

微波预处理污泥上清液为燃料的微生物燃料电池产电特性研究

方丽^{1,2,4}, 刘志华^{1,4}, 李小明^{1,3,4*}, 杨麒^{1,4}, 郑峤^{1,4}, 贾斌^{1,4}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 长沙环境保护职业技术学院环境工程系, 长沙 410082; 3. 广西大学环境学院, 南宁 530004; 4. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要:采用经微波预处理的剩余污泥上清液作为接种体,成功地启动了空气阴极单室无膜微生物燃料电池(MFC),同时考察了不同微波时间和功率下MFC最大输出功率密度以及外接电阻对MFC的影响。结果表明,MFC O₂产电周期长达600 h,在同一微波功率(900 W)下,MFC最大输出功率密度随辐射时间的延长而增大,在300 s时达到210.07 mW·m⁻²;当微波时间(300 s)相同时,随着微波功率的增大,MFC最大输出功率在720 W处出现一个峰值随后下降。长时间和较高功率(<900 W)的微波处理能够有效地提高MFC的工作效率;在最佳微波处理条件(300 s,720 W)下,最大输出功率密度最高可达306.2 mW·m⁻²;不同外接电阻(30、500、2 000 Ω)下,库仑效率依次为83.3%、79.0%、33.6%;通过扫描电镜观察到,当外接电阻较高(2 000 Ω)时,阳极表面附着的微生物以球菌为主,外接电阻较低(30 Ω)时,形态较为复杂,主要是丝状菌、球菌和杆菌,表明外接电阻会对MFC库仑效率和阳极表面微生物的富集产生影响。

关键词:微生物燃料电池;微波预处理;外接电阻;库仑效率;微生物

中图分类号:X382 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2518-07

Electricity Generation by the Microbial Fuel Cells Using the Supernatant Fluid of Microwave Pretreated Sludge as Fuel

FANG Li^{1,2,4}, LIU Zhi-hua^{1,4}, LI Xiao-ming^{1,3,4}, YANG Qi^{1,4}, ZHENG Yao^{1,4}, JIA Bin^{1,4}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Department of Environmental Engineering, Changsha Environmental Protection Vocational College, Changsha 410082, China; 3. College of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: A single-chamber membrane-less microbial fuel cell (MFC) was successfully started up by using the filtrate of sludge pretreated by microwave as substrate. The effects of microwave power and time on the maximum output power density were investigated and the influences of external resistance on the performance of MFC were also analyzed. The results indicated that the electric cycle lasted for nearly 600 h. Under the same microwave power (900 W), the maximum output power density ascend along with the radiation time, and was amount to 210.07 mW·m⁻² as the radiation time reached to 300 s. When radiation time kept constant (300 s), the maximum output power density had a peak on the power of 720 W followed by a gradual decrease with the increase of microwave power. The performance of MFC could be effectively improved by the longer irradiation time and moderate higher microwave power (<900 W). On the optimal treatment conditions (300 s, 720 W), the maximum output power density could reach up to 306.2 mW·m⁻². When the external resistance was 30 Ω, 500 Ω, 2 000 Ω, the coulombic efficiency was 83.3%, 79.0%, 33.6% respectively. The SEM observation showed that the surface of anodic electrode was covered by spherical bacteria at higher external resistance of 2 000 Ω. As at lower external resistance of 30 Ω, it was covered by several other kinds of bacteria besides spherical bacteria, such as filamentous bacteria and bacilliform bacteria. The coulombic efficiency and microorganisms on the surface of anodic electrode were influenced by the external resistance.

Key words: microbial fuel cell (MFC); microwave pretreatment; external resistance; coulombic efficiency; bacteria

建立节约型、循环型社会是实现可持续发展的必由之路,而如何在环境污染治理的同时获得清洁能源则是整个社会实现物质循环的技术保障。利用微生物作为催化剂将储存在有机物中的化学能转变成为电能的装置叫做微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)^[1,2]。由于所用原料可以是有机高浓度废水、城市垃圾或者污水处理厂的

剩余污泥,来源丰富,价格低廉,且不消耗矿物资源,而且能有效降解污染物,为节能低耗污水处理

收稿日期:2009-11-23;修订日期:2010-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50478054);新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0770)

作者简介:方丽(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制,E-mail:fanglililucky@163.com

* 通讯联系人,E-mail:xmli@hnu.cn

新工艺的研究提供了一个新思路,因此近年来受到广泛关注.

剩余污泥中含有丰富的有机物质,如蛋白质、多糖类和脂肪类等,是一种极具潜力的生物能源^[3]. 但是,这些物质大部分为细胞壁所包裹,不容易被微生物直接分解利用,限制了污泥的水解^[4]. 贾斌等^[5]以剩余污泥为燃料的微生物燃料电池(MFC)的最大输出功率密度仅为 $44 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,生物体系缓慢的电子传递效率是其发展的瓶颈^[6],因此研发提高 MFC 内电子传递效率的技术具有重要意义. 近年来,采用适当的预处理破坏细胞壁使有机质溶出增强污泥的生物处理效率的研究已有不少^[7,8]. Park 等^[9]的研究表明,微波预处理能够有效提高污泥厌氧消化性能,是一种非常快速的细胞水解方法,但利用其促进 MFC 效能的研究国内外鲜见报道.

本研究成功实现了厌氧生化处理技术与 MFC 的结合,考察不同微波辐射时间(30 ~ 300 s)以及不同处理功率(180 ~ 900 W)对 MFC 的产电效率的影响,进而确定最优预处理条件;并且探讨了不同外接电阻对电池的最大输出功率密度、SCOD 的去除率、库仑效率以及阳极表面微生物的附着情况的影响,以期研究产电优势菌和进一步提高输出功率密度提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 MFC 实验装置

实验采用单室无膜微生物燃料电池(如图 1 所示). 反应器为圆柱形玻璃容器,上端设有取样口,阳极(面积为 12 cm^2)为片状石墨电极,阴极为杆状石墨电极(未做包括镀 Pt 等任何处理),呈悬浮状

态. 阴、阳极之间用铜导线连接,外接 500Ω 的电阻(测定极化曲线时除外). 实验产生的电压通过 USB-1208LS 型电压数字采集卡(美国 Measurement Computing 公司)测定,按照设定的时间间隔(1 min)自动记录到计算机上.

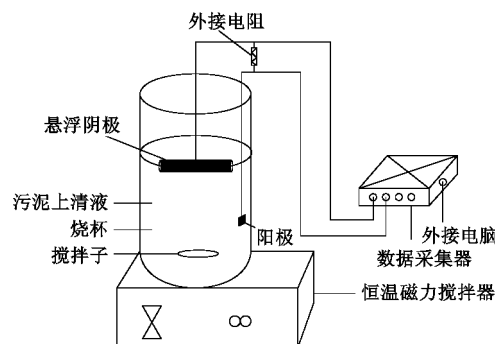


图 1 MFC 的实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the microbial fuel cell

1.2 接种和运行

采用经过预处理的长沙某污水处理厂的剩余污泥上清液作为 MFC 的基质,预处理后污泥上清液性质如表 1 所示. 预处理方法如下:取等量剩余污泥(400 mL)于微波炉中进行微波预处理,将微波后的剩余污泥置于离心机中离心($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 20 min)取上清液 200 mL 倒入 MFC 中作为接种物. 运行前,以剩余污泥为基质的 MFC 悬液 10 mL 作为接种体循环培养. 运行过程中,投加 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 作为离子添加剂,当电压下降至大约 50 mV 时,认为一个周期结束,继续添加新的基质,通过不断地更换,维持燃料电池的运行. 实验过程,不控温,不调 pH.

表 1 预处理后污泥上清液的基本特性

Table 1 Characteristics of the filtrate of the pretreated excess sludge

指标	pH 值	SCOD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	蛋白质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总糖/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	电导率/ $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$
微波处理后	7.3 ~ 8.2	489 ~ 980	300 ~ 450	348 ~ 490	1.5 ~ 4.9
最佳条件下	7.9	879	338	320	4.4

1.3 测定方法

蛋白质、总糖浓度^[10]、可溶性化学需氧量(SCOD)采用标准方法测量^[11]. pH 值采用 WTW muti340i pH 计测定;电导率采用 DDS-II A 型电导仪,测量得到的是待测液经过温度补偿后折算为 25°C 的电导率值;通过变化外电阻(20 ~ 5000 Ω),得到 MFC 的极化曲线. 实验结束后,取出阳极和少量的 MFC 上清液,通过扫描电镜观察其微生物形态

结构. 扫描前,阳极做如下预处理:经无菌生理盐水轻轻冲洗后,用浓度为 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸盐缓冲液($\text{pH} = 7.2$)继续洗涤,随后放置在 2.5% 的戊二醛溶剂中固定 24 h,依次将样本放入不同浓度(10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%)的乙醇溶液中脱水,随即将处理好的样品进行电镜扫描.

功率密度 $P(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$ 采用公式(1)计算:

$$P = UI/A = U^2/(R_e \cdot A) \quad (1)$$

式中, U (mV) 为电压, R_e (Ω) 为外电路电阻, I (mA) 为电流, 由欧姆定律 $I = U/R_e$ 计算得出, A (m^2) 为阳极的有效表面积.

库仑效率 E 按照公式(2)计算:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n U_i t_i}{RF_i b_i \Delta SV} M \times 100\% \quad (2)$$

式中, U_i 为 t_i 时刻 MFC 输出电压 (V); R 为外电阻 (Ω); F_i 为法拉第常数 ($96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$); b_i 为 1 mol COD 所产生的电子的摩尔数 (等于 $4 \text{ e}^- \cdot \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$); ΔS 为 COD 的去除浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为使用基质体积 (L); M 为氧相对分子质量 ($32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

2 结果与分析

2.1 MFC 的启动

以经过微波预处理的污泥上清液作为 MFC 的燃料, 采用剩余污泥为燃料的 MFC 中溶液为接种体, 经过 3 个月连续运行成功启动了单室无膜 MFC. 从图 2 可见, 在接种培养循环的第 1 周期, 电池启动电压很低, 电压达到峰值后迅速衰减; 在第 5 个周期时, 电池启动电压明显升高, 并且在放电曲线上形成一个很长的“放电平台”, 0 周期长达 600 h, 这表明系统已经成功稳定运行.

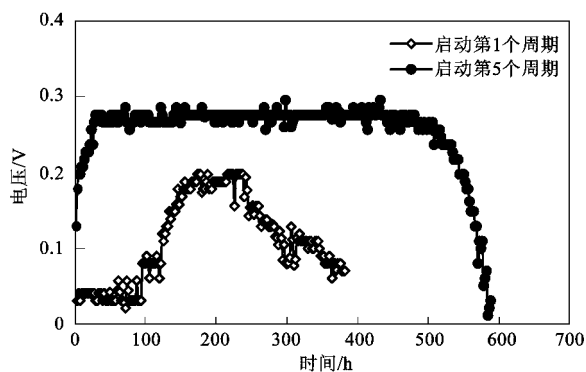


图2 接种时期电压随时间的变化

Fig. 2 Voltage output during inoculum period

2.2 微波时间对 MFC 输出功率密度的影响

在相同微波功率 (900 W) 下, 变化微波时间 (30、70、110、180、250、300 s), 考查微波时间对 MFC 最大输出功率密度的影响. 由图 3 可见, 当微波时间为 30 s 时, 最大输出功率密度为 $84.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; 70 s 时, 最大输出功率密度为 97.1

$\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$; 当时间延长至 180 s 时, 最大输出功率密度上升至 $125.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 随着微波时间增加到 300 s, 其最大输出功率密度可达到 $210.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 约是 30 s 的 2.5 倍. MFC 的最大输出功率密度随微波时间的延长呈逐步上升趋势.

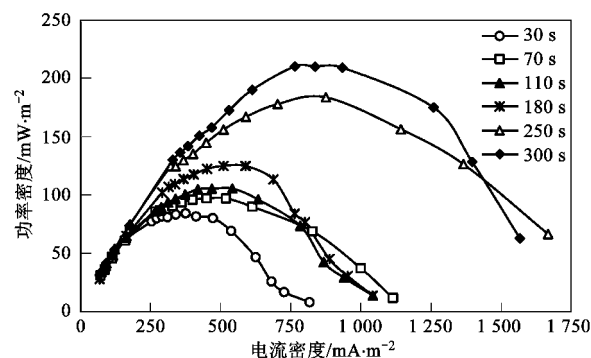


图3 微波时间对 MFC 功率密度的影响

Fig. 3 Effects of microwave time on the power density of the MFC

2.3 微波功率对 MFC 输出功率密度的影响

图 4 显示了在相同微波时间 (300 s) 不同微波功率 (180、360、540、720、900 W) 处理下, 输出功率密度的变化趋势. 在微波功率为 180 W 时最大输出功率密度为 $108.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 当微波功率为 360 W 时, 最大输出功率密度为 $176.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 随着微波功率上升到 720 W, 最大输出功率密度达到最高 $306.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 是直接污泥的 7 倍. 但是当微波功率上升为 900 W 时, 最大输出功率密度却下降到 $198.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 可见, 最大输出功率密度与微波功率并不是呈简单的正相关: 在微波功率 $< 720 \text{ W}$ 时, 最大输出功率密度随着微波功率的升高而增大, 但当微波功率 $> 720 \text{ W}$ 时, 最大输出功率密度反而随着微波功率的上升而有所下降, 可能是微波功率过大, 基质中的有机质有所损失所致.

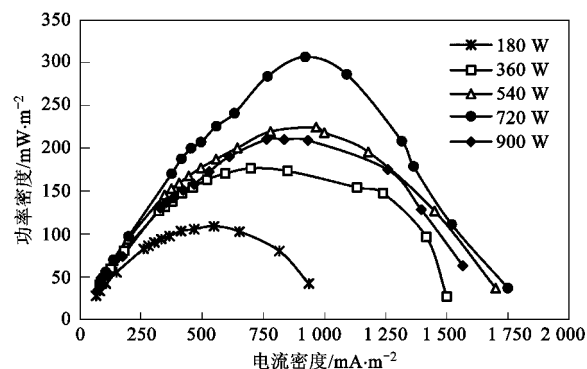


图4 微波功率对 MFC 功率密度的影响

Fig. 4 Effects of microwave power on the power density of the MFC

2.4 不同微波时间和微波功率对 MFC 输出功率密度的影响

同时改变微波功率和时间,确定微波功率和时间的最佳组合. 由图 5 可见,不同微波时间和微波功率组合(30 s, 900 W)、(30 s, 180 W)、(180 s, 540 W)、(300 s, 720 W)、(300 s, 180 W)和(300 s, 900 W)下, 电池最大输出功率密度分别为, 97.1、39.2、117.9、250.1、182 和 210.1 mW·m⁻². 可见,在微波功率为 720 W, 辐射时间为 300 s 时 MFC 的最大输出功率密度最大,是最优处理条件.

2.5 外接电阻对 MFC 性能的影响

表2反映了在3个不同外接电阻(30 Ω, 500

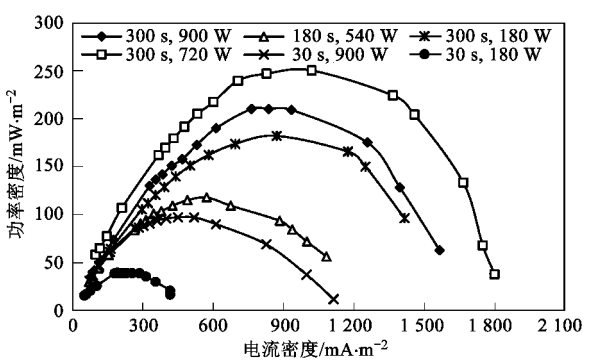


图 5 微波功率和时间对 MFC 功率密度的影响

Fig. 5 Effects of microwave power density and time on the power of the MFC

表 2 不同外接电阻下产电性能比较

Table 2 Comparison of the electricity production performance at different external resistances

项目	外接电阻/Ω		
	30	500	2 000
输出电流密度范围/mA·m ⁻²	66.7 ~ 142.5	69.2 ~ 639.0	33.6 ~ 241.2
输出功率密度范围/mW·m ⁻²	0.2 ~ 73.1	2.9 ~ 245.0	3.3 ~ 139.6
平均输出电流密度/mA·m ⁻²	554.8	522.1	187.2
平均输出功率密度/mW·m ⁻²	18.6	125.5	94.2
最大输出电压/mV	51.3	383.4	578.8
最大输出电流/mA·m ⁻²	1.7	0.8	0.3
出水 SCOD/mg·L ⁻¹	257.5	223.2	253.2
SCOD 去除率/%	70.7	74.6	71.2
库仑效率/%	83.3	79.0	33.6
内阻/Ω	274.9	223.3	222.6

Ω, 2 000 Ω) 的反应器中, MFC 产电性能的比较. 由表 2 可见,减小 MFC 的外接电阻,电流变大,电压变小,但是电池输出功率密度有 1 个峰值, 在外接电阻为 500 Ω 时,最大输出功率密度达到最大值,即 245.0 mW·m⁻². 但内阻受外接电阻影响不大. 外接电阻不同,电池的库仑效率表现出极大的差异: 外接电阻较低(30 Ω)时,电池的库仑效率高达 83.3%,当外接电阻升至 500 Ω 时,库仑效率为 79.0%,外接电阻较高(2 000 Ω)时,库仑效率降至 33.6%;不同外接电阻(30、500、2 000 Ω)下,经 MFC 处理,系统出水 SCOD 浓度分别为 257.5、223.2、253.2 mg·L⁻¹. 外接电阻的增大对 SCOD 的去除率影响不大,依次为 70.7%、74.6%、71.2%.

2.6 外接电阻对阳极表面微生物的影响

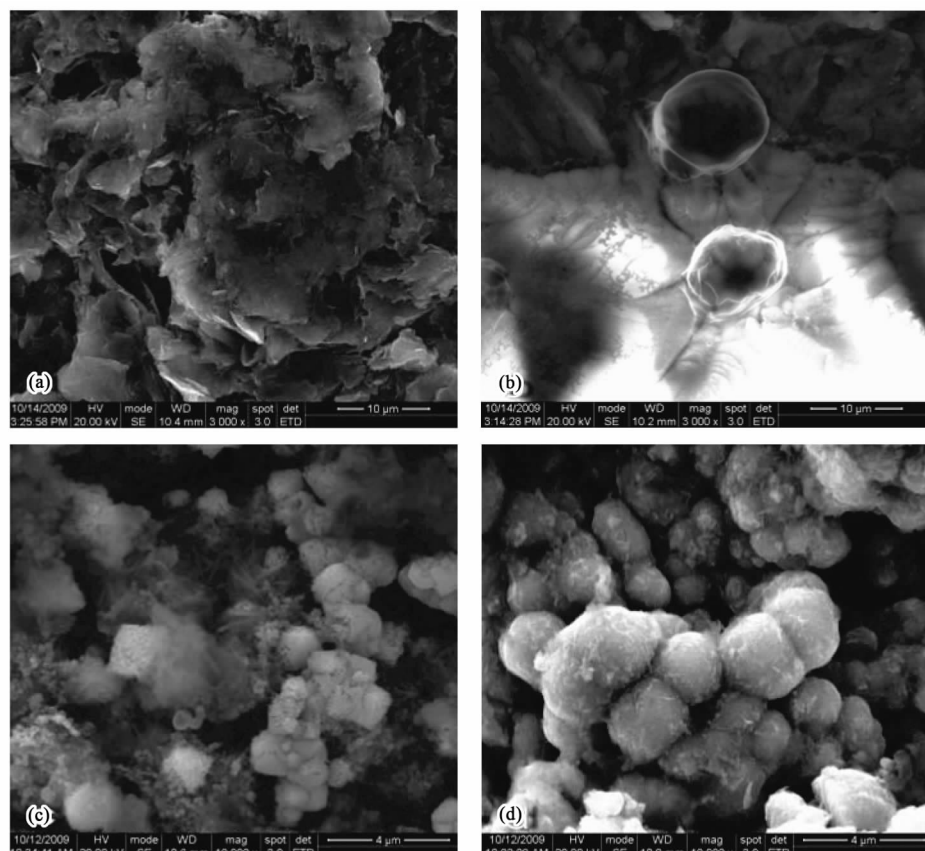
图 6 为不同外接电阻(30 Ω, 2 000 Ω)下,阳极表面和 MFC 上清液的 SEM 照片. 如图 6 可见,在外接电阻较大(2 000 Ω)时,电池阳极表面存在着大量球状细菌,上清液中也存在少量的球状细菌;而在外接电阻较小时,其阳极表面的微生物形态比较复杂,

有丝状,球状和杆状,其中丝状菌占优势,可能是由于外接电阻不同导致阳极表面上的微观环境也有所差异,从而影响了阳极表面的微生物形态.

3 讨论

3.1 微波预处理对 MFC 产电特性的影响分析

Oh 等^[12]研究表明,有机物的类型和浓度能够影响 MFC 系统中最大功率密度的输出. 采用微波预处理的污泥上清液为燃料, MFC 的最大输出功率密度高达 306.2 mW·m⁻²,是贾斌等^[5]以剩余污泥为燃料的 MFC 的最大输出功率密度的 7 倍. 2 种底物产电能力的差异说明微波预处理可以有效地提高 MFC 的产电能力. 造成这个现象的主要原因是:污泥经过微波作用,可以在短时间内产生大量的热量,促进污泥中微生物细胞内的有机质溶出,使基质中蛋白质,还原性糖和 SCOD 的浓度都大幅度的升高,而 SCOD 越高,表示污泥中的碳源越丰富,在微生物厌氧发酵中,其可生化性越强^[8];此外,本实验设计的 MFC 装置的内阻在 220 ~ 280 Ω 之间,比之前报



(a) 微生物附着前的石墨阳极表面的扫描电镜图 ($\times 3\,000$); (b) 外接电阻为 $2\,000\ \Omega$ 时 MFC 上清液的扫描电镜图 ($\times 3\,000$);
(c) 外接电阻为 $30\ \Omega$ 时阳极表面微生物的扫描电镜图 ($\times 10\,000$); (d) 外接电阻为 $2\,000\ \Omega$ 时阳极表面微生物扫描电镜图 ($\times 10\,000$)

图 6 不同外接电阻下附着在阳极表面和上清液中的微生物扫描电镜图

Fig. 6 SEM images of bacteria attached to the surface of the anodic and the supernatant fluid at different external resistances

道的直接微生物燃料电池内阻小^[5], 因为这种燃料电池流动性好, 传质阻力小, 根据文献[5]可知, 最大功率密度与内阻成反比, 因此能够达到相对较高的输出功率密度. 谢波等^[4]指出, 污泥的破解效果随着处理强度的加强而升高, 随着辐射时间的延长, SCOD 浓度越来越高, 在微波功率相同的情况下, SCOD 最高浓度总是在辐射时间最长的情况下出现, SCOD 随微波强度的变化较为复杂; 蛋白质和总糖浓度在开始阶段随辐射时间和功率的增加而升高, 当微波功率过高时, 蛋白质含量则可能降低, 而高强度辐射并不会降低总糖的浓度; 另有报道指出, 随着微波强度的提高, 污泥的可降解性和电导率也逐渐提高^[13,14]. 本研究中, MFC 的产电效率在开始阶段随污泥预处理的时间和功率的加强而升高, 但当微波功率上升到 $900\ \text{W}$ 时, 电池最大输出功率密度反而下降到 $198.0\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, 较 $720\ \text{W}$ 时减少了 35.3% , 可能是由于当功率为 $720\ \text{W}$ 时, 污泥中所有 COD 都已经溶解释放出来, 而当微波功率大于

$720\ \text{W}$ 时, 污泥内部分有机物会进一步氧化成为二氧化碳挥发出来使 SCOD 浓度降低, 而且当微波功率过高, 基质中的蛋白质溶解能力反而下降, 使可利用的有机物减少^[15,16], 因而不利于 MFC 的产电.

3.2 不同外接电阻对 MFC 系统的影响

研究表明, 外接电阻也是影响电子转移的一个因素^[21]. 减小 MFC 的外接电阻可以降低胞外电子传递阻力, 使得电子传递速率增加, 电流变大, 电压变小, 且当外接电阻较小时 ($30\ \Omega$), 库仑效率高达 83.3% , 当外阻增至 $2\,000\ \Omega$ 时, 库仑效率下降到 33.6% , 可能是外接电阻的增大改变了电子的传递分配比, 大部分电子消耗在向外电路输送的过程中^[22], 因此外接电阻越小越有利于电子的回收和利用^[23], 但存在一个最佳电阻使电池输出功率密度最大. MFC 内阻表现为产能阻力, 与电池结构密切相关^[24], 受外接电阻影响不大. 本实验设计的微生物燃料电池的内阻维持在 $200\sim 300\ \Omega$ 之间, 最大输出功率密度出现在 $500\ \Omega$ 处, 此时外接电阻最接近于

电池内阻,这与 Ghangrekar 等^[21]的研究结果一致.在不同外接电阻下,SCOD 的去除率变化不大,分析原因可能是:外接电阻主要与外电路的电子传递相关,对系统内部微生物的活性影响不大,因此不同外接电阻下微生物对有机物的去除率基本相同.

Liu 等^[1]在利用单室 MFC 处理城市污水的实验结果表明,尽管其 COD 去除率接近 80%,但库仑效率却小于 12%,Min 等^[17]、Kim 等^[18]、Oh 等^[19,20]的研究都表明,空气阴极单室无膜 MFC 的库仑效率一般较低,在 9%~12% 之间.本实验未添加任何物质,库仑效率却高达 83.3%,出现这种现象的可能原因是:①:预处理后的污泥上清液中大部分微生物的活性已经完全丧失,接种循环培养后,系统中存在的微生物主要为产电菌种,从而大幅度的提高了电能转化效率;②:由于系统周期较长,说明物质降解较为缓慢,减小了透过无膜空气阴极渗入阳极室的溶解氧对系统的影响.

3.3 外接电阻对阳极表面微生物的影响

MFC 阳极的特殊环境促使了具电化活性微生物在此富集.外接电阻不同,致使系统的微观环境也各不相同,通过扫描电镜发现,吸附在阳极表面的微生物的群落构成也有很大差异.外接电阻为 30 Ω 时,观察到的微生物形态各异,有球状菌,丝状菌和少量杆状菌;外接电阻为 2 000 Ω 时,优势菌种主要是球状菌,上清液中的微生物主要是球状菌.分析原因可能是阳极微观环境的差异所致:当使用的外阻较小时,由于 MFC 启动初期电流较小,而导致 MFC 的电压较小,也就使得阳极的电势相对较高,相反,外阻较大时则阳极的电势相对较高.但 You 等^[25]的扫描结果表明,附着在阳极表面的微生物主要呈杆状.另有研究表明,以活性污泥为接种物的 MFC 阳极上附着的微生物形态各异^[26].因此笔者认为,在同一系统中,条件不同,产电微生物优势菌群也有较大差异.

4 结论

(1)采用微波预处理的污泥上清液为燃料的微生物燃料电池,在运行 3 个月后能够成功实现产电.

(2)长时间和适度高功率(<900 W)的微波处理强度能够有效提高 MFC 的输出功率密度和库仑效率,在最优处理条件(300 s, 720 W)下,电池的最大输出功率密度可达 306.2 mW·m⁻²,库仑效率为 83.3%.

(3)库仑效率随着外接电阻的增大而变小,但

外接电阻的大小对 COD 去除率基本无影响.

(4)MFC 中,外接电阻不同,附着在其阳极表面的产电微生物也各不相同,当外阻较低时,阳极表面微生物形态较为复杂,主要呈球状,丝状和少量杆状;当外接电阻较高时,微生物主要呈球状.

参考文献:

- [1] Liu H, Ramnarayanan R, Logan B E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell[J]. Environ Sci Technol, 2004, **38**(7):2281-2285.
- [2] Du Z, Li H, Gu T. A state of art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy[J]. Biotechnol Adv, 2007, **25**(5):464-482.
- [3] Kapdan I K, Kargi F. Bio-hydrogen production from waste materials[J]. Enzyme Microb Technol, 2006, **38**:569~582.
- [4] 谢波,郭亮,李小明,等.三种预处理方法对污泥的破解效果[J].中国环境科学,2008,**28**(5):417-421.
- [5] 贾斌,刘志华,李小明,等.剩余污泥为燃料的微生物燃料电池产电特性研究[J].环境科学,2009,**30**(4):1227-1231.
- [6] Liu H, Cheng S, Logan B E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration[J]. Environ Sci Technol, 2005, **39**(14):5488-5493.
- [7] Wang C C, Chang C W, Chu C P, et al. Producing hydrogen from wastewater sludge by *Clostridium bifermentans* [J]. J Biotechnol, 2003, **102**(1):83-92.
- [8] Guo L, Li X M, Xie B, et al. Impacts of sterilization, microwave and ultrasonication pretreatment on hydrogen producing using waste sludge[J]. Bioresour Technol, 2008, **99**(9):3651-3658.
- [9] Park B, Ahn J H, Kim J, et al. Use of microwave pretreatment for enhanced anaerobiosis of secondary sludge [J]. Water Sci Technol, 2004, **50**(9):17-23.
- [10] 任南琪,王爱杰,马放.产酸发酵微生物生理生态学[M].北京:科学出版社,2005.301-306.
- [11] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.354-359.
- [12] Oh S E, Logan B E. Hydrogen and electricity production from a food processing Wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies[J]. Water Res, 2005, **39**(19):4673-4682.
- [13] Eskicioglu C, Kennedy K J, Droste R L, Enhanced disinfection and methane production from sewage sludge by microwave irradiation[J]. Desalination, 2009, **248**:279-285.
- [14] Toreci I, Kennedy K J, Droste R L, Evaluation of continuous mesophilic anaerobic sludge digestion after high temperature microwave pretreatment[J]. Water Res, 2009, **43**(5):1273-1284.
- [15] Chan W I, Wong W T, Liao P H, et al. Sewage sludge nutrient solubilization using a single-stage microwave treatment[J]. J Environ Sci Heal A, 2007, **42**(1):59-63.
- [16] Cigdem E, Nicolas T, Kevin J K. Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge[J]. Water Res,

- 2007, **41**(11):2457-2466.
- [17] Min B, Kim J R, Oh S E, *et al.* Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells [J]. *Water Res*, 2005, **39**(20):4961-4968.
- [18] Kim J R, Jung S H, Regan J M, *et al.* Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells[J]. *Bioresour Technol*, 2007, **98**(13):2568-2577.
- [19] Oh S, Min B, Logan B E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(18):4900-4904.
- [20] Oh S E, Logan B E. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect direct power generation in microbial fuel cells[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2005, **70**(2):162-169.
- [21] 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]. *Bioresour Technol*, 2007, **98**(15):2879-2885.
- [22] 徐伟. 微生物燃料电池的基础研究[D]. 扬州:扬州大学, 2007.
- [23] Jeong C M, Rae-Choi J D, Ahn Y, *et al.* Removal of volatile fatty acids (VFA) by microbial fuel cell with aluminum electrode and microbial community identification with 16S rRNA sequence [J]. *Korean J Chem Eng*, 2008, **25**(3):535-541.
- [24] 梁鹏, 范明志, 曹效鑫, 等. 微生物燃料电池表面内阻的构成和测量[J]. *环境科学*, 2007, (**28**)8:1894-1898.
- [25] You S J, Zhao Q L, Zhang J N, *et al.* A graphite-granule membrane-less tubular air-cathode microbial fuel cell for power generation under continuously operational conditions[J]. *J Power Sources*, 2007, **173**(1):172-177.
- [26] Ren Z, Ward T E, Regan J M. Electricity Production from Cellulose in a Microbial Fuel Cell Using a Defined Binary Culture [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(13):4781-4786.