

水基钻井液润滑减阻技术优化与效果评价

刘日淦

中海油田服务股份有限公司湛江分公司 广东 湛江 524057

摘要：水基钻井液润滑减阻依托吸附膜与混合润滑协同作用，常规体系以基础液相、润滑剂及辅助材料为主，但在高温高盐环境下吸附膜易失稳，固相污染及多因素耦合响应能力不足。配方组分、工况环境及界面作用参数共同影响减阻效果，通过工艺制度优化与组分协同匹配可显著提升性能。构建涵盖润滑、流变、滤失及抑制的多维评价指标体系，结合主观客观组合赋权与综合评价模型，能够有效区分优化技术与常规技术的效果差异，为方案筛选和现场应用提供科学依据。

关键词：水基钻井液；润滑减阻；影响因素；优化技术；综合评价体系

引言：水基钻井液在深井及复杂地层钻进中面临高温高盐和长水平段滑动钻进等苛刻条件，润滑减阻已成为保证作业安全与效率的核心技术难题。现有常规体系以基础液相、润滑剂及辅助材料为主，但高温下吸附膜稳定性下降，固相污染与多因素耦合响应能力不足，减阻效果波动显著。为此需系统研究配方组分、工况环境及界面作用参数的影响规律，并通过工艺制度优化与组分协同匹配提升体系性能。同时构建涵盖润滑、流变、滤失及抑制的多维评价体系，为主观客观赋权与综合对比评价提供依据，从而为优化技术筛选和现场应用提供科学支撑。

1 水基钻井液润滑减阻理论与现有技术体系

1.1 水基钻井液界面摩擦与润滑减阻机理

水基钻井液润滑减阻的机理核心在于钻具与井壁接触界面的摩擦学行为调控。钻具旋转和上下活动时，金属与岩石表面间的相对运动产生摩擦阻力，该阻力大小取决于真实接触面积、法向载荷及界面介质的剪切特性。润滑组分通过在金属表面形成物理或化学吸附膜，有效隔离摩擦副直接接触，将干摩擦转变为润滑膜内部的剪切流动。吸附膜承载能力与分子链长度、极性基团锚固强度及分子间排列致密程度密切相关。当膜厚足以完全分隔摩擦表面时，体系进入流体动压润滑状态，此时摩擦力主要由流体黏滞阻力决定。实际井下工况多处于混合润滑区间，减阻效果是吸附膜特性与流体流变性能协同作用的结果。

1.2 常规水基钻井液润滑体系组成与特性

常规水基钻井液润滑体系主要由基础液相、润滑处理剂及辅助功能材料构成。基础液相通常为淡水或盐水溶液，其自身润滑性能有限，需依赖添加专用润滑剂来

改善摩擦特性。液体润滑剂包含植物油改性产物、矿物油衍生物及合成酯类物质，利用分子中极性基团吸附于金属表面形成润滑膜。固体润滑剂如石墨和玻璃微珠通过降低界面剪切强度发挥作用，其在滤饼表面的嵌填也能改善接触状态。表面活性剂用于调节润滑剂的分散稳定性和润湿反转能力，确保高温高盐条件下不发生相分离^[1]。降滤失剂和增黏剂间接影响润滑效果，前者通过控制滤饼质量改变界面特性，后者通过调节黏度影响动压润滑的建立。各组分间需保持合理配伍关系，避免吸附竞争或沉淀反应降低减阻效率。

1.3 现有润滑减阻技术存在的技术局限

现有润滑减阻技术在深井超深井及复杂地层中暴露出明显技术局限。高温是首要制约因素，温度超过150℃后常规润滑剂分子吸附膜有序结构遭到破坏，极性基团脱附速率加快，润滑持久性大幅下降。高盐度地层水侵入改变离子强度和介电常数，压缩双电层厚度并削弱分子静电锚固能力，盐析效应还可能使表面活性剂失去增溶作用。细分散岩屑持续混入使固相含量攀升，颗粒在摩擦界面堆积增加犁沟效应，抵消了润滑剂的部分减阻贡献。此外常规体系对水平井大位移井段长距离滑动钻进中的持续低摩阻需求响应不足，润滑剂消耗补充缺乏实时调控手段，摩阻波动范围较大，难以满足精细化作业控制的技术要求。

2 水基钻井液润滑减阻效果影响因素分析

2.1 配方组分参数影响分析

水基钻井液本身的配方构成是决定润滑减阻效果的基础因素。润滑剂作为核心处理剂，其类型与加量直接关系到边界润滑膜的形成质量与持久性，不同化学结构的润滑剂在吸附成膜能力上存在显著差异。降滤失剂

通过控制液相向地层的过度渗滤,维持了井壁附近滤饼的致密性,间接影响了钻具与井壁的接触状态。增黏剂调整了流体的流变特性,适当提高动塑比有利于携带岩屑并改善钻具表面的润湿环境,但黏度过高则会增加流动阻力。无机盐的加入会改变体系的离子强度和抑制性能,可能压缩双电层并影响黏土颗粒的水化分散程度,进而改变摩擦副表面的物理化学状态。各类处理剂之间存在复杂的协同或对抗关系,其复配比例与加量浓度需要依据具体地层条件进行精细化调控,方能实现润滑减阻效果的最优平衡。

2.2 工况环境参数影响分析

钻井作业过程中的外部工况条件对润滑减阻效果产生显著的动态影响。井筒内循环温度的变化直接作用于钻井液各组分的分子热运动与化学活性,高温条件下部分处理剂可能发生降解或交联反应,导致润滑膜强度下降,而低温则可能增加流体黏度并削弱流动性。循环压差的变化改变了钻具与井壁间的接触载荷,高载荷工况下摩擦界面间的实际接触面积增大,对润滑膜的承载能力提出更高要求^[2]。钻具旋转速度与上下活动频率影响摩擦副的运动模式,较高转速有利于携带岩屑并维持流体动压效应,但同时也加剧了边界膜的剪切破坏风险。井底岩屑返出量与地层渗滤液的混入不断改变着钻井液的固相含量与离子组成,这些动态干扰因素要求润滑减阻体系具备较强的抗污染能力和自适应调节性能,以应对复杂多变的井下热力学与力学环境。

2.3 界面作用参数影响分析

润滑减阻效果从根本上受制于钻具表面与井壁岩石之间接触界面的物理化学作用特征。井壁表面形成的滤饼其厚度、致密度及表面电荷状态直接决定了摩擦副的初始粗糙度与黏着倾向,优质滤饼能够有效隔离钻具与地层岩石的直接接触并降低剪切阻力。钻井液中的表面活性剂分子通过疏水链在金属表面的定向排列形成有序吸附层,其吸附强度与分子链长度密切相关,吸附膜的结构致密性和热稳定性决定了润滑持续时间的上限。地层岩石的矿物组成与水敏性影响界面水化膜的发育程度,强水敏性泥页岩遇水后产生的水化膨胀作用会显著增加井壁与钻具间的法向接触压力。界面处电场与离子交换过程对双电层结构施加影响,进而改变摩擦副间的静电斥力与黏附功,这些界面力学的复杂耦合最终以宏观摩擦系数的变化形式加以呈现。

3 水基钻井液润滑减阻优化技术改进与提升

3.1 现有优化体系性能短板梳理

现有润滑减阻优化体系在实际应用中暴露出多项性能短板。高温环境下常规润滑剂分子链容易发生断裂或

重排,致使吸附膜完整性受损,减阻率随温度升高呈现显著下降趋势。有研究指出深井钻探面临高温高盐、钻进摩阻高等难题,现有水基钻井液润滑剂在高盐高温条件下效果欠佳。体系对高价金属离子和细分散岩屑的容纳限度偏低,污染物累积会引发黏度突增和润滑系数大幅波动,现场维护时需频繁补加处理剂,调控成本明显上升^[3]。滤饼致密性与表面润滑性之间常存在相互制约关系,过度强化降滤失会使滤饼表面粗糙度增大,而侧重润滑则可能削弱封堵效果。现有体系对温度场、压力场和化学场多因素耦合变化的自适应调节能力不足,整体有效工作窗口较为狭窄。

3.2 润滑技术工艺优化改进

润滑技术工艺层面的改进重点在于调整加注制度和操作参数。采用分段间歇式加注方法替代传统集中投入方式,确保循环系统中润滑剂的有效浓度始终维持在合理区间,避免浓度波动导致减阻效果起伏。依据井下实时采集的扭矩和摩阻数据动态调控循环排量,在高摩阻段适当提高流速以增强动压润滑效应,同时降低钻具高速旋转时对吸附膜的剪切破坏程度。入井前对钻井液进行热滚老化和预剪切处理,通过模拟井下温度条件筛选出当前工况下的最佳加量上限。以纳米二氧化硅为原料接枝改性合成的水基钻井液减阻剂 DRA-1,在基浆中加入 3% 后流性指数增幅达 366.7%,稠度系数降幅达 90.6%,极压润滑系数降低率达 82.82%,经 120℃ 热滚 16 小时后减阻效果进一步提高。现场应用表明在水基钻井液中加入 1% 的 DRA-1 后,压耗降低 2.937 兆帕,降低率达 22.61%。

3.3 体系性能协同提升优化

体系性能协同提升强调各功能组分之间的正向匹配与联合增效。选取与润滑剂吸附动力学相协调的降滤失剂类型,使其在滤饼形成过程中不竞争金属表面的活性吸附位点,反而通过优化滤饼孔隙结构为润滑膜提供更平整的基底。调整无机盐添加量以维持适宜的离子强度,既保证黏土水化抑制效果,又不至于过度压缩双电层从而削弱润滑剂分子的静电锚固能力^[4]。江汉油田研发的复合盐水基钻井液体系以抑制性强的氯化钙溶液为基液,结合抗盐增粘剂、降滤失剂、超强抗盐润滑剂、抗盐高效纳米封堵剂等助剂,成功实现了抑制性、降滤失与润滑减阻的协同优化。该体系在焦页 9-12HF 井超大偏移距三维水平井现场试验中,水平段一趟钻完成,三开井段浸泡 37 天无垮塌掉块,套管一次性下到底。大庆钻探在深层大斜度井中应用的强润滑抗高温水基钻井液体系,抗温达 200℃ 以上,机械钻速较同区块邻井提高 10% 以上,两口井三开施工周期分别较设计提前 12.67 天

和 16.17 天。

4 优化技术综合评价体系构建与分析

4.1 综合评价评价指标体系建立

综合评价评价指标体系是衡量润滑减阻优化技术优劣的基础框架。指标选取应当覆盖润滑性能、流变稳定性、滤失控制、抑制防塌及抗温抗污染等多个维度,避免单一指标带来的评价偏差。润滑性能方面以极压润滑系数和泥饼黏附系数为核心定量参数,流变稳定性则关注动塑比与切力随温度和老化时间的变化幅度,这两项指标直接反映了体系在井下持续作业过程中的抗衰减能力。滤失控制指标包括常温常压滤失量和高温高压滤失量,前者评价滤饼初始形成质量,后者衡量高温条件下滤饼的致密性保持能力。抑制性能通过岩屑回收率和线性膨胀率加以表征,抗污染能力则以体系对高价金属离子和细分散岩屑的耐受限度为衡量依据。各指标之间需满足独立性要求与可测性原则,确保现场测试条件下能够快速获取可靠数据。指标体系还需根据目标地层特征进行针对性调整,例如针对硬脆性泥岩地层适当提高抑制性能指标的权重占比,而针对高渗透性砂岩则需强化滤失控制指标的要求。

4.2 优化技术与常规技术效果对比评价

优化技术与常规技术的效果对比评价应当从技术指标与经济指标两个维度展开系统比较。技术指标方面重点对比摩阻降低幅度、井径扩大率、水平段钻进周期以及井下复杂情况发生率等核心参数,这些指标直接体现了优化技术在实际钻进过程中对减阻效果和井眼质量的改善程度。摩阻降低幅度反映了润滑减阻的直接成效,井径扩大率则间接衡量了体系对井壁稳定性的维护效果^[5]。经济指标方面需要综合考量材料消耗成本、人工维护费用以及因井下复杂情况导致的时间延误损失,优化技术虽然可能在初期材料投入上高于常规方案,但通

过缩短钻进周期和减少事故处理时间能够实现整体作业成本的显著下降。同时还应评估优化技术在不同井段和不同地层条件下的适应性与稳定性,确保其在全井作业周期内保持性能输出的一致性,唯有如此才能对优化技术的综合效益给出客观全面的评判。

结束语: 水基钻井液润滑减阻机理涉及吸附膜形成与混合润滑状态协同调控,常规体系在高温高盐环境下吸附稳定性不足,固相污染及多因素耦合响应能力有限。配方组分、工况环境与界面作用参数共同决定减阻效果,通过工艺制度优化和组分正向匹配可显著提升体系性能。构建涵盖润滑、流变、滤失及抑制的多维评价指标体系,结合组合赋权与综合评价模型,能够有效区分优化技术与常规技术的效果差异。未来应着力于抗高温抗盐润滑材料的开发,同时强化智能实时调控手段与评价方法的现场适应性,为深层复杂地层安全高效钻进提供技术支撑。

参考文献

- [1] 郭磊,李模刚,邓楚雯,等. 纳米改性材料在水基钻井液中的减阻性能 [J]. 钻井液与完井液,2025,42(3):308-317.
- [2] 黄贤斌,袁侦航,孙金声,等. 中国页岩气水基钻井液技术研究应用进展及发展展望 [J]. 天然气工业,2026,46(5):87-99.
- [3] 马梓文. 水基钻井液流动减阻作用机理与新方法研究 [D]. 东营:中国石油大学(华东),2022.
- [4] 刘培源,贺心怡. 纳米润滑剂在水基钻井液中的应用及润滑机理 [J]. 造纸装备及材料,2023,52(9):83-85.
- [5] 张文哲,孙金声,王永炜,等. 延安南部陆相页岩油水平井优质水基钻井液技术实践与思考 [J]. 钻采工艺,2025,48(2):195-199.