

# 大气环境挥发性有机废气治理研究

吴光跃

芜湖市生态环境保护综合行政执法支队 安徽 芜湖 241000

**摘要:** 文章聚焦大气环境挥发性有机废气 (VOCs) 治理。先解析VOCs污染特征与来源, 涵盖成分、时空分布及多行业来源。接着阐述治理技术体系, 包括源头控制、过程管理、末端破坏性与回收性技术及选择原则。通过石化、包装印刷等典型行业案例分析治理方案。还探讨地方政策实践与监管技术支撑。旨在为VOCs治理提供全面参考, 推动大气环境改善。

**关键词:** 挥发性有机物 (VOCs); 大气污染治理; 末端治理技术; 源头控制

引言: 随着工业与交通快速发展, 大气环境中的挥发性有机废气 (VOCs) 污染问题日益突出, 对空气质量和人体健康造成严重威胁。VOCs成分复杂、来源广泛, 不同行业排放特征各异, 治理难度较大。深入研究VOCs污染特征、来源, 构建科学有效的治理技术体系, 并完善政策与监管机制, 对于改善大气环境质量、实现可持续发展具有重要意义。

## 1 VOCs 污染特征与来源解析

VOCs (挥发性有机物) 污染具有显著特征。其成分复杂多样, 包含烷烃、烯烃、芳香烃、含氧烃等数百种化合物, 不同区域和行业的VOCs组成差异明显。在空间分布上, 城市地区因工业活动、交通排放集中, VOCs浓度通常高于乡村; 工业聚集区浓度又显著高于周边区域。时间变化上, 夏季气温高、光照强, 光化学反应活跃, VOCs浓度往往较高, 且部分化合物在一天内呈现明显早晚高峰, 与交通早晚高峰时段重合。VOCs来源广泛<sup>[1]</sup>。工业源是主要来源之一, 石油化工、涂料涂装、包装印刷等行业在生产过程中大量排放。交通源也不容忽视, 机动车尾气、船舶和飞机排放等都会释放VOCs。生活源同样占比不小, 建筑装饰、餐饮油烟、干洗行业以及日常使用的化妆品、清洁剂等都会产生VOCs。

## 2 VOCs 治理技术体系与原理

### 2.1 源头控制技术

源头控制是VOCs污染治理最经济有效的环节, 核心原理是通过替代、优化工艺等方式减少VOCs的产生量。主要技术包括低VOCs原料替代、生产工艺优化和设备密封改造。低VOCs原料替代是指用无VOCs或低VOCs原料替代高VOCs原料, 如在涂料行业用水性涂料替代溶剂型涂料, 在胶粘剂行业用水性胶粘剂替代溶剂型胶粘剂, 可大幅降低VOCs排放强度。生产工艺优化通过改进生产流程、采用密闭式生产设备等方式减少VOCs挥发, 如石化

行业采用连续化生产工艺替代间歇式生产, 包装印刷行业采用无溶剂复合工艺替代溶剂型复合工艺<sup>[2]</sup>。设备密封改造则针对泵、阀门、管道接口等易泄漏部位, 采用机械密封、填料密封等高效密封技术, 减少无组织排放。

### 2.2 过程管理技术

过程管理技术聚焦于VOCs产生环节的排放控制, 通过精细化管理减少生产过程中的无组织排放, 核心是构建“密闭-收集-输送”的全流程管控体系。关键技术包括密闭式生产系统、高效收集装置和输送管道优化。密闭式生产系统通过将生产设备、反应釜、储罐等进行密闭封装, 避免VOCs直接挥发到大气中; 高效收集装置根据VOCs排放特性, 采用集气罩、吸附棉、冷凝回收装置等设备, 对生产过程中挥发的VOCs进行精准收集, 收集效率可达85%以上。通过优化输送管道设计, 采用防泄漏管道和接头, 减少VOCs在输送过程中的泄漏。

### 2.3 末端治理技术

#### 2.3.1 破坏性技术

破坏性技术通过化学或生物反应将VOCs分解为二氧化碳、水等无害物质, 主要适用于低浓度、大风量的VOCs废气处理, 常见技术包括催化燃烧、热力燃烧、光催化氧化和生物降解等。催化燃烧技术利用催化剂降低VOCs的燃烧温度, 在200-400℃的条件下将其氧化分解, 具有处理效率高 (可达95%以上)、能耗低、无二次污染等优点, 适用于处理苯、甲苯等芳香族VOCs。热力燃烧技术无需催化剂, 通过高温 (600-1000℃) 燃烧将VOCs分解, 处理范围广, 但能耗较高。光催化氧化技术利用光催化剂在紫外线照射下产生的羟基自由基, 将VOCs氧化分解, 操作简单、运行成本低, 但处理效率受废气湿度、组分等因素影响较大。生物降解技术利用微生物的代谢作用将VOCs转化为无害物质, 绿色环保, 但处理周期长, 适用于低浓度、易生物降解的VOCs。

### 2.3.2 回收性技术

回收性技术通过物理方法将VOCs从废气中分离出来并回收利用，核心优势是实现资源循环利用，降低企业生产成本，适用于高浓度、高价值的VOCs废气处理，主要技术包括冷凝回收、吸附回收、膜分离和吸收法等。冷凝回收技术利用VOCs在不同温度下的饱和蒸汽压差异，通过降温、加压使VOCs冷凝为液体，从而实现分离回收，适用于处理沸点较高的VOCs，如丙酮、丁酮等，回收效率可达80%-90%。吸附回收技术利用活性炭、分子筛等吸附剂对VOCs进行吸附，然后通过脱附实现VOCs的回收，适用于低浓度、大风量的VOCs废气，吸附剂可重复使用。膜分离技术利用膜的选择性渗透作用分离VOCs，具有分离效率高、能耗低等优点，但膜的成本较高。吸收法利用吸收剂对VOCs的溶解作用实现分离，适用于处理水溶性较强的VOCs。

### 2.4 技术选择原则

VOCs治理技术选择需遵循“源头优先、过程控制、末端兜底”的总体原则，同时综合考虑废气特性、治理目标、经济成本、环境效益等多方面因素。首先，应优先采用源头控制技术，从根本上减少VOCs的产生，这是最经济、最有效的治理方式。其次，对于生产过程中无法避免产生的VOCs，应通过过程管理技术减少无组织排放，提高收集效率。在选择末端治理技术时，需根据VOCs废气的浓度、流量、组分、温度等参数精准匹配，高浓度、高价值VOCs优先选择回收性技术，实现资源循环利用；低浓度、大风量VOCs优先选择破坏性技术，确保处理效率。同时，还需考虑技术的成熟度、运行稳定性、二次污染风险等，优先选择处理效率高、能耗低、无二次污染的技术。另外，技术选择还应符合当地环保政策要求，兼顾企业的经济承受能力，实现环境效益与经济效益的统一。

## 3 典型行业 VOCs 治理案例分析

### 3.1 石化行业

大型石化企业主要从事原油加工、乙烯生产等业务，VOCs排放主要来源于储罐呼吸、装置泄漏、废水处理等环节，排放组分以烷烃、芳香烃为主，具有浓度高、组分复杂、排放量大的特点。该企业采用“源头控制+过程管理+末端治理”的综合治理方案：源头层面，采用低挥发原油替代高挥发原油，优化生产工艺参数，减少VOCs产生；过程管理层面，建立全面的LDAR机制，定期对设备、管道进行泄漏检测与修复，采用密闭式储罐和输送系统，减少无组织排放；末端治理层面，对储罐呼吸气采用冷凝-吸附回收组合技术，回收苯、甲

苯等有价值VOCs，回收效率达90%以上；对装置废气采用催化燃烧技术处理，处理效率超过95%。治理后，企业VOCs排放总量削减60%以上，达到当地环保排放标准，同时通过回收VOCs实现了资源循环利用，年节约成本约2000万元<sup>[3]</sup>。

### 3.2 包装印刷行业

包装印刷企业主要从事食品包装、纸箱印刷等业务，VOCs排放主要来源于油墨使用、烘干过程，排放组分以含氧VOCs、芳香族VOCs为主，具有低浓度、大风量、排放点多的特点。该企业采用“源头替代+过程收集+末端治理”的治理方案：源头层面，全面替代溶剂型油墨为水性油墨，溶剂型胶粘剂为水性胶粘剂，从根本上减少VOCs产生量，替代后VOCs排放强度降低70%以上；过程收集层面，对印刷机、烘干机等设备安装密闭式集气罩，采用负压收集方式，收集效率达90%以上；末端治理层面，采用吸附-催化燃烧组合技术处理收集的VOCs废气，处理效率超过95%。同时，企业优化烘干工艺，采用低温烘干技术，减少VOCs挥发。治理后，企业VOCs排放浓度稳定在10mg/m<sup>3</sup>以下，远低于国家排放标准，车间内空气质量明显改善，员工职业健康得到有效保障。

### 3.3 汽车制造行业

汽车制造企业主要从事汽车整车组装、涂装等业务，VOCs排放主要来源于涂装车间的喷漆、烘干过程，排放组分以芳香族VOCs、酯类为主，具有浓度中等、流量大、排放集中的特点。该企业采用“源头优化+过程密闭+末端回收”的治理方案：源头层面，采用高固体分涂料替代低固体分涂料，减少溶剂使用量，同时优化喷漆工艺，采用静电喷涂技术，提高涂料利用率；过程密闭层面，涂装车间采用全密闭设计，喷漆室采用负压操作，减少VOCs无组织排放；末端治理层面，对喷漆废气采用吸附浓缩-催化燃烧技术处理，对烘干废气采用冷凝回收技术回收溶剂，其中催化燃烧处理效率达96%以上，冷凝回收效率达85%以上。此外，企业建立了VOCs在线监测系统，实现对排放浓度的实时监控。治理后，企业VOCs排放总量削减55%以上，达到行业先进水平。

### 3.4 案例对比总结

通过对石化、包装印刷、汽车制造、典型行业VOCs治理案例的对比分析，可总结出不同行业治理技术选择的共性与差异。共性方面，各行业均遵循“源头优先、过程控制、末端兜底”的治理原则，均采用了“源头+过程+末端”的综合治理方案，且都重视LDAR机制和在线监测系统的建设，以确保治理效果的稳定性和可控性。差异方面，由于各行业VOCs排放特性不同，技术选择各

有侧重：石化行业因VOCs浓度高、价值高，优先采用冷凝-吸附回收等回收性技术；包装印刷行业因以低浓度VOCs为主，且源头替代空间大，优先采用水性原料替代和吸附-催化燃烧技术；汽车制造业兼顾回收与降解，采用吸附浓缩-催化燃烧和冷凝回收组合技术。另外，各行业治理投入和效益也存在差异，石化行业治理投入大，但资源回收效益显著；包装印刷行业源头替代成本低，治理效益明显。

#### 4 VOCs 治理政策与监管体系

##### 4.1 地方实践与创新

近年来，各地围绕VOCs治理出台了一系列针对性政策措施，形成了诸多可复制、可推广的实践经验与创新模式。以上海为例，推出“VOCs治理专项行动方案”，建立“源头替代白名单”制度，对采用低VOCs原料的企业给予财政补贴，同时推行“一厂一策”精准治理模式，组织专业团队为企业制定个性化治理方案。广东依托粤港澳大湾区协同治理机制，建立跨区域VOCs污染联防联控体系，实现区域内VOCs监测数据共享、执法联动，有效解决了跨区域污染问题。浙江则创新推出“VOCs排污权交易”制度，通过市场机制引导企业主动减少VOCs排放，同时建立“环保信用评价体系”，将VOCs治理成效与企业信用挂钩，纳入招投标、信贷审批等环节。多地还探索推行“第三方治理”模式，由专业环保公司为企业提供VOCs治理一体化服务，提高治理效率和稳定性，这些地方实践为全国VOCs治理政策的完善提供了重要支撑。

##### 4.2 监管技术支撑

VOCs监管技术支撑体系的构建是确保治理政策落地、提升监管效能的关键，主要包括监测技术、执法技术和信息化管理技术三大类。监测技术方面，已形成

“在线监测+手工监测+移动监测”的立体监测网络，其中在线监测系统可实现对企业排放口VOCs浓度、流量的实时监控，数据直连环保部门；手工监测可对VOCs组分进行精准分析，为来源解析和治理效果评估提供数据支撑；移动监测车、无人机等移动监测设备可实现对无组织排放的快速巡查，提高监管覆盖面<sup>[4]</sup>。执法技术方面，依托便携式VOCs检测仪、红外热成像仪等设备，实现对企业泄漏点、排放口的快速检测，提高执法效率；建立“双随机、一公开”执法机制，强化对企业的常态化监管。信息化管理技术方面，构建VOCs治理监管平台，整合监测数据、企业信息、执法记录等数据资源，实现对VOCs排放的全流程信息化管理，为政策制定和监管决策提供数据支撑。

##### 结束语

本文全面探讨了大气环境挥发性有机废气治理的多个关键方面，从污染特征与来源，到治理技术体系构建，再到典型行业案例分析及政策监管研究。通过系统分析，明确不同治理技术的适用场景与选择原则，展示多行业综合治理成效。未来，需持续优化治理技术，完善政策监管，推动VOCs治理向更高效、更科学方向发展，守护大气环境。

##### 参考文献

- [1]王婉雪,刘思远,董泽林.大气环境挥发性有机废气治理研究[J].化工设计通讯,2022,48(6):173-175,181.
- [2]吴尽,高付艳.大气环境中挥发性有机废气治理的常用方法研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(13):16-18.
- [3]房建.大气环境中挥发性有机物废气的环境监测及治理技术研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(24):59-61.
- [4]倪峰.研究大气环境中挥发性有机废气的治理技术[J].低碳世界,2024,14(10):22-24.