

# 原油储罐区挥发性有机物逸散规律与减排技术优化

孙宝齐 (山东港源管道物流有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 原油储罐区是石油石化行业 VOCs 的最大排放源, 在挥发出大量资源的同时也会引发臭氧污染及雾霾天气的产生, 系统的解析 VOCs 逸散的物理化学机制以及“物料-设备-环境-操作”多角度耦合规律、分析比选密封改造、冷凝回收、吸附净化、催化燃烧、膜分离等 VOCs 控制技术的技术经济性和适用性边界, 并提出从“源头控制-过程治理-智能管控”的三维 VOCs 优化技术体系构想。

**关键词:** 原油储罐; 挥发性有机物; 逸散规律; 减排技术; 工艺优化

**中图分类号:** X511      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0154-03

## Emission Regularity and Emission Reduction Technology Optimization of Volatile Organic Compounds in Crude Oil Tank Farms

Sun Baoqi (Shandong Gangyuan Pipeline Logistics Co., Ltd., Yantai Shandong 264000, China)

**Abstract:** Crude oil tank farms are the largest source of volatile organic compounds (VOCs) emissions in the petroleum and petrochemical industry. While emitting substantial amounts of resources, they also contribute to ozone pollution and haze weather. This paper systematically analyzes the physical and chemical mechanisms of VOCs emission and the multi-dimensional coupling laws from the perspectives of “material-equipment-environment-operation”. It further compares and evaluates the technical economy and applicability boundaries of various VOCs control technologies, including seal modification, condensation recovery, adsorption purification, catalytic combustion, and membrane separation. Finally, the paper proposes a three-dimensional VOCs optimization technology system framework based on “source control-process treatment-intelligent management and control”.

**Keywords:** Crude oil storage tank; Volatile Organic Compounds (VOCs); Emission regularity; Emission reduction technology; Process optimization

原油储罐区为石油石化产业链中 VOCs 无组织排放的重要单元, 通过呼吸损耗、密封泄漏、工作损耗等形式散发出大量 VOCs。其中既包括具有强毒性和致畸性的苯类、甲苯类、二甲苯类等特征污染因子, 对原油储罐区一线工人和周围百姓的生命健康产生直接危害, 也造成了每年数十万吨原油损失。为明确原油储罐区 VOCs 逸散规律, 开发并优化适用的 VOCs 减排技术, 达到兼顾环境效益、经济效益和社会效益的目的, 有利于推进石油石化行业向绿色低碳发展。

### 1 原油储罐区 VOCs 逸散规律解析

#### 1.1 逸散机理与排放类型

原油储罐区 VOCs 逸散是指轻烃组分在浓度梯度、压差和温差作用下发生的扩散运动, 主要有三类。

①呼吸损耗: 受昼夜或季节性温差影响, 罐体内的气相随着热胀冷缩出现逸散, 如果超过呼吸阀、真空阀的关闭压力时则会导致 VOCs 的排放, 占比在罐体总逸散量的 40%~60% 左右, 夏季的排放量是冬季的 2~3 倍。②工作损耗: 收卸料过程中液位的变化引起气相空间体积变化, VOCs 气体将被新鲜空气置换、排出。收卸料损耗量比存储期间增加了 3 倍以上, 大型储罐卸料瞬时浓度甚至达到了数千  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。③密封泄漏损耗: 以浮盘间隙、破损密封件、附件开孔等无

组织逸散为主, 部分未维护的老罐区存在泄漏率高的问题, 部分泄漏浓度过高超过国家限值。

#### 1.2 关键影响因素量化分析

①物质的属性和罐子的形状不同: 原油真实蒸气压 (RVP) 等理化性质决定了 VOCs 逸散潜能大小, 轻质原油 ( $\text{RVP} \geq 76.6\text{kPa}$ ) 的逸散速率比重质原油 ( $\text{RVP} \leq 27.6\text{kPa}$ ) 高出 5~8 倍; 轻烃 (C1~C8) 含量增加 10% 时, 其逸散速率提高约 15%~20%。原油罐不同类型的罐体结构对油品蒸发率的影响非常大: 固定顶罐的排放因子为 0.20~0.45  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 内浮顶罐降低到 0.05~0.12  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 双密封外浮顶罐相比单密封降低了 30% 左右, 而压力罐最低, 但只适用于小规模应用。②环保与操作过程相关因素影响: 温度是主要的影响因素, 每上升 10℃, 罐内蒸气压增大 25%~40%, 逸散率增加 30%~50%; 昼夜温差大于 15℃ 时呼吸损耗翻倍; 湿度降低 20%, 逸散增加 5%~8%; 风速大于 3m/s 时扩散增 40%; 气压下降 10kPa, 排放频率增大 30%。从操作上看, 液位上下波动超过 20%, 或每升高 0.5m/h 工作量提高, 工作损耗分别增加 1.8 倍及 10%~15%; 进频收卸料罐的罐体量多为正常值的 1.5~3 倍左右, 多次储罐清洗时, 单次的排放量最大可达平时的 10~20 倍。③设备老化与设备维护

水平效应：由于储罐设备老化严重，浮盘密封件超5年泄漏率增加3倍；呼吸阀定压 $\pm 1.0\text{kPa}$ 时，排放频率变为原来的2倍。维护水平影响控制效果：未开展LDAR维护的储罐泄漏点多3~4倍，密封件超过2年未更换导致逸散量增加40~60%；通过实测发现，开展定期维护的储罐NMHC排放浓度为80~120 $\text{mg}/\text{m}^3$ ，而疏于维护的储罐NMHC排放浓度高达300~500 $\text{mg}/\text{m}^3$ ，部分超过国家相关标准规定的5倍以上。

## 2 技术应用瓶颈与制约因素

### 2.1 技术本身固有缺陷

单一的减排技术无法做到“高效、经济、稳定”，主要有下面两方面的固有缺陷。其一，源头控制技术的成本较低，但密封改造、浮盘升级只能解决密封泄漏损耗问题，并不能从根本上控制呼吸损耗、工作损耗，也就很难实现较大程度的减排；其二，罐型升级、压力罐储存这类的终端技术减排效率较高，但对设备投资的要求很大，中小企业很难负担。以上文中常见的末端处理技术有以下弊端：冷凝回收技术受限于废气浓度高低，导致低浓度废气的废气冷凝回收的耗能及经济效益得不到保证；吸附技术会产生废固体，并且在吸附剂再生过程中可能会引起二次污染；燃烧技术需要较大的资金投入和后续运行费用，并且容易受到废气内杂质（硫、氯等）的影响导致催化剂中毒或是设备腐蚀；膜分离技术具有膜组价贵的特点，在预处理要求较高时，必须在进行气体处理时除去颗粒物、水分等杂质。

### 2.2 技术适配性不足

各种类型的石油企业由于本身的原料性质、罐体类型、生产规模及排污特点的不同，对减排技术的需求也不尽相同。“一刀切”的减排方法不能契合具体需求。如部分企业采用RTO处理低浓度废气回收，导致了运行成本过高（处理浓度1000 $\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，运行成本为1.0~1.5元/ $\text{m}^3$ ，而采用吸附技术仅为0.3~0.6元/ $\text{m}^3$ ），还有些企业仅仅给轻质原油储罐做单向密封改造，无末端处置设备，直接导致呼吸损耗排放超标；对于部分中小型企业，由于其生产工艺规模较小（如储存罐容积 $\leq 5$ 万 $\text{m}^3$ ），故购买一套大的冷凝回收系统所投入的成本高，回收的成本又偏高，投资回收期长达8年以上。

### 2.3 政策贯彻和运维漏洞

影响减排技术发挥作用的原因之一是环保政策执行不到位，如有的地方对储罐区VOCs排放监控力度不够，没有形成有效的在线监测执法及监管体系，使得企业缺乏减排积极性；有的企业没有按照LDAR制度要求定期开展泄漏检测与修复，导致1~2年后减

排成效衰减（超过30%）等。另外由于不同企业的运维管理能力水平不一样，而且有的企业运维人员自身专业技术水平不足，不知道减排设备正常的工作工艺以及运维要点，这样会导致设备的运行参数发生偏离最佳工作点的现象，使得设备的减排效率下降10%~20%，有些企业为了减少运营成本，会擅自停用减排设备，使VOCs直排的现象出现超标排放的情况。

### 2.4 技术创新与产业化滞后

尽管当前减排技术种类繁多，核心技术还存在一些不足：低能耗冷凝技术、高效吸附材料、抗中毒催化剂、高性能膜组件等关键技术产品研发落后，主要依赖国外引进，造成投资及运行成本较高；现有的组合工艺多为简单叠加，并没有很好地对各技术的协同耦合机理展开研究，很难发挥其协同作用（例如，冷凝—吸附组合工艺整体的脱除率并没有达到两者的乘积，而是只达到了两者之和的80%—90%）。另外，技术产业化程度不够高，缺乏统一的技术路线以及技术配套设备型号等技术方案和设备选型指导文件，使一些项目的实际工程中出现了设备配置不合理、施工质量差等问题，最终影响了节能减排效果。

## 3 减排技术优化路径与适配方案

以VOCs逸散规律及现有技术水平为依据建立“源头控制—过程治理—智能管控”三维优化技术体系，在各维度技术协同耦合的基础上实现VOCs全流程精准减排。

### 3.1 源头控制层

源头控废是减排的根本，其目的就是要通过设备更新、工艺改进等，从根源上控制VOCs逸散潜能，在控制源头上下足功夫。依据不同类型油罐和原油性质的不同，实施差别化源头控制措施。①对于现有固定顶罐：对于满足原油RVP $\leq 50\text{kPa}$ 、储罐容积 $\geq 5$ 万 $\text{m}^3$ 条件的固定顶罐，可采取“固定顶罐改内浮顶罐+双重密封”升级改造方案，改造后的油品挥发减排量达75%~90%，5—8年的投资回收期；对于容积 $\leq 5$ 万 $\text{m}^3$ 的固定顶罐，采用“密封改造+低压存储”方案（罐内压力保持在0.5~1.0 $\text{kPa}$ ），改造后油品挥发减排量达到60%—75%，投资回收期3—5年。②对于现有浮顶罐：其中，轻质原油储罐（RVP $\geq 76.6\text{kPa}$ ）采用“全接液浮盘+二次密封+呼吸阀升级”的方式，浮盘与液面接触率可以达到99%，将呼吸阀更换成低泄漏呼吸阀（泄漏检测值 $\leq 2000\mu\text{mol}/\text{mol}$ ），源头减排效率可达80%~85%，重质原油储罐（RVP $\leq 27.6\text{kPa}$ ）采用“单密封升级为双重密封+浮盘密封脂涂抹”的方式，减排效率可达到60%~70%，投资成本仅需8~12万元/万 $\text{m}^3$ 。③对于新建储罐：依原油RVP选型，

RVP  $\geq$  76.6kPa 的轻质原油首选“压力罐 + 冷凝回收预处理”方案；RVP 27.6~76.6kPa 的中质原油采用“双重密封外浮顶罐”；RVP  $\leq$  27.6kPa 的重质原油采用“内浮顶罐”，在设计阶段保障源头减污效益。

### 3.2 过程治理层

过程治理是实现深度减排的关键，核心目标是针对不同浓度、组分的 VOCs 废气，设计高效、经济的组合处理工艺，充分发挥各技术的协同效应。基于废气浓度分级，制定以下组合工艺方案。

①高于 3000mg/m<sup>3</sup>（高浓度）的废气采用“三级冷凝回收 + 活性炭吸附 + 催化燃烧（RCO）”的深度组合工艺，首先进入三级冷凝（一级冷凝到 4℃，二级冷凝到 -10℃，三级冷凝到 -25℃）收集 80% 以上的轻烃组分，实现资源化利用；将剩余冷凝尾气（浓度降到 500~1000 mg/m<sup>3</sup>）进入活性炭吸附塔进行深度净化，当活性炭吸附塔内吸附饱和后，使用低压蒸汽进行脱附，脱附气（浓度升高到 5000~8000mg/m<sup>3</sup>）再进 RCO 装置燃烧处理。处理后尾气总减排效率达到 97% 以上，NMHC 排放浓度稳定在 30~40mg/m<sup>3</sup> 左右。适用于轻质原油储罐区、大型收卸料站等高浓度排放场景，投资回报周期为 3~5 年。②浓度废气（VOCs 1000~3000mg/m<sup>3</sup>）采用“蜂窝活性炭吸附 - 脱附 + RTO”组合工艺，经除油除尘除湿预处理后的废气进入蜂窝活性炭吸附塔内吸附净化；当蜂窝活性炭饱和后用热风将其吸附的有机物脱附成高浓度废气（VOCs），此废气经沸石转轮浓缩 15~20 倍后再被送入 RTO 装置内燃烧破坏分解，吸附再生热量回收利用，总去除效率达到 95%~98%，相比单独采用 RTO 技术降低运行成本约 30%~40%，适用于中质原油储罐区、中型收卸料站等场所，其投资回报周期约为 4~6 年。③低浓度废气（VOCs  $\leq$  1000mg/m<sup>3</sup>）采用沸石转轮浓缩 + 小型 RCO 组合工艺或者高效活性炭吸附 + 催化燃烧工艺。沸石转轮浓缩工况下，适用于废气排放量大（ $\geq$  1 万 m<sup>3</sup>/h），且适用于余热回用，燃烧后的温度大于 600℃。高效活性炭吸附工况下，适用于废气排放量小（ $<$  1 万 m<sup>3</sup>/h），单次更换成本较低，运行方便，综合总减排效率达到 90%~95%，NMHC 排放浓度  $<$  50mg/m<sup>3</sup>。④对超低浓度废气（VOCs  $<$  500mg/m<sup>3</sup>）采用“光催化氧化 + 活性炭吸附”组合工艺或“生物滴滤 + 吸附”组合工艺；光催化氧化能够将一部分的 VOCs 分解成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，降低后续的吸附量，提高吸附剂寿命；生物滴滤可采用微生物降解 VOCs，运行费用较低（0.1~0.3 元/m<sup>3</sup>·处理气）、无二次污染，总减排率可达 85%~90%，适合于重质原油储罐区、小型储罐群等低浓度排放的情况使用。

### 3.3 智能管控层

智能管控是保证减排技术能长期稳定运行的前提，以物联网、大数据、人工智能等技术手段，从 VOCs 排放监测、设备运转控制、运维管理等几个方面实现智能化：①智能监测系统：对储罐呼吸阀出口、密封间隙、废气处理装置进出口等重点部位安装在线 VOCs 监测仪、压力传感器、温度传感器、流量传感器等，检测数据实时上传云平台，开展排放浓度、设备运行参数 24h 全天候监测；当监测值大于等于警戒值（NMHC 排放浓度  $\geq$  50mg/m<sup>3</sup> 或设备运行参数偏离最佳运行工况  $\pm$  10%）时，系统自动生成预警并发送至管理人员手机 APP 和 PC 端。②智能控制系统：依据逸散规律试验数据和数学模型以及在线检测装置的实时监测数据，建立智能控制算法，自主调节废气处理设备的运行参数（冷凝温度、吸附风速、燃烧温度等）使废气处理设备工作状态达到最优化，如当废气浓度变大后，自主减小冷凝温度增大吸附风速保证处理效果；如发现设备运行能耗高，则主动调节各项运行参数达到最优效率及最低能耗。③智能运维管理系统：设备运维台账包含设备运转时间、维护记录、故障信息等，根据设备运行状况和老化规律制定预防性维护计划，当需要进行密封件更换、吸附剂再生、催化剂活化等工作时通过平台自动提醒相关管理人员；搭建员工培训平台，线上提供操作课程、操作视频、考核题库等，提高员工操作水平。

## 4 结束语

原油储罐区 VOCs 逸散控制是一项系统性工程，其中包括逸散的规律分析、减污降碳的新技术的开发、相关的政策和法规的出台、企业的运行管理和维护等等。伴随着环保法越来越严和技术创新的进步，原油储罐区的 VOCs 排放减量会越做越好，并且更加精细化、高效率、智能化。同时这也为石油石化行业的“双碳”目标保驾护航，推动了石油石化行业的绿色低碳发展；也是大气污染治理以及生态环境改善方面的工作贡献力量。

### 参考文献：

- [1] 孙豆,等.挥发性有机物治理现状及处理技术分析[J].动力工程学报,2023(05):12-12.
- [2] 王坤,等.国内外油气田储罐挥发性有机物排放量计算方法研究[J].化工管理,2023(07):98-98.
- [3] 刘承根.原油储罐的腐蚀与防护[J].河南科技,2011(12X):1-1.
- [4] 韩旭,等.我国石化行业挥发性有机物源成分谱研究进展[J].石油炼制与化工,2022(04):01-02.
- [5] 方镜尧,等.某工业园区 VOCs 监测预警系统研究与应用[J].环境科技,2021(05):56-56.