

VOCs (挥发性有机物) 治理技术现状与发展趋势研究

杜秋芳

焦作市和盛环境检测技术有限公司 河南 焦作 454000

摘要: 本文深入探讨了挥发性有机物 (VOCs) 治理技术的现状与发展趋势。首先阐述了VOCs的来源、危害及治理的紧迫性,接着详细分析了当前常见的VOCs治理技术,包括吸附技术、吸收技术、催化燃烧技术、生物处理技术等。然后结合国内外政策导向、市场需求以及科技创新等因素,对VOCs治理技术的未来发展趋势进行了展望,如多种技术的耦合应用、智能化与自动化控制、新型材料的研发等。旨在为VOCs治理领域的相关从业者、研究人员和政策制定者提供全面且深入的技术参考,推动VOCs治理技术的不断进步和应用,以实现更好的环境效益和可持续发展。

关键词: 挥发性有机物; 治理技术; 现状; 发展趋势

1 引言

挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, 简称VOCs) 是一类在常温下容易挥发的有机化合物的总称,涵盖了众多不同种类的化学物质,如烷烃、烯烃、芳香烃、醛类、酮类等。VOCs来源广泛,工业生产过程中的石油化工、涂料涂装、印刷包装、电子制造等行业,以及日常生活里的汽车尾气排放、建筑装饰材料挥发等都是重要的VOCs排放源。VOCs不仅会对大气环境造成严重污染,是形成光化学烟雾和细颗粒物 (PM_{2.5}) 的重要前体物,进而影响空气质量,危害人体健康,引发呼吸道疾病、神经系统损伤等多种健康问题。而且,部分VOCs还具有毒性和致癌性,对生态环境和人类生存构成长期威胁。因此,加强VOCs治理已成为当前环境保护领域的重要任务,深入研究VOCs治理技术具有极其重要的现实意义。

2 VOCs 治理技术现状

2.1 吸附技术

2.1.1 技术原理

含VOCs废气与吸附剂接触,VOCs分子因分子间作用力或化学键力被吸附在表面实现气固分离。吸附分物理吸附和化学吸附,物理吸附靠范德华力,吸附力弱但可逆,吸附剂可脱附再生;化学吸附靠化学键力,吸附力强且通常不可逆。如活性炭吸附苯系物多为物理吸附,符合朗格缪尔吸附等温线模型,一定条件下吸附量可达自身重量20%-30%。

2.1.2 常用吸附剂

(1) 活性炭: 孔隙丰富、比表面积大 (500-3000m²/g), 吸附多种VOCs性能良好,应用广泛。但易燃,高温或接触氧化性气体可能燃烧爆炸,脱附再生难。

如处理含甲苯废气,活性炭饱和后热空气脱附 (100-120°C),效率80%-90%,多次再生后性能下降,通常再生3-5次需更换。(2) 分子筛: 铝硅酸盐晶体,孔径可调,能选择性吸附特定分子大小的VOCs,热稳定性好、不易燃,但价格高。如5A分子筛孔径约0.5nm,25°C、1个大气压下对正戊烷饱和吸附量达15%-20% (质量分数)^[1]。(3) 硅胶: 高活性吸附材料,多孔、比表面积大 (300-600m²/g),对极性VOCs吸附效果好,但吸附性能受湿度影响大。如相对湿度80%时,对丙酮吸附量比干燥环境降低约40%-50%。

2.1.3 优缺点分析

优点是操作简单,设备投资和运行成本低,适用于低浓度、大风量VOCs废气,可回收有价值有机物。如化工生产中活性炭吸附回收丙酮,回收率85%-90%,可重新用于生产。缺点是吸附剂易饱和,需定期更换或再生,再生可能产生二次污染;对高浓度、高温VOCs废气处理效果差;吸附容量和选择性有限,处理复杂组分废气有困难。如废气中VOCs浓度超5000mg/m³,活性炭吸附效率明显下降且易引发安全隐患。

2.2 吸收技术

2.2.1 技术原理

吸收分物理和化学吸收。物理吸收靠VOCs在吸收剂中的溶解度差异,过程可逆,吸收剂可解吸再生,如20°C时水吸收乙醇废气,乙醇在水中溶解度约20% (质量分数),增加塔高和喷淋量可提高吸收效率;化学吸收是吸收剂与VOCs反应生成稳定化合物,过程通常不可逆,如氢氧化钠溶液吸收含氯乙烯废气,反应生成乙醇钠和氯化钠,能更彻底去除氯乙烯。

2.2.2 常用吸收剂

(1) 水：对水溶性好的醇类、部分醛类等VOCs经济实用，但吸收容量有限，对多数VOCs吸收效果差。如20℃时水对甲苯溶解度仅0.053g/100g水，单独吸收甲苯废气效率低，常需多级吸收或联合其他吸收剂。(2) 有机溶剂：如柴油、煤油等，对多种VOCs溶解性好、吸收佳，但易挥发致二次污染，富液处理难。如柴油吸收苯系物废气，吸收效率80%-90%，挥发损失率约5%-10%，富液再生能耗高且产生废气。(3) 化学吸收剂：如氢氧化钠、硫酸溶液等，可与酸碱性或能反应的VOCs高效吸收，但选择性强、适用范围窄。如10%氢氧化钠溶液吸收含硫化氢废气，反应迅速彻底，合理设计吸收塔可使去除率达99%以上。

2.2.3 优缺点分析

优点是设备简单、操作方便，适合处理高浓度、小风量VOCs废气；对水溶性或能反应的VOCs吸收效率高；吸收剂可循环使用，降低运行成本，如化工生产中洗油吸收含苯废气可多次循环使用^[2]。缺点是吸收可能产生二次污染，富液需进一步处理；对低浓度、大风量废气吸收效果差；吸收剂选择和再生是关键，处理不当影响吸收效率和成本，如有机溶剂富液再生能耗高且增加治理成本和风险。

2.3 催化燃烧技术

2.3.1 技术原理

催化剂可降低VOCs氧化反应活化能，使反应在低温快速进行。含VOCs废气通过催化剂床层，VOCs分子在表面被吸附活化，与氧气氧化生成二氧化碳和水并释放热量。如甲苯在铂-钯催化剂作用下，300℃左右催化燃烧，反应方程式为 $C_7H_8+9O_2 \rightarrow 7CO_2+4H_2O$ ，反应热-3905kJ/mol。

2.3.2 常用催化剂

(1) 贵金属催化剂：如铂(Pt)、钯(Pd)，催化活性和选择性强，能在低温高效催化燃烧VOCs。但资源稀缺、价格贵且易中毒失活。如铂-钯合金催化剂对芳香烃催化燃烧活性高，250-350℃可使转化率达95%以上，但废气中硫化物浓度超10mg/m³，催化剂会明显中毒。

(2) 非贵金属催化剂：如锰(Mn)、铜(Cu)等金属氧化物及其复合氧化物，成本低、资源丰富。但催化活性和选择性低，需较高反应温度。如锰-铜复合氧化物催化剂对甲醇催化燃烧活性较好，400-500℃时转化率达90%以上，不过起燃温度高、能耗大。

2.3.3 优缺点分析

优点是起燃温度低、能耗低、处理效率高，能彻底氧化分解VOCs为无害物，无二次污染；适用于中高浓

度、小风量废气，对难生物降解的VOCs处理效果也好。如印刷行业处理含乙酸乙酯废气，去除率可达98%以上，尾气达标。

缺点是催化剂成本高，易受废气中杂质影响中毒失活，需定期更换或再生；对废气预处理要求高，要去除粉尘、油污等以防催化剂堵塞中毒；设备投资和运行成本相对高。

2.4 生物处理技术

2.4.1 技术原理

主要有生物过滤、生物滴滤和生物洗涤三种工艺。生物过滤中，含VOCs废气通过填充生物填料的滤床，VOCs被填料表面微生物吸附降解，生物填料常用天然或人工材料，孔隙率70%-90%，比表面积100-500m²/m³；生物滴滤在生物过滤基础上，滤床上方喷淋循环液，为微生物供营养水分并带走降解产物，循环液pH值6.5-7.5，温度20-35℃；生物洗涤是将废气通入含微生物和营养物质的洗涤液，VOCs被吸收降解，洗涤液经生物反应器再生，反应器中微生物浓度1000-5000mg/L。

2.4.2 常用微生物

用于VOCs生物处理的微生物有细菌、真菌和放线菌等，不同微生物对VOCs降解能力和适应性有别，需依废气中VOCs种类和浓度选合适菌种。如假单胞菌对苯系物降解能力强，能将芳香烃完全矿化；酵母菌对醇类、酯类等VOCs降解作用强，可处理食品加工等行业含醇废气。

2.4.3 优缺点分析

优点是运行成本低、无二次污染、操作简单，适合处理低浓度、大风量VOCs废气，对亲水性和易生物降解的VOCs处理效果好；生物填料可长期使用，无需频繁更换。如污水处理厂臭气处理，生物过滤工艺运行成本是化学处理的1/3-1/2，硫化氢去除率超95%，氨去除率达90%^[3]。缺点是对废气温度、湿度、pH值等环境条件要求高，要严格控制参数保证微生物活性与降解效率；对高浓度、难生物降解的VOCs处理效果差；生物反应器启动时间长，需2-4周驯化期培养适应废气成分的微生物群落。

3 VOCs 治理技术发展趋势

3.1 多种技术的耦合应用

单一的VOCs治理技术往往存在一定的局限性，难以满足不同行业、不同工况下复杂多变的VOCs废气处理需求。因此，多种技术的耦合应用将成为未来VOCs治理技术的发展趋势。例如，将吸附技术与催化燃烧技术相结合，利用吸附技术对低浓度VOCs废气进行浓缩富集，然后再通过催化燃烧技术将浓缩后的高浓度VOCs进行彻底氧化分解，既提高了处理效率，又降低了运行成本；将

吸收技术与生物处理技术相结合,先利用吸收技术对高浓度VOCs废气进行预处理,降低废气浓度,再通过生物处理技术对吸收后的废气进行深度净化,实现VOCs的高效去除。

3.2 智能化与自动化控制

随着信息技术和自动化技术的不断发展,智能化与自动化控制将在VOCs治理领域得到广泛应用。通过安装传感器、监测仪器等设备,实时监测废气中VOCs的浓度、流量、温度、湿度等参数,并将数据传输至控制系统。控制系统根据预设的程序和算法,自动调整治理设备的运行参数,如吸附剂的吸附时间、吸收剂的流量、催化燃烧的温度等,实现治理过程的优化控制,提高治理效率和稳定性,降低人工操作成本和人为误差。同时,利用大数据和人工智能技术,对大量的监测数据进行分析挖掘,为VOCs治理技术的改进和优化提供决策支持。

3.3 新型材料的研发与应用

新型吸附材料、催化剂材料和生物填料等的研发与应用将为VOCs治理技术的发展带来新的突破^[4]。例如,研发具有更高吸附容量、更好选择性和更强再生性能的新型吸附材料,如金属有机框架材料(MOFs)、共价有机框架材料(COFs)等,能够提高吸附技术对VOCs的处理效率和吸附剂的循环使用次数;开发具有更高催化活性、更宽适用范围和更强抗中毒能力的新型催化剂材料,如纳米催化剂、非贵金属催化剂等,能够降低催化燃烧技术的成本和提高催化剂的使用寿命;研制具有更好传质性能、更高微生物附着量和更强抗冲击负荷能力的新型生物填料,能够提高生物处理技术对VOCs的处理效率和稳定性。

3.4 低温催化氧化技术的发展

传统的催化燃烧技术需要较高的反应温度(200-400℃),能耗较高。低温催化氧化技术旨在开发能够在较低温度(通常低于200℃)下实现VOCs高效催化氧化的催化剂和反应工艺,降低能耗和运行成本。目前,研究人员正在积极探索新型低温催化剂材料和催化反应机制,通过优化催化剂的组成、结构和制备工艺,提高催

化剂在低温下的活性和选择性。低温催化氧化技术的发展将为VOCs治理提供更加节能、高效的技术手段,尤其适用于一些对温度敏感或能源有限的工业场景。

3.5 面向源头控制的治理技术

除了末端治理技术外,面向源头控制的VOCs治理技术将越来越受到重视。通过优化生产工艺、采用低VOCs含量的原材料和产品、加强设备密封和泄漏检测与修复(LDAR)等措施,从源头上减少VOCs的产生和排放,实现VOCs的源头减排。例如,在涂料涂装行业,推广使用水性涂料、粉末涂料等低VOCs含量的涂料产品;在石油化工行业,采用先进的催化裂化、加氢精制等生产工艺,降低生产过程中VOCs的生成量。源头控制技术不仅能够有效减少VOCs的排放,降低末端治理的压力和成本,还能促进企业生产工艺的升级和产品结构的优化,实现经济效益和环境效益的双赢。

结语

VOCs治理是环保重要任务,吸附、吸收、催化燃烧、生物处理等传统技术各有优劣,应用有成效也有局限。未来,VOCs治理将朝技术耦合、智能化、新型材料应用、低温催化氧化及源头控制等方向发展。为此,政府应加强政策引导与监管,制定严标准并支持技术研发;企业要履行责任,加大环保投入,从源头减排;科研机构 and 高校需加强产学研合作,突破技术瓶颈。各方合力,实现VOCs有效治理,改善环境,保障健康,推动可持续发展。

参考文献

- [1]宋艳杰.浅谈我国VOCs的治理现状及发展趋势[J].清洗世界,2024,40(08):55-57.
- [2]王莲莲,范贝贝,白玲,等.浅谈挥发性有机物治理技术的研究进展[J].皮革制作与环保科技,2025,6(04):126-128+137.
- [3]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(01):231-233.
- [4]卓秀丽.大气中挥发性有机物(VOCs)深度治理技术的研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(22):9-10+19.