

水基钻井液中固壁剂的研究进展与应用现状

马彩文, 李 越

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

随着页岩油气井钻探深度和复杂性增加, 井壁稳定性成为水基钻井液研究的重要方向。文章系统综述了水基钻井液中固壁剂的研究进展与应用现状, 重点分析了不同类型固壁剂的作用机理及性能特征, 包括降低水活度类、增粘液相类、封堵裂隙类、改变润湿性及桥联包被类等。同时, 介绍了典型固壁剂的分子结构设计及其对黏土水化、膨胀和滤失的抑制效果, 总结了环保型钻井液的发展趋势, 如有机盐钻井液、合成基钻井液、聚合醇钻井液及可逆乳化钻井液, 并强调了阳离子聚丙烯酰胺类聚合物在井壁稳定中的应用价值。研究表明, 固壁剂通过降低钻井液水活度、增强滤饼致密性、填充微裂隙、改变润湿性及桥联包被等多重机制, 有效提升井壁稳定性并保护储层; 绿色环保型固壁剂逐渐成为水基钻井液体系的发展趋势。研究结果为深井、高温、高压条件下钻井作业提供了理论依据和技术支持。

关键词

固壁剂, 水基钻井液, 井壁稳定, 页岩抑制, 纳米封堵, 环保钻井液

Research Progress and Application Status of Wellbore-Stabilizing Agents in Water-Based Drilling Fluids

Caiwen Ma, Yue Li

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 9, 2026; accepted: June 19, 2026; published: July 21, 2026

Abstract

With the increasing depth and complexity of shale oil and gas well drilling, wellbore stability has become a critical focus in the study of water-based drilling fluids. This review systematically summarizes the research progress and current applications of wellbore-stabilizing agents in water-based

drilling fluids, with particular emphasis on the mechanisms and performance characteristics of different types of stabilizers, including water activity reduction agents, fluid viscosity enhancers, pore and fracture sealing agents, wettability modifiers, and bridging and encapsulating polymers. Typical stabilizers' molecular structures and their effects on clay hydration, swelling, and filtration loss are analyzed. The development trends of environmentally friendly drilling fluids, such as organic salt-based fluids, synthetic-based fluids, polyol-based fluids, and reversible emulsion fluids, are also discussed. Cationic polyacrylamide polymers are highlighted for their significant contributions to wellbore stabilization. Studies indicate that stabilizers improve wellbore stability and protect the formation through multiple mechanisms, including reducing fluid water activity, enhancing filter cake compactness, sealing microfractures, modifying wettability, and bridging/encapsulating clay particles. Environmentally friendly wellbore stabilizers are gradually becoming the development trend for water-based drilling fluid systems. These findings provide a theoretical basis and technical support for drilling operations under deep-well, high-temperature, and high-pressure conditions.

Keywords

Wellbore-Stabilizing Agent, Water-Based Drilling Fluid, Wellbore Stability, Shale Inhibition, Nano-Sealing, Environmentally Friendly Drilling Fluid

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着页岩油气资源勘探和开发的快速推进, 钻井深度不断增加, 地层条件日益复杂, 井壁稳定性问题逐渐成为水基钻井液研究和应用的核心技术难题。水基钻井液因成本低廉、安全性高且环保, 目前仍是钻井作业的首选。然而, 在页岩地层中, 由于粘土矿物的吸水膨胀、分散及水化作用, 钻井液中的水分会渗入地层, 导致井壁坍塌、钻井周期延长和施工成本增加, 对钻井作业安全性和经济性造成严重影响。

为了有效抑制井壁失稳, 研究人员引入了各类固壁剂(井壁稳定剂), 其作用机制主要包括: 通过降低水活度、增大液相粘度、封堵微裂隙、调节井壁润湿性, 以及桥联包被黏土颗粒等。近年来, 随着环保法规的加强及绿色钻井需求的提升, 高性能环保型固壁剂逐渐成为研究热点, 能在高温高压深井环境下, 实现安全、可控的钻井施工。

同时, 分子设计和材料改性方面的研究也取得显著进展, 包括多功能基团分子、纳米复合材料及仿生聚合物等新型固壁剂的合成与应用。这些研究不仅有效改善了钻井液对泥页岩的抑制能力, 还在提高井壁稳定性和减少储层损伤方面发挥了重要作用。此外, 随着有机盐、合成基、聚合醇和可逆乳化钻井液的发展, 水基钻井液体系获得了更丰富的高效环保替代方案。阳离子聚丙烯酰胺类聚合物凭借其优异的水化抑制性能和环境友好特性, 在井壁稳定剂研发中占据重要地位。

本文将对水基钻井液固壁剂的研究进展进行系统梳理, 按作用机制将其分类为降低水活度类、增粘液相类、封堵裂隙类、改变润湿性类以及桥联包被类, 并结合环保型钻井液的发展趋势, 全面评述其在井壁稳定及储层保护中的应用现状, 为高性能水基钻井液体系设计提供参考。

2. 钻井液用固壁剂研究现状

井壁稳定剂主要通过两种机理发挥作用: 其一, 阻止水分子向地层迁移, 保护井壁; 其二, 利用处

理剂与矿物颗粒结合, 提高矿物颗粒间的胶结强度, 从而抑制黏土矿物在钻井液中长时间浸泡后的分散。常见类型如下[1]-[3]。

2.1. 降低水活度类

地层应力使井壁泥页岩产生大量孔隙(多数小于 10 nm), 这些孔隙短而弯曲、直径不均, 与黏土矿物双电层协同作用, 允许水分子自由通过而限制较大离子进入, 从而形成半透膜。由于钻井液中的自由水与地层水之间存在化学势差, 该势差驱动水分子从钻井液经半透膜进入地层, 引发水化作用并造成井壁失稳。向钻井液中添加 NaCl 或 CaCl₂ 等物质, 可有效降低钻井液水活度, 减缓水分子的地层迁移, 进而维持井壁稳定。

孙方龙等[4]-[6]通过加热搅拌法合成了新型活度调节剂 Urea-Gyl-DES, 当加量为 0.5%时, 能完全抑制页岩水化分散, 相对抑制率可至 100%。Urea-Gyl-DES 分子结构中富含-OH、-NH₂等极性基团, 如图 1 所示, 能与页岩表面的粘土矿物形成强氢键作用, 在页岩表面生成一层紧密的包覆层, 防止水分子接触黏土矿物, 显著抑制其水化膨胀与分散。FT-IR 分析也证实其体系中形成的氢键网络, 增强了其在页岩表面的吸附能力。

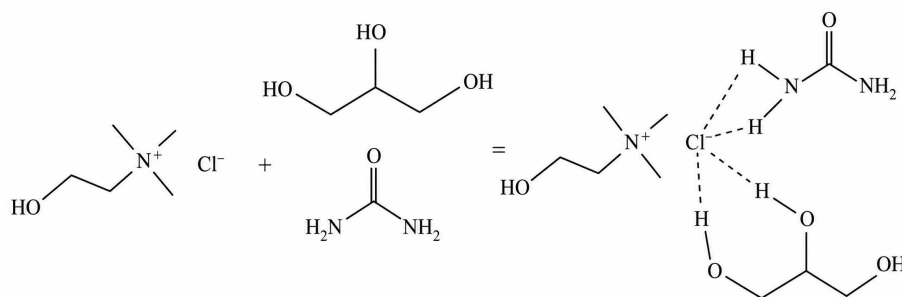


Figure 1. Synthetic molecular formula of Urea-Gyl-DES [4]-[6]

图 1. Urea-Gyl-DES 合成分子式[4]-[6]

王广财等[7]-[9]以氯化钙卤水为基液, 优选抑制剂 C-DBY 等处理剂, 构建了低活度卤水基钻井液体系; 该体系应用于二叠系盆地时, 实测井径扩大率仅为 3.44%, 有效稳定了井壁。C-DBY 是由 AMPS、NVP 和 DMAM 等单体共聚而成的抗温抗盐抑制剂, 其分子结构中引入刚性吡咯环增强热稳定性, 并能通过整合作用与 Ca²⁺等二价离子结合, 防止其进入黏土晶层间。C-DBY 能够在黏土表面形成一层致密吸附膜, 起到物理阻隔作用, 阻挡水分子入侵, 显著削弱黏土的水化分散。

王波等[10]-[12]采用甲酸盐降低液相活度, 并配合纳米复合封堵剂 YFD-2, 构建了 PSW-2 水基钻井液体系; 该体系在延安页岩气水平井中应用时, 滚动回收率超过 95%, 有效维持了井壁稳定。K⁺具有较小的水化半径和较强的嵌入能力, 可进入黏土矿物层间, 抑制阳离子交换, 阻止黏土水化膨胀, 从而有效控制页岩的水化分散。

曹伶等[13]将杜南平衡理论与活度调节剂相结合, 将钻井液活度控制在 0.84~0.95 范围内, 有效抑制了泥页岩的水化膨胀, 显著提升了井壁稳定性。活度调节剂包括无机盐、有机盐与非盐三类, 其中有机盐兼具降活效率与环保性, 目前主导着低活度水基钻井液体系的应用发展方向。

2.2. 增粘液相类

向钻井液中加入处理剂以提升滤液粘度, 可削弱水分子向地层的运移趋势, 从而稳定井壁。羟甲基纤维素(CMC)由天然纤维素改性制得, 分子链长, 既能增加滤液粘度, 又能在井壁形成致密坚韧的滤饼,

进而有效抑制水分子的地层侵入。

羧化纤维素纳米晶体(C-CNC)由 Shen 等[14]采用过硫酸铵(APS)一步氧化法制备而成, 1% C-CNC 使钻井液的滤失量由 36.2 mL 降至 11.4 mL, 同时将钠基膨润土的膨胀体积减少 76.8%。钻井压差和毛细管压力推动流体进入地层孔隙与裂缝, 而分子链上的羟基等基团则通过氢键在黏土表面形成致密膜, 该膜封堵孔隙及裂缝表面, 进而减少滤失、抑制黏土膨胀, 如图 2 所示。

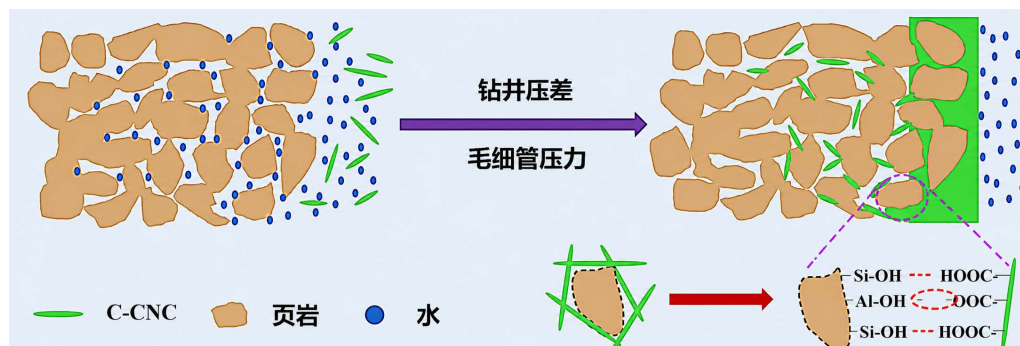


Figure 2. Schematic diagram of the mechanism by which carboxylated cellulose nanocrystals inhibit clay hydration, swelling and dispersion [14]

图 2. 羧化纤维素纳米晶体抑制粘土水化、膨胀和分散的机理示意图[14]

Cui 等[15][16]将除氧剂与交联剂协同增效, 在 200℃ 高温老化 16 小时后, 井壁稳定效果显著, 该体系表观粘度保持率为 68.6%, 能有效稳定井壁。交联结构则同时增强了聚合物的空间稳定性及在盐水中的抗收缩性, 防止因盐离子屏蔽效应而引起的分子链卷曲, 从而维持较高的表观粘度, 如图 3 所示。

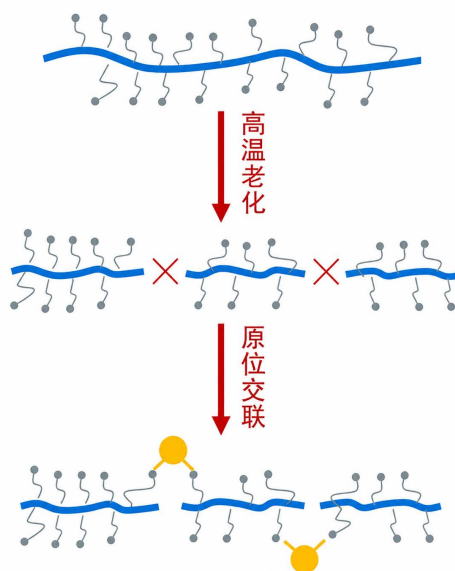


Figure 3. Schematic diagram of the *in-situ* crosslinking mechanism [15] [16]

图 3. 原位交联作用机理示意图[15] [16]

Ni 等[17][18]将除氧剂与交联剂协同使用, 在 205℃ 高温条件下, 该钻井液表观粘度保持率为 42.7%, 显著提升了体系的抗温性。交联剂可在聚合物链间生成适度交联结构及三维网络, 进而强化聚合物的结构稳定。

2.3. 封堵裂隙类

填充地层孔隙及微裂缝、阻隔水分运移是封堵类井壁稳定剂的抑制机理。以国外常用的聚合铝为例：该剂随滤液进入页岩孔隙后，因酸性增强， $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 与氢离子反应生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 凝胶堵孔；此外，聚合铝还与黏土反应生成固结性硅铝酸盐不透水层，双重阻隔滤液侵入。

Chang 等[19]在纳米木质素上接枝三种单体：N,N-二甲基丙烯酰胺(DMAM)、AMPS 和二烯丙基二甲基氯化铵，并且在水溶液中以过硫酸铵和亚硫酸钠作为引发剂，制备了新型两性聚合物 Nano-LS-g-DAD。2.0% Nano-LS-g-DAD 使钻井液表观粘度从 6.8 mPa·s 增加到 30.0 mPa·s，同时将钻井液滤失量从 10 mL (羧甲基纤维素水基钻井液)降至 4 mL (260℃/16 h)。多机制协同是性能提升的主因：首先，聚合物分子中的铵盐阳离子基团、酰胺中性基团和磺酸离子基团通过氢键和离子键的协同作用，在膨润土表面形成强吸附层并构建三维网络结构，显著改善钻井液的流变性能和滤失控制能力；其次，纳米尺寸的聚合物能够有效封闭地层的微纳米级孔隙，通过物理堵塞和表面吸附双重机制降低滤失量，同时实现对储层的保护(图 4)。

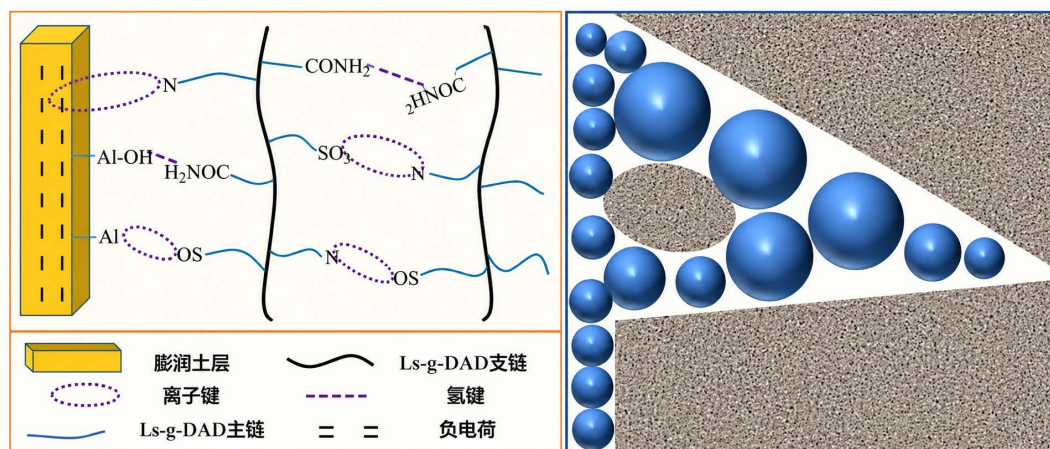


Figure 4. Schematic diagram of the filtration suppression mechanism of Nano-LS-g-DAD [19]

图 4. Nano-LS-g-DAD 抑制滤失机理图解[19]

范胜等[20]研发了以抗高温聚合物降滤失剂 HT-FL、仿生固壁剂 GBI、超疏水剂 CSSJ 和沥青封堵剂 FF-1 为核心的钻井液体系，在 200℃ 高温下，高温高压滤失量低于 8 mL，破碎岩心胶结强度提高率达 62.44%，有效增强了井壁稳定性。而 HT-FL 是一种通过引入刚性环状单体(五元环和六元环)合成的聚合物，其分子链在高温(200℃)下仍能保持稳定，不易降解。同时 CSSJ 能强烈吸附在岩石表面，将其润湿性从亲水转变为超疏水(接触角从 17.78°增大至 154.69°)。

王星星等[21]基于仿生水下粘附机理研制了 TA-PVA 和 DAAT 井壁稳定剂，通过氢键和静电作用显著增强水合物储层井壁稳定性，在-10℃下抗压强度提升最高达 58.33%。DAAT 为含邻苯二酚基团的两性离子聚合物，引入阳离子单体(DMDAAC)和磺酸基团(AMPS)，静电作用使黏土表面负电荷被中和，层间距缩小，从而抑制水化膨胀(图 5)。

Azeem Rana 等[22]将天然生物聚合物阿拉伯树胶与经电化学剥离制备的低成本石墨烯相结合，构建了一种纳米复合材料，即电化学剥离石墨烯改性阿拉伯胶。1%电化学剥离石墨烯改性阿拉伯胶不仅能使钻井液滤失量从 11.2 mL 降至 7.1 mL，还将钠基膨润土线性膨胀率由 119.2%降低至 76.6%。这一性能提升源于多重协同机制：石墨烯的共轭结构和表面杂原子通过 $\pi-\pi$ 堆积和电荷转移作用与粘土表面产生强相互作用；同时，石墨烯片层能够物理封堵纳米级孔隙，而阿拉伯胶则在粘土表面形成疏水保护层。这

种协同作用不仅有效阻隔了滤液向膨润土层的渗透, 还通过表面改性抑制了水分子进入黏土层间, 从而实现了滤失控制和水化膨胀抑制的双重效果(图 6)。

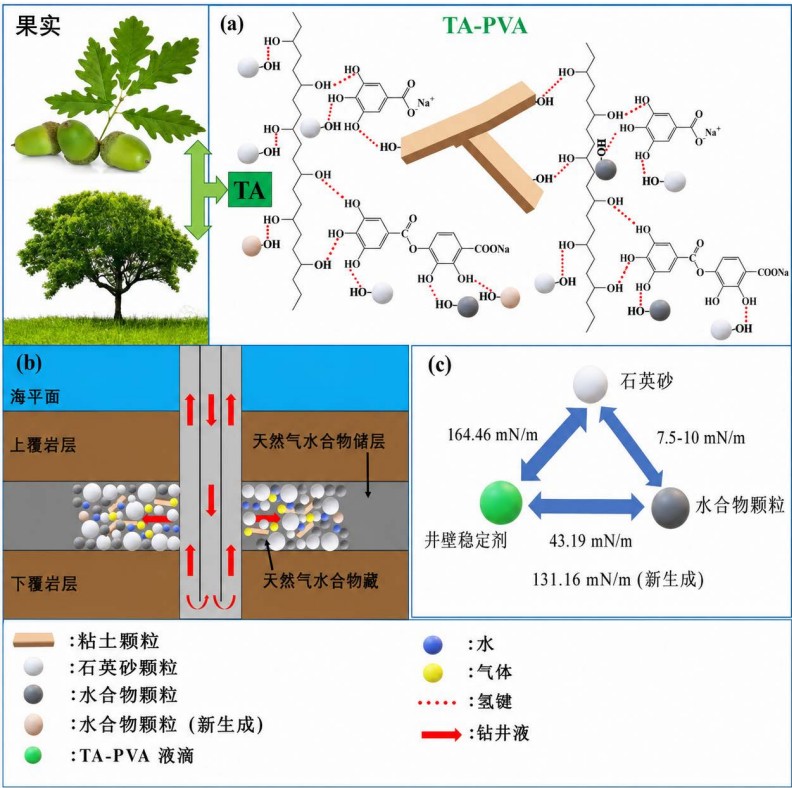


Figure 5. Wellbore stabilization mechanism of TA-PVA [21]
图 5. TA-PVA 井壁稳定机理[21]

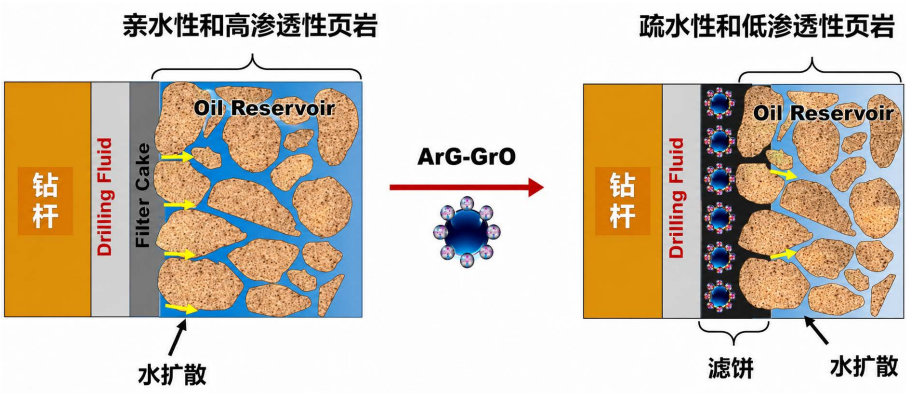


Figure 6. Mechanism of electrochemically exfoliated graphene-modified gum Arabic inhibiting hydration swelling and reducing drilling fluid filtration loss
图 6. 电化学剥离石墨烯改性阿拉伯胶抑制水化膨胀及降低钻井液滤失量机理图

2.4. 改变润湿类

黏土表面亲水易吸附水分而发生水化。加入疏水材料可改变井壁润湿性, 使其转为疏水表面, 从而提高井壁稳定性。中国石油大学开发的聚合物类超双疏剂, 能在岩石表面形成多级纳微米乳突结构, 将

泥页岩从亲水变为疏水疏油保护层, 减弱对钻井液自由水的吸引, 抑制自由水由井眼向岩壁的渗入, 实现井壁稳定与储层保护。

Zhang 等[23]向低分子量季铵盐中引入长烷基链, 制得疏水页岩抑制剂 SJAY, 在 10 g/L 加量下页岩滚动回收率提高 7 倍、接触角达 118.2° , 显著增强了井壁稳定性。SJAY 中的季铵盐阳离子可经静电作用强吸附于带负电的页岩(尤其是黏土矿物)表面, 生成稳定吸附层(图 7)。

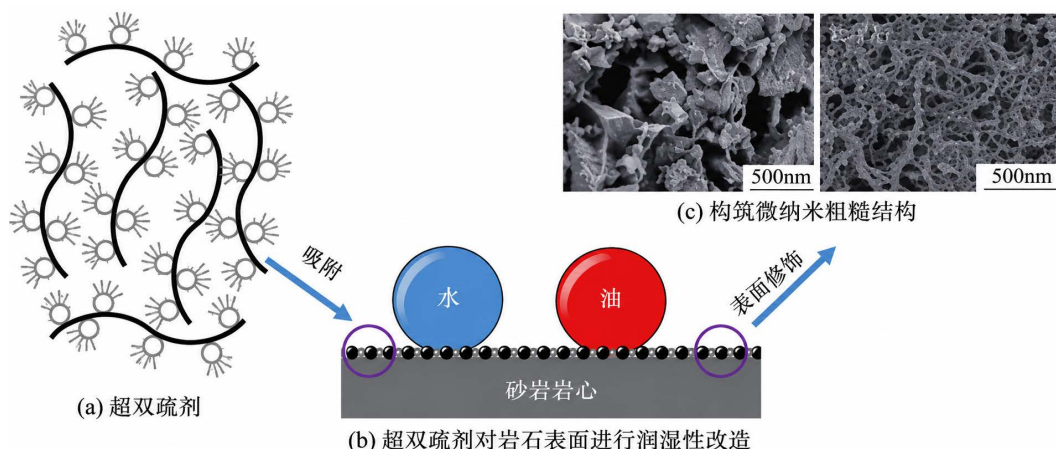


Figure 7. Superhydrophobic agents regulate the wettability and microstructure of rock surfaces [23]

图 7. 超双疏剂调控岩石表面的润湿性能及微观形貌[23]

蒋官澄等[24] [25]利用 SiO_2 和 CNT 构建微纳米粗糙结构并经氟硅烷改性, 研制出超双疏剂, 在 30 g/L 加量下使岩石表面水接触角达 165° , 岩屑回收率提高 80%, 显著增强了井壁稳定封堵性能。

2.5. 桥联包被类

桥联包被利用大分子包被剂包裹黏土颗粒, 阻止水分子接触而抑制水化。大分子聚合物因分子量、链节长, 能在黏土表面多点吸附并桥联, 阻断水与黏土的作用。同时, 包被剂在井壁形成保护膜, 有效维护井壁稳定。

张县民等[26]采用 AM、AMPS 及强吸附单体 M 合成了桥联型防塌剂 QFT, 3%加量下, 线性膨胀率下降 44.56%, 滚动回收率上升 34.1%, 且滤失性能明显提升。QFT 分子通过其链上的酰胺基($-\text{CONH}_2$)和羟基($-\text{OH}$)等强吸附基团, 与黏土表面形成氢键, 或与黏土边缘的 Al^{3+} 形成配位键, 实现层间牢固吸附。这有效地阻隔了水分子进入黏土晶层, 从源头上抑制了黏土的水化膨胀, 导致泥页岩线性膨胀量降低 44.56%。

3. 环保型钻井液研究现状

3.1. 有机盐钻井液

针对盐膏层钻井, 常规钻井液难以阻止 Na^+ 、 Ca^{2+} 进入体系, 造成流变与滤失性能劣化, 事故风险高。有机盐钻井液能很好克服此问题, 并且具备高效、低毒、环保及可回收特性, 应用广泛。该体系的作用原理是有机盐取代重晶石加重, 凭借其强电离能力, 离解出有机酸根与单价阳离子, 抑制盐膏层阳离子溶出, 实现抑制防塌及储层保护[27]。

赵俊杰等[28] [29]采用低成本有机盐 W-2 与甲酸钾复配形成钻井液基液, 老化温度 $120^\circ\text{C}\sim 180^\circ\text{C}$ 时, 岩屑滚动回收率均超过 95%, 表现出强抑制性与高温稳定性。甲酸钾与 W-2 组成的复合有机盐在水中解离出高浓度离子, 赋予钻井液高活度。当接触地层流体时, 产生由地层指向井筒的渗透压力。在此压力

下, 地层水被吸入钻井液, 而非钻井液水进入地层, 显著降低水相接触泥页岩的机会, 抑制页岩水化, 使得岩屑滚动回收率稳定超过 95%。

谢伦等[30]将有机盐含量提升至 50%, 复配纳米封堵防塌剂等材料, 构建了新型钻井液体系。该体系在 GT1 井应用后, 平均井径扩大率仅 2.81%, 井壁稳定性较对比井显著提升。配方中添加的纳米封堵防塌剂, 其颗粒尺寸极小, 能够有效侵入并封堵地层中的微米-纳米级孔喉和微裂缝, 直接于井壁四周构建出致密封堵层。

尹华洲[31]有机盐钻井液通过低水活度、离子交换及压缩双电层等机制, 在四川页岩气井中实现平均井径扩大率低于 10%, 井壁稳定效果明显。有机酸根阴离子(如羧酸根-COO-)可以依靠特性吸附作用, 直接吸附在带负电的黏土颗粒端面, 进一步中和电性并封堵水化活性位点, 增强抑制效果。

3.2. 合成基钻井液

油基钻井液抑制性好、能保障安全高效钻井, 但因污染重、环保性差, 许多国家改用合成基钻井液替代。合成基体系以改性有机物(易降解、低毒、物化性能接近矿物油)替代柴油、白油等作连续相, 辅以此盐水分散相及乳化剂、降滤失剂等构成。其有机连续相多为 C14~C22 的线性不饱和分子, 包括: 酯类(由棕榈油/椰子油水解所得脂肪酸与醇反应)、醚类(抗盐抗钙、水中稳定), 以及可逐步降解的 α -烯烃。这些连续相毒性低、BOD/COD 值小, 在需氧/厌氧条件下易生物降解[32][33]。目前国内外合成基钻井液已取得一定应用成果, 并正进一步改性以推广使用。

任鹏举等[34]通过引入 2%封堵剂 PF-MOSHIELD 优化 BIODRILL-S 合成基钻井液, 在渤海油田应用中井眼扩大率仅为 9.9%, 井壁稳定效果显著。

刘宝生等人[35]采用甲基丙烯酸甲酯为主链, 合成了吸油膨胀型自适应封堵剂 OBR-1, 在加量为 2% 时可使合成基钻井液对 20~80 目砂床承压能力达 20 MPa, 大幅提高井壁封堵强度。OBR-1 所含长链烷基酯亲油基团, 不仅与合成基钻井液良好相容, 还可吸附缠绕在岩石表面, 增强封堵层与地层之间的结合力, 防止封堵材料被冲散, 从而提高承压能力(图 8)。

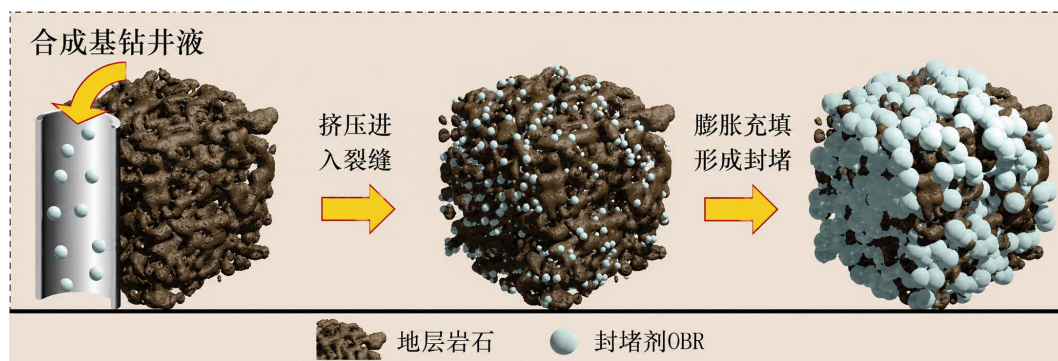


Figure 8. Plugging mechanism of OBR-1 [35]

图 8. 封堵剂 OBR-1 的封堵机理[35]

周启成等[36][37]以生物质合成树脂降滤失剂、抑制剂及润滑剂为核心, 构建了抗高温高密度生物质钻井液体系, 该体系在 200℃下岩屑滚动回收率达 94.3%, 显著增强了井壁稳定性。

郑文武等[38][39]将聚酯纤维、超细 CaCO_3 与雷特片状材料复配, 在 200℃高温下, 高温高压滤失量降至 3.0 mL, 对 4 mm 裂缝的承压能力达 2.758 MPa, 显著增强了井壁封堵层强度。聚酯纤维凭借其柔韧性在架桥骨盘中穿插、缠绕, 如同混凝土中的“钢筋”, 强化了封堵结构的整体性和韧性, 防止其在高流速下被冲散。同时, 超细 CaCO_3 颗粒进一步填充骨架内部的微小孔隙, 使封堵层变得更加致密。

3.3. 聚合醇钻井液

聚合醇钻井液兼具油基钻井液特性、环保性能且不干扰地质录井, 主要包括乙二醇/盐水、乙二醇/硅酸盐及 KCl-PHPA-乙二醇水基体系, 已在墨西哥湾、挪威、英国等地广泛应用。其作用机理有三: 浊点效应——聚合醇为非离子表面活性剂, 高温下溶解度降低而析出, 封堵泥页岩孔隙, 阻止水分子进入, 稳定井壁; 降活度——聚合醇降低钻井液水活度, 减弱水向地层迁移趋势; 吸附作用——粘土强吸附聚合醇, 在井壁形成保护膜, 抑制水化并提高润滑性[40]-[43]。

通过分子结构设计 with 浊点调控, 在水基钻井液中加入 3% LJILX 润滑抑制剂, 防膨率 $\geq 80\%$, 润滑系数降低率达 50%以上, 有效控制黏土水化, 同时增强井壁稳定[44]。LJILX 分子中含有多个羟基(-OH)等亲水基团, 能优先吸附于井壁泥页岩中的黏土表面, 形成一层稳定的水化膜。这层膜能阻断水分子与黏土矿物接触, 从而从根源上防止黏土水化膨胀及分散。

李乾等[45]将甲酸盐与聚合醇复配, 在浊点降至 49℃时岩心滚动回收率达 81.26%, 电动电位降至-9.4 mV, 使钻井液抑制性与井壁稳定性均显著增强。这些析出的聚合醇液滴和分子, 通过分子中的醚键和羟基与黏土表面形成强氢键吸附, 在井壁岩石和黏土颗粒表面形成一层疏水的隔离膜。

3.4. 可逆乳化钻井液

可逆乳化钻井液体系依靠特殊表面活性剂, 通过改变 pH 调节乳化剂亲水端离子强度, 使体系在油包水与水包油之间可逆转换。钻井时需油包水状态以发挥强抑制性, 实现快速钻进; 完井时, 由于油基钻井液滤饼清除困难、油膜影响固井, 通过加酸使体系转为酸性, 驱动乳化剂特性变化, 体系变为水包油状态, 完井作业得以顺利进行。该体系流变、滤失性能优, 低污染、低成本, 已在安哥拉、北海等地成功应用[46]-[50]。

王国师等[51]研发了基于叔胺基和动态亚胺键的 pH 响应型乳化剂 RE-HT 和 TA-CBA, 并构建了可逆乳化钻井液体系, RE-HT 抗温达 220℃、乳化稳定性优异, TA-CBA 乳化效果优于 Span-80 和硬脂酸钙, 钻井液于 pH = 4 时, 油基泥浆清除率可达 98%以上(图 9)。

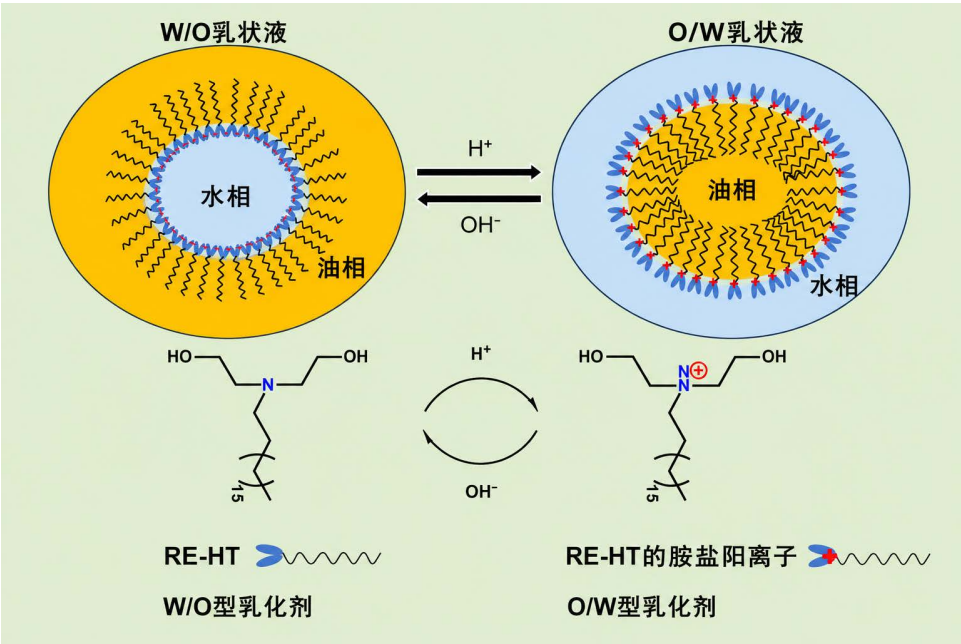


Figure 9. Mechanism of RE-HT and emulsion stimulation response [51]

图 9. RE-HT 与乳状液的刺激响应机理图[51]

刘飞等[52]以 0.8% 的改性纳米颗粒作为乳化剂构建可逆乳化钻井液(图 10), 耐温达 180℃; 经 180℃ 热滚 16 h 后, 破乳电压高于 1000 V, 高温高压滤失量低于 8 mL, 且含油钻屑经酸处理 5 h 后完全分散。

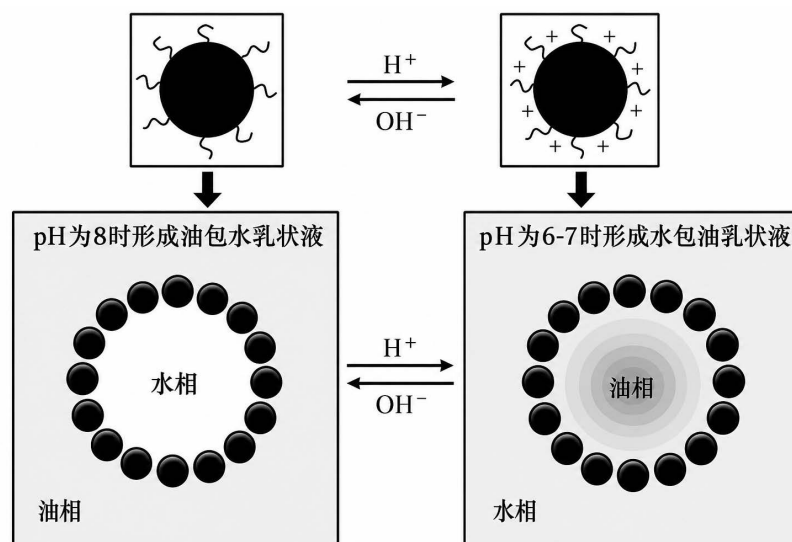


Figure 10. Reversible phase transition process of reversible emulsion prepared by modified nanoparticle emulsifier
图 10. 由改性纳米颗粒乳化剂制得的可逆乳液的可逆相变过程

梁大川等[53][54]采用酰胺化反应将有机酸与氨基乙基乙醇胺合成乳化剂 EMUL-GP, 而后与烷基苯磺酸钠以 3:2 的质量比混合, 应用于可逆乳化钻井液, 在油水比 7:3、乳化剂用量 4% 时, 破乳电压达 1652 V, 电导率为 0.11 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 200℃ 高温老化后高温高压滤失量低于 6 mL, 可阻止钻井液渗入地层, 从而维持井壁稳定。

3.5. 环境友好型水基钻井液

水基与油基钻井液的主要差异体现在抑制性。常规水基体系常添加 KCl 来获得抑制性, 但 K^+ 置换能力强, 会置换出黏土颗粒中的多价阳离子, 压缩双电层、破坏黏土结构, 导致土壤板结。近年开发的聚胺抑制剂体系则抑制效果好, 且兼具抗温、廉价、低毒环保等优点, 已在国内外广泛应用[55][56]。

胡进军等[57]采用天然惰性微米材料与纳米改性材料复配制成环保封堵剂 GS, 配合润滑剂 GL 与抑制剂 GG, 使 GREEN-DRILL 钻井液岩心渗透率恢复率超过 90%, 对蒙古裸腹蚤 72 h 半致死浓度大于 60,000 mg/L, BOD_5/COD 比值达 67.5%, 满足海洋一级排放标准。

夏小春等[58]以植物油脂为油相、多元醇水溶液为水相, 并采用 HLB 值为 6~7 的复合表面活性剂作乳化剂, 制得水基润滑剂 GreenLube, 其 BOD_5/COD 值达 0.95, 96 h 半致死浓度为 35 981 mg/L, 按 30 kg/m^3 加入, 可使淡水基浆扭矩减少 69%, 润滑系数降至 0.14~0.16, 满足海洋一级排放标准。

孙强等[59]采用含疏水脂肪烃和有机阳离子基团的抑制剂 GGD, 使页岩 16 h 线性膨胀率由 59% 降至 34%, 岩屑滚动回收率达 97.38%, 半致死浓度大于 32,000 mg/L, 渤海湾曹 21 井 1300 m 裸眼段裸露 12 天, 井壁稳定性良好。

4. 阳离子聚丙烯酰胺聚合物研究进展

阳离子聚丙烯酰胺聚合物水溶性好、呈线性, 常用共聚阳离子单体有三种[60]-[62]: ① 甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC, 分子式 $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$), 其正电荷 N 原子距双键远、空

间位阻小, 易生成高分子量长链产物, 分子量大、水溶性好、环保, 常用作絮凝剂; ② 丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC, 分子式 $\text{CH}_2=\text{CHCOOCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$), 比 DMC 少一个甲基, 空间位阻更小、水溶性更大、分子链更舒展, 与丙烯酰胺共聚后易在污染物表面形成密实聚集体, 减少分散; ③ 二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC, 分子式 $\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$), 其分子链可形成带电五元/六元环, 正电荷密度高、高效无毒, 分子量较小, 能压缩黏土双电层、抑制膨润土水化膨胀, 常用作石油领域的井壁稳定剂。

线性水溶性好的阳离子聚丙烯酰胺聚合物, 常见共聚单体包括 DMC、DAC 和 DMDAAC [60]-[62]。DMC($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$)因正电荷 N 远离双键, 位阻小, 利于合成长链高分子, 分子量大、水溶环保, 常用作絮凝剂。DAC($\text{CH}_2=\text{CHCOOCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$)较 DMC 少一个甲基, 位阻更小、溶解度更大、链更舒展, 与丙烯酰胺共聚后吸附污染物易形成密实聚集体。DMDAAC($\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$)链上可形成带正电五/六元环, 电荷密度高、无毒, 分子量小, 能压缩黏土双电层、抑制水化膨胀, 成为石油领域重要的井壁稳定剂。

三种主要阳离子单体常用于合成水溶性线型阳离子聚丙烯酰胺[60]-[62]: DMC 位阻小, 生成高分子链, 可作絮凝剂; DAC 位阻更小, 溶解度大, 链舒展, 吸附后形成密实聚集体; DMDAAC 形成带电环状结构, 正电荷密度高, 分子量小, 抑制黏土水化, 用作石油井壁稳定剂。

5. 总结

随着深井、高温、高压钻井作业的不断发展, 水基钻井液中固壁剂的应用成为保障井壁稳定和储层保护的重要技术手段。本文系统梳理了固壁剂的研究进展, 重点剖析了其作用机理与应用特性。固壁剂可通过降低钻井液水活度、增强液相粘度、封堵地层孔隙和微裂隙、改变井壁润湿性以及桥联包被黏土颗粒等多重途径, 显著抑制黏土水化膨胀与分散, 进而大幅增强井壁稳定性。

典型固壁剂包括水活度调节剂、增粘液相剂、裂隙封堵剂、润湿性调节剂和桥联包被聚合物等, 在深井及复杂地层中抑制效果良好。此外, 有机盐、合成基、聚合醇、可逆乳化等环保钻井液体系的进步, 为固壁剂提供了新的应用途径, 既提高了井壁稳定性, 又实现了环保要求, 适用于深井及复杂地层, 抑制效果突出。阳离子聚丙烯酰胺类聚合物作为代表性材料, 在抑制泥页岩水化膨胀和改善滤失控制方面显示出重要价值。

总体来看, 水基钻井液固壁剂的发展趋势集中在多功能化、纳米化、仿生化和环保化方向。未来的研究可进一步结合分子设计、材料改性和多机制协同策略, 提升固壁剂的高温耐压性能和井壁保护能力, 使复杂地层与深井钻井获得更可靠的技术保证。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2520149)。

参考文献

- [1] 刘钦甫, 许红亮, 张鹏飞. 煤系不同类型高岭岩中高岭石结晶度的区别[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 576-580.
- [2] Wieland, E. and Stumm, W. (1992) Dissolution Kinetics of Kaolinite in Acidic Aqueous Solutions at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 3339-3355. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90382-s](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90382-s)
- [3] 徐仁扣, 肖双成. 氧化铁的存在方式对土壤和黏土矿物胶体动电电位的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 945-947.
- [4] 孙方龙, 张承钰. 新型活度调节剂的合成与低活度水基钻井液的应用[J]. 科技和产业, 2024, 24(4): 247-253.
- [5] 刘成, 张连红. 低共熔溶剂及其应用的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(4): 43-47.
- [6] 石升友, 李水娥, 刘祥伟. 低共熔溶剂的应用研究现状[J]. 化学通报, 2022, 85(5): 583-589.

- [7] 王广财, 刘万成, 任运, 等. 一种强抑制低活度卤水基钻井液体系[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(4): 503-508.
- [8] 罗鸣, 高德利, 黄洪林, 等. 钻井液对页岩力学特性及井壁稳定性的影响[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(6): 693-700.
- [9] 李雨洋. 钻井液封堵性能对泥页岩井壁稳定的影响研究[J]. 石化技术, 2023, 30(5): 148-150.
- [10] 王波, 林进, 吴金桥, 等. 延安地区陆相页岩气水平井低自由水活度水基钻井液技术矿场实践[J]. 特种油气藏, 2025, 32(2): 154-161.
- [11] 金衍, 薄克浩, 张亚洲, 等. 深层硬脆性泥页岩井壁稳定力学化学耦合研究进展与思考[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 159-169.
- [12] 王翔, 冯永超. 鄂尔多斯盆地南缘华北探区页岩油储层岩石力学特性实验研究[J]. 非常规油气, 2024, 11(1): 110-118.
- [13] 曹伶, 于培志. 低活度水基钻井液体系中的活度调节剂的研究与应用[J]. 应用化工, 2022, 51(8): 2344-2347, 2361.
- [14] Shen, X., Jiang, G., Li, X., He, Y., Yang, L., Cui, K., *et al.* (2021) Application of Carboxylated Cellulose Nanocrystals as Eco-Friendly Shale Inhibitors in Water-Based Drilling Fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **627**, Article ID: 127182. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127182>
- [15] 崔鸿儒. 水基钻井液用抗高温抗盐增粘剂研究与评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [16] 赵小平, 孙强. 环境友好型水基钻井液技术研究新进展[J]. 山东化工, 2018, 47(20): 52-53.
- [17] 倪天姿, 王昌军, 吴宇. 无固相水基钻井液用抗高温增粘提切剂的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(4): 1157-1163.
- [18] 高鑫, 钟汉毅, 邱正松, 等. 钻井液用 β -环糊精聚合物微球降滤失剂的制备[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(1): 21-26.
- [19] Chang, X., Sun, J., Xu, Z., Zhang, F., Wang, J., Lv, K., *et al.* (2019) A Novel Nano-Lignin-Based Amphoteric Copolymer as Fluid-Loss Reducer in Water-Based Drilling Fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **583**, Article ID: 123979. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123979>
- [20] 范胜, 蒋官澄, 易浩, 等. 抗高温封堵固壁防塌水基钻井液研究与应用[J]. 钻采工艺, 2023, 46(2): 146-152.
- [21] 王星星. 天然气水合物地层水基钻井液井壁稳定剂研制及作用机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2024.
- [22] Rana, A., Murtaza, M., Saleh, T.A., Shahzad Kamal, M. and Mahmoud, M. (2023) Green Nanocomposite Synthesis and Application: Electrochemically Exfoliated Graphene-Modified Biopolymer as an Effective Clay Swelling Inhibitor for Water-Based Drilling Muds. *Geoenergy Science and Engineering*, **231**, Article ID: 212394. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212394>
- [23] 章超, 孙金声, 吕开河, 等. 疏水材料在油田化学领域研究进展与展望[J]. 化工进展, 2024, 43(11): 6293-6309.
- [24] 张县民, 蒋官澄, 付建国, 等. 无土相水基钻井液超分子增黏提切剂的研制[J]. 特种油气藏, 2017, 24(2): 160-164.
- [25] 蒋官澄, 杜明亮, 贺垠博, 等. 聚合物水基钻完井液的迭代创新发展及面临的技术挑战[J]. 建井技术, 2026, 47(3): 1-11.
- [26] 张县民, 蒋官澄, 宣扬, 等. 钻井液用高效桥联型防塌剂的研发及现场应用[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 39-44.
- [27] 吴国邦, 胡超, 刘伟, 等. 盐穴储气库钻井过程中配套钻井液技术应用研究[J]. 盐科学与化工, 2022, 51(9): 41-43, 47.
- [28] 赵俊杰, 万小刚, 白璐, 等. 复合有机盐钻井液的制备与性能研究[J]. 盐科学与化工, 2025, 54(9): 45-48.
- [29] 王养锋, 刘智勤, 陈力, 等. 有机盐-聚合物钻井液在北部湾大斜度井中的应用[J]. 广东化工, 2023, 50(4): 58-60.
- [30] 谢伦, 于建立, 于庆河, 等. GT1 井抗高温有机盐钻井液技术[J]. 石油工程建设, 2024, 50(z1): 81-85.
- [31] 尹华洲. 有机盐钻井液技术研究与应用现状[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(10): 54-56.
- [32] Rye, H., Reed, M., Frost, T.K. and Røe Utvik, T.I. (2006) Comparison of the ParTrack Mud/Cuttings Release Model with Field Data Based on Use of Synthetic-Based Drilling Fluids. *Environmental Modelling & Software*, **21**, 190-203. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.018>
- [33] 罗跃, 王志龙, 梅平, 等. 合成基钻井液技术研究进展[J]. 湖北化工, 1999, 16(2): 9-10.
- [34] 任鹏举, 胡国金, 韩超, 等. BIODRILL-S 合成基钻井液体系室内研究及在渤海油田的应用[J]. 海洋石油, 2025, 45(3): 95-101.
- [35] 刘宝生, 汤柏松, 霍宏博, 等. 渤海浅层大位移井合成基钻井液自适应高承压封堵剂[J]. 钻井液与完井液, 2025,

- 42(5): 587-593.
- [36] 周启成, 梁应红, 单海霞, 等. 抗高温高密度生物基钻井液体系研究及应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 78-84.
 - [37] 周启成, 张弢, 单海霞, 等. 东濮凹陷生物基合成基钻井液技术[J]. 油田化学, 2026, 43(1): 1-7.
 - [38] 郑文武, 刘福, 等. 合成基钻井液用复合堵漏剂的研究[J]. 精细石油化工进展, 2025, 26(2): 6-11.
 - [39] 郑文武, 田茂明, 刘福, 等. 复合盐防塌钻井液技术应用研究[J]. 化工管理, 2019(32): 125-126.
 - [40] Alkinani, H.H., Al-Hameedi, A.T.T. and Dunn-Norman, S. (2020) Data-Driven Decision-Making for Lost Circulation Treatments: A Machine Learning Approach. *Energy and AI*, 2, Article ID: 100031. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100031>
 - [41] 李杰, 冀璐. 聚合醇钻井液的研究与应用进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(3): 152-154.
 - [42] 迟建功. 高性能聚合醇钻井液体系在水平钻井中应用研究[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(6): 64-66.
 - [43] 邱康, 雷新超, 贾凤龙, 等. 氯化钾聚合醇钻井液在涪西区块定向井应用效果分析[J]. 海洋石油, 2016, 36(3): 93-97.
 - [44] 蒋巍. 海上硅酸钠聚合醇钻井液的研制[J]. 石油化工高等学校学报, 2019, 32(4): 52-57.
 - [45] 李乾, 杜明锋, 黄达, 等. 甲酸盐聚合醇钻井液在 WZ 油田储层段应用的研究分析[J]. 海洋石油, 2021, 41(4): 73-79, 89.
 - [46] 刘强, 王宇哲, 黄兵华. 一种新型的油基钻井液——可逆乳化油基钻井液的研究[J]. 广东化工, 2013, 40(17): 27-29.
 - [47] 吴满祥, 杨斌, 卓绿燕, 等. 国外新型可逆乳化钻井液技术发展现状[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(9): 47-49.
 - [48] 苏秀纯, 赵庆, 马颖洁, 等. 可逆的逆乳化钻井液——钻井液技术的重大飞跃[J]. 国外油田工程, 2001, 17(4): 18-22, 24.
 - [49] Liu, F., Li, Y., Wang, X. and Xia, Z. (2024) Preparation and Properties of Reversible Emulsion Drilling Fluid Stabilized by Modified Nanocrystalline Cellulose. *Molecules*, 29, Article 1269. <https://doi.org/10.3390/molecules29061269>
 - [50] Liu, F. and Wang, Y.L. (2017) Synthesis and Performance Study of the Nanomaterial Used to Stabilize the Reversible Invert Emulsion Drilling Fluid. *Key Engineering Materials*, 744, 498-505. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.744.498>
 - [51] 王国帅. pH 响应型乳化剂刺激响应机理及可逆乳化钻井液研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
 - [52] 刘飞, 王彦玲, 郭保雨, 等. 改性纳米颗粒稳定的可逆乳化钻井液的制备与性能[J]. 化工进展, 2017, 36(11): 4200-4208.
 - [53] 王瑜, 梁大川, 王博, 等. 钻井液高温保护剂 EGC-D 的评价[J]. 化学世界, 2019, 60(7): 457-464.
 - [54] 沈启航, 梁大川, 王瑜, 等. 基于乳化剂 EMUL-GP 可逆乳化钻井液的研制与性能评价[J]. 化学世界, 2020, 61(4): 298-304.
 - [55] 王睿, 马光长. 环保型天然高分子水基钻井液的研究与现场应用[J]. 精细石油化工进展, 2009, 10(12): 15-17, 21.
 - [56] 李靖. 环保型水基钻井液用抗温耐盐降滤失剂研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
 - [57] 胡进军, 孙强, 夏小春, 等. 环境友好型水基钻井液 GREEN-DRILL 的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 75-79.
 - [58] 夏小春, 胡进军, 孙强, 等. 环境友好型水基润滑剂 GreenLube 的研制与应用[J]. 油田化学, 2013, 30(4): 491-495.
 - [59] 孙强, 胡进军, 冀腾, 等. 环境友好型水基钻井液抑制剂 GGD 研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(6): 27-28, 32, 93.
 - [60] 刘福胜, 李志文, 于世涛. 甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵和丙烯酰胺的光辅助引发聚合[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(2): 22-25.
 - [61] 李娟, 沈士军, 刘晓燕, 等. 二甲基二烯丙基氯化铵聚合物研究新进展[J]. 精细石油化工进展, 2012, 13(9): 48-53.
 - [62] 李佳. 两性离子聚合物抑制剂及抑制性水基钻井液研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.