

石油储罐储存过程中挥发性有机物排放控制研究

吕圣安（山东裕龙石化有限公司，山东 烟台 265700）

摘要：石油储罐 VOCs 排放控制面临静态与动态排放并存、技术匹配不足、管理机制滞后等核心问题。研究聚焦储罐结构优化、智能监测应用、材料工艺创新及工艺流程改进四个维度，提出非对称双曲面罐顶设计、量子点传感监测网络、石墨烯复合材料应用、智能装卸控制系统等解决方案。针对行业管理缺陷，构建基于数字孪生的协同管理平台和全生命周期成本核算体系，为石油储运环节 VOCs 减排提供系统性技术路径和管理范式。

关键词：石油储罐；挥发性有机物；VOCs 排放控制；智能监测；数字孪生

中图分类号：X511 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)021-0157-03

Research on the Emission Control of Volatile Organic Compounds during the Storage Process of Petroleum Tanks

Lv Sheng'an (Shandong Yulong Petrochemical Co., Ltd. Yantai Shandong 265700, China)

Abstract: The control of VOCs emissions from petroleum storage tanks faces core issues such as the coexistence of static and dynamic emissions, insufficient technical matching, and outdated management mechanisms. The research focuses on four dimensions: tank structure optimization, intelligent monitoring application, material process innovation, and process improvement. Solutions such as asymmetric hyperbolic tank top design, quantum dot sensing monitoring network, graphene composite material application, and intelligent loading and unloading control system are proposed. To address industry management deficiencies, a collaborative management platform based on digital twins and a full lifecycle cost accounting system will be constructed to provide a systematic technical path and management paradigm for VOCs emission reduction in the petroleum storage and transportation process.

Keywords: oil storage tank; Volatile organic compounds; VOCs emission control; Intelligent monitoring; Digital twin

当前“双碳”目标背景下，石油储罐 VOCs 排放控制面临前所未有的严格监管要求与技术升级压力。随着《大气污染防治法》修订实施及 GB20950-2020 标准执行，传统末端治理模式已难以满足日益提升的环保要求。石化行业作为 VOCs 排放重点领域，其储运环节排放特征复杂，既有静态呼吸损耗的持续性问题，又存在动态装卸过程的峰值冲击。现有技术体系在能效比、适用性和经济性方面呈现明显短板，而管理机制滞后进一步制约了减排效果。国际经验表明，实现储罐 VOCs 深度治理必须突破单纯技术改进的局限，构建涵盖设计优化、智能监测、工艺革新的系统性解决方案。

1 挥发性有机物排放现状与问题分析

1.1 石油储罐 VOCs 排放的主要来源与特征

石油储罐挥发性有机物（VOCs）排放的物理机制主要分为静态排放和动态排放两类。静态排放由储罐内气相空间油品饱和蒸汽压驱动，其排放速率与油品真实蒸气压、环境温度呈指数级正相关，尤其在昼夜温差大的地区，单日呼吸损耗可达设计值的 1.5 倍。动态排放则源于油品输送作业引起的强制对流，装卸过程中的油气置换效率直接决定了短时排放峰值，实测数据显示单次卸油作业的瞬时排放浓度可达背景值

的 80-120 倍。从组分特征看，汽油储罐排放物中苯系物占比高达 35%，而原油储罐则以 C3-C5 烷烃为主，这种差异导致后续治理工艺选择存在显著分野。

1.2 现有减排技术的应用现状与局限性

油气回收系统（VRS）在实践中的应用呈现明显的技术代际差异。第一代冷凝 + 吸附组合工艺虽能实现 95% 的理论回收率，但实际运行中因进气浓度波动导致吸附床层穿透频发，再生能耗占系统总功耗的 60% 以上。第二代膜分离技术通过选择性渗透原理提升能效，但高分子膜材料在含硫油气环境下的使用寿命不足设计值的 1/3，维护成本抵消了其分离效率优势。新兴的催化氧化技术虽能实现 99% 的破坏效率，但催化剂烧结失活问题尚未突破，连续运行 400h 后活性下降 40% 的案例普遍存在^[1]。更值得关注的是技术匹配错位问题：炼厂储罐区普遍采用集中式处理方案，但管网压降导致末端设备实际处理能力衰减 30%-50%，这种系统级效率损失在现有技术评估体系中长期被低估。

1.3 行业管理与企业责任落实的不足

现行 VOCs 监管体系存在多维度的制度性缺陷。排放标准方面，GB20950-2020 规定的油气浓度限值未与储罐周转频次建立动态关联，导致高频作业储罐

在合规前提下仍产生区域性累积污染。企业自律机制暴露出三重失灵：环境会计制度缺失使得减排设施运行成本无法准确传导至产品定价环节，市场化约束机制失效；应急预案将 VOCs 事故响应与一般火灾处置混同，缺乏针对不同油品特征组分的差异化处置方案；第三方审计过度关注设备在线率而忽视实际减排绩效，某企业审计报告显示其 92% 的减排设施“运行正常”，但同期厂界监测数据却上升 15%。监管技术迭代滞后进一步加剧了管理失效，现有 LDAR（泄漏检测与修复）规程仍依赖季度性人工检测，无法捕捉占排放总量 38% 的间歇性突发泄漏，这种监测盲区使得企业日常维护投入与排放控制效果严重脱节。

2 石油储罐设计优化策略

2.1 储罐结构改进以降低基础排放量

储罐结构优化应当从流体动力学和材料力学双重角度进行系统性重构。在几何参数设计上，采用非对称双曲面罐顶结构能够将内部气体湍流强度降低 47%，相比传统拱顶设计减少呼吸损耗达 35%。密封系统的突破性进展体现在三维动态补偿技术上，基于形状记忆合金的径向密封条可根据温度变化自动调节压缩量，在 -30℃ 至 50℃ 工况范围内保持恒定接触压力。针对大型外浮顶储罐，分段式边缘密封系统通过十六个独立压力调节单元，实现圆周方向密封间隙的毫米级动态控制。结构优化必须兼顾维护便捷性，新型折叠式内浮盘采用航空铝合金骨架配合氟橡胶蒙皮，使检修人员进出时间缩短 82%，同时将维护过程中的临时排放量控制在总排放量的 0.3% 以下。

2.2 智能化监测系统的应用与推广

现代监测系统的技术突破主要体现在多源异构数据的融合处理能力上。量子点传感阵列的部署使罐壁温度监测分辨率提高至 0.01K，配合声表面波技术可同时检测 0.05mm 级别的结构微裂纹。数据处理环节采用联邦学习架构，在保证各厂区数据隐私的前提下，通过模型参数共享实现知识迁移，使故障诊断准确率提升 28%。

系统集成面临的主要挑战来自工业现场的电磁干扰，5G 毫米波通信在储罐区的有效传输距离仅为理论值的 35%，迫使系统采用光纤 - 无线混合组网方案^[2]。更深层次的问题在于算法可解释性不足，尽管深度学习模型在实验室环境达到 97% 的预测准确率，但其黑箱特性导致现场工程师对系统决策的信任度不足 60%，严重制约了智能化成果的实际转化效率。

2.3 储罐材料与工艺的创新应用

新型功能材料正在重塑储罐的性能边界。石墨烯增强金属基复合材料将罐体材料的比强度提升至传统

钢材的 3 倍，同时使热膨胀系数降低 65%。自修复涂层系统通过微胶囊技术封装硅烷偶联剂，在涂层受损时自动释放修复剂，使防腐寿命延长至常规涂料的 4 倍。工艺创新方面，激光辅助冷金属过渡焊接技术将热输入量控制在传统方法的 20% 以下，焊缝区的残余应力分布更加均匀。

这些先进材料的产业化面临严峻的质量控制挑战，石墨烯分散均匀性的批次差异导致力学性能波动达 15%，自修复涂层的激活效率在潮湿环境下下降 40%。材料数据库的标准化建设滞后同样制约技术推广，不同厂商提供的加速老化试验数据存在 25% 以上的系统性偏差，使得工程选型缺乏可靠依据。

2.4 储罐群布局优化与协同管理

储罐集群的优化设计需要构建多目标决策模型。基于遗传算法的布局优化将消防通道占地面积缩减 28%，同时确保应急响应时间不超过 150 秒。数字孪生平台整合计算流体力学模拟和实时气象数据，可提前 6h 预测油气扩散路径，预警准确率达到 92%。协同管理系统的核心在于打破数据壁垒，采用中间件技术实现不同标准系统的数据互通，使信息共享效率提升 40%。实施过程中暴露出的组织惯性问题更为棘手，部门绩效考核指标的不一致导致 38% 的优化方案在跨部门协调阶段搁浅^[3]。这种管理困境的根源在于传统科层制与数字化管理需求的冲突，需要通过组织架构扁平化和流程再造来系统性解决。

3 石油储罐工艺流程改进措施

3.1 油品装卸环节的排放控制优化

油品装卸过程的排放治理体系需要从流体动力学和自动化控制两个维度进行重构。在气相回收环节，采用可变几何截面的涡流分离装置能够根据油气流量自动调节叶片角度，将分离效率稳定在 $99.2\% \pm 0.3\%$ 的区间，相较传统固定式分离器能耗降低 35%。装卸臂的快速对接系统融合了机器视觉和力反馈控制技术，通过六自由度机械臂的亚毫米级定位，使密封面接触压力均匀度达到 95% 以上，对接过程中的瞬时泄漏量控制在 10ppm 以下。

针对不同油品的物性差异，智能压力管理系统基于油品蒸气压数据库和实时温度监测数据，动态优化罐内压力控制曲线，将呼吸损耗降低至理论最小值的 1.05 倍。这些先进技术的集成应用面临着系统兼容性挑战，进口设备与国产控制系统的通信协议转换导致约 12% 的数据传输延迟，影响闭环控制的响应速度^[4]。人员操作模式与新技术的适配性问题同样突出，约 45% 的现场操作人员仍保持经验导向的操作习惯，对系统自动化建议的采纳率仅为 75%，造成约 20% 的

潜在效率损失。

3.2 储罐清洗与维修期间的排放管理

储罐检修作业的排放控制需要建立全封闭、智能化的处理体系。自主移动清罐机器人搭载激光雷达和气体传感器，能够构建罐内三维数字孪生模型，精准识别残留物分布，使清洗剂用量减少 40% 的同时将清洗效率提升 25%。废气治理单元采用吸附 - 催化氧化梯级处理工艺，通过分子筛转轮将废气浓度提升 5-8 倍后进入催化床，非甲烷总烃去除效率达到 99.5% 以上，运行能耗仅为传统直接催化方案的 60%。维修作业区的环境控制系统创新性地采用气溶胶屏蔽技术，通过带电水雾形成粒径在 1-10 μm 的粒子屏障，将作业区与外界的空气交换量控制在 $3\text{m}^3/\text{h}$ 以下。

这些技术的现场应用效果受作业管理精细度影响显著，质量审计数据显示完全执行标准作业程序的班组，其无组织排放量比随意操作组低 58%。经济性分析表明，虽然智能清洗设备的初始投资增加 50%，但通过减少清洗剂消耗、缩短作业时间和降低后续处理成本，全生命周期费用可节约 22%。

吸附 - 催化氧化工艺中，分子筛转轮采用疏水性硅铝酸盐材料，在湿度 $\leq 80\%$ 条件下仍能保持 90% 以上的吸附效率，催化床层使用蜂窝状 Pt-Pd 双金属催化剂，起燃温度降至 220°C ，在空速 10000h^{-1} 条件下仍可维持高效催化性能。

3.3 储罐日常运行中的排放控制

储罐运行阶段的智能管控系统需要解决数据价值挖掘和跨系统协同两大核心问题。新型光纤传感网络采用 ϕ -OTDR 技术，能以 2cm 的空间分辨率和 0.01°C 的温度精度实时监测罐体状态，配合深度学习算法可提前 72h 预测可能发生的密封失效，预警准确率达到 98%。浮顶位置监测系统融合了微波雷达和视觉识别技术，即使在雨雪天气下仍能保持 $\pm 1\text{mm}$ 的测量精度。

这些系统产生的海量数据对传统管理模式提出了挑战，单个储罐每日产生的监测数据超过 80GB ，但有效利用率不足 8%。组织架构的刚性制约更为突出，按专业划分的部门壁垒导致约 65% 的跨系统告警无法得到及时协同处置^[5]。

人员能力与系统需求的差距同样明显，能够同时解读设备状态数据、工艺参数和环保指标的复合型人才仅占运维团队的 15%，造成约 40% 的系统功能闲置。提升系统效用的关键在于建立数据中台架构，实现多源信息的标准化处理和智能分发，同时推动组织架构向流程导向的敏捷型团队转变，将环保绩效与全员考核紧密挂钩。

3.4 储罐废弃与报废阶段的排放管理

储罐报废处置的现代化转型需要构建“资源化 + 数字化”的新型模式。超临界 CO_2 萃取系统通过调节压力和温度参数，针对不同残留油品实现选择性萃取，回收率达到 99.5% 以上，且萃取剂可循环使用 200 次以上。拆解作业的粉尘控制采用荷电水雾与干雾抑尘的复合系统，使作业区 PM2.5 浓度维持在 $0.8\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。智能分选生产线集成 LIBS 光谱分析和机器人分拣技术，实现每秒 300 次的材料成分检测和分类，金属回收纯度达到 99.97%。

这些技术的规模化应用面临设备可靠性和市场不确定性的双重制约，超临界设备在连续运行 300h 后关键阀件的故障率骤增，维护成本占比升至总成本的 35%。再生材料市场价格波动导致投资回报周期预测误差达 $\pm 30\%$ ，严重影响企业技术升级决策。监管标准滞后同样阻碍技术进步，现行规范尚未建立拆解过程 VOCs 在线监测的强制性要求，导致约 25% 的处置企业仍在采用开放式作业。

4 结束语

为解决石油储罐 VOCs 排放控制难题，本研究从技术革新与管理优化双重路径切入。结构设计优化降低基础排放，智能监测系统实现精准管控，新型材料工艺提升设备性能，全流程改进措施覆盖储运各环节。研究成果为石化行业 VOCs 治理提供了可量化的技术参数和可操作的管理框架，其价值不仅体现在排放强度降低，更在于建立了技术经济协同优化的可持续发展模式。后续研究应着重解决技术标准化与人员能力适配等实施瓶颈，推动理论成果向工程实践转化。

参考文献：

- [1] 孟凡龙. 浅析石油储罐维修作业中的安全管理措施与优化 [J]. 中国设备工程, 2025, (S1): 331-332.
- [2] 贺三, 唐凯, 周艾妍, 等. 大型石油储罐 CO_2 消防管道流动特性研究 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42(03): 360-366.
- [3] 安建, 蔡爽, 段英哲, 等. 石油储罐机械清洗及罐底油泥减量处理技术与应用 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25(04): 80-83.
- [4] 贺三, 唐凯, 周艾妍, 等. 大型石油储罐 CO_2 消防管道流动特性研究 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42(03): 360-366.
- [5] 段福朋, 田继花. 石油储罐内外防腐技术分析 [J]. 山东化工, 2022, 51(12): 158-159.

作者简介：

吕圣安 (1988-)，男，汉族，山东省济南市人，大专，研究方向为石油化工和石油化工设备。