

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, 中国·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。论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 and 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

Progress and Challenges of Volatile Organic Compounds (VOCs) Treatment Technologies in Air Pollution

Min Feng

Inner Mongolia Bilan Environmental Technology Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017000, China

Abstract: As an important component of air pollutants, Volatile Organic Compounds (VOCs) pose a serious threat to the environment and human health. This paper deeply explores the sources and hazards of VOCs in air pollution, as well as the progress of the current main treatment technologies, including the adsorption method, combustion method, biological treatment method, etc. At the same time, it analyzes in detail the challenges faced by these treatment technologies in practical applications, and puts forward corresponding countermeasures. The aim is to provide theoretical basis and practical guidance for promoting the development of VOCs treatment technologies and effectively controlling VOCs pollution in the atmosphere.

Keywords: Volatile Organic Compounds (VOCs); air pollution; treatment technology; progress; challenge

0 前言

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性的吸附。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℃,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 结语

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] 娄会荣.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(1):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:兰州大学,2023.