

# 电极材料对微生物燃料电池处理 老龄垃圾渗滤液性能的影响

谢 淼, 徐龙君, 胡金凤

(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:** 以碳毡和碳布为电极材料, 老龄垃圾渗滤液为阳极底物构建生物阴极型微生物燃料电池(MFC), 考察碳毡和碳布分别作为阴极和阳极材料时对 MFC 产电性能和老龄垃圾渗滤液主要污染物去除效果的影响。结果表明在阳极材料相同时, 碳毡阴极 MFC 产电性能和老龄垃圾渗滤液中污染物去除效果优于碳布阴极 MFC; 在阴极材料相同时, 碳布阳极 MFC 产电性能和老龄垃圾渗滤液中污染物去除效果优于碳毡阳极 MFC。以碳布为阳极、碳毡为阴极时, MFC 输出电压和功率密度最大(分别为 294 mV、95.31 mW/m<sup>2</sup>)、化学需氧量和氨氮去除率最大(分别为 58.78%、74.38%); 阳极、阴极均为碳布的 MFC 内阻最小(308 Ω), 阳极、阴极均为碳毡的 MFC 内阻最大(347 Ω)。

**关键词:** 微生物燃料电池; 生物阴极; 老龄垃圾渗滤液; 电极材料; 产电特征; 废水处理

**中图分类号:** X703.1

**文献标识码:** A

## 0 引 言

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)是一种利用电化学技术在微生物催化作用下将有机物的化学能转化为电能的反应器。有机物在阳极微生物作用下分解并释放出电子和质子, 它们分别通过外电路和质子交换膜到达阴极并结合, 完成有机物降解和产电过程。根据阴极催化剂的类别可将 MFC 分为生物阴极型 MFC 和非生物阴极型 MFC。生物阴极型 MFC 因成本相对较低、稳定性良好、能实现废水处理等优点而被广泛使用<sup>[1]</sup>。

影响 MFC 性能的主要因素有微生物、底物种类及浓度、阳极和阴极材料<sup>[2,3]</sup>。随着研究的深入, MFC 逐步用于各种生活生产废水, 如食品加工废水、猪粪废水等的处理及产电性能的研究<sup>[4-9]</sup>。2006 年, 尤世界等<sup>[10]</sup>将年轻垃圾渗滤液作为 MFC 底物进行研究, 比较了单室和双室 MFC 的产电性能。此后, 人们开始对垃圾渗滤液 MFC 进行研究。这些研究大多针对年轻垃圾渗滤液, 但对难处理、可生化性差的老龄垃圾渗滤液 MFC 的研究相对很少<sup>[11-14]</sup>。老龄垃圾渗滤液是垃圾在长期(10 a 以

上)的填埋和堆放过程中由于发酵作用、降水淋溶、地表水和地下水渗透而产生的污水<sup>[15]</sup>, 这种污水含有大量溶解性有机污染物、无机物等, 其成分受年份、降水、天气、垃圾类型等影响<sup>[16-18]</sup>, 其可生化性差、极难处理, 是近几年研究的热点。

电极材料直接影响 MFC 电子传输速率、电池的内阻以及微生物的生长, 与 MFC 产电性能及污染物处理效果存在极大关系。生物阴极型 MFC, 阳极和阴极反应都需要微生物的参与, 因此生物电极材料应具有良好的导电性能、耐腐蚀性、生物相容性以及粗糙的表面<sup>[19]</sup>。碳布、石墨、碳毡、纯钛板等均被用作电极材料研究 MFC 性能<sup>[20-22]</sup>。以碳为基础原料的碳毡、碳布、碳纸等碳材料作为 MFC 电极材料能满足 MFC 生物电极材料的基本要求, 且碳材料普遍常见, 因而被广泛使用。本文采用实验室常用的碳材料(碳毡、碳布)作为电极材料, 构建以老龄垃圾渗滤液为底物的生物阴极型 MFC, 考察碳毡和碳布分别作为阳极和阴极电极材料对 MFC 产电性能和废水处理效果的影响, 以期获得最佳电极材料组合。

收稿日期: 2016-09-26

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、环境科学与工程等方面的研究。xulj@cqu.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 老龄垃圾渗滤液采集及组分分析

老龄垃圾渗滤液水样取自重庆市长生桥镇茶园村长生桥垃圾卫生填埋场渗滤液集水井,实验室常温存放 1 a 以上。试验前用去离子水将原始垃圾渗滤液稀释 1 倍,作为试验用渗滤液水样。经检测,试验用渗滤液 pH 值为 8.67,电导率为 23.56 mS/cm,化学需氧量(COD)为 3750 mg/L,氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度为 1715.71 mg/L,硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)浓度为 43.38 mg/L,亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)浓度为 0.26 mg/L。

### 1.2 微生物燃料电池的构建

如图 1 所示,试验采用有机玻璃制 H 型双室微生物燃料电池。阳极室和阴极室的有效容积均为 800 mL,通过法兰(长 50 mm,直径 30 mm)连接,中间由 Nafion117 质子交换膜(有效面积为 7.07 cm<sup>2</sup>)隔开。阳极室密封,阴极室通过鼓风曝气装置提供溶解氧。阴阳极之间通过导线连接 1000 Ω 负载电阻构成外电路,且并联数据采集仪采集电压数据。

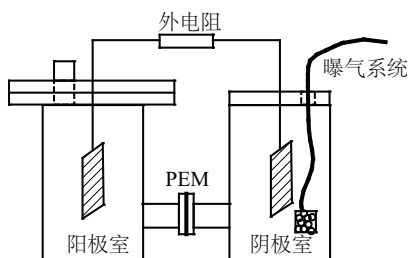


图1 MFC装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MFC

试验设计了 4 套仅电极材料不同的 MFC,分别编号为 1#、2#、3#、4#,其电极材料见表 1。4 套 MFC 电极材料的尺寸均为长 6 cm,宽 5 cm。电极材料和质子交换膜的预处理采用文献方法<sup>[23]</sup>。

表 1 1#~4# MFC 阳极和阴极电极材料

Table 1 Electrode materials of 1#-4# MFCs

电极	1#	2#	3#	4#
阳极	碳毡	碳毡	碳布	碳布
阴极	碳毡	碳布	碳毡	碳布

### 1.3 MFC 接种、启动与运行

阴极室直接采用重庆市沙坪坝区井口污水处

理厂好氧活性污泥接种。取泥液比为 1:1 的好氧活性污泥,加入营养物质,密封并置于水浴锅中 30 ℃ 恒温振荡,数日后得到厌氧活性污泥作为阳极室的接种微生物。

启动阶段,阳极室以 1.6 g/L CH<sub>3</sub>COONa、0.05 g/L NH<sub>4</sub>Cl 为营养物质,阴极室以 1.0 g/L NaHCO<sub>3</sub>、0.2 g/L NH<sub>4</sub>Cl 为营养物质。此外分别加入 12.5 mL/L 痕量金属液和 5 mL/L 维生素液。反应器采用间歇式运行方式。当 MFC 输出电压急剧下降时,表示 MFC 中有机物浓度已不能维持微生物的正常代谢活动,则需要添加新的营养物质。经过 4 个周期后,MFC 输出电压不仅能在较长时间内保持稳定,而且各周期最大输出电压相近,则认为 MFC 启动成功,且电极材料上的生物膜生长成熟。

运行阶段,用老龄垃圾渗滤液作为阳极室基质运行 MFC,并向阴极室投加 1.0 g/L NaHCO<sub>3</sub>、0.2 g/L NH<sub>4</sub>Cl,此外不再向 MFC 投加其他药品以避免干扰。为简化实验操作,电池在室温下运行。

### 1.4 分析方法和电化学监测

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:输出电压由数据采集系统进行测定。该系统每 0.02 秒采集一次,并自动存储每 10 秒的平均电压。电流由欧姆定律式(1)计算。电流密度和功率密度根据式(2)、式(3)分别求得。极化曲线采用文献方法测定<sup>[24]</sup>,电池内阻通过极化曲线计算得到。

$$I = U/R \quad (1)$$

$$I_v = U/V_{An}R \quad (2)$$

$$P_v = U^2/V_{An}R \quad (3)$$

式中, $I$ ——电流,mA; $U$ ——电压,mV; $R$ ——外电阻,Ω; $I_v$ ——电流密度,mA/m<sup>3</sup>; $V_{An}$ ——有效体积,m<sup>3</sup>; $P_v$ ——功率密度,mW/m<sup>3</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MFC 产电特性

#### 2.1.1 MFC 运行电压

图 2 为老龄垃圾渗滤液作为底物的 MFC 运行过程中输出电压随时间的动态变化情况。

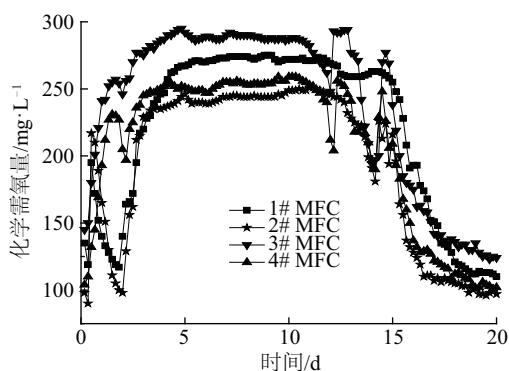


图2 MFC输出电压随时间的变化曲线

Fig. 2 Voltages changing of MFCs with time

启动结束后,将 MFC 底物由厌氧活性污泥更换为老龄垃圾渗滤液,MFC 运行开始。1#~4# MFC 运行至周期结束历时 20 d。图 2 反映了微生物生长的 4 个阶段。底物更换初期,微生物需要适应新的环境,1#~4# MFC 输出电压表现为较大波动。微生物逐步适应外界环境,不断吸收渗滤液中的营养物质,生长和代谢速率加快,表现为电压的迅速回升。第 3 天前,微生物数量达到最高水平且保持稳定,表现为 MFC 进入稳定运行阶段,并持续运行约 12 d。第 15 天,由于 MFC 内部营养物质的消耗及代谢产物的累积,微生物生长受限,出现负增长,MFC 电压逐渐下降。

由图 2 可知,1#~4# MFC 最大电压分别为 275、249、294、259 mV。阳极材料相同时,碳毡阴极 1#、3# MFC 产电性能分别优于碳布阴极 2#、4# MFC。阴极材料相同时,碳毡阳极 1#、2# MFC 性能较碳布阳极 3#、4# MFC 差。MFC 产电机理主要包括底物氧化、阳极还原、电子传输、质子迁移和阴极反应 5 个步骤<sup>[25]</sup>。1#~4# MFC 电压差异主要是由电极材料的不同引起的,涉及到阳极还原、电子传输以及阴极反应 3 个步骤。

碳毡和碳布构成材料相同,均为碳纤维丝,但在排列上有差异。与碳布相比,碳毡排列杂乱、质地疏松、表面孔隙大,但内阻较大<sup>[1]</sup>。电子通过外电路传递到阴极,在阴极表面与  $O_2$  和质子结合,生成水,完成阴极反应,因而阴极电极表面积大小会直接影响阴极反应速率,且影响大于阴极电极内阻。尽管碳毡内阻较大,但其具有较大的表面积,可为微生物生长提供更多的空间,且增加了电极与  $O_2$  的接触面积,有利于阴极反应的进行,因而其产电性

能较好。

阳极材料的不同影响产电过程中阳极还原以及电子传输 2 个步骤,而电极材料的内阻直接影响内部的物质传递,影响 MFC 阳极反应的进行和内部的电子传输<sup>[1]</sup>,因而阳极材料内阻对 MFC 产电性能的影响大于其表面积。碳毡作为阳极材料时,尽管其具有较大的表面积,但其产电性能仍较碳布阳极 MFC 差。

### 2.1.2 功率密度与内阻

MFC 运行稳定期功率密度见图 3,极化曲线见图 4。

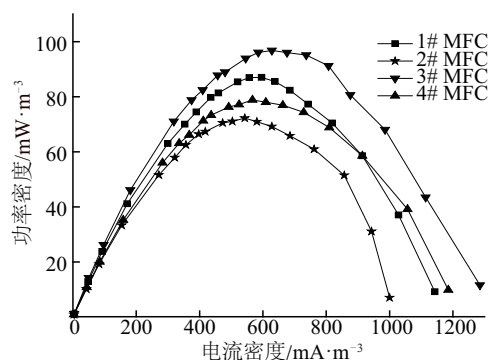


图3 MFC功率密度和电流密度关系

Fig. 3 Power density and current density of MFCs

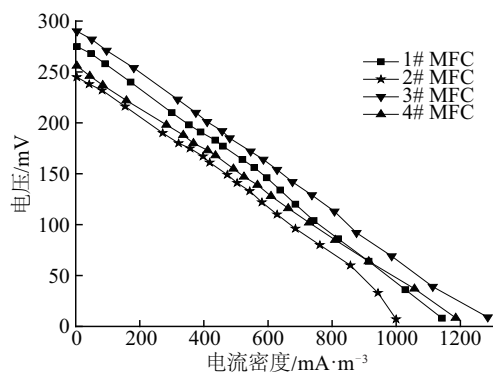


图4 MFC极化曲线

Fig. 4 Polarization curves of MFCs

由图 3 可知,1#~4# MFC 稳定期最大功率密度分别为 87.00、71.62、95.31、78.70  $mW/m^3$ 。实验发现,4 组 MFC 功率密度均不高,这是由于阴极反应特性是限制 MFC 整体功率输出的重要因素<sup>[26]</sup>。实验采用的生物阴极型双室微生物燃料电池以好氧活性污泥中的杂菌作为阴极催化剂,仅利用微生物的呼吸和代谢作用完成 MFC 产电过程,因而电子受体在电极上的还原速率较慢,功率密度不高。

由图 4 计算可得,1#~4# MFC 内阻分别为 347、332、325、308  $\Omega$ 。MFC 内阻由阳极内阻、阴极内阻、膜内阻以及电解液内阻构成<sup>[27]</sup>。1#~4# MFC 电池构型、底物均相同,因此膜内阻和电解液内阻差异可忽略不计。阴阳极的电极材料是影响阳极内阻和阴极内阻的主要因素。1#~4# MFC 内阻分别为 347、332、325、308  $\Omega$ 。1# MFC 内阻大于 3# MFC, 2# MFC 内阻大于 4# MFC,说明阴极材料相同时,作为阳极材料的碳毡内阻大于碳布;1# MFC 内阻大于 2# MFC,3# MFC 内阻大于 4# MFC,说明阳极材料相同时,作为阴极材料的碳毡内阻大于碳布。因此,我们认为碳毡内阻大于碳布,这与文献[1]结论一致。

## 2.2 MFC 废水处理效果影响

### 2.2.1 COD 处理效果

1#~4# MFC 主要污染物去除效果见表 2。化学需氧量作为水质监测的重要指标,反映水体受有机物、硫化物、亚铁盐等还原性物质的污染程度。由表 2 计算可得 1#~4# MFC 老龄垃圾渗滤液 COD 去

除率分别为 48.07%、45.93%、58.78%、53.64%。MFC 运行过程中,底物中的有机物等在厌氧微生物的催化作用下分解,因而老龄垃圾渗滤液的 COD 降低。研究发现,碳布阳极 MFC(3#、4#)COD 去除效果显著优于碳毡阳极 MFC(1#、2#),而碳毡阴极 MFC(1#、3#)COD 去除效果也分别优于碳布阴极 MFC(2#、4#)。有机物降解发生于阳极室,因而阳极材料本身对有机物降解反应有较大影响。根据实验结果,推测碳布阳极去除效果优于碳毡阳极是因为碳布具有更小的内阻,有利于厌氧微生物分解反应的进行,显著提高 COD 去除效果。碳毡作为阴极,能促进 MFC 阴极反应,从而促进阳极池有机物降解,提高 COD 去除效果。

由上述分析可认为:影响老龄垃圾渗滤液 COD 去除效果的原因主要为阳极材料电阻和阴极反应速率。其中,阳极材料电阻是影响 MFC 底物 COD 去除效果的关键因素,阳极材料电阻减小,能较大幅度也增加 COD 去除量。阴极反应速率的变化也会影响 COD 去除效果,但影响较小。

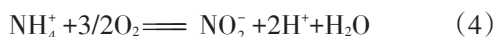
表 2 1#~4# MFC 主要污染物进水、出水浓度变化  
Table 2 Concentration of influent, effluent of 1#~4# MFC wastewater

MFC 编号	极室	位置	pH 值	电导率/ mS·cm <sup>-1</sup>	化学需氧量/ mg·L <sup>-1</sup>	氨氮浓度/ mg·L <sup>-1</sup>	硝酸盐氮 浓度/mg·L <sup>-1</sup>	亚硝酸盐氮 浓度/mg·L <sup>-1</sup>
1#	阳极室	进水	8.67	23.56	3750.00	1715.71	43.38	0.26
		出水	8.85	18.76	1947.39	789.18	38.00	0.33
	阴极室	进水	7.84	10.74	—	499.20	14.58	0.21
		出水	8.35	7.05	—	52.88	17.86	0.69
2#	阳极室	进水	8.67	23.56	3750.00	1715.71	43.38	0.26
		出水	9.00	18.44	2027.71	892.34	40.90	0.34
	阴极室	进水	7.84	10.74	—	499.20	14.58	0.21
		出水	8.20	6.92	—	79.53	15.47	0.38
3#	阳极室	进水	8.67	23.56	3750.00	1715.71	43.38	0.26
		出水	9.04	18.01	1545.78	439.56	41.36	0.50
	阴极室	进水	7.84	10.74	—	499.20	14.58	0.21
		出水	8.23	6.78	—	55.23	21.65	0.82
4#	阳极室	进水	8.67	23.56	3750.00	1715.71	43.38	0.26
		出水	9.06	17.78	1738.55	620.52	42.50	0.27
	阴极室	进水	7.84	10.74	—	499.20	14.58	0.21
		出水	8.17	6.45	—	70.57	17.16	0.64



### 2.2.2 无机氮污染物处理效果

由表 2 可知, 1#~4# MFC 老龄垃圾渗滤液中氨氮、硝酸盐氮浓度降低, 亚硝酸盐氮浓度升高。氨氮在以铵盐或游离氨的形式存在于垃圾渗滤液中。MFC 运行过程中, 反硝化氨氧化菌在缺氧条件下, 有机底物中的  $\text{NH}_4^+$  作为电子供体发生反硝化反应, 转化为  $\text{N}_2$ , 降低了溶液中  $\text{NH}_4^+$  含量。部分  $\text{NH}_4^+$  透过质子交换膜转移到阴极液。此外, 随着 MFC 的运行, 阳极室 pH 升高, 游离氨挥发, 也是降低阳极液  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度的原因之一。经计算, 1#~4# MFC 老龄垃圾渗滤液中氨氮去除率分别为 54.00%、47.99%、74.38%、63.83%。1#~4# MFC 氨氮去除规律与 COD 去除规律相同, 即碳布阳极 MFC 去除率高于碳毡阳极 MFC, 碳毡阴极 MFC 去除率高于碳布阴极 MFC。这也是由于内阻和阴极反应速率共同作用形成的。硝酸盐氮和亚硝酸盐氮除发生反硝化反应外, 在亚硝酸盐菌和硝酸盐菌作用下, 发生硝化反应, 如式(4)、式(5)所示。老龄垃圾渗滤液中  $\text{NH}_2^+\text{-N}$  浓度升高可能是由于高浓度的  $\text{NH}_4^+$  发生硝化反应, 且以式(4)为主, 造成了亚硝酸盐氮的堆积<sup>[28]</sup>。1#~4# MFC 阴极液氨氮浓度降低, 硝酸盐氮和亚硝酸盐氮浓度升高。这是由于 MFC 阴极室使用鼓风机装置通入  $\text{O}_2$ , 在好氧条件下大量  $\text{NH}_4^+$  转化为  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

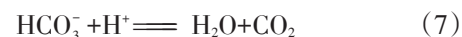


由表 2 计算可得, 1#~4# MFC 系统(阳极和阴极)无机氮去除率为 60.56%、57.51%、75.41%、66.94%。结果表明, 以碳布为阳极、碳毡为阴极的电极材料组合, 更有利于去除 MFC 系统中的无机氮。

### 2.2.3 pH 值和电导率的变化

试验用老龄垃圾渗滤液初始 pH 值为 8.67。经过 20 d 反应, 4 组 MFC 阳极液和阴极液 pH 值均增大。阳极液 pH 值增大的原因可能有: 1) MFC 运行过程中, 老龄垃圾渗滤液中含有大量挥发性脂肪酸等酸性成分在微生物作用下分解, 导致 pH 值增大; 2) 阳极室有机质被降解, 释放出  $\text{H}^+$  和电子,  $\text{H}^+$  通过质子交换膜迁移到阴极, 发生还原反应。阴极室  $\text{O}_2$  充足的情况下, 阳极室  $\text{H}^+$  的产生速率低于消耗速率, 因而阳极液 pH 值升高。阴极室  $\text{H}^+$  与氧气发生

反应式(6), 初始加入营养物质  $\text{NaHCO}_3$  与  $\text{H}^+$  发生反应式(7), 均消耗阴极室  $\text{H}^+$ , 使阴极液 pH 值增大。



电导率反映溶液中的离子浓度。4 组 MFC 阳极室和阴极室电导率均下降, 表明阳极液和阴极液中的离子浓度减小。这是由于 MFC 运行过程中离子被大量消耗所致。

## 3 结 论

本文研究以碳毡和碳布分别作为阳极和阴极电极材料的生物阴极型 MFC 的产电特性和对 COD、无机氮等主要污染物的处理效果, 得出以下结论:

1) 碳布阳极 MFC 产电性能(输出电压、功率密度)和对 COD、无机氮去除效果好于碳毡阳极 MFC; 碳毡阴极 MFC 产电性能和对 COD、无机氮去除效果好于碳布阴极 MFC。其中, 以碳布为阳极、碳毡为阴极的 3#MFC 输出电压和功率密度最大, 分别为 294 mV、95.31 mW/m<sup>3</sup>; 老龄垃圾渗滤液 COD 和系统无机氮去除率最大, 分别为 58.78%、75.41%。

2) 阴阳极均为碳布的 MFC 内阻最小(308  $\Omega$ )、阴阳极均为碳毡的 MFC 内阻最大(347  $\Omega$ )。

3) 4 组 MFC 电极材料组合中, 以碳布为阳极、碳毡为阴极的组合 MFC 性能最佳。

4) 阴极电极材料是影响 MFC 产电性能的主要因素; 阳极材料是影响 MFC 污染物去除效果的关键因素。

### [参考文献]

- [1] Wei Jingcheng, Liang Peng, Huang Xia. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells[J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (20): 9335—9344.
- [2] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, et al. Microbial fuel cells: Methodology and technology[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40 (17): 5181—5192.
- [3] Li Zhuang, Yu Zheng, Zhou Shungui, et al. Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment[J]. Bioresource Technology,

- 2011, 106: 82—88.
- [4] Oh S E, Logan B E. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technology[J]. *Water Research*, 2005, 39(19): 4673—4682.
- [5] Min Booki, Kim Jung-Rae, Oh Sang-Eun, et al. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells[J]. *Water Research*, 2005, 39(20): 4961—4968.
- [6] 王 鑫, 冯玉杰, 曲友鹏, 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.
- [6] Wang Xin, Feng Yujie, Qu Youpeng, et al. Effect of temperature on performance of microbial fuel cell using beer wastewater[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(11): 3128—3132.
- [7] 卢 娜, 周 奔, 邓丽芳, 等.  $\text{MnO}_2$  为阴极催化剂的微生物燃料电池处理淀粉废水研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17: 65—72.
- [7] Lu Na, Zhou Ben, Deng Lifang, et al. Starch processing wastewater treatment using a continuous microbial fuel cell with  $\text{MnO}_2$  cathodic catalyst[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17: 65—72.
- [8] Katuri K P, Enright A M, Flaherty V, et al. Microbial analysis of anodic biofilm in a microbial fuel cell using slaughter house wastewater[J]. *Bioelectro Chemistry*, 2010, 87: 164—171.
- [9] 樊立萍, 苗晓慧. 微生物燃料电池处理餐饮废水及同步发电性能研究[J]. *燃料化学学报*, 2014, 42(12): 1506—1512.
- [9] Fan Liping, Miao Xiaohui. Study on the performance of microbial fuel cell for restaurant wastewater treatment and simultaneous electricity generation[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2014, 42(12): 1506—1512.
- [10] You Shijie, Zhao Qingliang, Jiang Junqiu, et al. Sustainable approach for leachate treatment: Electricity generation in microbial fuel cell[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2006, 41(12): 2721—2734.
- [11] Greenman J, Gálvez A, Giusti L, et al. Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: Comparison with a biological aerated filter[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2009, 44(2): 112—119.
- [12] 谢 珊, 梁 鹏, 李 亮, 等. 两瓶型微生物燃料电池处理垃圾渗滤液的研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(15): 16—20.
- [12] Xie Shan, Liang Peng, Li Liang, et al. Landfill leachate treatment with two-bottle H type microbial fuel cell[J]. *China Water and Wastewater*, 2011, 27(15): 16—20.
- [13] Özkaya B, Cetinkaya A Y, Cakmkei M, et al. Electricity generation from young landfill leachate in a microbial fuel cell with a new electrode material[J]. *Bioprocessing and Biosystems Engineering*, 2013, 36: 399—405.
- [14] 严 丰, 黄少斌, 许玫英, 等. 微生物燃料电池处理晚期垃圾渗滤液的特性研究[J]. *工业水处理*, 2013, 33(1): 52—55.
- [14] Yan Feng, Huang Shaobin, Xu Meiyang, et al. Treatment of mature landfill leachate by microbial fuel cell[J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33(1): 52—55.
- [15] Li Yan, Lu Anhuai, Ding Hongrui, et al. Microbial fuel cells using natural pyrrhotite as the cathodic heterogeneous Fenton catalyst towards the degradation of biorefractory organics in landfill leachate[J]. *Electrochemistry Communications*, 2010, 12(7): 944—947.
- [16] Kulikowska D, Klimiuk E. The effect of landfill age on municipal leachate composition[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(13): 5981—5985.
- [17] Khattabi H, Aleya L, Mania J. Changes in the quality of landfill leachates from recent and aged municipal solid waste[J]. *Waste Management and Research*, 2002, 20(4): 357—364.
- [18] Kjeldsen P, Christophersen M. Composition of leachate from old landfills in Denmark[J]. *Waste Management and Research*, 2001, 19(3): 249—256.
- [19] Zhou Minghua, Chi Meiling, Luo Jianmei, et al. An overview of electrode materials in microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(10): 4427—4435.
- [20] 张晓艳, 腾洪辉. 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*, 2011, 49(6): 1162—1166.
- [20] Zhang Xiaoyan, Teng Honghui. Electricity generation characteristics of microbial fuel cell with landfill leachate as fuel[J]. *Journal of Jilin University*, 2011, 49(6): 1162—1166.
- [21] 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.
- [21] 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.
- [22] 周 玲, 李 萍, 颜幼平. 微生物燃料电池阳极碳材料对产电性能的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(4): 647—650.
- [22] Zhou Ling, Li Ping, Yan Youping. Effect of microbial fuel cell anode carbon material on MFC electrogenesis [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38 (4): 647—650.
- [23] Fan Liping, Miao Xiaohui. Study on the performance of microbial fuel cell for restaurant wastewater treatment and simultaneous electricity generation [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2014, 42 (12) : 1506—1512.
- [24] 曹 琳, 雍晓雨, 周 俊, 等. 以沼液为原料的微生物燃料电池产电降解特性[J]. *化工学报*, 2014, 65 (5): 1900—1905.
- [24] Cao Lin, Yong Xiaoyu, Zhou Jun, et al. Electrical and degradation characteristics of microbial fuel cell using biogas slurry as substrate [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65 (5): 1900—1905.
- [25] 卢 娜, 周顺桂, 倪晋仁. 微生物燃料电池的产电机理[J]. *化学进展*, 2008, 20(7/8): 1233—1240.
- [25] Lu Na, Zhou Shungui, Ni Jinren. Mechanism of energy generation of microbial fuel cell [J]. *Progress in Chemistry*, 2008, 20(7/8): 1233—1240.
- [26] Logan B E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2009, 7(5): 375—381.
- [27] Fan Yanzhen, Sharbrough E, Liu Hong. Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cells [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(21): 8101—8107.
- [28] 周少奇. 氨氮厌氧氧化的微生物反应机理[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2000, 28(11): 16—19.
- [28] Zhou Shaoqi. Microbial biochemical reactions of anaerobic oxidation of ammonium [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2000, 28(11): 16—19.

## EFFECTS OF ELECTRODE MATERIALS ON MICROBIAL FUEL CELLS' PERFORMANCE WITH TREATED-AGING LANDFILL LEACHATE AS CATHOLYTE

Xie Miao, Xu Longjun, Hu Jinfeng

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

**Abstract:** Bio-cathode microbial fuel cell (MFC) using carbon felt and carbon cloth as electrode materials and treated-aging landfill leachate as anolyte were investigated for their electricity production and treatment performance. As the anode materials are same, the electricity production and treatment performance of the MFC using carbon felt as cathode materials are both better than those of the MFC using carbon cloth as cathode materials. Meanwhile, the electricity production and treatment performance of the MFC using carbon cloth as anode materials are better than those of the MFCs using carbon felt-cathode MFC when the cathode materials are same. The MFC, used carbon cloth as anode material and carbon felt as cathode material, harvests maximum voltage and power density (294 mV, 95.31 mW/m<sup>3</sup>), and the highest chemical oxygen demand and ammonia removal rate (58.78% , 74.38% ). The minimum internal resistance is 308  $\Omega$  as carbon cloth is used as electrodes, while the maximum internal resistance is 347  $\Omega$ , when carbon felt is used as electrodes.

**Keywords:** microbial fuel cell; bio-cathode; aging landfill leachate; electrode material; electricity production; wastewater treatment