

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郭伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳芰湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究

张永娟, 李永峰*, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 本实验通过研究电池的启动过程、阳极有机物降解率和阴极 Cu^{2+} 的去除率, 评价了微生物燃料电池 (microbial fuel cell, MFC) 的产电和处理废水性能。以模拟糖蜜废水作为阳极基质, 模拟电镀废水作阴极电子受体, 建立简单的双室微生物燃料电池。结果表明在外电阻为 $800\ \Omega$ 的情况下, 电池得到最大电压 $417.00\ \text{mV}$, 从极化曲线上获得最大输出功率密度 $44.17\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, 内阻为 $293\ \Omega$ 。电池在第五周期时, COD 去除率也达到最高 47.31% 。在第四周期内, Cu^{2+} 最大的去除率为 59.76% 。综上所述, MFC 在处理有机废水和电镀废水方面具有可行性。

关键词: 燃料电池; 微生物燃料电池; 废水处理; 模拟废水; 微生物产电

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2427-05

Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater

ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, WANG Yi-xuan, LI Long, WANG Zi-ren, DONG Yi-xing

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The start-up procedures, the degradation efficiency of organics at the anode and the removal efficiency of Cu^{2+} at the cathode of the cell were studied, based on which the performance of MFC (microbial fuel cell) in electricity generation and wastewater treatment was evaluated. A simple two-chamber microbial fuel cell was established with simulated molasses wastewater as substrate at the anode and simulated electroplating wastewater as an electron acceptor at the cathode. The results from a batch of experiments showed that the highest voltage output of $417.00\ \text{mV}$ was obtained at an external resistance of $800\ \Omega$, and that the maximum power density of $44.17\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ was obtained with an internal resistance of $293\ \Omega$ based on the polarization curve. In addition, COD removal rate reached its highest value (47.31%) in the fifth cycle, and the maximum removal rate (59.76%) for Cu^{2+} was recorded in the fourth cycle. In summary, the application of MFC in the treatment of organic wastewater and electroplating wastewater is feasible.

Key words: fuel cell; microbial fuel cell; wastewater treatment; simulated wastewater; generating electricity by microorganisms

微生物燃料电池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^[1,2], 是在生物燃料电池基础上, 伴随微生物、电化学及材料等学科的发展而发展起来的^[3~5]。2002年, Bond等^[6]在海底沉积物的研究中, 发现了一种存在于底泥中的特殊微生物 *Geobacter*, 可以在不投加氧化还原介体的厌氧条件下, 持续稳定地利用乙酸等基质产生电流; 随后 Logan等^[7]利用厌氧污泥接种, 实现了污水生物产电。因此, 使得 MFC 受到世界范围内研究人员越来越多的关注。

梁敏等^[8]已经证实了以剩余污泥为底物的 MFC 可以实现在降解污泥中有机质同时处理含铜废水和回收铜, 最大输出功率为 $536\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-3}$, Cu^{2+} 的去除率达到 97.8% , 但是此方法最后产物是 Cu_2O 和 $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$, 没能实现铜的回收。Heijne等^[9]通过调节铜阴极液 pH 为 3, 获得了最大输出功率 $430\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-3}$, 铜的去除率在 99.88% 以上, 且最后产物是以铜单质形式产出, 其阳极使用的是乙酸

类物质。目前为止, 还没有一项研究是将 MFC 用于 2 种废水的处理。因此, 本实验在以上实验的基础上, 根据重金属废水和有机废水的氧化还原电位不同而组织构建的 MFC 处理系统。使用糖蜜废水作为阳极基质, 电镀废水作阴极电解液, 不但省去阴阳极液的耗材, 还能处理废水, 回收电子和重金属, 在废水处理和新能源开发领域具有广阔前景。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用经典双室微生物燃料电池, 这种 MFC 也是当前研究中使用最多的形式^[10~13], 双室 MFC 反应器由阳极、阴极和质子交换膜 (PEM) Nafion117 膜三部分构成 (如图 1)。电池的阳极室和

收稿日期: 2011-09-19; 修订日期: 2011-11-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA05Z109); 东北林业大学研究生科技创新项目 (GRAM2010)

作者简介: 张永娟 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境工程, E-mail: ninalianrui@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dr_lyf@163.com

阴极室均为有机玻璃制成的圆柱形,单个极室的内径为 100 mm,高为 100 mm,有效容积均为 600 mL. 两个极室用一个有机玻璃的圆形管(内径为 80 mm)连接,中间用质子交换膜隔开. 阴阳两极室均为密封厌氧,上端设有取样口,且用磁力加热搅拌器对阳极室内的混合液进行连续搅拌,以保证营养物质和厌氧污泥中的微生物充分混合. 阳极和阴极电极均由碳纸-60 制成,阳极电极有效面积为 64.22 cm²,两极间用铜导线连接,并接入负载电阻,外电阻为 800 Ω.

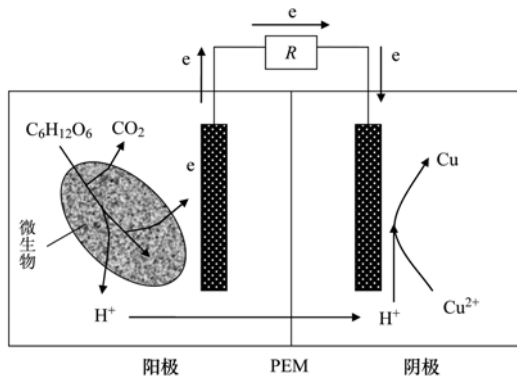


图 1 双室 MFC 结构工作原理示意

Fig. 1 Structure and principle of the two-chamber MFC

1.2 污泥驯化

接种污泥采用哈尔滨污水处理厂的二次沉淀池^[14~16],将其过滤、沉淀、淘洗后,在厌氧条件下保存,微生物的生长环境必须是厌氧,这样才能保证最终电子受体是电极而不是氧气,否则电子将直接参与氧气的化学还原生成水^[17]. 向污泥中投加糖蜜^[18](由 3.13 g·L⁻¹ NaHCO₃, 0.31 g·L⁻¹ NH₄Cl, 6.338 g·L⁻¹ NaH₂PO₄·H₂O, 6.855 6 g·L⁻¹ Na₂HPO₄·12H₂O, 0.13 g·L⁻¹ KCl, 0.2 g·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O, 0.015 g·L⁻¹ CaCl₂, 0.02 g·L⁻¹ MnSO₄·7H₂O, 3 g·L⁻¹ 红糖配制)废水进行厌氧培养驯化 20 d 左右,pH 值为 6.63,COD 值约为 7 720 mg·L⁻¹. 为了简化实验,阴极的电镀废水为自配的模拟电镀废水,配置成 0.1 mol·L⁻¹ Cu(NO₃)₂,溶液通过加酸调节 pH 值为 3.

1.3 分析检测方法

电化学特性测定与计算:电压用数显万用表(FLUKE 17B,美国)测定,实际上电压测定的是 MFC 外电路电阻两端的电势差,间接反应电池能量输出效果. 电流密度 $I = U/AR_{\text{外}}$,式中, A 是阳极有效面积, $R_{\text{外}}$ 是外电阻. 功率密度 $P = U^2/AR_{\text{外}}$.

水质指标测定:COD 按照标准分析法测定^[19],

用 COD 消解仪消解(COD-571-1,上海雷磁仪器厂),COD 测定仪测定(COD-57,上海雷磁仪器厂),COD 去除率为:

$$E_R = \frac{\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}}{\text{COD}_{\text{in}}} \times 100\%$$

金属离子浓度采用原子吸收分光光度计(Q1-AA320,北京中西化玻仪器有限公司)测定.

2 结果与分析

2.1 MFC 的启动

电池启动后,7 个周期内的电压变化如图 2 所示. MFC 连接好后,测量其电压值,在电压值 < 40 mV 时,更换阳极接种污泥混合液和阴极模拟电镀废水,即为一个周期,每个周期发电大概能持续 150 h. 第一个周期内阳极室内微生物由好氧转为厌氧培养,产电微生物处于驯化阶段,导致电压较低处在 50 mV 附近波动. 自第二个周期后,产电微生物生长稳定,电压上升稳定,电压变化趋势同微生物生长趋势相同,当加入新鲜培养基,30 h 左右产电微生物即可达到顶级群落,达到最大电压 417.00 mV,继稳定期后,营养物质的消耗和有害废物的积累引起条件恶化,导致电压下降至 41.50 mV. 目前已报道的使用酸类和电镀废水作为阴阳极微生物燃料电池获得电压一般也在 400 mV 左右^[20~22].

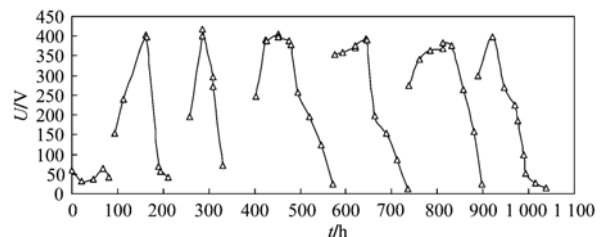


图 2 MFC 电压输出曲线

Fig. 2 Output voltage curve of MFC

为了考察电池性能,本实验设计了在产电稳定情况下,断开电路不再对外供电,保持 10 h 后,重复 3 次重新连接电路,发现其电压电流基本不变,如图 3 所示. 结果表明,MFC 可以持续放电,由断电前电压 542 mV 到 10 h 后接通电路的 537 mV,电压基本维持不变,电池性能良好.

2.2 极化曲线

改变外电阻,从 15 000 ~ 100 Ω 依次降低,得到 MFC 极化曲线如图 4 所示. 第一个区为活化极化区,在该区内活化损失占优势,当外阻无限大的时候,得到系统的最大电压 887.6 mV,此时电流为 0,初始电压随电流密度的增加急剧下降;第二个区为

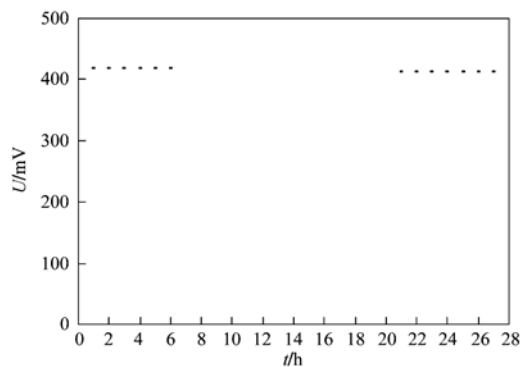


图3 MFC 通断之后电压比较

Fig. 3 Voltage of MFC after make-and-break

欧姆极化区,在该区内欧姆损失占优势,当电流密度为 $66.05 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,电压急剧下降到 424.2 mV ,通过该点后电压与电流呈线性关系;第三个区浓差极化区,该区内浓度损失(质量转移影响)占优势,在电流为 $151.41 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 处,电压第二次快速下降到 291.7 mV ,直至下降到最低 138.2 mV . 本研究所得极化曲线与文献[23]的实验所得极化曲线趋势相似.

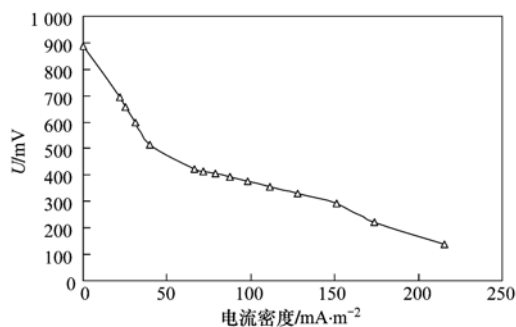


图4 MFC 极化曲线

Fig. 4 Polarization curve of MFC

2.3 功率及内阻分析

从图5可以看出在开路状态下无电流产生,功率为0,接着减小MFC的外电阻,电子传递速率会增加,电流变大,输出功率随电流密度的升高增大到最大功率点 $44.17 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,此时电流密度为 $29.17 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$,由欧姆定律计算出内阻为 293Ω ,由于欧姆损失及电极过电势的增加而引起功率下降. 最大功率密度比黄霞等[24]以乙酸钠为底物的双室空气阴极MFC所得功率密度 $25.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 高出近1倍.

2.4 阳极有机物降解效果

MFC对阳极有机废水COD的去除率如图6所示,在MFC的启动与运行阶段,利用间歇方式对MFC进行换水,每次更换水时测其进、出水COD,计

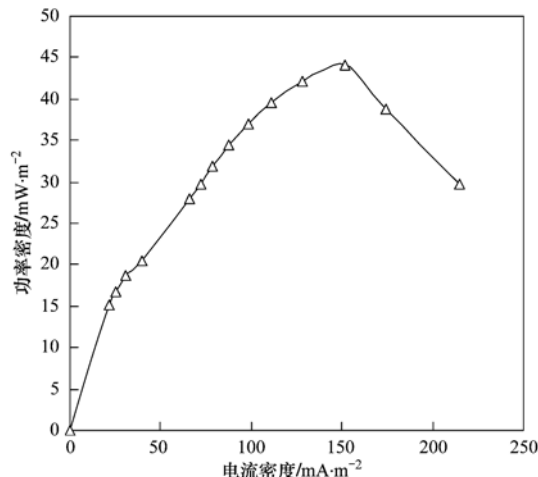


图5 MFC 功率密度曲线

Fig. 5 Power density curve of MFC

算得COD的去除率. 在厌氧条件下,碳水化合物作为底物被产电菌利用,转化为细胞物质、电子、二氧化碳、大量挥发性脂肪酸和醇,COD含量随之降低. 第一周期内,COD值下降到 $6600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时电池已基本不运行,电压降至 41 mV ,COD去除率最低仅有 14.51% ; 则第五周期,COD值从 $8180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 最低降到了 $4410 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,COD去除率也达到最高 47.31% . 除第一周期COD去除率较低外,后6个周期去除率都较高,一直保持在 45% 左右.

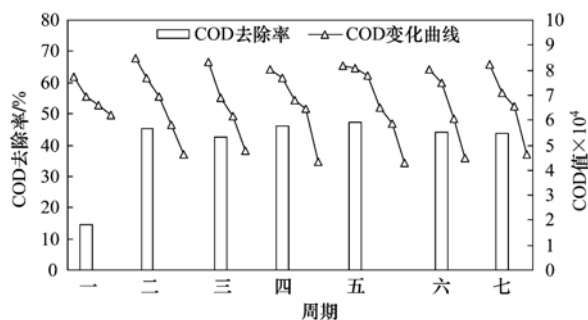


图6 阳极有机废水 COD 去除率曲线

Fig. 6 Curve of COD removal rate in the organic wastewater at the anode

2.5 阴极重金属废水处理效果

从图7可以看出,在第四周期内, Cu^{2+} 最大的去除率为 59.76% ,相比 Heijne 等[25]获得的铜的去除率在 99.88% 以上,相差甚远. 其他周期铜离子的去除率也维持在 58% 上下,且第一个周期去除率也只有 39.42% . 导致此结果的主要原因是质子膜的性能问题,质子膜只允许水和质子(或称水合质子, H_3O^+) 穿过,但是本实验中阳极侧质子膜有 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 蓝色晶体析出,影响质子传递的过程. 还

有一部分原因可能是质子由阳极传递到阴极,阴极自配的金属溶液中含硝酸根,所以阴极中有稀硝酸的成分,铜可与稀硝酸反应,一小部分金属铜又被氧化为铜离子,导致铜的去除率较低。

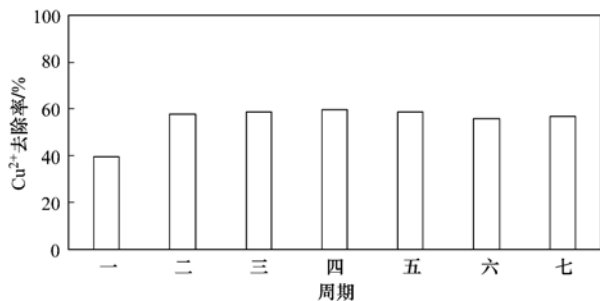


图7 阴极 Cu²⁺ 去除率

Fig. 7 Cu²⁺ removal rate at the cathode

3 结论

(1)以模拟糖蜜废水作为阳极基质,Cu²⁺作为阴极电子受体,可以建立双室微生物燃料电池.外电阻 800 Ω 时,可以获得最大稳定电压 417.00 mV,从极化曲线上获得最大输出功率密度 44.17 mW·m⁻².

(2)MFC 实现了对阳极有机物的降解,第五周期时,COD 值从 8 180 mg·L⁻¹ 降到了 4 310 mg·L⁻¹,COD 去除率也达到最高 47.31%,其他周期 COD 去除率也大概维持在 45%.

(3)MFC 实现了对阴极重金属离子的去除,在第四周期内,铜离子最大的去除率为 59.76%.

(4)由于电池本身结构,质子膜等问题的存在,导致本实验所得 Cu²⁺ 的去除率相对其他研究结果较低,但是本实验实现了同时处理两种废水,且回收电能和金属,达到了可持续发展的目的。

致谢:感谢东北林大学林学院环境工程实验室对本研究的支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Gil G C, Chang I S, him B H, *et al.* Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2003, **18**(4): 327-334.
- [3] Rabaey K, Rodríguez J, Blackall L L, *et al.* Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities[J]. *The ISME Journal*, 2007, **1**(1): 9-18.
- [4] Cao X X, Huang X, Liang P, *et al.* A completely anoxic microbial fuel cell using a photo-biocathode for cathodic carbon dioxide reduction[J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, **2**(5): 498-501.
- [5] Borole A P, Hamilton C Y, Vishnivetskaya T, *et al.* Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms in flow-through systems [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, **48**(1): 71-80.
- [6] Bond D R, Holmes D E, Tender L M, *et al.* Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments [J]. *Science*, 2002, **295**(5554): 483-485.
- [7] Logan B E, Cheng S A, Watson V, *et al.* Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(9): 3341-3346.
- [8] 梁敏, 陶虎春, 李绍峰, 等. 剩余污泥为底物的微生物燃料电池处理含铜废水[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 179-185.
- [9] Heijne A T, Liu F, van der Weijden R, *et al.* Copper recovery combined with electricity production in a microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(11): 4376-4381.
- [10] Logan B E, Murano C, Scott K, *et al.* Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell [J]. *Water Research*, 2005, **39**(5): 942-952.
- [11] 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.
- [12] 李婕, 刘广立, 张仁铎, 等. 葡萄糖和硝基苯为混合燃料时 MFC 的产电特性研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2811-2817.
- [13] 张永娟, 姜颖, 焦安英, 等. 高效双室微生物燃料电池的运行特性 [J]. *上海化工*, 2010, **36**(3): 10-13.
- [14] Lin C Y, Chang R C. Hydrogen production during the anaerobic acidogenic conversion of glucose [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1999, **74**(6): 498-500.
- [15] Lin C Y, Jo C H. Hydrogen production from sucrose using an anaerobic sequencing batch reactor process [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003, **78**(6): 678-684.
- [16] Chang J S, Lee K S, Lin P J. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, **27**(11-12): 1167-1174.
- [17] Zhang J N, Zhao Q L, You S J, *et al.* Continuous electricity production from leachate in a novel upflow air-cathode membrane-free microbial fuel cell [J]. *Water Science & Technology*, 2008, **57**(7): 1017-1021.
- [18] Lovley D R, Phillips E J P. Novel mode of microbial energy metabolism: organic carbon oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron or manganese [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, **54**(6): 1472-1480.
- [19] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 362-365.
- [20] Logan B E, Cheng S A, Watson V, *et al.* Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**

- (9): 3341-3346.
- [21] Oh S E, Logan B E. Voltage reversal during microbial fuel cell stack operation[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, **167**(1): 11-17.
- [22] Ren Z Y, Ward T E, Regan J M. Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(13): 4781-4786.
- [23] Logan B E. *Microbial fuel cell*[M]. New York: Johan Wiley & Sons, Inc, 2007. 50-53.
- [24] 黄霞, 范明志, 梁鹏, 等. 微生物燃料电池阳极特性对产电性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(3): 8-13.
- [25] Heijne A T, Liu F, van der Weijden R, *et al.* Copper recovery combined with electricity production in a microbial fuel cell[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(11): 4376-4381.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人