

VOC废气治理应用研究

邓 峰

银川市生态环境局灵武分局 宁夏 银川 751400

摘 要：随着环保标准日趋严格，VOC废气治理成为污染防控的重点领域。本文聚焦VOC废气治理的应用研究，系统分析了VOCs的来源与特性。阐述了吸附法、催化燃烧法、生物法、低温等离子体技术、膜分离技术的原理与工艺特点，并结合化工、涂装、印刷包装行业的废气特性，探讨了“吸附-催化燃烧”“冷凝-吸附”等组合工艺的实际应用体系，涉及预处理设计、主处理系统选型及运行参数调控。研究表明，针对不同行业VOC废气的浓度、成分及排放场景，选择适配的治理技术可实现高效净化与成本优化，为工业VOC废气治理提供了技术参考与实践路径。

关键词：VOC废气治理；技术；应用

引言：VOCs作为大气污染物的重要组成，其广泛来源于化工合成、涂装、印刷等工业过程及生活、移动源排放，具有强反应活性与环境毒性，是形成臭氧污染与PM2.5的关键前体物，对生态环境与人体健康构成显著威胁。当前治理技术多样但适用场景各异，实际应用中存在技术选型不当、运行效率不稳定等问题。本文基于VOCs的来源与特性，梳理主流治理技术的原理与工艺，结合典型行业应用实践，构建针对性治理方案，为提升VOC废气治理效能提供理论与实践支撑。

1 VOC 废气的来源与特性

VOC（挥发性有机化合物）是一类在常温常压下具有高蒸气压、易挥发的有机化学物质的总称，其来源广泛且特性复杂，对环境与人体健康构成显著威胁。从来源看，VOC废气的排放呈现以下多源性特征。（1）工业源是最主要的排放渠道，化工行业的有机合成反应、溶剂生产及储存过程会释放大量苯系物、醇类等；涂装行业中汽车、家具制造的喷漆工艺，通过底漆、面漆挥发产生酯类、酮类VOCs；印刷包装行业的油墨印刷、复合工艺则以甲苯、乙酸乙酯为主要排放成分。此外，医药制造、电子元件清洗等过程也会产生高浓度VOC废气。

（2）生活源排放同样不容忽视，建筑装饰中的涂料、胶粘剂挥发甲醛、苯系物，餐饮油烟中的非甲烷总烃，以及居民生活中化妆品、清洁剂的使用，构成了分散且持续的VOC排放。（3）移动源方面，机动车尾气中的烷烃、烯烃，以及船舶、工程机械排放的燃油挥发物，在城市大气VOC总量中占比可达20%-30%。

VOC废气的特性可从化学与物理两方面解析。（1）化学特性上，其成分复杂多样，涵盖烷烃、烯烃、芳香烃、醛酮类等数百种化合物，且具有强反应活性，在阳光照射下易与氮氧化物发生光化学反应，成为臭氧污染

和二次气溶胶（PM2.5）形成的关键前体物。部分VOCs如苯、甲醛具有毒性、致癌性，长期暴露会导致呼吸系统疾病和基因突变。（2）物理特性方面，VOCs沸点通常低于250℃，蒸气压大于0.1mmHg，这使其在常温下易挥发进入大气；不同VOCs的溶解度、吸附性差异显著，工业排放的VOC废气常伴随粉尘、水汽或酸性气体，形成复杂混合体系，进一步增加了治理难度^[1]。

2 VOC 废气治理技术

2.1 吸附法

吸附法是利用固体吸附剂对VOCs的选择性吸附性实现净化的技术，其核心原理基于吸附剂表面分子与VOCs分子间的范德华力或化学键力。常用吸附剂包括活性炭、分子筛、活性炭纤维等，活性炭凭借多孔结构和超大比表面积，对非极性VOCs展现出极强的捕获能力；分子筛则因规整的孔道结构，在高温、高湿度环境下仍能保持稳定的吸附效率，适合特定工况。吸附工艺系统通常由吸附塔、脱附单元和再生装置组成。废气进入吸附塔后，VOCs被吸附剂表面孔隙截留，净化后的气体直接排放；当吸附剂接近饱和时，通过热空气、蒸汽或惰性气体进行脱附处理，使VOCs从吸附剂中解析，形成的高浓度VOCs混合气体可进入后续处理环节，吸附剂经再生后循环使用。

2.2 催化燃烧法

催化燃烧法借助催化剂降低VOCs的燃烧活化能，使有机物质在200-400℃的低温条件下即可发生氧化反应，最终分解为CO₂和H₂O。催化剂是技术核心，常见类型包括贵金属催化剂（如铂、钯）和非贵金属催化剂（如过渡金属氧化物），贵金属催化剂活性高但成本昂贵，非贵金属催化剂则在经济性和稳定性上更具优势。工艺系统主要由预处理单元、催化反应器和热量回收装置构

成。废气需先经过滤除去粉尘、硫化物等杂质，避免催化剂中毒；预处理后的废气进入催化反应器，在催化剂作用下完成氧化反应；反应释放的热量通过换热器回收，可用于预热进气，降低能耗。该技术无需辅助燃料即可维持反应温度（针对中高浓度VOCs），净化效率稳定，且不会产生氮氧化物等二次污染物。

2.3 生物法

生物法利用微生物的代谢作用降解VOCs，微生物通过细胞膜吸附有机分子，在酶的催化下将其转化为 CO_2 、 H_2O 及自身生长所需的营养物质。参与降解的微生物多为细菌、真菌等，不同菌种对VOCs的降解能力具有特异性，需根据废气组分筛选驯化。主流工艺包括生物滤池、生物滴滤池和生物洗涤塔。生物滤池以土壤、堆肥等为填料，形成稳定的微生物群落，废气通过填料层时完成降解；生物滴滤池通过循环液向生物膜输送营养，适用于处理负荷较高的废气；生物洗涤塔则通过气液接触使VOCs先被吸收再被微生物降解。该技术可在常温常压下运行，能耗极低，且无二次污染风险。但受微生物活性限制，对难降解VOCs（如苯系物）的净化效率较低，处理效果易受温度、pH值等环境因素影响，且设备占地面积较大，启动周期长达数周。

2.4 低温等离子体技术

低温等离子体技术通过高压电场激发产生含有电子、离子、自由基等活性粒子的等离子体，这些高能粒子与VOCs分子发生碰撞，破坏化学键使其分解为小分子物质，最终氧化为无害产物。等离子体产生方式主要有介质阻挡放电、电晕放电等，其中介质阻挡放电因能在大气压下稳定运行而被广泛应用。工艺设备由等离子体发生器、反应器和电源系统组成。废气进入反应器后，在高能粒子作用下完成分解与氧化，整个过程无需催化剂，反应速率快（毫秒级）。该技术对多种VOCs均有降解效果，尤其适用于处理含复杂组分的废气，且设备体积极紧凑，启动迅速。

2.5 膜分离技术

膜分离技术基于VOCs与其他气体在膜材料中渗透速率的差异实现分离，其核心是具有选择性渗透能力的膜组件，常用膜材料包括高分子聚合物（如聚二甲基硅氧烷）和无机陶瓷材料。VOCs分子因与膜材料的亲和力更强或分子尺寸更小，渗透速率远高于氮气、氧气等空气成分，在压力差驱动下优先透过膜层，从而实现与废气的分离。工艺系统由压缩机、膜组件和真空系统构成。废气经压缩后进入膜组件，VOCs透过膜形成渗透侧气流（高浓度VOCs），未透过的截留侧气流则为净化气体；

渗透侧可通过真空抽吸提高分离效率，浓缩后的VOCs可进一步回收利用^[2]。

3 VOC 废气治理的具体应用

3.1 在化工行业的应用

化工行业的VOC废气主要源于有机合成反应环节与溶剂使用过程，治理需结合废气特性构建以下多层次处理体系。（1）在有机合成反应中，原料转化与中间产物分离过程会释放烷烃、烯烃、芳香烃等VOCs，且常伴随反应余热，废气温度多在40-120℃。治理方案需先通过预处理环节去除颗粒物与酸性杂质，通常采用喷淋洗涤塔，以碱性溶液中和酸性组分（如氯化氢、氟化氢），同时降温至30-50℃，避免高温对后续处理设备的影响。主处理系统多采用“吸附-催化燃烧”组合工艺，吸附单元选用蜂窝状活性炭或分子筛，利用其多孔结构捕获低浓度VOCs；当吸附剂接近饱和时，通过热氮气脱附形成高浓度VOCs气流（浓度可提升10-20倍），再进入催化燃烧反应器，在贵金属催化剂作用下完成氧化分解。对于高浓度有机合成废气（浓度>5000mg/m³），则优先采用蓄热式热力焚烧技术，通过蓄热体回收燃烧热量，热回收率可达90%以上，降低辅助燃料消耗。（2）溶剂使用过程（如萃取、溶解、清洗）产生的VOC废气，因溶剂种类多样（醇类、酯类、酮类等），治理需兼顾净化与资源回收。针对沸点较高的溶剂（如DMF、环己酮），采用“冷凝-吸附”联用工艺，先通过列管式冷凝器将废气温度降至溶剂露点以下，回收30%-60%的溶剂；未冷凝的低浓度VOCs进入吸附塔深度净化，脱附后的溶剂蒸汽再次冷凝回收。对于低沸点溶剂（如丙酮、乙醇），则采用膜分离-吸附组合工艺，利用选择性渗透膜富集VOCs，透过侧高浓度气体经压缩冷凝回收，截留侧气体进入吸附塔处理，整体溶剂回收率可达80%以上。（3）治理效果的稳定性依赖于系统参数的动态调控，如吸附塔的空塔流速控制在0.8-1.5m/s，催化燃烧的反应温度维持在250-400℃，溶剂回收系统的冷凝温度根据溶剂沸点设定（通常比沸点低5-10℃）。同时配备在线VOC浓度检测仪与自动调节装置，当进气浓度波动超过±20%时，自动调整风机频率或热媒供给量，确保净化效率稳定^[3]。

3.2 在涂装行业的应用

涂装行业的VOC废气治理核心在于“高效收集+精准净化”，需结合涂装线的生产模式（自动化/手动）、涂料类型（溶剂型/水性）及作业环境，构建适配的收集与净化系统。具体如下：（1）废气收集系统的设计要遵循“源头控制+全域覆盖”原则。对于自动化涂装线（如汽车车身涂装），采用全封闭喷漆室与流平室，通过负压

控制（静压差维持在-5至-10Pa）防止废气外泄，室内气流组织为上送下排，风速控制在0.3-0.5m/s，确保VOCs随气流均匀进入收集管道。手动涂装工位（如家具涂装）则采用局部密闭罩与侧吸风组合设计，罩口风速设定为1.0-1.5m/s，配合风幕阻隔外部气流干扰，减少无组织排放。对于晾干环节产生的低浓度废气，通过吊顶式吸气口与地面通风槽形成立体收集网络，换气次数控制在8-12次/h，确保VOCs浓度控制在爆炸下限的25%以下。

（2）净化技术的选择要匹配涂装废气“低浓度、大风量、含漆雾”的特性。预处理阶段采用干式过滤与湿式洗涤结合的方式，先用初效过滤器去除大颗粒漆雾（粒径 $>10\mu\text{m}$ ），再通过文丘里洗涤塔清除细小漆雾（粒径 $1-10\mu\text{m}$ ），洗涤液选用水基型除漆剂，定期更换以避免漆渣堵塞管道。主净化系统以吸附技术为核心，中小风量涂装线（ $<50000\text{m}^3/\text{h}$ ）多采用固定床活性炭吸附塔，活性炭填充量按废气量与吸附容量计算（通常为 $0.5-1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 废气），每8-12小时进行一次热脱附；大风量涂装线（ $>50000\text{m}^3/\text{h}$ ）则采用旋转式分子筛吸附转轮，吸附区与脱附区连续运行，脱附热空气温度控制在 $180-220^\circ\text{C}$ ，再生后的分子筛吸附效率可恢复至初始值的90%以上。

3.3 在印刷包装行业的应用

印刷包装行业的VOC废气主要来自油墨挥发，其治理核心在于结合油墨类型与生产规模选择工艺，并通过精细化管理控制成本，具体如下：（1）工艺选择要基于油墨挥发VOCs的特性。溶剂型油墨（如凹版印刷）挥发的VOCs浓度较高（ $1000-5000\text{mg}/\text{m}^3$ ），且以甲苯、乙酸乙酯为主，适合采用“吸收-催化燃烧”组合工艺。吸收单元选用高沸点有机溶剂（如矿物油）作为吸收剂，气液比控制在1500-2000，通过填料塔实现VOCs的初步富集（浓度提升至5-10倍）；吸收后的富液经加热解析，释放的高浓度VOCs进入催化燃烧反应器，在 $300-350^\circ\text{C}$

下完成氧化，催化剂选用钨基蜂窝催化剂，使用寿命可达2-3年。水性油墨（如柔版印刷）挥发的VOCs浓度较低（ $100-500\text{mg}/\text{m}^3$ ），且含少量醇类，可采用“生物滤池+低温等离子”联用工艺，生物滤池以火山岩为填料，接种降解醇类的微生物菌群，空床停留时间控制在30-60秒，去除率可达70%-80%；剩余VOCs进入低温等离子反应器，通过介质阻挡放电进一步分解，整体净化效率稳定在90%以上。（2）成本优化可通过三项措施实现：一是采用热回收装置，将催化燃烧的余热用于吸收剂解析或车间供暖，降低能耗30%-40%；二是建立耗材更换预警机制，通过在线监测吸附效率或催化剂活性，避免过早更换；三是结合生产排班调整治理系统运行，非生产时段关闭主设备，仅维持必要的通风，减少无效能耗^[4]。

结束语：本文通过分析VOCs来源特性，解析了吸附法、催化燃烧法等技术的应用逻辑，并在化工、涂装、印刷包装行业验证了组合工艺的可行性。实践表明，预处理与主处理系统的协同设计、运行参数的动态调控是确保治理效果的关键，而成本优化与资源回收技术的结合可提升治理的经济性。未来需进一步推动低耗高效技术研发，强化智能化监测与运维，完善行业适配标准，以实现VOC废气治理的可持续发展，为大气污染防治提供更有力的技术保障。

参考文献

- [1]严方婷.VOC废气治理应用研究[J].资源节约与环保,2020(4):78.
- [2]付继祥.浅谈VOC废气治理应用研究分析[J].建筑工程技术与设计,2020(27):4117.
- [3]许娜.化工废气中VOC废气治理技术研究[J].电脑校园,2023(28):127-129.
- [4]汤艳飞,李靖,高婷,等.VOC废气处理的常见方法及应用研究[J].区域治理,2022(36):202-205.