

文章编号:1000-582X(2009)10-1154-05

## 微型直接甲醇燃料电池流场板内多相流动分析

叶丁丁,朱 恂,廖 强,李 俊

(重庆大学 工程热物理研究所,重庆 400030)

**摘 要:**针对微型直接甲醇燃料电池,运用多孔介质理论建立了微型直接甲醇燃料电池流场板内含电化学反应的、毛细力驱动下的微通道内多相流动的传输模型;计算并分析了流场板内微通道尺寸、功率密度等重要参数对毛细力驱动下微通道中多相流动的传输特性的影响,以及流场板内微通道尺寸对电池性能的影响。结果表明:微通道内液相饱和度随通道宽度和高度的增加而增大,随节距和电池功率密度的增加而减小;电池的功率密度随微通道高度和宽度的增加而增大,随节距和长度的增加而减小。

**关键词:**直接甲醇燃料电池;微通道;电池性能;传输特性

中图分类号:TM911.4;O359

文献标志码:A

## Multiphase flow analysis in the flow field of a micro direct methanol fuel cell

YE Ding-ding, ZHU Xun, LIAO Qiang, LI Jun

(Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The multiphase flow driven by the capillary pressure in the anode flow field of a micro direct methanol fuel cell ( $\mu$ DMFC) is modeled based on the porous media theory. The electrochemical reaction at the anode is taken into account in this model. Parametric studies of the channel size and the power density are carried out to assess the effects on the transport characteristics of the multiphase flow driven by the capillary pressure in micro channels. In addition, the effects of the channel size on the cell performance are discussed. The results show that the liquid saturation in micro channels increases with the increase of the width and height of the channel, but decreases with the increase of the channel pitch and the power density. The cell performance is improved with the increase of the channel width and height. A larger channel pitch and length lead to a lower power density.

**Key words:** direct methanol fuel cells (DMFC); micro channel; cell performance; transfer characteristics

微型直接甲醇燃料电池具有结构紧凑、环境友好、方便持久、能量密度高等优点,它最有可能补充或代替目前广泛使用的蓄电池而成为将来的便携式电源,是一种具有广阔市场应用前景的高新技术,已成为电化学和能源科学领域研究的热点。

微型直接甲醇燃料电池的结构如图 1 所示。燃

料靠毛细压力驱动在微通道内流动,经阳极多孔扩散电极扩散到阳极催化层进行电化学反应,生成物  $\text{CO}_2$  返回阳极微通道内,而阴极电极完全暴露于空气中,靠空气中的氧气扩散至阴极催化层进行还原反应。大量研究学者集中于对微型直接甲醇燃料电池的设计制作<sup>[1-3]</sup>、性能<sup>[4-5]</sup>和构建电池堆<sup>[6-8]</sup>等方面

收稿日期:2009-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876119);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0912);重庆市自然科学基金资助项目(2008BB6046)

作者简介:叶丁丁(1983-),女,重庆大学博士研究生,主要从事燃料电池内传热传质研究。

廖强(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)lqzx@cqu.edu.cn。

进行研究,所制作的电池内流场板上微通道都只有几十甚至几个微米,由于流道尺寸很小,液体的表面张力起着极其重要的作用。微型燃料电池和传统燃料电池由于加工和结构上的差异,其热质传输机理和特性存在很大的差别,因此对其内部的传输特性进行研究具有非常重要的意义。

在微型直接甲醇燃料电池内部,一系列复杂的物理化学过程同时发生,其中包含气液两相流动、组分的传输、电化学反应及电荷的传输等,在电池运行过程中,阳极流场板内存在泡状、弹状等两相流型,且随着工作条件而发生变化<sup>[9]</sup>,可见,对阳极流场板内的两相流动进行模拟非常困难。Wang 等<sup>[10]</sup>采用漂移模型;王江等<sup>[11]</sup>提出“拟沸腾”的概念,建立了气液两相流压力降模型;张博等<sup>[12]</sup>用 CFD 软件对  $\mu$ DMFC 不同的流场结构进行模拟仿真。在 20 世纪 90 年代中期,Koh 等<sup>[13]</sup>首次把微结构简化成多孔介质,运用 Darcy 原理来描述其内部的流动。紧接着这一方法被广泛应用于微管道换热器,将微管道换热器抽象为多孔介质处理。笔者提出把  $\mu$ DMFC 阳极流场板简化为规则结构的多孔介质,运用多孔介质理论建立微型直接甲醇燃料电池流场板内含电化学反应的、毛细力驱动下的微通道内多相流动的传输模型。

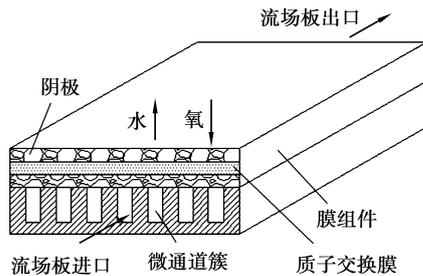


图 1 微型直接甲醇燃料电池结构示意图

## 1 数学模型

由于微型直接甲醇燃料电池流场板上的通道都是微米级的,而且燃料是靠毛细压力来驱动进入电池内部,因此可以将其流场板视作多孔介质,采用多孔介质理论对流场板上微通道内的流动进行建模。在燃料电池的阳极,随着反应的不进行,微通道内甲醇水溶液沿液体流动方向不断减少,而生成的  $\text{CO}_2$  不断增加,显然流场板微通道中为气液两相流动。模型取沿流动方向(即  $x$  方向)的单个微通道作为容积平均法的表征体元(Representative elementary volume, REV)。

模型运用了如下假设:电池内部温度恒定,工质为常物性;通道内为一维稳态的多相流动;通道中气体压力( $P_g$ )基本保持不变;不考虑渗透通过质子交换膜的甲醇和水;进入燃料电池的甲醇水溶液的摩尔数之比为 1:1,其在通道中完全反应。

流道内液相质量守恒方程

$$dq_m = -d(\rho_l A_1 u), \quad (1)$$

式中, $\rho_l$  表示甲醇水溶液的密度; $A_1$  表示微通道截面上液体所占的面积; $u$  表示甲醇水溶液在微通道内的流速; $q_m$  表示为甲醇水溶液的质量流量,与电化学反应有如下关系:

$$dq_m = \frac{i_0 \omega N}{6F} dx, \quad (2)$$

式中, $\omega$  表示流场板微通道的宽度; $N$  为甲醇的摩尔质量; $F$  为法拉第常数; $i_0$  为单位通道面积上的甲醇参加电化学反应所产生电流。

动量方程

$$d(\rho_l A_1 u^2) = -A_1 dP_l - A_1 dP_f, \quad (3)$$

式中  $P_l$ 、 $P_g$  分别表示微通道内液相、气相的压力,根据  $P_c = P_g - P_l$  有

$$dP_l = -dP_c, \quad (4)$$

毛细压力  $P_c$  是液相饱和度的函数,通用的经验式<sup>[14]</sup>为

$$P_c = (\epsilon/k)^{1/2} \sigma J(S), \quad (5)$$

式中, $\epsilon$  为流场板孔隙率, $\epsilon = \omega/p$ , $p$  为流场板微通道的节距,即为相邻两个微通道中心线之间的距离; $\sigma$  表示甲醇水溶液的表面张力; $k$  表示多孔介质的绝对渗透率,计算公式为

$$k = 2\epsilon d^2/C, \quad (6)$$

式中, $C$  为矩形通道内层流流动阻力修正系数, $C = fRe/64$ ,可由文献<sup>[15]</sup>确定; $d$  表示微通道的当量直径:

$$d = 2h\omega/(h + \omega), \quad (7)$$

$h$  表示微通道的高度; $J(S)$  为 Leverett 函数,可用下式确定<sup>[16]</sup>:

$$J(S) = 1.417(1 - S) - 2.120(1 - S)^2 + 1.263(1 - S)^3, \quad (8)$$

式中,相对饱和度  $S$  为

$$S = (s_l - s_{irl})/(1 - s_{irl} - s_{irg}), \quad (9)$$

其中, $s_l$  为液相饱和度, $s_{irl}$ 、 $s_{irg}$  分别是微通道中液相和气相的不可驱替饱和度,式(3)中  $dP_f$  为液相在微通道中流动的阻力损失,可由达西定律<sup>[14]</sup>求得:

$$dP_f = \frac{\mu_l q_l dx}{k_{eff} A} = \frac{\mu_l u s_l \epsilon}{k_{eff}} dx, \quad (10)$$

式中, $\mu_l$  表示甲醇水溶液的动力粘度; $q_l$  为通道内液

体的体积流量;  $k_{\text{eff}}$  为流场板通道的有效渗透率, 计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$k_{\text{eff}} = kk_{r1}, \quad (11)$$

$$\frac{ds_1}{dx} = \frac{K\mu_1 sh(l-x) - 2K^2 \rho_1 s_1 k(l-x)}{K^2 \rho_1 k(l-x)^2 + (\epsilon/k)^{1/2} \sigma \frac{ks_1^3 h^2 (-3.789S^2 + 3.338S - 0.966)}{1 - s_{\text{irf}} - s_{\text{irg}}}}, \quad (13)$$

式中,  $K = i_0 N / (6F\rho_1)$ 。流场板通道进口处的流体为摩尔数之比为 1:1 的甲醇水溶液, 液相饱和度为 1。沿着液体流动方向, 甲醇水溶液因参加反应而逐渐减少,  $\text{CO}_2$  气体的量随着电化学反应的进行逐渐增多, 因此边界条件为:  $x=0, s_1=1$ 。

## 2 计算结果及分析

针对微型直接甲醇燃料电池流场板通道内部的液相饱和度分布、流场板微通道结构尺寸等对燃料电池性能的影响进行了计算(采用的物性参数见表 1), 计算结果如下。

表 1 物性参数表

| 符号               | 单位                 | 数值                      |
|------------------|--------------------|-------------------------|
| $F$              | C/mol              | 96 487                  |
| $N$              | kg/mol             | 0.032                   |
| $s_{\text{irg}}$ | —                  | 0.15                    |
| $s_{\text{irf}}$ | —                  | 0                       |
| $\mu_1$          | N s/m <sup>2</sup> | $7.18 \times 10^{-4}$   |
| $\rho_1$         | kg/m <sup>3</sup>  | 851.0                   |
| $\sigma$         | N/m                | $2.9267 \times 10^{-2}$ |

### 2.1 流场板微通道内毛细力驱动下多相流动传输特性分析

不同条件下流场板内甲醇溶液液相饱和度分布见图 2~图 4。由图中可以看出, 从甲醇溶液的进口到出口, 液体饱和度逐渐减小。这主要是由于随着电化学反应的进行, 通道内甲醇溶液的流量逐渐减小, 而  $\text{CO}_2$  气体不断增加, 因此液相饱和度逐渐下降。而正是由于液相饱和度梯度的存在, 在通道内形成了毛细压力, 克服流动阻力, 驱动甲醇溶液进入燃料电池。显然, 对于流场板微通道长度一定的微型直接甲醇燃料电池, 出口液相饱和度越低, 液相饱和度梯度越大, 毛细压力越大, 出口饱和度为零时对应的燃料电池功率密度最大, 电池性能最佳。在微通道的同一截面上, 随着微通道宽度的增加、高度的增加、节距的减小, 微通道内的液体饱和度是增大的。这主要是由于微通道宽度的增大和微通道节距的减小都导致通道的孔隙率增大, 而微通道高度的增大和孔隙率的增大, 都会引起渗透率增大, 从而导致毛细压力梯度即液相饱和度梯度的减小。

$k_{r1}$  表示液相的相对渗透率, 计算公式为<sup>[16]</sup>

$$k_{r1} = s_1^3, \quad (12)$$

联立式(1)~(12), 经推导整理可得

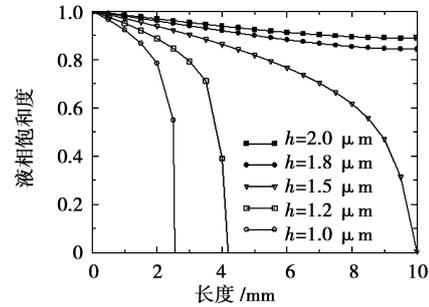


图 2 高度对液相饱和度分布的影响

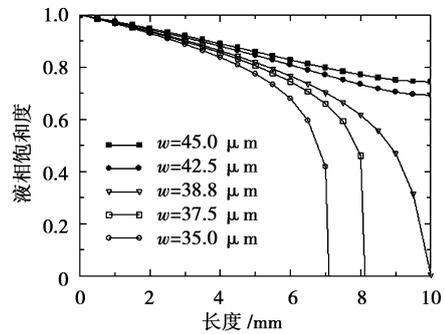


图 3 宽度对液相饱和度分布的影响

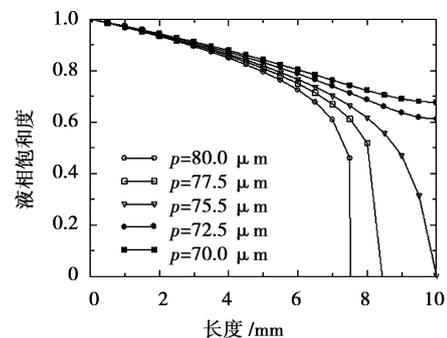


图 4 节距对液相饱和度分布的影响

在微型直接甲醇燃料电池的微通道尺寸一定的情况下, 电池功率密度对传输特性的影响如图 5 所示。从图中可以看出, 随着电池功率密度的增加, 微通道内的液体饱和度减小。这是因为功率密度增大意味着单位面积上消耗的甲醇量增多, 微通道内甲醇流量增大, 流动阻力增大, 毛细压力梯度即液相饱和度梯度也随之增大。

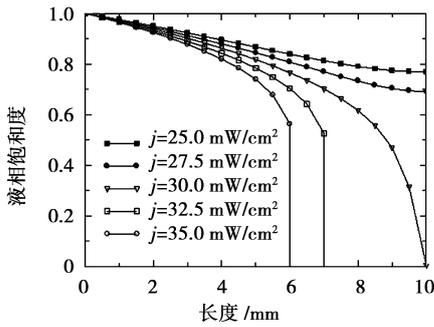


图 5 功率密度对液相饱和度分布的影响

### 2.2 流场板微通道尺寸对电池性能的影响

功率密度是衡量电池性能的一个重要因素,文中计算得到在一定通道尺寸条件下当进口甲醇溶液饱和度为 1 而出口甲醇溶液液相饱和度为零时的最大功率密度,如图 6~9 所示。从图 6 和 7 中可看出,随着微通道高度、宽度的增加,电池的功率密度增加。从图 9 和 10 可以看出,随着微通道节距、长度的增加,电池的功率密度减小。

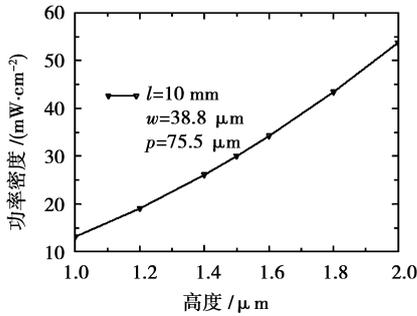


图 6 微通道高度对功率密度的影响

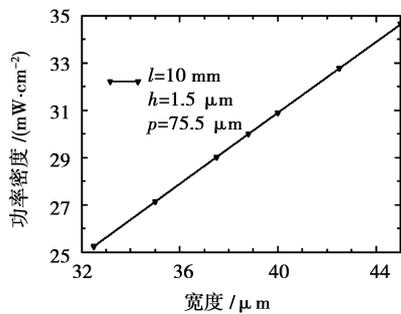


图 7 微通道宽度对功率密度的影响

这主要是由于微通道高度增加,甲醇的流量增大,单位面积上参加电化学反应的甲醇量相应增多,因此功率密度也随之增大。当微通道节距一定时,随着微通道宽度的增加,燃料电池的有效反应面积增大,功率密度随之增加。如果以微通道的表面积来计算功率密度(通道功率密度),其功率密度随微

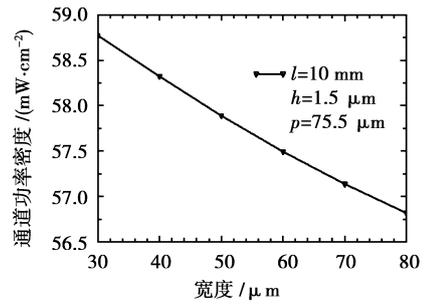


图 8 微通道宽度对通道功率密度的影响

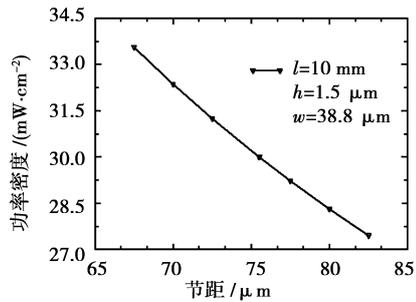


图 9 微通道节距对功率密度的影响

通道宽度的变化见图 8,从图中可看出:微通道宽度越大,功率密度越小,这主要是因为该功率密度去掉了有效反应面积在燃料电池中所占比例的影响,当微通道宽度增大时,微通道内毛细力作用减小,功率密度下降。此外,当长度增大时,单位面积上参加电化学反应的甲醇量相应减少,因此功率密度也随之减小。当微通道宽度一定时,微通道节距越大,燃料电池的有效反应面积的所占比例越小,燃料电池的功率密度越小。

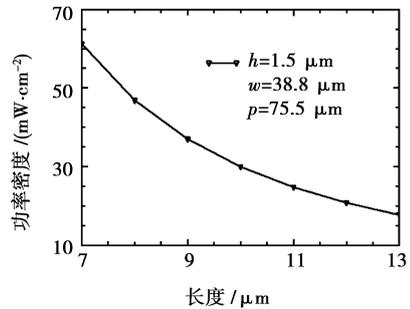


图 10 微通道长度对功率密度的影响

### 3 结 论

1)随着流场板微通道的宽度和高度的增加、以及节距的减小,微通道内甲醇溶液的液相饱和度增大。

2)随着电池功率密度的增加,微通道内甲醇溶

液的液相饱和度减小。

3)随着流场板微通道高度和宽度的增加,电池的功率密度增加;而随着微通道节距和长度的增加,电池的功率密度减小。

#### 参考文献:

- [1] SIM W Y, KIM G Y, YANG S S. Fabrication of micro power source (MPS) using a micro direct methanol fuel cell ( $\mu$ DMFC) for the medical application [C]. Interlaken, Switzerland, Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2001.
- [2] MOTOKAWA S, MOHAMEDI M, MOMMA T, et al. MEMS-based design and fabrication of a new concept micro direct methanol fuel cell ( $\mu$ DMFC) [J]. Electrochemistry Communications, 2004, 6: 562-565.
- [3] GUO Z, CAO Y. A passive fuel delivery system for portable direct methanol fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2004, 132: 86-91.
- [4] LU G Q, WANG C Y. Development of micro direct methanol fuel cells for high power applications [J]. Journal of Power Sources, 2005, 144: 141-145.
- [5] WONG C W, ZHAO T S, YE Q, et al. Transient capillary blocking in the flow field of a micro-DMFC and its effect on cell performance [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2005, 152(8): A1600-A1605.
- [6] LEE S J, CHANG-CHIEN A, CHA S W, et al. Design and fabrication of a micro dual cell array with flip-flop interconnection [J]. Journal of Power Sources, 2002, 112: 410-418.
- [7] YU J, CHENG P, MA Z, et al. Fabrication of a twin-fuel-cell on silicon wafer [J]. Electrochimica Acta, 2003, 48: 1537-1541.
- [8] ITO T, KIMURA K, KUNIMATSU M. Characteristics of micro DMFCs array fabricated on flexible polymeric substrate [J]. Electrochemistry Communications, 2006, 8: 973-976.
- [9] Lu G Q, Wang C Y. Electrochemical and flow characterization of a direct methanol fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2004, 134: 33-40.
- [10] WANG Z H, WANG C Y. Mathematical model of liquid-feed direct methanol fuel cells [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2003, 150 (4): A508-A519.
- [11] 王江,施明恒,蒋杰,等. 直接甲醇燃料电池阳极流道两相流动的拟沸腾模型(I)流动压力降的计算[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 289-291.  
WANG JIANG, SHI MING-HENG, JIANG JIE, et al. Two phase flow in anode channel of direct methanol fuel cell (I) calculation of pressure drop [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 289-291.
- [12] 张博, 张宇峰, 刘晓为, 等. 微型直接甲醇燃料电池三维性能数值仿真[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 2160-2162.  
ZHANG BO, ZHANG YU-FENG, LIU XIAO-WEI, et al. Numerical simulation of  $\mu$ -DMFC performance [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 2160-2162.
- [13] KOH J C Y, COLONY R. Heat transfer of microstructure for integrated circuits [J]. Int Comm Heat Mass Transfer, 1986, 13(1): 89-98.
- [14] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [15] 钱滨江, 伍贻文, 常家芳, 等. 简明传热手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [16] KAVIANY M. Principles of Heat Transfer in Porous Media [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.

(编辑 陈移峰)