

本质安全理论驱动下的储罐机械化清理标准化作业体系构建与实践

高岩

中国石化胜利油田港区服务协调中心油地融合协调部

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18464

[摘要] 随着石油石化行业安全环保标准的不断提升,传统人工原油储罐清理作业模式因高风险、低效率、环保合规难等问题,已难以适应高质量发展要求。本文以中石化胜利油田分公司油气集输总厂的实践为例,系统阐述了一种融合本质安全理论与标准化管理理念的储罐机械清理创新模式。该模式通过构建“三维穿透式”风险管控体系,实现风险的全流程闭环管理;通过落地“311”标准化作业体系,确保作业流程的规范统一;通过引入遥控清洗机器人、智能视频监控等智能技术,推动高危作业的“无人化”与“少人化”;并通过强化承包商协同管理与全流程环保管控,筑牢合作与绿色防线。实践表明,该模式成功实现了清罐作业“零事故、零伤亡、零污染”的目标,单罐清理周期缩短25%,成本显著降低,并产生了良好的经济、社会与生态效益,为行业同类高风险作业的本质安全管控提供了可复制、可推广的标准方案。

[关键词] 本质安全; 储罐清理; 标准化作业; 机械清罐; 风险管控; 智能化技术

引言

原油储罐作为油气储运系统的关键设施,其定期清理是保障设备安全运行、维持储存效能的核心维护作业。然而,储罐清理作业环境特殊,涉及受限空间、高空作业、易燃易爆及有毒介质等多重高风险因素叠加,长期以来是石油石化行业安全管理的难点和事故高发区。据统计,近五年行业清罐事故中,因爆炸极限失控和有毒气体超标导致的事故占比居高不下^[1]。传统依赖人工经验的清罐模式,不仅面临火灾、爆炸、中毒、窒息等巨大安全风险,还存在作业效率低下、环保压力大、VOCs无组织排放、危废处置不规范、承包商管理协同困难、合规性挑战日益严峻等诸多痛点^[2,3]。

“本质安全”作为一种先进的安全哲学,其核心在于通过从源头上消除或减少危险源,而非依赖附加的防护设施和人为干预,来实现系统的根本性安全^[4,5]。将本质安全理念与标准化管理方法深度融合,应用于储罐清理这类复杂高危作业,是提升行业整体安全水平的必然趋势。标准化作业通过将最佳实践固化为一套明确、可重复的操作规程、技术参数和管理清单,能够有效减少人为失误,确保作业质量与安全的一致性^[6]。

本文基于中石化胜利油田分公司油气集输总厂(以下简称“总厂”)的管理实践,详细论述了其构建的理论框架、核

心做法与实施成效。该模式并非简单的技术叠加或管理条款堆砌,而是一个集成了风险管控、技术标准、智能应用和协同管理的系统性解决方案,旨在实现清罐作业从“经验驱动”向“标准驱动”和“智能驱动”的根本性转变,为同行提供具有重要参考价值的实践案例。

1. 模式构建的核心框架与方法

总厂所构建的模式,其核心是两大体系的有机融合:一是以“消除、预防、减弱”为原则的“三位一体”本质安全体系;二是以确保作业一致性、可追溯性为目标的“311”标准化作业体系。

1.1 “三位一体”本质安全体系

该体系贯穿于清罐作业的全生命周期。风险消除优先采用技术手段从根本上消除风险。例如,广泛应用遥控清洗机器人替代人工进罐和高空作业,将人员与危险环境物理隔离,直接消除中毒窒息和高处坠落的风险。风险预防对于无法完全消除的风险,通过工程技术和措施进行预防。如强制采用氮气置换将罐内氧浓度控制在爆炸极限以下($\leq 8\%$),使用本安型防爆设备和工具预防点火源,通过标准化流程防止误操作。风险减弱对意外释放的能量或危险物质进行控制,减轻事故后果。如设置高效油气回收装置降低VOCs排放浓度,配备完备的应急物资和清晰的应急流程,确保事故发生

时能快速有效响应。

1.2 “311” 标准化作业体系

该体系是模式落地执行的骨架, 具体包括: “三类清单”, 即开工验收清单、过程巡检清单、验收归档清单, 共计 444 项检查项, 覆盖作业前、中、后全环节, 确保每一步操作有标可依, 每一项检查有据可查。“一套方案模板”, 即编制《外浮顶罐机械清罐施工方案》标准化模板, 量化 23 项关键作业参数 (如氮气流量、清洗压力、通风时间等), 杜绝“凭经验操作”, 保证技术方案的严谨性与科学性。“一项现场管理标准”, 即推行“四区两方”现场定置化管理。“四区”明确划分作业区、设备区、车辆停放区、物料区, 规范空间布局; “两方”清晰界定甲方 (总厂) 与乙方 (承包商) 的权责边界, 强化协同监督。

2. 模式实施的关键路径与创新实践

2.1 构建“三维穿透式”风险管控体系, 实现风险全流程闭环管控

风险管控是本质安全的基础。总厂突破了传统风险管理的局限性, 构建了动态、精准、穿透式的管控体系。

2.1.1 风险精准辨识与动态映射

采用“现场勘查+HAZOP 分析+事故复盘”的三维辨识方法, 对清罐全流程 11 项作业活动、12 个关键环节进行系统性风险辨识。不仅识别出物体打击、中毒窒息、火灾爆炸等 9 类传统风险, 更针对机械清罐特点, 重点识别出“静电积聚引发爆炸”、“氧含量控制失效”等新型风险。最终形成《清罐作业风险分级管控清单》, 采用“作业环节-风险类型-风险等级-触发条件-管控措施-责任人员”六栏式结构, 明确 215 项防控措施, 实现风险与措施的动态映射。

2.1.2 分级责任穿透与双签确认

为解决风险管控责任“上热下冷”的难题, 建立了“基层安全管理员-基层安全负责人-总厂业务部室-总厂分管领导-油田业务处室”五级管控责任体系。并配套“双签确认”机制, 即每一级管控措施落实后, 需由管控责任人与作业负责人共同签字确认, 方可进入下一作业环节, 确保了责任层层传递、措施环环相扣。

2.1.3 动态智能预警与数据驱动

引入物联网技术, 在储罐关键点位安装泵吸式在线气体

检测仪, 实时监测氧含量、可燃气体、 H_2S 等 4 项关键参数, 数据每 30 秒通过 5G 专网传输至三级监控平台。一旦数据异常 (如可燃气体浓度 $\geq 4\%LEL$), 系统立即触发声光报警, 并通过平台推送至相关责任人, 实现从“定期检测”到“实时监测”、从“被动响应”到“主动预警”的转变, 风险预警响应时间从小时级缩短至秒级。

2.2 赋能智能技术, 替代高危人工作业

材料科学与自动化技术的进步为本质安全提供了强大的工具支持。总厂积极引入先进智能装备, 实现“机械化换人、自动化减人”。

2.2.1 应用本安级遥控清洗机器人

针对罐壁人工清洗的高风险, 引入磁吸附式遥控爬壁清洗机器人。该机器人采用强磁吸附底盘和高强度轻量化材料, 确保在弧形罐壁上的稳定吸附与灵活移动。其搭载的高压水射流系统和耐磨喷嘴材料, 能高效剥离高粘度原油沉积物。操作人员可在罐外安全区域远程操控, 通过防爆摄像头实时监控清洗效果。此技术的应用, 不仅将人员从高危环境中彻底解放, 且清洗效率提升 50%, 实现了安全与效率的双赢。

2.2.2 搭建智能视频监管体系

在作业区部署具备 360° 旋转和光学变焦功能的防爆移动视频球机, 形成无死角监控网络。视频数据加密存储并实时上传至管理平台, 结合 AI 视觉识别算法, 可自动识别未佩戴安全帽、违章闯入等行为, 实现“远程监督、实时纠偏”, 有效弥补了人工监护的盲区和滞后性, 使现场作业规范率提升至 100%。

2.3 规范协同与环保管理, 构建绿色安全防线

本质安全模式的成功离不开高效的组织协同和严格的环保合规。

2.3.1 推行承包商“四维量化准入”与全过程协同

建立涵盖资质合规、技术能力、行业信誉、标准化水平的百分制评估体系, 严把承包商准入关。通过“三级例会”和清罐协同数字平台, 打通业主、承包商、第三方机构间的信息壁垒, 实现计划、数据、问题的实时共享与协同处置, 将跨单位响应时间从 24 小时大幅压缩至 4 小时。

2.3.2 落实全流程绿色清罐

在环保方面,严格执行“源头减排、过程管控、末端合规”。在所有作业点安装高效油气回收撬(回收率 $\geq 95\%$),确保VOCs排放浓度远低于国家标准($\leq 120\text{mg}/\text{m}^3$)。制定危废分类处置清单,确保油泥砂等危废100%合规处置。作业区域全域铺设高性能防渗材料(如HDPE膜,防渗系数 $\leq 10^{-11}\text{cm}/\text{s}$),杜绝土壤和地下水污染,彰显了企业的绿色责任担当。

3. 实施效果与讨论分析

自2025年该模式实施以来,总厂已成功完成6座大型原油储罐的清理任务,取得了显著的综合效益。

3.1 安全与环保效益凸显

最核心的成效是实现了“零事故、零伤亡、零污染”的绝对安全目标,安全环保合规率达到100%。这表明,基于本质安全的标准化模式能够有效破解传统清罐的高风险难题。特别是遥控机器人等智能技术的应用,从本质上改变了“人进入危险环境”的作业范式,是达成这一目标的关键。同时,VOCs的超低排放和危废的规范处置,完全符合甚至超越了国家日益严格的环保法规要求,为企业赢得了“绿色工厂”的声誉。

3.2 经济效益与管理效率显著提升

管理模式的重构带来了可量化的经济效益。单罐清理周期从60天缩短至45天,缩短25%,为储罐的后续检修和投用争取了宝贵时间。人工成本降低30%,危废处置费用单罐节约2万元。2025年累计节约成本42万元。更重要的是,标准化作业减少了因操作不当导致的设备损坏和返工,提升了资源利用效率。管理上,从依赖个人经验的粗放式管理,转向了依靠标准、数据和流程的精细化管理,管理决策的科学性和预见性大大增强。

3.3 行业引领与可复制性强

该模式所形成的一系列标准、清单和方案模板,如《外浮顶罐机械清罐模版》、《风险管控清单》等,已成为油田内部高风险作业的标杆。其成功实践在胜利油田内部得到快速推广,并通过行业论坛和交流活动,为全国石油石化企业提供了经过验证的、可复制的解决方案。同时,模式的成功也倒逼和带动了上下游产业链的技术升级与标准化水平提升,形成了良好的产业生态效应。

4. 结论与展望

本文详细介绍的“基于本质安全的储罐机械清理标准化作业模式”,通过系统性的方法论创新和技术集成应用,成功地将一个传统的高风险作业转变为一个安全、高效、绿色、可控的标准化流程。该模式的精髓在于四方面。理念先行,将本质安全理念作为核心指导思想,致力于从源头上控制和消除风险。标准筑基,通过建立详尽、可操作的标准化体系,为作业的每一个环节提供了明确指引,确保了安全与质量的一致性。技术赋能,充分利用智能技术替代人工作业,提升风险管控的精准度和作业效率。协同共治,构建了责任清晰、高效联动的多方协同管理机制。

展望未来,该模式仍有持续优化的空间。可进一步深化AI、大数据和数字孪生技术的应用,构建更具预测性和自适应性的智能安全管理平台;可将该模式拓展至更多类型的储罐及其他高风险作业场景,形成覆盖更广的标准化矩阵。总之,该模式的成功实践表明,推动本质安全与标准化、智能化的深度融合,是提升我国石油石化行业乃至整个高危工业领域安全生产水平的必由之路,具有广阔的推广前景和重要的战略意义。

[参考文献]

- [1] 中国石油化工集团公司. 石油化工企业事故案例汇编[R]. 北京: 中国石化出版社, 2023.
- [2] 王建国, 李志强. 大型原油储罐机械清洗技术安全风险分析及对策[J]. 安全、健康和环境, 2022, 22(5): 1-5.
- [3] 孙宝财, 周福军. 储油罐清洗作业中的安全问题与对策研究[J]. 化工管理, 2024, (10): 78-81.
- [4] Kletz, T. A. (1991). Plant Design for Safety: A User-Friendly Approach. Hemisphere Publishing Corporation.
- [5] 刘强, 陈国华. 本质安全理论及其在化工过程中的应用进展[J]. 化工学报, 2019, 70(1): 1-10.
- [6] 张金柱. 标准化作业在高危行业安全管理中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(S1): 56-60.
- [7] GB 31570-2015, 石油炼制工业污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.