

石油化工储罐的安全运行模式分析

王丹丹 (胜利油田分公司纯梁采油厂, 山东 滨州 256504)

摘要: 石油化工储罐作为产业核心设备, 其安全运行直接关乎生产稳定性与经济效益。本文系统剖析储罐安全运行模式, 从结构优化、安全附件配置、风险防控、人员管理四个维度展开研究。通过引入蜂窝式内浮顶、阻爆轰型阻火器等技术创新, 结合氮封系统优化、泄漏监测预警等管理手段, 构建覆盖设计、施工、运维全生命周期的安全管理体系。研究典型案例为实证, 揭示传统管理模式存在的缺陷, 提出本质安全设计、标准化作业流程、智能化监控系统等改进策略, 为行业提供可复制的安全运行范式。

关键词: 石油化工储罐; 安全运行模式; 本质安全设计; 风险防控体系; 智能化监控

中图分类号: TE972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 027-0121-03

Analysis of safe operation mode of petrochemical storage tank

Wang Dandan (Chunliang Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch, Binzhou Shandong 256504, China)

Abstract: As critical equipment in the petroleum and chemical industry, storage tanks' safe operation directly impacts production stability and economic benefits. This paper systematically analyzes tank safety operation models through four dimensions: structural optimization, safety accessory configuration, risk prevention, and personnel management. By introducing technological innovations such as honeycomb-type internal floating roofs and deflagration arresters, combined with management measures like nitrogen sealing system optimization and leakage monitoring systems, the study establishes a comprehensive safety management system covering the entire lifecycle from design and construction to operation and maintenance. Using typical case studies as empirical evidence, the research reveals shortcomings in traditional management models and proposes improvement strategies including inherently safer design, standardized operating procedures, and intelligent monitoring systems, providing the industry with replicable safety operation paradigms.

Key words: petrochemical storage tank; safe operation mode; intrinsically safe design; risk prevention and control system; intelligent monitoring

石油化工储罐作为储存原油、成品油及化工原料的核心设备, 其安全运行直接关系到企业生产连续性、环境保护及人员生命安全, 是石油化工产业链中不容有失的关键环节。据统计, 我国油品储罐事故中, 30% 以上由腐蚀引发, 金属罐壁在油气介质长期侵蚀下, 局部减薄甚至穿孔, 极易导致泄漏事故; 5% 的呼吸阀故障可导致压力异常, 当罐内压力超过设计极限时, 可能引发罐体变形或破裂; 泵送系统故障率达 3%, 机械密封失效、管道振动等问题不仅影响物料输送效率, 更可能因摩擦生热或介质泄漏引发火灾; 且 70% 的泄漏事故源于设备老化或维护不当, 密封件老化、螺栓松动等细节疏忽往往成为事故的导火索。在此背景下, 构建科学的安全运行模式成为行业亟待解决的课题^[1]。

本文结合中石化《关于提升内浮顶(拱顶)储罐本质安全及安全管理水平的建议》等文件, 立足行业实际痛点, 从技术革新、管理优化、人员能力提升三方面系统探讨储罐安全运行模式, 通过本质安全设计降低事故概率、标准化流程管控规范操作行为, 为行业提供兼具理论深度与实践价值的参考框架, 助力企业筑牢储罐安全防线。

1 储罐安全运行的技术基础

1.1 结构优化

传统储罐存在超压超温、冒罐、油气浓度过高等风险。以蜂窝式内浮顶为例, 其通过减少油品蒸发损耗, 降低气相空间油气浓度, 有效避免液位过高引发的爆炸风险。中石化镇海炼化雷击事故中, 浮筒式浮盘因耐火性不足倾覆, 导致全面积火灾; 而采用全金属全焊接蜂窝浮盘的储罐, 在类似工况下未发生次生灾害, 验证了结构优化的有效性。此外, 新建储罐可通过提升设计压力、增加隔热措施减少“呼吸”损耗。例如, 将设计压力从 2kPa 提升至 4-6kPa, 配合隔热涂料或双壁储罐技术, 可减少 67%-75% 的油气损耗, 同时扩大氮封系统压力控制区间, 提升系统可靠性^[2]。传统储罐潜藏超压超温、冒罐、油气浓度超标等诸多风险。以蜂窝式内浮顶来说, 减少油品蒸发损耗, 降低气相油气浓度, 防爆炸风险。镇海炼化雷击事故中, 浮筒式浮盘倾覆致灾, 蜂窝浮盘却无次生灾害。新建储罐提升设计压力、加强隔热, 也能降低风险。

1.2 安全附件配置

储罐安全附件包括呼吸阀、阻火器、紧急泄压阀等, 其性能直接影响安全水平。我国现行标准对呼吸

阀泄漏量要求为 $0.4\text{m}^3/\text{h}$,远低于API标准的 $0.014\text{m}^3/\text{h}$,导致部分储罐呼吸阀口油气浓度超标。中石化推荐采用低超压10%呼吸阀与阻爆轰型阻火器组合,可满足GB 37822-2019标准中重点地区 $2000\mu\text{mol}/\text{mol}$ 的排放要求。在浮盘选择上,箱式全接液浮盘因可维修性差,在苯罐检维修中曾引发闪爆事故;而全金属浮盘通过模块化设计,支持在线检修,显著降低检修风险。此外,氮封系统压力控制阀的交叉问题可通过正规设计解决,确保氮封效率与无组织排放达标^[3]。

2 储罐安全运行的管理体系

2.1 风险识别与评估

储罐风险包括火灾、爆炸、泄漏、腐蚀等,这些风险相互关联且可能引发连锁反应,需通过量化评估模型确定优先级,以实现精准防控。例如,某炼油厂采用HAZOP分析法,从工艺参数偏差出发,系统识别出呼吸阀故障、浮盘密封失效等高风险点,并制定针对性管控措施,如增设备用呼吸阀、缩短浮盘检修周期。对于VOCs排放,可通过建立油气浓度-压力-温度关联模型,结合历史数据与实时监测,实现动态预警与超限自动联锁,有效降低环境风险^[4]。

在腐蚀防控方面,储罐底部焊接热影响区因应力集中与介质沉积,是腐蚀高发区。某 10万m^3 原油储罐因底部腐蚀泄漏,导致周边土壤污染,直接经济损失达数百万元。通过引入超声波测厚、电化学阻抗谱等技术,可实现腐蚀速率实时监测与趋势预测,结合阴极保护与新型防腐涂层,形成“监测-防护-修复”闭环管理,显著延长储罐使用寿命,降低非计划停机风险。

2.2 标准化作业流程

储罐检修需严格执行能量隔离、气体分析等制度,确保作业安全可控。例如,中石化要求储罐检修前进行多点取样,覆盖罐顶、罐壁、罐底等关键区域,每2h分析一次罐内气体,确保氧含量在19.5%-23.5%之间,可燃气体浓度低于爆炸下限的10%,有毒气体浓度符合职业接触限值。进罐人员需佩戴四合一报警器,实时监测氧气、可燃气体、有毒气体浓度,数据异常时自动触发声光警报并联动通风系统,强制人员撤离。在收发油作业中,需通过液位计、流量计等设备实现自动化控制,避免人为操作失误。某储运公司通过安装雷达液位计与PLC控制系统,将液位超限事故率降低80%,同时实现流量精准计量与库存动态管理^[5]。

3 储罐安全运行的人员保障

3.1 人员培训

储罐安全运行的核心在于操作人员的专业能力与

风险防控意识。当前,储罐作业涉及高温、高压、易燃易爆等高风险场景,操作人员需掌握设备原理、工艺流程及应急处置技能。传统培训以理论授课为主,存在“重知识轻实践”的弊端,导致员工对浮盘检修、呼吸阀校验等关键操作的标准化流程理解不足。某油库引入“理论授课+VR模拟+现场实操”三位一体模式后,员工安全操作合格率从75%提升至95%,印证了实操演练的重要性。

培训内容需聚焦三大核心模块:一是安全规程,包括《石油化工企业储运罐区罐顶油气连通安全技术要求》等标准,明确罐区动火、受限空间作业等高风险环节的审批流程与防护要求;二是设备维护,针对呼吸阀、浮盘、阻火器等关键附件,制定定期校验、更换标准及故障诊断方法,例如浮盘密封胶老化导致油气泄漏的识别与处置;三是应急处置,通过泄漏堵漏、火灾扑救、人员疏散等场景模拟,提升员工对初期火灾灭火器选择、中毒人员心肺复苏等技能的熟练度。此外,培训需结合行业事故案例开展警示教育,如上海赛科苯罐检维修事故中,检维修人员未彻底置换罐内可燃物导致闪爆,此类案例可强化员工对“无置换不作业”原则的认知。

企业应建立“培训-考核-反馈”闭环机制,将安全绩效与岗位晋升、薪酬挂钩,激发员工主动学习意愿。同时,针对承包商人员流动性大的特点,实施“入厂前安全准入+作业前技术交底+过程中动态监督”的全流程管理,确保其具备储罐作业资质与风险识别能力。

3.2 应急管理

储罐事故应急管理需构建“预防-预警-响应-恢复”全链条体系,实现从“事后补救”向“事前防控”的转变。在预防阶段,企业应定期开展HAZOP分析、LOPA分析等风险评估,识别储罐设计缺陷、设备老化、操作违规等潜在隐患。例如,某炼油厂通过分析发现,呼吸阀泄漏量超标是导致VOCs无组织排放的主因,随即制定呼吸阀密封改造方案,将泄漏量控制在 $0.014\text{m}^3/\text{h}$ 以下,满足API标准要求。

预警机制是应急管理的关键环节。企业需安装高低液位报警、压力异常报警、可燃气体浓度监测等装置,并设置阈值触发条件。例如,中石化镇海炼化通过增设雷电预警系统,在雷暴天气前自动启动氮封系统、切断罐区电源,将雷击事故率降低60%。响应流程需明确指挥组、抢险组、医疗组等职责分工,制定标准化作业卡(SOP),确保火灾扑救、人员疏散等行动协同高效。某储运公司模拟储罐泄漏事故时,通过SOP指引,抢险组在10min内完成堵漏,医疗组同

步开展伤员救治,验证了流程的有效性。

恢复阶段需对储罐进行强度测试、防腐处理及安全附件校验,避免次生灾害。例如,上海赛科苯罐事故后,企业对同类型储罐进行全面检测,更换老化浮盘并增设在线监测系统,实现风险动态管控。

4 案例分析

4.1 中石化镇海炼化雷击事故(2014年)

2014年5月24日15时16分,中石化镇海国家储备库47号10万 m^3 原油储罐顶部遭雷击,引发油罐一次或二次密封上的金属物与罐壁发生放电,电火花引爆了密封空间内的油气。高温和冲击波破坏了一次密封油气隔膜后引燃了原油,明火于15时25分被扑灭。然而,仅一个月后的6月24日,该储罐再次因雷击起火,凸显了储罐防雷设施的重大隐患。

事故调查显示,雷击引发火灾的关键在于浮顶密封处油气浓度超标。传统浮顶储罐设计未充分考虑雷击产生的热效应与力效应叠加风险,导致密封失效后油气积聚。尽管GB50074-2014《石油库设计规范》规定顶板厚度 $\geq 4\text{mm}$ 的固定顶钢储罐可不装接闪杆,但实际运行中,雷电通过焊缝、法兰盘等过渡电阻时可能产生火花,成为点火源。镇海炼化事故中,雷电流通过浮顶与罐壁连接处时,因接触电阻过大引发电弧,直接引燃了密封空间内的油气。

此次事故暴露出防雷设计的局限性:一是未考虑雷电流在金属结构中的力效应,导致罐体局部变形加剧密封失效;二是未对过渡电阻进行量化管控,忽视了螺栓连接法兰盘在腐蚀环境下的放电风险。事后,中石化对同类储罐加装独立接闪杆,并引入光纤光栅传感器实现雷击早期预警,同时将浮顶密封改造为全接液蜂窝结构,降低油气挥发量,从源头减少可燃物积累。

4.2 上海赛科苯罐检修事故(2018年)

2018年5月12日15时33分,中石化上海赛科石油化工有限公司75-TK-0201苯罐在检修作业中发生闪爆,造成6名作业人员死亡。事故直接原因是浮盘铝合金浮箱组件内漏积液(苯),在拆除过程中苯外泄至罐底板,挥发的苯蒸气与空气混合形成爆炸性环境,作业人员使用非防爆工具产生的点火能量引发爆燃。

事故暴露出多重管理漏洞:一是风险辨识缺失,施工方案未识别苯的易燃易爆特性,仅关注毒害性与泄漏风险;二是变更管理失效,发现浮箱积液后未调整施工方案,未重新评估风险并增设管控措施;三是承包商管理松懈,上海赛科公司未严格审核承包商资质,未告知罐内燃爆风险,现场监护人员专业素质不足;四是特殊作业违规,受限空间内仅在人孔处检测

可燃气体浓度,未使用防爆器具和铜质工具。

事故后,应急管理部要求企业对危险化学品罐区特殊作业实施升级管理,严格执行作业票审批制度,强化全过程监控。上海赛科公司对同类储罐加装氮封系统,将浮盘改造为模块化全接液结构,支持在线检修;同时引入智能气体检测仪,实现罐内氧气、可燃气体浓度的实时监测与报警联动,杜绝因检测代表性不足导致的风险误判。

5 结论与展望

石油化工储罐安全运行需构建“技术-管理-人员”三位一体防控体系,以系统性思维破解高风险场景下的安全难题。在技术层面,本质安全设计是防范事故的“第一道屏障”,需重点推广蜂窝式内浮顶、阻爆轰型阻火器等创新技术——蜂窝式内浮顶通过全金属焊接结构与蜂窝单元设计,将油气挥发量降低90%以上,同时提升耐火性与抗变形能力,从源头减少可燃物积累;阻爆轰型阻火器采用多层级波纹板结构,可有效阻断火焰传播速度超音速的爆轰波,为储罐增加一道“硬隔离”。此外,需结合智能化监控系统实现风险动态感知,例如部署光纤光栅传感器监测罐壁温度、安装激光甲烷探测器实时分析气体浓度,并通过AI算法对泄漏、过热等异常信号进行智能预警,将事故响应时间从传统模式的10min缩短至2min内。

管理层面需构建“风险评估-流程管控-质量追溯”闭环机制。一方面,完善基于HAZOP(危险与可操作性分析)、LOPA(保护层分析)的风险评估模型,量化识别浮盘密封失效、呼吸阀卡滞等典型风险场景,为设备选型与维护周期提供科学依据;另一方面,制定覆盖储罐全生命周期的标准化作业流程,明确动火作业“无置换不施工”、检维修“双人确认”等刚性规则,并通过数字化工单系统强制执行。同时,强化检修质量管控,建立设备健康档案,对呼吸阀校验、浮盘密封更换等关键操作实施视频追溯与数据留存,确保每一步操作符合API 650等国际标准。

参考文献:

- [1] 叶威. 石油化工储罐的切水现状及发展趋势[J]. 广州化工, 2024, 52(04): 39-41.
- [2] 张灵华. 石油化工项目中储罐有限空间安全管理[J]. 化工管理, 2023(36): 113-116.
- [3] 苏剑, 柴锋均. 石油化工储罐火灾的灭火救援处置策略分析[J]. 当代化工研究, 2023(18): 173-175.
- [4] 李强. 石油化工储罐的安全运行模式分析[J]. 中国设备工程, 2023(17): 67-69.
- [5] 李志芳. 石油化工储罐的安全运行模式探讨[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(01): 25.