

用高浓度对苯二甲酸溶液产电的微生物燃料电池

叶晔捷¹, 宋天顺¹, 徐源¹, 陈英文¹, 祝社民², 沈树宝^{1*}

(1. 南京工业大学制药与生命科学学院, 南京 210009; 2. 南京工业大学材料科学与工程学院, 南京 210009)

摘要:以高浓度对苯二甲酸(TA)溶液为底物, 研究微生物燃料电池的产电效果. 以厌氧活性污泥作为接种体, 经过 210 h 驯化, 开路电压达到 0.54 V, 证明了 TA 可以作为微生物燃料电池的底物进行产电. 深入研究了不同 pH 值和底物浓度对产电的影响, 实验结果表明, 当体系 pH 为 8.0 时, 负载两端($R = 1\,000\ \Omega$)电压最大, 底物浓度越高, 负载两端电压越大, 并逐渐趋近于一个最大值, 通过 Monod 方程回归得到该微生物燃料电池体系输出电压的最大值 $U_{\max}$ 为 0.5 V, K_s 值为 785.2 mg/L. 当底物浓度(以 COD 计)为 4 000 mg/L 时, 最大输出功率密度为 96.3 mW/m², 库仑效率为 2.66%, COD 去除率为 80.3%.

关键词:微生物燃料电池; 单极室; 对苯二甲酸(TA); 产电

中图分类号: X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1221-06

Electricity Generation Using High Concentration Terephthalic Acid Solution by Microbial Fuel Cell

YE Ye-jie¹, SONG Tian-shun¹, XU Yuan¹, CHEN Ying-wen¹, ZHU She-min², SHEN Shu-bao¹

(1. College of Life Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The high concentration terephthalic acid (TA) solution as the substrate of microbial fuel cell (MFC) was studied to generate electricity. The open circuit voltage was 0.54 V after inoculating for 210 h with anaerobic activated sludge, which proved that TA can be the substrate of microbial fuel cell to generate electricity. The influence of pH and substrate concentration on generating electricity was studied deeply. The voltage output of external resistance ($R = 1\,000\ \Omega$) was the highest when pH was 8.0. It increased as the substrate concentration increasing and tended towards a maximum value. The maximum voltage output $U_{\max}$ was 0.5 V and K_s was 785.2 mg/L by Monod equation regression. When the substrate concentration (according to COD) was 4 000 mg/L, the maximum power density was 96.3 mW/m², coulomb efficiency was 2.66% and COD removal rate was 80.3%.

Key words: microbial fuel cell(MFC); single-chamber; terephthalic acid (TA); electrogenesis

近年来, 一种新型的废水处理技术——微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)受到了国内外学者的极大重视^[1-5]. MFC 以微生物作为催化剂将有机物中的化学能转化为电能. 在能源紧缺及环境污染日益严重的今天, 这种既能实现废水处理减少环境污染, 同时又能从中回收能源的技术, 对于建立节约型、循环型社会, 实现人类的可持续发展起着非常重要的作用.

目前国内外用于微生物燃料电池研究的废水主要是一些可生化性较好的废水, 包括城市生活污水^[6-8]、葡萄糖溶液^[9-13]、乙酸盐溶液^[14-16]、丁酸盐溶液^[15]、乙醇溶液^[17]等, 其浓度也相对较低, 一般为 COD < 1 000 mg/L, 对于可生化性较差及高浓度的有机废水研究较少. 然而高浓度有机废水可以提供比生活污水等高的碳源, 提供更多的电子供体, 可以产生更大的输出功率; 同时, 高浓度有机废水中的中间体可以作为电子介体, 以加快电子的传递^[18].

精对苯二甲酸(pure terephthalic acid, PTA)废水

是一种高浓度的有机酸废水^[19], 其中含有大量的芳香族化合物, 是一种难降解的石化废水. 本实验以 PTA 废水中主要的污染成分——对苯二甲酸(TA)为底物, 采用自制单极室微生物燃料电池反应器, 研究 MFC 利用高浓度难降解有机底物产电的效果, 并在此基础上考察不同 pH 值和底物浓度对产电效率的影响, 以期将来微生物燃料电池应用于处理高浓度有机废水产电提供一些科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验仪器及材料

仪器: 数据采集器(HPU100-F, 南京贺普科技有限公司), 数字万用表(Agilent HP 34970, U.S.), 马弗

收稿日期: 2008-06-13; 修订日期: 2008-07-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA02Z211); 江苏省省级污染防治专项基金项目(2006-W-19); 江苏省自然科学基金项目(BK2006181, BK2007188); 江苏省环保科技项目(2007020)

作者简介: 叶晔捷(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电化学, E-mail: enigma_yyj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zsbshen@njut.edu.cn

炉(SX2-4-10 高温箱形电炉,上海博迅实业有限公司医疗设备厂),超声波清洗器(KH400DB 数控型,昆山禾创超声波仪器有限公司),液压机(XLB-D350 * 350 * 1-Z 型,上海齐才液压机械有限公司),高速冷冻离心机(EXPERT 20K-R,长沙鑫奥仪器仪表有限公司),pH 计(pHs-3c,上海雷磁),紫外分光光度计(Lambda 25,美国 PerkinElmer 公司),高效液相色谱仪(P680 HPLC Pump UVD170U,美国 Dionex 公司)。

材料:炭布(上海新兴碳素有限公司),Vulcan XC-72 炭黑(美国卡博特公司),铂炭(40% Pt/C,美国 JM 公司),聚四氟乙烯(PTFE)乳液(美国杜邦公司),Nafion 溶液(美国杜邦公司),其他化学试剂均为市售分析纯。

接种污泥取自扬子石化有限公司的 PTA 厌氧污泥池。取回的污泥在厌氧条件下投加营养液进行驯化培养。其中营养液的成分为:TA 2.5 g/L、NH₄Cl 0.25 g/L、K₂HPO₄ 0.125 g/L,初始 COD 为 4 000 mg/L。实验采取间歇流操作,驯化培养及体系运行均在 33℃ 条件下进行。

1.2 微生物燃料电池体系

微生物燃料电池装置为单极室反应器,如图 1 所示。阴阳两极分别位于有机玻璃制成的圆柱体两端,长 40 mm,直径 115 mm,有效容积 120 mL。上下端设有出水口和进水口,上端中部设有取样口。阳极采用炭布(有效面积 30 cm²),阴极为按照文献[20]自制的含金属 Pt(0.75 mg/cm²)催化剂的电极,有效面积同阳极。阴阳两极用导线相连,外接变阻箱(0 ~ 2 000 Ω)。实验中产生的电压值通过数据采集器每隔 1 min 记录到计算机中。

1.3 分析方法

通过调节变阻箱(100 ~ 2 000 Ω)来改变外电路

的电阻大小,万用表测得电阻两端电压,按公式 $P = UI/A$ 计算功率密度 P (mW/m²),式中, U 为电压(V), I 为电流(A), A 为阳极有效面积(m²)。

内阻通过 $U = \epsilon - Ir$ 线性回归计算^[13], 式中, ϵ 为电池的电动势(V), r 为电池的内阻(Ω)。

电压(U)和底物浓度(S)符合 Monod^[21] 方程:

$$U = \frac{U_{\max} S}{K_s + S}$$

式中, $U_{\max}$ 为相应底物浓度下的最大电压, K_s 为半饱和度。

库仑效率 E 按照公式 $E = C_p/C_{Ti} \times 100\%$ 计算^[22,23], C_p 表示一段时间内获得的总电量, C_{Ti} 表示理论上氧化底物转移的总电量。

$$C_{Ti} = Fb_iS_iV/M_i$$

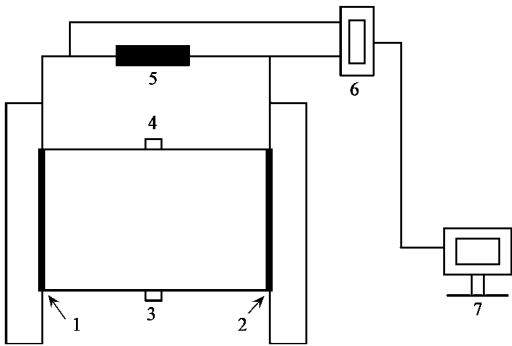
式中, F 为法拉第常数(96 485 C/mol), b_i 为 1 摩尔底物产生的电子摩尔数(30e⁻/mol), S_i 为底物去除浓度(g/L), V 为溶液体积(L), M_i 为底物的分子量(166 g/mol)。

COD 浓度测定采用标准的重铬酸钾法^[24]。
TA 浓度测定采用高效液相色谱法^[25]和紫外分光光度法^[26]。

2 结果与讨论

2.1 微生物燃料电池的启动

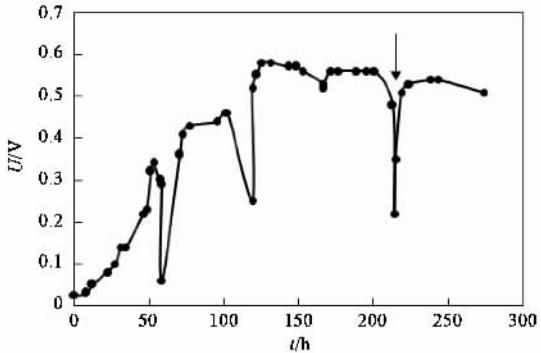
取 60 mL 驯化好的厌氧污泥和 60 mL 营养液混合均匀投加入反应器中。图 2 所示为 MFC 启动期开路电压随时间的变化。在初始 50 h 内,开路电压上升缓慢,待电压下降时,将反应器中溶液离心,回收污泥溶于新的 120 mL 营养液,重新加入反应器中。这样经过 2 次更换污泥和底物后,开路电压迅速上升,达到 0.58 V;第 3 次更换污泥和底物后,得到稳定的开路电压 0.56 V。在体系中,TA 是唯一的电子



1. 阳极; 2. 阴极; 3. 进水口; 4. 出水口;
5. 负载; 6. 数据采集器; 7. 电脑

图 1 单极室 MFC 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-chamber MFC

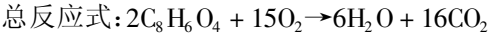
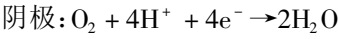
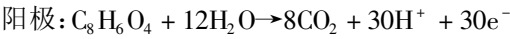


箭头表示更换底物,不投加污泥而直接投加营养液

图 2 MFC 启动期开路电压随时间的变化

Fig.2 Open circuit voltage during start-up period of MFC

供体,在微生物代谢 TA 的过程中,电子由细胞膜上的细胞色素传递至阳极,再通过外电路到达阴极;阳极产生的 H^+ 通过溶液到达阴极,与阴极的溶解氧和从阳极传递来的电子结合将氧还原.整个电池反应过程如下.



为了验证此系统启动成功,即回路中的电流是由阳极上生长的微生物转移电子产生,而不是溶液中悬浮微生物的作用^[27],更换底物,此时不投加厌氧污泥而直接投加营养液(如图 2 箭头所示).体系在 5 h 内迅速得到 0.54 V 开路电压,并能维持数十 h,说明电能的产生与溶液中悬浮的微生物无关,微生物已经附着在阳极上形成生物膜,有效地将厌氧呼吸产生的电子直接传递至阳极.这说明以 TA 作为微生物燃料电池的作用底物产电具有可行性.此微生物燃料电池系统启动成功.

2.2 pH 值对产电的影响

用 2 mol/L NaOH 溶液和 2 mol/L H_2SO_4 溶液调节营养液的 pH 分别为 6.0、7.0、7.5、8.0、9.0,研究本实验体系微生物生长代谢所需的最适 pH.底物浓度(以 COD 计,下同)均为 2 000 mg/L,每一 pH 值实验均更换底物 2 次以确保实验的可重复性.图 3 显示为不同 pH 值下 MFC 在外接电阻为 1 000 Ω 时的最大输出电压.当 pH 为 6.0 或 9.0 时,微生物处于较酸较碱的环境中,其代谢均受到抑制,最大输出电压很低,产电能力很弱;随着 pH 接近中性或弱碱环境,最大输出电压显著升高,当 pH = 8.0 时达到最大,说明 pH 值对微生物的生长代谢影响较大,即影响产电.实验表明此厌氧污泥微生物菌群最适作用 pH 为 8.0 左右.

2.3 底物浓度对产电的影响

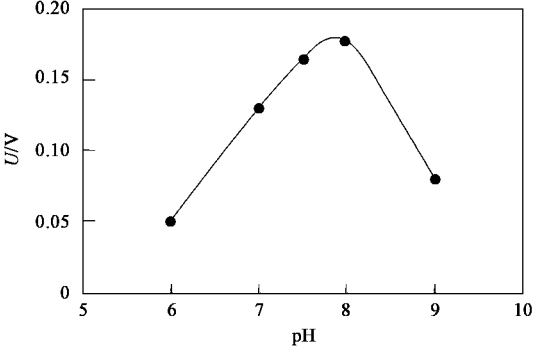


图 3 不同 pH 值下的最大输出电压 ($R = 1\,000\,\Omega$)

Fig.3 Maximum voltage output under different pH ($R = 1\,000\,\Omega$)

在体系的最佳 pH 值下 ($\text{pH} = 8.0$) 比较不同底物浓度对产电性能的影响.图 4 是营养液初始 COD 浓度分别为 1 000、2 000、3 000 和 4 000 mg/L 时 MFC 输出电压随时间的变化(外接电阻为 1 000 Ω),同一浓度实验均更换底物 2 次以确保实验的可重复性.从中可知,各浓度下电压上升均较快,2 次更换相同浓度底物得到近似的电压变化曲线及最大电压,实验具有较好的重复性.在不同底物浓度下,随着底物浓度增加,负载两端的最大输出电压随之升高,最大电压持续时间随之加长.当底物浓度达到 4 000 mg/L 时,获得最大输出电压为 0.43 V,且能维持 8 ~ 10 h,电能输出情况较好.同时,随着底物浓度增加,TA 的降解速度变慢,降解周期加长(以电压降至 0.13 V 为准),也就是说当底物浓度越高时,持续产电时间越长,电能输出也越多.但是并不是底物浓度越高越好,当底物浓度过高时,微生物受到渗透压的影响,自身代谢速率会受到一定程度的抑制,进而影响产电.

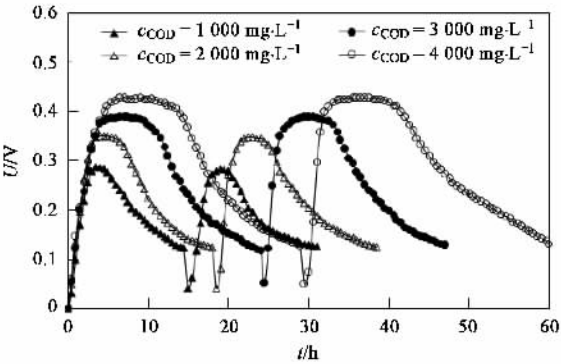


图 4 不同底物浓度下输出电压随时间的变化 ($R = 1\,000\,\Omega$)

Fig.4 Voltage output as a function of time on different substrate concentration ($R = 1\,000\,\Omega$)

图 5 反映了最大输出电压与底物浓度符合 Monod 方程关系.当底物浓度较低时,最大输出电压随浓度增加迅速升高;当底物浓度较高时,电压随浓度增加上升缓慢,并逐渐趋近于一个最大值,这说明了最大输出电压不会随着底物浓度的增加而一直升高,也证实了实验中并不是底物浓度越高越好,若浓度太高,最大输出电压值增加不明显,降解底物所需周期却明显增长,这样一来将极大地影响 MFC 的工作效率.由回归曲线得 MFC 以 TA 作为底物时输出电压最大值 U_{max} 为 0.5 V,其 K_s 值为 785.2 mg/L,拟合度 $R^2 = 0.998\,6$.

图 6 显示了底物浓度为 4 000 mg/L 时输出电压和功率密度随电流的变化.当外阻为 $R = 400\,\Omega$ 时

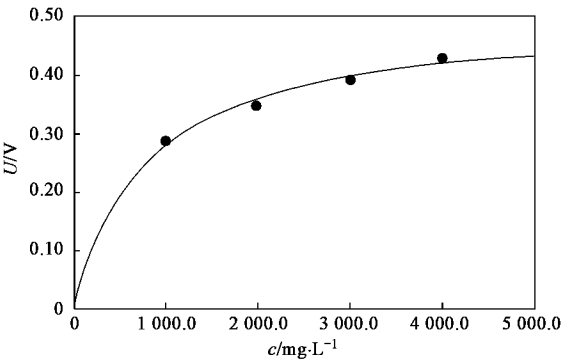


图5 底物浓度对最大输出电压的影响($R = 1\,000\,\Omega$)

Fig.5 Effect of substrate concentration on maximum voltage output ($R = 1\,000\,\Omega$)

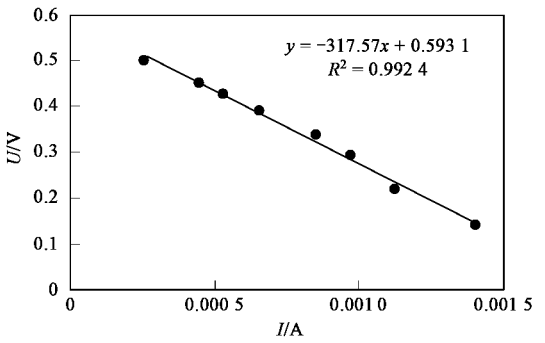


图7 电压随电流的变化($c_{\text{COD}} = 4\,000\,\text{mg/L}$)

Fig.7 Voltage as a function of current ($c_{\text{COD}} = 4\,000\,\text{mg/L}$)

得到最大功率密度为 $96.3\,\text{mW}/\text{m}^2$. 由库仑效率公式计算得系统库仑效率约为 2.66% . 图7线性回归得到的 $U-I$ 图中,斜率反映了电池的内阻,为 $317.5\,\Omega$;截距反应了电池的电动势,为 $0.593\,\text{V}$. 电池内阻的大小在很大程度上影响着功率的输出,由图7可见本体系内阻较大,故功率输出较低,这可能是由于TA是一种难降解的有机物,微生物降解TA速率慢,故电子的产生和转移速度慢,导致了内阻的增大.同时,反应器结构、电极构型以及运行条件也影响着体系的内阻.图6显示实验所得的最大功率密度在外接电阻为 $300\sim 400\,\Omega$ 时获得,符合当外接电阻等于内阻时回路获得最大输出功率的规律^[13].

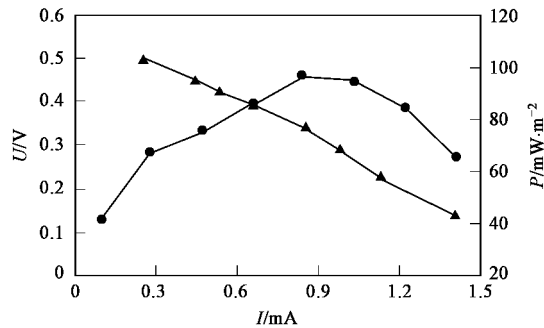


图6 电压和功率密度随电流的变化($c_{\text{COD}} = 4\,000\,\text{mg/L}$)

Fig.6 Voltage and power density as functions of current($c_{\text{COD}} = 4\,000\,\text{mg/L}$)

2.4 TA 浓度和 COD 浓度随时间的变化

体系中微生物代谢以TA作为碳源,在间歇流实验中,随着实验的进行,TA浓度及COD浓度不断降低.图8为当初始浓度为 $c_{\text{TA}} = 2\,500\,\text{mg/L}$ 、 $c_{\text{COD}} = 4\,000\,\text{mg/L}$ ($\text{pH} = 8.0$) 时溶液中TA和COD浓度随时间的变化曲线,从中看出TA和COD浓度随时间不

断降低,但TA的降解率要大于COD的降解率,这是因为TA浓度表示的是溶液中对苯二甲酸的浓度,而COD浓度表示的是溶液中有机的浓度,TA在微生物的代谢过程中被降解成了许多中间有机产物,故TA浓度的降低与COD浓度的降低不具有同步性.经75 h后,TA浓度降解率达到 92% ,COD浓度降解率达到 80.3% ,说明TA作为MFC的底物产电的同时得到了很好地降解.

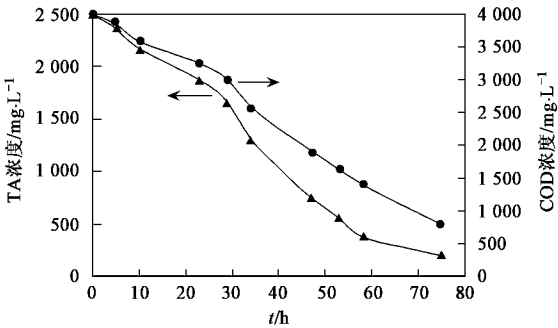


图8 TA 浓度和 COD 浓度随时间的变化

Fig.8 Concentration of TA and COD as functions of time

2.5 与其它底物的比较

底物、反应器结构以及电极材料的差异均会影响MFC功率的输出.在与本实验采用相似的单极室反应器以及电极材料的研究中,Liu等^[15]以乙酸盐作为底物时,获得 $506\,\text{mW}/\text{m}^2$ 的功率输出;以丁酸盐为底物时功率为 $305\,\text{mW}/\text{m}^2$.Zuo等^[28]用经稀酸预处理的玉米秸秆的水解产物作为底物,获得 $367\,\text{mW}/\text{m}^2$ 的功率.Kim等^[17]以乙醇作为底物,功率为 $488\,\text{mW}/\text{m}^2$. 同时有研究表明^[29]MFC输出的最大功率和初始底物浓度有关,即初始底物浓度的不同也影响着最大输出功率.

在研究难处理有机废水方面,Cheng等^[30]以一种煤及金属采矿产生的酸性污染物(AMD)来产电,

可以获得 290 mW/m^2 的输出功率,同时有效降解了 AMD.

本实验以高浓度难降解的对苯二甲酸溶液为底物研究,最大输出功率为 96 mW/m^2 ,较之以上底物获得的输出功率小,原因在于 TA 是一种石油化工中间产物,属于芳香族化合物,可生化性较差,微生物代谢 TA 的降解速度较葡萄糖、乙酸等可生化性较好的化合物慢,故电子的产生和转移速度慢,增大了体系的内阻,导致输出功率较小.针对 TA 的可生化性差,日后可加强研究 TA 厌氧代谢过程找出其功率限制步骤,或通过一定的预处理与 MFC 相结合的手段提高 TA 的可生化性,从而提高功率输出.

另一方面较大的体系内阻(约 317.5Ω)也导致了实验获得的输出功率较小,下一步工作可以通过改变反应器结构、电极材料及结构等来有效地提高功率输出.相信随着生物电化学、修饰电极以及燃料电池科学的深入,必将推动从 PTA 废水中回收能源的 MFC 发展.

3 结论

(1)以高浓度 TA 溶液作为微生物燃料电池的底物,以厌氧污泥为接种体,经过 210 h 驯化,开路电压达到 0.54 V ,证明了 TA 可以作为 MFC 的底物产电.

(2)该反应器体系最佳作用 pH 为 8.0.

(3)负载两端($R = 1\,000 \Omega$)电压随底物浓度增大而增大.通过 Monod 方程回归得到该微生物燃料电池体系输出电压最大值 $U_{\max}$ 为 0.5 V , K_s 值为 785.2 mg/L .

(4)底物浓度(以 COD 计)为 $4\,000 \text{ mg/L}$ 时,最大输出功率密度为 96.3 mW/m^2 ,内阻为 317.5Ω ,库仑效率为 2.66% ,COD 去除率为 80.3% .

参考文献:

[1] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, *et al.* Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(17): 5181-5192.

[2] He Z, Angenent L T. Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells [J]. Electroanalysis, 2006, **18**(19-20): 2009-2015.

[3] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation [J]. Trends in Biotechnology, 2005, **23**(6): 291-298.

[4] Lovley D R. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2006, **17**(3): 327-332.

[5] 曹效鑫, 梁鹏, 黄霞. “三合一”微生物燃料电池的产电特性研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1252-1257.

[6] Min B, Logan B E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(21): 5809-5814.

[7] Cheng S, Logan B E. Ammonia treatment of carbon cloth anodes to enhance power generation of microbial fuel cells [J]. Electrochemistry Communications, 2007, **9**(3): 492-496.

[8] Liu H, Ramnarayanan R, Logan B E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(7): 2281-2285.

[9] Oh S E, Logan B E. Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation [J]. Journal of Power Sources, 2007, **167**(1): 11-17.

[10] Rosenbaum M, Zhao F, Schroder U, *et al.* Interfacing electrocatalysis and biocatalysis with tungsten carbide: a high performance, noble-metal-free microbial fuel cell [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2006, **45**(40): 6658-6661.

[11] You S J, Zhao Q L, Zhang J, *et al.* Increased sustainable electricity generation in up-flow air-cathode microbial fuel cells [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2008, **23**(7): 1157-1160.

[12] Cheng S, 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.

[13] 尤世界, 赵庆良, 姜璐秋. 废水同步生物处理与生物燃料电池发电研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1786-1790.

[14] Jong B C, Kim B H, Chang I S, *et al.* Enrichment, performance, and microbial diversity of a thermophilic mediatorless microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(20): 6449-6454.

[15] Liu H, Cheng S, Logan B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(2): 658-662.

[16] 范明志, 梁鹏, 曹效鑫, 等. 阳极初始电势对微生物燃料电池产电的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 263-267.

[17] Kim J R, Jung S H, Regan J M, *et al.* Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(13): 2568-2577.

[18] 宋天顺, 叶晔捷, 徐源, 等. 用于废水处理及产能的微生物燃料电池研究进展[J]. 现代化工, 2008, **28**(4): 23-27.

[19] 何小娟, 李旭东, 包建平. 精对苯二甲酸废水处理技术及优化[J]. 化工环保, 2005, **25**(2): 110-112.

[20] Cheng S, Liu H, Logan B E. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure [J]. Electrochemistry Communications, 2006, **8**(3): 489-494.

[21] Catal T, Li K C, Bermek H, *et al.* Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2008, **175**(1): 196-200.

[22] 梁鹏, 范明志, 曹效鑫, 等. 填料型微生物燃料电池产电特性的研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 512-517.

[23] 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]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(14): 5488-5493.
- [24] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 354-358.
- [25] 宋天顺, 张利民, 祝社民, 等. 活性炭催化氧化预处理 PTA 废水[J]. 离子交换与吸附, 2006, **22**(3): 208-215.
- [26] 杨正富. 精对苯二甲酸排放污水中对苯二甲酸的测定[J]. 工业水处理, 2002, **22**(2): 38-39.
- [27] Oh S E, 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.
- [28] Zuo Y, Maness P C, Logan B E. Electricity Production from Steam-Exploded Corn Stover Biomass [J]. Energy & Fuels, 2006, **20**(4): 1716-1721.
- [29] Rodrigo M A, Canizares P, Lobato J, *et al*. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2007, **169**(1): 198-204.
- [30] Cheng S, 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.