

石油钻井液中腐殖酸的应用分析

王小安 罗永强 林 刚

中石化西南石油工程有限公司钻井工程研究院 四川 德阳 618000

摘 要：在油气勘探开发逐步转向复杂深层地层的行业背景下，钻井液体系的稳定性与环境适配性成为保障井下施工平稳推进的关键。文章结合腐殖酸独特的高分子结构与理化属性，探究此类有机材料和钻井液体系的适配特征与作用机制，分析材料对钻井液滤失造壁、流变调节、黏土抑制及抗温抗盐性能的优化路径。围绕药剂复配组合、组分配比调整与体系综合优化方式，搭建腐殖酸钻井液优化体系，梳理材料在复杂地层的适配特性与管控方式，总结改性材料的应用拓展方向与技术升级路径，可为钻井液体系精细化优化提供理论参考。

关键词：腐殖酸；钻井液；理化特性；性能调控；体系优化

引言：油气钻井施工的井下环境复杂多变，地层温度与矿化度的动态变化，容易造成常规钻井液体系性能波动，影响井壁稳定与施工推进效率。新型环保有机助剂逐步替代传统化工材料，成为钻井液体系升级的重要方向。腐殖酸作为天然有机高分子材料，具备优良的吸附特性与胶体调节能力，可适配多样化井下工况。结合腐殖酸理化特质开展钻井液体系优化研究，能够完善钻井液性能调控思路，提升复杂地层钻井施工的介质适配能力，助力钻井工程技术稳步升级。

1 腐殖酸的理化特性与钻井液适配性分析

1.1 腐殖酸的分子结构与官能团组成

腐殖酸属于结构复杂的天然有机高分子物质，整体分子骨架以芳香环为主体，搭配多样的脂肪链结构形成稳定的大分子体系^[1]。分子内部分布大量活性官能团，主要包含羟基羧基以及酮基等多种活性基团。各类活性基团能够赋予高分子结构较强的化学活性，可在液相环境中发生多种物理化学反应。丰富的官能团排布能够让腐殖酸具备优良的吸附性能与离子交换性能，为介入钻井液体系并调整体系理化状态提供基础条件。复杂的分子结构也让物质本身具备良好的结构稳定性，可在井下复杂环境中维持自身分子形态的基本完整。

1.2 腐殖酸在钻井液中的溶解与分散特性

腐殖酸的溶解与分散状态会直接影响钻井液体系的整体稳定性。碱性环境能够推动腐殖酸逐步解离，促使大分子结构均匀分散在钻井液液相体系内部。解离后的分子结构可以均匀分布在体系当中，不会出现大面积团聚或沉降现象。稳定的分散状态能够让物质性能均匀释放，持续作用于钻井液体系内部结构。液相环境的酸碱度与温度变化，会对分散均匀程度产生一定影响，环境波动会改变分子活跃程度，间接影响整体体系的稳定状态。

1.3 腐殖酸与钻井液各组分的相互作用方式

钻井液体系包含固相颗粒液相介质以及各类化学助剂，多元组分共同构成复杂的胶体悬浮体系。腐殖酸进入体系后可通过吸附作用附着于黏土颗粒表面，改变颗粒表面的电荷分布与水化膜状态。这种作用模式能够调整固相颗粒的聚集状态，抑制颗粒之间的聚合堆积行为。腐殖酸还可与体系内各类助剂产生适配反应，协同调整体系胶体状态，弱化不良理化变化的产生，维持钻井液体系的平衡状态。

1.4 腐殖酸适应不同井况条件的能力分析

井下作业环境存在温度压力以及水质条件的动态变化，不同作业深度的环境条件存在明显差异。腐殖酸高分子结构具备良好的耐高温能力，高温环境下依旧可以维持基础结构的完整性，保证自身理化性能不会快速衰减。高矿化度的井下水环境中，腐殖酸能够抵御盐类离子带来的体系干扰，保持稳定的分散状态与活性作用。多样的环境适配能力，让腐殖酸可以在不同工况环境中持续优化钻井液工作状态，适配多样化井下作业场景。

2 腐殖酸对钻井液性能的调控作用

2.1 腐殖酸对钻井液滤失造壁性能的调控

钻井液滤失与泥饼成型状态直接影响井下井壁的整体稳定状态，是钻井液体系的关键性能指标。腐殖酸融入钻井液体系后，能够依托自身丰富的活性结构吸附在黏土颗粒表层，细化体系内部固相颗粒的整体粒径分布^[2]。细化后的颗粒结构可以紧密堆积在井壁表层，逐步形成结构致密、厚度均匀的泥饼结构。这种致密泥饼能够有效封堵岩层层间孔隙，阻挡液相介质向地层内部渗透，弱化钻井液滤液大量侵入地层的现象。

2.2 腐殖酸对钻井液流变参数的调节作用

流变参数决定钻井液的悬浮携砂能力与流动特性，

是保障钻井作业平稳推进的重要基础。腐殖酸分子可以改变黏土颗粒的表面电学性质,削弱颗粒之间的相互吸附与团聚趋势,缓解固相颗粒过度聚集引发的体系黏稠度异常升高。适量添加腐殖酸能够改善钻井液整体流动状态,优化塑性黏度与动切力等关键流变指标。体系内部胶体结构可以维持相对稳定的分散状态,避免静止状态下出现严重胶凝问题,保障钻井液在循环启停过程中保持平稳的流动特性,适配井下持续循环的作业需求。

2.3 腐殖酸对黏土矿物膨胀的抑制机理

地层内部广泛分布的黏土矿物极易吸收水分发生水化膨胀,容易引发井壁缩径、剥落等井下问题。腐殖酸活性基团可以与黏土矿物表层离子发生相互作用,稳固黏土颗粒表层的水化结构。物质分子能够附着在矿物表层形成防护薄膜,阻隔自由水分子持续侵入矿物内部。水分渗透路径得到有效阻断,黏土矿物的水化进程可以得到有效放缓,矿物层间的水分子吸附量逐步降低。这种物理阻隔与化学作用结合的方式,能够约束黏土矿物的水化膨胀与分散剥离行为,维持井壁岩体的结构稳定。

2.4 腐殖酸对钻井液抗温抗盐性能的改善

深部地层普遍存在高温高矿化度的复杂环境,极端环境条件容易破坏钻井液胶体平衡状态,造成体系性能大幅波动。高温环境会破坏常规钻井液助剂的分子结构,造成助剂活性衰减、体系失稳等问题。腐殖酸高分子骨架结构具备较强的热稳定能力,高温环境中可以持续维持分子活性与结构完整。高矿化度环境中的盐离子会干扰胶体电荷平衡,腐殖酸可以缓冲盐离子带来的体系扰动,稳定胶体分散状态。各类恶劣环境带来的体系破坏作用能够得到有效弱化,钻井液综合耐受能力得到提升,适配深部地层的复杂作业环境。

3 腐殖酸钻井液体系的配方构建与优化

3.1 腐殖酸基降滤失剂的复配方案设计

腐殖酸自身具备良好的降滤失与胶体调节能力,但单一药剂融入钻井液后,功能覆盖维度较为单一,难以应对复杂地层中多变的孔隙结构与岩层特性。有机助剂种类丰富,不同药剂在泥饼压实、颗粒封堵、胶体稳定等层面具备独有优势^[3]。复配设计依托各类有机助剂的功能互补特性,结合腐殖酸优良的吸附成膜特质,搭建适配复杂井下环境的药剂组合体系。通过精细调节各类助剂的掺杂比例,有序改善钻井液内部固相颗粒的分布状态,推动细小颗粒均匀填充岩层孔隙,逐步形成结构致密、渗透阻力更高的泥饼结构。

3.2 腐殖酸与无机处理剂的协同配方构建

无机处理剂可以有效调节钻井液内部离子环境,改

良胶体分散平衡,是优化钻井液基础理化性质的重要助剂品类。有机与无机药剂的性能优势存在明显差异,两类材料搭配使用可以互补性能短板,丰富钻井液体系的功能维度。无机处理剂能够调节介质离子强度,弱化地层侵入杂质对胶体结构的扰动,为有机组分稳定发挥作用营造适宜的液相环境。腐殖酸可以依托自身活性结构优化泥饼成型质量,微调体系流变状态,弥补无机药剂在精细化性能调控层面的不足。两类材料相互配合可以深度优化钻井液胶体分散稳定性,减少固相颗粒无序聚集现象,全面提升钻井液对复杂井下工况的适应能力。

3.3 不同密度等级腐殖酸钻井液的配方调整

地层压力条件随钻井深度持续变化,不同作业层位需要匹配对应密度参数的钻井液体系,密度数值的改变会直接影响固相含量与胶体结构稳定性。低密度钻井液体系固相占比偏低,整体胶体结构相对薄弱,配方调整重点聚焦腐殖酸的均匀分散效果,强化基础滤失控制与井壁防护能力。中高密度钻井液体系填充大量加重材料,固相颗粒排布更为密集,极易出现颗粒堆叠黏结问题。通过合理调整腐殖酸添加比例,可以舒缓高固相体系的黏稠度异常增长问题,维持颗粒分散的均匀程度。结合密度梯度完成精细化配比调整,能够让腐殖酸的调控性能适配不同压力工况,保障钻井液各项性能持续平稳输出。

3.4 腐殖酸钻井液体系性能的综合优化

腐殖酸钻井液体系的整体优化需要兼顾流变状态、滤失控制、抗污染水平与井壁防护等多项核心性能,贴合井下复杂环境的运行要求。井下温度、水体矿化度及地层岩性存在明显差异,各类环境因素都会对钻井液体系平衡产生不同程度的干扰。优化工作围绕现场实际工况特点,持续调整体系内部各类组分的配比结构,协调各项性能指标的平衡关系。规避单一性能强化引发的体系失衡问题,实现钻井液综合性能的均衡提升。精细化的组分搭配模式可以有效抵御高温高盐环境带来的体系扰动,拓宽钻井液的工况适配范围,充分释放腐殖酸在钻井体系中的应用价值,满足各类井下作业的运行标准。

4 腐殖酸钻井液的现场应用与发展趋势

4.1 腐殖酸钻井液在复杂地层中的适用性分析

油气勘探开发逐步转向深层复杂地层,各类特殊地层环境对钻井液综合性能提出更高标准。复杂地层普遍存在高矿化度水体、高温环境以及不稳定岩性结构,常规钻井液体系难以维持长期稳定运行状态^[4]。腐殖酸钻井液依托独特的高分子结构与活性官能团特性,能够适配多变的地层环境条件。针对破碎松散地层,体系可以通

过优质成膜能力稳固井壁结构,减少岩层剥落与坍塌问题。针对高盐高温地层环境,体系可以抵御外界介质带来的胶体破坏作用,保持流变与滤失性能的稳定状态。适配特性可以充分适配非常规地层的钻井作业需求,为复杂工况下的钻井施工提供稳定介质支撑。

4.2 腐殖酸钻井液的现场维护与性能管控

钻井液体系在井下循环作业过程中,会持续接触地层杂质与各类矿化介质,长期运行容易出现性能波动与体系失衡问题。常态化现场维护工作能够持续保障腐殖酸功能特性稳定发挥,维系钻井液体系的平衡状态。作业推进过程中需要持续关注体系流变状态与滤失能力变化,依据井下环境变化微调内部组分配比。及时清理体系内部富集的杂质颗粒,避免杂质堆积干扰胶体分散结构。规范的管控模式可以延缓钻井液性能衰减速度,减少体系频繁调配带来的作业波动,让腐殖酸的调控作用始终贯穿钻井作业全过程,保障井下施工平稳推进。

4.3 改性腐殖酸在钻井液中的应用拓展

原始腐殖酸材料的性能上限存在局限,极端复杂地层中难以充分发挥调控作用。改性处理技术可以重塑腐殖酸分子结构,丰富分子内部活性官能团种类,提升材料本身的化学稳定性与环境耐受能力。经过改性处理的腐殖酸材料,在抗温抗盐、井壁稳定、滤失控制等多个维度均可实现性能提升。改性处理还可以增强腐殖酸与钻井液各类助剂的兼容能力,拓展材料复配使用的适配范围。依托改性技术挖掘材料潜在性能,能够突破传统腐殖酸钻井液的应用局限,延伸腐殖酸材料在油气钻井领域的应用边界。

4.4 腐殖酸钻井液技术的改进方向与趋势

钻井工程行业持续向着高效化、精细化、绿色化方向发展,钻井液技术也需要不断迭代升级适配行业发展

节奏。腐殖酸钻井液技术的优化升级重点聚焦材料改性革新、体系配比精细化、绿色适配升级等核心维度。新型改性工艺的持续研发可以不断提升腐殖酸材料的综合性能,适配更深层、更复杂的井下作业场景。体系配比的精细化调整能够推动钻井液性能适配各类差异化地层条件,弱化环境因素对施工流程的干扰^[5]。绿色低碳的材料优化思路,可以提升腐殖酸钻井液的环保属性,贴合油气开发绿色发展的主流方向,为钻井液体系的长效发展提供持续动力。

结束语

腐殖酸凭借独特的分子结构与官能团特性,可从流变调节、滤失管控、井壁防护及抗污染等多个维度优化钻井液综合性能。各类复配方案与配比调整模式,能够有效改善传统钻井液体系的应用短板,提升体系对复杂地层环境的耐受能力。通过改性技术革新与现场精细化管理,可持续拓宽腐殖酸在钻井工程中的应用范围。持续优化腐殖酸钻井液体系结构,能够完善钻井液精细化管理体系,为油气钻井工程提质增效提供有力支撑。

参考文献

- [1]汪春林,苏建国,刘生滔,等.腐殖酸改性技术及其在钻井液中的应用研究[J].石油天然气学报,2025,47(4):609-619.
- [2]贾国亮.生物质合成基钻井液体系优选及应用[J].精细石油化工进展,2025,26(6):1-6.
- [3]梁兵.低胶质油基钻井液体系的研究与应用[J].精细石油化工进展,2025,26(2):1-5.
- [4]唐自恒.石油深井水基钻井液性能控制因素及应用实践研究[J].石化技术,2025,32(11):303-305.
- [5]缪永飞,马登辉.石油钻井工具的检测及应用[J].石油化工建设,2026,48(1):153-155.