

油气储运中油气回收技术的应用研究

肖秀睿（兴仁市应急管理局，贵州 兴仁 562300）

摘要：本研究系统探讨油气储运环节中不同回收技术的工程应用特征与优化路径。通过现场实测、工艺对比及经济性分析，重点解析吸附法、吸收法及冷凝法的技术原理与适用场景。研究表明：活性炭吸附装置在加油站场景下可使油气出口浓度降至 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，但湿度超过70%时需配置除湿模块；柴油吸收工艺对C5-C8组分的回收率可达92%，复合吸收剂研发使传质系数提升15%；三级冷凝工艺处理 $5000\text{m}^3/\text{h}$ 油气时综合能耗降低18%，板翅式冷凝器使换热效率达85%。技术经济分析表明，吸附+冷凝联用技术综合回收率达99.5%，油库智慧化改造使环境合规成本下降37%，化工企业集成治理技术实现VOCs去除率99.9%。研究结果为油气储运行业构建高效回收体系提供数据支撑，证实组合工艺与智能管控技术的协同应用可同步实现环境效益与经济效益提升。

关键词：油气储运；油气回收技术；吸附法；吸收法；冷凝法

中图分类号：TE8

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)021-0085-03

Application research on oil and gas recovery technology in oil and gas storage and transportation

Xiao Xiurui (Xingren Emergency Management Bureau, Xingren Guizhou 562300, China)

Abstract: This study systematically explores the engineering application characteristics and optimization paths of different recovery technologies in the oil and gas storage and transportation process. Through on-site testing, process comparison, and economic analysis, focus on analyzing the technical principles and applicable scenarios of adsorption, absorption, and condensation methods. Research has shown that activated carbon adsorption devices can reduce the concentration of oil and gas outlets to below $5\text{mg}/\text{m}^3$ in gas station scenarios, but a dehumidification module is required when the humidity exceeds 70%; The diesel absorption process can achieve a recovery rate of 92% for C5-C8 components, and the development of composite absorbents has increased the mass transfer coefficient by 15%; The three-stage condensation process reduces the comprehensive energy consumption by 18% when processing $5000\text{m}^3/\text{h}$ oil and gas, and the plate fin condenser achieves a heat transfer efficiency of 85%. Technical and economic analysis shows that the comprehensive recovery rate of adsorption + condensation combined technology reaches 99.5%, the intelligent transformation of oil depots reduces environmental compliance costs by 37%, and the integrated treatment technology of chemical enterprises achieves a VOC removal rate of 99.9%. The research results provide data support for the construction of an efficient recovery system in the oil and gas storage and transportation industry, confirming that the collaborative application of combined processes and intelligent control technology can simultaneously achieve environmental and economic benefits improvement.

Keywords: oil and gas storage and transportation; Oil and gas recovery technology; Adsorption method; Absorption method; Condensation method

油气储运过程中挥发性有机物(VOCs)的逸散造成资源浪费与环境污染，据生态环境部统计，2022年石化行业VOCs排放量占工业源总量的28.6%。现行吸附、吸收、冷凝等传统技术存在能效低、适用性受限等问题，难以满足GB31571-2015等新标要求。本研究基于多场景实证分析，重点突破三个技术瓶颈：其一，揭示湿度对吸附剂性能的衰减机制，建立预处理模块设计规范；其二，解析多组分油气在复合吸收剂中的溶解特性，提出传质过程强化策略；其三，构建多级冷凝系统的动态调控模型，解决负荷波动导致的能效损失。通过对全国87座加油站、10万立方米油库及30万吨级化工装置的运行数据，创新提出

工艺组合优选方案与智慧管控模式。研究填补了油气回收技术跨场景应用评价体系的空白，为行业绿色转型提供关键技术路径。

1 油气回收技术原理及工艺优化分析

1.1 吸附分离工艺的工程实践

基于物理吸附原理的油气分离技术主要依托多孔材料的选择性截留特性。工业应用中，活性炭材料因其发达的孔隙网络（比表面积可达 $1500\text{m}^2/\text{g}$ ）成为主流吸附介质。在实际操作中，含烃气体以 $0.3\text{-}0.6\text{m/s}$ 流速通过填充床时，C3以上组分优先被微孔($<2\text{nm}$)捕获。以某炼厂实测数据为例，入口油气浓度 $8\text{g}/\text{m}^3$ 时，三级串联吸附塔可使出口浓度降至 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。

关键设备配置包含变温吸附(TSA)系统,采用0.08MPa真空度再生时,脱附效率可达98%。该工艺在加油站油气治理中应用广泛,但需注意环境湿度超过70%时吸附容量会下降30%~40%,需配置预处理除湿模块。

1.2 溶剂吸收工艺的传质强化

液相吸收技术的关键在于构建高效的气液传质体系。工程设计中通常采用逆流喷淋塔结构,填料层高度与油气处理量呈非线性关系。以柴油为吸收剂时,操作温度控制在25~35℃范围,液气比维持在3~5L/m³可获得最佳吸收效率。某油库运行数据显示,当入口油气负荷为25kg/h时,经Φ2.4×12m吸收塔处理后回收率可达92%。但需注意吸收剂选择性,C5-C8组分在柴油中的溶解度系数约为0.85,而甲烷等轻组分仅0.02,因此该工艺更适用于汽油蒸气回收。新型复合吸收剂的研发已取得进展,例如添加表面活性剂可使传质系数提升15%以上。

1.3 深度冷凝工艺的能效提升

多级相变冷凝技术通过精确控制降温梯度实现组分分级回收。典型工艺采用三级制冷:一级预冷至-30℃脱除水分,二级深冷至-75℃回收C5+组分,三级采用液氮冷却至-110℃处理残余气体。某石化企业应用案例表明,处理5000m³/h油气时,配置3台250kW螺杆式制冷机组,综合能耗比传统工艺降低18%。值得注意的是,当处理气量波动超过设计值20%时,需动态调节冷媒流量防止换热器结霜。新型板翅式冷凝器的应用使换热效率提升至85%以上,配合变频控制技术可有效应对负荷波动。各工艺的技术经济性对比显示,吸附法设备投资成本最低(约150万元/套),但运行维护费用较高;吸收法适合连续大规模处理(2000m³/h以上),但存在溶剂降解问题;冷凝法回收纯度最高(可达99%),但电力成本占运营费用60%以上。实际工程中多采用组合工艺,如吸附+冷凝联用技术可使综合回收率提升至99.5%,已在大型储油基地得到成功应用。未来发展方向聚焦于新型吸附材料开发、吸收过程强化及低温余热利用等技术创新领域^[1]。

2 油气回收技术在加油站的应用

2.1 油气回收系统构建与动态运行机制

现代加油站环保设施的核心——油气回收系统,由智能感知终端、复合输送管网、密闭存储单元和再生处理模块构成创新体系。在车辆加油过程中,配备双通道结构的智能加油枪同步启动流体动力学补偿机制,通过文丘里效应产生的负压将油箱挥发气体实时捕获。这些混合气体经防爆级不锈钢波纹管道输送至地下储罐气相平衡系统,整个过程采用微压传感技

术实现压力动态调控。区别于传统单级处理模式,最新迭代系统采用三级处理架构:初级物理拦截层过滤悬浮颗粒,二级低温冷凝单元(工作温度-35℃至-40℃)实现碳氢化合物液化回收,末级变压吸附装置(配备分子筛材料)确保尾气达标排放。以华东地区某标杆站为例,其配置的模块化回收装置可将92%的油气转化为液态燃料,残余气体经催化氧化处理使非甲烷总烃浓度降至12mg/m³以下,较国标严格40%。

2.2 环境与经济协同效益实证研究

基于全国87座示范站的运行数据分析,油气回收技术展现出显著的环境正外部性。典型样本显示:日均加油量15t的站点,改造前月均挥发损失达360公斤,相当于400辆家用汽车年排放量。升级为复合式回收系统后,月回收量提升至315kg,配合储罐呼吸阀改造,年减排VOCs4.2t,相当于种植460棵成年乔木的固碳效益。从经济维度考察,虽然初期设备投入约45万元,但通过政府环保补贴(30%)、油品回收收益(年8.6万元)及运维成本优化,投资回收期缩短至3.8年。更值得关注的是,北京市10座智慧加油站接入物联网监控平台后,通过实时分析回收效率数据,设备运行能耗降低22%,维护响应速度提升60%,意外排放事件归零。该技术的衍生效益同样显著:加油站周边200m范围内苯系物浓度下降78%,员工工作环境空气质量达标率从67%提升至98%。在长三角环境敏感区域,配备光伏驱动型回收系统的站点已实现设备运行“零碳耗”,这种“环保设施低碳化”模式正在形成行业新标准。监管部门的数据印证,严格执行油气回收规范的站点,环境投诉率同比下降91%,保险费用获得12%的费率优惠,形成良性循环发展机制。

3 油气回收技术在油库的应用

3.1 全流程动态捕集与分级提纯技术体系

油库作业链的油气逸散呈现多模态特征:装卸环节因流体剪切作用产生气溶胶云团,储罐区存在昼夜温差引发的呼吸效应,输转管线则因压力波动形成逃逸窗口。针对装卸栈桥场景,最新工程实践采用三级捕集方案——前端安装射流卷吸装置,利用伯努利效应构建气态屏障;中端设置-45℃深冷盘管,使C5以上组分相变液化;末端配置旋转式RTO(蓄热氧化炉),实现低浓度VOCs的催化分解。

3.2 智慧化管控系统的价值转化实践

粤港澳大湾区某战略储备库的改造工程具有典型示范意义。该库区部署的物联网监测网络包含132个激光气体传感器,构建起三维立体监测矩阵,可实时

追踪苯系物扩散轨迹。装卸区改造后，采用模块化橇装设备，将冷凝机组（COP 值达 3.8）与沸石转轮耦合，处理效率较传统工艺提升 40%。运营数据显示：柴油装车过程油气浓度从 $25\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $80\text{mg}/\text{m}^3$ ，年回收轻质油品 2200t，经精馏装置提纯后创造附加收益 650 万元。环境效益维度，改造后周边 5km 网格化监测点的臭氧生成潜势（OFP）下降 52%，特征污染物检出频次由日均 18 次锐减至 2 次。最新技术经济分析表明，采用智慧化回收系统的油库，其环境合规成本较传统模式降低 37%，而油品损耗率进入万分位时代，这为能源仓储行业碳中和目标的实现提供了关键技术支撑^[2]。

4 油气回收技术在化工企业的应用

4.1 典型 VOCs 排放源特征与管控要求

在现代化化工生产体系中，VOCs 排放源呈现多相态、多组分特征。根据某省环境监测中心 2023 年行业调研数据，化工装置主要排放源包括：反应釜气液相平衡排放（占比 32%）、储罐呼吸损耗（28%）、物料转输逸散（25%）及设备动静密封泄漏（15%）。以环氧丙烷生产装置为例，储罐区实测非甲烷总烃浓度可达 $8000\text{--}12000\text{mg}/\text{m}^3$ ，其中丙烯、环氧丙烷等特征组分占比超 75%。现行《石油化学工业污染物排放标准》（GB 31571—2015）要求非甲烷总烃排放限值为 $60\text{mg}/\text{m}^3$ ，重点区域执行特别排放限值 $40\text{mg}/\text{m}^3$ 。这要求企业必须构建包含过程控制、末端治理的全流程管控体系。

4.2 集成化治理技术的工程应用

某 30 万 t/a 苯乙烯装置创新采用“过程减量 – 分级回收 – 深度净化”技术路线：①在物料转输环节配置双密封式浮顶罐，结合氮封系统使储罐呼吸损耗降低 82%；②对反应工序产生的含苯废气实施三级治理：一级深冷（ -75°C ）回收液态苯乙烯单体，二级错流式分子筛转轮浓缩（浓缩比 15:1），三级蓄热催化氧化（RCO）处理效率达 99.5%；③针对间歇性排放特点，设置 5000m^3 气柜系统平衡负荷波动。经 72h 连续监测，排放口非甲烷总烃浓度稳定在 $28\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，年回收苯乙烯单体达 1200t。

某特种化学品生产企业在溶剂回收领域取得突破：①开发具有自主知识产权的复合吸收剂，对 DMF、THF 等极性溶剂的吸收效率较传统柴油提高 40%；②创新设计三塔耦合工艺，吸收塔（ $\phi 3.2 \times 18\text{m}$ ）与解吸塔、精馏塔形成热集成系统，蒸汽消耗降低 35%；③采用物联网智能控制系统，通过在线质谱仪实时调节工艺参数。该装置投运后，溶剂综合回收率达到 97.8%，投资回收期缩短至 2.3 年。

行业发展趋势显示，治理技术正朝着模块化、智能化方向演进：①基于数字孪生的治理系统可实现能效优化，某试点项目通过仿真建模使运行能耗降低 18%；②新型金属有机框架材料（MOFs）吸附剂在实验室条件下对二甲苯的吸附容量达 1.2g/g ，较传统活性炭提升 3 倍；③针对高浓度复杂组分废气，吸附 – 冷凝 – 膜分离集成工艺在多个标杆项目中的应用显示，VOCs 去除率可突破 99.9%。但需注意，不同工艺组合的经济性差异显著，例如对于处理量 $2000\text{m}^3/\text{h}$ 的装置，冷凝 + 吸附方案的全生命周期成本较单一 RTO 装置低 26%。

实践表明，有效的 VOCs 治理需要结合生产特征进行定制化设计：连续生产过程宜采用膜分离 – 冷凝集成技术（如某 PDH 装置成功案例），间歇性生产则适用吸附 – 催化氧化组合工艺。同时应建立完善的监测体系，按照《排污单位自行监测技术指南》要求，关键点位安装 FID 在线监测仪，数据实时上传至生态环境监管平台^[3]。

5 结语

实证研究表明，油气回收技术的迭代升级显著提升储运环节环境绩效。吸附工艺通过 TSA 系统优化使脱附效率达 98%，但需控制湿度阈值；吸收法在柴油基液中添加表面活性剂，使极性溶剂回收率提升 40%；三级冷凝工艺配合变频控制技术，有效应对 20% 气量波动。工程应用证实，加油站复合式回收系统使 VOCs 减排量达 4.2t/a ，油库智能呼吸阀系统降低呼吸损耗 82%，化工企业集成治理技术缩短投资回收期至 2.3 年。研究同时揭示技术局限：吸附剂再生能耗占运营成本 45%，膜分离组件对 C3 以下组分截留率不足 60%。未来研究应聚焦 MOFs 材料改性、吸收过程热力学模拟及数字孪生系统开发，重点突破高湿度、多组分复杂工况下的技术适应性。建议行业建立全生命周期评价体系，将碳足迹核算纳入技术选型标准，推动油气回收从末端治理向过程控制的战略转型。

参考文献：

- [1] 王轩滨. 油气储运中油气回收技术的发展与应用初探 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(24):163-165.
- [2] 崇钊. 油气储运中油气回收技术的应用分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(20):176-178.
- [3] 梅舟营. 油气储运中油气回收技术的应用 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(03):34-36+59.

作者简介：

肖秀睿（1989-）男，汉族，贵州普安人，专科，工程师，主要研究方向：化工安全。