

黄姜废水微生物燃料电池产电去污性能研究

李辉^{1,2}, 朱秀萍², 许楠^{1,2*}, 倪晋仁²

(1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:以 H 型反应器研究了微生物燃料电池(MFC)利用黄姜废水产电的效果,并结合产电周期中阳极液氧化峰电位、COD、pH 值等物化指标及进出水 IR、GC-MS 谱图变化讨论了 MFC 对黄姜废水污染物的去除特性. 黄姜废水 MFC 内阻约 480 Ω , 最大功率密度可达 118.1 mW/m^2 , 外接 1 000 Ω 电阻时, 5 mL 黄姜废水所含有机物可维持产电约 133 h, 输出电压为 0.4 V, 库仑效率约 3.93%. MFC 对黄姜废水中污染物具有良好的去除效果, 产电周期结束时, COD 去除率可达 90.1%, NH_4^+ -N 去除率可达 66.8% 左右; 呋喃类、部分酚类及其它一些复杂有机污染物在产电过程中可被降解利用, 出水残留物质为一些难降解的长链脂肪酸、酯、醚类以及含苯环结构的酯类和环烷、烯烃等.

关键词:黄姜废水; 微生物燃料电池; 产电; 污染物降解; 废水资源化处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)01-0186-07

Electricity Generation and Contaminants Degradation Performances of a Microbial Fuel Cell Fed with *Dioscorea zingiberensis* Wastewater

LI Hui^{1,2}, ZHU Xiu-ping², XU Nan^{1,2}, NI Jin-ren²

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Science, Ministry of Education, Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The electricity generation performance of a microbial fuel cell (MFC) utilizing *Dioscorea zingiberensis* wastewater was studied with an H-shape reactor. Indexes including pH, conductivity, oxidation peak potential and chemical oxygen demand (COD) of the anolyte were monitored to investigate the contaminants degradation performance of the MFC during the electricity generation process, besides, contaminant ingredients in anodic influent and effluent were analyzed by GC-MS and IR spectra as well. The maximum power density of the MFC could achieve 118.1 mW/m^2 and the internal resistance was about 480 Ω . Connected with a 1 000 Ω external resistance, the output potential was about 0.4 V. Fed with 5 mL *Dioscorea zingiberensis* wastewater, the electricity generation lasted about 133 h and the coulombic efficiency was about 3.93%. At the end of electricity generation cycle, COD decreased by 90.1% while NH_4^+ -N decreased by 66.8%. Furfural compounds, phenols and some other complicated organics could be decomposed and utilized in the electricity generation process, and the residual contaminants in effluent included some long-chain fatty acids, esters, ethers, and esters with benzene ring, cycloalkanes, cycloolefins, etc. The results indicate that MFC, which can degrade and utilize the organic contaminants in *Dioscorea zingiberensis* wastewater simultaneously, provides a new approach for resource recovery treatment of *Dioscorea zingiberensis* wastewater.

Key words: *Dioscorea zingiberensis* wastewater; microbial fuel cell (MFC); electricity generation; contaminant degradation; resource recovery treatment of wastewater

黄姜废水是一种高浓度、难降解的工业废水,来源于黄姜皂素提取工业. 废水主要产生于工艺的酸水解环节,因黄姜中淀粉、纤维素、薯蓣皂苷、色素、单宁酸等成分在强酸作用下生成形形色色的水解产物,故所排放废水不仅呈强酸性,且有机污染物成分复杂、浓度高,严重破坏当地水体生态环境. 尤其是黄姜皂素产业集中于丹江口水库周边,给南水北调中线水源区的水质安全带来隐患.

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)是一种新兴的生物能利用技术,借助阳极产电微生物的催化作用将底物(如有机酸、糖类等)的化学能直

接转化为电能^[1-3],具有在降解污染物的同时回收能源的特点,为污水资源化提供了新途径. 已有研究表明,产电微生物可利用底物范围广泛,生活废水^[4]、养猪废水^[5]、酿酒废水^[6,7]、食品废水^[8]、淀粉废水^[9]等都可以作为 MFC 的“燃料”,但由于废水水质差别, MFC 产电去污效果有所差异. 王超^[10]、李兆飞等^[11]初步尝试利用 MFC 处理黄姜废水,探讨

收稿日期: 2010-01-28; 修订日期: 2010-07-22

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB04A14)

作者简介: 李辉(1982~),女,博士研究生,主要研究方向为污水资源化利用、清洁生产, E-mail: lihui.sz@iee.pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xunan@szpku.edu.cn

了接种污泥来源、进水 COD 和 SO_4^{2-} 浓度对 MFC 性能的影响,获得了利用 MFC 技术处理黄姜废水的基础数据,但未对 MFC 降解和利用黄姜废水污染物的过程进行深入分析.本研究对 MFC 产电去污过程作详尽的分析,利用 H 型双室反应器分析了黄姜废水 MFC 的产电去污特性以及产电过程中阳极液物化特性的变化,并利用 GC-MS、IR 等仪器分析黄姜废

水 MFC 进、出水中有机污染物组分变化.

1 材料与方法

1.1 黄姜废水预处理

黄姜废水取自湖北省十堰市百科皂素厂,经 CaO 中和沉淀后取上清液用于实验配水.中和后的黄姜废水水质指标见表 1.

表 1 中和后的黄姜废水水质

Talbe 1 Characteristics of *Dioscorea zingiberensis* wastewater after pretreatment

指标	COD/mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg · L ⁻¹	pH	SO ₄ ²⁻ /mg · L ⁻¹	还原糖/mg · L ⁻¹	电导率/μS · cm ⁻¹
范围	91 000	1 300	6.5 ~ 7.0	791	6 000	1 850

1.2 MFC 结构及运行

实验采用 H 型双室反应器,阴极室和阳极室的容积均为 300 mL,通过两段内径为 2.5 cm、长度为 5 cm 的玻璃管及质子交换膜(Nafion 112, Dupont)将两室连接.阳极为 3 cm × 3 cm 的碳纤维毡(北京飞驰绿能),阴极为 2 cm × 4 cm 镀铂碳纸(北京飞驰绿能),载铂量为 1.8 mg/cm².外电路接 1 000 Ω 负载电阻,输出电压由 16 通道信号采集器(AD8223,北京瑞博华控制技术有限公司)自动采集存储,每隔 5 min 记录一次.阳极室通过水封同大气连接,阴极室通过空气泵曝气维持溶解氧的饱和状态.

MFC 阳极室用高碑店污水处理厂厌氧污泥接种,阴极液和阳极液体积均为 150 mL.反应器在室温条件下运行,采用序批式进水,外接电路电压下降至 50 mV 左右时更换阳极液,每 2 个产电周期更换一次阴极液.阳极液为 COD 浓度稀释为 3 000 mg/L 的黄姜废水,添加少量磷酸盐(5.62 g/L NaH₂PO₄ · 2H₂O, 6.15 g/L Na₂HPO₄ · 12H₂O),阴极液为 0.5 mol/L NaH₂PO₄ 缓冲液(pH 值用磷酸调至 3.3).

1.3 产电性能分析

MFC 产电周期中的输出电压由信号采集器自动记录.

MFC 内阻及最大输出功率的测定:MFC 产电稳定后,用变阻箱代替外接电阻,在 50 ~ 10 000 Ω 的范围内调节阻值,测定对应外路电压 U ,并根据公式(1)计算电流 I ,根据公式(2)计算输出功率密度 P_{an} ,以电流 I 为横坐标绘制极化曲线 $U-I$ 、 $P_{\text{an}}-I$. $P_{\text{an}}-I$ 曲线的峰值即 MFC 最大输出功率 P_{max} , $U-I$ 曲线的斜率即为 MFC 的内阻.

$$I = \frac{U}{R} \times 1\,000 \quad (1)$$

$$P_{\text{an}} = \frac{U^2}{RA_{\text{an}}} \times 1\,000 \quad (2)$$

式中, R 为变阻箱的阻值(Ω), U 为对应外路电压(V), I 为对应电路电流(mA), A_{an} 为 MFC 阳极总面积(m²), P_{an} 为 MFC 基于阳极面积的功率密度(mW/m²).

MFC 内阻构成分析:测定 MFC 内阻的同时,在阳极室和阴极室放置甘汞电极作为参比电极,记录阳极、阴极电势以及参比电极间的电势差的变化,以电流 I 为横坐标,分别绘制极化曲线,分析阳极、阴极及电极间的欧姆电阻.

1.4 水质分析

COD 采用酸性重铬酸钾氧化法测定,葡萄糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法^[12]. pH 值用 pH 计(pH211, HANNA)测得,电导率用电导率仪(DDS-307,探头为 DJS-1C 型,上海精密科学仪器有限公司)测得.

氧化峰电位分析:取黄姜废水 MFC 不同运行时段的水样,过滤后用电化学工作站 CHI760B(上海辰华)扫描循环伏安曲线,测定氧化峰电位.扫描电位区间为: -0.50 ~ 0.30 V,扫描速度为 100 mV/s.

GC-MS 分析:用色谱纯 CH₂Cl₂ 溶剂萃取酸性、中性、碱性条件下黄姜废水 MFC 的进、出水,萃取后将有机相浓缩、过膜(有机系 0.45 μm 滤膜,北化黎明),用 GC-MS(Agilent, USA)测定污染物成分.

红外谱图分析:将黄姜废水 MFC 的进、出水水样冷冻干燥,取少量样品粉末用光谱纯 KBr 压片,在 4 000 ~ 400 cm⁻¹ 扫描波数范围内用 TENSOR27 型傅立叶变换红外光谱仪(Bruker Optics, Germany)检测.

2 结果与分析

2.1 产电性能

MFC 接种厌氧污泥后,先用 300 mg/L 乙酸钠

配水驯化 5 个周期, 确认产电微生物在阳极成功挂膜后, 再以 COD 浓度稀释为 3 000 mg/L 的黄姜废水作为阳极进水. 图 1 记录了黄姜废水 MFC 输出电压 (外接 1 000 Ω 电阻) 的变化曲线, 分割线前为驯化阶段乙酸钠配水的产电情况, 分割线后为黄姜废水的

产电情况. 经过 1 个周期 (约 150 h) 的驯化, 产电微生物即可在阳极上成功挂膜, 在后续的 4 个驯化周期里, MFC 输出电压峰值稳定在 0.47 V 左右. 阳极进水换为黄姜废水后, MFC 需要一个周期适应水质变化, 之后电压峰值一直稳定在 0.4 V 左右.

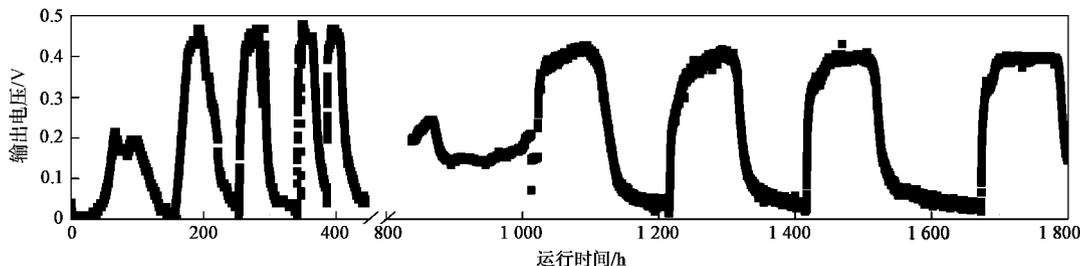


图 1 黄姜废水 MFC 输出电压随时间变化

Fig. 1 Time-potential relationship for MFC fed with *Dioscorea zingiberensis* wastewater

在阳极进水更换为黄姜废水后的第 5 个周期, 当 MFC 输出电压稳定在峰值附近时, 改变外接电路电阻 (50 ~ 10 000 Ω), 记录外电路电压及各电极电势的变化, 绘制 MFC 及各电极的极化曲线, 如图 2 所示. 其中, 图 2(a) 是黄姜废水 MFC 的极化曲线, 可以看出输出功率密度随外电路电阻增加呈现先升高后降低的趋势, 当外电路连接 480 Ω 外电阻时, 可获得最大功率密度 118.1 mW/m^2 ; 图 2(b) 是 MFC 阳极、阴

极的极化曲线以及阴、阳极室中两参比电极电势差的变化, 根据欧姆定律 $R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ 进行线性拟合, 可分析得到 MFC 内阻组成的详细信息, 为排除活化极化和浓度极化的影响, 拟合点选择线性区域数据点. 拟合结果见表 2, 电极间电极液和质子交换膜引起的欧姆电阻和阴极电阻是 MFC 内阻的主要成因, 分别占总内阻的 40% 左右, 阳极内阻约占总内阻的 19%.

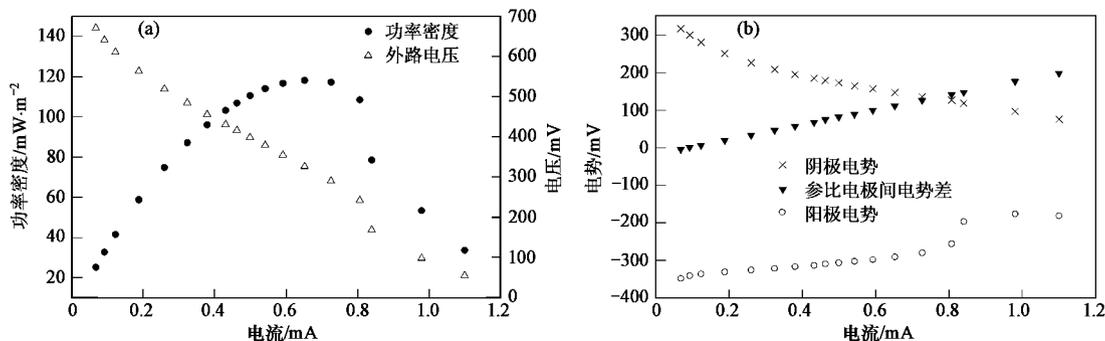


图 2 黄姜废水 MFC 的极化曲线

Fig. 2 Polarization curves of MFC fed with *Dioscorea zingiberensis* wastewater

表 2 黄姜废水 MFC 内阻组成分析

Table 2 Composition analysis of the internal resistance

项目	拟合点数	阻值/ Ω	R^2
总内阻	8	480	0.999 7
阳极内阻	8	92	0.992 4
阴极内阻	10	191	0.988 2
电极间内阻	18	197	0.999 9

为了验证黄姜废水 MFC 产电的稳定性, 阳极液更换为黄姜废水后共运行了 12 个周期 (约 100 d),

输出电压都稳定在 0.4 V 左右, 各产电周期峰值电压的持续时间差值 < 15 h. 150 mL COD 浓度稀释为 3 000 mg/L 的黄姜废水 (即 5 mL 黄姜废水原水) 可使 MFC 持续产电约 133 h, 库仑效率约为 3.93%.

2.2 去除污染物性能

图 3 记录了黄姜废水 MFC 阳极液总 COD (TCOD) 和可溶性 COD (SCOD) 在一个完整产电周期内的变化情况. TCOD 和 SCOD 整体上都呈下降趋势, 但在 24 ~ 72 h 时间段, SCOD 先大幅下降随后

又回升,不同于 TCOD 较为平缓的下降趋势,该现象在以葡萄糖、乙酸钠作碳源的实验中从未出现过. 结合黄姜废水成分,推测该现象的出现可能与废水中含有的 SO_4^{2-} 有关, SO_4^{2-} 在产电过程中可能起到电子媒介的作用,先作为电子受体被还原成低价态,生成溶解度较低的 CaS 或者 CaSO_3 ,然后又被氧化释放电子. 在 MFC 输出电压上升并维持在峰值的阶段,废水中约 85.3% 的污染物被去除,占整个周期污染物消减量的 94.6%. 之后,随着废水中可被利用的有机污染物浓度降低, MFC 输出电压迅速下降, TCOD、SCOD 的去除速度也减缓,输出电压降至 0.05 V 时,产电周期结束,废水中污染物去除率可达 90.1%. 在整个产电周期中,黄姜废水 MFC 阳极液的 NH_4^+ -N 由初始的 46 mg/L 降至 15 mg/L,去除率达 66.8%.

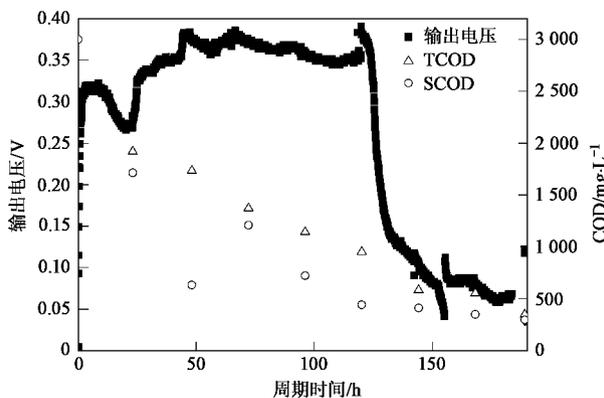


图3 产电过程中黄姜废水 MFC 阳极液 COD 的变化

Fig. 3 Changes of anolyte COD during the electricity producing process

黄姜废水中约有 6.6% 左右的 COD 是由葡萄糖造成的,实验发现在 48 h 的取样中已检测不出葡萄糖. 由于微生物一般优先利用结构简单、易分解的底物,可见在平均长达 133 h 的产电过程中,有不少结构比葡萄糖复杂的污染物也被产电微生物利用. 为进一步了解 MFC 对黄姜废水中污染物的降解利用情况,利用 GC-MS、IR 对 MFC 进、出水水样进行分析.

表 3 列出了进、出水 GC-MS 检测结果中峰面积最大的 10 种物质. 在进水中检测到呋喃及其衍生物,该类物质的峰面积占总积分面积的 40% 左右,除此之外,1,1'-Biphenyl、4,2',3',4'-tetramethoxy-6-methyl-、Desaspidinol 等酚类物质也是主要的检出成分.

黄姜废水 MFC 进、出水的 FTIR 光谱图如图 4 所示. 同进水相比,出水的红外吸收峰数量和相对强

表 3 黄姜废水 MFC 进出水 GC-MS 分析结果

Table 3 GC-MS analysis result of the influent and effluent of MFC fed with *Dioscorea zingiberensis* wastewater

有机化合物	进水	出水
Furfural	20.6 ¹⁾	— ²⁾
1,1'-Biphenyl, 4,2',3',4'-tetramethoxy-6-methyl-	16.3	—
2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)-	10.8	—
2,5-Furandicarboxaldehyde	6.6	—
Desaspidinol	3.1	—
Benzothiazole, 2-(2-hydroxyethylthio)-	3.0	—
Phenol, 4,6-di(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-	3.0	—
Phthalic acid, cyclobutyl decyl ester	3.0	—
Androst-5-en-17. beta. -ol-3-one	2.9	—
4-Methylcarbazole	2.2	—
Tetradecanoic acid, tetradecyl ester	—	16.7
1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl cyclohexyl ester	—	14.5
Tetradecanoic acid, hexadecyl ester	—	14.0
17-Pentatriacontene	—	11.7
6-oxo-Heptanoic acid	—	10.3
Cyclopentadecane	—	7.8
Phenol, 4,4'-(1-methylethylidene) bis-	—	7.7
1-Hentetracontanol	—	7.2
Cyclotetradecane	—	6.6
3-Ethyl-3-phenyl-1-pentene	—	3.6

1) 积分面积百分比,进水与文献[13]中所用废水为同批次水样,水质完全相同,故引用其分析数据; 2) 未检出

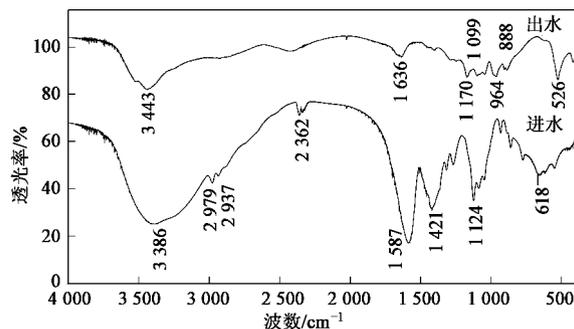


图4 黄姜废水 MFC 进出水红外光谱图

Fig. 4 IR spectra of the influent and effluent of MFC fed with *Dioscorea zingiberensis* wastewater

度都明显减小,有些官能团的特征吸收峰消失,这印证了黄姜废水中多数污染物在 MFC 产电周期里被分解或转化. 其中,3386 cm^{-1} (进水)、3443 cm^{-1} (出水)处出现的宽频强吸收谱带是由形成氢键的羟基的伸缩振动所引起,包括有机物中的碳水化合物羟基和样品中所含水分的羟基. 进水水样 2979 cm^{-1} 、2937 cm^{-1} 吸收峰是甲基和亚甲基中 C—H 伸缩振动引起,在出水谱图中消失,表明甲基、亚甲基基团被氧化. 进水水样红外谱图中有表示苯环振动的 1587 cm^{-1} 吸收峰,该峰在出水谱图中

消失,但出水在 $1\ 636\ \text{cm}^{-1}$ 处出现羰基伸缩振动峰,可能是苯环被氧化降解开环形成羰基.进水谱图中 $1\ 421\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 124\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰可认为是由纤维素和半纤维素分子中 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{OH}$ 剪切振动产生,在出水谱图中已观察不到,表明该类物质可能已被分解利用.进水谱图在 $2\ 362\ \text{cm}^{-1}$ 处出现 $-\text{CN}$ 叁键特征的弱吸收带和在 $618\ \text{cm}^{-1}$ 处出现吸收峰,可认为是含氮杂环化合物的特征吸收峰,在出水谱图中几乎观察不到,说明该物质在MFC产电过程中被降解.另外,出水谱图在 $1\ 099\ \text{cm}^{-1}$ 处出现醚键 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 的振动吸收峰,说明出水残留有机物可能含有醚类物质^[14].

2.3 产电过程中的水质变化

产电过程中,阳极液的氧化还原特性也有所变化.图5记录了同一周期不同时段黄姜废水MFC阳极液的氧化峰电势(E_p).在产电过程中,阳极液的 E_p 逐渐降低,这可能是由于废水中的污染物被逐渐分解成还原性更强、容易被产电微生物氧化利用的次级产物,而当这些次级产物被消耗完后,阳极液中只剩下难以被微生物氧化利用的污染物,其可氧化性比产电周期开始时更差,因此当输出电压开始下降后(120 h 取样点)阳极液的 E_p 比产电周期开始更高.

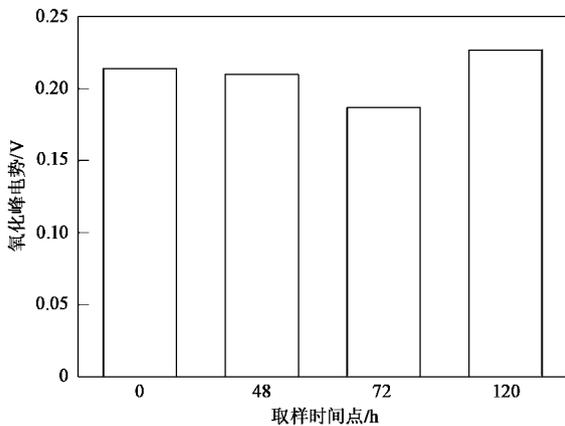


图5 黄姜废水MFC产电周期不同时段阳极液的氧化峰电势

Fig. 5 Oxidation peak potential of anolyte during the electricity producing process of MFC fed with *Dioscorea zingiberensis* wastewater

图6是黄姜废水MFC阳极液pH值和电导率在产电周期内的变化.pH值在产电周期里波动不大,约在6.3~6.5之间,略呈下降趋势,这可能是由酸化、发酵等副反应导致.阳极液的电导率随时间逐渐增加但幅度不大,这可能是由于MFC运行期间阳极液水分蒸发导致,另外,阳极微生物代谢生成可溶性

电子介体也可能会引起电导率升高.

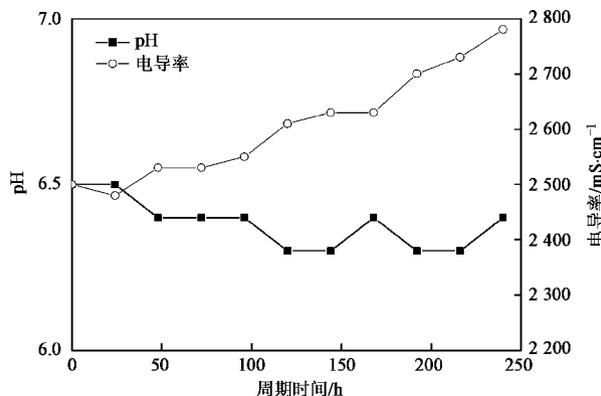


图6 黄姜废水MFC阳极液pH值和电导率在产电周期中的变化

Fig. 6 Periodic changes of anolyte pH and conductivity of MFC fed with *Dioscorea zingiberensis* wastewater

3 讨论

驯化期结束后MFC阳极进水改为黄姜废水,尽管只需一个周期产电微生物即可适应,但输出电压由0.47 V下降到0.4 V,最大输出功率密度由 $142.2\ \text{mW}/\text{m}^2$ 减小到 $118.1\ \text{mW}/\text{m}^2$,库仑效率由7.32%降低为3.93%.这可能由三方面原因导致:一是碳源产电效果的差异^[15, 16],如乙酸钠的产电效果一般优于葡萄糖和丁酸盐^[17],对于黄姜废水而言,由于其污染物成分、结构都比较复杂,产电效果比易被微生物利用的乙酸钠差^[18];二是驯化期碳源种类会影响MFC微生物菌群结构的形成^[19],乙酸钠作为驯化期碳源有利于产电微生物的富集,但分解大分子有机物的细菌可能会相对缺乏一些,在利用黄姜废水产电时效果稍差;三是黄姜废水中含有呋喃类、酚类物质,可能会对产电微生物有抑制作用^[20],从而导致MFC产电效果较驯化期有所下降.同其它实际废水MFC^[7, 9, 21]一样,黄姜废水MFC库仑效率也偏低,这可能是由三方面原因造成的:第一,这可能是由于废水中的污染物大多结构复杂,需要先被非产电微生物分解成小分子有机物才能被产电微生物利用^[22],降低了有机污染物的利用率^[23];第二,阴极液中的溶解氧透过PEM扩散至阳极室,部分有机物在微生物的兼氧和好氧呼吸代谢过程中被消耗^[24],降低了库仑效率;第三,黄姜废水中含有较高浓度的 SO_4^{2-} ,在厌氧环境下可作为电子受体消耗大量电子,导致库仑效率降低^[10, 25].由内阻组成的分析结果(表2)可知,本研究所用MFC的限制因素是反应器构型和阴极,若减小两电极间距、增加阴

极面积或改善阴极性能,黄姜废水 MFC 产电效果有进一步提高的潜力,库仑效率也可能会有所提高。

Catal 等^[20]认为呋喃类物质和酚类物质浓度高于 0.2 ~ 10 mmol/L 时(不同种类物质的浓度阈有所差别),就会严重损坏 MFC 的产电效果.然而在本实验中,尽管 MFC 进水的 GC-MS 主要检出成分是呋喃类物质和酚类物质,产电效果并未受到严重影响.这可能是因为 GC-MS 检测结果受物质挥发性的局限,只能反映废水中挥发性组分,呋喃类物质和酚类物质在黄姜废水总污染物中所占比例实际上并不高,且作为 MFC 进水时黄姜废水被稀释 30 倍,这 2 类物质的浓度已不足以损坏 MFC 的产电性能.经过 MFC 阳极微生物对废水中有机物的分解消耗,出水中未检测到呋喃类物质,主要检出成分为长链脂肪酸、酯、环烷、烯烃,以及含苯环结构的脂类物质,可以推测呋喃类物质及部分酚类物质在 MFC 产电过程中被分解利用,还有一部分酚类物质同废水中的有机酸结合生成酯类.通过进、出水 IR 光谱的对比,发现含氮杂环化合物以及有苯环结构的污染物在产电过程中也可以被降解去除.黄姜废水 MFC 对废水中结构复杂的有机污染物具有良好的去除效果。

4 结论

(1) H 型双室 MFC 反应器利用 5 mL 废水所含有机物即可持续产电 133 h 左右, MFC 内阻约 480 Ω , 最大功率密度为 118.1 mW/m²; 外接 1 000 Ω 电阻时, MFC 平均峰值电压为 0.4 V, 库仑效率约为 3.93% .

(2) 运行周期结束时, COD 去除率可达 90.1%, NH₄⁺-N 去除率约为 66.8% .

(3) 阳极微生物除了利用葡萄糖、简单有机酸等物质, 还可降解呋喃类、部分酚类及其它一些复杂有机污染物, 出水主要残留一些难降解的长链脂肪酸、酯、醚类, 以及含苯环结构的酯类和环烷、烯烃等物质。

参考文献:

[1] Logan B E, Regan J M. Microbial challenges and applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (17): 5172-5180.

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

[3] Du Z W, Li H R, Gu T Y. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy [J]. *Biotechnology Advances*, 2007, **25** (5): 464-

482.

[4] You S J, Zhao Q L, Jiang J Q, *et al.* Treatment of domestic wastewater with simultaneous electricity generation in microbial fuel cell under continuous operation [J]. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2006, **20** (4): 407-412.

[5] Min B, Kim J R, Oh S E, *et al.* Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells [J]. *Water Research*, 2005, **39** (20): 4961-4968.

[6] Wang X, Feng Y J, Lee H. Electricity production from beer brewery wastewater using single chamber microbial fuel cell [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **57** (7): 1117-1121.

[7] Feng Y, Wang X, Logan B E, *et al.* Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **78** (5): 873-880.

[8] Oh S E, Logan B E. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies [J]. *Water Research*, 2005, **39** (19): 4673-4682.

[9] 卢娜, 周顺桂, 张锦涛, 等. 利用玉米浸泡液产电的微生物燃料电池研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (2): 563-567.

[10] 王超, 薛安, 赵华章, 等. 单室型微生物燃料电池处理黄姜废水的性能研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (10): 3093-3098.

[11] 李兆飞, 陶虎春, 梁敏, 等. 双室微生物燃料电池不同接种条件下处理薯蓣皂素废水 [J]. *环境科学研究*, 2009, **22** (4): 462-466.

[12] 国家环境保护局. 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, 1989.

[13] Cheng P, Zhao H Z, Zhao B, *et al.* Pilot treatment of wastewater from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright production by anaerobic digestion combined with a biological aerated filter [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (12): 2918-2925.

[14] 苏克曼, 潘铁英, 张玉兰. 波谱解析法 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002.

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

[16] 骆海萍, 张翠萍, 宋海红, 等. 降解苯的微生物燃料电池产电性能研究 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2010, **49** (1): 113-118.

[17] Liu H, Cheng S A, 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.

[18] 叶晔捷, 宋天顺, 徐源, 等. 用高浓度对苯二甲酸溶液产电的微生物燃料电池 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (4): 1221-1226.

[19] Jung S, Regan J M. Comparison of anode bacterial communities and performance in microbial fuel cells with different electron donors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77** (2): 393-402.

[20] Catal T, Fan Y Z, Li K C, *et al.* Effects of furan derivatives and phenolic compounds on electricity generation in microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, **180** (1): 162-166.

[21] Cheng J, Zhu X P, Ni J R, *et al.* Palm oil mill effluent treatment

- using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(8): 2729-2734.
- [22] 张翠萍, 王志强, 刘广立, 等. 降解喹啉的微生物燃料电池的产电特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(4): 740-746.
- [23] Huang L P, Logan B E. Electricity generation and treatment of paper recycling wastewater using a microbial fuel cell [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **80**(2): 349-355.
- [24] Kim J R, Cheng S, Oh S E, *et al.* Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(3): 1004-1009.
- [25] Schroder U. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, **9**(21): 2619-2629.