

工业废气VOCs催化燃烧技术工程应用与优化

张苏苏

南京海林湾环境科技有限公司 江苏南京 210038

摘要: 工业挥发性有机物 (VOCs) 广泛源自化工、涂装、印刷、电子等行业生产过程, 其排放不仅导致光化学烟雾、酸雨等环境问题, 还可能引发人体呼吸系统疾病和基因突变。随着《挥发性有机物无组织排放控制标准》等法规的实施, 工业VOCs治理已成为污染防治攻坚战的关键领域。催化燃烧技术因其能在200-400℃将VOCs高效转化为CO₂和H₂O, 且能耗仅为热力燃烧的1/3-1/2, 成为高净化率、低二次污染的优选技术。

关键词: 工业废气; 催化燃烧技术; 工程应用; 优化策略

现有治理技术中, 吸附法受限于吸附剂容量, 吸收法易产生废液, 热力燃烧能耗过高, 而催化燃烧技术凭借低温催化、净化率超95%的优势, 成为主流技术之一。但工业工况下VOCs组分复杂、浓度波动大, 催化剂易因硫、氯、硅等杂质中毒失活, 工艺系统存在热回收效率低、安全控制难度大等问题, 亟待研究优化催化剂性能、工艺设计及运行的策略。

一、工业废气VOCs催化燃烧技术概述

(一) 催化燃烧基本原理

催化燃烧是借助催化剂降低VOCs氧化反应活化能的高效处理技术。碳氢化合物类VOCs分子通过扩散接触催化剂表面, 在活性位点发生物理或化学吸附, 形成不稳定的表面吸附态物种。VOCs分子中的C-H键、C-C键在催化剂作用下被弱化活化, 键能降低, 同时氧气分子在催化剂表面解离为活性氧物种, 与活化后的VOCs分子发生氧化反应, 逐步断裂碳氢键并生成中间产物, 最终

转化为CO₂和H₂O, 产物脱离催化剂表面完成循环^[1]。

该过程为放热反应, 反应焓变随VOCs种类变化, 如甲烷燃烧焓变为-890kJ/mol, 苯为-3267kJ/mol。起燃温度(T₅₀)是关键指标, 多数VOCs在催化剂作用下T₅₀可降至200-300℃, 远低于热力燃烧的600-800℃。反应速率随温度升高呈指数增长, 符合阿伦尼乌斯方程, 活化能通常降至40-80kJ/mol, 显著低于无催化时的120-200kJ/mol, 是催化燃烧节能的核心。

(二) 核心要素: 催化剂

催化剂是催化燃烧技术的核心, 其性能直接决定VOCs处理效率与经济性^[2]。评价催化剂性能需关注活性(T₅₀为转化率50%的温度, T₉₀为90%)、选择性(CO₂生成率需≥95%以避免二次污染)、稳定性(长期运行中T₉₀升幅≤50℃为合格)及寿命(工业工况下连续使用1-3年为实用标准)。

下面列举不同类型催化剂的性能, 见表1。

表1 不同类型催化剂性能对比表

类型	活性组分	常用载体	T ₅₀ (°C)	T ₉₀ (°C)	CO ₂ 生成率 (%)	寿命 (年)
贵金属	Pt, Pd	Al ₂ O ₃ 、蜂窝陶瓷	150-200	200-250	98-99	2-3
非贵金属	Mn、Co、Ce基氧化物	Al ₂ O ₃ 、TiO ₂	220-300	280-350	95-97	1-2
复合/负载型	Pt-Pd/Ce、Mn-Co/TiO ₂	TiO ₂ 、分子筛、堇青石蜂窝	180-230	230-300	97-98	2.5-4

(三) 催化燃烧工艺系统构成

预处理单元采用滤筒除尘器去除粉尘(出口浓度≤10mg/m³), 冷冻干燥机控制废气湿度(≤80%RH), 活性炭吸附塔或化学洗涤塔脱除硫/氯化物(残余浓度≤10mg/m³), 避免催化剂中毒或堵塞。

反应器单元中, 固定床反应器采用蜂窝式催化剂

床层, 压降≤200Pa, 适用于风量1000-50000m³/h的低浓度废气; 流化床反应器通过气流扰动使催化剂颗粒悬浮, 抗堵塞能力强, 适配含尘废气但能耗较高; 蓄热式(RCO)反应器集成陶瓷蓄热体, 热回收率≥90%, 适合中高浓度VOCs(2000-10000mg/m³), 可降低预热能耗。

辅助系统中, 电加热装置升温速率5-10℃/min, 燃

气加热适用于大流量工况；板式换热器热效率60-70%，蜂窝蓄热体可达90%以上；PLC控制系统实时监控反应器温度（±5℃精度）、VOCs浓度（0-5000mg/m³量程）及风量，超限时10s内触发防爆或补风调节。

二、工业废气VOCs催化燃烧技术工程应用现状

（一）典型行业场景

1. 化工行业

制药车间排放含丙酮、乙醇、甲苯的混合废气，浓度2000-8000mg/m³，采用蓄热式催化燃烧（RCO）工艺，Pt/Pd蜂窝催化剂处理效率达98%以上，热回收系统使燃气消耗降低60%。涂料生产中含酯类、醚类的高沸点VOCs，通过预处理加热汽化后进入固定床反应器，非贵金属Mn-Ce催化剂在300℃实现95%转化。

2. 涂装行业

汽车喷漆废气含苯系物、丁醇，浓度300-800mg/m³，携漆雾颗粒，经水幕除漆雾、活性炭吸附浓缩后，进入催化燃烧装置，Pd/Al₂O₃催化剂在250℃去除率92%-96%，避免漆雾堵塞反应器。家具喷漆废气风量波动大，采用变频控风的RCO系统，适应10000-30000m³/h风量变化，处理效率稳定在90%以上。

3. 印刷行业

塑料包装印刷排放乙酸乙酯、异丙醇，浓度150-500mg/m³，用蜂窝陶瓷固定床反应器，CO₂生成率97%，单位能耗80-120kWh/1000m³。纸张印刷含甲苯、二甲苯，非贵金属催化剂在280℃处理效率93%，运行成本较贵金属低40%。

（二）工艺设计要点

VOCs浓度100-1000mg/m³时，宜采用吸附浓缩+催化燃烧组合工艺，将浓度提升至2000mg/m³以上，降低预热能耗^[3]。浓度1000-10000mg/m³可直接采用催化燃烧，高浓度时需混入空气稀释至爆炸下限25%以下。风量5000m³/h以下选固定床反应器，10000m³/h以上优先蓄热式结构，减少设备占地面积。

多组分VOCs共存时，需评估组分间相互作用。含高沸点物质（如二氯甲烷）需预处理加热至沸点以上，避免冷凝堵塞催化剂床层；含硅氧烷的涂装废气，需增设专用过滤器，防止硅在催化剂表面沉积。

化工行业高浓度废气选RCO，初期投资比固定床高30%-50%，但热回收效率达90%以上，运行成本降低40%。涂装行业中低浓度废气用固定床，设备投资低20%，适合间歇式生产。印刷行业风量稳定，固定床与

RCO的选择取决于VOCs年排放量，排放量超100吨/年时RCO更经济。

防爆需在反应器前后设置阻火器，采用防爆风机，泄爆片爆破压力设定为工作压力1.2倍。温度超调时，连锁装置自动切断进气并开启冷风阀，催化剂床层温度超过400℃时启动紧急降温系统，防止催化剂烧结及VOCs不完全燃烧。

三、催化燃烧技术工程优化策略

（一）催化剂性能优化

研发新型催化剂时，对非贵金属进行掺杂改性，如在Mn基氧化物中引入Ce元素形成固溶体，利用Ce的储氧能力增强活性组分氧化还原性能，提升对硫、氯杂质的耐受度^[4]。同时采用纳米结构设计，将活性组分负载于纳米TiO₂载体，通过调控粒径至5-10nm增加比表面积至80-120m²/g，提高活性位点密度。

催化剂再生技术中，热再生适用于有机积碳失活的催化剂，在400-500℃惰性气氛下焙烧2-4小时，去除表面碳沉积物，恢复活性至初始值的85%以上，需控制升温速率≤5℃/min避免活性组分烧结。化学清洗再生针对酸碱可溶性杂质，采用稀硝酸或草酸溶液浸泡催化剂，清除硫、氯残留，适用于低浓度杂质污染场景，再生后T₉₀回升幅度可控制在30℃以内。

（二）工艺系统优化

预处理工艺升级采用覆膜滤料过滤器，纤维膜孔径0.2-0.5μm，对漆雾、粉尘的截留率达99.5%，避免催化剂表面覆盖。针对浓度低于500mg/m³的废气，串联活性炭吸附浓缩单元，将风量压缩至原体积的1/5-1/10，提升进入反应器的VOCs浓度至2000-3000mg/m³，降低预热能耗。

反应器结构改进采用蜂窝式催化剂床层，通道截面呈正六边形，孔径8-10mm，比传统颗粒床层压降降低40%-60%，气流分布均匀性提升至90%以上。蓄热体更换为堇青石-莫来石复合陶瓷蜂窝体，比表面积增至300-400m²/m³，热回收率从80%提升至92%，切换周期延长至90-120s，减少热量损失。

热集成技术通过反应器出口高温烟气（400-500℃）依次流经余热锅炉与热泵蒸发器，余热锅炉产生0.3-0.5MPa饱和蒸汽，用于车间加热或生产用热；热泵系统将烟气温度降至120-150℃后排空，回收的热量用于废气预热，使辅助加热能耗降低50%-70%。

例如某汽车涂装车间在预处理阶段，先经覆膜滤料

过滤器去除99.6%的漆雾，再通过活性炭转轮浓缩，将废气浓度从 $350\text{mg}/\text{m}^3$ 提升至 $2800\text{mg}/\text{m}^3$ ；反应器采用蜂窝式催化剂床层，压降从 250Pa 降至 120Pa ，蓄热体换用复合陶瓷材料，热回收率达93%；末端串联余热锅炉与热泵，每小时回收热量相当于 150kg 标准煤，预热能耗从 $180\text{kWh}/1000\text{m}^3$ 降至 $75\text{kWh}/1000\text{m}^3$ 。系统运行数据显示，VOCs处理效率稳定在98%以上，年节省能源费用约80万元，设备运行周期从原来的3个月清洗一次延长至8个月。

（三）智能运行与控制优化

基于PLC/DCS的自动化控制系统，通过分布在管道和反应器内的传感器实时采集废气浓度、流量、温度数据，系统根据预设算法动态调节引风机频率改变风量，调整电加热功率或燃气阀开度维持反应温度稳定，在催化剂活性衰减阶段通过程序控制补加装置补充活性组分。

大数据驱动的参数优化需构建包含3年以上运行数据的数据库，涵盖不同季节、生产负荷下的VOCs组分、处理效率、能耗等参数，采用随机森林或神经网络模型训练，可提前2小时预测最佳空速（ $10000\text{--}30000\text{h}^{-1}$ ）和预热温度（ $180\text{--}250^\circ\text{C}$ ），指导系统提前调整。

安全预警系统采用激光在线监测仪每秒采集VOCs浓度（量程 $0\text{--}10000\text{mg}/\text{m}^3$ ）、红外传感器监测CO浓度（ $0\text{--}500\text{ppm}$ ）、热电偶阵列监测催化剂床层温度（精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ），数据异常时10秒内触发防爆阀开启、惰性气体注入装置启动，同时切断进风阀门。

（四）行业个性化优化方案

化工高浓度废气处理采用“吸附浓缩+催化燃烧”组合工艺。高浓度废气先进入活性炭吸附床，利用活性炭多孔结构吸附VOCs，待吸附饱和后，通过热空气反向吹扫解析，使废气浓度浓缩10–20倍。浓缩后的废气进入催化燃烧反应器，燃烧释放的热量可维持反应温度，减少外部能源输入，降低系统整体能耗。

涂装行业针对漆雾中的硅成分，在预处理阶段增设硅捕获系统：采用覆膜滤料初步拦截漆雾颗粒，后续通过填充改性分子筛的吸附塔，分子筛孔道结构可选择性吸附硅氧烷分子。同时喷淋含特定螯合剂的水溶液，与硅成分反应生成稳定化合物，避免硅在催化剂表面形成玻璃态沉积物。

低温地区设备管道外敷 50mm 厚硅酸铝保温层，减少热量散失。催化燃烧产生的高温烟气经板式换热器加热待处理废气，同时在反应器入口设置电加热辅助装置，环境温度低于 -5°C 时自动启动，确保废气进入反应器时温度达到催化剂起燃点，降低预热阶段的能耗。

某北方涂装企业冬季废气处理面临双重问题：漆雾中的硅成分导致催化剂3个月内活性下降40%，且低温环境使预热能耗增加50%。于是，该企业便在预处理阶段先通过三级过滤系统，一级不锈钢网拦截大颗粒漆雾，二级覆膜滤料去除细小颗粒，三级改性分子筛吸附塔专门捕获硅氧烷，使废气中硅含量从 $65\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $8\text{mg}/\text{m}^3$ 。同时对催化燃烧系统进行改造，管道及反应器外壳增加 70mm 厚岩棉保温层，换热器更换为高效陶瓷蓄热体，热回收率提升至92%。反应器入口设置智能温控的电加热装置，根据实时进气温度自动调节功率， -15°C 环境下仍能将废气预热至 220°C 。改造后，催化剂运行8个月后 T_{90} 温度仅上升 15°C ，VOCs去除率保持96%以上，冬季运行能耗较之前降低45%。

结束语

综上所述，工业废气VOCs催化燃烧技术在能效提升、二次污染控制方面的优势，对实现“双碳”目标和生态环境质量改善具有不可替代的作用。今后，需聚焦非贵金属催化剂的活性与稳定性提升、多组分VOCs协同处理机制、智能化系统的工程化应用，结合不同行业废气特性开发定制化方案，为工业绿色低碳发展提供更高效、经济、可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 王志新, 刘诗成, 李东妮. 石化工业有机废气燃烧治理技术研究及应用[J]. 广州化工, 2022, 50(24): 36–39.
- [2] 包立全, 董益宏. 复杂工业有机废气处理技术及其展望[J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(04): 60–62.
- [3] 梁智联. 工业有机废气污染治理技术与实践研究[J]. 云南化工, 2021, 48(10): 85–87.
- [4] 李志刚. 关于工业有机废气的治理技术探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(16): 124–125.