

复合钻井技术在石油钻井工程施工中的应用

任庆访

中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司 四川 成都 610000

摘要：复合钻井技术通过地面转盘与井下动力钻具（如螺杆钻具）的协同驱动，实现了钻井效率与井眼质量的双重提升。该技术结合PDC钻头高效切削与井下动力精准导向，适用于硬地层冲击破碎、软地层刮削钻进及断层破碎带低扰动施工。在直井段、定向井及水平井中，复合技术可缩短钻井周期30%以上，降低单井成本20%—35%，同时通过MWD系统实时监测与动态参数调整，有效减少井下事故风险，成为复杂地质条件下高效开发油气资源的核心技术。

关键词：复合钻井技术；石油钻井工程施工；应用

引言：随着石油资源开发向深层、复杂地层拓展，传统钻井技术面临效率低、成本高、事故风险大等挑战。复合钻井技术通过融合地面转盘与井下动力钻具的双动力驱动模式，结合智能导向、实时监测等先进手段，实现了钻井速度、井眼质量与安全性的协同提升。该技术不仅能有效应对硬地层破碎难、软地层易缩径等地质难题，还可通过动态参数优化降低非生产时间，成为提升油气开发经济效益的关键。本文将从技术原理、应用场景、经济效益及优化方向等方面，系统探讨复合钻井技术的工程实践价值。

1 复合钻井技术原理与核心组件

1.1 技术定义与工作原理

复合钻井技术是一种融合地面与井下双动力驱动的高效钻井技术，通过协同作用提升钻井效率与井眼质量。（1）双动力源协同：地面转盘为钻柱提供基础旋转扭矩，确保钻具整体稳定运转；井下动力钻具（如螺杆钻具或涡轮钻具）作为补充动源，可根据地层硬度动态调节输出扭矩，在硬地层钻进时增强破岩能力，大幅降低地面设备负载，减少钻具疲劳损伤。（2）动态模型构建：基于地层岩石弹性参数（主要包括泊松比、纵波时差）建立波动方程，实时模拟钻井过程中钻具与地层的相互作用。通过该模型可预判地层变化，提前调整钻井参数，避免因地层突变导致的卡钻、井漏等事故，保障钻井作业连续进行。

1.2 关键设备与工具

（1）PDC钻头：采用聚晶金刚石复合片作为切削刃，具有硬度高、耐磨性强的特点，适用于中软地层（如泥岩、砂岩地层）。其切削效率比传统牙轮钻头提升30%以上，且使用寿命更长，能有效减少起下钻次数。

（2）螺杆钻具：基于容积式马达原理工作，以钻井液为

动力介质，通过钻井液推动转子旋转输出扭矩。其输出扭矩与钻井液流量呈正相关，流量调节便捷，可灵活适配不同地层的钻井需求，是井下动力的核心部件。（3）稳定器：安装于钻柱关键位置，通过与井壁接触支撑钻柱，控制井眼轨迹精度，减少井眼弯曲度。同时，可分散钻柱对井壁的压力，降低井壁坍塌风险，保障井眼规则性。（4）无线随钻测量系统（MWD）：通过井下传感器实时采集井斜、方位、工具面角等数据，经无线传输技术将数据传送至地面控制系统。工作人员依据数据实时调整钻井方向，确保钻井轨迹符合设计要求，尤其是在定向井、水平井施工中不可或缺^[1]。

1.3 技术分类与组合模式

（1）直井段：采用“PDC钻头+螺杆钻具”的组合模式，利用PDC钻头的高效切削能力与螺杆钻具的稳定动力，严格控制井斜角小于2°，保障直井段垂直精度，为后续钻井作业奠定基础。（2）定向井/水平井：采用“单弯螺杆+滑动导向”组合。单弯螺杆可提供定向造斜动力，滑动导向系统通过调整工具面角实现精准造斜与稳斜，能按照设计轨迹完成井眼转向，满足油气藏开发对井眼轨迹的复杂需求。（3）特殊工艺井：针对大位移井等特殊井型，采用“多级螺杆+高效钻杆”组合。多级螺杆可叠加输出扭矩，克服大位移井中钻柱摩阻大的问题；高效钻杆则具有高强度、低摩擦系数的特性，减少钻柱与井壁的摩擦阻力，保障钻井作业顺利推进。

2 复合钻井技术在石油钻井工程中的应用分析

2.1 不同地质条件下的适应性

（1）硬地层（花岗岩、玄武岩）：针对硬地层岩石硬度高、破碎难度大的特点，采用“牙轮钻头+高扭矩螺杆”的组合方案。牙轮钻头依靠牙齿的冲击与碾压作用破碎硬岩，高扭矩螺杆钻具则提供稳定且强劲的动力

输出，弥补地面转盘在硬地层中扭矩不足的问题。通过冲击破碎与高扭矩驱动的协同，有效克服硬地层钻进效率低的痛点，使机械钻速较传统技术提升40%-60%，例如在某花岗岩地层钻井项目中，该组合将单日进尺从80米提升至130米，大幅缩短硬地层施工周期。（2）软地层（泥岩、页岩）：软地层易出现井眼缩径、钻头泥包等问题，因此采用“PDC钻头+低转速螺杆”的适配模式。PDC钻头的聚晶金刚石切削刃适合对软岩进行刮削钻进，可减少泥包风险；低转速螺杆钻具能控制钻进速度，避免因转速过高导致井眼扩大或地层坍塌。同时，配合高粘度钻井液携带岩屑，确保井眼清洁，在某页岩气田开发中，该方案使软地层钻井的井眼合格率从75%提升至98%，保障后续固井作业顺利开展^[2]。（3）断层破碎带：断层破碎带地层稳定性差、易漏失，需通过参数优化降低地层扰动。施工时采用“常规钻头+可调速螺杆”组合，严格控制钻压（降至常规值的60%-70%）与转速（控制在60-80r/min），减少钻具对破碎地层的冲击；同时使用堵漏型钻井液，增强井壁稳定性。在某油田断层带钻井中，该策略将井漏发生率从50%降至12%，成功穿越200米长的破碎带地层。

2.2 关键施工环节应用

（1）直井段：直井段对垂直度要求高，采用“PDC钻头+高功率螺杆”组合，利用双动力源协同驱动提升钻进效率。地面转盘保障钻柱稳定旋转，井下螺杆提供额外动力，使机械钻速较传统技术提升2倍以上；同时借助稳定器与MWD系统实时控向，确保井斜角小于2°。以某油田直井施工为例，应用该技术后，单井直井段施工时间从15天缩短至10天，台月数（单台设备月均完成进尺）减少30%，设备利用率显著提高。（2）定向造斜：定向造斜需精准控制井眼转向，采用“单弯螺杆+MWD实时监测”方案。单弯螺杆通过调整工具面角实现定向造斜，MWD系统实时传输井斜、方位数据，工作人员根据数据动态调整参数，避免造斜偏差。该方案可实现“单趟钻完成增斜与稳斜”，无需起下钻更换工具，例如在某定向井造斜作业中，传统技术需2趟钻完成的造斜工序，复合技术1趟钻即可完成，节省作业时间48小时。（3）水平段：水平段易因钻柱与井壁摩擦导致摩阻增大，采用“复合钻进+滑动导向”工艺。复合钻进时，地面转盘与井下螺杆协同驱动，维持高转速（120-150r/min）提升破岩效率；需调整轨迹时，切换为滑动导向模式，通过螺杆工具面角调整实现精准转向，减少钻柱滑动距离，降低摩阻^[3]。在某水平井施工中，该工艺使水平段摩阻降低35%，单趟钻水平段进尺突破1200米，较传统

技术提升50%。

3 复合钻井技术的技术优势与经济效益

3.1 效率提升

（1）机械钻速与时间优化：凭借地面转盘与井下动力钻具的协同驱动，以及PDC钻头、高扭矩螺杆等设备的高效配合，机械钻速较传统技术提高1-2倍。同时，MWD系统实时监测与动态参数调整，减少因轨迹偏差、设备故障导致的停钻等待，使非生产时间（如起下钻准备、参数调试等）减少50%。以某页岩气井施工为例，传统技术需28天完成的钻井作业，采用复合技术后仅需12天，大幅缩短项目周期。（2）井眼质量与作业频次优化：稳定器的精准控向与动态模型的地层预判，使井眼轨迹平滑度提升30%以上，避免井眼弯曲导致的钻具卡顿。平滑的井眼轨迹减少了起下钻过程中的阻力，起下钻次数较传统技术减少2-3次/井，不仅降低了钻具磨损，还进一步压缩了作业时间，提升整体施工效率。

3.2 成本控制

（1）单井成本大幅降低：高效钻进减少了设备占用时间与人工投入，使单井成本降低20%-35%。以延长油田为例，应用复合技术前，单井钻井费用为192元/m，应用后降至134元/m，一口2000米深井可节省成本约11.6万元。对于大规模油田开发项目，累计成本节约可达数千万元，经济效益显著。（2）设备寿命与利用效率提升：通过优化设备组合与工况适配，核心设备寿命延长。其中，螺杆钻具因工况匹配度提升与磨损减少，单趟进尺突破800米，较传统技术提升40%以上，减少了设备更换频次与采购成本，同时降低了设备维护费用，进一步压缩综合成本^[4]。

3.3 安全与环保效益

（1）井下事故率显著降低：动态模型的风险预判、MWD系统的实时监测，以及针对复杂地层的参数优化，有效减少了井漏、卡钻等井下事故。数据显示，应用复合技术后，井下事故率降低60%以上，避免了因事故导致的经济损失与工期延误，保障了施工人员与设备安全。

（2）环保污染有效控制：推广应用环保型钻井液（如生物降解钻井液），其污染物含量较传统钻井液降低70%以上，减少了对土壤、地下水的污染。同时，部分钻井液可通过循环处理重复利用，降低了钻井废弃物排放量，符合绿色矿山建设要求，助力实现生态与工程协同发展。

4 复合钻井技术的技术挑战与优化方向

4.1 现存问题

（1）设备复杂度高，初期投资大：复合钻井系统整合了双动力源、MWD监测、稳定器等多类设备，设备

间协同控制模块精密，导致整体系统复杂度远高于传统钻井技术。同时，核心设备如高扭矩螺杆钻具、无线随钻测量仪器等依赖专业制造工艺，单套设备采购成本较传统设备高40%-60%，对于中小型油田企业而言，初期设备投入压力较大，一定程度上限制了技术推广范围。

(2) 施工人员技能要求高，培训成本增加：技术操作需工作人员同时掌握设备协同控制、地层参数分析、MWD数据解读等多领域知识，传统钻井人员需经过系统培训才能胜任。以某油田为例，培养一名合格的复合钻井操作技师，需开展3-6个月的理论与实操培训，单人次培训成本超2万元，且人员技能熟练度直接影响技术应用效果，若操作不当易引发设备故障或钻井事故。(3) 极端地质条件下故障率上升：在超深井(井深>6000米)、高温高压地层(温度>150°C、压力>80MPa)等极端工况下，核心设备易出现性能衰减——如螺杆钻具密封件在高温下老化速度加快，MWD系统信号传输稳定性下降，导致设备故障率较常规地层上升30%-50%。例如某超深井施工中，因高温导致螺杆钻具单趟进尺从800米降至520米，增加了起下钻频次与施工风险。

4.2 优化策略

(1) 技术创新：智能导向系统应用：研发并推广旋转型导向钻井系统，该系统可通过井下智能模块实时调整导向力，替代传统人工操作，减少人为误差，同时与地层监测数据联动，实现钻井轨迹的自动优化，使极端工况下的轨迹控制精度提升20%以上，降低对人员操作技能的依赖。(2) 设备改进：提升核心部件性能：聚焦高可靠性螺杆钻具研发，采用耐磨损合金材料与新型密封结构，延长其在高温高压环境下的使用寿命，目标将单趟进尺稳定在800米以上；同时优化PDC钻头切削刃设计，加入耐高温涂层，使其在180°C环境下仍能保持稳定

切削性能，降低极端条件下的设备故障率。(3) 工艺融合：动态优化钻井参数：建立“地质导向-钻井参数”联动机制，通过实时采集地层岩性、压力等数据，自动调整钻压、转速、钻井液排量等参数。例如在钻遇不均质地层时，系统可根据地质导向数据，在10-15秒内完成参数调整，减少地层突变对钻井过程的影响，提升技术适应性。(4) 环保措施：深化绿色工艺应用：扩大生物降解钻井液的使用范围，此类钻井液可在自然环境中30-60天内降解，且通过循环处理系统可实现80%以上的重复利用，减少钻井液排放量；同时配套建设岩屑无害化处理装置，将钻井废弃物转化为建筑骨料，实现“钻井-环保”协同发展。

结束语

复合钻井技术凭借双动力协同、智能导向与实时监测等创新，显著提升了石油钻井的效率、质量与安全性，在硬地层攻坚、软地层稳进及复杂轨迹控制中展现出不可替代的优势。其通过缩短周期、降低成本及减少事故风险，为油气开发注入强劲动能。未来，随着材料科学、智能算法的持续突破，复合技术将向更高效、更环保、更适应极端工况的方向演进，持续推动石油工程向智能化、绿色化转型升级。

参考文献

- [1] 阮庆华.复合钻井技术在石油钻井工程施工中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(05):167-169.
- [2] 杨浩.复合钻井技术在石油钻井工程施工中的应用[J].当代化工研究,2023,(17):90-92.
- [3] 樊振江.复合钻井技术在石油钻井工程施工中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(22):165-167.
- [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):129-131.