

石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化

孙 林

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涵盖常规与特殊工况下的多种核心技术。本文分析当前修井技术及工艺存在的技术与工况适配性、工艺实施及装备与技术协同短板,提出常规与特殊工况修井工艺精准化、针对性优化,装备与工艺协同优化,以及储层保护导向下的工艺优化方向,并探讨智能化、绿色环保、复合型技术融合及极端工况适配等发展导向。

关键词: 石油工程; 井下作业; 修井技术; 工艺优化; 发展导向

引言: 随着油气资源开发的不断深入,石油工程井下作业修井技术面临着日益复杂的地质条件和工况挑战。修井作业作为油气田开发过程中的重要环节,其技术水平和工艺质量直接关系到油气井的生产效益和安全稳定。当前,修井技术及工艺在应对复杂工况、提升作业效率及保护储层等方面仍存在诸多不足。因此,深入分析修井技术及工艺现状,探讨优化方向和发展导向,对于推动修井技术的进步和油气田的可持续发展具有重要意义。

1 井下作业修井核心技术体系及应用现状

1.1 常规修井核心技术类型及应用场景

打捞与解卡技术核心形式涵盖套铣打捞、震击解卡及电动切割等,适配管柱卡阻、井下落物等故障处置。依据落物类型与卡阻程度选择对应工艺,精准控制作业参数,将工具与套管接触压力控制在5-15MPa以内,以规避套管损伤^[1]。洗井、冲砂技术核心流程包括循环方式优化与参数调控,正反向循环结合负压捞砂工艺提升除砂效率,应用边界受地层漏失情况与井型结构限制,需匹配地层压力特性划定作业范围。修井液体系分为清水、卤水及低伤害型等,核心性能需适配地层压力、岩性及环保要求,通过调控黏度与密度平衡地层能量,防止地层污染与井壁失稳。套管修复与加固技术核心方式包含液压整形、胀管补接及取换套施工,针对套管变形、腐蚀穿孔等问题,依托精准力学分析优化工具结构,提升修复后套管承载能力与密封性。

1.2 特殊工况修井技术应用态势

深井、超深井修井技术核心要点聚焦工具耐高温耐压性能提升与作业精度控制。工具耐温需达到150-200℃,耐压能力达到100-140MPa,优化管柱结构设计降低井下摩擦,强化参数实时监测以应对复杂地层环境。水平井、定向井修井技术适配难点集中在管柱输送阻力与工具下入精准

度。水平井管柱输送阻力较直井增加40%-60%,需借助导向工具与分段处理技术,解决井段摩擦损耗与局部故障处置难题。高含硫、高压等高危井修井技术要求强化井控安全与远程操作,配置专用防喷设备与风险防控方案。通过电压电流精准调节,将井口压力控制在安全范围5-10MPa内,实现安全作业。老井、低效井修复技术核心方向侧重井筒完整性恢复与产能提升。结合小修代大修工艺优化,开展套损防治与地层改造技术融合,可使老井产能提升20%-40%,挖掘剩余开采潜力。

1.3 修井配套装备与技术协同现状

主力修井设备技术特性与井深、工况需求适配,依据作业吨位选择对应机型。对于井深3000-5000m的井,需选择起升能力100-200t的修井机,强化设备动力性能与稳定性以满足复杂作业要求,优化装备布局提升场地适配能力。智能化装备在修井作业中的融合进展体现在远程监测与智能调控,依托传感器与大数据技术实现井下参数实时采集。传感器采样频率可达10-20Hz,数据传输延迟控制在1s以内,通过算法优化动态调整施工参数。专用配套工具与核心技术适配性持续提升,定制化套铣筒、剪切捞筒等工具适配不同故障类型,电动切割工具与电缆传输技术结合优化作业效率,工具全生命周期管控保障与核心工艺的协同适配,构建标准化工具储备与调用体系。

2 当前修井技术及工艺存在的核心问题

2.1 技术与工况适配性矛盾

复杂地质条件下技术适配不足体现在深层超深层储层高温高压环境中,当储层温度超过180℃,压力超过120MPa时,现有工艺难以兼顾作业安全性与有效性^[2]。储层埋深增加伴随岩性致密化、渗透率降低,传统修井技术应对井塌井漏等风险的能力有限,缺乏针对性地层适应性调控手段。特殊井型修井技术针对性欠缺集中在

长水平段水平井及老井改造中，水平井水平段长度超过1000m时，水平井管柱输送与故障定位缺乏精准技术支撑，老井长期开采导致的套损老化问题，现有技术难以实现高效修复与产能协同提升。

2.2 工艺实施中的核心短板

工艺实施过程中的核心短板严重制约了修井作业的整体效能与质量提升。深入剖析这些短板，有助于精准施策，推动修井工艺的持续优化。作业流程衔接不畅源于各专业环节壁垒未完全打破，设计与施工环节衔接脱节，增加后期技术调整难度，拖累整体作业进度。流程管控缺乏系统性优化，各环节参数传递存在延迟，进一步加剧效率制约问题。工艺实施对储层保护的不足表现为入井液侵入、水相圈闭等损害，部分修井工艺忽视储层敏感性特征，缺乏全过程保护理念，导致储层渗透率下降，影响油井长期产能与经济寿命。

2.3 装备与技术协同短板

装备与技术协同短板是当前修井领域面临的又一重要挑战，影响着作业的可靠性与稳定性。只有加强装备与技术的深度协同，才能充分发挥各自优势，提升修井作业的综合水平。装备性能与工艺要求的协同性不足凸显在极限工况中，现有装备难以匹配深层超深层作业的大负载、超高压需求，关键部件磨损失效加快，服役可靠性不足。装备动力性能与工艺参数调控不匹配，无法充分发挥工艺技术优势。智能化装备与传统工艺融合不充分，智能传感器易受工况干扰导致数据采集偏差，算法模型与现场工艺适配度不够，难以实现流程自主优化，多数智能化装备仍处于辅助操作层面，未形成深度协同效应。

3 井下作业修井工艺优化核心方向

3.1 常规修井工艺精准化优化

常规修井工艺涵盖打捞、解卡、洗井冲砂及修井液体系应用等多个环节，精准化优化是提升修井效率与质量的关键。在打捞、解卡工艺方面，需对现有流程进行深度剖析，去除冗余步骤，实现流程精简^[3]。通过引入先进的力学分析模型与智能算法，对打捞工具的受力情况进行精准模拟，提升打捞操作的精度，降低工具与井下物体的碰撞风险，确保打捞作业一次成功率。洗井冲砂工艺中，参数优化是强化效果的核心。需综合考虑井深、井径、砂粒粒径及分布等因素，对冲砂液排量、压力、冲砂时间等参数进行动态调整，实现冲砂效率最大化。修井液体系性能优化需兼顾功能性与环保性，通过研发新型添加剂，提升修井液的携砂能力、润滑性能及稳定性，同时降低对环境的污染，满足日益严格的环保

要求。

3.2 特殊工况修井工艺针对性优化

特殊工况下的修井作业面临诸多挑战，需进行针对性优化以适应复杂环境。特殊工况的多样性决定了优化工作必须具有高度的针对性和专业性。极端井况如高温、高压、高含硫等条件下，修井工艺需进行适配性调整。研发耐温200-250℃、高压150-200MPa、抗腐蚀的修井工具与材料，优化作业流程，确保在极端环境下修井作业的安全性与可行性。高危井修井工艺需强化安全性能，通过引入实时监测与预警系统，对井下压力、温度、气体浓度等参数进行实时监测。监测频率达到5-10次/分钟，及时发现安全隐患并采取应对措施。老井修复工艺需注重高效化改进，通过采用先进的测井技术与数据分析方法，精准定位老井存在的问题，制定针对性的修复方案，提升修复效率与质量。

3.3 装备与工艺协同优化

装备与工艺的协同优化是提升修井作业整体效能的重要途径，二者相互促进。只有实现装备与工艺的深度协同，才能充分发挥各自优势，提升修井作业的综合竞争力。需对装备参数与修井工艺的匹配度进行深入分析，通过调整装备的工作参数，使其更好地适应修井工艺的需求。智能化装备与工艺的深度融合是未来发展趋势，通过引入物联网、大数据、人工智能等技术，实现修井装备的智能化控制与远程监控，提升作业的自动化水平与决策的科学性。专用工具的定制化优化需紧密结合修井工艺的需求，通过与工具制造商的紧密合作，开发出符合特定修井场景需求的专用工具，提升工具的适用性与作业效率。

3.4 储层保护导向下的工艺优化

储层保护是修井作业中不可忽视的重要环节，关乎油气井的长期生产效益。在修井作业中，必须将储层保护贯穿始终，确保油气井的可持续发展。低伤害修井工艺的构建与应用需从修井液体系、作业工具及作业流程等多方面入手，通过研发低伤害修井液、优化作业工具设计、规范作业流程等措施，降低修井作业对储层的伤害。作业流程中储层保护环节需进一步强化，通过引入先进的监测技术，对储层压力、渗透率等参数进行实时监测，及时调整作业参数，确保储层在修井作业过程中不受损害，保障油井的长期生产能力。

4 修井技术及工艺优化的发展导向

4.1 智能化发展导向

明确修井技术及工艺优化的发展导向，能够为行业的长远发展指明方向。在科技变革与能源需求变化的双

重驱动下,把握正确的发展导向至关重要^[4]。智能化发展导向是未来修井技术的重要趋势,智能感知技术与修井工艺的融合聚焦多维度参数精准捕获,升级井下传感器耐温耐压性能,拓宽感知范围与数据采集精度。将传感器耐温提升至200-250℃,耐压提升至150-200MPa,数据采集精度提高20%-30%,实现井内工况、工具状态及地层响应的实时捕捉。基于感知数据构建工艺调控模型,通过数据交互支撑工艺决策优化,推动修井作业从经验驱动转向数据驱动。自动化作业流程的构建侧重关键环节无人化操作升级,优化管柱起下、工具投放等环节的自动化控制逻辑,完善设备联动调控机制,减少人为干预带来的操作偏差。通过流程自动化重构缩短作业周期,提升修井作业的标准化与规范化水平,适配复杂工况下的高效作业需求。

4.2 绿色环保发展导向

绿色环保发展导向符合时代发展潮流,也是修井行业可持续发展的必然要求。在全球环保意识日益增强的背景下,修井作业必须积极践行绿色发展理念。环保型修井液与工艺的推广聚焦低污染、可循环特性升级,研发生物降解型处理剂替代传统化学药剂,优化修井液配方以降低对地层与周边环境的不良影响。推进修井液循环利用技术完善,构建高效回收处理体系,提升资源利用率的同时减少排放总量。作业废弃物减量工艺的创新围绕源头管控与过程减量展开,优化施工工艺减少废弃物生成,研发高效分离与无害化处理技术,实现废弃物减量化、资源化与无害化处置。贴合环保法规要求,推动修井作业与生态保护协同发展,构建绿色修井技术体系。

4.3 复合型技术融合导向

复合型技术融合导向能够整合各方优势,提升修井作业的综合处置能力。在面对日益复杂的修井难题时,单一技术往往难以胜任,复合型技术融合成为必然选择。多技术融合的复合型修井工艺构建注重不同领域技术的互补适配,整合修井作业与地层改造、井筒完整性治理等技术,形成一体化工艺方案,解决单一技术难以应对的复杂故障。通过工艺融合打破技术壁垒,提升对复杂工况的综合处置能力,实现修井作业与产能提升的协同推进。跨领域技术在修井工艺中的应用延伸聚焦新

能源、新材料及信息技术的跨界赋能,引入新型高强度轻量化材料优化工具与管柱性能,借助数字孪生技术构建井内虚拟场景,模拟工艺实施效果并优化参数设置,推动修井技术向多维度融合升级。

4.4 极端工况适配导向

极端工况适配导向是应对未来复杂油气勘探开发环境的关键举措。随着油气资源开发向极端环境拓展,极端工况适配能力成为修井技术的核心竞争力^[5]。极端环境下修井技术的创新聚焦极限条件下的性能突破,针对超深、超高温高压及极地等极端环境,优化工具结构与材质选型,提升技术装备的耐候性与可靠性。研发专项工艺方案适配极端环境下的故障处置需求,突破传统技术的应用局限。通用工艺的极端工况适配改造侧重现有工艺的适应性升级,通过参数优化、工具改良及流程调整,增强通用工艺对极端工况的适配能力,降低专项技术研发成本。建立通用工艺适配改造的标准化体系,实现不同极端工况下的快速技术响应,保障作业安全与效率。

结束语

石油工程井下作业修井技术及工艺优化是持续发展的过程。通过精准化、针对性优化常规与特殊工况修井工艺,加强装备与工艺协同,注重储层保护,以及顺应智能化、绿色环保、复合型技术融合、极端工况适配等发展导向,能够有效提升修井作业的效率与质量,降低作业成本与风险,为石油工程的高效、稳定、可持续发展提供坚实有力的技术支撑。

参考文献

- [1]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.
- [2]申强.石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化策略探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(17):193-195.
- [3]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(7):15-18.
- [4]何百成.井下作业修井技术现状及优化措施研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(6):187-189.
- [5]王金平.石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化研究[J].文渊(中学版),2023(8):703-705.