

# Removal of Toluene Contained Gas by Vertical Bio-trickling Filter

Jian Li<sup>1</sup>, Ying Chen<sup>1</sup>, Jia Liu<sup>1</sup>, Chunjing Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

<sup>2</sup>College of Resources and environmental science, Agricultural University of Hebei, Hebei 071001, China

Email: ljian@bjut.edu.cn, rubychenyong2010@emails.bjut.edu.cn

Received 2013

**Abstract:** The contained gas purification by vertical bio-trickling filter was performed with toluene as target pollutant, ceramists as packing material and the efficient composite bacteria as degrading bacteria, the efficient assorted bacteria are obtained from earlier experiments. The start-up process of the bio-trickling filter was studied; the effects of inlet toluene concentration and short-term stop on removal capacity under stable operation stage were also investigated.

**Keywords:** Toluene; Bio-trickling Filter; Start-up; Stable Operation; Adsorption

## 立式生物滴滤塔去除甲苯废气的研究

李 坚<sup>1</sup>, 陈 英<sup>1</sup>, 刘 佳<sup>1</sup>, 刘春敬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100024

<sup>2</sup>河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001

Email: ljian@bjut.edu.cn, rubychenyong2010@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2013

**摘 要:** 本实验以甲苯为目标污染物、陶粒为填料、实验室前期驯化筛选得到的优势甲苯组合菌为菌源进行实验, 研究立式生物滴滤塔的挂膜启动情况及在稳定运行阶段甲苯进气浓度、短期停置对甲苯去除率的影响。

**关键词:** 甲苯; 生物滴滤塔; 挂膜启动; 稳定运行; 吸附

## 1 引言

生物处理工艺广泛应用于工业废气、恶臭污染物、有机废气等处理, 主要包括生物过滤、生物洗涤和生物滴滤工艺<sup>[1]</sup>。生物滴滤是一种介于生物过滤和生物洗涤之间的生物处理技术, 具有生物量多, 反应条件 (pH、湿度) 易于控制, 净化效率高, 适合处理低浓度、大气量的挥发性有机物 (VOCs) 等特点<sup>[2]</sup>。近年来, 生物滴滤法去除 VOCs 污染物已经成为国内外学者的研究热点, 主要集中在填料特性<sup>[3]</sup>、目标污染物<sup>[4]</sup>、反应机理<sup>[5]</sup>、高效降解菌<sup>[6]</sup>、反应器结构设计

<sup>[7]</sup>等内容上。

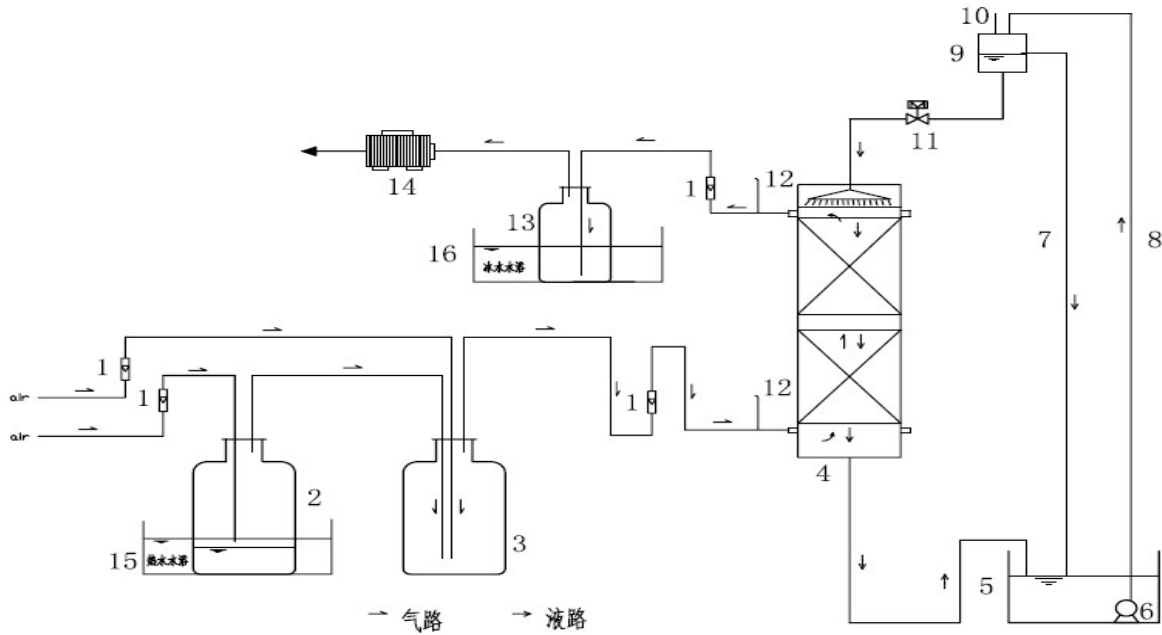
传统生物滴滤工艺多采用混合菌污泥作为菌源直接进行滴滤反应器的挂膜启动, 在运行过程中, 容易出现堵塞现象。本实验以前期驯化筛选出的高效甲苯组合菌为菌源、甲苯为目标污染物、陶粒为填料进行实验, 研究了生物滴滤塔的挂膜启动情况及在稳定运行阶段甲苯进气浓度、短期停置对甲苯去除率的影响。

## 2 材料和方法

### 2.1 实验装置

生物滴滤塔去除甲苯的实验流程如图 1 所示。生

基金资助项目: 国家自然科学基金(21107004); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (201011103120018)



1-质量流量计; 2-甲苯挥发瓶; 3-气体混合瓶; 4-生物滴滤塔; 5-储液槽; 6-潜水泵; 7-溢水管; 8-上液管; 9-放空管; 10-集液槽; 11-电磁阀; 12-采样口; 13-冷却缓冲瓶; 14-真空泵; 15-热水水浴; 16-冰水水浴

Figure 1. Schematic diagram of the vertical bio-trickling filter  
图 1. 生物滴滤塔净化甲苯废气实验装置

物滴滤塔由内径 85 mm 的有机玻璃管制成，总高为 1000 mm，其中填料层高度为 500 mm，分为两段，截面积为  $5.67 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，填料总体积为  $2.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。采用动态配气法配制含甲苯气体：进入反应器的空气分为两股，一股气流进入甲苯挥发瓶，吹送甲苯蒸汽进入混合瓶与另一股气流充分混合，形成模拟甲苯废气，通过流量计来控制进气量与废气浓度。废气从滤塔底端进入滴滤塔的微生物填料区，气流竖直向上通过填料区，营养液通过自动控制系统定时定量地由滤塔顶部的小喷头滴下，塔内气液逆流接触，净化后的气体由顶部排出，沥出液由底部液封装置进入营养液储液槽。

## 2.2 菌源、填料和循环液

菌源在生物滴滤系统中起着处理核心的作用，直接影响着生物滴滤系统的处理性能。本实验以北京小红门污水处理厂的活性污泥和北京小武基垃圾转运站调节池的垃圾渗沥液为初始菌源，进一步驯化筛选出能够降解甲苯的优势菌种，以其优势组合菌作为生物滴滤塔的挂膜菌源。

填料在生物滴滤塔系统中有着重要的作用，为微

生物提供生存空间，在给予机械支撑的同时储存营养物质并保持湿度<sup>[8]</sup>。本实验选用优选后的生物陶粒作为挂膜填料，其具体物理性能参数见表 1。

营养液：磷酸盐缓冲液 ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ )、 $\text{MgSO}_4$  溶液、 $\text{CaCl}_2$  溶液、 $\text{FeCl}_3$  溶液以及微量元素 ( $\text{MnSO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ )。

Table 1. Physical characters of ceramic pellets  
表 1. 生物陶粒的物性参数

外观	粒径 mm	密度 $\text{g/cm}^3$	比表面积 $\text{m}^2/\text{g}$	孔隙率 %
球状、表面深灰色、多微孔	2-3	1.81	1.33	$\geq 56$

## 2.3 分析方法

气相甲苯浓度：顶空抽样并通过 Agilent 6890A 气相色谱仪检测，FID 检测器，19091J-413 型毛细柱。检测条件为：柱温  $60^\circ\text{C}$ ，检测器  $300^\circ\text{C}$ ，进样口  $100^\circ\text{C}$ ，载气为  $\text{N}_2$ 。

采用静态配气法配制标准气体，甲苯标准曲线如图 2 所示。标准方程为：

$$y = 32.18x + 13.72, R^2 = 0.997$$

式中： $y$ —甲苯质量浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ ； $x$ —峰面积。

## 2.4 评价指标

在净化系统不漏风，即进、出口气量相同的情况下，生物滴滤塔的主要净化工艺指标如下：

1) 去除效率  $\eta$ ，废气的净化程度，其数学表达式为：

$$\eta = 1 - C_2 / C_1 \quad (1)$$

式中： $\eta$ —净化效率，%； $C_1$ —气体入口浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ ； $C_2$ —气体出口浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ 。

2) 进气负荷  $L_I$ ，单位时间、单位体积填料内所承载的污染物的量，数学表达式为：

$$L_I = C_1 Q / 1000V \quad (2)$$

式中： $L_I$ —体积负荷， $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ； $Q$ —气体流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ； $V$ —填料体积， $\text{m}^3$ 。

3) 体积去除负荷  $L_r$ ，即单位时间与单位体积生物填料所降解的污染物量，在净化系统不漏风的情况下，数学表达式为：

$$L_r = (C_1 - C_2) \cdot Q / 1000V \quad (3)$$

式中： $L_r$ —体积去除负荷， $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 生物滴滤塔的挂膜启动情况

#### 3.1.1 反应器启动初期填料的吸附作用

在生物滴滤反应器启动的最初阶段，出现了甲苯废气被完全去除的现象。图 3 为挂膜启动初期生物滴滤塔填料对甲苯的吸附情况，由图可知，反应器在挂

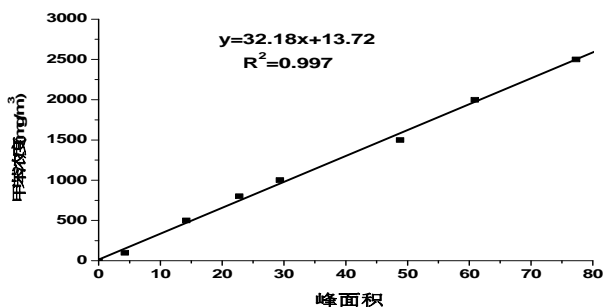


Figure 2. Standard curve of toluene determination  
图 2. 甲苯测定标准曲线

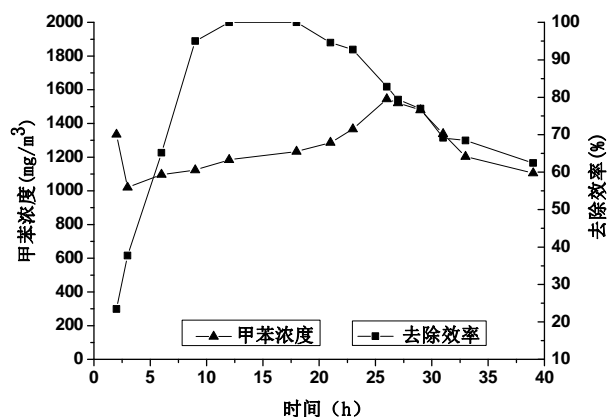


Figure 3. Ceramists adsorb toluene in the initial stage of start-up  
图 3. 挂膜启动初期填料对甲苯的吸附情况

膜启动的最初阶段去除效率先急剧增加达到 100%，再逐渐减少，且持续时间不长。初步分析主要是由于填料对甲苯的吸附作用。

#### 3.1.2 吸附饱和之后的挂膜启动

生物滴滤塔挂膜启动时，进气量为  $0.17 \text{ m}^3/\text{h}$ ，甲苯进口浓度维持在  $600 \sim 900 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，在滴滤塔的停留时间为 54 s，室温  $24 \sim 29^\circ\text{C}$ 。图 4 和图 5 为立式生物滴滤塔启动运行阶段净化效率与体积去除负荷的变化。

由图 4 和图 5 可知，随着运行天数的增加，立式生物滴滤塔的净化效率逐渐上升，体积去除负荷增加。起始阶段，反应器的净化效率由第 2 d 的 50% 上升到第 14 d 的 90%，此时体积负荷为  $42.15 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ，体积去除负荷达到  $38.79 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ，从第 14 d 以后的 5 d 时间里反应器维持较高的去除效率，体积去除负荷趋近于体积负荷，表明立式生物滴滤塔内填料表面附着的生物膜量逐渐增加，对甲苯的去除能力逐渐增强，滴滤塔的挂膜启动完成。

### 3.2 稳定运行阶段不同进气浓度下的去除效果

在进气流量  $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、停留时间为 45 s 时，室温  $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ ，考察进气质量浓度在  $300 \sim 800 \text{ mg}/\text{m}^3$  对甲苯去除率的影响，其结果如图 6 所示。

由图 6 可知，在考察的进气浓度范围内，甲苯去除效率基本在 80% 以上，当进气浓度突然提高时，去除率会下降，但由于碳源充足，填料表面的生物膜在最大去除能力范围内快速繁殖以去除更多的甲苯，在短期内可以恢复到较高的水平，在稳定运行阶段具有

较好的抗冲击负荷能力。

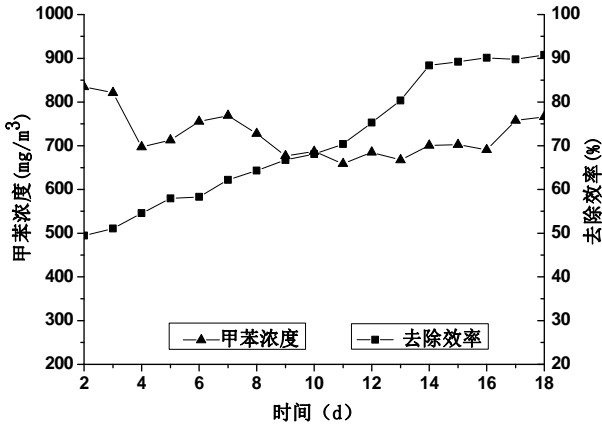


Figure 4. Change of removal efficiency in start-up stage  
图 4. 挂膜启动阶段净化效率的变化情况

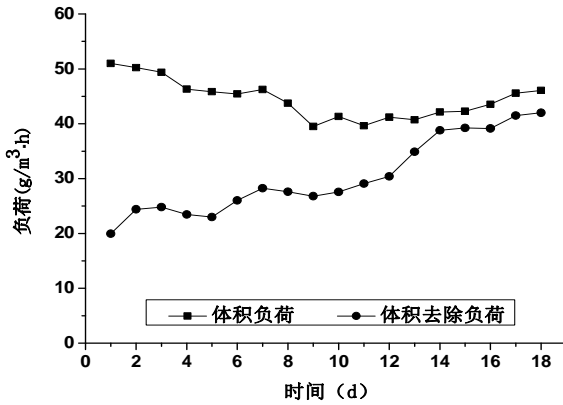


Figure 5. Volumetric removal rate under different volumetric loading in start-up stage  
图 5. 挂膜启动阶段体积去除负荷随体积负荷的变化情况

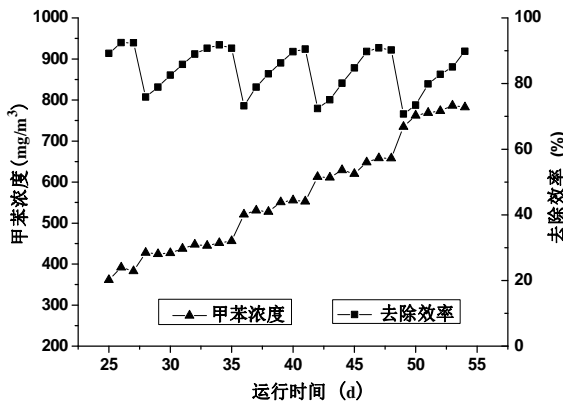


Figure 6. Effect of inlet concentration on the removal efficiency in stable stage  
图 6. 稳定运行阶段进气质量浓度与去除率的变化关系

### 3.3 反应器短期停置后启动运行情况

在实际工业生产过程中，由于工况的不连续性，使废气的排放形式通常为间歇式，生物滴滤塔在一定时期会处于停置的状态。在这种情况下，塔内微生物群落会处于不同程度的饥饿状态，生长繁殖受到抑制，甚至会处于休眠状态，从而在重新启动运行后存在一个恢复阶段。生物滴滤塔重新启动恢复时间长短直接体现了生物滴滤塔处理性能的好坏。

本实验进行了生物滴滤塔短期(8 d)停置后，生物滴滤塔性能恢复能力的研究。图 7 为生物滴滤塔短期停置后的启动运行情况。在停置期间仍定时定量喷淋营养液，保持床层湿度、提供无机养分。重新启动后甲苯进气浓度为  $500 \text{ mg/m}^3$  左右，进气量为  $0.18 \text{ m}^3/\text{h}$ ，停留时间 51 s。

由图 4 可以看出，反应器停置 8 d 后再次启动运行，最初的去除效率只有约 47%，10 h 内逐渐上升到 80% 以上，19 h 后反应器去除效率达到 90% 以上，24 h 后甲苯进口浓度为  $534.2 \text{ mg/m}^3$ ，出口浓度为  $19.6 \text{ mg/m}^3$ ，去除效率达到 95.3%。反应器在停止供应碳源、维持营养液的喷淋情况下，反应器在 1 d 内能够恢复性能，抗饥饿能力较好。

## 4 结论

- (1) 在生物滴滤塔挂膜启动最初阶段，出现了甲苯被完全去除的现象，分析是填料对甲苯废气有一定的吸附能力。
- (2) 以前期实验阶段驯化筛选出的甲苯组合菌为菌源，可以在较短时间内完成挂膜启动运行，在稳定运行阶段具有一定的抗冲击负荷能力。

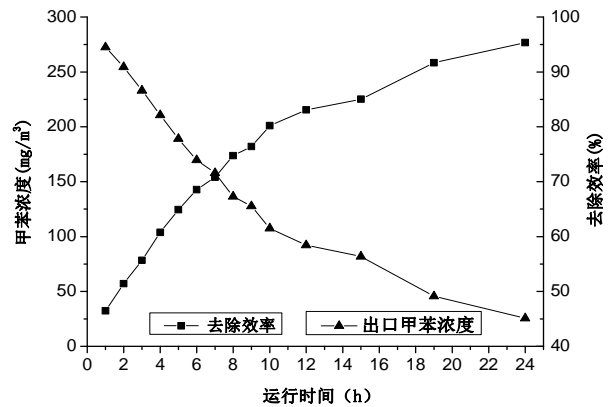


Figure 7. Start-up of the bio-trickling filter without toluene but nutrient provided  
图 7. 生物滴滤塔短期停置后启动运行情况

(3) 短期停置实验表明, 短期内停止供应碳源, 继续定时定量喷淋营养液, 维持床层湿度, 再次启动运行时, 反应器性能可以在短时间内恢复。

### 参考文献 (References)

- [1] 孙佩石, 杨显万, 黄若华. 生物膜填料塔对低浓度甲苯废气的净化性能研究[J]. 环境污染与防治, 1997, 19(3): 8-11.
- [2] G. A. Sorial, F. L. Smith, M. T. Suidan. Removal of ammonia from contaminated air by trickle bed air biofilters. Journal of Air & Waste Management Association, 2001, 51(5): 756-765.
- [3] 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, 2012, 31(7): 1451-1456.
- [4] J. Kid, J. Kim. Degradation of toluene vapor in a hydrophobic polyethylene hollow fiber membrane bioreactor with *Pseudomonas putida*. Process Biochemistry, 2005, 40(6): 2015-2020.
- [5] 王琳, 邵宗泽. 4 株苯系物降解菌菌株的筛选鉴定、降解特性及其降解基因研究[J]. 微生物学报, 2006, 46(5): 753-757.
- [6] E. I. Garcia-Pena, S. Hernandez. Toluene biofiltration by the fungus *Scedosporium apiospermum* TB1. Biotechnology and Bioengineering, 2001, 76(1): 61-68.
- [7] 彭淑婧, 李坚, 刘佳, 等. 静压箱式错流生物滴滤床去除甲苯废气的研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(12): 37-41.
- [8] 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, 18(8): 1866-1872.