

固化堵漏浆井下运移数值模拟研究

彭力^{1,2}, 于春勇³, 董易凡⁴, 史野^{1,2}, 蔺艺莹^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 李秀妹^{1,2}

(1. 天津市复杂条件钻井液企业重点实验室, 天津 300280; 2. 渤海钻探泥浆技术服务分公司, 天津 300280;
3. 渤海钻探第一录井分公司, 天津 300280; 4. 长庆油田公司苏里格南作业分公司, 西安 710018)

摘要: 固化堵漏是一种治理油气井钻井液漏失的有效手段, 揭示堵漏浆体在井筒-裂缝中运移规律, 构筑连续的固化体是该技术需要解决的关键问题之一。为此, 采用计算流体力学数值模拟方法, 建立井筒压力动态变化的垂直裂缝固化堵漏模型, 分析宾汉流型堵漏浆的密度、塑性黏度、动切力、排量以及裂缝开度等因素对堵漏浆运移的影响。结果表明: 注浆过程中, 低密度的堵漏浆优先进入垂直裂缝的上部, 而高密度堵漏浆优先进入垂直裂缝中部, 并出现明显混浆现象; 堵漏浆在裂缝中水平方向较竖直方向运移更快; 低黏度的堵漏浆更容易进入裂缝中, 黏度越大堵漏浆在裂缝出口达到相同体积分数的时间越长, 体积分越高堵漏浆顶替钻井液效率越低; 动切力对堵漏浆在井筒-裂缝中运移的影响不显著; 排量越小或裂缝开度越大, 裂缝出口堵漏浆瞬时流量占比增加越快, 进入地层深部堵漏浆体积占比越大, 裂缝出口达到相同体积分数需要的堵漏浆体积越小。数值模拟的结果对固化堵漏方案制定具有一定的理论指导意义。

关键词: 固化堵漏; 运移; 数值模拟; 井下; 垂直裂缝

中图分类号: TE28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0016-09

据统计全球井漏发生率占钻井总数的 20%~25%, 每年用于堵漏的费用高达 40×10^8 美元。2017—2018 年中国石油天然气股份有限公司国内和海外区块井漏导致的损失占总的钻井复杂损失的 70%, 年均经济损失超过 40×10^8 元^[1]。钻井工程面临复杂的地质条件和诸多技术瓶颈^[2-4], 裂缝性地层钻井液漏失问题严重阻碍了油气资源安全高效开发, 已成为制约钻井工程中“卡脖子”的关键技术难题之一^[1,5-6]。目前钻井工程常用漏失治理方法包括: 桥接堵漏、固化堵漏、高滤失堵漏、凝胶堵漏以及膨胀管漏失治理技术等, 现场常在桥接堵漏失败后应用固化堵漏, 固化堵漏也是使用频率仅次于桥接堵漏的有效漏失治理手段^[7-8]。固化堵漏技术采用钻杆输送可固化浆体进入地层裂缝等漏失通道内, 固化并封堵漏失通道的原理。主要的可固化材料包括水泥^[9-10]、环氧树脂^[11]、聚氨酯^[12]等。固化堵漏作业经验性强, 针对复杂地层一次堵漏成功率不高, 如何确定堵漏浆体的密度、流变性能以及注浆排量等工艺参数缺乏理论依据^[13]。裂缝性

地层固化堵漏浆在井筒-裂缝内顶替钻井液, 并完全填充井筒周围裂缝是堵漏成功的关键, 但堵漏浆的密度、黏度、动切力、注浆排量以及裂缝开度大小对堵漏浆在井筒-裂缝内运移影响规律仍然不清, 相关研究也鲜有报道, 因此亟须开展堵漏浆体在井下运移规律研究。

刘凡等^[14]、陶谦等^[15]采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟的方法, 定量分析了定压差条件下赫-巴流型的堵漏浆密度、流变性对堵漏浆在裂缝中的流速和体积分数的影响规律, 但裂缝出口与环空出口定压差的边界条件, 与堵漏浆进入环空, 环空液面增加、环空出口压力增加的实际情况存在明显差异。井下压力变化直接影响漏失和堵漏浆运移过程, 为更接近真实井下工况, 本文设置环空出口压力动态变化的边界条件, 分析宾汉流型堵漏浆的密度、黏度、动切力、注浆排量以及裂缝开度大小对堵漏浆在井筒-裂缝内运移影响规律及环空出口、裂缝出口堵漏浆流量分配情况。

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 中国石油集团渤海钻探工程有限公司企业项目 (2021D47F, 2021D48F)

作者简介: 彭力 (1991—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 工程师, 研究方向为油气井防漏堵漏技术; 于春勇 (1989—), 男, 河北沧州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为石油地质、油藏评价; 董易凡 (1986—), 男, 山东莱阳人, 高级工程师, 研究方向为钻井技术; 史野 (1987—), 男, 山东郓城人, 博士, 高级工程师, 研究方向为钻井液技术与防漏堵漏技术; 蔺艺莹 (1995—), 女, 河北保定人, 硕士, 工程师, 研究方向为油气井防漏堵漏技术; 张鹏 (1986—), 男, 甘肃庆阳人, 工程师, 研究方向为油气井防漏堵漏技术; 李秀妹 (1980—), 女, 山东平原人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为防漏堵漏材料开发。

1 数值模型

1.1 几何模型

为模拟固化堵漏浆通过钻杆注入地层裂缝的动态过程,建立的三维几何模型包括井筒、钻杆和裂缝,如图1所示。参考尺寸215.9 mm钻头,井眼扩大率5%,裸眼井筒直径为226.7 mm;钻杆长为1 m,钻杆内外径分别为108.6 mm和127 mm;井底存在对称分布垂直的裂缝,裂缝长为2 m,高度为0.5 m,考虑几何模型的对称性选取一半进行数值计算。固化堵漏作业常使用光钻杆输送堵漏浆,为减少起钻时间,降低井下卡钻、“插旗竿”等风险,控制固体在井筒内的留塞长度,一般会下钻至漏失层位以上一段距离。因此数值模型的钻杆设置在漏失裂缝以上,钻杆距离井底2 m。

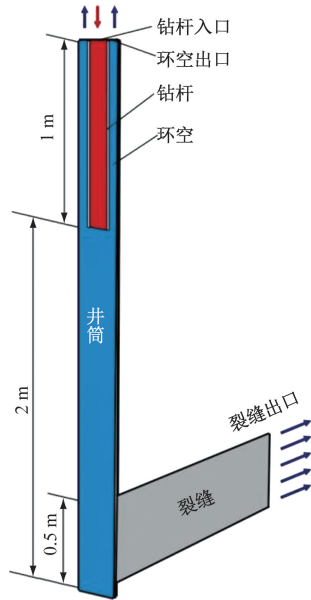


图1 井筒-垂直裂缝几何模型

1.2 材料属性和边界条件

初始状态下井筒、钻杆以及裂缝内部充满水基钻井液,随后被固化堵漏浆顶替,两种浆液均为宾汉流体,假设钻井液的密度、塑性黏度和动切力分别为 1.4 g/cm^3 、 $0.02 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 和 4 Pa 。堵漏浆性能参数见表1。模型设钻杆入口1个,裂缝出口1个,环空出口1个,如图1所示。钻杆入口设置为流速边界,裂缝出口为常压,边界压力值为 41 kPa (约3 m的钻井液液柱压力)。环空出口与裂缝出口压力差等于堵漏过程中进入环空浆体产生液柱压力与环空浆体流动压耗,漏失严重情况下环空浆体流速低,可以忽略浆体流动产生的压耗,假设上部井筒直径不变,则环空出口压力为速度、时间以及浆体质

表1 材料属性和边界条件

参数	取值
钻井液密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.4
钻井液塑性黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.02
钻井液动切力/ Pa	4
堵漏浆密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.0、1.4、1.8
堵漏浆塑性黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.005、0.01、0.02、0.04、0.08、0.16
堵漏浆动切力/ Pa	1、2、4、8、16
入口流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.08、2.16、3.24、4.32、6.48
裂缝开度/ mm	3、5、8

量分数的函数,具体表达式为

$$P_{\text{out}}^i = P_{\text{out}}^{i-1} + \nu_z \Delta t (\varphi_{\text{phase1}} \rho_{\text{phase1}} + \varphi_{\text{phase2}} \rho_{\text{phase2}}) g \quad (1)$$

式中: P_{out}^i 为第*i*时步环空出口压力($i=0$ 初始压力值取 0 Pa); ν_z 为竖直方向(z 方向)的流速; Δt 为时步长, φ_{phase1} 和 φ_{phase2} 分别钻井液和堵漏浆的体积分数; ρ_{phase1} 和 ρ_{phase2} 分别为钻井液和固化堵漏浆的密度; g 为重力加速度。

1.3 求解方法

数值模拟采用两相流瞬态计算模型,使用压力速度耦合算法,模拟时长为 $65\sim 100 \text{ s}$ 。假设钻井液和固化堵漏浆均为不可压缩流体且不互溶,两种流体流动密度和黏度满足加和性,浆体流动满足连续性方程和动量控制方程^[14],具体表达式为

$$\varphi_{\text{phase1}} + \varphi_{\text{phase2}} = 1 \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{phase1}} \rho_{\text{phase1}} + \varphi_{\text{phase2}} \rho_{\text{phase2}} = \rho \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{phase1}} \mu_{\text{phase1}} + \varphi_{\text{phase2}} \mu_{\text{phase2}} = \mu \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p + \rho f + \mu \nabla^2 v \quad (6)$$

式中: ρ 为浆体的密度; μ_{phase1} 、 μ_{phase2} 和 μ 分别为钻井液、堵漏浆和浆体的黏度; t 为注浆时间; v 、 v_x 和 v_y 分别为流速、 x 方向流速和 y 方向流速; p 为浆体压力; f 为浆体受的体积力。

2 结果分析

2.1 浆体密度的影响

数值模拟了不同密度堵漏浆体顶替钻井液的过程,堵漏浆体密度分别为 1.0 、 1.4 、 1.8 g/cm^3 ,其他的流变参数一致。图2给出3种密度堵漏浆注入 1.05 、 2.05 、 8.05 、 9.05 、 10.05 、 12.05 s 后井筒-裂缝中堵漏浆体体积分数,体积分数为 0 时表示浆体为钻井液,体积分数为 1 时表示浆体为堵漏浆,体积分数介于 $0\sim 1$ 表示浆体为两种的混合浆。当堵漏浆密度为 1.0 g/cm^3 和 1.4 g/cm^3 时(小于或等于钻井液密度),堵漏浆顺着井筒自上向下顶替钻井液,并会优先进入竖直裂缝的上部。裂缝中钻井液和堵

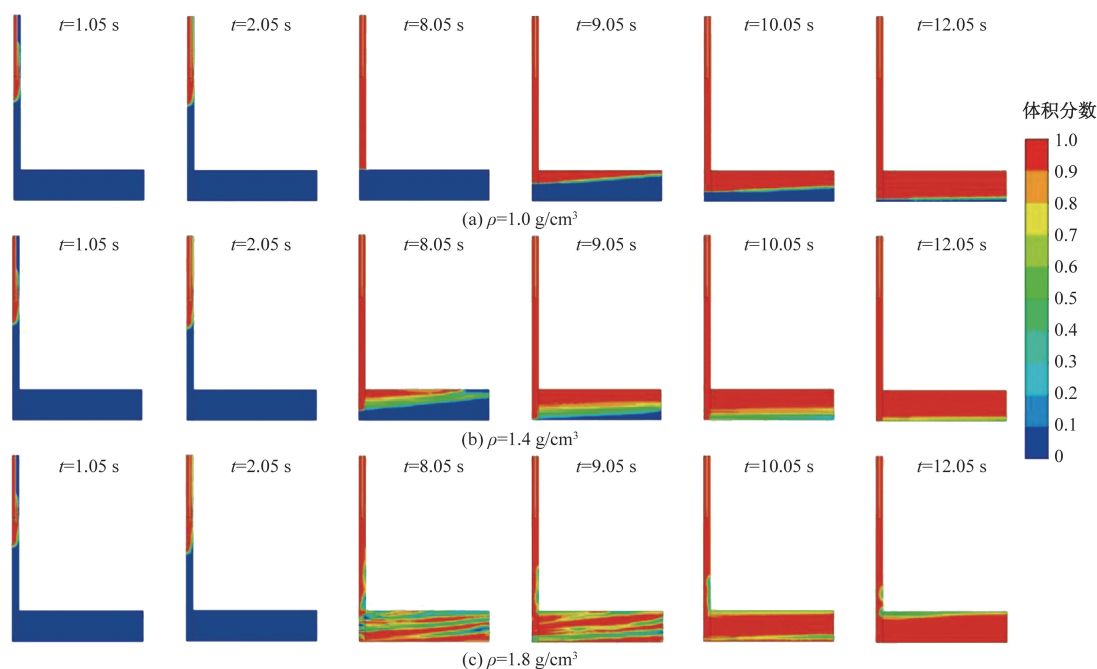


图 2 不同密度堵漏浆体在井下运移情况

漏浆均连续,随着堵漏浆流入逐渐顶替裂缝下部的钻井液。对比密度 1.0 g/cm^3 和 1.4 g/cm^3 堵漏浆的运移情况,发现低密度堵漏浆与钻井液分界明显,堵漏与钻井液过渡层更薄。当堵漏浆体密度为 1.8 g/cm^3 时(大于钻井液密度),堵漏浆会优先进入裂缝中部,然后逐渐填充裂缝下部和上部, $t=8.05 \text{ s}$ 和 $t=9.05 \text{ s}$ 裂缝中两种浆体不连续,表明顶替过程中混浆现象明显。因此,在保证井控风险和井壁稳定的前提下,从减小混浆量,提高固化体连续性角度,建议适当选用低密的固化堵漏浆进行堵漏施工。

由图 3 可知,密度 1.0 、 1.4 、 1.8 g/cm^3 堵漏浆从开始注入到 80 s 内,环空出口流速、环空液面高度变化量和裂缝出口流速随时间变化基本一致。环空出口流速在 $0\sim 0.66 \text{ s}$ 内迅速增加到 1.38 m/s ,钻井液和堵漏浆大量进入环空导致环空出口压力增加,流速逐渐减小, $t=80 \text{ s}$ 时环空流速降至 $0.026\sim 0.035 \text{ m/s}$ [图 3(a)],从曲线趋势可以判断环空出口流速最终将趋于零。相同条件下堵漏浆密度越高,环空出口流速降低略快。假设环空截面面积不随井深变化且浆体未从井口返出, $0\sim 80 \text{ s}$ 内环空液面高度逐渐增加,液面高度变化量达 $18.0\sim 20.2 \text{ m}$,堵漏浆密度越低液面高度变化量越大[图 3(b)]注浆、起钻完后留在井筒内的固化堵漏浆越多。为了有效控制堵漏浆固化后井筒内的留塞长度,可以适当减少注浆时钻杆距离井底的高度或

者注浆完毕后适当增加堵漏浆的憋挤体积。开始注浆后裂缝出口流速在 $0\sim 0.66 \text{ s}$ 迅速增加至 1.74 m/s , $t=2.23\sim 2.62 \text{ s}$ 时流速降低至 $0.006\sim 0.168 \text{ m/s}$,随后逐渐增加,在 $t=80 \text{ s}$ 时流速增加至 $5.70\sim 5.75 \text{ m/s}$ [图 3(c)]。从图 3(c)裂缝出口流速-时间曲线可以看出,流速存在两个极值,当裂缝浆体流动阻力和裂缝出口压力之和等于环空压力、浆体在环空内流动阻力以及重力之和时裂缝出口流速达到极值。

2.2 浆体黏度的影响

图 4 给出了塑性黏度为 0.01 、 0.40 、 0.16 、 $0.64 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的堵漏浆在井筒-裂缝中的运移情况。堵漏浆进入裂缝前 ($t\leq 7.05 \text{ s}$) 黏度对其流动影响不明显,但黏度明显影响着堵漏浆在裂缝内流动。 $t=8.05 \text{ s}$ 时堵漏浆黏度越低,在裂缝内突进深度越大,堵漏浆流动前沿形状越尖;而黏度越大突进深度越浅,前沿形状越平缓。这种现象表明低黏度的堵漏浆更容易进入裂缝中。 t 为 $8.05\sim 14.05 \text{ s}$ 范围内堵漏浆与钻井液竖直方向上的分界面逐渐下移,堵漏浆黏度越大下移速率越慢,而不同黏度的堵漏浆均表现出水平方向的运移速率较竖直方向运移更快。

通过裂缝出口堵漏浆体积分数可以判断裂缝内堵漏浆的填充情况,当体积分数达到 1.00 时裂缝完全填充。图 5 给出裂缝出口堵漏浆体积分数从 0 增加到 0.50 、 0.80 、 0.90 、 0.95 、 1.00 所需时间与堵

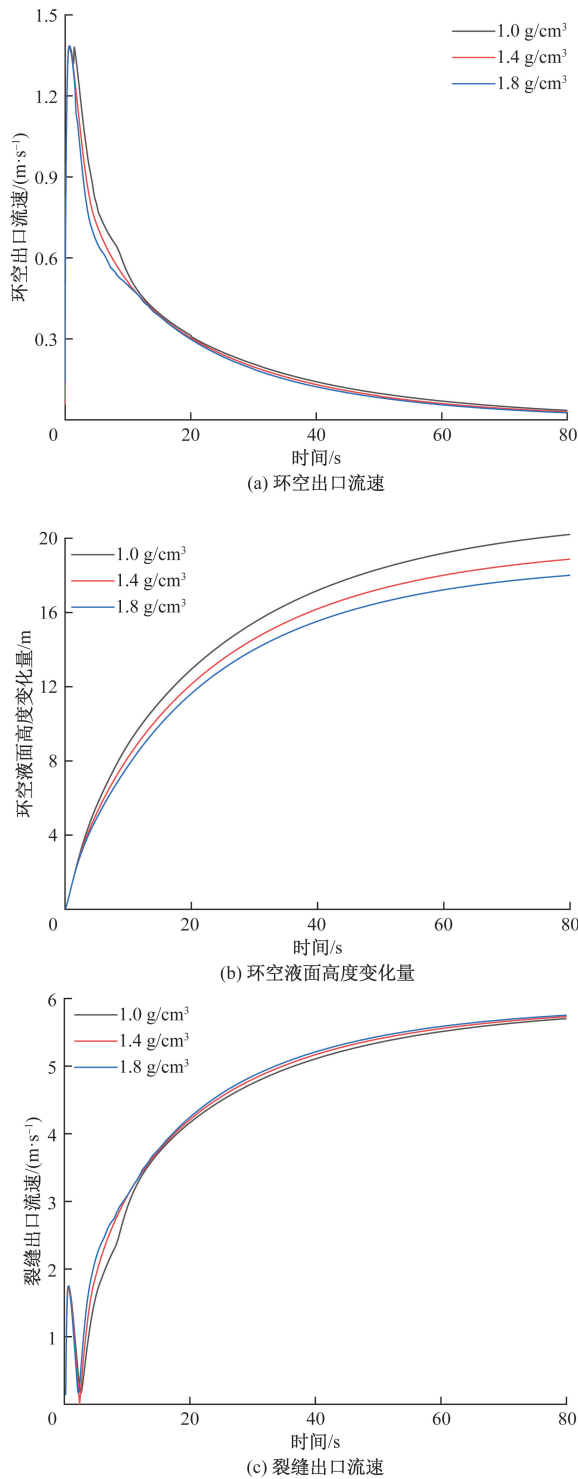


图3 不同密度堵漏浆条件下出口流速和环空液面高度变化量-时间曲线

漏浆黏度的关系。从图5可以看出,黏度 $0.005\sim 0.64\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的堵漏浆在裂缝出口体积分数从0增加到0.95所需时间为 $4.50\sim 16.80\text{ s}$,该过程需要注入堵漏浆 $0.135\sim 0.504\text{ m}^3$,而体积分数从0.95增加到1.00所需时间为 $7.26\sim 41.28\text{ s}$,需要堵漏浆 $0.2176\sim 1.2384\text{ m}^3$,堵漏浆在裂缝内的顶替效率

(堵漏浆体积分数增量与堵漏浆体积的比值)前者是后者的 $30.65\sim 46.69$ 倍。黏度越大,裂缝出口达到相同体积分数的时间越长;体积分数越高,堵漏浆顶替钻井液效率越低,体积分数增加趋势越慢。因此,如果不考虑浆体滞留性问题(低漏、渗漏或者不漏但需要提高地层承压能力时),固化堵漏作业时应该尽量选择低黏度的堵漏浆。

图6给出了塑性黏度为 $0.005、0.01、0.02、0.04、0.08、0.16、0.64\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的堵漏浆注浆过程中环空出口流速、环空液面高度变化量以及裂缝出口流速与时间关系曲线。 $t=0\sim 7.05\text{ s}$ 不同黏度的堵漏浆这3种曲线几乎重合,表明堵漏浆进入裂缝前黏度对其在井筒中流动影响不显著。当堵漏浆进入裂缝时,环空出口流速和裂缝出口流速-时间曲线均出现拐点。如果堵漏浆黏度大于钻井液黏度,环空出口流速迅速增加,而裂缝出口流速迅速减小,黏度差异越大这种变化趋势越明显;反之,环空出口流速加速减小,裂缝出口流速加速增加。当堵漏浆从裂缝出口流出且堵漏浆黏度大于钻井液黏度时,环空出口流速和裂缝出口流速-时间曲线均再次出现拐点,环空出口流速逐渐减小,而裂缝出口流速逐渐增加。堵漏浆进入裂缝后,相同条件下黏度越大,环空液面升高越快,环空液面高度变化量越大;而黏度越低环空液面高度越快达到平衡。

2.3 浆体动切力的影响

图7给出了动切力 $1、2、4、8、16\text{ Pa}$ 的堵漏浆注浆过程中,环空出口流速、裂缝出口流速、环空液面高度变化量、裂缝出口堵漏浆体积分数等参数与注浆时间的曲线关系。从图7中可以看出,注浆 90 s 内,不同动切力的堵漏浆体出口流速随时间变化曲线重合,而且变化趋势一致,在研究范围内堵漏浆动切力对浆体在井筒-裂缝内运移影响不明显。

2.4 注入排量的影响

根据现场钻井液泵的排量和堵漏现场经验,堵漏作业注浆排量为 $10\sim 60\text{ L/s}$,对应的入口流速为 $1.08\sim 6.48\text{ m/s}$,数值模拟了该排量范围内堵漏浆井下运移情况。注入井下的堵漏浆一部分从裂缝出口流出进入地层深部,一部分从环空出口流出进入环空上部,另一部分留在井底和裂缝中。堵漏浆注入排量不同,堵漏浆分配比例也不同。图8为排量 $10、20、30、60\text{ L/s}$ 条件下 $0\sim 80\text{ s}$ 内堵漏浆从环空出口、裂缝出口流出以及留在井底和近井筒裂缝中流量占比。由图8可知,当堵漏浆从环空出口流出后,排量越小,环空出口堵漏浆瞬时流量占比衰

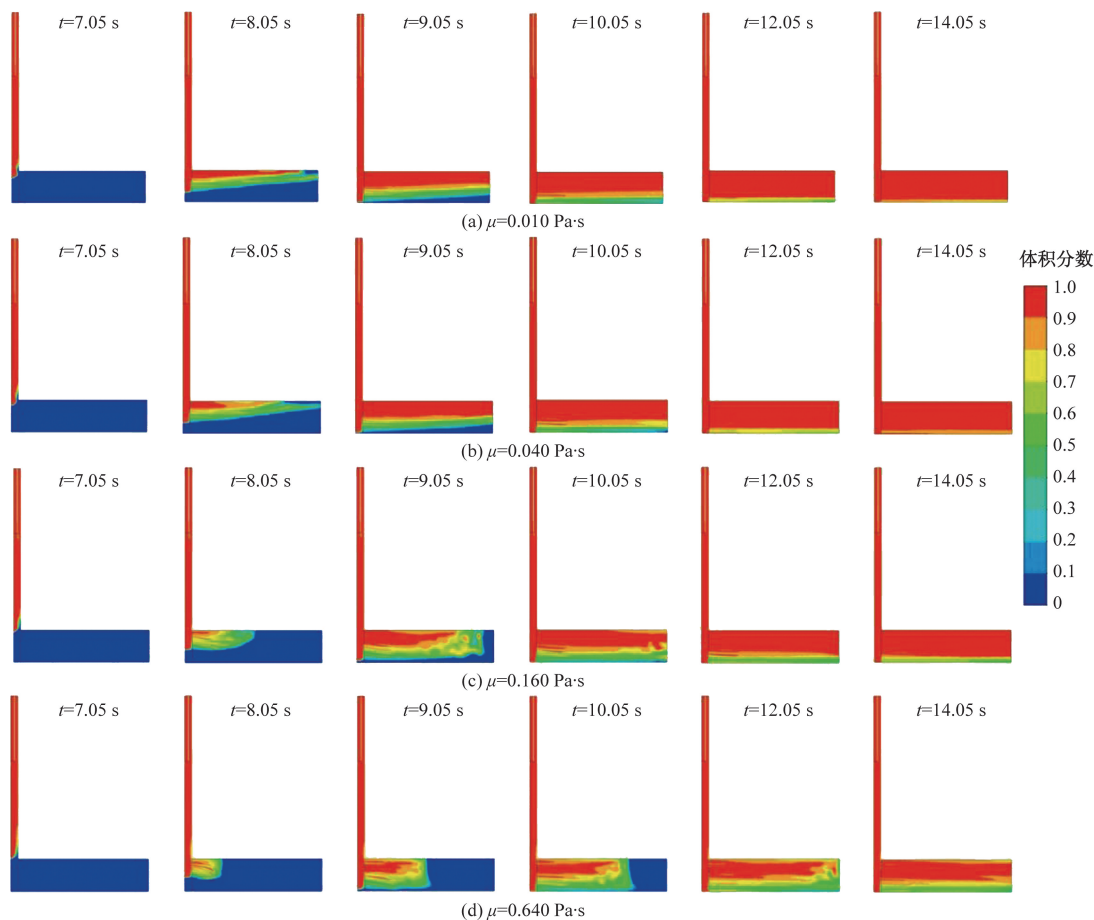


图 4 不同黏度堵漏浆体在井下运移情况

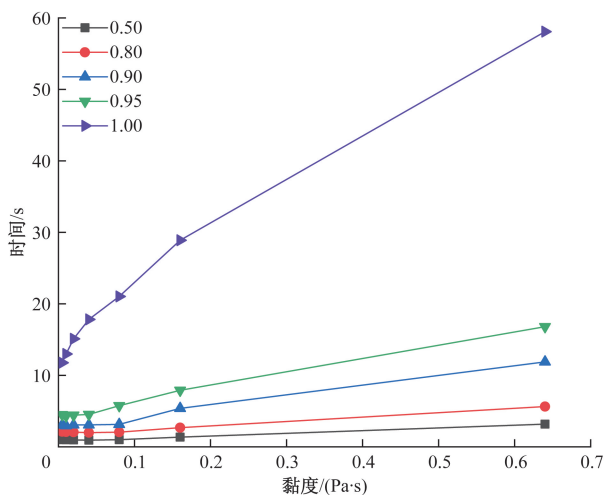


图 5 环空出口达到不同堵漏浆体积分数的时间-黏度关系

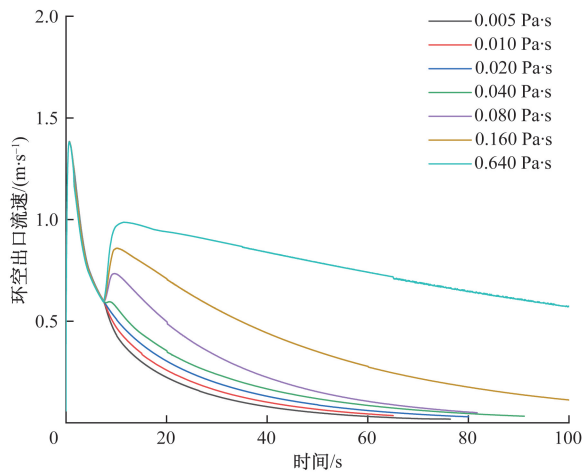
减越快,而裂缝出口堵漏浆瞬时流量占比增加也越快,导致进入环空上部的堵漏浆体积占注入堵漏浆总体积的比例越小,进入地层深部体积占比越大。排量从 60 L/s 降低至 10 L/s, $t=80$ s 时进入环空上部堵漏浆体积占比从 31.6% 降低至 10.2%,液面高度从 51.2 m 降低至 5.5 m(图 9);进入地层深部

堵漏浆体积占比从 67.2% 增加至 74.2%。

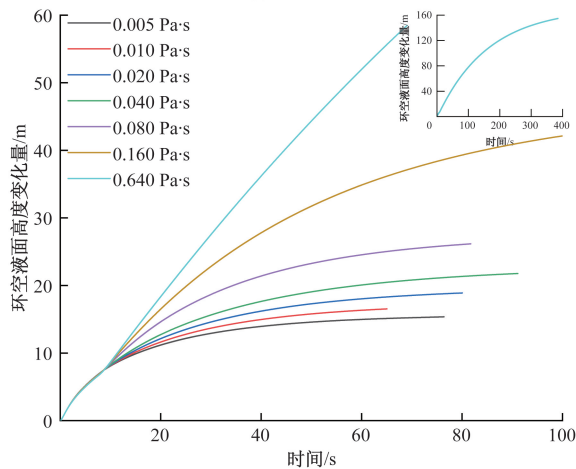
图 10 给出裂缝出口堵漏浆体积分数从 0 增加到 0.50、0.800、0.90、0.95、1.00 过程中注入的堵漏浆体积与排量的关系,给定体积分数条件下堵漏浆体积与排量近似呈线性关系,排量 10~60 L/s 的堵漏浆在裂缝出口体积分数从 0 增加至 0.95 注入堵漏浆体积 0.084~0.195 m³,而体积分数从 0.95 增加到 1.00 注入堵漏浆体积 0.262~0.391 m³,堵漏浆在裂缝内的顶替效率前者是后者的 38.10~59.26 倍。排量越大,裂缝出口达到相同体积分数堵漏浆体积越大;且体积分数越高,堵漏浆顶替钻井液效率越低。从堵漏浆的高效利用和封堵效果考虑,需要让流入地层中堵漏浆比例高,且顶替钻井液效率高,这样形成有效固化段更长,因此在保证施工安全情况下固化堵漏应选择低排量注浆。

2.5 裂缝开度的影响

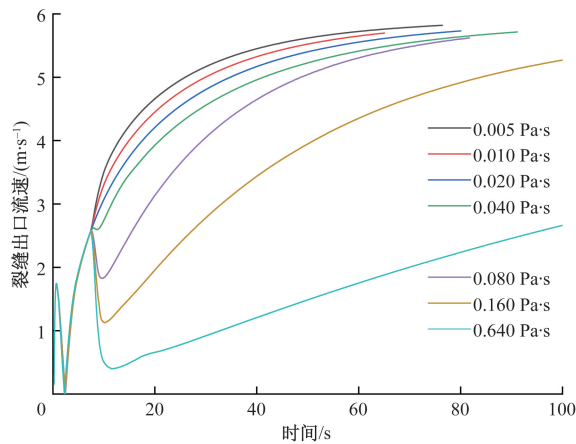
数值模拟裂缝开度 3、5、8 mm,注入排量 30 L/s 条件下堵漏浆在井下的运移。图 11(a)、图 11(b)分别为裂缝开度 3 mm 和 8 mm 条件下 0~80 s 内堵漏浆从环空出口、裂缝出口流出以及留在井底和近



(a) 环空出口流速



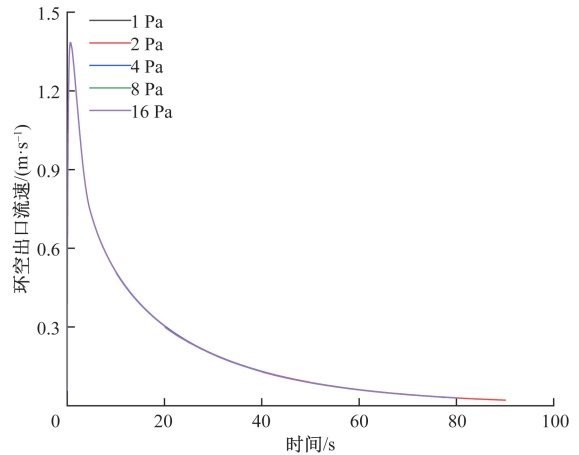
(b) 环空液面高度变化量



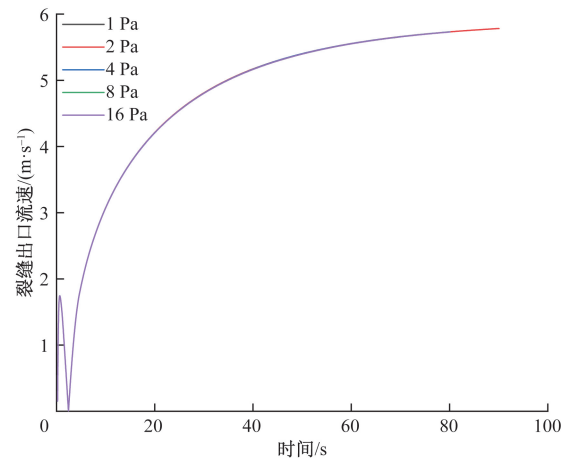
(c) 裂缝出口流速

图 6 不同黏度条件下出口流速和环空液面高度变化量-时间曲线

井筒裂缝中流量占比。当堵漏浆从环空出口流出后,开度越大,环空出口流速随时间先迅速增加至 1.17、1.38、1.73 m/s,环空出口流速随后逐渐减小,环空出口堵漏浆瞬时流量占比衰减越快,而裂缝出口堵漏浆瞬时流量占比增加也越快;导致进入环空上部的堵漏浆体积占注入堵漏浆总体积的比



(a) 环空出口流速



(b) 裂缝出口流速

图 7 不同动切力条件下出口流速-时间曲线

例越小,进入地层深部体积占比越大。开度从 3 mm 增加 8 mm, $t=80$ s 时进入环空上部堵漏浆体积占比从 53.1% 降低至 5.9%, 进入地层深部堵漏浆体积占比从 45.5% 增加至 87.6%。环空液面高度随时间逐渐变大,大裂缝开度条件下液面高度更快达到平衡,裂缝开度越小相同时间条件下环空液面高度变化量越大,80 s 后液面高度分别增加 43.4、18.9、7.42 m(图 12)。

图 13 给出不同开度裂缝出口堵漏浆体积分数从 0 增加到 0.50、0.80、0.90、0.95、1.00 过程中注入的堵漏浆体积与排量的关系。从图 13 可以看出,给定体积分数条件下堵漏浆体积与裂缝开度负相关;开度越小,裂缝出口达到相同体积分数堵漏浆体积越大。开度 3、5、8 mm 的裂缝出口堵漏浆体积分数从 0 增加至 0.95 注入堵漏浆体积分别为 0.217、0.133、0.093 m^3 , 而体积分数从 0.95 增加到 1.00 注入堵漏浆体积分别为 0.671、0.453、0.283 m^3 , 体积分数越高,堵漏浆顶替钻井液效率越低。

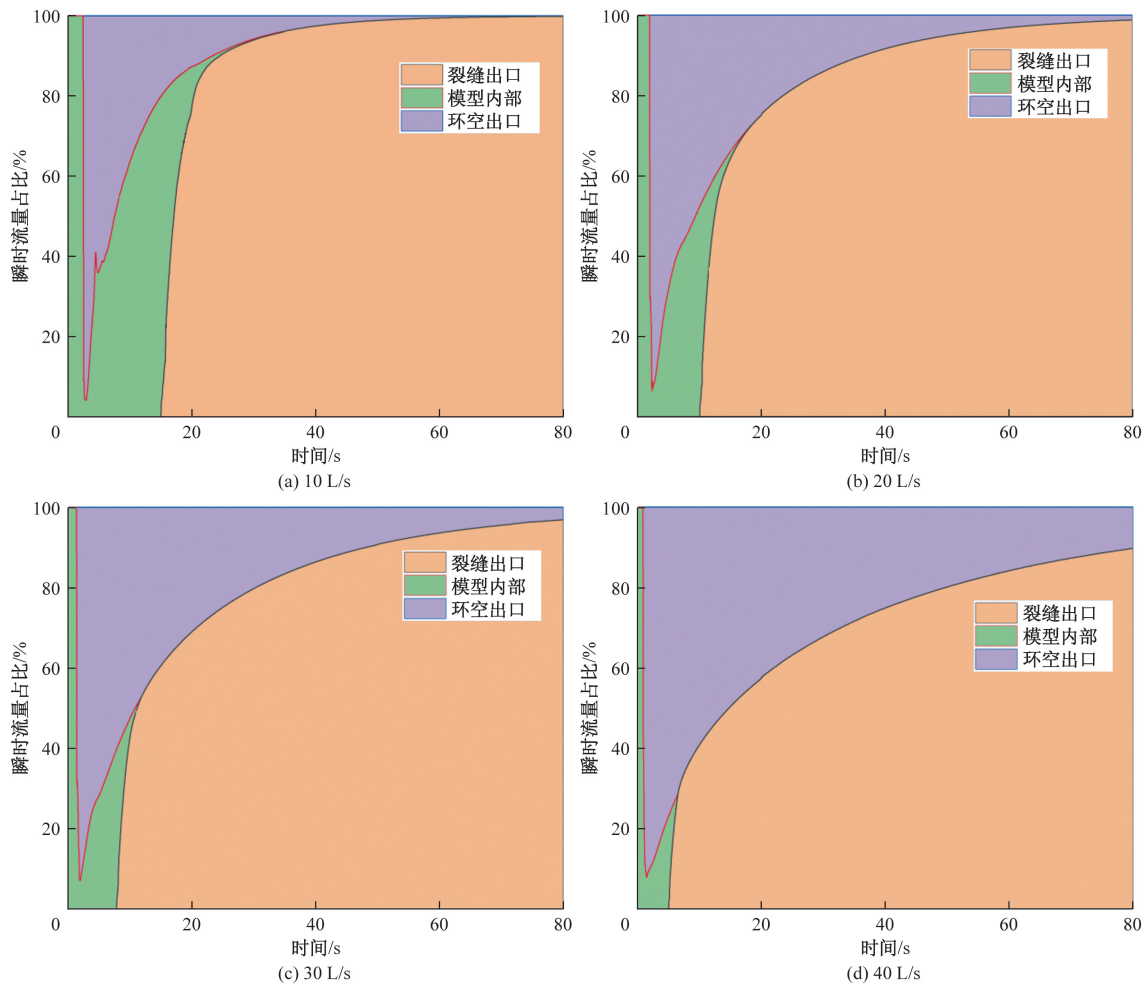


图 8 不同排量条件下瞬时流量占比-时间关系

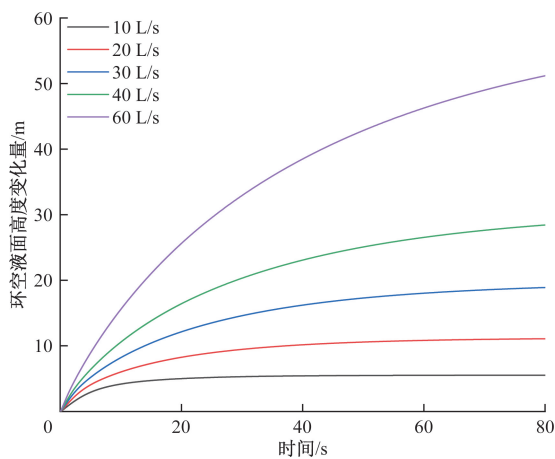


图 9 不同排量条件下环空液面高度变化量-时间曲线

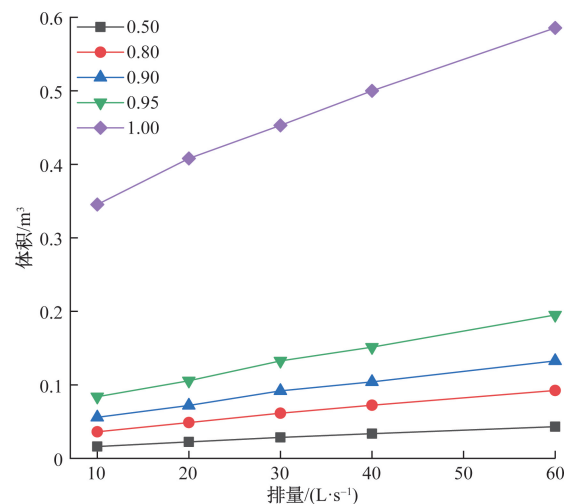


图 10 环空出口达到不同体积分数的堵漏浆体积-排量关系

3 结论

基于 CFD 数值仿真方法,建立了环空压力动态变化的井筒-垂直裂缝的堵漏模型,模拟了不互溶的堵漏浆和钻井液两相流体在井筒-裂缝中运移过程,分析了堵漏浆性能、排量及裂缝开度的影响,得

出如下结论。

(1)低密度的堵漏浆优先进入垂直裂缝的上部,逐步填充裂缝下部,两种浆体连续;而高密度的堵漏浆优先进入垂直裂缝中部,会出现明显混浆的

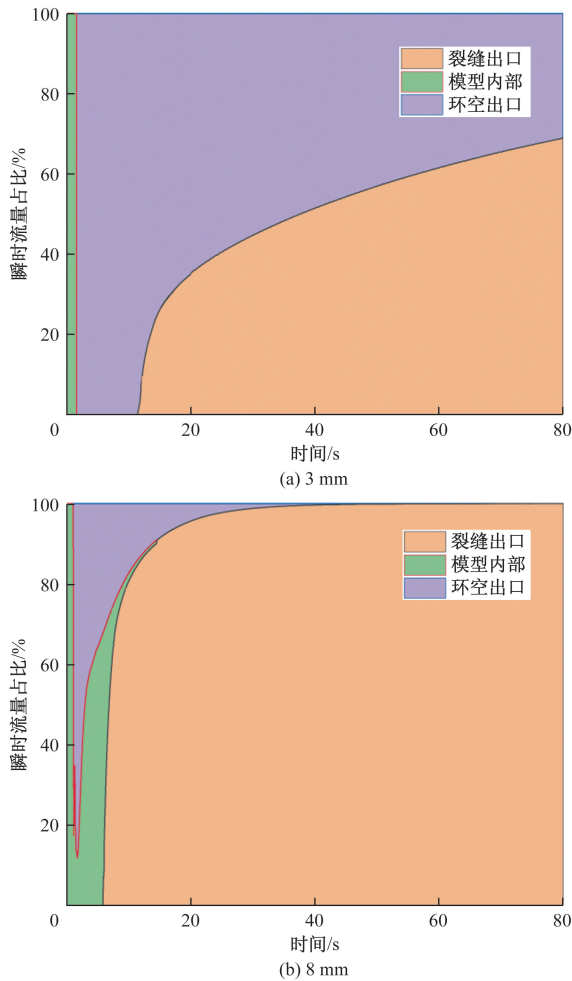


图 11 不同裂缝开度条件下瞬时流量占比-时间关系

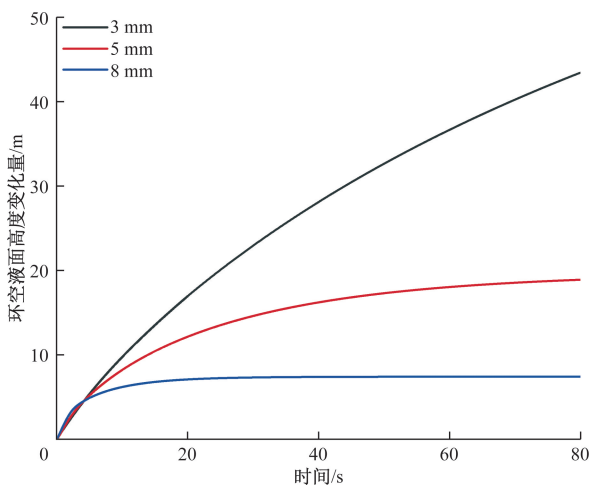


图 12 不同裂缝开度条件下环空液面高度变化量-时间曲线

现象,逐渐填充裂缝下部和上部。在保证井控风险和井壁稳定的前提下,建议适当选用低密度的固化堵漏浆进行堵漏施工。

(2)堵漏浆在裂缝中水平方向较竖直方向运移更快。低黏度的堵漏浆更容易进入裂缝中,黏度越

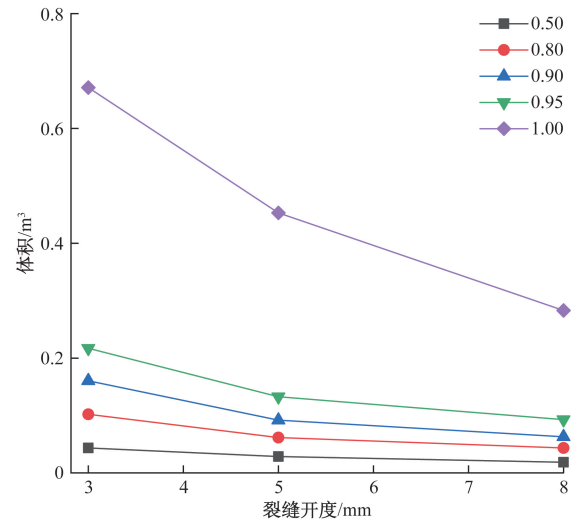


图 13 环空出口达到不同体积分数的堵漏浆体积-开度关系

大堵漏浆在裂缝出口达到相同体积分数的时间越长,体积分数越高堵漏浆顶替钻井液效率越低。如果不考虑浆体滞留性问题,固化堵漏作业时应该尽量选择低黏度的堵漏浆。

(3)堵漏浆的动切力对堵漏浆在井筒-裂缝中运移的影响不显著。

(4)当堵漏浆从环空出口流出后,环空出口流速先迅速增加,随后逐渐减小,排量越小或开度越大,环空出口堵漏浆瞬时流量占比衰减越快,而裂缝出口堵漏浆瞬时流量占比增加也越快;导致进入环空上部的堵漏浆体积占注入堵漏浆总体积的比例越小,进入地层深部体积占比越大。排量越大或开度越小,裂缝出口达到相同体积分数堵漏浆体积越大;且体积分数越高,堵漏浆顶替钻井液效率越低。在保证施工安全情况下固化堵漏应选择低排量注浆。

参考文献

- [1] 孙金声,白英睿,程荣超,等. 裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 630-638.
- [2] 齐彪,方俊伟,朱立鑫,等. 气侵条件下裂缝性地层漏失模拟实验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7059-7066.
- [3] 方俊伟,何仲,熊汉桥,等. 高温高压裂缝性碳酸盐岩气藏封缝堵气技术[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 93-98.
- [4] 李大奇,曾义金,刘四海,等. 裂缝性地层承压堵漏模型建立及应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 79-85.
- [5] 赵洪波,单文军,朱迪斯,等. 裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 740-746.

- [6] 孙金声, 杨景斌, 白英睿, 等. 裂缝性地层桥接堵漏技术发展综述与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 415-431.
- [7] 樊相生, 龙大清, 罗人文. 化学固结承压堵漏技术在明 1 井的应用[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(5): 67-71.
- [8] 李伟, 白英睿, 李雨桐, 等. 钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 4733-4743.
- [9] 符豪, 孙一流, 徐伟宁, 等. 裂缝性地层承压堵漏新工艺技术及应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(4): 137-143.
- [10] 王胜, 吴丽钰, 蒋贵, 等. 深孔纳米复合水泥基护壁堵漏材料研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(12): 7-13.
- [11] 赵庆琛, 葛际江, 郭洪宾, 等. 井筒漏失治理用环氧树脂胶塞的制备与性能评价[J]. 油田化学, 2021, 38(2): 210-215.
- [12] 刘凡, 刘钦政, 郝惠军, 等. 高强度可固化树脂堵漏剂 PMMM 研制与评价[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(6): 671-676.
- [13] 彭力, 史野, 王韧, 等. 两级固结堵漏井筒压力的变化规律[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7293-7299.
- [14] 刘凡, 程荣超, 郝惠军, 等. 裂缝性地层固化类堵漏材料井下运移仿真模拟研究[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(5): 560-567.
- [15] 陶谦, 周仕明, 张晋凯, 等. 水泥浆流变性对水平井固井顶替界面的影响: 基于天河一号大规模集群计算平台的数值模拟[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 185-191.

Numerical Simulation Study on the Migration of Consolidateable Plugging Slurry in Downhole

PENG Li^{1,2}, YU Chunyong³, DONG Yifan⁴, SHI Ye^{1,2}, LIN Yiyong^{1,2},
ZHANG Peng^{1,2}, LI Xiumei^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Drilling Fluids under Complex Condition, Tianjin 300280, China;

2. Mud Service Company, BHDC, Tianjin 300280, China; 3. Mud Logging Company, BHDC, Tianjin 300280, China;

4. South Sulige Operation Division, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Consolidation plugging is an effective means to control drilling fluid leakage in oil and gas wells. Revealing the migration law of plugging slurry in wellbore-fracture and constructing continuous solidified body is one of the key problems to be solved in this technology. Therefore, the CFD numerical simulation method is adopted. A numerical model of vertical fracture consolidation plugging with dynamic change of wellbore pressure is established. The effects of density, plastic viscosity, yield stress, displacement and fracture opening of Bingham flow plugging slurry on the migration of plugging slurry were analyzed. The research shows that during the grouting process, the low-density plugging slurry preferentially enters the upper part of the vertical crack. The high-density plugging slurry preferentially enters the middle of the vertical fracture, and there is obvious mixing phenomenon. The plugging slurry migrates faster in the horizontal direction than in the vertical direction in the fracture. The plugging slurry with low viscosity is easier to enter the fracture. The higher the viscosity is, the longer the time for the plugging slurry to reach the same volume ratio at the fracture outlet is. The higher the volume ratio is, the lower the efficiency of plugging slurry replacing drilling fluid is. The effect of yield stress on the migration of plugging slurry in wellbore-fracture is not significant. The smaller the displacement or the larger the crack opening, the faster the instantaneous flow rate of the plugging slurry at the crack outlet increases, the larger the volume of the plugging slurry entering the deep part of the formation, and the smaller the volume of the plugging slurry required to reach the same volume ratio at the crack outlet. The results of numerical simulation have certain theoretical guiding significance for the formulation of curing plugging scheme.

Keywords: consolidation plugging; migration; numerical simulation; downhole; vertical fracture