

油田大修井下作业中井下工具应用与技术创新研究

毛爱佳

辽河工程技术分公司欢喜岭作业大队

DOI: 10.12238/jpm.v6i2.7741

[摘要] 随着油田开发程度的不断加深, 油井大修井下作业技术的重要性愈加凸显。井下作业工具作为实现大修作业目标的核心设备, 其应用与创新直接影响油井作业效率、经济效益及安全性。本文围绕油田大修井下作业中的常用井下工具展开分析, 总结其应用现状与技术发展趋势。同时, 结合当前油田开发需求, 探讨井下工具的技术创新方向及应用前景, 为提高油田大修作业技术水平提供参考。

[关键词] 油田大修; 井下作业; 井下工具应用; 技术创新

Research on downhole tool application and technology innovation in oilfield overhaul operation

Mao Aijia

Liaohu Engineering technology branch HuanLing operation brigade

[Abstract] With the deepening of oilfield development, the importance of oil well repair technology is more and more prominent. As the core equipment to achieve the goal of overhaul operation, the application and innovation of downhole operation tools directly affect the operation efficiency, economic benefit and safety of oil wells. This paper analyzes the common downhole tools in oilfield overhaul, and summarizes the application status and technology development trend. At the same time, combined with the current oilfield development needs, the technical innovation direction and application prospect of downhole tools are discussed, so as to provide reference for improving the technical level of oilfield overhaul operation.

[Key words] oil field overhaul; downhole operation; downhole tool application; technology innovation

引言

油田开发进入高采出阶段后, 井筒完整性问题、储层能量衰减及设备老化等因素使得大修井下作业需求增加^[1]。井下工具作为实施作业的关键环节, 直接关系到油井的修复效果与生产效率。然而, 传统井下工具在适应复杂工况方面存在诸多局限, 亟需技术创新以满足现代油田开发的需求。

1 井下工具在油田大修作业中的应用现状

1.1 常用井下工具的分类及功能

井下工具根据功能可分为完井工具、测井工具、修井工具以及特殊作业工具^[2]。这些工具的主要分类和功能如下:

(1) 封隔器: 封隔器是指连接于井下管柱之上, 用于封隔油管与油气井套管或裸眼井壁环形空间的井下工具, 其主要通过控制不同井段的作业区域, 达到提高施工精度的目的。

(2) 磨铣工具: 磨铣工具用于解决井下的复杂问题, 例如处理落入井下的异物、井筒中的结蜡问题以及水泥桥等障碍物。

(3) 打捞工具: 打捞工具的主要作用是回收在井下作业

过程中遗失的工具或设备, 以减少损失并恢复正常施工。

(4) 桥塞和滑套: 桥塞和滑套在分段压裂或其他分层作业中得到了广泛应用, 可以有效控制压裂段落, 提高分层作业的效果。

这些工具在油田的大修作业中发挥着重要作用, 不仅能够解决井下复杂问题, 还能提高作业效率。然而, 目前常用工具的性能和适应性仍存在不足, 尤其是在面对更加复杂的井况时, 其可靠性和稳定性有待进一步提升。

1.2 应用中的技术难点

在井下工具的实际应用过程中, 存在以下几个主要技术难点:

(1) 复杂井况的适应性: 现代油田作业中越来越多地涉及到超深井、高温高压井以及水平井的施工, 这对井下工具的材料选择、性能设计和耐久性提出了更高要求^[3]。例如, 在超深井中, 工具需要在极高的压力和温度环境下保持稳定的性能, 而传统工具难以满足这些严苛的条件。

(2) 工具操作的智能化不足: 当前大多数井下工具仍然

依赖于人工操作,这不仅增加了操作的复杂性,还容易受到人为因素的影响,例如操作失误或判断失误可能导致作业失败。智能化操作的缺乏制约了作业的精确性和效率。

(3) 高效性与经济性之间的平衡:一些先进的井下工具虽然性能优越,但制造成本和使用费用较高,导致其在大规模应用中受到限制。如何在保证高效性的同时降低工具成本,仍是一个亟待解决的问题。

综合来看,井下工具的研发和应用需要在适应复杂井况、提升智能化操作水平以及优化经济性方面不断改进,从而更好地满足油田大修作业的实际需求。

2 井下工具技术创新研究

2.1 材料创新

随着高温高压井作业条件的日益严苛,传统材料在井下工具中的应用逐渐无法满足超深井和恶劣环境的需求。因此,科研人员针对高温高压井作业的特殊需求,重点研究了耐高温、高强度的合金材料和复合材料,以显著提高井下工具的性能,特别是在极端环境下的使用寿命和可靠性。

(1) 镍基合金材料:镍基合金材料的耐高温性能使其能够在 600°C 至 1000°C 的高温条件下稳定工作,且在长时间高温下保持良好的抗氧化性和抗腐蚀性。镍基合金中加入的铬、钼、铝等元素有效地提高了其抗氧化能力,确保其能够在含硫、含氯的腐蚀性气体环境中不发生氧化和腐蚀。例如,Inconel 718(镍基合金材料的一种)被广泛应用于封隔器和打捞工具中,因为其具有良好的耐硫化物腐蚀性,适应高压高温的环境。此外,镍基合金材料的屈服强度通常可达到 800MPa 以上,抗拉强度可达到 1100MPa ,能够在高压作业条件下承受极大的载荷而不发生变形或断裂。这些优越的力学特性使镍基合金成为深井和高温井作业中理想的材料选择。

(2) 碳纤维复合材料:碳纤维复合材料通常由高强度碳纤维与树脂基体复合而成,具备较低的密度(约为金属的 $1/4$),使得井下工具在减轻重量的同时保持较高的机械强度。在高温环境下,碳纤维复合材料的热膨胀系数较低,可以有效减少高温导致的变形问题。实验数据显示,碳纤维复合材料在 200°C 至 300°C 的高温条件下,依然保持超过 2000MPa 的抗拉强度,同时具有较强的抗疲劳性能,适应反复负载的井下作业环境。此外,碳纤维复合材料在抗腐蚀性方面具有显著优势,能够抵抗硫化物、氯化物等化学介质的侵蚀,这对于油气井中常见的酸性气体环境尤其重要。碳纤维复合材料的应用使得井下工具重量大大减轻,减少了井下作业时的负担,同时增强了工具的操作灵活性和精准性。

随着这些新型材料的不断研究和优化,尤其是在材料的高温稳定性、抗腐蚀性和力学性能方面的突破,镍基合金和碳纤维复合材料已成为高温高压井下作业的关键材料。研究人员正

在通过对材料微观结构的深入分析,进一步提升其耐高温性和抗腐蚀性。例如,通过在镍基合金中添加稀土元素,如钇(Y)和铈(Ce),可以显著提高其抗氧化性能;而在碳纤维复合材料中引入不同类型的环氧树脂和改性纳米材料,也能显著提高其热稳定性和化学稳定性。这些技术的进展不断推动着井下工具材料的边界,确保工具在超深井、高温高压及恶劣地质环境下能够长期稳定工作,极大地提升了井下作业的安全性和可靠性。

2.2 工具结构优化

工具结构优化是提升井下作业效率的重要技术手段,其核心在于通过精细化的设计和功能集成,最大限度地简化井下操作流程、减少作业时间并提高工具的适应性和可靠性。

(1) 功能集成设计:功能集成设计是当前井下工具优化的主要方向。以封隔器和滑套的结合为例,科研人员通过模块化结构设计将两者功能集成到一体,开发了多功能复合工具。这种复合工具能够在分段压裂作业中实现一趟管柱下入完成多段封隔和开关滑套操作的任务,显著减少了井下重复作业的次数。通过在工具内部设置智能控制模块,可以实现封隔器的自动扩张与滑套的精准开关,从而提高操作精度和作业效率。实验表明,与传统单功能工具相比,这类多功能工具的作业效率提升了30%以上。

(2) 多功能工具:在材料与结构优化方面,多功能工具采用了复合材料和力学优化的设计策略。工具的外部结构通常选用高强度镍基合金,具备较高的屈服强度($800\text{--}1200\text{MPa}$)和延展性,以适应高压(高达 15000psi)和高温(300°C 至 400°C)的井下环境。内部元件采用轻质碳纤维复合材料,结合耐磨涂层减少工具的摩擦系数(降低至 0.05 以下),以提高作业稳定性并延长使用寿命。此外,滑套的密封结构采用复合弹性体材料设计,能够在高温高压下维持稳定的密封性能,确保井段的精准隔离。

(3) 结构适应性设计:结构适应性设计是针对复杂井况需求的重要优化方向。在超深井或井径变化较大的水平井中,优化后的工具能够通过自动调节设计实现适应性增强。例如,采用可伸缩封隔器结构,利用弹簧加载和液压驱动双重机制实现直径在 95mm 至 178mm 范围内的连续可调。这种结构通过嵌入传感器实时监测井径变化,并向控制单元反馈信号,实现精准调节,从而确保工具在不同井段的稳定工作。

(4) 流体通道优化:流体通道优化是工具效率提升的另一关键技术。在打捞工具与磨铣工具的优化中,研究人员采用CFD(计算流体动力学)仿真技术对流体通道进行了优化设计。通过调整通道曲率半径和表面涂层处理,降低了流体流经通道的阻力损失,使流体通道的效率提高了 $15\text{--}20\%$ 。这种设计改

下转第 229 页

化,特别是在钻探过程中,如发现地层压力异常升高,应立即暂停钻井作业,并采取减压措施,防止井喷等事故的发生。环境应急预案不仅应包括标准的应对措施,还应结合具体作业环境进行个性化设计,例如在地震多发区的钻井作业中,应准备专门的应急预案,定期组织地震应急演练,提高作业人员的应急响应能力。同时,环境监测数据应实时与作业计划相结合,管理人员根据环境变化动态调整作业计划,避免在恶劣气候条件或高风险地质条件下进行高危操作,从而有效降低因环境因素引发的安全事故风险。

2.4 完善人员轮班与疲劳管理

为了防范人员疲劳引发的安全风险,应科学制定作业人员的轮班制度,确保人员在工作期间有足够的休息时间。引入生物节律管理,通过合理安排工作和休息时间,避免因长时间连续作业导致的疲劳。在制定轮班制度时,应充分考虑作业的持续时间和强度,合理安排工作时长与休息时间,确保操作人员在生理和心理上都能得到充分的恢复。例如,可以采用三班倒的工作制,每班工作不超过8小时,并设置适当的交接班时间,确保信息的充分传递和作业的平稳过渡。此外,还应针对操作人员的生物节律进行分析,尽量安排作业人员在个人生物节律的高峰期进行工作,减少疲劳积累。为了进一步保障操作人员的健康,应定期开展健康检查和心理评估,及时发现疲劳或健康问题。特别是在长时间作业或高风险作业后,应安排强制休息,

必要时可以调换岗位,确保人员在最佳状态下进行操作。同时,应建立疲劳管理的长效机制,通过疲劳监测设备对操作人员的生理指标进行实时监测,如心率、血压等,一旦发现疲劳迹象,应及时采取措施,调整作业强度或安排短暂休息。此外,可以通过心理疏导和健康管理等手段,帮助操作人员有效缓解压力和疲劳,确保在工作期间保持清醒和专注,从而减少因疲劳导致的操作失误和安全事故。

3 结语

石油钻井现场直接作业的安全管理是保障钻井作业顺利进行的关键,深入开展安全风险评估并采取相应的防控措施,对于降低事故发生率、保障人员安全和设备正常运行具有重要意义。通过设备维护与管理、操作人员培训与监督、环境监测与预警、人员轮班与疲劳管理等多方面的措施,可以有效防范石油钻井现场直接作业中的各类安全风险,从而提高钻井作业的安全管理水平与高效作业质量。

[参考文献]

- [1]张文谱,张宏,钟高鹏.石油钻井作业中安全评价方法的应用[J].山东化工,2024,53(08):240-243.
- [2]吕冯君,贾素芳,兰进.油气钻井施工作业安全策略研究[J].中国管理信息化,2023,26(06):121-123.
- [3]陈国强.石油钻井中的安全影响因素及管理对策研究[J].企业改革与管理,2020,(10):221-222.

上接第226页

进不仅提升了工具在高流速条件下的操作能力,也减少了能量损耗,确保了复杂工况下的作业稳定性。

2.3 智能化与数字化技术的应用

随着科技的不断进步,智能化和数字化技术在井下工具中的应用逐渐得到推广,极大地提升了作业的精确性、安全性和效率。这些技术的引入不仅优化了传统作业流程,还为油田作业提供了全新的解决方案。

(1) 自动化控制:自动化控制技术利用传感器和自动控制系统,能够实时监测井下工具的运行状态,并及时反馈相关数据。这种技术的应用确保了工具始终处于最佳工作状态,有效避免了工具故障和作业中的潜在问题。通过减少人工操作的干预,自动化控制技术大大降低了人为失误的风险,提高了作业的可靠性和精确性,从而使作业过程更加安全、高效。

(2) 数字孪生技术:数字孪生技术通过构建井下工具的数字化模型,使得研究人员能够进行虚拟作业模拟与优化。这种技术能够为实际作业提供多种模拟方案,帮助研究人员预测作业过程中可能遇到的风险和问题,从而提前做好优化调整。通过数字孪生技术,井下作业流程可以在虚拟环境中得到全面验证,不仅降低了实际作业的风险,还显著提高了作业效率和精准度。

(3) 机器人作业工具:智能机器人作业工具的研发为井

下作业提供了更加安全和高效的替代方案。这些机器人能够在复杂的井下环境中代替人工完成高难度的作业任务,如精密操作和危险环境下的工作。机器人作业工具有效减少了人为因素对作业质量的影响,降低了人员受伤的风险。同时,智能机器人具有高度的精准性和灵活性,能够在各种复杂井况下实现高效作业,进一步提高了作业的精准度和整体效率。

通过这些技术创新,井下工具的性能得到了显著提升,不仅在应对复杂井况方面表现更加出色,同时也大大提升了作业的安全性和经济性。

3 结语

随着油田开发向智能化、绿色化方向发展,井下工具的技术创新仍将以智能化、模块化和高性能材料为核心。研究多功能集成工具、智能操作系统及新型耐极端环境材料将成为关键方向。通过推动技术创新,油田大修井下作业的效率 and 安全性将持续提高,为我国能源开发提供强有力的技术支持。

[参考文献]

- [1]李辉,尚鑫,祝普庆,柳明义.油田井下钻具测试系统建造方案[J].设备管理与维修,2023,(14):47-49.
- [2]路明,吴双亮,张凯轩,陈雷.电气自动化在井下工具实验室的应用策略[J].化工管理,2023,(14):31-34.
- [3]王淳.油田井下打捞作业及其工具改进研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(03):28-30.