

文章编号 1004-924X(2011)04-0820-08

# 微型直接甲醇燃料电池阴极集流板多孔结构设计

张 鹏<sup>1</sup>, 张宇峰<sup>1,2</sup>, 张 博<sup>1</sup>, 刘晓为<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对自呼吸微型直接甲醇燃料电池阴极氧气传质效率低和性能差等问题,对微型直接甲醇燃料电池阴极集流板多孔结构进行了设计和实验研究。通过建立甲醇燃料电池阴极模型,分析了集流板开孔形状和开孔率的变化对电池性能的影响,指出开孔形状对阴极电流几乎没有影响,开孔率在一定范围内变化时阴极电流变化较小。然后对得出的结果进行了实验验证。提出了一种具有平行沟道的阴极集流板多孔结构,通过对阴极氧气浓度、速度和电流密度的模拟仿真,说明了提出的结构可以有效改善氧气传质和提高电池性能。利用微精密加工技术实现了有效面积为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的自呼吸微型直接甲醇燃料电池,室温下测试显示,当甲醇溶液浓度为 $1\text{ mol/L}$ ,流速为 $1\text{ ml/min}$ 时,最大输出功率达到 $11\text{ mW/cm}^2$ ,为便携式微能源系统的应用开发奠定了基础。

**关键词:**微型直接甲醇燃料电池;阴极集流板;自呼吸;平行沟道

**中图分类号:** TM911.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0820

## Design of perforated structures of cathode current collectors in micro-direct methanol fuel cells

ZHANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Yu-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, LIU Xiao-wei<sup>1,2</sup>

(1. MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing,  
Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To solve the low efficiency of oxygen mass transport and weak performance of self-breathing micro-direct methanol fuel cells ( $\mu\text{DMFCs}$ ), the different cathode current collectors with a perforated structure were designed. Firstly, the effects of opening shapes and opening ratios on the cell performance were studied by establishing the cathode model of  $\mu\text{DMFC}$ , which indicates that the opening shapes have little effect on the cathode current density, and the variations of cathode current are rather small in the range of opening ratios. Then, experiments were performed to verify the simulations. Based on the above analysis, a cathode perforated structure with parallel channels was presented. Compared with conventional structures, the simulation results illustrate that the improved structure can effectively improve the oxygen mass transport to increase the cell performance. A self-breathing  $\mu\text{DMFC}$  with the active area of  $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$  was fabricated on the stainless steel plates by utilizing

**收稿日期:** 2010-08-08; **修订日期:** 2010-08-26.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 60806037; No. 61076105); 教育部高校博士点基金资助项目(No. 20102302110026); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(No. HIT. NSRIF. 2009008)

micromachining technology. Test results show that the peak power density of the  $\mu$ DMFC is 11 mW/cm<sup>2</sup> with methanol solution of 1 mol/L and speed of 1 ml/min at room temperature. In conclusion, the improved self-breathing cathode structure can be contribute to further development of portable micro power source systems.

**Key words:** Micro-direct Methanol Fuel Cell ( $\mu$ DMFC); cathode current collector; self-breathing; parallel channels

## 1 引言

随着微能源技术的迅速发展和其市场需求的不断增大,基于 MEMS 技术的微型直接甲醇燃料电池(Micro Direct Methanol Fuel Cell,  $\mu$ DMFC)逐渐成为研究热点<sup>[1-4]</sup>。 $\mu$ DMFC 是一种将甲醇和氧的化学能通过催化电极反应直接转换成电能的微型能源器件,通过微精密机械加工技术来实现各组件(如集流板)。 $\mu$ DMFC 除了具有一般燃料电池的优点外,还具有室温启动快速、燃料补充方便、比能量密度高、结构简单、容易操作等优势。与传统化学电池相比,  $\mu$ DMFC 在移动电话、MP3、PDA(个人数字助手)、笔记本电脑等便携式电子系统中的应用极具优势,具有广阔的市场前景。

$\mu$ DMFC 主要由阳极集流板、阴极集流板和膜电极(包括阳极和阴极扩散层、催化剂以及质子交换膜,简称 MEA)组成。在阳极反应中,甲醇水溶液在催化剂作用下发生氧化反应生成二氧化碳,同时释放出氢质子(H<sup>+</sup>)和电子(e<sup>-</sup>),电子通过阳极的传导到达外电路产生电流,而质子则直接通过质子交换膜(PEM)交换至阴极催化层表面;在阴极反应中,氧气通过扩散层到达阴极催化层表面,和穿透阳极的质子以及外电路的电子发生还原反应,最终生成水。

由以上过程可知,  $\mu$ DMFC 工作时需要不断地供给阴极氧气。考虑到便携式应用的特点,通常  $\mu$ DMFC 阴极集流板具有一定数量的自呼吸式窗口,以保证与外界空气直接接触,而氧气则通过浓度扩散方式进入电池阴极参与化学反应。近几年,这种自呼吸式  $\mu$ DMFC 阴极集流板结构已成为新的研究热点<sup>[5-9]</sup>。Kim 等人<sup>[10]</sup>分析了不同空气自呼吸开孔形状和比率对电池性能的影响。Esquivel 等人<sup>[11]</sup>利用 MEMS 体硅工艺制作出具有不同开孔率的自呼吸式阴极结构并进行了测试

分析。Hashim 等人<sup>[12]</sup>报道了一种新型自呼吸式阴极流场结构,但没有对设计初衷以及新型结构的特点加以说明与分析。总地来说,自呼吸式  $\mu$ DMFC 性能较低,而且稳定性较差,主要原因是目前阴极集流板多采用平板式直孔结构,这样导致氧气在扩散层中传质速率较慢且不均匀,而且阴极生成水不能有效地排出,造成“水淹”现象。因此,研究  $\mu$ DMFC 阴极集流板多孔结构对于电池输出性能的提高和使用寿命的延长具有十分重要的意义。本文首先对传统的阴极集流板平板式多孔结构进行了理论和实验研究,分析了开孔形状和开孔比率对  $\mu$ DMFC 的影响;在此基础上提出了一种具有平行沟道的阴极集流板多孔结构的改进方案,并进行了建模仿真,最后通过实验验证了此结构的可行性和优越性。

## 2 阴极集流板平板式多孔结构分析

### 2.1 理论分析

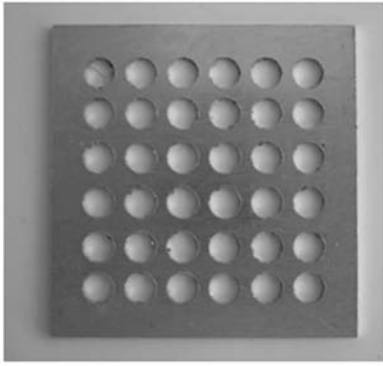
自呼吸  $\mu$ DMFC 的阴极集流板平板式多孔结构多以圆孔和方孔(条形孔也可看作是一种方孔)为主,如图 1 所示(平板大小都为 20 mm × 20 mm,开孔阵列为 6 × 6)。开孔率(指集流板开孔窗口的面积与集流板有效面积的比率)是设计阴极集流板结构的一个重要参数,直接影响  $\mu$ DMFC 的输出性能。开孔率越大,阴极与空气接触的面积也就越大,氧气传质效果就越好,但集流板导电面积减小导致接触电阻变大,因此并不是说开孔率越大性能就越高,往往存在一个最优值或者是范围。本文首先建立了阴极集流板的数学模型,对开孔形状和比率进行理论分析。

$\mu$ DMFC 催化层为发生电化学反应的区域,其质子传导和电子传导关系式分别表示为:

$$-\nabla(-\sigma_{i,\text{eff}}\nabla\phi_i) = S_a i_c, \quad (1)$$

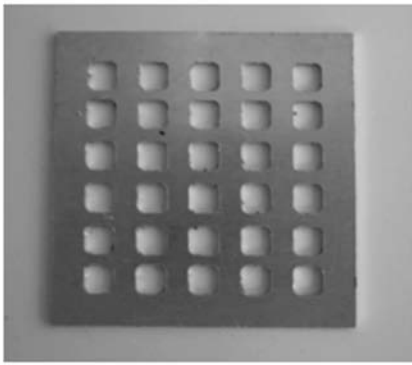
$$-\nabla(-\sigma_{s,\text{eff}}\nabla\phi_s) = S_a i_c, \quad (2)$$

其中  $\sigma_{s,\text{eff}}$  和  $\sigma_{i,\text{eff}}$  分别表示有效电子传导率和电解



(a) 圆孔照片(半径为 0.8 mm)

(a) Photo of circle openings with radius of 0.8 mm



(b) 方孔照片(边长为 2 mm)

(b) Photo of the square openings with length of 2 mm

图 1  $\mu$ DMFC 阴极平板式多孔集流板样品照片

Fig. 1 Photos of cathode current collector with different structure

质有效离子传导率,  $S_a$  为比表面积,  $i_c$  为电流密度,  $\phi_s$  为催化层过电势,  $\phi_l$  为电解液过电势。

阴极多组分混合气体的扩散流量可以由 Maxwell-Stefan 方程来求解:

$$n_i = \left\{ -\rho_g \omega_i \sum_{j=1}^3 \frac{MD_{ij}}{M_j} (\nabla \omega_j + \frac{\omega_j}{M} \nabla M) + \omega_i \rho_g u_g \right\} \quad (3)$$

这里  $n_i$  表示各组分的质量流量,  $\rho_g$  表示混合气体的密度,  $\omega_i$  表示各组分的质量分数,  $M$  为混合气体的摩尔质量,  $M_j$  为各组分的摩尔质量,  $D_{ij}$  为气体分子  $I$  在  $j$  中的二元扩散系数,  $u_g$  为气体速度。

采用 Darcy 定律建立气相物质的动量守恒方程,

$$u_g = \frac{-Kk_{rg}}{\mu_g} \nabla p_g \quad (4)$$

其中,  $K$  为多孔介质的绝对渗透率,  $\mu_g$  为气相物

质的动力学黏度,  $p_g$  为气相压强,  $k_{rg}$  为气相物质的相对透率。

建立如图 1 所示的阴极集流板多孔结构模型(圆孔和方孔), 利用瑞典公司的多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 3.6 并结合边界条件对上述方程进行耦合仿真求解, 从而分别得到当阴极集流板开孔形状为圆孔和方孔时, 开孔率与阴极集流板电流密度变化的关系, 如图 2 所示。从图中可以看出, 阴极集流板在相同开孔率情况下, 开孔形状无论是方孔还是圆孔, 对阴极集流板电流贡献几乎是相同的; 另外, 当开孔率为 0.3~0.55 时, 集流板电流密度变化较小; 开孔率超过 0.55 时, 电流密度随着开孔率增加而减小, 说明接触电阻的增大减小了电池的输出性能。

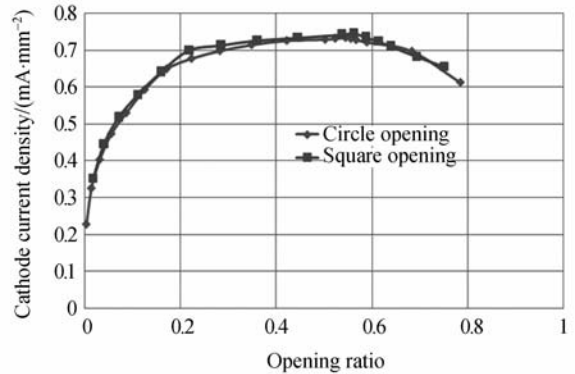


图 2 开孔率对阴极电流影响的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of effects of opening ratios on cathode currents

## 2.2 实验分析

为了验证上述仿真分析结果, 本文利用微细精密加工技术在不锈钢材料上分别加工出不同开孔形状和开孔率的多孔平板结构作为  $\mu$ DMFC 阴极集流板, 阳极集流板则采用平行流场结构。实验用膜电极阳极催化剂为载量 4.0 mg/cm<sup>2</sup> 的铂钉, 阴极催化剂为载量 4.0 mg/cm<sup>2</sup> 的铂黑, 质子交换膜为美国杜邦公司生产的 Nafion 117, 扩散层则选用日本东丽公司生产的碳纸(Toray TG-PH-090)。采用机械夹紧方法将阳极集流板、膜电极和阴极集流板以及垫片进行“三合一”封装, 并在测试性能前进行活化处理。活化条件为在 80 °C 情况下, 阳极通入浓度为 1 mol/L 的甲醇溶液, 阴极通入纯氧, 外接小负载连续工作 3~5 h。

在相同测试条件下(室温, 阳极以 1 ml/min

通入 1 mol/L 甲醇溶液), 阴极集流板分别采用不同开孔形状和开孔率的多孔结构来测试  $\mu$ DMFC 的输出性能。首先, 对阴极集流板开孔率同为 30% 的不同开孔形状(方孔与圆孔)的电池性能进行测试, 如图 3 所示。从图中可以看出, 当开孔率相同时, 不同开孔形状对电池影响甚小, 性能几乎相同, 与仿真结果相吻合。而后阴极集流板开孔形状采用圆孔形状, 在不同开孔率情况下进行测试(20%, 30%, 40%, 50%, 60%), 如图 4 所示。从结果可以看出在一定范围内(开孔率小于 55% 时), 开孔率越大, 电池性能越好; 当开孔率继续增大时, 电池性能反而降低, 这也与仿真结果基本相同。

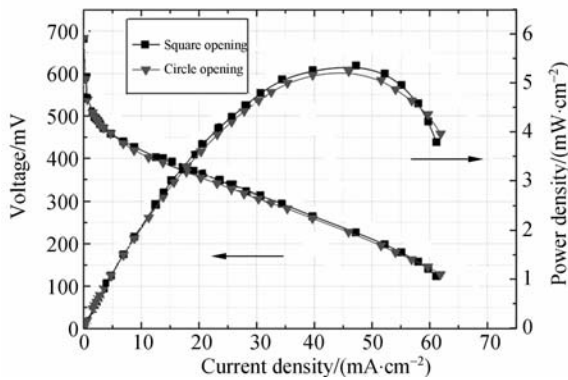


图3 相同开孔率情况下阴极不同开孔形状的电池性能曲线

Fig. 3 Performance curves of cells with different opening shapes in the case of same opening ratio

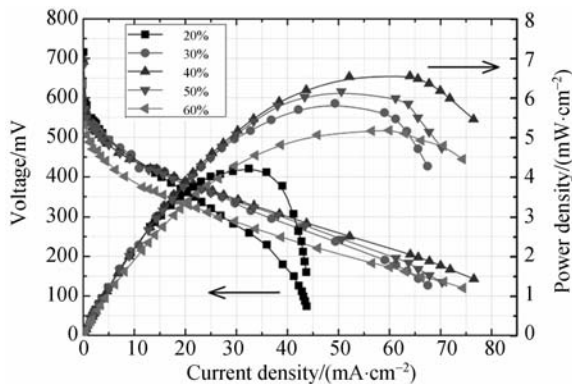


图4 阴极不同开孔率的电池性能曲线(圆孔)

Fig. 4 Performance curves of cells with different opening ratios (The opening structure is circular shape)

### 3 阴极集流板多孔结构改进与分析

#### 3.1 多孔结构改进设计

由上述分析可知, 单纯通过设计阴极集流板平板式多孔结构的开孔形状和开孔率无法很好地提高电池性能, 因此, 本文针对传统阴极集流板结构氧气传质多采用扩散方式而效率低的问题, 提出一种具有平行沟道的阴极集流板多孔结构的改进方案, 如图 5 所示。这种设计是将原有平板结构改进为平行流场结构, 虽然  $\mu$ DMFC 体积有所增加, 但是氧气传质则采用自然对流和扩散两种方式, 大大加强了传质效率。

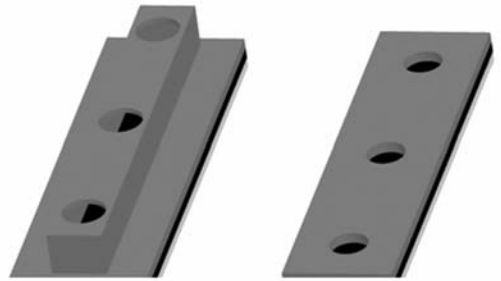
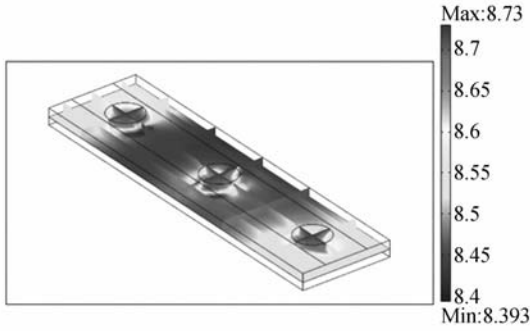


图5 阴极集流板多孔结构(左图为改进结构, 右图为传统结构)

Fig. 5 Cathode current collectors with different perforated structures (The left is improved structure and the right is conventional one)

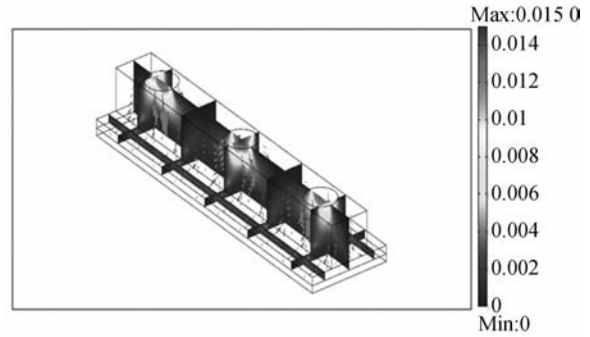
对上述两种结构利用 COMSOL Multiphysics 3.6 进行了建模耦合仿真。图 6 为两种阴极集流板结构的氧气传质浓度分布示意图, 从图中可以看出改进结构的氧气最小浓度为 8.546 mol/L, 高于传统结构(8.393 mol/L)。改进结构采用平行流道可以在不改变集流板导电面积情况下扩大氧气传质区域, 导致更多氧气对阴极进行供给。另外, 催化层上的氧气分布也较传统结构要更加均匀。

图 7 为两种结构的氧气传质速度分布示意图。改进结构中的流场沟道会对氧气传质产生截然相反的两种效果: 一方面流道深度延伸了氧气传质的距离, 降低了氧气浓度; 另一方面流道又拓宽了自呼吸开孔空间。可看出氧气对流速度要远



(a) 阴极传统结构的氧气传质浓度分布示意图

(a) Concentration distribution of oxygen mass transport with conventional structure

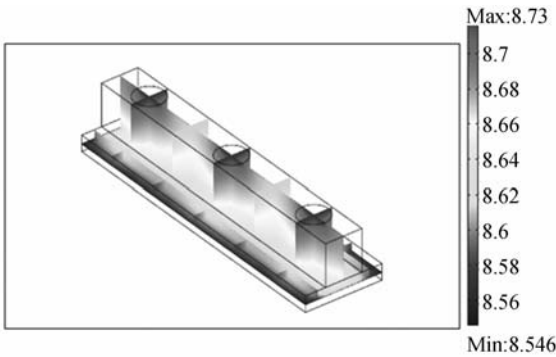


(b) 阴极改进结构的氧气传质速度分布示意图

(b) Velocity distribution of oxygen mass transport with improved structure

图 7 氧气传质速度分布示意图

Fig. 7 Velocity distributions of oxygen mass transport

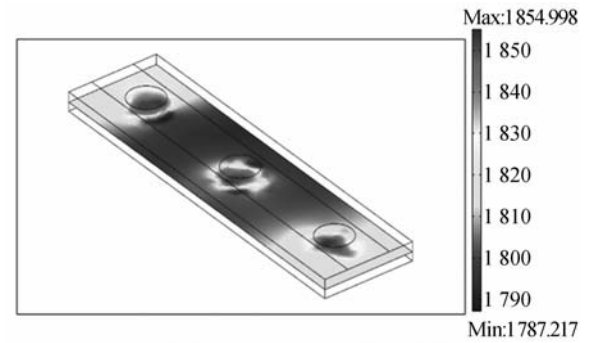


(b) 阴极改进结构的氧气传质浓度分布示意图

(b) Concentration distribution of oxygen mass transport with improved structure

图 6 氧气传质浓度分布示意图

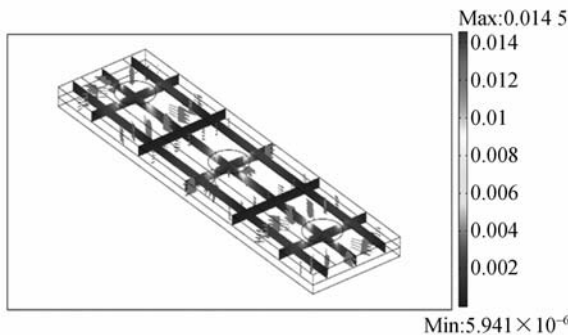
Fig. 6 Concentration distributions of oxygen mass transport



(a) 阴极传统结构的电流密度分布示意图

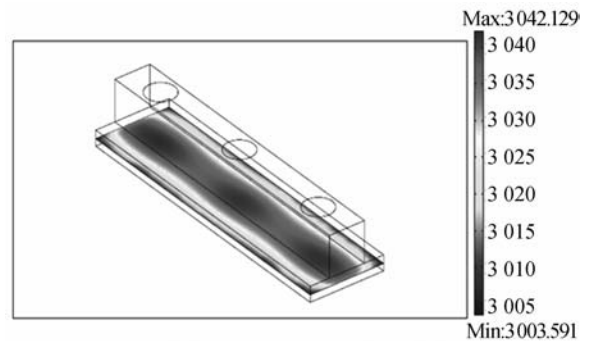
(a) Distribution of cathode current density with conventional structure

高于扩散速度,因此对流可加强反应时氧气的供给,也弥补了由于沟道深度所引起氧气浓度减小的不利影响。



(a) 阴极传统结构的氧气传质速度分布示意图

(a) Velocity distribution of oxygen mass transport with conventional structure



(b) 阴极改进结构的电流密度分布示意图

(b) Distribution of cathode current density with improved structure

图 8 阴极多孔结构的电流密度分布示意图

Fig. 8 Distributions of cathode current density with perforated structure

图 8 为两种结构的电流密度分布示意图。在阳极和阴极相同电势下改进结构的电流密度要

比传统结构大  $1000 \text{ A/m}^2$ 。这主要有两个原因:(1)改进结构加强了氧气传质,使得反应加剧;(2)改进结构由于沟道的存在可以更有效地排除水,从而增加了氧气与催化剂接触的有效面积。另外,由于氧气传质均匀,改进结构的电流密度分布也更均匀。

### 3.2 自呼吸 $\mu\text{DMFC}$ 的制作与测试

本文采用  $300 \mu\text{m}$  厚的不锈钢板作为  $\mu\text{DMFC}$  集流板的衬底材料,制作微模具并利用微冲压成型技术来完成阳极、阴极集流板。流场结构均为平行流场,采用激光打孔实现阴极集流板的开孔结构。膜电极采用如上所述的参数来制备完成。 $\mu\text{DMFC}$  有效面积为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,采用特种黏接方法将阳极集流板、膜电极和阴极集流板集成封装在一起,如图9所示。

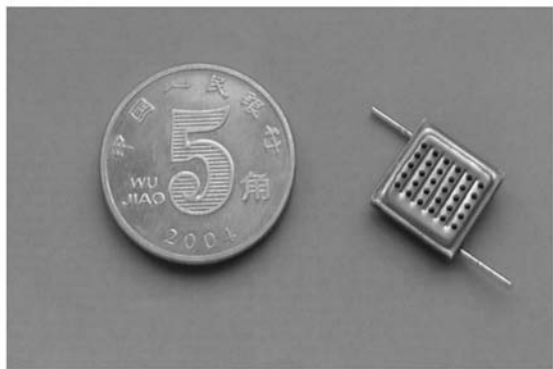


图9 自呼吸微型直接甲醇燃料电池样品

Fig. 9 Photo of the assembled self-breathing  $\mu\text{DMFC}$

在室温常压下对  $\mu\text{DMFC}$  进行了初步测试。固定甲醇溶液浓度  $1 \text{ mol/L}$ ,通过改变甲醇溶液流速来观察对电池输出性能的影响,如图10所示。从图中可清晰地看到这4种流速均未造成阳极浓差极化。流速如果过慢容易造成生成的二氧化碳气体在流道内的阻塞从而降低性能,而流速过快使得甲醇渗透加剧从而导致阴极过电势减小电池性能下降,因此在燃料电池工作时存在一个最佳流速。由图10可知,当流速为  $1.00 \text{ ml/min}$  时  $\mu\text{DMFC}$  性能最佳,其最大输出功率密度达到  $11 \text{ mW/cm}^2$ ,要远高于采用传统结构完成的  $\mu\text{DMFC}$ 。考虑到黏接方法易造成集流板与膜电极接触电阻过大,如采用机械夹紧方法将会使电池性能进一步提高。

在室温、甲醇溶液的流速和浓度分别为  $1.0 \text{ ml/min}$  和  $1.0 \text{ mol/L}$  的条件下,测试了当电流密

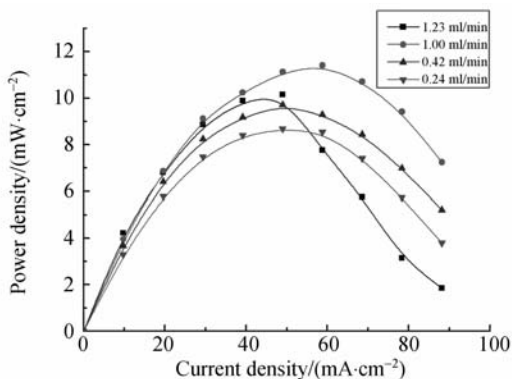


图10 不同流速下  $\mu\text{DMFC}$  性能变化曲线图

Fig. 10 Performance curves of the  $\mu\text{DMFC}$  with different flow rates

度为  $30 \text{ mA/cm}^2$  时,此  $\mu\text{DMFC}$  在  $24 \text{ h}$  不间断工作的稳定性,如图11所示。结果表明,电池长时间工作性能基本稳定, $24 \text{ h}$  之后性能大约下降  $13\%$ 。这主要是由于阴极无法有效地排除积聚在多孔电极表面的液态水,从而使电池性能随着时间增长而逐渐下降。因此,阴极“水淹”问题是影响自呼吸微型直接甲醇燃料电池稳定工作的关键因素之一。

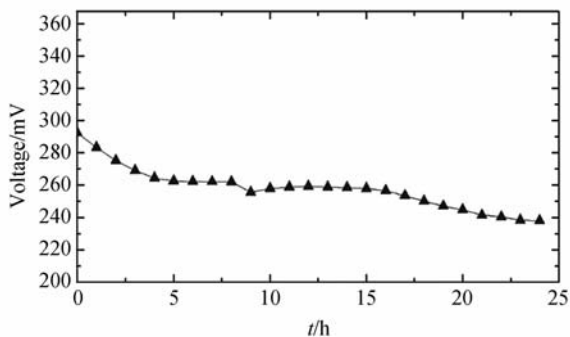


图11 一定电流密度下  $\mu\text{DMFC}$  的  $24 \text{ h}$  稳定性测试

Fig. 11 Durability testing of  $\mu\text{DMFC}$  under a certain current density

## 4 结论

本文采用建模仿真和实验相结合方法对自呼吸  $\mu\text{DMFC}$  阴极集流板多孔结构进行了分析和研究,得出以下结论:相同开孔率情况下,开孔形状对电池性能几乎无影响;开孔率在合理范围内,电池性能变化较小,但当超出范围后,性能会迅速下降。提出一种具有平行沟道的阴极集流板多孔结

构。仿真结果表明,此种结构与传统结构相比可以有效提高甲醇传质浓度和速度,阴极电流大幅度提高。在此基础上利用微精密加工技术实现了一种自呼吸微型直接甲醇燃料,常温下测试其最

大输出功率密度可达  $11 \text{ mW/cm}^2$ ,远大于采用阴极传统结构的微型直接甲醇燃料电池。这种电池有望作为微能源器件在便携式电子产品得到进一步应用。

### 参考文献:

- [1] 刘冲,吴成百,张文涛,等. 微小型燃料电池测试系统的气体流量控制[J]. 光学精密工程,2008,16(3):459-466.  
LIU CH, WU CH B, ZHANG W T, *et al.*. Gas flux control of testing system for micro/minature fuel cell [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 459-466. (in Chinese)
- [2] 汤小川,张宇峰,张博,等. 应用硅和非硅 MEMS 技术的微型直接甲醇燃料电池[J]. 光学精密工程,2009,17(6):1218-1222.  
TANG X CH, ZHANG Y F, ZHANG B, *et al.*. A Micro direct methanol fuel cell based on silicon and non-silicon MEMS Technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1218-1222.
- [3] 张谦,王晓红,郑翔. 集成在微型直接甲醇燃料电池中加热器的设计[J]. 光学精密工程,2009,17(6):1391-1396.  
ZHANG Q, WANG X H, ZHENG X. Design of heater integrated into micro direct methanol fuel cell [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1391-1396. (in Chinese)
- [4] ZHANG B, ZHANG Y F, HE H, *et al.*. Development and performance analysis of a metallic micro-direct methanol fuel cell for high-performance applications [J]. *J. Power Sources*, 2010, 195(21): 7338-7348.
- [5] CHU D, JIANG R Z. Effect of operating conditions on energy efficiency for a small passive direct methanol fuel cell [J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51(26):5829-5835.
- [6] JIANG Y Q, WANG X H, ZHONG L Y. 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.
- [7] MARTIN J J, QIAN W M, WANG H J, *et al.*. Design and testing of a passive planar three-cell DMFC [J]. *J. Power Sources*, 2007, 164(1):287-292.
- [8] CAO J Y, ZOU Z Q, HUANG Q H, *et al.*. Planar air-breathing micro-direct methanol fuel cell stacks based on micro-electronic-mechanical-system technology [J]. *J. Power Sources*, 2008, 185(1):433-438.
- [9] CHANG Y H, ZHAO T S, CHEN R, *et al.*. A small mono-polar direct methanol fuel cell stack with passive operation [J]. *J. Power Sources*, 2008, 178(1):118-124.
- [10] KIM S H, CHA H Y, MIESSE C M, *et al.*. Air-breathing miniature planar stack using the flexible printed circuit board as a current collector [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2009, 34:459-466.
- [11] ESQUIVEL J P, SABATÉ N, SANTANDER J, *et al.*. Influence of current collectors design on the performance of a silicon-based passive micro direct methanol fuel cell [J]. *J. Power Sources*, 2009, 194:391-396.
- [12] HASHIM N, KAMARUDIN S K, DAUD W R W. Design, fabrication and testing of a PMMA-based passive single-cell and a multi-cell stack micro-DMFC [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2009, 34: 8263-8269.

## 作者简介:



张鹏(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2004年、2007年于哈尔滨理工大学和哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位,主要方向为微型燃料电池。E-mail: uuzhangpeng@126.com



张博(1982—),男,辽宁沈阳人,博士,2004年、2007年和2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为MEMS和微型燃料电池。E-mail: edzhangbo@126.com.



张宇峰(1976—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,博士生导师,1999年、2001年和2004年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,目前主要从事MEMS传感器和MEMS微能源的设计和研发工作。E-mail: yufeng\_zhang@hit.edu.cn



刘晓为(1956—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,目前主要从事集成传感器、MEMS技术和无线传感网络方面的研究。E-mail: lxw@hit.edu.cn.

## ●下期预告

## 非球面精密数控研抛力控制方法的研究

史永杰<sup>1,2</sup>, 郑堤<sup>2</sup>, 王龙山<sup>1</sup>, 胡利永<sup>2</sup>

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

为了提高光学非球面表面研抛质量,控制非球面数控研抛系统中的研抛力以实现恒压力研抛,提出了一种基于磁流变力矩伺服装置(Magnetorheological torque-servo, MRT)的非球面数控研抛力控制方法。对该方法的原理、模型、影响因素等进行了研究,并研发了相应的实验研究系统。首先,阐述了基于磁流变力矩伺服装置的研抛力控制原理;其次,基于Preston方程分析了恒压力控制的重要性,基于Hertz理论建立了研抛压力模型,并建立了研抛力控制模型,探讨了影响研抛力控制的主要因素;最后,规划了系统的研抛压力并进行了实验研究。实验结果表明:在研抛用时均为90 min的情况下,恒力研抛得到的非球面表面粗糙度为 $0.067\ \mu\text{m}$ ,表面粗糙度不均匀度为94.4%,而恒压力研抛得到的表面粗糙度为 $0.028\ \mu\text{m}$ ,表面粗糙度不均匀度为11.4%,研抛质量和效率显著提高。该方法能够独立、主动、实时地控制研抛过程中的研抛力和研抛压力,实现非球面超精密、高效率、低成本数控研抛。