

Analysis of Drilling Fluid Properties 'Impact on Wellbore Cleaning Efficiency in Complex Formations

Shiqiang Guo

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling General Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710200, China

Abstract

Under complex formation conditions, wellbore cleaning status during drilling directly affects drilling safety and speed. By observing wellbore structures under different formation types from multidimensional perspectives and integrating cuttings migration mechanisms, this study investigates the influence mechanisms of drilling fluid properties on wellbore cleaning efficiency through rheological characteristics, density, solid phase content, and chemical stability. Results indicate: 1) The matching degree between rheological properties and annular return velocity determines cuttings suspension and transportation efficiency; 2) Density regulation ensures wellbore stability and cuttings transport differential pressure field; 3) Solid phase regulation combined with inhibitor treatment effectively mitigates wellbore instability and mud cake thickening.

Keywords

Complex formations; Drilling fluid properties; Wellbore cleaning; Rheological characteristics; Cuttings transportation efficiency

钻井液性能对复杂地层井眼清洁效果的影响分析

郭世强

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部, 中国·陕西 西安 710200

摘要

由于复杂地层条件下钻井过程中井眼清洁状况直接影响钻井安全与钻进速度, 在运用多维度的视角观察地层类型下井眼结构的基础上, 并结合岩屑运移机理, 从钻井液流变性、密度、固相含量及钻井液化学稳定性等方面出发, 探讨钻井液性能指标对井眼清洁效果的影响机制。结果表明: 流变性能-环空返速匹配度决定了岩屑悬浮和携带效果; 密度调控确定了井壁稳定、携屑压差场; 固相调控与抑制剂共治可有效缓解井壁失稳和泥饼增厚等问题。

关键词

复杂地层; 钻井液性能; 井眼清洁; 流变特性; 携屑效率

1 引言

钻井液是井眼清洁的主要介质, 钻井液的流变特性、密度和固相含量直接影响到携屑能力及环空流场稳定, 而随着深井、超深井工程发展迅猛, 传统的经验式钻井液设计方式已无法满足其井眼清洁的动态需求。针对上述情况, 学界、工程界不断尝试探索钻井液性能的多参数耦合优化途径, 通过对流变性、密度、地层等多参数耦合作用下钻井液流动剖面、携屑能力等钻井液性能变化的研究, 以及数值模拟和现场监测分析钻井液流变性和密度、地层之间的耦合机理。结合不同地层复杂特点, 对钻井液各项关键性能参数作用于井眼清洁效应的内在机理进行全面、深入的分析, 建立不同地层条件下的钻井液优化模式, 最终达到提高井眼清洁度的目的。

的, 实现钻井安全可靠平稳运转。

2 复杂地层井眼清洁的工程特征与钻井液性能需求

2.1 复杂地层井眼清洁的典型问题

复杂地层井眼清洁还存在一系列工程性问题。典型的如岩屑沉积、环空流场不均匀、井壁坍塌和井径扩大。高斜深和水平井段由于受到重力作用, 在井筒底部低侧较易发生岩屑沉积, 严重影响了环空携屑能力。当钻进速度快、钻井液流变性能不好时, 环空不易携带出掉落的大块岩屑, 容易造成环空堵塞, 引起井下憋泵、憋漏、甚至井涌、卡钻的现象。软弱胶结的软塑性地层、循环过程极易出现掉片、泥页岩剥落等复杂情况, 造成清洁系统负担加重, 返速不够。非均质性的地层及地层压力系统的复杂性导致井眼清洁过程的非稳态性比较严重, 而钻井液剪切稀化、屈服应力变化较大都会引起流体流态的变化。

【作者简介】郭世强(1980-), 男, 中国甘肃会宁人, 本科, 工程师, 从事钻井工程研究。

2.2 钻井液在井眼清洁中的作用机制

钻井液在井眼清洁方面的机理是，钻井液的环空流性能决定了岩屑在井底的受力状态和迁移路径。钻井液剪切速率、屈服应力和黏度等参数能够控制岩屑能否被低速流场包裹而带出井底。当钻井液为层流—紊流复合流态时，能增加井底的扰动及岩屑的分散程度，有利于井眼自清。钻井液中固相颗粒能通过黏附、碰撞等作用，来完成钻屑运移过程。钻井液的固相颗粒在钻屑传输过程中的分布均匀性和粒径结构，能够显著影响流体的携屑能力和井壁应力分布状态。

2.3 钻井液性能参数对清洁效果的影响规律

钻井液性能参数的合理配置对提高清洁效率有着重大作用，流变特性、密度、固相含量及化学稳定性。其中流变性能参数是指塑性黏度和动切力，这两者主要反映的是钻井液携屑和悬浮能力，当它们发生变化时会直接影响岩屑返速以及井眼流场稳定性^[1]。如果钻井液黏度过低，则会影响岩屑携带性能，反之则增加了泵压及能耗，不利于形成高效循

环，流变参数控制至低剪切高黏度或强剪切低黏度是复杂地层井眼清洁的技术措施之一。钻井液密度影响井底压差和地层孔隙压力平衡，钻井液密度大，可增大携屑压差驱动力，但是过高容易超过地层破裂压力造成漏失。

3 钻井液性能参数与井眼清洁效率的关联分析

3.1 流变性能与返速匹配规律

钻井液的流变参数包括塑性黏度、动切力和屈服应力等，它们决定了钻井液在不同剪切速率下的流动状态与携屑能力。当环空返速低于临界携屑速度时，岩屑易于在井底低侧沉积，形成携屑死区；而当返速过高，则会导致井壁冲刷与压力波动，对井眼稳定性造成不利影响。通过调节流变性，实现低剪切高黏度与高剪切低黏度的双重特性，可在不同井段动态维持携屑效率与能耗的平衡。研究表明，在长庆油区高倾角井施工中，钻井液塑性黏度保持在 28 ~ 32 mPa·s、动切力控制在 8 ~ 10 Pa 范围内时，岩屑返出率提升约 20%，并有效抑制井底沉积。如表 2-1 所示：

表 2-1 不同流变参数下岩屑返出率与清洁效率对比

序号	钻井液塑性黏度 (mPa·s)	动切力 (Pa)	环空返速 (m/s)	岩屑返出率 (%)	清洁效率提升幅度 (%)	备注
1	22	6	0.55	68.2	0	传统体系
2	26	8	0.6	77.9	14.2	稳态携屑改善
3	30	9	0.62	82.4	20.1	最优匹配区间
4	34	11	0.66	79.6	16.7	黏度偏高能耗上升
5	28	10	0.58	81.2	18.4	现场优化结果

3.2 钻井液密度与携屑能力的耦合关系

就钻井液密度与携屑能力的耦合而言，钻井液密度增大有利于提高环空静压，进而增加上返流的剪切力和携屑动能，但是当密度高于地层破裂压力时会容易造成漏失、井漏、卡钻等事故。另外如果密度过小就会造成地层压力失衡，岩屑的沉降更加严重，而此时的钻井液密度就与井下携屑效率之间是呈非线性关系的，只有在一定的范围内才合适，所以应该结合地层孔隙压力、井径结构和岩屑粒度的分布合理选择钻井液密度的大小^[2]。从长庆地区的实际钻井情况来看，一般在页岩泥质砂岩组合地层使用钻井液密度保持 1.20~1.35g/cm³ 时，既能够保证环空流体动压梯度不变，又能够维持地层中的岩屑悬浮，携屑效率相比于常规配比提高约 15%。

3.3 固相控制与化学稳定性调节策略

钻井液中固相颗粒的数量和粒径大小会影响其流变性和滤失特性，当固相颗粒中超细固相偏高时会使得流体的黏度异常升高，滤饼增厚，携屑阻力增大。相反，如果固相颗粒偏低，则容易导致岩屑悬浮和井壁支撑能力变差。利用机械分离法、化学稀释法相配合来使固相含量稳定维持在 4%~6%，使流体黏度、携屑能力处于动态平衡的状态是非常有效的办法。化学稳定性的调节，在弱胶结地层里面往往

会导致页岩水化膨胀和碎屑分散，应该使用抑制剂-包被剂-润滑剂组合体系来增强钻井液的抗水化性、抗离析性。长庆钻井总公司第四工程项目部，在弱胶结砂岩井段使用了聚阳离子包被加有机胺抑制剂复合体系，滤失量较之前降低了 30%，井壁坍塌的风险降低了大约 18%，携屑效果得到了充分的改善。

4 不同地层条件下的钻井液优化应用分析

4.1 高倾角与水平井段的钻井液设计参数优化

钻井液设计需在携屑效率与流动阻力之间实现最优平衡，其关键在于流变参数的定向优化与返速动态匹配。针对长庆地区高倾角井施工特点，通过数值模拟与现场数据反演，确定塑性黏度应维持在 30 ~ 35 mPa·s、动切力控制在 9 ~ 11 Pa、环空返速保持在 0.6 ~ 0.7 m/s 的区间内，可实现岩屑连续悬浮与定向迁移。为防止井底沉积带形成，采用低剪切高黏度的触变性钻井液体系，在钻具滑动状态下可形成自支撑环流，提高岩屑返出率。与此同时，通过调整井眼压力梯度与流型分布，使井底切屑再悬浮能力增强。项目部在高倾角井段应用复合型聚合物钻井液体系后，岩屑返出率提升 21%，钻具扭矩下降 15%，表明参数优化可显著改善复杂井段的清洁稳定性与钻进效率。如图 3-1 所示：

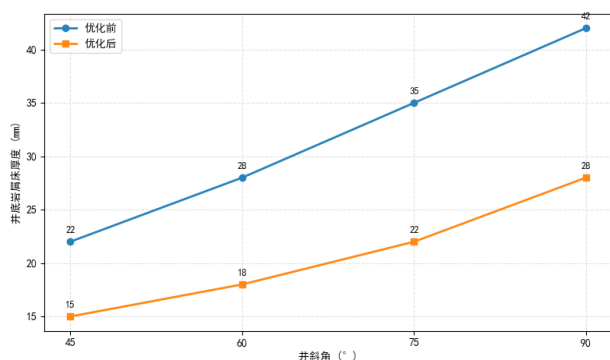


图 3-1 高倾角与水平井段清洁效果优化对比

4.2 弱胶结与易塌地层中的钻井液稳定控制

弱胶结和易塌地层中钻井液稳定体系应具有抑制性和封堵性功能，在钻进过程中用合理的滤失量和适宜的化学稳定性来维护井壁动态稳定。长庆钻井总公司第四工程项目部对泥页岩或砂质泥岩地层，选用聚阳离子包被剂、有机胺抑制剂和纳米封堵剂组合成分体系，形成了以聚阳离子包被剂、有机胺抑制剂和纳米封堵剂为主，实现岩屑表面致密的包裹吸附膜、减小孔隙度、减缓吸水膨胀速度、纳米颗粒嵌入微裂缝自愈修复等作用的一套复合型稳定体系。该体系试验结果表明与常规抑制型钻井液相比，其滤失量降低了32%，井壁坍塌的概率降低了18%，携屑稳定性得到明显的改善。

4.3 井下携屑流场优化与现场监测技术应用

井下携屑流场优化和现场监测技术结合 CFD(计算流体动力学)模拟和现场传感器数据实现钻井液流态分布携屑效率量化模型建立，在现场应用压力波动及环空返速智能监测系统，实时采集流体密度、流速、剪切应力参数数据并利用算法判断岩屑沉积的趋势。在系统检测流速低于临界携屑速度之后，自动调节泵速或钻井液流变性参数，通过闭环控制来完成；根据各井段不同流态特性，进行优化喷嘴布置，合理分配流体分配，加大环空紊流扰动程度，提高携屑动能。从井下流场优化监测系统联控表明，在典型水平井段开展流场优化监测系统联控后，可提高岩屑返出率17%，降低井底岩屑沉积厚度25%，提高钻进速度约0.8m/h。

5 钻井液性能优化的现场应用与经济效益分析

5.1 综合优化体系的建立与实施效果

该项目部通过建立井下压力监控传感器、环空流速传感器和携屑浓度检测设备，建立数据驱动的钻井液运行性能反馈机制，由原来的依靠经验控制升级为智能化精确匹配^[3]。在高斜度井和弱胶结地层中，通过对塑性黏度控制在30-35mPa·s，密度控制在1.25-1.35g/cm³，固相控制在5%-7%内，在保证岩屑返出率的前提下提高携屑效率，确保井壁稳定，现场统计表明，运用综合优化体系以后岩屑返出率提高了19%，降低钻具扭矩13%，降低了卡钻的风险，钻井周期缩短了1.5~2.0天，同时应用这项技术进行完井，具备

相应的技术借鉴意义。

5.2 安全与经济效益的量化分析

项目部通过对比20口采用传统钻井液与优化体系井的生产数据，发现优化体系下的平均机械钻速提高8.6%，钻井周期缩短约11%，单位井造价平均降低5.3%。由于钻井液返速稳定与环空流态均匀，卡钻事故率由7.8%降至2.1%，井漏事件减少近40%，直接节约钻具维护及抢险成本约35万元/井。安全方面，通过降低井底压差波动幅度与泥饼厚度，减少了井壁坍塌与井涌风险，钻井安全等级由Ⅱ级提升至Ⅰ级。经济测算显示，在单井钻井成本控制目标为800万元的条件下，钻井液优化体系每口井可节约成本约42万元，间接经济收益约占工程总投资的3.8%。如表4-1所示：

5.3 管理经验与现场推广建议

项目部在推广该方法的过程中总结出三点经验：一是建设“设计—检测—反馈—调整”的四级联动体系，做到设计方案到现场施工全周期的闭环；二是实行钻井液性能数字化看板管理，将流变参数、密度、固相含量等重要指标以图表化方式展示出来，达到实时监控与预警的目的；三是开展好技术培训及落实好标准化施工，使现场的操作工人能够及时准确识读参数并正确调节参数。根据不同的地层类型，可按分区分类的方式分片逐步开展，例如对于高倾角井段先做流变控制和携屑监测，对弱胶结地层先做化学稳定和滤失控制，从管理上来讲可以引入钻井液性能数据库、AI辅助诊断模型开展参数预测工作。

6 结论

复杂地层条件下井眼清洁效果受钻井液流变特性、密度调控、固相控制、化学稳定等多方面耦合作用的影响。采用流变-密度-固控-化学流体性能综合优化体系，以调节钻井液流体性能为驱动，钻井液流体携屑与井下流动特性相适应，实现携屑效率、井壁稳定性和能耗控制的最佳协同，发挥最佳钻井液流体性能，强化了地层清洁能力。现场施工数据显示，该体系对改善高倾角井、弱胶结地层岩屑返出率、增强钻进稳定性、减缓卡钻、井漏等事故、缩短钻井周期、降低成本有重要作用。理论研究成果表明，利用大数据和智能调控是提高复杂地层井眼清洁度的有效途径，该综合优化体系可将钻井液技术向智能化、精准化、经济化的方向进一步发展，同时对该类地层的钻井液技术具有一定参考价值及广泛的推广应用前景。

参考文献

- [1] 刘伟,欧阳伟,彭陶钧.石油钻井超深井大尺寸井眼段清洁因素分析[J].化工设计通讯,2023,49(02):42-44.
- [2] 聂强勇,陈新,杜仕勇,等. HEM抗高温钻井液性能优化[J].当代化工研究,2023,(16):170-172.
- [3] 刘成.钻井液在复杂地层中的流变性调控问题与对策研究[J].石化技术,2025,32(05):276-278.