

工业废气挥发性有机物（VOCs）治理工艺对比研究

张弘

扬州凯通绿色环境咨询有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i8.2773

[摘要] 挥发性有机物(VOCs)作为工业废气中的主要污染物,具有毒性、刺激性及光化学反应活性,不仅危害人体健康,还会加剧雾霾、臭氧污染等环境问题,其治理已成为工业污染防治的核心任务之一。当前工业领域应用的VOCs治理工艺种类繁多,各有适用场景与技术短板,盲目选择易导致治理效率低、运行成本高。本文围绕工业废气VOCs治理的主流工艺展开研究,首先明确VOCs的来源与危害,随后从工艺原理、核心设备、适用条件、处理效率、运行成本、优缺点等维度,对吸附法、吸收法、催化燃烧法、热力燃烧法、生物法及等离子体法6类主流工艺进行系统对比,最后结合企业生产规模、VOCs浓度与组分、环保要求等因素,提出工艺选择的决策建议,并展望低能耗、高效率、资源化的工艺发展方向,旨在为工业企业科学选择VOCs治理方案提供理论支撑,助力实现“双碳”目标下的绿色生产转型。

[关键词] 挥发性有机物(VOCs); 工业废气治理; 工艺对比; 吸附法; 催化燃烧法; 生物法; 环保技术
中图分类号: S888.74+8 文献标识码: A

Comparative Study on the Treatment Processes of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Industrial Waste Gas

Hong Zhang

Yangzhou Kaitong Green Environment Consulting Co., Ltd.

[Abstract] Volatile organic compounds (VOCs), as the main pollutants in industrial waste gas, have toxicity, irritability, and photochemical reactivity. They not only harm human health, but also exacerbate environmental problems such as haze and ozone pollution. Their treatment has become one of the core tasks of industrial pollution prevention and control. There are many types of VOCs treatment processes applied in the current industrial field, each with its own applicable scenarios and technical shortcomings. Blindly choosing can easily lead to low treatment efficiency and high operating costs. This article focuses on the mainstream processes of VOCs treatment in industrial waste gas. Firstly, the sources and hazards of VOCs are clarified. Then, from the dimensions of process principles, core equipment, applicable conditions, treatment efficiency, operating costs, advantages and disadvantages, six mainstream processes including adsorption, absorption, catalytic combustion, thermal combustion, biological and plasma methods are systematically compared. Finally, based on factors such as enterprise production scale, VOCs concentration and composition, and environmental protection requirements, decision-making suggestions for process selection are proposed, and the development direction of low-energy, high-efficiency, and resource-based processes is looked forward to. The aim is to provide theoretical support for industrial enterprises to scientifically choose VOCs treatment solutions and help achieve green production transformation under the "dual carbon" goal.

[Key words] volatile organic compounds (VOCs); Industrial waste gas treatment; Process comparison; Adsorption method; Catalytic combustion method; Biological law; Environmental technology

引言

工业废气中的VOCs主要来源于石油化工、涂装、印刷、橡胶塑料、电子制造、医药化工等行业,其组分复杂,常见类型包括苯系物(苯、甲苯、二甲苯)、烷烃(乙烷、丙烷)、烯烃(乙烯、

丙烯)、醛酮类(甲醛、丙酮)及卤代烃(氯甲烷、氯乙烯)等。从环境危害来看,VOCs是形成臭氧(O_3)和细颗粒物($PM_{2.5}$)的重要前体物,在光照条件下与氮氧化物(NO_x)发生光化学反应,会导致区域臭氧浓度升高,加剧雾霾天气;从健康风险来看,多数

VOCs具有致癌、致畸、致突变特性,长期接触会损害人体呼吸系统、神经系统及生殖系统,例如苯被列为I类致癌物,甲醛会引发呼吸道刺激与过敏反应,严重威胁职业人群与周边居民健康。

1 工业废气VOCs治理的必要性

随着《挥发性有机物治理攻坚方案》《“十四五”挥发性有机物污染防治行动方案》等政策的出台,我国对工业VOCs排放的管控日益严格,要求企业实现“源头减量-过程控制-末端治理”全流程管控,其中末端治理工艺的选择直接决定VOCs的最终去除效果。因此,系统对比不同治理工艺的技术特性,结合企业实际需求选择适配方案,既是企业满足环保排放标准的基本要求,也是降低治理成本、提升环境效益的关键。^[1]

2 主流工业VOCs治理工艺技术特性对比

当前工业领域应用成熟的VOCs治理工艺可分为“回收类”(如吸附法、吸收法,实现VOCs资源化)与“销毁类”(如催化燃烧法、热力燃烧法、生物法、等离子体法,将VOCs氧化分解为CO₂和H₂O)两大类,各类工艺的技术特性差异显著,具体对比如下:

2.1 吸附法: 适用于低浓度、大风量VOCs回收

工艺原理: 利用活性炭、分子筛、活性炭纤维等吸附剂的多孔结构,通过物理吸附作用将废气中的VOCs分子固定在吸附剂表面,实现VOCs与空气的分离;当吸附剂饱和后,通过热空气、水蒸气等脱附手段使VOCs解析,解析后的高浓度VOCs可冷凝回收或燃烧处理,吸附剂则循环使用。

核心设备: 吸附塔(固定床、移动床、流化床)、脱附装置、冷凝回收器、风机。

适用条件: VOCs浓度 $\leq 1000\text{mg}/\text{m}^3$ 、风量 $\geq 10000\text{m}^3/\text{h}$,组分单一(如甲苯、丙酮)、无黏性及高沸点杂质(避免堵塞吸附孔),适用于涂装、印刷、电子行业的低浓度VOCs回收。

处理效率: 常规条件下去除率可达85%-95%,选择高性能吸附剂(如分子筛)时可提升至98%以上。

运行成本: 主要为吸附剂更换/再生费用、脱附能耗,吨废气处理成本约1-3元,再生吸附剂的运行成本低于一次性吸附剂。

优点: 设备简单、操作便捷、VOCs可资源化回收(如涂装行业回收甲苯溶剂),无二次污染;缺点: 吸附剂易受高湿度、高浓度VOCs影响而失活,需定期再生或更换,不适用于含高沸点、黏性组分的废气。^[2]

2.2 吸收法: 适用于中低浓度、易溶于吸收剂的VOCs

工艺原理: 利用VOCs在吸收剂(如柴油、乙二醇、水+表面活性剂)中的溶解度差异,将废气通入吸收塔,通过气液逆流接触,使VOCs溶解于吸收剂中,实现废气净化;吸收了VOCs的富液可通过蒸馏、萃取等方式再生,回收VOCs后吸收剂循环使用,或直接作为燃料燃烧(如柴油吸收剂)。

核心设备: 填料吸收塔、喷淋吸收塔、富液再生装置、循环泵。

适用条件: VOCs浓度 $\leq 2000\text{mg}/\text{m}^3$ 、风量 $5000-20000\text{m}^3/\text{h}$,组分易溶于吸收剂(如醇类、醛类、酮类),适用于石油化工、医

药行业的水溶性VOCs治理。

处理效率: 去除率通常为70%-90%,受吸收剂溶解度、气液接触面积影响较大,优化吸收剂配方可提升至92%以上。

运行成本: 主要为吸收剂补充、富液再生能耗,吨废气处理成本约2-4元,水溶性VOCs使用水基吸收剂时成本较低。

优点: 设备投资低、抗冲击负荷能力强(可应对VOCs浓度波动),适用于含粉尘、雾滴的复杂废气;缺点: 吸收剂易饱和,需定期更换或再生,若富液处理不当易造成二次污染(如废水排放),不适用于难溶性VOCs(如苯系物)。

2.3 催化燃烧法(RCO): 适用于中高浓度、低风量VOCs销毁

工艺原理: 在催化剂(如铂、钯、二氧化锰)作用下,将VOCs在较低温度(200-400℃)下氧化分解为CO₂和H₂O,催化剂可降低VOCs的活化能,减少燃烧所需能耗,同时避免生成NO_x等二次污染物。为提升能耗利用率,通常采用“吸附浓缩+催化燃烧”组合工艺: 低浓度VOCs先经吸附剂浓缩为高浓度气体,再进入催化燃烧炉处理,解析过程的热量可用于吸附剂再生,实现能量循环。

核心设备: 催化燃烧炉、催化剂床层、换热器、吸附浓缩装置。

适用条件: VOCs浓度 $1000-10000\text{mg}/\text{m}^3$ 、风量 $\leq 5000\text{m}^3/\text{h}$,组分无硫、磷、卤素(避免催化剂中毒),适用于涂装、橡胶行业的中高浓度VOCs销毁。

处理效率: 去除率可达95%-99%,催化剂活性稳定时可维持高效去除效果。

运行成本: 主要为催化剂更换(寿命2-3年)、加热能耗,组合工艺吨废气处理成本约3-6元,纯催化燃烧成本高于组合工艺。

优点: 能耗低(相比热力燃烧节能30%-50%)、无二次污染、处理效率高;缺点: 催化剂易受杂质中毒,需预处理去除硫、磷等成分,设备投资较高,不适用于含卤素VOCs。^[3]

2.4 热力燃烧法(TO): 适用于高浓度、难降解VOCs销毁

工艺原理: 在高温(800-1200℃)条件下,将VOCs与空气充分混合后直接燃烧,使VOCs氧化分解为CO₂和H₂O,为降低能耗,通常配备蓄热装置(如蓄热式热力燃烧炉RTO),利用蓄热体回收燃烧尾气的热量,预热进入的废气,热回收率可达90%以上。

核心设备: 热力燃烧炉、蓄热体(陶瓷、蜂窝体)、燃烧器、换热器。

适用条件: VOCs浓度 $\geq 5000\text{mg}/\text{m}^3$ 、风量 $\leq 10000\text{m}^3/\text{h}$,组分难降解(如卤代烃、多环芳烃)、无腐蚀性,适用于石油化工、医药行业的高浓度VOCs销毁。

处理效率: 去除率可达98%-99.9%,高温条件下可彻底分解难降解VOCs。

运行成本: 主要为燃料(天然气、柴油)消耗、蓄热体维护,吨废气处理成本约5-10元,RTO工艺成本低于传统TO工艺。

优点: 处理范围广(适用于各类VOCs)、去除效率高、抗冲

击能力强; 缺点: 能耗高、运行成本高, 高温下易生成 NO_x (需配备脱硝装置), 不适用于低浓度VOCs (燃料消耗占比过高)。

2.5 生物法: 适用于低浓度、易生物降解VOCs净化

工艺原理: 利用微生物 (细菌、真菌、放线菌) 的代谢作用, 将废气中的VOCs作为碳源和能源, 通过吸附、吸收、生物降解三个阶段, 将VOCs转化为 CO_2 、 H_2O 及微生物自身biomass, 常见工艺形式包括生物滤池、生物滴滤池、生物洗涤塔。

核心设备: 生物反应器 (滤池、滴滤池、洗涤塔)、微生物载体 (活性炭、陶粒、聚氨酯填料)、营养液供给装置。

适用条件: VOCs浓度 $\leq 500\text{mg}/\text{m}^3$ 、风量 $5000\text{--}15000\text{m}^3/\text{h}$, 组分易生物降解 (如醇类、酯类、有机酸类), 温度 $15\text{--}35^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\%\text{--}80\%$, 适用于食品加工、污水处理厂、喷涂行业的低浓度VOCs净化。

处理效率: 去除率通常为 $70\%\text{--}90\%$, 优化微生物种类与载体时可提升至 92% 。

3 VOCs治理工艺选择的影响因素与决策建议

工业企业选择VOCs治理工艺时, 需综合考虑以下核心因素, 避免“一刀切”式选择:

3.1 核心影响因素

VOCs浓度与组分: 低浓度 ($\leq 500\text{mg}/\text{m}^3$)、易生物降解的VOCs优先选择生物法 (成本低); 中低浓度 ($500\text{--}2000\text{mg}/\text{m}^3$)、易吸附的VOCs选择吸附法 (可回收); 中高浓度 ($2000\text{--}10000\text{mg}/\text{m}^3$)、无催化剂中毒成分的VOCs选择催化燃烧法 (节能); 高浓度 ($\geq 5000\text{mg}/\text{m}^3$)、难降解的VOCs选择热力燃烧法 (高效); 易溶于吸收剂的VOCs可选择吸收法。

废气风量: 大风量 ($\geq 20000\text{m}^3/\text{h}$) 废气优先选择吸附法、等离子体法 (设备适配性强); 小风量 ($\leq 5000\text{m}^3/\text{h}$) 废气可选择催化燃烧法、热力燃烧法 (能耗占比低)。

环保要求: 若地方标准要求VOCs去除率 $\geq 95\%$, 需选择催化燃烧法、热力燃烧法或“吸附+燃烧”组合工艺; 若要求资源化回收 (如溶剂回收), 则优先选择吸附法、吸收法。

企业规模与成本预算: 中小型企业 (预算有限) 可选择生物法、吸附法 (设备投资低); 大型企业 (高环保要求) 可选择催化燃烧法、RTO (处理效率高, 长期效益好)。

3.2 典型行业工艺选择建议

涂装行业: 废气含甲苯、二甲苯等低浓度VOCs, 风量中等, 优先选择“吸附浓缩+催化燃烧”组合工艺 (兼顾回收与高效处理);

石油化工行业: 废气含高浓度烷烃、烯烃, 优先选择RTO (彻底销毁, 抗冲击能力强);

印刷行业: 废气含乙醇、乙酸乙酯等易生物降解VOCs, 风量

较大, 可选择生物法或等离子体法 (成本低, 适配大风量);

医药化工行业: 废气含难降解卤代烃, 浓度高, 选择RTO (高温彻底分解), 并配备脱硝、脱卤装置 (避免二次污染)。

4 VOCs治理工艺的发展趋势

未来工业VOCs治理工艺将朝着“低能耗、高效率、资源化、一体化”方向发展:

组合工艺优化: 单一工艺难以满足复杂废气治理需求, “吸附/吸收+燃烧”“生物+吸附”等组合工艺将成为主流, 例如“吸附浓缩+低温催化燃烧”可实现低浓度VOCs的节能处理, “生物滴滤+等离子体”可提升难降解VOCs的去除率;

资源化技术升级: 吸附法、吸收法将进一步优化再生工艺, 提升VOCs回收率 (如采用新型分子筛吸附剂, 实现VOCs纯度 99% 以上回收), 同时开发“VOCs-热能回收”一体化设备 (如RTO与余热利用结合), 实现污染物治理与能源回收的协同;

智能化运维: 结合物联网、大数据技术, 开发VOCs治理设备的智能监控系统, 实时监测废气浓度、设备温度、催化剂活性等参数, 实现故障预警与自动调节 (如根据VOCs浓度自动调整燃烧温度), 降低人工运维成本;

绿色催化剂与微生物研发: 研发低成本、抗中毒的非贵金属催化剂 (如 $\text{MnO}_2\text{--CeO}_2$ 复合催化剂), 替代传统铂、钯贵金属催化剂, 降低催化燃烧法成本; 筛选耐高温、耐毒性的高效微生物菌株 (如基因工程菌), 拓展生物法的适用范围。

5 结语

工业废气VOCs治理工艺的选择需遵循“因地制宜、按需适配”原则, 不存在“万能工艺”, 只有“最优方案”。企业需在充分分析自身废气特性、环保要求与成本预算的基础上, 科学选择单一或组合工艺, 同时关注工艺的节能性与二次污染控制。随着环保政策的不断收紧与技术的持续创新, VOCs治理将从“末端被动处理”转向“源头减量+过程控制+末端高效治理”的全流程管控, 为工业绿色低碳发展提供重要支撑, 助力我国实现环境质量改善与经济高质量发展的协同推进。

[参考文献]

[1] 张荣芝, 张焱, 史密伟, 等. 岩棉行业废气挥发性有机物治理技术探析及建议[J]. 能源与环境, 2023, (04): 105–107.

[2] 张鸿. 工业挥发性有机物VOCs的危害及防治措施的对比研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(09): 176–177.

[3] 王蒋镔, 郭耀广. 某有机化工企业危废仓库挥发性有机物的治理案例[J]. 上海第二工业大学学报, 2020, 37(2): 87–92.

作者简介:

张弘 (1991–), 女, 汉族, 江苏扬州人, 本科, 职称: 工程师, 研究方向: 环境工程。