

石油化工井下作业事故预防技术 与石油仓储安全管理策略研究

王建伟（中澳煤层气能源有限公司，山西 吕梁 033200）

曹 鹤 周 泉 曹 伟（辽宁贝斯瑞德石油装备制造有限公司，辽宁 沈阳 110034）

摘 要：近年来，随着我国经济的发展和人民生活水平的提高，原油的需求和产量日益增加。为保证国家战略物资供应和企业生产经营需求，需要对一定数量的原油进行集中储备。由于原油本身具有易燃、易爆、腐蚀等特点，大量集中储存在一起必然会产生巨大的安全隐患。如果经营企业不采取有效的管理方法，那么重大安全事故就不可避免。本文对石油化工井下作业事故特点及预防技术进行分析，研究石油仓储安全管理策略，建立井储安全综合管理体系，以期为石油化工企业安全生产提供参考。

关键词：石油化工；井下作业；石油仓储；安全

0 引言

近年来，我国危化品事故总起数、死亡总人数是在逐年下降的，表明我国目前安全形势总体是向好的。然而在 2017-2019 三年间平均每年发生两起化工重大事故，危化品事故、工矿企业事故、火灾事故尤其严重，说明我国安全生产管理工作依然任重道远。

1 石油化工井下作业事故特点分析

1.1 突发性

井下作业事故常在地层压力突变、气体泄漏或井壁坍塌等情况下瞬间爆发，这种骤然发生的灾害性事件使现场作业人员及设备完全暴露在极端危险的环境中且来不及采取任何有效防护措施，尤其是在进行钻井、测井、酸化等高风险井下作业时，从异常工况出现到酿成重大灾难往往只需几秒到几分钟时间。井喷失控、气体爆炸、井壁坍塌等重大事故的突发性特点导致常规应急处置措施根本无法有效实施，突发事件发生时井下环境条件急剧恶化的速度远超过人员应急反应能力。

1.2 隐蔽性

深井作业环境下的各类风险因素普遍存在于地下数千米深处的复杂地层环境中，井筒内的套管腐蚀损坏程度、地层压力异常变化、气体窜层和油水窜流等重大隐患无法通过常规检测手段准确探测和全面评估；井下工具和设备在高温、高压、强腐蚀的恶劣环境中长期运行所产生的性能退化和材料损伤情况难以实时监测和预判^[1]。

2 石油化工井下作业事故预防技术

2.1 监测预警技术

井下作业监测预警系统基于多层神经网络算法构建井筒压力场异常模式识别模型。监测系统在井筒内不同深度采集压力、声波、电磁等多维数据，对采集的数据信号进行实时频谱分析并提取异常特征值。深度神经网络对典型井下事故工况下采集的压力、声波、电磁数据建立监测数据库，结合历史事故案例中地层压力波动规律、声波传播特征和电磁场变化趋势形成故障特征映射关系。当实时监测参数与数据库中故障模式出现匹配时自动预判潜在风险并发出分级报警信号。

2.2 压力控制技术

井下作业压力控制技术以变频调速泵组和自适应优化算法为基础，泵组控制单元利用高精度压力传感网络获取井筒压力分布数据并结合液柱静压力和环空动摩阻计算建立井筒压力动态平衡方程。井筒压力优化控制机理融合多目标规划和流变学理论，通过计算井筒内外压差、液柱压力梯度及环空返出压力等参数确定压力调控策略，建立基于井筒压力安全窗口的智能补偿机制。泵组调控技术采用 PID 闭环控制算法对钻井液密度、泵排量及环空背压实施协同调节，利用压力敏感材料实现井筒压力的精准调控，融合深度学习算法构建的压力预测模型能够提前预判井筒压力波动趋势并自动启动防喷和井控机制。

2.3 井筒密封技术

井筒密封采用双金属封隔器结构并在表面镀覆超

疏水纳米涂层材料,金属封隔器内置高性能橡胶复合密封圈在恒压补偿机构作用下与井壁形成可靠密封面。复合密封材料选用改性聚四氟乙烯与特种橡胶材料经高温硫化工艺制备而成,密封材料在 150℃ 高温和 70MPa 压力环境下仍保持良好的弹性变形能力和密封性能,纳米涂层的超疏水特性显著增强了金属封隔器与井壁接触面的密封效果。密封系统中的恒压补偿机构采用碟形弹簧组件对密封圈施加预紧力,在井筒压力波动时密封圈能够通过径向变形自动补偿压力变化,防止因井筒结构变形或振动导致的密封失效,井下复杂环境中密封材料的耐老化性能和低应力松弛特性确保了井筒密封系统的长期可靠运行^[2]。

2.4 井控保护技术

井控保护技术根据井筒压力动态变化规律和地层流体入侵机理,研究防喷装置的驱动控制方法,本质上是解决防喷装置快速响应和持续密封的重要技术途径。针对井控保护过程中驱动动力源稳定性差、密封装置启闭速度慢等问题,以气动液压联合驱动技术为例,将高压氮气瓶组和伺服液压泵应用于双重动力源系统。具体来看,氮气瓶组中 35MPa 的高压气体在压力传感器监测下向液压蓄能器定量充入动力介质,同时伺服液压泵以 0.5MPa/s 的增压速率向主油路补充高压液压油维持驱动压力。联合驱动技术中的多级增压阀组对氮气压力进行精确调节,通过阀组内置的压力补偿装置消除气体压力波动对液压系统的冲击影响,实现防喷器在 0.3 秒内完成快速增压和闭合,有效解决了传统单一动力源系统响应滞后的难题。

3 石油仓储安全管理策略

3.1 划分储存区域等级

石油仓储区域依据原油的危险性等级和储存环境条件实施分区管理策略,以闪点温度和最大储存量为主要依据将储罐区科学划分为甲类、乙类和丙类三个等级区域,各类储存区域按照相应标准配备消防水系统、泡沫灭火系统和可燃气体检测报警系统等安全防护设施。油品储罐区与辅助生产设施区之间的防火间距严格执行国家标准规范要求,在储罐区内设置醒目的安全警示标识并在区域四周合理布设防火堤和事故应急池。储罐区域规划充分考虑地形地貌特点和周边环境敏感点分布情况,在保证消防通道和应急疏散通道通畅的前提下科学规划罐区工艺管线走向和消防设施布局,在区域内根据物料危险特性配置防雷、防静电等安全附属设施,最终形成系统完整的分区管控体

系。

3.2 规范作业操作流程

石油仓储作业流程管理围绕储罐日常运行维护和进出油作业两个关键环节建立标准化操作规范体系,储罐进出油作业要求操作人员在作业前对储罐本体状态、管线系统完整性、电气设备接地保护等内容进行全面检查并执行双人确认制度。罐区日常巡检作业严格落实定时定线路巡检机制,巡检人员按照预先制定的路线对储罐设备运行状态、安全附件性能、检测报警装置可靠性等进行系统检查。储罐清洗置换等受限空间作业必须编制专项施工方案并执行作业许可审批制度,对各类应急处置作业制定针对性操作规程明确规定岗位职责和处置流程,确保作业安全风险始终处于受控状态^[3]。

3.3 落实检修维修制度

石油储罐区检维修工作贯彻动态管理理念,根据储罐设备运行状态评估结果和检维修规范要求科学制定储罐年度检修计划。储罐本体检测工作对罐体壁厚变化趋势和关键焊缝质量状况开展全面无损检测,定期评估防腐层防护效果并实施修复维护。储罐附属设施维护重点对呼吸阀密封性能、液位计准确度等关键部件进行定期检验,对管线系统的焊接接头和法兰连接处进行系统性探伤检测,确保防腐系统防护效果和消防设施运行可靠性满足安全运行要求。

3.4 强化人员安全培训

储罐区从业人员安全培训采用理论学习与实践操作相结合的培训模式,培训内容重点围绕储罐区安全管理制度、标准操作规程、应急处置措施等方面开展系统性教育。员工培训过程中强调对储罐区典型案例的深入分析和经验总结,定期组织开展消防设施使用技能演练和突发事件应急疏散演练。储罐作业人员必须经过专业技能培训并取得相应资质证书方可上岗作业,持续开展事故警示教育和应急处置技能训练切实提升员工安全意识和应急响应能力,培训考核结果全面纳入员工绩效管理评价体系。

4 石油化工井下作业与仓储安全综合管理体系构建

4.1 建立井储一体化指挥平台

井储一体化指挥平台在总调度中心设立统一调控系统,整合井下作业主控与储罐区集散控制功能。平台构建了包含压力监测、液位监控、气体检测在内的多维数据采集网络,实时跟踪井筒压力变化、储罐液位波动、油品输转状态等关键参数。基于机器学习的

智能预警单元对采集的数据进行系统分析，建立井场生产与储运业务的数据关联模型。在此基础上，调度中心依据产量预测和库存分析结果动态分配资源，制定储罐调配计划。当发生井下工况异常或储罐超限预警时，指挥平台启动应急联动响应机制并统一调度应急处置，促进井场和储运系统的深度融合。

4.2 实施井储联合风险评估

井储联合风险评估以井下作业过程和储运环节为评估对象，运用故障树和事故树分析方法识别井筒压力失控、储罐泄漏爆炸等危险源并量化风险等级。风险评估系统基于历史数据库建立井下工况预警指标和储罐区风险判据，对井场与储运环节的安全隐患开展系统性分析并形成风险防控清单。评估结果直接指导井储安全管理，把风险管控措施落实到具体岗位和责任人，持续完善井场生产与储运作业的安全保障体系^[4]。

4.3 制定井储协同应急预案

协同应急预案立足井场生产与储运作业的深度融合，针对性地部署分级响应机制。预案涵盖井下压力失控、储罐泄漏着火、井储联动故障等多发事故场景，细化制定处置流程和应急措施。基于风险评估结果，应急预案建立四级响应体系，规范各层级处置权限。关键岗位人员实行 AB 岗配置，保证事故响应的连续性和有效性。井储联动应急处置中心统一调度内外部应急资源，组织开展实战化应急演练，推动应急体系持续优化。

4.4 推进井储信息共享机制

信息共享平台基于统一的数据标准实现井下作业数据和储运过程数据的互联互通，数据中台对工艺参数、设备状态、安全监测等信息进行多维度分析形成智能化监控网络。系统架构设计中重点打通井场生产数据与储罐运行数据的壁垒，实施油品平衡智能计算和异常工况快速预警。数据分析平台挖掘井储历史数据的深层价值，为安全管理决策提供数据支撑，推动井场作业与储运业务的深度协同^[5]。

5 典型事故案例研究

基于近年来石油化工井下作业和仓储安全事故统计，对某石化液化气爆燃事故进行深入分析。事故数据显示（如表 1），违章操作和管理缺失是引发重大事故的主要原因。

数据分析表明，事故从泄漏到爆炸历时 87 分钟，泄漏 9.7t 液化气造成火灾影响面积达 8.75 万平方米。

表 1. 某石化液化气爆燃事故分析表

事故阶段	时间点	违规行为 / 管理缺陷	泄漏 / 损失情况
作业准备	23 : 40	违反操作规程切水	
泄漏初期	23 : 50	班长忽视门岗报警	液化气外溢
泄漏扩散	00 : 05	未及时启动应急预案	泄漏约 9.7t
事故升级	00 : 45	多级汇报延误处置	气体持续扩散
事故爆发	01 : 07	违规明火源引燃	350m×250m 区域起火
伤亡统计		人员脱岗，管理混乱	死亡 26 人，烧伤 15 人

事故暴露出井储作业存在严重的违章操作和管理漏洞：作业人员无视操作规程全开阀门导致泄漏，班组 7 人中 5 人擅离职守，罐区周边违规设置炉灶。事故发展过程中，多级报告机制延误处置时机，未能及时控制泄漏源和疏散危险区域人员，最终酿成重大伤亡。该事故凸显井储安全管理体系中人员管理、应急处置、明火管控等环节存在重大缺陷。

6 结语

综上所述，石油化工井下作业和仓储安全管理工作应重点关注突发性、隐蔽性和连锁性等事故特征，有效应用监测预警、压力控制、井筒密封、井控保护等技术手段预防事故发生。储存区域等级划分、作业操作规范、检维修制度落实和人员安全培训等管理策略构成了石油仓储安全管理体系的重要内容。建立井储一体化指挥平台，实施联合风险评估，制定协同应急预案，推进信息共享机制，形成了井下作业与仓储安全的综合管理体系。

参考文献：

[1] 王永惠. 石油仓储场所防火防爆及消防安全管理 [J]. 当代化工研究, 2023, (24): 194-196.

[2] 焦莹, 王娅娇. 化工危险品仓储安全管理思考 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(19): 87-88.

[3] 董鲁燕. 瀚坤能源油品仓储安全管理改进策略研究 [D]. (青岛) 山东科技大学, 2020.

[4] 孙喜久. DQ 石油公司井下作业项目 HSE 管理体系应用研究 [D]. (大庆) 东北石油大学, 2019.

[5] 白玉兰. 石油井下作业安全标准化建设方案设计研究 [D]. 中国地质大学 (北京), 2008.

作者简介：

王建伟 (1983-), 男, 河北承德人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 石油化工。