

生物滴滤池降解挥发性有机物的研究进展*

王 玮¹ 杨 达¹ 蓝惠霞^{1,2,**}

(1. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042;

2. 齐鲁工业大学制浆造纸科学与技术教育部重点实验室, 山东 济南 250353)

摘 要

由于挥发性有机气体(VOCs)的排放量巨大且对人体具有较大的危害,而备受人们的关注.使用生物滴滤池对VOCs进行处置,不仅在投资和运行上的成本较低,而且其处理效果较好,无二次污染.本文对生物滴滤池降解VOCs的相转移理论进行了概述,对生物滴滤池降解VOCs效果的因素(生物填料、温度和氧气浓度、pH、菌剂的选择等)进行综述和分析,结合生物滴滤池处理VOCs现状对发展和研究方向提出了展望.

关键词:挥发性有机气体,生物滴滤池,去除率.

中图分类号: X511

0 引 言

VOCs(volatile organic compounds)普通意义上就是指挥发性有机物.VOCs中包含烷烃类、芳香烃及其衍生物、卤代烃等化合物,其中大部分具有较强挥发性、毒性、燃爆性^[1]等.据报道^[2],我国VOCs的年排放量大约在2 000~3 000万吨,而国内对VOCs污染的治理尚处于起步阶段,对VOCs的处理缺乏较为高效的手段.由于VOCs对人体和环境具有较大的威胁而且我国的VOCs排放量巨大,因此对VOCs的处理已经引起我国高度的重视.继1997年1月开始施行的《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996)后,2012年,国务院批复实施我国第一部综合性大气污染防治规划《重点区域大气污染防治“十二五”规划》.为了进一步加强对VOCs的处理,2013年起各个省市分别颁布防止大气污染的法案,如重庆市的地标标准DB-50-418-2016等.因此寻求一种技术上可行、经济上可以接受的处理技术就尤为重要.

目前VOCs的处理常规方法包括:吸附、燃烧、

光催化、膜分离、低温等离子法等.对VOCs的处理的手段虽然较多,但是不同的处置方法由于均存在一定的问题而难以在处理VOCs上得以广泛应用.对于吸附^[3]和吸收^[4]等方法,在VOCs处理过程中,因为吸附材料或吸收剂的缺陷多会造成二次污染;光催化^[5]用于处理低浓度的VOCs有较好的效果,但由于其使用的催化剂对激发源能级的要求较严格,所以当处理高浓度VOCs时,可能由于催化剂的活化程度低而产生有害的副产品;对于高浓度的VOCs,燃烧法^[6]虽然效率很高,但易中毒的催化剂很大程度上限制了燃烧法的广泛应用;低温等离子法^[7]处理VOCs从20世纪70年代被提出就一直受到广泛关注,而目前研究最多的由脉冲电晕放电产生的等离子体距离实用阶段仍有较大差距,有待经过更深入的研究才有望推向市场.

相对于常规方法处理VOCs,生物法^[8]具有无二次污染和降解效果好等诸多优点,自上世纪80年代,德国和荷兰专家提出使用生物法有效地降解有机废气,生物法处理废气的技术就被运用得越来越多.据报道,生物滴滤池对可挥发的189种有害气体均有较好的处理效果,如氨、硫醇、二硫化物、苯、甲醇等^[9].在欧洲,更多的化工过程产出的工业废气由生物滴滤池进行处理^[10].针对不同的废气成分,生物滴滤池的设计和菌剂的选择也有所不同,因此,VOCs的降解效果和效率都处于较高水平.Pena等^[11]利用真菌在塔设备上对甲苯进行生物降解,其

收稿日期:2017-04-24

* 制浆造纸科学与技术教育部重点实验室开放基金资助(KF201509);山东省科技重大专项(新兴产业)(2015ZDXX0403B03).

**通信作者:蓝惠霞,E-mail:lanhuixia@163.com.

去除率最高达到 98%。张京等^[12]接种恶臭假单胞菌在自制的错流式生物滴滤池净化甲苯废气,其稳定运行的平均去除率为 95%。

生物滴滤池对 VOCs 的降解效率与效果受到微生物、填料、pH 以及运行参数的等多个因素的综合影响,本文针对影响生物滴滤池处理 VOCs 的诸多条件进行详细讨论,并提出该领域中存在问题。

1 VOCs 在生物滴滤池中的相转移理论

相转移是生物滴滤池降解 VOCs 的核心,VOCs 从气相转移到生物膜表面,最终被微生物降解成为 CO₂ 和 H₂O。关于 VOCs 的相转移,报道时间较早且被较多学者认可的是由荷兰专家 Ottengraf 提出的吸收-生物膜理论^[13]。该理论借鉴吸收过程中的双膜理论,即 VOCs 先由气相转移到液相中,在液相中由于浓度差的推动力,VOCs 进入生物膜,最后被微生物作为能量源与碳源分解利用。虽然,吸收-生物膜理论在一些浓度较高的 VOCs 的处理过程得以应用,但是在低浓度或在喷淋液中溶解度较低的 VOCs 的降解过程中该理论难以合理解释。

孙珮石等^[14]提出了低浓度条件下吸附-生物膜理论,其理论认为:浓度较低或者溶解度低的 VOCs 会扩散到生物膜表面并且被吸附,微生物会降解吸附在生物膜表面的 VOCs。该理论的动力学模型计算式为

$$S_{gout} = S_{gin} \left(1 - \frac{L}{H \times G_c} \right) - b \times \frac{\lambda S_{gin}}{1 + \lambda S_{gin}} \times \frac{A}{G_c} \times H$$

式中: S_{gin} 、 S_{gout} 为进出口气体污染物的浓度,单位:mg/L; H 为塔高,单位:mm; A 为塔内径,单位:mm; G_c 为气体流量,单位:m³/s; λ 为吸收系数。

在使用假单胞菌属中的短杆菌降解甲苯的实验中,根据吸附-生物膜理论计算出的计算值和实际实验结果较为接近。

在 VOCs 的降解模型中,其限制步骤在于 VOCs 传递或吸附在液相上。根据 Lebrero 的报道^[15],在一般的动力学模型中,传质系数表征了 VOCs 的传递。通过拟合模型的空床停留时间和传递系数可以得到 VOCs 吸收的实验数据,因此认为停留时间的变化可以改变 VOCs 的吸收效果。而根据实验结果,超过临界点,停留时间的变化对 VOCs 的降解效果没有影响,这表明,VOCs 的降解的主要阻力在于液相。

2 生物滴滤池处理 VOCs 的影响因素

2.1 填 料

作为生物膜的支撑,生物滴滤池内的填料对设备降解 VOCs 的能力也有较大的影响。良好的填料应该具有以下性质^[16]:

(1) 比表面积大,较大的比表面积有利于微生物的生长,同时也提高了废气的传质效果;

(2) 高孔隙率,可以有效地促进气体的均匀分布;

(3) 良好的保水能力,微生物的生长需要一定的湿度,具有较好保水能力的填料可以避免因为床层干燥而造成的生物膜脱落。

生物滴滤池内最常见的生物填料有^[17]:海藻石、陶环、陶粒、塑料环、不锈钢环等,这几种填料具备成为良好的填料所应该具有的性质。不同的填料具有不同的优势与不足,如:塑料环^[18]虽然价格低廉但是比表面积较小,且产生高压降,而且其表面疏水性较强,这使其表面较难附着湿润的生物膜。陶环、陶粒^[19]是新型的材料,其比表面积大,持水能力好,渗透性好。陶粒、陶环由于其诸多优势被广泛应用于废水的处理中。不锈钢环^[20]的湿填料因子为 1 000,仅高于塑料环,即在其表面难以附着生物膜。海藻石^[21]是最常使用的生物材料,其表面易形成较密集的生物膜,能够提供一个密集和多样的微生物系统,具有良好的持水能力和透气性。孙珮石^[14]研究使用海藻石等多种生物过滤的填料降解甲苯废气,结果表明以海藻石为填料的生物滴滤池处理效果最佳,而以塑料环为填料的生物滴滤池处理效果最差。

廉价的填料在生物滴滤池上的性能较差,而性能较好的填料却价格高昂。未来开发的新型填料,不仅应该具有较大比表面积以提升单位比表面积 VOCs 的降解量,而且应该价格低廉以降低运行成本。开发生活垃圾中的可回收垃圾以及医用垃圾中的感染性废物中的一次性医疗用品或者一次性医疗器械作为生物填料不仅能够降低成本,而且能充分利用资源,具有一定的研究价值。

2.2 微 生 物

生物净化的实质上是一种生物分解的过程,生物滴滤池能够降解 VOCs 的关键在于微生物是否能够分解并矿化 VOCs 的各种废气。1923 年,德国人首次提出^[22]使用活性污泥对生活 and 工业有机废物进

行处理.之后,微生物降解有机物的研究越来越多,不少学者利用生物方法降解 VOCs 中的一类废气,分离出对特定废气有较高降解效果的菌株. Qiang 等^[23]利用强固芽孢杆菌(*Bacillus firmus*)对浓度为 500~3 000 mg/m³的二甲苯进行降解,在停留时间为 17~84.8 s 时,去除率达到 100%. Pena 等^[11]利用石化污泥混合菌对低浓度苯、甲苯、二甲苯进行降解也达到较高的水平. Wan 等^[24]利用污水处理厂筛选的 208 菌种在停留时间为 83~110 s 条件下,对三甲胺的去除率也达到 100%. 对于成分复杂的废气,使用菌群处理会有较好的效果. Chen 等^[25]使用含苯(70~550 mg/m³)、甲苯(80~510 mg/m³)、邻二甲苯(500~3 000 mg/m³)的废气驯化培养的混合菌群,在填充高度为 0.6 m,内径为 0.12 m 的生物滴滤池中,当停留时间为 90 s 时,对废气的去除率达到 94.3%. Lu 等^[26]使用的菌群由假单胞菌、考克氏菌、节杆菌和芽孢杆菌组成,处理甲醛(0~6.5 mg/m³)、苯(2.2~46.7 mg/m³)、甲苯(0.5~28.2 mg/m³)和二甲苯(4.1~59 mg/m³)最高的去除率也达到 93%.

虽然混合菌群已经被广泛地应用于处理废气和废水,但是菌群在处理 VOCs 过程中的各个菌种之间的协同和拮抗作用的机理还尚未有统一的理论.因此,完整的生理学和遗传学的正交实验可能有助于优化菌种的比例的选择,进一步提升菌群的降解效率与效果.

2.3 pH 值

pH 对生物滴滤池降解 VOCs 的影响较大. pH 可以直接影响微生物,其不仅能够直接影响微生物的生长状况,而且也能改变液相中有机化合物的离子态. 据报道^[27],具有降解挥发性有机物能力的微生物大部分是异养微生物,其适宜的 pH 值在 7~8 之间. 而一些菌种能接受较为严峻的 pH 值,如对 NO 具有降解效果的螯合球菌(*chelatooccus daeguensis*),其适宜的 pH 值在 9~10 左右^[28]. pH 能够通过影响酶的活性,从而影响微生物对 VOCs 的降解能力. 据报道^[29],芳香类化合物的降解主要包括苯环的开环和羟基化两种,其中羟基化为限制步骤. 羟基化主要是加氧酶将分子氧或者其他供氧体中氧原子加到芳香烃中,不适宜的 pH 值直接影响到加氧酶的活性,影响羟基化的速率. 对于成分复杂的 VOCs,使用存在共代谢关系的菌群往往处理效果较好^[30-31],而在过高或者过低的 pH 条件下,由于关键酶的活性受到抑制,菌群的降解能力也不能够

令人满意.

一般情况下,液相中离子态的有机物较非离子态有机物难于被微生物作为碳源或者能量源利用. 过低的 pH 值通常使液相中的有机物以离子形态存在,因此在这样的状态下,液相中的有机物难以被微生物降解.

2.4 温度与氧气浓度

生物滴滤池内的温度通常直接与 VOCs 的气流的温度和塔设备的保温装置相关,适宜的温度有助于微生物降解 VOCs^[32]. 大多数的文献中^[33-35],反应设备的内部温度通常保持在 25~40 °C 左右,温度除了对微生物有所影响,也会影响气液的传质^[36]. 温度的提升可以降低亨利系数,加快气体的扩散速度,起到促进废气进入填料表面的生物膜的作用. 而设备通常设置有保温装置且降解反应为放热,所以设备内部的温度往往稍高于预设温度. 也有文献报道^[37],生物滴滤池接种特定的耐受高温菌种处理高温烟气污染,其内部温度保持在 50 °C. 由于能够在较高温度下保持生物活性的微生物种类较少,而工业排出的废气通常温度较高,因此,可以根据高温废气的化学性质不同,先经过特定成分喷淋液淋洗以降低气体温度.

降解 VOCs 的菌种大多数是好氧微生物,因此,塔设备内部的氧气浓度会影响好氧微生物对 VOCs 的降解,而使用的生物填料等对氧气的塔设备中的氧气浓度也会有所影响,从而使生物滴滤池内氧气的浓度远远高于 VOCs 的浓度. 然而由于亨利系数较高的原因,氧气难以充分地渗透到生物膜表面,供好氧微生物对 VOCs 进行降解. 设备氧气入口处的浓度由降解 VOCs 的种类和性质决定,亲水性较强的成分的降解所需的耗氧量低于疏水性的成分. 因此,在操作过程中,停留时间和进气浓度会对 VOCs 的降解效率造成影响.

2.5 生物滴滤池运行参数

VOCs 的传质效率在一定程度上受到生物滴滤池的运行参数的影响,Lebrero 等^[38]的报道中,在使用生物滴滤池时,以聚氨酯作为生物填料降解甲苯的过程中,调节参数污染物流量 Q_g 与喷淋液流量 Q_l 之比在 60~275 之间,气液传质效率达到最佳,过高的气液比会导致传质效率降低. 而 Zhang 等^[39]在生物滴滤池降解苯的研究中发现,苯的去除率随着污染物浓度的增加而增加,苯浓度达到 175 mg/m³ 后去除率趋于稳定,这主要是因为较低的进口浓度

的条件下,生物填料表面的微生物的吸附能力未完全发挥.因此,根据处理任务,合理选定操作参数,有助于高效降解 VOCs. Hassan 和 Sorial^[40] 使用不同的参数在生物滴滤池上降解苯,他们的实验中采用 60 ~ 120 s 的停留时间,并且每周有两天不通入苯,实验结果表明,在相同的停留时间下,生物滴滤池稳定运行下苯的去除率低于不通入苯的饥饿状态下的去除率.

生物滴滤池的参数之间有一定关联,在处理不同浓度 VOCs 时,应合理调整各个运行参数.在近期的研究中,Lebrero^[15] 设定了停留时间为 4 ~ 48 s,污染负荷高于 $3.32 \sim 9.96 \text{ gm}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$,考察 VOCs 的去除率,发现在停留时间为 8 s,污染负荷为 $3.32 \text{ gm}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$,VOCs 的平均去除率达到 90%. 过高的污染负荷进入滴滤池内,即使延长停留时间也难以达到较高的

去除率.

3 前景与展望

因为生物滴滤池降解 VOCs 具有效率高、无二次污染、成本相对较低的特点而受到广泛的关注.但目前,生物滴滤池的降解 VOCs 的技术并不完善,仍需要在以下几方面进行深入研究:

1) 以生活及医用垃圾进行新型填料的开发.

2) 以各个菌种之间的协同和拮抗作用的机理为基础,构建高效的生物菌群.

3) 开发新型材料,提升塔设备的机械强度.

4) 生物滴滤池实际应用中,操作参数的优化.

随着科技的发展,这些问题也必将会解决,生物滴滤池应用于 VOCs 的降解也会有更加广阔的前景.

参 考 文 献

- [1] 李静,韩世同,白书培,等. 低温等离子体协同催化处理 VOC 技术中填充材料的研究进展[J]. 化工科技, 2006, 14(5): 33 - 39.
- [2] Guo H, Ling Z H, Cheng H R, et al. Tropospheric volatile organic compounds in China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1021 - 1043.
- [3] Zhang L, Peng Y, Zhang J, et al. Adsorptive and catalytic properties in the removal of volatile organic compounds over zeolite-based materials [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2016, 37(6): 800 - 809.
- [4] Tatin R, Moura L, Dietrich N, et al. Physical absorption of volatile organic compounds by spraying emulsion in a spray tower: Experiments and modelling [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2015, 104: 409 - 415.
- [5] Šuligoj A, Štangar U L, Ristić A, et al. TiO₂-SiO₂ films from organic-free colloidal TiO₂ anatase nanoparticles as photocatalyst for removal of volatile organic compounds from indoor air [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2016, 184: 119 - 131.
- [6] 路洋,郭阳,杜再江,等. 植物释放 VOCs 的研究[J]. 化工科技, 2013, 21(1): 75 - 79.
- [7] Ragazzi M, Tosi P, Rada E C, et al. Effluents from MBT plants: Plasma techniques for the treatment of VOCs [J]. Waste Management, 2014, 34(11): 2400 - 2406.
- [8] Vijayan D, Kochupurackal J, Abraham A, et al. Microbial consortia formulation for the effective biodegradation of benzene, toluene, xylene and phenol [J]. Journal of Microbiology Biotechnology and Food Sciences, 2014, 3(6): 457 - 462.
- [9] Shareefdeen Z, Hermer B, Singh A. Biotechnology for air pollution control - an overview [M] // Shareefdeen I, Singh A. Biotechnology for Odor & Air Pollution control. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 3 - 15.
- [10] Cloirec P L, Andrès Y, Gérente C, et al. Biological treatment of waste gases containing volatile organic compounds [M] // Shareefdeen Z, Singh A. Biotechnology for Odor & Air Pollution Control. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 281 - 302.
- [11] García-Peña E I, Hernández S, Favela-Torres E, et al. Toluene biofiltration by the fungus *Scenedosporium apiospermum* TB1 [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 76(1): 61 - 69.
- [12] 张京,李坚,孙莉,等. 错流式生物滴滤床净化甲苯废气[J]. 环境工程学报, 2008, 31(1): 59 - 63.
- [13] Ottengraf S P, Van A H. Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter [J]. Biotechnology & Bioengineering, 1983, 25(12): 3089 - 3102.

- [14] 孙佩石,杨显万,谢蕴国.生化法净化低浓度挥发性有机废气的动力学模式研究[J].上海环境科学,1997,16(8):13-17.
- [15] Lebrero R, Gondim A C, Pérez R, et al. Comparative assessment of a biofilter, a biotrickling filter and a hollow fiber membrane bioreactor for odor treatment in wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2014, 49, 339-350.
- [16] 魏在山,孙佩石,黄若华,等.生物法处理低浓度有机废气的填料选择研究[J].重庆环境科学,2001,23(2):40-41.
- [17] Aranda E. Promising approaches towards biotransformation of polycyclic aromatic hydrocarbons with Ascomycota fungi [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2016, 38: 1-8.
- [18] 周卫列,王家德,郑荣勤,等.塔填料生物成膜工艺及其特性参数研究[J].浙江工业大学学报,1999,27(4):300-305.
- [19] Wu S, Qi Y, Fan C, et al. Application of novel catalytic-ceramic-filler in a coupled system for long-chain dicarboxylic acids manufacturing wastewater treatment [J]. Chemosphere, 2016, 144: 2454.
- [20] 孙佩石,杨显万,黄若华,等.生物膜填料塔对低浓度甲苯废气的净化性能研究[J].环境污染与防治,1997,19(3):8-11.
- [21] 孙端方,李建军,叶广运,等.装填不同填料的生物滴滤池法对甲苯废气处理[C].杭州:全国恶臭污染测试与控制技术暨恶臭污染物排放标准修订研讨会,2009.
- [22] Ternes T A, Kreckel P, Mueller J. Behaviour and occurrence of estrogens in municipal sewage treatment plants-II. Aerobic batch experiments with activated sludge [J]. Science of the Total Environment, 1999, 225(1/2): 91-99.
- [23] Qiang L, Babajide A E, Ping Z, et al. Removal of xylene from waste gases using biotrickling filters [J]. Chemical Engineering & Technology, 2006, 29(3): 320-325.
- [24] Wan S, Li G, Zu L, et al. Purification of waste gas containing high concentration trimethylamine in biotrickling filter inoculated with B350 mixed microorganisms [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(12): 6757-6760.
- [25] Chen Y, Fan Z, Ma L, et al. Performance of three pilot-scale immobilized-cell biotrickling filters for removal of hydrogen sulfide from a contaminated air stream [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2014, 21(5): 450-456.
- [26] Lu Y, Liu J, Lu B, et al. Study on the removal of indoor VOCs using biotechnology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1-3): 204-209.
- [27] Schiavon M, Ragazzi M, Rada E C, et al. Air pollution control through biotrickling filters: a review considering operational aspects and expected performance [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2015, 36(6): 1143-1155.
- [28] Niu H, Leung D Y C, Wong C, et al. Nitric oxide removal by wastewater bacteria in a biotrickling filter [J]. J Environ Sci, 2014, 26(3): 555-565.
- [29] Fuchs G, Boll M, Heider J. Microbial degradation of aromatic compounds - from one strategy to four [J]. Nature Reviews Microbiology, 2011, 9(11): 803-816.
- [30] Palanisamy K, Mezgebe B, Sorial G A, et al. Biofiltration of chloroform in a trickle bed air biofilter under acidic conditions [J]. Water Air and Soil Pollution, 2016, 227(12): 478.
- [31] 廖雷,钟雪梅,钱公望.生物净化气态污染的系统研究[J].环境科学与技术,2004,27(6):110-112.
- [32] Parnian P, Zamir S M, Shojaosadati S A. Styrene vapor mass transfer in a biotrickling filter: effects of silicone oil volume fraction, gas-to-liquid flow ratio, and operating temperature [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 284: 926-933.
- [33] Singh S, Singh N, Kumar V, et al. Toxicity, monitoring and biodegradation of the fungicide carbendazim [J]. Environmental Chemistry Letters, 2016: 1-13.
- [34] 王东红.生物滴滤塔净化烟气中SO₂的研究[D].南京:南京理工大学,2009.
- [35] 张馨月.高温和常温生物过滤塔处理甲苯气体的对比试验研究[D].天津:天津大学,2012.
- [36] Alvarez-Hornos F J, Lafita C, Martínez-Soria V, et al. Evaluation of a pilot-scale biotrickling filter as a VOC control technology for the plastic coating sector [J]. Biochemical Engineering Journal, 2011, 58(1): 154-161.
- [37] Liang W, Huang S, Yang Y, et al. Experimental and modeling study on nitric oxide removal in a biotrickling filter using *Chelatococcus daeguensis* under thermophilic condition [J]. Bioresource Technology, 2012, 125: 82-87.
- [38] Lebrero R, Estrada J M, Muñoz R, et al. Toluene mass transfer characterization in a biotrickling filter [J]. Biochemical Engineering Journal, 2012, 60(6): 44-49.
- [39] Zhang L, Jia Y, Zhang H, et al. Pilot study on removal of benzene by using high efficient biotrickling filter [C].

Proceedings of ICBBE: 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering , Chengdu: 2010.

- [40] Hassan A A , Sorial G. Biological treatment of benzene in a controlled trickle bed air biofilter[J]. Chemosphere , 2009 , 75(10) : 1315 - 1321.

Research Progress on Volatile Organic Compounds Control Through Biotrickling Filters

Wang Wei¹ Yang Da¹ Lan Huixia^{1,2}

(1. College of Environment and Safety Engineering , Qingdao University of Science and Technology , Qingdao Shandong 266042 ;

2. Key Lab of Pulp and Paper Science & Technology , Ministry of Education , Qilu University of Technology , Ji'nan Shandong 250353)

Abstract

Volatile organic compounds have attracted seriously attention from the public duing to the huge amounts of emissions and terrific harm. Controlling through biotrickling filters had the advantages of low investment and operating cost , high efficiency and pollution free. The phase transfer theory of Volatile organic compounds degradation by biotrickling filter was reviewed. The influence factors , including temperature , oxygen concentration , pH and strain , effected on the result of treatment volatile organic compounds by biotrickling filters were analyzed. The state and trends of biopurification were discussed and predicted as well.

Key words:volatile organic compounds , biotrickling filters , removal efficiency.

作者简介 王玮(1990 -) ,男 ,汉族 ,青岛科技大学环境与安全工程学院研究生 ,从事化工废气处理方面的学习和研究. E-mail:705074219@qq.com.