

# 微型燃料电池设计与三维数值模拟分析

郑道友, 钟振忠

(浙江工贸职业技术学院 汽车与机械工程学院, 浙江 温州 325003)

**摘要:**以一反应面积  $2.5 \text{ cm}^2$  利用微机电制程蚀刻流场板之微型质子交换膜燃料电池为研究对象, 利用 CFD-ACE+ 软件仿真燃料电池电化学反应分析微型燃料电池内部质子交换膜电化学反应分布情形, 三维数值仿真电池性能与实验测试数据相互验证。三维模型仿真分析 2 个不同气体流量电流密度、温度、水和水含量于质子交换膜上的分布情形。结果表明: 微型燃料电池内部温度分布受质子交换膜上气态水分布所影响, 当操作电压定在  $0.4 \text{ V}$  时, 质子交换膜上较低的气体流量会有较佳的电化学反应, 因此会有较均匀的电流密度分布, 而质子交换膜上水亦较多且均匀分布, 产生较低且较均匀的温度分布, 仿真结果阐明微型燃料电池内部物理现象。

**关键词:** 质子交换膜; 燃料电池; 微机电制程; 仿真

**中图分类号:** TK911.48

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-264-07

微型燃料电池具备低温操作、快速启动、系统重量轻、体积小及低污染等特点, 被期待为携带型电子产品的电源首选。微机电制程常用制作微尺寸材料与微小型电子仪器, 因此, 微机电制程可制作微型燃料电池, 微型燃料电池内的流场板材料利用硅晶圆蚀刻而成。

Kim 等<sup>[1]</sup>利用微机电制程在硅晶圆上制作流道。Esquivel 等<sup>[2]</sup>使用微影制程制作微型直接甲醇燃料电池流道。Henriques 等<sup>[3]</sup>推导出经验公式, 使得实验所得之燃料电池极化曲线能与公式相符。Le 等<sup>[4]</sup>说明不同操作条件, 实验与模拟值对燃料电池性能的影响。Zhu 等<sup>[5]</sup>建立 3 D 模型, 分析水在质子交换膜中的传输情形与热传递的现象。Taymaz 等<sup>[6]</sup>探讨压力对燃料电池性能的影响。Alvarado 等<sup>[7]</sup>发现流道深宽比低可增进电池电传导。Chen 等<sup>[8]</sup>计算不同流道设计在相同操作条件下比较电池性能, 实验结果表示蛇形流道在相同操作条件下具有最均匀的电流分布情况。何海婷等<sup>[9]</sup>计算分析 PEMFC 典型动态特性和温度对其工作状况的影响。陶侃等<sup>[10]</sup>通过自定义函数编入 FLUENT 软件, 对不同工作温度条件下的单电池进行了气流场及电化学仿真计算。徐青等<sup>[11]</sup>在三维非等温单相模型的基础上, 比较了 PEMFC 楔形流场与平行流场的电池性能。翟双等<sup>[12]</sup>对比了三类 PEMFC 数学模型的特点及应用范围。吴孟飞等<sup>[13]</sup>利用 FLUENT 软件针对流道的几何特征进行了系

统的数值研究与优化。

许多文献皆以数值方式探讨了燃料电池流道结构、水和热对电池质传现象与性能的影响。然而, 却很少文献以数值计算方式研究微型燃料电池质传与电流分布情形。因此, 笔者以三维数值模拟分析研究微型燃料电池, 探讨两个不同气体流量 ( $15 \text{ cm}^3/\text{min}$  和  $40 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) 电流密度、温度、水和水含量于质子交换膜上的分布情形, 并将仿真出的电池性能与实验数据相互验证比对。

## 1 理论及研究方法

微型燃料电池由许多组件所组成。图 1 为微型燃料电池与零组件示意图。

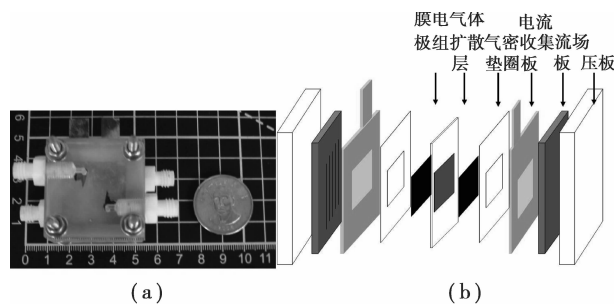


图 1 微型燃料电池与零组件示意图

### 1.1 理论模式

1) 稳态; 2) 层流; 3) 忽略重力场; 4) 等温; 5) 理想

气体;6)单相流体;7)忽略各层间的接触电阻;8)极化曲线遵守欧姆定律;9)将气体扩散系数、孔隙度、流场板及离子的导电率等参数条件,视为常数;10)假设气体扩散层、触媒层、质子交换膜为等向、均质的多孔隙材质;11)质子交换膜绝缘并且气体无法穿透。

### 1.2 统驭方程式

数值计算主要理论模式以质量、动量、电荷、物料和能量守恒方程式为理论基础,方程式建立在三维数值模型上,并使用有限体积法求解。笔者利用CFD-ACE+软件完成模型计算。

1.2.1 纯流体流场 纯流体流场说明气体在流道中,流体传输不如在多孔隙材质中需考虑到孔隙度的影响。由以上假设,在流道中的质量、动量及能量守恒方程式分别描述为:

质量守恒方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0; \quad (1)$$

动量守恒方程式

X 轴

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u); \quad (2)$$

Y 轴

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v); \quad (3)$$

Z 轴

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w). \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为流体密度, $p$ 为压力, $\mu$ 为动力黏滞系数, $U$ 为流体的速度向量。

物料守恒方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{U}Y_i) = \nabla \cdot J_i, \quad (5)$$

式中: $Y_i$ 为第*i*个物料的质量分率, $J_i$ 为扩散通量。

气体的扩散通量  $J_i$  表示为

$$J_i = \rho D_i \nabla Y_i + \frac{\rho Y_i}{M} D_i \nabla M - \rho Y_i \sum_j D_j \nabla Y_j - \rho Y_i \frac{\nabla M}{M} \sum_j D_j Y_j, \quad (6)$$

式中  $M$  为混合分子量,第 1 项为因为浓度梯度所产生的菲克扩散(Fickian diffusion),后 3 项为满足 Stefan-Maxwell 的修正项。而  $D_i$  为有效质量扩散系数,其定义为

$$D_i = D_{i,FS} \epsilon^\delta, \quad (7)$$

式中: $D_{i,FS}$ 为第*i*个气体分子的自由流体扩散系数,

$\epsilon$ 为孔隙度, $\delta$ 为多孔隙材质的弯曲度。

1.2.2 多孔隙材质 多孔性材质其几何形状相当复杂,故将其假设为等向性的阻抗,而在多孔隙材质中的质量、动量守恒方程式会受到其孔隙度  $\epsilon$  及渗透率  $\kappa$  之影响,其方程式为

质量方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho) + \nabla \cdot (\epsilon \rho U) = 0; \quad (8)$$

动量守恒方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho U) + \nabla \cdot (\epsilon \rho U U) = -\epsilon \nabla p + \nabla \cdot (\epsilon \tau) + \frac{\epsilon^3 G_F \rho}{\sqrt{k}} |U| U, \quad (9)$$

式中  $G_F$  为二次阻力系数, $\tau$  为剪应力张量。方程式(9)等号右边第 3 项及第 4 项,为因黏性及惯性所产生的损失。根据达西定律(Darcy's law),黏性损失会与流体速度成比例,其阻抗系数与孔隙度的大小有关,惯性损失则会与流体速度平方成比例。而在燃料电池中,因流体速度很低,故只考虑其黏性损失而将惯性损失忽略,故其动量方程式描述为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho U) + \nabla \cdot (\epsilon \rho U U) = -\epsilon \nabla p + \nabla \cdot (\epsilon \tau) + \frac{\epsilon^2 \mu U}{\kappa}, \quad (10)$$

式中, $\frac{\epsilon^2 \mu U}{\kappa}$ 为达西阻力(Darcy's drag force),此力会作用于孔隙中的流体,当流过多孔隙材质时,会产生一个明显的压降。

物料守恒方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \rho Y_i) + \nabla \cdot (\epsilon \rho \bar{U}Y_i) = \nabla \cdot J_i + \dot{\omega}_i. \quad (11)$$

由于在触媒层中会发生电化学反应,所以,必须加上在气相中第*i*个物料的产生率 $\dot{\omega}_i$ ,气体的扩散通量 $J_i$ 、有效扩散系数 $D_i$ 分别如方程式(6)、(7)所示。

温度场遵守能量守恒方程式

$$\nabla \cdot (\epsilon \rho U h) = \nabla \cdot q + \epsilon I \cdot \nabla U - j_e \left( \frac{s}{v} \right)_{\text{eff}} \eta + \frac{|j \cdot j|}{\sigma}, \quad (12)$$

式中: $h$ 是焓, $q$ 是热通量, $j_e$ 是交换电流密度, $s$ 是反应面积, $v$ 是体积, $\eta$ 是电极过电位, $j$ 是传输电流密度, $\sigma$ 是电导率。

反应物料于触媒层发生电化学反应,气体在此与触媒接触并产生反应,氢气分子会分解为氢离子和电子,其中氢离子会穿透高分子膜由阳极到达阴极,而电子则是通过触媒层离开由外电路到达阴极,因此,氢气进行氧化反应,而氧气则进行还原反应,

氧化与还原反应由电位差驱动,称作活化过电位。传输电流  $j$  可以藉由巴特勒-福尔默方程 (Butler-Volmer) 方程式得到,写成下列方程式:

$$j = j_e \left( \frac{C}{C_{ref}} \right)^\nu \left( \exp\left(\frac{\beta_{an} F}{RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{\beta_{ca} F}{RT} \eta\right) \right), \quad (13)$$

式中:  $C$  是反应物莫耳浓度,  $C_{ref}$  是参考莫耳浓度,  $\beta_{an}$  与  $\beta_{ca}$  分别为阳极传输常数和阴极传输常数,可由实验值取得,  $\eta$  为电极过电位。

燃料电池进行电化学反应时,性能下降的主因在于反应表面反应物物料浓度不足所造成,尤其是当电池于低电压操作时,过多的水会阻塞流道,浓度极化方程式

$$\eta_{con}^{tot} = \frac{RT}{2F} \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \frac{C_C^R}{C_L^R}, \quad (14)$$

式中,  $C_C^R$  是流道上的反应物莫耳浓度,  $C_L^R$  是触媒层上的反应物莫耳浓度,  $\alpha$  是浓度指数。

### 1.3 边界条件

微型燃料电池统驭方程式为椭圆与偏微分方程式,文中利用有限体积法将计算的区域分割成许多控制体积的计算格点,再将各个统驭方程式离散为计算格点上的代数方程式,并在计算机上执行计算。

阳极与阴极流道出口边界条件为等温流体,温度维持在 323 K,阳、阴极流道入口边界条件气体为 323 K、压力 3 atm、流量 15 cm<sup>3</sup>/min 与 40 cm<sup>3</sup>/min 的 100% 氢气与氧气。因还原速率低于氧化速率,因此设定阳极过电位值为零,所有过电位值由阴极求得,再由过电位计算出电流值。

### 1.4 解题流程

解题流程首先输入各边界上所设定的值和条件,并先在各计算区域中给定一个猜测的初始值后,开始进行迭代运算。在运算过程中,先计算出压力场及速度场,再解电流、电位及浓度场。收敛的条件是以整个计算区域两次迭代之残值最大相对误差小于 10<sup>-4</sup> 为收敛条件。模型中质子交换膜物理与化

学特性参考 Mazumder 等<sup>[14]</sup> 的论文。气体扩散系数于多孔性材质的气体扩散层、触媒层与质子交换膜孔隙度与弯曲度,利用 Bruggeman 修正 Stefan-Maxwell 方程式计算求得。表 1 与表 2 为流道、质子交换膜和电极材料尺寸与参数,并说明数值模拟起始操作条件。模型中组件与传输等参数参考 Mazumder 等<sup>[14]</sup> 与 Springer 等<sup>[15]</sup> 的论文。

表 1 模型尺寸与参数

流道长/mm	14
流道宽/mm	0.3
流道深/ $\mu$ m	500
肋条宽/mm	0.7
气体扩散层厚度/mm	0.4
阳极触媒层厚度/mm	0.018
阴极触媒层厚度/mm	0.026
质子交换膜厚度/mm	0.035
全反应面积/cm <sup>2</sup>	2.5
质子交换膜有效扩散系数 (Bruggeman 模型)	$\tau=5$
气体扩散层、触媒层有效扩散系数 (Bruggeman 模型)	$\tau=1.5$
质子交换膜渗透性/m <sup>2</sup>	$1.8 \times 10^{-18}$
气体扩散层、触媒层渗透性/m <sup>2</sup>	$1.76 \times 10^{-11}$
质子交换膜孔隙度	0.28
气体扩散层、触媒层孔隙度	0.4
气体压力/Pa	$3.03 \times 10^5$
阳极传输系数(Tafel 常数)	0.3
阳极参考电流密度/(A/m <sup>3</sup> )(m <sup>3</sup> /(kgmolH <sub>2</sub> )) <sup>1/2</sup>	$9.23 \times 10^8$
阴极传输系数(Tafel 常数)	1.5
阴极参考电流密度/(A/m <sup>3</sup> )(m <sup>3</sup> /(kgmolH <sub>2</sub> )) <sup>1/2</sup>	$1.05 \times 10^6$
气体扩散层、触媒层传导率/( $\Omega$ m) <sup>-1</sup>	0.53

表 2 模型操作条件

阳极气体	氢气入口流量/(cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	阴极气体	氧气入口流量/(cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	操作压力/Pa	操作温度/K
100% 氢气	15 与 40	100% 氧气	15 与 40	$1.01 \times 10^5$	323

### 1.5 实验

文中微型燃料电池压板选用材料为亚克力,尺寸为 45 mm×45 mm×13 mm。气密垫圈材料选用硅胶,厚度 1 mm。气体扩散层使用碳纸,厚度 0.4 mm,膜电极组选用商用膜,厚度 0.035 mm,阳极与

阴极白金触媒负载量为 0.5 mg/cm<sup>2</sup>。微型燃料电池反应面积为 2.5 cm<sup>2</sup>。

硅晶圆被选用做阳极与阴极流场板材料,流道应用微机电制程制作,图 2 为硅晶圆蚀刻流道制程流程图。

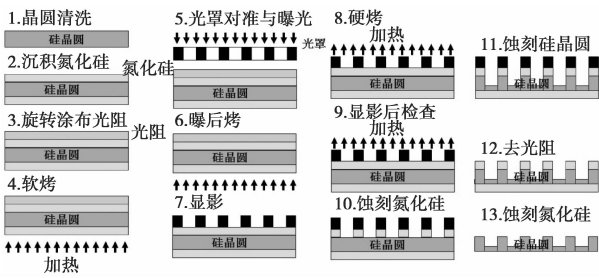


图2 硅晶圆蚀刻流道制程流程图

晶圆清洗的目的在于不破坏或劣化晶圆表面之前提下,去除晶圆表面的附着尘粒与化学不纯物,以得到洁净之晶圆。

以化学气相沉积沉积 200 nm 氮化硅,选择一面抛光后使用 AZ4620—7 μm 光阻以不同转速旋转涂布于晶圆片上。接着将晶圆片加热软烤,软烤的目的是移除涂布光阻时的溶剂。上光罩对准晶圆曝光形成微型流道形状,曝光后再加热 2~3 min 烘烤显影。

显影后再硬烤 1 min 左右,之后检查晶圆上是否显影所需流道形状,利用反应性离子蚀刻蚀刻氮化硅 300 μm 宽。氮化硅层太薄而无法让气体从入口到出口流动,因此,使用 80 °C 氢氧化钾蚀刻硅晶圆使微型燃料电池流道成形,流道深度 500 μm。接着制程为去除晶圆上的光阻,最后再以 180 °C 磷酸去除晶圆上残余的氮化硅。

阳极与阴极流道形状同样为蛇型流道,流道宽 0.3 mm,肋条宽 0.7 mm,阳、阴极入、出口处分别钻穿以让气体进出,流场面积 2.5 cm<sup>2</sup>,一个直径四吋硅晶圆可制作 4 片流场板,图 3 为硅晶圆片经微机电制程加工后之流场板。

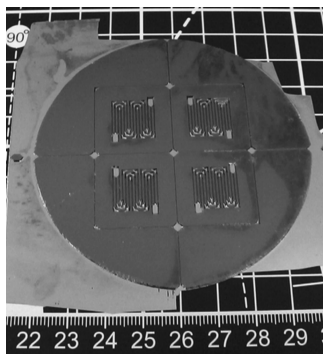


图3 蚀刻流道后硅晶圆片图

## 2 结果与分析

实验研究两不同气体流量对微型燃料电池性能

之影响,图 4 与图 5 表示气体流量 15 cm<sup>3</sup>/min 与 40 cm<sup>3</sup>/min 之极化曲线图。

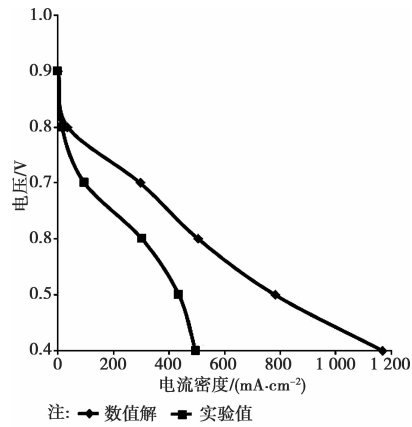


图4 数值解与实验值极化曲线验证图

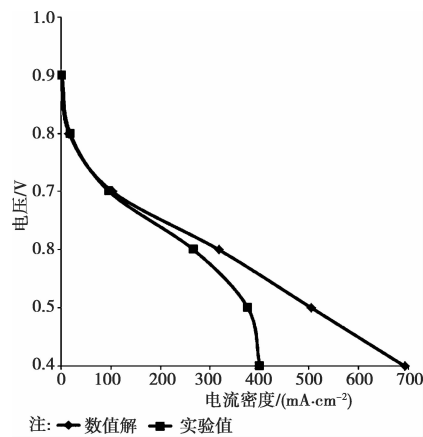


图5 数值解与实验值极化曲线验证图

由图形发现仿真值优于实验结果,但极化曲线所表达的物理现象一致。微型燃料电池在蚀刻流道与装配电池时,因误差使电池组件各层有间隙产生,造成电子传导的有效面积变小,增加电极与池体材料之间的接触阻抗,整体电化学反应随之变慢,使得实验结果所测量的数据无法实际反映理论值。而数值解因无接触阻抗困扰,欧姆极化趋于理论值,因此性能较实验值优越。并且在模拟时,假设为单相流体,亦即不考虑液态水的生成,不会发生因液态水阻塞孔隙造成水泛滥产生质传极限而导致性能下降。但模拟结果可用做观测微型燃料电池内部物理现象。

图 6 为两不同流量实验值比较极化曲线图,由图可以观察到,燃料流量增加,电池性能反而较差。燃料电池为一放热电化学反应机制,当电流密度越高,代表电化学反应越激烈,电池温度提升,水的含量也增加。电池温度提升,有助于增加电池的性能,水的含量增加会提高质子交换膜湿度,电池性能也

会随之增加,主要是由于较高的湿度能增加膜内的水含量,提高膜内的离子传导率并减小传导时所产生的奥姆阻抗。因此,当气体在高流速时,活性面积为  $2.5 \text{ cm}^2$ ,氢气分布不甚均匀,许多燃料未解离产生电化学反应即由流场板出口处流出,使得燃料利用率变得相当低,并把电池所需的热量与膜上的水一并带走。实验结束拆解电池后,并未发现电池体内有水泛滥的现象,因此可以预测微型燃料电池低流速时性能比高流速时佳,主要因为氧气还原速率低,流速太快,氧气不及扩散反应,并把热与水一并带走,而氢离子也无法有效传递。结果可知燃料流速会影响微型燃料电池性能,高流速时会造成质子交换膜湿度降低,并减小膜内的离子传导率与提高传导时的奥姆阻抗,当流速在  $15 \text{ cm}^3/\text{min}$  时,能反应较佳的性能。

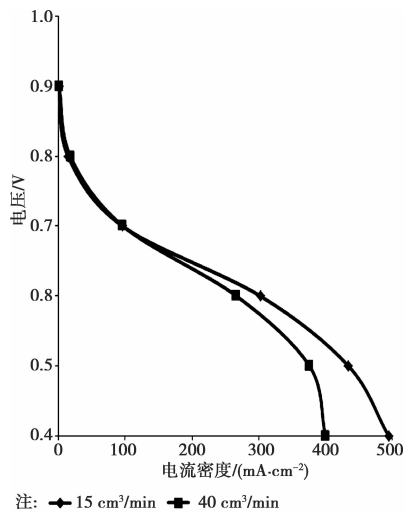


图 6 不同燃料流量实验值极化曲线图

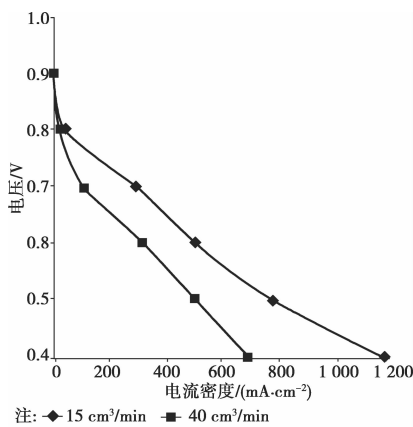


图 7 不同燃料流量数值解极化曲线图

图 7 为两不同流量数值解极化曲线图,由图 7 可发现,燃料低流量时极限电流密度明显高于高流

量时,此结果验证微型燃料电池性能与流量有关,较低的流量可增加膜内的氢离子渗透性并让氧气有效扩散,提高微型燃料电池电化学反应以提升电池性能。因此,由仿真结果证明微型燃料电池低流量时可获得较理想性能,主因在于温度与水在质子交换膜上的分布,会严重影响微型燃料电池的性能。

图 8 为定电压  $0.4 \text{ V}$  两不同燃料流量于质子交换膜上电流密度分布图,由图可判断,电流密度分布由入口处至出口出递增。燃料低流量时流道上气体浓度均匀地分布在每一条流道中,更可以明显看到由于蛇行流道能均匀地分布气体,良好的质传现象也使得电流密度分布相当的均匀,在低操作电压下,气体能有效的传递至触媒层进行反应,气体的使用率高,而在燃料高流量时无此现象,因此燃料低流量时电池性能高了许多。

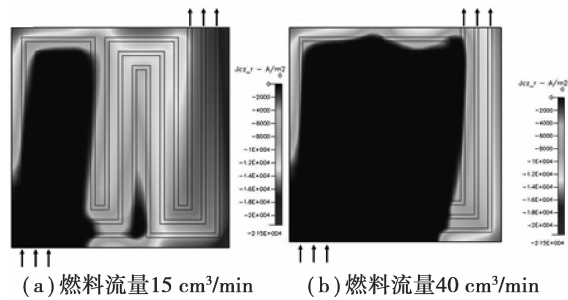


图 8 定电压  $0.4 \text{ V}$  质子交换膜电流分布图

图 9 为定电压  $0.4 \text{ V}$  两不同燃料流量于质子交换膜上温度分布图,图 9(a)表示流量  $15 \text{ cm}^3/\text{min}$  于质子交换膜上有较均匀的温度分布,温度由入口至出口处,随着电流密度增加而渐渐地降低,这是因为剧烈的电化学反应产生更多的水,湿度高的质子交换膜可增进质子传导率,较佳的电池性能也可展现出来。图 9(b)发现流量  $40 \text{ cm}^3/\text{min}$  于质子交换膜上平均温度较高,分布亦不均匀,高温会降低质子交换膜湿度增加离子传导阻抗,而在下游区有最低温产生,这可能是因为由电流密度分布图(图 8(b))可以知道燃料高流量时在下游区才有明显电流密度产生,因此也产生较多的水,但流速快,又接近出口处,因此气体迅速把产生的水带走,结果热量也一并损失。

结果说明燃料低流量时有均匀的温度分布也产生较高的电流密度,这是因为氢离子的传导率佳增进电化学反应,由图了解到微型燃料电池流道中游到下游部分有较均匀的温度分布,离子传导阻抗低,电化学反应明显。此物理现象说明微型燃料电池中游到下游产生较高的电流密度,此证明较均匀的温

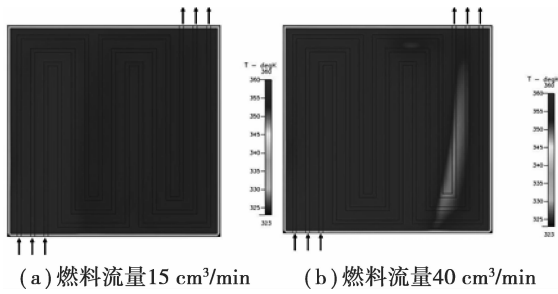


图9 定电压0.4 V质子交换膜温度分布图

度分布能产生较高的电流密度。而在文中微型燃料电池的微小反应面积(2.5 cm<sup>2</sup>),由图观察到,燃料高流量时会在质子交换膜上有热点产生,温度分布又不均匀,导致性能较差。因此,均匀的温度分布对质子交换膜上离子传导率与增加微型燃料电池性能是很重要的,较低的流量能有较均匀的温度分布。

水管理亦影响微型燃料电池性能,因此探讨微型燃料电池质子交换膜上水分布情形。图10为定电压0.4 V两不同燃料流量于质子交换膜上水分布图,在定电位情况下,水浓度由入口处至出口处渐渐增加,低流量有较稳定的电化学反应,因此也产生较多的水,结果亦指示水浓度最高在接近流道出口处,因此可以知道氧气在此处消耗最完全,氧气的反应量大,氧气浓度在此区域最低。燃料电池电化学反应会产生水,水会从质子交换膜扩散到流道,但高流量的燃料会迅速把水带走,导致较少的水累积以致膜湿度降低,产生较高离子传导阻抗让电池性能不佳。

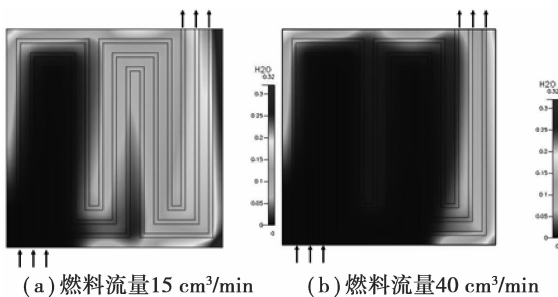


图10 定电压0.4 V质子交换膜水分布图

水含量表示水分子传递氢离子的比例,此比例指示质子交换膜饱和和水浓度,亦是降低质子交换膜电传导阻抗的重要指标,因此,维持质子交换膜均匀水含量分布可以延长微型燃料电池寿命,这是因为可以降低热点产生破坏膜电极组结构,亦可减少流道水泛滥现象。图11为定电压0.4 V两不同燃料流量于质子交换膜上水含量分布图。结果表示,在这两流量皆有随着电流密度增加,水含量增加的现象,

而因为低流量时有较高的电流密度,因此水含量也较高流量时高。水含量分布与燃料利用率息息相关,当定电压0.4 V时,燃料流量15 cm<sup>3</sup>/min会有较高的水含量,这是因为稳定的电化学反应产生较多的水,膜上较高的水含量能有较高的离子传导率,而不稳定的电化学反应无法产生足够的水,高流量的燃料更导致膜内的水含量减少,进而增加了氢离子在传导时所产生的奥姆阻抗,因此阴极端无法获得充足的氢离子供给反应,电池效能随之低落,直接反应在电流密度分布上。

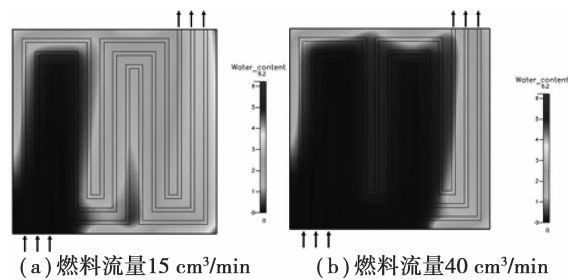


图11 定电压0.4 V质子交换膜水含量分布图

### 3 结论

携带型电子产品需要轻、薄、短、小但又具高能量的电源供应,微型燃料电池极符合此条件。文中利用微机电制程在硅晶圆上蚀刻流场制作成微型燃料电池流场板,微型燃料电池反应面积为2.5 cm<sup>2</sup>,实验成功组装一颗微型燃料电池单电池,并利用三维数值仿真验证其性能及分析质子交换膜上各种物理现象,模型仿真了2个不同燃料流量下,电流密度分布、温度分布、水与水含量分布,结果说明较低的燃料流量能有较佳的电化学反应,因此在质子交换膜上会有较均匀的温度分布,也可发现有较多也较均匀的水与水含量分布,因此表现微型燃料电池理想性能。

#### 参考文献:

[1] Kim T, Kwon S. MEMS fuel cell system integrated with a methanol reformer for a portable power source [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 154(2):204-211.

[2] Esquivel J P, Sabate N, Santander J, et al. Influence of current collectors design on the performance of a silicon-based passive micro direct methanol fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1):391-396.

[3] Henriques T, Cesar B, Branco P J C. Increasing the efficiency of a portable PEM fuel cell by altering the

- cathode channel geometry: A numerical and experimental study[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1400-1409.
- [ 4 ] Le A D, Zhou B, Shiu H R, et al. Numerical simulation and experimental validation of liquid water behaviors in a proton exchange membrane fuel cell cathode with serpentine channels [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(21):7302-7315.
- [ 5 ] Zhu X, Liao Q, Sui P, et al. Numerical investigation of water droplet dynamics in a low-temperature fuel cell microchannel; Effect of channel geometry[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(3):801-812.
- [ 6 ] Taymaz I, Benli M. Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell [J]. *Energy*, 2010, 35 ( 5 ): 2134-2140.
- [ 7 ] Alvarado B R, Guerrero A H, Robles D J, et al. Numerical investigation of the performance of symmetric flow distributors as flow channels for PEM fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(1):436-448.
- [ 8 ] Chen L, Cao T F, Li Z H, et al. Numerical investigation of liquid water distribution in the cathode side of proton exchange membrane fuel cell and its effects on cell performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(11):9155-9170.
- [ 9 ] 何海婷,贾力,张竹茜. 质子交换膜燃料电池动态特性仿真. *工程热物理学报*, 2009, 30(7):1219-1222.  
He H T, Jia L, Zhang Z Q. Modeling and simulation of PEM fuel cell dynamic behaviors [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(7):1219-1222.
- [10] 陶侃,杨代军,郑晓亮,等. 基于 Fluent 不同温度条件下的 PEMFC 仿真分析. *电源技术*, 2010, 34(4):395-398.
- Tao K, Yang D J, Zheng X L, et al. Fluent based numerical analysis of PEMFC at different operating temperatures [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2010, 34(4):395-398.
- [11] 徐青,李文娟,凌长明,等. 几何尺寸对楔形流场 PEMFC 性能的影响. *电源技术*, 2011, 35 ( 10 ): 1240-1242.  
Xu Qing, Li W J, Ling C M, et al. Effect of geometric dimensions on cell performance of PEMFC with tapered flow field [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2011, 35(10):1240-1242.
- [12] 翟双,周苏,陈凤祥,等. 质子交换膜燃料电池分布参数模型数值仿真研究进展. *同济大学学报*, 2012, 40(6): 932-936.  
Zhai S, Zhou S, Chen F X, et al. Advance in numerical simulation of distributed parameter model for PEMFCs [J]. *Journal of Tongji University*, 2012, 40 ( 6 ): 932-936.
- [13] 吴孟飞,鲁聪达,吴明格,等. 多蛇形流道几何特征的数值研究. *电池工业*, 2012, 17(4):221-226.  
Wu M F, Lu C D, Wu M G, et al. Numerical study on the geometrical feature of multiple serpentine flow channels [J]. *Chinese Battery Industry*, 2012, 17(4): 221-226.
- [14] Mazumder S, Cole J V. Rigorous 3-D mathematical modeling of PEM fuel cells II. model predicitions with liquid water transport [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, 150(4):1510-1517.
- [15] Springer T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer electrolyte fuel cell model [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1991, 138(1):2334-2342.

(编辑 胡英奎)