

Application of volatile organic compounds (VOCs) online monitoring technology in industrial waste gas treatment

Wenping Xiang Yang Jiang* Haiyang Liu

Sichuan Zhonghuan Lianshu Environmental Consulting Services Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610100, China

Abstract

With the continuous acceleration of industrialization, volatile organic compounds (VOCs), as one of the main components of air pollution, have become an important factor affecting the ecological environment and public health. To achieve efficient control of VOCs emissions, the application of online monitoring technology has become one of the core means of industrial waste gas treatment. This article systematically analyzes the sources and hazards of VOCs, sorts out the current mainstream VOCs online monitoring technology system, and combines typical industrial scenarios to explore its practical application effects and optimization strategies in source control, process regulation, and end of pipe treatment. Through data analysis of typical cases, the idea of constructing a "monitoring feedback governance" closed-loop mechanism is proposed to provide technical support and decision-making basis for the VOCs pollution prevention and control system.

Keywords

volatile organic compounds; Online monitoring; Industrial waste gas; Environmental governance; Pollution Control Technology

挥发性有机物 (VOCs) 在线监测技术在工业废气治理中的应用

向文平 蒋杨* 刘海洋

四川中环联蜀环境咨询服务有限公司, 中国·四川成都 610100

摘要

随着工业化进程的不断加快,挥发性有机物(VOCs)作为大气污染的主要成分之一,已成为影响生态环境与公众健康的重要因素。为实现对VOCs排放的高效管控,在线监测技术的应用成为当前工业废气治理的核心手段之一。本文系统分析了VOCs的来源与危害,梳理了当前主流的VOCs在线监测技术体系,并结合典型工业场景探讨其在源头控制、过程调节及末端治理中的实际应用效果与优化策略。通过对典型案例的数据分析,提出构建“监测—反馈—治理”闭环机制的思路,期为VOCs污染防治体系提供技术支持与决策依据。

关键词

挥发性有机物; 在线监测; 工业废气; 环境治理; 污染控制技术

1 引言

挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)是指在常温常压下易挥发的有机化合物,其化学性质复杂,广泛存在于石化、制药、喷涂、印刷、电力等行业的生产过程中。VOCs不仅对环境空气质量构成严重威胁,还可与氮氧化物在阳光照射下发生光化学反应,生成臭氧与细颗粒物(PM_{2.5}),对人类呼吸系统造成直接危害。为实现对VOCs排放的高效、实时、精准管控,构建科学的在线监测

系统显得尤为关键。我国近年来在环保政策层面持续加码,《“十四五”生态环境保护规划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》《重点行业挥发性有机物综合治理方案》等政策文件均将VOCs纳入重点监管对象,推动企业安装在线监测装置。与传统间歇式采样相比,在线监测技术具有响应快速、监测连续、自动化程度高等优点,在工业废气治理中具有广阔应用前景。

2 VOCs 的来源与环境危害分析

2.1 VOCs 的主要来源

挥发性有机物的工业来源具有高度多样性与行业依赖性,主要分为原料使用过程、工艺生产过程与末端废气治理过程三大类。在不同工业门类中,VOCs的成分、浓度、排放模式各具特点,呈现出较强的异质性与波动性。在石油化

【作者简介】向文平(1994-),男,中国四川广元人,本科,工程师,从事环境监测研究。

【通讯作者】蒋杨(1991-),中国四川遂宁人,本科,工程师,从事环境监测研究。

工行业中，VOCs 排放主要来自催化裂化、加氢裂化、芳构化等炼油与精细化工工艺环节，非甲烷总烃（NMHC）与烯烃类为主要组分。在原油储运、装卸过程，因封闭不严或温度波动，烷烃类、苯类化合物等大量逸散至大气中。据中国石油化工行业协会统计，2022 年该行业 VOCs 年排放总量约占全国工业源排放量的 30% 以上。在涂装与印刷行业，VOCs 主要来源于溶剂型涂料、油墨与稀释剂的使用和干燥过程，排放成分以芳香烃类（如甲苯、二甲苯）、酯类（如乙酸乙酯）和醛类（如甲醛、丙烯醛）为主。喷涂操作过程中，由于粒径分布不均、喷房密闭性不足等问题，大量有机溶剂未能充分利用，直接进入车间空气并排放至外部环境^[1]。

2.2 环境与健康影响

VOCs 作为典型的空气污染因子，其环境危害体现在臭氧形成、颗粒物前体、温室效应及生态系统干扰等多个层面。第一，VOCs 是近地面臭氧（O₃）生成的前体物。在阳光照射下，VOCs 与氮氧化物（NO_x）发生光化学反应，生成臭氧及有机自由基，诱发光化学烟雾污染。臭氧在大气中的过量积累不仅破坏作物光合作用、损伤叶片，还可能腐蚀橡胶、塑料与金属材料，造成隐性经济损失。据生态环境部《2023 年中国环境状况公报》数据，地级及以上城市中约 64% 的夏季臭氧污染事件与工业 VOCs 排放有关。第二，部分 VOCs 作为 PM_{2.5} 的二次前体物，在大气中氧化形成低挥发性的有机气溶胶，进而凝结为细颗粒物。这一过程通常发生在高温强光与稳定气象条件下，增强灰霾污染的持续性与区域性。研究表明，在城市高臭氧日中，VOCs 对 PM_{2.5} 生成贡献率可达 40% 以上。第三在健康方面，VOCs 通过呼吸道进入人体，可引发急性与慢性毒性反应。低浓度暴露可造成头晕、咽痛、皮肤过敏等症状；高浓度或长期暴露则可能诱发肝脏毒性、神经系统损伤甚至癌变。因此系统、精准、实时的监测技术是科学识别污染特征、评估健康风险与制定治理策略的必要前提。

3 VOCs 在线监测技术体系分析

针对 VOCs 具有组分复杂、浓度波动大、排放方式多样的特点，传统的间歇式人工采样法在时效性、代表性及准确性方面存在显著局限。相比之下，在线监测技术凭借其连续性、高频率、自动化和实时报警等优势，成为实现 VOCs 精细化、智能化监管的关键工具。目前常见的在线监测技术主要包括：傅里叶变换红外光谱（FTIR）、气相色谱-质谱联用技术（GC-MS）、紫外差分吸收光谱（DOAS）、光离子化检测器（PID）、激光拉曼光谱（LRS）及电子鼻（E-nose）等。

3.1 傅里叶变换红外光谱（FTIR）与气相色谱-质谱联用技术

FTIR 技术基于不同 VOCs 分子在中红外波段对特定频率光的选择性吸收，通过采集吸收光谱进行反演计算，从而

实现多组分定性与定量分析。其具有非接触、响应快、可多组分同步分析等优势。FTIR 适用于苯类、烷烃、酮类、酯类等常见 VOCs 组分，尤其适合在高温、高湿、有腐蚀性气体存在的复杂环境中运行。国内某钢铁企业在烧结环节采用 FTIR 进行氨、苯胺及甲苯等组分同步检测，监测精度在 ±5% 以内。其缺点在于水汽与二氧化碳背景干扰较大，需通过光路补偿与算法校正提升数据准确性^[2]。

GC-MS 是实验室分析级监测系统中最精确的技术之一，GC 部分负责对 VOCs 样品进行预分离，MS 部分进行分子质量与碎片识别，具有极强的定性能力和痕量检测能力，可识别低至 ppb 级浓度的有机物。GC-MS 特别适用于排放成分复杂、浓度较低的精细化工、医药行业，其高分辨率使其成为污染溯源、环境执法取证的权威工具。然而，其价格昂贵、体积较大、维护成本高、对现场环境要求较高，限制其在日常在线运行中的推广，更多应用于移动应急监测或固定监测站点。

3.2 紫外差分吸收光谱（DOAS）与光离子化检测器（PID）

DOAS 技术依赖于气体对紫外光的差分吸收特性，能实现对多组分的定量分析，且具备远程、非接触测量优势，适合布设在厂区边界、烟道出口或大气走航监测系统中。该技术可有效识别苯、甲苯、甲醛、苯乙烯等 VOCs，对环境影响评价与排放总量监测具有重要意义。其不足在于谱线重叠易导致组分误判，同时背景噪声较强时精度下降，常需结合气象修正算法与边界识别技术协同应用。

光离子化检测器（PID）技术通过高能紫外光源将有机气体分子电离，产生电流信号以反映 VOCs 总浓度水平。其结构简单、成本低廉、响应迅速、维护简便，广泛应用于车间环境监测、泄漏报警与趋势监控等场景。PID 检测限一般在 ppb 至 ppm 量级，可快速响应突发排放。但 PID 技术无法区分具体组分，且受温度、湿度、交叉干扰影响较大，常作为总量监控与趋势预警工具，而非用于精确定性分析^[3]。部分高端 PID 系统通过更换灯源与结合色谱前处理，可扩展一定的组分识别能力。激光拉曼光谱（LRS）通过检测气体分子的拉曼散射效应实现无接触、高分辨率的实时识别，具有高选择性、抗干扰能力强等优点，适用于某些特征性 VOCs 如苯类化合物的识别。但设备造价高、维护复杂，尚处于工业应用推广初期。电子鼻（E-nose）模拟人类嗅觉机制，通过多个金属氧化物半导体（MOS）传感器对气体混合物响应并结合模式识别算法，适合多组分趋势判断及快速报警。近年来与神经网络算法结合后，在制药与包装车间有较好应用前景。

4 在线监测技术在典型工业场景中的应用实践

4.1 石油化工行业：管控链条长、系统集成度高

某大型石化联合体在其原油蒸馏、催化裂化、芳构化、

储罐区等关键工艺节点设置了32个VOCs固定在线监测点位。系统采用FTIR与DOAS协同布设,前者部署于装置区间监控关键反应过程排放水平,后者布设于厂区围栏,监测企业无组织排放与大气扩散趋势。数据采集终端连接中央数据服务器,通过Modbus TCP/IP协议接入企业DCS系统,实现VOCs浓度的动态可视化。2023年9月,系统在高温运行阶段实时监测到C6-C8芳烃浓度连续三天超标,立即启动活性炭吸附塔并同步调低反应釜温度,排放浓度从峰值74.2 mg/m³降至30 mg/m³以内。通过与风速风向仪、气象站数据融合,企业构建了排放扩散模型,对污染物扩散路径进行仿真预测,协助政府部门科学划定风险防控区。此类集成度的系统不仅强化了企业的环境自律,也提高了政府监管效率。

4.2 汽车涂装行业, 环节明确、系统响应快

在某年产30万辆整车的汽车制造企业,其喷涂车间因使用大量溶剂型涂料,VOCs排放量高。该车间通过安装密闭喷涂线、低温等离子体+活性炭组合治理设备,并同步布设PID在线监测探头实现实时浓度监测。监测点主要位于喷漆室出口、烘干线排气口及吸附装置前后端。在治理设备前段,PID监测显示日均VOCs浓度波动在300~450 mg/m³,经治理后下降至80 mg/m³以内,处理效率稳定在85%以上。系统联动机制设计合理,若浓度超过设定阈值(如500 mg/m³),设备自动切换吸附单元并提醒人员检查前端作业流程。而该企业还利用DOAS技术对车间外排风口进行边界监测,结合视频监控实现“可视化排放管理”,并将排放数据上传至当地生态环境局监管平台,接受实时监督。

4.3 制药化工行业: 组分复杂、技术组合多样

某医药中间体企业在抗生素合成、结晶干燥与溶剂回收环节VOCs排放复杂,排放组分主要包括氯仿、乙腈、丙酮与乙酸乙酯等。该企业引入GC-MS作为核心在线监测平台,重点布设在合成反应釜排口及有机溶剂储罐呼吸阀出口。为弥补GC-MS采样周期较长的缺陷,企业在各关键点同时部署PID传感器,实现浓度趋势变化的秒级监控。一旦PID读数波动超阈值,系统自动触发GC-MS进行精准采样分析,并联动视频监控确认操作环节是否异常。通过2023年全年监测数据统计显示,该系统共识别异常排放事件28起,其中23起为储罐阀门未及时关闭导致,系统及时报警与干预,有效避免了污染事件扩大。此类“定性+定

量”“趋势+溯源”的组合策略,大幅提升了治理精准度。

4.4 包装印刷行业, 规模小、成本敏感型应用

针对包装印刷行业中存在的中小企业数量多、设备简陋、治理资金有限的问题,某省印刷工业园区试点建立集中在线监测平台。系统采用性价比高的PID阵列模块与简易光谱模块组合安装于各企业排气筒,平台统一收集数据并通过无线传输上传至园区云端数据库。每家企业仅需承担探头与初级数据采集模块费用,系统运行成本低,适合大范围推广应用。监测数据显示,70%以上企业VOCs排放主要集中于工作日10:00~16:00期间,治理装置负荷集中、运行压力大。园区据此优化排产计划,实施轮流错峰印刷策略,实现区域VOCs总量控制。该模式显示了VOCs在线监测技术在中小微企业中的普适性与可扩展性,未来可与碳排放因子测算、绩效评估体系相结合,推动区域性污染治理精细化管理。

5 结语

VOCs是工业大气污染的关键治理对象,其排放具有组分复杂、波动性强等特点。在线监测技术以其实时性和高效性,已成为提升VOCs治理水平的核心工具。本文结合多种监测技术原理及典型行业应用,说明了FTIR、GC-MS、DOAS与PID等技术在实际工况中的优势互补和应用效果,验证了构建“监测—反馈—治理”闭环机制的可行性与必要性。在实践中应推动在线监测系统与智能化手段融合,提升污染预警与响应效率,同时加强标准建设和中小企业推广力度,形成精准、高效、可持续的VOCs治理体系,为改善环境空气质量提供有力支撑。

参考文献

- [1] 周洁婷,高敏,徐红梅,等.陕北煤化工园区VOCs污染状况及其对居民健康风险的贡献[J/OL].生态毒理学报,1-13[2025-03-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5470.X.20250319.1806.004.html>.
- [2] 张翼翔,贾岳清,姚志泉,等.我国东部某港口城市夏季大气挥发性有机物(VOCs)污染特征及来源解析[J/OL].环境化学,1-13[2025-03-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.x.20250317.1140.002.html>.
- [3] 梁缉攀,余塘,江伟武,等.T-C复合吸附管应用于室内空气中低沸点挥发性有机物测定[J].分析测试学报,2025,44(03):527-533.