

钻井提速技术难点分析与对策

商国庆

江汉油田分公司油气产能建设管理中心，重庆市涪陵区，408000；

摘要：本文分析了钻井提速技术面临的四大难点，包括复杂地质条件制约钻进效率、钻井工具与设备性能存在瓶颈、钻井工艺参数优化难度大、井眼轨迹控制与井眼质量矛盾突出。针对这些问题，提出了相应优化策略，如基于地质特性设计差异化方案、升级钻井工具与设备并进行适配管理、构建智能化工艺参数动态优化系统、采用井眼轨迹与质量协同控制技术，为提升钻井效率提供了系统性解决思路。

关键词：钻井提速技术；难点分析；对策

DOI：10.64216/3080-1508.25.05.022

引言

随着油气资源开发向深层、复杂地层推进，钻井效率成为制约勘探开发效益的关键因素。当前，钻井过程中因地质条件复杂、工具设备性能不足、参数优化困难及轨迹与质量矛盾等问题，导致钻进效率低下、成本增加。在此背景下，深入剖析钻井提速技术难点并探索针对性优化策略，对推动钻井工程高效、安全开展具有重要意义。

1 钻井提速技术难点分析

1.1 复杂地质条件制约钻进效率

钻井提速技术的实践应用面临多方面问题，具体而言，由于复杂地质条件的约束导致钻进效率低下，不同地质层的硬度、孔隙度、渗透率差异较大，导致钻头磨损不均，需要频繁更换钻头或调整钻井参数；再加上断裂带及地层发育区域易引发井壁失稳，需降低转速与控制钻井指标，这一过程也制约了钻进效率。并且在深层或超深层次钻井中，地层温度超过150℃、压力超过140MPa，导致钻井液性能劣化，如黏度下降、滤失量增加，需要频繁调整配方或停钻维护，高温还加速了钻具材料的疲劳磨损，缩短了使用寿命，增加了非生产时间。

1.2 钻井工具与设备性能存在瓶颈

传统PDC钻头在软地层效率高，但在硬地层易崩齿；牙轮钻头耐磨性不足，需平衡切削效率与寿命。此外，高转速下钻柱振动加剧会导致钻头跳钻偏磨，需优化钻柱刚度与减振设计；并且顶部驱动装置功率不足，无法满足大扭矩钻进需求，尤其在复杂工况操作中表现明显；同时，钻机关键部位故障率高、维修时间长，影响连续作业效率；再加上自动化程度低下，人工操作依赖性强，导致参数调整滞后于钻进工况。

1.3 钻井工艺参数优化难度大

钻井工艺参数优化难度大也是常见的突出问题，多参数耦合效应复杂，如钻压、转速、排量、泵压等参数相互影响，需通过实验或数值模拟建立动态优化模型，但实际工况变化使模型适配不足；此外，传统随钻测量数据传输速率低，无法实时调整参数以应对地层变化；而人工智能优化算法需大量历史数据训练，在新探区数据匮乏时模型准确性下降；且不同钻井区需定制化参数组合，但现场工程师经验差异大，导致方案执行存在偏差；同时在环保要求层面进一步限制了参数选择范围，需要平衡效率与合规性。

1.4 井眼轨迹控制与井眼质量矛盾突出

在钻井过程中，井眼轨迹控制与井眼质量保障的难题同样存在，为提高油气采集率，水平井、大位移井等复杂结构井需严格按照轨迹设计钻井，但在轨迹控制过程中频繁调整钻进方向，容易导致井眼不规则，引发卡钻、套管下入困难等问题，需通过低伤害钻井液、高效井眼稳定等措施维持井壁稳定。同时，高精度钻井轨迹控制可能会牺牲转速，而追求高效钻进又可能导致井眼质量下降，即形成效率与质量的二元对立情况。

2 钻井提速技术优化策略

2.1 基于地质特性的差异化钻井方案设计

现阶段，在钻井提速优化过程中，工程师需根据地质特性的差异优化钻井方案设计，这些环节需精准识别地质参数并转化为可操作的钻井技术参数。工程师可参照地层岩性、硬度、孔隙度、渗透率等基础地质数据为输入，通过多维分析构建地质特征模型，进而设计差异化的钻井参数组合。

2.1.1 数据整合

期间工作人员需建立起地质工程一体化的数据平

台,整合地震勘探、测井解释、岩心分析等数据源,采用三维地质建模技术对目标地层进行高精度重构,重点分析地层非均匀性对钻井动态的影响,如软硬交错地层中钻头磨损速率的变化规律,以及裂缝发育带可能引发的井漏风险,通过数据驱动的方式量化地质特性与钻井参数的关联性,为后续方案设计提供科学依据。

2.1.2 参数设计

在参数设计阶段需根据地层特性模型动态调整钻井参数组合,具体包括钻头选型、钻压分配、转速优化以及钻井液性能调控等关键环节。其中针对高硬度地层,工程师可优先选用抗冲击性强的 PDC 复合片钻头,并配合高钻压、低转速组合以减少钻头磨损;对于软地层则采用高转速、低钻压的参数策略以提升机械钻速,同时通过调整钻井液流变性能(如增加低剪切速率黏度)以增强岩屑携带能力,防止井壁重复破碎。

2.1.3 动态调整

最为关键的是,工作人员还需要建立起实时参数反馈机制,通过随钻测量系统采集钻进过程中的震动、扭矩、转速等动态数据,再结合地层特性模型进行实时工况分析,若发现实际钻速与理论偏差超过 15%,则需要立即调整钻压或转速参数,确保钻井过程始终处于最优工况。最后方案的执行需强化过程控制与动态优化,建立起多级预警机制,对钻井风险进行主动管理,在钻进前需根据地层特性模型制定风险预案,如针对高压水层预测井控压力阈值并配置相应的井控设备。在钻进过程中还需要通过实时监测系统对钻井液密度、黏度、滤失量等关键指标进行监控,确保井壁稳定性与钻井效率的平衡。

2.2 钻井工具与设备性能升级与适配管理

钻井工具与设备的性能升级与适配管理同样不可或缺,其核心在于通过技术迭代与动态匹配实现工具性能与地质条件的精准适配。

2.2.1 性能参数库构建

工程师需以工具性能参数库建设为基础,结合地层特性分析结果进行工具选型与定制化改造,进而构建起全生命周期管理机制以保证工具持续高效运行。在此过程中,需建立起系统化工具性能参数库,整合钻头、钻柱、稳定器、动力钻具等关键工具的力学性能、结构特性、适用地层范围等基础数据信息,并采用数值模拟技术,分析不同工具组合在不同地质条件下的协同效应,例如,可通过有限元分析评估钻头与钻柱的振动耦合特性;或通过流体力学模拟优化动力钻具的流场分布,以此形成工具性能与地质条件的量化匹配模型,为后续选

型提供数据支撑。

2.2.2 工具选型与定制

在工具选型与定制阶段,工程师需基于地层特性分析结果对工具性能参数进行动态调整,其中针对深层高压地层应选用抗高压、高耐磨的钻头材料,并通过表面涂层技术提升其热稳定性;而对于复杂断层带,则可采用稳定器与柔性钻杆组合模式,以增强钻具的抗弯曲能力并降低卡钻风险。这些环节还需要建立起根据地层动态适配的机制,通过实时监测钻进过程的扭矩、振动、转速等参数,结合工具性能参数进行实时匹配度评估,如果发现工具磨损速度超出理论值 20%或钻井效率下降 15%以上,则需要启动工具更换或参数调整流程,以确保工具性能始终与地层条件保持最优适配状态。

2.3 智能化工艺参数动态优化系统构建

智能化工艺参数动态优化需基于数据驱动与模型融合实现对参数的实时感知、智能决策与动态调整,这一环节,工作人员需结合地质工程耦合模型与智能算法库,构建起数据采集、模型分析、参数优化、执行反馈的闭环控制体系。

2.3.1 过程性数据整理

工作人员需要搭建高精度数据采集与传输网络,整合随钻测量系统、地质导向系统、设备状态监测装置等多元数据源,重点采集钻压、转速、扭矩、钻井液性能、地层岩性等关键参数,通过 5G 或工业以太网实现毫秒级实时传输,同时建立起数据清洗与预处理机制,对异常值、缺失值进行自动修正,确保输入数据的完整性与准确性,为后续模型分析提供可靠基础。

例如,在某页岩气田水平井钻井作业中,现场团队依托智能化工艺参数动态优化系统实现高效钻井,他们先搭建覆盖井场全域的高精度数据采集网络,在钻台安装 20 组压力传感器采集钻压数据,在转盘驱动装置部署转速监测模块记录转速变化,通过扭矩传感器实时捕捉钻柱扭矩数值,同时在钻井液循环系统设置黏度、密度、含砂量监测仪采集钻井液性能参数,在地层出口处安装岩性分析仪识别页岩、砂岩等地层岩性,所有参数经 5G 网络实现毫秒级传输至中控系统,系统自动触发数据清洗机制,当钻压数值出现瞬时跳变时立即标记为异常值并调用相邻 10 组数据的均值进行修正,若钻井液密度数据连续 3 秒缺失则启动插值算法补全,确保每一组输入数据都能准确反映实际工况。

2.3.2 动态模型搭建

在模型构建与算法开发阶段需建立起地质工程耦合动态模型,将地层硬度、孔隙度、渗透率等地质参数

与钻头磨损、钻柱振动、钻井液岩屑等工程参数进行关联分析,通过机器学习算法训练参数预测模型,实现对转速、扭矩等关键指标的提前5~10米预测。同时开发多目标优化算法库,以机械钻速最大化、钻头寿命最长化、钻井成本最低化为优化目标,结合约束条件生成最优参数组合。

例如,在动态模型搭建环节,技术人员将该井已探明的地层硬度数据(2500-3200MPa)、孔隙度(5%-8%)、渗透率(0.1-0.5mD)等地质参数导入系统,关联钻头磨损量监测数据(当机械钻速下降15%时判定为中度磨损)、钻柱振动频率(超过15Hz触发预警)、钻井液岩屑返出量等工程参数,通过随机森林算法训练参数预测模型,将历史3000米钻井数据作为训练集,成功实现对转速、扭矩在钻头钻进前8米的精准预测;他们还开发多目标优化算法库,设定机械钻速 $\geq 20\text{m/h}$ 、钻头寿命 ≥ 150 小时、单米钻井成本 ≤ 800 元的约束条件,当模型预测到前方5米将进入高孔隙度地层时,自动生成钻压180kN、转速80r/min、钻井液密度 1.2g/cm^3 的最优参数组合,中控系统立即向执行机构发送调整指令,钻台液压装置响应并稳定钻压,转盘电机调整输出功率以匹配目标转速,钻井液处理系统同步调节添加剂注入量。

2.4 井眼轨迹与井眼质量的协同控制技术

井眼轨迹与井眼质量的协同控制技术,要求通过动态调整钻进方向与井壁稳定性的耦合关系实现轨迹精度与井眼质量的同步优化,工程师需结合实时监测数据打造闭环控制系统,形成井眼轨迹动态调整与质量保障的协同调控体系。其中,工作人员需建立起高精度三维地质导向模型,整合地震勘探、测井解释以及邻井数据,通过地层对比与趋势预测技术确定目标层位空间分布特征,重点分析地层倾角、断层走向等关键参数对井眼轨迹的影响;同时结合钻具组合的弯曲刚度、造斜率等力学特性,采用数值模拟方法计算不同钻进参数下的轨迹偏移量,制定包含安全窗口、造斜率范围、扭矩阈值等约束条件在内的轨迹规划方案,确保轨迹设计既符合地质目标要求又满足钻具力学性能限制。

例如,某区块水平井作业中,工程师团队启动井眼轨迹与井眼质量协同控制流程时,先以三维地质导向模型为核心,该模型整合了区块三维地震剖面、邻井测井曲线及实钻岩心数据,通过地层对比发现目标层位存在 15° 倾角且受北东向断层切割,据此将地层倾角、断层走向等参数输入导向系统,实时标注轨迹设计的避断层

安全距离;同时选用 1.25° 单弯螺杆钻具组合,其弯曲刚度经实验室测试达 $8500\text{N}\cdot\text{m}^2$,造斜率理论计算值为 $6^\circ/30\text{m}$,工程师通过数值模拟软件输入钻井液密度 1.4g/cm^3 、转盘转速80r/min等参数,计算得出不同井段轨迹偏移量在0.3-0.8m范围,进而制定轨迹规划方案:安全窗口设定为 $1.2-1.8\text{g/cm}^3$,造斜率控制在 $4^\circ-7^\circ/30\text{m}$,扭矩阈值不超过 $35\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

钻进至井深2800m时,随钻测井显示井眼轨迹向断层方向偏移,偏移量达0.6m,工程师立即调用地质导向模型对比邻井数据,确认是地层倾角突变导致,遂指令司钻将钻压从180kN降至150kN,同时调整转盘转速至60r/min,使造斜率稳定在 $5^\circ/30\text{m}$;当监测到井壁出现轻微坍塌迹象,钻井液返出携带岩屑量增加15%,团队即刻将钻井液密度提升至 1.6g/cm^3 ,扭矩同步降至 $28\text{kN}\cdot\text{m}$,既纠正了轨迹偏移又抑制了井眼失稳;后续通过连续30组实时数据闭环反馈,轨迹最终精准落在目标层位中轴线1.2m范围内,井径扩大率控制在8%以下,实现了地质目标与井眼质量的双重达标。

3 结束语

总体来说,钻井提速技术的突破需突破单一环节改进,实现地质特性、工具设备、工艺参数与井眼控制的多维度协同。上述优化策略通过动态适配与智能调控,不仅解决了当前技术瓶颈,更构建了“地质-工具-参数-轨迹”的一体化技术框架。这一框架为复杂条件下钻井效率提升提供了范式,也为未来钻井技术向智能化、定制化发展指明了方向,助力行业实现安全与效率的双重提升。

参考文献

- [1]王运功,张汉信,倪华峰,等.鄂尔多斯盆地东部气田深层煤岩气水平井井身结构优化及钻井提速配套技术[J]. 钻采工艺,2025,48(03):62-69.
- [2]祝效华,刘伟吉,邓开创,等.大宁-吉县区块三气合采多目的层钻井综合提速研究[J]. 钻采工艺,2025,48(03):70-76.
- [3]李强. 沈630区块深水平井钻井的难点分析和对策探讨[J]. 科技风,2020,(12):130. DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.202012117.
- [4]崔强. 深井钻井提速技术难点分析及对策[J]. 化工管理,2018,(23):125.
- [5]王斐. 深井钻井提速技术难点分析及对策[J]. 石化技术,2016,23(12):49.