

# 气井针型节流阀失效因素模拟分析

刘玲莉<sup>1</sup>, 彭贤强<sup>2</sup>, 陈洪地<sup>2</sup>, 程欣<sup>2</sup>, 缪凯<sup>2</sup>

- 1. 中国石油勘探开发研究院亚太研究所 北京 100083
- 2. 中国石油集团长城钻探工程有限公司测试公司 北京 100101

通讯作者: Email: pengxq.gwdc@cnpc.com.cn

引用: 刘玲莉, 彭贤强, 陈洪地, 等. 气井针型节流阀失效因素模拟分析[J]. 油气井测试, 2020, 29(2): 7-12.

Cite: LIU Lingli, PENG Xianqiang, CHEN Hongdi, et al. Simulation analysis of failure factors for needle throttle valve in gas well [J]. Well Testing, 2020, 29(2): 7-12.

**摘要** 在气井中可调针型阀节流时常因高压高速及含砂出现阀杆脱落断裂、针阀冲蚀、水合物冰堵等失效现象, 影响测试和生产地面流程安全。利用 Fluent 数值模拟, 建立针型节流阀数值模型, 通过模拟计算, 得到节流前后速度、压力、温度流场, 认识针型节流阀节流规律; 分析水合物冰堵潜在成因, 认为温度最低部位在锥形油嘴芯后半部分; 分析阀杆受力情况, 得到阀杆脱落原因主要在于对阀杆及阀芯的直接冲击、进入节流段前绕流引起的横向振动、进入节流段后锥面上漩涡脱落引起的横向和纵向振动; 结合冲蚀离散模型计算, 得到针阀冲蚀速率分布规律, 冲蚀部位主要为针形阀芯中部及阀座突缩处。模拟计算得到的冲蚀损伤部位与实际损伤部位较符合。该分析适用于类似流场和冲蚀速率分布规律研究。

**关键词** 试油; 针型节流阀; 冲蚀; 水合物; 冰堵; 阀杆; 静载荷; 振动载荷; 数值模拟

**中图分类号**: TE353      **文献标识码**: A      **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.02.002

## Simulation analysis of failure factors for needle throttle valve in gas well

LIU Lingli<sup>1</sup>, PENG Xianqiang<sup>2</sup>, CHEN Hongdi<sup>2</sup>, CHENG Xin<sup>2</sup>, MIAO Kai<sup>2</sup>

- 1. Asia Pacific Research Institute of China Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China
- 2. Test Company of CNPC Great Wall Drilling Engineering Co., Ltd., Beijing 100101, China

**Abstract**: In a gas well, the adjustable needle valve often becomes invalid due to high pressure and high speed and sand containing, with valve stems falling off and cracking, needle valve erosion, hydrate ice blocking and other failure phenomena. These problems affect the safety of testing and production surface processes. This paper established a numerical model of needle throttle using Fluent numerical simulation. Through simulation calculation, the velocity, pressure, and temperature flow fields before and after throttling are obtained, and the throttling rule of needle throttle is recognized. The potential cause of hydrate ice blocking is analyzed. It is considered that the lowest temperature is in the second half of the conical nozzle core. After the force of the valve stem is analyzed, the main reasons for the valve stem falling are the direct impact on the valve stem and the valve core, the lateral vibration caused by the flow before entering the throttle section, and lateral and longitudinal vibration caused by vortex shedding on the rear cone surface of the segment. The distribution pattern of the erosion rate of the needle valve is obtained with the calculation of the erosion discrete model. The erosion part is mainly in the middle of the needle valve core and at the seat of the valve seat. The erosion damage area calculated by simulation is in good agreement with the actual damage area. The analysis is applicable to the study of similar flow field and erosion rate distribution.

**Keywords**: oil production test; needle throttle valve; erosion; hydrate; ice plug; stem; static load; vibration load; numerical simulation

针型节流阀在中亚、国内塔里木、四川等典型气田区域作业时, 往往会出现管汇以及节流阀门失效甚至危及安全的问题<sup>[1-4]</sup>。特别是在应用针型节流阀进行放喷返排测试过程中, 容易出现阀杆脱落断裂、针阀冲蚀、水合物冰堵等失效现象<sup>[5-6]</sup>, 有必要就此展开研究。

一些研究基于 CFD 仿真模型, 应用 Fluent 软

件, 采用气液两相模型、气固模型或者多相流模型, 对节流阀流场开展模拟仿真研究, 分析结果为节流阀的抗冲蚀结构优化提供了一定的依据。其中, 王江云等<sup>[7]</sup>基于欧拉-拉格朗日多相流模型方法, 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和 Sutherland Viscosity Law 可压缩流体黏度修正模型及改进的冲蚀模型, 对高压天然气单孔和多孔节流过程进行数值模拟。宋保

健等<sup>[8]</sup>运用两相流计算流体动力学,建立了流体携岩冲蚀楔形节流阀的 CFD 仿真模型,研究了楔形节流阀开度与冲蚀速率的关系。殷伟伟等<sup>[9]</sup>应用 Fluent 软件中的离散相模型和磨损模型,对节流阀的流量系数、内部液固两相运动和壁面磨损进行了模拟研究。张圆等<sup>[10]</sup>进行气液两相流数值模拟,基于 Cavitation 模型,对节流阀进行气液两相的气穴分析。张晓东等<sup>[11]</sup>利用 Fluent 软件仿真计算,揭示了节流阀冲蚀和气蚀失效的原因,并提出一些减缓失效的方法。曾伟等<sup>[12]</sup>对针形节流阀进行气固两相流冲刷磨蚀的数值仿真,得到节流阀阀腔受介质冲蚀严重的部位,提出了降低节流阀冲蚀磨损率的措施。

一些学者提出了油气井生产及管道运输中水合物冻堵问题,分析了原因并提出防冻堵措施。彭贤强等<sup>[13]</sup>考虑油气嘴多相流节流的各阶段特征,建立模型分析过气嘴节流各阶段温度压力降落特征,对于节流后水合物生成预测有指导意义。董双<sup>[14]</sup>通过科学分析气井冻堵的规律和机理,开展了有针对性的气井天然气水合物冻堵防治措施研究。杨刚等<sup>[15]</sup>对雅克拉、大涝坝、S3 凝析气田因节流效应井口回压金属管线冻堵原因进行了分析,有针对性地提出了解冻对策。

部分学者从流固耦合模拟、金属相分析、载荷分析、加工工艺等角度和方法出发,分析了节流阀所受冲击载荷、交替应力。考虑本身材质、外部加工,以及设计因素,提出阀杆强度和设计的改进意见。邢大伟等<sup>[16]</sup>分析得出节流阀在高压流场中的轴向液压推力和横向推力公式,采用双向流固耦合计算方法,对楔形节流阀芯和锥形阀芯在流体冲击载荷作用下位移变化值进行对比分析。洪茂林等<sup>[17]</sup>对阀杆进行宏观检查、金相显微组织观察、化学成分分析、硬度测试试验和拉伸试验,表明阀杆同时受到交变应力和附加弯曲应力的共同作用,阀杆的硬度偏高,强度偏低,力学性能不符合要求,而且长期在高应力的交替作用下导致其发生疲劳断裂。贾林等<sup>[18]</sup>建立了液体节流阀阀腔的计算域与固体阀芯的计算域,对流场与阀芯进行了流固耦合运算,研究了节流阀阀芯在不同开度条件下的振动位移。高世德等<sup>[19]</sup>认为,阀杆失效的主要原因是杆体与锥体连接结构不合理,在高速含砂流体的冲刷、交变载荷的作用和高频振动的工况下,硬质合金锥体断裂、脱落,导致节流阀无法正常工作。熊

海斌等<sup>[20]</sup>认为,导致针式节流阀失效的主要原因有整体式阀杆的阀芯头硬度不够、阀芯头与阀杆连接的焊接工艺达不到要求等,提出阀杆整体喷焊的措施。

以上模拟研究,未考虑部分油气田的多相流因素,主要是针对锥型节流阀的模拟,大部分没有结合离散相模型和磨损模型进行模拟,没有对针型节流阀的节流改进设计。故在此考虑结合数值模型和离散相冲蚀模型,针对针型节流阀开展多相流模拟,来帮助认识针型节流阀失效原因和规律,从而提出改进措施。

## 1 数学模型

本研究结合数值模型和离散相冲蚀模型,针对针型节流阀开展多相流模拟。

### 1.1 湍流模型

采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型作为湍流模型,通过修正湍动黏度来模拟平均流动中的旋转及旋转流动情况,能够较为准确地预报突扩突缩管内局部漩涡流动,其湍动能  $k$  和湍流耗散  $\varepsilon$  的输运方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{1\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $G_k, G_b$  为模型参数,分别由平均速度梯度和浮力引起的湍动能  $k$  产生项,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ ;  $Y_M$  为模型参数,在可压缩湍流中脉动扩张的贡献,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ ;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$  为模型常量(值分别为 1.44、1.68);  $S_k, S_\varepsilon$  为由用户定义的源项(非固定参数);  $k$  为湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\varepsilon$  为湍流耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $u_i$  为流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $x_i, x_j$  为通用坐标,  $\text{mm}$ ;  $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  为模型常数;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效湍流黏性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $R_\varepsilon$  为模型参数,  $\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2/\text{s}^{10}$ 。

### 1.2 可压缩流体黏度修正

气井测试过程中,可压缩性远大于液体的气体流经两端压差变化加大的油嘴时,气体节流后压力变化引起体积膨胀,进而导致的高流速及温降现象不可忽略,应将流动介质视为可压缩流体进行计算,并对其黏度采用 Sutherland Viscosity Law 的三参数法进行修正。黏度计算公式为

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \tag{3}$$

式中: $\mu$  为温度  $T$  时流动介质黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_0$  为温度  $T_0$  时流动介质黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $T_0, T$  分别为初始和终态气体温度,  $\text{K}$ ;  $S$  为 Sutherland(萨瑟兰)常数。

1.3 冲蚀模型

Fluent 中, 冲蚀速率计算公式为

$$R_e = \sum_{p=1}^{N_p} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_f} \tag{4}$$

式中: $R_e$  为冲蚀速率,  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;  $m_p$  为颗粒质量,  $\text{kg}$ ;  $\alpha$  为颗粒路径与壁面间冲击角,  $(^\circ)$ ;  $v$  为颗粒相对速度;  $A_f$  为壁面面积,  $\text{m}^2$ ;  $C(d_p)$  是与颗粒粒径有关的函数;  $f(\alpha)$  是与颗粒冲击角度有关的函数;  $b(v)$  是关于颗粒速度的函数。

Fluent 默认冲蚀速率计算公式中, 上述函数中值分别为  $1.8\times10^{-9}$ 、1、0。当三个函数值均为常数时, 无法正确反映管内冲蚀过程与颗粒大小及颗粒冲击角度之间的关系, 从而导致计算结果偏离实际情况。笔者在前人关于颗粒冲击角对冲蚀速率影响规律研究的基础上, 采用自定义函数的方式, 对 fluent 默认冲蚀模型进行了修正, 并将其应用于对针型节流阀的冲蚀计算中。

2 针型节流阀流场

采用数值模拟方法, 建立针型节流阀模型, 并对节流流场进行分析。

2.1 数值模拟模型

利用 Fluent 数值模拟软件<sup>[11-12]</sup>, 基于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型、Eulerian 多相流模型, 视针形节流阀内部天然气的真实流动为理想气体的黏性流动, 建立三维完全结构化网格, 采用压力入口及压力出口边界条件, 假定入口压力 43.39 MPa, 出口压力 23.5 MPa。流场计算稳定后, 对固定油嘴进行冲蚀计算, 采用速度入口及压力出口边界条件, 固体颗粒由入口面释放, 且其进入速度等于入口处的流体速度。颗粒相在壁面处的边界类型为反弹, 在出口处的边界类型则为逃逸。另外, 颗粒质量流量为气体质量流量的 0.3%, 此条件下固体颗粒体积浓度小于 10%, 符合 Fluent 中离散相模型的相关要求。

2.2 节流流场分析

由图 1 看出, 当高压天然气以一定速度由入口流入针型可调节流油嘴, 经过入口稳定段、锥型节流段、膨胀段及出口恢复段由油嘴出口流出。

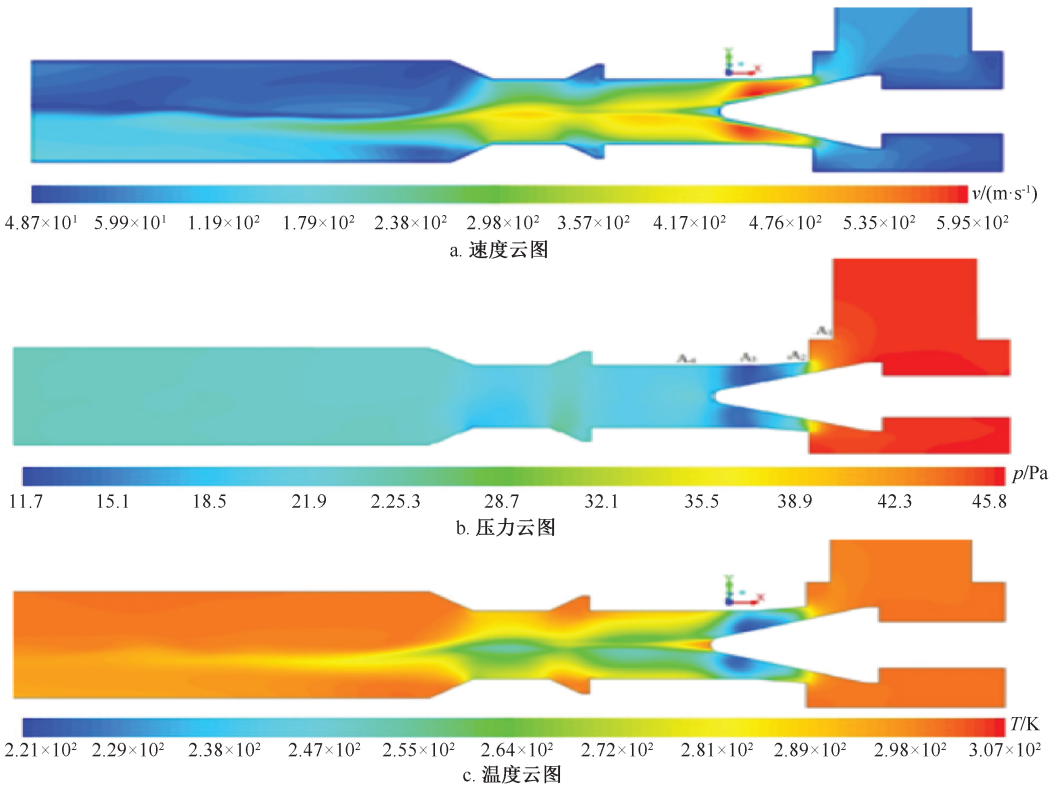


图 1 针型可调油嘴流场速度压力温度云图

Fig.1 Cloud chart of flow field, velocity, pressure and temperature of needle type adjustable nozzle



天然气在入口稳定段流动时,流体流动相对稳定。流经锥型节流段时,流通截面突然缩小,压力急剧降低,由于气体的可压缩性,天然气体积膨胀,速度迅速升高,同时由于流体流经节流孔时的节流降温效应,天然气温度明显降低。经过锥型节流段后天然气进入膨胀段,由于流通截面积的增大,气体速度降低,压力以及温度得到一定的回升,最后经出口稳定段流出油嘴。

### 3 水合物冰堵分析

图2为天然气经过锥型节流段时,在不同横截面上的速度、压力及温度横截面平均值曲线。由曲线可以看出,天然气经过锥型节流段时,温度与速度变化趋势刚好相反。速度最高时,温度以及压力达到最低值,并且速度最高点并未出现在节流面积最小处,这是由于气体的可压缩性而引起的射流所造成的。由图中温度曲线可以看出,在入口稳定段温度分布比较均匀,温度约为27℃左右,在油嘴芯锥面过流截面最小处,逐渐降低,在锥形油嘴芯后半部分,速度达到最高时,温度最低约为零下30℃左右。水合物的生成主要条件是高压、低温及含水,如果油嘴开度过小,温度降低过大,极易生成天然气水合物而堵塞油嘴。可以通过实验或者计算生成气井水合物预测曲线,根据井口压力和温度变化预测,判断井口水合物冰堵可能性,并提前采取伴热、注抑制剂等措施。

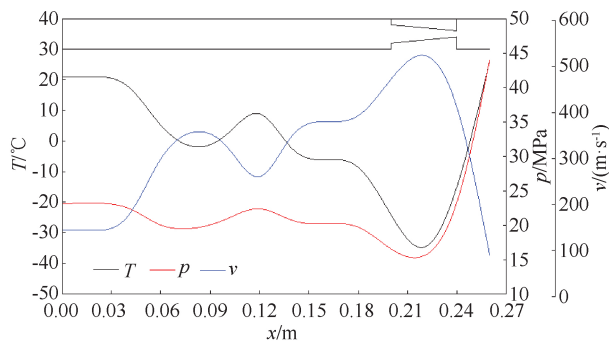


图2 针型节流阀速度、压力、温度横截面平均值曲线图

Fig.2 Average value curve of speed, pressure and temperature cross section of needle type throttle valve

### 4 阀杆脱落断裂分析

阀杆断裂与阀芯脱落与阀芯受到的静载荷和振动载荷有关<sup>[16,18,21-22]</sup>。由图3可以看出,可能引起阀杆断裂脱落的原因有三个方面,可以考虑调整阀杆背侧距离、强化阀杆、阀芯与阀杆一体结构设

计等措施改善侧向力和震动。

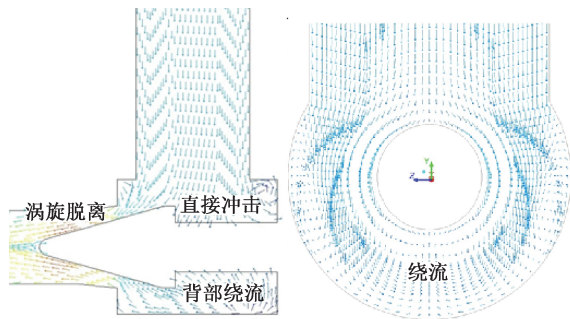


图3 针型可调油嘴流场速度矢量图

Fig.3 Velocity vector diagram of flow field of needle type adjustable nozzle

(1) 流体流经入口稳定段后,以一定速度直接撞击到阀杆及阀芯上的冲击作用。

(2) 进入节流段前绕流引起的横向振动。液流从一侧进入阀腔流经锥型节流段时,流通截面缩小,速度的大小和方向也开始发生变化,处于来流管径中间区域的流体质点直接流入阀口进入下阀腔,而还有大部分质点先沿y轴负方向绕阀杆流向阀杆背侧,然后才沿x轴负方向流经针型节流段,导致这些质点的流动方向发生了急剧变化,从而使阀芯受到随机变化的横向作用力而产生横向振动。

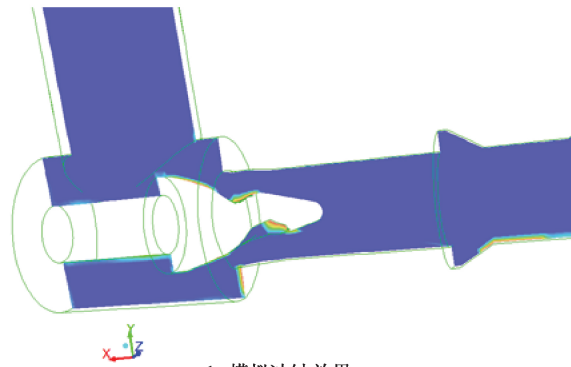
(3) 进入节流段后锥面上漩涡脱落引起的横向和纵向振动。流体通过节流口后进入逆压梯度的作用区域,在锥面附面层下部发生逆向流动,附面层上部流体依然具有正向速度,当上部顺流和下部逆流相接触时,势必使附面层与壁面脱离产生漩涡。当阀芯开度进一步减小,雷诺数逐渐增大时,流动就可能出现非对称的漩涡脱落,使得阀芯表面压力和切应力发生周期性变化,从而使阀芯发生横向和纵向振动。当漩涡脱落频率与锥阀的固有频率相一致时还可导致共振。

### 5 针阀冲蚀分析

对阀体部件,如阀腔、阀芯等的冲蚀主要来自那些高速撞击阀体部件的固体砂粒,塑性材料将发生切削磨损,脆性材料将发生断裂或疲劳磨损<sup>[8,23]</sup>。主要冲蚀部位在针形阀芯中部及阀座突缩处,冲蚀率达到最大0.01 115 kg/(m<sup>2</sup>·s),主要是由于流道截面积变小,流动速度升高,又是直角转弯结构,造成颗粒以一定的冲击速度对油嘴芯进行严重冲击。从图4可以看出,数值模拟计算得到的冲蚀损伤部位与实际损伤部位较符合。



a. 实际冲蚀情形



b. 模拟冲蚀效果

图 4 针型油嘴阀芯冲蚀图

Fig.4 Erosion diagram of needle nozzle valve core

可以从图 5 看出, 阀芯表面及下阀腔阀体表面冲蚀速率平均值沿轴向方向变化分布。阀芯锥形表面冲蚀速率最大位置在阀芯前半部分, 此处为可调针形油嘴内的主要冲蚀部位, 其它地方冲蚀速率较低。造成这种现象的原因主要是流体经过阀芯与阀座形成的渐扩的通道时, 首先在阀座突缩处得以节流, 压力降低, 流体开始加速, 随后随着针型阀锥形面导致流道又逐渐扩大, 进一步加大了流体膨胀升速, 进而砂粒在流体携带作用下在阀芯锥面上形成了小角度的冲击剥离作用, 故产生较大冲蚀损伤。

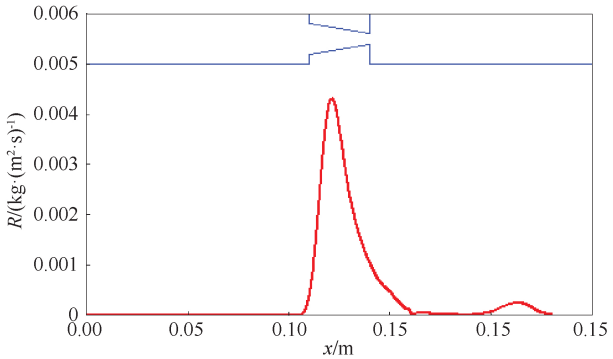


图 5 针型油嘴内表面冲蚀速率平均值沿轴线方向变化曲线  
Fig.5 Curve of average value of erosion rate of inner surface of needle nozzle along axis direction

上面分析可以看出, 阀芯与阀座形成环状线节流导致局部流速和冲蚀过大, 可改为顺应流动的面节流方式, 将油嘴套与阀芯之间的线节流设计改为锥面形式, 可降低局部冲蚀损毁。

6 结论

(1) 基于 Fluent 数值模拟方法, 结合冲蚀离散模型, 可有效模拟可调针阀节流特征, 可以帮助解决现实中节流特征难以观察的问题, 从而可以对改进针阀设计、提高使用寿命、降低失效率提供建议。

(2) 通过模拟研究, 认为节流后急剧温降易导致水合物堵塞, 温度最低部位在锥形油嘴后半部分。认识到流体直接冲击、节流段前绕流引起的横向振动以及节流段后锥面上漩涡脱落引起的横向和纵向振动易导致阀杆脱落断裂。另外, 由于流体膨胀快速升速冲蚀率在针形阀芯中部及阀座突缩处达到最大从而产生较大冲蚀损伤。

(3) 该研究方法适用于类似流场和冲蚀研究。下一步应进一步提出针型节流阀设计改进方案, 并通过模拟对比、现场实验进行验证, 拓展研究结果的实际应用。

致谢: 感谢中国石油大学(北京)王江云研究员在项目研究中提供的帮助。

参考文献

[1] 陈华良, 刘兴华, 张洋. 140MPa 超高压油气井地面测试技术[J]. 油气井测试, 2016, 25(6): 52-55, 58.  
CHEN Hualiang, LIU Xinghua, ZHANG Yang. 140 MPa ultra-high pressure well surface testing technology [J]. Well Testing, 2016, 25(6): 52-55, 58.

[2] 陈华良, 张洋. 塔中高含 H<sub>2</sub>S 凝析气井地面测试技术[J]. 油气井测试, 2017, 26(4): 63-65, 69.  
CHEN Hualiang, ZHANG Yang. Surface testing technology of Tazhong condensate gas wells with high content of H<sub>2</sub>S [J]. Well Testing, 2017, 26(4): 63-65, 69.

[3] 刘东明, 王瑞莲. 南约洛坦气田井口节流阀运行故障分析[J]. 石油工程建设, 2015, 41(6): 76-81.  
LIU Dongming, WANG Ruilian. Analysis of wellhead choke valve failure in South Yolotan gas reservoir [J]. Petroleum Engineering Construction, 2015, 41(6): 76-81.

[4] 杨廷玉, 黎洪. 川东北高含硫气井测试作业安全控制技术浅谈[J]. 油气井测试, 2012, 21(3): 72-74.  
YANG Tingyu, LI Hong. A brief discussion on security control technology of gas well testing operation containing high Sulfur in Northeastern Sichuan gas field [J]. Well Testing, 2012, 21(3): 72-74.

[5] 王磊. 节流油嘴损坏原因分析[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(5): 38-40.  
WANG Lei. Chokes damage analysis [J]. Inner Mongolia

- Petrochemical Industry, 2010,36(5):38-40.
- [6] 刘鹏,董伟,曾庆辉,等. 南海高温高压气田油嘴冲蚀分析[J]. 中国石油和化工,2016(S1):96.  
LIU Peng, DONG Wei, ZENG Qinghui, et al. Erosion analysis of chokes in HPHT gas field in South China Sea [J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2016(S1):96.
- [7] 王江云,彭贤强,刘玲莉,等. 高压天然气多孔节流效应及冲蚀特性分析[J]. 石油学报(石油加工),2018,34(3):521-529.  
WANG Jiangyun, PENG Xianqiang, LIU Lingli, et al. Multi-hole throttling effect and the erosion characteristics of the high pressure natural gas [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2018,34(3):521-529.
- [8] 宋保健,明鑫,孙凯,等. 楔形节流阀冲蚀磨损规律研究[J]. 石油矿场机械,2018,47(4):30-34.  
SONG Baojian, MING Xin, SUN Kai, et al. Study on the erosion law of wedge-shaped throttle valve [J]. Oil Field Equipment, 2018,47(4):30-34.
- [9] 殷伟伟,殷舜时,未莉莉,等. 针型节流阀内部液固两相运动及壁面磨损研究[J]. 石油机械,2016,44(6):96-101.  
YIN Weiwei, YIN Shunshi, WEI Lili, et al. Study on liquid-solid two-phase movement and wall wear in the needle shape choke valve [J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(6):96-101.
- [10] 张圆,周海,黄建军,等. 基于 FLUENT 的锥形节流阀数值模拟和气穴分析[J]. 石油矿场机械,2016,45(3):58-61.  
ZHANG Yuan, ZHOU Hai, HUANG Jianjun, et al. Numerical simulation and cavitation analysis of taper throttling valve based on FLUENT [J]. Oil Field Equipment, 2016,45(3):58-61.
- [11] 张晓东,李俊华. 基于 Fluent 的锥形节流阀流场数值模拟[J]. 石油矿场机械,2009,38(9):50-52.  
ZHANG Xiaodong, LI Junhua. Numerical simulation for flow field of conical wing valve based on Fluent [J]. Oil Field Equipment, 2009,38(9):50-52.
- [12] 曾伟,吴巍巍. 基于 Fluent 的高压针形节流阀冲蚀磨损分析[J]. 内江科技,2013,34(6):74,79.  
ZENG Wei, WU Weiwei. Erosion and wear analysis of high pressure adjustable choke valve based on Fluent [J]. Neijiang Science & Technology, 2013,34(6):74,79.
- [13] 彭贤强,齐彦强,王文起,等. 多相流过气嘴节流温降特征[J]. 油气井测试,2006,15(3):11-13.  
PENG Xianqiang, QI Yanqiang, WANG Wenqi, et al. Temperature falling character after choke throttling [J]. Well Testing, 2006,15(3):11-13.
- [14] 董双. 雅克拉采气厂气井天然气水合物冻堵防治措施研究[J]. 石化技术,2018,25(3):26.  
DONG Shuang. Study of freeze protection and anti-clogging measures for hydrate in Yakela gas production plant gas wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018,25(3):26.
- [15] 杨刚,代维,梁根生,等. 凝析气田单井井口回压集输管线冻堵分析及解决对策[J]. 石油化工应用,2011,30(2):86-89.  
YANG Gang, DAI Wei, LIANG Gensheng, et al. The analysis of individual well head back pressure collector pipeline frozen plugging problem and countermeasure on condensate field [J]. Petrochemical Industry Application, 2011,30(2):86-89.
- [16] 邢大伟,柴希伟. 节流阀芯流场受力分析及结构优化[J]. 西部探矿工程,2016,28(10):67-70.  
XING Dawei, CHAI Xiwei. Force analysis and structure optimization of choke valve spool flow field [J]. West-China Exploration Engineering, 2016,28(10):67-70.
- [17] 洪茂林,邱启明. 阀杆断裂分析[J]. 热加工工艺,2015,44(24):238-239,243.  
HONG Maolin, QIU Qiming. Stem fracture analysis [J]. Hot Working Technology, 2015,44(24):238-239,243.
- [18] 贾林,艾志久,王彪,等. 节流阀阀芯振动失效分析及结构改进[J]. 石油矿场机械,2013,42(4):29-32.  
JIA Lin, AI Zhijiu, WANG Biao, et al. Throttle spool vibration failure analysis and structure improvement [J]. Oil Field Equipment, 2013,42(4):29-32.
- [19] 高世德,邓利新,王宏吉,等. 针式节流阀阀杆连接结构改进[J]. 机械工程师,2012,21(3):163-164.  
GAO Shide, DENG Lixin, WANG Hongji, et al. Structure improvement of needle valve stem connection [J]. Mechanical Engineer, 2012,21(3):163-164.
- [20] 熊海斌,王向旗,刘新平. 针式节流阀的整体式阀杆加工工艺改进[J]. 石油机械,2007,35(3):67-68.  
XIONG Haibin, WANG Xiangqi, LIU Xinping. Improvement of processing technology for integral stem of needle throttle valve [J]. China Petroleum Machinery, 2007,35(3):67-68.
- [21] 王德玉,刘清友,何霞. 高压节流阀的失效与受力分析[J]. 天然气工业,2005,25(6):94-96.  
WANG Deyu, LIU Qingyou, HE Xia. Analysis on failure and force of high-pressure throttle valve [J]. Natural Gas Industry, 2005,25(6):94-96.
- [22] 蒋小丽. 高压气井针形节流阀结构性能分析与优化[D]. 成都:西南石油大学,2014.  
JIANG Xiaoli. Performance analysis and optimization of needle throttle valve in high pressure gas wells [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [23] 李悦钦,李友,战晓溪,等. 高压节流阀冲蚀机理研究[J]. 石油和化工设备,2010,13(4):31-33.  
LI Yueqin, LI You, ZHAN Xiaoxi, et al. Study on the reasons of choke's erosion in high pressure and high output conditions [J]. Petro & Chemical Equipment, 2010,13(4):31-33.

编辑 刘振庆

第一作者简介:刘玲莉,女,1980年出生,高级工程师,2006年毕业于中国石油勘探开发研究院油气田开发专业,长期从事油气田开发和试井技术工作。电话:010-59286016,13683514940;Email:liulingli@cnpicint.com。通信地址:北京市海淀区学院路20号石油大院,邮政编码:100083。