碳毡可渗透阳极空气自呼吸微流体燃料电池性能

刘林波¹, 叶丁丁^{1,2*}, 李俊^{1,2}, 朱恂^{1,2}, 付乾^{1,2}, 张亮^{1,2}, 陈蓉^{1,2}, 张倩茹³

1. 重庆大学低品位能源利用及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400030;

3. 酒泉卫星发射中心, 酒泉 732750

* 联系人, E-mail: dingdingye@cqu.edu.cn

2017-03-17 收稿, 2017-05-02 修回, 2017-05-02 接受, 2017-09-20 网络版发表

国家自然科学基金(51376203)、国家杰出青年科学基金(51325602)和国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(51620105011)资助

摘要 构建了具有碳毡可渗透阳极的空气自呼吸微流体燃料电池, 与阳极采用碳纸可渗透电极的空气自呼吸微流体燃料电池进行了对比, 在酸性和碱性条件下分别测试了两种阳极的电化学性能以及电池性能, 并在碱性条件下对电池内的传质与性能特性进行了实验研究. 实验结果表明, 无论是酸性还是碱性条件下, 碳毡电极的电化学性能均优于碳纸; 在酸性条件下, 采用碳毡阳极的自呼吸微流体燃料电池的最高功率密度和极限电流密度分别是采用碳纸阳极的自呼吸微流体燃料电池的1.8倍和2.8倍; 在碱性条件下, 采用碳毡阳极电池的最高功率密度为35.1 mW/cm², 极限电流密度为192.9 mA/cm², 分别是采用碳纸阳极的自呼吸微流体燃料电池的5.2倍和7倍; 与酸性条件相比, 碱性条件下两种阳极的自呼吸微流体燃料电池的性能均较好; 在碱性条件下, 电池的性能随着燃料及电解液流量的提高而增加, 而后保持不变, 随着燃料浓度、电解液及支持电解液浓度的提高均呈现先增加后减小的趋势.

关键词 多孔可渗透电极, 微流体燃料电池, 碳毡, 自呼吸

便携式电子设备的快速发展, 对高效可靠的微型移动电源提出了更高的要求, 而目前的微型电源如锂离子电池已经不能满足电子设备长期连续运行的需要. 微流体燃料电池利用燃料和氧化剂在微通道内形成的平行层流流动, 从而自然分隔开阴、阳极反应物, 去除了传统燃料电池中的质子交换膜, 消除了膜昂贵的成本及由膜引起的水管理、膜降解老化等技术难题, 具有体积小、反应物选择灵活、结构简单、制造方便等诸多优点, 是极具前景的微型电源之一, 近年来受到了国内外学者的广泛关注^[1,2].

早期的微流体燃料电池性能严重受到阴极侧氧化剂溶解氧传质的限制^[3]. 2005年Jayashree等人^[4]提出空气自呼吸微流体燃料电池, 阴极直接利用空气

中的氧气作为氧化剂, 由于空气中氧气的浓度和扩散系数均大大高于溶解氧中的值, 使得电池性能得到显著提高, 然而电池性能还会受到阳极燃料传质的限制. Kjeang等人^[5]采用钒氧化还原电对作为反应物, 提出了具有多孔可渗透(flow-through)电极的微流体燃料电池, 燃料与氧化剂以对流的方式通过可渗透电极, 然后在主流道中汇合形成层流, 这种可渗透电极结构实现了燃料及氧化剂向电极表面对流传输, 强化了反应物向电极表面的传质, 燃料利用率高达94%. Shaegh等人^[6]以甲酸作为燃料, 构建了具有可渗透阳极的空气自呼吸微流体燃料电池, 结果表明与平面(flow-over)电极相比, 采用多孔可渗透电极强化了阳极侧燃料的传质, 使得电池性能提高. 此

引用格式: 刘林波, 叶丁丁, 李俊, 等. 碳毡可渗透阳极空气自呼吸微流体燃料电池性能. 科学通报, 2017, 62: 3821–3828

Liu L B, Ye D D, Li J, et al. An air-breathing microfluidic fuel cell with a carbon felt flow-through anode (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3821–3828, doi: 10.1360/N972017-00304

外, 研究学者还针对具有可渗透电极的微流体燃料电池进行了数值模拟^[7-9], 为优化电池设计及提高电池性能提供理论指导. 然而目前针对可渗透阳极空气自呼吸微流体燃料电池的研究中, 阳极均采用碳纸作为电极^[5-9], 其比表面积较小, 而碳毡是钒电池中常见的电极材料, 具有三维的多孔结构, 不但可增加电极的比表面积, 还可强化反应物在电极内的传递, 将其应用于可渗透阳极空气自呼吸微流体燃料电池中有望进一步强化阳极侧传质, 从而提高电池的性能.

本文采用碳毡作为阳极构建具有三维多孔可渗透电极结构的空气自呼吸微流体燃料电池, 与采用碳纸作为阳极的自呼吸微流体燃料电池进行对比, 考察在酸性和碱性条件下电极的电化学特性和电池性能, 并在碱性条件下研究流量、燃料浓度、电解液及支持电解液浓度对电池内传质及性能的影响.

1 实验装置及方法

1.1 电池结构

本文构建的具有碳毡可渗透阳极的空气自呼吸微流体燃料电池结构如图1所示. 该电池主要由阳极盖板、燃料流场板、电极槽板、电解液流场板、以及阴极盖板构成, 均采用2 mm厚的有机玻璃板加工而成. 其中, 燃料流场板中燃料流道的尺寸为18 mm×2 mm×2 mm, 电极槽板中间加工有20 mm×5 mm×2 mm的电极槽来放置碳毡电极, 燃料流道尺寸比电极槽尺寸略小, 以便能均匀压紧电极. 电解液流道的尺寸为26 mm×2 mm×2 mm, 其下方为空气自呼吸阴极, 尺寸为22 mm×5 mm×0.28 mm. 利用阴极盖板固定空气自呼吸阴极, 盖板中间加工有大小为20 mm×2 mm×2 mm的自呼吸孔, 比阴极尺寸略小, 以便压紧空气自呼吸阴极. 在阴极盖板的前后两端还分别加工有电解液入口和废液出口. 在有机玻璃板的四周开有6个直径为0.5 mm的孔, 采用M5尼龙螺栓紧固, 分别在燃料流场板与电极槽板、阴极盖板与主流道板中间布置0.2 mm的硅胶垫片密封, 以防止燃料和电解液泄漏. 将钛箔(宽1 mm)压紧在阴阳极电极表面的边缘处, 以引出电子进行集流. 将图1中碳毡换为碳纸(尺寸为20 mm×5 mm×0.28 mm)即可构建采用碳纸可渗透阳极的自呼吸微流体燃料电池.

电池运行时, 电解液由电解液入口进入电解液

图1 具有碳毡阳极的微流体燃料电池结构示意图

Figure 1 Schematic of the microfluidic fuel cell with a carbon felt anode

流道, 燃料由燃料入口进入燃料流道, 在燃料流道内流动的同时渗透通过阳极电极, 在低 Re 数时, 燃料和电解液在电解液流道中汇合并形成平行层流流动, 二者之间只靠扩散作用混合, 最终经废液出口流出. 以酸性条件为例, 在阳极侧, 燃料在渗透经过阳极电极的过程中, 在阳极催化剂的作用下发生电化学反应产生质子、电子和二氧化碳, 二氧化碳随电解液和未反应完的燃料一起排出, 质子通过扩散和电迁移的作用传递至阴极侧, 电子通过外电路到达阴极; 在阴极侧, 阴极电极直接暴露在空气中, 空气中的氧气通过自然对流和扩散作用传递至阴极电极内部, 在阴极催化剂作用下与质子、电子发生电化学反应生成水, 阴极产物水随着流动的电解液及未反应完的燃料一起排出电池. 为增强离子在阴阳极之间的传输并减小欧姆内阻, 在燃料中加入与电解液等浓度的硫酸溶液(或氢氧化钾溶液)作为支持电解液.

在酸性条件下, 采用甲酸溶液为燃料, 硫酸溶液为电解液, 电池内发生的电化学反应方程式为

$$E_{\text{Anode}}^0 = -0.198 \text{ V vs. SHE}, \quad (1)$$

在碱性条件下, 采用甲酸钠溶液为燃料, 氢氧化钾溶液为电解液, 电池内发生的电化学反应方程式为^[10]

$$E_{\text{Anode}}^0 = -1.05 \text{ V vs. SHE}, \quad (3)$$

1.2 电极制备

实验中采用电化学沉积法制备阳极催化层, 首先将碳纸(Toray, TGP-H-090, 厚度为280 μm)和碳毡(PAN基碳纤维毡, 北海碳素, 厚度为2 mm)在无水乙醇中超声波振荡以去除其内部的杂质, 然后80 $^{\circ}\text{C}$ 下在1 mol/L稀硝酸中浸渍5 h对碳纸和碳毡进行亲水处理, 最后在0 V vs. Ag/AgCl (sat' KCl)恒电位的条件下进行反复电化学沉积至催化剂载量为0.4 mgPd/mgC(假设库仑效率为60%)^[11-13], 电镀液为溶解在1 mol/L盐酸中质量分数为1%的氯化钯溶液. 空气自呼吸阴极采用PTFE憎水处理后(PTFE质量分数为17%)的碳纸(Toray, TGP-H-090, 尺寸为20 mm $\times$ 5 mm)作为扩散层、Pt为催化剂, 采用喷涂法把催化剂浆料(Pt、去离子水和5%的Nafion溶液按一定比例混合)喷涂在电极表面, Pt催化剂载量为3 mg/cm²^[14]. 采用扫描电子显微镜(Tescan Vega II SEM系统)对阳极表面的微观形貌进行表征.

1.3 测试方法

采用双通道注射泵(LSP02-1B, 兰格)供应燃料和电解液, 且保持二者流量相同. 以制备好的碳纸或碳毡电极作为工作电极、铂电极作为对电极、Ag/AgCl电极作为参比电极构建三电极体系, 采用电化学工作站(PARSTAT PMC-1000, Princeton Applied Research)对所制备的电极进行循环伏安(CV)测试. 采用恒电压放电的方式对两种不同阳极电极结构的电池进行性能测试. 从开路电压开始, 以100 mV逐渐递减至0 V, 每个电压下放电时间均为3 min, 并采用最终稳定值作为该电压下对应的电流值. 将Ag/AgCl(sat' KCl)参比电极置于电池出口处, 通过万用表测得阴极与参比电极之间的电压即阴极电势, 电池电压采用电化学工作站测得, 而阳极电势由阴极电势减去电池电压得到. 电池的测试均在恒温室进行, 环境温度为30 $^{\circ}\text{C}$.

2 结果与讨论

2.1 阳极电极的物理化学表征

图2为采用碳毡和碳纸制备的电极表面SEM图像. 从图中可以看出, 碳毡及碳纸均由碳纤维无规则交织而成, 电化学沉积后碳毡和碳纸的碳纤维上均可观察到均匀分布的催化剂纳米颗粒, 但二者形貌

图2 电极表面SEM图像. (a) 沉积前碳毡; (b) 沉积前碳纸; (c) 沉积后碳毡; (d) 沉积后碳纸

Figure 2 SEM images of electrode surface. (a) Carbon felt before electrodeposition; (b) carbon paper before electrodeposition; (c) carbon felt after electrodeposition; (d) carbon paper after electrodeposition

有明显差别, 碳毡电极表面的催化剂层几乎完全覆盖了碳纤维, 形成了致密均匀的催化层, 隐约可见碳毡内部碳纤维的表面也覆盖有催化剂, 而碳纸表面催化剂覆盖量较少, 催化层稀疏. 造成其表面催化层形貌差异的原因在于: 一方面, 由于催化剂载量相同均为0.4 mgPd/mgC, 此载量为单位质量碳毡/碳纸上所负载的催化剂量, 而碳毡厚度大于碳纸, 碳毡上催化剂总量大于碳纸上催化剂总量; 另一方面, 而且更重要的原因是碳毡电极具有较大的孔隙率, 电化学沉积过程中电解液传质阻力小, 更易传输至电极内部, 易于催化剂层的形成, 而对于碳纸, 其孔隙率较小, 电解液传质阻力大, 不利于催化剂的沉积. 两种电极催化层形貌的差别将严重影响其电化学性能.

采用浓度为1 mol/L的稀硫酸溶液作为电解液, 选择的电势区间为-0.2~0.7 V (vs. Ag/AgCl sat' KCl), 扫描速率为10 mV/s, 对制备好的碳毡和碳纸电极进行CV测试^[15,16], 结果如图3(a)所示. 从图中可以看出, 碳纸电极在CV曲线中依次出现了氢解吸附峰、钯氧化峰、钯还原峰和氢吸附峰. 而碳毡的氢解吸附峰电位向右偏移了200 mV左右, 这可能是由于碳毡的多孔结构使碳毡具有一定的电容; 氢解吸附峰面积表征了电极的电化学活性面积, 很明显碳毡电极的电化学活性面积更大. 从图中还可以看出, 钯的氧化在0.6 V(vs. Ag/AgCl sat' KCl)左右开始, 在0.7 V达到峰值(21 mA), 而碳纸中钯的氧化峰电流约为9 mA, 可见, 碳毡电极的峰电流大于碳纸电极的相应值. 这主要是由于碳毡具有更大的孔隙, 电解液更易进入

碳毡内部,形成了更为均匀的催化层,而且其三维的多孔结构使其具有更大的比表面积,催化剂附着后有更多的活性位点,使得电化学活性面积更大。

在碱性条件下,采用浓度为2 mol/L的氢氧化钠溶液作为电解液对制备好的碳毡及碳纸电极进行循环伏安法测试,选择的电势区间为 $-1\sim 0.4$ V(vs. Ag/AgCl sat' KCl),扫描速率为10 mV/s,结果如图3(b)所示。从图中可以看出,在CV曲线中碳纸和碳毡电极均在 -0.4 V(vs. Ag/AgCl sat' KCl)开始发生Pd的氧化,在 -0.4 V出现了Pd的还原峰,但碳毡阳极的峰电流明显大于碳纸电极的峰电流,说明在碱性条件下碳毡电极比碳纸电极具有更大的电化学活性面积。

2.2 电池性能对比

采用1 mol/L的甲酸和1 mol/L的硫酸分别作为燃料和电解液、1 mol/L的硫酸作为支持电解液,流量均为5 mL/h时,测试了在酸性条件下采用碳纸和碳毡电极的电池性能,结果如图4所示。从图中可以看出,

具有碳纸阳极的电池最大功率密度为 1.55 mW/cm^2 ,最大电流密度为 8.35 mA/cm^2 ,采用碳毡电极的电池虽然开路电压较低,但最大功率密度和极限电流密度分别为 2.9 和 23.6 mA/cm^2 ,分别是采用碳纸电极电池的 1.8 倍和 2.8 倍。从图4(b)可以看出,采用碳毡电极的电池阴极性能较差,但阳极性能比碳纸阳极的性能更好。这主要是因为:(1)在酸性条件下,电池阳极侧发生甲酸氧化反应生成二氧化碳,二氧化碳气体产生于碳毡阳极内部,从电极内向电解液流动的过程中携带部分液相燃料,破坏主流道内的层流流动,强化燃料向阴极侧的对流传输,导致燃料渗透增加;(2)碳毡电极孔隙率较大,燃料更易渗透通过阳极,在电解液流道内与电解液混合并扩散至阴极,造成混合电位,使得阴极性能下降。然而由于碳毡阳极的催化层分布更为均匀,且具有更多的电化学活性位点,从而阳极侧性能大大提升,最终使得具有碳毡阳极的自呼吸微流体燃料电池的性能更佳。

在碱性条件下,采用1 mol/L甲酸钠和2 mol/L氢

图3 (网络版彩色)碳纸(CP)和碳毡(CF)电极在1 mol/L H_2SO_4 (a)和2 mol/L NaOH (b)中的CV曲线

Figure 3 (Color online) CV curves of carbon paper and carbon felt in 1 mol/L H_2SO_4 (a) and 2 mol/L NaOH (b)

图4 (网络版彩色)在酸性条件下碳纸和碳毡的电池性能对比。(a)电压及功率密度曲线;(b)阴阳极极化曲线

Figure 4 (Color online) Performance comparison of fuel cell with carbon paper and carbon felt electrodes in acidic condition. (a) Voltage and power density curves; (b) polarization curves of anode and cathode

氧化钾分别作为燃料和电解液、2 mol/L氢氧化钠溶液作为支持电解液,燃料和电解液流量均为5 mL/h,研究了采用碳纸和碳毡电极的自呼吸微流体燃料电池的性能,结果如图5所示.从图中可以看出,在碱性条件下,采用碳毡阳极的电池开路电压仍低于采用碳纸阳极的电池,这同样是由于碳毡孔隙较大,燃料渗透更强所引起的;其最大功率密度为35.1 mW/cm²、极限电流密度为192.9 mA/cm²,分别是采用碳纸阳极电池的5.2倍和7倍,这是由于在碱性条件下碳毡电极具有更高的电化学活性所致.此外,对比图4和5可以看出,相比于酸性条件下,碱性条件下碳纸和碳毡电极的电池性能均有显著的提升.这主要是由于碱性电解液中电池阴、阳极的电化学反应动力学均得到了提升^[12,16];而且碱性条件下阳极侧没有二氧化碳气体生成,去除了二氧化碳气体对层流流动带来的不利影响.这两方面因素使得碱性条件下微流体燃料电池的性能大幅提高.

3 碱性条件下电池性能

基于以上实验结果,针对碱性条件下采用碳毡阳极的自呼吸微流体燃料电池,研究不同工况下(包括燃料及电解液流量、燃料浓度、电解液及支持电解液浓度)电池内传质及性能.

3.1 燃料及电解液流量对电池性能的影响

保持燃料浓度和电解液浓度一定,同时改变燃料与电解液的流量,测得流量对电池性能的影响如图6所示.从图中可以看出,随着燃料及电解液流量的提高,在高电流密度下(>75 mA/cm²),电池的电压及功率密度随着流量的提高而有所提升.这主要是由于提高了燃料及电解液的流量,增强了阳极侧燃

料向电极表面的传输.从电池的阴阳极极化曲线(图6(b))可以看出,随着流量的提升,在相同的电流密度下,阴极电势保持一致,而阳极电势降低,极化程度减弱,这说明此时阳极侧为电池性能限制因素,流量的提升强化了阳极侧传质,从而使得电池性能升高.

3.2 燃料浓度对电池性能的影响

燃料浓度对电池性能的影响如图7所示.随着燃料浓度从0.25 mol/L提高到1 mol/L,电池的最大功率密度与最大电流密度得到了一定的提升,而继续提高燃料浓度至2 mol/L,电池的性能反而会有所下降.这主要是由于在燃料浓度较低时,电池的性能更容易受到传质限制,因此提高燃料浓度可以增强燃料向电极表面的传质,从图7(b)的阳极极化曲线中可以看出,燃料浓度升高使得阳极电势降低、阳极性能提升,从而提高了电池性能.而继续提高燃料浓度,在强化燃料传质的同时也增强了燃料向阴极的传输,从而造成燃料渗透,在阴极形成混合电位,阴极极化严重(图7(b)),从而降低电池性能.

3.3 电解液及支持电解液浓度对电池性能的影响

实验中,在燃料中加入与电解液相等浓度的氢氧化钾溶液作为支持电解液,以增强OH⁻的传输、减小电池欧姆内阻,通过同时改变电解液及支持电解液的浓度来研究浓度对电池的性能影响,结果如图8所示.从图中可以看出,电池的性能随着电解液及支持电解液浓度的提高呈现先增加后降低的趋势.这主要是由于在一定范围内提高电解液及支持电解液浓度,溶液的电导率升高,减小了电池的欧姆内阻,从而提高了电池的性能;当电解液及支持电解液浓度继续提高时,反而增强了OH⁻向阴极表面的吸附,

图5 (网络版彩色)在碱性条件下碳纸和碳毡的电池性能对比。(a) 电压及功率密度曲线; (b) 阴阳极极化曲线

Figure 5 (Color online) Performance comparison of fuel cell with carbon paper and carbon felt electrodes in alkaline condition. (a) Voltage and power density curves; (b) polarization curves of anode and cathode

图 6 (网络版彩色)燃料及电解液流量对电池性能的影响。(a) 电压及功率密度曲线; (b) 阴阳极极化曲线

Figure 6 (Color online) Effect of fuel and electrolyte flow rate on the cell performance. (a) Voltage and power density curves; (b) polarization curves of anode and cathode

图 7 (网络版彩色)燃料浓度对电池性能的影响。(a) 电压及功率密度曲线; (b) 阴阳极极化曲线

Figure 7 (Color online) Effect of fuel concentration on the cell performance. (a) Voltage and power density curves; (b) polarization curves of anode and cathode

图 8 (网络版彩色)电解液及支持电解液浓度对电池性能的影响。(a) 电压及功率密度曲线; (b) 阴阳极极化曲线

Figure 8 (Color online) Effect of electrolyte and supporting electrolyte concentration on the cell performance. (a) Voltage and power density curves; (b) polarization curves of anode and cathode

抑制阴极侧反应的发生, 阴极侧极化严重(图8(b), 4 mol/L时阴极电势低于2 mol/L的阴极电势); 也有文献表明^[17], 当电解液浓度过高时, 溶液的电导率反而会下降, 因此降低了电池性能。从图8(b)可以看出, 随着电解液及支持电解液浓度从1 mol/L提高到4 mol/L, 阳极电势不断降低, 阳极性能升高, 这主要是由于阳极侧OH⁻浓度增加、加快了阳极电化学反应所致。

4 结论

本文构建了具有三维结构碳毡阳极的空气自呼吸式微流体燃料电池, 在相同实验条件下与具有碳纸阳极的自呼吸微流体燃料电池的电极电化性能及电池性能进行了对比, 并研究了在碱性条件下燃料及电解液流量、燃料浓度、电解液及支持电解液浓

度对电池性能的影响. 得出的主要结论如下:

(1) 由于碳毡具有较大的比表面积, 碳毡阳极相对于碳纸电极拥有更大的电化学反应活性面积, 无论是酸性还是碱性条件下, 采用碳毡阳极的电池性能更佳, 且碱性条件下电池性能优于酸性条件下的性能.

(2) 随着燃料及电解液流量在一定范围内提升, 电池的性能也随之得到提升而后基本保持不变.

(3) 随着燃料浓度的提升, 电池的性能呈现先增加后减小的趋势. 这主要是由于在一定范围内提升燃料浓度有助于提高阳极侧的传质, 但进一步提升燃料浓度则会造成燃料渗透.

(4) 在一定范围内电解液及支持电解液浓度的提高有助于减小电池的欧姆内阻, 但进一步提升两者浓度则会导致电池的性能下降.

参考文献

- Goulet M A, Kjeang E. Co-laminar flow cells for electrochemical energy conversion. *J Power Sources*, 2014, 260: 186–196
- Nasharudin M N, Kamarudin S K, Hasran U A, et al. Mass transfer and performance of membrane-less micro fuel cell: A review. *Int J Hydrogen Energy*, 2014, 39: 1039–1055
- Choban E. Microfluidic fuel cell based on laminar flow. *J Power Sources*, 2004, 128: 54–60
- Jayashree R S, Gancs L, Choban E R, et al. Air-breathing laminar flow-based microfluidic fuel cell. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 16758–16759
- Kjeang E, Michel R, Harrington D A, et al. A microfluidic fuel cell with flow-through porous electrodes. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 4000–4006
- Shaegh S A M, Nguyen N T, Chan S H, et al. Air-breathing membraneless laminar flow-based fuel cell with flow-through anode. *Int J Hydrogen Energy*, 2012, 37: 3466–3476
- Shaegh S A M, Nguyen N T, Chan S H. An air-breathing microfluidic formic acid fuel cell with a porous planar anode: Experimental and numerical investigations. *J Micromech Microeng*, 2010, 20: 105008
- Zhang B, Ye D D, Sui P C, et al. Computational modeling of air-breathing microfluidic fuel cells with flow-over and flow-through anodes. *J Power Sources*, 2014, 259: 15–24
- Krishnamurthy D, Johansson E O, Lee J W, et al. Computational modeling of microfluidic fuel cells with flow-through porous electrodes. *J Power Sources*, 2011, 196: 10019–10031
- Bartrom A M, Haan J L. The direct formate fuel cell with an alkaline anion exchange membrane. *J Power Sources*, 2012, 214: 68–74
- Kjeang E, Brolo A G, Harrington D A, et al. Hydrogen peroxide as an oxidant for microfluidic fuel cells. *J Electrochem Soc*, 2007, 154: B1220
- Kjeang E, Michel R, Harrington D A, et al. An alkaline microfluidic fuel cell based on formate and hypochlorite bleach. *Electrochim Acta*, 2008, 54: 698–705
- Adams B D, Ostrom C K, Chen A. Highly active PdPt catalysts for the electrochemical reduction of H_2O_2 . *J Electrochem Soc*, 2011, 158: B434–B439
- 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
- Zhang H, Xuan J, Xu H, et al. A numerical study on microfluidic fuel cell: Improving fuel utilization and fuel operation concentration. *Energy Procedia*, 2014, 61: 250–253
- 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
- Gilliam R, Graydon J, Kirk D, et al. A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures. *Int J Hydrogen Energ*, 2007, 32: 359–364

Summary for “碳毡可渗透阳极空气自呼吸微流体燃料电池性能”

An air-breathing microfluidic fuel cell with a carbon felt flow-through anode

LIU LinBo¹, YE DingDing^{1,2*}, LI Jun^{1,2}, ZHU Xun^{1,2}, FU Qian^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}, CHEN Rong^{1,2} & ZHANG QianRu³

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

² Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

³ Jiuquan Satellite Launch Centre, Jiuquan 732750, China

* Corresponding author, E-mail: dingdingye@cqu.edu.cn

Rapid development of portable electronic devices promotes the demand for high performance and durability of micro power sources. As a new kind of portable power sources, microfluidic fuel cells (MFFC) utilize the parallel laminar flow to separate the fuel and the oxidant naturally without a proton exchange membrane (PEM) in traditional PEM fuel cells. As a result, a series of problems related to the PEM such as high cost, complicated water management and degradation of membrane can be eliminated. Therefore, microfluidic fuel cells have been paid more and more attention recently and are gradually becoming one of the promising micro portable power sources.

Previous studies on microfluidic fuel cells showed that due to a relatively high oxygen concentration and diffusivity of oxygen in the air, using an air-breathing cathode could alleviate the oxygen transfer limitation in traditional microfluidic fuel cells which used dissolved oxygen as oxidant. As a result, the performance could be improved by the air-breathing cathode. However, the mass transfer at the anode still limits the cell performance. To further enhance the microfluidic fuel cell performance, a porous flow-through anode could be used to achieve the convective transport of the fuel to the electrode, resulting in reduction of the concentration boundary layer thickness at the planar electrode surface. However, in most studies of microfluidic fuel cells with porous flow-through electrodes, the two-dimensional porous carbon paper was used at the anode. As a common electrode material, the three-dimensional porous carbon felt with large porosity and specific surface area is expected to further improve the microfluidic fuel cell performance.

In this study, an air-breathing microfluidic fuel cell with a carbon felt flow-through anode was fabricated and compared with the microfluidic fuel cell with a carbon paper anode. The micro morphology of electrode surface was characterized by a scanning electron microscopy (SEM). The electrochemical and cell performances were tested in acidic and alkaline conditions. The mass transport and performance characteristics of the microfluidic fuel cell with the carbon felt flow-through anode were further studied in alkaline condition. The experimental results showed that catalysts were better-distributed on the carbon felt electrode surface than that on the carbon paper electrode surface. The electrochemical performance of carbon felt electrode was superior to carbon paper electrode both in acidic and alkaline conditions because of its inherent three-dimensional porous structure. In acidic condition, the optimal power density and maximum current density of the microfluidic fuel cell with carbon felt anode were 1.8 and 2.8 times than that of the microfluidic fuel cell with carbon paper anode density, respectively. In alkaline condition, the optimal power density and the maximum current density of microfluidic fuel cell with carbon felt anode were 35.1 mW/cm² and 192.9 mA/cm², which were 5.2 and 7 times than that of the microfluidic fuel cell with carbon paper anode. Moreover, the cell performance under alkaline condition increased with an increase in the fuel and electrolyte flow rate and then remained almost the same, while it increased at first and then decreased as the fuel concentration, electrolyte and supporting electrolyte concentration increased.

porous flow-through electrode, microfluidic fuel cell, carbon felt, air-breathing

doi: 10.1360/N972017-00304