

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.013

# 单级MABR纯生物膜法处理市政污水的应用研究

陈晶<sup>1</sup>, 王冠平<sup>2</sup>, 石伟<sup>2</sup>, 陈利军<sup>2</sup>, 郭骥铭<sup>1</sup>, 李杰<sup>1</sup>

(1. 光大水务科技发展<南京>有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 光大水务<深圳>有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 为了研究膜曝气生物反应器(MABR)在污水处理过程中的应用前景,探索氧气传质和脱氮规律,以昆山市某污水处理厂为研究对象,搭建了单级式MABR纯生物膜中试装置,在不同负荷条件下探究了MABR对污染物的去除效果,并对MABR在污水中的传氧性能进行了分析。结果表明,MABR在保证传氧的同时能够大幅降低曝气能耗,脱氮过程中有明显的同步硝化反硝化反应发生,而且污染物浓度越高越利于氧的高效利用;16S rDNA测序结果显示,MABR生物膜具有丰富的生物相,且以好氧微生物为主。

**关键词:** 膜曝气生物反应器; 市政污水; 脱氮; 氧气传质; 同步硝化反硝化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0074-05

## Application of Single Stage MABR Pure Biofilm for the Treatment of Municipal Wastewater

CHEN Jing<sup>1</sup>, WANG Guan-ping<sup>2</sup>, SHI Wei<sup>2</sup>, CHEN Li-jun<sup>2</sup>, GUO Qi-ming<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>

(1. Everbright Water Technology Development <Nanjing> Co. Ltd., Nanjing 210000, China;  
2. Everbright Water <Shenzhen> Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** To investigate the application prospect of membrane aerated biofilm reactor (MABR) in wastewater treatment, and explore the rule of oxygen mass transfer and nitrogen removal in the reactor, a single stage MABR pure biofilm pilot plant was built in a wastewater treatment plant in Kunshan. The pollutants removal performance of MABR was explored under different load conditions, and the oxygen transfer efficiency in wastewater was analyzed. MABR greatly reduced the energy consumption of aeration while ensuring oxygen transfer. Obvious simultaneous nitrification and denitrification took place in the process of nitrogen removal in the MABR, and the higher concentration of pollutant was conducive to efficient utilization of oxygen. The 16S rDNA sequencing showed that the MABR biofilm had diverse microbial species, and aerobic microbes were the dominant.

**Key words:** membrane aerated biofilm reactor (MABR); municipal wastewater; denitrification; oxygen mass transfer; simultaneous nitrification and denitrification

近年来环保排放标准不断提高,如环太湖流域、北京、天津等地都相继出台了更为严格的地方性污染物排放标准,尤其对氮素污染的控制更为严苛,相关的排水运营单位都面临着不小的压力。对于已建成运行的污水处理厂,大多面临改造用地紧张的难

题,膜曝气生物反应器(MABR)在脱氮方面有着非常显著的优势。

MABR是一种无泡曝气技术,也可以认为是一种正向渗透传氧技术,该技术主要是利用膜材料将曝气侧的氧传递到污水中,靠近污水的膜侧会慢慢

富集形成需氧生物膜,由于膜曝气生物反应器存在特殊的曝气模式和传氧机制,生物膜会产生明显的分层。该生物膜可大致分为3个功能层,即好氧层、缺氧层、厌氧层,这就意味着在MABR中会有同步硝化反硝化(SND)作用发生<sup>[1]</sup>。膜材料的性质也决定了MABR系统的运行效果,常用的MABR膜材料一般分为3类:致密的硅橡胶膜、微孔膜以及在膜基材涂覆致密层的复合膜<sup>[2]</sup>。MABR技术在国内的发展尚处于起步阶段,缺少中试规模以上的相关研究。为推进该技术在市政污水脱氮除碳领域的工程化应用,积累有价值的工程设计参数,笔者将MABR膜及其组件置于单级反应池内构建单级式MABR反应器,利用市政污水进行连续流生物挂膜,探究微生物的性质、传氧能力和对污染物的去除能力。

## 1 材料与方 法

### 1.1 MABR膜材料及组件形式

本研究选择的MABR膜主要由硅橡胶材料制成,膜表面致密无孔,结构为中空纤维式,这有利于MABR生物膜与污水中的污染物进行充分接触,同时污水流速也可以在生物膜周围提供剪切力以控制其生长,该结构的装填密度也更高<sup>[3]</sup>。MABR膜材料的表面具有疏水性,且疏水性较强<sup>[4]</sup>,同时具有更高的化学稳定性和耐腐蚀性。

MABR反应器由若干组膜束按比例排列,整个MABR模块的膜面积为1452 m<sup>2</sup>,膜组件的体积约为4 m<sup>3</sup>。膜组件上端的气路可供气,底部气路排气,以保证冷凝水排出膜内腔,不会影响氧气传质效果。排出的尾气收集后分配至模块两侧用于气提搅动,以确保污泥处于悬浮态,并且加强内部水流循环。同时膜组件底部设置了一排穿孔管,采用间歇性大气泡进行擦洗,以达到控制生物膜厚度和吹脱固体垃圾的作用。

### 1.2 单级MABR中试装置

中试装置如图1所示。装置由碳钢材料搭建而成,有效容积为8 m<sup>3</sup>。MABR模块置于反应器内,污水由反应器底部泵入,从顶部出水堰流出。MABR模块装置一般安装在刚好浸没于水面以下位置,尾气的气提气路一般在水深1.5 m左右,供气量为8 m<sup>3</sup>/h,气提装置循环水流约为30 m<sup>3</sup>/h,可见MABR模块在运行时并不需要过高压,这也是MABR节约

能耗的原因。

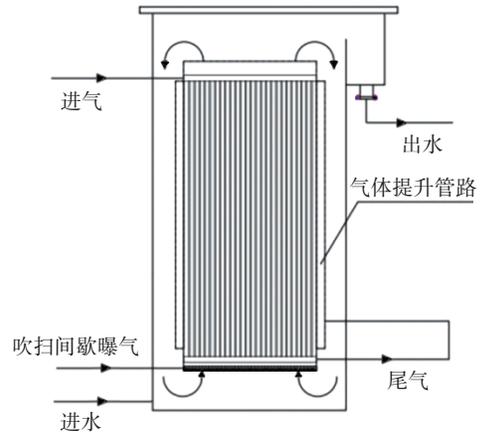


图1 单级MABR中试反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of single stage MABR pilot reactor

### 1.3 进水水质

进水COD为104.15~846.23 mg/L,平均值为237.12 mg/L;BOD<sub>5</sub>为49.40~548.21 mg/L,平均值为128.03 mg/L;SS为19~550 mg/L,平均值为87 mg/L;NH<sub>3</sub>-N为1.08~42.72 mg/L,平均值为23.03 mg/L;TN为7.23~71.08 mg/L,平均值为28.50 mg/L;TP为1.46~16.31 mg/L,平均值为4.60 mg/L。

### 1.4 MABR的挂膜与驯化

中试初期采用连续流循环法进行挂膜,接种污泥来自某污水厂A<sup>2</sup>O工艺好氧池。该污泥富含硝化菌,挂膜初期反应器内污泥浓度约为3500 mg/L。为了在膜表面驯化和富集氨氧化细菌(AOB),挂膜期间对MABR进行供氧。以实际生活污水为氮源、碳源,连续进水量为0.80 m<sup>3</sup>/h,停留时间为10 h。有研究表明<sup>[5]</sup>,生物膜中AOB与挂膜载体间的结合力较高,同时AOB的富集也有利于MABR传氧的高效性。为使AOB在MABR生物膜中相对占优,抑制异养微生物的过量生长,可投加少量氯化铵(以NH<sub>3</sub>-N计,投加量为10 mg/L)。MABR系统挂膜运行20 d后发现,膜表面均匀附着了微生物,其厚度为295 μm。从第1天开始,就发现系统可去除氨氮,说明即使在生物膜生长的初期,氧也能通过MABR膜的传递促进活性污泥和污染物发生反应。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同负荷下MABR的处理效能

MABR系统完成挂膜后,所有活性污泥都被排出。中试分为3个阶段,考察了各阶段MABR系统

的生化处理效果。MABR供气量恒定为 $8\text{ m}^3/\text{h}$ ,通过尾气管路的调节阀控制膜内压强在 $20\text{ kPa}$ 左右,以增加氧的高效传质。MABR的运行不受水深限制,模块内压损也不会超过 $5\text{ kPa}$ ,所以该压强下能够保证膜丝尾端供氧,且尾气压强足以完成气提循环。正常运行期间,为防止生物膜生长过厚,在底部设置高强度的穿孔管曝气用于吹扫中空纤维膜丝表面,装置设计的最大吹扫强度为 $65\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右,并根据实际进出水水质、生物膜生长厚度和氧转移速率进行调整。3个阶段的吹扫强度均为 $43.33\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,每隔 $1\text{ h}$ 吹扫 $20\text{ s}$ 。为保证系统运行的稳定性,未将尾气接至气提内循环装置,而是另设一台隔膜气泵为气提内循环提供动力,气提流量为 $10\text{ m}^3/\text{h}$ ,对应的系统内循环水量可达 $25\sim 30\text{ m}^3/\text{h}$ 。适当的内循环强化了装置内污染物的均匀混合,加强了污水与膜表面的接触,并提供了一定剪切力,既起到促进生物膜生长的作用,同时高水流剪切力也使生物膜不至于生长过厚。

第I阶段的进水量为 $1\text{ m}^3/\text{h}$ ,实际水力停留时间为 $8\text{ h}$ ;第II阶段的进水量为 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,实际水力停留时间为 $5.3\text{ h}$ ;第III阶段进一步加大进水负荷,进水量为 $4\text{ m}^3/\text{h}$ ,实际水力停留时间为 $2\text{ h}$ 。图2为MABR系统对污染物的去除效果及DO的变化。

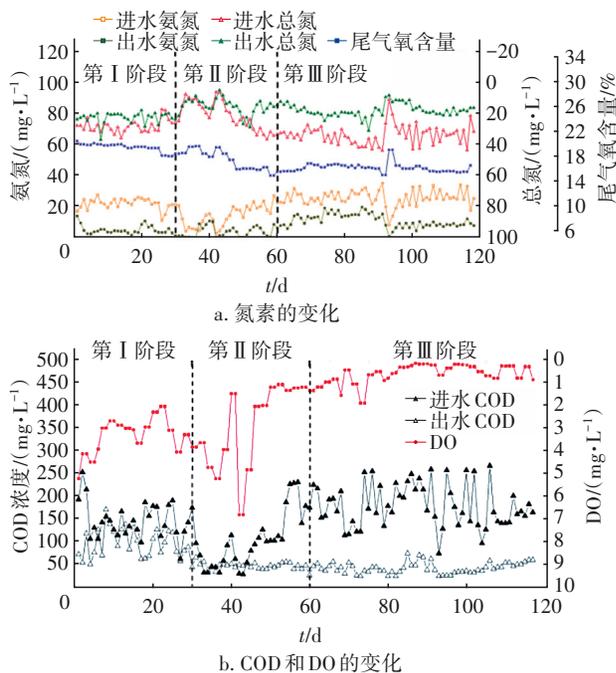


图2 MABR系统对污染物的去除效果及DO的变化

Fig.2 Removal effect of pollutants by MABR system and the change of DO

第I阶段,进水氨氮约为 $22.31\text{ mg/L}$ ,总氮约为 $28.65\text{ mg/L}$ ,系统运行 $5\text{ d}$ 后氨氮去除率明显升高,且稳定于 $80\%$ 左右。氨氮去除负荷为 $0.28\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,DO稳定于 $3.20\text{ mg/L}$ 左右,系统处于好氧环境中,所以反硝化效果并不明显。系统进出水COD的平均浓度分别为 $151.83$ 和 $97.13\text{ mg/L}$ ,COD去除率为 $36\%$ ,COD去除负荷仅为 $0.83\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

第II阶段提高了污染物负荷,在第 $32\sim 39$ 天,因受台风强降雨影响,进水污染物浓度较低,负荷也较低,不纳入分析范围,随后系统逐渐恢复至正常负荷。系统稳定运行后,进水氨氮约为 $20.23\text{ mg/L}$ ,总氮约为 $29.12\text{ mg/L}$ ,氨氮去除负荷为 $0.39\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。随着负荷的提高,溶解氧稳定于 $1.30\text{ mg/L}$ ,同时系统内有明显的同步硝化反硝化反应发生,总氮去除效果明显,去除负荷为 $0.27\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。第II阶段进出水COD平均浓度分别为 $104.62$ 和 $48.75\text{ mg/L}$ ,去除率为 $53\%$ ,COD去除负荷为 $2.53\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

第III阶段,由于进水负荷较高,系统内DO平均约为 $0.26\text{ mg/L}$ 。该阶段进水氨氮为 $25.38\text{ mg/L}$ ,总氮为 $34.00\text{ mg/L}$ ,COD为 $180.27\text{ mg/L}$ ,硝化去除率为 $57.3\%$ ,反硝化去除率为 $49.8\%$ ,较好地实现了同步硝化反硝化。氨氮和总氮去除负荷分别为 $0.96$ 和 $0.83\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。出水COD为 $44.17\text{ mg/L}$ ,COD去除负荷达到较高水平,约为 $8.99\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

## 2.2 MABR的碳氮转化分析

随着污染物负荷的升高,MABR系统内的碳氮转化差异较明显,氧转移量和碳氮去除负荷都随之升高,说明污染物浓度或负荷直接影响MABR的工作效率和同步硝化反硝化反应,Lackner等<sup>[6]</sup>同样利用硅胶膜(PDMS)在高氨氮浓度下取得了较好的处理效果,氨氮去除负荷约为 $6\sim 8\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

对MABR曝气采用了固定曝气量的供氧形式。第I阶段,在低污染物浓度下,生物膜内溶解氧偏高,反硝化脱氮受限,同时也会使系统内的异养微生物开始积累,过度消耗碳源。对于市政生活污水,由于污染物浓度较低,所以很难达到高污染负荷。在低氨氮负荷[ $<0.30\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ]条件下,系统内溶解氧处于较高水平,抑制了反硝化反应的发生。第III阶段,在纯生物膜体系下,MABR中的氧被水中的氨氮大量消耗,因此不会抑制外侧反硝化微生物。说明在较高氨氮负荷且有足够碳源的情况下,MABR的同步硝化反硝化反应才能够有效发生,

可以通过提高进水量、缩短 HRT 的方式来提高氨氮负荷。

控制 MABR 最优化运行的核心是适度匹配曝气强度和进水氨氮负荷之间的关系,同时 MABR 模块本身因其结构和排布设计,也存在最经济的供气量,所以这两个因素的比例关系需要根据实际情况确定。本研究中,当 MABR 模块的供气量为  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  时,氨氮负荷至少应超过  $0.40 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

在使用 MABR 纯生物膜法处理市政污水时,3 个阶段的 C/N 分别为 2.96、9.37、10.80。第 I 阶段几乎未发生反硝化,第 II 阶段和第 III 阶段的 C/N 均较高,由于此单级系统无厌氧水解,进水中大部分颗粒性 COD 可能以游离污泥的形态随吹扫过程而流失。

以溶解性 COD 计算 C/N 时,3 个阶段的 C/N 分别为 1.24、6.36 和 5.84,接近一般生化系统的 C/N, MABR 系统硝化阶段对 COD 的消耗也较明显,说明该生物膜体系中也存在相当一部分的好氧异养型微生物。采用 MABR 工艺处理低污染物浓度生活污水条件下,C/N 也反映了该系统依然符合硝化反硝化反应的规律,较难发生短程硝化反硝化或者厌氧氨氧化。

### 2.3 MABR 的氧传递分析

PDMS 膜材料的壁厚约为  $100 \mu\text{m}$ ,其较经济的膜内压强应控制在  $15\sim 20 \text{ kPa}$ 。在中试的 3 个阶段, MABR 的供气量都维持在  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,3 个阶段排出尾气的氧含量从 20% 逐渐降低至 15.7%,说明污染物负荷的提高能够有效提升 MABR 的传氧效率。中试运行的最后阶段, MABR 系统的氧利用率达到 24.5%,氧转移负荷达到  $9.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,传氧动力效率达到  $3.87 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。该结果也体现了 MABR 传氧的高效性,纯生物膜体系下依然比传统好氧生化段的微孔曝气的传氧效率高。

MABR 的传氧负荷与氨氮去除负荷比为 10,一般的硝化过程该值约为 4.57,证明 MABR 系统对氧的利用仍有提升空间,供气量与污染物浓度和负荷或许是影响氧利用的重要因素,需要进一步探讨。有相关研究也证明了 MABR 系统在硝化过程中存在最佳的生物膜厚度,使得透气膜能向附着的生物膜提供最大的传氧通量<sup>[5]</sup>。当生物膜厚度为  $119.00 \mu\text{m}$  左右时, MABR 能够提供最大的氧通量,氨氮的表面去除负荷最大,硝化性能最好。所以,

对于不同污水,精确控制生物膜厚度是 MABR 技术突破的核心。

### 2.4 MABR 生物膜微生物多样性分析

挂膜稳定运行 3 个月后, MABR 系统表现出稳定的性能,载体上的生物膜呈现灰褐色,其厚度达到  $500 \mu\text{m}$  以上。在两个不同区域截取膜材料,样本容量为 2,对其沥水后进行洗涤,随后对生物膜样本进行离心。称取  $0.5 \text{ g}$  均质生物膜作为 DNA 提取原样,提取后的 DNA 片段以 1% 的琼脂糖进行电泳试验<sup>[7]</sup>。

MABR 生物膜样本在科水平的分类如图 3 所示。两个样本菌群的相对丰度比较接近,红环菌科 (*Rhodocyclaceae*) 的相对丰度均最大,其次占比较多的菌科由高至低依次为硫发菌科 (*Thiotrichaceae*)、黄杆菌科 (*Flavobacteriaceae*)、伯克氏菌科 (*Burkholderiaceae*)、噬几丁质菌科 (*Chitinophagaceae*)、黄单胞菌 (*Xanthomonadaceae*)。

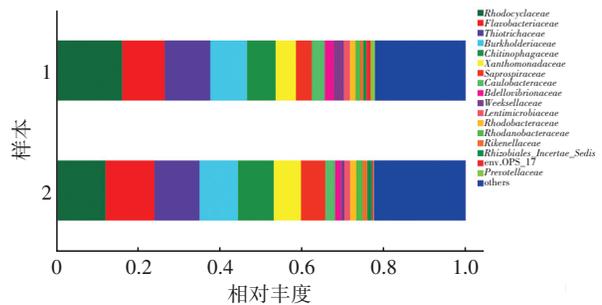


图 3 MABR 生物膜样本在科水平的分类

Fig.3 Proportion of MABR biofilm samples at family level

MABR 生物膜样本上的微生物在门类上以变形菌 (*Proteobacteria*) 和拟杆菌 (*Bacteroidetes*) 为主,这两个门类在污水处理中具有重要作用。在科水平分布上,体现了 MABR 生物膜丰富的生物相,红环菌科占比最大,该菌科利用有机底物作为碳源和电子供体进行厌氧光照生长,也可以在黑暗微好氧或好氧条件下生长;硫发菌科是严格的好氧自养型硫细菌,通常附着于固体基质上,氧化  $\text{H}_2\text{S}$  为  $\text{SO}_4^{2-}$ ;黄杆菌科一般为严格好氧的异养型细菌;伯克氏菌科一般为专性需氧型,大部分菌种可氧化葡萄糖,还原硝酸盐为亚硝酸盐,或产生氮气;噬几丁质菌科以真菌细胞壁几丁质为主要营养基质,生产多种活性物质,专性好氧;黄单胞菌属于化能有机营养型,以谷氨酸和甲硫氨酸为底物。

### 3 结论

MABR的处理能力随污染物负荷的升高而增强。以纯生物膜法处理低浓度市政污水时,在较短的停留时间下,氨氮和总氮去除负荷可达0.96、0.83 g/(m<sup>2</sup>·d),COD去除负荷为8.99 g/(m<sup>2</sup>·d),尾气氧含量稳定于15.7%,氧利用率较高,达到24.5%,且具有较高的氧动力效率,传氧动力效率达3.87 kg/(kW·h)。污水中足够的氨氮负荷与曝气强度的配比是MABR发生同步硝化反硝化的重要条件,在8 m<sup>3</sup>/h供氧量条件下,氨氮负荷应高于0.40 g/(m<sup>2</sup>·d),并且有足够碳源。纯膜法MABR工艺脱氮本质仍属于全程硝化反硝化过程。同时,MABR生物膜具有丰富的生物相,其中以好氧微生物为主。

#### 参考文献:

- [1] TERATA A, ITO J, MATSUMOTO S, *et al.* Fibrous support stabilizes nitrification performance of a membrane-aerated biofilm: the effect of liquid flow perturbation [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2009, 42 (8): 607-615.
- [2] 张慧敏. MABR处理模拟生活污水的运行效能及污染物降解动力学研究[D]. 天津:天津大学,2015.
- ZHANG Huimin. MABR Study of Operation Efficiency and Kinetic Model of Pollutant Degradation with Simulated Domestic Wastewater [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015(in Chinese).
- [3] 曾庆楠,吴云,张宏伟,等. 膜材料对膜曝气生物膜反应器性能影响的比较[J]. *化工学报*, 2016, 67(4): 1483-1489.
- ZENG Qingnan, WU Yun, ZHANG Hongwei, *et al.* Effects of membrane materials on performance of membrane aerated biofilm reactor [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(4):1483-1489(in Chinese).
- [4] SYRON E, CASEY E. Performance of a pilot scale membrane aerated biofilm reactor for the treatment of landfill leachate [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 44: 2082-2084.
- [5] 王荣昌,王亚楠,赵建夫. 氨氮负荷对膜曝气生物膜反应器部分亚硝化性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4):991-998.
- WANG Rongchang, WANG Yanan, ZHAO Jianfu. Effect of ammonium loading on partial nitrification in membrane-aerated biofilm reactor for treating ammonium-rich wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4):991-998(in Chinese).
- [6] LACKNER S, TERADA A, HORN H, *et al.* Nitrification performance in membrane-aerated biofilm reactors differs from conventional biofilm systems [J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 6073-6084.
- [7] 张宏玉. MABR微生物群落结构的研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- ZHANG Hongyu. Research of Microbial Community Structure in MABR [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012(in Chinese).

作者简介:陈晶(1992-),男,江苏南京人,硕士,工程师,主要研究方向为污水处理技术。

E-mail: chenjin01@ebwater.com

收稿日期:2020-06-09

修回日期:2020-08-28

(编辑:任莹莹)

借自然之力,护绿水青山