

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.02.006

厌氧膜生物反应器处理工业废水的应用研究进展

张衷译¹, 程延彬², 张 爽¹, 刘瑞峰¹, 徐忆哲¹, 熊中浩¹

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316299)

摘 要: 厌氧膜生物反应器(AnMBR)工艺具有较高的污染物去除效率及沼气等能源转化率, 已大量应用于工业废水处理。然而, 由于膜的功能特性, 工业废水中无机物、有机物、微生物等会附着在膜表面并形成膜污染, 大大限制了其实际应用。目前, 已开发了多种膜污染防控方法, 如操作条件调控、流化载体添加、多种工艺组合等。此外, 研究人员也逐渐意识到微生物群落对AnMBR系统运行的积极影响, 合理调控以富集特定微生物种群可显著提升系统性能。因此, 综述了AnMBR在工业废水处理效能、膜污染及防控、微生物等方面的最新研究进展, 以期为AnMBR应用及其发展提供理论和技术参考。

关键词: 厌氧膜生物反应器; 处理性能; 膜污染; 微生物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)02-0039-08

Research Progress in Anaerobic Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment

ZHANG Zhongyi¹, CHENG Yanbin², ZHANG Shuang¹, LIU Ruifeng¹, XU Yizhe¹,
XIONG Zhonghao¹

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environmental Technology, Beijing 102206, China;

2. Zhejiang Petroleum & Chemical Co. Ltd., Zhoushan 316299, China)

Abstract: Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) process has been widely used in the treatment of industrial wastewater, and it has achieved satisfactory pollutant removal efficiency and energy conversion rate. However, due to the functional characteristics of membrane, inorganic, organic and biological pollution in industrial wastewater could inevitably attach to the membrane surface, forming membrane fouling. The membrane fouling could bring about constraints in practical application for AnMBR. Various methods have been developed and applied to membrane pollution prevention and control, such as operation condition regulation, fluidization carrier addition, multi-process combination, etc. In addition, the positive impact of microbial communities on the operation of AnMBR systems has been increasingly recognized, and reasonable regulation to achieve enrichment of specific microbial populations can significantly improve system performance. Therefore, this paper reviews the latest research progress of AnMBR in the industrial wastewater treatment efficiency, membrane fouling prevention and control, and microbial analysis, in order to provide theoretical and technical references for AnMBR application and development.

通信作者: 张爽 E-mail: zhang-shuang@cnpc.com.cn

Keywords: anaerobic membrane bioreactor (AnMBR); treatment performance; membrane fouling; microorganism

厌氧生物反应器与膜处理单元耦合的厌氧膜生物反应器(AnMBR)凭借优异的出水水质、低污泥残留、完全的固液分离、高效的资源回收、更低的能源消耗及更小的占地面积^[1-3],已成为最受欢迎的厌氧技术之一。目前,AnMBR工艺已广泛应用于高浓度工业废水如制药废水^[1]、糖果废水^[4]、酿酒废水^[5]、竹工业废水^[6]、乳品加工废水^[7]等的处理,展现出优异的处理性能及低能源消耗。因此,有必要总结分析其在工业废水处理中的研究进展情况。

简要介绍了AnMBR工艺的基本原理、发展及系统构型,重点总结了其处理工业废水的效能和能源需求分析,阐述了限制发展因素即膜污染及其防控方法,并梳理了微生物在该处理系统中的分布及作用,以期AnMBR高效处理工业废水并保障其稳定运行提供参考。

1 AnMBR 基本原理与构型

AnMBR是一种将膜处理单元与厌氧生物反应器耦合的新型处理工艺,属于厌氧消化领域,涉及水解、酸化、乙酸化、产甲烷化四个阶段,其降解及转化效率取决于微生物数量及种群间(发酵细菌、乙酸菌、氢营养产甲烷菌和乙酸营养产甲烷菌等)的协同作用^[8]。传统厌氧消化系统中产甲烷菌生长缓慢且易随出水流失,产甲烷效果不佳。然而,厌氧系统结合膜处理单元实现了水力停留时间(HRT)与污泥停留时间(SRT)的完全分离,可以保留并富集产甲烷菌,实现更高的沼气产量^[1-3]。

1978年Grethlein^[9]提出以平板膜组件结合厌氧系统处理化粪池污水,AnMBR首次以膜外置应用形式[见图1(a)]出现在学者视野中,1988年Yamamoto等^[10]实现了浸没式AnMBR[见图1(b)]的成功应用,解决了膜处理技术的外置式高能耗问题。由此,AnMBR迎来了高速发展期,并衍生出外置浸没式AnMBR[见图1(c)]。外置浸没式AnMBR通过将膜单元浸没在与生物工作系统反应室分开的腔室,改进了膜单元的维护和清洁^[11],极大减轻了膜污染程度。据报道,多项中试规模AnMBR研究中80%以上采用了外置浸没式两级构型^[12]。基于AnMBR技术的不断丰富与成熟,大量以AnMBR为核心的

工业废水处理技术在全球范围内得到了推广与成功应用。

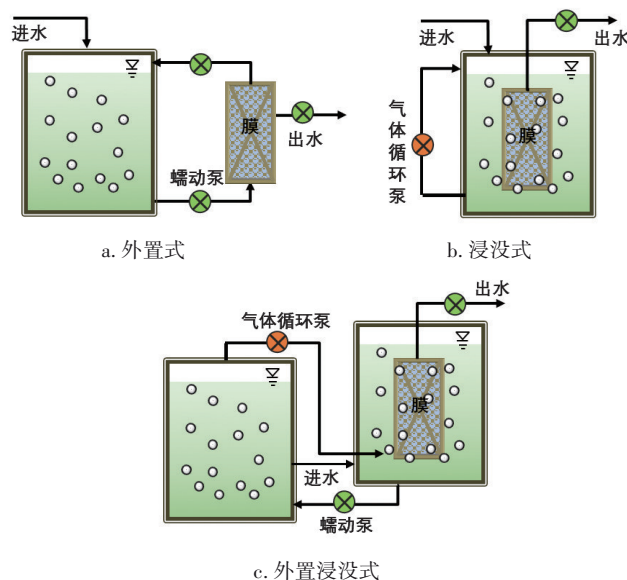


图1 AnMBR 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of different AnMBR structures

2 AnMBR 处理效能

2.1 去除性能

近年来,AnMBR在处理工业废水和废物方面已得到广泛研究,许多实验室规模、中试规模及工程规模的AnMBR系统在各种操作条件下被用于处理不同种类的工业废水或废物^[1,4-7,13-15](见表1)。例如,Svojitka等^[1]采用AnMBR处理制药废水,在温度为35~37℃、HRT为3.0~3.5d、SRT为120~450d、COD为4.20g/L的条件下,实现了高COD去除率(91%~97%)和高甲烷收益(甲烷产量为0.30~0.36L/gCOD)。Ye等^[7]采用AnMBR处理乳品加工废水,在温度为55℃、HRT为20~2.5d、COD为(63.19±2.71)g/L、有机负荷率(OLR)为26.3gCOD/(L·d)条件下,达到了98.2%~98.5%的COD去除率及约0.30L/gCOD的甲烷产量。此外,久保田株式会社在日本、北美等地区建立了超过20个工程规模的AnMBR装置,用于处理各种废水或废物^[16]。Ken's Foods公司在北美建立的第一个AnMBR工程装置,主要用于处理沙拉酱和烧烤酱生产废水,实现了99.4%的COD去除率,COD浓度从39g/L降至0.21

g/L^[17]。综合相关研究报道,得益于丰富的微生物量及膜的高效截留作用,AnMBR 应用于高浓度工业废水/废物处理可实现优异的除污性能(COD 去除率>95%)以及较好的甲烷收益(甲烷产量>0.30 L/gCOD)。

表 1 AnMBR 处理不同工业废水的运行性能

Tab.1 AnMBR performance for treating different industrial wastewater

基质类型	基本参数	AnMBR 构造	运行性能
酿酒厂废水	温度为 35℃,HRT 为 2.2~2.3 d,COD 为 2.92~5.09 g/L	外置式,工作体积 5 L,侧流膜块,有效过滤面积 0.1 m ²	COD 去除率为 (96.7 ± 2.7)%,甲烷产量为 0.28~0.33 L/gCOD
制药废水	温度为 35~37℃,HRT 为 3.0~3.5 d,SRT 为 120~450 d,COD 为 4.20 g/L	外置式,工作体积 50 L,陶瓷膜,有效过滤面积 0.25 m ²	COD 去除率为 91%~97%,甲烷产量为 0.30~0.36 L/gCOD
农药废水	温度为 (20 ± 3)℃,HRT 为 24~96 h,SRT 为 (150 ± 20) d,COD 为 (10.37 ± 0.10) g/L	浸没式,工作体积 1.5 m ³ ,中空纤维膜,有效过滤面积 5 m ²	COD 去除率为 61.1%~80.1%
竹工业废水	温度为 28~30℃,HRT 为 2~10 d,COD 为 (21.4 ± 0.1) g/L,OLR 为 4.4 gCOD/(L·d)	外置浸没式,工作体积 5/1.5 L,中空纤维膜,有效过滤面积 0.07 m ²	COD 去除率为 85%~90%
垃圾渗滤液	温度为 (37 ± 1)℃,HRT 为 10 d,COD 为 53.8~57.6 g/L,OLR 为 6.0 gCOD/(L·d)	浸没式,工作体积 10 L,陶瓷膜,有效过滤面积 0.12 m ²	COD 去除率为 95%,甲烷产量为 0.28 L/gCOD _{removed}
乳品加工废水	温度为 55℃,HRT 为 20~2.5 d,COD 为 (63.19 ± 2.71) g/L,OLR 为 26.3 gCOD/(L·d)	浸没式,工作体积 6 L,平板膜,有效过滤面积 0.116 m ²	COD 去除率为 98.2%~98.5%,甲烷产量约 0.30 L/gCOD
糖果废水	温度为 35℃,COD 为 18.0~18.9 g/L,OLR 为 2.2~7.4 gCOD/(L·d)	浸没式,工作体积 6 L,平板膜,有效过滤面积 0.16 m ²	COD 去除率为 99%,甲烷产量为 0.31 L/gCOD _{removed}
餐厨垃圾	温度为 50℃,HRT 为 10 d,COD 为 (95.1±3.4) g/L,OLR 为 9.0 gCOD/(L·d)	外置浸没式,工作体积 3/12 L,中空纤维膜,有效过滤面积 0.1 m ²	COD 去除率为 94%,甲烷产量为 0.53 L/gCOD _{removed}

2.2 操作条件

2.2.1 HRT

操作条件(如 HRT、OLR、SRT 等)的变化会显著影响 AnMBR 的处理性能。Chen 等^[18]研究发现,HRT 的降低(从 36 h 降至 12 h)并不影响 AnMBR 对制药废水中间甲酚的总去除效果(去除率为 93.6%~96.0%),但会使间甲酚的生物去除效果变差,其去除率从(86.3 ± 1.9)%降至(62.9 ± 3.7)%,而相对的物理去除效率即膜截留率从(9.2 ± 2.6)%提高到(31.7 ± 3.9)%。Liu 等^[13]的研究进一步证实了该现象,同时也揭示出 HRT 的降低(从 72 h 降至 48 h)会导致溶解性 COD 含量显著增加[从(1 023 ± 130) mg/L 升至(2 937 ± 189) mg/L],去除率下降(从 80.1% 降至 67.4%)。此外,基于生物降解效率的降低和膜截留效率的升高,HRT 下降通常会带来甲烷产量的降低和膜污染速率的增大。Hu 等^[19]发现,HRT 从 96 h 降至 24 h,甲烷产量从 0.22 L/gCOD_{removed} 降至 0.16 L/gCOD_{removed};Kong 等^[20]研究发现,HRT 从 18 h 缩短到 8 h,跨膜压差(TMP)从 0.24 ~ 0.47 kPa 显著升至 12.99 kPa,膜污染速率增大。综合考虑污染物的去除效果、甲烷生成量、膜污染等情况,采用

AnMBR 处理工业废水时 HRT 宜在 18~48 h 之间。

2.2.2 OLR

OLR 是影响 AnMBR 处理性能的关键因素之一。Chen 等^[21]研究了 AnMBR 处理合成抗生素溶剂废水性能的变化,发现 OLR 从 3.9 gCOD/(L·d) 增加到 12.7 gCOD/(L·d),间甲酚总去除率稳定在 94.0% 以上,而间甲酚生物去除率降至 67.9%、膜物理去除率明显提高至 22.0%。这表明 OLR 的上升会给 AnMBR 内部微生物带来冲击,影响微生物活性。Hu 等^[22]研究发现,当 OLR>10.0 gCOD/(L·d) 时,抗生素溶剂废水中四氢呋喃的生物去除率会降至 70.8%,进一步明确了膜物理去除具有重要作用。此外,OLR 的适度提升会给 AnMBR 内微生物带来更多的底物,从而增加沼气产量。Gökhan 等^[4]在利用 AnMBR 处理糖果废水试验中发现,沼气产量随着 OLR 的增大不断增加,当 OLR 从 1.1 gCOD/(L·d) 分别升至 2.2、4.4、6.6、7.9 gCOD/(L·d) 时,沼气产量从 1.5 L/d 分别增至 3.0、5.8、8.3、9.7 L/d。进一步地,Hu 等^[22]发现,当 OLR>10.0 gCOD/(L·d) 时,沼气产量大幅降低,分析认为 OLR 过高会降低微生物活性、加快膜污染速率并加重膜污染程度。

因此,综合考虑COD去除效果、甲烷产量及膜污染等情况,推荐AnMBR的运行 $OLR < 10.0 \text{ gCOD}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。

2.2.3 SRT

通常,较长的SRT有利于AnMBR系统中污染物的去除。Yurtsever等^[23]研究发现,SRT从无限分别缩短至60、30 d时,AnMBR对纺织废水COD的去除效果变差,COD去除率从86%分别降至72%、65%。这归因于SRT的减小使得AnMBR系统中可溶性微生物产物(SMP)的量增加。然而,当AnMBR处于低HRT(<18 h)、高 $OLR > 5 \text{ gCOD}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 环境中,其内部污泥活性受影响较大,长SRT反而效能不佳,补充部分接种污泥会有利于其降解性能的提升^[24]。因此,应综合考虑HRT、OLR的影响,SRT并非越长越好,可适当缩短SRT。

2.3 能源平衡分析

能源经济性是AnMBR工艺的优势之一。AnMBR的能源消耗主要来自膜污染控制及系统运行(包括泵、沼气内循环等),其中膜污染控制一般占能源消耗的70%以上^[2-3]。能源收益主要来自沼气利用(燃烧加热、发电等)。经调查,浸没式AnMBR的能源消耗为 $0.038 \sim 5.680 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,可获得的能源收益达到 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kgCOD}_{\text{removed}}$ 或以上^[2-3]。因而在多数高浓度有机废水处理中,AnMBR工艺可实现高能源收益,甚至是净能量平衡,如Galib等^[25]利用AnMBR处理肉类加工废水,实现了 $0.16 \sim 1.83 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 的净能源收益。这说明AnMBR工艺不仅能实现电能平衡,还能实现能量输出。此外,Kong等^[20]对比了传统活性污泥(CAS)工艺和AnMBR工艺处理含N、N-二甲基甲酰胺工业废水的经济成本,发现AnMBR较CAS工艺节省能耗 $4.16 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,且减少57.8%的 CO_2 排放量,这表明AnMBR工艺的应用更符合碳减排与碳中和的绿色发展理念。

3 膜污染及控制

3.1 膜污染

膜污染由进料中各成分之间及各成分与膜表面之间的复杂物理化学作用引起,会导致TMP的上升、膜通量的减少,造成运维成本的提升。膜污染演变过程如图2所示,包括膜污染形成、生长、压实等,其中伴随着典型的TMP跳跃变化。

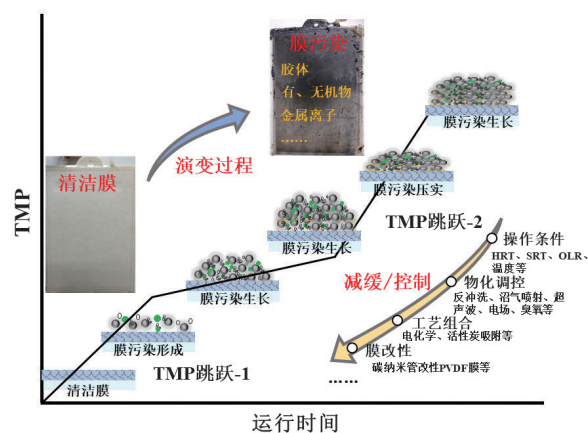


图2 膜污染演变与控制过程及TMP变化

Fig.2 Membrane fouling evolution and control process and the variation of TMP

膜污染的发生通常以初始孔阻塞和随后的滤饼层形成为特征,其可归因于污染物、微生物、代谢产物、无机杂质等的沉积^[7,26]。其中,滤饼层是膜污染的主要贡献者之一,如Maleki^[26]研究了AnMBR处理麦芽厂工业废水时膜污染贡献的分布,结果显示滤饼层贡献了56.9%,有机污染贡献了23.1%。然而,由于处理对象、系统构造等的差异,膜污染成分的贡献度也会发生变化。Ye等^[7]利用AnMBR处理乳品加工废水,发现有机污染物是膜污染的主要贡献者(贡献率为68.0%~81.0%),其次是滤饼/凝胶层(贡献率为13.1%~26.6%)。此外,滤饼层中主要的污染成分为胞外聚合物(EPS)和SMP等微生物代谢物,其与膜污染物质的结合性最强,远胜于其他影响因素(如MLSS、絮凝体尺寸、粒度分布等),这可归因于SMP和EPS在膜上或膜中的保留和吸附会促进布朗扩散的发生,形成更强的渗透阻力^[27]。同时,多数研究还聚焦于SMP、EPS中的蛋白质、多糖含量与比例对膜污染的影响机制^[4]。研究表明,由蛋白质和多糖形成的非共价网络具有较高的膜污染潜力,其中蛋白质具备高疏水性和强黏附力,可极大促进不可逆污染的发生^[28]。Kudisi等^[29]探究了AnMBR处理合成对苯二甲酸废水的膜污染过程,发现EPS中蛋白质浓度的突然增加与TMP的快速增大一致。然而,基于厌氧环境污染形成的复杂性,膜污染通常是多种污染物的协同作用结果,不同基质、不同环境条件下污染物的相互作用也存在差异性。针对实际应用废水,可采用耗散型石英晶体微天平(QCM-D)与原子力显微镜(AFM)等技术

揭示 AnMBR 运行过程中更复杂的污染物相互作用现象,如混合液中滤饼层与污染物之间的相互作用。

3.2 膜污染控制

基于膜污染对 AnMBR 工艺的限制影响,目前已开发了多种膜污染控制策略,如化学清洗、操作参数调控、工艺组合、膜改性等。其中化学清洗是 AnMBR 工程运行中最常用、起效最快的膜污染控制方法,经过 NaClO、柠檬酸清洗可实现 80% 以上膜通量的恢复^[7],但随着清洗次数的增多,不可逆污染占比会逐渐增大。针对工业废水的高浓污染物特性,有人开展了相应的膜污染控制策略研究。例如, Deng 等^[30]将电化学引入 AnMBR 中,利用阳极铁絮凝作用来吸附污染物、增加污泥的絮体尺寸和孔隙率,不仅显著改善了处理效果(磷酸盐去除率提升 55%),还有效缓解了膜污染(TMP 降低 50%)。类似地,电化学-AnMBR 在处理农药废水时也显著降低了 30% 以上的膜污染速率,同时进一步提升了 COD 去除率(5%)、毒性削减率(7.8%~47.7%)并降低了运行成本(38.9%)^[15]。流化载体(填料、聚合物)的添加也可以改善污泥性状,减少滤饼结垢,显著缓解膜污染。Chen 等^[31]在 AnMBR 处理制药废水系统中加入具有生物聚合物吸附能力的生物炭,促进了 EPS 中蛋白质的转化,致使 TMP 上升速率降低 56%,并提升了 COD 向甲烷的转化率。Nabi 等^[32]将石墨添加至 AnMBR 中,也实现了膜污染速率的减缓与甲烷产量的提升。此外,动态膜与群体淬灭技术也是缓解 AnMBR 处理工业废水膜污染的有效措施,动态膜可将滤饼结垢层用作有效分离的过滤介质^[33],直接将膜污染转化为竞争优势;而群体淬灭技术可通过抑制生物物质产生的 N-酰基高丝氨酸内酯(AHL)来延缓 EPS 等的产生,从而减缓膜污染速率^[34]。然而,由于这两项技术目前仍多停留在理论研究阶段,其在工程中的稳定应用仍需进一步研究。

4 微生物分析

鉴于参与污染物降解的厌氧微生物复杂性,深入了解微生物种群分布及其功能对于 AnMBR 的有效调控至关重要。AnMBR 中的微生物主要由水解、发酵和产甲烷微生物组成^[8],多种微生物协同作用实现了有机物的有效降解。参与有机物降解代谢

的微生物概况如图 3 所示。

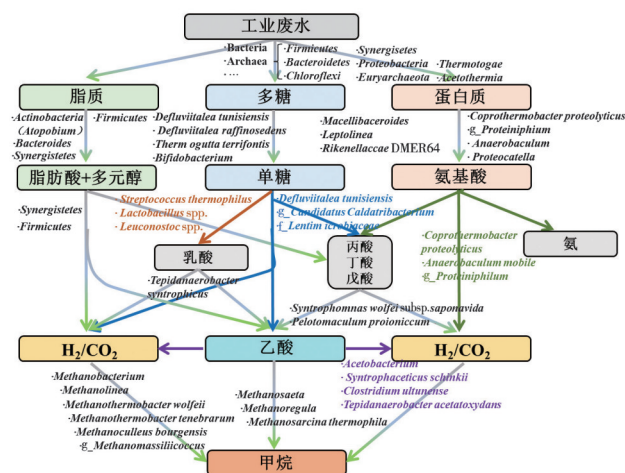


图3 AnMBR 处理工业废水时微生物参与有机物降解的代谢过程

Fig.3 Microbial involvement in the metabolic processes of organic matter degradation for AnMBR treating industrial wastewater

由图 3 可以看出, AnMBR 处理制药废水、垃圾渗滤液、糖果生产废水、甲醇废水等工业废水时, *Proteobacteria*、*Firmicutes*、*Bacteroidetes*、*Chloroflexi* 等占主要优势,其相对丰度为 60% 或以上。研究表明,该类微生物在厌氧消化过程中负责有机酸、多糖等的降解转化^[4,29,31],因而改变该类微生物的种群丰度,可显著影响系统的处理效果与甲烷产量。例如, Chen 等^[31]采用添加生物炭措施,通过富集 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 等微生物丰度,强化了制药废水有机污染物的降解转化效果, COD 去除率进一步提升(从 89.2% 升至 93.8%)。 *Chloroflexi* 对复杂环境的耐受性较强,可以利用复杂有机污染物[如可吸收有机卤化物(AOX)]作为生长的底物^[4,31],提升其丰度有利于去除复杂工业废水的特征污染物。然而, *Chloroflexi* 也是 EPS 产生的主要贡献者之一,在处理高浓度工业废水时, *Chloroflexi* 丰度的上升也会加速 AnMBR 中的生物污染^[35]。特别是 *Arcobacter* 被认为具有生物膜形成功能,多数研究显示降低其丰度可显著减缓膜污染速率^[4,31]。同样也有研究认为 *Tissierella*、*Ignatzscheria* 等微生物可以降解复杂的有机物并减轻膜污染^[36]。此外,向 AnMBR 系统中添加部分特定微生物可以强化某些特征污染物的降解,如添加 *Oliephilus* sp.、*Thermohalobacter* sp. 可强化多环芳烃等有机物的去除^[37],添加

Syntrophorhabdus aromaticivorans 可强化苯酚的降解转化^[38],添加N,N-二甲基甲酰胺(DMF)水解细菌可强化DMF的分解^[24]。

产甲烷菌是厌氧体系中最重要的一类微生物,直接关系甲烷或氢气等能源的转化。根据代谢行为及功能性,将产甲烷菌分为3类^[35,39]:①乙酸型产甲烷菌,如*Methanosaeta*、*Methanoregula*可将乙酸转化为甲烷;②氢营养型产甲烷菌,如*Methanolinea*、*Methanobacterium*、*Methanothermobacter tenebrarum*、*Methanothermobacter wolfeii*、*Methanoculleus bourgensis*可将H₂/CO₂转化为甲烷;③多功能产甲烷菌,如*Methanosarcina*、*Methanomethylovorans*可利用甲基化合物作为碳和能量来源。常规AnMBR处理工业废水过程中,占主导位置的产甲烷菌为*Methanosaeta*,该类微生物的主要问题是底物(乙酸)甲烷化效率低、能源收益不佳。而氢营养型产甲烷菌较乙酸型产甲烷菌具有更高的底物利用率、生长速率和细胞产量^[40],更能适应环境变化,在高氨浓度^[39]等条件下对污染物的转化效果更佳、甲烷产量也更高。由于工业废水成分的复杂特性,多功能产甲烷菌(甲基营养型)的重要性开始凸显,如*Methanomethylovorans*可直接将甲醇转化为甲烷^[35]; *Methanomethylovorans*、*Methanomassiliicoccus*和*Methanolobus*可以有效代谢转化DMF中间体^[24]。此外,*Geobacter*等细菌也可通过间接电子传递作用强化产甲烷菌的甲烷产生量^[4,31],提高能源转化率。综上,微生物群落对AnMBR系统运行具有积极影响,通过调控富集微生物特定种群可显著提升系统运行效能。然而,仍需要更深入的研究来揭示不同微生物在具体工业废水中的作用机制,以更好地指导AnMBR系统在工业废水处理中的运行与管理。

5 结论

AnMBR工艺在工业废水中的应用已被证实具有令人满意的污染物去除效率及沼气等能源转化率,并符合我国绿色、低碳发展理念。主要结论如下:

① 最佳操作参数(HRT、OLR、SRT等)随工业废水特性、应用工艺流程差异、系统使用构造等的改变而改变,应根据试验调整优化。同时,应考虑工业废水中高值营养物质的再利用。

② AnMBR系统与多种工艺的组合应用技术

成为提高污染物处理效能、缓解膜污染、降低运行成本等的有效手段,在工业废水处理中可以考虑采用流化载体+AnMBR工艺、电化学-AnMBR组合工艺等,统筹利用各项技术优势,强化污染物去除效能。

③ 微生物种群丰度变化直接影响AnMBR工艺的运行效能,如何有效调控、富集特定微生物种群是未来研究的主要难点之一。此外,群体感应淬灭技术的提出也为AnMBR发展提供了新视角,但该技术在实际工程中应用较少,仍需更深入的研究来揭示其作用机制。

参考文献:

- [1] SVOJITKA J, DVOŘÁK L, STUDER M, et al. Performance of an anaerobic membrane bioreactor for pharmaceutical wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 229: 180–189.
- [2] WU C X, QI C R, ZHAI G H, et al. Zero-valent iron to advance anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment and reuse: a critical review [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 32: 103394.
- [3] LIN H J, PENG W, ZHANG M J, et al. A review on anaerobic membrane bioreactors: applications, membrane fouling and future perspectives [J]. *Desalination*, 2013, 314: 169–188.
- [4] GÖKHAN B, GULSUM Y, BERIL G Z. Evaluation of anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating confectionery wastewater at long-term operation under different organic loading rates: performance and membrane fouling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 404: 126261.
- [5] BASSET N, SANTOS E, DOSTA J, et al. Start-up and operation of an AnMBR for winery wastewater treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 86: 279–289.
- [6] WANG W, YANG Q, ZHENG S S, et al. Anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for bamboo industry wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149: 292–300.
- [7] YE M, SUN B C, SONG L Y, et al. Organic transformation, lactic acid metabolism, and membrane performance in high-rate methanogenic treatment of dairy processing wastewater using thermophilic high-solid anaerobic membrane bioreactor [J]. *Chemical*

- Engineering Journal, 2022, 455: 140780.
- [8] OBEROI A S, SURENDRA K C, WU D, et al. Anaerobic membrane bioreactors for pharmaceutical-laden wastewater treatment: a critical review [J]. Bioresource Technology, 2022, 361: 127667.
- [9] GRETHLEIN H E. Anaerobic digestion and membrane separation of domestic wastewater [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1978, 50(4): 754-763.
- [10] YAMAMOTO K, HIASA M, MAHMOOD T, et al. Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank [J]. Water Science and Technology, 1988, 21: 43-54.
- [11] SONG X Y, LUO W H, HAI F I, et al. Resource recovery from wastewater by anaerobic membrane bioreactors: opportunities and challenges [J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 669-677.
- [12] SHIN C, BAE J. Current status of the pilot-scale anaerobic membrane bioreactor treatments of domestic wastewaters: a critical review [J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 1038-1046.
- [13] LIU L X, LIU W Y, YU L Q, et al. Optimizing anaerobic technology by using electrochemistry and membrane module for treating pesticide wastewater: chemical oxygen demand components and fractions distribution, membrane fouling, effluent toxicity and economic analysis [J]. Bioresource Technology, 2022, 346: 126608.
- [14] WU Z Y, QIAO W, DONG R J. Elucidating methanogenesis and membrane filtration performance of a ceramic AnMBR treating municipal waste leachate [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103905.
- [15] JIANG M M, HUANG J, LI P, et al. Optimization of membrane filtration and cleaning strategy in a high solid thermophilic AnMBR treating food waste [J]. Chemosphere, 2023, 342: 140151.
- [16] ZHEN G Y, PAN Y, LU X Q, et al. Anaerobic membrane bioreactor towards biowaste biorefinery and chemical energy harvest: recent progress, membrane fouling and future perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109392.
- [17] CHRISTIAN S, GRANT S, MCCARTHY P, et al. The first two years of full-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) operation treating high-strength industrial wastewater [J]. Water Practice & Technology, 2011, 6(2): wpt2011032.
- [18] CHEN Z B, LI X, HU D X, et al. Performance and methane fermentation characteristics of a pilot scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for treating pharmaceutical wastewater containing m-cresol (MC) and iso-propyl alcohol (IPA) [J]. Chemosphere, 2018, 206: 750-758.
- [19] HU D X, LIU L X, LIU W Y, et al. Improvement of sludge characteristics and mitigation of membrane fouling in the treatment of pesticide wastewater by electrochemical anaerobic membrane bioreactor [J]. Water Research, 2022, 213: 118153.
- [20] KONG Z, XUE Y, HAO T W, et al. Carbon-neutral treatment of N,N-dimethylformamide-containing industrial wastewater by anaerobic membrane bioreactor (AnMBR): bio-energy recovery and CO₂ emission reduction [J]. Bioresource Technology, 2022, 358: 127396.
- [21] CHEN Z B, SU H Y, HU D X, et al. Effect of organic loading rate on the removal of DMF, MC and IPA by a pilot-scale AnMBR for treating chemical synthesis-based antibiotic solvent wastewater [J]. Chemosphere, 2018, 198: 49-58.
- [22] HU D X, SU H Y, CHEN Z B, et al. Performance evaluation and microbial community dynamics in a novel AnMBR for treating antibiotic solvent wastewater [J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 218-227.
- [23] YURTSEVER A, CALIMLIOGLU B, SAHINKAYA E. 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, 2017, 314: 378-387.
- [24] LI L, KONG Z, XUE Y, 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.
- [25] GALIB M, ELBESHISHY E, REID R, et al. Energy-positive food wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182: 477-485.
- [26] MALEKI E. Psychrophilic anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for treating malting plant wastewater and energy recovery [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 34: 101174.

- [27] MAAZ M, YASIN M, ASLAM M, et al. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: novel configurations, fouling control and energy considerations [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 283: 358–372.
- [28] MENG F G, ZHANG S Q, OH Y, et al. Fouling in membrane bioreactors: an updated review [J]. *Water Research*, 2017, 114: 151–180.
- [29] KUDISI D, LU X Q, ZHENG C T, et al. Long-term performance, membrane fouling behaviors and microbial community in a hollow fiber anaerobic membrane bioreactor (HF-AnMBR) treating synthetic terephthalic acid-containing wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127458.
- [30] DENG H Q, REN H L, FAN J Z, et al. Membrane fouling mitigation by coagulation and electrostatic repulsion using an electro-AnMBR in kitchen wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2022, 222: 118883.
- [31] CHEN L L, CHENG P J, YE L, et al. Biological performance and fouling mitigation in the biochar-amended anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) treating pharmaceutical wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122805.
- [32] NABI M, GAO D W, LIANG H, et al. Landfill leachate treatment by graphite engineered anaerobic membrane bioreactor: performance enhancement and membrane fouling mitigation [J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 114010.
- [33] AN Z J, ZHU J J, ZHANG M, et al. Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of high-strength waste/wastewater: a critical review and update [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 144322.
- [34] LIU J B, ENG C Y, HO J S, et al. Quorum quenching in anaerobic membrane bioreactor for fouling control [J]. *Water Research*, 2019, 156: 159–167.
- [35] LU X Q, ZHENG C T, ZHEN G Y, et al. Roles of colloidal particles and soluble biopolymers in long-term performance and fouling behaviors of submerged anaerobic membrane bioreactor treating methanolic wastewater [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125816.
- [36] PU Y H, TANG J L, ZENG T, et al. Enhanced energy production and biological treatment of swine wastewater using anaerobic membrane bioreactor: fouling mechanism and microbial community [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127850.
- [37] NG KWANG K, SHI X Q, NG HOW Y. Evaluation of system performance and microbial communities of a bioaugmented anaerobic membrane bioreactor treating pharmaceutical wastewater [J]. *Water Research*, 2015, 81: 311–324.
- [38] SIERRA J D M, OOSTERKAMP M J, WANG W, et al. Impact of long-term salinity exposure in anaerobic membrane bioreactors treating phenolic wastewater: performance robustness and endured microbial community [J]. *Water Research*, 2018, 141: 172–184.
- [39] YE M, ZHU A J, SUN B C, et al. Methanogenic treatment of dairy product wastewater by thermophilic anaerobic membrane bioreactor: ammonia inhibition and microbial community [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 357: 127349.
- [40] CHENG D L, NGO H H, GUO W S, et al. Anaerobic membrane bioreactors for antibiotic wastewater treatment: performance and membrane fouling issues [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 714–724.

作者简介: 张衷译(1993—), 男, 山东郓城人, 博士, 工程师, 主要研究方向为废水处理技术、电化学、CO₂回收再利用、环境保护管理技术、QHSE管理体系。

E-mail: zhangzhongyi@cnpcc.com.cn

收稿日期: 2023-10-23

修回日期: 2024-01-12

(编辑: 丁彩娟)