

利用紫外预处理加强氯苯的生物滴滤净化

成卓韦¹, 林雯雯¹, 蒋轶锋^{1*}, 陈建孟¹, 张丽丽¹, 张华²

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江中信设备安装有限公司, 杭州 310004)

摘要: 试验采用主波长为 185 nm 的低压汞灯为紫外光源、醚型聚氨酯海绵 (PU-foam) 为填料的紫外-生物滴滤塔联合装置净化氯苯废气。进气氯苯浓度为 $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、停留时间分别为 92、69 和 46 s 时, 联合装置的平均去除率分别达到 99%、95% 和 80%; 最大去除负荷达到 $59.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$; 联合装置和单独生物滴滤塔生物膜形成时间分别为 20 d 和 27 d; 联合装置的抗冲击能力较好, 停留时间缩短至 30 s, 联合装置去除效率可达 75% 以上, 高于单独生物滴滤塔的去效率 (25%)。对紫外-生物滴滤塔联合装置机制初步探讨表明, 紫外氧化氯苯形成了水溶性较好的可生物降解的物质, 降低生物滴滤塔氯苯的处理负荷, 同时紫外辐照过程中产生的 O_3 能有效地控制生物滴滤塔内微生物的过量生长, 从而维持整个装置的最佳运行状态。

关键词: 氯苯; 紫外; 生物滴滤; 预处理; 联合

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1160-07

Using UV Pretreatment to Enhance Biofiltration of Chlorobenzene

CHENG Zhuo-wei¹, LIN Wen-wen¹, JIANG Yi-feng¹, CHEN Jian-meng¹, ZHANG Li-li¹, ZHANG Hua²

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Zhejiang Zhongxin Equipment Installation Co., Ltd, Hangzhou 310004, China)

Abstract: Purification of chlorobenzene by ultraviolet-biotrickling filter (UV-BTF) was studied in this paper. The light source and the biofilm carrier were an ozone producing lamp with a maximum emission ($>99\%$) at 185nm and the ether-based polyurethane foam (PU-foam), respectively. When the residence time were 92, 69 and 46s, with the chlorobenzene concentration of $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, the average removal efficiencies were 99%, 95% and 80%, respectively while the maximum removal load was $59.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. The biofilm formed in the UV-BTF was 20 d, shorter than that of the sole BTF (27 d). Compared with the sole BTF, the UV-BTF had strong resistance to load shock. When the residence time was shortened to 30s, the removal efficiency of UV-BTF achieved over 75%, higher than that of sole BTF (25%). Considering the mechanism of the UV-BTF process, the UV converted the chlorobenzene into more soluble and biodegradable intermediates, thus the removal load by BTF decreased. Meanwhile, the ozone produced during the UV photolysis could control the microorganism growth in the BTF, keeping the whole system in optimal operation.

Key words: chlorobenzene; ultraviolet; biotrickling filtration (BTF); pretreatment; coupling

氯苯是一类卤代芳香族化合物, 工业上被广泛作为溶剂、氧化/还原剂及一些染料、农药和化工生产的中间体, 其气态型污染物进入大气会造成严重的环境污染, 为联合国环境规划署列出的 12 类优先处理物之一^[1]。当前含氯芳香烃尾气的处理方法主要有物理吸附、化学催化和生物降解等, 但由于氯苯化学性质非常稳定, 因此各种技术都存在着投资和运行费用高、工作寿命短、二次污染、处理效率低等弊端。

近年来, 有研究者^[2,3]提出采用紫外光氧化-生物法联合处理难溶难生物降解 VOCs, 取得了一定的研究成果。该项技术不仅可从根本上解决当前单一技术在应用上的瓶颈, 而且二者的协同作用将大幅度提高现有生物处理系统对水溶性差、不易生物降解 VOCs 的去除负荷和运行稳定性, 将是一种应用前景广阔的污染治理新技术。

本研究采用紫外 (ultraviolet, UV)-生物滴滤塔

(biotrickling filter, BTF) 联合装置处理氯苯废气。采用主波长为 185nm 紫外光对氯苯废气进行光解, 光解出气直接进入 BTF, 考察了总停留时间、进气浓度等因素对去除效果的影响; 系统比较了单独 BTF 和 UV-BTF 装置在挂膜启动阶段和稳定运行阶段的处理效果, 并对 UV-BTF 联合装置的去处机制作了简要分析, 以期工程应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 紫外-生物滴滤联合实验装置

试验装置由紫外光反应器和生物滴滤塔组成 (图 1)。圆柱套管型紫外光反应器 (内管直径 38

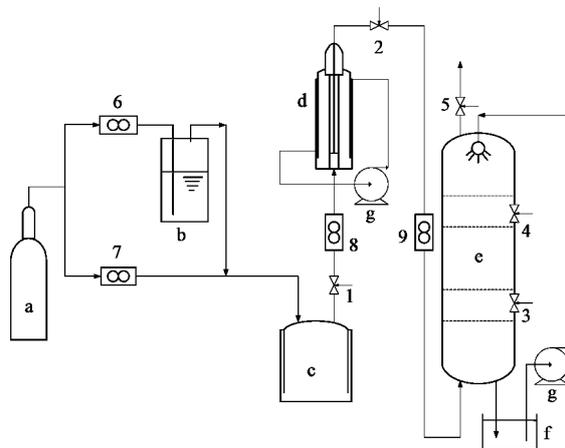
收稿日期: 2009-07-21; 修订日期: 2009-11-02
基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06A310);
浙江省重大科技专项重点项目 (2006C13045); 浙江省新
苗人才计划项目 (2008R40G2020021)

作者简介: 成卓韦 (1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气
污染控制, E-mail: c82z09w12@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jyf@zjut.edu.cn

mm, 高度 230 mm; 外管直径 60 mm, 高度 250 mm) 由石英玻璃制成, 中央置一紫外灯 (185 nm, 18 W, 北京电光源研究所), 内外管之间为光反应区, 反应体积 400 mL. 生物滴滤塔由有机玻璃制成, 内径是 0.04 m, 外径是 0.045 m, 选用孔径 2.5 PPC (PPC = 孔数/cm) 醚型聚氨酯海绵 (PU-foam) 作为生物填料, 填料层高度为 0.6 m. 生物滴滤塔装有喷淋装置, 配有水泵, 对生物填料喷洒营养液, 提供微生物生长的营养物质. 紫外光反应器和生物滴滤塔均配有循环水系统, 反应温度维持在 25 ~ 30℃.

液态氯苯经空气吹脱后挥发, 在气体混合缓冲罐中混合后, 进入紫外光反应器, 经光解后直接进入生物滴滤塔底部, 气液逆流操作. 气路系统上配有流量计和气体采样口, 流量计控制气体流量和浓度, 采样口采集气体分析.



a. 空气钢瓶; b. 氯苯气体发生罐; c. 气体混合缓冲罐;
d. 紫外反应器; e. 生物滴滤塔; f. 循环液罐; g. 水泵;
1 ~ 5. 气体采样口; 6 ~ 9. 气体流量计

图1 紫外与生物滴滤联合装置工艺流程
Fig.1 Schematic of UV-BTF coupling system

1.2 实验方法

1.2.1 BTF 接种挂膜

活性污泥取自杭州市四堡污水处理厂兼氧池, 将污泥多次淘洗后接种至培菌玻璃罐内进行污泥驯化, 每 48 h 更新营养液 1/3, 维持 pH 在 7.2 左右. 氯苯作为唯一碳源, 氯苯浓度呈梯度增加. 营养液成分 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): NH_4Cl 4780, KH_2PO_4 1100, CaCl_2 36.4, FeCl_3 0.25.

污泥驯化 1 个月后, 采用气液相联合挂膜法分别对单独 BTF 和 UV-BTF 中的 BTF 进行接种挂膜. 启动挂膜条件为: 废气流量 $0.75 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 停留时间为 92 s (UV 32 s; BTF 60 s), 进气氯苯浓度由 200

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 逐步升至 $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.2.2 单独 BTF 和联合装置稳定运行

单独 BTF 和联合装置挂膜成功后, 考察了进气浓度、总时间、进气负荷等工艺参数对于氯苯去除效率的影响. 试验期间循环喷淋 pH 维持在 5 左右, 喷淋量为 $0.6 \text{ L} \cdot \text{h}$. 各因素的考察水平及工艺参数如表 1 所示.

表 1 试验因素和工艺参数

Table 1 Experimental factors and operation parameters

| 考察因素 | 考察水平 | 工艺参数 |
|---|-----------|--|
| 总停留时间 ¹⁾ t/s | 45 ~ 90 | 氯苯浓度 $400 \sim 800 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| 进气浓度 $c/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 400 ~ 800 | 总停留时间 46 ~ 92 s |
| 进气负荷 $Q/g \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ | 25 ~ 100 | 总停留时间 46 ~ 92 s |

1) 总停留时间包括 UV 工艺停留时间 (UVRT) 和 BTF 空塔停留时间 (EBRT)

1.3 分析方法

采用气相色谱 (Shimadzu GC-14B) 测定气体样品中的氯苯浓度. 色谱柱为 AT-FFAP ($30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.33 \mu\text{m}$) 毛细管柱, 色谱分析条件: 进样口温度 200°C , 柱温 100°C ; 检测器 (氢火焰离子化检测器, FID) 温度 180°C . 每个样品至少平行测定 3 次.

氯苯光解产物经出口去离子水吸收后, 采用 TOC-VCPH 型总碳总氮测定仪 (Shimadzu) 测定 TOC. 生物填料在 2.5% 的戊二醛溶液中 4°C 固定过夜后, 经磷酸缓冲液漂洗、钨酸固定、梯度乙醇脱水后, 临界点干燥, 喷金镀膜后, 在荷兰 Philips 公司的 XL30ESEM 型环境扫描电镜下观察.

2 结果与讨论

2.1 紫外-生物滴滤联合装置处理气态氯苯

2.1.1 总停留时间对去除率的影响

当联合装置处于稳定运行阶段时, 控制氯苯进气浓度, 考察了 EBRT 对于去除率的影响. 由图 2 可见, 联合系统的氯苯去除率随着整个装置的总停留时间的缩短而下降. 随着总停留时间由 92 s 逐渐下降至 69 s, 联合系统氯苯去除率基本维持在 95% 以上; 随着总停留时间进一步下降至 46 s, 此时氯苯进气浓度也相应下降至 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 联合系统的去除率突然降至 60%, 3 d 后整个装置适应了外界条件的改变, 去除率逐渐上升, 10 d 后达到 90%. 林雯雯等^[4]研究发现, 当气态氯苯浓度为 $1360 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 光照时间对于氯苯去除率基本没有影响, 去除率维持在 75% ~ 77%. 因此总停留时间对于联合装置去除率的影响主要是由 BTF 引起的. Liu

等^[5]采用 BTF 处理苯乙烯、丁酸等废气,发现空床停留时间(EBRT)对于污染物的去除率影响较大.主要原因是污染物分子在 BTF 内必须先气相扩散进入填料表面的液相,然后被微生物降解,存在扩散传质和生物降解 2 个复杂过程.当氯苯进气浓度不变时,EBRT 的减少意味着氯苯分子通过填料通道的速度加快,影响了扩散传质过程,同时氯苯分子与液相、生物膜接触的机会大大减少,微生物利用并降解的机率也随之减少,宏观上表现为氯苯净化效率的下降.

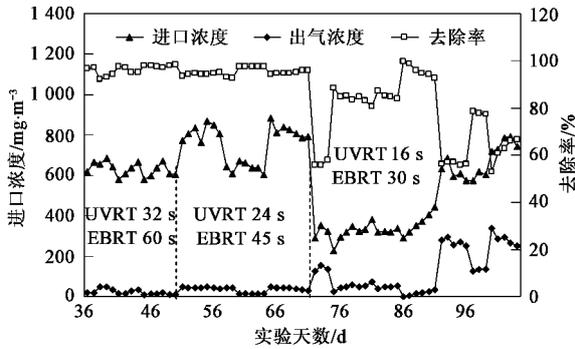


图 2 总停留时间对氯苯的去除率的影响
Fig. 2 Effect of total residence time on removal efficiency of chlorobenzene

2.1.2 进气负荷对去除率的影响

分别在总停留时间为 92、69 和 46 s 的条件下,考察了氯苯进气负荷对去除效果的影响,结果如图 3 所示.在总停留时间为 92 s 和 69 s 时,联合装置的去负荷随进气负荷的增加呈线性增加,去除率达到 95% 以上.总停留时间缩短为 46 s,当进气负荷较低时,去除负荷随进气负荷增加基本呈线性增加,去除率达到 75% 以上;当进气负荷 > 68.5 $g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}$ 时,去除负荷逐渐偏离直线趋于某一定值 $[59.6 g \cdot (m^3 \cdot h)^{-1}]$.前文已经指出,联合系统中 BTF 的工艺参数对于氯苯的去除率影响较大.随着进气负荷的增加,氯苯在 BTF 内传质速率增大,传质推动力相应增加,氯苯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.随着进气负荷的进一步增加,氯苯分子的传质速率达到一最大值,此时微生物降解成为控速步骤,而 BTF 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.这一研究结果与褚淑祎等^[6]采用生物法处理 H_2S 废气所得的结果相一致.

2.1.3 紫外光解和不同填料段对氯苯去除率的

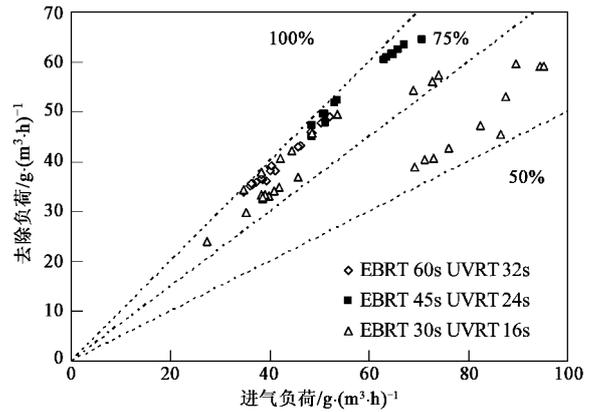


图 3 进气负荷对氯苯去除负荷的影响
Fig. 3 Effect of inlet load on removal capacity of chlorobenzene

贡献

气态氯苯在联合装置中的去除率主要有两部分组成:紫外光解和生物降解,同时紫外光解效果也将直接影响到生物滴滤塔的处理效果.生物填料层的高度也决定着氯苯的有效停留时间,气相中氯苯浓度也将随填料层高度变化呈现出浓度变化廓线^[7].在本实验中,填料总高 0.6 m,每 0.2 m 设一个采样口,因此可将填料分为上、中、下三段.总停留时间为 69 s 和 46 s,进口氯苯浓度为 $850 mg \cdot m^{-3}$ 时,氯苯浓度随填料高度的变化和各部分对整体氯苯去除率的贡献分别如图 4、5 所示.

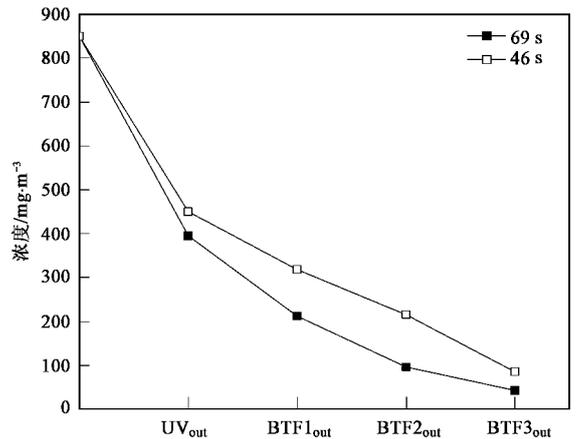


图 4 不同出口处氯苯浓度变化
Fig. 4 Chlorobenzene concentration varied with different outlets

由图 5 可知,紫外光氧化对于氯苯的去除贡献最大,当总停留时间分别为 46 s 和 69 s 时,光解出气中氯苯浓度分别下降到了 $395 mg \cdot m^{-3}$ 和 $450 mg \cdot m^{-3}$,所占的比例分别为 56.34% 和 52.28%,高于生物滴滤塔三段填料层的总体去除效率

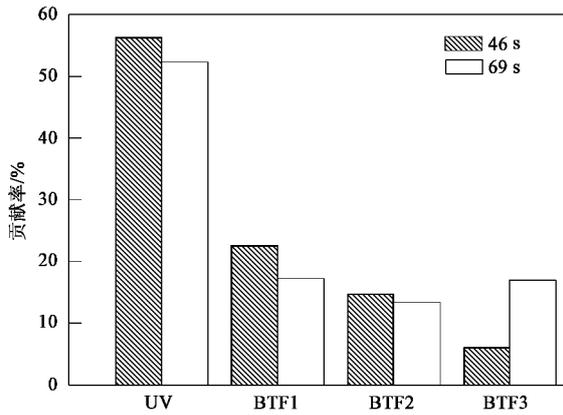


图5 各部分对氯苯去除率的贡献

Fig. 5 Contribution to chlorobenzene-removal of UV and three biomass carriers

(43.66% 和 47.72%)。而在三段生物填料层中,填料层下段即氯苯进口段的去除率较高,对氯苯去除率的贡献分别为 22.66% 和 17.25%。总停留时间为 46 s 时,中段填料去除效果好于上段填料的去除效果;而在总停留时间为 69 s 时,上、中两段填料的去除效果差不多。这主要是因为下段填料在进口处氯苯浓度最高,氯苯从气相进入液相再到生物相的传质推动力较大;同时,由于采用顶部喷淋的方式,下段填料生物膜表面的液膜厚度相对较薄,传质阻力小,因此,此段填料内的微生物食物充足,生长速度快,微生物数量多,因而对氯苯的去除率最高。当氯苯进口负荷大于下段填料的去除负荷时,没有被处理完全的氯苯继续向上通过中、上段填料。虽然上段填料的营养物质最为丰富,但是由于填料的孔隙率大、持水性好,营养液喷淋后形成的液膜厚度也较大,气液相传质阻力明显增大,因此当停留时间较短时,气态氯苯流量很大,宏观表现为上段填料的去除效果不如中段填料好。当停留时间相对较长时,

上、中段对于氯苯去除率的贡献几乎相同。

2.2 单独 BTF 和 UV-BTF 联合装置处理气态氯苯效果比较

2.2.1 BTF 挂膜启动

在进口氯苯浓度、停留时间相同的条件下,考察了单独 BTF 和联合装置挂膜启动情况,结果如图 6 所示。挂膜期间,联合装置的去除率均高于单独 BTF 对氯苯的去除率,形成生物膜的时间明显缩短。在第 20 d,联合装置的去除率就维持在 95% 左右,比单独 BTF 高出 30% 左右。镜检结果(图 7)进一步表明,联合装置中填料表面的微生物数量明显多于单独 BTF。紫外预处理能把部分氯苯直接氧化成容易生物降解的物质(有机醇、有机羧酸类等)^[8],减小了气态氯苯对生物滴滤塔的负荷,缩短了形成生物膜的时间。研究者指出,毒性较大的污染物浓度较低时有利于生物膜快速形成,从而缩短生物滴滤塔的挂膜启动时间。Oh 等^[9]利用 BTF 处理毒性较大的气态硝基苯,他们发现在 BTF 挂膜启动阶段,进口硝基苯浓度必须相对较低($< 80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),可避免污染物对微生物的毒害作用,缩短挂膜启动时间。

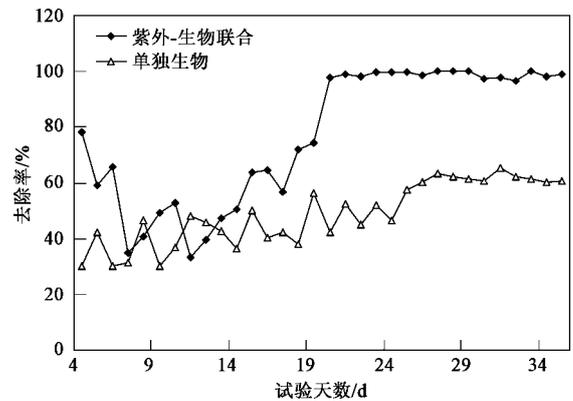
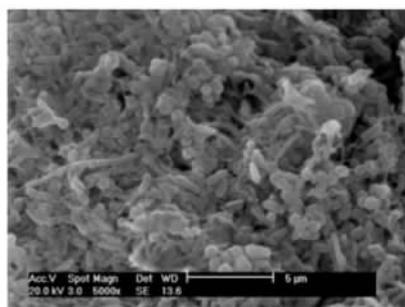
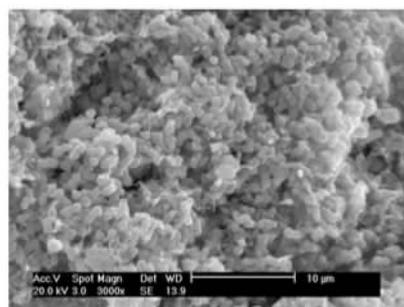


图6 UV-BTF与单独BTF挂膜启动阶段的比较

Fig. 6 Comparison of start-up by UV-BTF and sole BTF



单独 BTF



UV-BTF

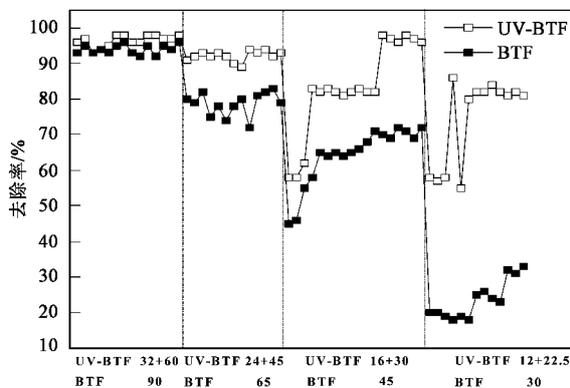
图7 填料电镜照片比较

Fig. 7 Comparison of scanning electron microphotograph of biomass carrier

2.2.2 稳定运行期

(1) 停留时间

图 8 比较了不同停留时间下联合装置和单独 BTF 对于氯苯的去除效率,其他操作条件为:氯苯进口浓度 $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,循环液 pH 5. 当停留时间较长时 ($>90 \text{ s}$),联合装置和单独 BTF 装置中氯苯的去除率几乎一样,维持在 95% 左右;随着停留时间的缩短,两者对于氯苯的去除效率出现明显差距. 当停留时间为 $30 \sim 34.5 \text{ s}$,单独 BTF 中氯苯的去除效率只有 25% 左右,而联合装置对于氯苯的去除效率仍然维持在 75% 以上. 停留时间较长时,氯苯在生物滴滤塔中有充分的反应时间,能够被微生物利用降解,因而两者处理效果几乎没有差别. 而停留时间较短时,由于氯苯在光反应器中已被部分光解氧化成为容易生物降解的物质,光解出气中氯苯的浓度已明显降低,直接进入 BTF 后,一方面降低了氯苯对于 BTF 的负荷,另一方面光解产生的容易生物降解的水溶性物质使得滤塔内微生物生长良好,从而有利于氯苯的降解. 值得注意的是,联合装置对于抗冲击的能力明显优于单独 BTF,当外界条件改变时,前者适应时间较短,只要 $2 \sim 3 \text{ d}$ 就能迅速恢复到较高的处理效果水平,而后者适应时间较长,有时甚至无法恢复到较好的处理效果. 在实际工业生产过程中,废气排放的不稳定性导致废气浓度瞬时波动,污染物负荷瞬间增大将会导致 BTF 处理效果下降,甚至难以恢复到先前的处理水平,这是制约生物法净化有机废气工业化应用的瓶颈^[10]. UV-BTF 联合装置克服了这一制约因素,将扩大生物法净化有机废气的工业化运用领域,解决现实存在的问题.



UV-BTF 32 + 60 表示 UV 工艺停留时间为 32 s, BTF 空塔停留时间为 60 s; BTF 90 表示 BTF 空塔停留时间为 90 s, 余同

图 8 不同停留时间下 UV-BTF 与单独 BTF 去除效果比较
Fig. 8 Comparison of removal efficiency by UV-BTF and sole BTF under different residence times

(2) 去除负荷

在总停留时间为 69 s 的条件下,比较了联合装置和单独 BTF 对于氯苯的去除负荷,结果如图 9 所示. 当氯苯进气负荷较低时,两者对于氯苯的去除负荷相差不大;随着进气负荷的升高,去除负荷和去除率逐渐背离,联合装置明显比单独 BTF 优越,最大去除负荷可达 $68 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,单独 BTF 只有 $47 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. Seignez 等^[11]利用 BTF 处理氯苯类化合物,当 EBRT 为 72s、氯苯进口负荷为 $62 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ (以 C 记,下同),去除负荷为 $20 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,去除率为 32.21%,接近于本研究中单独 BTF 处理效果 (EBRT 为 67s,进口负荷为 $62 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,去除负荷为 $27.52 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,去除率为 44.38%). 在相同条件下,联合装置的去除负荷和去除率分别达到了 $43.84 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 70.7%,显示出了紫外氧化作为生物滴滤塔处理高负荷难降解有毒 VOCs 预处理的优点. 值得注意的是,当进气 VOCs 负荷较低时,可以关闭紫外灯,此时生物滴滤塔完全能达到较好的处理效果;当进气负荷相对较高时,打开紫外灯,利用紫外氧化作为预处理,降低 BTF 的进气负荷,从而达到较好的处理效果. 在实际应用中这样操作不仅能延长紫外灯的使用寿命,还能节省部分能源,真正达到“有的放矢”的作用.

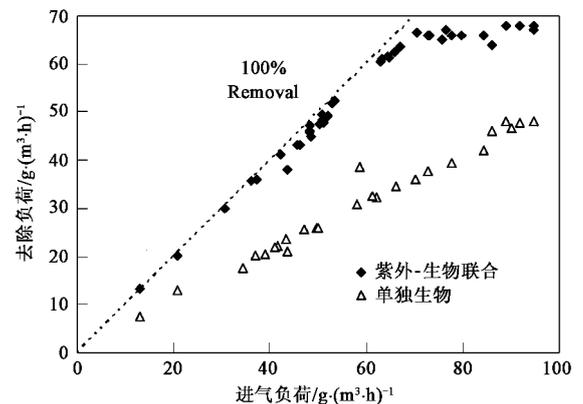


图 9 不同进气负荷下 UV-BTF 与单独 BTF 去除负荷的比较
Fig. 9 Comparison of removal capacity by UV-BTF and sole BTF under different inlet loads

2.3 UV-BTF 联合装置机制的初步探讨

UV 氧化是一种典型的高级氧化技术,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^[12]. 对氯苯光解出气吸收液进行 TOC 测定,发现

当氯苯进气浓度 $1\ 360\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、光解时间 $48\ \text{s}$ 时,氯苯去除率达到 80% 。通过计算,UV氧化能去除 $0.696\ 32\ \text{mg}$ 的有机碳,其中有 $0.36\ \text{mg}$ 的有机碳转化为可溶性的有机碳,约占 51.7% 。Mohseni等^[2]利用UV氧化邻二甲苯,在研究中发现UV过程能去除 $3.94\ \text{mg}$ 的有机碳,其中有 $2.372\ \text{mg}$ 的有机碳转化为可溶性的有机物,约占 60.2% 。他们同时指出,UV氧化产生的水溶性好且易生物降解的物质能够使生物塔内微生物保持更高的生长率和活性,生物塔的性能也得到改善。

对光解出气进行成分分析,发现主要产物为醇、醛、羧酸、 CO_2 等^[8],这些物质都是氯苯和相应的活性基团($\cdot\text{OH}$ 、 O_3 等)作用形成的。苯、醇、醛等有机物属于容易生物降解物质的范畴^[13],已有不少通过生物法净化去除的实例^[14,15]。氯苯通过UV氧化转化为这些物质,降低了氯苯对BTF的处理负荷,BTF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。由于氯苯分子含有氯,用离子色谱(IC)分析出气吸收液,发现有少量的盐酸存在,定时测定BTF的循环液,其pH值也逐渐下降。酸性环境对微生物生长有一定的毒害作用,因此必须定时调节循环液的pH,维持BTF内微生物生长的环境。

近年来,有研究者提出生物滤塔排出的气体中存在一定数量的生物气溶胶(bioaerosol),它的存在对人类健康造成了危险^[16]。此外,制约生物滤塔工业化运用的另一个因素是生物量的过度积累引起的生物滤塔长期不稳定运行^[17]。相关研究表明,低浓度的臭氧不仅不影响微生物降解有机物的活性,还能在一定程度上控制微生物的过量生长^[18]。Wang等^[19]比较了紫外-生物滤塔联合系统和单独生物滤塔系统出气中生物气溶胶的量,指出前者出气中生物气溶胶的量接近于背景值($60\ \text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $40\ \text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$),远远低于单独生物滤塔系统($1\ 380\ \text{CFU}\cdot\text{m}^{-3}$)。由于本研究采用 $185\ \text{nm}$ 的紫外灯作为光源,紫外光照射空气会产生 O_3 ,未反应完全的 O_3 (研究中光解出气能使靛蓝二磺酸钠溶液褪色)进入BTF中,不仅能和目标污染物继续反应生成容易降解的物质,而且也能控制微生物的过量生长,使BTF长期稳定运行,相应出气中生物气溶胶和臭氧也会减少。

3 结论

(1)采用UV-BTF联合装置处理气态氯苯,进气

氯苯浓度为 $600\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、停留时间分别为 92 、 69 和 $46\ \text{s}$ 时,平均去除率分别达到 99% 、 95% 和 80% ;最大去除负荷可达到 $59.6\ \text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$;UV预处理能去除 55% 左右的氯苯,三段生物填料对于氯苯的去除贡献在 $6\%\sim 20\%$ 之间。

(2)联合装置中BTF生物膜形成时间缩短了 $1/3$,去除率高于单独BTF 30% ;稳定运行期,联合装置抗冲击的能力明显优于单独BTF;停留时间越短,联合装置的处理效果越优于单独BTF。

(3)UV氧化氯苯形成醇、醛、羧酸等水溶性较好的可生物降解的物质,能改善BTF的运行性能;UV辐照产生的 O_3 能有效地控制BTF内微生物的过量生长。

参考文献:

- [1] 樊奇,羌宁. 挥发性有机废气净化技术研究进展[J]. 四川科学, 2005, 24(4): 40-49.
- [2] Mohseni M, Zhao J L. Coupling ultraviolet photolysis and biofiltration for enhanced degradation of aromatic air pollutants [J]. J Chem Technol Biotechnol, 2006, 81(2): 146-151.
- [3] Koh L H, Kuhn D C S, Mohseni M, et al. Utilizing ultraviolet photooxidation as a pre-treatment of volatile organic compounds upstream of a biological gas cleaning operation [J]. J Chem Technol Biotechnol, 2004, 79(6): 619-625.
- [4] 林雯雯, 蒋轶锋, 何健, 等. 紫外光降解气态氯苯的影响因素及其动力学研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(3): 28-31.
- [5] Liu J W, Liu J X, Li L. Performance of two biofilters with neutral and low pH treating off-gases [J]. J Environ Sci, 2008, 20(12): 1409-1414.
- [6] 褚淑祯, 陈建孟, 沙昊雷, 等. 生物法处理高浓度 H_2S 废气的现场试验[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 431-435.
- [7] 齐国庆, 刘发强, 刘光利. 生物滴滤塔处理恶臭气体工艺优化试验[J]. 中外能源, 2007, 12(4): 102-104.
- [8] 罗立贤, 林雯雯, 蒋轶锋, 等. 紫外光解气态氯苯的研究[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(2): 144-148.
- [9] Oh Y S, Bartha R. Removal of nitrobenzene vapors by a trickling air biofilter [J]. J Environ Eng, 1997, 18(5): 293-296.
- [10] 张书景, 李坚, 李依丽, 等. 恶臭假单胞菌生物滴滤塔净化甲苯废气的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1866-1872.
- [11] Seigneux C, Atti A, Adler N, et al. Effect of biotrickling filter operating parameters on chlorobenzenes degradation [J]. J Environ Eng, 2002, 128(4): 360-366.
- [12] Zhang L F, Sawell S, Moralejo C, et al. Heterogeneous photocatalytic decomposition of gas-phase chlorobenzene [J]. Appl Catal B, 2006, 71(3-4): 135-142.
- [13] Fouhy K. Cleaning waste-gas, naturally [J]. Chem Eng, 1992, 99(12): 41-46.
- [14] Luvsanjamba M, Sercu B, Kettesz S, et al. Thermophilic

- biotrickling filtration of a mixture of isobutyraldehyde and 2-pentanone[J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 2007, **82**(1):74-80.
- [15] Pielech-Przybylska K, Zieminski K, Szopa J S. Acetone biodegradation in a trickle-bed biofilter [J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2006, **57**(4): 200-206.
- [16] Schlegelmich M, Herold T, Streese J, *et al.* The potential to reduce emission of airborne microorganisms by means of biological waste gas treatment system[J]. *Waste Manage*, 2005, **25**: 955-964.
- [17] Cox H H J, Deshusses M A. Chemical removal of biomass from waste air biotrickling filters: Screening of chemicals of potential interest [J]. *Water Res*, 1999, **33**(10): 2383-2391.
- [18] Moussavi G, Mohseni M. Using UV pretreatment to enhance biofiltration of mixtures of aromatic VOCs[J]. *J Hazard Mater*, 2007, **144**(1-2): 59-66.
- [19] 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]. *J Air Waste Manage Assoc*, 2009, **59**(4): 405-410.