

废气中挥发性有机物检测技术研究进展

翟君妍

天津永诚检测检验有限公司, 中国·天津 300450

摘要: 废气中挥发性有机物的排放不仅加剧了大气污染, 还对人类健康和生态环境产生严重威胁, 其检测技术研究进展已成为环境科学的重要课题。随着工业化与城市化进程加快, 挥发性有机物来源日益复杂, 排放特征多样化, 传统检测手段在灵敏度、选择性和实时性方面存在局限。近年来, 色谱、光学、电化学及多类型传感器技术不断优化, 提升了对不同组分的检测能力。与此同时, 在线监测与快速筛查方法逐渐成熟, 为大规模、长周期的环境管理提供了可能。结合信号处理与数据建模, 检测精度得到改善, 工程化应用范围持续扩大。综上所述, 废气中挥发性有机物检测技术正向高效化、集成化和多参数化方向发展, 为污染防控与环境质量改善提供了坚实支撑。

关键词: 废气; 挥发性有机物; 检测技术; 在线监测; 环境管理

Research progress in the detection technology of volatile organic compounds in exhaust gases

Zhai Junyan

Tianjin Yongcheng Testing and Inspection Co., Ltd., China Tianjin 300450

Abstract: The emission of volatile organic compounds from exhaust gases not only exacerbates air pollution but also poses serious threats to human health and ecological systems. The advancement of detection technologies for VOCs has therefore become a critical issue in environmental science. With the acceleration of industrialization and urbanization, the sources of VOCs have grown increasingly complex, and their emission characteristics have become more diverse. Traditional detection methods exhibit limitations in sensitivity, selectivity, and real-time capability. In recent years, chromatographic, optical, electrochemical, and multi-type sensor technologies have been continuously optimized, enhancing detection capabilities for various compounds. Meanwhile, online monitoring and rapid screening methods have matured, enabling large-scale and long-term environmental management. Coupled with signal processing and data modeling, detection accuracy has been improved, and the scope of engineering applications has expanded. In summary, VOCs detection technologies for exhaust gases are evolving toward higher efficiency, integration, and multi-parameter analysis, providing solid support for pollution control and environmental quality improvement.

Keywords: Exhaust gas; Volatile organic compounds; Detection technology; Online monitoring; Environmental management

0 引言

挥发性有机物作为大气污染物的重要组成部分, 在光化学反应过程中能够生成臭氧和二次有机气溶胶, 进而导致区域性灰霾和光化学烟雾的频发。工业生产、交通运输及生活排放是主要的释放源, 其排放特征不仅因行业差异而异, 还受到温度、压力及混合成分等多重因素的影响。面对复杂的成分与动态变化的环境条件, 准确、高效地检测废气中挥发性有机物成为环境科学和工程领域的重要挑战。过去的研究多依赖于传统实验室分析方法, 虽然具有一定准确性, 但在快速响应、连续监测和大规模应用上存在不足。随着光学、电化学、色谱及传感器等技术的不断发展, 检测手段正逐步向便携化、自动化和高通量方向演进。本文将从来源特征、基础理论、检测技术进展及工程

应用等方面展开分析, 以期为后续的污染防控与政策制定提供理论支撑和方法参考。

1 挥发性有机物的来源与环境特征

1.1 工业废气中挥发性有机物的排放特性

工业生产过程中的挥发性有机物排放具有种类繁多、浓度差异显著的特点。石化行业排放中苯、甲苯、二甲苯等芳香烃占比可达排放总量的 60%, 涂装和印刷环节以醇类和酮类为主, 单厂年排放量常超过 1000 吨。冶金和建材行业燃料燃烧所产生的烃类化合物浓度区间在 50 至 300 毫克每立方米之间。工业废气中常伴随氮氧化物和颗粒物, 形成复杂的混合污染环境, 对检测带来干扰。排放时间上表现出生产周期性, 昼夜浓度波动可达到 2 至 3 倍, 这种不均衡性增加了监测和治理的难度。

1.2 交通源废气中挥发性有机物的排放规律

交通运输过程中, 机动车尾气是挥发性有机物的重要来源。汽油车排放中烯烃类化合物占比约 25%, 芳香烃类占比约 30%, 柴油车尾气中醛类和酮类含量更高。交通高峰期排放量较低谷期增加约 1.8 倍, 隧道和封闭道路区域监测到的浓度可达到室外开放区域的 3 倍。机动车老化程度与排放强度密切相关, 车龄超过 10 年的车辆挥发性有机物排放量比新车高出 40% 至 60%。在不同季节中, 夏季高温条件下燃油蒸发造成额外排放, 浓度水平比冬季高出 20% 至 30%。这种显著的时间与空间规律性使交通源废气对城市空气质量的影响呈现周期性波动。

1.3 生活与其他源废气中挥发性有机物的组成差异

生活源和其他源的挥发性有机物排放具有多样化特征。家庭使用清洁剂、涂料和空气清新剂时, 醇类和醚类的排放占比超过 40%, 烷烃类约为 15%。餐饮业油烟排放中醛类物质浓度范围为 20 至 150 毫克每立方米, 含量变化与烹饪方式差异显著。垃圾填埋场和堆肥场释放的甲烷与非甲烷总烃浓度可超过 200 毫克每立方米, 其中芳香烃类仅占 5%。农村地区因使用生物质燃料, 排放中含有大量呋喃类和多环芳烃, 比例高达 30%。这些生活与其他源的排放特征表现为低强度、广分布, 成分复杂度高, 对环境监测和健康风险评估构成长期挑战^[1]。

2 挥发性有机物检测的基础理论

2.1 气体物理化学性质与检测难点

挥发性有机物具有低沸点和高压力的特征, 例如甲苯在 25 摄氏度时的蒸气压为 28 毫米汞柱, 乙醇为 59 毫米汞柱, 这使其易于挥发并进入大气。分子量差异显著, 从 16 的甲烷到 200 以上的多环芳烃, 导致扩散速率和吸附特性不同。在空气中部分组分的反应速率达到 10^{-11} 厘米³ 分子⁻¹ 秒⁻¹, 极易与臭氧、氢氧自由基发生反应, 造成检测过程中的浓度损失。部分物质的检测下限需达到 0.1 毫克每立方米, 而混合环境中背景噪声往往高于 0.05 毫克每立方米, 增加了准确检测难度。不同极性的物质在采样和传输管路中的吸附率可达到 30%, 导致测量结果出现偏差。复杂化学性质和反应活性使得检测需考虑物质的稳定性、干扰性和传输过程中的损耗, 成为检测工作的核心难点。

2.2 常见检测指标体系与评价参数

挥发性有机物检测通常关注浓度、成分、活性和毒性四大指标。浓度测量中, 非甲烷总烃的常见环境标准控制在 2 毫克每立方米以内, 超标时臭氧生成潜势可增加 50%。成分检测以芳香烃、烯烃、醛类为核心, 苯的健康风险阈

值被限定在 0.11 毫克每立方米。活性评价基于光化学反应速率常数, 例如异戊二烯的速率常数为 10^{-10} 厘米³ 分子⁻¹ 秒⁻¹, 较甲烷高出 200 倍, 对臭氧生成贡献显著。毒性参数中, 甲醛的致癌风险浓度被限定在 0.01 毫克每立方米, 苯的毒性当量因子设定为 1, 而甲苯为 0.1。检测体系不仅包含物质浓度和成分的定量分析, 还需通过风险模型将数据转化为健康和环境效应的定性判断, 从而为监测与治理提供完整评价框架。

2.3 采样与预处理对检测结果的影响

采样与预处理过程对结果的准确性具有决定性作用。以采样袋法为例, 特氟龙袋在 24 小时内的吸附损失可达到 15%, 而聚酯薄膜袋则超过 30%。冷凝管采样在低温条件下能有效捕集高沸点组分, 回收率超过 90%, 但对低沸点物质如乙烯仅有 60% 的回收效率。预处理环节中常用的固相萃取柱对芳香烃的富集因子可达 50 倍, 而对极性醇类的回收率不足 70%。在多组分混合环境下, 活性较强的烯烃在预处理阶段与氧化剂发生反应, 浓度下降幅度在 20% 至 40% 之间。采样时间与流量同样影响检测结果, 1 升每分钟的流速下采样 30 分钟, 检测误差控制在 5% 以内, 而超过 60 分钟时偏差增大至 15%。因此, 合理选择采样材料、控制条件和优化预处理方法, 是保障挥发性有机物检测准确性的重要环节。

3 废气中挥发性有机物检测技术进展分析

3.1 色谱类检测技术研究进展

色谱—质谱路线在痕量范围内实现对多组分挥发性有机物的准确定量, TO-15A 明确了适用浓度约 20 - 5000 pptv, 并给出以高分辨气相色谱耦合低 / 高分辨质谱的分析策略; 方法表中示例最低检测限以 10 - 20 pptv 量级给出, 并要求在加湿零气背景下开展清洁度与性能验证。以固体吸附—热脱附—GC/MS 的 TO-17 为代表, 方法学性能标准提出方法检出限 ≤ 0.5 ppb、重复性误差 $\leq 20\%$ 、分配体积对精密度的 $\leq 25\%$ 、加标审计准确度 $\leq 30\%$ (0.5 - 25 ppb)。吸附 / 预浓缩链路与低含水前处理的组合提高了含氧 / 卤代组分的回收与峰形稳定性; 在在线方向, 自动连续 GC 对臭氧前体物的场测实现分钟级分辨率, 配合三段式预浓缩可压低水干扰并保持 <30 天样品稳定性。上述规范化指标推动色谱法在围栏、室内外与源解析应用中的可比性与可追溯性^[2]。

3.2 光学检测技术研究进展

开路光谱在数百米路径实现多组分实时扫描, UV-DOAS 常用波段 225 - 400 nm, 单路径 300 - 700 m, 时间

分辨 30 s, 检出限可达低 ppb 甚至亚 ppb; FT-IR 典型分辨率 0.5 cm^{-1} , 时间分辨约 2-3 min, 在 300-700 m 路径对短链烃、醛酮和氨等具优势。在苯的对比中, 300 m 路径下 FT-IR 的实用最低检出限 $>100\text{ ppb}$, 而 UV-DOAS 在 253 nm 处可做到 $<1\text{ ppb}$, 满足 9.4 ppb 与 8.6 ppb 等健康阈值比较需要。路径配置上, 单站单程 300-700 m、双站可至 1000 m; 针对 H_2S 等选择性问题, TDL 以窄带中红外实现单组分高选择测量, 并通过调制算法将 300 m 路径的实用 MDL 压至约 25 ppb。多技术并用的围栏网络由此覆盖苯系物、烃类与含硫气体, 兼顾选择性、时间分辨与空间覆盖。

3.3 电化学与传感器检测技术研究进展

直接质谱类快速传感在实时性与检出限上形成突破。PTR-TOF 新一代仪器灵敏度可达 $80000\text{ cps ppbv}^{-1}$, 1 s 积分时检出限 0.5-5 pptv; 现场可部署 PTR-MS 通常在数秒积分下达到 $\sim 10\text{ pptv}$ 检出限, 并保持宽线性范围。SIFT-MS 通过软化学电离与多前体离子切换, 低 ppb 量级快速定量, 并在负离子模式提升对特定 VOC 的选择性; 资料显示其标准检出限位于低至亚 ppt 范围, 应用研究在环境与职业暴露监测中验证了低 ppb 稳定读数。相较 PID 等宽谱响应器件, 直接质谱以反应动力学与质荷分辨率降低共存干扰, 并避免色谱分离带来的通量瓶颈, 适合瞬变排放与工况波动场景^[3]。上述参数表明电化学/直接质谱传感在灵敏度、特异性与毫秒-秒级响应上的综合优势正补位传统实验室色谱。

3.4 在线监测与快速检测技术研究进展

在围栏与社区空气网络中, 法规对在线系统的性能提出量化门槛: 某些地方法规要求苯的 $\text{MDL} \leq 1\text{ ppb}$ 、 $\text{H}_2\text{S} \leq 2\text{ ppb}$; 加州规则 1180 明确优先采用开路 UV-DOAS 与 FT-IR 开展总烃与特定 VOC 监测。工程化运行显示 UV-DOAS、FT-IR、TDL 分别可实现约 30 s、3 min、5 min 数据间隔, 满足健康阈值对比与事件告警需要; 针对苯, UV-DOAS 在 300 m 路径的实用 $\text{MDL} < 1\text{ ppb}$; TDL 在信号处理与波长调制改进后可达约 25 ppb (300 m), 适配含硫目标。高频化在线质谱方面, PTR-MS 在 0.5 s 时间分辨下的 LOD 约 34 pptv, 支持峰值捕捉与快速源-受体响应。配套数据平台需要 10-20 min 内公开显示, 并在季度尺度处理 ~ 650 万数据点, 要求自动质控与人工复核协同以降低误报并支撑事件回放。

3.5 检测精度与数据处理方法研究进展

方法学对精度与准确度的硬性指标推动了数据处理与

不确定度管理。TO-17 规定方法检出限计算遵循 40 CFR 136 Appendix B, 要求 $\text{MDL} \leq 0.5\text{ ppb}$; 重复样对分析精密度 $\leq 20\%$, 分配体积对 (如 1 L 与 4 L) 差异 $\leq 25\%$, 0.5-25 ppb 区间的加标审计准确度 $\leq 30\%$ 。TO-15A 在痕量 20-5000 pptv 框架内, 给出了仪器空白、加湿零气、端口挑战与示例 MDL 表, 并强调前浓缩干燥与三阶段聚焦以抑制水背景与提高峰容量。开路监测的工程化数据管理要求在 10-20 min 内完成实时发布, 单季度数据量约 650 万点, 倒逼谱线拟合、残差结构校正与多传感融合的自动质控算法, 以减少共吸收、基线漂移与误报。规范化的 MDL/IDL 估计、批内/批间精密度控制与路径长度归一化成为跨站点、跨技术数据并行比对的前提^[4]。

4 废气中挥发性有机物检测技术的工程应用现状

工业源废气中挥发性有机物种类繁多, 排放浓度高, 监测技术的应用在此类场景中得到了最广泛的实践。石化、化工、涂装等行业常采用气相色谱与质谱联用方法实现组分分析, 能够在毫克每立方米到微克每立方米范围内实现稳定检测。由于工业废气具有高温、高湿和混合干扰的特点, 工程实践中引入了冷凝预处理、固相吸附和多级稀释等手段来降低干扰, 提高回收率。

城市大气环境中挥发性有机物排放来源复杂, 空间分布差异显著, 监测网络的建设已成为区域空气质量评估的重要组成部分。常规监测站点配置气相色谱或光学分析仪器, 能够对数十种典型挥发性有机物实现小时级别的数据获取。在核心城区和交通干线沿线, 还布设了便携式检测仪和移动监测车, 以提高空间分辨率并补充固定站点的不足。近年来, 光学多路径差分吸收光谱和傅里叶红外监测技术逐渐应用于城市监测网络, 能够在数百米路径上实现对多种组分的同步监控。部分城市已建立联网数据平台, 通过无线传输实现数据共享, 并结合气象和污染源清单开展污染过程解析。这些工程应用强化了城市空气质量监测的动态性和广覆盖性, 为大气环境质量改善提供了连续的观测支撑^[5]。

5 结语

废气中挥发性有机物检测技术的研究与应用不断深化, 为环境污染防控和空气质量改善提供了有力支撑。随着工业排放、交通源排放及生活源排放的复杂性日益增强, 检测技术呈现出多样化和综合化的发展态势。色谱、光学、电化学及传感器等多种方法各具优势, 在精度、灵敏度与实时性方面不断突破, 推动了监测手段的工程化应用。与

此同时,在线监测系统与快速筛查方法的应用提高了数据获取效率,使得污染溯源与动态管控更加科学高效。当前,检测技术已从实验室走向大规模应用,为政府制定政策、企业实施治理和社会开展环境保护提供了坚实的技术基础。未来,加强技术融合与数据共享将进一步提升监测效能,为实现可持续的环境治理与公众健康保障奠定更加稳固的基础。

参考文献:

[1] 陈丽娟. 工业废气中挥发性有机物 (VOCs) 的精准检测及其总量控制管理措施研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(16):97-99.

[2] 陈冬, 徐开春. 大气环境中挥发性有机废气治理技术分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(15):85-87.

[3] 潘锦, 植深晓, 凡传明. 不同燃烧源废气常规污染物及挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境科学与管理, 2025,50(08):102-107.

[4] 周峰. 气相色谱-质谱联用技术在废气挥发性有机物检测中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2025,43(07):12-14.

[5] 吴尽, 高付艳. 大气环境中挥发性有机废气治理的常用方法研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025,6(13):16-18.

作者简介: 翟君妍 (1994.10-), 女, 汉族, 天津市人, 大学本科, 职称: 初级, 研究方向: 废气 + 废水。