

石油工程井下作业修井技术优化措施探究

沈正庆

河南省濮阳市中原油田股份有限公司采油气工程服务中心 河南 濮阳 457001

摘要: 石油工程井下作业修井技术优化对保障油气资源安全高效生产意义重大。当前修井技术面临极端井况适应性不足、作业效率低、成本与安全风险高等问题。本文从工艺流程、设备与工具、数字化与智能化、安全与环保等方面提出优化措施,旨在提升修井技术的高效性、安全性与环保性,推动我国石油工程修井技术向智能化、绿色化转型,实现油气行业可持续发展。

关键词: 石油工程; 井下作业; 修井技术; 优化措施

引言: 石油作为现代工业的“血液”,其稳定供应关乎国家能源安全与经济发展。在石油工程中,井下作业修井技术是保障油井正常生产、恢复产能的关键环节。然而,随着勘探开发向深部、复杂地层拓展,传统修井技术面临效率低、成本高、安全风险大等挑战。本文聚焦修井技术优化,从工艺、设备、智能化及安全环保等维度提出创新措施,旨在为提升修井作业效能、推动行业技术升级提供理论支持与实践参考。

1 石油工程井下作业修井技术现状分析

1.1 修井技术分类与特点

(1) 常规修井技术: 此类技术是保障油井正常生产的基础手段,应用范围广泛。打捞技术针对井下落物开展回收作业,工艺相对成熟但需根据落物类型精准适配工具;解卡技术通过机械或化学方式解除管柱卡阻,核心在于精准判断卡阻原因;套管修复技术可应对套管缩径、破裂等问题,维持井筒完整性,具有操作流程标准化、适配常规井况的特点。(2) 特殊修井技术: 具备高效、精准、环保的优势。连续油管作业采用一体化连续管柱,可实现带压作业,减少地层污染,适配水平井、深井等复杂井型;智能完井技术集成井下传感与远程控制模块,能实时监测井内参数并动态调整生产参数,大幅提升作业智能化水平,但对设备与技术集成度要求较高^[1]。

1.2 现有技术应用中的问题

(1) 技术局限性: 现有技术在高温高压高含硫井、长水平段井等极端井况下适配性不足。例如常规修井工具在深井中易受应力冲击失效,特殊修井技术对极端环境的耐受能力有限,难以满足复杂地层的修井需求。(2) 效率瓶颈: 常规修井作业流程繁琐,设备搬运、调试耗时久;复杂井况下,打捞、解卡等核心作业的成功率偏低,常出现多次返工情况,导致作业周期大幅延长,严重影响油气产能恢复效率。(3) 成本与安全风险: 复杂工况下

修井设备损耗率高,核心工具更换与维护成本高昂;作业过程中,钻井液泄漏、废气排放等问题易引发环境污染,带压作业、深井作业等场景还存在井喷、硫化氢泄漏等安全隐患,安全管控压力较大。

1.3 国内外技术对比与差距分析

(1) 先进国家技术优势: 欧美等石油工业发达国家的修井技术已实现高度自动化与智能化,自动化修井机、井下作业机器人普及率高,借助大数据与AI技术实现作业全流程优化;在深海、极地等极端环境修井技术领域积累深厚,作业效率与安全保障能力领先全球。(2) 国内技术短板与发展方向: 国内修井技术的核心短板在于高端设备国产化率低、复杂井况配套工艺不完善、信息化集成水平不足。未来发展需聚焦自主创新,重点攻关高温高压井修井技术与智能井下工具;推进修井作业信息化平台建设,实现数据共享与智能决策;推广绿色修井工艺,平衡作业效率与环保要求,推动修井技术向高效、智能、安全、环保方向转型。

2 石油工程井下作业修井技术优化关键要素与理论支撑

2.1 技术优化原则

石油工程井下作业修井技术优化需坚守四大核心原则,形成多维度协同优化体系。(1) 安全性原则,将井控安全与人员防护置于首位,通过技术升级规避井喷、管柱失效、硫化氢泄漏等风险,构建从井况预判到应急处置的全流程安全防线。(2) 经济性原则,在保障作业质量的前提下,通过简化流程、降低设备损耗、提升作业成功率等方式压缩成本,例如优化工具选型减少耗材浪费,缩短作业周期提升产能恢复效率,实现投入产出比最大化。(3) 环保性原则,契合绿色能源发展战略,优化作业工艺减少钻井液泄漏、废气排放等污染问题,推广可降解化学药剂、废弃物循环利用等技术,降低对周

边生态环境的影响。(4) 高效性原则, 聚焦作业效率提升与产能快速恢复, 通过技术创新与流程再造, 解决传统修井作业周期长、工序衔接不畅等痛点, 保障油井稳定高效生产。

2.2 理论支撑体系

(1) 岩石力学与井筒稳定性理论: 作为修井技术优化的核心基础理论, 其核心价值在于精准把控地层与井筒的相互作用关系。通过测试地层岩石抗压强度、泊松比等关键参数, 结合井深、压力等工况条件, 预判修井过程中地层坍塌、套管变形等风险, 为井眼轨迹优化、钻井液密度选型、套管修复方案制定提供科学依据, 尤其对深井、复杂岩性地层修井作业的安全性与可靠性至关重要。(2) 流体动力学与井下工具设计原理: 流体动力学为修井过程中井筒内流体流动状态调控提供理论指导, 通过分析流体流速、压力分布等参数, 优化洗井、冲砂等作业工艺, 减少流体阻力对作业的干扰。同时, 该理论与井下工具设计深度融合, 指导研发抗高压、抗磨损的打捞工具、封隔器等核心设备, 优化工具结构与工作原理, 提升工具在复杂井下环境中的适配性与作业精度^[2]。(3) 数字化与智能化技术基础: 为修井技术智能化升级提供核心支撑, 是实现作业模式转型的关键理论。大数据技术可整合历史作业数据、井下实时监测数据、设备运行数据等多维度信息, 挖掘作业规律与参数关联; AI技术则通过机器学习、深度学习算法实现故障智能诊断、作业参数动态优化, 推动修井作业从“经验驱动”向“数据驱动”转变, 大幅提升决策科学性与作业智能化水平。

2.3 优化技术路径选择

(1) 工艺流程优化: 核心是通过流程再造减少非生产时间。推行模块化作业模式, 将修井作业拆解为井况诊断、设备部署、核心作业、收尾验收等标准化模块, 实现不同作业场景下的模块快速组合与适配; 采用并行施工理念, 合理统筹多工序衔接, 例如在管柱起下作业的同时开展井下参数监测, 优化人员与设备配置, 大幅缩短作业周期。(2) 设备升级: 聚焦核心设备的性能提升与智能化改造。研发集成自动化钻台、智能送钻系统的高性能修井机, 提升设备在高温高压、复杂地形下的作业能力; 加快智能井下工具研发, 推广应用带传感功能的可变径稳定器、自适应钻头等设备, 实现作业参数实时感知与精准调控, 同时推进设备国产化替代, 降低对进口设备的依赖。(3) 信息化管理: 构建全流程信息化管理体系, 打通数据采集、传输、分析、决策的闭环。通过井下传感器、地面监控设备实时采集压力、温度、设备运行状态等数据, 借助5G、物联网技术实现数据高速

传输; 搭建远程决策平台, 集成专家系统与数据分析模型, 为现场作业提供实时指导, 实现对作业全流程的精准管控, 提升作业效率与安全性^[3]。

3 石油工程井下作业修井技术优化具体措施

3.1 工艺流程优化

(1) 快速诊断与精准定位技术: 整合高精度智能测井设备与三维建模技术, 构建全井筒可视化诊断体系。通过阵列感应测井、超声成像测井等技术精准识别落物类型、卡阻位置及套管破损程度, 结合地层参数建立三维地质模型, 实现井况问题的快速定性定量分析, 避免盲目作业。例如在复杂井下落物打捞中, 借助三维建模模拟打捞路径, 可将诊断时间缩短30%以上, 大幅提升作业针对性。(2) 模块化作业流程设计: 按修井作业全流程拆解为井况诊断、设备部署、核心作业、收尾验收等标准化模块, 针对不同井型与作业类型制定模块化组合方案。通过预制标准化作业单元、优化设备转运与组装流程, 实现各模块的快速衔接与高效切换。同时建立非生产时间管控机制, 减少设备调试、工序等待等无效耗时, 使非生产时间占比降低至20%以下, 显著提升作业整体效率^[4]。(3) 复杂井况解卡与打捞工艺改进: 针对高温高压、深井等复杂井况, 优化解卡与打捞工艺体系。升级液压震击器结构设计, 提升其在极端环境下的冲击力与稳定性, 实现精准可控震击解卡; 研发多功能一体化打捞工具, 集成抓取、切割、研磨等功能, 适配不同类型落物; 采用“化学解卡+机械打捞”复合工艺, 解决顽固卡阻问题, 将复杂井况打捞成功率提升至85%以上。

3.2 设备与工具创新

(1) 高效修井机研发: 聚焦修井机自动化与节能化升级, 研发集成自动化钻台、智能送钻系统的一体化修井机, 实现管柱起下、钻压调节等操作的自动化控制, 减少人工干预。采用节能型动力系统, 搭配变频调速技术与余热回收装置, 降低设备能耗30%以上; 优化设备底盘结构, 提升在山地、沙漠等复杂地形的通行能力, 增强设备适应性。(2) 智能工具应用: 推广应用具备实时感知与自适应调节功能的智能井下工具。可变径稳定器可根据井眼直径动态调整自身尺寸, 保障钻井轨迹稳定性, 减少井眼扩径问题; 自适应钻头通过内置传感器监测地层岩性变化, 自动调节切削角度与转速, 提升钻井效率与钻头使用寿命。同时研发智能丢手工具、可回收桥塞等, 实现工具作业状态的实时监测与远程控制。(3) 连续油管与带压作业技术升级: 升级连续油管材质与制造工艺, 采用高强度耐腐蚀合金材料, 提升管柱在高压、高含硫环境下的承载能力与使用寿命; 优化连续油管作业设备

的集成化程度,实现作业参数的精准调控。完善带压作业技术体系,研发高效密封装置与压力控制模块,扩大带压作业适用范围,减少作业过程中地层流体泄漏风险,实现环保高效作业。

3.3 数字化与智能化提升

(1) 井下作业大数据平台构建:构建覆盖修井全流程的大数据管理平台,整合井下监测、设备运行、历史作业等多维度数据。通过边缘计算技术实现井下数据的实时采集与预处理,采用云计算平台开展数据深度分析,挖掘作业参数与作业效果的关联规律。基于数据分析结果构建决策支持模型,为修井方案优化、设备故障预警提供科学依据,推动作业从“经验驱动”向“数据驱动”转型。(2) 远程监控与自动化控制系统:搭建全流程远程监控体系,通过井下传感器、地面摄像头、无人机巡检等多手段,实现对作业现场、设备状态、井下参数的实时监测。研发井下作业机器人,替代人工完成高危环境下的管柱操作、井口维护等作业;构建远程控制中心,实现修井机操作、作业参数调节的远程精准控制,提升作业安全性与智能化水平。(3) 人工智能在修井方案优化中的应用:将人工智能技术深度融入修井作业全流程,基于机器学习算法构建故障预测模型,通过分析设备运行数据与井下参数,提前预测管柱失效、井漏等故障风险,预警准确率提升至90%以上。利用深度学习技术开展修井方案智能优化,结合井况数据自动匹配最优作业工艺与参数;开发智能专家系统,实现作业故障的快速诊断与解决方案推送,提升问题处置效率^[5]。

3.4 安全与环保技术强化

(1) 井控技术改进:针对高压、高含硫井等高危井况,升级井控技术体系。研发高效高压井快速封堵装置,采用自适应密封结构,实现井口的快速封堵与压力控制;优化钻井液性能,研发高密度、抗污染钻井液体系,提升井眼稳定性与压力控制能力。建立井控风险分级管控机制,结合实时压力监测数据动态调整井控措施,杜绝井喷等重大安全事故。(2) 废弃物处理与绿色修井工艺:推

行绿色修井理念,研发无污染化学解堵剂、可降解钻井液等环保材料,减少作业过程中化学污染物排放。建立修井废弃物一体化处理系统,通过固液分离、化学固化、生物降解等技术,实现钻井液、岩屑等废弃物的无害化处理与资源化利用,处理达标率达到100%。推广清水修井、无土作业等绿色工艺,降低对周边生态环境的破坏。(3) 人员安全防护体系升级:升级人员安全防护装备,配备智能防爆安全帽、便携式有毒有害气体检测仪、耐高温高压防护服等,提升人员个体防护能力。构建智能化应急响应体系,研发应急指挥调度平台,实现应急资源的快速调配与作业现场的远程指挥;定期开展实战化应急演练,提升作业人员对井喷、火灾等突发事件的处置能力,保障人员生命安全。

结束语

石油工程井下作业修井技术优化是应对复杂地质条件、提升开发效益的必然选择。通过工艺流程精细化、设备工具智能化、数字化管控升级及安全环保技术强化等措施,可显著提升修井作业效率、降低成本并降低安全风险。未来需持续推动技术创新与产学研融合,加快高端装备国产化替代,构建绿色智能修井体系,为保障国家能源安全、推动石油工业高质量发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]周阳.石油井下修井作业管理措施及修井技术优化分析[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(3):71-72.
- [2]张江南.石油工程井下作业修井技术及工艺探讨[J].现代工程科技,2022,1(07):15-18.
- [3]何兵.石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化[J].化工管理,2022,(29):55-57.
- [4]牛宁生.石油井下作业管理及修井技术优化分析[J].石化技术,2022,29(06):244-246.
- [5]吴小亮,赵天增,朱宏业.提高井下修井作业施工中质量管理的对策探讨[J].石化技术,2023,30(12):230-232.