

蒋进元,张月,何绪文,等.微生物燃料电池工作原理及产电性能提升策略[J].环境工程技术学报,2024,14(2):699-709.

JIANG J Y,ZHANG Y,HE X W,et al.Working principle of microbial fuel cell and strategies for enhancing power generation performance[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2): 699-709.

微生物燃料电池工作原理及产电性能提升策略

蒋进元¹,张月^{1,2*},何绪文²,谭伟¹,宋浩洋¹,石冬妮¹,赵洪兵³

1.中国环境科学研究院环境污染控制工程技术研究中心

2.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院

3.四川省广元生态环境监测中心站

摘要 微生物燃料电池(MFC)是一种解决其他能源在环境方面不足的新技术,目前低能量输出是MFC实际应用的关键瓶颈。基于MFC工作原理,提出微生物活性差、电子迁移阻力、质子传输阻力及阴极还原反应缓慢是MFC能量输出的限制因素,并从以下5个方面综述了提升MFC产电性能策略:调节pH和选择最佳盐度,加强微生物代谢活性;改性阳极材料,降低电子迁移阻力;增强电解液电导率、优化隔膜材料及缩短电极间距减小质子传输阻力;制备高效阴极催化剂和选择优异电子受体加快阴极还原反应速率;改进MFC反应器构型,提高整体产电性能。未来,可在合成新型阴极催化剂、降低膜污染、优化微生物生长环境、制备优异的电极材料和改进MFC反应器配置5个方面开展重点研究。

关键词 微生物燃料电池(MFC);产电性能;输出功率;微生物活性;策略

中图分类号:X703 文章编号:1674-991X(2024)02-0699-11 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230563

Working principle of microbial fuel cell and strategies for enhancing power generation performance

JIANG Jinyuan¹, ZHANG Yue^{1,2*}, HE Xuwen², TAN Wei¹, SONG Haoyang¹, SHI Dongni¹, ZHAO Hongbing³

1.Research Center of Environmental Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing)

3.Sichuan Guangyuan Ecological Environment Monitoring Center Station

Abstract Microbial fuel cell (MFC) is a new technology that addresses the environmental deficiencies of other energy sources. At present, low energy output is a key bottleneck in the practical application of MFC. Based on the working principle of MFC, it was proposed that poor microbial activity, resistance to electron migration, proton transfer resistance, slow cathodic reduction reaction were the limiting factors for the energy output of MFC. The strategies for improving MFC electricity production performance were summarized from the following five aspects: adjusting pH and selecting the optimal salinity to enhance microbial metabolic activity; modifying anode materials to reduce electron migration resistance; enhancing electrolyte conductivity, optimizing membrane materials, and shortening electrode spacing to reduce proton transfer resistance; preparing efficient cathode catalysts and selecting excellent electron acceptors to accelerate the cathodic reduction reaction rate; and improving the configuration of MFC reactor to improve overall power generation performance. In the future, key research could be carried out in five areas, including synthesis of new cathode catalysts, reduction of membrane pollution, optimization of microbial growth environment, preparation of excellent electrode materials, and improvement of MFC reactor configuration.

Key words microbial fuel cells (MFC); performance of power generation; output power; microbial activity; strategies

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)利用微生物在阳极的代谢活动和阴极的氧化还原反应,将化学能转化为电能,与污水处理相结合实现同步

废水处理和电能回收^[1-2],是一种具有应用前景的可持续发展技术^[3],有助于实现污水处理技术从耗能过程向产能过程过渡。与现有的传统污水处理技术相

收稿日期:2023-07-30

基金项目:黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022-YRUC-01-0203);广元市长江水生态环境保护研究项目(2022-LHYJ-02-0509-06)

作者简介:蒋进元(1974—),男,研究员,博士,主要从事水污染控制技术研究,jiangjy@cras.org.cn

*通信作者:张月(1999—),女,硕士研究生,主要从事水污染控制技术研究,zhang08150924@163.com

比, MFC 具有以下优势: 1) 可将底物直接转化为电能, 燃料来源广泛; 2) 不同于现有的生物能处理, MFC 在常温环境条件下能够有效运行, 环境友好、操作条件温和; 3) MFC 产生的废气主要是 CO₂, 不需要进行废气处理; 4) MFC 不需要输入较大能量, 对于空气阴极或单室微生物燃料电池仅需通风就可以被动地补充阴极气体; 5) 无二次污染, 产泥量少。在缺乏电力基础设施的局部地区, MFC 具有广泛应用潜力, 同时也扩大了能源需求燃料的多样性^[4-5], 可以最大限度地实现废水处理和可持续发展。

MFC 可以不经过燃烧仅通过发生化学反应便能将化学能转化为可以直接利用的电能^[6-7], 其能源化及资源化发展潜力较大^[8-9], 是一种低能耗、高效益、环保的新型污水处理工艺^[10-12], 在生产电能和生物能源方面受到越来越多的关注^[13-14], 成为废水处理和新能源领域的热点之一。基于 Web of Science (WoS) 核心合集中检索到的 2012—2022 年论文的发文章可知, 近 10 年来关于 MFC 技术的研究热度呈快速上升趋势(图 1)。然而, MFC 技术自诞生以来, 一直处于实验室研究阶段, 主要原因是 MFC 产电效率低且影响因素较多, 限制了其在实际污水处理中的规模化应用^[15]。因此, 提升 MFC 产电性能, 对于 MFC 的发展及应用至关重要。

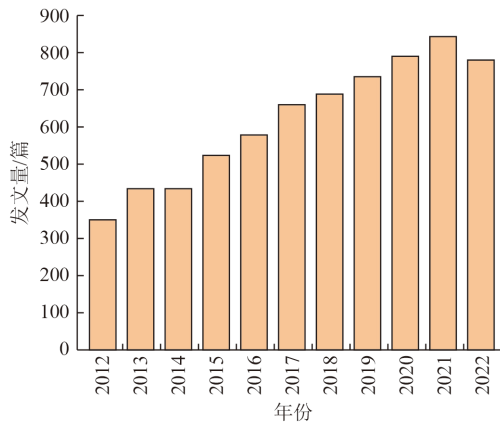


图 1 WoS 中关于微生物燃料电池技术研究的年发文章量
Fig.1 Annual publications on research on microbial fuel cell technology in WoS

近年来, 研究者们对 MFC 输出功率影响因素进行了深入研究, 取得了较大的进步, 但大多数研究工作集中在阳极性能、阴极性能、阻隔材料以及 MFC 内阻方面^[16-19], 对于 MFC 产电性能提升策略研究比较分散。因此, 笔者基于 MFC 输出功率的影响因素, 结合 MFC 工作原理, 对 MFC 产电性能提升策略进行了综述, 并对未来研究方向进行展望, 以期后续研究提供理论参考。

1 MFC 工作原理

MFC 主要包括阳极室、阴极室、阳极、阴极、隔膜、电解液和微生物等构件(表 1)。图 2 为 MFC 的工作原理示意。

表 1 MFC 结构
Table 1 Structure of MFC

组件	组成和功能
阳极室	由阳极电极和微生物组成, 容纳污水, 是微生物降解底物的场所
阴极室	由阴极电极和电催化剂组成, 是阴极还原反应发生的场所
阳极	一般采用碳基电极作为阳极电极, 如碳布或碳纸, 阳极电极与金属丝连接, 以收集细菌氧化过程中产生的电子, 并将电子提供给阴极电极
阴极	通常采用涂有活性催化剂的碳基电极作为阴极电极, 将各种铂、非铂、杂原子掺杂的催化剂用作还原反应催化剂, 以加速阴极还原反应动力学
电解液	从阳极室到阴极室产生的质子由电解液转移
燃料	各种有机来源均可作为 MFC 的燃料, 如生活污水和各种工业废水
微生物	将底物氧化为 CO ₂ , 产生电子, 并将电子从电池内部转移到阳极表面 ^[20]
隔膜	阻隔阳极室和阴极室, 具有传导质子的作用

MFC 的产电过程主要包括以下 4 个步骤: 1) 阳极室中微生物在厌氧条件下分解废水中有机物, 产生二氧化碳、质子和电子^[21]; 2) 质子通过隔膜(通常为质子交换膜(PEM), 只允许质子通过, 阻碍其他离子通过)从阳极室到达阴极室^[22]; 3) 电子通过一系列的传递先到达阳极, 再通过外电路的传递最终到达阴极^[23], 从而产生电流; 4) 在阴极上质子与电子受体(一般为氧气)和外电路传递来的电子反应生成水^[24-25]。以葡萄糖为阳极底物, O₂ 为阴极电子受体时, 电极反应式如下。

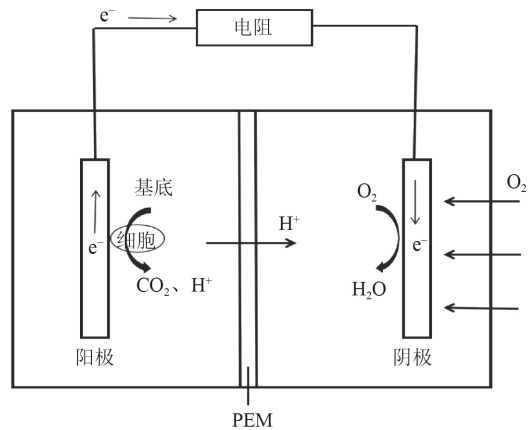
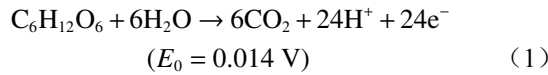


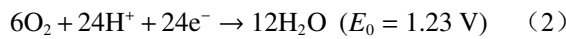
图 2 MFC 工作原理示意^[26]

Fig.2 Schematic diagram of MFC working principle

阳极反应:



阴极反应:



总反应:



式中 E_0 为电动势。

MFC 的正常运行需要保证产电的每个步骤顺利完成, 包括产电微生物的代谢活动, 电子从细胞传递至阳极, 质子透过隔膜到达阴极, 质子和电子在阴极与电子受体反应 4 个过程^[27]。表 2 根据 MFC 工作原理列出了对应的影响因素及策略方法。结合 MFC 工作原理可知, 底物降解、微生物向阳极的电子转移、质子通过液体介质从阳极向阴极迁移、阴极还原反应速率是影响 MFC 性能的关键步骤^[28-29]。

表 2 MFC 影响因素及对应措施

Table 2 MFC influencing factors and corresponding measures

序号	工作原理	限速步骤	影响因素	策略方法
1	阳极室中微生物分解废水中有机物, 产生 CO_2 、 H^+ 和电子	底物降解	微生物活性	调节 pH 或选择最佳盐度
2	电子从微生物传递到阳极, 并通过外电路传递到阴极, 从而产生电流	电子转移	阳极材料	改性阳极材料
3	H^+ 通过隔膜从阳极到达阴极	质子传递	膜	优化膜材料
			电极间距	缩短电极间距
			电解液	加强电解液电导率
4	在阴极上 H^+ 与电子受体和电子反应生成水	阴极还原反应	催化剂 电子受体	制备高效催化剂 选择优异电子受体

2 提高 MFC 产电性能策略

底物降解速率、电子转移速率、质子传递速率以及阴极还原反应速率是影响 MFC 性能的主要因素^[30]。针对这 4 个影响因素, 主要从以下 5 个方面提出对应的解决措施。

2.1 加强微生物活性

阳极上的厌氧微生物膜对于 MFC 的生物降解和发电过程起着至关重要的作用, 微生物活性会显著影响 MFC 产电性能。阳极室的工作条件会影响阳极微生物的生长和代谢活性, 通过调节阳极溶液的 pH 和盐度条件, 可为微生物的生长代谢提供最佳生长环境, 增强微生物代谢活性, 提高产电性能。

2.1.1 调节 pH

阳极溶液 pH 通过改变阳极微生物的催化活性^[31-32] 和附着数量影响电化学性能, 根据微生物培

养环境的不同, 不同微生物适应的 pH 环境不同, 通过调节 pH 为微生物提供最佳生长环境, 有利于加强微生物代谢活性, 从而提高 MFC 产电性能。然而 MFC 系统内部发生的一系列化学反应会导致溶液 pH 发生变化, 可以在阳极溶液中添加缓冲溶液以调节溶液 pH, 提高系统稳定性^[33]。

一般情况下, 微生物在微碱性条件下可以达到最佳生长状态, pH 过高或过低会在一定程度上抑制阳极细菌的活性。当阳极环境 pH 为 8 左右时, 有利于产电细菌的生长, 且 pH 为 8 时产生的功率密度是 pH 为 6 的 3.8~5.8 倍^[34]。Kumar 等^[35] 研究了硫酸盐还原菌在不同 pH 环境条件下对 MFC 产电的影响, 当 pH 为 8 时, 产生的功率密度和电流密度最大, 分别为 4.4 W/m^2 和 48 A/m^2 ; 当 pH 下降时, 功率密度和电流密度进一步降低, 表明硫酸盐还原菌在 pH 为 8 时表现出较好的性能, 而酸性条件不利于其生长和繁殖。Yuan 等^[32] 也进行了相同的研究, 结果表明, 不同 pH 条件下阳极附着细菌数量不同, 微碱性条件为细菌生长提供了较好的环境; 与 pH 为 7 时相比, pH 为 9 时阳极附着的细菌数量有所增加, 而 pH 为 5 时阳极附着细菌数量减少。

2.1.2 选择最佳盐度

MFC 的产电性能取决于微生物对溶液盐度的耐受性, 各项研究表明, 提高底物盐度可以提高 MFC 的产电性能, 但如果盐度增加过多超过了微生物的耐盐性, 则会抑制微生物活性, 降低 MFC 的输出功率^[35]。当电解液盐度超过微生物的耐受值时, 微生物细胞会因为渗透压脱水使活性下降, 从而导致 MFC 产电性能下降。因此, 选择最佳盐度水平, 有利于保持微生物代谢活性, 从而提高 MFC 产电性能。

由于培养环境的不同, 不同电化学活性微生物的耐盐性不同, 从含盐沉积物中驯化的发电细菌可以耐受的最佳盐度为 250 g/L , 在以生活污水为接种物的 MFC 中最佳盐度为 $340\sim 400 \text{ mmol/L}$, 用厌氧污泥接种的 MFC 最佳盐度更低^[36]。功率密度随着盐度的增加先提高, 再随着盐添加量超过微生物的耐受值而降低。Kumar 等^[35,37] 通过向阳极溶液中添加 NaCl 证明了增加底物盐度可以提高 MFC 产电性能, 但当盐度超过细菌的耐受值时, 微生物活性下降, 发电量和电压输出也随之下降。

2.2 降低电子迁移阻力

微生物将电子转移到电极上的机制可以分为 2 种类型 (图 3): 直接电子转移 (细胞表面与电极直接接触) 和间接电子转移 (通过电子介质)。但大多数外源性介质有毒且价格昂贵, 所以并没有实际应

用^[38],目前研究较多的是不依赖于介体的直接电子转移。在 MFC 组件中阳极电极在能量产生和污染物去除中起着至关重要的作用^[39]。许多具有电化学生活性的微生物具有将有机物代谢产生的电子直接转移到阳极的能力^[40],阳极电极与微生物直接接触,影响电子从微生物转移到阳极表面的速率。理想的电极材料应具有生物相容性,有利于微生物附着以及电子的转移和流动^[41],还应具有良好的导电性和较低的电阻^[42]。

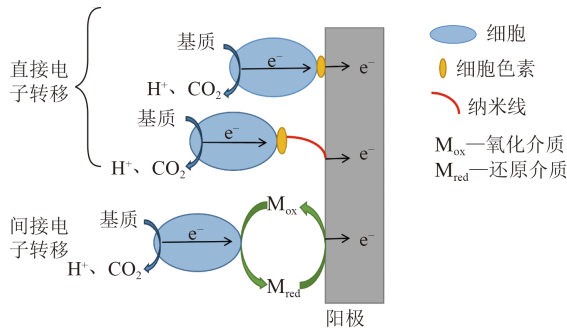


图 3 阳极电子转移示意^[43]

Fig.3 Schematic diagram of anode electron transfer

阳极材料的类型与组成会影响细菌附着和电子流动的难易程度^[44]。目前已经研究的阳极电极材料有碳基材料(碳纸、碳布、碳棒、碳纤维、石墨棒、石墨刷、石墨片、石墨布和石墨纤维)、金属基材料(Au、Cu、Al、Ag)和导电聚合物(聚吡啶、聚苯胺)^[45-46],但这些材料固有的疏水性不利于微生物黏附,导致电子传递能力差,而微生物分泌的物质对阳极材料表面的污染又进一步加剧了该问题^[47-48]。为了促进电子转移和微生物黏附,可以对电极材料进行改性来增强电极的物理化学性能^[49-50]。通过对阳极材料改性,可以提高阳极的比表面积,增大微生物的附着面积,加速阳极微生物的电化学反应。Wu等^[51]利用沸石对阳极电极材料进行改性,沸石的微孔结构提高了阳极的比表面积,大大提高了MFC的性能,改性后产生的功率密度为215.3 mW/m²,库伦效率为50%,分别比未改性的电极材料提高了152.1%和36.2%。近年来,人们对不同技术改性的纳米级复合材料进行了研究,利用纳米技术对阳极材料进行改性,可以促进微生物和阳极之间的电子传递^[52]。如Wen等^[53]制备TiO₂纳米粒子修饰的碳纳米管(CNTs@TiO₂)作为MFC阳极材料,其性能比传统材料有所提高。纳米复合材料提高了MFC系统的导电性、比表面积、电化学生活性,使MFC系统性能优于传统碳电极^[54]。

2.3 减小质子传输阻力

质子传输阻力是阳极产生的质子通过电解液传

输到阴极参与反应的过程中所受到的阻力,主要与电解液、隔膜材料以及电极间距有关。因此可通过增强电解液的电导率、优化隔膜材料、缩短电极间距来降低质子传输阻力,提高MFC产电性能。

2.3.1 增强电解液电导率

在许多MFC中,电解液的电阻是内阻的主要部分^[19]。大多数MFC中所用的电解液离子电导率较低,导致MFC内阻较高,通过向电解液中添加NaCl或KCl可以提高离子强度,从而增强电解液的电导率,使MFC内阻降低。

有研究发现电导率与NaCl浓度之间存在线性关系^[55],然而,MFC发电量并不总是随着盐度的增加而增加,在2.1.2节已经提到不同的微生物耐盐性不同,当电解液盐度超过微生物的耐受值时,会抑制微生物生长,降低微生物的活性,从而降低输出功率,因此溶液电导率只能在适合微生物生长的限度内增加。综合考虑细菌活性、溶液电导率,NaCl应有一个最佳投加量,以获得最佳的MFC性能。Liu等^[30]通过向溶液中添加NaCl来降低MFC的内阻,当NaCl浓度从0.1 mol/L增至0.4 mol/L时,MFC内阻从161 Ω降至79 Ω,产生的最大功率密度从720 mW/m²增至1330 mW/m²。Aaron等^[56]也进行了相关的研究,证实了通过增加溶液的离子强度可以减小燃料电池的内阻,提高燃料电池发电性能。

2.3.2 优化隔膜材料

隔膜材料将MFC分为阳极室和阴极室,同时能够有效传递质子(图4)。膜本身的内阻以及对电子受体传质的阻碍作用^[57],增大了溶液离子内阻^[58-60],使传质阻力较大,产电密度相对较低^[61]。理想的隔膜材料应具有高质子传递系数以保证材料不抑制质子到达阴极,低的氧传递系数以防止阴极氧气向阳极扩散^[62],且不可生物降解^[63]。

在MFC中,阴极质子消耗的速率通常高于质子通过离子交换膜的转移速率^[59,64],因此,为了提高发电效率,所使用的离子交换膜应具有高的质子转移速率、低内阻等特性^[65-66]。通过增加膜的面积可以降低与膜有关的离子电阻^[26]。Oh等^[37]报道,对于固定的阳极和阴极表面积,功率密度随着PEM面积的增大而增大,当膜的面积从3.5 cm²增加到30.6 cm²时,内阻从1110 Ω降到了89 Ω,此时最大功率为0.4 mW,PEM面积越大,电流越大。但PEM成本比较高,因此需要合成低成本且质子传输能力好的新型膜材料。Park等^[67]将瓷隔膜应用于单室MFC中,发现其性能与使用PEM的双室MFC相当。减小膜的厚度也能够降低膜阻力,从而提高燃料电池

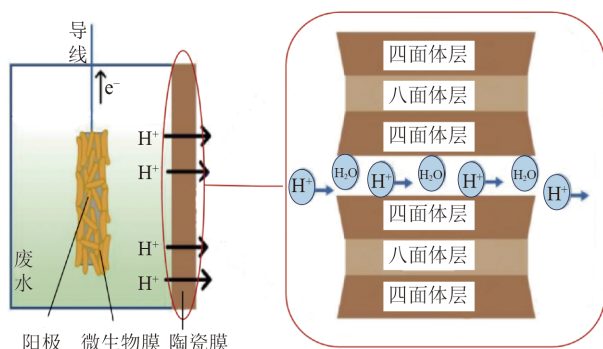


图 4 双室 MFC 中陶瓷膜传递质子结构示意图^[54]

Fig.4 Schematic diagram of proton transfer structure through ceramic membranes in dual chamber MFC

的性能^[68]。较薄的膜具有较低的传递阻力和较快的通量,可以提供较低的欧姆过电位。Behera 等^[69]研究了不同陶瓷膜厚度对 MFC 产电性能的影响,结果表明,较厚的陶瓷膜(8.5 mm)MFC 性能较差,产生的内阻高于较薄的陶瓷膜(4 mm)。膜的类型也会影响质子的流动,进而影响发电量^[70]。Hou 等^[71]探究了不同膜类型对于空气阴极单室 MFC 性能的影响,发现使用超滤膜 UFM-1K 获得了更高的功率密度(324 mW/m²),比使用 PEM(186 mW/m²)高 74%,这是因为使用 PEM 产生的内阻(166 Ω)比 UFM-1K(101 Ω)高。

2.3.3 缩短电极间距

MFC 电极之间的距离会产生电阻,影响电极材料之间离子的传递,进而影响 MFC 产电性能。缩短电极间距有助于降低内阻^[70],进而提高 MFC 输出功率。

减小电极间距可以缩短离子的传输距离,使阳极室和阴极室之间的离子传质阻力减小,从而降低反应器的运行内阻;相反地,增大电极间距,质子传递会延迟,减缓质子参与阴极反应速率,导致内阻增加^[72]。Liu 等^[30]将电极间距从 4 cm 减小到 2 cm,发现最大功率密度从 720 mW/m² 增加到 1 210 mW/m²; Ghangrekar 等^[73-74]也进行了相关研究,发现电极间距越小,功率密度越高。虽然电极间距越小,内阻越小,但将 2 个电极放置太近会增加短路的可能性,也会导致阴极附近的氧气渗透到阳极室,影响阳极微生物厌氧反应,导致输出功率降低。如 Cheng 等^[75]在单室空气阴极 MFC 的研究中发现,当电极间距从 4 cm 减小到 2 cm 时,电池内阻从 161 Ω 降至 77 Ω,产生的最大功率密度也随之增加;当电极间距进一步减小到 1 cm 时,内阻从 35 Ω 降到 16 Ω,但功率密度并没有随之增加,反而从 811 mW/m² 降到 423 mW/m²。

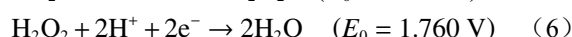
2.4 促进阴极还原反应

阴极还原反应速率是限制 MFC 性能的主要因素之一,通过制备高效的阴极催化剂加快阴极还原反应速率,或选择优异的电子受体提高氧化还原电位,可以促进阴极还原反应,提高 MFC 产电性能。

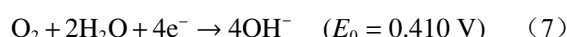
2.4.1 制备高效催化剂

目前 MFC 阴极使用 O₂ 作为电子受体,因为 O₂ 容易获得,具有成本效益,适于开发和广泛应用。MFC 阴极氧还原反应可以分为四电子反应和双电子反应 2 种途径。在不同的 pH 基质中,具体的反应过程不同^[76-77]。

在酸性介质中,四电子[式(4)]、双电子[式(5)、式(6)]反应式分别为:



碱性介质中,四电子[式(7)]、双电子[式(8)、式(9)]反应式分别为:



根据离子方程式,酸性条件下有利于氧还原反应,为反应提供质子或消耗生成的羟基离子。然而,微生物生长需要的 pH 通常在 6~9^[78],在近中性介质中氧还原反应(ORR)动力学缓慢导致还原电位高,限制了 MFC 性能^[79]。

图 5 为 ORR 的 2 种途径,四电子反应途径是氧气发生四电子反应与氢离子结合直接生成水,而双电子反应途径是氧气先发生两电子反应生成过氧化氢,部分过氧化氢继续发生两电子反应生成水。从能量转化角度讲,四电子反应途径相对于双电子反应途径放出的能量更多,更加有利于放电反应^[80],因为双电子途径涉及 H₂O₂ 的产生,导致过电位过高,从而影响 MFC 的产电性能。

阴极催化剂作为燃料电池的主要组成部分之一,对提高燃料电池的功率密度起着重要作用^[80]。研究具有高效活性和稳定性以及低成本的 ORR 催化剂具有重要的意义,理想的 ORR 催化剂应促使 ORR 遵循四电子还原过程,具有高催化活性、高稳定性、高选择性、抗中毒、低成本等特性^[80]。通过制备高效的催化剂可以促使 ORR 遵循四电子反应途径,加快阴极 ORR 动力学,提高阴极性能。Gautam 等^[79]制备了不同的电催化剂,并对其催化性能进行研究,表明负载氮掺杂石墨烯(MN/NrGO)催化剂的 α-MnO₂ 纳米棒电极产生的最大功率密度为 135.27 mW/m²,显著高于其他催化剂,计算发现纯 α-MnO₂

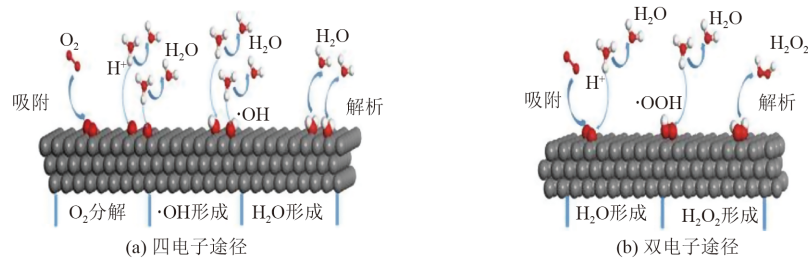


图 5 ORR 的 2 种途径^[81]

Fig.5 Two ways of ORR

纳米棒和负载石墨烯催化剂的 $\alpha\text{-MnO}_2$ 纳米棒电极上发生的 ORR 是双电子和四电子途径并存, 在 MN/NrGO 催化剂电极中, ORR 主要是四电子途径, 其高导电性保证了电荷的快速转移, 从而降低了电荷转移阻力, 使还原电流更高, 因此更快的电子传输增加了氧还原速率, 最终促进了 ORR 动力学。

2.4.2 选择优异电子受体

MFC 阴极电位取决于电子受体的类型, 具有高氧化还原电位的阴极电子受体可以有效提高 MFC 输出功率。目前 MFC 阴极电子受体应用最多的是 O_2 , 使用溶解氧阴极 MFC 的输出功率与阴极电解液中的溶解氧浓度成正比^[82], 但 O_2 在溶液中的溶解度有限, 且 O_2 在电极表面还原速度慢, 限制了 MFC 的实际应用。用铁氰化物、高锰酸钾等介质代替 O_2 作为电子受体, 具有较快的还原速率和较高的氧化还原电位, 从而提高了阴极反应动力学, 但与 O_2 相比不具有可持续性, 需要定期更换电解液。

在许多研究中, 有人提出用铁氰化物^[37,67]、高锰酸钾^[83]、重铬酸钾^[84]和过硫酸盐^[85]等阴极介质来代替 O_2 作为电子受体, 与 O_2 相比可以获得更高的输

出功率。例如, Oh 等^[85]在阴极室中使用铁氰化物作为电子受体, 与溶液中的 O_2 作为电子受体时相比, 产生的功率密度增加了 50%~80%。高锰酸盐因其高氧化能力和环境安全的优点常被用作阴极电子受体, 使用高锰酸盐作为阴极电子受体产生的最大功率密度为 115.6 mW/m^2 , 比使用 O_2 (10.2 mW/m^2) 作为阴极电子受体所产生的能量高 11.3 倍^[83]。

2.5 改进 MFC 反应器构型

MFC 电极间距、质子交换膜面积以及电极表面积不同, 产生的 MFC 内阻不同, 进而影响 MFC 的产电性能。通过优化 MFC 配置, 可以降低 MFC 内阻, 提高发电量^[86], 为 MFC 实际应用提供可能。

MFC 可以分为单室 MFC 和双室 MFC, 单室 MFC 根据是否存在质子交换膜分为单室无膜 MFC 和具膜 MFC, 双室 MFC 又包括 H 型 MFC^[87]、平板式 MFC^[88]、上流式 MFC^[89]和圆筒型 MFC^[90]。图 6 为不同 MFC 反应器构型。

双室 MFC 是最常见的, 也是最常用的^[91]。传统的 H 型是最早尝试构建的双室微生物燃料电池^[70], 应用广泛且价格低廉。由于 H 型双室 MFC 电极间

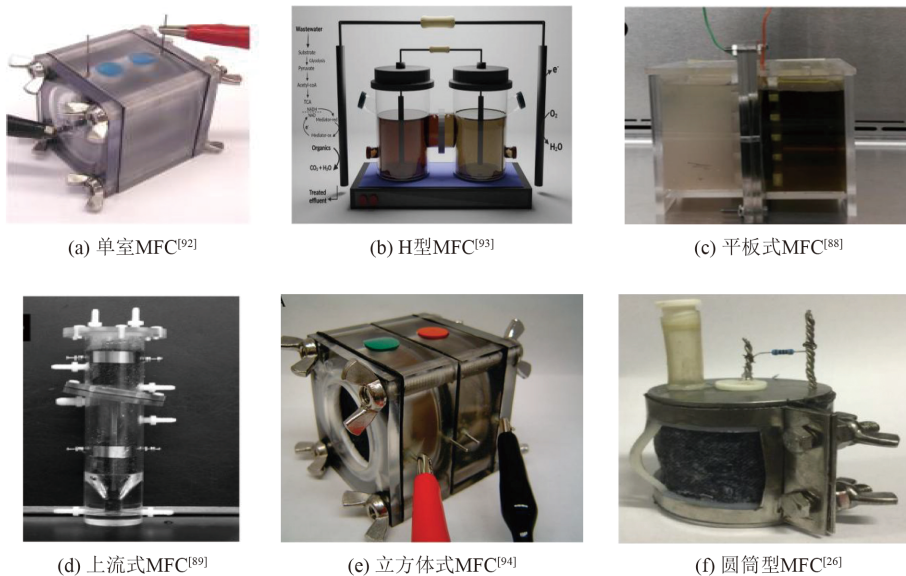


图 6 MFC 反应器构型

Fig.6 Configurations of MFC reactor

距大, 产电性能差, 通过对双室 MFC 构型进行优化, 出现了平板型 MFC、上流式 MFC 和圆筒型 MFC。与单室 MFC 相比, 这些双室 MFC 存在一个共同的弊端, 阴极电极都浸泡在电解液中, O_2 作为电子受体时, 溶解氧浓度低, 氧还原反应速率慢, 人工曝气需

要额外消耗能量。而单室 MFC 只有 1 个电极室, 采用空气阴极, 直接利用空气中的 O_2 作为电子受体, 节省了能量消耗。表 3 总结了不同的 MFC 反应器构型的优缺点。在工程应用中可以根据实际情况选择不同的反应器构型。

表 3 不同 MFC 反应器构型的优缺点

Table 3 Advantages and disadvantages of different MFC configurations

MFC构型	优点	缺点
单室MFC	结构简单, 采用空气阴极, 直接以 O_2 作为电子受体, 不需定期更换阴极电解液, 两极间距小	只有1个电极室, 不利于单独研究, 有的缺乏质子交换膜的隔离, 阴极催化剂容易受到微生物的污染 ^[95]
H型MFC	保证了两极室的空间独立性, 避免了相互干扰	电极间距大, 传质阻力大, 需要人工曝气, 溶解氧浓度低, 氧还原反应动力学缓慢
平板型MFC	采用PEM电极组件, 电极间距较短, 促进了电极之间的质子转移 ^[96] , 最大限度减少了内阻; 两极室采用蛇形流场板, 强化了液体流动, 增强了物质基质的传输 ^[97]	O_2 容易渗透到阳极
上流式MFC	提高了阳极接触面积, 不用设搅拌设备 ^[98]	人工曝气额外消耗能量, 溶解氧浓度低
圆筒形MFC	离子交换膜面积大, 电极间距小, 启动快, 电池阻抗低; 阳极上附着的生物量多, 电催化活性高 ^[99]	人工曝气额外消耗能量, 溶解氧浓度低

近年来, 已对不同 MFC 反应器构型的产电性能进行了大量的研究, MFC 反应器构型不同, 产电性能不同。研究人员的目标是使污水处理技术从耗能过程向产能过程过渡, 使 MFC 技术朝着实用化和规模化应用的方向发展, 通过改进 MFC 反应器构型, 探究其整体产电性能, 有望将 MFC 技术应用到实际工程处理中。表 4 总结了近年来不同 MFC 反应器构型的产电性能。

表 4 不同 MFC 反应器构型产电性能

Table 4 Electricity generation performance of different MFC reactor configurations

MFC类型	是否存在 PEM	电极间距/cm	PEM面积/cm ²	离子强度/(mmol/L)	内阻/ Ω	功率密度/(W/m ²)	数据来源
单室	是	4	16	68	390	0.354	文献[20]
	是	0	16	68	120	1.18	文献[20]
	是	12	7	68	1 800	0.031	文献[20]
H型双室	是	10	6	1.7	310±65	0.069	文献[86]
	否	5		1.7	200±50	0.23	文献[52]
平板式	是	0		3.9	45.3±6.5	12.9	文献[99]
上流式					17	29.2	文献[100]
					84	3.1	文献[89]
圆筒型	否	1		50	49.66	1.364	文献[101]

3 结论与展望

微生物燃料电池作为一种新型污水处理技术, 可以将化学能转化为电能, 具有处理废水和回收能源的双重优势。与现有技术相比, MFC 具有节能、产泥量少、能耗低三大特点, 受到广泛关注, 应用前景广阔。基于 MFC 工作原理, 限制 MFC 功率输出的因素主要为底物降解、电子迁移阻力、质子传输

阻力和阴极还原反应。针对这 4 个影响因素, 提出如下策略来提高 MFC 产电性能, 为以后实际应用提供可能: 通过调节阳极溶液 pH 和盐度加强微生物代谢活性; 通过改性阳极材料降低电子迁移阻力; 通过增强电解液电导率、优化隔膜材料、缩短电极间距减小质子传输阻力; 制备高效阴极催化剂、选择优异的电子受体促进阴极还原反应; 改进 MFC 反应器构型。

尽管 MFC 技术的研究在实验室中不断取得进展, 但其维持实际大规模能源生产的能力仍有待检验。推动 MFC 技术发展使其投入实际生产应用, 对于 MFC 的持续研究至关重要。未来可以从以下几方面开展重点研究: 合成新型阴极催化剂以降低运行成本, 降低膜污染以减小后期清洁规模, 优化微生物生长环境以提高 MFC 长期运行稳定性, 制备优异的电极材料以延长电极寿命, 改进 MFC 反应器配置以提高整体产电性能。

参考文献

- [1] JADHAV D A, CARMONA-MARTÍNEZ A A, CHENDAKE A D, et al. Modeling and optimization strategies towards performance enhancement of microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124256.
 - [2] 徐戴非, 吴兵党, 杨晶晶, 等. 藻炭改性电极强化微生物燃料电池产电及去除硝基苯性能[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(6): 2092-2104.
- XU D F, WU B D, YANG J J, et al. Removal efficiency of nitrobenzene and electricity generation by microbial fuel cell with algal biochar modified electrode[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(6): 2092-2104.

- [3] 操家顺, 贺含悦, 李超, 等. 不同方式预处理污泥对微生物燃料电池的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(8): 1389-1398.
CAO J S, HE H Y, LI C, et al. Effects of different pretreatments on sludge in microbial fuel cell[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(8): 1389-1398.
- [4] 綦琪, 王许云, 贾云. 微生物燃料电池电极材料研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(14): 28-31.
QI Q, WANG X Y, JIA Y. Latest research development of electrode materials for microbial fuel cells[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(14): 28-31.
- [5] PANDEY P, SHINDE V N, DEOPURKAR R L, et al. Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery[J]. Applied Energy, 2016, 168: 706-723.
- [6] WEE J H. Applications of proton exchange membrane fuel cell systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1720-1738.
- [7] LIU J G, MOONEY H, HULL V, et al. Systems integration for global sustainability[J]. Science, 2015, 347(6225): e1258832.
- [8] 陈立香, 肖勇, 赵峰. 微生物燃料电池生物阴极[J]. 化学进展, 2012, 24(1): 157-162.
CHEN L X, XIAO Y, ZHAO F. Biocathodes in microbial fuel cells[J]. Progress in Chemistry, 2012, 24(1): 157-162.
- [9] SINGH D, PRATAP D, BARANWAL Y, et al. A green technology for power generation[J]. Annals of Biological Research, 2010, 1(3): 128-138.
- [10] VENKATA MOHAN S, MOHANAKRISHNA G, REDDY B P, et al. Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 39(1): 121-130.
- [11] DU Z W, LI H R, GU T Y. A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy[J]. Biotechnology Advances, 2007, 25(5): 464-482.
- [12] DURRUTY I, BONANNI P S, GONZÁLEZ J F, et al. Evaluation of potato-processing wastewater treatment in a microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2012, 105: 81-87.
- [13] PARKHEY P, SAHU R. Microfluidic microbial fuel cells: recent advancements and future prospects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(4): 3105-3123.
- [14] JADHAV D A, MUNGRAY A K, ARKATKAR A, et al. Recent advancement in scaling-up applications of microbial fuel cells: from reality to practicability[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 101226.
- [15] 李朝明, 许丹, 黄铭意, 等. 不同阳极设置对人工湿地-微生物燃料电池脱氮及产能的影响[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 205-213.
LI C M, XU D, HUANG M Y, et al. Effects of different anode settings on the performance of nitrogen removal and electrogenesis capacity in constructed wetland-microbial fuel cells[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 205-213.
- [16] 孔晓英, 李连华, 孙永明, 等. 微生物燃料电池产能原理及输出功率的影响因素[J]. 现代化工, 2007, 27(增刊2): 282-284.
- [17] 顾熠滢. 微生物燃料电池输出功率影响因素综述[J]. 水电与新能源, 2014(2): 69-74.
GU Y Y. Output power and its influencing factors of microbial fuel cells: a review[J]. Hydropower and New Energy, 2014(2): 69-74.
- [18] JUNG S P, PANDIT S. Important factors influencing microbial fuel cell performance[M]//Microbial electrochemical technology. Amsterdam: Elsevier, 2019: 377-406.
- [19] CHEN S L, PATIL S A, BROWN R K, et al. Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: transitioning from fundamental studies to practical implementation[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 15-28.
- [20] Liang P, Huang X, Fan M Z, et al. Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 77: 551-558.
- [21] ABOURACHED C, ENGLISH M J, LIU H. Wastewater treatment by microbial fuel cell (MFC) prior irrigation water reuse[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 144-149.
- [22] 崔康平, 金松. 微生物燃料电池阳极室内电子受体竞争研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(1): 90-93.
CUI K P, JIN S. Competition between electron acceptors in anodic chamber of microbial fuel cells[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(1): 90-93.
- [23] 赵阳, 宋永会, 段亮. 微生物燃料电池降低活化内阻和欧姆内阻技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(2): 343-353.
ZHAO Y, SONG Y H, DUAN L. Technical research progress of reducing activation internal resistance and ohmic internal resistance in microbial fuel cells[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(2): 343-353.
- [24] WANG S Q, TIAN S, ZHANG P Y, et al. Enhancement of biological oxygen demand detection with a microbial fuel cell using potassium permanganate as cathodic electron acceptor[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 252: 109682.
- [25] NACHAMMAI K T, RAMACHANDRAN S, NAGARAJAN C, et al. Exploration of bioinformatics on microbial fuel cell technology: trends, challenges, and future prospects[J]. Journal of Chemistry, 2023, 2023: 6902054.
- [26] RISMANI-YAZDI H, CARVER S M, CHRISTY A D, et al. Cathodic limitations in microbial fuel cells: an overview[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(2): 683-694.
- [27] 王维大, 李浩然, 冯雅丽, 等. 微生物燃料电池的研究应用进展[J]. 化工进展, 2014, 33(5): 1067-1076.
WANG W D, LI H R, FENG Y L, et al. Research and application advances in microbial fuel cell[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(5): 1067-1076.
- [28] LOGAN B E, REGAN J M. Microbial fuel cells: challenges and applications[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(17): 5172-5180.
- [29] ZHOU M H, CHI M L, LUO J M, et al. An overview of electrode materials in microbial fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(10): 4427-4435.
- [30] LIU H, CHENG S A, LOGAN B E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(14): 5488-5493.

- [31] ZHANG E R, LIU L, CUI Y Y. Effect of pH on the performance of the anode in microbial fuel cells[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 608/609: 884-888.
- [32] YUAN Y, ZHAO B, ZHOU S G, et al. Electrocatalytic activity of anodic biofilm responses to pH changes in microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(13): 6887-6891.
- [33] 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进展[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3): 1150-1160.
DUAN L, LI S L, XING F. Technical research progress of controlling reverse solute flux and membrane fouling in osmotic microbial fuel cell[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(3): 1150-1160.
- [34] BEHERA M, GHANGREKAR M M. Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 5114-5121.
- [35] KUMAR S S, KUMAR V, GNANESWAR GUDE V, et al. Alkalinity and salinity favor bioelectricity generation potential of *Clostridium*, *Tetrathiodacter* and *Desulfovibrio* consortium in microbial fuel cells (MFC) treating sulfate-laden wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306: 123110.
- [36] GUO F, LUO H Q, SHI Z Y, et al. Substrate salinity: a critical factor regulating the performance of microbial fuel cells, a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143021.
- [37] OH S E, LOGAN B E. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 70(2): 162-169.
- [38] LOGAN B E, ROSSI R, RAGAB A, et al. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17: 307-319.
- [39] ALI YAQOOB A, IBRAHIM M N M, RODRÍGUEZ-COUTO S. Development and modification of materials to build cost-effective anodes for microbial fuel cells (MFCs): an overview[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2020, 164: 107779.
- [40] HE L, DU P, CHEN Y Z, et al. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 388-403.
- [41] CI S Q, WEN Z H, CHEN J H, et al. Decorating anode with bamboo-like nitrogen-doped carbon nanotubes for microbial fuel cells[J]. *Electrochemistry Communications*, 2012, 14(1): 71-74.
- [42] HUGGINS T, WANG H M, KEARNS J, et al. Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 157: 114-119.
- [43] AIYER K S. How does electron transfer occur in microbial fuel cells[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2020, 36(2): 19.
- [44] MEHDINIA A, ZIAEI E, JABBARI A. Multi-walled carbon nanotube/SnO₂ nanocomposite: a novel anode material for microbial fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 130: 512-518.
- [45] WEI J C, LIANG P, HUANG X. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(20): 9335-9344.
- [46] KUMAR G G, SATHIYA SARATHI V G, NAHM K S. Recent advances and challenges in the anode architecture and their modifications for the applications of microbial fuel cells[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 43: 461-475.
- [47] ZHU Y X, JI J Y, REN J Y, et al. Conductive multilayered polyelectrolyte films improved performance in microbial fuel cells (MFCs)[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 455: 92-96.
- [48] CHOU H T, LEE H J, LEE C Y, et al. Highly durable anodes of microbial fuel cells using a reduced graphene oxide/carbon nanotube-coated scaffold[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169: 532-536.
- [49] PARK I H, CHRISTY M, KIM P, et al. Enhanced electrical contact of microbes using Fe₃O₄/CNT nanocomposite anode in mediator-less microbial fuel cell[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 58: 75-80.
- [50] KANG C S, EAKTASANG N, KWON D Y, et al. Enhanced current production by *Desulfovibrio desulfuricans* biofilm in a mediator-less microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 165: 27-30.
- [51] WU X Y, TONG F, SONG T S, et al. Effect of zeolite-coated anode on the performance of microbial fuel cells[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2015, 90(1): 87-92.
- [52] SCOTT K, RIMBU G A, KATURI K P, et al. Application of modified carbon anodes in microbial fuel cells[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2007, 85(5): 481-488.
- [53] WEN Z H, CI S Q, MAO S, et al. TiO₂ nanoparticles-decorated carbon nanotubes for significantly improved bioelectricity generation in microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 234: 100-106.
- [54] VIDHYESWARI D, SURENTHAR A, BHUVANESHWARI S. General aspects and novel PEMs in microbial fuel cell technology: a review[J]. *Chemosphere*, 2022, 309: 136454.
- [55] WANG X, CHENG S A, ZHANG X Y, et al. Impact of salinity on cathode catalyst performance in microbial fuel cells (MFCs)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(21): 13900-13906.
- [56] AARON D, TSOURIS C, HAMILTON C Y, et al. Assessment of the effects of flow rate and ionic strength on the performance of an air-cathode microbial fuel cell using electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Energies*, 2010, 3(4): 592-606.
- [57] TAMAKLOE R Y, DONKOR M K E, SINGH K. Fabrication and study of power- output of MultiChamber microbial fuel cells (MFCs) with clay as ion exchange partition[J]. *European Scientific Journal, ESJ*, 2017, 13(30): 173.
- [58] ZHOU G Y, YOSHINO Y, YAMASHITA T, et al. Effect of anode size, membrane and membrane size on power generation and wastewater treatment in microbial fuel cells[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 164: 506-510.
- [59] LIU H, LOGAN B E. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(14): 4040-4046.

- [60] JANICEK A, FAN Y Z, LIU H. Design of microbial fuel cells for practical application: a review and analysis of scale-up studies[J]. *Biofuels*, 2014, 5(1): 79-92.
- [61] 马骏, 苏冬云, 濮海坤, 等. 微生物燃料电池反应器构型设计[J]. *电源技术*, 2015, 39(10): 2318-2320.
MA J, SU D Y, PU H K, et al. Reactor configuration design of microbial fuel cell[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(10): 2318-2320.
- [62] FLIMBAN S G A, HASSAN S H A, RAHMAN M M, et al. The effect of Nafion membrane fouling on the power generation of a microbial fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(25): 13643-13651.
- [63] ZHANG X Y, CHENG S A, WANG X, et al. Separator characteristics for increasing performance of microbial fuel cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8456-8461.
- [64] GIL G C, CHANG I S, KIM B H, et al. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2003, 18(4): 327-334.
- [65] DAUD S M, KIM B H, GHASEMI M, et al. Separators used in microbial electrochemical technologies: current status and future prospects[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 195: 170-179.
- [66] YANG E, CHAE K J, CHOI M J, et al. Critical review of bioelectrochemical systems integrated with membrane-based technologies for desalination, energy self-sufficiency, and high-efficiency water and wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2019, 452: 40-67.
- [67] PARK D H, ZEIKUS J G. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 81(3): 348-355.
- [68] PEIGHAMBARDUST S J, ROWSHANZAMIR S, AMJADI M. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(17): 9349-9384.
- [69] BEHERA M, GHANGREKAR M M. Electricity generation in low cost microbial fuel cell made up of earthenware of different thickness[J]. *Water Science & Technology*, 2011, 64(12): 2468-2473.
- [70] TAMBOLI E, ESWARI J. Microbial fuel cell configurations[J/OL]. *Microbial Electrochemical Technology*, 2019. DOI:10.1016/B978-0-444-64052-9.00016-9.
- [71] HOU B, SUN J, HU Y Y. Simultaneous Congo red decolorization and electricity generation in air-cathode single-chamber microbial fuel cell with different microfiltration, ultrafiltration and proton exchange membranes[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6): 4433-4438.
- [72] SANGEETHA T, MUTHUKUMAR M. Influence of electrode material and electrode distance on bioelectricity production from sago-processing wastewater using microbial fuel cell[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2013, 32(2): 390-395.
- [73] GHANGREKAR M M, SHINDE V B. Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(15): 2879-2885.
- [74] PAPIILLON J, ONDEL O, MAIRE É. Scale up of single-chamber microbial fuel cells with stainless steel 3D anode: effect of electrode surface areas and electrode spacing[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2021, 13: 100632.
- [75] CHENG S A, LIU H, LOGAN B E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(7): 2426-2432.
- [76] NIE Y, LI L, WEI Z D. Recent advancements in Pt and Pt-free catalysts for oxygen reduction reaction[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(8): 2168-2201.
- [77] YU D S, NAGELLI E, DU F, et al. Metal-free carbon nanomaterials become more active than metal catalysts and last longer[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2010, 1(14): 2165-2173.
- [78] ERABLE B, FÉRON D, BERGEL A. Microbial catalysis of the oxygen reduction reaction for microbial fuel cells: a review[J]. *ChemSusChem*, 2012, 5(6): 975-987.
- [79] GAUTAM R K, BHATTACHARJEE H, VENKATA M S, et al. Nitrogen doped graphene supported α -MnO₂ nanorods for efficient ORR in a microbial fuel cell[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(111): 110091-110101.
- [80] XIA Z H, AN L, CHEN P K, et al. Oxygen reduction: non-Pt nanostructured catalysts for oxygen reduction reaction: synthesis, catalytic activity and its key factors[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(17): 1670104.
- [81] STACY J, REGMI Y N, LEONARD B, et al. The recent progress and future of oxygen reduction reaction catalysis: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 401-414.
- [82] PANDIT S, SENGUPTA A, KALE S, et al. Performance of electron acceptors in catholyte of a two-chambered microbial fuel cell using anion exchange membrane[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2736-2744.
- [83] YOU S J, ZHAO Q L, ZHANG J N, et al. A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 162(2): 1409-1415.
- [84] LI J, FU Q, LIAO Q, et al. Persulfate: a self-activated cathodic electron acceptor for microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 269-274.
- [85] OH S, MIN B, LOGAN B E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(18): 4900-4904.
- [86] LI F X, SHARMA Y, LEI Y, et al. Microbial fuel cells: the effects of configurations, electrolyte solutions, and electrode materials on power generation[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, 160(1): 168-181.
- [87] LOGAN B E, HAMELERS B, ROZENDAL R, et al. Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17): 5181-5192.
- [88] SAMARASINGHE N, LONGTIN N, FERNANDO S. Performance of *Methylococcus capsulatus* based microbial and enzymatic proton exchange membrane fuel cells[J]. *Renewable Energy*, 2022, 195: 17-27.
- [89] HE Z, MINTEER S D, ANGENENT L T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(14): 5262-

- 5267.
- [90] 刘春梅, 廖强, 叶丁丁, 等. 矩形与双筒型微生物燃料电池产电特性比较 [J]. *电源技术*, 2015, 39(9): 1891-1894.
LIU C M, LIAO Q, YE D D, et al. Comparison of electricity generation performance of rectangular and tubular microbial fuel cells[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(9): 1891-1894.
- [91] BOND D R, LOVLEY D R. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(3): 1548-1555.
- [92] 赵世辉. 双室型微生物燃料电池在制浆废水处理中的应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [93] ABUBACKAR H N, BIRYOL İ, AYOL A. Yeast industry wastewater treatment with microbial fuel cells: effect of electrode materials and reactor configurations[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(33): 12424-12432.
- [94] CHENG S A, DEMPSEY B A, LOGAN B E. Electricity generation from synthetic acid-mine drainage (AMD) water using fuel cell technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(23): 8149-8153.
- [95] SONG Y E, LEE S, KIM M, et al. Metal-free cathodic catalyst with nitrogen- and phosphorus-doped ordered mesoporous carbon (NPOMC) for microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 451: 227816.
- [96] VARANASI J L, PRASAD S, SINGH H, et al. Improvement of bioelectricity generation and microalgal productivity with concomitant wastewater treatment in flat-plate microbial carbon capture cell[J]. *Fuel*, 2020, 263: 116696.
- [97] 张军. 微生物燃料电池阳极构型及其物质传输强化和产电特性 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [98] 赵立新, 邹立军, 王宣, 等. 以葡萄糖为燃料的上流式单室微生物燃料电池 [J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(1): 76-79.
ZHAO L X, ZOU L J, WANG X, et al. An up-flow single-chamber microbial fuel cell using glucose as fuel[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(1): 76-79.
- [99] PARK Y, PARK S, NGUYEN V K, et al. Complete nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in flat-panel air-cathode microbial fuel cells treating domestic wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 316: 673-679.
- [100] HE Z, WAGNER N, MINTEER S D, et al. An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17): 5212-5217.
- [101] ZHANG M, MA Z K, ZHAO N, et al. Increased power generation from cylindrical microbial fuel cell inoculated with *P. aeruginosa*[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 141: 111394. ◇