

A Review of Biofilter for Treatment of VOCs and Odours*

Xiaoliang Chen¹, Xiang Dai², Xin Wang², Yulei Meng³, Beidou Xi⁴, Shiping Wang^{1#}

¹College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing

²Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing

³Aerospace Capital Co., Ltd., Beijing

⁴Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing

Email: pieroo@126.com, #Wang74447@163.com

Received: Nov. 8th, 2011; revised: Nov. 22nd, 2011; accepted: Dec. 7th, 2011.

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) and odorous compounds discharged into the environment create ecological and health hazards. In the recent past, biological waste air treatment processes using bio-reactors have gained popularity in control of VOCs and odour, since they offer a cost effective and environment friendly alternative to conventional air pollution control technologies. This review provides an overview of the biofilters that are used in VOC and odour abatement, along with details on their configuration and design, mechanism of operation, insights into the microbial biodegradation process and future R&D needs in this area.

Keywords: VOC; Odor; Biofilter

生物滤池在处理 VOCs 和异味气体中的应用研究进展*

陈晓亮¹, 戴祥², 王欣², 孟瑜磊³, 席北斗⁴, 王世平^{1#}

¹中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京

²中国环境保护部, 北京

³航天投资控股有限公司, 北京

⁴中国环境科学研究院, 北京

Email: pieroo@126.com, #Wang74447@163.com

收稿日期: 2011年11月8日; 修回日期: 2011年11月22日; 录用日期: 2011年12月7日

摘要: 挥发性有机物(VOCs)和异味气体的排放对生态环境和人类健康都会造成极大的危害。生物处理方法与传统方法相比不仅节省资源而且对环境污染少, 在处理 VOCs 和异味气体领域备受推崇, 其中生物滤池法更是一种简便有效的方式。本文对用于 VOCs 和异味气体处理的生物滤池法的各项参数、构造、生物降解过程及未来发展需求等方面进行了综述。

关键词: VOC; 异味气体; 生物滤池

1. 引言

挥发性有机物(VOCs)和异味气体不仅对人类健康造成了危害, 也对环境造成了污染。随着人口的增

加和工业的发展, 急需能够净化 VOCs 和异味气体的设备, 同时迫切需要政府针对环境问题立法, 督促企业对废气进行处理达到排放标准。与传统的物理和化学处理方式相比, 生物处理比传统的焚烧、吸附法不仅更节省资源而且对环境污染少, 拥有巨大的优势, 因此备受推崇^[1-3]。

*基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划(2009BAD2B02)。

#通讯作者。

根据要处理的废气的种类及处理量的要求,产生了几种不同的生物反应器,在工业释放的可挥发性有机物和气味处理中扮演了很重要的角色。尽管有很多构造不同的生物反应器,但常规的类型主要包括生物滤池、生物滴滤器和生物洗涤器。新型生物反应器如近些年发明的生物膜反应器^[3-5]。尽管不同的生物反应器废气处理的基本机理都是相似的,但在微生物的使用(如生物膜的形成)、填充介质、污染物的浓度等方面仍然存在不同。

本文针对生物滤池的优缺点、重要参数、生物降解过程及未来发展需求等方面进行了综述。

2. 生物滤池(Biofilter, BFs)

生物滤池是使潮湿的污染空气通过生长有能够降解污染物的微生物的多孔填充床,达到臭气处理目的的一种装置(图 1)。污染气体通过多孔填充介质时,接触到介质中微生物形成的生物膜,在膜上发生生物氧化作用。

生物滤池被广泛地用来处理工业废气、城市废气中多种有机和无机污染物。过去,生物滤池常被用来处理污水处理厂和垃圾堆埋区的异味气体,近年来在多种挥发性有机物和异味处理中得到广泛应用,异味气体如氨、硫化氢、硫醇、二硫化物等, VOCs 如丙烷、丁烷、苯乙烯、苯酚、氯化乙烯、甲醇等。小试规模和中试规模的实验证明生物滤池能够处理 189 种危害性空气污染物(HAPs)中的 60 种^[1,3]。

生物滤池是处理含有低浓度挥发性有机物或异味气体的空气流较大的典型装置,它的优缺点如表 1 所述。

Table 1. Merits and demerits of biofilter
表 1. 生物滤池优缺点

优点	缺点
成本较低 (操作费用和建设费用较低)	悬浮颗粒可能引起介质阻塞
压力损失小	介质退化问题
能够处理含有低浓度挥发性有机物或异味气体的大量空气	处理高浓度污染物时效率低
不产生二次污染气体	湿度和 pH 难以控制

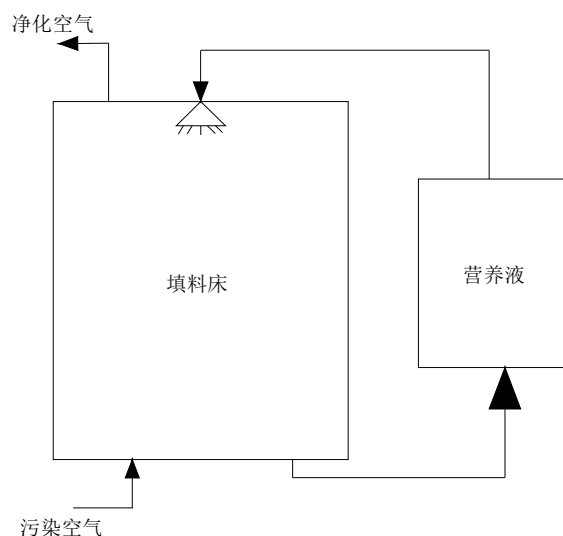


Figure 1. Schematics of a biofilter unit
图 1. 生物滤池结构

用来处理 VOC 和异味气体的生物滤池有两种不同设计模式。开放式设计的生物滤池采用上升气流,安置在产生 VOC/异味气体装置的外部。这样的反应器需要较大的空间,同时易受天气气候改变的影响。密闭式设计采用上升或下降气流,安置在密闭的空间内,相比开放式设计,需要较小的空间。

3. 生物过滤过程

生物过滤过程包括几个过程,首先是废气从气相传送到水相中,然后进入介质或生物膜,最后在生物膜中完成 VOC/异味气体的生物降解^[1]。影响生物过滤过程的较为重要的物理、化学和生物学参数主要包括以下几方面。

3.1. 污染物的传质和分离

生物过滤进程的第一步是把污染物从空气中转移到水相中,这不是一个限速步骤,因此常假定气液两相处于平衡状态。采用亨利法则分离平衡时空气和水,公式如下:

$$C_{gi} = H_i C_{li}$$

C_{gi} ——气相中污染物 i 的浓度, H_i ——亨利系数, C_{li} ——i 在液相中的浓度。

由于采用无因次的亨利系数,不同的报道中关于亨利系数的描述不同,若物质的亨利系数超过 0.01 则认为是易挥发的,并且亨利系数越高,此物质在水中

的溶解性越低。比如,报道中称氨在 25°C 下的无因次亨利系数为 0.0005,硫化氢为 0.92。亨利系数决定于液相温度和化学势^[3]。

一般来说,生物滤池的处理能力随着亨利法则常数的升高而下降,因为这表明了气体在发生生物降解作用的液相和生物膜相中溶解度发生下降。

3.2. 生物膜

生物膜是生物滤池的关键因素,因为挥发性有机物和异味气体的生物降解作用正是在生物膜中进行的。生物膜是微生物在载体表面生长形成的,能够实现异化反应从而将污染物转变为无害的产物。

生物膜受很多因素影响,其中包括污染物的类别、通过生物滤池的气流比例、使用的填料、所使用装置的设计和构成等。生物膜厚度从 10 μm 到 1 cm 不等,通常观测到的平均厚度为 1 mm 或稍低^[6]。反应强度随着膜厚度的增加而增大,直至称之为“活性厚度”的等级时达到最大。超过这个等级,营养物质的扩散就变成了限制因素^[1]。同时有报道不同的稳态和动力学数学模型用以预测生物膜中基质、氧气、营养物质渗透概况,以便于评估生物膜整体效率因素^[6-8]。

3.3. 生物滤池填料床

填料床是生物过滤的核心部分,因为它提供了微生物生长的条件。Bohn 证明了理想的填料床应有的特点^[9],其中最重要的特点包括:1) 高的比表面积用于生物膜的形成和气膜间的传质过程;2) 高的孔隙率便于气体的相似分散;3) 较好的持水性以防止填料床过干;4) 可利用的固有的营养物质;5) 存在高密度和多样性的微生物区系。

泥炭、土壤、堆肥和木屑是最常用的填料。这些材料符合大部分的描述特点,并且成本低、便于寻找。这其中每一种材料都有各自的优缺点。土壤的最大优点是提供了丰富和多样性的微生物菌群,但却只含有很少的营养物质可供利用,且比表面积较小、底部的压力较大^[10]。泥炭中含有丰富的有机质,且比表面积大、持水性好、渗透性好,但与土壤或堆肥相比,泥炭中矿物质含量和微生物菌群多样性较差。堆肥是生物过滤中最常用的填料,因为堆肥有高密度、多样性

好的微生物菌群,较好的持水性,较好的气体渗透性以及大量的营养物质,此外,这也是一条循环利用废弃有机资源的良好途径,比如用废水处理厂的污泥、森林产品(树枝、树叶、树皮)、家庭残渣等^[11],但相比土壤或泥炭较容易碎裂而变得紧实,堆肥不够稳定,容易引起填料床的降压过大,这与其他一些现象共同造成了它的高持水性。一些学者应用木屑或者树皮作为填料进行了研究^[12-15]。但大多数研究者都认为用这些过滤材料不如堆肥和泥炭结果理想,这被认为是 pH 缓冲能力、低比表面积和低营养物质含量等的影响。尽管有这样的不同,木屑与泥炭或堆肥联合的方式仍然在生物过滤中得到的广泛的应用。

为了防止填料垮塌和压实,多数研究者建议填料应易于保持且较坚固,进而延迟堵塞现象的出现,从而延长填料床的使用寿命。实际的研究案例中用各种不同的填料,如木屑^[16]、珍珠岩^[17]、蛭石^[18]、玻璃珠^[19]、聚氨酯泡沫塑料^[20]、聚苯乙烯^[21]、熔岩^[22]等。Ibrahim 等人将活性污泥固定在凝胶珠上构成填料^[23]。

生物过滤对于污染物的处理效率是通过吸收系数或者分配系数表示的。Tang、Hwang 等人报道中甲苯在堆肥填料中分离系数为 1.43 mg·g⁻¹,硅藻填料中分离系数为 2.00 mg·g⁻¹,谷壳填料中分离系数为 0.89 mg·g⁻¹^[24]。填料床中的含有活性炭(颗粒状或粉状)能够使甲苯的吸收系数提高 10~20 倍(颗粒状活性炭中甲苯吸附系数为 50.6 mg·g⁻¹)^[24,25]。研究表明添加活性炭能够提高生物过滤的讲解能力^[26],清除疏水组分,并且能够更好地控制负荷变化^[27]。

3.4. 含氧量

在生物过滤过程中,含氧量扮演了重要的角色,从不同研究者关于氧含量对生物过滤影响研究中可得出具体的细节。Shareefdeen^[28]等人在 1997 年研究中用富含氧气的空气提高了生物过滤的效率,从而论证了氧气是一个限制因素。另一项研究中,Deshusses^[29]等研究表明当提高空气中氧气含量时,未能显著提高同时处理甲基乙基酮和甲基异丁酮的效率。这项研究显著交叉抑制两种物质的生物降解现象表明动力学效应比扩散效应更为重要。这是一项短期实验,利用注射器分别将两种组分注射进生物滤池,同时观察交叉抑制和单独抑制现象。因此,生物过滤中氧气的角

色趋近特定。对于高性能的生物滤池或当较厚的生物膜存在时, 氧气的影响愈发突出^[30]。

在大多数的应用中, 生物过滤过程都极力避免厌氧环境, 这是因为即使存在微厌氧环境, 也能导致产生异味气体, 而这背离了减少异味气体和 VOCs 的总体目标。但一些研究表明生物滤池中存在偶然产生的厌氧微环境条件能够帮助降解有机污染物^[28]。

3.5. 营养物质

进入生物滤池的污染物形成了微生物活动的主要碳源和能量来源, 氢和氧能够从空气、生长介质、有时从 VOCs 中获得, 其它的主要营养素(N、P、K、S)和微量元素(维生素、金属元素)则能够部分的从填料中获得, 例如污泥中含有多种营养素。

前人研究已经证明除填料之外, 为了保持适宜的微生物降解活性, 持续地添加一定的营养物质是必须的。比如, 有研究证明长时间持续使用堆肥填料床会使自带的营养物质逐渐耗尽^[31]。营养物质的逐渐缺失就成了生物滤池长时间使用的限制因素^[32,33]。

研究已经证明营养物质供应的生物过滤模型, 特别是氮源供应的模型的可行性^[8,32-35]。供微生物生长所需的营养物质主要有两种形式, 一种是固体形态, 直接添加到填料床中^[36], 或者是溶液形式, 溶液形式的应用更为广泛。Wu^[37]等人比较了生物过滤中最常用的营养物质, 包括 KH_2PO_4 、 $\text{Na}_x\text{H}_{(3-x)}\text{PO}_4$ 、 KNO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4Cl 、 NH_4HCO_3 、 CaCl_2 、 MgSO_4 、 MnSO_4 、 FeSO_4 、 Na_2MoO_4 、维生素 B_1 等。考虑到营养元素的多样性以及影响微生物生长的成分的不同, 生物过滤所需的营养物质选择是很具有挑战性的研究领域。

3.6. PH

与很多的生物过程类似, pH 对生物过滤效率有重要影响。高于或低于最适 pH 值, 微生物的活性都会受到影响。生物过滤中绝大多数微生物都是嗜中性的, 最适 pH 为 7。Lu^[38]等人研究表明苯系物的降解作用强度达到最大的 pH 适宜范围为 7.5~8.0。Lee^[39]等也报道苯系物降解的适宜 pH 为 7.0。Veiga^[40]等研究了不同的 pH(3.5~7.0)对烷基苯降解作用的影响, 结果表明降解作用随着 pH 升高而增强。Arnold^[41]等证明中性环境能够提高苯乙烯的去除。

VOCs 中含有杂原子(S、O、N)的气体, 会转变为酸性物质而使 pH 降低^[42], 进而影响微生物生长, 并会引起气流下行管道的腐蚀^[43]。很多学者观察到类似的结果^[3,44]。Kennes^[45]等研究报道在生物滤池中使用的有机填料中, 土壤具有最好的 pH 缓冲能力, 其次是堆肥和木屑。泥炭本身呈酸性(pH 3.0~4.0), 且缓冲能力差。很多学者进行了在填料中添加缓冲材料以保持 pH 在中性的研究, 例如碳酸钙^[12,13]、白云石^[14]。也可以通过用含 pH 缓冲液的营养液淋洗填料得以控制, 如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaOH ^[19]、 NaHCO_3 ^[24]、尿素^[46]等。

3.7. 含水率

含水率是生物过滤的关键因素, 因为微生物需要水分实现正常的新陈代谢过程。非最优的水分含量条件会导致填料床的干涸和裂缝, 进而导致沟流和短流效应^[3]。微生物缺水会引起生物降解效率的显著降低, 而水分过多则会引起氧气和疏水污染物向生物膜的传质过程, 进而在填料床中形成缺氧区限制反应效率。水分含量太高会由于缺氧而导致污臭气体的排放, 由于孔隙体积而引起反压升高, 以及填料床中气体的沟流效应。

最适的含水率因不同的填料而不同, 主要与介质、比表面积、多孔性等因素有关。生物滤池的最适含水率应在 30%~60%(以重量计), 取决于所用的介质。保持含水率主要有通过对进入气体进行预湿, 或通过填料床顶部的洒水装置淋湿。先进的控制措施主要是感应器测定填料床重量进而控制洒水装置。由于生物氧化过程是一个放热反应, 进而可能导致填料床的干涸, 因此需要追加补水。填料的干涸会导致干涸点的局部扩大, 同样导致气体分配不均和微生物活性降低^[3]。最近的研究表明生物滤池的进气口会经受干燥气体, 随着时间推移引起处理效率的下降^[47]。

进气口温度和相对湿度的变化以及污染物氧化过程的放热都会导致填料的干燥, 因此要控制含水率, 需要对此有更好的理解。目前, 有很多研究干燥程度以及对生物过滤的影响的模型, 通过对污染物的浓度、相对空气湿度、温度、介质水分含量的研究, 预测填料中水分散失, 从而得出代谢产热、进气口气流相对湿度变化、生物过滤效率降低程度等实验结果^[1,8,48,49]。

3.8. 微生物

微生物是生物降解 VOCs 和异味气体的催化剂。对 VOCs 的降解过程中,大量研究证明多为异养微生物(多数为细菌和真菌)。填料中的接种量决定于填料的自身特性和微生物对所要处理的 VOCs 的降解能力。很多研究者都喜欢利用在填料床上生长较好的生态系统^[32,33,46,50]。经过适应期后,对 VOC 的抗性菌种能够被自然的选择出来,然后在填料床中对其进行评估。其它研究中(如对玩抗性 VOCs),研究者在填料床上接种从污泥中分离得到的或商业购买的或之前生物滤池中分离得到的菌种,一般情况下,生物滤池中细菌和放线菌的生物量密度应达到 106~1010 cfu/g^[51]。Pedersen 等人以及 Delhomenie 等分别报道了生物滤池中具有降解作用的菌种约占总微生物种类的 1%~15%^[33,52,53]。

3.9. 生物膜结构

VOC 的去除是同时发生在生物膜上的很多相互依赖的反应共同作用的结果。目前为止,只有很少关于生物过滤过程中生物膜结构的信息。之前的研究焦点集中在激光显微镜显示无细胞通道,它是由膜——水分离面向下延伸而形成的,能够加快污染物和氧气的传质过程^[54]。用来表征生物膜宏观体系的新技术是计算机辅助 X 射线断层摄影技术(CAT)^[28]。应用 CAT 扫描处理甲苯的生物膜,发现含有大量固定在聚苯乙烯鲍尔环上的生物膜呈现不均匀分布,而其他区域生物膜厚度小于 1 mm。进一步的图像解析显示空气/水通道大小在 5~380 mm²。未来研究中,高分辨率 CAT 扫描技术能够对生物膜结构的分析起到显著作用,这就能加深对污染物传质过程的理解,最终设计形成更为优良的填料^[28]。

4. 结论与展望

生物滤池已经被证明是一项节能、费用低、能够处理一系列排放气体包括 VOCs 和异味气体的技术。但也有必要进行技术革新,比如对 VOCs 和异味气体预处理以去除颗粒状物质、提高生物降解能力、优化处理技术以能够处理更复杂的气体组分,特别是多种污染物的混合物。此外,在其基本原理得到很好的理解之前,生物滤池就得到了广泛应用,导致一些不成

功或非最优条件的大型生物过滤池的存在,造成了一定的资源浪费。对生物过滤进程基本原理的研究不断深入,但仍然存在目前无法解答的原理问题,包括生物量转移的定量分析,生物降解动力学关系及影响这种关系的各因素,生物滤池的复合生态的复杂性,以及污染物、氧气、必要的营养物质间相互依赖的关系^[30,54]。这些因素都被证明能够显著影响生物滤池的性能和稳定性,这就需要进一步的研究,特别是定量研究是很必要的,这将会使现代生物技术得到广泛应用。此外,对传质和传热过程、生物膜中扩散系数、气液滞留进行相关研究以对生物滤池进行设计改造。传统现象学模型的研究最好与实际问题,如理化现象之上的结构知识细节问题,发展、测试、验证所需的大量实践问题进行结合。因此,利用生物启发计算技术设计生物过滤过程的一般数学模型进行可靠的定量预测和设计最优化条件是很必要的^[55,56]。最后,需要克服的最大问题是如何将基本的理论研究投入到实际生产过程中。

5. 致谢

在此感谢中华人民共和国科学技术部“十一五”国家科技支撑计划(2009BADC2B02)对研究的支持,感谢中国农业科学院环境保护与可持续发展研究所、中国环境科学研究院在研究过程中提供的合作支持。

参考文献 (References)

- [1] J. S. Devinny, M. A. Deshusses and T. S. Webster. Biofiltration for air pollution control. New York: Lewis Publishers, 1999: 1-5.
- [2] M. C. Delhomenie, M. Heitz. Biofiltration of air: A review. Critical Reviews in Biotechnology, 2005, 25(1-2): 53-72.
- [3] Z. Shareefdeen, A. Singh. Biotechnology for odor and air pollution control. Berlin: Springer, 2005.
- [4] A. Kumar, J. Dewulf and H. V. Langenhove. Membrane-based biological waste gas treatment. Chemical Engineering Journal, 2008, 136(2-3): 82-91.
- [5] A. Kumar, J. D. M. Luvsanjamba and H. V. Langenhove. Continuous operation of membrane bioreactor treating toluene vapors by Burkholderia vietnamiensis G4. Chemical Engineering Journal, 2008, 140: 193-200.
- [6] S. N. Mudliar, S. Banerjee, A. N. Vaidya, et al. Steady state model for evaluation of external and internal mass transfer effects in an immobilized biofilm. Bioresource Technology, 2008, 99 (9): 3468-3474.
- [7] S. N. Mudliar, K. V. Padoley, P. Bhatt, et al. Pyridine biodegradation in a novel rotating rope bioreactor. Bioresource Technology, 2008, 99(5): 1044-1051.
- [8] A. Metris, A. M. Gerrard, R. H. Cumming, et al. Modelling shock loadings and starvation in the biofiltration of toluene and

- xylene. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2001, 76(6): 565-572.
- [9] H. Bohn. Considering biofiltration for decontaminating gases. *Chemical Engineering Progress*, 1992, 88(4): 34-40.
- [10] W. J. Swanson, R. C. Loehr. Biofiltration: Fundamentals, design and operation principles, and applications. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(6): 538-546.
- [11] R. Alexander. Compost markets grow with environmental applications. *Biocycle*, 1999, 40(4): 43-48.
- [12] E. Smet, G. Chasaya and H. V. Langenhove. The effect of inoculation and the type of carrier material used on the biofiltration of methyl sulphides. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, 45(1-2): 293-298.
- [13] E. Smet, H. van Langenhove and W. Verstraete. Long-term stability of a biofilter treating dimethyl sulphide. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, 46(2): 191-196.
- [14] E. Smet, H. van Langenhove and G. Philips. Dolomite limits acidification of a biofilter degrading dimethyl sulphide. *Biodegradation*, 1999, 10(6): 399-404.
- [15] J. H. Hong, K. J. Park. Wood chip biofilter performance of ammonia gas from composting manure. *Compost Science and Utilization*, 2004, 12(1): 25-30.
- [16] J. Luo. A pilot-scale study on biofilters for controlling animal rendering process odours. *Water Science and Technology*, 2001, 44(9): 277-285.
- [17] J. R. Woertz, W. N. M. Van Heiningen and M. H. A. Van Eekert. Dynamic bioreactor operation: Effects of packing material and mite predation on toluene removal from off-gas. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, 58(2): 690-694.
- [18] J. Pineda, R. Auria, F. Perez-Guevara, et al. Biofiltration of toluene vapors using a model support. *Bioprocess Engineering*, 2000, 23(5): 479-486.
- [19] M. Zilli, A. Del Borghi and A. Converti. Toluene vapours removal in a laboratory-scale biofilter. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2000, 54(2): 248-255.
- [20] W. M. Moe, R. L. Irvine. Polyurethane foam medium for biofiltration. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, 126(9): 815-825.
- [21] D. Arulneyam, T. Swaminathan. Biodegradation of ethanol vapour in a biofilter. *Bioprocess Engineering*, 2000, 22(1): 63-67.
- [22] D. E. Chitwood, J. S. Deviny. Treatment of mixed hydrogen sulfide and organic vapors in a rock medium biofilter. *Water and Environmental Research*, 2001, 73(4): 426-435.
- [23] M. A. Ibrahim, H. Mizuno, Y. Yasuda, et al. Removal of mixtures of acetaldehyde and propionaldehyde from waste gas in packed column with immobilized activated sludge gel beads. *Journal of Biochemical Engineering*, 2001, 8(1): 9-18.
- [24] H. M. Tang, S. J. Hwang. Transient behavior of the biofilters for toluene removal. *Journal of Air and Waste Management Association*, 1997, 47: 1142-1151.
- [25] M. E. Acuna, F. Perez, R. Auria, et al. Microbiological and kinetic aspects of a biofilter for the removal of toluene from waste gases. *Biotechnology and Bioengineering*, 1999, 63(2): 175-184.
- [26] R. J. Abumaizar, W. Kocher and E. H. Smith. Biofiltration of BTEX contaminated streams using compost-activated carbon filter media. *Journal of Hazardous Material*, 1998, 60(2): 111-126.
- [27] C. A. Mason, G. Ward, K. Abu-Salah, et al. Biodegradation of BTEX by bacteria on powdered activated carbon. *Bioprocess Engineering*, 2000, 23(4): 331-336.
- [28] Z. Shareefdeen, A. A. Shaikh and Z. Ansar. Development, experimental validation and dynamic analysis of a general transient biofilter model. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(5): 759-773.
- [29] M. A. Deshusses, G. Hamer and U. Dunn. Transient state behaviour of a biofilter removing mixtures of vapours of MEK and MIBK from air. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, 49(5): 587-598.
- [30] S. Mudliar, B. Giri, K. Padoley, et al. Bioreactors for treatment of VOCs and odours—A review. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(8): 1039-1054.
- [31] E. Morgenroth, E. D. Schroeder, D. P. Y. Chang, et al. Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane. *Journal of Air Waste Management Association*, 1996, 46(4): 300-308.
- [32] M. C. Delhomenie, L. Bibeau, J. Gendron, et al. Influence of nitrogen on the degradation of toluene in a compost-based biofilter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2001, 76(9): 997-1006.
- [33] M. C. Delhomenie, L. Bibeau, J. Gendron, et al. Air treatment by biofiltration: Influence of nitrogen concentration on operational parameters. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2001, 40(23): 5405-5414.
- [34] C. Alonso, X. Zhu, M. T. Suidan, et al. Mathematical model of biofiltration of VOCs: Effect of nitrate concentration and backwashing. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, 127(7): 655-664.
- [35] A. D. Dorado, G. Baquerizo, J. P. Maestre, et al. Modeling of a bacterial and fungal biofilter applied to toluene abatement: Kinetic parameters estimation and model validation. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 140(1-3): 52-61.
- [36] M. J. Gibbins, R. C. Loehr. Effect of media nitrogen concentration on biofilter performance. *Journal of Air Waste Management Association*, 1998, 48(3): 216-226.
- [37] G. Wu, A. Dupuy, A. Leroux, et al. Peat based toluene biofiltration: A new approach to the control of nutrients and pH. *Environmental Technology*, 1999, 20(4): 367-376.
- [38] C. Lu, M. R. Lin and C. Chu. Effects of pH, moisture and flow pattern on tricklebed air biofilter performance for BTEX removal. *Advance Environmental Research*, 2002, 6(2): 99-106.
- [39] E. Y. Lee, Y. S. Jun, K. S. Cho, et al. Degradation characteristics of toluene, benzene, ethylbenzene and xylene by *Stenotrophomonas maltophilia* T3-C. *Journal of Air Waste Management Association*, 2002, 52(4): 400-406.
- [40] M. C. Veiga, M. Fraga, L. Amor, et al. Biofilter performance and characterization of a biocatalyst degrading alkyl benzene gases. *Biodegradation*, 1999, 10: 169.
- [41] M. Arnold, A. Reittu, W. A. Von, et al. Bacterial degradation of styrene in waste gases using a peat filter. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1997, 48(6): 738-744.
- [42] P. Christen, F. Domenech, G. Michelena, et al. Biofiltration of volatile ethanol using sugar cane bagasse inoculated with *Candida utilis*. *Journal of Hazardous Material*, 2002, 89(2-3): 253-265.
- [43] T. S. Webster, J. S. Deviny. Biofiltration. In: R. A. Meyers, Ed., *Encyclopedia of environmental analysis and remediation* 8. New York: John Wiley & Sons, 1998: 653-665.
- [44] J. P. Maestre, X. Gamisans and D. Gabriel. Fungal biofilters for toluene biofiltration: Evaluation of the performance with four packing materials under different operating conditions. *Chemosphere*, 2007, 67(4): 684-692.
- [45] C. Kennes, F. Thalasso. Waste gas biotreatment technology. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1998, 72(4): 303-319.
- [46] M. C. Delhomenie, L. Bibeau, N. Bredin, et al. Biofiltration of air contaminated with toluene on a compost-based bed. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(3): 239-244.
- [47] T. Sakuma, T. Hattori and M. A. Deshusses. The effects of a lower irrigation system on pollutant removal and on the microflora of a biofilter. *Environmental Technology*, 2009, 30(6): 621-627.
- [48] J. S. Deviny, D. S. Hodge. Formation of acidic and toxic intermediates in overloaded ethanol biofilters. *Journal of Air Waste Management Association*, 1995, 45(2): 125-131.
- [49] M. Morales, S. Hernandez, T. Cornabe, et al. Effect of drying on biofilter performance: Modeling and experimental approach. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(5): 985-992.
- [50] M. Mohseni, D. G. Allen. Biofiltration of mixtures of hydrophilic and hydrophobic volatile organic compounds. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(9): 1545-1558.
- [51] S. Krailas, Q. T. Pham, R. Amal, et al. Effect of inlet mass

- loading, water and total bacteria count on methanol elimination using upward flow and downward flow biofilters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2000, 75(4): 299-305.
- [52] A. R. Pedersen, E. Arvin. Removal of toluene in waste gases using a biological trickling filter. *Biodegradation*, 1995, 6: 109-118.
- [53] A. R. Pedersen, S. Moller, S. Molin, et al. Activity of toluene-degrading *Pseudomonas putida* in the early growth phase of a biofilm for waste gas treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, 54(2): 131-142.
- [54] H. H. J. Cox, M. A. Deshusses. Biological waste air treatment in biotrickling filters. *Current Opinion in Biotechnology*, 1998, 9 (3): 256-262.
- [55] B. S. Narendra, P. V. Shivapullaiah, S. Suresh, et al. Prediction on unconfined compressive strength of soft grounds using computational intelligence techniques: A comparative study. *Computer and Geotechniques*, 2006, 33(3): 196.
- [56] S. N. Omkar, R. Khandelwal, S. G. Yathindra, et al. Artificial immune system for multi-objective design optimization of composite structures. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2008, 21(1): 1418.