

工业废气中挥发性有机物 (VOCs) 的检测与治理策略研究

费 凡

江苏高研环境检测有限公司盐城分公司 江苏盐城 224000

摘 要: 本文旨在深入研究工业废气中挥发性有机物 (VOCs) 的检测与治理策略。首先阐述了VOCs的定义、分类、来源以及对环境和人体健康的危害,为后续研究奠定基础。接着详细分析了传统和新型的VOCs检测技术,并探讨了检测技术的发展趋势。然后介绍了物理法、化学法、生物法等常见的VOCs治理方法,并讨论了治理方法的选择与集成。最后得出结论,强调了有效检测和治理VOCs对于环境保护和人体健康的重要性。

关键词: 工业废气;挥发性有机物 (VOCs);检测技术;治理方法

引言

在工业化高速发展的今天,工业废气排放也越来越严重。挥发性有机物 (VOCs) 是工业废气中的一个关键成分,它对环境 and 人类的健康带来了巨大的威胁。VOCs不但能引起大气臭氧层的破坏、光化学烟雾的形成和酸雨的产生,而且还能危害人的呼吸系统和神经系统。因此,加强对工业废气中VOCs的检测和控制,对提高环境质量和保证人体健康具有现实意义。

一、工业废气中VOCs的来源与危害

1.VOCs的定义与分类

VOCs是挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds) 的英文缩写,我国的标准主要是基于是否可以参与光化学反应来进行定性,将其定义为“能够参加大气光化学反应或按规定方法对所鉴定有机化合物进行测定或核算”。VOCs并非指某一种特定的污染物,而是对一类具有相似理化性质的有机化合物的统称。按照化学结构,VOCs可分为烷烃(直链烷烃和环烷烃)、烯烃、炔烃、苯系物、醇类、醛类、醚类、酮类、酸类、酯类、卤代烃及其他,共12类物种。常用VOCs物质有苯、甲苯、二甲苯、甲醛、乙酸乙酯。

2.工业废气中VOCs的主要来源

工业废气中VOCs的来源广泛,主要可分为固定源和移动源。固定源方面,煤、石油和天然气或以它们为燃料或原料的工业及相关化学工业是VOCs产生的重要来源。例如,石油开采与加工过程中,原油的蒸馏、裂解等环节会产生大量的VOCs;炼焦与煤焦油加工时,煤的干馏、煤焦油的蒸馏等过程也会释放VOCs;煤矿开采中,煤炭的运输、储存等环节会有VOCs挥发;木材干馏

过程中,木材在高温下分解会产生VOCs;天然气开采与利用时,天然气的净化、输送等环节也会有VOCs排放。此外,一些以VOCs为原料或使用含VOCs产品的行业也是重要来源,如涂料、油墨、胶粘剂、农药等生产行业,以及涂装、印刷、粘合、工业清洗等使用过程。移动源主要指交通运输,汽车、船舶、飞机等交通工具的燃料燃烧会排放大量的VOCs。

3.VOCs对环境和人体健康的危害

(1) 对环境的危害

VOCs是形成臭氧和细颗粒物的重要前体物质,会导致城市雾霾加重。此外,VOCs在空气中与氮氧化物反应,生成臭氧,破坏大气臭氧层。同时,VOCs还能与空气中的氮氧化物和颗粒物等物质发生反应,形成二次污染物,进一步加剧环境污染,如光化学烟雾、酸雨等。

(2) 对人体健康的危害

VOCs对人体健康的影响不容忽视。当VOCs在空气中达到一定浓度后,会刺激人体的呼吸道、眼睛和皮肤,引起咳嗽、气喘、过敏等症状。长期接触高浓度的VOCs还可能对神经系统、免疫系统、生殖系统等方面的疾病,甚至诱发癌症。

二、工业废气中VOCs的检测技术

1.传统检测技术

(1) 气相色谱法 (GC)

气相色谱法是一种经典的VOCs检测技术。它通过将样品中的VOCs分离并检测,具有高灵敏度和高选择性的特点,能够检测到低浓度的VOCs。GC通常与不同的检测器联用,如火焰离子化检测器 (FID)、电子捕获检测器 (ECD) 或质谱检测器 (MS),以提高检测的准确性和灵敏度。例如,在与FID联用时,氢火焰燃烧

有机物产生离子，通过测量离子电流强度确定浓度，对碳氢化合物敏感，线性范围广（ppm至%级），但受氧气、水蒸气干扰，需定期校准。该方法适用于石油化工、制药行业的排放口监测，可同时测定多种成分，如非甲烷总烃、苯系物等，不过分析周期较长，通常为10-30分钟。

（2）质谱法（MS）

质谱法是一种强大的VOCs检测技术，它通过测量分子的质量来识别和定量VOCs，可以提供分子级别的信息，对于复杂样品中的VOCs检测非常有用。质谱法可以与GC联用，形成气相色谱-质谱联用技术（GC-MS），以实现VOCs的高效分离和精确鉴定。GC-MS的精度极高，可追溯污染物来源，如区分不同苯系物。但设备昂贵，维护复杂，需要专业的操作人员进行管理和维护，一般应用于实验室分析、环境应急事件溯源等领域。

2. 新型检测技术

（1）光离子化检测器（PID）

PID是一种便携式VOCs检测设备，它通过紫外光照射样品，使VOCs分子电离，然后测量产生的离子电流。PID对大多数VOCs具有良好的响应，灵敏度高，可达ppb级，响应速度快，秒级即可得出检测结果。其体积小，无需辅助气体，适合便携式设备，常用于工业园区、工厂烟囱的连续监测以及危险气体泄漏预警。然而，PID无法区分VOC类型，只能检测低浓度挥发性有机物的总量，如苯、甲苯等。

（2）傅里叶变换红外光谱（FTIR）

FTIR是一种高灵敏度的红外光谱技术，它通过傅里叶变换来处理光谱数据，从而获得高分辨率的光谱图。FTIR适用于VOCs的定性和定量分析，可同时监测多种气体，如苯、甲苯、二甲苯等。它具有响应速度快的特点，但光学部件维护成本高。该技术可用于城市空气质量监测、交通路口污染源追踪等领域，能够实时、准确地获取VOCs的浓度信息。

（3）传感器阵列技术

传感器阵列技术利用多种类型的传感器来检测VOCs，每种传感器对不同的VOCs有不同的响应。通过分析传感器的响应模式，可以识别和定量VOCs。这种方法适合于实时监测和预警系统，能够快速检测到VOCs的变化情况。不过，传感器阵列技术的定量能力有限，通常需要与其他技术联用以提高准确性。例如，将其与气相色谱法结合，可先通过传感器阵列进行初步筛选，再利用气相色谱法进行精确分析。

3. 检测技术的发展趋势

伴随着技术的进步，VOCs检测技术正向着高精度、高灵敏度、响应快、便携化、智能化等方向发展。一方面对气相色谱法、质谱法等传统检测技术进行了持续改进与革新，提升了检测精度与效率，减少了设备成本与维修难度。如新型气相色谱仪利用较先进分离技术及检测器使分析周期缩短、检测灵敏度提高。另一方面新的检测技术也层出不穷，例如以纳米材料、量子点为载体的传感器技术灵敏度高，选择性好。与此同时，检测技术同信息技术、物联网技术结合日益密切，检测数据实时传输及远程监控成为可能，对VOCs精准监测及治理提供强大支撑。

三、工业废气中VOCs的治理方法

1. 物理法

物理法对工业废气中VOCs治理具有重要意义，常用方法包括冷凝法、吸收法以及吸附法等。冷凝法将废气中VOCs冷凝为液体并降低其温度而从废气中分离出来，适合高浓度低流量VOCs废气的治理，如同石化中、在溶剂制造领域，这种方法经常被采用来回收溶剂，尽管它在经济上是可行的，但其能源消耗相对较大。吸收法是通过使用液体吸收剂来吸取废气中的VOCs，通常选用水或有机溶剂作为吸收剂，特别适用于如醇类这样的水溶性VOCs、醛类化合物的预处理或与其他处理方法的结合使得设备更为简洁，特别适用于处理酸性或碱性的VOCs。然而，吸收液需要进一步的处理，并且对于非水溶性VOCs的处理效果并不理想，这在化工和制药行业中是一个典型的例子。吸附法是利用吸附剂对废气中VOCs进行吸附，常见吸附剂有活性炭和分子筛，该法操作简单且费用比较低廉，这种材料特别适合处理低浓度的VOCs废气，但由于吸附剂存在饱和和再生问题，因此在印刷、涂装等多个行业中得到了广泛应用。

2. 化学法

化学法对工业废气中VOCs治理效果显著，常用的方法包括催化燃烧法、氧化法、化学吸收法以及等离子体法。在催化剂的催化作用下，催化燃烧法能将VOCs在相对较低的温度条件下转化为二氧化碳和水，这种方法特别适合处理中到低浓度的VOCs废气，通过采纳“沸石转轮浓缩+催化燃烧”的组合技术，包装印刷业能够显著减少能源消耗和处理费用，从而达到每年减少VOCs120吨的目标；在电子制造行业中，当处理半导体的清洁废气时，异丙醇的去除率高达99.2%，并且在最新的技术中，稀土元素改良的催化剂的抗中毒性能增加

了30%，AI智能控制系统能进一步节约能源15%，并且其模块化的设计方案将安装周期缩减了60%。氧化法是一种直接在高温条件下对VOCs进行氧化分解的方法，特别适用于处理高浓度的VOCs。化学吸收方法是通过溶剂与污染物进行化学反应或物理溶解，利用碱性溶剂如NaOH、氨水来中和酸性气体，适用于酸性气体如HCl、SO₂等的处理，反应公式是 $\text{SO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 。等离子体法通过利用等离子体中的高能粒子来促使VOCs进行分解和氧化反应，这种方法不仅处理效率高、反应速度快，还可以处理多种类型的VOCs废气，但需要的设备投资和运行成本相对较高。不同化学法各有优缺点，需要在实践中根据废气具体状况进行合理选用。

3. 生物法

生物法具有环保、经济的优点，是工业废气中VOCs治理的一种重要手段，目前常用的方法包括生物过滤法、生物滴滤法以及生物洗涤法。生物过滤法是利用土壤和堆肥作为过滤介质，尾气在经过介质层的过程中VOCs受到微生物的分解。该方法装置简单，运行成本低，适合于污水处理厂、垃圾填埋场等低浓度易生物降解VOCs废气治理，但是需要进气浓度及湿度，占地面积较大。生物滴滤法是一种将废气排放到填充有惰性材料的滴滤床中的方法，在这个过程中，微生物会附着在填料表面，形成生物膜，从而使废气中的VOCs被生物膜中的微生物分解和代谢。此法适应污染物负荷变化能力强，可处理部分难降解VOCs，占地面积比较小，但填料更换及维护费用昂贵。生物洗涤法使废气接触含微生物液体，利用微生物代谢作用使其污染物变成无害物质。此法反应条件易于控制且能处理高浓度废气，但是对洗涤设备及循环液处理系统要求比较大，操作费用也比较昂贵。在实践中，需要根据废气的性质、治理要求和经济成本来考虑，合理地选择生物法治理工艺，才能达到治理VOCs的高效经济。

4. 治理方法的选择与集成

治理工业废气中VOCs时，治理方法的选择与集成至关重要，要综合考量多方面因素。根据废气的不同成分，需要采用不同的处理技术。例如，含有二氧化硫的废气可以使用湿法脱硫或干法脱硫等方法，而VOCs废气则可以通过吸附、燃烧或冷凝等方式进行处理。废气的浓度与流量还会影响到治理设备的大小与治理能力，浓度高的废气可能需要预处理后才能进行深度治理，而流量大的废气需要治理能力大且阻力低的装置。废气的湿度和温度都会对治理技术的选择和设备的运行效果产生影响。例如，吸附法主要适用于处理低浓度、大风量的VOCs废气，而燃烧法则更适合处理高浓度、小风量的有

机废气，并能有效地分解污染物。

设备性能和可靠性对保证废气治理效果至关重要，需要综合考虑其处理效率、运行稳定性以及维护保养的难度。各个地区和行业都有其特定的排放标准和规定，特别是在某些重点区域和特定行业，这些标准和规定更为严格，因此在选择治理方案时，必须严格遵循这些规定和标准。

从成本上看，初始投资主要包括治理设备购置、安装、调试及其他成本，各种治理技术及设备价格相差很大；操作的费用主要涉及能源的消耗、药剂的消耗、设备的维修费用、人员的工资等等，例如燃烧法处理废气的操作费用比较昂贵，生物法的操作费用则以微生物的培养及营养液的投加为主，比较低廉。

为了达到较好的治理效果可以对各种治理方法进行整合。例如，对高浓度VOCs废气首先通过冷凝法预处理，回收一部分有机物并降低其浓度，然后通过吸附法对其做进一步的处理，再通过燃烧法对其深度净化。综上所述，治理方法的选择和集成需要综合权衡各种因素才能达到治理VOCs的高效和经济目的。

结论

在工业排放的废气中，挥发性有机物（VOCs）的释放对环境 and 人们的健康构成了巨大的威胁，因此，对其进行有效的检测和管理显得尤为关键。在检测技术上，传统和新型技术各有优缺点，今后向高灵敏度和实时在线监测的方向迈进，以支持准确把握VOCs的排放状况。治理方法中，物理、化学和生物法各有其适用场景，需要从废气性质和成本两方面考虑进行筛选和整合应用。通过提高检测和治理水平可以降低VOCs的排放、提高环境质量、保证人体健康、促进工业可持续发展和环境改善、助力绿色生态环境建设。

参考文献

- [1] 褚娜. 工业废气中挥发性有机物（VOCs）的减排技术研究[J]. 城市周刊, 2024 (51).
- [2] 牛艳. 城市环境中化工废气挥发性有机污染物治理技术研究[J]. 环境科学与管理, 2025, 50 (1): 65-69.
- [3] 李承. 环境空气和废气中VOCs总量表征方式及监测分析方法研究[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43 (2): 83-86.
- [4] 贡桂霞. 滨海县城汽修企业挥发性有机物治理现状及对策研究[J]. 污染防治技术, 2023, 36 (5): 39-41.
- [5] 张弘. 电厂废气中挥发性有机物（VOCs）治理技术研究[J]. 工程管理与技术探讨, 2024, 6 (15): 106-108.