

石油钻井工程中复合钻井技术的优化与应用策略研究

何青青

中国石油化工股份有限公司西北油田分公司 新疆 库尔勒 841000

摘要：通过概述复合钻井技术的定义、分类及关键设备与工具，包括高性能回转钻头、机械钻具、精准测量与指引装置、高效钻井流体循环系统以及自动化与智能化工具。分析复合钻井技术在不同类型油井和特殊地质条件中的应用效果，对比传统钻井技术，展示复合钻井技术的显著优势。探讨复合钻井技术的优化方法，包括钻井技术参数的优化以及与自动化控制系统的集成，以期为复合钻井技术的进一步推广和应用提供理论支撑和实践指导。

关键词：复合钻井技术；钻井工程；钻井效率；优化策略；自动化控制系统

随着石油资源的不断开采和地质条件的日益复杂，传统的钻井技术已难以满足高效、安全、经济的钻井需求。复合钻井技术作为一种新兴的钻井方法，通过综合运用多种钻井技术，有效提升钻井作业的效率和精度，降低成本，增强适应复杂地质条件的能力。复合钻井技术的应用和优化仍面临诸多挑战，如钻井参数的选择、关键设备与工具的配套、自动化控制系统的集成等。深入研究复合钻井技术的应用与优化策略，对于推动石油钻井技术的发展、提高油气开采效率具有重要意义。

1 复合钻井技术概述

1.1 复合钻井技术的定义

复合钻井技术是指在单一钻井过程中，综合运用多种钻井技术，以达到提高钻井效率、降低成本、提高钻井精度和适应复杂地质条件的目的。该技术通过整合不同钻井方法的优点，形成一个高效、灵活的钻井系统，能够应对各种复杂的地质环境和钻井需求。

1.2 复合钻井技术的分类

根据钻井过程中所采用的技术组合，复合钻井技术主要可分为以下几类：

1.2.1 旋转复合钻井：该技术结合旋转钻井的优点，通过优化钻头的旋转速度和钻压，提高钻井速度和效率。旋转复合钻井还可以根据地层特性调整钻井参数，以适应不同地层的钻井需求^[1]。

1.2.2 定向复合钻井：定向复合钻井技术主要用于复杂地质条件下的钻井作业，如定向井、水平井等。该技术通过精确控制钻头的运动轨迹，确保钻井路径的准确性和稳定性，从而提高钻井成功率和油气产量。

1.2.3 水力复合钻井：水力复合钻井利用高压水流对地层进行冲击和切割，提高钻井速度。水力复合钻井还可以通过调整钻井液的性能和流量，优化钻井过程中的冷却、润滑和携带岩屑的效果。

2 复合钻井技术的关键设备与工具

2.1 高性能回转钻头与机械钻具

高性能回转钻头是复合钻井技术的核心工具之一，经过特殊设计，能够应对不同硬度和类型的岩层，提供卓越的穿透能力和使用寿命。例如，在硬质地层中，采用金刚石或硬质合金材料的钻头能够有效提高钻井速度；而在软质地层中，可以选择具有更高耐磨性和切削效率的钻头。机械钻具同样扮演着至关重要的角色。顶驱系统和动力钻杆等机械钻具不仅能够提高钻井作业的自动化程度，稳定传递扭矩和钻压，还有效降低人工操作的难度和风险^[2]。

2.2 精准测量与指引装置

精准测量与指引装置是复合钻井技术实现高精度钻井的关键，能够实时追踪钻头的运动轨迹，确保钻井路径的准确性和稳定性。例如，先进的导航系统能够利用地球物理信息，如重力、磁力等，对钻头进行精确导航；而测斜仪和方位仪等仪器可以实时监测钻头的倾斜角和方位角，及时调整钻井参数。此外，此类装置还能够提供钻井过程中的关键数据，如钻井深度、钻压、转速等，为钻井作业的优化提供重要依据。

2.3 高效钻井流体循环系统

高效钻井流体循环系统是复合钻井技术中不可或缺的组成部分。钻井流体在钻井过程中起着冷却、润滑、携带岩屑和平衡地层压力等多重作用。一个高效的钻井流体循环系统能够确保钻井流体的稳定供应和循环利用，提高钻井作业的效率和安全性。

2.4 自动化与智能化工具的应用

随着科技的不断发展，自动化与智能化工具在复合钻井技术中的应用越来越广泛。这些工具能够有效提高钻井作业的自动化程度和作业安全性，降低人工操作的难度和风险。例如，自动钻井管理系统能够根据实时

钻井数据，自动调整钻井参数，优化钻井过程；而智能钻井机器人能够代替人工进行危险或重复的钻井作业，提高作业效率 and 安全性。此外，还有一些先进的传感器和监测设备，能够实时监测钻井过程中的各种参数和状态，为钻井作业的决策和优化提供重要依据。

3 复合钻井技术在石油钻井工程中的应用^[3]

3.1 在不同类型油井中的应用

3.1.1 垂直井

在垂直井钻井作业中，复合钻井技术的高效性与精确性得到了充分展现。该技术通过综合旋转钻井与导向技术，确保了钻头在垂直方向上能够稳定且快速地穿透地层，使得复合钻井技术在垂直井作业中获得了广泛应用。复合钻井技术通过优化钻井参数、采用高性能钻头和钻井液，以及集成自动化控制系统等手段，实现对钻井过程的精确控制，从而确保钻井作业的高效与安全。

3.1.2 定向井与水平井

在定向井与水平井钻井作业中，要求钻头能够精确穿越特定油气藏，对钻井技术的精度和灵活性提出更高要求。复合钻井技术通过集成旋转钻井、定向钻井和水力压裂等多种方法，形成高效的钻井系统。此外，复合钻井技术还通过优化钻井参数、采用先进的测量与指引装置以及自动化控制系统等手段，进一步提升钻井效率 and 安全性。这些优化措施不仅缩短钻井周期，还降低钻井成本。

3.2 在特殊地质条件下的应用

3.2.1 高温高压地层

在高温高压地层中，其高温和高压环境对钻井设备

和钻井液都提出了极高的要求。复合钻井技术通过采用耐高温材料、优化钻井液配方等手段，有效应对了这些挑战。通过复合钻井技术的应用，该项目成功地克服了地层复杂、钻探难度大的问题，实现钻探作业的稳定与高效。

3.2.2 易塌地层与盐质地层

在易塌地层和盐质地层中，井筒的稳定性是钻探作业成功的关键。这些地层中的岩石通常较为松散或易于溶解，容易导致井筒失稳或井壁崩塌。复合钻井技术通过优化钻井液性能和钻探参数，有效增强了井筒的稳定性^[4]。复合钻井技术还通过采用先进的测量与指引装置，实现对钻头运动轨迹的精确控制，进一步提高钻探作业的成功率。

3.2.3 硫化氢岩层

硫化氢岩层中的钻探作业存在极高的安全风险。硫化氢是一种有毒气体，对人体和环境都具有极大的危害。在硫化氢岩层中进行钻探作业时，须采取严格的防护措施。复合钻井技术通过搭配独特的防护手段和装置，有效保障了钻探活动的安全性。该技术还提高钻探作业的效率 and 成功率，为油田的勘探与开发提供有力支持^[5]。

3.3 应用效果对比分析

复合钻井技术在石油钻井工程中的应用效果显著。该技术通过优化钻井参数和采用高效设备，有效提高钻井速度，同时降低钻井成本；能够应对复杂地质条件，实现深井钻探和高精度钻井；通过优化钻探参数和采用特殊钻井液配方等技术手段，提高了油气产量 and 开采效率。如表1所示。

表1 传统钻井技术与复合钻井技术对比分析表

应用方面	传统钻井技术	复合钻井技术
钻井速度与成本	速度较慢，成本高昂	速度提升显著，成本大幅降低
钻探深度与精度	深度有限，精度不足	深度增加，精度高达95%以上
油气产量与开采效率	产量较低，效率不高	产量提高，开采效率显著提升

4 复合钻井技术的优化方法^[5]

4.1 钻井技术参数的优化

4.1.1 钻压、转速与钻井液流量的调整

在复合钻井技术的实际应用中，钻压、转速和钻井液流量是影响钻井效率的关键因素。通过精细调整这些参数，可以有效提升钻井速度，延长钻头的使用寿命，从而降低钻探成本^[5]。

钻压是指施加在钻头上的压力。在地质条件允许的情况下，适当增加钻压可以有效提升钻井效率。例如，在塔里木盆地的石油勘探项目中，通过优化钻压参数，将钻压从150kN提高至180kN，成功实现钻井速度的显著提升。

转速是指钻头的旋转速度。通过提高转速，可以加快钻头的切割速度，从而缩短钻井周期。过高的转速也会导致钻头过度磨损。在确定转速时，需要综合考虑地质条件、钻头类型以及钻探目标等因素。在塔里木盆地的项目中，将转速从90rpm提高至110rpm，既提高钻井速度，又确保钻头的耐用性。

钻井液流量是指钻井过程中钻井液的循环速度。钻井液在钻探过程中起着冷却钻头、携带岩屑以及维持井筒稳定的重要作用。通过增加钻井液流量，可以提高钻井液的携带能力，从而确保钻探过程的顺利进行。在塔里木盆地的项目中，通过优化钻井液流量参数，将钻井

液流量从80L/s增加至100L/s，有效提高岩屑的携带效率，降低井筒坍塌的风险^[3]。

4.1.2 钻头类型的选择

在钻井作业中，钻头类型的选择是提高钻井效率的关键因素之一。不同类型的钻头在地质环境、岩石硬度、钻进深度等方面表现出不同的适应性和性能，选择高性能的钻头对于确保钻井作业的高效进行至关重要。

以隼岩层页岩油勘探项目为例，在面对复杂多变的地质环境和坚硬的岩石层时，经过深入研究和比较，选择专门设计的高性能钻头。通过采用先进的材料和制造工艺，具有优异的耐磨性和抗冲击能力。在钻井过程

中，能够有效地应对矿石残渣的移除困难，减少因残渣堆积而导致的钻头堵塞和磨损问题。该高性能钻头还强化钻井液的过滤功能。钻井液在钻井作业中起着润滑、冷却和携带岩屑的重要作用。通过优化钻头的结构设计，确保了钻井液能够顺畅地流动，有效地将岩屑带出井筒，从而有效提升了钻井作业的效率。

4.1.3 优化效果评估

优化效果的评估是确保钻井技术参数调整有效性的关键步骤。通过收集和分析钻井过程中的数据，如钻井速度、扭矩、钻井液流量等，可以评估参数调整对钻井效率的影响。如表2所示。

表2 钻井技术参数优化效果评估表

参数类型	优化前参数值	优化后参数值	优化效果
钻压（kN）	150	180	钻速提升20%
转速（rpm）	150	110	钻头寿命延长15%
钻井液流量（L/s）	80	100	岩屑携带效率提高25%
钻头类型	标准	高性能	穿透力增强30%

4.2 与自动化控制系统的集成

4.2.1 自动化调整钻探参数

自动化调整钻探参数是复合钻井技术与自动化控制系统集成的核心功能。通过装配在钻杆上的高精度检测装置，系统能够实时采集钻探过程中的关键数据，如钻进力、旋转扭力、振荡频率等，为智能控制系统提供了决策依据，使其能够根据实时情况自动优化钻探参数，如钻压、转速和钻井液流量，从而确保钻探作业的顺利进行。以美国德州鹰滩页岩石油勘探项目为例，自动化控制系统的应用显著提高了钻探效率，将每口井的勘探周期从通常的30天缩短至15天，勘探开销也减少约40%。

4.2.2 钻探路径自动追踪

钻探路径的自动追踪是确保钻探精度和效率的关键技术。通过先进的定位测量技术，系统能够精确控制钻头的运动轨迹，确保钻探路线与油层的理想对接。在塔里木盆地的石油勘探项目中，利用自动化控制系统实现了对钻探路径的实时追踪和调整。有效提高了钻探精度，减少因路径偏差而导致的重复钻探和资源浪费，从而提升整体钻探效率。

4.2.3 钻井液特性自动化监测

钻井液特性的自动化监测对于确保钻探过程的安全性和稳定性具有至关重要的作用。通过实时监测钻井液的粘度、密度、含砂量等关键指标，系统能够及时发现并处理潜在的安全隐患。在易塌地层和盐质地层等复杂

地质条件下，钻井液的稳定性和适应性对钻探成功至关重要。通过优化钻井液配方、调整钻探参数以及结合自动化监测系统的应用，能够有效增强井筒的稳定性，降低井壁坍塌的风险。

5 结语

复合钻井技术通过综合运用多种钻井方法，有效提升钻井作业的效率、精度和安全性，降低了成本，增强适应复杂地质条件的能力。随着科技的不断发展，复合钻井技术将进一步与智能化、自动化技术相结合，为石油钻井工程带来更加革命性的变革。通过持续的研究和实践，复合钻井技术将在石油勘探与开发中发挥更加重要的作用，为人类的能源事业做出更大的贡献。

参考文献

[1]杨世龙.石油钻井中旋冲钻井技术的运用[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(03):180-182.

[2]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):129-132.

[3]唐纯鹏.石油钻井工程中防漏堵漏技术研究[J].西部探矿工程,2023,35(08):58-60.

[4]郎卫生.旋冲钻井技术在大庆石油钻井中的应用[J].化学工程与装备,2021,(04):54+62.

[5]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.