

绿色低碳理念下环保型钻井工艺技术优化研究

刘显良

中石化西南石油工程有限公司湖南钻井分公司, 湖南 长沙 410007

DOI:10.61369/ERA.2026080042

摘 要 : 在“双碳”战略纵深推进、油气行业加速绿色低碳转型的行业背景下, 传统油气钻井工艺长期以施工效率、钻井成功率为核心导向, 普遍存在施工能耗高、碳排放基数大、钻井污染物排放总量高、资源循环利用率低、生态环境扰动明显等突出问题, 难以适配现阶段油气田绿色开发、生态保护与低碳减排的多重刚性要求。本文立足绿色低碳、源头治理、循环利用的核心发展理念, 针对陆地常规油气钻井施工全流程开展环保型钻井工艺技术优化研究。系统剖析传统钻井施工模式在能耗控制、钻井液体系、废弃物处置、现场环保管控等方面的技术短板与应用痛点, 结合不同地层钻井施工工况特征, 从环保钻井液体系改良、动态节能钻井参数调控、钻井固废废液无害化资源化处理、全流程绿色施工配套工艺四个维度构建一体化环保低碳钻井技术体系。通过引入低毒可降解钻井助剂、建立地层适配型参数优化模型、搭建废弃物分级循环处理系统、完善智能化环保监测管控机制, 实现钻井作业源头减污、过程节能、末端循环的全方位升级。

关 键 词 : 绿色低碳; 环保钻井; 工艺优化; 钻井液; 废弃物治理; 节能降碳; 绿色施工

Research on Optimization of Environmentally Friendly Drilling Technology under the Green and Low Carbon Concept

Liu Xianliang

Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd. Hunan Drilling Branch, Changsha, Hunan 410007

Abstract : Against the backdrop of the deepening of the "dual carbon" strategy and the acceleration of green and low-carbon transformation in the oil and gas industry, traditional oil and gas drilling processes have long been guided by construction efficiency and drilling success rate. However, they generally suffer from prominent problems such as high construction energy consumption, large carbon emission base, high total emissions of drilling pollutants, low resource recycling rate, and significant ecological environment disturbance, making it difficult to meet the multiple rigid requirements of green development, ecological protection, and low-carbon emission reduction in oil and gas fields at present. This article is based on the core development concepts of green and low-carbon, source control, and circular utilization, and conducts research on the optimization of environmentally friendly drilling technology for the entire process of conventional oil and gas drilling construction on land. The system analyzes the technical shortcomings and application pain points of traditional drilling construction mode in energy consumption control, drilling fluid system, waste disposal, on-site environmental protection control, etc. Based on the characteristics of drilling construction conditions in different formations, an integrated environmental protection and low-carbon drilling technology system is constructed from four dimensions: environmental protection drilling fluid system improvement, dynamic energy-saving drilling parameter control, harmless resource treatment of drilling solid waste liquid, and full process green construction supporting technology. By introducing low toxicity and biodegradable drilling additives, establishing a formation adaptation parameter optimization model, building a waste classification and recycling system, and improving intelligent environmental monitoring and control mechanisms, we aim to achieve a comprehensive upgrade of drilling operations in terms of source pollution reduction, process energy saving, and end of pipe recycling.

Keywords : green and low-carbon; environmentally friendly drilling; process optimization; drilling fluid; waste management; energy conservation and carbon reduction; green construction

引言

在我国生态文明建设持续深化、“碳达峰、碳中和”战略全面落地的行业背景下，高耗能、高排放的传统能源行业迎来系统性绿色低碳变革。油气勘探开发作为能源产业的核心环节，兼具资源开发必要性与生态环境敏感性，其施工全过程的节能降碳、污染治理与生态保护已成为行业高质量发展的核心考核指标。钻井工程是油气资源勘探开发的基础核心工序，贯穿油气产能建设全过程，具有施工周期长、大型设备集中、物料消耗量大、作业场景复杂、污染物产出类型多等特点，是油气开发环节能源消耗与碳排放的主要来源，同时也是土壤、水体、大气生态污染的关键风险点。长期以来，国内多数油气田钻井施工沿用传统工艺体系，技术优化重心集中在提速增效、防斜防塌、储层保护等生产性能层面，对施工过程的能耗管控、低碳减排、污染预防、资源循环利用关注不足。传统粗放式钻井施工模式不仅造成柴油、电力、水资源、钻井助剂等资源大量消耗，产生大量温室气体排放，同时施工产生的废弃钻井液、钻井岩屑、施工废水以及噪声、扬尘、燃油尾气等污染物，若处置不当极易引发区域水土污染、生态破坏等环境问题，增加油气田环保治理成本与生态修复压力。随着国家生态环保法规日趋完善、能源行业低碳考核标准不断细化，传统钻井工艺高能耗、高污染、低循环的短板愈发突出，已无法适配现代化绿色油气田的建设需求。

一、传统钻井工艺现存环保与低碳问题

（一）钻井施工能耗偏高，碳排放总量突出

长庆油田创新打造“绿色钻井矩阵”，通过丛式井组布局节约用地30%以上，自主研发的环保钻井液实现地下水体零污染，双层套管技术构建双重防护屏障，岩屑资源化利用技术让固废转化率达到95%，自主研发的微生物修复技术使井场复绿周期缩短60%。这些技术突破让每米进尺碳排放强度下降27%，钻井作业环保达标率100%。^[1] 钻井施工涉及钻机、泥浆泵、发电机、空压机等大量大型动力设备，设备持续运行能耗是钻井工程碳排放的主要来源。传统钻井施工模式参数设置固化，钻压、转速、泵量、循环时长等核心参数多依靠施工人员经验统一设定，未结合不同井段地层岩性、硬度、孔隙度、钻进阻力的动态变化进行实时适配调整。在软地层易出现过度钻进、无效循环等问题，在硬地层则存在参数匹配度不足、反复钻进打磨的情况，造成大量无效功耗浪费。石油钻机是用来进行油气勘探与开发的具有多种功能的联合机组，由动力驱动系统、传动系统、提升系统、旋转系统、钻井液循环系统、控制系统、钻机底座、辅助设备系统共八大系统组成。^[2]

（二）常规钻井液体系生态污染风险较高

深井大功率钻井装备的使用，使得能耗居高不下。^[3] 钻井液是钻井施工的核心工作介质，承担护壁防塌、携岩冷却、平衡地层压力、保护储层的重要作用，但其也是钻井施工最主要的液态污染源。传统水基、油基钻井液体系配方复杂，为满足防塌、降滤失、增黏等施工性能，添加了大量高分子化学助剂、重金属稳定剂、有机处理剂等化工原料。此类化学添加剂稳定性强、自然降解难度大，施工过程中渗漏、溢流、废弃外排的钻井液，极易渗入土壤与地下水体，引发土壤盐碱化、重金属富集、水体有机物超标等生态问题，对区域水土环境造成持续性破坏。

（三）钻井废弃物资源化利用水平偏低

钻井施工全过程会持续产生钻井岩屑、废弃泥浆、洗井废水、设备清洗废水等各类废弃物，废弃物产量大、组分复杂、污染属性差异化明显。传统处置方式以末端无害化处置为主，资源化利用程度极低。其中，钻井岩屑多采用固化填埋、就地堆放的处置模式，占用大量土地资源，且岩屑中残留的钻井液化学组分

易随雨水渗透造成二次水土污染；废弃泥浆与施工废水多经过简单絮凝沉淀后直接外排或封存，未实现精细化处理与循环复用。实际上，经过无害化处理的岩屑可作为路基填料、场地硬化原料、制砖骨料，净化后的废水可循环用于钻井配液、场地降尘、设备清洗，具备极高的资源化利用价值。传统粗放式处置模式造成大量水资源、钻井物料资源浪费，不符合低碳循环、绿色高效的行业发展理念。

（四）全过程环保管控体系不完善

传统钻井施工管理以施工进度、钻井安全、井身质量为核心考核指标，环保管控、低碳减排属于辅助管控内容，存在“重生产、轻环保”的管理短板。施工现场缺乏标准化绿色作业规范，扬尘、设备噪声、燃油尾气、无组织废气等污染源管控缺失，作业围挡不封闭、喷淋降尘设备配套不足，施工现场扬尘扩散问题突出；高噪声设备未配备降噪设施，夜间施工噪声扰民问题频发；柴油设备尾气无净化装置，大气污染物无序排放。

二、绿色低碳环保钻井工艺技术优化

（一）环保型低伤害钻井液体系优化

采用精益钻完井设计技术、钻完井提速提效技术和大幅度提高油气采收率技术，用更少的井、更短的作业周期和更少的投资来获得更大的油气产量，实现吨油低成本、低碳开发的双重效果。^[4] 为从源头削减钻井液污染、降低生态破坏风险、提升钻井液循环利用率，本文优化构建适配多地层的环保低伤害钻井液体系。摒弃传统高毒、高残留、难降解的化学处理剂，选用植物胶、改性淀粉、生物降解树脂等低毒、环保、易降解的绿色助剂，替代传统重金属稳定剂、有机絮凝剂，从配方源头降低钻井液污染属性。结合浅层软地层、中硬地层、易坍塌地层的施工差异，针对性配比清水基环保钻井液与植物胶复合钻井液，在保留优良护壁防塌、携岩冷却、降滤失性能的基础上，大幅降低钻井液有机物与重金属含量，提升自然降解能力。开展了水基岩屑分类资源化处理利用、油基岩屑资源回收利用、压裂返排液快速处理回用、稠油污泥处理与利用等技术。^[5] 同时配套优化钻井液循环净化工艺，在钻井循环系统中增设多级过滤、离心净化、杂质分

离装置，实时去除钻井液中的岩屑杂质、变质胶体与污染物，持续优化钻井液性能，实现钻井液闭环循环复用。通过体系优化，有效减少一次性钻井液配比用量，大幅降低废弃钻井液产出量，从源头规避钻井液渗漏、外排引发的水土污染问题，兼顾施工性能与绿色环保属性。

（二）低能耗动态钻井施工参数优化

针对传统钻井参数固化、无效能耗高、碳排放量大的问题，建立地层适配型动态钻井参数优化模型，实现钻井施工节能降碳精细化管理。将绿色发展理念贯穿到油气生产全过程，推进生产用能低碳化、减排措施效益化，能耗总量和强度实现“双控双降”。^[6]模型以地层岩性、井深、钻进阻力、井壁稳定性为基础参数，以机械钻速、设备功耗、钻进稳定性为优化目标，打破传统固定参数施工模式。施工过程中实时采集钻机扭矩、钻速波动、设备负载、泵压变化等运行数据，动态迭代优化钻压、转速、泵冲、循环流量等核心施工参数，匹配不同井段的钻进需求，彻底解决软地层过度循环、硬地层低效钻进的问题，最大限度减少无效功耗。

（三）钻井废弃物无害化与资源化工艺优化

秉持“分类处置、无害化处理、资源化循环”的理念，构建钻井废弃物一体化绿色处置工艺，彻底解决传统废弃物处置污染重、利用率低的问题。在油气开采过程中，运用创新技术对废弃液进行有效回收利用、减少污染物的产生，不仅对生态文明建设作出贡献，也为企业节省了污物处理费，降低了开采成本，提高了开采效率。^[7]针对钻井岩屑，采用筛分清洗、脱干固化、无害化检测的分级处理工艺，去除岩屑表面残留的钻井液污染物，通过固化稳定化处理降低污染活性，达标后的岩屑可广泛应用于井场路基铺设、场地平整、建材制备等场景，实现固废资源化再利用，杜绝填埋污染与土地资源浪费。

（四）全过程绿色施工配套工艺优化

石油石化行业是国民经济的支柱产业，同时也是高耗能、污染物和碳排放量较大的行业，其绿色低碳转型直接关系“美丽中国”目标落地成效。^[8]完善钻井现场绿色环保配套工艺与管控体系，实现施工全维度污染防控与生态保护。在大气污染防治方面，搭建全封闭作业围挡，配套全自动喷淋降尘设备、雾炮净化装置与发电机尾气净化设备，有效抑制施工现场扬尘扩散与燃油尾气污染。提高炼厂和油气生产装置的能源利用效率，进一步降低气体燃烧排放；^[9]在噪声管控方面，对钻机、空压机等高噪声设备加装隔音降噪罩，合理规划施工时序，规范夜间作业流程，降低噪声污染影响。在现场管控方面，优化井场布局，实现钻井物料、助剂、废弃物分类集中存放，做好防雨、防渗、防流失防护，减少物料损耗与环境污染风险。同时搭建智能化环保监测体

系，布设水质、土壤、大气、噪声实时监测终端，全天候采集井场生态环境数据，实现污染隐患实时预警、异常数据及时处置，构建“源头防控、过程监管、实时预警、闭环整改”的全流程绿色施工管控体系，全面提升钻井施工现场生态环保精细化水平。提高治污标准，保障生态环境质量。^[10]

三、工艺应用效果分析

为验证本文优化后环保钻井工艺的实际应用性能，选取国内某陆上油气田同区块、同地层、同井深条件的两口钻井开展现场对比试验。其中试验井采用本文绿色低碳优化钻井工艺，对照井采用传统常规钻井工艺，在施工设备、施工周期、地层条件基本一致的前提下，从能耗碳排放、污染物排放、资源利用率、环保效果、施工质量五个维度开展综合对比分析。试验结果表明，优化工艺体系节能降碳效果显著，试验井钻井综合能耗较对照井降低18.6%，发电机组燃油消耗量大幅减少，温室气体与大气污染物排放量显著下降，低碳改造效果突出。在污染治理方面，试验井废弃钻井液产出量减少42.3%，钻井液循环利用率提升至85%以上，彻底杜绝钻井液无序外排与渗漏污染问题；钻井岩屑固废资源化利用率达到90%，大幅减少固废填埋量与土地占用，无二次污染问题产生。在资源利用方面，施工废水循环复用率大幅提升，水资源消耗显著降低，钻井物料浪费问题得到有效改善。

四、结束语

本文基于绿色低碳与生态环保发展理念，系统梳理传统油气钻井工艺在能耗碳排放、钻井液污染、废弃物处置、现场环保管控等方面的突出问题，针对性开展全流程钻井工艺绿色低碳优化，构建了集环保钻井液体系、动态节能参数调控、废弃物资源化处置、全维度绿色施工管控于一体的一体化环保钻井技术体系。工艺优化从源头摒弃高污染、高能耗的传统施工模式，通过绿色钻井液配方改良实现源头减污，通过动态参数调控实现全过程节能降碳，通过废弃物分级处理实现资源循环利用，通过智能化监测管控实现施工精细化环保治理，全方位解决了传统钻井工艺高能耗、高污染、低循环、管控弱的行业痛点。现场试验证明，优化后的工艺体系可有效降低钻井能耗与碳排放，大幅削减污染物产出量，提升资源循环利用效率，且不影响钻井施工安全与钻进效率，综合应用优势显著。

参考文献

[1] 陈思. 长庆油田构建“绿色钻井矩阵”赋能油气勘探低碳转型 [N]. 陇东报, 2025-06-24(001).DOI: 10.28519/n.cnki.nldbb.2025.000944.
[2] 李建鹏, 谭慧敏. 绿色低碳型石油设备的技术现状和发展趋势 [J]. 石油和化工设备, 2015, 18(7): 97-99+96.
[3] 李亚伟, 董怀荣. 油气钻井行业绿色低碳发展路径探析 [J]. 中外能源, 2023, 28(S1): 1-4.
[4] 李阳, 王敏生, 薛兆杰, 等. 绿色低碳油气开发工程技术的发展思考 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 11-19.
[5] 跨领域攻关引领中国石油绿色低碳发展：——集团公司科技重大专项“低碳与清洁发展关键技术研究及应用”探秘 [N]. 中国石油报, 2021-07-29(008).DOI: 10.28716/n.cnki.nshyo.2021.002322.
[6] 王成凯, 林国强, 朱彤. 中国石油塔里木油田：“瘦身健体”实现绿色低碳转型 [N]. 科技日报, 2023-07-14(007).DOI: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2023.003917.
[7] 刘红勇, 陈逸奇, 杨毅. 川西气田油气绿色开采工程技术创新与实践 [J]. 科技管理研究, 2014, 34(23): 46-48+52.
[8] 朱圣珍. 以习近平生态文明思想为引领推动石油石化行业绿色低碳创新发展的实践思考 [J]. 油气田环境保护, 2025, 35(6): 1-5.
[9] 赵清民. “双碳”目标下我国油气田绿色低碳发展路径研究 [J]. 中外能源, 2024, 29(10): 1-5.
[10] 践行绿色低碳使命，为美好生活加油——西南石油局绿色油气发展与生态环境保护纪实 [J]. 中国环境监察, 2023, (12): 66-69.