

生物滴滤塔净化甲苯废气的工程应用研究

安少锋*, 吴江渤, 王晓磊, 押玉荣, 秦海利, 赵利华
(嘉诚环保工程有限公司, 河北省污水治理与资源化技术创新中心,
污水治理与水体修复工程研究中心, 河北 石家庄 050031)

摘要:研究了生物过滤塔处理挥发性有机物,考察了反应器启动及实际运行效果。结果表明,采用活性污泥接种,约30 d完成挂膜驯化。在稳定运行期间,进气质量负荷最高至 $120\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$,其中负荷在 $90\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 以下时甲苯去除率稳定在50.2%以上,去除负荷最高时达到 $67.4\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。不同负荷下各高度区的填料对污染物去除的效率不同,生物塔停运1周,重新恢复大约需要10 d时间,恢复效率与温度有关。

关键词:生物滴滤塔;挥发性有机物;甲苯负荷;工程应用

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)03-0195-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.03.042

Engineering application of bio-trickling filter tower in treatment of toluene-containing waste gas

AN Shao-feng*, WU Jiang-bo, WANG Xiao-lei, YA Yu-rong, QIN Hai-li, ZHAO Li-hua
(Wastewater Treatment and Waterbody Remediation Engineering Research Center, Wastewater Treatment and Resource Reusing Technology Innovation Center of Hebei Province, Jiacheng Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract:The treatment of volatile organic compounds (VOCs) through bio-trickling filter (BTF) tower is studied. BTF's start-up and physical running effect are investigated. It is shown that a high efficiency bacteria membrane can be acclimated in thirty days if activated sludge is used for inoculation. During steady operation period, the inlet gas loading speed can be up to $120\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. The removal rate can remain above 50.2% when the inlet gas loading speed under $90\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. The highest removal rate of toluene can be achieved when the inlet gas loading speed is $67.4\text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. Under different inlet gas loading speeds, the removal effect varies at different fillings height. It need to spend ten days for the membrane to recover filtration capacity if BTF stops running for one week. The restoration performance has relation to temperature.

Key words:bio-trickling filter tower; VOCs; loading rate of toluene; engineering applications

挥发性有机化合物(VOCs)是形成细颗粒物(PM_{2.5})和O₃的重要前驱体^[1-2],某些特殊行业排放的VOCs具有毒性和致癌性^[3-5],国家和地方政府陆续出台政策,加大对VOCs的治理力度。生物处理法因成本低、操作简单、技术清洁等而受到广泛的关注^[6-8]。目前采用生物法处理VOCs的研究主要集中在高效降解菌种的筛选、动力学模型建设、生物量控制等方面,且多为小试规模的研究^[9-12]。本实验采用中试规模的反应装置,对典型VOC废气甲苯进行处理,考察生物过滤塔的启动、沿程去除效果、生物塔停运对恢复效果影响以及运行成本核算等,

以为实际工程提供参考。

1 材料与方法

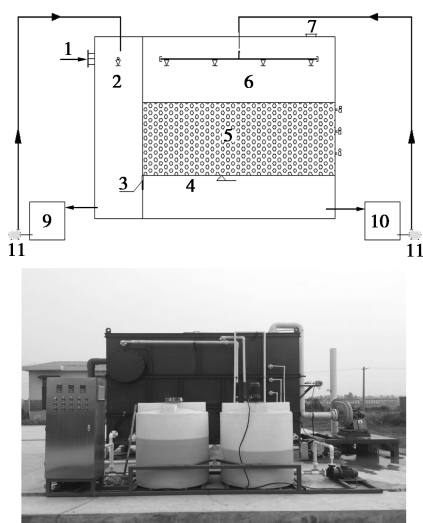
1.1 试验装置

实验装置由不锈钢制成,设备外形尺寸 $4\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$,处理气量 $1\ 000\text{ m}^3/\text{h}$,空塔停留时间50 s。试验采用气液逆流操作,甲苯气体在引风机作用下,经喷淋区由底部布气孔进入生物填料区,顶部排出,流程如图1所示。填料区为火山岩填料,填料高度1 m,沿填料底部0.3、0.6、0.9 m设置气体取样口。

收稿日期:2019-05-27;修回日期:2019-12-20

基金项目:石家庄市重大科技专项(176240857A)

作者简介:安少锋(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为VOC生物治理及废水资源化利用技术,通讯联系人,asf1985@126.com。



1—进气口;2—清水喷淋;3—布气孔;4—布气区;5—填料区;
6—营养液喷淋;7—出气口;8—取样口;9—清水罐;
10—营养液储存罐;11—泵

图 1 生物过滤塔试验流程及现场实验图

1.2 试验方法

生物滤塔营养液喷淋方式及用量参照文献 [10], 清水喷淋保证进入生物塔填料区的废气湿度维持在 30%~60%。生物塔中微生物挂膜驯化采用污水处理厂排出的活性污泥作为反应器启动的接种污泥, 直接投入反应器, 闷曝 72 h, 排掉污泥后连续进气, 进气负荷逐步提高, 去除率连续 1 周稳定在 50% 左右视为挂膜成功。

1.3 分析方法

实验中的气相产物利用 SP-2100A (TCD 检测器) 进行色谱分析 (北分瑞利分析仪器有限公司)。文中各指标计算公式如下。

甲苯去除率 (RE):

$$RE = [(C_i Q_i - C_e Q_e) / C_i Q_i] \times 100\% \quad (1)$$

污染物进气负荷 (C):

$$C = C_i Q_i / 1000V \quad (2)$$

污染物去除负荷 (EC):

$$EC = (C_i Q_i - C_e Q_e) / 1000V \quad (3)$$

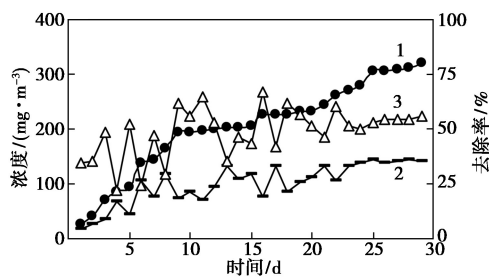
式中, C_i (mg/m^3)、 C_e (mg/m^3) 分别为反应器入口、出口气体中甲苯的浓度; Q_i (m^3/h)、 Q_e (m^3/h) 分别为反应器入口、出口气体的流量, V 为填料区体积。

2 结果与分析

2.1 挂膜驯化

生物挂膜期间, 进出气浓度及去除负荷变化如图 2、图 3 所示。在初期 1~10 d 内, 进气浓度快速

提高, 由 $25 \text{ mg}/\text{m}^3$ 逐步升高至 $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右, 去除率在 25%~50% 之间波动, 说明微生物在 VOCs 驯化适应期较为敏感, 在 10~15 d 内, 进气浓度维持在 $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右, 去除率由 64% 降为 35%, 出现短暂降低的现象, 分析原因在于: ① 系统内的火山岩填料对甲苯具有吸附作用, 在运行初期, 可将甲苯废气吸附于填料内, 随着吸附量增加, 趋于饱和, 后期吸附效果降低。② 系统运行前采用活性污泥闷曝, 运行时将污泥排出, 但会有残留污泥吸附在池壁或填料上, 降解甲苯废气, 之后开始喷淋, 喷淋液将吸附的污泥冲刷下来, 降低了处理效果。在 15 d 之后, 随着进气浓度升高, 去除率虽出现波动, 但整体趋于稳定, 23 d 左右时, 浓度升高至 $320 \text{ mg}/\text{m}^3$, 连续 1 周去除率稳定在 50% 以上, 表明生物挂膜成功。进气负荷呈逐步升高趋势, 至生物挂膜成功时, 去除负荷维持在 $35 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 较好地反映了生物挂膜效果。



1—进气;2—出气;3—去除率

图 2 进出气浓度历时变化图

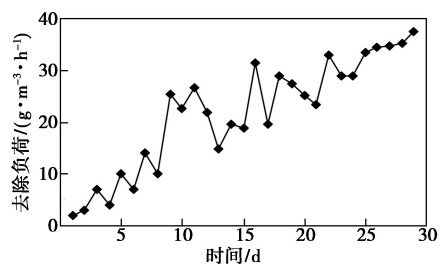
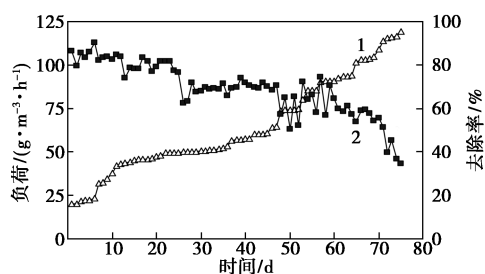


图 3 去除负荷历时变化图

2.2 进气负荷对生物塔运行效果

正式运行期间生物塔负荷及去除率变化如图 4 所示。在近 80 d 的连续运行中, 进气质量负荷由 $20 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 逐步提高至 $120 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 接近生物塔的最高 $160 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 的质量负荷^[13]。在 1~11 d 时, 质量负荷进入快速提高期, 负荷由 $20 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 逐步提高至 $42 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 提高了 1 倍多, 而系统去除效果基本维持在 80% 以上, 平均去除率为 84.2%, 说明系统内微生物快速增长, 活性维持在较高水平。在 12~47 d 时, 进气质量负荷呈缓慢升高

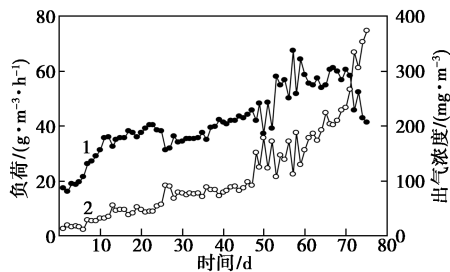
趋势,而去除率较之前有所降低,基本维持在70%左右,平均去除率为73.2%,较之前下降了11%,这是因为在较小的进气负荷时微生物代谢能力有冗余,对去除率影响较小。而随着负荷提高,微生物代谢能力能跟上负荷量的增加,因此净化效率变小。在48~75 d时,进气质量负荷由 $75 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 增长至 $120 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,去除率出现波动和下降趋势。其中负荷在 $75 \sim 90 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 试验段内,去除率在50.2%~74.4%之间波动,而负荷由 $90 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 升高至 $120 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 时,系统去除率呈明显下降趋势,基本在60%以下,最低时仅35%,说明该负荷已经达到系统处理能力的阈值。



1—系统负荷;2—去除率

图4 进气负荷及去除率历时变化

物污染去除负荷和系统出气浓度如图5所示。由图可知,去除负荷与进气负荷呈正相关,随着进气负荷的增加,去除负荷呈升高趋势,最高时达到 $67.4 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。但在试验后期,进气负荷提高至 $110 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 时,去除负荷反而降低,说明该负荷已超过生物的降解能力,对生物活性产生了抑制作用,系统呈崩溃状态,出气浓度也直线上升。同时由图可知,如要维持出气浓度低于 $60 \text{ mg}/\text{m}^3$,进气负荷不应超过 $50 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。



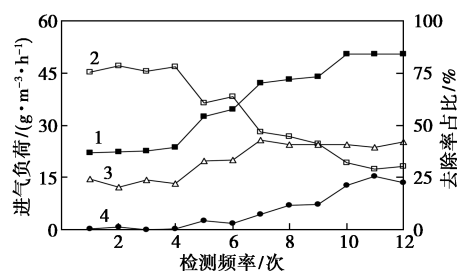
1—去除负荷;2—出气浓度

图5 去除负荷及出气浓度历时变化

2.3 沿程高度去除效果

本系统填料总高度100 cm,在系统运行稳定期间,选取30、60、90 cm高度处检测出气浓度,分别计算0~30 cm(以下简称第一层)、30~60 cm(以下简

称第二层)、60~90 cm(以下简称第三层)填料段的去除效果,结果见图6。



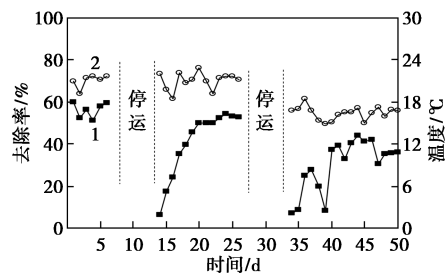
1—系统负荷;2—30 cm;3—60 cm;4—90 cm

图6 不同填料区高度去除效果

由图6可知,当系统进气负荷较低时[$20 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 左右],第一、二、三层填料区对VOCs去除率平均分别为76.8% (75.3%~78.3%)、22.6% (20.2%~24.3%)、0.6% (0.1%~1.5%),由此可知该进气负荷时,第一层的填料发挥大部分的净化作用,而达到第二层高度处,已有99.4%的VOCs被降解处理,剩余40 cm高度的填料未被利用,存在浪费现象。当负荷为 $40 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 时[$32.3 \sim 44.8 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$],第一、二层填料区去除率总占比平均为89.5%,较低负荷时降低了近9.9%,而第三层填料区的去除率占比上升,由0.6%升高至7.7%。当负荷达到 $50 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 时,第三层填料区的去除率占比进一步升高至23.0%,与前两层基本呈平均分布趋势。这与周炜焯^[14]的研究结果较为类似,说明填料高度存在较大的优化空间。

2.4 恢复试验

梅瑜等^[15]、樊奇^[16]在考察停运恢复时均考虑在停运期间保持水分供给。本试验在正常运行过程中,完全停止进气和营养液供给等操作7 d,之后恢复系统运行,进气负荷与停运前保持一致,考察系统恢复效果,试验结果见图7。



1—去除率;2—温度

图7 停运恢复对生物塔运行效果的影响

由图7可知,第一次停运重新启动后,系统去除率随着恢复时间延长逐步升高,经过约10 d恢复至

93%左右,期间温度维持在 21℃ 上下。说明在温度条件合适时,填料上的挂膜微生物可利用填料内部的残留水分和营养物质保持一定活性,重新恢复试验时,可大大缩短适应周期。第二次停运时外界温度出现了下降,期间温度平均在 17℃ 左右,恢复运行时,去除率整体呈上升趋势,但难以恢复至原有去除率水平^[17]。

2.5 运行成本核算

生物滴滤塔中试装置处理规模为 1 000 m³/h,运行成本主要包含 3 部分:设备运行电耗、营养药剂消耗和填料折旧。本文中试装置主要耗电设备为引风机和喷淋水泵,引风机功率为 2.2 kW,喷淋水泵功率为 1.1 kW,由于喷淋水泵每 4 h 开一次,且每次运行 1 min,电耗费用可忽略不计,电价按照大工业用电 0.65 元/kWh 计,因此设备电耗为 1.43 元/1 000 m³。营养药剂主要为工业级硫酸铵、酸二氢钾、氯化钙、硫酸锰等循环使用,试验期间平均每月更换 1 次,单次药剂成本为 30 元左右,因此药剂消耗为 0.04 元/1 000 m³。填料为火山岩填料,中试设备中填料总价 4 500 元,一般为 2~7 a 更换一次^[13],以 4 a 为例,填料折旧为 0.13 元/1 000 m³。综上所述,该处理装置运行成本为 1.7 元/1 000 m³,比现有文献报道的运行成本低^[13]。

由于该中试装置需考察进气负荷影响,所选用的风机功率偏大,一定程度上增加了处理费用,且填料用量可大幅降低,在实际工程应用优化后,处理成本能够达到 1.5 元/1 000 m³ 左右,具有较好的经济推广价值。

3 结论

(1)生物滴滤塔启动时采用活性污泥接种,实操性强且价格低廉,通过逐步提高进气负荷,约 30 d 的时间完成生物挂膜。

(2)系统进气负荷低于 50 g/(m³·h)时,出气浓度低于 60 mg/m³,达到排放标准。

(3)不同高度区的填料对污染物去除的效率不同,应根据不同的负荷选择填料高度,避免填料区浪

费。生物塔停运 1 周,重新恢复大约需要 10 d 时间,恢复效率与温度有关。

(4)该中试装置运行成本在 1.5~1.7 元/1 000 m³,具有较好的经济可行性。

参考文献

- [1] 陈宗耀,伦小秀,唐贵刚,等.中国人为源 VOCs 排放因子库研究[J].环境工程,2018,36(9):68-73.
- [2] 洪沁,常宏宏.家具涂装行业 VOCs 污染特征分析[J].环境工程,2017,35(5):82-86.
- [3] 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.
- [4] 黄长缨,陆峰,李贤英,等.植物提取液对城市生活垃圾中转站 VOCs 的去除效果研究[J].环境工程,2018,36(2):98-103.
- [5] Chunrong Jia, Stuart Batterman, Christopher Godwin. VOCs in industrial, urban and suburban neighborhoods, Part 1: Indoor and outdoor concentrations, variation, and risk drivers[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(9): 2083-2100.
- [6] 廖裕芬,郑理慎,陈志平,等.生物滴滤池去除 VOCs 工艺参数优化研究[J].环境工程,2017,35(12):68-72.
- [7] 苏俊朋,杜青平,李彦旭,等.鼠李糖脂强化生物滴滤塔去除乙苯废气效能及菌群结构研究[J].环境科学学报,2018,38(9):3514-3521.
- [8] 杨凯雄.挥发性有机污染物及恶臭生物处理技术综述[J].环境工程,2016,34(3):107-111.
- [9] 段传人,胡江,宋永安,等.高效苯降解菌的筛选鉴定及其在生物过滤塔处理苯的填料选择[J].环境工程学报,2012,6(7):2388-2394.
- [10] 任爱玲,赫环环,郭斌,等.生物滴滤塔净化含低浓度苯乙烯废气的研究[J].环境科学学报,2013,33(7):1840-1848.
- [11] 张定丰,房俊逸,叶杰旭,等.生物滴滤塔净化多组分废气的研究[J].环境科学,2013,34(6):2116-2120.
- [12] 曹菁洋,刘佳,杨竹慧,等.不同生物塔净化化纤污水场恶臭性能的比较[J].环境工程学报,2017,11(6):3625-3632.
- [13] 李守信,苏建华,马德刚,等.挥发性有机物污染控制工程[M].北京:化学工业出版社,2017:162.
- [14] 周炜煌.生物滴滤塔处理氨气、硫化氢混合气体的研究[J].环境科技,2009,(4):28-33.
- [15] 梅瑜,成卓韦,王家德,等.利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究[J].环境科学,2015,36(12):4389-4395.
- [16] 樊奇.生物滴滤法净化 MEK 废气[D].上海:同济大学,2006.
- [17] 何泽,李桂英,安太成,等.生物滴滤塔中两种优势菌种对高浓度甲苯废气净化对比实验[J].环境工程,2007,(2):39-42. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。