文章编号:1673-2677(2026)01-0009-17 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.002
引用: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.
Cite:YANG Jie,WANG Ren,LUO Yufeng,et al. Research progress on high temperature fluid loss control mechanisms and materials for water based drilling fluids[J]. Xinjiang Oil & Gas,2026,22(1):9-25.

水基钻井液高温滤失控制机理及材料研究进展

杨杰[1],王韧[2],罗宇峰[1],梁浩[1],敬玉娟[1],周楚翔[3]
(1.中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻井液技术服务公司,四川成都 610051;2.中国石油集团工程技术研究院有限公司,北京昌平 102206;3.中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院,四川广汉 618300)

摘 要:水基钻井液在高温深井钻探过程中易发生滤失量剧增、性能恶化等问题,严重影响井壁稳定和钻井安全。对水基钻井液高温滤失控制机理及降滤失材料的研究成为当前油气钻井工程的关键课题。综述了水基钻井液高温滤失的影响因素及作用机理,分析了温度、压力及地层条件对滤失性能的协同影响,揭示了高温条件下黏土颗粒聚沉、聚合物分子链降解及滤饼结构破坏的内在机制。在此基础上,论述了近年来高温降滤失材料的研究进展,包括改性天然高分子、耐高温聚合物、磺化材料及纳米复合材料的功能设计、合成方法及性能优化策略;对比了四类降滤失材料的高温稳定性和滤失控制效果;总结了面临的超高温适应性、环保性及经济性等问题;并展望了水基钻井液耐极端环境性能、绿色可持续性和智能化设计协同的未来发展方向。相关讨论可为高温钻井液滤失控制材料的研发与应用提供理论参考和技术支撑。

关键词:水基钻井液;降滤失剂;高温高盐;机理;聚合物;纳米复合材料
中图分类号:TE254 **文献标识码:**A

Research Progress on High Temperature Fluid Loss Control Mechanisms and Materials for Water Based Drilling Fluids

YANG Jie[1],WANG Ren[2],LUO Yufeng[1],LIANG Hao[1],JING Yujuan[1],ZHOU Chuxiang[3]
(1. Drilling Fluid Technical Service Company,CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co.,Ltd.,Chengdu 610051,Sichuan,China;2. CNPC Engineering Technology R&D Co.,Ltd.,Changping 102206,Beijing,China;3. Drilling & Production Technology Research Institute,CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co.,Ltd.,Guanghan 618300,Sichuan,China)

Abstract: In the process of high temperature deep well drilling,water based drilling fluid is prone to problems such as sharp increase in fluid loss and deterioration of performance,which seriously affects wellbore stability and drilling safety. Therefore,the research on high temperature fluid loss control mechanism and materials has become a critical issue in current oil and gas drilling engineering. This review summarizes the influencing factors and mechanism of high temperature fluid loss of water based drilling fluids,analyzes the synergistic effects of temperature,pressure,and formation conditions on leak off performance,and reveals the underlying mechanisms of clay particle aggregation,polymer molecular chain degradation,and mud cake structure disruption under high temperature conditions. On this basis,the research progress of high temperature fluid loss control materials in recent years is discussed,including the function-

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项课题"抗超高温高盐水基钻井液"(2025ZD1401302)。
第一作者:杨杰(1996-),2024年毕业于西南石油大学化学工程与技术专业,博士,工程师,现从事钻井液与完井液的研究工作。(E-mail)yangjie11_sc@cnpc.com.cn
通讯作者:王韧(1987-),2017年毕业于中国地质大学(武汉)地质工程专业,博士,正高级工程师,现从事钻井液与智能化技术以及天然气水合物钻采理论与技术的研究工作。(E-mail)wangrdr@cnpc.com.cn

al design, synthesis methods and performance optimization strategies of modified natural polymers, high temperature polymers, sulfonated materials, and nanocomposite materials. The high temperature stability and fluid loss control effect of four kinds of fluid loss reducer are compared. The problems of ultra-high temperature adaptability, environmental protection and economy are summarized, and the future development directions of extreme environment resistance, green sustainability and intelligent design synergy are prospected. This review provides theoretical insights and technical support for the development and application of fluid loss control materials for high temperature drilling fluids.

Key words: water based drilling fluid; fluid loss reducer; high temperature and high salinity; mechanism; polymer; nanocomposite material

当前全球油气资源需求持续增长，油气的勘探开发逐步向深层、超深层（≥6 000 m）及非常规储层拓展[1]。钻井液作为钻井工程的“血液”，承担着稳定井壁、悬浮携屑、冷却钻头及传递水动力等关键作用[2-3]。深部地层的高温（>200 ℃）、高压及高盐环境易导致钻井液性能劣化，表现为黏切力下降、滤失量增加，甚至引发井壁失稳等事故，严重威胁钻井安全与效率[4]。发展高性能钻井液技术，尤其是研发耐高温高盐的降滤失剂，成为保障深井、超深井安全钻进的核心关键之一。

降滤失剂通过吸附于膨润土颗粒表面，形成致密滤饼并封堵地层微裂缝，从而有效控制钻井液滤失量[5]。其作用机制主要包括：①通过氢键、静电力等吸附于黏土颗粒，构建“膨润土-聚合物-水”三维网络结构；②填充微小孔隙，增强滤饼的封堵能力[6-7]。目前，降滤失剂主要分为天然高分子、合成聚合物、磺化材料及纳米复合材料四大类。天然高分子，如淀粉、纤维素、木质素等，因成本低、可降解等优势广泛应用于浅中层钻井，但其分子链中的醚键在高温下易水解断裂，导致性能失效。合成聚合物，如丙烯酰胺和2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸共聚物（AM/AMPS），通过单体结构设计可提升热稳定性，但在超高温高盐环境中仍面临分子链降解、交联等问题[8]。近年来，纳米技术的引入为降滤失剂性能提升提供了新思路。凭借其尺寸效应和高比表面积，纳米材料可增强滤饼致密性，抑制黏土水化，并显著改善钻井液的流变与滤失性能[9]。目前提升降滤失剂耐温抗盐性能的研究主要集中在以下方向：①优化聚合物分子结构，如引入刚性基团或强水化基团（如磺酸基）；②调控凝聚态结构，通过交联或复合构建更稳定的三维网络；③纳米复合技术，将无机纳米材料，如二氧化硅（SiO_2）、纳米石墨、层状双氢氧化合物水滑石（LDH），与聚合物结合，协同提升热稳定性和封堵效率[10-12]。然而，极端条件下分子链的构象转变、纳米材料的分散性等问题仍待进一步解决。

本文系统综述了天然高分子及其改性产物、合成聚合物、磺化材料及纳米复合材料降滤失剂的研究进展；分析了其结构、作用机理与性能的关联性；对比了各类处理剂的性能特点及成本优势；探讨了耐高温高盐降滤失剂的设计策略与发展趋势，以期为深井高温钻井液降滤失剂的优化提供理论参考。

1 滤失控制机理及影响因素

1.1 滤失控制机理

钻井液滤失性能主要取决于两个关键因素：滤饼质量和滤液黏度特性[2]。基于这一认识，现代钻井液技术主要通过优化滤饼的微观结构和提升滤液黏度来实现高效的滤失控制。作为钻井液体系中的关键添加剂，降滤失剂通过多尺度、多机制的协同作用实现对滤失过程的精准调控[13-14]。一是吸附桥联作用，降滤失剂通过其分子结构对黏土颗粒进行吸附桥联，形成“黏土-聚合物-水”的稳定结构。该结构不仅能增强钻井液胶体稳定性，抑制颗粒絮结，促进形成薄而致密的滤饼；该三维网络结构还具有良好压缩性，能自适应填充孔隙以封堵滤失通道，束缚水分子在滤饼表面形成非渗透膜，从而降低滤饼渗透率，控制滤失。二是物化封堵作用，降滤失剂通过尺寸效应和构象变化实现动态封堵。聚合物降滤失剂分子在压差作用下可卷曲成团，直接封堵滤饼孔隙入口，或嵌入内部填充微孔隙，降低渗透性。同时，微纳米无机材料也能协同填充，与聚合物共同形成多级封堵网络，强化滤饼质量，有效减少滤液流失。三是提高滤液黏度，聚合物分子通过改变溶液的微观结构显著影响滤液的流动特性。聚合物分子溶于水后，其伸展的分子链和无规卷曲结构增大了流体内部摩擦；同时，分子间桥联形成超分子结构，进一步增大了力学体积。这两者共同作用显著提高了滤液的黏滞性，有效束缚了水分子的自由迁移，从而降低滤失量。

此外，滤失控制已从被动封堵向智能化与纳米化方向演进。智能响应型聚合物（如温敏聚合物）能在特定井下条件（高温、高盐或特定pH）下发生构象或体积变化，实现自适应封堵，例如在高温下链段收缩以紧密封堵相应孔隙。高效成膜技术利用新型聚合物在井壁岩石表面直接形成一层极薄且柔韧的非渗透膜，有效阻隔滤液侵入。纳米技术通过引入功能化纳米材料（如改性纳米纤维素、MXene），凭借其高比表面积和强界面相互作用与聚合物协同构建坚固、致密的“纳米复合网络”结构，显著增强了滤饼的封堵效

率与高温耐受性。这些创新策略共同推动了钻井液滤失控制向精准、自适应和高效方向发展。

1.2 滤失性能影响因素

温度、压力及地层环境对钻井液滤失行为的影响表现为显著的协同效应。这些因素并非独立作用，而是通过复杂的耦合机制共同调控钻井液的流变性、滤饼结构特征及滤液侵入，从而决定最终的滤失控制效果。

1.2.1 温度的影响

高温从多个方面加剧了滤失现象：①聚合物分子链降解，常见降滤失剂（如天然高分子与合成聚合物）在高温条件下易发生分子链断裂或官能团水解（如酰胺基、磺酸基等），削弱其吸附能力、水化性能及封堵效能；②黏土颗粒聚集，高温促进黏土颗粒脱水并加速其聚沉，导致体系中有效胶体颗粒数量减少，滤饼孔隙度上升；③滤液黏度下降，温度升高引起滤液黏度降低，进而提高滤液在地层中的渗透速率。

1.2.2 压力的影响

高压主要通过物理压缩机制影响滤失行为：①滤饼压实作用，较高压力可增强滤饼的密实性，降低其渗透率，但压力过高可能诱发滤饼结构破裂，形成导流裂隙；②压力传导效应，在高温高压协同条件下，滤液更易被驱动进入微裂缝发育地层，从而加剧滤失程度。

1.2.3 地层环境的影响

地层特性对滤失的控制作用主要体现在：①孔隙结构与渗透性，高渗砂岩或裂缝性储层会显著增大滤失风险，需借助刚性颗粒材料（如超细碳酸钙）或纳米封堵剂实现有效封堵；②地层水化学组成，高矿化度地层水（含Ca^{2+}、Mg^{2+}等）可引起聚合物分子链卷曲、析出，或与降滤失剂发生沉淀反应（如磺酸盐转化为磺酸钙），导致其功能退化。③地应力场非均质性，在非均质地层中，滤液倾向于沿最小主应力方向优势侵入，可能诱发局部井壁稳定问题。

温度、压力与地层条件之间存在复杂的交互作用，其综合效应远较单一因素影响更为显著。高温会降低降滤失剂的化学稳定性，高压则强化滤液侵入动力，而地层高矿化度或含水特性进一步协同加速滤失进程。鉴于钻井过程中温度与压力随井深动态变化，降滤失剂需具备宽温压范围内的适应性与稳定性，以保障钻井液性能的可靠性。

2 降滤失剂研究进展

降滤失剂作为钻井液关键核心处理剂之一，其核心作用机理是通过在井壁表面形成致密、低渗透且具有良好韧性的滤饼层，从而有效控制钻井液的滤失量。这种作用不仅能显著降低钻井液滤液对地层的侵入，更能有效预防因滤液侵入导致的井壁坍塌和储层伤害等工程问题。在耐高温高盐降滤失剂研究领域，国内外学者已开展了大量卓有成效的工作，总体上降滤失剂可归纳为四大类：天然高分子及其改性产物、合成聚合物、磺化材料以及纳米复合材料。

2.1 天然高分子及其改性产物

天然高分子聚合物及其衍生物因其来源广泛、成本低廉、环境友好且可生物降解等优势，成为耐高温抗盐降滤失剂的重要选择。淀粉、纤维素和腐殖酸等是常见的天然高分子降滤失剂。然而，未经改性的天然高分子聚合物耐温性能有限（通常低于130 ℃），主要适用于浅层钻井作业。为提升其性能，研究者通过化学改性和复配技术显著改善了这类材料的耐高温抗盐能力。目前主要的改性方法包括醚化改性、接枝改性和交联改性等，这些方法通过引入特定官能团或构建交联网络结构，有效增强了天然高分子在苛刻钻井环境下的稳定性。

2.1.1 淀粉类

淀粉作为一种由α-葡萄糖单元构成的天然多糖高分子化合物，其分子结构中富含羟基官能团。一方面，这些羟基能够与黏土片层产生吸附作用，促进黏土颗粒的水化分散；另一方面，羟基通过氢键作用可有效束缚水分子，降低自由水的渗透性。值得注意的是，淀粉葡萄糖单元上的C2、C3和C6位羟基作为活性位点，为化学改性提供了可能。

为克服天然淀粉耐温性差、抗盐性不佳等局限，研究者发展了多种改性路径，核心在于对其活性羟基进行定向调控，通常采用醚化改性、接枝共聚改性和交联改性等三类。通过优选淀粉发现木薯淀粉相较于马铃薯淀粉和玉米淀粉具有更优异的耐温性能，通过共糊化改性技术对木薯淀粉进行功能强化，成功将其耐温性能提升至140~160 ℃的高温区间[15]。醚化改性（如使用环氧氯丙烷）是通过在聚合物链引入醚键，显著提升产物的耐温与抗盐性能，研究证实淀粉经醚化改性可提升高温下的流变与滤失稳定性[16]。环氧乙烷、环氧丙烷和氯乙酸等是常用的醚化剂[11]。接枝共聚改性则通过引入丙烯酰胺（AM）、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸（AMPS）和N-乙烯基吡咯烷酮（NVP）等乙烯基单体[17-19]，在淀粉主链上嫁接高性能聚合物支链[20]，从而优化其在苛刻条件下的综合性能。而交联改性的着力点在于构建三维网络结构，如使用交联剂亚甲基双丙烯酰胺（MBA）等。采用可溶性淀粉与MBA的反相乳液聚合交联，由此制得的微纳

米级球形淀粉颗粒(图1)不仅能通过物理堵塞作用封堵滤饼孔隙[21],其优异的弹性还实现了“弹性填充”效应,在150 ℃下展现出卓越的降滤失效果且对钻井液流变性影响极小。改性淀粉类降滤失剂作用机制也从单纯的水化升级为构建致密滤饼与智能物理封堵的多重协同,最终实现性能的提升。

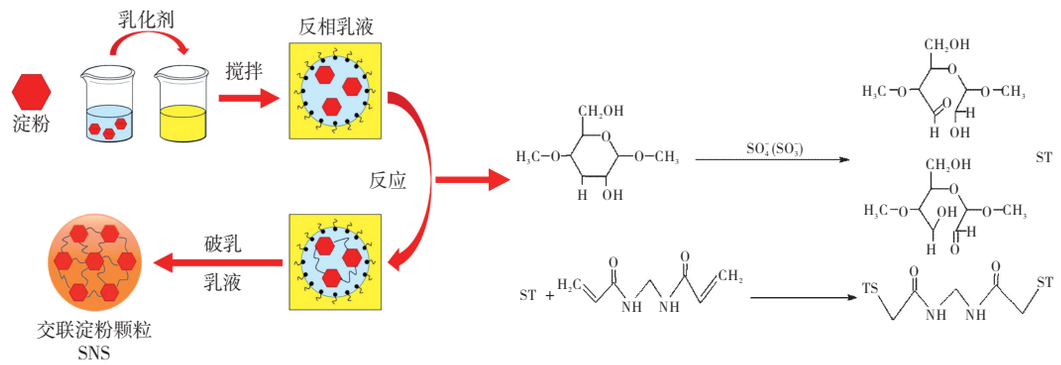


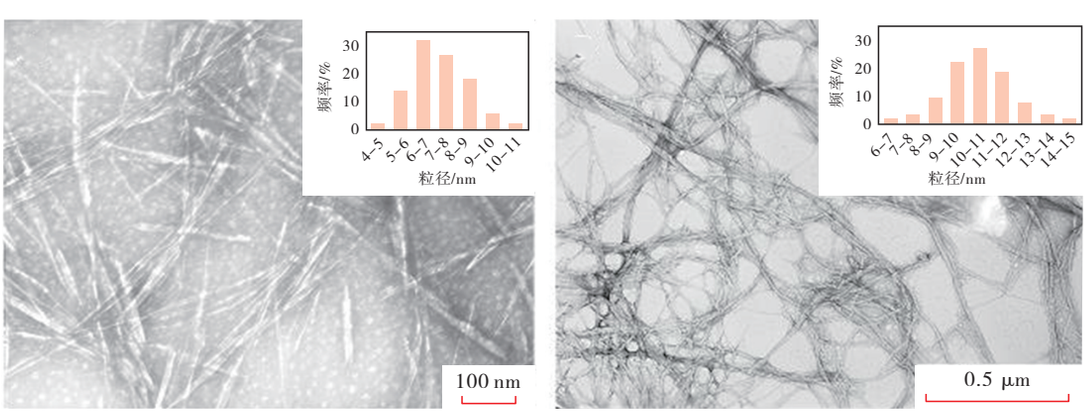
图1　可溶性淀粉与MBA的反相乳液聚合交联反应过程[21]

Fig. 1 The cross-linking reaction process of soluble starch and MBA by inverse emulsion polymerization[21]

2.1.2　纤维素类

纤维素与淀粉虽然同属多糖类高分子化合物,但其分子结构存在显著差异。纤维素由D-葡萄糖通过β-1,4糖苷键连接形成线性分子链,具有较高的聚合度,且分子内和分子间存在较强的氢键网络,这使得纤维素在热稳定性方面明显优于淀粉。但这种致密的晶体结构也导致其水溶性较差,必须经过化学改性才能应用于钻井液体系。目前主要的改性方法包括醚化改性和纳米化处理等。

改性纤维素降滤失剂的发展呈现出多元化特点,其中醚化改性是最成熟的路线,衍生出羧甲基纤维素(CMC)、聚阴离子纤维素(PAC)和羟乙基纤维素(HEC)等典型产品[22-24]。它们在性能上各有侧重:阴离子型的CMC和PAC提供了良好的耐温性(后者可达180 ℃)[25];而非离子型的HEC则在抗盐性能上表现优异。纳米化改性为纤维素性能提升提供了新思路,例如改性产物CNCFL-1[26]在高温条件下能大幅降低滤失量。通过将纤维素解构为纳米尺度的纤维素纳米晶体(CNC)或纤维素纳米纤维(CNF)(图2)[27-28],极大增加了其比表面积和活性位点,其中CNC被证实能形成更薄、渗透率更低的致密滤饼,展现出优于CNF的封堵能力。研究表明,此类纳米材料不仅能通过吸附和增黏发挥作用,更能凭借其纳米尺寸效应实现高效的物理封堵,极大提升钻井液性能。纤维素类降滤失剂的性能提升,逐渐从传统的基团改性向微观结构调控深化。纳米化技术通过发挥纳米材料独特的增强与封堵效应,成功地将纤维素的高温稳定性提升至新的水平。



(a) CNC微观形貌和粒径分布　　(b) CNF微观形貌和粒径分布

图2　纳米化纤维素透射电镜图像和粒径分布[27]

Fig. 2 Transmission electron microscopy image and particle size distribution of nanocellulose[27]

2.1.3　腐植酸类

腐植酸是一种具有复杂结构的天然有机大分子,其分子骨架主要由芳香环构成,含有丰富的酚羟基、醇羟基、羧基和羰基等活性官能团。这些官能团赋予腐植酸优异的吸附性能,使其在碱性条件下能够与黏土颗粒发生有效吸附和水化作用,从而显著降低钻井

液滤失量[29]。由于腐植酸是以碳链和芳香环为主的分子结构，腐植酸本身即具有出色的热稳定性，通过接枝共聚引入特定的合成单体，可构建兼具天然产物特性与合成聚合物高性能的杂化分子。通过将聚合单体和磺化剂（JSJ）接枝共聚到腐植酸分子上，得到的改性腐植酸降滤失剂CPHA在200 ℃、含盐15%条件下仍能保持72 h的稳定性能[30]。Xu等[31]利用腐植酸、木质素等为原料，与含酰胺及硅烷基团的单体共聚制备了去磺化降滤失剂FLO-H，在200 ℃高温下添加3% FLO-H时的API滤失量控制在6.2 mL。通过对腐植酸进行分子结构功能化设计，特别是引入具有耐温抗盐能力的合成支链，能够显著提升其在高温条件下的综合性能。

除上述传统天然高分子外，木质素[32]、车前子壳[33]和环糊精[34]等材料经改性后也可作为降滤失剂使用。这类材料虽然具有环境友好、成本低廉等优势，但其耐温抗盐性能普遍存在局限。淀粉和纤维素类衍生物经过多种化学改性后，耐温性能通常仍难以突破180 ℃；腐植酸类材料虽耐温性能较好，但在当前日益严格的环保要求下面临应用限制。

2.2　合成聚合物

相较于天然高分子降滤失剂，合成聚合物降滤失剂因其可调的功能基团、可控的分子链形态、结构及分子量等优势[35]，成为近年耐温抗盐降滤失剂的研究热点。为提升其性能，通常采取以下策略：向主链或侧链引入刚性位阻基团增强分子链刚性，以磺酸基替代羧基作为阴离子水化基团改善耐温抗盐性[36]，适度交联提高耐温能力，或利用两性离子“反聚电解质”效应增强抗盐性。

在聚合物降滤失剂的研发领域，国外研究机构和企业展现出显著的技术优势，研究成果已实现广泛的商业化应用。以AM/AMPS共聚物为代表的功能性聚合物体系，已形成多个具有国际影响力的商业化产品系列。典型代表包括：德国巴斯夫公司开发的Polydrill、COP-1和COP-2系列产品[37]；贝克休斯公司推出的Pyro-Trol和Kem Seal高效降滤失剂[38]；哈里伯顿公司研发的TSF聚合物体系[39]；斯伦贝谢公司创新的VeraVis支化聚合物技术[40]；以及雪佛龙公司开发的Driscal D和Dristemp系列产品[41-42]。这些先进材料和技术目前在国际高温钻井液添加剂市场一直占据着主导地位。

相较之下，我国在高温聚合物降滤失剂领域的研究起步相对较晚。随着我国油气勘探向深层、超深层高温高盐地层拓展，对降滤失剂的耐温抗盐性能提出了更高要求，这促使国内科研机构和企业加速开展相关研究。目前，国内学者主要从聚合物分子构型设计入手，将高温聚合物降滤失剂分为线型聚合物和结构聚合物等类别进行系统性研究。

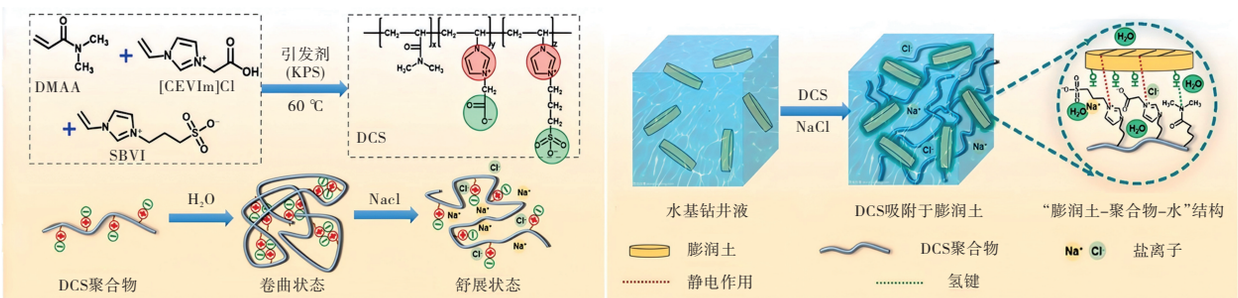
2.2.1　线型聚合物

线型聚合物降滤失剂因其优异的分子量与良好的水溶性得到广泛研究。这类聚合物具有独特的分子结构特征，其主链由柔性的—C—C—键构成，赋予分子良好的构象自由度；侧链通过精心设计包含多种功能基团，如吸附基团（酰胺基、季铵阳离子或醚键等）、水化基团（羧基或磺酸基等）以及刚性基团（苯环或杂环等）。这种结构设计使线型聚合物能够有效吸附于黏土表面，显著促进黏土颗粒的水化分散性能。

AMPS单体的引入是推动丙烯酰胺类聚合物降滤失剂性能实现跨越式提升的关键。AMPS聚合物分子结构中的磺酸基团具备强水化能力和对二价阳离子的高耐受性，这从根本上赋予了共聚物产物优异的耐温抗盐基础。一方面构建以刚性磺酸基为核心的多元共聚物骨架，通过AMPS与其他单体的共聚形成具有内在热稳定性的刚性主链。王中华研究团队系统性开发出三元AMPS共聚物P（AMPS/AM/AN）[36]、P（AMPS/IPAM/AM）[43]及P（AMPS/AM/DEAM）[44]等一系列产品。这些产品不仅表现出优异的抗盐性能，更将聚合物的耐温能力显著提升至180~200 ℃的高温区间。另一方面通过引入离子基团以强化吸附与稳定机制，进一步提升聚合物在高温高盐条件下对黏土颗粒的吸附稳定性。研究人员致力于在聚合物分子链中引入特定离子基团，如阳离子基团（如季铵盐）的引入可通过与黏土颗粒表面的负电荷位点产生强静电吸附，增强聚合物的包被与固定能力；而两性离子结构的设计则能发挥独特的“反聚电解质”效应，即在盐溶液中聚合物分子链反而趋于伸展，从而显著抵消盐析效应，提升抗盐性能[45]。

基于上述机理，在共聚物中同时引入阴、阳离子单体以构建两性离子结构，可有效增强其在高温高盐条件下的性能表现。Bai等[46]和Li等[47]分别通过四元共聚和两性离子功能化策略制备两性离子聚合物，得到的降滤失剂在饱和盐水中的耐温能力分别达到180 ℃与200 ℃。Li等[48]通过合成含刚性咪唑环的阳离子单体，开发出两性离子共聚物DCS（图3），其在200 ℃和饱和盐条件下仍具备优异的吸附与滤失控制能力。罗明望等[49]与Tchameni等[50]以NVP等为辅助单体，优化得到耐温达230 ℃、抗盐至15%~20%NaCl的高性能降滤失剂PANAD与AB-47。当前，对AMPS类线型聚合物降滤失剂的研究，已从早期的简单二元共聚发展到基于明确构效关系的多元单体协同阶段。

其核心在于通过协同引入磺酸基、阳离子及两性离子等多种官能团，构建兼具刚性骨架、强吸附能力与优异水化作用的先进聚合物分子，从而系统性地解决高温与高盐环境下的滤失控制难题。



(a) DCS制备过程　　(b) DCS和膨润土相互作用

DMAA：N，N-二甲基丙烯酰胺；[CEVIm]Cl：1-(2-羧乙基)-3-乙烯基咪唑氯盐；SBVI：磺基甜菜碱乙烯基咪唑

图3　DCS共聚物的制备及作用机理[48]

Fig. 3　Preparation and working mechanisms of DCS copolymers[48]

此外，通过引入有机硅单体与黏土表面发生化学键合，可显著增强聚合物在高温条件下的吸附稳定性。常用的有机硅单体包括：乙烯基三甲氧基硅烷(A-171)[51]、乙烯基三乙氧基硅烷(A-151)[52]、N-(3-三乙氧基甲硅氧烷基)丙基丙烯酰胺(APTS)[53]及γ-(甲基丙烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷[54]等。这些单体中的硅氧烷基团(Si—OR)在高温条件下可与黏土表面的羟基发生缩合反应，形成稳定的Si—O—Si化学键，从而显著增强聚合物在黏土表面的吸附强度，有效提升材料的高温稳定性。

2.2.2　结构聚合物

结构聚合物是指通过分子设计使降滤失剂分子呈现特定空间构型的一类聚合物。这类聚合物因其独特的空间结构具有出色的热稳定性和盐稳定性，能有效增强降滤失剂的耐温抗盐性能。根据分子结构特征，结构聚合物主要可分为三类：支链型聚合物、微交联型聚合物和微球型聚合物。其中，支链结构通过增加分子链的空间位阻效应提高稳定性；微交联结构通过适度交联增强分子骨架刚性；微球结构则利用其规整的物理结构实现优异的耐温抗盐性能。

支链聚合物分子设计核心在于通过构建特定的拓扑结构来增强分子刚性，从而显著提升耐温抗盐性能。根据分子结构与作用机理的不同，目前主要形成了梳状聚合物、疏水缔合聚合物和超支化聚合物等具有代表性的技术路线。梳状聚合物通过在线性主链上引入规整的侧链，利用侧链间的空间位阻效应和静电排斥作用有效抑制分子链在高温高盐环境下的卷曲，维持较大的流体力学体积，从而保障降滤失性能的稳定性[55]。此外，部分长侧链还能插入黏土片层，增强与黏土颗粒的相互作用。Yang等[56]选用不同分子量的异戊烯醇聚氧乙烯醚(TPEG)作为功能侧链，成功制备了具有优异高温稳定性的梳状聚合物。该材料在220 ℃高温下仍保持稳定，并对Na^+(15%)和Ca^{2+}(0.5%)表现出卓越的耐受性。梳状聚合物中强水化的磺酸基团提供了对盐不敏感的水化能力，而非离子型的聚乙二醇侧链则通过双重作用机制发挥效能，既通过增加扩散双电层厚度来稳定体系，又能嵌入黏土片层促进颗粒水化和分散，形成致密滤饼(图4)。疏水缔合聚合物通过在主链中引入疏水单体，在溶液中形成动态的物理交联网络，这一独特的结构转变使其在高温高盐条件下仍能保持良好的性能。研究表明，疏水缔合聚合物通过在主链引入疏水单体甲基丙烯酸月桂酯(LMA)[57]，在溶液中形成可逆的物理交联网络，使其在高温(200 ℃)高盐(30%NaCl)条件下能有效维持钻井液的流变与滤失稳定性。而超支化聚合物JHPAN(图5)则通过其三维多臂拓扑结构，集成大量功能基团协同作用，在220 ℃饱和盐水环境中实现优越的滤失控制(API滤失量和高温高压滤失量分别为11.8 mL和25.5 mL)[58]。JHPAN通过支链结构提供大量的吸附位点、水化基团和耐温抗盐单元，协同增强了与黏土颗粒的相互作用，能够实现分子刚性增强与界面相互作用强化的协同效应，可强化极端条件下的滤失控制性能。

作为结构聚合物降滤失剂另外两大研究方向，微交联聚合物与微球聚合物在提升钻井液耐温抗盐性能方面展现出显著优势与互补机制。微交联聚合物通过构建适度交联的三维网络结构，在维持水溶性的同时有效增强了聚合物的结构稳定性。早期研究通过引入β-环糊精作为骨架结构，利用氢键与离子键协同作用改善滤饼质量，实现了高温高盐条件下的滤失控制[59]。后续研究进一步通过共价微交联与两性离子“反聚电解质”效应的协同(图6)强化了耐温抗盐

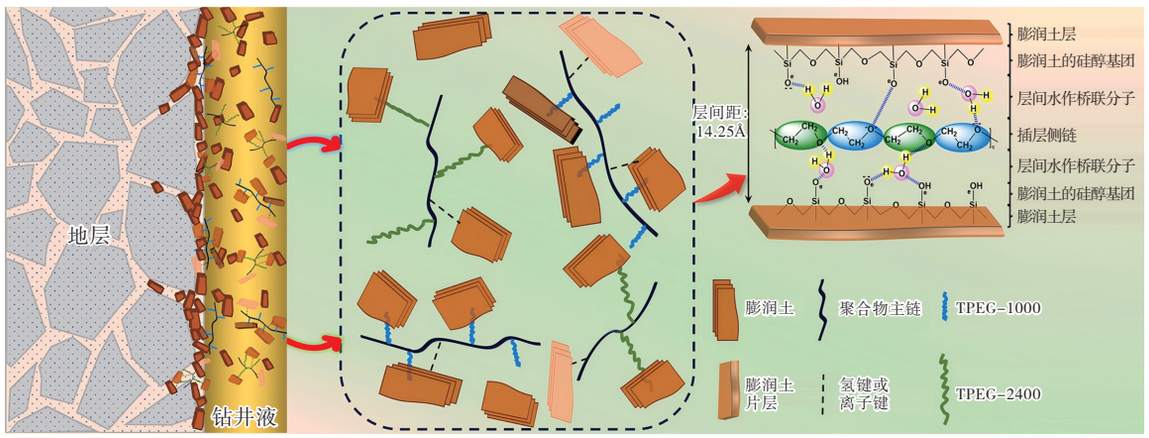
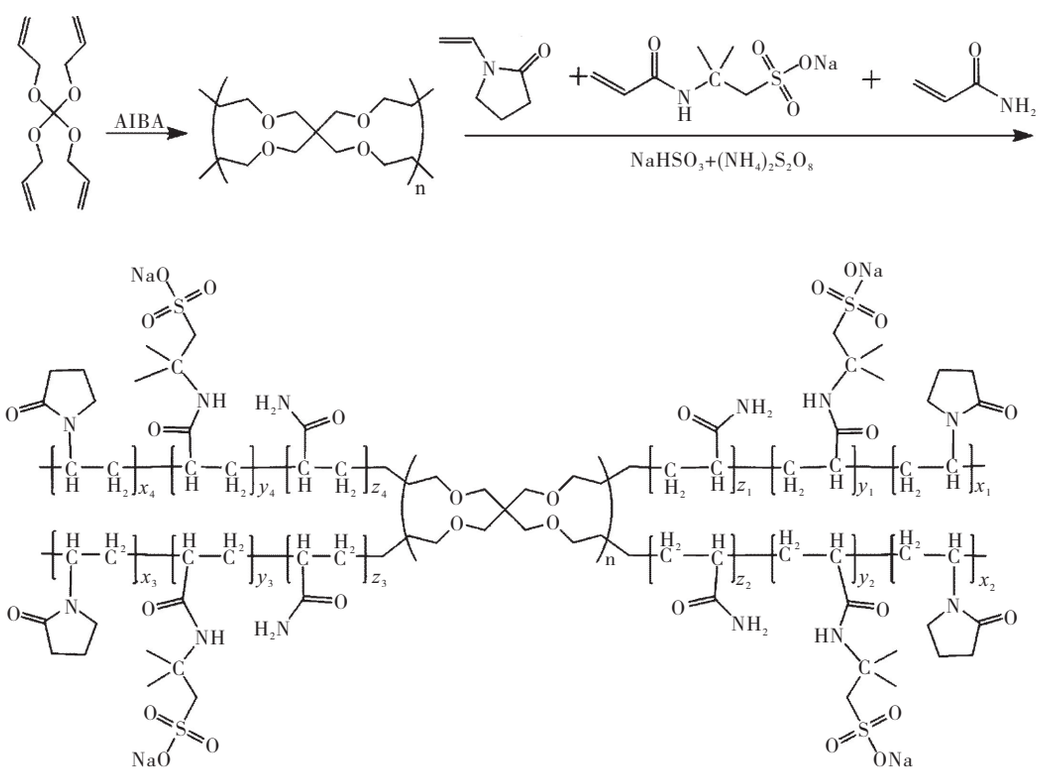


图4　梳状聚合物滤失控制机理[56]

Fig. 4　Fluid loss control mechanism of comb polymer[56]



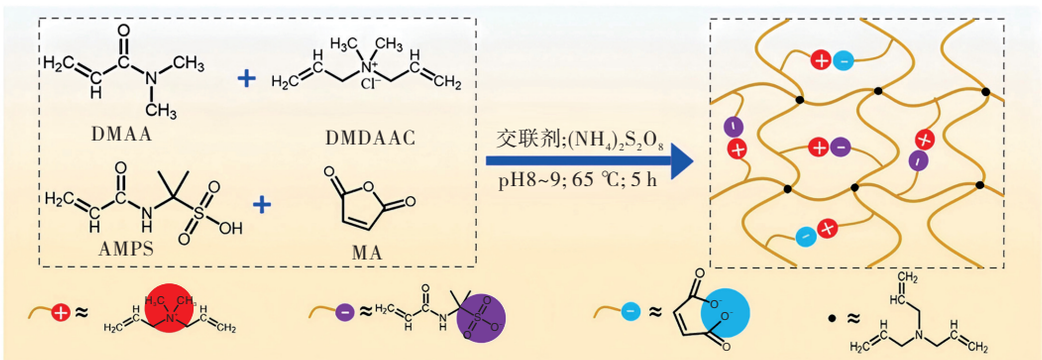
引发剂：2，2′-偶氮(2-甲基丙基脒)二盐酸盐(AIBA)

图5　超支化聚合物降滤失剂JHPAN合成路线[58]

Fig. 5　Synthesis route of hyperbranched polymer fluid loss reducer JHPAN[58]

性能[60]。值得关注的是，双重交联策略的提出标志着结构设计的重大进展，通过有机-无机交联剂的协同作用构建了更稳定的三维网络，将降滤失剂的耐温性能提升至210~220 ℃，有效抑制了高温降解，展现出更优的滤失控制能力[61]。微球聚合物则凭借其规整的球形结构、可控的粒径分布与优异的热稳定性，通过吸附-桥连、吸水膨胀与堆积封堵等多重机制协同作用实现滤失控制。从早期自交联微球的热变形与成膜特性[62]，到核壳结构微球的吸附-变形-堵塞协同机制[63]，微球设计不断优化。特别是微球-线型聚合物复合体系的开发实现了常温胶体稳定与高温孔隙封堵的协同[64]，如微球聚合物复合材料(ADA@SM)展现了响应型智能控制的优势(图7)。这两类材料分别从分子网络构建与微观结构设计两个维度推进了降滤失剂的技术发展，其结构优化策略与作用机制研究为下一代高性能钻井液材料的开发提供了重要理论基础与技术路径。

合成聚合物降滤失剂是应对高温高盐钻井环境



DMAA:N,N-二甲基丙烯酰胺;DMDAAC:二甲基二烯丙基氯化铵;MA:马来酸酐

图6 微交联型两性降滤失剂DDAM的合成方法和结构式[60]

Fig. 6 Synthesis method and structural formula of micro-crosslinked amphoteric fluid loss reducer DDAM[60]

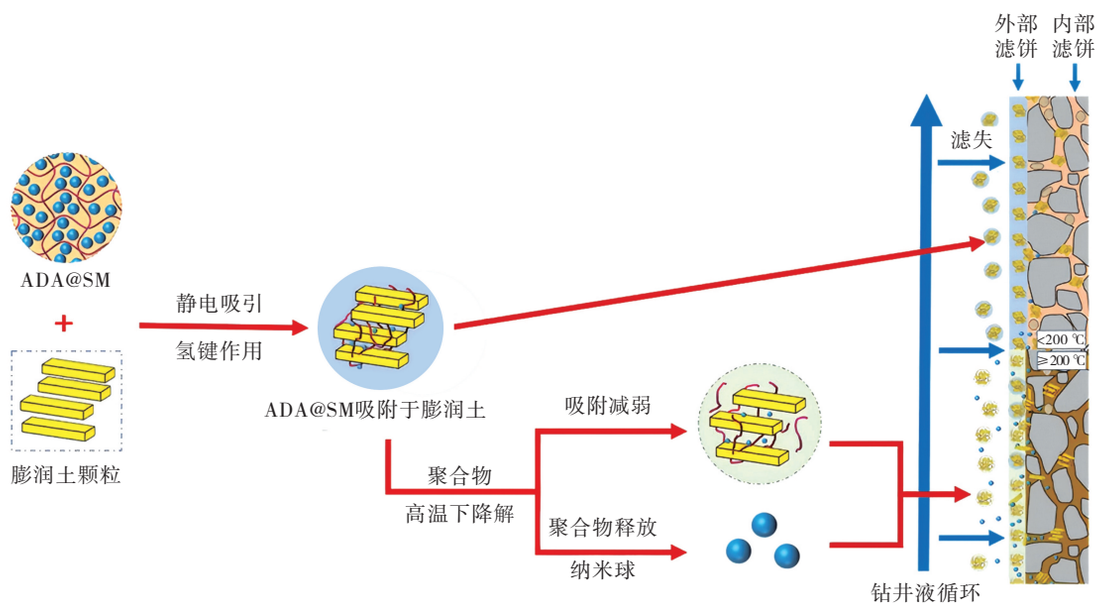


图7 ADA@SM在钻井液中的作用机理[64]

Fig. 7 Mechanism diagram of ADA@SM in drilling fluids[64]

的核心技术。与国际先进水平相比,国内产品在极端条件下的长期稳定性仍有提升空间。当前技术发展表明,通过精准的分子设计构筑支链、微交联及微球等特定拓扑结构,可显著超越传统线型聚合物的性能极限。这些结构聚合物通过增强空间位阻、构建动态物理交联网络、发挥纳米尺度封堵效应等多重协同机制,有效抑制了高温裂解与盐离子去水化作用,可在极端工况下维持优异的滤失控制性能。

2.3 磺化材料

因具有优异的耐高温和抗盐性能,磺化降滤失剂自20世纪70年代以来一直是深井、超深井钻井液技术的核心处理剂之一。早期,以罗平亚院士为代表的国内研究团队通过磺化改性天然聚合物和树脂,成功研制出磺化酚醛树脂(SMP)、磺化褐煤(SMC)和磺化褐煤树脂(SPNH)等第一代磺化降滤失剂,并以此为基础建立了耐高温抗盐的磺化/聚磺钻井液体系[2]。该体系在高温高压环境下表现出良好的滤失控制能力,至今仍广泛应用于深井和超深井钻探作业。随着研究的深入,磺化降滤失剂的种类不断丰富。研究人员通过对不同高分子材料进行磺化改性,开发了磺化木质素、磺化沥青、改性磺化酚醛树脂等多种衍生物,进一步优化了磺化降滤失剂的耐温性和抗盐性。磺化反应引入的磺酸基团(—SO_3H)不仅增强了分子的水化能力,还提高了降滤失剂在高温和高矿化度环境下的稳定性,使其在200 ℃以上仍能有效控制滤失量。此外,磺化降滤失剂通常兼具封堵和抑制黏土分散的作用,能够形成致密滤饼,降低钻井液向地层的滤失。

近年来,随着环保法规的日益严格,磺化降滤失剂的应用受到一定限制。一方面,传统磺化工艺常使

用浓硫酸或发烟硫酸作为磺化剂，反应过程中可能产生含硫废水，增加环保处理成本；另一方面，部分磺化产物（如磺化酚醛树脂）可能残留游离甲醛，不符合绿色化学的发展趋势。此外，磺化降滤失剂在高钙、镁离子环境中可能发生沉淀，影响其性能稳定。

2.4　纳米复合材料

因具有独特的量子尺寸效应、表面效应和宏观量子隧道效应[65]，纳米材料在钻井液降滤失领域展现出显著优势。材料具有的纳米级尺寸和超高比表面积使其能够有效填充滤饼和井壁的微纳米孔隙，实现高效封堵。在滤失过程中，纳米材料会向滤饼形成区域定向迁移，通过物理堵塞和界面相互作用促进形成薄而致密的优质滤饼[66]，从而显著降低滤失量。目前，多壁碳纳米管[67]、石墨烯纳米片[68]、纳米碳酸钙[69]和纳米氧化铁[70]等纳米材料已被广泛研究应用于高温降滤失领域。纳米复合材料是指两种及以上纳米尺度组分通过化学键（离子键、共价键、配位键等）或物理作用（氢键等）在纳米尺度上复合形成的多功能材料[71]。无机-有机纳米复合材料将无机纳米材料的刚性骨架和优异热稳定性与有机聚合物的功能性和耐温抗盐特性有机结合，实现了材料性能的协同提升。这种复合体系通过纳米材料与聚合物的协同作用可显著改善高温条件下钻井液的滤失性能[72]。当前研究热点主要集中在以下几类纳米复合材料：纳米SiO_2-聚合物复合材料、石墨烯-聚合物复合材料、纳米锂皂石-聚合物复合材料以及水滑石-聚合物复合材料等。

2.4.1　纳米SiO_2-聚合物复合材料

作为一类关键的无机纳米添加剂，纳米SiO_2通过其独特的体积效应与量子隧道效应可与聚合物基体产生显著的协同增强作用。其核心机理在于纳米SiO_2表面能够与有机聚合物链中的π电子云发生重叠并诱导交联，在分子层面构建起更为刚性的三维网络结构，最终宏观表现为材料耐温性与抗盐性的全面提升[73]。早期研究通过将纳米SiO_2与AM、AMPS等单体共聚，成功制备了疏水缔合型复合材料，并在现场试验中验证了其在220 ℃以上高温环境中的稳定滤失控制能力（API滤失量<5 mL）[74]。进一步的结构创新体现在核壳杂化设计上，例如以纳米SiO_2为核，与两性离子单体共聚构建的纳米SiO_2两性离子聚合物复合材料（ZSHNM），不仅实现了纳米尺度的粒径控制与长期分散稳定性，更将耐温极限提升至240 ℃，抗盐至高浓度$CaCl_2$及饱和盐水[75]。界面相互作用有效强化了性能的突破，如纳米SiO_2聚阴离子纤维素聚合物复合材料（PAC-DDAS-SiO_2）通过纳米SiO_2对聚阴离子纤维素链的刚性增强、链上丰富阴离子基团与黏土颗粒的氢键/离子键合、对入侵离子的吸附屏蔽等多重机制（图8），在260 ℃超高温或35%$CaCl_2$高盐条件下仍能维持优异的滤失控制性能[76]。其作用本质在于通过形成致密滤饼与稳定分散体系实现了极端条件下的结构稳定性。纳米SiO_2与聚合物的复合已从初期的简单共混复合，发展到如今精准调控的杂化结构与多机制协同的阶段。

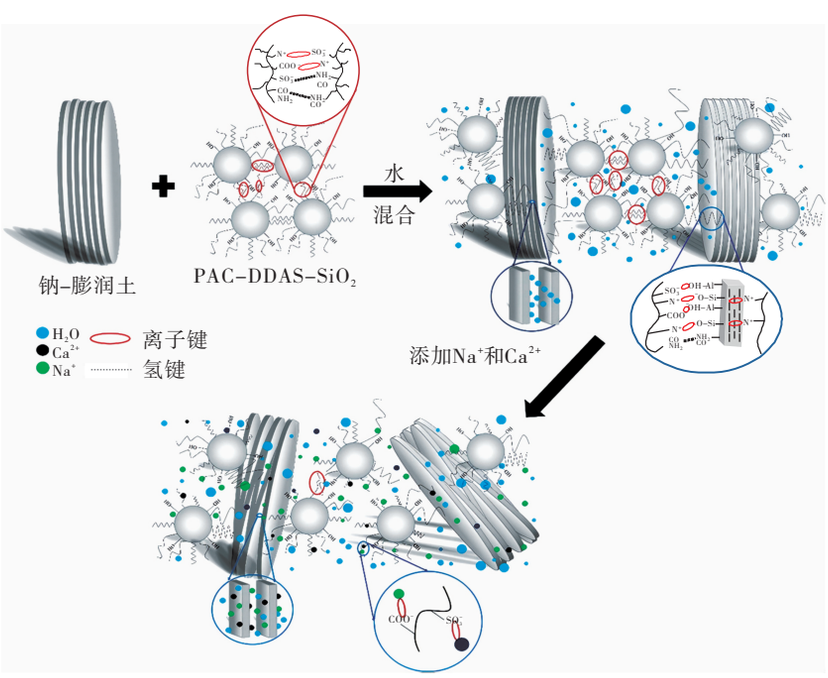


图8　PAC-DDAS-SiO_2与黏土颗粒作用机理[76]

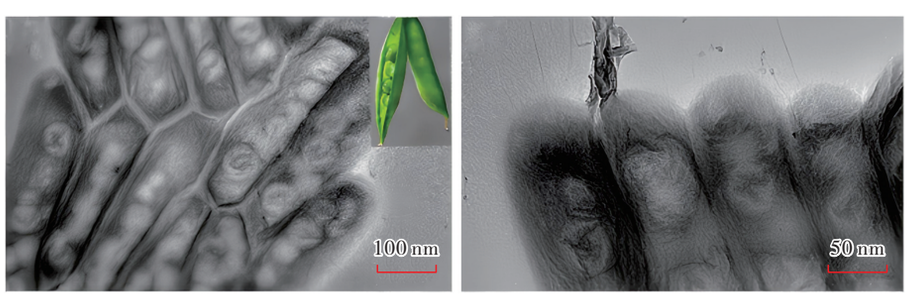
Fig. 8　Interaction mechanism between PAC-DDAS-SiO_2 and clay particles[76]

2.4.2 石墨烯-聚合物复合材料

作为石墨烯的重要衍生物，氧化石墨烯（GO）凭借其独特的二维纳米片层结构、高比表面积及丰富的表面官能团在钻井液滤失控制领域展现出巨大潜力。其作用机制主要基于片层对滤饼纳米级孔隙的物理封堵效应[77-78]，能有效抑制滤液侵入和页岩水化[79]。但GO在实际应用中面临添加量高、成本效益低的难题。为克服这一局限，研究方向转为以GO为纳米增强相，与聚合物构建复合材料的策略，协同提升性能与经济效益，典型研究如GO与PAM的复合。在该体系中，GO主要发挥物理封堵功能，而PAM聚合物则通过增强颗粒间黏附力显著改善滤饼在剪切流动下的结构稳定性，二者协同作用使复合材料的降滤失性能超越了单一组分[80-81]。此外，该类复合材料所继承的石墨烯家族的优异导热性也为高温条件下的热转变提供了潜在优势。GO与聚合物复合，不仅解决了单独使用时的成本难题，更通过纳米片层的封堵作用与高分子链的黏结功能实现了性能协同，是推动石墨烯基材料走向实际应用的有效路径。

2.4.3 纳米锂皂石-聚合物复合材料

纳米黏土矿物是一类天然或人工合成的、至少在一个维度上达到纳米尺度的层状硅酸盐黏土矿物。通过将纳米级黏土矿物与聚合物复合，能成功整合黏土矿物的纳米特性与聚合物的分子设计性，在钻井液滤失控制领域展现出独特优势[82-83]。该类材料性能的提升主要源于其精巧的微观结构设计。研究发现，纳米锂皂石疏水聚合物复合材料（AADS@LP）通过构建“豆荚”状复合结构（图9），可实现纳米片层与聚合物链的紧密整合，该结构不仅通过疏水缔合作用促进黏土分散，更能通过物理封堵机制有效降低滤失量，从而赋予材料优异的热稳定性[84]。进一步的研究通过引入改性纳米锂皂石与多种功能单体共聚，开发出具有微交联结构的纳米复合材料。此类材料中，纳米片层通过氢键与共价键均匀分散于聚合物网络中，显著增强了整体结构的刚性，使其在200 ℃高温老化后仍能维持良好的滤失控制性能[85]。值得关注的是，通过精确调控纳米片层与聚合物网络间的相互作用（氢键、静电作用等），可获得性能更为卓越的复合材料体系。例如，纳米锂皂石四元聚合物复合材料（PDADA-LAP）通过在聚合物网络中均匀分散的纳米片层构建稳定的微交联结构（图10），不仅有效缓解了盐污染对膨润土的不利影响，更使钻井液在220 ℃高温及20%NaCl下仍保持优异的降滤失性能[86]。



(a) “豆荚”状结构　　(b) “豆荚”间的通道

图9　AADS@LP透射电镜图[84]

Fig. 9 Transmission electron microscopy image of AADS@LP[84]

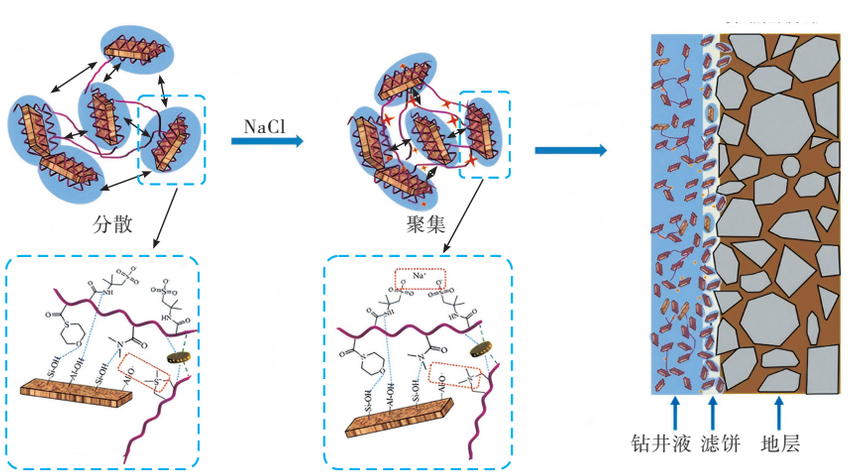


图10　PDADA-LAP作用机理[86]

Fig. 10 The mechanism of PDADA-LAP[86]

2.4.4　水滑石-聚合物复合材料

水滑石（LDH）是一种由纳米片层和带有永久正电荷的可交换层间阴离子组成的层状材料，其独特的夹层结构、可调控的层间距以及阴离子交换特性赋予了LDH优异的插层和缓释性能[87-88]。值得注意的是，LDH与膨润土具有相似的层状结构但相反的层状永久电荷，可通过自组装形成网络结构，从而表现出良好的触变性能[89-90]。基于此，开发了以LDH为载体的缓释型纳米复合材料，利用LDH的层间空间作为聚合物链的“纳米容器”，通过原位聚合将阴离子聚合物，如阴离子聚合物插层水滑石材料（PSADM-LDH），嵌入层间，形成插层结构（图11）。该结构能有效屏蔽高温与剪切应力对聚合物的直接破坏，并在特定盐水中实现聚合物的可控释放。释放出的聚合物可吸附于黏土颗粒表面，抑制其团聚，从而在160~240 ℃的宽温区内持续改善钻井液的流变与滤失性能[91]。进一步的结构优化产生了插层-剥离型复合材料，如水滑石两性离子梳状聚合物复合材料（P-LDH），实现了纳米片层与聚合物更充分的协同（图12）。该材料通过氢键、静电吸附及插层效应与膨润土产生强界面作用，不仅保障了其在240 ℃与15%NaCl下的稳定分散，更能通过纳米-微米级孔隙的协同封堵作用形成致密滤饼。此双重机制使P-LDH在极端条件下仍能将API滤失量与高温高压滤失量分别控制在6.3 mL与29.6 mL，展现出卓越的胶体稳定性与滤失控制能力[92]。综上所述，水滑石基复合材料通过其独特的层状结构实现了对聚合物的有效保护与可控释放，并借助与黏土颗粒的强界面作用及物理封堵效应成功解决了高温高盐钻井液的滤失控制难题，成为未来深部复杂地层钻探中关键性的特种材料。

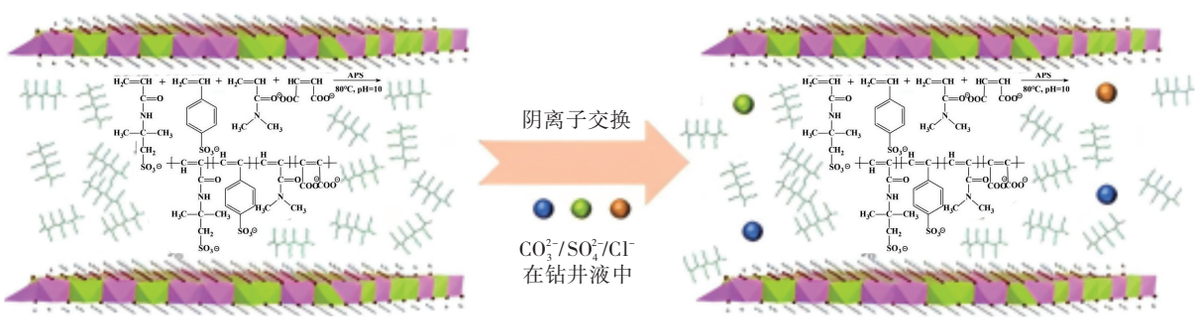


图11　PSADM-LDH的阴离子交换过程[91]

Fig. 11　Anion exchange process of PSADM-LDH[91]

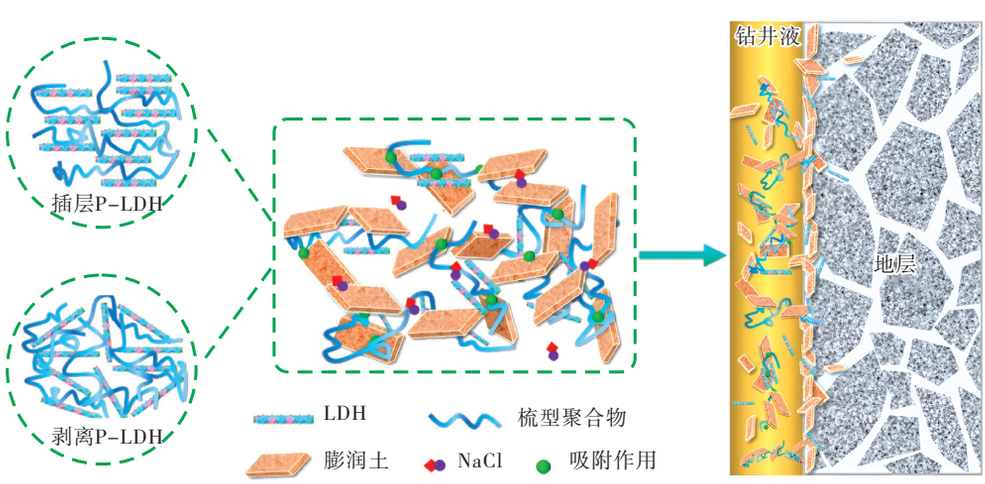


图12　P-LDH的滤失控制机理[92]

Fig. 12　Fluid loss control mechanism of P-LDH[92]

以上研究成果通过精巧的多尺度结构设计，实现了纳米复合材料耐温抗盐性能的跨越式提升。其核心机理在于利用纳米组分独特的体积效应、表面效应与拓扑结构，与聚合物基体产生协同增强作用。一方面，纳米相作为刚性支撑点，显著提升了聚合物网络的整体刚性与热稳定性；另一方面，其巨大的比表面积大大强化了与黏土颗粒的界面吸附与桥接能力，并通过纳米级物理封堵作用优化了滤饼质量。该材料体系正从简单的物理共混向精细的界面设计与智能响应方向发展。

3 水基钻井液高温降滤失剂对比

现有高温降滤失剂大致分为天然高分子及其改性产物、合成聚合物、磺化材料和纳米复合材料等四类。主要机理为通过吸附于黏土表面增加水化膜厚度，促进其分散形成致密滤饼，再辅以小尺寸固相颗粒对孔隙和裂缝进行物理封堵，强化滤饼渗透率，降低滤失量。天然聚合物基本用于中低温滤失控制，高温降滤失主要以合成聚合物和磺化材料为主，纳米复合材料目前多处于室内研究阶段，还需进一步探索以增加现场应用的可行性。

通过对当前高温降滤失剂的研究与应用开展综述，从各类降滤失剂的材料特点、耐温抗盐性能及成本等方面进行系统对比，见表1。

表1 水基钻井液高温降滤失剂分类对比

Tab. 1 Classification and comparison of high-temperature fluid loss reducers for water-based drilling fluid

类别	类型	典型代表	特点	耐温性能	抗盐性能	成本	局限性
天然高分子及其改性产物	改性天然高分子	羧甲基纤维素(CMC)、羟乙基纤维素(HEC)	环保性好，生物降解性高，增黏效果显著	≤160 ℃（易降解）	弱(高价金属离子易导致絮凝)	低	高温易降解，抗盐钙能力差
合成聚合物	线型聚合物	聚丙烯酰胺(PAM)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)共聚物	分子量可调，吸附性、水化作用强，可通过单体组合优化性能	≤180 ℃（部分可达200 ℃）	中-高(依赖磺酸基团)	中低	超高温下分子链断裂，抗剪切性不足
	结构型聚合物	梳状聚合物、微交联聚合物	刚性分子骨架，高温稳定性好，可通过交联增强结构	≤220 ℃（部分可达240 ℃）	高(磺化基团)	中高	合成工艺复杂，环保性受限
磺化材料	磺化树脂类	磺化酚醛树脂(SMP)、磺化褐煤树脂(SPNH)	可实现井下交联，兼具封堵与降滤失功能，易形成致密滤饼	≤200 ℃	高(磺酸基)	中	可生物降解性差，抗高价盐效果差
纳米复合材料	无机-有机复合材料	纳米SiO_2/聚合物、石墨烯/聚合物、纳米锂皂石/聚合物、水滑石(LDH)/聚合物	结构可设计性强，封堵、降滤失等多功能集成，纳米颗粒增强滤饼，协同聚合物提升高温稳定性	≤260 ℃（依赖载体）	高(无机纳米材料惰性)	高	分散性难控制，成本高，工业化难度较大

表1系统总结了四大类高温降滤失剂(天然高分子及其改性产物、合成聚合物、磺化材料、纳米复合材料)的性能与局限。总体来看，随着材料从天然改性向合成聚合物，再向纳米复合与杂化体系发展，其耐温性(从160 ℃以下提升至260 ℃)和抗盐性(由弱增至极高)显著增强，功能也从单一降滤失向封堵、润滑、高温稳定等多功能集成演进。然而，高性能材料也面临合成工艺复杂、分散性控制难、成本高昂及工业化制备难度大等挑战，反映出降滤失剂在追求高温高压等苛刻工况适应性时，需在滤失控制、高温稳定、环保性、工艺可行性及经济成本之间实现平衡。

4 结论与展望

随着油气资源勘探开发向深层及非常规储层不断推进，井下高温、高压、高矿化度等极端环境对钻井液体系及其处理剂的性能提出了更为严苛的要求。目前，高温降滤失剂主要涵盖四大类材料：天然高分子及其改性产物、合成聚合物、磺化材料及纳米复合材料。尽管这些材料已在理论研究和现场应用中取得显著成效，但仍难以完全适应日益复杂的钻井工况需求。未来研发应着重从以下几方面寻求突破：提升产品的热稳定性和化学稳定性、优化降滤失效率、增强耐高温抗盐性能、改进合成工艺路线、以及降低工业化生产成本。虽然当前高温降滤失剂技术已取得长足进步，但面对更具挑战性的作业环境，仍需从多学科交叉融合的角度开展更深入的系统性研究。

1)开发耐受极端环境(超高温、高矿化度)的高性能降滤失剂。当前降滤失剂在超高温(>220 ℃)、高矿化度(如饱和盐水体系)下的稳定性仍显不足，易发生分子链降解或交联失效。为保障深井、超深井作业的顺利实施，亟需开发具有优异热稳定性、抗水解性和长效稳定性的高性能钻井液降滤失剂。未来研究应聚焦于探索高温稳定机理，结合分子模拟与实验验证，指导高性能降滤失剂设计；系统开展耐高温聚合物构效关系研究，建立分子结构与性能的定量关联，以优化分子结构设计；设计合成含刚性骨架、耐温基

团的新型多功能单体，或引入刚性芳环、杂环或耐温基团（如磺酸基、酰胺基）以增强热稳定性；突破传统线性分子结构限制，开发支化、超支化及星形拓扑结构聚合物或复合材料，如有机-无机杂化材料、纳米增强聚合物等，通过微观构型显著提升产品的高温稳定性及抗盐钙污染能力。

2）发展环境友好、低成本的高温降滤失剂。传统降滤失剂依赖石油化学基原料，存在合成工艺复杂、环境负担较重等问题。未来应着力于开发生物基环保材料，如纤维素、淀粉、壳聚糖等，着重探索深度改性提升温度上限；从制备过程优化绿色合成路径，如酶催化聚合、水相反应等，减少酚类、醛类、磺酸基类单体的使用；推动废弃物资源化利用，如利用工业副产物（木质素、腐殖酸）制备低成本降滤失剂，实现经济性与环保性的平衡。

3）推进智能化降滤失剂的设计与合成。智能化功能材料的发展为降滤失剂的精准调控提供了新思路。加紧探索刺激响应型降滤失剂，如pH/温度/盐度敏感聚合物，实现滤失性能的动态调节；此外，可建立基于人工智能（AI）和机器学习（ML）的分子设计，加速高性能材料的筛选与优化；结合原位监测技术（如纳米传感器）实时反馈井下环境变化，并以此为依据调整降滤失剂性能，提升钻井液的智能化水平。

未来高温降滤失剂的研发应兼顾耐极端环境性能、绿色可持续性和智能化设计三大方向。通过多学科交叉融合（如高分子化学、材料科学、计算化学及人工智能），推动降滤失剂向更高性能、更低成本和更智能化的方向发展，以满足深层复杂油气藏高效开发的需求。

参考文献

[1]孙金声，杨景斌，白英睿，等. 深层超深层钻井液技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发，2024，51(4)：889-898.
SUN Jinsheng，YANG Jingbin，BAI Yingrui，et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology[J]. Petroleum Exploration and Development，2024，51(4)：889-898.

[2]鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 山东东营：中国石油大学出版社，2012：1-2.
YAN Jienian. Drilling Fluid Technology[M]. Dongying，Shandong：China University of Petroleum Press，2012：1-2.

[3]孙金声，蒋官澄. 钻井工程“血液”——钻完井液技术的发展现状与趋势[J]. 前瞻科技，2023，2(2)：62-74.
SUN Jinsheng，JIANG Guancheng. Development status and trend of drilling and completion fluid："Blood" of drilling projects[J]. Frontiers of Science and Technology，2023，2(2)：62-74.

[4]孙金声，王韧，龙一夫. 我国钻井液技术难题，新进展及发展建议[J]. 钻井液与完井液，2024，41(1)：1-30.
SUN Jinsheng，WANG Ren，LONG Yifu. Challenges，developments，and suggestions for drilling fluid technology in China[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid，2024，41(1)：1-30.

[5]刘亚鹏，吴迪，宋洪瑞，等. 耐高温型钻井液用AMPS降滤失剂的研究进展[J]. 应用化工，2023，52(10)：2963-2967.
LIU Yapeng，WU Di，SONG Hongrui，et al. Research progress of high-temperature resistant AMPS filtrate reducer for drilling fluid[J]. Applied Chemical Industry，2023，52(10)：2963-2967.

[6]SHAN W，MA J，JIANG G，et al. An inverse emulsion polymer as a highly effective salt-and calcium-resistant fluid loss reducer in water-based drilling fluids[J]. ACS Omega，2022，7(18)：16141-16151.

[7]CHANG X，SUN J，XU Z，et al. A novel nano-lignin-based amphoteric copolymer as fluid-loss reducer in water-based drilling fluids[J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2019，583：123979.

[8]孙金声，黄贤斌，吕开河，等. 提高水基钻井液高温稳定性的方法，技术现状与研究进展[J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2019，43(5)：73-81.
SUN Jinsheng，HUANG Xianbin，LV Kaihe，et al. Methods，technical progress and research advance of improving high temperature stability of water based drilling fluids[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)，2019，43(5)：73-81.

[9]孙金声，杨杰，戎克生，等. 水基钻井液用流型调节剂研究进展[J]. 新疆石油天然气，2023，19(2)：1-16.
SUN Jinsheng，YANG Jie，RONG Kesheng，et al. Advances in study on rheology modifier for water-based drilling fluids[J]. Xinjiang Oil & Gas，2023，19(2)：1-16.

[10]罗源皓，林凌，郭拥军，等. 纳米材料在抗高温钻井液中的应用进展[J]. 化工进展，2022，41(9)：4895-4906.
LUO Yuanhao，LIN Ling，GUO Yongjun，et al. Progress in the application of nanomaterials in high temperature resistant drilling fluids[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2022，41(9)：4895-4906.

[11]熊贵霞，林凌，冯茹森，等. 耐温抗盐水基钻井液降滤失剂的研究进展[J]. 石油化工，2023，52(11)：1619-1631.
XIONG Guixia，LIN Ling，FENG Rusen，et al. Research progress of temperature and salt-resistant fluid loss reducer for water-based drilling fluid[J]. Petrochemical Technology，2023，52(11)：1619-1631.

[12]由福昌，周书胜，韩银府，等. 国内抗高温聚合物降滤失剂研究与进展[J]. 辽宁化工，2022，51(2)：231-234.
YOU Fuchang，ZHOU Shusheng，HAN Yinfu，et al. Research and development of high temperature resistant polymer fil-

trate reducer in China [J]. Liaoning Chemical Industry, 2022,51(2):231-234.

[13]张春光,孙明波,侯万国,等.降滤失剂作用机理研究——对不同类型降滤失剂的分析[J].钻井液与完井液,1996,13(3):11-17.
ZHANG Chunguang, SUN Mingbo, HOU Wanguo, et al. Study on the mechanism of fluid loss additives: Analysis of different types of fluid loss additives [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,1996,13(3):11-17.

[14]张春光,孙明波,侯万国,等.降滤失剂作用机理研究——对滤液粘度和滤饼渗透率的影响[J].钻井液与完井液,1996,13(2):5-8.
ZHANG Chunguang, SUN Mingbo, HOU Wanguo, et al. Study on the mechanism of fluid loss additives—Effects on filtrate viscosity and filter cake permeability [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,1996,13(2):5-8.

[15]王全得.钻井液用抗高温改性淀粉制备及性能研究[D].陕西西安:西安石油大学,2023.
WANG Quande. Preparation and performance study of high temperature resistant modified starch for drilling fluids [D]. Xi'an,Shaanxi:Xi'an Shiyou University,2023.

[16] RICKY E, MPELWA M, WANG C, et al. Modified corn starch as an environmentally friendly rheology enhancer and fluid loss reducer for water-based drilling mud[J]. SPE Journal,2022,27(2):1064-1080.

[17]EUTAMENE M,BENBAKHTI A,KHODJA M,et al. Preparation and aqueous properties of starch-grafted polyacrylamide copolymers[J]. Starch-Stärke,2009,61(2):81-91.

[18]EL-HOSHOUDY A,DESOUKY S. Synthesis and evaluation of acryloylated starch-g-poly (Acrylamide/Vinylmethacrylate/1-Vinyl-2-pyrrolidone) crosslinked terpolymer functionalized by dimethylphenylvinylsilane derivative as a novel polymer-flooding agent[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2018,116:434-442.

[19]ZHANG Q,TIAN X,SUN J,et al. Preparation of starch-g-PMMA, starch-g-P (MMA/BMA) and starch-g-P (MMA/MA) nanoparticles and their reinforcing effect on natural rubber by latex blending:A comparative study[J]. Polymer Science,Series A,2017,59:708-717.

[20]BAI X,ZHANG X,XU Y,et al. Synthesis and characterization of sodium carboxymethyl starch-graft acrylamide/1-vinyl-2-pyrrolidone copolymers via central composite design and using as filtration loss agent in drilling muds[J]. Starch-Stärke,2021,73(3-4):2000151.

[21]ZHONG H,KONG X,CHEN S,et al. Preparation,characterization and filtration control properties of crosslinked starch nanospheres in water-based drilling fluids[J]. Journal of Molecular Liquids,2021,325:115221.

[22]YANG P,LI T,WU M,et al. Analysis of the effect of polyanionic cellulose on viscosity and filtrate volume in drilling fluid[J]. Materials Research Innovations,2015,19(S5):S5-12-S15-16.

[23]PRAKASH V,SHARMA N,BHATTACHARYA M,et al. Application of new environment friendly natural product in water based drilling fluid to improve its filtration properties[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2023,20(1):993-1006.

[24]KEITH M E,ANDREA B,TON M,et al. Advances in API/ISO standard grade purified poly-anionic cellulose (PAC) and drilling grade xanthan gum (XG) test procedure and specifications definition[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdan, The Netherlands, 2009: SPE-119983-MS.

[25]MENEZES R,MARQUES L,CAMPOS L,et al. Use of statistical design to study the influence of CMC on the rheological properties of bentonite dispersions for water-based drilling fluids[J]. Applied Clay Science,2010,49(1-2):13-20.

[26]王伟吉.耐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.
WANG Weiji. Development and characteristics of a high temperature environmentally friendly nanocellulose filter loss reducer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid,2020,37(4):421-426.

[27]SONG K,WU Q,LI M,et al. Performance of low solid bentonite drilling fluids modified by cellulose nanoparticles [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2016,34:1403-1411.

[28]ZHOU S,SONG J,XU M,et al. Rheological and filtration properties of water-based drilling fluids as influenced by cellulose nanomaterials: Different aspect ratios and modified groups[J]. Cellulose,2023,30(6):3667-3683.

[29]李虎.石油钻井液中腐殖酸的应用分析[J].化工管理,2016,(11):111-112.
LI Hu. Application analysis of humic acid in petroleum drilling fluids [J]. Chemical Enterprise Management, 2016,(11):111-112.

[30]魏艳.腐植酸的化学改性及性能研究[D].陕西西安:西安石油大学,2013.
WEI Yan. Study on the modification of humic acid and the performance of the product [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an Shiyou University,2013.

[31]XU J,YOU F,ZHOU S. Study of a high-temperature and high-density water-based drilling fluid system based on non-sulfonated plant polymers[J]. Polymers,2022,14(20):4433.

[32]POURMAHDI M,ABDOLLAHI M,NASIRI A. Effect of lignin source and initiation conditions on graft copolymerization of lignin with acrylamide and performance of graft copolymer as additive in water-based drilling fluid[J]. Journal of Petro-

leum Science and Engineering，2023，220：111253.

[33] CHEN X，GAO X，CHEN J，et al. Application of psyllium husk as a friendly filtrate reducer for high-temperature water-based drilling fluids[J]. ACS omega，2022，7(32)：27787-27797.

[34]ZHONG H，GAO X，QIU Z，et al. Formulation and evaluation of β-cyclodextrin polymer microspheres for improved HTHP filtration control in water-based drilling fluids[J]. Journal of Molecular Liquids，2020，313：113549.

[35]林凌. 丙烯酰胺类两性离子聚合物用作耐温抗盐降滤失剂研究[D]. 四川成都：西南石油大学，2015.
LIN Ling. Study of acrylamido-polyampholyte as fluid loss reducer resistant to high temperature and high salinties[D]. Chengdu，Sichuan：Southwest Petroleum University，2015.

[36]王中华. AMPS/AM/AN三元共聚物降滤失剂的合成与性能[J]. 油田化学，1995，12(4)：367-369.
WANG Zhonghua. Synthesis and properties of AMPS/AM/AN terpolymer as a fluid loss additive[J]. Oilfield Chemistry，1995，12(4)：367-369.

[37]PERRICONE A，ENRIGHT D，LUCAS J. Vinyl sulfonate copolymers for high-temperature filtration control of water-based muds[J]. SPE Drilling Engineering，1986，1(5)：358-364.

[38]CHESSER B，PERRICONE C，BETTGE G. Drilling fluid systems with improved fluid loss properties：US10136522[P]. 2008-10-21.

[39]TRAVAS-SEJDIC J，EASTEAL A. Study of free-radical copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulphonic acid[J]. Journal of Applied Polymer Science，2000，75(5)：619-628.

[40] YOUNG S，RAMSES G，SWACO M-I. High-performance water-based mud improves results：Drilling report[J]. World Oil，2006，227(4)：31-39.

[41]UJMA K，PLANK J. A new calcium-tolerant polymer helps to improve drilling-mud performance and to reduce costs[J]. SPE Drilling Engineering，1989，4(1)：41-46.

[42]SPOONER M，MAGEE K，OTTO M，et al. The application of HTHP water based drilling fluid on a blowout operation[C]// The AADE 2003 National Technology Conference，Houston，Texas，USA，2003.

[43]王中华. 钻井液降滤失剂P(AMPS-IPAM-AM)的合成与评价[J]. 钻井液与完井液，2010，27(2)：10-13、87.
WANG Zhonghua. The synthesis and evaluation of P(AMPS-IPAM-AM) as a filtration reducer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid，2010，27(2)：10-13，87.

[44]王中华. AMPS／AM／DEAM共聚物钻井液降滤失剂的合成[J]. 四川化工，1998，18(6)：5-7.
WANG Zhonghua. Synthesis of AMPS/AM/DEAM copolymer as a drilling fluid loss additive[J]. Sichuan Chemical Industry，1998，18(6)：5-7.

[45] ADVINCULA，RIGOBERTO C. Supramolecular polymers，polymeric betains，oligomers[J]. Journal of the American Chemical Society，2007，129(4)：1009-1010.

[46]BAI X，YANG Y，XIAO D，et al. Synthesis，characterization，and performance evaluation of the AM/AMPS/DMDAAC/SSS quadripolymer as a fluid loss additive for water-based drilling fluid[J]. Journal of Applied Polymer Science，2014，132(14)：41762.

[47]LI H，HUANG X，SUN J，et al. Application of zwitterionic copolymer as a filtration control agent against high temperature and high salinity for water-based drilling fluids[J]. Journal of Molecular Liquids，2023，385(0)：122419.

[48]LI J，SUN J，LV K，et al. A zwitterionic copolymer as fluid loss reducer for water-based drilling fluids in high temperature and high salinity conditions[J]. Geoenergy Science and Engineering，2023，222：111200.

[49]罗明望，张现斌，王中秋，等. 超高温低黏聚合物降滤失剂的研制及作用机理[J]. 钻井液与完井液，2020，37(5)：585-592.
LUO Mingwang，ZHANG Xianbin，WANG Zhongqiu，et al. Preparation and working mechanisms of an ultra-high temperature low viscosity polymer filtrate reducer[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid，2020，37(5)：585-592.

[50]TCHAMENI A，XIE B，LIU W，et al. Amphoteric tetramer as a filtration-loss reducer in low-solid phase water-based drilling fluids under high thermal-saline conditions[J]. Journal of Dispersion Science and Technology，2021，42(6)：920-933.

[51]刘喜亮. 抗高温抑制性有机硅降滤失剂的合成与评价[J]. 石油化工应用，2022，41(2)：108-111.
LIU Xiliang. Synthesis and evaluation of silicone fluid loss additive with high-temperature resistance and inhibitory effect[J]. Petrochemical Industry Application，2022，41(2)：108-111.

[52]由福昌，周书胜，韩银府，等. 抗高温有机硅降滤失剂的合成及性能评价[J]. 化学工程师，2021，35(10)：8-10、72.
YOU Fuchang，ZHOU Shusheng，HAN Yinfu，et al. Synthesis and performance evaluation of high temperature resistant silicone fluid loss reducer[J]. Chemical Engineer，2021，35(10)：8-10，72.

[53]褚奇，罗平亚，苏俊霖，等. 抗高温有机硅降滤失剂的合成与作用机理研究[J]. 精细石油化工，2012，29(3)：35-39.
CHU Qi，LUO Pingya，SU Junlin，et al. Synthesis and mechanism of an organosilicon polymer used as high temperature-resistant fluid loss additive[J]. Speciality Petrochemicals，2012，29(3)：35-39.

[54]罗霄，蒲晓林，都伟超，等. 耐温抗盐有机硅降滤失剂制备与性能研究[J]. 化工新型材料，2017，45(8)：138-140、

143.
LUO Xiao, PU Xiaolin, DU Weichao, et al. Preparation and performance research of silicone polymer filtrate reducer with high temperature resistant and sodium tolerant [J]. New Chemical Materials, 2017, 45(8): 138-140, 143.

[55] LUO Z, WANG L, PEI J, et al. A novel star-shaped copolymer as a rheology modifier in water-based drilling fluids [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168: 98-106.

[56] YANG J, SUN J, WANG R, et al. Investigation of TPEG comb polymer as filtration and rheological additives for high-temperature water-based drilling fluid [J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 400: 124577.

[57] ZHANG X, SUN J, WANG Z, et al. Development and evaluation of a high temperature and high salinity resistant rheological enhancer for water-based drilling fluids [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2353(1): 012001.

[58] 张颖, 余维初, 丁飞, 等. 基于多臂结构抗高温高盐降滤失剂的合成及作用机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 149-159.
ZHANG Ying, YU Weichu, DING Fei, et al. Synthesis and mechanism of high temperature and high salt fluid loss reducer based on multi-arm structure [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48 (4): 149-159.

[59] LIN Z, LI F, LIU X, et al. Synthesis of a network-structured polymer with low viscosity effect and its use as filtrate reducer for water-based drilling fluids [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(43): 54581.

[60] LI J, SUN J, LV K, et al. Temperature-and salt-resistant micro-crosslinked polyampholyte gel as fluid-loss additive for water-based drilling fluids [J]. Gels, 2022, 8(289): 1-13.

[61] 王志永, 周新宇, 李怀科, 等. 具有双重交联结构的低成本高性能降滤失剂[J]. 油田化学, 2025, 42(2): 198-205、214.
WANG Zhiyong, ZHOU Xinyu, LI Huaike, et al. Low cost and high-performance filtrate reducer with dual cross-linking structure [J]. Oilfield Chemistry, 2025, 42(2): 198-205, 214.

[62] LEI M, HUANG W, SUN J, et al. Synthesis and characterization of high-temperature self-crosslinking polymer latexes and their application in water-based drilling fluid [J]. Powder Technology, 2021, 389: 392-405.

[63] YANG J, JIANG G, WANG G. Performance evaluation of polymer nanolatex particles as fluid loss control additive in water-based drilling fluids [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 223: 211462.

[64] LUO Y, LIN L, LUO P, et al. Polymer nanocomposite ADA@SM as a high-temperature filtrate reducer for water-based drilling fluids and its filtration loss mechanism [J]. Colloids and Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 672: 131701.

[65] 郑楠, 李小红, 张治军. 功能纳米材料在石油开采中的应用进展[J]. 材料导报, 2011, 25(S1): 45-49.
ZHENG Nan, LI Xiaohong, ZHANG Zhijun. Application and progress of functional nanomaterials in petroleum extraction [J]. Materials Review, 2011, 25(S1): 45-49.

[66] AL-SHARGABI M, DAVOODI S, WOOD D, et al. Nanoparticle applications as beneficial oil and gas drilling fluid additives: A review [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 352: 18725.

[67] MOHAMED S, MOHAMED M, NORANI M. Multiwalled carbon nanotubes and graphene oxide as nano-additives in water-based drilling fluid for enhanced fluid-loss-control & gel strength [J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2151 (1): 1-6.

[68] RIDHA S, IBRAHIM A, SHAHARI R, et al. Graphene nanoplatelets as high-performance filtration control material in water-based drilling fluids [Z]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018: 012025.

[69] 黄维安, 李国真, 贾江鸿, 等. 环保型改性纳米碳酸钙降滤失剂的合成与性能评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 126-134.
HUANG Weian, LI Guozhen, JIA Jianghong, et al. Synthesis and performance evaluation of environment-friendly modified nano-calcium carbonate filtrate reducer [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48 (2): 126-134.

[70] BARRY M, JUNG Y, LEE J K, et al. Fluid filtration and rheological properties of nanoparticle additive and intercalated clay hybrid bentonite drilling fluids [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127: 338-346.

[71] 林志东. 纳米材料基础与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010: 271-272.
LIN Zhidong. Fundamentals and applications of nanomaterials [M]. Beijing: Peking University Press, 2010: 271-272.

[72] AFTAB A, ISMAIL A, IBUPOTO Z, et al. Nanoparticles based drilling muds a solution to drill elevated temperature wells: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 1301-1313.

[73] HOELSCHER K P, DE G, RILEY M, et al. Application of nanotechnology in drilling fluids [C]//SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Noordwijk, The Netherlands, June 2012: SPE-157031-MS.

[74] MAO Z, HUANG W. Hydrophobic associated polymer based silica nanoparticles composite with core-shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at utra-high temperature [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015, 129: 1-14.

[75] AO T, YANG L, XIE C, et al. Zwitterionic silica-based hy-

brid nanoparticles for filtration control in oil drilling conditions[J]. ACS Applied Nano Materials，2021，4(10)：11052-11062.

[76]JIA X，ZHAO X，CHEN B，et al. Polyanionic cellulose/hydrophilic monomer copolymer grafted silica nanocomposites as HTHP drilling fluid-loss control agent for water-based drilling fluids [J]. Applied Surface Science，2022，578：152089.

[77]BATIHA M，DARDIR M，ABUSEDA H，et al. Improving the performance of water-based drilling fluid using amino acid-modified graphene oxide nanocomposite as a promising additive[J]. Egyptian Journal of Chemistry，2021，64(4)：1799-1806.

[78]SALEH T A，RANA A，ARFAJ M K. Graphene grafted with polyethyleneimine for enhanced shale inhibition in the water-based drilling fluid [J]. Environmental Nanotechnology，Monitoring & Management，2020，14：100348.

[79]KOSYNKIN D V，CERIOTTI G，WILSON K C，et al. Graphene oxide as a high-performance fluid-loss-control additive in water-based drilling fluids[J]. ACS applied materials & interfaces，2012，4(1)：222-227.

[80]GUDARZIFAR H，SABBAGHI S，REZVANI A，et al. Experimental investigation of rheological & filtration properties and thermal conductivity of water-based drilling fluid enhanced [J]. Powder Technology，2020，368：323-341.

[81]MOVAHEDI H，JAMSHIDI S，HAJIPOUR M. New insight into the filtration control of drilling fluids using a graphene-based nanocomposite under static and dynamic conditions [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering，2021，9(38)：12844-12857.

[82]ZHONG H，GUAN Y，QIU Z，et al. Application of carbon coated bentonite composite as an ultra-high temperature filtration reducer in water-based drilling fluid[J]. Journal of Molecular Liquids，2023，375：121360.

[83]DA C，MADRUGA L Y，MARQUES N D N，et al. Evaluation of polymer/bentonite synergy on the properties of aqueous drilling fluids for high-temperature and high-pressure oil wells[J]. Journal of Molecular Liquids，2021，327：114808.

[84]SHEN H，LV K，HUANG X，et al. Hydrophobic-associated polymer-based laponite nanolayered silicate composite as filtrate reducer for water-based drilling fluid at high temperature [J]. Journal of Applied Polymer Science，2020，137(18)：48608.

[85]DONG X，SUN J，HUANG X，et al. Nano-laponite/polymer composite as filtration reducer on water-based drilling fluid and mechanism study [J]. Royal Society Open Science，2022，9(10)：220385.

[86]LUO Y，LIN L，LUO P，et al. Polymer-laponite composites as filtrate reducer for high temperature and salt resistant drilling fluid：Characterization and performance evaluation[J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2024，688：133679.

[87]SIDERIS P J，NIELSEN U G，GAN Z，et al. Mg/Al ordering in layered double hydroxides revealed by multinuclear NMR spectroscopy[J]. Science，2008，321(5885)：113-117.

[88]XU S，CHEN Z，ZHANG B，et al. Facile preparation of pure CaAl-layered double hydroxides and their application as a hardening accelerator in concrete[J]. Chemical Engineering Journal，2009，155(3)：881-885.

[89]LI S，HOU W，SUN D，et al. The thixotropic properties of hydrotalcite-like/montmorillonite suspensions[J]. Langmuir，2003，19(8)：3172-3177.

[90]LI P，HU M，LIU M，et al. Thixotropic and hydration effects of Mg/Al-layered double hydroxide and sodium montmorillonite composite dispersion on oil well cement paste[J]. Cement and Concrete Composites，2022，134：104785.

[91]LI P，LIU M，FENG J，et al. Copolymer intercalated hydrotalcite sustained release-type fluid loss additive for water-based drilling fluid：Synthesis，characterization，and performance evaluation [J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2023，669：131451.

[92]YANG J，WANG R，SUN J，et al. Comb polymer/layered double hydroxide (LDH) composite as an ultrahigh temperature filtration reducer for water-based drilling fluids[J]. Applied Surface Science，2024，645：158884.

（修改回稿日期：2025-12-15　编辑：何园）