

油田大修井下作业安全风险分析与防控研究

毛爱佳

辽河工程技术分公司欢喜岭作业大队

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8345

[摘要] 随着石油工业的不断发展,油田大修井下作业在油气开采中占据着重要地位。然而,由于井下环境复杂、作业技术难度大,安全风险问题日益突出。本文结合油田大修作业的实际特点,系统分析了大修井下作业的主要安全风险来源,并提出了一系列针对性的防控措施。研究表明,科学的风险识别与评估、有效的技术保障以及完善的管理机制是防范安全事故的关键。通过本研究,可为油田企业的安全管理提供参考,有效降低事故发生率,提高作业效率。

[关键词] 油田大修; 井下作业; 安全风险; 风险防控

Research on Safety Risk Analysis and Prevention of Downhole Operations in Oilfield Overhaul

Mao Aijia

Huanxiling Operation Brigade of Liaohe Engineering Technology Branch

[Abstract] With the continuous development of the petroleum industry, underground operations for oilfield overhaul play an important role in oil and gas extraction. However, due to the complex underground environment and the difficulty of operation techniques, safety risks have become increasingly prominent. This article combines the actual characteristics of oilfield overhaul operations, systematically analyzes the main sources of safety risks in underground overhaul operations, and proposes a series of targeted prevention and control measures. Research has shown that scientific risk identification and assessment, effective technical support, and sound management mechanisms are key to preventing safety accidents. Through this study, reference can be provided for the safety management of oilfield enterprises, effectively reducing accident rates and improving operational efficiency.

[Key words] oilfield overhaul; Underground operations; Security risks; Risk prevention and control

引言

油田大修井下作业是油气田开发过程中不可或缺的一环,其目的是恢复或提升井筒生产能力,延长油井使用寿命。然而,由于作业环境深处地下,涉及复杂的机械设备、高压环境以及多种工艺流程,大修井下作业安全问题备受关注。近年来,国内外发生的多起安全事故暴露出该领域在风险管理方面仍存在诸多不足。因此,针对油田大修井下作业的安全风险来源与防控对策进行深入研究,具有重要的现实意义。

1. 油田大修井下作业的安全风险分析

1.1 风险来源分类

油田大修井下作业的安全风险来源广泛且复杂,主要包括以下几个方面:

(1) 设备风险: 井下作业的设备可靠性对作业安全具有直接影响。老化的设备、维护工作的不到位或设备操作的失误

均可能导致设备运行异常,进而引发故障或重大事故^[1]。例如,吊卡和旋转设备的故障可能导致井筒内作业无法顺利完成,甚至威胁作业人员的生命安全。

(2) 工艺风险: 井下作业通常涉及复杂的工艺流程,包括冲砂、酸化、解卡等作业环节。这些工艺对操作的精准性和技术要求较高,任何一个环节的操作失误都可能导致设备损坏、井筒环境失控或工艺失败,从而对作业安全产生严重影响。

(3) 环境风险: 井下环境具有天然的高危性,例如高温高压的地质条件、地层复杂性和腐蚀性流体的存在。这些自然环境因素显著增加了井下作业的不确定性,可能引发地层坍塌、压力失控以及设备腐蚀等问题,直接威胁作业的安全。

(4) 人为风险: 作业人员的技能水平和操作规范性在井下作业中至关重要。技能不足的人员可能无法正确操作设备或应对突发情况,而作业人员在疲劳状态下作业或进行违规操作

也容易引发安全事故。

(5) 突发事件风险：井下作业中不可控的突发事件是安全风险的重要来源。井喷、井涌以及地层漏失等突发状况可能导致井下环境瞬间失控，甚至引发大规模的安全事故，对设备和人员造成严重威胁^[2]。

1.2 风险评估

为了科学评估油田大修井下作业中的安全风险，研究者通过引入层次分析法 (AHP) 与失效模式及影响分析 (FMEA)，构建了一套系统的风险评估模型。通过该模型，可以对不同风险因素的影响程度进行量化评估。研究结果表明，设备风险和突发事件风险的权重值较高，这表明这两个方面是井下作业中的主要安全隐患，必须作为安全防控工作的重点方向。

此外，评估结果还表明，各类风险之间存在复杂的相互作用。例如，设备故障可能触发工艺风险，而突发事件的发生往往与地层环境和人为操作密切相关。因此，综合考虑多种风险因素的协同作用，有助于更加全面地识别安全隐患并优化防控策略。

2. 大修井下作业的安全防控对策

2.1 加强设备管理

设备管理是大修井下作业安全的基础，设备的可靠性直接关系到作业安全和效率。因此，在设备管理方面，必须注重技术参数的精准控制以及设备运行状态的科学评估。

2.1.1 设备检测与维护

油田企业应建立详细的设备检测与维护计划，确保设备的性能指标符合作业要求^[3]。具体措施包括：

(1) 定期全面检查：每季度对设备进行一次全面检查，并对关键设备如钻机、井口装置和泵送设备进行月度检查。检查内容应包括机械完整性测试、电气绝缘检测和流体传输能力评估。

(2) 采用无损检测技术：利用超声波检测（频率范围为 1-10 MHz）和红外成像技术对设备进行检测。超声波检测可用于识别钻杆、套管的内外壁裂纹；红外成像可检测设备过热部位，以提前发现隐患。

(3) 维护标准化：建立设备维护记录，包括压力泵最大输出压力（如 70 MPa）和转动设备的最大转速（如每分钟 1000 转），并确保维护操作符合相关行业标准（API Spec 7K 等）。

2.1.2 设备更新与升级

针对设备老化或技术落后问题，油田管理者需要根据作业需求逐步实施设备升级计划。

(1) 引入高精度设备：例如，在测压设备中使用具有 0.1% FS（全量程）精度的高分辨率压力传感器，实时监测井筒压力变化，确保数据可靠性。

(2) 使用耐腐蚀材料设备：井下环境腐蚀性较强，建议广泛采用镍基合金（如 Inconel 718）制造的耐腐蚀套管和工具，以提升设备在恶劣环境中的使用寿命。

(3) 自动化设备更新：针对高风险作业场景，可采用自动化设备，如带有传感器和自动制动系统的旋转防喷器，最大限度降低人工操作风险。

2.2 优化作业工艺

优化作业工艺是提高井下作业安全性的重要环节。通过科学设计和实施标准化工艺，可以有效减少风险。

2.2.1 制定标准化操作流程

标准化操作流程应涵盖从准备阶段到作业完成的各个环节，明确工艺参数与技术要求。例如：

(1) 冲砂作业：冲砂方式冲砂方式一般有正冲砂、反冲砂和正反冲砂三种。在冲砂过程中，建议控制泵注压力在 40 MPa 以下，以防止井筒结构失稳。砂浆浓度应控制在 20% 以下，确保冲砂效果的同时减少对套管的冲蚀。

(2) 酸化处理：酸化液体的浓度建议控制在 15%-20% 范围内，同时作业过程中实时监测井筒温度（建议小于 120℃），避免高温导致酸液分解和反应失控。

(3) 解卡作业：在解卡过程中使用扭矩传感器监控钻杆受力情况，扭矩值应控制在钻杆极限值的 80% 以内，以避免机械损坏。

2.2.2 引入智能化技术

智能化技术能够有效提升井下作业的安全性和效率。

(1) 实时监测技术：安装高分辨率的井下多功能传感器，可以同时监测压力（ ± 0.05 MPa 精度）、温度（ $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 精度）和流量（ $\pm 0.5\%$ 精度），实现作业过程的精细化控制。

(2) 自动化作业系统：采用井下自动化作业工具，如遥控操作的井口装置和具有自学习功能的钻井机器人，可以减少人工干预，同时提高复杂工艺的执行准确性。

2.3 完善环境监测

井下环境复杂多变，对安全防控提出了更高的要求。完善环境监测系统可以帮助及时发现潜在风险。

2.3.1 实时监测井下环境

实时监测系统应涵盖以下内容：

(1) 压力监测：使用多级压力传感器监控井下压力变化。对于高压井筒，监测范围建议为 0-150 MPa，数据采样频率不少于 1 次/秒。

(2) 温度监测：井下温度监测设备的量程建议为 -20°C 到 200°C ，适用于深井高温环境。

(3) 流体特性监测：通过光谱分析仪实时分析井下流体的组成和性质，例如含砂量、含硫量和 pH 值，以判断井筒环

境是否存在腐蚀性流体。

2.3.2 建立应急预警机制

基于监测数据建立智能化的预警系统：

(1) 数据分析模型：利用机器学习算法分析监测数据的变化趋势，例如利用支持向量机 (SVM) 预测井涌可能性。

(2) 多级预警设置：预警机制应根据风险程度分为三级，例如当井下压力波动幅度超过 ± 5 MPa 时触发一级预警，超过 ± 10 MPa 时触发二级预警。

2.4 强化人员培训与管理

作业人员作为油田大修安全防控的执行主体，其专业能力、风险意识以及管理水平直接决定了作业的安全性和效率。因此，必须通过系统的培训和科学的管理手段，全面提升作业团队的安全意识和应急能力。

2.4.1 提升人员素质

为了应对复杂多变的井下作业环境，作业人员需要掌握全面的技术知识和操作技能，特别是在关键设备操作和应急处置能力方面。以下是具体的培训内容和要求：

(1) 安全操作技能：培训的核心目标是确保作业人员能够熟练操作设备，理解其技术参数并能够应对常见问题。例如，在设备操作方面，应重点培训作业人员对防喷器的正确使用，要求熟悉设备的最大允许压力（如不超过 70 MPa）及其关闭步骤。此外，还需通过实操训练，模拟紧急停井过程，确保作业人员能够在井控失效的情况下快速启动井口安全阀，避免事故扩大。

(2) 应急处置能力：针对井喷、井涌等高风险事件，企业需组织作业团队进行定期实战演练。例如，在模拟井喷场景中，应设置从井涌初现到井口压力失控的多级情景，要求操作人员在 30 秒内关闭防喷器，并利用泥浆泵快速增压至设计参数（如 60 MPa）。通过高强度的实战训练，确保团队在面对突发事件时能够快速反应、协同作业。

(3) 技术更新培训：随着油田智能化技术的普及，作业人员还需定期接受新设备和新技术的培训。例如，在远程控制设备的使用培训中，操作人员需掌握遥控平台的主要功能模块，包括井下传感器数据的实时解读、设备运行状态的远程诊断等。对于引入的智能监测系统（如具有 ± 0.05 MPa 压力精度的传感器），培训应涵盖系统配置、故障排查和数据分析等环节。

2.4.2 实施科学排班制度

科学合理的排班制度对于保障作业人员的身心健康以及提升操作效率具有重要意义。具体措施包括：

(1) 合理安排作业时长：油田大修作业通常伴随高强度的工作负荷，要求每位作业人员的连续工作时间不得超过 8 小

时。建议将作业周期细分为准备、操作和监控三阶段，每阶段作业人员的工作负荷应在可承受范围内。例如，在高压操作（超过 40 MPa）过程中，需安排专人负责监测井口压力，并在超过设定值时第一时间发出警报，避免因疲劳导致监测失误。

(2) 轮班管理

为保证作业的连续性和安全性，企业应采用两班倒或三班倒的轮班制度。每班次间需安排不低于 12 小时的休息时间，并在作业高峰期额外增设夜班支持团队，确保每位作业人员的精神状态良好。例如，井喷控制期间需要额外增加一组后备操作员，以应对长时间的高强度作业。

2.5 建立综合应急体系

综合应急体系是保障作业安全的重要措施，必须具备快速响应和高效处置的能力。

2.5.1 制定应急预案

应急预案应包括以下内容：

(1) 井喷事件：详细说明防喷器关闭步骤和最大操作压力（建议大于井筒设计压力的 1.2 倍）。

(2) 井涌事件：规定井口流量监测临界值（如超过 50 m³/h 时启动应急措施）。

(3) 井控失效：明确井控设备替换流程和备用设备启动方案。

2.5.2 开展应急演练

应急演练应覆盖常见突发事件场景：

(1) 模拟井喷演练：操作人员在演练中应完成压力监测、关闭防喷器和启动泥浆泵增压等操作，演练时间控制在 10 分钟内。

(2) 井控恢复演练：重点测试作业团队的协调配合能力，包括备用设备的快速启用和井口压力的稳定控制。

3 结语

油田大修井下作业的安全管理是一个复杂的系统工程，涉及多方面因素的协同作用。本文基于风险分析方法，明确了大修井下作业的主要安全风险来源，并提出了一套系统的防控对策。未来，随着智能化和数字化技术的进一步发展，油田作业的安全保障水平将不断提高。本研究为油田安全管理提供了理论支持与实践指导，对推动行业健康发展具有重要意义。

[参考文献]

- [1]李金海. 油田井下作业危害因素及安全技术探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44 (17): 28-30.
- [2]马坤金, 孙亚龙. 井下作业井控风险分析及应对策略[J]. 石化技术, 2023, 30 (12): 199-201.
- [3]路永和. 油田修井作业井口泄露的应急处置技术研究[J]. 消防界(电子版), 2023, 9 (02): 71-73.