

生物滴滤法净化 VOCs 的研究进展

司旗^{1,2} 杜昭^{1,2,3*} 王晓朋^{1,2}

1. 河北科技大学 环境科学与工程学院 河北石家庄 050018;

2. 挥发性有机物与恶臭污染防治技术国家地方联合工程研究中心 河北石家庄 050018;

3. 河北省大气污染防治技术研究推广中心 河北石家庄 050018

DOI:10.12238/ems.v7i6.13852

[摘要] 生物法处理挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 因其具有去除效率高、二次污染小、运行安全性高等优势, 已经成为工业废气治理领域的研究热点。生物滴滤塔 (biotrickling filter, BTF) 作为典型的生物反应器, 其净化性能受多因素影响, 综合分析了净化 VOCs 的关键影响因素及强化措施。

[关键词] VOCs; 生物滴滤; 填料; 温度; 氮磷

[中国分类号] TQ 033; TQ 423; X 511; X 172

Research progress on purification of VOCs by biotrickling filter

SI Qi^{1,2} DU Zhao^{1,2,3*} Wang Xiao-peng^{1,2}

1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. National Local Joint Engineering Research Center for Volatile Organic Compounds and Odorous Pollution Control Technology, Shijiazhuang 050018, China; 3. Hebei Province Air Pollution Prevention and Control Technology Research and Extension Center, Shijiazhuang 050018, China

Abstract: Biological treatment of volatile organic compounds (VOCs) has become a research hotspot in the field of industrial waste gas treatment due to its advantages of high removal efficiency, low secondary pollution and high operational safety. As a typical bioreactor, the purification performance of biotrickling filter (BTF) is affected by many factors. The key influencing factors and strengthening measures of VOCs purification were comprehensively analyzed.

Key words: VOCs; biotrickling filter; fillers; temperature; nitrogen and phosphorus

在当今社会, 随着工业化进程的加速以及交通运输业的蓬勃发展, 挥发性有机化合物 (VOCs) 的排放问题逐渐凸显, 成为环境科学领域亟待解决的问题。这些化合物不仅引发生化学烟雾生成、臭氧层损耗以及温室效应加剧等一系列问题, 而且对人体健康构成了严重威胁。因此, 深入研究 VOCs 控制技术, 对于保护生态环境和人类健康具有重要的现实意义^[1]。

1 生物滴滤技术

1.1 生物滴滤流程

在 BTF 中, 气相和液相以逆流模式循环通过滴滤塔。利用空气泵向装有有机废气水溶液的洗气瓶鼓气, 使有机废气从塔底进入; 喷淋液从高向下喷淋填料层到底部, 再由蠕动泵将喷淋液输送到高处循环, 使有机废气与喷淋液结合, 最后净化完成的气体从塔顶导管排出。

1.2 生物滴滤机理

在 BTF 中微生物会附着于具有粗糙表面的填料介质上, 并逐渐形成一层黏性膜, 即生物膜^[2]。生物膜的生长速度受填料、营养液及微生物等的影响, 形成周期通常从几天到数月不等^[3]。当含有污染物的空气流经生物滴滤系统时, 水溶性污染物会渗透至填料表面的生物膜内部。在此过程中, 微

生物将这些污染物转化为 CO₂、H₂O、生物量以及细胞能量, 从而实现 VOCs 的净化处理^[4]。

2 填料

生物滴滤系统的关键组件——填料介质, 其特性直接影响着微生物群落的定植能力和污染物降解效能^[5]。理想的填料需具备以下特征: 首先应为微生物代谢活动提供适宜的多相界面环境, 具备高效的气液传质能力; 其次需要维持稳定的物理结构特性, 包括卓越的抗压强度、持久的化学稳定性以及环境友好特性。

近些年来, 国内外的学者们对不同类型的组合填料进行了大量研究。Yan 等人^[6]制备了一种嵌入恶臭假单胞菌的固定化材料。当 EBRT 为 18 s, 进口负荷低于 41.4 g·m⁻³·h⁻¹ 时, BTF 可快速启动并且去除效率保持在 90% 以上。Kumar^[7]等人涉及的堆肥-活性炭复合载体, 加速生物膜生长速率。甲苯进气负荷波动区间在 20-80 g/(m³·h) 条件下, 仍维持 >99% 的去除效率。复合填料通常具有更优质的孔隙结构, 增加 VOCs 与生物膜的接触面积, 加速 VOCs 从气相到液相和生物膜相的转移, 达到更高的传质效率。

3 工艺参数

工艺参数是影响生物滴滤塔净化效率的重要因素,包括 pH、温度、氮磷等。具体分析如下。

3.1 pH

pH 值的变化可影响微生物体内蛋白质、核酸等物质所带电荷、细胞膜电荷发生改变^[8],从而导致微生物汲取营养物质性能改变,当 pH 值偏离微生物适宜的生长区间时,会影响降解微生物的正常代谢活动。Omri^[9]和 Chouari^[10]等研究人员都强调了 pH 是影响微生物群落构成的关键因素,改变 pH 条件会导致不同的自养和异养微生物变得活跃并占据主导地位,可以极大改变种群结构及多样性,最终影响 BTF 系统性能。

3.2 温度

环境温度影响废气处理效果,其作用机制主要源于温度对微生物代谢产生效应。当温度超过临界阈值,会破坏胞内蛋白的稳定性,引发蛋白质不可逆变性及核酸分子损伤;而在亚适宜温度区间,则会导致微生物活性降低或休眠,从而降低污染物降解效率。周学霞^[11]研究在邻二甲苯进气浓度为 550-600 mg·m⁻³, EBRT 为 60 s 条件下,考察平均室温分别为 20 和 25℃对 BTF 降解效果的影响。结果发现,平均室温为 25℃时,对邻二甲苯的降解效率可以达到 100%,同期平均室温为 20℃时去除效率只有 70%左右。温度影响微生物体内酶的活性^[12],从而影响微生物的生长、繁殖和代谢速率。

3.3 氮磷

在 BTF 运行期间,循环液营养组分在供应氮(N)、磷(P)和其他必要元素方面发挥着重要作用,参与微生物的生长代谢过程。N 可以参与氨基酸中氨基的形成,对蛋白质折叠过程中氢键的形成和 DNA 双链的形成十分重要。除 N 外,磷酸(PO_4^{3-})也是形成核酸的必需物质,对维持营养液和微生物细胞的酸碱平衡至关重要^[13]。当液相中氮、磷营养盐供给水平低于微生物生长的临界阈值时,将抑制微生物合成蛋白质和核酸,延长细胞分裂周期,降低对 VOCs 的降解速率。

4 结论与展望

如今治理挥发性有机化合物已经成为一项严峻的挑战,生物滴滤技术是较高效去除 VOCs 的解决方案。对于生物反应器的改良,调节工艺参数(包括 pH、温度、氮磷等)利于维持 BTF 系统的稳定运行。

[参考文献]

[1]LIU J, JI Q Z, LI P, et al. Swelling problems in immobilized filler: an improvement method and comparative study of the effect of different fillers on biotrickling filters [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2025, 48 (2): 193-207.

[2]VERGARA-FERNÁNDEZ A, REVAH S, MORENO-CASAS P, et al. Biofiltration of volatile organic compounds using

fungi and its conceptual and mathematical modeling [J]. *Biotechnology Advances*, 2018, 36 (4): 1079-93.

[3]ELIMIAN E A, KIKI C, AMENAGHAWON A N, et al. Biofiltration as a sustainable approach for the treatment of hydrophobic volatile organic compounds: Improvement strategies and integrated systems [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 69.

[4]BARBUSINSKI K, KALEMBA K, KASPERCZYK D, et al. Biological methods for odor treatment - A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152: 223-41.

[5]DUAN C S, LIAO H, WANG K D, et al. The research hotspots and trends of volatile organic compound emissions from anthropogenic and natural sources: A systematic quantitative review [J]. *Environmental Research*, 2023, 216.

[6]YAN Y X, YANG J, ZHU R C, et al. Performance evaluation and microbial community analysis of the composite filler micro-embedded with *Pseudomonas putida* for the biodegradation of toluene [J]. *Process Biochemistry*, 2020, 92: 10-6.

[7]KUMAR M, GIRI B S, KIM K H, et al. Performance of a biofilter with compost and activated carbon based packing material for gas-phase toluene removal under extremely high loading rates [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 285.

[8]赵芷玲. pH 对微生物和化学电池产电和脱氮的影响 [D], 2019.

[9]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): 10202-9.

[10]CHOUARI R, DARDOURI W, SALLAMI F, et al. Microbial Analysis and Efficiency of Biofiltration Packing Systems for Hydrogen Sulfide Removal from Wastewater Off Gas [J]. *Environmental Engineering Science*, 2015, 32 (2): 121-8.

[11]周学霞, 姚伟国, 杨冰雪, et al. 生物滴滤塔处理邻二甲苯废气研究 [J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2013, 40 (01): 71-5.

[12]王子聪, 马晓婧, 孙嘉彤, et al. 多环芳烃降解菌的研究进展 [J]. *精细与专用化学品*, 2025, 33 (03): 1-10.

[13]HEMKEMEYER M, SCHWALB S A, HEINZE S, et al. Functions of elements in soil microorganisms [J]. *Microbiological Research*, 2021, 252.