

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

序	郝郑平 (4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳, 朱彬, 李用宇 (4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 王亘, 翟友存 (4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉, 朱彬, 高晋徽, 李用宇, 夏丽 (4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄 (4529)
四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响	韩丽, 王幸锐, 何敏, 郭卫广 (4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷 (4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春, 彭艳春, 谭吉华, 郝吉明, 柴发合 (4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷, 李红, 王学中, 张新民, 温冲 (4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银, 王秀艳, 高爽 (4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究	王浙明, 徐志荣, 叶红玉, 许明珠, 王晓星 (4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰, 王铁宇, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征	崔如, 马永亮 (4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源, 李建军, 廖东奇, 涂翔, 许玫英, 孙国萍 (4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开, 程赫明, 罗会龙 (4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清, 聂磊, 田刚, 李靖, 邵霞, 王敏燕 (4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强, 甘平, 杨乐, 戴子瑜, 祁世鸿, 贾建丽, 何绪文 (4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平, 杨乐巍, 房增强, 郭淑倩, 于妍, 贾建丽 (4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平, 王世杰, 赵欢欢, 伍斌, 韩春媚, 房吉敦, 李慧颖, 细见正明, 李发生 (4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林, 邱兆富, 何龙, 宴颖, 吕树光, 隋倩, 林匡飞 (4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超, 罗茜, 陈虎, 魏孜, 王子健, 许科文 (4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰, 徐建芬, 唐访良, 张明, 阮东德 (4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌, 律国黎, 任爱玲, 杜昭, 邢志贤, 韩鹏, 高博, 刘淑娅 (4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜, 成卓韦, 王家德, 活泼 (4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超, 赵梦升, 张丽丽, 陈建孟 (4669)
BF 和 BTF 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙, 於建明, 成卓韦, 蔡文吉 (4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德, 郑亮巍, 朱润晔, 俞云锋 (4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔, 郑亮巍, 毛玉波, 王家德 (4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞, 黄维秋, 王丹莉, 张琳, 杨光 (4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷, 杨国靖, 夏静芬 (4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟, 栾志强, 解强, 叶平伟, 李凯, 王喜芹 (4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章, 黄维秋, 杨光, 赵晨露, 王英霞, 蔡道飞 (4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖, 王敏燕, 张健, 何万清, 聂磊, 邵霞 (4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟, 于艳科, 陈进生, 何焜 (4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁, 刘玉海, 韦连梅, 叶招莲, 张善端 (4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春, 刘杰民, 付慧婷, 孙媛, 林文辉 (4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅, 张国宁, 任春, 邹兰, 魏玉霞 (4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅, 张国宁, 邹兰, 魏玉霞, 张明慧 (4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇, 李奇峰, 吕永龙 (4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强, 周刚, 钟琪, 赵金宝, 杨凯 (4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹, 隋立华, 郭亚逢, 马传军, 杨文玉, 高阳 (4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞, 李延明 (4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新, 王宇飞, 郝郑平, 王铮 (4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事 (4717) 《环境科学》征稿简则 (4742) 信息 (4528, 4626, 4693, 4700)	

新型生物滴滤填料性能评价

梅瑜¹, 成卓韦², 王家德^{2*}, 活泼¹

(1. 浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310005; 2. 浙江工业大学环境工程研究中心, 杭州 310032)

摘要: 填料是微生物附着生长、水分保持的支撑体, 填料的性能直接关系到污染物的最终去除效果. 研究开发了 3 种新型生物滴滤填料: 纹翼多面球、改性毛刺球和空心多面柱. 测试表明 3 种填料中, 空心多面柱和纹翼多面球的结构特性参数均优于普通的生物滴滤填料, 特别是比表面积, 达到了 $200 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ 左右. 纹翼多面球的阻力系数 ζ 在挂膜前后几乎没有变化, 而毛刺球的阻力系数 ζ 增长明显. 生物滴滤塔 (BTF) 实验表明, 采用空心多面柱的 BTF 挂膜启动的时间明显快于其他两种填料; 稳定运行阶段实验结果表明, 当甲苯和乙醇进口浓度分别为 $687.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $651.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 采用纹翼多面球的 BTF 去除效果较好, 对于两者的去除率分别达到了 76.78% 和 99.23%. 生物量测试表明, 3 种填料湿生物量也均高于普通的聚丙烯鲍尔环. 纹翼多面球填料易实现生物膜的更新与剥落, 稳定运行后期单位填料层压降维持在 $51.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$, 而毛刺球平均压降显著升高 ($193.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$), 出现了严重堵塞现象.

关键词: 生物滴滤; 填料; 性能评价; 去除效率; 生物量

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4661-08

Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings

MEI Yu¹, CHENG Zhuo-wei², WANG Jia-de², HUO Po¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310005, China; 2. Research Center of Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Packing is the support medium for microbial adhesion and water retention, and its characteristics are directly related to the removal of pollutants. In the present study, three novel biotrickling packings were developed: polyhedral sphere, burr sphere and polyhedral hollow column. The results showed that the structural characteristics of polyhedral sphere and polyhedral hollow column, with the specific surface area of $200 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, were better than those of traditional biotrickling packings. The resistance coefficient ζ of polyhedral sphere was almost identical before and after the biofilm formation. Under the same condition, ζ of burr sphere increased much more. Investigations on the start-up time showed that the polyhedral hollow columns could contribute more to the quick biofilm formation. The performance of BTF which was packed with polyhedral sphere was better than the others. When the inlet concentrations of toluene and ethanol were 687.37 and $651.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, the removal efficiencies achieved 76.78% and 99.23%, respectively. Biomass measurements showed that the biomass adhering on these packings were more than that on the common polypropylene Bauer ring. Biofilm could be renewed and removed easily from the polyhedral sphere and the pressure drop could maintain at $51.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ at the later stable running phase. However, the pressure drop in the BTF which used burr sphere as the packings increased much more ($193.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$), thus causing a clogging phenomenon.

Key words: biotrickling filter; packings; performance evaluation; removal efficiency; biomass

近年来, 燃煤、工业废气和扬尘颗粒的大量排放, 造成了 SO_2 、氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 等污染物共存的现象, 使得我国大气污染总体上进入了复合型污染阶段. 特别是 2012 年底到 2013 年初, 我国大部分地区出现的灰霾现象, 就是由复合型大气污染造成的. VOCs 是其中一类重要的污染物, 《国家环境保护“十二五”规划》里也明确指出“……加强挥发性有机污染物和有毒废气的控制……”. 因此, 防治 VOCs 污染具有非常重要的现实意义.

生物净化 VOCs 是在已成熟的采用微生物处理有机废水的基础上发展起来的, 主要的处理对象是既无回收价值又严重污染环境的恶臭废气和中低浓

度的 VOCs^[1,2]. 填料是生物净化工艺的核心组件, 它既是微生物附着生长、水分保持的支撑体, 又能对微生物胞外酶和污染物进行吸附富集, 因此它的性能直接影响了污染物的去除效果^[3,4]. 优质填料一般应具有以下特征^[5~8]: 较大的孔隙率和比表面积, 一定的机构强度和较低的自重, 较好的持液性能和营养供给, 耐腐蚀性和不易腐烂等. 目前, 废气生物净化所采用的填料主要包括两种类型: 一是天然填料 (用于生物过滤工艺), 如土壤、堆肥、改性活

收稿日期: 2013-06-20; 修订日期: 2013-07-31

基金项目: 国家国际科技合作项目 (2011DFA92660); 浙江省引进大院名校共建创新载体项目 (2012E80002)

作者简介: 梅瑜 (1983~), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: imyl220@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jdwang@zjut.edu.cn

性炭、改性硅藻土等,其中所含有机质会被降解,使填料压实;二是人工合成填料(用于生物滴滤工艺),这类填料通过强化功能改造和人工设计来改善性能,如高孔隙率、高机械强度的 PU 填料等.

随着生物净化 VOCs 的研究逐步深入,一些常规的填料已无法满足净化要求,研究者开始致力于新型填料的研发工作. 王家德等^[9]研发的具有营养缓释功能的高效复合生物过滤填料以立体网状纤维为骨架,通过胶膜固定、吸附包埋等工艺,使有机养分以固相状均匀负载于网状纤维表面,使用过程中缓慢释放无机营养成分,解决了传统生物填料需额外添加营养、易堵塞等工程技术问题. Li 等^[10]比较了分子筛、粒状多孔碳和氧化铁脱硫剂等 3 种材料作为填料处理含硫恶臭废气,结果表明,填充包埋有脱硫菌的氧化铁的生物滴滤塔对于含硫恶臭废气的处理效果最好. 目前,有关生

物过滤填料的报道较多,而有关生物滴滤填料的研究国内外鲜有报道.

基于以上背景,本研究研发了 3 种新型生物滴滤填料:纹翼多面球、毛刺球和空心多面柱,测定了它们的特性参数,建立了以这 3 种填料为生物载体的滴滤塔,并以甲苯和乙醇混合气为模拟废气,考察了 3 种填料对污染物去除性能的影响,从而对 3 种填料进行综合性能评价,以期在实际工程应用提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 填料研发

本研究开发了 3 种生物滴滤填料,分别为纹翼多面球、改性的毛刺球和空心多面柱(见图 1). 3 种填料主体材质均为聚丙烯,两个球形填料规格为 $\Phi 50\text{ mm}$; 空心多面柱规格为 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$.

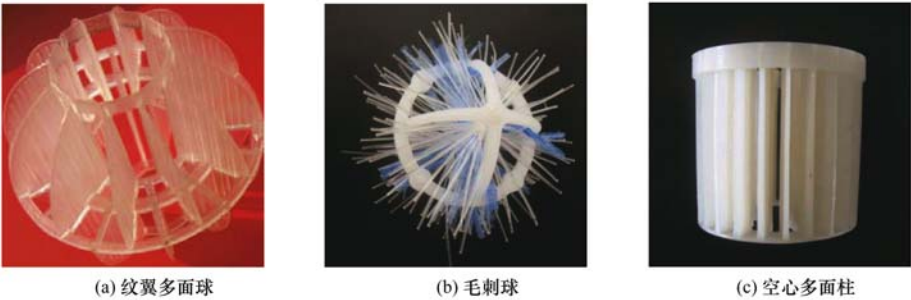


图 1 填料实物示意

Fig. 1 Photos of the packing materials

1.2 生物滴滤中试装置

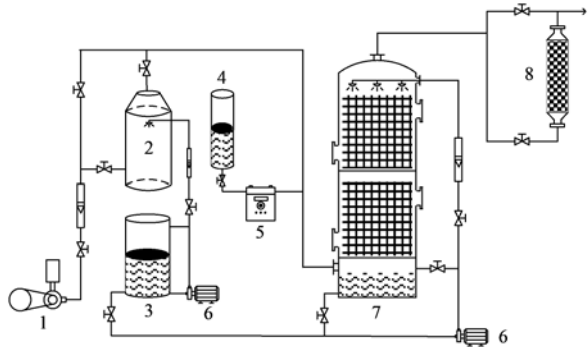
生物滴滤中试装置工艺流程图详见图 2. 生物滴滤塔内径为 780 mm,塔体分为三段,每段高 800 mm,自上而下第一、二段装载填料,第三段用于贮存循环液. 塔体第一、二段相对方向设填料取样

口,进出气管设气体采样口.

生物滴滤装置运行时,喷淋强度保持 $30\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 不变,循环液每天更新一次. 模拟废气风量为 $32\sim 128\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,进行气液逆流操作(表 1). 采用的接种物系某医药股份有限公司好氧池活性污泥,经甲苯、乙醇驯化一个月所得,采用气液联合挂膜法对生物滴滤塔进行挂膜. 实验分 2 个阶段进行:阶段 I 为挂膜启动期,阶段 II 为稳定运行期.

表 1 生物滴滤塔运行参数

Table 1 Operating parameters of biotrickling filter				
运行阶段	时间/d	进气流量 $/\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	停留时间 $/\text{s}$	进气浓度 $/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
I	0 ~ 30	64	32	乙醇 600 ~ 650
				甲苯 680 ~ 700
II	31 ~ 60	32-128	16-64	乙醇 600 ~ 650
				甲苯 680 ~ 700



1. 罗茨风机; 2. 增湿器; 3. 贮水罐; 4. 高位槽;
5. 恒流泵; 6. 循环泵; 7. 生物滴滤塔; 8. 吸附柱

图 2 生物滴滤中试装置工艺流程示意

Fig. 2 Diagram of the pilot-scale biotrickling filter

1.3 分析方法

堆积密度 γ_p : 取数量足够多的填料,用精度为

0.01 g 的分析天平称出其总重量,再除以填料个数,为每个填料的平均重量.平行样 3~5 次后即为单个填料的平均重量,记为 $m(\text{g})$.堆积密度按下式计算:

$$\gamma_p = m \times n \times 10^{-3}$$

式中, γ_p 为堆积密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; m 为单个填料重量, $\text{g}\cdot\text{个}^{-1}$; n 为填料堆积个数, $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$,从而得出堆积密度 γ_p .

空隙率 ε :对于 BTF 填料来说,填料空隙由三部分组成,一是填料个体之间以及填料个体与塔壁之间的空隙,二是填料内部空隙,三是构成填料材料所含的孔隙包括微孔.空隙率可按式计算:

$$\varepsilon = (1 - \gamma_p/\rho) \times 100\%$$

式中, ε 为空隙率,%; γ_p 为堆积密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ 为真密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

比表面积 a :比表面积 a 用精度 0.02~0.05 mm 的游标卡尺测量并计算.将其分解为若干个面积测量和计算单元,并逐一测量和计算,再进行累加.本研究不考虑因微孔导致的表面积和填料表面的粗糙度.

压力降 ΔP :采用上海宏宇环保应用研究所 DP-2000 数字压力计测定,该压力计量程为 0~1 999 Pa,分辨力为 1 Pa.

持液量 h :持液量分静持液量 h_s 和动持液量 h_o .静持液量 h_s 测定采用在中试装置的循环水罐内充满一定量的循环液,并记录液位刻度 $v_1(\text{m}^3)$,开启循环泵按喷淋强度为 $30\text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$ 喷淋 20 min 以上,直至所有填料充分湿润停止喷淋,观察填料层,直至填料层不再滴水时再次读取水位刻度 v_2

(m^3).按下式计算静持液量: $h_s = (v_1 - v_2)/V$.动持液量 h_o 与静持液量 h_s 采用同一测定方法,但要使风机和循环水泵运行并按气量 $88\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 、循环水流量为 $860\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 情况下测定,在运行稳定情况下仔细读取在喷淋情况下的水位刻度 $v_3(\text{m}^3)$.按下式计算动持液量:

$$h_o = (v_1 - v_3)/V$$

填料生物量 X :将覆盖生物膜的填料、103~105℃ 烘干至恒重后的填料以及生物膜完全剥离后的填料分别进行称重,计算可得.

耐酸率 R_A :填料样品在酸溶液中保持一定时间,腐蚀后试样的重量和腐蚀前试样重量之比,即可得出填料的耐酸度.填料耐酸性 R_A 的计算公式:

$$R_A = m_2/m_1 \times 100$$

式中, R_A 为耐酸率,%; m_1 为试样原始质量,g; m_2 为试样腐蚀后质量,g.

甲苯、乙醇浓度测定:甲苯和乙醇质量浓度均采用气相色谱法测定,气相色谱仪为日本岛津 GC-2014,色谱柱为 RTX-1 毛细管柱,毛细柱、汽化室和检测器温度分别为 60、150、160℃,流速 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 填料结构参数

实验测得 3 种填料的主要物理结构特性参数见表 2.

空隙率和比表面积是表征填料性能的两个重要参数.较高的空隙率有利于污染物和养分的扩散传

表 2 生物滴滤填料结构特性参数

Table 2 Structural parameters of packing materials

项目	纹翼多面球	毛刺球	空心多面柱
材质	聚丙烯	聚丙烯	聚丙烯
规格 D_g/mm	$\Phi 50$	$\Phi 50^{1)}$	$\Phi 50 \times 50$
堆积个数 $n/\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	11 610	8 437	7 153
挂膜前堆积密度 $\gamma_{p0}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	46.14	43.79	119.36
挂膜后堆积密度 $\gamma_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	47.08	55.26	122.33
真密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	904.8	935.5	958.0
空隙率 $\varepsilon/\%$	94.90	95.32	87.54
比表面积 $a/\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$	193	119	257
干填料因子 F/m^{-1}	227	137	383
耐酸率 $R_A/\%$	0.017 0	0.044 3	0.022 1
初始静态持液量 $h_s/\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.015 0	0.020 4	0.013 7
初始动态持液量 $h_o/\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.023 1	0.028 9	0.022 4
挂膜后静态持液量 $h_{1s}/\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.041 7	0.037 8	0.040 7
挂膜后动态持液量 $h_{1o}/\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	0.047 6	0.043 5	0.046 1

1) 指毛刺球外框尺寸

质,较大的比表面积则有利于污染物的吸附和微生物的附着生长^[11,12]. 3种填料的空隙率均在85%以上,高于普遍采用的PU填料和一些生物过滤填料. 废气生物填料的比表面积达到 $200 \sim 1\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ 即可满足生物净化工艺要求^[3]. 根据这一要求,空心多面柱和纹翼多面球具备了生物填料的基本特性.

填料的持液量变化如图3所示. 3种填料的持液性能良好,填料完成挂膜后,其持液量明显提高,持液特性显著提升. 纹翼多面球的持液特性显然优于其它两种填料,其挂膜后持液量最大,静态和动态持液量(液体/填料层)分别为 $0.0417 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.0476 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,分别是挂膜前的2.78和2.06倍.

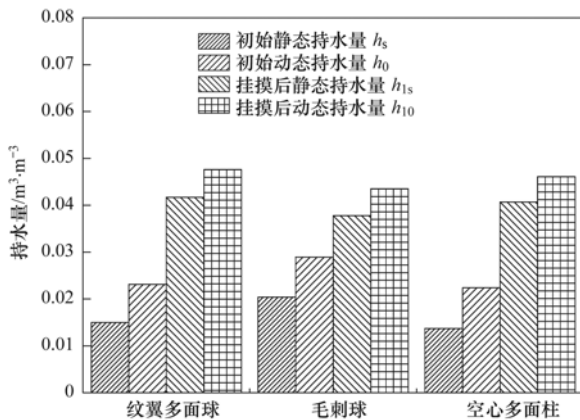


图3 填料挂膜前、后持液量对比

Fig. 3 Comparison of the water holding before and after start-up

2.2 填料阻力系数

根据 $\Delta P/Z = \zeta \times (\rho v^2/2)$

式中, ΔP 为填料层阻力,Pa; Z 为填料层高度,m; ζ 为阻力系数,无因次; ρ 为气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 为空塔气速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

由上可知,单位填料层阻力与空塔气速平方成正比. 在一定的液体喷淋量下,空塔气速越大,阻力越大,其压降也越大. 喷淋强度保持 $30 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$,调节气体流量,分别选取挂膜前和系统长期稳定运行时,考察了阻力与空塔气速的关系,结果如图4所示.

根据上述公式,分别计算了3种的填料的阻力系数 ζ . 纹翼多面球、毛刺球和空心多面柱三者挂膜前阻力系数 ζ 分别为13 784、12 722和29 007. ζ 值越小,流动阻力越小,由此可知,毛刺球流动阻力最小. 挂膜后,在系统稳定运行下,3种填料的阻力系数 ζ 分别为13 860、85 872和63 094,纹翼多面球填料层阻力系数几乎没有发生变化,而毛刺球填料层的阻力系数增长明显. 毛刺球填料层在运行过程中,压实现象严重,初始填料层高度为1.080 m,稳定运行一段时间后填料层高度仅为0.856 m,缩减为原来的79.3%. 通过观察填料,发现固定在填料上的生物量大且生物膜较厚,部分接触处甚至可达数毫米,从而造成毛刺球填料层堵塞严重,气流通过阻力明显增大. 从以上分析可知,挂膜后填料层阻力最小的为纹翼多面球,从阻力角度来讲,纹翼多面球填料更优.

2.3 生物滤塔实验

2.3.1 挂膜启动期比较

挂膜启动阶段是生物滤塔运行的重要阶段之一,它的长短直接影响了生物滤塔的工程应用. 除了要有特定的混合菌群作为接种液外,填料性能也直接影响了生物膜的形成过程^[13~15]. 3种填料均采用相同的挂膜条件,循环液更换率 $30 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,环境温度 $25 \sim 35^\circ\text{C}$. 挂膜启动阶段混合废气的去除情况如图5所示. 由于填料具有一定的吸附特性,故先将

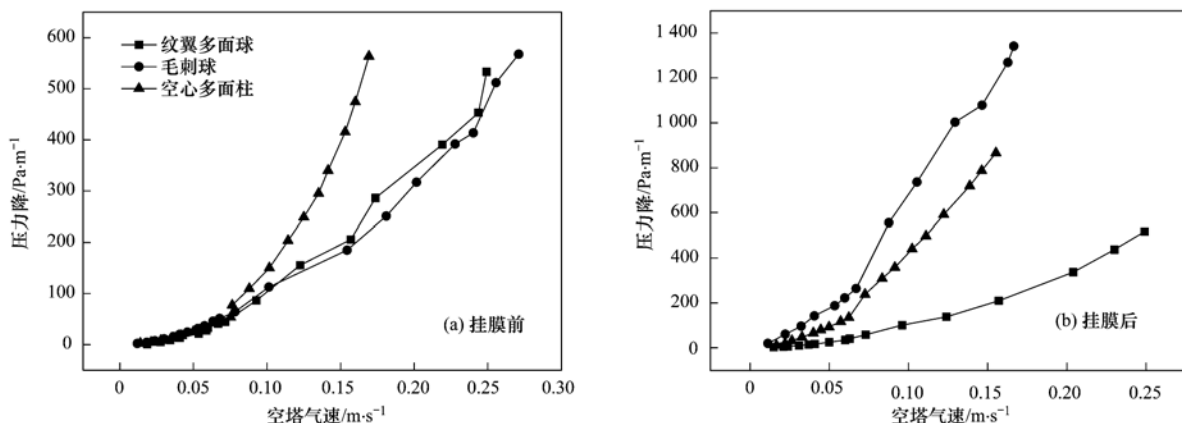


图4 不同空塔气速下阻力变化曲线

Fig. 4 Curve of the pressure drop under different velocity

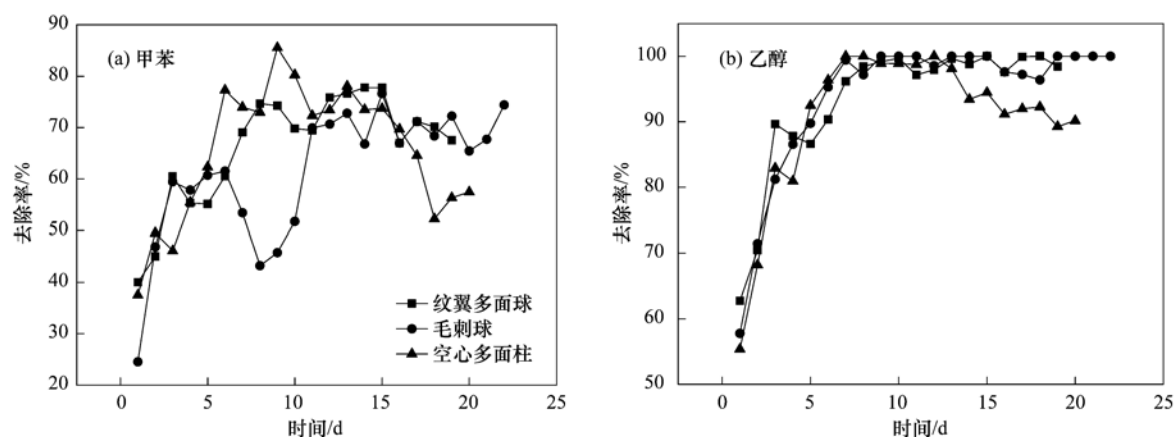


图5 BTF挂膜阶段各种废气组分去除率变化曲线

Fig. 5 Curve of BTF's removal efficiency at the starting-up phase

混合废气通入一段时间,待进出口废气组分浓度一样时,说明填料已吸附饱和,再进行挂膜启动考察。

当污染物进口浓度一定时,去除率逐步上升至一定值并保持,即可认为挂膜启动完成。由图5可知,采用纹翼多面球、毛刺球和空心多面柱填料的BTF对乙醇的去除率在7、6和6 d后维持在95%以上,而对甲苯的去除率相对较低,达到稳定时间也相对较长,为8 d (75%)、12 d (71%)和6 d (77%)。3种填料的BTF启动速度为:空心多面柱>纹翼多面球>毛刺球。

2.3.2 稳定运行比较

在稳定运行阶段,分别考察了不同停留时间条件下,填充3种填料的BTF对甲苯和乙醇的去除效果。循环液喷淋强度始终保持在 $30 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$,更换率为 $30 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,环境温度为 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 。BTF对甲苯和乙醇的去除效果分别如图6所示。

在甲苯进气浓度基本一致(分别为687.37、

697.23和 $682.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)的实验条件下,仅以纹翼多面球填料的BTF系统能保持稳定的去除率和去除负荷,在稳定运行的25 d内,平均去除率为76.78%,平均去除负荷为 $87.49 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。而采用毛刺球和空心多面柱为填料的BTF系统污染物去除能力均在运行后期发生下滑:毛刺球填料BTF在运行后期,甲苯平均去除率为23.70%,平均去除负荷则仅为 $31.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$;空心多面柱填料BTF运行后期甲苯平均去除率和去除负荷为27.02%和 $30.82 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

造成污染物去除效果下降的主要原因是由于填料层的堵塞所引起的。填料堵塞是废气生物处理过程中经常出现的问题之一,是由于填料表面老化脱落的生物膜和一些代谢产物等没有及时排出系统造成的^[16,17]。毛刺球填料BTF系统运行两周左右时,压力降开始逐渐增加,填料层开始出现阻塞现象。由于填料层上微生物量开始增加,生物膜变厚,附着有生物膜的填料层持液量也有所增加。由于气流通

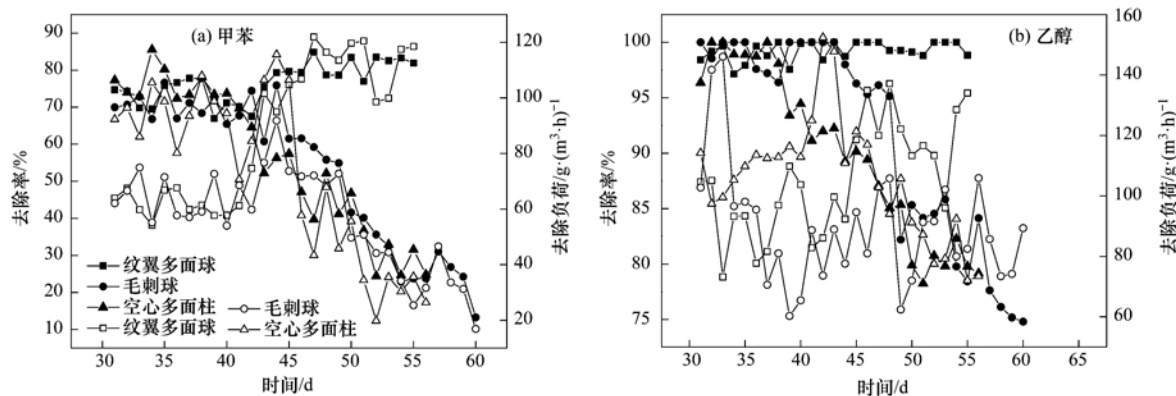


图6 BTF稳定运行阶段各组分去除率、去除负荷比较

Fig. 6 Comparison of removal efficiency and eliminate capacity by BTF with different packing materials

过的阻力增大主要来自于生物膜和填料层持液的增加,因此,导致填料层重量增大,填料层之间互相紧密,局部出现墩实现象,毛刺球填料层高度缩短了20.71%,从而导致了BTF填料层空隙率变小、气流通过阻力增大、填料层内循环液分布不均.通过观察填料层发现,塔内部分填料层有黑色的生物膜,而适宜于降解甲苯和乙醇混合废气的微生物混合菌群多为浅黄色,这可能是由于老化的生物膜附着在填料表面,生物膜内部得不到充足的氧气,厌氧层增厚,好氧层与厌氧层之间的平衡被打破,生物膜得不到及时更新,从而导致微生物活性下降甚至于死亡,降低了系统的污染物降解能力.

由图6(b)可以看出,在乙醇进气浓度基本一致(分别为651.17、604.19和630.22 mg·m⁻³)时,3种填料的BTF对乙醇的去除率分别为99.23%、99.21%和98.87%,对应的去除负荷为105.43、93.03和108.18 g·(m³·h)⁻¹.三者差异不是很大,这可能是由于相对于甲苯,乙醇的水溶性好,容易从气相扩散至液相,填料的性能对其扩散传质的效果影响不是很大.采用Michaelis-Menten模型对生物滤塔内甲苯和乙醇的动力学行为进行描述[式(1)]^[18]:

$$\frac{V/Q}{c_{gi}-c_{go}}=\frac{K_m}{r_{max}}\times\frac{1}{c_{ln}}+\frac{1}{r_{max}} \tag{1}$$

式中,V为生物滤塔体积,m³;Q为气体流率,m³·s⁻¹;c_{gi}为VOCs进气浓度,g·m⁻³;c_{go}为VOCs出气浓度,g·m⁻³;c_{ln}=(c_{gi}-c_{go})/ln(c_{gi}/c_{go}),g·m⁻³.利用1/c_{ln}和(V/Q)/(c_{gi}-c_{go})关系作图,可以得到相应的动力学常数,结果如表3所示.

气相饱和常数K_m可间接表征污染物在滤塔内的传质特性^[19].由于甲苯的水溶性相对较差,若湿度过大填料表面的液膜较厚,可能会影响甲苯从气相扩散进入液相的过程,进而影响去除效率.在分别装填有3种填料的生物滴滤塔内,甲苯的气相饱和常数和单位滤塔体积的最大降解速率都有了不同程度的提高.采用改性的多孔煤作为填料的生物滴滤塔中甲苯的气相饱和常数为0.736 g·m⁻³^[18],采用PU作为填料的生物滴滤塔中甲苯的最大降解速率为113.64 g·(m³·h)⁻¹^[20],说明了这3种填料有助于甲苯在滤塔内的传质,从而能获得较好的去除效率.乙醇的水溶性较好,填料特性对其传质过程影响甚少,因而其气相饱和常数在装填有不同填料的生物滴滤塔内差异不是很大.

表3 采用不同填料的生物滴滤塔内甲苯和乙醇的K_m和r_{max}

Table 3 The K_m and r_{max} values in BTF with different packing materials

动力学常数	甲苯			乙醇		
	纹翼多面球	毛刺球	空心多面柱	纹翼多面球	毛刺球	空心多面柱
r _{max} /g·(m ³ ·h) ⁻¹	149.12	133.28	142.06	178.12	174.25	176.24
K _m /g·m ⁻³	1.015	0.812	0.898	2.087	1.963	1.997

2.3.3 填料生物量

生物量是反映生物填料污染物去除特性的一个特殊参数,不同填料的生物滴滤塔去除性能

的好坏主要决定于单位填料的生物量的多少.表4为各填料自挂膜起至稳定运行结束不同阶段生物量.

表4 填料层生物量¹⁾/kg·m⁻³

Table 4 Biomass on the packings/kg·m⁻³

时间	纹翼多面球		毛刺球		空心多面柱	
	干生物量	湿生物量	干生物量	湿生物量	干生物量	湿生物量
第6 d	7.79	194.48	6.63	165.58	10.51	262.44
第12 d	11.37	284.58	9.53	238.55	12.03	299.12
第18 d	12.80	321.27	11.34	283.61	13.50	301.12
第24 d	13.64	340.91	12.92	322.76	14.88	370.37
第30 d	13.21	330.66	14.73	368.84	—	—
第36 d	—	—	15.58	389.45	—	—

1) “—”为未测定;加粗数值为稳定运行时的生物量

由表4可知,正常运行时纹翼多面球生物量最大,干湿生物量分别为13.64 kg·m⁻³和340.91 kg·m⁻³.Cox等^[21]报道,以7~20 mm的聚丙烯鲍尔环的BTF去除甲苯废气,正常运行下填料层湿生

物量为160 kg·m⁻³.显然,纹翼多面球、毛刺球和空心多面柱所测得的生物量均高于文献报道值,表明了这3种填料能维持较高的生物量.

通常,填料能负载的生物量越大,则越有利于目

标污染物的去除,但这并不意味着生物量越多越好。生物量过多易引起填料层堵塞,影响气流分布,进而影响系统的去除性能。填料层生物量主要取决于填料本身的相关特性,如填料比表面积的大小、填料表面粗糙度、表面亲水能力以及填料空间结构等^[22,23]。根据 Rittmann^[24]关于生物膜剥落的速率公式,生物膜的剥落除了上述影响因素以外,与来自于循环液的剪切力也有密切关系。通过不同阶段填料生物量测定,结果表明纹翼多面球填料易实现微生物更新与剥落之间的动态平衡,在保证生物量的前提下,其填料层压降仍维持稳定,对比其它两种填料,性能更优,易于生物滴滤塔长期稳定运行。

2.3.4 动态阻力实验

生物滴滤塔正常运行后,生物填料经历生物膜的更新(脱落、再生)过程,且会随操作条件改变而发生变化,最终影响系统的稳定运行。通过考察填料层阻力宏观参数变化,可以掌握填料表面生物膜的更新信息。BTF 系统稳定运行时,在空塔气速为 $0.049 \sim 0.074 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的实验条件下,填料层阻力随时间变化趋势可见图 7。

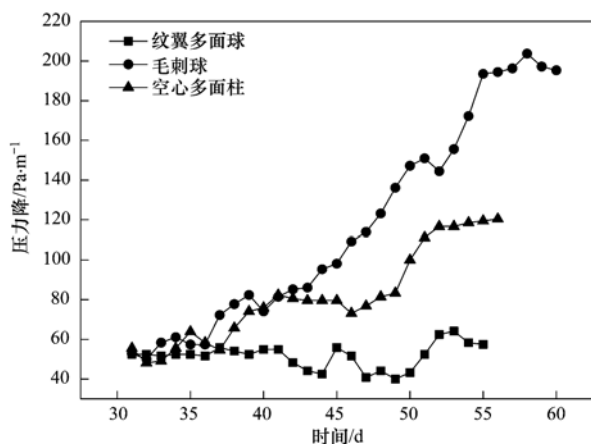


图 7 BTF 稳定运行阶段填料层阻力变化

Fig. 7 Pressure drop curve of the BTF at the stable operation phase

由图 7 可知,纹翼多面球填料层维持一个相对稳定的阻力值。在稳定运行的 25 d 内,纹翼多面球填料层压力降基本在 $40.0 \sim 64.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 的范围内,平均为 $51.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而毛刺球和空心多面柱填料层阻力随着系统运行而显著增大,以毛刺球为例,其填料层压力降在正常运行初期为 $68.9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$,运行后期的平均压力降为 $193.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

填料层阻力随着运行时间而增加,它与填料的物理化学特性密切相关^[25]。从阻力角度来看,纹翼多面球 BTF 在运行的过程中填料层所产生的阻力

最小且维持稳定。主要有两方面原因:一方面,可能是由于纹翼多面球的空隙率大(94.90%),能够保持填料原有的形状且具有一定的刚性,从而不易压实,挂膜前后填料层高度基本没有发生变化;另一方面,纹翼多面球填料表面的结构特性决定了其易于新生物膜的形成和老生物膜的脱落,从而加快生物膜的更新频率,使生物量不至于过多而造成堵塞。

3 结论

(1)开发了 3 种新型生物滴滤填料:纹翼多面球、毛刺球和空心多面柱,考察了 3 种填料的结构特性和阻力特征。3 种填料的结构特性均优于常见的滴滤填料(如 PU 填料等),纹翼多面球的阻力系数 ζ 在挂膜后小于其他两种填料。

(2)采用空心多面柱填料的 BTF 生物膜形成过程最快,对乙醇和甲苯的去除率在第 6 d 达到 95% 以上和 77% 并保持稳定。

(3)稳定运行阶段结果表明,3 种填料中纹翼多面球运行性能更优,对甲苯的平均去除率为 76.78%,平均去除负荷为 $87.49 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,对乙醇的平均去除率为 99.23%,平均去除负荷为 $105.43 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。受生物膜过量生长而引起的填料层堵塞,采用毛刺球和空心多面柱填料的 BTF 系统运行后期污染物去除能力有所下降,毛刺球填料层压实度达到了 20.71%,压力降达到了 $193.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(4)乙醇的水溶性相对甲苯较好,3 种填料对乙醇的去除效果影响不大,而对甲苯去除效果影响较大,采用纹翼多面球的 BTF 中,甲苯的气相饱和常数 K_m 是其在采用毛刺球的 BTF 中的 1.3 倍。

参考文献:

- [1] Rene E R, Špačková R, Veiga M C, et al. Biofiltration of mixtures of gas-phase styrene and acetone with the fungus *Sporothrix varicibatus* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **184**(1-3): 204-214.
- [2] Pandey R A, Mudliar S N, Borgalokar S. Treatment of waste gas containing diethyldisulphide (DEDS) in a bench scale biofilter [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(1): 131-135.
- [3] Delhomenie M C, Heitz M. Biofiltration of air: A review [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2005, **25**(1-2): 53-72.
- [4] Chan W C, Lu M C. A new type synthetic filter material for biofilter: preparation and its characteristic analysis [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2005, **13**(1): 7-17.
- [5] Chen L, Hoff S J. Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, **25**(5): 751-766.

- [6] Álvarez-Hornos F J, Gabaldón C, Martínez-Soria V, *et al.* Biofiltration of ethylbenzene vapours: Influence of the packing material[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(2): 269-276.
- [7] Maestre J P, 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.
- [8] 伍永钢, 任洪强, 丁丽丽. 新型聚乙烯填料生物滴滤床净化硫化氢气体运行特性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1451-1456.
- [9] 王家德, 金顺利, 陈建孟, 等. 一种缓释复合生物填料性能评价[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2010, **40**(12): 1874-1879.
- [10] Li Z L, Sun T H, Zhu N W, *et al.* Comparative study of using different materials as bacterial carriers to treat hydrogen sulfide [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **81**(3): 579-588.
- [11] Ma Y L, Yang B L, Zhao J L. Removal of H₂S by *Thiobacillus denitrificans* immobilized on different matrices[J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(16): 2041-2046.
- [12] Liang J, Koe L, Chiaw C, *et al.* Application of biological activated carbon as a low pH biofilter medium for gas mixture treatment[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **96**(6): 1092-1100.
- [13] 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.
- [14] Ramirez-Lopez E M, Corona-Hernandez J, Avelar-Gonzalez F J, *et al.* Biofiltration of methanol in an organic biofilter using peanut shells as medium[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 87-91.
- [15] 李慧颖, 黄少斌, 卢乐, 等. 有氧条件下生物滤塔去除 NO_x 的挂膜启动及研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1881-1887.
- [16] Stewart P S, Franklin M J. Physiological heterogeneity in biofilms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(3): 199-210.
- [17] Bayles K W. The biological role of death and lysis in biofilm development[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, **5**(9): 721-726.
- [18] Mathur A K, Majumder C B. Biofiltration and kinetic aspects of a biotrickling filter for the removal of paint solvent mixture laden air stream[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 1027-1036.
- [19] Mathur A K, Sundaramurthy J, Balomajumder C. Kinetics of the removal of mono-chlorobenzene vapour from waste gases using a trickle bed air biofilter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **137**(3): 1560-1568.
- [20] Chen J M, Zhu R Y, Yang W B, *et al.* Treatment of a BTo-X-contaminated gas stream with a biotrickling filter inoculated with microbes bound to a wheat bran/red wood powder/diatomaceous earth carrier [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8067-8073.
- [21] Cox H H J, Deshusses M A. Effect of starvation on the performance and re-acclimation of biotrickling filters for air pollution control [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(14): 3069-3073.
- [22] Legrand P, Malhautier L, Geiger P, *et al.* Biofiltration of reduced sulphur compounds: impact of packing material inoculation with acclimatized microbial communities on performance[J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2011, **8**(2S1): 45-51.
- [23] Gaudin F, Andrès Y, Le Cloirec P. Packing material formulation for odorous emission biofiltration [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(6): 958-966.
- [24] Rittmann B E. Detachment from biofilms[A]. In: Characklis W G, Wilderer P A (Eds.). *Structure and function of biofilms* [M]. New York: John Wiley. 1989.
- [25] Ralebitso-Senior T K, Senior E, Di Felice R, *et al.* Waste gas biofiltration: advances and limitations of current approaches in microbiology[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(16): 8542-8573.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr * Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人