

裂缝型漏失地层钻井液防漏堵漏数值模拟研究

孔二伟^{1,2}, 王利锋^{1,2}, 韩子辰³, 刘长晔³, 杨现禹^{3*}, 蔡记华^{3*}

(1. 河南省第四地质勘查院有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 河南省小口径钻探工程技术研究中心, 河南 郑州 450001; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 钻井液防漏堵漏是保障钻井安全、保护储层、减少经济损失、提高钻井效率和助力环境保护的关键技术措施。由于现场实际观测和实验条件限制,漏失地层的堵漏机理难以探究。为更好地解释裂缝型漏失地层的颗粒堵漏机理,本研究使用COMSOL Multiphysics建立了裂缝型地层的封堵模型,并分析了颗粒浓度、颗粒粒径及颗粒级配对接缝型漏失地层封堵效率的影响,从而揭示其颗粒封堵的具体机理。结果表明:(1)封堵效率与颗粒尺寸呈正相关。在相同浓度下,颗粒粒径越大,封堵形成时间越短。(2)颗粒浓度存在一个有效封堵范围,颗粒浓度过低时无法形成有效封堵,而颗粒浓度过高时封堵效率趋于饱和。(3)颗粒级配可协同提升封堵效率和封堵致密性。大尺寸颗粒浓度相同,小尺寸颗粒浓度质量分数增加1%时,最终漏速降低了35%;小尺寸颗粒浓度相同,大尺寸颗粒浓度质量分数增加4%时,裂缝桥堵形成时间减少了50%。堵漏颗粒中小颗粒主要影响封堵层的致密性,大颗粒主要影响封堵效率。

关键词: 裂缝型漏失; 钻井液堵漏; 数值模拟; 颗粒封堵; 桥堵效率; 颗粒级配

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0046-08

Numerical simulation study on leakage prevention and sealing of fractured formation drilling fluids

KONG Erwei^{1,2}, WANG Lifeng^{1,2}, HAN Zichen³, LIU Changye³, YANG Xianyu^{3*}, CAI Jihua^{3*}

(1. The Fourth Geological Exploration Institute of Henan Province Co., Ltd, Zhengzhou Henan 450001, China; 2. Henan Provincial Engineering and Technology Research Centre for Small Diameter Drilling, Zhengzhou Henan 450001, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Leakage prevention and plugging of drilling fluid is a key technical measure to ensure drilling safety, protect reservoirs, reduce economic losses, improve drilling efficiency and environmental protection. Due to the limitations of actual observation and experimental conditions in the field, it is difficult to explore the plugging mechanism of leaky formations. In order to better explain the particle plugging mechanism of fractured leaky formations, this study used COMSOL Multiphysics to establish a plugging model for fractured formations, and analysed the effects of particle concentration, particle size and particle gradation on the plugging efficiency of fractured leaky formations, so as to reveal the specific mechanism of particle plugging. The results show that: (1) The plugging efficiency is positively correlated with the particle size. The larger the particle size, the shorter the plugging time under the same concentration. (2) There is an effective blocking range for particle concentration, and effective blocking cannot be formed when the particle concentration is lower than the lower limit of the range, while the increase in concentration has little effect on the blocking efficiency when the particle concentration

收稿日期: 2024-10-28; 修回日期: 2025-02-18 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.006

基金项目: 国家自然科学基金“纳米颗粒钻井液离散元流固耦合模拟与页岩孔隙封堵机理研究”(编号: 42002311)

第一作者: 孔二伟, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 从事钻探技术研究与管理, 河南省郑州市高新技术产业开发区科学大道81号, kew19870916@163.com。

通信作者: 杨现禹, 男, 汉族, 1992年生, 副教授, 地质工程专业, 博士, 从事冲洗液、离散元流体力学、流体机器学习等方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, yxy@cug.edu.cn。

蔡记华, 男, 汉族, 1978年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 从事钻井液、工程浆液和完井液等方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, caijh@cug.edu.cn。

引用格式: 孔二伟, 王利锋, 韩子辰, 等. 裂缝型漏失地层钻井液防漏堵漏数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 46-53.

KONG Erwei, WANG Lifeng, HAN Zichen, et al. Numerical simulation study on leakage prevention and sealing of fractured formation drilling fluids[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 46-53.

is higher than the upper limit of the range. (3) The particle gradation can synergistically improve the blocking efficiency and blocking densification. When the concentration of large-sized particles is the same and the mass fraction of small-sized particles concentration is increased by 1%, the final leakage velocity is reduced by 35%; When the concentration of small-sized particles is the same and the mass fraction of large-sized particles concentration is increased by 4%, the formation time of crack bridge plugging is reduced by 50%. The small particles in the plugging particles mainly affect the densification of the plugging layer, while the large particles mainly affect the plugging efficiency.

Key words: fractured leakage; plugging of drilling fluids; numerical simulation; particle plugging; bridging efficiency; particle grading

0 引言

随着我国经济的快速发展,对矿产资源的开发和建筑工程的需求不断增加,钻探技术的应用越来越广泛。然而,钻探过程中遇到的地层条件复杂多变,其中,松散破碎地层对钻探技术提出了较高的要求,钻进过程中易受这种地层的影响^[1-3]。松散破碎地层结构松散,破碎程度高,存在大量裂缝,地质钻探钻遇松散、破碎等复杂地层时易发生钻孔漏失、孔壁失稳等孔内事故^[4-7]。这不仅会降低钻进效率,造成钻井液漏失,还会导致卡钻和埋钻等事故,使钻进周期延长甚至导致钻孔报废,造成重大经济损失。因此,研究钻井液对地层裂缝的封堵机理,具有重要的现实意义^[8-16]。

颗粒封堵理论指首先通过较大尺寸封堵颗粒对漏失地层裂缝架桥,以提高地层承压能力^[17-18]。然后以较小尺寸封堵材料对架桥颗粒充填后的剩余空间和孔隙进行充填,形成封堵层,进而降低地层渗透率^[19-23]。在裂缝型地层防漏堵漏方面,国内外学者做了大量研究。Abrams^[24]提出了“1/3”规则理论,认为桥接剂中值粒径等于或略大于地层裂缝平均孔喉尺寸的1/3时,封堵效果最佳,但其在裂缝型地层中无法完全适用。黄立新等^[25]认为当架桥颗粒粒径在裂缝平均宽度的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 之间,同时架桥颗粒浓度 $>1.5\%$ 时,架桥封堵效果最佳。Hands等^[26]提出了D90规则,认为当颗粒粒度累计分布曲线上90%的颗粒粒径小于地层孔隙最大孔喉直径时,颗粒封堵效果最优。在D90规则基础上,Dick等^[27]提出了理想充填理论,即在最大程度封堵地层裂缝的同时,还要封堵由架桥颗粒产生的孔隙,以形成更加致密的封堵层,强化封堵能力。张金波等^[28]的研究表明,应把颗粒粒度累计分布曲线上90%累积分数所对应横坐标值的平方根作为封堵颗粒的尺寸,同时该尺寸应等于孔喉直径的最大值。对于刚性颗粒封堵理论,前人研究已经较为充

分,但大部分是基于实验和现场数据,而对封堵机理的微观研究相对较少。为此,基于COMSOL Multiphysics软件,结合河南崤山地区松散破碎地层现场钻进试验情况,对颗粒封堵地层裂缝进行数值模拟,为堵漏钻井液应用提供理论基础。

1 数值理论和数学模型

1.1 流体控制方程

为了在确保模拟精度的前提下简化求解模型,现作如下假设:(1)在流体流动过程中,裂缝形态不会进一步破坏延伸;(2)流体为牛顿流体且不可压缩;(3)整个过程保持等温。裂缝中流体的动量方程可以通过Navier-Stokes方程^[29-30]来表示:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left\{ -p_n + \mu \left[\nabla u + (\nabla u)^T \right] \right\} + F + \rho g \quad (1)$$

式中: ρ ——流体密度,kg/m³; u ——流体流速,m/s; p_n ——流体在裂缝中的压力,Pa; μ ——流体黏度,Pa·s; F ——体积力,N/m³; g ——重力加速度,m/s²。

1.2 颗粒受力分析

固体颗粒随流体运动而移动,属于固液两相流。根据牛顿第二定律,单位质量颗粒所受的外力总和等于其质量与加速度的乘积。固体颗粒的运动方程可以表示为:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_t \quad (2)$$

式中: m_p ——颗粒质量,kg; u_p ——颗粒速度,m/s; F_t ——颗粒所受到的总力,N。

通过分析可知,在流体中,固体颗粒受到重力、浮力、曳力、压力梯度力、虚拟质量力和Basset力等^[31-32]多种力的作用。然而,由于Basset力和虚拟质量力对本研究的影响可以忽略不计,因此在仿真计算中可以不予考虑。因此,计算时主要关注重力、浮力、曳力和压力梯度力的影响。

1.2.1 重力与浮力

固体颗粒浸没在流体中,除了受到重力作用外,还有流体产生的浮力,其合力表示为:

$$F_g = m_p g (\rho_p - \rho) / \rho_p \quad (3)$$

式中: ρ_p ——颗粒密度, kg/m^3 。

1.2.2 曳力

由于钻井液流体具有一定的黏度,当颗粒与流体相对运动时,流体对颗粒会产生一个阻力或推力,即曳力。单个固体颗粒所受曳力表示为:

$$F_D = C_D \pi \rho d_p^2 |u - u_p| (u - u_p) / 8 \quad (4)$$

要定义阻力系数,需要引入颗粒雷诺数:

$$Re_p = \rho d_p |u - u_p| / \mu \quad (5)$$

假设流体中固体颗粒为球形颗粒,通过颗粒雷诺数可以计算得出其阻力系数为:

$$C_D = \begin{cases} 24/Re_p & Re_p < 1 \\ 30/Re_p^{0.625} & 1 < Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_D ——阻力系数,无量纲; d_p ——颗粒粒径, m ; u_p ——颗粒速度, m/s ; Re_p ——颗粒雷诺数。

1.2.3 压力梯度力

压力梯度力的产生是由于颗粒表面不同位置受力不同,其大小表示为颗粒体积与压强梯度的乘积,方向与压力梯度相反。作用在颗粒上的压力梯度力:

$$F_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) \quad (7)$$

1.3 流固耦合分析

堵漏钻井液中流体和颗粒的相互作用是双向耦合问题,即流体影响颗粒的运动,颗粒反过来也会影响流体的流动。采用 COMSOL 软件中的流体-颗粒相互作用模块。该模块中流体与颗粒的相互作用力由曳力公式定义,综合考虑颗粒在流体中的相对位置,通过计算每个粒子所受的总曳力来计算粒子作用在流体上的体积力,并引入修正系数力倍增因子 n 完善颗粒与流体的相互作用力来实现双向耦合。其表达式为:

$$F_v = - \sum_{e=1}^N n F_D \delta(r - q_e) \quad (8)$$

式中: n ——力倍增因子,无量纲; $\delta(r - q_e)$ ——狄拉克方程, $\delta(r - q_e) = \begin{cases} 1 & r = q_e \\ 0 & r \neq q_e \end{cases}$; r ——空间位置矢量; q_e ——第 e 个颗粒的位置矢量。

2 模型建立

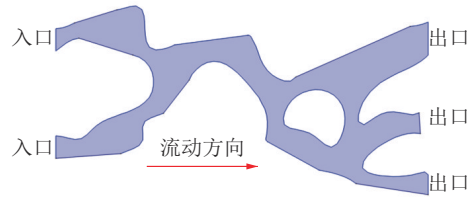
2.1 几何模型和网格划分

河南崤山地区取心情况如图 1 所示,其岩心破碎不完整,有大量裂缝,基于现场岩心的复杂裂缝,随机构建弯曲裂缝模型,建立裂缝封堵几何模型如图 2(a) 所示。水平长度为 25 mm,孔喉直径 d 在 0.8~1.5 mm 之间。仿真开始前,使用 COMSOL Multiphysics 软件对模型进行网格划分,由于壁弯曲较多,故采用自由三角形网格进行网格划分,网格尺寸在 0.0117~0.408 mm 之间,并对边界部分进行加密,加密部分网格尺寸在 0.00466~0.326 mm 之间,共 7100 网格单元数。如图 2(b) 所示。

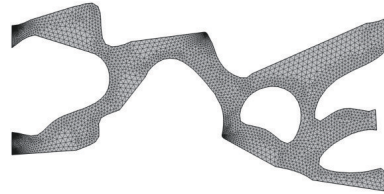


图 1 河南崤山地区地层岩心

Fig.1 Stratigraphic Cores of Henan Xiaoshan Area



(a) 几何模型



(b) 网格划分

图 2 裂缝几何模型和网格划分示意

Fig.2 Schematic diagram of fracture geometry model and mesh division

2.2 边界条件

流体和颗粒的入口、出口和流动方向如图 2(a) 所示,入口设为速度入口,出口为压力出口,假定裂

缝壁面是无滑移边界条件,颗粒在壁上的反弹条件为漫散射,液相设置为牛顿流体并且不可压缩,颗粒重力方向与流体流动方向垂直向下。

2.3 模拟参数

在实际地层裂缝的封堵过程中,钻井液中通常包含不同类型和大小的颗粒,如土体颗粒、井下岩屑、封堵材料以及加重材料,这些颗粒形成了一个多分散体系,尺寸跨度从微米到毫米级别,其中大颗粒在地层裂缝中主要起架桥封堵作用,小颗粒则进一步封堵架桥封堵后的空间和孔隙,形成致密封堵层。

由于极小的颗粒数量很多,在模拟过程中,为避免过大的计算量,忽略极小颗粒的堆叠和填充过程,主要研究架桥颗粒的架桥封堵效率。仿真中的参数设置为:(1)流体参数:流体密度 1200 kg/m^3 ,黏

度 $40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,入口流速 0.5 m/s ,出口压力 0 kPa 。(2)颗粒参数:入口速度随速度场变化,粒径 $0.2\sim 0.6 \text{ mm}$,粒子释放形式为指定释放时间,每 0.02 s 释放1次,每次释放 $1\sim 10$ 个,密度 2500 kg/m^3 ,杨氏模量 0.25 GPa ,泊松比 0.25 。

3 结果与分析

3.1 颗粒粒径对地层漏失裂缝封堵的影响

基于上述仿真过程,设置了3种颗粒尺寸,直径(d_p)分别为 0.2 、 0.4 、 0.6 mm ,以此研究不同颗粒尺寸对地层裂缝封堵效果的影响,在指定颗粒释放时间步(每 0.02 s 释放1次,每次释放2个)的情况下,通过监测出口处流体速度以及颗粒平均动能来分析颗粒尺寸对堵漏效果的影响规律,仿真结果如图3、图4所示。

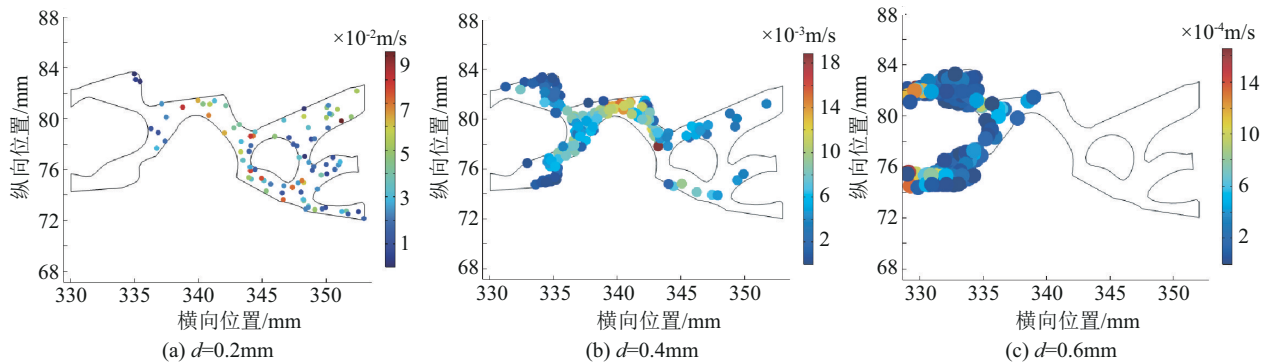


图3 不同颗粒尺寸桥接堵漏效果

Fig.3 Bridge plugging effect diagram of different particle sizes

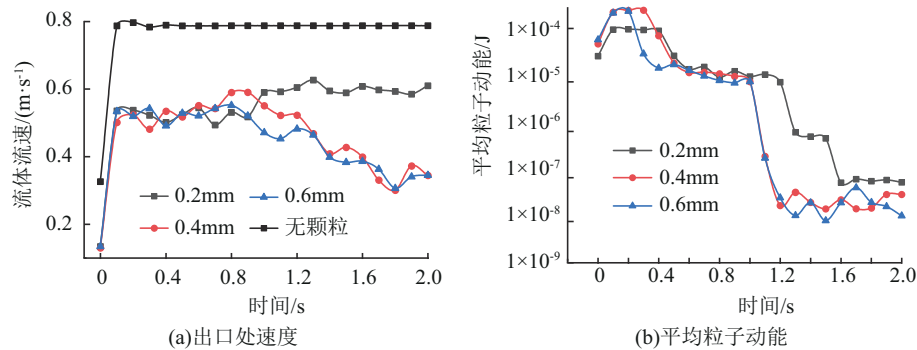


图4 不同颗粒尺寸出口处流体速度和平均粒子动能

Fig.4 Different particle sizes affect the fluid velocity at the outlet and the average particle kinetic energy

由图3可以看出, $d=0.2 \text{ mm}$ 时没有形成有效封堵, $d=0.4$ 、 0.6 mm 时颗粒在裂缝内形成架桥封堵,且 $d=0.6 \text{ mm}$ 时更早形成封堵,封堵位置更靠前。由图4(a)可以看出,携带颗粒的流体流速要低

于不携带颗粒的流体流速, $d=0.4$ 、 0.6 mm 时出口处流速显著降低,且 $d=0.6 \text{ mm}$ 的颗粒封堵效率更高。由于只有大颗粒的架桥封堵,故仍有少量流体渗出。同时还观察到 $d=0.2 \text{ mm}$ 时流体流速也有

一定程度的降低,推测是由于有部分颗粒悬浮在流体中导致流体重度增加,进而导致流速变慢。粒子的平均动能在封堵后有明显降低,同时也观察到 $d=0.2\text{ mm}$ 时颗粒动能也有比较明显的下降(图4b),通过观察图3发现是由于部分颗粒被流体携带到壁附近的低流速区域,导致粒子平均动能减小。

3.2 颗粒浓度对地层漏失裂缝桥堵的影响

根据实际堵漏经验可知,只有当颗粒浓度达到一定值时,才能形成有效的封堵。本研究采用粒径为 0.2 mm 的颗粒模拟堵漏颗粒,设置5个颗粒浓度梯度,分别为4%、8%、12%、16%和20%,仿真结果如图5、图6所示。

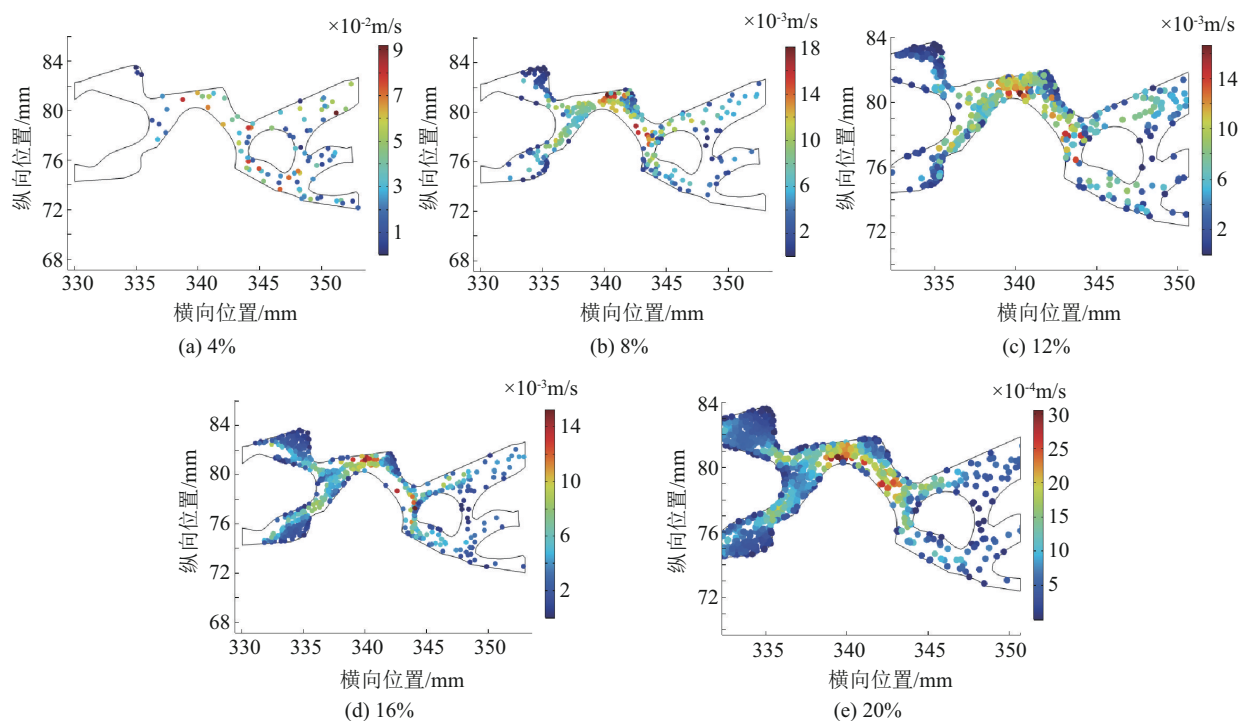


图5 不同颗粒浓度桥接堵漏效果

Fig.5 Bridge plugging effect diagram of different particle concentrations

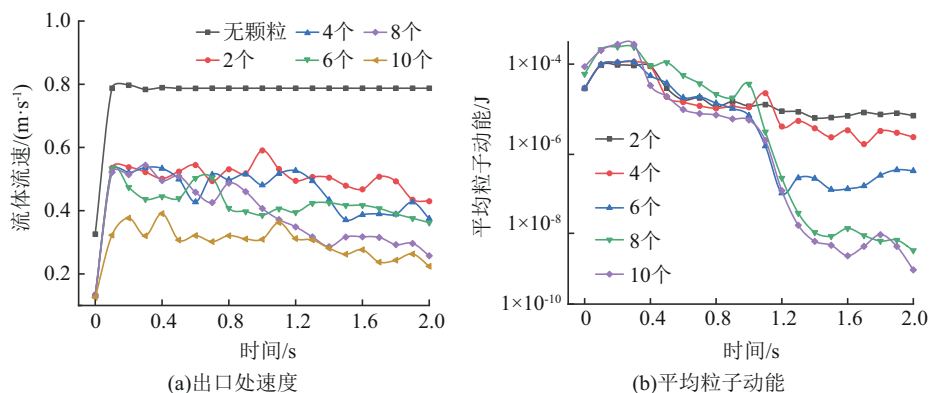


图6 不同颗粒浓度出口处速度和平均粒子动能

Fig.6 Different particle sizes affect the fluid velocity at the outlet and the average particle kinetic energy

从图5和图6可以看出,颗粒浓度对颗粒桥接堵塞的影响比较显著,当颗粒浓度较小时,无法形成裂缝桥接封堵,持续增大颗粒浓度后,开始在较

细的孔喉处形成堵塞,直至完全堵塞。随着颗粒浓度的升高,出口处的流速逐渐降低,粒子平均动能也逐渐降低,但当颗粒浓度高于16%后,其封堵后

的出口流速以及平均粒子动能并未有明显差别,进一步增加颗粒浓度对堵漏效率影响有限,还会增加成本。此外,颗粒浓度过高会导致颗粒在入口处堆积堵塞,但会有颗粒持续冲击堵塞区域,导致后期形成二次堵塞,从而降低整体堵漏效率。

3.3 颗粒级配对地层漏失裂缝桥堵的影响

上述裂缝封堵仿真过程仅采用单一尺寸的堵漏颗粒。为了深入研究不同尺寸颗粒组合对裂缝型地层堵漏效果的影响,采用尺寸分别为 $d_{p1}=0.1$ mm 和 $d_{p2}=0.4$ mm 的颗粒进行复配。具体的配比如表 1 所示。

表 1 颗粒复配方案	
Table 1 Granule compounding programme	
序号	复配方案
1	d_{p2} (12%)
2	d_{p1} (1%) + d_{p2} (12%)
3	d_{p1} (1%) + d_{p2} (16%)
4	d_{p1} (2%) + d_{p2} (12%)

注:括号中的百分比代表颗粒浓度。

通过表 1 的复配方案进行模拟,模拟结果如图 7 所示。可以看出,有颗粒级配的第 2、3、4 组的出口流速均小于没有颗粒级配的第 1 组。同时,由于第 4 组平均粒径更小,其封堵后的最终流速相对于第 2 组封堵后的最终流速下降了 35%,相同时间内,其失水量也相应降低。第 3 组的平均粒径更大,其在 0.6 s 处流速开始下降,而平均粒径更小的第 2 组在 1.2 s 处流速开始下降,表明堵漏颗粒平均粒径增大时,地层裂缝内形成桥堵的时间缩短。

对比 4 种复配方案的最终流速可以发现,细颗粒含量较高时,平均粒径更小,裂缝出口处的流速相对较低,这表明细颗粒含量越多,形成的封堵层越致密。而随着粗颗粒浓度较高,平均粒径更大,堵漏的效率较高。由此可见,封堵层的致密性主要由细颗粒决定,而粗颗粒则主要影响封堵效率。

3.4 实验验证

本文基于 COMSOL Multiphysics 建立了裂缝封堵模型,并分析了颗粒浓度、粒径及颗粒级配对裂缝型漏失地层封堵效率的影响,从而揭示其颗粒封堵的具体机理。但上述结论为数值模拟的研究成果,在实际工程生产中,颗粒属性对裂缝型漏失地层封堵效率的影响是否符合模拟得出的结论还有待验证。

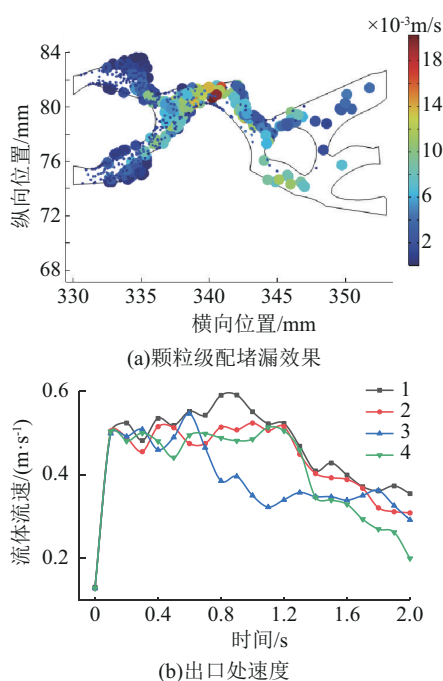


图 7 颗粒级配堵漏效果和出口处流速
Fig.7 Particle size distribution plugging effect diagram and outlet flow velocity

通过文献调研和已发表论文实验数据,基于油基钻井液分别搭配高抗压能力陶粒与有机高分子材料(OPM)为架桥材料设计室内堵漏浆液配方。配方 A: 6%OPM (2.80~2.00 mm) + 5%OPM (2.00~1.18 mm) + 5%OPM (0.85~0.425 mm) + 9% 填充材料(0.613~0.25 mm) + 2% 纤维材料 + 3% 片状材料;配方 B: 5% 陶粒(1.18~0.85 mm) + 5% 陶粒(0.85~0.425 mm)。配方 A 形成的裂缝封堵层承压能力 19.2 MPa, 累计漏失量为 29.4 mL; 配方 B 形成的裂缝封堵层承压能力 12.0 MPa, 累计漏失量为 45.6 mL^[33], 封堵结果如表 2 所示。

选用不同浓度和不同粒径的封堵材料作为固

表 2 实验结果与数值模拟对比结果		
Table 2 Comparison of experimental results with numerical simulation results		
类别	配 方	封堵效率提升
实验测试 ^[33]	配方 A (架桥颗粒 + 5% 纤维和片状材料)	配方 A 相对于
	配方 B (仅有架桥颗粒)	配方 B 失水量降低 36%
数值模拟	复配方案 4 (相较于复配方案 2 增加 1% 质量分数细颗粒)	方案 4 相对于
	复配方案 2	方案 2 失水量降低 35%

体堵漏材料与基浆配合进行室内堵漏实验,得出以下结论:(1)细颗粒对封堵层的致密性影响较大,而粗颗粒主要影响桥接效率。小尺寸颗粒浓度增加50%时,堵漏效率提高了35%。(2)骨架颗粒浓度较低时,堵漏效果较差;随着浓度增加,堵漏效果显著提高,但当浓度超过阈值时,封堵效果提升幅度减小甚至不再增加。室内实验得出的结论与前文数值模拟结论相符合,可以互相印证。

4 结论

本文通过 COMSOL Multiphysics 建立了裂缝型漏失地层颗粒封堵模型,研究了钻井液堵漏颗粒的粒径、浓度和粒径级配对漏失裂缝桥接堵塞效果的影响规律,得出以下结论:

(1) 堵漏颗粒的粒径大小影响漏失裂缝的桥堵效率。颗粒粒径需达到一定值时才能形成封堵,随着颗粒粒径的增大,桥堵形成所需时间减少。

(2) 颗粒浓度存在一个封堵范围,当颗粒浓度低于该范围下限值时无法形成有效封堵,而颗粒浓度高于其上限值时,浓度的增加对封堵效率影响不大。

(3) 粗颗粒在封堵过程中影响桥堵效率,而细颗粒则在封堵层形成后提升其致密性。大尺寸颗粒浓度相同,小尺寸颗粒浓度质量分数增加1%时,裂缝封堵完成后的最终漏速降低了35%;小尺寸颗粒浓度相同,大尺寸颗粒浓度质量分数增加4%时,裂缝桥堵形成时间减少了50%。

研究结果可为裂缝型地层堵漏设计提供理论依据,但研究内容目前仍面临模型相对简化、参数不确定性、多物理场耦合不足等局限。未来的研究应通过高精度模型、多物理场耦合以及高性能计算等手段,进一步提升模拟的准确性和实用性,为裂缝型地层堵漏技术的发展提供理论基础和技术支持。

参考文献(References):

[1] 杨斌,许成元,张浩,等.深部破碎地层井壁失稳机理研究进展与攻关对策[J].石油学报,2024,45(5):875-888.
YANG Bin, XU Chengyuan, ZHANG Hao, et al. Research progress on mechanism of wellbore instability in deep fractured formations and related countermeasures[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 875-888.

[2] 陈修平,李双贵,于洋,等.顺北油气田碳酸盐岩破碎性地层防塌钻井液技术[J].石油钻探技术,2020,48(2):12-16.
CHEN Xiuping, LI Shuanggui, YU Yang, et al. Anti-Collapse drilling fluid technology for broken carbonate formation in Shun-

bei oil and gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 12-16.

[3] 罗敦明,卢春华,王旭,等.松散、破碎、易冲蚀地层四重管密闭保形取芯钻具研制[J].工程勘察,2019,47(7):1-4.
LUO Dunming, LU Chunhua, WANG Xu, et al. The development of quadruplex-tube sampler for loose, fractured and erodible strata[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(7): 1-4.

[4] 许俊良.疏松及破碎地层取心新技术[J].钻采工艺,2009,32(1):22-23,26.
XU Junliang. New coring technology for unconsolidated and broken formations[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(1): 22-23, 26.

[5] 曹华庆,龙志平.苏北盆地戴南组和阜宁组地层取心关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(2):28-33.
CAO Hinghua, LONG Zhiping. Key coring technologies for the Dainan formation and Funing formation in North Jiangsu basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 28-33.

[6] 李伟成,陈晓彬,陈立,等.提高碳酸盐岩破碎地层取心收获率技术[J].钻采工艺,2007,30(2):37-38.
LI Weicheng, CHEN Xiaobin, CHEN Li, et al. Coring technology of improving core recovery in the fractured carbonate formation[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 37-38.

[7] 王春,赵毅.松散破碎地层立井井筒注浆堵水技术研究[J].山西煤炭,2013,33(11):69-70.
WANG Chun, ZHAO Yi. Technology of grouting and blocking water in shaft of loose and broken strata[J]. Shanxi Coal, 2013, 33(11): 69-70.

[8] 叶成,任涛,尹泽斌,等.准噶尔南缘冲断带破碎地层井壁稳定性机理[J].西南石油大学学报(自然科学版),2023,45(6):95-103.
YE Cheng, REN Tao, YIN Zebin, et al. Wellbore stability mechanism of fractured formation in the thrust belt of southern margin of Junggar basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2023, 45(6): 95-103.

[9] 邓盈盈,孙平贺,夏余宏焯,等.剪切增稠流体对裂隙地层的封堵特性试验研究[J].钻探工程,2024,51(5):68-76.
DENG Yingying, SUN Pinghe, XIA Yu hongye, et al. Experimental study on the sealing characteristics of fractured formation by shear thickening fluid[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 68-76.

[10] 杨宽才,孔二伟.地质钻探堵漏用盐水水泥浆的实验研究[J].钻探工程,2023,50(5):95-100.
YANG Kuancai, KONG Erwei. Experimental study on salt-water cement slurry for plugging in geological drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 95-100.

[11] 刘金华.顺北油气田二叠系火成岩漏失分析及堵漏技术[J].钻探工程,2023,50(2):64-70.
LIU Jinhua. Leakage analysis and plugging technology for Permian igneous rock in Shunbei oil and gas field[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 64-70.

[12] 闫晶,张坤,郭栋,等.弹性体型胶粘材料在大庆油田裂缝性漏失中的应用研究[J].钻探工程,2024,51(2):133-139.
YAN Jing, ZHANG Kun, GUO Dong, et al. Application of elastic adhesive material in drilling fluid plugging of fractured formation in Daqing oilfield[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 133-139.

- [13] 王李昌,隆威,高士娟.复杂地层钻探堵漏浆液的研究与应用[J].地质与勘探,2013,49(4):770-776.
WANG Lichang, LONG Wei, GAO Shijuan. Research on plugging agent for drilling in complex formations and its application[J]. Geology and Exploration, 2013,49(4):770-776.
- [14] 张健松,刘永升,李之军,等.地质钻探复杂地层固壁堵漏新工艺[J].地质与勘探,2020,56(4):819-825.
ZHANG Jiansong, LIU Yongsheng, LI Zhijun, et al. New technology of geological drilling for Borehole-Wall reinforcement and leaking stoppage in complex formation[J]. Geology and Exploration, 2020,56(4):819-825.
- [15] 王洪波,张庆松,刘人太,等.临江破碎地层基坑涌水综合分析方法研究[J].隧道建设,2017,37(4):455-461.
WANG Hongbo, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Study of comprehensive analysis method of water gushing of foundation pit near river in fractured ground[J]. Tunnel Construction, 2017,37(4):455-461.
- [16] 成景民,冯会斌,王治中,等.深井灰岩破碎地层取心技术及应用[J].钻采工艺,2006,29(3):26-27.
CHENG Jingmin, FENG Huibin, WANG Zhizhong, et al. Deep broken formation coring technology and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2006,29(3):26-27.
- [17] 杨宽才,孟燕杰,许权威,等.松散破碎地层钻进高吸水树脂堵漏剂合成与评价[J].钻探工程,2024,51(6):39-47.
YANG Kuancai, MENG Yanjie, XU Quanwei, et al. Synthesis and evaluation of highly absorbent resin plugging agent for drilling in loose broken formation[J]. Drilling Engineering, 2024,51(6):39-47.
- [18] 蒋炳,严君凤,张统得.HTD-3型高温堵漏材料研制及性能评价[J].钻探工程,2022,49(1):57-63.
JIANG Bing, YAN Junfeng, ZHANG Tongde. Development and performance evaluation of HTD-3 high temperature plugging material[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):57-63.
- [19] 刘均一,柴金鹏,李光泉,等.准噶尔盆地硬脆性页岩强化致密封堵水基钻井液技术[J].石油钻探技术,2022,50(5):50-56.
LIU Junyi, CHAI Jinpeng, LI Guangquan, et al. Enhanced tight plugging Water-Based drilling fluid technology for hard and brittle shales in Junggar basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022,50(5):50-56.
- [20] 殷慧,柳华杰,安朝峰,等.水玻璃复合堵漏体系中氯化钙控释技术[J].钻井液与完井液,2024,41(2):239-245.
YIN Hui, LIU Huajie, AN Chaofeng, et al. Controlled release of Calcium chloride from compounded Waterglass-Calcium chloride lost circulation material[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024,41(2):239-245.
- [21] 姜旭,柳华杰,马小龙,等.一种综合固化和桥接性能的堵漏体系[J].钻井液与完井液,2023,40(6):798-805.
JIANG Xu, LIU Huajie, MA Xiaolong, et al. A lost circulation control slurry with solidifying and bridging functions[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023,40(6):798-805.
- [22] 王涛,叶艳,朱金智,等.基于3D扫描打印技术的裂缝性堵漏模拟新方法[J].钻井液与完井液,2023,40(5):571-577.
WANG Tao, YE Yan, ZHU Jinzhi, et al. Research on a new method for simulation of fractured plugging based on 3D scanning and printing technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2023,40(5):571-577.
- [23] 陈金霞.适用于硬脆性泥页岩的钻井液井壁稳定性评价方法[J].油田化学,2018,35(3):527-532.
CHEN Jinxia. Evaluation method for wellbore stability of drilling fluid applying to hard-brittle shale[J]. Oilfield Chemistry, 2018,35(3):527-532.
- [24] Abrams A. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion[J]. Journal of Petroleum Technology, 1977,29(5):586-592.
- [25] 黄立新,罗平亚.裂缝性储集层的屏蔽式暂堵技术[J].江汉石油学院学报,1993(3):53-57.
HUANG Lixin, LUO Pingya. A technique of temporary screen plugging for fractured formation[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute(Social Science Edition), 1993(3):53-57.
- [26] Hands N. Drill-in fluid reduces formation damage, increases production rates[J]. Oil and Gas Journal, 1998,96(28):65.
- [27] Dick M A, Heinz T J, Svoboda C F, et al. Optimizing the selection of bridging particles for reservoir drilling fluids[C]// Proceedings of SPE International Symposium on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, 2000: SPE-58793-MS.
- [28] 张金波,鄢捷年.钻井液中暂堵剂颗粒尺寸分布优选的新理论和新方法[J].石油学报,2004,25(6):88-91,95.
ZHANG Jinbo, YAN Jienian. New theory and method for optimizing the particle size distribution of bridging agents in drilling fluids[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004,25(6):88-91,95.
- [29] 刘月田,丁祖鹏,屈亚光,等.油藏裂缝方向表征及渗透率各向异性参数计算[J].石油学报,2011,32(5):842-846.
LIU Yuetian, DING Zupeng, QU Yaguang, et al. The characterization of fracture orientation and the calculation of anisotropic permeability parameters of reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(5):842-846.
- [30] Le Bars M, Worster M G. Interfacial conditions between a pure fluid and a porous medium: implications for binary alloy solidification[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006,550:149-173.
- [31] 王松,杨兆中,卢华,等.水力压裂中支撑剂输送的数值模拟研究[J].石油天然气学报,2009,31(5):380-383,441.
WANG Song, YANG Zhaozhong, LU Hua, et al. Numerical simulation research of proppant transportation in hydraulic fracturing[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(5):380-383,441.
- [32] 赵庆彪,韩红利,谢宏,等.大孔径垂直管道投放并研石固体散料运动规律初探[J].华北科技学院学报,2012,9(1):33-35.
ZHAO Qingbiao, HAN Hongli, XIE Hong, et al. Primary exploration on the motion law of solid bulk materia of waste rock thrown in large aperture vertical line[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2012,9(1):33-35.
- [33] 康毅力,郭昆,游利军,等.考虑地应力及缝宽/粒径比的钻井堵漏材料抗压能力评价[J].石油钻采工艺,2021,43(1):39-47.
KANG Yili, GUO Kun, YOU Lijun, et al. Evaluation on the compression strength of lost circulation materials considering in-situ stress and fracture width/particle size ratio[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021,43(1):39-47.

(编辑 王跃伟)