

活性炭吸附浓缩耦合催化氧化技术在喷漆废气处理中的工业应用

敬丹丹

广州拉斯卡工程技术有限公司，广东 广州 510305

DOI:10.61369/EAE.2025050012

摘 要： 本文阐述了喷漆废气的来源、排放特征，并对当前应用的常规处理技术的优缺点进行了分析。通过对某自动化装备生产企业喷漆车间废气产排情况及应用活性炭吸附浓缩耦合催化氧化技术的工艺流程、处理效率、运行费用等深入分析总结，证明了该技术在喷漆 VOCs 废气治理上的可行性，以期为有效解决工业涂装行业的喷漆废气问题提供指导。

关 键 词： 活性炭；催化氧化；工业涂装；挥发性有机物

Industrial Application of Activated Carbon Adsorption Concentration Coupled with Catalytic Oxidation Technology in the Treatment of Painting Waste Gas

Jing Dandan

Raschka Guangzhou Engineering & Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510305

Abstract： This article discussed the sources and emission characteristics of painting exhaust, and analyzed the advantages and disadvantages of the conventional treatment technologies. Through analysis and summary of the exhaust gas generation and emission in the painting workshop of an automated equipment manufacturing enterprise, as well as the process, treatment efficiency, and operation costs of applying activated carbon adsorption and concentration coupled with catalytic oxidation technology, it has been proved that this technology is feasible for the treatment of painting VOCs. This is expected to provide guidance for effectively solving the problem of painting exhaust in the industrial coating industry.

Keywords： activated carbon; catalytic oxidation; industrial coating; VOCs

引言

喷漆废气广泛产生于汽车及零部件制造、家具制造、汽修及金属表面处理等行业，废气排放流量大、以低浓度为主且波动大、排放源分散。针对喷漆废气，单一活性炭吸附、低温等离子体、光催化等技术应用占比大，处理效率低下。为打赢蓝天保卫战、进一步改善环境空气质量，喷漆废气作为工业 VOCs 废气的重要来源之一，迫切需要行之有效且经济性可接受的技术。

一、喷漆废气的排放特征及常用处理技术

据2023年中国生态环境统计年报^[1]可知，全国 VOCs 的排放量达到651.5万吨，其中工业源排放量为214.4万吨，约占 VOCs 总排放量的33%。在涉 VOCs 排放的工业行业中，石化、化工、工业涂装、包装印刷、油品储运销为我国 VOCs 重点排放源^[2]。工业涂装 VOCs 排放占整个工业源排放量的20%以上^[3]，是 VOCs 减排不可忽视的行业。

工业涂装的喷漆废气主要来源于含挥发性有机物的原辅料的使用，主要排放工序为漆料涂覆及干燥/固化。喷漆废气作为工业

VOCs 的重要来源，其排放呈现多维度特征。从排放源看，汽车及船舶制造、木质家具制造、金属表面处理、汽修等行业是主要产生领域，涉及行业多且以小规模分散作业为主，收集困难。从排放成分看，主要污染物种包括漆雾颗粒、芳香烃和含氧挥发性有机物（OVOCs），如苯系物、乙酸乙酯、乙酸丁酯等，这些组分难降解且部分具有神经毒性和致癌性。从排放模式看，废气具有间歇性、浓度随喷漆作业起停从几十到上千毫克波动，考验治理设施稳定性。上述排放特征使得喷漆废气收集困难，处理效率不高，设施稳定性降低，治理难度加大。

目前较为成熟的工业 VOCs 治理技术主要包括以吸收、冷凝

作者简介：敬丹丹（1988-），女，四川南充人，工学硕士，工程师，主要从事三废焚烧及 VOCs 处理工艺设计及技术开发工作。

等为主的回收技术及以燃烧、催化氧化等为主的破坏技术^[4]。每一种技术均有不同的适用范围，实际应用需结合废气的特征选择适配的技术。根据喷漆废气的特征，目前广泛采用的处理技术包括活性炭吸附、低温等离子体、光催化、浓缩+燃烧/催化等。单一活性炭吸附处理初期效果较好，但饱和后需及时换炭，且易因湿度饱和导致效率衰减缩短换炭周期，成本高；低温等离子体及光催化技术存在有机物未彻底分解而以其他小分子有害成分排放的风险，且低温等离子体易引起安全风险。燃烧/催化技术，虽能实现有机组分彻底分解，但其对 VOCs 的浓度有要求，以催化氧化为例，经济浓度为 3~6g/m³，无法直接用于低浓度喷漆废气处理。采用分子筛或活性炭对间歇排放的浓度波动大的喷漆废气进行浓缩均化后，再经燃烧或催化氧化彻底分解，原理上可行。

二、某自动化装备生产企业喷漆废气处理应用实例

（一）应用案例喷漆废气产生及排放情况

本案例位于四川某自动化装备生产企业，该企业主要从事长距离运输设备生产，喷漆废气的排放源于大件金属零部件表面喷涂。用到的涉 VOCs 的原辅料主要为 PU 聚氨酯面漆和稀释剂。PU 聚氨酯面漆的化学组成为树脂 60%（SIC80%、二甲苯 5%、丁酯 15%）、二氧化钛 35%、助剂 2%、醋酸正丁酯 3%，使用量为 940L/天/车间；稀释剂的化学组成为二甲苯 15%、醋酸正丁酯 45%、乙酯 20%、环己酮 20%，使用量为 460L/天/车间。本案例共计 2 个车间，两车间的喷漆工艺、原辅料消耗一致。

涉 VOCs 的 PU 聚氨酯面漆和稀释剂，在使用过程中苯系物、酯类、酮类会挥发至车间空气中，VOCs 的浓度随喷涂作业时间呈现周期性规律变化。VOCs 高强度排放出现在喷涂作业期间，之后随着喷涂作业的结束，VOCs 浓度开始逐渐下降，直至第二次喷涂作业开始再回升。

根据车间尺寸，按每小时换气 4 次考虑，单个车间的排气量约 80000m³/h。依据 PU 聚氨酯面漆及稀释剂的用量和有机物含量计算可挥发成分的量分别为 160 L/d、460 L/d。VOCs 密度按 0.85kg/L 计算，挥发率按 50% 考虑，则单个车间 VOCs 平均浓度计算为 412mg/m³。事实上，因间歇作业，VOCs 浓度在喷涂作业期间达到峰值，远大于计算的平均浓度。

（二）设计及实施处理工艺流程

本案例采用活性炭吸附浓缩耦合催化氧化工艺。喷漆废气在引风机的作用下负压进入预处理单元。预处理单元为一台双效过滤器，分别采用 G4 滤网和 F5 滤网进行初效、中效两级过滤以去除漆雾、漆粉等颗粒，避免对后续处理系统造成黏附、堵塞。经过滤预处理后的废气进入活性炭罐，苯系物、酯类、酮类等 VOCs 分子经活性炭层后被吸附拦截而去除，尾气经烟囱达标排放。吸附达饱和后采用热空气进行脱附，热空气来源于催化氧化的高温净烟气。脱附出的高浓度废气进入催化氧化单元，经与催化氧化后的尾气换热预升温后，再经加热器进一步升温至需要的反应温度进入催化氧化反应塔，有机组分在催化剂的作用下被彻底分解为 CO₂ 和 H₂O 并放热。净化后的高温尾气经回收热量后，一部分

经排气筒达标排放，另一部分用作活性炭罐的脱附热风。工艺流程如图 1。

每个车间设置 5 个炭罐，各炭罐吸附脱附轮流进行，设计按 4 吸 1 脱，脱附周期 6h，脱附及吹冷周期 1.5h。脱附媒介采用 120℃ 热空气，热空气来源于催化氧化的高温净烟气。催化反应起燃温度 300℃。

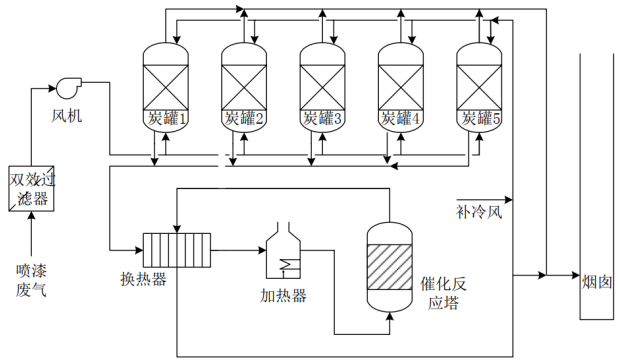


图 1. 设计处理工艺简图

（三）运行数据及处理效率分析

本案例装设在线监测设备，对废气处理装置的进出口非甲烷总烃（NMHC）及特征组分苯、甲苯、间二甲苯、邻二甲苯的浓度进行实时监测。进口采样点设在双效过滤器上游，出口采样点设在烟囱上，截取一个完整喷漆周期的实时监测数据分析进出口浓度及去除率如图 2。

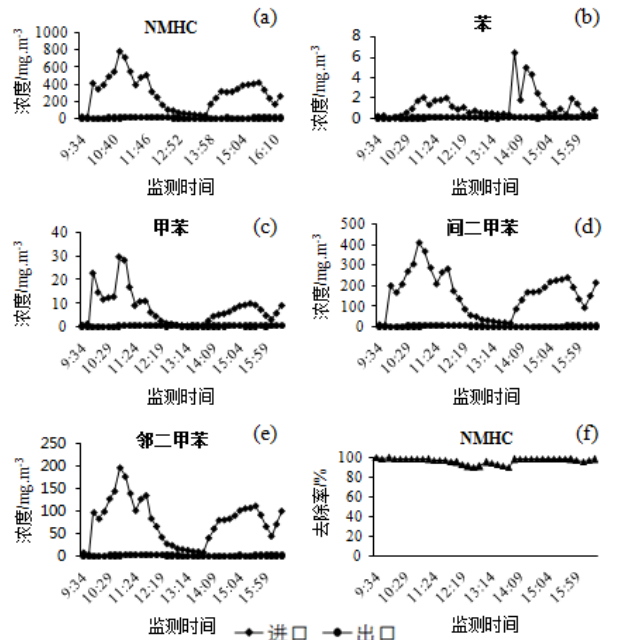


图 2. 进出口浓度数据及处理效率

从图 2 可知，NMHC 及各特征组分的进口浓度变化趋势与车间喷漆作业规律吻合。喷漆开始后，污染物浓度逐渐上升并达到峰值；当工人休息停止作业后，污染物浓度随之下降，同时浓度峰值还与作业强度相关，上午 9:30~12:00，为集中喷漆作业，NMHC 及各特征组分浓度峰值更高，而下午 14:00~16:00，为零星喷涂、补漆，浓度峰值相对较低。

四川地区对于 NMHC、苯、甲苯、二甲苯的排放限值分别为

60、1、5、15，单位 mg/m^3 。图2中 NMHC 及各特征组分的出口浓度数据表明经处理装置后均能实现达标排放，且处理效率达到90%以上。

三、运行费用及技术经济性分析

本案例运行费用主要包括电加热器及各风机的电耗，滤网、活性炭、催化剂耗材费用，以及年度检修费用。根据工艺设计、消耗量、市场单价，按年操作时间4000h/y核算，总电力消耗量1376MWh，单价800元/MWh，电费110万元/年；滤网年耗量1920张，单价105元/张，耗费20万元/年；折算活性炭年耗量10m³，单价2万元/m³，费用20万元/年；折算催化剂年耗量432L，单价300元/L，费用13万元/年。活性炭、催化剂寿命均按2年考虑。年度检修按4人次考虑，价格5000元/人次，费用为2万元/年。综合前述数据，本案例年运行总费用为165万元/年，其中电力消耗和耗材占比分别为67%、32%。

单一活性炭技术处理成本约24元/kgVOCs，低温等离子体技术处理成本约16元/kgVOCs^[5]。本案例依据运行费用核算处理成本约6元/kgVOCs。由此可见，与单一活性炭吸附或低温等离子体法处理相比，采用活性炭吸附浓缩耦合催化氧化工艺，运行费用更低，具备技术经济可行性。

四、结语

针对某自动化装备生产企业产生的喷漆废气采用活性炭吸附浓缩耦合催化氧化工艺进行处理，NMHC及特征污染物苯、甲苯、邻二甲苯、间二甲苯均能实现稳定达标排放，NMHC的去除率稳定达到90%以上。经运行费用核算，处理成本约6元/kgVOCs，运行成本明显低于单一活性炭吸附或低温等离子体法，表明活性炭吸附浓缩耦合催化氧化技术可在喷漆废气治理进行推广。

参考文献

[1] 国家统计局. 2023年中国生态环境统计年报 [R]. 2024.
[2] 陈岷轩, 杨霞, 张强, 等. 重点行业挥发性有机物排污权核算方法研究: 以湖北省企业为例 [J]. 环境科学与技术, 2024, 47 (S2) : 245-250.
[3] 宁森, 邵霞, 刘杰, 等. 对构建工业涂装 VOC 全过程管控体系的系统思考 [J]. 涂料工业, 2017, 47(12):42-47.
[4] 高宗江. 典型工业涂装行业 VOCs 排放特征研究 [D]. 华南理工大学, 2015.
[5] 敬丹丹, 赖庆智, 易晓辉, 等. 多段式臭氧光催化技术在制药企业有机废气治理中的应用 [J]. 广东化工, 2017, 44 (10) : 163-164.