

用于废水处理及产能的微生物燃料电池 研究进展

宋天顺, 叶晔捷, 徐 源, 徐夫元, 陈英文, 沈树宝
(南京工业大学制药与生命科学学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 详细介绍了用于废水处理及产能的微生物燃料电池的工作原理和特点, 并阐述微生物燃料电池相关的微生物、阴极、阳极、反应方式和底物的最新研究进展, 提出今后研发的重点。

关键词: 微生物燃料电池; 废水处理; 能源

中图分类号: TM911.145

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)04-0023-05

Progress in microbial fuel cell for wastewater treatment and power generation

SONG Tian-shun, YE Ye-jie, XU Yuan, XU Fu-yuan, CHEN Ying-wen, SHEN Shu-bao

(College of Life-Science and Pharmacy, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: In this paper, the principle and characteristics of microbial fuel cell are introduced in detail, with the emphasis on the research progress in microbial, anode, cathode, reaction process and substrates. Furthermore, its development prospect is also presented.

Key words: microbial fuel cell; wastewater treatment; energy resource

优质可靠的能源供给是保证社会、经济持续发展的必要条件, 而降低污染物的产量以及减少对资源的索取是建设可持续发展社会的先决条件。通过对污水的处理及资源化再利用, 在消除污染的同时又达到资源化的目的。正是基于此目标, 一种新型的水处理技术——微生物燃料电池(MFC)被提出。MFC是利用电化学技术将微生物代谢能转化为电能的一种装置, 它可以将废水中的有机污染物转变成电能, 并同时处理废水。这不仅降低污水处理厂的运行费用, 而且实现了废物资源化。因此, 微生物燃料电池作为一种有前途的废水处理技术已受到国内外学者的广泛重视。特别是最近两三年, 此研究取得了长足的进步。

1 微生物燃料电池的原理及特点

燃料在微生物的催化作用下于阳极室中被氧化, 产生的电子通过位于细胞外膜的电子载体传递到阳极, 再经过外电路到达阴极, 质子通过质子交换膜或直接通过电解质到达阴极, 氧化剂在阴极室与质子和电子反应生成水。相当于把原来的氧化还原反应的发生区域扩展到细胞以外的外界环境, 延伸

到整个电池结构体系中。

微生物燃料电池是燃料电池中特殊的一类, 它利用生物催化剂将化学能转变为电能, 所以除了在理论上具有很高的能量转化效率之外, 还有其他燃料电池不具备的若干特点: ①原料来源广泛、要求低。可以利用一般燃料电池所不能利用的多种有机、无机物质作为燃料, 甚至可利用光合作用或直接利用污水等。②具有一般生化的优势即操作条件温和, 一般是在常温、常压、接近中性的环境中工作, 这使得电池维护成本低、安全性高。③清洁高效, 将底物直接转化为电能, 具有较高资源利用率, 氧化产物多为 CO_2 及 H_2O , 无二次污染。

影响其产电的主要因素有微生物、阴极、阳极、反应方式和底物 5 个方面, 以下就这 5 个方面的研究进展做一评述。

2 产电微生物

许多微生物可以把有机物代谢过程中的电子传递到阳极上, 因此把这些微生物称为产电微生物。表 1 为常见的几种用于 MFC 的产电微生物。

虽然许多文献报道了产电微生物的筛选和生物

收稿日期: 2008-01-07

基金项目: “十一五”国家“863”项目(2006AA02Z211)和江苏省环保科技项目(2007020)

作者简介: 宋天顺(1981-), 男, 博士生, 主要从事环境电化学方面的研究; 沈树宝(1957-), 教授, 博士生导师, 研究方向为酶工程、多肽合成、环境工程, 通讯联系人, 025-83587349, zsbshen@njut.edu.cn。

鉴定,但是对其基因序列和染色体构成还没有形成统一的认识,还需要进一步的研究,并且纯菌的产电效果有限,近期的研究都是利用厌氧污泥里丰富的混合菌群^[9]来提高产电效果。

表 1 用于 MFC 的产电微生物

产电微生物	参考文献
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	[1]
<i>Escherichia coli</i>	[2]
<i>Geobacter metallireducens</i>	[3]
<i>Micrococcus luteus</i>	[4]
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	[5]
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	[6]
<i>Shewanella oneidensis</i>	[7]
<i>Staphylococcus aureus</i>	[8]

3 阴极

3.1 氧气作为电子受体

氧气对于微生物燃料电池来说是一种合适的电子受体,但是它还原成水的高的过电位限制了其产生电流的大小。

由 Tafel 方程可知:

$$\ln\left(\frac{i}{i_0}\right) = \frac{\beta F \eta_{\text{cathode}}}{RT}$$

η_{cathode} 是阴极过电位, R 是理想的气体常数 ($8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), β 是对称因素, F 是法拉第常数 (96485 C/mol), i 是电流密度, i_0 是交换电流密度。国内外对如何降低其过电位,主要是分为 2 种方法:一种是加入催化剂来减少氧气还原的活化能(也就是增加 i_0);另一种是通过增大材料的比面积减少电流密度,从而降低过电位。

3.1.1 化学催化剂

一般微生物燃料电池多采用石墨作为阴极,但是其输出功率偏小,而采用铂^[10]可以增加氧的还原电流,并且催化剂用量可以低至 0.1 mg/cm^2 ,但是由于 Pt 的价格比较昂贵,因此需要寻找廉价的可替代铂催化剂。

Morris 等^[11]用 PbO_2 来代替 Pt 作为阴极催化剂。实验结果表明, PbO_2 阴极产生的功率是 Pt 的 4 倍,这说明了用 PbO_2 来代替 Pt 不仅有利于提高微生物燃料电池的功率,而且降低了成本。Yu 等^[12]研究了各种金属卟啉和酞菁作为阴极还原氧的催化剂。结果表明,用卟啉类的 TMPP、CoTMPP、FeCoTMPP 和酞菁类的 Pc、FePc、CoPc、FeCuPc 负载在 (KJB) 碳上时,FePc-KJB 的效果最好,功率达到 634 mW/m^2 ,

要高于用 Pt 作为催化剂的功率 (593 mW/m^2)。

3.1.2 生物催化剂

非生物的阴极通常需要催化剂或者是电子受体以获得高的电子传递效果,但是也相应地增加了成本,降低了操作的可行性。此缺点可以通过用生物阴极代替来克服,即可以用生物来协助阴极反应。对于好氧阴极以氧气作为最终的电子受体,电子介体如铁、锰首先被化学阴极还原,然后再被细菌氧化^[13]。Peterclauwaert 等^[14]研究了生物阴极对于氧的还原作用,发现生物阴极可以减少金属和非金属催化剂的用量,提高了微生物燃料电池的操作性。

3.1.3 增大材料的比面积

Freguia 等^[15]用石墨颗粒作为阴极催化剂,以提高阴极的比表面积。结果输出功率达到 21 W/m^3 ,大于其他用石墨作为阴极的输出功率。Zuo^[16]在管状的超滤膜阴极上涂一层导电碳层来作为阴极,研究表明,随着管状阴极的比表面积从 13.5 cm^2 增加到 54 cm^2 ,其功率从 0.51 mW 增加到 0.83 mW 。这说明微生物燃料电池阴极的研究不仅应集中在催化剂上,也要集中在如何提高材料的比面积上。

3.2 除氧气外的其他电子受体

除了用氧气作为电子受体外,对其他的化学物质作为电子受体也进行了研究。You 等^[17]用高锰酸作为阴极的电子受体,产生的功率为 115.60 mW/m^2 ,要大于用六氰合铁酸 (25.62 mW/m^2) 和用氧气的功率 (10.2 mW/m^2),这主要是由于高锰酸的加入引起了开路电压 (OCP) 的增大。Tartakovsky 等^[18]用过氧化氢作为电子受体,也增大了其输出功率。而以铁氰化物作为电子受体,可以获得很高的输出功率,例如 7200 ^[19]、 4310 mW/m^2 ^[5],普遍都要高于用氧气作为电子受体的。这可能是由于铁氰化物加快了传质过程,降低了活化能。但是这些化学物质的加入也相应增加了微生物燃料电池的成本,限制其商业化应用。

4 阳极

一般微生物燃料电池用无腐蚀性的导电材料作为阳极,如碳布、石墨等,因此对阳极的研究主要是对导电材料的改性和加入其他的催化剂。

4.1 对材料的改性

Zeikus^[20]报道了用石墨阳极固定微生物来增加电流密度,然后用 AQDS、NQ、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Fe_3O_4 、 Ni^{2+} 来改性石墨作为阳极,结果表明,这些改性阳极产生的电流功率是平板石墨的 $1.5 \sim 2.2$ 倍。

Zhang^[2]报道了在石墨中加入聚四氟乙烯 (PTFE) 作为 MFC 的阳极, 研究表明, PTFE 的含量影响了 MFC 的电流产生, 质量分数为 30% 的 PTFE 可以获得的最大功率为 760 mW/m²。PTFE 会引起石墨电极的多孔结构, 低含量的 PTFE 使得亲水性的细菌容易附着在电极表面。随着 PTFE 含量的提高, 电极的亲水性提高, 使得细菌生物膜在孔道内部形成, 进而将增加电子传递阻力。此外, 过多的 PTFE 将降低电极的导电性, 因此适量的 PTFE 才能使得 PTFE 产生大电流。Cheng^[21]将用氨气预处理过的碳布作为 MFC 的阳极, 结果表明, 预处理过的碳布产生的功率为 1 640 mW/m², 要大于未预处理过的功率, 并且 MFC 的启动时间缩短了 50%。这主要是由于碳布经氨气处理过后, 比表面积增加, 从而有利于产生电子和质子以及微生物的吸附。

4.2 加入其他催化剂

Qiao^[22]报道了用碳纳米管/聚苯胺 (CNT/PANI) 作为 MFC 阳极, 碳纳米管可以提高电子的传导性, 但不利于细菌的生长。而 PANI 不仅可以电催化产生电流, 而且有利于细菌的生长, 但是它的低传导性限制了其在 MFC 中的应用。通过把两者结合起来, 可以达到互补的作用。Kargi 等^[9]用铜和铜-金导线来代替石墨电极作为 MFC 的阳极, 结果发现, 随着阳极表面积的增大, 产生的电流和功率也随之增大。Rosenbaum^[23]研究了用碳化钨作为微生物燃料电池的阳极, 获得了不错的效果, 其电化学活性和化学稳定性作为微生物燃料电池的阳极是适合的。

5 反应方式

5.1 双室

双室 MFC 反应器^[3]有一个阴极室和一个阳极室, 中间由质子交换膜或者是盐桥隔开。由于用质子交换膜把反应器阴极和阳极隔离开, 造成了阴极 pH 的上升 (由于质子扩散受到阴极的限制)。pH 的调控和定期更换阴极液, 限制了其规模化。有研究者^[24]用双极膜代替 CEM, 可以消除 pH 的梯度产生和库仑效率的损失, 但是它增加了 MFC 的内阻。

5.2 单室

由于双室的复杂性, 很难进行放大, 于是 Liu 等^[25]开发了单室 MFC 反应器。与双室 MFC 反应器在结构上的显著不同是: ①阴极和阳极在同一反应室, 阴极和 PEM 直接压在一起; ②采用了空气电极作为阴极。该反应器运行的功率密度可达 262 mW/m², 高于相同条件下的双室。并且当去掉 PEM

后, 减少了内阻, 功率密度上升到 494 mW/m²。由于不含有 PEM, 使得质子可以自由通过阴极, 从而使得 pH 一致。但是氧气可以穿过扩散层, 直接和底物发生反应, 引起了库仑效率的下降。

5.3 升流式

该 MFC^[26]是由 2 个圆柱形树脂玻璃室组成, 阴极室位于阳极室的上部, 采用具有一定开孔率的网状玻璃碳电极, 阳极采用孔径稍大的网状玻璃碳以阻止生物膜的堵塞。质子交换膜与水平线呈 15 度角安置在两室间, 以防止气泡的积聚。实验中以 COD 质量浓度为 1 000 mg/L 的模拟污水为底物, 24 h 水力停留时间下获得的最大功率密度为 170 mW/m², COD 去除率可达 90%。升流式 MFC 具有结构简单、体积负荷高、运行成本低的优点, 更适合与污水处理工艺偶联。

5.4 旋转阴极式

Hea 等^[27]研究了用旋转阴极来提高阴极的反应速率, 其产生的功率大于不旋转的阴极, 虽然旋转阴极增加了 MFC 的溶解氧含量, 但是导致了阳极电位变负和高的电子传递阻力。因此高的溶解氧对于上部的阴极反应和下部的阳极反应应该有个最佳的平衡点, 还需要进一步的研究。

5.5 阳极-阴极连续式

连续式阳极-阴极生物燃料电池的生物过程见图 1。

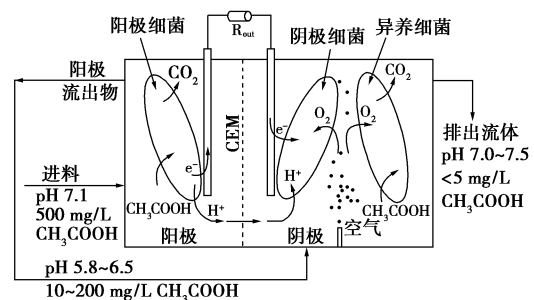


图 1 连续式阳极-阴极生物燃料电池的生物过程

Freguia 等研究了阳极-阴极连续式循环的 MFC, 其优点有: ①由于阳极不能彻底地降解 COD, 通过把阳极用过的溶液流到好氧的阴极, 利用在阴极上的好氧生物来氧化这些 COD, 使得其出水 COD 的含量都比较低。②由于用 CEM 的 MFC 会造成阴极 pH 的增加, 这个问题对于放大很重要, 而阳极-阴极连续式循环可以很好地解决这个问题。既可以控制 pH, 也可以获得比较高的电流效率。③其产生的功率为非连续式的 3 倍。缺点为过多的 COD 进

入阴极,将会造成阴极的好氧生物迅速增长,从而限制了氧气的提供,阻止了电流的产生。所以必须日常监控阴极电位,以防止阴极的 COD 超限。

5.6 燃料电池组

Oh^[28]研究发现 MFC 单室最大的电压为 0.5 V,通过用导线把单个的 MFC 连接起来,可以使起开路电压增大为 1.3 V,从而增大其功率输出。可是当其中的一个电池相对于另一个电池不能产生充足的电压时,会发生电压反转现象,这主要是在燃料不足或者是细菌活性降低时发生。进一步的研究显示,通过暂时隔离不稳定的电池直到其稳定产能,可以控制电压的反转。

Shin^[29]加入双极板来组装微生物燃料电池,与用导线连接每一个单电池相比较,双极板既可以作为一个电池的阳极,也可以作为另一个电池的阴极,整个电压很稳定。

Peteraelterman 等^[30]把 6 个独立的 MFC 通过串联或者是并联的方式进行连接,其最大功率可达 258 W/m³。在用并联方式进行连接时,随着时间的延长,初始的微生物群体减少,革兰氏(染色)阳性菌开始占主导地位。微生物群体的迁移时伴随着单个 MFC 输出功率增大了 3 倍,内阻从 6.5Ω 降低至 3.9Ω。进一步证实了 MFC 潜在地可以产生有用的电能。

6 底物

微生物燃料电池一般以模拟废水来进行研究,这些模拟废水中最常见的碳源为葡萄糖、蔗糖、醋酸盐;其次是以生化性能良好的生活污水和糖工业废水^[31]作为底物。Rodrigo 等^[32]研究了用微生物燃料电池来处理生活污水,研究发现,最大输出功率和初始的 COD 有关系,而和流速关系不大。

有关难降解有机废水的研究比较少。Venkata Mohan 等研究了复杂的化工废水作为微生物燃料电池底物的可行性。其化工废水的 COD 质量浓度达到了 12 100 mg/L,主要的成分为化学中间体、染料中间体、农药、药物。去除率可达 62.9%,输出电流密度达 862.82 mA/m²。美国宾夕法尼亚州立大学(Pennsylvania State University)的 Cheng 等^[33]以一种煤及金属采矿产生的酸性污染物(AMD)来产电,也获得了满意的效果。利用高浓度有机化工废水来进行研究,可使 MFC 更接近实际废水的处理,并且高浓度有机化工废水可以提供比生活污水高的碳源,这样可以产生更大的输出功率。此外,高浓度有机

化工废水中的中间体可以作为电子介体,以加快电子的传递。

基于此,笔者所在课题组已选择扬子石化有限公司的对苯二甲酸(PTA)废水作为底物,其 COD 质量浓度一般在 3 000 ~ 5 000 mg/L,为一种难降解的有机废水,并采用自制单室结构的生物燃料电池和笔者所在课题组保藏的高效降解 PTA 菌株^[34],研究了该微生物燃料电池产电及降解有机废水的特性,稳定产能后其 COD 的去除率达 80%,最大功率密度达 255 mW/m²。

7 结语和展望

MFC 自身潜在的优点展示了其良好的发展前景,但是其输出功率还比较低,运行成本也较高。若能降低成本,提高发电效率,将会为废水处理节省庞大的开支。因此还需要在以下几个方面进行进一步研究,推动其商业化应用。

(1)应以氧气作为电子受体,以利于提高工业化应用,并可以通过以下方法降低其过电位,提高阴极氧还原速度:①加入富氧材料以提高氧在电极表面的富集;②研究可以替代 Pt 的廉价催化剂;③通过物理改性或者是化学修饰的方法提高阴极比表面积;④加入某些导电材料以提高电子传导性。

(2)加强产电微生物研究及产电微生物与降解有机物微生物分子生物学研究,通过增加选择压力和基因工程改造,提高产电效果。

(3)增加阳极比表面积,以提高微生物的附着量,并在阳极上加入催化剂,以利于电子向电极的迁移。

(4)进一步优化反应器的结构。结构简单、操作方便并可以减少传质阻力,以增大输出功率,易与污水处理工艺偶联。

(5)加强对处理高浓度有机化工废水的 MFC 研究:一方面提高 MFC 的实用性,另一方面使其可以连续产生一定功率的电能,这是低浓度废水所不具有的。

随着全球能源短缺及污染的日益严重,MFC 绿色技术具有潜在的重要应用前景,使得 MFC 成为全世界的研究热点。虽然它的研究现在还处于起步阶段,但是相信随着生物电化学、修饰电极以及燃料电池科学的深入,必将推动从废水中回收能源的 MFC 发展。

参考文献

[1] Ieropoulos I A, Greenman J, Melhuish G, et al. Comparative study of

- three types of microbial fuel cell[J]. *Enzyme Microb Tech*, 2005, 37(2):238-245.
- [2] Zhang Tian, Zeng Yulong, Chen Shengli, *et al.* Improved performances of *E. coli*-catalyzed microbial fuel cells with composite graphite/PTFE anodes[J]. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(3):349-353.
- [3] Min B, Cheng S, Logan B E. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells[J]. *Water Res*, 2005, 39(9):1675-1686.
- [4] Choi Y, Jung E, Park H, *et al.* Effect of initial carbon sources on the performance of a microbial fuel cell containing environmental microorganism *micrococcus luteus*[J]. *Bull Korean Chem Soc*, 2007, 28(9):1591-1594.
- [5] Rabaey K, Boon N, Siciliano S D, *et al.* Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer[J]. *Appl Environ Microb*, 2004, 70(9):5373-5382.
- [6] Liu Z D, Lian J, Du Z W, *et al.* Construction of sugar-based microbial fuel cells by dissimilatory metal reduction bacteria[J]. *Chin J Biotech*, 2006, 22(1):131-137.
- [7] Ringeisen B R, Ray R, Little B. A miniature microbial fuel cell operating with an aerobic anode chamber[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 165(2):591-597.
- [8] Morozan A, Stamatina L, Nastase F, *et al.* The biocompatibility microorganisms-carbon nanostructures for applications in microbial fuel cells[J]. *Phys Stat Sol*, 2007, 204(6):1797-1803.
- [9] Kargi F, Eker S. Electricity generation with simultaneous wastewater treatment by a microbial fuel cell (MFC) with Cu and Cu-Au electrodes[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2007, 82(7):658-662.
- [10] Cheng S, Liu H, Logan B E. Power densities using different cathode catalysts (pt and cotmpp) and polymer binders (nafion and ptfe) in single chamber microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(1):364-369.
- [11] Morris J M, Jin Song, Wang Jiaquan, *et al.* Lead dioxide as an alternative catalyst to platinum in microbial fuel cells[J]. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(7):1730-1734.
- [12] Yu E H, Cheng S, Scott K, *et al.* Microbial fuel cell performance with non-Pt cathode catalysts[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 171(2):275-281.
- [13] He Zhen, Angenent L T. Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells[J]. *Electroanalysis*, 2006, 18(19):2009-2015.
- [14] Clauwaert P, Vanderha D, Boon N, *et al.* Open air biocathode enables effective electricity generation with microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(21):7564-7569.
- [15] Freguia S, Rabaey K, Yuan Zhiguo, *et al.* Non-catalyzed cathodic oxygen reduction at graphite granules in microbial fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 53(2):598-603.
- [16] Zuo Yi, Cheng Shaoan, Call D, *et al.* Tubular membrane cathodes for scalable power generation in microbial fuel Cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(9):3347-3353.
- [17] You Shijie, Zhao Qingliang, Zhang Jinna, *et al.* A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 162(2):1409-1415.
- [18] Tartakovsky B, Guiot S R. A comparison of air and hydrogen peroxide oxygenated microbial fuel cell reactors[J]. *Biotechnol Prog*, 2006, 22(1):241-246.
- [19] Schröder U, Nießen J, Scholz F. A generation of microbial fuel cells with current outputs boosted by more than one order of magnitude[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2003, 42(25):2880-2883.
- [20] Zeikus G J, Park D H, Lovley D R. Harvesting energy from the marine sediment-water interface: II. Kinetic activity of anode materials[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, 21(11):2058-2063.
- [21] Cheng Shaoan, 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.
- [22] Qiao Yan, Li Changming, Bao Shujuan, *et al.* Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 170(1):79-84.
- [23] Rosenbaum M, Zhao Feng, Quaaas M, *et al.* Evaluation of catalytic properties of tungsten carbide for the anode of microbial fuel cells[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2007, 74(3):261-269.
- [24] Ter Heijne A, Hamelers H V M, De Wilde V, *et al.* A bipolar membrane combined with ferric iron reduction as an efficient cathode system in microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17):5200-5205.
- [25] Liu Hong, Logan B E. Microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane[J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38(14):4040-4046.
- [26] He Z, Minteer S D, Angenent L T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(14):5262-5267.
- [27] Hea Z, Shaob H, Angenenta L T. Increased power production from a sediment microbial fuel cell with a rotating cathode[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22(12):3252-3255.
- [28] Oh S E, Logan B E. Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 167(1):11-17.
- [29] Shin S H, Choi Y, Na S H, *et al.* Development of bipolar plate stack type microbial fuel cells[J]. *Bull Korean Chem Soc*, 2006, 27(2):281-285.
- [30] Aelterman P, Pabaey K, Pham H T, *et al.* Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(10):3388-3394.
- [31] Prasad D, Sivaram T K, Berchmans S. Microbial fuel cell constructed with a micro-organism isolated from sugar industry effluent[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(2):991-996.
- [32] 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.
- [33] Cheng Shaoan, Dempsey B A, Logan B. Electricity generation from synthetic acid-mine drainage (AMD) water using fuel cell technologies[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(23):8149-8153.
- [34] 冯杨阳, 陈俊, 沈树宝, 等. 一株对苯二甲酸降解菌的鉴定及其降解特性[J]. *化工学报*, 2006, 57(8):1968-1973. ■