

# Key Technologies and Field Applications for Accelerating and Enhancing Efficiency in Drilling Complex Oil and Gas Reservoirs

Xiaolong Liu

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

## Abstract

The widespread challenges in drilling complex oil and gas reservoirs—including low mechanical drilling speeds, prolonged operation cycles, and complex downhole conditions—seriously hinder the smooth progress and realization of efficient development. This study conducted in-depth analysis and exploration of multiple key technical aspects, including high-efficiency rock-breaking technologies and drill bit optimization strategies, wellbore reinforcement methods and working fluid systems, as well as advanced tool development and process optimization. The results not only effectively improved mechanical drilling speeds and shortened operation cycles, reducing the probability of complex situations, but also significantly enhanced drilling efficiency, leading to increased economic benefits.

## Keywords

complex oil and gas reservoir; drilling acceleration; key technologies; integrated application; effectiveness evaluation

## 复杂油气藏钻井提速提效关键技术及现场应用研究

刘晓龙

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部, 中国·陕西 西安 710018

## 摘要

复杂油气藏钻井进程中广泛存在的如机械钻速处于较低水平、作业周期相对较长、井下状况复杂多样等一系列问题, 严重地束缚和阻碍着效益开发的顺利推进与实现。本研究通过对高效破岩技术与钻头优选策略、井筒强化手段与工作液体系、先进工具研发与工艺优化等多个关键技术层面进行深入且细致的剖析与探究, 不仅有效地促使机械钻速得到了提升, 让作业周期得以缩短, 使复杂情况的发生概率降低, 而且显著地提升了钻井效率, 带来了经济效益的增长。

## 关键词

复杂油气藏; 钻井提速; 关键技术; 集成应用; 效果评价

## 1 引言

在全球能源需求如同不断膨胀的气球般持续增长, 且常规油气资源似沙漏中的细沙般日益枯竭的大背景之下, 作为保障能源供给安全关键领域的复杂油气藏勘探开发, 其所涉及的储层, 往往是赋存于那深不可测的深层、超深层地带, 又或者是具备着高温高压、高应力、强研磨性以及窄密度窗口等一系列错综复杂的地质工程特征; 鉴于此, 深入开展研究并且进行集成应用那些具有针对性的钻井提速提效关键技术, 对于攻克钻井工程中如同拦路虎般的难题、降低高企的开发成本、实现复杂油气资源的安全高效动用而言, 不仅有着重大的现实意义, 更有着刻不容缓的紧迫性。

**【作者简介】** 刘晓龙 (1981-), 男, 中国甘肃宁县人, 本科, 从事石油工程、钻井现场安全管理研究。

## 2 复杂油气藏钻井提速提效关键技术剖析

### 2.1 高效破岩与钻头优选技术

高效破岩是实现钻井提速的根基, 核心在于实现钻头与地层的最佳匹配。工作始于精细的地层岩石力学特性分析, 利用测井资料反演与室内岩心实验, 精确获取地层的抗压强度、内摩擦角、研磨性等关键参数, 据此计算地层的可钻性级值。针对高研磨性砾岩或石英砂岩地层, 钻头选型侧重于极高的耐磨性与抗冲击韧性, 通常选用具有高密度布齿、高抗研磨性复合片、强化力平衡设计的 PDC 钻头, 其复合片后倾角通常设计在  $15^{\circ}$  至  $20^{\circ}$  之间, 以在保证攻击性的前提下获得足够寿命<sup>[1]</sup>。对于频繁出现的软硬交错地层, 钻头设计的关键在于应对剧烈的负载波动, 防止钻头回旋和切削齿崩损, 采用具有差异化后倾角与侧倾角的混合布齿方案成为有效手段, 即在软岩层布设攻击性强的切削齿以实现

快速吃入，在硬夹层布设负前角或具有倒划眼功能的切削齿以增强稳定性，个性化钻头选型推荐结果见表1。

## 2.2 井筒强化与工作液技术

复杂油气藏钻井中，井筒稳定是提速提效的前提，窄密度窗口与高地层应力使得井壁失稳风险剧增。钻井液技术从传统的“被动防塌”转向“主动强壁”。封堵型钻井液体系通过引入刚性、弹性及柔性等多级粒径封堵材料，在近井壁地带形成致密的低渗透封堵层，有效封堵微裂缝与孔隙，其封堵层承压能力可提升50%以上。成膜型钻井液则依赖

特殊聚合物在井壁岩石表面形成一层疏水、致密的半透膜，显著降低钻井液滤液向地层的渗透，抑制泥页岩水化膨胀。工作液的关键性能体现在高切力、低滤失与强抑制性，动塑比维持在0.3-0.5 Pa/(mPa·s)有利于岩屑携带，高温高压滤失量需控制在10 mL以下以保护储层。当量循环密度的精细控制是核心工艺，通过实时监测与分析井下压力，优化排量、钻柱组合与钻井液流变参数，将ECD严格控制在安全窗口内，避免因压力激动诱发漏失或坍塌，核心钻井液性能指标。

表1 个性化钻头选型推荐表

地层类型	推荐钻头类型	关键设计参数	预期机械钻速提升范围
高研磨性砂岩/砾岩	高耐磨性PDC钻头	16 mm 高耐磨复合片，布齿密度 $\geq 1.2$ cutter/inch <sup>2</sup> ，20°后倾角	15%-30%
软硬交错地层（泥岩夹砂岩）	混合布齿PDC钻头	13/16 mm 混合布齿，后倾角10°/20°组合，深排屑槽	20%-40%
深层硬塑性地层	尖圆齿/锥形齿PDC钻头	19 mm 尖圆齿/锥形齿，攻击性布齿，强化保径结构	25%-50%
易斜地层	强稳斜性PDC钻头	低攻击性布齿，短保径，力平衡设计	钻速稳定，防斜效果优

## 2.3 先进工具与工艺技术

先进钻井工具与工艺是实现高效破岩与轨迹精确控制的物理载体，直接决定机械能量向地层的传递效率。旋转导向系统摆脱了传统滑动导向的依赖，实现全旋转状态下的三维井眼轨迹连续控制，其工具面可在地面指令下自动调整，大幅提高了定向钻进效率与长水平段的延伸能力，机械钻速较滑动导向平均提升40%以上，且井眼平滑度显著改善，降低了后续作业风险。高性能大功率螺杆钻具提供了更强的井下动力，扭矩输出比常规螺杆提高30%-50%，配合个性化钻头能够有效应对硬质地层，减少了粘滑震动对钻具的损害。扭冲工具与震荡工具从不同维度解决托压与摩擦阻问题，扭冲工具将钻压转化为高频、均匀的轴向冲击，直接作用于钻头，提升破岩效率；震荡工具则在钻柱上产生周期性轴向振动，有效降低管柱与井壁的静摩擦力，解决水平段长距离钻进中的托压难题，工具应用后平均机械钻速提升可达15%-25%。

## 3 关键技术集成与现场应用方案

### 3.1 技术集成方案设计

技术集成方案设计的核心思路是以地质工程一体化为导向，以实现“一趟钻”或最优进尺为目标，将钻头、钻井液、工具与工艺进行系统性匹配与优化。方案依据岩石可钻性剖面与岩性特征，为不同井段匹配个性化的高效破岩工具，在上部松软地层选用攻击性强的PDC钻头以实现快速钻进，在深部硬塑性地层则选用尖圆齿钻头配合高频扭冲工具。钻井液体系的遴选与性能设计紧密围绕井筒稳定核心，在易塌的泥页岩段采用强封堵、强抑制的成膜水基钻井液，在窄密度窗口的裂缝性储层段则转换为随钻封堵能力更强的油基或合成基体系，其密度与流变参数根据实钻的随钻压力监测数据进行动态微调。工具与工艺的集成聚焦于能量传递效率

与轨迹控制精度的提升，在定向造斜段及水平段，采用旋转导向系统实现平滑轨迹控制与高钻速钻进，配合高性能螺杆提供稳定动力<sup>[2]</sup>；在长水平段或大位移井，集成应用井下震荡工具以克服摩擦阻，确保有效钻压的传递。

### 3.2 试验井概况与应用过程

选位于某油田某区块的一口重点评价井作为试验井，该井设计井深5500m且主要目的层为深部致密砂岩与砂泥岩互层，其地质分层自上而下依次穿越第四系疏松地层、中部巨厚的易塌泥岩段以及下部高研磨性的石英砂岩与硬脆性泥岩互层段而显得复杂；该井的钻井难点极具代表性，上部地层存在浅层气与易漏失风险，中部泥岩段因水化膨胀性强而井壁失稳历史频发，下部目的层岩石可钻性级值高达7-8级致使机械钻速极低，且存在窄密度窗口而井下漏溢同层风险高；该试验井设计为三开井身结构，一开是采用 $\Phi 444.5$ mm钻头钻至1200m后下入 $\Phi 339.7$ mm表层套管，二开为采用 $\Phi 241.3$ mm钻头钻至3800m并下入 $\Phi 193.7$ mm技术套管封固复杂段，三开则是采用 $\Phi 149.2$ mm钻头钻至目的层完钻；集成技术的应用集中于二开中下部及整个三开井段，在二开易塌泥岩段（2500-3800m）应用了强抑制成膜水基钻井液体系，其核心性能被严格控制为高温高压滤失量 $\leq 8$ mL、动塑比0.4Pa/(mPa·s)，并配合低转速、大排量钻井参数，有效抑制了井壁坍塌，该段平均井径扩大率仅为9.5%<sup>[3]</sup>；进入三开高研磨性硬地层（3800-5500m）后技术集成应用全面展开，依据随钻测井资料实时优化钻头选型，先后使用针对砂泥岩互层的混合布齿PDC钻头和针对纯石英砂岩的19mm尖圆齿PDC钻头，钻井液转换为高承压封堵体系且密度精确控制在1.35-1.38g/cm<sup>3</sup>的狭窄窗口内，全程应用旋转导向系统进行轨迹控制，配合大扭矩螺杆和井下扭冲工具，试验井关键地质分层与钻井设计。

### 3.3 应用效果对比分析

集成技术于试验井的应用效果借由与采用常规钻井技术的邻井所进行的涵盖多维度指标的详细对比而得以全方位验证,在作为核心评价项的效率指标层面,试验井三开井段处于 3800-5500 m 深度范围的平均机械钻速达成 8.5 m/h 这一数值,该数据与邻井同层段所记录的 5.2 m/h 相比实现了幅度达 63.5% 的提升,且纯钻时效从邻井所呈现的 35% 这一基准值显著提升至试验井的 48%,作为衡量井下复杂程度与工具可靠性之关键指标的起下钻次数,在试验井三开井段因钻头磨损、井下复杂情况所导致的该类作业次数仅为 3 次,反观邻井在同一井段内该数值却达到 9 次,其中有 5 次起下钻作业与井壁坍塌、钻头早期损坏等异常状况存在直接相关性。当聚焦于复杂情况控制维度时,试验井通过应用强化井筒技术,在整个作业周期内未出现任何由井壁失稳问题所引发的卡钻或严重缩径事件,且井下漏失量累计仅为 15 m<sup>3</sup>。

## 4 应用效果综合评价与优化建议

### 4.1 综合效果评价

通过多维度定量评价集成提速提效技术的应用效果全面揭示其产生的综合效益,在技术指标维度核心的机械钻速提升表现得最为突出,其中试验井在三开难钻地层的平均机械钻速达到 8.5 m/h,该数据较邻井常规技术钻速提升 63.5%,这一提升标志着破岩效率实现质的飞跃,而纯钻时效从 35% 提升至 48%,这表明无效的非生产时间被大幅压缩的同时钻井作业的连续性与有序性显著增强;经济指标的分析展现出该技术所具备的巨大成本优势,虽然集成技术中旋转导向、个性化钻头等多项工具或材料成本有所上升,但经综合计算单米钻井成本实现了 18% 的降低,成本降低的核心驱动力源于建井周期的显著缩短,如试验井三开段钻井周期较邻井缩短 12 天;在工程安全与质量指标方面成效同样显著,集成技术将井下复杂时效降低了约 70%,具体体现为起下钻次数从 9 次减少至 3 次、因井壁失稳导致的卡钻事故从 2 次降为 0 次以及钻井液漏失量从超过 150 m<sup>3</sup> 控制到 15 m<sup>3</sup> 以内。

### 4.2 存在问题与优化方向

虽然集成技术所取得的成就是显著的,但现场应用过程中所暴露出来的一些技术局限性与存在的改进空间是亟待解决的,这些为后续的深化研究以及推广指明了方向,在技术适应性这一方面,当前的高速破岩工具以及强化钻井液体系在应对如超过 200° C 的超高温地层这种极端地质条件时仍有不足显现。现有 PDC 钻头复合片的热稳定性会急剧下降,其耐磨性也会显著降低,而在含有大量燧石或者黄铁矿结核的具有极端研磨性的地层里,钻头的磨损速度依旧是过快的,钻井液体系在面对大型开放性裂缝或者异常高压地层之时,其封堵承压能力与密度调节精度是面临着极限挑战的,成本控制方面的压力始终是存在的,像旋转导向服务、高性能油基钻井液等单项技术的成本是高昂的,在低油价的环境之下,这对项目的经济性会构成一定的压力。

## 5 结语

本研究对高效破岩、井筒强化与先进工具等关键技术展开系统剖析,进而形成了那种适用于复杂油气藏的集成化钻井提速提效方案,而且该方案在现场应用过程中其显著成效得到了验证,提供了一套历经实践检验的、能够进行复制推广的技术方法与作业模式,研究不但证明了借助地质工程一体化思路和关键技术协同配合是可以实现安全、效率与经济相统一的,并且所形成的个性化钻头选型方法、钻井液强化井筒工艺以及工具工艺集成策略,提升钻井设计的科学性以及施工的精准性,这对于降低深层及非常规油气资源的开发成本、加速产能释放而言,具有直接的工程应用价值,同时也推动着复杂条件钻井技术从被动应对的状态朝着主动优化的方向不断进步。

### 参考文献

- [1] 曾大乾,张广权,朱思南,等. 复杂油气藏型储气库关键技术及发展方向[J/OL].石油与天然气地质,1-12[2025-12-31].
- [2] 蒋廷学,王敏生. 非常规油气藏复杂储层压裂技术与装备发展现状及趋势[J].石油钻探技术,2025,53(04):1-14.
- [3] 雷刚林,党青宁,段文胜,等. 塔里木盆地沙漠区域超深层复杂油气藏地震勘探关键技术进展[J].天然气工业,2025,45(07):40-49.