

# 膜生物反应器 ( MBR ) 在水处理中的应用与优化

刘紫恩

武汉华德环保工程技术有限公司 湖北 武汉 430080

**摘要:** 膜生物反应器 ( MBR ) 技术以其独特的高效固液分离特性和生物处理功能, 在水处理领域受到了广泛的关注。本文详细探讨了MBR技术在水处理中的各种应用场景, 并针对其在实际运行中面临的挑战, 如膜污染、能耗等问题, 提出了切实可行的优化策略。通过深入研究和分析, 本文旨在为MBR技术的进一步推广、应用和改进提供有力的理论支持和实践指导。

**关键词:** 膜生物反应器; 水处理; 膜污染; 能耗; 优化策略

## 引言

随着全球水资源日益紧张和水环境问题的不断凸显, 高效、环保的水处理技术成为了研究的热点。膜生物反应器 ( MBR ) 作为一种融合了膜分离和生物处理两大技术的新型水处理工艺, 正逐渐在全球范围内得到广泛应用。本文将从MBR技术的基本原理和特点出发, 深入探讨其在水处理中的应用场景, 并针对存在的问题提出优化建议, 以期推动MBR技术的持续发展和完善。

### 1 MBR 技术的基本原理与独特优势

MBR技术通过结合生物处理与膜分离技术, 实现了高效的水质净化。生物处理部分主要利用微生物的降解作用去除水中的有机物, 而膜分离部分则通过微滤或超滤膜的高效拦截作用, 进一步去除水中的悬浮物、细菌、病毒等杂质, 从而确保出水水质。MBR技术的独特优势在于: (1) 出水水质高: MBR技术能够持续稳定地提供高质量的出水, 满足日益严格的环保标准。(2) 污泥浓度高: MBR反应器内的污泥浓度远高于传统活性污泥法, 这有助于提高生物处理的效率和去除效果。(3) 占地面积小: 紧凑的设计使得MBR技术在空间有限的环境中也能得到应用。(4) 操作灵活: MBR系统易于实现自动化控制, 能够根据水质变化灵活调整运行参数。

## 2 MBR 在水处理中的多元化应用

### 2.1 市政污水处理

市政污水处理是MBR技术得到广泛应用的一个重要领域。在城市化快速发展的今天, 城市污水的处理问题日益凸显, 而MBR技术的高效性和灵活性使得其成为解决这一问题的有力工具。MBR技术在市政污水处理中的核心优势在于其高效的污染物去除能力。传统的活性污泥法虽然能去除大部分有机物, 但其出水水质往往难以达到高级别的回用标准。而MBR技术通过膜的高效分离作用, 能够进一步去除水中的悬浮物、胶体、细菌等杂

质, 从而确保出水水质的清澈透明和高纯度。特别是在城市污水回用方面, MBR技术展现出了巨大的潜力。随着城市水资源的日益紧张, 污水回用成了一种重要的水资源补充途径。MBR技术能够提供符合甚至超过饮用水标准的再生水, 这不仅缓解了城市水资源紧张的问题, 还为城市的可持续发展提供了有力支持。MBR技术在市政污水处理中的另一个亮点是其灵活性。由于MBR系统可以实现模块化设计, 因此可以根据实际需要灵活调整处理规模。这种灵活性使得MBR技术既适用于大型污水处理厂, 也适用于小型或分散式的污水处理设施<sup>[1]</sup>。此外, MBR技术还易于实现自动化控制, 大大降低了人工操作的难度和成本。值得一提的是, MBR技术在市政污水处理中的应用还带来了显著的环境效益。通过高效去除污染物, MBR技术有助于改善城市水环境, 保护生态系统的健康。同时, 由于其出水水质高, 可以直接用于城市绿化、道路清洗等用途, 从而减少了新鲜水资源的消耗。

### 2.2 工业废水治理

在工业废水治理领域, MBR技术同样显示出了其卓越的处理能力, 特别是对于化工、制药、电镀等行业中产生的难以处理的废水。这些废水往往含有高浓度的有毒有害物质, 如重金属离子、有毒有机物等, 若未经妥善处理直接排放, 将对环境和人类健康造成极大的威胁。MBR技术的引入, 为这些难处理废水的治理提供了新的解决方案。其核心在于通过调整生物反应器中的微生物种类和运行条件, 实现对废水中特定污染物的有针对性去除。这种灵活性使得MBR技术能够应对各种复杂多变的工业废水处理需求。在化工废水处理中, MBR技术通过优化微生物群落结构, 能够有效降解废水中的有机污染物, 同时去除部分重金属离子。对于制药废水, MBR技术可以针对废水中的药物残留和有毒有机物进行

高效处理,确保废水达标排放。而在电镀废水处理中,MBR技术则能够去除废水中的重金属离子,如铬、镍、铜等,降低其对环境的危害。除了能够处理多种难降解的污染物外,MBR技术还具有高度的稳定性和可靠性。在工业废水处理过程中,MBR系统能够持续稳定地运行,确保废水处理的连续性和高效性。此外,MBR技术的模块化设计也使得其易于扩展和维护,为工业废水治理提供了极大的便利。

### 2.3 分散式污水处理

在偏远山区、海岛或是人口稀少的乡村地区,由于地理位置偏远、人口分散,建设传统的大型污水处理厂显得既不经济也不切实际。这些地区往往缺乏足够的基础设施和人力资源来支持大规模的水处理设施,然而,污水处理的需求却同样迫切,因为这些地区的自然环境同样需要得到保护。MBR技术因其独特的优势,成为了这些地区分散式污水处理的理想选择。首先,MBR系统占地面积小,这意味着即使在土地资源有限的地区,也能轻松部署。这一点对于空间受限的环境来说至关重要,它使得污水处理设施可以更加贴近污染源,减少污水长距离输送的成本和环境污染风险。其次,MBR技术操作简便,对运行人员的技术要求相对较低。这对于缺乏专业技术人员的偏远地区来说,是一个显著的优势。通过简单的培训,当地人员就能掌握MBR系统的基本操作技能,确保污水处理设施的稳定运行<sup>[2]</sup>。再者,MBR技术具有较高的灵活性和可扩展性。随着人口的增长或污水排放量的变化,可以方便地增加或减少MBR模块,以满足不同处理需求。这种模块化设计不仅降低了初期投资成本,还使得后期的运营和维护更加便捷。通过在各地部署小型化的MBR系统,可以有效地处理当地产生的污水,防止污水直接排放到自然环境中,从而保护当地的水资源和生态环境。

## 3 MBR 技术的关键问题与优化方案

尽管MBR技术在水处理领域具有广泛的应用前景,但在实际运行中仍面临一些挑战,如膜污染、高能耗以及运营成本等问题。为了解决这些问题,本文提出以下优化方案:

### 3.1 膜污染的防治与优化

膜污染是MBR技术面临的主要问题之一,它会导致膜通量下降、运行成本增加。为了防治膜污染,可以采取以下措施:

#### 3.1.1 选择合适的膜材料

针对膜污染问题,首要策略是选择那些抗污染性能强、亲水性好的膜材料。这类材料具有较低的表面能,

能够减少污染物在膜表面的吸附和沉积。抗污染性强的膜材料通常具有特殊的表面涂层或改性处理,这些处理能够增强膜对污染物的抵御能力,从而降低膜污染的风险。同时,亲水性好的膜材料能够更好地与水分子相互作用,形成一层水化层,这有助于阻止污染物接近膜表面。水化层作为一道屏障,减少了污染物与膜的直接接触,进而延长了膜的使用寿命,提高了MBR系统的整体性能。因此,在选购膜材料时,应重点考虑其抗污染性和亲水性,这是确保MBR系统长期稳定运行的关键。通过选择合适的膜材料,可以有效降低膜污染的发生概率,提升水处理效果。

#### 3.1.2 优化膜组件设计

除了选择合适的膜材料,优化膜组件设计也是提高膜抗污染能力的关键。在这一方面,采取错流过滤方式是一个重要的策略。与传统的死端过滤不同,错流过滤允许流体在膜表面形成切线流动,这种流动方式能够有效地减少污染物在膜表面的沉积和堵塞。此外,增加膜表面的湍流程度也是优化设计的关键一环。通过增加流体的流速和改变流体的流动路径,可以在膜表面形成更强烈的湍流,这有助于冲刷掉附着在膜上的污染物,从而保持膜的通透性。这种设计不仅提高了膜的抗污染能力,还延长了膜的使用寿命<sup>[3]</sup>。优化膜组件设计是提高MBR系统中膜抗污染能力的重要手段。通过采用错流过滤方式和增加膜表面的湍流程度,可以有效地减少膜污染,确保MBR系统的稳定运行和高效的水处理效果。

#### 3.1.3 定期清洗和更换膜

为确保MBR系统中膜的高效性能,定期的物理或化学清洗以及适时的膜更换是不可或缺的维护步骤。随着时间的推移,膜表面会逐渐积累污染物,如颗粒物、有机物和微生物等,这些污染物会降低膜的通透性,进而影响整个系统的处理效率。物理清洗主要是通过水力冲洗或机械刮擦的方式,去除膜表面附着的较为松散的污染物。而化学清洗则采用特定的清洗剂,针对更为顽固的污染物进行深层清洁,恢复膜的通透性。两种清洗方式相辅相成,共同维护膜的性能。此外,根据膜的使用寿命和性能衰减情况,及时更换新膜也是保持系统高效运行的关键。老化的膜不仅通透性降低,还可能产生破损,导致处理效果下降甚至系统失效。因此,定期评估膜的状态,并在必要时进行更换,是确保MBR系统长期稳定运行的重要措施。

### 3.2 降低能耗与运营成本

MBR技术的能耗主要集中在曝气系统和膜过滤过程中。为了降低能耗和运营成本,可以采取以下策略:

### 3.2.1 采用高效节能型曝气装置

在MBR技术的运营中,曝气装置的能耗占据了相当大的比例。因此,采用高效节能型曝气装置成为了降低能耗和运营成本的关键。高效、低能耗的曝气装置,如微孔曝气器等,通过其独特的设计和优化,能够显著提高氧传递效率。这意味着在相同的能耗下,这类曝气装置能够向生物反应器中提供更多的溶解氧,从而支持更高的生物处理效率。微孔曝气器的工作原理是通过微小的气孔将空气均匀地分散到水中,这样不仅增大了气液接触面积,还使得氧气能够更快速地溶解到水中。这种高效的氧传递方式直接导致了能耗的降低,因为在达到相同的溶解氧水平时,所需的空气量减少了,进而减少了压缩机的运行时间和能耗。此外,高效节能型曝气装置通常还具有更长的使用寿命和更低的维护成本,这进一步降低了运营成本。因此,在选择MBR系统的曝气装置时,应优先考虑高效、低能耗的类型,以实现长期的节能和成本效益。通过采用这样的装置,MBR技术在水处理领域的应用将更具经济性和可持续性。

### 3.2.2 优化曝气方式

优化曝气方式是实现MBR技术能效提升的重要环节。在传统的曝气过程中,固定的曝气量往往导致能源的浪费,特别是在水质和生物负荷变化时。为了避免这种情况,现代MBR系统通过引入智能控制系统来精确调整曝气量。智能控制系统能够实时监测生物反应器中的溶解氧浓度、有机物负荷等关键参数,并根据这些数据动态调整曝气装置的运行状态。例如,当监测到溶解氧浓度过高时,系统会自动减少曝气量,从而避免过度曝气造成的能源浪费。此外,这种智能控制系统还可以根据历史数据和预测模型,对曝气量进行预调整,以适应水质和生物负荷的周期性变化。这种前瞻性的控制策略,不仅提高了能源的利用效率,还确保了MBR系统的稳定运行<sup>[4]</sup>。通过优化曝气方式,MBR技术能够在保证处理效果的同时,显著降低能耗,从而实现更为经济、环保的水处理过程。

### 3.2.3 提高膜通量

在MBR技术中,膜的渗透通量是衡量膜性能的重要

指标,它直接影响到过滤过程的效率和能耗。为了提高膜的渗透通量,可以从膜的制备工艺和使用条件两方面入手进行改进。首先,通过优化膜的制备工艺,可以改善膜的结构和性能,进而提高膜的渗透能力。例如,采用先进的制膜技术,可以制备出孔径分布更均匀、孔隙率更高的膜,从而增加水分子通过膜的速度和数量。其次,改善膜的使用条件也是提高膜通量的有效途径。这包括调整操作压力、温度和pH值等参数,以创造更有利于水分子通过膜的环境。例如,适当增加操作压力可以推动更多的水分子通过膜,但也要注意避免过高的压力对膜造成损害。通过这些改进措施,可以显著提高膜的渗透通量,从而减少过滤过程中所需的能耗。这不仅降低了MBR系统的运营成本,还有助于提高整个系统的处理效率。

### 结语

膜生物反应器(MBR)技术以其高效、稳定的水处理性能在水处理领域展现出了巨大的应用潜力。本文通过对MBR技术的深入研究和探讨,揭示了其在市政污水处理、工业废水治理以及分散式污水处理等多个方面的应用优势。同时,针对MBR技术在实际运行中遇到的膜污染、能耗等问题,提出了一系列切实可行的优化策略。展望未来,随着新材料、新技术的不断涌现以及智能化控制系统的应用,MBR技术将在水处理领域发挥更加重要的作用,为全球水资源保护和可持续发展做出积极贡献。

### 参考文献

- [1]邢力.倒置A~2O-MBR组合工艺处理低碳氮比生活污水实验研究[D].兰州交通大学,2020,28(001):125-128.
- [2]姚文华,王凯波,石晓杰.Airlift~(TM)MBR膜在电厂生活污水处理系统的应用研究[J].能源与节能,2020,14(011):300-301.
- [3]吕龙,张怡晓,张颖,等.某污水处理厂MBR膜系统新增组器运行效果分析[J].环境工程,2021,39(027):610-611.
- [4]马刚.膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用——以THELUS污水站为例[J].工程技术研究,2022,7(09):65-67.