

生物法处理VOCs废气的影响因素及工艺改进

蒋丽霞

宜兴市苏嘉环保设备有限公司，江苏无锡

摘要：生物法作为一种环境友好型技术，在处理挥发性有机化合物（VOCs）废气方面展现出巨大潜力。本文综述了影响生物法处理VOCs效果的关键因素，包括微生物种类与活性、废气的化学性质、温度与pH值、溶解氧与营养物浓度以及接触时间与气液传质效率。此外，文章还探讨了工艺参数如填料类型、操作压力、湿度管理以及废气负荷对处理效果的具体影响。基于这些分析，我们提出了一系列工艺改进策略，旨在优化生物膜结构、构建高效的混合微生物种群、强化废气预处理及后处理系统集成，以期提高生物法处理VOCs的整体效率和稳定性。

关键词：生物法；VOCs废气处理；微生物活性；工艺参数；工艺改进

Factors Affecting the Effectiveness of Biological Treatment for VOCs Exhaust Gas and Process Improvements by

Lixia Jiang

Yixing Sujia Environmental Protection Equipment Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu

Abstract: As an environmentally friendly technology, biological treatment has shown significant potential in treating volatile organic compound (VOCs) exhaust gas. This paper reviews the key factors affecting the effectiveness of biological treatment for VOCs, including microbial species and activity, the chemical properties of the exhaust gas, temperature and pH levels, dissolved oxygen and nutrient concentrations, as well as contact time and gas-liquid mass transfer efficiency. Additionally, the paper explores how process parameters such as filler type, operating pressure, humidity management, and exhaust gas load specifically impact the treatment outcomes. Based on these analyses, a series of process improvement strategies are proposed to optimize the biofilm structure, build an efficient mixed microbial population, enhance the integration of pre-treatment and post-treatment systems, and improve the overall efficiency and stability of biological treatment for VOCs.

Keywords: Biological method; VOCs exhaust gas treatment; Microbial activity; Process parameters; Process improvement

1 引言

随着工业化进程的加速，挥发性有机化合物（VOCs）的排放问题日益严峻，对环境和人类健康构成了严重威胁。生物法作为一种绿色、可持续的废气处理技术，因其高效、低成本和环境友好的特点而受到广泛关注。本文深入剖析了影响生物法处理VOCs效果的多方面因素，从微生物的微观特性到工艺参数的宏观调控，全面揭示了生物法处理VOCs的复杂机制。提出的工艺改进策略，如生物膜优化、混合微生物种群的构建以及废气预处理与后处理系统的集成，有望进一步提升生物法处理VOCs的效率和稳定性。

2 生物法处理VOCs的影响因素分析

2.1 微生物种类与活性

微生物种类与活性是生物法处理VOCs废气的关键因素之一。不同种类的微生物具有不同的代谢途径和对VOCs的降解能力，如某些细菌和真菌能有效地降解芳香烃和醇类化合物。活性方面，微生物的生长状态、活性表达以及对环境变化的适应性直接影响VOCs的去除效率。例如，研究发现，通过调控培养条件，可以提高微生物对特定VOCs的降解酶活性，从而增强处理效果。此外，构建多菌种共生系统，模拟自然环境中的微生物多样性，可以提高系统对复杂VOCs混合物的处理能力，增加处理的稳定性和持久性。

2.2 废气的化学性质

废气的化学性质是生物法处理VOCs过程中的关键因素之一。VOCs的化学结构、极性、溶解度和毒性都会影响微生物的降解效率。化学结构复杂的VOCs可能需要特定的微生物种类或更长的降解时间。极性较大的VOCs更容易溶于水，从而有利于微生物的接触和降解。溶解度决定了VOCs在气液界面上的传质效率，高溶解度的VOCs更容易被微生物捕获和利用。此外，VOCs的毒性对微生物具有抑制作用，高毒性的VOCs可能导致微生物活性下降甚至死亡，从而降低处理效率。因此，了解

废气的化学性质对于选择合适的微生物种类和优化处理条件至关重要[1,2]。

2.3 温度与pH值

温度与pH值是生物法处理挥发性有机化合物（VOCs）过程中的关键环境因素，它们直接影响微生物的活性和代谢效率。温度的变化可以影响微生物的生长速率和酶的活性。适宜的温度可以促进微生物的生长和繁殖，从而提高其对VOCs的降解速率[3]。相反，过高的温度可能导致酶失活，抑制微生物的活性，甚至导致微生物死亡。因此，找到一个适合微生物生长的温度范围对于优化生物法处理VOCs至关重要。pH值同样对微生物的活性有显著影响。不同的微生物种类对pH值的适应性不同，一些微生物在酸性环境中表现出更高的活性，而另一些则在碱性环境中更为活跃。因此，根据所选择的微生物种类，调节合适的pH值可以显著提高处理效率。同时，稳定的pH值条件也有助于维持微生物群落的稳定性和处理系统的长期运行效果。

2.4 溶解氧与营养物浓度

溶解氧和营养物浓度是生物法处理挥发性有机化合物（VOCs）过程中的关键环境因素，它们直接影响微生物的活性和生长状态。适当的溶解氧水平可以保证微生物有效地进行氧化还原反应，将VOCs转化为无害的代谢产物。营养物浓度则决定了微生物的生长速度和代谢活性。微生物在处理VOCs过程中需要摄取必要的营养物质，如碳源、氮源、磷源等，这些营养物质的浓度应维持在适宜范围内，以保证微生物的正常生长和繁殖。营养物浓度过高或过低都会对微生物的活性产生不利影响。例如，营养物浓度过高可能导致微生物生长过快，产生大量的生物量，增加处理系统的负荷；而营养物浓度过低则可能限制微生物的生长和代谢，降低处理效率。因此，合理调控溶解氧和营养物浓度是提高生物法处理VOCs效果的关键措施之一。

2.5 接触时间与气液传质效率

在生物法处理VOCs废气的过程中，接触时间

和气液传质效率是两个关键的工艺参数。接触时间决定了VOCs分子在生物膜中停留的长短，直接影响微生物对VOCs的降解效率。

较长的接触时间通常有利于微生物充分降解VOCs，但过长的接触时间也可能导致处理系统占地面积增大，运行成本提高。因此，需要在保证处理效率的前提下，合理确定接触时间。气液传质效率则决定了VOCs分子从气相转移到液相，进而被微生物降解的速度。高效的气液传质可以促进VOCs与微生物的充分接触，提高降解速率。为了提高气液传质效率，可以采取优化填料结构、增加气体扰动等措施。

3 工艺参数对处理效果的影响

3.1 填料类型与床层结构

在生物法处理挥发性有机化合物（VOCs）废气的过程中，填料类型与床层结构是决定气液接触效率和生物膜形成的关键因素。不同类型的填料具有不同的比表面积和空隙率，直接影响到微生物的附着和气体的扩散。例如，多孔陶瓷填料因其高比表面积而常被选用，能提供大量微生物生长的场所，同时其良好的机械强度能保证在气流冲击下床层的稳定性。

床层结构的设计则关注于气流的均匀分布和液体的回流。流化床和固定床是两种常见的床型，流化床通过气流使填料颗粒悬浮，增加了气液接触机会，但可能因颗粒磨损导致填料损失。相比之下，固定床能保持填料位置稳定，但需要优化气体分布器以避免气流短路。此外，分级床结构结合了两者的优点，通过多层不同粒径的填料实现气流的逐步降速和充分接触，提高VOCs的去除效率。

3.2 操作压力与气流分布

在生物法处理VOCs废气的过程中，操作压力与气流分布是至关重要的工艺参数，它们直接影响到微生物与废气的接触效果以及传质效率。适当的操作压力可以保证废气在生物反应器中的停留时间，从而提高微生物对VOCs的降解效率。过低的操作压力可能导致废气过快通过反应器，减

少接触时间，而过高的压力则可能增加能耗并影响微生物活性。此外，均匀的气流分布对于提高传质效率至关重要。通过合理设计气体分布器，确保废气在反应器内均匀分布，可以最大化微生物与废气的接触面积，从而提高VOCs的去除率。因此，在生物法处理VOCs废气的过程中，对操作压力和气流分布进行精确控制是实现高效处理的关键。

3.3 湿度与水分管理

湿度与水分管理是生物法处理挥发性有机化合物（VOCs）过程中的关键参数之一。生物处理系统中的微生物活性往往依赖于适宜的水分环境，因为这直接影响到微生物的生长、代谢和VOCs的溶解状态。例如，当湿度过低时，可能导致微生物膜的干燥，从而降低对VOCs的吸附和降解效率。相反，过高的湿度可能造成气液传质阻力增大，影响传质效率。因此，在生物法处理VOCs废气的过程中，合理控制湿度与水分至关重要。适宜的湿度条件可以维持微生物的活性，促进其对VOCs的有效降解。为了实现这一目标，需要采取一系列措施，如安装湿度调节设备、优化反应器内部结构以提高水分分布均匀性等。通过这些措施，可以确保生物处理系统处于最佳的工作状态，从而实现VOCs的高效去除。

3.4 废气负荷与处理能力

废气负荷与处理能力是评估生物法处理VOCs效率的关键指标。提高处理能力通常涉及调整工艺参数以适应更高浓度或流量的VOCs废气。例如，通过增加生物反应器的体积或优化气流分布，可以允许系统处理更大的废气负荷而不降低去除效率。此外，改进生物反应器的设计，如采用更高效的填料材料或增加生物膜的比表面积，也能有效提升处理能力。这些改进措施不仅增强了系统的处理能力，还确保了在高负荷条件下仍能维持稳定的去除效率。因此，在设计和优化生物法处理VOCs的工艺时，需综合考虑废气负荷与处理能力的平衡，以实现高效、稳定的VOCs去除效果[4]。

4 生物法的工艺改进策略

4.1 生物膜优化技术

生物膜优化技术是提升生物法处理挥发性有机化合物（VOCs）效率的关键途径之一。通过改进生物膜的结构和功能，可以增强微生物对VOCs的吸附、转化和去除能力。例如，采用新型的多孔材料作为生物膜载体，可以增加比表面积，从而提供更多的微生物栖息位点，提高污染物的接触效率。此外，通过引入纳米材料或者进行表面改性，可以提高生物膜的亲水性，促进气液界面的VOCs传质[5]。

在实际应用中，生物膜动态调控技术也得到了广泛关注。这种技术允许根据VOCs负荷的变化实时调整生物膜的厚度和微生物活性，以保持最佳的处理性能。例如，通过控制气相或液相的流速，可以控制生物膜的生长速度，防止因膜过厚导致的传质阻力增加。

另外，引入竞争共存的微生物种群可以增强生物膜的抗毒性及适应性，确保对复杂VOCs混合物的稳定去除。通过模拟自然生态系统中的物种多样性，可以构建具有协同作用的微生物群落，提高对不同化学性质VOCs的降解能力。

4.2 混合微生物种群的构建

混合微生物种群的构建是生物法处理挥发性有机化合物（VOCs）的关键技术之一。通过精心设计和优化微生物群落，可以提高生物法对不同化学性质VOCs的去除效率和稳定性。例如，研究发现，将具有不同降解能力的微生物共培养，如假单胞菌属与德氏乳酸菌，可以协同降解多种VOCs，提高系统对复杂废气组成变化的适应性。此外，利用生物工程技术改造微生物，增强其对特定VOCs的降解能力，也是种群构建的重要方向。例如，通过基因克隆和表达，可以将特定的降解基因引入到自然微生物群落中，创建出对难降解VOCs具有高效降解能力的工程菌株。这种种群构建策略不仅提升了处理效率，还有助于构建更稳定的生物处理系统，降低因VOCs浓度波动导致的系统性能波动。

4.3 废气预处理与预脱附

在生物法处理VOCs废气的过程中，废气预处理与预脱附是提升处理效率和确保系统稳定运行的关键步骤。预处理旨在改善VOCs组分的生物可降解性，减少对微生物的毒性影响。例如，通过化学氧化或吸附技术，可以将高毒性或低生物降解性的VOCs转化为更易于生物降解的形式。在实际应用中，预处理单元可能包括采用活性炭吸附来浓缩和分离废气中的VOCs，提高后续生物处理的针对性。

预脱附过程则主要针对吸附在填料表面或生物膜中的VOCs，通过改变温度、pH或通入解吸气流，促进VOCs从固相或液相释放到气相，从而维持生物膜的活性和防止填料堵塞。有效的预脱附不仅能恢复填料的吸附能力，还能确保生物处理单元持续接收到较高浓度的VOCs，这对于维持高效的处理效率至关重要。在实际操作中，预脱附条件的选择需根据VOCs的种类、浓度以及生物处理系统的特性进行精细调控。例如，对于某些热敏性VOCs，温和的加热方式和适宜的温度控制是关键，以避免VOCs的分解或生物活性的丧失。同时，合理的pH调节和解吸气流的选择也能显著提高预脱附效率，减少能耗和运营成本。通过精细的预处理与预脱附策略，生物法处理VOCs废气的系统不仅能够应对复杂多变的废气组成，还能在长期运行中保持高效稳定的处理性能。

4.4 后处理系统集成

在生物法处理VOCs废气的过程中，后处理系统集成是提升整体处理效率和去除率的关键环节。通过集成不同的技术，如生物滤池与生物滴滤器的组合，可以确保对生物法未完全降解的VOCs进行补充处理。此外，后处理系统集成还包括对废气中残留的无机盐、微生物代谢产物等副产物的有效去除，以提升废气的净化质量。例如，通过引入化学吸收或物理吸附等后处理技术，可以进一步降低废气中的污染物浓度，确保达标排放。同时，后处理系统集成还需考虑系统的稳定性和经济性，通过优

化工艺流程和参数设置，减少能耗和运营成本，提高整体处理效率。通过合理的后处理系统集成，生物法处理VOCs废气的系统不仅能够实现高效稳定的处理效果，还能更好地适应不同的废气组成和处理需求。

5 结语

总而言之，生物法处理VOCs废气作为一种环境友好型技术，在处理低浓度、大气量VOCs废气方面展现出显著优势。通过对微生物种类与活性、废气化学性质、操作条件以及工艺参数的细致调控，可以显著提升处理效率和去除率。同时，结合生物膜优化、混合微生物种群构建、废气预处理与预脱附以及后处理系统集成等工艺改进策略，生物法处理VOCs废气的系统性能得到了进一步优化。未来，随

着对微生物代谢机制更深入的理解以及新型材料的开发利用，生物法处理VOCs废气技术有望在处理效率、经济性和环境适应性方面取得更大突破。

参考文献

- [1]赵连成. 生物法处理挥发性有机废气的研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(1): 72-76.
- [2]杜佳辉, 刘佳, 杨菊平, 等. 生物法联合工艺治理VOCs的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(5): 2802-2812.
- [3]张帮才, 王洪玲. 生物法在挥发性有机废气处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(1): 152-154.
- [4]王玮. 有机废气VOCs的治理技术研究[J]. 中国高新科技, 2024, 12(20).
- [5]何奋飞. 生物法处理挥发性有机废气的研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(10): 80-81.

