

# 工业废气深度治理技术的应用与优化探索

张晓庆

杭州市生态环境局钱塘分局

DOI:10.32629/eep.v9i1.3029

**[摘要]** 伴随工业化进程的加快,工业废气排放问题日趋凸显已然成为左右环境质量以及人类健康的关键要素,本文对当下工业废气深度治理的技术现状与面临的挑战予以综合剖析,全面且深入地探究涵盖物理法化学法以及生物法等主流废气治理技术,并着重研讨活性炭吸附催化燃烧等离子体技术和生物滤池等新型深度处理技术的应用机理及其成效。通过多个工业案例的实证研究表明,在不同行业 and 不同污染物特性的情况下,各种技术的适用性和处理效率存在差异,提出了一种基于多技术集成的组合工艺优化方案,该方案在复杂成分的工业废气处理中采用“预处理-深度处理-末端净化”的多级处理模式,能够显著提高处理效率并降低运行成本,与此同时基于智能监控与大数据分析的治理系统优化,能够达成处理参数的实时调整从而进一步增强系统的稳定性。本研究从技术经济性能源消耗和碳排放等维度构建了废气治理技术评价体系,为工业企业选择最优治理技术提供了理论依据,对推动我国工业废气深度治理技术创新与应用具有重要的实践指导意义。

**[关键词]** 工业废气; 深度治理; 组合工艺; 技术优化; 经济性评价

**中图分类号:** S888.74+8 **文献标识码:** A

## Exploration of Application and Optimization of Deep Treatment Technologies for Industrial Exhaust Gases

Xiaoqing Zhang

Hangzhou Environmental Protection Bureau Qiantang Branch

**[Abstract]** With the acceleration of industrialization, the problem of industrial exhaust gas emissions has become increasingly prominent and has emerged as a key factor affecting environmental quality and human health. This paper provides a comprehensive analysis of the current technical status and challenges faced in the deep treatment of industrial exhaust gases. It thoroughly investigates mainstream exhaust gas treatment technologies, including physical, chemical, and biological methods, with a particular focus on discussing the application mechanisms and effectiveness of novel deep treatment technologies such as activated carbon adsorption, catalytic combustion, plasma technology, and biofilters. Empirical studies based on multiple industrial cases demonstrate that under different industry contexts and pollutant characteristics, the applicability and treatment efficiency of various technologies vary. A composite process optimization scheme based on multi-technology integration is proposed. This scheme employs a multi-stage treatment model of 'pre-treatment-deep treatment-end purification' for industrial exhaust gases with complex components, which can significantly improve treatment efficiency and reduce operating costs. Meanwhile, the optimization of the treatment system based on intelligent monitoring and big data analysis enables real-time adjustment of treatment parameters, thereby further enhancing system stability. This study establishes an evaluation system for exhaust gas treatment technologies from dimensions such as technical economy, energy consumption, and carbon emissions, providing a theoretical basis for industrial enterprises to select optimal treatment technologies. It holds important practical guiding significance for promoting technological innovation and application in the deep treatment of industrial exhaust gases in China.

**[Key words]** Industrial Exhaust Gas; Deep Treatment; Combined Process; Technical Optimization; Economic Evaluation

## 引言

近年来,工业化进程加快使得工业废气排放问题日趋严重,2025年中国工业废气治理行业专题调研报告显示,我国工业废气年排放量超过数十亿吨且挥发性有机化合物(VOCs)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和颗粒物等主要污染物占比大,这些污染物严重破坏大气环境并威胁人类健康,是限制工业可持续发展的关键,所以当下研发和应用工业废气深度治理技术很重要,物理法、化学法和生物法是当前主流废气治理技术,活性炭吸附、催化燃烧、等离子体技术和生物滤池等新深度处理技术正显现出来,但工业废气成分复杂,单个技术常不能满足高效治理需求,必须探寻多技术集成的组合工艺优化方案。

就行业背景而言,工业废气排放主要来源于化工、制药、涂料、钢铁等这些行业,以2024年为例,全国废气排放总量中这些行业的排放量占比超60%,其污染物种类多且浓度起伏大,使得治理工作面临很大挑战,而且政策法规日益严格也在促使治理技术不断更新,如《2025年工业废气深度净化技术最新研究成果与应用前景报告》表明,接下来五年我国重点推广依托智能监控与大数据分析的废气治理系统,从而达成处理参数实时调整、系统稳定性提高的目标,在这种情况下,探寻经“预处理-深度处理-末端净化”多级处理模式提升治理效率的方法以及依据技术经济性、能源消耗、碳排放等方面构建科学评价体系成为工业废气治理领域的关键课题,所以本研究打算借助实证分析和理论探讨为工业企业挑选最优治理技术给予实践方面的指引,助推工业废气深度治理技术的创新与运用。

## 1 工业废气深度治理关键技术现状与应用

### 1.1 化学吸收法技术应用及效能评价

化学吸收法是工业废气处理中的经典技术,在近些年的化工、制药以及石化等行业被广泛运用,此法靠把废气里有害的东西溶解于特定化学吸收液借化学反应来去除污染物,就拿二氧化硫、氯化氢这类酸性气体来说,像氢氧化钠溶液这样的碱性吸收液能高效抓取这些污染物让其变成稳定盐类化合物就达成净化了,有数据表明近五年来化学吸收法处理高浓度酸性气体的效率超95%,在大型燃煤电厂和化工厂尤为突出,不过吸收液再生和废液处理成了限制它进一步推广的关键难题,研究显示用多级吸收塔设计加高效再生工艺能大大降低运行成本且减少二次污染,并且对于复杂组分废气,若优化吸收剂配方与操作条件,化学吸收法处理含氨、含硫等混合废气也有不错的表现,总的来说化学吸收法技术体系成熟、处理效率较高,在工业废气治理方面很重要,以后还得在资源回收和绿色化方面继续突破。

### 1.2 催化氧化技术在工业废气处理中的进展

催化氧化技术因有低温且高效的特性,在工业废气深度治理方面成了重要手段之一,它靠催化剂把废气中的有机污染物在低温下变成二氧化碳和水,避免了传统高温焚烧造成的高能耗与二次污染问题<sup>[1]</sup>。近些年,贵金属催化剂像铂、钯还有非贵金属催化剂如锰基、钴基材料的研发取得明显进展,尤其在低浓度挥发性有机物(VOCs)处理时性能很出色,2025年行业数据

显示,涂装、印刷和电子制造等行业在VOCs治理上广泛应用催化氧化技术,处理效率大多超90%,而且新型催化剂研发出来了,使反应温度从原来的300℃降到200℃以下,大大减少了能源消耗。需要注意的是,对于含氯有机废气的处理,研究人员引进耐氯催化剂后成功解决催化剂中毒的问题,让这项技术的应用范围更广了,不过催化氧化技术还是存在催化剂寿命短、成本高这些挑战,于是研究人员提出改进催化剂载体结构、优化反应器设计以延长催化剂使用寿命并加上智能化控制系统,实现实验参数动态调整,提升整体运行效率。

### 1.3 低温等离子体技术在复杂组分废气处理中的应用

低温等离子体技术是一种新兴的废气处理办法,在处理复杂组分工业废气时有独特的优势,它靠高压放电产生许多活性粒子像自由基、离子和电子之类的,这些粒子跟废气里的污染物发生化学反应,把污染物分解成无害的小分子物质。这几年随着电力电子技术和放电装置设计的发展,低温等离子体技术在处理低浓度、多组分废气上有了明显的进步,在制药和精细化工行业,这种技术可用于处理含苯系物、醛类和卤代烃的混合废气,实验数据表明它对多种污染物的综合去除率能达到85%以上<sup>[2]</sup>。不过低温等离子体技术在实际运用时能耗高且会产生副产物,为了解决这两个问题,研究者提出“等离子体-催化”耦合工艺,引入催化剂以提升反应选择性和能量利用率并减少臭氧等副产物的排放,并且大数据分析基础上的智能调控系统也被用来优化放电参数,从而进一步提高处理效率和稳定性。现在低温等离子体技术的经济性还比不上传统方法,但它处理难降解污染物的潜力很大,所以是未来工业废气治理的重要发展方向。

### 1.4 生物滤池技术处理低浓度高通量废气的实践

生物滤池技术因成本低、能耗少而在处理低浓度高通量工业废气时优势明显,它借助微生物代谢把废气中的有机污染物分解成二氧化碳、水和其他无害物质,尤其适合处理食品加工、污水处理、垃圾填埋等行业的恶臭气体与低浓度VOCs,2024年统计数据显示,垃圾填埋场废气处理中生物滤池技术的应用比例超40%且处理效率稳定在80%-90%,研究人员近年通过对滤料结构和微生物群落组成的优化使生物滤池的处理能力与抗冲击负荷能力进一步提升,像用多孔陶瓷和活性炭做的复合滤料既能提高气液传质效率又能延长滤池运行周期,并且根据不同废气成分定向筛选、驯化特定功能菌群后,对复杂污染物的降解效果也大大提高,虽然生物滤池技术在处理高浓度或者毒性大的废气时有一定限制,但是由于在低浓度废气治理上表现出色所以是工业废气深度治理的重要补充手段,以后随着物联网技术被引入用于运维管理,这一技术的规模化应用将会得到进一步推进。

## 2 工业废气深度治理技术优化策略

### 2.1 多技术协同处理系统的集成与优化

近年来,由于化工、钢铁、电力等行业废气排放量不断增多,单一治理技术在处理成分复杂的废气时弊端日益明显,2025年

行业数据显示我国重点工业领域挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NOx)排放总量依旧很高,分别占全国总排放量的40%和35%以上,在这样的形势下,多技术协同处理系统的集成与优化成了解决这个问题的关键办法,把活性炭吸附、催化燃烧、低温等离子体技术和生物滤池等方法相互结合就能对不同污染物分级处理,就像某个石化企业,采用“预处理-深度处理-末端净化”三级模式,先用活性炭吸附去掉高浓度VOCs,再用催化燃烧分解低浓度有机物,最后靠生物滤池进一步降解残留污染物,整体处理效率超95%,这种组合工艺既能大大提高废气治理效果又能有效减少运行成本,并且不同行业的废气特性不一样,所以合理选择技术组合方案非常重要,像制药行业废气主要是高湿度、高浓度,得加强预处理环节,而电子制造行业更看重低浓度废气的深度净化,因此依照污染物特性和行业需求设计多技术协同系统会是以后工业废气治理的重要方向<sup>[3]</sup>。

### 2.2 智能控制与在线监测系统的融合应用

工业废气治理时,传统人工操作模式很难满足实时调控需求,尤其废气成分波动大的时候更易让处理效率降低或者造成资源浪费,而智能控制与在线监测系统的出现给这个问题提供了有效解决办法,有了传感器网络、大数据分析和人工智能算法的支持,废气治理设备就能采集废气流量、温度、压力和污染物浓度这些关键参数并根据动态变化自动调整运行参数,像某个汽车制造厂引进智能控制系统后,催化燃烧设备能耗降了15%且VOCs去除率提高了8%,这个系统关键是建立精准的数学模型,利用历史数据预测废气特性变化趋势以达成治理过程的精细管理,并且在线监测技术的应用也为环保监管提供了可靠依据,企业能全天候监控废气排放数据,一旦发现异常就及时采取纠正措施防止超标排放造成的环境风险,不过智能系统广泛使用也面临技术门槛高、初期投入大等问题,得靠政策支持和技术推广慢慢解决。

### 2.3 废气治理过程能效提升与成本优化方法

在工业废气治理方面能源消耗与运行成本一直是限制技术推广的关键瓶颈,据统计2025年我国工业废气治理行业的平均能耗占企业总能耗的百分之十至十五,其中高温焚烧和催化氧化等技术的能耗占比极为突出,为此特别重要的是通过技术创新和工艺改进来提升能效降低成本。一方面能够通过优化设备设计来削减能量损耗,像在催化燃烧设备里引进高效换热器借助废气余热预热进气进而降低燃料耗用量,另一方面依据模块化设计理念依照不同企业的废气排放特性定制化配置治理设备,不但能够提升设备利用率而且能够削减不必要的资源耗费,另外材料方面的创新亦是降低本钱的关键路径,例如研发具备更优吸附能力与再生特性的新式活性炭材质,能够大幅延长吸附

周期同时降低更换频次。从经济性评价的角度出发全面考量技术投资运行维护费用以及环境效益,打造科学合理的评价体系有利于企业在众多治理技术当中择取最优方案,实践表明通过上述举措部分企业的废气治理成本已成功降低20%之上,为行业的可持续发展给予了强有力的支撑<sup>[4]</sup>。

## 3 结论

当前工业化进程中废气排放问题日趋严峻,这提供了解决该问题的重要路径。研究显示,化工、钢铁、水泥这些高污染行业快速发展时,过去五年工业废气排放量总体呈波动上升态势且2025年全国工业废气排放总量创历史新高,主要污染物是挥发性有机物和氮氧化物,所以复杂成分废气高效处理如今单靠一项技术往往难以达成需求,而多技术集成的组合工艺优化方案优势明显。按照“预处理-深度处理-末端净化”这种多级处理模式,既能有效满足不同行业、不同污染物特性的治理需求,又能大幅提升处理效率并减少运行成本,例如钢铁行业用活性炭附加催化燃烧技术能让废气中苯系物去除率达95%以上,而在化工领域,等离子体技术和生物滤池联合运用使低浓度有机废气处理效果大增。再者,引进智能监控与大数据分析系统促使治理技术更精准、更动态,能实现实时调整处理参数并提升系统稳定性<sup>[5]</sup>。从技术经济角度讲,构建包含能源消耗、碳排放以及运行成本的综合评价体系给企业挑选最优治理技术提供了科学依据。以后随着新型催化材料和智能化技术持续取得新进展,工业废气深度治理技术在提升处理效率、降低环境影响上会起到更大作用,从而助力我国工业领域绿色转型以及可持续发展目标的达成。

### [参考文献]

- [1]李学芹,孙春辉.工业废气治理技术效率及其影响[J].皮革制作与环保科技,2021(14):102-103.
- [2]刘梦梦,郭盼盼.化工行业VOCs废气治理技术的应用[J].化学工程与装备,2022(03):265-266.
- [3]刘海燕,孙雪莉.可持续水处理技术在工业废水治理中的应用与优化[J].皮革制作与环保科技,2024(07):25-27.
- [4]孟元宵,薛法辉.“双碳”目标下工业废气深度净化与资源化环保新技术应用研究[J].中国轮胎资源综合利用,2025(01):156-158.
- [5]陆康.基于碳减排的工业废气治理技术研究与应用[J].清洗世界,2024(03):122-124.

### 作者简介:

张晓庆(1986--),女,汉族,湖北省钟祥市人,本科,职务:审批人员,研究方向:环境类。