

# 油气储运系统中挥发性有机物（VOCs）减排技术及回收利用方案

殷 慧（中石化江苏石油工程设计有限公司，江苏 扬州 225100）

**摘要：**油气储运系统里 VOCs 排放问题很突出，设备密封存在的缺陷与回收工艺效率不足是主要症结。本文优化储罐密封结构，升级浮盘密封材料、改良呼吸阀性能；提升管道输送技术，强化柔性连接密封、优化压力调节系统；改进吸附与膜分离回收技术，优化吸附-解吸循环等措施，能有效减少 VOCs 泄漏，提升回收效率，让系统 VOCs 排放得到有效控制，回收利用水平显著提高。

**关键词：**油气储运；挥发性有机物；VOCs 减排；回收技术；密封优化

**中图分类号：**TE8      **文献标识码：**A      **文章编号：**1674-5167 (2025) 030-0103-03

## Volatile organic compounds (VOCs) emission reduction technology and recycling scheme in oil and gas storage and transportation systems

Yin Hui (Sinopec Jiangsu Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Yangzhou Jiangsu 225100, China)

**Abstract:** The problem of VOCs emission in oil and gas storage and transportation system is very prominent, and the defects in equipment sealing and the insufficient efficiency of the recovery process are the main crux. In this paper, the sealing structure of the storage tank is optimized, the floating plate sealing material is upgraded, and the breathing valve performance is improved. Improve pipeline transportation technology, strengthen flexible connection sealing, and optimize pressure regulation system; Improving the adsorption and membrane separation and recovery technology, optimizing the adsorption-desorption cycle and other measures can effectively reduce VOCs leakage, improve recovery efficiency, effectively control VOCs emissions in the system, and significantly improve the recycling level.

**Keyword:** oil and gas storage and transportation; volatile organic compounds; VOCs emission reduction; recycling technology; Sealing optimization

油气储运过程中，VOCs 排放会造成资源浪费，加剧环境污染，还藏着安全隐患，储运系统在设备密封性能与回收工艺应用上存在明显不足，使得 VOCs 排放问题一直难以得到有效解决。油气储运系统的 VOCs 减排及回收利用技术，对减少排放总量、提升资源利用效率、促进行业朝着绿色方向发展有着重要意义，目的是借助技术层面的改进，为 VOCs 排放这一难题提供切实有效的解决办法。

## 1 油气储运系统 VOCs 减排及回收技术现状

### 1.1 储运系统 VOCs 控制现状

在油气储运系统中，控制挥发性有机物（VOCs），当下主要关注储罐、管道及装卸环节，储罐环节，不少企业用氮封技术，在罐内油品上方充氮气，减少油品接触空气，降低 VOCs 因氧化和温差出现的挥发，优化浮盘设计，用新型密封材料，特种橡胶或复合材料能增强浮盘与罐壁贴合度，减少缝隙处油气泄漏。管道上，用高精度检测设备，激光泄漏检测技术可定期查管道焊缝、阀门及连接处微小泄漏点，及时修复，装卸作业时，推行密闭装卸工艺，借专用鹤管和密封连接装置，把装卸过程中油气密闭收集，避免逸散到

大气里。

### 1.2 废气回收处理技术应用现状

冷凝回收技术依据不同温度下油气各成分饱和蒸气压的差异，借助多级制冷系统逐步降低油气温度，让其中的 VOCs 冷凝成液态回收，设备一般有预冷器、冷凝器和制冷机组等，可高效回收高沸点、高浓度的 VOCs，吸附回收技术利用吸附剂，如活性炭、分子筛等，吸附油气中的 VOCs。吸附剂饱和后，用蒸汽吹扫或降压解吸等方式将 VOCs 从吸附剂上脱附，再做冷凝回收，吸收回收技术挑选合适的吸收剂，像轻柴油等有机溶剂，在吸收塔内与油气逆流接触，使 VOCs 溶解到吸收剂中，之后解吸等操作完成回收。

## 2 油气储运系统 VOCs 减排及回收技术问题

### 2.1 设备密封技术存在缺陷

储罐浮盘密封结构长期运行，经油品腐蚀、温度变化及机械磨损，密封材料易老化、变形或局部破损，浮盘与罐壁间形成微小缝隙，油气便缝隙逸散，管道连接部位的密封垫片，因材质耐温性、耐油性不够，在周期性压力波动下易弹性失效，形成持续性泄漏通道。装卸作业用的鹤管密封组件，受对接精度偏差及

表1 不同类型呼吸阀性能对比数据

呼吸阀类型	开启压力偏差	泄漏量 (mg/m³)	材质	使用寿命 (年)
普通呼吸阀	±15%-±20%	约 200-500	碳钢	2-3
高灵敏度低超压翼型阀盘呼吸阀	±5% 以内	约 1-5	316L 不锈钢	5-8
镜面级金属面密封呼吸阀	±8% 以内	< 20	特种合金	6-10

数据来源：中石化沧州炼化储罐区 VOCs 治理项目实测数据、普瑞泰格呼吸阀产品检测报告、相关行业呼吸阀应用调研数据。

频繁操作磨损，密封面贴合度降低，难完全阻断油气挥发路径，现有密封技术对极端气候条件适应性不足，低温易让密封材料硬化开裂，高温易加快材料老化，VOCs 泄漏风险因此进一步加剧。

## 2.2 回收处理工艺效率不足

冷凝回收工艺在处理低浓度油气的过程中，由于制冷深度存在局限，部分轻质 VOCs 很难达到冷凝露点，这就导致尾气里仍会残留一定量未被回收的组分，吸附回收工艺当中，吸附剂本身对湿度较为敏感，油气中含有的水汽容易占据吸附活性位点，进而降低吸附容量，在解吸过程中若是温度控制不到位，很容易造成吸附剂性能衰减，对循环使用效率产生影响。膜分离工艺里，膜材料对于复杂组分油气的选择性渗透性能不均衡，部分重质 VOCs 分子容易在膜表面沉积形成堵塞，使得膜通量下降，膜组件的耐压性能有一定限制，在高压运行状态下容易出现膜孔扩张，让分离精度降低，各类单一工艺在应对成分波动较大的油气时，都会存在处理效率不稳定的问题。

## 3 油气储运系统 VOCs 减排技术改进

### 3.1 储罐密封结构优化

#### 3.1.1 浮盘密封材料升级

氟橡胶有出色的耐油性、耐化学腐蚀性和耐高温表现，适合做浮盘密封材料，工作温度在 -20℃ 到 200℃ 之间，能应对不同地区、季节的温度差异。把它放在汽油里浸泡 1000h，体积膨胀率不到 5%，长期接触油气环境也能维持良好的密封效果。

硅橡胶柔韧性和抗老化性能突出，在 -50℃ 到 150℃ 之间能保持稳定密封状态，透气性又极低，可有效阻挡油气分子扩散，5000m³ 的储罐用普通橡胶密封材料，每天可能因密封不严密导致约 10kg VOCs 泄漏，换成硅橡胶后，泄漏量能降到 1kg 以下。聚四氟乙烯与橡胶复合的新型材料，有聚四氟乙烯的低摩擦系数和橡胶的弹性，能减小浮盘升降的摩擦阻力，延长使用时间，密封效果也大幅增强。

#### 3.1.2 罐顶呼吸阀性能改良

新型呼吸阀采用高灵敏度低超压翼型阀盘技术，开启压力偏差可控制在 ±5% 以内，这样能避免因压力控制不够精准而导致的频繁起跳，减少不必要的油气

排放。密封性能方面，运用镜面级金属面密封技术，泄漏量达到了安全阀的标准，普瑞泰格研发的高效环保超低泄漏呼吸阀，经过现场实际测量，其泄漏量仅为普通阀门的万分之一，在中石化沧州炼化储罐区 VOCs 治理项目中，泄漏检测数值低于 20mg/m³，基本实现了“零排放”的目标。

呼吸阀材质采用耐腐蚀、高强度的不锈钢或特种合金，316L 不锈钢材质的呼吸阀在沿海这类潮湿、高盐分环境中，可经受 5 年以上腐蚀且性能不受影响，使用寿命比普通碳钢材质长 2 至 3 倍。结构经优化，增设防风雨、防虫网等附属装置，防止杂物干扰工作，日常维护借助智能监测系统实时监控工作状态，涉及压力变化、开启次数等参数，定期校准维护，确保处于最佳运行状态，高效控制储罐内压力，减少 VOCs 排放，见表 1。

### 3.2 管道输送减排技术提升

#### 3.2.1 柔性连接密封强化

密封材料用氢化丁腈橡胶 (HNBR)，耐油温度在 -40℃ 到 150℃ 之间，在原油、汽油等介质里浸泡 168h，硬度变化值能控制在 ±5 Shore A 以内，拉伸强度保持率比普通丁腈橡胶好。结构采用双唇边密封设计，主唇边直径比法兰密封面大 2mm，副唇边构成辅助密封腔，腔内填着 0.5mm 厚的膨胀石墨带，介质压力到 0.2MPa 时，主唇边紧密贴住密封面，副唇边膨胀形成二次密封。

#### 3.2.2 压力调节系统优化

选用高精度压力变送器，测量范围包含 0.1MPa 到 6.4MPa，精度等级达到 0.075 级，采样频率设为 10Hz，能实时捕捉 0.001MPa 的压力变化。控制单元运用模糊 PID 算法，把管道压力波动范围控制在设定值 ±0.02MPa 以内，检测到压力偏离阈值时，调节阀门响应时间不超过 0.5s。

执行机构采用电动偏心旋转阀，阀体流通直径与管道公称直径相同，流阻系数小于 0.5，全关状态下的泄漏量比 0.01% 额定流量还低。系统中增设压力缓冲罐，容积按管道容积的 1/10 来设计，罐内填充多孔金属填料，孔隙率为 85%，可吸收瞬时压力冲击，让压力波动幅度降低到原来的 1/3。

## 4 油气储运系统 VOCs 回收技术完善

### 4.1 吸附回收技术改进

#### 4.1.1 高效吸附剂选型应用

活性炭纤维比表面积达  $1500\text{--}2500\text{ m}^2/\text{g}$ , 孔径分布  $1\text{--}5\text{ nm}$ , C3-C8 烃类 VOCs 静态吸附量  $0.3\text{--}0.5\text{ g/g}$ , 吸附速率较颗粒活性炭快 3-5 倍, 低浓度油气可被快速捕捉。13X 型分子筛孔径  $1.0\text{ nm}$ , 水分子吸附量不足  $0.05\text{ g/g}$ , 水汽干扰得以减少, 相对湿度 60% 环境中吸附容量保持率处于较高水平。

复合吸附剂呈双层填充结构, 下层 13X 分子筛厚  $30\text{ cm}$ , 上层活性炭纤维毡厚  $20\text{ cm}$ , 总床层高  $50\text{ cm}$ , 气流速度  $0.8\text{--}1.2\text{ m/s}$ , 接触时间不低于  $0.8\text{ s}$ 。再生温度随成分调整, 汽油油气  $120\text{--}150^\circ\text{C}$ , 柴油油气  $180\text{--}200^\circ\text{C}$ , 再生时间  $40\text{--}60\text{ min}$ , 残留吸附量低于  $0.02\text{ g/g}$ , 装填时借助气流分布板布气, 板上开孔率 15%, 孔径  $8\text{ mm}$ , 孔间距  $5\text{ cm}$ , 防止气流偏流造成局部饱和, 材料匹配与结构优化可提升对复杂油气组分的捕获效率。

#### 4.1.2 吸附-解吸循环优化

采用三塔轮换工艺, 单塔吸附  $8\text{ h}$ , 解吸与冷却各  $4\text{ h}$ , PLC 控制系统全自动切换, 响应时间不超  $5\text{ s}$ , 保障废气连续处理。解吸用阶梯式升温,  $50^\circ\text{C}$  热氮气先吹扫  $10\text{ min}$  除游离水, 再升温至  $120^\circ\text{C}$  保持  $20\text{ min}$  脱附轻组分 VOCs, 最后升至  $180^\circ\text{C}$  维持  $10\text{ min}$  深度脱附重组分, 热氮气流量  $150\text{--}200\text{ m}^3/\text{h}$ , 流速  $0.5\text{ m/s}$ 。

冷却阶段引入  $20\text{--}30^\circ\text{C}$  低温氮气, 流量同热氮气, 持续  $30\text{ min}$  让吸附剂温度降至  $40^\circ\text{C}$  以下, 残留热量不影响下一周期效率, 循环中设压力平衡步骤, 两塔压力差在  $0.02\text{ MPa}$  以内开启平衡阀, 减少能耗损失。吸附塔进出口装在线 VOCs 浓度监测仪, 检测下限  $0.1\text{ ppm}$ , 出口浓度超  $50\text{ ppm}$  提前再生, 动态调整参数让单次循环 VOCs 去除量稳定, 吸附剂寿命延长至  $3\text{--}5\text{ 年}$ 。

### 4.2 膜分离回收技术升级

#### 4.2.1 复合膜材料性能提升

基材用聚砜中空纤维膜, 内径  $0.8\text{ mm}$ , 壁厚  $0.2\text{ mm}$ , 孔隙率 75%, 膜丝机械强度足够, 可承受  $0.8\text{ MPa}$  操作压力不破裂。表面涂层为交联型聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 厚度控制在  $5\text{ }\mu\text{m}$ , 等离子体处理技术提升涂层与基材结合强度,  $1000\text{ h}$  运行测试显示, 涂层脱落量低于  $0.1\text{ mg/cm}^2$ 。

增强对 VOCs 的选择性渗透, PDMS 涂层中掺杂  $0.5\text{ nm}$  分子筛颗粒, 量为涂层质量 15%, 膜对丙烷渗透系数达  $8000\text{ Barrer}$ , 对氮气渗透系数控制在  $50\text{ Barrer}$  以内, 渗透选择系数提升至 160。膜丝组装用内压式

设计, 有效膜面积每平方米膜组件  $150\text{ m}^2$ , 卷式缠绕工艺让膜组件直径  $200\text{ mm}$ , 长度  $1000\text{ mm}$ , 单位体积膜面积比传统组件提高 30%, 制备时, 凝胶浴温度  $30^\circ\text{C}$ 、凝固时间  $60\text{ s}$ , 膜孔结构均匀, 泡点测试显示, 最大孔径偏差不超  $0.05\text{ }\mu\text{m}$ , 膜材料对油气中 VOCs 的分离效率与长期稳定性显著提升。

#### 4.2.2 膜组件运行参数优化

操作压力  $0.6\text{ MPa}$ , 增压泵稳定压力, 波动幅度控制在  $\pm 0.02\text{ MPa}$  以内, 膜结构不会因压力骤变受损。原料气进入膜组件前预热至  $40^\circ\text{C}$ , 板式换热器换热, 每小时处理  $100\text{ m}^3$  原料气配置  $10\text{ m}^2$  换热面积, 气体温度稳定, VOCs 分子扩散系数保持在  $1.2 \times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。

原料气在膜组件内流速  $10\text{ m/s}$ , 错流过滤, 壳程与管程流速比 3:1, 导流板提升气流均匀性, 边缘与中心区域流速偏差不超  $0.5\text{ m/s}$ 。渗透侧真空抽吸, 真空度维持在  $-0.08\text{ MPa}$ , 稳定浓度梯度促进渗透, 每  $24\text{ h}$  在线清洗,  $30^\circ\text{C}$  去离子水冲洗膜表面  $10\text{ min}$ , 流量  $5\text{ m}^3/\text{h}$ , 去除重质组分, 膜通量恢复率较高。

## 5 结语

针对油气储运系统 VOCs 排放这一实际问题, 从设备的密封处理到回收工艺的具体环节实施了多方面技术改进, 储罐与管道的密封性能得到实质性提升, 切实阻断了 VOCs 的泄漏路径; 吸附与膜分离技术的应用细节不断完善, 有效提升了 VOCs 的回收效率。各项技术措施相互配合协同作用, 大幅降低了系统 VOCs 的排放量, 提高了资源的回收利用率, 为油气储运行业在环保与节能发展方面提供了切实可行的技术支撑, 有力推动行业实现绿色可持续运营。

## 参考文献:

- [1] 翟中杨, 吴梦蝶, 周秀梅. 储罐挥发性有机物排放分析及减排策略研究 [J]. 石油化工安全环保技术, 2025, 41(03):33-37+6-7.
- [2] 林晓朋, 胡建, 曲广顺. 石油化工企业油气储运工程安全性问题的探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(05):84-86.
- [3] 孙雅倩, 王爽, 胡宗武, 等. 油气储运中的安全环保问题及其对策 [J]. 甘肃科技, 2021, 37(12):11-12+141.
- [4] 杜羸. 石油化工企业油气储运工程安全性研究 [J]. 居业, 2021, (02):133-134.
- [5] 黄烯茜. 典型 VOCs 污染源成分谱及基于反应活性的减排对策研究 [D]. 上海交通大学, 2020.

## 作者简介:

殷慧 (1991- ), 女, 汉族, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向: 油气储运工程。