

石油工程施工中井下作业修井技术研究

张永亮

中原油田分公司采油气工程服务中心 河南 濮阳 457001

摘要：井下作业修井技术是石油工程施工的核心支撑技术，直接关系到油井的正常生产、使用寿命及开采效益。本文以石油工程井下修井作业为研究对象，系统阐述修井作业的基本流程、核心设备工具及安全环保要求，深入解析维护性、修复性及增产性三类核心修井技术的原理与应用要点，结合常规油井与特殊工况井的应用场景总结实践经验，最后展望修井技术的发展方向与未来趋势。本文成果为石油工程井下修井作业的规范化开展提供理论参考，助力石油开采行业高质量发展。

关键词：石油工程；井下作业；修井技术

引言：随着石油开采进程的不断推进，油井在长期生产过程中易受地层变化、流体腐蚀、设备老化等因素影响，出现井下落物、套管损坏、产量下降等问题，严重制约石油开采效率与效益。井下作业修井技术作为解决此类问题的核心手段，通过对油井进行维护、修复及改造，可恢复油井生产能力、延长油井使用寿命。当前，修井技术虽已取得显著发展，但在复杂工况适配、环保性能提升等方面仍存在不足。基于此，本文全面梳理石油工程井下修井技术的核心内容与应用要点，为修井技术的优化应用与创新提供发展提供参考。

1 石油工程井下修井作业的核心基础

1.1 修井作业的基本流程

石油工程井下修井作业流程具有较强的系统性与规范性，核心可分为前期准备、井况诊断、核心施工及完井验收四个阶段。前期准备阶段需完成施工方案编制、设备工具调试、安全环保措施部署等工作，明确修井目标、施工步骤及风险防控要点，同时对施工人员进行技术与安全培训。井况诊断阶段通过井下探测仪器、测井数据等手段，精准判断油井故障类型与程度，如井下落物位置、套管损坏程度、油层堵塞情况等，为施工方案优化提供依据。核心施工阶段根据故障类型选用对应修井技术开展作业，包括起下油管、清理井内杂物、修复套管、油层改造等关键工序，施工过程中需实时监测井下数据，及时调整施工参数。完井验收阶段需对修井质量进行全面检测，包括井口密封性、油井产量、井下设备运行状态等，确保符合生产标准后，移交生产单位投入正常使用。整个流程需严格遵循施工规范，保障作业安全与质量。

1.2 修井作业的核心设备与工具

修井作业的顺利开展离不开各类专业设备与工具的

支撑，核心设备主要包括修井机、井口装置、循环系统及辅助设备。修井机是核心动力设备，负责起下油管、钻杆等井下工具，根据作业需求可分为常规修井机、连续油管修井机等，其性能直接决定修井效率与深度。井口装置包括防喷器、井口四通、套管头等，用于控制井口压力、防止井喷事故，保障作业安全。循环系统由泥浆泵、循环罐、管线等组成，负责循环钻井液，携带井内岩屑、冷却井下工具。核心工具涵盖打捞类、修复类、增产类等，打捞类工具包括打捞矛、打捞筒、套铣筒等，用于清除井下落物；修复类工具包括套管补贴器、胀管器等，用于修复损坏套管；增产类工具包括射孔枪、压裂工具等，用于改造油层、提升产量^[1]。此外，还包括井下监测工具如测井仪、压力计等，为施工提供精准数据支撑。

1.3 修井作业的安全与环保基础要求

安全与环保是石油工程井下修井作业的核心前提，需建立完善的管控体系。安全方面，需严格执行井控管理规定，前期开展井控风险评估，配备合格的防喷设备并定期校验，施工中加强井口压力监测，严防井喷、井漏等事故。强化作业人员安全防护，配备安全帽、防化服、防毒面具等防护装备，定期开展应急演练，提升事故处置能力。严格管控施工过程中的机械伤害、触电等风险，设备运行前需进行全面检查，严禁违规操作。环保方面，需制定专项环保方案，对施工产生的钻井液、岩屑、废水等污染物进行分类处理，钻井液经净化处理后可循环利用，岩屑需固化处理后合规处置，废水达标后排放。加强施工现场生态保护，避免施工活动破坏周边植被与土壤，作业完成后及时清理场地，恢复周边环境原貌，符合环保法规要求。

2 石油工程核心井下修井技术解析

2.1 维护性修井核心技术

维护性修井技术主要用于解决油井日常生产中的轻微故障,维持油井正常生产状态,核心包括清蜡、清砂、打捞及井口维护等技术。清蜡技术分为机械清蜡与化学清蜡,机械清蜡通过刮蜡器、清蜡钻头工具清除油管内壁蜡质,适用于蜡质沉积严重的油井;化学清蜡通过注入清蜡剂溶解蜡质,操作简单、成本低,适用于轻度蜡堵油井。清砂技术通过循环钻井液携带井内砂粒至地面,或采用抽砂泵直接抽砂,结合防砂管柱安装,可有效解决油井出砂问题,避免砂粒磨损设备、堵塞油层。打捞技术针对井下落物如断杆、落鱼、电缆等,根据落物类型选用对应打捞工具,如打捞矛适配杆类落物、打捞筒适配管类落物,复杂落物需采用组合打捞工艺。井口维护技术包括井口密封件更换、阀门检修等,确保井口密封性与操控性,保障油井正常生产。

2.2 修复性修井核心技术

修复性修井技术用于修复油井关键部件损坏问题,恢复油井生产能力,核心包括套管修复、油管修复及井身结构修复技术。套管修复技术针对套管变形、破损、错断等问题,常用方法有套管补贴、套管整形、套管加固等,套管补贴通过下入补贴器将补贴管固定在损坏部位,实现密封修复;套管整形采用整形器对变形套管进行修复,恢复其通径。油管修复技术包括油管更换、油管修补等,对于磨损、腐蚀严重的油管需整体更换,轻微损坏部位可采用焊接、套管加固等方式修复。井身结构修复技术针对井斜、井漏等问题,井斜可通过定向纠斜技术调整井身轨迹;井漏需先确定漏失层位,再采用堵漏材料如水泥浆、凝胶等进行封堵,确保井身结构完整性。此类技术对施工精度要求高,需结合井下监测数据精准操作^[2]。

2.3 增产性修井核心技术

增产性修井技术旨在通过改造油层或优化生产工艺,提升油井产量与采收率,核心包括酸化、压裂、防砂及堵水等技术。酸化技术通过向油层注入酸液,溶解油层岩石中的堵塞物如泥质、钙质等,扩大油层孔隙通道,提升油流渗透性,适用于油层堵塞严重的油井,根据酸液类型可分为盐酸酸化、土酸酸化等。压裂技术分为水力压裂与体积压裂,水力压裂通过高压泵将压裂液注入油层,使油层产生裂缝,再填入支撑剂保持裂缝开启,扩大油流通道;体积压裂适用于低渗透油藏,可形成复杂裂缝网络,大幅提升油层导流能力。防砂增产技术结合机械防砂与化学防砂,在防止油井出砂的同时,保障油层产能释放,如砾石充填防砂可有效阻挡砂粒进

入井筒。堵水技术用于解决油井出水问题,通过注入堵剂封堵水层,减少水对产量的影响,提升原油采收率。

3 修井技术的典型应用场景与实践要点

3.1 常规油井修井作业实践

常规油井多处于浅层、常温常压工况,故障类型以蜡堵、砂堵、井下落物等为主,修井技术选用以维护性修井为主、修复性修井为辅。实践中,首先通过测井数据与井口参数诊断故障类型,若为蜡堵,优先采用机械清蜡技术,结合化学清蜡剂辅助,确保清蜡彻底;若为砂堵,采用循环清砂结合防砂管柱安装,从根源解决出砂问题。对于井下落物故障,需精准探测落物位置与形态,选用适配打捞工具,避免盲目打捞造成二次损坏。施工要点包括:严格控制修井液性能,避免污染油层;起下油管时控制速度,防止产生过大压力冲击;施工后进行产能测试,确保修井效果。常规油井修井需注重效率提升,优化施工流程,降低作业成本,同时保障施工质量与安全。

3.2 特殊工况井修井技术适配

特殊工况井包括深层井、高温高压井、高含硫井、水平井等,其修井作业面临工况复杂、风险高、技术要求高等难题,需针对性适配修井技术。深层井与高温高压井需选用耐高温、高压的设备与工具,修井液需具备良好的抗温、抗盐性能,酸化、压裂等增产技术需优化施工参数,避免地层破裂失控。高含硫井需强化防硫安全管控,采用抗硫材质的井下工具与井口装置,作业人员配备专业防硫防护装备,施工中加强硫化氢浓度监测,严防中毒事故。水平井修井需注重井眼轨迹控制,打捞、修复等技术需适配水平井结构特点,采用连续油管修井技术可提升作业效率与安全性,压裂技术优先选用分段压裂,实现油层均匀改造。特殊工况井修井需提前开展专项技术论证,制定个性化施工方案。

3.3 修井技术应用的核心注意事项

修井技术应用需严格把控各环节要点,确保作业质量与效果。一是前期诊断精准化,采用多手段联合诊断如测井、录井、井下成像等,全面掌握井况信息,避免因诊断失误导致技术选用不当。二是技术选型适配化,根据油井类型、故障类型、工况条件等,科学选用修井技术与施工工艺,特殊工况需开展技术可行性试验^[3]。三是施工过程精细化,严格遵循施工方案与技术规范,实时监测井下压力、温度等参数,及时调整施工参数,避免违规操作。四是质量管控全程化,建立“施工前检查、施工中监督、施工后验收”的质量管控体系,关键工序实行旁站监督,确保每道工序符合标准。五是风险

防控常态化,针对修井作业中的各类风险,制定专项防控措施,配备应急物资,定期开展风险排查与应急演练。

4 石油工程修井技术的发展趋势与展望

4.1 修井技术的发展方向

未来石油工程修井技术将朝着智能化、精准化、高效化、环保化方向发展。智能化方面,推广应用智能修井设备如自主修井机器人、智能监测系统等,结合大数据、人工智能技术实现井况自动诊断、修井过程智能调控,减少人工干预,提升作业安全性与效率。精准化方面,研发高精度井下探测与定位技术,实现故障点精准定位,优化修井工艺参数,提升修井质量,降低对油层的损伤。高效化方面,发展连续油管修井、复合修井等一体化技术,简化施工流程,缩短作业周期,提升修井效率;研发高效修井工具如多功能打捞工具、高效压裂工具等,强化技术适配性。环保化方面,开发环保型修井液、堵剂等材料,实现污染物减量与循环利用;推广无废排放修井技术,减少对周边环境的影响,契合绿色开采理念。

4.2 未来发展展望

随着石油开采向深层、超深层及复杂油气藏拓展,修井技术面临更大挑战,同时也迎来发展机遇。未来,需加强跨学科技术融合,推动修井技术与数字化、智能化技术深度结合,构建“数字孪生+智能修井”体系,实现修井作业全流程可视化、可控化。加大核心技术与装备研发投入,突破高端修井设备、特种材料等关键技术瓶颈,提升修井技术的自主化水平。完善修井技术标准体系,针对特殊工况井修井制定专项标准,规范施工流程,提升行业整体修井水平。加强国际技术交流与合作,引进吸收国外先进修井技术与经验,结合国内石油开采实际进行创新优化^[4]。另外,需强化修井专业人才培养,打造一支兼具技术研发、施工操作与管理能力的专业队伍,为修井技术的持续发展提供人才支撑。

4.3 修井技术与新能源融合发展

在能源转型的大背景下,修井技术与新能源的融合将成为新的发展方向。一方面,可将太阳能、风能等清洁能源引入修井作业现场,为修井设备提供辅助动力。

例如,在偏远地区或海上平台,安装太阳能板和风力发电机,满足部分设备的用电需求,减少对传统燃油发电的依赖,降低碳排放和能源成本。另一方面,探索修井技术与地热能开发的结合。地热能作为一种清洁、可再生的能源,其开发过程中也需要进行井下作业。修井技术中的打捞、修复、增产等技术可为地热井的维护和改造提供支持,提高地热能的开采效率和稳定性。同时,利用地热能可为修井作业现场提供热源,实现能源的综合利用。随着氢能等新能源的发展,未来修井设备有望采用氢燃料电池等新型动力系统,进一步提升作业的环保性和可持续性^[5]。通过与新能源的融合,修井技术将在推动石油工程绿色发展的同时,拓展自身的应用领域和发展空间。

结束语

井下作业修井技术是保障石油工程顺利推进、提升石油开采效益的关键技术,其发展与应用水平直接关系到石油行业的高质量发展。本文系统阐述了修井作业的核心基础、核心技术、应用要点及发展趋势,明确了不同修井技术的适配场景与实践要求。未来,需以技术创新为核心,强化智能化、精准化、环保化技术研发,完善安全环保与质量管控体系,推动修井技术不断突破。相信通过技术创新与实践积累,修井技术将更好地适配石油开采的复杂需求,为石油行业的可持续发展提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]张凤冬.石油工程井下作业修井技术现状及工艺优化[J].化学工程与装备,2023,(05):78-79+77.
- [2]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.
- [3]陈永峰.修井技术现状分析与发展趋势展望[J].化工设计通讯,2023,49(10):28-30+33.
- [4]丁勇.浅谈石油工程施工时涉及的井下作业修井技术[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(17):196-198.
- [5]如则尼亚孜·伊敏江.针对石油工程井下作业修井技术与工艺的分析[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(17):193-195.