# 地面压裂管汇冲蚀风险 研究

## 张益臣<sup>1</sup>,张琳婧<sup>1</sup>,姜 艳<sup>2</sup>,王海宇<sup>3</sup>,张 鹏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司油气产能建设事业部,浙江 杭州 <sup>2</sup>国家管网集团建设项目管理分公司北方项目管理中心,河北 廊坊 <sup>3</sup>重庆科技大学安全科学与工程学院,重庆

收稿日期: 2024年9月23日; 录用日期: 2024年12月2日; 发布日期: 2024年12月12日

## 摘要

本文研究了压裂施工参数对地面高压管汇冲蚀的影响,重点探讨了不同施工工况下地面高压管汇的冲蚀情况。通过SolidWorks三维建模软件,建立了内径为88.90 mm的主管和内径为69.85 mm的支管的高压管汇几何模型,并采用控制变量法研究固体颗粒质量流量和流体流速对高压管汇冲蚀率的影响。利用Fluent流体仿真软件进行井下模拟计算。结果表明,当流体流速超过14 m/s时,固体颗粒对高压管汇的冲蚀显著增加。同时,在高流速和固体颗粒质量流量共同作用下,固体颗粒对高压管汇的最大冲蚀率提高了两倍。此外,冲蚀损伤的重点部位(如弯头和三通)在高压管汇中的安装位置不同,其在相同时间内受到的损伤也不同。根据不同部件所受的风险,可以更有效地指导压裂现场安全计划的制定。

## 关键词

高压管汇,Fluent,冲蚀仿真

## **Erosion Risk Study of Surface Fracturing Pipe Stack**

#### Yichen Zhang<sup>1</sup>, Linjing Zhang<sup>1</sup>, Yan Jiang<sup>2</sup>, Haiyu Wang<sup>3</sup>, Peng Zhang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Oil & Gas Capacity Building Division, Zhejiang Oilfield Branch, China National Petroleum Corporation, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Northern Project Management Centre, Construction Project Management Branch, National Pipe Network Group, Langfang Hebei

<sup>3</sup>School of Safety Sciences and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2024; published: Dec. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, the influence of fracturing construction parameters on the erosion of above-ground high-pressure pipe stack is investigated, focusing on the erosion of above-ground high-pressure pipe stack under different construction conditions. The geometric model of high-pressure pipe stack of the main pipe with an inner diameter of 88.90 mm and the branch pipe with an inner diameter of 69.85 mm was established by SolidWorks three-dimensional modeling software, and the influence of mass flow rate of solid particles and fluid flow rate on the erosion rate of high-pressure pipe stack was investigated by using the method of controlling variables. Fluent fluid simulation software was utilized to perform downhole simulation calculations. The results show that when the fluid flow rate exceeds 14 m/s, the erosion of solid particles on the high-pressure pipe stack increases significantly. Meanwhile, the maximum erosion rate of solid particles on the high-pressure pipe stack increased by two times under the combined effect of high flow rate and mass flow rate of solid particles. In addition, the priority parts for erosion damage (e.g., elbows and tees) were subjected to different damage at the same time depending on their installation location in the high-pressure pipe stack. Depending on the risk to different components, the development of a fracturing site safety program can be more effectively guided.

## **Keywords**

High-Pressure Pipe Stack, Fluent, Erosion Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

随着非常规油气资源开发的不断推进,水力压裂技术作为一种重要的增产增注手段在油气行业得到 广泛应用。在水力压裂工程中,地面高压管汇作为关键设备扮演着至关重要的角色,负责将高压流体输 送至井筒,从而实现对油气储层的增产。然而,随着压裂工程的频繁进行,地面高压管汇系统在工作过 程中不仅承受高压力的挑战,还常常面临固体颗粒携带所导致的冲蚀磨损问题。在这种极端的高压环境 下,地面高压管汇系统中的弯头、连续弯管和三通等结构复杂部位尤其容易遭受严重的冲蚀损伤。这些 损伤在持续高压作用下不断累积和恶化,极易导致管件突发性刺穿或爆裂。一旦发生此类故障,高压流 体将瞬间外泄,不仅会造成重大的设备损失,更会对现场作业人员的生命安全构成严重威胁。

近年来国内外学者[1]-[6]基于流体动力学对管道弯头冲蚀进行了大量研究。在大量理论和实验研究的基础上, Zhang [7]建立了一个二维冲蚀模型, 该模型考虑了颗粒碰撞与湍流的影响。研究结果显示, 在冲蚀计算中, 颗粒的径向和切向速度分量以及湍流流场的状态起着关键作用。Sahoo [8]采用喷气试验 台和 Taguchi 正交阵列实验设计,在不同测试条件下进行了冲蚀实验,研究了固体颗粒的微观结构变化 (如层状、双峰和等轴)对室温下 Ti-6AL-4V 合金冲蚀磨损行为的影响。结果显示,冲击速度是影响材料冲 蚀磨损的主要因素,冲击角度和颗粒尺寸次之。Ansari [9]测试了不同工艺条件下低碳钢和奥氏体不锈钢 的冲蚀磨损速率,并研究了工艺参数对冲蚀坑深度的影响。Singh 等[10]使用商用计算流体力学软件 Fluent 对 90°弯管内的浆料冲蚀磨损进行了研究。研究采用离散相冲蚀磨损模型,通过欧拉-拉格朗日方法求解 控制方程,预测了 90°弯管的冲蚀磨损状况,并进一步分析了弯管处的冲蚀磨损与速度分布及湍流强度之 间的关系。Masaya Suzuki [11]等人对固体颗粒同壁面的碰撞及不同直径颗粒的近壁面函数的设置。张继信等[12]采用 Fluent 软件构建了高压管汇中弯管的液固两相流模型,通过模拟计算得到了流体的压力分布和冲蚀磨损情况。结果显示,该模型能够很好地应用于水力压裂工况,且低角度切削磨损是固体颗粒导致管道内壁冲蚀的主要形式。刘琦等[13]基于欧拉-拉格朗日方法开展了 90°弯管的液固两相流数值模拟研究。结果表明,碰撞模型的选择对磨损预测的影响并不十分显著。滕烁等[14]利用 CFD 计算软件研究了油气输送弯管的冲蚀破坏情况。他们采用 K-ε 湍流模型和 DPM 颗粒相模型模拟了弯管内壁的多相流冲蚀现象。结果表明,弯管外侧压力最大,内侧流体速度最大,存在二次回流。弯头外侧壁面 40°~50° 区域的冲蚀磨损最严重,最大冲蚀率随流体速度和颗粒直径的增大而提升。王凯[15]等提出相对冲蚀率概念,并针对特定条件下固体颗粒的冲蚀现象展开了研究。他们重点关注了在固定流速环境中,特定大小的固相颗粒所表现出的冲蚀行为特征。李方淼[16]利于 Fluent 软件研究了 U 型管通径和曲率半径对冲蚀规律的影响,发现 U 型管的冲蚀速率随 U 型管通径、曲率半径的增大而减小。高凯歌[17]通过 CFD 软件研究不同压裂工况条件下对 69.85 mm 的双弯弧活动弯头冲蚀速率的影响,但不同工况对于整体压裂管汇冲蚀规律的影响缺少。

通过对近些年关于冲蚀特性文献的整理归纳,不难发现国内外学者的研究方向主要是对弯管和三通 管的单个元件冲蚀分析,未考虑多个弯头和三通管汇集所组成的高压管汇系统中各个元件之间的冲蚀特 性关联。本文利用 Fluent 软件研究了地面压裂管汇在不同流体流速和砂砾粒径条件下的冲蚀规律变化, 旨在为降低地面压裂管汇的安全风险提供数据支持。

## 2. 计算模型

#### 2.1. 流动基本控制方程组

高压管汇输送的介质为携带支撑剂的含砂压裂液,它可简化视为液固两相流,其中液相为水基压裂 液,固相为固体颗粒。在使用 Fluent 进行模拟时,压裂液液相可看作连续相,固相视为离散相。液相的 流动为三维、粘性、不可压缩的湍流流动,其流动方程包括连续性方程、动量方程和湍流模型方程,方 程[18]分别如下所示。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

式中 $\rho_s$ 为流体密度;  $u_i$ 为与坐标轴  $x_i$ 平行的速度分量。

2) 离散型连续方程

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

式中 $\rho_g$ 为流体密度; $u_i$ 为与坐标轴 $x_i$ 平行的速度分量。

3) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$
(3)

式中p为静压力; tij为粘性应力张量; pgi为重力体积力; Fi为其它体积力。

4) 湍流模型方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{k}{x_j}\right]}{\partial x_j} + G_k + G_b - Y_m - \rho\varepsilon$$
(4)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\varepsilon}{x_j}\right]}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - C_{1\varepsilon}C_{3\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_b$$
(5)

式中 k 为湍流动能;  $\mu_t$  为湍流的粘度;  $G_k$  为平均速度梯度产生的湍流动能;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能;  $Y_m$  为可压缩湍流波动扩张对整体耗散率的影响;  $\epsilon$ 为湍流动能耗散功率;  $\sigma_k$  为湍动能 k 的湍流普朗特数;  $\sigma_\epsilon$ 为耗散率 $\epsilon$ 的湍流普朗特数。Fluent 中默认值为  $C_{1\epsilon} = 1.42$ 、 $C_{2\epsilon} = 1.68$ ,  $C_{3\epsilon} = 1.83$ 。

## 2.2. 颗粒相运动方程

高压管汇中固体颗粒的体积分数通常小于 10%,可忽略颗粒间的相互碰撞,在 Fluent 软件中采用 DPM 模型对固体颗粒进行冲蚀数值模拟计算,离散相模型中颗粒的动力学方程为:

$$\frac{\mathrm{d}u_{ip}}{\mathrm{d}t} = F_D \left( u_i - u_{ip} \right) + \frac{g_i \left( \rho_p - \rho \right)}{\rho_p} + F_{ip}, \quad i = 1, 2, 3$$
(6)

式中, $u_i$ 为连续相速度分量; $u_{ip}$ 为颗粒速度分量; $\rho$ 为连续相密度; $\rho_p$ 为颗粒密度; $F_D$ 为颗粒单位质量重力与浮力的合力; $F_{ip}$ 为颗粒上除曳力和重力之外的其它作用力; $F_D(u_i - u_{ip})$ 为单位质量颗粒受到的流动阻力。

$$F_{D} = \frac{18\mu}{\rho_{p}d_{p}^{2}} \frac{C_{D}R_{e}}{24}$$
(7)

式中, $\mu$ 为流体动力粘度; $d_p$ 为颗粒直径; $R_e$ 为相对雷诺数, $R_e = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu}$ 为连续相速度; $u_p$ 为颗粒相速度; $C_D$ 为阻力系数。

#### 2.3. 冲蚀模型

地面高压管汇冲蚀受到流速、颗粒粒径大小、质量流量和材质等因素的影响。本文使用 Oka 模型计算高压管汇冲蚀规律。Oka 模型基于实验数据和理论分析,考虑了多种影响侵蚀过程的因素,包括颗粒的冲击角度、冲击速度、颗粒大小以及靶材料的性质等。这使得该模型能够较为准确地预测各种工况变化下的侵蚀情况。模型公式如下:

$$E = K \left(\frac{V_p}{V_{ref}}\right)^n f\left(\alpha\right) \tag{8}$$

式中: E 是侵蚀率(kg/m<sup>2</sup>·s), K 是材料常数,  $V_p$ 是颗粒冲击速度,  $V_{ref}$ 是参考速度(通常取 1 m/s), n 是速度指数(通常在范围 2.3~2.5 之间),  $f(\alpha)$ 是角度函数,  $\alpha$  为冲击角度。

角度函数 $f(\alpha)$ 进一步定义为:

$$f(\alpha) = (\sin \alpha)^{a} \left(1 + H_{\nu} \left(1 - \sin \alpha\right)\right)^{b}$$
(9)

式中: a, b 是与材料相关的常数, H, 是材料的维氏硬度。

DPM 侵蚀率模型中的 Oka 模型通过经验公式和实验数据,提供了对颗粒侵蚀行为的有效预测方法。

它在工业应用中具有重要意义,能够帮助工程师设计防护措施,延长设备使用寿命,降低维护成本。然 而,模型的精确应用需要结合具体工况进行参数校准和验证。

#### 3. 数值模拟

#### 3.1. 模拟参数设置

基于现场压裂施工实际参数,建立地面压裂管汇模型,设置进口边界条件为速度入口,管壁为反射 边界,假设管段进口处支撑剂和携砂液的速度方向一致且初始速度相同。管道入口速度 8~16 m/s,出口 压力 105 MPa。压裂液采用水基压裂液,在模拟设置中选取滑溜水,其密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>,粘度为 0.001 Pa·s。作为支撑剂的固体颗粒选取石英砂,其粒径大小 450 µm 密度为 3300 kg/m<sup>3</sup>。

#### 3.2. 网格设置

管汇模型应用 SolidWorks 三维建模软件对固体域进行几何建模,主管内径 88.90 mm,支管内径 69.85 mm,采用 Mesh 软件对高压管汇流体域进行非结构化网格单元划分。对网格进行无关性验证,发现网格数量超过 3.9×10<sup>6</sup>后,最大冲蚀磨损速率趋于稳定。为提高数值模拟精度,在高压管壁面处加入边界层 网格,如图1所示。



**Figure 1.** Diagram of the fluid domain of a high-pressure pipe stack 图 1. 高压管汇流体域网格图

## 4. 仿真结果分析

#### 4.1. 高压管汇冲蚀分析

从地面高压管汇整体冲蚀云图分析,可以看出管汇冲蚀率较大的区域主要分布在支管的连续弯管附 近以及主管路的三通管下游通道附近。入口直管段和弯头前部的冲蚀现象相对较轻。这主要归因于流体 在直管段内呈线性流动,携带的固体颗粒很少与管壁发生碰撞。然而,当流体进入弯头后,其运动轨迹 由直线变为曲线。由于固体颗粒与流体的密度差异,颗粒难以紧随流体的运动轨迹。这导致大量颗粒撞 击弯头外侧内壁,使该区域遭受较为严重的冲蚀损伤。弯头内侧虽然流速较高,但由于此处颗粒浓度较 低,冲蚀现象并不显著。当流体和颗粒离开弯头进入出口直管段时,受惯性影响,颗粒倾向于维持其原 有运动方向。这种惯性效应导致颗粒无法立即跟随流体的新流向,而是继续沿着之前的轨迹运动一段距 离。从图 2 观察分析,对于高压管汇而言,入口部分的弯管的冲蚀磨损远远低于管汇后段的弯头,初步 分析是由于管汇上游段的管道较规则,在长直管流域,固体颗粒被高压流裹挟着流动,使固体颗粒在重 力的作用下在直管段内形成方向稳定的流动。



Figure 2. Diagram of high-pressure pipe sink erosion 图 2. 高压管汇冲蚀云图

按图 2 所示,从出口开始按顺序将弯管进行编号。从冲蚀云图分析可以发现,弯管 1 位置的最大冲 蚀率在所有弯管中最低,而弯管 5 位置的冲蚀率最高。根据压裂管汇的整体冲蚀云图可知,固体颗粒在 高压流体的裹挟下,并没有形成过于紊乱的运动轨迹。在重力作用和液相流的裹挟流动下,对弯管 1 的 冲蚀损伤大幅减少。弯管 2、弯管 3、弯管 4 和弯管 5 属于连续弯管结构,由于压裂现场受到场地因素的 限制,通常采用多弯管连续连接。这使得这些弯管下端的直管较短,甚至没有直管,导致大量颗粒和流 体难以形成平稳流动。流体和固体颗粒在经过弯管时碰撞壁面并发生反射,流动的紊乱程度不断叠加, 增加了对弯管的冲蚀损伤。弯管 5 位于连续弯管段的末端,因此其冲蚀损伤最大,图 3 为管汇连续弯管 冲蚀情况和弯管 5 冲蚀情况。



在高压流体的裹挟下,固体颗粒在支管中不断碰撞,最终高速撞击连接主管的三通,并在主管中聚

集。所有支管注入的固体颗粒汇集到主管,使得主管面临的冲蚀损伤远大于支管,尽管主管没有弯头等 易受损管件。

三通作为主管连接支管的首个管件,固体颗粒在经过时受到流体影响和管壁碰撞而改变方向,对管 壁造成显著的冲蚀损伤。如图 4 所示,由于流经的固体颗粒数量不同,主管下游的三通和直管所承受的 冲蚀损伤更为严重。



#### 4.2. 流体速度对地面压裂管汇的影响

在压裂施工工程中管汇中流体的速度受到泵注压力的影响,管汇内的流体流速存在波动。根据现场数据以8.0 m/s、10.0 m/s、12 m/s、14 m/s、16 m/s,得到不同流速对地面高压管汇的最大冲蚀率,如图5 所示。



**Figure 5.** Diagram of Effects of fluid flow rate on erosion of high-pressure pipe stack 图 5. 流体流速对高压管汇的冲蚀影响

由图 5 可知,随着管汇内流体流速的持续攀升,固体颗粒对管汇的最大冲蚀率呈现出明显的递增趋势。特别值得注意的是,当流速超过 14 m/s 这一临界点后,最大冲蚀率随速度的增加而急剧上升,呈现出近乎指数级的增长态势。

## 4.3. 支撑剂质量流量对地面压裂管汇的影响

压裂施工中,支撑剂流量是决定高压管汇冲蚀程度的关键因素。实际施工中,压裂液中的砂含量会随时间呈阶段性变化。设定支撑剂质量流量分别为 2.5 Kg/s、3.75 Kg/s、5 Kg/s、7.5 Kg/s、8.34 Kg/s,计

算得出不同质量流量浓度对地面高压管汇的冲蚀规律,得到不同质量流量对地面高压管汇的最大冲蚀率, 如图 6 所示。



**Figure 6.** Diagram of the effect of mass flow rate on the erosion of high pressure pipe stack 图 6. 质量流量对高压管汇的冲蚀影响

由图 6 可知,质量流量对高压管汇的冲蚀影响呈现正相关关系,随着质量流量的增加管汇的最大冲蚀率也随之递增。低流体流速时,质量流量变化对高压管汇最大冲蚀率影响幅度较低,当流体流速低于 12 m/s 时高压管汇最大冲蚀率随质量流量上升而上升的幅度较低。随着流体流速达到 16 m/s 时,在质量流量因素相互作用下对高压管汇的冲蚀伤害更大。

## 5. 结论

1)根据井场压裂管道布置参数,对整体高压管汇组合方式开展冲蚀研究,结果表明整体管汇内压力 沿流动方向从进口到出口,总体是逐渐减小的,而从最左侧支管到最右侧支管,各个支管内的进口压力 和出口压力也都呈现依次减小的特征,且每个支管的弯头处均是外侧压力高于内侧压力。四个支管的流 速分布基本相同,除近壁面外,每个支管的弯头内侧速度大于外侧速度,相比于单一的高压管道冲蚀研 究,高压管汇冲蚀研究对现场压裂施工安全管理更具有意义。安装在管汇不同位置的弯头面临着不同的 冲蚀风险,针对不同冲蚀风险等级的弯头采取不同的安全管理方法,有助于提高企业的安全管理效率和 降低安全经费的过度使用,从而提高经济效益。

2) 流体流速是管道冲蚀研究的重点,流速的增加对管道冲蚀的影响幅度大。当流速超过 14 m/s 后,将大幅度提高管道冲蚀伤害。质量流量是影响管汇冲蚀的主要因素之一,固体颗粒质量流量对高压管汇的冲蚀损伤呈现正相关关系。过高的质量流量会和其他冲蚀因素(例如流速)的相互作用下,大幅度提高对 管汇的冲蚀损伤。

基于压裂施工参数开展管汇冲蚀研究,可以为现场压裂施工提供科学指导。在满足压裂施工要求的 前提下,协调施工参数和施工时间等因素,降低管道冲蚀风险。同时对压裂管汇系统进行整体研究,根 据管汇系统中不同位置弯管、三通面临的冲蚀伤害不同,制定有针对性的安全计划,可以提高现场安全管理效率和提高经费使用率。本文对压裂管汇冲蚀因素的研究虽然有所探讨,但仍存在一定不足。后续将进一步深入研究其他冲蚀因素对于压裂管汇的影响规律,为指导压裂现场施工参数的优化提供更为全面的数据支持。

## 参考文献

- [1] 代四维, 樊建春, 张党生, 等. 压裂双弯头液固两相流冲蚀影响数值分析[J]. 润滑与密封, 2024, 49(1): 9-14.
- [2] 黄艳娟, 周思柱, 李宁. 高压管汇材料疲劳性能测试及 P-S-N 模型曲线的拟合[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2024, 21(3): 55-61.
- [3] 李美求, 刘方, 张昆, 等. 管道冲蚀液-固数值模拟的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14497-14506.
- [4] 李申, 刘洋, 姚方旭, 等. 新型返排管汇关键结构液固两相流冲蚀特性分析[J]. 液压与气动, 2024, 48(3): 51-59.
- [5] 杨思齐, 樊建春, 李德宁, 等. 考虑载荷模拟作用的高压弯头冲蚀数值仿真[J]. 润滑与密封, 2024, 49(3): 112-119.
- [6] 杨思齐, 樊建春, 张来斌. 结构参数对压裂双弯头冲蚀及流致变形的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(10): 1-8.
- [7] Zhang, Y., Mclaury, B., Shirazi, S. and Rybicki, E.F. (2010) A Two-Dimensional Mechanistic Model for Sand Erosion Prediction Including Particle Impact Characteristics. *CORROSION* 2010, San Antonio, 14-18 March 2010, NACE-10378.
- [8] Sahoo, R., Mantry, S., Sahoo, T.K., Mishra, S. and Jha, B.B. (2013) Effect of Microstructural Variation on Erosion Wear Behavior of Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 56, 555-560. https://doi.org/10.1080/10402004.2013.767400
- [9] Ansari, R., Ghara, T., Adak, D.K., Desta, G., Das, S. and Haldar, B. (2018) Study on Erosion Wear of Steels under Varying Abrasive Jet. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 25027-25035. <u>https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.303</u>
- [10] Singh, J., Singh, J.P., Singh, M. and Szala, M. (2019) Computational Analysis of Solid Particle-Erosion Produced by Bottom Ash Slurry in 90° Elbow. *MATEC Web of Conferences*, 252, Article ID: 04008. https://doi.org/10.1051/matecconf/201925204008
- [11] 林楠. 输气管道中颗粒属性及流场作用对冲蚀磨损的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [12] 张继信,康健,樊建春,等. 压裂工况下油气田地面管汇的冲蚀磨损研究[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(8): 28-32.
- [13] 刘琦, 龙新平, 陈正文, 等. 90°弯管液固两相流动冲蚀磨损的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(5): 443-450.
- [14] 滕烁, 孙首群, 焦玉格. 石油化工管道弯头冲蚀磨损数值模拟[J]. 软件导刊, 2021, 20(1): 41-45.
- [15] 王凯, 李秀峰, 王跃社, 等. 液固两相流中固体颗粒对弯管冲蚀破坏的位置预测[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 691-694.
- [16] 李方淼. U 型弯管冲蚀数值模拟[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(1): 23-27.
- [17] 高凯歌, 闫柯乐, 孙少光, 等. 水力压裂工况对活动弯头冲蚀行为的影响[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6): 85-92.
- [18] 陈江林, 吕宏兴, 石喜, 等. T 型三通管水力特性的数值模拟与试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 73-77.