

# 140 MPa压裂管汇四通管道冲蚀模拟

刘 洋

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2024年7月30日; 录用日期: 2024年8月23日; 发布日期: 2024年8月30日

## 摘 要

随着页岩气开采难度的增加, 为了提高效率, 部分厂商设计了140 MPa高低压管汇撬, 由于压裂液的冲蚀以及管道工作处于高压环境, 高压管汇极易发生冲蚀磨损情况。针对140 MPa压力下四通管道的冲蚀磨损情况, 根据RNG $\kappa$ - $\epsilon$ 湍流模型和DPM冲蚀模型, 利用FLUENT仿真软件分析水力压裂情况下的管汇撬四通管道的冲蚀磨损规律。分析结果发现, 冲蚀磨损面主要发生在四通管道交汇处及附近管壁上。

## 关键词

压裂装置, 四通管道, 冲蚀磨损, 140 MPa

# Erosion Simulation of 140 MPa Fracturing Manifold Four-Way Pipeline

Yang Liu

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: Jul. 30<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2024; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

With the increasing difficulty of shale gas extraction, in order to improve efficiency, some manufacturers have designed 140 MPa high and low pressure manifold levers. Due to the erosion of fracturing fluid and high-pressure environment, the high-pressure manifold is prone to erosion and wear. Based on the turbulence model and DPM erosion model, FLUENT simulation software was used to analyze the erosion and wear patterns of the four-way pipeline under hydraulic fracturing pressure of 140 MPa. The analysis results show that erosion and wear surfaces mainly occur at the intersection of four-way pipelines and near the pipe walls.

## Keywords

Fracturing Device, Four-Way Pipeline, Erosion Wear, 140 MPa

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/>



Open Access

## 1. 引言

天然页岩气是一种十分常见且储备量巨大的非常规天然气资源, 由于其绿色可再生的特性, 其成为当代油气资源中十分重要的能源[1]。现阶段, 水力压裂技术正是开发页岩气的主要手段, 由于页岩气钻采情况越来越复杂, 钻井所需深度越来越深, 压裂设备要求的施工压力, 施工排量以及工作时间不断增加, 对比原有的 2000 型和 2500 型管汇撬, 140 MPa 压裂管汇撬具有更大的功率, 更大的排量以及更高的压力。针对深层开采的高压压裂情况要求, 主要有两种解决方法, 一种是采用多管汇结合, 采用多个泵压较低的高压管汇系统。第二种则是采取提高泵压和提升管汇强度的方法。第一种方法相对简单但耗费资金较高, 由此研究适应高压压裂工况的高压管汇就尤为重要。作为一种主要的油气输送设备, 140 MPa 压裂撬管汇撬高压管汇在油气工业中发挥着重要作用。140 MPa 压裂管汇撬采用水力压裂技术, 在大规模和长距离的工作情况中, 管汇撬的高压管汇不仅要承受内部压裂流体的高压脉动作用, 同时还会受到各种载荷的激励和振动。由于其在使用过程中所遭受的高温高压等复杂工况影响, 其存在着一定的安全隐患和性能瓶颈, 因此对其进行冲蚀磨损研究和优化是必要的。

目前针对水力压裂工况下高压管汇的研究分析还很少。徐亚东等[2]研究了高压管汇的冲蚀磨损规律分析了内壁直径, 弯管曲率半径和弯管弯曲度对于高压管汇的冲蚀规律影响。张继信等[3]针对高压管汇弯管冲蚀情况, 应用计算流体力学方法以及建立仿真模型, 分析了支撑液浓度, 流量流速, 动力黏度, 粒剂以及密度对于弯管冲蚀结果的影响。黄艳娟等[4]通过采用多种分布模型和不同的 S-N 模型对高压管汇进行了拟合分析, 为高压管汇的疲劳安全设计提供了有效证据。陶文杰等[5]研究了固液两相流对于四通管道的冲蚀作用, 对四通管道的冲蚀磨损情况进行了探究并提出了设计优化。

近年来随着压裂作业的规模和难度逐渐增大, 140 Mpa 管汇撬的研究和应用也随之越来越多。本文根据某厂设计的压裂管汇撬, 选择其中高压管汇的四通管道部分, 进行建模仿真, 对高压四通管道流体流动进行分析, 分析 140 MPa 压力下压裂液对管壁的冲蚀磨损规律, 寻找四通管道易被压裂液冲蚀磨损的区域并提出优化办法。

## 2. 几何模型建立与网格划分

据某厂设计的 140 MPa 压裂管汇撬设计并简化其四通几何模型, 其高压管汇为单管, 主管内径为 180 mm, 支管内径为 100 mm 连接方式分别为法兰及由壬。

根据 API 6A 标准, 设计主管法兰为 6BX 整体式法兰, 支管由壬为 FIG2002 型由壬, 压裂液从主管一侧进入并从主管另一侧及两侧支管流出。根据设计模型抽取流体域设置边界条件后划分网格如图 1 所示。

本文主要需提供对象及理论如下: (1) 介质为压裂液以及携沙液等; (2) 冲蚀磨损模型采用 Finnie 提出的塑性材料切削理论; (3) 湍流模型为 RNGk-ε 模型; (4) 壁面碰撞恢复系数采用 Forder 提出的壁面恢复系数。

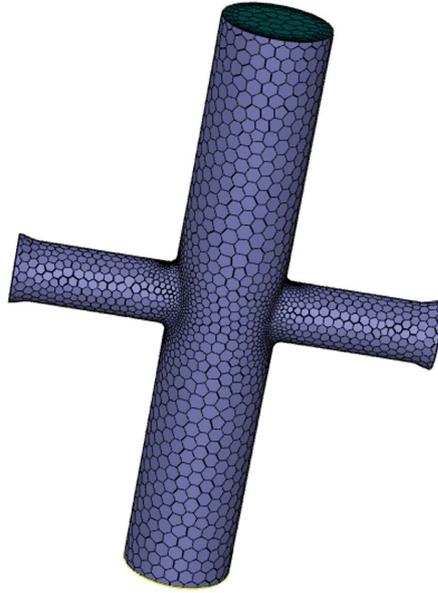


Figure 1. Grid division of four-way pipeline  
图 1. 四通管道网格划分

### 3. 数值模拟过程

#### 3.1. 离散相模型

近些年来，有关单液相的冲蚀磨损研究相当多，其研究通常依照美国 API-14E 标准进行分析。鉴于高压管汇内部的压裂液包括了水、支撑剂等多样介质，并且由于压裂液中固体颗粒的体积分数低于 10%，能够忽略粒子彼此的相互碰撞，可以视作液固两相流，因此能够运用 CFD 仿真里的离散相模型予以模拟。本文中，液体属于连续相，而磨粒属于离散相。该模型不仅能够观察颗粒间的受力状况，而且能够分析粒子与连续介质之间的相互作用关联。在仿真计算时，二者互不影响，最终获取管汇内部的整体流场的分布情形，以及磨粒的运动轨迹。离散相计算模型为：

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi} \quad (1)$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = F(u_{fi} - u_{pi}) |u_{fi} - u_{pi}| \quad (2)$$

$$F = \frac{3C_D \rho_i}{4\rho_p D_p} \quad (3)$$

式中： $f$ 、 $p$  为连续相、离散相；

$x$  为空间坐标位置；

$t$  为时间；

$u$  为运动速度；

$i$  为空间方位；

$F$  为固体颗粒所受的拖曳力；

$D$  为固体颗粒的直径；

$C_D$  为基于固体颗粒雷诺数；

$R_{ep}$  为定义的拖曳系数;  
 $\rho$  为密度。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & (Re_p < 1000) \\ 0.4 & (Re_p > 1000) \end{cases} \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{D_p \theta |u_{fi} - u_{pi}|}{\nu} \quad (5)$$

式中:  $\nu$  为连续相的运动粘度;

$u$  为基于 RANS 得到的时均速度。

### 3.2. FLUENT 冲蚀方程

本文的仿真分析是借助 FLUENT 软件来对 140 MPa 压裂管汇四通管道的冲蚀磨损现象进行仿真模拟。在该软件中, 冲蚀率被定义为在单位时间以及单位面积范围内冲蚀所造成的金属材料损失的质量。FLUENT 把冲蚀划分成三个阶段: 在流体流通过程中流体会牵引粒子进行运动, 首先软件会计算流体的牵引力; 之后, 软件会对粒子的运动以及撞击状况加以分析, 从而得出其粒子的运动轨迹; 最后, 可以依据材料表面的冲蚀分布和损失质量, 算出冲蚀率的数值[6]。

FLUENT 中冲蚀率的计算模型[7]为:

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (6)$$

式中:  $\dot{m}_p$  为颗粒质量流量, kg/s;

$C(d_p)$  为颗粒粒径函数, 一般取  $1.8 \times 10e^{-9}$ ,  $f(\alpha)$  为冲击角函数;

$N$  为发生碰撞的颗粒数量;

$v$  为相对碰撞速度, m/s;  $b(v)$  为冲击速度指数, 默认为 2.6;

$A$  为冲蚀计算面积,  $m^2$ 。

### 3.3. 湍流模型

压裂高压管汇撬结构复杂, 管道之间存在交汇处且有多处转折, 尤其在管道交汇处的流体容易形成涡流, 本文中根据计算可得雷诺数范围经过判断, 四通管道内部流体为湍流, 要考虑湍流模型。目前共有 7 类经常使用的湍流模型, 其中, 在大部分的流体分析中采用标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型, 该模型用于计算充分发展的湍流(即雷诺数值范围较高), 通过用以对耗散率  $\epsilon$  与湍动能  $\kappa$  予以描述的双方程模型。鉴于湍流存在各向异性, 其粘性系数属于各向异性张量, 然而标准的  $\kappa$ - $\epsilon$  模型的粘性系数却是各向同性标量, 所以, 在针对旋转、弯曲流动等情形进行计算时, 标准的  $\kappa$ - $\epsilon$  模型将会出现误差。为了解决这个问题 RNG $\kappa$ - $\epsilon$  模型随之出现, RNG $\kappa$ - $\epsilon$  模型主要针对在有旋涡、壁面弯曲率过高或流动轨迹过于弯曲等场合。由于本文冲蚀磨损对象是四通高压管道内的液固两相流, 且由于管汇撬存在多个迂回转折的特点, 故采用计算精度高、稳定性好的 RNG $\kappa$ - $\epsilon$  模型[8]。

### 3.4. 参数设置

根据油田工作经验, 管道内相关参数如表 1 所示。

**Table1.** Related parameters in the pipeline**表 1.** 管道内相关参数

管道工作压力 MPa	流体动力粘度 $\mu/(\text{pa}\cdot\text{s})$	支撑剂粒径 D (mm)	支撑剂密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^3)$	施工排量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$
140	0.001~0.03	0.18~0.85	1800~2500	$\leq 12$

设管道中流体为压裂液，管汇冲蚀主要原因为压裂液所携带的磨粒。在模拟仿真中可以假设管道入口的流体中水流体与磨粒以同种速度进入，根据所提供流量计算可得速度为 7.84 m/s，离散相设置为陶粒或石英砂，设计与离散相交，DPM 迭代间隔为 10，跟踪步数为 12000，步长因子为 5，其质量分数为 7%，根据钟功祥[9]等论文，不同直径颗粒对管壁的冲蚀磨损影响不同，当颗粒直径过大时会导致磨损结果不明显，因此选择颗粒直径为 0.425 mm、密度 1800 kg/m<sup>3</sup> 根据计算质量流量为 3.7 kg/s。液相可视为水，动力粘度为 0.001 pa·s，出口为压力出口设置压力为管汇撬工作压力 140 MPa，壁面为 wall。

根据数值模型分析，选择 FLUENT 中的 RNG $\kappa$ - $\varepsilon$  模型用于本文仿真计算。设置壁面边界条件为反射 (reflect)，将壁面边界条件设定为反射(reflect)，同时设定壁面碰撞恢复函数。当冲击粒子与管汇内壁发生撞击时，在能量迁移的过程中，会伴有能量的损失。故而，碰撞后的颗粒速度会比入射时的初始速度低。为了阐释这种前后的损失状况，引入了壁面碰撞恢复系数的概念，其中，法向恢复系数  $n$  表示碰撞前后垂直壁面的法向速度分量的比值；切向恢复分量  $t$  则代表碰撞前后与壁面相切方向的速度分量的比值。在 2001 年，在 2001 年之际，Wallance 把 6 种常见的壁面碰撞恢复方程予以对比，最后得知，在冲蚀模拟的过程里面，由 Forder [10]提出的恢复系数方程具备更为显著的优势，其后得到了广泛的应用。本文所探究的高压管道所用材料 35 CrMn。

壁面碰撞恢复函数：

$$\varepsilon_t = 0.998 - 0.029\alpha + (6.43e-4)\alpha^2 - (3.56e-6)\alpha^3 \quad (7)$$

$$\varepsilon_n = 0.993 - 0.0307\alpha + (4.75e-4)\alpha^2 - (2.61e-6)\alpha^3 \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为颗粒冲击角。

设置壁面为反弹壁面，需要设置法相恢复系数，切向恢复系数，粒径函数，速度指数函数以及冲击角函数五个参数，根据公式 5 和 6 设置磨粒壁面法相及切向恢复系数，根据冲蚀率计算模型设置粒径函数为  $1.8 \times 10^{-9}$ ，速度指数函数为常数 2.6，冲击角函数采用分段式函数。

## 4. 模拟结果分析

### 4.1. 四通管道流体分析

根据上文的准备工作，进行 140 MPa 下四通管道的流体流场分析，分析其速度及压力变化趋势，研究压裂液对四通管道的冲蚀磨损影响情况。得到速度云图，压力云图以及湍流动能云图。

管壁附近速度云图如图 2 所示。

由速度云图可知管道中央为流速最大位置，最大值为 8.94 m/s 明显大于平均流速，支管流体速度明显小于主管，因此粒剂轨迹很少停留在支管中。放大流速界面观察，在边界摩擦的影响下两管壁侧流体速度明显降低，形状如图 3 所示。

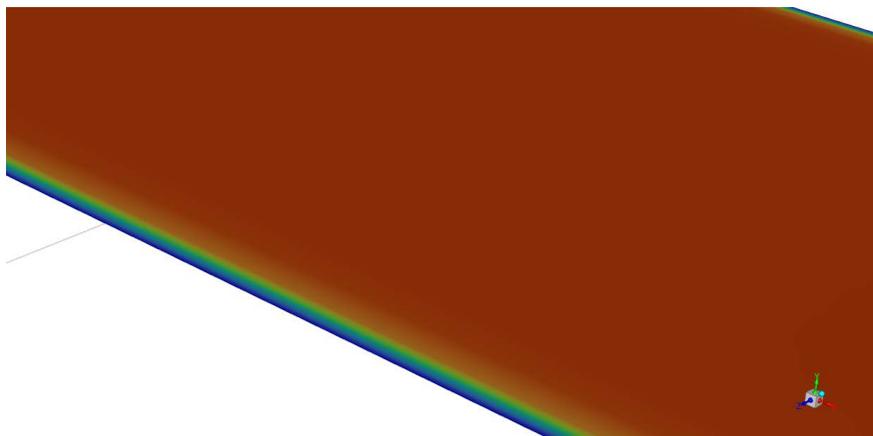


Figure 2. Velocity cloud map near the pipe wall  
图 2. 管壁附近速度云图

管壁压力云图如图 3 所示。

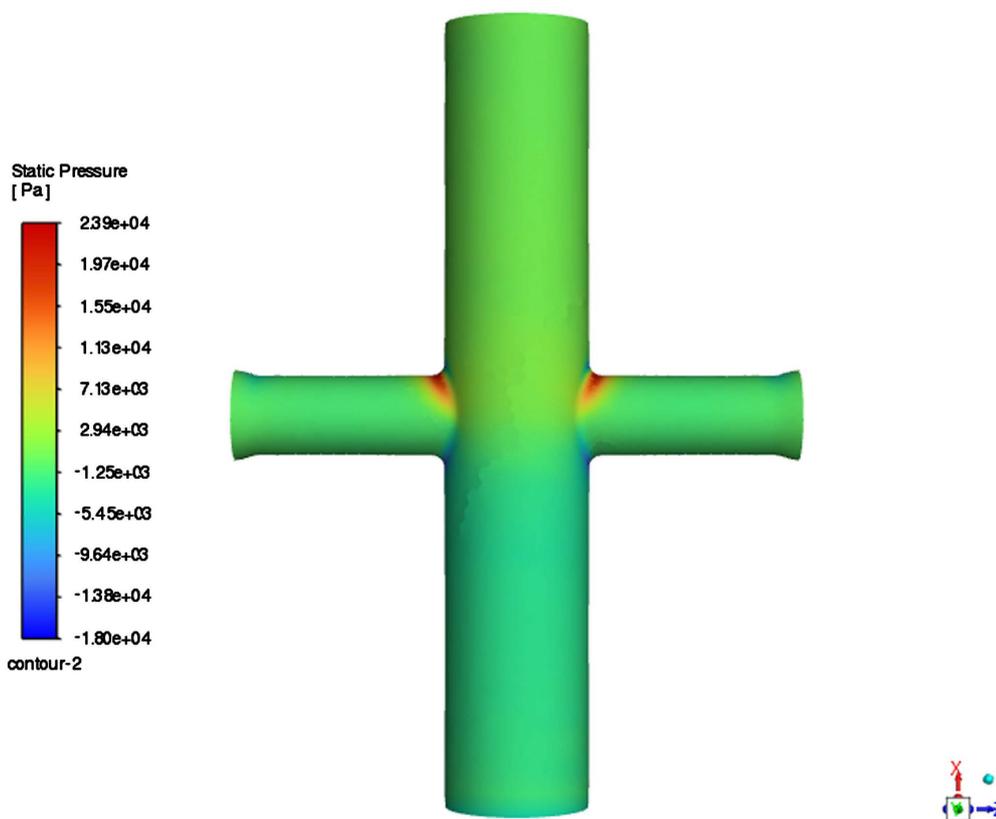
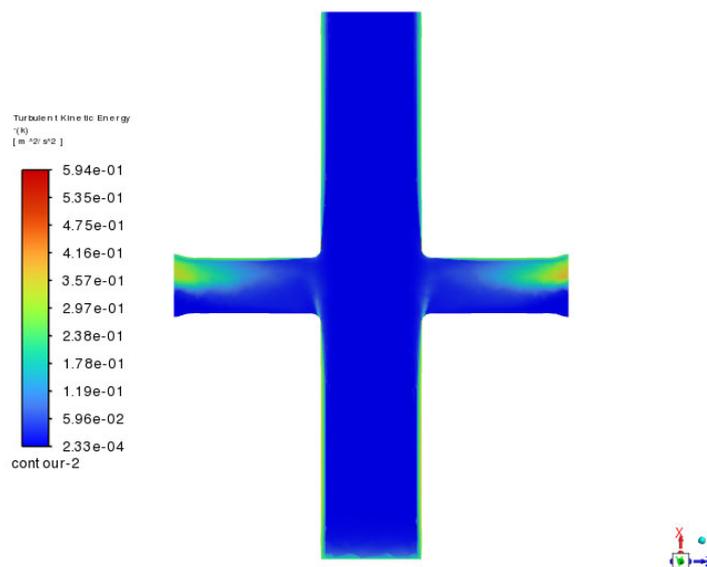


Figure 3. Cloud map of pipe wall pressure  
图 3. 管壁压力云图

从压力变化云图发现管壁压力整体趋势成梯状从出口开始减小，约有  $4.1 \times 10^4$  Pa 的变化，但管道压力最大值集中在四通管道交汇处，此时管壁受到压力作用最大。

其湍流能量云图如图 4 所示。



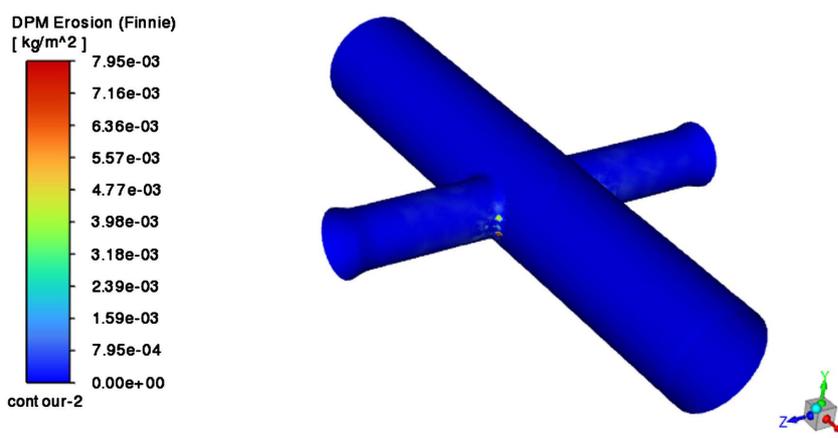
**Figure 4.** Turbulent flow energy cloud map  
**图 4.** 湍流动能云图

根据速度云图，湍流动能云图，发现主流体流动方向分布基本相同，结合管壁压力云图，根据颗粒路径推断管道冲蚀面应集中在管道交汇处，且最大磨损面出现方向应与管道流体方向一致[11]。

#### 4.2. 冲蚀磨损模型分析

因为压裂液为液固两相流，支撑剂中颗粒会以较小的冲击角切削管壁，产生磨损。而管壁上因为冲蚀磨损不同会出现明显的冲蚀集中面。

管壁的冲蚀云图如图 5 所示。



**Figure 5.** Cloud map of pipe wall erosion  
**图 5.** 管壁冲蚀云图

观察可见，冲蚀面主要集中在四通管道的管道交界面上，且出现方向为管道流体流动方向，此处的磨损原因主要为管道中支撑剂所携带沙砾冲击而成，且此处的磨损远远大于其他部位，因为在流体流动时支撑剂随液相流入，在压力和流速影响下紧贴壁面射入，管道的交汇处属于最先遭受高速颗粒冲击的

区域,大部分的支撑剂会以 $45^\circ$ 的角度对管道相接处进行冲击。据赵彦琳等分析[12],当支撑剂的冲击角为 $45^\circ$ 时,管壁的磨损程度最为严重,导致交汇处的磨损远大于其他区域,因此仿真结果显示管道交汇处的冲蚀磨损率远远大于其他部位,冲蚀最大值区域出现在管汇交接处,最大冲蚀可达 $7.85e^{-3} \text{ kg/m}^{-2}$ 。

放大管管交汇处冲蚀区域如图6所示。

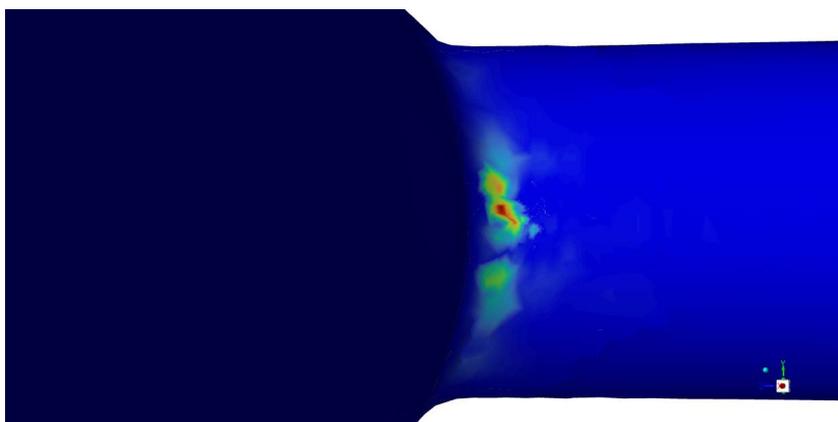


Figure 6. Erosion cloud map 1 of pipelines

图6. 管道冲蚀云图1

管道交汇处延伸冲蚀区域如图7所示。

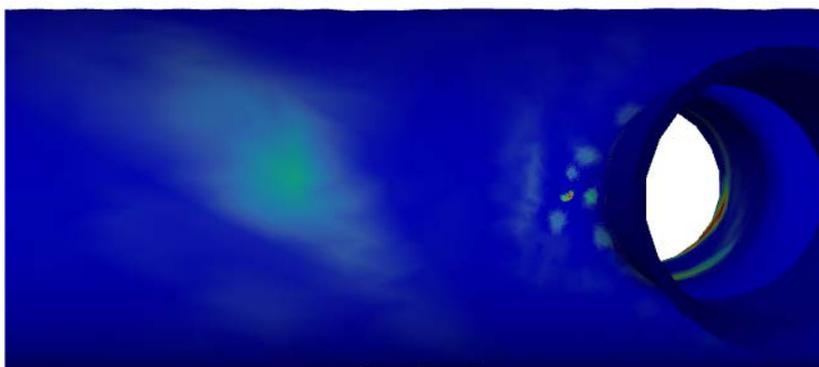


Figure 7. Erosion cloud map 2 of pipelines

图7. 管道冲蚀云图2

可以发现最大冲蚀区域位于管汇交接处,此外还有部分磨损区域沿着管壁靠近交界处区域如图7所示,冲蚀区域以不规则的方向向 $z$ 轴方向延伸,这主要是因为靠近两侧的支撑剂在测流影响下向两侧偏转,导致以较小的冲击角冲击管壁,结合文献[13]可知管汇冲蚀磨损情况与冲击角相关,因冲击角较小,且动能较低,此时的冲击磨损率远小于管道交汇处。

而管道其余地方冲蚀率较小且分布零散,在仿真结果中可忽略这些冲蚀对于管壁的磨损影响。结合理论可知仿真中管汇磨损集中部位与支撑剂冲击管壁部位一致。

## 5. 结论

(1) 140 MPa 压裂管汇四通管道在压裂工作中最大冲蚀磨损面出现在管道交汇处,尤其是管道流体流

动方向所处交汇处冲蚀磨损现象最严重,主要为管道中支撑剂所携带的沙砾冲击而成,最大冲蚀可达  $7.85 \text{ e}^{-3} \text{ kg/m}^2$ 。管道交汇处延伸区域会因颗粒偏转有较小的不规则冲蚀,而管道其余地方会有可忽略的小冲蚀区域。

(2) 综合以上结论,应将管道交汇处作为重点保护对象,可以通过适当增加此处管道直径、改善圆角等方法来减少应力集中,达到保护高压管道的同时节约成本的目的。

## 参考文献

- [1] 傅建斌, 靳彦欣, 等. 页岩气压裂高压管汇失效风险分析及防控措施[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(2): 39-44.
- [2] 徐亚东, 徐小兵, 陈飞跃, 等. 高压管汇冲蚀规律研究[J]. 石油机械, 2018, 46(2): 84-88.
- [3] 张继信, 樊建春, 汪彤, 等. 压裂液对高压弯管冲蚀作用的数值分析[J]. 润滑与密封, 2013, 38(4): 27-31
- [4] 黄燕娟, 周思住, 李宁, 等. 高压管汇材料疲劳性能测试及 P-S-N 曲线的拟合[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2024, 21(3): 55-61.
- [5] 陶文杰, 李美求, 等. 固液冲蚀作用下的四通管道设计与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(15): 6092-6098.
- [6] Finnie, I. and Mcfadden, D.H. (1978) On the Velocity Dependence of the Erosion of Ductile Metals by Solid Particles at Low Angles of Incidence. *Wear*, **48**, 181-190. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90147-3)
- [7] 张继信, 樊建春, 等. 水力压裂工况下 42CrMo 材料冲蚀磨损特性研究[J]. 石油机械, 2012, 40(4): 100-103.
- [8] 刘秀梅, 徐化文, 李贝贝, 等. 液压节流阀内非定常空化特性的数值分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 89-95.
- [9] 钟功祥, 胥卜轩, 谢锐, 等. 压裂液对四通管冲蚀磨损的仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(4): 534-541.
- [10] Forder, A., Thew, M. and Harrison, D.L. (1998) A Numerical Investigation of Solid Particle Erosion Experienced within Oilfield Control Valves. *Wear*, **216**, 184-193. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00217-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00217-2)
- [11] 戴义明, 丁智超, 王智, 等. 进 140MPa 井口压裂四通管道冲蚀分析[J]. 装备制造技术, 2021(4): 89-91, 96.
- [12] 赵彦琳, 杨少帅, 姚军, 等. 304 不锈钢两相流冲蚀腐蚀的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(8): 1504-1511.
- [13] Chen, X.Q. and Pereira, J.C.F. (1998) Computation of Particle Dispersion in Turbulent Liquid Flows Using an Efficient Lagrangian Trajectory Model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **26**, 345-364. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(19980215\)26:3<345::AID-FLD636>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0363(19980215)26:3<345::AID-FLD636>3.0.CO;2-G)