

## 净化废气的生物过滤技术及其影响因素

李建军<sup>1,2,3\*</sup> 廖东奇<sup>1,2,3</sup> 曾培源<sup>1,2,3</sup> 许玫英<sup>1,2,3</sup> 孙国萍<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东省微生物研究所 广东 广州 510070)

(2. 广东省菌种保藏与应用重点实验室 广东 广州 510070)

(3. 省部共建华南应用微生物国家重点实验室 广东 广州 510070)

**摘要:** 生物过滤方法在废气净化中具有费用低和环保的特点,因而成为一种应用前景良好的空气污染控制技术。本文综述了不同生物过滤反应器的特点,详细分析了应当在生物过滤过程中合理控制的关键参数,并展望了今后的研究热点。

**关键词:** 生物过滤, 废气, 生物滴滤池, 生物滤池

## Biofiltration techniques for waste gases purification and its influencing factors

LI Jian-Jun<sup>1,2,3\*</sup> LIAO Dong-Qi<sup>1,2,3</sup> ZENG Pei-Yuan<sup>1,2,3</sup> XU Mei-Ying<sup>1,2,3</sup>  
SUN Guo-Ping<sup>1,2,3</sup>

(1. *Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China*)

(2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangzhou, Guangdong 510070, China*)

(3. *State Key Laboratory of Applied Microbiology, South China (The Ministry-Province Joint Development), Guangzhou, Guangdong 510070, China*)

**Abstract:** Biofiltration method has proved to be a cost-effective and environment friendly alternative for the removal of pollutants from waste gases stream, and therefore has emerged as a promising technology in the area of air pollution control. This review summaries the charac-

teristics of various bioreactors, the key parameters that should be controlled properly during the biofiltration are described in detail. At last, the hot topics in future researches and development were also presented.

**Keywords:** Biofiltration, Waste air, Biotrickling filter, Biofilter

工业生产过程如污水处理、污泥处置、印染、石油化工、养殖等均会产生种类不同的废气污染物, 包括还原性硫化物(RSCs)和挥发性有机物(VOCs), 随意排放将对车间工人和附近居民的健康以及生态有潜在的风险。近几年, 随着国家经济的快速发展, 城市密集区域的大气污染正由传统煤烟型污染转向复合型污染, 其中工业固定源排放的 VOCs 是一重要来源, VOCs 的排放总量不断增加。

生物过滤技术是一种净化废气的可靠方法, 不仅运行成本低, 且能彻底将污染物转化为无害的简单化合物。生物过滤反应器在常温下运行, 操作简单安全。截至 2005 年, 仅在欧洲就有大约超过 7 500 座废气生物处理系统<sup>[1]</sup>。尽管生物过滤技术在国外已经有 60 多年的历史, 但在国内废气污染治理中的应用仍处于起步阶段。国内的研究主要集中于工艺条件的优化和有效性的证实, 对于填料和污染物特性影响传质和微生物活性的机理及过程尚缺乏系统研究, 技术仍不成熟, 工程设计大多依赖经验设计, 运行过程中出现如填料板结、工艺条件与污染负荷不匹配等问题。另外, 我国尚未建立完善的 VOCs 排放清单, 缺乏具体的行业排放标准, 也影响到 VOCs 排放的监控。

本研究团队近年来研发了恶臭气体的生物过滤设备, 优化了填料配方, 已在国内 30 多个市政污水厂应用。同时针对化工行业废气, 正在开展相关工艺、菌种及填料的研究。生物过滤系统的成功运行取决于填料表面能否有效形成由相应

污染物降解菌组成的生物膜, 工艺条件能否维持降解菌的生长以及填料的物化特性是否有利于污染物从气相转移至生物膜。因此, 本文综述了生物过滤技术的基本反应器类型以及影响生物过滤效率的关键因素, 期望为生物过滤工程的合理设计提供参考。

## 1 生物过滤反应器类型

Delhomenie 和 Mudliar 等学者详细综述了废气处理中所用到的生物过滤反应器<sup>[2-3]</sup>。虽然已经报道了很多构型的反应器, 但在实际工程中得到应用的仍然是传统的三类生物过滤反应器, 即生物滤池、生物滴滤池和生物洗涤池, 尤其是前两种反应器。

### 1.1 生物滤池

生物滤池(Biofilter, 图 1A)没有独立的水相, 废气经过多孔、潮湿的填料床, 气相中的污染物转移至生物膜, 生物氧化发生在生物膜中。Pomeroy 于 1953 年在美国加利福尼亚的一个污水处理厂安装了一个以土壤为填料的生物滤池, 用于处理该厂释放的含硫化氢废气<sup>[4]</sup>, 这是生物滤池最早的工程应用实例。从 20 世纪 80 年代开始, 生物滤池的应用范围已逐步拓展到 VOCs 的净化。生物滤池以有机材料为填料, 如堆肥、树皮和腐殖土等, 填料本身含有丰富的土著微生物, 一般不需要接种, 除非在去除顽固性污染物时。填料含有部分营养, 意味着生物滤池不需要经常补充营养。因此, 生物滤池设备的管理简单方便。但有机填料容易发生生物降解, 导致填料

压实, 压力损失增加, 同时孔隙率减少, 后期运行的去除效果下降, 因而有机填料一般 2-5 年需要更换。

### 1.2 生物滴滤池

对于较高浓度的废气或生物降解性低的污染物, 生物滴滤池(Biotrickling filter, 图 1B)更为合适。生物滴滤池与生物滤池相似, 两者最大的区别是生物滴滤池以无机质为填料并有连续供应的液相。无机惰性填料强度大, 使用寿命长, 压

降长期运行仍能保持在较低水平, 除非过多的生物量堵塞孔隙率。另外, 与传统有机填料相比, 无机填料中没有营养和土著微生物。因此, 生物滴滤池的启动需要接种相应的菌种, 并定期补充营养和水分。相对于生物滤池, 生物滴滤池在 pH 控制、防止代谢产物积累以及生物量控制方面具有很大的优势<sup>[5]</sup>。在水相中如果加入一定比例的惰性有机物可显著提高生物滴滤池处理疏水性污染物的能力, 并可提高耐负荷冲击的能力<sup>[6]</sup>。

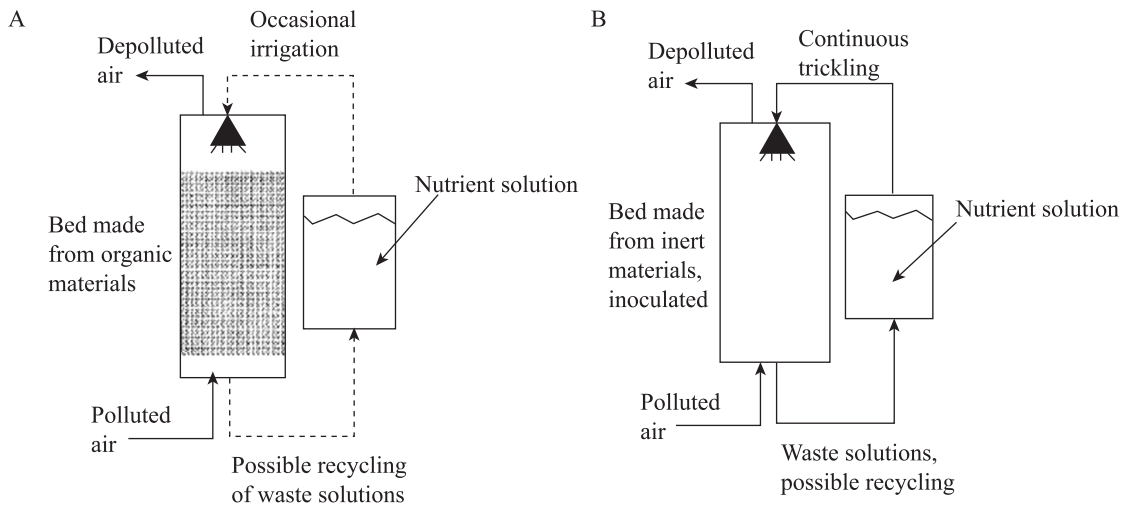


图 1 生物滤池(A)与生物滴滤池(B)的比较<sup>[3]</sup>

Fig. 1 The comparison between biofilter (A) and biotrickling filter (B)<sup>[3]</sup>

### 1.3 生物洗涤池

生物洗涤池(Bioscruber, 图 2)由吸附单元和生物反应器两部分组成, 生物反应器实质上是一个活性污泥再生系统, 活性污泥悬浮于营养液中。活性污泥在生物反应器中降解所吸附的污染物, 再生后的活性污泥进入吸附单元。在吸附单元中, 活性污泥与废气接触, 污染物从气相传递至液相, 由活性污泥吸附。生物洗涤池虽然也可以像生物滴滤池一样有利于营养和 pH 等条件的控制, 但也存在一些缺点, 如不适合处理挥发性较强的污染物, 同时会产生剩余污泥和废水。

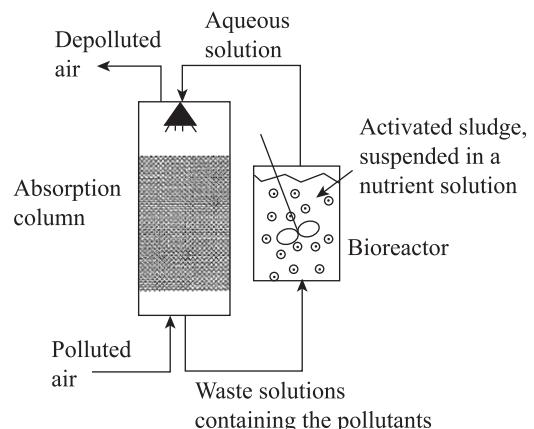


图 2 生物洗涤池工艺<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Schematics of a bioscruber process<sup>[3]</sup>

### 1.4 两相分配生物反应器

两相分配生物反应器(Two-phase partitioning bioreactors, TPPBs, 图 3)是在系统中增加一个与水不相容的非水相(液体溶剂或固体聚合物), 非水相对目标污染物有较强的亲和力, 从而提高了污染物尤其是疏水性 VOCs 和氧气的气液扩散速率, 解决了传统生物过滤反应器在处理挥发性有机物时经常遇到的传质限制问题, 并且通过降低毒性物质在水相中的浓度而减弱其对微生物细

胞的损害<sup>[7-9]</sup>。Bailon 等比较了单相和两相生物反应器去除二氯甲烷的性能, 在非水相(Silicone oil)存在的情况下, 连续搅拌罐生物反应器的最大去除能力可增加 300%, 二氯甲烷能够被彻底脱氯和矿化, 而且在施加负荷冲击时, 两相反反应器的去除性能稳定<sup>[10]</sup>。不过由于非水相物质价格昂贵、能源消耗大、易起泡沫等问题, TPPBs 的应用受到限制, 至今尚未有实际工程应用的报道。

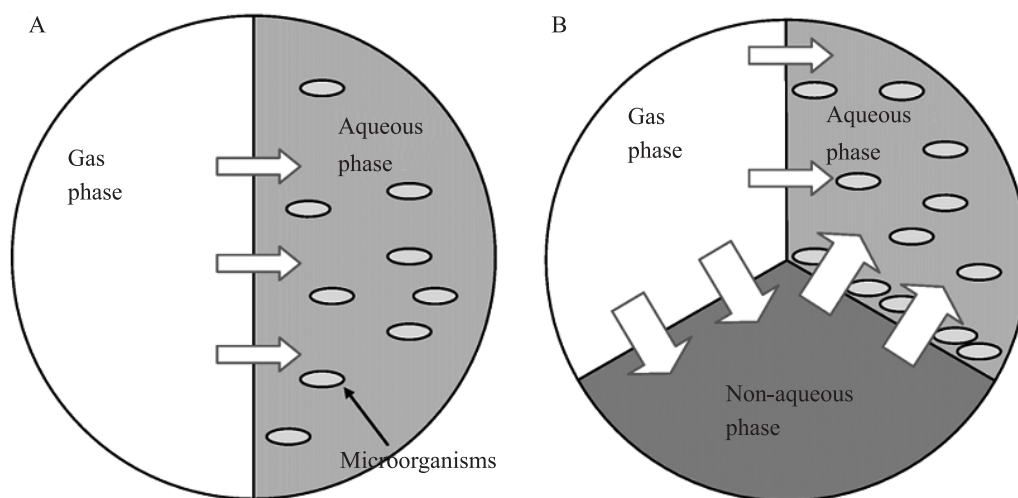


图 3 普通生物反应器(A)与两相反反应器(B)传质过程比较<sup>[8]</sup>

Fig. 3 Comparison of mass transfers in conventional bioreactor (A) and TPPBs (B)<sup>[8]</sup>

### 1.5 膜生物反应器

Kumar 等报道了膜生物反应器(Membrane bioreactor, MBR)的原理和在废气处理方面的应用<sup>[11-12]</sup>。在膜生物反应器中, 气相和液相由多孔膜所分开, 气体在浓度梯度的驱动下向膜的另一侧主动扩散, 微生物附着于膜的另一侧形成生物膜, 营养液从生物膜表面流过。膜介于气相和液相之间充当气液界面, 该界面具有较高的比表面积, 可显著提高传质效率(图 4)。因此, 膜反应器尤其适合处理水溶性低的化合物。独立的液相使得生物膜湿度的调节和降解产物的移除也变得容易, 因而避免了生物膜的失活<sup>[3]</sup>。但膜反应器

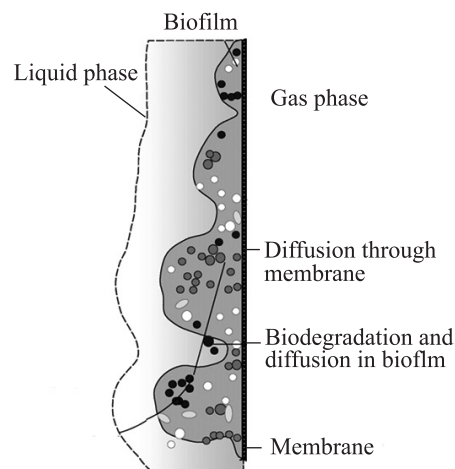


图 4 膜生物反应器中污染物的传质示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 4 A diagram of how pollutants transfer from gas phase to biofilm<sup>[11]</sup>

的缺点是价格昂贵,膜孔容易被过多的生物质堵塞,反应器长期运行的稳定性差。

## 1.6 复合反应器

生物过滤和传统的物理化学反应器结合使用是一种很好的选择。Lim 等的比较研究发现,生物滤池和光催化复合反应器对甲苯和乙醇的最大去除能力分别为  $130 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  和  $230 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , 远远高于仅用生物滤池所获得的去除能力[甲苯:  $40 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , 乙醇:  $130 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]<sup>[13]</sup>。先用光催化对混合 VOCs 进行预处理,可以降低毒性或相互抑制作用,从而增强生物过滤的效果<sup>[14-15]</sup>。单独利用光催化,虽然可以氧化一些生物降解性低的污染物,但会产生一些对健康或环境有害的副产物,如臭氧,但研究证明臭氧可以在后续的生物过滤系统中有效去除<sup>[16]</sup>。Moussavi 等证明光催化和生物过滤复合反应器在处理甲苯和邻-二甲苯混合废气时具有协同效益,苯和邻-二甲苯在光催化氧化作用下成为水溶性和易降解的中间代谢产物,并在生物反应器中彻底氧化,而臭氧能控制生物量的积累,预防填料堵塞<sup>[17]</sup>。

将活性炭吸附柱整合进生物过滤系统也是一种非常有效的做法,利用活性炭的吸附作用可以减弱进气负荷波动对生物过滤系统的影响。Cai 等设计了一种新颖的复合生物滴滤池,在生物滴滤池前置一个循环的活性炭吸附-解吸附床,在处理含有甲苯、苯乙烯、甲乙酮和甲基异丁基酮的混合 VOCs 时,循环床不仅可以作为负荷波动的缓冲单元,也能在生物滴滤池饥饿期间持续为微生物生长提供碳源<sup>[18]</sup>。Hassan 等的研究也证实,该循环床对负荷以矩形波形式波动的己烷和苯的混合气体也有很好的缓冲效果,增强了后续生物滴滤池的去除效率和稳定性<sup>[19]</sup>。

## 2 影响生物过滤效率的关键因素

### 2.1 填料

填料在生物过滤过程起着重要的作用,微生

物在填料载体表面附着生长,最终发育为生物膜,废气中污染物的去除主要依赖于组成生物膜的各种微生物的代谢作用。填料表征特性还影响着污染物在气相、液相和生物膜之间的扩散效率。因此,合适的填料对于提高生物过滤技术的效率和稳定性是一个关键性的因素,与微生物构成生物过滤系统的两个核心。选择填料时需要考虑的主要特征包括比表面积、孔隙率、pH、持水能力、缓冲能力和组成成分等。良好的填料应该具备以下特征:良好的持水能力,孔隙率高,足够大的比表面积以供微生物附着,耐压性好,密度低,同时具有一定的吸附能力和 pH 缓冲能力。填料有两类,有机填料和无机填料。堆肥、土壤、树皮、椰子纤维、泥炭土等<sup>[20-23]</sup>是最常用的有机填料,这些填料的多数指标符合要求,而且在当地市场容易获得。无机物有聚乙烯球、珍珠岩、火山岩、活性炭、橡胶粒<sup>[24-27]</sup>等。

填料含有适当的营养有助于生物量的增加。例如用吸附有硫化氢的废弃活性炭作为生物滴滤池填料,其中已吸附的硫可刺激硫氧化菌的生长,缩短驯化时间,并增强了生物滴滤池的去除负荷和稳定性<sup>[28-29]</sup>。与无机填料相比,有机填料由于微生物的降解作用,发生填料压实、孔隙率降低和填料层压力损失增加等现象,从而影响去除效果和使用寿命<sup>[30]</sup>。有机填料填装的生物过滤设备在营养消耗后去除率将会受到明显的影响<sup>[31]</sup>。

有机物和无机物组合在一起作为填料,结合了两材料的优点,填料的物理化学特征如亲水性、物理强度、持水力以及孔隙率等得到了很大程度的改进。不仅能为微生物的生长提供营养,还可维持合适的 pH 范围,防止酸化,增强耐用性能等。例如,在聚氨酯中添加淀粉,填料的亲水性、挂膜性能以及对 VOCs 的吸附能力因羟基基团的存在得到了增强,而且能为微生物的生长提供额外的碳源<sup>[32]</sup>。Dumont 等以碳酸钙、磷酸

和尿素为原料,合成了一种称作 UP20 的添加剂(C:N:P 摩尔比为 100:5:1),与泥炭土混合使用,显著提高了生物滤池对硫化氢的去除能力<sup>[33]</sup>。另外, Yasuda 等报道了一个装填石棉、沸石和干鸡粪混合填料的全尺寸生物滤池能有效去除畜禽粪便堆肥过程产生的  $\text{NH}_3$ , 填料中的有机物可增强反硝化活性,促进  $\text{NO}_3^-$  转化为  $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[34]</sup>。作者单位报道了一种混合填料,处理负荷显著高于单一填料,生物反应器能在负荷冲击和短时闲置后迅速恢复去除能力<sup>[35]</sup>。

## 2.2 营养

微生物新陈代谢需要营养,如碳、氮、磷、钾、硫以及微量元素和维生素等,营养的缺乏可导致去除效率的显著下降。例如, Aizpuru 等发现在 2 个不同孔隙率的拉西环生物过滤去除甲苯的实验中,营养供给速率增加,甲苯的去除负荷显著增加,当营养供给速率从每 4 天补充一次(80 mL/min 循环 30 min)的频率增加至每天补充一次时,甲苯的去除负荷分别从 170 和 115  $\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  增加至 275 和 185  $\text{g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ <sup>[36]</sup>。上述营养元素中,氮源浓度往往是影响生物滤池长期效率的关键性的限制因素。对于一定的进气负荷,必须保证相应比例的氮源,但过高的营养浓度可能会使盐离子积累,从而对微生物的活性产生负面的影响<sup>[37]</sup>。生物过滤系统经常会因为生物量的过度增加而导致填料堵塞,压降上升,适当保持氮源水平,也能有效控制生物量的增长<sup>[38]</sup>。对于氮源种类而言, Prado 等认为对多数微生物来说,吸收硝态氮比氨态氮要困难一些,使用氨态氮,将使较广泛的微生物在生物膜中发育,导致生物量过多而堵塞填料,同时填料中 pH 的下降也比使用硝态氮时更强烈,酸性环境会抑制微生物的活性,除非利用耐酸性微生物<sup>[39]</sup>。

## 2.3 传质过程

根据 Lobo 等的推测,污染物在生物过滤反

应器中的去除过程包括以下步骤: (1) 污染物从气相中转移至气液界面; (2) 在液体中溶解; (3) 从气液界面转移至液体中; (4) 再从液体转移至液体-生物膜界面; (5) 最后在生物膜中扩散和生物降解<sup>[40]</sup>。在生物滴滤池中,含有培养基的液相从顶部以一定流速均匀滴滤至填料床,气相中的污染物首先溶解于液相,然后扩散至生物膜,由微生物降解或转化。因此,生物过滤效率不仅决定于生物降解速率,而且与污染物在气相和液相中的传质速率有关。对于如何界定生物过滤效率的下降是否由传质过程还是生物降解过程引起的, Lobo 等定义了有效因子  $\eta_0$ , 通过测定气相和液相中污染物的浓度,可以计算出有效因子,根据有效因子的值可以确定生物过滤过程中的限速步骤<sup>[40-41]</sup>。填料、气体流速和液体流速是影响污染物传质效率的重要因素。液体流速过大,减少了填料孔隙率,增加了污染物、氧气等的传质阻力,并造成填料床形成局部的厌氧区,影响生物过滤性能。Lee 等发现,液体滴滤速率超过 0.8 m/h 后,珍珠岩生物滴滤池对乙烯的去除明显下降,为保证最佳的去除效果,液体滴滤速率不应超过 0.4 m/h<sup>[42]</sup>。气体流速增加,能驱动更多的气体进入到填料中较细微的空隙,提高填料空隙的利用率。气体流速增加,如要保持填料体积和停留时间不变,需要适当增加填料层的高度。Kim 等系统比较了不同填料在气体流速范围为 100-8 000 m/h、液体流速在 0.1-12 m/h 范围内的传质系数,气膜传质系数随着气体流速、液体流速的增加而增加,但液膜传质系数主要决定于液体流速。填料比表面积也是影响气膜传质系数的重要因素,比表面积大的填料,为气液接触提供了更多的界面和机会<sup>[43]</sup>。

## 2.4 微生物

废气中的污染主要是依靠微生物的生理代谢作用而去除的,不同种群的微生物附着在填料表

面,形成一定厚度的生物膜。因此,维持系统中足够多的生物量是保证生物过滤效率的前提条件。生物过滤系统中的微生物来源有活性污泥、富集的培养物、纯菌等,有机填料中的土著微生物也是重要来源。

接种污泥是一种方便的选择,活性污泥含有丰富的微生物,能降解广泛的污染物。如以堆肥和聚苯乙烯为填料,接种活性污泥的生物滤池对乙醇的去除能力为  $195 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ <sup>[44]</sup>。对于难降解的物质,利用相应的降解菌种能有效提高去除能力,缩短微生物的驯化时间,改善生物反应器的去除性能和稳定性。Zilli 等在以泥炭土和玻璃珠为填料的生物滤池中接种了甲苯降解菌,处理性能得到明显提高,甲苯去除能力达到  $242 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ <sup>[45]</sup>。另一个用苯乙烯降解菌 *Brevibacillus* sp. 为唯一接种物的生物滤池对苯乙烯的去除能力为  $125 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ <sup>[46]</sup>, 而用污泥接种的生物滤池苯乙烯去除能力为  $45 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ <sup>[47]</sup>。还原性硫化化合物的最终生物降解产物是硫酸,硫酸的产生可导致系统中 pH 的急剧下降,抑制微生物的活性,而利用嗜酸性硫氧化菌往往能取得理想的效果。Aroca 等比较了分别接种 *Thiobacillus thioparus* 和 *Acidithiobacillus thiooxidans* 的生物滴滤池,前者控制 pH 在中性条件下,后者不加调节,其它条件相同,结果发现,虽然接种 *Acidithiobacillus thiooxidans* 的生物滴滤池在酸性条件下运行,但其对硫化氢的最大去除能力远高于接种 *Thiobacillus thioparus* 的生物滴滤池,可达到  $370 \text{ g S}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ <sup>[48]</sup>。Li 等利用焦磷酸测序技术分析酸性条件下生物滴滤池的微生物群落结构,发现 *Thiomonas* 和 *Acidithiobacillus* 菌属的细菌在处理市政污水厂恶臭气体的生物滴滤池中逐步发展为优势微生物, *Acidithiobacillus* 显著增强了生物滴滤池的稳定性<sup>[49]</sup>。

大多数的生物滤池接种以细菌为主的微生物,尽管有很多成功的案例,但也有学者发现当环境条件变得恶劣时(如填料干燥、pH 下降),基于细菌的生物滤池的去除性能可能会逐步降低。而与细菌相比,真菌表现出较强的耐受干燥、酸化、负荷波动等不利的环境条件。Maestre 等利用 4 四个分别装填椰子纤维、堆肥、泥炭土和松树叶的生物滴滤池在处理甲苯气体时,当生物滤池的渗滤液 pH 逐步下降时,反应器中的微生物种群从以细菌为主转变为真菌成为优势降解菌<sup>[50]</sup>。另外,由于疏水性物质在液相生物膜中的溶解度低,该类化合物的去除对于细菌生物滤池而言相对困难。但真菌疏水性的气生菌丝可以与废气中的化合物直接接触,从而使得真菌对疏水性物质的吸收因传输面积的增加而更加容易<sup>[51-53]</sup>。因而,真菌生物滤池在处理疏水性化合物时比细菌生物滤池更具优势。但截止目前,仅有少量有关真菌生物滤池的报道。Jin 等分离了一株真菌 (*Ophiostoma*) 并将其用于生物滤池中,分析了气体流速、进气浓度、温度、相对湿度以及负荷冲击和氮源种类对  $\alpha$ -萜烯去除的影响,当负荷为  $100 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  时,去除率接近 100%<sup>[54-55]</sup>。Zhu 等研究了负荷、停留时间和 pH 对真菌生物滤池处理乙硫醇效率的影响,当负荷为  $50 \text{ g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$  时,95% 的乙硫醇得到去除<sup>[56]</sup>。由丁基乙酸、甲乙酮、甲基丙基酮和甲苯模拟的油漆废气在真菌生物滤池中也证明能得到有效和稳定的去除<sup>[57]</sup>。

利用真菌生物滤池也有某些缺点,如真菌生长比细菌慢,菌丝的蔓延生长可能导致孔隙堵塞和压降上升等。Vergara-Fernandez 等发现,在启动期,提供生物可利用性更好的碳源,能快速增加真菌的生物量,从而显著降低真菌生物滤池对疏水性 VOCs 的驯化时间<sup>[58]</sup>。对于填料堵塞的问题, Aizpuru 等发现,选择孔隙率大的拉西环,同



时保持较低含水量, 不仅能获得较高的去除负荷, 压降也能维持在较低的水平<sup>[36]</sup>。

### 3 结语

在国内, 生物过滤技术正逐步广泛地应用于废气污染治理, 根据实际工程所遇到的问题, 建议加强以下几方面的研究: (1) 工业废气中往往混杂有多种成分, 单一组分的废气少见, 开展多组分废气生物过滤过程及条件的研究更具实践指导意义; (2) 深入研究生物过滤过程中功能微生物的组成及其与工艺条件的互作关系; (3) 填料的表征与传质速率和生物降解速率之间的关系。

### 参考文献

- [1] Groenestijn JV, Kraakman NR. Recent developments in biological waste gas purification in Europe[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 113(2/3): 85-91.
- [2] Delhoméie MC, Heitz M. Biofiltration of air: a review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2005, 25(1/2): 53-72.
- [3] Mudliar S, Giri B, Padoley K, et al. Bioreactors for treatment of VOCs and odours-a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(5): 1039-1054.
- [4] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 EC-排放清单不确定性研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 305-312.
- [5] Paca J, Halecky M, Misiaczek O, et al. Biofiltration of paint solvent mixtures in two reactor types: overloading by polar components[J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2012, 47(7): 1036-1045.
- [6] Rocha-Rios J, Muñoz R, Revah S. Effect of silicone oil fraction and stirring rate on methane degradation in a stirred tank reactor[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, 85(3): 314-319.
- [7] Quijano G, Hernández M, Thalasso F, et al. Two-phase partitioning bioreactors in environmental biotechnology[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 84(5): 829-846.
- [8] Muñoz R, Villaverde S, Guieysse B, et al. Two-phase partitioning bioreactors for treatment of volatile organic compounds[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(4): 410-422.
- [9] Hernández M, Quijano G, Muñoz R, et al. Modeling of VOC mass transfer in two-liquid phase stirred tank, biotrickling filter and airlift reactors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 172(2/3): 961-969.
- [10] Bailón L, Nikolausz M, Kästner M, et al. Removal of dichloromethane from waste gases in one- and two-liquid-phase stirred tank bioreactors and biotrickling filters[J]. *Water Research*, 2009, 43(1): 11-20.
- [11] Kumar A, Dewulf J, Langenhove HV. Membrane-based biological waste gas treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 136(2/3): 82-91.
- [12] Kumar A, Dewulf J, Vercruyssen A, et al. Performance of a composite membrane bioreactor treating toluene vapors: inocula selection, reactor performance and behavior under transient conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(8): 2381-2387.
- [13] Lim KH, Park SW, Lee EJ, et al. Treatment of mixed solvent vapors with hybrid system composed of biofilter and photo-catalytic reactor[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2005, 22(1): 70-79.
- [14] Wang C, Xi JY, Hu HY, et al. Advantages of combined UV photodegradation and biofiltration processes to treat gaseous chlorobenzene[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1/3): 1120-1125.
- [15] 成卓韦, 林雯雯, 蒋轶锋, 等. 利用紫外预处理加强氯苯的生物滴滤净化[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1160-1166.
- [16] Wang C, Jy X, Hu HY. A novel integrated UV-biofilter system to treat high concentration of gaseous chlorobenzene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(17): 2712-2716.
- [17] Moussavi G, Mohseni M. Using UV pretreatment to enhance biofiltration of mixtures of aromatic



- VOCs[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144(1/2): 59–66.
- [18] Cai ZL, George AS. Treatment of dynamic VOC mixture in a trickling-bed air biofilter integrated with cyclic adsorption/desorption beds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 151(1/3): 105–112.
- [19] Aly Hassan A, Sorial GA. Treatment of dynamic mixture of hexane and benzene vapors in a Trickle Bed Air Biofilter integrated with cyclic adsorption/desorption beds[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(4): 521–528.
- [20] Pandey RA, Joshi PR, Mudliar SN, et al. Biological treatment of waste gas containing mixture of monochlorobenzene (MCB) and benzene in a bench scale biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5168–5174.
- [21] Yang L, Wang X, Funk TL, et al. Biofilter media characterization and airflow resistance test[J]. *Transactions of the Asabe*, 2011, 54(3): 1127–1136.
- [22] Chmiel K, Palica M, Jarzebski A. Analysis of butanol biofiltration over the pine tree bark bed[J]. *Inzynieria Chemiczna i Procesowa*, 2003, 24(4): 677–684.
- [23] Yani M, Hirai M, Shoda M. Removal kinetics of ammonia by peat biofilter seeded with night soil sludge[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1998, 85(5): 502–506.
- [24] Park J, Evans EA, Ellis TG. Development of a biofilter with tire-derived rubber particle media for Hydrogen sulfide odor removal[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, 215(1/4): 145–153.
- [25] Hejazi P, Borenberg F, Isik G, et al. Treatment of alpha-pinene-contaminated air using silicone oil-coated perlite biofilter[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2010, 29(3): 313–318.
- [26] Jeong GT, Lee GY, Cha JM, et al. Comparison of packing materials in biofilter system for the biological removal of Hydrogen sulfide: polypropylene fibrils and volcanic stone[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2008, 25(1): 118–123.
- [27] Babbitt CW, Pacheco A, Lindner AS. Methanol removal efficiency and bacterial diversity of an activated carbon biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(24): 6207–6216.
- [28] Jiang X, Yan R, Jay JH. Reusing H<sub>2</sub>S-exhausted carbon as packing material for odor biofiltration[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(5): 698–704.
- [29] Jiang X, Tay JH. Removal mechanisms of H<sub>2</sub>S using exhausted carbon in biofiltration[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2/3): 1543–1549.
- [30] Akdeniz N, Janni KA, Salnikov IA. Biofilter performance of pine nuggets and lava rock as media[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(8): 4974–4980.
- [31] Cho E, Galera MM, Lorenzana A, et al. Ethylbenzene, o-xylene, and BTEX removal by *spingomonas* sp. D3K1 in rock wool-compost biofilters[J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(1): 45–52.
- [32] Gutiérrez-Acosta OB, Arriaga S, Escobar-Barrios VA, et al. Performance of innovative PU-foam and natural fiber-based composites for the biofiltration of a mixture of volatile organic compounds by a fungal biofilm[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 201-202: 202–208.
- [33] Dumont E, Andres Y. Evaluation of innovative packing materials for the biodegradation of H<sub>2</sub>S: a comparative study[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, 85(3): 429–434.
- [34] Yasuda T, Kuroda K, Fukumoto Y, et al. Evaluation of full-scale biofilter with rockwool mixture treating ammonia gas from livestock manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(4): 1568–1572.
- [35] Sun DF, Li JJ, An TC, et al. Evaluation of the performance of structured mixed packing and inert packing materials in toluene biotrickle-filtration[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2011, 16(5): 1009–1018.
- [36] Aizpuru A, Dunat B, Christen P, et al. Fungal biofiltration of toluene on ceramic rings[J]. *Journal of Environmental Engineering-asce*, 2005, 131(3): 396–402.
- [37] Mathur AK, Majumder CB, Chatterjee S. Combined removal of BTEX in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(1/2): 64–74.

- [38] Delhoménie MC, Bibeau L, Gendron J, et al. A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2003, 94(3): 211–222.
- [39] Prado OJ, Veiga MC, Kennes C. Effect of key parameters on the removal of formaldehyde and methanol in gas-phase biotrickling filters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(3): 543–548.
- [40] Lobo R, Revah S, Viveros-garcia T. An analysis of a trickle-bed bioreactor: carbon disulfide removal[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1999, 63(1): 98–109.
- [41] Sudeep CP, Deshusses MA. Analysis of the rate-limiting step of an anaerobic biotrickling filter removing TCE vapors[J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45(4): 549–555.
- [42] Lee SH, Li CN, Albert JH, et al. Ethylene removal using biotrickling filters: Part I. Experimental description[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 158(2): 79–88.
- [43] Kim S, Deshusses MA. Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control. 1. Experimental results[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(4): 841–855.
- [44] Arulneyam D, Swaminathan T. Biodegradation of ethanol vapour in a biofilter[J]. *Bioprocess Engineering*, 2000, 22(1): 63–67.
- [45] Zilli M, Del Borghi A, Converti A. Toluene vapour removal in a laboratory-scale biofilter[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2000, 54(2): 248–254.
- [46] Hwang JW, Choi CY, Park S, et al. Biodegradation of gaseous styrene by *Brevibacillus* sp. using a novel agitating biotrickling filter[J]. *Biotechnology Letters*, 2008, 30(7): 1207–1212.
- [47] Dehghanzadeh R, Torkian A, Bina B, et al. Biodegradation of styrene laden waste gas stream using a compost-based biofilter[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(3): 434–439.
- [48] Aroca G, Urrutia H, Nunez D, et al. Comparison on the removal of Hydrogen sulfide in biotrickling filters inoculated with *Thiobacillus thioparus* and *Acidithiobacillus thiooxidans*[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2007, 10(4): 514–520.
- [49] Li J, Ye G, Sun D, et al. Performances of two biotrickling filters in treating H<sub>2</sub>S-containing waste gases and analysis of corresponding bacterial communities by pyrosequencing[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 95(6): 1633–1641.
- [50] Maestre JP, Gamisans X, Gabriel D, et al. Fungal biofilters for toluene biofiltration: evaluation of the performance with four packing materials under different operating conditions[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(4): 684–692.
- [51] Qi B, Moe WM, Kinney KA. Biodegradation of volatile organic compounds by five fungal species[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, 58(5): 684–689.
- [52] Vergara-Fernández A, Hernández S, Revah S. Phenomenological model of fungal biofilters for the abatement of hydrophobic VOCs[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 101(6): 1182–1192.
- [53] Arriaga S, Revah S. Improving hexane removal by enhancing fungal development in a microbial consortium biofilter[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 90(1): 107–115.
- [54] Jin YM, María CV, Kennes C. Performance optimization of the fungal biodegradation of  $\alpha$ -pinene in gas-phase biofilter[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(8): 1722–1728.
- [55] Jin Y, Guo L, Veiga MC, et al. Fungal biofiltration of alpha-pinene: effects of temperature, relative humidity, and transient loads[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, 96(3): 433–443.
- [56] Zhu GY, Liu JX. Investigation of factors on a fungal biofilter to treat waste gas with ethyl mercaptan[J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2004, 16(6): 898–900.
- [57] Qi B, Wm M, Kinney KA. Treatment of paint spray booth off-gases in a fungal biofilter[J]. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 2005, 131(2): 180–189.
- [58] Vergara-Fernández A, Hernández S, Revah S. Elimination of hydrophobic volatile organic compounds in fungal biofilters: reducing start-up time using different Carbon sources[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2011, 108(4): 758–765.