

化工生产过程中挥发性有机物治理技术对比分析

魏仁文

昌邑新奥化工有限公司, 山东 潍坊 261300

摘要: 化工生产各工序产生大量 VOCs 废气, 废气风量波动大、浓度跨度广、组分复杂、高湿含尘, 部分含腐蚀性杂质, 增大末端治理难度。在大气污染防治和“双碳”战略背景下, 化工 VOCs 治理需兼顾达标排放、污染消减、资源回收及能耗管控目标。本文把末端处理技术分成回收和销毁两类, 分别介绍吸附法、冷凝法以及催化燃烧法等技术的运作, 然后从处理效果、经济投入和适用条件等角度做比较, 最后结合实际情况提出建议。有些企业在技术选择不合适, 治理设施运行效率不高, 面对这些现实困境, 研究从源头减排、工艺匹配、新型材料应用等多个环节, 提出改进思路, 希望能为化工 VOCs 的有效治理提供一些参考。

关键词: 化工生产; 挥发性有机物; VOCs; 技术对比; 工艺选型

0 引言

化工生产包含合成反应、物料存储、装卸运输、分离干燥等环节, 所用原料、中间产物和最终产品大多易挥发, 会释放大量的 VOCs 废气^[1]。该废气组分复杂, 包含烷烃、苯系物、酯类等物质, 排放风量波动大、浓度范围广, 为多组分混合废气, 且高湿含尘, 部分含腐蚀性杂质, 大幅增加末端处理难度^[2]。随着我国大气污染治理推进和“双碳”战略实施, 化工领域 VOCs 治理标准提升, 除排放达标外, 还需综合考量污染物削减量、资源回收效率及生产能耗控制等维度^[3]。目前行业常用吸附、冷凝、催化燃烧、光催化等治理技术, 但多数企业实际应用中存在技术选型不当、装置运行效果差、能耗偏高及二次污染风险等问题。因此, 系统对比不同 VOCs 治理工艺特点、明确其适用条件, 结合生产实际选配适配方案, 对提升化工废气治理效果、推动行业绿色低碳转型具备重要实际意义。

1 化工 VOCs 主流治理技术原理

从技术原理来看, 化工行业处理挥发性有机物 (VOCs) 主要有两种方式。一种叫作回收类技术, 用物理方法把废气里的 VOCs 分离并收集起来, 有价值的溶剂就能被回收再利用。另一种是销毁类技术, 通过化学反应或生物过程将 VOCs 彻底分解为二氧化碳和水等无污染的小分子。

1.1 回收类治理技术

1.1.1 吸附法

多孔材料, 比如活性炭、分子筛和沸石, 有非常大的比表面积, 吸附法可以利用这个特点, 把废气里的气相 VOCs 固定在固体表面上, 这样就能净化气体。当吸附剂吸满以后, 可以通过脱附让它恢复吸附能力, 脱附出来的高浓度 VOCs 既可以

回收, 也能送到后面的装置去销毁^[4]。用活性炭的方案, 初始投资低, 运行管理简便, 尤其适合处理大风量、低浓度的废气。

1.1.2 冷凝法

基于有机物饱和蒸气压会随着温度下降而降低这个物理特性, 冷凝技术就是通过制冷让废气温度降下来, 里面的 VOCs 成分就能从气态变成液态, 实现油气分离回收的目的。采用多级冷凝能提高回收效率。这项技术适合处理初始浓度高的 VOCs 废气, 例如储罐呼吸气和装车作业油气, 可直接回收有机溶剂, 经济性较好^[5]。

1.1.3 吸收法

吸收法的工作原理是让废气和液态吸收剂充分接触混合, 通过溶解或者化学反应把 VOCs 成分转移到液体里, 达到净化废气的目的^[6]。处理之后的富液可以通过解析和精馏过程把有机物回收回来, 吸收剂也能重复使用。该方法设备简单, 能适应废气浓度波动, 尤其适合处理醛、酮等易溶于水的有机废气。

1.2 销毁类治理技术

1.2.1 催化燃烧法

在贵金属或非贵金属催化剂的帮助下, 催化燃烧技术 (RCO/CO) 可以在 250℃ 到 400℃ 相对较低的温度下, 让挥发性有机物 (VOCs) 发生没有火焰的氧化反应, 最终变成二氧化碳和水。这个工艺的净化效果能超过 95%, 产生的氮氧化物不多。它特别适合用来处理成分比较复杂、浓度处于中低水平的化工废气。

1.2.2 光催化氧化技术

采用 TiO₂ 或类石墨相氮化碳这类催化材料, 在常温常压和光照条件下, 就能把挥发性有机物 (VOCs) 转变成无害物质。

这个过程不需要复杂的设备，也没有明火带来的安全隐患，关键点在于光照能让催化剂产生羟自由基和超氧自由基这些活性很高的氧化物质。早期的光催化材料大多需要紫外光才能起作用，存在光能利用不充分、光生载流子容易复合等问题，对高浓度废气的净化效果不太好，所以以前主要用来处理一些低浓度的恶臭气体，作为辅助手段。后来通过调整结构和界面，人们制备出了新型的多元复合光催化材料，对可见光的响应范围变得更宽，同时抵抗水汽干扰的能力也增强了，这为化工行业治理 VOCs 提供了新的可能。不过，工业大规模应用仍需更多研究完善。

1.2.3 生物处理法

基于微生物的代谢功能，VOCs 能够作为碳源被分解成二氧化碳和水，为生物处理技术最核心的一个反应机制。生物滤池和生物滴滤塔是两种主要装置，能耗和日常维护成本都低。不过，微生物的活性很容易受到温度、pH 值和湿度变化的影响，这项技术一般只适合处理浓度不高而且容易降解的 VOCs。像苯系物这类难以降解的污染物，用这种方法的处理效率就不太理想，处理能力有限，还需要比较大的空间。从目前的应用来看，这个方法主要还是用在化工园区里，处理那些浓度较低的恶臭废气。

2 化工 VOCs 治理技术综合对比

考虑到化工废气在风量、气体成分、浓度和湿度这些方面的特性不太一样，所以从投资运行的费用高低、处理效果好不好、对实际工况的适应性以及各自的核心优缺点等角度来做个全面的比较，具体结果可以看表 1。结合工程经验，针对不同浓度废气推荐相应治理工艺，详见表 2。

根据表 1 和表 2 的数据来看，并没有哪一种 VOCs 处理方案能解决所有情况，任何技术都有它自己适合用的场合。如果有机废气本身具备回收潜力，采用回收型技术会更合适，可以优先考虑资源的再利用，把环保和经济收益结合在一起。相反，如果废气没什么回收价值，成分又比较复杂、很难降解，那就应该选用销毁类技术，把污染物彻底处理掉。化工生产过程中废气状况变化很大，只用单一技术很难保证一直稳定达标。所以在实际工程项目中，大家更倾向于采用组合工艺的模式，比如“冷凝配合吸附”或者“吸附浓缩结合催化燃烧”这样的方案，能把不同技术的优点整合起来，配合作用，整体能耗和运行维护的风险也就降低了。有些企业在面对成分复杂的化工废气时，选错了处理方式，比如只用单一的光催化或者过于简单的活性炭吸附，结果排放浓度超标、处理设施经常失效的问题就不断出现。工艺选择未充分考虑废气工况，导致了这些问题。

3 化工 VOCs 治理优化对策

3.1 源头减量管控无组织排放

实施源头管控策略，关键是从生产的前端入手去减少 VOCs 的生成。首要工作是推动企业使用低 VOCs 含量的原辅料，同时改进合成工艺，减少溶剂的用量。为了控制无组织排放，需要对储罐、反应釜以及物料装卸与输送这些设备进行密闭化改造，比如给固定顶罐装上气相平衡收集设施，装车时采用密闭式的鹤管，这样就能减少储罐大小呼吸以及装卸过程中 VOCs 的逸散。另外，还应该推行设备泄漏检测与修复（LDAR）机制，定期检查，发现泄漏就要对法兰、阀门、泵体这些密封点位进行维修。这些做法目标是源头减排，降低后续处理压力，防止末端处理能力不足影响效果。

表 1 化工 VOCs 主流末端治理技术综合对比

技术类别	具体技术	优势	劣势	适用工况
回收类	吸附法	投资较低，运行简便，可回收溶剂	活性炭易受水汽粉尘影响，废炭为危废；分子筛沸石造价高	大风量、低浓度废气
	冷凝法	有机溶剂可直接回收，回收效率高	低浓度工况能耗大，设备投资高	高浓度废气，常搭配吸附联用
	吸收法	设备简单，适应浓度波动	水溶性差有机物去除效果有限，易产生废水二次污染	易溶于水有机废气，多用于预处理
销毁类	催化燃烧（RCO/CO）	净化效率高，NO _x 生成少	催化剂易中毒，更换成本高	组分复杂、中低浓度废气
	光催化	常温常压运行，无明火风险	高浓度处理效果差，工业大规模应用尚待完善	低浓度恶臭废气，作辅助处理
	生物处理	能耗与运维成本低	受温湿度 pH 制约，难降解物质去除差，占地大	低浓度易降解恶臭废气

表 2 不同工况化工废气工艺选型推荐

废气工况特征	推荐工艺	备注
高浓度、具备回收价值 大风量-低浓度 中低浓度、组分复杂 低浓度、易降解恶臭气体 含硫、卤素等有毒组分	冷凝、吸附回收 吸附；沸石转轮浓缩+催化燃烧 吸附浓缩-催化燃烧等组合工艺 生物滤池、生物滴滤塔 预处理+主处理工艺	优先溶剂资源化 单光催化、简易活性炭不建议单独使用 兼顾处理效率与运行稳定性 受温湿度、pH 影响较大 避免催化剂中毒失效

3.2 “一源一策”科学选用治理工艺

化工生产各个环节产生的废气，在污染物浓度、成分构成以及含湿量这几个方面都有明显的不同，所以不能直接套用同一个治理模板，必须针对每个具体的排放源头去制定专门的策略。首先需要做废气来源解析，对各个产污点排放气体的流量、挥发性有机物含量、组分、温度和湿度还有粉尘这些杂质都进行测定，掌握这些废气的基本属性之后，才能为后续选择处理工艺提供依据。如果废气浓度比较高，并且具备回收潜力，应该优先考虑采用冷凝或者吸附回收这类技术，实现溶剂的循环利用。而对于那些中低浓度且成分比较复杂的气体，则更适合优先采用组合式的处理方案，把物理回收技术和销毁技术结合起来，比如先用沸石转轮进行浓缩，然后再进行催化燃烧。要是废气里面含有硫、卤素这些有毒物质，就必须进行预处理，防止催化剂失效。应避免高浓度复杂废气直接单独使用光催化或简易活性炭吸附，以确保设施长期稳定运行和达标排放。

3.3 迭代核心材料推进新技术落地

围绕现有的技术瓶颈，需要重点去突破那些关键的功能材料。在分子筛吸附材料方面，应该研制吸附量更高、在潮湿环境下也能用，并且不容易受杂质影响的新品种；对于光催化材料，要更深入地探索多元复合改性的方法，提高它对可见光的利用效率，同时让它的性能不那么容易受水汽影响，这样就有希望让光催化技术从辅助手段变成主流处理工艺之一。催化燃烧这块，主要目标是开发采购和更换成本都更低，而且不容易中毒的非贵金属催化剂。另外，还需通过中试加快新材料及耦合工艺的工程示范，弥补其工业化应用短板，完善化工 VOCs 治理方案。

3.4 搭建智能运维监管保障体系

一些化工企业在挥发性有机物处理系统的管理上存在明显问题，往往比较重视前期的建设投入。但系统投用后的日常维护工作却做得不够。这导致维护管理缺失的情况经常出现，比如吸附材料超过了使用期限还在继续用、催化组件已经失去活

性了、前处理工段也不能正常运行，结果就是废气排放浓度超过了规定的限值。为了应对这个问题，企业需要建立一套针对处理设施的日常运维管理体系，严格执行设备与消耗品的周期性检查和更换记录。同时，应该在每个废气处理环节的入口和出口位置都安装挥发性有机物在线监测设备，不间断地追踪，并设置浓度、温度和压力这些关键指标出现异常状态时的自动报警和联锁响应程序。这样当废气浓度发生大的变化时，系统就能自己调节运行参数，防止出现安全和环境超标方面的隐患。另外，还需要加强对运行人员的专业技能培训，提高他们对运行状态的判断能力和对设备异常情况的处理能力，推动处理设施朝着精细化管理和智能运维的方向转变，确保整个挥发性有机物治理体系能够持续稳定高效地工作。

4 结论

化工行业产生的挥发性有机物废气成分复杂，生产工况也经常变化。目前常用的治理方法有吸附、冷凝、吸收、催化燃烧、光催化和生物处理等，这些技术都有自己的长处和短板，并没有哪一种能解决所有情况下的问题。回收型技术可以把有机溶剂重新利用，能带来经济回报，但应用前提是废气浓度达到一定水平。销毁型技术虽然能把污染物彻底分解，但普遍存在能耗高、催化剂容易失效、耗材花费大等实际问题。考虑到化工废气处理的需求复杂，单一技术往往不够用，实际工程中，几种技术组合使用的情况更为常见。针对化工 VOCs 的治理，需要建立覆盖源头、生产过程、末端排放以及日常监管的完整防控链条。具体来说，要强化生产源头的密闭管理并做好泄漏修复，根据废气特点坚持“一源一策”选择合适的技术，推动功能材料的升级和新技术的实际应用，健全智能化的运维监管体系。在“双碳”目标的要求下，化工 VOCs 治理需要同时考虑达标排放、资源回收和控制能耗这几个目标，朝着资源回收、低碳减排和智能管控的方向发展，支撑化工行业走上绿色低碳的高质量发展道路。

参考文献:

- [1] 李凡. 面向化工挥发性有机物治理的高效光催化材料设计[J]. 皮革与化工, 2025, 42(8): 157-159.
- [2] 武治年, 蒋成银, 崔春江, 等. 天然气处理厂挥发性有机物治理工艺技术应用与评价[J]. 石化技术, 2025, 32(8): 234-236.
- [3] 姜蓂. 碳中和背景下化工生产中的废水、废气处理[J]. 山西化工, 2025, 45(5): 287-288+295.
- [4] 王坤. 挥发性有机物的典型治理方法及选择研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(5): 113-115.
- [5] 党在清. 涂料生产企业挥发性有机物治理工艺技术及效果分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(24): 190-192.
- [6] 佟海波, 朱晓艳. 重点行业挥发性有机物治理研究进展[J]. 山东化工, 2023, 52(16): 253-255.

作者简介: 魏仁文 (1991—), 男, 汉族, 山东省潍坊市昌邑市, 本科学历, 研究方向为安全工程。