石油钻井液中腐殖酸的应用分析

周　俊

中石化西南石油工程公司钻井工程研究院　四川　德阳　618000

摘　要：钻井液性能稳定性直接决定井下钻井施工质量与地层保护效果，复杂地层工况容易造成常规钻井液胶体失衡、滤失超标、流变参数异常等问题。本文结合腐殖酸的理化特性与分子结构特点，深入剖析这类天然高分子材料与水基钻井液体系的适配机理，系统梳理材料在降滤失、稀释降粘、抗温抗污染、井壁防护等方面的功能原理。结合不同地层施工缺陷与调控需求，总结腐殖酸提纯改性、复配体系搭建、地层差异化适配的优化路径，进一步完善钻井液性能改良的技术思路，为复杂工况钻井液体系提质增效提供理论支撑。

关键词：石油钻井液；腐殖酸；性能调控；作用机制；地层适配

引言：油气钻井工程持续向深部、复杂地层推进，井下高温、高盐、破碎岩体等工况不断增多，对钻井液综合性能提出更为严苛的标准。常规水基钻井液自身稳定性有限，面对复杂地质环境极易出现性能衰减，引发井下施工隐患。天然腐殖酸具备优良的水化吸附与胶体改良能力，是适配水基钻井液的绿色功能性助剂。明晰腐殖酸基础特性与钻井液的适配规律，厘清材料对钻井液各项性能的调控机制，可以有效解决复杂地层钻井液运行短板，提升井下施工整体稳定性，为钻井液体系优化改良提供可靠支撑。

1 腐殖酸基础特性与钻井液适配原理

1.1 腐殖酸基本理化性质

腐殖酸属于天然有机高分子混合物，广泛存在于风化煤、泥炭及土壤有机质中，自身具备稳定的理化属性。这类物质耐温性能良好，可在地层高温环境中保持结构稳定，不易出现分解失效的情况。在酸碱环境中能够维持相对平衡的物化状态，具备较强的环境耐受能力。水溶性与分散性表现良好，可在水基介质中均匀分散，快速融入液相体系并稳定存在。腐殖酸整体惰性较强，不易与常规钻井液组分发生剧烈化学反应，不会轻易破坏钻井液原有体系平衡[1]。稳定的物理化学属性，让这类物质具备作为钻井液功能助剂的先天条件，能够适配钻井作业复杂的井下环境。

1.2 腐殖酸分子结构与官能团特征

腐殖酸拥有复杂的高分子网状分子结构，整体架构疏松多孔，内部空隙分布丰富，具备较强的吸附与包裹能力。分子链段可在介质中舒展延伸，形成稳定的空间网状结构，对悬浮固相颗粒起到约束作用。分子表面富集羧基、羟基、醌基等活性官能团，各类活性基团赋予物质多样的物化功能。活性基团可以吸附钻井液中的细微固相颗粒，改变颗粒表面的电荷分布与分散状态。基团还可与水分子形成稳定结合状态，在介质内部构建致密的水化膜结构。独特的分子架构与丰富的官能团组成，是腐殖酸改良钻井液综合性能的核心内在条件。

1.3 腐殖酸与钻井液体系的适配机理

水基钻井液以水为连续相，搭配各类无机、有机助剂构成分散体系，体系稳定性依赖颗粒分散状态与水化结构完整性。腐殖酸掺入钻井液后，活性官能团可主动吸附悬浮固相颗粒，改善颗粒团聚现象，优化钻井液整体分散均匀度。舒展的分子链能够填充体系内部结构空隙，辅助构建稳定的胶体体系，弱化井下温度、盐离子带来的体系扰动。分子表面水化结构可以强化钻井液整体造壁性能，优化液相阻隔能力。腐殖酸凭借自身结构优势与物化特性，能够从微观层面改善钻井液胶体结构，优化体系稳定状态，实现对钻井液综合性能的良性改良。

2 钻井液体系工况缺陷与调控需求

2.1 常规钻井液体系基础属性特征

常规水基钻井液是井下钻井作业的核心配套介质，由水体、黏土固相、无机助剂与有机添加剂混合组成多相分散胶体体系。体系内部依靠颗粒水化作用与静电平衡维持稳定状态，具备基础的携岩、护壁、冷却、压力平衡作业能力，适配多数浅层常规地层的钻井施工条件。体系流变性能、滤失性能与胶体稳定状态，会跟随井下环境变化产生动态波动。固相颗粒均匀分散程度直接决定钻井液整体性能，水化膜完整度影响井壁防护

与滤水控制效果[2]。常规钻井液组分搭配偏向通用性设计，基础性能可以满足平稳地层的基础施工要求，但自身结构稳定性较弱，环境抗干扰能力存在明显局限，面对复杂井下工况容易出现性能衰减问题。

2.2 复杂地层钻井液运行存在的问题

深部地层、高盐地层与破碎地层的复杂施工环境，会持续冲击常规钻井液的胶体平衡状态。井下高温环境会破坏钻井液内部水化结构，弱化胶体颗粒的分散性能，引发颗粒聚结沉淀，造成钻井液黏度大幅波动。地层盐性介质会侵入液相体系，打乱颗粒电荷分布，破坏原有胶体稳定结构，提升钻井液滤失量。破碎地层孔隙发育、裂隙分布杂乱，常规钻井液难以快速形成致密泥饼，滤液容易渗入地层缝隙，诱发井壁剥落、坍塌等隐患。地层压力不均衡也会改变钻井液循环工况，造成携岩不畅、固相堆积等问题，持续干扰钻井施工的有序推进，制约井下作业质量提升。

2.3 钻井施工对液相调控材料的功能需求

复杂地层钻井施工对钻井液调控材料提出多项精细化功能要求，适配井下多变的工况条件。调控材料需要具备优良的高温稳定能力，可在高温环境中维持自身结构与功能稳定，保障钻井液流变参数平稳可控。需要具备良好的抗盐抗污染性能，抵御地层盐质介质带来的体系扰动，保护胶体结构完整性。调控材料可优化钻井液造壁性能，促进致密泥饼快速成型，阻挡滤液深入地层缝隙，强化井壁防护效果。材料还需具备优良的分散与悬浮调节能力，改善固相颗粒分布状态，规避颗粒聚结沉降问题。多重功能需求相互配合，能够全面补齐常规钻井液的性能短板，适配复杂地层钻井施工的高质量作业要求。

3 腐殖酸在钻井液中的功能作用与作用机制

3.1 钻井液降滤失功能及内在机制

钻井施工过程中，钻井液滤液渗入地层孔隙会引发地层水化扰动、井壁失稳等各类问题，滤失性能是衡量钻井液综合质量的核心指标。腐殖酸凭借独特的高分子结构与丰富活性基团，能够从微观层面优化钻井液胶体结构，实现滤失性能有效调控。腐殖酸活性基团可牢固吸附在钻井液黏土固相颗粒表面，提升颗粒整体水化程度，在颗粒表层形成均匀致密的水化保护膜。水化结构能够抑制固相颗粒无序团聚，让细小颗粒均匀分散在液相体系中。均匀分布的细微固相颗粒在井筒压差作用下，可在井壁表面有序堆积，形成结构致密、厚度均匀、渗透性极低的泥饼[3]。致密泥饼可以有效封堵地层微小孔隙与裂隙通道，阻断钻井液滤液向地层内部渗透扩散，减少液相介质流失量。这类依托颗粒改性与泥饼结构优化的调控方式，能够从源头改善钻井液滤失缺陷，稳定井下施工环境。

3.2 钻井液稀释降粘作用机制

常规水基钻井液在持续循环作业中，黏土颗粒容易在静电作用下相互搭接，形成密集的网状絮结结构。这类结构会束缚大量自由水体，提升钻井液整体黏度与切力，增大井下循环阻力，不利于钻井作业高效推进。腐殖酸可以有效拆解这类不稳定絮结结构，实现钻井液流变性能合理调控。腐殖酸分子吸附于黏土颗粒表面后，能够改变颗粒表层电荷分布，弱化颗粒之间的静电吸附作用力，瓦解颗粒搭建的空间网架体系。被网架结构束缚的自由水体得到释放，重新参与液相流动。分散后的颗粒会被腐殖酸分子链隔离包裹，难以再次聚结搭接。钻井液内部无效结构持续减少，流动阻力稳步降低，流变参数回归合理区间，保障钻井液拥有优良的循环输送性能。

3.3 钻井液抗温抗污染稳定机制

深部钻井作业面临高温、高盐的复杂井下环境，恶劣工况会严重破坏常规钻井液的胶体平衡，引发性能大幅衰减。腐殖酸高分子骨架结构具备优异的热稳定性能，高温环境下不会发生分子断裂或结构失效，可长期维持功能完整性。高温工况中，腐殖酸持续加固黏土颗粒水化膜，削弱高温脱水效应带来的结构破坏，稳固钻井液胶体体系。地层中的盐离子会侵入钻井液内部，压缩颗粒双电层结构，造成颗粒聚结沉降。腐殖酸可在颗粒表面形成防护结构，缓冲盐离子对胶体体系的破坏作用，削弱盐污染带来的性能扰动。多重防护作用能够大幅提升钻井液的环境耐受能力，让体系在复杂井下工况中保持稳定运行状态。

3.4 井壁稳定与储层保护辅助作用

疏松地层、破碎地层的岩体结构稳定性差，孔隙裂隙发育丰富，钻井液滤液侵入后极易出现水化膨胀、岩体剥落、井壁坍塌等故障。腐殖酸改良后的钻井液可快速成型致密泥饼，完整覆盖井壁岩体表面，封堵表层孔隙与细微裂隙，阻隔滤液持续侵入岩体内部。岩层水化程度得到有效控制，岩体结构强度得以保留，大幅降低井壁失稳风险。稳定的井筒环境可以规避井下复杂事故，保障钻井作业连续开展。优良的胶体稳定性能还能减少细微固相颗粒的无序渗透，降低颗粒堵塞储层孔隙的概率。最大程度保留储层原始孔隙结构与渗透性能，

减少钻井施工对储层物性的损伤，实现钻井作业与储层保护的双向兼顾。

4 腐殖酸钻井液应用优化与改良方向

4.1 腐殖酸提纯改性处理方式

天然腐殖酸原料取自风化煤、泥炭等天然矿物，内部掺杂大量灰分、杂质与惰性组分，有效活性成分占比有限。未经处理的原料纯度不足，活性官能团分布杂乱，物化性能存在明显缺陷，直接投入钻井液使用难以充分发挥调控作用。提纯处理可以剔除原料内部无效杂质，浓缩有效有机组分，规整分子结构与官能团分布状态，提升原料整体纯度与活性水平。改性处理可针对天然腐殖酸的性能短板进行优化，通过化学活化、结构重构等方式重塑分子架构，丰富活性官能团种类，强化分子吸附、分散、抗温及抗盐性能[4]。改性后的腐殖酸可以突破天然原料的性能局限，在高温、高盐复杂工况中保持稳定的调控能力。针对性提纯与改性手段，能够从原料层面夯实腐殖酸在钻井液体系中的应用基础，挖掘材料本身的性能潜力。

4.2 复合改性腐殖酸钻井液体系构建

单一腐殖酸材料的调控性能存在一定局限，功能维度相对单一，难以全面适配复杂地层钻井液的综合性能需求。结合各类钻井液助剂的性能优势，搭建复合改性体系，能够实现不同材料的性能互补，补齐单一腐殖酸应用短板。依托腐殖酸优良的降滤失、稳胶结构特性，搭配高分子助剂、无机稳定剂、抗盐改性组分进行复合配比，重构钻井液胶体体系结构。复合体系可以整合各类材料的功能优势，强化钻井液流变调控、高温稳定、抗盐抗污染等综合性能。通过优化组分配比逻辑，规避不同助剂之间的相互干扰问题，保障各类改性组分协同发挥作用。科学的复合体系构建模式，可大幅提升钻井液整体稳定性与环境适配能力，拓展腐殖酸钻井液的应用场景范围。

4.3 不同地层条件下腐殖酸适配调整方式

不同地层的地质构造、温度压力、水质盐度存在明显差异，固定的腐殖酸掺量与应用工艺无法适配全部钻井工况。常规浅层地层工况稳定，地层干扰因素较少，基础改性腐殖酸即可满足钻井液调控需求，重点保障体系基础流变与滤失性能。深部高温地层井下温度偏高，胶体结构破坏风险突出，需要侧重提升腐殖酸的抗温性能，调整改性工艺强化分子高温结构稳定性。高盐污染地层盐离子侵入频繁，钻井液胶体极易失衡，可优化腐殖酸抗盐改性方案，增强体系离子耐受能力与胶体防护效果。破碎疏松地层侧重依托腐殖酸优化泥饼质量，强化井壁封堵与防护能力。依据地层工况特征差异化调整改性方式与应用工艺，能够让腐殖酸的调控性能精准匹配现场施工需求，最大化发挥材料改良优势，提升复杂工况下钻井作业的整体稳定性[5]。

结束语

腐殖酸依靠独特的分子结构与理化属性，能够从胶体结构、流变特性、抗干扰能力等多个维度改良钻井液综合性能，有效应对复杂地层带来的施工难题。明确材料适配机理与功能作用机制，可充分发挥腐殖酸在钻井液稳体系、控滤失、护井壁等方面的优势。通过原料改性、复合体系构建、地层工况适配等优化手段，持续补齐单一材料应用短板，提升钻井液对复杂井下环境的适应能力。整套改良方式可以有效优化钻井施工条件，稳固井下作业秩序，助力油气钻井工程高质量开展。

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] 吕小强, 闫丽丽, 王建华, 等. 油基钻井液用降滤失剂的研究现状及展望 [J]. 应用化工,2026,55(4):1035-1040,1047.

[3] 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.

[4] 陈方帅, 陈俊杰, 张思蕊, 等. 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.

[5] 徐贵勤, 谢水祥, 任雯, 等. 废弃聚磺钻井液固相资源化绿色处理剂 [J]. 石油钻采工艺,2023,45(6):683-689.