

“活性炭吸附 + 催化燃烧”工艺在 VOCs 中的治理

于经伟, 马成, 王晓鹏, 池保华, 胥凯文
西安航天源动力工程有限公司, 陕西 西安 710000

DOI: 10.61369/ERA.12271

摘 要 : 本文详细阐述“活性炭吸附 + 催化燃烧”工艺在挥发性有机化合物 (VOCs) 治理中的应用。首先介绍该工艺的原理、流程及技术优势, 通过对活性炭吸附、脱附以及催化燃烧各环节的深入分析, 展现其高效治理 VOCs 的内在机制。结合实际治理实例, 从项目背景、工艺方案到装置组成及治理效果进行全面剖析, 并基于实际运行数据评估了该工艺的运行成本与治理效果。研究表明, 该工艺在 VOCs 治理方面具有显著成效, 为相关行业废气治理提供了可靠的技术参考。

关 键 词 : 活性炭; 吸附浓缩; 催化燃烧; VOCs; 废气治理

The Treatment of VOCs Using the "Activated Carbon Adsorption+Catalytic Combustion" Process

Yu Jingwei, Ma Cheng, Wang Xiaopeng, Chi Baohua, Xu Kaiwen
Xi'an Aerospace Source Power Engineering Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi 710000

Abstract: This article elaborates on the application of the "activated carbon adsorption+catalytic combustion" process in the treatment of volatile organic compounds (VOCs). Firstly, the principle, process, and technical advantages of this technology are introduced. Through in-depth analysis of the adsorption, desorption, and catalytic combustion of activated carbon, the internal mechanism of its efficient treatment of VOCs is demonstrated. Based on practical governance examples, a comprehensive analysis was conducted from project background, process scheme to device composition and governance effect. The operating cost and governance effect of the process were evaluated based on actual operational data. Research has shown that this process has significant effectiveness in VOCs treatment, providing reliable technical references for waste gas treatment in related industries.

Keywords: activated carbon; adsorption concentration; catalytic combustion; VOCs; waste gas treatment

挥发性有机化合物 (VOCs) 作为大气污染物的重要组成部分, 来源广泛, 涵盖化工、涂装、印刷等众多行业。VOCs 不仅会对人体健康造成危害, 如刺激呼吸道、引发神经系统症状等, 还在大气环境中参与光化学反应, 是形成臭氧 (O₃) 和细颗粒物 (PM_{2.5}) 污染的关键前体物^[1]。随着环保要求日益严格, 对 VOCs 的有效治理成为当前环境保护领域的研究热点与重点^[2]。“活性炭吸附 + 催化燃烧”工艺作为一种成熟且高效的 VOCs 治理技术, 近年来得到了广泛应用^[3]。巧妙地结合活性炭吸附的富集作用与催化燃烧的彻底分解优势, 能够在较低能耗下实现对低浓度、大风量 VOCs 废气的深度净化, 为解决 VOCs 污染问题提供了切实可行的方案。本文将深入探讨该工艺的技术细节、实际应用案例及治理效果, 以期为相关领域的工程实践和技术研究提供有价值的参考。

一、活性炭吸附 + 催化燃烧工艺概述

(一) 工艺原理

活性炭吸附 - 催化燃烧工艺, 是基于物理吸附与催化氧化反应原理, 对挥发性有机化合物 (VOCs) 进行高效治理的技术。其核心在于利用活性炭独特的物理特性, 实现对废气中低浓度 VOCs 的富集, 再借助催化燃烧实现污染物的无害化分解。

活性炭内部拥有大量直径各异的微孔、介孔和大孔, 构建出庞大的孔隙网络, 这使得其比表面积高达 500~1500 m²/g^[4]。废

气通入活性炭吸附床时, VOCs 分子在范德华力、静电引力等作用下, 被吸附于活性炭孔隙表面, 实现废气与污染物的初步分离。当活性炭吸附饱和后, 通过升高温度打破吸附平衡。通常将热流温度控制在 120~150℃, 使吸附质分子热运动加剧, 挣脱活性炭的束缚, 脱附出来的高浓度 VOCs 气体被收集。脱附后的气体进入催化燃烧装置, 在催化剂作用下, VOCs 分子的化学键被削弱, 降低了反应活化能。常见的铂、钯类贵金属催化剂和非贵金属催化剂, 如过渡金属氧化物, 能促使 VOCs 在 250~400℃ 的相对低温下, 与氧气发生氧化反应, 彻底转化为二氧化碳 (CO₂) 和水

作者简介: 于经伟 (1995.09-), 男, 汉族, 山东青岛人, 硕士研究生, 工程师设计员, 研究方向: 能源化工废气治理。

(H₂O)，完成废气净化的全过程^[6]。

(二) 工艺流程

1. 活性炭吸附

含 VOCs 的废气首先进入预处理单元，该单元配备过滤装置，如袋式过滤器、旋风分离器等，能有效拦截废气中夹带的粉尘、颗粒物等杂质，防止其堵塞活性炭孔隙，确保吸附过程稳定运行。经预处理后的废气以 0.2–0.6m/s 的空塔流速，均匀进入活性炭吸附塔。吸附塔多采用固定床结构，内部装填粒状或柱状活性炭^[6]。为保证吸附效率，活性炭床层高度一般在 0.8–2m。在吸附塔内，废气与活性炭充分接触，VOCs 分子不断被吸附到活性炭表面，随着时间推移，活性炭吸附量逐渐增加。当出口废气中 VOCs 浓度接近排放标准上限时，判定活性炭吸附饱和，此时切换至备用吸附塔继续吸附，饱和吸附塔则转入脱附流程。

2. 活性炭脱附

饱和吸附塔则通过热风循环系统实施脱附操作^[7]。热风由热风炉产生，温度精准控制在 120–150℃，经风机加压后，沿管道均匀送入吸附塔内。热风在活性炭床层中穿梭，为吸附质提供足够能量，使其从活性炭表面脱附。脱附产生的高浓度 VOCs 气体，经管道收集并输送至催化燃烧装置。为保障脱附效果和活性炭使用寿命，需严格控制热风流量、温度以及脱附时间。热风流量一般为废气处理量的 5%–15%，脱附时间持续 2–4 小时，确保活性炭能有效再生，重复投入吸附工作^[8]。

3. 催化燃烧

脱附后的高浓度 VOCs 气体先进入预热室，利用电加热或燃气加热方式，将气体温度提升至催化剂的起燃温度。进入催化反应室后，在催化剂作用下，VOCs 迅速发生氧化反应，释放大量热量，使反应温度可维持在 300–400℃^[9]。反应后的高温气体流经热交换器，与进入催化燃烧装置的冷空气进行热量交换，预热冷空气，自身温度降低后达标排放。经热交换回收的热量，可显著减少后续废气预热所需能耗，提升整个系统的能源利用效率，排放气体中的 VOCs 浓度通常可稳定低于 50 mg/m³。（见图 1）为活性炭吸附 + 催化燃烧处理 VOCs 废气的工艺流程图。

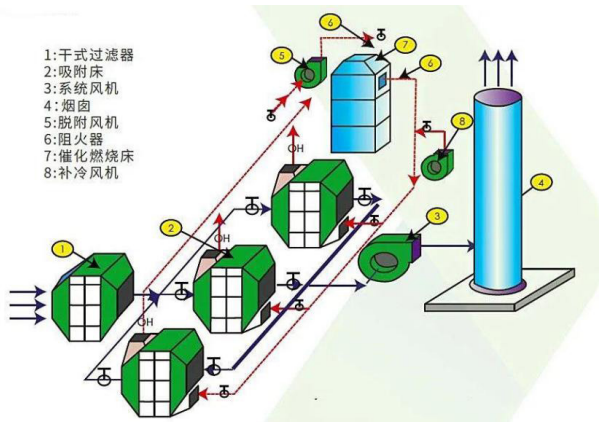


图 1 活性炭吸附 + 催化燃烧处理 VOCs 废气的工艺流程

(三) 技术优势

该工艺具备多方面显著优势，在处理低浓度、大风量 VOCs 废气时表现出色，能将废气中 VOCs 浓度降低至严格的环保排放

标准以下，净化效率高达 90% 以上。通过活性炭吸附实现 VOCs 富集，将低浓度废气转化为高浓度，使得后续催化燃烧过程能耗大幅降低，相比直接燃烧法，能耗可削减 30%–50%^[10]。催化燃烧在较低温度下进行，极大减少了氮氧化物（NO_x）等二次污染物的生成，降低对环境的二次危害。此外，该工艺自动化程度高，借助控制系统可实时监测与调控设备运行参数，运行稳定性强，且设备占地面积相对较小，便于在各类工业场所安装部署，适合大规模工业化应用，为企业提供高效、经济、环保的 VOCs 治理方案。

二、治理实例

(一) 项目背景

某精细化工企业主要从事医药中间体的生产，其生产工艺涉及众多有机合成反应，这导致在生产过程中会持续排放大量含有挥发性有机化合物（VOCs）的废气。经检测，废气中主要成分包括苯、甲苯、二甲苯等典型苯系物，以及丙酮、丁酮等酮类物质。这些 VOCs 不仅具有刺激性气味，对现场操作人员的呼吸系统、神经系统造成直接损害，而且在大气环境中极易引发光化学反应，是形成地面臭氧污染和细颗粒物（PM_{2.5}）的关键前体物。该企业废气排放量巨大，废气风量稳定在 20000 m³/h，且 VOCs 初始浓度约为 300mg/m³，远超当地环保部门规定的排放标准。为响应日益严格的环保要求，企业亟需对废气进行深度治理，以实现达标排放，并降低对周边环境的负面影响。鉴于废气成分复杂、浓度波动但整体处于低浓度区间、风量大的特点，经过综合技术评估与经济分析，最终确定采用“活性炭吸附 + 催化燃烧”工艺作为废气治理方案。

(二) 工艺方案

依据废气的具体参数和治理目标，设计构建一套高效且稳定的废气处理系统（见图 2）。该系统配备两套活性炭吸附塔，采取一用一备的运行模式，确保废气处理的连续性。每套吸附塔内部精准装填 5m³ 的优质柱状活性炭，经前期实验测定，该活性炭对废气中各类 VOCs 的吸附容量可达 0.2–0.3kg/kg 活性炭。

吸附塔的吸附周期设定为 24 小时，这是基于对废气流量、VOCs 浓度以及活性炭吸附性能的综合考量所得出的最佳运行时长。当一套吸附塔达到吸附饱和状态时，系统将自动切换至备用吸附塔继续进行吸附作业，而饱和吸附塔则进入脱附再生流程。在脱附环节，采用温度恒定在 120℃ 的热风作为脱附介质，热风流量精确控制在 1000 m³/h。此温度与流量参数经过反复模拟计算与实际调试确定，既能保证活性炭表面的 VOCs 充分脱附，又可避免因温度过高或流量过大对活性炭结构造成破坏，影响其使用寿命。脱附产生的高浓度 VOCs 气体经专用管道收集后，定向输送至催化燃烧装置。催化燃烧装置选用以铂钯为活性成分的贵金属催化剂，将催化燃烧温度严格控制在 300℃，在此温度下，催化剂能够高效地促使 VOCs 发生氧化反应，实现污染物的彻底分解。

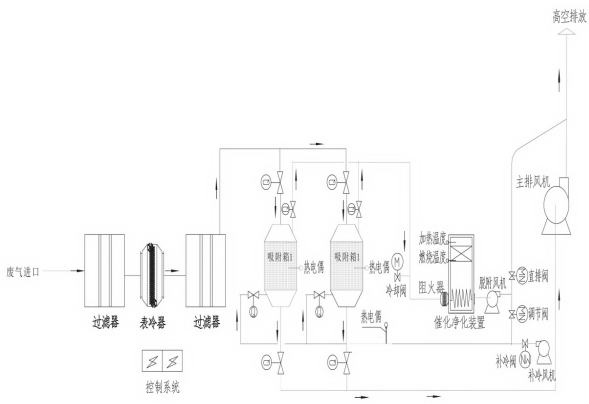


图2 工艺方案系统图

（三）装置组成

整个治理装置由多个关键部分协同构成，共同保障废气治理的高效运行。（见表1）为主要设备及具体参数情况，预处理过滤器采用袋式过滤技术，能有效去除废气中的粉尘，防止其堵塞活性炭孔隙。活性炭吸附塔采用碳钢材质，内部设置气体分布器，确保废气均匀通过活性炭床层，提升吸附效率。热风炉为脱附提供稳定热源，热风循环风机保障热风在吸附塔内的循环。催化燃烧装置集成预热、催化反应与热量回收功能，主风机负责提供废气输送的动力，控制系统则对整个装置的运行参数进行自动化监控与调节，确保装置稳定、高效运行。

表1 主要设备及具体参数

设备名称	数量	规格
预处理过滤器	1套	过滤精度5μm，可拦截95%以上的粉尘及颗粒物
活性炭吸附塔	2套	碳钢材质，内径2.5m，塔高5m，内部装填5m³活性炭
热风炉	1台	供热功率500kW，可稳定输出120℃热风
热风循环风机	1台	风量1000m³/h，风压3000Pa
催化燃烧装置	1套	预热室功率100kW，催化反应室尺寸2m×2m×3m，热交换器换热效率70%
主风机	1台	风量20000m³/h，风压4000Pa
控制系统	1套	可实时监测与调控温度、流量、压力等参数

三、效果分析

（一）运行成本

据统计，此次“活性炭吸附+催化燃烧”治理装置的运行成本，主要由电费、活性炭更换费用以及催化剂更换费用构成。在电费方面，风机负责输送废气与循环热风，热风炉为脱附环节供热，这些设备的总功率达100kW。以每日运行24小时、电费单价0.8元/kWh计算，每日电费支出为1920元。活性炭作为吸附介质，因长期吸附VOCs会逐渐饱和，需定期更换。按照每半年更换一次，每次更换费用5万元来算，每日活性炭更换成本约为278元。催化剂作为催化燃烧的关键，每两年更换一次，更换费用为10万元，平均到每天约为137元。综合各项费用，该装置每日运行成本约为2335元。这一成本在同类VOCs治理工艺中处于合理区间，可以达到高效的治理效果，性价比极高。

（二）治理效果

该工艺展现出卓越的VOCs治理效能，通过长期实际运行监

测，该工艺对废气中VOCs整体治理效果显著。治理前，废气中VOCs浓度高达300mg/m³，经处理后，浓度稳定维持在30mg/m³以下，去除率达到90%以上，远优于当地环保部门规定的排放标准（见表2）。以苯系物为例，治理前废气中苯、甲苯、二甲苯等总浓度为150mg/m³，治理后降低至15mg/m³以下。从排放气体的综合指标来看，不仅VOCs浓度大幅降低，其他可能伴随产生的有害副产物，如因高温燃烧易生成的氮氧化物（NO_x），由于催化燃烧在300℃左右相对低温条件下进行，其排放量也控制在极低水平。同时，通过热换热器的高效热量回收，将催化燃烧产生的高温气体热量传递给进入系统的冷空气，有效降低了装置整体能耗。经测定，热交换器的热量回收效率可达65%–75%，显著提升了能源利用效率。

表2 2023年2024年挥发性有机物检测结果统计

年份	监测点位编号	检测项目	检测结果 / (mg/m³)	参考标准 / (mg/m³)
2023	1	挥发性有机物	2.5	4.0
	2		2.8	4.0
	3		2.6	4.0
2024	1	挥发性有机物	2.2	4.0
	2		2.3	4.0
	3		2.4	4.0

四、结语

综上，“活性炭吸附+催化燃烧”工艺在VOCs治理中展现出了卓越的性能。通过对工艺原理、流程的深入理解以及实际案例的验证，其在处理低浓度、大风量VOCs废气方面具有高效、节能、稳定等优势。随着环保技术的不断发展，该工艺有望在更多领域得到应用，并通过技术创新进一步降低成本、提高治理效率，为改善大气环境质量做出更大贡献。

参考文献

[1]侯泽明,代常彬,邹春林,等.活性炭吸附-催化燃烧技术在油气废气治理中的应用[J].天津化工,2023,37(S2):93-96.

[2]廖永涛.低浓度VOCs活性炭吸附-催化燃烧处理系统分析[J].中外能源,2023,28(11):90-94.

[3]徐秀丽.浅谈活性炭工艺在VOCs污染治理工程中的应用及缺陷[J].清洗世界,2023,39(08):1-3.

[4]崔进.活性炭吸附脱附+催化燃烧处理印刷废气工程实例[J].化工管理,2021,(11):175-176.

[5]柳添辉.催化燃烧在VOCs中治理的运用及研究[J].绿色环保建材,2021,(01):43-44.

[6]吴思聪.活性炭热氮循环脱附涂装VOCs规律及其再生特性研究[D].华南理工大学,2020.

[7]冷星月,胡彩虹,王炜月,等.低浓度挥发性有机物吸附浓缩材料的研究进展[J].化工进展,2020,39(S2):336-345.

[8]魏建波.喷淋吸收-活性炭吸附工艺在化工行业VOCs废气治理与控制中的应用[J].机电信息,2023,(13):85-88.

[9]焦琳,高太红,晋平平.活性炭吸附法对小风量低浓度VOCs的处理效率及经济成本分析[J].山西化工,2023,43(04):250-251+273.

[10]王宁.活性炭吸附-蒸汽脱附工艺治理医药厂污水站废气的工程案例[J].广州化工,2022,50(12):129-131.