

研究论文

微型直接甲醇燃料电池阳极传质分析

叶丁丁, 廖 强, 朱 恂, 丁玉栋, 石 泳, 田 鑫

(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, 将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了包括流场板在内的阳极传输模型。模型考虑了阳极流道内液体饱和度沿流动方向的变化、催化层的厚度以及甲醇渗透, 计算并讨论了阳极流道内液体饱和度的分布和流量对电池电流密度的影响, 分析了阳极过电位对甲醇浓度分布和电池性能的影响以及质子交换膜内的传质特性。

关键词: 微型直接甲醇燃料电池; 阳极; 传质

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 02-0309-07

Mass transport analysis of micro direct methanol fuel cell anode

YE Dingding, LIAO Qiang, ZHU Xun, DING Yudong, SHI Yong, TIAN Xin

(Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A mathematical model for a micro direct methanol fuel cell (μ DMFC) anode was presented. In particular, the flow channels of the anode were simplified as regular porous media. The theoretical model of anode regions including flow channels was established based on the theory of porous media. In addition to the mass transport in the catalyst layer, the model considered methanol crossover caused by diffusion and electro-osmosis. The distribution of liquid saturation and the effect of anode flow rate on current density were investigated. The methanol concentration distribution in the anode was also calculated. Moreover, the characteristics of mass transport in the anode were analyzed. It was found that the methanol concentration decreased along the anode flow channels, and reduced evidently along the direction perpendicular to flow channels with an increase in overpotential. Methanol concentration distribution in the anode diffusion layer and catalyst layer showed similar variations. The methanol crossover flux decreased along the direction parallel to flow channels. A higher current density led to a lower methanol crossover flux.

Key words: micro direct methanol fuel cell; anode; mass transport

引 言

微型直接甲醇燃料电池 (μ DMFC) 是通讯设备和移动电子设备最有前途的高能量密度和长使用时间的电源之一, 正成为电化学和能源科学里的一

个研究热点。 μ DMFC 阳极流场板的微通道只有几百微米, 由于流道尺寸很小, 液体的表面张力起着极其重要的作用, 其热质传输机理和特性与常规尺寸的燃料电池存在很大差别, 因此对 μ DMFC 阳极传输特性进行研究具有非常重要的意义。

2007-06-27 收到初稿, 2007-11-19 收到修改稿。

联系人: 廖强。第一作者: 叶丁丁 (1983—), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90410005), 教育部优秀青年教师资助计划项目 (教人司 [2003] 355 号文), 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-07-0912)。

Received date: 2007-06-27.

Corresponding author: Prof. LIAO Qiang. E-mail: lqzx@cqu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (90410005).

Kulikovsky^[1]提出了一种关于 DMFC 阳极气泡流动的简单模型; Jeng 等^[2]建立了 DMFC 阳极的单相模型, 但没有考虑气相的影响; Wang 等^[3]将两相混合模型应用于 DMFC, 忽略了催化层的厚度; 王江等^[4-5]利用多孔介质模型对 DMFC 质子交换膜内两相区的形成和发展规律进行了探索研究, 并研究了膜内的传热过程和干涸现象; 郭航等^[6]对 DMFC 内部的两相流动和传质问题进行了实验研究; 张博等^[7]用 CFD 软件对 μ 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^[8]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。随后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。本文提出把 μ 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阳极流道 (ac) 内的两相传输方程, 并与阳极扩散层 (agdl)、阳极催化层 (acl)、质子交换膜 (mem) 内的传输方程进行耦合, 得到 μ DMFC 阳极传输模型。

1 数学模型描述

本模型计算区域如图 1 所示, 流体流动方向平行于 y 轴, 为运用多孔介质理论建立 μ DMFC 阳极传输模型, 取沿流道方向的单个微通道作为容积平均法的表征体元 (representative elementary volume, REV)。

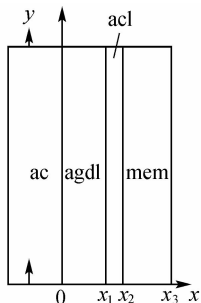


图 1 模型计算区域示意图

Fig. 1 Schematic of computational domain

模型运用了如下假设: 电池工作于稳态、等温条件下; 阳极流道内为沿 y 方向的一维层流流动; 工质为常物性不可压缩流体; 扩散层、催化层、膜为各向同性的均匀多孔介质, 且沿 y 方向尺寸远大于其厚度; 在扩散层和催化层存在两种不同性质的孔, 憎水孔和亲水孔, 分别为气体和液体的传递通道; 扩散层、催化层内部液相饱和度沿 x 方向

保持不变且并与流道内的液相饱和度分布相同; 质子交换膜完全水合; 甲醇靠扩散和电渗作用渗透通过质子交换膜, 且在膜与阴极催化层界面处被氧气完全氧化; Tafel 方程控制电化学反应动力学。

1.1 流道内传输方程

根据质量守恒建立流道内连续性方程

$$\frac{d(\rho_l A_l \bar{u}_l)}{dy} = \left[D_m^{\text{agdl}} \frac{dC_m^{\text{agdl}}}{dx} M_m - \left(\frac{I}{6F} + \lambda_w \frac{I}{F} \right) M_w \right] p \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho_g A_g \bar{u}_g)}{dy} = \frac{I}{6F} M_g p \quad (2)$$

式中 ρ 表示各相的密度, $\bar{u}$ 表示各相在微通道内的平均流速, p 表示为流场板微通道的间距 (定义为两个微通道中心线间的距离)。

根据多孔介质内两相流动的基本方程^[9]可建立流道内的动量方程

$$\frac{\rho_l}{\epsilon s_l} \frac{du_l}{dy} = - \frac{dP_l}{dy} - \frac{\mu_l}{kk_{r,l}} u_l - \rho_l \frac{C_E k^{1/2}}{kk_{r,l}} u_l^2 \quad (3)$$

$$\frac{\rho_g}{\epsilon(1-s_l)} \frac{du_g}{dy} = - \frac{dP_g}{dy} - \frac{\mu_g}{kk_{r,g}} u_g - \rho_g \frac{C_E k^{1/2}}{kk_{r,g}} u_g^2 \quad (4)$$

式中 ϵ 为双极板孔隙率, $\epsilon = w/p$, w 表示流场板微通道的宽度; u 表示各相的 Darcy 速度, 它与平均速度的关系为

$$\bar{u}_l = \frac{u_l}{\epsilon s_l}, \bar{u}_g = \frac{u_g}{\epsilon(1-s_l)}$$

P 表示微通道各相的压力; μ 表示各相的动力黏度; C_E 表示 Ergen 系数; k 表示多孔介质的绝对渗透率

$$k = 2\epsilon d^2 / C_l \quad (5)$$

d 表示微通道的当量直径

$$d = 2hw / (h + w) \quad (6)$$

C_l 为矩形通道内层流流动阻力修正系数, 可由文献 [10] 确定; $k_{r,l}$ 、 $k_{r,g}$ 分别表示液体和气相的相对渗透率, 经验公式^[9]为

$$k_{r,l} = S^3 \quad (7)$$

$$k_{r,g} = 1.2984 - 1.9832S + 0.7432S^2 \quad (8)$$

S 为相对饱和度

$$S = (s_l - s_{ir,l}) / (1 - s_{ir,l} - s_{ir,g}) \quad (9)$$

式中 s_l 为液体饱和度, $s_{ir,l}$ 、 $s_{ir,g}$ 分别是微小通道中液相和气相的不可驱替饱和度, 气液压力差等于毛细压力, 即 $P_c = P_g - P_l$, 而毛细压力是液体饱和度的函数, 通用的经验式^[9]为

$$P_c = (\epsilon/k)^{1/2} \sigma J(S) \quad (10)$$

式中 σ 表示甲醇水溶液的表面张力, $J(S)$ 为 Leverett 函数, 可由式 (11)^[9]确定

$$J(S) = 1.417(1-S) - 2.120(1-S)^2 + 1.263(1-S)^3 \quad (11)$$

流道内 CH_3OH 的质量组分方程为

$$\frac{d}{dy}(u_l s_l \bar{C}_m^{\text{ac}}) = -\frac{N_m}{h} \quad (12)$$

式中 $\bar{C}_m^{\text{ac}}$ 表示甲醇在流道横截面内的平均浓度, h 表示流场板微通道的高度。

1.2 扩散层、催化层、膜内传输方程

在阳极扩散层内甲醇以扩散方式传递到催化层, 其质量通量不变; 在催化层内的甲醇质量通量传递不仅包括扩散还有电化学反应, 因此质量通量不断减少; 由于为液体进料的 DMFC, 且质子交换膜较薄, 故可不考虑膜两侧的压差, 认为在膜内甲醇靠扩散和电渗作用传递。

扩散层内甲醇的传输方程为

$$D_m^{\text{agdl, eff}} \frac{d^2 C_m^{\text{agdl}}}{dx^2} = 0 \quad (13)$$

式中 C 表示浓度; D 表示甲醇的扩散系数; 上角标 eff 表示为有效值, 与扩散层的孔隙率 ϵ^{agdl} 有关, 可用 Bruggeman 修正式^[11] 来计算

$$D_m^{\text{agdl, eff}} = (\epsilon^{\text{agdl}})^{1.5} D_m^{\text{agdl}} \quad (14)$$

催化层内甲醇的传输方程为

$$D_m^{\text{acl, eff}} \frac{d^2 C_m^{\text{acl}}}{dx^2} + \dot{r}_m = 0 \quad (15)$$

式中 $\dot{r}_m$ 表示甲醇的体积消耗率, 它与体积电流密度 j_a 有关

$$\dot{r}_m = -j_a / (6F) \quad (16)$$

体积电流密度 j_a 可由 Tafel 方程得到

$$j_a = (1 - s_l) a I_m^{\text{ref}} \left(\frac{C_m}{C_m^{\text{ref}}} \right)^{\gamma_a} \exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a \right) \quad (17)$$

式中 a 表示阳极的比表面积, I_m^{ref} 表示阳极的参考交换电流密度, C_m^{ref} 表示甲醇的参考浓度, γ_a 表示阳极反应级数, α_a 表示阳极的传输系数, η_a 为阳极过电位。

膜内甲醇的传输方程为

$$N_m^{\text{mem}} = -D_m^{\text{mem, eff}} \frac{dC_m^{\text{mem}}}{dx} + \lambda_m \frac{I}{F} \quad (18)$$

式中 λ 表示电渗拖拽系数。膜内甲醇的质量通量不变, 而且电流密度 I 也不变, 故可得

$$D_m^{\text{mem, eff}} \frac{d^2 C_m^{\text{mem}}}{dx^2} = 0 \quad (19)$$

电流密度 I 为

$$I = \int_{x_1}^{x_2} j_a dx = \int_{x_1}^{x_2} (1 - s_l) a I_m^{\text{ref}} \left(\frac{C_m}{C_m^{\text{ref}}} \right)^{\gamma_a} \exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a \right) dx \quad (20)$$

电池的平均电流密度

$$\bar{I} = \frac{1}{l} \int_0^l I dy \quad (21)$$

1.3 边界条件

在流道和扩散层边界处甲醇浓度等于流道内的平均浓度, 在阳极扩散层和催化层边界以及催化层和膜边界处甲醇浓度相等、质量通量也相等, 根据假设, 在膜和阴极催化层边界处甲醇浓度为 0, 可得如下边界条件

$$y = 0, \bar{u}_l = Q_{m, a} / (hw), \bar{u}_g = 0, s_l = s_{l, g}, \bar{C}_m^{\text{ac}} = C_m^{\text{in}} \quad (22)$$

$$x = 0, C_m^{\text{ac}} = C_m^{\text{agdl}} \quad (23)$$

$$x = x_1, C_m^{\text{agdl}} = C_m^{\text{acl}}, D_m^{\text{agdl, eff}} \frac{dC_m^{\text{agdl}}}{dx} = D_m^{\text{acl, eff}} \frac{dC_m^{\text{acl}}}{dx} \quad (24)$$

$$x = x_2, C_m^{\text{acl}} = C_m^{\text{mem}}, -D_m^{\text{acl, eff}} \frac{dC_m^{\text{acl}}}{dx} = -D_m^{\text{mem, eff}} \frac{dC_m^{\text{mem}}}{dx} + \lambda_m \frac{I}{F} \quad (25)$$

$$x = x_3, C_m^{\text{mem}} \approx 0 \quad (26)$$

1.4 计算方法

由入口已知条件 u_l 、 s_l 、 C_m , 给定 η_a , 根据催化层边界条件用梯形公式求出电流密度 $I^{(1)}$, 然后根据各层间边界条件, 可求出用各边界甲醇浓度表示各层浓度分布, 接着可以根据甲醇浓度分布求出电流密度新值 $I^{(2)}$, 与 $I^{(1)}$ 进行比较直到前后两次计算的相对误差小于 10^{-3} , 再根据迭代计算得到的电流密度 I , 运用流道内控制方程求出下一节点的 u_l 、 s_l 、 C_m , 依次类推可以得到给定 η_a 时的液体饱和度分布、甲醇浓度分布以及电池的平均电流密度。

2 计算结果及分析

本文针对 μDMFC 阳极甲醇的两相流动和传输, 对流道内液相饱和度分布、阳极各层甲醇浓度分布等进行了计算, 模型中采用的参数和电池工作条件如表 1 所示。

2.1 阳极流道内多相流动对电池性能的影响

在一定过电位下, 阳极流道内液相饱和度沿 y 方向分布如图 2 所示, 从图中可以看出, 液相饱和度沿流动方向减小, 这是由于液相燃料参加电化学反应、不断被消耗, 生成的二氧化碳气体增加, 因此液相饱和度降低。随着流量的增大, 电池的平均电流密度下降, 其变化趋势如图 3 所示, 其原因在于其他参数不变而流量增大, 进口流速增大, 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, 从而导致液相饱和度下降, 电池的平均电流密度减小。

表 1 μDMFC 阳极模型参数表和电池工作条件

Table 1 Values of mathematic model of μDMFC anode and operation conditions

Parameters	Values
flow channel size, $l \times h \times w/\text{m}$	$0.01 \times 0.0005 \times 0.0005$
channel pitch, p/m	0.001
thickness of diffusion, catalyst layer and membrane, $\delta^{\text{agdl}}, \delta^{\text{acl}}, \delta^{\text{m}}/\text{m}$	$1.4 \times 10^{-4}, 3.0 \times 10^{-5}, 1.8 \times 10^{-4}$
cell temperature, T/K	298
pressure, P/Pa	1.013×10^5
anode inlet flow rate, $Q_{\text{in},a}/\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$	0.95
inlet methanol concentration, $C_{\text{m}}^{\text{in}}/\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0
reference concentration of methanol, $C_{\text{m}}^{\text{ref}}/\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0
irreducible saturation of gas phase, liquid phase, $s_{\text{ir},g}, s_{\text{ir},l}$	0.02, 0.0 ^[9]
Ergen constant, C_{E}	0.55 ^[10]
surface tension of methanol solution, $\sigma/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	6.492×10^{-2}
density of methanol solution, $\rho_l/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	988.48
dynamic viscosity of methanol solution, $\mu_l/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	8.855×10^{-4}
faraday constant, $F/\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$	96485.3
porosity of diffusion layer, catalyst layer, membrane, $\epsilon^{\text{agdl}}, \epsilon^{\text{acl}}, \epsilon^{\text{m}}$	0.6, 0.4, 0.28 ^[12]
anode transfer coefficient, α_a	0.35 ^[13]
electro-osmotic drag coefficient of water, methanol, λ_w, λ_m	$2.9 \exp[1029(1/333 - 1/T)]$, $x_{\text{m}}^0 \lambda_w$ ^[13]
diffusion coefficient of methanol in diffusion layer, $D_{\text{m}}^{\text{agdl}}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$2.8 \times 10^{-9} \exp[2436(1/353 - 1/T)]$ ^[14]
diffusion coefficient of methanol in catalyst layer, $D_{\text{m}}^{\text{acl}}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$2.8 \times 10^{-9} \exp[2436(1/353 - 1/T)]$ ^[14]
diffusion coefficient of methanol in membrane, $D_{\text{m}}^{\text{mem}}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$4.9 \times 10^{-10} \exp[2436(1/333 - 1/T)]$ ^[14]
anode reaction order, γ_a	1.0 ^[15]
reference exchange current density times specific area at anode, $aI_{\text{m}}^{\text{ref}}/\text{A} \cdot \text{m}^{-3}$	1.0×10^6 ^[15]

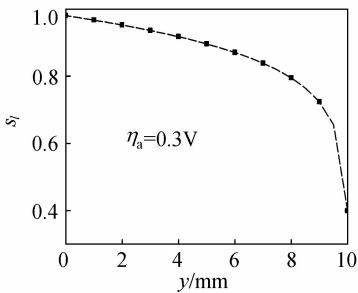


图 2 流道内液相饱和度沿 y 方向分布
Fig. 2 Distribution of liquid saturation in anode channel

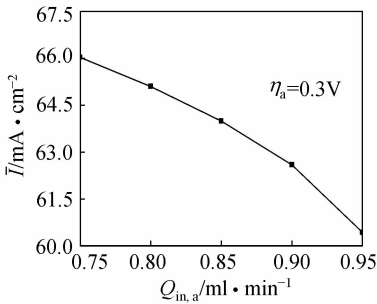


图 3 流量对电池平均电流密度的影响
Fig. 3 Effect of flow rate in anode channel
on average current density

2.2 阳极过电位对甲醇浓度分布和电池性能的影响

不同的阳极过电位对阳极各层甲醇浓度分布的影响如图 4 所示。从图中可以看出，甲醇浓度沿流动方向和垂直于流动方向都不断减小，而在阳极流道内甲醇浓度沿 y 方向变化较小，这是由于进料就是甲醇的稀溶液，摩尔分数仅为 0.01847，而甲醇和水按 1 : 1 的比例反应，且部分会渗透通过质子交换膜，剩余部分回到流道中排出，故浓度变化并不大。对于不同的阳极过电位，甲醇浓度分布有所不同，随着阳极过电位 η_a 的增大，甲醇浓度沿 x 方向下降较快，这是由于电流密度不同引起的，电流密度增大，电化学反应消耗的甲醇增多，浓度随之减少。

对于氢氧燃料电池（PEMFC）来说阴极过电位较大，而对于 DMFC，由于阳极甲醇的电化学活性较低，导致阳极过电位较大，因此对其阳极极化现象进行研究具有非常重要的意义。μDMFC 阳极过电位对平均电流密度的影响如图 5 所示。从图中可以看出，电池的平均电流密度随着阳极过电位

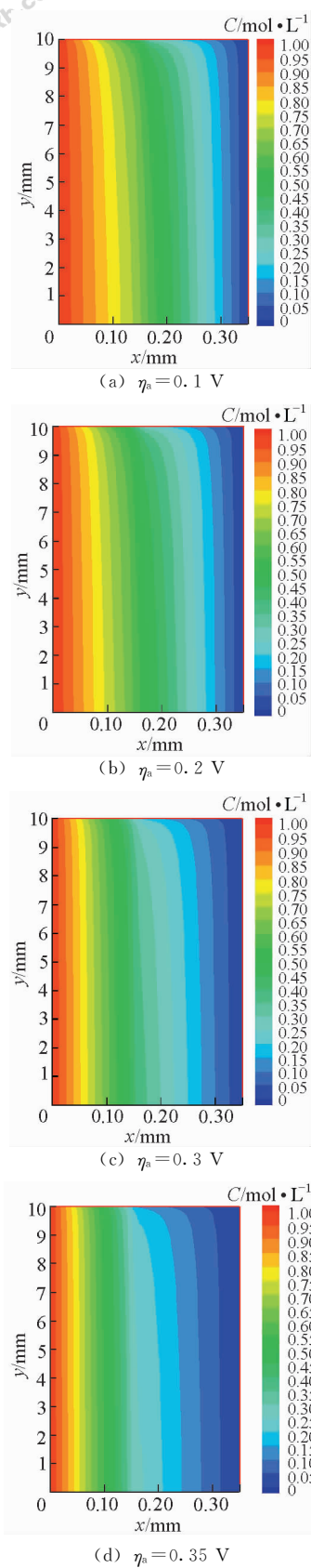


图 4 阳极过电位对甲醇浓度分布的影响
Fig. 4 Effect of anode overpotential on distribution of methanol concentration

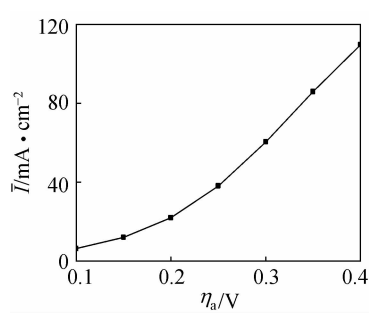


图 5 阳极过电位对平均电流密度的影响
Fig. 5 Effect of overpotential on average current density

的增大而增大，这与 Tafel 方程是吻合的。

2.3 质子交换膜内传输特性

在 DMFC 中一般使用 Nafion 膜作为电解质膜，甲醇可以渗透通过 Nafion 膜，并在阴极产生混合电位，引起阴极催化剂中毒，使得电池性能降低，因此甲醇渗透是影响 DMFC 发展和应用的一个关键问题。本模型考虑了甲醇渗透，图 6 为质子交换膜内甲醇渗透量沿 y 方向的分布图，由于沿 y 方向液相饱和度和甲醇浓度的降低，导致了质子交换膜内甲醇渗透量沿平行于流道方向降低，表明在低电流密度下甲醇渗透现象更为严重。平均电流密度对平均甲醇渗透量的影响如图 7 所示，从图中可以看出，平均甲醇渗透量随着平均电流密度的增大而减小，这是因为电流密度增大，参加反应的甲醇量增多，而流量一定，渗透量随之减少。

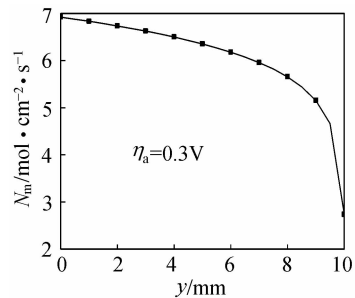


图 6 膜内甲醇渗透通量沿 y 方向分布
Fig. 6 Distribution of methanol crossover flux in membrane

3 结 论

本文将微型直接甲醇燃料电池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了包括流场板在内的 μ DMFC 阳极传输模型，通过计算和分析得到以下结论：

(1) 流道内液相饱和度沿流动方向减小；

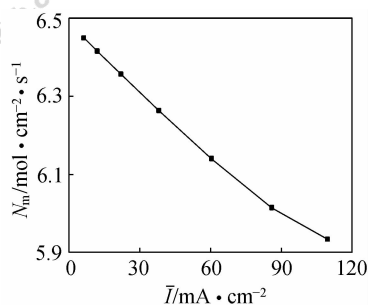


图 7 平均电流密度对甲醇渗透通量的影响

Fig. 7 Effect of average current density on methanol crossover flux

(2) 随着流量的增大, 电池的平均电流密度下降;

(3) 甲醇浓度在流道内沿流动方向的变化较小, 沿着垂直于流道方向降低, 随着阳极过电位的增大, 甲醇浓度沿垂直于流道方向下降较快;

(4) 甲醇渗透量沿平行于流道方向降低;

(5) 甲醇渗透量随着平均电流密度的增大而减小。

符 号 说 明

A ——微通道截面上各相所占的面积, m^2

C ——浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

D ——甲醇的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

F ——法拉第常数, $\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$

I ——电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$

k ——多孔介质的绝对渗透率

$k_{r,l}$ ——液体的相对渗透率

$k_{r,g}$ ——气相的相对渗透率

M ——摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

P ——压力, Pa

P_c ——毛细压力, Pa

R ——气体常数, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

S ——相对饱和度

s_l ——液相饱和度

$s_{ir,l}$ ——液相不可驱替饱和度

$s_{ir,g}$ ——气相不可驱替饱和度

T ——电池工作温度, K

α ——传输系数

γ ——反应级数

ϵ ——孔隙率

η ——过电位, V

λ ——电渗拖拽系数

μ ——动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

σ ——表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

上角标

acl——阳极催化层

agdl——阳极扩散层

eff——有效值

mem——膜

下角标

a——阳极

g——气相

in——进口

l——液相

m——甲醇

w——水

References

- [1] Kulikovskiy A A. Model of the flow with bubbles in the anode channel and performance of a direct methanol fuel cell. *J. Electrochemistry Communications*, 2005, **7**: 237-243
- [2] Jeng K T, Chen C W. Modeling and simulation of a direct methanol fuel cell anode. *J. Power Sources*, 2002, **112**: 367-375
- [3] Wang Z H, Wang C Y. Mathematical model of liquid-feed direct methanol fuel cells. *J. Electrochem. Soc.*, 2003, **150** (4): A508-A519
- [4] Wang Jiang, Shi Mingheng. Study on two-phase countercurrent flow and transport phenomenon in PEM of a direct methanol fuel cell. *Science in China: Series E Technological Sciences*, 2006, **49** (1): 102-114
- [5] Wang Jiang (王江), Shi Mingheng (施明恒). The mechanism of membrane dryout in direct methanol fuel cell. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2003, **24** (1): 103-105
- [6] Guo Hang (郭航), Jia Jieli (贾杰林), Wang Maohai (汪茂海), Liu Xuan (刘璇), Ma Chongfang (马重芳). Two-phase flow and its influence on mass transfer in DMFC. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2007, **28** (1): 101-103
- [7] Zhang Bo (张博), Zhang Yufeng (张宇峰), Liu Xiaowei (刘晓为), Qiao Yuhua (乔育花), Zhang Peng (张鹏). Numerical simulation of μ -DMFC performance. *Chinese Journal of Sensors and Actuators* (传感技术学报), 2006, **19** (5): 2160-2162
- [8] Koh J C Y, Colony R. Heat transfer of microstructure for integrated circuits. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 1986, **13** (1): 89-98
- [9] Kaviany M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. New York: Springer-Verlag, 1995: 9, 477

- [10] Qian Binjiang (钱滨江), Wu Yiwen (伍贻文), Chang Jiafang (常家芳), Ding Yiming (丁一鸣). Concise Handbook of Heat Transfer (简明传热手册). Beijing: Publishing House of Science Advanced Education, 1983: 161-163
- [11] Baschuk J J, Li X G. Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding. *J. Power Sources*, 2000, **86**: 181-196
- [12] Bernardy D M, Verbrugge M W. A mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell. *J. Electrochem. Soc.*, 1992, **139** (9): 2477-2491
- [13] Chen R, Zhao T S. Mathematical modeling of a passive-feed DMFC with heat transfer effect. *J. Power Sources*, 2005, **152**: 122-130
- [14] Scott K, Taama W M. Performance of a direct methanol fuel cell. *J. Applied Electrochemistry*, 1998, **28**: 289-297
- [15] Kulikovskiy A A, Divisek J, Kornyshev A A. Two-dimensional simulation of direct methanol fuel cell: a new (embedded) type of current collector. *J. Electrochem. Soc.*, 2000, **147** (3): 953-959