

企业工艺生产废气排放特征与治理技术研究

沈徐帆

湖州翰创环保机械有限公司 浙江湖州 313000

【摘要】 工业生产过程中产生的大量废气对环境 and 人体健康构成了严重威胁。不同工艺所产生的废气在污染物种类、排放方式以及浓度水平等方面均存在显著差异，因此，精准识别排放特征是实现高效治理的前提。本文聚焦于典型行业工艺废气的排放特征，构建了相应的排放谱系，并结合多污染物的时空分布以及VOCs（挥发性有机化合物）组分分析方法，深入探讨了污染物的扩散规律。在治理技术层面，本文分析了现有主流技术的适用性、能效比、运行成本以及潜在瓶颈，并提出了相应的优化策略。通过构建基于排放特征的工艺与技术匹配模型，探索多技术协同机制，以及引入智能监测技术和新型材料，有效提升了废气治理的精准度和稳定性。同时，本文强调了清洁生产与末端治理的协同路径，以推动产业向绿色低碳方向转型。本研究为废气治理技术的优化及企业污染控制提供了理论依据和实践指导。

【关键词】 工艺废气；排放特征谱；治理技术组合；清洁生产

Study on the emission characteristics and treatment technology of waste gas from industrial process production

Shen Xufan

Zhejiang Hanchuang Environmental Protection Machinery Co., LTD. Zhejiang Jianghu 313000

【Abstract】 The large amount of exhaust gas produced during industrial production poses a serious threat to the environment and human health. There are significant differences in pollutant types, emission methods, and concentration levels among different processes. Therefore, accurately identifying emission characteristics is essential for effective governance. This paper focuses on the emission characteristics of typical industry process exhaust gases, constructs corresponding emission spectra, and combines spatiotemporal distribution of multiple pollutants with VOCs (volatile organic compounds) component analysis methods to thoroughly explore the diffusion patterns of pollutants. In terms of governance technology, this paper analyzes the applicability, energy efficiency ratio, operating costs, and potential bottlenecks of existing mainstream technologies, and proposes corresponding optimization strategies. By constructing a process and technology matching model based on emission characteristics, exploring multi-technology synergy mechanisms, and introducing intelligent monitoring technologies and new materials, the precision and stability of exhaust gas governance have been effectively improved. At the same time, this paper emphasizes the collaborative path between clean production and end-of-pipe treatment to promote the transition of industries towards green and low-carbon directions. This study provides theoretical basis and practical guidance for the optimization of exhaust gas governance technologies and corporate pollution control.

【Key words】 process waste gas; emission characteristic spectrum; treatment technology combination; clean production

引言：

工业化进程的加速导致工艺废气排放成为环境污染的主要来源，其中VOCs（挥发性有机化合物）、颗粒物、氮氧化物等污染物对空气质量和生态系统产生了深远影响。传统污染治理主要依赖于末端控制，然而，由于污染物组分复杂、排放模式多样，单一技术难以满足各种工业场景的需求。近年来，国家环保政策日益严格，对企业提出了更高的减排要求，这促进了废气治理技术的升级和优化。研究工业废气排放特征，以及分析污染物的形成机制与扩散规律，是制定高效治理方案的基础。治理技术的发展需要突破传统工艺的局限，结合智能化技术、材料科学等前沿领域，以提高治理效果并降低运行成本。此外，清洁生产理念的引入，为从源头减少污染物排放提供了可能。本文围绕工艺废气的排放特征、治理技术的优化以及智能管控系统等方面展开研究，探

讨废气治理的系统性解决方案。

1. 企业工艺废气排放特征谱系构建

1.1 典型行业生产工艺与废气发生源解析

不同工业行业不同的生产工艺决定了其废气的排放源头及产生物质。石化、印刷、医药、金属加工行业工艺环节上所涉及的高温反应、溶剂排放、燃烧等过程均会对废气排放强度、污染类型、污染物含量的波动发生相应变化。石化行业裂解、精馏、储罐的无组织泄漏烃类气体为主要的VOC（挥发性有机物）废气排放源头；印刷行业主要来自于油墨（溶剂型），废气中所含污染物类型单一；制药行业由于广泛使用有机溶剂，决定了所排放废气中VOCs类别的复杂多样性。金属加工行业在焊接、切削、涂装工艺中会产生含有金属氧化物、细颗粒及有机溶剂类复合混合废气^[1]。研究不

同行业工艺中废气的排放,有利于准确掌握行业主要污染源,可以针对所排放废气的治理,增强污染整治的准确性和有效性。

1.2 多污染物时空分布特征与扩散规律

由于生产工艺的运行与运行状况、设备运行状态和气象条件等因素,废气的排放时间分布、空间分布和浓度分布呈现出不同的特征。间歇式的生产状况往往使得废气排放浓度出现一定程度的振荡状态,持续的生产状态下则保持相对恒定的浓度排放。高温废气容易造成热力上升的气流,有利于提升垂直扩散过程。低浓度废气无组织状态往往容易受到区域附近微小流场的影响,容易造成低浓度废气在局部区域聚集,因此城市工业园区内存在的产业集群排放将产生叠加作用,扩大污染物二次生成的可能(如 VOCs 光催化氧化过程形成臭氧、二次有机气溶胶等)。更加精细解析废气的排放时间分布和空间分布是优化污染防控的关键所在,通过灵活调整废气排放的时间、合理的通风排风以及源头控制等方式实现污染物在时间分布和空间分布上的分散。

1.3 挥发性有机物(VOCs)组分指纹识别技术

VOCs 的复杂性决定了其指纹识别的重要性,每种工业废气的 VOCs 组分数谱有较大的差异,比如石化工业以烷烃、芳香烃为主,制药工业富含大量醇类、醚类和酯类,而喷涂工业富含酮类、醛类等^[2]。对 VOCs 的组分识别利用气相色谱-质谱联用(GC-MS)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)以及荧光光谱等技术可实现 VOCs 高精度的定性定量分析。组分识别精准程度提升也源于机器学习算法的运用,为实现污染追溯、污染物去除效率的最优提供了数据依据。VOCs 精准识别,便于筛选适宜的治理技术。比如针对高沸点 VOCs,优选低温等离子体技术;对于低分子量的 VOCs,优选吸附或者催化氧化技术。

2. 现有治理技术效能评估与瓶颈分析

2.1 主流治理技术分类及适用性图谱

现阶段工业废气治理技术包含吸附、冷凝、燃烧、生物、光催化、等离子体等。其中,活性炭吸附技术应用于低浓度大风量的 VOCs 废气的治理,其还可以采用活性炭再生循环来达到节约成本的目的;蓄热式燃烧技术(RTO)用于高浓度 VOCs 废气的处理,但该技术初始投资成本较高,且其在运行过程中存在较高能耗。光催化、等离子体技术分别适用于低浓度 VOCs 气体的治理,但其废气环境对高湿度以及高粉尘的废气环境适应能力较弱。生物技术专用于含氧有机物(如醇类、醛类)的去除,其反应速率有限,无法针对高浓度、复杂组分的 VOCs 废气进行有效净化。因此,针对不同工艺废气特性,需建立相应治理技术适用范围,以保证技术选型的合适程度,防止因治理成效降低或运行支出增大而失去治理能力。

2.2 能效比与去除效率多维度评价

治理技术的评估应该不单注重去除效率,还需要考虑效率功率比、资源能源耗损及设备维护等其他成本。催化燃烧技术去除效率高,却消耗大量燃料,且催化剂易中毒失效;

低温等离子体技术对 VOCs 降解效率很高,但也有副产物生成的可能;吸附技术的耗能低,但是吸附剂的再生需要额外的能源投入^[3]。因此应该建立多指标的评价体系,包括能耗(单位污染物处理的能耗),去除效率(不同污染物的降解效率),经济性(设备投资及运行成本)等参数来帮助企业选择最佳技术组合提供强有力的数据支撑。

2.3 运行成本与二次污染风险分析

高效治理技术往往也存在较高运营成本,如 RTO(蓄热燃烧)装置的燃料消耗、催化燃烧装置的催化剂更换费用和吸附装置的活性炭再生成本等,且部分治理技术可能还存在带来二次污染的风险。如等离子体降解 VOCs 会产生醛酮类产物、光催化产生二次颗粒物以及生物法不完全降解可能产生难降解中间产物,二次污染也是治理技术选择时考虑的要点,应结合不同技术的副产物特征进行工艺优化配置,确保污染物去除的彻底性。

2.4 复杂工况下的技术失效案例研究

实践表明,许多治理技术对于复杂工艺工况的适应性不足,例如 RTO(蓄热式燃烧技术)对于高湿度高粉尘工况,很容易堵塞换热器从而降低热回收率;对于高浓度 VOCs 工况,吸附剂(活性炭)很快会饱和,因此吸附量降低;光催化技术对于气流速度快的情况,由于催化剂和污染物接触时间短,无法有效降解。上述研究案例显示技术失败的主要原因有不恰当的工艺参数设计、污染物组分发生变化、未考虑技术适用范围的变化以及设备的维护不及时等。如何确保治理系统长周期稳定运行对于不同行业复杂的废气工况应建立起动态调控机制,采用智能化监控、技术组合等方式。

3. 治理技术优化与系统集成策略

3.1 基于排放特征的工艺-技术匹配模型

工业废气的另一个难点就是废气的排放特征的多样性(排放物组分的不确定性、排放方式的不确定性、工况条件的不确定),采用单一技术不能做到同时适用多种排放工况。因此,工艺与技术匹配模型,应是基于排放特征而设计的工艺技术匹配模型,才是最优的治理策略^[4]。各种工艺排放的废气,其排放物浓度、排放物温度与湿度、排放组分的复杂程度都不尽相同。例如高温燃烧产生的废气组分主要是 CO 与 NOx,含多种挥发性有机物 VOCs 组分废气则是从有机溶剂挥发得到。因此为了匹配适合的技术需要构建决策模型,应包括污染物物化特性分析、不同技术的应用矩阵以及工艺约束条件,通过数据驱动的决策模型,通过历史监测的数据以及模拟的结果继续优化匹配精准度。企业因此可根据此决策模型匹配找到高效、经济、可持续的最佳治理技术和治理工艺,以避免盲目投资与低效治理,将治理体系进行“精准匹配”排放特征。

3.2 多技术耦合的协同增效机制

单一技术很难在治理所有污染物时,都保证较好的效率尤其是多组分复合性污染,单一技术的去除效率、能源消耗和减少二次污染都可能存在缺点,因此多技术耦合也是提高去除效果的有效途径。不同技术耦合作用可以使污染物降解

路径得到加强,例如等离子体技术与催化燃烧技术的耦合,可借助等离子体活化 VOCs 分子,提高后续催化氧化技术的氧化效率,并降低燃烧温度从而减少耗能,吸附—催化氧化技术耦合也可以有效地改善高浓度 VOCs 的处理效果,在低浓度阶段,先采用吸附技术进行 VOCs 的储存,在达到一定浓度后,再采用催化氧化技术进行处理,提高处理效率及减少运行成本。光催化技术与湿式洗涤技术耦合可以解决高湿废气中的 VOCs 去除率较低的问题。多技术耦合核心是确定最佳组合模式,要从污染物的特性、能耗、运行稳定性等多方面综合考虑,以技术组合的方式实现技术最佳降解效率。

3.3 智能监控与物联网运维系统构建

治理过程中传统的治理设备多是根据预设值来调控,采用人工监测的方式,往往随着废气排放的变化,治理结果也存在不可控性,易导致废气治理效果波动、废气处理效率低等情况。而随着智能化检测的介入,实现对污染物排放情况、设备运行情况、废气处理效果的全流程在线监控^[5],并根据物联网运维系统应用的传感器网络、数据采集设备、智能分析系统,对污染源的排放量与治理设备的负荷情况以及运行状况进行数据采集,经过智能分析,辅助调制废气治理的参数,如当 VOCs 浓度过高时,会调整吸附材料的更换频率或投入催化氧化形式运行。在线远程的运维管理也对设备本身的维护提出了更多时效性的要求。如当 RTO 内部出现燃烧不完全问题时,智能监控系统会自动触发报警并调整燃烧温度。而智能化治理体系作为治理的重要抓手,核心体现还在于其智能化自适应优化调节治理成效,使得废气治理从被动式管控为主观式的智能化调控为主,这具有有效保证治理可靠性和经济性。

3.4 新型吸附/催化材料创新应用

因此,吸附材料和催化材料是决定 VOCs 治理技术有效性和经济性的重要因素,优化新型吸附材料和催化材料的合成是推动 VOCs 治理技术发展的关键所在,具体体现在两方面:第一,活性炭吸附材料因饱和周期短、容易二次污染等,新型的多孔材料如 MOFs (metalorganicframeworkmaterials) 由于比表面积大且可通过合理设计多孔材料孔径结构,可进行高效多相吸附与分子选择分离,提升 VOCs 的吸附能力;第二,在催化材料领域,贵金属催化剂具有高活性但是昂贵,

纳米复合氧化物催化剂成为新的催化剂研究重点,CeO₂-TiO₂ 低温催化剂被用于 VOCs 催化降解;第三,石墨烯材料具有良好的导电性与催化特性,利用石墨烯基材料制备新型吸附/催化载体用于催化氧化或光催化氧化 VOCs。

3.5 清洁生产与末端治理协同路径

以末端治理为核心的污染防治模式,是在污染物排出后再控制和处理污染物。清洁生产结合末端治理,可以在控制污染物总量的同时,提高末端治理的绩效^[6]。源头上降低污染物发生量和排放量,有效降低了废气末端治理的排放量和污染物的去除量。比如,印刷业应用水性油墨,可显著减少 VOCs 废气产生;在喷漆环节应用高固体含量漆或粉末涂料,降低溶剂的使用和 VOCs 废气产生;在制药环节通过改进萃取工艺或采用密闭式生产设备,均可有效减少 VOCs 的无组织排放。污染者不能规避的 VOCs 无组织排放及挥发产生的废气,在通过源头削减的基础上,考虑如何优化末端治理系统,选择低能耗、少副产物的治理技术组合,可以实现更加高效、更加经济的控制策略。清洁生产结合末端治理,通过有效控制,可以保证企业的合规性,实现一种绿色的生产方式。

4. 结语

综上所述,工业废气排放治理是绿色可持续发展的关键环节。通过深入分析不同行业的工艺废气排放特征,构建科学的排放谱系,可以为精准治理提供基础数据支撑。在治理技术层面,现有技术各有优势与局限。针对不同污染物的特性,匹配最优的治理模式是提高去除效率的关键。多技术协同优化以及智能监测系统的引入,增强了治理体系的自适应性,确保了运行的稳定性与经济性。同时,材料科学的进步为吸附、催化等核心治理技术带来了新的突破。清洁生产与末端治理的相结合,不仅降低了污染排放总量,也减轻了末端处理的负担。未来的废气治理应持续向精准化、高效化、智能化的方向发展。相信通过政策支持、技术创新和企业协同,日后定能够实现经济效益与环境效益的双赢。

参考文献

- [1]席国辉.煤化工企业 VOCs 综合治理技术与方法[J].河南化工, 2023, 40 (08): 57-59.
- [2]刘文辉.大型煤化工企业甲醇罐区 VOCs 回收技术应用探讨[J].山东化工, 2023, 52 (11): 241-244.
- [3]邓皓.煤化工企业 VOCs 治理技术措施探究[J].山西化工, 2023, 43 (05): 259-260.
- [4]郭涛.沸石转轮在电子器件行业处置有机废气核心参数的技术研究综述[J].工业安全与环保, 2023, 49 (06): 81-84.
- [5]陈清艳,程东日,吕杭权.危险废物焚烧烟气湿法脱酸工艺优化研究[J].工业安全与环保, 2024, 50 (06): 72-76.
- [6]张道斌,孙青松,厉建祥,王浩,徐杨,王昭华.基于“五有”的危化品企业双重预防机制数字化建设[J].工业安全与环保, 2023, 49 (11): 6-9+19.

作者简介:沈徐帆,出生年:1989.07,男,民族:汉族,籍贯:浙江湖州,职务:总经理,职称:中级工程师,学历:本科,研究方向:环境保护。