

扩散层孔隙率对平行流场 PEMFC 性能影响研究

熊 牡,何仕荣,张 勇,叶云涛

上海理工大学 机械工程学院,上海 200093

摘要:为了研究扩散层孔隙率对质子交换膜燃料电池的性能影响,采用计算流体动力学商业软件 ANSYS Fluent 在不同扩散层孔隙率(0.3、0.5、0.7)的条件下,对传统平行流场和斜坡平行流场的性能曲线、气体浓度分布、液态水分布进行数值模拟分析;结果表明:在高电位下各案例对应的性能差异较小,在中低电位性能差异较大,随着扩散层孔隙率越大,质子交换膜燃料电池性能越好,且孔隙率在 0.3~0.5 时电流密度增长率最大,最大可达 9.03%;当扩散层孔隙率较高时,有利于反应气体穿过扩散层,使得催化层氧气浓度增大,促进了燃料电池内部的电化学反应;随着扩散层孔隙的增大,能够更有效地促进反应气体的传输,流道内水含量越高,越有利于液态水的排出;相比传统平行流场,斜坡平行流场电池性能更好,氧气分布更均匀,流道中气体流速更大,排水效果更好,且孔隙率为 0.7 时电流密度增长率最大,最大可达 28.79%。

关键词:质子交换膜燃料电池;孔隙率;斜坡;数值模拟

中图分类号:TK91 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0004.003

Influence of Diffusion Layer Porosity on PEMFC Performance in Parallel Flow Field

XIONG Mu, HE Shirong, ZHANG Yong, YE Yuntao

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: In order to study the effect of diffusion layer porosity on the performance of proton exchange membrane fuel cell, the performance curves, gas concentration distribution and liquid water distribution of traditional parallel flow field and slope parallel flow field were numerically simulated and analyzed by using computational fluid dynamics commercial software ANSYS Fluent under the conditions of different diffusion layer porosity (0.3, 0.5 and 0.7). The results showed that the performance difference of each case was small at high potential, and the performance difference was large at medium and low potential. The greater the porosity of the diffusion layer, the better the performance of proton exchange membrane fuel cell. When the porosity was 0.3~0.5, the maximum growth rate of current density was 9.03%. When the porosity of the diffusion layer is high, it is conducive for the reaction gas to pass through the diffusion layer, which increases the oxygen concentration in the catalytic layer and promotes the electrochemical reaction in the fuel cell. With the increase of the pores in the diffusion layer, it can more effectively promote the transmission of reaction gas. The higher the water content in the channel, the more conducive to the discharge of liquid water. Compared with the traditional parallel flow field, in the slope parallel flow field, the cell performance is better, the oxygen distribution is more uniform,

收稿日期:2022-04-13 **修回日期:**2022-05-21 **文章编号:**1672-058X(2023)04-0019-06

基金项目:上海科技委员会资助项目(19060502300)。

作者简介:熊牡(1997—),男,硕士研究生,从事质子交换膜燃料电池设计与优化研究。

通信作者:何仕荣(1964—),男,教授,从事精密加工与先进制造、新能源技术、同步设计制造研究。Email:shironghe@bentek.com.cn

引用格式:熊牡,何仕荣,张勇,等.扩散层孔隙率对平行流场 PEMFC 性能影响研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(4):19—24.

XIONG Mu, HE Shirong, ZHANG Yong, et al. Influence of diffusion layer porosity on PEMFC performance in parallel flow field [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 19—24.

the gas flow rate in the flow channel is greater, the drainage effect is better, and the current density growth rate is the largest at a porosity of 0.7, up to 28.79%.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; porosity; slope; numerical simulation

1 引言

当前,由于化石能源的大量消耗,造成了温室效应、大气污染、酸雨等环境问题,因此,节能减排已经成为我国经济社会发展的主要问题^[1]。PEMFC 作为一种利用化学能直接转化为电能的高效转换器,不同于传统热机受卡诺循环热效应的制约,其能量转换效率高、能量密度大、启动速度快、运行温度低、运行噪声低、产品无污染,是 21 世纪最理想的替代能源之一^[2]。

为了研究燃料电池的相关性能问题,大量的专家学者做了许多相关研究。Kanai 等^[3]使用响应面法使单个 PEMFC 的输出功率最大化。Yang 等^[4]基于双喷射器再循环的 PEMFC,研究喷射器操作条件对燃料电池性能的影响,结果表明,通过提高运行压力可以显著提高 PEMFC 的性能。Zhang 等^[5]进行了大规模多相模拟,证实对于氧气和氢气的逆流,冷却水的流向设计为与氧气相同,有利于提高燃料电池的性能。Flipo 等^[6]测试了具有不同润湿性的通道材料,验证流道表面湿润度对燃料电池的影响。李英等^[7]通过研究 PEMFC 阴极扩散层厚度、接触角和渗透率等对水淹的影响。Mojica 等^[8]对 3 种流场设计进行了对比研究,结果表明,直线平行流场、多蛇形流场和单通道蛇形流场在干燥条件和低电流密度下表现相似,平行通道设计在潮湿条件下表现不佳,多通道蛇形流场在潮湿条件下表现最佳。Atyabi 等^[9]提出了一种蜂窝阴极通道,并基于三维 PEMFC 模型研究了燃料电池的传输特性。模拟结果表明,蜂窝通道改善了气体扩散层和催化层交界处的压力和温度分布,并有利于液态水的排出。Yin 等^[10]研究了添加到流道中的挡板对 PEMFC 传质和性能的影响,结果表明,与没有挡板的通道相比,在流道中添加挡板增强了垂直方向的对流传质。Perng 等^[11]使用有限体积 SIMPLE-C 算法分析了 PEMFC 的输出性能并对流道经行改进,研究发现,新型流道的性能比直流道高 8%。

综合上述文献可知,为了提高质子交换膜燃料电池性能,对其进行了大量的数值计算与实验研究,通过改变操作条件、进气方式、冷却水排布及流场结构优化等,都可以对燃料电池内部的传质、反应气体分布、排水及电池性能都有着积极的影响,从而有效的提升了燃料电池性能。然而气体扩散层是质子交换膜燃料电池核心组件的重要组成部分,一般由多孔材料组成,具有良好的导电性能,并起到传递反应气体、电子传导、

支撑催化层、改善水热管理重要作用,是影响燃料电池性能的关键部件之一^[12]。孔隙率是体现气体扩散层性能的重要指标,直接影响反应气体的传输及反应生成液态水的排出。因此,基于计算流体动力学商业软件 ANSYS Fluent 分别在不同扩散层孔隙率的条件下,对传统平行流场和斜坡平行流场进行了模拟仿真,研究扩散层孔隙率对平行流场 PEMFC 性能影响。

2 数值模型

2.1 物理模型

燃料电池结构为传统平行流场和斜坡平行流场结构,基于有限元仿真软件 Fluent 建立了 PEMFC 物理模型如图 1 所示,模型参数如表 1 所示。计算域由阴阳两极集流板、流场、扩散层、催化层和质子交换膜组成。为了研究扩散层孔隙率对平行流场 PEMFC 的性能影响,设计了 6 种不同扩散层孔隙率($\varphi=0.3, 0.5, 0.7$)的传统平行流场(Case 1—Case 3)和斜坡平行流场(Case 4—Case 6)。计算过程中所用到的参数如表 2 所示。

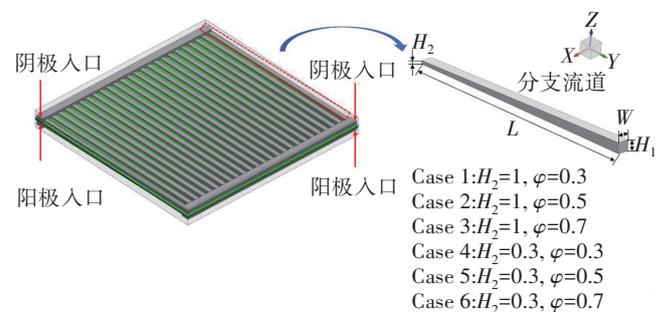


图 1 PEMFC 几何模型

Fig. 1 Geometric model of PEMFC

表 1 PEMFC 的主要几何参数

Table 1 Main geometric parameters of PEMFC

几何参数/mm	传统平行流场 (Case 1/2/3)	斜坡平行流场 (Case 4/5/6)
集流板长度	50	50
集流板宽度	50	50
集流板高度	2	50
流道宽度	$W=1$	$W=1$
流道高度	$H_1=1, H_2=1$	$H_1=1, H_2=0.3$
气体扩散层厚度	0.2	0.2
催化层厚度	0.01	0.01
质子交换膜厚度	0.05	0.05

表2 PEMFC 的主要操作参数

Table 2 Main operating parameters of PEMFC

参数	数值
工作温度/K	353
工作压力/Pa	101 325
相对湿度/%	100
扩散层孔隙率	0.3/0.5/0.7
扩散层渗透率/m ²	1.18×10 ⁻¹¹
催化层渗透率/m ²	2.36×10 ⁻¹²
扩散层电导率/(S·m ⁻¹)	222
催化层电导率/(S·m ⁻¹)	1 000
膜电导率/(S·m ⁻¹)	9.825
氢/氧/水比热容/(kg ⁻¹ K ⁻¹)	14 283/919.3/2 014
氢/氧/水热导率/(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	0.167 2/0.024 6/0.026 1
阴极/阳极化学计量数	1.2/2
阴极/阳极粘度/(Pa·S)	2.46×10 ⁻⁵ /1.19×10 ⁻⁵
阴极/阳极参考电流密度/(A·m ⁻²)	0.008 8/24 511
阴极/阳极浓度系数	1/1
阴极/阳极转移系数	1/1
开路电压/V	0.95

2.2 模型假设

在建立模型过程中,尽可能确保模型的准确性和精确性,同时不影响仿真结果的前提下,对模型进行了以下的基本假设:

- (1) 燃料电池处于稳态和 353 K 的等温状态下;
- (2) 反应气体为层流,气体性质服从理想气体定律;
- (3) 燃料电池的任何部件都没有发生变形。燃料电池中只有水能通过质子交换膜,反应气体不能通过质子交换膜;
- (5) 扩散层和催化层为均质材料,忽略各向异性;
- (6) 不考虑重力影响。

2.3 数学模型方程

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式(1)中, ρ 为密度(kg/m³); \mathbf{v} 为速度矢量; ∇ 为算子, $\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy} + \frac{d}{dz}$ 。第二项表示质量通量的变化。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla p + (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) + \nabla (\mu^{\text{eff}} \nabla \mathbf{v}) + S_m \quad (2)$$

式(2)中, p 为工作压力; μ^{eff} 为混合物的平均粘度; S_m

为动量源项。动量守恒方程中瞬态项表示动量随时间的积累,第二项描述了对流量动量通量。

能量守恒方程:

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_{\text{eff}} (v \nabla T) = \nabla (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_e \quad (3)$$

式(3)中, c_p 为混合平均比热容量(Jkg⁻¹K⁻¹); T 为工作温度(K); k 为热导率(Wm⁻¹K⁻¹); S_e 为能量源;下标 eff 表示多孔介质的有效性:

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = (1-\varepsilon) \rho_s c_{p,s} + \varepsilon \rho c_p \quad (4)$$

$$k_{\text{eff}} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s + k} + \frac{1-\varepsilon}{3k_s} \right]^{-1} \quad (5)$$

式(4)、式(5)中, ρ_s 、 $c_{p,s}$ 和 k_s 分别表示温度、比热容和固体混合物的热导率。

组分守恒方程:

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho x_i)}{\partial t} + \nabla (v \varepsilon \rho x_i) = \nabla (\rho D_i^{\text{eff}} \nabla x_i) + S_{s,i} \quad (6)$$

式(6)中, x_i 为气体的组分质量分数, $i=1,2,\dots,N$ (例如,对于氢 $i=1$,对于氧 $i=2$,对于水蒸气 $i=3$ 等;液态水可看作独立的组分); $S_{s,i}$ 为组分源或汇。

电荷守恒方程:

质子交换膜燃料电池的电势有固相电势和膜相电势两种,其守恒方程可以表示为

$$\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \varphi_s) + S_s = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_m \nabla \varphi_m) + S_m = 0 \quad (8)$$

式(7)、式(8)中, σ_s 、 σ_m 分别表示固相电导率、膜相电导率; φ_s 、 φ_m 分别表示固相电势和膜相电势。两个方程的源项只存在于催化层电化学反应区,且 $S_s + S_m = 0$ 。

在阳极催化层:

$$S_s = -R_{an} (<0)$$

$$S_m = R_{an} (>0) \quad (9)$$

在阴极催化层:

$$S_s = R_{cat} (>0)$$

$$S_m = -R_{cat} (<0) \quad (10)$$

式(9)、式(10)中 R 为体积交换电流密度。

电化学反应过程:

$$R_{an} = j_{an,ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left(e^{\frac{\alpha_{an} F}{RT} \eta_{an}} - e^{-\frac{\alpha_{cat} F}{RT} \eta_{cat}} \right) \quad (11)$$

$$R_{cat} = j_{cat,ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{\gamma_{cat}} \left(e^{\frac{\alpha_{an} F}{RT} \eta_{an}} - e^{-\frac{\alpha_{cat} F}{RT} \eta_{cat}} \right) \quad (12)$$

式(11)、式(12)中, $j_{an,ref}$ 、 $j_{cat,ref}$ 分别为阳极和阴极的参考电流密度; γ_{an} 、 γ_{cat} 分别为阳极和阴极反应物浓度系数; C_{H_2} 、 C_{O_2} 、 $C_{H_2,ref}$ 、 $C_{O_2,ref}$ 分别为阳极和阴极的反应物浓度与反应物参考浓度; α_{an} 、 α_{cat} 分别为阳极和阴极的转移系数; η_{an} 、 η_{cat} 分别为阴极阳极的活化过电势。

$$\begin{aligned}\eta_a &= \varphi_s - \varphi_m \\ \eta_c &= \varphi_s - \varphi_m - V_{oc}\end{aligned}\quad (13)$$

式(13)中, V_{oc} 为开路电压。

液态水输运方程:

$$\partial(\varepsilon\rho_l s)/\partial t + \nabla(s\rho_l u_1) = r_w \quad (14)$$

式(14)中, s 为液态水体积分数; r_w 为凝结速率。

$$r_w = c_r \max\left\{\left[(1-s)\left(\frac{p_{wv} - p_{sat}}{RT}\right)M_{w,H_2O}\right], [-s\rho_l]\right\} \quad (15)$$

式(15)中, c_r 为凝结速率常数; p_{wv} 为水蒸气的压力; p_{sat} 为水的饱和蒸汽压力。由于扩散层中的孔隙更细, 水通过多孔介质的运动通过毛细作用发生, 毛细管扩散项用来代替方程中的对流项:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_l \frac{Ks^3 dp_c}{\mu_l ds} \nabla s \right] = r_w \quad (16)$$

式(16)中, K 为绝对渗透率; μ_l 为液态水的动力粘度; p_c 为毛细压力, 由式(17)计算:

$$p_c = \begin{cases} \frac{\sigma_l \cos\theta_c}{(K/\varepsilon)^{0.5}} [1.417(1-s) - 2.12(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3] & \theta_c < 90^\circ \\ \frac{\sigma_l \cos\theta_c}{(K/\varepsilon)^{0.5}} (1.417s - 2.12s^2 + 1.263s^3) & \theta_c > 90^\circ \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, ε 为孔隙率, σ_l 是表面张力系数, θ_c 为接触角, s 为液体饱和度, K 为固有渗透率。

2.4 模型验证

为保证模拟结果的准确性与科学性, 将模拟结果与文献[13]的实验数据进行了对比, 数值模型中使用的流场尺寸和操作参数与实验条件一致。如图2所示, 仿真模拟结果与实验结果吻合较好, 这验证了数值模型推广到其他流场的可行性。

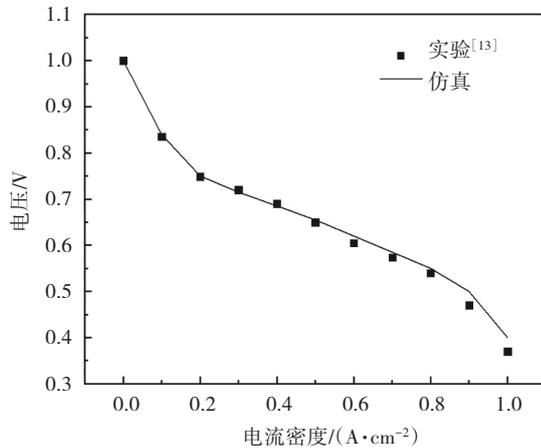


图2 模型验证

Fig. 2 Model validation

2.5 网格无关性验证

为了减少网格疏密对计算结果的影响, 建立了面网格尺寸分别为 0.15、0.25、0.35、0.45 mm 的网格模型, 再进行加密。在此基础上, 利用 ANSYS Fluent 软件对 4 种大小不同的网格进行了验证, 使用 SIMPLE 算法进行迭代求解, 为保证计算精度, 控制方程的残差设定为 1×10^{-6} , 计算循环类型为 F-cycle, 稳定性方法为 BCGSTAB。计算得到了 0.6 V 工作电压下各尺寸网格模型的电流密度, 结果如表 3 所示, 当网格尺寸在 0.15~0.25 mm 时, 电流密度相对误差为 0.8%, 为了保证计算精度和节约时间成本, 研究采用尺寸为 0.25 mm 的网格进行计算。

表 3 网格无关性验证

Table 3 Grid-independence verification

网格尺寸/mm	电流密度/(A·cm ⁻²)	相对误差/%
0.15	2.135	0.8
0.25	2.153	—
0.35	2.197	2.1
0.45	2.558	16.4

3 结果与讨论

3.1 电池性能

图3、图4为传统平行流道与斜坡平行流道在不同孔隙率(0.3、0.5、0.7)条件下得到的极化曲线和功率密度曲线。可以看到, 在高电位下, 各案例对应的极化曲线和功率密度曲线差异较小, 但在中低电位情况下, 各案例间的电池性能差异逐渐增大; 与传统平行流场相比, 在相同扩散层孔隙率的条件下, 斜坡平行流场的电池性能较优, 随着扩散层孔隙率越大, 电池性能越优, 这说明斜坡结构在平行流场中可以有效地提高 PEMFC 性能。

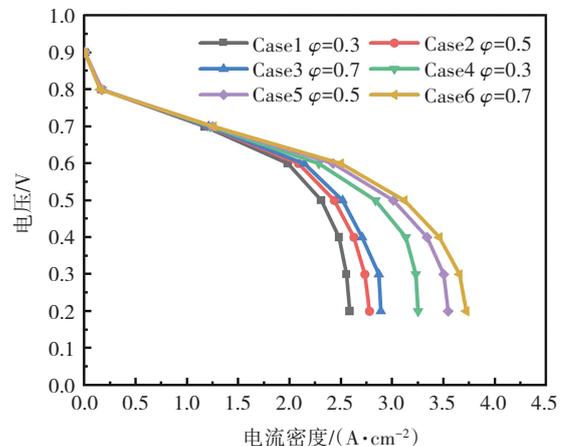


图3 极化曲线

Fig. 3 Polarization curves

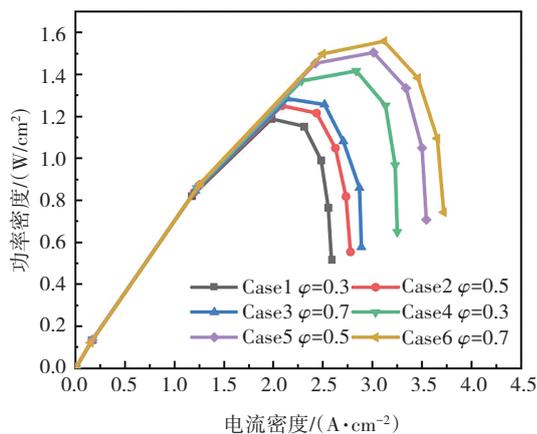


图 4 功率密度曲线

Fig. 4 Power density curves

表 4 为电流密度增长率,可以看到,随着扩散层孔隙率的增大,燃料电池电流密度增长率越来越小,扩散层孔隙率在 0.3~0.5 时的电流密度增长率最大,最大可达到 9.03%;相比之下,在相同孔隙率的条件下,斜坡平行流场比传统平行流场的电流密度更大,且孔隙率为 0.7 时最大,电流密度增长率最大可达 28.79%。

表 4 电流密度增长率

Table 4 Current density growth rates

电池结构	孔隙率	电流密度增长率/%
传统流道	0.3~0.5	7.43
传统流道	0.5~0.7	3.99
斜坡流道	0.3~0.5	9.03
斜坡流道	0.5~0.7	4.69
传统-斜坡	0.3	25.74
传统-斜坡	0.5	27.61
传统-斜坡	0.7	28.79

3.2 阴极氧气浓度分布

图 5 为传统平行流道 (Case 1—Case 3) 与斜坡平行流道 (Case 4—Case 6) 在不同孔隙率 (0.3、0.5、0.7) 条件下得到的阴极流道氧气质量分数分布。如图 5 所示,流场入口主流道氧气浓度比较大,单根支路入口区域氧气浓度相差不大,并随着气体的流动方向流道内的氧气浓度逐渐减小,且传统平行流道与斜坡平行流道的氧气质量分数变化规律基本保持一致,这是由于其内部发生电化学反应,导致氧气逐渐被消耗。相比之下,流道中的氧含量随孔隙度的增大而降低,其原因在于,当扩散层孔隙率较低时,反应气体不易穿过扩散层向催化层进行扩散,此外,在燃料电池中,由于电化

学反应而产生的液态水难以及时排出,导致扩散层含水过高,进一步阻碍了反应气体扩散到催化层进行电化学反应;当扩散层孔隙率较高时,反应气体更容易穿过扩散层,使得催化层中的氧气浓度增加,促进了燃料电池内部发生的电化学反应,从而有效地提升了电池性能。相比传统平行流场,斜坡平行流场流道中氧气分布更均匀,主要因为斜坡流场各流道截面面积逐渐变小,使得流道中气体流速增加,从而使其气体分布更均匀。

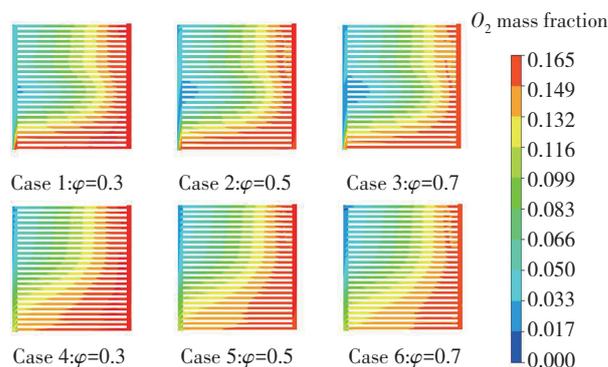


图 5 各方案在阴极流道中截面上的氧气质量分数 (0.6 V)

Fig. 5 Oxygen mass fraction of each scheme on the middle section of cathode channel (0.6 V)

3.3 阴极液态水分布

图 6 为传统平行流道 (Case 1—Case 3) 与斜坡平行流道 (Case 4—Case 6) 在不同孔隙率 (0.3、0.5、0.7) 条件下得到的阴极扩散层与流道交界面液态水的质量分数分布。如图 6 所示,液态水的质量分数分布与氧气质量分数分布恰好相反,对应着入口主流道的水含量较低,单根支路流道内的水含量较高,并沿着气体流动方向水含量越来越高。在传统平行流场中,对应流道中下端出现大量液态水聚集情况,随着扩散层的孔隙率越来越大,传统平行流道与斜坡平行流道中的水含量越来越高,其原因为,随着燃料电池阴极催化层电化学反应的进行,沿着相应流动方向的水含量也逐渐增加。随着扩散层孔隙率的增大,流道内水含量也逐渐增加,说明随着燃料电池内部电化学反应的进行,内部反应生成的水在较高扩散层孔隙率的作用下,更加容易向流道中进行扩散。在不同扩散层孔隙率的作用下,斜坡平行流场相比传统平行流场,流道中下端液态水大量聚集的情况也有了显著的改善,其原因在于斜坡平行流场由于流道截面面积逐渐减小,有利于液态水的排出,而且随着扩散层孔隙的增大,排水性能也越来越明显。

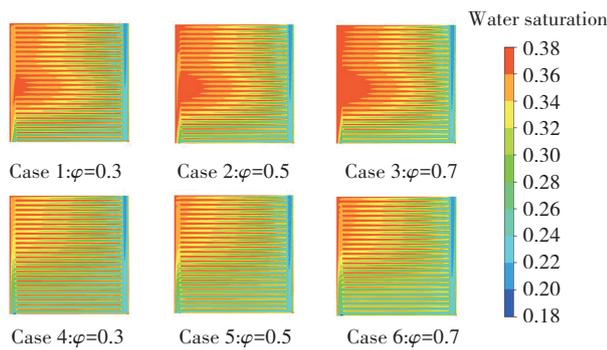


图 6 各方案在阴极扩散层与流道交界面上液态水分布(0.6 V)

Fig. 6 Liquid water distribution at the interface between cathode diffusion layer and flow channel (0.6 V)

4 结 论

为了研究扩散层孔隙率对平行流场 PEMFC 性能影响,采用计算流体动力学商业软件 Fluent 在不同扩散层孔隙率的条件下,对传统平行流场和斜坡平行流场进行了模拟仿真对比,主要研究结论如下:

(1) 对不同工况下各流场进行了性能分析,结果表明,随着扩散层孔隙率越大,质子交换膜燃料电池性能越好,孔隙率在 0.3~0.5 时电流密度增长率最大,最大可达 9.03%;相比传统平行流场,斜坡流场更有利于燃料电池性能的提升,且孔隙率为 0.7 时电流密度增长率最大,最大可达 28.79%。

(2) 分析了不同工况下各流场电池内部氧气质量分数分布,结果表明:随着扩散层孔隙率增大,有利于氧气通过扩散层扩散进入催化层,提高电化学反应速率;并且相比传统平行流场,斜坡平行流场氧气分布更均匀。

(3) 分析了不同工况下各流场电池内部水质量分数分布,结果表明:随着扩散层孔隙率的增大,流道内水含量越大,越有利于液态水的排出;并且相比传统平行流场,斜坡平行流场流道中气体流速更大,有利于液态水的排出。

参考文献(References):

[1] RATH R, KUMAR P, MOHANTY S, et al. Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(15): 8931—8955.

[2] PAN Z F, AN L, WEN C Y. Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles[J].

Applied Energy, 2019, 240(1): 473—485.

- [3] KANANI H, SHAMS M, HASHEMINASAB M, et al. Model development and optimization of operating conditions to maximize PEMFC performance by response surface methodology[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 93(1): 9—22.
- [4] LIU Y, TU Z, CHAN S H. Performance enhancement in a H_2/O_2 PEMFC with dual-ejector recirculation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(25): 12698—12710.
- [5] ZHANG G, XIE X, XIE B, et al. Large-scale multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 555—563.
- [6] FLIPO G, JOSSET C, BELLETTRE J, et al. Clarification of the surface wettability effects on two-phase flow patterns in PEMFC gas channels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(34): 15518—15527.
- [7] 李英, 周勤文, 周晓慧. PEMFC 阴极扩散层结构特性对水淹影响的数值分析[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1424—1430.
- LI Ying, ZHOU Qin-weng, ZHOU Xiao-hui. Numerical analysis of influence of structural properties of cathode diffusion layer in PEMFC on water flood[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 64(4): 1424—1430.
- [8] MOJICA F, RAHMAN M A, MORA J M, et al. Experimental study of three channel designs with model comparison in a PEM fuel cell[J]. Fuel Cells, 2020, 20(5): 2261—73.
- [9] ATYABI S A, AFSHARI E. Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214(1): 738—748.
- [10] YIN Y, WANG X, ZHANG J, et al. Influence of sloping baffle plates on the mass transport and performance of PEMFC [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(7): 2643—2655.
- [11] PERNG S W, WU H W, WANG R H. Effect of modified flow field on non-isothermal transport characteristics and cell performance of a PEMFC [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80(1): 87—96.
- [12] 衣宝廉. 燃料电池的原理, 技术状态与展望[J]. 电池工业, 2003, 8(1): 16—22.
- YI Bao-lian. The principle, technical status and prospect of fuel cell[J]. Battery Industry, 2003, 8(1): 16—22.
- [13] UM S, WANG C Y. Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2004, 125(1): 40—51.