

# 关于钻井工程技术的探究

罗 潇

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：**钻井工程技术作为石油天然气勘探开发的核心，其发展直接影响能源安全与产业链效率。近年来，随着深层、超深层及非常规油气资源开发需求增加，技术突破聚焦于高精度导向、智能化控制与复杂地质适应能力。旋转导向、随钻测量（MWD/LWD）及自动化钻机等技术显著提升钻井效率，而欠平衡钻井、膨胀管钻井等特殊工艺有效降低储层伤害。未来，钻井技术将向材料耐候性提升、设备智能化及多学科协同优化方向演进，以应对极端环境与环保要求。

**关键词：**钻井工程技术；创新；技术挑战；解决方案

引言：钻井工程技术是能源开采领域的基石，贯穿石油、天然气及地热等资源开发的全过程。随着全球能源需求持续增长与资源开发向深层、海洋及非常规领域拓展，传统钻井技术面临高温高压、复杂地质构造及环保要求等多重挑战。近年来，自动化控制、人工智能与新材料技术的融合，推动钻井工艺向高效化、精准化、绿色化方向演进。深入探究钻井工程技术的前沿进展与创新路径，不仅对提升资源开发效率、降低生产成本具有现实意义，更为保障国家能源安全、实现可持续发展提供关键技术支撑。

## 1 钻井工程技术基础理论

### 1.1 钻井工程基本概念与分类

（1）陆地钻井：以陆地地表为作业平台，适用于平原、山地、沙漠等陆地地貌，是应用最广泛的钻井类型。作业中无需考虑海水浮力、海洋气象等特殊因素，设备部署相对简便，常见于油气田陆上区块开发，如我国鄂尔多斯盆地的油气钻井多采用此类方式。（2）海洋钻井：在海洋水域开展，需依托钻井平台（如固定式平台、浮式平台）作业，需应对海水腐蚀、风浪冲击、海底复杂地质等挑战。技术上需强化平台稳定性、防漏防喷措施，多用于海洋油气资源开发，如我国南海油气田钻井作业。（3）特殊地质钻井：针对非常规地质条件的专项钻井类型，其中页岩气钻井需采用水平井技术配合水力压裂，突破页岩低渗透性瓶颈；深水钻井则聚焦水深超500米的海域，需攻克低温高压、地层稳定性差等难题，对设备耐候性和钻井液性能要求极高。

### 1.2 钻井工艺流程与核心环节

（1）钻前准备：需完成井场选址与平整、设备安装调试（如钻机、泥浆循环系统）、地质资料分析及钻井设计制定，同时做好防喷、防洪等安全预案，确保后续作业

合规且安全。（2）钻进阶段：根据地质分层选择适配钻头，通过钻机驱动钻柱带动钻头破碎岩石，实时监测钻井参数（如钻压、转速），调整钻井液性能以保障钻进效率。（3）完井阶段：钻井达到设计深度后，进行井眼清洗、测井作业（评估储层情况），随后下入套管并固井，最后安装井口装置，为油气开采做好准备。（4）固井环节：将水泥浆注入套管与井壁间隙，待水泥浆凝固后形成坚固的水泥环，起到封隔地层、保护套管、防止油气窜流的作用，是保障油井寿命的关键步骤<sup>[1]</sup>。

### 1.3 钻井工程中的力学原理

（1）岩石破碎机理：基于岩石力学特性，通过钻头对岩石施加压力、剪切力或冲击力，使岩石产生裂纹并最终破碎，不同岩石（如砂岩、石灰岩）需匹配不同破碎方式以提升效率。（2）钻头选型：依据地层岩石硬度、研磨性及钻井工况选择钻头类型，如牙轮钻头适用于软-中硬地层，PDC钻头（聚晶金刚石复合片钻头）适用于中硬-硬地层，可减少钻头磨损，降低起下钻频率。（3）钻压与转速优化：钻压需控制在合理范围，过小则岩石破碎效率低，过大易导致钻头过度磨损、钻柱弯曲；转速需结合钻头类型与地层特性调整，确保在提升钻进速度的同时，避免因转速过高引发钻柱振动。

### 1.4 钻井液体系与技术作用

（1）钻井液功能：一是冷却钻头，通过循环带走钻头摩擦产生的热量，防止钻头因高温损坏；二是携岩作用，将钻进产生的岩屑悬浮并带出地面，保持井眼清洁；三是平衡地层压力，通过调整钻井液密度，抵消地层孔隙压力，防止井喷、井漏等事故。（2）钻井液分类：按分散介质可分为水基钻井液（以水为连续相，成本低、易处理，适用于多数地层）、油基钻井液（以油为连续相，抗污染能力强，适用于水敏性地层）；按功

能可分为钻井液、完井液等，完井液需具备更低的滤失量，减少对储层的伤害。

## 2 关键钻井技术分析与创新

### 2.1 旋转钻井技术

(1) 传统旋转钻井的局限性：依赖钻机转盘驱动钻柱带动钻头旋转，传动效率低，尤其在深井、超深井作业中，钻柱扭矩损耗大，易出现钻柱疲劳断裂；对复杂地层适应性差，如在软硬交错地层中，易导致钻头偏磨，钻进效率大幅下降；且需频繁起下钻更换钻头，作业周期长、成本高。(2) 改进方向：研发复合驱动旋转系统，结合顶部驱动与井下动力钻具（如螺杆钻具），减少钻柱扭矩损耗，提升传动效率；优化钻头与钻柱匹配设计，采用高强度钻柱材料，增强抗疲劳性能；引入自适应钻进控制技术，根据地层变化自动调整旋转参数，减少起下钻次数。

### 2.2 定向钻井与水平井技术

(1) 定向井轨迹控制：通过调整井下钻具组合（如弯壳体动力钻具）的造斜率，结合井眼轨迹测量数据，实现对井眼走向的精准控制；采用实时轨迹预测模型，提前预判轨迹偏差，及时修正，确保井眼沿设计路径延伸，满足储层穿越需求。(2) 随钻测量技术（MWD/LWD）：MWD可实时传输井眼方位、倾角等几何参数，为轨迹控制提供数据支撑；LWD能在钻进过程中同步测量地层电阻率、孔隙度等地质参数，无需起钻即可获得储层信息，减少作业中断，提升储层识别精度，尤其适用于水平井储层段钻进<sup>[2]</sup>。

### 2.3 自动化与智能化钻井技术

(1) 智能钻机：集成自动送钻、自动起下钻等功能，通过传感器实时采集设备运行数据，实现钻机操作的自动化执行，减少人工干预，降低人为操作误差，提升作业安全性与稳定性。(2) 远程操控：借助5G、卫星通信技术，构建远程操控中心，可对异地钻井现场的设备运行、钻井参数进行实时监控与远程调节，解决偏远井场人员不足、作业环境恶劣等问题。(3) AI在钻井参数优化中的应用：利用AI算法分析历史钻井数据与实时地层数据，构建钻井参数优化模型，自动推荐最优钻压、转速、钻井液密度等参数，实现钻进过程的动态优化，提升钻进效率，降低事故发生率。

### 2.4 特殊钻井技术

(1) 欠平衡钻井：通过控制钻井液密度，使井底压力低于地层孔隙压力，减少钻井液对储层的侵入与伤害，尤其适用于低渗透、易污染储层，同时可提高机械钻速，缩短作业周期。(2) 膨胀管钻井：采用可膨胀套

管技术，在钻井过程中对套管进行现场膨胀，实现套管尺寸的优化匹配，减少套管层次，降低井眼直径缩减幅度，为后续作业预留更大空间，适用于深井、超深井钻井。(3) 激光钻井：利用高能激光束的热效应破碎岩石，无需机械钻头接触地层，可大幅提高钻进速度，且对地层扰动小、无钻屑缠绕问题，不过目前仍处于试验阶段，需突破高能激光传输、设备耐高温等技术瓶颈<sup>[3]</sup>。

### 2.5 环保型钻井技术

(1) 废弃物处理：采用钻井液循环再利用技术，对钻井废弃液进行固液分离、化学处理后重新投入使用，减少废液排放；对钻屑进行无害化处理（如固化、热解），实现钻屑的资源化利用（如用作建筑材料），降低对环境的污染。(2) 低毒钻井液：研发以生物降解材料为基础的低毒、环保钻井液体系，替代传统含重金属、难降解成分的钻井液，减少钻井液泄漏对土壤、水源的污染，提升钻井作业的环境兼容性。(3) 绿色完井技术：在完井过程中采用可降解暂堵剂、无固相完井液，减少对储层与环境的双重伤害；优化井口装置设计，提升井口密封性能，防止油气泄漏，同时简化完井流程，降低能耗与污染物排放。

## 3 钻井工程中的技术挑战与解决方案

### 3.1 深层与超深层钻井难题

(1) 高温高压环境下的材料耐久性问题：深层（井深超4500米）与超深层地层温度常达150-200℃，压力超100MPa，传统钻柱材料（如普通合金钢）易出现强度下降、疲劳加速现象，钻井液在高温下易发生黏度骤增、失水量变大等性能劣化问题，导致钻柱断裂风险升高、钻进效率降低。(2) 解决方案：研发耐高温高压的特种材料，如采用镍基合金、钛合金制成的钻柱，提升材料在高温下的抗拉强度与抗疲劳性能；优化钻井液配方，加入高温稳定剂（如有机黏土稳定剂、抗温降黏剂），确保钻井液在180℃以上仍保持稳定的流变性与滤失性；对井下工具（如随钻测量仪器）进行耐高温封装设计，采用陶瓷绝缘、耐高温电池等组件，保障工具在高温高压环境下的正常工作。

### 3.2 复杂地质条件应对策略

(1) 硬地层钻井风险与解决：硬地层（如花岗岩、石英砂岩）岩石硬度高、研磨性强，易导致钻头磨损失、钻进速度慢，且易引发钻柱振动，增加钻具断裂风险。解决方案：选用高效破岩钻头，如孕镶金刚石钻头、PDC复合钻头，通过提高钻头硬度与切削效率提升破岩能力；采用冲击-旋转复合钻进技术，在旋转钻进基础上叠加高频冲击，辅助破碎硬岩；优化钻压与转速

参数,降低钻柱振动幅度,减少钻具损耗。(2)断层带钻井风险与解决:断层带地层稳定性差,易出现井壁坍塌、井漏问题,且断层处易发生地层压力突变,引发井喷风险。解决方案:提前通过地震勘探、随钻测井精准识别断层位置与范围;采用满眼钻具组合(如多稳定器钻具)增强井眼稳定性,防止井壁坍塌;在断层带钻进时,控制钻井液密度略高于地层压力,同时加入随钻堵漏材料(如纤维类、颗粒类堵漏剂),及时封堵地层裂缝,避免井漏;加强井控监测,实时监控井口压力变化,做好防喷应急准备。(3)高压水层钻井风险与解决:高压水层易导致钻井液被水稀释,引发钻井液性能恶化,且高压水易侵入井眼,增加井喷、井漏风险。解决方案:采用抗盐抗钙钻井液体系,加入黏土防膨剂、降滤失剂,防止钻井液被水稀释后性能下降;通过随钻地层压力监测技术,提前预判高压水层压力,合理调整钻井液密度平衡地层压力;在高压水层段采用套管隔离技术,提前下入技术套管封隔高压水层,避免后续钻进受水层影响<sup>[4]</sup>。

### 3.3 成本控制与效率提升

(1)钻井周期优化方案:通过精细化钻井设计,整合钻前准备、钻进、完井各环节流程,减少工序衔接等待时间;采用快速起下钻技术,优化钻柱连接方式(如采用液压大钳快速上扣),缩短起下钻作业时间;推广应用丛式井技术,在同一井场钻多口定向井,减少井场建设成本与设备搬迁时间,提升单井场作业效率。

(2)设备故障预测与维护方案:构建钻井设备物联网监测系统,通过传感器实时采集钻机、泥浆泵、钻柱等设备的运行数据(如振动频率、温度、压力),利用大数据分析技术识别设备异常运行特征,提前预测设备故障风险;建立设备全生命周期维护档案,根据设备使用时长、工况条件制定个性化维护计划,避免过度维护或维护不足,降低设备故障停机率,减少维修成本。

### 3.4 安全与环保问题

(1)井控技术与防喷器系统优化:井控核心风险是井喷,需强化防喷器系统性能,采用双闸板防喷器、环形防喷器组合,提升防喷器密封可靠性与耐压能力;定期对防喷器进行压力测试与维护保养,确保紧急情况下能快速关闭井口;建立井控应急演练机制,提升现场人员井喷应急处置能力,制定详细的压井方案,确保井喷发生后能及时控制井口压力。(2)碳排放控制方案:推广应用电动钻机替代传统柴油钻机,利用电网供电或新能源(如光伏、风电)辅助供电,减少柴油燃烧产生的碳排放;优化钻井液循环系统,采用节能泥浆泵、变频电机等节能设备,降低设备能耗;对钻井过程中产生的伴生气进行回收利用,将伴生气用于加热、发电或输送至集输管网,减少温室气体排放;推进钻井废弃物资源化利用,如将钻屑固化后用于井场道路铺设,减少固废填埋量,降低环境负担。

### 结束语

钻井工程技术作为能源开发的核心支撑,其发展始终与行业需求、技术创新紧密相连。从传统旋转钻井到智能化、自动化技术的突破,从应对常规地层到攻克深层、超深层及特殊地质难题,技术迭代不断推动资源开发边界的拓展。未来,随着材料科学、数字孪生与低碳技术的深度融合,钻井工程将朝着更高效、更安全、更环保的方向迈进,为全球能源转型与可持续发展注入持久动力。

### 参考文献

- [1]张强.石油钻井技术的管理与创新探讨[J].石化技术,2023,30(03):243-245.
- [2]李福君.关于石油钻井工程技术的探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(21):190-192.
- [3]付晓磊,党莫裔.采油厂钻井工程技术的应用现状及发展趋势[J].石化技术,2024,31(05):216-218.
- [4]白建伟.石油钻井工程技术的优化措施探析[J].天津化工,2024,38(02):129-130.