

无泡式中空纤维膜生物反应器研究与应用现状

任志鹏, 陈小光

(东华大学环境科学与工程学院, 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620)

[摘要] 无泡式中空纤维膜生物反应器(Membrane-aerated biofilm reactor, MABR)有效地将生物膜法污水处理技术和膜分离技术结合在一起, 其具有无泡曝气和硝化反硝化一体的优点。回顾了 MABR 的发展历程, 分析了 MABR 的基本结构和原理, 介绍了 MABR 常用的膜材料及氧传质系数模型, 阐述了 MABR 的影响因素, 综述了国内外 MABR 的研究与应用现状, 指出了 MABR 需要解决的问题并展望了该技术的未来发展。

[关键词] 无泡式中空纤维膜生物反应器; 中空纤维膜; 膜材料; 传质系数模型

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)01-0038-10

Research and application progress of membrane-aerated biofilm reactor

REN Zhipeng, CHEN Xiaoguang

(College of Environmental Science and Engineering, State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Membrane-aerated biofilm reactor(MABR), which has the advantages of bubble free aeration and nitrification and denitrification, combine the technology of biofilm wastewater treatment and membrane separation effectively. In this study, we reviewed the development of MABR and analyzed the basic structure and action principle of MABR, the membrane materials and mathematical model of mass transfer coefficient commonly used in MABR are introduced, the influencing factors of MABR are described, and introduced the research and application status of MABR in China and foreign country. At the same time, we summarize the research and application status of MABR at home and abroad, and point out the problems which should be solved in MABR and prospect the future development trend of MABR.

Key words: membrane-aerated biofilm reactor; hollow fiber membrane; materials of membrane; mathematical model of mass transfer coefficient

随着国家对环境水污染治理的要求日益严格, 近年来膜技术因具有应用面广、净化效果好、环境污染小等优点, 获得空前广泛的应用。无泡式中空纤维膜生物反应器(membrane-aerated biofilm reactor, MABR)是一种新兴的膜技术, 其具有氧传质效率高(高达 80%~100%, 是传统曝气方式的 10 倍左右)、无泡沫、低能耗和具有同步脱碳除氮功能等优点, 因而兼具理论和工程研发价值。目前, MABR 已从处理生活污水逐步拓展至其他废水。如国外的 B. TASKAN 等^[1]使用 MABR 处理药物废水, 对四环素的去除率为 63%。国内的 Hailong TIAN 等^[2]采用两级式 MABR 处理高浓度邻氨基苯酚(OAP)废水, 对

邻氨基苯酚的去除率高达 99%, COD 去除率达到 88.4%~90.9%。

美国的 S. H. YEH 和 C. R. JENKINS 在 1978 年最早使用聚四氟乙烯中空纤维膜构建 MABR, 利用附着在纤维膜表层的生物膜处理人工污水, 发现可以有效去除污水中的有机质^[3]。随后国外展开了大量有关 MABR 的理论研究。T. ROY 等^[4]在 1983 年论证了该工艺在污水处理的可行性和优越性。K. BRINDLE 等^[5]在 1996 年探究了 MABR 有望成为传统硝化工艺的替代品。E. CASEY 等^[6]在 1999 年结合 MABR 的基本原理和发展状况撰写了第一篇综述, 并构想了 MABR 在未来废水处理领域中广泛的

应用前景。A. TERADA 等^[7]在 2006 论述了 MABR 实现可控硝化的可行性。C. M. POTVIN 等^[8]在 2012 年用中试规模的 MABR 处理四溴双酚 A 污水,其中四溴双酚 A 以 $0.2 \mu\text{g/L}$ 的浓度掺入,氨转化率达到 $(83 \pm 6)\%$,研究发现 MABR 中用于吸附损失的生物量远低于 MBR 或 CAS 反应器中的生物量。P. PEREZ-CALLEJA 等^[9]在 2017 年发现闭端式 MABR 中,管腔气体的周期性排放可改善膜的平均氧转移率和污染物去除通量,而不会对氧转移效率产生显著影响。近年来, M. CASTRILLO 和 E. CASEY 等(2019 年)对 MABR 的研究较为活跃: M. CASTRILLO 等^[10]通过特殊的膜结构(膜的头部设置更靠近出水位置)增强 MABR 的传质和硝化作用,使比硝化速率得到显著提高(高达 69.2%); E. CASEY 团队^[11]用 MABR 处理垃圾渗滤液,进水氨质量浓度为 $500 \sim 2\,500 \text{ mg/L}$,实现了 $80\% \sim 99\%$ 的硝化能力。

我国膜处理技术起步于 20 世纪 90 年代,1991 年岑运华^[12]报道了膜生物反应器在国外的应用情况,而对 MABR 的报道和研究起步更晚。近些年随着膜成本的降低^[13]和 MABR 自身性能的优越^[14],越来越多的学者开始在实验室中利用 MABR 装置处理各种污水。其中天津大学^[15]和大连理工大学环境学院^[16]进行了大量试验研究,研究内容不仅涉及 MABR 工艺运行参数的优化,而且还涉及到生物膜结构剖析和微生物菌落探究。国内学者研究较多的还有向梅、李保安、杨凤林等人, Mei XIANG 等^[17]深入探究了 MABR 对废水中甲醛的降解机理,实验结果表明,甲醛在 MABR 中的降解遵循准一级动力学模型,当进水甲醛质量浓度为 116.31 mg/L 时,甲醛、COD、共基质甲醇的平均去除率分别为 99.90% 、 81.50% 、 97.14% 。李保安^[18]采用 MABR 处理采油废水,出水 COD 和氨氮分别为 85 mg/L 和 3.685 mg/L ,达到采油废水排放标准。Shaowei HU 等^[19]构建 MABR 装置处理城市污水, COD 去除率、氨氮去除率、总氮去除率分别达到 82.5% 、 95.1% 、 84.2% ,同时在 MABR 中发现了同步硝化反硝化现象。

基于上述关于 MABR 的研究背景,笔者通过分析 MABR 的特色、介绍膜材料及氧传质系数模型、阐明 MABR 的影响因素和回顾国内外研究与应用现状等,从而提出未来 MABR 的发展趋势,以促进 MABR 的研究与应用。

1 MABR 的特色

1.1 MABR 结构

MABR 的工艺流程见图 1。

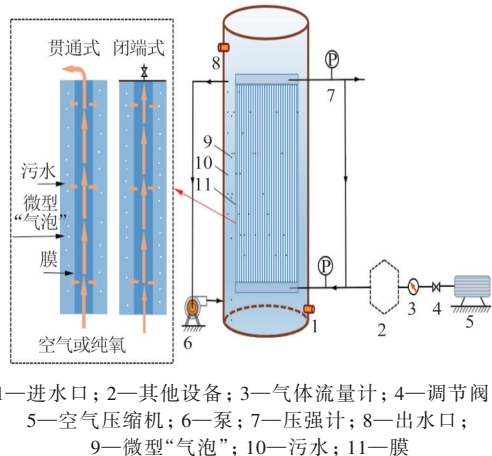


图 1 MABR 膜组件示意(左)和工艺流程(右)

Fig. 1 MABR's membrane module diagram (left) and system diagram (right)

图 1 中序号 2 是备选设备,可以选择空气净化装置^[20]或压力表等。在 MABR 中气体依次通过空气压缩机(产气装置)、流量计(显示气体流量)和压力表(显示膜腔内压力变化,防止出现膜堵塞等情况)进入中空纤维膜,再透过中空纤维膜逐步扩散至液相中,剩余气体可选择循环利用或直接排出。

1.1.1 供气方式

MABR 根据供气方式分为闭端式(或死端式) MABR 和贯通式 MABR。如图 1 所示,闭端式 MABR 中反应器一端密封,空气压缩机将气体不断送入中空纤维膜中,在压力和自由扩散的作用下,气体全部进入生物膜,氧气传质效率理论上可达 100% 。但 P. COTE^[21]在实际操作中发现水蒸气、氮气、二氧化碳等会通过膜孔扩散进入纤维膜内腔使氧传质速率下降,故实验室大多在膜组件末端安装截流阀,并定期排出多余气体。贯通式 MABR 中气体由一端通入膜内腔,从反应器的另一端排出,这种供气方式可以带走膜腔中存在的水蒸气和其他杂质气体,增强传质效果。

1.1.2 流通方式

根据液相是否循环可将 MABR 分为循环式 MABR 和流通式 MABR^[20]。循环式 MABR 如图 1 所示,液相在泵的作用下在反应器中循环流动,可以起

到搅拌的效果,是目前大部分实验采用的液相流通方式;流通式 MABR 中液相从一端进入反应器中,从另一端排出,这种方式会使液相与生物膜接触时间短、接触不充分、部分液体无法接触生物膜而导致出水水质不佳。

根据液相与气体的相对流通方式可分为平流式和错流式^[22]。平流式指水流方向和纤维膜中气流方向是平行的,这种方式会使液相持续冲击生物膜,导致挂膜阶段耗时较长;错流式指水流方向与气流方向成一定的夹角,错流式相较于平流式可以选择较高的液相流速而不用担心生物膜脱落。

1.2 无泡式中空纤维膜结构与生物脱氮原理

中空纤维膜结构及硝化反硝化示意图 2。

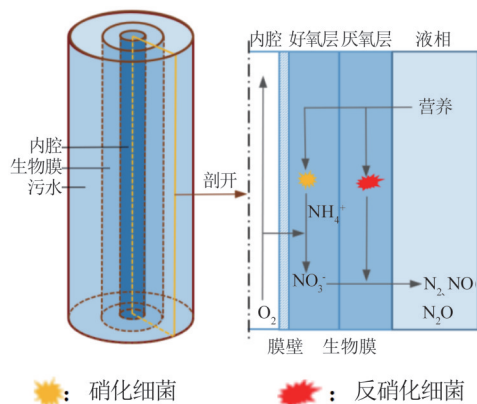


图2 中空纤维膜结构及硝化反硝化示意

Fig. 2 Structural diagram of hollow fiber membrane and schematic diagram of nitrification and denitrification

由图2可见,MABR采用逆向曝气方式,即将空气(或氧气)从纤维膜内腔直接引入,透过纤维膜壁面与其表面附着的生物膜接触,气体分子由内向外,其作用力与生物膜的黏附力方向相反,有效地克服了膜过滤中由于进水有机、无机物质及其代谢产物形成滤饼层,以及微生物黏附形成的生物膜等造成的膜污染导致透水通量下降的问题。由于中空纤维膜的孔径范围多在 $0.01\sim 0.30\ \mu\text{m}$,因而离开中空纤维膜的是低于泡点以下的气体,从而降低曝气过程中对生物膜的冲击,减少生物膜的脱落,同时在气体由内向外穿过生物膜的过程中,氧气分子被好氧微生物优先利用(因此在生物膜内部存在一定的溶解氧浓度梯度),从而使生物膜内部建立了溶解氧浓度梯度,由内至外依次形成好氧层、缺氧层以及厌氧层,即微生物选择性地聚集在一起形成中空纤维膜

表面的生物膜,使其具有脱碳除氮功能。

MABR具有高氧转移效率和高比硝化速率。该反应器可控制气泡在泡点之下,具有极高的氧转移效率^[23](理论上90%~100%,实际上在80%~90%左右)。同时具有硝化反硝化脱氮功能,在早期文献中已经论证了该工艺在氨氮负荷率为 $0.2\ \text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 的条件下,氨氮去除率在99%上下^[5]。尤其适用于低浓度氨氮废水的深度处理(强化硝化性能的MABR中总氮 $60\ \text{mg/L}$,脱氮率在70%上下)^[10]。

MABR可以通过短程硝化反硝化的方式脱氮,如陈瑜^[24]通过研究发现游离氨大于 $2\ \text{mg/L}$ 且溶解氧小于 $0.5\ \text{mg/L}$,从而出现了亚硝化现象,使高氨氮废水的脱氮率达到80%以上。罗晓静^[25]在氧循环MABR中高效富集了异养硝化-好氧反硝化菌群[以不动杆菌属(*Acinetobacter*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)为主],其出水 NH_4^+-N 和TN平均去除率分别为80.3%和76.7%。可见,MABR可以通过控制水中溶解氧浓度富集多种功能微生物,同时能够以硝化/亚硝化-反硝化甚至厌氧氨氧化的形式脱氮^[24],因此在深度脱氮方面具有较大的潜力。

2 膜材料及氧传质系数模型

2.1 膜材料

膜作为MABR的主要单元,其具有2种功能,一方面膜本身是微生物的载体;另一方面为附着在其表面的微生物提供氧气,因此它必须具有良好的微生物亲和力、耐污染性和稳定运行等特性。MABR所用膜包括微孔膜、致密膜和复合膜。

微孔膜主要由聚乙烯、聚丙烯、聚偏氟乙烯等疏水性高分子材料制成,由表2可知微孔膜具有传质阻力较小和价格便宜等特点,是目前大部分实验所使用的膜(见表1)。Hailong TIAN等^[2]采用以PVDF为材质的微孔膜的MABR处理高浓度邻氨基苯酚(OAP)废水,邻氨基苯酚去除率高达99%,COD去除率达到88.4%~90.9%。陈瑜^[24]利用聚丙烯材质微孔膜的MABR处理高氨氮废水,氨氮去除率为90%。

致密膜是由硅橡胶等具有致密结构的材料制成,因其具有对氧选择性高和操作压力高等特点,可在生物膜中构建较高的溶解氧梯度。Mei XIANG等^[27]采用硅橡胶膜的MABR处理甲醛污水,进水甲醛质量浓度为 $116.31\ \text{mg/L}$,甲醛、COD、共基质甲醛的

表1 不同膜的实验效果

Table 1 Experimental results with different membranes

膜材料	污水种类	进水流量/(mL·min ⁻¹)	COD去除率/%	氨氮去除率/%	膜内径/mm	文献	
微孔膜	PVDF	化工废水	—	88.4	90	0.16	〔2〕
	聚丙烯	高氨氮废水	—	—	90	0.32	〔24〕
致密膜	聚丙烯	药物废水	3 000	87.2	80	—	〔26〕
	硅橡胶膜	甲醛废水	0.4	81.5	—	1.00	〔27〕
	硅橡胶膜	垃圾渗滤液	—	80	90	0.30	〔11〕
复合膜	复合中空纤维膜	反渗透浓缩液	—	80	—	0.60	〔28〕
	复合中空纤维膜	生活污水	—	96	86	0.30	〔29〕

表2 膜材料参数对比

Table 2 Comparison of membrane material parameters

膜材料	传质阻力	对氧选择性	操作压力	气体通量	使用寿命(理想状态)	膜污染	成本
微孔膜	小	差	10~50 kPa	大	较短	易发生	低
致密膜	大	好	0.3~0.6 MPa	小	可长期使用	难	较高
复合膜	小	较好	—	大	可长期使用	难	很高

平均去除率分别为99.90%、81.50%、97.14%。E. SYRON等^[11]使用硅橡胶膜的MABR处理氨氮质量浓度高达500~2 500 mg/L的垃圾渗滤液,氨氮去除率为80%~99%。

复合膜一般是在微孔膜上包裹一层薄的致密膜如聚氨酯或聚二甲基硅烷(PDMS),其具有氧通量大、传质阻力小和可长期运行等优点,但制作过程复杂,成本较高,目前使用频率较低。Meichao LAN等^[28]采用高分子复合中空纤维膜MABR处理煤化工反渗透浓缩液,COD、NH₄⁺-N、TN去除率分别达到81.01%、92.31%、70.72%。张雨辰^[29]使用复合中空纤维膜MABR处理生活污水,COD、氨氮、总氮去除率分别为92.2%、90.9%、82.7%

由于微孔膜具有操作压力低、气体通量大、传质阻力小、价格低廉等特点,多用于对氧需求量相对较低的污水。致密膜具有操作压力高、对氧选择性好等特点,多适用于对氧需求高、负荷量高的污水。而复合膜结合了微孔膜和致密膜的优点,适用于大多数污水的处理,但生产成本较高,扩大化使用有赖于膜技术的突破。未来关于膜材料研究可能朝两方面发展:其一,改进膜材料性能。如采用界面聚合的方法制备的聚苯胺-聚偏氟乙烯中空纤维复合膜与聚偏氟乙烯中空纤维膜^[30]相比,微生物的挂膜更加迅速、高效;聚丙烯纤维膜经过左旋多巴的碱性溶液改进后,表面形成一层氧化膜从而提升了生物亲和性,进而提高了COD和氨氮的去除效率^[31];通过在聚偏氟乙烯膜表面涂覆凝胶^[32]制备复合膜曝气生物膜反应器,可以缩短反应器启动时间,调控生物膜厚度和生物量,使

COD去除率高达88%;其二,选择可替代的膜材料。如Qiang LIU等^[33]以煤基微孔碳管构建MABR,在溶解氧为0.8 mg/L的条件下,NH₄⁺-N、TN和COD去除率分别为87.8%、86.5%和87.6%,NH₄⁺-N的去除率随DO的升高而增大,去除率可高达99.7%。

2.2 氧传质系数模型

氧传质系数模型的建立是先通过双膜理论计算出氧传质系数,然后构建氧传质系数与压强、液相流速及液相性质的关系。构建模型的步骤如下:

(1)计算氧传质系数。基于双膜理论,氧传质系数 k 的计算见式(1):

$$\ln \frac{C^*-C_L}{C^*-C_0} = \frac{kA}{V} t \tag{1}$$

式中: C^* ——液相中饱和溶解氧的质量浓度,mg/L;
 C_0 、 C_L ——起始时刻和 t 时刻时液相中氧的质量浓度,mg/L;
 k ——氧传质系数;
 A ——中空纤维膜的总表面积,m²;
 V ——反应器内液体的体积,m³。

(2)根据相关文献^[34],当流体流过球形固体颗粒、液滴(其内部是停滞的)与颗粒、液滴之间进行传质时,其与氧传质系数的关系可定义为:

$$Sh=a \cdot Re^b \cdot Sc^c \tag{2}$$

式中, $Sh=k \cdot d_0/D$, $Re=v \cdot d_0 \cdot \rho/\mu$, $Sc=\mu/(\rho \cdot D)$ 。其中 k 为氧通过膜的传质系数; d_0 为中空纤维膜膜管外径; D 为氧在液相的扩散系数; v 为液相流速; ρ 液体密度; μ 为动量黏性系数。其中舍伍德数(Sh)用来表征对流传质与扩散传质的比值,雷诺数(Re)用

来表征流体流动情况的无量纲数,施密特数(Sc)用来描述同时有动量扩散及质量扩散的流体。

在实际操作中,将膜丝假设为无数固体颗粒的累计,联立式(1)、式(2)即可将氧传质系数与液相流速和液相性质关联起来。不同学者研究的氧传质系数与 Re 和 Sc 的关系式见表3。

表3 氧传质系数关系式

Table 3 Relationship of oxygen mass transfer coefficient

学者	年份	传质系数数学模型	文献
王荣昌等	2016	$0 < P < 2\ 000\ \text{Pa}$ 时: $Sh = 0.019P^{0.91}Re^{0.34}Sc^{0.33}$	[35]
		$2\ 000\ \text{Pa} < P < 10\ 000\ \text{Pa}$ 时: $Sh = 4.36P^{-1.17}Re^{0.34}Sc^{0.3}$	
Shufeng SHEN 等	2010	$Sh = 0.55Re^{0.72}Sc^{0.33}$ 适用于 $0.1 < Re < 250$	[36]
S. KARTO HARDJONO 等	2005	$Re < 400$ 时: $Sh = 0.1789a^{0.86}Re^{0.34}Sc^{0.33}$	[37]
		$400 < Re$ 时: $Sh = (-1.37a^2 + 1.738a^2 - 0.798a + 0.167)Re^{0.7}Sc^{0.3}$	
刘旦玉	2005	$Sh = 1.795\ 7 \cdot Re^{0.325\ 4} \cdot Sc^{0.33}$	[38]

注: a 为堆积密度(无量纲)。

由表3可知,其一般形式为: $Sh = A \cdot P^a \cdot Re^b \cdot Sc^c$,其中 A 为修正系数, a 、 b 、 c 为常量, a 主要取决于膜内压强变化,且 a 与膜内压强是负相关的。 b 主要与液相的流速有关,王荣昌等^[35]的研究表明,当 P 为0~2 kPa时,传质系数与液相流速具有线性相关关系,且相关性很强,当 P 为2~10 kPa时,传质系数的变化趋势和液相流速一致,但并不显著,且随着压强的增加, b 逐渐减小。 c 主要取决于液相的性质,对于特定的液相 c 为定值。

3 MABR 的影响因素

3.1 曝气压力

在MABR中曝气压力会影响生物膜中的溶解氧梯度。一个合适的曝气压力可以在生物膜内部构建一个适宜的溶解氧梯度,从而使微生物在生物膜内部同时完成对COD的降解、硝化反应和反硝化反应,曝气压力太低会导致水中溶解氧浓度较低,影响生物膜中微生物的代谢活动,曝气压力太高会导致生物膜脱落^[39]。E. CASEY等^[40]研究发现不同的曝气压力会影响生物膜中微生物的活性,从而影响污水的处理效果。Peng LI等^[41]研究发现曝气压力过低会导致膜污染而曝气压力过高则可能会使生物膜在载体上附着不牢而脱落。

3.2 液相流速

液相流速影响着MABR的各个阶段。在挂膜阶段,应降低液相流速,避免因流速产生的水流剪切力冲散生物膜,在运行阶段,应适当提高液相流速以提高污水和生物膜的接触量,提高对溶解氧的利用,但液相流速过高会导致生物膜生长过厚或生物膜被冲刷而影响对污水的处理效果。Xin WEI等^[42]构建一种特殊的MABR(即膜组件是将中空纤维膜缠绕在实心芯上,可使污水流向与中空纤维膜垂直),发现液相流速从0.02 m/s增加到0.05 m/s时,TN的去除率从47%提高到64%,表明液相流速是影响脱氮的关键因素之一。这可能是因为液相流速的提高增强了硝化细菌对氧的有效竞争,从而提高了硝化反应氨氧化阶段的效率,较高的液相流速也为短程硝化反硝化提供了一个理想条件^[43](亚硝酸盐浓度较高,溶解氧较低,COD浓度较高),促进了反应器短程硝化反硝化的建立,提高了TN的去除率。E. CASEY等^[40]发现生物膜实际厚度取决于液相流速。

3.3 碳氮比

碳氮比会影响异养菌与硝化细菌对溶解氧的竞争从而影响氨氧化阶段的进行。Huijun LIU等^[44]发现最佳碳氮比为5。此时,COD去除率达到85%,氨氮去除率达到96%。随着碳氮比的增加,过量的异养菌对硝化细菌的活性有很大的抑制作用,导致硝化过程较差,COD去除率降到80%,而氨氮去除率降到40%。孙浩翔等^[45]采用MABR处理养殖废水时发现当混合液的碳氮比为5:1时,MABR能较好地实现同步硝化反硝化反应,此时对 NH_4^+-N 和TN平均去除率分别为98.86%和55.21%。张燕伟等^[46]以市政污水为研究对象,应用MABR技术探讨同步硝化反硝化(SND)过程的构建及其在不同低碳氮比下运行的特点,在碳氮比为6.3~8.0时,成功实现了稳定的SND工艺,SND率达87.48%,且不存在亚硝酸盐型硝化;当碳氮比由4.4降至2.3时,平均SND率由87.34%降至84.53%;碳氮比降低对生物膜与菌群多样性影响较小,对优势属种类影响较大。

3.4 pH

在MABR中硝化反应会使液相的pH降低,而适宜硝化细菌生长的pH为7.0~7.5,适宜反硝化细菌生长的pH为6.5~7.5。吴座栋^[47]设置进水pH梯度为5、6、7、8、9,研究发现当pH=8时,COD、氨氮、总

氮的去除率达到最佳,去除率分别为90.6%、90.2%、85.0%。Changqing CAO等^[48]所作的实验表明当pH为7.5时,MABR对NO_x⁻-N和COD有较高的去除率,去除率分别为99%和93%。这是因为生物膜中的微生物大多数在偏碱性的条件下活性较高。

4 MABR国内外研究与应用现状

4.1 国内研究与应用现状

我国自20世纪90年代以来先后开展了膜生物反应器的研究,国内MABR研究现状见表4。

表4 国内研究现状

Table 4 Research on MABR in China

膜材料	污水种类	进水COD/(mg·L ⁻¹)	COD去除率/%	氨氮去除率/%	耦合工艺	文献
微孔膜	PVDF 生活污水	—	92.2	90.9	—	[29]
	中空纤维膜 化工废水	6 300	79.7	—	铁碳微电解—Fenton反应—MABR	[49]
	PP 乙二醇废水	5 000~40 000	85	83	微电解—混凝沉淀—MABR—A/O— 高级氧化—混凝沉淀—BAF	[50]
	PVDF 高浓度邻氨基苯酚废水	367~2 158	88.4~90.9	—	两级式 MABR	[2]
	疏水性中空纤维膜 合成橡胶废水	480	90.6	97.8	MABR—絮凝联合工艺	[51]
致密膜	致密中空纤维膜 市政反渗透浓水	80~90	92	98.5	—	[52]
	硅橡胶膜 甲醛废水	—	81	—	—	[17]
复合膜	增强型PVDF 地表水	—	37.5	97.4	—	[41]
	中空纤维复合膜 畜禽养殖废水	2 000	89	60	ABR—MABR	[53]

国内MABR的起步较晚,研究方向主要分为以下三个方面:

(1)在水处理对象方面的研究。在处理污水方面,MABR的处理对象逐步从生活污水扩展到化工废水、养殖废水、合成橡胶废水等。如张雨辰^[29]利用MABR处理生活污水,COD、NH₄⁺-N、总氮去除率分别为92.2%、90.9%、82.7%。张慧敏等^[49]构建MABR处理化工废水,COD去除率为94.4%。孙浩翔等^[45]采用MABR处理养殖废水,COD、NH₄⁺-N和总氮去除率分别为83.96%、37.56%和38.29%。胡亮等^[51]构建MABR处理合成橡胶废水,COD和NH₄⁺-N的去除率分别为90.6%和97.8%。

(2)在生物膜菌群方面的研究。全晓^[52]利用MABR处理市政反渗透浓水,发现Proteobacteria(变形菌门,丰度为41.5%)和Actinobacteria(放线菌门,丰度为2.54%)分别为生物膜中的优势门类和次要优势门类,而很多与硝化相关的菌群隶属于Proteobacteria,很多与反硝化相关的菌群隶属于Actinobacteria。这说明MABR生物膜中可实现较高的硝化反硝化效率。Yiwen LIU等^[54]在MABR中培养氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)时发现AOA—MABR的TN去除率通常比AOB—MABR高5%,这意味着AOA—MABR系统中的供氧可被切断5%,同时仍能达到与AOB—MABR系统相同的TN去除率,可使整个废水处理装置每年节省大量的运行费用(即2%~3%)。Huijun LIU

等^[44]通过对不同COD/N下生物膜的研究分析表明,COD/N为0时亚硝基单胞菌、亚硝基螺菌和硝基螺菌在生物膜中形成了重要的硝化菌群,而COD/N在5时,亚硝基螺菌和硝基螺菌成为硝化作用的主要菌种。

(3)在工艺组合方面的研究。MABR可采用多级MABR系统即由2个或2个以上MABR反应器构建污水处理装置。如Hailong TIAN等^[2]采用两级式MABR处理高浓度邻氨基苯酚(OAP)废水,一级MABR用于去除OAP,二级MABR用于深度处理废水中的氮污染物。结果表明邻氨基苯酚的去除率为99%,COD去除率达到88.4%~90.9%,总氮的去除率为90.5%。Meichao LAN等^[28]采用三级MABR系统处理煤化工反渗透浓缩液(ROC),在实验中将MABR串联并控制各个MABR中DO的浓度以控制生物膜的优势菌群。在一级MABR中DO约为0.5 mg/L,主要为了培养厌氧细菌,厌氧细菌可以降解大分子有机物以提高ROC的生物降解性,同时利用反硝化反应去除部分NO₂⁻-N和NO₃⁻-N。在二级MABR中DO维持在2~4 mg/L,有利于好氧菌的生长,主要作用是降低废水中的NH₄⁺-N和COD。在三级MABR中将DO维持在1~2 mg/L,进一步去除残余的碳和氮污染物。最终COD、氨氮、总氮的去除率分别为81%、92%、71%。MABR也可与其他工艺耦合以提高对污水的处理效果。如陈晴等^[53]构建ABR—MABR(厌氧折流板反应器—膜曝气生物膜反应器)装置处理畜禽

养殖废水,耦合反应器对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别可达 89%、60%。赵丽等^[55]利用 AMBR-MABR(厌氧迁移式污泥床反应器-无泡中空纤维膜生物反应器)装置处理畜禽养殖废水,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和总氮去除率分别为 83.96%、37.56% 和 38.29%。

国内 MABR 发展较晚,工程应用案例较少,2019

年在浙江省某地农村建设了以 MABR 为主要工艺的污水处理厂^[56],主要处理农村生活污水。生活污水处理量在 20~35 m³/d,水量变化系数大,出水 COD 稳定在 40 mg/L 以下,氨氮质量浓度稳定在 10 mg/L 以下。

4.2 国外研究与应用现状

国外 MABR 研究见表 5。

表 5 国外部分 MABR 研究现状

Table 5 Partial research on MABR in overseas

膜材料	污水种类	COD 去除率/%	氨氮去除率/%	备注	文献
微孔膜	中空纤维膜	—	—	四环素去除率最高 63%	[1]
	中空纤维膜	—	70~80	—	[57]
	聚乙烯	—	83	TOC 去除率 96%	[58]
致密膜	PDMS	—	70	—	[10]
	PDMS	20~50	80~99	纯氧供气	[11]
复合膜	PDMS 和无孔膜组成	>90.2	68.6	以聚乙烯醇凝胶珠为生物载体	[59]

国外研究方向与国内相似,但也不是完全相同,具体可分为以下三个方面:

(1)在水处理对象方面的研究。在国外,MABR 被用来处理多种类型的污水,如 B. TASKAN 等^[1]利用 MABR 处理含高浓度四环素的药物废水,四环素去除率最高可达 63%。E. SYRON 等^[11]用 MABR 处理垃圾渗滤液,COD 去除率为 20%~50%,氨氮去除率为 80%~99%。N. H. S. M. PREMARATHNA 等^[59]利用 MABR 处理生活污水,TN 的最大去除效率为 68.63%,COD 去除率始终在 90.2% 以上。

(2)在生物膜菌群方面的研究。M. AYBAR 等^[60]研究了 MABR 生物膜中微生物的捕食行为,发现当原生动物在生物膜之内时,在生物膜的底部有很大的连续空隙,这可能会影响氧传质效果,同时原生动物的捕食行为也会影响生物膜中的菌种结构。A. CELIK 等^[61]利用 MABR 为抗生素降解菌提供适宜的环境,生物膜群落由细菌环境样品、b-蛋白细菌、CFB 群细菌、g-蛋白细菌、d-蛋白细菌和 a-蛋白细菌组成,研究表明 MABR 对土霉素最高去除率为 46%。

(3)在高效脱氮方面的研究。A. V. ACEVEDO 等^[62]研究发现在 30 ℃,生物膜厚度为 0.5 mm 时,MABR 表现出对氮的较高的去除率,当温度降低时,必须增加生物膜厚度才能达到相同的效果。同时研究发现纵向氧浓度梯度对高效脱氮的影响要大于污染物浓度梯度。M. R. AUGUSTO 等^[63]采用厌氧氨氧化和部分硝化进行脱氮,构建 2 个 MABR,MABR-1 氮负荷率为 50 g/(m³·d),MABR-2 氮负荷率为 100

g/(m³·d),在 MABR 建立 80 d 后系统趋于稳定。MABR-1 平均 TN 去除率为 (78±6)%,最大去除率为 84%。MABR-2 平均 TN 去除率为 (61±5)%,最大去除率为 69%。研究表明较高的溶解氧水平可能导致 MABR-2 微生物群落的不平衡,从而导致反应器性能的下降。这些反映了 MABR 中能够快速进行部分硝化脱氮。M. CASTRILLO 等^[10]研究发现当 MABR 膜结构更为紧凑时,其脱氮能力高于传统结构的 MABR。这种差异在低流速(1 m/h)时不是很显著,当流速大于 10 m/h 这种差异将变得十分显著。

MABR 技术在国外发展较为迅速,如以色列 Emefcy 公司于 2016 年在以色列 HaYogev 建立第一个市政规模的商用 MABR 污水处理厂。该污水处理厂通过 MABR 处理一部分高浓度氨氮废水,使出水氮污染物实现达标排放。此外,Emefcy 公司目前在美国圣托马斯岛、米克利大学医院、埃塞俄比亚等地也建有 MABR 污水处理厂。

由此可见,国内多注重 MABR 对污水的深度处理和工艺组合的研究,国外侧重于 MABR 脱氮效能及生物膜菌种的理论研究。国内外 MABR 虽有少量工程应用但规模并不大,有待于进一步拓展。

5 结语

MABR 因具有传质效率高、无泡曝气、动力消耗小、硝化反硝化一体化等优点,逐渐受到水污染治理领域的关注。现阶段科研人员主要在运行机制、工艺优化与技术应用等环节对 MABR 开展了大量研

究,从整体上看相关研究与应用多处于实验室阶段,而且尚未形成系统的理论体系。欲推进 MABR 工程化应用,还需进一步探清溶解氧浓度、污染物浓度以及液相流速等参数对 MABR 效能的影响;寻找价格低廉、性能优越的新型膜材料或改进现有膜材料以及探究膜污染和污染物降解机理,进而推动未来 MABR 在废水深度脱氮处理领域的快速发展。

参考文献

- [1] TASKAN B, CASEY E, HASAR H. Simultaneous oxidation of ammonium and tetracycline in a membrane aerated biofilm reactor[J]. *Sci. Total Environ.*, 2019, 682: 553-560.
- [2] TIAN Hailong, HU Yanzhuo, XU Xingjian, et al. Enhanced wastewater treatment with high *o*-aminophenol concentration by two-stage MABR and its biodegradation mechanism[J]. *Bioresour. Technol.*, 2019, 289: 121649.
- [3] YEH S J, JENKINS C R. Pure oxygen fixed film reactor[J]. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1978, 104(4): 611-623.
- [4] ROY T, BLANCH H W, Wilke C R. Microbial hollow fiber bioreactors, trends of biotechnology[J]. *Trends in Biotechnology*, 1983, 1(5): 135-139.
- [5] BRINDLE K, STEPHENSON T. Nitrification in a bubbleless oxygen mass transfer membrane bioreactor[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(9): 261-267.
- [6] CASEY E, GLENNON B, HAMER G. Review of membrane aerated biofilm reactors[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1999, 27(1/2): 203-215.
- [7] TERADA A, YAMAMOTO T, IGARASHI R, et al. Feasibility of a membrane-aerated biofilm reactor to achieve controllable nitrification[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 28(2): 123-130.
- [8] POTVIN C M, LONG Z, ZHOU H. Removal of tetrabromobisphenol A by conventional activated sludge, submerged membrane and membrane aerated biofilm reactors[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(10): 1183-1188.
- [9] PEREZ-CALLEJA P, AYBAR M, PICIOREANU C, et al. Periodic venting of MABR lumen allows high removal rates and high gas-transfer efficiencies[J]. *Water Res.*, 2017, 121: 349-360.
- [10] CASTRILLO M, DIEZ-MONTERO R, ESTEBAN-GARCIA A L, et al. Mass transfer enhancement and improved nitrification in MABR through specific membrane configuration[J]. *Water Res.*, 2019, 152: 1-11.
- [11] SYRON E, SEMMENS M J, CASEY E. Performance analysis of a pilot-scale membrane aerated biofilm reactor for the treatment of landfill leachate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 120-129.
- [12] 岑运华. 膜生物反应器在污水处理中的应用[J]. *水处理技术*, 1991(5): 39-44.
- [13] PEETERS J, ADAMS N, LONG Z, et al. Demonstration of innovative MABR low-energy nutrient removal technology at Chicago MWRD[J]. *Water Practice and Technology*, 2017, 12(4): 927-936.
- [14] BRINDLE K, STEPHENSON T. Nitrification in a bubbleless oxygen mass transfer membrane bioreactor[J]. *Water Practice and Technology*, 1996, 9(261/262/263/264/265/266/267): 927-936.
- [15] 李鹏. 新型 MABR 的研究及其在污水处理中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [16] LI Peng. Study of novel MABR and its application in wastewater treatment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [17] 胡绍伟, 徐小连, 杨春雨, 等. 厌氧折流板反应器与膜曝气生物膜反应器耦合作用的试验研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 697-702.
- [18] HU Shaowei, XU Xiaolian, YANG Chunyu, et al. Coupling anaerobic baffled reactor and membrane-aerated biofilm reactor[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 697-702.
- [19] XIANG Mei, GUO Zhongwei, LIU Juan, et al. Treatment of formaldehyde wastewater by a membrane-aerated biofilm reactor (MABR): The degradation of formaldehyde in the presence of the co-substrate methanol[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 673-683.
- [20] 李保安. MABR 应用于采油废水处理[C]//第二届膜法城镇新水源技术研讨会论文集, 北京: 第二届膜法城镇新水源技术研讨会, 2015: 41-44.
- [21] LI Baoan. Application of MABR in oil production wastewater treatment[C]//Proceedings of the second symposium on new water source technology in cities and towns by membrane method, Beijing: The Second Symposium on New Water Source Technology in Cities and Towns by Membrane Method, 2015: 41-44.
- [22] HU Shaowei, YANG Fenglin, LIU Sitong, et al. Simultaneous nitrification and denitrification of membrane-aerated biofilm reactor[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(2): 416-420.
- [23] 郑斐. 无泡曝气膜生物反应器的初步研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [24] ZHENG Fei. Preliminary study on membrane aeration biofilm reactor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [25] COTE P. Bubble-free aeration using membranes: Mass transfer analysis[J]. *Journal of Membrane Science*, 1989, 47(1): 91-96.
- [26] 王碧玮. 膜曝气生物反应器处理生活污水的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [27] WANG Biwei. Study on the treatment of domestic sewage by membrane aeration biofilm reactor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.
- [28] AHMED T, SEMMENS M J, VOSS M A. Oxygen transfer characteristics of hollow-fiber, composite membranes[J]. *Advances in Environmental Research*, 8(3/4): 637-646.
- [29] 陈瑜. 基于 MABRs 亚硝化过程的高氨氮废水处理研究[D]. 哈

- 尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- CHEN Yu. Nitrogen removal via nitrite in mabrs for high ammonia wastewater treatment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [25] 罗晓静. 具有异养硝化-好氧反硝化功能的 MABR 反应器构建及性能研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2020.
- LUO Xiaojing. Construction and performance study of MABR with heterotrophic nitrification-aerobic denitrification function[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
- [26] WEI Xin, LI Baoan, ZHAO Song, et al. Mixed pharmaceutical wastewater treatment by integrated membrane-aerated biofilm reactor(MABR) system—A pilot-scale study[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 189–195.
- [27] MEI Xiang, GUO Zhongwei, LIU Juan, et al. Treatment of formaldehyde wastewater by a membrane-aerated biofilm reactor(MABR): The degradation of formaldehyde in the presence of the co-substrate methanol[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 673–683.
- [28] LAN Meichao, LI Mei, LIU Jun, et al. Coal chemical reverse osmosis concentrate treatment by membrane-aerated biofilm reactor system[J]. *Bioresource Technol.*, 2018, 270: 120–128.
- [29] 张雨辰. 曝气膜生物反应器处理生活污水及强化除磷试验研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2019.
- ZHANG Yuchen. Experimental study on treatment of domestic sewage by membrane aeration bioreactor and enhanced phosphorus removal[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2019.
- [30] HOU Feifei, LI Baoan, Xing Minghao, et al. Surface modification of PVDF hollow fiber membrane and its application in membrane aerated biofilm reactor (MABR) [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 140: 1–9.
- [31] 王琴, 胡亮, 侯飞飞, 等. 左旋多巴改性 MABR 中空纤维膜[J]. *化学工业与工程*, 2015, 32(6): 52–57.
- WANG Qin, HU Liang, HOU Feifei, et al. Surface modification of polypropylene hollow fiber membrane with L-DOPA for MABR[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2015, 32(6): 52–57.
- [32] 王洪亭. 新型凝胶负载膜曝气生物膜的制备及其脱氮性能研究[D]. 天津:天津科技大学, 2019.
- WANG Hongting. A novel composite membrane aerated biofilm and its nitrogen removal performance research[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.
- [33] LIU Qiang, YANG Fenglin, ZHANG Xingwen, et al. Treatment of high concentration ammonical sewage by carbon tube membrane aeration biological reactor (MABR) [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 33(1): 63–66.
- [34] 王绍亭, 陈涛. 动量、热量与质量传递[M]. 天津:天津科学技术出版社, 1986: 328–373.
- WANG Shaoting, CHEN Tao. Momentum heat and mass transfer[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1986: 328–373.
- [35] 王荣昌, 王小燕, 肖帆. 膜内气压和液相流速对无泡膜曝气氧传质性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(23): 68–71.
- WANG Rongchang, WANG Xiaoyan, XIAO Fan. Effects of intra-membrane air pressure and liquid velocity on oxygen transfer performance in bubbleless membrane aeration reactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(23): 68–71.
- [36] SHEN Shufeng, KENTISH S, STEVENS G. Shell-side mass-transfer performance in hollow-fiber membrane contactors[J]. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2010, 28(6): 817–844.
- [37] KARTOHARDJONO S, CHEN V. Mass transfer and fluid hydrodynamics in sealed end hydrophobic hollow fiber membrane gas-liquid contactors [J]. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 2005, 2: 1–12.
- [38] 刘旦玉. 无泡曝气膜生物反应器的曝气和硝化研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- LIU Danyu. Bubble free aeration & nitrification of membrane aerated biofilm reactor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [39] 董文艺, 甘光华, 王宏杰, 等. DO 对膜曝气生物反应器同步除碳脱氮的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(2): 50–55.
- DONG Wenyi, GAN Guanghua, WANG Hongjie, et al. Effect of DO on simultaneous removal of carbon and nitrogen by a membrane aerated bioreactor[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(2): 50–55.
- [40] CASEY E, GLENNON B, HAMER G. Biofilm development in a membrane-aerated biofilm reactor: Effect of flow velocity on performance[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, 67(4): 476–486.
- [41] LI Peng, LI Mei, ZHANG Yunge, et al. The treatment of surface water with enhanced membrane-aerated biofilm reactor(MABR)[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 144: 267–274.
- [42] WEI Xin, LI Baoan, ZHAO Song, et al. COD and nitrogen removal in facilitated transfer membrane-aerated biofilm reactor(FT-MABR)[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 389: 257–264.
- [43] DOWNING L S, NERENBERG R. Effect of oxygen gradients on the activity and microbial community structure of a nitrifying, membrane-aerated biofilm[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 101(6): 1193–1204.
- [44] LIU Huijun, YANG Fenglin, SHI Shuyi, et al. Effect of substrate COD/N ratio on performance and microbial community structure of a membrane aerated biofilm reactor[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(4): 540–546.
- [45] 孙浩翔, 刘德钊, 蓝丽华, 等. 探究 C:N 对 MABR 处理水产养殖废水水质影响[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(2): 163–169.
- SUN Haoxiang, LIU Dezha, LAN Lihua, et al. Investigation of the effect of C:N on the water quality of aquaculture wastewater treated by MABR[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(2): 163–169.
- [46] 张燕伟, 程方, 李奕辉, 等. 低碳氮比下 MABR 同步硝化反硝化过程的构建[J]. *工业水处理*, 2020, 40(5): 70–76.
- ZHANG Yanwei, CHENG Fang, LI Yihui, et al. Construction of simultaneous nitrification and denitrification process in membrane-

- aerated biofilm reactor under low C/N ratio[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(5): 70-76.
- [47] 吴座栋. MABR处理微污染景观水体性能优化及其膜污染研究[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
- WU Zuodong. Study on performance optimization and membrane pollution of micro polluted landscape water treated by MABR[D]. Tianjing: Tianjin Polytechnic University, 2019.
- [48] CAO Changqing, ZHAO Liang, XU Dezhi, et al. Membrane-aerated biofilm reactor behaviors for the treatment of high-strength ammonium industrial wastewater[J]. Chemical Engineering & Technology, 2009, 32(4): 613-621.
- [49] 张慧敏, 李鹏, 孙临泉, 等. 膜曝气膜生物反应器耦合系统处理化工废水[J]. 化学工业与工程, 2017, 34(3): 58-64.
- ZHANG Huimin, LI Peng, SUN Linquan, et al. Treatment of chemical wastewater by coupled membrane-aerated biofilm reactor (MABR) system[J]. Chemical Industry and Engineering, 2017, 34(3): 58-64.
- [50] 伊学农, 付彩霞, 暴鹏. 物化/生化/高级氧化工艺对乙二醇废水的强化处理[J]. 中国给水排水, 2017, 33(3): 69-72.
- YI Xuenong, FU Caixia, BAO Peng. Performance of physicochemical/biochemical/advanced oxidation process for enhanced treatment of glycol wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 69-72.
- [51] 胡亮, 赵德喜, 侯飞飞, 等. MABR-絮凝联合工艺处理合成橡胶废水的探索[J]. 工业水处理, 2015, 35(4): 60-64.
- HU Liang, ZHAO Dexi, HOU Feifei, et al. Investigation of the treatment of synthetic rubber wastewater by the combined process, MABR-flocculation[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(4): 60-64.
- [52] 全晓. 基于MABR的市政反渗透浓水脱氮及微生物群落研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- QUAN Xiao. MABR-based study on nitrogen removal performance and microbial community for municipal RO concentrate[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [53] 陈晴, 王毅力, 赵丽, 等. ABR-MABR耦合工艺处理畜禽养殖废水的同步启动[J]. 环境科学研究, 2017, 30(2): 298-305.
- CHEN Qing, WANG Yili, ZHAO Li, et al. Synchronous Start-up of anaerobic baffled reactor-membrane biofilm bioreactor (ABR-MABR) coupling process treating synthetic livestock and poultry wastewater[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(2): 298-305.
- [54] LIU Yiwen, NGO H H, GUO Wenshan, et al. Autotrophic nitrogen removal in membrane-aerated biofilms: Archaeal ammonia oxidation versus bacterial ammonia oxidation[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 302: 535-544.
- [55] 赵丽, 王毅力. AMBR-MABR耦合工艺处理模拟畜禽养殖废水的启动和运行[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5799-5809.
- ZHAO Li, WANG Yili. Start-up and operation of anaerobic migrating blanket reactor-membrane biofilm bioreactor (AMBR-MABR) coupling process treating synthetic livestock wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 5799-5809.
- [56] 陈文华, 潘超群, 厉雄峰, 等. MABR技术在农村生活污水处理上的应用[J]. 水处理技术, 2019, 45(5): 126-128.
- CHEN Wenhua, PAN Chaoqun, LI Xiongfeng, et al. The application research on rural domestic wastewater by MABR[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(5): 126-128.
- [57] AHMADIMOTLAGH A, LAPARA T, SEMMENS M. Ammonium removal in advective-flow membrane-aerated biofilm reactors (AF-MABRs) [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 319 (1/2): 76-81.
- [58] TERADA A, HIBIYA K, NAGIA J, et al. Nitrogen removal characteristics and biofilm analysis of a membrane-aerated biofilm reactor applicable to high-strength nitrogenous wastewater treatment [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, 95(2): 170-178.
- [59] PREMARATHNA N H S M, VISVANATHAN C. Enhancement of organic matter and total nitrogen removal in a membrane aerated biofilm reactor using PVA-Gel bio-carriers[J]. Bioresource Technology Reports, 2019, 8: 100325.
- [60] AYBAR M, PEREZ-CALLEJA P, LI M, et al. Predation creates unique void layer in membrane-aerated biofilms[J]. Water Res., 2019, 149: 232-242.
- [61] CELIK A, CASEY E, HASAR H. Degradation of oxytetracycline under autotrophic nitrifying conditions in a membrane aerated biofilm reactor and community fingerprinting[J]. J. Hazard. Mater., 2018, 356: 26-33.
- [62] ACEVEDO A V, LACKNER S. Membrane aerated biofilm reactors—How longitudinal gradients influence nitrogen removal—A conceptual study[J]. Water Res., 2019, 166: 115060.
- [63] AUGUSTO M R, CAMILOTI P R, SOUZA T S O. Fast start-up of the single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) from conventional activated sludge in a membrane-aerated biofilm reactor[J]. Bioresour. Technol., 2018, 266: 151-157.
- [作者简介] 任志鹏(1998—), 本科。电话: 18734064640, E-mail: r18734064640@163.com。通讯作者: 陈小光, 博士, 副教授, E-mail: cxg@dhu.edu.cn。
- [收稿日期] 2021-11-05(修改稿)