

陶冉, 贾学斌, 马玉新, 等. 厌氧膜生物反应器处理有机废水研究进展[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 130-140.

TAO Ran, JIA Xuebin, MA Yuxin, et al. Research progress of organic wastewater treatment with anaerobic membrane bioreactor[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 130-140.

厌氧膜生物反应器处理有机废水研究进展

陶冉¹, 贾学斌^{2,3}, 马玉新², 何国鹏⁴

(1. 黑龙江大学 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 黑龙江省村镇饮水安全工程技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080; 4. 华汇工程设计集团股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 高浓度及工业企业难降解有机废水直接排放水体会严重危害环境安全和人类健康。结合膜生物反应器的使用, 出现了将厌氧工艺和膜分离工艺结合在一起的新型废水处理技术——厌氧膜生物反应器(AnMBR), 具有高效处理高浓度及工业有机废水能力。针对 AnMBR 高效处理有机废水相关问题, 研究了影响反应器降解有机物效率的因素和反应器能量回收与利用的情况, 并对膜污染问题进行了讨论, 展望了 AnMBR 绿色生物处理技术的发展前景。结果表明, 在生物降解过程中的胞外多聚物及一些可溶性微生物产物抵抗了对微生物的抑制作用, 通过对膜材料的改性、调节混合液的性质以及采用动力学调控的方法可减缓膜污染。AnMBR 可以有效地处理有机废水, 但仍然面临着技术上和经济上的巨大挑战。将 AnMBR 与其他工艺结合处理一般生物处理法难以处理的人工合成的化学物质可产生可以回收利用的能量, 提高 AnMBR 商业化的可行性; 这为以后 AnMBR 的广泛应用提供了新思路。

关键词: 有机废水; 厌氧膜生物反应器; 厌氧工艺; 膜污染; 能量回收; 影响因素; 水环境保护; 水污染治理

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)10-0130-11



Research progress of organic wastewater treatment with anaerobic membrane bioreactor

TAO Ran¹, JIA Xuebin^{2,3}, MA Yuxin², HE Guopeng⁴

(1. School of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 2. School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 3. Heilongjiang Rural Drinking Water Safety Engineering Technology Research Center, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 4. Huahui Engineering Design Group Co., Ltd., Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: The direct discharge of high-concentration and refractory organic wastewater from industrial enterprises will seriously endanger environmental safety and human health. Combined with the use of membrane bioreactors, a new type of wastewater treatment technology that combines anaerobic and membrane separation processes has emerged—Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR), which has the ability to efficiently treat high-concentration and industrial organic wastewater. Targeting at the problems related to the efficient treatment of the organic wastewater with AnMBR, the factors affecting the organic degradation efficiency of

收稿日期: 2020-06-10

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019E074)

作者简介: 陶冉(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事污废水处理及其资源化方向研究。E-mail: 942530525@qq.com

通信作者: 贾学斌(1971—), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事污废水处理及其资源化方向研究。E-mail: jxb511@163.com

the bioreactor as well as the energy recovery and utilization of the bioreactor are studied herein, while the problem of membrane fouling is discussed and the developing trend of the AnMBR green biological treatment technology is prospected as well. The study result shows that the extracellular polymeric substances (EPS) and some soluble microbial products resist the microbial inhibition during the biodegradation process, and then the membrane fouling can be alleviated through modifying the membrane materials, adjusting the properties of the mixed solution and adopting dynamic regulation method. AnMBR can effectively treat the organic wastewater, but it is still faced with great technical and economic challenges. Combining AnMBR with the other relevant technologies for treating the artificial synthetic chemicals those are difficult to be treated with the conventional biological treatment methods can produce the energy that can be recycled and enhance the feasibility of the commercialization of AnMBR, which provides a new idea for the wide application of AnMBR in the days to come.

Keywords: organic wastewater; anaerobic membrane bioreactor (AnMBR); anaerobic process; membrane fouling; energy recovery; influencing factors; water environment protection; water pollution control

0 引言

高浓度及工业企业有机废水具有种类繁多、化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)值高、色度重、成分复杂、难降解、酸碱性等特点^[1]。排入水体之后,可造成水中溶解氧减少,影响鱼类和其他水生生物的生长,破坏水环境生态,危害环境和人类安全。这类废水通常采用传统生物法进行处理时,很难达到排放标准和环境水体要求^[2],因此,选择合适的方法处理有机废水,使其水质达到规定的排放标准是十分有必要的^[3]。高浓度及工业企业有机废水来源包括养殖、屠宰、肉类加工及焦化厂废水、造纸厂废水、制药厂废水、印染厂废水^[4]。有机废水的分类如表1所列。

厌氧生物处理技术在处理高浓度及上述工业企业有机废水时,比单纯利用好氧生物处理技术相比更具有抵抗冲击负荷、剩余污泥产量少、节约运行成本、降低能源消耗、回收可利用沼气能源等优势^[7]。

膜生物反应器(Membrane Bioreactor, MBR)是将污水生物处理工艺和膜组件相结合的一种污水处理工艺,它同时具有两种生物处理工艺和膜处理工艺的特点。MBR占地面积小、出水水质质量高,是处理有机废水的新型工艺^[8-12]。MBR最早是由GRETHLEIN等^[13]将一个外置式膜组件引入到城镇污水处理系统处理城镇生活污水有机废水,厌氧膜生物反应器

(Anaerobic Membrane Bioreactor, AnMBR)是一种将厌氧发酵工艺与膜分离工艺相结合的污水处理工艺,是由Shelf最早进行研究的^[14]。此后,由于膜工艺理论与技术以及膜材料技术的限制,MBR理论及技术的研究推广在一定时期内相对处于停滞状态。

进入到20世纪90年代后期,随着膜材料技术飞跃发展,以及AnMBR工艺和理论技术取得了长足的进步,加之AnMBR工艺不需要曝气,且产生剩余污泥较少,且能够产生甲烷,具有好氧MBR不具有的优点,以及AnMBR可以处理好氧MBR难处理难降解的有机废水,膜组件使用寿命相比好氧MBR更长一些,很多专家学者有重新把目光重新关注到AnMBR的研究推广上。KANAI M^[15]等在研究处理食品垃圾废水过程中,AnMBR的体积可以减小为传统的厌氧发酵槽体积的1/5~1/3,并且可以产生生物能支持可持续发展。LIN等^[16]在关于AnMBR的应用、膜污染问题及未来展望中指出,AnMBR在高浓度有机废水的处理方面应用前景非常好,但是大规模推广还需要有很多问题需要讨论研究。

由于膜污染问题阻碍了AnMBR大规模推广应用。研究学者对膜污染的相关问题进行了大量研究,通过对膜组件改性、调整反应器组合方式、调整反应器运行参数、与其他工艺结合等来控制或缓解膜污染,AnMBR工艺又可以大力研究和推广使用了^[17-18]。

表1 有机废水的分类^[5-6]

类 型	主要来源及特点	处理方法
易降解型	一般来自以农牧产品为原料的工业废水和禽畜粪便废水等,如啤酒废水、水产加工废水、肉类加工废水。主要组分是碳水化合物、脂肪和蛋白质等	采用好氧法或者厌氧法,优先采用厌氧法(高效低能、且可回收大量生物能)
难降解型	主要来自化学、石油化工、炼焦工业等,如制药、燃料废水;主要组分是难降解的高分子有机物	采用厌氧法来提高有机物的可生化性,单独采用好氧法得不到满意效果
有毒有害型	主要来自化工工业和发酵工业,如味精废水、糖蜜废水等;废水中含有某些有害物质	首先预处理去除有害物质,仍可采用厌氧法

表2 国内外采用 AnMBR 处理有机废水处理现状

废水类型	废水名称	处理水量 /L	混合液污泥悬浮浓度 /g · L ⁻¹	有机负荷 /kgCOD · m ⁻³ · d ⁻¹	容积负荷 /kgCOD · m ⁻³ · d ⁻¹	水力停留时间 /h	温度 /°C	进水 COD /mg · L ⁻¹	出水 COD /mg · L ⁻¹	最大 COD 去除率/%	文献编号	
国内	易降解型	啤酒废水	3 000	-	-	2	2~3	31~38.8	2 000	-	90	[19]
		城镇生活污水	-	9.90	-	-	18~8	30±2	1 500	28.83	93.38	[20]
		养猪废水	-	5.9~30.7	-	5.68	3.3~1.7	33±2	-	296.3~629.6	94.7	[21]
	难降解型	餐厨垃圾废水	-	1 000~1 050	0.01~0.02	-	48~12	35±2	10 000	-	90	[22]
		制药厂废水	2~20	10	-	25	3	34~37	13 510	26	99.4	[23]
	有毒有害型	含苯并噻唑废水	-	4.85	-	-	24~12	35~15	3 000	210±18	93.6±0.6	[24]
含甘油高盐废水		0.02	-	1.5~0.75	-	120	-	7 500	250	95	[25]	
国外	易降解型	麦芽废水	-	24.6~18.8	1.33±0.11~2.78±0.2	-	62.4~86.4	23±1	-	400±35	93	[26]
	难降解型	纺织废水	-	-	-	-	36~55.2	-	1 000±110	70	92.13	[27]
		含环丙沙星废水	-	-	-	-	12~6	35	500	14~24	95	[28]
	有毒有害型	N-N 二甲基酰胺废水	-	-	3~4	-	24~6	35	2 000	-	100	[29]

1 AnMBR 性能

1.1 有机废水的处理

近些年,国内外学者分别对易降解有机废水、难降解有机废水和有毒有害型有机废水的处理分别进行了研究。国内外采用 AnMBR 处理 3 种不同类型的有机废水处理如表 2 所列(参考文献[19~29])。

AnMBR 具备污泥浓度高、泥龄长、耐冲击负荷能力强等优点,在处理高浓度废水、低能耗运行方面具有好氧 MBR 无法替代的优势,已经在高浓度和复杂有机废水处理方面展现出很好的应用前景。AnMBR 中的膜组件有三种组合形式,即外部错流式、内部浸没式、外部浸没式^[30],如图 1 所示。

1.2 影响 AnMBR 反应器去除有机物效率的因素

1.2.1 温度

温度是影响 AnMBR 去除有机物效能的重要因素。AnMBR 可以在高温(50~60 °C)或中温(30~40 °C)条件下运行^[31]。如果 AnMBR 在低温条件下运行,生物量增长放缓并且需要更长的固体停留时间(Solid Retention Time, SRT)来稳定系统^[32]。AnMBR 启动可以在适宜条件下相对较快地实现^[33]。大多研

究者都更倾向于研究具有普适性的中温条件下的 AnMBR 反应器运行。王浩宇等^[34]在利用一体式 AnMBR 处理生活污水试验中发现,AnMBR 在 35 °C 条件下的 COD 平均去除率是 90%,在 25 °C 条件下的 COD 的平均去除率为 77.1%。李玥^[24]处理模拟苯并噻唑废水时,观察到 35 °C、25 °C 和 15 °C 条件下,出水 COD 的去除率分别为 89.9±1.1%、88.6±1.5% 和 69.3±2.9 mg/L,认为出现这种现象的原因是:厌氧污泥中的微生物对温度感知比较敏感,温度降低导致酶活性降低,影响了基质的扩散速率,导致反应器对 COD 的去除率明显降低;当将温度从 35 °C 调整至 25 °C 时,COD 去除率也比较稳定这是因为厌氧污泥自身具有一定的抵抗温度的能力。FERRARI 等^[35]通过研究中温条件下的微生物群落结构和活性如果 AnMBR 中的温度由低温状态一旦恢复到 23 °C 和 35 °C 会增加中温菌群的活性,中温菌群在整个反应过程中占主导地位。JAEHO 等^[36]在保持其他条件不变的情况下,将 AnMBR 分别在 25 °C 和 15 °C 下运行,COD 去除率分别为 95% 和 85%,这说明了温度降低对 AnMBR 的去除效率有较大的影响。曾庆鹏等^[37]分别在温度为(14~27 °C)和(30~32 °C)下的试验研究,发

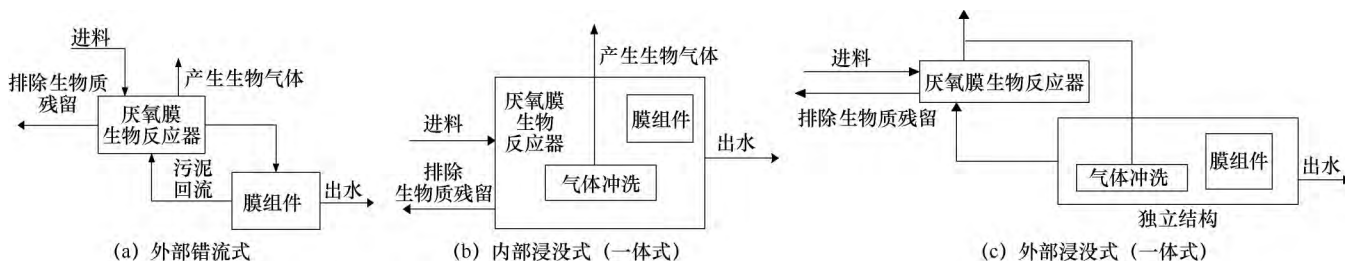


图1 膜组件有三种组合形式

现由于温度升高可以增强厌氧微生物的活性, COD 去除率从 75% 增加到 88.4%。

对比上述数据, 可以明显的看到, 温度是影响 AnMBR 运行的重要因素, 因此, 温度降低导致酶活性降低, 导致反应器对 COD 的去除率明显降低, 在 23 °C ~ 35 °C 条件下, 中温菌群在整个反应过程中占主导地位。因此, 在合适的温度范围内, 适当提高温度, 可以提高 AnMBR 反应器内的微生物活性, 提高反应速率。

1.2.2 水力停留时间

水力停留时间 (Hydraulic Retention Time, HRT) 是指污水与 MBR 内厌氧微生物作用的平均反应时间。HRT 的长短对 AnMBR 的处理效率是有一定的影响。BERKESSA 等^[38]在厌氧条件下, 使用 AnMBR 反应器去除 MLSS 浓度为 22.00 g/L 的、MLVSS 浓度为 13.00 g/L 的合成的高浓度有机废水 [葡萄糖 (30.96 g), 乙酸钠 (19.23 g), 氯化铵 (4.30 g), 磷酸氢二钾 (1.60 g), 酵母提取物 (1.00 g)], 其试验结果表明, HRT 为 47 d, 反应器稳定运行时 COD 去除率 > 98%, 两个反应器的平均渗透通量分别达到 58.70 L/(m²·h) 和 54.00 L/(m²·h), 这是由于 HRT 增加, 生物膜上的异养细菌氯氟沙星被还原, 从而导致膜通量增加, 说明长 HRT 对增加膜通量是有利的。朱凯^[39]处理高浓度啤酒人工合成废水 (第一阶段 COD 含量为 1000 mg/L, 第二阶段 COD 含量为 1500~4000 mg/L), 观察到当 HRT 时间高于 18 h 时改变 HRT 对 AnMBR 的影响不大, COD 的去除率增幅不大且相对稳定; 当 HRT 小于 18 h 时候, AnMBR 对 COD 的去除率大幅减小, 这是由于 HRT 若小于响应面的中心点, 反应器有可能会出挥发性脂肪酸 (Volatility Fat Acid, VFA) 的累积进而不断影响 AnMBR 内的菌群活性降低导致反应器处理效率下降。WANDERA 等^[40]使用浸没式平板厌氧膜生物反应器处理生活污水时, 观察了 HRT 与跨膜压差 (Transmembrane Pressure, TMP) 剖面图, 从图中发现当 HRT 从 20 d 到 10 d 时, TMP 从 -5.80 ~ -3.91 L/(m²·h), 斜率相对水平, 此时可以看出膜污染最小。EVANS 等^[41]处理筛选后的生活污水, COD 有机负荷为 1.3~1.4 kg_{COD}·m⁻³·d⁻¹ 观察到粒状活性碳 (Granular Activated Carbon, GAC) 流态化 AnMBR 的 HRT 比气体喷射 AnMBR 短 65%, AnMBR 中悬浮固体和胶体有机物的浓度更高。BURMAN 等^[42]根据以往对饲料废水的研究发现在整个试验期间, 反应器的总 HRT 保持在 2 d 不变。除取样目的外, 在整个操作期间未抽出

污泥样品。由于该 HRT 对 COD 的去除率较高 (89%~90%), 可以将 HRT 优化为 2 d。

基于 AnMBR 运行泥水分离的运行特点, 也有学者对长时间保持 SRT 运行及跨膜压差的状态进行了研究。污泥停留时间 (Sludge Retention Time, SRT) 指曝气池微生物细胞的平均停留时间, 表示为悬浮固体物质从反应器前后被排出的时间间隔, 又称为污泥龄^[22]。SRT 对维持微生物功能群的平衡, 维持群落活性, 提高固体废物向液相释放有机物的效率起着重要作用^[43]。GIMÉNEZ 等^[44]利用 AnMBR 处理生活污水, HRT 变化范围为 6~20 h, SRT 为 70 d, 稳定运行期间 COD 的平均去除率为 87%, 出水 COD 平均浓度为 77 mg/L。王浩宇等^[34]使用一体式 AnMBR 处理生活污水则观察到当 HRT 在 0.25~3 d 之间, 当 HRT 大于 1 d 时, AnMBR 内的微生物菌群大部分已经发挥了最高的处理能力, 增大 HRT 不会大幅度提高 AnMBR 对 COD 的去除率反而会增大能源消耗, 保持 AnMBR 的 SRT 在 300 d, 整个运行期间 AnMBR 并未出现酸现象。ADEM 等^[45]将 AnMBR 和 AeMBR 在 SRT 为无限、60 d、30 d 的条件下研究了 AnMBR 处理纺织废水的性能的影响, AnMBR 的 HRT 控制在 2.1±0.13 d, AeMBR 的 HRT 控制在 1.55~1.0 d, 发现由于生物质浓度的降低, SRT 降低使短时间内平均 COD 去除率从 86% 下降至 65%。

因此, 从上述数据, 可知长的 HRT 和 SRT 对 AnMBR 反应器的整体是有利的, 而且甚至在 HRT 超过最适 HRT 一定程度时, AnMBR 反应器依旧正常运行只是能耗增加, 并且少有出现产酸现象, SRT 的长短也影响 AnMBR 反应器的处理效率, 增加 SRT 的运行时间会使得 AnMBR 系统稳定。长的 HRT 的虽能提高去除率, 但却降低了反应器的运行效能, 因此解决增加 SRT 同时减少 HRT 的矛盾问题也是 AnMBR 亟待解决的操控问题。

1.2.3 有机负荷率

有机负荷率 (Organic Load Rate, OLR) 是指单位体积滤料 (或池子) 单位时间内所能去除的有机物质, 它是生物滤池 (或曝气池) 设计和运行的重要参数^[46], OLR 对 AnMBR 中的微生物生长代谢和维持反应器正常运行十分重要。SVOJITKA 等^[47]研究用 AnMBR 处理制药废水和化学工业废水, 经过试验验证认为, OLR 为 2.5 kg_{COD}/(m³·d) 时, COD 去除率约为 90%。XIAO 等^[48]利用中试规模的 AnMBR, 在 OLR 为 4.7 kg_{COD}/(m³·d) 的强度条件下处理厨房废水泥浆试验, 结果表明在 140 d 稳定运行且无污泥排放的

情况下, COD 的去除效率可以达到 78%。曹琦等^[22]研究表明, 使用 AnMBR 处理餐厨垃圾废水, OLR 为 $15.00 \text{ kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 各物质的去除率、产气量和系统稳定性都保持较高水平, COD 去除率达 98%。当将 OLR 升高至 $20.00 \text{ kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 膜表面球形杆菌属占 40.23%, 古菌属含量为 4.42%, 膜表面微生物丰度发生变化, OLR 升高影响了膜表面的微生物丰度从而加剧膜污染。TOMOHIRO 等^[49]研究了正常运行了 120 d 的 AnMBR, 突然将 OLR 从 $2.3 \text{ kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增加到 $11.6 \text{ kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时的微生物群落动态变化情况, 研究表明, OLR 突然大幅度提高, VFA 积累突增, 产酸菌群占优势, 使得产甲烷菌落被破坏。ARVIND 等^[50]观察到, 当 OLR 从 $1.36 \text{ kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增加到 $3.18 \text{ kg}_{\text{COD}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 出水 COD 去除率由 $94.1\% \pm 2.5\%$ 降至 $90.2\% \pm 1.4\%$, OLR 过高处理效果会变差。

通过分析表明, AnMBR 可以处理各种 OLR 浓度的有机废水, OLR 升高容易导致反应器内 VFA 积累, 甲烷菌无法及时利用造成累积影响 AnMBR 正常运行, OLR 升高也影响了膜表面的微生物丰度加剧了膜污染, 导致反应器处理效果变差, 因此, 选取合适的 OLR 对 AnMBR 的运行是十分重要的。

1.3 能量回收与成本

AnMBR 与 MBR 相比, 剩余污泥产量少, 不需要向反应器中鼓入氧气并将可生物降解的有机物转化为气态能量载体 CH_4 得以回收^[51-52], JEISON 等^[53]通过运行价值 50 万欧元/套及 4.6 万欧元/套的净水处理设备试验表明, 目前的能量回收相对于膜材料及运行成本来说不值得一提, 但却是趋势和好的开始。KIM 等^[54]研究了 AnMBR 的产能问题, 使用 AnMBR 反应器处理高浓度(进水总 COD 为 513 mg/L) 易降解有机废水, 推断出为维持反应器流态所需的总能量大约占产生 CH_4 的 30%, 数值为 $0.058 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$, 也即仅使用所产生的 30% 的甲烷就可以覆盖该能量, 其中 AnMBR 消耗 $0.028 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 。PRETEL 等^[55]使用 AnMBR 处理城市污水的研究发现其能源需求为 $0.07 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$, 远低于 MBR [$0.3 \sim 0.55 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$] 和传统活性污泥系统 [$0.19 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$], 因此, 就能量消耗而言, AnMBR 工艺比其他当代废水处理技术更具能源效率。MALEKI 等^[56]以 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的流量估算了一个在中温条件下处理麦芽废水的 AnMBR 反应器的资本成本和运营成本分别为 360 万美元/a 和 420 209 美元/a。在低温过程中, 将产生的沼气在 90% 的高效冷凝炉中燃烧, 每天可产

生 63 383 MJ 的能量。所产生的能量可用于 AnMBR 装置所需的能量。以每立方米甲烷 0.5 美元的价格出售所生产的沼气^[57], 每年可获得 323 846 美元的收入, 这可以抵消很大一部分运营成本。

AnMBR 技术有可能以灵活的方式与其他处理技术相结合, 利用其工业企业中间副产物生产产品或回收能量, 如 PAN 等^[58]使用乙醇和醋酸为原料(乙醇/醋酸=3) AnMBR 反应器长期生产乙酸, 生产可以利用的能源。PEYMAN 等^[59]利用细菌厌氧膜生物反应器(PAnMBR)与紫外技术结合, 即在紫外低照度下处理城市污水的光反应, 通过试验发现, 比红外和普通照明结合的技术能源成本最高可以降低高达 97%。SERGI 等^[60]将 AnMBR 与正渗透(FO)、反渗透(RO)相结合处理城市污水并通过敏感性分析表明, 当在闭环方案中将 FO 回收率限制为 50% 时, 实现的最低废水处理成本估计为 0.81 €/m^3 。低 FO 膜通量被确定为限制因素, 达到 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的 FO 通量将显著提高 FO-RO-AnMBR 系统在污水处理中的竞争力。AnMBR 技术也可以通过改变内部结构或工艺来减少能源消耗, 如张淳之等^[61]研究发现, AnMBR 内构件的改造设计与内部流态特性的变化之间有很深且重要的联系, 通过改造反应器内的构件设计来选择合适的流态特性, 可以降低运行成本, 提高反应器去除效率, 进而提高出水水质。因此, 尽管膜成本随着科技的发展在慢慢减低, 但它们仍然是限制膜生物反应器应用的关键问题之一。

因此, AnMBR 净水能耗虽高于其他, 但在回收甲烷技术, 反应器水力器结构完善、膜技术的进步, 与其他工艺相结合处理废水一定会大有发展。

2 膜污染问题

膜污染是由于颗粒物、胶体、可溶性有机物、无机物、微生物细胞等沉积在膜的表面、孔隙和孔隙内壁, 使得膜孔径变小或者堵塞, 从而造成膜通量降低和透膜压差升高的现象^[62]。膜污染是 MBR 的主要缺点之一, 它阻碍了系统的稳定运行, 影响了膜通量, 增加了膜组件的成本。膜污染的独特特征表明, 厌氧消化过程中产生的无机污染物和微生物膜表面的沉积量比好氧 MBR 膜表面低^[63-64], 但由于 AnMBR 通常在较低的膜渗透通量下运行^[65], 且 AnMBR 的具有低污泥可过滤性的特点, 这也加剧了膜污染^[66]。

2.1 影响膜污染的因素

膜污染一般是由于进样基质中的各种成分之间以及这些成分和膜表面之间的复杂物理、化学和生物相

相互作用引起的^[67]。膜污染机制主要有^[68-69]:(1) 污染物和胶体在膜表面和膜内部的吸附;(2) 污泥絮体沉积在膜表面;(3) 膜表面泥饼层的形成;(4) 形成凝胶层;(4) 在系统长时间的运行过程中, 污染物组成的变化。已有研究发现滤饼的形成是控制适用膜渗透通量^[70]和临界通量^[33]的主要因素。膜污染会导致膜组件堵塞, 膜的截留作用减小, 使得膜寿命降低及运行成本增加等。AnMBR 膜污染通常包括生物污染、有机污染和无机污染(氮、磷等无机营养物质)^[71]。影响其膜污染的因素有直接因素和间接因素, 直接因素包括胞外多聚物(EPS)、粒径分布(PSD)、可溶性微生物产物(SMP)污染等; 间接因素是废水特性及运行因素带来的膜污染, 主要包括 HRT、SRT、搅拌速度、OLR、温度和 pH 值等^[72]。相关研究表明, 高剪切应力能够降低微生物活性和生物絮凝作用, 同时还可以增加混合液中 SMP 的释放量, 使膜污染程度减弱^[73, 74]。PEYMAN 等^[59]处理城市污水时发现, 运行过程中 AnMBR 反应器中的污染物及中间过程产物很容易附着在膜表面, 导致膜通量和分离效率显著降低, 同时也发现, 横流操作能够减少膜上的颗粒沉积, 每当横流速度增加时, 膜的性能都会得到改善^[75]。BÉRUBÉ 等^[76]研究发现, 膜通量主要受 TMP 值和膜松弛持续时间的影响, 剪切力在膜污染中起着非常重要的作用。王顺^[77]研究 AnMBR 反应器处理含酚废水时也发现, 错流流速增大, 大颗粒造成膜污染程度大大减小^[78-81]。

膜组件是 AnMBR 的核心组成, 膜材料、孔隙率、亲水性等都会影响系统的整体性能^[82]。膜组件可以按照膜材质的不同, 分为无机膜和有机膜。有机膜组件和无机膜对比如表 3 所列。

KANG 等^[80]研究了不同膜材料对膜污染的影响并对其污染特征进行了比较, 结果发现, 有机膜和无机膜存在完全不同的污染特征。ZHANG 等^[83]研究发

现 EPS 与三种膜之间亲和能力顺序为: PAN<PVDF<PES, 即 PAN 膜具有更强的抗污能力。GAO 等^[81]分别用聚偏氟乙烯膜(PVDF)和聚醚酰亚胺膜处理超滤区的废水, 结果发现, 后者比前者污染速度得更快^[66]; 纳米材料用于膜表面改性技术引起广泛关注, 比如将 TiO₂ 纳米颗粒加入以 PVDF 为基膜的膜表面, 该膜对蛋白质有较好的抗污染性^[84], 这证明了膜材料在结垢中的重要性。

以上资料表明, 膜污染是影响 AnMBR 运行效率及降低运行成本的重要因素, 膜材料及高剪切力的操作运行对于膜污染的减缓与提高运行周期及效率是重要的因素, 因此膜材料的技术发展及 AnMBR 机理及操控技术进步是 AnMBR 是推广和使用的最重要的技术支持。

2.2 胞外多聚物和可溶性微生物产物

在 AnMBR 反应器中, 活性污泥与污水混合液特性决定了膜过滤的性能和出水水质, 而表征活性污泥与污水混合液特性的两个重要因素有胞外多聚物(EPS)和可溶性微生物产物(SMP)^[82]。EPS 是指通过不同的化学和物理方法提取的与细胞表面结合的有机高分子^[85], 起到维持活性污泥的形态和形状^[86-87], 起到保护微生物的作用^[88]。SMP 是指由于细胞溶解、EPS 水解以及微生物与周围环境相互作用而释放到原来混合液中的微生物产物^[89], 大多研究者认为, EPS 和 SMP 的变化与膜污染的加剧或缓解程度密切相关, 并且随着 EPS 和 SMP 浓度的增加, 膜组件的过滤阻力也随之增加^[90], EPS 的组成、微生物的活性都会受到剪应力的影响, 可能会影响 SMP 的后续释放^[85, 91-92]。

EPS, SMP 主要由多糖和蛋白质组成^[77], 对膜污染影响可以通过比较其中的多糖和蛋白质质量分数的变化情况从而分析出微生物对有机物质的耐受性。李硕等^[93]研究发现, EPS 在废水处理的过程中起

表 3 有机膜组件和无机膜对比

	常用膜材料	优点	缺点	应用实例	参考文献
无机膜	陶瓷膜	热稳定性和化学性好、孔径分布窄、耐污染性好、易于清洗。	制备成本昂贵且膜孔径只可做到微滤(MF)和超滤(UF)。	王顺等处理苯酚废水且所使用的平板膜孔径为 0.2 μm, 总有效膜面积为 0.07 m ² 。	[77]
有机膜	聚偏氟乙烯膜(PVDF)、聚砜膜(PSF)、聚氯乙烯(PVC)	能耗低、耐酸碱和腐蚀性好、化学性质稳定、成本较低。	膜容易变形、处理效果和膜通量不稳定、出水水质不稳定。	许美兰等处理养猪废水, 其所使用的聚醚砜平板膜为 10 张, 总有效膜面积为 0.12 m ² 。	[21]
				曹琦等使用反应器处理餐厨垃圾废水, 其膜组件为中空纤维膜, 孔径为 0.02 μm, 总有效膜面积为 4.2 m ² 。	[22]
				李玥等使用的中空纤维膜(聚乙烯)处理含苯并噻唑废水, 总有效膜面积为 0.21 m ² , 膜孔径为 0.4 μm。	[24]

着重要的作用, EPS 中多糖、蛋白质等物质的因质量分数不同而影响 EPS 的带电性和亲水性, 导致颗粒污泥的带电性和亲水性的不同。柳锋等^[94]将生物接触氧化法 (Biological Contact Oxidation Reactor, BCOR) 与 MBR 结合, 利用三维荧光光谱对上清液的 SMP 的微生物特性进行研究, 分析组合工艺膜污染的变化原因, 为合理控制膜污染提供新思路。贾学斌等^[95]在对厌氧微生物降解苯酚过程中胞外蛋白 (Protein, PN) 及多糖 (Polysaccharide, PS) 变化研究中发现, 胞外多聚物 (EPS) 和可溶性微生物产物 (SMP) 是微生物降解有机物过程中产生的耐受性应激反应, 微生物为提高对苯酚毒性的耐受性, 分泌大量的 EPS 和 PN 来抵抗苯酚毒性, 当苯酚浓度为 100 mg/L 时, PN 值增加 2 倍多。

由以上分析和研究表明, 胞外多聚物 (EPS) 和可溶性微生物产物 (SMP) 是微生物降解有机物过程中产生的耐受性应激反应, 由此对膜过滤性能造成不利及污染加剧, 这是 AnMBR 运行效能的两面性, 因此, 解决控制 EPS 和 SMP 浓度与膜过滤性能矛盾, 也是决定 AnMBR 能否快速推广使用的重要一方面。

2.3 膜污染的减缓措施

通常情况下, 膜污染分为可去除污染、不可去除污染和不可逆污染。可去除污染是由松散附着的污泥絮凝物在膜表面上形成滤饼层造成的, 它可以通过物理清洗方法 (如反冲洗) 去除; 不可去除污染是由于膜孔堵塞和过滤期间膜表面强烈附着的污泥引起的, 归因于膜孔堵塞, 它可以通过化学清洗方法 (如酸性清洗) 去除^[96]。而不可逆污染则是永久性污染^[97], 现有技术方法都无法将其彻底消除。TOMOHIRO 等^[98]采用高通量测序的方法研究了 AnMBR 膜组件的微生物组分, 试验发现, 由原核生物和真核生物组成的附着生物膜, 膜最下层的污垢呈网状, 由丝状的微生物或有机物组成, 膜上层的污垢通过沉积形成了滤饼层, 主要是非细胞区域, 分析表明, 膜材料上的微生物与污泥中的微生物不尽相同, 膜材料上的微生物上的微生物形成不利于减缓膜污染。LIAO 等^[99]在反应器运行过程中, 利用 AnMBR 短期阶段性的操作, 可以有效减少膜污染, 分析表明, 反应器阶段性的短期运行, 膜表面污垢并未成型, 可以有效减少膜污染。

有些学者更倾向于改变膜材料表面性能或在反应器投加吸附及絮凝材料从而提高膜材料的特性, 减轻膜污染的研究。KOCHKODAN 等^[100]在膜表面利用 UV/氧化还原引发的接枝聚合和用亲水性聚合物层对

膜进行物理涂覆改性的方法, 通过调整膜粗糙度、膜亲水性和膜电荷等参数, 可以很好地减少膜的微生物污染。PENG 等^[101]利用热诱导相分离 (TIPS) 技术对 β 相聚偏二氯乙烯 (PVDF) 平板膜进行浇铸, 然后进行高压极化处理, 使 PVDF 膜具有压电特性, 并在 AnMBR 处理废水同时施加电场时, 压电 β -PVDF 膜可有效地减轻膜污染。ZHEN 等^[102]利用在 AnMBR 反应器中投加聚氯化铝 (Poly Aluminum Chloride, PAC) 处理合成污水 (COD 为 500 ± 50 mg/L, 氨氮为 40 ± 5 mg/L, 总磷为 5.0 ± 0.5 mg/L, 没有添加悬浮固体) 时, 发现即便是在长期运行 (超过 140 d) 后, 仍能有效控制膜污染, 且在 HRT 为 8 h 时, 膜污染的速率从 3.12 kPa/d 降低至 0.89 kPa/d。ZHANG 等^[103]利用在 MBR 反应器中添加 PAC, 试验得到 PAC 最佳补充比率为 1.67% 时, 可以有效的膜污染缓解和增强的优势细菌结构。考虑 PAC 是推进 An-MBR 应用的一种有前途的方法。降低膜污染的效果。同样, YANG 等^[104]研究也发现, 投加 PAC 进行吸附可以减少 25% 的膜清洗和膜组件更换费用。

也有学者通过生物群体猝灭 (Quorum-quenching, QQ) 和超声波等技术方法, 来研究膜污染的机理, 以期获得较好的减缓膜污染的效果。XU 等^[105]研究了 AnMBR 生物群体猝灭对膜污染机制和生物产能的影响, 研究表明, QQ 能改变 EPS 浓度和减缓滤饼层 (Cake layer, CL) 的形成, 且对 COD 去除和甲烷回收没有造成任何影响。在王珂等^[106]研究 AnMBR 厌氧消化反应过程时, 也发现膜组件上主要污染物质来自于滤饼层, 并使用原位在线超声波控制技术来控制 and 减缓滤饼层的污染, 借助高能超声波脉冲, 将膜材料与其污染物分离, 较好地减缓了膜污染程度。

由贴近膜材料的丝状微生物和有机物组成网状结构及其之上的沉淀污垢形成的滤饼层, 是膜污染及通过性阻力的主要因素, 可通过膜材料热诱导相分离及高压极化处理改性、反应器投加聚氯化铝和粉末活性炭、生物群体猝灭及高能超声波脉冲等方式, 可以有效改善膜过滤性和膜污染现象, 提高膜的使用寿命及水处理的成本降低。

3 结 论

(1) AnMBR 是一种将厌氧发酵工艺与膜分离工艺相结合的污水处理新型工艺, 具备污泥浓度高、泥龄长、耐冲击负荷能力强等优点, 随着膜工艺理论与技术以及膜材料技术的进步, 在高浓度废水和复杂有机废水的处理、低能耗运行方面一定展现出很好的应

用前景,必将成为一种有前途的绿色生物处理技术。

(2) 温度、HRT 及 OLR 等是影响 AnMBR 反应器去除效率及减轻膜污染的重要操控因素。合适温度范围下适当提高温度,可以提高微生物活性,提高反应速率。适当长的 HRT 和 SRT 对 AnMBR 反应器的去除效率提高是有利的,且少有出现产酸现象,但长的 HRT 对于去除效能不利; OLR 升高容易导致反应器内 VFA 积累,也影响了膜表面的微生物丰度,加剧了膜污染。因此,解决减小 HRT 与运行效能之间的矛盾,以及提高反应器高 OLR 下的膜污染问题,对于 AnMBR 反应器推广使用和运行是较为重要的研究内容。

(3) 目前的 AnMBR 反应器的能量回收相对于膜材料及运行成本虽不值得一提,但在解决膜材料性能、AnMBR 反应器内部结构水利条件及与紫外技术、渗透技术及其他工艺等结合后一定会大有发展的。

(4) 膜污染是影响 AnMBR 运行效率及降低运行成本的重要因素。贴近膜材料的丝状微生物和有机物组成网状结构及其之上的沉淀污垢形成的滤饼层,是膜污染及通过性阻力的主要原因;胞外多聚物(EPS)和可溶性微生物产物(SMP)有利于加强微生物在降解有毒有害的物质,但也能对膜过滤性能造成不利及污染加剧。因此,解决控制 EPS 和 SMP 浓度与膜过滤性能矛盾,是决定 AnMBR 能否快速推广使用的重要的一方面。

(5) 利用 UV/氧化还原引发的接枝聚合、用亲水性聚合物层对膜进行物理涂覆改性、热诱导相分离(TIPS)技术对 β 相聚偏二氟乙烯(PVDF)平板膜进行浇铸及高压极化处理等方法改变膜材料表面性能及高剪切力的阶段性短期操作运行或投加聚氯化铝和粉末活性炭、群体猝灭及高能超声波脉冲等方式,可以有效改善膜过滤性和膜污染现象,提高膜的使用寿命及水处理的成本降低,这是决定能否使 AnMBR 反应器快速推广使用的技术关键。

4 展 望

AnMBR 是一种处理有机废水有前途的绿色生物工艺,具有产生可在生能源的巨大潜力。AnMBR 工艺的推广和使用具有很大的发展前景。

(1) 在膜材料技术及 AnMBR 反应器生物降解机理研究有了长足进步之后,水处理建设成本及运行成本一定会大大降低。

(2) 在解决了温度、HRT 及 OLR 等操控因素的最佳技术参数之后,AnMBR 反应器一定会在运行效

能和能量回收方面有长足进步。

参考文献:

- [1] 赵月龙,祁佩时,杨云龙.高浓度难降解有机废水处理技术综述[J].四川环境,2006,25(4):103-108.
- [2] MANNINA G, COSENZA A, DI T D, et al. Membrane bioreactors for treatment of saline wastewater contaminated by hydrocarbons(diesel fuel): An experimental pilot plant case study[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 291: 269-278.
- [3] 王洪艳.高浓度有机废水处理的技术进展[J].广东化工,2011,38(4):168-169.
- [4] 芦娟,杨宁.难降解有机废水处理技术研究进展[J].化工设计通讯,2020,46(6):232-233.
- [5] 任南琪.高浓度有机工业废水处理技术[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [6] 万松,李永峰,殷天名.废水厌氧生物处理工程[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.
- [7] 刘丰源,辛嘉英.膜生物反应器在污水处理中的应用研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2018,34(4):412-417.
- [8] STOHWALD N, ROSS W R. Application of the ADUF(R) process to brewery effluent on a laboratory scale[J]. Water Science & Technology, 1992, 25(10):95-105.
- [9] SADDODU A, HASSAIRI I, SAYADI S. Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey [J]. Biore-source Technology, 2007, 98(11):2102-2108.
- [10] HE Y, XU P, LI C, et al. High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor [J]. Water Research, 2005, 39(17):4110-4118.
- [11] HARADA H, MOMONI K, YAMAZAKI S, et al. Application of anaerobic-UF membrane reactor for treatment of a wastewater containing high strength particulate organics [J]. Water Science & Technology, 1994, 30(12):307-319.
- [12] AMAL Z, SAMI M, FATHI A, et al. Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of leachates from Jebel Chakir discharge in Tunisia [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177: 918-923.
- [13] GRETHLEIN H E. Anaerobic digestion and membrane separation of domestic wastewater [J]. Water Pollution Control Federation, 1978, 50(4):754-763.
- [14] 王建国,钱兴福,李维新.废水厌氧处理研究前沿和趋势探讨[J].环境保护科学,2009(1):32-35.
- [15] KANAI M, FERRE V, WAKAHARA S, et al. A novel combination of methane fermentation and MBR-Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor process [J]. Desalination, 2010, 250(3):964-967.
- [16] LIN H, PENG W, ZHANG M, et al. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives [J]. Desalination, 2013, 314(4):169-188.
- [17] SHIN C, BAE J. Current status of the pilot-scale anaerobic membrane bioreactor treatments of domestic wastewaters: A critical review [J]. Biore-source Technology, 2018, 247: 1038-1046.
- [18] LEI Z, YANG S M, LI Y Y, et al. Application of anaerobic membrane bioreactors to municipal wastewater treatment at ambient tem-

- perature: a review of achievements, challenges, and perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 756–768.
- [19] 陈凤明, 王 威. 内置式厌氧膜生物反应器用于处理啤酒废水的研究 [J]. *环境科学导刊*, 2019, 38(4): 55–58.
- [20] 刘莉莉. 分置式厌氧陶瓷膜生物反应器处理生活污水研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [21] 许美兰, 李元高, 叶 茜, 等. 厌氧旋转膜生物反应器处理畜禽养殖废水 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(23): 99–103.
- [22] 曹 琦. 外置式厌氧膜生物反应器处理餐厨垃圾废水研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [23] 黄贞岚, 付嘉琦, 麦兆环, 等. 厌氧膜反应器处理制药厂废水实验 [J]. *江西科学*, 2019, 37(4): 497–500.
- [24] 李 玥. 厌氧颗粒污泥膜生物反应器处理含苯并噻唑模拟废水研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [25] 李腾飞, 颜丙花, 谭 明, 等. 电渗析-厌氧膜生物反应器处理含甘油高盐废水 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(8): 93–99.
- [26] MALEKI E, BOKHARY A, LEUNG K, et al. Long-term performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor treating malting wastewater at room temperature ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019, 7(4): 103–269.
- [27] ADEM Y, ERKAN S, ÖZER Ç. Performance and foulant characteristics of an anaerobic membrane bioreactor treating real textile wastewater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 33: 101088.
- [28] DO M T, STUCKEY D C. Fate and removal of Ciprofloxacin in an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121683.
- [29] LI L, KONG Z, XUE Y, WANG T, et al. A comparative long-term operation using up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the upgrading of anaerobic treatment of N,N-dimethylformamide-containing wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134370.
- [30] 袁 博, 李 靖, 郭 强. 厌氧膜生物反应器在废水处理中的研究及发展方向 [J]. *工业水处理*, 2015, 35(10): 1–6.
- [31] WIJEKOON K C, MCDONALD J A, KHAN S J, et al. Development of a predictive framework to assess the removal of trace organic chemicals by anaerobic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technol*, 2015, 189: 391–398.
- [32] 丁 一. AnMBR+FOMBR 组合系统处理城市污水膜污染特性及机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [33] 胡 蝶, 陈文清, 张 奎, 等. 垃圾渗滤液处理工艺实例分析 [J]. *水处理技术*, 2011, 37(3): 132–135.
- [34] 王浩宇. 一体式厌氧膜生物反应器在污水处理中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [35] FERRARI F, BALCAZAR J L, RODRIGUEZ-RODA I, et al. Anaerobic membrane bioreactor for biogas production from concentrated sewage produced during sewer mining [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 993–1000.
- [36] HO J, SUNG S. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(7): 2191–2196.
- [37] 曾庆鹏. 基于厌氧膜生物反应器的城市生活污水处理工艺探究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [38] BERKESSA Y W, YAN B, LI T, et al. Novel anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) design for wastewater treatment at long HRT and high solid concentration [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 281–289.
- [39] 朱 凯. 完全混合式厌氧生物膜反应器的构建及处理效能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [40] WANDERA S M, QIAO W, JIANG M, et al. Enhanced methanization of sewage sludge using an anaerobic membrane bioreactor integrated with hyperthermophilic biological hydrolysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 846–855.
- [41] EVANS P J, PARAMESWARAN P, LIM K, et al. A comparative pilot-scale evaluation of gas-sparged and granular activated carbon-fluidized anaerobic membrane bioreactors for domestic wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 299: 120949.
- [42] GUPTA T, AGARWAL A K, AGARWAL R A, et al. *Energy, Environment, and Sustainability* [M]. Singapore: Springer Nature, 2018.
- [43] JO D V, WILLY V. Perspectives for microbial community composition in anaerobic digestion: from abundance and activity to connectivity [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(9): 2797–2809.
- [44] GIMENEZ J B, ROBLES A, CARRETERO L, et al. Experimental study of the anaerobic urban wastewater treatment in a submerged hollow-fibre membrane bioreactor at pilot scale [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19): 8799–8806.
- [45] ADEM Y, BESTE C, ERKAN S. Impact of SRT on the efficiency and microbial community of sequential anaerobic and aerobic membrane bioreactors for the treatment of textile industry wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 314: 378–387.
- [46] 王梦一, 刘 爽, 李文哲. 有机负荷对 UASB 产氢反应器中颗粒污泥的影响研究 [J]. *农机化研究*, 2020, 42(11): 229–234.
- [47] SVOJITKA J, DVORAK L, STUDER M, et al. Performance of an anaerobic membrane bioreactor for pharmaceutical wastewater treatment, *Bioresour Technol*, 2017, 229: 180–189.
- [48] XIAO X, HUANG Z, RUAN W, et al. Evaluation and characterization during the anaerobic digestion of high-strength kitchen waste slurry via a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 193: 234–242.
- [49] TOMOHIRO I, TAO S, TOMO A, et al. Microbial community in an anaerobic membrane bioreactor and its performance in treating organic solid waste under controlled and deteriorated conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 269: 110786.
- [50] ARVIND D K, PATRICK E, PRATHAP P. Long-term microbial community dynamics in a pilot-scale gas sparged anaerobic membrane bioreactor treating municipal wastewater under seasonal variations [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 310: 123425.
- [51] MCCARTY P L, BAE J, KIM J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer—can this be achieved [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(17): 7100–7106.
- [52] SMITH A L, STADLER L B, LOVE N G, et al. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 149–159.

- [53] JEISON D, LIER J B V. Thermophilic treatment of acidified and partially acidified wastewater using an anaerobic submerged MBR: Factors affecting long-term operational flux [J]. *Water Research*, 2007, 41(17): 3868-3879
- [54] KIM J, KIM K, YE H, et al. Anaerobic Fluidized Bed Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(2): 576-581.
- [55] PRETEL R A, ROBLES M V, RUANO A, et al. Ferrer. The operating cost of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 126: 30-38.
- [56] MALEKI E, CATALAN L J J, LIAO B Q. Effect of organic loading rate on the performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR) for malting wastewater treatment and biogas production [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2018, 93(6): 1636-1647.
- [57] LIN H J, CHEN J R, WANG F Y, et al. Feasibility evaluation of submerged anaerobic membrane bioreactor for municipal secondary wastewater treatment [J]. *Desalination*, 2011, 280(1): 120-126.
- [58] Pan X R, Huang L, Fu X Z, et al. Long-term, selective production of caproate in an anaerobic membrane bioreactor. [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122865.
- [59] PEYMAN D, GHOLAMREZA B, GEORGE N, et al. Municipal wastewater treatment by purple phototropic bacteria at low infrared irradiances using a photo-anaerobic membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2020, 173: 115535.
- [60] SERGI V, SERGI A, JOAN M, et al. Techno-economic analysis of combining forward osmosis-reverse osmosis and anaerobic membrane bioreactor technologies for municipal wastewater treatment and water production [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122395.
- [61] 张淳之, 陆永生. 内构件优化推动厌氧生物反应器的发展 [J]. *工业水处理*, 2020, 40(4): 24-27.
- [62] 韩永萍, 肖燕, 宋蕾, 等. MBR膜污染的形成及其影响因素研究进展 [J]. *膜科学与技术*, 2013, 33(1): 102-110.
- [63] MENG F, YANG F. Fouling mechanisms of deflocculated sludge, normal sludge, and bulking sludge in membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 305(1-2): 48-56.
- [64] SUN Y J, YONG W, XIA H. Relationship between sludge settleability and membrane fouling in a membrane bioreactor [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2007, 1(2): 221-225.
- [65] BAEK S H, PAGILLA K R. Aerobic and Anaerobic Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment [J]. *Water Environment Research*, 2006, 78(2): 133-140.
- [66] SPAGNI A, CASU S, CRISPINO N A, et al. Filterability in a submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2010, 250(2): 787-792.
- [67] GUO W S, NGO H, LI J X. A mini-review on membrane fouling [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 27-34.
- [68] MENG F G, CHAE S R, DREWS A, et al. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material [J]. *Water Research*, 2009, 43(6): 1489-1512.
- [69] JOHIR M A H, GEORGE J, VIGNESWARAN S, et al. Effect of imposed flux on fouling behavior in high rate membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 42-19.
- [70] JEISON D, LIER J B V. Cake formation and consolidation: Main factors governing the applicable flux in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) treating acidified wastewaters [J]. *Separation & Purification Technology*, 2007, 56(1): 71-78.
- [71] 夏天, 高心怡, 徐向阳, 等. 填料投加强化 AnMBR 性能研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(2): 392-399.
- [72] 赵冰心, 黄万抚, 李睿涵. 膜生物反应器中膜污染控制的研究进展 [J]. *应用化工*, 2018, 47(12): 218-222, 228.
- [73] LIN H J, XIE K, MAHENDRAN B, et al. Sludge properties and their effects on membrane fouling in submerged anaerobic membrane bioreactors (SAnMBRs) [J]. *Water Research*, 2009, 43(15): 3827-3837.
- [74] JEISON D, TELKAMP P, LIER J B V. Thermophilic sidestream anaerobic membrane bioreactors: The shear rate dilemma [J]. *Water Environment Research*, 2009, 81(11): 2372-2380.
- [75] OZGUN H, DERELI R K, ERSAHIN M E, et al. A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 118: 89-104.
- [76] BERUBE P R, Hall E R, Sutton P M. Parameters governing permeate flux in an anaerobic membrane bioreactor treating low-strength municipal wastewaters: A literature review [J]. *Water Environment Research*, 2006, 78(8): 887-896.
- [77] 王顺. 厌氧陶瓷膜生物反应器处理含酚废水效能及作用机制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [78] KADIYA C, BELEN R, CABIROL N, et al. Analysis of microbial communities developed on the fouling layers of a membrane-coupled anaerobic bioreactor applied to wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7): 4618-4627.
- [79] BILAD M R, MARBELIA L, LAINE C, et al. A PVC-silica mixed-matrix membrane (MMM) as novel type of membrane bioreactor (MBR) membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 493: 19-27.
- [80] KANG I J, YOON S H, LEE C H. Comparison of the filtration characteristics of organic and inorganic membranes in a membrane-coupled anaerobic bioreactor [J]. *Water Research*, 2002, 36(7): 1803-1813.
- [81] GAO D W, ZHANG T, TANG C Y Y, et al. Membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor: Differences in relative abundance of bacterial species in the membrane foulant layer and in suspension [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 364(1/2): 331-338.
- [82] 黄兴. MBR中EPS、SMP和生物多样性的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [83] ZHANG G, JI S, GAO X, et al. Adsorptive fouling of extracellular polymeric substances with polymeric ultrafiltration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 309(1): 28-35.
- [84] LI J H, XU Y Y, ZHU L P, et al. Fabrication and characterization of a novel TiO₂ nanoparticle self-assembly membrane with improved fouling resistance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 326: 659-

666.

- [85] DU X, WANG Y, LESLIE G, et al. Shear stress in a pressure-driven membrane system and its impact on membrane fouling from a hydrodynamic condition perspective: a review [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnol.* 2017, 92 (3): 463-478.
- [86] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥EPS含量的影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 6-12.
- [87] 万俐, 赵君凤, 付永胜, 等. 絮凝剂对活性污泥胞外聚合物的影响研究 [J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2016, 33(5): 651-655.
- [88] 王雪梅, 刘燕, 华志浩, 等. 胞外聚合物对浸没式膜-生物反应器膜过滤性能的影响 [J]. *环境科学学报*, 2005(12): 30-35.
- [89] JARUSUTHIRAK C, AMY G. Understanding soluble microbial products(SMP) as a component of effluent organic matter(EfOM) [J]. *Water Research*, 2007, 41(12): 2787-2793.
- [90] LE-CLECH P, CHEN V, FANE T A G. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 284(1): 17-53.
- [91] DVORAK L, GOMEZ M, DOLINA J, et al. Anaerobic membrane bioreactors—a mini review with emphasis on industrial wastewater treatment: applications, limitations and perspectives [J]. *Desalination and Water Treatment*. 2016, 57(41): 19062-19076.
- [92] ANDRADE L H D, MENDES F D D S, ESPINDOLA J C, et al. Internal versus external submerged membrane bioreactor configurations for dairy wastewater treatment [J]. *Desalination & Water Treatment*, 2014, 52(16-18): 2920-2932.
- [93] 李硕, 彭永臻, 王然登. 胞外聚合物在污水生物处理中的作用 [J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2016, 33(4): 515-520.
- [94] 柳锋, 李维国, 郭旭, 等. BCOR-MBR 系统处理含盐废水过程中可溶性微生物代谢产物特性 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3914-3921.
- [95] 贾学斌, 魏金亮, 张军, 等. 厌氧微生物降解苯酚过程中胞外蛋白及多糖变化分析 [J]. *中国给水排水*, 2018(13): 20-25.
- [96] 周小玲, 陈建荣, 余根英, 等. 膜生物反应器中膜污染机理和控制研究新进展 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(10): 86-91.
- [97] LUNA H J, BAETA B E L, AQUINO S F, et al. EPS and SMP dynamics at different heights of a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) [J]. *Process Biochemistry*, 2014, 49(12): 2241-2248.
- [98] TOMOHIRO I, TOMO A, TOMOYUKI H, et al. Clarifying prokaryotic and eukaryotic biofilm microbiomes in anaerobic membrane bioreactor by non-destructive microscopy and high-throughput sequencing [J]. *Chemosphere*, 2020, 254: 126810.
- [99] LIAO B Q, XIE K, LIN H J, et al. Treatment of kraft evaporator condensate using a thermophilic submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. *Water Science & Technology*, 2010, 61(9): 2177-2183.
- [100] KOCHKODAN V, JOHNSON D J, HILAL N. Polymeric membranes: surface modification for minimizing (bio) colloidal fouling [J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2014, 206: 116-140.
- [101] CAO P, SHI J, ZHANG J, et al. Piezoelectric PVDF membranes for use in anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) and their antifouling performance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 603: 118037.
- [102] LEI Z, YANG S, LI X, et al. Revisiting the effects of powdered activated carbon on membrane fouling mitigation in an anaerobic membrane bioreactor by evaluating long-term impacts on the surface layer [J]. *Water Research*, 2019, 167: 115137.
- [103] ZHANG S, XIONG J, ZUO X, et al. Characteristics of the sludge filterability and microbial composition in PAC hybrid MBR: effect of PAC replenishment ratio [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2019, 145: 10-17.
- [104] YANG W, PAETKAU M, CICEK N. Improving the performance of membrane bioreactors by powdered activated carbon dosing with cost considerations [J]. *Water Science & Technology*, 2010, 62(1): 1-9.
- [105] XU B, NG T C A, Huang S, et al. Effect of quorum quenching on EPS and size-fractionated particles and organics in anaerobic membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2020, 179: 115850.
- [106] 王珂, 赵德智, 王德慧, 等. 陶瓷膜的污染与清洗技术进展 [J]. *应用化工*, 2018, 47(6): 1296-1300.

(责任编辑 王海锋)