

文章编号: 0253-2409(2015)08-1011-07

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

程李钰, 徐龙君

(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: 构建生物阴极型双室微生物燃料电池, 处理老龄垃圾渗滤液。研究了阳极与阴极面积比值对微生物燃料电池产电能力和对老龄垃圾渗滤液处理效果的影响。结果表明, 阳极与阴极面积比为 1:2、2:2、2:1 的 3 组生物阴极型微生物燃料电池输出电压分别为 408、452、396 mV, 最大电功率密度分别为 145.73、237.65、136.50 mW/m², 内阻分别为 350、200、400 Ω, COD 的去除率分别为 21.18%、20.20%、22.31%。3 组微生物燃料电池运行 30 d 后, 垃圾渗滤液中氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮浓度均下降, 其中, 氨氮去除率分别为 80.88%、73.61% 和 66.17%, 其去除效果与产电性能相关。

关键词: 微生物燃料电池; 老龄垃圾渗滤液; 电极面积; 产电性能

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A

Effects of electrode surface area on the performance of microbial fuel cells with the aging landfill leachate as substrate

CHENG Li-yu, XU Long-jun

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

Abstract: Bio-cathode microbial fuel cells (MFCs) were built to treat the aging landfill leachate; the effect of electrode surface area on the aging landfill leachate treatment and electrical performance of MFCs was investigated. The results show that for three sets of bio-cathode MFCs with the ratios of anode area to cathode area being 1:2, 2:2 and 2:1, the stable maximum output voltages are 408, 452 and 396 mV, respectively, with the maximum electric power density of 145.73, 237.65 and 136.50 mW/m², the resistance of 350, 200 and 400 Ω, and COD removal rate of 21.18%, 20.20% and 22.31%, respectively. After running for 30 days, the concentration of ammonia, nitrate and nitrite nitrogen in landfill leachate is decreased; the ammonia removal rates for the three sets of MFCs are 80.88%, 73.61% and 66.17%, respectively, which is related to the electricity generation of MFCs.

Key words: microbial fuel cell; aging landfill leachate; electrode area; electricity generation

微生物燃料电池 (Microbial Fuel Cell, 简称 MFC) 是一种既能处理污水又能产生电能的反应器^[1,2]。目前, 常见的双室微生物燃料电池主要分为以化学药品或 Pt 等惰性金属作阴极催化剂的非生物阴极型 MFCs^[3] 和以微生物作为阴极催化剂的生物阴极型 MFCs^[4,5]。近年来, 生物阴极型 MFC 由于其建造成本相对便宜, 并且阳极室、阴极室均具有去除底物污染物的能力, 成为了研究热点^[6,7]。

探索微生物燃料电池运行机制和机理, 对研究生物阴极型 MFC 具有重要意义^[8]。电极面积是影响 MFC 运行性能的重要因素^[9,10], 研究阳极与阴极面积的比值对双室微生物燃料电池的产电性能和底物处理能力的影响, 可探究阳极室、阴极室构造参数对电池性能的影响以及探讨 MFC 的运行机制, 为进一步改进电池构造、有效提升 MFC 的性能提供

参考。目前, 对电极面积的研究不够深入和全面。Ghangrekar 等^[11]以污水作为底物的 MFC 实验中, 研究单个电极面积对 MFC 产电性能的影响, 在阳极面积为 70.21 cm² 时得到功率密度最大为 10.13 mW/m²。但实验中没有指出改变阳、阴极面积对电池运行机制和机理的影响。王艳芳等^[12]研究电极面积对 MFC 性能影响, 在阳极面积分别为 15.32、25.00、26.00 和 33.68 cm² 时, 输出电压随着阳极表面积的增加而先增大后减小; 在阴极面积分别为 45.97、61.29 和 76.62 cm² 时, 输出电压随着阴极表面积的增加而增加。实验探究了电极面积对输出电压、电功率的改变, 但是未同时探究其对 COD 降解率、氨氮浓度等底物处理效果的影响。

与此同时, 老龄垃圾渗滤液因其组分复杂、可生化性差, 一直是污水处理研究中的难点^[13]。研究表

收稿日期: 2015-02-02; 修回日期: 2015-04-08。

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

联系作者: 徐龙君 (1963-), 教授, 主要从事安全科学与工程、环境科学与工程等方面的教学与科研工作。Tel: 023-65106873; E-mail:

xulj@cqu.edu.cn。

明,利用 MFC 技术处理老龄垃圾渗滤液极具前景^[14]。实验构建了低成本运行条件的双室 H 型 MFC,以老龄垃圾渗滤液作为阳极底物,阴极采用微生物作为催化剂,在普通碳毡作电极、无缓冲剂条件下,研究阳极与阴极面积的不同比值时对 MFC 产电能力和对老龄垃圾渗滤液的处理效果的影响,对探究生物阴极型 MFC 运行的机制与机理和对有效处理老龄垃圾渗滤液有积极的推动作用。

1 实验方法

1.1 MFC 实验装置

实验采用 3 套相同的有机玻璃制 H 型双室微生物燃料电池装置。阳极室与阴极室有效容积相同,均为 800 mL。两室以 Nafion 117 质子交换膜(Proton Exchange Membrane,简称 PEM;有效面积为 7.07 cm²,美国杜邦公司)分隔,通过圆柱法兰(长 50 mm、直径 30 mm)连接。除采用橡胶塞密封的进出水口、导线引出孔外,阳极室不设置其他孔口,以达到密封效果。阴极室呈半封闭状态以减缓阴极液的蒸发。并且,阴极室设置与大气相通的排气、曝气口,用于气体排出和曝气装置向阴极室曝气。图 1 为装置结构示意图。

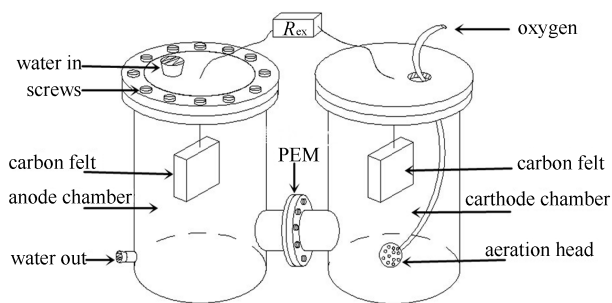


图 1 微生物燃料电池装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of the microbial fuel cell

3 套装置分别编号为 1#、2#、3#,均采用长方体型碳毡作为阳极电极与阴极电极。电极表面积分为两种:0.005 3 m²(长 0.045 m,宽 0.04 m,高 0.01 m)与 0.010 6 m²(长 0.088 m,宽 0.045 m,高 0.01 m)。阳极面积与阴极面积的不同比值是 3 套实验装置的区别。1#、2#、3#装置阳极面积与阴极面积的比值分别为 1:2、2:2、2:1。碳毡与质子交换膜的预处理采用文献方法^[15]。装置阳极与阴极之间通过铜丝连接一个 1 500 Ω 的外电阻以方便测量输出电压,并提供利于微生物生长的小电流环境。

1.2 接种与运行

接种微生物来自重庆市井口污水处理厂曝气池

的好氧污泥。将污泥加入纯水配制成泥液比为 1:1 的悬浊液,再将其分为两份。一份用于阴极室接种,即在室温(20 ℃左右)且保持连续对液体曝气条件下,用该悬浊液浸泡阴极碳毡两周;另一份加入少量 Na₂S 作为除氧剂以去除悬浊液中的氧并密封放置于 30 ℃恒温水浴中振荡培养一周,该温度为相同实验条件下驯化厌氧污泥最佳温度^[16],所得厌氧污泥上清液用于阳极室接种,即在室温下用该液体浸泡阳极碳毡并保持密封状态一周。

阳极室底物取自重庆市长生桥垃圾填埋场渗滤液集水井中存放时间超过 1 年的老龄垃圾渗滤液。该渗滤液 pH 值为 8.40,COD、氨氮(NH₃ 和 NH₄⁺ 形态的氮)、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮平均浓度分别为 6 975.81、3 552.50、432.50 和 0.78 mg/L。为利于阳极微生物生长,实验中将老龄垃圾渗滤液稀释一倍。稀释后的垃圾渗滤液 COD、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮平均浓度分别为 3 346.77、1 784.50、233.00 和 0.38 mg/L,pH 值为 8.38。

阳极室除稀释后的老龄垃圾渗滤液外,不再加入其他药品以避免干扰。在电池初始运行期,每隔 1 d 向阴极室内投入 1.64 g/L NaAC 作为阴极微生物的营养源以利于输出电压快速上升,直到输出电压上升到稳定值,即输出电压不再随着 NaAC 的加入而改变后停止加料。实验过程中,为了考察 MFC 运行对阳极液、阴极液 pH 值的变化,阳极池与阴极池中均不加入缓冲剂 KH₂PO₄ 和 K₂HPO₄。为保证实验效果并简化实验操作,电池运行在室温下进行。

1.3 数据测量与计算

化学需氧量(COD/(mg·L⁻¹))、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮浓度采用标准方法^[17]进行测定,pH 值采用 pH 计测量。

实验中 MFC 产生的电压(即输出电压, U /mV)由数据采集仪(Agilent 34970A,美国)测定。装置启动后,数据采集仪每 0.002 s 采集一次数据,并将每 5 s 内的电压平均值导入电脑记录保存。电池内阻由极化曲线的斜率确定;实验选用的外电阻(R_{ex})为 1 500 Ω,根据欧姆定律,可计算得出输出电流(I /mA)。电流密度(I_v /(mA·m⁻³))表征阳极室单位体积产生的电流,用方程(1)计算;阳极室体积功率密度(P_v /(mW·m⁻³))用方程(2)计算:

$$I = \frac{V}{V_{An} R_{ex}} \quad (1)$$

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

式中, V_{An} 为阳极室有效体积, m^3 。

2 结果与讨论

2.1 阳极与阴极面积比对微生物燃料电池输出电压的影响

1#、2#、3# 反应器的阳极面积与阴极面积比分别为 1:2、2:2、2:1, 其输出电压 U 见图 2。由图 2 可知, 启动 MFC 后, 3 套反应器经过约 20 d 的运行, 均达到稳定状态。稳定期 1#、2#、3# 微生物燃料电池平均稳定输出电压 U 值分别为 408、452 和 396 mV, 即在实验条件下, 输出电压呈现随着电极面积增加而增大的趋势, 阳极表面积与阴极表面积比值为 2:2 的 2# 反应器输出电压最大。

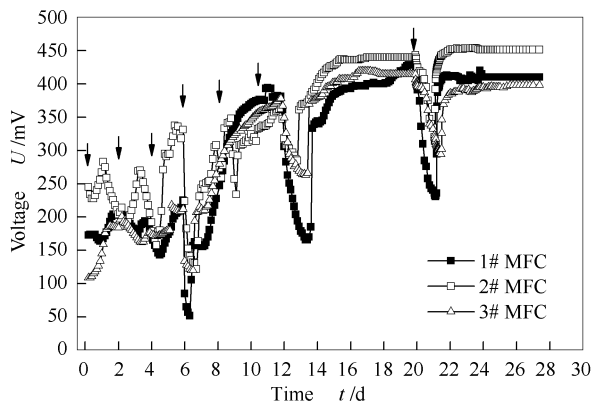


图 2 不同电极比值的 MFC 输出电压随时间的变化

Figure 2 Output voltages of the MFCs with different anode to cathode surface area ratios; the arrow means the addition of NaAC in the cathode chamber

由图 2 还可知, 微生物对生物阴极 MFC 氧化还原反应起着不可替代的作用^[18,19], 对于生物阴极微生物燃料电池, 增加阴极表面积即增加了在阴极上具有催化氧化还原作用的微生物, 从而影响了电池的运行, 即表现为提高了 MFC 的输出电压。阳极表面作为产电微生物的生长区域并同时充当电子传递的场所, 阴极表面作为阴极催化微生物的生长区域, 同时也是通过外电路传递至阴极的电子与电子受体——溶解氧结合的场所。阳极与阴极应存在一定的匹配关系, 即一单位的阳极产电微生物作用并传递 1 个电子至阴极, 应有一定量的阴极微生物能够催化促使这 1 个电子与电子受体结合, 完成电子传递。在 MFC 启动初期, 阳极、阴极微生物均处于驯化中, 输出电压 U 主要受到微生物生长情况的影响, 阳极与阴极的匹配关系由两种微生物中数量最少的一方确定, 而电极作为微生物生长的区域, 其面积大小反映了初期接种微生物的多少, 故输出电压

在 MFC 启动初期表现为受到电极中最小表面积电极的影响。这就解释了在实验开始 0~7 d, 电极中最小面积相等的 1# 与 3# 反应器输出电压 U 值相近, 而具有较大最小电极面积的 2# 反应器输出电压 U 高于 1# 和 3# 反应器。在实验进行 7 d 以后, 2# 与 1#、3# 输出电压差距缩小, 1# 与 3# 输出电压出现差距。此现象表明, 随着 MFC 运行趋于稳定, 微生物驯化达到稳定生长期, 输出电压 U 不只受到该匹配关系的影响。

2# 反应器的平均稳定输出电压比 1# 反应器增大 10.8% (2 个反应器阴极表面积相同, 但 2# 反应器阳极表面积为 1# 反应器的 2 倍), 2# 反应器的输出电压比 3# 反应器增大 14.1% (2 个反应器阳极表面积相同, 但 2# 反应器阴极表面积为 3# 反应器的 2 倍)。这表明阳极电极面积与阴极电极面积对 MFC 的输出电压均存在影响, 当增加相同面积时, 增大阴极面积比增大阳极面积产生的影响较大。

2.2 阳极与阴极面积比对微生物燃料电池输出功率的影响

实验 MFC 稳定期 (20~28 d) 的输出功率见图 3。

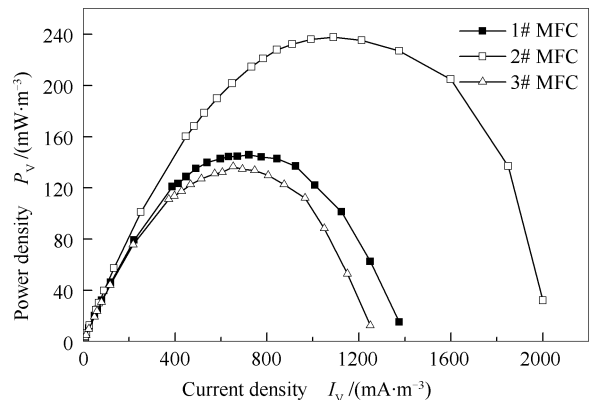


图 3 1#、2#、3# MFC 功率密度和电流密度的关系

Figure 3 Relation between power density and current density for three sets of MFCs

由图 3 可知, 稳定期 1#、2#、3# MFC 的最大电功率密度 P_V 分别为 145.73、237.65 和 136.50 mW/m^3 ; 最大电功率密度随着电极面积增加而增加。当 2# 反应器与 1# 反应器阴极表面积相同, 阳极表面积为 1# 反应器的 2 倍时, 最大电功率密度 P_V 增加 63.08%。当 2# 反应器与 3# 反应器阳极表面积相同, 阴极表面积为 3# 反应器的 2 倍时, 最大电功率密度 P_V 增加 74.10%。这表明阳极电极面积与阴极电极面积均对 MFC 的最大电功率密度存在影响。当增加相同的面积时, 增大阴极面积

比增大阳极面积对产电的影响更大。

2.3 阳极与阴极面积比对微生物燃料电池内阻的影响

实验 MFC 稳定期(20~28 d)的极化曲线见图 4。

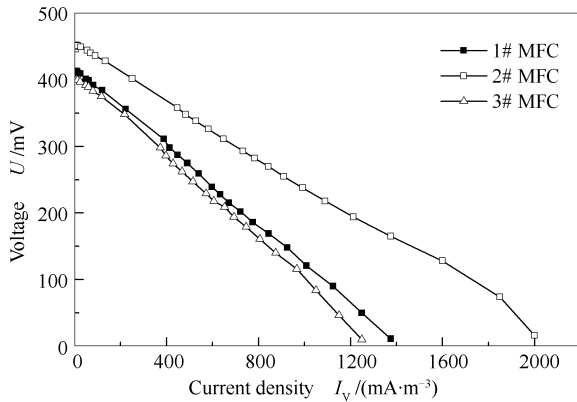


图 4 1#、2#、3# MFC 的极化曲线

Figure 4 Polarization curves for three sets of MFCs

根据极化曲线计算出 3 套 MFC 内阻分别为 350、250、400 Ω 。在实验中,内阻随着电极面积增加而减少。阳极与阴极面积比值为 2:2 的 2# 反应器内阻最佳。当 2# 反应器与 1# 反应器阴极表面积相同,阳极表面积为 1# 反应器的 2 倍时,内阻降低 28.57%。当 2# 反应器与 3# 反应器阳极表面积相同,阴极表面积为 3# 反应器的 2 倍时,内阻降低 37.5%。

实验中电极面积对 MFC 输出电压、输出功率和内阻的影响均表明,阳极电极面积与阴极电极面积均对 MFC 产电存在影响,当增加相同面积时,增大阴极面积比增大阳极面积产生的影响较大。实验分析认为,电子被阴极室接收的程度是决定燃料电池产电量的重要因素。在生长于阳极表面的产电菌作用下,有机物释放出电子,并通过外电路传递至阴极,附着在阴极的电子通过与电子受体——溶解氧结合,完成电荷被阴极室接受。在阴极室氧气充足的情况下,增加阴极表面积,促进电子与电子受体的结合,提高电子被阴极室接受的程度,从而增大了功率密度。阳极室产生电子的能力同样影响电池的产电量,但是电子受到产电菌生长情况和传递的影响,使得通过增加阳极表面积而增多产电微生物不能达到对产电能力理想化的提升。

2.4 阳极与阴极面积比对垃圾渗滤液中主要污染物去除效果的影响

实验采用老龄垃圾渗滤液的初始 pH 值为 8.38。经过 30 d 的反应,3 组 MFC 阳极池的 pH 值

均呈小幅度下降后达到稳定,pH 值分别为 8.14、8.08、8.18;阴极池的 pH 值均上升后达到稳定,pH 值分别为 8.37、8.46、8.31。3 组反应器 pH 值的变化主要表现为稳定输出电压越高的 MFC,阳极室 H^+ 浓度越大,阴极室 H^+ 浓度越小。这是因为在双室 MFC 产电过程中阳极室有机质在微生物作用下被降解,理论上释放出等量的 H^+ 与电子,电子由阳极通过外电路至阴极,从而产生输出电流 I ; H^+ 通过质子交换膜至阴极室,与 OH^- 生成水,达到反应电荷平衡。当外电阻恒定时,输出电压 U 越大,则输出电流 I 越大,即阳极室底物释放并通过外电路的电子越多,与之同时释放的 H^+ 也越多且释放速率高于其转移至阴极室的速率^[20],此外底物在微生物作用下被分解成小分子物质而产生酸化,故阳极室 H^+ 浓度越大;同时,为了保证高输出电流下产电反应的电荷平衡,移动到阴极室中的 H^+ 与 OH^- 结合生成水的反应越剧烈,消耗掉大量 H^+ ,故阴极室中 H^+ 浓度下降。

微生物燃料电池运行过程中,老龄垃圾渗滤液的 COD 随时间的变化见图 5,其氨氮浓度、硝酸盐氮浓度、亚硝酸盐氮浓度随时间的变化见表 1。

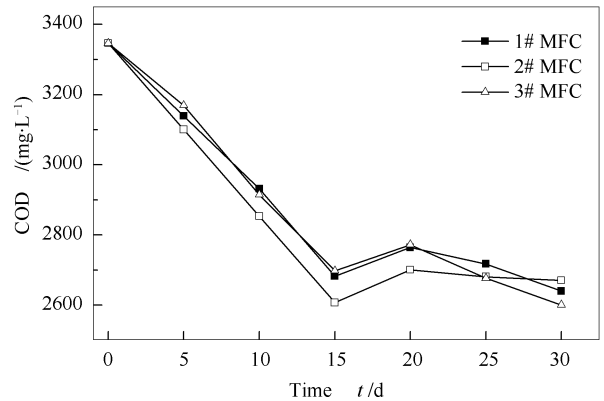


图 5 老龄垃圾渗滤液的 COD 随时间的变化

Figure 5 Changes in COD value of aging landfill leachate with time for three sets of MFCs

由图 5 可知,0~20 d 下 MFC 处于启动阶段,3 套反应器对老龄垃圾渗滤液的 COD 分别降解了 582.54、646.28、574.53 mg/L,该阶段 COD 的降解量分别占实验全过程总降解量的 82.45%、95.59%、76.94%,这说明 3 套反应器处理 COD 主要是在启动阶段进行的。实验开始后的 20~28 d, MFC 处于稳定产电阶段,此阶段内 3 套装置对老龄垃圾渗滤液的 COD 分别降解了 123.23、29.83、172.23 mg/L,且降解速率比实验初期明显变缓。在整个实验过程中,3 套反应器对老龄垃圾渗滤液

COD 的降解率分别为 21.18%、20.20% 和 22.31%，降解程度有限。实验还表明，稳定输出电压越高的 MFC，老龄垃圾渗滤液的 COD 降解率越低。其主要原因为阳极室中同时存在多种微生物，其中，一类微生物将底物中有机质分解成小分子、并产生 CO_2 和水，降低了底物的 COD；另一类微生物催化底物

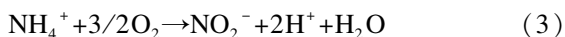
释放出 H^+ 与电子，电子由阳极通过外电路传递至阴极，维持 MFC 的输出电流^[21]；实验是以老龄垃圾渗滤液作为底物和微生物营养源，有限的营养源使得不同种类的微生物之间存在竞争，较高的输出电压表明产电微生物在竞争中处于优势，而较低的 COD 降解量表明降解 COD 微生物在竞争中处于劣势。

表 1 老龄垃圾渗滤液经过不同反应时间后的氨氮浓度、亚硝酸盐氮浓度、硝酸盐氮浓度
Table 1 Ammonia, nitrate and nitrite concentration of aging landfill leachate after different reaction times

		Concentration $\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$						
		0 d	5 d	10 d	15 d	20 d	25 d	30 d
Ammonia	1# anode	1 784.50	1 460.50	1 241.25	1 104.00	925.50	688.00	341.25
	1# cathode	91.00	140.70	100.50	81.50	7.10	6.50	4.50
	2# anode	1 784.50	1 513.50	1 416.25	1 407.25	1 236.50	754.75	471.00
	2# cathode	91.00	98.20	73.20	58.70	40.20	5.30	7.50
	3# anode	1 784.50	1 484.25	1 325.75	1 234.50	1 166.25	870.50	603.75
	3# cathode	91.00	106.90	96.40	64.00	6.10	4.90	7.90
Nitrate	1# anode	233.00	294.00	—	231.00	192.50	200.00	188.00
	1# cathode	17.75	26.20	—	45.00	42.00	107.10	327.50
	2# anode	233.00	273.00	—	229.50	197.50	220.00	195.00
	2# cathode	17.75	23.20	—	33.90	38.50	49.40	331.90
	3# anode	233.00	276.00	—	231.00	202.00	198.00	195.00
	3# cathode	17.75	30.30	—	43.20	39.30	62.40	284.00
Nitrite	1# anode	0.38	0.40	—	0.35	0.25	0.33	0.33
	1# cathode	0.00	0.18	—	1.58	15.48	28.78	0.43
	2# anode	0.38	0.33	—	0.30	0.25	0.28	0.28
	2# cathode	0.00	0.08	—	0.40	31.73	23.95	0.93
	3# anode	0.38	0.35	—	0.38	0.28	0.30	0.28
	3# cathode	0.00	0.18	—	1.38	5.85	29.03	0.78

—: data are not gotten

由表 1 可知，反应 30 d 后，3 套反应器阳极室与阴极室总氨氮去除量分别为 1 223.80、1 117.60 和 1 101.08 mg，去除率分别为 81.56%、74.49% 和 67.39%；阳极室老龄垃圾渗滤液氨氮去除量分别为 1 154.60、1 050.8 和 944.6 mg，去除率分别为 80.88%、73.61% 和 66.17%。阳极室氨氮浓度、硝酸盐浓度、亚硝酸盐氮浓度均下降；阴极室氨氮浓度下降、亚硝酸盐氮浓度和硝酸盐氮浓度上升，这说明阴极室具有去除氨氮的效果，并且阴极室发生了反应 (3) 和 (4)^[22] 导致了硝酸盐氮与亚硝酸盐氮的增加。



实验开始后的 0 ~ 20 d，MFC 处于启动阶段，3 套反应器阳极室的氨氮透过质子交换膜转移到阴极室的质量分别为 5.68、32.16 和 4.88 mg；根据反应 (3)、(4) 和质量守恒，理论上阴极室每增加

1 mol NO_3^- 或 1 mol NO_2^- ，则阳极室有 1 mol NH_4^+ 被转化，故由阴极室 NO_3^- 、 NO_2^- 增量确定 3 套反应器转化阳极室氨氮质量分别为 13.72、17.78 和 10.35 mg。3 套反应器阳极室转移与转化的氨氮质量总和明显小于阳极室氨氮去除质量：687.20、438.40 和 494.6 mg。此结果说明，阳极室氨氮的去除不仅为向阴极室转移或转化成硝酸盐氮、亚硝酸盐氮，还存在在阴极室将 NH_4^+ 变为气体排出，且在 MFC 启动阶段，3 套反应器以该手段去除的氨氮量分别占阳极室氨氮总去除量的 97.18%、88.61%、96.92%。

实验开始后的 20 ~ 28 d，MFC 处于稳定产电阶段，3 套反应器阴极室氨氮浓度持续下降并稳定在 10 mg/L 以下，说明由阳极室转移至阴极室的氨氮减少或阴极室去除氨氮能力增加；同时阴极室硝酸盐氮浓度均显著增加的现象表明阴极室反应 (3) 和 (4) 加剧，3 套反应器转化阳极室中的氨氮别为

62.62、64.36 和 52.14 mg,明显小于 3 套反应器阳极室总氨氮减少量 467.40、612.40 和 450.00 mg,实验分析此阶段阳极室氨氮的去除仍然为向阴极室转移或转化成硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、以及在阴极室将 NH_4^+ 变为气体排出。实验现象表明,阳极室氨氮向阴极室转化为硝酸盐氮、亚硝酸盐氮越多的 MFC,其稳定输出电压越高。分析其原因为电子在阴极发生反应(5)时,会产生 OH^- 。通常情况下, OH^- 与从阳极室透过质子交换膜来到阴极室的 H^+ 发生反应(6)。但是反应(3)增大了 H^+ 浓度,为了提供更多的 OH^- 满足反应(6)的发生,反应(5)增强,即增加了电子与电子受体溶解氧的结合,增多了有效电子数量,从而提高了产电性能。



3 结论

实验构建 3 组电极比值分别为 1:2、2:2、2:1 的生物阴极型微生物燃料电池,探索在较低成本运行

条件下,MFC 产电性能和对老龄垃圾渗滤液的处理效果的影响;并利用改变电极面积,探索生物阴极型 MFC 的运行机制和机理。结果表明,在一定面积范围内增加相同的电极表面积,增大阴极表面积比增大阳极表面积更有利于 MFC 产电性能的提高。阴极微生物作为催化剂,其数量随着阴极面积的增加而增加,其会对电池运行产生影响。3 组 MFC 中,阳极与阴极面积比值为 2:2 的 MFC 输出电功率密度最大为 237.65 mW/m^3 ,内阻最小为 200Ω 。生物阴极型 MFC 对阳极底物和阴极液的污染物均具有处理作用。3 组 MFC 对老龄垃圾渗滤液 COD 的去除率分别为 21.18%、20.20%、22.31%;老龄垃圾渗滤液氨氮去除率分别为 80.88%、73.61%、66.17%。阳极室氨氮的去除由向阴极室转移或转化成硝酸盐氮、亚硝酸盐氮以及在阴极室将 NH_4^+ 变为气体排出共同完成,在 MFC 启动阶段, NH_4^+ 变气体排出是主要方式。实验表明,微生物燃料电池的产电性能、老龄垃圾渗滤液 COD 的去除率和阴极室的硝化反应均受到电极面积的影响。

参考文献

- [1] SEVDA S, DOMINGUEZ-BENETTON X, VANBROEKHOVEN K, DE WEVER W, SREKRISHNAN T R, PANT D. High strength wastewater treatment accompanied by power generation using air cathode microbial fuel cell[J]. *Appl Energy*, 2013, **105**: 194-206.
- [2] WANG H, JIANG S C, WANG Y, XIAO B. Substrate removal and electricity generation in a membrane-less microbial fuel cell for biological treatment of wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2013, **138**: 109-116.
- [3] LIEW K B, DAUD W R W, GHASEMI M, LEONG J X, LIM S S, ISMAIL M. Non-Pt catalyst as oxygen reduction reaction in microbial fuel cells: A review[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2014, **39**(10): 4870-4883.
- [4] LIU S, SONG H, WEI S, YANG F, LI X. Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow constructed wetland-Microbial fuel cell systems[J]. *Bioresour Technol*, 2014, **166**: 575-583.
- [5] ZHANG H, ZHANG R, ZHANG G, YANG F, GAO F. Modified graphite electrode by polyaniline tourmaline improves the performance of bio-cathode microbial fuel cell[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2014, **39**(21): 11250-11257.
- [6] MANSOORIAN H J, MAHVI A H, JAFARI A J. Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing[J]. *Enzyme Microb Technol*, 2013, **52**(6/7): 352-357.
- [7] KIM J, KIM B, KIM H, YUN Z. Effects of ammonium ions from the anolyte within bio-cathode microbial fuel cells on nitrate reduction and current density[J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2014, **95**(Part A): 122-126.
- [8] CHEN L, XIAO Y, ZHAO F. Biocathodes in microbial fuel cells[J]. *Prog Chem*, 2012, **24**: 157-162.
- [9] ALATRAKTCHI F A, ZHANG Y, SAFAA NOORI J, ANGELIDAKI I. Surface area expansion of electrodes with grass-like nanostructures and gold nanoparticles to enhance electricity generation in microbial fuel cells[J]. *Bioresour Technol*, 2012, **123**: 177-183.
- [10] SACCO N J, FIGUEROLA E L M, PATACCINI G, BONETTO M C, ERIJMAN L, CORTON E. Performance of planar and cylindrical carbon electrodes at sedimentary microbial fuel cells[J]. *Bioresour Technol*, 2012, **126**: 328-335.
- [11] GHANGREKAR M M, SHINDE V B. Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production[J]. *Bioresour Technol*, 2007, **98**(15): 2879-2885.
- [12] 王艳芳, 刘百仓, 郑哲, 郑雪艳. 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**(3): 68-74. (WANG Yan-fang, LIU Bai-cang, ZHENG Zhe, ZHENG Xue-yan. Effects of the electrode area and electrode spacing on the electricity generation capacity of MFCs[J]. *Renew Energy*, 2013, **31**(3): 68-74.)
- [13] ZHANG Q, TIAN B, ZHANG X, GHULAM A, FANG C, HE R. Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants[J]. *Waste Manage*, 2013, **33**(11): 2277-2286.
- [14] GANESH K, JAMBECK J. Treatment of landfill leachate using microbial fuel cells; Alternative anodes and semi-continuous operation[J]. *Bioresour Technol*, 2013, **139**: 383-387.
- [15] 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. (FAN Li-ping, MIAO Xiao-hui. Study on the performance of microbial fuel cell for restaurant wastewater treatment and simultaneous electricity generation[J]. *J Fuel Chem Technol*, 2014, **42**(12): 1506-1512.)
- [16] 荆淇. 生物阴极 MFC 处理垃圾渗滤液基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (JIN Qi. Treatment of landfill leachate by biocathode microbial fuel cell[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)

- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
(State Environmental Protection Administration. Determination methods for examination of water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.)
- [18] WANG Z, ZHENG Y, XIAO Y, WU S, WU Y, YANG Z, ZHAO F. Analysis of oxygen reduction and microbial community of air-diffusion biocathode in microbial fuel cells[J]. Bioresour Technol, 2013, **144**: 74-79.
- [19] LOGAN B E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells[J]. Nat Rev Microbiol, 2009, **7**: 375-381.
- [20] CLAUWAERT P, VAN DER HA D, BOON N, VERBEKEN K, VERHAEGE M, RABAEY K, VERSTRAETE W. Open air biocathode enables effective electricity generation with microbial fuel cells[J]. Environ Sci Technol, 2007, **41**(21): 7564-7569.
- [21] ZHANG X, HE W, REN L, STAGER J, EVAN P J, LOGAN B E. COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells[J]. Bioresour Technol, 2015, **176**: 23-31.
- [22] ZHANG X, ZHU F, CHEN L, ZHAO Q, TAO G. Removal of ammonia nitrogen from wastewater using an aerobic cathode microbial fuel cell[J]. Bioresour Technol, 2013, **146**: 161-168.

《燃料化学学报》征稿简则

《燃料化学学报》是由中国科学院主管、中国化学会和中国科学院山西煤炭化学研究所主办。刊载国内外燃料化学基础研究及其相关领域的最新研究成果和进展, 涵盖煤炭、石油、油页岩、天然气、生物质, 以及与此相关的环境保护和应用催化等方面的内容。

栏目设置

研究论文 报道学术价值显著、实验数据完整的研究成果, 全文一般不超过 6000 字;

研究快报 迅速报道学术价值显著的最新进展, 全文一般不超过 4000 字;

研究简报 报道研究工作中的部分或阶段性的研究成果, 全文一般不超过 4000 字;

综合评述 一般为预约稿(不超过 8000 字)。

投 稿

1. 本刊热忱欢迎国内外学者投稿, 中英文稿件均可, 请登陆本刊网站(<http://rlhxxb.sxicc.ac.cn>)注册投稿;
2. 来稿请邮寄单位推荐信, 说明文稿无泄密和一稿多投等内容。

稿件及出版

- (1) 审理结果一般在 3 个月内通知作者, 对不宜采用的稿件会尽快通知。不刊用的稿件恕不退还;
- (2) 刊出的稿件通知作者交论文发表费和审稿费。期刊印出后酌致稿酬, 并赠期刊 2 份和分装本 10 份;
- (3) 从 2000 年起本刊已入编中国学术期刊光盘版、网络版, 均不再另外通知和另付稿酬。凡不愿加入者, 请投稿时说明。

联系方式:

通讯地址: 山西省太原市桃园南路 27 号《燃料化学学报》编辑部 邮编: 030001

联系电话: 0351-2025214 4066044 传真: 0351-2025214

E-mail: rlhx@sxicc.ac.cn