

AO与MBR一体化工艺处理城镇生活污水的对比

任 焱

绵阳城市学院现代技术学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2023年3月18日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月28日

摘 要

随着经济的繁荣发展, 大量人口涌入城镇, 导致城镇的污水排放量增加, 水质严重恶化。在城镇化进程中, 研究污水治理工艺有助于推广更加经济、高效的技术与方案, 实现城镇的可持续发展。为此, 本文将通过对AO与MBR两种一体化工艺处理城镇生活污水展开比较, 主要从工艺特点、脱氮除磷效果、出水水质、工艺设备及后期运行费用入手, 结合案例进行初步分析和讨论, 希望通过对比两种工艺的优缺点及适用条件, 对城镇生活污水处理体系的发展给予有效的建议。

关键词

城镇生活污水处理, AO工艺, MBR工艺

Comparison of AO and MBR Integrated Process for Treating Urban Domestic Sewage

Yan Ren

Department of Modern Technology, Mianyang City College, Mianyang Sichuan

Received: Mar. 18th, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 28th, 2023

Abstract

With the prosperity and development of the economy, a large number of people have poured into cities and towns, leading to an increase in the amount of sewage discharge in cities and towns, and

a serious deterioration in water quality. In the process of urbanization, studying wastewater treatment processes can help promote more economical and efficient technologies and schemes, and achieve sustainable development of cities and towns. Therefore, this article will compare the two integrated processes of AO and MBR for the treatment of urban domestic sewage, mainly starting from the process characteristics, nitrogen and phosphorus removal efficiency, effluent quality, process equipment, and later operating costs. Based on a preliminary analysis and discussion of cases, it is hoped that by comparing the advantages, disadvantages, and applicable conditions of the two processes, effective suggestions will be given for the development of urban domestic sewage treatment systems.

Keywords

Urban Domestic Sewage Treatment, AO Process, MBR Process

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由《中国水资源公报》《2021 年城市建设统计年鉴》等相关数据整理, 2021 年全国用水总量 $5.92 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 较 2015 年减少 $1.13 \times 10^{10} \text{ m}^3$; 城市污水年排放量约 $6.25 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 城市污水处理率为 97.92%。2021 年, 我国的城镇污水处理市场总投资为 5.63×10^{11} 元, 据市场反馈情况来看, 该领域的发展还有很大的上升空间, 这一趋势极大地促进了市场的需求。以上数据充分表明, 近年来我国在处理城镇生活污水这方面做出的努力。

我国城镇生活污水处理总量虽有大幅提升, 但污染物排放总量的减少滞后于污水处理量的增幅, 研究发现, 50% 的城镇污水处理厂出水氨氮低于 20.5 mg/L , 浓度普遍偏高, 不能达到排放标准[1]。随着国家《水污染防治行动计划》的实施, 一些城市和企业的污水排放标准也相应改变, 特别是中型城市以及一些环境容易被破坏的地区, 如北京、天津、江浙等地排放标准必须要达到 IV 类水体标准, 因此必须持续改进污水处理技术, 才能使出水中的氮、磷含量达标[2]。

世界各国在污水处理这方面的研究已有一定的历史, 其中美国的污水处理系统最为发达, 污水处理厂的数量最多, 达到二级排放标准的污水处理厂占全世界的 80% 左右; 其处理工艺主要有传统活性污泥法和生物膜法, 以传统活性污泥工艺为基础的还有吸附 - 生物降解工艺、间歇式活性污泥工艺、氧化沟工艺、接触氧化法、湿地处理法等[3]。

我国国土面积大, 自然资源、地形、气候等条件等因素导致各区域之间的城镇化水平不平衡, 不同城镇的产业结构、发展特点和发展规划也存在较大差异, 城镇的职能结构也随着经济的发展改变, 城镇的人口不断流动, 导致我国城镇污水处理存在空间和时间上的复杂性。因而, 城镇污水的组分结构、管网布局规划、污水处理工艺乃至污水处理厂选址都不能一概而论。

目前, 国内外对城市污水脱氮除磷技术的探索, 主要集中于发展有益菌以及利用生物膜的活性, 本文以适用范围广、处理效果好、易于操作管理的 AO (厌氧好氧) 一体化工艺与 MBR (膜 - 生物反应器) 一体化工艺为研究对象, 分别从工艺特点、脱氮除磷效果及出水水质、工艺设备及后期运行费用入手, 比较二者对于城镇污水处理效果及优缺点。

2. AO (厌氧好氧)一体化工艺

2.1. 工艺概述

AO 工艺是一种生物处理技术，也被称为厌氧/好氧活性污泥法，A 是厌氧阶段，厌氧菌可水解、酸化生活污水中大分子有机物，例如淀粉、碳水化合物、纤维等，将其降解成小分子有机物；O 是好氧阶段，主要去除污水中的其他有机污染物。根据大多数污水处理厂的运行结果来看，AO 一体化污水处理工艺兼备除 COD、BOD₅、SS、NH₃-N、TP、TN 的能力，在处理过程中较稳定，处理后的水质基本能达到要求，前期不需要大量的投资，后期对设备的清洁管理方便，安装设备所需的面积不大，而且露天设备不需要额外保护措施，是一种较为理想的污水处理工艺，但是由于没有独立的污泥回流系统，不能培养出具有特定功能的污泥，难以去除污水中难降解的污染物，脱氮除磷率难以达到 90%。

AO 一体化工艺的典型流程如图 1，原水在调节池中进行水量调节后，通过提升泵提升至一体化装置内，在缺氧区中，大分子有机污染物转化为小分子有机污染物，此区域中的鲍尔环填料加大微生物与污水中有机污染物的接触面积，去除效率提高且有利于后续有氧处理。在回流硝化菌的作用下，可进行部分硝化和反硝化，去除氨氮。再将污水送入好氧区，活性污泥在有氧条件下，通过微生物菌群的生化、吸附作用，使污水中的污染物、COD 值大幅降低。好氧过程比较耗时，大概需要 8 小时的平均水力停留时间，必要时还需要进行曝气处理。最后污水中的污泥沉淀到沉淀区，在生态过滤床进行水、泥分离，经消毒后达标的污水供人们再次利用，剩余污泥则被清理至污泥池中进行循环处理。

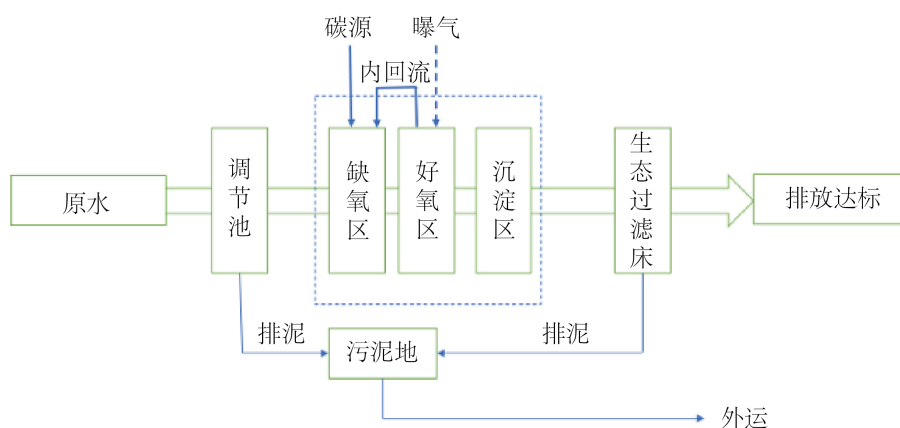


Figure 1. Flow diagram of AO integrated domestic sewage treatment equipment
图 1. AO 一体化生活污水处理设备流程示意图

2.2. 脱氮除磷功能及出水水质

1) 脱氮除磷功能。根据一项采用 AO 工艺进行污水脱氮除磷的实验，设计相同的进水量($3.2 \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$)和 HRT (10 h)，控制 DO 浓度(第 1~5 阶段 DO 值分别为 2 mg/L 、 1.5 mg/L 、 0.9 mg/L 、 0.6 mg/L 、 0.3 mg/L)，发现在第 4 阶段(DO 值为 0.6 mg/L)各项指标达到稳定值[4]。当平均水力停留时间为 10 h 时，TN 的除率约为 61%，未达标；TP 的平均率达 95% 以上，达标。

2) 出水水质。以“多级 AO 型活性污泥法 + 高密度沉淀池”的分阶段污水治理技术为例，该技术不但可以节省占地面积，而且运行成本低，比传统的 AO 工艺脱氮除磷效果好，而且在污水中含碳有机物少的情况下，还可以补充缺氧池的碳源[5]。回流的设定量很小，甚至可以不用设计回流，若加以化学除磷，理论上脱氮率可以达到 75% 左右，磷的去除率达到 90% 左右，可达到较高的出水标准。

3) 处理设备及运行费用。这种污水处理装置耐冲击能力强、占地面积小、对能源的消耗较小、出水水质稳定、管理简单,在污水处理中发挥着举足轻重的作用。市面上的一体化装置虽多,但其内部构造却大同小异,通常由酸化池、生物接触氧化池、风机房、沉淀池、污泥池、消毒池等组成,设备内部有多个反应池[6]。

其运营成本主要是风机、水泵运转的电能消耗,以及消毒池的固体 ClO_2 费用,总电耗为 4.34×10^4 元/年,加药成本为 1013 元/年,维护成本低,预计随着设备的后续使用,水泵零部件的问题会逐渐显露出来,维修成本将会增加,但是不断改进工艺,可使单位操作费用下降。

3. MBR (膜 - 生物反应器)一体化工艺

3.1. 工艺概述

MBR 一体化工艺结合了传统的生物处理技术和现代的膜分离技术,因此又被成为膜生物反应技术,其工作原理是生物反应池中的活性污泥和较大有机物被固定在反应池中,再通过膜分离技术分离,这样就免去了污水的二次沉淀。其工艺流程如图 2,除添加了 MBR 膜池以外,其他的流程与 AO 工艺基本相似,膜池中起主要作用的是膜组件,能够有效拦截微生物,使其完全截留在反应器内,实现反应器的水力停留时间和污泥停留时间完全分离,从而实现灵活控制、稳定运行。

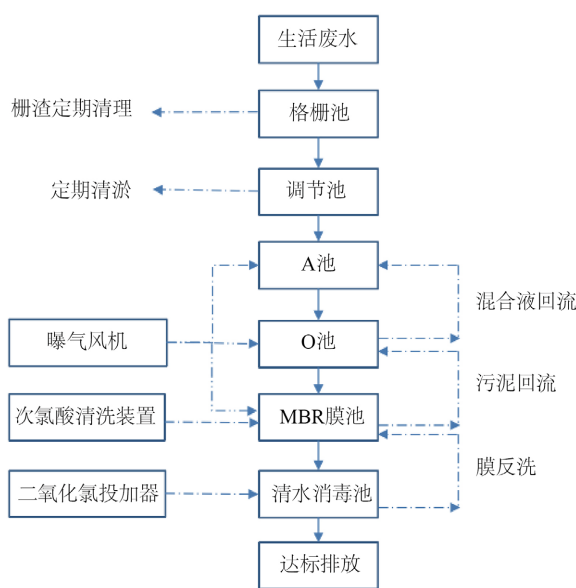


Figure 2. Flow chart of MBR integrated process
图 2. MBR 一体化工艺流程图

自 2008 年以来,相关部门在生物膜这方面的投入加大,不断改进技术,降低生产成本,MBR 一体化工艺的应用规模也发生了翻天覆地的变化。例如,瑞典斯德哥尔摩的 Henriksdal 污水处理厂顺利完成了 MBR 工艺的改进和运营,处理能力为 $8.64 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,是全球 MBR 一体化工艺的“巨无霸”[7]。在我国也有许多典型的工程,北京槐房污水处理厂已经正常运转,其处理能力也达到 $6.00 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,这样的处理能力在全世界 MBR 污水处理工艺中可以说是屈指可数[8]。

3.2. 脱氮除磷功能及出水水质

常规工艺对污水的脱氮除磷处理效果不佳,目前尚无单一的生物、化学及物理方法可以完全消除水

体中的氮、磷等营养元素。由于 MBR 一体化工艺结合了传统的生物技术和先进的膜分离技术，能针对污泥浓度高、生物物种多的污水进行处理，因而 MBR 一体化工艺在生物脱氮除磷领域中有广泛的应用前景。在 MBR 工艺中，SRT (污泥停留时间)可以不依靠 HRT (水力停留时间)而独立地进行，即利用隔膜的阻断作用，在不增大反应池容积的前提下，延长 SRT 时间，以增加硝化细菌和微生物的停留时间。大部分 MBR 工艺的脱氮除磷技术与传统的 AO 工艺十分相似，但生物膜组件的存在，可以提高脱氮除磷率，且经相关人员研究发现，在高 DO 的条件下，加强调控反硝化除磷细菌(DPB)的氧化分解作用，可以达到脱氮和除磷双效功能[9]。

某污水处理厂经过大量的水质测试，当工艺运行平稳后，具体指标数据如下表 1，污水中 COD、NH₃-N、TP、TN 的去除率较高，该工艺的平均出水质量超出设计指标[10]。

综合来看，MBR 工艺对 NH₃-N、TP 均有很高的去除率，说明 MBR 工艺可以同时进行脱氮除磷，即生物聚磷的同时，还能将硝酸盐氮还原为氮气，这样就利用相同的细菌，实现了氮、磷的同步去除。

Table 1. Average inlet and outlet water data (Unit: mg/L) [10]

表 1. 平均进出水数据(单位: mg/L) [10]

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP
平均进水	273.2	94.6	26.1	35.1	5.9
平均出水	24.2	2.8	0.3	7.0	0.1
去除率	91.1	97.0	98.9	80.0	98.0

3.3. 处理设备及运行费用

与 AO 一体化设备情况类似，MBR 一体化设备的结构相差无几，其主要结构包括调节池、厌氧池、MBR 池、污泥池、泵及曝气设备。现有的 MBR 工艺装备种类繁多，目前大部分 MBR 工艺的流程复杂，需要的设备也相应增多，如：潜污泵、搅拌器、回流泵、排泥泵、鼓风机、生物膜、加药设施、填料等。常规生产工艺的直接运行费用为 0.62 元/m³，MBR 工艺的直接运行费用为 0.5~0.9 元/m³，比常规工艺提高 0.15 元/m³，再加上设备折旧费用要高出 0.4 元/m³。

4. 结果与讨论

4.1. 现存问题及建议

4.1.1. AO 一体化工艺

1) AO 一体化设备在长期运行中，由于有部分淤泥沉淀在池底，难以通过管道排出，需要定期进行彻底的人工清洗。若将 AO 一体化的整体地基提升，并在底部安装人孔装置，留出人工清扫淤泥的空间，既节省了更换填料的费用，又能定期更新池中的活性污泥，方便后续的调整，从而改善 AO 一体化系统的出水质量。

2) 加强预处理，改善出水水质。污水处理系统的绝大部分管线都铺设在地下，输送线路的途中往往会有一些不连续的检查井，特别是在这些管线比较复杂的区域，经常会有泥沙带入，如果不及时进行处理，泥沙就会进入调节池，大量堆积，严重影响排水。建议在调节池前的主管上设计一条通往沉砂池的输水管道，当系统正常运转时，污水流进沉砂池沉淀泥沙后，再进入调节池，这样短期内将污水直接送到调节池中进行处理，既能降低后期设备的泥沙沉积，又能降低操作费用，而且只需清理沉砂池的泥沙。

4.1.2. MBR 一体化工艺

1) 保持原有膜箱体积不变, 调整其内部结构, 避免因使用时间过长而发生膜性能衰减现象[11]。

2) 采用性能更好、流量更大、过滤孔径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的浸没超滤 MBR 膜装置。由于操作时间及进水水质等因素的影响, 膜组件内部空间小, 容易污堵, 膜与膜之间的压差很大, 若不进行人工清洁, 会造成流量降低的结果。如果人工清洁的频率和强度太高, 又会造成部分膜片的断裂、脱落, 使有效膜的面积减小, 影响出水质量[12]。

3) 通过优化操作和管理模式, 确保膜系统的产水量。在设备初期的运行和维护中, 可能会出现操作管理不到位、清洗方式不正确等问题, 使膜片性能衰减严重, 当清洁次数和强度增加时, 膜片系统的高效工作时间会减少, 从而进一步降低产能[13]。

4.2. AO 与 MBR 一体化工艺对比结果

1) 工艺特点: AO 工艺仅仅是在传统的生物处理技术上进行微小的改进; MBR 工艺则是在传统的生物技术上, 添加了一项可以减小设备运转负荷的膜分离技术。

2) 在污水处理方面, MBR 一体化处理工艺具有明显的优越性。大多数 AO 工艺处理后的污水只能达到一级 B 排放标准, 需要其他工艺辅以二次处理, 才能达到一级 A 排放标准, 因而该工艺比较适合水质要求不太高的工程, 例如绿化用水、河塘供水、厕所用水等。MBR 工艺的出水稳定性较好, 在不使用人工湿地的情况下, 基本可以满足一级 A 排放标准。AO 一体化技术的操作不稳定, 很容易超过限定值, 没有单独的污泥回流体系, 很难形成具有特定作用的污泥, 氮的去除率达不到期望值。MBR 工艺的处理效率比 AO 工艺提高了一个档次, 能达到较高的水质标准和脱氮除磷效率, 操作稳定, 因此 MBR 工艺适用于组分复杂的有机污水和对排放要求高的污水, 例如养殖场污水、生活管道污水、园区污水、医院污水等。

城镇生活污水组分复杂, 所以在选择城镇一体化生活污水处理工艺过程中, 必须综合考虑当地经济情况、出水水质等多种因素。

3) 工艺设备及运行费用。从能耗角度而言, AO 一体化污水处理设备大多采用微动力设计, 平均耗电 $0.3\sim 0.4$ 元/ m^3 , MBR 一体化设备的能耗则高于 AO 一体化设备。另外, MBR 工艺一套膜组件的使用寿命一般在 2~3 年左右, 更换一套膜组件的成本相对较高, 相应 MBR 的维修成本也比其它工艺要高得多。再者, 由于我国的污水中含有大量杂质, 薄膜很容易被刮破, 从而进一步增加维护费用。设备方面, AO 一体化污水处理装置占地面积小、设施简易、效率高、运行成本低; MBR 一体化工艺装置占地面积小、无场地限制、操作简单、便于自动化控制, 但运行成本更高。

4.3. 结论

通过对 AO 与 MBR 一体化工艺的工艺特点、脱氮除磷效果、设备运行费用的对比, 虽然二者的除磷率都较高, 平均在 90% 以上, 但由于 AO 一体化工艺的出水水质较差, 脱氮率较低, 平均在 60% 左右, 运行费用相对较低, 因此 AO 一体化污水处理工艺比较适合水质要求不太高的工程, 例如绿化用水、河塘供水、厕所用水等; MBR 工艺的出水水质相对较好, 脱氮率在 70% 左右, 但运行费用较高, 因此 MBR 设备则比较适合处理难降解的污水以及排放标准较高的污水, 例如养殖场污水、生活管道污水、园区污水、医院污水等。城镇生活污水组分复杂, 所以在选择城镇一体化生活污水处理工艺过程中, 必须综合考虑当地经济情况、出水水质等多种因素。

虽然我国在这方面取得了优异的科研成果, 但是随着经济的发展, 城镇生活污水的处理面临着更多更复杂的问题。AO 一体化生物处理技术相比于传统的污水处理技术具有优势, 水质达标率更高, 是国内

较为先进的技术,但是其缺点也较为明显,为了保证此工艺 100%的产水合格率,设计人员和设备厂商应引起高度重视,不断优化工艺设计及运行方式,只有在发扬优点的同时,不断弥补不足,才能走得更远。采用 MBR 一体化工艺,利用反硝化除磷可以解决污水中磷含量高的问题,然而,在此领域的研究尚不深入,还需在工艺设计、系统性能和操作稳定性等方面进行探讨,必须从膜损坏机理和防护措施等多个角度进行综合考虑,真正实现高效率、低投资、易管理、易维护的 MBR 一体化工艺。

参考文献

- [1] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 12-15.
- [2] 李博洋,顾成奎,罗晓丽,等. “水十条”实施背景下工业绿色转型发展的路径探讨[J]. 环境保护, 2015, 43(9): 28-31.
- [3] 关伟,郭会平,赵学洋,等. 我国城市污水处理现状及城市污水处理厂提标改造路径分析[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2015, 42(4): 378-384.
- [4] 叶琼,张朝升,张可方,等. AO 工艺同步脱氮除磷效能的研究[J]. 广东化工, 2012, 39(15): 70-72.
- [5] 李昂,张雁秋,李燕. ECOSUNIDE 工艺在工程中的应用[J]. 水处理技术, 2009, 35(11): 111-113.
- [6] 马燕兵. 大牛地气田倒班点 WSZ-AO 工艺污水一体化处理装置综述[J]. 城市建设, 2010(12): 452-453.
- [7] Andersson, S., Ek, P., Berg, M., Grundestam, J. and Lindblom, E. (2016) Extension of Two Large Wastewater Treatment Plants in Stockholm Using Membrane Technology. *Water Practice and Technology*, **11**, 744-753. <https://doi.org/10.2166/Wpt.2016.034>
- [8] 温爱东,王海波,李振川,等. 大型地下式 MBR 工艺设计重难点分析[J]. 给水排水, 2016(6): 27-30.
- [9] 刘爱萍,李开明,陈中颖,等. 膜生物反应器同步脱氮除磷研究进展[J]. 工业水处理, 2006, 26(7): 1-3.
- [10] 李易寰,高芳,奚蕾蕾,等. 一体化 MBR 工艺运行效果及扩建设计建议[J]. 环保科技, 2019, 25(4): 18-22.
- [11] 张永. MBR 膜处理控制系统的实现[J]. 自动化信息, 2010(5).
- [12] 李顺义,位红卫,吕斯濠,等. MBR 的临界膜通量及其影响研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(9): 1585-1588.
- [13] 单学敏. 膜生物反应器处理柠檬酸洗废液的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2005.