

钻井液用环保型降滤失剂的研究与进展

陈方帅, 陈俊杰, 张思蕊, 任 壕, 徐建根*

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月22日; 发布日期: 2025年7月9日

摘 要

钻井液用降滤失剂能够有效防止钻井液进一步滤失、降低污染等, 然而, 其往往不易被生物分解, 残留的反应单体或会对环境产生负面影响。随着环保理念的深入人心以及相关法规的日益严苛, 钻井作业对钻井液性能的要求也日益提升, 不仅需要其满足复杂地质条件下的作业需求, 更要确保在整个作业过程中对环境的影响降至最低。在此背景下, 环保型降滤失剂应运而生, 并成为当前钻井液领域研究的重点与热点。本文系统介绍了淀粉类、腐殖酸类、纤维素类、木质素类及其他天然产物类降滤失剂的性质和作用机理。并在此基础上, 针对当前钻井液降滤失剂的技术问题, 提出钻井液用环保型降滤失剂的发展趋势, 为“安全、环保、优质、高效”的油气钻探井提供技术支持。

关键词

水基钻井液, 滤失造壁性, 降滤失剂, 环保型

Research and Progress of Environment Friendly Fluid Loss Additives for Drilling Fluids

Fangshuai Chen, Junjie Chen, Sirui Zhang, Hao Ren, Jiange Xu*

College of Oil and Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 22nd, 2025; published: Jul. 9th, 2025

Abstract

The fluid loss additive for drilling fluid can effectively prevent further fluid loss of the drilling fluid and reduce pollution, etc. However, it generally resists biodegradation, and the residual reactive monomers could pose environmental risks. With the increasing popularity of environmental protection

*通讯作者。

文章引用: 陈方帅, 陈俊杰, 张思蕊, 任壕, 徐建根. 钻井液用环保型降滤失剂的研究与进展[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 681-686. DOI: 10.12677/me.2025.134077

concepts and the growing strictness of relevant regulations, the requirements for the performance of drilling fluids in drilling operations are also rising day by day. It is required not only to meet the operational needs under complex geological conditions but also to ensure that the impact on the environment during the entire operation process is minimized. Against this backdrop, environmentally friendly fluid loss additives have emerged as the times require and have become the focus and hotspot of current research in the field of drilling fluids. This paper systematically introduces the properties and action mechanisms of fluid loss additives such as starch-based, humic acid-based, cellulose-based, lignin-based, and other natural product-based ones. On this basis, aiming at the current technical problems of drilling fluid fluid loss additives, the development trends of environmentally friendly fluid loss additives for drilling fluids are put forward, providing technical support for “safe, environmentally friendly, high-quality, and efficient” oil and gas drilling operations.

Keywords

Water-Based Drilling Fluid, Fluid Loss and Wall-Building Property, Fluid Loss Additive, Environment Friendly

Copyright © 2025 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

随着石油工业的迅速发展, 钻井液技术也经历了前所未有的变革与发展。寻常的降滤失剂抗温性不高, 且用于钻井液中容易产生“三废”, 对环境造成一定程度的污染。为积极响应构建生态文明社会号召, 研发适用于高温深层钻井工程且具备环保特性的关键处理剂, 目前已成为钻井液技术研究的焦点之一。在钻井过程中, 钻井液中的自由液相会受压差作用不可避免地通过井壁滤失到地层中, 产生钻井液滤失。同时钻井液中的固相颗粒会附着在井壁上形成“滤饼”, 可有效防止钻井液进一步滤失, 并且还能起到保护井壁的作用[1][2]。但是在滤饼井壁形成的过程中, 如果滤失量过大, 形成的滤饼井壁过厚, 或细固相颗粒随液相进入地层, 易引起页岩膨胀和坍塌, 造成井壁不稳定或复杂泥岩地层井眼缩径, 造成压差卡钻等复杂情况[3], 并且在钻井过程中, 钻井液也会对环境造成一定污染[4][5]。故而, 往往需要向钻井液中投入降滤失剂, 来维持适当的细颗粒比例, 使井壁上构建出厚度小、结构紧密且渗透率低的滤饼, 达到降低滤失量, 维护钻井液性能稳定, 保障钻采安全高效等方面的效果[6][7]。

目前油田使用的降滤失剂有很多种, 每个种类之间的性能也不一样。合成聚合物类降滤失剂高性能产品成本高, 分子量和交联控制难度大, 容易多种物质存在配伍冲突, 影响钻井液性能, 且有单体残留, 生物降解难, 具生态毒性。而天然材料改性类降滤失剂满足环保要求, 但现场使用时存在黏度损失导致钻井液流变性变差、较高地层温度下易降解, 容易被 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 污染等问题, 造成复杂的井下情况, 限制其应用范围[8]。因此, 研究和开发出环保型降滤失剂对推动我国油气钻探向“安全、环保、优质、高效”方向发展意义重大[9]。基于此, 笔者对钻井液用降滤失剂的研究进展进行了概述, 针对当前钻井液降滤失剂的技术问题, 提出了环保型降滤失剂的发展趋势, 以期望对国内环保抗温高效的新型降滤失剂的开发提供帮助。

2. 钻井液用环保型降滤失剂的研究概况

2.1. 淀粉类降滤失剂

淀粉类降滤失剂在钻井液中的应用历史颇为悠久, 可追溯至 80 余年前。然而, 由于天然淀粉水溶性

差,在钻井液体系中难以实现均匀分散,流动性欠佳,且分子结构单一,无法满足复杂多变的钻井工况对性能的多样化需求,极大地限制了其在钻井液中的广泛应用。尤为突出的是,在高温环境下,天然淀粉会致使钻井液粘度过高,严重干扰钻井液的流变性能。为有效克服这些弊端,科研人员积极开展研究,采用接枝或交联等化学反应手段对天然淀粉进行改性。交联改性主要通过构建三维网状结构提升淀粉热稳定性,在高温下保持良好降滤失效果,但过度交联易导致水溶性下降、与钻井液其他成分相容性变差,适合对耐温性要求极高的深井作业。而接枝改性通过引入特定功能单体,显著改善淀粉的耐温抗盐性能,例如赵凯强[10]等通过接枝聚合法合成出一种改性淀粉,通过正交实验确定最佳合成条件: $m(\text{淀粉}):m(\text{丙烯酸胺}):m(\text{KGM})=3:5:2$ 、引发剂加量为0.9%、反应温度为65℃。改性淀粉评价结果表明,改性淀粉耐温达到200℃,抗盐达到饱和,抗 CaCl_2 达到2.5%,无生物毒性,易降解,但其反应需精准控制原料配比、引发剂用量及温度等条件,工艺要求高,适用于高温高盐等复杂深井工况。

2.2. 腐殖酸类降滤失剂

腐殖酸分子中含有的多数官能团都易吸着在黏土颗粒表面,以及一些强水化基团,为腐殖酸带来显著降滤失能力和降粘效果。虽然其会与钙离子 Ca^{2+} 反应生成难溶于水的腐殖酸钙沉淀,但适量的腐殖酸钙沉淀可作为泥饼的填隙物质,填充泥饼孔隙,降低泥饼渗透率,进而优化泥饼质量,提升降滤失效果[11]。以王中华[12]等制备的新型腐殖酸接枝共聚物(AOBS-AM-AA)为例,通过接枝丙烯酰氧丁基磺酸(AOBS)、丙烯酰胺(AM)及丙烯酸(AA),该共聚物的抗温抗盐性能得到大幅提升。在240℃高温老化16h后,随着接枝共聚物用量的增加,钻井液的滤失量大幅度降低。当其在淡水钻井液中加量2%以上时,滤失量比室温还低;在盐水钻井液中接枝共聚物加量为2.5%时,可使钻井液的滤失量由基浆的200 mL下降至18 mL;在饱和盐水钻井液中加量4%时可使滤失量由基浆的260 mL下降至11.6 mL。虽然从成本角度分析,引入的特殊单体如AOBS价格较高,且合成步骤相对复杂,导致了生产成本显著增加,但其克服了天然腐殖酸在高温环境下性能衰减、与钙离子反应易产生沉淀的缺陷,适用于高温、高盐等复杂恶劣的钻井环境。

2.3. 纤维素类降滤失剂

纤维素属于可再生天然物质资源,具备极高的利用价值,其单体为 β -葡萄糖,聚合度较高,分子内和分子间存在强烈的氢键作用。这使得纤维素材料在抗温性能方面相较于淀粉具有明显优势。然而,纤维素的水溶性较差,无法直接应用于水基钻井液中,必须经过适当的化学改性才能发挥作用。以羧甲基纤维素(CMC)为典型代表的纤维素类降滤失剂,具有原料来源丰富、价格相对低廉以及生产工艺简便等优点。但CMC在钻井液中的抗温能力有限,一般仅能达到130℃~140℃,且抗高价离子污染和抗盐能力也较为薄弱。为突破这些性能瓶颈,科研人员开展了大量深入研究,以醚化反应为核心手段,通过引入特定官能团有效改善其水溶性与降滤失性能。如王伟吉[13]制备的纳米纤维素降滤失剂CNCFL-1,其采用硫酸水解制备纳米纤维素晶体后与氯乙酸进行醚化反应,显著提升了纤维素基降滤失剂的综合性能。CNCFL-1加量仅1%时就能使4% NaCl盐水膨润土基浆经160℃、16 h热滚后的滤失量降低至17.2 mL,相比于PAC-LV降低至25.4 mL、CMC-LV降低至32.6 mL,CNCFL-1降滤失效果更优。不过其制备工艺复杂,需精准控制条件,且在高价钙、镁离子环境中性能仍有衰减风险,还可能影响钻井液流变特性,适用于160℃以下、中高盐度钻井环境。

2.4. 木质素类降滤失剂

木质素的分子结构中富含大量的芳香基、酚羟基等活性基团,这些活性基团赋予了木质素丰富的化学反应活性,使其能够进行氧化还原、水解等多种化学反应。同时,木质素具有可再生性和可利用性,

为其在钻井液降滤失剂领域的应用奠定了良好基础。近年来,以木质素为基础的功能性产品研发工作日益活跃,受到了广泛关注。例如,王平全[14]等通过在木质素上接枝单体 AM、AOPS、CaSL,研制出一种改性木质素类降滤失剂,经过接枝改性,拓展了木质素的分子结构,使其在不同酸碱环境和盐度条件下仍能保持稳定,提升了产品的环境适应性。实验数据显示,经 180℃/16 h 高温老化后,聚合物在淡水钻井液中加量为 2.5%即可有效地控制钻井液的 FL_{API} 降至 11.6 mL, FL_{HTHP} 降至 18.8 mL;在 4.0%盐水钻井液中加量为 3.5%即可使 FL_{API} 降至 14.8 mL, FL_{HTHP} 降至 21.8 mL;在饱和盐水钻井液中加量为 3.5%时,即可控制 FL_{API} 小于 15 mL, FL_{HTHP} 小于 30 mL。其表现出优异的降滤失效果,同时维持了稳定的流变性能,有效解决了木质素直接应用时性能不足的问题,适用于常规中低温、中低盐度的钻井环境。但从环保角度看,当前木质素磺酸盐类产品常与铁、铬等重金属体系配合使用,会造成环境污染,不符合当下绿色钻井的环保理念。

2.5. 其他天然产物类降滤失剂

除了淀粉、腐殖酸、纤维素及木质素等常见天然产物外,还有众多其他天然产物直接或经过改性用作降滤失剂,具备不同的功能特性,以适应多样化的钻井工况。这些天然产物具有来源广泛、成本相对合成材料较低以及生产工艺简单等显著优势。并且,它们大多能与钻井液中的各种成分良好相容,有效减少复杂化学反应的发生,有利于维持钻井液体系的稳定性。如唐玲娟[15]等通过组成分析天然岩沥青和传统沥青两种降滤失剂的有效降滤失组分含量,传统沥青有效降滤失含量仅有 66.36%,加入钻井液体系后易增黏;而天然岩沥青中有效降滤失组分含量为 100%,加入钻井液体系后不增黏。还对天然岩、传统沥青降滤失剂测试了不同温度老化 16 h 后的降滤失性能,得到在温度为 200℃时,加入天然岩沥青降滤失剂的油基钻井液滤失量仅为 4 mL,能够满足高温井施工需求;而加入传统沥青降滤失剂的油基钻井液在测试温度高于 180℃时滤失量超过 6 mL,降滤失效果较差。结果表明,天然岩沥青降滤失剂安全环保,与传统沥青降滤失剂相比性能突出,对油基钻井液体系性能变化影响小,可用于环保油基钻井液体系。

3. 钻井液用环保型降滤失剂的发展趋势

近些年,我国水基钻井液降滤失剂研究持续推进,部分产品已具备国际领先水平,然而,抗温抗盐性能差、环境友好性不足等技术难题仍旧存在,制约着油气钻探向“安全、环保、优质、高效”发展。故而,研发一种环保抗温高效的新型降滤失剂以解决上述问题势在必行。要想取得更大的经济、环境和社会效益,今后应着重开展如下几个方面降滤失剂的研究。

3.1. 抗高温的环保型降滤失剂

随着油气资源勘探不断向深部地层发展,一些高温深井以及地质条件复杂井使得钻井液的抗温性能面临严重挑战[16],未来的抗高温降滤失剂的标准或许将是耐受 200℃以上甚至更高的温度[17]。传统降滤失剂在高温作用下,滤失效果往往会大打折扣。从热稳定性来看,像聚合物类降滤失剂,在 150℃左右就容易出现高温降解的情况,一旦降解,分子结构被破坏,无法有效在井壁形成致密泥饼,导致钻井液滤失量增大。因此研制能耐受 200℃以上高温且环保的新型降滤失剂非常迫切[18]。

针对传统降滤失剂高温失效、环保性能差、成本较高等问题,可尝试从原料创新与工艺革新两方面进行工艺优化,从而突破技术瓶颈。首先,在新型原料方面,可以通过深度改性天然高分子材料,比如对木质素磺甲基化、接枝共聚改性,或对纤维素醚化、酯化,在具有良好生物降解性的同时,将抗温性能提升至 200℃以上;也可选择具有低挥发性、高热稳定性和结构可设计性的离子液体,使降滤失剂抗高温性能、生物降解性优良;还可选用超支化聚合物,凭借其高度支化的分子结构降低钻井液黏度,拥有良好的溶解性与热稳定性,可有效改善钻井液流变性能。在合成工艺方面,实施复合改性方法,可以将

纳米二氧化硅、石墨烯等耐高温材料与天然高分子复合,利用纳米材料的增强效应弥补单一材料性能短板,减少特殊原料的用量。也可采用可控聚合技术,比如原子转移自由基聚合、可逆加成-断裂链转移聚合,控制聚合物分子链结构与分子量分布,增强分子间作用力,提升热稳定性。通过上述优化策略,有望研发出具备抗高温、环保、经济与高适配性的新型降滤失剂,克服高温高压钻探不理想的问题。

3.2. 抗盐的环保型降滤失剂

在钻探深井和超深井的过程中,钻遇盐膏层等富含盐分的地层现象愈发常见。在高盐环境下,传统降滤失剂中的高分子链会由于盐离子的作用发生聚沉,故而破坏钻井液的胶体稳定性,使滤饼疏松、滤失量增大,不仅影响了钻井效率,还可能损害油气层。当前,抗盐降滤失剂虽有一定发展,但其在环保性能上存在明显不足。部分抗盐性能较好的处理剂,多为不可降解的化学合成物,在环境中难以降解。

未来,抗盐环保型降滤失剂研究应沿多技术融合的方向深入发展。一是在天然高分子材料改性方面,应加强改进纤维素、壳聚糖等天然高分子材料的化学改性技术,通过接枝、磺化等改性手段,将羧基、磺酸基等抗盐官能团定向引入高分子链。如采用自由基接枝聚合技术,将含磺酸基单体与纤维素主链结合,提升其在高盐环境下的稳定性。二是可通过分子模拟技术,解析聚合物分子与盐离子的相互作用,从分子层面设计出具有特殊空间构象与功能基团的可生物降解聚合物。例如,通过模拟优化分子链排列与官能团分布,开发出含有多重氢键网络或环状结构的聚合物,使其在盐溶液中保持稳定构型,持续发挥降滤失作用。三是在材料复合与优化方向,可通过研究不同材料间的协同效果,进行性能互补与增效。例如,将纳米黏土与抗盐聚合物复合,利用纳米材料的增强效达到改善泥饼质量的目的。通过上述技术路线和研究方向,未来针对不同盐膏层的矿物组成、含盐浓度等特性,有望开发出优良的抗盐环保型降滤失剂产品,推动钻井液技术向前进步。

4. 结语

如今,随着全球对于环境保护的重视程度不断提高,钻井液用环保型降滤失剂在石油勘探开发领域的重要性愈发凸显。从原料选择到合成工艺,从性能提升到应用拓展,环保型降滤失剂正沿着绿色、高效、多元化方向持续发展。尽管环保型降滤失剂已取得一些进展,但石油开采环境的复杂性及多样性决定了研发之路仍任重道远,仍面临着巨大的环境压力、更复杂的地质条件和较高使用成本等问题,须进一步优化原料创新与工艺革新,加强多技术融合,研发出抗高温、抗盐、环保、高效、经济于一体的新型降滤失剂。这不仅有助于推动钻井液技术迈向新高度,也将为“安全、环保、优质、高效”的油气钻探并提供技术支撑。

基金项目

重庆科技大学大学生科技创新训练项目(项目编号:2024201011)。

参考文献

- [1] 陈琳. 钻井液用降滤失剂专利技术研究进展[J]. 广东化工, 2018, 45(5): 163-164+170.
- [2] 陈思琪. 钻井液用淀粉微球降滤失剂的研制[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
- [3] 吴鑫磊, 闫丽丽, 王立辉, 等. 环保型钻井液用降滤失剂研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(3): 8-16.
- [4] 鲍鹏. 环保型钻井液体系制备及应用效果[J]. 化学工程师, 2025, 39(1): 57-61+31.
- [5] 郭东红, 汤柏松, 张博, 等. 适用于渤海大斜度探井的环保型合成基钻井液体系研制与性能评价[J]. 化学工程与装备, 2024(3): 25-28.
- [6] Tao, W., *et al.* (2011) Solution and Drilling Fluid Properties of Water Soluble AM-AA-SSS Copolymers by Inverse

- Microemulsion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **78**, 334-337.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.06.027>
- [7] Song, K., Wu, Q., Li, M., Ren, S., Dong, L., Zhang, X., *et al.* (2016) Water-Based Bentonite Drilling Fluids Modified by Novel Biopolymer for Minimizing Fluid Loss and Formation Damage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **507**, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.07.092>
- [8] 黄志明, 罗跃, 江夏, 米远祝. 两性聚合物降滤失剂的合成及性能评价[J]. 石油天然气学报, 2018, 40(5): 72-75.
- [9] 赵莹. 环保型钻井液用降滤失剂研究进展[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(5): 230.
- [10] 赵凯强, 杨超, 周成华, 等. 耐高温抗盐淀粉接枝共聚物的制备及其评价[J]. 精细石油化工, 2022, 39(6): 4-9.
- [11] 冷文龙. 腐殖酸改性环保型降滤失剂研制及作用机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [12] 王中华. 腐殖酸接枝共聚物超高温钻井液降滤失剂合成[J]. 西南石油大学学报, 2010, 20(4): 149-155.
- [13] 王伟吉. 抗温环保纳米纤维素降滤失剂的研制及特性[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(4): 421-426.
- [14] 王平全, 宫璇, 崔彦, 等. AM/AOPS/木质素磺酸接枝共聚物降滤失剂的合成与性能评价[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2012, 14(2): 108-111.
- [15] 唐玲娟, 刘超, 吴伟林, 等. 油基钻井液天然岩沥青降滤失剂的环保性能[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(6): 706-710.
- [16] Peng, B., Peng, S., Long, B., Miao, Y. and Guo, W. (2009) Properties of High-Temperature-Resistant Drilling Fluids Incorporating Acrylamide/(Acrylic Acid)/(2-Acrylamido-2-Methyl-1-Propane Sulfonic Acid) Terpolymer and Aluminum Citrate as Filtration Control Agents. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **16**, 84-89.
<https://doi.org/10.1002/vnl.20199>
- [17] 王义虎, 全晓虎, 杨静, 等. 一种钻井液用抗盐抗高温封堵降滤失剂及其制备方法和应用与流程[P]. 中国, CN202410672795. 2024-10-25.
- [18] Liu, L., Pu, X., Tao, H., Deng, Q. and Luo, A. (2018) Synthesis and Characterization of Comb-Shaped Copolymer as a Filtration Reducer and Comparison with Counterparts. *RSC Advances*, **8**, 11424-11435.
<https://doi.org/10.1039/c7ra13255g>