

大排量下四通管冲蚀磨损影响因素分析及寿命预测

刘晓东, 毕玉玺, 刘 苏, 王 石, 陆志天

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年8月19日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年9月25日

摘 要

针对管道输送中的冲蚀磨损问题, 采用计算流体力学(CFD)和离散相模型(DPM)对水力压裂下快接管汇装置四通部位的冲蚀磨损进行数值模拟, 分析了压裂液流速、颗粒质量流量等关键因素对冲蚀速率的影响。通过构建冲蚀磨损数学模型, 结合材料属性和允许壁厚损失, 预测压裂四通管汇的使用寿命。研究发现, 冲蚀磨损主要集中在相贯线及其附近的管壁上, 且冲蚀速率随流体速度和颗粒质量流量的增大而显著增加, 使用寿命随流体速度和颗粒质量流量的增大急剧下降。

关键词

水力压裂, DPM, 冲蚀磨损, 寿命预测

Analysis of Influencing Factors on Erosion Wear of Large-Displacement Cross Tees and Life Prediction

Xiaodong Liu*, Yuxi Bi, Su Liu, Shi Wang, Zhitian Lu

Chongqing University of Science and Technology, School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing

Received: Aug. 19th, 2025; accepted: Sep. 13th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

To address the issue of erosion wear in pipeline transportation, computational fluid dynamics (CFD)

*通讯作者。

文章引用: 刘晓东, 毕玉玺, 刘苏, 王石, 陆志天. 大排量下四通管冲蚀磨损影响因素分析及寿命预测[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 497-507. DOI: 10.12677/jogt.2025.473054

and the discrete phase model (DPM) were employed to numerically simulate the erosion wear at the cross-tee section of a quick-connect manifold assembly under hydraulic fracturing conditions. The effects of key factors, such as fracturing fluid velocity and particle mass flow rate, on the erosion rate were analyzed. By establishing a mathematical model for erosion wear and considering material properties along with the allowable wall thickness loss, the service life of the fracturing cross-tee manifold was predicted. The study revealed that erosion wear primarily concentrates on the intersection line and the adjacent pipe wall. Furthermore, the erosion rate increases significantly with higher fluid velocity and particle mass flow rate, leading to a sharp decrease in service life as these parameters increase.

Keywords

Hydraulic Fracturing, DPM, Erosion Wear, Life Prediction

Copyright © 2025 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

水力压裂作为油气开采领域中一种关键性的增产增注技术，现已在国内外油气行业中得到了广泛的认可和应用[1][2]。而地面高压管汇作为压裂过程中的关键部分，它负责将由压裂泵输出的高压流体集中并输送到井下，促使携带高强度支撑剂颗粒的高压流体在地下形成人造裂缝，以此增进油气的开采效率[3]。在这个过程中，高压管汇需要承受几十乃至上百兆帕的压力和携砂液的反复冲刷，易发生冲蚀磨损情况，特别是那些用于改变管道流动方向的部位，由于其独特的结构设计和内部流体流动方向的急剧变化，导致流体速度和压力产生突变，这种突变使得方向变化处的管道相较于其他部分受到冲蚀磨损的损害会更大[4]。因此，研究高压管汇转弯处部分的冲蚀磨损影响因素和分布规律，对提高高压管汇可靠性和预测寿命具有重要意义。

基于此，结合油田现场对压裂施工提出的高要求。本文通过构建离散相模型，深入探讨了大排量下压裂液在四通管区域的流动特性以及由此产生的冲蚀分布规律。在此基础上，我们进一步分析了压裂液速度、颗粒质量流量和颗粒粒径这三个关键参数对管道系统冲蚀磨损情况的具体影响，以指导现场作业及时维修更换，有利于减少管汇失效事故发生。

2. 模型建立及网格划分

2.1. 模型建立

图 1(a)为本研究结合现场情况设计的管道装置三维模型图，图 1(b)为通过三维模型图与现场情况对比简化的几何结构示意图。管道内径 D 为 130 mm，入口端和出口端的直管长度设置为 1000 mm，中段连接直管长度 L 设置为 3000 mm。以确保流体充足发展和准确计算。

2.2. 网格划分

采用 Fluent Meshing 对模型进行六面体网格划分，对四通管交汇处和管壁边界层网格进行加密处理，最终网格划分如图 2 所示，共 289,084 个网格。

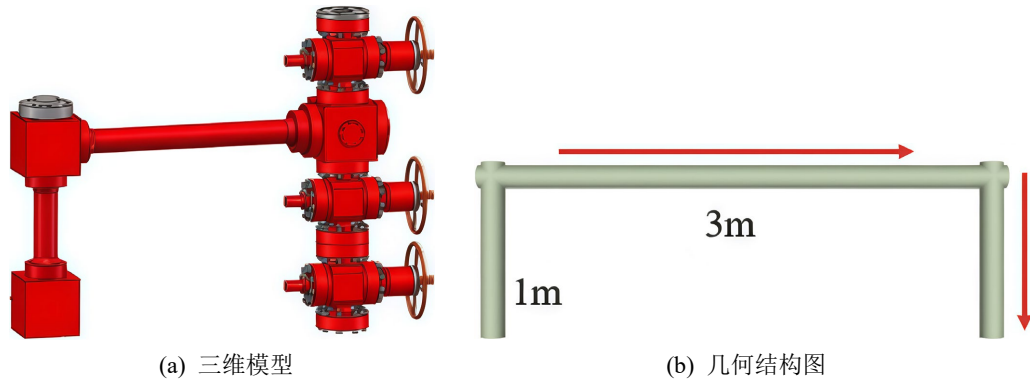


Figure 1. 3D model diagram and geometric structure diagram
图 1. 模型三维图、几何结构图

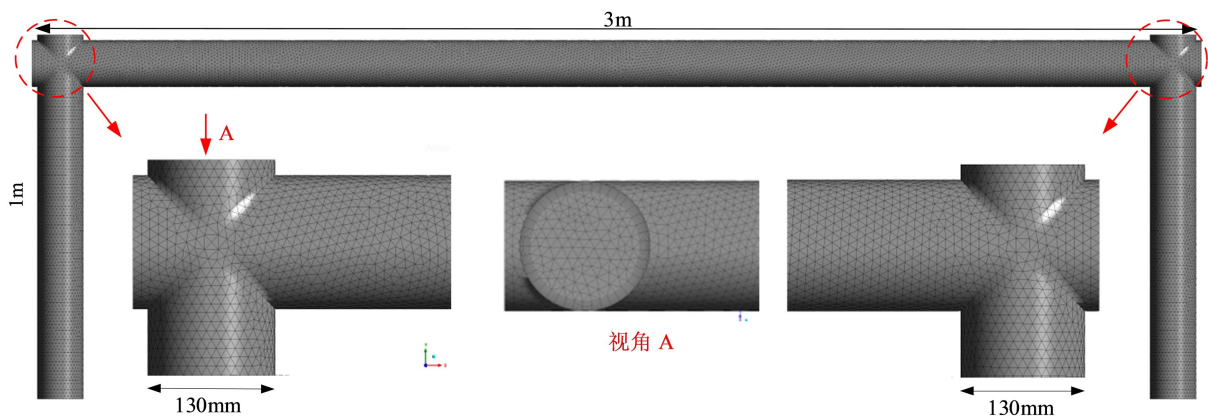


Figure 2. Schematic diagram of the computational mesh
图 2. 网格示意图

3. 数学模型及控制方程

3.1. 湍流模型

在高压管汇快连装置的几何模型中，由于包含多根管线，尤其在交汇的四通处，流场变得异常复杂，管道内部常出现回流、旋转等复杂流动现象。为了实现高精度的计算分析，我们选择 **Realizable κ - ε** 湍流模型来研究四通处的冲蚀磨损情况。**Realizable κ - ε** 模型是在经典的 **Standard κ - ε** 模型基础上进行修正和改进得到的，它能够更准确地预测流体在复杂几何结构中的扩散率和流动特性，这对于分析高压管汇四通处的流体行为尤为重要。其湍动能 κ 和湍动耗散 ε 的运输方程可以表述为[5]：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \rho \dot{\varepsilon} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

其中：

$$P_k = \mu_t S_{ij} S_{ij}, \quad \mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中 ρ ——流体密度;
 u_j ——速度分量;
 P_k ——湍动能产生项;
 μ ——分子黏性系数;
 S_{ij} ——应变率张量;
 C_u 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε ——模型常数。

3.2. 冲蚀磨损模型

高压管汇内部面的冲蚀磨损速率与压裂液流体速度、支撑剂颗粒质量流量、粒径大小等因素有关[6]。Generic 冲蚀模型是一个综合考虑颗粒浓度、粒径、冲击角度及冲击速度等多种参数对材料壁面侵蚀作用的常用模型。众多研究者以此为基础,进一步引入了颗粒形状系数、壁面材料硬度等变量,拓展了该模型在预测侵蚀行为方面的适用性。由于其综合性强、涵盖因素全面,本研究选用该模型进行分析。

冲蚀速率定义为在单位时间内、单位面积上材料损失的质量,用于量化侵蚀的严重程度。该速率受多个操作与物性参数的影响,其中颗粒的冲击速度、质量流量及粒径是主要影响因素。冲蚀速率的计算可通过以下模型表达:

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A} \quad (3)$$

式中: R_{erosion} 为内表面冲蚀速率,单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N 为冲击颗粒总数; m_p 为颗粒质量流量,单位 kg/s ; $C(d)$ 为颗粒粒径函数,取 1.8×10^{-9} ; $f(\alpha)$ 为冲击角函数,定义为线性分段函数; v 为颗粒相对速度,单位 m/s ; $b(v)$ 为相对速度系数,该装置材料为 30CrMo,取 2.6; A 为壁面单元面积,单位 m^2 。

4. 边界条件及仿真参数设置

在仿真模拟过程中,为准确反映实际工况,选用石英砂作为支撑剂颗粒,并依据现场数据设定入口质量流量与流速,将支撑剂体积分数控制在 20% 以内,以尽可能贴近工程实际。考虑到支撑剂颗粒的圆度与球度对其在高闭合压力下导流性能的重要影响,本模拟将所有颗粒简化为球形,并采用自入口法向均匀注入的方式引入。颗粒初始速度设定为与压裂液流速一致,以确保流固两相流动的耦合稳定性。

在边界条件设置方面,入口采用速度入口条件,用于定义流体进入计算域的初始速度分布;出口设置为压力出口,压力值为 90 MPa,用于模拟回压环境。在离散相模型(DPM)中,入口与出口边界均指定为逃逸(escape)类型,以合理描述颗粒一旦离开计算域即不再返回的物理行为。

对于壁面处理,连续相采用无滑移条件,模拟流体在壁面处的黏性作用;离散相则采用反射(reflect)条件,表示颗粒与壁面发生弹性碰撞。为进一步精确刻画颗粒与壁面碰撞过程中的动量变化,引入 Grant 壁面恢复系数模型,该模型通过分别定义法向与切向恢复系数的计算关系[7],量化碰撞带来的动能损失与反弹行为,从而提升冲蚀预测的准确性。

$$e_N = 0.993 - 0.0307\theta + 4.75 \times 10^{-4} \theta^2 - 2.61 \times 10^{-6} \theta^3 \quad (4)$$

$$e_T = 0.998 - 0.029\theta + 6.43 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.56 \times 10^{-6} \theta^3 \quad (5)$$

式中: e_N 和 e_T 分别为法向恢复系数和切向恢复系数。

为进一步研究压裂作业中工况参数对四通管冲蚀磨损行为的影响,结合江汉油田某区块的实际生产参数,选取携砂液流速、支撑剂颗粒质量流量、支撑剂粒径作为关键变量开展数值模拟。各参数的具体取值范围如表 1 所示。

Table 1. Simulation parameters and their value ranges
表 1. 仿真模拟工况参数及取值范围

参数	取值范围
压裂液流体速度/(m·s ⁻¹)	20~35
质量流量/(Kg·s ⁻¹)	20~140
含砂比%	5~20
支撑剂颗粒直径/mm	0.15~0.4
支撑剂密度/(Kg·m ⁻³)	2650
压裂液动力粘度/(Pa·s ⁻¹)	0.02

5. 仿真结果与分析

5.1. 四通管流场分析

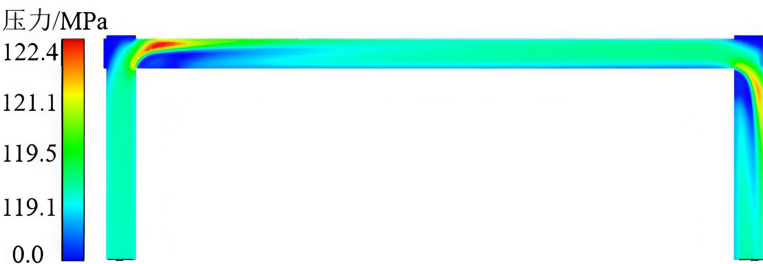
在压裂作业中，四通管交汇区域的内壁面临高速、高压支撑剂颗粒的持续冲击，并伴随强烈湍流效应。为提升计算收敛性，本研究采用基于压力 - 速度耦合的稳态 SIMPLE 算法求解流动控制方程。压力项、动量项及湍动能项均离散为二阶迎风格式，并通过标准化初始化方法自入口边界启动计算。

在各项工况参数中，选取流体速度 30.1 m/s (对应排量 24 m³/min)、支撑剂粒径 0.3 mm (40/70 目)及质量流量 60 kg/s 作为典型工况开展数值模拟。最终获取井口装置内部流场的压力分布、速度分布及壁面冲蚀速率分布云图，如图 3 所示。

根据图 3(a)所示的压力分布云图可以看出，井口装置入口与出口直管段内的压力分布较为均匀，且出口段压力略高于入口段。在四通管交汇区域可观察到明显的压力波动，并形成自外向内递减的径向压力梯度，外侧压力显著高于内侧。

图 3(b)展示了管道内的流体速度分布情况。在入口流速为 30.1 m/s 的条件下，装置内流体最大速度达到 54.4 m/s。高速区域主要出现在四通管出口肩部及水平段上侧。该现象可归因于流体流经四通管时流动方向的急剧改变，导致交汇区内侧形成低速区；在总流量恒定的条件下，部分区域出现流速增大，同时该处存在的显著压力波动也进一步影响了速度分布。

从图 3(c)所示的表面冲蚀云图可见，冲蚀磨损在进出口直管段均较轻微，主要集中于四通管交汇区域，且在出口连接处的外侧肩部达到最大值。造成该分布的主要原因包括：四通区域中存在的压力梯度、离心力和二次流等复杂流动结构，致使大量支撑剂颗粒持续密集冲击外侧壁面；同时，在流出四通区域后的出口段外侧，流体速度升高、颗粒冲击频率与数量增加，进一步加剧了该区域的冲蚀程度，从而形成最大冲蚀区。



(a) 流场压力云图

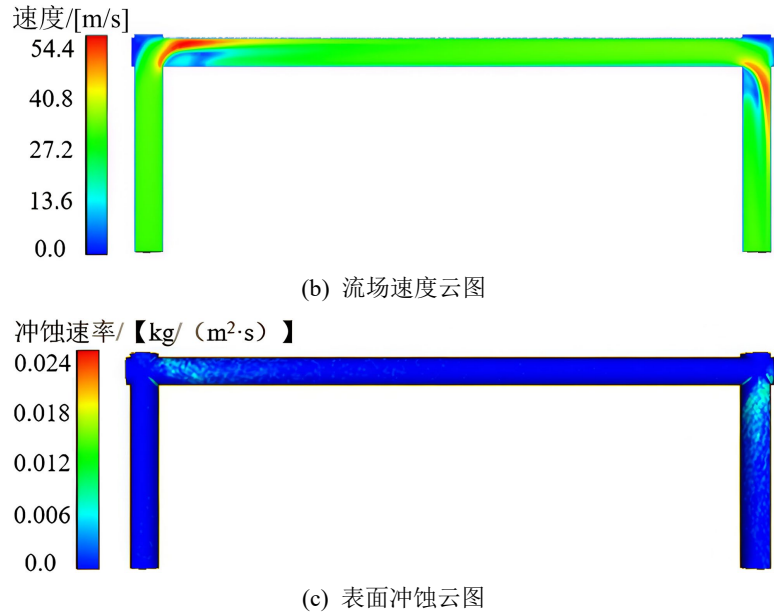


Figure 3. CFD result contour of the physical quantity field
图 3. 流场云图

5.2. 冲蚀特性分析

图 4 呈现了管道结构的冲蚀分布。从流体力学角度，流体在管道内流动时，受管道几何结构约束，流场会形成二次流等复杂流动形态；与此同时，流场产生的压力梯度会驱动颗粒运动，使颗粒运动方向改变。在二次流及主流的共同作用下，颗粒运动轨迹发生变化，流体与颗粒的耦合作用、压力梯度驱动下的颗粒加速冲击以及二次流对颗粒运动的引导等多因素共同作用，致使冲蚀并非均匀分布，而是集中于特定区域(区域①、②)。从主视图、俯视图的数模结果可见管道内存在明显冲蚀风险区域，将数模模拟的冲蚀分布与实际冲蚀图对比，模拟结果与实际冲蚀位置高度吻合，有力验证了数模分析的准确性。

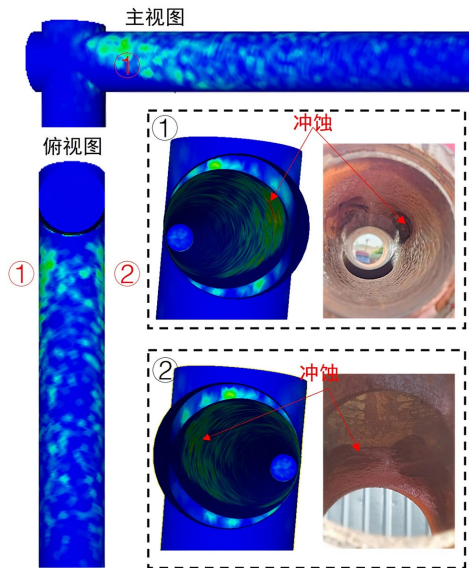


Figure 4. Erosion rate contour
图 4. 冲蚀分析图

5.3. 流体速度对冲蚀磨损的影响

在支撑剂颗粒质量流量 60 kg/s ，颗粒粒径为 0.15 mm (70/140 目)、 0.3 mm (40/70 目)、 0.4 mm (30/50 目) mm 时，通过改变压裂液流体速度进行数值仿真，研究流体速度对四通管冲蚀磨损的影响，图 5 所示粒径为 0.3 mm 时不同流速下冲蚀速率分布。

由图 5 可知，随着流体速度增大，固体颗粒对四通管内壁的冲蚀速率不断增大。主要原因是颗粒与压裂液一起流动的过程有较强的跟随性质，因此在压裂液流速增加的过程中，单位时间经过四通管内部的颗粒逐渐增多，速度增大，导致压裂液中的颗粒在单位时间内冲击四通管壁面的几率也因此增大，表现出四通管肩部与出口管连接处所受的冲蚀磨损率增大。由图 6 可看出，不同流体速度范围内冲蚀速率的变化幅度存在差异，当流体速度大于 25 m/s 时，冲蚀速率随流体速度变化幅度增大。这是因为当速度较小时，粒子的动能小，其对四通管壁面不能进行有效的冲击，因此冲蚀速率较小。

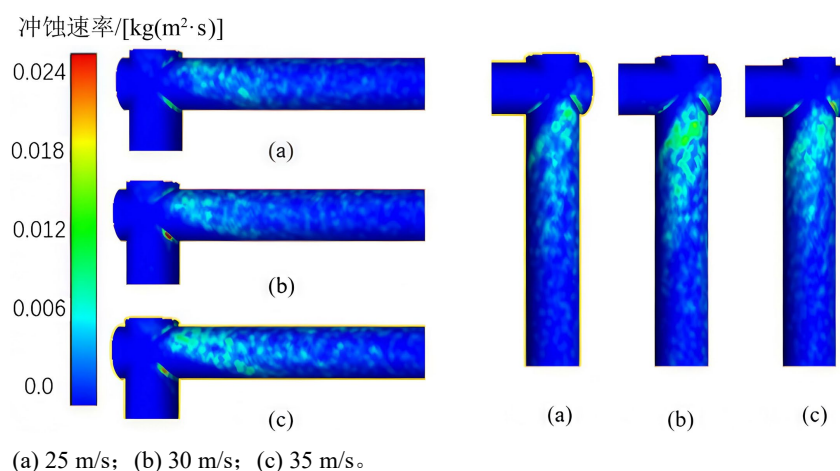


Figure 5. Contour of erosion rate distribution under different flow velocities
图 5. 不同流速下冲蚀率分布云图

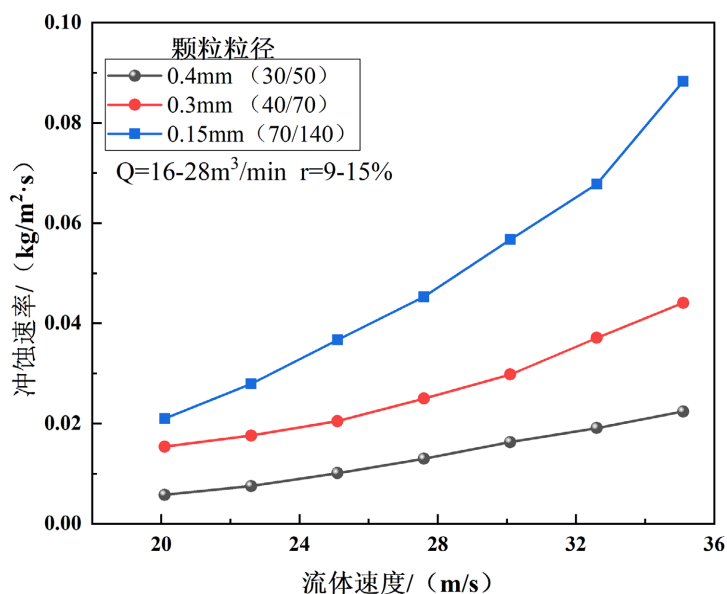


Figure 6. Effect of fluid velocity on the erosion rate
图 6. 流体速度对冲蚀速率的影响

5.4. 质量流量对冲蚀磨损的影响

在支撑剂颗粒粒径 0.3 mm，压裂液流体速度 20 m/s (排量 16 m³/min)、25 m/s (排量 20 m³/min)、30 m/s (排量 24 m³/min)时，通过改变支撑剂颗粒质量流量进行数值仿真，研究质量流量对四通管冲蚀磨损的影响，图 7 所示为 24 m³/min 时不同砂比下冲蚀速率分布。

由图 7 可知，随着支撑剂颗粒质量流量的增大，四通管壁面冲蚀速率不断增大。主要原因是在颗粒粒径不变的情况下，支撑剂颗粒质量流量增大会导致颗粒数量增多，四通管内壁的冲击次数和频率增大，造成冲蚀速率增大。由图 8 可看出，在流体速度为 30 m/s 时，总体冲蚀速率均为最大，且增幅高于其他两种流体速度。这是因为在支撑剂颗粒质量流量较大时，颗粒质量流量与流体速度的交互作用增强，流体速度越大，曲线斜率越大，因为撞击动能与速度呈二次方关系，所以随着流体速度的增大，四通管冲蚀速率随颗粒质量流量增大而增大的趋势逐渐增强。

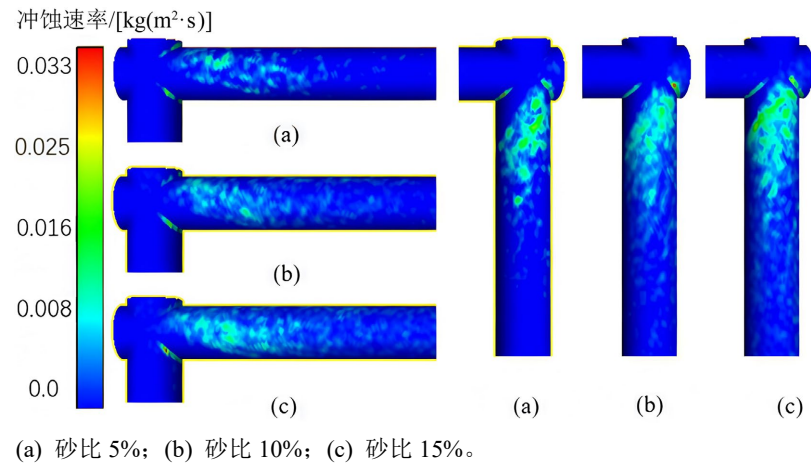


Figure 7. Contour of erosion rate distribution at different sand concentrations
图 7. 不同砂比下冲蚀率分布云图

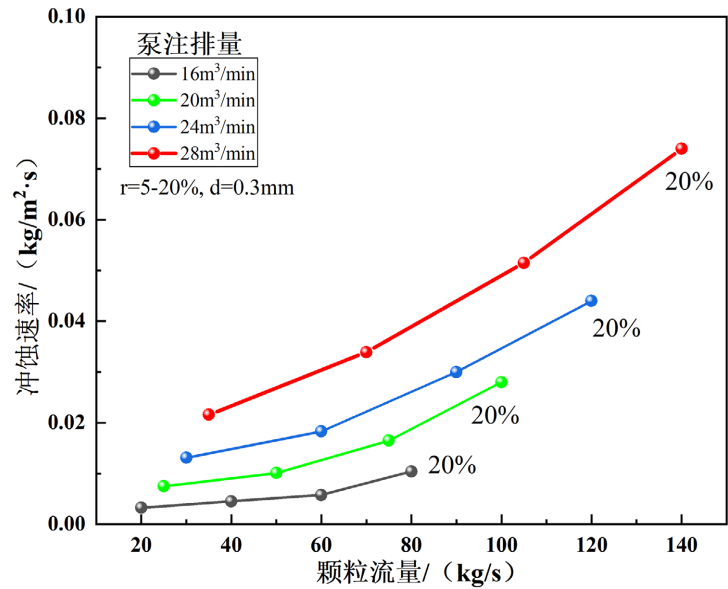


Figure 8. Effect of particle mass flow rate on the erosion rate
图 8. 颗粒质量流量对冲蚀速率的影响

5.5. 颗粒粒径对冲蚀磨损的影响

在压裂液流体速度为 25.1 m/s, 支撑剂颗粒质量流量为 5 kg、15 kg、25 kg 时, 通过改变支撑剂颗粒粒径进行数值仿真, 研究颗粒粒径对四通管冲蚀磨损的影响, 图 9 所示为 25 kg 时不同粒径下冲蚀速率云图。

由图 9 可知, 随着颗粒粒径的增大, 四通管的冲蚀速率总体呈下降趋势。这是因为流体对直径较小颗粒的携带效果更好, 颗粒与壁面的碰撞更加充分; 随着颗粒粒径的不断增大, 颗粒随流体流动的跟随性下降, 且颗粒间更容易产生有效碰撞导致颗粒能量损失, 使固体颗粒与壁面撞击的次数及强度下降。由图 10 可知, 当颗粒直径为 0.05~0.15 mm 时, 四通管冲蚀速率减小速度较快; 当颗粒直径为 0.15~0.25 mm 时, 四通管冲蚀速率减小速度明显降低。

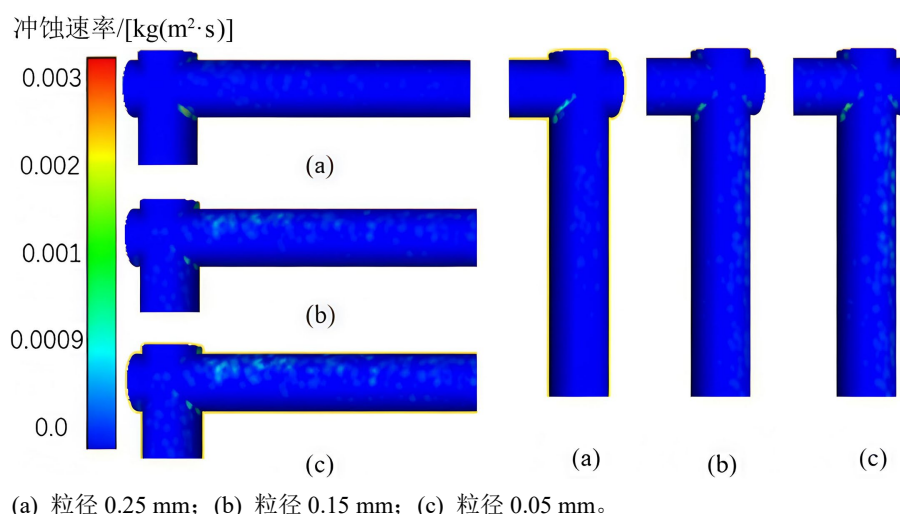


Figure 9. Contour of erosion rate distribution for different particle sizes
图 9. 不同粒径下冲蚀率分布云图

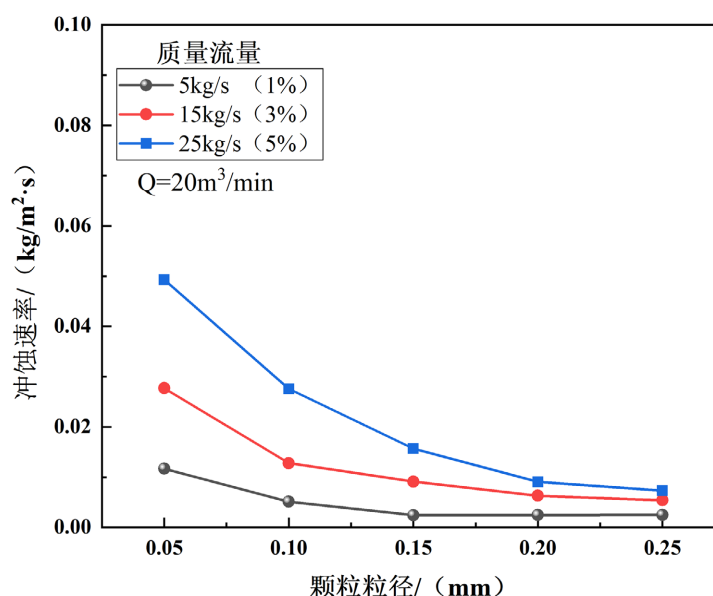


Figure 10. Effect of particle size on the erosion rate
图 10. 颗粒粒径对冲蚀速率的影响

5.6. 寿命预测

从四通管失效破坏的观点来看,研究四通管壁面冲蚀磨穿的速度,即最大冲蚀速率至关重要。本小节冲蚀速率的研究考虑了流速、质量流量和颗粒粒径三个主要影响因素,并结合剩余寿命理论与模型[8]完成剩余寿命的计算。图 11 为不同条件下的剩余寿命预测。整体来看,在不同粒径下,井口装置的使用寿命衰减趋势大致相同,小排量小砂比时衰减幅度较大,大排量大砂比时比较平缓。

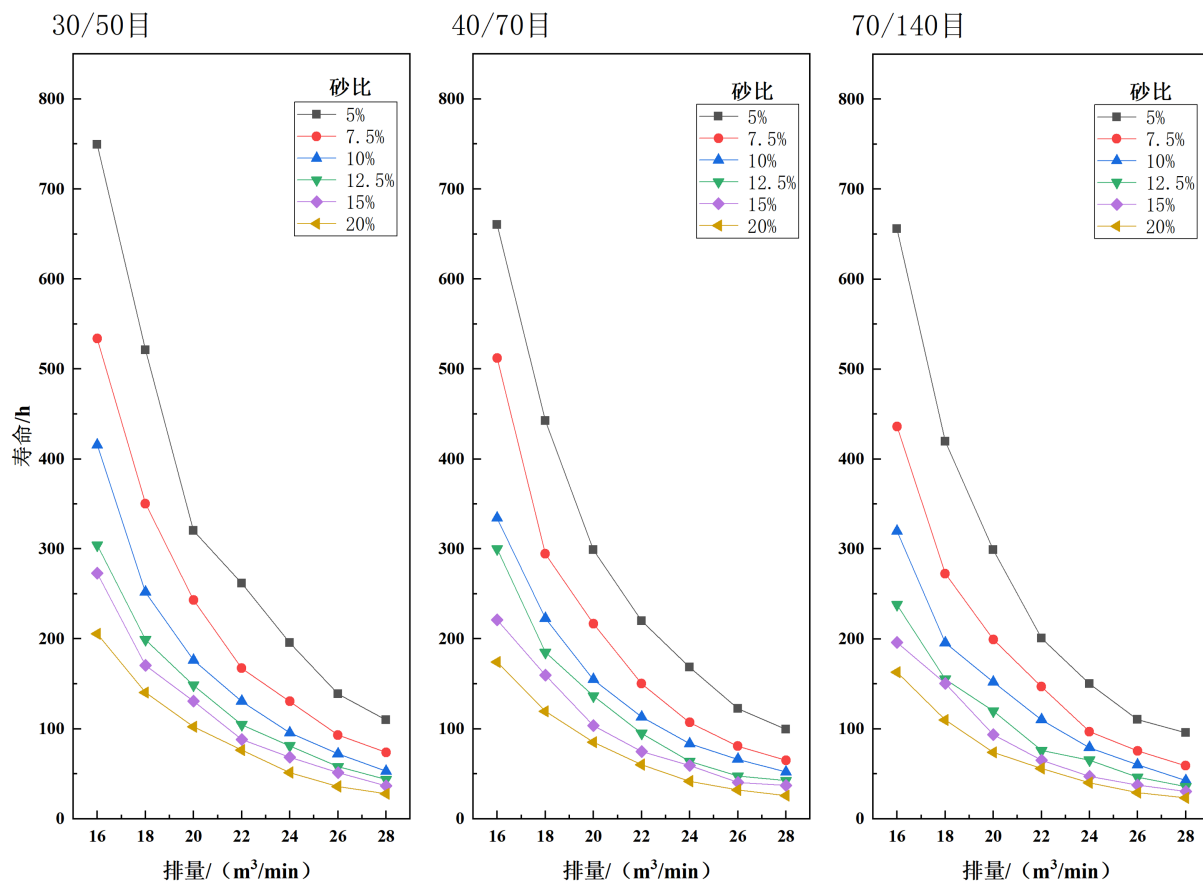


Figure 11. Service life prediction results
图 11. 寿命预测图

6. 讨论

在本研究中,虽对携砂液在管道内的冲蚀情况展开了探究,但不可避免地存在一些局限性。一方面,将压裂液简化为牛顿流体进行处理。实际压裂液多为复杂的非牛顿流体,其流变特性与牛顿流体存在显著差异,简化处理可能导致对流体流动行为及冲蚀预测的偏差。另一方面,忽略了颗粒形状和颗粒间碰撞的影响。真实的石英砂颗粒形状不规则,且在流动过程中颗粒间存在频繁碰撞,这些因素会改变颗粒轨迹及对管壁的冲击特性,而本研究未将其纳入考量。

基于上述局限性,未来研究可从多方面拓展。首先,引入非牛顿流体本构模型,精确描述压裂液的复杂流变行为,以更贴合实际工况。其次,考虑不规则颗粒形状的冲蚀效应,通过建立更真实的颗粒模型,研究颗粒形状对冲击角度、能量传递的影响。再者,深入探究颗粒间碰撞机制,结合离散元等方法,模拟颗粒群的动态行为,从而提升对携砂液冲蚀现象的理解与预测精度。

7. 结论

(1) 随着流速的增加,四通管内速度在各个位置的分布情况基本保持不变。当流体由竖直入口段流向水平段后,在四通管竖直段和水平段交界处,在四通管竖直段和水平段交界处,四通管竖直段右侧的速度高而左侧速度低,水平段上侧速度高而下侧速度低,速度较高一侧平均速度均高于入口速度。

(2) 压力场与速度场分布类似,当流体由竖直入口段流向水平段之后,在四通管竖直段和水平段交界处,由于受到向外的离心力作用,使得流体向水平段上侧壁面偏移,因此,下侧压力骤降,四通管流体转向处形成了压力差,使得四通管水平段下侧压力低而上侧压力高。流体和砂砾的流向在四通管竖直入口段和水平段交接处发生剧烈变化,砂砾在强离心力的作用下,直接对四通管肩部高速冲击,使得四通管肩部位冲蚀速率较高。

(3) 数值计算结果计算得到的四通管易失效位置位于其肩部,与实际工程中四通管失效位置吻合,因此在使用过程中注意加强对肩部位置的重点检测。随流体流速增加,四通管最大冲蚀速率增幅明显。质量流量增加使得颗粒数量增加,导致四通管受到更多的颗粒冲击,使得四通管最大冲蚀速率增加。颗粒粒径增加,最大冲蚀速率反而呈下降趋势。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目“页岩气水平井超大排量压裂井口冲蚀规律研究”(YKJCX2420146)。

参考文献

- [1] 周福建,李根生,刘皓,等. 致密油气藏精准压裂-提高采收率一体化技术发展现状及建议[J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 75-88.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 朱红波,唐礼俊,周永新. 基于 DPM 模型的压裂管线弯头冲蚀磨损影响因素分析[J]. 科技与创新, 2024(1): 5-8, 14.
- [5] 马国华,于凤荣,张思青. 三种 $k-\epsilon$ 模型模拟混流式水轮机转轮叶片湍流场差异性比较[J]. 水电能源科学, 2014, 32(8): 148-152.
- [6] 周兰,张红,陈文康,等. 页岩气压裂管汇弯头的冲蚀磨损影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 53-58.
- [7] 史晶莹,陈燕才,蔡晓明,等. 天然气携砂在 90°弯管中的冲蚀磨损数值分析[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(5): 6-11.
- [8] 刘鸣,张川,蒋发光,等. 基于流场分析的压裂四通管汇冲蚀预测[J]. 石油矿场机械, 2020, 49(2): 21-26.