

石油开采中水平井钻井技术的价值研究

谭 伟

中石化西南石油工程有限公司重庆钻井分公司 四川 德阳 618000

摘要：水平井钻井技术通过“垂直段-造斜段-水平段”结构显著增加油藏接触面积，提升单井产量与采收率，在薄层、低渗透及非常规油气开发中优势突出。其经济价值体现在缩短钻井周期、降低开发成本，环境价值在于减少地表占地与碳排放。技术突破如旋转导向系统、长水平段延伸等，推动我国非常规油气商业化开发，增强能源安全保障能力，成为石油工业高质量发展的核心支撑。

关键词：石油开采；水平井钻井技术；价值

引言：随着全球能源需求持续增长，石油与天然气等传统能源的稳定供应仍是保障国家能源安全的关键。然而，常规直井开发面临薄层油藏接触面积有限、低渗透资源采收率低等瓶颈，难以满足高效开发需求。在此背景下，水平井钻井技术凭借其独特的三段式井眼结构与精准地质导向能力，成为突破资源开发困境的核心手段。本文从经济、效率、环境及战略价值四个维度，系统分析水平井技术的综合效益，并探讨其发展挑战与优化路径。

1 水平井钻井技术概述

1.1 技术定义与原理

(1) 水平井与直井/定向井的结构差异：直井呈垂直井眼形态，定向井井眼沿预定轨迹倾斜，而水平井井眼在目的层段与地层保持平行，形成“垂直段-造斜段-水平段”的三段式结构，能大幅增加与油藏的接触面积。直井、定向井以垂向或斜向穿透油藏为主，接触面积有限，水平井通过水平段延伸实现大范围覆盖，采收效率显著提升。(2) 关键技术参数：造斜率是造斜段井眼偏离垂直方向的角度变化率，直接影响井眼轨迹控制精度，常规范围为 3° - 10° /30m；水平段长度根据油藏厚度、分布范围确定，常规水平井水平段长800-1500m，页岩气开发中可达2000m以上；此外，井眼曲率、水平段位移等参数也直接关乎钻井安全性与开发效果。

1.2 技术分类与演进

(1) 多级压裂水平井、智能完井、大位移水平井等：多级压裂水平井通过分段压裂改造储层，适配页岩气、致密油等低渗资源开发；智能完井集成传感器与控制装置，实现井下工况实时监测与产量动态调控；大位移水平井水平位移超3000m，适用于海上平台等空间受限场景，可实现单井控制大面积油藏。(2) 技术迭代路径：早期以单一水平井独立施工为主，施工周期长、成本高；逐步发

展为丛式水平井，在同一井场部署多口井减少占地；现阶段“井工厂”模式实现钻井、完井流程标准化、批量化作业，通过设备共享、工序衔接优化，大幅提升施工效率，降低单位开发成本。

1.3 核心技术体系

(1) 地质导向技术(LWD/MWD)：随钻测井(LWD)与随钻测量(MWD)技术实时采集井下地质参数与井眼轨迹数据，通过地面系统分析调整钻井方向，确保水平段精准穿行于目的层，降低储层污染与漏失风险。(2) 旋转导向钻井系统(RSS)：替代传统滑动导向，实现钻井过程中钻头旋转与导向同步进行，提升井眼轨迹控制精度与钻井速度，适配长水平段、复杂轨迹井施工，减少井眼摩阻与扭矩。(3) 连续管钻井技术：采用连续无接头钢管作为钻柱，减少起下钻次数，提升作业效率，尤其适用于小井眼、老井侧钻等场景，兼具储层保护与作业安全优势。(4) 高效钻头与钻井液体系：PDC钻头等高效钻头提升岩石破碎效率，适配不同岩性地层；高性能钻井液具备润滑、携砂、防塌等功能，满足水平井长水平段井眼稳定与储层保护需求^[1]。

1.4 应用场景分析

(1) 薄层油藏、页岩气、致密油等非常规资源：薄层油藏中，水平井可避免直井穿透厚度不足的问题；页岩气、致密油等低渗资源通过水平井+多级压裂组合技术，实现储层高效改造与产能释放，破解常规钻井开发难题。(2) 海上油田开发、老油田增产等特殊场景：海上油田通过大位移水平井减少平台建设数量，降低开发成本；老油田通过水平井侧钻技术盘活剩余油资源，实现增产增效，延长油田开发寿命。

2 水平井技术的价值维度分析

2.1 经济价值

(1) 单井产量提升：水平井通过延长储层接触长度，

大幅提升单井产量。以我国四川盆地页岩气开发为例,常规直井单井日产量仅1-3万立方米,采用水平井+多级压裂技术后,单井日产量可达15-30万立方米,部分高产井甚至突破50万立方米,单井产量提升5-10倍,显著增强了资源开发的经济性。(2)开发成本优化:在批量开发场景中,水平井可通过丛式井部署和“井工厂”模式优化成本。钻机日费方面,“井工厂”模式下单台钻机可连续作业多口井,设备利用率提升30%以上,单井分摊的钻机日费降低25%-40%;材料消耗上,共享井场设施减少管线、道路等配套工程材料用量,同时长水平段减少单井井数,整体材料消耗降低15%-20%。(3)投资回报率分析:基于全生命周期成本模型测算,水平井开发虽初始钻井投入较直井高30%-50%,但凭借产量提升和成本分摊优势,投资回收期可缩短2-3年。以页岩气开发为例,水平井全生命周期投资回报率可达18%-25%,较直井的8%-12%提升显著,尤其在规模开发后,回报率可进一步攀升。

2.2 效率价值

(1) 钻井周期缩短:自动化钻机与旋转导向系统的协同应用,大幅缩短钻井周期。传统定向井钻井周期约45-60天,而水平井采用自动化钻机后,钻井周期可压缩至25-35天,其中页岩气水平井的长水平段钻井效率提升更为明显,单井钻井周期较传统工艺缩短40%以上,大幅提升了井场周转效率。(2) 采收率提高:通过数值模拟技术验证,水平井对不同油藏类型的采收率提升效果显著。对于薄层油藏,直井采收率通常为15%-20%,水平井可提升至35%-45%;对于页岩气等非常规资源,水平井配合多级压裂,采收率可从直井的5%以下提升至15%-20%,极大程度盘活了低渗难采资源^[2]。(3) 资源利用率提升:水平井可精准穿行于老油田剩余油富集区,实现剩余油高效动用。在东部老油田,常规直井二次开发剩余油动用率仅20%-30%,采用水平井侧钻技术后,剩余油动用率提升至50%-60%,有效延长了老油田开发寿命,提升了资源整体利用效率。

2.3 环境价值

(1) 减少地表占地:丛式水平井和“井工厂”模式大幅减少地表占地。单口直井井场面积约0.3-0.5公顷,而一个“井工厂”可部署10-20口水平井,总占地仅0.8-1.2公顷,单井平均占地减少70%-80%,尤其适用于生态敏感区和耕地保护区域,降低了对地表生态的破坏。(2) 降低碳排放:水平井开发通过缩短钻井周期、减少钻机数量和配套工程,显著降低碳排放。与直井开发相比,同等产能下水平井开发的碳排放减少30%-40%,其中钻机

作业能耗降低和运输环节减排占比最大。以百万立方米天然气开发为例,水平井较直井可减少碳排放约120-180吨。(3) 废弃物处理成本节约:水平井减少单井数量,同步降低钻井岩屑、废弃钻井液等废弃物产生量,废弃物处理成本节约25%-35%。同时,集中化的井场便于废弃物集中处理和资源化利用,如岩屑固化后用于井场道路铺设,进一步降低了环保处理成本和环境风险。

2.4 战略价值

(1) 能源安全保障:水平井技术实现了页岩气、致密油等非常规资源的商业化开发,打破了我国非常规油气开发瓶颈。我国页岩气储量丰富,水平井技术的应用使页岩气年产量突破300亿立方米,有效补充了天然气供给缺口,提升了国内能源自给率,增强了能源安全保障能力。(2) 技术自主可控:经过多年攻关,水平井核心装备实现高度自主可控,旋转导向系统、随钻测井仪器、高效PDC钻头的关键设备国产化率超90%,打破了国外技术垄断。国产化装备不仅降低了开发成本,更保障了能源开发产业链安全,为技术规模化应用奠定了基础。(3) 行业竞争力提升:我国水平井技术已具备国际竞争力,成功应用于伊拉克、巴基斯坦等国际油气项目。在伊拉克鲁迈勒油田,我国提供的水平井钻井技术服务,使单井产量提升4倍,钻井周期缩短35%,获得国际市场认可,推动了我国油气工程技术服务的国际化拓展^[3]。

3 水平井钻井技术发展的挑战与对策建议

3.1 技术瓶颈

(1) 深层/超深层钻井风险:深层及超深层地层具有高温、高压、高应力特性,温度可达150-200°C,压力系数超1.8,易引发井漏、井喷、套管变形等恶性事故。同时,深层岩石硬度高、研磨性强,钻头磨损严重,钻井效率极低,且高温环境易导致随钻测井仪器失灵,进一步加剧钻井风险。(2) 复杂地质条件下的导向精度:在断裂发育、岩性突变、薄互层等复杂地质区域,地质导向技术易受地层干扰,难以精准识别目的层边界。部分区域储层厚度仅数米,水平段穿行过程中易偏离靶区,导致储层接触面积不足,影响产能释放。此外,井眼轨迹的摩阻扭矩增大,也会降低导向控制的稳定性与精度^[4]。(3) 高端装备国产化率低:尽管核心装备国产化取得一定进展,但部分高端产品如高精度旋转导向系统、耐高温高压随钻测井仪器、高性能PDC钻头等,仍依赖进口。进口装备不仅价格昂贵,且售后维护周期长、成本高,同时受国际供应链波动影响,制约了水平井技术的规模化、高效化应用。

3.2 经济性挑战

(1) 初期投资高：水平井钻井需配备自动化钻机、旋转导向系统、随钻测井等高端设备，单井初期投资较直井高出50%-80%。其中，一套进口旋转导向系统造价超千万元，自动化钻机购置成本是传统钻机的2-3倍，高额的初始投资对中小企业形成资金壁垒，限制了技术的普及应用。(2) 服务成本波动：水平井钻井服务成本与国际油价高度关联。当油价低迷时，油气企业会缩减开发投入，减少水平井钻井工作量，导致钻井服务需求萎缩，行业产能闲置；而油价高涨时，设备租赁、耗材采购等成本同步攀升，叠加劳动力短缺，进一步推高服务成本，挤压行业利润空间。

3.3 环境与社会风险

(1) 水力压裂的水资源争议：水平井开发配套的多级水力压裂技术，单井需消耗数万至数十万立方米水资源，在干旱、半干旱油气产区，易引发工业用水与农业、生活用水的竞争矛盾。同时，压裂返排液含有化学添加剂和地层污染物，若处理不当会污染土壤和地下水，引发社会环保争议。(2) 微地震活动监测需求：水力压裂过程中易诱发微地震，虽多数震级较低，但部分区域可能触发较强地震活动，威胁周边居民安全。目前，微地震监测技术存在监测范围有限、数据解读精度不足等问题，难以实现全流程、高精度预警，给水平井开发带来潜在的社会风险与舆情压力。

3.4 对策建议

(1) 政策支持：出台针对性税收优惠政策，对水平井开发项目减免资源税、企业所得税，降低企业税负；设立专项研发补贴资金，重点扶持高端装备国产化、核心技术攻关项目，鼓励科研机构与企业协同创新。同时，搭建技术示范平台，对规模化应用水平井技术的企业给予专项奖励，引导行业技术升级。(2) 技术创新方向：推进智能钻井技术研发，整合AI、大数据技术实现钻井参

数实时优化与故障预警，提升复杂地质条件下的导向精度；研发绿色环保钻井液体系，采用可降解添加剂，降低对水资源的污染；攻关耐高温高压装备与仪器，突破高端装备国产化瓶颈，提升技术自主可控能力^[5]。(3) 行业协作模式：建立水平井钻井技术与工程标准体系，规范钻井流程、装备选型、安全环保等环节要求，提升行业整体发展质量；搭建设备共享平台，鼓励企业联合购置高端装备，实现资源高效利用，降低中小企业投资成本；推动上下游企业协同，建立产学研用一体化合作机制，加速技术成果转化与推广应用。

结束语

水平井钻井技术作为石油工业革命性突破，通过提升单井产量、优化开发效率、降低环境影响，已成为保障能源安全、推动绿色转型的核心支撑。面对深层地质风险与高端装备国产化挑战，需持续强化技术创新、完善政策支持、深化行业协作，加速技术迭代与规模化应用。未来，随着智能钻井与绿色工艺的融合发展，水平井技术将进一步释放潜力，为全球能源可持续开发提供中国方案。

参考文献

- [1]李涛.水平井钻井技术在石油勘探开发中的应用[J].石油石化物资采购,2021,(05):74-75.
- [2]韩飞翔.水平井钻井技术在石油勘探开发中[J].石化技术,2020,27(04):343-345.
- [3]闫宝华.水平井钻井技术在石油勘探开发中的应用分析[J].石油石化物资采购,2020,(14):72-75.
- [4]程富海.水平井钻井技术在石油勘探开发中的应用[J].石油石化物资采购,2024(3):94-96.
- [5]刘刚.水平井钻井技术在石油勘探开发中的应用[J].石油石化物资采购,2023(5):79-81.