

环保型水基钻井液处理剂的研究进展

郭 瑞

皖江工学院土木与安全工程学院, 安徽 马鞍山

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月20日

摘 要

随着油气勘探开发不断向深部地层推进, 超深井等复杂井的占比持续上升, 井下工况愈发严苛, 对水基钻井液的性能要求不断提高。与此同时, 生态环保力度持续加大, 相关法律法规日趋完善, 传统钻井液处理剂因污染性强, 已难以适配绿色发展需求。在此背景下, 研发环保型水基钻井液处理剂对保障深井高效钻进, 推动油气勘探绿色环保可持续发展具有重要意义。文章综述了水基钻井液中常见环保型处理剂(包括降滤失剂、抑制剂、润滑剂与降粘剂)的研究进展, 总结了目前此类处理剂的常用改性原料及其合成方法, 分析了各项性能, 并系统评价了环保处理剂的未来发展趋势。

关键词

水基钻井液, 环保型处理剂, 降滤失剂, 抑制剂, 润滑剂, 降粘剂, 研究进展

Research Progress on Environmentally Friendly Water-Based Drilling Fluid Additives

Rui Guo

School of Civil and Safety Engineering, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan Anhui

Received: May 25, 2026; accepted: June 23, 2026; published: July 20, 2026

Abstract

With oil and gas exploration and development continuously advancing into deeper formations, the proportion of complex wells, such as ultra-deep wells, continues to rise. Downhole conditions are becoming increasingly harsh, and the performance requirements for water-based drilling fluids are continuously increasing. At the same time, ecological and environmental protection efforts are being strengthened, and relevant laws and regulations are becoming increasingly comprehensive.

文章引用: 郭瑞. 环保型水基钻井液处理剂的研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 999-1007.

DOI: 10.12677/me.2026.144100

Traditional drilling fluid additives, due to their strong pollution, can no longer meet the demands of green development. In this context, the development of environmentally friendly water-based drilling fluid additives is of great significance for ensuring efficient deep well drilling and promoting the green, environmentally friendly, and sustainable development of oil and gas exploration. This paper reviews the research progress of several common environmentally friendly water-based drilling fluid additives (including fluid loss reducers, inhibitors, lubricants, and viscosity reducers). It summarizes the commonly used modified raw materials for these environmentally friendly additives and their synthesis methods, analyzes the various properties of the additives, and systematically evaluates the future development trends of environmentally friendly additives.

Keywords

Water-Based Drilling Fluid, Environmentally Friendly Treatment Agent, Fluid Loss Additive, Inhibitor, Lubricant, Viscosity Reducer, Research Progress

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

钻井液是石油钻井开采作业中必不可少的工程浆液，其主要起到保护钻井井壁稳定性、携岩、润滑冷却钻头的作用。随着油气勘探开发的不断发展、环保法规的不断完善和要求，环保型钻井液的研发越来越被重视[1][2]。水基钻井液主要以水、膨润土、钻井液处理剂(如降滤失剂、润滑剂、抑制剂等)及加重材料配制而成。与油基钻井液相比，水基钻井液成本较低，远低于油基钻井液。另外，水基钻井液不含油类，对环境的污染远小于油基钻井液，在绿色环保方面具有更广的发展空间。因此，随着环保法律法规的日趋严格，以及绿色钻井理念的不断深入与推行，研发与应用环保型水基钻井液以及绿色无毒、易生物降解的处理剂已成行业必然趋势。

常用传统水基钻井液的处理剂，多为磺化处理剂，此类处理剂因其具有抗温性能好、热稳定性高的优势而被长期用于深井及超深井[3]。但因残留亚硫酸氢钠与焦亚硫酸钠，磺化处理剂对费氏弧菌存在毒害作用，并且多孔的处理剂大颗粒对细菌的吸附-失活作用而导致磺化处理剂具有生物毒性，并难以降解[4]-[6]。在目前环保意识和环保规范及指标要求的约束下，磺化处理剂逐渐被淘汰使用，需要对磺化处理剂进行非磺化处理，提高其绿色环保的性能。

天然生物质材料及其衍生物低毒易降解、可再生、价廉易得，在钻井液处理剂领域应用前景广阔[7]。为了提高钻井液的环境友好性，常选择天然高分子类为钻井液处理剂的原料。淀粉主要由玉米等农作物分离提取而成，由葡萄糖通过缩聚反应形成的天然多糖高分子化合物。淀粉不含有毒性物质，在淀粉酶及微生物的作用下分解为二氧化碳和水，对生物及生态环境友好，并且不依赖石油等不可再生化石原料，生产过程碳排放量低，符合绿色低碳发展理念，属于绿色环保可再生资源[8][9]。木质素和纤维素是自然界中储量丰富的天然可再生高分子聚合物，具备良好的生物可降解性、无毒、无污染，是处理剂优良的改性原料[10]-[12]。但大多数天然高分子类处理剂的抗温性能差，在高温情况下容易分解。因此需要进行改性，提高各项性能，满足不同深井井下的复杂环境要求。

本文围绕环保型水基钻井液处理剂，系统检索了近十年间国内该领域的研究成果。通过以“水基钻井液”、“环保型”、“润滑剂/降滤失剂/抑制剂/降粘剂”等关键词，结合“天然材料”、“生物质”、

“淀粉”等关键词进行交叉检索，筛选出符合综述研究的相关文献。所选文献聚焦于利用天然生物质或废弃资源开发兼具抗高温、抗盐和低生物毒性的处理剂，成果来自 CNKI 国内石油专业数据库，集中反映了油气田在环保钻井液技术领域的最新进展与应用实践。

2. 环保型降滤失剂

用于降滤失剂的天然高分子主要以淀粉、木质素、腐殖酸、纤维素为主，通过醚化改性、接枝改性和交联改性等方法，可有效提升热稳定性[11]-[15]。

淀粉分子结构中富含羟基官能团，可有效束缚自由水，降低渗透，起到降滤失的作用[15]。赵杰等[8]以水溶性淀粉为原料，添加细目核桃壳粉和环保丙烯酸树脂，采用反相乳液聚合和交联技术，制备出一种抗高温环保型淀粉基复合降滤失剂，该降滤失剂不但无毒、易降解，在抗高温性能上也得到了大幅度的提升，其最大热分解温度高达 286℃，在 220℃的环境下能发挥其良好的降滤失性能。淀粉通过酶促反应可生成 β -环糊精(β -CD)，一种天然环状低聚糖，无毒、无刺激、环境友好；以 β -CD 为原料，环氧氯丙烷为交联剂，借助反相乳液聚合法可制备 β -CDP，合成工艺绿色，过程低污染，并且对钻井液的流变性影响很小，不显著增粘，不破坏体系流变性，又因不含磺化等有毒基团，不会对地层、地下水造成不良污染[16]-[18]。

木质素含有丰富的活性基团，结构类似苯酚，且来源广泛、可生物降解，常替代酚醛树脂，用做环保型降滤失剂的原料[12]。周启成等[19]借助生物酶催化对木质素进行降解重组改性，引入抗温、抗盐的基团，制备出一种环保型生物质合成树脂降滤失剂(LDR-501)，整个制备过程采用生物化学相结合的方法，无毒，环保。LDR-501 热稳定性高，降滤失性能与环保性能均优于传统磺化酚醛树脂降滤失剂 SMP-II。

腐殖酸来源于动植物，是一种天然大分子有机酸，广泛存在于自然界。王犁[14]通过优选，以腐殖酸为原料，添加 N,N-二甲基丙烯酰胺、二甲基二烯丙基氯化铵和改性的石墨烯，通过接枝共聚，制备出环保型耐温抗盐降滤失剂。既具备抗温抗盐性能，又保留其环境友好的本质。其中，引入的石墨烯可有效起到物理屏障作用，提高降滤失性能。

GE 是来源于葡萄籽的一种天然提取物，内含原花青素，其分子结构含有苯并六元杂环，分子链刚性强，具有很好的热稳定性。GE 可强烈吸附于膨润土，改善泥饼质量，可起到有效的降滤失作用，将其作为降滤失剂可解决一些天然材料降滤失剂抗温能力不足的问题[13] [20]。

舒勇等[21]结合淀粉、植物多酚及木质素三类天然材料的优势，研发出复合降滤失剂 PLS。玉米淀粉提供醇羟基，促进化学改性，植物多酚提供酚羟基和苯环，增强吸附和刚性，木质素磺酸钠提供磺酸根和刚性苯环，提升热稳定性，三者的协同作用充分发挥出天然高分子的降滤失性能。相比于 CMC-LV 和 SAP 两种淀粉枝接共聚物，PLS 具有最佳抗盐钙性能。

以上环保型降滤失剂汇总见表 1。

Table 1. Summary of environmentally friendly fluid loss additives
表 1. 环保型降滤失剂汇总

名称	主要原料	改性方法	抗温性 API 滤失量		生物毒性 (EC ₅₀ /mg/L)	降解性 (BOD ₅ /CODcr)
淀粉基复合降滤失剂[8]	水溶淀粉、核桃壳粉、环保丙烯酸树脂	反相乳液聚合	286℃	12 mL (2%加量, 220℃)	7.05 × 10 ⁴	7.68%
葡萄提取物(GE) [13]	葡萄提取物	天然提取, 未改性	170℃	12.8 mL (3%加量, 170℃)	1.3369 × 10 ⁵	32.75%
HA-KGO [14]	腐殖酸、NNDMA、DMAAC、氧化石墨烯	接枝共聚	220℃	5.2 mL (4%加量, 200℃)	4.72 × 10 ⁴	23.3%

续表

β -环糊精聚合	反相乳液聚合	240℃	16.5 mL (3%加量, 240℃)	/	49.78%
物微球[18] 环氧氯丙烷					
LDR-501 [19] 木质素	生物酶定向催化 + 分子重排、化学聚合	180℃	5.6~8.4 mL (3%加量)	4.4×10^5	26%
PLS [21] 植物多酚、木质素磺 酸钠、玉米淀粉	交联改性 (醛类交联剂)	180℃	9.6 mL (2%加量, 180℃)	7.78×10^4	5.05%

上述环保型降滤失剂主要为木质素、淀粉、植物多酚等为原料通过化学交联或接枝共聚合成的天然改性高分子；或基于环糊精等单体的聚合物微球；又或者直接利用天然提取物。其作用机理都是通过引入羟基、酚羟基、磺酸基等极性基团增强与黏土颗粒的氢键或静电吸附，提高黏土分散稳定性，并借助刚性苯环或杂环结构增强分子链的抗温性。其中的差异在于： β -CDP 在高温(>160℃)下通过水热碳化反应生成纳米碳球和纳米复合物，实现“温度响应型”封堵，而其他材料主要依赖分子本身的抗降解性和物理封堵(如淀粉基复合粒子的纤维状结构、石墨烯的片层屏障)。虽有所创新，但也存在一些不足，比如：多数改性天然材料的抗温极限仍集中在 180℃~220℃，且长期老化后体系易增稠或降解；同时，各研究对“环保”的评价主要依据 EC50 和 BOD5/COD_{Cr}，忽略了降解产物的生态毒性及复杂井下环境对降解行为的影响，因此在抗温性与可降解性的平衡需要更进一步研究。

3. 环保型抑制剂

泥页岩的黏土矿物与水基钻井液接触后，易发生水化作用，导致井壁地层发生膨胀，进而造成缩径，易导致下钻遇阻，甚至存在卡钻、井壁坍塌、憋泵的风险。为了避免此类事故发生，需要在水基钻井液中添加抑制剂[7] [22]。

我国藻类资源丰富、利用率低，藻糖肽作为海洋藻类提取的多糖衍生物，含大量活性基团且易生物降解。生物质基团改性季铵盐表面活性剂，可有效降毒、提高抑制性与降解性[7]。李书应等[7]选择藻糖肽为原料，经胺酯化、季铵化等反应，成功制备出了一种可适用于页岩气井的环保型抑制剂 HBM-T，并优化了制备工艺、表征结构及评价性能。

徐毅等[23]以多肽明胶为基体，借助季铵盐与改性生物多肽活性官能团的 SN₂ 加成反应，将高分子季铵化，成功制备出了具有环保性能的抑制剂 WNGT。改性生物多肽是一种蛋白质水解产物，属于天然可再生的生物质资源，易于降解，对环境友好，满足环保要求。季铵盐本身具备良好的抑制分散作用，因此制备而成的 WNGT 既具备环保作用还能显著增强抑制性能。与 KCL 及聚醚胺 PEA 相比，WNGT 抑制效果更好；150℃ 环境下热滚 16 h 的页岩回收率可高达 95.15%。

L-赖氨酸是一种主要来源于动植物的氨基酸，属于生物质资源，无毒，对环境无污染，可生物降解。宣扬等[24]基于 Wilson 提出的最新泥页岩井壁失稳理论，以 L-赖氨酸为聚合单体，借助磷酸，在 190℃ 环境下制备出低分子量聚赖氨酸，其可轻易进入纳米级微孔隙，起到良好的抑制分散作用。研究发现，聚赖氨酸的抑制性能优于 KCL 等抑制剂，并突破了 KCl 对伊利石抑制效果差的局限，并在 254℃ 以下仍可保持良好的热稳定性。

杨建民等[25]将马来酸酐、多羟基三乙胺与水混合，在无水乙酸的参与下，经过一系列反应，制备出复合抑制剂 HBYZ-2。HBYZ-2 不含重金属和有毒物质，对水 and 环境不造成污染，易于降解，具备良好的环保功效。HBYZ-2 分子结构中的胺基和多羟基能起到抑制黏土颗粒水化膨胀的作用，从而可有效抑制页岩分散，保证钻进过程中井壁的稳定性。同时，HBYZ-2 表现出良好的热稳定性。

黄新平等[26]以 APTS、DMC、AA 为原料制备出了两性离子性抑制剂 YZ-1。抑制剂含有的季铵根可

固定黏土晶格，防止水分进入，可有效避免扩散；硅氧基水解后可与膨润土的硅羟基产生缩聚反应，在膨润土黏土颗粒表面形成疏水吸附膜，有效包裹粘土颗粒，高温环境下也不易脱落，因此不仅有效抑制黏土水化且具备良好的热稳定性。YZ-1 无毒，易于生物降解，其环保性能全面优于聚胺抑制剂。

以上环保型抑制剂汇总见表 2。

Table 2. Summary of environmentally friendly inhibitors
表 2. 环保型抑制剂汇总

名称	主要原料	改性方法	抗温性	抑制性	生物毒性 (EC ₅₀ /mg/L)	降解性 (BOD ₅ /COD _{Cr})
HBM-T [7]	藻糖肽、N,N-二丁基-1,3-丙二胺、溴代烷烃	胺酯化 + 季铵化	/	相对抑制率 86.5% (1.5%加量); 滚动回收率 90.7% (一次)/ 81.6% (二次); Zeta 电位降至-10 mV (3%加量) 24 h 膨胀量 1.60 mm	6.2 × 10 ⁵	32.6%
WNGT [23]	明胶、2,3-环氧丙基三甲基氯化铵	环氧-氨基开环反应	150℃	(2%加量): 滚动回收率 95.15% (150℃); Zeta 电位降至-11.7 mV	/	/
聚赖氨酸 [24]	L-赖氨酸	热缩聚 (磷酸催化)	180℃	滚动回收率 75% (1%加量); Zeta 电位降至-4 mV	/	65.6%
HBYZ-2 [25]	马来酸酐、多羟基三乙胺	水溶液聚合	150℃	滚动回收率 73.5%; 线性膨胀率 1.02% (16 h)	3.86 × 10 ⁴	39.52%
YZ-1 [26]	APTS、DMC、丙烯酸	自由基聚合	120℃	滚动回收率优于 KCl 和 Ultrahib; 线性膨胀率 < 30% (0.5%加量); 层间距降低	7.434 × 10 ⁴	23.5%

上述环保型抑制剂的研究中，主要基于天然多肽/氨基酸的改性聚合物，合成型两性离子聚合物，以及复合型小分子/高分子抑制剂。其作用机理均通过阳离子基团(季铵盐、胺基)与黏土表面负电荷发生静电吸附，中和 Zeta 电位、压缩双电层，从而抑制水化膨胀与分散；部分抑制剂还借助多羟基或疏水链增强吸附牢度或阻水效果。主要区别在于：聚赖氨酸等生物基抑制剂强调分子量低，便于进入纳米级孔隙，并利用酰胺键等结构实现生物降解；而合成型两性离子聚合物则引入硅氧烷基团，可与黏土表面发生缩聚反应形成不可逆化学吸附，抗脱附能力更强；HBYZ-2 则通过胺基与多羟基的“多点吸附”协同作用。目前这些抑制剂也存在一些问题，比如，抗温性能不够高，效果欠佳；同时，忽略了降解中间产物的生态毒性及高盐、高 pH 条件下降解行为的变化；还有抑制机理仍主要基于 Zeta 电位和层间距测试，缺乏对黏土-抑制剂-水相互作用分子尺度的直接证据。

4. 环保型润滑剂

随着深井尤其超深井、长裸眼段水平井等复杂井的相继开发，对井下摩阻控制要求也越来越高。水平段延长、旋转导向工具应用、高温高密度钻井液使用等因素容易加剧摩阻，易引发井下复杂事故。油基钻井液润滑性好，但受环保要求和钻屑处理难题的限制，高效润滑水基钻井液成为重要的发展方向。但目前水基钻井液常用润滑剂仍存在一些短板，比如：固体润滑剂难降解，容易污染环境；原油柴油类有毒，有荧光、应用受限；植物油易起泡、影响流变性、高温稳定性差。为此，亟需研发一种高效、环保、润滑性能优良的润滑剂[27]-[31]。

张强等[30]以绿色淀粉水解物葡萄糖为原料，经缩合、磺化、胺化等分子修饰，制备出抗高温、配伍性好、不起泡的环保型液体润滑剂。经 160℃热滚 16 h 后测试，该润滑剂润滑效果良好，加量 0.5%时润

滑系数降低率超过 70%，2.0%时达 85%以上。200℃高温老化后润滑系数降低率仍超 65%，表现出良好的热稳定性。

蓖麻油是从蓖麻籽压榨提取的天然植物油脂，是自然界唯一含有羟基的植物油，富含蓖麻油酸，黏度大、润滑性好、耐低温、化学活性强，易发生酯化、醚化、交联改性[32][33]。张雪等[31]结合改性蓖麻油与石墨微粒，引入复合表面活性剂和分散剂，成功研制出高效环保的润滑剂 XNRH-1。蓖麻油改性后碘值升高，可提升抗氧化能力，改善热稳定性。改性石墨呈层状结构，高温下膨胀形成网状孔道并部分剥离，摩擦小，可提升植物油的承载、抗磨与抗温能力。基于极性吸附原理，XNRH-1 可形成高韧性的润滑油膜，依靠分子间内聚力作用，可有效阻断钻具与井壁间的直接接触，实现润滑效果。

地沟油属于废弃生物质油脂，回收再利用具备良好的环保特性，可转化为绿色工业材料，经过加工可作为钻井润滑油，变废为宝[34]。郑华耀[35]利用两步酯化法和过氧羧酸氧化法，制备出地沟油基生物柴油，以此为基础油，再添加处理剂，成功制备出润滑剂 SWRH。SWRH 借助酯基官能团较强的极性，在钻具及地层中形成润滑薄膜，降低摩阻。

以上环保型润滑剂汇总见表 3。

Table 3. Summary of environmentally friendly lubricants
表 3. 环保型润滑剂汇总

名称	主要原料	改性方法	抗温性	润滑系数降低率	生物毒性 (EC ₅₀ /mg/L)
高性能环保 润滑剂[30]	葡萄糖等	缩合 + 磺化 + 胺化	200℃	85%以上(2%加量, 160℃); 200℃仍 > 65%	4.814 × 10 ⁵
XNRH-1 [31]	改性植物油(蓖麻油)、 改性石墨、复合表面 活性剂、分散剂	酸催化/酯交换 + 超声乳化	150℃	4%盐水基浆(150℃老化后): 93.6% 饱和盐水基浆(150℃老化后): 89.9%	1.27 × 10 ⁵
SWRH [35]	地沟油(生物柴油 + 过氧羧酸氧化改性)	两步酯化 + 过氧羧 酸氧化 + 复配改性	160℃	淡水基浆: >80% (0.5%加量); 现场 > 20%	>1.0 × 10 ⁵

上述环保型润滑剂的研究中，主要分为三类：改性动植物油脂/地沟油基液体润滑剂、引入石墨等固体微粒的复合润滑剂、以及合成酯/聚醚类润滑剂。这些润滑剂均是通过极性基团在金属/黏土表面形成物理吸附膜，或借助固体颗粒的滚动/填充作用，将干摩擦转化为低阻力润滑。其差异在于：地沟油路线强调成本与环保，通过环氧化、酯交换等改性提升抗温性；石墨复合路线利用层状结构降低剪切强度，但可能影响固控；合成酯类则通过引入磺酸基、醚键等提高热稳定性。目前的不足包括：多数产品抗温仍低于 180℃~200℃，高温下易起泡或增黏；环保评价缺乏对降解产物毒性及井下复杂环境适应性的系统评估；地沟油原料批次稳定性差，且改性过程中使用的催化剂(如浓硫酸)及部分极压剂可能存在潜在污染；润滑机理多停留在定性吸附解释，缺乏吸附膜强度与摩擦系数之间定量关系的深入表征。

5. 环保型降粘剂

水基钻井液在钻进过程中，因携岩而导致泥浆中的固相含量不断升高，颗粒间易发生聚集抱团，造成粘度上升。同时，在高温高压环境下，处理剂的分子结构容易发生蜷缩变形，致使胶体稳定性发生变化，浆液逐渐稠化。另外，对于一些含盐量高的地层，一些钙镁离子进入钻井液后，会发生絮凝聚结，浆体增稠。随着油气的不断开发，水基钻井液被大量应用于泥页岩地层中，钻井液中的水相易使该地层的黏土发生水化膨胀，高度分散，大幅度增加泥浆整体的黏度与切力。钻井液黏切过高，易导致诸多问题，比如：钻进效率下降，起下钻阻力大，甚至发生钻井事故。为了降低钻井液的黏切，改善钻井液性能，降

粘剂成了不可或缺的钻井液处理剂之一[36]-[38]。

为满足环保的相关法律法规，需开发毒性低，对环境友好，对生态无污染的环保型降粘剂。此类降粘剂常以天然材料为原料，通过对其化学改性、接枝共聚改性，合成改性产物，既保留了天然材料所具备的无毒，环保无污染优势，又可有效改善抗温抗盐性能[37] [39]。

随着超深井不断发展，为适应其高温的钻进环境，需提高降粘剂的热稳定性。周新宇等[38]将丙三醇进行预热，随后依次滴加铅盐溶液与聚马来酸恒温反应，调至中性制备出一种抗高温降黏剂 GMZ，其毒性低，符合国家标准，满足环保要求。添加 GMS 的钻井液经 210℃高温老化 16 h 后，膨润土颗粒受侵蚀程度降低，加强了片层结构的稳定性，降黏率高达 82.61%，表现出了良好的降粘效果。常用的铁铬木质素磺酸盐含有铬离子，对环境造成严重污染。针对这一问题，孟繁奇等[39]选用腐植酸和聚丙烯腈为主要原料，借助乙酸锌 - 尿素复合交联剂接枝共聚，替换铬交联，成功制备出新型腐植酸接枝聚合物降粘剂。谢建宇等人[40]将 AA、AMPS 和 DMDAAC 与天然材料混合，经过滴加法进行聚合、保温反应，中和并烘干制备出天然材料接枝共聚物降粘剂 JZ-1。该降粘剂可有效提高重晶石表面 Zeta 电位，防止重晶石的聚集，提高钻井液流变性。王霄正[41]选取 DMDAAC、IA 为聚合单体，亚硫酸氢钠和过硫酸铵为引发剂，制备出降粘剂 ID。ID 可拆解粘土颗粒聚集结构，释放自由水，减弱黏土颗粒的静电排斥，抑制黏土水化，借助低分子量破坏黏土与高分子聚合物联结，收缩聚合物分子链，协作降粘。

以上环保型降粘剂汇总见表 4。

Table 4. Summary of environmentally friendly viscosity reducers
表 4. 环保型降粘剂汇总

名称	主要原料	改性方法	抗温性	抗盐浓度	降粘效果	环境毒性/降解性
GMZ [38]	丙三醇、铅盐 THSZ、聚马来酸 PMA	配位交联 + 聚合	210℃	15% NaCl (润滑性能保持)	膨润土基浆降粘率：82.61% (2%加量，210℃)	EC ₅₀ > 4 × 10 ⁴ mg/L
FQ [39]	腐植酸、聚丙烯腈	水解 + 接枝共聚 + 交联	150℃	抗 2% NaCl (盐水基浆)	淡水标浆降粘率 89.5% (0.8%加量，常温)； 盐水标浆降粘率 76.7% (3%加量，常温) 淡水基浆：分散率 50%以上 (3%加量)； 超高密度钻井液(2.8 g/cm ³)： / 漏斗黏度从 282 s 降至 130 s (2%加量) 淡水基浆降粘率：92.38% (0.5%加量)； 聚合物基浆降粘率：75.14% (0.4%加量)； 盐水基浆降粘率：74.55% (0.6%加量)； 钙处理基浆降粘率：17.39% (0.2%加量)	无铬，环保
JZ-1 [40]	天然材料 T、AA、AMPS、DMDAAC	接枝共聚	150℃	抗 10% NaCl		
ID [41]	IA、DMDAAC	自由基聚合 (过硫酸铵/亚硫酸氢钠引发)	180℃	抗 NaCl		EC ₅₀ = 3.41 × 10 ⁴ mg/L; BOD/COD = 23.59%

上述环保型降粘剂的研究中，主要为天然改性(如腐植酸接枝)、合成聚合物(如 IA/DMDAAC)及复合交联型(如 FQ)，均通过吸附分散黏土 - 聚合物网状结构，降低动切力。不同之处在于：天然改性抗盐性差；合成聚合物抗温可达 180℃，但在钙浆中因羧基螯合失效；复合交联型抗盐抗温性最优，接近铁铬盐水平。其中所存在的研究不足包括：高温高密度下降粘率骤降；钙处理浆中羧基失效问题未有效解决；金属离子(锌、铁)长期生态毒性缺乏评估；“降粘”与“抑制”功能常相互矛盾，研究中未兼顾滤失造壁

性优化。

6. 结语

随着环保意识的提高与相关法律法规的不断完善和要求,水基钻井液的环保型处理剂发展迅速。该处理剂常以天然高分子为原料(如淀粉、木质素、腐殖酸、纤维素等),充分利用其易生物降解,无毒,环境相容性好,对储层伤害小的特性。

本文综述的环保型处理剂均以天然高分子为原料,通过化学改性赋予其特定功能,在性能上各具侧重:润滑剂,如地沟油基 SWRH、改性植物油 XNRH-1,通过引入极性酯基或复配纳米石墨,在淡水基浆中润滑系数降低率可达 80%以上,抗温达 150℃~200℃;降滤失剂中, β -环糊精微球(β -CDP)和淀粉基复合降滤失剂利用高温下水热碳化生成纳米颗粒填充泥饼孔隙,使 240℃老化后滤失量降至 16.5 mL 以下,而腐植酸-氧化石墨烯复合物(HA-KGO)则通过化学吸附与物理封堵协同作用,抗温达 220℃、耐盐达 25% NaCl;抑制剂,如聚赖氨酸、改性生物多肽 WNGT,通过阳离子季铵基团中和黏土负电荷、压缩双电层,使页岩滚动回收率提升至 95%以上,抗温达 150℃~180℃;降粘剂,如 ID、FQ,则通过拆散聚合物-黏土网状结构降低黏度,在淡水基浆中降粘率可达 92%,但抗钙、抗高密度固相能力仍有不足。整体而言,这些处理剂均满足无毒、易降解的环保标准,且已在诸多油田获得现场应用验证。

然而,目前环保型水基钻井液处理剂仍然面临着核心瓶颈问题,比如:在“非磺化/低毒性”的环保约束下,处理剂的抗超高温(>200℃)与抗复合盐(高钙/高固相)性能难以满足深井需求,且环保评价体系与复杂井下工况严重脱节。多数降滤失剂、降粘剂在 180℃以上滤失量骤增、降粘率低于 50%;润滑剂在高温高密度下易起泡、润滑系数降低率低于 30%;同时,环保评价仅依赖 EC50 和 BOD5/COD_{Cr},忽略降解中间产物的生态毒性及高盐、高密度条件下降解行为的变化。

针对上述问题,未来研究方向应多聚焦于以下几个方面:

- 1) 借鉴 β -环糊精微球的机理,设计在高温(>200℃)下能原位生成纳米封堵颗粒或石墨烯类润滑膜的智能材料,突破传统处理剂热降解即失效的局限;
- 2) 模拟高温、高盐、高压动态老化条件,测定处理剂及其降解产物的长期生物累积效应与生态毒性,替代现有静态、短期的 BOD5/COD_{Cr} 单指标评价;
- 3) 针对钙处理浆中羧基失效问题,引入膦酸基、硅氧烷基等对钙离子不敏感且可形成化学吸附的官能团,从根本上避免螯合沉淀导致的性能下降。

基金项目

马鞍山市土地检测评估与修复工程技术研究中心开放基金项目(项目编号:TDJC25004)、皖江工学院校级科研项目(项目编号:WG25031)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杜峰,杨瑞涛,李岩.石油钻井泥浆环保处理技术优化研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(23):193-195.
- [3] 张勇,王彪,刘晓栋.国内钻井液用磺化酚醛树脂研究进展[J].油田化学,2016,33(3):547-551.
- [4] 瞿凌敏,王书琪,王平全,等.抗高温高密度饱和盐水聚磺钻井液的高温稳定性[J].钻井液与完井液,2011,28(4):22-24+93.
- [5] 常胜利,黄健勇,薛伟强,等.抗高温高密度饱和盐水聚磺钻井液体系[J].化学工程与装备,2020(12):167-168.
- [6] 王春生,朱金智,张震,等.磺化处理剂的生物毒性来源及其无毒化处理方法[J].油田化学,2024,41(4):579-587+601.
- [7] 李书应,孙钢.页岩气井水基钻井液用环保型抑制剂的制备及性能研究[J].断块油气田,2025,32(2):346-352.

- [8] 赵杰, 张羽臣, 刘占奇, 等. 抗 220°C 淀粉基复合降滤失剂的研制与性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(5): 617-622.
- [9] 王皓, 尹飞, 李泽群, 等. 环保水基钻井液体系研究及综合效能评价[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(36): 15375-15383.
- [10] 刘晓娜, 程立, 欧阳传湘. 新型生物质环保添加剂对水基钻井液性能的提升[J]. 当代化工, 2026, 55(3): 531-534.
- [11] 王灿, 赵雄虎, 贾相如, 等. 抗高温水基钻井液用纳米纤维素降滤失剂[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(6): 738-747.
- [12] 赵田田, 位华, 郭建华, 等. 木质素基水基钻井液降滤失剂的研究进展[J]. 精细石油化工, 2026, 43(3): 77-80.
- [13] 王倩男, 蒋官澄, 王奕杰, 等. 葡萄提取物作为环保型降滤失剂的室内研究与评价[J]. 石油科学通报, 2024, 9(4): 617-626.
- [14] 王犁, 刘鹏, 钱洪芳, 等. 环保型耐温抗盐基降滤失剂的制备与应用[J]. 化学研究与应用, 2025, 37(10): 2892-2899.
- [15] 杨杰, 王韧, 罗宇峰, 等. 水基钻井液高温滤失控制机理及材料研究进展[J]. 新疆石油天然气, 2026, 22(1): 9-25.
- [16] 李仲谦, 杨威, 王培霖, 等. β -环糊精聚合物微球的合成与表征[J]. 精细化工, 2010, 27(7): 692-695.
- [17] 朱春山, 张强, 宋佳. 改性 β -环糊精微球的制备与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(3): 150-153.
- [18] 钟汉毅, 高鑫, 邱正松, 等. 环保型 β -环糊精聚合物微球高温降滤失作用机理[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 1091-1102+1112.
- [19] 周启成, 单海霞, 位华, 等. 环保型生物质合成树脂降滤失剂[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(5): 593-596.
- [20] 周向辉. 葡萄籽提取物营养成分组成及其生物学功能研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 228-233+240.
- [21] 舒勇, 江路明, 杨俊, 等. 环保型复合降滤失剂的研制与应用[J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(1): 35-40.
- [22] 郝雨, 李善建, 陈世军, 等. 新型水基钻井液页岩抑制剂的的应用进展[J]. 化工技术与开发, 2025, 54(11): 56-65.
- [23] 徐毅, 许桂莉, 蒋官澄. 环保型改性生物多肽水基钻井液抑制剂的合成与应用[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(3): 301-306.
- [24] 宣扬, 蒋官澄, 李颖颖, 等. 环保型高效页岩抑制剂聚赖氨酸的制备与评价[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 84-91.
- [25] 杨建民, 刘伟, 熊小伟, 等. 页岩气井环保型强抑制水基钻井液体系研究与应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 107-110+7.
- [26] 黄新平. 环保型两性离子抑制剂的制备及其性能评价[J]. 辽宁化工, 2023, 52(2): 204-207.
- [27] 邓兴强. 深层水平井钻井液技术难点及设计方案研究[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(6): 85-86.
- [28] 甄剑武. 水平井高密度钻井液润滑减阻技术研究及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 55-60.
- [29] 宋海, 龙武, 邓雄伟. 页岩气水基钻井液用抗高温环保润滑剂的研制及应用[J]. 断块油气田, 2021, 28(6): 761-764.
- [30] 张强. 高性能环保水基钻井液润滑剂的研制及应用[J]. 精细石油化工进展, 2023, 24(6): 6-8+25.
- [31] 张雪, 张鸿鹄, 王方博, 等. 高效环保水基钻井液润滑剂的研制及应用[J]. 石油化工应用, 2026, 45(1): 18-23+35.
- [32] 朱彦, 张初银, 邱建帆, 等. 基于蓖麻油的多异氰酸酯固化剂的合成与性能研究[J]. 聚氨酯工业, 2025, 40(2): 15-20.
- [33] 张陆军, 秦瑜, 郝旭东, 等. 蓖麻油及衍生物羟基含量测定方法比较研究[J]. 聚氨酯工业, 2026, 41(2): 11-14.
- [34] 张松才. “地沟油”变身钻井润滑油[J]. 石油知识, 2020(6): 31.
- [35] 郑华耀. 抗高温环保型液体润滑剂的制备与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2024.
- [36] 刘仕, 焦冬有. 超深井抗高温水基钻井液体系研究[J]. 石化技术, 2021, 28(11): 79-80.
- [37] 庞少聪, 安玉秀, 马京缘. 近十年国内钻井液降粘剂研究进展[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 96-103.
- [38] 周新宇, 李怀科, 赖全勇. 一种抗高温降黏剂的合成与性能评价[J]. 油田化学, 2026, 43(1): 27-35.
- [39] 孟繁奇, 薛伟, 张志磊, 等. 水基钻井液用无铬降粘剂腐植酸接枝聚丙烯腈的制备及其降粘特性[J]. 工业技术创新, 2015, 2(3): 359-365.
- [40] 谢建宇, 李彬, 张滨. 天然材料接枝共聚物分散剂的合成及性能评价[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(5): 496-500.
- [41] 王霄正. 环保型水基钻井液降粘剂研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2021.