

挥发性有机物快速检测方法对比与应用评价

高彩娥¹ 马凤英¹ 万慧军² 陈艳³ 王海源²

1 鄂尔多斯市城投检测有限公司

2 鄂尔多斯市城市水务有限责任公司

3 鄂尔多斯市城投环保有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i1.3038

[摘要] 挥发性有机物(VOCs)作为一类广泛存在于环境中的污染物,对生态环境和人体健康构成严重威胁。快速、准确地检测VOCs对于环境监测、污染防控及健康风险评估具有重要意义。本文综述了当前主流的VOCs快速检测方法,包括气相色谱-质谱联用技术、光离子化检测技术、氢火焰离子化检测技术、声表面波气相色谱技术及便携式传感器技术等,对比分析了各方法的原理、优缺点及适用范围,并结合实际应用案例评价了其检测效果,旨在为VOCs快速检测技术的选择与应用提供参考。

[关键词] 挥发性有机物; 快速检测; 方法对比; 应用评价

中图分类号: O741+.6 **文献标识码:** A

Comparison and Application Evaluation of Rapid Detection Methods for Volatile Organic Compounds

Cai'e Gao¹ Fengying Ma¹ Huijun Wan² Yan Chen³ Haiyuan Wang²

1 Ordos City Investment Inspection Co., Ltd

2 Ordos Urban Water Resources Co., Ltd

3 Ordos City Investment Environmental Protection Co., Ltd

[Abstract] Volatile organic compounds (VOCs), as a class of widely distributed environmental pollutants, pose significant threats to ecosystems and human health. Rapid and accurate detection of VOCs is crucial for environmental monitoring, pollution control, and health risk assessment. This article reviews mainstream rapid VOC detection methods, including gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), photoionization detection (PID), hydrogen flame ionization detection (HFID), surface acoustic wave gas chromatography (SAW-GC), and portable sensor technologies. The principles, advantages, disadvantages, and applicable scopes of each method are compared and analyzed, and their detection performance is evaluated through practical application cases. The aim is to provide a reference for the selection and application of rapid VOC detection technologies.

[Key words] volatile organic compounds; rapid detection; method comparison; application evaluation

引言

挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs),是一类在常温常压下极易挥发的有机化合物。它们具有丰富多样的化学结构,广泛涵盖烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃,以及醇类、醛类、酮类等。

VOCs的危害不容小觑。在大气环境中,它们是大气光化学烟雾和臭氧层破坏的主要前体物,会引发一系列复杂的大气化学反应,导致空气质量恶化,影响生态平衡。对人体而言,VOCs具有显著的毒性效应,长期接触或吸入高浓度VOCs,会对人的神经系统、呼吸系统及免疫系统造成损害,威胁人体健康^[1]。

当下,随着工业化和城市化进程的迅猛加速,VOCs的排放量

持续攀升,其污染问题愈发严峻。在此背景下,开发高效、准确的VOCs快速检测技术迫在眉睫,这对于加强环境监管、有效开展污染治理以及科学评估健康风险,都具有极其关键且不可替代的重要意义。

1 VOCs快速检测技术概述

1.1 气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)

原理: GC-MS结合了气相色谱(GC)的高效分离能力和质谱(MS)的高灵敏度鉴定能力,通过色谱柱将混合物中的各组分分离,随后利用质谱仪对分离后的组分进行定性定量分析。

优点: 分辨率高、灵敏度高、可同时检测多种VOCs组分,是VOCs检测的“金标准”。

缺点: 设备昂贵、操作复杂、分析时间长, 需专业人员操作, 且前处理步骤繁琐, 难以实现现场快速检测。

适用范围: 实验室环境监测、污染溯源分析、科学研究等。

1.2 光离子化检测技术 (PID)

原理: PID利用紫外灯 (UV) 光源将VOCs分子电离成正负离子, 通过检测离子电流强度反映VOCs浓度。PID对大多数挥发性有机物具有高灵敏度, 但对饱和烃类及部分无机气体不敏感。

优点: 响应速度快、灵敏度高、操作简便、可连续监测, 适用于现场快速筛查。

缺点: 无法区分具体VOCs种类, 易受环境湿度、温度等因素干扰。

适用范围: 工业废气排放监测、室内空气质量评估、应急监测等。

1.3 氢火焰离子化检测技术 (FID)

原理: FID通过氢气和空气燃烧产生的火焰作为能源, 当VOCs进入火焰时发生化学电离, 产生与有机物含量成正比的离子流, 通过检测离子流强度实现定量分析^[2]。

优点: 对碳氢化合物具有高灵敏度、线性范围宽、稳定性好。

缺点: 无法检测永久性气体 (如氮气、氧气) 及部分无机气体, 需配备气源及流速控制系统, 设备体积较大。

适用范围: 石油化工、环境监测、实验室分析等。

1.4 声表面波气相色谱技术 (SAW-GC)

原理: SAW-GC结合了声表面波 (SAW) 传感技术和气相色谱分离技术, 通过声表面波器件对压电基片上传播的声信号进行处理, 实现VOCs的快速分离与检测。

优点: 分析速度快、灵敏度高、设备紧凑、可现场检测。

缺点: 色谱柱分离能力有限, 对复杂样品分析能力较弱。

适用范围: 车内空气质量监测、工业过程控制、现场快速筛查等。

1.5 便携式传感器技术

原理: 便携式传感器技术包括电化学传感器、金属氧化物半导体传感器、光电离子化传感器等, 通过检测VOCs与传感器材料相互作用产生的电信号变化实现定量分析^[3]。

优点: 体积小、重量轻、操作简便、成本低廉, 可实现实时连续监测。

缺点: 选择性较差、易受交叉干扰、寿命有限, 需定期校准。

适用范围: 个人防护、室内空气质量监测、便携式检测设备。

2 VOCs快速检测方法对比分析

2.1 检测性能对比

2.1.1 灵敏度: 灵敏度是衡量检测方法能够检测到的最低VOCs浓度的关键指标。GC-MS凭借其先进的气相色谱分离与质谱鉴定技术, 拥有极高的灵敏度, 能够精准检测低至ppb (十亿分之一) 级别的VOCs^[4]。这使得它在环境监测中, 对于痕量污染物的检测具有不可替代的优势, 例如在监测大气中一些低浓度但危

害较大的挥发性有机物时, GC-MS可以提供准确的数据。PID同样具有较高的灵敏度, 可检测低至ppb级别的VOCs, 它对大多数挥发性有机物响应迅速, 在现场快速筛查中能及时发现潜在的污染问题。FID对碳氢化合物展现出较高的灵敏度, 在石油化工等行业的废气排放监测中, 对于碳氢类VOCs的检测效果显著。而SAW-GC和便携式传感器灵敏度相对较低, 不过对于现场快速检测而言, 其灵敏度已经能够满足基本需求, 如在一些工业场所的常规巡检中, 能快速判断是否存在VOCs超标情况。

2.1.2 选择性: 选择性反映了检测方法区分不同VOCs组分的能力。GC-MS的选择性堪称最佳, 它通过色谱柱的分离作用, 能够将复杂样品中的各种VOCs组分逐一分离, 再利用质谱进行精确鉴定, 可区分多种VOCs组分, 为污染溯源和成分分析提供详细准确的信息。PID和FID对特定类型的VOCs具有较好的选择性, PID对大多数挥发性有机物有响应, 但对饱和烃类及部分无机气体不敏感; FID则主要针对碳氢化合物有较好的检测效果。SAW-GC和便携式传感器的选择性相对较差, 在检测过程中容易受到其他物质的交叉干扰, 导致检测结果出现偏差, 例如在复杂气体环境中, 可能无法准确区分目标VOCs和其他类似物质^[5]。

2.1.3 分辨率: 分辨率体现了检测方法分离相邻组分的能力。GC-MS的分辨率最高, 其色谱柱能够根据不同VOCs组分的物理化学性质, 实现复杂样品中各组分的精确分离, 即使是结构相似的化合物也能清晰区分, 为深入研究VOCs的组成和特性提供了有力支持。FID和SAW-GC的分辨率次之, 在面对一些相对简单的样品时, 能够较好地分离主要组分, 但对于复杂样品中结构极为相近的组分, 分离效果可能不如GC-MS。PID和便携式传感器的分辨率较低, 难以区分具体组分, 通常只能给出样品中VOCs的总体浓度信息, 无法提供详细的成分分析。

2.2 操作便捷性对比

2.2.1 设备体积与重量: GC-MS设备庞大、重量重, 通常需要固定安装在专门的实验室中, 对场地和环境条件有一定要求, 这限制了其在现场快速检测中的应用。PID、FID和SAW-GC设备体积较小, 具备一定的便携性, 可车载或方便地携带到现场进行检测, 适用于一些需要移动检测的场景。便携式传感器体积最小、重量最轻, 如同普通的便携式仪器一样, 易于携带, 操作人员可以随时随地使用它进行检测。

2.2.2 操作复杂度: GC-MS操作复杂, 涉及到复杂的仪器参数设置、样品前处理和数据分析等环节, 需要专业人员经过专门培训才能熟练操作。PID、FID和SAW-GC操作相对简便, 但也需要操作人员具备一定的专业知识和技能, 经过一定培训后才能准确使用。便携式传感器操作最为简单, 无需专业培训, 操作人员只需按照说明书进行简单操作即可上手, 大大降低了使用门槛。

2.2.3 前处理需求: GC-MS需要复杂的前处理步骤, 如吸附管采样、热脱附等, 以确保样品符合检测要求, 这些前处理过程不仅耗时, 而且需要专业的设备和操作技巧。PID、FID和SAW-GC前处理步骤相对较少, 在一定程度上简化了检测流程, 提高了检测效率。便携式传感器通常无需前处理, 可直接采样检测, 极大

地节省了时间和人力成本,适合快速检测的需求。

2.3 成本效益对比

2.3.1 设备成本:GC-MS设备成本最高,可达数十万至数百万元,这对于一些小型企业或预算有限的单位来说是一笔不小的开支。PID、FID和SAW-GC设备成本次之,数万至数十万元,相对GC-MS来说更为经济实惠。便携式传感器成本最低,数千元至数万元,使得更多的用户能够承受得起,具有更广泛的应用前景。

2.3.2 运行成本:GC-MS运行成本较高,包括载气、标准品、维护费用等,长期使用下来,运行成本会成为一笔较大的开支。PID、FID和SAW-GC运行成本较低,主要是一些常规的耗材和简单的维护费用。便携式传感器运行成本最低,仅需定期更换传感器或校准,大大降低了使用成本。

2.3.3 检测效率:GC-MS检测效率较低,单次分析时间较长,从样品采集到结果分析需要较长时间,难以满足现场快速检测的需求。PID、FID和SAW-GC检测效率较高,可实现快速连续检测,能够在较短时间内完成多个样品的检测。便携式传感器检测效率最高,可实时监测,操作人员可以随时获取检测数据,及时做出决策。

3 VOCs快速检测方法应用评价

3.1 环境监测领域应用

在环境监测领域,GC-MS作为“金标准”,广泛应用于大气、水体、土壤等环境介质中VOCs的定性定量分析。例如,在区域大气污染监测中,GC-MS可准确识别臭氧前体物组成,为光化学污染防控提供科学依据。PID和便携式传感器则更多用于现场快速筛查和应急监测,如化工园区泄漏事故中,PID可快速定位污染源,便携式传感器可实时监测污染扩散范围^[6]。

3.2 工业生产领域应用

在工业生产领域,FID和SAW-GC因其对碳氢化合物的高灵敏度和快速分析能力,被广泛应用于石油化工、涂装、印刷等行业废气排放监测。例如,在汽车制造涂装车间,FID可实时监测挥发性有机物排放浓度,确保达标排放。便携式传感器则更多用于生产过程控制,如半导体制造车间内,便携式传感器可实时监测洁净室空气质量,保障产品质量。

3.3 室内空气质量评估领域应用

在室内空气质量评估领域,PID和便携式传感器因其操作简便、成本低廉的优势,被广泛应用于住宅、办公楼、学校等场所的VOCs检测。例如,在新装修房屋中,PID可快速检测甲醛、苯系

物等有害气体浓度,为通风换气提供依据。便携式传感器则更多用于个人健康防护,如佩戴式VOCs检测仪可实时监测室内空气质量,提醒用户及时采取防护措施。

4 结论与展望

本文综述了当前主流的VOCs快速检测方法,包括GC-MS、PID、FID、SAW-GC及便携式传感器技术等,对比分析了各方法的原理、优缺点及适用范围,并结合实际应用案例评价了其检测效果。结果表明,不同检测方法在检测性能、操作便捷性及成本效益等方面存在显著差异,需根据具体检测需求选择合适的方法。

未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展,VOCs快速检测技术将朝着智能化、网络化、微型化方向演进。一方面,通过集成多种传感器技术,实现多参数、多组分同时检测,提高检测准确性和全面性;另一方面,通过物联网技术实现检测数据的实时传输和远程监控,提升环境管理和健康风险评估的时效性和科学性。同时,随着新型材料、纳米技术等的应用,VOCs传感器的灵敏度和选择性将进一步提升,为VOCs快速检测技术的发展注入新的活力。

[参考文献]

[1]李丹丹,何智豪,李成林,等.基于质子转移反应质谱的纺织品挥发性有机物快速分析技术研究[J/OL].质谱学报,1-12 [2026-02-07].

[2]李如意,康萍萍,吴佳,等.太湖沉积物中新污染物浓度水平特征与生态风险的研究综述[J].环境监控与预警,2025,17(5):13-23+77.

[3]胡嘉敏,胡瑜恬,包一翔,等.矿井水中有有机污染物检测技术的研究进展[J/OL].应用化工,1-9[2026-02-07].

[4]甘瑛琳,马春光,张敏,等.高效液相色谱-双检测器法测定空气中多环芳烃方法研究[J].医学动物防制,2025,41(04):412-416.

[5]张阳,胡鹏博,冯驰.室内气态污染物测定方法及其影响因素研究进展[J].化工进展,2025,44(07):4126-4143.

[6]王莉华,安欣欣,刘保献,等.基于PID传感器的挥发性有机物监测研究[J].中国环境监测,2025,41(01):142-151.

作者简介:

高彩娥(1986--),女,汉族,陕西榆林人,四川大学本科,研究方向:环境工程。