

doi: 10.3969/j.issn.1671-7627.2017.04.007

微生物燃料电池 (MFC) 处理垃圾 渗滤液与同步产电性能

伍元东^{1,2}, 吕乾川^{1,2}, 贾红华^{1,2}, 郑涛³, 邓丽芳³, 雍晓雨^{1,2}

(1.南京工业大学 生物与制药工程学院,江苏 南京 211800;
2.南京工业大学 生物能源研究所,江苏 南京 211800;
3.中国科学院 广州能源研究所,广东 广州 510640)

摘要: 微生物燃料电池(MFC)是能在处理有机污染物时产电的装置。着重研究了MFC同步处理老龄垃圾渗滤液和其产电能力。实验在典型双室MFC装置中进行,其中以碳毡为电极材料,活性污泥为接种源,铁氰化钾溶液为阴极液。MFC驯化6个周期后产电达到稳定,此时以垃圾渗滤液和污泥作为阳极液,检测了电池的产电性能及其对垃圾渗滤液的处理效果。结果表明,经过驯化电池的最大功率密度比使用未驯化的电极对照组提高了22倍,达到了 439.1 mW/m^2 ,电池内阻约为 $1\text{ k}\Omega$ 。同时扫描电镜(SEM)观察到电极表面形成一层由典型的球菌和杆菌组成的生物膜。电池运行15 d,垃圾渗滤液化学需氧量(COD)、总氮、氨氮的去除率分别达到了($49.05\% \pm 1.40\%$)、($68.95\% \pm 1.07\%$)、($73.54\% \pm 0.91\%$)。本研究为同步产能及处理老龄垃圾渗滤液提供了数据支持。

关键词: 垃圾老龄渗滤液;双室构型微生物燃料电池;等浓度驯化;产电;降解

中图分类号: TM 911.45

文章编号: 1671-7627(2017)04-0037-06

Synchronous degradation of landfill leachate and electricity production by microbial fuel cell

WU Yuandong^{1,2}, LYU Qianchuan^{1,2},
JIA Honghua^{1,2}, ZHENG Tao³, DENG Lifang³, YONG Xiaoyu^{1,2}

(1.College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;
2.Bioenergy Research Institute, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;
3.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Microbial fuel cell (MFC) is a kind of equipment that can generate electricity and degrade waste water at the same time. Synchronous degradation of mature landfill leachate and electricity production by MFC was studied. Typical dual chambers MFC with carbon felt as electrode material, activated sludge as inoculation source and potassium hexacyanoferrate as cathode liquid was used to treat landfill leachate. Stable electricity production could be realized with the MFC after six cycles

收稿日期: 2016-08-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB733904);江苏省自然科学基金(BK20130932);江苏高校自然科学研究面上项目(14KJB530002);江苏省博士后科研资助计划(1401009A)

作者简介: 伍元东(1993—),男,安徽淮南人,硕士,主要研究方向为微生物燃料电池处理有机废水;雍晓雨(联系人),讲师, yongxiaoyu@njtech.edu.cn.

引用本文: 伍元东,吕乾川,贾红华,等.微生物燃料电池(MFC)处理垃圾渗滤液与同步产电性能[J].南京工业大学学报(自然科学版),2017,39(4):37-42.

domestication, and with landfill leachate and activated sludge as the anode liquid, the performance comparison of the MFC with the control group without domestication on electrode and the effects on the degradation of landfill leachate were investigated. Results showed that after the domestication, the highest power density reached 439.1 mW/m^2 , which was 22 times higher than that of the control group. Besides, the internal resistance was about $1 \text{ k}\Omega$, and a layer of typical biofilms which consisted of *cocci* and *bacillus* was formed on the surface of electrode. The COD, total N, NH_4^+-N for the anode substrate (mature landfill leachate) reached removal rates of $(49.05\% \pm 1.40\%)$, $(68.95\% \pm 1.07\%)$, and $(73.54\% \pm 0.91\%)$, respectively. The experimental data supported bioenergy production and mature landfill leachate treatment simultaneously.

Key words: old landfill leachate; dual chambers microbial fuel cells; equal concentration domestication; electricity generation; degradation

我国是人口大国,人们日常活动所产生的生活垃圾数量巨大,据统计每年我国城市生活垃圾产生总量超过 10 亿 t^[1]。而现阶段,我国 85% 的生活垃圾依赖卫生填埋的方式处理。尽管这种方式操作相对简易,但其产生的垃圾渗滤液对土壤产生了长期的污染^[2]。在垃圾填埋的开始阶段,因为水分、有机物含量较高^[3],可生化性好,这个阶段的垃圾渗滤液通常采用生物法处理,如 SBR 好氧工艺等。但是当垃圾填埋场运行时间的推移,垃圾中可以被生物法利用的物质被大量消耗, COD 降低,并且生化性变差,如果继续使用 SBR 等好氧工艺处理,效果会降低,甚至没有效果^[4-5]。而渗滤液的性质受到填埋场的填埋时长、气候变化、季节更迭、垃圾的种类性质等的影响,本身的性质发生变更^[6]。这个过程所产生的老龄垃圾渗滤液氨氮含量高,含有重金属离子及萘、菲等有毒有机化合物^[7],可生化性变差,从而增加了处理渗滤液的难度,因此在城市化的进程中,如何处理老龄垃圾渗滤液成为一个亟须解决的问题。

微生物燃料电池是一种生物电化学装置,它通过产电微生物的代谢作用,利用有机物产生电能^[8-10]。双室 MFC 中,阳极产电微生物氧化阳极室中的有机物,在这个过程中产生了电子和质子,电子通过外电路、质子通过质子交换膜分别达到阴极室,并与电子受体反应,从而产生电流^[11]。20 世纪 90 年代初,有报告证实了 MFC 能应用于废水处理^[12]。近年来,利用 MFC 处理有机废水并同步产能的研究成为了 MFC 研究的一大热点。例如曹琳等^[13]构建的以牛粪沼液为原料的单室微生物燃料电池在产生电能的同时还去除了其中大量的氮磷,去除率达 67.82%、72.56%, COD 去除率在 24 h 内

达到 20.73%。尽管 MFC 已经广泛用于处理有机废水,但是 MFC 处理老龄垃圾渗滤液的研究相对较少。严丰^[6]使用双室 MFC 处理老龄垃圾渗滤液,经过 35 d 的运行, COD 去除率达到 70.4%, 氨氮去除率达到 74%。在传统的厌氧工艺处理有机废水时得到的甲烷等可以用来发电,但是间接的产电方式会带来 30% 左右的能量损失,另一方面也产生了 H_2S 等废气^[14]。MFC 利用有机物直接产电,避免了间接产电带来的损失,并且少有废气产生^[15]。MFC 的产电依赖产电微生物,而产电微生物能将有机酸、糖类等有机物作为碳源^[16],还可以利用多种氮源和重金属元素^[17],有研究证明,产电微生物还可以降解偶氮、蒽醌等有毒有机化合物^[18]。老龄垃圾渗滤液不仅氨氮、有机物浓度高,还含有多种重金属元素如 Cr、Cu 等及有毒有机化合物,因此利用产电微生物降解老龄垃圾渗滤液并产电的 MFC 是处理此种有机废水的适宜方式。

在典型双室 MFC 中降解老龄垃圾渗滤液,为达到一定的 COD 或氨氮去除率,通常需要较长的运行时间,并且在驯化结束后启动电池时,作为驯化时期主要菌种来源的污泥被移除。故本研究在典型双室 MFC 中,以活性污泥为接种源,经过驯化后,以垃圾渗滤液和污泥作为 MFC 的阳极液启动电池,研究其同步产电及处理老龄垃圾渗滤液的效率,旨在为利用 MFC 技术处理有机废水的实际应用提供支持。

1 材料和方法

1.1 材料和装置

老龄垃圾渗滤液来自生活垃圾填埋场,深褐色液体,有少量沉淀,保存在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱,使用前混匀。

活性污泥取自江苏省南京市长江江心洲污水处理厂的污泥,污泥呈泥浆状,和垃圾渗滤液混合静置几小时会沉淀,容易取得上清液,保存在4℃冰箱,使用前混匀。驯化时所用的培养液为: $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 4.57 g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.45 g/L, KCl 0.13 g/L, NH_4Cl 0.31 g/L, 葡萄糖 1.00 g/L, 调节 pH 为 7.0。阴极液: $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 1.53 g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.82 g/L, KCl 0.04 g/L, $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 4.40 g/L, 调节 pH 为 7.0。实验反应器由阳极室和阴极室两个室并列相通构成,两室体积均为 30 mL,两室相通处使用质子交换膜相隔。质子交换膜使用前用 1 mol/L HCl 溶液浸泡 12 h 以上,用超纯水冲洗质子交换膜上的残留 HCl 溶液。电极材料为碳毡(规格 1.5 cm×2 cm×0.5 cm,湖南九华碳素厂),碳毡使用前用 4 mol/L HCl 溶液浸泡 24 h,重复 4 次。外电阻(ZX94A 型电阻箱,上海正阳仪表厂)用钛丝连接,使用蓝丁胶隔绝接口处,阻值 2 kΩ。

1.2 方法

1) 输出电压 U 。使用数据采集器测量,每 2 min 记录一次电压数据,并绘制成时间-电压曲线,单位为 mV。

2) COD、总氮含量、氨氮含量的测定。测定 COD、氨氮含量使用的兰州连华科技公司连华牌 COD 测定仪;测定总氮含量使用的为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ636-2012)。单位为 mg/L。

3) 极化曲线和功率密度的测定。将运行稳定的电池断开 5 h 以上,然后将电池连接万用表或数据采集器,从大到小改变外电阻阻值: 5 000、4 000、3 000、2 000、1 500、1 000、800、600、400、200 Ω,记录 1 min 内各阻值电压在波动不高于 2 mV 的值 U 。从而由式(1)得出电流密度 I ,式(2)得出功率密度 P ,以电流密度为横坐标,电压为纵坐标绘制极化曲线。以电流密度为横坐标,功率密度为纵坐标绘制功率密度曲线。

$$I = \frac{U}{RA} \quad (1)$$

$$P = \frac{UI}{A} = \frac{U^2}{RA} \quad (2)$$

式中: A 代表阳极电极有效表面积; R 代表外电阻阻值 Ω; I 代表电流密度, mA/m^2 ; P 代表功率密度, mW/m^2 。

4) 循环伏安曲线的测定。在电池电压达到最

大值时接入电化学工作站(PGSTAT302N, Metrohm 公司),以铂丝电极作对电极,甘汞电极作参比电极,电池阳极电极为工作电极,扫描的电压范围为 -0.70~0.70 V,扫描速率为 0.005 V/s。

5) 扫描电镜试样预处理方法。用镊子夹取一小块电极,放入 5 mL 离心管中,加入 2.5%、pH=6.8 的戊二醛,淹没试样,在 4℃ 冰箱放置 90 min,随后用磷酸盐缓冲溶液(0.10 mol/L、pH=6.8)轻轻漂洗,依次用体积分数为 50%、70%、80%、90% 的酒精,分别浸泡 10~15 min,再用 100% 的酒精浸泡 3 次,每次 10~15 min,取得的处理后电极用滤纸包住,在干燥器中干燥待测。

1.3 MFC 的运行

为提高 MFC 处理垃圾渗滤液的能力和产电能力,驯化阳极生物膜。将垃圾渗滤液、培养液、活性污泥按照 1:1:1 的体积比混合加入阳极室,阴极室为 30 mL 铁氰化钾溶液。运行电池直至电池电压下降到 50 mV 左右,按第一周期相同比例更换电池阳极液,阴极液继续运行至电压下降到 50 mV 左右,循环此前步骤直至电池最大电压无明显升高,驯化结束。驯化结束后,阳极室更换为 $V(\text{垃圾渗滤液}) : V(\text{污泥}) = 2:1$ 启动电池,检测产电性能,和未经驯化的阳极电极的对照组 MFC 进行比较,并在电池运行至 0.5、1、2、3、5、7、10、15 d 时拆开电池取阳极室上层液,阳极电极待测。保持电池在 30℃ 培养箱中运行。

2 结果与讨论

2.1 MFC 产电

MFC 驯化期产电曲线如图 1 所示。由图 1 可知:在驯化时期,电池运行第 1 周期时, MFC 产电较低,最

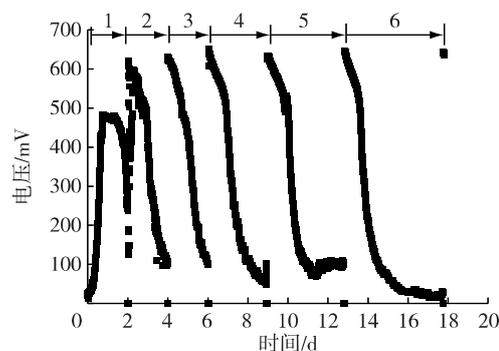


图1 MFC 驯化期产电曲线

Fig.1 Curves of electricity generation during domestication period

大电压为 482.5 mV。当电池运行到第 6 周期,和前几周期相比电池的最大电压趋于稳定,此时驯化结束。未驯化的 MFC 在启动后电压便从 170 mV 左右迅速下降,稳定在 50~100 mV 之间;而经过驯化的 MFC 启动后最大电压可以达到 530 mV 左右,并且可以在 100 mV 以上维持 2 d 左右的时间。

MFC 输出对比曲线如图 2 所示。由图 2 可知:电池驯化后将运行稳定的电池断开数小时后,测得最大功率密度为 439.1 mW/m^2 ,比不经过驯化的对照组高 22 倍;此时电池驯化后的电流密度为 855.5 mA/m^2 ,电压为 513.3 mV;驯化后电池内阻约为 $1 \text{ k}\Omega$ 。电池驯化时期的最大功率密度为 593.0 mW/m^2 ,是驯化后电池最大功率密度的 1.35 倍,张晓艳等^[11]采用 500 mL 阴阳极室容积, 30 cm^2 钛板

电极的装置,以双氧水为电子受体,经过驯化,最大功率密度达到 12.074 W/m^2 ,远远高于本实验,说明容积大小、电极材料、电极大小、电子受体类型均有可能影响电池的产电性能。一般来说阳极有机物越多,微生物就有更多可以利用的营养物质,电池的产电能力就越强^[19],一方面,驯化时阳极培养液中添加的葡萄糖在驯化后没有添加,使得微生物的产电能力减弱,同时从图 2 中可知:在驯化后没有添加葡萄糖的情况下,电池仍具备一定的产电能力,说明了微生物能利用垃圾渗滤液产电。另一方面,电池在驯化后,阳极室垃圾渗滤液量提升了,微生物能利用的有机物量提升的同时,不利于微生物生长的一些有害物质如亚硝酸盐、 H_2S 的量也在上升^[20],从而抑制了电池的产电。

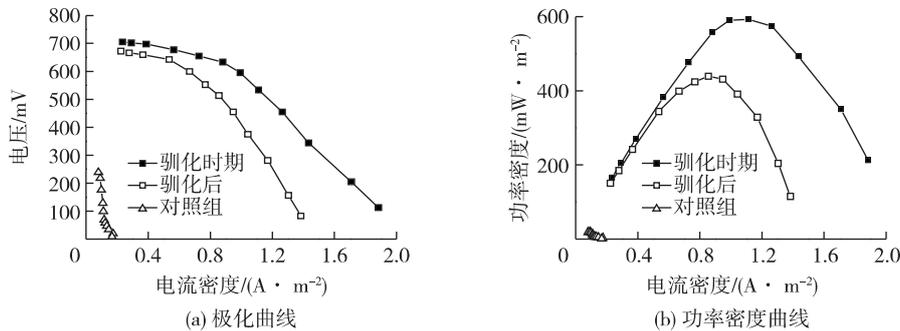


图 2 MFC 输出对比

Fig.2 MFC output comparison

2.2 MFC 循环伏安曲线的测定

循环伏安法是一种衡量 MFC 产电能力并判断 MFC 氧化还原反应性质的方法^[21]。以甘汞电极为参比电极,驯化后在电池电压达到最高时检测。MFC 驯化时期、驯化后和对照组的循环伏安曲线如图 3 所示。由图 3 可知:当扫描范围为 $-0.70 \sim 0.70 \text{ V}$ 、扫描速率为 0.005 V/s 时,驯化时期在 -0.38 、 -0.13 、 -0.20 V 处有氧化峰,在 -0.40 V 处有还原峰;驯化后 MFC 分别在 -0.18 、 0.18 、 -0.40 V 处有氧化峰,在 -0.38 V 处有还原峰。对照组 MFC 分别在 -0.26 V 处有氧化峰,在 -0.48 V 处有还原峰;氧化还原峰的出现说明在电极上存在电化活性物质促进了氧化还原反应的发生。和文献^[19]相比,驯化后都在 -0.40 V 左右的位置有峰,但是本实验驯化后出现 2 个新的氧化峰;驯化时期和驯化后的循环伏安曲线峰的位置和形状相似,但是驯化后电流响应明显比驯化时期要低,说明在驯化时和驯化

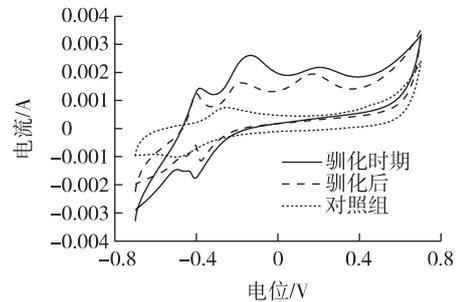


图 3 MFC 驯化时期、驯化后和对照组的循环伏安曲线

Fig.3 Cyclic voltammetry of MFC during domestication, after domestication and the control group

后电极表面所发生的氧化还原反应相似,但产电的能力高低具有差异。此外在驯化的过程中随着产电微生物富集在电极上,不同种类的菌在电极表面构成群落,一些负责利用有机物产电,一些负责将有机物降解成小分子物质^[22]相对于没有经过驯化

的电极更加活跃,和对照组相比,对照组的一对峰和驯化后的峰均不在同一位置,并且对照组峰的高度也大大低于驯化后。说明驯化的过程中,随着微生物的生长和富集,在电极上形成了生物膜,成熟的生物膜大大提升了电池的产电能力^[23]。

2.3 垃圾渗滤液 COD、总氮、氨氮的去除

驯化后按天数拆解电池取电池阳极液为试样待测,检测电池驯化前后 COD、总氮、氨氮质量分数的变化,如表 1 所示。由于阳极室驯化后的搭配为活性污泥 10 mL、垃圾渗滤液 20 mL,而活性污泥的含水量高达 96%,所以原始垃圾渗滤液的 COD、总氮、氨氮的值,即表 1 中 0 天对应的值,均为换算后的值。电池运行 15 d 后,COD、总氮、氨氮的去除率分别达到了(49.05±1.40%)、(68.95±1.07%)、(73.54±0.91%)。高秀红等^[24]使用沉积型微生物燃料电池处理低浓度垃圾渗滤液,氨氮去除率达到 59%,本实验对于氨氮的去除效果更佳。原因分析可能为本实验电池一共运行了 15 d,高秀红等的电池经过驯化只运行了 10 d,较长的运行时间使得电池阳极室内废水的氨氮去除率相对较高;电池在运行到 0.5 d 左右时,COD 的去除率和去除速率达到最大,2 d 左右 COD 的去除速率开始下降;电池在运行到 5 d 左右,总氮和氨氮的去除速率开始趋于缓慢。据文献[20]证明 MFC 具有处理高浓度有机废水产电的能力,将 COD 达到 40 g/L 的有机废水作为底物用于 MFC 的产电,最大输出功率达 170 mW/m²。在 MFC 利用有机物产电的同时,增加有机物底物浓度可以增大输出功率,高氨氮的废水同样适合作为 MFC 的底物^[25]。老龄垃圾渗滤液成分复杂,有机物浓度和氨氮浓度高,并且含有多种有毒有机化合物和重金属,而 MFC 中产电微生物不仅可以利用老龄垃圾渗滤液中的碳源和氮源进行产电,也可以利用 Cr、Cu 等重金属产电^[26-27],实验结果表明 MFC 利用老龄垃圾渗滤液为阳极室底物,最大输出功率可达 439.1 mW/m²,并且降解老龄垃圾渗滤液的效果良好。

2.4 生物膜电镜观察

产电微生物种类多样,分布广泛,当前所研究的产电微生物多属于变形菌门(*Proteobacteria*)和厚壁菌门(*Phylum Firmicutes*)^[28]。考虑到电子传递方式会影响到产电微生物产电能力的大小,而厚壁菌门的细菌又因为其较厚的细胞壁,电子穿过细胞壁的方式与细胞质内的其他电子传递方式无明显优

势,导致研究中发现的大部分产电微生物的属于变形菌门,如硫还原地杆菌(*Geobacter sulfurreducens*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、希瓦氏菌(*Shewanella*)。从形态上来看,产电微生物包含球菌如铜绿假单胞菌(*P. Aeruginosa*)、杆菌如金属还原地杆菌(*Geobacter metallireducens*)、梭菌如丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)等,说明产电微生物的外观形态多样丰富。

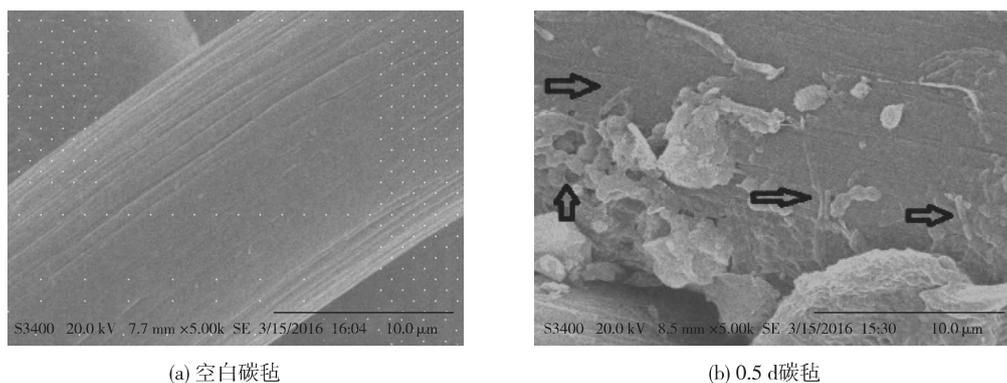
表 1 垃圾渗滤液 COD、总氮、氨氮质量分数
Table 1 COD, total N and NH₄⁺-N mass ratio of landfill leachate

运行时间/ d	COD/ (g·L ⁻¹)	ρ(总氮) / (g·L ⁻¹)	ρ(氨氮) / (g·L ⁻¹)
0	2.106±0.076	5.420±0.163	5.042±0.152
0.5	1.632±0.053	3.011±0.096	2.799±0.073
1	1.382±0.032	2.931±0.053	2.756±0.042
2	1.323±0.029	2.795±0.067	2.685±0.039
3	1.309±0.033	2.298±0.043	1.887±0.054
5	1.244±0.021	1.789±0.052	1.392±0.032
7	1.235±0.032	1.738±0.047	1.376±0.036
10	1.159±0.038	1.700±0.049	1.356±0.035
15	1.073±0.031	1.683±0.058	1.334±0.046

注: 所测数据均为垃圾渗滤液对应天数的数据。

另一方面电极的材料同样影响生物膜的生长。选择时要求材料吸附性能好,导电性能优良,在此基础上,电极的比表面积越大输出电压就越高。碳材料因其良好的生物亲和性,高电导率成为广泛应用的阳极材料^[29]。相对于碳布、石墨棒,碳毡的比表面积更大,因而具有更好的输出电流的能力^[30]。

本实验将拆取的 0.5 d 时的电池阳极电极以及空白碳毡预处理后,在扫描隧道电子显微镜下拍摄如图 4。图 4(a) 中为空白碳毡,即没有经过 MFC 运行的碳毡,从图 4(a) 可以看出: 空白碳毡的碳纤维在 5 000 倍的放大倍数下,表明相对光滑,几乎没有附着杂质或菌体。此外,从图 4(a) 还可以看出,每根碳纤维之间有一些空隙,这也为菌的附着提供了空间和位点; 图 4(b) 为 0.5 d 时的电池阳极电极上的一根碳纤维表面,可以看出该区域有一些球菌、杆菌和一些形状不规则的物质,说明电池经过驯化,菌逐渐附着吸附在碳毡的纤维上,这和空白碳



(a) 空白碳毡

(b) 0.5 d碳毡

图4 阳极电极 SEM 照片

Fig.4 SEM images of the anode electrodes

毡形成了鲜明的对比。同时废水中的杂质可能也吸附在纤维上,这些杂质可能是废水中未溶解的物质,这些未溶解的物质在影响微生物在电极上分布的同时也影响了电子的传递,从而造成内阻较高^[13]。

3 结论

1) 实验研究了驯化对 MFC 产电的影响, MFC 在驯化后电池最大功率密度为 439.1 mW/m^2 , 比对照组高 22 倍。MFC 通过驯化这一过程, 一方面在电极上富集了菌, 另一方面也使得菌逐渐适应了废水的环境, 从而提高了产电能力。

2) 本实验使用的老龄垃圾渗滤液氨氮达 7.5 g/L , 利用双室 MFC 运行 15 d, 在产电的同时降解晚期垃圾渗滤液, COD、总氮、氨氮的去除率分别达到了 $(49.05\% \pm 1.40\%)$ 、 $(68.95\% \pm 1.07\%)$ 、 $(73.54\% \pm 0.91\%)$ 。在实验过程中, 驯化后运行 2 d 后 MFC 中 COD、总氮、氨氮的去除能力已经开始趋于减弱。

3) 通过电镜观察到电极表面可能吸附了许多不可溶的杂质, 这在一定程度上影响了 MFC 的产电能力, 因此如何去除杂质的影响成为提升 MFC 产电能力的关键。

参考文献:

- [1] 范艳超, 孙洪军. 城市垃圾填埋场沉降计算的现状和展望[J]. 辽宁大学学报(自然科学版) 2016, 36(3): 171.
- [2] 晏发春, 汪恂, 朱雷, 等. 水热法制备纳米 TiO_2 处理垃圾渗滤液的实验研究[J]. 工业安全与环保 2016, 42(5): 23.
- [3] SEBASTIA P, MARC S, MARTA C, et al. Microbial fuel cell application in landfill leachate treatment[J]. Journal of hazardous

materials 2011, 185(2/3): 763.

- [4] 聂法臣. 垃圾渗滤液处理工艺技术研究[J]. 辽宁化工 2014, 43(3): 285.
- [5] YAN L, LU A H, DING H G, WANG X, et al. Microbial fuel cells using natural pyrrhotite as the cathodic heterogeneous Fenton[J]. Electrochemistry communications 2010, 12(7): 944.
- [6] 严丰. 老龄垃圾渗滤液在双室型微生物燃料电池中污染物的去除研究[D]. 广州: 华南理工大学 2012.
- [7] 袁浩然, 邓丽芳, 王亚琢, 等. 垃圾预处理条件对渗滤液组分及其微生物燃料电池处理效果的影响[J]. 化工学报 2012, 10(63): 3237.
- [8] YONG X Y, FENG J, CHEN Y L, et al. Enhancement of bioelectricity generation by cofactor manipulation in microbial fuel cell[J]. Biosensors & bioelectronics 2014, 56(24): 19.
- [9] YONG X Y, SHI D Y, CHEN Y L, et al. Enhancement of bioelectricity generation by manipulation of the electron shuttles synthesis pathway in microbial fuel cells [J]. Bioresource technology 2014, 152(1): 220.
- [10] 吴夏芃, 宋天顺, 朱旭君, 等. 植物沉积型微生物燃料电池的基础研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版) 2013, 6(35): 91.
- [11] 张晓艳, 滕洪辉. 以垃圾渗滤液为燃料的微生物燃料电池产电性能[J]. 吉林大学学报(理学版) 2011, 49(6): 1162.
- [12] 章轶磊. 微生物燃料电池强化处理高浓度有机废水[D]. 合肥: 合肥工业大学 2012.
- [13] 曹琳, 雍晓雨, 周俊, 等. 以沼液为原料的微生物燃料电池产电特性[J]. 化工学报 2014, 65(5): 1900.
- [14] RULKENS W. Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options[J]. Energy & fuels 2008, 22(1): 9.
- [15] 尤世界. 微生物燃料电池处理有机废水过程中的产电特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2008.
- [16] SHARMA V, KUNDU P P. Biocatalysts in microbial fuel cells [J]. Enzyme and microbial technology 2010, 47(5): 179.
- [17] MICHAEL T M, JOHN M M, DAVID A S, et al. Brock Biology of Microorganisms[M]. San Francisco: Pearson education Inc 2010.

(下转第 47 页)

紧密的无定形区。

2) 溶胀度越高, 改性表面的接触角越低, 溶胀度 16.3% 时的接触角为 15.3°。

3) 含 AIBN 的改性表面在浸水 5 周后, 其接触角仍保持在 47.0°, 远低于不含 AIBN 改性表面的 78.0°, AIBN 及双键的引入有利于两亲分子包埋改性表面亲水稳定性的改善。

参考文献:

- [1] DESAL N P, HUBBELL J A. Solution technique to incorporate polyethylene oxide and other water soluble polymers into surfaces of polymeric biomaterials [J]. *Biomaterials*, 1991, 12(2): 144.
- [2] QURIK R B, DAVIES M C. Surface engineering of poly(lactic acid) by entrapment of modifying species [J]. *Macromolecules*, 2000, 33(2): 258.
- [3] QURIK R B, DAVIES M C. Controlling biological interactions with poly(lactic acid) by surface entrapment modification [J]. *Langmuir*, 2001, 17(9): 2817.
- [4] 黄健, 王晓琳, 谭小春, 等. 一种两亲性分子对半结晶性聚烯烃多孔膜表面的亲水改性方法: ZL200910032055. X [P]. 2011-05-11.
- [5] 黄健, 王晓琳, 姚岚, 等. 一种两亲性分子对聚偏氟乙烯多孔膜表面的亲水改性方法: ZL201010140905. 0 [P]. 2012-05-23.

- [6] ZHANG Q, LIU Y H, CHEN K C, et al. Surface biocompatible modification of polyurethane by entrapment of a macromolecular modifier [J]. *Colloids and surfaces B: biointerfaces*, 2013, 102: 354.
- [7] 黄珏欣, 郭浩飞, 黄健. 两亲分子在聚丙烯表面的包埋及亲水改性 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(4): 40.
- [8] BORA I, KENNETH B W. Decreasing the alkyl branch frequency in precision polyethylene: pushing the limits toward longer run lengths [J]. *Journal of the American chemical society*, 2011, 133(31): 11872.
- [9] 王晓静, 廖龙凤, 柏文玖. 热处理对聚丙烯结晶结构和力学性能的影响 [J]. *塑料*, 2011, 40(3): 61.
- [10] PERRIN-SARAZIN F, TON-THAT M T, BUREAU M N, et al. Micro and nano-structure in polypropylene/clay nanocomposites [J]. *Polymer*, 2005, 46(25): 11624.
- [11] DESAL N P, HUBBELL J A. Surface physical interpenetrating networks of poly-(ethylene terephthalate) and poly(ethylene oxide) with biomedical applications [J]. *Macromolecules*, 1992, 25(1): 226.
- [12] 郭金龙, 黄文艳, 张俊. 链转移剂单体 α -甲基丙烯酸- β -巯基己酯对支化聚苯乙烯悬浮聚合的影响 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2013, 29(8): 93.
- [13] 冯玉冬, 陈永杰, 李月. 马来酸酐为连接剂的 Gemini 非离子表面活性剂的合成及性能 [J]. *精细石油化工*, 2015, 32(1): 30.

(责任编辑 林本兰)

(上接第 42 页)

- [18] 肖翔, 曹丹鸣, 吴勇民, 等. 产电微生物在染料废水生物降解中的应用综述 [J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(12): 364.
- [19] YUAN H R, DENG L F, CHEN Y, et al. Optimization of biodying pretreatment of municipal solid waste and microbial fuel cell treatment of leachate [J]. *Biotechnology and bioprocess engineering*, 2014, 19(4): 1.
- [20] 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.
- [21] 谭忠印, 周丹红. 电化学分析原理及技术 [M]. 大连: 辽宁师范大学出版社, 2001: 146.
- [22] 王敏. 底物对微生物燃料电池产电性能及微生物群落结构的影响研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [23] 高崇洋, 吴唯民, 王爱杰, 等. 平行启动的微生物燃料电池阳极微生物群落差异性解析 [J]. *哈尔滨工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(2): 15.
- [24] 高秀红, 刘子明, 赵玲子, 等. 沉积物微生物燃料电池处理低

浓度渗滤液的试验研究 [J]. *辽宁化工*, 2015, 44(5): 513.

- [25] YOU S J, ZHAO Q L, Jiang J Q, et al. Sustainable approach for leachate treatment: electricity generation in a microbial fuel cell [J]. *Journal environmental science & health A*, 2006, 41(12): 2721.
- [26] 印霞斐, 刘维平, 姜璐. 利用微生物燃料电池回收含铜废水中的铜 [J]. *环境工程*, 2014, 9(32): 152.
- [27] 赵立新, 孔凡英, 王宣, 等. 微生物燃料电池处理含铬废水并同步产电 [J]. *现代化工*, 2014, 11(29): 37.
- [28] 谢晴, 王彬, 冷庚, 等. 基于混菌产电微生物燃料电池的最新研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2010, 26(2): 9.
- [29] 曾丽珍, 李伟善. 微生物燃料电池材料的研究进展 [J]. *电池工业*, 2009, 14(4): 280.
- [30] 刘松山, 陈亮, 黄满红, 等. 碳毡和碳布两种生物阴极材料微生物燃料电池产电性能 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4540.

(责任编辑 陈怡)