

化工企业挥发性有机物（VOCs）排放问题及高效回收技术研究

夏溶苹¹ 丁莹莹² 崔浩³

1. 临沂市环境应急管理服务中心；2. 临沂市生态环境综合执法支队；3. 临沂市兰陵县环境监控中心

摘要：化工企业是挥发性有机物（VOCs）排放的主要来源之一，其排放对环境污染和人体健康造成严重威胁。本文分析了化工企业 VOCs 排放的现状与影响，总结了常见治理技术及其优缺点，重点探讨了高效回收技术的研究进展，包括新型吸附材料的应用及多技术联合回收系统设计。结合实际，提出了排放监控与评估体系的建设方案以及源头控制与治理设施优化的策略。

关键词：化工企业；挥发性有机物（VOCs）；排放治理；高效回收；管理优化

挥发性有机物（VOCs）是一类重要的大气污染物，因其广泛的来源和巨大的排放量，已成为全球关注的环境问题。尤其在化工企业中，由于生产工艺的复杂性和使用的原材料及中间产物易挥发，VOCs 排放显得尤为突出。随着环境保护政策的收紧，化工企业在 VOCs 治理方面投入了大量资源。治理技术效率低、资源回收利用不足以及管理体系不完善仍然是主要挑战。本文系统分析了化工企业 VOCs 排放的现状与影响，着重探讨高效回收技术的研究进展与实际应用，结合当前技术和管理的瓶颈，提出优化措施，为化工企业的可持续发展提供理论和实践指导。

1 化工企业 VOCs 排放现状与影响

1.1 VOCs 的定义及分类

挥发性有机物（VOCs）是一类在常温常压下具有高蒸汽压和低水溶解度的有机化合物，具有易挥发、易进入大气环境的特性。世界卫生组织（WHO）将 VOCs 定义为沸点 50 ~ 260℃ 的有机化合物。这些化合物被广泛应用于化

工、制药、涂料和石化等行业，在生产和使用过程中极易释放至环境中。从化学结构上看，VOCs 可分为烷烃类、芳香烃类、酮类、醇类及醛类等；从排放来源上，可分为工业排放、交通排放、居民生活排放及自然源排放。化工企业的 VOCs 排放主要集中于工业源领域，其排放浓度高、成分复杂，是治理的核心目标之一。中国《大气污染物综合排放标准》（GB16297—1996）对特定 VOCs 种类的排放浓度和限值作出了明确规定，为工业源的排放控制提供了重要依据。全球各国对 VOCs 的定义及排放标准差异明显，统一标准的缺乏使得跨国排放监管和治理存在一定困难。

1.2 化工企业 VOCs 排放的主要来源

化工企业的 VOCs 排放具有来源广泛、种类复杂和排放特性多样的特点，主要集中在生产工艺和设备设施中。生产工艺中的主要排放环节包括原料存储、化学反应过程及产品分离。原料存储因液体蒸发形成挥发物，是 VOCs 的常见排放源之一；在化学反应过程中，压力与温度的波动可能导致反应器逸散排放大量 VOCs。而在产品分离与精制

过程中，不完全密封也会增加排放风险。与此设备设施如储罐、管道、阀门和泵的长期运行可能因密封失效或老化出现“跑、冒、滴、漏”等问题。废气处理装置在运行过程中，因效率不足或故障，可能出现未完全净化的末端排放。辅助环节如装卸作业、包装及运输也可能导致无组织排放，进一步增加治理难度。针对这些复杂的排放来源，化工企业亟需采用针对性的技术与管理手段，从源头减少 VOCs 的产生并提高末端治理效率，以实现绿色生产目标。

1.3 VOCs 对环境和健康的影响

VOCs 排放对环境和人体健康具有显著的负面影响。在环境方面，VOCs 是光化学污染的重要前体物，能够与氮氧化物（NO_x）发生光化学反应，生成臭氧（O₃）和二次有机气溶胶（SOA），从而加剧大气污染和雾霾现象。VOCs 积累在生态系统中可能对植物生长产生抑制作用，并通过大气沉降进入水体，影响水生态平衡。在健康方面，短期高浓度暴露于 VOCs 环境可能引起急性症状，如头晕、恶心、呼吸困难等；长期接触某些特定种类的 VOCs（如苯、甲

苯等)可能引发慢性中毒、癌症、神经系统损伤等严重后果。如图 1 展示了 VOCs 对环境和健康的主要危害^[1]。

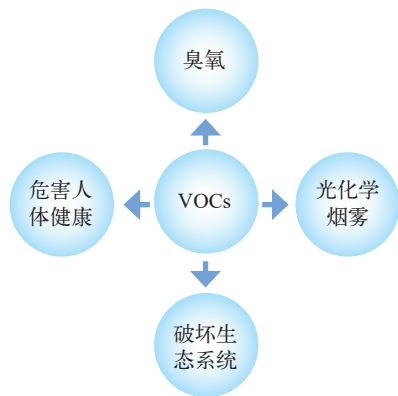


图 1 VOCs 的危害

2 VOCs 治理与高效回收技术研究

2.1 常见治理技术概述

针对化工企业排放的挥发性有机物 (VOCs)，目前广泛采用的治理技术包括吸附技术、吸收技术、冷凝技术、生物处理技术以及燃烧技术等。这些技术的选择和应用与废气的浓度、排气量、温度等因素密切相关。图 2 展示了不同 VOCs 处理技术的适用范围。

如图 2 所示，吸附回收技术适用于低浓度、常温的 VOCs 废气，而燃烧技术（如蓄热式催化燃烧）适用于中高浓度、高温废气的处理。生物处理技术对低浓度 VOCs 的处理效果较好，但对排气量和温度的适应范围有限。冷凝回收技术则主要针对高浓度、高温的废气处理。通过分析不同技术的适用范围，可以为企业选择适合自身生产特性的治理方案提供重要参考^[2]。

2.2 高效回收技术的研究与应用

在化工企业中，不同工艺和设备的 VOCs 排放量存在显著差异。据统计，动静密封点、储罐、装卸作业等环节是 VOCs 排放的主要来源，而其他环节如废水、工艺有组织排放和循环水的贡献相对较小。以图 3 为例，展示了企业 A 各源项的 VOCs 排放比例^[3]。

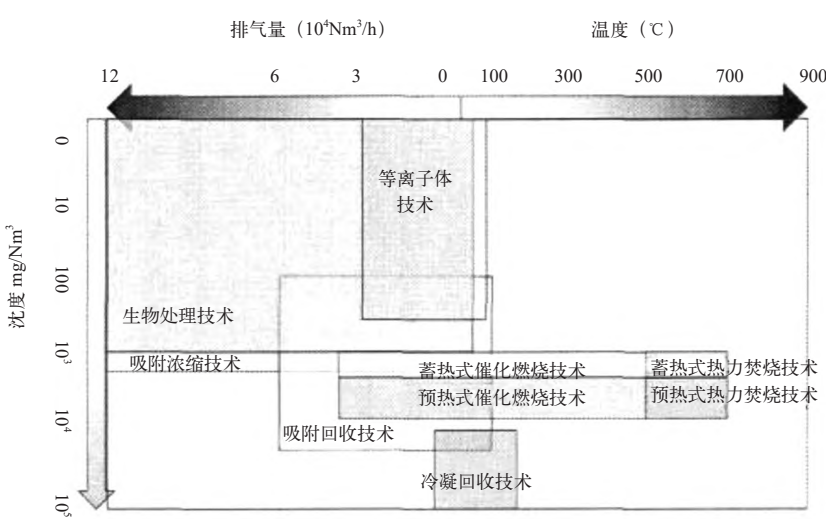


图 2 VOCs 处理技术适用范围

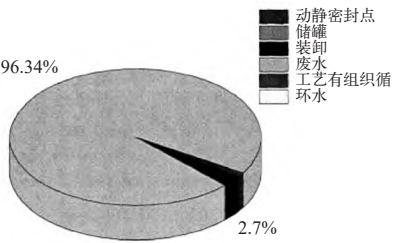


图 3 企业 A 各源项的 VOCs 源项排放量对比图

如图 3 所示，企业 A 各源项的 VOCs 排放中，动静密封点占比高达 96.34%，成为主要排放源；而储罐排放占比为 2.7%。这一数据表明，治理重点应集中在动静密封点的泄漏控制与密封性改进上，同时通过储罐优化设计进一步降低排放量。结合这些排放特征，制定针对性高效回收技术是实现减排目标的关键。

2.2.1 吸附材料的研究与应用

吸附材料是 VOCs 高效回收的核心，其性能直接决定了回收效率和经济性。传统吸附材料如活性炭因其高比表面积和强吸附能力被广泛应用，但其再

生性能较差且寿命有限。近年来随着研究的深入，新型吸附材料逐渐成为焦点。分子筛和金属有机框架 (MOFs) 因具有更高的选择性和吸附容量，成为新的研究热点。分子筛具有精确的孔径控制，能够有效吸附具有特定分子结构的 VOCs，特别适用于处理低浓度的废气。金属有机框架 (MOFs) 则以其极大的比表面积和可调节的孔结构，能够高效捕捉各类 VOCs，且适用于不同的温度和湿度条件下，展现出优异的回收性能。

纳米材料的出现也为高效回收技术提供了新的思路。纳米材料具有超大的比表面积和优异的热稳定性，能够高效捕获高浓度 VOCs 废气，特别是在高温工况下，展现出良好的回收效果。通过将纳米材料与分子筛或 MOFs 结合，能够进一步提升材料的回收效率和耐用性，特别适用于对复杂气体的处理。不同吸附材料的性能对比，如图 4 所示展示了各种吸附材料的比表面积和吸附容量差异。

表 1 吸附材料对不同 VOCs 的选择性吸附性能

吸附材料	苯 (C ₆ H ₆)	甲苯 (C ₇ H ₈)	二甲苯 (C ₈ H ₁₀)	乙烯 (C ₂ H ₄)	丙烯 (C ₃ H ₆)
活性炭	中等	高	中等	低	低
分子筛	高	高	高	高	高
MOFs	高	高	高	高	高
纳米材料	高	高	高	中等	中等
活性铝土矿	中等	中等	低	低	低

表 2 不同吸附材料的性能对比

吸附材料	比表面积 /(m^2/g)	吸附容量 /(mg/g)	吸附选择性	适用废气浓度范围	使用温度 / $^{\circ}\text{C}$	再生性能	优势	局限性
活性炭	800 ~ 1 500	200 ~ 600	一般	中高浓度	20 ~ 100	热再生	高比表面积, 高吸附能力	再生性能差, 吸附饱和快
分子筛	400 ~ 900	150 ~ 500	高选择性	低浓度	-50 ~ 200	微波再生	高选择性, 吸附容量大	对水分敏感, 成本高
金属有机框架 (MOFs)	1 000 ~ 3 000	500 ~ 1 200	高选择性	低浓度	-40 ~ 150	真空再生	优异的吸附性能, 高比表面积	对空气湿度敏感, 成本高
纳米材料	500 ~ 2 500	200 ~ 700	高选择性	低至中浓度	-50 ~ 200	微波再生	超大比表面积, 热稳定性好	生产工艺复杂, 价格高
活性铝土矿	200 ~ 600	100 ~ 300	一般	中浓度	20 ~ 150	热再生	价格低, 资源丰富	吸附容量较低, 选择性差

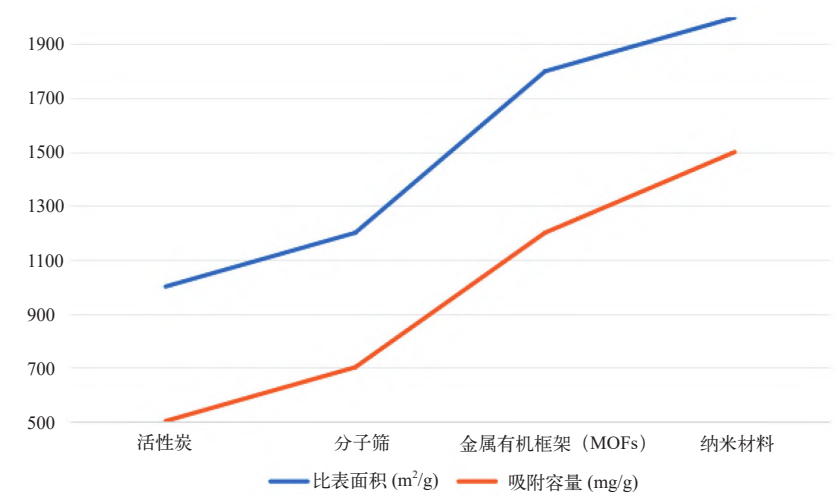


图 4 不同吸附材料的吸附性能对比

针对不同 VOCs 的选择性吸附能力，表 1 展示了不同吸附材料对 VOCs 的选择性吸附效果，帮助确定最佳材料用于特定 VOCs 的处理。为了更好地选择适合的吸附材料，表 2 是不同吸附材料的性能对比，展示了各种材料的特性和适用范围。吸附材料在 VOCs 处理中的实际应用也非常关键。表 3 展示了不同吸附材料在 VOCs 处理中的应用实例，进

一步说明了它们在实际操作中的表现。
2.2.2 多技术联合回收系统设计
吸附材料是 VOCs 高效回收的核心，其性能直接决定了回收效率和经济性。多技术联合回收系统因其综合处理能力，逐渐成为 VOCs 治理的研究热点。该系统通过结合吸附、冷凝、吸收等多种技术，针对不同特性的 VOCs 废气进行定制化处理，能够显著提高回收效率

并降低运行成本。吸附 - 冷凝联合系统通过吸附单元捕获低浓度 VOCs 废气，并利用冷凝单元进一步浓缩和回收高浓度组分，从而实现资源的高效利用。而吸附 - 燃烧联合技术则将吸附的高效捕集与燃烧的彻底氧化能力相结合，适用于复杂组分和高浓度废气的处理。

图 5 展示了吸附 - 冷凝联合系统在企业 A、B、C 的实际应用效果。通过数据对比可以看出，企业 B 的处理废气量达到 800 万 m^3/a ，年回收量为 700 t，同时实现了 2 000 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 的节能量和 4 000 t 的 CO_2 减排量。这表明该系统在实现资源回收的同时，还有效减少碳排放，具有显著的经济效益和环保价值。智能化技术的引入将进一步提升多技术联合系统的性能。通过实时监测和动态调整运行参数，可以根据废气浓度、温度和流量的变化，优化设备运行状态，实现回收效率和能源消耗的最佳平衡。多技术联合回收系统的模块化设计将增加其在不同规模和复杂性企业中的适用性，推动 VOCs 治理向更加高效和可持续的方向发展。

表 3 吸附材料在 VOCs 处理中的应用实例

吸附材料	VOCs 种类	废气浓度范围 /ppm	应用案例	处理效果
活性炭	苯、甲苯、二甲苯	500 ~ 5 000	石化企业 VOCs 排放治理	降低浓度至 50 ppm 以下
分子筛	乙烯、丙烯、醇类	100 ~ 1 000	聚合物生产厂废气治理	达到 90% 以上的回收效率
MOFs	甲醇、苯、乙烯	100 ~ 500	化肥厂 VOCs 废气治理	降低浓度至 50 ppm 以下
纳米材料	甲醛、苯、氯仿	200 ~ 2 000	化学品生产企业 VOCs 治理	提高 30% 以上的吸附能力

3 化工企业 VOCs 排放管理优化措施

3.1 VOCs 排放监控与评估体系

建立科学高效的 VOCs 排放监控与评估体系是化工企业提升排放管理水平的关键环节。应通过安装在线监测设备对排放源进行实时监控，精准获取废

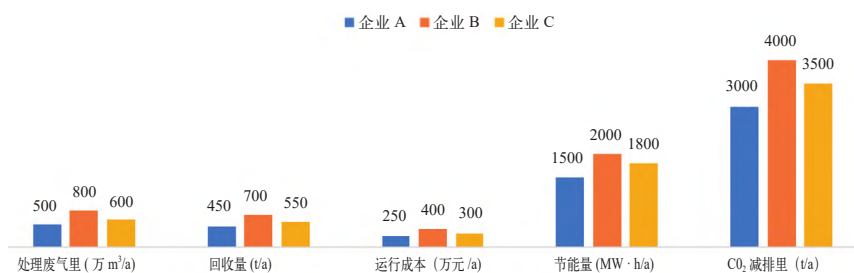


图5 吸附-冷凝联合回收系统的实际应用效果

气中 VOCs 的浓度、排放量和组分信息。先进的监测技术如光离子化检测器 (PID)、气相色谱法 (GC) 和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 等, 可以为企业提供高精度的监测数据。利用大数据和云平台技术, 对监测数据进行汇总分析, 识别排放规律和潜在异常, 确保数据的及时性和准确性。在此过程中, 吸附材料的使用可为排放源的监测与控制提供辅助支持。吸附技术不仅能作为 VOCs 废气的高效回收手段, 还能在监测过程中协助对废气的过滤与浓缩, 帮助检测设备获取更加精准的 VOC 浓度信息。尤其是在低浓度 VOCs 的监测中, 采用高选择性的吸附材料 (如 MOFs、分子筛或纳米材料) 能够有效提高数据的准确性, 为企业提供更加可靠的监测数据。

评估体系的建立同样重要。企业可借助排放因子法和物料平衡法对各环节的 VOCs 排放进行定量评估, 并结合环境影响模型模拟排放对区域环境的影响^[4]。通过定期发布排放评估报告, 不仅能够全面掌握企业的 VOCs 排放现状, 还能后续优化措施提供科学依据。这种监控与评估的闭环管理模式能够帮助企业实现精准治污与高效决策。

3.2 排放源头控制与治理设施优化

源头控制是化工企业 VOCs 排放管理的核心。应优化生产工艺流程, 从源头减少 VOCs 的产生。通过原料替代技术, 用低挥发性或无挥发性原料替代高挥发性原料; 改进设备设计, 提高密封性, 降低因泄漏所导致的逸散排放。优化储运环节, 通过采用浮顶储罐、双层密封技术等措施, 有效减少储存和转运

过程中的挥发损失。在治理设施优化方面, 吸附材料的应用尤为重要。高效的吸附材料, 如活性炭、分子筛、MOFs 和纳米材料, 能够有效捕捉废气中的 VOCs, 并通过吸附-再生技术实现资源的循环利用。这些材料的引入, 使得 VOCs 治理设施的效率大大提高, 尤其在低浓度 VOCs 回收中表现尤为突出。

结合智能化监控手段, 企业可实时掌握设施的运行状态, 动态调整治理参数, 进一步提升治理效果与资源回收效率。这些措施的实施将从源头到末端构建完善的 VOCs 排放管理体系, 为化工企业的绿色发展提供有力保障。

3.3 企业管理体系与法规政策的完善

在化工企业 VOCs 排放治理过程中, 完善的企业管理体系与相关法规政策是确保治理效果的重要保障。企业应建立健全的环境管理体系, 落实环保责任制, 明确各部门和人员在 VOCs 排放管理中的职责。企业内部应设立专门的环境管理部门, 配备专业的技术人员和管理人员, 定期开展 VOCs 排放的监测、评估与审核, 确保排放数据的准确性和实时性。

针对吸附材料的管理, 企业应加强对吸附材料的采购、使用和更换周期的管理, 确保材料的高效性与可持续性。并在企业内部推行吸附材料的使用标准, 确保所有排放源的治理都采用合适的材料与技术。这不仅能提高 VOCs 回收效率, 也能减少不必要的资源浪费。

企业要根据实际情况制定详细的排放控制计划, 明确排放量、治理措施和排放标准, 做到源头控制与末端治理相

结合。法规政策的完善对于企业的 VOCs 排放治理至关重要。政府应出台更为严格的 VOCs 排放标准, 明确规定各类排放源的控制要求, 并加强监管力度。针对高排放行业, 政府可以设立补贴或激励机制, 推动企业采用先进的治理技术, 特别是鼓励使用高效吸附材料和创新回收技术, 提高回收效率和资源利用率。相关部门应加大对企业 VOCs 排放的执法力度, 确保政策的落实与执行, 避免部分企业借机偷排漏排, 损害公共利益。企业管理体系的完善与法规政策的健全是实现 VOCs 排放治理目标的关键, 只有两者协同发力, 才能确保化工企业在绿色发展道路上的顺利前行。

4 结语

化工企业 VOCs 的排放治理与高效回收是实现环境保护与资源化利用的关键环节。本文从 VOCs 排放现状与影响入手, 深入分析了现有治理技术及其局限性, 探讨了吸附材料、多技术联合系统等高效回收技术的应用潜力, 提出了排放监控与评估体系建设和源头控制与治理设施优化的具体策略。这些措施为实现化工企业 VOCs 的精准治理与资源高效利用提供了理论支持和技术参考。

参考文献:

- [1] 关璐. 沈阳化工园区大气 VOCs 污染特征、健康风险评估及来源解析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [2] 董元霖, 陈任. 化学原料药生产基地废气治理改善探讨 [J]. 流程工业, 2023(12): 36-40.
- [3] 王琪. VOCs 走航监测在化工园区大气污染管控中的应用 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41 (06): 59-61.
- [4] 丁晓叶. 化工园区 VOCs 监控预警溯源排查体系建设与应用 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41 (04): 129-131.