

剪切增稠流体对裂隙地层的封堵特性试验研究

邓盈盈^{1,2,3}, 孙平贺^{1,2,3*}, 夏余宏焯⁴, 徐勇⁵, 蒲英杰^{1,2,3},

张鑫鑫^{1,2,3}, 张晨^{1,2,3}, 张航盛^{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. 中国电建中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014; 5. 核工业二二零研究所, 湖南长沙 410034)

摘要: 裂隙性地层存在的裂缝型漏失通道通常具有多尺度特性和不确定性, 钻井液漏失问题在裂隙性地层进行地质钻探施工中尤为突出。剪切增稠流体(Shear Thickening Fluid, STF)作为一种新型智能材料, 具备自感知、自适应和自修复等优良特性, 目前已在多领域得到广泛应用。本研究将剪切增稠流体作为一种堵漏材料, 通过API堵漏仪单缝管封堵试验, 探究了剪切增稠流体在不同分散相浓度(56.9vol%、59.2vol%和61.7vol%)、缝宽(1、2、3、4、5 mm)和压力条件下对裂缝的封堵特性。封堵试验结果表明: 漏失量会随着缝宽和时间的增加而增加; 纳米SiO₂浓度在56.9%~61.7%范围内增加时, 会降低漏失速率并减弱缝宽对漏失速率的影响程度; 当漏失压力为0 MPa时, 剪切增稠流体不产生增稠效应, 以液态形式从缝内漏失, 压力小幅增加时会激发其增稠效应, 产生团聚状颗粒对缝管进行封堵降低漏失速率; 当压力进一步增大超过封堵层承压能力时, 剪切增稠流体以板状形态被挤出裂缝。研究剪切增稠流体在堵漏领域的应用, 有望为裂隙性地层堵漏提供创新解决方案。

关键词: 剪切增稠流体; 纳米SiO₂; 智能材料; 堵漏试验; 裂缝封堵

中图分类号: P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)05-0068-09

Experimental study on the sealing characteristics of fractured formation by shear thickening fluid

DENG Yingying^{1,2,3}, SUN Pinghe^{1,2,3*}, XIA Yuhongye⁴, XU Yong⁵, PU Yingjie^{1,2,3},

ZHANG Xinxin^{1,2,3}, ZHANG Chen^{1,2,3}, ZHANG Hangsheng^{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. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha Hunan 410014, China;

5. No.230 Research Institute of Nuclear Industry, Changsha Hunan 410034, China)

Abstract: The fracture leakage channel in fractured formation usually has multi-scale characteristics and uncertainty. The drilling fluid leakage problem is particularly prominent in the construction of geological drilling in fractured formation. Shear Thickening Fluid (STF), as a new type of intelligent material, has excellent properties such as

收稿日期: 2024-07-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.008

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: 2024ZZTS0397)

第一作者: 邓盈盈, 女, 汉族, 2001年生, 博士研究生在读, 地质工程专业, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, dyying@csu.edu.cn。

通信作者: 孙平贺, 男, 汉族, 1982年生, 教授, 博士生导师, 主要从事钻探科学与技术的相关教学与科研工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, pinghesun@csu.edu.cn。

引用格式: 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 Yuhongye, et al. Experimental study on the sealing characteristics of fractured formation by shear thickening fluid[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 68-76.

self-sensing, self-adaptation and self-repair, and has been widely used in many fields. In this study, shear thickening fluid was used as a plugging material, and the plugging characteristics of shear thickening fluid were investigated under different dispersed phase concentrations (56.9vol%, 59.2vol% and 61.7vol%), slit widths (1, 2, 3, 4, 5mm) and pressure conditions through the plugging test of API plugging instrument. The plugging test results show that the amount of leakage increases with the increase of seam width and time. When the concentration of nano silica increases in the range of 56.9%~61.7%, the leakage rate will be reduced and the effect of the gap width on the leakage rate will be weakened. When the leakage pressure is 0 MPa, the shear thickening fluid does not produce thickening effect, but leaks out from the seam in the form of liquid. When the pressure increases slightly, the thickening effect will be stimulated, and agglomeration particles will be generated to seal the seam pipe and reduce the leakage rate. When the pressure further increases beyond the bearing capacity of the sealing layer, the shear-thickening fluid is extruded out of the fracture in a plate form. The application of shear-thickening fluid in plugging field is expected to provide innovative solutions for plugging in fractured formation.

Key words: shear thickening fluid; nano-silica; smart material; plugging test; crack plugging

0 引言

钻孔坍塌、漏失是裂隙性地层中常见的问题,处理不当往往容易导致井喷、卡钻、埋钻等钻孔事故,极大影响钻探施工的正常进行^[1-4]。钻孔的护壁堵漏是钻孔施工的主要组成部分,其成本高达单孔成本的1/3^[5-7]。随钻堵漏法采用堵漏材料对裂缝通道进行填充,具有环保、易操作等优势^[8-9],是解决地层钻井液漏失的常用方法。然而裂隙性地层中由于复杂地应力、地层不均匀性等影响,发育着形状各异的漏失通道,难以预测孔隙、裂缝尺寸^[10]。与此同时,常用堵漏浆液广谱性差,只能针对某一尺寸的裂缝有较好的封堵效果^[11-12];惰性填充材料变形能力差,难以匹配漏失通道尺寸变化较大的地层;纤维类材料长度过长时易发生“封门”现象,不利于封堵^[13]。凝胶类堵漏材料对裂隙性地层漏失通道的适应性得到加强,但存在成胶时间难控制和封堵体承压能力较差的问题^[14-18]。

智能材料的研发与应用是当今国际前沿学科领域之一,其具备自感知、自适应和自修复等优良特性^[19]。孙金声院士团队提出了智能堵漏材料的概念,并研发了剪切响应型凝胶堵漏剂^[20]、杂化交联复合凝胶堵漏剂^[21]、耐高温形状记忆聚合物堵漏剂^[22]等智能堵漏材料,显示了智能堵漏材料的巨大应用潜力。

剪切增稠流体(Shear Thickening Fluid,简称STF)是典型的非牛顿流体^[23],也是一种新型智能材料,目前已在阻尼振动控制、个体安全防护等领域得到广泛应用^[24-26]。STF在受到外界剪切应力或所受剪切应力突然增大的情况下,自身粘度将瞬间增大几十倍并且转变为软固体形态。STF的种类

丰富,目前关于粒子分散于连续相溶剂中形成的悬浮液体系研究较为成熟^[27],其中纳米SiO₂-聚乙二醇体系STF具备无毒和热稳定性良好等优点,是实验室研究的主要对象^[28]。HOFFMAN^[29]和BARNES^[30]的研究表明,当分散相的体积分数达到50%时,悬浮液的增稠特性得到大幅度提升,并且分散相体积分数越大,临界剪切速率越低,即较低的剪切应力就可以让STF产生增稠效应。

基于此,本研究对纳米SiO₂-聚乙二醇体系STF在裂隙性地层的封堵特性进行研究,通过API堵漏仪开展了单缝管封堵试验,探究了STF在不同纳米SiO₂浓度、裂缝宽度以及封堵压力条件下的封堵特性。研究STF在堵漏领域的应用,有望为裂隙性地层堵漏提供创新解决方案。

1 试验材料及试验装置

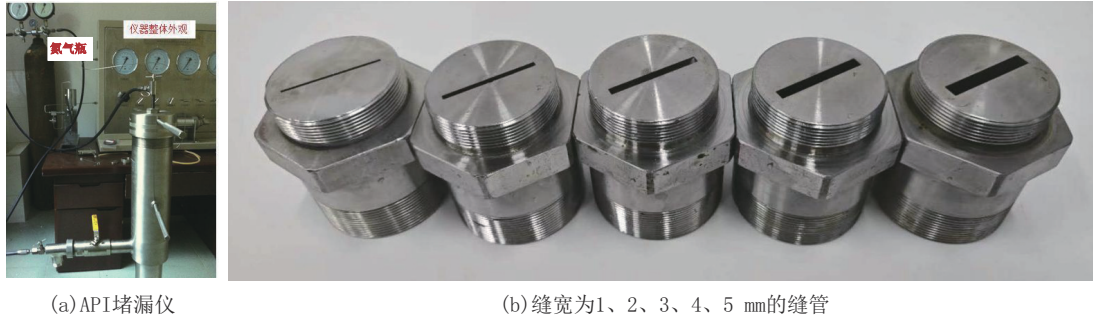
试验材料:凝胶法纳米SiO₂(粒径300 nm)、聚乙二醇PEG200(化学纯,CP)、无水乙醇(分析纯,AR)、硅烷偶联剂KH-550。

试验装置:D-7401-90型电动搅拌机、AK-040SD型超声波清洗机、RM-1A型真空泵、DL-2型API静态堵漏试验仪和配套的缝管。为研究STF在不同缝宽中的封堵特性,准备了缝宽为1、2、3、4、5 mm的缝管,API堵漏仪和缝管如图1所示,试验时需要通过氮气瓶连接堵漏仪进行加压。

2 试验方法

2.1 剪切增稠流体的制备

为探究STF的分散相(纳米SiO₂)浓度对裂缝封堵效果的影响规律,设置了3个浓度梯度,具体样



(a) API堵漏仪

(b) 缝宽为1、2、3、4、5 mm的缝管

图1 API堵漏仪和缝管

Fig.1 API plugging device, seam pipes with a seam width of 1, 2, 3, 4 and 5mm

品制备参数如表1所示。

制备剪切增稠流体时,先将纳米SiO₂在105℃下烘干24h,用搅拌机将纳米SiO₂分散在聚乙二醇中。纳米SiO₂的高表面能及表面丰富的硅羟基,导

表1 剪切增稠流体制备参数

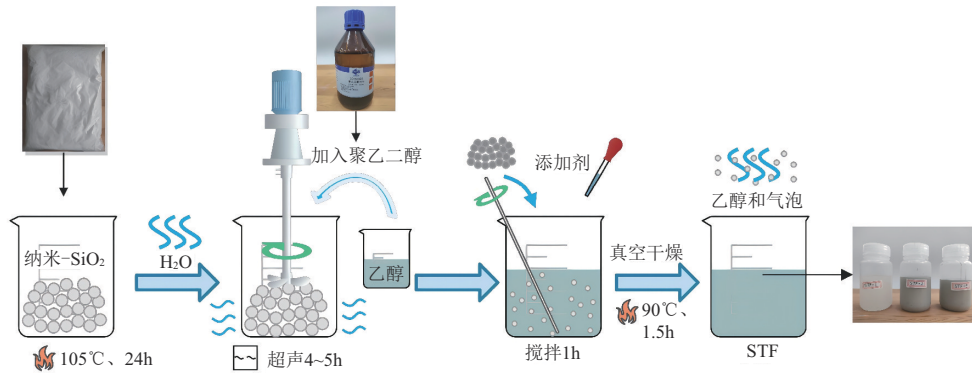
Table 1 Preparation parameters of shear thickening fluid

名称	SiO ₂ 粒径/nm	KH550/wt%	SiO ₂ 含量/vol%	试验温度/℃
STF-T1	300	1.5	56.9	25
STF-T2	300	1.5	59.2	25
STF-T3	300	1.5	61.7	25

致其易发生团聚,因此在搅拌过程中加入适量的无水乙醇,并使用水浴超声来辅助纳米SiO₂均匀分散,持续搅拌4~5h。纳米SiO₂均匀分散后再加入1.5wt%的硅烷偶联剂搅拌1h,以此来改善纳米SiO₂因表面硅羟基发生的团聚现象。将得到的混合液加热至90℃并持续搅拌,使混合液中的无水乙醇蒸发,最后用真空泵进行消泡处理得到STF-T1、STF-T2和STF-T3样品。制备样品流程如图2所示。

2.2 单缝管封堵试验方法

API静态堵漏试验仪通过漏失量来评价堵漏效



(a) 流程示意



(b) 水浴超声辅助搅拌

(c) 真空消泡

图2 制备剪切增稠流体流程

Fig.2 Process for preparing shear-thickening fluid

率,其评价原理为在压力作用下,堵漏材料从缝管中被挤出试验装置,如果堵漏材料在当前试验压力、模拟地层裂缝条件下能够实现封堵时,则漏失量很小甚至不发生出漏;如果不能实现封堵则漏失量很大甚至完全漏失。

本研究用 API 堵漏仪来评价 STF 的封堵特性,讨论分散相浓度、缝宽和封堵压力对 STF 封堵的影响规律。

具体试验操作步骤如下:

(1)将当次试验用缝管安装在堵漏仪上,并检查装置内部及接口处,确保装置干燥清洁后关闭堵漏仪底部阀门。

(2)将制备好的 STF 样品保温至试验温度后倒入堵漏仪。

(3)密封堵漏仪上部端盖,检查并确认仪器密封性良好后打开出口端的漏失液阀门,用量筒在出口端收集漏失液。

(4)连接加压系统,设置氮气瓶的压力为试验

所需压力,然后打开出口阀门同时开始计时并记录剪切增稠流体在开始漏失后 15~30 min 内的漏失量,每 3 s 记录一次 STF 样品的漏失量,总的记录时长由 STF 样品的出漏形态进行调整。

(5)记录完毕后,关闭出口阀门,打开进气阀泄压,卸下缝管,观察记录缝管封堵情况,清理堵漏仪。

(6)根据试验数据绘制漏失量随时间变化关系图,计算各压力下的平均漏失速率。

3 单缝管封堵试验结果分析

3.1 STF-T1 的封堵特性

STF-T1 在不同缝宽、不同压力下的漏失量随时间变化关系以及漏失速率随压力变化关系如图 3 所示。因为 STF-T1 粘度较低,试验中使用 5 mm 缝管和 0.8 MPa 压力以上时,漏失量以及漏失速率过大,故不考虑 5 mm 缝管和压力 > 0.8 MPa 的试验结果。

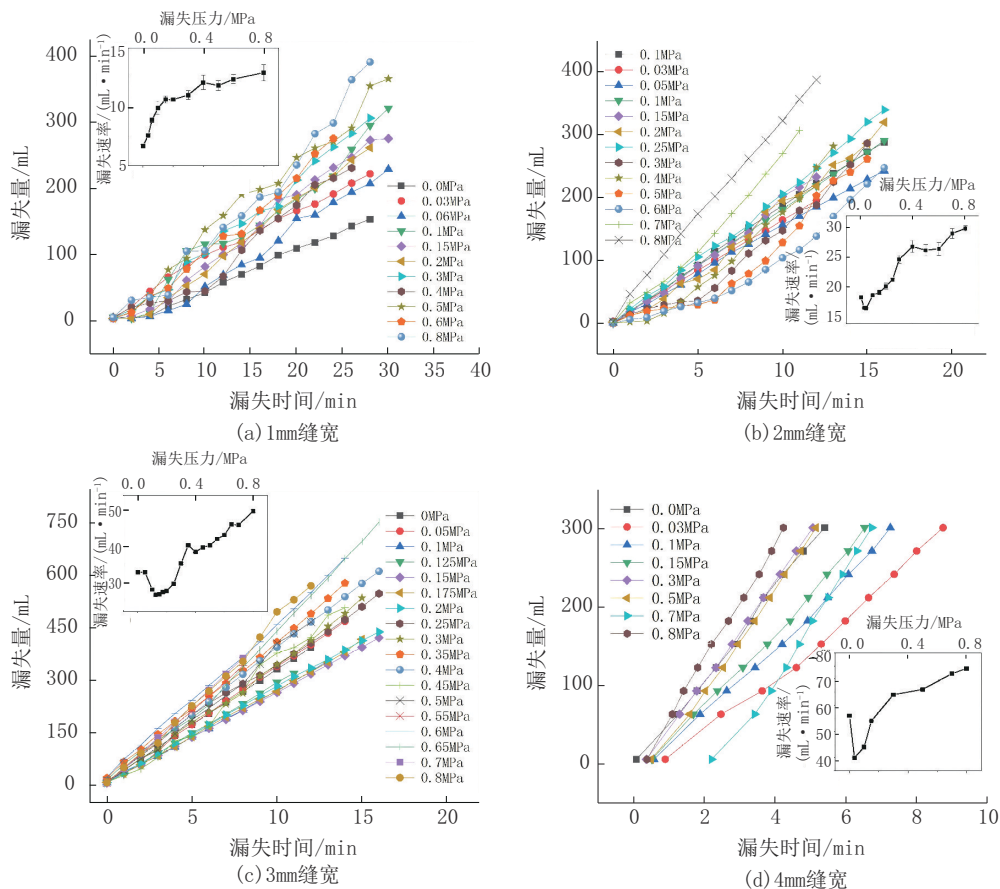


图 3 不同压力下 STF-T1 在不同缝宽的漏失

Fig.3 Leakage of STF-T1 at 1mm (a), 2mm (b), 3mm (c) and 4mm (d) seam widths under different pressures

由图3可知:随漏失时间增加,漏失量以近似线性趋势增大,并没有出现漏失量缓慢增加并逐渐收敛的趋势,说明STF-T1没能在裂缝中产生完全封堵效果,依然存在少量漏失;1、2、3和4 mm缝宽对应的最小漏失速率分别为6.7、16.6、26.7和40.0 mL/min,最小漏失速率随着缝宽的增加而明显增加。

根据平均漏失速率与压力的关系图可知:除1 mm缝管以外,STF-T1的平均漏失速率随漏失压力增大,呈现先减小后增大的趋势,并且试验过程中可以明显观察到STF-T1的漏失速率与漏失形态存在一定关系。为进一步探究STF-T1的漏失速率与漏失形态的内在关系,具体分析3 mm缝管漏失试验。

不同压力下STF-T1在3 mm缝管中的漏失形态如图4所示。在未加压力的状态下STF-T1不产生增稠现象,呈液体状从裂缝中漏失。压力逐渐增大后STF-T1出现增稠现象,并在0.125 MPa时达到漏失速率最小值26.7 mL/min,此时漏失的剪切增稠流体呈团聚的颗粒状,因为加压激发了STF-T1的增稠效应,变成软固体状态的STF-T1能够堵住裂缝,此时漏失速率呈下降趋势。当压力进一步增大至0.7 MPa时,超过了封堵层的承压能力,同时因为缝管表面光滑,封堵层难以在缝管内黏附停留,于是以板状形态被连续挤出。

3.2 STF-T2的封堵特性

STF-T2在不同缝宽度、不同压力下的漏失量

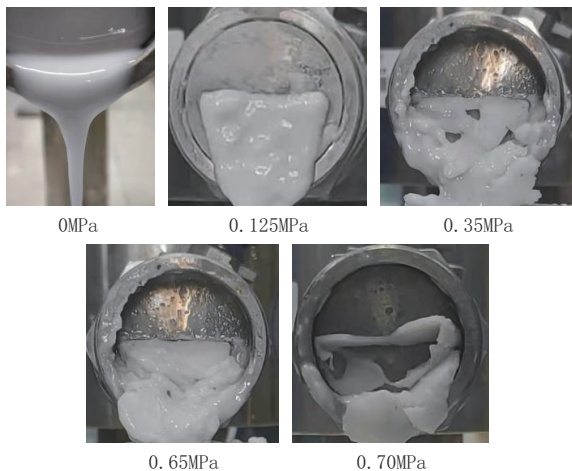


图4 不同压力下STF-T1在3 mm缝管漏失现象

Fig.4 STF-T1 leakage at 3mm seam under different pressures

随时间变化关系以及漏失速率随压力变化关系如图5所示。STF-T2在1 mm宽的缝管中漏失现象并不明显;压力 >2 MPa时,漏失速率过大,因此本组试验仅分析2、3、4和5 mm缝宽条件下且压力 <2 MPa的试验数据。

随漏失时间增大,STF-T2的漏失量呈近线性趋势的增大,与STF-T1的变化规律一致。STF-T2在2、3、4和5 mm缝宽对应的最小漏失速率分别为7.2、8.9、11.2和14.9 mL/min,最小漏失速率随着缝宽的增加而明显增加。STF-T2的最小漏失速率相比STF-T1有显著的减小,这是因为STF-T2的分散相纳米 SiO_2 浓度增加,使得剪切增稠流体更加浓稠不易流动,压力增加时其增稠效应更明显,显著降低了漏失速率。

STF-T2的漏失速率随压力增加整体呈波动上升的趋势,与更低浓度的STF-T1的变化趋势一致。同样对不同压力下STF-T2在3 mm缝管中的漏失形态进行观察,其结果如图6所示。

压力为0 MPa时,STF-T2呈现液体流动状态漏失。压力逐渐增大后STF-T2出现增稠现象,并在0.1 MPa时达到漏失速率最小值8.9 mL/min,此时的压力能够激发STF-T2的增稠效应不至于破坏封堵层,实现了低漏失速率封堵。但压力增大到1.6 MPa时,会破坏已经形成的封堵层,并且STF-T2难以在压力作用下附着在光滑缝管壁面,故呈板块状被挤出缝管。

3.3 STF-T3的封堵特性

STF-T3在不同缝宽度、不同压力下的漏失量随时间变化关系以及漏失速率随压力变化关系如图7所示。STF-T3的漏失量随漏失时间的变化规律与STF-T1、STF-T2的变化规律一致:漏失量随时间的推移线性增加,也表明本研究采用漏失速率来评价剪切增稠流体封堵效果的合理性。

STF-T3的漏失速率随着压力增加整体呈减小的趋势,与STF-T1和STF-T2的趋势相反,推测在STF-2和STF-T3之间存在一个临界纳米 SiO_2 浓度,高于这个浓度时,压力增加带来的剪切增稠效应大于对封堵层的破坏作用,整体上表现漏失速率的降低;低于这个浓度时,STF的剪切增稠强度不够,当压力增加时,封堵层被破坏导致漏失速率加快。

在2、3、4和5 mm缝宽中,STF-T3的最小漏失速率分别为1.22、1.29、1.39和1.75 mL/min,是3个

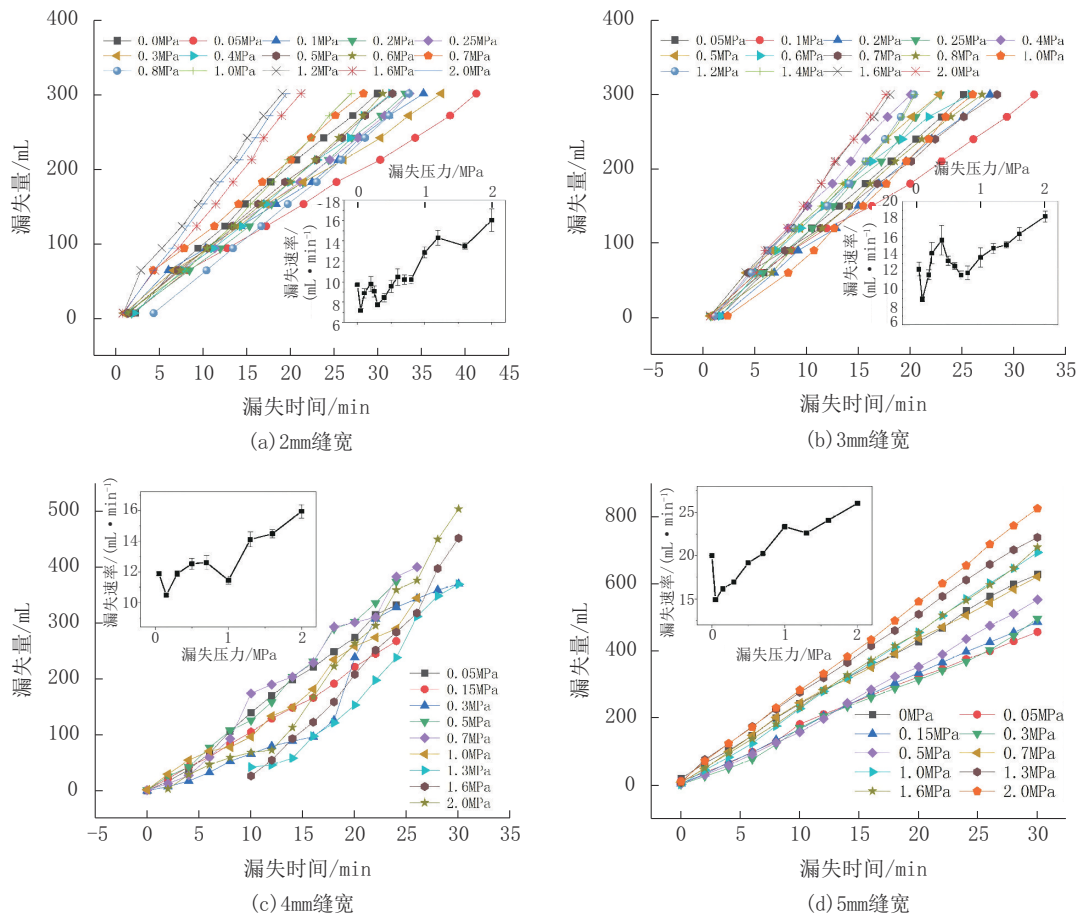


图 5 不同压力下 STF-T2 在不同缝宽的漏失

Fig.5 Leakage of STF-T2 at 2mm (a), 3 mm (b), 4 mm (c) and 5 mm (d) seam widths under different pressures

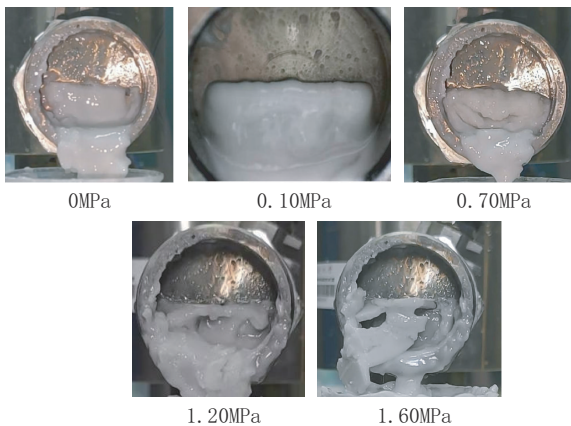


图 6 不同压力下 STF-T2 在 3 mm 缝管漏失现象
Fig.6 STF-T2 leakage at 3 mm seam under different pressures

样品中最小漏失速率最低的一组。为了进一步讨论纳米 SiO₂ 浓度、缝宽与最小漏失速率之间的关系,绘制三者之间的关系如图 8 所示。

3 组样品的最小漏失速率均随着缝宽增加而增

加,随纳米 SiO₂ 浓度的增加整体降低。当纳米 SiO₂ 浓度增加时,最小漏失速率受到缝宽影响程度迅速减小,即在不同缝宽中漏失速率的波动范围减小。这说明纳米 SiO₂ 浓度增加,能够加强 STF 对裂缝的封堵效果和对裂缝宽度变化的适应能力。

不同压力下 STF-T3 在 4 mm 缝管中的漏失形态如图 9 所示。同样的当压力为 0 MPa 时,STF-T3 呈液体状流出;压力为 3 MPa 时,可以明显观察到 STF-T3 因为剪切增稠效应变为固体状,并以块状被挤出缝管。

3.4 试验中剪切增稠流体的粘度松弛现象

在单缝管封堵试验中还观察到剪切增稠流体在增稠后的粘度松弛现象。现有研究表明剪切增稠流体在软固体与液体转换的过程中并不是瞬时的:由增稠后的最大粘度降低到增稠前的最小粘度,其内部微粒需要一定的时间进行调整,具备时间特性,这就是粘度的松弛过程^[31]。

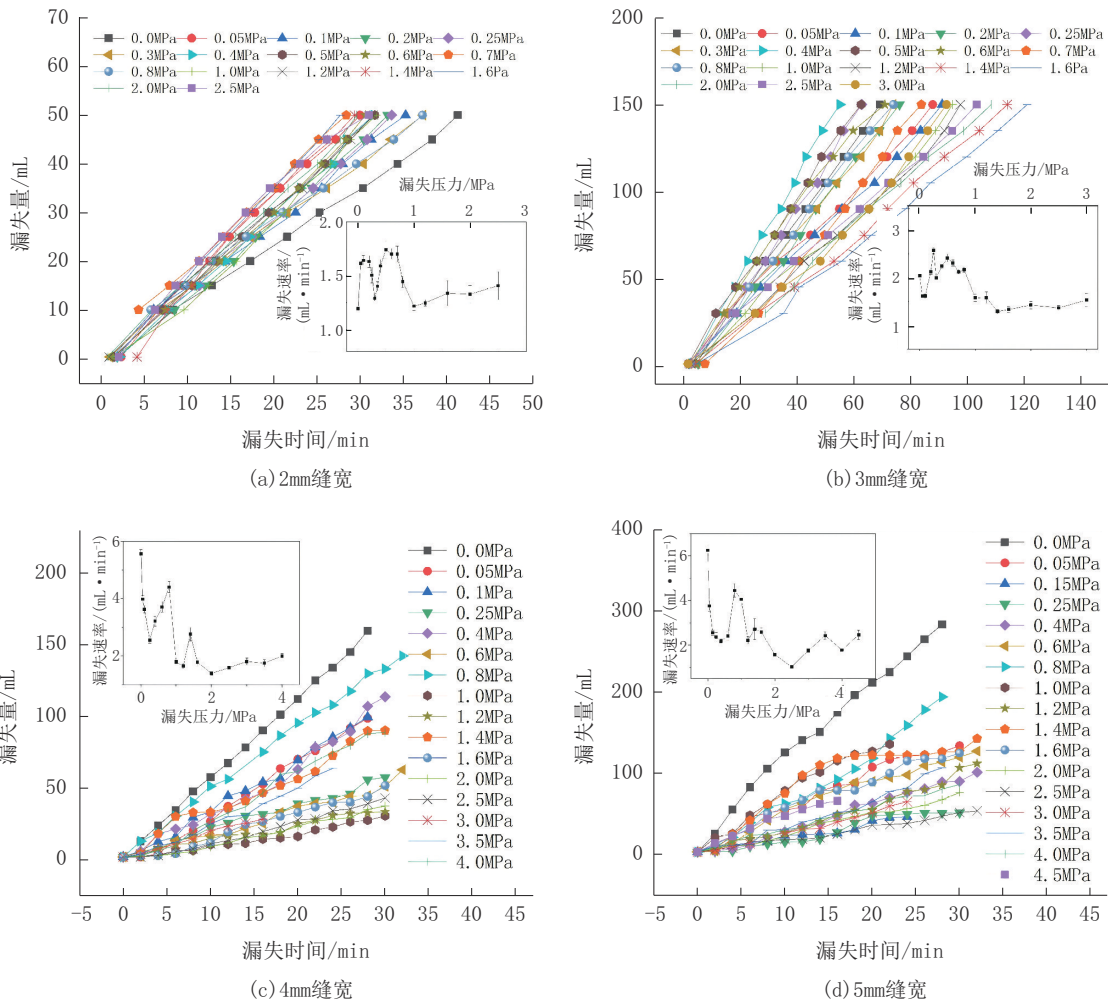


图7 不同压力下STF-T3在不同缝宽的漏失

Fig.7 Leakage of STF-T3 at 2 mm (a), 3 mm (b), 4 mm (c) and 5 mm (d) seam widths under different pressures

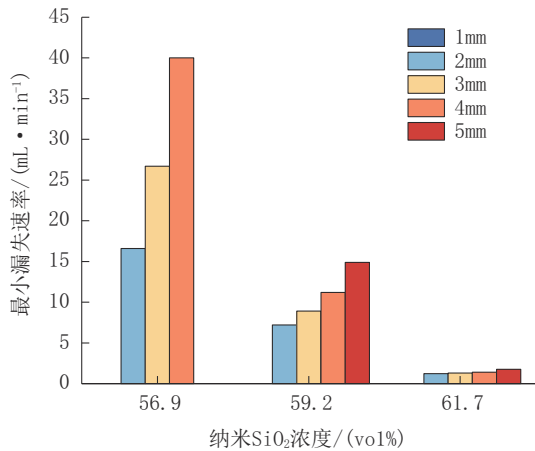


图8 不同缝宽、纳米SiO₂浓度下的最小漏失速率

Fig.8 Minimum leakage rate at different seam widths and concentrations of nano-silica

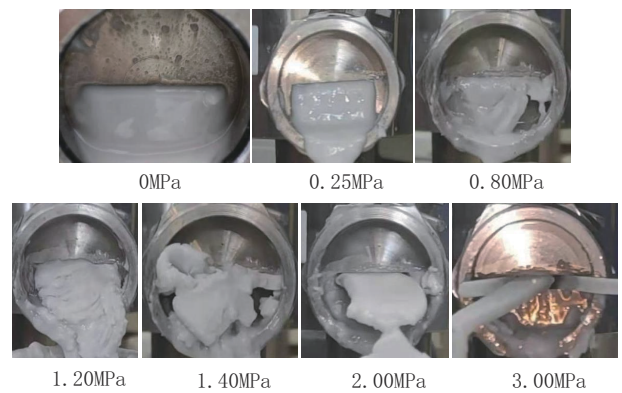


图9 不同压力下STF-T3在4mm缝管漏失现象
Fig.9 STF-T3 leakage in 4 mm seam under different pressures

图10是STF-T2在封堵试验完成后,缝管入口端形成的封堵层随时间的变化情况。该入口孔宽

度为4 cm,远大于缝隙尺寸,撤去压力后在裸露不受扰动的状态下,封堵层经过近5 h才还原成初始未受剪切力的液体状态。

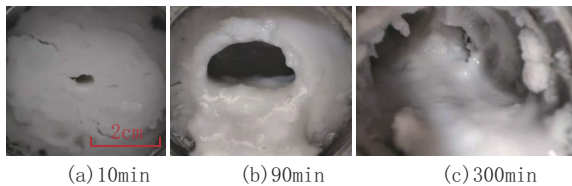


图10 STF-T2形成的封堵层

Fig.10 Sealing layer formed by STF-T2

剪切增稠流体因为具备增稠可逆性,理论上在封堵过程中无法长期完全封堵地层裂缝,但实际上因为存在粘度松弛现象,剪切增稠流体受外力增稠形成的封堵层在撤掉外力后依然能够存在一段时间。如果剪切增稠流体样品强度足够,并满足裂缝封堵要求时,软固体状态可以长期存在,这一现象对于实际地层裂隙封堵是有利的。

4 结论及展望

本研究将纳米 SiO_2 剪切增稠流体作为新型智能堵漏材料,通过API堵漏仪单缝管封堵试验,探究了不同纳米 SiO_2 浓度的剪切增稠流体在不同压力下对宽为1~5 mm的裂缝封堵特性,并得到如下结论:

(1)3种浓度的剪切增稠流体在裂缝封堵中的漏失量与时间整体呈线性相关,不存在漏失量增加缓慢并收敛的情况,认为更适合采用漏失速率来评价其封堵效果。缝宽从1 mm增加到5 mm时,剪切增稠流体的最小漏失速率增加;纳米 SiO_2 浓度在56.9vol%~61.7vol%范围内增加时,封堵效果加强,最小漏失速率从6.7~40 mL/min范围内迅速降低至1.22~1.75 mL/min范围内,并且能削弱缝宽变化对最小漏失速率的影响程度。

(2)根据漏失速率变化曲线,推测在59.2vol%和61.7vol%纳米 SiO_2 浓度之间存在一个临界浓度,低于临界浓度时,压力增加会破坏已形成的剪切增稠流体封堵层,导致漏失速率加大;高于临界浓度时,压力增加会强化剪切增稠效应,使漏失速率降低。由于缝管表面光滑,剪切增稠流体封堵层难以粘附在缝管表面,当压力超过封堵层承压能力时,会以板块状被挤出缝管。

(3)试验中观察到明显的剪切增稠流体粘度松弛效应,使得在外力作用后,形成的封堵层仍能够以软固体状态存留一段时间,实际工况中起下钻的周期压力会周期性激发剪切增稠流体的增稠效应,有利于裂隙性地层的封堵。

(4)剪切增稠流体在封堵中的研究还处于初步阶段,其在裂缝发育地层的封堵仍存在很多问题需要进一步研究,例如:试验中采用纯剪切增稠流体进行封堵试验,并未复配常用钻井液堵漏材料进行协同封堵,后续可进一步掺入常规惰性堵漏材料等,扩大剪切增稠智能堵漏材料应用体系。

参考文献(References):

- [1] 王胜,欧兴贵,解程超,等. 钻井利器故事之“护壁堵漏材料”[J]. 钻探工程,2024,51(3):157-161.
WANG Sheng, OU Xingui, XIE Chengchao, et al. The story of a drilling weapon: Wall protection and plugging materials[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):157-161.
- [2] 黄宁,孙金声,刘敬平,等. 水基钻井液封堵理论和材料研究现状及发展趋势[J]. 化工进展,2024(3):1-18.
HUANG Ning, SUN Jinsheng, LIU Jingping, et al. Research status and development trend of plugging theory and materials of water-based drilling fluid[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024(3):1-18.
- [3] 杨科,罗龙,曹灶开,等. 阳山矿区严重漏失垮塌地层钻进工艺及工程实践[J]. 钻探工程,2024,51(2):119-126.
YANG Ke, LUO Long, CAO Zaokai, et al. Drilling technology and engineering practice for seriously lost and collapsed formation in Yangshan Mining Area[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2):119-126.
- [4] 孙金声,白芙蓉,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.
- [5] 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.
- [6] 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.
ZHANG Xiwen, LI Shuang, ZHANG Jie, et al. Research progress of plugging materials and anti-leakage plugging technology for drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009, 26(6):74-76.
- [7] 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研究应用进展[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.
- [8] 杨沛,陈勉,金衍,等. 裂缝承压能力模型及其在裂缝地层堵漏中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(3):479-487.
YANG Pei, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Crack pressure bearing capacity model and its application to plugging of fractured formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(3):479-487.
- [9] 孙威威. 海坨区块高效堵漏体系的优化与应用[J]. 钻探工程, 2021,48(12):72-78.
SUN Weiwei. Optimization and application of the efficient plugging system in the Haituo block[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):72-78.
- [10] 蔡利山,苏长明,刘金华. 易漏失地层承压能力分析[J]. 石油学报, 2010,31(2):311-317.
CAI Lishan, SU Changming, LIU Jinhua. Analysis on pressure-bearing capacity of leakage formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(2):311-317.
- [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] 张晶. 煤矿区钻井裂缝性漏失承压堵漏机理与关键技术研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2020.
ZHANG Jing. Study on the mechanism and key technology of fracture leakage plugging while drilling in coal mining area[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [14] 熊正强,陶士先,周凤山,等. 聚合物交联凝胶堵漏性能评价方法研究进展[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023,38(1):85-94.
XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, ZHOU Fengshan, et al. Progress in plugging performance evaluation methods of polymer crosslinked gel[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2023,38(1):85-94.
- [15] Chenevert M E, Dewan J T. A model for filtration of water-base mud during drilling: Determination of mudcake parameters[J]. Petrophysics—The SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description, 2001,42(3).
- [16] 任冠龙,吕开河,刘玉霞,等. 钻井液滤饼物性参数测量研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2014,31(1):84-90.
REN Guanlong, LÜ Kaihe, LIU Yuxia, et al. Research progress on measurement of physical properties of drilling fluid cake[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014,31(1):84-90.
- [17] ALI A, KALLOO C L, SINGH U B. Preventing lost circulation in severely depleted unconsolidated sandstone reservoirs[J]. SPE Drilling & Completion, 1994,9(1):32-38.
- [18] YANG Y, YUAN B, WANG Y. Updated methodology for evaluating lost circulation control of cement slurry for double lost channels[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018,171:16-22.
- [19] BAHL S, NAGAR H, SINGH I, et al. Smart materials types, properties and applications: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020,28:1302-1306.
- [20] 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]. 2020-02-18.
BAI Yingrui, SUN Jinsheng, LÜ Kaihe, et al. Shear-responsive gel plugging agent and its preparation method and application: CN201910185780.4[P]. 2020-02-18.
- [21] 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.
- [22] ZHAO Z, SUN J, 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.
- [23] GÜRGEN S, KUŞHAN M C, LI W. Shear thickening fluids in protective applications: A review[J]. Progress in Polymer Science, 2017,75:48-72.
- [24] 赵明娟,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):211-218.
ZHAO Mingmei, ZHANG Jinqiu, PENG Zhizhao, et al. Theoretical basis and engineering application progress of shear thickening fluid[J]. Materials Reports, 2022,36(9):211-218.
- [25] GÜRGEN S, SOFUOĞLU M A. Experimental investigation on vibration characteristics of shear thickening fluid filled CFRP tubes[J]. Composite Structures, 2019,226:111236.
- [26] GÜRGEN S, KUŞHAN M C. The ballistic performance of aramid based fabrics impregnated with multi-phase shear thickening fluids[J]. Polymer Testing, 2017,64:296-306.
- [27] van EGMOND J W. Shear-thickening in suspensions, associating polymers, worm-like micelles, and poor polymer solutions[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 1998,3(4):385-390.
- [28] 杨人元,占晓,徐余欢,等. 剪切增稠流体在Kevlar复合材料中的应用研究进展[J]. 胶体与聚合物, 2024,42(1):42-45.
YANG Renyuan, ZHAN Xiao, XU Yuhuan, et al. Research progress on the application of shear thickening fluid in Kevlar composites[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2024,42(1):42-45.
- [29] HOFFMAN R L. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. II. Theory and experimental tests[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1974,46(3):491-506.
- [30] BARNES H A. Shear-thickening (“Dilatancy”) in suspensions of no aggregating solid particles dispersed in Newtonian liquids[J]. Journal of Rheology, 1989,33(2):329-366.
- [31] CAO S, HE Q, PANG H, et al. Stress relaxation in the transition from shear thinning to shear jamming in shear thickening fluid[J]. Smart Materials and Structures, 2018,27(8):85013.