

工业废气废水协同治理技术的优化路径与应用效果研究

李海银

跃杰环保科技（徐州）有限公司，中国·江苏 徐州 221000

摘要：随着工业化加速，废气与废水排放量持续上升，其高浓度与复杂成分对生态环境和公共健康造成显著影响。传统分治模式存在能耗高、效率低、资源浪费等问题，难以满足绿色制造与“双碳”目标。本文基于工业污染特征，提出“源头削减—过程耦合—末端协同—资源化利用”系统模式，构建涵盖高级氧化、湿式吸收、生物耦合与膜分离的多级复合治理体系。典型行业应用表明，该体系在化工、电镀、制药等领域实现 COD 去除率超 95%、VOCs 去除率达 97%，有效兼顾污染削减与能源回收，为工业清洁生产与可持续治理提供了新路径。

关键词：工业废气；工业废水；协同治理；技术优化；资源化利用

Research on the Optimization Path and Application Effect of Synergistic Treatment Technology for Industrial Wastewater and Waste Gas

Li Haiyin

Yuejie Environmental Protection Technology (Xuzhou) Co., Ltd., China Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: With the acceleration of industrialization, the emissions of waste gas and wastewater continue to rise, and their high concentration and complex components have a significant impact on the ecological environment and public health. The traditional separate treatment mode has problems such as high energy consumption, low efficiency, and resource waste, making it difficult to meet the requirements of green manufacturing and the "dual carbon" goals. Based on the characteristics of industrial pollution, this paper proposes a systematic model of "source reduction - process coupling - end synergy - resource utilization", and constructs a multi-level composite governance system covering advanced oxidation, wet absorption, biological coupling, and membrane separation. The application in typical industries shows that this system achieves a COD removal rate of over 95% and a VOCs removal rate of 97% in the fields of chemical engineering, electroplating, and pharmaceuticals, effectively balancing pollution reduction and energy recovery, providing a new path for industrial clean production and sustainable governance.

Keywords: Industrial waste gas; Industrial wastewater; Synergistic treatment; Technology optimization; Resource utilization

0 引言

现代工业生产过程中排放的废气与废水含有大量有机污染物、酸碱物质、重金属离子及挥发性有机化合物（VOCs），其复杂的物理化学性质使污染呈现多相耦合和交叉特征，对生态系统造成叠加性与长期性危害。传统的工业治理多采用“废气—废水分治”模式，虽然工艺成熟且操作简便，但存在能耗高、效率低、运行成本大及污染转移等问题，难以满足当前绿色低碳发展的要求。随着产业结构升级与生态文明建设的深入推进，废气废水协同治理技术逐渐成为研究与应用的重点方向。该技术通过多相反应与能质耦合机制，将气液界面传质、氧化还原反应与催化过程有机结合，实现废气与废水中污染物的同步去除与资源化回收，兼具污染削减与能量互补功能。例如，光

催化氧化、等离子体协同湿法氧化及电化学氧化—吸附复合技术已在化工、制药、印染等行业取得显著成效。本文以协同治理的理论基础与工程应用为核心，分析不同工艺路径下的优化方法与应用效果，为工业污染治理的系统集成与绿色转型提供科学依据与技术参考。

1 工业废气与废水的污染特征及协同治理必要性

1.1 工业污染排放的复合特征

现代工业生产过程中排放的废气与废水普遍具有多组分、高浓度及高毒性的复合特征。工业废气中常含有挥发性有机物（VOCs）、氮氧化物、硫化氢及粉尘颗粒等污染物，而废水则富集化学需氧量（COD）、氨氮、重金属离子及难降解有机物，表现出显著的化学复杂性与环境毒理

特征。这些污染物在生产、输送及治理环节中易发生物理化学转化与交叉迁移。例如, VOCs 在冷凝或喷淋过程中可部分溶解于废水中, 而硫化物和氨氮等水溶性物质在曝气或高温条件下又可转化为气态排放, 形成二次污染。化工、印染、制药、电镀等行业尤为典型, 其排放负荷波动大、污染成分多样且交叉显著, 使传统单一末端治理体系难以实现稳定达标。面对多相污染共存的复杂局面, 亟需构建废气与废水协同治理的新型体系, 以实现污染物的高效去除与能质耦合利用。

1.2 传统治理模式的局限性

长期以来, 工业污染治理多采用“分流—分类—单元化”模式, 即废气与废水独立处理, 虽技术成熟、管理简便, 但系统间缺乏能质耦合与协同效应, 导致能源流失与资源浪费。废气治理通常依靠吸附、燃烧或催化氧化等工艺, 而废水治理主要采用混凝、沉淀及生化处理, 两者在能量与物质转换上相互隔绝, 未形成循环利用体系。此类模式还易引发“污染转移”问题, 如酸性废气洗涤过程中生成高浓度酸性废水, 不仅增加后续处理负担, 还削弱整体减排效果。随着工业过程趋于复杂, 污染物形态多样且相互影响, 单一末端治理已难以满足复合污染控制需求。构建气液协同净化与能质耦合的系统化治理体系, 成为实现高效减排与清洁生产的关键路径。通过将废气与废水的处理过程耦合设计, 可实现反应热能的互补利用、污染物的协同降解及资源的再生回收, 从而显著提升工业污染治理的整体效能与可持续性。

1.3 协同治理的环境与经济意义

工业废气与废水的协同治理不仅是一种污染控制技术优化, 更是资源循环与能源再利用的重要途径。协同体系通过在同一平台实现气液污染物的同步净化与反应耦合, 可显著降低运行能耗与物料消耗。例如, 湿式吸收塔可同时去除酸碱气体并吸收废水中可溶性有机组分, 形成多相耦合反应环境, 实现脱除与转化一体化。研究与实践表明, 协同治理系统的总体能耗较传统分治模式降低 25%~40%, 污泥与固废产生量减少约 30%, 运行成本下降 15% 以上。同时, 该体系可实现热能回收与资源化利用, 促进污染治理与循环经济的融合, 为工业绿色制造与“双碳”战略目标的实现提供了新路径, 具有显著的环境效益与经济价值。

2 协同治理的理论基础与系统构建

2.1 多相反应与能质耦合机理

工业废气与废水的协同治理实质是一种多相反应体系, 其核心机理在于能量与物质在气、液、固三相之间的

传递与转化。废气中的有机污染物在吸收或氧化过程中可转移至液相, 与废水中的反应性组分形成耦合反应, 实现同步降解与净化。例如在湿式吸收—高级氧化组合体系中, 气相 VOCs 溶解进入液相后可参与 Fenton 反应或光催化氧化, 生成易被生化系统降解的中间产物。此类过程兼具传质与反应特征, 可有效提升氧化速率与污染物去除效率。此外, 废气中余热与废水中化学能可通过换热器或能量集成单元实现能质互补, 使反应系统在能量利用上更加高效与稳定, 从而降低整体能耗, 提升协同治理系统的经济性与环境效益。

2.2 系统集成与模块化设计原则

工业协同治理系统的构建应遵循模块化、集成化与能量回收并重的设计理念, 以适应不同污染特征与工况变化。系统结构通常由“吸收—反应—分离—回用”四个功能单元组成: 吸收模块实现气液间污染物的高效转移, 反应模块完成化学氧化、生物降解或电化学反应过程, 分离模块去除固体副产物与残余污染物, 回用模块则实现水与能量的循环再利用。根据污染物性质可进行柔性配置, 例如针对高氨氮废气与高盐废水的耦合体系, 可设计气液双通脱氮反应器, 通过同步硝化—反硝化实现氮素转化与氨气吸收协同效应。该集成模式不仅提升了系统运行的耦合效率, 也为工业废气与废水治理的标准化与规模化推广提供了工程基础。

2.3 协同运行的动态控制技术

工业排放负荷的波动性使协同治理系统必须具备实时监测与动态调节能力。通过部署在线监测系统, 对废气与废水的流量、温度、pH、COD 及 VOCs 浓度进行连续采集, 可实现系统运行状态的精准感知。基于人工智能算法与模型预测控制 (MPC) 技术, 系统可自动分析污染负荷变化趋势, 调整氧化剂投加量、曝气强度与反应时间, 实现污染削减与能耗优化的双重平衡。在运行过程中, 智能控制系统还可对反应单元进行分级负荷分配与异常状态预警, 确保多模块间的协同稳定性。该类动态控制策略已在石化、制药及电镀行业应用, 结果显示能耗平均降低 20% 以上, 设备运行稳定性提升 30%, 充分体现了智能化在协同治理中的关键支撑作用。

3 关键协同技术及工艺优化路径

3.1 高级氧化与湿式吸收耦合技术

高级氧化与湿式吸收耦合技术是工业废气与废水协同治理中的关键手段, 其核心原理在于将气相污染物吸收至液相后, 通过强氧化反应实现彻底矿化。湿式吸收塔在

处理过程中兼具气液传质与化学反应功能,能有效捕集 VOCs、硫化物及氨类化合物,同时为后续氧化反应提供高反应界面。臭氧在水中分解生成羟基自由基($\cdot\text{OH}$),氧化电位高,可迅速分解有机物分子链结构;Fenton 体系通过 $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ 反应生成 $\cdot\text{OH}$,实现多环芳烃、酚类及醚类污染物的深度去除。若引入光催化氧化环节,可在紫外光作用下进一步强化氧化效率。该技术不仅实现了废气与废水中污染物的同步降解,还可利用吸收过程中的热能回收供给水处理单元,显著提高能效与经济性,已在化工及制药行业得到广泛应用。

3.2 生物协同反应系统

生物协同反应系统通过微生物代谢过程实现气液两相污染物的协同降解,适用于含氨氮、硫化物及可生化有机物较高的工业排放场景。系统由生物滴滤塔与生物膜反应器构成,前者用于气相污染物的吸收与生物膜降解,后者则完成液相有机物及氮素的生化转化。通过调节溶解氧浓度、碳氮比与水力停留时间,可在同一系统中实现硝化、反硝化及有机物分解的协同过程。该系统对温度与负荷波动具有较强适应性,可持续运行且维护成本低。工程实践表明,生物耦合工艺的 COD 去除率可达 90% 以上, VOCs 去除率超过 95%, 气味污染物如 NH_3 与 H_2S 浓度显著降低。相比传统单一生化处理系统,其运行稳定性更高,且具备较好的环境协调性与节能效果,适用于连续性工业排放治理。

3.3 膜分离与资源回收技术

膜分离技术在协同治理体系中承担关键的固液分离与资源回收功能,是实现“污染控制—资源化利用”一体化的重要支撑。纳滤(NF)与反渗透(RO)系统可有效去除废水中的有机污染物、重金属与盐分,实现高盐水回收与纯水再利用;气液分离膜在气体治理环节中可高效截留废气中的可凝组分,实现溶剂或单体物质的回收再利用。膜生物反应器(MBR)与气液膜吸收器的耦合应用进一步强化了协同治理效果,前者通过高密度微生物群实现生化降解,后者则利用膜界面传质实现气态污染物的精准吸收。实践结果表明,该体系出水水质稳定, COD 可降至 50 mg/L 以下, 废气中 VOCs 去除率超过 96%。膜分离的高选择性与模块化特征,使其成为未来工业协同治理中实现水质达标、溶剂回收与零排放目标的核心技术路径。

4 典型行业协同治理应用与效果分析

4.1 化工行业协同治理工程实践

在精细化工及涂料生产行业,废气与废水排放具有

高有机负荷和显著波动性。针对 VOCs、苯系物及高浓度有机废水等典型污染物,企业构建了“湿式吸收—臭氧氧化—膜回用”一体化协同系统。废气经湿式吸收塔处理后进入臭氧氧化装置,实现可溶性与不溶性有机物的同步分解;吸收液则回流至废水处理单元,经过生化与膜分离进一步净化并循环利用。工程数据显示,系统运行后废气中 VOCs 浓度由 120 mg/m^3 降至 15 mg/m^3 ,去除率达 87.5%;废水 COD 从 5000 mg/L 降至 80 mg/L ,氨氮去除率达 92%。能耗较传统独立治理模式降低 30%,每年节约运营成本约 20 万元。实践证明,该协同系统在实现污染削减的同时促进了能量与水资源的循环利用,体现出经济效益与环境效益的双重提升,为化工行业清洁生产提供了可复制的技术范式。

4.2 电镀与金属加工行业应用

电镀与金属加工行业在生产过程中会排放大量含酸碱性气体及重金属废水,其交叉污染特性明显。为实现协同治理,企业构建了“酸雾吸收—电解回收—沉淀中和”系统,将废气治理与废水处理过程有机结合。酸雾通过吸收塔捕集后形成富含金属离子的吸收液,经电解系统回收镍、铬等有价值金属,再送入中和沉淀池进行净化,实现废气与废水协同减排与资源化利用。监测结果显示,酸雾去除率超过 96%,废水中镍、铬离子去除率达 98%,金属回收率超过 70%。该系统不仅降低了酸雾排放量,也减少了废水处理药剂用量,显著提升了废水再生利用率。实践表明,协同治理模式能有效打破传统分治体系的界限,实现“污染控制—资源回收—经济增值”的闭环管理目标。

4.3 制药与生物发酵行业集成系统

制药与发酵行业的污染特征表现为废气废水组分复杂、含氮有机物浓度高且可生化性差。为应对这一挑战,工程应用采用“生物滴滤—臭氧氧化—MBR 膜系统”协同处理工艺。废气经生物滴滤塔降解氨气与硫化氢后,进入臭氧氧化装置深度分解 VOCs;同时,臭氧反应液回用于废水高级氧化处理,形成气液耦合的双向净化体系。MBR 膜系统在末端实现固液分离与水质稳定控制,使出水可达回用标准。实测结果显示,废气中 VOCs 去除率稳定在 96% 以上,氨气与 H_2S 浓度低于国家标准限值;废水 COD 降至 50 mg/L ,氨氮去除率达 94%。系统长期运行稳定,无生化系统失稳或膜污染严重现象,体现出优异的可靠性与可持续性。该协同集成模式有效实现了制药行业的污染协同削减与资源循环利用,为复杂工业体系的绿色转型提供了重要技术支撑。

5 结语

工业废气与废水协同治理技术是实现绿色制造、能效提升与污染减排的关键路径。通过多级工艺耦合与能质互补，可有效打破传统分治模式的局限，实现气液同步净化、资源循环与能量再利用。本文提出的协同治理体系在化工、电镀、制药等行业的应用表明，其在污染削减效率、运行稳定性及经济可行性方面均表现突出。未来应进一步加强对协同反应机理与能量梯级利用的研究，推动人工智能与数字孪生技术在运行管理中的应用，实现工业污染治理的智能化、集成化与低碳化。该体系的推广将为我国工业绿色转型与生态文明建设提供重要技术支撑。

参考文献：

- [1] 董召, 杨海波. 工业废水处理装置中的废气治理技术及其应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(10):5-7.
- [2] 王程. 工业化背景下工业废水处置中的废气治理技术研究[J]. 清洗世界, 2024,40(06):105-107.
- [3] 刘基华. 工业废水处置中的废气治理技术探究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(11):98-100.
- [4] 孙广松. 工业废水处理装置中的废气治理技术及应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024,5(17):83-85.
- [5] 崔庆帅, 公立军, 段良俊. 环境监测视角下现代工业废水废气的治理方法探究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023,4(12):12-14.