

一种陆基微生物燃料电池装置及 产电性能实验研究

张大兴^{1,2},葛玉兵¹,高宏伟¹,王卫东¹

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

摘要: 由于具有处理废弃物和联产电能的双重功效,微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFCs)已被认可为最具前景的可替代、可再生的清洁能源之一。目前,针对基于水环境的微生物燃料电池(Aquatic Microbial Fuel Cells, AMFCs)的研究已经取得了实质性的研究成果,部分研究人员已开始工程实用阶段的研究。但是,工作地理环境的限制严重约束了AMFCs的应用范围。陆基微生物燃料电池(Terrestrial Microbial Fuel Cells, TMFCs)能够解决AMFCs工作地理环境受限的缺点,是拓展MFCs应用领域的一个新突破口。本文提出并详细介绍了一种TMFC的结构和菌群培养过程,测试了其产电性能。所设计的TMFC开路电压(Open Circuit Voltage, OCV)约为0.75V,输出功率密度约为3mW/m²,这些数据均在目前MFCs研究报道的合理范围内。测试了温度和土壤含水率对TMFC产电性能的影响,对进一步提高TMFC产电性能具有实验指导意义。

关键词: 陆基微生物燃料电池; 产电性能; 极化曲线

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0496-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.012

Experimental Study on a Terrestrial Microbial Fuel Cell Setup and Its Power Generation Performance

ZHANG Da-xing^{1,2}, GE Yu-bing¹, GAO Hong-wei¹, WANG Wei-dong¹

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Microbial fuel cells (MFCs) are considered as a promising alternative renewable energy source because of its power generation and wastewater treatment performance. The power generation performance of aquatic microbial fuel cells (AMFCs) is verified, and the applications of AMFCs are approved. However, the application range is limited for AMFCs because of the water environment they need. Terrestrial microbial fuel cells (TMFCs) can overcome the shortcoming and expand the application areas of MFCs. A TMFC reactor is proposed and the structure and inoculation procedure are presented. The power generation performance of the proposed TMFC is tested. The open circuit voltage (OCV) is about 0.75V and the output power density is about 3mW/m², which are normal values in the previous researches of AMFCs. The relationship between environment temperature, soil water content and the output power density of the proposed TMFC are tested by experiments. Experimental results show the effects of the TMFC power generation performance by environmental factors. The results will contribute to improving the power generation performance of TMFCs.

Key words: terrestrial microbial fuel cell; power generation performance; polarization curves

1 引言

由于具有处理废弃物和联产电能的双重功效,微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFCs)已被认可为最具前景的可替代、可再生的清洁能源之一。不同于其他燃

料电池,只要给细菌提供足够的食物(可以是废弃物、污染物等),在常温常压和中性PH环境条件下,MFCs不需要维护就可以持续不断地将化学能直接转化为电能,在供电电池难以维护的场合或缺乏电力基础设施的局部地区,MFCs具有广泛应用的潜力^[1~3]。目前,对于水

环境的微生物燃料电池(Aquatic Microbial Fuel Cells, AMFCs)已有较深入的研究,在 AMFCs 产能机理和实际应用方面均有不少文献报道^[4~10]。但是,水生工作地理环境的限制,严重约束了 AMFCs 的应用范围。基于陆地环境的微生物燃料电池(Terrestrial Microbial Fuel Cells, TMFCs),能够弥补 AMFCs 工作地理环境受限的缺陷,进一步拓展 MFCs 的应用领域。

本文提出并设计搭建了一种 TMFC 实验装置,详细介绍了所设计 TMFC 的结构以及菌群培养过程,测试了 TMFC 的开路电压、极化曲线等性能指标。用实验方法得到了环境温度、土壤含水率与 TMFC 产电性能的关系,对进一步研究提高 TMFC 的产电性能的方法具有实验指导意义。

2 TMFCs 简介

TMFCs 的产电原理与 AMFCs 类似,是一个能通过有机基底催化反应产生电能的生物电化学系统^[1~3]。它通常由三部分组成:阳极,阴极(一般由质子交换膜隔开)和电解质。在 TMFCs 中,土壤可同时作为营养媒介、接种体和质子交换膜,阳极埋在一定深度的土壤中,阴极安放在土壤顶部并暴露在空气中,其结构如图 1 所示。

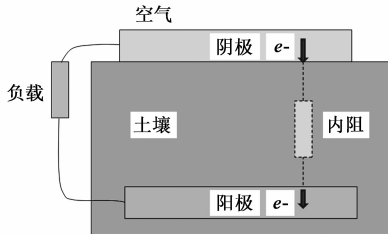


图1 TMFC结构原理图

由于沉积多年,土壤中通常饱含 MFCs 产电所需的微生物,其中的嗜氧微生物就像氧气过滤器,作用如同 AMFCs 中昂贵的质子交换膜,土壤的氧化还原电势随着深度变深而降低^[11]。土壤中含有的多种糖份及其他营养物质,可以维持细菌正常的生长。自然环境中,微生物所需的营养物质可以随着动植物的分解源源不断的供给,因此,TMFCs 理论上可以无限产电。

3 TMFC 实验装置及特点

自主设计制作的 TMFC 结构如图 2 所示。一个口大底小的塑料桶作为 TMFC 的反应室,底部直径约为 150mm,开口直径约为 190mm,高度约为 260mm。TMFC 阳极采用圆形的碳布(HCP330,河森电气有限公司,上海),直径约为 160mm,放置在距离反应室底部高约 45mm 的位置。TMFC 阴极采用圆形的碳纸(HCP030,河森电气有限公司,上海),直径约为 160mm,碳纸表面均匀的涂有一层铂催化剂(XC-72, Fuel Cell Store, Boulder, CO, USA),碳纸和碳布的距离约为 110mm。在阴极碳纸

上面铺有一层石块,以防止碳纸变形。阴极和阳极均通过钛丝引出反应室,钛丝与外电路连接,进而输出电能。土壤从沉积多年的森林(秦岭,陕西)中采集,以保证其中富含微生物和足够的养分。

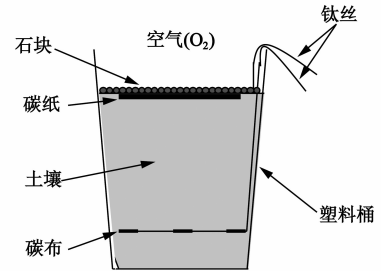


图2 TMFC实验装置结构图

TMFC 实验装置制作完成后,开始进行 TMFC 菌群培养实验。菌群培养过程如下:在阴极和阳极之间接一个 1kΩ 电阻,用万用表检测电阻两端电压。开始使用原始采集的土壤,其质量含水率约为 0.15,开始培养 7 天后, TMFC 实验装置的输出电压仍在 0V 左右。第 8 天,往装置内加入 1L 去离子水,水中添加有 500mg 葡萄糖和 500mg NaCl,其中葡萄糖用来增加土壤的养分,NaCl 用来增加反应室的离子数,葡萄糖和 NaCl 是为了加快 TMFC 菌群培养速度,对 TMFC 的产电性能没有影响。如果选用的原始土壤质量含水率较高(约 0.3 以上),可以省略加去离子水的过程。

加入去离子水 1 天以后(第 9 天),电极两端电压开始升高,此后大约 30 小时左右,出现电压快速上升的现象,在课题组进行的 AMFCs 实验中也同样发现过此现象^[4,5,7],这种现象在其他文献中也得到过证实^[12]。大约 80 小时以后,电极两端电压达到 0.3V 左右,并趋向稳定,菌群培养过程结束。菌群培养过程中电极两端的电压变化情况如图 3 所示。

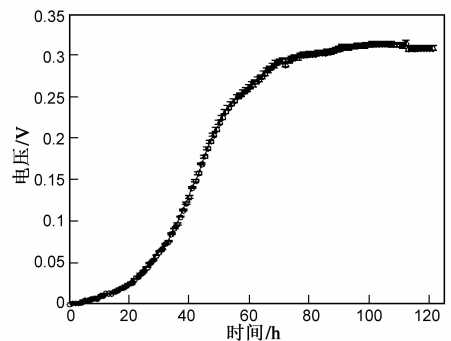


图3 TMFC菌群培养过程电极两端电压变化曲线(两极间接有1 kΩ电阻)

4 TMFC 产电性能及影响其性能的因素

4.1 TMFC 产电性能

菌群培养完成以后,进行 TMFC 的产电性能测试实验。菌群培养结束且 TMFC 达到稳定状态后,将电极两

端的 1k Ω 电阻断开,开始测量 TMFC 的开路电压(Open Circuit Voltage, OCV),测试后的 OCV 曲线如图 4 所示. 本实验中稳定后的开路电压约为 0.75V,该开路电压值在 MFCs 的正常开路电压范围内^[2,4,12].

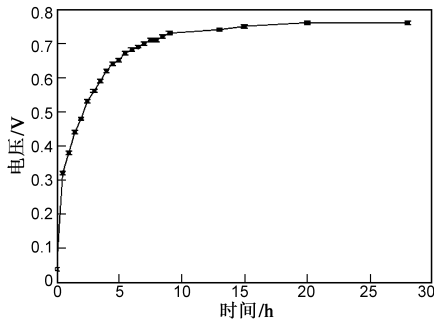


图4 TMFC开路电压变化曲线

开路电压测试结束后,进行 TMFC 极化曲线的测试实验,具体测试过程如下^[4,11]:

步骤 1 在电极两极间连接一个 10k Ω 电阻,监测电极两端电压变化情况,10 分钟后记录电极两端电压值;

步骤 2 适当减小两极间连接的电阻的阻值,并记录其阻值;

步骤 3 重复步骤 1 和步骤 2,直至电极两端电阻阻值等于或者小于 50 Ω . 每次记录的电压除以相应的电阻阻值,就可以得到通过输出的电流大小,电流除以阳极或者阴极面积,可得到输出的电流密度.

TMFC 输出的功率密度可以通过电压乘以相应的电流密度得到. 根据以上计算方法,便可得到 TMFC 的极化曲线,如图 5 所示. 该实验中的 TMFC 最大输出功率密度约为 3mW/m².

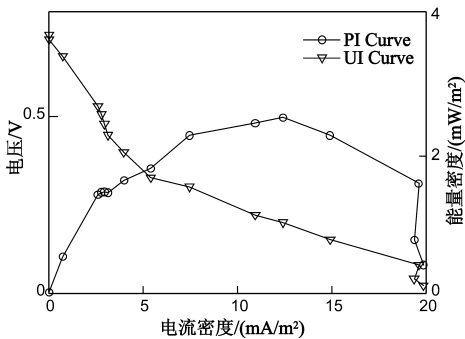


图5 TMFC极化曲线

4.2 影响 TMFC 产电性能的因素

为了进一步提高 TMFC 的产电性能,用实验方法测试了温度和土壤质量含水率对 TMFC 产电性能的影响效果. 土壤含水率与 TMFC 输出能量密度的关系如图 6 所示. 土壤的含水率采用土壤水分速测仪(TZS-I, 托普仪器有限公司, 浙江)实时测量. 实验中,首先选用含水

率较低的土壤样本进行测试,通过向 TMFC 反应室中添加去离子水来提高土壤的含水率. 这种方法相比于从含水率高的土壤开始测试,采用烘干等方式降低含水率的方法要简单,且对土壤中微生物影响较小. 由图可见,在土壤含水率小于等于 0.2 的时候, TMFC 基本无能量输出;当土壤含水率大于等于 0.4 后, TMFC 输出能量密度达到最大值,且不再随着土壤含水率的变化而变化,基本维持不变;土壤含水率在 0.2 到 0.4 之间时, TMFC 能量输出密度随着土壤含水率的增加而增大.

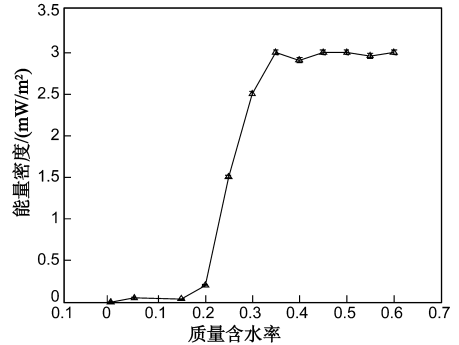


图6 TMFC能量输出密度与土壤含水率的关系曲线

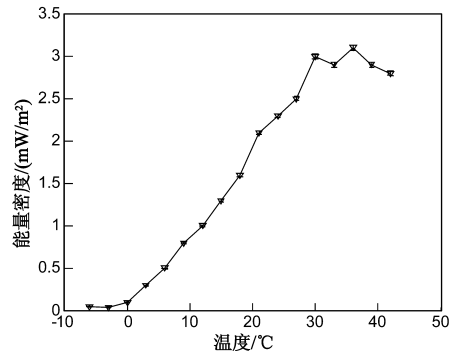


图7 TMFC能量输出密度与温度的关系曲线

TMFC 能量输出密度与温度的关系如图 7 所示. 实验中, TMFC 反应室放置在恒温恒湿箱中(THS-B4H-100, KSON, 台湾), 恒温恒湿箱设置的温度范围是 -6 $^{\circ}$ C 到 42 $^{\circ}$ C, 温度间隔为 3 $^{\circ}$ C, 每个温度测试点至少保持一个小时, 以确保 TMFC 能量输出达到稳定状态. 实验中, TMFC 的土壤含水率保持在 0.3 左右. 由图可见, 在大约 36 $^{\circ}$ C 以下, TMFC 的能量输出密度随着温度的增加而提高, 温度超过 36 $^{\circ}$ C 以后, TMFC 的能量输出密度随着温度的增加有减小的趋势.

5 结束语

MFCs 能够长期的提供连续、无污染、免维护的电能, 被认为是绿色、可持续发展的能量采集装置. TMFCs 能够在陆地上培养菌群和产生电能, 克服 AMFCs 工作地理环境受限的缺点, 进而扩展 MFCs 的应用领域. 本

文自主设计制作了一个塑料桶式 TMFC 实验装置,详细介绍了其结构以及菌群培养过程,测试了 TMFC 的产电性能.实验结果表明,设计的 TMFC 实验装置具有与 AMFCs 相当的 OCV 和输出能量密度.用实验方法测试了温度和土壤含水率与 TMFC 输出能量密度的关系,对进一步提高 TMFC 的产电性能具有实验指导意义.后期的工作包括确定更多环境因素,如空气含氧量、海拔高度等,对 TMFC 产电性能的影响以及 TMFC 的实用技术研究等.

参考文献

- [1] K Rabaey, L Angenent, U Schroder, et al. Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application[M]. London: IWA Publishing, 2010.
- [2] Logan B E. Microbial Fuel Cells[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [3] 黄丽萍, 成少安. 微生物燃料电池生物质能利用现状与展望[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 942 - 949.
Huang Liping, Cheng Shaoan. Biomass energy utilization in microbial fuel cells: potentials and challenges[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 942 - 949. (in Chinese)
- [4] Fan Yang, Daxing Zhang, Tsutomu Shimotori, et al. Study of transformer-based power management system and its performance optimization for microbial fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2012, 205: 86 - 92.
- [5] 张大兴, 邱雪娜, 梁英, 等. 针对微生物燃料电池能量采集的最优电容理论计算方法与实验研究[J]. 电子学报, 2012, 40(8): 1635 - 1639.
ZHANG Da-xing, QIU Xue-na, LIANG Ying, et al. Theoretical method and experimental study of determining the optimal capacitance for energy harvesting from MFCs[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(8): 1635 - 1639. (in Chinese)
- [6] Andrew Meehan, Hongwei Gao, Zbigniew Lewandowski. Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 176 - 181.

- [7] Daxing Zhang, Fan Yang, Tsutomu Shimotori, et al. Performance evaluation of power management systems in microbial fuel cell-based energy harvesting applications for driving small electronic devices[J]. Journal of Power Sources, 2012, 217: 65 - 71.
- [8] Conrad Donovan, Alim Dewan, Huan Peng, et al. Power management system for a 2.5W remote sensor powered by a sediment microbial fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2011, 916(3): 1171 - 1177.
- [9] Fei Zhang, Lei Tian, Zhen He. Powering a wireless temperature sensor using sediment microbial fuel cells with vertical arrangement of electrodes[J]. Journal of Power Sources, 2011, 96(22): 9568 - 9573.
- [10] Jae-Do Parka, Zhiyong Ren. High efficiency energy harvesting from microbial fuel cells using a synchronous boost converter[J]. Journal of Power Sources, 2012, 208(15): 322 - 327.
- [11] Cooke Keegan G, Gay Marcus O, et al. BackyardNet (TM): Distributed sensor network powered by terrestrial microbial fuel cell technology[A]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering[C]. Orlando, Florida: International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [12] Pinto R P, Srinivasan B, et al. A two-population bio-electrochemical model of a microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5256 - 5265.

作者简介



张大兴 男, 1978 年 11 月出生于山东即墨, 工学博士, 现为西安电子科技大学机电工程学院副教授, 硕士生导师. 主要研究方向: 机电一体化、自主机器人技术、无线传感器网络、微弱能量的采集与管理等.

E-mail: zhangdx@xidian.edu.cn

葛玉兵 男, 1987 年 7 月出生于山东聊城市, 西安电子科技大学机电工程学院硕士研究生, 研究方向为微弱能量的采集与管理.