

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,窦颖,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烯废气的研究 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,李奇锋,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)

UV-生物过滤联合降解苯乙烯废气的研究

沙昊雷, 杨国靖, 夏静芬

(浙江万里学院生物与环境学院, 宁波 315100)

摘要: 实验采用主波长为 185 nm 的低压汞灯为紫外光源, 泥炭、棕纤维、多孔活性炭为填料的 UV-生物过滤塔联合装置净化苯乙烯废气. 苯乙烯进气浓度控制在 $320 \sim 583 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 稳定后去除率能维持在 95% 以上. UV 光解苯乙烯形成醇、醛、羧酸等水溶性较好的可生物降解的物质, 能改善生物过滤塔的运行性能. 稳定运行阶段, 当总停留时间 (total residence time, TRT) 较长时, 进气浓度的变化基本不影响去除率, 随着 TRT 减少, 进气浓度对去除率的影响逐渐显现. TRT 为 102 s 时, 联合装置的去除负荷随进气负荷的增加而线性增加, 去除率达 95% 以上. TRT 为 68 s 时, 进气负荷较低时, 去除负荷的变化也遵循上述规律, 但当进气负荷大于 $30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 去除负荷逐渐偏离直线并趋于某一定值. 若仅考虑苯乙烯浓度的增减, UV 光解对苯乙烯的去除贡献率高于生物过滤塔, 而系统关停 10 d 后重启, 苯乙烯的去除效果在第 4 d 就能恢复.

关键词: 苯乙烯; 紫外; 生物过滤; 联合; 去除负荷; 大气污染

中图分类号: X701.7 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4701-05

Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration

SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen

(College of Biological & Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: Purification of styrene by ultraviolet (UV)-biofiltration was studied in this paper. The light source and the biofilm carrier were ozone producing lamp at 185 nm and the peat, palm fiber, porous activated carbon, respectively. Styrene inlet concentration was controlled between $320\text{-}583 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, and the removal efficiency remained above 95% after stabilization. The UV converted styrene into more soluble and biodegradable intermediates, such as alcohol, aldehyde and acid, thus the performance of biofilter can be improved. In the stable operation stage, the variation of inlet concentration did not affect the removal efficiency when the total residence time (TRT) was long, however, the inlet concentration obviously affected the removal efficiency when the TRT decreased. The removal load of coupling system increased linearly with increasing inlet load, and the removal efficiency was higher than 95% under a TRT of 102 s. When TRT was 68 s and the inlet load was low, the variation of removal load complied with the law described above, but it gradually deviated from the straight line and tended to stabilize at a certain value when the inlet load became higher than $30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. If considering the fluctuation of styrene concentration only, the contribution rate of ultraviolet photolysis to styrene removal was greater than that of the biofilter, and the removal effect could be restored on the fourth day, after closing the system for ten days and restarting.

Key words: styrene; ultraviolet; biofilter; coupling; removal load; air pollution

苯乙烯是一种重要的有机化工原料,用途十分广泛. 但作为一种典型的单环芳香类难溶难生物降解的 VOCs, 苯乙烯是公认的八大恶臭气体之一, 对人体和环境具有较大的危害性, 会通过呼吸对人体粘膜、肝、肺、肾和神经系统产生毒性和致癌性; 同时, 苯乙烯还是光化学反应剂, 会产生二次污染物, 各国环保部门也都将其列为重点控制的空气污染物之一.

生物法是近年来发展起来的一项 VOCs 净化新技术, 尤其适用于中低浓度工业废气处理^[1-5], 已较多地开展了生物法处理易溶易生物降解有机废气的研究^[6-10], 而对于难溶难生物降解的气态污染物由于难以获得较为理想的去除效果, 有关研究较少. 国内外学者通过生物法降解苯乙烯废气的研究^[11-16]表明, 微生物能以苯乙烯为唯一碳源, 代

生成甲醛、甲酸、 H_2O 和 CO_2 等产物, 但因其低水溶性和难生物降解, 生物净化效率和处理负荷不高. 因此, 有必要寻求一种适宜的预处理手段来强化过程调控, 目前, 以紫外 (UV) 光解为代表的高级氧化技术正日益在 VOCs 废气治理中得到重视, 其通过光敏化氧化、光激发氧化和光催化氧化等多种作用机制使目标污染物发生彻底矿化^[17-20]或部分氧化^[21-25], 有利于后续生物法的深度净化. 本研究将采用自行设计的紫外 (UV)-生物过滤联合反应装置降解含苯乙烯废气, 分析苯乙烯的去除率、去除负

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-08-08

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LQ13B070004); 宁波市自然科学基金项目 (2012A610166, 2013A610182)

作者简介: 沙昊雷 (1981 ~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为环境生物技术和大气污染控制, E-mail: hlsha@zwu.edu.cn

荷和影响因素等,以期为联合降解难溶难生物降解的气态污染物提供可靠的实验数据,具有一定的理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 实验装置

UV-生物过滤塔联合降解反应器如图 1 所示:装置主要由苯乙烯废气制备系统、紫外反应器、生物过滤塔、水泵、循环液罐、流量计和采样口等组成。紫外反应器由石英玻璃制成,内管直径 38 mm,高度 230 mm,外管直径 60 mm,高度 250 mm,中央置一紫外灯(低压汞灯,185 nm,18 W),内外管之间为光反应区,体积约 400 mL。生物过滤塔塔体由有机玻璃制成,直径 80 mm,高为 1 000 mm,塔内装有以泥炭、棕纤维、多孔活性炭为主的混合生物填料,填料高度 600 mm,填料层体积约 3.0 L。生物过滤塔装有喷淋装置,配有水泵,对生物填料喷洒营养液,运行时采用气液逆流操作,反应温度维持在 25~30℃。

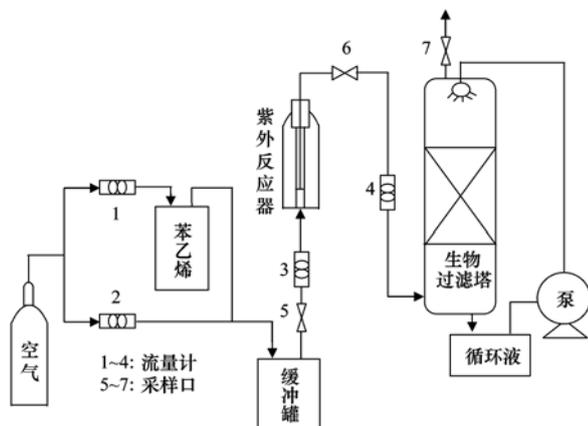


图 1 UV-生物过滤塔反应器示意

Fig. 1 Flow chart of experimental device

1.2 废气来源及实验方法

(1) 废气来源

液态苯乙烯经空气吹脱后挥发,在气体混合缓冲罐中停留混合后,进入紫外反应器反应,经光解后产物直接进入生物过滤塔底部,气液逆流操作。气路系统上设置流量计和气体采样口,流量计控制气体流量和苯乙烯的产生浓度,采样口采集气体样本,精确分析苯乙烯浓度。

(2) 生物过滤塔接种挂膜

活性污泥取自宁波市北区污水处理厂二沉池污泥,将该活性污泥接种至生物过滤塔内进行污泥驯化,每 3 d 更新 1/3 的营养液,维持 pH 在 7.0~7.5,

以苯乙烯废气作为唯一碳源,废气流量 2.0 L·min⁻¹,总停留时间(total residence time, TRT, UV + 生物过滤塔的总停留时间)为 102 s(其中 UV 12 s; 生物过滤塔 90 s),进气苯乙烯浓度控制为 300~800 mg·m⁻³。所添加的营养液成分主要有: NH₄Cl 5 200 mg·L⁻¹, K₂HPO₄ 1 000 mg·L⁻¹, KH₂PO₄ 1 000 mg·L⁻¹, CaCl₂ 54 mg·L⁻¹, FeCl₃ 0.5 mg·L⁻¹, MgCl₂ 10 mg·L⁻¹。

(3) 联合装置稳定运行

实验进入生物过滤塔接种挂膜后期(30 d 后),与 UV 光解装置串联后一起运行,从挂膜开始约 45 d 后,联合装置挂膜成功,苯乙烯去除效率稳定,实验即进入稳定运行期。在稳定运行期,主要考察了进气浓度、TRT、进气负荷等工艺参数对苯乙烯去除效率的影响,实验期间循环液 pH 控制在 5~6 之间,间歇喷淋。

1.3 分析方法

采用气相色谱(Agilent GC6890)测定气体样品中的苯乙烯浓度,色谱柱为内填充载体 Chromosorb 的不锈钢柱(长 2 m,内径 4 mm)。色谱分析条件:进样口温度 150℃,柱温 105℃,检测器(氢火焰离子化检测器, FID)温度 150℃,样品进样采用 1 mL 气密型进样针采集 1 mL 气体进样,每个样品至少平行测定 3 次。pH 采用 P53 型 pH/ORP 分析仪(HACH)。苯乙烯光解产物用纯净水吸收后,采用 TOC-VCPH 型总碳总氮测定仪(Shimadzu)测定其 TOC。

2 结果与讨论

2.1 联合装置降解苯乙烯的实验运行

联合装置从启动到进入稳定运行,共进行 45 d。实验控制苯乙烯废气流量 2.0 L·min⁻¹, TRT 为 102 s,在温度 25℃~30℃ 的条件下,考察了启动期间联合装置内苯乙烯进、出浓度及去除率的变化,结果如图 2 所示。

启动阶段苯乙烯的进气浓度控制在 320~583 mg·m⁻³ 之间。在启动前期(即生物过滤塔的接种挂膜期),由于接种的活性污泥还未适应生物过滤塔内的环境,处于微生物挂膜着床阶段,苯乙烯的去除率较低,且不稳定,出气浓度波动较大,但随着实验时间增加,苯乙烯去除率逐渐增加,在第 21~30 d,去除率稳定在 75% 左右。第 31 d 开始,与 UV 光解装置串联后一起运行,苯乙烯去除率又有明显增加,运行后期,苯乙烯的去除率基本能稳定在 95% 左右。这表明联合装置联合降解苯乙烯废气的效果非

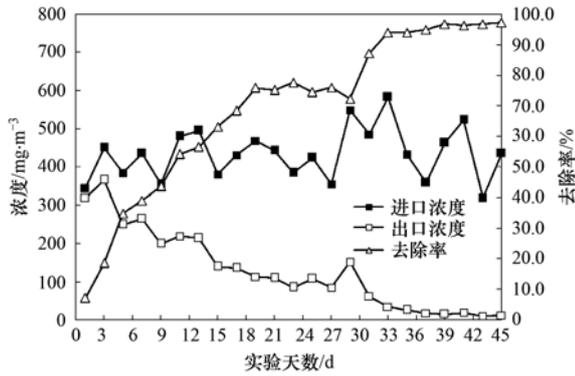


图2 启动期苯乙烯去除率变化情况

Fig. 2 Variation of styrene removal efficiency during set-up

常显著, 出气浓度基本保持在 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.2 TRT 对苯乙烯去除的影响

实验进入稳定运行阶段后, 控制废气进气量 (1.5 、 2.0 、 2.5 、 $3.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), 考察在不同 TRT (136 、 102 、 81.6 、 68 s) 下, 苯乙烯进气浓度对去除率的影响, 结果如图 3 所示. 当 TRT 为 102 s 和 136 s (其中 UV 16 s ; 生物过滤塔 120 s) 时, 苯乙烯进气浓度的变化基本不影响去除率, 且污染物的去除率分别达到 95% 和 98% 以上; 随着 TRT 减少, 进气浓度增加, 去除率逐渐减小; 当 TRT 为 68 s (其中 UV 8 s ; 生物过滤塔 60 s), 苯乙烯进气浓度从 $345 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $570 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 去除率从 86.1% 下降到 80.7% . 而在同一进气浓度下, 显然去除率是随着 TRT 的增大而上升 (虽然实验很难控制不同 TRT 下的同一浓度, 在图 3 可以看出), 但是增大 TRT 实质是减少进气量, 从而导致去除负荷的降低, 投资成本增加, 经济性不佳, 因此本实验大部分时间控制的 TRT 为 102 s , 在此条件下, 浓度从 $320 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 增加到 $585 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 去除率从 95.3% 下降到 93.1% , 从经济性和去除效果看, 较为合适.

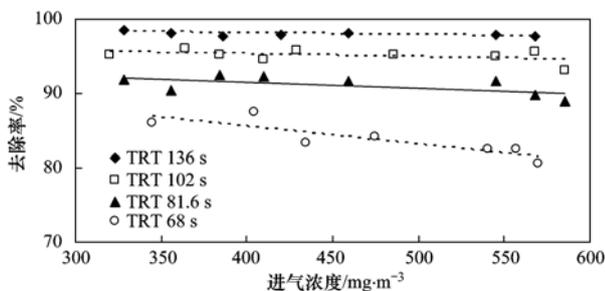


图3 TRT 对苯乙烯去除率的影响

Fig. 3 Effect of total residence time on removal efficiency of styrene

2.3 进气负荷对苯乙烯去除率的影响

在 TRT 为 102 s 和 68 s 的条件下, 考察了苯乙

烯进气负荷对去除效果的影响, 结果如图 4 所示. 在 TRT 为 102 s 时, 联合装置的去除负荷随进气负荷的增加而线性增加, 去除率达 95% 以上, 受进气负荷的影响较小. TRT 为 68 s 时, 进气负荷较低时, 联合装置的去除负荷随进气负荷的增加而线性增加, 进气负荷去除率达 85% 以上, 当进气负荷大于 $30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 去除负荷逐渐偏离直线并趋于某一定值 [$34.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$]. 由此可知, 随着进气负荷的增加, 苯乙烯在生物过滤塔内传质速率增大, 传质推动力相应增加, 苯乙烯分子迅速从气相扩散至生物膜内被微生物利用降解, 宏观上表现为去除率稳定, 去除负荷增加. 但随着进气负荷的进一步增加, 分子的传质速率达到最大值, 此时微生物降解成为控速步骤, 而生物过滤塔内微生物总量一定, 因此去除负荷趋于某一定值, 去除效率下降.

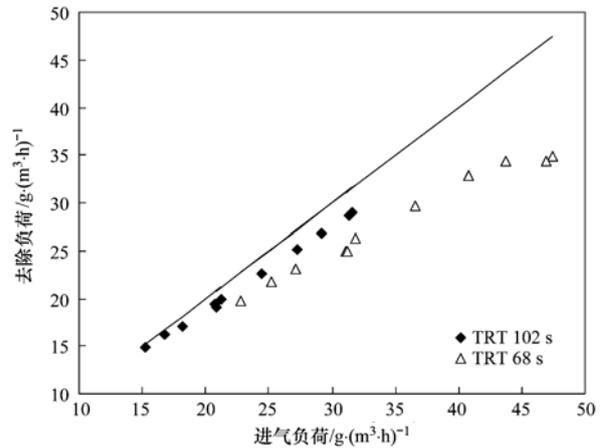


图4 进气负荷对苯乙烯去除效果的影响

Fig. 4 Effect of inlet load on removal effect of styrene

2.4 UV 光解和生物过滤塔对苯乙烯去除的贡献

苯乙烯在联合装置中的去除主要分成两个部分: UV 光解和生物过滤塔内的生物降解, 而 UV 光解效果也会影响生物过滤塔的处理效果. 在 TRT 为 102 s 和 68 s 时, 考察了 UV 光解和生物过滤塔对苯乙烯的去除贡献, 实验结果如图 5 所示.

由图 5 可知, 当 TRT 为 68 s 时, UV 光解和生物过滤塔对苯乙烯的平均去除贡献率分别为 57% 和 43% , 当 TRT 为 102 s 时, 平均去除贡献率分别为 54% 和 46% . 可见, UV 光解对苯乙烯的去除贡献率高于生物过滤塔的贡献率, 在进气浓度 $322 \sim 541 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内, 两者贡献率的波动幅度不大. 这主要是因为 UV 光解过程是把苯乙烯降解成小分子有机物, 而本研究中评价苯乙烯的去除率也仅仅考虑了苯乙烯的浓度, 未考虑苯乙烯降解后的产物. 生

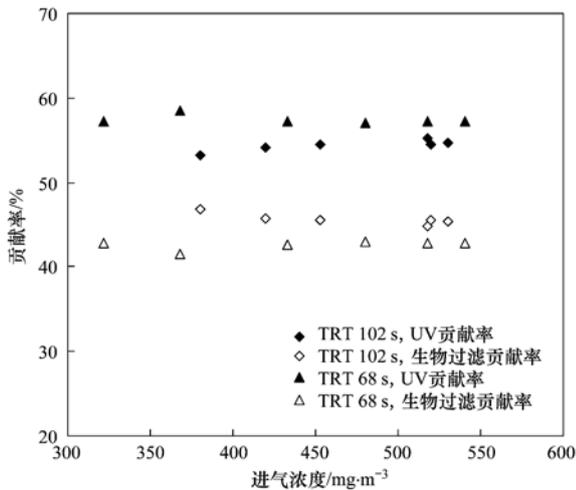


图5 UV和生物过滤塔对苯乙烯的去除贡献

Fig. 5 Contribution of UV and biofilter to styrene-removal

物过滤塔除降解苯乙烯外,还承担了降解UV光解后产物的任务,因此从表象看,UV光解对苯乙烯的去除贡献率要稍高于生物过滤塔。另外,TRT的增加,有利于生物过滤塔的降解过程,因此TRT为102 s时的生物过滤塔对苯乙烯的去除贡献率要大于TRT为68 s时的去除贡献率。因为在低停留时间时,由于苯乙烯难溶于水,生物过滤塔系统中传质阻力影响较大,是传质控制步骤,增加停留时间有助于改善生物过滤塔系统的传质效果,从而改善总体去除效果。

2.5 系统停运对苯乙烯去除效果的影响

在实验第81 d开始停运系统,共10 d,在此期间定期向生物过滤塔内喷洒营养液,当处理系统重新启动后,控制在稳定运行期间的工艺参数,观察联合系统对苯乙烯废气的净化去除能力,实验结果如图6所示。

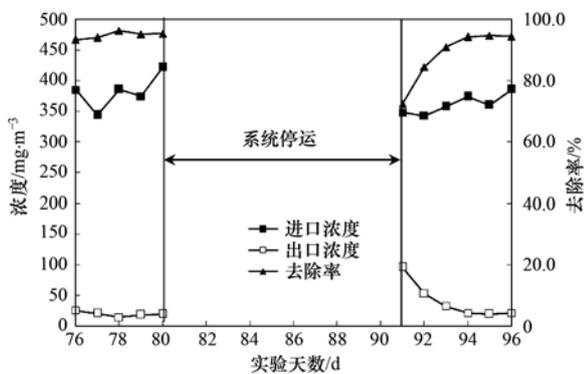


图6 系统停运重启对苯乙烯去除效果的影响

Fig. 6 Removal effect of styrene after system restart

由图6可见,联合系统在停运前,对苯乙烯的去除率维持在93.5%~95.4%,系统停运10 d后恢复

通气第1 d,联合系统对苯乙烯的去除率为72.4%,第2 d,系统对苯乙烯的去除率为84.5%,第3 d去除率为91%,第4~6 d联合系统对苯乙烯的去除率分别达到了94.4%、94.7%和94.6%,可见联合系统对苯乙烯的处理效果已经基本恢复,系统停运对苯乙烯去除效果的影响有限。这为今后实际工程应用中,进行系统停运检修或者闲置提供了借鉴。

2.6 UV-生物过滤联合降解机制初探

UV光解作为一种高级氧化技术,能在常温、常压下有效地降解气/液相中的多种难降解有机物,并使之部分转化为水溶性好、易生物降解的物质^[25~27]。本研究对苯乙烯光解产物用纯净水吸收后,采用TOC-VCPH型总碳总氮测定仪测定其TOC,发现当苯乙烯进气浓度为 $460 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,光解时间12 s时,苯乙烯去除率达到95.4%,其中UV光解贡献率为56.2%。通过计算,UV氧化能去除0.091 mg的有机碳,其中有0.053 mg的有机碳转化为可溶性的有机碳,约占58.2%。

Moussavi等^[23]利用UV氧化甲苯和邻二甲苯,在研究中发现UV光解过程去除的可溶性有机碳占总有机碳的60.2%,同时产生水溶性和可生物降解的中间产物如乙醛和甲醛,并在下游生物滤池中去除。UV光解产生的水溶性好且易生物降解的物质(醇、醛、羧酸等)能够使生物反应器内微生物保持更高的生长率和活性,生物反应器的性能也得到改善。国内外学者^[28,29]还指出,UV光解有可能导致具有显著的急性毒性和遗传毒性的产物产生,但后置的生物反应器可以净化UV光解产生的有毒产物,产物的急性毒性和遗传毒性能大大减弱,在UV光解和生物法净化过程中表现出协同效应。由此可见,本研究中UV与生物过滤的联合处理,不仅降低了苯乙烯对生物过滤塔的处理负荷,生物过滤塔也能较好地去除醇、醛、羧酸等有机物,联合装置达到较好的运行状态。

3 结论

(1)启动阶段苯乙烯的进气浓度控制在 $320 \sim 583 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,稳定后去除率能维持在95%以上,表明联合装置降解苯乙烯废气的效果非常显著,UV光解苯乙烯形成醇、醛、羧酸等水溶性较好的可生物降解的物质,能改善生物过滤塔的运行性能。

(2)稳定运行阶段,当TRT较长时,进气浓度的变化基本不影响去除率(95%以上),随着TRT减少,进气浓度对去除率的影响逐渐显现。TRT为102

s 时,联合装置的去除负荷随进气负荷的增加而线性增加,去除率达 95% 以上。TRT 为 68 s,进气负荷较低时,去除负荷的变化也遵循上述规律,但当进气负荷大于 $30 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,去除负荷逐渐偏离直线趋于某一定值。

(3) TRT 为 68 s 时,UV 光解和生物过滤塔对苯乙烯的平均去除贡献率分别为 57% 和 43%,TRT 为 102 s 时,平均去除贡献率分别为 54% 和 46%,若仅考虑苯乙烯浓度的变化,UV 光解对苯乙烯的去除贡献率高于生物过滤塔,而系统关停后重启,苯乙烯的去除效果在第 4 d 就能恢复。

参考文献:

- [1] 周卿伟,朱润晔,胡俊,等. 生物滴滤降解氯苯废气的实验研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3673-3678.
- [2] Mukesh K Y, Mallikarjun V P, Raksh V J. Acetoxylation and hydration of limonene and α -pinene using cation-exchanged zeolite beta[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2009, **297**(2): 101-109.
- [3] 沙昊雷,谢国建,陈金媛. 生物过滤塔处理实验室废气[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3708-3712.
- [4] Rahul, Mathur A K, Balomajumder C. Biological treatment and modeling aspect of BTEX abatement process in a biofilter[J]. Bioresource Technology, 2013, **142**(2): 9-17.
- [5] 倪建国,吴成强,朱润晔,等. 生物滴滤塔反硝化净化 NO 废气的启动[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 444-448.
- [6] Omri I, Bouallagui H, Aouidi F, et al. H₂S gas biological removal efficiency and bacterial community diversity in biofilter treating wastewater odor[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(22): 10202-10209.
- [7] 钱东升,房俊逸,陈东之,等. 板式生物滴滤塔高效净化硫化氢废气的研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2786-2793.
- [8] Jiang X, Tay J H. Operational characteristics of efficient co-removal of H₂S and NH₃ in a horizontal biotrickling filter using exhausted carbon[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 638-643.
- [9] Jiang X, Yan R, Tay J H. Simultaneous autotrophic biodegradation of H₂S and NH₃ in a biotrickling filter[J]. Chemosphere, 2009, **75**(10): 1350-1355.
- [10] Maestre J P, Rovira R, Gamisans X, et al. Characterization of the bacterial community in a biotrickling filter treating high loads of H₂S by molecular biology tools[J]. Water Science and Technology, 2009, **59**(7): 1331-1337.
- [11] 刘建伟,马文林,王敏,等. 真菌生物滤池净化苯乙烯废气的研究[J]. 环境工程, 2010, **28**(5): 66-69, 73.
- [12] 陈波,张耀斌,吴丹,等. 生物滴滤法去除低浓度苯乙烯[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(3): 644-648.
- [13] Rene E R, Montes M, Veiga M C, et al. Styrene removal from polluted air in one and two-liquid phase biotrickling filter: steady and transient-state performance and pressure drop control[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(13): 6791-6800.
- [14] Li L, Lian J, Han Y P, et al. A biofilter integrated with gas membrane separation unit for the treatment of fluctuating styrene loads[J]. Bioresource Technology, 2012, **111**(1): 76-83.
- [15] Kim M S, Liu G, Cho H K, et al. Application of a hybrid system comprising carbon-doped TiO₂ film and a ceramic media-packed biofilter for enhanced removal of gaseous styrene[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 537-543.
- [16] 吴献花,孙珮石,雷艳梅,等. 生物滴滤塔净化低浓度苯乙烯废气的研究[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(4): 5-9, 32.
- [17] Chou M S, Chang K L. UV/ozone degradation of gaseous hexamethyldisilazane (HMDS) [J]. Chemosphere, 2007, **69**(5): 697-704.
- [18] Yang L P, Liu Z Y, Shi J W, et al. Degradation of indoor gaseous formaldehyde by hybrid VUV and TiO₂/UV processes [J]. Separation & Purification Technology, 2007, **54**(2): 204-211.
- [19] Liang W J, Li J, Jin Y Q. Photo-catalytic degradation of gaseous formaldehyde by TiO₂/UV, Ag/TiO₂/UV and Ce/TiO₂/UV [J]. Building & Environment, 2012, **51**(3): 345-350.
- [20] Alapi T, Van K C, Van H L, et al. Direct VUV photolysis of chlorinated methanes and their mixtures in a nitrogen stream[J]. Chemosphere, 2007, **66**(1): 139-144.
- [21] 成卓韦,林雯雯,蒋铁锋,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.
- [22] Zhang P Y, Liu J, Zhang Z L. VUV photocatalytic degradation of toluene in the gas phase[J]. Chemistry Letters, 2004, **33**(10): 1242-1243.
- [23] 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.
- [24] Den W, Ravindran V, Pirbazari M. Photooxidation and biotrickling filtration for controlling industrial emissions of trichloroethylene and perchloroethylene [J]. Chemical Engineering Science, 2006, **61**(24): 7909-7923.
- [25] 姚远,席劲瑛,王灿,等. 氯苯紫外光降解产物对生物过滤塔运行性能的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(1): 60-65.
- [26] Zhang L F, Sawell S, Moralejo C, et al. Heterogeneous photocatalytic decomposition of gas-phase chlorobenzene [J]. Applied Catalysis B-Environmental, 2006, **71**(3-4): 135-142.
- [27] Cheng Z W, Sun P F, Jiang Y F, et al. Ozone-assisted UV_{254nm} photodegradation of gaseous ethylbenzene and chlorobenzene: Effects of process parameters, degradation pathways, and kinetic analysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **228**(3): 1003-1010.
- [28] Luvsanjamba M, Sercu B, Ketsz S, et al. Thermophilic biotrickling filtration of a mixture of isobutyraldehyde and 2-pentanone [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2007, **82**(1): 74-80.
- [29] Wang C, Xi J Y, Hu H Y. Reduction of toxic products and bioaerosol emission of a combined ultraviolet-biofilter process for chlorobenzene treatment [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, **59**(4): 405-410.

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