

丝状真菌生物过滤塔对挥发性有机物的去除性能

王灿, 胡洪营*, 席劲瑛

(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘 要 生物过滤塔工艺是控制挥发性有机物(VOCs)污染的一种重要工艺。其中,丝状真菌由于所产生的菌丝体易捕捉气相中的疏水性污染物,同时又具备耐受低 pH 值和适应干燥环境等特性,而日益成为 VOCs 生物过滤技术中新的研究热点。文章在对丝状真菌生物过滤塔的降解机理和特点进行分析的基础上,针对目前在生物过滤塔技术中研究较多的几种典型丝状真菌,较详细介绍了该类真菌生物过滤塔对 VOCs 的去除性能,并对该技术在 VOCs 控制方面的研究与应用中存在的问题和发展方向进行了分析和展望。

关键词 丝状真菌; 生物过滤塔; 挥发性有机物

中图分类号 X17 **文献标志码** A **文章编号** 1003-6504(2008)07-0040-04

Performance of Filamentous Fungal Biofilters for Volatile Organic Compounds Control

WANG Can, HU Hong-ying*, XI Jin-ying

(Department of Environmental Science and Engineering, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstracts: Gas phase biofilters are widely accepted as a new technology for the volatile organic compounds (VOCs) treatment, and filamentous fungal biofilters are becoming the focus of this kind of technology because of advantages of being more resistant to reduced moisture content and low pH. Mechanism and main characteristics of filamentous fungal biofilters are described as well as the performances of different filamentous fungal biofilters for VOCs control. Problems and prospects of the filamentous fungal biofiltration technology are also analyzed.

Key words: filamentous fungi; biofilter; volatile organic compounds (VOCs)

随着工农业的发展和化学有机溶剂的大量使用,排入大气中的挥发性有机物(VOCs)的数量不断增加,已经成为大气环境中第三大污染物^[1-2]。同时,大多数的 VOCs 对人体产生毒性或致癌作用。因此,VOCs 污染已经引起人们广泛的关注。近年来,以细菌为核心的生物工艺被作为一种经济、方便的处理技术而逐渐应用于 VOCs 污染的控制^[3-4]。但细菌类微生物对疏水性 VOCs 往往不能表现出很高的去除能力。这主要是因为细菌难以适应气固相生物过滤塔中的干燥条件和因某些 VOCs(卤代 VOCs)代谢而产生的低 pH 环境。在这一点上,真菌比细菌具有明显的优势。

真菌按形态可以分为丝状真菌(霉菌等)和非丝状真菌(酵母菌等)。丝状真菌是典型的气生型微生物,对于干燥环境或强酸性环境具有较强的耐受能力。目前,一些研究表明,丝状真菌在对疏水性 VOCs 的控制方面,表现出比细菌更好的去除性能。近年来,丝状真菌类生物过滤塔的研究和开发已经成为 VOCs

控制领域新的研究热点。

1 丝状真菌过滤塔对 VOCs 的去除机理

与普通细菌过滤塔类似,丝状真菌过滤塔去除 VOCs 主要包括两个过程:氧气和污染物的传质过程以及微生物的降解过程。当含有 VOCs 的气体通过过滤塔时,由于填料的吸附、菌体的吸收以及真菌菌丝的捕集作用,VOCs 由气相转入生物相(生物膜),在好氧条件下大部分被微生物降解为水和二氧化碳或其它代谢产物,小部分转化为剩余菌体。

2 丝状真菌过滤塔的特点

与普通的细菌类微生物相比,丝状真菌具有特殊的生理特性和形态特征。这种微生物性质上的差异使得丝状真菌生物过滤塔比一般细菌生物过滤塔表现出特定的优势。下面,将详细介绍丝状真菌生物过滤塔的主要特点。

2.1 菌丝型生长

收稿日期:2007-04-02 修回:2007-11-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2004AA601061)

作者简介:王灿(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为挥发性有机物控制技术,(电话)010-62778943(电子信箱)wangcan04@mails.tsinghua.edu.cn;通讯作者,教授,博士生导师,(电子信箱)hyhu@tsinghua.edu.cn

丝状真菌在生长过程中产生繁茂的分枝从而形成网状菌丝体（酵母菌在一定条件下能形成假菌丝，但其生长类型和菌丝结构与丝状菌存在本质的不同）。丝状真菌的生长是以其顶端延长的方式进行，可以向气相空间生长。丝状真菌的菌丝直径一般为 5~10 μm。接种在生物过滤塔中的丝状真菌，其菌丝不断发生分枝，从而形成具有一定特征的菌落。在菌丝的生长过程中，不同个体的菌丝之间相互接触，在接触点相近的细胞壁局部降解而发生菌丝的网结现象，因此，使菌落形成一个完整的网状结构。

这种具有网状的菌丝型结构使得生物过滤塔内的真菌相对于细菌具有更大的表面积，有利于 VOCs，特别是疏水性 VOCs 的吸附和传质。但在另一个方面，真菌菌丝向四周扩散生长的特征，使得菌丝过多占据了过滤塔当中的剩余空间，从而导致压力损失增大，降低了生物过滤塔的运行稳定性。

2.2 较强的耐低 pH 能力

与一般的细菌类生物过滤塔相比，丝状真菌生物过滤塔另一个明显的特点就是能够在较低的 pH 条件下运行，表 1 列举了几种丝状真菌过滤塔在正常运行过程当中的 pH。真菌生物过滤塔的这种特点源自于真菌微生物特殊的生理特性。一般而言，真菌适合在 pH 为 2~7 的中、酸性环境中生长。尽管部分细菌也能够 在酸性条件下有效去除污染物，如 yang 等^[5]曾报道，某种降解硫化物的细菌在 pH 为 1~2 的范围内仍能保持较高的活性。但这类细菌的数量很少，并且所处理的挥发性有机物主要局限于含硫化合物。

表 1 几种丝状真菌过滤塔正常运行条件下的 pH
Table 1 pH conditions of several filamentous fungi biofilters

真菌种类	污染物	pH	参考文献
宛氏拟青霉 (<i>Paecilomyces variotii</i>)	甲苯	5.9	Est érez, et al. 2005[7]
尖端囊多孢子菌 (<i>Scedosporium apiospermum</i>)	甲苯	4.5	Garc ía, et al. 2001[8]
枝霉(<i>Cladosporium</i> spp.)	正己烷	4.1	Soria, et al. 2005[9]
镰刀菌(<i>Fusarium</i> spp.)	正己烷	6.7	Soria, et al. 2005[9]
腐皮镰霉(<i>Fusarium solani</i>)	正己烷	4	Soria, et al. 2005[9]

有研究发现^[6]，丝状真菌微生物细胞内部的 pH 实际并不低，往往接近于中性。这说明，尽管丝状真菌生活在低 pH 的环境中，但是它们能够通过某些生理活动，自动维持细胞内部正常的 pH 值，从而保证微生物的活性。

2.3 较好的抗干燥性能

在气相生物过滤塔的设计与运行中，控制一定的湿度对于降低过滤塔压降和维持塔内微生物活性都具有重要意义。对于气生型的微生物——真菌而言，它能使生物过滤塔在较为干燥的环境中仍能发挥较好的废气处理功能。Garc ía-Peña 等^[8]的研究表明，将

丝状真菌接种在以蛭石和颗粒活性炭为填料的气相过滤塔中去除甲苯，当过滤塔内水分在 40%~60%（低于细菌过滤塔内水分 60%~80%）的条件下，甲苯的去除能力 (Elimination Capacity) 可达 258g/(m³·h)（进口负荷 300g/(m³·h)）。Kennes^[10]在比较真菌与细菌性质时也指出，细菌最佳生长条件下的水活度一般要求在 0.9 以上，而对于大多数真菌而言，其水活度可以降至 0.6。

真菌抗干燥能力强的特点使得丝状真菌生物过滤塔对于疏水性 VOCs 的去除效果较细菌类生物过滤塔要好。以 *Aspergillus niger* 为优势菌种的生物过滤塔对正己烷的平均去除能力达 150g/(m³·h)^[11]，而细菌生物过滤塔对正己烷的去除能力仅为 10~60g/(m³·h)^[12]。

值得指出的是，丝状真菌过滤塔虽然在干燥的环境下能够维持一定的 VOCs 去除能力，当这并不意味着该类生物过滤塔的去除性能与环境的干燥程度成正比关系。Est érez 等^[7]采用真菌和细菌的复合生物过滤塔处理甲苯气体，系统考察了系统在不同相对湿度 (Relative Humidity) 条件下的去除能力。结果表明，在 pH7.5 的条件下，生物过滤塔的相对湿度从 85%提高到 100%时，系统的去除能力也从 95.6g/(m³·h) 增加到 164.4g/(m³·h)。因此，丝状真菌具有较好的抗干燥性能主要是相对于细菌而言的。

3 丝状真菌过滤塔的去除性能

正如上文所提到的，丝状真菌生物过滤塔由于其自身的特点，对疏水性的 VOCs 具有较好的去除能力。目前，一些学者研究了不同种类的丝状真菌在生物过滤塔中对典型 VOCs 的降解性能。下面，根据当前研究较多的几类丝状真菌来详细介绍各类真菌生物过滤塔对 VOCs 的去除情况。

3.1 拟青霉 (*Paecilomyces* spp.) 生物过滤塔

拟青霉类真菌是除白腐真菌 (White Rot Fungi) 外又一类可以降解木质素和与木质素结构相似的芳香族化合物的真菌微生物^[13]。Est érez 等^[7]从一个细菌与真菌的复合体系中分离得到 *Paecilomyces variotii*，并把该菌接种到以珍珠岩为填料，有效容积为 3.5L 的生物过滤塔中去除甲苯气体。在运行过程中，每周向过滤塔补充一次无菌营养液，在营养液中添加了土霉素 (Oxytetracycline) 以抑制细菌在生物过滤塔中的生长。该生物过滤塔在空塔停留时间为 80s，20℃，pH 为 5.9，相对湿度 85%的条件下运行了 120d。结果表明，当进口负荷从 100g/(m³·h) 降为 40g/(m³·h) 时，甲苯的去除率相应的从 40%升高到 95%。当进口

负荷达到 100g/(m³·h) 后,再增加进口负荷会导致过滤塔去除能力的下降。Est évez 还通过考察 *P. variotii* 生物过滤塔中丝状真菌生物膜的分布发现,塔内生物膜的厚度介于 70~379 μm 之间,其中 50% 以上的生物量属于非活性生物量(对 VOCs 不起降解作用的部分)^[7]。另外,过滤塔出口处的生物膜厚度明显高于进口处,这主要是由于出口处非活性微生物过量生长造成的。

在另一项研究中,Aitor^[14]采用陶瓷环为填料的生物过滤塔,考察了 *Paecilomyces variotii* CBS 115145 对甲苯的去除性能。经过 76d 的运行后发现,在高负荷的情况下(甲苯进口负荷 270~330g/(m³·h)),生物过滤塔的去除能力达 245g/(m³·h),远高于 Est évez 的研究结果。同时,Aitor^[14]还证明了在真菌-细菌共生的生物过滤塔中,真菌对甲苯的去除起了主要作用(去除的甲苯中 70% 是由真菌降解)。

3.2 枝霉 (*Cladosporium* spp.) 生物过滤塔

早在 1995 年,从处理甲苯的气相生物过滤塔中分离得到了 *Cladosporium* sp.,该真菌被证实可以将苯、甲苯、二甲苯等芳香烃作为单一碳源^[15]。Sonia^[16]建立了两套细菌-真菌复合体系的生物过滤塔(真菌为 *Cladosporium* sp. 和 *Fusarium* sp.),分别在中性 (pH=6.7) 和酸性 (pH=4.1) 条件下去除正己烷。结果表明,在正己烷进口负荷为 140g/(m³·h) 时,酸性条件下的去除能力 (100g/(m³·h)) 优于中性条件下的去除能力 (60g/(m³·h))。这说明,真菌在对正己烷的去除中起了重要作用,并且在酸性环境中表现出更高的去除性能。通过对微生物蛋白质含量的测定发现,酸性环境中的蛋白质含量明显要高于中性环境中的蛋白质含量。但中性环境中的微生物分泌出更多的胞外多聚物 (EPS)。因此,环境因素对丝状真菌的生理活性和去除效果产生很大的影响。

除了处理单一 VOC 之外,有学者^[17-18]研究了以 *Cladosporium* sp. 为优势菌的生物过滤塔对含有甲苯、乙酸丁酯和酮类物质等多种 VOCs 气体的去除情况。该生物过滤塔以聚氨基甲酸乙酯泡沫为载体,通过载体浸泡于液体培养基的方式进行挂膜。过滤塔的

空塔停留时间为 15s,运行 94d 后,总去除能力可达 92.4g/(m³·h)。

3.3 白腐真菌 (White rot fungi) 生物过滤塔

白腐真菌是一类具有特殊性质的微生物,该类菌能分泌胞外酶降解木质素和纤维素,对其它具有复杂结构的难降解有机物也具有很强的分解能力^[19]。正是由于白腐真菌独特的降解性能,使得该菌种在环境污染控制领域的研究日益成为热点。其中黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 是白腐真菌中的模式菌种,Oh Y S^[20]等曾将 *Phanerochaete chrysosporium* 在土豆浸出液培养基中(加入细菌抑制剂)培养 3~4d 后,分别接种在以水疔球 (Hydroball) 和玻璃珠为填料的过滤塔内(直径 6cm,高度 30cm)。在曝气一周后,将苯、甲苯和二甲苯的混合气体通入生物过滤塔。运行约 40d 后,水疔球过滤塔的总去除能力稳定在 0.9~1.2g/(m³·h) (进口负荷约为 1.5g/(m³·h)) 玻璃球过滤塔的总去除能力最大可达 10g/(m³·h) (进口负荷约为 20g/(m³·h))。另外,作者在研究进气流速对 *Phanerochaete chrysosporium* 玻璃球过滤塔去除效果的影响时发现,在 0.026~0.450L/h 的流速范围内,生物过滤塔在大流速下往往能获得较好的去除效果。值得注意的是,与其它真菌过滤塔不同,白腐真菌过滤塔对 BTX 的降解并不需要加入额外的碳源(营养液)。这说明,BTX 类物质在白腐真菌的初生代谢阶段得到了降解,这一降解过程与木质素在次生代谢阶段发生降解的过程不同^[21]。这个观点在 Yadav 和 Reddy 的论文中也有所表述^[22]。

目前,应用白腐真菌在生物过滤塔中处理 VOCs 的研究非常有限,已有的研究在过滤塔的处理能力和稳定性方面还有很大的提高空间。因此,对于白腐真菌气相生物过滤塔的开发和研究还有待进一步深入。

3.4 其它丝状真菌过滤塔

除了上述几种丝状真菌过滤塔用于 VOCs 的控制外,还有部分学者将其它种类的丝状真菌也应用到气相生物过滤塔当中,详见表 2。表中的数据表明,多数丝状真菌过滤塔对 VOCs 都具有较好的去除能力。

表 2 其它丝状真菌过滤塔去除 VOCs 的主要参数
Table 2 VOCs removal by other filamentous fungi biofilters

真菌种类	污染物	进口负荷 (g/(m ³ ·h))	去除能力 (g/(m ³ ·h))	填料种类	反应器容积 (L)	空塔停留时间 (s)	运行天数 (d)	参考文献
镰刀菌 (<i>Fusarium</i> sp.)	正己烷	140	50	珍珠岩	0.23	21	25	Sonia, et al. 2005 ^[9]
腐皮镰霉 (<i>Fusarium solani</i>)	正己烷	148~172	130	珍珠岩	2.5	60	100	Sonia, et al. 2005 ^[9]
黑曲霉 (<i>Aspergillus niger</i>)	正己烷	300	150	颗粒黏土	1.8	3240	60	Spigno, et al. 2004 ^[11]
尖端囊多孢子菌 (<i>Scedosporium apiospermum</i>)	甲苯	300	258	蛭石和颗粒 活性炭	2.9	69	180	Garc ía, et al. 2001 ^[8]

4 丝状真菌过滤塔控制 VOCs 的研究方向

综上所述,丝状真菌过滤塔是一种有效的 VOCs 控制技术,它相对于细菌类生物过滤塔具有去除效率

高,耐低 pH,抗干燥等优势。但在以下几方面还需进一步研究:

(1) 所研究的 VOCs 种类较少,且多集中在甲苯、正己烷、苯乙烯等少数几种物质上,对于更难生物降解,对人体毒性更强的卤代烃及其衍生物研究很少。

(2) 研究的气体多为单一组分 VOC,对于混合 VOCs 气体的研究有限。

(3) 对于保持丝状真菌生物过滤塔长期运行的稳定性和对生物量进行有效控制等问题有待进一步解决。

(4) 对于部分高效菌种(如:白腐真菌)在气相生物过滤塔方面的研究有待加强。

5 结语

当前,随着工农业的迅速发展,VOCs 的使用和排放日益增加,由此而带来的环境问题也引起人们广泛的关注。在众多的 VOCs 控制技术中,生物过滤塔工艺由于其处理效率高,运行费用低,操作方便等特点而被广泛研究和应用。其中,丝状真菌过滤塔又具有耐低 pH 能力强,抗干燥性能好等优点而逐渐成为研究的热点。随着研究的不断深入和技术的日趋完善,以丝状真菌过滤塔为主的 VOCs 控制技术,将会得到越来越广泛的应用。

[参考文献]

- [1] 王灿,席劲瑛,胡洪营,等.白腐真菌生物过滤塔处理氯苯气体的研究[J].环境科学,2008,29(2):230-235.
Wang Can, Xi Jin-ying, Hu Hong-ying. White-rot fungi biofilter treating waste gas containing chlorobenzene[J]. Journal of Environmental Science, 2008, 29(2): 230-235. (in Chinese)
- [2] 刘明阳,刘建华,张馥,等.我国有机氯污染物污染现状及监控对策[J].环境科学与技术,2004,27(3):108-110.
Liu Ming-yang, Liu Jian-hua, Zhang Fu, et al. Organochlorine pollutants and monitoring method in China[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 27(3): 108-110. (in Chinese)
- [3] 席劲瑛,胡洪营.生物过滤法处理挥发性有机物气体研究进展[J].环境科学与技术,2006,29(10):106-108.
Xi Jin-ying, Hu Hong-ying. Performance of biofilters for the removal of VOCs[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(10): 106-108. (in Chinese)
- [4] 瞿畏,杨春平,曾光明,等.生物滴滤塔去除挥发性有机物的影响因素[J].环境科学与技术,2004,30(1):105-107.
Qu Wei, Yang Chun-ping, Zeng Guang-ming, et al. Influencing factors of VOCs removal in biotrickling filter[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 30(1): 105-107. (in Chinese)
- [5] Yang Y, Allen E R. Biofiltration control of hydrogen sul-

fide[J]. Journal of Air Waste Management, 1994, 44: 863-868.

- [6] 李琳,刘俊新.真菌降解挥发性有机污染物的特性与影响因素[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(3):1-5.
Li Lin, Liu Jun-xin. Characteristics and effect on the degradation of volatile organic pollution by fungi[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(3): 1-5. (in Chinese)
- [7] Estévez Elenea, Veiga Maria C, Kennes Christian Biofiltration of waste gases with the fungi *Exophiala oligosperma* and *Paecilomyces variotii*[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2005, 67: 562-568.
- [8] García-Peña EI, Hernández S, Favela-Torres E, et al. Toluene biofiltration by the fungus *Scedosporium apiospermum* TB1. [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 76(1): 61-69.
- [9] Sonia Arriaga, Sergio Revah. Removal of n-hexane by *Fusarium solani* with a gas-phase biofilter[J]. Journal of Microbial Biotechnol, 2005, 32: 548-553.
- [10] Kennes Christian, Veiga Maria C. Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air[J]. Journal of Biotechnology, 2004, 113: 305-319.
- [11] Spigo Giorgia, Pagella Claudio, Fumi M Daria, et al. VOCs removal from waste gases: gas-phase bioreactor for the abatement of hexane by *Aspergillus niger* [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58: 739-746.
- [12] Kibazohi Oscar, Yun Soon, Anderson William A. Removal of hexane in biofilters packed with perlite and a peat-perlite mixture[J]. World Journal of Microbial Biotechnology, 2004, 20: 337-343.
- [13] Kluczek-Turpeinen B, Tuomela M, Hatakka A, et al. Lignin degradation in a compost environment by the deuteromycete *Paecilomyces inflatus*[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2003, 61: 374-379.
- [14] Aitor Aizpuru, Bertrand Dunat, Pierre Christen, et al. Fungal biofiltration of toluene on ceramic rings[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(3): 396-402.
- [15] Weber F J, Hage K C, de Bont J A M. Growth of the fungus *Cladosporium sphaerospermum* with toluene as the sole carbon and energy source[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1995, 61: 3562-3566.
- [16] Sonia Arriaga, Sergio Revah. Improving hexane removal by enhancing fungal development in a microbial consortium biofilter [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 90(1): 107-115.
- [17] Moe William M, Qi Bing. Performance of a fungal biofilter treating gas-phase solvent mixtures during intermittent loading[J]. Water Research, 2004, 38: 2258-2267.

(下转第 52 页)

- fluorooctanoate and perfluorooctane sulfonylamide in human plasma by column-switching liquid chromatography-electrospray mass spectrometry coupled with solid-phase extraction[J]. Journal of Chromatography Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2004, 810(1): 49-56.
- [63] Vyas S M. Differences in the isomer composition of perfluorooctanesulfonyl (PFOS) derivatives[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2007, 42(3): 249-255.
- [64] Langlois I. Structural identification of isomers present in technical perfluorooctane sulfonate by tandem mass spectrometry[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2006, 20(5): 844-850.
- [65] De Silva A O. Isolating isomers of perfluorocarboxylates in polar bears (*Ursus maritimus*) from two geographical locations[J]. Environ. Sci. Technol., 2004, 38(24): 6538-6545.
- [66] Meesters R J W. Perfluorooctane sulfonate- a quite mobile anionic anthropogenic surfactant, ubiquitously found in the environment[J]. Wat. Sci. Technol., 2004, 50(5): 235-242.
- [67] 郭睿, 蔡亚岐, 江桂斌, 等. 全氟辛烷磺酰基化合物 (PFOS) 的污染现状与研究趋势[J]. 化学进展, 2006, 18(6): 808-813. Guo Rui, Cai Ya-qi, Jiang Gui-bin, et al. Current Research of Perfluorooctane Sulfonate[J]. Progress in Chemistry, 2006, 18(6): 808-813. (in Chinese)
- [68] 陈静, 张彭义, 刘剑. 全氟羧酸在 185nm 真空紫外光下的降解研究[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 772-776. Chen Jing, Zhang Peng-yi, Liu Jian, et al. Photodegradation of perfluorinated carboxylic acids by 185nm VUV light[J]. Environmental Science, 2007, 28(4): 772-776. (in Chinese)
- [69] 薛学佳, 周钰明, 吴敏, 等. 含氟有机化合物优势降解菌的筛选[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(1): 11-12. Xue Xue-jia, Zhou Yu-min, Wu Min, et al. Screening of dominant strains of degrading organo-fluorine compounds[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 27(1): 11-12. (in Chinese)
- [70] 杨波, 南碎飞, 余晓斌. 含低浓度全氟辛酸铵废水溶液的处理研究[J]. 水处理技术, 2006, 32(4): 30-33. Yang Bo, Nan Sui-fei, Yu Xiao-bin, et al. Treatment of wastewater with low concentration organofluorine[J]. Technology of Water Treatment, 2006, 32(4): 30-33. (in Chinese)
- [71] Higgins C P, Luthy R G. Sorption of perfluorinated surfactants on sediments[J]. Environ. Sci. Technol., 2006, 40(23): 7251-7256.
- [72] 贾成霞, 潘纲, 陈灏. 全氟辛烷磺酸盐在天然水体沉积物中的吸附-解吸行为[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1611-1617. Jia Cheng-xia, Pan Gang, Chen Hao. Sorption and desorption behavior of perfluorooctane sulfonate on the natural sediments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(10): 1611-1617. (in Chinese)
- [73] 范保安, 安静雯. 全氟辛酸铵盐在离子交换树脂上的行为研究[J]. 有机氟工业, 1991, 4: 1-4. Fan Bao-an, An Jing-wen. Research and application about the action of perfluorooctanoic ammonium on the ion-exchange resins[J]. Organo-fluorine Industry, 1991, 4: 1-4. (in Chinese)
- [74] 宋学章. 全氟辛酸回收技术的研究[J]. 有机氟工业, 2007, 3: 8-9. Song Xue-zhang. Research on collected technology of PFOA[J]. Organo-fluorine Industry, 2007, 3: 8-9. (in Chinese)
- [75] 张在利, 曾子敏, 刘忠文, 等. 回收全氟辛酸的研制和应用[J]. 化工新型材料, 2004, 32(4): 53-55. Zhang Zai-li, Zeng Zi-min, Liu Zhong-wen, et al. Preparation and application of recovered perfluorooctanoic acid[J]. New Chemical Materials, 2004, 32(4): 53-55. (in Chinese)
- [76] 张和平, 南碎飞, 窦梅. 泡沫分离法回收废水中的全氟辛酸铵的研究[J]. 化学工程师, 2005, 123(12): 48-51. Zhang He-ping, Nan Sui-fei, Dou Mei. Research on recovery of ammonium perfluorooctanoate from wastewater by adsorptive bubble separation method[J]. Chemical Engineer, 2005, 123(12): 48-51. (in Chinese)
- [77] 王钦. 纳滤与泡沫分离集成回收废水中全氟辛酸铵的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. Wang Qin. Combination of Nanofiltration and foam Separation to Recover Ammonium perfluorooctanoate from wastewater[D]. HangZhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)

(上接第 43 页)

- [18] Qi Bing, Moe William M, Kinney A Kerry. Treatment of paint spray booth off-gas in a fungal biofilter[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(2): 180-188.
- [19] John A Bumpus, Ming Tien, David Wright, et al. Oxidation of persistent environmental pollutants by a white rot fungus[J]. Science, 1985, 228: 1434-1436.
- [20] Oh Young-sook, Choi Sung-chan, Kim Yeong-kwan. Degradation of gases of BTX by biofiltration *Phanerochaete chrysosporium*[J]. The Journal of Microbiology, 1997, 3: 34-38.
- [21] Pointing S B. Feasibility of bioremediation by white-rot fungi[J]. Appl Microbiol Biotechnology, 2001, 57: 20-33.
- [22] Yadav J S, Reddy C A. Degradation of benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes (BTEX) by the lignin-degradation basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Appl Microbiol Biotechnology, 1993, 59: 756-762.