

石化企业罐区 VOCs 废气治理 工程设计与应用研究

夏露露

山东玉皇化工有限公司

摘要: 为响应国家关于大气污染防治的政策要求, 实现石化企业挥发性有机物 (VOCs) 的达标排放与超低排放目标, 本文以某化工公司罐区 VOCs 治理提标改造项目为研究对象, 系统分析了现有储罐与装车装置 VOCs 排放现状及存在问题, 并结合具体工程实践, 探讨了冷凝吸附 + 锅炉焚烧联合处理工艺的适用性与优化设计。研究表明, 采用氮封密闭、废气集中收集与高效回收装置等手段后, VOCs 排放浓度由改造前 60 mg/m^3 降至 20 mg/m^3 以下, 年减排总量达 3.68 t , 取得了良好的环境效益和示范价值。

关键词: VOCs 治理; 石化储罐; 废气回收; 冷凝吸附; 环保工程设计

随着我国生态文明建设的深入推进, 大气污染防治工作逐步迈入精细化、系统化的新阶段。挥发性有机物 (VOCs) 作为臭氧 (O_3) 和细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 生成的关键前体物, 其在光化学反应过程中扮演着重要角色。近年来, 全国范围内 O_3 浓度持续升高, 成为继 $\text{PM}_{2.5}$ 之后影响城市空气质量的又一主要污染因子。

VOCs 的减排已成为控制臭氧污染、打赢蓝天保卫战的重要措施。石化、化工行业因原料和产品多为易挥发有机物, 且生产、储运、装卸等环节复杂, 是我国 VOCs 排放的主要来源之一^[1]。国家和各省相继出台了多项 VOCs 治理政策与行业标准^[2], 明确提出石化储运环节必须实现源头控制与过程减排相结合的治理思路。

某化工有限公司作为一家典型的液化气深加工企业, 其生产装置包括 MTBE、甲醇、正丁烷等多种 VOCs 高风险物料, 储罐区及装卸系统 VOCs 无组织排放问题突出。原有设施仅依靠氮封与浮盘结构进行基础

密封, 缺乏废气收集和治理环节, 不能适应日益严格的环保标准, 也对周边环境与企业自身安全构成一定威胁。

在此背景下, 公司启动了罐区 VOCs 治理提标改造工程, 计划通过密闭系统改造、集中废气收集、高效冷凝回收与末端焚烧处理等多措并举, 系统性解决 VOCs 排放问题。本文围绕该工程的设计与实施进行深入分析, 对推动行业绿色低碳转型、提升企业环境管理水平具有重要的现实意义和广泛的推广价值。

1 工程背景与问题分析

某化工有限公司作为以液化气深加工为主的现代化石化企业, 其罐区储存系统是 VOCs 排放的重要环节。当前公司共有 MTBE 储罐 8 座、甲醇储罐 8 座, 总储存容积达到 $46\,000 \text{ m}^3$ 。这些储罐虽已配备基础的常规密封措施, 如浮盘与氮封系统, 但并未建立完善的有机废气收集和治理装置, 导致罐区在物料进出、温度波动、压力变化等过程中易

产生大量 VOCs 无组织逸散, 不仅影响企业周边空气质量, 也增加了安全风险。

公司现有配置的一套 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 的油气回收系统, 主要服务于装车环节 VOCs 回收, 该装置处理能力有限、排放浓度已接近国家排放标准限值 (60 mg/m^3), 缺乏足够的冗余与调控空间, 难以应对实际运行中废气波动较大的复杂工况。随着地方环保监管的不断趋严及超低排放的政策导向, 现有 VOCs 治理能力已不能满足合规与可持续发展的双重要求, 实施罐区 VOCs 废气系统性升级改造已成为企业提升环境治理能力、实现绿色转型的优先选择^[3]。

2 技术路线与工艺设计

2.1 总体技术方案

为有效解决罐区 VOCs 无组织排放问题, 某化工有限公司在本次治理提标改造中, 采用“密闭储罐 + 集中收集 + 冷凝吸附 + 锅炉焚烧”的组合式处理工艺, 构建起全过程、闭环化

的 VOCs 治理系统，整体技术流程如图 1 所示。在源头控制方面，通过对 MTBE 和甲醇储罐实施氮封系统、天窗密闭等密闭化改造，维持罐内微正压状态，有效防止油气逸散。同时在气相管道中设置防爆型阻火器、远程气动切断阀及压力连锁装置，实现储罐单罐单控，提升安全性与响应速度。

废气收集方面，各储罐顶部废气通过气相支管汇入罐组收集总管，并最终进入厂区集中总管。所收集的高浓度有机废气首先进入冷凝 + 吸附装置，经三级深度冷凝与活性炭吸附净化处理后，排放浓度大幅下降。处理后的尾气进一步送入现有锅炉焚烧装置中，利用余热进行彻底氧化分解，确保最终排放浓度低于 20 mg/m^3 ，远低于现行排放标准限值。该工艺不仅大幅提升了治理效率与稳定性，也具备良好的适应性与可复制性，为石化罐区 VOCs 深度治理提供了可行路径。

2.2 工艺系统关键设计

在本次 VOCs 治理提标改造工程中，某化工有限公司从源头控制、过程收集、终端治理等多个环节入手，

系统性构建了“密闭储罐 + 集中收集 + 冷凝吸附 + 锅炉焚烧”的复合式治理技术路径。其中，各子系统在工艺设计和工程实施中均进行了优化与创新，确保了 VOCs 污染物的高效去除与排放达标，现分系统进行详细说明如下。

2.2.1 密闭储罐与氮封系统

为控制挥发性有机物在储存阶段的无组织排放，项目对 MTBE 及甲醇储罐全部实施密闭化改造，并在每台储罐顶部设置独立的氮封系统。氮封系统通过高纯氮气充入储罐气相空间，形成微正压环境（压力设定范围为 $0.2 \sim 0.5\text{ kPa}$ ），既有效抑制外部空气进入，防止氧气引入带来的爆炸风险，又能在罐内容积变化时缓冲压力波动，减少物料挥发量。

氮封系统配套压力检测及联锁控制装置。当罐内压力低于设定下限值时，氮封阀自动开启，补充氮气维持罐内稳定气压；当压力超过上限值时，氮封自动关闭，并通过气动切断阀或呼吸阀将过量气体引导至收集系统中处理，确保压力处于安全运行区间。系统还配置紧急泄压装置，紧急泄放

阀定压为 1.8 kPa 、回座压力为 1.6 kPa ，一旦系统异常超压可快速排放，保障设备和人员安全。

2.2.2 废气收集系统

在废气收集环节，本项目设计采用单罐单控、分级联锁、全密闭收集的技术路径。每台储罐顶部设有防爆阻火器、气动切断阀和压力变送器，三者通过控制系统实现联锁控制。在储罐内压力达到设定值（ 0.9 kPa ）时，气动切断阀自动开启，VOCs 废气通过气相支管进入罐组收集总管。若压力下降至 0.65 kPa 以下，气动阀自动关闭，保障系统稳定性。

所有气相废气经过汇总后进入厂区总收集管道，总管内配置有变频引风机和氧含量分析仪，确保废气运输安全、效率可控。引风机运行受总管压力自动调节，当压力超过 0.5 kPa 时启动，引导废气进入处理系统；当压力回落至 0 kPa 时停止运转，避免系统过度抽吸或负压运行。同时，为防止氮封失效导致氧含量异常，系统在关键节点设置氧分析仪，一旦氧浓度超过安全阈值就联锁切断进气路径并切入应急排放系统。

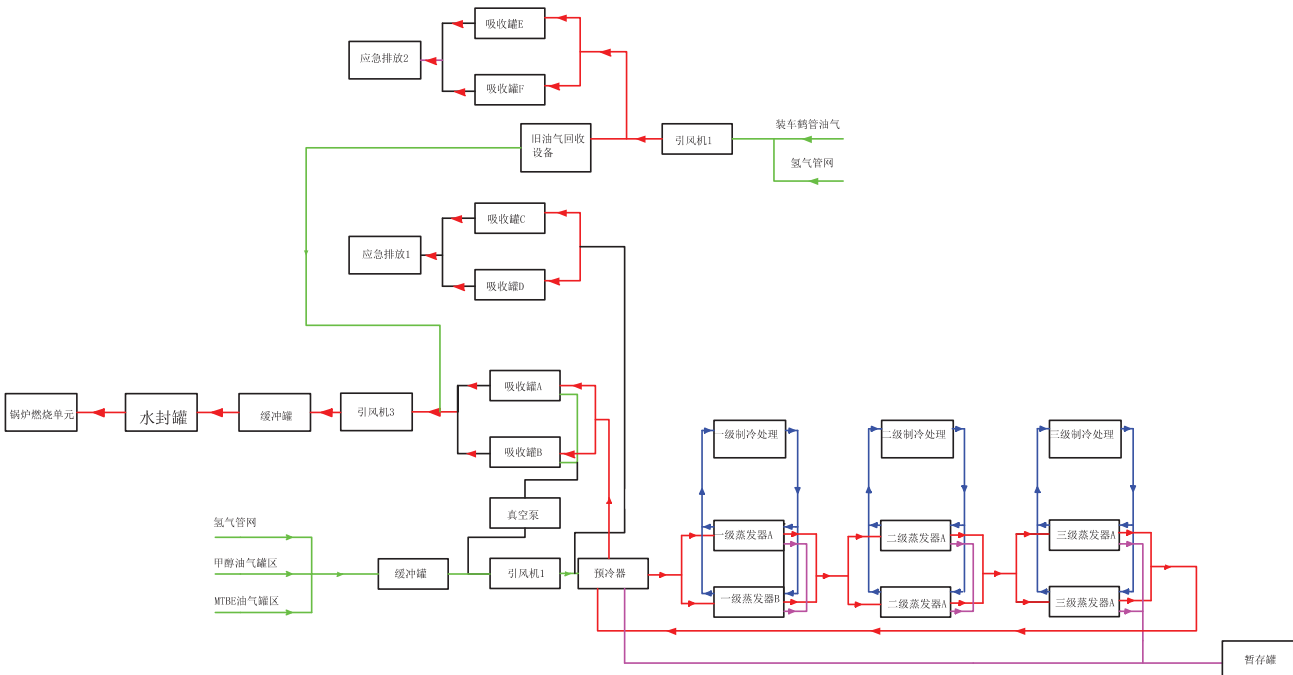


图 1 整体技术流程图

2.2.3 冷凝吸附处理系统

本项目废气中 VOCs 浓度较高,最高可达 $8\,000\text{ mg/m}^3$,属于高浓度有机废气处理范畴。为实现稳定达标排放,工程配置了三级低温冷凝与深度吸附系统。冷凝系统采用多级压缩机制冷机组,一级冷凝温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,二级冷凝为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,三级冷凝温度低至 $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$,可最大限度冷凝回收废气中的有机成分并形成液态回收物,避免资源浪费。

在冷凝后残余 VOCs 仍具一定浓度的尾气将进入活性炭吸附单元进行深度净化。吸附系统采用高性能活性炭材料,吸附容量大、效率高,确保净化气体 VOCs 浓度稳定控制在 20 mg/m^3 以下,显著优于国家与地方标准限值(如 DB37/2801.7—2019 规定的 60 mg/m^3)。

冷凝液和吸附回收液均设置收集储罐,并通过回收泵输送至厂内指定回用或处置区域,实现有机物资源化利用,进一步增强了系统的环保效益与经济价值。

2.2.4 尾气焚烧系统

为进一步降低残余污染物,净化气体最终进入厂区锅炉焚烧系统,与锅炉烟气混合一并高温燃烧排放。锅炉系统本身为企业供热设施,运行温度高、燃烧条件充分,能够将 VOCs 完全氧化为 CO_2 与 H_2O ,确保最终无害排放。该路径不仅有效提高末端处理的彻底性,还兼具能源协同利用优势,减少了新增处理设施的能耗与运行成本。

整个处理系统运行后,VOCs 减排效果显著。据测算本项目年运行时间约为 $8\,000\text{ h}$,处理风量 $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$,预计年减排 VOCs 总量达 3.68 t ,其中有组织排放减排 0.48 t ,无组织排放减排 3.2 t 。排放浓度较改造前降低 66% 以上,达到了超低排放标准的工程目标。

3 工程效果分析

本次某化工有限公司罐区 VOCs 治理提标改造项目完成后,治理系统设计年运行时间达 $8\,000\text{ h}$,处理风量稳定控制在 $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$ 。根据运行模拟及排放数据测算,整体系统年可实现 VOCs 总减排量约 3.68 t 。

其中,有组织排放通过新增冷凝吸附装置及末端焚烧系统,有效将废气排放浓度由 60 mg/m^3 降至 20 mg/m^3 以下,年减排量达 0.48 t ;而通过储罐氮封系统及密闭改造后所形成的废气收集系统,最大限度压缩了罐区的无组织排放源头,年减排量达 3.2 t ,占总减排量的 87% 左右,显示出源头治理在 VOCs 控制中的关键作用。

项目实施后罐区废气实现“密闭—收集—净化—焚烧”全流程控制,有效遏制了以往因储罐“跑、冒、滴、漏”而形成的 VOCs 无组织逸散问题,显著降低了罐区及装卸区域空气中 VOCs 浓度,对厂区及周边居民生活环境起到了积极改善作用。

同时,系统运行安全性也大幅提升,氮封联锁、压力控制、在线监测等功能的集成,使企业对 VOCs 排放的控制能力由“被动应对”转向“主动预警与实时响应”,极大增强了本质安全保障。

4 结论与建议

本研究以某化工有限公司罐区 VOCs 治理提标改造工程为案例,系统分析了石化企业在储罐区 VOCs 排放方面存在的关键问题,并提出了一整套“密闭储罐+集中收集+冷凝吸附+末端燃烧”相结合的复合治理技术路径。工程实践表明,该组合工艺在处理高浓度有机废气方面具有显著优势,治理效率高、运行稳定性强,能够实现 VOCs 从源头控制到终端净化的全过程高效治理。

通过罐区密闭改造和氮封系统布设,可有效减少无组织排放,提高废气收集效率;冷凝+吸附联合工艺则能对浓度波动较大的有机废气进行深度净化,保证最终排放浓度稳定达标;而末端锅炉协同焚烧处理不仅强化了达标保障,还实现了热能回收利用,兼具环保与经济效益。整体系统技术成熟、可操作性强,适用于绝大多数以液态烃类、有机溶剂等为原料或产品的石化类企业,尤其在高浓度、间歇性排放废气场合下表现更为突出。

建议在其他类似石化企业中积极推广本项目所采用的技术路径,并结合各地环保政策、排放标准和企业工况进行因地制宜的技术适配与集成优化。通过该类系统治理工程的持续实施,可有效推动区域 VOCs 总量削减、臭氧污染防控和环境空气质量改善,助力我国大气污染防治工作实现新突破,为构建绿色低碳、高质量发展的现代工业体系提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 夏溶苹,丁莹莹,崔浩.化工企业挥发性有机物(VOCs)排放问题及高效回收技术研究[J].流程工业,2025(03):62-65.
- [2] 王喜芹,李京芬,栾志强,等.有机废气治理行业2024年评述和2025年发展展望[J].中国环保产业,2025(02):10-14.
- [3] 姚瑶.储罐VOCs废气输送及锅炉协同治理的改造实践[J].山东化工,2024,53(13):263-268+273. DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2024.13.027.