

高压压裂液对 JY-50 压裂弯管冲蚀行为影响的数值模拟

易先中^{1a,1b}, 彭灼^{1a,1b}, 周元华^{1a,1b}, 成芳^{1a,1b}, 刘军辉², 盛治新³, 殷光品⁴

(1.长江大学 a.机械工程学院 b.地热资源开发研究所, 湖北 荆州 434023;
2.克拉玛依创业有限公司, 新疆 克拉玛依 834000; 3.青岛金江源工业装备有限公司,
山东 青岛 266111; 4.湖北佳业石油机械股份有限公司, 湖北 荆州 434022)

摘要:目的 研究在水力压裂作业中, 高压压裂液对 JY-50 压裂弯管冲蚀磨损的影响规律及其主要影响因素。**方法** 基于液-固两相流理论、FLUENT 冲蚀模型, 为消除误差, 应用 FLUENT 3 次重复性分析并取平均值, 得到支撑剂密度、粒径、质量浓度、压裂液流速的变化对弯管冲蚀行为的影响。**结果** 压裂弯管的易冲蚀区域为弯管段靠近出口的内壁面外侧区域和接近弯管出口的直管区域。随着支撑剂密度和粒径的增大, 最大冲蚀速率均增大, 支撑剂密度从 2500 kg/m³ 增大到 3500 kg/m³ 时, 最大冲蚀速率增长了 0.69 倍, 粒径从 0.074 mm 增大到 0.54 mm 时, 最大冲蚀速率增长了 1.45 倍, 但二者对平均冲蚀速率数值影响变化不大。支撑剂质量浓度的增大, 导致冲蚀速率呈近似线性增大, 从 40 kg/m³ 增大到 210 kg/m³ 时, 最大冲蚀速率增长了 2.3 倍, 平均冲蚀速率增长了 1.526 倍。流速从 5 m/s 增大到 25 m/s 时, 最大冲蚀速率平均增长了 34.30 倍, 平均冲蚀速率也增长了 34.85 倍。**结论** 对 JY-50 压裂弯管冲蚀行为及影响进行了数值模拟, 获得了压裂液的参数变化对压裂弯管的冲蚀影响规律, 综合最大冲蚀速率和平均冲蚀速率数值及其增长倍数分析, 压裂液流速是冲蚀速率增长的主要因素, 对弯管冲蚀磨损影响显著。

关键词: 高压压裂液; 冲蚀行为; 弯管; 冲蚀速率; 磨损; 数值模拟

中图分类号: TG172; TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0144-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.021

Numerical Simulation for Erosion Behavior of High-pressure Fracturing Fluids on JY-50 Fracturing Bend Pipe

YI Xian-zhong^{1a,1b}, PENG Zhuo^{1a,1b}, ZHOU Yuan-hua^{1a,1b}, CHENG Fang^{1a,1b},
LIU Jun-hui², SHENG Zhi-xin³, YIN Guang-pin⁴

(1.a.School of Mechanical Engineering, b.Institute of Geothermal Resources Development, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2.Karamay Chuangye Co., Ltd, Karamay 834000, China; 3.Qingdao Jinjiangyuan Industrial Equipment Co., Ltd, Qingdao 266111, China; 4.Hubei Jiaye Petroleum Machinery Co., Ltd, Jingzhou 434022, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence laws and main influence factors of high pressure fracturing fluid to JY-50

收稿日期: 2018-07-20; 修订日期: 2018-09-06

Received: 2018-07-20; Revised: 2018-09-06

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05022006-004, 2017ZX05009-003), 湖北省技术创新专项 (2016ACA181), NSFC-石油化工联合基金 (U1762214, U1262108)

Fund: Supported by National Science and Technology Major Project (2016ZX05022006-004 and 2017ZX05009-003), Hubei Provincial Technical Innovation Major Project (2016ACA181), Petroleum and Chemical Engineering United Foundation Project of NSFC-CNPC (U1762214 and U1262108)

作者简介: 易先中 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为油气钻采机械及其智能化。邮箱: yxz@yangtzeu.edu.cn

Biography: YI Xian-zhong (1963—), Male, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: oil and gas drilling machinery and intelligent. E-mail: yxz@yangtzeu.edu.cn

fracturing bend pipe in the process of hydraulic fracturing operation. Based on the liquid-solid two-phase flow theory and FLUENT erosion model, the FLUENT software was used for 3 times to repeat analysis and take the average to eliminate the error and obtain the effects of proppant density, particle size, mass concentration and change of fluid velocity on bend pipe erosion behavior. The easy erosion area of fracturing bend pipe was the curved section near the exit of the inner wall of the lateral area and close to the straight tube of bend pipe export area. As proppant density and particle size increased, the maximum erosion rate increased. When the density of proppant increased from 2500 kg/m³ to 3500 kg/m³, the maximum erosion rate increased by 0.69 times. When diameter changed from 0.074 to 0.54 mm, the maximum erosion rate increased by 1.45 times, but the impact on the average erosion rate value was not obvious. The increasing proppant concentration led to the approximately linear increase of erosion rate. When the proppant concentration changed from 40 kg/m³ to 210 kg/m³, the maximum erosion rate increased by 2.3 times and the average erosion rate increased by 1.526 times. When velocity ranged from 5 m/s to 25 m/s, the maximum erosion rate and the average erosion rate increased by 34.30 and 34.85 times, respectively. Through the numerical simulation for erosion behavior and effects on JY-50 pressure fracturing pipe, the erosion laws of pressure fracturing fluid parameters on pressure fracturing bend are obtained. Combined with the maximum erosion rate, average erosion numerical value and growth times analysis, fracturing fluid flow rate is the main factor for erosion rate growth and significantly affects the erosion wear of bend.

KEY WORDS: high pressure fracturing fluid; erosion behavior; bend pipe; erosion rate; wear; numerical simulation

页岩储层致密，渗透率极低，需要采取大规模的水力压裂，才具备开发价值^[1]。高压压裂液作为压裂工艺的重要组成部分，其对管线，尤其是弯管的冲蚀问题显得尤为突出。大量研究表明，弯管的冲蚀磨损比直管段约严重 50 倍^[2-5]。冲蚀一般是指流体介质携带固体颗粒并以一定的速度或角度对材料表面进行冲击所造成的磨损现象^[6-8]，是引起材料破坏、设备失效的重要原因之一^[9-11]。在压裂施工过程中，一旦因冲蚀导致管线或弯管刺漏、破裂等事故，将发生严重的设备故障。如何准确地预测压裂液中固体颗粒对弯管的冲蚀磨损，找出弯管中最容易发生冲蚀磨损的位置，得到压裂液各典型工况参数对弯管的冲蚀磨损规律，是非常重要的工程课题。

随着计算流体力学和 CFD 等仿真软件的快速发展，国内外都对此有了一定的研究。冯进等^[12]利用数值试验，分析比较了在不同冲蚀模型中，冲蚀位置的分布、冲击速度和粒径对冲蚀率的影响。陈铮等^[13]根据流速、剪切力等参数变化情况，结合高温环烷酸腐蚀机理，预测并验证了异径偏心弯管易腐蚀的部位。梁光川等^[14]运用 FLUENT 软件，针对不同流速，对弯头内部流场进行了数值模拟，分析压力、速度等流动参数的变化情况，分析了流场对弯头冲蚀造成的影响，验证了弯头处较易腐蚀的部位。国外学者 DESALE G R^[15]通过测试八种不同粒径的固体，得出了腐蚀速率与固体颗粒尺寸之间呈指数分布关系。目前针对于高压高速压裂液对弯管的冲蚀磨损研究及规律还不够完善，本文对压裂液流过 90° 弯管这一典型的易冲蚀部件的冲蚀特性进行了数值模拟，得出了在压裂作业过程中，工况参数对冲蚀易发区域的影响，并得出了相关规律。

1 几何模型及参数

以 JY-50 型压裂弯管为研究对象。选用弯曲度为 90°，内径 D 为 47.75 mm，曲率半径为 95.5 mm 的 JY-50 型弯管建立模型，进行冲蚀磨损分析，材质为 PCrNi3Mo，工作压力为 75~150 MPa。为了使流体在管道内充分流动，确保弯管内流场稳定，取连接直管部分长度 $2D=95.5$ mm。网格划分采用六面体网格，并在弯管壁面添加适当的边界层，以保证更真实准确地模拟壁面处的流体流动。弯管几何模型如图 1 所示，压裂液物理性能的基本参数见表 1。

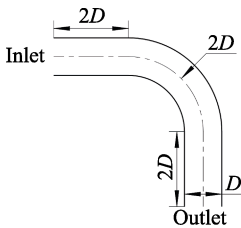


图 1 弯管几何模型
Fig.1 Bend pipe geometry model

表 1 基本参数
Tab.1 Basic parameters

Fracturing fluid parameter	Parameter scale
Apparent density of proppant particles $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^3)$	2500~3500
Fracturing fluid velocity $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5~25
Particle size of proppant d/mm	0.074~0.53
Dynamic viscosity of fracturing fluid $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	20~30
Mass concentration of proppant $\rho_n/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	25~225

2 弯管三维紊流流场数值模拟

综合考虑在水力压裂作业过程中,压裂液快速流经管道时,管道内部流体为复杂的液-固两相流三维紊流流场,对弯管的数值模拟选用 DPM 模型。其中,连续相为液相,离散相为压裂液支撑剂固体颗粒,并忽略离散相之间的相互作用,满足粒子负载流动模式^[16]。采用在 Eulerian 坐标系下计算连续相流场,在 Lagrangian 坐标系下求解计算离散相中颗粒的运动轨迹方程。管道内三维紊流流场采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,压力-速度耦合采用 SIMPLE 方法,并作如下假设:不考虑外界温度对流体粘度的影响;忽略重力对流体流速的影响;不考虑流体流动导致弯管振动等影响因素。

2.1 控制方程

质量守恒方程^[17]:

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

动量守恒方程,惯性坐标系下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h \quad (4)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u 为流体速度矢量, m/s ; u_i 、 u_j 为 u 在 x 、 y 方向上的分量; F_i 为重力体积力和其他体积力, m/s ; p 为压力, Pa ; τ_{ij} 为应力张量, Pa ; E 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; k_{eff} 为有效导热系数; J_j 为组分 j 的扩散通量; S_h 为包括化学反应热和其他体积热源的源项, W/m^3 。

2.2 湍流模型

标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程形式为:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 2} P_k) \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能, J ; u 为流体速度矢量, m/s ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; p_k 为剪切湍动能, J ; σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 均为常量; ε 为紊流耗散率, m^2/s^3 。

2.3 弯管内壁面冲蚀磨损模型

压裂弯管内壁面冲蚀速率的大小与颗粒质量流量、冲击速度、粒径大小、颗粒特性等因素有关,根据文献定义^[18],即:

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{n=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\theta) v^{b(v)}}{A_f} \quad (7)$$

$$f(\theta) = 2.69\theta + 1.61\theta^2 - 8.84\theta^3 + 7.33\theta^4 - 1.85\theta^5 \quad (8)$$

式中: R_{erosion} 为冲蚀速率, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; N 为颗粒碰撞数目; m_p 为颗粒平均质量流量, kg/s ; $C(d_p)$ 为颗粒粒径的函数,一般情况下, $C(d_p) = 1.8 \times 10^{-9}$; θ 为颗粒对管道壁面的冲击角(入射角); $f(\theta)$ 为冲击角(入射角) θ 的函数; v 为颗粒冲击速度, m/s ; $b(v)$ 为颗粒相对于速度 v 的函数,是决定冲蚀快慢的重要参数,默认为 2.6; A_f 为冲蚀壁面计算单元的面积, m^2 。

2.4 边界条件

在运用 Fluent 计算过程中,进口边界条件定义为速度进口(velocity inlet),出口边界定义为自由流出(outflow),设置进口处压裂液流体和支撑剂颗粒的速度大小相等、方向相同。壁面条件为 Wall 壁面,在 DPM 模型中采用 reflect 类型,反弹系数依据 A. Forder 和 K. R. Ahlert 等^[19-20]的研究成果取值,动能、能量、湍流耗散率的离散均选用二阶迎风格式。

3 结果及讨论

3.1 冲蚀磨损位置及分析

为得到弯管易冲蚀磨损位置,取压裂液支撑剂颗粒视密度为 $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$,颗粒粒径 $d = 0.35 \text{ mm}$,黏度 $\mu = 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,流速为 $v = 15 \text{ m/s}$ 。经 FLUENT 分析,弯管易冲蚀区域如图 2 所示。

因为流体密度和黏度较高,此时曳力成为固体颗粒运动的主要因素。压裂液固体颗粒对弯管的冲蚀发生在弯管内壁面外侧区域,在入口直管段冲蚀磨损较小。由图 2 可知,易冲蚀区域主要有两处:弯管段靠近出口的内壁面外侧区域,此处冲蚀磨损最为严重;接近弯管出口的直管区域。同时,最大冲蚀率也发生在弯管段靠近出口的内壁面外侧区域。

3.2 支撑剂密度对冲蚀结果的影响

为了研究支撑剂密度对冲蚀结果的影响,取压裂液黏度为 $25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,颗粒粒径 $d = 0.32 \text{ mm}$,支撑剂质量浓度为 $\rho_n = 80 \text{ kg/m}^3$ 。根据实际工况,支撑剂视密度 $\rho = 2500 \sim 3500 \text{ kg/m}^3$,选取合适梯度($\rho = 2500$ 、 2700 、 3000 、 3200 、 3500 kg/m^3),以流速为 $v = 15$ 、 20 、 25 m/s 做 3 次数值模拟分析。图 3 为选取在流速为 $v = 20 \text{ m/s}$ 下,支撑剂密度为 $\rho = 2500$ 、 3000 、 3500 kg/m^3 时的最大冲蚀速率云图。计算得到的支撑剂密度与最大冲蚀速率和平均冲蚀速率的关系曲线如图 4 所示。

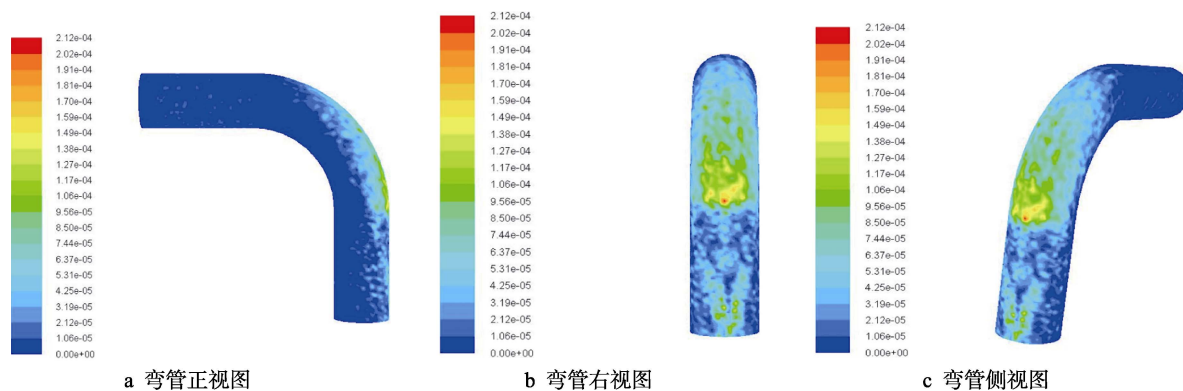


图 2 弯管冲蚀区域云图
Fig.2 Cloud of bend pipe erosion area

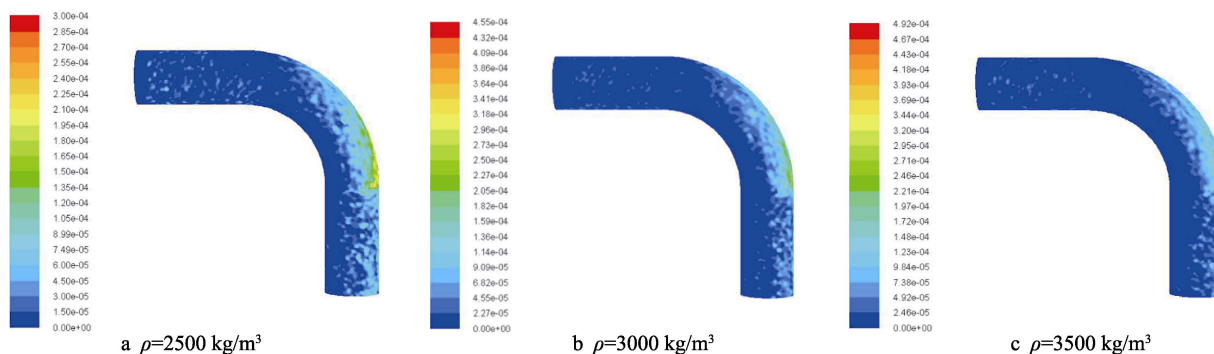


图 3 不同支撑剂密度下的最大冲蚀速率云图 ($v=20$ m/s)
Fig.3 Cloud of the maximum erosion rate under different density of proppant ($v=20$ m/s)

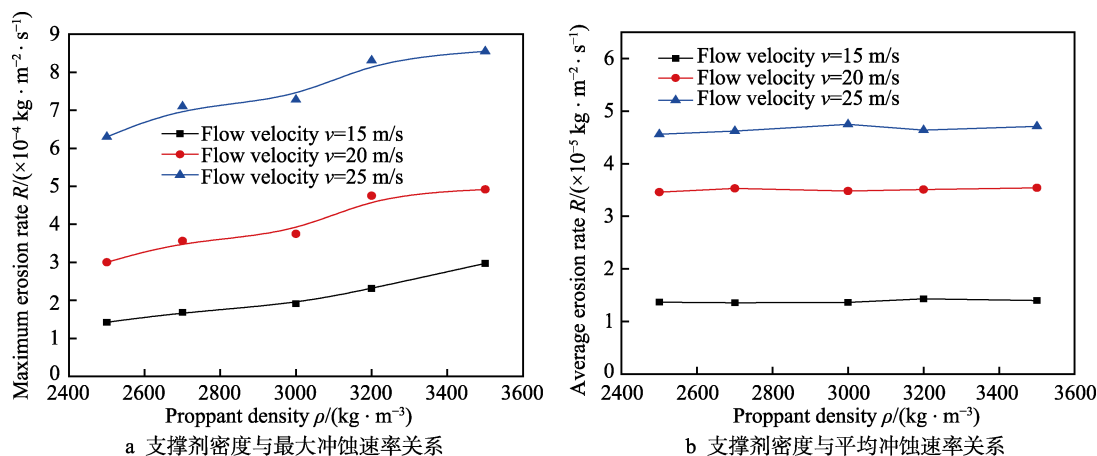


图 4 支撑剂密度对弯管冲蚀速率影响

Fig.4 Effects of proppant density on bend erosion rate: a) relationship between proppant density and the maximum erosion rate; b) relationship between proppant density and the average erosion rate

如图 4a 所示,随着支撑剂颗粒密度从 2500 kg/m^3 逐步递增到 3500 kg/m^3 ,在三种流速情况下,计算平均值得到最大冲蚀速率增长了 0.69 倍。对于流速,支撑剂质量浓度、质量流量等均为定值情况下,弯管的最大冲蚀速率也逐步增大。由于粒径为定值,支撑剂密度增大,即单个固体颗粒的密度变大,使得单个固体颗粒质量变大,即单个固体颗粒的冲击动能也变大,导致弯管的最大冲蚀速率也相应变大。又由于黏度、粒径为定值,对于支撑剂密度相同的情况下,也可以得出流速越大,其最大冲蚀速率越大。如图 4b

所示,随着支撑剂密度变大,但其与平均冲蚀速率关系波动不大。这是由于在质量流量为定值下,虽然固体颗粒质量变大,但流入弯管的支撑剂固体颗粒数量却相应地减少,即固体颗粒与弯管内壁面发生碰撞、冲击从而导致内壁面发生冲蚀的区域面积变少,因此支撑剂密度的变化对弯管平均冲蚀速率影响不大。

3.3 支撑剂粒径对冲蚀结果的影响

支撑剂粒径对冲蚀磨损也会有重要的影响,在分析支撑剂粒径对冲蚀影响规律时,取压裂液流速为

$v=15$ m/s, 压裂液支撑剂颗粒视密度为 $\rho=3000$ kg/m³, 支撑剂质量浓度为 $\rho_n=80$ kg/m³。根据实际工况, 压裂液支撑剂粒径为 $d=0.074\sim 0.53$ mm, 选取合适梯度 ($d=0.074$ 、 0.2 、 0.35 、 0.45 、 0.53 mm)。选取压裂液

黏度为 $\mu=25$ mPa·s 下, 支撑剂粒径为 $d=0.074$ 、 0.35 、 0.53 mm 时的最大冲蚀速率云图如图 5 所示。计算得到的支撑剂粒径与最大冲蚀速率和平均冲蚀速率关系如图 6 所示。

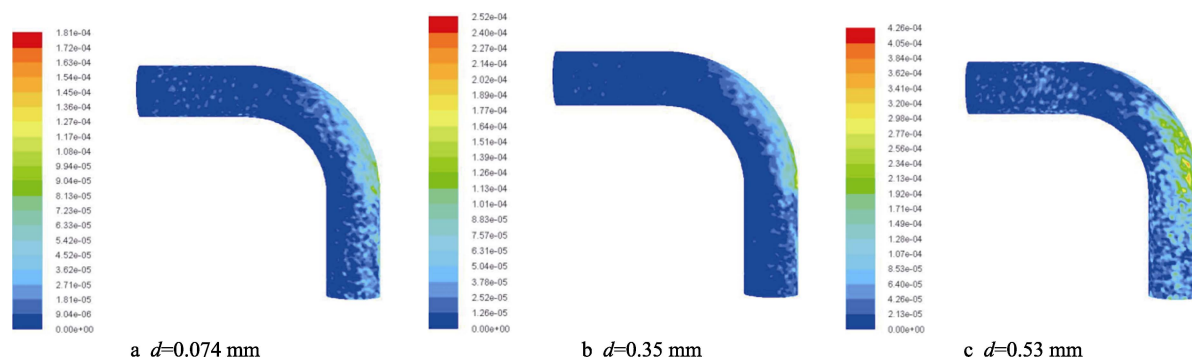


图 5 不同支撑剂粒径下的最大冲蚀速率云图 ($\mu=25$ mPa·s)

Fig.5 Cloud of the maximum erosion rate under different proppant size ($\mu=25$ mPa·s)

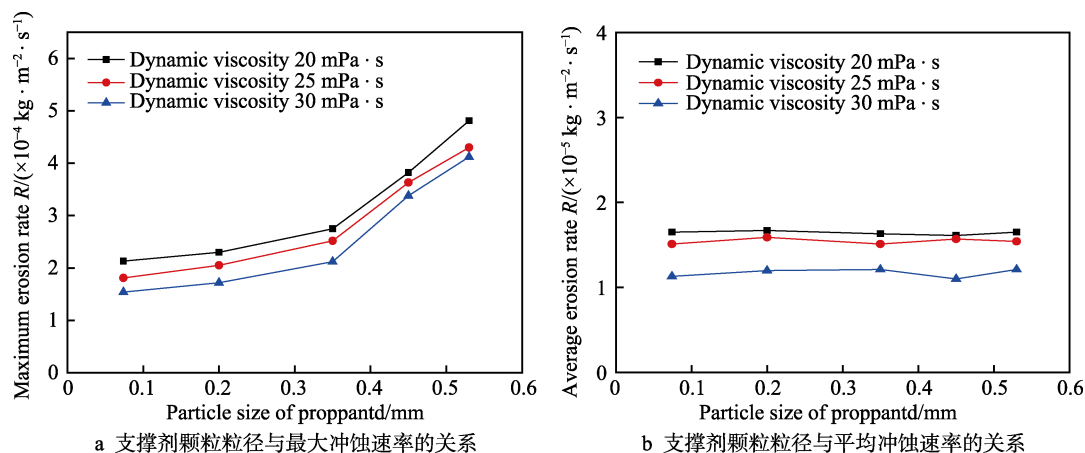


图 6 支撑剂颗粒粒径对弯管冲蚀速率影响

Fig.6 Effects of proppant particle size on bend erosion rate: a) relationship between proppant particle size and the maximum erosion rate; b) relationship between proppant particle size and the average erosion rate

如图 6a 所示, 支撑剂粒径从 0.074 mm 增长到 0.54 mm 时, 最大冲蚀速率 (取平均值) 增长了 1.45 倍。随着支撑剂粒径的逐步增大, 弯管最大冲蚀速率随之变大。当支撑剂视密度为定值, 粒径变大时, 支撑剂颗粒质量随之变大。即单个固体颗粒质量变大, 导致单个固体颗粒的冲击动能随之变大, 使得固体颗粒对弯管内壁面造成更大程度的冲击。虽然由于流速、质量流量一定 (单位时间内通过弯管入口的支撑剂固体颗粒质量为定值), 支撑剂粒径增大颗粒质量增大, 导致单位时间内通过弯管入口的支撑剂固体颗粒数量减少, 但是单个固体颗粒的冲击动能增大, 可以弥补因颗粒数量减少所造成的动能损失。因此支撑剂粒径的增大, 仍然使得最大冲蚀速率变大。如图 6b 所示, 随着支撑剂粒径的增大, 平均冲蚀速率比较平稳。这是因为虽然单个固体颗粒导致的最大冲蚀速率变大, 但通过弯管的质量流量为定值, 单个固体

颗粒的质量增大, 则单位时间内通过弯管的固体颗粒数量减少, 导致固体颗粒在单位时间内一定面积上与弯管内壁面发生碰撞次数减少, 即发生冲蚀的次数减少, 使得支撑剂粒径的变化对平均冲蚀速率影响较小。

3.4 支撑剂质量浓度对冲蚀结果的影响

为了定量地研究支撑剂质量浓度对冲蚀行为的影响, 取压裂液支撑剂颗粒视密度为 $\rho=3000$ kg/m³, 颗粒粒径为 $d=0.35$ mm。根据实际工况, 压裂液流速 $v=15$ m/s, 支撑剂质量浓度为 $\rho_n=25\sim 225$ kg/m³, 选取合适梯度 ($\rho_n=40$ 、 80 、 130 、 170 、 210 kg/m³)。图 7 为选取压裂液黏度为 $\mu=30$ mPa·s 下, 支撑剂质量浓度为 $\rho_n=40$ 、 130 、 210 kg/m³ 时的最大冲蚀速率云图。计算得到的支撑剂质量浓度与最大冲蚀速率和平均冲蚀速率关系如图 8 所示。

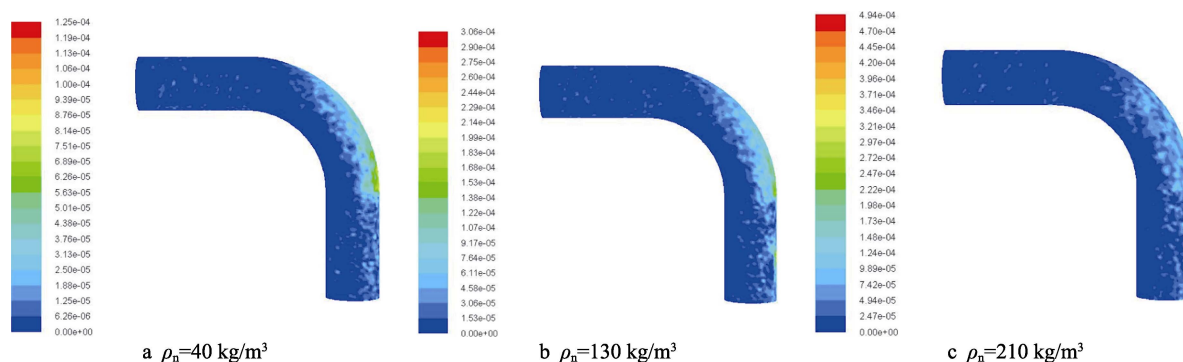
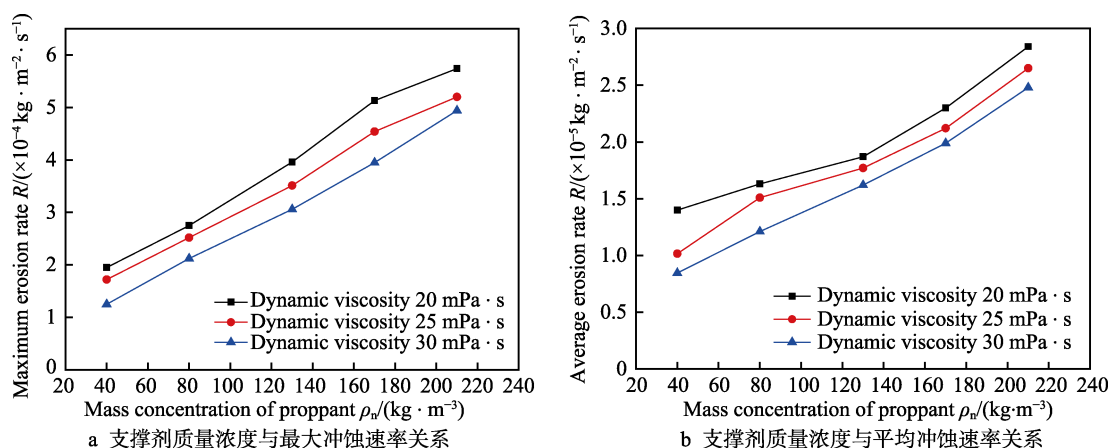
图 7 不同支撑剂质量浓度下的最大冲蚀速率云图 ($\mu=30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)Fig.7 Cloud of the maximum erosion rate under different proppant concentrations ($\mu=30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)

图 8 支撑剂质量浓度对弯管冲蚀速率影响

Fig.8 Effects of proppant concentration on bend erosion rate: a) relationship between proppant concentration and the maximum erosion rate; b) relationship between proppant concentration and the average erosion rate

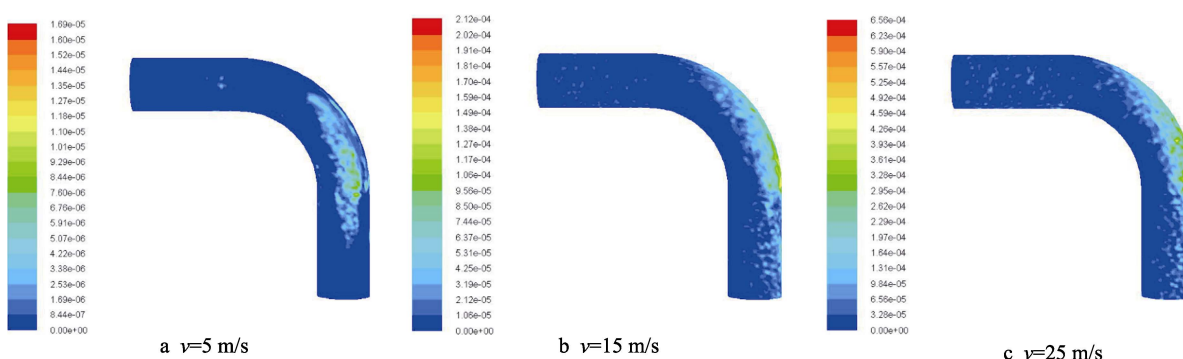
从图 8 可以看出, 支撑剂质量浓度从 40 kg/m^3 增大到 210 kg/m^3 时, 最大冲蚀速率增长了 2.30 倍, 平均冲蚀速率增长了 1.526 倍。随着支撑剂质量浓度的增加, 弯管内壁面最大冲蚀速率和平均冲蚀速率均呈近似线性增长。压裂液质量浓度增加, 使得在单位时间、单位体积内压裂液中固体颗粒增加, 则导致在单位时间、单位面积上与弯管内壁的碰撞次数增多, 从而使得最大冲蚀速率和平均冲蚀率均增大。

3.5 压裂液流速对冲蚀结果的影响

流速也是影响颗粒冲蚀的重要因素, 在进行

FLUENT 数值模拟分析时, 取压裂液支撑剂颗粒视密度为 $\rho=3000 \text{ kg/m}^3$, 颗粒粒径为 $d=0.35 \text{ mm}$, 支撑剂质量浓度为 $\rho_n=80 \text{ kg/m}^3$ 。根据实际工况, 压裂液流速 $v=5\sim 25 \text{ m/s}$, 选取合适梯度 ($v=5、10、15、20、25 \text{ m/s}$)。图 9 为选取压裂液黏度为 $\mu=30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 下, 流压裂液速为 $v=5、15、25 \text{ m/s}$ 时的最大冲蚀速率云图。计算得到的压裂液流速与最大冲蚀速率和平均冲蚀速率关系如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 压裂液流速对弯管冲蚀效果的影响十分明显, 最大冲蚀速率和平均冲蚀速率均有较大的变化。依据冲蚀磨损理论模型分析, 当压裂液

图 9 不同流速下的最大冲蚀速率云图 ($\mu=30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)Fig.9 Cloud of the maximum erosion rate under different flow velocity ($\mu=30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)

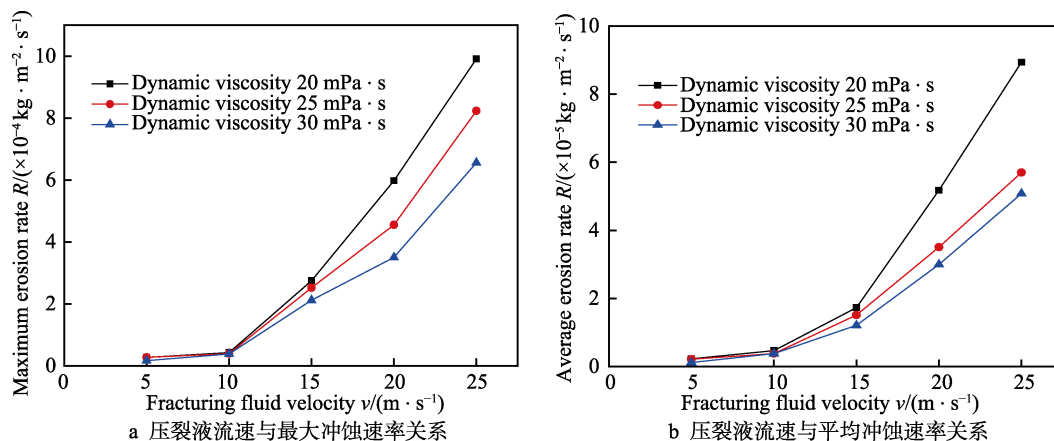


图 10 压裂液流速对弯管冲蚀速率影响

Fig.10 Effects of fracturing fluid velocity on the bend erosion rate: a) relationship between fracturing fluid velocity and the maximum erosion rate; b) relationship between fracturing fluid flow velocity and the average erosion rate

流速小于 10 m/s 时, 压裂液中固体颗粒的冲击动能较小, 对弯管内壁面造成的冲蚀效果较弱, 所以最大冲蚀速率和平均冲蚀速率增长较为平缓。当压裂液流速大于 10 m/s 时, 随着流速变大, 最大冲蚀速率和平均冲蚀速率增长较为急剧。因为流速与压裂弯管的内表面冲蚀速率呈指数函数关系, 当流速变大时, 压裂液中固体颗粒的冲击动能也随之急剧变大, 造成对弯管内壁面较大的冲蚀效果。

当流速为 25 m/s, 黏度为 20 mPa·s 时, 最大冲蚀速率能达到 $8.94 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 压裂液流速从 5 m/s 增大到 25 m/s 时, 最大冲蚀速率增长了 34.30 倍, 平均冲蚀速率增长了 34.85 倍。当流速增加时, 冲蚀速率均呈指数增长。可以认为, 流速的变化是导致弯管发生冲蚀的关键因素。

4 结论

1) 易冲蚀区域为弯管段靠近出口的内壁面外侧区域和接近弯管出口的直管区域, 在入口直管段冲蚀磨损较小, 最大冲蚀率也发生在弯管段靠近出口的内壁面外侧区域。故应在易冲蚀区域重点加强监测。

2) 支撑剂密度和粒径对弯管的冲蚀规律相似, 随着支撑剂密度和粒径的增大, 弯管的最大冲蚀速率增大, 但却对平均冲蚀速率影响较小。支撑剂质量浓度增大, 使得最大冲蚀率和平均冲蚀率均呈现出线性增大的趋势。弯管的最大冲蚀速率和平均冲蚀速率随着压裂液流速的增大急剧增大。

3) 综合分析最大冲蚀速率和平均冲蚀速率数值及其增长倍数, 流速的变化导致最大冲蚀速率平均增长了 34.30 倍, 平均冲蚀速率增长了 34.85 倍, 其数值远超出其他影响因素。故认为压裂液流速是冲蚀速率增长的主要因素, 对弯管冲蚀磨损的影响显著。

4) 在实际水力压裂作业过程中, 应综合考虑实际井下压裂工况和冲蚀磨损的影响因素, 合理调整压裂液流速, 对于减小压裂液固体颗粒对弯管造成的冲蚀磨损, 增长设备寿命有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 杨国圣, 张玉清. 涪陵页岩气工程技术实践与认识[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015: 283.
YANG Guo-sheng, ZHANG Yu-qing. Practice and understanding of shale gas engineering technology in fuling[M]. Beijing: Chinese Sinopec Press, 2015: 283.
- [2] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 440-442.
SUN Jia-shu. Wear of metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 440-442.
- [3] 黄桢, 李鹭光, 胡桂川. 天然气井油管柱疲劳寿命预测[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012: 81-82.
HUANG Zhen, LI Lu-guang, HU Gui-chuan. Gas well tubing string fatigue life prediction[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012: 81-82.
- [4] 付林. 油煤浆输送管道弯头部位冲击磨损预测与壁厚监测[D]. 天津: 河北工业大学, 2009.
FU Lin. Impact wear prediction and wall thickness monitoring of the elbow region in the oil-coal slurry pipeline[D]. Tianjing: Hebei University of Technology, 2009.
- [5] ALLEN C, BALL A. A review of the performance of engineering materials under prevalent tribological and wear situations in south africa industries[J]. Tribology international, 1996, 29(3): 105-116.
- [6] 董刚, 张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2): 307-312.
DONG Gang, ZHANG Jiu-yuan. Developments of research on the solid particle erosion of materials[J]. Journal of materials science & engineering, 2003, 21(2): 307-312.
- [7] 马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 21-15.
MA Ying, REN Jun, LI Yuan-dong, et al. Development of research on erosion of materials[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(1): 21-15.
- [8] 陈思. 潜油泵叶轮的冲蚀磨损研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
CHEN Si. Research on erosion and protect in the electric submersible[D]. Daqing: Northeast Petroleum University.

- 2016.
- [9] SY/T 6270—2012 石油钻采高压管汇的使用、维护、维修与检测[S].
SY/T 6270—2012, Operation, maintenance, repair and inspection of high pressure manifolds for drilling and production operation[S].
- [10] 王郭雨薇, 敬加强, 梁全胜, 等. 输气管道砂冲蚀的模拟实验[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(2): 310-315.
WANG Guo-yu-wei, JING Jia-qiang, LIANG Quan-sheng, et al. Experimental simulation research of sand erosion in gas pipeline[J]. Journal of materials science & engineering, 2016, 34(2): 310-315.
- [11] 吕东莉, 练章华, 张涛. 基于有限元的 20#钢冲蚀磨损行为模拟[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 31-37.
LYU Dong-li, LIAN Zhang-hua, ZHANG Tao. Finite element-based simulation on erosive wear behaviour of 20# steel[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 31-37.
- [12] 冯进, 张慢来, 冯仲. 带粒液流中圆形弯管的冲蚀模型研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2008, 5(3): 74-80.
FENG Jin, ZHANG Man-lai, FENG Zhong. Research on erosion damage models for round-section elbow in liquid-particle flows[J]. Journal of Yangtze University (Natural science edition), 2008, 5(3): 74-80.
- [13] 陈铮, 路伟, 赵志顶, 等. 基于 Fluent 的异径偏心弯管环烷酸冲蚀分析[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(4): 335-339.
CHEN Zheng, LU Wei, ZHAO Zhi-ding, et al. Naphthenic acid erosion-corrosion analysis of eccentric reducing elbow pipe based on Fluent[J]. Corrosion & protection, 2016, 37(4): 335-339.
- [14] 梁光川, 聂畅, 刘奇, 等. 基于 FLUENT 的输油管道弯头冲蚀分析[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(9): 822-830.
LIANG Guang-chuan, NIE Chang, LIU Qi, et al. Erosion-corrosion analysis of oil pipeline elbow based on FLUENT[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(9): 822-830.
- [15] DESALE G R, GANDHI B K, JAIN S C. Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063) [J]. Wear, 2009, 266(11): 1066-1071.
- [16] 周兆明, 练章华, 万夫. 高压管汇冲蚀磨损的多相流仿真[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(5): 101-104.
ZHOU Zhao-ming, LIAN Zhang-hua, WAN Fu. Multi-phase flow simulation on erosion of high pressure manifold[J]. Computer aided engineering, 2013, 22(5): 101-104.
- [17] 温正. FLUENT 流体计算应用教程(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 77-78.
WEN Zheng. FLUENT Course of application of fluid calculation (the Second edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 77-78.
- [18] ZHANG Y, REUTERFORS E P, MCLAURY B S, et al. Comparison and measured particle velocities and erosion in water and air flows[J]. Wear, 2007, 263(1): 330-338.
- [19] FORDER A, THEW M, HARRISON D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves[J]. Wear, 1998, 216(2): 184-193.
- [20] AHLERT K R. Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel[D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1994.