

# 电极间距对单室微生物燃料电池处理 老龄垃圾渗滤液性能的影响

胡金凤, 徐龙君, 徐艳昭

(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 以体积分数为60%的老龄垃圾渗滤液为单室无膜空气阴极微生物燃料电池底物,考察电极间距分别为1、2、3、4、5 cm时电池产电性能及底物中污染物的去除效果。结果表明,间距为2 cm时输出电压和最大功率密度最大,间距为4 cm时输出电压和最大功率密度最小;电极间距为1~3 cm时电池内阻随电极间距的增大而增大,而电极间距大于3 cm时电池内阻随电极间距的增大而减小。电极间距为2 cm时,微生物燃料电池(MFC)对老龄垃圾渗滤液中化学需氧量(COD)和氨氮去除率最高;5个电池的库伦效率分别为35.6%、27.6%、35.4%、14.9%和14.9%,单室无膜空气阴极MFC可在一定程度上提高老龄垃圾渗滤液的可生化性。

**关键词:** 单室微生物燃料电池; 电极间距; 老龄垃圾渗滤液; 产电性能; 污染物去除

**中图分类号:** X703.1

**文献标识码:** A

## 0 引 言

单室型微生物燃料电池(MFC)是以成本低廉、无污染的空气作为阴极室替换双室型MFC中的阴极室而构成的,它降低了电池运行的成本,同时输出功率大于多数双室型的MFC。2002年, Park等<sup>[1]</sup>构建第一个单室空气阴极MFC,认为产电能力与电极的组成、电子给体类型和电解液的浓度有关,所获得的最大功率密度为10.2 mW/m<sup>2</sup>。Liu Hong等<sup>[2]</sup>于2004年制作了热压合阴极,将质子交换膜、碳布压合在一起构建圆筒型单室MFC并以连续流的方式运行,电池的输出功率为26 mW/m<sup>2</sup>。质子交换膜可减少底物从阳极相阴极的转移及O<sub>2</sub>从阴极阳极的转移而提高库伦效率<sup>[3]</sup>。但因膜材料昂贵,增加了MFC的运行成本,同时增加了电池内阻,降低了电池的输出功率<sup>[4,5]</sup>。文献[4]的单室空气阴极MFC实验表明,在以葡萄糖为底物时,有和无质子交换膜的最大功率密度分别为262±10和494±21 mW/m<sup>2</sup>。由于单室空气阴极MFC具有构型简单和产电效率高的特点,目前单室空气阴极MFC普遍被认为是一种最具有发展潜力的MFC结构,如利用单室空气

阴极MFC处理模拟污水<sup>[6]</sup>、生活污水<sup>[7]</sup>、啤酒废水<sup>[8]</sup>和炼油废水<sup>[9]</sup>时最大功率密度分别为4300、328、4.1和280 mW/m<sup>2</sup>化学需氧量(COD)的去除率分别93.5%、94%、85%和86%。

文献[10]研究以葡萄糖为底物的单室空气阴极MFC时表明,电极间距由2 cm增至4 cm时功率密度由1210 mW/m<sup>2</sup>减至720 mW/m<sup>2</sup>。文献[11]研究表明,当电极间距由1 cm增大到2 cm时,电池内阻虽然由16 Ω升至35 Ω,但功率密度却由423 mW/m<sup>2</sup>增至811 mW/m<sup>2</sup>。王艳芳等<sup>[12]</sup>研究立方体型MFCs处理生活废水的产电能力时认为,电极间距分别为14、21、34、54 mm时,间距的减小能有效减小内阻,同时有利于底物和生成物的流动传质,提高输出功率,且电极间距为21 mm的装置产电能力和运行效果最佳。Noori等<sup>[13]</sup>利用环形单室MFC处理巧克力生产废水时认为,电极间距(分别为0.4、0.7、1.0和1.3 cm)为0.7 cm时效果最佳,输出功率密度和电流分别为22.898 W/m<sup>3</sup>和6.42 mA。但总体上说,电极间距对MFC产电特征及底物中污染物的去除的影响缺乏系统研究,且多采用生活污水(模拟废水)、工业废水或可生化性较

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划重点项目(CSTC, 2013jjB20001)

通信作者: 徐龙君(1963—),男,博士、教授,主要从事安全科学与工程、环境科学与工程方面的研究。xulj@cqu.edu.cn

高的早期垃圾渗滤液作为电池运行底物,同时多数研究仅关注产电特征。老龄垃圾渗滤液是一种高浓度有机废水,含有大量生物难降解有机污染物、氨氮及重金属等,成分复杂、填埋时间久、可生化性差,用微生物燃料电池处理垃圾渗滤液逐渐成为研究热点<sup>[14-17]</sup>,但处理降解老龄垃圾渗滤液相对较少<sup>[14]</sup>。为此,本文构建单室无膜空气阴极 MFC,采用成分复杂、难降解的老龄垃圾渗滤液作为电池底物,系统考察电极间距对电池的产电性能及老龄垃圾渗滤液中污染物去除效率的影响。

## 1 实 验

### 1.1 材料和方法

所用化学试剂均为分析纯。接种污泥取自重庆西永污水处理厂,并对污泥进行厌氧驯化和筛选。老龄垃圾渗滤液取自重庆长生桥垃圾填埋场,渗滤液中 COD、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和 5 d 生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)分别为 4360.00、3550.00、10.00、1.04 和 207.00 mg/L, pH 值为 8.32, 电导率为 5640  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

### 1.2 微生物燃料电池的构建与运行

在室温条件下,构建电极间距分别为 1、2、3、4 和 5 cm 的 MFC(分别记为 1#、2#、3#、4#和 5# MFC)。其中,阳极材料为碳毡,有效面积为 12.56  $\text{cm}^2$ ;阴极材料为载铂碳布(0.5  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ),有效面积为 11.34  $\text{cm}^2$ ,阳极室有效容积为 120 mL。用钛丝连接阴极,用铜导线连接阳极、阴极钛丝、外接电阻( $R=1000\ \Omega$ ),并联数据采集仪(Agilent 34970A, 美国)采集电压。装置示意图参见图 1。考虑到电池底物有机物浓度对电池产电周期、电池性能和污染物去除也有较大影响,结合实验条件选取体积分数为 60% 的老龄垃圾渗滤液作为实验电池底物。

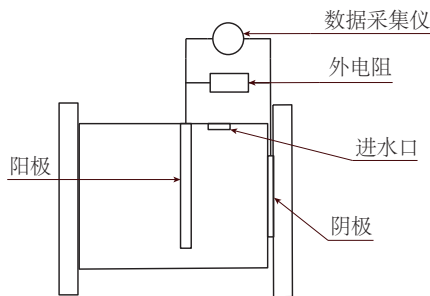


图1 MFC装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MFC

微生物燃料电池的启动与运行参照 Logan 实验室的接种方法<sup>[18,3]</sup>,当电池有 2~3 个稳定输出电压周期且稳定输出电压约为 150 mV,则认为电池启动完成,之后将电池底物换成体积分数为 60% 的老龄垃圾渗滤液即进入实验。实验在室温下进行。

### 1.3 分析方法

水质指标测定:各水质指标均按照标准方法进行测定,pH 值采用台式数显酸度计测定,电导率采用电导率仪测定。

电化学特性测定与计算:输出电压( $U$ ,单位 mV)由数据采集仪每 10 秒采集一次。电池内阻由极化曲线确定,根据欧姆定律计算得出输出电流。电流密度( $I_v$ ,单位  $\text{mA}/\text{m}^3$ )表征阳极室单位体积产生的电流用式(1)计算:

$$I_v = \frac{U}{V_{\text{An}} R_{\text{ex}}} \quad (1)$$

阳极室的功率密度( $P_v$ ,单位  $\text{mW}/\text{m}^3$ )用式(2)计算:

$$P_v = \frac{U^2}{V_{\text{An}} R_{\text{ex}}} \quad (2)$$

库伦效率采用式(3)计算:

$$C_E(\%) = \frac{M_{\text{O}_2} \int_0^t I dt}{F \cdot b V_{\text{An}} \cdot \Delta \text{COD}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $M_{\text{O}_2}$ —— $\text{O}_2$ 摩尔质量,32  $\text{g}/\text{mol}$ ;  $F$ ——法拉第常数,96485  $\text{C}/\text{mol}$ ;  $b$ ——以氧为标准的氧化 1 mol 有机物需转移的电子数量,4  $\text{mol e}^-/\text{mol}$ ;  $V_{\text{An}}$ ——有效体积, $\text{m}^3$ ;  $\Delta \text{COD}$ ——在时间 0~ $t$  内 COD 的变化,  $\text{g}/\text{m}^3$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电极间距对 MFC 产电特性的影响

#### 2.1.1 输出电压

MFC 运行过程中输出电压与运行时间的关系见图 2,由此得出的各 MFCs 的输出电压列于表 1。由表 1 可知,当间距为 2 cm 时输出电压最大,间距为 4 cm 输出电压最低;当间距为 1、3、5 cm 时输出电压的值接近;对于间距为 2、3、4 cm 的 3 个电池而言,输出电压随间距的增加呈减小趋势,这与后文讨论输出功率与间距的关系相同。上述结果依据文献[10]及式(2)是容易理解的。

表1 实验MFCs电池性能统计

Table 1 MFCs performance statistics

间距/cm	电压/mV	内阻/ $\Omega$	功率密度/ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$
1	143	408	74.2
2	152	494	258.0
3	140	689	60.8
4	125	569	31.4
5	142	381	63.4

由图2可知,间距为2 cm的电池产电周期最长,1、3 cm次之;间距为1、2、3 cm的3个电池的输出电压的稳定时间呈现 $2\text{ cm} > 3\text{ cm} > 1\text{ cm}$ 的规律,而间距为4和5 cm的2个电池稳定时间远小于其他3个电池。总体说来,在本实验条件下5个电池输出电压值相差不大,表明改变电极间距对输出电压的影响并不显著,主要原因是电压的高低取决于两电极间的电势差。由于产电微生物均匀分布在阳极底物中,因而随着电极间距的改变各阳极电极电动势相差不大。不过,这与王艳芳等<sup>[12]</sup>采用双室MFC处理航空港生活废水以及Noori等<sup>[13]</sup>采用环形单室MFC处理巧克力生产废水时得到的结论有一定差异。

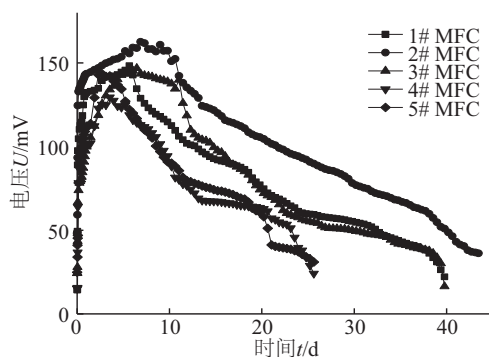


图2 MFCs的输出电压曲线

Fig. 2 Output voltages of MFCs with different electrode spacing

### 2.1.2 内阻

不同间距单室空气阴极MFC的极化曲线见图3。可得出各电池的内阻,结果列于表1。由表1可知,当电极间距为1~3 cm时电池内阻随电极间距的增大而增大,这与文献<sup>[11]</sup>的研究结果一致;而当电极间距大于3 cm时,电池内阻随电极间距的增大而减小。电池间距对电池内阻的影响主要体现在2个方面:1)单室空气阴极MFC电极间距的改变,

从而改变了电池阳极微生物周围溶液中的溶解氧,进而影响电池阳极微生物活性,最终影响电池运行;2)电池电极间的变化改变了电池欧姆内阻,进而影响电池运行过程中内阻的变化。

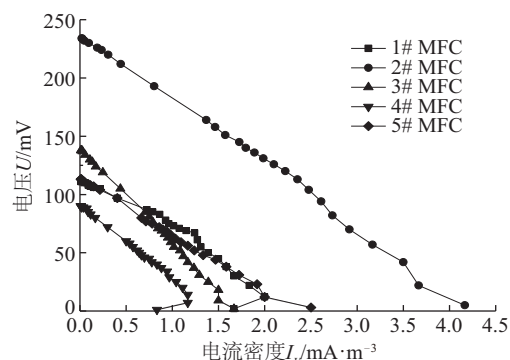


图3 MFCs的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves of five MFCs

随着电极间距的增加,产电微生物产生的质子迁移至阴极的距离增大,反应体系的电阻增大<sup>[12,19]</sup>;同时,当电极间距过小时,空气中的少量 $\text{O}_2$ 渗透进入阳极,与产电微生物反应,消耗部分电子,被消耗的电子不会通过外电路到达阴极形成电流<sup>[20]</sup>,从而使得输出电流减小,内阻增大。实验结果表明,对于1#、2#、3#MFC而言,由于电池欧姆内阻增大速率高于电化学极化内阻减小的速率,故出现电池内阻随电池电极间距的增大而增大的现象。对于3#、4#、5# MFC,电池欧姆内阻增大速率低于电化学极化内阻减小的速率,因而出现电池内阻随电池电极间距的增大而减小的现象。

### 2.1.3 最大功率密度

不同间距单室空气阴极MFC功率密度曲线见图4,由此得出的各电池的最大功率密度见表1。

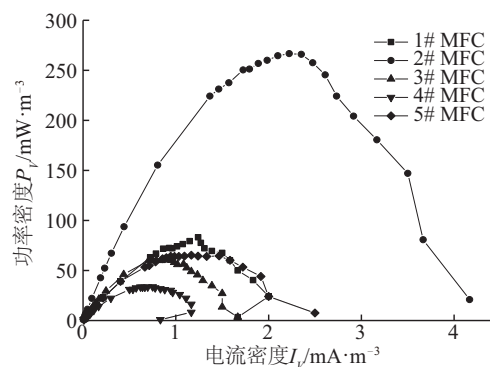


图4 MFCs功率密度曲线

Fig. 4 Relation between power density and current density for five MFCs

由表 1 可知,当间距为 2 cm 时电池的最大功率密度最大,4 cm 时最小,这与文献[14,16]的研究结果趋势一致。文献[10]以葡萄糖为底物的单室 MFC 电极间距由 2 cm 增大到 4 cm 时功率密度由 1210 mW/m<sup>2</sup> 减至 720 mW/m<sup>2</sup> (减少 43.8%),本实验以老龄垃圾渗滤液为底物,电极间距由 2 cm 增至 4 cm 时功率密度减少 87.8%,原因是电极间距的增大会增大电解液的欧姆损失而导致电池内阻增大,因而功率密度减小。由表 1 还可得出,对于 4#、3#、2# MFC 而言,电池最大功率密度随电池间距的减小而增大,说明电极间距的减小能有效减小溶液中离子和质子的转移阻力,减小欧姆电阻,也有利于底物和生成物的流动传质,微生物降解底物加快,从而使系统的传质阻力降低,进而降低整个系统阻力,提高输出功率<sup>[16]</sup>;对于 1#、2# MFC 而言,当电池间距由 1 cm 增至 2 cm 时,最大功率密度由 74.2 mW/m<sup>2</sup> 增至 258.0 mW/m<sup>2</sup> (增大 2.48 倍),这与文献[15]的研究结果(增大 92%)一致,其主要原因是由于电极间距过低,空气中的 O<sub>2</sub> 容易扩散至阳极,抑制阳极厌氧微生物的代谢,影响电池产电性能;当电池间距继续增大为 5 cm 时,电池输出功率大于间距为 4 cm 时的值,这主要是源于阳极周围溶液中的溶解氧浓度低而使阳极微生物的活性较高之故。

## 2.2 电极间距对 COD 去除效果及库伦效率的影响

MFC 运行过程中,5 个 MFC 底物 COD 随时间的变化见表 2。

### 2.2.1 COD 处理效果

在实验过程中,老龄垃圾渗滤液作为电池底物用于维持电池运行。结合 MFC 原理,老龄垃圾渗滤液中 COD 降低主要是由于电池中微生物的自身代谢作用引起的。电池的电极间距的改变会影响电池内阻,进而影响底物中 COD 的去除效果。由表 2 可知,电池电极间距的变化对电池去除底物(老龄垃圾渗滤液)中 COD 有较大影响,底物中 COD 去除量与 COD 去除率变化规律一致。电极间距为 2 cm 的 MFC,老龄垃圾渗滤液 COD 去除率最高为 34.9%。当电极间距由 1 cm 增至 2 cm 时电池的欧姆内阻增大,同时空气阴极中的部分 O<sub>2</sub> 可渗透进入阳极反应室内抑制阳极厌氧微生物的活性,影响到微生物对底物有机质的降解反应,从而导致

1# MFC 中底物 COD 去除率低于 2# MFC。当电池电极间距大于 2 cm 时,电池欧姆内阻增大,电池溶液传质阻力也增大,导致微生物受到影响,进而使 3#、4#、5# MFC 中底物有机质 COD 去除率均小于 2# MFC。

表 2 老龄垃圾渗滤液经过不同反应时间后 COD 浓度  
Table 2 Changes in COD of aging landfill leachate with time for five MFCs

时间/d	1#	2#	3#	4#	5#
1	2880	2880	2880	2868	2868
5	2573	2600	2440	2617	2713
10	2393	2372	2532	2419	2419
15	2567	2511	2723	2460	2683 (13 d)
20	2590	2560	2570	2410	—
25	2386	2398	2328	2217 (23 d)	—
30	2409	2490	2369	—	—
35	2271	2350	2550	—	—
39	2332	2094	2332	—	—
44	2381	2094	2381 (41 d)	—	—
49	—	1875	—	—	—
50	—	1890	—	—	—
去除量/mg	731	1206	663	782	539
去除率/%	21.2	34.9	19.2	22.7	15.6

### 2.2.2 库伦效率

根据式(3),5 个电池的库伦效率分别为 35.6%、27.6%、35.4%、14.9%和 14.9%。可见,1#、3# MFC 库伦效率相差不大且较高,2# MFC 库伦效率次之,4#、5# MFC 库伦效率相近且较低。这可从电池的产电特性以及底物 COD 的去除率变化趋势得到解释。

### 2.2.3 底物可生化性

实验测量 MFC 反应初期和结束时溶液中的 BOD<sub>5</sub> 值,列于表 3。溶液的可生化性衡量指标为 BOD<sub>5</sub> 与 COD 的比值,其值越大,溶液的可生化性越

好。由表 3 中知,在本实验条件下单室无膜空气阴极 MFC 可适当提高老龄垃圾渗滤液的可生化性。其中,4# MFC 可生化性变化最大,其原因还有待进一步探讨。

表 3 电池运行始末老龄垃圾渗滤液可生化性变化

Table 3 Change of biodegradability of aging landfill leachate in beginning and end of stabilization period

项目	1#	2#	3#	4#	5#
COD/mg·L <sup>-1</sup>	2880	2880	2880	2868	2868
始 BOD <sub>5</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	247	247	247	263	263
BOD <sub>5</sub> /COD	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
COD/mg·L <sup>-1</sup>	2332	1875	2328	2217	2419
末 BOD <sub>5</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	347	203	242	471	301
BOD <sub>5</sub> /COD	0.15	0.11	0.10	0.21	0.12

### 2.3 电极间距对氮去除效果的影响

1#、2#、3#、4#、5# MFC 运行期间,底物氨氮浓度、硝酸盐氮浓度、亚硝酸盐氮浓度随时间的变化见表 4。

#### 2.3.1 氨氮去除效果

电极间距与氨氮去除效果的关系示于图 5。由图 5 可知,单室空气无膜 MFC 对老龄垃圾渗滤液中的氨氮去除效率较大。氨氮去除量分别为 755、1075、823、787 和 712 mg,经计算去除率分别为 33.5%、47.7%、36.6%、36.3%和 32.9%。2# MFC 对老龄垃圾渗滤液中氨氮去除效果最好,这与其稳定周期最长有关;对于 1#、3#、4#、5# MFC,3#、4# MFC 氨氮的去除效果均约为 36%,1#、5# MFC 氨氮去除效果均约为 33%。上述表明,MFC 电极间距的改变对底物氨氮的去除有影响。

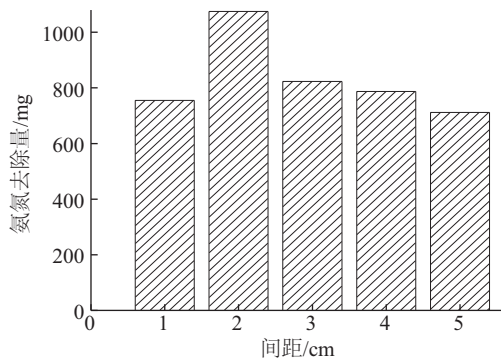


图 5 老龄垃圾渗滤液氨氮去除效果

Fig. 5 Ammonia removal of aging landfill leachate

#### 2.3.2 硝酸盐氮、亚硝酸盐氮去除效果

由表 4 可知,在电池运行期间,5 个电池运行初期硝酸盐氮、亚硝酸盐浓度都相对较低;电池对底物中硝酸盐氮、亚硝酸盐去除效果较差。5 个电池中,底物硝酸盐氮浓度出现升高的现象,1#、3#、4# MFC 底物亚硝酸盐浓度降低,2#、5# MFC 底物亚硝酸盐浓度升高。微生物燃料电池对电池底物中氮的去除主要通过氨氮转变成气体排出,部分氨氮转化为硝酸盐氮、亚硝酸盐氮,以及硝酸盐氮、亚硝酸盐氮通过反硝化作用去除。在本实验中,电池底物中硝酸盐氮、亚硝酸盐氮去除趋势变化主要是由于氨氮向硝酸盐氮、亚硝酸盐氮转移的速率与电池对硝酸盐氮、亚硝酸盐氮反硝化去除速率存在差异导致的。5 个 MFC 对于氮的去除表现为氨氮去除量远大于硝酸盐氮、硝酸盐氮的去除量。这说明电池在运行过程中老龄垃圾渗滤液中氮的去除主要是通过氨氮的去除实现,同时氨氮的去除途径主要是氨氮转化为气体排出或因阳极室 pH 值上升游离氨挥发。

#### 2.4 电极间距对底物 pH 值的影响

在实验过程中,电池中老龄垃圾渗滤液的 pH 值随时间的变化见图 6。由图 6 知,电极间距为 4#、5# MFC 因产电周期短,导致阳极底物 pH 值升高,介于 9.2~9.3 之间;对电极间距为 1#、2#、3# MFC 基本上呈增加—减小—再增加的变化趋势。这可理解为:电池微生物代谢有机物产生 H<sup>+</sup>和电子,电子、H<sup>+</sup>和 O<sub>2</sub>在阴极结合生成水,电池运行 20 d 内,因阴极 O<sub>2</sub>充足,反应室中的 H<sup>+</sup>被大量消耗,阳极产生 H<sup>+</sup>的速率低于阴极 H<sup>+</sup>消耗的速率,导致整个反应室中的 pH 值快速上升;之后电池运行时因

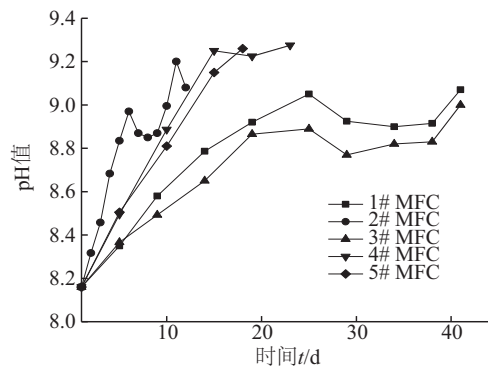


图 6 pH 值随时间的变化

Fig. 6 Change of pH value after different reaction time

表 4 电池运行期间底物氨氮浓度、硝酸盐氮浓度、亚硝酸盐氮浓度变化(mg/L)							
Table 4 Ammonia, nitrate and nitrite concentration of aging landfill leachate after different reaction time(mg/L)							
1# MFC	时间/d	1	5	10	15	20	25
	氨氮	1877	1718	1553	1449	1356	1289
	硝酸盐氮	5.81	6.27	6.41	7.11	7.41	8.08
	亚硝酸盐氮	0.43	0.37	0.42	0.45	0.39	0.39
	时间/d	30	35	39	41	49	50
	氨氮	1429	1437	1299	1248	—	—
	硝酸盐氮	7.57	7.82	7.82	7.95	—	—
	亚硝酸盐氮	0.42	0.41	0.39	0.41	—	—
	时间/d	1	5	10	15	20	25
	氨氮	1877	1615	1495	1441	1259	1114
	硝酸盐氮	5.52	6.52	6.28	6.82	6.56	7.07
	亚硝酸盐氮	0.43	0.29	0.34	0.39	0.37	0.33
2# MFC	时间/d	30	35	39	44	49	50
	氨氮	1101	1197	1143	1148	1000	981
	硝酸盐氮	7.19	7.89	8.14	9.21	7.57	8.33
	亚硝酸盐氮	0.42	0.40	0.39	0.39	0.44	0.46
	时间/d	1	5	10	15	20	25
	氨氮	1877	1727	1581	1463	1385	1369
	硝酸盐氮	5.81	6.23	6.19	6.94	6.85	7.95
	亚硝酸盐氮	0.43	0.30	0.43	0.40	0.40	0.43
	时间/d	30	35	39	41	49	50
	氨氮	1296	1449	1337	1191	—	—
	硝酸盐氮	7.70	9.02	7.76	8.45	—	—
	亚硝酸盐氮	0.43	0.45	0.38	0.38	—	—
4# MFC	时间/d	1	5	10	15	20	23
	氨氮	1803	1359	1193	1165	1181	1147
	硝酸盐氮	6.19	6.19	6.06	6.82	7.13	6.94
	亚硝酸盐氮	0.47	0.33	0.38	0.47	0.41	0.40
5# MFC	时间/d	1	5	10	13	20	25
	氨氮	1803	1289	1209	1239	—	—
	硝酸盐氮	6.19	6.41	7.19	6.94	—	—
	亚硝酸盐氮	0.47	0.33	0.30	1.24	—	—

输出电压的减小导致阳极和阴极电化学反应间的平衡出现波动,引起底物 pH 值有小幅变化,这与文献[17]采用环形单室 MFC 处理巧克力生产废水时得到的结果(pH 值由 5.02 增至 5.83)一致。

### 3 结 论

通过改变单室无膜空气阴极 MFC 电极间距,考察电池降解老龄垃圾渗滤液时的产电性能的变化以及老龄垃圾渗滤液中污染物的去除效果,得出

如下主要结论:

1) 当间距为 2 cm 时输出电压最大, 间距为 4 cm 时输出电压最低; 间距为 2 cm 的 MFC 产电周期最长, 间距为 1 和 3 cm 的次之。当电极间距为 1~3 cm 时电池内阻随电极间距的增大而增大, 而当电极间距大于 3 cm 时电池内阻随电极间距的增大而减小; 当间距为 2 cm 时电池的最大功率密度最大, 4 cm 时其值最小。

2) 电池电极间距的变化对电池底物老龄垃圾渗滤液中 COD 去除的影响较大, 电极间距为 2 cm 的 MFC 老龄垃圾渗滤液 COD 去除率最高为 34.9%; 电池间距为 1、2、3、4、5 cm 时的库伦效率分别为 35.6%、27.6%、35.4%、14.9%、14.9%, 氨氮去除率分别为 33.5%、47.7%、36.6%、36.3%、32.9%; 电池对底物中硝酸盐氮、亚硝酸盐去除效果较差, 底物的 pH 值在电池运行过程有所增大。

#### [参考文献]

- [1] Park D H, Zeikus J G. Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 59(1): 58—61.
- [2] Liu Hong, Ramnarayanan R, Logan B E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(7): 2281—2285.
- [3] Liu Hong, 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]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(14): 4040—4046.
- [4] Hu Zhiqiang. Electricity generation by a baffle-chamber membraneless microbial fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(1): 27—33.
- [5] Fan Yanzhen, Hu Hongqiang, Liu Hong. Enhanced Coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration [J]. Journal of Power Sources, 2007, 171(2): 348—354.
- [6] Fan Yanzhen, Han Sun-Kee, Liu Hong, et al. Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size [J]. Energy and Environmental Science, 2012, 5(8): 8273—8280.
- [7] Ahn Y, Hatzell M C, Zhang F, et al. Different electrode configurations to optimize performance of multi-electrode microbial fuel cells for generating power or treating domestic wastewater [J]. Journal of Power Sources, 2014, 249: 440—445.
- [8] Zhuang Li, Yuan Yong, Wang Yueqiang, et al. Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater [J]. Bioresource Technology, 2012, 123: 406—412.
- [9] Zhang Fang, Ahn Y, Logan B E. Treating refinery wastewaters in microbial fuel cells using separator electrode assembly or spaced electrode configurations [J]. Bioresource Technology, 2014, 152: 46—52.
- [10] Liu Hong, Cheng Shaoan, Logan B E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(14): 5488—5493.
- [11] Cheng Shaoan, Liu Hong, Logan B E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(7): 2426—2432.
- [12] 王艳芳, 刘百仓, 郑哲, 等. 电极面积和电极间距对立方体型 MFCs 产电能力的影响 [J]. 可再生能源, 2013, 31(8): 68—74.
- [12] Wang Yanfang, Liu Baicang, Zheng Zhe, et al. Effects of the electrode area and electrode spacing on the electricity generation capacity of MFCs [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(8): 68—74.
- [13] Noori P, Najafpour G. Enhanced power generation in annular single-chamber microbial fuel cell via optimization of electrode spacing using chocolate industry wastewater [J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2016, 63(3): 427—434.
- [14] 程李钰, 徐龙君. 电极面积对老龄垃圾渗滤液为底物的微生物燃料电池性能影响 [J]. 燃料化学学报, 2015, 43(8): 1011—1017.
- [14] Cheng Liyu, Xu Longjun. Effects of electrode surface area on the performance of microbial fuel cells with the aging landfill leachate as substrate [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(8): 1011—1017.
- [15] You S J, Zhao Q L, Jiang J Q, et al. Sustainable approach for leachate treatment: Electricity generation in microbial fuel cell [J]. Environ Science Health A, 2006, 41(12): 2721—2734.
- [16] Puig S, Serra M, Coma M, et al. Microbial fuel cell

- application in landfill leachate treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2-3): 763—767.
- [17] Galvez A, Greenman J, Ieropoulos I. Landfill leachate treatment with microbial fuel cells: Scale-up through plurality [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 5085—5091.
- [18] Borgwardt L, Højgaard L, Carstensen H. Power densities using different cathode catalysts (Pt and Co TMPP) and polymer binders (Nafion and PTFE) in single chamber microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(1): 364—369.
- [19] 陈 青, 周顺桂, 袁 勇, 等. 外阻对污泥微生物燃料电池产电以及有机物降解的影响 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(5): 946—950.
- [19] Chen Qing, Zhou Shungui, Yuan Yong, et al. The effect of different external resistance on electricity generation and organic matter degradation in a sludge microbial fuel cell [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(5): 946—950.
- [20] 叶晔捷, 宋天顺, 徐 源, 等. 微生物燃料电池产电的影响因素 [J]. *过程工程学报*, 2009, 9(3): 526—530.
- [20] Ye Huajie, Song Tianshun, Xu Yuan, et al. Investigation on influential factors in electricity generation of microbial fuel cell [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(3): 526—530.

## EFFECT OF ELECTRODE SPACING ON POLLUTIONS DISPOSAL IN AGED LEACHATE AND ELECTRICITY PRODUCTION BY SINGLE-CHAMBER MEMBRANE-LESS AIR-CATHODE MFC

Hu Jinfeng, Xu Longjun, Xu Yanzhao

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The aging landfill leachate with a volume fraction of 60% was used as substrate of the single-chamber membrane-less air cathode microbial fuel cells, and the pollutions' disposal efficiency and electricity production were studied when the electrode spacing (ES) was 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm and 5 cm, respectively. The results showed that the output voltage and power density of MFC with 2 cm ES were the largest, and those of MFC with 4 cm ES was the lowest. But generally speaking, the effect of ES on the output voltage was not obvious. The internal resistance of MFC increased with the increase of ES as ES was 1-3 cm, but decreased as ES was 3-5 cm. The removal rates of COD and ammonia nitrogen in substrate were the largest as the ES was 2 cm. Coulomb efficiency of 5 microbial fuel cells were 35.6%, 27.6%, 35.4%, 14.9% and 14.9%, respectively. The single-chamber membrane-less air cathode MFC can improve the biodegradability of the aged landfill leachate to a certain extent.

**Keywords:** single-chamber microbial fuel cell; electrode spacing; aging leachate; electricity production characteristics; pollutant removal