

煤炭地下气化生产井井口装置冲蚀规律研究

王辰龙¹, 王杰², 敬鑫², 乔磊¹, 何爱国¹, 刘奕杉¹, 唐洋²

(1. 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京 100013;

2. 西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要: **目的** 研究煤炭地下气化生产井井口装置采气过程中, 携带煤灰、煤渣的粗煤气对井口装置采气流场区域冲蚀磨损的影响规律及主要影响因素。**方法** 基于气-固两相流理论, 采用离散相模型 (DPM) 描述离散固相颗粒的运动学和运动轨迹, 采用雷诺-平均-纳维-斯托克斯 (RANS) 方程计算连续相的流体动力学特性, 通过数值分析得到主要冲蚀磨损位置, 以及固体颗粒粒径、颗粒质量流量、粗煤气流速的变化对采气流场区域冲蚀率的影响, 并通过实验进行验证。**结果** 主要冲蚀磨损区域在小四通和侧阀 I 的内部壁面。固体颗粒粒径为 20~200 μm , 小四通内壁面处, 颗粒粒径为 40 μm 时最大冲蚀率最大, 为 $8.7 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是粒径为 180 μm 时的 11.9 倍。固体颗粒质量流量为 $2.5 \times 10^{-4} \sim 12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, 小四通内壁面处, 在质量流量为 $12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时, 最大冲蚀率最大, 为 $7.3 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是质量流量为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时的 5.2 倍。粗煤气流速从 10~20 m/s, 小四通内壁面处, 在粗煤气流速为 20 m/s 时, 最大冲蚀率最大, 为 $6.7 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是粗煤气流速为 10 m/s 时的 2.7 倍。通过实验验证了数值分析对主要冲蚀区域预测的正确性, 并且验证了堆焊能有效减轻气固两相流对装置的冲蚀。**结论** 小四通和侧阀 I 的内部壁面受到冲蚀磨损最严重。颗粒粒径、颗粒质量流量和粗煤气产量等因素对装置的冲蚀磨损率均有较大影响, 且颗粒粒径影响最大。在井口装置加工的时候, 应对主要冲蚀区域做堆焊处理, 在生产井口装置工程应用中, 应当对小四通和侧阀 I 加强监测, 及时更换, 并且参考分析结果对工艺流程进行相应的合理优化, 尽可能地减少对装置的磨损。

关键词: 煤炭地下气化; 井口装置; 冲蚀; 数值仿真

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0101-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.010

Simulation Study on Erosion Law of Wellhead Equipment in Underground Coal Gasification Production Well

WANG Chen-long¹, WANG Jie², JING Xin², QIAO Lei¹, HE Ai-guo¹, LIU Yi-shan¹, TANG Yang²

(1. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 100013, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-11-16

Received: 2022-04-07; Revised: 2022-11-16

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目[2019E-25 (JT)]

Fund: Scientific Research and Technology Development Project of China National Petroleum Corporation [2019E-25(JT)]

作者简介: 王辰龙 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为非常规油气钻采新方法、新技术。

Biography: WANG Chen-long (1988-), Male, Master, Engineer, Research focus: new methods and technologies for unconventional oil and gas drilling and production.

通讯作者: 唐洋 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为油气及新能源装备现代设计与仿真、设备设施完整性技术研究。

Corresponding author: TANG Yang (1988-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: oil and gas and new energy equipment design and simulation, equipment and facility integrity technology research.

引文格式: 王辰龙, 王杰, 敬鑫, 等. 煤炭地下气化生产井井口装置冲蚀规律研究[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 101-110.

WANG Chen-long, WANG Jie, JING Xin, et al. Simulation Study on Erosion Law of Wellhead Equipment in Underground Coal Gasification Production Well[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 101-110.

ABSTRACT: Underground coal gasification is a new type of coal mining technology, which is used to burn underground coal resources into crude gas (in which, the main component is methane, etc.). With the increasing development of UCG technology, it is imperative to demonstrate the application of on-site engineering, and it is imminent to solve the problems encountered in production of its equipment. During the use of the UCG gas production wellhead equipment, the high-speed crude gas produced will carry a large amount of solid particles, which may cause serious erosion to the gas production channel of the wellhead equipment and affect the structural strength of the wellhead equipment. In this paper, the erosion model of the high temperature production wellhead equipment was established, and the erosion law of the wellhead equipment by the crude gas with different physical properties was analyzed. And the erosion experimental program was designed to verify the numerical simulation results.

The CFD model was coupled with the DPM numerical method to predict the movement of solid particles such as coal ash in the gas flow field. On this basis, numerical simulation was carried out for the effects of particle size, particle mass flow rate and flow rate of crude gas on the erosion of the wellhead equipment. The following conclusions were drawn from numerical simulations: (1) The areas where the solid particles eroded the wellhead equipment most seriously were the inner wall surface of the small four-way and the upper wall surface of the side valve I. (2) As the particle size of the solid particles increased, the maximum erosion rate first increased and then decreased, but when the particle size exceeded the critical value (160 μm), the maximum erosion rate was gradually reduced by the impact of the particle size, and the change trend of the maximum erosion rate gradually eased. At the inner wall of the small four-way, the maximum erosion rate was the largest when the particle size was 40 μm , which was $8.7 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, which was 11.9 times that when the particle size was 180 μm . (3) As the mass flow of solid particles increased, the erosion area and the maximum erosion rate gradually increased, and the maximum erosion rate on the small four-way was approximately proportional to the particle mass flow. When the mass flow rate was $12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, the maximum erosion rate was $7.3 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, which was 5.2 times that when the mass flow rate was $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$. (4) As the flow rate of crude gas increased, the erosion area and maximum erosion rate increased significantly with the increase of the flow rate. When the crude gas flow rate was 20 m/s, the maximum erosion rate was $6.7 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, which was 2.7 times that when the crude gas flow rate was 10 m/s.

Through the erosion experiment, it was found that the erosion rate is the largest when the erosion angle was 20° and 30° , which further verified the correctness of the numerical simulation analysis on the prediction of the severe erosion area. Through experiments, it is found that the surfacing treatment can effectively reduce the erosion of the gas-solid two-phase flow on the wellhead equipment. During the processing of the wellhead equipment, the key erosion areas should be surfacing, and in the process of the UCG project, the small spool and side valve I should be monitored to prevent these key erosion areas from being worn to a dangerous thickness.

By establishing the erosion simulation model and erosion experiment plan of the gas production channel of the UCG wellhead device, the erosion law of the gas production channel of the wellhead device can be studied, which can effectively guide the design and processing of the wellhead device.

KEY WORDS: underground coal gasification; wellhead equipment; erosion; numerical simulation

煤炭地下气化是一种新型的地下采煤技术,是通过将地下煤层以地下燃烧气化的方式产出可燃气体的新型地下煤矿开采技术,可将原位煤层通过化学转化为 CO 、 H_2 、 CH_4 等气体。气化炉生产井口是开采粗煤气的地面井口装置,由于地下煤层气化生产出的粗煤气中含有大量的煤渣、煤灰等固体颗粒,并且工作环境高温高压,气化炉生产井口在长时间开采粗煤气过程中,非常容易受到冲蚀磨损,这将影响到生产井口装置的使用寿命。另外,冲蚀磨损发生在装置内部,不易直接察觉,在高温高压的环境下将极大地影响到生产作业安全。因此,对其进行冲蚀磨损分析以及装置寿命及失效分析,对于安全地进行煤炭地下气化具有重要的意义^[1-8]。

国内外学者对液固、气固两相流冲蚀磨损已经开展了很多研究。Parsi 等^[9]研究了生产石油或天然气出砂对管道弯头的冲蚀磨损,详细介绍了不同的几种侵蚀方程,讨论了流速和出砂率等参数对固体颗粒侵蚀的影响,并总结出目前可用的冲蚀模型过于保守,影响了油气生产的效率,需开发出更精确的冲蚀模型以优化生产和降低风险。Zhu 等^[10]研究了高压天然气携砂对弯管的冲蚀磨损,采用计算流体力学模型,结合 DPM 模型和 FSI 数值方法,预测了含颗粒气体流在高压泄压管线弯头处的流动侵蚀,进行了一系列模拟来评估入口流速、管道直径和离散相含量对管道冲蚀磨损的影响。结果表明,在小直径管道中,入口流速越大,冲蚀磨损越严重。冲蚀磨损随着离散相含量的

增加而变得更加明显, 并且砂粒含量增加对冲蚀磨损的影响大于液滴含量增加对冲蚀磨损的影响。彭文山等^[11]开展了气固两相流下弯管内的冲蚀研究, 研究了不同弯径比及颗粒直径对弯管的冲蚀影响。研究发现, 在固体颗粒临界直径前后, 冲蚀磨损规律差距很大。艾志久等^[12]研究了气固两相流对 Y 型采气井口装置的冲蚀磨损, 研究发现, 由于气体通道截面大小和气体流动方向发生改变, 气固两相流产生涡流现象, 加速了井口装置的冲蚀磨损, 并且对井口装置的冲蚀磨损进行了量化计算。张恩搏等^[13]研究了气固两相流对高压高产气井的冲蚀磨损, 使用数值分析方法分析日产量和日出砂量对于采气树冲蚀速率、冲蚀位置和颗粒轨迹的影响。研究发现, 高压高产气井的日产气量和日出砂量均与冲蚀速率呈正相关。王宇等^[14]对组合弯头展开气固两相流冲蚀研究, 主要研究了 Z 型和 II 型 2 种型号的组合弯头, 得到了这 2 种组合弯头的冲蚀特性, 发现在弯头 50°~60°附近冲蚀磨损最严重。陈璟等^[15]采用数值模拟对 U 型弯头展开了气固两相流冲蚀磨损特性研究, 研究发现, 固相颗粒对管壁的最大冲蚀率随着气体速度的增加呈指数增大, 随着颗粒质量流量增大呈线性增大, 颗粒直径增大也会加剧对管壁的冲蚀磨损。吴贵阳等^[16]通过试验研究的方式, 利用喷射式冲蚀实验装置, 研究了气固两相流不同流速和入射角度对 360N 钢管材的冲蚀磨损影响。研究发现, 固体颗粒攻角为 30°时, 对钢材的影响最大。由上述研究不难发现, 目前针对煤炭地下气化中高温气化炉生产井口的冲蚀规律研究较少, 而高温气化炉生产井口作为煤炭地下气化中的关键设备, 其冲蚀磨损不易察觉, 且长期处于高温高压的环境下, 这极大地影响生产作业安全, 因此很有必要对高温气化炉生产井口的冲蚀规律进行研究。

综上所述, 为保证煤炭地下气化安全产出粗煤气, 本文基于欧拉-拉格朗日算法的 DPM 冲蚀预测模型, 建立气化炉生产井口装置冲蚀磨损模型, 对不同物性的粗煤气流经生产井口装置进行数值仿真。预测了在生产井口装置工作过程中易发生磨损冲蚀的区域, 并通过分析装置易冲蚀区域的最大冲蚀率和冲蚀面积变化情况, 得到了不同物性粗煤气对生产井口装置冲蚀磨损的影响规律, 并通过实验进行验证, 从而为生产井井口装置的设计和优选提供指导。

1 井口装置流场分析模型建立

在煤炭地下气化生产过程中, 粗煤气快速流经井口装置时, 产气通道内部流场为复杂的气-固两相流流场, 选用 DPM 模型对井口装置进行数值仿真。其中的连续相为粗煤气, 离散相为煤渣、煤灰等固体颗粒^[17]。采用在 Eulerian 坐标系下计算连续相流场, 在 Lagrangian 坐标系下求解计算离散相运动轨迹方程^[18-19]。装置内

流场采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 方法^[20-21], 重力加速度取 9.8 m/s², 并不考虑外界温度对流体黏度等因素的影响。

1.1 湍流模型

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型是基于 Boussinesq 假设^[22], 认为流体自身的黏性力是形成湍流的主要原因。本文选取 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 方程为^[10]:

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

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + \rho C_1 E_{ij} \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (4)$$

$$\eta = (2 E_{ij} E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (6)$$

式中: ρ 为密度, kg/m³; x_i 、 x_j 为空间坐标分量, m; k 为湍动能, J; ε 为湍动能耗散率; σ_k 为 k 方程的湍流普朗特数, 取 1.0; σ_ε 为 ε 方程的湍流普朗特数, 取 1.3; u_i 为流体在 i 方向上的速度, m/s; μ_t 为涡流黏度, Pa·s; μ 为动力黏度, Pa·s; C_1 、 C_2 为经验常数, 分别为 1.44、1.92; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; E_{ij} 为时均应变率; ν 为运动黏度, m²/s。

1.2 壁面碰撞模型

固体颗粒在与井口装置壁面发生碰撞时, 其运动的速度大小和方向都会发生变化。颗粒壁面碰撞模型如式 (7) 和式 (8) 所示^[23-24]。

$$\varepsilon_N = 0.993 - 0.0307\alpha + 4.75 \times 10^{-4}\alpha^2 - 2.61 \times 10^{-6}\alpha^3 \quad (7)$$

$$\varepsilon_T = 0.998 - 0.029\alpha + 6.43 \times 10^{-4}\alpha^2 - 3.56 \times 10^{-6}\alpha^3 \quad (8)$$

式中: α 为颗粒入射角度; ε_N 为碰撞模型法向弹性系数; ε_T 为碰撞模型切向弹性系数。

1.3 数值分析模型建立

煤炭地下气化是将地底煤炭进行可控地燃烧气化, 将煤炭燃烧转化为粗煤气^[25], 产出粗煤气主要成分见表 1。煤炭地下气化技术特点决定了生产井井口装置需要具有耐高温和高压的性能, 其需耐高温温度

达 350 ℃, 其需耐高压压力达 6 MPa。生产井井口装置产气通道主要由油管、主阀、小四通、侧阀 I、法兰接头以及侧阀 II 等组成, 主要材料为 12Cr13。生产井井口装置的结构如图 1a 所示, 在对其作颗粒冲蚀分析时, 主要是对其内部的流体流动区域进行分析, 具体结构如图 1b 所示, 网格划分如图 1c 所示。

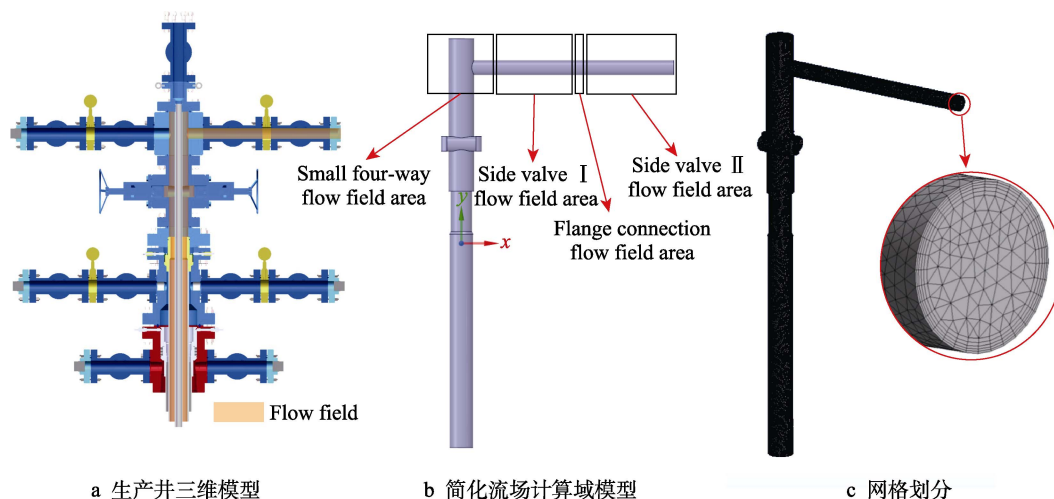


图 1 冲蚀仿真模型建立

Fig.1 Establishment of erosion simulation model: a) 3D model of production well; b) simplified computational domain model of flow field; c) meshing

在运用数值仿真软件计算过程中, 定义粗煤气产出通道的进口边界条件为速度入口 (velocity), 定义粗煤气产出通道的出口边界为压力出口 (pressure outlet), 设置进口处粗煤气和煤渣等固体颗粒的速度大小相等、方向相同。壁面条件为 Wall 壁面, 在 DPM 模型中, 采用 reflect 类型考虑颗粒发生的弹性碰撞。数值仿真中不同物性的粗煤气参数见表 2。

表 2 仿真参数
Tab.2 Simulation parameters

Model parameter	Parameter scope
Solid density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 200
Inlet velocity size $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10, 12.5, 15, 17.5, 20
Particle size $d/\mu\text{m}$	20-200
Particle mass flow rate $q/(10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1})$	2.5, 5, 7.5, 10, 12.5

2 井口装置流场数值仿真结果及分析

2.1 冲蚀磨损位置分析

为确定煤渣固体颗粒对井口装置的主要冲蚀区域, 取仿真参数来自加拿大天鹅山地下气化工程, 设置颗粒密度为 1 200 kg/m³, 颗粒粒径 $d=80 \mu\text{m}$, 流速为 $v=15 \text{ m/s}$ 。经过数值仿真分析, 冲蚀率云图及冲蚀角度预测如图 2 所示。可以看出, 固体颗粒对井口装置的主要冲蚀磨损区域在小四通和侧阀 I 的内部壁

表 1 产出气主要组分含量
Tab.1 Contents of main components of produced gas

Parameters	Components/%					Temperature/ ℃	Pressure/ MPa
	CH ₄	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O		
Crude gas	16.1	4.1	8.1	21.2	50.5	350	6

面。其中, 对比图 1b 可以看出, 煤灰、煤渣等固体颗粒对小四通的内壁面冲蚀磨损最严重, 其次在侧阀 I 的上部壁面冲蚀磨损也较严重, 而法兰接头和侧阀 II 内壁面与其他部位冲蚀磨损相对较轻。

为进一步分析以上现象, 从数值仿真软件中导出离散相固体颗粒运动轨迹, 如图 3 所示。可以看出, 在弯头区域 (即小四通处), 由于横截面积变小, 并发生转向, 使得颗粒对壁面的冲击角、速度较大, 导致冲蚀磨损较为严重。固体颗粒在撞击侧阀 I、法兰接头和侧阀 II 壁面时, 冲击角依次减小, 并且由于颗粒间相互碰撞, 致使速度减小, 因此受到冲蚀磨损依次减小。在竖直管段, 由于流场变化较小, 几乎没有受到冲蚀作用。

2.2 颗粒粒径影响分析

井口装置产出的粗煤气中, 煤渣等固体颗粒粒径对冲蚀磨损有重要的影响。在分析固体颗粒粒径对冲蚀影响规律时, 取粗煤气流速为 $v=15 \text{ m/s}$, 固体颗粒质量流量为 $q=7.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 。根据实际工况, 固体颗粒粒径 d 为 20~200 μm , 以 20 μm 为梯度设置 10 个模型, 冲蚀率云图如图 4 所示。气固两相流对井口装置的最大冲蚀率与颗粒粒径关系曲线如图 5 所示。

从图 4 可以看出, 固体颗粒粒径从 20 μm 到 200 μm , 整体上小四通内壁面受到的冲蚀问题最为严重。颗粒粒径为 180 μm 时, 最大冲蚀率最小, 为 $7.3 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 颗粒粒径为 40 μm 时, 最大冲蚀率最大, 为 $8.7 \times$

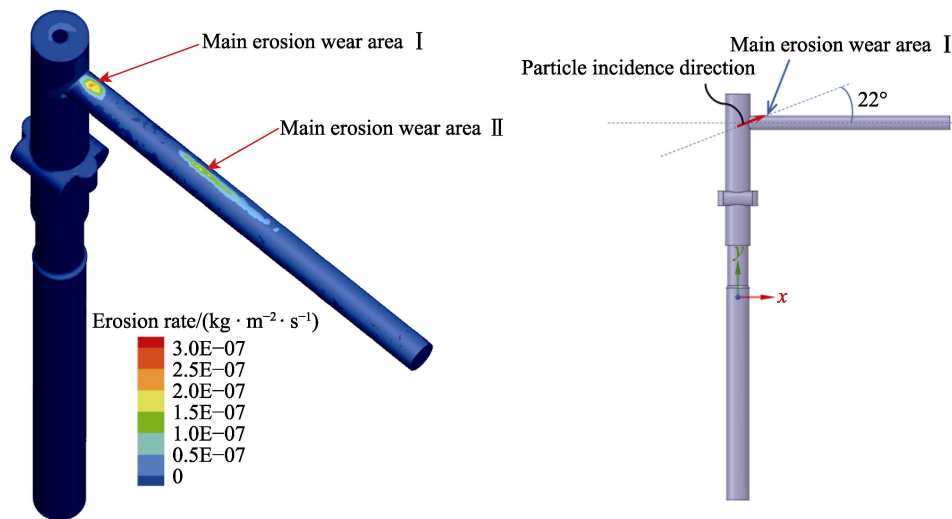


图 2 井口装置冲蚀云图及冲蚀角度预测
Fig.2 Erosion pattern and erosive angle prediction of wellhead device

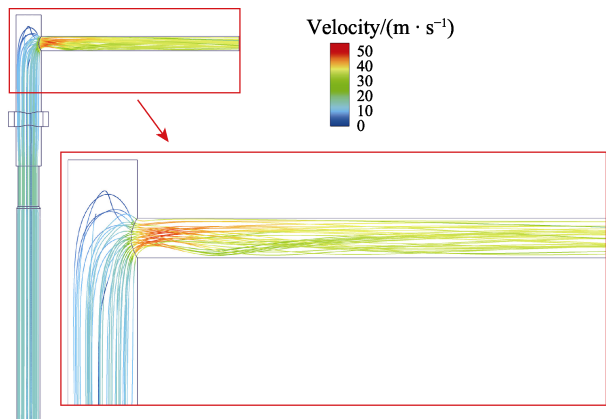


图 3 固体颗粒运动轨迹
Fig.3 Motion trajectory of solid particles

$10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是粒径为 $180 \mu\text{m}$ 时的 11.9 倍。侧阀 I 内壁面受到的冲蚀问题较为严重, 颗粒粒径为 $40 \mu\text{m}$ 时, 最大冲蚀率最小, 为 $4.3 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 颗粒粒径为 $120 \mu\text{m}$ 时, 最大冲蚀率最大, 为 $5.7 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是粒径为 $40 \mu\text{m}$ 时的 13.3 倍。法兰接头和侧阀 II 均在颗粒粒径为 $80 \mu\text{m}$ 时, 受到的冲蚀磨损最严重, 但相对于小四通和侧阀 I 来说, 磨损问题较轻。

分析图 5 中曲线, 在小四通和侧阀 I 上随着颗粒粒径逐渐增大, 最大冲蚀率均表现出先增大、后减小的趋势。产生上述现象的主要原因是, 在相同质量流量下, 煤渣等粒径较小时, 颗粒数目较多, 且在壁面处颗粒间相互碰撞, 减缓了冲蚀磨损。随着煤渣等固体颗粒粒径的增大, 单个颗粒的质量增大, 其所具有的动能增加, 使其能逐渐摆脱连续相的束缚, 加剧了对井口装置的冲蚀磨损。随着煤渣等固体颗粒粒径继续增大, 颗粒间的相互碰撞造成更多的能量损失, 在碰撞井口装置壁面时, 颗粒自身携带能量降低, 对井口装置壁面的冲蚀作用有所缓解。当煤渣等颗粒粒径超过临界直径 ($160 \mu\text{m}$) 后, 随着颗粒粒径的增大, 其自身的硬度随之降低, 颗粒相互碰撞过程中碎裂加剧, 其对井口装置的冲蚀磨损逐渐减小, 最大冲蚀率变化趋势逐步平缓。

2.3 质量流量影响分析

煤渣等固体颗粒质量流量对冲蚀磨损有重要的影响, 在分析固体颗粒质量流量对冲蚀影响规律时, 取粗煤气流速为 $v=15 \text{ m/s}$, 固体颗粒粒径为 $d=60 \mu\text{m}$ 。根据实际工况, 固体颗粒质量流量 q 为 $2.5 \times 10^{-4} \sim$

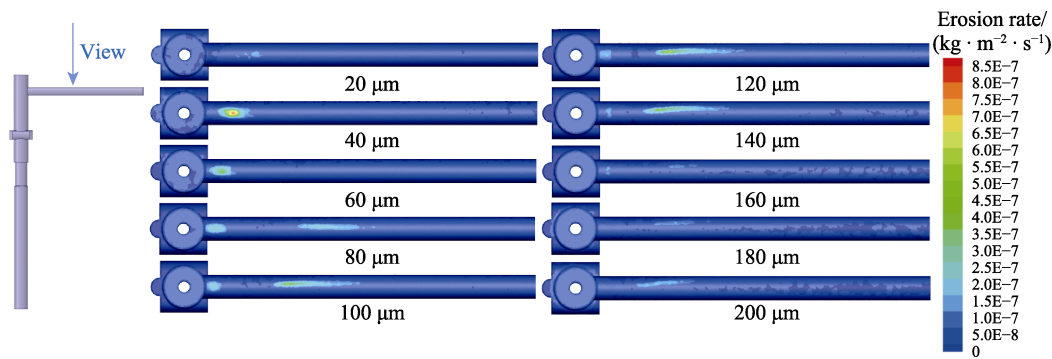


图 4 不同颗粒粒径冲蚀云图
Fig.4 Erosion pattern of the different particle sizes

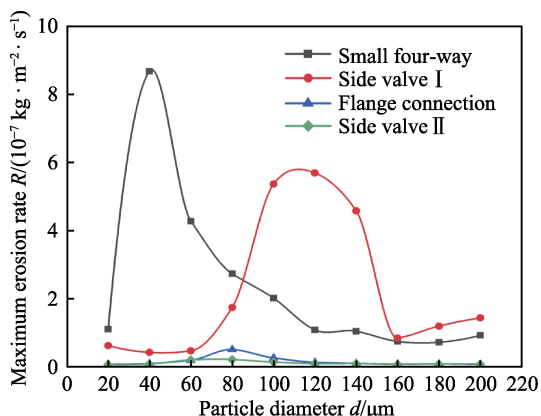


图 5 最大冲蚀率与不同颗粒粒径关系曲线
Fig.5 Relationship between the maximum erosion rate and different particle sizes

$12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, 以 $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 为梯度设置 5 个模型, 其冲蚀率云图如图 6 所示。气固两相流对井口装置的最大冲蚀率与不同颗粒质量流量关系曲线如图 7 所示。

由图 7 可知, 固体颗粒质量流量为 $2.5 \times 10^{-4} \sim 12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, 整体上, 小四通内壁面受到的冲蚀问题最为严重, 并且随着质量流量的增加最大冲蚀率均匀增大。在质量流量为 $12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时, 最大冲蚀率最大, 为 $7.3 \times 10^{-7} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$, 是质量流量为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时的 5.2 倍。侧阀 I 在质量流量为 $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时, 最大冲蚀率最大, 为 $1.2 \times 10^{-7} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$, 是质量流量

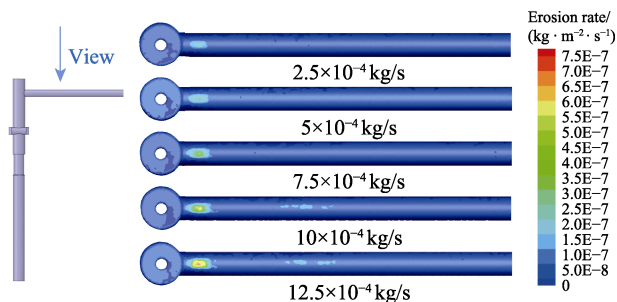


图 6 不同固体颗粒质量流量冲蚀云图
Fig.6 Erosion pattern of mass flow rate of different solid particles

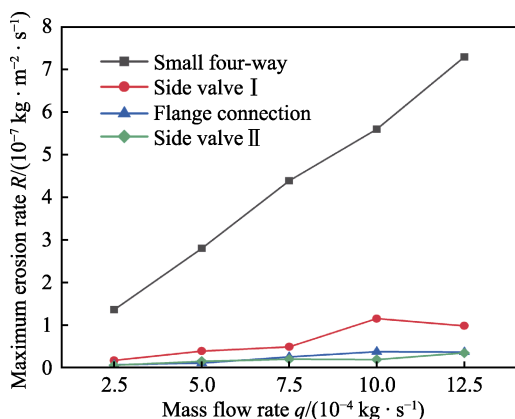


图 7 最大冲蚀率与不同颗粒质量流量关系曲线
Fig.7 Relationship between the maximum erosion rate and the mass flow rate of different particles

为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时的 7 倍。法兰接头和侧阀 II 壁面冲蚀磨损程度随着质量流量的增加, 最大冲蚀率均增大, 但变化程度均较小。

分析不同颗粒质量流量对最大冲蚀率的影响可以看出, 在颗粒粒径和流速不变的情况下, 颗粒质量流量从 $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 变化到 $12.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 的过程中, 由于控制颗粒粒径和流速不变, 单位时间内通过的固体颗粒数增多。从图 6 中明显可以看出, 随着颗粒质量流量的增大, 冲蚀面积逐渐增大, 在小四通上的最大冲蚀率与颗粒质量流量近似呈正比例关系。从图 6 可以看出, 在颗粒质量流量从 $7.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 变化到 $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 的过程中, 侧阀 I 壁面受到的冲蚀磨损明显加剧。从图 7 曲线中也能明显看出, 曲线出现明显上升, 由于单位时间通过井口装置的固体颗粒数增多, 有更多的颗粒冲射到侧阀 I 的壁面, 使其磨损加剧。

2.4 粗煤气产量 (流速) 影响分析

固体颗粒粒径对冲蚀磨损有重要的影响, 在分析固体颗粒粒径对冲蚀影响规律时, 取固体颗粒粒径为 $d=60 \mu\text{m}$, 固体颗粒质量流量为 $q=7.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 。根据实际工况, 粗煤气流速 v 为 $10 \sim 20 \text{ m/s}$, 以 2.5 m/s 为梯度设置 5 个模型, 其冲蚀率云图如图 8 所示。气固两相流对井口装置的最大冲蚀率与不同粗煤气流速关系曲线如图 9 所示。

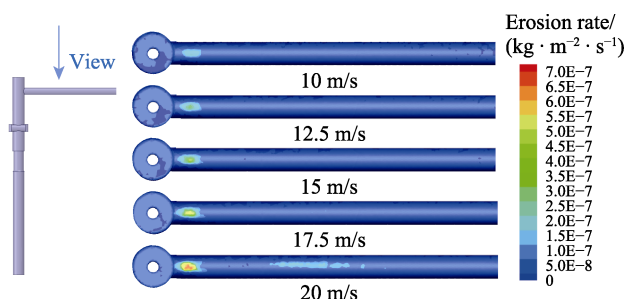


图 8 不同粗煤气流速冲蚀云图
Fig.8 Erosion pattern of different crude gas velocities

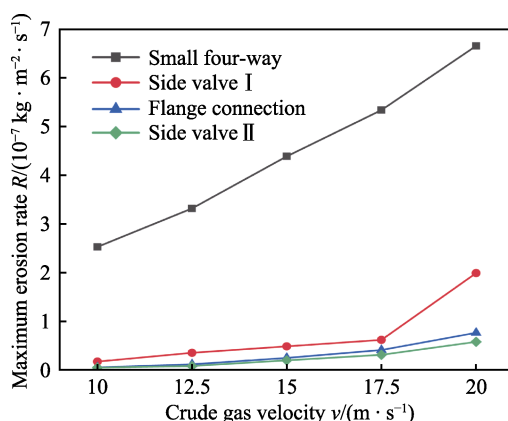


图 9 最大冲蚀率与不同粗煤气流速关系曲线
Fig.9 Relationship between the maximum erosion rate and different crude gas velocities

由图 9 可以看, 粗煤气流速为 10~20 m/s, 整体上, 小四通内壁面受到的冲蚀问题最为严重, 并且随着粗煤气流速的增加, 最大冲蚀率均匀增大。在粗煤气流速为 20 m/s 时, 最大冲蚀率最大, 为 6.7×10^{-7} kg/(m²·s), 是粗煤气流速为 10 m/s 时的 2.7 倍。侧阀 I 在粗煤气流速为 20 m/s 时, 最大冲蚀率最大, 为 2.0×10^{-7} kg/(m²·s), 是粗煤气流速为 10 m/s 时的 11.7 倍, 并且在 17.5~20 m/s 出现突变。法兰接头和侧阀 II 壁面冲蚀磨损程度随着粗煤气流速的增加, 最大冲蚀率均增大, 分别增加 13.8、11.3 倍, 但受冲蚀程度均较小。

分析不同粗煤气流速对最大冲蚀率的影响可以看出, 在颗粒粒径和颗粒质量流量不变的情况下, 粗煤气流速从 10 m/s 变化到 20 m/s 的过程中, 由于控制颗粒粒径和颗粒质量流量不变, 单个固体颗粒所具有的动能增加, 其撞击壁面带来的磨损也明显加剧。从图 8 中明显可以看出, 随着粗煤气流速的增大, 冲蚀面积逐渐增大。粗煤气流速从 17.5 m/s 变化到 20 m/s 的过程中, 侧阀 I 壁面受到冲蚀磨损明显加剧, 并且从图 9 曲线中也能明显看出, 曲线出现突变明显上升。由于单个固体颗粒所具有的动能增加, 在撞击角度很大的情况下也带来了较大的磨损。

3 冲蚀实验

3.1 实验装置

在弯头区域(小四通)粗煤气携带的颗粒流向发生变化, 导致颗粒以不同入射角度冲蚀该区域, 造成该区域冲蚀严重。为了验证颗粒入射角变化对冲蚀影响, 本研究设计了一套实验装置。气固冲蚀实验台架及实验原理如图 10 所示, 其主要由空气压缩机、输气管道、冲蚀台架、试样夹具以及储砂罐组成。气固冲蚀实验台架工作原理为, 空气压缩机为气源, 产生高速气体进入管道中, 储砂罐从旁路管道加入固相颗粒与高速气流混合, 随后气固两相混合物在冲蚀腔内由固定喷嘴射出, 并与安装好的实验试样撞击。

3.2 实验样品

选取天然细白沙作为冲蚀介质进行冲蚀实验。实验选用 12Cr13 加工实验试样, 材料试样尺寸为 100 mm×80 mm×3 mm。实验试样的硬度为 165HV, 表面粗糙度 *Ra* 为 1.6 μm。

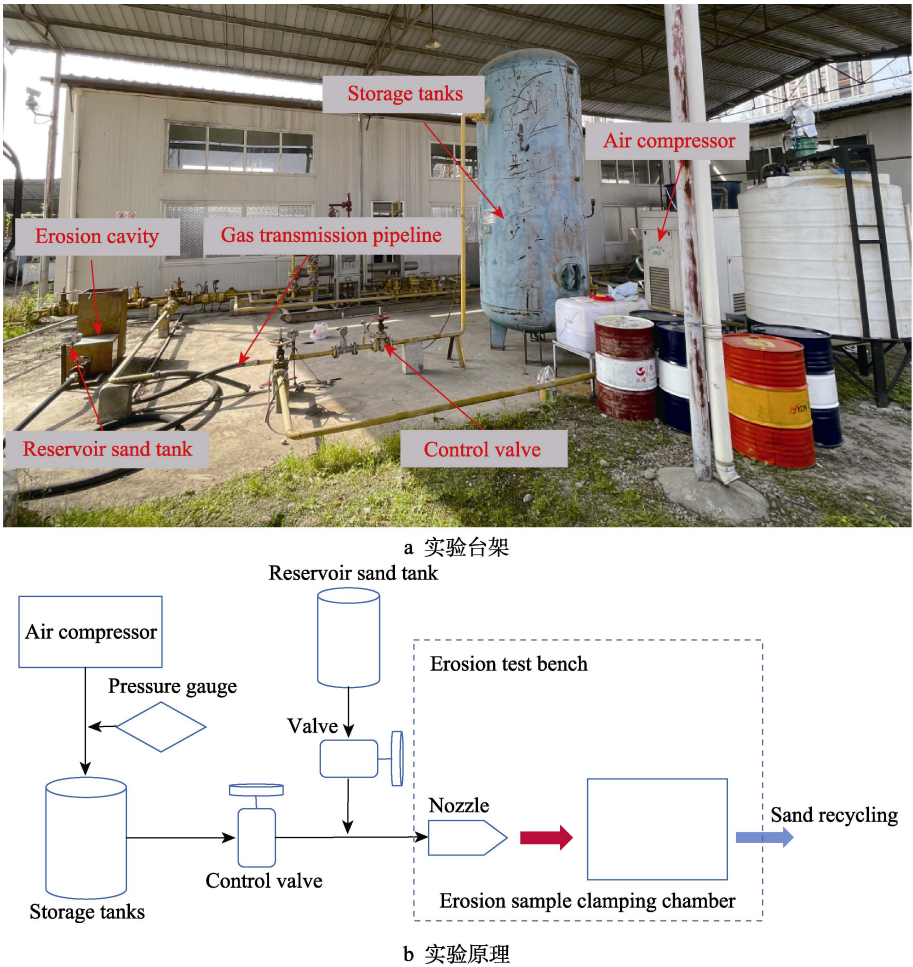


图 10 气固冲蚀实验
Fig.10 Gas-solid erosion test: a) test bench; b) experimental schematic diagram

3.3 实验步骤

为了更好地描述试件表面的冲蚀特性,对试件表面进行打磨,直至被冲蚀表面光滑平整,以尽量减少表面杂质对实验的影响。首先,将抛光后的试件安装在夹具中心,使待冲击试样的表面始终在喷嘴的喷射中心。然后根据实验设计的冲击角将夹具安装在侵蚀室中。本实验在条件允许的范围内,选择冲击角分别为 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 。

根据实验系统的具体工作原理,设置空压机的压力为 0.8 MPa ,喷嘴出口的速度为 1.5 m/s ,喷嘴与试件的距离为 50 mm ,冲蚀时间为 5 min 。选取试件的冲蚀角分别为 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 。首先在除砂罐中放入一定量的沙砾,按设定的冲击角度安装试样。接着打开空压机,待排气压力和排气流量达到实验要求且稳定后,让沙砾与高速气流混合冲击试件。最后,在冲蚀室内取出试件,并回收沙砾。

在处理实验结果的时候,取下试样后,先用细软毛刷轻轻清扫试件表面的沙砾,然后通过称量法得到各试件表面清理前后的质量损失量,每次称量至少重复 3 次,取冲蚀后试件质量的平均值,以保证冲蚀结果的准确性。通过冲蚀率 η_{ER} 来衡量材料冲蚀情况,如式 (1) 所示^[26]。

$$\eta_{\text{ER}} = \frac{m_t}{m_p} = \frac{m_{t1} - m_{t2}}{m_p} \quad (9)$$

式中: m_t 为冲蚀实验前后实验试样损失的质量; m_{t1} 为冲蚀实验前实验试样的质量; m_{t2} 为冲蚀实验后实验试样的质量; m_p 为本次实验所用砂砾总质量。

3.4 冲蚀角度对冲蚀的影响及分析

为了研究不同冲蚀角度对材料的影响规律,本实验选择 20° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 作为研究角度。实验结束后,用细软毛刷轻轻清扫试件表面的沙砾。冲蚀实验结果如图 11 所示。整理实验得到的数据后见表 3,经过计算得到的冲蚀率曲线如图 12 所示。

从图 12 可以看出,冲蚀角度为 20° 、 30° 时,冲蚀率一样,为 $4.16 \times 10^{-4}\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;当冲蚀角度继续增大到 90° 时,冲蚀率减小到 $2.37 \times 10^{-4}\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。可以看出,冲蚀角度在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时,试样受到的冲蚀最为严重。参照如图 2 所示的井口装置冲蚀云图及冲蚀角度预测,可以看出,前文仿真分析中受冲蚀最严重的区域,颗粒射入角度基本在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。结合冲蚀实验结论,可进一步验证数值仿真分析对冲蚀最严重区域预测的正确性。通过对易受冲蚀区域位置的正确预测,可以指导井口装置在加工过程中对该区域做强化处理,提升其使用寿命。

3.5 堆焊对冲蚀的影响及分析

为了验证对冲蚀严重区域做堆焊处理能够有效

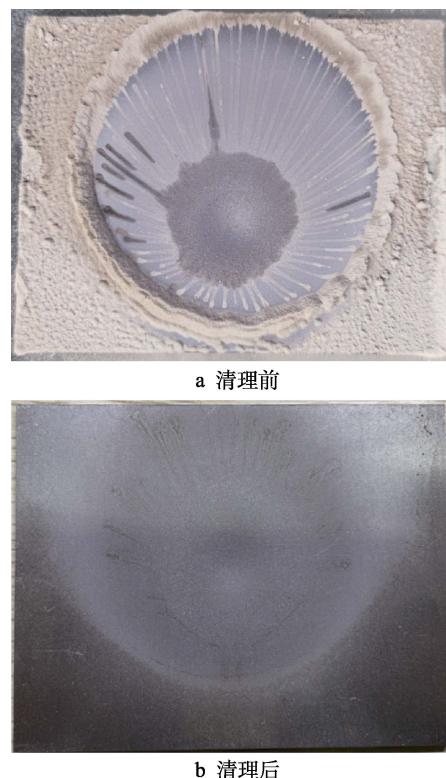


图 11 试件冲蚀实验结果对比

Fig.11 Comparison of erosion test results of specimens: a) before surface cleaning; b) after surface cleaning

表 3 冲蚀角度对冲蚀率的影响实验数据
Tab.3 Experimental data on effect of erosion angle on erosion rate

Erosion angle/($^\circ$)	20	30	45	60	90
Quality loss/g	1.4	1.4	1.3	1.1	0.8

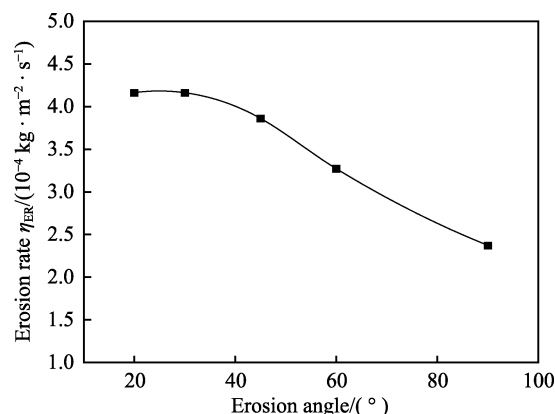


图 12 冲蚀角度对冲蚀率的影响
Fig.12 Effect of erosion angle on erosion rate

地缓解冲蚀作用对井口装置材料的磨损,本次实验在前述试样尺寸的基础上对试样做堆焊处理,并对实验试样是否做堆焊处理进行冲蚀实验对比分析。堆焊所使用的材料为 718 不锈钢,堆焊厚度为 5 mm ,堆焊试件硬度为 380 HV ,表面粗糙度 R_a 为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 。其实验结果如图 13 所示。

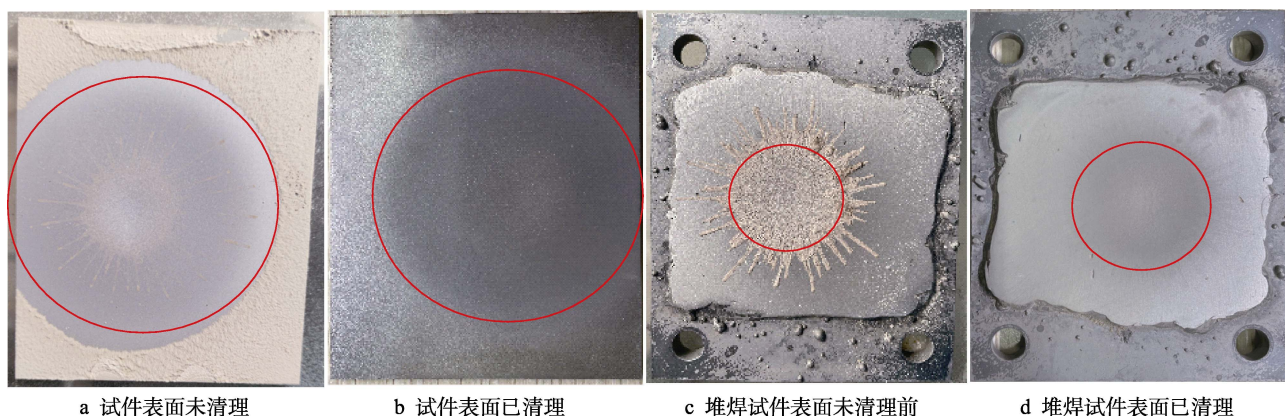


图 13 试件堆焊前后冲蚀实验结果对比

Fig.13 Comparison of erosion test results before and after surfacing of specimens: a) surface of the specimen is not cleaned; b) surface of the specimen has been cleaned; c) surface of surfacing specimen is not cleaned; d) surface of surfacing specimen has been cleaned

观察图 13 中可以看出, 做堆焊处理后, 受冲蚀影响区域明显减小, 冲蚀率为 $0.89 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 小于未做堆焊处理时的冲蚀率 $2.37 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。通过实验, 进一步验证了对井口装置严重冲蚀区域做堆焊处理能够有效地减轻气固两相流对井口装置的磨损。

4 结论

采用 CFD 模型与 DPM 数值方法耦合, 预测了煤渣等固相颗粒在气相流场中的运动。在此基础上, 针对固体颗粒粒径、固体颗粒质量流量以及粗煤气流速对装置冲蚀的影响进行了数值仿真。根据结果分析, 可以得出以下结论:

1) 小四通内壁面处, 固体颗粒速度最快, 壁面冲击角度最大, 此处冲蚀磨损最严重。侧阀 I 上部壁面处, 固体颗粒速度较快, 壁面冲击角度较小, 其冲蚀磨损也较为严重。法兰接头和侧阀 II 壁面, 固体颗粒速度、壁面冲击角度均比较小, 受到冲蚀作用较小, 而在竖直接管段, 流场变化较小, 几乎没有受到冲蚀作用。

2) 控制质量流量和流速不变, 煤渣等固体颗粒粒径较小时, 颗粒数目较多, 且在壁面处颗粒间相互碰撞减缓了冲蚀磨损。随着颗粒粒径的增加, 其所具有的动能增加, 加剧了对井口装置的冲蚀磨损。随着颗粒粒径继续增加, 颗粒间的相互碰撞造成更多的能量损失, 井口装置壁面的冲蚀作用有所缓解。当粒径超过临界直径 ($160 \mu\text{m}$) 后, 颗粒硬度降低, 颗粒相互碰撞过程中碎裂加剧, 其对井口装置的冲蚀磨损逐渐减小。

3) 在控制变量的情况下, 增加颗粒质量流量或增加粗煤气流速, 都会加大固体颗粒对井口装置的冲蚀磨损。控制颗粒粒径和流速不变时, 随着颗粒质量流量增加, 固体颗粒对井口装置流场壁面冲蚀面积及最大冲蚀率均逐渐增大。控制颗粒粒径和颗粒质量流量不变的情况下, 随着粗煤气流速增加, 由于单个固

体颗粒所具有的动能增加, 冲蚀面积和最大冲蚀率明显增大。

4) 通过冲蚀实验发现, 冲蚀角度为 20° 、 30° 时, 冲蚀率最大, 验证了数值仿真分析对冲蚀严重区域的预测的正确性。另外, 堆焊处理能够有效地减轻气固两相流对井口装置的冲蚀。在井口装置加工时, 应对重点冲蚀区域做堆焊处理, 并且在进行煤炭地下气化的过程中, 对小四通和侧阀 I 进行重点监测, 防止这些重点冲蚀区域被磨损到危险厚度。

参考文献:

- [1] XIE Jun, XIN Lin, HU Xiang-ming, et al. Technical Application of Safety and Cleaner Production Technology by Underground Coal Gasification in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119487.
- [2] WIATOWSKI M, KAPUSTA K. Evolution of Tar Compounds in Raw Gas from a Pilot-Scale Underground Coal Gasification (UCG) Trial at Wieczorek Mine in Poland[J]. Fuel, 2020, 276: 118070.
- [3] LI Huai-zhan, ZHA Jian-feng, GUO Guang-li, et al. Improvement of Resource Recovery Rate for Underground Coal Gasification through the Gasifier Size Management[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120911.
- [4] ZAGORŠČAK R, SADASIVAM S, THOMAS H R, et al. Experimental Study of Underground Coal Gasification (UCG) of a High-Rank Coal Using Atmospheric and High-Pressure Conditions in an Ex-Situ Reactor[J]. Fuel, 2020, 270: 117490.
- [5] 杨兰和, 梁杰, 余力, 等. 徐州马庄煤矿煤炭地下气化试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 86-90.
YANG Lan-he, LIANG Jie, YU Li, et al. The Test Study on Underground Coal Gasification at Mazhuang Coal Mine in Xuzhou[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 86-90.
- [6] 胡鑫蒙, 赵迪斐, 郭英海, 等. 我国煤炭地下气化技术

- (UCG)的发展现状与展望——来自首届国际煤炭地下气化技术与产业论坛的信息[J]. 非常规油气, 2017, 4(1): 108-115.
- HU Xin-meng, ZHAO Di-fei, GUO Ying-hai, et al. Present Development Situation and Prospect of Underground Coal Gasification(UCG)Technology in China—Information from the 1st International Academic Forum for Underground Coal Gasification Technology and Industry[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(1): 108-115.
- [7] 杨甫, 段中会, 马东民, 等. 煤炭地下气化技术进展[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 71-85.
- YANG Fu, DUAN Zhong-hui, MA Dong-min, et al. New Development of Coal Gasification Technology[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(20): 71-85.
- [8] 梁杰, 王喆, 梁颀, 等. 煤炭地下气化技术进展与工程科技[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 393-402.
- LIANG Jie, WANG Zhe, LIANG Kun, et al. Progress and Technology of Underground Coal Gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 393-402.
- [9] PARSI M, NAJMI K, NAJAFIFARD 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 and Engineering, 2014, 21: 850-873.
- [10] ZHU Hong-jun, WANG Jian, BA Bin, et al. Numerical Investigation of Flow Erosion and Flow Induced Displacement of Gas Well Relief Line[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 37: 19-32.
- [11] 彭文山, 曹学文. 基于气-固双向耦合的输气管道最大冲蚀角度预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 110-118.
- PENG Wen-shan, CAO Xue-wen. Prediction on the Maximum Erosion Angle of Gas Pipelines Based on the Gas-Solid Bidirectional Coupling[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(2): 110-118.
- [12] 艾志久, 孟璋劫, 柴希伟, 等. 整体式 Y 型采气井口装置冲蚀规律及量化计算[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 54-58.
- AI Zhi-jiu, MENG Zhang-jie, CHAI Xi-wei, et al. Erosion Characteristics and Quantitative Calculation of Y-Type Gas Production Wellhead[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(11): 54-58.
- [13] 张恩搏, 曾德智, 李双贵, 等. 高压高产气井应急试采过程中采气树抗冲蚀性能分析[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 183-190.
- ZHANG En-bo, ZENG De-zhi, LI Shuang-gui, et al. Erosion Resistance of Gas Production Tree during Emergent Trial Production of High-Pressure and High-Output Gas Wells[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 183-190.
- [14] 王宇, 何琪, 于飞, 等. 组合弯头内气固两相流动磨损特性的数值模拟与结构优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 832-839.
- WANG Yu, HE Qi, YU Fei, et al. Numerical Simulation of the Erosion Characteristics and Structure Optimization of Elbows Connection for Gas-Solid Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 832-839.
- [15] 陈璟, 杨占君, 郑准备, 等. U 型弯头内气固两相流动磨损特性数值模拟[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 91-95.
- CHEN Jing, YANG Zhan-jun, ZHENG Zhun-bei, et al. Numerical Investigation on Erosion Characteristics of U-Type Elbow Suffering Gas-Solid Two-Phase Flow[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 91-95.
- [16] 吴贵阳, 谢明, 胡红祥. 页岩气采气管线材料 L360N 钢的含砂冲蚀行为研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(5): 63-69.
- WU Gui-yang, XIE Ming, HU Hong-xiang. Study on Sand Erosion Behavior of L360N Pipeline Steel in Shale Gas Production[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2020, 49(5): 63-69.
- [17] 王锦, 周正萍. Boussinesq 方程的研究进展[J]. 水运工程, 2011(12): 11-18.
- WANG Jin, ZHOU Zheng-ping. Development of Research on Boussinesq Equation[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(12): 11-18.
- [18] 赵永志, 程易, 丁宇龙, 等. 下行床气粒流动行为的 Eulerian-Lagrangian 模拟[J]. 化工学报, 2007, 58(5): 1163-1171.
- ZHAO Yong-zhi, CHENG Yi, DING Yu-long, et al. Eulerian-Lagrangian Simulation of Hydrodynamics of Gas-Solid Flows in Downer[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58(5): 1163-1171.
- [19] 刘向军, 石磊, 徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状[J]. 计算力学学报, 2007, 24(2): 166-172.
- LIU Xiang-jun, SHI Lei, XU Xu-chang. Activities of Dense Particle-Gas Two-Phase Flow Modeling in Eulerian-Lagrangian Approach[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2): 166-172.
- [20] 李娟, 闫小康, 李晓恒, 等. 旋流器内部流场的数值模拟方法研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3250-3257.
- LI Juan, YAN Xiao-kang, LI Xiao-heng, et al. Numerical Simulation on Internal Fluid Field in Cyclone[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 3250-3257.
- [21] 汪飞, 李义天, 葛华, 等. 同位网格上 SIMPLE 算法收敛特性的 Fourier 分析[J]. 计算力学学报, 2013, 30(1): 10-15.
- WANG Fei, LI Yi-tian, GE Hua, et al. Fourier Analysis of the Convergence Behaviors of SIMPLE Algorithm on Collocated Grid[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(1): 10-15.
- [22] 易先中, 彭灼, 周元华, 等. 高压压裂液对 JY-50 压裂弯管冲蚀行为影响的数值模拟[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 144-151.
- YI Xian-zhong, PENG Zhuo, ZHOU Yuan-hua, et al. Numerical Simulation for Erosion Behavior of High-Pressure Fracturing Fluids on JY-50 Fracturing Bend Pipe[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 144-151.