

Reflection on the Technology and Application of Industrial VOCs Gas Pollution Control

Yonghong Gao

Inner Mongolia Hehe Eco-environmental Technology Consulting Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

Abstract

The emission of volatile organic compounds (VOCs) from industrial sources is one of the key problems in the current air pollution control, and its impact on the environment and human health has received increasing attention. With the continuous advancement of industrialization, VOCs emissions have increased year by year, and the difficulty of governance has gradually increased. In this paper, the treatment technology of VOCs gas pollution from industrial sources is systematically discussed, including adsorption, condensation, combustion and biological treatment. At the same time, based on the actual situation of China's industrial development, the advantages and disadvantages of these technologies in different application scenarios were analyzed, and VOCs governance strategies adapted to China's national conditions were proposed. At the end of the paper, the future development direction of VOCs governance for industrial sources is prospected, in order to provide reference for the research and practical application in related fields.

Keywords

industrial source; volatile organic compounds; pollution control; treatment technology; applied thinking

工业源 VOCs 气体污染治理技术与运用思考

高永红

内蒙古和合生态环保技术咨询有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要

工业源挥发性有机化合物 (VOCs) 排放是当前大气污染治理中的关键问题之一, 其对环境 and 人体健康的影响日益受到关注。随着工业化进程的不断推进, VOCs 排放量逐年增加, 治理难度也逐渐加大。论文主要对工业源 VOCs 气体污染的治理技术进行了系统探讨, 涵盖了吸附、冷凝、燃烧和生物处理等主要治理方法。同时, 结合中国工业发展的实际情况, 分析了这些技术在不同应用场景中的优缺点, 提出了适应中国国情的 VOCs 治理策略。论文最后对工业源 VOCs 治理的未来发展方向进行了展望, 以期对相关领域的研究和实际应用提供参考。

关键词

工业源; 挥发性有机化合物; 污染治理; 治理技术; 应用思考

1 引言

随着经济的快速发展和城市化进程的加速推进, 工业源 VOCs 排放已成为中国空气污染的重要来源之一。VOCs 作为臭氧和 $PM_{2.5}$ 的前体物, 严重威胁到环境质量和人类健康。治理 VOCs 排放成为环保部门的重点工作之一, 相关技术也在不断创新和发展。论文旨在对工业源 VOCs 污染治理技术进行系统的梳理和分析, 结合工业生产过程中的具体特点, 探讨各种治理技术的实际应用效果, 并为未来的治理方向提供建议。

2 工业源 VOCs 的治理原则与技术概述

2.1 吸附技术在 VOCs 治理中的应用

吸附技术是治理 VOCs 气体污染的重要手段之一, 其

原理是通过吸附剂与 VOCs 分子之间的物理或化学作用, 将有害气体从废气中分离出来。常用的吸附剂包括活性炭、沸石、硅胶等, 这些材料具有较大的比表面积和良好的吸附性能。吸附技术适用于低浓度、大风量的 VOCs 处理场景, 尤其在化工、印刷等行业应用广泛。近年来, 随着新型吸附材料的研发, 如金属有机框架 (MOF) 和活性炭纤维 (ACF), 吸附技术在效率和再生能力方面有了显著提升。然而, 吸附剂的选择、吸附饱和后的再生处理以及运行成本是该技术在实际应用中的主要挑战^[1]。

2.2 冷凝技术在 VOCs 治理中的作用

冷凝技术主要通过降低废气的温度, 使 VOCs 在较低温度下达到饱和并凝结, 从而实现从气相到液相的分离。该技术适用于高浓度、小风量的 VOCs 治理, 如石油化工行业的有机溶剂回收。冷凝技术具有操作简单、设备投资较小的优势, 但其对 VOCs 的回收率受限于冷却温度, 通常只能降低到接近环境温度。为了提高冷凝效率, 常与其他治理技术

【作者简介】高永红 (1987-), 男, 中国内蒙古乌兰察布人, 本科, 工程师, 从事环境工程/环境影响评价研究。

联用,如吸附或燃烧处理。冷凝设备需要经常维护以防止堵塞和结霜,这也是制约其大规模应用的一个重要因素。

2.3 燃烧技术在 VOCs 处理中的应用

燃烧技术是通过高温氧化分解 VOCs,将其转化为二氧化碳和水等无害物质。燃烧技术包括直接燃烧和催化燃烧两种形式,直接燃烧适用于高浓度 VOCs 的处理,而催化燃烧则适合中低浓度 VOCs 的净化。催化燃烧中使用的催化剂能降低反应温度,提高处理效率,同时减少二次污染。该技术具有处理效率高、适应范围广的优点,但对设备材质和催化剂性能的要求较高,运行成本相对较大,特别是在高浓度的场景中需要大量能源投入。如何平衡燃烧温度、能耗和催化剂寿命是未来研究的方向。

3 生物处理技术与其他新兴治理手段

3.1 生物滤池法在工业源 VOCs 治理中的应用

生物滤池法是一种利用微生物代谢作用降解 VOCs 的治理技术。通过让含 VOCs 的废气通过填充有特定微生物的滤料,微生物可以将有机污染物降解为无害的小分子物质。生物滤池法适用于中低浓度的 VOCs 处理,具有绿色环保、能耗低的特点。其不足之处在于,生物滤池对温度、湿度的要求较高,且微生物群落的稳定性也容易受到废气组分变化的影响。生物滤池的设计需要综合考虑气流速度、停留时间、填料选择等因素,以确保微生物的活性和系统的处理效果。近年来,为了提高生物滤池的稳定性和处理效果,研究者们开发了多种新型填料和微生物菌种。例如,某些复合型填料不仅具有良好的透气性,还能够为微生物提供附着和生长的良好环境^[2]。在菌种方面,通过基因改造技术选育的高效降解菌株表现出更强的代谢能力和适应性。

3.2 生物滴滤塔的应用与发展

生物滴滤塔是一种改进的生物处理技术,通过液相的循环流动,将营养物质和微生物不断补充到反应塔内,以提高 VOCs 的去除效率。该技术与传统生物滤池相比,能够更好地控制 pH 值和养分浓度,使得微生物的活性更稳定。生物滴滤塔的应用领域主要集中在中低浓度、持续排放的工业源,如制药、喷涂等行业。尽管生物滴滤塔的处理效果优良,但由于运行过程中的水耗和营养物质的需求较高,其运行成本也相对较高。未来需要在减少运行成本和优化营养液配比方面进一步研究。在生物滴滤塔的运行中,研究者还尝试将生物滴滤塔与其他物理化学处理方法结合,如在滴滤塔前端加入预处理装置,去除废气中的颗粒物和其他不易生物降解的成分,以减轻生物滴滤塔的处理负担。通过这些措施,生物滴滤塔在实际应用中的处理效率得到了进一步提升。

4 VOCs 治理技术的定量分析与效率评估

4.1 吸附技术的效率评估

吸附技术的效果通常通过吸附量、吸附效率以及吸附剂再生能力来评价。在实际应用中,活性炭的吸附效率可达

90% 以上,但随着吸附时间的增加,其吸附速率逐渐下降。在某化工厂的应用中,处理 VOCs 浓度在 $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 的废气,吸附装置的净化效率稳定在 85%~90% 之间。而新型吸附剂如金属有机框架材料,其吸附量可比传统活性炭提高 30% 以上,但其成本相对较高。通过数学模型对吸附过程进行模拟,可以进一步优化吸附系统的设计,减少能耗,提高整体治理效率。在吸附技术的实际应用中,还需要对吸附剂的饱和时间和再生周期进行科学管理,以确保系统的长期稳定运行。例如,在某大型化工企业中,通过在线监测吸附剂的吸附容量,科学制定再生计划,使得吸附系统的整体运行效率提高了 15%。此外,吸附塔的多级设计也是提高吸附效率的重要手段,通过多级吸附可以实现对不同组分 VOCs 的逐级去除,从而提高整体的净化效果。

4.2 冷凝和燃烧技术的对比分析

冷凝技术与燃烧技术在 VOCs 治理中的应用具有不同的特点。冷凝技术主要应用于高浓度、小风量的废气处理,实验数据显示,冷凝回收的效率可达 70% 至 80%,特别是在处理苯、甲苯等易冷凝的有机物时效果较好。而燃烧技术在高浓度、大风量场景中更具优势,其净化效率可高达 99%。某石化企业采用冷凝与催化燃烧联用的方式,处理浓度为 $3000\text{mg}/\text{m}^3$ 的废气,其最终净化效率达到 97% 以上,且回收了部分有机溶剂,实现了经济和环境效益的双赢。为了进一步提高治理效率,冷凝和燃烧技术的联用成为一种有效的策略。例如,通过在冷凝段先将废气中的高浓度组分凝结回收,然后将剩余气体进行催化燃烧处理,可以大大降低燃烧的能耗。在某大型化工园区的实际应用中,这种联用工艺有效地减少了 30% 的能源消耗,同时将 VOCs 的净化效率提升至 98% 以上。此外,催化燃烧中的催化剂选择和冷凝段的温度控制是影响整个系统效率的关键因素,需要根据废气的具体组分和浓度进行精确设计。

4.3 生物处理技术的实际应用效果

生物处理技术在处理低浓度 VOCs 时表现出色,但其效果与进气条件密切相关。在某印刷行业的实际应用中,生物滤池在处理浓度为 $500\text{mg}/\text{m}^3$ 的废气时,其去除效率可稳定在 85% 左右,而当温度和湿度偏离最佳范围时,去除效率会下降至 70% 以下。通过在线监测和自动控制技术,可以有效提高生物处理系统的稳定性和效率。在未来,生物处理与物理、化学技术的结合,将会进一步提升其在 VOCs 治理中的竞争力。生物处理技术的效率评估还涉及微生物群落的多样性和活性。例如,通过对生物滤池中的微生物进行高通量测序,可以分析出主要的降解菌种和它们在不同环境条件下的响应机制。这些研究结果有助于优化微生物的培养条件和营养物质的配比,从而提高系统的处理效率。此外,通过引入强化剂如表面活性剂,可以提高 VOCs 的溶解度,从而增加微生物的降解速率。在某些应用中,通过这些改进措施,生物滤池的处理效率提高了 20% 以上^[4]。

5 工业源 VOCs 治理的综合策略与发展前景

5.1 多元化组合治理技术的应用

由于不同工业源的 VOCs 排放特性差异较大,单一的治理技术往往难以达到理想的效果。因此,多元化组合治理技术逐渐成为趋势。吸附—燃烧、冷凝—吸附等组合技术能够有效提高 VOCs 去除率,并降低运行成本。在某化工企业的实际应用中,采用吸附—催化燃烧联用工艺,处理浓度为 $2000\text{mg}/\text{m}^3$ 的废气,其去除效率达到 98%,且能耗降低了 20%。这种组合方式的应用,不仅能够充分发挥各单项技术的优势,还能实现能耗和经济性的优化。

在多元化组合治理技术的应用中,系统集成和协同控制是关键。通过将不同治理技术有机结合,并对系统的各个部分进行精确控制,可以实现最佳的处理效果。例如,在某大型工业园区,通过建立智能控制系统,对吸附、燃烧和冷凝装置的运行参数进行动态调整,使得整个治理系统的净化效率提高了 15%,同时运行成本也得到了显著降低。未来,随着传感技术和自动控制技术的进一步发展,多元化组合治理技术将在工业源 VOCs 治理中发挥更大的作用。

5.2 技术应用中的经济性与可行性分析

VOCs 治理技术的选择除了要考虑其处理效果,还需关注其经济性与可行性。通过对比吸附、燃烧和生物处理技术的成本,可以发现吸附和生物处理适用于中低浓度、长期运行的场景,而燃烧技术则更适用于高浓度、间歇排放的场景。在某企业的经济性分析中,采用生物滴滤塔处理低浓度 VOCs 的年运行成本比燃烧技术低 30%,但其初期投资较高。为了提高 VOCs 治理的可行性,未来应在技术设备的国产化、系统集成和能耗优化方面加强研究,以降低企业的经济负担^[9]。

经济性与可行性分析还应包括对治理技术的生命周期评估。通过对技术的全生命周期进行分析,可以确定其在整个运行过程中的环境影响和经济效益。例如,在某石化企业,通过对吸附—催化燃烧系统的生命周期评估,发现其在设备投资、运行维护和废弃物处理方面具有较高的性价比,特别是在长期运行的情况下,其整体成本比单一燃烧技术低 20% 以上。此外,为了提高治理技术的经济性,可以考虑通过余热回收等手段实现能源的再利用,从而降低运行成本。

5.3 VOCs 治理的政策支持与技术看新方向

我国政府在 VOCs 治理方面出台了一系列政策和标准,

如《挥发性有机物排放标准》等,为 VOCs 治理提供了政策支持。然而,仅依靠政策推动难以完全解决 VOCs 污染问题,技术创新是实现长效治理的关键。未来的技术创新方向包括高效吸附材料的开发、低能耗等离子体设备的推广以及光催化剂的稳定性提升。同时,应加强治理技术与工业生产工艺的融合,从源头减少 VOCs 的产生,以实现污染防治和工业发展的双赢。

在政策支持方面,应进一步细化 VOCs 排放标准,并根据不同工业行业的特点制定针对性的治理要求。例如,对化工、涂料等高排放行业,应实施更加严格的排放限值,并提供财政补贴和税收优惠以鼓励企业引进先进的治理设备。此外,建立健全 VOCs 排放的监测和报告机制,通过在线监测、数据共享等手段提高监管效率。技术创新方面,应加强产学研合作,鼓励科研机构和企业共同开发适应我国国情的 VOCs 治理技术,特别是在吸附材料的改性、催化剂的优化以及自动化控制系统的集成方面,开展更多应用性研究。

6 结语

工业源 VOCs 污染的治理是实现环境质量改善的重要环节。论文对多种 VOCs 治理技术进行了系统梳理与分析,包括吸附、冷凝、燃烧、生物处理等方法,结合实际应用中的案例,探讨了各技术的优缺点及其适用性。同时,提出了未来 VOCs 治理的发展方向,包括多元化组合治理技术的应用、经济性与可行性分析,以及技术创新方向。只有通过政策支持、技术创新与工业工艺的有机结合,才能有效实现 VOCs 的长效治理,为生态环境保护作出贡献。

参考文献

- [1] 侯立新,蒋绍炜.现代工业源VOCs治理技术研究与实践[J].环境科学学报,2024,42(3):123-129.
- [2] 裴永丰,阎晓晴.生物滤池在挥发性有机物治理中的应用分析[J].中国环境管理,2023,39(5):87-93.
- [3] 钟海瑞,蔡振东.吸附-催化燃烧技术在石化行业VOCs治理中的应用[J].化工进展,2024,33(7):45-52.
- [4] 徐正平,梁丽霞.低温等离子体技术在VOCs废气处理中的研究进展[J].工业环保,2023,31(8):66-71.
- [5] 郭海波,吴新兰.光催化降解技术在工业VOCs治理中的应用与挑战[J].环境保护科学,2024,28(4):101-106.