

## 分析测试

# 燃料电池的微尺度测试技术

裴媛, 郭航, 叶芳, 马重芳

(北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:**随着燃料电池体积的微化,传统的测试技术已经不再适合微型燃料电池某些参数的测试。在这种情况下,基于机电系统的微尺度测试技术被逐步引入燃料电池的测试中。本文对燃料电池的温度、湿度及燃料浓度等参数的微小型测试技术进行了回顾,同时也对引入显微镜等设备的微型燃料电池可视化系统进行了讨论。最后对燃料电池的微尺度测试技术发展前景进行了分析。

**关键词:**燃料电池;微型机电系统;测试;电化学

中图分类号:TM911.4

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)03-0087-06

## Micro-scale measuring and testing techniques for fuel cells

PEI Yuan, GUO Hang, YE Fang, MA Chong-fang

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education, Beijing Municipal Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** With the microminiaturization of fuel cells, the traditional testing techniques is no longer suitable to some parameters test for micro fuel cells. Therefore, micro-scale measuring and testing techniques based on micro-electro-mechanical systems (MEMS) is introduced into fuel cells measurement. In this paper the measurement methods for temperature, humidity and concentration testing in fuel cells are reviewed. Visualization system of two-phase flow based on microscopy for micro fuel cells is discussed. And the long-term potential of micro scale measuring and technologies for fuel cells are also analyzed.

**Key words:** fuel cells; micro electro mechanical systems; testing; electrochemistry

燃料电池(Fuel Cell, FC)是将储存在燃料中的化学能直接转化成电能电化学发电装置<sup>[1]</sup>,随着现代通信技术的高速发展,逐步被应用于可移动电子产品(如手机、笔记本电脑、便携式摄像机等),并且逐渐向更加紧凑、微型化结构的方向发展。在这种情况下,微型燃料电池(Micro Fuel Cell,  $\mu$ FC)更是脱颖而出成为研究的热点<sup>[2]</sup>。

对于燃料电池来说,其运行时内部的温度、湿度以及燃料的浓度等参数均是影响其电性能的重要因素<sup>[3-4]</sup>。然而,随着燃料电池结构的紧凑化和微型化,随之而来的问题是:除了利用伏特计或高阻抗数字万用表直接测量燃料电池正负极瞬态开路电压<sup>[5-7]</sup>以及恒电位仪对电池内部的腐蚀测量和阻抗分析<sup>[5,8-15]</sup>等电测试技术不受尺度限制外,传统传感器均由于体积太大而难于实现电池内部参数的精

确测试<sup>[16]</sup>,不足之处在于这种电测量的测试精度和采集频率要比同等情况下集成电子负载测试系统<sup>[2,17-19]</sup>的低。除此以外,目前燃料电池运行参数的测试中不少是直接将传感器置于电池的进出口处监测电池进出口处反应物的温、湿度值等。但燃料电池进出口处的参数值与内部电化学反应区的参数值之间存在很大的差异,无法代替电池内部电化学反应区真实状态的<sup>[20]</sup>。由此,常规测试手段由于存在尺度方面的局限性已不再适用于当前燃料电池的测试。随着微机电技术(Micro Electro Mechanical Systems technology, MEMS)被广泛应用于微型传感器和 $\mu$ FC的制作中<sup>[21]</sup>,微型温、湿度传感器及甲醇浓度传感器等逐渐被引入到燃料电池的测试中。

笔者分析了应用于燃料电池的微尺度测试技术,主要包括直接测试手段中的温度、湿度以及燃料

收稿日期:2009-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(50976006);北京市优秀人才培养项目(20081D0501500167)

作者简介:裴媛(1984-),女,硕士生;郭航(1970-),男,博士,教授,主要研究方向为动力工程及工程热物理,通讯联系人,hangguo@bjut.edu.cn。

浓度等参数的测试和非接触式测试中的红外线测温技术<sup>[10]</sup>,同时对逐步趋于完善的燃料电池两相流观测技术做了详尽的阐述。

## 1 测试技术

### 1.1 温度测试

常规热电偶由于体积的问题而难于布置于当前的微型燃料电池测试中,即使将其勉强布置于电池的流道中,由于这些传感器的导线直径几乎与膜电极的厚度相当,在使用中通过导线释放的热量会对电池内局部热流分布起到干扰作用,同时其体积太大也增加了电池的装配难度<sup>[5]</sup>,处理不当甚至会导致燃料在电池运行过程中向外泄露<sup>[20,22]</sup>。因此,目前燃料电池的测试大多数采用微型热电偶和阻抗式温度传感器(Resistance Temperature Detector, RTD)。其中,微型热电偶布置于集流板与极板之间或其他待测点上即可实现测温<sup>[19,23]</sup>,其操作简单,但电压信号不稳定,在燃料电池测试中应用较少。与传统微型热电偶相比,RTD是中低温区(-200~650℃)常用的温度检测器,其测量精度高,在燃料电池中应用十分广泛。Li等<sup>[24]</sup>将精度为0.1℃的水银温度计和RTD同时浸泡在水中,通过对水银温度计和RTD各自测试结果的比较发现RTD的测试值与水银温度计的测试值吻合甚好。此外,非接触测温领域中已用于燃料电池测试的技术主要有红外线测温,但不是十分广泛。

#### 1.1.1 阻抗式温度传感器测温

RTD主要分为电阻线温度检测器和热敏电阻器。电阻线温度检测器主要利用了金属铂(Pt)材料良好的重现性、稳定性以及电阻值随着温度呈线性变化的特性。基于MEMS制作<sup>[5]</sup>而成的电阻线温度检测器具有体积小、结构简单、精度高以及安放便捷等优点而被置于燃料电池的流道底部(图1)或气体扩散层表面中进行温度测试。被置于流道底部的电阻线温度检测器由于处于两相流流体中,制作时通常要经过物理蒸发、沉积法形成核心部件后由湿腐蚀法在其表面形成导热层作为热量传递界面<sup>[25]</sup>,然后再在其表面做绝缘处理防止燃料电池电化学反应对传感器的扰动作用<sup>[26]</sup>;当电阻线温度检测器与气体扩散层作为一体共同置于极板的肋脊上时可首先利用物理气相沉积的方法将Pt直接沉降到气体扩散层外侧的多孔硅表面,然后在传感器最外层表面沉降光阻材料作为抗腐蚀掩膜。此时铂金属面不仅作为微型温度传感器测定气体扩散层的表

面温度,同时也起到收集电流的作用<sup>[27]</sup>,这种布置方式既实现了测量的目的,又避免了对流体造成的阻力影响<sup>[28]</sup>(图2)。

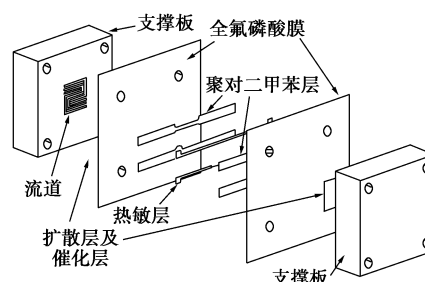


图1 电阻线温度检测器在燃料电池流道内的布置<sup>[25]</sup>

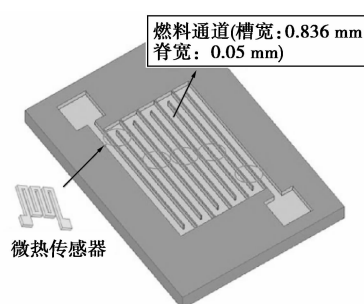


图2 电阻式测温器与气体扩散层共同置于微通道肋脊<sup>[28]</sup>

但是Pt金属线作为导线传导电子势必导致电阻线温度上升,影响到测试的精确性。应尽量将电阻线温度检测器仅作为燃料电池的温度传感器,因此需在其表面做严格的化学防腐及电绝缘处理后才能实施测试。热敏电阻器是一种对温度敏感、阻值随着温度的变化呈非线性变化的测温装置,由单晶、多晶半导体材料制成,其核心部件有两部分:薄膜和不定型锆的热敏电阻。薄膜可以由氮化硅和硅组成,表面需做绝缘处理;高灵敏度的不定型锆热敏电阻对称分布在薄膜两侧,测量过程中随着感应温度的不同呈现出不同的电阻值<sup>[11]</sup>。当热敏电阻器被制作到气体扩散层与催化层之间对电化学反应区进行温度测量时<sup>[16]</sup>可有效的增加膜的抗拉伸能力,但同时也会增加燃料在气体扩散层与催化层之间的传递阻力。Chi<sup>[20]</sup>采用不同温度传感器对运行中燃料电池做了对比实验,最终表明RTD的测量平均值要比热电偶测得的平均值精确4℃左右。尽管在测试中RDT会将部分电能转化为热量释放到电池中,但是对测量精度的影响是微乎其微的<sup>[29]</sup>。

#### 1.1.2 红外线测温技术

红外线辐射测量是微通道内部常用非接触式

测温技术,它可以定量的获得确定点温度值、区域的平均温度值及热线图。在燃料电池的测试中,红外线辐射设备通过对气体扩散层表面和流道侧壁的温度进行测试获得电池内部的温度,有效消除测温装置对微通道内流体的扰动和电化学腐蚀等影响<sup>[30]</sup>;更重要的这种测试技术可以精确地反映燃料电池内部 MEA 表面的热流分布(图3),没有传统热电偶只能监控电池流场板及端板外表面温度的弊端<sup>[31]</sup>。

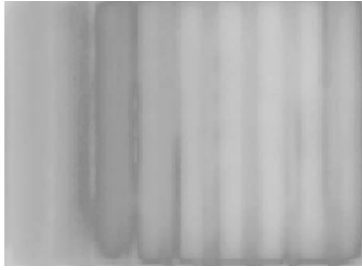


图3 红外测温技术测试燃料电池阳极 MEA 表面温度场<sup>[31]</sup>

Shou<sup>[10]</sup>用红外线辐射仪测试了不同工况时微型质子交换膜燃料电池阴极膜电极表面的温度值,并且与数值计算结果做了对比,最终通过理论计算结果很好地验证了红外线辐射测温技术在燃料电池中的实用性。Hetsroni<sup>[32]</sup>设计了尺寸和结构均类似于燃料电池的平行流场微通道用于模拟燃料电池内热流分布,在测试过程中红外线透过耐热透明玻璃端板落到气体扩散层表面,可实施温度测试。尽管红外线辐射测温技术在燃料电池中已有不少应用,但由于这种测温技术只能在被测体的表面实施,当电池端板采用有机玻璃板时需要考虑其对红外线透过性的影响,甚至根据测试要求匹配适合红外线透过的有机玻璃端板,因此增加了测试过程的局限性。

## 1.2 湿度测试

影响燃料电池膜润湿性的因素主要包括电化学反应自生成的水在浓度差和电渗透的作用下以扩散方式对膜的润湿以及被加湿的反应气流在流动过程中对膜的润湿<sup>[33]</sup>。据此,微型湿度传感器要么以膜的形式安放于气体扩散层与催化层之间,要么被布置于气体的流道内。在大多数情况下,微型湿度传感器由热稳定性好和低介电常数的聚合物制成,最终根据输出信号的不同被分为电阻式和电容式2种类型。微型电容式湿度传感器在燃料电池湿度的测试中已有应用<sup>[34]</sup>,在制作过程中首先将铬金属蒸发到硅片表面作为传感器的核心部件,然后在其表面沉降厚度为 1  $\mu\text{m}$  的聚合物膜起保护作用,最终经

过离子刻蚀作用将聚酰亚胺涂到微型湿度传感器表面作为感应膜。在测试过程中电容式湿度传感器直接热压在与极板肋脊相对应的气体扩散层表面上,当反应气通过气体扩散层时将很容易被检测到其湿度(图4)<sup>[5,20]</sup>。这种布置方式的优点在于有效的避免了传感器对流道内的流体造成流动阻力,同时也尽可能地保证了气体扩散层的有效面积。

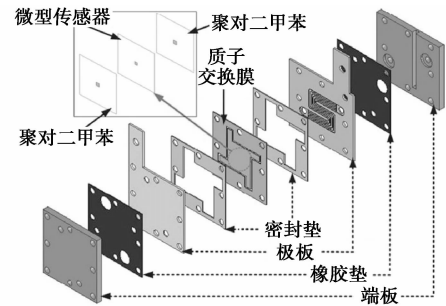


图4 微型湿度传感器被热压在燃料电池气体扩散层表面<sup>[20]</sup>

## 1.3 甲醇浓度测试

常规燃料电池中甲醇浓度的测试通常采用电容式甲醇浓度传感器。这种传感器根据不同甲醇浓度的介电常数的差异达到测量的目的,但不同浓度甲醇溶液的介电常数相差很小,因此在测试中极易出现错误。而其他根据甲醇溶液密度制成的密度计也可用于甲醇溶液的测试,但其体积太大而不适用于当前的燃料电池<sup>[35]</sup>。

当甲醇浓度低于 1 mol/L 时,限量扩散的甲醇浓度传感膜布置于直接甲醇燃料电池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)的阳极后与外部阻值固定的电阻相连,此时甲醇浓度传感器测得的甲醇溶液浓度值几乎与通过电阻的电流值呈线性,浓度不仅是浓度传感器的输出电流的函数,同时也是电池运行温度、燃料电化学反应以及燃料流速等多参数的函数,因此上述测试方法的精度具有局限性<sup>[36]</sup>。根据甲醇溶液的最大温度增长值(电池运行时阳极的最大温度值减去环境温度值)是甲醇浓度的单一函数的原理制成的微型甲醇浓度传感器,最终由电阻两端的电压值间接显示。这种浓度传感器的优点在于随着浓度传感膜厚度的增加,可测试的甲醇浓度范围也相应增加。但事实上甲醇浓度传感器是目前 DMFC 中甲醇浓度测试的一种仪器。该传感器体积小,电极的总面积也不到 1  $\text{cm}^2$ ,因此在测试中对甲醇溶液流动造成的阻力影响很小。

根据微型甲醇浓度传感器的测试原理,DMFC 中甲醇溶液浓度的测试过程分为 2 步:①当电池

运行温度高于环境温度时,测试阳极温度的最大增长值;②根据上一步的测试结果及电池最大温度增长值与甲醇溶液浓度值之间的线性关系计算甲醇溶液的浓度值。Zhen 等<sup>[35]</sup>为了验证电池最大温度增长值与甲醇浓度的关系共进行了5组实验,无论是定负载、定电流还是定电压过程都很好地证明了DMFC在运行时阳极的最大温度增长值与甲醇溶液浓度呈线性关系。但是为了保证微型甲醇浓度传感器的测试精度,在测试中甲醇溶液中甲醇的化学能要完全转换成电能,并且测试中微型甲醇浓度传感器对浓度范围有一定的限制,浓度太高或太低都会影响测量的准确性,因此在使用中同样具有一定的局限性。

由于DMFC的铂/钌催化电极对甲醇起到催化作用,最终在阳极发生电化学反应生成 $\text{CO}_2$ 、质子和电子<sup>[37]</sup>, $\text{CO}_2$ 作为甲醇溶液电化学反应的产物之一必须被及时地排出电池,否则会增加反应物的传质阻力,通常利用红外探测仪即可探测到电池阴极出口气流中 $\text{CO}_2$ 的含量<sup>[38]</sup>,进而得到甲醇从阳极窜流到阴极的含量。事实上,这种测试方法可以借鉴到DMFC阳极甲醇浓度的测试中:当DMFC在恒定工况的条件下运行时根据阴极 $\text{CO}_2$ 的含量可以间接得到甲醇的窜流量值,然后通过测定向电池阳极提供的纯甲醇和甲醇溶液的量即可计算出电池内甲醇溶液的浓度。这是一种间接的测试方法,需要在测试的基础上进一步通过计算间接得到甲醇溶液的浓度值,并不能实时监控电池阳极的甲醇溶液的浓度值,目前该方法尚未被应用到DMFC的甲醇浓度测试中。

#### 1.4 两相流监测

$\text{CO}_2$ 的产生使得直接甲醇燃料电池中的阳极流体以气液两相流的形式存在。在常规燃料电池中,气液两相流流动特性的观测大多是透过透明端板直接拍摄即可<sup>[39]</sup>。对于微型燃料电池观测,受尺寸的影响常规摄像仪的分辨率和像素都已不能满足拍摄要求。要想解决这一问题通常采用的方法是在拍摄过程中引入具有显微放大作用的高速摄像仪<sup>[40]</sup>或立体显微镜(图5)<sup>[41]</sup>将流道的局部区域放大;有时为了解决微通道内的背光问题也引入聚光灯<sup>[42]</sup>或光纤照明器<sup>[40]</sup>增强拍摄区域的亮度。因此,随着可视化技术的完善,燃料电池微通道内两相流现象的观测也不再是难题。Yang<sup>[42]</sup>用功率为600 W的聚光灯加强燃料电池两相流区域的亮度后配合使用高速动态分析系统(Kodak Ektapro-1000)和数字化

摄像机(Sony DCR-TRV900E)对实验现象进行观测和采集。其中,数字摄像机快门速度被设定为3 000 pixels/s,每帧图像又可分为3个画面,即相当于拍摄速率为9 000 pixels/s,这个拍摄速率足够将两相流的动态画面连续的拍摄下来并对其进行分析。

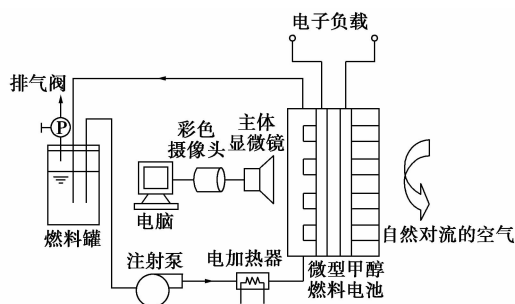


图5 直接甲醇燃料电池可视化实验装置<sup>[41]</sup>

## 2 分析与展望

微型燃料电池各部件的结构紧凑,当各种微型传感器布置于电池内部时若处理不当,会增加电池内的传质阻力。笔者认为将燃料电池与尽可能多的测试设备一体化后,不仅可提高电池内部有限空间的利用率,同时还可同时监控电池内各参数的瞬时状态、深层次探究电池内部参数之间的相互影响。两相流的观测不仅存在于DMFC的阳极,同时在PEMFC,DMFC的阴极有时也存在类似的情况。两相流的观测可以帮助我们深入探究DMFC阳极 $\text{CO}_2$ 的排出情况和PEMFC阴极凝水的排出。尤其随着燃料电池体积的微小化,流体在微型燃料电池微通道内的流动与阻力特性有别于传统燃料电池常规通道内的。微尺度两相流的观测技术将在微型燃料电池实验技术中占据越来越重要的地位。

燃料电池内电流密度分布的测试过程同样受到微尺度的挑战。根据DMFC电化学反应的关系式,电子与 $\text{CO}_2$ 的数量之间成正比例关系。因此通过定量测定不同区域 $\text{CO}_2$ 的含量可以间接判断该区域的电化学反应产生的电子量,从而了解电池在不同区域的电流密度分布状况。Liang<sup>[41]</sup>通过定量计算DMFC阳极入口处、中心部位及出口处 $\text{CO}_2$ 的算数平均值定性判断电流密度在该区域的分布状况。由于DMFC的电化学反应速度不仅受到燃料供应速率的控制,同时也受到电池运行温度、环境温度以及流体两相流流型等多方面因素的影响,因此Liang的研究结果表明电池不同部位处的电量并未呈现出与 $\text{CO}_2$ 算数平均值相同的发展趋势。笔者认为,出

现这种现象原因可能在于在电池入口处  $\text{CO}_2$  的流动方向与燃料传递方向相反,在燃料反方向推动力的作用下积聚在入口处的  $\text{CO}_2$  的量就相对较少。但是在电化学反应的中心区域,由于电化学反应较为活跃, $\text{CO}_2$  的量逐渐增多;随着  $\text{CO}_2$  在浮生力的作用下逐渐向电池出口处迁移<sup>[43]</sup>,在迁移过程中  $\text{CO}_2$  不断堆积,直至排出电池外部。笔者认为采用积分的思想将被测区域划分为很多个小区域,每个小区域的电化学反应受整个电池运行工况的影响较小,然后在采样区域足够小的情况下继续深入研究 DMFC 内电量与  $\text{CO}_2$  之间的关系对于间接整合出电流密度在电池内的分布具有重要的意义。

除了以上相关观测外,燃料电池内流体的流速和压力也是影响电池性能的重要方面,但由于结构的微型化和反应物两相流流动的影响,燃料电池内流体流速及压力降的测试至今仍然是难点,很少见到文献报道。笔者认为可考虑尝试将微通道内流体流速和压力降的测量技术<sup>[44]</sup>引用到燃料电池内流体流动的测试中。

### 3 结语

受尺度变小的影响,传统测试技术已经不再适用于微型燃料电池的测量。本文对影响燃料电池性能的温度、湿度、燃料的浓度等重要参数的微尺度测试以及电池微小流道内两相流的观测做了详细的介绍。

(1) RDT 是目前燃料电池中常用的接触测温技术。

(2) 非接触测温领域中红外线测温可避免测试过程中对微通道内流体的扰动和电化学腐蚀等影响。

(3) 微型电容式湿度传感器应用在燃料电池中减小了传感器对流道内的流体造成的流动阻力,同时也保证了气体扩散层的有效面积。

(4) 微型甲醇浓度传感器在测试中对甲醇溶液流场造成的影响较小,可靠性更好。

(5) 有显微放大作用的高速摄像机或立体显微镜设备的引入使得燃料电池两相流动观测技术更加完善。

本文还对燃料电池微尺度测试技术的发展做了分析与展望。

### 参考文献

[1] Jiang Y Q, Wang X H, Zhong L Y, *et al.* Design, fabrication and

testing of a silicon-based air-breathing micro direct methanol fuel cell[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(9): S233 - S239.

[2] Zhao T S, Wong C W, Ye Q, *et al.* Experimental investigations of the anode flow field of a micro direct methanol fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 155(2): 291 - 296.

[3] Kenis P J A, Yeom J, Jayashree R S, *et al.* Passive direct formic acid microfabricated fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(2): 1058 - 1064.

[4] Baqlo V, Stassi A, Marera F V, *et al.* Optimization of properties and operating parameters of a passive DMFC mini-stack at ambient temperature[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 180(2): 797 - 802.

[5] Lee C Y, Wu G W, *et al.* In situ diagnosis of micro metallic proton exchange membrane fuel cells using micro sensors[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(1): 363 - 367.

[6] Zhang Y, Lu J, Zhou S H, *et al.* Application of nanoimprint technology in MEMS-based micro direct-methanol fuel cell ( $\mu$ -DMFC)[J]. *Journal of Micro Electromechanical Systems*, 2008, 17(4): 1020 - 1028.

[7] Yang W M, Chou S K, Shu C. Effect of current-collector structure on performance of passive micro direct methanol fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 164(2): 549 - 554.

[8] Zhu Y L, Liang J S, Liu C, *et al.* Development of a passive direct methanol fuel cell (DMFC) twin-stack for long-term operation[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 193(2): 649 - 655.

[9] Lim S W, Kim S W, Kim H J, *et al.* Effect of operation parameters on performance of micro direct methanol fuel cell fabricated on printed circuit board[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1): 27 - 33.

[10] Shou S H, Kuan M C. Channel and rib geometric scale effects of flow field plates on the performance and transient thermal behavior of a micro-PEM fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 173(1): 222 - 232.

[11] Kuntner J, Kohl F, Jakoby B. Simultaneous thermal conductivity and diffusivity sensing in liquids using a micromachined device[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 130 - 131(14): 62 - 67.

[12] Suk W C, O'Hayre R, Yong I P, *et al.* Electrochemical impedance investigation of flooding in micro-flow channels for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1): 138 - 142.

[13] Lu G Q, Wang C Y, Yen T J, *et al.* Development and characterization of a silicon-based micro direct methanol fuel cell[J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 49(5): 821 - 828.

[14] Moghaddam S, Pengwang E, Lin K Y, *et al.* Millimeter-scale Fuel Cell with onboard fuel and passive control system[J]. *Journal of Micro Electromechanical Systems*, 2008, 17(6): 1388 - 1395.

[15] Zhang Y, Lu J, Zhou S H, *et al.* Effects of the nanoimprint pattern on the performance of a MEMS-based micro direct methanol fuel cell[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(1): Article number: 015003.

[16] Su H H, Matthew M M, Srinivas T. Thin film temperature sensor for

- real-time measurement of electrolyte temperature in a polymer electrolyte fuel cell[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 125(2): 170 - 177.
- [17] Pichonat T, Gauthier M B, Hauden D. A new proton-conducting porous silicon membrane for small fuel cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, 101(1/2/3): 107 - 111.
- [18] Shah K, Shin W C, Besser R S. A PDMS micro proton exchange membrane fuel cell by conventional and non-conventional micro fabrication techniques[J]. *Sensors and Actuators B*, 2004, 97(2/3): 157 - 167.
- [19] Liu J G, Zhao T S, Liang Z X, *et al.* Effect of membrane thickness on the performance and efficiency of passive direct methanol fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 153(1): 61 - 67.
- [20] Chi Y L, Wei J H, Guan W W. Embedded flexible micro-sensors in MEA for measuring temperature and humidity in a micro-fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 181(2): 237 - 243.
- [21] Yohtaro Y. Application of MEMS technology to micro fuel cells. *Electrochimica Acta* [J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 50(2/3): 663 - 666.
- [22] Lee C Y, Hsieh C L, Wu G W. Novel method for measuring temperature distribution within Fuel Cell using microsensors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 46(5A): 3155 - 3158.
- [23] Hassan I, Pehlivan K, Vaillancourt M. Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14/15): 1506 - 1514.
- [24] Li M M, Liu C, Liang J S, *et al.* Development of anodic flux and temperature controlling system for micro direct methanol Fuel Cell [C]//Tan J. *Proceeding of 4th International Symposium on Instrumentation Science and Technology*. UK: *Journal of Physics: Conference Series*, 2006: 1078 - 1084.
- [25] Lee C Y, Lee S J, Chuang C W, *et al.* A Novel integration approach for combining the porous silicon on a micro Fuel Cell [C]//Hinduja S, Fan K C. *Proceedings of the 35th International Matador Conference-Formerly the International Machine Tool Design and Research Conference*. England: Springer-Verlag, 2007: 133 - 136.
- [26] Pattekar A V, Kothare M V. Microreactor for hydrogen production in micro fuel cell applications[J]. *Journal of Micro Electromechanical Systems*, 2004, 13(1): 7 - 18.
- [27] Lee C Y, Lee S J, Huang R D, *et al.* Integration of the micro thermal sensor and porous silicon as the gas diffusion layer for micro fuel cell [C]//IEEE. *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology*. USA: IEEE, 2007: 1252 - 1255.
- [28] Lee C Y, Huang R D, Chuang C W. Novel integration approach for in situ monitoring of temperature in micro-direct methanol fuel cell [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(10A): 6911 - 6914.
- [29] Wang F M, Steinbrenner J E, Hidrovo C H, *et al.* Investigation of two-phase transport phenomena in microchannels using a microfabricated experimental structure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(10): 1728 - 1733.
- [30] Liu C W, Gau C, Liu C G, *et al.* Design consideration and fabrication of a microchannel system containing a set of heaters and an array of temperature sensors[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 122(2): 177 - 183.
- [31] Wang M H, Guo H, Ma C F. Temperature distribution on the MEA surface of a PEMFC with serpentine channel flow bed[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 157(1): 181 - 187.
- [32] Hetsroni G, Mosyak A, Segal Z, *et al.* Two-phase flow patterns in parallel micro-channels [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(3): 341 - 360.
- [33] Jewett G, Guo Z, Faghri A. Water and air management systems for a passive direct methanol fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 168(2): 434 - 446.
- [34] Lee C Y, Wu G W, Hsieh W J. Fabrication of micro sensors on a flexible substrate [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 147(1): 173 - 176.
- [35] Zhen G, Amir F. Thermal behavior of a novel micro-fuel cell-based methanol concentration sensor [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(13): 1605 - 1613.
- [36] Luft G, Starbeck G. Device for measuring alcohol concn, esp. in fuel cells-comprises anode, cathode and ion-permeable and diffusion-limiting membranes: US, 5624538 [P]. 1997 - 04 - 29.
- [37] Yang Y M, Liang Y C. A direct methanol fuel cell system with passive fuel delivery based on liquid surface tension [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 165(1): 185 - 195.
- [38] Baqlio V, Stassi A, Marera F V, *et al.* Investigation of passive DMFC mini-stacks at ambient temperature [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(7): 2004 - 2009.
- [39] Lu G Q, Wang C Y. Electrochemical and flow characterization of a direct methanol Fuel Cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 134(1): 33 - 40.
- [40] Ren Q X, Mo B, Jacob N C. Formation of bubbles in a simple co-flowing micro-channel [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(5): 1002 - 1011.
- [41] Liang J S, Liu C, Chen L, *et al.* In situ visual investigation of CO<sub>2</sub> bubbles clogging phenomena in  $\mu$ DMFC anode micro flow field [C]//IEEE. 2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. USA: IEEE, 2006: 1374 - 1378.
- [42] Yang H, Zhao T S, Cheng P. Gas-liquid two-phase flow patterns in a miniature square channel with a gas permeable sidewall [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(26): 5725 - 5739.
- [43] Kim D, Cho E A, Hong S A, *et al.* Recent progress in passive direct methanol fuel cells at KIST [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 130(1): 172 - 177.
- [44] Guo H, Wang L, Yu J, *et al.* Local resistance of fluid flow across sudden contraction in small channels [J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2010, 4(2): DOI 10.1007/s11708 - 009 - 0060 - 7. ■