

张娟, 彭东晓, 刘其庭, 等. 正渗透微生物燃料电池新技术在废水处理减污脱盐中的发展与挑战[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 21-29, 44.  
ZHANG J, PENG D X, LIU Q T, et al. Development and challenges of new forward osmosis microbial fuel cell technology in pollution reduction and desalination of wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 21-29, 44.

## 正渗透微生物燃料电池新技术在废水处理减污脱盐中的发展与挑战

张娟<sup>1</sup>, 彭东晓<sup>2</sup>, 刘其庭<sup>2</sup>, 彭龙飞<sup>1</sup>, 赵亮<sup>1</sup>, 刘洪波<sup>2,\*</sup>

(1. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要** 【目的】针对传统废水脱盐技术能耗高、成本高、碳足迹大的问题, 研究旨在探讨正渗透微生物燃料电池 (OsMFC) 在废水减污脱盐中的应用潜力, 并分析其面临的挑战, 为该技术的可持续发展和规模化应用提供理论支持。【方法】文章详细介绍了 OsMFC 的工作原理, 对比分析了不同原料液、驱动液、膜材料和电极材料运行条件下, OsMFC 系统的电化学性能、膜通量和污染物降解效果。通过文献调研和数据分析, 总结了影响 OsMFC 运行效能的关键因素, 并针对放大化应用中存在的问题, 提出了潜在的解决方案。【结果】研究表明, 使用氯化钠作为驱动液时, OsMFC 表现出较高的电能输出和脱盐效率。薄层复合膜由于其更大的孔隙率和机械强度, 被认为是比传统醋酸纤维膜更理想的选择。OsMFC 展现出高效的有机污染物处理能力, COD 去除率可达 63%~95%。然而, 该技术仍面临浓差极化、膜结垢和反向溶质通量等问题, 这些问题降低了水通量和产电性能, 提高了运行成本。【结论】OsMFC 作为一种新兴的废水处理技术, 具有废水减污、脱盐和能量回收的潜力。未来的研究应重点关注以下几个方面: 开发低成本、高水通量的膜材料; 筛选培养电活性微生物, 优化微生物产电性能; 优化 OsMFC 放大应用后的反应器设计和配置; 探索利用盐厂盐水或反渗透废水等廉价易得的废水作为驱动液。通过解决这些问题, 有望实现 OsMFC 的规模化应用, 构建一种可持续发展的低碳废水处理解决方案。

**关键词** 正渗透微生物燃料电池 (OsMFC) 正向渗透 (FO) 减污脱盐 膜污染 海水淡化

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)08-0021-10

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.003

## Development and Challenges of New Forward Osmosis Microbial Fuel Cell Technology in Pollution Reduction and Desalination of Wastewater Treatment

ZHANG Juan<sup>1</sup>, PENG Dongxiao<sup>2</sup>, LIU Qiting<sup>2</sup>, PENG Longfei<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>, LIU Hongbo<sup>2,\*</sup>

(1. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China;

2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract** [Objective] Aiming at the problems of high energy consumption, high cost and large carbon footprint of traditional wastewater desalination technology, this study aims to explore the potential application of osmotic microbial fuel cell (OsMFC) in wastewater pollution reduction and desalination, and analyze the challenges it is facing, so as to provide theoretical support for the sustainable development and large-scale application of this technology. [Methods] The working principle of OsMFC is introduced in detail, and the electrochemical performance, membrane flux and pollutant degradation effect of the OsMFC system are comparatively analyzed under the operating conditions of different feedstock fluids, driving fluids, membrane materials and electrode materials. Through literature research and data analysis, the key factors affecting the operating efficacy of OsMFC are summarized, and potential solutions are proposed for the problems in scale-up applications. [Results] The study shows that OsMFC exhibits high electrical energy output and desalination efficiency when sodium chloride is used as the driving fluid. Thin-layer composite membranes are considered to be a more desirable option than traditional acetate membranes due to their greater porosity and mechanical strength.

[收稿日期] 2024-03-29

[作者简介] 张娟(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事火力发电水处理等工作, E-mail: zhangjuan@speri.com.cn.

[通信作者] 刘洪波(1979—), 男, 教授, 主要从事污水低碳处理与回用技术、工业废水处理与资源化等工作, E-mail: Liuhib@usst.edu.cn.

OsMFC demonstrates high efficiency in treating organic pollutants, with COD removals ranging from 63% to 95%. However, the technology still faces problems such as concentration polarization, membrane fouling, and reverse solute flux, which reduce the water flux and power production performance and increase the operating cost. [Conclusion] OsMFC, as an emerging wastewater treatment technology, has the potential for wastewater pollution reduction, desalination and energy recovery. Future research should focus on the following aspects: developing low-cost and high water flux membrane materials; screening and cultivating electroactive microorganisms to optimize the microbial electricity production performance; optimizing the reactor design and configuration after the scale-up application of OsMFC; and exploring the use of cheap and readily available wastewater, such as saltworks brine or reverse osmosis wastewater, as the driving fluid. By solving these problems, it is expected to realize the large-scale application of OsMFC and construct a sustainable low-carbon wastewater treatment solution.

**Keywords** osmotic microbial fuel cell (OsMFC) forward osmosis (FO) pollution reduction and desalination membrane fouling seawater desalination

膜分离技术因其能够产生高质量水而被广泛应用于废水脱盐和海水淡化等不同行业。然而,传统的脱盐技术存在能源消耗大、成本高、碳排放量大等问题,这限制了其在实际应用中的发展<sup>[1]</sup>。为了解决这些问题,正向渗透作为一种新兴的基于膜的水提取技术,因其能耗低、占地面积小和可扩展性等优点而备受关注<sup>[2]</sup>。正向渗透技术通过自然渗透压运行,在半透膜上的渗透压梯度推动水从低渗透压区域(原料液)向高渗透压区域(驱动液)移动,无需施加外部压力。该技术不仅能够有效抑制污水中大分子物质(如蛋白质、盐和多糖)的运动,还对污水中各种污染物具有较高的回收率<sup>[3]</sup>。因此,正向渗透技术已在废水回收中得到了广泛应用,尤其是在海水脱盐和渗透发电领域<sup>[4]</sup>。尽管正向渗透技术具有许多优势,但在实际应用中,它主要作用于浓缩废水,而无法实现污水中污染物的有效降解。此外,原料液和驱动液中的浓缩物需要进一步处理,这无疑增加了废水处理的成本。为克服这些局限性,将微生物电化学技术与正向渗透技术耦合是一种有效的解决方案。

微生物燃料电池是一种新兴技术,通过电活性微生物催化污染物氧化还原过程的同时回收电能<sup>[2]</sup>。微生物燃料电池由阴极室和阳极室组成,它们之间由离子交换膜隔开<sup>[5]</sup>。虽然微生物燃料电池在去除废水中的重金属、营养物质、抗生素、微污染物等方面效果显著,但由于实际运行中产电性能较低,且处理后的污水经过一定程度的后处理才能回用,限制了其在实际中的应用。近年来,通过用正向渗透膜替代质子交换膜、阴离子交换膜和阳离子交换膜,开发正渗透微生物燃料电池<sup>[6]</sup>。正渗透微生物燃料电池与传统微生物燃料电池结构相似,如

图1所示。在正渗透微生物燃料电池中,阳极的工作原理类似于微生物燃料电池,通过生物电化学过程处理废水,在阴极室中含有浓缩的盐溶液,废水在阳极室中,透过正向渗透膜进入阴极室。在阳极室中,电化学活性细菌附着在电极上发生催化反应。阳极室在厌氧环境下发生氧化反应,阴极室在好氧条件下发生还原反应,从而使电子和质子从阳极室移动到阴极室。

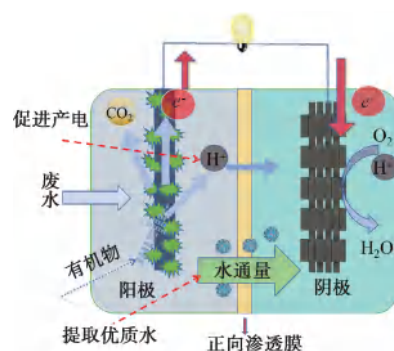
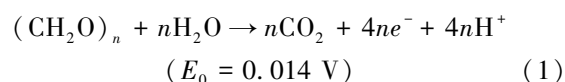


图1 正渗透微生物燃料电池结构

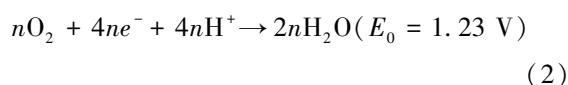
Fig. 1 Structure of Forward Osmosis Microbial Fuel Cell

质子和电子最终与氧原子结合,并在阴极室中生成水,同时外部电子的流动可以产生电能,反应如式(1)~式(2), $E_0$ 表示标准电极电位。

阳极反应:



阴极反应:



正渗透微生物燃料电池中的正向渗透膜实现了

以下 3 个方面的功能:首先,它能够从废水中回收高质量的水;其次,由于水通量的提高,改善了质子在膜上的扩散,从而增加了电力的生成;最后,通过防止溶解氧从阴极向阳极的反向扩散,正向渗透膜在阳极室中创造了厌氧条件<sup>[7-8]</sup>。这种正向渗透膜的作用原理可以通过渗透过程来解释,在这个过程中,由于溶质浓度差异,水会从高水势区域(废水/阳极液)移动到低水势区域(盐溶液/阴极液)<sup>[3]</sup>。水通量的计算如式(3)~式(4)。

$$J_w = A\sigma\Delta\Pi = \frac{\Delta V_1}{A_m \Delta t} \quad (3)$$

$$\Pi = iMRT = i \times \left(\frac{n}{V}\right) \times RT \quad (4)$$

其中: $J_w$ ——水通量,  $L/(m^2 \cdot h)$ ;

$A$ ——膜的水渗透系数;

$\sigma$ ——反射系数(用于衡量特定膜对特定溶质的相对渗透性),当膜表现出较高的阻挡时,通常将其取为 1。

$\Delta V_1$ ——在研究期间提取的水量, L;

$\Delta t$ ——时间, h;

$\Pi$ ——渗透压, Pa;

$A_m$ ——膜的表面积,  $m^2$ ;

$i$ ——范特霍夫因子(物质溶解时形成的粒子浓度与物质质量浓度的比率);

$n$ ——溶质的物质的量, mol;

$V$ ——溶液体积, L;

$R$ ——气体常数,  $J/(mol \cdot K)$ ;

$T$ ——溶液绝对温度, K;

$M$ ——溶液浓度, mol/L。

尽管正向渗透膜被期望充当完美的屏障,但盐分却在与水通量方向相反的方向上发生了移动<sup>[9]</sup>。这种移动是由于膜两侧的浓度差异较大所致。反向溶质通量,即盐分通过膜的运动(从吸引层到送水层),可以描述为原料和驱动液之间浓度差异的比例<sup>[10]</sup>。膜上的质量传输则由相应的方程如式(5)。

$$J_s = B \times (C_D - C_F) = \frac{C_f V_f - C_i V_i}{A_m \Delta t} \quad (5)$$

其中: $J_s$ ——反向溶质通量,  $mol/(m^2 \cdot s)$ ;

$B$ ——膜的溶质渗透系数,  $L/(m^2 \cdot s)$ ;

$C_D$  和  $C_F$ ——吸引层和送水层的浓度, mol/L;

$C_i$  和  $C_f$ ——送水层的初始和最终浓度, mol/L;

$V_i$  和  $V_f$ ——送水层的初始和最终体积, L。

反向溶质通量降低推动力,从而导致水通量减小,使盐分在膜上积聚,影响了送水层的质量。因此,应该控制这种反向运动以提高正渗透微生物燃料电池的效率。

正向渗透膜的加入在促进微生物燃料电池产电性能的同时促进了清洁水的直接提取<sup>[11]</sup>。微生物燃料电池产生的驱动力可以提高正向渗透膜的水通量,降低溶质与溶解氧的反向迁移<sup>[7-8]</sup>。微生物燃料电池和正向渗透膜的协同组合,充分利用了 2 个过程的优势。在技术上将正向渗透膜耦合到微生物燃料电池中是可行的,它们的协同作用可以实现水提取、废水处理和能源回收。然而,现有关于正渗透微生物燃料电池的研究大多处于实验室阶段,其实际应用还存在诸如浓差极化、膜结垢等问题亟待解决。因此,本文对影响正渗透微生物燃料电池的运行效能的关键因素、放大化应用中存在的问题和潜在解决方案进行了详细讨论,并指出了未来的研究方向,以期为推动正渗透微生物燃料电池的实际应用提供理论支持。

## 1 影响正渗透微生物燃料电池运行效能的关键因素

### 1.1 原料液和驱动液

污水中的有机质是阳极生物膜的碳源,生物膜的形成是微生物燃料电池产生电能的关键。由于实际废水的成分复杂,当前对于正渗透微生物燃料电池的研究常采用合成废水(含有葡萄糖或乙酸作为碳源)作为原料液<sup>[12]</sup>。废水中有机质的含量对正渗透微生物燃料电池的性能具有重要意义。驱动液的作用是使正向渗透膜上保持一定的渗透压梯度,从而促进污水中的水分子与  $H^+$  的定向迁移<sup>[13]</sup>。在选择正渗透微生物燃料电池中的驱动液时,分子大小、离子扩散性、pH、温度、流体黏度、浓度和盐的类型等因素至关重要。这是因为 pH 或温度等参数的变化都可能使污水中的离子( $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ba^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $CO_3^{2-}$ <sup>[13]</sup>) 在膜上沉淀,从而导致膜堵塞。因此,驱动液必须具有低成本、高导电性以及环境友好、无毒等特点,并且无反向溶质通量或通量较低,从而减少因

溶质回流引起的膜堵塞问题<sup>[14]</sup>。

当前报道<sup>[3]</sup>的各种有机无机驱动液中,氯化钠由于其高溶解度、较高的渗透势和低成本的特点被广泛地应用于废水的减污脱盐处理。黄丽等<sup>[15]</sup>研究了不同种类和浓度的驱动液对微生物燃料电池的性能,结果表明,采用浓度为 1 mol/L 氯化钠为驱动液的燃料电池其产电性能与化学需氧量(COD)降解率均高于以碳酸氢钠和碳酸氢铵的燃料电池。驱动液浓度的增加会导致系统的渗透压差升高,水通量增大,但随着浓度的增加盐返混现象加剧,致使溶质反向扩散,降低膜两侧的驱动力<sup>[16]</sup>。选择合适的驱动液浓度,减少浓差极化作用,对提高微生物燃料电池的整体性能十分重要<sup>[17]</sup>。

## 1.2 正向渗透膜

正向渗透膜是由确定膜选择性的致密活性层(厚度为 0.1~1.0  $\mu\text{m}$ )和提供机械支撑的多孔支撑层(厚度为 100~200  $\mu\text{m}$ )组成<sup>[18]</sup>。正向渗透膜的性能决定了原料液中杂质分子的截留率与系统的水通量<sup>[19]</sup>。正向渗透膜的原理如图 2 所示,原料液中的水分子通过正向渗透膜孔隙进入驱动液,将盐离子截留在膜的另一侧,从而实现废水的脱盐过程。在废水处理过程中,正向渗透膜自身结构在很大程度上决定膜的水通量与溶质截留率。理想条件下,膜的活性层应该表现出大的水通量与小的溶质渗透系数<sup>[20]</sup>;多孔支撑层具有较高的机械强度、较强的亲水性与较低的孔隙率<sup>[21]</sup>。研究<sup>[22]</sup>发现,多孔支撑层的亲水性较低的话,膜孔内的空气或水蒸气会阻碍水在支撑层内的连续流动,从而加剧了原料液侧的浓差极化现象。相反,在多孔支撑层亲水性较高的条件下,会极大提高膜的水通量。此外,由于正向渗透膜的不对称结构,膜的置向也会影响膜的水通量<sup>[23]</sup>。研究<sup>[24]</sup>表明,当正向渗透膜的活性层朝向原料液时,在废水脱盐过程中其水通量的下降速度较快;而当膜的活性层朝向驱动液时,膜的水通量几乎没有下降,这种由膜朝向引起的水通量改变是由膜的化学特性与流体动力学共同作用的结果<sup>[25]</sup>。

当前,在正渗透微生物燃料电池实际应用中最常见的膜是醋酸纤维膜和薄层复合膜<sup>[26]</sup>。醋酸纤维膜具有良好的亲水性、抗氧化性和较高的机械强度<sup>[27]</sup>,但由于其活性层与支撑层采用同一材料制成,两层之间无明显分界,不利于膜的进一步改性优化性能<sup>[28]</sup>。而薄层复合膜具有较高的孔隙率与机

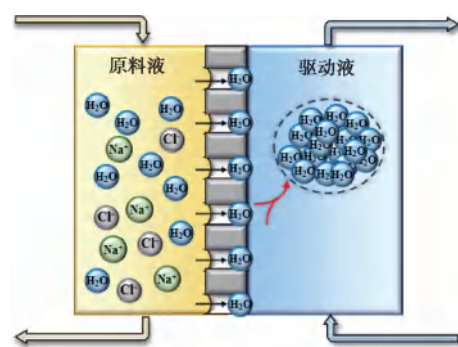


图 2 正向渗透膜脱盐原理

Fig. 2 Principle of Desalination by Forward Osmosis Membrane 械强度,在实际应用中表现出高水通量与污染物截留率,而被更广泛的应用<sup>[29]</sup>。通过对膜改性可进一步提高正渗透微生物燃料电池的运行效能,Tian等<sup>[30]</sup>通过使用磺酸基团在正渗透膜中引入质子导电位点,提高了 61.9% 的水提取效果。膜的改性处理使正渗透微生物燃料电池的电流密度增加了 16.56%,盐度降低了 58.86%。因此,膜的特性影响着水通量和溶质截留,进而影响正渗透微生物燃料电池中的脱盐效率和产电性能。

## 1.3 微生物电极

与传统的微生物燃料电池相似,微生物与电极之间的电子转移效率决定了系统的产电性能<sup>[31]</sup>。选用的电极材料应具有较高的电导率、较大的比表面积、良好的生物相容性和较低的成本。当前,在正渗透微生物燃料电池中阳极常采用碳刷、碳毡、碳布<sup>[32-33]</sup>和石墨纤维刷<sup>[34]</sup>。碳材料的多孔特性有利于电活性微生物形成生物膜,然而其较低的电导率降低了系统电能的输出。通过添加金属可提高碳材料的导电性,但这将提高实际运行的成本。另一方面,通过提高电活性微生物与电极之间的电子传递效率可提高系统的产电性能。龙再柱<sup>[35]</sup>通过在阳极添加铁还原细菌,增加了阳极上电子的产量,促进了电子在微生物与电极间的转移,使污水中 COD 的去除率达到 98.82%,最高输出电能为 1.276 W/m<sup>3</sup>,在提高污染物降解率的同时,进一步提高了系统的产电性能。

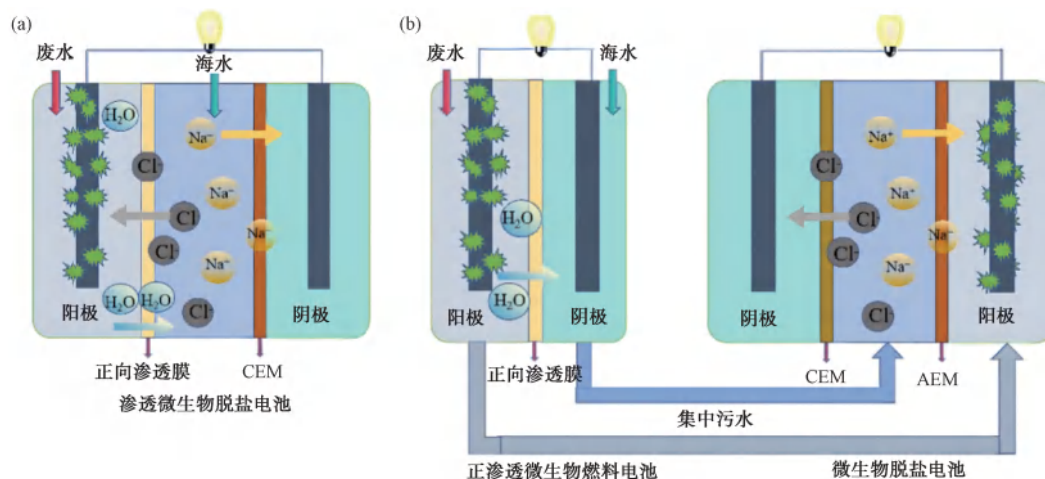
## 2 正渗透微生物燃料电池实际应用中的挑战

### 2.1 海水淡化

当前利用正渗透微生物燃料电池实现海水淡化有 2 种主要方式。一种是通过用正向渗透膜取

代阴离子交换膜形成一个三室微生物脱盐电池配置。与阴离子交换膜相比,正向渗透膜能够更容易地将水从阳极室抽取到中室,进而稀释中室中的盐水,通过稀释以及  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  的定向迁移共同作用实现海水淡化。类似于传统的微生物脱盐电池[图 3(a)]。研究<sup>[36]</sup>采用这种方式实现了

57.8% 的盐分去除。另一种方式是将正渗透微生物燃料电池和微生物脱盐电池进行耦合<sup>[37]</sup>。正渗透微生物燃料电池利用盐水作为驱动液,从废水中回收水,通过稀释可以降低盐水的浓度。随后,稀释后的盐水被供给微生物脱盐电池,进一步脱去盐水中的盐分[图 3(b)]。



注:AEM—阴离子交换膜,CEM—阳离子交换膜。

图 3 (a) 渗透微生物脱盐电池;(b) 液压耦合正渗透微生物燃料电池和微生物脱盐电池

Fig. 3 (a) Osmotic Microbial Desalination Cell;(b) Hydraulically Coupled Osmotic Microbial Fuel Cell and Microbial Desalination Cell

在海水淡化过程中,不可避免的浓差极化会导致膜的水通量降低,从而降低了海水淡化的效果。根据浓差极化发生的位置可以分为外浓差极化与内浓差极化,外部浓差极化是由于溶质在活性层表面的积聚而产生的,可以通过提高原料液的流速来去除,但提高流速会增加系统的能耗,提高运行的成本。内浓差极化是水流动而导致支撑层内的溶质浓度差异,是降低水通量的主要因素<sup>[38]</sup>,且内浓差极化几乎无法通过提高流速来去除,只能对膜进行改性处理来减缓,但传统的改性方法通常耗时、昂贵,会进一步提高海水淡化的成本。寻找简单有效的方法降低浓差极化是正渗透微生物燃料电池实际应用急需解决的问题。

## 2.2 污水处理及浓缩减量化

在正渗透微生物燃料电池中,废水中的有机污染物作为电活性微生物的碳源,使废水得到处理的同时产生电能。目前报道<sup>[39]</sup>的研究中,正渗透微生物燃料电池对 COD 去除效率在 63%~95%。正渗透微生物燃料电池中通过正向渗透膜从废水中提取水。因此,反应结束后阳极室中的废水是被高度浓

缩减量化的。研究<sup>[7]</sup>使用正渗透微生物燃料电池处理家庭废水,随水力停留时间变化实现了 24.3%~72.2% 的体积减少。黄丽等<sup>[40]</sup>利用正渗透微生物燃料电池处理垃圾渗滤液,试验表明,总有机碳(TOC)、氨氮、总氮(TN)和总磷(TP)的去除率都达到 70% 以上。

然而由于不同废水的组分复杂且存在较大差异,在实际应用中容易使膜发生结垢,如图 4 所示,从而影响系统的水通量。生物结垢导致膜结垢是最常见的原因,由于微生物附着在多孔支撑层形成生物膜,造成膜的孔隙率降低,增强膜内部的浓差极化,从而降低了对污水的浓缩效果<sup>[8]</sup>。为了提高对污水中的有机物的降解效果,系统运行时通常会使水流保持较低的横向流速,较低的流速容易促使膜上发生结垢。在保证废水处理效果的同时,降低膜结垢现象是今后研究的重点方向。此外,由于实际应用中所需处理的废水量较大,单个系统可能无法满足规模化处理的进水量。因此,要将多个正渗透微生物燃料电池耦合或者与其他系统联立,此时会面临更多的问题,包括在共享电解质时的质量传递

损失、电堆叠时的电压反冲和功率过大,以及在整个反应器中保持均匀底物特性等。

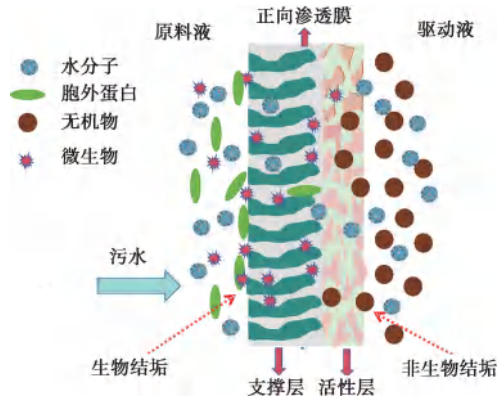


图4 正向渗透膜结垢

Fig. 4 Forward Osmosis Membrane Fouling

### 2.3 同步回收水和能量

正渗透微生物燃料电池的一个突出特点是通过渗透作用从废水中提取水分至驱动液,驱动液中的水可通过简单的脱盐工艺纯化回收<sup>[41]</sup>。目前已被应用于不同废水的处理,如表1所示。根据水质的不同,回收的水可应用于农业灌溉、水产养殖、海水稀释等不同场景。使用正渗透微生物燃料电池可以实现废水再用,而不是简单排放<sup>[42]</sup>。与传统的微生物燃料电池相比,正渗透微生物燃料电池的产电量更高,在较高阴极驱动液浓度下,这一差异更为显

著<sup>[43]</sup>。当氯化钠(58 g/L)被用作驱动液时,正渗透微生物燃料电池的最大功率密度达到 $4.74 \text{ W/m}^3$ ,而传统微生物燃料电池仅为 $3.48 \text{ W/m}^3$ 。Werner等<sup>[34]</sup>比较了空气阴极微生物燃料电池与空气阴极正渗透微生物燃料电池的产电性能,相同运行条件下空气阴极正渗透微生物燃料电池输出功率为 $43 \text{ W/m}^3$ ,几乎是空气阴极微生物燃料电池( $23 \text{ W/m}^3$ )的2倍。正向渗透膜的引入降低了溶液的内阻,提高了氧气的截留率,维持系统阳极液与阴极液pH的稳定性,从而使系统的输出功率得以提高<sup>[44]</sup>。传统的正渗透微生物燃料电池常采用氯化钠溶液作为驱动液,而Ismail等<sup>[45]</sup>将石油采出水作为驱动液,在实现污水净化、海水脱盐的同时,驱动液中石油采出水的溶解性总固体(TDS)也降低了80%,实现了正渗透微生物燃料电池的功能最大化。

在正向渗透过程中,随着驱动液被原料液中提取的水分不断稀释,不可避免地会出现溶质的反向流动,可能会导致阳极室中盐离子的累积,进而造成电活性微生物失活与水通量降低<sup>[46]</sup>。另外,现有的大部分正向渗透膜大多对质子的选择性较差,主要依靠水的跨膜流动实现质子的跨膜传输,随着渗透压的降低,质子的传输效率也随之降低,从而降低了系统电能的产生<sup>[47]</sup>。减少溶质反向通量,提高质子跨膜传输效率是维持正渗透微生物燃料电池稳定回

表1 用于污水净化与海水脱盐的正渗透微生物燃料电池性能参数

Tab. 1 Performance Parameters of Forward Osmosis Microbial Fuel Cells for Wastewater Purification and Seawater Desalination

| 原料液    | 驱动液   | 渗透膜              | 电极                    | 水通量/<br>[ $\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] | 最大输出<br>电压/mV | 输出电能                  | 电流密度                  | 文献<br>来源 |
|--------|-------|------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| 垃圾渗滤液  | 氯化钠   | 正向渗透膜            | 碳毡(阳极)、碳毡(阴极)         | 0.979                                                         | 615           | $0.442 \text{ W/m}^2$ | $1.663 \text{ A/m}^2$ | [40]     |
| 垃圾渗滤液  | 氯化钠   | 正向渗透膜            | 碳毡(阳极)、碳毡(阴极)         | 0.98                                                          | 614           | $0.44 \text{ W/m}^2$  | $1.663 \text{ A/m}^2$ | [15]     |
| 合成废水   | 硝酸银   | 正向渗透膜            | 碳毡(阳极)、碳布(阴极)         | /                                                             | 490           | $0.6 \text{ W/m}^2$   | $0.123 \text{ A/m}^2$ | [48]     |
| 合成废水   | 氯化钠   | 正向渗透膜            | 碳毡(阳极)、空气阴极           | 2.3                                                           | 670           | $4.38 \text{ W/m}^3$  | /                     | [32]     |
| 生活废水   | 海水    | 正向渗透膜            | 碳刷(阳极)、碳片(阴极)         | 1.46                                                          | 348           | $28.9 \text{ W/m}^3$  | /                     | [39]     |
| 合成废水   | 氯化钠   | 正向渗透膜            | 碳刷(阳极)、涂有铂的碳布(阴极)     | 8.5                                                           | 440           | $3.45 \text{ W/m}^3$  | /                     | [49]     |
| 模拟生活污水 | 氯化钠   | 正向渗透膜            | 碳刷(阳极)、涂有铂的碳布(阴极)     | 2.0~2.9                                                       | 500           | $0.12 \text{ W/m}^3$  | $0.58 \text{ A/m}^3$  | [50]     |
| 模拟养猪废水 | 氯化钠   | 正向渗透膜            | 碳毡+石墨棒(阳极)、碳毡+石墨棒(阴极) | 1.83                                                          | 840           | $1.276 \text{ W/m}^3$ | $0.651 \text{ A/m}^3$ | [35]     |
| 生活污水   | 油田采出水 | 正向渗透膜/<br>阳离子交换膜 | 石墨电极(阳极)、石墨电极(阴极)     | 4.17                                                          | 540           | $0.485 \text{ W/m}^2$ | $0.136 \text{ A/m}^2$ | [45]     |

收水和电能的关键。

### 3 针对性解决方案

目前,正渗透微生物燃料电池的研究和应用仍处于试验阶段,要实现大规模化应用就必须克服浓差极化、膜结垢、反向溶质通量与系统规模化设计的问题。将驱动液与正向渗透膜活性层的选择性进行匹配,可以有效地控制系统的内部浓差极化与反向溶质通量产生。选择具有高扩散性、低黏度和较小分子大小的驱动液,可以控制内部浓差极化的发生,但是驱动液的小尺寸也可能引发反向溶质通量,此时选择合适的膜,其活性层可将驱动液中的溶质有效截留。此外,通过保持驱动液的 pH 在碱性条件下可以最小化反向溶质通量,可以选择使用聚丙烯酸作为 pH 响应型驱动液,其反向溶质通量与氯化钠相比更低<sup>[51]</sup>。通过在正向渗透膜上添加防污涂层可以有效减少膜结垢现象,降低了因系统流速提高而造成的能耗增加。为进一步提高污水中有机物的去除率与减缓膜结垢现象,可将正渗透微生物燃料电池与其他生物处理技术耦合。此外,正向渗透上的污垢可以通过反冲洗减轻,因为与其他压力驱动膜相比,其污垢层相对较松散。在系统规模化设计方面,可以将正渗透微生物燃料电池与微生物脱盐电池联立,提高其脱盐效率,降低成本。也可以采用类似正渗透微生物燃料电池耦合上流式微生物脱盐电池、正渗透微生物燃料电池耦合人工湿地以及正渗透微生物燃料电池与海水淡化相结合的混合系统来提高系统性能,使其在水和营养物质回收以及能源生产方面具有规模化可行性。除此之外,正渗透微生物燃料电池也可以用作反渗透和电脱盐等海水淡化过程的前处理技术。它可以减少负荷,并减少其他技术的能源需求。要想实现正渗透微生物燃料电池的实际应用,还需进一步加深对该技术的了解,通过对其运行模型的构建是明确运行效能的方法。在实际应用前可以通过生命周期分析以明晰正渗透微生物燃料电池的技术经济可行性和环境影响。

### 4 结论与展望

正渗透微生物燃料电池采用正向渗透膜替代传统的离子交换膜,在实现废水减污脱盐的同时产生电能,是一种低碳环保的污水处理技术。然而在实际应用中,由于浓差极化、膜结垢、反向溶质通量、系

统设计等问题造成水通量与产电性能的降低,提高了实际运行成本,限制了其在实际中的应用。因此,本文探讨了影响正渗透微生物燃料电池运行效能的关键因素,分析了该技术在应用中面临的问题并提出了针对性的解决方案。为进一步提高正渗透微生物燃料电池的运行效能及规模,未来的研究可以从以下几个方面切入。

(1) 开发低成本、高水通量的膜,比如使用纳米结构材料和仿生分子来增强膜的性能等。解决现有的正向渗透膜在实际应用中表现出低水通量与易膜结垢问题。

(2) 筛选培养嗜电微生物,优化微生物产电性能,研究嗜电微生物与电极的相互作用。

(3) 优化正渗透微生物燃料电池技术的放大化应用,包括反应器的设计、配置、膜材料、电极等,降低由设计不合理引起的系统能量损失。利用耦合系统,如正渗透微生物燃料电池耦合人工湿地等提高性能,提高系统在水和营养物回收以及能源生产方面的商业可行性。

(4) 利用盐厂的盐水或反渗透废水等廉价易得废水作为驱动液,进一步降低该技术实际运行的成本以及驱动液再利用的需求。如果以上的问题得到解决,有望实现正渗透微生物燃料电池的大规模化应用,解决海水淡化高能耗、废水减污与浓缩难的问题,同时实现废水中的清洁水回用,从而构建一种可持续发展的低碳废水处理解决方案。

### 参考文献

- [1] 袁玺,郭宪. 膜生物反应技术在污水处理中的应用[J]. 低碳世界, 2024, 14(1): 22-24.  
YUAN X, GUO X. Application of membrane bioreactor technology in wastewater treatment [J]. Low Carbon World, 2024, 14(1): 22-24.
- [2] FRANCIS L, OGUNBIYI O, SATHTHASIVAM J, et al. A comprehensive review of forward osmosis and niche applications [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2020, 6(8): 1986-2015.
- [3] LUTCHMIAH K, VERLIEFDE A R D, ROEST K, et al. Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review [J]. Water Research, 2014, 58: 179-197. DOI: 10.1016/j.watres.2014.03.045.
- [4] ZHANG B P, GAO H P, TONG X, et al. Chapter 6-Pressure retarded osmosis and reverse electrodialysis as power generation membrane systems [M]//BASILE A, CASSANO A, FIGOLI A.

- Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, 2019; 133–152.
- [ 5 ] KHAN M J, SURYAVANSHI V J, JOSHI K B, et al. Chapter 16-Photosynthetic microalgal microbial fuel cells and its future upscaling aspects [M]//EL-SHEEKH M, ABOMOHR A E-F. Handbook of Algal Biofuels. Amsterdam: Elsevier, 2022; 363–384.
- [ 6 ] GUNASEELAN K, JADHAV D A, PANT D, et al. Effectiveness of biophotovoltaics system modified with fuller-clay composite separators for chromium removal [J]. *Electrochimica Acta*, 2022, 426: 140714. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140714.
- [ 7 ] GE Z, PING Q Y, XIAO L, et al. Reducing effluent discharge and recovering bioenergy in an osmotic microbial fuel cell treating domestic wastewater [J]. *Desalination*, 2013, 312: 52–59. DOI: 10.1016/j.desal.2012.08.036.
- [ 8 ] LU Y Q, BIAN X, WANG H L, et al. Simultaneously recovering electricity and water from wastewater by osmotic microbial fuel cells: Performance and membrane fouling [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, 12: 5. DOI: 10.1007/s11783-018-1049-4.
- [ 9 ] WU S M, QIAN G R, HE Z. Examination of inorganic-based draw solutes and mitigation of their reverse solute flux in osmotic microbial fuel cells [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2019, 94(7): 2107–2114.
- [ 10 ] QIN M, ABU-REESH I M, HE Z. Effects of current generation and electrolyte pH on reverse salt flux across thin film composite membrane in osmotic microbial fuel cells [J]. *Water Research*, 2016, 105: 583–590. DOI: 10.1016/j.watres.2016.09.028.
- [ 11 ] ZHANG H L, DUAN L, LI S L, et al. Simultaneous wastewater treatment and resources recovery by forward osmosis coupled with microbial fuel cell: A review [J]. *Membranes*, 2024, 14(2): 29.
- [ 12 ] PANT D, BOGAERT V G, DIELS L, et al. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 1533–1543.
- [ 13 ] GE Z, HE Z. Effects of draw solutions and membrane conditions on electricity generation and water flux in osmotic microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 109: 70–76. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.01.044.
- [ 14 ] LONG Q W, JIA Y M, LI J P, et al. Recent advance on draw solutes development in forward osmosis [J]. *Processes*, 2018, 6(9): 165–175.
- [ 15 ] 黄丽, 黄满红, 陈亮, 等. 汲取液对正渗透微生物燃料电池处理垃圾渗滤液的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3830–3836.
- HUANG L, HUANG M H, CHEN L, et al. Effect of draw solution on the performance of osmosis microbial fuel cell for landfill leachate treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10): 3830–3836.
- [ 16 ] 谢朋, 张忠国, 孙涛, 等. 正渗透过程中汲取质反向渗透研究进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(10): 3540–3550.
- XIE P, ZHANG Z G, SUN T, et al. Research progress of reverse draw solute permeation in forward osmosis process [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(10): 3540–3550.
- [ 17 ] 刘帅, 谢朝新, 周宁玉, 等. 葡萄糖、蔗糖、果糖作正渗透汲取液溶质的对比实验研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(5): 42–45, 49.
- LIU S, XIE C X, ZHOU N Y, et al. Comparative study of glucose, sucrose and fructose as draw solutes in forward osmosis [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(5): 42–45, 49.
- [ 18 ] SUZAIMI N D, GOH P S, ISMAIL A F, et al. Strategies in forward osmosis membrane substrate fabrication and modification: A Review [J]. *Membranes*, 2020, 10(11): 332–374.
- [ 19 ] 祁伟健, 张胜寒, 王若彤, 等. 正渗透膜研究进展及其在电厂水处理中的应用[J]. *现代化工*, 2022, 42(1): 85–89.
- QI W J, ZHANG S H, WANG R T, et al. Research progress in positive permeation membrane and its application in water treatment in power plant [J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 43(1): 85–89.
- [ 20 ] TANG C Y, SHE Q H, LAY W C L, et al. Coupled effects of internal concentration polarization and fouling on flux behavior of forward osmosis membranes during humic acid filtration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 354(1): 123–133.
- [ 21 ] CATH T Y, CHILDRESS A E, ELIMELECH M. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 281(1): 70–87.
- [ 22 ] MCCUTCHEON J R, ELIMELECH M. Influence of membrane support layer hydrophobicity on water flux in osmotically driven membrane processes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 318(1/2): 458–466. DOI: 10.1016/j.memsci.2008.03.021.
- [ 23 ] 薛念涛, 潘涛. 正渗透浓差极化与膜污染特征的研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2015, 35(5): 109–113.
- XUE N T, PAN T. Research progress on characterization of concentration polarization and membrane fouling of forward osmosis [J]. *Membrane Science and Technology*, 2015, 35(5): 109–113.
- [ 24 ] NG H Y, TANG W, WONG W S. Performance of forward (direct) osmosis process: Membrane structure and transport phenomenon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(7): 2408–2413.
- [ 25 ] MI B, ELIMELECH M. Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 348(1): 337–345.

- [26] PARDESHI P, MUNGRAY A. High flux layer by layer polyelectrolyte FO membrane; Toward enhanced performance for osmotic microbial fuel cell [J]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 2014, 63(12): 595–601.
- [27] ZHAO S F, ZOU L D, TANG C Y, et al. Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 396: 1–21. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.12.023.
- [28] 唐媛媛, 徐佳, 陈幸, 等. 正渗透脱盐过程的核心——正渗透膜[J]. 化学进展, 2015, 27(7): 818–830.  
TANG Y Y, XU J, CHEN X, et al. Core of forward osmosis for desalination——Forward osmosis membrane [J]. Progress in Chemistry, 2015, 27(7): 818–830.
- [29] SHEN L, TIAN L, ZUO J, et al. Developing high-performance thin-film composite forward osmosis membranes by various tertiary amine catalysts for desalination [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019, 2(1): 51–69.
- [30] TIAN E L, LIU Y, YIN F J, et al. Facilitating proton transport by endowing forward osmosis membrane with proton conductive sites in osmotic microbial fuel cell [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138767. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138767.
- [31] 关毅, 张鑫. 微生物燃料电池[J]. 化学进展, 2007, 19(1): 74–79.  
GUAN Y, ZHANG X. The research of microbial fuel cells[J]. Progress in Chemistry, 2007, 19(1): 74–79.
- [32] LIU J M, WANG X H, WANG Z W, et al. Integrating microbial fuel cells with anaerobic acidification and forward osmosis membrane for enhancing bio-electricity and water recovery from low-strength wastewater [J]. Water Research, 2017, 110: 74–82. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.012.
- [33] PARDESHI P M, MUNGRAY A A. Performance of photopolymerized active layer forward osmosis membrane in the osmotic microbial fuel cell [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23: 101669. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101669.
- [34] WERNER C M, LOGAN B E, SAIKALY P E, et al. Wastewater treatment, energy recovery and desalination using a forward osmosis membrane in an air-cathode microbial osmotic fuel cell [J]. Journal of Membrane Science, 2013, 428: 116–122. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.10.031.
- [35] 龙再柱. 阳极铁还原细菌强化 OsMFC 对养猪废水的处理及膜抗污染能力研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
LONG Z Z. Study on anodic iron reduction bacteria enhanced OsMFC treatment of pig wastewater and pollution resistance of membrane [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [36] ZHANG B, HE Z. Integrated salinity reduction and water recovery in an osmotic microbial desalination cell [J]. Rsc Advances, 2012, 2(8): 3265–3269.
- [37] ZHANG B, HE Z. Improving water desalination by hydraulically coupling an osmotic microbial fuel cell with a microbial desalination cell [J]. Journal of Membrane Science, 2013, 441: 18–24. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.04.005.
- [38] XU W X, CHEN Q Z, GE Q C. Recent advances in forward osmosis (FO) membrane: Chemical modifications on membranes for FO processes [J]. Desalination, 2017, 419: 101–116. DOI: 10.1016/j.desal.2017.06.007.
- [39] AL-MAMUN A, BAAWAAIN M S, DHAR B R, et al. Improved recovery of bioenergy and osmotic water in an osmotic microbial fuel cell using micro-diffuser assisted marine aerobic biofilm on cathode [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 128: 235–242. DOI: 10.1016/j.bej.2017.09.020.
- [40] 黄丽, 黄满红, 陈亮, 等. 正渗透微生物燃料电池处理垃圾渗滤液的产能和降污性能研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(1): 30–32, 37.  
HUANG L, HUANG M H, CHEN L, et al. Study on the production capacity and pollution reduction performance of landfill leachate treatment by osmosis microbial fuel cell [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(1): 30–32, 37.
- [41] LU Y B, QIN M H, YUAN H Y, et al. When bioelectrochemical systems meet forward osmosis: Accomplishing wastewater treatment and reuse through synergy [J]. Water, 2015, 7(1): 38–50.
- [42] YANG Y L, WU Y, LU Y X, et al. A comprehensive review of nutrient-energy-water-solute recovery by hybrid osmotic membrane bioreactors [J]. Bioresource Technology, 2021, 320: 124300. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124300.
- [43] ZHANG F, BRASTAD K S, HE Z. Integrating forward osmosis into microbial fuel cells for wastewater treatment, water extraction and bioelectricity generation [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(15): 6690–6696.
- [44] QIN M H, PING Q Y, LU Y B, et al. Understanding electricity generation in osmotic microbial fuel cells through integrated experimental investigation and mathematical modeling [J]. Bioresource Technology, 2015, 195: 194–201. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.06.013.
- [45] ISMAIL Z Z, IBRAHIM M A. Desalination of oilfield produced water associated with treatment of domestic wastewater and bioelectricity generation in microbial osmotic fuel cell [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 490: 247–255. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.05.012.
- [46] LU Y L, HE Z. Mitigation of salinity buildup and recovery of wasted salts in a hybrid osmotic membrane bioreactor-electrodialysis system [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(17): 10529–10535.
- [47] 段亮, 李世龙, 邢飞. 正渗透微生物燃料电池反向溶质通量和膜污染控制技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(3): 1150–1160.

(下转第44页)

正地代替人工完成各种复杂、危险、工作量大的工作,助力城镇水务行业迈向智能化、智慧化。

### 参考文献

- [1] 刘雅慧. 排水检测行业中水质检测的方法分析[J]. 山西化工, 2023, 43(12): 77-79.  
LIU Y H. Analysis of water quality testing methods in the drainage testing industry [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(12): 77-79.
- [2] 覃建业, 喻浩, 何仁杰, 等. 基于无线通信的水下水质检测机器人系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(20): 30-34.  
QIN J Y, YU H, HE R J, et al. Design of underwater water quality detection robot system based on wireless communication [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(20): 30-34.
- [3] 杨明霞. 城市排水管道检测机器人研究进展[J]. 广东建材, 2023, 39(8): 132-134.  
YANG M X. Research progress on urban drainage pipeline detection robots [J]. Guangdong Building Materials, 2023, 39(8): 132-134.
- [4] 朱贵兵, 李俊, 苏善昭. 管内检测机器人在城镇供水管网评估中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 183-190.  
ZHU G B, LI J, SU S Z. The application of in pipe inspection robots in urban water supply network evaluation [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 183-190.
- [5] 吴迪, 张云超, 崔苗苗, 等. 排水管道检测机器人研究进展[J]. 智能城市, 2023, 9(4): 19-22.  
WU D, ZHANG Y C, CUI M M, et al. Research progress on drainage pipeline inspection robots [J]. Intelligent City, 2023, 9(4): 19-22.
- [6] 闫宏伟, 李健, 刘翼, 等. 直轮驱动式自适应管道机器人通过性能研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 300-304.  
YAN H W, LI J, LIU Y, et al. Research on the performance of a straight wheel driven adaptive pipeline robot [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023(5): 300-304.
- [7] 刘瑾, 高增亮, 钱明星, 等. 水面垃圾清理设备的研究现状及发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(5): 82-84, 97.  
LIU J, GAO Z L, QIAN M X, etc. Development of surface waste disposal equipment [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(5): 82-84, 97.
- [8] 朱俊卿, 魏海娟, 陈祺炜, 等. 封闭污水处理环境下无人巡检装置开发和试验[J]. 电气自动化, 2022, 44(5): 112-114, 118.  
ZHU J Q, WEI H J, CHEN Q W, et al. Development and testing of unmanned inspection devices in enclosed sewage treatment environments [J]. Electrical Automation, 2022, 44(5): 112-114, 118.
- [9] 刘尚珩. 无线巡检机器人在综合管廊的应用与研究[J]. 设备管理与维修, 2023(22): 26-28.  
LIU S J. Application and research of wireless inspection robots in comprehensive pipe galleries [J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(22): 26-28.
- [10] 石红梅, 侯伟. 管道检测机器人关键技术研究进展[J]. 机械制造, 2022, 60(7): 88-90.  
SHI H M, HOU W. Research progress of key technologies of pipeline detection robot [J]. Machinery, 2022, 60(7): 88-90.
- [48] 王昭云. 垃圾渗滤液对正渗透微生物燃料电池运行性能的研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2019.  
WANG Z Y. Study on the performance of landfill leachate for osmosis microbial fuel cell [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2019.
- [49] LIU Y, HAN M Z, LI F M, et al. Performance and mechanism of SMX removal by an electrolysis-integrated ecological floating bed at low temperatures: A new perspective of plant activity, iron plaque, and microbial functions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 463: 132802. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132802.
- [50] 张春秋, 易夏文, 王靖翔, 等. 连续流正渗透微生物燃料电池的运行性能研究[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(6): 83-89.  
ZHANG C Q, YI X W, WANG J X, et al. Performance of a novel osmotic microbial fuel cell in a continuous operation [J]. Membrane Science and Technology, 2017, 37(6): 83-89.
- [51] JAIN A, ZOU S, HE Z. Chapter 2-Integration of membranes into bioelectrochemical systems for enhanced treatment performance [M]//BASILE A, COMITE A. Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. Amsterdam: Elsevier, 2020: 35-51.