

图4 基本组合下主梁内力

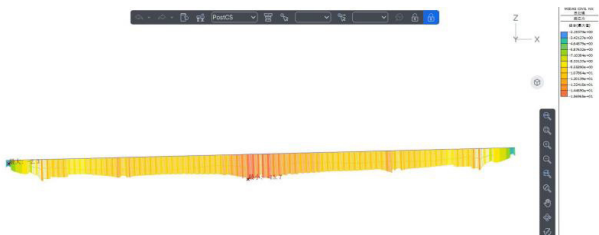


图5 频遇组合下主梁内力

4.1.2 塔墩及基础

经计算, 承载力极限状态强度、裂缝、变形及稳定性验算均满足设计规范要求。

4.1.3 斜拉索

斜拉索的承载力根据《公路斜拉桥设计规范》第 7.2.4 条计算, 满足设计规范要求, 斜拉索应力幅满足产品疲劳性能的要求。

4.1.4 抗震设计

桥址处地震动基本烈度为 6 度, 根据《公路桥梁抗震设计规范》^[4], 本项目桥梁抗震设防类别为 A 类, 抗震设防措施等级为二级。主桥抗震设计主要体现在以下方面:

- 1、整桥采用塔墩梁固结体系, 主墩采用纵向双肢空心薄壁墩。
- 2、主梁采用抗扭刚度较大、整体性能较好的单箱五室截面。
- 3、结构分析时采用时程分析与多振型反应谱法, 桩基础考虑桩 - 土 - 结构相互作用对桥梁地震效应的影响。

4、在 E1 地震作用下, 在 E1 地震作用下, 塔墩和桩基弯矩小于截面初始屈服弯矩; 在 E2 地震作用下, 塔墩与桩基的弯矩则小于相应截面的等效屈服弯矩。

⑤在主梁与交界墩之间设置摩擦摆式减隔震支座, 以改善地震效应的影响。

5 结语

斜拉桥结构体系不同, 对结构受力影响很大, 因此需要针对不同工程概况, 择优选取结构体系^[5]。贺龙特大桥的设计充分结合地形、水文及抗震要求, 采用 (130+305+130) m 跨径布置与墩塔固结体系, 通过单箱五室主梁和空间扇形斜拉索布局, 实现了结构安全性与经济性的平衡。数值模拟验证了主梁、桥塔及斜拉索在施工与运营阶段的可靠性, 抗震措施有效降低了地震作用下的结构风险。本桥的创新点包括:

- 1、结构优化: 单箱五室主梁提升抗扭刚度, 双肢薄壁墩增强抗震性能;
- 2、技术应用: 斜拉索防风雨激振设计及减隔震支座的应用;
- 3、综合效益: 兼顾行洪、环保与景观协调。

未来可进一步探索多灾害耦合作用下的设计方法, 以应对更复杂的工程挑战。本桥的设计经验可为山区大跨径混凝土斜拉桥提供实践借鉴。。

参考文献

- [1] 胡建明. 遵义湘江大桥主跨560m公路组合梁斜拉桥设计 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (32): 141-144.
- [2] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [3] 公路斜拉桥设计规范: JTG/T 3365-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [4] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [5] 曾晓茜,冯振兴.(127+280+127)m双塔双索面混凝土斜拉桥总体设计[J].交通科技与管理,2024,5(07):53-55+52.

Research on the Improvement of Drilling Fluid Lubrication Performance under Complex Well Section Conditions

Yujang Li

Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Changqing Drilling General Company, Xi'an, Shaanxi, 710016, China

Abstract

As oil and gas exploration and development advance into deeper, ultra-deep, and unconventional reservoirs, complex wellbore sections such as high-angle wells, horizontal segments, and long open-hole sections have become increasingly prevalent. The cumulative amplification of frictional resistance and torque between the drill string and wellbore along these sections has significantly increased the risks of slippage, vibration, and sticking, posing critical challenges to drilling safety and construction efficiency. As the only actively controllable engineering medium during downhole operations, drilling fluid lubrication performance plays a decisive role in the tribological behavior of complex wellbore sections. This study systematically analyzes the interfacial mechanisms of drilling fluid lubrication performance based on the formation mechanisms of frictional resistance in complex wellbore sections, and proposes a technical approach to enhance drilling fluid lubrication performance for such conditions. The research findings provide practical technical insights for optimizing drilling fluid systems and controlling downhole friction risks in complex wellbore sections, demonstrating strong engineering applicability and broad promotion value.

Keywords

Complex well section; Drilling fluid; lubrication performance; Friction control; Engineering application

复杂井段条件下钻井液润滑性能提升技术研究

李玉江

川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 中国·陕西 西安 710016

摘要

随着油气勘探开发向深层、超深层及非常规储层不断推进,高井斜、水平段及长裸眼等复杂井段大量出现,钻柱—井壁摩擦阻力与扭矩沿井段累积放大,黏滑振动与卡阻风险显著增加,已成为制约钻井安全性与施工效率的重要因素。钻井液作为井下作业过程中唯一可主动调控的工程介质,其润滑性能对复杂井段摩擦学行为具有决定性影响。本文从复杂井段摩阻形成机理出发,系统分析钻井液润滑性能的界面作用机制,提出了一种面向复杂井段的钻井液润滑性能提升技术路径。研究成果为复杂井段钻井液体系优化与井下摩擦风险控制提供了可行的技术思路,具有良好的工程适用性与推广价值。

关键词

复杂井段; 钻井液; 润滑性能; 摩阻控制; 工程应用

1 引言

随着油气勘探开发逐步向深层、超深层及非常规油气资源拓展,钻井工程面临的井段条件日趋复杂,井斜大、水平位移长、井眼轨迹曲率变化频繁等特征显著增加。在此背景下,钻柱与井壁之间的摩擦阻力急剧增大,引发扭矩与摩阻异常升高、钻具磨损加剧、卡钻风险上升等一系列工程问题。钻井液作为井下作业过程中唯一可调控的工程介质,其润滑性能直接影响井下摩擦状态与钻进安全性,已成为复杂井段钻井技术体系中的关键控制因素之一。因此,围绕复杂井段工况特征,系统研究钻井液润滑机理并提出针对性的性

能提升技术,对于保障钻井作业连续性、降低工程风险具有重要的理论意义与现实价值。

2 复杂井段钻井工况特征与摩阻机理分析

复杂井段通常表现为井眼空间结构非线性显著、钻柱与井壁接触形式多样化以及井下受力状态高度耦合等特征[1]。在高井斜或水平段内,钻柱自重沿井眼轴向分量显著减小,而径向分量明显增大,使钻柱与井壁之间形成持续接触状态。此时,摩擦阻力不再呈现局部集中分布,而是沿井段长度方向累积放大,导致扭矩和摩阻呈非线性增长趋势。从摩阻形成机理看,钻柱—井壁接触摩擦主要由三部分构成:一是钻柱表面与井壁岩石或泥饼之间的干摩擦;二是钻井液在接触界面形成的液膜剪切阻力;三是钻屑在井壁与钻柱间的嵌入摩擦。在复杂井段条件下,由于井眼清洁度下

【作者简介】李玉江(1986—),男,中国陕西西安,硕士,工程师,从事钻井工程研究。

降、钻屑床易于形成，第三类摩擦成分显著增强，使整体摩擦阻水平明显高于直井或低斜井段。而井壁泥饼结构的致密程度与表面粗糙度对摩擦行为具有重要影响。高滤失、粗糙泥饼易造成钻柱与井壁的“机械咬合”效应，进一步放大摩擦阻。因此，单纯依靠机械参数优化难以从根本上解决复杂井段摩擦阻问题，必须通过钻井液润滑性能的系统提升实现摩擦状态的整体改善。

3 钻井液润滑性能的作用机理与技术路径

3.1 钻井液润滑性能的作用机理

钻井液润滑性能本质上体现在其降低摩擦系数、削弱界面剪切应力以及改善钻柱—井壁接触状态的综合能力[2-3]。从微观层面看，润滑性能主要依赖于钻井液在固体接触界面形成稳定润滑膜的能力。当润滑膜连续且具有一定承载能力时，可有效将干摩擦转化为边界润滑或流体润滑，从而显著降低摩擦阻。在复杂井段条件下，钻井液润滑作用主要通过以下机制实现：其一，润滑剂分子在金属表面或泥饼表面发生物理吸附或化学吸附，形成定向排列的吸附膜，降低界面表面能；其二，润滑相在高压条件下渗入微观凹凸结构中，填充接触间隙，削弱真实接触面积；其三，通过改善泥饼结构，使其表面趋于平整光滑，降低钻柱滑移过程中的剪切阻力。值得注意的是，复杂井段中高温、高压及高剪切环境对润滑膜稳定性提出了更高要求。若润滑体系耐温性或抗剪切性能不足，润滑膜易发生破坏，导致润滑效果快速衰减。因此，润滑性能的提升不仅取决于润滑剂种类，还与钻井液体系的整体结构密切相关。

3.2 钻井液润滑性能提升的关键技术路径

在复杂井段条件下，单一类型润滑剂往往难以满足长期、高效减摩需求。通过引入复配润滑技术，将不同作用机理的润滑剂进行协同设计，可显著提升整体润滑效果。例如，极压型润滑剂可在高载荷条件下形成化学反应膜，防止金属直接接触；而表面活性型润滑剂则有助于降低界面张力，改善液膜铺展能力。二者复配后，可在不同工况区间内实现润滑性能互补。在水基钻井液体系中，常通过引入改性脂肪酸酯、聚合物润滑剂或纳米润滑材料，实现低摩擦系数与良好环境相容性的统一。研究表明，合理控制润滑剂加量及其在体系中的分散状态，是避免润滑剂对流变性和滤失性能产生不利影响的关键。润滑性能并非孤立存在，而是与钻井液流变性、滤失性及抑制性等性能相互耦合[4]。在复杂井段中，若钻井液黏度过高，虽有利于携岩，却可能增加液体剪切阻力；若黏度过低，则不利于润滑膜稳定形成。因此，通过体系协同优化，实现“适度黏度—稳定泥饼—有效润滑”的平衡，是润滑性能提升的重要技术路径。工程实践中，通常通过调控固相含量、优化胶体结构以及引入低摩擦阻封堵材料，使钻井液在井壁形成致密、光滑的薄泥饼，从而为润滑剂发

挥作用创造有利条件。这种从体系结构层面改善润滑环境的方法，在长裸眼井段中表现出较好的适应性。复杂井段钻井过程中，摩擦阻水平随井深、井斜及钻进参数变化而动态演化，润滑需求呈现明显的阶段性特征。因此，建立润滑性能与井下工况之间的匹配关系，并实施动态调控，是提升润滑技术实效性的关键。

通过实时监测扭矩、摩擦阻等工程参数，可对井下摩擦状态进行定量评估，并据此调整润滑剂加量或钻井液性能参数，实现润滑效果的动态优化。这种“监测—分析—调控”的技术路径，有助于避免润滑剂过量投加，提高技术经济性。

4 工程应用效果与技术意义分析

4.1 现场应用效果评估与关键指标响应

在复杂井段（高井斜—水平段—长裸眼段耦合）钻进过程中，摩擦阻与扭矩的异常增长往往呈现“沿程累积—局部突变”并存的演化特征，表现为滑动钻进阶段扭矩波动加剧、起下钻摩擦阻曲线抬升、钻具与井壁接触工况由间歇接触向连续接触转化。基于现场应用的对比结果，采用“复配润滑剂+泥饼结构协同优化+参数动态调控”的润滑性能提升方案后，井段摩擦阻响应呈现显著改善[5]。其一，扭矩与摩擦阻的短周期波动幅度明显收敛，井下摩擦状态由不稳定的混合摩擦向稳定边界润滑过渡，钻柱运动的黏滑（stick-slip）现象得到抑制；其二，滑动钻进效率提升，表现为同等钻压与转速下机械钻速波动降低、定向段滑动推进更平顺，减少了因摩擦阻突增导致的频繁提拉/划割操作；其三，起下钻过程的摩擦阻曲线趋于平缓，特别是在长水平段中，复配润滑体系通过形成高承载吸附膜与改善井壁泥饼表面粗糙度，降低了钻柱—泥饼界面的真实接触面积，从而削弱了摩擦阻沿程累积效应。现场统计数据表明，在长水平段井中引入复配润滑体系后，摩擦阻降幅可稳定达到20%~35%，并显著降低滑动钻进阶段的卡阻风险；同时扭矩峰值出现频次减少，钻进过程中的扭矩—泵压耦合异常得到缓解，说明井眼清洁度与界面润滑状态实现了同步改善。值得强调的是，上述效果并非仅由润滑剂单因素贡献，而是润滑剂在钻井液胶体结构、固相级配与滤失控制约束下形成稳定润滑膜，并在动态调控策略作用下实现工况匹配，从而在高载荷、强剪切的复杂井段条件下维持较高的润滑有效性。

为了系统揭示复杂井段条件下钻井液润滑性能提升对工程响应的作用路径，本文从井下摩擦工况演化、润滑调控策略及其工程反馈三个层面构建了润滑性能提升的工程作用逻辑框架，如图3所示。该框架以高井斜、水平段及长裸眼井段形成的复杂摩擦工况为起点，揭示摩擦阻与扭矩沿井段累积放大的内在联系，并将润滑性能提升策略分解为润滑剂体系、泥饼结构调控及参数动态匹配三条协同路径，从而解释润滑性能改善对钻进过程稳定性的综合影响。