

超高压天然气可调式节流阀冲蚀磨损特性研究

牟星洁, 牟小清, 任俊松, 赵文雯

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川德阳 618000

项目支持: 中石化集团公司科技项目“特深层气井试气评价关键技术研究与应用”(P23160)

引用: 牟星洁, 牟小清, 任俊松, 等. 超高压天然气可调式节流阀冲蚀磨损特性研究[J]. 油气井测试, 2026, 35(2): 32-38.

Cite: MOU Xingjie, MOU Xiaoqing, REN Junsong, et al. Study on erosion-wear characteristics of adjustable choke valves for ultra-high pressure natural gas[J]. Well Testing, 2026, 35(2): 32-38.

摘要 为了提高超高压气井排液及求产期间安全节流效果, 地面流程采用通过调整两半月形通道重合面积从而实现无级节流的可调式节流阀。本文以压力 140 MPa、排量 2~200×10⁴ m³/d 的天然气或 50~500 m³/d 液体、在 80 目砂砾、砂比 0.5%~4% 工况下当量直径 3~20 mm 的可调式节流阀为例, 基于冲蚀磨损理论研究及 COMSOL 软件建立冲蚀仿真模型, 研究超高压天然气井地面可调式节流阀内固体颗粒的运动轨迹及各工况下冲蚀磨损特性。结果表明, 气体条件下, 可调式节流阀冲蚀最严重的区域位于堵头腔室的本体内壁, 冲蚀速率随排量的增加基本呈指数增长、随砂比增加呈线性增长、随当量直径增加呈指数降低; 液体条件下, 当量直径 10 mm、20 mm 可调式节流阀冲蚀最严重的区域分别位于双半月型流道变径处和入口处; 冲蚀速率随排量的增加基本呈指数增长、随砂比增加呈线性增长、随当量直径增加而降低。研究结果明确了可调式节流阀运行过程中冲蚀磨损的关键控制参数、高风险工况和高风险区域, 提升了超高压天然气井地面节流安全性。

关键词 超高压; 可调式节流阀; 磨损机制; 流场分析; 冲蚀速率; 高风险工况; 高风险区域

中图分类号: TE93

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.005

Study on erosion-wear characteristics of adjustable choke valves for ultra-high pressure natural gas

MOU Xingjie, MOU Xiaoqing, REN Junsong, ZHAO Wenwen

Downhole Operation Company, Xi'nan Oilfield Service Corporation, SINOPEC, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: To enhance the safety and throttling efficiency during liquid unloading and production testing of ultra-high pressure gas wells, adjustable choke valves are employed in the surface process, achieving stepless throttling by adjusting the overlapping area of two half-moon-shaped flow channels. Taking an adjustable choke valve with an equivalent diameter of 3 to 20 mm as an example—under operating conditions of 140 MPa pressure, a natural gas flow rate of 2~200×10⁴ m³/d or a liquid flow rate of 50~500 m³/d, utilizing 80-mesh sand with a sand ratio of 0.5% to 4.0%—an erosion simulation model was established based on erosion-wear theory and COMSOL Multiphysics software. This model investigates the motion trajectories of solid particles and the erosion-wear characteristics within the surface adjustable choke valve of ultra-high pressure gas wells under various operating conditions. The results indicate that, under gas conditions, the most severe erosion area of the adjustable choke valve is located on the inner wall of the valve body within the plug chamber. The erosion rate exhibits an approximately exponential growth with an increase in flow rate, a linear growth with an increase in sand ratio, and an exponential decrease with an increase in equivalent diameter. Under liquid conditions, for adjustable choke valves with equivalent diameters of 10 mm and 20 mm, the most severe erosion areas are located at the diameter reduction section of the double half-moon flow channel and the inlet, respectively. Similarly, the erosion rate grows exponentially with an increase in flow rate, linearly with an increase in sand ratio, and decreases as the equivalent diameter increases. These research findings clarify the key control parameters, high-risk operating conditions, and high-risk areas for erosion-wear during the operation of adjustable choke valves, thereby significantly enhancing the safety of surface throttling in ultra-high pressure natural gas wells.

Keywords: ultra-high pressure; adjustable choke valve; wear mechanism; flow field analysis; erosion rate; high-risk operating condition; high-risk area

全球天然气资源呈现“深部富集”特征。据地质勘探数据, 地下 3 000 m 以上的深部地层(含页

岩、致密砂岩、碳酸盐岩储层) 蕴藏的天然气储量, 占全球已探明总储量的 60% 以上。而我国油气资

源总量的34%为深层、超深层油气资源,具有重大勘探价值。四川盆地是我国深地工程天然气勘探开发重要阵地,主要勘探层位茅口组、灯影组等埋深超过7 000 m,具有超高温、超高压、高破裂压力、关井压力高等特征。由于该类气井多采用加砂压裂工艺,排液求产过程中,高压高速流体携砂返出,地面流程节流装置冲蚀严重。研究关键影响因素对节流阀的冲蚀作用规律,对实现超高压天然气井地面安全控制具有重要的意义。

国内外主要采用仿真模拟和流体冲蚀试验两种方式开展节流装置冲蚀机理研究。廖柯熹等^[1]分析了节流阀内部流场情况、冲蚀速率和位置。徐婷婷等^[2]对采气井口装置中在同一开度下三种不同角度阀芯的锥形节流阀所受冲蚀压力及冲蚀范围进行了分析。贾文龙等^[3]对井口笼套式节流阀的磨蚀机理进行了分析。李千登等^[4]对筒式、楔形、孔板3种节流阀的冲蚀损伤机制进行了分析。史鸿博等^[5]对阀门内部气固两相流场进行三维数值模拟研究。王建超^[6]对不同工况下节流阀阀芯处的流场特性和冲蚀情况进行分析,明确了各类影响因素对节流阀的影响。魏立明等^[7]开展数值模拟分析了直板式节流阀压降特性。张绍文^[8]对节流阀耐冲蚀性能进行了试验及仿真分析。万骥^[9]对针形节流阀进行了两相流特性分析并以此提出冲蚀磨损弱化措施。钟功祥等^[10]对天然气井下定压节流阀气固两相流冲蚀情况进行了分析。刘恩斌等^[11]对页岩气分离器出口阀套式排污阀在砂粒冲蚀下的特性进行了数值模拟。辜志宏等^[12]对页岩气井节流阀冲蚀失效进行了分析。彭炜曦^[13]对直通式节流阀开展冲蚀分析并进行了结构优化。LIU等^[14]分析液压滑阀的固体冲蚀行为以及颗粒轨迹,明确了冲蚀严重区域。这些研究主要针对针形、筒式、楔形、孔板节流阀进行冲蚀模拟,未针对可连续调整开度的半月形通道的节流阀进行气固、液固两种工况下的冲蚀特性研究。

本文针对超高压气井排液、求产工况,分别开展不同开度下半月形可调式节流阀液固、气固两相流仿真模拟,进行冲蚀磨损特性研究,以明确其运行过程中关键控制参数,提升超高压天然气井地面节流安全性。

1 半月形节流阀冲蚀模型构建

基于流体动力学理论及可调式节流阀的内部

结构,分别构建节流阀理论模型及物理模型并设定边界条件。

1.1 理论模型

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

(2) 运动方程

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f - \nabla P + \nabla \tau \quad (2)$$

(3) 能量方程

$$\rho \frac{Di}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi + \rho q_R \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; v 为流体流速, m/s ; f 为质量引起的加速度, m/s^2 ; P 为流体压力, Pa ; i 为单位质量流体的焓, J ; q_R 为单位时间辐射到单位质量流体的热量, J ; τ 为分子粘性应力张量, Pa ; λ 为流体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为流体温度, K ; Φ 为单位体积粘性耗散函数, W/m^3 。

(4) 湍流模型

$k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型是常用的湍流模型,都具有湍动能和比耗散率两类方程,在工程计算中具有较好的稳定性。但是, $k-\omega$ 模型能够精准计算近壁面颗粒的受力情况,从而更好地模拟砂粒撞击流道壁面的过程。由于节流阀内结构复杂且可调式节流阀不同开度导致流型可能发生变化,增加了近壁面颗粒状态的模拟难度,因此选用 $k-\omega$ 湍流模型^[15],其表达式如下

$$\frac{\partial(\rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}\right)}{\partial x_i} + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_\omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right)}{\partial x_i} + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (5)$$

式中: Γ_k 、 Γ_ω 分别为流动能 k 和湍流能量耗散率 ω 的扩散率; G_k 为 k 增长或衰减过程中由外部施加的额外能量; G_ω 为 ω 增长和减少受外部影响的能量; Y_k 、 Y_ω 分别为 k 和 ω 的发散项; S_k 、 S_ω 为自定义数据。

(5) 冲蚀模型

莫尔等^[16-18]基于阀门内部固体颗粒冲蚀规律,总结出冲蚀模型如下

$$E_R = \sum_{n=1}^{N_{\text{traject}}} \frac{m_k C(d_k) f(a) v_k^n}{A_{\text{face}}} \quad (6)$$

式中： E_R 为冲蚀率； N_{traject} 为颗粒总数； m_k 为颗粒质量流量，kg/s； $C(d_k)$ 为与颗粒直径 d_k 有关的函数； $f(a)$ 为碰撞角度函数； v_k 为颗粒速度，m/s； n 为速度指数， n 取2.41； A_{face} 为碰撞面积， m^2 。

1.2 物理模型

基于高压地面流程管汇中可调式节流阀的结构及尺寸参数，建立可调式节流阀仿真模型，将可调式节流阀入口及出口支管长度设置为内径的5倍，使得离散相和连续相在竖直段更加充分的流动，保证流场更加稳定，更符合现场作业实际情况。对模型进行网格划分时，通常在保证相对精确结果的前提下，尽可能的减少模型网格的数量，从而降低计算成本。本文采用扫掠方法将入口流道网格划分为六面体，将堵头位、双半月型节流段和出口流动短节划分为四面体网格。此外，边界层采用5层，第一层网格厚度为1 mm，拉伸因子为1.3。物理模型如图1所示，节流阀内部流道参数如表1所示。

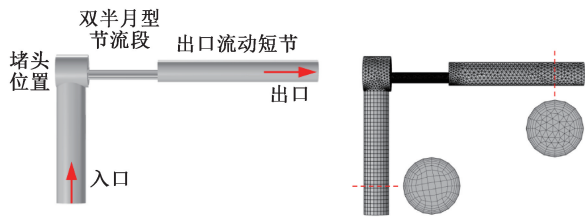


图1 可调式节流阀仿真模型

Fig. 1 Adjustable choke valve simulation model

表1 节流阀内部流道结构参数

Table 1 Internal flow channel structural parameters of choke valve

位置	内径/mm	长度/mm
入口段	65	200
堵头	92	
双半月型节流区域	根据工况调整	77
出口流动短节	61	268

在保证计算精度的基础上为了提高运算效率，将模型分为直管段及节流段进行网格划分。考虑到节流阀交汇处流道交错，所以在节流阀节流段将网格细化，并以壁厚减薄作为收敛指标开展网格无关性验证，网格数量达到 3.2×10^4 时与网格数量分别为 4.6×10^4 和 5.7×10^4 时的壁厚减薄相差0.000 01和0.000 02 mm，相对误差分别为0.08%和0.162%，因此优选网格总数为 3.2×10^4 。

1.3 边界条件

将固体颗粒看作离散相，固体颗粒以某一初速度从入口进入，从出口流出，流体看作连续相，为不可压缩性。

2 可调式节流阀冲蚀磨损仿真分析

基于现场排液、求产实际工况，分别开展液体、气体条件下可调式节流阀冲蚀规律分析。本文节流阀模型本体采用4130材料，硬度为229HB；阀芯采用YG8材料，硬度为770HB。工况参数如表2所示。

表2 可调式节流阀冲蚀计算工况参数

Table 2 Operating condition parameters for erosion calculation of adjustable choke valve

参数	气体冲蚀	液体冲蚀
当量直径/mm	3~20	3~20
排量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$2 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4$	50~500
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.717	1 000
颗粒密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 200	2 200
粒径/目	80	80
砂比/%	0.5~4	0.5~4

2.1 可调式节流阀内部流场

如图2、图3所示，可调式节流阀内气体、液体速度变化均分为两个阶段：①当流体流经直管段时，流速分布均匀，其大小从流道中心位置沿靠近管壁处呈现逐渐降低的趋势，这主要是因为离管壁越近，流体受到的粘滞阻力越大；②流体流进入阀芯后，由于通径处截面积变小导致流速增大，并在短节内形成涡流。当砂砾经过直管段后，在流体的作用下撞击堵头腔室本体，随后砂砾在流体作用下继续向前运移。

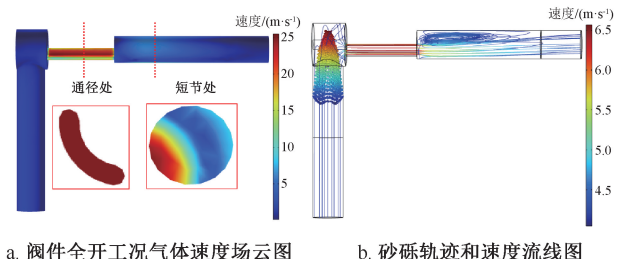


图2 可调式节流阀气体冲蚀流场图

Fig. 2 Gas erosion flow field diagram of adjustable choke valve

同时由图3以当量直径10、20 mm为例可知，对于不同当量直径的可调式节流阀，阀件全开，整个半月型节流段流场分布均匀；阀件未全开时，双

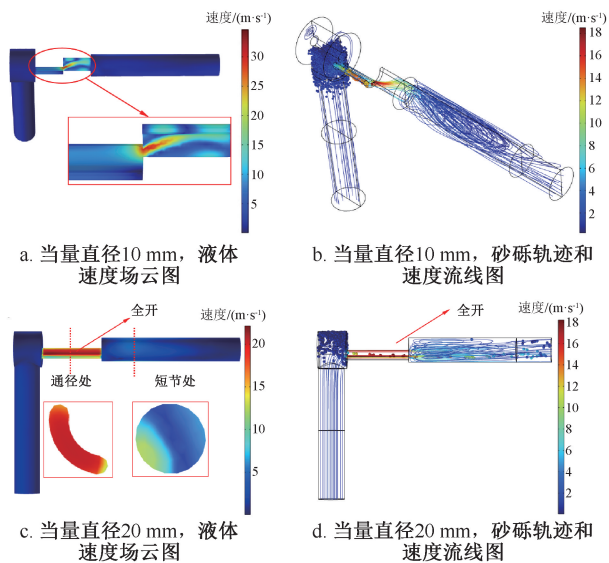


图 3 可调式节流阀液体冲蚀流场图

Fig. 3 Liquid erosion flow field diagram of adjustable choke valve

半月型重合区域流速较快,周围区域流速相对较小。

2.2 可调式节流阀冲蚀分析

2.2.1 可调式节流阀内部冲蚀区域

如图 4 所示气体排量 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,节流阀冲蚀速率最大值出现在堵头腔室的本体内壁及阀杆位置,说明冲蚀最严重区域位于堵头腔室本体内壁及阀杆,与现场冲蚀严重位置一致。在堵头腔体及阀杆位置,气体携带砂粒沿入口流道向上流动,到达堵头位置时在惯性力作用下导致砂粒脱离流线转向,造成对堵头的直线冲击。

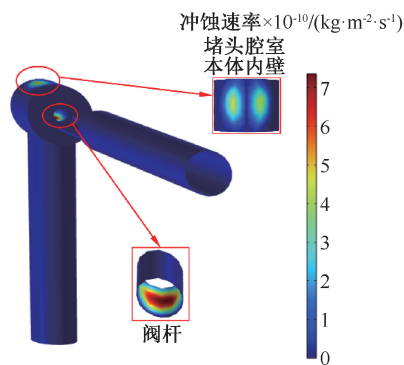


图 4 可调式节流阀气体冲蚀速率云图

Fig. 4 Adjustable throttle valve gas erosion diagram

如图 5 所示,液体冲蚀工况下,当量直径 10 mm (双半月型流道部分重合) 冲蚀最严重的区域位于两半月型重合位置即流道变径处;当量直径 20 mm (双半月型流道完全重合) 冲蚀最严重的区域位于双半月型节流段入口处。这是由于液体携带砂粒

沿入口流道向上流动,到达堵头位置时,由于液体的携带作用较强,砂粒跟随液体从堵头腔室到达变径处,对变径处造成冲击。对比图 3 可知,冲蚀严重区域与流速最大区域一致,说明严重冲蚀是由于砂砾在高速流体的粘性力作用下撞击阀件内壁造成的。

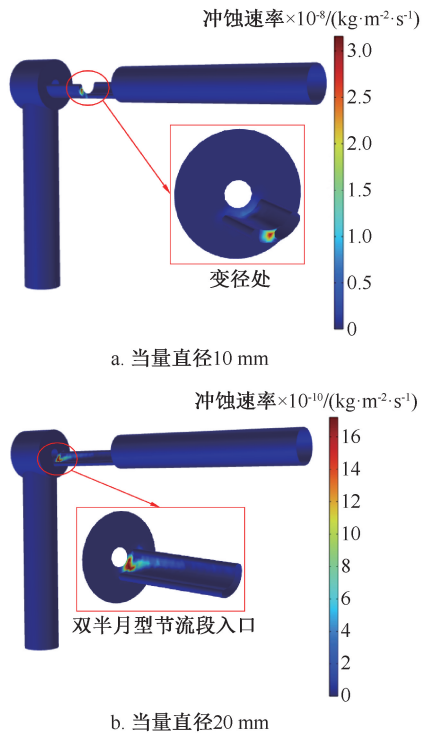
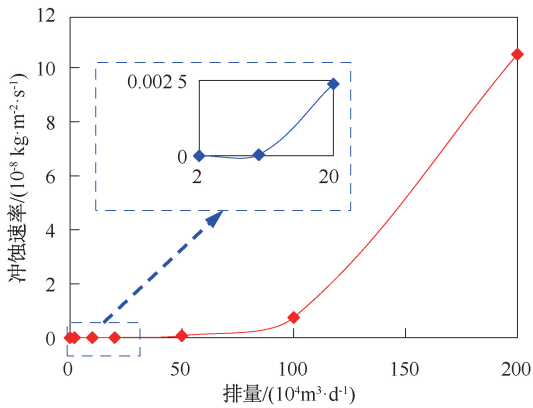


图 5 可调式节流阀液体冲蚀速率云图

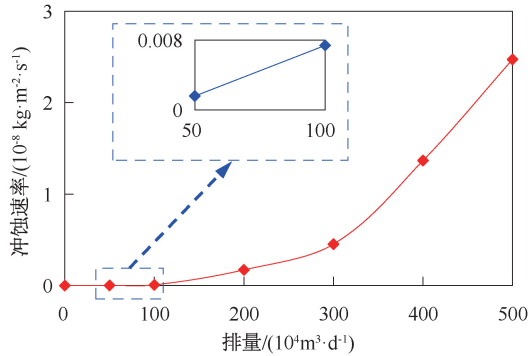
Fig. 5 Liquid erosion rate contour map of adjustable choke valve

2.2.2 不同排量冲蚀规律分析

开展当量直径为 20 mm、砂比为 0.5%、气体排量为 $2 \sim 200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、液体排量 $50 \sim 500 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内的可调式节流阀冲蚀仿真分析。由图 6 可知,随着气体、液体排量的增大,可调式节流阀的最大冲蚀率均呈现指数型增大的趋势,其中气体排量为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,可调式节流阀的最大冲蚀率为 $10.5 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,液体排量为 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,可调式节流阀的最大冲蚀率为 $2.47 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。同理开展其他工况壁厚减薄量模拟计算,得到不同气体、液体排量与冲蚀时间下内壁壁厚减薄图版如图 7 所示,气体排量为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工况下 100 d 后可调式节流阀壁厚减薄 0.116 mm,液体排量为 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 工况下 100 d 后可调式节流阀壁厚减薄 0.027 3 mm,说明阀件耐冲蚀性能满足放喷排液求产需求。



a. 不同排量气体冲蚀速率



b. 不同排量液体冲蚀速率

图6 不同排量最大冲蚀速率曲线

Fig. 6 Maximum erosion rate curve for different displacements

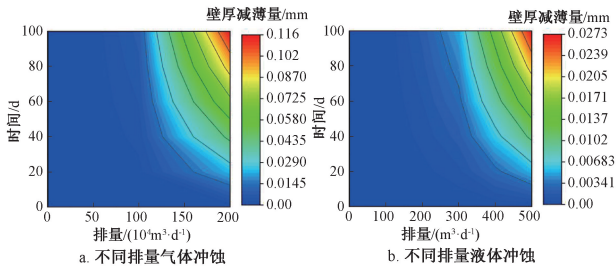
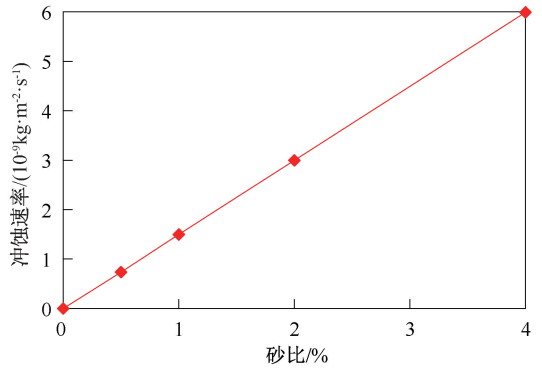


图7 不同排量壁厚减薄计算图版

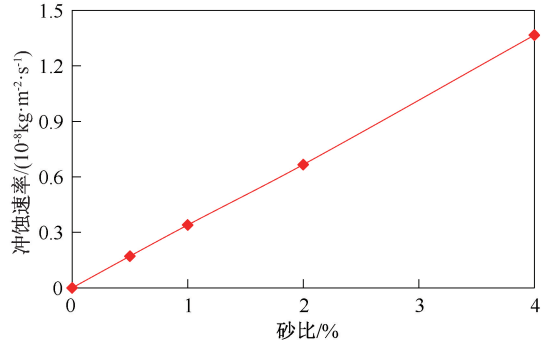
Fig. 7 Wall thickness reduction calculation chart for different displacements

2.2.3 不同砂比下冲蚀规律分析

开展当量直径为 20 mm, 气体排量为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、液体排量为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$, 砂比为 0.5%~4% 范围内的可调式节流阀冲蚀仿真分析, 各工况下最大冲蚀速率如图 8 所示。由图 8 可知, 气体、液体携砂的工况下, 最大冲蚀速率与砂比均呈线性关系, 基于最大冲蚀速率模拟结果, 计算得到不同砂比与冲蚀时间内内壁厚减薄图版, 如图 9 所示。由图 9 可知, 砂比 4% 气体冲蚀 100 d, 壁厚减薄为 0.0066 mm, 砂比 4% 液体冲蚀 100 d, 壁厚减薄为 0.0151 mm 阀件冲蚀穿孔风险极低。



a. 不同砂比气体冲蚀速率曲线



b. 不同砂比液体冲蚀速率曲线

图8 不同砂比冲蚀速率曲线

Fig. 8 Maximum erosion rate curve for different concentrations

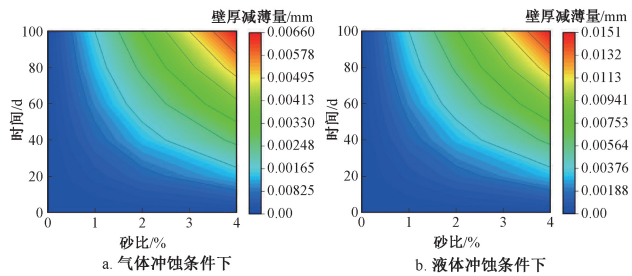


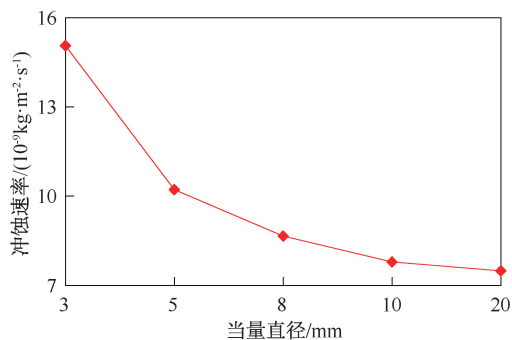
图9 不同砂比壁厚减薄图版

Fig. 9 Wall thickness reduction chart for different proppant concentrations

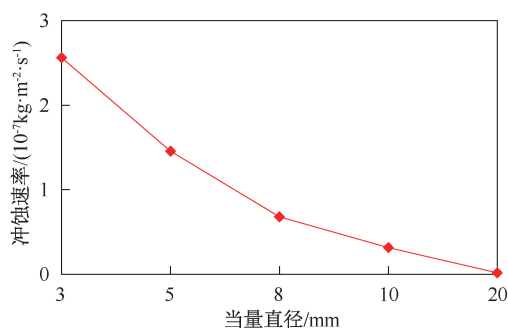
2.2.4 不同当量直径下冲蚀规律分析

开展气体排量为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、液体排量为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$, 砂比为 0.5%, 当量直径为 3~20 mm 范围内的可调式节流阀冲蚀仿真分析, 五种当量直径下阀件最大冲蚀速率如图 10 所示, 计算结果表明: 随着当量直径的增大, 可调式节流阀的最大冲蚀率均呈现指数减小的趋势, 其中当量直径从 3 mm 增大至 5 mm, 冲蚀速率大幅下降, 当量直径达到 5 mm 以上后继续增大当量直径, 阀件最大冲蚀速率降幅减小。基于阀件冲蚀速率计算得到不同当量直径下壁厚减薄图版如图 11 所示。由图 11 可知, 口径 3 mm, 气体冲蚀 100 d, 壁厚减薄 0.0166 mm; 液体冲蚀 100 d, 壁厚减薄 0.282 mm, 说明阀件冲蚀穿孔

风险低。



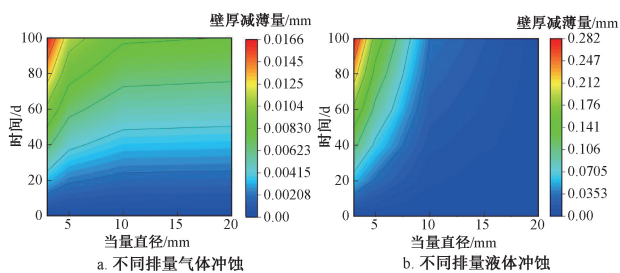
a. 不同当量直径气体冲蚀速率曲线



b. 不同当量直径液体冲蚀速率曲线

图10 不同当量直径冲蚀速率曲线

Fig. 10 Maximum erosion rate curve for different concentrations



a. 不同排量气体冲蚀

b. 不同排量液体冲蚀

图11 不同当量直径壁厚减薄图版

Fig. 11 Chart of wall thickness reduction for different equivalent diameters

3 结论

(1) 可调式节流阀气体条件下高冲蚀风险区位于本体,尤其是内壁及阀杆;液体条件下的高冲蚀风险区位于双半月型节流通道。

(2) 冲蚀速率随排量指数型增长、随砂比线性增长,随节流阀当量直径指数型下降。

(3) 为降低节流阀冲蚀磨损损伤,可采用优选耐冲蚀材质、适当降低排量和砂比、适当增加当量直径等方法。

致谢: 特别感谢西南石油大学丁亮亮教授、周兰博士的技术支持。

参考文献

- [1] 廖柯熹, 钟瀚宇, 何国玺, 等. 气井口固定式节流阀固体颗粒冲蚀行为的数值模拟[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(3): 77-83.
LIAO Kexi, ZHONG Hanyu, HE Guoxi, et al. Numerical simulation of solid particle erosion behavior in fixed throttle valve at gas well head [J]. Corrosion & Protection, 2025, 46(3): 77-83.
- [2] 徐婷婷, 王尧, 戴京, 等. 采气井口装置中节流阀冲蚀模拟分析[J]. 装备制造技术, 2023(3): 56-58.
XU Tingting, WANG Yao, DAI Jing, et al. Simulation analysis of erosion of throttle valve in gas production wellhead equipment [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(3): 56-58.
- [3] 贾文龙, 李晓宇, 成婷婷, 等. 超高压含硫天然气节流阀冲蚀磨损机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(3): 58-64.
JIA Wenlong, LI Xiaoyu, CHENG Tingting, et al. Study on erosion wear mechanism of choke valves at outlet of ultra-high pressure sour natural gas wells [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(3): 58-64.
- [4] 李千登, 管志川, 樊朝斌, 等. 高压液固两相流节流阀耐冲蚀特性研究[J]. 石油机械, 2022, 50(2): 89-94.
LI Qiandeng, GUAN Zhichuan, FAN Chaobin, et al. Erosion-resisting characteristic study of throttle valve in high-pressure liquid-solid flow [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(2): 89-94.
- [5] 史鸿博, 王少聪, 张行, 等. 含砂天然气套筒式节流阀内部两相流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(2): 139-146.
SHI Hongbo, WANG Shaocong, ZHANG Xing, et al. Analysis of gas-sand two-phase flow characteristics in sleeve throttle valve [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(2): 139-146.
- [6] 王建超. 基于CFD的大导流面柱塞型节流阀冲蚀分析及结构优化[D]. 武汉: 长江大学, 2023: 25-55.
WANG Jianchao. Erosion analysis and structural optimization of large flow surface plunger type throttle valve based on CFD [D]. Wuhan: Yangtze University, 2023: 25-55.
- [7] 魏立明, 李伟华, 王兴义, 等. 基于CFD的直板式节流阀压降特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 85-88.
WEI Liming, LI Weihua, WANG Xingyi, et al. Research on pressure drop characteristics of straight plate throttle valve based on CFD [J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(4): 85-88.
- [8] 张绍文. 节流阀冲蚀性能仿真分析与试验研究[J]. 石化技术, 2020, 27(2): 316.
ZHANG Shaowen. Simulation analysis and experimental

- research on erosion performance of throttle valve [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(2): 316.
- [9] 万骐. 气井针形节流阀两相流特性分析和冲蚀磨损弱化研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2024: 5-32.
- WAN Qi. Analysis of two-phase flow characteristics and erosion wear weakening of needle throttle valve in gas well [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2024: 5-32.
- [10] 钟功祥, 王进, 蒋晓波. 天然气井井下定压节流阀数值模拟及结构优化[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(11): 1666-1673.
- ZHONG Gongxiang, WANG jin, JIANG Xiaobo. Numerical simulation and structure optimization of a down-hole throttling valve of constant pressure for gas well. [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(11): 1666-1673.
- [11] 刘恩斌, 李茜, 寇博, 等. 页岩气分离器阀套式排污阀冲蚀特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 52-60.
- LIU Enbin, LI Xi, KOU Bo, et al. Study on erosion characteristics of valve sleeve blowdown valve of shale gas separator [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 52-60.
- [12] 辜志宏, 张玉树, 曹佳. 页岩气井节流阀失效原因分析及改进措施[J]. 内蒙古石油化工, 2023, 49(9): 29-33.
- GU Zhihong, ZHANG Yushu, CAO Jia. Analysis of the failure reasons on shale gas well throttle valve and its improvement measures [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2023, 49(9): 29-33.
- [13] 彭炜曦. 直通式节流阀冲蚀分析及结构优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024: 22-35.
- PENG Weixi. Analysis of erosion in straight-through orifice valve and structural optimization research [D]. Lanzhou: School of Petrochemical Engineering, 2024: 22-35.
- [14] LIU X, JI H, MIN W, et al. Erosion behavior and influence of solid particles in hydraulic spool valve without notches [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 114-131.
- [15] KOU Bo, LIU Enbin, LI Dangjian, et al. Research on erosion characteristics of the sleeve-type blowdown valve in the shale gas gathering and transportation station [J]. Production & Operations, 2024, 29(1): 328-345.
- [16] 莫丽, 冯满, 陈行, 等. 椭圆歧型三通冲蚀磨损数值模拟[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 151-159.
- MO Li, FENG Man, CHEN Heng, et al. Numerical simulation of erosion wear of oval disproportionate tee [J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 151-159.
- [17] 胡开松, 周思柱, 华剑, 等. 高压鱼尾管汇冲蚀规律研究[J]. 中国科技论文, 2020, 15(10): 1177-1181.
- HU Kaisong, ZHOU Sizhu, HUA Jian, et al. Analysis on erosion laws of high-pressure fishtail manifold [J]. China Sciencepaper, 2020, 15(10): 1177-1181.
- [18] 祝效华, 张覃, 张洋铭, 等. 高压管汇三通冲蚀磨损特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 258-265.
- ZHU Xiaohua, ZHANG Qin, ZHANG Yangming, et al. Study on erosion wear characteristics of high pressure manifold tee [J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 258-265.

编辑 程莹

第一作者简介: 牟星洁, 女, 1994年出生, 工程师, 硕士研究生, 2019年毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现从事天然气井试气设计编写及相关研究工作。电话: 18117967907, Email: 863820477@qq.com。通信地址: 四川省德阳市旌阳区金沙江西路699号中国石化井下作业分公司, 邮政编码: 618000。