

钻井工程技术问题与对策研究

王小军

中石化西南石油工程有限公司重庆钻井分公司 四川 德阳 618000

摘要: 钻井工程在深部、复杂地质开发中面临钻头磨损快、井下复杂频发、轨迹控制难、高温高压适配差及环保约束等挑战。本文梳理钻进效率、井况防控、定向控制、深井技术及环保五大类技术问题,分析地质复杂、设备局限、监测缺陷与协同不足成因,提出新型钻头、动态压井、智能导向、耐高温材料及废弃物闭环等对策,并从研发体系、标准化、人才、风控保障落地,以提升效率、安全与可持续性,支撑能源开发。

关键词: 钻井工程; 技术问题; 对策研究; 技术保障; 可持续发展

引言: 钻井工程作为能源开发的关键环节,其技术水平直接影响资源开采效率与成本。随着开发向深部、复杂地质及特殊环境拓展,钻井工程面临诸多挑战。复杂地质条件使钻头磨损快、钻速提升难;井下复杂情况频发,威胁作业安全;定向钻井轨迹控制精度不足;深井超深井高温高压环境对材料与设备要求苛刻;环保要求也日益严格。在此背景下,深入研究技术问题与对策,对推动钻井工程发展意义重大。

1 钻井工程关键技术问题分类

1.1 钻进效率问题

钻头磨损过快是制约钻进效率的首要因素。在复杂地质条件下,钻头与岩石持续摩擦导致切削齿快速损耗,直接影响钻井周期与成本。需从材料科学角度优化钻头合金配方,提升抗冲击与耐磨性,并结合数值模拟优化切削齿布局^[1]。钻速提升瓶颈涉及地层适应性不足与能量传递效率低。不同地层岩石力学性质差异大,传统钻井参数难以高效破岩,需建立地层-钻具动态匹配模型,通过实时调整转速、钻压等参数提升能量转化率。此外,钻井液循环系统效能不足导致岩屑携带不畅,易引发重复破碎与井底温度异常,需优化流道设计与泵排量配置以增强携岩与冷却效果。

1.2 井下复杂情况处理

井壁失稳与坍塌风险源于地层压力失衡与钻井液性能缺陷。在页岩、煤层等地层中,钻井液滤失量过高或抑制性不足会破坏井壁结构,需研发强抑制性、低滤失钻井液体系,并实时监测地层压力变化。井漏与井涌的动态平衡是井控核心挑战。漏失可能导致循环中断,井涌则可能引发井喷,需结合地层压力预测与钻井液密度窗口分析,建立动态压井模型实现精准调控。钻具卡钻与解卡技术局限体现在机理认知不足与解卡工具适应性差,需通过力学分析与实验模拟揭示演化规律,并开发

多功能解卡装置。

1.3 定向钻井与轨迹控制难题

井眼轨迹偏差修正技术不足导致轨迹偏离设计路径,增加钻井成本与风险。需结合随钻测量数据与地质导向技术,建立三维轨迹修正模型以实现动态优化。旋转导向系统稳定性问题源于井下振动与温度变化对电子元件的影响,需通过结构优化与材料升级提升系统抗干扰能力,同时开发自适应控制算法增强轨迹控制精度。多级压裂水平井的钻井液匹配挑战在于需同时满足携岩、润滑、防塌与压裂液兼容性要求,需研发多功能钻井液体系并通过实验验证其综合性能。

1.4 深井与超深井技术瓶颈

高温高压环境下的材料耐受性是深井钻井的首要难题。井下工具需承受超过200°C高温与140MPa以上压力,需研发高强度、耐腐蚀的合金材料与密封技术,并通过实验测试验证其可靠性。井底压力动态监测与控制精度不足易导致井控事故,需结合光纤传感与智能算法实现压力数据的实时采集与精准分析。深井钻具组合的力学优化需考虑钻柱振动、疲劳与稳定性问题,需建立钻柱动力学模型,通过参数优化降低钻具失效风险。

1.5 环保与可持续性技术挑战

钻井废弃物处理与资源化利用是环保技术的重点。钻井液与岩屑中含有的重金属与有机物需通过化学固化、生物降解等技术实现无害化处理,同时探索在建材、路基材料等领域的资源化利用途径。低排放钻井液体系研发滞后制约了绿色钻井发展,需开发以生物基材料为基础的低毒、可降解钻井液以减少环境污染。噪声与振动控制技术不足影响人员健康与设备寿命,需通过隔振设计、主动降噪等技术降低钻井过程的噪声与振动水平。

2 技术问题成因分析

2.1 地质条件复杂性

非均质地层对钻井参数的动态干扰显著,其岩性、孔隙度及渗透率的空间变异导致钻头受力状态频繁波动。例如,在砂泥岩互层中,钻头从砂岩进入泥岩时,钻压与转速需即时调整以避免过载或空转,而现有参数控制系统响应滞后常引发钻头异常磨损^[2]。高压过渡带与断层带的预测误差则源于地质勘探数据的分辨率限制,三维地震勘探虽能识别宏观构造,但对微断层或压力异常带的刻画精度不足,导致钻井液密度设计偏差,易引发井涌或井漏事故。例如,某油田在钻遇未识别微断层时,因钻井液密度低于地层孔隙压力,诱发大规模井涌,处理耗时超过72小时。

2.2 设备与材料局限性

钻具材料强度与韧性的平衡难题源于极端工况需求冲突,深井超深井作业中,钻具需承受巨大拉压载荷与高频振动,同时需具备抗冲击性能以应对砾石层或断层摩擦。传统高强度合金虽能满足抗压需求,但韧性不足易引发脆性断裂,而高韧性材料又难以兼顾强度,导致钻具寿命缩短。钻井液添加剂功能单一化问题则体现在其作用维度局限,现有添加剂多聚焦于单一功能,如降滤失剂仅能改善滤饼质量,而缺乏兼具润滑、封堵与抗温的多功能添加剂,导致复杂地层中需叠加使用多种添加剂,不仅增加成本,还可能因配伍性问题引发性能衰减。

2.3 监测与控制系统缺陷

实时数据传输延迟与精度不足源于井下传感器的技术瓶颈,高温高压环境限制了传感器采样频率与传输带宽,导致关键参数如钻头扭矩、井底压力的监测数据存在秒级延迟,难以支撑即时决策。自动化决策支持系统则体现在算法鲁棒性不足,现有系统多基于历史数据训练的静态模型,对突发工况适应性差,例如在井壁失稳初期,系统可能因数据波动阈值设置过高而未能及时预警,错失最佳处理时机。

2.4 技术协同性不足

不同专业技术间的衔接断层,主要体现在各专业系统采用的数据格式与传输协议互不兼容。这使得数据共享需人工转换,效率低下且容易引入误差。这种孤立的现状也导致多学科数据融合应用水平较低。现有分析平台大多局限于单一学科内部,缺乏跨学科的数据关联与综合分析能力。例如,在识别复杂地层压力过渡带时,若仅依赖单一的地震数据,而未能结合钻井过程中反映地层特征的实时参数,就容易造成判断偏差,影响钻井作业的精准度与安全性。

3 针对性技术对策研究

3.1 钻进效率提升策略

新型钻头设计需突破传统结构限制,通过优化复合片布局提升切削效率。例如,采用非对称排列与多级切削齿设计,增强钻头对不同硬度地层适应性,减少单齿过载早期失效。抗冲击结构方面,引入高韧性合金基体与梯度强化层,提升钻头在复杂地层抗冲击能力^[3]。智能钻井液体系研发聚焦自适应流变调节技术,嵌入智能响应材料实现钻井液黏度与切力动态调控。例如,利用温度或压力敏感型聚合物,使钻井液在高温高压下自动调整性能,保证携岩能力且降低循环压耗。能量传递优化结合涡轮与螺杆钻具协同作用,二者组合覆盖更广泛地层条件,并通过智能控制系统实现功率按需分配。

3.2 井下复杂情况防控技术

井壁稳定强化技术需融合化学固壁与机械支撑双重作用。化学固壁通过添加纳米级封堵剂,形成致密滤饼以阻隔滤液侵入地层,利用聚合物交联反应增强井壁岩石胶结强度。机械支撑则采用可膨胀式套管或纤维增强复合材料,在井壁失稳初期提供即时支撑。动态压井与堵漏材料创新聚焦于可变形颗粒封堵技术,此类材料在高压下可发生塑性变形,填充地层孔隙与裂缝,形成有效密封层。智能解卡装置结合振动与冲击复合作用,通过高频振动降低摩擦阻力,施加瞬时冲击力破坏卡钻点力学平衡,实现高效解卡。

3.3 定向钻井与轨迹控制优化

高精度导向工具研发需突破抗磁干扰技术瓶颈,采用光纤陀螺或量子传感器替代传统磁性传感器,消除地层磁场异常对导向精度的影响。井眼轨迹预测模型迭代引入机器学习算法,通过历史数据训练与实时参数反馈,实现轨迹偏差的提前预警与动态修正。钻井液润滑性动态调控技术通过嵌入微胶囊化润滑剂,在井壁摩擦力升高时自动释放润滑成分,维持钻具与井壁间的低摩擦状态,延长定向钻进距离。

3.4 深井与超深井技术突破

高温钻井液体系构建需开发耐温300℃以上的基液与添加剂,例如采用全氟聚醚或硅基聚合物作为基液,配合无机纳米颗粒增强热稳定性,确保钻井液在极端温度下仍能维持流变性能与封堵能力。钻具动态强度评估与轻量化设计需结合有限元分析与拓扑优化技术,通过模拟钻具在复杂载荷下的应力分布,优化材料分布与截面形状,在保证强度的同时降低钻具重量。井底压力实时补偿系统开发利用智能泵控技术,根据井底压力波动自动调节钻井液密度与排量,维持井底压力平衡。

3.5 环保与可持续性技术路径

钻井废弃物闭环处理工艺采用微生物降解技术,通

过筛选高效降解菌株与优化发酵条件,将钻井液中的有机污染物转化为二氧化碳与水,同时回收重金属离子用于资源化利用。低毒可降解钻井液配方优化聚焦于生物基材料的应用,例如以植物油基酯或改性淀粉替代传统矿物油,降低钻井液对土壤与水体的毒性。钻机噪声主动控制技术基于声波抵消原理,通过布置噪声传感器与反向声波发射器,实时监测并抵消钻井过程产生的噪声,实现作业现场的降噪目标。

4 技术对策实施保障措施

4.1 技术研发体系完善

跨学科联合攻关机制需打破传统学科壁垒,构建地质勘探、机械设计与材料科学等多领域协同创新平台。例如,在深井钻具研发中,地质学家可提供地层压力与岩石力学参数,机械工程师据此优化钻具结构,材料科学家则开发耐高温高压的特种合金,通过多学科数据共享与模型耦合实现技术突破^[4]。仿真模拟平台建设应聚焦数字孪生技术应用,通过构建高精度三维地质模型与钻井过程动态仿真系统,实现钻头磨损、井壁稳定等关键问题的虚拟实验验证。例如,利用有限元分析模拟钻具在复杂地层中的应力分布,结合计算流体动力学优化钻井液流场设计,可显著降低现场试验成本与风险。

4.2 标准化与规范化建设

关键技术参数标准制定需结合行业实践与前沿研究,建立覆盖钻头选型、钻井液性能、井控操作等全流程的技术指标体系。例如,针对不同地层条件制定钻头切削齿硬度与布齿密度的分级标准,或依据井深与温度梯度划分钻井液耐温耐压等级,为技术实施提供量化依据。操作流程动态优化指南应基于大数据分析 with 现场反馈持续迭代,例如通过收集全球钻井事故案例与成功经验,提炼形成涵盖钻前准备、钻进监控与事故处理的标准化操作流程,并结合智能监测系统实现流程的实时提示与偏差预警。

4.3 人才培养与团队建设

复合型技术人才引进与培训需构建“理论+实践+创新”三位一体培养模式。高校与企业可联合开设跨学科课程,例如在石油工程专业中融入人工智能、新材料等

前沿领域知识,通过轮岗实习、海外研修等方式提升工程师的现场问题解决能力。国际化技术交流与合作机制应聚焦全球技术资源整合,例如参与国际钻井技术标准制定、加入跨国研发联盟或定期举办国际学术会议,通过技术共享与人才流动缩小国内外技术差距。例如,某企业通过与北欧科研机构合作开发抗低温钻井液,成功突破北极地区钻井技术瓶颈。

4.4 风险评估与应急预案

技术实施风险分级管控需建立覆盖设计、试验、应用全周期的风险评估模型。例如,针对新型钻井液体系,需从毒性、腐蚀性、稳定性等维度开展实验室测试与小规模现场试验,依据风险等级制定差异化管控措施,如高风险技术需配备双重冗余系统或限制应用范围。快速响应技术支援体系构建应整合行业资源,建立由专家库、远程诊断平台与应急物资储备中心组成的支援网络。例如,当深井钻具发生突发故障时,可通过5G通信实时传输井下数据至专家终端,结合数字孪生模型快速定位故障点,并调度最近的物资储备中心调运备用钻具,实现故障的小时内处置。

结束语

钻井工程技术问题涉及多环节、多因素,制约着行业的进一步发展。通过深入剖析问题成因,针对性提出技术对策,并完善研发体系、加强标准化建设、注重人才培养与团队建设、做好风险评估与应急预案等保障措施,可有效提升钻井工程的技术水平与作业效率,降低安全风险与环境影响,为能源开发提供坚实的技术支撑,推动钻井工程持续稳定发展。

参考文献

- [1]黄守帅.深井石油钻井技术关键问题及解决方案探讨[J].石化技术,2025,32(10):213-215.
- [2]秦鑫.定向井钻井施工常见问题及对策[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(11):16-18.
- [3]杜海洋,孙冰心,黄磊.石油钻井井控设备现状与改进对策[J].化工设计通讯,2024,50(11):46-48.
- [4]万瑞,杨正凯.赵集盐矿钻井工程难点和对策[J].中国井矿盐,2023,54(2):27-29.