

生物滴滤池处理废气中生物质的积累与控制措施

黄树杰 陈凡植 游咏妍

(广东工业大学环境科学与工程学院 广州 510090)

摘要: 生物滴滤池在废气处理中具有其无以比拟的优点,但由于其在工业化应用面临的最大难题就是如何解决生物质积累所带来的种种问题。综述分析生物滴滤池处理废气中生物质的积累的危害;以 ε_r 和 α_r 为参数探求其积累的机理;生物质积累的控制措施,包括化学法、物理机械法与其他一些方法。

关键词: 生物滴滤池, 生物质积累, 控制

中图分类号: Q93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-2654 (2006) 02-0114-05

Waste Air Treatment in a Biotrickling Filter: Biomass Accumulation and Control Measures

HUANG Shu-Jie CHEN Fan-Zhi YOU Yong-Yan

(Faculty of Environmental Science and Technology, Guangdong University of Technology Guangdong, Guangzhou 510090)

Abstract: Biotrickling filter often offers a cost effective and environmentally friendly alternative to conventional air pollutant control technologies, but major problems with clogging of the filters due to a high biomass accumulation will prevent it from the industrial uses. In this paper, the effect of the high biomass accumulation in an air pollution treatment with a biotrickling filter is discussed. Two parameters with specific surface area with biofilm growth (α_r) and the bed porosity with biofilm (ε_r) are used to analyse its principle of accumulation. Finally, some control measures including chemical methods, physical machine-made methods and other control methods are overviewed.

Key words: Biotrickling filter, Biomass accumulation, Control

生物法处理废气污染物是近几十年开发出来的一种新的废气处理方法,与传统的废气处理方法相比,其具有较好的经济性与环境友好性等优点,已受到公众越来越多的关注。生物滴滤池作为近几年开发出来的一种废气处理工艺,以其能更好的控制 pH 值、营养条件、提高气-液传质率和处理效率等优点,已成为广大科研工作者重点研究的对象^[1-4]。目前,国内外对生物滴滤池的研究已有很多相关的研究报道^[5-9],国外已有部分工业化应用^[10,11],而我国尚未见过其大规模工业应用的相关报道。影响生物滴滤池工业化应用的主要有以下几方面的因素:①如何防止填料床堵塞与降低系统压降②如何提高系统的服务寿命③对比其他处理方法,投资与运作费用应具有较好的优势④如何实现自动化控制。关于这方面,国外学者研究较多的是关于如何防止生物质过度积累而导致填料床堵塞的问题,而国内却鲜有这方面的报道。本文的目的是综述分析生物滴滤池处理废气中生物质的积累、危害以及控制措施,以为生物滴滤池在以后的

通讯作者 Tel: 020-88243867, E-mail: jiesir@tom.com

收稿日期: 2005-06-28, 修回日期: 2005-08-10

工业化应用中提供一些参考。

1 生物质的积累

1.1 生物滴滤池降解废气污染物的机理 目前, 主要存在两种理论来解释废气污染物降解的机理, 一是 Ottengran 的吸收-生物降解理论^[12], 另一种是国内孙佩石的吸附-降解理论^[13]。一般认为, 生物滴滤池存在一个连续流动的水相, 因此系统内整个传质过程包括气、液、固三相。首先, 废气经过生物填料, 废气污染物被液相吸收或被固相生物膜吸附; 接着, 溶于液相或吸附在生物膜表面的污染物被微生物吸收、吸附到微生物体内; 最后, 进入微生物体内的污染物被微生物作为营养物质进行代谢降解得以去除。实际上, 生物滴滤池去除废气污染物是经过一系列复杂的物理化学反应与生物降解反应相结合的结果。

1.2 生物质的积累 由上面机理可知, 生物法降解废气是通过传质过程将废气污染物转至微生物体内, 再由微生物通过代谢降解得以去除, 其中一部分废气污染物被微生物作为营养物质转化为微生物细胞物质, 一部分转化为最终代谢产物 (如 CO_2 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等), 排出微生物体外。一般, 基质污染物浓度与生物质浓度和生物膜厚是相关的。随着污染物基质浓度的提高与运作时间的延长, 转化为微生物细胞物质与代谢产物不断增加, 以及一些失活微生物细胞的积累, 这些物质的不断积累就是系统生物质积累过程, 表现为生物质浓度与生物膜厚度的增加。在一定程度内, 这种积累是有利于生物降解的, 但当生物质过度积累, 失活微生物细胞与代谢产物未能及时排出, 将会导致填料空隙率下降, 比表面积降低, 甚至堵塞现象。这时, 虽然生物质浓度高, 但具有活性的微生物其实不多, 对生物降解具有阻碍影响。因此, 在降解过程中, 除了保持系统微生物活性外, 应有一个最适合的生物质积累浓度, 使其降解效率最高。

Cristina. Alonso 等^[14]用两个物理参数来评定生物膜浓度积累增长的极限, 也既是反应床达到堵塞时的最大生物膜厚度或是生物质浓度。当空隙率变得非常小或比表面积接近零的情况下, 这时可认为生物质积累已到达极限。可由以下公式推断:

$$\alpha_f = \frac{4\pi(R + L_f)^2 - nA_1}{\frac{4}{3}\pi R^3} (1 - \varepsilon_0) = \frac{3(1 - \varepsilon_0)}{2R} \left(1 + \frac{L_f}{R}\right) \left[(2 - n) \frac{L_f}{R} + 2\right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{\frac{4}{3}\pi(R + L_f)^3 - nV_1}{\frac{4}{3}\pi R^3} (1 - \varepsilon_0) \quad (2)$$

$$\varepsilon = 1.072 - 0.1193n + 0.00431n^2 \quad (3)$$

α_f ——比表面积 cm^2/cm^3 , R ——填料介质球的直径 cm , L_f ——生物膜厚度 cm , n ——与一固定填料球所接触的填料球数量, A_1 ——两个填料球相接触后生物膜的损失面积 cm^2 , ε_0 ——初始孔隙率, V_1 ——两个填料球相接触后生物膜的损失体积 cm^3 。

式 (3) 为经验公式^[15], 对于一般给定的填料, ε 是可知的, 因此可根据公式算出 n , 一般取整数。当考察在不同 n 值下比表面积与生物膜厚的关系时, 发现当 $n < 4$ 时, 比表面积随膜厚的增加而增加, 当 $n \geq 4$ 时, 比表面积随膜厚增加而减少。这就可解释

为什么在一定膜厚下，生物质的积累会导致腐化的原因。同时，也可为在填料的选择时提供一些参考。

第 1 种情况，如方程 (1) 所示，当比表面积 α_f 接近零时，可认为生物膜厚度生长到极限，生物质积累致使堵塞。结合方程 (1) 与 (3) 可算出最大生物膜厚。

第 2 种情况，如方程 (2) 所示，当孔隙率 ε_f 接近零时，同样，也认为生物质积累已达到最大值，同理，可结合方程 (2) 与 (3) 算出生物质积累到最大时生物膜厚度。

生物滴滤池中生物质积累可通过以上两种情况找到依据。使我们对生物质在填料中的积累有了更进一步的了解。

2 生物质过度积累的危害

国外学者在对生物滴滤池的实验室研究与工业应用中，尤其是对高浓度废气的处理时，发现影响滴滤池应用的最主要因素是生物质的过度积累^[16,17]。生物质的过度积累将会出现以下几种情况：空隙率下降 比表面积减少 产生沟流 靠近反应器内壁形成急剧的速度梯度。这些将会导致系统运行时出现一系列的问题：降低系统的处理效率 系统压降升高，增加运行能耗 增加反应器的维护费用 情况严重时，填料床形成堵塞致使整个系统瘫痪，降低系统的使用寿命。因此，如何有效的防止生物质过度积累或如何去除已经积累的生物质成为生物滴滤池能否成功应用于实际工程的关键因素。

3 控制措施

通过生物法处理废气的机理可知，微生物降解废气污染物是利用其作为营养物质代谢来获得能量与自身所需的物质，合成自身细胞物质。因此，生物质的积累是绝对的。所以，控制生物质的途径可通过控制物理或生物反应条件来限制生物质的产生量；或去除已积累的生物质这两条途径解决。目前，主要有化学法、物理机械法与其他方法等控制生物质。对于各种工艺，各有各的优点与缺点，实际上，没有哪种处理方法能同时具备生物质的高去除率与废气的高处理率，在实际的工程应用种，可根据情况，选择不同的工艺技术相结合，以求达到所要的最佳点，使生物滴滤池即满足所要求的处理率，又能更好的控制生物质，使系统能够良好、高效、长期的运行。表 1 列出近几年的国外在生物质积累控制这方面的研究进展，希望对我们以后的研究工作能起到一定的参考作用。

表 1 生物质积累控制的研究进展

方法	要点	机理	优点	缺点	文献
化学法	甲苯废气处理中 0.4% (w/v) NaOH 溶液冲洗比纯水冲洗提高 50.2% 的湿物质去除率	使生物质与生物膜分离成为悬浮物与溶解碳等	去除效果好、对生物活性影响不大	产生大量的悬浮物与溶解碳，须后续处理废水	Cox and Deshusses ^[16]
	甲苯废气处理中 1.31% (w/v) NaClO 溶液冲洗比用纯水冲洗提高 77.0% 的湿物质去除率	通过氧化作用使其转化为气相与挥发化合物	去出效果明显、处理费用低、无须复杂装置	降低生物活性，处理后完全恢复活性须 2~3d	

续表 1

	循环液中保持高的 NaCl 浓度	通过降低微生物的生长率来控制细胞	从根本上控制生物	Diks 等 ^[18]
	限制 K ⁺ 浓度, 控制细胞生物物质生长, 生物物质可降低 60%	生物质的生长控制生物质的产生	质产生, 使用方便 降低细胞产出, 降低污染物的总处理效率	Weber 等 ^[19]
			能保持连续运行, 无须太人能耗, 可提高特性菌种的活性	Wubker 等 ^[20]
	NO ₃ -N 代替 NH ₃ -N 作为微生物生长所需的氮源	好氧菌的生长产出在 NO ₃ -N 比在 NH ₃ -N 中低, 所以生物质积累相对要少些	由实验知, 对于给定的 N 源, 使用 NO ₃ -N 有两个优点: VOC 降解率更高; 对于相同的降解率, 生物物质积累至少减少 40%	Smith 等 ^[21]
物理机械法	利用清水或化合物溶液对填料床进行冲洗与反冲洗	通过冲洗是液体与生物膜产生强剪切力使生物物质从膜上脱落	效果较好, 能够有效的去除已积累的过量生物物质	需要较大的反应床体、产生大量高 BOD 废水, 不能连续运行、处理后须一定时间才能恢复活性
	反应器中安装螺旋搅拌器, 定期搅拌床体	通过搅拌直接产生的切力与水架动所	效果好、可改善气-液传质、不会对微生物生长造成太大影响、能保持反应器中生物物质浓度, 可连续运行	设备复杂、增加投资费用与运行成本
	对生物转盘反应器进行改良处理甲苯废气, 通过盘的转动去除生物物质	利用盘在空气与液相中的来回转动, 所产生的剪切力作用于膜去除过量生物物质	保持微生物的活性、对废气的降解效果好, 能实现自动化控制, 可连续运行	设备复杂、维修困难、增加能耗、投资成本高
	通过暂停甲苯废气的供给, 考察饥饿状态对生物质的影响, 表明饥饿时间与生物物质减少成一级动力学反应, 0 ~ 9 天中生物物质减少 10 ~ 50%	饥饿状态下生物死亡或老化, 菌种进入内源呼吸, 二级生物的捕捉, 或循环液的剪切作用都可能使生物物质减少	可因地制宜, 根据实际情况, 当工厂由于种种原因停工时, 即可降低运行成本, 有可降低生物物质积累, 延长系统的寿命	生物物质减少不明显, 重新启动需用一定恢复时间, 停工过程中仍须外加循环液或其他诱导酶
其他方法	生物滴滤池分别在 22℃ 和 53℃ 下处理乙烷废气, 表面高温下生物质积累低	高温下, 耐热菌与嗜热性微生物活性高, 乙烷转化为 CO ₂ 高	适合于中温与高温菌种, 温度升高可提高活性, 对生物质有一定去除作用	并不适用所有菌种, 温度太高会灭杀菌种, 能耗高, 设备复杂
	利用原生与后生动物对微生物或其代谢产物进行捕食	利用生态系统的生物链原理, 二级生物捕食微生物及其代谢产物或残体	利用自然的生态条件, 不会降低生物活性, 有利于降解效率, 对生物物质有一定控制作用	微生物的生长不能很有效的控制, 实际应用时, 要得到良好的生态系统, 需要优化各种条件

4 结论

生物滴滤池在废气处理中具有其无以比拟的优点,但由于其在工业化应用面临的^{最大难题就是如何解决生物质积累所带来的种种问题。目前,国内对这方面的研究尚}未见之报道。本文综述分析了国外近几年生物滴滤池中生物质的积累控制的一些相关内容,其中包括积累的机理、危害与控制措施等。在各种控制方法中,化学法是采用化学药剂或从营养物质方面从根本上抑制生物质的产出,或将所积累的生物质通过氧化等化学反应去除;物理机械法是采用动力学的方法,通过各种切力将已积累的生物质从膜上去除,具有良好的去除效果;其他一些利用生态系统或生物的生长特性加以控制,也具有一定的效果。总的来说,各种方法各有长短,在以后的研究中,可将不同的处理方法结合起来,使在生物质的产生与去除都能通过工艺量化控制,并且使系统能够处于最佳的处理状态。

参考文献

- [1] Duk-Soo C, Joseph S, Devanny, *et al.* Journal of Environmental Engineering, 2004, **130** (3): 322 ~ 328.
- [2] Cox H H J, Deshusses M A. Chemical Engineering Journal, 2002, **87**: 101 ~ 110.
- [3] 李清雪, 王冬云, 冯如彬. 环境导报, 2003, **9**: 38 ~ 39.
- [4] 刘 波, 姜安玺, 程养学, 等. 中国环境科学, 2003, **23** (6): 618 ~ 621.
- [5] 王家德, 陈建猛. 浙江工业大学学报, 2000, **18** (4): 293 ~ 309.
- [6] 谢维民, 张兰河, 汪群慧, 等. 环境科学, 2003, **24** (6): 74 ~ 78.
- [7] Cox H H J, Deshusses M A. Environmental Biotechnology, 1996, **9**: 255 ~ 262.
- [8] Seignez C, Atti A, Adler N, *et al.* Journal of Environmental Engineering, 2002, **128** (4): 360 ~ 366.
- [9] Warren J S, Raymond C L. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123** (6): 538 ~ 546.
- [10] Vladimir O P, Alexey M B, Cavanagh M, *et al.* Environmental Progress, 2004, **23** (1): 39 ~ 43.
- [11] Robert L M, Ross C. The Water Environment Federation's 69th Annual Conference & Exposition, 1996.
- [12] Ottengraf S P P, Van Den Oever A H C. Biotechnology and Bioengineering, 1983, **XXV**: 3089 ~ 3102.
- [13] 孙佩石. 上海环境科学, 1997, **16** (8): 13 ~ 17.
- [14] Cristina A, Makram T S, George A S, *et al.* Biotechnology and Bioengineering, 1997, **54** (6): 583 ~ 594.
- [15] Dullien F A L. Academic New York, 1979.
- [16] Cox H H J, Deshusses M A. Water Res, 1999, **33**: 2383 ~ 2391.
- [17] Diks R M M, Ottengraf S P P, Van den Oever A H C. Biodegradation, 1994, **5**: 129 ~ 141.
- [18] Weber F J, Hartmans S. Biotechnol Bioeng, 1996, **50**: 91 ~ 97.
- [19] Wubker S M, Laurenzis A, Werner U, *et al.* Biotechnology and Bioengineering, 1997, **55** (4): 686 ~ 692.
- [20] Smith F, George A S, Makram T S, *et al.* Sci. Technol, 1996, **30**: 1744 ~ 1751.
- [21] Laurenzis A, Heits H, Wubker S M, *et al.* Biotechnol Bioeng, 1998, **57**: 497 ~ 503.
- [22] Rudolf von Rohr P, Vinage I. Bioprocess Biosyst Eng, 2003, **26**: 69 ~ 74.
- [23] Cox H H J, Deshusses M A. Environ Sci Technol, 2002, **36**: 3069 ~ 3073.
- [24] Cox H H J, Thomas S, Zarook M S, *et al.* Environmental Science and Technology, 2001, **35** (12): 2612 ~ 2619.
- [25] Cox H H J, Deshusses M A. Biotechnol Bioeng, 1999, **62**: 216 ~ 224.