

石油工程井下作业修井技术优化策略探讨

赵 鑫

河南省濮阳市中原油田分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是油气田高效开发的核心支撑，当前已形成智能诊断与复合工艺结合的技术体系，但仍存在应用局限、设备老化及人才短缺等问题。通过构建数字孪生仿真系统、研发模块化机器人集群、建立设备全生命周期管理体系、完善人才培养机制及优化作业流程等策略，可实现修井技术从经验驱动向数据驱动的转变，提升作业精准度与效率，为油气田全生命周期开发提供技术保障。

关键词：石油工程；井下作业修井技术；优化策略

引言

石油工程井下作业修井技术对维持油气井持续生产至关重要，其发展与破解井下复杂工况需求紧密相关。尽管当前技术已取得显著进步，但在应用中仍面临诸多挑战，如技术局限性、设备老化更新滞后及专业人才短缺等，制约了修井作业效能的提升。本文围绕石油工程井下作业修井技术的优化策略展开探讨，旨在通过技术创新、设备管理、人才培养及流程优化等方面的改进，为提升修井作业质量与效率提供思路。

1 石油工程井下作业修井技术概述

石油工程井下作业修井技术是维持油气井持续高效生产的核心支撑，其发展始终与井下复杂工况的破解需求紧密联动。这类技术通过精准干预井下管柱、地层及流体状态，实现对井筒完整性的修复与生产潜能的挖掘，在油气田开发全生命周期中扮演着不可替代的角色。当前修井技术体系已突破传统单一作业模式，形成以智能诊断为先导、复合工艺为核心的新型技术架构。借助随钻监测系统与井下机器人的协同作业，可实时捕捉井筒内压力场、温度场的细微变化，为套损修复、落物打捞等关键作业提供毫米级精度的决策依据，这种动态感知能力显著降低了盲目施工带来的地层伤害风险。在工艺创新层面，连续管作业技术的模块化应用重塑了修井效率边界，其柔性管柱配合高压喷射工具，能够在不动管柱的前提下完成井筒清洗、储层改造等多工序作业，配合可降解桥塞等环保型工具，既减少了作业液对地层的污染，又缩短了修井周期与油气井停产时间。针对深井、超深井的特殊环境，修井技术正朝着耐温耐压材料与自适应控制算法的融合方向演进，新型钛合金工具与自适应节流系统的结合，可在高温高压条件下保持稳定的作业性能，有效应对深井井眼缩径、井喷风险等棘手问题，为深层油气资源的经济开发提供了技术保

障。修井技术的创新不仅体现在硬件设备的升级，更体现在作业理念的转变，通过数字孪生技术构建的虚拟井筒模型，能够对修井方案进行预演与优化，将传统经验驱动的作业模式升级为数据驱动的精准施工，这种变革使修井作业从被动应对故障转向主动预防风险，为油气田的长期稳产注入了持续动能。

2 石油工程井下作业修井技术现状分析

2.1 技术应用存在局限性

在石油工程井下作业修井领域，尽管技术不断革新，但应用层面仍存在诸多局限。以常见的套管修复技术为例，面对复杂套损状况，如套管严重变形、多处破裂等，现有的常规修复工艺，像是机械整形、补贴等，往往难以达到理想效果。机械整形在处理大变形套管时，受工具强度与地层应力影响，易出现整形不彻底或再次变形问题，导致修复后套管的通径难以满足后续生产要求，阻碍井下工具的顺利下入与作业开展。补贴技术虽能在一定程度上修复套管破损，但对于深层高温高压井，补贴材料的耐久性面临严峻考验，高温使材料性能退化，高压易造成补贴部位密封失效，从而限制了该技术在这类特殊井况中的广泛应用。地层特性的复杂多变也给修井技术应用带来阻碍。在疏松砂岩地层，出砂问题频繁发生，常规的防砂修井技术，如砾石充填、绕丝筛管等，在高渗透、强出砂地层中，防砂效果难以持久。砾石充填易因地层砂迁移导致砾石层堵塞或流失，绕丝筛管也可能被细颗粒砂体堵塞，进而影响油井产能，甚至引发砂埋油层、卡管柱等严重事故，使得这类技术在应对复杂地层出砂时显得力不从心。对于低渗透地层的修井增产作业，常规的酸化、压裂技术受地层渗透率低、非均质性强等因素制约，难以形成有效的渗流通道，增产幅度有限，无法充分挖掘低渗透油藏的潜力，这无疑限制了修井技术在提升低渗透油井产量方面

的应用成效^[1]。

2.2 设备老化与更新滞后

石油工程井下作业环境恶劣,设备长期在高温、高压、高腐蚀的工况下运行,加速了设备老化进程。许多油田的修井设备使用年限较长,部分关键部件磨损严重,性能大幅下降。例如,修井机的绞车系统,长期承受重负荷起下作业,钢丝绳磨损、断丝现象频发,制动系统的制动片磨损加剧,制动可靠性降低,在起下管柱过程中,极易出现管柱失控坠落风险,严重威胁作业安全。老化的动力设备,如柴油机,燃烧效率降低,能耗增加,排放超标,不仅增加了作业成本,还对环境造成污染,且动力输出不稳定,难以满足复杂修井作业对设备动力的精准需求。在设备更新方面,由于资金投入大、技术研发周期长等因素,导致设备更新滞后。新型修井设备,如自动化修井机、智能连续管作业设备等,虽具备高效、安全、精准等优势,但因成本高昂,许多企业难以大规模引进。老旧设备的升级改造同样面临困境,第一,部分老旧设备设计理念陈旧,结构布局不合理,改造难度大;第二,改造所需的技术与配件供应不足,使得改造后的设备性能提升有限,无法与新型设备相媲美。这使得作业现场仍大量依赖传统老旧设备,不仅作业效率低下,起下管柱速度慢,辅助作业时间长,而且劳动强度大,人工操作环节多,安全风险高,严重制约了修井作业的整体效能与质量提升。

2.3 专业技术人员短缺

石油工程井下作业修井技术专业性强,对技术人员的知识储备与实践经验要求极高。然而,当下行业内专业技术人员短缺现象较为突出。随着油气田开发向深层、超深层以及复杂地质区域拓展,修井作业面临的技术难题愈发复杂,如超深井的高温高压井控技术、水平井的精细修井工艺等,需要技术人员具备深厚的石油工程专业知识,熟悉地质、力学、材料等多学科领域,并能将理论知识灵活应用于实际作业。现实中,多数技术人员知识结构单一,对新兴修井技术与复杂井况应对经验不足,在面对复杂修井难题时,难以迅速制定有效的解决方案。修井作业的艰苦环境与高风险特性,使得行业对专业人才的吸引力下降。野外作业条件简陋,工作时间不规律,长期与家人分离,加之作业过程存在井喷、硫化氢中毒等安全风险,导致许多高校石油工程专业毕业生不愿投身修井一线。企业内部对修井技术人员的培养体系不完善,培训内容与实际作业需求脱节,培训方式单一,缺乏实践操作与新技术应用培训,使得新入职人员成长缓慢,难以快速填补专业技术人员缺口。

专业技术人员的短缺,导致作业现场技术指导不足,施工过程易出现操作不规范、技术应用不当等问题,影响修井作业质量与效率,增加了作业成本与安全风险,成为制约修井技术发展与应用的关键因素^[2]。

3 石油工程井下作业修井技术优化策略

3.1 推动技术创新与升级

(1) 构建基于数字孪生的修井工艺仿真系统,整合历史作业数据与实时监测参数,于虚拟空间开展修井工具和井筒环境的动态耦合分析,达成套损修复等工艺参数预优化。此虚实交互模式可大幅降低传统试错成本,为复合工艺设计提供力学、环境、操作等多维度验证支撑。结合量子点标记技术打造新型井筒诊断工具,借助纳米级荧光探针追踪裂缝与流体规律,为储层伤害评估提供可视化依据,助力精准制定修井方案。(2) 研发模块化连续管作业机器人集群,搭载多样功能模块的机器人协同,可完成井筒检测、修复、改造一体化施工。其自主避障与群体智能控制,能灵活适应井眼轨迹变化,在水平井段作业优势显著高于传统技术。配套开发可循环使用的相变储能修井液,利用相变材料的吸热放热特性平衡井筒温度场,解决高温井作业时的流体性能衰减问题,同时降低对储层的热损伤。(3) 突破超深井修井的材料-结构-控制一体化技术,采用梯度功能材料制造井下工具,材料成分梯度分布实现抗高温与韧性协同优化,配合自适应压力补偿系统,确保工具在极端环境下稳定工作。开发基于深度学习的井眼风险预警模型,分析随钻数据异常模式,提前预测井喷、井塌等风险,为应急处置争取关键时间窗口。

3.2 加强设备管理与更新

(1) 建立修井设备全生命周期数字档案,利用物联网传感器采集关键部件实时数据,结合疲劳损伤模型计算剩余寿命,实现从故障维修到预测性维护的转变,这种动态管理模式可显著缩短设备停机时间。引入区块链技术构建设备配件溯源系统,确保关键部件的质量可追溯,同时优化配件库存管理,实现供需精准匹配。(2) 推行修井设备模块化升级方案,针对老旧修井机的动力系统、控制系统进行模块化替换,保留仍具使用价值的机械结构,在降低更新成本的同时提升设备自动化水平。开发便携式智能检测终端,集成红外热成像与超声波探伤技术,能快速完成绞车、井架等关键设备的状态评估。该终端无需繁琐拆卸设备即可检测,相比传统方法,大幅提升了检测效率,操作更加便捷高效。(3) 构建区域性修井设备共享平台,运用智能调度算法对区域内连续管作业车、压裂设备等大型装备进行统筹安排,

达成跨油田的资源灵活调配，有效提升设备利用率，实现资源高效利用。开发设备远程运维系统，借助5G+边缘计算技术实现对作业设备的远程诊断与参数调试，专家无需抵达现场即可指导解决设备故障，缩短故障处理周期^[3]。

3.3 完善人才培养与引进机制

(1) 打造沉浸式修井技术培训中心，运用VR/AR技术搭建模拟井场，逼真还原高温高压井控、复杂套损修复等作业场景，让学员在虚拟环境中积累实战经验，再辅以力反馈设备增强操作真实感，加速技术人员技能提升。建立动态案例库，实时更新国内外最新修井技术案例与解决思路，通过案例解析与模拟演练提升学员的问题解决能力。(2) 实施理论现场协同导师人才培育计划，为青年技术人员分别配置理论导师与现场导师。理论导师专注于帮助其搭建多学科知识架构，现场导师着重分享复杂井况应对经验，借助项目制学习推动储层地质学、材料力学等理论与修井实践紧密结合。定期组织技术比武与创新工坊活动，鼓励技术人员围绕修井难题开展创新攻关，对优秀方案给予资金支持并推动现场应用。(3) 建立柔性人才引进机制，与高校、科研院所共建修井技术创新实验室，通过项目合作柔性引进专家团队，重点解决智能诊断、新型材料应用等技术瓶颈。开发修井技术数字知识库，整合设备手册、工艺规范、典型案例等资源，采用知识图谱技术实现精准检索与智能推荐，为技术人员提供随时随地的知识支持，降低对资深专家的依赖度。

3.4 优化作业流程与管理模式

(1) 构建修井作业全流程数字化管控平台，整合作业计划、物资调配、现场施工等环节的数据，通过智能调度算法优化工序衔接，减少非生产时间。例如在连续管作业时，利用平台预先做好井口装置和管柱参数的匹配校验，能明显减少设备准备所需时长，加快后续作业流程推进速度。引入数字签批系统实现作业指令与验收报告的电子化流转，提升流程效率的同时确保可追溯性。(2) 推行修井作业标准化模块，将套铣、打捞、

封隔器更换等常规作业分解为标准化工序单元，制定统一的操作规范与质量标准，配合智能检查工具实现关键步骤的自动校验，减少人为操作差异导致的质量波动。针对复杂井况建立作业方案分级评审机制，根据井深、压力等参数确定评审等级，快速调动相应层级的技术资源，平衡方案科学性与决策效率。(3) 开发修井作业能效优化系统，深入剖析设备能耗和作业参数间的内在联系，构建能耗预测模型。依据该模型，在保障施工要求的基础上，动态调节动力输出，达成作业能耗的显著降低，提升能源利用效率。构建环境风险评估矩阵，根据井场周边敏感目标分布与作业类型，制定差异化的环保防控措施，如针对含硫井优化作业液循环系统，减少硫化氢无组织排放^[4]。

结语

综上所述，石油工程井下作业修井技术的优化是一项系统工程，需从技术、设备、人才及管理多维度协同发力。通过数字孪生、智能机器人等技术创新突破应用局限，借助全生命周期管理与共享平台提升设备效能，依托沉浸式培训与柔性引才破解人才困境，结合数字化管控与标准化模块优化作业流程，可推动修井技术向智能化、精准化、高效化转型，为深层油气资源开发及油气田长期稳产提供强有力的技术支撑与创新动能。

参考文献

- [1] 李志强, 乔燕, 吴良军, 等. 石油工程井下作业修井技术优化策略探讨[J]. 石油化工建设, 2025, 47(1): 169-171.
- [2] 魏晓强, 吴建, 田志召. 石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化的策略探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(22): 178-180.
- [3] 刘江波. 浅析石油工程修井作业技术及工艺优化[J]. 石油石化物资采购, 2024(1): 100-102.
- [4] 杨鹏涛, 徐锋波, 王军. 石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(15): 163-164.