

阴极电极面积和膜面积对 H 型 MFCs 产电能力的影响

刘百仓^{1,2}, 姚雪^{1,2,3}, 周先敏^{1,2}, 邬晓超⁴

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3. 西南交大土木工程设计有限公司, 成都 610031; 4. 成都科雅污水处理有限公司, 成都 610207)

摘要:以生活污水为底物, 碳棒作电极, 构建 H 型瓶式微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFCs), 研究了阴极电极面积和膜面积对电池产电能力的影响。阳极以厌氧污泥作接种体, 两室分隔物使用阳离子交换膜 (cation exchange membrane, CEM), 阳极不使用中介体, 阴极使用无催化剂的普通碳电极。采用几种不同的阴极面积和阳离子交换膜面积, 以最大功率密度和内阻等作为比较参数, 比较其产电性能。结果表明: ① 阴极电极面积较小时, 功率密度随其增加而增大, 内阻随其增加而减小, 但两者的变化幅度均逐渐减小; 当两者达到极值后, 随着阴极电极面积的增加, 功率密度值逐渐减小, 内阻增大; 当阴极电极面积为 71.55 cm^2 时, 最大功率密度达到最大值为 27.36 mW/m^2 , 内阻达到最小值为 $1.84 \text{ k}\Omega$; ② CEM 面积小于阳极电极面积时, CEM 尺寸是 MFCs 产电能力提高的限制性因素, 增大 CEM 面积可以显著提高 MFCs 功率输出, 降低系统内阻, 电池产电性能最优的条件是 CEM 面积 (9.62 cm^2) 与阳极电极面积 (8.42 cm^2) 相当, 得到的最大功率密度为 46.1 mW/m^2 , 内阻为 $1.01 \text{ k}\Omega$ 。

关键词:微生物燃料电池; 产电能力; 阳离子交换膜面积; 阴极电极面积; 最大功率密度; 内阻

中图分类号: X703.1; X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)06-1837-06

Effect of Cathode Electrode and Cation Exchange Membrane Areas on Electricity Production of H-type MFCs

LIU Bai-cang^{1,2}, YAO Xue^{1,2,3}, ZHOU Xian-min^{1,2}, WU Xiao-chao⁴

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Southwest Jiaoda Civil Engineering Design Co. Ltd, Chengdu 610031, China; 4. Chengdu Keya Sewage Treatment Co. Ltd., Chengdu 610207, China)

Abstract: H-type microbial fuel cells (MFCs) in which domestic wastewater was used as substrate and graphite sticks were used as electrodes were constructed to investigate the effect of cathode surface and membrane area on the performance of MFCs. Anaerobic sludge was inoculated in the anode compartment, and a cation exchange membrane (CEM) was adopted to separate the two chambers, while no mediator was employed in the anode and no catalyzer was used in the cathode. The maximum power density and the internal resistance were chosen as the parameters to compare the power generation of the MFCs, which had different cathode areas and different CEM areas. The results showed: ① When cathode electrode area is small, the power density increases with the increase of cathode electrode area, the internal resistance decreases with the increase of cathode electrode area, but the magnitude of both gradually decreases; when the two reaches maximum value, with the increase of the cathode electrode area, the power density decreases and the resistance increases; The maximum power density gained in the experiment was 27.36 mW/m^2 and the minimum internal resistance was $1.84 \text{ k}\Omega$ with a cathode area of 71.55 cm^2 . ② When the area of CEM was less than that of anode electrode, the dimension of CEM was the limiting parameter to the increase of power generation. Increasing the CEM area would improve the MFCs' power output and reduce its internal resistance. When the CEM area (9.62 cm^2) corresponded with the anode electrode area (8.42 cm^2), MFCs had the optimal condition, which had a maximum power density of 46.1 mW/m^2 and an internal resistance of $1.01 \text{ k}\Omega$.

Key words: microbial fuel cells; electricity production; cation exchange membrane area; cathode electrode area; maximum power density; internal resistance

微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFCs) 是一种利用微生物代谢作用将有机物中化学能转化为电能电化学装置^[1,2]。当前, 很多研究者以葡萄糖和醋酸盐等有利于微生物吸收的有机物作为 MFCs 的燃料^[3], 但可以预见的是在 MFCs 未来的扩大生产和应用中, 这些燃料底物使用将增加制作和使用成本。生活污水中含有多种有机物, 富含各种产电细菌^[2-4], 可用作 MFCs 燃料底物, 将废弃的污水变废为宝, 因此使用污水作燃料来制作 MFCs 是具有重

要意义的研究方向之一。但使用污水为底物的电池系统所产生的能量与实际应用所需量还有很大的差距。Daniel 等^[5]使用污水处理厂中污水为燃料底物, 接种 *Pseudomonas* sp. 菌, 铁氰化钾为阴极氧化剂,

收稿日期: 2010-06-22; 修订日期: 2010-08-17

基金项目: 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金项目 (2009B055); 中央高校基本科研业务费四川大学青年教师科研启动基金项目 (2009SCU11046)

作者简介: 刘百仓 (1981 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为给水与污水处理理论与工艺, E-mail: bcliu@scu.edu.cn

在阳极使用亚甲基蓝为中介体,仅得到 $979\text{ }\mu\text{W}/\text{m}^2$ 的最大功率密度和 $1.15\text{ mA}/\text{m}^2$ 的电流密度. 其中,就双室 MFC 运行而言,有很多限制能量产出的因素,其中一个影响较大的因素就是作分隔物的膜,它的使用将增加电池内阻,膜的种类和面积都极大地影响电池产能. 质子交换膜^[6,7] (proton exchange membrane, PEM) 因其良好的质子传递效率而常在双室 MFCs 中被用作分隔物. Oh 等^[8] 使用厌氧池脱水污泥作阳极接种体,以醋酸盐为底物,构建双室 MFC,实验结果表明当质子交换膜 (PEM) 面积小于电极面积时,PEM 面积是限制功率输出的因素,这主要是由于 PEM 面积过小时,电池内阻将增大. 另外,电极面积也是影响 MFCs 产能的重要因素^[8,9]. 很多学者在研究中发现,当阳极和阴极的面积相等时^[6,7,10],能获得较高的功率密度. 也有学者研究单个电极面积对电池的影响,比如 Ghangrekar 等^[9] 使用污水为底物,并对阴极进行曝气,构建了升流式 MFC,使用 3 种阳极面积: 70.21 、 140.43 和 210.64 cm^2 ,当阳极面积为 70.21 cm^2 时得到的功率密度最大为 $10.13\text{ mW}/\text{m}^2$,但实验中没有明确给出电极面积的增长趋势对电池的影响,也没有指出阳极电极与阴极电极和膜面积的比例对功率输出的影响. 本研究主要从以下两方面研究如何提高无介体 H 型 MFCs 的产电能力:①以生活污水作为底物,阳极接种厌氧池污泥,石墨棒作电极,使用阳离子交换膜 (cation exchange membrane, CEM) 作为分隔物,空气中氧作最终电子受体,阳极不使用电子中介体,阴极不使用催化剂,研究阴极电极面积的变化趋势以及其与阳极电极面积在何种关系下能使电池达到最优的运行效果,②研究不同的 CEM 面积下 MFCs 的运行效果的优劣. 本实验中,使用的材料环保、清洁、价廉,装置的制作和运行成本都相对较低;研究阴极碳棒面积和 CEM 面积的变化对 MFCs 运行效果的影响,以期合理使用材料并提高电池产电能力,这对未来 MFCs 的生产和运用都具有一定的实际意义.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行

实验装置如图 1 所示,本实验构建了多个瓶式 H 型 MFCs 系统,研究在不同膜面积和阴极电极表面积下 MFCs 的产电能力. 阳极有效容积约 400 mL ,阳极使用碳棒做电极,长 4.6 cm ,直径 0.55 cm ,表面积 8.42 cm^2 ; 阴极有效容积约 300 mL ,阴极碳棒使用的数量根据实验方法不同而改变,每根碳棒长

5.7 cm ,直径 0.75 cm ,表面积 14.31 cm^2 . 用有机玻璃管连接阳极室与阴极室,有机玻璃管中间放置阳离子交换膜 (CEM) 将 2 个反应室隔开,以玻璃管内径为膜面直径计算膜面积. 具体参数见表 1.

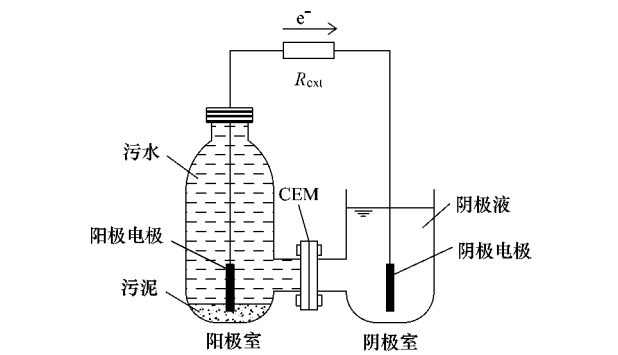


图 1 MFCs 结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of MFCs

表 1 实验装置参数

Table 1 MFCs device parameters						
反应器 编号	电极 材料	膜材料	阳极面积 / cm^2	阴极面积 / cm^2	膜面积 / cm^2	电极距离 / cm
1	碳棒	CEM	8.42	14.31	3.14	8
2	碳棒	CEM	8.42	42.93	3.14	8
3	碳棒	CEM	8.42	71.55	3.14	8
4	碳棒	CEM	8.42	100.17	3.14	8
5	碳棒	CEM	8.42	42.93	0.785	9.5
6	碳棒	CEM	8.42	42.93	3.14	9.5
7	碳棒	CEM	8.42	42.93	9.62	8

MFCs 阳极底物取自航空港污水厂 (四川省成都市双流县) 厌氧池的污水,污水取回未使用前保存在冰箱 (温度控制在 4°C) 中. 为便于 MFCs 的启动,每个装置启动时,阳极液中添加 15 mL 葡萄糖溶液 ($1000\text{ mg}/\text{L}$) 和 5 mL 无机盐溶液,无机盐溶液 (1000 mL) 主要成分为: $310\text{ mg NH}_4\text{Cl}$, 101.98 mg NaCl , $4.9\text{ mg KH}_2\text{PO}_4$, $6.16\text{ mg Na}_2\text{HPO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$. 阴极使用溶解氧水溶液作电解液,溶液 pH 值为 7 左右. 所有装置放置在水浴锅内 (余姚市东方电工仪器厂) 恒温运行,设置温度为 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

1.2 数据测量与计算

污水浓度用 COD 表示, COD 使用 5B-3B 快速测定仪 (兰州连华科技) 测定. 电池开路时,将数字万用表接正负两极测量 MFCs 产生的开路电压 (open circuit voltage, OCV); 将数字万用表与电池所加载的负载并联测量 MFCs 产生的电压 (即负载电压 U). 实验装置启动后,每 2 h 测量一次电压. 由于数据采集使用人工测量的方式进行,因此 $21:00$

~次日 09:00 的数据未测量,但装置整个运行周期历时较长,短时间的数据断点并不影响对电池性能的反应.根据欧姆定律,实验中 MFCs 的输出电流 I 用式(1)计算:

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

式中, I 为电流, mA; U 为电压, V; R 为外电阻, k Ω .

对于特定构型的 MFCs 系统,功率并不能很好地描述系统的效率.阳极电极表面是微生物附着的主要载体,也是阳极反应的场所,因此阳极表面积将影响微生物燃料电池能量的输出,本实验以阳极表面对输出功率进行规范.功率和功率密度分别用式(2)和式(3)计算:

$$P = I^2 R_{\text{ext}} \quad (2)$$

式中, P 为功率, mW; I 为电流, mA; R_{ext} 为外电阻, k Ω .

$$P_{\text{An}} = \frac{I^2 R_{\text{ext}}}{A_{\text{An}}} \quad (3)$$

式中, P_{An} 为功率密度, mW/m²; R_{ext} 为外电阻, k Ω ; I 为电流, mA; A_{An} 为阳极电极表面积, m².

本实验 MFCs 系统的内阻测量使用极化曲线斜率法,测量不同的外电阻下对应的稳定电压,并计算其电流密度值,作极化曲线,求其斜率,即为电池的内阻.

1.3 实验内容

1.3.1 阴极电极表面积变化对 MFCs 产电能力的影响

为研究阴极电极表面积变化对 MFCs 产电能力的影响,本实验用装置编号 1~4 做比较,其阴极电极表面积依次为 14.31、42.93、71.55 和 100.17 cm²,阴极与阳极电极面积的比值为 1.7、5.1、8.5 和 11.9,电池电极距离约为 8 cm(连接管长 2.5 cm),详细参数见表 1.0~220 h,电池连接的外荷载为 15、5、5 和 3 k Ω ,220 h 后,电池连接的外荷载均为 3 k Ω .所有装置阳极液污水的 COD 均为 632 mg/L,装置运行温度为 30 $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,阴极液 pH 值约为 7.

1.3.2 CEM 面积变化对 MFCs 产电能力的影响

为研究膜面积变化对 MFCs 产电能力的影响,本实验分别使用不同条件下的 2 组装置做比较,实验装置编号 2 和编号 7 比较、实验装置编号 5 和编号 6 比较.其中,2 号电池 CEM 面积为 3.14 cm²,7 号电池 CEM 面积为 9.62 cm².2 个电池连接的外荷载为 3 k Ω ,电极距离约为 8 cm(连接管长 2.5 cm).

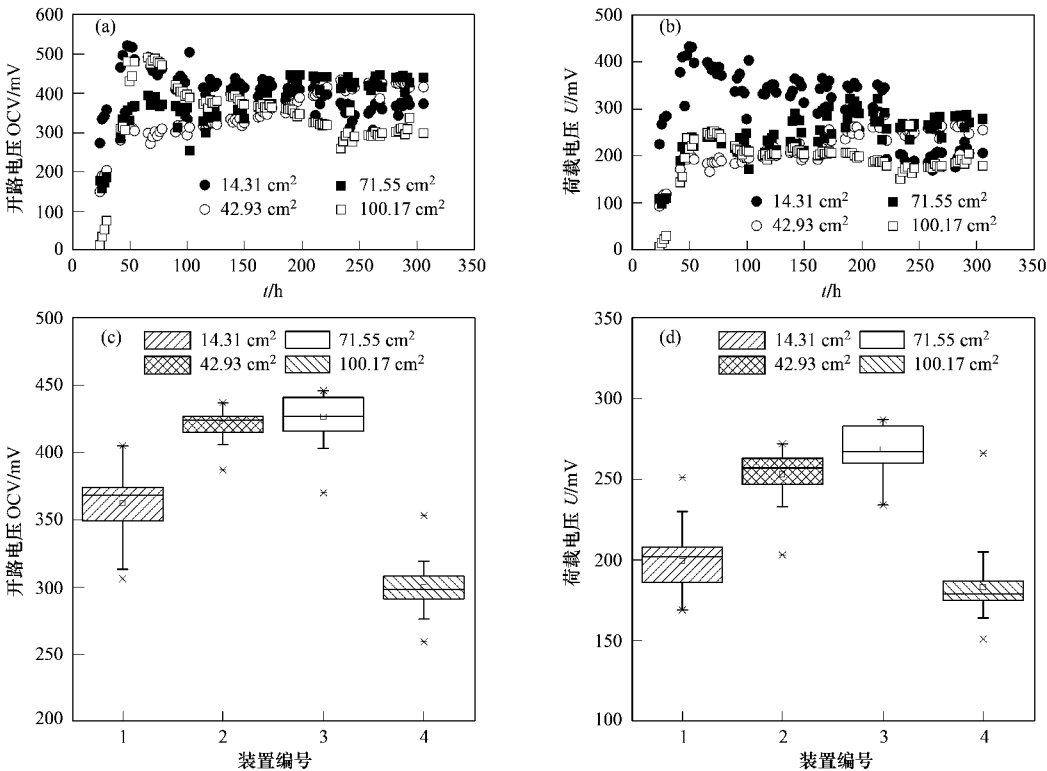
5 号电池 CEM 面积为 0.785 cm²,电池连接的外荷载为 15 k Ω ;6 号电池 CEM 面积为 3.14 cm²,电池连接的外荷载为 10 k Ω .2 个电池电极距离约为 9.5 cm(连接管长 4 cm),详细参数见表 1.所有装置阳极液污水的 COD 均为 632 mg/L,装置运行温度为 30 $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,阴极液 pH 值约为 7.

2 结果与讨论

2.1 阴极电极表面积变化对 MFCs 产电能力的影响

图 2 为阴极电极面积变化时 MFCs 的开路电压(OCV)与荷载电压(U).其中图 2(a)为 4 套装置的开路电压从启动到运行结束随时间变化曲线;图 2(b)为 4 套装置的荷载电压从启动到运行结束随时间变化曲线;图 2(c)为在电池开路电压和荷载电压数值均达到稳定后到装置运行结束的阶段中,对这一阶段中开路电压的数值进行统计分析所得出的数值;图 2(d)为在电池开路电压和荷载电压数值均达到稳定后到装置运行结束的阶段中,对这一阶段中荷载电压的数值进行统计分析所得出的数值.由图 2(a)、2(b)可知,4 套装置有相对较稳定的电压输出.在不同的外电阻下,4 套装置 OCV 和 U 并没有明显的可比性,2 号和 3 号电池加载同样的外荷载(5 k Ω)且它们的阴极电极面积较大,电池的 OCV 和 U 较高;1 号电池电极面积最小,当其外荷载很高时,它与阴极面积最大的 4 号电池有相似的 OCV 和 U ,表明外荷载对电池的放电有一定的影响,电池加载较高的外荷载时,电池的 OCV 和 U 也会升高.220 h 后将 4 套装置外电阻更换为 3 k Ω ,可以较直观地比较阴极电极面积变化对 MFCs 的 OCV 和 U 的影响,从图 2(c)可以看出,4 套装置的开路电压(OCV)分别为 370、425、430 和 300 mV,从图 2(c)和图 2(d)中可以看出,荷载电压(U)分别为 200、255、265 和 180 mV,表明电池 OCV 和 U 随阴极电极面积增加而增加,但不是阴极面积越大,OCV 和 U 就越高,阴极电极面积从 14.31 cm² 增加到 42.93 cm² 时 OCV 和 U 急剧增加,而从 42.93 cm² 增加到 71.55 cm² 时,OCV 和 U 增量较小,阴极电极面积进一步增加到 100.17 cm² 时,OCV 和 U 反而急剧下降,表明在一定范围内增加阴极电极面积可以提高电池的 OCV 和 U ,电极面积的进一步增加将降低电池的 OCV 和 U .

开路电压(OCV)和荷载电压(U)只能反映电池的部分性能,电池的内阻和最大输出功率密度能进



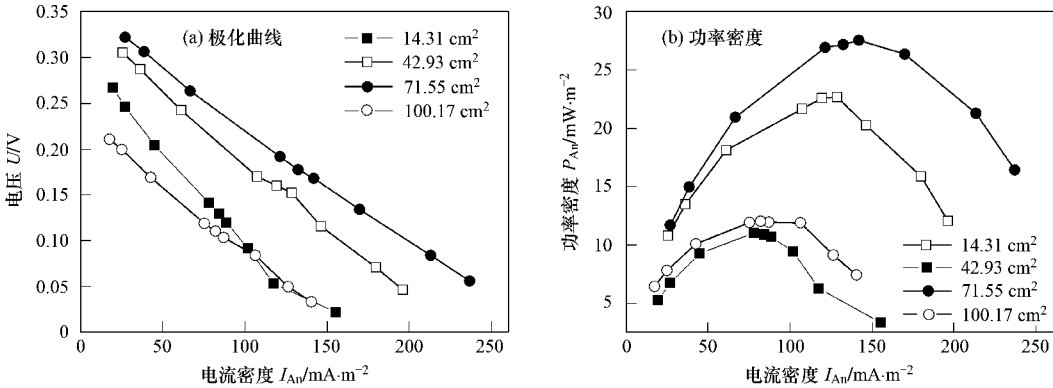
(a)、(b)分别为 OCV 和 U 随时间变化图, (c)、(d)分别为 MFCs 稳定阶段 4 套装置加载相同的荷载 OCV 和 U 的数值分布图; 阳极面积 8.42 cm^2 , 电极距 8 cm , CEM 面积 3.14 cm^2 , $0\sim 220\text{ h}$: $R_{\text{ext}1}=15\text{ k}\Omega$, $R_{\text{ext}2}=5\text{ k}\Omega$, $R_{\text{ext}3}=5\text{ k}\Omega$, $R_{\text{ext}4}=3\text{ k}\Omega$, 220 h 后: $R_{\text{ext}1}=R_{\text{ext}2}=R_{\text{ext}3}=R_{\text{ext}4}=3\text{ k}\Omega$

图 2 阴极电极面积变化 MFCs 的开路电压与荷载电压

Fig. 2 OCV and voltage of external resistance of MFCs of different cathode surface area

一步反应它的性能. 4 套 MFCs 稳定后, 测量不同电阻下的电压, 由式(1)和(3)计算对应的电流和功率密度, 得到 4 套装置功率密度图[图 3(a)]和极化曲线图[图 3(b)]. 如图 3 所示, 阴极面积为 14.31 、 42.93 、 71.55 和 100.17 cm^2 时, MFCs 对应的最大功率密度分别为 10.85 、 22.44 、 27.36 和 10.89 mW/m^2 , 内阻分别为 2.6 、 2.23 、 1.84 和 $2.25\text{ k}\Omega$.

当阴极电极面积从 14.31 cm^2 增加到 42.93 cm^2 时, 功率密度增加 106.8% , 内阻减少 14.2% ; 从 42.93 cm^2 增加到 71.55 cm^2 , 功率密度只增加 21.9% , 内阻减少 17.5% . 功率密度变化幅度减小 84.9% , 内阻变化幅度增加 3.3% . 然而, 从 71.55 cm^2 增加到 100.17 cm^2 时, 功率密度减小, 内阻增大. 这表明, 阴极电极面积变化时, MFCs 最大功率



阳极面积 8.42 cm^2 , 电极距 8 cm , CEM 面积 3.14 cm^2 , $R_{\text{ext}1}=R_{\text{ext}2}=R_{\text{ext}3}=R_{\text{ext}4}=3\text{ k}\Omega$

图 3 阴极电极面积变化 MFCs 的极化曲线与功率密度

Fig. 3 Polarization curves and power density curves of MFCs of different cathode surface area

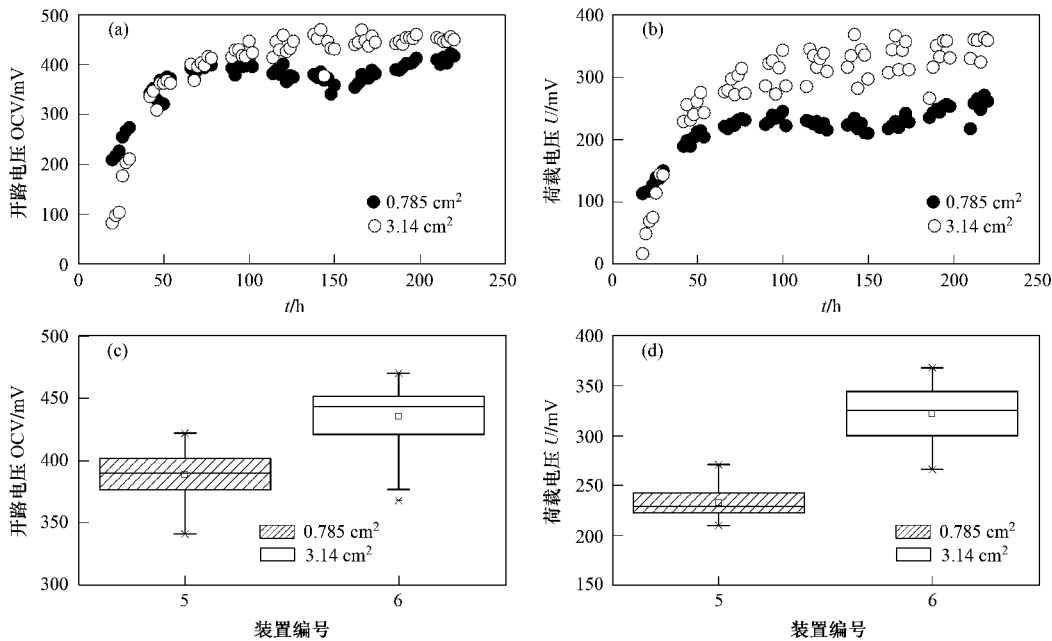
密度和内阻变化规律与OCV和*U*相同.随着阴极电极面积的增大,最大功率密度增大,内阻减小,功率密度和内阻的变化幅度逐渐减小.当功率密度达到最大值、内阻达到最小值后,进一步增大阴极电极面积将减小最大功率密度,增加内阻值.

2.2 CEM 面积变化对 MFCs 产电能力的影响

如图4所示,CEM面积变化时,2套装置都有较稳定的电压输出,5号电池CEM面积为0.785 cm²、外荷载为15kΩ时,电池的开路电压(OCV)和荷载电压(*U*)分别为400 mV、230 mV;6号电池CEM

面积为3.14 cm²、外荷载为10 kΩ时,电池的开路电压(OCV)和荷载电压(*U*)分别为430 mV、340 mV.5号电池CEM面积较小,因此尽管外荷载很高,电池的开路电压(OCV)和荷载电压(*U*)仍然低于6号电池CEM面积增大到4倍所对应的值,表明膜面积对MFCs的运行效果有显著影响,增大膜面积可以显著提高MFCs的开路电压(OCV)和荷载电压(*U*).

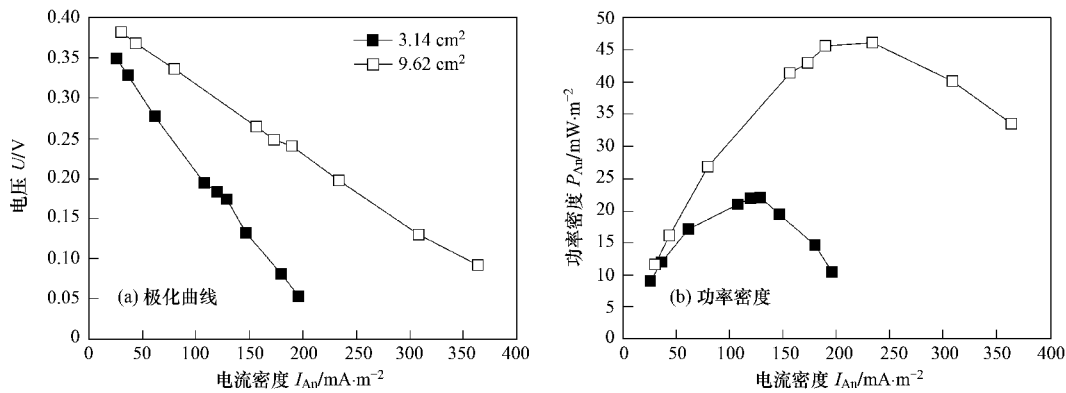
如图5所示,电极距为8 cm时,CEM面积从3.14 cm²增加到9.62 cm²时,MFCs的最大功率密



(a)、(b)分别为OCV和*U*随时间变化曲线,(c)、(d)分别为MFCs稳定阶段2套装置加载相同的荷载OCV和*U*的数值分布;
阳极面积8.42 cm²、阳极电极面积42.93 cm²、电极距9.5 cm, $R_{\text{ext}5} = 15\text{ k}\Omega$ 、 $R_{\text{ext}6} = 10\text{ k}\Omega$

图4 CEM 面积变化 MFCs 的开路电压与荷载电压

Fig.4 OCV and voltage of external resistance of MFCs of different CEM area



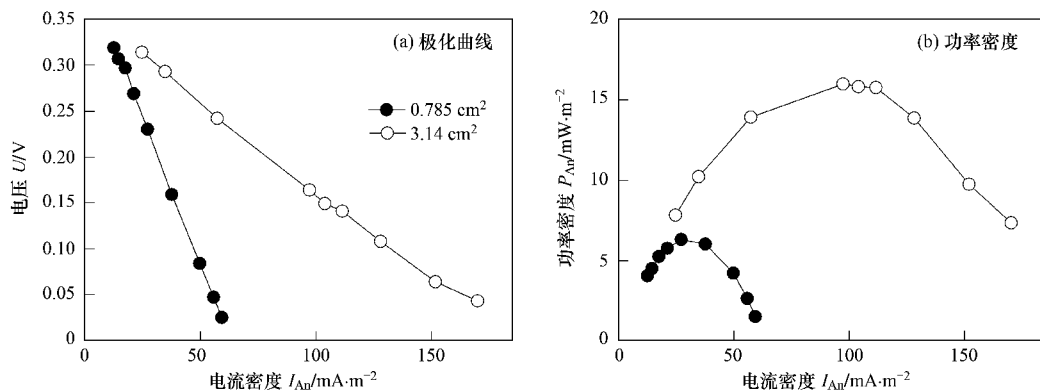
阳极面积8.42 cm²、阴极电极面积42.93 cm²、电极距8 cm, $R_{\text{ext}2} = R_{\text{ext}7} = 3\text{ k}\Omega$

图5 膜面积变化 MFCs 的极化曲线与功率密度(电极距为8 cm)

Fig.5 Polarization curves and power density curves of MFCs of different CEM area (the distance between two electrodes was 8 cm)

度从 6.28 mW/m^2 增加到 15.97 mW/m^2 , 系统内阻从 $7.58 \text{ k}\Omega$ 降到 $2.26 \text{ k}\Omega$. 如图 6 所示, 电极距为 9.5 cm 时, CEM 面积从 0.785 cm^2 增加到 3.14 cm^2 时, MFCs 的最大功率密度从 22.44 mW/m^2 增加到 46.1 mW/m^2 , 系统内阻从 $2.04 \text{ k}\Omega$ 降到 $1.01 \text{ k}\Omega$. MFCs 阳极电极面积为 8.42 cm^2 , CEM 面积为 0.785 cm^2 , 电池得到的最大功率密度仅为 6.28

mW/m^2 , 内阻高达 $7.58 \text{ k}\Omega$, CEM 面积增大到 9.62 cm^2 与阳极电极面积相当时, 电池得到的最大功率密度增加到 46.1 mW/m^2 , 内阻降到 $1.01 \text{ k}\Omega$. 表明 CEM 面积小于阳极电极面积时, CEM 尺寸成为 MFCs 增加功率输出和减小内阻的限制性因素, 而增大 CEM 面积可以显著提高 MFCs 功率输出和降低系统内阻.



阳极面积 8.42 cm^2 、阴极电极面积 42.93 cm^2 、电极距 9.5 cm , $R_{\text{ext}5} = 15 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{ext}6} = 10 \text{ k}\Omega$

图 6 膜面积变化 MFCs 的极化曲线与功率密度 (电极距为 9.5 cm)

Fig. 6 Polarization curves and power density curves of MFCs of different CEM area (the distance of two electrodes was 9.5 cm)

3 结论

(1) 对阳极使用污水作燃料底物, 阴极无催化, 阳极电极面积为 8.42 cm^2 、CEM 面积为 3.14 cm^2 、电极距为 8 cm 的瓶式 H 型 MFCs 系统. MFCs 产电性能随阴极电极面积增大而提高, 达到最大值后, 进一步增大电极面积 MFCs 产电性能将降低. 阴极与阳极电极面积的比值为 8.5 倍时, MFCs 产电性最好, 电池最大功率密度为 27.36 mW/m^2 , 内阻为 $1.84 \text{ k}\Omega$.

(2) 对阳极使用污水作燃料, 阴极无催化, 阳极电极面积为 8.42 cm^2 、阴极电极面积为 4.93 cm^2 的瓶式 H 型 MFCs 系统. CEM 面积小于阳极电极面积时, CEM 尺寸成为 MFCs 产电能力提高的限制性因素, 增大 CEM 面积可以显著提高 MFCs 功率输出和降低系统内阻. CEM 面积 (9.62 cm^2) 与阳极电极面积 (8.42 cm^2) 相当时, 电池的最大功率密度为 46.1 mW/m^2 , 内阻为 $1.01 \text{ k}\Omega$.

致谢: 本研究在模型构建阶段, 得到了南开大学王鑫老师的帮助, 实验过程中, 刘亚同学参与了数据测量工作, 在此表示感谢.

参考文献:

[1] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells; novel biotechnology for energy generation [J]. Trends in Biotechnology, 2005, **23** (16): 291-298.

[2] 布鲁斯·洛根. 微生物燃料电池 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[3] Rabaey K, Lissens G, Siciliano S D, et al. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency [J]. Biotechnology Letters, 2003, **25** (18): 1531-1535.

[4] 李颖, 孙永明, 孔晓英, 等. 微生物燃料电池中产电微生物的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2009, **36** (9): 1404-1409.

[5] Daniel D K, Mankidy B D, Ambarish K, et al. Construction and operation of a microbial fuel cell for electricity generation from wastewater [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, **34** (17): 7555-7560.

[6] Chaudhuri S K, Lovley D R. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediator-less microbial fuel cells [J]. Nature Biotechnology, 2003, **21** (10): 1229-1232.

[7] Oh S E, Min B, Logan B E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38** (18): 4900-4904.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.