

考虑气固两相流的球阀冲蚀磨损失效研究

施宇恒¹, 李 春², 王春生³, 闫阳天²

(1. 中国石化上海高桥石油化工有限公司, 上海 200093; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
3. 东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 针对管道气体携带杂质对球阀冲蚀磨损导致其失效的问题, 采用欧拉-拉格朗日流体描述方法, 运用 Comsol Multiphysics 软件对气固两相流球阀冲蚀磨损进行数值模拟计算, 研究球阀流场特征、冲蚀磨损分布、不同参数对冲蚀磨损影响及冲蚀率随参数变化趋势, 并把模拟结果与工程现场冲蚀球阀对比, 验证模拟的准确性。结果表明: 球阀内流速在一定范围内改变, 产生的二次流漩涡是导致冲蚀的主要因素; 球阀冲蚀磨损随开度减小, 随流速、粒径和质量流率增大而增加, 呈非线性正相关。

关 键 词: 球阀; 气固两相流; 失效; 冲蚀磨损; 数值模拟

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.07.016

[引用本文格式] 施宇恒, 李 春, 王春生, 等. 考虑气固两相流的球阀冲蚀磨损失效研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 116-124. SHI Yu-heng, LI Chun, WANG Chun-sheng, et al. Research on erosion and wear failure of ball valve based on comsol multiphysics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 116-124.

Research on Erosion and Wear Failure of Ball Valve based on COMSOL Multiphysics

SHI Yu-heng¹, LI Chun², WANG Chun-sheng³, YAN Yang-tian²

(1. Sinopec Shanghai Gaoqiao Petrochemical Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, Post Code: 200093;
3. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, China, Post Code: 163318)

Abstract: In view of the erosion and wear failure of the ball valve caused by the impurity carried by the pipeline gas, the Eulerian-Lagrangian fluid description method was used, and COMSOL Multiphysics software was applied to numerically simulate and calculate the erosion and wear of the gas-solid two-phase flow ball valve, and study its flow field characteristics, the distribution of erosion and wear, the influence of different parameters on erosion and wear and the variation trend of erosion rate with parameters. The simulation results are compared with the engineering site erosion ball valve to verify the accuracy of the simulation. The results show that the flow velocity in the ball valve changes within a certain range, and the secondary flow vortex is the main factor leading to erosion. Ball valve erosion and wear reduces with opening, while increases with the increase of flow velocity, particle size and mass flow rate, showing a non-linear positive correlation.

Key words: ball valve, gas-solid two-phase flow, failure, erosion and wear, numerical simulation

引 言

冲蚀磨损是松散颗粒形式的液体或固体按一定速度和角度对材料表面造成损耗的一种现象^[1-4]。该现象极大影响工业元件使用寿命,严重时甚至导致元件失效并造成泄漏。据统计,冲蚀磨损约占工业生产中磨损破坏的 80%^[5]。

近年来,国内外专家学者通过数值模拟方法对阀门冲蚀磨损展开了大量的分析研究。刘先冬等人^[6]采用控制变量法对金属硬密封球阀进行液固两相流冲蚀数值模拟分析,分析不同开度对其冲蚀影响并确定冲蚀磨损较严重位置。张一帆等人^[7]通过 CFD-DEM 方法研究稀相气固两相流中闸阀内部颗粒流动特性及壁面冲蚀磨损分布情况,结果表明,开度变小、速度增大会使颗粒速度增大,对壁面的冲蚀磨损程度也会变大。李长俊等人^[8]采用 CFD-DPM 方法对旋塞球阀不同结构参数进行研究,结果表明,颗粒与气流分离并在壁面产生 3 处冲蚀磨损。Weickert 等人^[9]基于动网格方法模拟冲蚀过程中流场与颗粒运动轨迹的演变过程,并提出一种描述壁面进化的方法,但只适用于二维模型。Zhu 等人^[10]基于流固耦合方法对针型阀壁面磨损率与流动产生的壁面变形展开研究,结果发现,针型阀尖端部位为高磨损区域,粒径和流量对尖端部位变形影响较为显著。

球阀在石油天然气行业中使用极为广泛,天然气长输管道中的颗粒粉尘等杂质,在高速气流携带下将对球阀阀芯造成冲蚀磨损,破坏球阀的密封性,导致气体泄漏,对工业生产造成极大危害^[11-12]。因此,研究气固两相流对球阀的冲蚀情况极其重要^[13-14]。

然而,目前对于气固两相流冲蚀磨损的研究大多基于直管、弯管和 T 型管等,而针对球阀气固两相流冲蚀磨损的研究相对较少。本文结合现场实际工况数据对天然气管道球阀冲蚀磨损问题采用有限元软件 Comsol Multiphysics 进行数值模拟^[15],分析不同参数对球阀冲蚀磨损与冲蚀率变化趋势的影响,为更好地预测球阀冲蚀磨损状况、提高球阀使用寿命提供理论依据和实现途径。

1 物理模型

选用固定金属球阀,球阀结构如图 1 所示。其中,管道外径 711 mm,壁厚 16 mm,阀门内径取 679 mm。同时,为保证管内湍流充分发展,使模拟结果更接近实际工况,更好地分析阀内流场变化特征,将阀门前后进行延长处理,前后各延长 100 mm,简化后模型的剖面如图 2 所示。

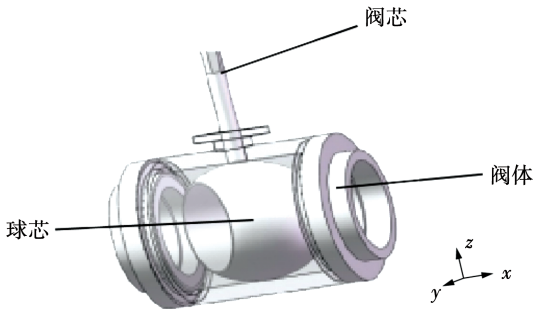


图 1 球阀结构图
Fig.1 Structure diagram of ball valve

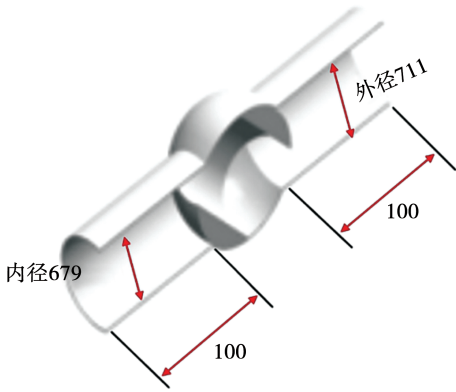


图 2 球阀剖面图(mm)
Fig.2 Profile of ball valve(mm)

2 边界条件及数学模型

2.1 边界条件

根据现场生产中的实际工况确定模拟参数条件,选用开度为 50% 的工况条件,忽略阀腔间隙流体以及阀座等影响,连续相为天然气,离散相为颗粒,入口和出口分别为速度入口及压力出口,球阀及管道材质选用碳钢材质。其他计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数表
Tab. 1 Calculation parameter table

参数	数值
流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	7
质量流率/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.002
天然气密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.002
气相动力粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	1.1067×10^{-5}
颗粒密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 750
粒径/ μm	180
杨氏模量/Pa	2.0×10^{11}
碳钢密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7 850
泊松比	0.3

2.2 流体控制方程

流体力学三大控制方程包括:质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。本文研究对象球阀内部流体为不可压缩流体,热量交换很小。因此,忽略能量守恒方程。

任何流动都必须符合质量守恒定律,其描述为:入口处单元体质量流等于出口处单元体质量流加单元体在流道内部的质量变化率,方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \tag{1}$$

式中: ρ —密度; t —时间; u —速度矢量。

动量守恒定律是牛顿第二定律的变形,其描述为:微元体中流体的动量对时间的变化率等于微元体所受各种力之和,方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + p_x \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + p_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + p_z \end{aligned} \tag{2}$$

式中: p —流体微元体上的压力; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ —微元体表面所受粘性应力的分量; p_x, p_y, p_z —微元体上的压力。

2.3 湍流模型

$k-\omega$ 湍流模型作为低雷诺数模型,可与壁函数结合使用,且在多种流动状况下较 $k-\varepsilon$ 湍流模型具有更高的准确性,如腔体内部流动、强曲率流动及分

离流射流。球阀模型表现出强曲率流动,综合考虑模型精确度及计算量问题,选用 $k-\omega$ 湍流模型来求解更加合适^[16]。标准 $k-\omega$ 湍流模型方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + Y_k + S_k \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \end{aligned} \tag{3}$$

式中: G_k —层流速度梯度产生的湍动能; G_ω 湍流模型方程产生的湍动能; Γ_k, Γ_ω — k 和 ω 的扩散率; Y_k, Y_ω —扩散产生的湍流; S_k, S_ω —用户自定义源项。

2.4 颗粒轨道模型

离散相颗粒轨道模型在拉格朗日体系下的微分方程进行计算求解,单个颗粒受力通过牛顿第二定律求解得出,颗粒在流场中所受的惯性力等于颗粒所受各种力之和^[17]:

$$F_D + F_G + F_S + F_P + F_{VM} + F_B = m_p \frac{dv_p}{dt} \tag{4}$$

式中: F_D —曳力; F_G —重力; F_S —升力; F_P —压力梯度力; F_{VM} —虚假质量力; F_B —巴塞特力; m_p —粒子质量; V_p —粒子速度; t —时间。

2.5 冲蚀模型

E/CRC 模型在气固、气液两相流喷射模型计算中可以准确地描述颗粒流场分布情况,具有较高计算精度^[18]。因此,选用 E/CRC 模型来计算求解:

$$\begin{aligned} E_M &= \sum_i E_{M,j} \\ E_{M,j} &= CF_s (BH)^{-0.59} \left(\frac{V}{V_{\text{ref}}} \right)^n F(\alpha_j) \\ F(\alpha_j) &= \sum_{k=1}^5 A_k \alpha_j^k \end{aligned} \tag{5}$$

式中: E_M —冲蚀率; C —模型系数,默认值为 2.17×10^{-7} ;BH—表面材料的布氏硬度,默认值为 200; F_s —颗粒形状系数,默认值为 0.2; n —模型指数,默认值为 2.41; α —冲击角度; A —面积; V_{ref} —参考速度。

粒子碰撞过程将产生动能损失,粒子的反射速度总是低于入射速度,粒子—壁面碰撞回弹模型恢复系数和冲击角度之间的关系式为^[19]:

$$\begin{aligned} e_n &= \frac{v_{n_2}}{v_{n_1}} = 0.988 - 0.78\theta + 0.19\theta^2 - \\ &\quad 0.024\theta^3 + 0.027\theta^4 \\ e_t &= \frac{v_{t_2}}{v_{t_1}} = 1 - 0.78\theta + 0.84\theta^2 - 0.21\theta^3 + \\ &\quad 0.028\theta^4 - 0.022\theta^5 \end{aligned} \tag{6}$$

式中: e_n —法向恢复系数; e_t —切向恢复系数; v_{t_1} , v_{t_2} —碰撞前后切向粒子速度分量; v_{n_1} , v_{n_2} —碰撞前后法向粒子速度分量; θ —粒子碰撞角度; 角标 1, 2—碰撞前、后的条件。

3 求解设置及网格划分

3.1 求解设置

采用欧拉 - 拉格朗日流体描述方法^[20], 把流体看做欧拉体系下的连续介质, 把固体颗粒看做拉格朗日体系下的离散相颗粒。采用有限元软件 Comsol Multiphysics 开展流场 - 颗粒相互作用耦合数值模拟, 能较好地耦合离散相颗粒运动方程和连续相流体方程。选取壁函数对近壁面区域进行处理, 壁条件选用无滑移, 设置为反弹, 出口设置为消失, 湍流弥散模型选择离散随机游走, 稳态求解器选用分离求解器, 瞬态求解器选用全耦合求解, 持续迭代计算直至收敛, 完成计算。

3.2 网格划分

选取物理场控制网格序列进行网格划分, 带有自动壁处理功能的湍流模型可以生成比层流模型更细化的网格, 在保证计算结果精确的前提下, 可以有效减少内存需求。球阀网格划分如图 3 所示。划分后的网格平均单元质量为 0.84, 网格质量能够满足计算精度要求。

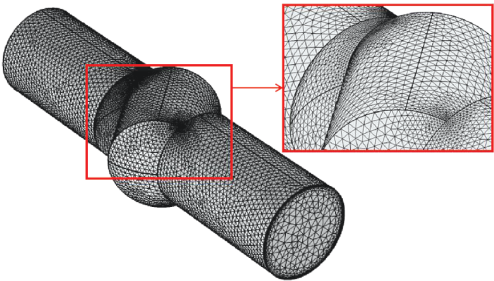


图 3 球阀网格划分图

Fig. 3 Diagram of ball valve mesh division

4 结果与分析

4.1 流场特征

球阀速度场流体速度变化云图, 如图 4 所示。当气体流到阀芯拐角处时, 流动方向被迫改变, 由于流道突然变窄气体在此处产生高速射流, 冲击到内通道壁面会产生较大的冲击力。阀芯内气流呈现极其紊乱状态, 并在壁面上产生反复的碰撞。因此, 阀内气体速度变化范围最大, 为 5 ~ 25 m/s。当气体到达出口时, 由于受到节流作用, 出口也将产生高速射流。阀内最高流速和最低流速分别产生在阀芯出口处和下游阀芯死角处。

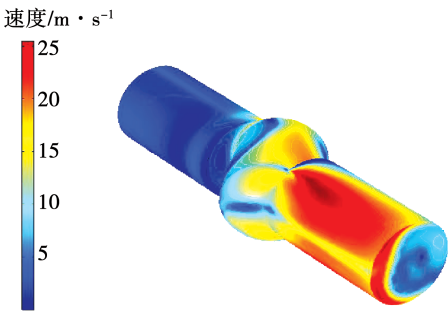


图 4 球阀速度场

Fig. 4 Diagram of ball valve velocity field

流体通过球阀时速度与旋涡变化情况如图 5 所示。球阀内出现多处二次流旋涡: 其中, 一处产生在阀芯入口拐角处, 由于气体流动时遇到阀芯阻挡产生回旋流动; 一处产生在阀芯内通道, 经入口节流后的气体突然加速以射流形式进入内通道, 并在通道内产生反复冲击流动达到高度紊乱状态, 此处旋涡最多、最复杂; 一处产生在阀芯出口拐角处, 阀芯内气体由于惯性作用从出口射出, 正对出口的管壁附近流体高速撞击, 而另一面阀芯拐角处会产生一个低压区, 在压差作用下产生二次流旋涡。从截面 2 到截面 4 旋涡尺度变得越来越大, 截面 4 出现了一对大小相等方向相反的旋涡, 阀体内部流动极为紊乱, 颗粒在其中做不规则运动, 此处冲蚀程度最严重。

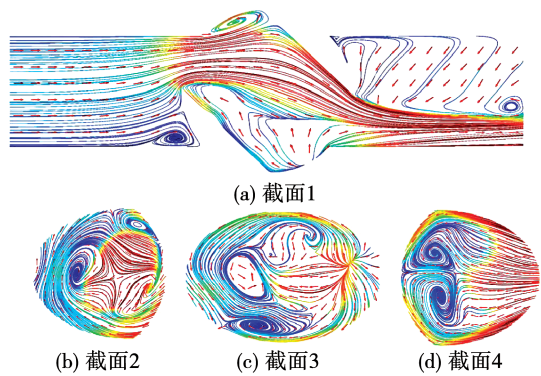


图 5 球阀流线图
Fig.5 Streamlines of ball valve

图 6 为球阀速度为 7 m/s 时的冲蚀磨损分布图。由图 6 可知,球阀大致会产生 A,B,C,D,E 和 F 6 处主要的冲蚀磨损区域。A 处阀芯迎流面,直接阻挡来流,在高速气流作用下,颗粒瞬间对迎流面产生冲击造成冲蚀磨损;B 处为撞击迎流面后反弹回来的颗粒撞击造成的冲蚀磨损;C 处为阀芯入口节流处产生的高速射流对内通道壁面直接冲击造成的冲蚀磨损;D 处为内通道内高度紊乱的颗粒在出口阀芯锐缘处产生反复碰撞冲击造成的冲蚀磨损;E 处为冲击到 D 处的气流产生反弹对壁面造成的冲蚀磨损;F 处为由于颗粒在 D 处二次反弹撞击造成的冲蚀磨损。

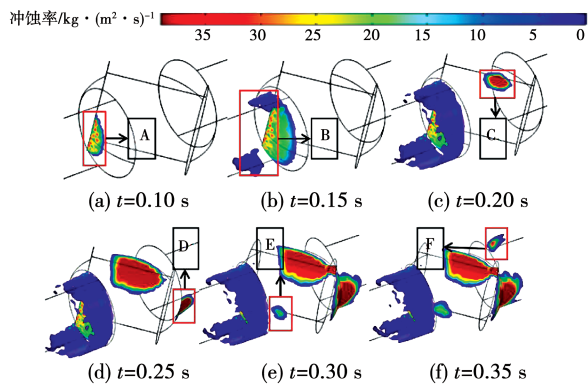


图 6 球阀冲蚀磨损分布图
Fig.6 Diagram of ball valve erosion and wear distribution

图 7 为粒子速度为 7 m/s 时颗粒运动轨迹可视化效果图。由图 7 可知,当球芯迎流面受到来流颗粒的冲击时,颗粒受到反弹向后推移做无规则运动,下游颗粒动能明显高于上游。原因是入口变窄流速变大,压力梯度变化较大,阀内气体流动高度紊乱,

颗粒在阀内做高度无规则运动,颗粒动能变大并不断撞击壁面从而对壁面造成冲蚀磨损,动能大的区域冲蚀磨损必然严重。

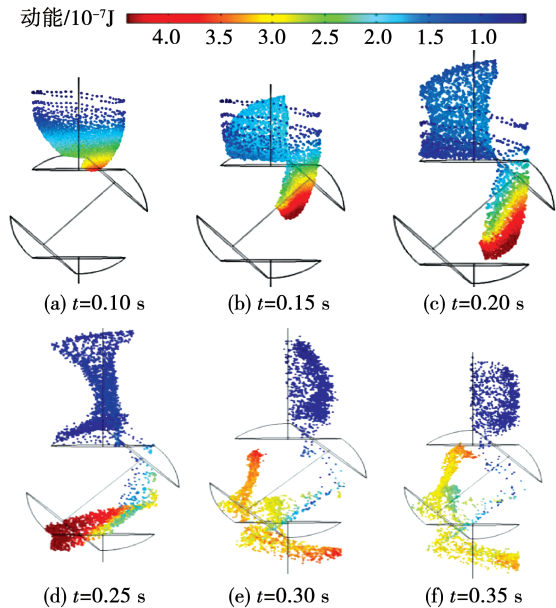


图 7 粒子轨迹图
Fig.7 Particle trajectory

4.2 球阀开度对冲蚀的影响

设定入口流速为 7 m/s,分别模拟了 10% ,30% ,50% ,70% 和 90% 5 种不同球阀开度时冲蚀磨损分布,如图 8 所示。随开度减小入口节流处流速增大,两端压力梯度变化较大,从而对球芯产生较大的冲击力,球阀冲蚀磨损随开度减小不断增大且冲蚀磨损位置更加集中。球芯迎流面冲蚀磨损面积随开度减小越来越大,当开度为 10% 时冲蚀磨损面积较大且呈现圆形,当开度为 90% 时阀芯轴线和上、下游管道轴线夹角较小,内通道和上、下游管道几乎成直线。因此,内通道壁面几乎没有产生冲蚀磨损。

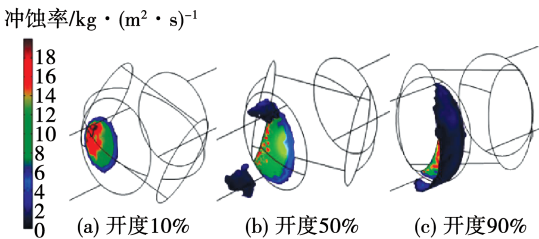


图 8 不同球阀开度下冲蚀磨损图
Fig.8 Diagram of ball valve erosion and wear at different openings

图 9 为不同开度下冲蚀率变化图。冲蚀率整体随开度减小而增大。在 10% 开度下冲蚀率最大,最大冲蚀率和平均冲蚀率分别为 6.68×10^{-8} 和 $6.05 \times 10^{-9} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在 10% ~ 30% 开度时冲蚀率急剧下降,在 30% ~ 70% 缓慢下降,70% 之后逐渐趋于平稳变化。

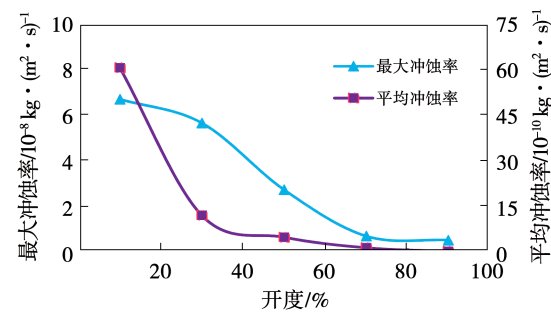


图 9 不同开度下冲蚀率变化图

Fig. 9 Variation diagram of erosion rate at different openings

4.3 流速对冲蚀的影响

设定球阀开度为 50% ,分别模拟不同流速对球阀冲蚀磨损情况。不同流速冲蚀磨损如图 10 所示。球阀整体冲蚀磨损随流速增大而逐渐增大,但并不是呈线性正相关。球芯迎流面冲蚀磨损面积随流速增加不断扩大,冲蚀形状呈现出半圆形状,锐缘处冲蚀磨损最大,因为此处壁厚较薄,应力相对比较集中。当速度为 11 m/s 时,靠近球芯管道附近区域开始受到冲蚀磨损,当速度为 17 m/s 时球阀入口处内通道壁面出现冲蚀磨损。

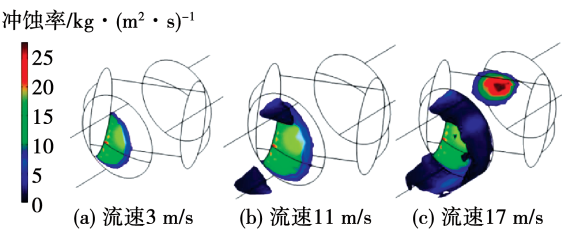


图 10 不同流速冲蚀磨损图

Fig. 10 Diagram of erosion and wear at different flow velocities

图 11 为不同流速冲蚀率变化图。当流速低于 9 m/s 时,最大冲蚀率与平均冲蚀率均呈缓慢上升趋势;当流速在 9 ~ 20 m/s 时,随流速增加最大冲蚀率与平均冲蚀率均表现为急剧上升趋势。随流速增加球阀最大冲蚀率与平均冲蚀率整体呈上升趋势并

与流速大致成幂指数关系。

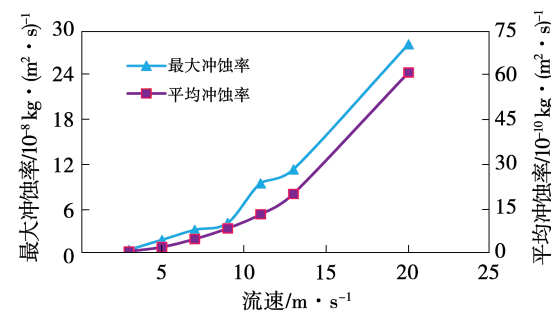


图 11 不同流速冲蚀率变化图

Fig. 11 Variation diagram of erosion rate at different flow velocities

4.4 粒径对冲蚀的影响

设定球阀开度为 50% ,入口流速为 7 m/s,分别模拟了不同颗粒粒径对球阀冲蚀磨损的影响情况,如图 12 所示。粒径为 3 μm 时,颗粒并不会对球芯迎流面造成冲蚀磨损且冲蚀程度较为均匀;当粒径为 25 μm 时,球阀冲蚀磨损不再均匀分布而是较为集中;粒径为 50 μm 时,球阀迎流面开始受到冲蚀,球芯的冲蚀磨损程度整体是随粒径增大而增大,且随粒径增大冲蚀磨损位置更加集中。这种现象可用斯托克斯数 Stk 来解释。 Stk 表示颗粒在流场中的运动轨迹,描述了颗粒随流体运动的性质^[21]。当 $Stk < 1$ 时颗粒位于旋涡内部,当 $Stk > 1$ 时颗粒位于旋涡外部。 Stk 越小表明颗粒惯性越小,随流体的跟随性越好,颗粒运动轨迹受湍流脉动影响较大,冲蚀相对均匀。 Stk 越大表明颗粒惯性越大,大颗粒受湍流脉动影响较小,运动轨迹近乎为直线。因此,冲蚀磨损不再分布均匀而是位置更加集中。

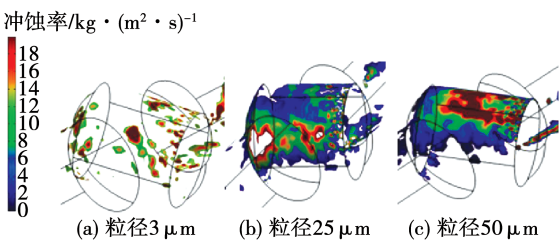


图 12 不同粒径下球阀冲蚀磨损图

Fig. 12 Diagram of ball valve erosion and wear at different particle sizes

图 13 为不同粒径冲蚀率变化图。粒径在 1 ~

50 μm 时最大冲蚀率变化波动较大,出现了 2 个波峰和 2 个波谷。1 ~ 3 和 7 ~ 15 μm 呈急剧上升趋势,最高点 3 和 15 μm 最大冲蚀率分别是 4.51×10^{-7} 和 $7.91 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 3 ~ 7 和 15 ~ 25 μm 呈急剧下降趋势,最低点 7 和 25 μm 最大冲蚀率分别是 6.10×10^{-8} 和 $1.66 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。平均冲蚀率只出现了 1 个波峰和 1 个波谷,1 ~ 3 和 7 ~ 15 μm 呈急剧上升趋势,最高点 3 和 15 μm 平均冲蚀率分别是 1.26×10^{-7} 和 $1.3 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 3 ~ 7 μm 时呈急剧下降趋势,最低点 7 μm 平均冲蚀率为 $5.9 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

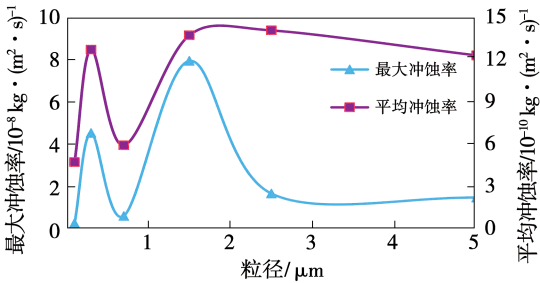


图 13 不同粒径冲蚀率变化图

Fig. 13 Variation diagram of erosion rate at different particle sizes

4.5 质量流率对冲蚀的影响

设定球阀开度为 50%,入口流速为 7 m/s,模拟了不同数量级质量流率研究其变化规律。不同质量流率冲蚀磨损如图 14 所示。

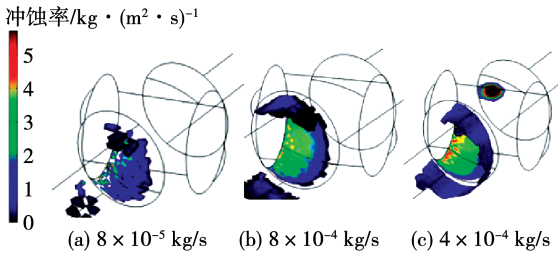


图 14 不同质量流率冲蚀磨损图

Fig. 14 Diagram of erosion and wear at different mass flow rates

球芯冲蚀磨损程度整体随颗粒质量流率增大而增大。当质量流率为 $8 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{s}$ 时球芯迎流面冲蚀磨损较分散,呈斑点形状;当质量流率为 $8 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$ 时球芯迎流面冲蚀磨损较集中,呈半圆形状;当质量流率达到 $4 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$ 时在管道壁面和内通

道壁面开始产生冲蚀磨损。因为颗粒数随颗粒质量流率增加而增加,撞击频率增加,冲蚀磨损变得较为严重。

图 15 为不同质量流率冲蚀率变化图。颗粒质量流率在 $2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$ 时最大冲蚀率和平均冲蚀率均出现 1 个波峰。当质量流率在 $8 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$ 时急剧上升;在 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$ 时急剧下降,波峰最高点 $2 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s}$ 的最大冲蚀率和平均冲蚀率分别为 1.41×10^{-6} 和 $2.36 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

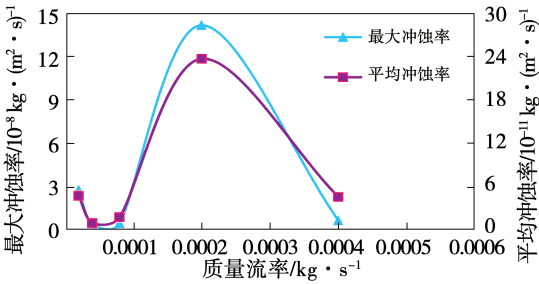


图 15 不同质量流率冲蚀率变化图

Fig. 15 Variation diagram of erosion rate at different mass flow rates

5 数值模拟结果准确性验证

为验证球阀冲蚀磨损模拟结果的准确性,在某天然气站场选取了球阀冲蚀磨损实物。图 16 为球阀冲蚀磨损实物图,将其与模拟结果进行对比验证。由图 16 可知,数值模拟预测球阀冲蚀磨损位置与工程实际冲蚀磨损工况基本吻合,在球芯迎流面及其锐缘处冲蚀磨损较为严重。因此,采用 Comsol Multiphysics 软件预测球阀进行冲蚀磨损是准确可行的。

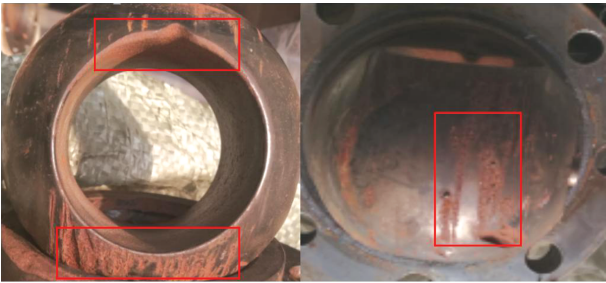


图 16 球阀冲蚀磨损实物图

Fig. 16 Diagram of physical image of ball valve erosion and wear

6 结 论

以天然气管道球阀为研究对象,运用 Comsol Multiphysics 软件对气固两相流对其造成的冲蚀磨损进行数值模拟,研究其流场特征、冲蚀磨损分布、不同参数对冲蚀磨损及冲蚀率变化趋势的影响。结论为:

(1) 球阀内气体速度变化在 $5 \sim 25 \text{ m/s}$,最高流速产生在阀芯出口,最低流速产生在下游阀芯死角。球阀内出现多处二次流旋涡,分别在阀芯入口拐角、阀芯内通道和阀芯出口拐角。球阀会产生阀芯迎流面、内通道壁面及阀芯进出口锐缘处等 6 处冲蚀磨损区域。

(2) 球阀冲蚀磨损随球阀开度减小而增大,且冲蚀磨损位置更加集中。在 10% 开度下冲蚀率最大;冲蚀磨损随流速增大逐渐增大,呈非线性正相关,球芯迎流面冲蚀形状呈半圆形状,锐缘处冲蚀磨损最大;冲蚀磨损随粒径增大而增大,当粒径为 $25 \mu\text{m}$ 时冲蚀磨损不再均匀分布,变得较为集中;随颗粒质量流率增加,颗粒对壁面的撞击频率增加,冲蚀磨损变得较严重,当质量流率达到 $4 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 时,在管道壁面和内通道壁面开始产生冲蚀磨损区域。

(3) 球阀 10% ~ 30% 开度时冲蚀率最大,在实际操作中应避免在此开度下运行。流速较高会产生严重的冲蚀磨损,控制好流速对于生产运行尤为重要,流速控制在 9 m/s 内可以有效降低冲蚀磨损情况。将粒径尺寸控制在 $3 \mu\text{m}$ 以内,质量流率控制在 $4 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ 以下均可避免产生多处冲蚀磨损。

参考文献:

[1] 梁佳鹏,左海滨,刘燊辉,等. 含尘气流对 20 g 冲蚀磨损性能的研究[J]. 热能动力工程,2020,35(2):208-212.

LIANG Jia-peng,ZUO Hai-bin,LIU Shen-hui,et al. Study on the erosion and abrasion performance of 20 g by dust-laden airflow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(2):208-212.

[2] 杜明俊,张振庭,张朝阳,等. 多相混输管道 90° 弯管冲蚀破坏应力分析[J]. 油气储运,2011,30(6):427-430,392.

DU Ming-jun,ZHANG Zhen-ting,ZHANG Chao-yang,et al. Erosion failure stress analysis of 90° elbow of multiphase mixed transportation pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2011,30(6):427-430,392.

[3] 曹学文,李星標,樊茵,等. 固体颗粒冲蚀理论与试验研究进展[J]. 油气储运,2019,38(3):251-257.

CAO Xue-wen,LI Xing-biao,FAN Yin,et al. Solid particle erosion theory and experimental research progress[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2019,38(3):251-257.

[4] 刘巨保,兰秉宇,丁宇奇,等. 通径式喷砂器全键流场仿真与防冲蚀设计[J]. 石油机械,2017,45(6):72-77.

LIU Ju-bao,LAN Cheng-yu,DING Yu-qi,et al. Flow field simulation and anti-erosion design of umbrella key of through-diameter sand blaster[J]. Petroleum Machinery,2017,45(6):72-77.

[5] GUANF,DUANM,MAW,et al. An experimental study of mechanical behavior of coiled tubing in pipelines[J]. Applied Ocean Research,2014,414:13-19.

[6] 刘先冬. 液固两相对球阀密封性影响的数值模拟研究[D]. 镇江:江苏大学,2018.

LIU Xian-dong. Numerical simulation study on the influence of liquid-solid two-phase flow on the sealing performance of ball valves[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2018.

[7] 张一帆. 不同浓度下闸阀气固两相流致模拟数值模拟及实验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2018.

ZHANG Yi-fan. Numerical simulation and experimental research on gas-solid two-phase flow induced by gate valve under different concentrations[D]. Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University,2018.

[8] 李长俊,季楚凌,陈磊,等. 气固两相流下球阀磨损特性研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(3):5-11.

LI Chang-jun,JI Chu-ling,CHEN Lei,et al. Research on wear characteristics of ball valve under gas-solid two-phase flow[J]. China Work Safety Science and Technology,2015,11(3):5-11.

[9] WEICKELT M,SOMMERFELD M,TEIKE G,et al. Experimental and numerical investigation of the hydroerosive grinding[J]. Powder Technology,2011,214(1):1-13.

[10] ZHU H,PAN Q,ZHANG W. et al. CFD simulations of flow erosion and flow-induced deformation of needle valve effects of operation,structure and fluid parameters[J]. Nuclear Engineering & Design,2014,273(1):396-411.

[11] 赵杨文. 调压器在天然气行业的应用[J]. 石油工业技术监督,2005(5):138-140.

ZHAO Yang-wen. Application of pressure regulator in natural gas industry[J]. Technical Supervision in Petroleum Industry,2005(5):138-140.

[12] 王 蓓. 输气管道球型调节阀内气固两相流场的数值模拟 [D]. 北京: 中国石油大学, 2008.
WANG Bei. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field in spherical control valve of gas pipeline [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.

[13] GUAN F, DUAN M, MA W, et al. An experimental study of mechanical behavior of coiled tubing in pipelines [J]. Applied Ocean Research, 2014, 41(4): 13 – 19.

[14] 郭仁宁, 赵立柱, 马 冶, 等. 气固两相流中 90° 竖直弯管肋条防磨性能的研究 [J]. 热能动力工程, 2016, 31 (4): 17 – 23, 140 – 141.
GUO Ren-ning, ZHAO Li-zhu, MA Ye, et al. Research on the anti-wear performance of 90° vertical elbow ribs in gas-solid two-phase flow [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31 (4): 17 – 23, 140 – 141.

[15] 梁 栋. 浅单元法在机械工程中的应用 [J]. 建材发展导向, 2017 (15): 307.
LIANG Dong. Application of shallow finite element method in mechanical engineering [J]. Development Orientation of Building Materials, 2017 (15): 307.

[16] 李井洋. 大口径输流管道冲蚀失效影响因素研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
LI Jing-yang. Research on the influencing factors of erosion failure of large-diameter fluid conveying pipelines [D]. Daqing: North-east Petroleum University, 2019.

[17] LAIN S, SOMMERFELD M. Numerical prediction of particle erosion of pipe bends [J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30 (2): 366 – 383.

[18] 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.

[19] FORDER A, THEW M, HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves [J]. Wear, 1998, 216 (2): 184 – 193.

[20] MAZUMDER H. Effect of liquid and gas velocities on magnitude and location of maximum erosion in U-bend [J]. Open Journal of Fluid Dynamics, 2012, 2 (2): 29 – 34.

[21] WANG Xiao-ning, ZHENG Xiao-jing, WANG Ping. Direct numerical simulation of particle-laden plane turbulent wall jet and the influence of Stokes number [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 92: 82 – 92.

(刘 颖 编辑)

(上接第 115 页)

[11] 李明强, 樊俊杰, 张忠孝, 等. 液渣捕捉高碱煤中碱金属特性及机理 [J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23 (5): 429 – 435.
LI Ming-qiang, FAN Jun-jie, ZHANG Zhong-xiao, et al. Mechanism study on liquid slag capture of alkali metal [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23 (5): 429 – 435.

[12] 周广钦, 张喜来, 姚 伟. 准东高碱煤在液态排渣旋风炉上燃烧及沾污特性试验 [J]. 热力发电, 2018, 47 (11): 40 – 45.
ZHOU Guang-qin, ZHANG Xi-lai, YAO Wei. Experimental study on combustion and fouling characteristics of Zhundong high sodium coal in liquid slagging cyclone furnace [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47 (11): 40 – 45.

[13] 亚云启, 闫伟杰, 姜 春, 等. 垃圾焚烧炉内燃烧火焰的光谱诊断 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38 (11): 2495 – 2502.
YA Yun-qi, YAN Wei-jie, LOU Chun, et al. Spectral diagnosis of combustion flame in municipal solid waste incinerator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38 (11): 2495 – 2502.

[14] ZHANG Xiang-yu, LU Xu, YANG yu, et al. Temperature measurement of coal fired flame in the cement kiln by raw image processing [J]. Measurement, 2018, 129 (12): 471 – 478.

[15] YAN W, ZHOU H, JIANG Z, et al. Experiments on measurement of temperature and emissivity of municipal solid waste (MSW) combustion by spectral analysis and image processing in visible spectrum [J]. Energy & Fuels, 2013, 27 (11): 6754 – 6762.

[16] YAN W, LI K, HUANG X, et al. Online measurement of the flame temperature and emissivity during biomass volatile combustion using spectral thermometry and image thermometry [J]. Energy & Fuels, 2020, 34 (1): 907 – 919.

[17] 贾子秀, 周广钦, 李宇航, 等. 碱性金属在立式旋风炉上的迁移规律研究 [J]. 热力发电, 2019 (8): 81 – 86.
JIA Zi-xiu, ZHOU Guang-qin, LI Yu-hang, et al. Migration law of alkaline metal in vertical cyclone furnace [J]. Thermal Power Generation, 2019 (8): 81 – 86.

(丛 敏 编辑)