

固液侵入条件下智能堵漏钻井液剪切增稠响应特性研究

孙平贺^{1,2,3}, 邓盈盈^{1,2,3}, 曹函^{1,2,3*}, 杨浩宇^{1,2,3}, 黄小程^{1,2,3}, 赵冬鹏^{1,4}, 王亮^{1,5}

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 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. 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;

4. 郑州尚有材料科技有限公司, 河南 郑州 450000;

5. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410083

摘要: 钻井液漏失不仅损失大量钻井液还会导致孔壁失稳等事故为明确实际钻井中存在的地层粘土矿物和水侵入对智能堵漏钻井液剪切增稠响应规律, 选用纳米二氧化硅和聚乙二醇制备剪切增稠流体(STF), 通过SEM、氮气吸脱附和比重瓶法表征纳米二氧化硅; 通过挤压流动测试、稳态剪切测试表征 STF 增稠特性; 设计伊利石、高岭石和蒙脱石侵入量 0、1.8、3.6、5.4 和 7.2wt%, 水侵入量为 0、2、4、6 和 8wt% 的试验。结果表明高岭石和伊利石侵入会导致 STF 最大粘度下降 79.8%和 72.9%; 而 5.4wt%蒙脱石侵入导致 STF 增稠强度增大了 56.4%。8wt%水侵会显著稀释-抑制 STF 增稠特性, 剪切增稠强度下降 99.6%。本文为剪切增稠型智能堵漏钻井液的应用提供了理论参考。

关键词: 智能材料; 剪切增稠流体; 堵漏; 流变性; 粘土矿物

中图分类号: P634

收稿日期: 2025-12-31

Research on the Shear Thickening Response Characteristics of Intelligent Plugging Drilling Fluid under Solid-Liquid Invasion Conditions

Pinghe Sun^{1,2,3}, Yingying Deng^{1,2,3}, Han Cao^{1,2,3*}, Haoyu Yang^{1,2,3},

Xiaocheng Huang^{1,2,3}, Dongpeng Zhao^{1,4}, Liang Wang^{1,5}

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, 42172346)

作者简介: 孙平贺(1982--), 教授, 博士生导师, 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, ORCID: 0000-0003-4256-0797, pinghesun@csu.edu.cn。

通讯作者: 曹函(1982--), 副教授, 硕士生导师, 从事非常规能源钻采关键技术与储层保护等方面教学与科研工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号, ORCID: 0000-0001-6713-7456,

hancao@csu.edu.cn。

-
1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
 2. Key Laboratory of Non-Ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha, 410083, Hunan, China;
 3. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha, 410083, Hunan, China
 4. Zhengzhou Shangyou Material Technology Corporation Limited, Zhengzhou, 450000, Henan, China
 5. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, 410083, Hunan, China

Abstract: Drilling fluid loss results in significant material wastage and can lead to severe accidents such as borehole instability. To elucidate the effects of formation clay minerals and water intrusion on the shear thickening response of smart plugging drilling fluids, shear thickening fluids (STFs) were prepared using nano-silica and polyethylene glycol (PEG). The nano-silica was characterized by SEM, nitrogen adsorption-desorption and the balance bottle method. The STFs were characterized via squeeze flow and steady-state shear tests. Experiments were designed involving the intrusion of illite, kaolinite, and montmorillonite at concentrations of 0, 1.8, 3.6, 5.4, and 7.2 wt%, as well as water intrusion at 0, 2, 4, 6, and 8 wt%. The results indicate that the intrusion of kaolinite and illite reduced the maximum viscosity of the STF by 79.8% and 72.9%, respectively, due to the interlayer slippage effect. In contrast, the intrusion of 5.4 wt% montmorillonite increased the thickening intensity of the STF by 56.4%. However, 8 wt% water intrusion significantly diluted and inhibited the thickening characteristics of the STF, causing a 99.6% decrease in shear thickening intensity. This study provides a theoretical reference for the application of shear-thickening-based smart plugging drilling fluids.

Key Words: Smart materials; Shear thickening fluid; Plugging; Rheology; Clay minerals

引言

钻井液漏失是一种钻井施工过程中常见的现象(孙金声等, 2020^[21]; 李伟等,

2021^[13]), 不仅增加钻井成本、损失大量钻井液还会导致孔壁失稳等复杂事故(谭忠健等, 2023^[23])。根据漏失通道形态可以将漏失分为孔隙型、裂缝型和溶洞型漏失(Sun et al., 2021^[19])。针对不同漏失类型, 学者研发出一系列堵漏材料, 包括桥接堵漏、高失水堵漏、聚合物凝胶等材料(康毅力等, 2018^[10]; 暴丹等, 2019^[2]; 颜帮川等, 2019^[25]; Sun et al., 2021^[19]), 提供了有效的堵漏手段。然而在复杂地应力、非均质性强等地层中, 发育着形状各异的天然裂缝漏失通道(郝越翔等, 2025^[8]), 难以预测孔隙、裂缝尺寸, 常用的堵漏材料在存在变形能力弱、裂缝适应性差、驻留能力差等问题(孙金声等, 2020^[21])。为了提高堵漏材料对复杂裂缝自适应性, 学者们提出了智能堵漏材料概念, 并研发出以剪切响应型凝胶堵漏剂(白英睿等, 2019^[1])、杂化交联复合凝胶堵漏剂为代表的智能凝胶堵漏材料; 以智能记忆金属、智能记忆聚合物为代表的智能记忆堵漏材料(李公让等, 2016^[12]; 汤龙皓等, 2022^[24]; 刘振东等, 2025^[16])。智能堵漏在特定的温度、应力等环境刺激下做出响应, 能自适应各种复杂地层, 在钻井液防漏堵漏领域具备广阔的应用前景。

剪切增稠流体 (Shear Thickening Fluid, STF) 由液相分散介质和固相颗粒组成, 是一种具备智能感知剪切力、自适应形变的非牛顿流体(Zhao et al., 2020^[28]; Serra et al., 2024^[18]; Yang et al., 2025^[25])。在受到剪切、冲击或挤压等作用力时, 其表观粘度会呈指数型增大, 同时其相态从流动态转变为软固态(Zarei et al., 2020^[27]; Liu et al., 2025^[15])。图 1 是典型的 STF 稳态剪切流变曲线, 展示了其受到剪切力时表观粘度与剪切速率的关系, STF 表观粘度随剪切速率的变化可以分为三个阶段: 剪切变稀阶段、剪切增稠阶段和二次剪切变稀阶段。其中 η_0 表示 STF 的初始表观粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η_c 和 $\dot{\gamma}_c$ 为 STF 的最低表观粘度和临界剪切速率, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 和 s^{-1} ; η_{\max} 和 $\dot{\gamma}_{\max}$ 为 STF 能达到的最大表观粘度和对应的剪切速率值。工程应用中一般用上述参数作为指导 STF 制备的指标, η_0 、 $\dot{\gamma}_c$ 、 $\dot{\gamma}_{\max}$ 越小, η_{\max} 越大, 则认为体系的剪切增稠性能越强, 此外衍生参数例如剪切增稠强度 Δ (式 1) 越大也可以认为体系的剪切增稠性越强。

$$\Delta = \eta_{\max} - \eta_c \quad (1)$$

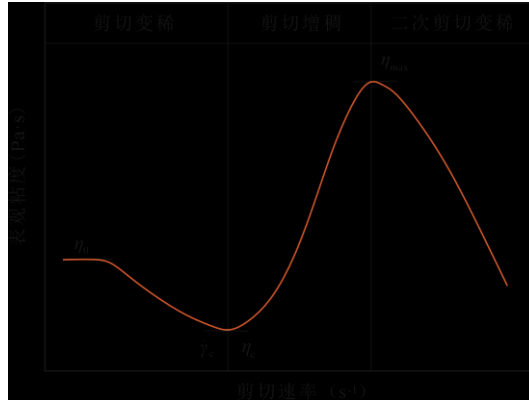


图 1 STF 的典型稳态剪切流变曲线

Fig. 1 Typical steady-state shear rheological curves of STF

STF 的压力感知和自适应填充特性使其具备智能封堵破碎、裂缝发育地层的可行性。本文在前期试验研究表明, 基于纳米二氧化硅和聚乙二醇 (Polyethylene glycol, PEG) 的 STF 在压力作用下能触发其剪切增稠特性, 能够显著降低其在单一裂缝中的漏失速率 (邓盈盈等, 2024^[6])、实现对粘土中裂缝的自适应封堵。试验结果显示 STF 中纳米二氧化硅体积分数越高, 其增稠特性和封堵效果越好 (孙西超等, 2014^[22]; 杜苏睿等, 2022^[7]; 邓盈盈等, 2024^[6]), 即增稠特性与封堵效果呈正相关。

在实际钻井工程中, 地层中钻屑以及水侵会影响 STF 的增稠特性进而影响其堵漏效果, 为了系统厘清钻屑及水侵入对其封堵特性的关系, 本文以常见粘土矿物模拟钻屑, 开展了高岭石、伊利石、蒙脱石和水侵对 STF 增稠特性的影响规律, 结合 SEM、氮气吸脱附试验和比重瓶法表征纳米二氧化硅, 通过挤压流动和稳态剪切测试探究 STF 在固液侵入下的响应机制, 为合理使用 STF 堵漏材料提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与 STF 样品制备

本文采用 300、500nm 凝胶法纳米二氧化硅作为分散相, 以 PEG200 为分散介质、无水乙醇为辅助分散溶剂, 通过机械搅拌法制备 STF, 如图 2 所示。首先向纳米二氧化硅中加入无水乙醇, 配合水浴超声波辅助纳米二氧化硅预分散。然后添加定量 PEG, 配合水浴超声波和机械搅拌得到均匀悬浮液。最后将悬浮液置于真空干燥箱, 在 85℃ 下烘干 1.5h 以蒸发过量无水乙醇、消除机械搅拌过程中卷

入的气泡，得到 STF 样品。



图 2 STF 制备流程

Fig. 2 Preparation process of STF

为了研究 STF 在压力作用下的流动特性以及粘土矿物、水侵入对 STF 流变性的影响规律，制备了不同纳米二氧化硅体积分数、粘土矿物和水侵入量的 STF 样品，各组分详细参数如表 1 所示。除自变量外，控制其他参数为 PEG200、分散相体积分数为 59%、300nm 二氧化硅。

表 1 STF 增稠特性影响因素试验参数表

Table 1 Experimental parameters of factors affecting the thickening characteristics of STF

自变量	纳米二氧化硅 粒径 (nm)	纳米二氧化硅 体积分数 (%)	伊利石侵入 量 (wt%)	高岭石侵 入量 (wt%)	蒙脱石侵入 量 (wt%)	水侵入量 (wt%)
变量 梯度	300	54		0.0		0.0
	500	56		1.8		2.0
	/	59		3.6		4.0
	/	61		5.4		6.0
	/	/		7.2		8.0
测试 方法	稳态剪切流变测试、 挤压流动测试		稳态剪切流变测试			

1.2 试验方法

(1) 纳米二氧化硅分散性及比表面积测试

纳米二氧化硅颗粒分散性是影响二氧化硅-聚乙二醇体系流变性的重要因素(杜苏睿等, 2022^[7]), 本文通过 SEM 获取纳米二氧化硅微观形貌图以评价其颗粒

分散均匀性；通过氮气吸脱附试验和 BET 方程计算纳米二氧化硅颗粒比表面积。

(2) 纳米二氧化硅密度评价

此外，由于纳米二氧化硅蓬松堆积，具有极低的堆积密度，因此准确地测量纳米二氧化硅颗粒密度是控制样品分散相体积分数的关键。本研究采用比重瓶法测量纳米二氧化硅颗粒密度，以无水乙醇作为置换液体以减少纳米二氧化硅团聚并保证其充分润湿，依据 GB/T1713-2008 流程进行测定。

(3) STF 流变性测试

稳态剪切流变测试是常用的 STF 流变性表征方法。采用 Anton Paar MCR 302 旋转流变仪对样品进行测试，得到稳态剪切流变曲线，根据公式 (1) 计算样品剪切增稠强度。测试前对样品施加 1min 的 $1s^{-1}$ 预剪切处理，使样品内部颗粒均匀分布，以消除加载过程对样品流变性的影响，保证结果准确性。

(4) STF 挤压流动性测试

为了揭示 STF 受地层挤压力作用，在漏失通道中发生液-固态转变形成封堵层的转变机制，设计了挤压流动试验。采用 Anton Paar MCR 302 旋转流变仪结合平行圆板测试附件开展等体积挤压测试。测试时将平行圆板初始间距调整为 1.0mm，取 0.5mL 试样置于下方圆板的中心，上方圆板分别以 30、60、90、120、150 $\mu m/s$ 的挤压速率向下挤压试样以模拟不同地层压力条件。根据法向应力和平行板间距的关系曲线来描述 STF 的挤压流动性能。

2 结果分析与讨论

2.1 纳米二氧化硅表征结果

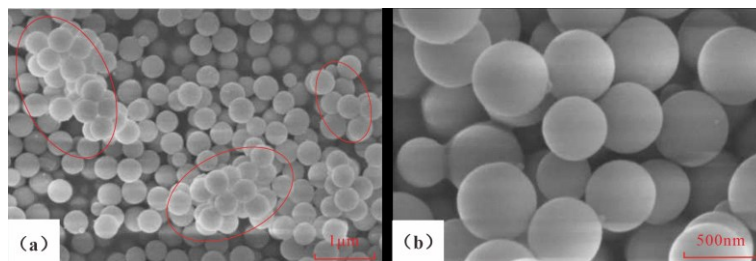


图 3 纳米二氧化硅 SEM 图像 (a) 300nm； (b) 500nm

Fig. 3 SEM images of silica nanoparticles (a) 300 nm; (b) 500 nm

图 3 可以观察到纳米二氧化硅颗粒呈微球形状，300nm 的二氧化硅表现出明显的团聚现象；而 500nm 二氧化硅表现出较好的单分散状。随着纳米二氧化硅粒

径的减小,增加的比表面积和表面能越大,因此其倾向于通过团聚来降低表面能,粒径越小的纳米二氧化硅团聚现象越明显;同时由于纳米二氧化硅粒径和颗粒间距小,这导致粒子间的范德华力显著增强,使颗粒之间相互吸引(胡昌富等, 2025^[9])。表 2 呈现了纳米二氧化硅的比表面积以及密度数据,结果显示 300nm 二氧化硅比表面积可达 180m²/g, 大于 500nm 二氧化硅的比表面积 170m²/g, 与 SEM 显示的 500nm 二氧化硅颗粒分散性更好的结果一致。

表 2 纳米二氧化硅颗粒表征参数

Table 2 Characterization parameters of nanosilica

纳米二氧化硅粒径	比表面积 (m ² /g)	颗粒密度 (g/cm ³)
300nm	180	1.98
500nm	170	1.82

2.2 STF 流变性表征

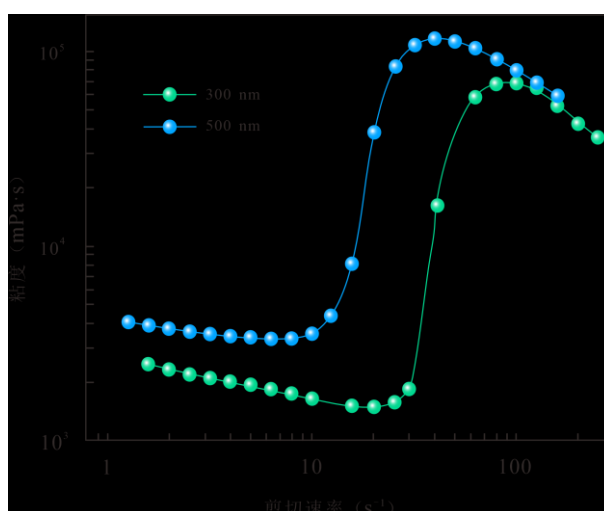


图 4 300nm、500nm 二氧化硅制备的 STF 稳态剪切流变曲线

Figure 4 Steady-state shear rheological curves of STF prepared with 300nm and 500nm silica

图 4 显示 300、500nm 二氧化硅制备 STF 的剪切增稠行为: 当达到临界剪切速率后, 剪切速率再增加时表观粘度迅速增大。300nm 和 500nm 二氧化硅 STF 的剪切增稠强度分别为 67.6Pa·s、90.3Pa·s, 临界剪切速率分别为 20.0s⁻¹ 和 6.3s⁻¹, 即 300nm 二氧化硅制备的 STF 具有更高的临界速率。这与 Maranzano 和 Barnes 等人的研究结果一致: 临界剪切速率与分散相颗粒平均尺寸的关系成反比: 粒径越小, 临界剪切速率越大(陈潜等, 2016^[4])。

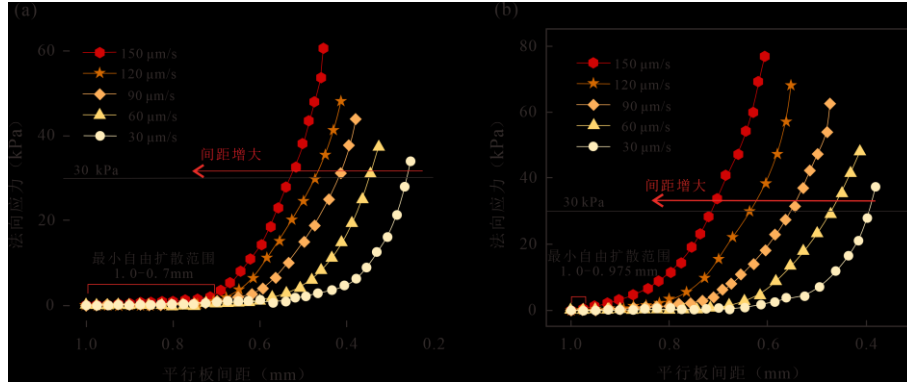


图5 不同挤压速度下 STF 法向应力与板间距关系 (a) 300nm 二氧化硅; (b) 500nm 二氧化硅
Fig. 5 Relationship between normal stress and gap distance of STF at different squeeze speeds

(a) 300 nm nanosilica; (b) 500 nm nanosilica

图 5 显示在不同挤压速度下的挤压流动曲线具有相似的变化趋势, 挤压速度越快, 平行板间距越大。把平行板的挤压力看作剪切作用, 挤压速度越快则作用在 STF 样品上的剪切速率更大, 越早超过临界剪切速率从而激发其增稠特性, 使 STF 转变为软固体, 产生较大的法向应力。此外, 两个样品的挤压流动曲线都符合图 6 所示的剪切增稠流体的典型挤压流动曲线的自由扩散、粘性流动和固化三个阶段。根据挤压流动理论可知 STF 在挤压过程中发生法向压缩以及径向流动, 从而产生法向应力和剪切应力。这两种力都来源于纳米颗粒间的 PEG 流体动力润滑力, 如式 2 所示。根据式 2 可知在挤压初期平行板间距较大, 挤压力作用促使 STF 中纳米二氧化硅颗粒重新排序而颗粒间距几乎不变, 因此产生的法向应力几乎不变, 为自由扩散阶段; 继续挤压会使 STF 中二氧化硅颗粒间距逐渐减小导致润滑力增大, 因此法向应力作为润滑力的分力也逐渐增大, 即粘性流动阶段; 当平行板间距继续减小直至纳米二氧化硅颗粒相互接触时, 颗粒间出现巨大接触力并形成网状结构产生阻塞现象(周浩等, 2021^[29]), 体系实现由液相到软固态的转变, 接触力传递到平行板, 表现为法向应力急速上升, 即固化阶段。

$$F_{\text{sphere-sphere}} = \frac{6\pi}{d^2} \quad (2)$$

其中, $F_{\text{sphere-sphere}}$ 代表颗粒间的润滑力, N; r 代表颗粒半径, m; U 代表颗粒间相对速度, m/s; η 代表分散介质粘度, Pa · s; d 代表颗粒间距, m。

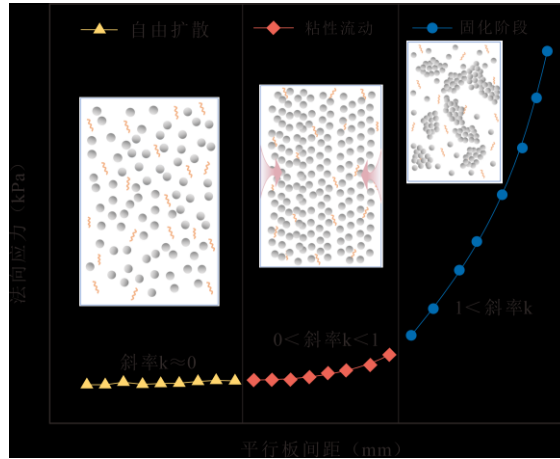


图6 STF 的典型挤压流动曲线

Fig. 6 Typical squeeze flow curves of STF

图5显示300nm和500nm二氧化硅在 $150\ \mu\text{m/s}$ 挤压速度下的自由扩散范围最小，分别为1.0-0.7mm和1.0-0.975mm，300nm二氧化硅的自由扩散范围显著大于500nm二氧化硅。自由扩散阶段是STF体系中二氧化硅颗粒在挤压力作用下重新排序的过程。300nm二氧化硅粒径相对更小，其在挤压力作用下具备更强的重新排序能力。因此宏观上表现为300nm二氧化硅在不同挤压速度下的自由扩散范围更大。在实际地层封堵中，较宽的自由扩散范围能保证STF在相同压差下扩散渗流到裂缝深处，更加紧密地自适应填充裂缝，对应更加好的封堵效果，基于此后续试验选用300nm二氧化硅作为本文的主要探讨对象。

2.3 剪切增稠流体增稠效应影响因素

2.3.1 纳米二氧化硅体积分数对STF增稠效应的影响

图7(a)显示当纳米二氧化硅体积分数在54%-61%范围内均表现出良好的剪切增稠特性。图7(b)能观察到随纳米二氧化硅体积分数增大，STF的剪切增稠强度和初始粘度上升，而临界剪切速率呈减小趋势。现有研究表明只有当STF体系内部的分散相体积分数超过临界值时，才会产生增稠效应(Negi et al., 2009^[17]; Lin et al., 2025^[14])。公式(3)揭示了粒子簇特征尺寸 l_c 与STF中分散相体积分数的关系，当分散相体积分数趋近于体系最大分散相体积分数 ϕ_{max} 时，粒子簇特征尺寸发散，导致STF体系的粒子簇堵塞更为严重，体系剪切增稠强度显著增加(Brady et al., 1985^[3])。

$$l_c \sim \left(1 - \left(\frac{\phi}{\phi_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中, l_c 代表粒子簇的特征尺寸; ϕ 为分散相体积分数, ϕ_{\max} 为最大分散相体积分数。

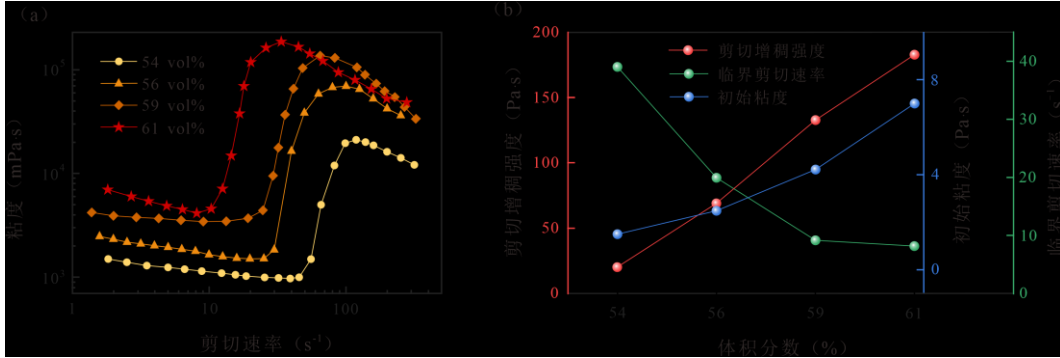


图 7 (a) 不同纳米二氧化硅体积分数 STF 的流变曲线; (b) 体积分数与流变参数的关系

Fig. 7 (a) Rheological curves of STF with different silica volume fractions;

(b) Relationship between volume fraction and rheological parameters

2.3.2 高岭石、伊利石侵入对 STF 增稠特性的影响

图 8 (b) 和 (d) 显示随着高岭石和伊利石质量分数的增加, STF 的剪切增稠强度均表现出显著的下降趋势, 且当粘土矿物侵入量在 3.6wt%-7.2wt% 范围内时, 其下降幅度明显增加。当高岭石和伊利石侵入量为 3.6wt% 时, STF 最大表观粘度分别下降了 28.9% 和 24.1%; 当侵入量为 7.2% 时, 最大表观粘度分别下降了 79.8% 和 72.9%。

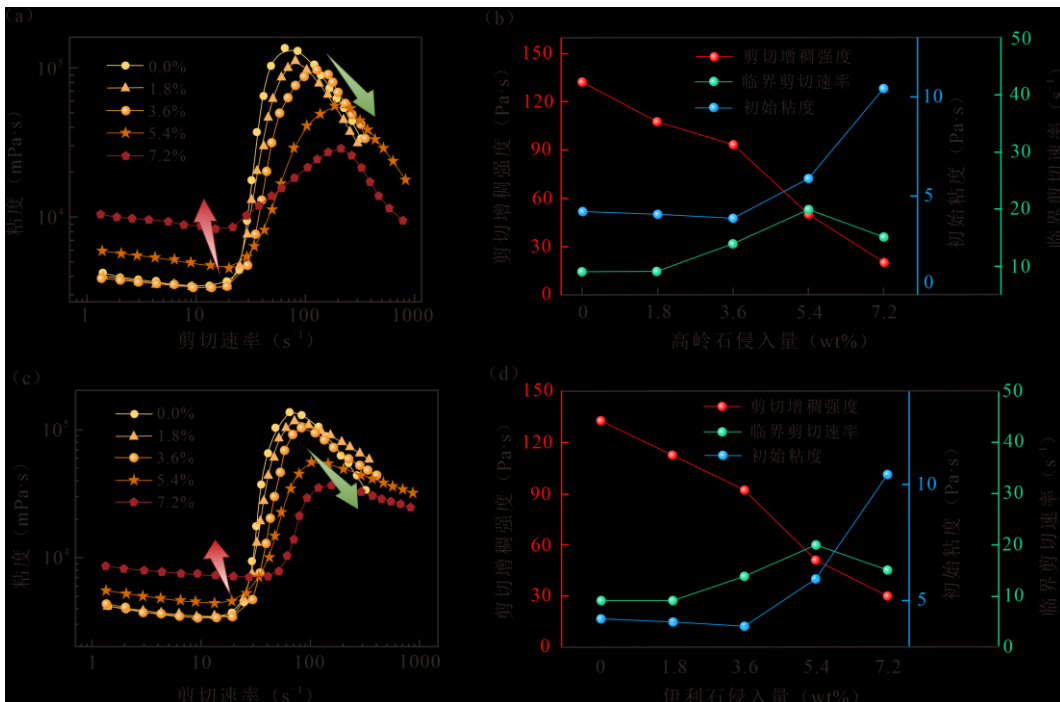


图8 (a) 高岭石侵入的 STF 流变曲线; (b) 高岭石侵入与流变参数的关系

(c) 伊利石侵入的 STF 流变曲线; (d) 伊利石侵入与流变参数的关系

Fig. 8 (a) Rheological curves of STF with kaolinite intrusion;

(b) Relationship between kaolinite intrusion and rheological parameters;

(c) Rheological curves of STF with illite intrusion;

(d) Relationship between illite intrusion and rheological parameters

图9 是高岭石、伊利石导致 STF 最大表观粘度下降的机理示意图。粒子簇理论指出剪切增稠现象是因为纳米二氧化硅颗粒在剪切力作用下相互接触、咬合锁死形成粒子簇, 粒子簇阻碍流体运动导致表观粘度迅速增大(Lee et al., 2006^[11]; Cheng et al., 2011^[6])。STF 的最大表观粘度反映了体系中粒子簇抵抗剪切力破坏的能力。高岭石和伊利石是一种片状结构粘土矿物, 在剪切场中易发生层间滑移, 这种滑移机制作为一种应力释放方式有效耗散了剪切能量、削弱了颗粒间接触力, 降低了二氧化硅粒子簇结构强度, 表现为加粘土矿物侵入后 STF 体系的最大表观粘度剧烈下降。

高岭石和伊利石侵入量在 0-3.6wt%范围内时, 稳态剪切流变曲线的在前半段有明显重合即初始粘度、临界剪切速率几乎不受影响。而当侵入量大于 5.4wt%时, 初始粘度显著上升, 临界剪切速率也有所增加。导致 STF 初始粘度增大的原因可以概括为两点: 粘土矿物的侵入增加了体系内的固相含量; 高岭石和伊利石表面的羟基与纳米二氧化硅、PEG 互相作用形成氢键增大了体系内分子作用力, 促使体系形成具有一定强度的空间骨架结构, 提升了其对剪切力破坏的抵抗作用。而粘土矿物带来的颗粒间接触力削弱作用远大于因为固相含量增加、分子间作用力增强带来的初始粘度上升, 因此高岭石和伊利石侵入最终导致 STF 的剪切增稠强度降低。

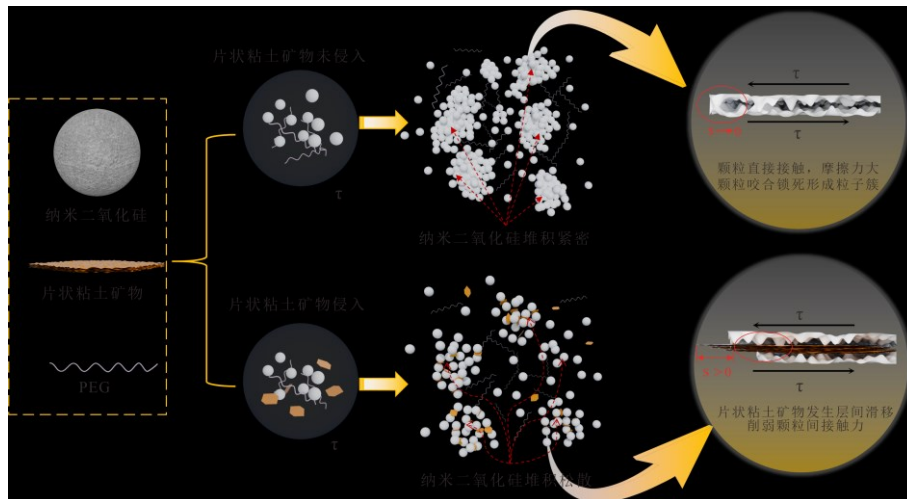


图9 片状粘土矿物侵入后 STF 最大表观粘度下降机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the reduction mechanism of maximum apparent viscosity of STF after flaky clay mineral intrusion

2.3.3 蒙脱石侵入对 STF 增稠特性的影响

与高岭石、伊利石侵入导致的 STF 增稠强度下降作用不一样，图 10 显示在 0-5.4wt%范围内的蒙脱石侵入显著增强了 STF 的剪切增稠强度，其中 5.4wt%的蒙脱石侵入时 STF 的剪切增稠强度上升了 56.4%；而当蒙脱石侵入量为 7.2wt%时，STF 的剪切增稠强度急速下降，剪切增稠强度下降了 33.1%。

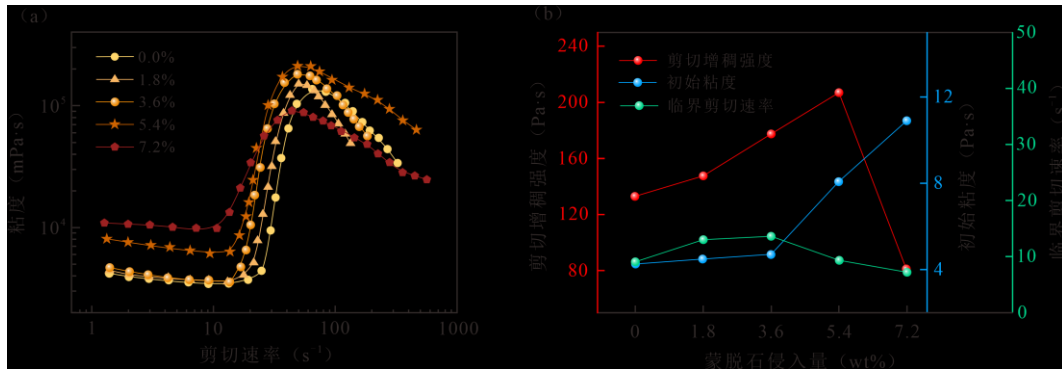


图 10(a) 蒙脱石侵入的 STF 流变曲线； (b) 蒙脱石侵入与流变参数的关系

Fig. 10 (a) Rheological curves of STF with montmorillonite intrusion;

(b) Relationship between montmorillonite intrusion and rheological parameters

蒙脱石对 STF 剪切增稠强度的双重影响机制可以从其与高岭石和伊利石不同的晶体结构角度来解释。蒙脱石矿物相邻层间为氧原子，层间结合力弱，其层间距为 9.6-40Å，这种松散的层间联结使得其易吸附极性 PEG 分子进入晶层。图 11 是蒙脱石双重作用机制示意图，在侵入量小于 5.4wt%的阶段，增稠强度增加是由于溶剂竞争作用：层间松散的蒙脱石掠夺分散介质 PEG，减少了分散介质含量，相当于提高了纳米二氧化硅的有效体积分数，导致粒子簇特征尺寸增加，进而提高了剪切增稠强度；当蒙脱石侵入量达到 7.2wt%时，蒙脱石片层在剪切力作用下的定向排列滑移机制作用强于溶剂竞争作用，致使增稠强度迅速下降。

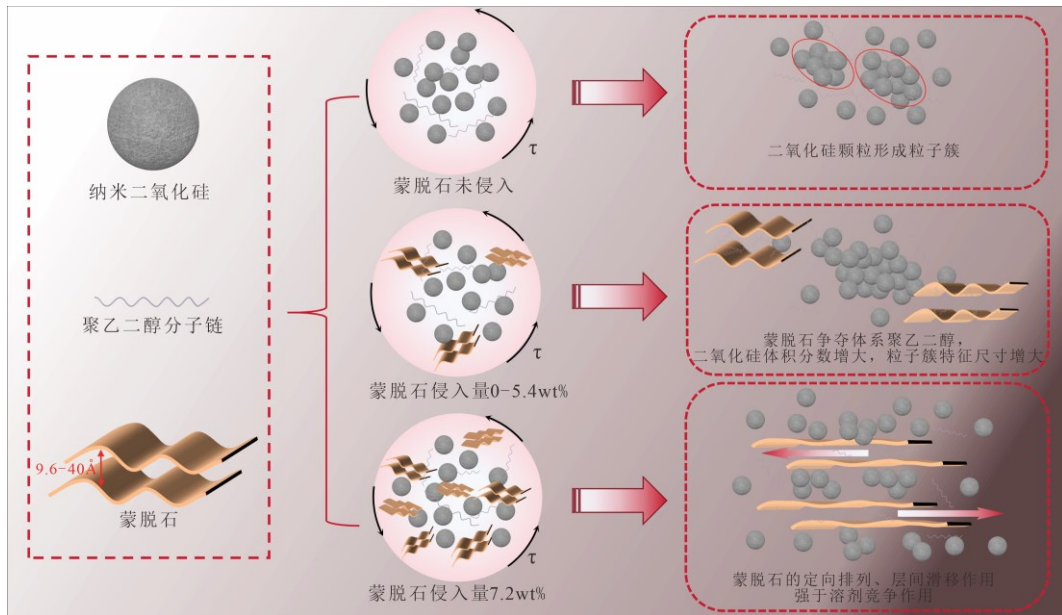


图 11 蒙脱石侵入的双重作用机制示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the dual-action mechanism of montmorillonite intrusion

综合对比三种粘土矿物对 STF 的流变性的影响规律，可以总结出以下两点：

(1) 高岭石和伊利石的侵入均会导致 STF 的剪切增稠强度下降，两种粘土矿物侵入量小于 3.6wt%时，下降幅度在 27%~30%左右；(2) 随粘土矿物侵入量增加，三种矿物对流变特性的影响作用存在差异，蒙脱石层间距大、层间作用力弱具备特殊的溶剂竞争机制，在 0-3.6wt%范围内表现为剪切增稠强度的提升。高岭石和伊利层间结构稳定，其在剪切应力场作用下只表现层间滑移作用，削弱粒子簇强度。这三种差异化的流变响应，为针对不同地质特征的裂隙性地层设计合理的 STF 封堵材料提供了理论依据。

2.3.4 水侵对增稠特性的影响

水的侵入对 STF 的流变性能产生了显著的“稀释-抑制”效应：图 12 (b) 显示水侵入 STF 后，其初始粘度和剪切增稠强度均呈现明显下降趋势，临界剪切速率增大。当水侵率达到 8.0wt%时，初始粘度从 4220.6mPa·s 下降至 333.3 mPa·s；剪切增稠强度由 132.7Pa·s 下降至 0.48 Pa·s（下降了 99.6%）。区别于三种粘土矿物对 STF 的临界剪切速率影响较小的规律，水的侵入导致临界剪切速率显著升高：从纯 STF 的 9.1s⁻¹ 增大至 8.0wt%水侵时的 123.9s⁻¹。这表明在含水率较高时，激发剪切增稠特性需要极高的外部剪切力作用，STF 的液固态转换阈值被显著抬高。

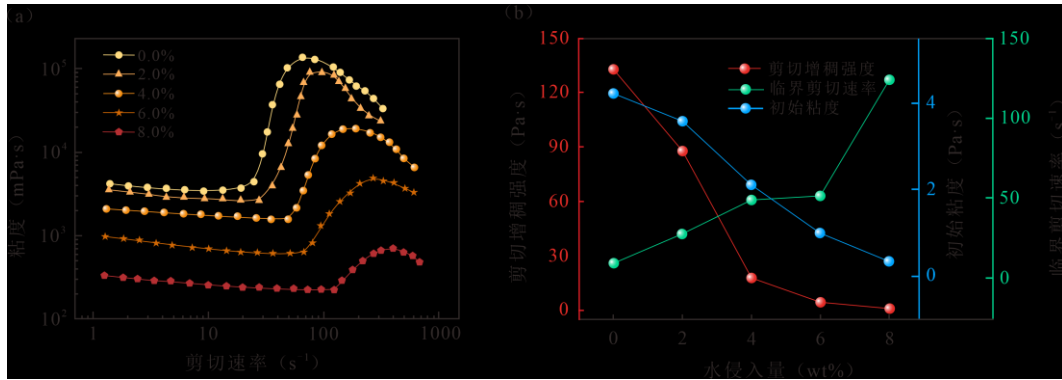


图 12(a)水侵入的 STF 流变曲线； (b) 水侵入与流变参数的关系

Fig. 12 (a) Rheological curves of STF with water intrusion;

(b) Relationship between water intrusion and rheological parameters

水侵对 STF 体系的作用可以概括为“宏观稀释”与“微观润滑”。PEG 具有良好的水溶性，水的加入直接稀释了连续相 PEG，降低了体系内纳米二氧化硅的有效体积分数，导致颗粒间距增大，显著降低了颗粒接触碰撞和形成网络结构的概率，直接导致增稠强度下降。水的侵入改变了纳米二氧化硅颗粒表面的微观环境，相比二氧化硅表面硅羟基与 PEG 长链中醚键氧原子的单点氢键结合，颗粒表面的亲水基团会优先与自由水结合形成多重氢键，在表面形成形成水化膜；同时纳米二氧化硅颗粒为了降低表面能会优先吸附表面张力更大、更强的水分子。水化膜的存在为纳米二氧化硅颗粒接触带来了空间位阻，降低了微粒的迁移能力，同时水化膜也是一种高效润滑剂，降低了颗粒间摩擦阻力。水化膜带来的微观润滑效应使得纳米二氧化硅颗粒彼此难以接触和形成水合粒子簇，因此需要更大的剪切速率才能激发剪切增稠效应，导致材料宏观剪切增稠能力的严重削弱。

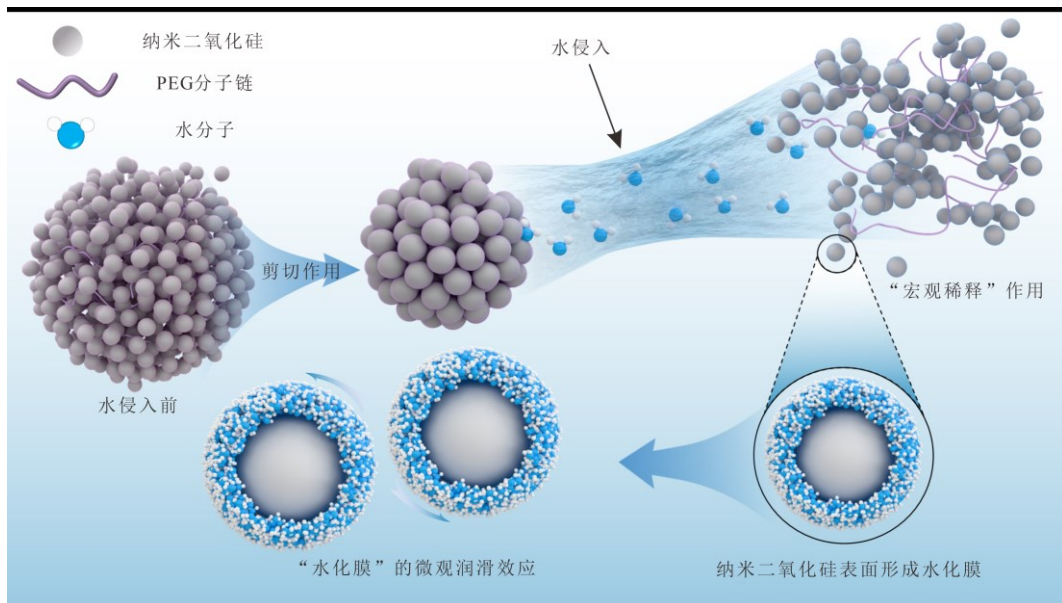


图 13 水侵对 STF 体系的“宏观稀释”与“微观润滑”作用机理图

Fig. 13 Mechanism diagram of "macroscopic dilution" and "microscopic lubrication" effects of water intrusion on the STF system

3 结论与展望

本文围绕 STF 作为智能堵漏钻井液的应用,探讨了常见粘土矿物和水侵对 STF 增稠特性的影响规律,得到的结论如下:

(1) 稳态剪切试验表明凝胶法纳米二氧化硅和 PEG200 制备的 STF 能表现出明显的剪切增稠效应;平板挤压测试表明 STF 在 $150 \mu\text{m/s}$ 的挤压速度下比在 $30 \mu\text{m/s}$ 下更早发生增稠效应。300nm 二氧化硅制备的 STF 具备更广的自由扩散区间,更有利于实际封堵过程中 STF 的自适应填充裂缝;

(2) 高岭石、伊利石和蒙脱石三种粘土矿物的侵入对 STF 造成了不同的影响。其中高岭石和伊利石侵入由于其片状结构带来的层间滑移效应导致 STF 剪切增稠强度显著下降,通过实验发现两者的侵入量在 3.6-7.2wt% 范围内时,剪切增稠强度下降更为显著;蒙脱石由于其特殊的溶剂争夺作用,使其在 0-5.4wt% 的实验范围内侵入时导致 STF 剪切增稠强度增加,最大可上升至 56.4%。

(3) 0-8wt% 实验范围内的水侵会由于宏观稀释效应以及在二氧化硅表面形成水化膜,显著削弱 STF 剪切增稠强度,当水侵量达到 8.0wt% 时,初始粘度从 $4220.6 \text{mPa} \cdot \text{s}$ 下降至 $333.3 \text{mPa} \cdot \text{s}$;剪切增稠强度由 $132.7 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 下降至 $0.48 \text{Pa} \cdot \text{s}$ (下降了 99.6%)。

(4) 未来围绕 STF 封堵层在钻井液和地层水动态冲蚀下的破坏机制以及长期时间尺度下,STF 封堵层与地层的互相作用机制。

References

- [1] Bai, Y. R., Sun, J. S., Lv, K. H., et al., 2019. Preparation and Application of Shear-responsive Plugging Gel. CN109825269 (in Chinese).
- [2] Bao, D., Qiu, Z. S., Qiu, W. Q., et al., 2019. Experiment on Properties of Lost Circulation Materials in High Temperature Formation. *Acta Petrolei Sinica*, 40(7): 846-857 (in Chinese with English abstract).

-
- [3]Brady, J. F., Bossis, G., 1985.The Rheology of Concentrated Suspensions of Spheres in Simple Shear Flow by Numerical Simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 155:105–129.<https://doi.org/10.1017/s0022112085001732>.
- [4]Chen, Q., He, Q.Y., Liu,M., et al., 2016.Mechanical Properties and Mechanism of Shear Thickening Fluid. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 37(06):518–537(in Chinese).
- [5]Cheng, X., Mccoy, J.H., Israelachvili, J.N., et al., 2011.Imaging the Microscopic Structure of Shear Thinning and Thickening Colloidal Suspensions. *Science*, 333(6047):1276–1279.<https://doi.org/10.1126/science.1207032>.
- [6]Deng, Y.Y., Sun, P.H., Xia, Y.H.Y., et al., 2024.Experimental Study on the Sealing Characteristics of Fractured Formation by Shear Thickening Fluid. *Drilling Engineering*, 51(05):68–76(in Chinese with English abstract).
- [7]Du, S.R., Liu, Y.Q., Fan, Y.Z., et al., 2022.Influence of the Dispersibility of Fumed Silica on the Steady-state Rheological Property of STF. *New Chemical Materials*, 50(04):220–224(in Chinese with English abstract).
- [8]Hao, Y.X., Yin, C., Li, Y.Z., et al., 2025.Evaluation of Fracturing Effect and Mechanism of Casing Deformation Weakening for Ultra-Long Section Fracturing. *Earth Science*, 50(12):4751–4763(in Chinese with English abstract).
- [9]Hu, C.F., Jiang, J.Y., Cai, J.C., et al., 2025.Research Progress on Aggregation Behavior Mechanism and Inhibition Methods of Nanomaterials Modified Polymers. *Plastics Science and Technology*, 53(11):195–201(in Chinese with English abstract).
- [10]Kang, Y.L., Zhang, J.Y., Xu, C.Y., et al., 2018.The Effect of Geometrical Morphology of Rigid Lost Circulation Material on Its Retention Behavior in Fractures. *Petroleum Drilling Techniques*, 46(05):26–34(in Chinese with English abstract).
- [11]Lee, Y., Wagner, N., 2006.Rheological Properties and Small-Angle Neutron Scattering of a Shear Thickening, Nanoparticle Dispersion at High Shear Rates. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45:7015–7024.<https://doi.org/10.1021/ie0512690>

-
- [12]Li, G.R., Liu, Z.D., Zhang, J.H., et al., 2016.A Plugging Agent Containing Shape-memory Alloy, CN201611203356.0(in Chinese).
- [13]Li, W., Bai, Y.R., Li, Y.T., et al., 2021.Research and Application Progress of Drilling Fluid Lost Circulation Materials and Technical Countermeasures for Lost Circulation Control. *Science Technology and Engineering*, 21(12):4733-4743(in Chinese with English abstract).
- [14]Lin, J., Chen, Y., Min, S., et al., 2025.Effect of Nanowire Doping and Rheological Viscosity on Novel Design of Highly Concentrated Shear Thickening Fluid for Stabbing Resistant Composites. *Composites Part B: Engineering*, 303:112601.<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112601>
- [15]Liu, S., Zhao, C., Wen, Z., 2025.Impact Protection Performance of Kevlar Fabric Composites Impregnated with Modified Multiphase Shear Thickening Fluids. *Thin-Walled Structures*, 214:113399.<https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113399>
- [16]Liu, Z.D., Li, H.B., Sun, T.F., et al., 2025.Plugging Performance of Shape Memory Foam Plugging Material with High Activation Temperature. *Oilfield Chemistry*, 42(03):388-392(in Chinese).
- [17]Negi, A.S., Osuji, C.O., 2009.New Insights on Fumed Colloidal Rheology—Shear Thickening and Vorticity-Aligned Structures in Flocculating Dispersions. *Rheologica Acta*, 48(8):871-881.<https://doi.org/10.1007/s00397-008-0341-9>
- [18]Serra, G.F., Oliveira, L., Gürgen, S., et al., 2024.Shear Thickening Fluid (STF) in Engineering Applications and the Potential of Cork in STF-Based Composites. *Advances in Colloid and Interface Science*, 327:103157.<https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103157>
- [19]Sun, J., Bai, Y., Cheng, R., et al., 2021.Research Progress and Prospect of Plugging Technologies for Fractured Formation with Severe Lost Circulation. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3):732-743.[https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60059-9](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60059-9)
- [21]Sun, J.S., Lei, S.F., Bai, Y.R., et al., 2020.Research Progress and Application Prospects of Smart Materials in Lost Circulation Control of Drilling Fluids. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural*

-
- Science*), 44(4):100-110(in Chinese with English abstract).
- [22]Sun, X.C., Li, Y.Q., Zhan, X.F., et al., 2014.Preparation and Properties of Shear Thickening Fluid. *Journal of Textile Research*, 35(08):5-9(in Chinese with English abstract).
- [23]Tan, Z.J., Deng, J.H., Zhang, X.Q., et al., 2023.Quantitative Characterization of Fractures under Volcanic Thermal Expansion Based on Thermal-Mechanical Coupling Analysis. *Earth Science*, 48(7):2665-2677(in Chinese with English abstract).
- [24]Tang, L.H., Wang, Y.L., Zhang, C.B., et al., 2022.Preparation and Evaluation of Thermosensitive Plugging Materials Based on Shape Memory Polymers. *Petroleum Drilling Techniques*, 50(5):70-75(in Chinese with English abstract).
- [25]Yan, B.C., Jiang, G.C., Hu, W.J., et al., 2019.Study on High Temperature Delayed Crosslinking PAM gel LCM. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 36(06):679-682(in Chinese with English abstract).
- [25]Yang, J., Zhang, J., Wang, B., et al., 2025.Constitutive Modeling of Shear Thickening Fluid Using Continuum Mechanics. *International Journal of Mechanical Sciences*, 289:110057. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110057>
- [27]Zarei, M., Aalaie, J., 2020.Application of Shear Thickening Fluids in Material Development. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5):10411-10433. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.049>
- [28]Zhao, C., Gong, X., Wang, S., et al., 2020.Shear Stiffening Gels for Intelligent Anti-Impact Applications. *Cell Reports Physical Science*, 1(12):100266. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100266>
- [29]Zhou, H., Tan, Z.H., 2021.Study on the Influence of Graphene on the Squeeze Flow Mechanical Properties of Shear Thickening Fluid. *Materials Science and Technology*, 29(01):66-73(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- [1]白英睿, 孙金声, 吕开河, 等, 2019.剪切响应型凝胶堵漏剂及其制备方法与应用, CN109825269.

-
- [2]暴丹, 邱正松, 邱维清, 等, 2019. 高温地层钻井堵漏材料特性实验. 石油学报, 40(07):846-857.
- [4]陈潜, 何倩云, 刘梅, 等, 2016. 剪切增稠液的力学性能与机理. 固体力学学报, 37(06):518-537.
- [6]邓盈盈, 孙平贺, 夏余宏焯, 等, 2024. 剪切增稠流体对裂隙地层的封堵特性试验研究. 钻探工程, 51(05):68-76.
- [7]杜苏睿, 刘亚青, 樊益泽, 等, 2022. 气相二氧化硅分散性对剪切增稠液体稳态流变学性能的影响. 化工新型材料, 50(04):220-224.
- [8]郝越翔, 尹陈, 李宜真, 等, 2025. 页岩超长段压裂模式效果评价及套变弱化机制. 地球科学, 50(12):4751-4763.
- [9]胡昌富, 蒋金云, 蔡建臣, 等, 2025. 纳米材料改性聚合物团聚行为机理及抑制方法研究进展. 塑料科技, 53(11):195-201.
- [10]康毅力, 张敬逸, 许成元, 等, 2018. 刚性堵漏材料几何形态对其在裂缝中滞留行为的影响. 石油钻探技术, 46(05):26-34.
- [12]李公让, 刘振东, 张敬辉, 等, 2016. 一种含有记忆金属的堵漏剂, CN201611203356.0
- [13]李伟, 白英睿, 李雨桐, 等, 2021. 钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策. 科学技术与工程, 21(12):4733-4743.
- [16]刘振东, 李海斌, 孙腾飞, 等, 2025. 高激活温度形状记忆发泡材料堵漏性能. 油田化学, 42(03):388-392.
- [21]孙金声, 雷少飞, 白英睿, 等, 2020. 智能材料在钻井液堵漏领域研究进展和应用展望. 中国石油大学学报(自然科学版), 44(04):100-110.
- [22]孙西超, 李艳清, 詹小芳, 等, 2014. 剪切黏稠液体的制备及其性能. 纺织学报, 35(08):5-9.
- [23]谭忠健, 邓津辉, 张向前, 等, 2023. 基于热力耦合分析的火山热膨胀型裂缝定量表征. 地球科学, 48(7):2665-2677.
- [24]汤龙皓, 王彦玲, 张传保, 等, 2022. 基于形状记忆聚合物的温敏型堵漏材料制备与评价. 石油钻探技术, 50(05):70-75.
- [25]颜帮川, 蒋官澄, 胡文军, 等, 2019. 高温延迟交联聚丙烯酰胺凝胶堵漏剂的研究. 钻井液与完井液, 36(06):679-682.

[29]周浩, 谭柱华, 2021. 石墨烯对剪切增稠液挤压流动力学性能的影响. 材料科学与工艺,
29(01):66-73.