

面向能源地质钻探孔隙地层的剪切增稠流体封堵机理研究

黄小程^{1,2,3}, 孙平贺^{1,2,3*}, 王亮⁴, 夏余宏焯⁴, 邓盈盈^{1,2,3}, 李嘉雪^{1,2,3}, 张绍和^{1,2,3}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南长沙 410083; 2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083; 3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 4. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要: 针对非常规地质能源钻采中孔隙性地层漏失治理难及传统堵漏材料适配性差、性能难控等问题, 以纳米SiO₂为分散相、聚乙二醇为连续相制备剪切增稠流体(STF), 通过API静态堵漏仪与弹子床模拟孔隙地层进行试验, 系统探究了临界剪切速率、剪切增稠强度与剪切增稠比3个参数对STF封堵性能的影响机制。结果表明: 临界剪切速率主导压力响应特性与增稠触发时机, 在弹子床孔径0.15~1.66 mm时, 低临界剪切速率的样品易在低压下触发增稠效应, 漏失速率低至2 mL/min以下; 剪切增稠强度决定封堵层的致密程度与极限承压能力, 高增稠强度的样品漏失速率最低降至0.38 mL/min, 并在高压下仍具有优异的封堵效果; 剪切增稠比影响封堵形态的稳定性与压力敏感性, 高剪切增稠比能形成有效的“封喉”或“封腰”结构, 在压力大于3.0 MPa时漏失速率仍能降至1.71 mL/min, 有较好的承压能力。本研究揭示了STF核心增稠参数对孔隙封堵性能的作用机制, 为其在孔隙性漏失地层的工程化应用提供了理论支撑与技术依据。

关键词: 剪切增稠流体; 孔隙地层; 堵漏机理; 临界剪切速率; 剪切增稠强度; 剪切增稠比; 纳米SiO₂; 智能材料; 能源钻采

中图分类号: P634.8; TE28 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2026)02-0068-09

Research on the plugging mechanism of shear thickening fluid in porous formations for energy geological drilling

HUANG Xiaocheng^{1,2,3}, SUN Pinghe^{1,2,3*}, WANG Liang⁴, XIA Yuhongye⁴,
DENG Yingying^{1,2,3}, LI Jiaxue^{1,2,3}, ZHANG Shaohe^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring; (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha Hunan 410083, China; 3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 4. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha Hunan 410014, China)

Abstract: To address the challenges of lost circulation control in porous formations during unconventional geo-energy drilling, as well as the shortcomings of traditional plugging materials such as poor adaptability and difficult performance

收稿日期: 2025-12-11; 修回日期: 2026-01-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.007

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“剪切感知微粒流体对HDD高渗地层泥饼生长与增效机制研究”(编号: 42172346); 中南大学研究生自主探索创新项目(编号: 1053320241405)

第一作者: 黄小程, 女, 壮族, 2001年生, 地质工程专业, 硕士研究生, 研究方向为非常规能源钻采、钻井液防漏堵漏技术等, 湖南省长沙市麓山南路932号, hxcheng@csu.edu.cn。

通信作者: 孙平贺, 男, 汉族, 1982年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事深部钻探、非常规能源勘探与开发等方面的教学与科研工作, 湖南省长沙市麓山南路932号, pinghesun@csu.edu.cn。

引用格式: 黄小程, 孙平贺, 王亮, 等. 面向能源地质钻探孔隙地层的剪切增稠流体封堵机理研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 68-76.

HUANG Xiaocheng, SUN Pinghe, WANG Liang, et al. Research on the plugging mechanism of shear thickening fluid in porous formations for energy geological drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 68-76.

control, a shear thickening fluid (STF) was prepared using nano-SiO₂ as the dispersed phase and polyethylene glycol as the continuous phase. Experiments were conducted using an API static plugger and marble beds to simulate porous formations, systematically investigating the influence mechanisms of three key parameters-critical shear rate, shear thickening intensity, and shear thickening ratio-on the plugging performance of STF. The results indicate that the critical shear rate dominates the pressure response characteristics and the timing of thickening triggering. Within the marble bed pore size range of 0.15~1.66 mm, samples with a lower critical shear rate readily triggered the thickening effect under low pressure, reducing the leakage rate to below 2 mL/min. The shear thickening intensity determines the compactness and ultimate pressure-bearing capacity of the plugging layer; samples with high shear thickening intensity achieved a minimum leakage rate of 0.38 mL/min and maintained excellent plugging effectiveness even under high pressure. The shear thickening ratio affects the stability of the plugging morphology and pressure sensitivity. A high shear thickening ratio facilitated the formation of effective "throat-plugging" or "waist-plugging" structures, reduced a low leakage rate of 1.71 mL/min at pressures exceeding 3.0 MPa and demonstrating good pressure-bearing capacity. This study reveals the mechanisms by which the core thickening parameters of STF affect pore plugging performance, providing theoretical support and a technical basis for its engineering application in porous lost circulation formations.

Key words: shear thickening fluid; porous formation; plugging mechanism; critical shear rate; shear thickening intensity; shear thickening ratio; nano-SiO₂; smart material; energy drilling and extraction

0 引言

随着非常规地质能源钻采向深部复杂地层不断拓展,钻探施工过程中面临的裂缝性地层,其漏失通道具有多尺度、不确定性的显著特征,导致钻进难、护壁难、堵漏难等问题愈发突出。钻井液漏失治理已成为钻探施工成本控制的关键环节,钻孔护壁堵漏成本约占钻探施工总成本的1/5,单孔堵漏成本占比甚至高达1/3^[1-4]。为应对裂缝性地层漏失,传统堵漏方案主要依赖套管物理护壁或各类堵漏材料随钻封堵^[5-7]。常规堵漏材料可分为惰性堵漏材料与化学堵漏材料两类。惰性堵漏材料通过颗粒架桥填充漏失通道^[8-10],但面对尺寸多变的漏失通道适配性不足,尤其针对严重漏失地层堵漏成功率不高^[11]。化学堵漏材料(如交联聚合凝胶、延迟膨胀剂等)通过挤压变形或膨胀的方式封堵漏层^[12-16],具备一定自适应性,但存在成胶时间与强度难控、受井下环境影响大等局限^[17]。

随着智能材料的发展,具有自感知、自修复、自适应特性的智能堵漏材料^[18]成为破解裂缝性地层堵漏难题的重要方向。孙金声院士团队研发的剪切响应型凝胶堵漏剂^[19]、杂化交联复合凝胶堵漏剂^[20]、耐高温形状记忆聚合物堵漏剂^[21]等智能堵漏材料均表现出了优越的封堵性能,在钻探领域具有广阔的应用前景。

剪切增稠流体(Shear Thickening Fluid, STF)作为典型的智能材料,在受到外界剪切应力激变时,自身黏度瞬间增大几倍甚至几十倍,吸收大量

因外部作用产生的能量^[22],且增稠响应迅速。其具备的能量吸收特性及无源、自适应、制备工艺简便等优势,已在阻尼、振动控制、个体安全防护等领域得到广泛应用^[23-25]。作为新型智能材料,STF作为封堵材料的研究尚处于起步阶段^[26],对于STF在裂缝性地层封堵机理研究尚未形成成熟的封堵理论。

STF流变特性不仅反映表观黏度受外力作用时的变化规律,同时反映STF作为堵漏材料的适用范围:临界剪切速率 γ_c 为STF的剪切速率达到增稠响应时的临界值,剪切增稠强度 $\Delta\eta$ 为STF增稠响应后其最大黏度 $\eta_{\max}$ 与响应初始黏度 η_c 的差值,剪切增稠比 $R=\eta_{\max}/\eta_c$ 。基于此,本文以纳米SiO₂为分散相、聚乙二醇为连续相制备剪切增稠流体,通过室内模拟孔隙封堵试验,揭示临界剪切速率、剪切增稠强度、剪切增稠比各参数对孔隙封堵效果的作用机制,研究剪切增稠流体在不同孔隙地层中的封堵规律与适配区间,为剪切增稠流体在孔隙性漏失地层的工程化应用提供理论支撑与技术依据。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

设置剪切增稠流体试验样品,分别考虑临界剪切速率、剪切增稠强度、剪切增稠比各参数差异,在控制其他增稠特性参数差异的基础上对目标参数设置3种梯度进行封堵试验,各样品增稠性能参数见表1。

1.2 试验方法

为室内评价剪切增稠流体孔隙型漏失性能,采

表1 试验各样品的目标性能参数

Table 1 The target performance parameters of each sample

样品	临界剪切速率/ s^{-1}	剪切增稠强度/ ($mPa \cdot s$)	剪切增稠比
STF-C1	12.59		
STF-C2	31.62		
STF-C3	63.09		
STF-M1		67325.6	
STF-M2		48119.9	
STF-M3		30115.2	
STF-R1			33.18
STF-R2			5.35
STF-R3			1.52

用API静态堵漏仪作为主要试验仪器,仪器主要由漏斗、球阀、钢缝隙板、弹子床、游动活塞和压力源等组成,试验装置如图1所示。该装置的评估原理是在压力作用下将测试材料挤出试验装置,若堵漏材料在当前试验压力及模拟地层环境下能满足封堵要求,则出漏量小甚至无出漏;反之,若出漏量大甚至发生完全漏失,则表明该材料无法满足封堵要求。

试验中采用不同粒径钢珠及玻璃珠堆积形成床体,颗粒间形成不同大小孔隙,以模拟不同孔隙发育的地层。弹子间孔隙的计算主要通过“四颗粒相接”和“五颗粒相接”两种常用理论模型,如图2所示。本试验中将“五颗粒相接”定义为弹子床孔径上限,“四颗粒相接”为弹子床孔径下限。

针对两种颗粒相接模型,假定弹子直径相同且为 D ,则“四颗粒相接”模型孔隙直径为 $0.1547D$,“五颗粒相接”模型孔隙直径为 $0.4142D$ 。本试验中所采取不锈钢钢珠直径包括4、14 mm,玻璃珠直径包括1、2、8 mm,以上弹子单独形成床体时,模拟的孔隙由上述模型计算,结果见表2。

具体试验步骤及封堵评价方法如下:

(1)取所需体积试验弹子,在试验装置筒底部放入模拟孔隙发育的地层介质,然后关闭底部阀门。

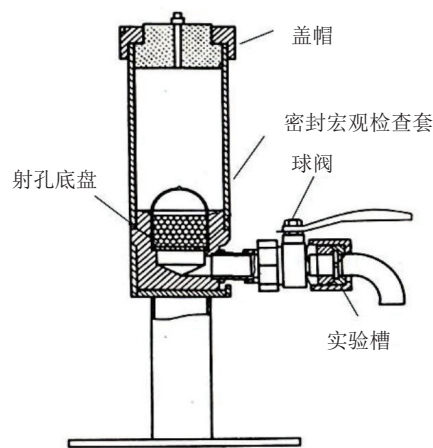
(2)制备剪切增稠流体,制作完成后控温至指定试验温度,加入试验装置。

(3)密封装置上部端盖,检查装置气密性,打开出口端滤液称量装置。

(4)连接加压系统,将装置内氮气压力提升至本



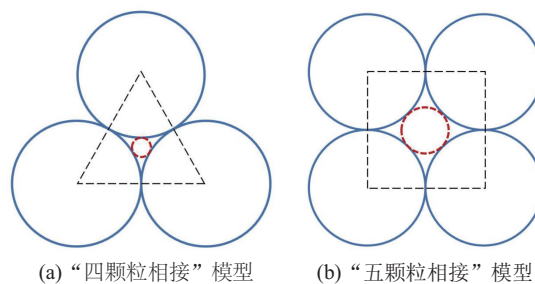
(a)实物



(b)结构示意图

图1 API静态堵漏仪

Fig.1 API static plugger



(a)“四颗粒相接”模型

(b)“五颗粒相接”模型

图2 理论模型

Fig.2 Theoretical models

次试验所需压力,打开出口阀门同时开始计时,观察并记录浆液漏失情况,待浆液出漏稳定后记录15~30 min内出口漏失量,单次记录时间不大于30 s,总记录时间根据浆液出漏形态调整。

(5)关闭出口阀门,打开进气阀泄压,取出多余样品及模拟地层,观察并记录模拟地层表面及剖面

表2 孔隙封堵试验弹子床孔径
Table 2 Pore plugging test marble bed hole size

弹子直径/ mm	四颗粒模型孔 径/mm	五颗粒模型孔 径/mm	孔径范围/ mm
1	0.1547	0.4142	0.15~0.41
2	0.3094	0.8284	0.31~0.83
4	0.6188	1.6568	0.62~1.66
8	1.2376	3.3136	1.24~3.31
14	2.1658	5.7988	2.16~5.80

封堵情况,清理试验仪器。

(6)绘制漏失量随时间变化曲线,剔除误差过大数据,拟合计算各压力下平均漏失速率。

弹子床采用1、2、4、8、14 mm钢珠及玻璃珠分层摆放,共设置4种类型弹子床模拟孔隙地层,弹子床编号及所用弹子类型和用量见表3,弹子布置均为粒径上大下小,如图3所示。

表3 弹子床设置及弹子用量
Table 3 Marble bed setting and marble usage scale

弹子床 编号	1 mm 玻 璃珠用 量/mL	2 mm 玻 璃珠用 量/mL	4 mm 钢 珠用量/ mL	8 mm 玻 璃珠用 量/mL	14 mm 钢珠用 量/mL
1	90	90	90	0	0
2	0	90	90	90	0
3	0	0	90	90	90
4	0	0	0	90	180

由于STF-C系列、STF-M系列样品在4号弹子床中的出漏量较大且漏失曲线无明显规律,不能体现改变流变参数引起的封堵效果差异,仅使用1、2、3号弹子床作为临界剪切速率、剪切增稠强度影响试验的模拟地层。由于STF-R系列样品的剪切增稠强度配置时被控制在较高水平,在1号弹子床中的出漏现象不明显,故使用2、3、4号弹子床进行剪切增稠比影响试验。

2 临界剪切速率对孔隙封堵效果影响

图4为剪切增稠样品STF-C1、STF-C2、STF-C3在1、2、3号弹子床中漏失速率随漏失压力变化曲线。可以看出,随漏失压力的增加,3种样品的漏失速率整体均表现出先减小后增大再减小的趋势。在初期,随压力升高,STF的增稠效应被激发,此时纳米SiO₂分散相颗粒快速团聚,形成软固体封堵孔

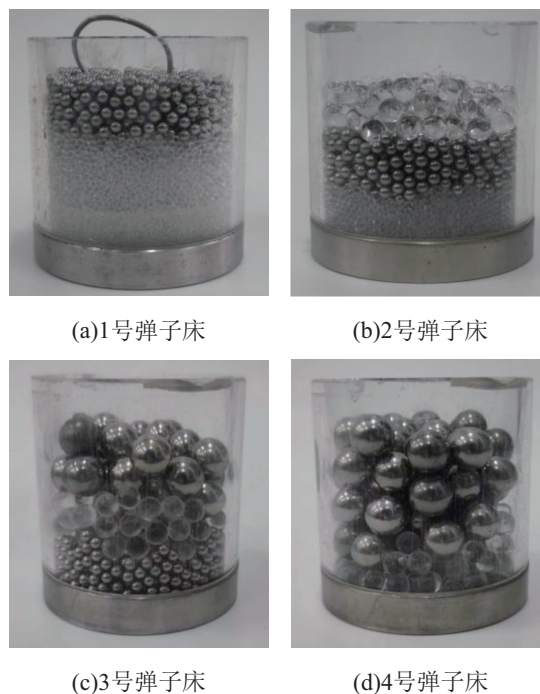


图3 弹子布置方式及实物

Fig.3 The arrangement and the physical diagrams of the marble beds

隙,漏失速率下降(此时除3号弹子床外,漏失速率均在4 mL/min以下,封堵效果良好);压力继续升高至0.5 MPa,STF流动状态变化导致团聚结构松动,漏失速率回升;当压力进一步增大至2.0 MPa,在较大的压力下颗粒形成了更稳定的封堵结构,漏失速率再次下降,形成三段式曲线。

随着临界剪切速率依次增大,即由12.59 s⁻¹增大至63.09 s⁻¹,触发增稠效应时(即曲线前期极大值点)的压力均有所上升,在1~3号弹子床中达到封堵效果所需压力均变大。并且由图4(a)可看出,弹子床孔隙较小(0.15~1.66 mm)且样品临界剪切速率在12.59、31.62 s⁻¹时,即临界剪切速率较小,压力上升能够直接触发增稠效应,使得试验刚开始漏失速率就迅速下降至<2 mL/min。这是因为临界剪切速率本质是触发STF增稠的临界条件,数值越小意味着不需要很大的压力就能使流体剪切速率达到临界值并触发该效应,尽早形成封堵结构,减少漏失。3号弹子床中孔隙尺寸在0.62~5.80 mm之间,平均孔径较大,漏失通道宽,在压力超过1.0 MPa后,团聚的颗粒无法形成有效的封堵结构,此时样品间临界剪切速率的差异性难以在封堵效果中体现。

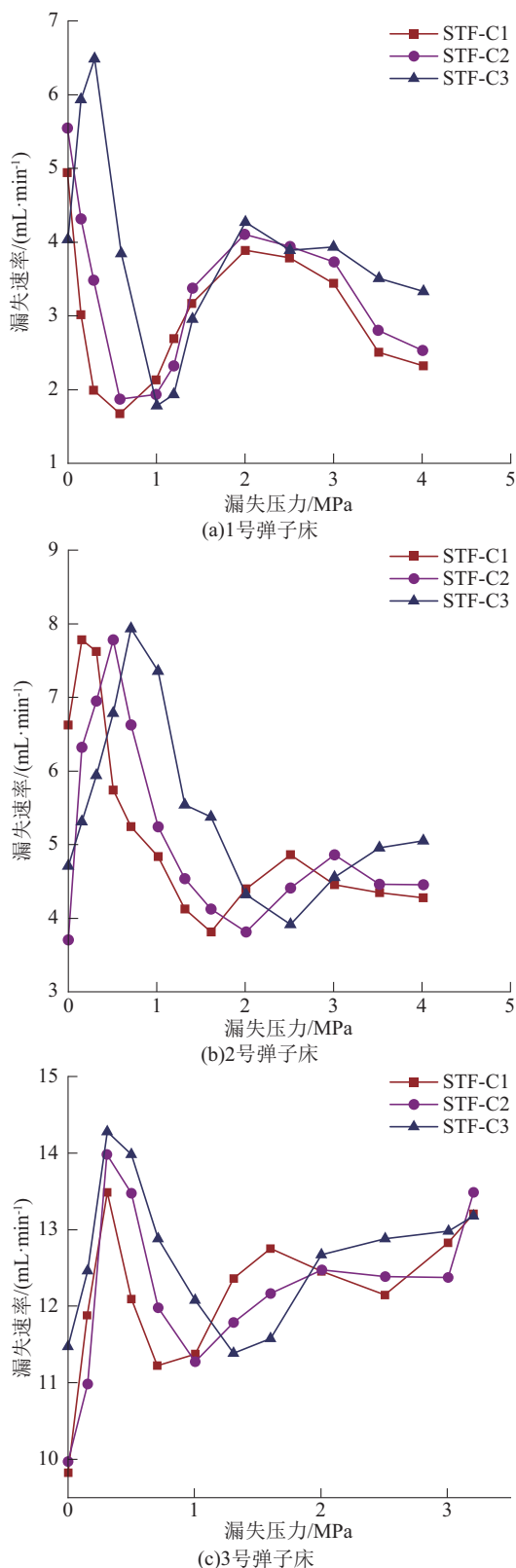


图4 STF-C1、STF-C2、STF-C3漏失速率随漏失压力变化曲线

Fig.4 Curves of leakage rate variation with leakage pressure for STF-C1, STF-C2, and STF-C3

3 剪切增稠强度对孔隙封堵效果影响

图5为剪切增稠样品STF-M1、STF-M2、STF-M3在1、2、3号弹子床中漏失速率随漏失压力变化曲线。可以看出,剪切增稠强度越大,在压力变化的全程漏失速率越小,STF-M1触发增稠后漏失速率最低降至0.38 mL/min,在封堵效果上最为优异。剪切增稠强度决定STF在增稠响应后封堵结构的强度,剪切增稠强度越大,STF在剪切应力下形成的团聚结构越致密,抗冲刷和承压能力越强,能更有效地阻挡流体渗漏。

在1号弹子床模拟漏失中,试验曲线呈现出三段式形态,此时弹子床孔隙直径最小(0.15~1.66 mm),各样品的剪切增稠强度均能满足该弹子床的封堵要求(增稠后漏失速率<3 mL/min)。此时,STF-M1剪切增稠强度最大,在较高漏失压力下封堵效果最好;STF-M3剪切增稠强度最小,虽能满足封堵要求,但对比STF-M1、STF-M2,其封堵能力并无优势。

在2、3号弹子床模拟漏失中,两弹子床漏失曲线形态相似,触发增稠效应后曲线下降,又随压力升高逐渐上升。在2号弹子床中,剪切增稠强度较大的STF-M1、STF-M2仍表现出较好的孔隙封堵能力,在压力为4.0 MPa时,漏失速率均<3 mL/min。在3号弹子床中,模拟地层孔隙较大(0.62~5.80 mm),随压力升高,漏失速率均>10 mL/min。3号弹子床中各样品触发增稠效应后,随压力升高,漏失速率下降,流体漏失仍能得到一定抑制,但剪切增稠强度最小的STF-M3在压力增至2.0 MPa后仍持续回升,无法满足封堵要求。

4 剪切增稠比对孔隙封堵效果影响

图6为剪切增稠样品STF-R1、STF-R2、STF-R3在2、3、4号弹子床中漏失速率随漏失压力变化曲线。由图6可知,剪切增稠比越大,孔隙封堵效果越好。STF-R1、STF-R2、STF-R3在压力为0 MPa时的初始漏失速率依次减小,但随着压力升高,STF-R1、STF-R2、STF-R3的孔隙封堵效果反而依次变差。这是因为样品剪切增稠比大,剪切增稠强度一定时,意味着样品黏度小、流动性好,在未加压状态下易漏失,流体更易进入孔隙漏失腔道中;加压后,具有一定速率的流体进入漏失腔道中,此时流体局部流速快速增加并达到临界剪切速率,更易触发STF的增稠

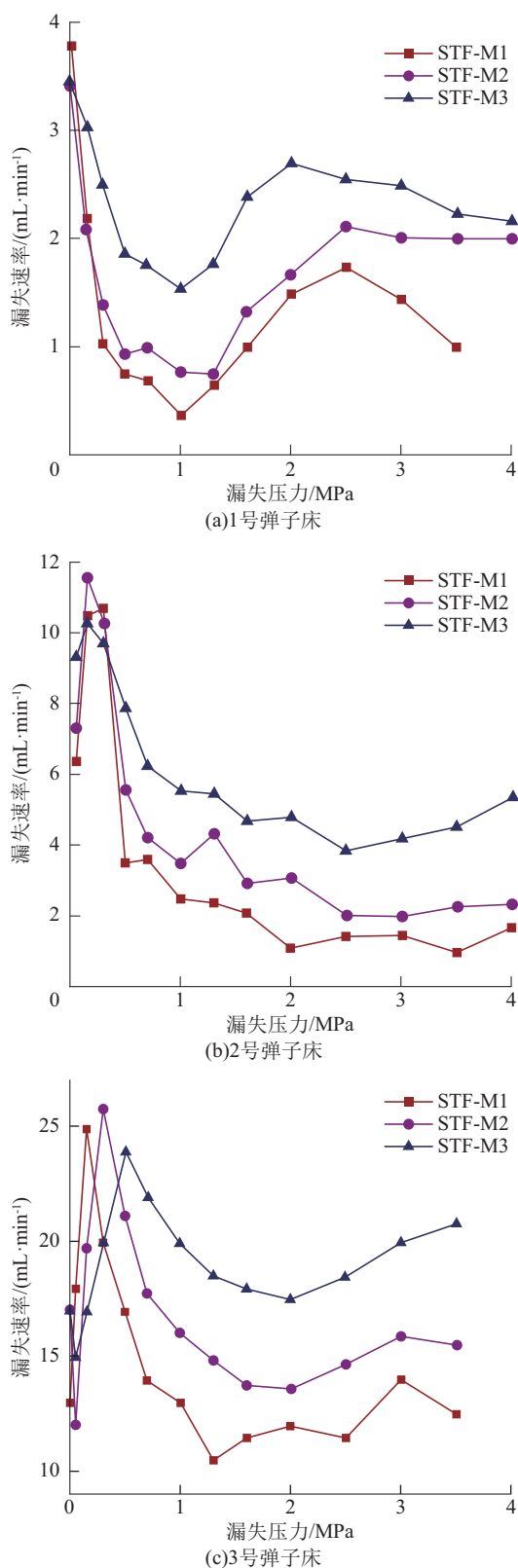


图5 STF-M1、STF-M2、STF-M3

漏失速率随漏失压力变化曲线

Fig.5 Curves of leakage rate variation with leakage pressure for STF-M1, STF-M2, and STF-M3

效应。此现象表现为 STF-R1 的漏失曲线在 2 号弹子床中呈现明显的三段式特征,在 3、4 号弹子床中触发增稠效应后漏失速率分别在 5、15 mL/min 以下,漏失速率保持在该组样品的最低水平;STF-R2 存在曲线下下降阶段但下降趋势较小,触发增稠效应后,随着压力升高,封堵效率较低,无法阻止漏失速率上升;STF-R3 剪切增稠比最小,在压力升高时未能形成有效封堵,漏失速率持续上升。

为进一步研究剪切增稠比对 STF 封堵状态的影响,引入封堵材料在孔隙裂隙中封堵状态的概念,包括封门、封喉、封腰、封尾 4 种形式,封堵材料与孔隙通道的相对关系如图 7 所示,图 8、图 9 分别为 STF-R1、STF-R3 在 2 号弹子床的封堵状态。

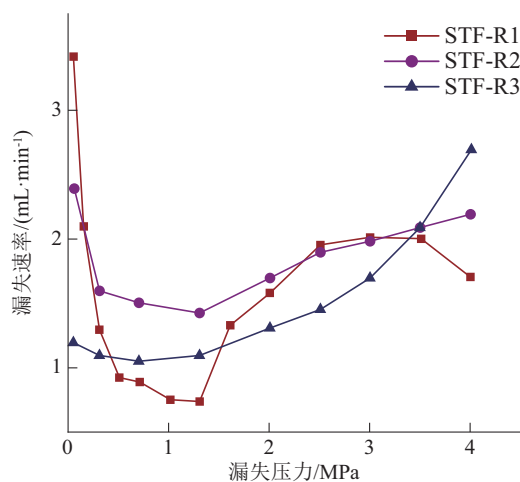
由图 8 可知,STF-R1 在 2 号弹子床中能够进入模拟地层内增稠形成封堵,形成的团聚体大小适中,能够在漏失通道前端或中部堆积,形成“封喉”或“封腰”。由图 6(a)可看出,STF-R1 漏失速率最低仅为 0.75 mL/min,同时具有较好的承压能力,在压力大于 3.0 MPa 时,漏失速率还能由 2.04 mL/min 逐渐降低至 1.71 mL/min,堵漏效果明显。

由图 9 可知,STF-R3 剪切增稠比低,黏度大,增稠响应后形成较大的团聚体,极易在 2 号弹子床漏失通道开口处大量堆积,形成“封门”。由图 6(a)可知,此时其在 0 MPa 压力下漏失速率仅为 1.15 mL/min,初始状态具有一定封堵能力,但随着压力由 0 MPa 增大到 4.0 MPa,其漏失速率由 1.15 mL/min 不断上升至 2.73 mL/min。这说明该封堵状态不具备良好的承压能力,低剪切增稠比的 STF-R3 形成的封堵状态极易破坏,导致复漏发生。

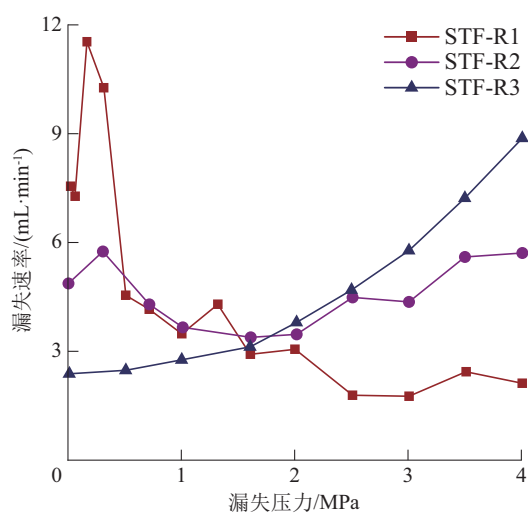
5 结论及展望

本研究以纳米 SiO₂ 剪切增稠流体作为新型智能堵漏材料,自制了具有不同临界剪切速率、剪切增稠强度、剪切增稠比的 STF 样品,通过 API 静态堵漏仪与弹子床模拟孔隙地层进行试验,探究了三种增稠特性参数对 STF 孔隙封堵性能的作用机制,可得以下结论。

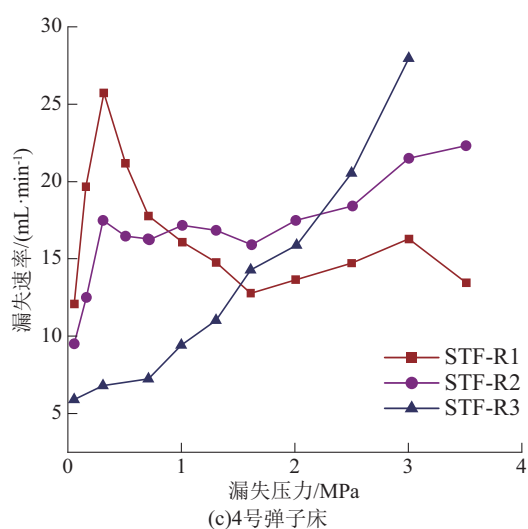
(1) 临界剪切速率主导压力响应特性与增稠触发时机,反映了流体对剪切作用的敏感程度。在 1、2 号弹子床(孔径 0.15~3.31 mm)中,临界剪切速率越低(如 STF-C1 为 12.59 s⁻¹),流体越容易在低压下触发增稠效应,迅速形成封堵。



(a)2号弹子床



(b)3号弹子床



(c)4号弹子床

图6 STF-R1、STF-R2、STF-R3漏失速率随漏失压力变化曲线

Fig.6 Curves of leakage rate variation with leakage pressure for STF-R1, STF-R2, and STF-R3

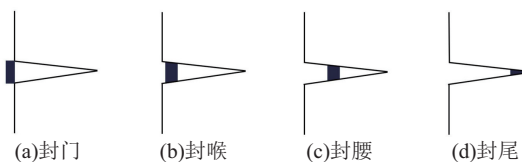
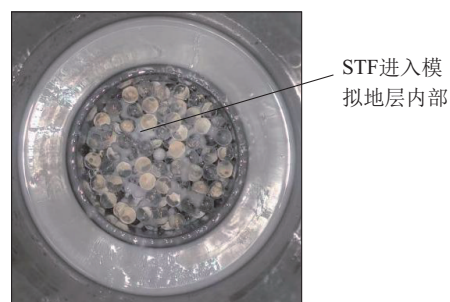
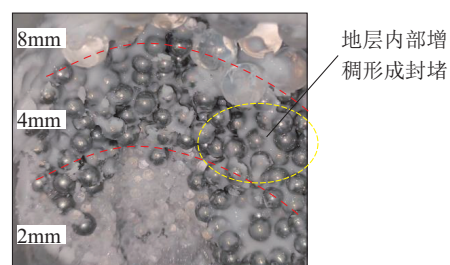


图7 裂缝封堵的状态

Fig.7 The sealing states of fracture

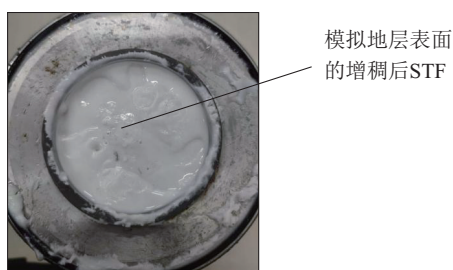


(a)模拟地层表面

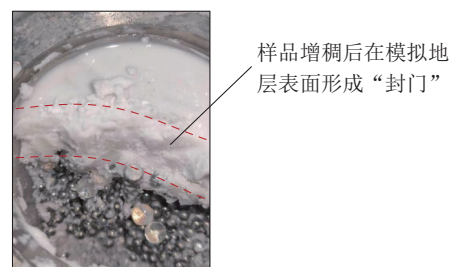


(b)模拟地层剖面

图8 STF-R1在2号弹子床的封堵状态

Fig.8 The sealing state of STF-R1 in 2nd marble bed

(a)模拟地层表面



(b)模拟地层剖面

图9 STF-R3在2号弹子床的封堵状态

Fig.9 The sealing state of STF-R3 in 2nd marble bed

(2)剪切增稠强度决定封堵层的致密程度与极限承压能力,直接影响团聚结构的抗冲刷性能。数据显示,高增稠强度的STF-M1样品漏失速率最低降至0.38 mL/min,表现出最优异的封堵效果;而低强度的STF-M3样品在模拟大孔隙(3号弹子床)漏失中,压力增至2.0 MPa时漏失仍持续回升,无法维持稳定封堵。

(3)剪切增稠比影响封堵形态的稳定性与压力敏感性。高剪切增稠比(如STF-R1,比值为33.18)能形成有效的“封喉”或“封腰”,具有良好的承压能力,在压力大于3.0 MPa时,漏失速率仍能持续降低至1.71 mL/min的极低水平。低剪切增稠比(如STF-R3,比值为1.52)时,由于增稠效应微弱,在孔隙表面堆积形成劣质“封门”,随压力从0 MPa升至4.0 MPa,漏失速率由1.15 mL/min上升至2.73 mL/min,表明其形成的封堵层在高压下极易失效,导致复漏。

本研究主要通过室内模拟手段开展,其试验条件与真实地层高温、高压、高盐等复杂环境尚存一定差异,相关结论在复杂井下工况中的适用性仍需进一步验证。其在复杂地质条件下的封堵机理、参数优化与工程适应性仍需深入研究,未来可结合多元分散相、智能响应型添加剂等手段,进一步提升其封堵性能与环境适应性。

参考文献(References):

- [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.
SUN Jinsheng, BAI Yingrui, CHENG Rongchao, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(3):630-638.
- [2] Alkinani H H, Al-Hameedi A T T, Dunn-Norman S, et al. Using data mining to stop or mitigate lost circulation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,173:1097-1108.
- [3] 张希文,李爽,张洁,等.钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J].钻井液与完井液,2009,26(6):74-76,79.
ZHANG Xiwen, LI Shuang, ZHANG Jie, et al. Research progress on lost circulation materials and lost circulation control technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(6):74-76,79.
- [4] 孙平贺,刘伟胜,杨涵涵,等.中国非开挖水平定向钻进装备与技术应用进展[J].工程科学学报,2022,44(1):122-130.
SUN Pinghe, LIU Weisheng, YANG Hanhan, et al. Progress in research and applications of trenchless horizontal directional drilling equipment and technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(1):122-130.
- [5] 隗德祥,高金华,刘维平,等.岩心钻探漏失地层水泥堵漏技术的实例分析与研究[J].钻探工程,2024,51(S1):327-331.
KUI Dexiang, GAO Jinhua, LIU Weiping, et al. Case study and analysis of cement plugging technology for core drilling in lost circulation formation [J]. Drilling Engineering, 2024, 51 (S1):327-331.
- [6] 王志祥,许非,陈冲,等.地质钻探完全漏失地层处理方式探讨[J].钻探工程,2023,50(S1):218-222.
WANG Zhixiang, XU Fei, CHEN Chong, et al. Discussion on treatment of completely leak strata for geological drilling [J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):218-222.
- [7] 景龙,李兴权,鲍石磊,等.基于压力平衡条件下“戴帽”固井注水泥技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):79-84.
JING Long, LI Xingquan, BAO Shilei, et al. Discussion of cement injection technology for“cap”cementation based on balanced pressure condition[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):79-84.
- [8] 康毅力,张敬逸,许成元,等.刚性堵漏材料几何形态对其在裂缝中滞留行为的影响[J].石油钻探技术,2018,46(5):26-34.
KANG Yili, ZHANG Jingyi, XU Chengyuan, et al. The effect of geometrical morphology of rigid lost circulation material on its retention behavior in fractures [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(5):26-34.
- [9] Kang Y L, Tan Q G, You L J, et al. Experimental investigation on size degradation of bridging material in drilling fluids[J]. Powder Technology, 2019,342:54-66.
- [10] Nasiri A, Ghaffarkhah A, Dijvejin Z A, et al. Bridging performance of new eco-friendly lost circulation materials[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(6):1154-1165.
- [11] 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.
- [12] Imqam A, Bai B J. Optimizing the strength and size of pre-formed particle gels for better conformance control treatment [J]. Fuel, 2015,148:178-185.
- [13] 王中华.聚合物凝胶堵漏剂的研究与应用进展[J].精细与专用化学品,2011,19(4):16-20.
WANG Zhonghua. Research and application progress of the polymer gel plugging agent[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2011,19(4):16-20.
- [14] 聂勋勇,王平全,张新民.聚合物凝胶堵漏技术研究进展[J].钻井液与完井液,2007,24(1):82-84,94.
NIE Xunyong, WANG Pingquan, ZHANG Xinmin. Progresses in gelling polymer sealing technology research [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(1):82-84, 94.
- [15] 史野,左洪国,夏景刚,等.新型可延迟膨胀类堵漏剂的合成与性能评价[J].钻井液与完井液,2018,35(4):62-65,72.
SHI Ye, ZUO Hongguo, XIA Jinggang, et al. Synthesis and evaluation of a new swelling deferrable lost circulation material [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018,35(4):62-65,72.
- [16] 臧晓宇,邱正松,暴丹,等.新型延迟膨胀堵漏剂特性实验研究[J].钻井液与完井液,2020,37(5):602-607.
ZANG Xiaoyu, QIU Zhengsong, BAO Dan, et al. Laboratory

- study on the properties of a new delayed expansion lost circulation material[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(5):602-607.
- [17] 龚浩宇,任培昱,张福榕,等.基于触变性浆体的双液法堵漏研究[J]. *钻探工程*, 2025, 52(1):102-108.
- GONG Haoyu, REN Peigang, ZHANG Furong, et al. Research on dual liquid plugging method based on thixotropic slurry[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(1):102-108.
- [18] Bahl S, Nagar H, Singh I, et al. Smart materials types, properties and applications: a review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 28(Part 3):1302-1306.
- [19] 白英睿,孙金声,吕开河,等.剪切响应型凝胶堵漏剂及其制备方法与应用:CN201910185780.4[P].2019-03-12.
- BAI Yingrui, SUN Jinsheng, KaiheLÜ, et al. Shear -responsive gel plugging agent and its preparation method and application;CN201910185780.4[P].2019-03-12.
- [20] 白英睿,张启涛,孙金声,等.杂化交联复合凝胶堵漏剂的制备及其性能评价[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(4):176-184.
- BAI Yingrui, ZHANG Qitao, SUN Jinsheng, et al. Synthesis and performance evaluation of a hybrid cross-linked plugging agent[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(4):176-184.
- [21] Zhao Z, Sun J S, Liu F, et al. High-temperature-resistant thermal shape memory polymers as lost circulation materials for fracture formations[J]. *SPE Journal*, 2023, 28(5):2629-2641.
- [22] 张进秋,赵明媚,李欣,等.剪切增稠液体流变特性研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(12):236-241.
- ZHANG Jinqiu, ZHAO Mingmei, LI Xin, et al. Research progress on rheological property of shear thickening Fluid[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(12):236-241.
- [23] 赵明媚,张进秋,彭志召,等.剪切增稠液体理论基础和工程应用进展概述[J]. *材料导报*, 2022, 36(9):207-214.
- ZHAO Mingmei, ZHANG Jinqiu, PENG Zhizhao, et al. Theoretical basis and engineering application progress of shear thickening fluid[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(9):207-214.
- [24] Gürçen S, Kuşan M C. The ballistic performance of aramid based fabrics impregnated with multi-phase shear thickening fluids[J]. *Polymer Testing*, 2017, 64:296-306.
- [25] Gürçen S, Sofuoğlu M A. Experimental investigation on vibration characteristics of shear thickening fluid filled CFRP tubes [J]. *Composite Structures*, 2019, 226:111236.
- [26] 邓盈盈,孙平贺,夏余宏烨,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 YUhongye, et al. Experimental study on the sealing characteristics of fractured formation by shear thickening fluid[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(5):68-76.

(编辑 王跃伟)