；B、C和D部位冲蚀逐渐加剧，在D部位冲蚀情况最严重，其高危位置主要

集中在180°左右，即弯管的外拱中心线位置附近；而F部位的冲蚀较严重区域分布在225°~45°。

通过分析弯管的压力和速度分布情况来进一步探究弯管的冲蚀机理。图11为弯管的压力场和速度场，可以看到，流体进入弯头之后，弯头外拱压力高而内拱压力低，形成指向弯管曲率中心的顺压力梯度，而速度在弯管区域的内拱区域大于外拱区域。这可归因于流体在流动过程中受弯管曲率影响，被离心力带到弯管的外弧，外拱内壁面流体挤压，导致外部压力较大，而压力的急剧变化导致速度的急剧变化。图12为A、B、E和F位置处截面的流体速度和压力变化趋势，可以看到，A至B区间，流体的压力和速度梯度逐渐形成；而E至F区间，流体的高速区域逐渐移至弯管外拱，速度轮廓线呈舌形，包裹内拱附近的低速流体。由此可以认为，外拱的高速流体沿管壁向内拱流动形成垂直于流体前进方向的二次流。

图13为管道流线图，可以看到二次流在位置B两侧开始形成。结合图10位置B处的弯管的冲蚀情况分析，位置B的管道两侧（60°~280°）冲蚀开始加剧；随着角度的增加，位置C和D涡流范围逐渐扩展，且在D位置扩展到达到整个截面流体域，图10位置C和D所示管道两侧冲蚀范围是逐渐扩展，且在位置D冲蚀范围达到最大（15°~340°）；位置E到F，涡流的涡心逐渐转移到弯管内拱，由图10同样可以看到位置F的管道底部冲蚀逐渐加剧。因此，可以得出管道二次流的形成及扩展会加大管道冲蚀的面积以及加剧冲蚀。

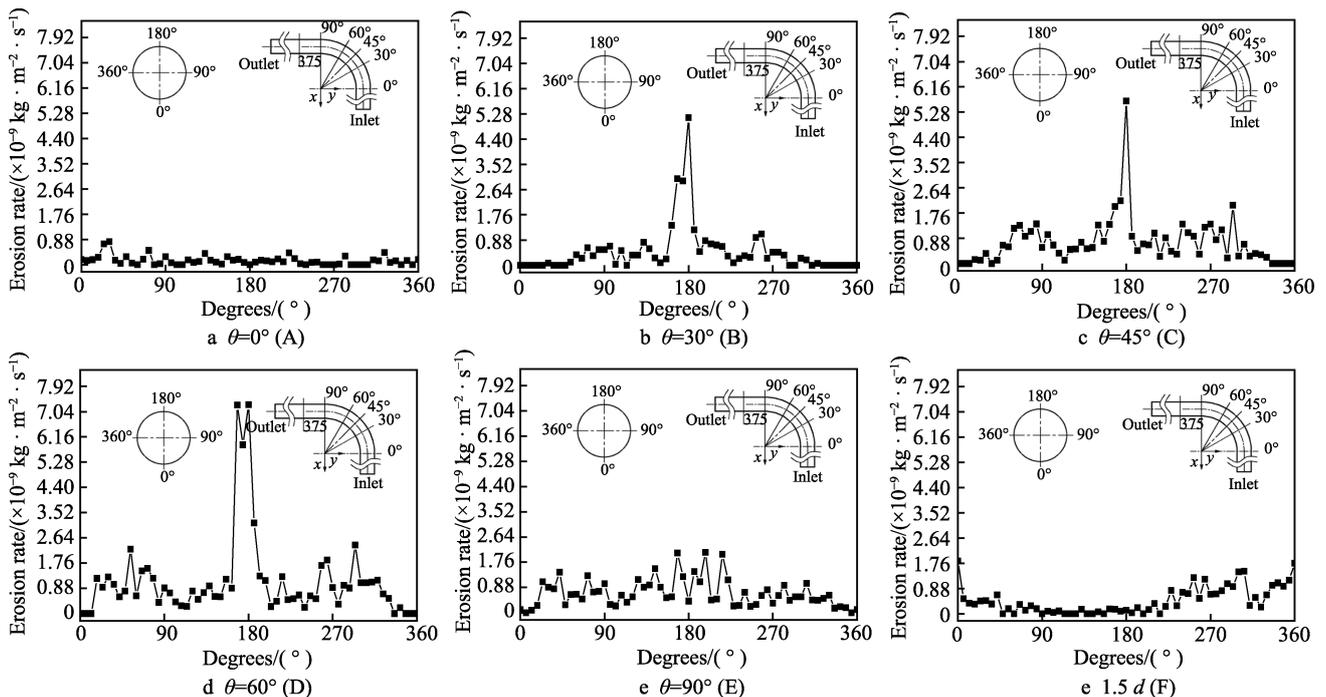


图10 不同位置的冲蚀率
Fig.10 Erosion rate of different position

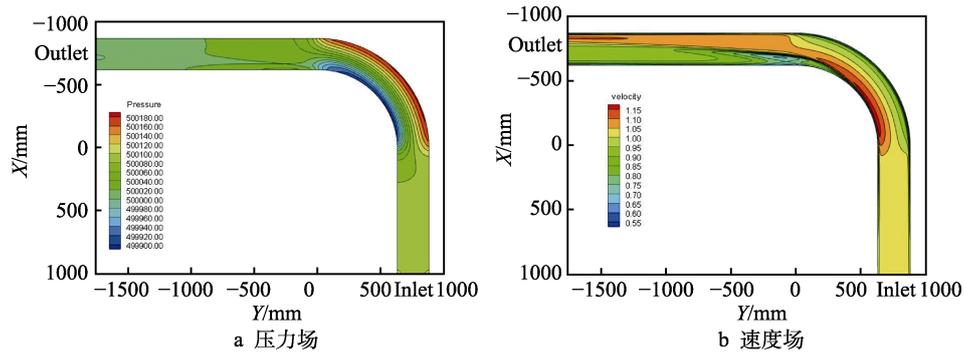


图 11 弯管的压力场和速度场

Fig.11 Pressure field and velocity field of the elbow: a) pressure field; b) velocity field

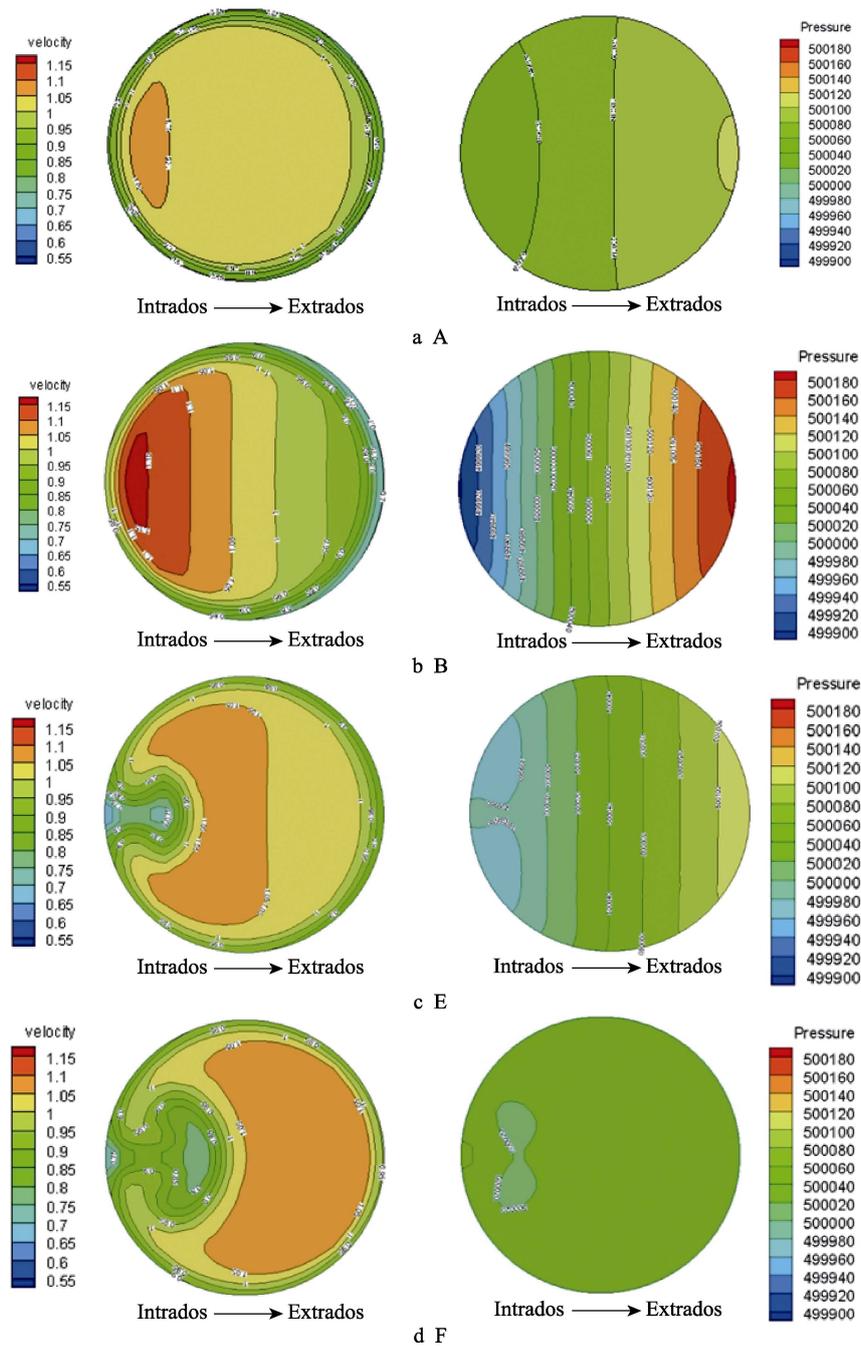


图 12 A、B、E 和 F 处截面的速度和压力变化趋势

Fig.12 Trends in velocity and pressure at the section A, B, E and F

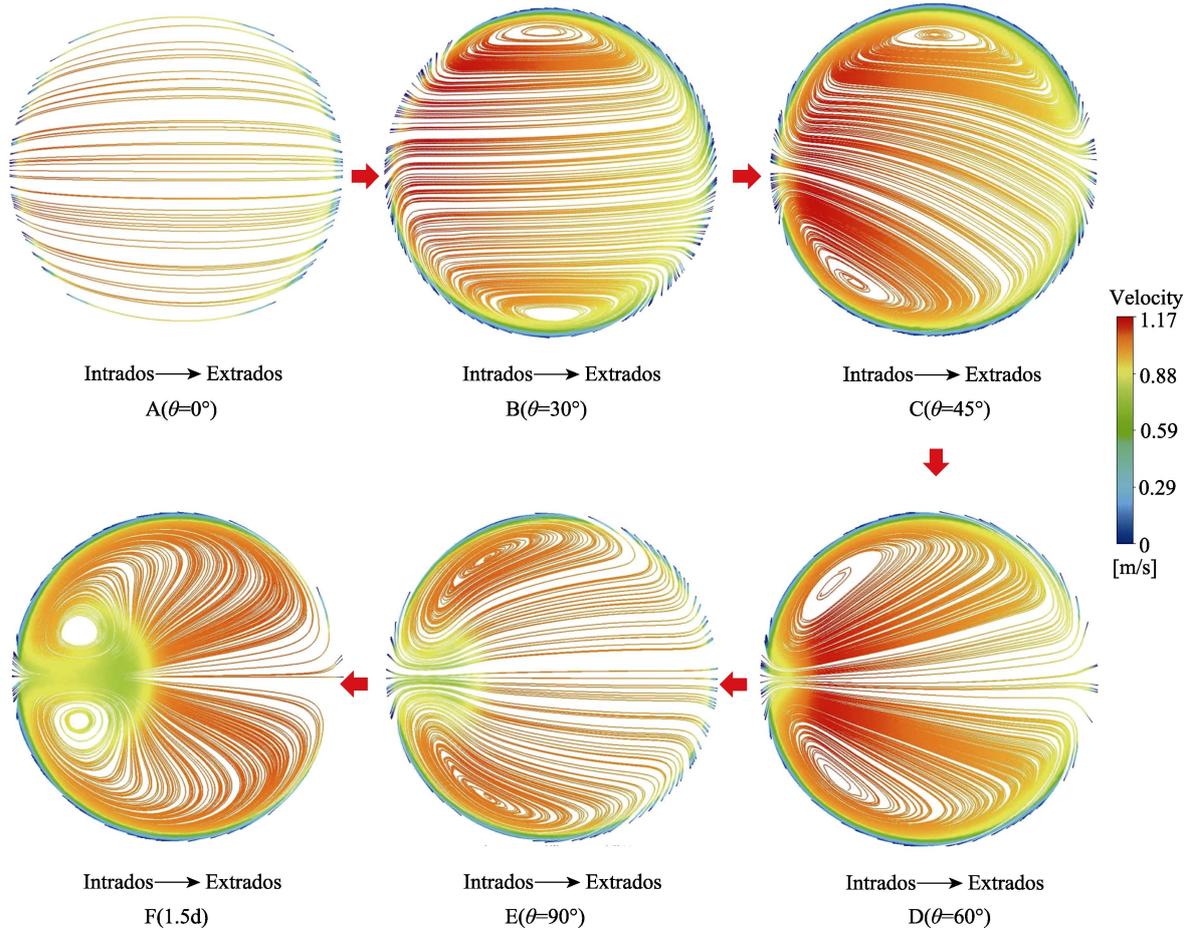


图 13 截面处的流线图
Fig.13 Stealine chart of section A, B, C, D, E and F

综上，管道中流体主要存在两种流动形式：一是沿着弯管方向流动的主流，高速流体的携带煤粉颗粒，对弯管外拱管壁造成严重冲蚀；二是由弯道同一截面速度分布不均引起的垂直于主流方向的二次流，二次流主要裹挟颗粒在周向方向对管道两侧造成冲蚀。如图 14 所示，流体进入弯头后，受弯头弯曲的影响，颗粒首先跟随主流冲击管道出口附近的外拱壁，然后二次流及重力作用携带部分颗粒撞击弯管的两侧及下游水平管的底壁，造成这两部位冲蚀严重。

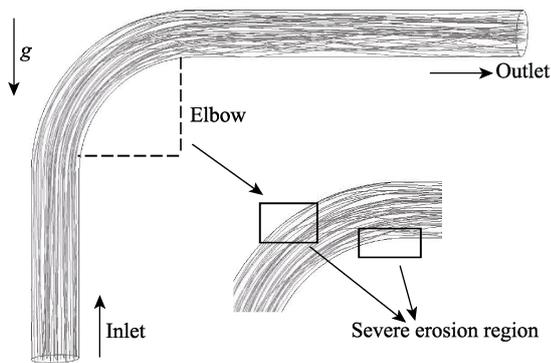


图 14 颗粒的运动轨迹
Fig.14 Particle trajectories

2.3 冲蚀最严重位置分布规律

为了进一步分析弯管冲蚀高风险区的位置分布规律，讨论流体速度和粒径对离散粒子的受力及管道冲蚀特性的影响。

图 15a 为流体速度及粒径对管道冲蚀的影响，可以看到随着粒径的增大，弯管拱背处的冲蚀率降低，且弯管冲蚀最严重的位置分布受粒径的影响：在粒径为 70~200 μm 的颗粒撞击下，管道拱背的 55~60° 位置冲蚀最严重；对于粒径为 10~50 μm 的小颗粒，管道的主要冲蚀部位在 70° 左右。提取弯管出口和弯管出口 1.5d 的位置的冲蚀状况，发现与弯管冲蚀情况相反：弯管出口处和出口 1.5d 处，随着粒径的增大，冲蚀率增大，主要冲蚀区域在管道底部及两侧位置（图 15b 和图 15c）。

图 15d 为流体速度对管道冲蚀的影响，可以看出速度越大，冲蚀越严重，这是由于较大的速度导致较大的冲击能量；随着速度的提高，拱背冲蚀峰所在弯管的角随之升高。在速度为 1 m/s 时，冲蚀峰在 58° 左右；当速度达到 2 m/s 时，冲蚀峰达到 70° 左右。综合来看，速度越大、粒径越小，弯管区域的冲蚀越严重（图 15e）。

引入斯托克斯数 S_t (反映惯性力与曳力的相对大小), 分析其对管道冲蚀的影响。

$$S_t = \frac{\rho_p d_p^2 u}{18\mu D} \quad (12)$$

其中, ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒粒径, μ 为气体动态黏度, u 为连续相速度, D 为管径。

如图 16 所示, 随着 S_t 的增大, 弯管遭受冲蚀的区域逐渐增大, 并扩散到弯管两侧和下游水平管底

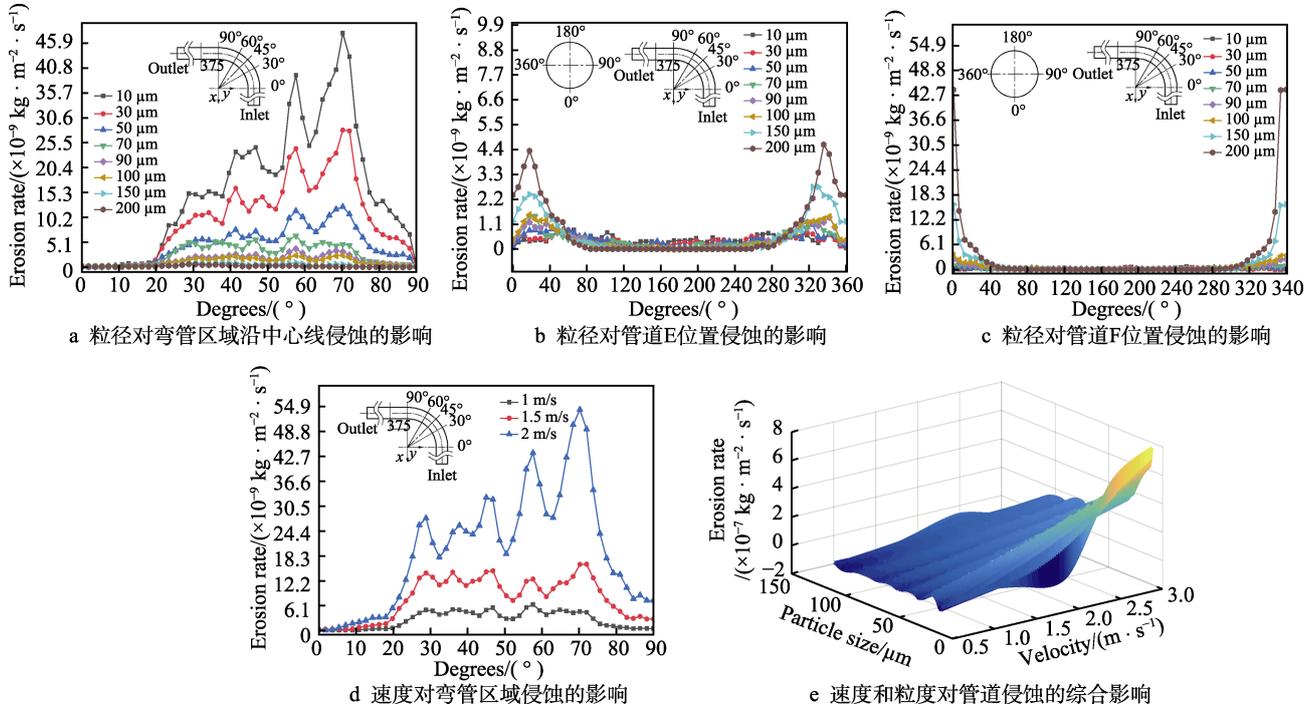


图 15 速度和粒径对管道冲蚀的影响

Fig.15 Effect of velocity and particle size on pipe erosion: a) effect of particle size on erosion of center line in elbow; b) effect of particle size on erosion at E position of pipeline; c) effect of particle size on erosion at F position of pipeline; d) effect of velocity on erosion of elbow; e) combined effect of speed and particle size on pipeline erosion

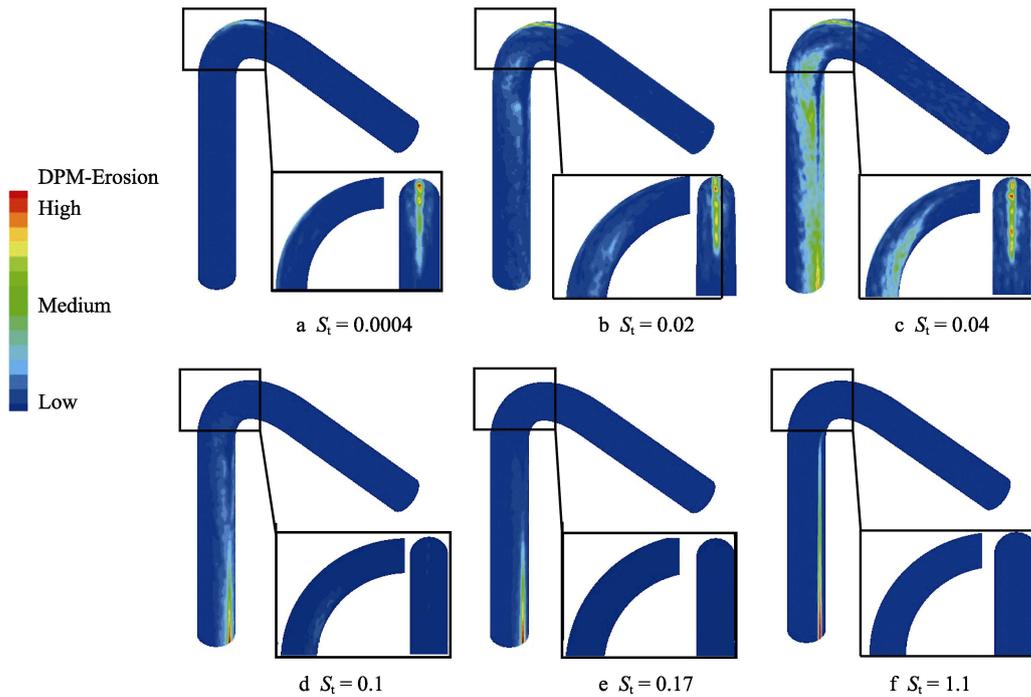


图 16 斯托克斯数对管道冲蚀的影响

Fig.16 Effect of Stokes number on pipeline erosion

部,并在 $S_i=0.04$ 时,弯管冲蚀区域最大。随着 S_i 继续增大,弯管冲蚀区域逐渐减小,而水平管底部的冲蚀逐渐加剧。当 S_i 较小(小于 0.04)时,颗粒在弯头处受曳力的驱动作用影响较大,颗粒与主流和二次流的跟随性较好,使得最大磨损区域主要集中在弯管外拱及两侧区域;当 S_i 较大(大于 0.04)时,粒径逐渐增大,重力作用逐渐占主导性,并足以克服主流及二次流中的携带作用,在重力作用下撞击管道下游水平管底部,造成严重冲蚀。

3 结论

1) 管道失效主要是腐蚀-冲蚀耦合作用造成。金属管道在高温条件下生成的氧化皮(主要为 Fe_3O_4),在颗粒的切削和撞击下,逐步破裂剥落,露出新鲜基体材料并被黑水中的 H_2S 腐蚀生成 FeS 。在腐蚀和冲蚀循环作用下,管壁逐渐减薄直至穿孔失效。

2) CFD 模拟结果显示,煤粉颗粒在二次流影响下,弯管冲蚀最严重部位约为弯管的 58.5° 位置(与实际吻合)。管道最大冲蚀位置受流速和粒径的影响较大,在斯托克斯数为 0.4 时,弯管遭受冲蚀区域最大;随着斯托克斯数的增大,弯管区域冲蚀减小,下游水平管底部冲蚀加剧。

3) CFD 模拟计算出弯管外拱出口处和下游水平管底部等为易受损区域,因此,在实际生产中要加强易受损位置的防护,如适当降低流速,使用灰分较低的煤以减少合成气携带的飞灰,更换更加耐磨的黑水管道材料等,这些措施对于延长煤气化黑水处理系统管道的寿命均具有一定的积极作用。

参考文献:

- [1] LIN Jiang, FRIDLEY D, LU Hong-you, et al. Has coal use peaked in China: Near-term trends in China's coal consumption[J]. Energy policy, 2018, 123(12): 208-214.
- [2] QIN Shi-yue, CHANG Shi-yan, YAO Qiang. Modeling, thermodynamic and techno-economic analysis of coal-to-liquids process with different entrained flow coal gasifiers[J]. Applied energy, 2018, 229(12): 413-432.
- [3] SÁNCHEZ-HERVÁS J M, MOYA G M, ORTIZ-GONZÁLEZ I. New trends in coal conversion[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 175-202.
- [4] XU Jian, YANG Yong, LI Yong-wang. Recent development in converting coal to clean fuels in China[J]. Fuel, 2015, 152(7): 122-130.
- [5] SHABANI H, GOUDARZI N, SHABANI M. Failure analysis of a natural gas pipeline[J]. Engineering failure analysis, 2018, 84(1): 167-184.
- [6] MORE S R, BHATT D V, MENGHANI J V. Failure analysis of coal bottom ash slurry pipeline in thermal power plant[J]. Engineering failure analysis, 2018, 90(4): 489-496.
- [7] 钟功祥, 石强, 赵乾坤. 含 CO_2 油气管道内腐蚀模拟及剩余寿命预测[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 106-112.
ZHONG Gong-xiang, SHI Qiang, ZHAO Qian-kun. Corrosion simulation inside oil-gas pipelines containing CO_2 and prediction of residual life[J]. Surface technology, 2016, 45(11): 106-112.
- [8] 蔡锐, 吴鹏, 赵金龙, 等. 某 L245 集输管道腐蚀失效原因分析[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 58-64.
CAI Rui, WU Peng, ZHAO Jin-long, et al. Corrosion failure analysis of L245 gathering pipeline[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 58-64.
- [9] 王冰, 刘晓娟, 熊哲, 等. 某天然气管道内腐蚀原因及防控措施[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 89-94.
WANG Bing, LIU Xiao-juan, XIONG Zhe, et al. Corrosion reasons and control measures of a natural gas pipeline[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 89-94.
- [10] ZHU Min, SUN Li, OU Guo-fu, et al. Erosion corrosion failure analysis of the elbow in sour water stripper overhead condensing reflux system[J]. Engineering failure analysis, 2016, 62(2): 93-102.
- [11] ZHANG Ji-xin, KANG Jian, FAN Jian-chun, et al. Research on erosion wear of high-pressure pipes during hydraulic fracturing slurry flow[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2016, 43(9): 438-448.
- [12] XU Lei, ZHANG Qian, ZHENG Jin-yang, et al. Numerical prediction of erosion in elbow based on CFD-DEM simulation[J]. Powder technology, 2016, 302(22): 236-246.
- [13] WANG Lin, QI Guo-li, LI Zhen-jie, et al. Numerical simulation of flow behavior of topped gas-particles jet in a bubbling fluidized bed[J]. Powder technology, 2019, 348(8): 51-64.
- [14] PEYMAN Z, SAEID P, ALIREZA A, et al. Random forest regression prediction of solid particle erosion in elbows[J]. Powder technology, 2018, 338(20): 983-992.
- [15] JEREMY K E, BRENTON S M, SIAMACK A S. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service, 2000[C]// Proceedings of the 2000 asme fluids engineering division summer meeting. Boston: American Society of Mechanical Engineers, 2000: 959-966.
- [16] ZHANG Yong-li, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. Wear, 2007, 263(1): 330-338.