

填料型微生物燃料电池产电特性的研究

梁鹏¹, 范明志¹, 曹效鑫¹, 黄霞^{1*}, 黄正宏², 王诚³

(1. 清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学新型炭材料研究室, 北京 100084; 3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:将石墨和碳毡作为阳极填料组装成填料型微生物燃料电池, 其启动期在 1 d 左右, 低于平板型微生物燃料电池的启动期. 碳毡作为填料时, 微生物燃料电池的最大产电功率密度为 $1\,502\text{ mW/m}^2$ (37.6 W/m^3), 优于石墨作为填料的 MFC. 将碳毡与碳纸烧结一体以提高填料型微生物燃料电池阳极的导电性, 与平板型微生物燃料电池相比, 其面积内阻从 $0.071\ \Omega\cdot\text{m}^2$ 下降到 $0.051\ \Omega\cdot\text{m}^2$, 最大电流密度从 $3\,000\text{ mA}$ 上升到 $8\,000\text{ mA}$, 最大产电功率密度从 $1\,100\text{ mW/m}^2$ (27.5 W/m^3) 上升到 $2\,426\text{ mW/m}^2$ (60.7 W/m^3), 阳极电势平均下降 100 mV . 循环流量影响填料型微生物燃料电池的产电能力, 当流量低于 1 mL/min 时, 其产电功率密度随流速降低而下降. 填料型微生物燃料电池在外电阻为 $600\ \Omega$ 下长期稳定运行 30 d 以上, 其库仑效率约为 10.6% .

关键词:微生物燃料电池; 填料; 内阻

中图分类号: X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0512-06

Electricity Generation Using the Packing-Type Microbial Fuel Cells

LIANG Peng¹, FAN Ming-zhi¹, CAO Xiao-xin¹, HUANG Xia¹, HUANG Zheng-hong², WANG Cheng³

(1. Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. New Carbon Materials Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The packing-type microbial fuel cells (MFCs) were constructed using the granular graphite and the carbon felt as packing materials. The start-up time of the packing-type MFC was about 1 d, which was lower than that of the flat-type MFC. The maximal power density (P_m) of the MFC with carbon felt as packing material was $1\,502\text{ mW/m}^2$ (37.6 W/m^3), which was higher than that with granular graphite as packing material. The carbon felt and carbon paper were sintered together to enhance the electric conductivity. Compared with the flat-type MFC, the area-specific resistance of the packing-type MFC decreased from $0.071\ \Omega\cdot\text{m}^2$ to $0.051\ \Omega\cdot\text{m}^2$, the maximal current density increased from $3\,000\text{ mA}$ to $8\,000\text{ mA}$, the P_m increased from $1\,100\text{ mW/m}^2$ (27.5 W/m^3) to $2\,426\text{ mW/m}^2$ (60.7 W/m^3) and the potentials of anode decreased about 100 mV . The flow rate affected the power generation of the MFC. When the flow rate was lower than 1 mL/min , the P_m dropped with the flux decreasing. The packing-type MFC was operated for over 30 and the coulomb efficiency was about 10.6% .

Key words: microbial fuel cell; packing materials; internal resistance

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)在净化污水的同时收获电能, 有可能降低污水处理的成本, 因而近年来受到了广泛关注^[1~4]. 然而, 目前 MFC 输出功率很低, 以空气阴极 MFC 为例, 国外文献中报道的最大输出功率密度为 $1\,500\text{ mW/m}^2$ ^[5], 远低于氢氧燃料电池的功率密度, 因而当务之急是提高 MFC 的产电能力. MFC 的阴极形式可以分为空气型和非空气型^[6], 空气型阴极中氧传递效率高, 可以省略阴极室, 在 MFC 的研究中广泛采用, 本研究所涉及的 MFC 均为空气型阴极.

阳极作为产电微生物的载体, 同时传递产电微生物产生的电子, 对 MFC 的产电能力具有很大的影响. 黄霞等^[7]通过比较碳纸、石墨和碳毡 3 种阳极材料对 MFC 产电能力的影响, 发现以碳毡做阳极时 MFC 的产电性能更好. 尤世界等^[8]研究了平板型阳极 MFC, 发现提高阳极面积有利于 MFC 产电, 阳极

面积是影响 MFC 产电的重要因素. 然而, 平板型 MFC 中阳极面积的增加将导致 MFC 总体积的增加, 不利于提高单位体积的 MFC 产电能力, 所以阳极立体化是提高 MFC 产电能力的一个方向. 阳极立体化 MFC 的研究涉及填料的选取、填料和集流板(收集电流并将其引出电池)之间的有效连接、影响填料型 MFC 传质的因素等. 本研究提出填料型 MFC, 首先将石墨颗粒和碳毡简单填充在平板型 MFC 中以提高阳极表面积, 考察填充前后 MFC 的产电能力, 然后将优选的填料与碳纸烧结成一体以减小电子在阳极传递的阻力, 考察强化填料和电极连接方式后对

收稿日期: 2007-03-31; 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA062329); 国家自然科学基金项目(20577027)

作者简介: 梁鹏(1976~), 男, 博士, 主要研究方向为污水资源化与能源化, E-mail: liangpeng@tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xhuang@tsinghua.edu.cn

填料型 MFC 产电的促进效果,同时针对阳极室基质流量对填料型 MFC 产电的影响及 MFC 长期运行的产电特性进行了初步考察.

1 材料与方法

1.1 MFC 试验装置

试验分为 2 种装置: 平板型 MFC 和填料型 MFC,如图 1 所示.2 种 MFC 的阴极均采用空气型阴极,包括膜电极(GEFC-MEA,将催化剂铂负载在质子膜 PEM 上,载量 0.5 mg/cm²,金能,北京)与扩散层(GDL-4,金能,北京),二者通过多孔板压在一起.平板型 MFC 的阳极为碳纸(3 cm×3 cm,60 型,东丽公司,日本).填料型 MFC 阳极又分为 2 类,一类是非烧结型阳极,将碳毡(1 cm,三业碳素公司,北京)或石墨颗粒(粒径:1~3 mm,三业碳素公司,北京)

直接作为填料堆积在阳极室,并与碳纸直接接触以收集传递电子;另外一类是烧结型阳极,参考文献[9]制作碳纳米管电极时采用的粘结剂及碳化温度对碳毡和碳纸进行处理.本研究采用粘结剂为 96% 酚醛树脂+4% 乌托品,99% 乙醇作为溶剂,在 60℃ 下溶解,碳毡和碳纸粘合后置于 105℃ 烘干,然后在 600℃ 下以氮气作为保护气将酚醛树脂碳化,整体成型为新型填料型阳极.阳极室容积为 36 cm³.利用蠕动泵(HJ-2 型,兰格,保定)将基质由 500 mL 三角瓶中泵入反应器,出水回流至三角瓶中,通过调节蠕动泵转速改变循环流量.阳极室中插入饱和甘汞电极(SCE,212 型,上海)作为参比电极,负载采用可调电阻箱(ZX21 型,天水).输出电压由信号采集系统(DAQ2213,Dalink,台湾)自动记录存储,采集速率最小时间间隔可达 1 ms.

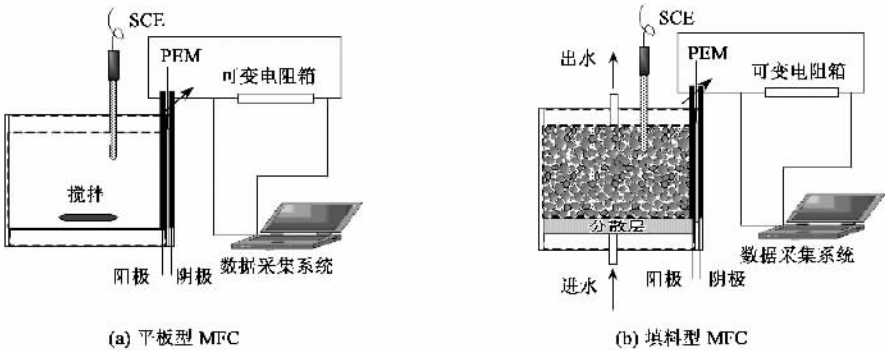


图 1 平板型 MFC 和填料型 MFC 试验装置
Fig.1 Diagrams of the flat-type MFC and the packing-type MFC

1.2 MFC 的微生物接种与运行

试验所用菌种取自北京清河污水厂厌氧污泥,经乙酸自配水在厌氧条件下驯养 3 d 后作为接种污泥,接种量为 10 mL.阳极室供给的基质为乙酸自配水,主要成份为(mg/L):CH₃COONa 1 640;NH₄Cl 500;KH₂PO₄ 300;MgCl₂·6H₂O 100;CaCl₂·2H₂O 100;KCl 100^[10];pH 在 7 左右.基质溶液用泵从 500 mL 三角瓶中泵入阳极室中后再回流到三角瓶中,当输出电压迅速降低时,更换三角瓶中基质.阳极室上有盖密封,试验前将阳极室溶液曝氮气 2 min,以去除其中的 O₂,阳极室中溶解氧浓度维持在 0.2 mg/L 以下,温度恒定在 25℃±3℃.

1.3 测试和计算方法

采用稳态放电法测定 MFC 的表观内阻^[11],为了便于比较面积不同的 MFC 内阻大小,本研究所有内阻单位均按照面积内阻率(area-specific resistance)^[12]

计算,单位为Ω·m².
采用标准分析方法测定进出水 COD 浓度^[13].
库仑效率 E 按照公式(1)计算.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n U_i t_i}{R F_i b_i \Delta S V} M$$

(1)

式中,U_i为 t_i 时刻 MFC 输出电压,R 为外电阻,F_i为法拉第常数(96 485 C/mol),b_i为 1 mol COD 所对应的电子数(等于 4e⁻ mol/mol),ΔS 为 COD 去除浓度(mg/L),V 为使用基质体积(L),M 为氧分子量(等于 32 g/mol).

2 结果与分析

2.1 MFC 的启动

在 2 种空气型阴极的 MFC(平板型 MFC 和以碳毡为填料的 MFC)中接种驯化后活性污泥,在外电

阻为10 000 Ω 条件下,输出电压随时间变化如图 2 所示.该实验的循环流速为 6 mL/min,2 种 MFC 在接种污泥后的产电均有急剧上升期.平板型 MFC 接种污泥 50 h 后电压急剧上升,到 60 h 后基本结束;填料型 MFC 中接种污泥 4 h 以后电压迅速上升,到 20 h 后基本结束.填料型 MFC 在接种活性污泥后产电上升较快,而平板型 MFC 接种污泥后有一个较长的稳定期,这是由于填料型 MFC 阳极能够提供更多的供微生物附着的空间,附着微生物量较多所致.

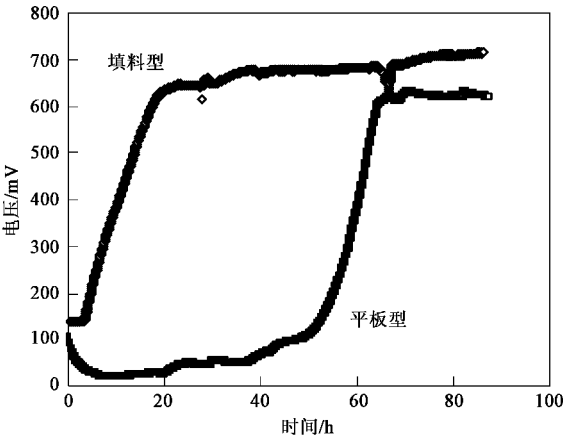


图 2 2 种 MFC 接种污泥后电压随时间变化(外电阻为 10 000 Ω)
Fig.2 Potential changing with time at external resistance of 10 000 Ω after inoculation in the two MFCs

2.2 填料型 MFC 的产电性能

将石墨和碳毡作为阳极填料,接种运行 6 d,待 2 种填料型 MFC 产电达到稳定后,对其进行稳态放电试验,测定极化曲线,计算输出功率,该实验的循环流速为 6 mL/min.首先将外电阻 R 调整到 90 000 Ω 并稳定 1 h 后开始测试,逐渐将外电阻调小,直至 20 Ω,通过数据采集卡获得不同外电阻下 MFC 输出电压 U 和阳极电势(阳极和参比电极间的电势差) U_a ,两者相减得到阴极电势 U_c ,根据公式 $P = U^2/R$ 计算得到输出功率.具体试验方法如文献[11]所述.石墨为填料的 MFC 输出电压和功率如图 3,碳毡为填料的 MFC 输出电压和功率如图 4.平板式 MFC 输出电压和功率如图 5,此时阳极室中没有填充任何填料.

测定结果表明,石墨填料型 MFC 的内阻 R_i 为 $0.103 \Omega \cdot m^2$,最大功率密度 P_m 为 $1\ 056 \text{ mW/m}^2$ (26.4 W/m^3);碳毡填料型 MFC 的 R_i 为 $0.068 \Omega \cdot m^2$, P_m 为 $1\ 502 \text{ mW/m}^2$ (37.6 W/m^3);平板型 MFC 的内阻 R_i 为 $0.08 \Omega \cdot m^2$,最大功率密度 P_m 为 $1\ 178 \text{ mW/m}^2$ (29.5

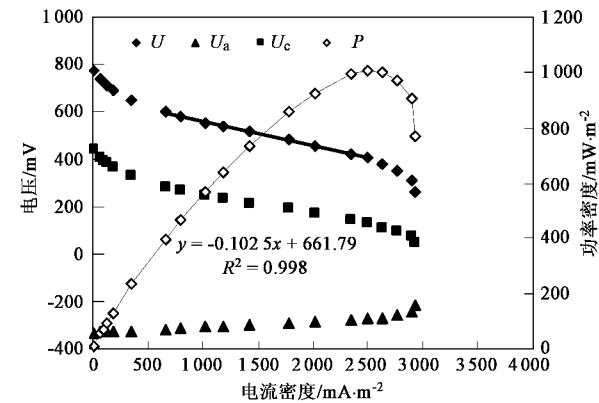


图 3 石墨为填料的 MFC 输出电压和功率随电流强度变化
Fig.3 Polarization curve and power density-current curve in the granular graphite packing MFC

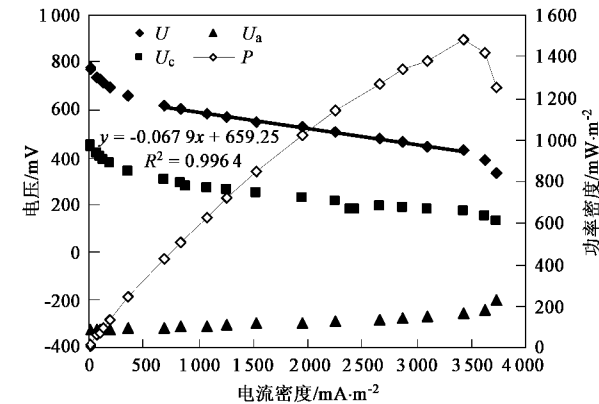


图 4 碳毡为填料的 MFC 输出电压和功率随电流强度变化
Fig.4 Polarization curve and power density-current curve in the carbon felt packing MFC

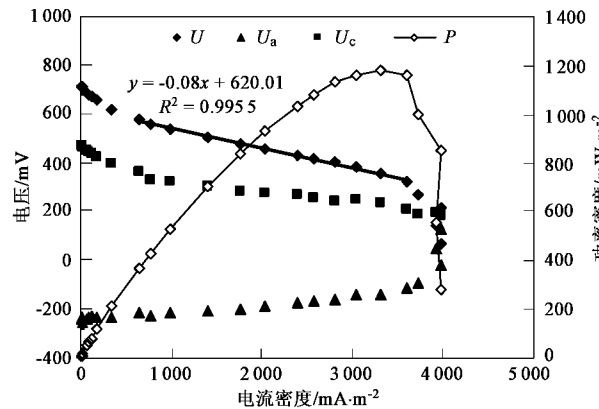


图 5 平板型 MFC 输出电压和功率随电流强度变化
Fig.5 Polarization curve and power density-current curve in the flat-type MFC

W/m³).
可见,采用碳毡简单填充 MFC 阳极室,可以将

原平板型 MFC 的 P_m 提高约 28%, 同时内阻降低, 而石墨填料型 MFC 的 P_m 和平板型 MFC 相差不大, 其原因可能是石墨颗粒通过堆积与阳极自然接触时, 接触面积小, 接触点不稳定, 而且会由于生物膜的生长, 使石墨与阳极的直接接触被阻断, 电子的传递阻力增大, 因此石墨颗粒上的微生物很难发挥产电作用。

2 种填料型 MFC 的阳极极化曲线(图 3 和图 4 中的 U_a) 在相同电流密度下要低于平板型 MFC(图 5), 如电流密度为 $2\,000\text{ mA/m}^2$ 时碳毡填料 MFC 的阳极电势为 -293 mV , 石墨填料 MFC 的阳极电势为 -285 mV , 而平板型 MFC 阳极电势为 -186 mV , 填料型 MFC 阳极电势比平板型低 100 mV 左右。另外, 图 3 和图 4 中极化曲线欧姆区最大电流密度不同, 石墨填料 MFC 的最大电流密度为 $2\,500\text{ mA/m}^2$, 碳毡填料 MFC 的最大电流密度为 $3\,300\text{ mA/m}^2$ 左右, 说明碳毡上附着的微生物单位时间产电量更大, 碳毡更适合作为阳极填料。

2.3 烧结填料型 MFC 的产电性能

从 2.2 的试验结果可知, 碳毡填料型 MFC 的产电能力比平板型 MFC 提高大约 28%。然而, 碳毡提供的比表面积远远大于平板型 MFC 阳极碳纸, 相对于碳毡巨大的比表面积, 这个值显然不够高。碳毡的简单填充虽然能够增大阳极表面积, 但填料和阳极电流收集材料(集流材料)之间的连接不够紧密, 可能会对电子的传递产生影响, 进而影响产电能力的提高。因此, 考虑将碳毡和碳纸通过粘合剂粘合并烧结形成烧结填料型 MFC, 以加强填料和阳极电子集流材料碳纸之间的连接。

待烧结填料型 MFC 运行 6 d, 循环流速为 6 mL/min , 达稳定运行后, 按 2.2 所用的方法, 测定极化曲线。测定的烧结填料型 MFC 的输出电压和功率如图 6。

由图 6 可知, 烧结填料型 MFC 的最大产电功率密度为 $2\,426\text{ mW/m}^2$ (60.7 W/m^3), 面积内阻率为 $0.051\ \Omega\cdot\text{m}^2$, 最大产电功率密度时的电流密度约为 $6\,700\text{ mA/m}^2$ 。最大产电功率密度和最大电流密度均优于碳毡简单填充时的 MFC。

2.4 循环流速对烧结填料型 MFC 产电性能的影响

影响填料型 MFC 产电性能的另一重要因素是阳极室的传质条件, 循环流速对阳极室的传质条件有重要影响。为考察循环流速对填料型 MFC 产电性能的影响, 以已达到稳定运行的碳毡烧结填料型 MFC 为对象, 将循环流速从 12 mL/min 逐渐下降到

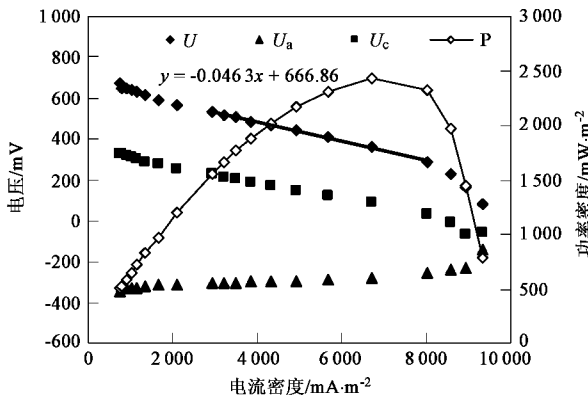


图 6 烧结填料型 MFC 输出电压和功率随电流强度变化
Fig. 6 Polarization curve and power density-current curve in the sintered MFC

0.2 mL/min , 每次改变流速后间隔 1 h , 使 MFC 产电达到稳定, 然后通过稳态放电法测定其最大输出功率和内阻的变化。循环流速对填料型 MFC 产电的影响如图 7。由图 7 可知, 当循环流速在 1 mL/min 以上时, 填料型 MFC 产电功率密度在 $2\,300\text{ mW/m}^2$ (57.5 W/m^3) 左右, 不受循环流速的影响, 而当循环流速由 1 mL/min 下降到 0.2 mL/min 时, 填料型 MFC 最大输出功率下降到 $1\,640\text{ mW/m}^2$ (41 W/m^3)。循环流速对最大输出功率的影响主要由于循环流速对内阻的影响, 而构成微生物燃料电池内阻的阻力包括传质阻力、电化学反应阻力和欧姆阻力 3 种, 循环流速的大小直接影响到传质的快慢。当循环流速较大, 阳极和基质间边界层较小, 基质向阳极上微生物传递速度加快, 传质阻力下降, MFC 内阻下降, 产电能力维持在较高水平, 反之, 循环流速较小, 边界层变厚, 传质阻力上升, 内阻增加, 最大产电功率密度下降。

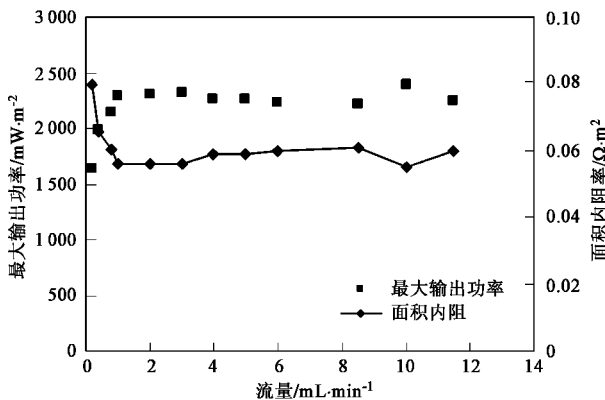


图 7 循环流速对 MFC 产电的影响

Fig. 7 P_m and R_i changing with time in the packing-type MFC

2.5 烧结填料型 MFC 长期运行性能

在外电阻为 $600\ \Omega$ 条件下长期运行烧结填料型

MFC,每当输出电压低于 200 mV 时更换新基质,系统连续运行 650 h,9 个周期,如图 8,更换新基质后填料型 MFC 外电压迅速恢复到 600 mV 左右,说明该填料型 MFC 能够长期运行.以第 4 周期为例,加入基质 COD 浓度为 621 mg/L,该周期结束后 COD 浓度为 263 mg/L,根据公式(1)计算得到系统库仑效率约为 10.6%.

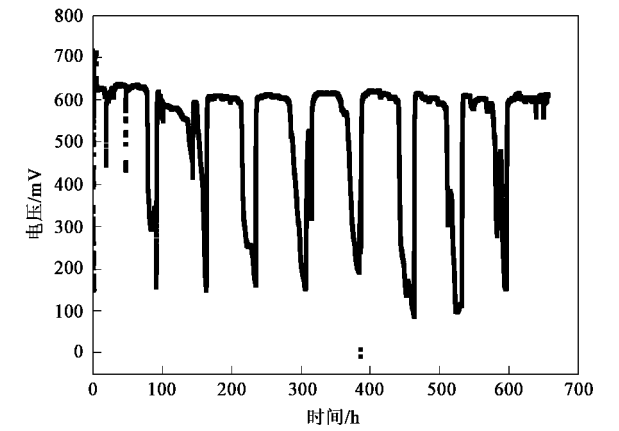


图 8 长期运行条件下填料型 MFC

Fig.8 Voltage generation over time in the packing-type MFC

3 讨论

填料型 MFC 增大了 MFC 阳极可附着生物量,降低了阳极内阻,是改善 MFC 反应器结构的一个发展方向.参照氢氧燃料电池膜电极的构成,采用烧结填料型阳极,有利于进一步提高 MFC 产电能力.表 1 是几种空气型阴极 MFC 的产电功率密度,和平板型 MFC 相比,烧结填料型 MFC 的内阻最低,最大产电功率密度提高幅度较大,突破 2 000 mW/m² (50 W/m³).

表 1 几种空气型阴极 MFC 内阻和产电功率密度的比较

Table 1 Internal resistances and power densities of several air-cathode MFCs					
阳极形式	R_i / $\Omega\cdot m^2$	P_m / $mW\cdot m^{-2}$	电极间距 /cm	离子强度 /mmol·L ⁻¹	文献
平板型	0.16	506	4	> 10	[14]
	0.15	218	4	57	[15]
	0.12	720	4	100	[16]
	0.054	1 210	2	400	[16]
	0.073	1 564	1	> 50	[5]
	0.35	354	4	65	本研究
	0.076	1 180		65	本研究
	1.13	33			[17]
	3.17	31		65	本研究
	0.135	624	2		[8]
烧结填料型	0.051	2 426		65	本研究

4 结论

- (1) 填料型 MFC 的启动期在 1 d 左右,低于平板型 MFC 启动期.
- (2) 以碳毡简单填充于平板型 MFC 最大产电功率密度比填充前提高约 28%,以石墨颗粒简单填充于平板型 MFC 的最大产电功率密度和平板型基本一致.
- (3) 碳毡烧结型 MFC 面积内阻为 0.051 $\Omega\cdot m^2$,最大电流密度 8 000 mA,最大产电功率密度 2 426 mW/m² (60.7 W/m³),其产电能力远高于碳毡简单填充型 MFC 和平板型 MFC.
- (4) 流速影响碳毡烧结填料型 MFC 的产电能力,当表观流速低于 1 mL/min 时,其产电功率密度随流速降低而下降.
- (5) 碳毡烧结填料型 MFC 在外电阻为 600 Ω 下长期稳定运行 30 d 以上,输出电压稳定约 600 mV,其库仑效率约为 10.6%.

参考文献:

[1] Rabaey K, Verhaege M. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation [J]. Trends in Biotechnology, 2005, **23**(6): 291-298.

[2] Logan B E. Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation [J]. Water Science and Technology, 2005, **52** (1-2): 31-37.

[3] Cheng S H, Liu H, Logan B E. Power Densities Using Different Cathode Catalysts (Pt and CoTMP) and Polymer Binders (Nafion and PTFE) in Single Chamber Microbial Fuel Cells [J]. Environmental Science Technology, 2006, **40**: 364-369.

[4] Cheng S H, Liu H, Logan B E. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure [J]. Electrochemistry Communications, 2006, **8**: 489-494.

[5] Cheng S A, Liu H, 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**: 2426-2432.

[6] 黄霞,梁鹏,曹效鑫,等.无介体微生物燃料电池研究进展[J].中国给水排水,2007,23(4): 1-6.

[7] 黄霞,范明志,梁鹏,等.阳极材料特性对 MFC 产电的影响[J].中国给水排水,2007,23(3): 8-13.

[8] 尤世界,赵庆良,姜瑞秋.电极构型对空气阴极生物燃料电池发电性能的影响[J].环境科学,2006,27(11): 2159-2163.

[9] 王立志,陈冠民,徐才录,等.粘结剂对块状电极碳纳米管双电层电容器性能影响研究[J].无机材料学报,2001,16: 672-676.

[10] 曹效鑫,梁鹏,黄霞.“三合一”微生物燃料电池的产电特性研究[J].环境科学学报,2006,26(8): 31-37.

[11] 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.

[12]

Shao Z P, Haile S M. A high-performance cathode for the next generation of solid-oxide fuel cells [J]. Nature, 2004, 43: 170-173.

[13]

国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M].(第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.107-108.

[14]

Cheng S A, Liu H, Logan B E. Production of Electricity from Acetate or Butyrate Using a Single-Chamber Microbial Fuel Cell [J]. Environmental Science Technology, 2005, 39: 658-662.

[15]

Logan B E, Liu H. 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: 4040-4046.

[16]

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]. Environmental Science Technology, 2005, 39: 5488-5493.

[17]

Logan B E, Murano C, Scott K, *et al.* Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell[J]. Water Research, 2005, 39: 942-952.

2006 年环境科学技术类期刊总被引频次和影响因子排序表¹⁾

(中国科学技术信息研究所 2007 年 11 月 15 日发布)

代码	期刊名称	总被引频次			影响因子		
		数值	学科排名	离均差率	数值	学科排名	离均差率
Z027	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES	352	26	-0.61	0.406	22	-0.40
Z549	安全与环境学报	563	21	-0.37	0.744	13	0.11
Z029	长江流域资源与环境	811	12	-0.09	0.830	11	0.23
Z024	城市环境与城市生态	611	18	-0.32	0.301	27	-0.55
Z015	电镀与环保	330	27	-0.63	0.444	20	-0.34
Z544	防灾减灾工程学报	99	31	-0.89	0.348	26	-0.48
Z013	工业水处理	1 021	10	0.14	0.406	22	-0.40
Z032	工业用水与废水	288	28	-0.68	0.207	31	-0.69
Z010	海洋环境科学	642	15	-0.28	0.653	14	-0.03
Z009	化工环保	595	19	-0.34	0.944	7	0.40
Z017	环境保护科学	274	29	-0.69	0.246	30	-0.63
Z005	环境工程	569	20	-0.36	0.371	25	-0.45
Z004	环境科学 ²⁾	2 899	1	2.24	1.310	3	0.95
Z003	环境科学学报	2 362	2	1.64	1.076	5	0.60
Z002	环境科学研究	1 141	8	0.27	1.089	4	0.62
Z025	环境科学与技术	687	14	-0.23	0.397	24	-0.41
Z019	环境污染与防治	701	13	-0.22	0.462	19	-0.31
Z021	环境污染治理技术与设备	1 503	6	0.68	0.550	16	-0.18
Z008	农业环境科学学报	1 779	5	0.99	0.879	8	0.31
H784	生态环境	975	11	0.09	0.837	10	0.24
Z023	生态与农村环境学报	627	16	-0.30	0.838	9	0.25
Z016	水处理技术	614	17	-0.31	0.268	29	-0.60
Z007	四川环境	419	25	-0.53	0.413	21	-0.39
T953	消防科学与技术	254	30	-0.72	0.291	28	-0.57
Z551	植物资源与环境学报	517	23	-0.42	0.638	15	-0.05
G129	中国安全科学学报	1 060	9	0.18	0.828	12	0.23
Z030	中国环境监测	445	24	-0.50	0.480	18	-0.29
Z001	中国环境科学	2 045	3	1.28	1.062	6	0.58
Z546	中国人口资源与环境	518	22	-0.42	0.513	17	-0.24
Z022	资源科学	1 152	7	0.29	1.350	2	1.01
Z012	自然资源学报	1 926	4	1.15	1.675	1	1.49
平均值		896			0.673		

1) 数据源于:中国科学技术信息研究所,2007 年版中国科技期刊引证报告(核心版)[M].北京:科学技术文献出版社,2007.212.

2) 《环境科学》2002~2007 连续 6 年荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.