

大气污染中挥发性有机物 (VOCs) 治理技术进展与挑战

冯 敏

内蒙古碧蓝环境科技有限公司 内蒙古鄂尔多斯 017000

摘 要: 挥发性有机物 (VOCs) 作为大气污染物的重要组成部分, 对环境和人体健康造成严重威胁。本文深入探讨了大气污染中 VOCs 的来源、危害以及当前主要治理技术的进展情况, 包括吸附法、燃烧法、生物处理法等。同时, 详细分析了这些治理技术在实际应用中面临的挑战, 并提出了相应的应对策略。旨在为推动 VOCs 治理技术的发展和有效控制大气中 VOCs 污染提供理论依据和实践指导。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 大气污染; 治理技术; 进展; 挑战

引言

工业化和城市化导致大气污染加剧, 特别是挥发性有机物 (VOCs) 的排放, 因其毒性、刺激性及参与生成臭氧和二次有机气溶胶等污染物, 对环境和健康有害。因此, 开发有效的 VOCs 治理技术对改善空气质量至关重要。

1 VOCs 的来源与危害

1.1 来源

工业源: 工业生产过程中的, 如石油化工、制药、涂装、印刷等行业, 会挥发大量 VOCs。例如, 石油化工行业排放苯、甲苯、二甲苯、乙烯、丙烯等; 涂装行业喷漆、烘干工序产生醇类、酯类、酮类等 VOCs。

交通源: 机动车尾气排放是城市 VOCs 重要来源, 燃料燃烧和润滑油挥发产生 VOCs。摩托车、船舶等移动源同样排放 VOCs, 对大气环境影响显著。

生活源: 家庭装修使用油漆、涂料、胶粘剂等, 干洗剂、化妆品挥发及餐饮油烟, 均含有 VOCs。

1.2 危害

对人体健康危害: VOCs 如苯具致癌性, 长期暴露可能引发血液系统疾病; 甲醛具刺激性, 长期接触可能降低免疫力、引起过敏。部分 VOCs 影响神经系统, 导致头痛、头晕、乏力。

对环境危害: VOCs 与 NO_x 等污染物光化学反应生成臭氧, 影响植物生长, 导致农作物减产。VOCs 还可生成 SOA, 是雾霾天气成因之一, 降低大气能见度, 影响交通安全。

2 VOCs 治理技术进展

2.1 吸附法

技术原理: 吸附法是利用吸附剂对 VOCs 的吸附作用,

将其从废气中分离出来。常用的吸附剂有活性炭、分子筛、活性氧化铝等。活性炭具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积, 对大多数 VOCs 具有良好的吸附性能。当废气通过装有吸附剂的吸附床时, VOCs 分子被吸附在吸附剂表面, 从而使废气得到净化。吸附饱和后的吸附剂可通过升温、降压等方式进行脱附再生, 恢复吸附能力。

技术进展: 近年来, 吸附法在吸附剂性能和吸附工艺方面取得了显著进展。在吸附剂研发上, 新型活性炭纤维 (ACF) 和分子筛吸附剂不断涌现。ACF 具有更短的吸附扩散路径和更高的吸附容量, 对低浓度 VOCs 的吸附效果更佳。分子筛吸附剂则具有良好的选择性, 能够根据 VOCs 分子的大小和极性进行选择吸附。在吸附工艺方面, 变压吸附 (PSA) 和变温吸附 (TSA) 技术得到广泛应用。PSA 通过改变压力实现吸附和脱附过程, 适用于处理高浓度、大流量的 VOCs 废气; TSA 则通过升温实现脱附, 操作相对简单, 适用于处理低浓度、小流量的废气。此外, 为了提高吸附效率和降低能耗, 一些组合吸附工艺如吸附 - 冷凝、吸附 - 催化燃烧等也得到了发展。

2.2 燃烧法

技术原理: 燃烧法是将 VOCs 在高温下氧化分解为二氧化碳和水等无害物质。根据燃烧方式的不同, 可分为直接燃烧法、热力燃烧法和催化燃烧法。直接燃烧法适用于处理高浓度、高热值的 VOCs 废气, 废气直接在燃烧炉中燃烧, 温度一般在 1000℃ 左右。热力燃烧法适用于处理中低浓度的 VOCs 废气, 废气先与辅助燃料混合后再进行燃烧, 通过燃烧辅助燃料提供热量使 VOCs 达到燃烧温度。催化燃烧法则

是在催化剂的作用下,降低 VOCs 的燃烧温度,一般在 200 – 500℃之间,从而减少能耗和降低氮氧化物等二次污染物的产生。

技术进展:在燃烧法的发展过程中,催化剂的研发是关键。目前,贵金属催化剂(如铂、钯等)和非贵金属催化剂(如铜、锰、钴等)得到了广泛研究和应用。贵金属催化剂具有活性高、起燃温度低等优点,但成本较高。为了降低成本,研究人员通过改进催化剂的制备工艺、添加助剂等方式,提高贵金属催化剂的性能和稳定性,同时开发高效的非贵金属催化剂。此外,燃烧设备的优化也是研究热点。新型的蓄热式燃烧设备(RTO)和蓄热式催化燃烧设备(RCO)能够有效回收燃烧过程中的热量,提高能源利用效率,降低运行成本。RTO 通过蓄热陶瓷将燃烧后的高温尾气热量储存起来,用于预热进入燃烧炉的废气;RCO 则是在 RTO 的基础上结合了催化燃烧技术,进一步降低燃烧温度和能耗。

2.3 生物处理法

技术原理:生物处理法是利用微生物的代谢作用将 VOCs 转化为二氧化碳、水和微生物自身细胞物质。根据微生物的存在形式和处理工艺的不同,可分为生物过滤法、生物滴滤法和生物洗涤法。生物过滤法是将废气通过含有微生物的滤料层,VOCs 在微生物的作用下被降解。生物滴滤法与生物过滤法类似,但在滤料层上方设置了喷淋装置,可调节滤料层的湿度和营养物质浓度,更适合处理水溶性较差的 VOCs。生物洗涤法则是将废气通入含有微生物的洗涤液中,通过气液传质使 VOCs 进入洗涤液并被微生物降解。

技术进展:生物处理法的研究主要集中在微生物菌种的筛选和培养、生物反应器的优化设计以及工艺参数的调控等方面。近年来,通过基因工程技术筛选和培育出了一些对特定 VOCs 具有高效降解能力的微生物菌种,提高了生物处理法的处理效率和适用范围。在生物反应器设计上,采用新型的结构和材料,如多级串联生物反应器、固定化微生物载体等,改善了微生物的生长环境,增强了气液传质效果。同时,通过优化工艺参数,如温度、pH 值、停留时间等,进一步提高了生物处理系统的稳定性和处理效果。

2.4 其他治理技术

光催化氧化法:光催化氧化法是利用光催化剂在光照下产生的电子-空穴对,将 VOCs 氧化分解为二氧化碳和水。常用的光催化剂有二氧化钛(TiO_2)等。该技术具有反应条

件温和、能耗低、无二次污染等优点,但目前光催化剂的活性和稳定性还有待提高,且处理效率受光照强度、废气浓度等因素影响较大。

低温等离子体法:低温等离子体法是通过放电产生高能电子、离子、自由基等活性粒子,与 VOCs 分子发生碰撞反应,将其分解为小分子物质。该技术具有处理效率高、反应速度快、设备简单等优点,但存在能耗较高、易产生二次污染物等问题。

3 VOCs 治理技术应用挑战

3.1 治理技术适应性问题

不同行业排放的 VOCs 成分复杂多样,浓度和流量波动较大,单一的治理技术往往难以满足所有工况的需求。例如,吸附法对于低浓度、大风量的 VOCs 废气具有较好的处理效果,但对于高浓度、小风量的废气,可能需要频繁更换吸附剂,导致运行成本增加。燃烧法虽然对高浓度 VOCs 废气处理效果好,但对于低浓度废气,可能需要消耗大量的辅助燃料,经济性较差。生物处理法适用于处理易生物降解的 VOCs,但对于一些难降解的 VOCs,处理效率较低。

3.2 运行成本高

许多 VOCs 治理技术的运行成本较高,限制了其广泛应用。例如,吸附法中的吸附剂需要定期更换或再生,燃烧法中的辅助燃料消耗以及催化剂的更换等,都会增加运行成本。生物处理法虽然能耗相对较低,但需要定期添加营养物质和维护生物反应器,也会产生一定的费用。此外,一些新型治理技术如光催化氧化法和低温等离子体法,由于技术不成熟,设备投资和运行成本都较高。

3.3 二次污染问题

部分 VOCs 治理技术在处理过程中可能会产生二次污染。例如,燃烧法在燃烧过程中可能会产生氮氧化物(NO_x)等二次污染物,尤其是在高温燃烧时, NO_x 的生成量会增加。吸附法中,脱附后的 VOCs 如果处理不当,可能会重新排放到大气中造成污染。生物处理法中,微生物代谢产物如果不能及时处理,也可能对环境造成影响。

3.4 监测与管理难度大

VOCs 种类繁多,不同种类的 VOCs 性质差异较大,这给监测工作带来了挑战。目前,针对 VOCs 的监测技术和设备还不够完善,难以实现对所有 VOCs 成分的准确、实时监测。此外,由于 VOCs 排放源分散,涉及众多行业和企业,

监管难度较大, 部分企业存在偷排、漏排等现象, 影响了治理效果。

4 应对策略

4.1 优化治理技术组合

针对不同行业和工况的特点, 采用多种治理技术组合的方式, 提高治理效果和适应性。例如, 对于高浓度、小风量的 VOCs 废气, 可以先采用冷凝法回收部分有机物, 再通过吸附法或燃烧法进行深度处理; 对于低浓度、大风量的废气, 可以采用吸附浓缩-燃烧法, 先通过吸附剂将废气中的 VOCs 浓缩, 再进行燃烧处理。通过合理组合治理技术, 既能提高处理效率, 又能降低运行成本。

4.2 降低运行成本

一方面, 加强对治理技术的研发和创新, 提高设备的性能和能源利用效率。例如, 研发高效的吸附剂和催化剂, 延长其使用寿命, 降低更换频率; 优化燃烧设备的结构和运行参数, 减少辅助燃料的消耗。另一方面, 加强企业管理, 合理安排生产计划, 减少 VOCs 的产生量, 从源头上降低治理成本。同时, 政府可以出台相关政策, 对采用先进治理技术、降低运行成本的企业给予一定的补贴和优惠。

4.3 控制二次污染

对于可能产生二次污染的治理技术, 要采取相应的控制措施。例如, 在燃烧法中, 采用低氮燃烧技术、选择性催化还原 (SCR) 等技术, 降低氮氧化物的生成和排放; 在吸附法中, 对脱附后的 VOCs 进行妥善处理, 如通过燃烧或其他方式进行无害化处置; 在生物处理法中, 加强对微生物代谢产物的监测和处理, 确保其不对环境造成污染。

4.4 完善监测与管理体系

加大对 VOCs 监测技术和设备的研发投入, 开发更加准确、便捷、实时的监测技术和设备, 实现对 VOCs 成分、浓度、流量等参数的全面监测。同时, 加强环境监管力度, 建立健全 VOCs 排放监管制度, 利用在线监测、卫星遥感等技术手段, 对企业的排放情况进行实时监控, 严厉打击偷排、漏排等违法行为。此外, 加强对企业的宣传教育, 提高企业的环保意识, 使其自觉遵守环保法规, 积极采取有效的治理措施。

5 结论

VOCs 治理技术的发展对改善大气环境质量至关重要。传统技术如吸附法、燃烧法、生物处理法持续改进, 同时新型技术如光催化氧化法、低温等离子体法也在发展。未来研究应加强基础研究和应用开发, 探索高效、经济、环保的治理技术和工艺, 支持大气污染控制和生态环境可持续发展。此外, 政府、企业和社会各界需共同努力, 加强政策引导、资金投入和环保意识, 形成全社会共同参与 VOCs 治理的良好局面。

参考文献:

- [1] 姜会荣. 大气污染治理中挥发性有机物的控制措施分析 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(01): 231-233.
- [2] 廖均. 挥发性有机物的污染现状与治理策略探讨 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(23): 100-102.
- [3] 敖华玲. 大气中挥发性有机物监测与治理分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(24): 68-70.
- [4] 杨燕萍. 中国西北典型石化工业城市挥发性有机物污染特征研究 [D]. 兰州大学, 2023.