

生物滴滤系统处理模拟甲苯废气的研究

高 亭^{1a,b}, 戴 珏^{1a,b}, 关 杰^{1a,b}, 王晓璞^{1a,b},
朱秋杰^{1a,b}, 范丹丹^{1a,b}, 王 冠²

(1. 上海第二工业大学 a. 环境与材料工程学院; b. 资源循环科学与工程中心, 上海 201209;
2. 河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘 要: 以模拟的甲苯废气为目标污染物, 探究生物滴滤 (biological trickle filter, BTF) 系统在室温条件下空白系统、启动挂膜以及稳定运行 3 个阶段进气浓度、进气量及营养液喷淋速率对甲苯去除效率 (η) 的影响。研究结果表明: 在空塔试运行下, 甲苯进出口浓度差 $< 3\%$, 空白系统各因素下甲苯吸附效率在 $3\% \sim 5\%$ 之间, 对后续系统运行的影响可忽略不计。BTF 系统在进气量 15 L/min 、进气浓度 $100 \sim 300 \text{ mg/m}^3$ 及营养液喷淋速率 60 mL/min 的条件下, 活性污泥挂膜时间 $< 30 \text{ d}$; 当进气浓度增加至 500 mg/m^3 , $\eta > 90\%$ 。系统稳定运行结果表明, 随着进气量和进气浓度的增大, η 略微下降; 当进气量为 $5 \sim 25 \text{ L/min}$ 、进气浓度为 $100 \sim 1\,000 \text{ mg/m}^3$, $\eta > 85\%$; 当营养液喷淋速率在 $10 \sim 100 \text{ mL/min}$, η 稳定在 95% 左右。

关键词: 生物滴滤系统; 甲苯; 启动挂膜; 稳定运行; 去除效率

中图分类号: X511

文献标志码: A

Study on the Treatment of Simulated Toluene Waste Gas by Biological Trickle Filter System

GAO Ting^{1a,b}, DAI Jue^{1a,b}, GUAN Jie^{1a,b}, WANG Xiaopu^{1a,b}, ZHU Qiujie^{1a,b},
FAN Dandan^{1a,b}, WANG Guan²

(1a. School of Environmental and Material Engineering; 1b. Resource Recycling Science and Engineering Center, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: At room temperature, the simulated toluene exhaust gas was used as the target pollutant, and the effect of toluene intake concentration, the intake air amount and the nutrient solution spray rate to toluene removal efficiency (η) were investigated in the three stages of the blank system, the start-up membrane and the stable operation of biological trickle filter (BTF) system. The results show that under the empty tower test operation, the difference of toluene inlet and outlet concentration is less than 3% , and the adsorption efficiency of toluene is between 3% and 5% under various factors of blank system, which has negligible impact on the subsequent system operation. When BTF system has an intake air volume of 15 L/min , an intake air concentration of $100 \sim 300 \text{ mg/m}^3$ and a nutrient solution spray rate of 60 mL/min , the activated sludge filming time is less than 30 d . The gas concentration increases to 500 mg/m^3 , η is over 90% . During the stable operation phase of the system, η gradually decreases with the increase of the intake air amount and the toluene intake concentration; when the intake air amount is $5 \sim 25 \text{ L/min}$ and the intake air concentration is $100 \sim 1\,000 \text{ mg/m}^3$, η is more than 85% ;

收稿日期: 2019-02-19

通信作者: 戴 珏 (1985-), 男, 江苏苏州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为环境治理技术与装备。E-mail: daijue@sspu.edu.cn

基金项目: 上海市高原学科 - 环境科学与工程 (资源循环科学与工程), 上海第二工业大学培育学科建设项目 (EGD18YJ0029), 上海市联盟计划 - 难题招标专项 (LM201857), 上海第二工业大学研究生项目基金 (EGD17YJ003) 资助

changing the spraying rate of nutrient solution to 10~100 mL/min, η is approximately stable at 95%.

Keywords: biological trickle filter system; toluene; film forming start up; stable operation; removal efficiency

0 引言

随着城市化程度及工农业的不断扩大和发展, 空气质量恶化问题日趋严重, 特别是化工行业迅速发展所导致的大量挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 排入大气中, 引起严重的环境和社会问题。目前, 有机废气已成为全球第二大严重空气污染因素^[1], 而甲苯作为一种典型的有机废气, 其排放控制及治理技术已成为关键问题。美国环境保护委员会 (environmental protection agency, EPA) 将苯、甲苯、乙苯和二甲苯列为首要治理的污染物^[2]。我国以国务院办公厅转发《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》(国办发[2010]33号) 文件为标志, VOCs 污染控制步入重点环境保护工作, 通过制订一系列标准, 明确了甲苯在内的 VOCs 控制要求^[3]。

甲苯废气具有来源广泛、排放量大、难于治理等特点。2010—2017 年相关数据显示, 我国所排放的有机废气浓度高达美国的 5~15 倍以上^[4], 2010 年我国人为源 VOCs 排放总量已经达到 2 230.0 万 t^[5]。张靖等^[6] 在调查北京市大气中 VOCs 的组成时发现, 检出物中的 54 种有毒有害物质的主要成分是苯系物和卤代烃。这不仅给环境带来污染问题, 也造成了大量资源的浪费。甲苯废气治理技术大致分为物理、化学和生物方法 3 类, 主要包括冷凝、吸收和吸附、焚烧、催化燃烧^[7]、光催化法^[8]、催化氧化^[9]、等离子体法、生物滤池、生物洗涤及生物滴滤 (biological trickle filter, BTF) 等净化方法^[10-11]。为了提高降解的速率和效率, 不少研究者将这些技术联合使用^[12-17]。生物法净化甲苯等 VOCs 因操作简易、维护方便、运行费用低、无二次污染等优点而备受世界各国关注^[18]。同时因其在经济分析和环境友好发展上均达到环保要求, 生物法治理工业有机废气已成为一种主流优选的办法^[19]。生物法主要包括生物过滤、BTF 和生物洗涤法, 其中 BTF 技术可作为传统空气污染控制技术的替代方案^[20]。

本文自行设计 BTF 系统, 聚氨酯海绵作为填料,

模拟的甲苯废气作为目标气体, 活性污泥作为菌源直接挂膜, 分别探究了室温条件下空白系统、启动挂膜以及稳定运行 3 个阶段甲苯进气浓度、进气量及营养液喷淋速率对甲苯去除效率 (η) 的影响。在节约成本的条件下, BTF 系统可以高效、稳定运行, 为后续的研究工作提供一定的理论支撑。

1 实验材料与方法

1.1 BTF 塔的设计

BTF 系统的主体为有机玻璃材质的圆柱形塔体, 即 BTF 塔 (见图 1), 其内径 180 mm, 外径 190 mm, 壁厚 5 mm, 总塔高 926.01 mm, 塔体截面积和有效体积分别为 254 cm² 和 1.27×10⁻² m³。

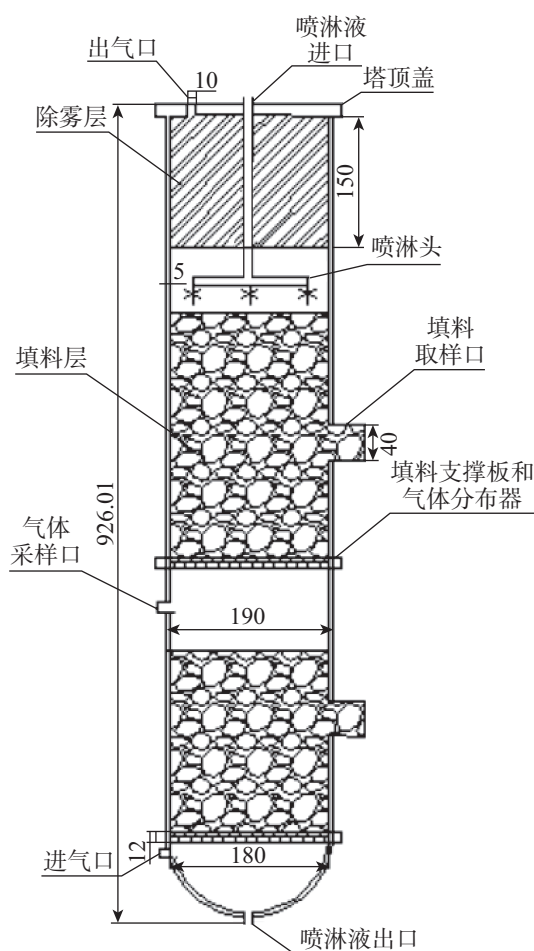


图 1 BTF 塔 (mm)

Fig. 1 BTF tower (mm)

BTF 塔分为 4 部分,上层为喷淋及气体除雾层;中层和下层分别为 2 m 和 3 m 高的填料层,每层之间隔板的开孔率超过 60%,起到均匀分布气体及喷淋液的作用,每层都有设置气体采样口和填料采样口;最底层为循环营养液缓冲区及出口。填料性能是 BTF 塔的重要参数之一,本文使用 1 cm×1 cm×1 cm 立方体聚氨酯填料,详细参数如表 1 所示。

表 1 聚氨酯填料性能参数
Tab. 1 Performance parameters of polyurethane filler

聚氨酯			
密度/(kg·m ⁻³)	≈ 1	比表面积/(m ² ·m ⁻³)	3.2 × 10 ⁴
丝径/mm	0.6~1.5	成品质量/(kg·m ⁻³)	21
孔隙率/%	97.3	承膜质量/(kg·m ⁻³)	426
有机负荷/ (kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	1.1		

1.2 实验试剂

营养液可以为微生物提供必要的营养物质,同时保证其生长环境所需的湿度。启动挂膜初期加入适量的葡萄糖作为碳源,随着微生物适应时间的增加葡萄糖含量逐渐减少,最终达到以甲苯为唯一碳源的目的,提高甲苯的降解效率。营养液成分及浓度^[21-23]如表 2 所示。

表 2 营养液成分及浓度
Tab. 2 Nutrient solution composition and concentration

名称	化学式	含量/(g·L ⁻¹)
葡萄糖 - 水合物	C ₆ H ₁₂ O ₆	0~0.1
氯化铵	NH ₄ Cl	0.3
氯化镁	MgCl ₂	0.1
无水氯化钙	CaCl ₂	0.1
磷酸氢二钾	K ₂ HPO ₄	0.5
磷酸二氢钠	NaH ₂ PO ₄	0.5
硫酸锰	MnSO ₄	0.3
无水硫酸铜	CuSO ₄	0.01
七水合硫酸锌	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.01
七水合硫酸亚铁	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.01

1.3 实验流程

BTF 系统 (见图 2) 包括气液两路,由配气及输气装置、BTF 塔、尾气缓冲装置和喷淋循环装置组成,且采用气液逆流的操作方式。甲苯经吹脱瓶后在混合瓶中与另一路空气混匀后(动态配气法)制得目标气体;经输送气泵从 BTF 塔底部进入塔体,通过两层负载有微生物且经过循环营养液喷淋的的填料层后,从 BTF 塔顶端进入到尾气缓冲装置排出;循环营养液从底部流出经蠕动泵再次从塔体顶部喷淋。进气采样口位于塔体底端,出气采样口位于塔体顶端。

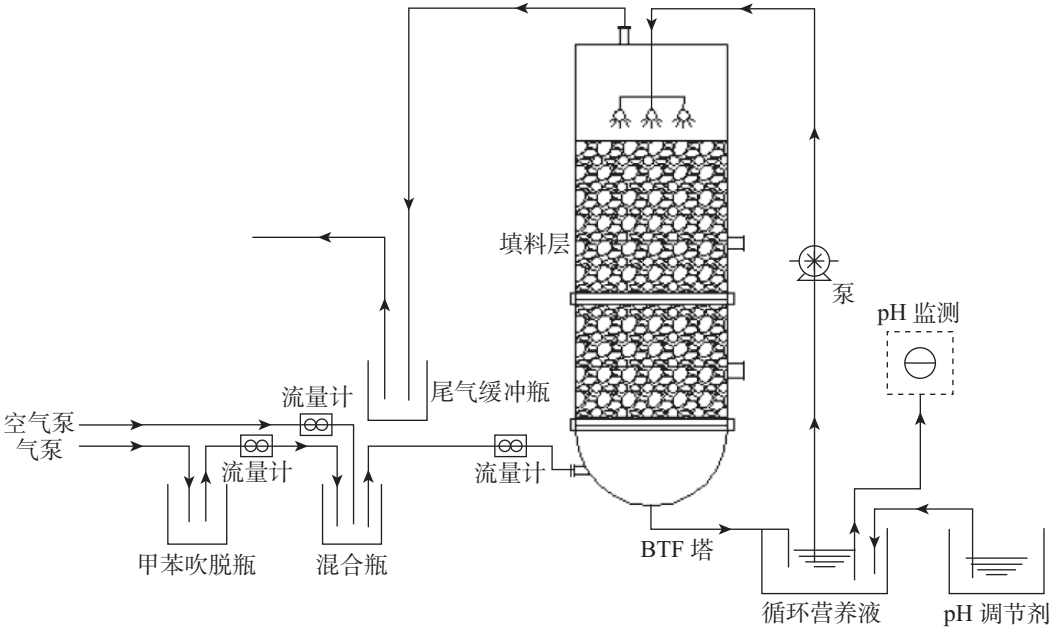


图 2 BTF 系统
Fig. 2 BTF system

首先进行空塔试运行实验,主要考察 BTF 系统的气密性;其次进行空白系统运行实验,主要考察除微生物降解外系统对甲苯吸附或吸收作用的影响;最后考察 BTF 系统挂膜阶段和稳定阶段的表现。各阶段的操作条件如表 3 所示。进气量和进气浓度由

输送气泵、气体流量计和阀门进行调控,营养液喷淋速率和频次由蠕动泵调控。营养液采取循环间歇式喷淋,每喷淋 5 min 间歇 5 min,每周添加新配制营养液。气体的采集时间在喷淋间歇期间,每次采集 3 次平行样,取平均值作为该阶段的数值。

表 3 BTF 系统各阶段操作条件
Tab. 3 Operating conditions at various stages of BTF system

阶段	t/d	甲苯浓度/(mg·m ⁻³)	营养液喷淋速率/(mL·min ⁻¹)	进气量/(L·min ⁻¹)	停留时间/s
空塔试运行	3	100~1 000	—	5~25	—
空白系统运行	5	200~1 200	10~100	5~25	30.48~152.40
挂膜阶段	0~30	0~500	60	15	50.80
稳定阶段	31~70	0~1 000	10~100	5~25	30.48~152.40

1.4 分析方法

甲苯质量浓度由岛津 GC-2014 气相色谱仪测定,具体操作条件为气化室温度 150 ℃,色谱柱温度 80 ℃,火焰离子化检测器 (flame ionization detector, FID) 温度 250 ℃,色谱柱为长度 60.0 m、内径 0.25 mm 且由岛津生产的名为 WandaCap 的毛细管柱,载气 N₂ 的流量 30.0 mL/min,空气流量 400.0 mL/min, H₂ 流速 40.0 mL/min, N₂ 和空气均由钢瓶提供, H₂ 由型号为 KCH-300 的氢气发生器提供,气化室压力 124.3 kPa,检测时间 11 min。

营养液喷淋速率由卡川流体科技(上海)有限公司生产的型号为 S16 32 mm×64 mm 6 转子 LLS Plus 卡默尔蠕动泵控制。

气体流量由祥锦流量仪表厂生产的型号为 LZB-4WB 玻璃转子流量计测定。

BTF 系统的表现由 η 体现,即甲苯的净化程度,其表达式为

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho} \times 100 \quad (1)$$

式中: η 为甲苯去除效率,%; ρ 为甲苯进气口浓度, mg/m³; ρ_0 为甲苯出气口浓度, mg/m³。

进气量的对应相为停留时间,即甲苯在有效体积内的停留时间,其表达式为

$$EBRT = V_{\text{有效}}/Q \quad (2)$$

式中: EBRT 为停留时间, s; $V_{\text{有效}}$ 为系统有效体积, m³; Q 为进气量, m³/s。

数据分析和图谱采用 Excel 2013 及 OriginLab

OriginPro 8.5 软件分析。

2 结果与分析

2.1 空白系统运行表现

空白系统运行前先进行空塔试运行,测试结果表明进出口浓度相差 <3%,整个系统气密性良好。空白系统是在未添加活性污泥的条件下运行的,考察没有挂膜的填料、喷淋液及整个系统对甲苯气体的吸附或吸收作用,最终系统达到甲苯吸附饱和状态,排除因微生物降解以外因素造成的实验误差。

BTF 系统在仅有填料未添加营养液喷淋条件下,控制温度 22~28 ℃,甲苯进气浓度 200~300 mg/m³,考察进气量 5~25 L/min 对甲苯去除效果的影响(见图 3);在进气量 15 L/min 条件下,考察甲苯进气浓度 200~1 200 mg/m³ 对甲苯去除效果的影响(见图 4)。从图 3、4 可以看出,随着进气量

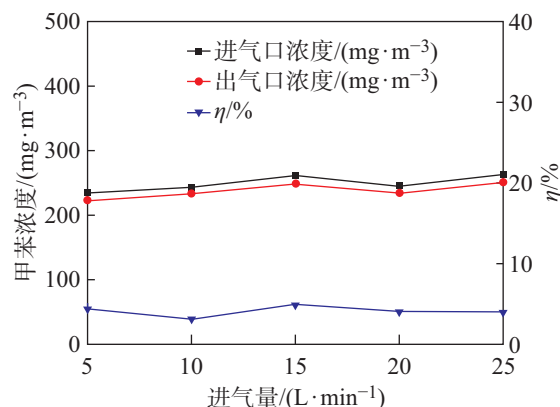


图 3 空白系统下进气量对 η 的影响

Fig. 3 Effect of intake air amount on η under blank system

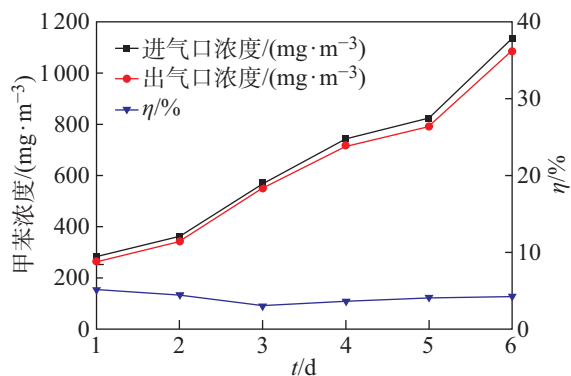


图4 在进气量 15 L/min 的空白系统下甲苯进气浓度对 η 的影响

Fig. 4 Effect of toluene intake concentration on η in a blank system with an intake air volume of 15 L/min

和进气浓度的不断增加, 系统对甲苯的吸附效率在 3%~5% 之间变化。

在 BTF 系统温度 22~28 °C, 进气量 15 L/min, 甲苯进气浓度 100~500 mg/m³ 条件下, 考察喷淋速率 10~100 mL/min 对 η 的影响。从图 5 可以看出, 随着甲苯进气浓度及营养液喷淋速率的变化, 系统对甲苯吸收作用稳定在 5% 左右。

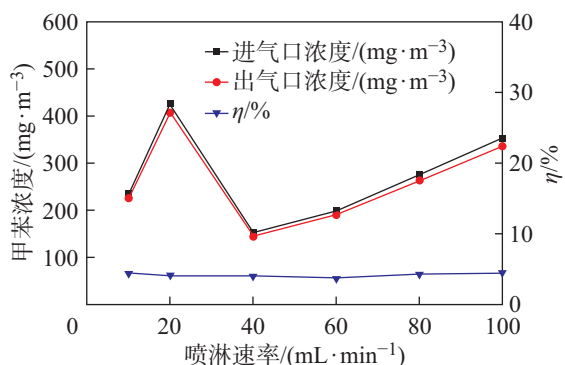


图5 空白系统下营养液喷淋速率对 η 的影响

Fig. 5 Effect of spray rate of nutrient solution on η in a blank system

由此可见, 在未添加污泥的条件下, 空白系统对甲苯的吸收作用在 3%~5%, 证明系统对甲苯的吸附作用甚微, 对后期挂膜及稳定运行阶段的影响可忽略不计。

2.2 BTF 系统启动挂膜表现

BTF 系统空塔试运行及空白系统运行结果表明, 进气量、进气浓度和营养液喷淋速率对甲苯降解效率的影响较小。系统启动挂膜期, 活性污泥中的微生物需要一定的适应时间, 所以需要初期进气浓度较低, 后期逐渐升高, 进气量和营养液喷淋速率保持在相对恒定范围内, 因此本文选择影响程度较小

的进气量 15 L/min, 以及为了保证微生物生活环境湿度的喷淋速率为 60 mL/min。控制温度 22~28 °C, 甲苯进气浓度 100~300 mg/m³, 从图 6 可以看出, 挂膜前 3 d, η 低于 20%, 此阶段为微生物适应甲苯阶段; 3 d 后采用未添加葡萄糖的营养液喷淋, 3~25 d 期间, η 随着挂膜时间的增加而不断增加; 25 d 后 $\eta > 90\%$, 改变甲苯进气浓度为 100~500 mg/m³, η 仍维持在 90%~95%。由此可见, 在未添加外源菌种的条件下, 活性污泥 30 d 内完成挂膜。

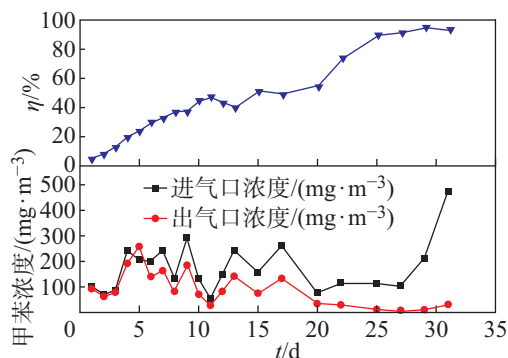


图6 启动挂膜期间 η 的表现

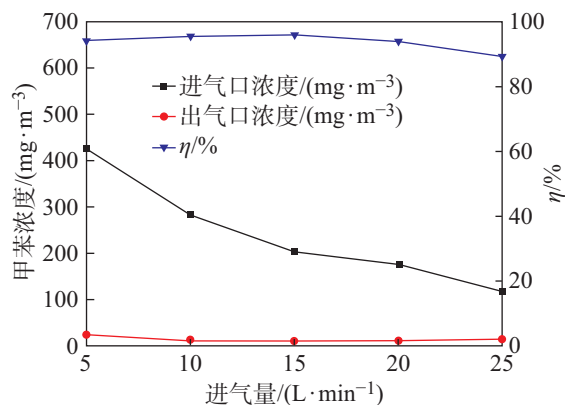
Fig. 6 Performance of η during the filming process

本阶段研究结果表明, BTF 系统在进气量 15 L/min, 即停留时间 50 s, 甲苯进气浓度 100~500 mg/m³ 的条件下, η 在第 25 d 后可达 90% 以上。这与文献 [23-24] 中研究的 BTF 塔挂膜成功时 $\eta > 90\%$ 结果一致, 但是, 文献中的实验停留时间分别为 96 s 和 120 s, 而本实验停留时间仅为 50 s, 大大缩短了停留时间, 适用于大多数工业中气量大、浓度低的工况, 具有较强应用性。

2.3 BTF 系统稳定运行表现

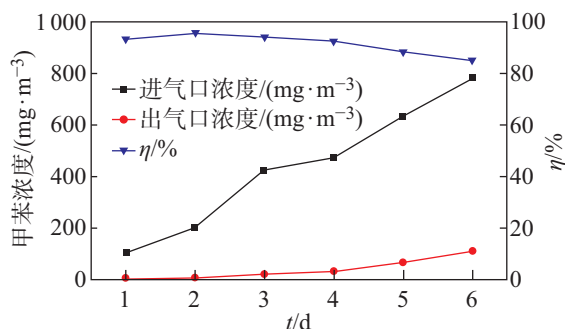
BTF 系统挂膜成功后, 考察运行期间进气量、进气浓度及营养液喷淋速率对系统降解甲苯效果的影响。

控制系统温度 22~28 °C, 甲苯进气浓度 100~500 mg/m³, 喷淋速率 60 mL/min 的条件下, 考察进气量 5~25 L/min 对 η 的影响。从图 7 可以看出, 随着进气量的增大, 去除效率有所下降; 当进气量 < 15 L/min 时, $\eta > 96\%$, 继续增大进气量至 25 L/min, 效率降至 90%; 增大进气量的同时降低了甲苯在系统中的停留时间, 与生物膜接触时间过短, 故 η 有所下降, 由此可见, 合适的进气量可提高甲苯净化效率。

图7 稳定运行期间进气量对 η 的影响Fig. 7 Effect of intake air amount on η during steady operation

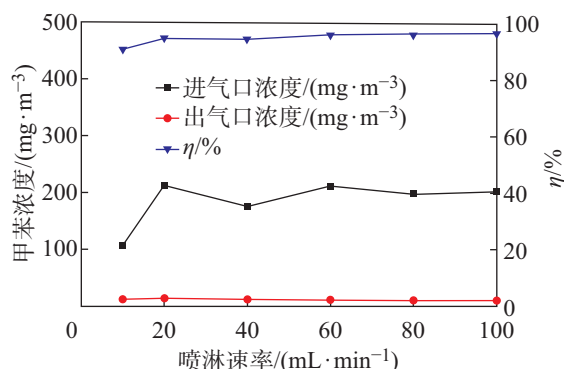
Chen 等^[21]对上述因素也进行了研究,当进气量从 $0.02 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加至 $0.06 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下, η 由 95% 下降到 80%, η 下降了 15%, 而本文进气量从 $5.00 \text{ L}/\text{min}$ 增至 $25.00 \text{ L}/\text{min}$, η 由 96% 下降至 90%, 仅下降 6%。由此可见, 本文的 BTF 具有较好的稳定性, 能够应对外界因素变化的影响。

系统稳定运行期间, 控制温度 $22\sim 28^\circ\text{C}$, 进气量 $15 \text{ L}/\text{min}$, 喷淋速率 $60 \text{ mL}/\text{min}$, 考察甲苯进气浓度 $100\sim 800 \text{ mg}/\text{m}^3$ 对 η 的影响。如图 8 所示, 甲苯进气浓度 $< 400 \text{ mg}/\text{m}^3$ 时, η 在 95% 左右, 随着进气浓度的增加, η 略微下降; 当甲苯进气浓度增大至 $600 \text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $800 \text{ mg}/\text{m}^3$ 时, η 分别为 90% 和 85%。由此可见, 本文 BTF 系统甲苯进气浓度增加 $400 \text{ mg}/\text{m}^3$, η 仅下降 10% 左右, 这与 Singh 等^[25] 甲苯进气浓度增大 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ 时 η 从 95% 降至 80% 这一结果相比, 本系统受外界因素变化的自控稳定性较强。

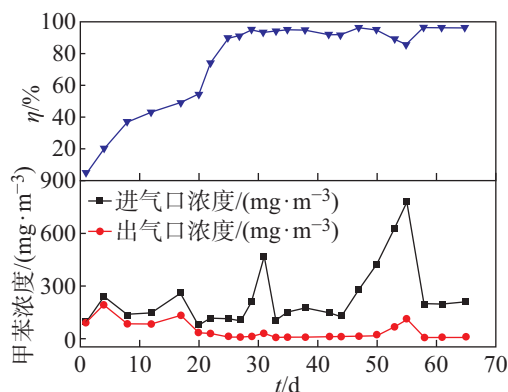
图8 稳定运行期间甲苯进气浓度对 η 的影响Fig. 8 Effect of toluene intake concentration on η during stable operation

控制 BTF 系统温度 $22\sim 28^\circ\text{C}$, 进气量 $15 \text{ L}/\text{min}$, 甲苯进气浓度 $100\sim 300 \text{ mg}/\text{m}^3$, 考察喷淋速率 $10\sim 100 \text{ mL}/\text{min}$ 对 η 的影响。如图 9 所示, η 随着

喷淋速率的改变没有较大幅度的变化, 基本稳定在 90% 以上。在相对恒定的甲苯进气浓度条件下, 喷淋速率 $> 60 \text{ mL}/\text{min}$ 后去除效率稳定在 96% 左右。由此可见, 喷淋速率对 η 的影响甚微。

图9 稳定运行期间喷淋速率对 η 的影响Fig. 9 Effect of spray rate on η during stable operation

从图 10 可以看出, 系统成功挂膜后 30 d 以上可稳定运行, 即使改变进气量、进气浓度及喷淋速率等条件, η 稳定在 85%~97%。在甲苯进气浓度为 $800 \text{ mg}/\text{m}^3$ 的条件下, η 仍高于 85%, 降低进气浓度后 η 能快速达到 90% 以上, 说明本文 BTF 系统具有较好的稳定性。

图10 稳定运行期间 η 的表现Fig. 10 Performance of η during stable operation

3 结论

(1) 空白系统试运行结果表明, 在未添加污泥的条件下, 系统的 η 为 3%~5%, 对启动挂膜和稳定运行阶段的影响可忽略不计。

(2) 本文 BTF 系统采用活性污泥直接挂膜方式, 控制进气量 $15 \text{ L}/\text{min}$, 温度 $22\sim 28^\circ\text{C}$, 甲苯进气浓度 $100\sim 300 \text{ mg}/\text{m}^3$, 喷淋速率 $60 \text{ mL}/\text{min}$, 系统在 30 d 内成功完成挂膜, η 稳定在 95% 左右。

(3) 系统成功挂膜后 30 d 以上可稳定运行, 改变进气量 5~25 L/min、甲苯进气浓度 100~800 mg/m³ 及喷淋速率 10~100 mL/min 等条件, η 稳定在 90% 左右。甲苯进气浓度增大至 800 mg/m³, η 有所下降, 但在降低浓度后 η 能快速达到 96% 以上, 说明本文 BTF 系统随外界环境因素的改变, 波动较小。

综上所述, 本文 BTF 系统选用价格低廉性能较优的聚氨酯填料、污水处理厂的活性污泥作为菌源、多次循环使用的喷淋液, 操作简便、维护费用低, 具有较好的稳定性能, 且对甲苯具有良好的净化效果。因而该系统具有较广的应用前景, 但生物膜生长及变化状况等研究仍需深入探索。

参考文献:

- [1] 崔保聪, 易红宏, 唐晓龙, 等. 工业废气中甲苯处理技术研究现状与进展 [J]. 现代化工, 2016, 36(2): 30-33.
- [2] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] 张国宁, 郝郑平, 江梅, 等. 国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究 [J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3501-3508.
- [4] 罗秋容, 黄世裕. 分析有机废气新型处理技术应用的研究进展 [J]. 环境与发展, 2017, 29(8): 91-92.
- [5] 龚芳. 我国人为源 VOCs 排放清单及行业排放特征分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [6] 张靖, 邵敏, 苏芳. 北京市大气中挥发性有机物的组成特征 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(5): 1-5.
- [7] 孙浩程, 赵朝成, 陈亚男, 等. 催化燃烧法处理挥发性有机物的研究进展 [J]. 现代化工, 2015, 35(6): 57-61.
- [8] 张轩, 郭斌, 孙嘉祺, 等. 光催化处理挥发性有机物研究进展 [J]. 现代化工, 2018, 38(5): 20-23.
- [9] WU H, YIN Z H, QUAN Y, et al. Removal of methyl acrylate by ceramic-packed biotrickling filter and their response to bacterial community [J]. Bioresource Technology, 2016, 209: 237-245.
- [10] 孙立, 吴旭景. 生物滴滤法净化 VOCs 气体的研究进展 [J]. 广东化工, 2016, 43(11): 138-139.
- [11] PARMAR G R, RAO N N. Emerging control technologies for volatile organic compounds [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2008, 39(1): 41-78.
- [12] WU H, GUO C Y, YIN Z H, et al. Performance and bacterial diversity of biotrickling filters filled with conductive packing material for the treatment of toluene [J]. Bioresource Technology, 2018, 257: 201-209.
- [13] AKMIRZA I, PASCUAL C, CARVAJAL A, et al. Anoxic biodegradation of BTEX in a biotrickling filter [J]. Science of the Total Environment, 2017, 587/588: 457-465.
- [14] ALINEJAD A, ZAMIR S M, SHOJAOSADATI S A. Different strategies for transient-state operation of a biotrickling filter treating toluene vapor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(8): 3451-3462.
- [15] 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, 2016, 36(6): 1143-1155.
- [16] 卢峰, 李明玉, 刘吉军, 等. VUV/O₃ 协同降解气态甲苯 [J]. 现代化工, 2018, 38(3): 177-181.
- [17] 唐沙颖稼, 徐校良, 黄琼, 等. 生物法处理有机废气的研究进展 [J]. 现代化工, 2012, 32(10): 29-33.
- [18] 刘超, 廖雷, 彭娟, 等. 挥发性有机废气生物处理技术研究进展 [J]. 环境工程, 2016, 34(4): 95-99.
- [19] BALASUBRAMANIAN P, PHILIP L, BHALLAMUDI S M. Biotrickling filtration of VOC emissions from pharmaceutical industries [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 209: 102-112.
- [20] BARBUSINSKI K, KALEMBA K, KASPERCZYK D, et al. Biological methods for odor treatment: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 223-241.
- [21] CHEN R, LIAO Q, TIAN X, et al. Characterization of the start-up behavior and steady-state performance of biotrickling filter removing low concentration toluene waste gas [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(6): 1701-1710.
- [22] ALINEJAD A, ZAMIR S M, SHOJAOSADATI S A. Different strategies for transient-state operation of a biotrickling filter treating toluene vapor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(8): 3451-3462.
- [23] CHENG Z W, LU L C, KENNES C, et al. Treatment of gaseous toluene in three biofilters inoculated with fungi/bacteria: Microbial analysis, performance and starvation response [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 303: 83-93.
- [24] CHEN X, QIAN W, KONG L J, et al. Performance of a suspended biofilter as a new bioreactor for removal of toluene [J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 98: 56-62.
- [25] SINGH R S, RAI B N, UPADHYAY S N. Removal of toluene vapour from air stream using a biofilter packed with polyurethane foam [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010, 88(5): 366-371.