文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4740 /（中图刊号）：715GL012

恶臭污染治理技术的研究进展

冯派　张蕾*　刘源　杨家元
大连海洋大学
DOI:10.12238/eep.v8i3.2594

[摘　要] 恶臭污染是引起人们不愉快感觉的挥发性物质作用于人的嗅觉器官而被感知的一种环境污染问题。近年来,恶臭污染已成为我国人民群众反映愈来愈强烈的环境污染问题,随之而来的污染纠纷越来越多。各级环保部门对恶臭污染的治理应当加强,发展更高效的恶臭污染治理技术。本文首先介绍了恶臭污染问题,其次简述恶臭污染物的定义、组成成分及其排放标准,最后针对恶臭污染治理技术做出了综述,主要阐述了各项技术的处理特征、适用范围以及优缺点。
[关键词] 恶臭污染；挥发性有机物(VOCs)；治理技术
中图分类号：X501　文献标识码：A

Research progress on odor exhaust gas treatment technology

Pai Feng　Lei Zhang*　Yuan Liu　Jiayuan Yang
Dalian Ocean University

[Abstract] Odor pollution is a type of environmental pollution issue perceived by the human olfactory system due to the action of volatile substances that cause unpleasant sensations. In recent years, odor pollution has become an increasingly pressing environmental issue among the public in China, leading to a growing number of pollution disputes. Environmental protection departments at all levels should strengthen the management of odor pollution and develop more efficient odor pollution control technologies. This article first introduces the issue of odor pollution, then briefly describes the definition, composition, and emission standards of odor pollutants. Finally, it reviews odor pollution control technologies, mainly discussing the treatment characteristics, applicable ranges, and advantages and disadvantages of each technology.
[Key words] odor pollutants; Volatile Organic Compounds (VOCs); Control Technologies

引言

随着工业化和城市化进程加快,恶臭污染问题日益严峻。硫化氢、有机胺类等多种恶臭污染物,广泛来源于污水处理、垃圾处理等行业,不仅严重影响居民生活质量,更威胁人体健康。在此背景下,有效治理恶臭污染成为改善生态环境、提升公众幸福感的关键。本文系统梳理物理、物化、化学及生物技术在恶臭污染治理中的应用,分析技术特性与局限性,探讨技术适配性与联用策略,以期为恶臭污染防治提供参考。

1 恶臭污染的概述

恶臭污染被定义为由恶臭气体排放所引起,其刺激作用对嗅觉器官有负面影响,进而导致人体产生不适反应甚至对身心健康造成损害,以及对生活环境质量构成破坏现象[1-2]。恶臭污染物涵盖硫化氢、氨、甲胺、二甲胺、三甲胺等有机胺类,苯系物、酚、醛类、醚类及卤代烃等多种成分。恶臭污染的来源分布范围广泛,主要包括但不限于污水处理、水产品加工工厂、制药业、造纸业、城市垃圾处理厂、下水道系统等。此类污染严重影响居民日常生活,极端时更威胁身体健康。随着我国居民生活水平的显著提升,人们对美好优质生活的追求日益增强。因此,加强恶臭及异味污染治理,已成为我国当前阶段打赢污染防治攻坚战、促进生态环境改善、提升人民群众幸福感的关键措施。

2 恶臭污染治理的物理技术研究

冷凝技术通过降低温度或增加压力,降低气态污染物的饱和蒸汽压,使其冷凝为液态并从气相中分离。该技术尤其适用于处理浓度高、温度低、气体量小的有机废气。但是,冷凝技术对运行的温度和压力要求比较苛刻。陆续长等[3]在恶臭含硫挥发性有机物(VOCs)的二次污染控制方面取得了重要进展,该团队提出了通过竞争吸附结合双功能催化剂的策略,以避免恶臭含硫副产物的生成,同时展示了冷凝技术在减少恶臭气体排放方面的潜力。

3 恶臭污染治理的物化技术研究

3.1吸附技术

吸附技术是一种吸附剂的表面吸附作用,将恶臭污染物从气相或液相中分离出来的方法。该技术适用于浓度为100~2000 mg/m³的恶臭气体处理。吸附法因其工艺成熟、净化效率高、能耗低等特性广泛应用于恶臭污染的处理。例如,利用活性炭吸附-焚烧－脱硫净化工艺对某橡胶生产工厂的硫化车间污染物进行处理[4]。然而,多数吸附剂面临再生性能不佳的问题,同时吸附技术操作复杂、成本高昂,且易于引发二次污染。

3.2膜分离技术

膜分离技术作为一种高效的恶臭污染物处理方法,其工作机制是在压力驱动下,依据各组分通过膜时渗透压的差异,借助膜特有的选择透过性—允许部分组分透过、阻拦其余组分,实现对恶臭污染物的有效分离。该方法适用于回收浓度处于3000~10000mg/m³区间内的恶臭废气组分[5]。魏昕等[6]科研人员开发了一种以PVDF平板膜为基膜、改性PDMS为功能层的复合膜,将其应用于炼油厂罐区排放污染物的回收处理。研究表明,在非甲烷总烃浓度处于41000~182000mg/m³、进气量为50m³/h的条件下,采用蒸汽渗透二级膜分离－冷凝－变压吸附工艺,可使废气中非甲烷总烃浓度降至80mg/m³以下,去除率高达99%。膜分离技术具备操作条件易于调控、无需额外添加其他化学试剂等优势,但也存在膜系统造价高昂、在工业复杂条件下膜性能不够稳定等局限性。

4 恶臭污染治理的化学技术

4.1直接燃烧技术

直接燃烧技术,是借助高温(通常在800℃以上)环境将恶臭污染物分解为二氧化碳(CO_2)和水(H_2O)。这项技术尤其适用于处理高浓度(浓度范围在2000~10000mg/m³)、高热值的挥发性有机物(VOCs)类恶臭组分[7]。不过,它也存在明显短板。由于有机污染物和空气难以混合均匀,燃烧过程往往不够充分,极易产生二噁英等有害成分。在实际应用中,这些问题进一步引发了安全隐患,导致近年来直接燃烧技术的应用逐渐减少。

4.2蓄热燃烧技术

蓄热燃烧技术,通常在750℃以上的高温环境下运作,其核心原理是将恶臭污染物氧化分解为二氧化碳(CO_2)和水(H_2O)。该技术借助蓄热陶瓷或其他高密度惰性材料床层,有效回收处理后废气携带的热量,用于余热入口处的低温废气,以此达成节能目标。Yang等人[8]研发的蜂窝状沸石转子浓缩器在VOCs处理中表现出色,其去除率可达到95%以上,与沸石转轮浓缩系统在实际应用中的高效性相一致。在实际应用中,蓄热燃烧技术虽然处理效率可高达99%,但是,该技术存在投资运行成本高、设备体积庞大,对安装场地的空间条件苛刻的局限性。

4.3催化燃烧技术

催化燃烧技术是基于蓄热燃烧技术发展而来的工艺,能够在相对较低的温度区间,即200~450℃范围内,促使恶臭污染物转化为二氧化碳(CO_2)和水(H_2O)。催化剂通过降低反应的活化能,提升其反应效率,减少二次污染问题。不过,该技术也存在缺点,催化剂极易受水蒸气、积炭以及中毒等因素影响而出现失活现象,进而对催化燃烧系统的温度运行与长期效能产生不利影响。

4.4光催化氧化技术

光催化氧化技术作为一种恶臭污染物处理技术,其核心机制在于催化剂吸收光能后生成羟基自由基,以此驱动恶臭有机污染物中的有害物质转化为无害物质,有效缓解污染物对环境造成的负面影响。Cui等人[9]利用$CaCO_3/TiO_2$材料进行光催化降解50ppm甲苯实验。结果表明,光照60min后,甲苯处理效率可达90%。从优势层面来看,光催化氧化技术具有投资成本低、反应进程较为彻底以及无二次污染等显著特性。然而,该技术亦有其局限性,即催化剂在光反应过程中容易遭受毒化。目前,光催化技术常与吸附技术、生物技术联合使用,广泛应用于煤化工、制药等行业,用于处理VOCs类恶臭气体。

4.5臭氧催化氧化技术

臭氧催化氧化技术,是将恶臭污染物导入吸收液体系,利用臭氧自身的强氧化性,或在催化氧化过程中生成的羟基自由基等活性物质,对污染物中的有害成分进行吸收－降解处理[10]。Kim等人以Mn/HZSM-5为载体,负载贵金属Ru和Ag制备出特定催化剂。研究发现,这些贵金属显著提升了催化剂活性,进而有效提高了对甲苯的去除率[11]。在实际应用中,臭氧催化氧化技术能够在常温条件下,对单一恶臭污染物进行较为高效地降解。不过,在污染物降解过程中产生的中间体、硫和氯元素等中间物质会导致催化剂失活,对污染物的降解效率造成负面影响。

5 恶臭污染治理的生物技术

5.1生物洗涤技术

生物洗涤技术作为生物处理技术的重要分支,借助微生物的代谢活动,对恶臭废气以及挥发性有机物(VOCs)进行降解处理。生物洗涤系统主要由洗涤塔与生物反应器两大部分组成。洗涤塔内部填充惰性填料,负责气体的传质;生物反应器构建活性污泥处理系统,进行生物降解反应。其核心原理主要是利用微生物的代谢功能,将废气分解为CO2、H2O等无害物质。李远啸等人[12]选用经培养驯化、具有降解苯能力的活性污泥作为洗涤剂,当生物洗涤塔的进气苯质量浓度维持在200~500mg/m³、废气在洗涤塔内的停留时间控制在60~70 s、洗涤液的pH值调节至6.8,并且气体流量设定为0.14m³/h时,气相苯的去除率可达到最高94.15%。生物洗涤技术不产生化学试剂残留,投资和运行成本相对低廉,且填料不易堵塞。然而,该技术也存在一定的局限性,如需要额外添加营养物质以满足微生物生长所需；严格把控各项参数。

5.2生物滤池技术

生物滤池通过微生物酶催化作用处理恶臭废气(浓度<300 mg/m³),其核心机制包含三个阶段(图1[13])：(1)气相污染物经吸附/溶解作用转移至填料表面液膜；(2)溶解态污染物通过跨膜运输进入生物膜,经三羧酸循环等途径矿化为CO_2、H_2O及细胞组分；(3)净化气体达标排放。系统采用多孔天然填料(土壤、堆

肥、木屑等),兼具微生物载体与营养供给功能。该技术优势显著：运行成本低(如Dumont团队[14]发现NH_3处理成本仅为活性炭法的18%-23%)、设备简易且无二次污染。但存在填料板结、毒性物质抑制菌群活性等局限,需通过温湿度及pH值精准调控维持系统稳定性。

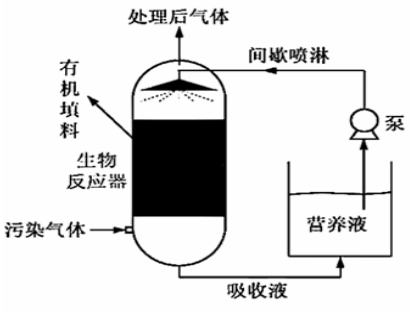

图1 生物滤池示意图

5.3生物滴滤池技术

生物滴滤池通过异养微生物代谢实现恶臭废气降解(浓度<500mg/m³),其核心流程包含：(1)气相污染物经气液传质进入液膜；(2)生物膜捕获污染物进行矿化(生成CO_2、H_2O)。如图2所示[15],系统由进气单元、填料层及循环液系统组成,定时喷淋维持生物膜活性与营养平衡。周珍雄团队[16]发现：pH为1.7时对含硫废气(H_2S/甲硫醇/甲硫醚)去除率达99.62%/85.09%/85.52%,效率与pH呈负相关(硫氧化菌酶活性受pH调控)。技术优势显著：①运行成本低(免化学药剂、基础营养补给)②设备简易③处理稳定。但存在疏水性物质难降解、高负荷易致传质失衡等局限,需严格控制参数(温度30-35℃、pH 6.5-8.5、湿度>95%)并预处理含抑制成分废气。

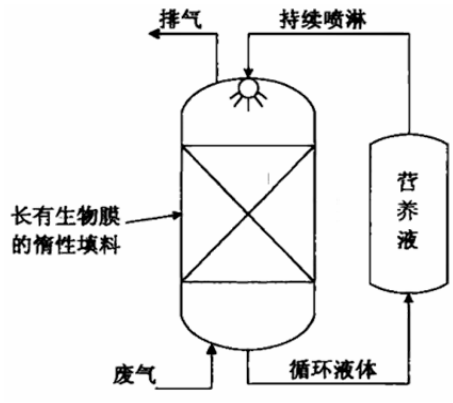

图2 生物滴滤池示意图

5.4生物强化技术

生物强化技术通过定向投加优势菌株或基因工程菌(如巨大芽孢杆菌、恶臭假单胞菌),显著提升污染物降解效率[17]。相较于传统生物法,其优势体现在：①破解生物抑制性物质(卤代烃/重金属)处理难题；②缩短微生物适应周期；③增强低温环境代谢活性(如甲硫醇降解速率提升2.7倍[18])。技术核心包括：内源菌种筛选与外源菌种引入(含基因工程菌),通过矿化与共代谢双路径降解污染物。通常认为,微生物降解污染物的途径有两种[19]：(1)矿化作用——污染物被彻底分解为CO_2、H_2O等无机物;(2)共代谢作用——难降解污染物需依赖其他可利用基质(第一基质)存在时,才能被微生物转化。张磊研究[20]证实：接种土壤源降解菌群(Corynebacterium sp.AL-5、Achromobacter sp.ED-2、Diaphorobacter sp.ED-3)的生物滴滤池,在甲苯浓度600mg/m³、空塔停留68s时去除率达94%(缩短至17s仍保持33%效率),关键机制为菌株高效表达甲苯双加氧酶。该技术对苯系物等难降解物质处理优势显著,但需精准控制菌群结构与代谢途径。

6 结语

综上所述,恶臭污染物对环境和人体健康危害极大,及时有效治理迫在眉睫。其成分复杂,涵盖硫化氢、挥发性有机物(VOCs)、含硫有机物等,具有难降解、嗅阈值低、来源广等特点,是环境污染治理的重点与难点。本文从物理、物化、化学、生物等方面综述恶臭污染物处理技术,并得出以下结论与展望：

(1)不同行业排放的恶臭污染物种类与成分差异大,需综合考虑处理成本,选择适配技术。如污水处理厂排放含硫醇、醚类物质,多采用生物法与吸收法处理。

(2)恶臭污染物治理技术的材料研发与实际应用脱节。科研人员常针对特定污染物研发催化剂、膜材料等,但实际恶臭污染现场复杂,污染物种类多、浓度变化且环境各异,使得研发成果难以全面应对复杂工况。

(3)针对成分复杂、难降解的废气,需综合考虑废气成分、浓度及工况条件,应选取高效技术组合。以VOCs废气处理为例,高浓度、高沸点的可先用冷凝回收技术,再用活性炭吸附进一步去除VOCs;中高浓度的VOCs废气可用蓄热式热力焚烧(RTO)或蓄热式催化燃烧(RCO)技术；低浓度、生物可降解性好的则用生物技术。多种技术联用可确保废气达标排放,弥补单一技术不足,提升处理效能,是未来攻克复杂污染物治理难题的关键方向。

[参考文献]

[1]Zarra T,Galang M G,Ballesteros Jr F,et al.Environmental odour management by artificial neural network-A review[J].Environmental International,2019,133:105189.

[2]Brancher M, Griffiths K D,Franco D, et al. A review of odour impact criteria in selected countries around the world [J].Chemosphere, 2016,168:1-40.

[3]Lu J,Mu W,Qin C,et al.Synchronous catalytic elimination of malodorous mercaptans based VOCs: Controlling byproducts and revealing sites-pathway relationship[J]. Applied Catalysis B: Environment and Energy,2024,357:124253.

[4]陈金胜,奚海萍,胡月霞,等.橡胶硫化废气吸附/脱附-焚烧-脱硫净化工艺[J].工业安全与环保,2017,43(4):56-58.

[5]Li X,Ma J,Ling X.Design and dynamic behaviour investigation of a novel VOC recovery system based on a deep condensation process[J].Cryogenics,2020,107:103060.

[6]魏昕,王刚,栾金义,等.二级膜分离-冷凝-吸附工艺处理石化罐区废气[J].化工环保,2019,39(3):268-272.

[7]黄心,刘荣,李红梅,等.VOCs处理技术研究进展[J].广州化工,2021,49(13):31-34.

[8]Yang J,Chen Y F,Cao L M,et al.Development and field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator /recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry[J]. Environmental Science & Technology,2012,46(1):441-446.

[9]Cui W, Li J,Chen L, et al. Nature-inspired CaCO3 loading TiO2 composites for efficient and durable photocatalytic mineralization of gaseous toluene[J]. Science Bulletin, 2020, 65(19):1626-1634.

[10]Abdedayem A,Guiza M,Toledo F J R, et al. Nitrobenzene degradation in aqueous solution using ozone/cobalt supported activated carbon coupling process: A kinetic approach[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 184: 308-318.

[11]Kim J, Lee J E, Lee H W, et al. Catalytic ozonation of toluene using Mn-M bimetallic HZSM-5 (M: Fe, Cu, Ru, Ag) catalysts at room temperature[J].Journal of Hazardous Materials, 2020, 397: 122577.

[12]李远啸,郭斌,刘倩,等.生物洗涤法处理含苯废气[J].化工环保,2019,39(6):646-652.

[13]赵越.生物滤池除臭技术在污水处理中的应用[C]//2011全国给水排水技术信息忘年会暨技术交流会论文集,乌海,2011.

[14]DumontE,Hamon L, Lagadec S, et al. NH3 biofiltration of piggery air[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 140:26-32.

[15]杨凯雄,李琳,刘俊新.挥发性有机污染物及恶臭生物处理技术综述[J].环境工程,2016,34(03):107-111.

[16]周珍雄,余姮蓉,王智佳,等.低pH环境下生物滴滤池处理制药废水站含硫废气[J].能源环境保护,2021,35(2):46-50.

[17]S E Fantroussi, Spiros N Agathos. Is Bioaugmentation a Feasible Strategy for Pollutant Removal and Site Remediation[J]?Current Opinion in Microbiology,2005,(8):268-275.

[18]Li L H, Zhang R Z,Zhang W C, et al. Improvement of the activity and thermostability of <sc>l</sc>-threonine aldolase from Pseudomonas putida via tailoring of the active sites lining the binding pocket[J]. Systems Microbiology And Biomanufacturing,2023,3(3):440-448.

[19]王家玲.环境微生物学(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2004.

[20]张磊.高校苯系物降解菌强化生物滤池及其处理甲苯性能研究[D].上海:华东理工大学,2021.

作者简介：

冯派(2000--),女,汉族,辽宁锦州人,硕士研究生,研究方向:海洋科学及废气治理。