

钻井工程技术及提高效率措施分析

李书君

中原石油工程有限公司塔里木分公司 河南 濮阳 457001

摘要：钻井工程技术是油气资源开发的核心环节，其效率直接影响开采成本与资源利用率。当前技术已实现从“经验主导”向“数据驱动”转型，通过旋转导向钻井、智能钻具及随钻测量系统，大幅提升轨迹控制精度与破岩效率。然而，深部地层高温高压、复杂岩性及环保要求仍是主要挑战。提高效率需综合应用高效钻头、自动化装备、低伤害钻井液及数字化管理，同时强化多学科协同与标准化流程，以实现安全、经济、高效的钻井作业。

关键词：钻井工程技术；钻井效率影响因素；提高效率措施

引言：在全球能源需求攀升与油气开发复杂度加剧的背景下，钻井工程作为资源勘探开发的关键技术，其效率与可靠性直接关乎项目经济效益。传统钻井技术虽在常规地层中应用成熟，但面对深部高温高压地层、页岩气等非常规资源时，暴露出破岩效率低、井下风险高、环保压力大等问题。本文通过剖析钻井技术现状与核心挑战，系统探讨地质适配、装备创新及数字化管理对效率的影响，旨在为行业提供技术升级与效能提升的实践路径。

1 钻井工程技术现状与挑战

1.1 传统钻井技术概述

(1) 旋转钻井是目前主流基础方法，通过转盘或顶驱带动钻柱、钻头旋转切削地层，凭借连续钻进、适应多数地层的优势，广泛应用于油气钻井作业，但在花岗岩等超硬地层中，机械钻速明显下降，易出现钻头过载问题。冲击钻井则依靠钻具垂直冲击破碎岩石，适用于坚硬、致密地层，不过其钻进不连续，每次冲击后需提钻排屑，深孔钻井效率极低，当前多与旋转钻井结合形成“冲击-旋转”复合钻进，平衡硬岩适应性效率。(2) 定向钻井借助造斜工具调整井眼轨迹，可从单井口向多个油气藏靶点钻进，减少井口占地面积，降低开发成本；水平井技术通过造斜使井眼在储层内水平延伸，大幅增加储层接触面积，相比直井可提升油气采收率30%-50%，但受地层应力、井眼稳定性影响，水平段延伸长度受限，且轨迹控制精度易受钻具摩阻干扰。

1.2 现代钻井技术发展

(1) 智能钻井系统以旋转导向钻井为核心，通过井下闭环控制系统实时调整导向力，结合随钻测量(MWD)数据动态修正井眼轨迹，轨迹控制误差可缩小至 $\pm 0.3^\circ$ ，相比传统定向技术效率提升40%，尤其适配页岩气、致密油等复杂油气藏开发。(2) 自动化钻机集成

自动送钻、自动排管等模块，替代人工完成起下钻、接单根等高危操作，减少现场作业人员60%以上；远程操控技术依托5G或卫星通信，实现地面控制中心对千米外钻井平台的实时操控，在海上、沙漠等极端环境中，可将作业故障率降低25%。(3) 特殊钻井技术突破资源开发边界：深水钻井通过水下防喷器、抗风浪钻机，实现3000米深海油气开采；页岩气钻井结合水平井与分段压裂技术，将原本难以开采的页岩气资源商业化，单井产量提升3-5倍，但面临压裂液污染、井壁稳定等难题^[1]。

1.3 当前技术瓶颈分析

(1) 钻头寿命与破岩效率不足，在硬岩、研磨性地层中，钻头磨损快，需频繁起下钻更换，不仅增加作业时间，还提高成本，现有破岩技术难以平衡效率与寿命。(2) 井下复杂情况处理能力有限，面对井漏、井涌、卡钻等问题，现有监测技术难以实时精准预警，处理方案多依赖经验，易导致作业延误甚至井眼报废。(3) 钻井液性能与环保矛盾，高性能钻井液需添加化学药剂以满足润滑、护壁需求，但部分药剂易污染土壤与地下水，环保型钻井液则存在性能不足的问题。(4) 深部地层高温高压适应性差，深部地层温度超150℃、压力超100MPa，导致钻井工具密封失效、传感器数据失真，现有设备与材料难以承受极端环境，制约深部油气开发。

2 钻井效率影响因素分析

2.1 地质条件与工程参数

(1) 地层岩性、硬度与渗透率是影响钻井效率的基础因素。软岩地层易导致钻头泥包，增加钻进阻力；硬岩或研磨性地层会加速钻头磨损，降低破岩效率；而渗透率低的地层易引发井眼液柱压力失衡，增加井漏风险。例如，在砂岩与页岩互层地层中，岩性突变会导致钻进参数频繁调整，直接延长作业周期。(2) 钻压、转速、排量等参数优化对效率起关键调控作用。合理钻

压可保证钻头牙齿有效吃入地层,过大易造成钻柱过载断裂,过小则破岩不充分;转速需与地层匹配,硬岩地层需降低转速以保护钻头,软岩地层可提高转速提升效率;排量不足会导致岩屑携带不及时,引发卡钻,排量大则会增加循环系统能耗,需通过动态模拟实现参数最优匹配。

2.2 设备与材料性能

(1) 钻头选型与耐磨性直接决定钻进周期。PDC钻头适用于软-中硬地层,钻进速度快但耐磨性差;牙轮钻头耐冲击性强,适用于硬岩地层,但转速受限。若钻头选型与地层不匹配,会导致平均机械钻速下降30%以上,频繁起下钻还会增加非生产时间。(2) 钻杆、钻具材料强度影响作业连续性。高强度合金钻杆可承受更高钻压与扭矩,减少因钻杆疲劳断裂导致的作业中断;而钻具接头密封性能不足会引发钻井液泄漏,不仅污染地层,还会降低循环效率,增加作业风险^[2]。(3) 钻井液循环系统效率关乎岩屑处理能力。高效循环系统需具备大排量、高压特性,确保岩屑及时返出井眼;若泥浆泵功率不足、管线堵塞,会导致岩屑沉积井眼,增加卡钻概率,严重时需进行井眼清理,大幅延长工期。

2.3 管理与组织因素

(1) 施工流程标准化程度影响作业规范性。标准化的钻进、起下钻、接单根流程可减少操作误差,例如统一的钻具检查标准能提前排查隐患,避免因钻具故障导致的停工;反之,流程混乱会导致各环节衔接不畅,平均每口井非生产时间增加10-15小时。(2) 团队协作与应急响应能力决定问题处理效率。钻井作业涉及钻台、泥浆、地质等多岗位,高效协作可实现参数实时调整;而应急响应能力不足会延误井漏、井涌等问题的处理,例如卡钻后若不能在4小时内制定解决方案,会导致钻柱黏附地层,增加处理难度。(3) 成本控制与资源分配影响设备与人力投入。过度压缩成本会导致优质钻头、高性能设备投入不足,反而降低效率;而资源分配失衡,如关键岗位人员配置不足、备件储备短缺,会在设备故障时延长维修时间,间接增加作业成本。

3 提高钻井效率的技术措施

3.1 钻井装备与工具优化

(1) 高效钻头设计是提升破岩效率的核心。针对不同地层特性优化钻头结构,如在软-中硬地层推广采用新型PDC钻头,通过增加金刚石切削齿密度、优化齿形角度,将机械钻速提升20%-40%;在硬岩与研磨性地层应用混合钻头,结合PDC齿的高速切削与牙轮的抗冲击优势,减少钻头磨损,使单只钻头进尺量提高50%以上,

大幅减少起下钻次数。同时,在钻头表面涂覆耐磨陶瓷涂层,进一步延长使用寿命,降低更换频率。(2) 智能钻具与测控系统应用实现井下状态精准把控。研发集成多参数传感器的智能钻杆,实时采集井下温度、压力、扭矩及井眼轨迹数据,通过无线传输技术将数据同步至地面控制系统,误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,避免因井眼轨迹偏移导致的返工;推广应用随钻测井(LWD)与随钻测量(MWD)一体化系统,在钻进过程中同步完成地层评价与井眼监测,省去单独测井环节,缩短作业周期15%-20%。(3) 新型钻井液体系平衡性能与环保需求。开发低伤害、强抑制性钻井液,采用生物可降解的高分子聚合物作为降滤失剂,在页岩地层中可将井壁坍塌率降低30%,同时减少对储层的伤害,使油气产能恢复率提升至90%以上;针对深井高温环境,研发抗温超200℃的油基钻井液,通过添加纳米颗粒增强润滑性能,将钻柱摩擦降低25%,避免因高温导致的钻井液性能劣化,保障钻进连续性^[3]。

3.2 工艺流程改进

(1) 快速钻进技术突破传统效率瓶颈。推广复合钻进技术,结合转盘驱动与井下动力钻具,在定向钻井中实现“旋转+滑动”协同钻进,使井眼轨迹调整效率提升40%,尤其适用于大位移水平井;在地层条件稳定区域采用激进参数钻井,通过动态模拟确定最优钻压、转速组合,在保证井眼安全的前提下,将平均机械钻速提高30%-50%,例如在疏松砂岩地层,采用高排量、中钻压参数,可减少岩屑沉积,避免卡钻风险。(2) 井眼轨迹优化与防斜打直技术降低作业风险。基于地层力学模型优化井眼轨迹设计,采用“直井段-造斜段-水平段”平滑过渡的轨迹曲线,减少井眼曲率变化,降低钻柱磨损与摩阻;应用自动垂直钻井系统(VDS),通过井下闭环控制机构实时调整钻压分配,在易斜地层中将井斜角控制在 0.5° 以内,避免因井斜超标导致的纠斜作业,节省工期2-3天/口井。(3) 钻井液循环与固控系统升级强化岩屑处理能力。升级泥浆泵为高压大排量型号,将循环排量提升至30-40L/s,确保岩屑及时返出;优化固控系统流程,采用“振动筛-除砂器-除泥器-离心机”四级净化工艺,将钻井液含砂量控制在0.1%以下,减少岩屑对钻头与钻具的研磨,同时降低钻井液损耗,使钻井液重复利用率提升至85%以上,减少新浆配置量。

3.3 数字化与智能化应用

(1) 钻井大数据分析与实时监测实现精准管控。构建覆盖钻井全流程的数据库,整合地质数据、设备参数、作业记录等信息,通过机器学习算法挖掘参数关联

规律,例如分析不同地层下钻压与机械钻速的对应关系,为参数优化提供数据支撑;搭建实时监测平台,通过物联网技术连接井下传感器与地面设备,当井下压力、温度等参数超出安全阈值时,自动触发预警,响应时间控制在10秒以内,避免恶性事故发生。(2)人工智能辅助决策系统提升问题处理效率。开发基于深度学习的钻井故障诊断模型,通过分析振动、扭矩等数据特征,可精准识别卡钻、井漏等故障,准确率达92%以上,并自动生成处理方案,例如针对井漏问题,推荐合适的堵漏材料与注入参数,减少人工决策时间;在水平井轨迹控制中,应用AI算法动态调整导向工具参数,使轨迹偏差控制在0.3米以内,提升储层钻遇率^[4]。(3)远程钻井技术支持平台打破地域限制。建立总部-现场两级远程支持体系,现场作业数据通过5G或卫星网络实时传输至总部专家团队,专家可通过虚拟仿真系统远程查看井眼状态,指导现场调整作业参数;在偏远地区或海上钻井平台,通过远程操控技术实现关键环节的异地操作,例如远程控制起下钻设备,减少现场人员配置,同时降低作业风险,将专家响应时间从24小时缩短至2小时以内。

3.4 管理与协同优化

(1)精益化管理在钻井工程中的应用减少资源浪费。推行钻井作业标准化流程(SOP),明确钻进、起下钻、接单根等各环节的操作规范与时间节点,例如规定接单根时间不超过5分钟,通过流程优化减少非生产时间;采用“准时化生产”理念,根据作业进度精准调配钻头、钻井液等物资,避免库存积压与短缺,使物资周转率提升30%,降低仓储成本。(2)跨部门协作与供应链整合提升协同效率。建立钻井、地质、采购等多部门协同工作机制,定期召开联合会议,共享地层数据、设备状态等信息,例如地质部门提前提供地层岩性预测,

为钻头选型提供依据;整合供应链资源,与钻头、钻井液等供应商建立长期合作关系,实现物资按需供应与实时补货,缩短备件采购周期,例如将钻头到货时间从7天缩短至3天,避免因备件短缺导致的停工。(3)人员培训与技能提升策略强化人才支撑。构建“理论+实操+模拟”三位一体的培训体系,通过线上课程学习钻井新技术、新设备知识,在模拟钻井平台进行实操训练,提升人员操作熟练度;针对智能钻井系统、远程操控等新技术,开展专项培训,培养具备数字化技能的复合型人才;建立技能考核与激励机制,将培训效果与岗位晋升、薪酬挂钩,激发员工学习积极性,使员工技能达标率提升至95%以上,减少因操作失误导致的效率损失。

结束语

钻井工程技术作为油气开发的核心支撑,其效率提升需技术与管理双轮驱动。通过高效钻头、智能测控系统及新型钻井液的创新应用,结合工艺流程优化、数字化管控与跨部门协同,可有效突破深部地层与复杂岩性的技术瓶颈。未来,随着人工智能、自动化装备的深度融合,钻井工程将向更安全、高效、绿色的方向演进,为全球能源安全提供坚实保障。

参考文献

- [1]王勇,张晖.石油钻井工程技术的应用现状及发展趋势分析[J].石化技术,2024,(04):38-40.
- [2]牛东学.钻井工程中提高钻井效率的措施分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,(02):23-24.
- [3]张苏,顾冰,李义刚.钻井工程技术中存在的问题及提高钻井效率的对策[J].云南化工,2021,(05):47-49.
- [4]曾晓霞.分析钻井工程中提高钻井效率的措施[J].中国科技期刊数据库工业A,2021,(07):71-72.