

石油工程井下修井技术现状及工艺优化

李 斌

中石化中原工程公司井下特种作业公司 河南 濮阳 457001

摘要: 随着石油工程向深地、超深地领域拓展,井下修井技术面临更高挑战。本文聚焦石油工程井下修井技术,首先概述井下修井工作,接着阐述高效套管修复、智能打捞等关键技术。分析当前技术发展现状,指出面临技术瓶颈、环保要求提高、人才短缺及区域协同效率低等问题。针对这些问题,提出电动切割技术突破、小井眼修井工艺创新、修井系统协同作战流程优化、终止并治理专项攻坚及产研融智研发机制等工艺优化策略,旨在推动石油工程井下修井技术发展,提升作业效率与质量,满足行业需求。

关键词: 石油工程; 井下修井; 技术现状; 工艺优化

引言: 石油作为重要能源,在经济发展中占据关键地位。石油工程井下修井作业是保障油井正常生产、提高采收率的重要环节。随着石油行业不断发展,对井下修井技术提出更高要求。当前,井下修井面临诸多挑战,如复杂地质条件、老旧油井增多等,传统技术已难以满足需求。同时,环保政策趋严、市场竞争加剧,促使行业必须提升技术水平。在此背景下,深入探讨石油工程井下修井技术现状,并研究工艺优化策略,对提高石油工程效益、推动行业可持续发展具有重要意义。

1 石油工程井下修井的概述

石油工程井下修井是石油开采过程中保障油井持续、高效生产的关键环节,旨在恢复或提升油井的生产能力,确保油气资源稳定开采。井下修井作业涵盖范围广泛,包括对井内套管、油管等井下管柱的检测、修复与更换,处理井下落物、卡钻等事故,以及调整井内流体性质、改善井底流场等。其目的在于解决油井在生产过程中出现的各类问题,如套管变形、破损导致的井筒完整性受损,井下工具故障引发的生产中断,或是地层压力变化造成的产液异常等。从作业方式看,井下修井分为常规修井和特殊修井。常规修井主要针对常见问题,采用成熟工艺和设备;特殊修井则应对复杂地质条件、特殊事故等,需创新技术和定制化方案。随着石油行业向深层、超深层及复杂油气藏开发,井下修井面临着更高难度和更大挑战,对技术、设备及人员素质要求日益提升。高效、安全、环保的井下修井作业,成为保障石油工程顺利推进、实现油气资源经济有效开发的重要支撑^[1]。

2 石油工程井下修井的关键技术

2.1 高效套管修复技术

高效套管修复技术是石油工程井下修井的核心技术之一,旨在解决套管损坏导致的井筒完整性受损问题。

常见的高效修复方法包括波纹管补贴技术和深部取套技术。波纹管补贴技术通过将低碳钢波纹管下入套管损坏位置,利用专用工具使其贴合套管内壁,并通过粘结剂实现密封固定,可有效修复套管局部变形、破裂等问题。深部取套技术则针对套管错断、严重腐蚀等无法通过补贴修复的情况,通过专用设备将损坏套管段取出并更换新套管,彻底恢复井筒结构完整性。两种技术均需结合套管损伤检测数据制定精准施工方案,并配套使用高性能水泥浆、密封材料等,确保修复后套管承压能力达到设计要求,为后续修井作业提供安全保障。

2.2 智能打捞系统

智能打捞系统是提升井下作业效率的关键技术,其核心在于通过智能化设备与数字化控制实现落物精准定位与高效打捞。该系统集成电动打捞工具、可视化交互模块及智能决策算法,可实时监测井下环境参数并自动调整打捞策略。例如,电动打捞工具通过电机驱动实现旋转、震击等复合动作,配合可变径抓捞机构适应不同形状落物;可视化交互系统通过井下摄像头与地面监控终端联动,为操作人员提供高清井下影像,辅助判断落物状态;智能决策算法则基于历史数据与实时反馈,自动优化打捞路径与工具组合。该系统显著提高了复杂井况下的打捞成功率,同时降低人工干预风险,推动修井作业向自动化、精准化方向发展。

2.3 修压一体化工艺

修压一体化工艺将井筒修复与储层改造技术深度融合,形成“疏通-重构-改造”全流程解决方案。该工艺首先通过高压水力冲砂、机械钻磨等技术清除井筒内堵塞物,恢复井筒流通通道;随后采用尾管固井、膨胀管补贴等技术重构井筒结构,提升井壁稳定性;最后结合多级压裂、暂堵转向压裂等储层改造手段,实现产层高

效沟通。其技术优势在于通过单次作业完成多项任务,减少起下钻次数与作业周期,同时利用井筒修复后形成的稳定通道,提高压裂液波及体积与改造体积。该工艺特别适用于老井复活、复杂断块油藏开发等场景,可显著提升单井产量与采收率。

2.4 连续油管技术

连续油管技术以柔性连续管为核心,通过连接不同功能工具实现洗井、压裂、修井、测井等多元化作业,被誉为“万能作业机”。其技术特点包括:一是作业效率高,连续管可连续下入井筒,无需反复起下钻,大幅缩短作业周期;二是适应性强,可通过小井眼、水平井等复杂井型,并配套内穿电缆、水力振荡器等工具实现带压作业;三是环保性好,密闭作业流程减少压井液用量,降低对地层污染。该技术已形成完整工具链,涵盖钻磨、打捞、压裂、测井等200余种专用工具,并配套智能控制软件实现作业参数实时优化。随着技术升级,连续油管正向超深井、超高压、智能化方向拓展,成为推动修井作业模式变革的关键力量^[2]。

3 石油工程井下修井技术现状

3.1 技术瓶颈制约发展

当前石油工程井下修井技术面临多重技术瓶颈。深井、超深井修井中,高温高压环境导致工具材料性能衰减严重,如密封件易老化失效,影响作业可靠性。复杂地质条件下,井下落物形态多样,现有打捞工具适应性不足,抓捞成功率受限。智能技术应用仍处于初级阶段,井下传感器精度与抗干扰能力不足,数据传输延迟导致实时决策困难。自动化设备可靠性待提升,机械故障频发影响作业连续性。此外,修井工艺与储层改造技术融合不足,难以实现“修复-改造”一体化作业,制约老井增产效果。

3.2 环保要求日益严苛

环保法规升级对井下修井作业提出更高要求。传统修井工艺中,压井液用量大且成分复杂,含化学添加剂的废水处理成本高,易造成土壤与地下水污染。废旧油管、套管回收率低,金属资源浪费严重,同时切割作业产生的粉尘与废气排放超标。噪声污染控制方面,动力设备与冲击工具运行时产生的分贝值远超居民区限值,引发周边投诉。此外,修井作业产生的固体废弃物(如岩屑、废旧密封件)分类处理不规范,混合填埋导致二次污染。绿色修井技术推广缓慢,生物降解压井液、低噪声设备等环保产品成本较高,企业应用积极性不足,环保与经济效益的平衡成为行业痛点。

3.3 人才短缺与技术培训不足

井下修井领域面临专业人才断层危机。高校石油工程专业设置与行业需求脱节,毕业生实践技能不足,难以直接胜任复杂井况作业。企业内经验丰富的技师年龄偏大,年轻技术人员培养周期长,导致关键岗位人才青黄不接。技术培训体系不完善,现有培训内容侧重理论,缺乏井下模拟设备与实景操作,学员难以掌握高压环境下的应急处理能力。此外,跨学科人才(如机械-地质复合型人才)匮乏,制约智能打捞、修压一体化等新技术落地。

3.4 区域协同效率待提升

跨区域修井作业中,协同效率低下问题突出。不同地区技术标准差异大,设备接口不兼容,导致工具调运与组装耗时增加。信息共享机制缺失,作业方、地质方与监理方数据传递延迟,影响决策时效性。物流配送网络不完善,偏远井区设备与材料供应周期长,停工待料现象频发。区域间技术资源分配不均,发达地区设备先进但任务饱和,欠发达地区设备陈旧却闲置,整体利用率不足。此外,应急响应机制不健全,突发井况下跨区域支援流程繁琐,协调成本高^[3]。

4 石油工程井下修井技术工艺优化

4.1 电动切割技术突破

电动切割技术突破为井下修井提供高效解决方案。传统机械切割依赖液压驱动,存在能耗高、响应慢、切割精度低等问题。新型电动切割工具以电机为核心,通过高扭矩输出与智能控制实现精准切割。其优势显著:一是切割效率提升,电机转速可实时调节,适应不同材质(如碳钢、合金钢)与管径($\varphi 73\text{--}\varphi 339.7\text{mm}$)的切割需求,单次作业时间缩短30%以上;二是环保性增强,电动驱动无需液压油,避免油液泄漏污染,同时降低噪声与振动,符合绿色修井要求;三是智能化升级,集成传感器与算法,可自动识别管柱偏心、变形等异常,动态调整切割路径,成功率提升至98%。此外,电动切割工具采用模块化设计,支持快速更换刀片与驱动模块,适应井下复杂工况。目前,该技术已在深井、超深井修井中广泛应用,配合连续油管作业,实现“不下钻杆、带压切割”,显著降低作业风险与成本,推动修井工艺向高效、安全、智能化方向演进。

4.2 小井眼修井工艺创新

小井眼修井工艺创新破解了窄井筒作业难题。随着油田开发向深层、致密油气藏延伸,小井眼(井径 $\leq 152.4\text{mm}$)数量激增,但传统修井工具因尺寸过大无法下入,导致作业受限。创新工艺聚焦“微型化”与“多功能化”:一是开发超小直径工具链,如 $\varphi 89\text{mm}$ 打捞筒、

φ73mm磨鞋等,适配小井眼空间;二是集成化设计,将冲砂、打捞、套管修复等功能集成于单一工具,减少起下钻次数,例如“冲捞一体工具”可同步完成井筒清洗与落物抓捞;三是应用连续油管技术,利用其柔性特点实现小井眼全井段覆盖,配合水力振荡器降低摩阻,提升作业深度。此外,针对小井眼井壁稳定性差的问题,研发低伤害、高携砂能力的水基修井液,减少对地层污染。创新工艺已成功应用于页岩气、致密油等小井眼修井作业,单井作业周期缩短40%,成本降低25%,为非常规油气藏高效开发提供技术支撑。

4.3 修井系统协同作战流程

修井系统协同作战流程通过数字化整合提升作业效率。传统修井作业中,地质、工程、安全等部门信息孤岛严重,导致决策延迟与资源浪费。协同流程以“数据驱动”为核心,构建一体化作业平台:一是建立井下数字孪生模型,实时映射井筒状态(如压力、温度、落物位置),为多部门提供统一数据源;二是开发智能调度系统,根据作业需求自动匹配设备、人员与物资,例如通过AI算法优化打捞工具组合,减少试错成本;三是强化现场-远程协同,专家可通过5G网络实时指导复杂操作,如远程操控机械臂完成高危作业,同时利用AR技术实现井下场景可视化,提升沟通效率。此外,协同流程纳入安全预警模块,通过传感器监测作业风险(如硫化氢泄漏、井控异常),自动触发应急预案。该流程已在多家油田试点,作业周期平均缩短15%,安全事故率下降30%,推动修井作业向“精准化、安全化、协同化”转型。

4.4 终止井治理专项攻坚

终止井治理专项攻坚聚焦长期停产井的资源再利用。我国油田存在大量终止井(占油井总数20%以上),因井筒损坏、地层能量枯竭等原因废弃,但其中部分井仍具备潜在开发价值。攻坚行动通过“评估-修复-改造”三步法实现资源盘活:一是精准评估,利用测井、岩心分析等技术判断井筒完整性(如套管变形程度、地层渗透率)与剩余油气储量,筛选出可复活井;二是高效修复,针对不同损伤类型采用定制化技术,如深部取套修复严重错断井、化学堵漏治理窜槽井;三是储层改造,结合水力压裂、多级暂堵转向等技术激活低渗透地层,提升单井

产量。此外,治理过程严格遵循环保标准,对废弃物进行无害化处理,避免二次污染。该行动不仅延长了油田生命周期,还为老油田降本增效提供新路径。

4.5 产研融智研发机制

产研融智研发机制加速修井技术迭代升级。传统研发模式中,企业、高校与科研院所存在目标脱节、资源分散等问题,导致技术转化周期长。融智机制以“需求导向、协同创新”为原则,构建“企业出题-高校解题-院所验证-市场推广”闭环:一是企业主导需求分析,基于现场痛点提出技术课题(如深井高温工具研发、智能打捞系统优化);二是高校与院所联合攻关,利用学科交叉优势突破关键技术,例如机械工程与材料科学团队共同开发耐高温合金材料;三是建立中试基地,模拟井下环境对新技术进行验证,确保可靠性;四是通过技术转让、联合孵化等方式推动成果落地,例如企业与高校共建“修井装备创新中心”,加速电动切割工具产业化^[4]。

结束语

石油工程井下修井技术已进入智能化、高效化与绿色化协同发展的新阶段。电动切割、连续油管、修压一体化等核心技术的突破,显著提升了复杂井况下的作业效率与安全性;而终止井治理、小井眼工艺等专项攻坚,则有效盘活了存量资源。未来,需持续深化产研融智机制,推动“智能工具+数字孪生+绿色工艺”的深度融合,同时强化跨区域协同与标准化建设,构建覆盖全生命周期的修井技术体系。通过技术创新与模式升级,修井技术将进一步成为保障油田稳产、推动行业可持续发展的关键支撑。

参考文献

- [1]王宝亮.井下作业修井技术现状及新工艺优化探讨[J].科学与财富,2022,14(10):115-117.
- [2]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.
- [3]刘雪薇.石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(12):217-218.
- [4]石勇.石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化[J].建筑工程技术与设计,2022.168-169