

微生物燃料电池利用甘薯燃料乙醇废水产电的研究

蔡小波^{1,2}, 杨毅^{1,2}, 孙彦平^{1,2}, 张良^{1,2}, 肖瑶^{1,2}, 赵海^{1*}

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:利用空气阴极微生物燃料电池(MFC)处理甘薯燃料乙醇废水,以COD为5000 mg/L的废水做底物,获得的最大电功率密度为334.1 mW/m²,库仑效率(CE)为10.1%,COD去除率为92.2%。实验进一步考察了磷酸缓冲液(PBS)浓度和废水浓度对MFC产电性能的影响。PBS含量从50 mmol/L增加到200 mmol/L, MFC输出的最大电功率密度提高了33.4%, CE增加26.0%,但PBS对废水的COD去除率影响不大。含50 mmol/L PBS的废水COD从625 mg/L增加到10000 mg/L, COD去除率和MFC输出的最大电功率密度在废水浓度为5000 mg/L处均获得最大值,但CE值有降低的趋势,从28.9%变化至10.3%。这些结果表明,MFC可以在处理甘薯燃料乙醇废水的同时获得电能;增大PBS浓度能提高MFC的产电性能;MFC输出的最大电功率密度随废水COD增加而增大,但废水浓度过高会引起酸化使MFC产电性能下降。

关键词:甘薯燃料乙醇废水;微生物燃料电池;产电;磷酸缓冲液;废水浓度

中图分类号:X382 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)10-2512-06

Electricity Generation from Sweet Potato Fuel Ethanol Wastewater Using Microbial Fuel Cell Technology

CAI Xiao-bo^{1,2}, YANG Yi^{1,2}, SUN Yan-ping^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}, XIAO Yao^{1,2}, ZHAO Hai¹

(1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Air cathode microbial fuel cell (MFC) were investigated for electricity production from sweet potato fuel ethanol wastewater containing 5000 mg/L of chemical oxygen demand (COD). Maximum power density of 334.1 mW/m², coulombic efficiency (CE) of 10.1% and COD removal efficiency of 92.2% were approached. The effect of phosphate buffer solution (PBS) and COD concentration on the performance of MFC was further examined. The addition of PBS from 50 mmol/L to 200 mmol/L increased the maximum power density and CE by 33.4% and 26.0%, respectively. However, the COD removal efficiency was not relative to PBS concentration in the wastewater. When the COD increased from 625 mg/L to 10000 mg/L, the maximum value of COD removal efficiency and the maximum power density were gained at the wastewater strength of 5000 mg/L. But the CE ranged from 28.9% to 10.3% with a decreasing trend. These results demonstrate that sweet potato fuel ethanol wastewater can be used for electricity generation in MFC while at the same time achieving wastewater treatment. The increasing of PBS concentration can improve the power generation of MFC. The maximum power density of MFC increases with the rise of COD concentration, but the electricity generation will decrease for the acidification of high wastewater concentration.

Key words: sweet potato fuel ethanol wastewater; microbial fuel cell (MFC); electricity generation; phosphate buffer solution; wastewater concentration

甘薯燃料乙醇作为非粮生物质能源之一,在中国,尤其在长江流域具有很大的发展潜力。然而,在甘薯燃料乙醇生产过程中废水排放量大,如何处理这些废水成为其发展的技术障碍之一。虽然这些废水可以采用常用的生物法处理,但是这些工艺大多需要较高的能耗。

微生物燃料电池(MFC)是以微生物作为催化剂氧化有机物同时产生电流的装置^[1~4]。将MFC技术用于废水的处理,可在处理废水的同时回收其中的部分能量,从而降低工业废水的处理成本,因此MFC技术在污水处理领域有很大的应用潜力。国内外已报道应用MFC技术处理的废水有:城市生活污水^[5]、猪场废水^[6]、淀粉加工废水^[7]、垃圾渗滤

液^[8]、啤酒酿造废水^[9,10]、化学废水^[11]等。

甘薯燃料乙醇废水具有COD高、酸度大等特点。国内外还鲜见以实际甘薯燃料乙醇废水作为MFC底物进行产电的研究报道,本研究证实了空气阴极MFC处理甘薯燃料乙醇废水同时产电的可行性。实验首先对以空气阴极MFC为平台,甘薯燃料乙醇发酵废水为底物产电的可行性进行了研究,并进一步考察了缓冲液和废水浓度这2个因素对MFC产电性能及废水COD去除率的影响。本实验

收稿日期:2009-12-18;修订日期:2010-03-24

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(nycytx-16-B-15)

作者简介:蔡小波(1983~),男,硕士研究生,主要研究方向为生物质能源, E-mail: caixb617@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhaohai@cib.ac.cn

中 MFC 利用的底物 COD 最高达 10 000 mg/L,并对 MFC 运行过程中的 pH 做了全程监测,而之前针对实际废水研究的 COD 大多小于 5 000 mg/L,对 O₂ MFC 运行过程中 pH 的跟踪也鲜见报道.

1 材料与方法

1.1 废水

甘薯燃料乙醇发酵废醪取自中国科学院成都生物研究所中试基地.发酵废醪经过过滤,滤液去乙醇,保存于 4℃ 冰箱备用.废水相关参数:COD 32 754 mg/L, pH 4.5, 电导率 7.35 mS/cm.实验中将制得的废水用蒸馏水稀释一定倍数作为 MFC 的底物,部分底物中添加一定浓度的 PBS. 50 mmol/L 的磷酸缓冲液: NaH₂PO₄ 2.13 g/L; Na₂HPO₄ · 12H₂O 11.53 g/L.

1.2 MFC 装置及材料

本实验中空气阴极 MFC 参考了 Cheng 等^[12]和 Fan 等^[13]的 MFC 结构:阳极采用石墨炭毡(炭毡,炭布和石墨粉均购于甘肃郝氏炭纤维有限公司),背向溶液一侧涂 60% PTFE 乳液(Dupont),并在 370℃ 下高温处理,重复 2 次.阳极投影面积:11.9 cm².阴极材料为非防水炭布,制作采用文献[12]的方法. Nafion 溶液(Dupont): 5%.用 400 目石墨粉替代碳黑.阴极电极催化层 Pt 含量: 0.5 mg/cm² (5% 铂炭催化剂,陕西开达化工有限责任公司).阴极投影面积:10.2 cm²,两极间距:4.1 cm,装置容积: 40 mL.实验中在阴极电极催化剂面增加 4 层 400 目尼龙滤布一同固定在装置上.

1.3 MFC 挂膜启动及运行

将实验室储存的污泥及葡萄糖模拟废水^[14](葡萄糖 1 g/L; NH₄Cl 0.31 g/L; NaH₂PO₄ · H₂O 2.45 g/L; Na₂HPO₄ 4.58 g/L; KCl 0.13 g/L; 维生素溶液 5 mL; 微量元素溶液 10 mL)投入到 MFC 装置中,在 30℃ 培养箱中进行挂膜.当输出电压 < 50 mV 时,更换底物.经过 3 次更换底物,再以含有 50 mmol/L PBS 浓度为 5 000 mg/L(文中的废水浓度均指废水的 COD 含量)的废水为底物运行 2 个循环(实验中外接电阻均为 1 000 Ω). MFC 挂膜启动成功后,以不添加 PBS 浓度为 5 000 mg/L 的废水为底物(pH 调至 7.3 ~ 7.5)运行 MFC 来研究它的产电、pH 变化及 COD 去除率.然后进一步研究 PBS 浓度(50、100、200 mmol/L)和废水浓度(625、1 250、2 500、10 000 mg/L 都含有 50 mmol/L 的 PBS)这 2 个因素对 MFC 产电性能及 COD 去除率的影响.每个实验

重复 2 ~ 3 个循环.

1.4 测试方法

废水 COD 的测定用微波密封消解 COD 快速测定仪(Wc-微波消解 COD 测定仪 长沙湘蓝科学仪器有限公司)测定. MFC 运行过程的 pH 变化用 pH 计(雷磁 pHs-3C 上海精科)和市售摄像头记录.用数据采集卡(PMD-1208LS 迪阳科技)每隔 5 min 采集一次 MFC 外接电阻两端的电压,并储存在计算机中.每个实验的极化曲线采用稳态中断法^[15]测定.溶液电导率用电导率仪(DDS-11A + X 型 方舟科技)测定.

1.5 计算方法

电路中电流 I (A) 的计算公式:

$$I = U / (1\,000 R_{\text{ext}})$$

U (mV) 为输出电压, R_{ext} (Ω) 为外接电阻的阻值. 电流密度 j (A/m²) 根据公式 $j = I / A_{\text{An}}$ 计算得到, A_{An} (m²) 为阳极投影面积. MFC 的电功率密度 q (mW/m²) 根据公式 $q = IU / A_{\text{An}}$ 计算得到. 库仑效率 (CE) 表示实际回收的电子与理论上从废水中可回收电子比值的百分数. 计算公式如下:

$$\text{CE} = \frac{8 \int_0^T I dt}{FV(\text{COD}_0 - \text{COD}_T)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, 8 是每摩尔氧气转移的电子数(4)与氧气的相对分子质量(32)比值的倒数, T (s) 是 MFC 运行的周期时间, I 为 t 时刻的电流, F 为法拉第常数(96 485 C/mol), V (L) 是 MFC 的底物体积, COD_0 (g/L) 是废水初始 COD 值, COD_T (g/L) 是运行结束时的出水 COD 值.

2 结果与讨论

2.1 以 5 000 mg/L 的废水为 MFC 底物的运行情况

前期挂膜阶段 MFC 的输出电压在 480 mV 左右能稳定 100 h 以上,说明挂膜成功.然后以稀释至 5 000 mg/L 的废水(电导率为 2.79 mS/cm)做底物(pH 调至 7.3 ~ 7.5)运行.连续 3 个重复实验的输出电压及 pH 变化情况类似,如图 1.从图 1 中可以看出在 MFC 运行的第 3 个周期,输出电压在前 40 h 从 383 mV 降低到 81 mV,接着又逐渐上升,在 432 mV 左右能维持约 70 h.而废水的 pH 值在前 9 h 从 7.2 降低到 5.3,在 40 h 处又逐渐增大.可见 pH 的变化对 MFC 电压输出有一定的影响. MFC 处理的废水初始 COD 过高,易出现酸化现象,而 pH 的变化会影响阳极产电微生物的活性. Gil 等^[16]在他们

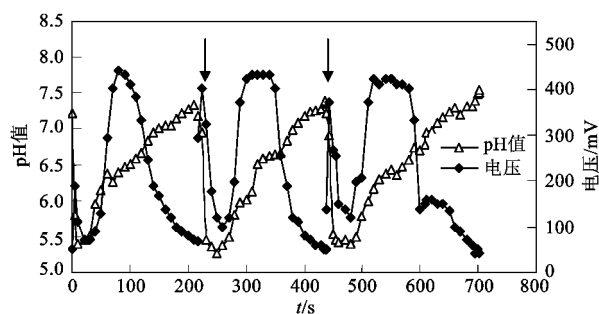


图1 MFC 的输出电压(1 000 Ω)和 pH 值随时间的变化曲线

Fig. 1 Curves of voltage output(1 000 Ω) and pH in the MFC

的研究中也发现:pH 值的不同会影响微生物的活性,在 pH 等于 5 和 6 时 MFC 的输出的最大电压小于 pH 等于 7 时的值。

当 MFC 的输出电压稳定后,通过稳态中断法获得第 3 个周期的极化曲线^[15](图 2)。以 COD 为 5 000 mg/L 的废水为底物,最大电功率密度可达到 334.1 mW/m² (244.6 Ω , 1.1 A/m²),大于以城市生活废水^[5] (146 mW/m²)、猪场废水^[6] (261 mW/m²) 和啤酒酿造废水^[9] (205 mW/m²) 为底物的运行结果。其中一个主要原因是本实验的阳极电极采用的是石墨炭毡,与上述研究中的炭布相比有更大的比表面积,更有利于产电微生物在电极上的形成,从而使 MFC 的产电性能得以提高。Logan 等^[17] 对比了阳极材料石墨刷和炭纸对 MFC 电功率密度输出的影响,结果发现使用炭纸的电功率密度为 600 mW/m²,而使用比表面积更大的石墨刷可达到 1 430 mW/m²。

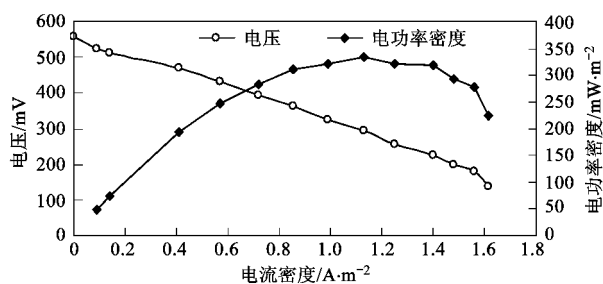


图2 不同外接电阻下电功率密度及电压曲线(第3个周期)

Fig. 2 Curves of power density and voltage with different resistors (the third cycle)

第 3 个周期的库仑效率为 10.1%,与以猪场废水^[6] (10%) 和啤酒酿造废水^[9] (10%) 为 MFC 底物的实验结果接近,小于以城市生活废水^[5] (20%) 为底物的实验结果。MFC 的运行时间影响其库仑效率,而 MFC 运行的时间又与底物的种类和浓度相

关。在同一 MFC 体系中,MFC 运行时间越长,氧通过阴极电极扩散进 MFC 体系的机会越大,底物就容易被阳极好氧微生物以氧为电子受体利用而降低电能输出,从而导致 CE 越低。

此外在实验中还发现:在上述连续 3 次重复实验之后,每次当 MFC 运行到 40 ~ 60 h 就停止运行并更换新的底物(初始 pH 调至 7.3 ~ 7.5),随着次数的增加,每次的起始输出电压就逐渐降低,更换第 3 次底物时起始输出电压只有 50 mV,而且在前 40 h 或更长的时间里都维持在 50 mV 左右。在 40 ~ 60 h 中止 MFC 运行的实验和上述 3 次重复实验使用同一装置,更换相同底物,起始输出电压却因 MFC 终止时间的不同而改变,这说明阳极产电微生物的菌群在 MFC 运行过程中可能因 pH,底物浓度等因素发生变化。

2.2 PBS 对 MFC 产电性能的影响

为了研究在甘薯燃料乙醇废水中添加 PBS 对 MFC 产电性能的影响,在 5 000 mg/L 废水中添加一定浓度的 PBS,使其浓度分别为 50、100 和 200 mmol/L (30℃, 1 000 Ω)。添加 PBS 的 MFC 电功率密度及输出电压随电流密度的变化情况如图 3。含 50 mmol/L PBS 的 MFC 输出的最大电功率密度 (470.0 mW/m²) 与不含 PBS 的 MFC (334.1 mW/m²) 相比增加 40.7%,说明添加 PBS 能明显提高 MFC 的输出电功率密度。这主要是因为:一方面添加 PBS 可提供适宜产电微生物生长代谢的 pH 环境,不添加 PBS 的 MFC 运行过程中 pH 最低降到 5.3 (图 1 中第 3 个周期),而添加 PBS 可以使 pH 维持在 6.2 (图 4) 以上;另一方面添加 PBS 可以提高溶液的电导率,在 5 000 mg/L 废水中添加 50 mmol/L

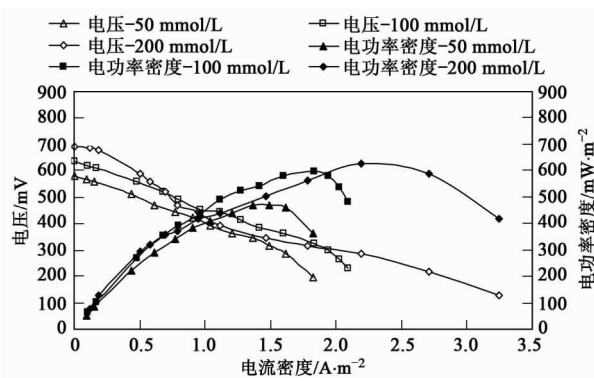


图3 电功率密度及输出电压随电流密度的变化曲线(含不同浓度的 PBS)

Fig. 3 Power density and voltage acquired as a function of current density with different concentration of PBS

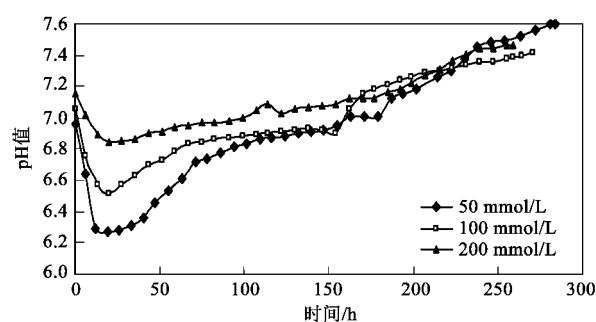


图4 不同PBS浓度下MFC运行中pH的变化曲线

Fig. 4 Curves of pH in the MFC containing different concentration of PBS

PBS 使其电导率从 2.79 mS/cm 增大到 6.47 mS/cm.

废水中 PBS 含量从 50 mmol/L 增加到 200 mmol/L, 溶液的电导率从 6.47 mS/cm 增大到 18.07 mS/cm, MFC 表观内阻从 193.2 Ω 降低到 128.9 Ω , 最大电功率密度提高了 33.4%. 虽然(图4)含不同浓度 PBS 的 MFC 运行过程中 pH 在前 19 h 内逐渐降低, 但输出电压在前 8 h 内均达到最大值并能稳定输出(图未给出). 由此可推断当 pH 在 6.2 以上, pH 不再是本实验 MFC 体系的主要限制因素, PBS 浓度的不同是 MFC 输出的最大电功率密度出现差异的主要原因. 增加 PBS 浓度可增大溶液的电导率, 降低 MFC 的表观内阻, 从而增大 MFC 输出的电功率密度. Liu 等^[18]在 MFC 的底物中添加 NaCl 将溶液的离子强度从 100 mmol/L 提高到 400 mmol/L, 使阳极电极和阴极电极的电势都得到改善, 并降低了 MFC 的表观内阻, 从而使 MFC 输出的最大电功率密度提高了 84.7%.

图5表明, 废水 COD 去除率分别为 90.8% (50 mmol/L PBS)、93.7% (100 mmol/L PBS) 和 92.9% (200 mmol/L PBS). 由此可看出添加 PBS 与不添加 (92.2%) 相比废水 COD 去除率变化不大, 含不同浓度 PBS 废水的 COD 去除率变化也不大. 而 MFC 的库仑效率(图5)随 PBS 浓度的增加从 12.3% 提高到 15.5%. 这表明 PBS 虽然对废水 COD 的去除率影响不大, 但可以增大 MFC 的库仑效率.

2.3 废水浓度对 MFC 性能的影响

为了考察废水浓度对 MFC 产电性能的影响, 将废水稀释为 625、1 250、2 500 和 10 000 mg/L (都含有 50 mmol/L 的 PBS). 电导率分别为 5.73、5.94、6.09 和 8.83 mS/cm. 不同 COD 的 MFC 输出的最大电功率密度(外接电阻 1 000 Ω , 温度 30 $^{\circ}$ C) 如图 6.

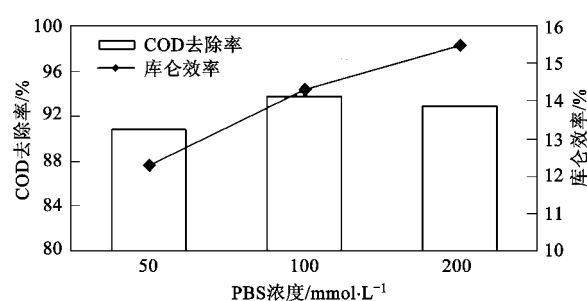


图5 PBS浓度对MFC库仑效率及COD去除率的影响

Fig. 5 Effect of PBS concentration on COD removal efficiency and CE

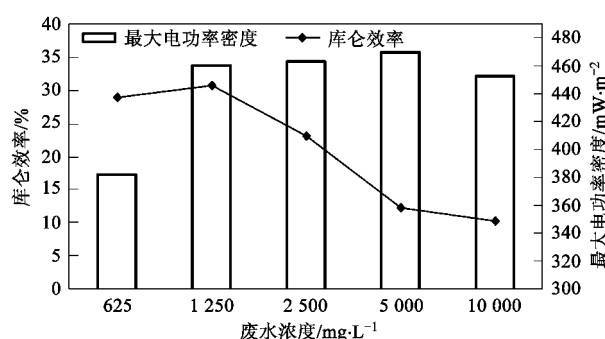


图6 废水浓度(均含50 mmol/L PBS)对最大电功率密度和CE的影响

Fig. 6 Effect of concentration of wastewater containing 50 mmol/L PBS on the maximum power density and CE

MFC 输出的最大电功率密度在 COD 为 625 ~ 5 000 mg/L 之间随底物 COD 增加而增大. 这是因为随着底物 COD 增加, 溶液电导率增大, MFC 的表观内阻减小, 其输出电压(图7)及电功率密度随之增大. Min 等^[6,19]、Feng 等^[9]、梁鹏等^[20]、Liu 等^[21,22]的研究表明: MFC 的最大电功率密度随底物浓度变化(他们研究中的底物浓度均低于 5 000 mg/L)的趋势符合 Monod 饱和动力学方程, 并且半饱和速率常数和底物种类相关.

当废水 COD 增大到 10 000 mg/L 时, MFC 的输出电压在 7 h 处达到 430 mV 后逐渐降低至 149 mV, 接着又逐渐增大, 在 97 h 处达到约 440 mV 并稳定输出. 其电压(图7)及 pH(图8)变化趋势不同于其它浓度废水的运行情况, 类似于以不添加 PBS 的 5 000 mg/L 的废水为底物 MFC 的运行情况(图1). 这是因为当浓度增加到 10 000 mg/L, 50 mmol/L PBS 的缓冲能力减弱, pH 降低到 5.9, 成为 MFC 电压输出的限制因素. 高浓度有机废水容易出现酸化现象, 虽然添加高浓度的 PBS 可以减小酸化

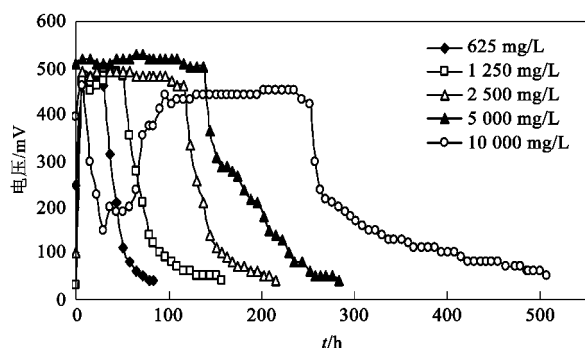


图7 以不同浓度废水(均含 50 mmol/L PBS)为 MFC 底物的产电情况

Fig. 7 Voltage output of MFC with different concentration of wastewater containing 50 mmol/LPBS

作用对 MFC 产电性能不利的影响,但由于磷本身的污染限制其在实际污水处理中的应用. 针对高浓度有机废水的酸化问题,下一步的研究工作可以采取的措施有以下方面:筛选耐酸产电微生物;将高浓度的有机废水与其它低浓度的废水如城市生活废水混合作为 MFC 的底物;将 MFC 出水回流稀释高浓度有机废水作为 MFC 底物.

从图 7 中可以看出:浓度为 1 250 mg/L 废水的 MFC 运行周期时间为 157 h,CE 值可达到 30.7%,大于以猪场废水^[6]为底物(底物 COD 约 1 200 mg/L,有膜,CE 约 26%),以啤酒酿造废水^[9]做底物(底物 COD 1 600 mg/L,CE 约 15%)所获得的 CE 值. 原因之一可能是本实验在 MFC 阴极的催化剂一侧增加了 4 层 400 目滤布,目的是为了减少通过阴极进入 MFC 的氧气量. Fan 等^[13]给 MFC 增加 2 层 J-cloth,可以减少氧的扩散,使 MFC 的库仑效率增加了 100%. 当废水浓度从 625 mg/L 增大到 10 000 mg/L, MFC 运行时间从 84 h 增加到 520 h, CE 从 28.9% 增大到 30.7% (1 250 mg/L) 又降低至 10.3%. CE 随底物 COD 增大而降低的这种趋势与 Min 等^[6]、Feng 等^[9]、Liu 等^[22]、Huang 等^[23]的实验结果类似. 废水浓度增加,就会延长 MFC 的运行时间,从而增加了氧扩散进 MFC 体系的机会. 在 MFC 体系中,微生物以扩散进体系的氧为电子受体,导致消耗底物而不产电.

废水浓度从 625 mg/L 增加至 5 000 mg/L, COD 去除率从 86.4% 增加到 90.8% (图 9). 当底物浓度增大到 10 000 mg/L, 同样是在 MFC 输出电压为 50 mV 左右停止运行,因 pH 等不利因素的影响,导致与其它浓度废水相比出水 COD 较高,所以 O₂ 循环

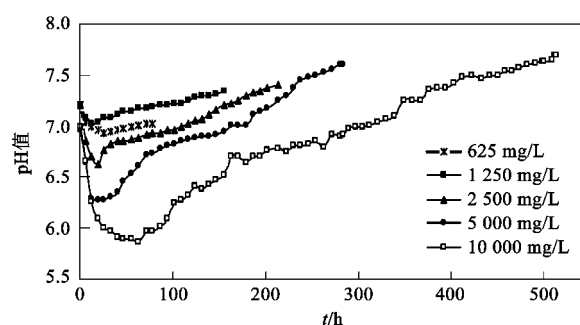


图8 不同浓度废水 MFC 运行过程中 pH 值的变化

Fig. 8 pH given in the MFC with different concentration of wastewater

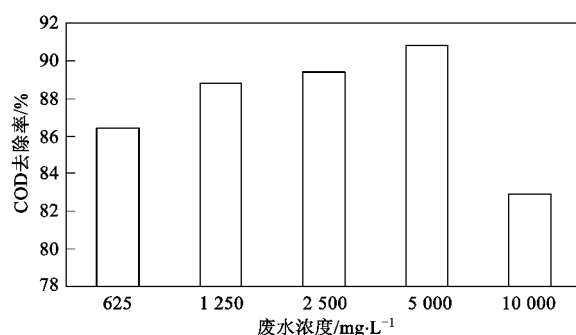


图9 废水浓度对 COD 去除率的影响

Fig. 9 Effect of different concentration of wastewater on COD removal efficiency in the MFC

的 COD 去除率仅为 82.9%. COD 去除率变化趋势和电功率密度与底物浓度的关系相似.

3 结论

(1) 空气阴极 MFC 可处理甘薯燃料乙醇废水 (5 000 mg/L) 并产电, 库仑效率可达到 10.1%, 获得的最大电功率密度为 334.1 mW/m², COD 去除率为 92.2%. 底物 pH 影响 MFC 的产电性能.

(2) 废水中添加 PBS 可提高 MFC 的产电性能: PBS 含量从 50 mmol/L 增加到 200 mmol/L, MFC 的最大功率密度和 CE 分别提高 33.4% 和 26%. 但 PBS 对 MFC 处理废水 COD 的去除效率影响不大.

(3) 废水 COD 浓度影响 MFC 的产电性能. 含 50 mmol/L PBS 的废水 COD 从 625 mg/L 增加到 10 000 mg/L, MFC 输出的最大功率密度和 COD 去除率在 5 000 mg/L 处达到最大值, 分别为 470 mW/m² 和 90.8%; 废水 COD 增加, MFC 处理的时间延长, 库仑效率随之降低.

参考文献:

- [1] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, *et al.* Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology [J]. Environ Sci Technol,

- 2006, **40**(17): 5181-5192
- [2] Lovley D R. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2006, **17**(3): 327-332.
- [3] Chaudhuri S K, Lovely D R. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells [J]. *Nat Biotechnol*, 2003, **21**(10): 1229-1232.
- [4] Oh S, Min B, Logan B E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cell [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(18): 4900-4904.
- [5] Liu H, Ramnarayanan R, Logan B E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(7): 2281-2285.
- [6] Min B, Kim J R, Oh S E, *et al.* Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells [J]. *Water Res*, 2005, **39**(20): 4961-4968.
- [7] Lu N, Zhou S G, Zhuang L, *et al.* Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology [J]. *Biochem Eng J*, 2009, **43**(3): 246-251.
- [8] Greenman J, Galvez A, Giusti L, *et al.* Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: comparison with a biological aerated filter [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2009, **44**(2): 112-119.
- [9] Feng Y J, Wang X, Logan B E, *et al.* Brewery wastewater treatment using air cathode microbial fuel cells [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2008, **78**(5): 873-880.
- [10] 王鑫,冯玉杰,曲有鹏,等. 温度对啤酒废水微生物燃料电池产电性能的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3128-3132.
- [11] Mohan S V, Mohanakrishna G, Reddy B P. Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediator-less (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment [J]. *Biochem Eng J*, 2008, **39**(1): 121-130.
- [12] Cheng S A, Liu H, Logan B E. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure [J]. *Electrochem Commun*, 2006, **8**(3): 489-494.
- [13] Fan Y Z, Hu H Q, Liu H. Enhanced columbic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration [J]. *J Power Sources*, 2007, **171**(2): 348-354.
- [14] Lee J, Phung N T, Chang I S, *et al.* Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2003, **223**(2): 185-191.
- [15] 梁鹏,范明志,曹效鑫,等. 微生物燃料电池表观内阻的构成和测量[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1894-1898.
- [16] Gil G C, Chang I S, Kim B H, *et al.* Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell [J]. *Biosens Bioelectron*, 2003, **18**(4): 327-334.
- [17] Logan B, Cheng S A, Watson V, *et al.* Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(9): 3341-3346.
- [18] Liu H, Cheng S A, Logan B E. Power Generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(14): 5488-5493.
- [19] Min B, Logan B E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(21): 5809-5814.
- [20] 梁鹏,王慧勇,黄霞,等. 环境因素对接种 *Shewanella baltica* 的微生物燃料电池产电能力的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2148-2152.
- [21] Liu H, Logan B E. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(14): 4040-4046.
- [22] Liu H, Cheng S A, Logan B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(2): 658-662.
- [23] Huang L P, Logan B E. Electricity production from xylose in fed-batch and continuous-flow microbial fuel cells [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2008, **80**(4): 655-644.