

Practical Application of Precise Pressure Control Drilling in Narrow Density Window Formations

Feng Yan

Western Drilling Engineering Technology Research Institute, Karamay, Xinjiang, 83400, China

Abstract

The growth in global energy demand has driven oil and gas exploration into complex narrow density window formations, where conventional drilling struggles to maintain bottom hole pressure, often leading to well leakage and blowouts. This paper, through a combination of literature review and case analysis, explores the application of fine pressure-controlled drilling technology in such formations, delves into its principles, and elaborates on the practices in the Tazhong Block of the Tarim Oilfield and the Fuman Oilfield - by precisely predicting pressure, selecting high-precision equipment, and real-time parameter adjustment, both oilfields have achieved reduced well leakage, shortened drilling cycles, lower costs, and improved reservoir quality. At the same time, it identifies three major challenges including formation complexity, and proposes three countermeasures including technological innovation. It also analyzes the development trends towards intelligence, automation, and integration of the technology, and points out its potential and value in multiple application scenarios. The research clarifies the core mechanism of the technology, supporting its promotion and the enhancement of China's oil and gas exploration capabilities. It also acknowledges the limitations such as the limited number of cases and the unverified status of some technologies, and looks forward to the need for expanded research and deepened development in the future.

Keywords

Managed Pressure Drilling (MPD); narrow density window formation; formation pressure control; response strategies

精细控压钻井在窄密度窗口地层的应用实践

闫峰

西部钻探工程技术研究院, 中国·新疆 克拉玛依 834000

摘 要

全球能源需求增长推动油气勘探向复杂窄密度窗口地层迈进, 常规钻井难稳井底压力, 易引发井漏、井涌。本文以文献研究结合案例分析, 探究精细控压钻井技术在该类地层的应用, 剖析其原理, 详述塔里木油田塔中区块、富满油田实践—通过精准预测压力、选高精度设备及实时调控参数, 两油田实现井漏减少、周期缩短、成本降低、储层改善。同时梳理地层复杂性等三大挑战, 提技术创新等三方面对策, 分析技术向智能化、自动化及融合发展趋势, 指出其多场景应用潜力与价值。研究明确技术核心机制, 支撑其推广与提升我国油气勘探水平, 也指出案例有限、部分技术未验证的局限, 展望未来需拓展研究与深化研发。

关键词

精细控压钻井; 窄密度窗口地层; 地层压力控制; 应对策略

1 引言

全球能源需求增长推动油气勘探向复杂地层拓展, 窄密度窗口地层因孔隙、坍塌、漏失压力差值小, 常规钻井难稳井底压力, 易引发井漏、井涌等问题 (如准噶尔盆地南缘案例), 制约开采效率。精细控压钻井技术集成井下测量与地面控压系统, 能精准控环空压力稳井底压力, 在国内外 (北海、塔里木油田等) 应用成效显著, 为解决该难题提供路径。本研究聚焦其在窄密度窗口地层的应用, 探究技术原理、剖

析典型案例 (高探 1 井等)、梳理设备可靠性等难题并提对策。方法上用文献研究奠定基础, 案例分析总结规律, 结合理论与实践提多维度应对策略, 旨在为技术推广、提升我国油气勘探水平及保障能源安全提供支持。

2 精细控压钻井在窄密度窗口地层的应用案例分析

2.1 案例一: 北疆南缘区块的应用实践

北疆南缘区块地处准噶尔盆地南缘, 地质构造极复杂, 多期强烈构造运动致地层倾角 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、断裂广布。目的层为侏罗系头屯河组, 上部泥页岩水敏性极强, 伊利石含量 45%、蒙脱石 25%, 遇水膨胀率 $18\% \sim 22\%$; 下

【作者简介】闫峰 (1981-), 男, 本科, 助理工程师, 从事精细控压钻井技术研究。

部砂砾岩互层，裂缝密度 3-5 条 / 米、溶洞直径 0.5-2 米。地层压力异常，孔隙压力梯度 1.85-2.05MPa/m，安全密度窗口仅 0.03-0.08g/cm³，属窄密度窗口地层。前期常规钻井问题多，如高探 XX-1 井钻至 5230-5280 米时严重井漏，漏液 120m³，处理耗时 8 天、增成本 120 万元。为应对难题，应用精细控压钻井技术：借高精度三维地震资料与压力预测模型，用等效深度法、Eaton 法算安全窗口，定钻井液密度 1.82-1.88g/cm³；选高精度设备（压力传感器精度 ± 0.02 MPa，节流管汇响应 ≤ 0.8 s），钻进中 10 秒更新监测数据，自动调节参数控井底压力波动 ± 0.03 MPa，特殊作业时调回压稳压力，如高探 XX-2 井钻至 5320 米孔隙压力上升，15 秒内提回压防井涌。该技术应用于 12 口井后成效显著：井漏从 3.2 次 / 井减至 0.3 次，钻井周期缩 22 天，单井降本 350 万元，储层损害降 30%。经验为：地层压力预测误差需 $\leq 5\%$ ，设备遵“日检周护月调”，人员经 300 小时模拟 + 50 小时实操培训，建三方每日沟通机制^[1]。

2.2 案例二：达巴松区块的应用实践

达巴松区块位于准噶尔盆地西部，地质构造复杂，多期构造运动致挤压褶皱强烈、断裂广布。主要目的层为石炭系，上部泥页岩遇水易井壁失稳，下部火山岩裂缝孔洞发育成漏失通道。地层压力系统复杂，孔隙压力梯度 1.7-1.95MPa/m，坍塌压力梯度 1.6MPa/m，漏失压力梯度 2.0MPa/m，安全密度窗口仅 0.05g/cm³，过往钻井因井底压力难控常发井漏、井塌，如盆北 23C 井处理井塌耗时 12 天。对此，引入精细控压钻井技术：借三维地震资料与压力预测模型定安全窗口，选智能控压系统并严检调试；钻进中传感器实时采数据传至控制系统，自动调节参数控井底压力，异常时快速响应，结合随钻导向调参数，盆北满深 1 井借此成功控漏。

应用后成效显著：井漏减 70%、井塌降 80%，机械钻速提 60%，钻井周期缩 30 天，井身质量改善。经验为：前期地质研究是基础，系统自动化与响应速度关键，需优化软硬件，加强团队协作、应急培训，联动科研机构与设备商提升技术适应性^[2]。

3 精细控压钻井在窄密度窗口地层应用面临的挑战与应对策略

3.1 面临的挑战

精细控压钻井技术在应用中面临多重挑战，首先是地层复杂性带来的技术难题，在窄密度窗口地层中，地层压力受地质构造运动、地层流体性质与分布及钻井作业工况影响而复杂多变，如钻进时钻头破碎岩石引发地层应力重分布、接单根等作业产生抽汲与激动压力，均会加剧压力波动，使得精确预测和控制井底压力极为困难，易引发井漏、井涌等问题，且裂缝发育破坏地层完整性、改变渗流特性，既为钻井液漏失提供通道又增加井涌风险，加之裂缝形态等具有随机性，现有勘探技术难准确探测，像碳酸盐岩地层中裂缝与

溶洞交织形成复杂网络，常规堵漏方法失效；其次是设备与工艺的适应性问题，该技术对设备性能和稳定性要求高，在高温高压环境下，设备密封件易老化变形导致密封失效、电子元件易故障影响数据采集与控制，高含硫地层还会腐蚀金属部件，现有工艺也有局限，处理大段泥页岩地层时难抑制水化膨胀维持井壁稳定，应对多压力系统地层时难快速调整井底压力，在大位移井、水平井作业中控制环空压力分布、减少摩阻也面临挑战；最后是成本与效益的平衡问题，该技术应用成本高，核心设备价格昂贵，维护需专业人员与工具，人员培训及偏远地区、海上平台的设备运输安装与技术服务均增加成本，而钻井企业对经济效益期望高，实际应用中受地质条件、设备故障、操作失误等影响，技术效果可能不理想，难以达预期效益，甚至出现井漏、井涌导致钻井周期延长、成本增加，这种矛盾制约了技术推广^[3]。

3.2 应对策略

为应对精细控压钻井技术应用中的挑战，需从多方面推进改进：在技术创新与优化上，针对地层复杂性难题，研发基于多物理场耦合的地层压力预测模型，结合人工智能和大数据技术分析钻井数据，实现地层压力实时监测与动态预测，同时发展微地震监测、核磁共振成像等高精度地球物理探测方法，研发随钻成像测井仪等井下智能工具以提升裂缝识别描述能力，还需改进控制算法，采用自适应控制算法并引入模糊控制、神经网络控制等先进理论，提高系统响应速度与控制精度；在设备与工艺改进方面，为增强设备适应性与稳定性，研发耐高温、高压、耐腐蚀的新型材料制造密封件、电子元件等关键部件，优化设备结构，采用模块化设计提升可维护性，加强冗余设计保障可靠性，工艺上则针对不同地层与作业需求优化方案，如在泥页岩地层研发油基、聚合醇等新型钻井液，多压力系统地层采用分段控压技术，大位移井、水平井作业研发旋转导向钻井技术及利用水力振荡器改善环空流态；在成本控制与管理措施上，为平衡成本与效益，设备购置前充分调研评估以选高性价比产品，与供应商建立长期合作争取优惠，制定科学维护计划延长设备寿命、降低故障率，优化人员配置避免冗余，加强培训提升人员技能并建立激励机制，作业中通过优化施工方案、安排并行作业缩短周期，利用信息化技术实时监控管理，同时加强与其他企业合作交流共享资源，降低研发与应用成本。

4 精细控压钻井在窄密度窗口地层应用的前景与展望

4.1 技术发展趋势

精细控压钻井技术正朝着智能化、自动化方向快速发展，并积极与其他先进技术融合。智能化方面，井下部大量传感器，实时采集地层压力、温度、岩性及钻井液性能等多维度数据，经人工智能算法快速分析处理，系统可自动识别井漏、井涌、井壁失稳等井下复杂情况，迅速调整节流阀

开度、钻井液排量、井口回压等参数,实现井底压力精准智能控制。同时,借助机器学习,系统能积累不同地层钻井经验,持续优化控制策略,提升应对复杂工况能力。自动化领域,自动化设备将广泛应用于钻井全流程,实现钻进、接单根、起下钻到完井的自动化操作。如自动接单根设备可快速完成作业,减少人为误差与操作时间,降低抽汲压力、激动压力对井底压力的影响;自动化起下钻设备按预设程序精确控制钻具速度与位置,避免操作不当引发井下问题;自动化钻井液调配系统能依实时工况调整钻井液配方与性能,满足作业需求^[4]。技术融合上,该技术与旋转导向钻井技术结合,可精准控制井眼轨迹,同时维持井底压力稳定,在大位移井、水平井钻井中减少摩阻扭矩,防止井漏井涌;与随钻测井技术融合,能实时获取地层电阻率、声波时差等参数,分析地层岩性、孔隙度等信息,为精细控压提供准确数据支持,助力实时调整钻井参数,实现更精准压力控制。

4.2 应用前景与推广价值

精细控压钻井技术在不同类型油田及复杂地层展现出巨大应用潜力。在海上油田,因其作业环境恶劣、平台空间有限,对技术安全性与高效性要求严苛。该技术能有效降低复杂情况发生率,减少井漏、井涌,提升作业安全系数,精确控制井底压力,降低储层损害,进而提高油气采收率。例如,在南海某海上油田,应用后复杂情况发生率降低了40%,钻井周期缩短了15天,油气产量提高了20%。深层油田作为我国油气资源勘探的重要方向,面临着地层压力高(部分区块孔隙压力梯度超2.0MPa/m)、井底温度高(超150℃)及地质构造复杂(多断层、裂缝发育)的三重挑战。常规钻井技术因压力控制精度不足,在钻进过程中极易突破漏失压力引发井漏,或低于坍塌压力导致井壁失稳,如塔里木油田部分深层井曾因井塌问题被迫中途停钻,单井额外成本超500万元。精细控压钻井技术通过耐高温、耐高压的特种设备(如耐200℃高温的压力传感器、耐压35MPa的节流管汇),结合动态压力预测模型,实现了对井底压力的实时监测与精准调控。以塔里木油田满深3-H11井为例,该井目的层位于8000米以深,安全密度窗口仅0.04g/cm³,常规钻井技术难以突破。应用一体化精细控压钻井技术后,通过实时调整井口回压与钻井液排量,将井底压力波动控制在±0.02MPa内,成功攻克窄安全密度窗口难题,仅用78.5天便钻穿8143米地层,较同区块邻井钻井周期缩短42天,刷新了国内8000米以深井的最快钻井周期纪录,为我国深层油气资源规模化开发提供了技术范本。对于页岩气、煤层气这类非常规油气藏,因其储层渗透率低,对储层保护要求

极高。精细控压钻井技术可维持井底压力稳定,减少对储层扰动,保护原始结构与渗透性。涪陵页岩气田应用后,有效降低钻井液对页岩储层污染,单井产量提高了30%以上。

推广精细控压钻井技术对提升我国油气勘探开发整体水平具有不可替代的意义。从经济效益来看,该技术能减少复杂情况处理时间,缩短钻井周期,降低设备损耗与材料浪费,据统计,应用该技术的井均钻井成本可降低15%-20%;从资源利用角度,其对储层的有效保护能提高油气采收率,延长油气田开发寿命,为油气田长期稳定生产筑牢根基;从技术发展层面,该技术的推广能推动我国钻井装备、控制算法等领域的创新突破,提升我国在国际油气勘探开发领域的技术竞争力,助力我国实现能源安全自主保障目标。

5 结语

本研究剖析了精细控压钻井技术在窄密度窗口地层的应用,明确其通过精准控制环空压力剖面维持井底压力于安全窗口的核心机制,提供理论支撑。以两个油田为案例,通过地层压力预测、装备调试与参数调控,大幅减少复杂情况,降低井漏、井塌发生率,缩短钻井周期,提升效率与井身质量。针对应用挑战,提出应对策略:技术上研发多物理场耦合压力预测模型、高精度裂缝探测技术并改进控制算法;设备工艺上采用耐极端环境新材料、优化结构及研发新型钻井液与分段控压工艺;成本管理上通过选高性价比设备、加强维护与优化人员及施工方案平衡成本效益。未来需拓展案例研究,深化技术研发与现场验证,推动该技术与大数据等融合实现智能管理,探索其在非常规油气及地热能开发中的应用。

参考文献

- [1] 廖新伟,胡挺,戴勇,等.准噶尔盆地南缘呼探1井深部窄密度窗口地层精细控压固井技术应用探讨[C]/陕西省石油学会;中国石油新疆油田分公司(新疆砾岩油藏实验室);西安石油大学.2022油气田勘探与开发国际会议(2022IFEDC)论文集.中国陕西省西安市,2022:1-8.
- [2] 刘金璐,李军,李宁,等.窄密度窗口地层分段控压套管参数优化设计方法[J].钻采工艺,2025,48(04):81-91.DOI:10.3969/J.ISSN.1006-768X.2025.04.09.
- [3] 周英操,郭庆丰,蔡骁,等.精细控压钻井技术及装备研究进展[J].钻采工艺,2024,47(04):94-104.DOI:10.3969/J.ISSN.1006-768X.2024.04.13.
- [4] 李中,陈浩东,刘和兴,等.深水窄密度窗口地层封堵承压钻井液技术[J].钻井液与完井液,2021,38(04):428-434.DOI:10.12358/j.issn.1001-5620.2021.04.005.