

工业废气排放控制与管理策略

俞 凯

(南大恩洁优环境技术(江苏)股份公司, 江苏 南京 211500)

摘要 工业废气排放包含的有害成分直接威胁到空气质量与人类健康, 凸显了加强排放控制的重要性。本文系统分析工业废气的成分和来源, 探讨现有的控制技术和管理策略, 通过案例分析展示其实际应用效果。通过物理、化学、生物等多种控制技术的综合应用, 以及排放监测、政策法规、经济激励和企业内部管理等多方面的管理策略, 提出了一套全面的工业废气排放控制与管理方案, 以期工业废气排放控制提供理论支持和实践参考, 助力实现可持续发展和环境保护目标。

关键词 工业废气; 排放控制; 环境影响; 物理控制技术; 化学控制技术

中图分类号: X51

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0049-03

工业废气排放是全球环境污染的主要来源, 不仅影响空气质量, 还加剧了温室效应和酸雨现象, 对生态系统和人类健康构成威胁。近年来, 随着工业化进程的加快, 废气排放量持续增加, 促使各国政府和企业加大了对废气控制技术的研发投入和管理力度。本文全面梳理工业废气排放控制与管理的最新进展, 旨在为相关领域科研人员和决策者提供参考和启示。

1 工业废气排放现状分析

1.1 工业废气的主要成分及来源

工业废气的主要成分复杂多样, 源自广泛的工业活动。常见的废气成分包括但不限于颗粒物如烟尘、飞灰, 有害气体如二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、挥发性有机化合物(VOCs)、硫化氢(H_2S)、氨(NH_3), 以及重金属蒸汽如铅、汞。这些废气来源于煤炭燃烧、金属冶炼、化工生产、石油加工、制药、涂料制造等多种工业过程。其中, 燃煤发电厂和工业锅炉是二氧化硫和颗粒物的主要排放源; 汽车尾气和石化行业则是氮氧化物和 VOCs 的主要贡献者; 而重金属污染常与金属矿产的开采和加工活动相关。工业废气的排放不仅直接影响大气质量, 还可以通过化学反应生成二次污染物, 如臭氧和细颗粒物 PM2.5, 加剧环境恶化, 对生态系统和人体健康构成严重威胁。

1.2 废气排放的环境影响

工业废气排放对环境的影响深远且多维, 涉及大气化学平衡、生态系统健康及人类福祉。首要影响体现在对大气质量的恶化, 尤其是二氧化硫和氮氧化物可催化形成酸雨, 破坏植被, 侵蚀建筑物, 并加剧土壤与水体酸化; 挥发性有机物参与光化学反应, 生成

地面臭氧和二次有机气溶胶, 加剧呼吸系统疾病。细颗粒物(PM2.5)穿透肺部屏障, 引发心血管疾病, 甚至影响神经系统。温室气体如二氧化碳累积, 加速全球气候变化, 导致极端天气事件频发。重金属沉积则毒害生物链, 损害生物多样性^[1]。长期暴露于高浓度工业废气中, 人群面临癌症、呼吸道疾病及生殖障碍等健康风险。

2 工业废气排放控制技术

2.1 物理控制技术

物理控制在工业废气治理中扮演着关键角色, 主要通过改变废气中污染物的物理状态实现去除。其中, 吸收技术利用特定液体作为吸收剂, 如使用碱液吸收 SO_2 , 通过气液接触实现污染物从气相向液相转移; 吸附技术采用具有高比表面积的固体吸附剂, 如活性炭, 对 VOCs 等有机污染物进行物理捕获, 通过孔隙结构实现高效净化; 过滤技术针对颗粒物, 如袋式除尘器利用纤维网捕捉 PM2.5 及更小粒子, 确保排放达标; 冷凝技术适用于高浓度、易冷凝的污染物, 通过降低温度使气体中的某些组分转变为液态而被分离; 膜分离技术基于膜材料的选择透过性, 实现不同组分的分离, 特别适合处理低浓度有害气体。

2.2 化学控制技术

化学控制在工业废气治理领域中占据重要地位, 通过引发或促进化学反应来转化或消除污染物。其中, 湿法脱硫(WFGD)技术利用石灰石浆液与烟气中的二氧化硫反应生成亚硫酸钙, 进而氧化为硫酸钙, 有效去除 SO_2 ; 选择性催化还原(SCR)和非选择性催化还原(SNCR)技术通过注入氨或尿素, 在催化剂作

用下与氮氧化物 (NO_x) 反应, 转化为无害的氮气和在水蒸气; 化学洗涤技术采用强氧化剂, 如臭氧或过氧化氢, 与挥发性有机化合物 (VOCs) 发生氧化反应, 将其转化为 CO₂ 和 H₂O; 化学吸收法通过添加化学试剂到吸收液中, 提高对特定污染物的吸收效率, 如使用氢氧化钠溶液吸收酸性气体; 而燃烧技术则在高温条件下将有机污染物彻底氧化分解。

2.3 生物控制技术

在工业废气治理中, 生物控制技术的核心在于利用微生物的新陈代谢能力降解有害物质。生物过滤技术通过使废气流经富含微生物的固定床层, 如土壤、堆肥或特殊培养基, 微生物将 VOCs 等有机污染物作为碳源和能源进行生物降解; 生物滴滤塔则是在连续湿润的填料层上培育微生物群落, 废气中的污染物溶于水后被微生物代谢, 适用于处理较高湿度和低浓度的废气; 生物洗涤塔采用液体循环系统, 废气中的污染物先溶解于水中, 随后在生物反应器内被微生物消化, 特别适合处理水溶性较好的污染物^[2]; 生物膜反应器利用固定化微生物, 形成稳定的生物膜, 能高效处理含有特定污染物的废气。

2.4 新兴控制技术

新兴的工业废气控制技术正引领着污染治理领域的革新, 其中光催化氧化和等离子体技术尤为突出。光催化氧化技术利用光催化剂 (如 TiO₂), 在紫外光照射下, 氧化分解 VOCs 等有机污染物到 CO₂、H₂O, 达到高效净化; 等离子技术通过高能量电子、自由基和活性离子对污染物分子进行快速裂解, 适用于处理难以降解的有机物质的高压电场产生低温等离子。作为一种物理分离过程, 膜分离技术采用聚酰亚胺、聚丙烯等具有选择性渗透特性的膜材料, 将目标污染物从气流中分离出来, 具有低能耗、无二次污染等优点。但集成智能控制系统的废气处理设备, 可对运行条件进行实时监控和优化, 提高处理效率, 降低资源消耗, 具有组合物联网、大数据分析和机器学习算法等功能。

3 废气排放管理策略

3.1 排放监测与数据分析

废气排放监测与数据分析是实时掌握排放状况、确保合规、优化减排策略的现代工业环保管理的核心环节。安装有探头、预处理单元和分析仪器的在线监控系统 (CEMS), 连续采集烟气样品, 测量 SO₂、NO_x、颗粒物等关键污染物浓度。利用大数据平台进行数据存储和初步分析, 通过无线或有线网络将数据传输到中央数据库。应用机器学习算法等数据挖掘技术, 深

入分析海量历史和实时数据, 识别排放方式、异常排放源和超标隐患。通过建立尾气排放预报模型, 对今后的尾气排放趋势进行提前预警, 并对预防检修和工艺调整进行指导^[3]。基于分析结果, 企业可以在实现节能减排和成本控制双重目标的同时, 动态调整生产计划, 优化能源使用, 实施更加精确的末端治理措施, 以符合法规要求。

3.2 排放控制政策与法规

废气排放控制政策与法规是环保治理体系的基石, 通过设定严格的排放标准来约束工业活动, 促进环境质量的改善与公众健康的保护。我国《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996) 作为一项核心法规, 规定了 33 种大气污染物的排放限值, 包括最高允许排放浓度、速率及无组织排放监控浓度, 适用于既有污染源的管理与新建设项目的影 响评估。这一标准要求企业采用高效净化技术, 如选择性催化还原 (SCR) 减少 NO_x 排放, 湿式电除尘器 (WESP) 控制微粒物质。同时, 政策层面引入总量控制与排放权交易机制, 鼓励企业内部减排与外部市场调节相结合, 实现经济效益与环保效益的双赢^[4]。持续修订更新排放标准, 引入更先进的监测手段, 如远程红外光谱分析, 确保法规与时俱进, 适应日益严峻的环境挑战。

3.3 经济激励与市场机制

经济激励和市场机制是以市场化手段推动企业主动减排的废气排放管理中的一种创新策略。核心机制包括政府为企业设定行业排放总量上限、向企业分配或拍卖排放配额、需要从市场上购买超额排放的配额等总量控制和排放交易制度, 而将多余的配额卖出, 形成激发企业投入减排技术的“污染者付费”市场逻辑。同时, 对高污染行业征税, 提高企业经营成本, 倒逼企业优化生产流程, 绿色税收与补贴政策双管齐下; 财政补贴或税收减免使用清洁能源和先进环保技术的企业, 减轻其改造负担。鼓励金融机构对环保项目优先支持的绿色信贷投资机制, 为绿色产业拓宽了融资渠道。

3.4 企业内部管理

企业应建立将环保责任融入日常运营的 ISO14001 等环境管理体系 (EMS), 确保各项活动符合法规要求。实施清洁生产审核, 采取低氮燃烧技术降低氮氧化物排放、实施原料替代降低 VOCs 排放等方式, 通过工艺改进、资源循环利用, 减少废气产生。同时, 为防止因设备故障造成的不计划排放, 建立全面的设备检修、维护计划。企业也需要通过培训, 培养员工对环保政策的认识和执行能力, 提高他们的环保意识。将减排

目标与经营层、员工绩效挂钩，激发全员参与环保行动的积极性，建立环保绩效考核奖惩机制。环保报告定期发布，排放数据透明公开，企业的社会责任和环保承诺得到社会监督，打造企业良好形象。

4 案例分析

4.1 案例概况

某印刷厂在生产过程中使用了大量的胶水和水性油墨，产生了含有细小粉尘颗粒的 VOCs 废气。针对这一问题，该厂实施了废气治理工程，采用了生物吸附技术和蓄热式热氧化技术相结合的方式，有效地降低了 VOCs 排放浓度，达到了国家规定的排放标准，同时提高了生产环境的安全性和舒适度。

4.2 控制技术与策略应用

为了有效控制挥发性有机化合物 (VOCs) 排放并减少对环境的影响，印刷厂采取了一系列先进的控制技术和严格的管理策略。这些措施不仅有助于提高生产效率，还能确保企业的社会责任得到履行。印刷厂采用了生物吸附技术来处理废气中的 VOCs。这种技术利用微生物的生命活动来降解废气中的有机污染物。通过在特殊的生物过滤器中培养特定的微生物群落，可以有效地将 VOCs 转化为二氧化碳、水和其他无害物质。这一过程不仅能够显著降低 VOCs 的浓度，而且成本相对较低，是一种经济高效的净化手段。为了进一步处理经过生物吸附技术初步净化后的废气，印刷厂还采用了蓄热式热氧化技术 (RTO)。这项技术通过高温氧化反应将剩余的 VOCs 转化为二氧化碳和水蒸气。RTO 系统通常包含两个或多个陶瓷填充床，废气通过这些床层时会被加热到高温 (通常为 760 °C 以上)，在此温度下 VOCs 迅速被氧化分解。蓄热式热氧化器还能够回收部分热量用于预热进入的废气，从而节约能源消耗，提高了整个系统的热效率。印刷厂还加强了生产过程中 VOCs 排放的监测与控制。这包括定期检查生产设备的密封性和完好性，确保没有泄漏点存在。通过安装传感器和在线监测系统，可以实时监控 VOCs 排放水平，一旦发现异常情况即可及时采取措施^[5]。为了确保废气处理设施的稳定运行和长期有效性，印刷厂建立了一套完整的废气排放管理体系。这套体系包括以下几个方面：(1) 定期培训员工，增强员工的环保意识，确保他们了解最新的环保政策和技术要求。(2) 制定应急预案，针对可能发生的突发环境事件，如设备故障导致的大量 VOCs 泄漏，提前准备应急计划和响应措施。(3) 维护保养制度，定期对废气处理设施进行维护和保养，确保其始终处于最佳工作状态。(4)

定期检测与评估，通过第三方专业机构对废气排放情况进行定期检测与评估，确保符合国家和地方的环保标准。(5) 持续改进机制，基于监测数据和评估结果，不断调整优化管理措施和技术方案，实现 VOCs 排放的持续减少。

4.3 应用成效分析

实施废气治理工程后，该印刷厂在 VOCs 排放浓度方面从 120 mg/m³ 显著降低至 20 mg/m³，细小粉尘颗粒含量也从 15 mg/m³ 降至 3 mg/m³，达到了国家规定的排放标准，具体如表 1 所示。生产线停机次数从每年 12 次减少至 2 次，年度维护成本从 15 万元降至 10 万元，废气处理效率从 60% 提升至 90%。这些数据显示了采用生物吸附技术和蓄热式热氧化技术相结合的方式对降低 VOCs 排放浓度和提高生产效率具有明显效果，同时有效降低了维护成本，提高了生产环境的安全性和舒适度。(见表 1)

表 1 应用成效

项目	实施前	实施后
VOCs 排放浓度 (mg/m ³)	120	20
细小粉尘颗粒含量 (mg/m ³)	15	3
生产线停机次数 (次/年)	12	2
年度维护成本 (万元)	15	10
废气处理效率 (%)	60	90

5 结束语

工业废气排放控制与管理已经成为全球工业发展过程中必不可少的一环，而有效的废气控制技术与策略不仅是履行企业社会责任的表现，还是实现可持续发展的必经之路。展望未来，废气排放控制与管理策略将更加注重技术创新与跨学科融合，以期在保障环境质量的同时，推动工业经济的高质量发展。

参考文献:

- [1] 吴晶, 乐小亮, 毛慧. 泰州市工业废气排放特征分析与评价 [J]. 绿色科技, 2021, 23(22): 155-157.
- [2] 李刚. 工业废气排放的环境规划问题及对策 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 02(01): 74-76.
- [3] 胡中南, 樊蓓蓓. 工业废气排放质量监测系统设计与自动化仪表 [J]. 2021, 42(09): 14-19.
- [4] 李刚. 现代工业废气排放管理与大气环境质量评估模型的构建 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(01): 96-98.
- [5] 张裴. 电子工业废气 VOCs 排放特征及防治对策探讨 [J]. 清洗世界, 2024, 40(01): 111-113.