

# 进气速度对交指 HT-PEM 燃料电池性能的影响

陈士忠<sup>1</sup>, 罗鑫<sup>1</sup>, 夏忠贤<sup>1</sup>, 孔建霞<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 内蒙古医科大学计算机信息学院, 内蒙古 呼和浩特 010110)

**摘要** 目的 研究高温质子交换膜(HT-PEM)燃料电池在不同进气速度下的性能差异. 方法 改进一个耦合气体流道和气体扩散层的三维、两相、多组分 HT-PEM 燃料电池模型, 考虑 4 种进气速度对燃料电池性能的影响. 结果 提高反应气体进入流道的速度, 可以改善流道中反应气体浓度分布, 使反应气体更加均匀地分布在流道中. 在温度为 453.15 K 的交指流场中, 氧气的进气速度为 1.6 m/s, 氢气的进气速度 4 m/s 为最优进气速度. 结论 PEM 燃料电池性能在不断的改善, 交指流场中氧气浓度分布更加均匀, 进出口的压力差足够排除生成物, 膜电流密度分布的更加均匀.

**关键词** PEM 燃料电池; 交指流场; 进气速度; COMSOL

中图分类号 TM911.4 文献标志码 A

## Simulation of Effects of Intake Air Velocity on the Performance of Interdigital HT-PEM Fuel Cells

CHEN Shizhong<sup>1</sup>, LUO Xin<sup>1</sup>, XIA Zhongxian<sup>1</sup>, KONG Jianxia<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Computer and Information, Inner Mongolia Medical University, Hohhot, China, 010110)

**Abstract:** In order to study the performance difference of high temperature proton exchange membrane (HT-PEM) fuel cell at different air intake rates. We optimized a three-dimensional, two-phase and multi-component model and modeled the flow and transport in the combined gas channel and porous gas diffuser in the HT-PEM fuel cell. We considered the effects of four kinds of intake air velocities on the fuel cell performance. The simulation results showed that the rate of reaction gas entering the runner was improved, and the concentration of the reaction gas was improved in the channel. At the temperature of 453.15 K, the oxygen inlet velocity is 1.6 m/s and hydrogen inlet velocity is 4 m/s, which is the best intake rate. HT-PEM fuel cell performance was improved and the distribution of oxygen concentration was more uniform in the channel. The pressure between import and export can exclude the product and the membrane current density distribution is better.

**Key words:** PEM fuel cell; interdigitated flow field; intake velocity; COMSOL

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51176131, 51476107); 沈阳建筑大学学科涵育项目(xkhy2-114)

作者简介: 陈士忠(1979—), 男, 副教授, 博士后, 主要从事质子交换膜燃料电池技术和建筑机械研究.

质子交换膜燃料电池具有室温快速启动、高功率密度、方便携带、噪音低和零污染物排放等优点,有望替代传统的内燃机在未来交通等应用领域中起到中流砥柱的作用<sup>[1-3]</sup>.但是在这期间如果可以攻破成本和技术上的难关,从特定用途转向民用,便可加快燃料电池的推广<sup>[4-9]</sup>.交指型流场可以提高反应气体进入催化层的速率,增加膜的水合状态,加强质子交换膜的导电性,改善燃料电池的综合性能<sup>[10]</sup>.Vesselin 等<sup>[11]</sup>建立了单个 HT-PEM 燃料电池的 3D CFD 电化学模型,形象的描述了从内部流体动力场耦合到电化学反应的现象.Hrong-Wen 等<sup>[12]</sup>建立了关于电流传输通过膜电极组件和电化学反应的模型,深入研究了气体运输中的关键性问题,给出了改善电池性能的意见.Kristian 等<sup>[13]</sup>提出建立 HT-PEM 神经-模糊推理系统.Muhittin 等<sup>[14]</sup>建立三维计算模型,模拟研究了 PEM 燃料电池在阳极和阴极气体流动通道中排出障碍物的性能,进行了不同操作条件下(化学计量,相对湿度和温度)的模拟研究,详细的阐述了在不同操作条件下,燃料电池性能的变化情况.Kuo 等<sup>[15]</sup>研究了改变流道形状对 PEM 燃料电池的性能影响,其中着重研究了气体流动特性,电化学反应效率.

笔者基于已有研究发现,目前并没有针对不同进气速度下对交指流场性能影响的研究,且也没有给出最优的进气速度.因此笔者通过建立三维、稳态、恒温的交指流场 HT-

PEM 燃料电池模型<sup>[16]</sup>,利用多物理场直接耦合分析软件 COMSOL Multiphysics,对采用交指型流场的 HT-PEM 燃料电池单体内流动和传质过程进行数值模拟和计算研究.得到改变进气速度时燃料电池性能的变化规律,对指导 HT-PEM 燃料电池进气速度有关工作具有积极的参考意义.

1 几何模型

HT-PEM 燃料电池模型主要包括阴阳极流道、阴阳极气体扩散层、阴阳极催化层,以及质子交换膜(见图1).笔者以有效工作面积为 3.61cm<sup>2</sup> 的交指流场 HT-PEM 燃料电池为研究对象,在 COMSOL Multiphysics 软件中进行模拟计算,模拟的主要参数见表1.

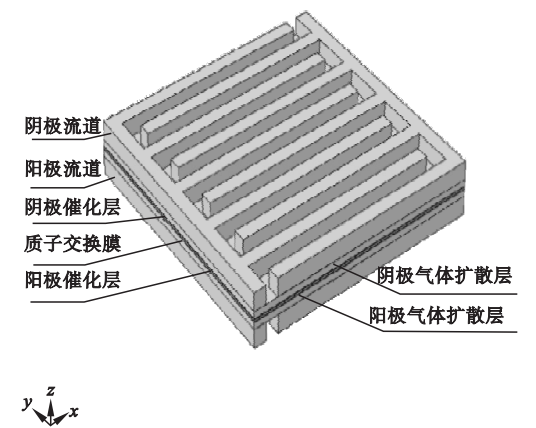


图1 交指流场三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of interdigitated flow field

表1 主要参数值

Table 1 The main parameter values

流道长度/cm	流道高度/cm	流道宽度/cm	脊宽/cm	扩散层厚度/cm	催化层厚度/cm
1.9	0.1	0.1	0.1	0.38	0.005
膜厚度/cm	扩散层孔隙率	电池温度/K	参考压力/Pa	开路电压/V	膜电导率/(S·m <sup>-1</sup> )
0.01	0.4	453.15	1.01×10 <sup>5</sup>	0.9	9.825

笔者在模拟中进行了如下的假设:①催化层、气体扩散层和质子交换膜均为均质和各向同性的多孔介质;②参与反应的气体为

空气和理想氢气;③反应气体在流道中以层流的方式进行流动;④反应气体为不可压缩气体;⑤燃料电池单体在稳态条件下运行.

## 2 数学模型

### 2.1 控制方程

#### 2.1.1 Butler-Volmer 方程

PEM 燃料电池电化学反应的交换电流密度通过 Butler-Volmer 方程求解,其阳极和阴极分别<sup>[17]</sup>为

$$S_a = j_{a,\text{ref}} \left( \frac{C_{H_2}}{C_{H_2,\text{ref}}} \right)^{\gamma_a} \left( e^{\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_a} - e^{\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_c} \right), \quad (1)$$

$$S_c = j_{c,\text{ref}} \left( \frac{CO_2}{CO_{2,\text{ref}}} \right)^{\gamma_c} \left( e^{\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_c} - e^{\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_a} \right). \quad (2)$$

式中: $\eta$  为活化过电位; $j_{\text{ref}}$  为参考体积交换电流密度,  $A/m^2$ ;  $C_i$ ,  $C_{i,\text{ref}}$  分别为  $i$  组分的局部摩尔浓度; $i$  组分的参考摩尔浓度 ( $kg \cdot mol/m^3$ );  $\gamma$  为浓度指数(无量纲);  $\alpha$  为传递系数(无量纲). 下标字母 a、c 分别表示阳极和阴极. 式(1)和(2)中,考虑了反应气体浓度、温度、极化对电化学反应的影响.

#### 2.1.2 质量守恒方程

PEM 燃料电池电化学反应过程中的质量守恒方程为

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{v}) = S_m. \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$  为多孔介质中的孔隙率; $\rho$  为气体混合物之间的密度; $\mathbf{v}$  为速度矢量; $S_m$  为质量方程中的源项.

#### 2.1.3 动量守恒方程

在流道与多孔介质中,动量控制方程一般形式为

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_u. \quad (4)$$

式中:右边第一项是扩散项,右边第二项也为扩散项,右边第三项是动量原项;左边第一项代表非稳态项,左边第二项代表对流项. 其中  $\mu$  为黏度; $S_u$  为动量原项; $\varepsilon$  代表多孔介质中的孔隙率; $p$  为压力.

#### 2.1.4 气体扩散方程

气体在 PEM 燃料电池中的扩散方程为

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho W_d) = -\nabla \cdot J_d + S_{m,d}. \quad (5)$$

式中: $W_d$  为物质 d 的质量分数;d 可以代表氢气( $H_2$ )、氧气( $O_2$ )、气态液态水( $H_2O$ ),同时也亦可以代表氮气( $N_2$ ); $S_{m,d}$  为物质 e 相关的物质原项; $J_d$  为扩散通量.

$J_d$  的扩散通量表达式为

$$J_d = -\varepsilon D_d \nabla_{w_d}. \quad (6)$$

式中: $D_d$  代表着物质扩散系数.

### 2.2 电池电流电压关系式

燃料电池中电压的计算为式

$$U_0 = 0.0025(t + 273.15) + 0.2329. \quad (7)$$

式中: $t$  为电池的工作温度. 但是,由于在实际的使用情况中,电池内有着不可逆损耗,其电池的相关实际工作电压为

$$U_{\text{cell}} = U_0 - \eta - \eta_{\text{ohm}}. \quad (8)$$

式中: $\eta$  为过电位,其中包含了浓度极化以及活化极化.

$$\eta_{(x,y)} = \frac{R(t + 273.15)}{0.5F} \ln \left[ \frac{J(x,y)}{J_{p_{O_2}}(x,y)} \right]. \quad (9)$$

式中: $F$  为法拉第系数; $R$  为气体系数; $J(x,y)$  为当地相关的电流密度量; $J_0$  为交换电流密度; $p_{O_2}$  为当地相关的氧气分压量; $\eta_{\text{ohm}}$  为欧姆极化,其是由于电池内部的电阻引起的量.

其中欧姆极化的量值为

$$\eta_{\text{ohm}}(x,y) = I(x,y) R_m. \quad (10)$$

式中: $I$  为电流; $R_m$  为膜电阻.

## 3 结果与讨论

### 3.1 极化曲线

图2 为交指流场在 453.15 K 温度下的极化曲线. 方案 A 代表氧气的进气速度为 0.4 m/s,氢气的进气速度为 1 m/s;方案 B 代表氧气的进气速度为 0.8 m/s,氢气的进气速度为 2 m/s;方案 C 代表氧气的进气速度为 1.6 m/s,氢气的进气速度为 4 m/s;方案 D 代表氧气的进气速度为 6 m/s,氢气的进气速度为 15 m/s.

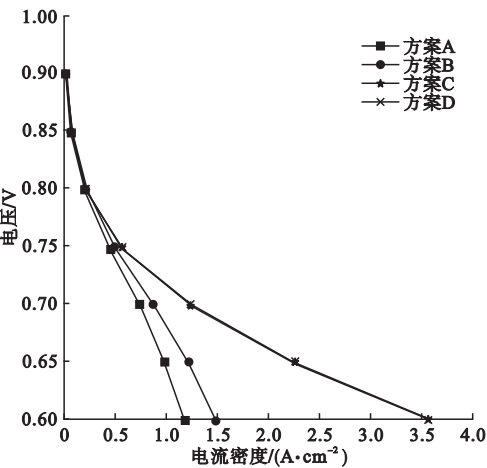


图2 四种进气速度的极化曲线

Fig. 2 The polarization plot of four kinds of inlet velocity

分析图2可以得出,在燃料电池电压相同的情况下,电流密度的大小依次是方案D,方案C,方案B,方案A,在燃料电池工作电压量一定的情况下,质子交换膜燃料电池关于输出功率值和电流密度呈正比关系,可知燃料电池的性能方案D最好,而方案A最差.此时进气速度的大小也依次是方案

D,方案C,方案B,方案A,可知提高进气速度可以有效地改善燃料电池的性能.但当氧气的进气速度由1.6 m/s增至6 m/s,氢气的进气速度由4 m/s增至15 m/s时,HT-PEM燃料电池的输出功率基本相同.这是由于当进气速度增大时,氢气氧气在流道中的流量和流速也在不断增大,即氢气和氧气在气体扩散层中的扩散率也在不断加大.但由于催化剂的催化速率是一定的,所以当气体流速由方案C增至方案D时,电池的输出功率并未出现增加.而气体流速由方案A增加到方案C时,输出功率随着进气速度的增大也在不断增加.结合实际应用,可以得出最为经济的实用速度为方案C.

3.2 阴极流道中氧气浓度的变化分析

图3为关于4种方案下阴极流道中氧气浓度变化的模拟图.氧气沿左下方入口流入流道,再由右上方出口流出流道.阴极氧气浓度变化模型取值面是沿着电池厚度方向,取阴极流道的中间面.

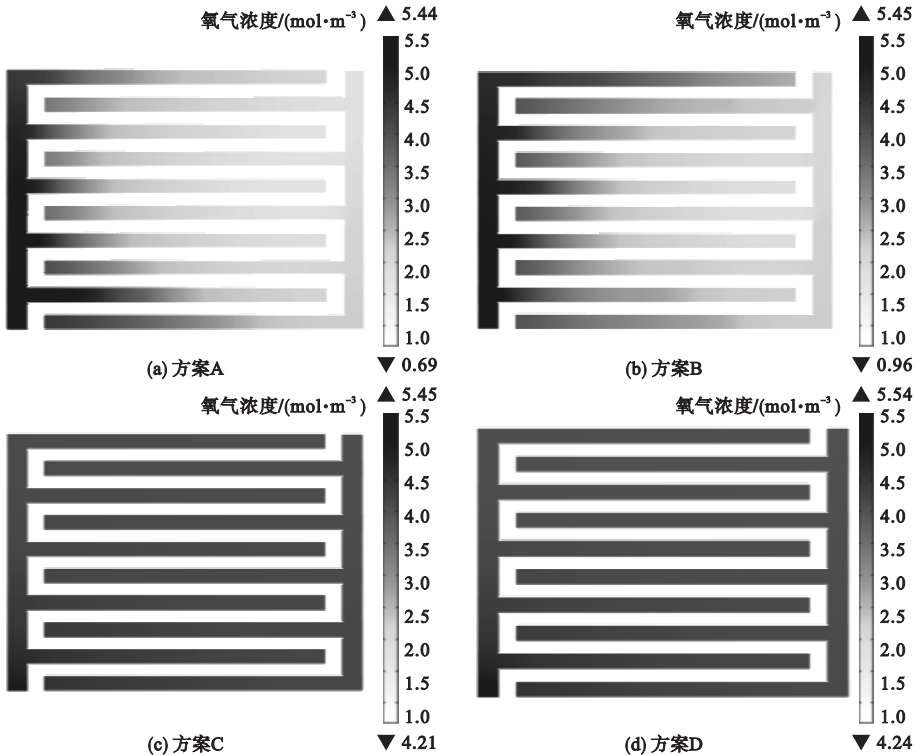


图3 阴极流道中氧气浓度变化

Fig. 3 The variation of oxygen concentration in cathode channel

对比图中 4 个阴极氧气浓度变化分布图可以发现,当氧气的进气速度由 0.4 m/s 逐渐增加到 6 m/s,氢气的进气速度由 1m/s 逐渐增加到 15 m/s 时,在交指流道入口处,氧气的浓度由  $5.44\text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  增至  $5.54\text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ ,在流道的出口处,氧气的浓度由  $0.69\text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  增至  $4.24\text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ . 这是因为改变进气速度可以提高在单位时间内通过气体的流量. 在交指流场中,由于单位时间内通过入口截面的气体流量增加,流道内的氧气浓度会相应的增大,当氧气的浓度增大时会迫使更多的氧气通过气体扩散层在催化剂层与  $\text{H}^+$  发生电化学反应,多余的氧气就会通过气体扩散层扩散到流道的出口. 当氧气和氢气的流速越大时,在催化层处发生的电化学反应就越剧烈.

PEM 燃料电池阴极流道入口氧气浓度数值、出口氧气浓度数值以及氧气浓度差值见表 2.

表 2 阴极流道入口和出口的氧气浓度  
Table 2 The oxygen concentration of inlet and outlet in the cathode channels  $\text{mol}/\text{m}^3$

方案	入口浓度	出口浓度	浓度差
A	5.44	0.69	4.75
B	5.45	0.96	4.49
C	5.45	4.21	1.24
D	5.54	4.24	1.30

从表 2 可知,进出氧气浓度的差值为方案 A,方案 B,方案 D,方案 C,而进出口浓度差越小,气体在流道中的分布就会越均匀,浓差极化影响就会越小,这样就会延迟燃料电池极限值的出现. 当进气速度越大时,电流密度的极限值出现的就会越晚,由于方案 C 和方案 D 之间的浓度差值相差较小可以忽略. 增加进气速度会改善燃料电池的性能. 这一结果和极化曲线结论一致. 从经济实用的角度来考虑,方案 C 的进气速度更符合生产的需要.

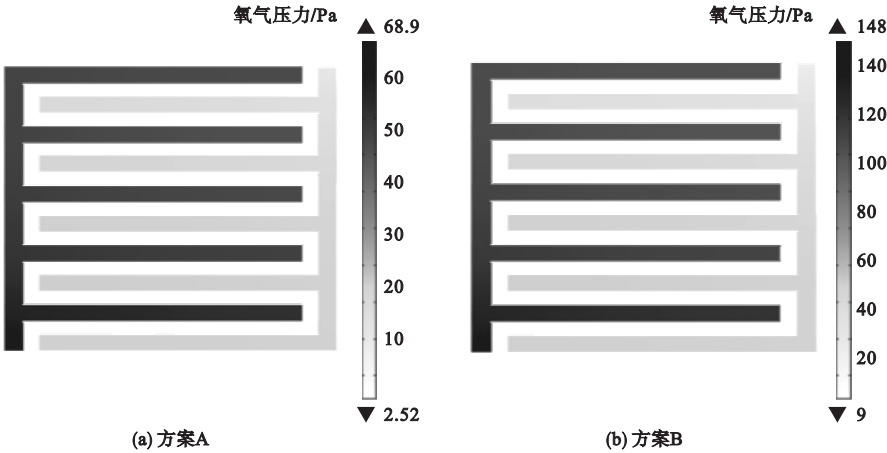
3.3 阴极流道氧气压力变化分析

图 4 为阴极氧气压力变化模型. 气体沿左下方的入口流入流道,再由右上方的出口流出流道. 阴极压力变化模型取值面是沿着电池厚度方向,取阴极流道的中间面.

由图 4 可知,阴极流道内的氧气压力变化趋势是沿着气体流道的方向逐渐减小的,交指流道中的进气口和出气口压力下降明显. 阴极流道中氧气压力下降和阴极流道中氧气浓度的变化趋势一致.

PEM 燃料电池阴极流道入口氧气压力数值、出口氧气压力数值以及氧气压力差值见表 3.

根据表 3 的结果可知,压力差大小依次为方案 D,方案 C,方案 B,方案 A. 当氧气的进气速度由 0.4 m/s 增至 6 m/s,氢气的进气





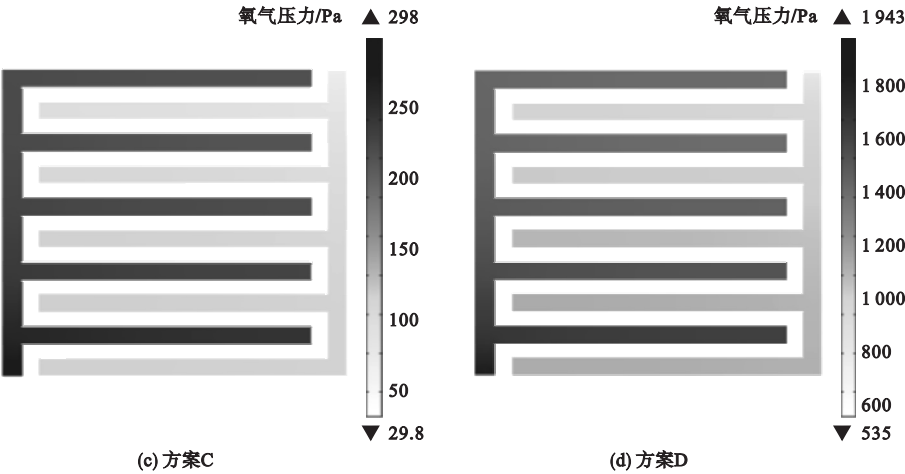


图4 阴极流道中心压力变化

Fig. 4 The pressure variation of center in the cathode channels

表3 阴极流道入口和出口的压力

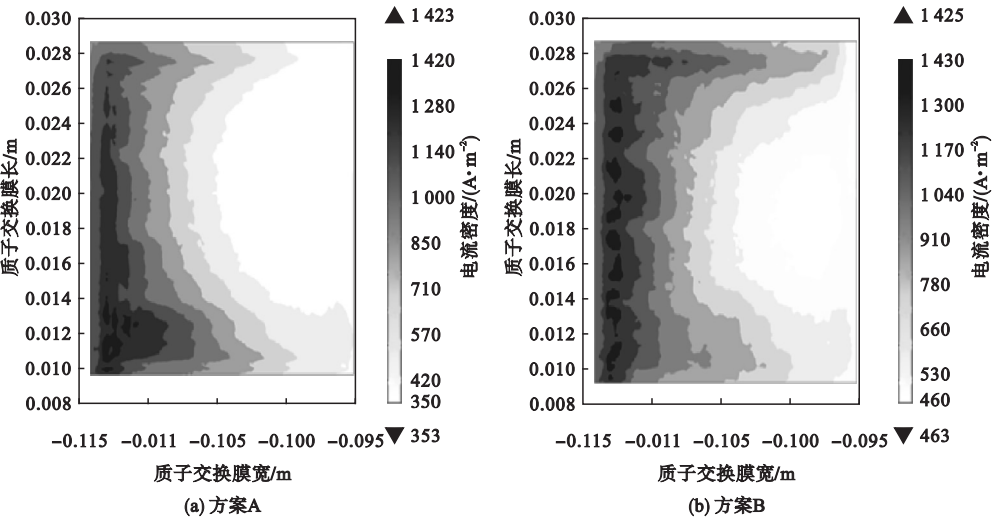
Table 3 The pressure of inlet and outlet in the cathode channel				Pa
方案	入口压力	出口压力	压力差	
A	68.9	2.52	66.38	
B	148	9	139	
C	298	29.8	268.2	
D	1943	535	1408	

速度由 1 m/s 增至15 m/s时,各流场沿气体流动的方向压力降变化由 66.38 Pa 增大到 1 408 Pa. 当压力降相对较大时,会迫使入口处的氧气通过气体扩散层扩散到催化层处,

使得氧气在催化层处分布更加均匀,加大了物质反应的速率. 而且当压力降增大时,会更好 地排放出在电化学反应过程中所产出的气态水,提高了反应界面上的氧气浓度,进而改善燃料电池的输出性能. 所以燃料电池的性能好坏依次为方案 D, 方案 C, 方案 B, 方案 A.

3.4 膜电流密度

图5 为4 种方案下的膜电流密度变化模型,气体沿左下方的入口流入流道,再由右上方的出口流出流道. 膜电流密度变化模型取值面是沿着电池厚度方向,取质子交换膜的中间面.



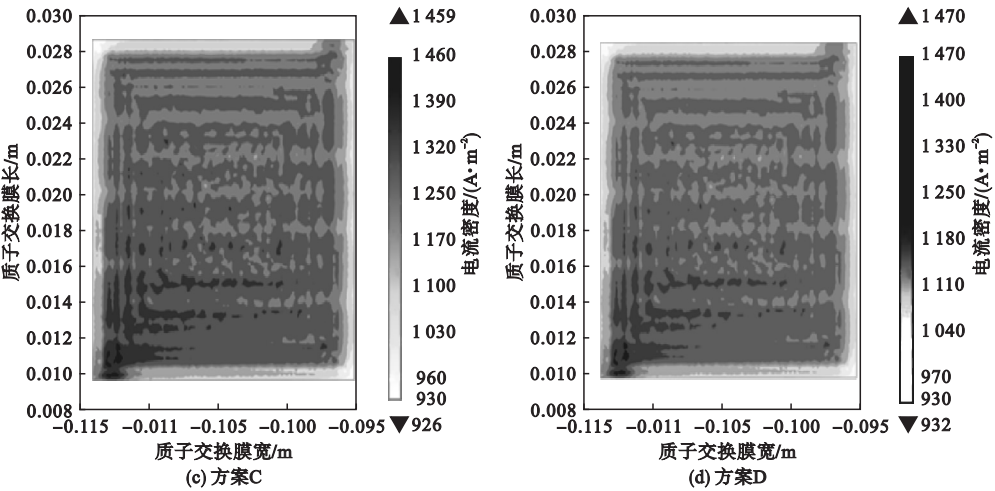


图5 膜电流密度

Fig.5 The membrane current densities

由图5可以看出,当氧气的进气速度由0.4 m/s 增至 6 m/s,氢气的进气速度由1 m/s增至 15 m/s 时,深色区域逐渐扩大,即电流密度值在不断增大.浅色区域在不断向着出口处缩小,而在不断缩小过程中深色区域的值也在不断增加. PEM 燃料电池质子交换膜入口处电流密度、出口处电流密度以及入出口处电流密度差值见表4.

表4 阴极流道入口和出口的膜电流密度

Table 4 The membrane current density of inlet and outlet in the cathode channels A/m<sup>2</sup>

方案	入口周围电 流密度	出口周围 电流密度	电流密 度差
A	1 423	353	1 070
B	1 425	463	962
C	1 459	926	533
D	1 470	932	538

根据表4可知,进出口处的膜电流密度差值大小依次为方案A,方案B,方案D,方案C,膜电流密度差值越小,说明电化学反应在膜上越均匀.由于方案C和方案D的差值较小,可以忽略不计.根据图5和表4的差值结果可知,当进气速度增加时膜电流密度的分布会更加均匀.这是因为当进气速度增加时,流道内的氧气含量会加大,迫使氧气透过气体扩散层更加均匀地分布在电化学反应界

面,减小了浓差极化的影响.当反应物均分在反应界面时,就会相对应的提高电流密度,提高燃料电池的输出性能.

4 结 论

- (1)提高反应气体进入流道的速度,可以改善流道中反应气体浓度分布,使反应气体更加均匀地分布在流道中.
- (2)在温度为 453.15 K 的交指流场中,氧气的进气速度为 1.6 m/s,氢气的进气速度为 4 m/s 为最优进气速度.
- (3)提高反应气体的速度,可以使膜电流密度分布更加均匀.
- (4)当进气速度提高时,可以改善浓差极化的影响,避免电流密度极限值的过早出现.

参考文献

[1] 张文毓. 燃料电池的新进展[J]. 上海化工, 2014,39(4):38-40.  
(ZHANG Wenyu. New progress of fuel cells [J]. Shanghai chemical industry, 2014,39(4): 38-40.)

[2] 聂明,张连营,李庆,等. 质子交换膜燃料电池研究现状[J]. 表面技术,2012,41(3):109-111.  
(NIE Ming, ZHANG Lianying, LI Qing, et al. Research status of proton exchange membrane fuel cell[J]. Surface technology, 2012,41(3): 109-111.)

- [3] WANG Y, CHEN K S, MISHNER J, et al. Adroher XC. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research[J]. Appl energy, 2011, 88: 981 – 1007.
- [4] 陈士忠, 王艺澄, 于东旭, 等. 基于温度条件 PEM 燃料电池的动态特性[J]. 沈阳建筑大学(自然科学版), 2016, 32(3): 506 – 511.  
(CHEN Shizhong, WANG Yicheng, YU Dongxu, et al. Dynamic characteristics of PEM fuel cell based on temperature[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(3): 506 – 511.)
- [5] 候明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012(1): 1 – 13.  
(HOU Ming, YI Baolian. Current status and prospect of fuel cell technology[J]. Journal of electrochemistry, 2012, 1: 1 – 13.)
- [6] 陈士忠, 王艺澄, 张旭阳, 等. 四流道蛇形结构质子交换膜燃料电池温度分布数值模拟[J]. 可再生能源, 2016, 34(6): 921 – 925.  
(CHEN Shizhong, WANG Yicheng, ZHANG Xuyang, et al. Numerical simulation of temperature distribution in a four-passage snake structure proton exchange membrane fuel cell[J]. Renewable energy, 2016, 34(6): 921 – 925.)
- [7] 陈士忠, 刘健, 夏忠贤, 等. 基于数值模拟研究渗透率对 HT-PEMFC 性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(4): 706 – 713.  
(CHEN Shizhong, LIU Jian, XIA Zhongxian, et al. Effects of the permeation rate on HT-PEMFC performance based on the numerical simulation[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(4): 706 – 713.)
- [8] 刘洁, 王菊香, 荆志娜, 等. 燃料电池研究进展及发展探讨[J]. 节能技术, 2010, 162(28): 364 – 368.  
(LIU Jie, WANG Juxiang, XING Zhina, et al. The investigation on research progress and development of fuel cell[J]. Energy conservation technology, 2010, 162(28): 364 – 368.)
- [9] LI Q, JESSEN J O, SAVINELL R F, et al. High temperature proton exchange membrane based on polybenzimidazoles for fuel cells[J]. Prog polym sci, 2009, 34: 449 – 77.
- [10] 吴玉厚, 刘振鹏, 孙红, 等. 交指流场与蛇形流场 PEM 燃料电池性能比较[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(4): 679 – 682.  
(WU Yuhou, LIU Zhenpeng, SUN Hong, et al. Characteristics of PEM fuel cell with interdigital flow field and serpentine flow field[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008, 24(4): 679 – 682.)
- [11] VESSELIN K K, GIACOMO F, ELIN J, et al. 3D CFD modeling and experimental characterization of HT PEM fuel cells at different anode gas compositions[J]. Hydrogen energy, 2014, 39: 21663 – 21672.
- [12] HORNG-WEN Wu. A review of recent development; transport and performance modeling of PEM fuel cells[J]. Applied energy, 2016, 165: 81 – 106.
- [13] KRISTIAN K J, SOREN J A, SIMON L S. Modeling of a HTPM fuel cell using adaptive neuro-fuzzy inference systems[J]. Hydrogen energy, 2015, 40: 16814 – 16819.
- [14] MUHITTIN B, MAGDALENA B, GEORGIOS T. Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions[J]. Hydrogen energy, 2015(40): 2303 – 2311.
- [15] KUO J K, YEN T H, CHEN C K. Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels[J]. Power sources feb, 2008, 177(1): 96 – 103.
- [16] LOBATO J, CANIZARES P, RODRIGO M A, et al. Enhancement of the fuel cell performance of a high temperature proton exchange membrane fuel cell running with titanium composite polybenzimidazolebased membranes[J]. Power sources, 2011, 196: 8265 – 71.
- [17] MICHAEL G W, MARK R W, THOMAS A T. Performance of high temperature PEM fuel cell materials. part 1: effects of temperature, pressure and anode dilution[J]. Science direct, 2016, 134: 1 – 11.