

# 城市工业污水处理中的生物反应器优化设计

赵云峰 薛晨恺 陆中芳 罗刚

嘉兴海然环境科技有限公司，浙江嘉兴，314000；

**摘要：**在城市工业蓬勃发展的浪潮中，污水排放给生态环境带来严峻挑战。生物反应器作为城市工业污水处理的“心脏”，其设计优劣直接关乎处理成效。本文深入挖掘生物反应器的设计根基，剖析传统设计的短板，全方位阐述从结构到菌群、运行参数的优化路径，展示实际应用成果，展望智能化、技术融合、绿色化发展趋势。为城市工业污水处理提供极具实操性的生物反应器优化方案，助力提升处理效率，守护城市生态，推动工业绿色前行。

**关键词：**城市工业污水；生物反应器；优化设计；污水处理

**DOI：**10.69979/3060-8767.25.03.043

## 引言

城市工业宛如经济发展的强劲引擎，一路高歌猛进，可工业污水排放却成为生态环境的沉重枷锁。生物反应器，作为污水处理流程中的核心枢纽，宛如精密的“生态工厂”，借助微生物的神奇力量，将污水中的污染物逐步转化分解。但传统生物反应器在复杂多变、成分各异的城市工业污水面前，常显得力不从心。优化其设计，提升处理效能，迫在眉睫。深入钻研相关领域，对城市生态环境改善、工业可持续发展意义非凡，此为本文探讨的核心所在。

## 1 城市工业污水处理生物反应器设计基础

### 1.1 生物反应器工作原理概述

生物反应器利用微生物的代谢活动处理污水。在好氧生物反应器中，微生物在有氧环境下，通过呼吸作用将污水中的有机污染物作为碳源和能源，经一系列酶促反应，转化为二氧化碳和水等无害物质。例如，活性污泥法生物反应器中，好氧微生物附着在活性污泥上，形成菌胶团，对污水中的有机物进行吸附、分解。厌氧生物反应器则在无氧环境下，微生物通过发酵、产甲烷等代谢途径，将复杂有机物转化为简单有机物、甲烷等。像在处理高浓度有机废水时，厌氧发酵可先将大分子有机物分解为小分子有机酸，再进一步转化为甲烷，实现能源回收与污染物降解。

### 1.2 常见生物反应器类型特点

常见生物反应器各有特点。连续流搅拌槽式反应器（CSTR），通过搅拌使污水与微生物充分混合，反应均匀，但微生物易随出水流失，处理效率受一定影响。推流式生物反应器（PFR），污水呈推流状态通过反应器，微生物沿水流方向逐渐适应水质变化，处理效率较高，

尤其适用于处理污染物浓度较高的污水。生物膜反应器（MBR），微生物附着在载体表面形成生物膜，对水质、水量冲击负荷有较强适应能力，能有效截留大分子有机物和微生物，提高处理效果，且占地面积小，在城市工业污水处理中应用逐渐广泛。

### 1.3 影响生物反应器性能的关键因素

温度、pH 值、溶解氧等环境因素对生物反应器性能影响显著。多数微生物适宜在 25 - 35℃ 环境下生长代谢，温度过高或过低都会抑制酶活性，降低处理效率。pH 值方面，不同微生物有其适宜范围，如好氧细菌多适宜中性至微碱性环境，而厌氧微生物对 pH 值变化更为敏感。溶解氧是好氧微生物代谢必需，充足的溶解氧能保障其呼吸作用正常进行。此外，污水中污染物浓度与成分也至关重要，高浓度有毒有害物质可能抑制微生物生长，复杂成分需多种微生物协同代谢，合理调控这些因素才能确保生物反应器高效运行。

## 2 城市工业污水处理生物反应器现存问题

### 2.1 处理效率与稳定性问题

传统生物反应器处理效率与稳定性欠佳。在处理城市工业污水时，水质、水量波动大，微生物难以快速适应。例如，工业生产高峰时污水量激增，生物反应器内微生物负荷瞬间增大，处理效率大幅下降。且污水中成分复杂，含有重金属、难降解有机物等，易抑制微生物活性，导致处理效果不稳定。部分生物反应器内微生物分布不均，也影响处理效率，使得出水水质难以稳定达标，无法满足日益严格的环保要求。在一些工业园区，不同企业生产时段不同，污水排放时间与水量极不规律，时而污水大量涌入生物反应器，微生物处理能力跟不上，时而水量稀少又使微生物活性降低。而污水中重金属如

汞、镉等，即使微量存在，也会严重干扰微生物的酶系统，阻碍其正常代谢，导致处理效率起伏不定，出水水质时好时坏。

## 2.2 对复杂工业污水适应性不足

城市工业污水成分复杂多样，含多种难降解有机污染物、重金属离子及酸碱污染物。传统生物反应器中的微生物菌群难以适应如此复杂环境。像石油化工污水中的多环芳烃、制药化工污水中的抗生素等难降解物质，常规微生物无法有效分解。且重金属离子会对微生物产生毒害作用，降低微生物活性与代谢能力。生物反应器的结构与运行参数若不能根据污水特性灵活调整，就难以实现对复杂工业污水的高效处理。以印染工业污水为例，不仅含有各类染料、助剂等难降解有机物，还因染色工艺不同呈现强酸性或强碱性。传统生物反应器内微生物在这样极端 pH 值环境下，生长繁殖受到极大抑制，更难以对其中复杂污染物进行有效分解转化，处理效果大打折扣。

## 2.3 能耗与运行成本较高问题

生物反应器能耗与运行成本较高。好氧生物反应器需持续曝气提供溶解氧，曝气设备能耗占总能耗的 50% - 70%。在处理高浓度有机污水时，为维持微生物活性，需投入大量营养物质与化学药剂，增加运行成本。且生物反应器设备老化、故障维修频繁，也增加了运行成本。例如，生物膜反应器中生物膜的定期清洗、更换载体等维护工作，耗费人力、物力，制约了生物反应器在城市工业污水处理中的广泛应用。在处理造纸工业产生的高浓度有机废水时，为保证好氧微生物的活跃性，需加大曝气强度，导致电费支出大幅增加。同时，为补充微生物生长所需营养，需不断添加氮、磷等营养剂，进一步推高运行成本。

# 3 城市工业污水处理生物反应器优化设计方向

## 3.1 结构优化设计要点

结构优化是提升生物反应器性能的重要方向。通过改进反应器内部构造，提高微生物与污水的接触效率。例如，在厌氧生物反应器中设置折流板，使污水在反应器内形成复杂流态，延长污水与微生物接触时间，提高处理效率。采用模块化设计，方便根据污水水质、水量变化灵活调整反应器规模与结构。在生物膜反应器中，研发新型载体材料，增加载体比表面积，提高微生物附着量，同时优化载体形状与布置方式，促进污水在反应器内均匀分布，提升整体处理效果。

## 3.2 微生物菌群优化策略

优化微生物菌群可增强生物反应器处理能力。筛选、驯化对城市工业污水中难降解污染物有高效降解能力的微生物菌株，构建优势菌群。例如，从长期受石油污染土壤中筛选出能降解石油烃的微生物，将其引入处理石油化工污水的生物反应器中。利用基因工程技术，将具有特定降解功能的基因导入微生物体内，构建工程菌，提高微生物对复杂污染物的降解效率。定期补充、更新微生物菌群，维持菌群活性与多样性，以适应污水水质变化，提升生物反应器处理复杂污水的能力。

## 3.3 运行参数优化方法

合理优化运行参数可提高生物反应器运行效率。利用传感器实时监测污水水质、温度、pH 值、溶解氧等参数，通过自动化控制系统，根据监测数据及时调整运行参数。例如，当污水中有机物浓度升高时，自动增加曝气量，保障好氧微生物代谢需求；当温度降低时，适当延长水力停留时间，维持微生物处理效果。建立数学模型，模拟生物反应器运行过程，预测不同运行参数下的处理效果，通过优化算法确定最佳运行参数组合，实现生物反应器高效、稳定运行。

# 4 城市工业污水处理生物反应器优化设计应用实践

## 4.1 在不同工业行业的应用实例

在城市工业污水处理中，生物反应器的优化设计已在多个行业得到广泛应用，取得了显著的成效。例如，在制药行业，针对高浓度、难降解的有机废水，采用优化设计的序批式活性污泥法（SBR）生物反应器，通过调整曝气时间和污泥回流比，显著提高了对难降解有机物的去除效率。在食品加工行业，针对高有机负荷的废水，采用优化设计的厌氧-好氧组合生物反应器，通过厌氧阶段的高效产甲烷作用和好氧阶段的深度降解，实现了对废水的高效处理。在化工行业，针对含盐量高的废水，采用优化设计的膜生物反应器（MBR），通过膜分离技术有效截留高浓度的有机物和盐分，提高了系统的稳定性和出水水质。

## 4.2 优化设计后的效果评估

优化设计后的生物反应器在处理效率、运行稳定性和成本效益等方面表现出显著的优势。在处理效率方面，通过优化曝气系统和污泥回流系统，提高了氧气的传递效率和微生物的活性，使得有机物的去除率显著提高。例如，某化工企业的优化设计生物反应器在运行后，CO

D 去除率从原来的 70% 提高到 90% 以上。在运行稳定性方面, 优化设计的生物反应器能够更好地适应水质波动, 减少系统故障的发生。例如, 通过智能控制系统实时监测和调整运行参数, 确保系统在不同工况下都能稳定运行。在成本效益方面, 优化设计的生物反应器通过降低能耗和提高处理效率, 显著降低了运行成本。

#### 4.3 应用过程中的经验总结与启示

在生物反应器优化设计的应用过程中, 积累了许多宝贵的经验和启示。首先, 针对不同行业的废水特点, 需要进行定制化的优化设计。例如, 对于高盐废水, 需要优化膜材料的抗污染性能; 对于高有机负荷废水, 需要优化厌氧和好氧阶段的协同作用。其次, 优化设计过程中需要充分考虑系统的灵活性和可扩展性, 以适应未来可能的水质变化和处理需求。例如, 通过模块化设计, 方便系统的升级和扩展。此外, 智能化控制系统的应用是提高生物反应器运行效率和稳定性的关键。例如, 通过实时监测和数据分析, 实现对曝气量、污泥回流比等参数的自动调整, 提高系统的自动化水平。

### 5 城市工业污水处理生物反应器优化设计发展趋势

#### 5.1 智能化与自动化发展趋势

智能化与自动化是未来生物反应器优化设计的重要发展方向。通过引入先进的传感器技术和自动化控制系统, 生物反应器能够实现对污水处理过程的实时监测和精准控制。例如, 利用智能传感器实时监测水质参数和设备运行状态, 结合自动化控制系统实现自动调节曝气量、药剂投加量等功能, 提高处理效率和设备运行稳定性。此外, 智能化系统还可以通过数据分析和预测模型, 提前预警设备故障, 减少停机时间, 提高系统的可靠性和经济性。

#### 5.2 与新兴技术的融合趋势

生物反应器的优化设计将与新兴技术的融合成为未来的发展趋势。例如, 结合物联网技术实现生物反应器的远程监控和管理, 提高运维效率。通过物联网平台, 操作人员可以随时随地获取设备运行数据, 及时发现和解决问题。同时, 利用大数据和人工智能技术优化生物反应器的运行参数, 实现智能化决策。例如, 通过机器学习算法分析水质变化趋势, 自动调整处理工艺参数,

提高处理效果。此外, 与新能源技术的结合, 如太阳能和风能的应用, 将为生物反应器提供更环保、更经济的能源解决方案, 降低运行成本。这种与新兴技术的融合, 将为生物反应器的优化设计带来更多的创新和发展机会。

#### 5.3 绿色环保型生物反应器研发方向

随着环保要求的日益严格, 绿色环保型生物反应器的研发将成为未来的重要方向。未来, 生物反应器将更加注重能源回收和再利用, 例如通过厌氧消化技术回收沼气, 用于设备运行或发电。此外, 开发高效的污染物去除技术, 减少化学药剂的使用量, 降低对环境的二次污染。例如, 利用生物降解技术和高级氧化技术, 高效去除难降解的有机污染物, 提高处理水质。同时, 优化生物反应器的设计, 提高处理效率, 减少能源消耗, 实现污水处理的低碳化和可持续发展。

### 6 结论

城市工业污水处理生物反应器的优化设计, 从夯实设计基础, 到解决现存问题, 再到探索优化方向、应用实践及展望未来趋势, 是一个系统且持续的过程。虽面临诸多挑战, 但通过不断创新优化, 在提升处理效率、降低成本、适应复杂污水等方面成效显著。持续推进优化工作, 对城市工业污水处理水平提升、生态环境保护意义重大, 需科研人员、企业等多方携手, 在实践中不断探索创新, 推动生物反应器技术持续进步。

#### 参考文献

- [1] 顾军, 赵敏燕, 栾燕, 等. 膜生物反应器及其在工业废水处理中的应用[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(08): 134-136.
- [2] 陈蕊, 刘春, 杨旭, 等. 臭氧氧化法预处理工业废水研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(04): 1168-1173.
- [3] 张姣, 肖康, 刘紫微, 等. 大型膜生物反应器在中国工业废水处理中的应用——技术经济特征、驱动力和展望[J]. Engineering, 2021, 7(06): 358-385.
- [4] 曾涛, 赵杰. 基于膜分离技术在污水处理中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(03): 69-73.
- [5] 吴宇峰. 厌氧生物技术在工业废水处理中的应用[J]. 科技风, 2021, (05): 183-184.