

滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池系统单双向模组结构产电性能研究

吴志鸿^{1,2,3*}, 汪 翔^{4*}, 刘小文¹, 张佳华¹, 朱晓婷⁴, 杨诚鑫¹

¹三明学院资源与化工学院, 福建 三明

²福建省矿山生态修复工程技术研究中心, 福建 三明

³福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室, 福建 三明

⁴三明学院机电工程学院, 福建 三明

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年1月15日; 发布日期: 2026年1月23日

摘要

微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)是一种创新的污染物处理方式, 可以在降解有机污染物的同时回收电能。本研究是将生物滴滤塔(Bio-Trickling-Filter, BTF)和圆管型空气阴极(Tubular Air-Cathode, T-AC)微生物燃料电池共同组装成新型的滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池系统(BTF-T-AC-MFCs), 并在维持系统的阴极、阳极体积相同的情况下, 将BTF-T-AC-MFC结构改变成单向(Lateral, L)、双向(Bilateral, B)两种运作模式(L-BTF-T-AC-MFCs, B-BTF-T-AC-MFCs), 并以废旧糖蜜作为污染源及人工模拟循环流废水的条件下, 进行功能测试。实验结果显示, 在初始化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)浓度范围介于790~1100 mg/L时, B-BTF-T-AC-MFCs产生的最高电压为3.84 V、最大体积功率密度为4348 mW/m³; 而L-BTF-T-AC-MFCs产生的最高电压为2.19 V、最大体积功率密度为1703 mW/m³; 两大系统的COD去除率可达67%以上。B-BTF-T-AC-MFCs系统输出的电压高于L-BTF-T-AC-MFCs系统, 整体电压提升75%、体积功率密度提升155%。

关键词

生物滴滤塔, 圆管型空气阴极微生物燃料电池, 单向, 双向, 电压提升

Study on the Electricity Generation Performance of Lateral and Bilateral Bio-Trickle Filter Tubular Air-Cathode Microbial Fuel Cells

Chih-Hung Wu^{1,2,3*}, Xiang Wang^{4*}, Xiaowen Liu¹, Jiahua Zhang¹, Xiaoting Zhu⁴, Chengxin Yang¹

*通讯作者。

文章引用: 吴志鸿, 汪翔, 刘小文, 张佳华, 朱晓婷, 杨诚鑫. 滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池系统单双向模组结构产电性能研究[J]. 水污染及处理, 2026, 14(1): 33-43. DOI: [10.12677/wpt.2026.141004](https://doi.org/10.12677/wpt.2026.141004)

¹School of Resources and Chemical Engineering, Sanming University, Sanming Fujian

²Fujian Mine Ecological Restoration Engineering Technology Research Center, Sanming Fujian

³Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring & Sustainable Management and Utilisation, Sanming Fujian

⁴School of Mechanical and Electrical Engineering, Sanming University, Sanming Fujian

Received: December 23, 2025; accepted: January 15, 2026; published: January 23, 2026

Abstract

Microbial fuel cell (MFC) is an innovative way to treat contaminants, which can recover electricity at the same time as the degradation of organic pollutants. In this study, a new type of bio-trickling-filter tubular air-cathode microbial fuel cells system (BTF-T-AC-MFCs) containing bio-trickling-filter (BTF) and tubular air-cathode (T-AC) was first assembled, while maintaining the same volume of cathodes and anodes in the system, the BTF-T-AC-MFCs structure was further divided into a one-way (Lateral, L) and two-way (Bilateral) two modes of operation (L-BTF-T-AC-MFCs, B-BTF-T-AC-MFCs). Under the conditions of waste molasses as a source of contamination and manual simulation of circulating wastewater, the functional tests were conducted. The results show that the initial chemical oxygen demand (COD) concentration is between 790~1100 mg/L, B-BTF-T-AC-MFCs produce a maximum voltage of 3.84 V, a maximum volume power density of 4348 mW/m³, and L-BTF-T-AC-MFCs produce a maximum voltage of 2.19 V and a maximum volume power density of 1703 mW/m³; The COD removal rate of both systems can reach more than 67%. The B-BTF-T-AC-MFCs system outputs more voltage than the L-BTF-T-AC-MFCs system, increasing the overall voltage by 75% and the volume power density by 155%.

Keywords

Bio-Trickling-Filter (BTF), Tubular Air-Cathode Microbial Fuel Cell (T-AC-MFC), Lateral (L), Bilateral (B), Voltage

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

糖蜜废水一般含有较高的化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)，直接排放会对环境产生严重的危害[1][2]。糖蜜属于一种复合形态的有机物，既能为微生物提供生长繁殖所需的营养，又富含其必需的微量元素[3]。微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)系统可以实现去除有机污染物和回收电能的双重功效，在发电的同时亦可修复环境污染。目前，MFC系统已被广泛应用于处理不同有机废水等相关领域中，例如：Sciarria等人采用单室空气阴极MFC系统来处理橄榄厂废水与生活污水，以14:1(w/w)的比例混合后废水，在1 kΩ外电阻可获得380 mV的电压[4]。Lai等人利用白腐真菌作为MFC系统中的生物阴极，提高MFC系统输出的电压和降解污水中的色度[5]，最高输出电压达821 mV。Xu等人则使用湿地型MFC系统方式来处理含盐类的废水，产生的电压约390 mV [6]。上述MFC系统均采用单颗电池模组及静态有机污水等方式来产生电能，但因产生的电压无法启动小功率电器而无法达到实用性的功能。

生物滴滤塔(Bio-Trickling Filter, BTF)是一种废气处理常用的设备，废气从滴滤塔下方进入后再向上通过填充滤料层，此时废气经过气液双膜后被附著在生物滤料层表层的生物膜所分解，处理后的气体则从滴滤塔上方排出。BTF 系统已被应用在硫化氢(H₂S) [7] 和挥发性有机废气(Volatile Organic Compounds, VOCs)的处理中[8]。BTF 系统增加填充滤料层数时，可提升系统上的比表面积，进而有利于液气传质速率[9]。当生物滤料选择生物活性炭(Biological Activated Carbon, BAC)时，除了具备吸附特性外，附著在BAC 表层内外的生物膜亦可将废气降解而有利于加速废气的处理效率[10]。

综上，MFC 系统具有输出电能的功用，而 BTF 系统则可以处理废气，若将这两类系统间的优点加以整合，即可同时达到处理气态污染物并回收电能的目的。目前，Wu 等人已将 BTF 与 MFC 整合成滴滤塔式微生物燃料电池(BTF-MFC)系统[11]。该系统特色是将 BTF 系统内的填充滤料更改成导电性与多孔隙的焦炭，并于焦炭堆中插入一个石墨棒作为阳极导电棒使用，而周围的焦炭堆则为气态污染物与微生物附著的填充滤料与载体；同时将 BTF 四周管壁钻数个大孔，然后利用聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)制成的空气阴极膜电极紧密与大孔压合，即形成具备产电与去除气态污染物的 BTF-MFC 系统，输出的电压约 600 mV [11]。Wu 等人将其 BTF-MFC 进行改良，在相同滤料体积下，通过系统内的挡版设计方式将原本单颗 BTF-MFC 系统划分成两颗 BTF-MFCs 系统，使得该系统可在连续动态进流方式下，透过串联方式将上下两层电池串接后达到电压放大功能，输出的电压约为 635 mV [12]。Estrada-Arriaga 等人则堆栈了 40 个空气阴极(Air-Cathode, AC) MFC，获得电压约 4.9 V [13]。但堆栈式 MFC 容易受到阴极限制造成电压下降，同时电池内存在的高电阻现象也容易产生交叉电流干扰[13]。

虽然 MFC 系统可通过堆栈多个电池方式来获得电压加成，但实际加成情况并不好。因此，本研究以处理气态污染物的 BTF-MFC 系统作为基础，将原本堆栈的导电滤料更改成不锈钢丝球后填充在圆管内作为阳极使用，阴极则使用碳化陶瓷环和 PVA 水凝胶构成空气阴极型式的膜电极，将两者整合在圆管中构成圆管型空气阴极 MFC (T-AC-MFCs)，再插入至上层滴滤盒中构成滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池(BTF-T-AC-MFCs)，以此探讨在含有糖蜜废水状态下的产电情况。另外，考虑到在 BTF 系统中的横截面积已固定，单纯增加电池个数并不现实，且电池输出电压性能与阴阳极材料有关而与体积无关[14]，因此在保持阴阳电极总体积不变的情况下，通过单向(Lateral)和双向(Bilateral)模组结构的改变创造在同一圆管内具有双颗电池的情况，实现电压的加成与放大。

2. 材料与方法

2.1. 微生物与废水来源

本研究采用的污泥取自福建省三明市三元区荆东污水处理厂，该污水处理厂主要处理荆东工业园区内企业排放的污水，以及荆东、荆西片区的生活污水。污泥取回后放在实验室内，用 1000 mg/L 的糖蜜废水驯化 3 个月，驯化后作为 BTF-T-AC-MFCs 系统中的菌种来源。实验用的废水来源是采用人工模拟方式配制而成 20 L 后备用，成分和配比包含有：200 mg/L CH₃COONa、35 mg/L NH₄Cl、8 mg/L KH₂PO₄、35 mg/L NaH₂PO₄、0.03 g/L CaCl₂、0.02 g/L MgSO₄，以及 0.1 ml/L 营养液。营养液是提供微生物生长的必要微量元素，成分与配比包括有：0.15 g/L CoCl₂·6H₂O、0.13 g/L MnCl₂·4H₂O、1.3 g/L FeCl₃·6H₂O、0.15 g/L H₃BO₃、0.02 g/L KI、0.13 g/L ZnSO₄·7H₂O、10 g/L EDTA、0.02 g/L CuSO₄·5H₂O。

2.2. 电池材料的制备

本研究采用普通市售的不锈钢丝球作为阳极材料，其具有良好的导电能力与致密的多孔洞结构，易让微生物附著并传递电子。陶瓷环具有高孔隙和高机械强度[15]，是良好的空气容纳材料，也具备抗压能力不容易破碎。然而陶瓷环不具有导电性功能，因此要作为阴极材料使用则需要经过改性方式让陶瓷环具备导

电性功能。本实验使用糖蜜原浆浸泡陶瓷环 24 h 后，经完全烘干后再放入到 950℃无氧高温煅烧 1 h，获得具导电性功能的碳化陶瓷环。使用时挑选电阻值小于 20Ω 以下方可使用。本实验采用聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)水凝胶作为质子交换膜，其价格低廉且具有良好的吸水性，可以让质子由阳极液产生后传递至阴极。质子膜制作方式配制成 10% (v/v) 的聚乙烯醇(PVA-2699，皖维高新材料股份有限公司)溶液，通过 -20°C 冷冻 24 h 后放到常温状态下解冻，让原本为水溶性的 PVA 溶液产生不可逆的变性而形成带有黏性的水凝胶形式的质子膜；使用时再与碳化陶瓷环相互紧密黏合后即可制成水凝胶型式的空气阴极。

2.3. 滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池组装运行

本研究将圆管型空气阴极微生物燃料电池(T-AC-MFC)作为核心组件嵌入滴滤盒，构建糖蜜废水处理单元。T-AC-MFCs 系统阳极采用不锈钢丝球并置于滴滤盒内部；阴极采用碳化陶瓷环作为空气阴极，置于滴滤盒外部；阴阳电极间则采用 10% 的 PVA 水凝胶作为质子膜。通过紧密压缩方式，使 3 种材料在圆管内相互紧密接触而形成单颗 T-AC-MFCs。构成滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池(BTF-T-AC-MFCs)的组合方式，是将滴滤盒内镶嵌三根圆管作为 MFC 的外壳，将不锈钢阳极、碳化陶瓷环阴极及 PVA 水凝胶质子膜，三者共同放入至圆管内即组合成 T-AC-MFCs。BTF-T-AC-MFCs 的主体结构是将滴滤盒内插入 3 颗 T-AC-MFCs，透过水泵抽取水箱内的糖蜜废水后，将废水抽往至滴滤盒上方的滴滤管中再均匀滴滤在 T-AC-MFCs 中的阳极区域内(不锈钢丝球区域)；多余的糖蜜废水或未处理完毕的废水则再次进入到水箱中，形成连续循环状态的废水处理模式。

本研究所选用的单向滴滤式空气阴极微生物燃料电池(L-BTF-T-AC-MFCs)系统是在圆管中设置成单边 T-AC-MFC 形式，最终形成一层滴滤盒中含有 3 颗 T-AC-MFCs；双向滴滤式空气阴极微生物燃料电池(B-BTF-T-AC-MFCs)系统则是在保持总电池体积不变的前提下，缩减单颗 T-AC-MFC 阴阳极体积至 L-BTF-T-AC-MFCs 的一半，同一圆管内左右各布置一颗 T-AC-MFCs，并架设在滴滤盒两边，最终形成一层滴滤盒中含有 6 颗 T-AC-MFCs。详细单双向模组化 BTF-T-AC-MFCs 系统示意图，如图 1 所示。

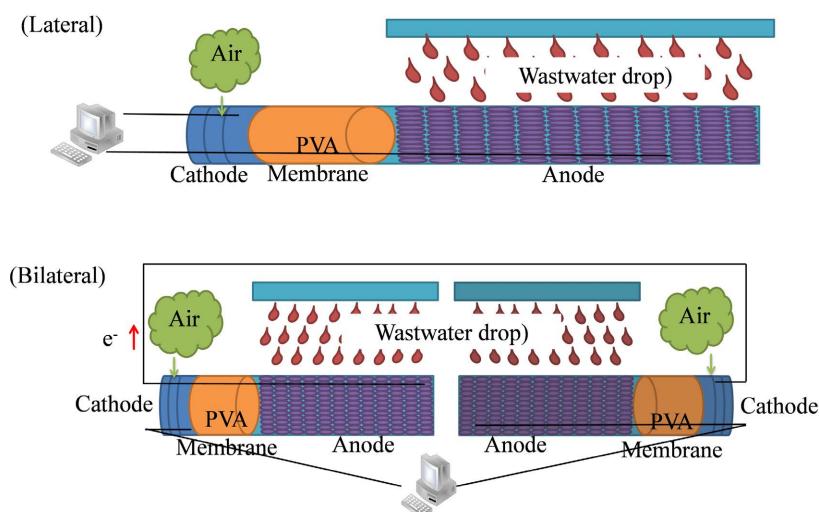


Figure 1. Schematic diagram of L- and B-BTF-T-AC-MFCs
图 1. 单双向模组化滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池图

2.4. 水质与电化学分析

本研究监测糖蜜废水检测方法为：采用 GL-25K 多功能快速消解仪(格林凯瑞，山东)对样品进行消解，之后再用 GL-200 多参数水质测定仪对消解后的样品进行比色分析，进而得出测定的结果。MFC 系

统输出的电压(V)数据采用 PS-2024 连续型数据监测仪(思迈科华技术有限公司, 北京), 每分钟监测一笔数据; 电流(I)是通过公式(1)计算获得。功率(P)是通过公式(2), 经由电流(I)和电压(V)相乘计算获得。体积功率密度则是用功率(P)除以阳极体积计算得出。利用极化斜率法和功率密度峰值法测定每个 BTF-T-AC-MFC 系统的内阻[16]。待 BTF-T-AC-MFC 系统运行一段时间且稳定后, 使用可调节电阻箱和万用表测量电压, 电流和功率都由上述公式计算得出。利用面积电流密度、电压、体积功率密度绘制图表。

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

$$P = I \times V \quad (2)$$

3. 结果和讨论

3.1. 单双向模组对滴滤式空气阴极 MFC 产电性能的研究

单向滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池(L-BTF-T-AC-MFCs)、双向滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池(B-BTF-T-AC-MFCs)产生的电压趋势变化如图 2 所示。从图中可知, 单向和双向 BTF-T-AC-MFCs 所产生的电压趋势两者类似, 均在 21 h 后成功启动, 同时电压也急速上升; 其中, 双向系统产生的电压约单向系统的 2 倍, 具有明显的电压加成效应。双向(B-BTF-T-AC-MFCs)系统实验结果显示, 在第 40 h 产生的最大电压为 3.84 V, 并在实验的第 155 h 电压下降至 2.55 V; 而单向(L-BTF-T-AC-MFCs)系统则在第 31 h 产生最大电压为 2.19 V, 在第 155 h 后电压下降至 1.22 V, 两者间产生的最大电压差异达 1.33~1.65 V。在反应约 180 h 后再次添加糖蜜废水, 此时电压大幅度上升趋势复现, 显示出二次添加糖蜜废水后可以恢复原有状态。在细部探讨下, 当 T-AC-MFC 系统摆设在滴滤盒中时, 于连续滴滤淋洗下, 在相同水平面、进流水流量及阴阳电极同一体积条件下, 双向系统会在滴滤盒中形成 6 颗独立运行的 T-AC-MFCs。当 BTF-T-AC-MFCs 系统采取串联方式来放大电压时, 则双向系统输出的电压为 6 颗 T-AC-MFCs 总和, 明显具有加成效果。相较之下, 单向系统仅 3 颗 T-AC-MFCs 系统在运行, 故获得的电压低于双向系统。

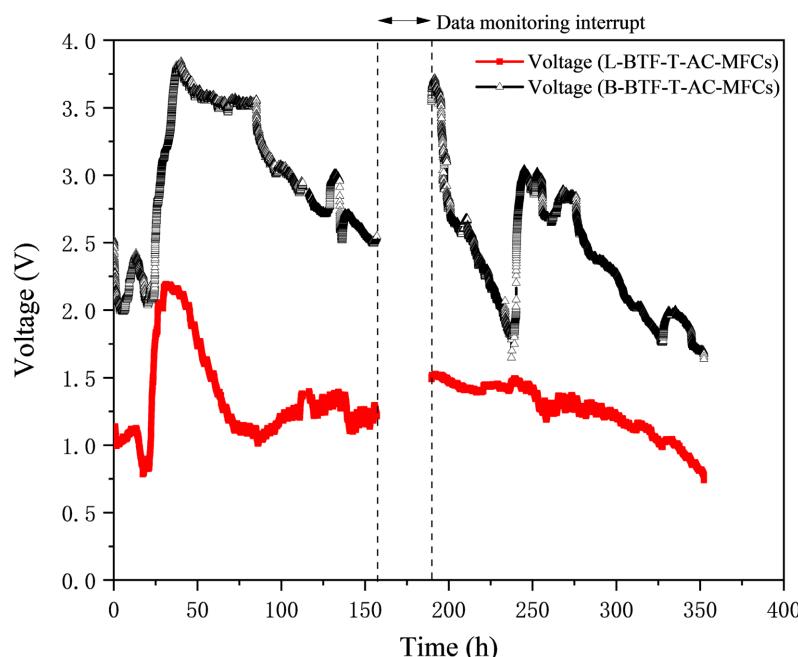


Figure 2. Voltage changes of L- and B-BTF-T-AC-MFCs

图 2. 单双向模组化滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池的电压变化

就整体电压趋势变化而言，双向系统产生的电压比较容易出现不稳定状态，波动幅度较单向系统产生的电压大，这是由于长时间运行后，在滴滤管上会逐渐生成生物膜，其堵塞了滴滤管中的滴滤孔(如图3所示)，进而导致滴滤孔滴水不匀，使得糖蜜废水不能均匀分布在各个T-AC-MFCs上。在实验进行到237 h时，将滴滤管进行反冲洗并清除滴滤管上附着过多的生物膜，以避免出现废水分布不匀的情况。当滴滤管进行反冲洗后，观察到电压会迅速上升，这是由于在反冲洗后，滴滤管进水流量加大，同时废水分布均匀，使得T-AC-MFCs获得的有机物含量更多而产生更高的电压，最终形成了电压上升的趋势，这和Jadhav等人的研究有类似的发现[17]。由于底物浓度的多寡会对MFC系统输出的电流产生影响，所以当底物浓度在微生物耐受范围内，随着浓度的提高而产生更高的电流，反之则电流下降。



Figure 3. Biofilm changes in a BTF-T-AC-MFCs

图3. 滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池的生物膜变化

双向系统是由6颗独立T-AC-MFC所组成，因此在外界环境变化下，总电压的波动幅度大于单向系统。Li等人的研究成果指出，将同一个圆管中区隔成5颗T-AC-MFCs，且有机废水进流方式以硅胶管串通各颗电池时，在连续进流状态下获得的电压为1.1 V [18]。然而，实际上串联5颗T-AC-MFCs理论总电压约2.05 V，明显减低0.95 V，显示连续进流状态下，电池之间受到废水进流方式的影响，而导致电池系统在串联时容易有明显的电压损失[18]。相较之下，双向系统是采用6颗T-AC-MFCs堆栈而成，串联后的电压可达3.84 V，远高于Li等人实验所产生的电压，表明本研究采用滴滤式进流方式没有产生明显电压损失。此外，根据文献资料，当T-AC-MFC系统处理静态有机污水，并在多颗电池串联条件下进行电压放大加成时，若各电池间消耗电子的速率不一致则会产生电压反转现象而不利于电压的加成[19]，或电池间燃料的缺乏也会导致发生电压反转的现象[20]。产生电压反转的原因，是因为在回路中流动的电子是由各单体电池阴极与各自产生的质子反应不平衡性引起的，导致了各单体电池的电极电势变化[19]。本研究使用单向或双向BTF-T-AC-MFCs系统并未出现电压反转现象，是因为废水从上层往下滴落，水平面上废水中有机物浓度处于均衡状态，各电池接受的污染物较为一致，不会存在电子消耗不平衡导致电压反转的产生。纵向上废水的浓度变化不大，不会造成纵向电池因为缺乏燃料而导致的电压反转。

3.2. 进水状态对滴滤式空气阴极MFC产电性能的影响

图4是单双向BTF-T-AC-MFCs中间隔板处无进水状态下电压的变化。其中，第一阶段(I)控制滴滤管水滴位置滴滤在T-AC-MFC系统中的阳极部分；第二阶段(II)则是在第一阶段基础上加大滴滤管滴滤面积，让水滴能够均匀地滴滤到T-AC-MFC中间隔板及阳极区域。图4结果显示，实验初始时预先将糖蜜废水滴滤在T-AC-MFC系统中的阳极区域，此时单双向BTF-T-AC-MFCs系统输出的电压稳定且呈

现倍率关系，双向系统产生的电压约 3.0 V，而单向系统产生的电压约 1.6 V。在加大滴滤管滴滤面积后，BTF-T-AC-MFCs 系统产生的电压均出现下降现象；其中，双向系统产生的电压由 3.0 V 下降到 1.2 V，而单向系统产生的电压则由 1.6 V 下降到 1.35 V。

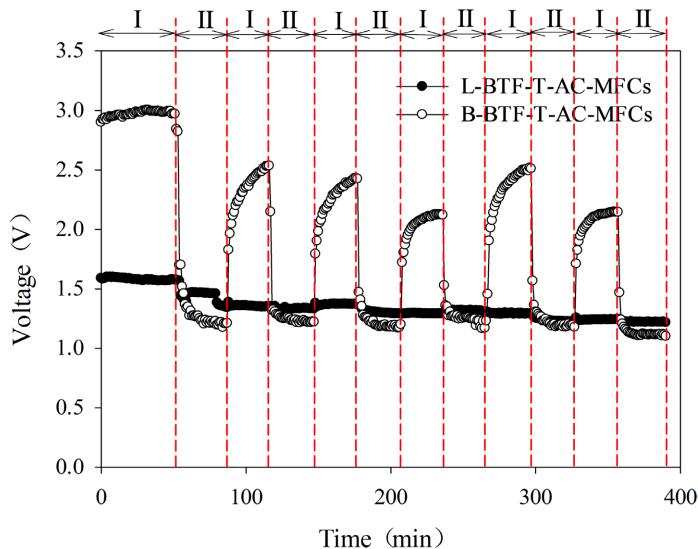


Figure 4. The change of the voltage of the intermediate plate with or without water intake in L- and B-BTF-T-AC-MFCs
图 4. 单双向模组化滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池中间隔板有无进水状态下对电压的变化

当双向系统中间连接隔板处被滴滤水润湿时，此时电压会快速下降且产生的电压明显低于单向系统，类似 Ieropoulos [21] 和 O’Hayre [22] 的研究成果。文献资料结果指出，堆栈式 MFC 系统容易在连续进流状态下引起导电的流体之间相互连接各电池中的阳极，进而产生共用电解液的情形，导致横向的电解液中离子产生交叉传递损失而发生能量损失现象 [21] [22]。而在缩小滴滤面积仅用糖蜜废水滴滤微生物燃料电池的阳极时，发现两系统电压得到了上升。当滴滤管滴滤面积缩小至仅滴滤在阳极区域时(中间隔板保持干燥环境)，则双向系统产生的电压明显回升，电压由 1.2 V 立即回升到 2.5 V，但单向系统产生的电压略微回升。这是由于电池中间隔板未滴滤时保持干燥，未能导致一根圆管内的两颗电池形成阳极共用而产生离子交叉传递损失。

经过 6 次重复实验后获知，在圆管中间隔板处未进行滴滤的条件下，双向系统产生的电压均大于单向系统产生的电压，而在圆管中间隔板处进行滴滤的条件下，双向系统产生的电压大幅度下降，而单向系统产生的电压变化不明显。这是由于，单向系统是由 3 根圆管型微生物燃料电池组装而成，而双向系统是在单向圆管型微生物燃料电池的基础上，缩减阴阳极材料一半并各安装到圆管两端，形成一根圆管中存在两颗 MFCs，共形成 6 颗电池。故此，对于中间隔板处滴滤状态而言，BTF-T-AC-MFCs 系统会导致一根圆管内的两颗电池发生离子交叉传递损失，进而导致电压大幅度下降变化明显；而单向系统内的 3 颗电池不会形成离子交叉传递损失，故此对中部隔板滴滤的状态反应不明显。

对于 BTF-T-AC-MFCs 系统而言，若进水流量过大，进水在系统中汇成水流时，会通过上部的滴滤管和下部的滴滤盒形成连通导致离子交叉传递损失产生使得电压下降；但是对于单向系统而言，若系统内相邻 MFCs 距离过近，则会导致水滴或水流同时落在两颗电池的阳极上，发生离子交叉传递损失产生电压下降；而对于双向系统而言，除了会发生上述两种原因产生的离子传递交叉损失外，还会发生双向电池中央部分淋水形成阳极共用导致的离子交叉传递损失。

本研究选用 BTF-T-AC-MFCs 系统能够实现电压的加成效应，是在于控制了进水的流速，实现了水

流在纵向上是以水滴的形式存在，不会上下连通 MFCs 系统中的阳极区域，可以避免纵向上阳极电解液产生共用的情况；同时，废水的进流方式是以水滴的形式存在于系统中，不会连接 MFC 系统中的阳极和滴滤盒的底部，因此不会造成纵向上的交叉传导损失。在横向上，水流进流方式是以纵向方式流经系统，通过控制 T-AC-MFCs 的位置，可以避免横向上水滴同时滴滤在相邻的两颗 MFCs 的阳极而导致阳极电解液共用。双向系统之所以能够实现电压的加成效应，在于双向系统中间的隔板能将两颗 T-AC-MFCs 隔开，避免了同一圆管内两颗 T-AC-MFCs 的阳极共用阳极电解液的情况。

3.3. 单双向模组对滴滤式空气阴极 MFC 处理糖蜜废水效率

图 5 是单双向 BTF-T-AC-MFCs 系统在第一阶段产电的过程中对糖蜜废水中的 COD 浓度变化。由图 3 可知，当 COD 浓度范围控制在 700~1100 mg/L 时，双向系统在约 4 天后的 COD 去除率为 70%，而单向系统则为 68%，两系统的 COD 去除效率差异性小，故无论单向或双向 BTF-T-AC-MFCs 系统，均可作为处理糖蜜废水的处理单元，产生的电压双向系统为 3.84 V，单向系统则为 2.19 V。对比 Fan [23]、Hassan [24] 的研究结果，当 MFC 系统选用双槽式、燃料选择为糖蜜时，在高浓度 COD (12,890 mg/L) 下，去除率为 54.8%，获得电压为 39.52 mV [23]，而在中低浓度(300~2000 mg/L)下，去除率在 5 天后达 11.7%，30 天后则达 81.7%，获得电压为 990 Mv \pm 5 Mv [24]。由于，糖蜜废水属于中高浓度的有机废水，在处理上需优先降低 COD 去除效率，故常见处理系统包括：双氧水 - 光触媒系统($H_2O_2/TiO_2/UV/沸石$) 方式获得的去除效率仅 15% [25]，或采用厌氧发酵罐处理方式获得的去除率为 46% [26]。本研究采用单双向 BTF-T-AC-MFCs 系统处理糖蜜废水所获得的 COD 去除效率约为 70%，处于一般处理糖蜜废水 COD 去除效率范围内，但本系统属于 MFC 系统，因此在处理糖蜜废水时，在废水连续滴滤状态下获得串联电压可达 3.84 V (双向) 或 2.19 V (单向)，明显优于其他 MFC 系统[23] [24]，显示出糖蜜废水可以作为燃料并提高 MFC 发电电压，是处理糖蜜废水的有效替代方法。

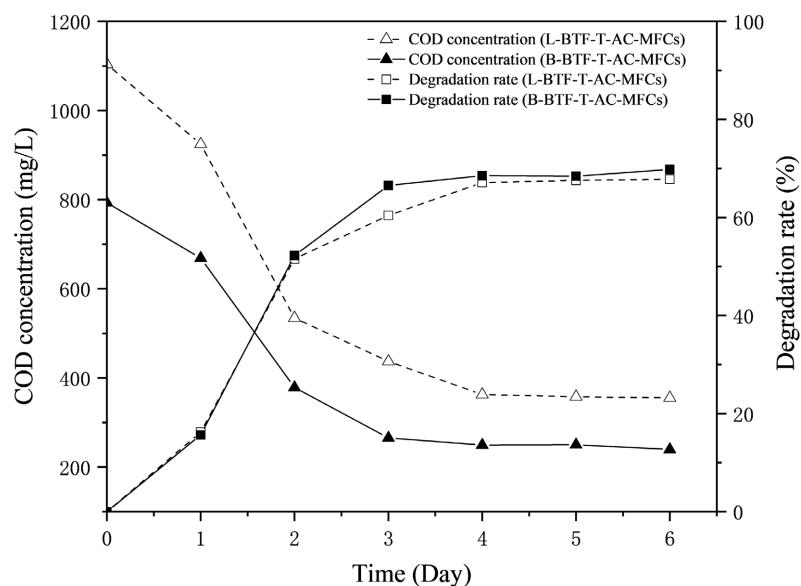


Figure 5. The change of COD concentration of L- and B-BTF-T-AC-MFCs
图 5. 单双向模组化滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池的 COD 浓度变化

3.4. 单双向模组对滴滤式空气阴极 MFC 产电性能的对比

图 6 为单双向 BTF-T-AC-MFCs 系统的功率密度曲线和极化曲线图。从图可知，单向系统获得的开

路电压为 1.5 V、最大体积功率密度为 1703 mW/m^3 、内阻为 9175Ω ；而双向系统所获得的开路电压为 3.36 V、最大功率密度为 4348 mW/m^3 、内阻为 $21,078 \Omega$ 。单双向系统相互比较下可知，双向系统产生的最大体积功率密度大幅度提高了 155%、电阻则提升了 130%。Boghani 研究结果显示，串联 4 颗管式 MFC 系统时，总体电压达 1.26 V，但单颗电池电压仅 0.315 V [27]。Santoro 串联 28 颗陶瓷 MFC，但因为堆栈的电池放在一个水箱中，故输出的电压受到电解液间的离子干扰而仅有 570 mV，且体积功率密度介于 $114.3\sim378.6 \text{ mW/m}^3$ [28]。Estrada-Arriaga 则串联 40 颗 T-AC-MFC，获得的总电压为 4.9 V，单颗电池输出电压介于 0.08~1.1 V，平均单颗电池功率密度约为 62.5 mW/m^2 [13]。将上述结果汇整到表 1 发现，虽然堆栈式 MFC 系统可以获得电压加成，但加成的过程中 MFC 系统的类型会影响电压与功率密度的输出。本研究所采用的 BTF-T-AC-MFCs 系统在连续进流状态下，单向系统仅用了 3 颗电池即可达到 2.19 V 的电压，而双向系统在 6 颗电池下即可达到 3.84 V 的电压，成功地解决了在连续进流污水条件下，MFC 系统放大电压的问题。

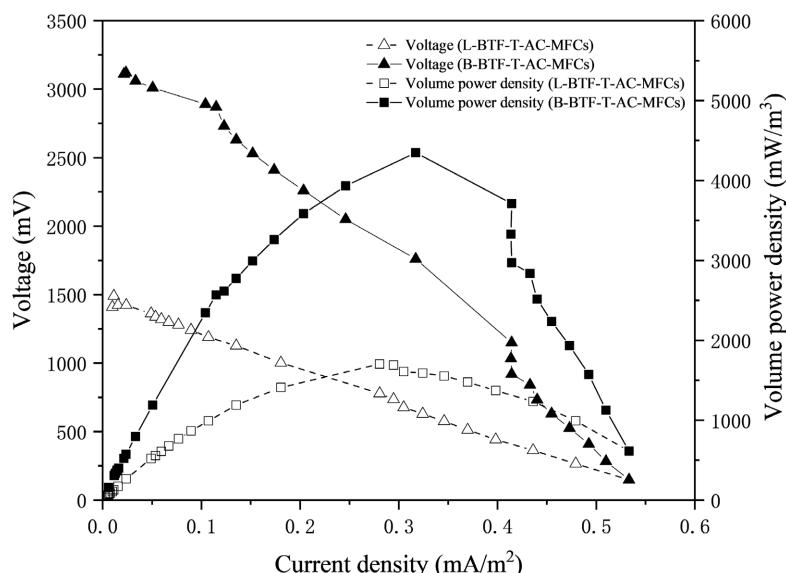


Figure 6. Trend of power density curve and polarization curve of L- and B-BTF-T-AC-MFCs
图 6. 单双向模组化滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池的功率密度曲线和极化曲线趋势

Table 1. Convergence of output voltage and power density of stack microbial fuel cell system
表 1. 堆栈式微生物燃料电池系统输出的电压与功率密度汇整

MFC 系统	污水进流方式	MFC 个数(颗)	最大串联电压(V)	平均单颗 MFC 输出电压(V)	总体 MFC 功率密度	平均单颗 MFC 功率密度	参考文献
单向滴滤式	连续滴滤式	3	2.19	0.64	1703 mW/m^3	568 mW/m^3	本研究
双向滴滤式	连续滴滤式	6	3.84	0.73	4348 mW/m^3	725 mW/m^3	本研究
管状式	连续管柱流式	4	1.26	0.315	3.18 mW	0.795 mW	Boghani [27]
陶瓷式	同槽静态方式	28	0.57	0.594	$3.2\sim10.6 \text{ W/m}^3$	$114.3\sim378.6 \text{ mW/m}^3$	Santoro [28]
空气阴极式	连续管柱流式	40	4.9	0.1225	2500 mW/m^2	62.5 mW/m^2	Estrada-Arriaga [13]

备注：符号“-”代表无此数据。

4. 结论

在滴滤式圆管型空气阴极微生物燃料电池(BTF-T-AC-MFCs)系统中，可以实现在不改变阳极体积和

阴阳极体积比的前提下，获得电压加成的效果。该系统污水进流方式是采用滴滤式进水，因此可以避免共用阳极液产生的离子交叉传递损失，进而获得电压的加成。双向系统相较于单向系统，可以提高电压的原因在于实际工作的电池个数可从 3 颗增加到 6 颗，故电池个数的增加实现了电压提升的目的，其最大电压可从 2.19 V 提升到 3.84 V，同时系统的体积功率密度从 1703 mW/m³ 提升到 4348 mW/m³，增加了 155%。本实验验证了 BTF-T-AC-MFCs 系统作为一种新型的有机废水处理方式，不仅可以实现污染物的降解，同时还可以达到能源回收产电的双重目标。

基金项目

本研究由福建省自然科学基金(项目编号：2023J011018)、三明学院高层次人才科研启动基金(项目编号：22YG13)及福建省高校新世纪优秀人才支持计划(项目编号：KC180079)资助。

参考文献

- [1] Eremekta, G., Tünay, O., Orhon, D. and Gönenç, E. (1995) The Pollution Profile of Alcohol Distilleries Treating Beet Sugar Molasses. *Water Science and Technology*, **32**, 181-188. <https://doi.org/10.2166/wst.1995.0485>
- [2] Satyawali, Y. and Balakrishnan, M. (2008) Wastewater Treatment in Molasses-Based Alcohol Distilleries for COD and Color Removal: A Review. *Journal of Environmental Management*, **86**, 481-497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.024>
- [3] Sun, Y., Lan, J., Du, Y., Guo, L., Du, D., Chen, S., et al. (2020) Chromium(VI) Bioreduction and Removal by *Enterobacter* sp. SL Grown with Waste Molasses as Carbon Source: Impact of Operational Conditions. *Bioresource Technology*, **302**, Article ID: 121974. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121974>
- [4] Sciarria, T.P., Tenca, A., D'Epifanio, A., Mecheri, B., Merlini, G., Barbato, M., et al. (2013) Using Olive Mill Wastewater to Improve Performance in Producing Electricity from Domestic Wastewater by Using Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, **147**, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.033>
- [5] Lai, C., Wu, C., Meng, C. and Lin, C. (2017) Decolorization of Azo Dye and Generation of Electricity by Microbial Fuel Cell with Laccase-Producing White-Rot Fungus on Cathode. *Applied Energy*, **188**, 392-398. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.044>
- [6] Xu, F., Ouyang, D., Rene, E.R., Ng, H.Y., Guo, L., Zhu, Y., et al. (2019) Electricity Production Enhancement in a Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell System for Treating Saline Wastewater. *Bioresource Technology*, **288**, Article ID: 121462. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121462>
- [7] Khanongnuch, R., Di Capua, F., Lakaniemi, A., Rene, E.R. and Lens, P.N.L. (2019) H2S Removal and Microbial Community Composition in an Anoxic Biotrickling Filter under Autotrophic and Mixotrophic Conditions. *Journal of Hazardous Materials*, **367**, 397-406. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.062>
- [8] Santos-Clotas, E., Cabrera-Codony, A., Boada, E., Gich, F., Muñoz, R. and Martín, M.J. (2019) Efficient Removal of Siloxanes and Volatile Organic Compounds from Sewage Biogas by an Anoxic Biotrickling Filter Supplemented with Activated Carbon. *Bioresource Technology*, **294**, Article ID: 122136. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122136>
- [9] Zabranska, J. and Pokorna, D. (2018) Bioconversion of Carbon Dioxide to Methane Using Hydrogen and Hydrogenotrophic Methanogens. *Biotechnology Advances*, **36**, 707-720. <https://doi.org/10.1016/j.bioteadv.2017.12.003>
- [10] Duan, H., Yan, R., Koe, L.C.C. and Wang, X. (2007) Combined Effect of Adsorption and Biodegradation of Biological Activated Carbon on H₂S Biotrickling Filtration. *Chemosphere*, **66**, 1684-1691. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.07.020>
- [11] Wu, C.-H. and Lin, C.-W. (2016) Electricity Generation and Kinetic Aspects of a Biotrickling Filter-Microbial Fuel Cell for the Biofiltration of Ethyl Acetate Vapor from Waste Gas. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107016303601>
- [12] Wu, C., Shih, J. and Lin, C. (2016) Continuous Production of Power Using Microbial Fuel Cells with Integrated Biotrickling Filter for Ethyl Acetate-Contaminated Air Stream Treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**, 21945-21954. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.186>
- [13] Estrada-Arriaga, E.B., Hernández-Romano, J., García-Sánchez, L., Guillén Garcés, R.A., Bahena-Bahena, E.O., Guadarrama-Pérez, O., et al. (2018) Domestic Wastewater Treatment and Power Generation in Continuous Flow Air-Cathode Stacked Microbial Fuel Cell: Effect of Series and Parallel Configuration. *Journal of Environmental Management*, **214**, 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.007>
- [14] Zhao, C., Wang, Q., Lu, Y., Li, B., Chen, L. and Hu, Y. (2018) High-Temperature Treatment Induced Carbon Anode with

- Ultrahigh Na Storage Capacity at Low-Voltage Plateau. *Science Bulletin*, **63**, 1125-1129.
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.07.018>
- [15] Dele-Afolabi, T.T., Hanim, M.A.A., Norkhairunnisa, M., Sobri, S. and Calin, R. (2017) Research Trend in the Development of Macroporous Ceramic Components by Pore Forming Additives from Natural Organic Matters: A Short Review. *Ceramics International*, **43**, 1633-1649. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.177>
- [16] Logan, B.E. (2008) Microbial Fuel Cells. John Wiley & Sons.
- [17] Jadhav, G.S. and Ghangrekar, M.M. (2009) Performance of Microbial Fuel Cell Subjected to Variation in pH, Temperature, External Load and Substrate Concentration. *Bioresource Technology*, **100**, 717-723.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.041>
- [18] Zhuang, L., Zheng, Y., Zhou, S., Yuan, Y., Yuan, H. and Chen, Y. (2012) Scalable Microbial Fuel Cell (MFC) Stack for Continuous Real Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, **106**, 82-88.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.019>
- [19] 陈禧, 朱能武, 李小虎. 串联微生物燃料电池的电压反转行为[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 139-142.
- [20] Oh, S. and Logan, B.E. (2007) Voltage Reversal during Microbial Fuel Cell Stack Operation. *Journal of Power Sources*, **167**, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.016>
- [21] Ieropoulos, I., Greenman, J. and Melhuish, C. (2008) Microbial Fuel Cells Based on Carbon Veil Electrodes: Stack Configuration and Scalability. *International Journal of Energy Research*, **32**, 1228-1240. <https://doi.org/10.1002/er.1419>
- [22] O'Hayre, R., Fabian, T., Lee, S. and Prinz, F.B. (2003) Lateral Ionic Conduction in Planar Array Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, **150**, A430. <https://doi.org/10.1149/1.1554912>
- [23] Fan, L., Shi, J. and Gao, T. (2020) Comparative Study on the Effects of Three Membrane Modification Methods on the Performance of Microbial Fuel Cell. *Energies*, **13**, Article 1383. <https://doi.org/10.3390/en13061383>
- [24] Hassan, S.H.A., El Nasser A. Zohri, A. and Kassim, R.M.F. (2019) Electricity Generation from Sugarcane Molasses Using Microbial Fuel Cell Technologies. *Energy*, **178**, 538-543. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.087>
- [25] Apollo, S., Onyongo, M.S. and Ochieng, A. (2014) UV/H₂O₂/TiO₂/Zeolite Hybrid System for Treatment of Molasses Wastewater. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **33**, 107-117.
- [26] Sirianuntapiboon, S., Phothilangka, P. and Ohmomo, S. (2004) Decolorization of Molasses Wastewater by a Strain No.BP103 of Acetogenic Bacteria. *Bioresource Technology*, **92**, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.07.010>
- [27] Boghani, H.C., Dinsdale, R.M., Guwy, A.J. and Premier, G.C. (2017) Sampled-Time Control of a Microbial Fuel Cell Stack. *Journal of Power Sources*, **356**, 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.118>
- [28] Santoro, C., Flores-Cadengo, C., Soavi, F., Kodali, M., Merino-Jimenez, I., Gajda, I., et al. (2018) Ceramic Microbial Fuel Cells Stack: Power Generation in Standard and Supercapacitive Mode. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 3281.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-21404-y>