阳极流道具有微孔阵列的被动式纸基微流体燃料电池性能特性

文金玲^{1,2}, 叶丁丁^{1,2*}, 朱恂^{1,2}, 张彪^{1,2}, 陈蓉^{1,2}, 廖强^{1,2*}

1. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆大学能源与动力工程学院工程热物理研究所, 重庆 400030

* 联系人, E-mail: dingdingye@cqu.edu.cn; lqzx@cqu.edu.cn

2020-02-12 收稿, 2020-03-14 修回, 2020-03-17 接受, 2020-03-18 网络版发表

国家自然科学基金(51620105011, 51776026)、重庆大学科研后备拔尖人才培养计划(cqu2017hbrclB06)、重庆市留学人员回国创业创新支持计划创新类(cx2018019)和重庆英才计划资助

摘要 纸基微流体燃料电池利用纸多孔介质内毛细渗流实现了阴阳极反应物被动输运和自然分隔, 去除了质子交换膜和微泵, 是基于电化学反应的新一代纸基微流控芯片理想的新型微型电源. 针对常规纸基微流体燃料电池存在的燃料传质限制, 本文提出阳极流道具有微孔阵列的新型电池结构, 利用微孔阵列强化燃料的对流/扩散传质提高电池性能, 研究了阴阳极间距、电极长度、燃料浓度及电解液浓度对电池性能特性的影响. 研究表明, 阳极流道内微孔阵列能够强化燃料传质并降低离子传输阻力, 使得阳极流道具有微孔阵列的纸基微流体燃料电池最大功率密度提高41.2%; 减少阴阳极间距有利于降低离子传输阻力, 而且阴极电解液流速大于阳极电解液流速, 抑制了燃料渗透, 使得电池性能提升; 电池性能随燃料和电解液浓度上升先升高后降低. 当阴阳极间距为1.0 mm, 电极长度为5.0 mm, 燃料和电解液浓度均为2.0 mol/L时, 电池性能达到最优, 其最大功率密度为29.7 mW/cm².

关键词 纸基微流体燃料电池, 微孔阵列, 燃料传质, 电池性能

近年来, 基于电化学反应的新一代纸基微流控芯片实现了高灵敏度、高特异性的定量检测, 广泛应用于生物医学领域, 在血糖监测^[1]、细菌检测^[2]、肿瘤标志物筛选^[3]、DNA诊断^[4]等方面, 具有巨大的发展潜力. 目前主要采用锂离子电池作为微型电源, 但锂离子电池温度适应性较差, 存储条件有诸多限制^[5], 且一次性使用成本较高, 丢弃后对环境亦有不利影响^[6]. 因此, 开发价格低廉、存储方便的高性能微型电源成为国内外研究热点.

纸基微流体燃料电池(paper-based microfluidic fuel cell, PMFC)利用燃料和氧化剂在纸基多孔介质内自发的毛细渗流实现了阴阳极反应物的被动输运, 并利用

平行层流特性使得阴阳极反应物自然分隔且允许离子传输(图1(a)), 从而去除了质子交换膜和微泵, 使电池设计、制造和运行都更为简单, 更利于系统集成^[7]. Esquivel等人^[8]于2014年首次提出了基于纸内毛细渗流的被动式纸基微流体燃料电池, 以甲醇作为燃料、氢氧化钾作为电解液、空气中的氧气作为氧化剂, 证明了新型电池的可行性. 目前, 国内外研究者主要基于双进口Y形纸基流道研究了流道几何尺寸、吸收垫物性参数^[9]和纸孔隙结构^[10]等对电池性能的影响. Lai等人^[11]提出了一种基于U形纸基流道的新型电池结构, 该结构有利于避免燃料渗透, 但是其最高功率密度仅为0.57 mW/cm². Yan等人^[12]提出了利用过氧化氢同时作

引用格式: 文金玲, 叶丁丁, 朱恂, 等. 阳极流道具有微孔阵列的被动式纸基微流体燃料电池性能特性. 科学通报, 2020, 65: 2527–2534

Wen J L, Ye D D, Zhu X, et al. Cell performance of passive paper-based microfluidic fuel cells with mini-hole array in the anode flow channel (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2527–2534, doi: 10.1360/TB-2020-0126

为燃料和氧化剂的纸基微流体燃料电池,进一步简化了电池结构,但性能仍然较低.这主要是由于纸基微流体燃料电池主要依靠纸多孔介质内自发的毛细渗流实现反应物输运,其流动速度较低,导致对流传质速率较慢,而扩散传质亦受到纸多孔介质的影响,使得阳极燃料传质成为纸基微流体燃料电池性能的主要限制因素^[10].特别是在常规纸基微流体燃料电池中,阳极催化层紧贴纸基流道布置(图1(a)),由于毛细流动速度很低,燃料主要以扩散的方式从纸多孔介质向阳极多孔催化层传输,传质阻力较大,限制了电池性能.然而,目前国内外报道的纸基微流体燃料电池主要通过改变运行工况、流道和吸收垫的物性参数和电池结构等强化电池性能,而通过强化阳极燃料传质提高电池性能的报道较少.

为强化被动式纸基微流体燃料电池中燃料传质,本文提出一种新型阳极结构,即在阳极侧纸基流道中构建微孔阵列,并使其与阳极多孔催化层直接接触,一方面利用微孔内主体溶液流动强化对流传质,另一方面利用中空的微孔阵列强化燃料与阳极多孔催化层的接触,强化扩散传质(图1(b)).本文采用氢氧化钾溶液作为电解液、甲酸钠溶液作为燃料、空气中的氧气作为氧化剂,研究阳极流道具有微孔阵列的被动式纸基微流体燃料电池的性能特性,探究电极间距与长度、燃料浓度、电解液浓度等对电池性能的影响.

1 电池构建及实验方法

1.1 电池结构

阳极流道具有微孔阵列的被动式纸基微流体燃料电池如图1(b)所示.该电池主要由Y形纸基流道、空气自呼吸阴极、阳极和吸收垫构成.其中,Y形纸基流道

是基于纤维素层析滤纸(Avantor, VWR417, 厚度0.2 mm)并采用CO₂激光切割机(Universal, VLS 3.60)进行加工.纸基流道平直段的长度为15.0 mm,宽度为5.0 mm,并在阳极流道中加工有8个直径为600 μm的微孔,两个相邻微孔间距为400 μm.空气自呼吸阴极采用喷涂法制备,即在带整平层的疏水碳纸(Toray, TGP-H-120, 尺寸为2 mm×20 mm)上喷涂由铂黑、碳粉、Nafion膜溶液、去离子水、异丙醇按一定比例均匀混合后制备的催化剂浆料,铂黑载量为3.5 mg/cm²^[13].阳极采用电化学沉积法制备,首先将碳纸(Toray, TGP-H-060, 尺寸为2 mm×20 mm)电极在0.5 mol/L硫酸中进行阳极氧化法亲水处理^[14],随后在1 wt% PdCl₂溶液中进行电化学沉积,钯催化剂载量为2.5 mg/cm²,阳极有效面积为0.1 cm².前期研究表明,当阳极和阴极电极沿流动方向的间距逐渐减小时,电池最大功率密度逐渐增加.当阴阳极沿流动方向的间距为0时,即阴阳极相对布置时电池具有最佳性能.因此,本文中阴阳极电极平行布置在Y形纸基流道前部(图1(b)),与文献[10]报道一致.吸收垫采用多层无尘试纸制成,其作用是吸收流过纸基流道的液体,维持纸基流道内毛细流动.该电池中燃料和电解液依靠纸多孔介质中的毛细力实现被动输运,同时实现自然分隔,从而去除了质子交换膜或外部泵.

文献[15]研究表明,相比于酸性体系,碱性体系反应动力学更好,并可消除气-液两相流对物质传输的影响.因此,本文采用氢氧化钾作为电解液,甲酸钠作为燃料,空气中的氧气作为氧化剂.电池内发生的电化学反应方程式为

图1 (网络版彩色)常规纸基流道(a)和含微孔阵列阳极流道(b)的纸基微流体燃料电池示意图

Figure 1 (Color online) Schematic illustrations of paper-based microfluidic fuel cells with either conventional flow channel (a) or novel anode flow channel with mini-hole array (b)

1.2 测试方法

待电池稳定运行后, 采用电化学工作站(辰华, CHI710)和数据采集仪(安捷伦, 34972A)对电池进行性能测试. 控制电池电压从开路电压以 -10 mV/s 的速率进行线性电位扫描直至 10 mV 以获得极化曲线^[10], 并在平直流道尾部吸收垫中放置银/氯化银参比电极以获得阴阳极电势. 此外, 以电池阴极作为工作电极、阳极作为对电极, 在电池开路电压下进行了电化学交流阻抗(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)测试, 振幅为 10 mV , 频率范围为 $100 \text{ kHz} \sim 500 \text{ mHz}$. 燃料和电解质的流速通过用精密电子天平测量电池运行过程中燃料和电解质质量的减少量(mg/min)来计算, 通过测定不同浓度下燃料和电解质的密度($\text{mg}/\mu\text{L}$), 计算出反应物的流量($\mu\text{L/min}$).

2 实验结果与讨论

2.1 阳极流道微孔阵列对电池性能的影响

本文研究了分别具有常规流道和含微孔阵列阳极流道的纸基微流体燃料电池性能, 如图2所示. 采用 1.0 mol/L 甲酸钠和 1.0 mol/L 氢氧化钾分别作为燃料和电解质, 并在燃料中加入 1.0 mol/L 氢氧化钾作为支持电解质. 阴阳极间距为 1.0 mm , 电极尺寸为 2.0 mm (宽) $\times 5.0 \text{ mm}$ (长). 从图2(a)可以看出, 具有常规流道的纸基微流体燃料电池最大功率密度为 $8.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 而阳极流道具有微孔阵列的纸基微流体燃料电池最大功率密度达到 $12.0 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 提高了 41.2% . 从图2(b)可以看出, 两种电池的阴极性能相近, 而阳极性能差异较为显著, 这主要是由于两种电池结构除阳极流道外完全一致, 使得微孔阵列的影响主要体现在阳极侧. 研究结果表明, 具有微孔阵列的阳极流道能够强化阳极性能. 这主要是因为一方面微孔内燃料溶液的微流动能够强化对流传质, 另一方面燃料能够通过中空微孔阵列与阳极多孔催化层直接接触, 减小了扩散阻力, 从而强化了阳极燃料传质, 提高了电池性能. 此外, EIS测试结果也表明具有微孔阵列的阳极流道结构还降低了电池的总欧姆内阻(图2(c)), 这主要是由于微孔阵列在强化燃料传质的同时也强化了氢氧根离子传输, 从而减小了电

图2 (网络版彩色)具有常规流道和微孔阵列阳极流道的纸基微流体燃料电池. (a) 性能对比; (b) 阴阳极电势对比; (c) 欧姆内阻对比
Figure 2 (Color online) Comparison of the cell performance (a), anode/cathode potential (b), and ohmic resistance (c) of the paper-based microfluidic fuel cells with either conventional flow channel or novel anode flow channel with mini-hole array

池内离子传输阻力.

2.2 阴阳极间距对电池性能的影响

常规纸基微流体燃料电池性能受欧姆内阻影响较大, 其中阴阳极之间的离子传输阻力是最主要的影响因素. 减少阴阳极间距有利于降低离子传输阻力, 但是当阴阳极间距过小时易发生燃料渗透, 因此本文研究了阴阳极间距对电池性能的影响, 结果如图3所示. 燃料浓度为 2.0 mol/L , 电解质浓度为 1.0 mol/L , 电极尺寸

为 $2.0\text{ mm}\times 5.0\text{ mm}$.从图3(a)可以看出,当阴阳极间距从 4.0 减小至 1.0 mm 时,电池最高功率密度由 9.0 增加至 15.2 mW/cm^2 ,提高了 68.9% .这主要是由于阴阳极间距减小使得离子传输距离减小,降低了电池欧姆内阻(图3(b)).此外,图3(a)还表明,当阴阳极间距减小至 1.0 mm 时,开路电压保持不变,说明该电池未出现明显的燃料渗透.这主要是由于阴极液流速快,阳极液流速慢,使得阴阳极液体分界面不在流道正中,分界面偏向阳极,抑制了燃料从阳极向阴极的渗透(图3(c)),使得电池性能提升.

图3 (网络版彩色)阴阳极间距对电池性能(a)、欧姆内阻(b)和阴阳极流量(c)的影响

Figure 3 (Color online) Effects of the interspace between the anode and cathode on the cell performance (a), ohmic resistance (b), and catholyte and anolyte flow rates (c)

2.3 电极长度对电池性能的影响

电极长度对电池性能的影响如图4所示.燃料浓度为 2.0 mol/L ,电解液浓度为 1.0 mol/L ,阴阳极间距为 1.0 mm .从图4(a)可以看出,电池最大功率密度随着电极长度的减小而增大,当电极长度从 15.0 缩短至 5.0 mm 时,电池的最高功率密度由 10.7 增加至 15.2 mW/cm^2 ,提高了 42.1% .这主要由于电化学反应消耗和较缓慢的扩散传质会使阳极表面燃料浓度沿长度方向降低,形成浓度边界层,限制电池性能.从图4(b)可以看出,随着电极长度增加,在高电流密度下阳极电势变化更为明显.这主要是由于高电流密度下,阳极表面燃料的消耗速率远大于传质速率,在较长电极的中后部出现浓差极化,致使阳极过电位增大,降低了电池性能.

2.4 反应物浓度对电池性能的影响

燃料浓度对电池性能的影响如图5所示.电解液浓度为 1.0 mol/L ,阴阳极间距为 1.0 mm ,电极尺寸为 $2.0\text{ mm}\times 5.0\text{ mm}$.从图5(a)可以看出,低电流密度($<15\text{ mA/cm}^2$)时,燃料浓度对电池性能的影响可以忽略,而在高电流密度下,电池性能随燃料浓度上升呈现

图4 (网络版彩色)电极长度对电池性能(a)和电极电势(b)的影响

Figure 4 (Color online) Effects of electrode length on cell performance (a) and electrode potentials (b)

图5 (网络版彩色)燃料浓度对电池性能(a)、阴阳极电势(b)及阴阳极流量(c)的影响

Figure 5 (Color online) Effects of fuel concentration on cell performance (a), electrode potential (b), and catholyte and anolyte flow rates (c)

先升高后降低的趋势。当燃料浓度为2.0 mol/L时, 电池最大功率密度达到15.2 mW/cm², 极限电流密度为95 mA/cm²。这主要是由于适当提高燃料浓度能够强化阳极燃料传质, 使阳极电化学反应速率加快, 从而使电池性能得到提升。但燃料浓度提高到4.0 mol/L时, 电池性能显著降低。这主要是由于阳极燃料流体的黏度和密度增大, 使得阳极流量降低(图5(c)), 引起了燃料传质限制。图5(b)所示为燃料浓度对阴阳极电势的影响。可以看出, 随着燃料浓度提高, 阳极性能得到强化; 但

当燃料浓度达到4.0 mol/L时, 阳极燃料的黏度和密度较高, 使得阳极流量明显降低, 高电流密度时阳极电势曲线较快上升(图5(b)), 表明此时燃料传质受限, 导致电池性能下降。

在纸基微流体燃料电池中, 阴极氧还原反应产生的氢氧根离子主要以电迁移的方式传导至阳极。本文还研究了电解液浓度对电池性能的影响, 结果如图6所示。阴阳极间距为1 mm, 电极尺寸为2 mm×5 mm, 燃料浓度为2.0 mol/L, 同时在燃料中加入与电解液浓度相等的KOH溶液作为支持电解液。

从图6(a)可以看出, 随着电解液浓度的增加, 电池性能先升高后降低。从阴阳极电势(图6(b))可知, 当电解液浓度从0.5 mol/L上升至2.0 mol/L时, 阴阳极性能都有所提升, 其中阳极性能强化比较明显。一方面是因为通道中较高的氢氧根离子浓度强化了离子传输, 降低了电池欧姆内阻(图6(d)); 另一方面, 较高的氢氧根离子浓度能够强化阳极反应动力学, 使得电池性能上升。当电解液浓度继续增加到4.0 mol/L时, 虽然电池欧姆内阻进一步减小, 但是电池性能略有降低。这是由于电解液浓度过高时, 燃料和电解液的密度和黏度均上升, 会显著降低阴阳极流量(图6(c)), 从而引起传质限制使电池性能降低。当电解液浓度为2.0 mol/L时电池性能最优, 其最大功率密度可达29.7 mW/cm²。与国内外已发表的纸基微流体燃料电池论文相比(表1), 本文提出的阳极流道具有微孔阵列的纸基微流体燃料电池性能高于除Arun等人^[9]外大部分论文。

3 结论

本文提出了一种阳极流道具有微孔阵列的被动式纸基微流体燃料电池, 一方面利用微孔内微流动强化对流传质, 另一方面利用中空的微孔阵列使得燃料与阳极多孔催化层直接接触, 强化扩散传质。实验研究了微孔阵列对电池性能的影响, 探究了阴阳极间距、电极长度、燃料浓度、电解液浓度等结构及运行参数对电池性能的影响。研究表明, 阳极流道内微孔阵列能够强化燃料传质并降低电池欧姆内阻, 使得阳极流道具有微孔阵列的纸基微流体燃料电池最大功率密度比常规纸基微流体燃料电池提高了41.2%; 由于阴极电解液流速高于阳极电解液, 抑制了燃料渗透, 电池性能随着阴阳极间距减小而提升。此外, 电池性能随燃料和电解液浓度上升先升高后降低, 电池最高功率密度达到29.7 mW/cm²。

图6 (网络版彩色) 电解液浓度对电池性能(a)、阴阳极电势(b)、阴阳极流量(c)和电池欧姆内阻(d)的影响

Figure 6 (Color online) Effects of electrolyte concentration on cell performance (a), electrode potential (b), catholyte and anolyte flow rate (c), and ohmic resistance (d)

表1 本文纸基微流体燃料电池最高功率密度与文献报道对比

Table 1 The optimal power density comparison of proposed paper-based microfluidic fuel cells with literature reports

作者	阳极催化剂	阳极燃料	阴极催化剂	阴极燃料	最高功率密度 (mW/cm ²)	参考文献
Esquivel等人	PtRu	甲醇	Pt	氧气	4.2	[8]
Arun等人	石墨	甲酸	石墨	氧气	32	[9]
Lal等人	石墨	甲酸	石墨	高锰酸钾	0.57	[11]
Copenhaver等人	Pd	甲酸盐	石墨	过氧化氢	0.44	[16]
Purohit等人	Pd	甲酸盐	银	硝酸银	4.1	[17]
Ehteshami等人	铝	过氧化氢	普鲁士蓝	过氧化氢	0.81	[18]
Yan等人	银纳米线	过氧化氢	普鲁士蓝	过氧化氢	0.88	[12]
Shen等人	Pd/C	甲酸盐	Pd/C	氧气	7.1	[10]
本文	Pd	甲酸盐	Pt	氧气	29.7	

参考文献

- Xia Y, Si J, Li Z. Fabrication techniques for microfluidic paper-based analytical devices and their applications for biological testing: A review. *Biosens Bioelectron*, 2016, 77: 774–789
- Lin D, Li B, Qi J, et al. Low cost fabrication of microfluidic paper-based analytical devices with water-based polyurethane acrylate and their application for bacterial detection. *Sens Actuat B-Chem*, 2020, 303: 127213
- Wang Y, Xu H, Luo J, et al. A novel label-free microfluidic paper-based immunosensor for highly sensitive electrochemical detection of carcinoembryonic antigen. *Biosens Bioelectron*, 2016, 83: 319–326
- Forouzandeh M. An enzymatic paper-based biosensor for ultrasensitive detection of DNA. *Front Biosci*, 2019, 11: 122–135
- Lisbona D, Snee T. A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Saf Environ Protection*, 2011, 89: 434–442

- 6 Notter D A, Gauch M, Widmer R, et al. Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. [Environ Sci Technol](#), 2010, 44: 6550–6556
- 7 Osborn J L, Lutz B, Fu E, et al. Microfluidics without pumps: Reinventing the t-sensor and h-filter in paper networks. [Lab Chip](#), 2010, 10: 2659–2665
- 8 Esquivel J P, Del Campo F J, Gómez de la Fuente J L, et al. Microfluidic fuel cells on paper: Meeting the power needs of next generation lateral flow devices. [Energy Environ Sci](#), 2014, 7: 1744–1749
- 9 Arun R K, Halder S, Chanda N, et al. A paper based self-pumping and self-breathing fuel cell using pencil stroked graphite electrodes. [Lab Chip](#), 2014, 14: 1661–1664
- 10 Shen L L, Zhang G R, Venter T, et al. Towards best practices for improving paper-based microfluidic fuel cells. [Electrochim Acta](#), 2019, 298: 389–399
- 11 Lal S, Janardhanan V M, Deepa M, et al. Low cost environmentally benign porous paper based fuel cells for micro-nano systems. [J Electrochem Soc](#), 2015, 162: F1402–F1407
- 12 Yan X, Xu A, Zeng L, et al. A paper-based microfluidic fuel cell with hydrogen peroxide as fuel and oxidant. [Energy Technol](#), 2018, 6: 140–143
- 13 Zhu X, Zhang B, Ye D D, et al. Air-breathing direct formic acid microfluidic fuel cell with an array of cylinder anodes. [J Power Sources](#), 2014, 247: 346–353
- 14 Zhang X, Zhou F, Pan W, et al. General construction of molybdenum-based nanowire arrays for ph-universal hydrogen evolution electrocatalysis. [Adv Funct Mater](#), 2018, 28: 1804600
- 15 Zhang B, Ye D D, Li J, et al. Air-breathing microfluidic fuel cells with a cylinder anode operating in acidic and alkaline media. [Electrochim Acta](#), 2015, 177: 264–269
- 16 Copenhaver T S, Purohit K H, Domalaon K, et al. A microfluidic direct formate fuel cell on paper. [Electrophoresis](#), 2015, 36: 1825–1829
- 17 Purohit K H, Emrani S, Rodriguez S, et al. A microfluidic galvanic cell on a single layer of paper. [J Power Sources](#), 2016, 318: 163–169
- 18 Ehteshami S M M, Asadnia M, Tan S N, et al. Paper-based membraneless hydrogen peroxide fuel cell prepared by micro-fabrication. [J Power Sources](#), 2016, 301: 392–395

Summary for “阳极流道具有微孔阵列的被动式纸基微流体燃料电池性能特性”

Cell performance of passive paper-based microfluidic fuel cells with mini-hole array in the anode flow channel

Jinling Wen^{1,2}, Dingding Ye^{1,2*}, Xun Zhu^{1,2}, Biao Zhang^{1,2}, Rong Chen^{1,2} & Qiang Liao^{1,2*}

¹ Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

² Institute of Engineering Thermophysics, School of Energy and Powering Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Paper-based microfluidic fuel cells (PMFCs) exploit the capillary flow in paper porous media to enable passive transport of reactants, and also use the co-laminar flow nature to separate the fuel and oxidant, thereby eliminating the conventional proton exchange membrane and micro-pumps. PMFCs have been regarded as promising micro-power sources for next-generation paper-based electrochemical microfluidic assay for biomedical diagnosis.

The PMFC performance is usually limited by fuel transport, failing to meet the power requirement. At present, the paper-based microfluidic fuel cells have been reported to improve the performance mainly by changing the operating parameters, the physical parameters of the paper channel and the absorption pad, and the cell structure. However, few studies have been reported to improve the cell performance by enhancing fuel transfer. In this paper, a new anode structure is proposed to enhance fuel transfer. That is, a mini-hole array is constructed in the paper-based channel on the anode to make part of the catalyst layer of the anode contact with the mini-hole array. It was expected that the fluid in the mini-hole array can not only enhance the convective fuel transport, but also improve the diffusive fuel transport due to the direct contact between the fluid in the paper-based flow channel and anode catalyst layer. Performance comparison was firstly conducted between paper-based microfluidic fuel cells with conventional flow channel and mini-hole array in the anode flow channel. Moreover, effects of operation conditions including anode/cathode interspace, electrode length, fuel and electrolyte concentration on the cell performance were investigated and discussed.

The experimental results confirmed that the mini-hole array in the anode flow channel can enhance fuel transport and ion conduction. As compared to the PMFC with the conventional flow channel, the PMFC with mini-hole array in the anode flow channel yielded 41.2% higher maximum power density. In addition, the experimental data also indicated that the ion transfer resistance can be reduced by diminishing the anode/cathode interspace, leading to an improved cell performance. No obvious fuel crossover was observed even at the interspace of 1.0 mm, because the flow rate of catholyte was higher than that of the anolyte, impeding the fuel crossover towards the cathode. The maximum power density of the cell increased with the decrease in the electrode length. This was mainly due to electrochemical reaction consumption and slow diffusion on the anode surface, which would reduce the fuel concentration on the anode surface along the flow direction, forming a concentration boundary layer and limiting the cell performance. In addition, upon the increasement of fuel or electrolyte concentration, the cell performance was enhanced at relatively low concentration but then dropped at high concentration. The fuel transfer was enhanced at high concentration and the ion transfer resistance can be reduced by increasing the electrolyte concentration, leading to an improved cell performance. However, the viscosity and density of the fuel and electrolyte increase with the electrolyte concentration, which led to the decrease of the flow rate of the reactants, further resulting in fuel mass transfer limitation and performance reduction. The optimal power density reached 29.7 mW/cm² by the proposed PMFC at the anode/cathode interspace of 1.0 mm, the electrode length of 5.0 mm, and the fuel and electrolyte concentrations of 2.0 mol/L.

paper-based microfluidic fuel cells, mini-hole array, fuel transfer, cell performance

doi: [10.1360/TB-2020-0126](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0126)