

Research on Precision Control Technology for Horizontal Well Drilling Trajectories in Tight Oil Reservoirs

Xiaolong Liu

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

Abstract

Tight oil, one of China's most critical unconventional oil and gas resources, plays a vital role in national energy security through efficient extraction. Horizontal wells, which maximize reservoir contact and enhance single-well productivity, represent a key technological approach for developing tight oil resources. However, the unique characteristics of tight oil reservoirs—including low porosity, low permeability, strong heterogeneity, and thin interbedding—pose stringent requirements for precise drilling trajectory control. Addressing these technical challenges, this study systematically investigates core technologies such as geological guidance optimization, drilling tool matching, trajectory design and dynamic adjustment, wellbore stability control, and green-low-carbon coordinated control. A comprehensive “design-control-monitor-adjust” precision control technology system has been established. Through practical case validation, this research aims to provide valuable references for professionals in the industry.

Keywords

tight reservoir; horizontal well; drilling trajectory; precision control

致密油藏水平井钻井轨迹精准控制技术研究

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

致密油是我国最主要的非常规油气资源之一, 其高效开采关系到国家能源安全。水平井能够最大限度地接触储层, 提高单井产能, 是我国致密油气资源开发的重要技术途径, 然而, 由于致密油储层具有低孔、低渗透、强非均质性和薄互层等特点, 对其钻进轨迹的精确控制提出了苛刻的要求。基于此, 本文针对致密油藏水平井钻井轨迹控制面临的技术难题, 系统研究了地质导向优化、钻井工具适配、轨迹设计与动态调整、井眼稳定性控制、绿色低碳协同控制等核心技术, 构建了“设计-控制-监测-调整”全流程精准控制技术体系。并通过实例验证, 以为行业内相关人员提供参考。

关键词

致密油藏; 水平井; 钻井轨迹; 精准控制

1 引言

由于致密油具有孔、渗、砂含量高特点, 常规的直井开采效果十分低下, 单井生产很难实现经济效益。水平井通过建立长水平段储层与储层之间的有效接触, 极大地增加了渗流区, 是实现致密油气藏高效开采的唯一途径。但是, 由于致密油储层的厚度通常很小(3-10m), 并且具有很强的横向非均质性和复杂的界面形状, 使得在钻进过程中的轨迹发生轻微的偏差就会造成脱靶现象, 从而降低了可采性。同时, 由于致密储层的岩石力学特性复杂, 井壁稳定性难以保证, 因此, 在轨迹控制中, 需要在保证钻井速度的前提下,

实现井壁的完整性。当前, 我国致密油储层水平井钻进轨迹控制还面临着设计不符合地质条件、随钻导向精度不高、实时调整滞后等难题, 严重影响了其开采效益的提高。基于此, 本文聚焦致密油藏水平井钻井轨迹精准控制技术, 从难点分析、关键技术研发、现场应用验证等方面开展研究, 为致密油藏高效开发提供技术保障。

2 致密油藏水平井钻井轨迹控制技术难点

2.1 地质条件复杂导致轨迹控制难度大

致密油气藏大多在陆相沉积条件下发育, 储层横向连续性差, 厚度变化大, 常伴有断层、夹层等地质灾害, 给油气勘探开发带来了很大的不确定性。一方面, 由于储层厚度较薄(3-10m), 需要将水平段的轨迹严格控制在“甜点”之内, 靶心距离的容许误差一般不超过1m, 大大超过了常规油气

【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。

藏的需求。而致密油储层孔隙率低（通常小于10%）、渗透率极低（ $<0.1\text{mD}$ ），且储层与非储层的岩性差别较大，在随钻时很难对油气藏界面进行快速识别，造成轨迹穿出储层。另外，由于致密储层的抗压强度高（60-120MPa），井壁容易缩径坍塌，在轨迹调节时需要兼顾造斜率和井壁的稳定，这就更加大了其控制的难度。

2.2 随钻导向数据解释精度不足

随钻导向作为水平井轨迹控制的关键，其测量结果的准确性取决于随钻资料的精确判读。由于致密油储层与周围环境的地球物理响应相差较小，常规测井资料如自然伽马、电阻率等分辨率较低，很难精确判别油气藏中的轨迹。

2.3 钻井工具性能适配性差

致密油储层水平井需要同时满足高造斜率、高稳定性和高精度导向等条件，这对钻具的性能提出了苛刻的挑战。致密油储层普遍具有高研磨性、非均质性强的特征，进一步放大了工具适配难题。常规螺旋钻具成坡能力较弱，轨迹调整响应滞后，很难适应薄油气藏对轨迹精准把控的要求；然而，传统的回转导钻工具在高密度、高硬度的地层中易与岩石发生剧烈摩擦，不仅容易出现磨损、卡钻等现象，还会因工具失效导致钻井周期延长。

2.4 轨迹调整与井眼稳定矛盾突出

在致密油储层中，水平井的轨迹调整需要通过改变钻压、排量和速度等钻进参数或工具的姿态来实现，而这些参数的调节有可能导致井壁失稳。如增大钻井压力来增大造斜率，容易造成井壁垮塌；在提高携岩效率的过程中，为了提高携岩效率，会出现井内渗漏。另外，长水平断面钻进阻力矩较大，且在轨迹调节时刀具的受力情况较为复杂，极易产生偏差，且难于精确控制。

3 致密油藏水平井轨迹精准控制核心技术

3.1 地质导向优化技术

地质导向是精确控制轨迹的先决条件，其核心是利用随钻测井资料对油气藏进行实时定位，并将其引导到油藏有效厚度范围内。为了解决致密油储层难以识别的难题，从数据采集、解释模式和导向策略三个角度对其进行了优化。在资料收集上，选择适合致密油的随钻测井组合，综合利用天然伽马、电阻率、密度、中子孔隙度等多种测井手段，并辅以随钻地震（LWD-VSP）资料，实现多源信息的融合，提高油气藏识别的可靠性。针对致密油储层和非储层测井响应差别较小的难题，利用已钻测井数据和岩心数据作为训练样本，通过对GR-RES-DEN的联合解释，实现储层识别精度由常规方法的75%提高到90%以上。在导向策略上，采用“预判-验证-调整”的闭环导向模式。基于前期地质建模成果，通过对储层倾向、厚度的预测，确定储层的运动方向、厚度的变化规律，并设置相应的报警阈值；在钻进过程中，将LWD资料与预测模型进行实时对比，一旦出现油气藏界

面偏离情况，应立即进行调整；考虑到水平段的薄油层，本项目拟采取“中轴导向”的控制措施，保证油层的纵向分布在油层的中部，从而有效地防止油藏侧向改变而造成轨迹的脱层。

3.2 钻井工具适配与参数优化

钻井工具的适配性直接影响轨迹控制精度，结合致密油藏地质特征和钻井要求，为取代常规的滑动式导钻工具，选择了旋转式导钻组合钻具。采用新型的可360度旋转钻进新技术，解决了因导向滑移而引起的井眼阻力大、轨迹不光滑等难题，并能提高造斜精度（ $0.5^\circ/30\text{m}$ ）。根据致密油储层各井段的钻进要求，对钻具组合进行了优化，即在纵向上，采用PDC钻头+高效电机+稳定器的组合，保证了钻进速率；造斜段采用变径稳定器，可灵活调节造斜量；在水平井段，为了减小钻具震动对井眼轨迹的影响，采取了“长保直径PDC钻头+旋转式导钻+LWD”的组合方式。采用正交实验法对钻进工艺和钻具工艺进行了优选。造斜段的最佳钻进压力为80-100kN，转速60-80r/min，排量30-35L/s，以保证造斜段的造斜率达到设计要求；在水平井段，钻进压力为60-80kN，转速80-100r/min，排量28-32L/s，提高了钻进效率，同时保证了井眼的平稳。在此基础上，利用数值仿真技术，研究钻进过程中各因素对井眼轨迹的影响规律，构建参数优选数据库，为实际生产提供依据。

3.3 轨迹设计与动态调整技术

根据致密油储层特征，提出了“多目标优选+分段造斜”轨迹设计方法。在此基础上，对靶位进行合理布局，靶位间距控制在300-500m之间，以保证井眼轨迹能够灵活地适应油藏的变化；在造斜段，为了减小造斜时钻孔应力集中，减小了井塌的危险性，采取了“缓慢造斜-快速造斜-稳造斜”的三级方案；横向断面采用“微曲率”曲线，曲率半径 ≥ 1500 米，保证了钻具的顺利通过。针对轨迹调节存在时滞的问题，提出了一种基于PID的动态调节方法。以油藏中心轴线为研究对象，通过实时获取井眼实际偏移量（ Δx ， Δy ， Δz ）、造斜率偏差（ ΔK ）等参数，利用PID控制器进行校正，得到井眼轨迹的修正值，并输出钻井工具的导向命令。以致密油储层为研究对象，利用模糊控制原理对其进行参数（比例系数 K_p ，积分系数 K_i ，微分系数 K_d ）进行优化，以增强其抗扰动能力。实验结果表明，所提出的动力学调节方法在响应时间 ≤ 5 分钟的情况下，能够较大幅度地提高轨迹偏移的控制精度，提高30%以上。

3.4 井眼稳定性控制技术

井眼稳定是轨迹精准控制的保障，致密油储层由于天然裂缝发育，岩石脆性大，在钻进时极易出现井崩，造成井眼轨迹的失控。为了提高钻孔的稳定性，对钻井液系统进行了优化，并对其进行了压力控制。对钻井液配方进行了优化，研制了适合致密油储层的防塌型润滑钻井液。本项目拟在聚磺钻井液体系中添加纳米阻堵剂（50-100nm）及弹性

微粒,对储层的微观裂隙、孔隙进行封闭,减少滤失的渗透;在钻井液中加入润滑油(3%-5%),可使钻井液摩擦因数低于0.15,从而减小了钻头与井壁之间的摩擦力;通过对钻井液密度的调节,使其达到1.25-1.35克/厘米³的目的,达到了平衡地层压力、防止井壁垮塌的目的。利用动压控制技术,实现对环空压的实时监控,并通过调整钻井液密度、排量等参数,使环空压降至安全窗口(地层孔压~破岩压力)。为解决水平井段岩屑沉积所引起的地层压力异常问题,提出了“分段循环+脉冲振荡”的方法,以防止因地层压力过大而造成井漏、井崩等事故。实践证明,该方法可使井筒复合事故发生率由18%下降到5%以内,为实现精确轨迹的精确控制创造了有利的井况。

3.5 绿色低碳协同控制技术

面对“双碳”战略和能源安全的双重需求,我国致密油气资源的高效利用和低碳环境保护是亟需解决的关键问题。钻井液系统采用可循环利用配方,利用纳米级阻堵剂和弹性颗粒的最佳配合比,使钻井液损失降低30%以上,并减小废物排放带来的环境污染风险。在钻具能量控制上,采用旋转导向钻进联合动力管理系统,对其进行能量的动态调节,并与传统的燃油驱动方式相结合,使其在单井钻进过程中的碳排放量比常规工艺减少18%。在此基础上,采用“分段循环+脉动”的方法,减小了钻井液的堆积,减少了钻井液的补充频率,满足了非常规油气资源的“绿色化”发展趋势。

4 现场应用案例

4.1 应用区块概况

选取鄂尔多斯盆地某致密油区块作为试验区,该区储层主要为孔隙度为6%-9%,渗透率为0.01-0.08mD的长石砂岩,储层厚度4-7m,具有较高的侧向非均质性和较多的自然裂缝。试验井为水平井ZJ-1井,设计垂深2850m,设计了3个靶点,使其在水平方向上的偏移不超过±0.2m,油藏可钻遇率≥90%。

4.2 技术实施过程

采用本文研究的轨迹精准控制技术体系进行施工:一是在地质导向上,选择了GR-RES-DEN-CNL随钻测井组合,并采用机器学习的方法进行油气藏界面的实时识别;二是钻

具选用回转式钻具,在造斜段,钻压90kN,转速70r/min,水平井段,70kN,转速90r/min;三是轨迹设计为多目标分段造斜型,横向断面为1800米,采用PID-模糊控制方法进行动力调节;四是为了提高井壁的稳定性和稳定性,使用了高密度1.30g/cm³的防塌型钻井液,对环空压进行了实时监控。

4.3 应用效果

ZJ-1井的钻探工作取得了较好的效果,水平段轨迹最大偏差0.12m,其平均值为0.08米,符合设计要求(±0.2米);油藏可采率为93.5%,比(常规工艺)区块相邻的油井高出14.2个百分点;与邻近的油井相比,该油井的钻探周期为28.5天,钻探效率提高15.6%;井筒复合事故发生率为3.2%,比相邻井减少12.8%。单井日产油量为18.6t,与常规工艺相比,提高了62.1%。为进一步验证技术的普适性,在该区块后续部署的5口水平井中推广应用,平均井眼轨迹偏移0.10m,油层可钻性92.3%,平均钻进时间减少13.8%,日产单井原油17.8t,总体上提高了开采效率。

5 结语

综上所述,致密油气藏水平井钻进轨道精确调控是解决其开发的关键技术支撑。本文针对地质条件复杂、导向精度不足等行业难题,构建了“设计-控制-监测-调整”全流程技术体系,通过多学科交叉融合,实现轨迹控制精度、储层可采性和开采收益的同时提高。现场应用表明,可望实现水平井井眼轨迹偏移不超过0.12米、油藏可钻遇率超过92%、单井日产油能力提高60%以上,减少二氧化碳排放和井眼事故,并验证所提出的方法的科学性和实用性。未来,随着我国深部油气资源的深度开采和能源转型,我国致密油开采面临着超深层、极薄油气藏等更加复杂的环境条件,亟需加强智能智能引导、低碳装备集成等关键技术研究,促进其“自适应、自决策、全绿色”发展。

参考文献

- [1] 李根生,黄中伟,牛继磊.致密油藏水平井高效钻井技术进展与展望[J].石油学报,2020,41(5):632-646.
- [2] 高德利,刁斌斌,曲从锋.水平井轨迹控制技术现状与发展趋势[J].石油钻采工艺,2019,41(2):137-144.
- [3] 王敏生,张洪伟,李勇.致密油藏地质导向钻井技术优化与应用[J].天然气工业,2021,41(8):102-109.