

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212278

质子交换膜燃料电池阴极侧糖葫芦型流道 数值模拟研究

喻峰正, 冼海珍

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 阴极侧流道结构是影响质子交换膜燃料电池性能的主要因素之一。阴极侧流道需要将液态水及时排出燃料电池和使氧气尽可能多地流向阴极催化层, 从而避免阴极水淹和传质损失现象发生。设计了 1 种糖葫芦型三维阴极侧流道。糖葫芦型流道是在传统直流道的基础上, 增加弧形边梯形块而形成的。对阴极侧糖葫芦型流道进行模拟, 结果表明: 与传统直流道相比, 糖葫芦型三维阴极侧流道高电流密度区域电流密度提高了约 8%; 并且由于糖葫芦型流道的特殊结构, 气流以脉冲递减的形式向出口推进, 传热传质得到明显增强。另外, 还进一步探究了弧边梯形高度对整体性能的影响。

[关键词] 质子交换膜燃料电池; 糖葫芦型流道; 三维多相流模型; 传热传质

[引用本文格式] 喻峰正, 冼海珍. 质子交换膜燃料电池阴极侧糖葫芦型流道数值模拟研究[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 51-59.
YU Fengzheng, XIAN Haizhen. Numerical simulation analysis of sugar gourd type channel on cathode side of proton exchange membrane fuel cell[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 51-59.

Numerical simulation analysis of sugar gourd type channel on cathode side of proton exchange membrane fuel cell

YU Fengzheng, XIAN Haizhen

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The flow channel structure at the cathode side is one of the main factors affecting the performance of proton exchange membrane fuel cells. The flow channel at the cathode side needs to discharge liquid water out of the fuel cell in time and make oxygen flow to the cathode catalytic layer as much as possible. Thus, the phenomenon of cathode flooding and concentration polarization is avoided. An innovative 3D cathode side channel, sugar gourd type channel, is designed. The sugar gourd type channel is formed by adding arc-shaped side trapezoidal block based on the traditional straight flow channel. The simulation results show that, compared with the traditional straight flow channel, the current density in the high current density region is increased by about 8%. And because of the special structure of the sugar gourd type channel, the air flow advances to the outlet in the form of pulse decline, and the heat and mass transfer are significantly enhanced. In addition, the influence of arc-shaped side trapezoidal height on overall performance is further explored.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; sugar gourd type channel; three-dimensional multiphase flow model; heat and mass transfer

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 有诸多优点, 例如有很高的能量转化效率, 产物仅有水, 对环境几乎零污染, 放电的过程是电化学反应放电, 不存在动机械, 因此操作环境相对安静, 而且调节反应

迅速^[1-4]。将 PEMFC 作为汽车动力首先需要保证足够的输出功率, 而 PEMFC 的流道结构是影响燃料电池功率的主要因素之一。从原理上看, 可通过改变流道结构来增加垂直于扩散层方向上的气流流

修回日期: 2022-12-12

第一作者简介: 喻峰正 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为质子交换膜燃料电池冷启动, 2571157518@qq.com。

通信作者简介: 冼海珍 (1971), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为氢能技术, xhz@ncepu.edu.cn。

量,使燃料电池在高电流密度区获得充足的燃料供给^[5-6],并且有利于反应生成的水顺利排出燃料电池,以达到水热平衡。因此,出现了许多对流道内部进行的精细设计,如添加堵块、新型三维流场、子流道和渐缩流道等。

Ghanbarian A 等^[7]在传统直流道里加入梯形、半圆形和长方形堵块,研究结果表明直流道里面加入堵块,有助于增强传质过程,并在高电流密度区域能够有效去除产生的水。在此基础上,Yin Y 等^[8]具体研究了梯形堵块的数量对燃料电池性能的影响,结果表明堵块数量为5时,其平均电流密度最大。Wan Z M 等^[9]设计了1种横截面为M形的流道,数值结果表明,使用M形流道后,平均电流密度比波浪形流道提高了约21.3%。Niu Z 等^[10]将挡风板倾斜安装在流道内,与传统直流道相比,其性能提高约9%。Jsa B 等^[11]在主流道内添加挡板,与子流道在过渡区汇合后导向扩散层,研究表明,这种设计的流场使得氧气分布更加均匀。Zehtabiyani-Rezaie N 等^[12]将传统平行流场中的脊倾斜一定的角度,形成汇聚流道和发散流道,结果表明,1个汇聚流道供给相邻的2个发散流道,其原因是相邻流道间压差引起了扩散,净输出功率要比采用直流道时增加约16%。利用这种汇聚和发散效应的还有Chowdhury M Z 等^[13],他们设计了1款蛇形渐缩流道。Timurkutluk B 等^[14]设计了等差递减的渐缩流道,Ghasabehi M 等^[15]对平行流场的入口进行了渐缩式设计。渐缩流道能显著提高电池性能的。此外,采用子流道辅助供气来调整气流的干湿度,可以自产自销产生的液态水,可以避免高电流密度区的水淹现象。Wang Y 等^[16]设计了1种在阴极流道侧壁上开孔,从孔中通入干燥空气的流道,结果表明,流道的除水效果明显增强。Koresawa R 等^[17]在流道脊下设计微流道,出口的水分混合后再分配到入口,使电池内部达到最佳水热平衡。

综合以上流道的优缺点,本文设计了1款糖葫芦型流道,将梯形块的2个腰边改为圆弧边,然后将弧边梯形块组合形成糖葫芦型流道,流道内渐阔区与窄口区交错分布;然后在FLUENT软件中调用PEM计算模型,使用有限体积法和压力与速度耦合的SIMPLE算法,对偏微分方程组进行求解,并对所有的方程进行F循环调整,以提高解的收敛性和收敛速度;对PEMFC阴极侧流体的流动行为、扩散层和催化层界面内液态水和温度的分布以及燃

料电池的整体性能进行了数值研究,分析了弧边梯形高度对整体性能的影响。

1 建立几何模型

1.1 几何模型

由于阳极的氢气扩散率很大^[18],所以本文只将阴极侧流道改成糖葫芦型。图1为阴极糖葫芦型和传统直流道的几何结构模型。弧边梯形的几何尺寸见表1。

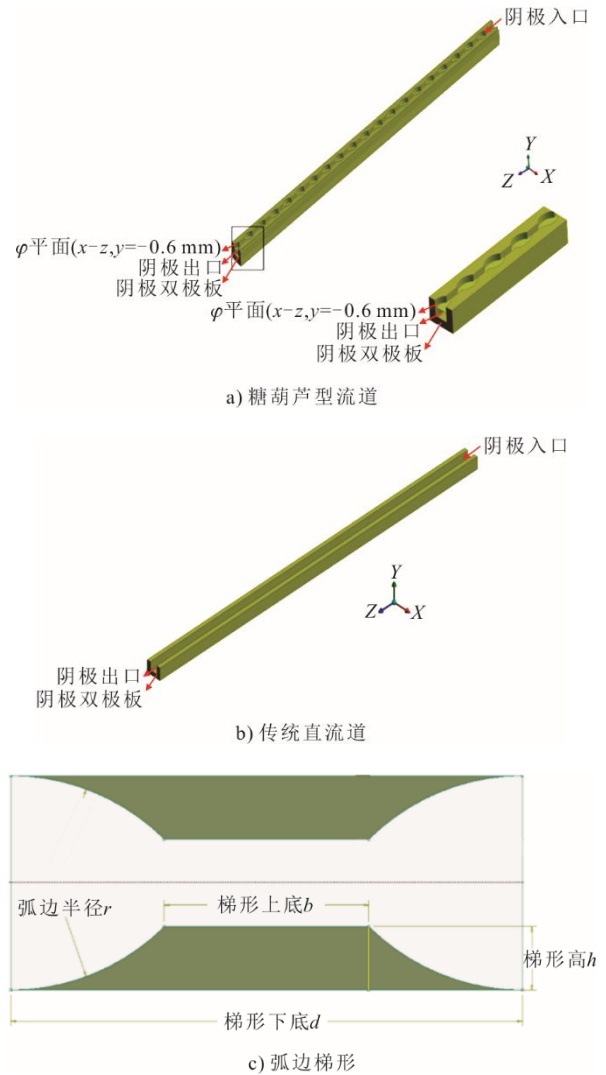


图1 糖葫芦型流道几何模型

Fig.1 The geometric model of sugar gourd type channel

1.2 模型假设

在PEMFC中的物质传输以及电化学反应过程较复杂,在理论允许的条件下做了以下简化^[19-22]:

1) 质子交换膜燃料电池工作在稳定多相等温的状态下; 2) 燃料电池中的多孔介质层是各向同性的,且气体组分不会跨膜运输; 3) 气体在流道内处于层流状态,且混合气体是理想气体,其扩散遵循菲克

扩散定律；4) 忽略重力带来的影响；5) 水相变发生在催化层和扩散层。

表 1 弧边梯形几何尺寸 单位: mm

Tab.1 Geometric dimensions of arc-shaped side trapezoid

区域	宽度	厚度	长度
流道	1.00	1.00	50.00
集电极	2.00	1.50	50.00
扩散层	2.00	0.19	50.00
催化层	2.00	0.015	50.00
质子交换膜	2.00	0.05	50.00
梯形下底 d			2.50
梯形上底 b			1.00
弧边半径 r			1.088
梯形高 h			0.30

2 数学模型

模型计算流程如图 2 所示。

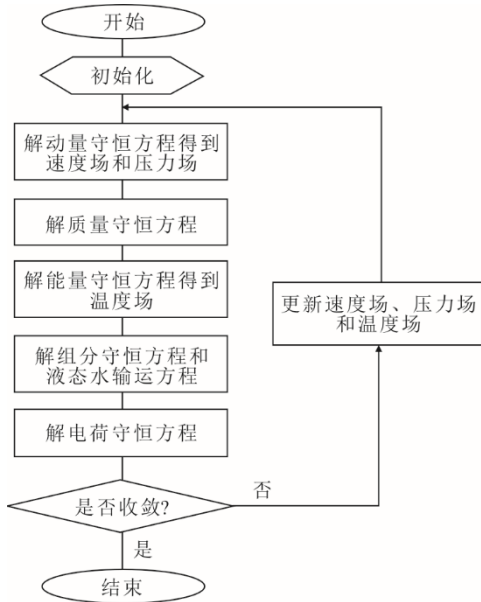


图 2 求解流程
Fig.2 Solution flow chart

2.1 控制方程

1) 质量守恒方程

质量守恒方程为^[23]:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho_g \vec{u}_g) = 0, \vec{u}_g = [u, v, w]^T \quad (1)$$

式中: ε 表示多孔介质区域的孔隙率, 在阴阳流道区域其孔隙率 1, 在双极板处为 0; ρ_g 表示混合气体的密度, kg/m^3 ; \vec{u}_g 表示气流的速度矢量, m/s 。

2) 动量守恒方程

动量守恒方程为^[24]:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_u \quad (2)$$

式中: p 为压强, Pa ; μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; S_u 为源项。

在多孔电极内, 动量守恒方程可以简化为 Darcy 定律:

$$\vec{\varepsilon} u_g = \frac{K_p}{\mu} \nabla p \quad (3)$$

式中: K_p 为多孔介质区域的渗透率^[25], m^2 。

$$K_p = \frac{d_p^2}{72\beta^2} \frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \quad (4)$$

式中: d_p 表示多孔介质的颗粒平均直径, m ; β 为颗粒弯曲度。

3) 组分守恒方程

气体组分在传输过程中守恒方程为^[8]:

$$\nabla \cdot (\rho_g \vec{u}_g Y_i) = \nabla \cdot (\rho_g D_{i,\text{eff}} \nabla Y_i) + S_i \quad (5)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数; i 表示氢气、氧气、水蒸气、氮气; $D_{i,\text{eff}}$ 表示气体组分有效扩散系数。

$D_{i,\text{eff}}$ 修正为^[26-27]:

$$D_{i,\text{eff}} = \varepsilon^{0.5} (1-s)^{\zeta} D_{i,0} \left(\frac{p_0}{p} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \quad (6)$$

式中: r_s 表示孔隙饱和度指数; $D_{i,0}$ 为组分 i 在参考温度和参考压力下的扩散系数; s 为水饱和度, 其计算式为式(7)。

$$s = \frac{v_{\text{liq}}}{v_{\text{mix}}} \quad (7)$$

式中: v_{liq} 和 v_{mix} 分别表示液态水的体积和总体积。

4) 能量守恒方程

能量守恒方程为^[27]:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_n \quad (8)$$

式中: c_p 表示为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; k_{eff} 有效导热系数; S_n 为源项, 包括了焦耳热、化学反应热、水的相变潜热、活化热, 不可逆热。

5) 电荷守恒方程

持续电流需要持续推动电化学反应的进行, 而电化学反应进行的驱动力正是阴阳两极的过电势, 即固相电位与膜相电位的差值^[28]。

对于固相而言:

$$\nabla \cdot (\mathcal{G}_s \nabla \Phi_s) + J_s = 0 \quad (9)$$

对于膜相而言:

$$\nabla \cdot (\mathcal{G}_m \nabla \Phi_m) + J_m = 0 \quad (10)$$

式中: \mathcal{G} 表示电导率; Φ 表示电势, V 。

式(9)中: 在阳极时, $J_s = -J_a < 0$; 在阴极时, $J_s = +J_c > 0$ 。式(10)中: 在阳极时, $J_m = +J_a > 0$; 在阴极时, $J_m = -J_c < 0$ 。

电池的过电势 η , 阳极 η_a 和阴极 η_c 可以定义为:

$$\eta = \Phi_s - \Phi_m - V_{\text{ref}} \quad (11)$$

$$\eta_a = \Phi_s - \Phi_m, \quad V_{\text{ref}} = 0 \quad (12)$$

$$\eta_c = \Phi_s - \Phi_m - V_{\text{open}}, \quad V_{\text{ref}} = V_{\text{open}} \quad (13)$$

式中: V_{ref} 表示电池的电动势, V; V_{open} ^[27] 为电池的开路电压, V。

$$V_{\text{open}} = \frac{-\Delta G_0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0.5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (14)$$

燃料电池中反应速 J_a 、 J_c 由 Butler-Volmer 公式计算得到^[8]:

$$J_a = (1-s)^r \xi_a j_{a,\text{ref}} \left(\frac{c_{\text{H}_2}}{c_{\text{H}_2,\text{ref}}} \right)^{\gamma_a} \left(e^{\frac{\alpha_a \eta_a F}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_c \eta_a F}{RT}} \right) \quad (15)$$

$$J_c = (1-s)^r \xi_c j_{c,\text{ref}} \left(\frac{c_{\text{O}_2}}{c_{\text{O}_2,\text{ref}}} \right)^{\gamma_c} \left(e^{\frac{\alpha_c \eta_c F}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_a \eta_c F}{RT}} \right) \quad (16)$$

式中: r 为集电流区孔隙堵塞系数; ξ_a 、 ξ_c 分别表示为阳极和阴极的比活性表面积; $j_{a,\text{ref}}$ 、 $j_{c,\text{ref}}$ 分别表示为阳极和阴极的参考体积电流密度, A/m³; α_a 、 α_c 分别为阳极和阴极的传输系数; R 为气体常数; F 为法拉第常数; c_{H_2} 、 c_{O_2} 为氢气和氧气的局部浓度;

$c_{\text{H}_2,\text{ref}}$ 、 $c_{\text{O}_2,\text{ref}}$ 为氢气和氧气的参考浓度; γ 为浓度指数。

6) 液态水运输方程

液态水运输方程为^[27]:

$$\nabla \cdot (\rho_L \vec{v}_L s) = h_w \quad (17)$$

式中: 下角标 L 表示液体; h_w 表示冷凝速率, 其在催化层和扩散层中计算公式^[27]分别为式(18)、式(19)。

$$h_w = (1-s) c_r \frac{p_{\text{wv}} - p_{\text{sat}}}{RT} M_{\text{H}_2\text{O}}, \quad p_{\text{wv}} > p_{\text{sat}} \quad (18)$$

$$h_w = s c_r \frac{p_{\text{wv}} - p_{\text{sat}}}{RT} M_{\text{H}_2\text{O}}, \quad p_{\text{wv}} < p_{\text{sat}} \quad (19)$$

式中: c_r 为冷凝速率常数; p_{wv} 、 p_{sat} 分别为水蒸气压力和水蒸气饱和蒸气压。

对于公式(17)而言, 若假设在流道内, 气流速度与液体流速相等, 则公式将变成:

$$\nabla \cdot \left(\rho_l \frac{Ks^3}{\mu_L} \frac{dp_c}{ds} \nabla s \right) = h_w \quad (20)$$

式中: p_c 表示多孔介质区域的毛细压力, Pa, 由 Leveret's 公式计算得到^[27]。

$$p_c = \frac{\zeta_{\text{surf}} \cos \theta_c}{\left(\frac{K_p}{\varepsilon} \right)^{0.5}} [1.417(1-s) - 2.12(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3], \quad \theta_c < 90^\circ \quad (21)$$

$$p_c = \frac{\zeta_{\text{surf}} \cos \theta_c}{\left(\frac{K_p}{\varepsilon} \right)^{0.5}} [1.417s - 2.12s^2 + 1.263s^3], \quad \theta_c > 90^\circ \quad (22)$$

式中: ζ_{surf} 为表面张力, N/m; θ_c 为接触角。

在式(18)、式(19)中, p_{sat} 、 p_{wv} 分别由以下的公式进行计算^[27]:

$$\lg p_{\text{sat}} = -2.1794 + 0.02953\Delta T - 9.1837 \times 10^{-5} \times \Delta T + 1.4454 \times 10^{-5} \Delta T \quad (23)$$

$$\Delta T = T - 273.15 \quad (24)$$

$$RH \cdot p_{\text{sat}} = x_{\text{H}_2\text{O}} p_{\text{wv}} \quad (25)$$

在水的运输过程必然会影响到质子交换膜的质子电导率, 其影响的过程原理表达式为^[8]:

$$\kappa_{\text{H}^+} = (0.514\lambda - 0.236) \cdot e^{1.268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)}, \quad \lambda \geq 1 \quad (26)$$

$$\kappa_{\text{H}^+} = (0.33\lambda - 0.01) \cdot e^{1.268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)}, \quad \lambda < 1 \quad (27)$$

式中: λ 表示膜中电解质的水合程度, 也叫电解质含水量^[8]。

$$\lambda = 0.043 + 17.28q - 39.85q^2 + 36q^3, \quad q \leq 1 \quad (28)$$

$$\lambda = 14 + 1.4(q-1), \quad 1 < q \leq 3 \quad (29)$$

$$q = \frac{p_{\text{wv}}}{p_{\text{sat}}} + 2s \quad (30)$$

式中: q 为水活度。

2.2 边界条件

入口边界条件为: 在气体流道入口采用质量流量入口, 可以调节入口温度和各组分的质量分数。在阴阳两极的质量分数计算式为^[27]:

$$\dot{m}_{\text{inlet},a} = \frac{\rho_g^a \delta_a i_{\text{ref}} A_{\text{MEA}}}{2w_{\text{H}_2} F} \quad (31)$$

$$\dot{m}_{\text{inlet},c} = \frac{\rho_g^c \delta_c i_{\text{ref}} A_{\text{MEA}}}{4w_{\text{O}_2} F} \quad (32)$$

式中: δ_a 、 δ_c 分别为阳极阴极化学计量比; i_{ref} 为参考电流密度, A/cm²; w_{H_2} 、 w_{O_2} 为氢气、氧气的浓度, mol/m³; A_{MEA} 为 MEA 的活化面积, m²; ρ_g^a 、 ρ_g^c 分别为阳极和阴极混合气体密度, kg/m³。

出口边界条件为: 在计算的时候设定出口边界条件为压力出口, 设定一定的温度和出口背压。

壁面边界条件为: 在模型中入口与出口之间的壁面都设定为绝热边界条件, 并且假定是无滑移的壁面。

电子电势边界条件为: 在该模型中采用设定阳极电压为 0, 阴极侧电压为电池的输出电压 V_{cell} 。

各区域的材料性质见表 2，电化学模型参数见表 3，各边界条件详细情况见表 4。

表 2 材料参数
Tab.2 Material parameters

项目	电极	扩散层	催化层	膜
密度/(kg·m ⁻³)	1 880.00	490.00	2 010.00	1 980.00
定压比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	875.00	710.00	710.00	2 000.00
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10.70	1.60	8.00	0.67
电导率/(S·m ⁻¹)	120.00	5 000.00	1 000.00	1.23
黏性阻力/m ⁻¹		1.90×10 ¹⁰	1.90×10 ¹⁰	1.40×10 ¹⁵
孔隙率		0.70	0.70	
接触角/(°)		130.00	110.00	
表面积比/m ⁻¹			2.00×10 ⁵	
膜当量质量/(kg·kmol ⁻¹)				1 100.00

表 3 电化学模型参数
Tab.3 Electrochemical model parameters

项目	数值
参考电流密度/(A·cm ⁻²)	10 000.00
参考温度/K	300.00
参考压力/MPa	0.10
法拉第常数/(C·mol ⁻¹)	96 487.00
气体常数/(J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	8.314
阳极参考浓度/(kmol·m ⁻³)	0.056 4
阴极参考浓度/(kmol·m ⁻³)	0.003 39
阳极参考电流密度/(A·cm ⁻²)	4 700.00
阴极参考电流密度/(A·cm ⁻²)	5.00
阳极浓度指数	0.50
阴极浓度指数	1.00
阳极交换系数	0.50
阴极交换系数	1.50
开路电压/V	1.10
氢气参考扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	1.10×10 ⁻⁴
氧气参考扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	3.23×10 ⁻⁵
氮气参考扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	7.35×10 ⁻⁵
水蒸气参考扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	1.10×10 ⁻⁵
堵塞饱和度指数	2.50
孔隙转移电流指数	2.50
水凝结率/s ⁻¹	100.00
接触电阻/(Ω·m ⁻²)	2.00×10 ⁻⁶

2.3 网格划分

图 3 为糖葫芦型流道网格。本文将几何模型划分成六面体结构化网格，并在 V_{cell}=0.55 V 下，计算出不同网格数量对应的电流密度。比较发现，网格数量为 552 000 时计算的电流密度与网格数量为 512 000 时计算的电流密度差值小于 5%，512 000 网格数已达到计算要求。

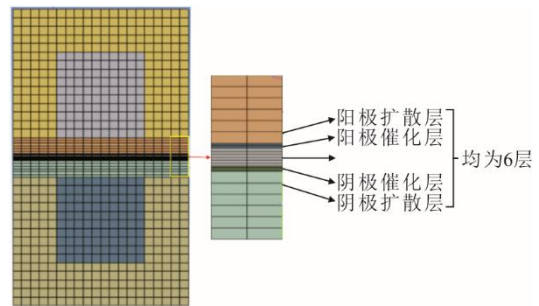
2.4 模型验证

在文献[27]的几何条件和工作条件下，对直流

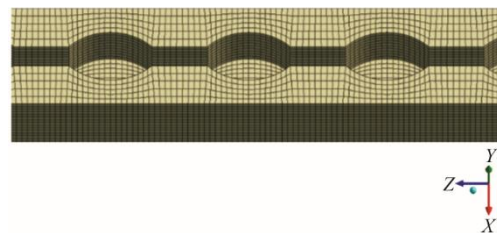
道的质子交换膜燃料电池进行本文模型验证，其结果如图 4 所示。由图 4 可见，数值模拟结果与 Atyabi S A 等^[27]的实验结果具有较高的吻合度。因此，该模型能够成为本次研究的计算模型。

表 4 各区域边界条件
Tab.4 Boundary conditions of each region

区域	边界条件类型	数值
阳极入口条件	进口质量流量/(kg·s ⁻¹)	6.60×10 ⁻⁸
	化学计量比	1.20
	氢气的质量分数	0.76
	水蒸气的质量分数	0.24
	相对湿度/%	100.00
	温度/K	353.00
阳极出口条件	出口背压/MPa	0
	温度/K	353.00
阴极入口条件	进口质量流量/(kg·s ⁻¹)	5.70×10 ⁻⁷
	化学计量比	3.00
	氧气的质量分数	0.16
	水蒸气的质量分数	0.24
	相对湿度/%	100.00
	温度/K	353.00
阴极出口条件	出口背压/MPa	0
	温度/K	353.00
阳极上表面	电子电势/V	0
阴极下表面	电子电势/V	1.10
其他壁面	绝热边界条件	
全区域	操作压力/MPa	0.11



a) 糖葫芦型流道网格正视图



b) 糖葫芦型阴极流道网格俯视图

图 3 糖葫芦型流道网格
Fig.3 Grid of sugar gourd type channel

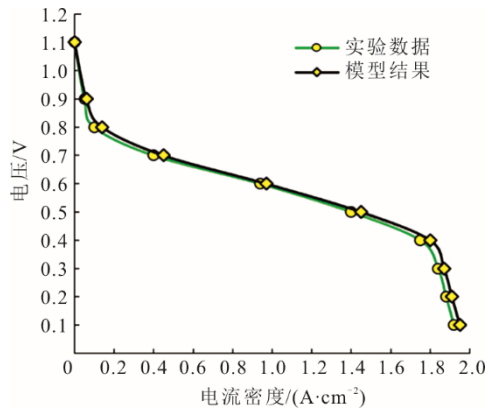


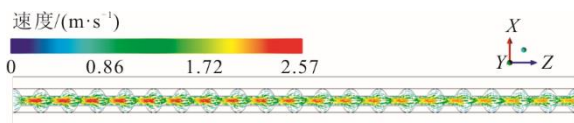
图4 模型验证
Fig.4 Model validation

3 模拟结果及分析

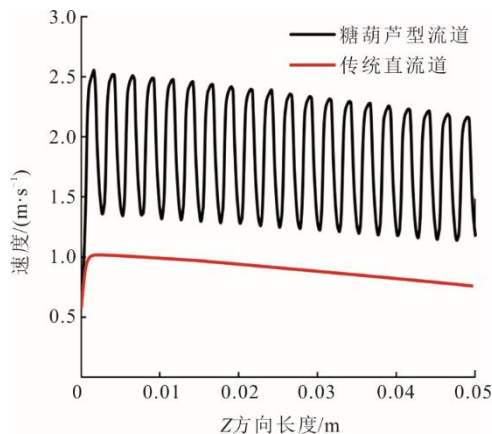
由计算结果可知,当 $V_{\text{cell}}=0.55\text{ V}$ 时,电池的输出功率达到最大,当 V_{cell} 超过 0.55 V 时,PEMFC 的输出功率会随着电化学反应变慢而减小。因此,本文在 $V_{\text{cell}}=0.55\text{ V}$ 下对比糖葫芦型流道的性能。

3.1 速度分布

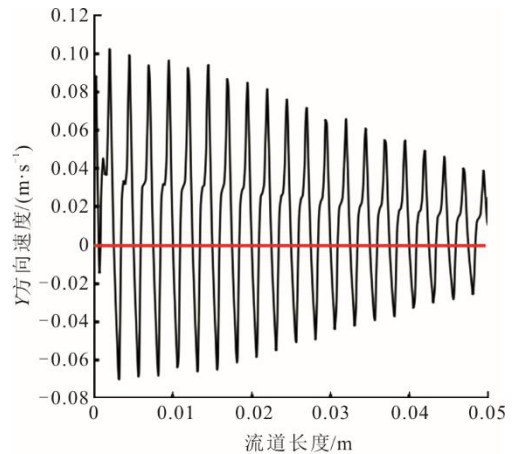
图 5 为糖葫芦型流道在 ϕ 平面上的速度分布。由图 5b)可见,气流沿程在糖葫芦型流道的窄口区加速,在渐阔区减速,从入口到出口经历 20 次速度增减,气流速度大小呈现脉冲递减的形式。相比于传统直流道,糖葫芦型流道中的气流变化更加剧烈,扰动更加充分,平均速度比传统直流道增大约 2 倍。当气流从渐阔区进入窄口区时,流道横截面积突然减小,气流突然加速,气流的惯性力随之而增大,从而有效避免阴极侧流道内段塞流的产生^[29-30]。



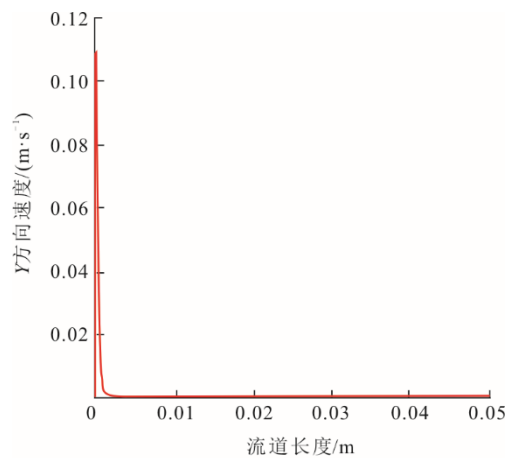
a) 糖葫芦型流道速度矢量 ($Y=-0.6\text{ mm}$)



b) 糖葫芦型流道与传统直流道速度



c) 糖葫芦型流道Y方向速度



d) 传统直流道Y方向速度

图5 糖葫芦型流道在 ϕ 平面上的速度分布
Fig.5 Velocity of sugar gourd type channel in ϕ plane

由图 5c)、图 5d)可见,当气流从窄口区流入渐阔区时,流道横截面积突然增大,速度减小,压力减小,窄口流道内的气流会被迅速释放,氧气流向扩散层的分量增多,电化学反应增强,温度升高。糖葫芦型流道和传统直流道在 Y 方向上速度的对比,佐证了糖葫芦型流道可以提高传质能力。

3.2 液态水分布

当速度以脉冲递减形式向前推进时,流道内水分和温度的分布将得到优化。在 PEMFC 中,液态水的除去效果是燃料电池在高电流密度区保持整体性能的关键因素。图 6 为糖葫芦型流道和传统直流道在催化层和扩散层界面处液态水质量分数分布。由图 6 可见,糖葫芦型流道中液态水的去除效果明显优于传统直流道,尤其在流道出口处液态水去除效果更加明显。

同时,本文氧气和氢气逆流的形式,也有助于排出出口处的液态水。结合糖葫芦型流道的特殊性

和气流的脉冲波动性分析可知，气流在窄口处横截面突然减小，在流量不变的情况下，速度增大扰动

加强，带走的水分增多，有利于除去产生的液态水，故而呈现出图 6 中的分布。

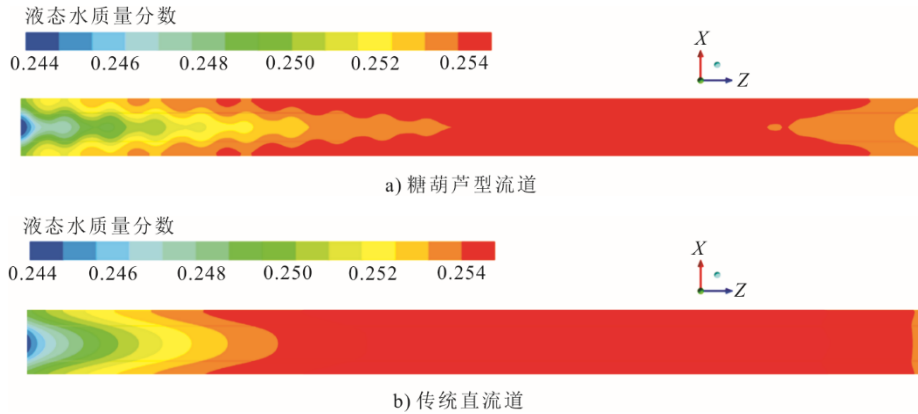


图 6 糖葫芦型流道和传统直流道阴极侧催化层与扩散层界面处液态水分布

Fig.6 Liquid water distribution at the interface between catalytic layer and diffusion layer at cathode side

3.3 温度分布

PEMFC 中的温度是影响整体性能的又 1 个关键因素，电化学反应的快慢取决于催化剂的活性，而温度又是影响催化剂活性的关键因素。图 7 是糖葫芦型流道和传统直流道阴极侧催化层和扩散层界面处的温度分布。两者对比可见，糖葫芦型流道温度分布更加均匀，最高温度仅出现在渐阔区中心且最高温度低于传统直流道。流道窄口区产生扰动

后，更多的气流到达渐阔区上方参与反应，故而在渐阔区上方反应更加剧烈，整个平面温度差约 3~4 K。传统直流道高温区集中在流道中间，与周边低温区温度差约 6 K。

根据 Pasaogullari U 等^[31]研究可知，催化层与扩散层界面温度差小于 5 K 为最佳。相比而言，糖葫芦型流道更利于温度传导，进而提高电池的性能。

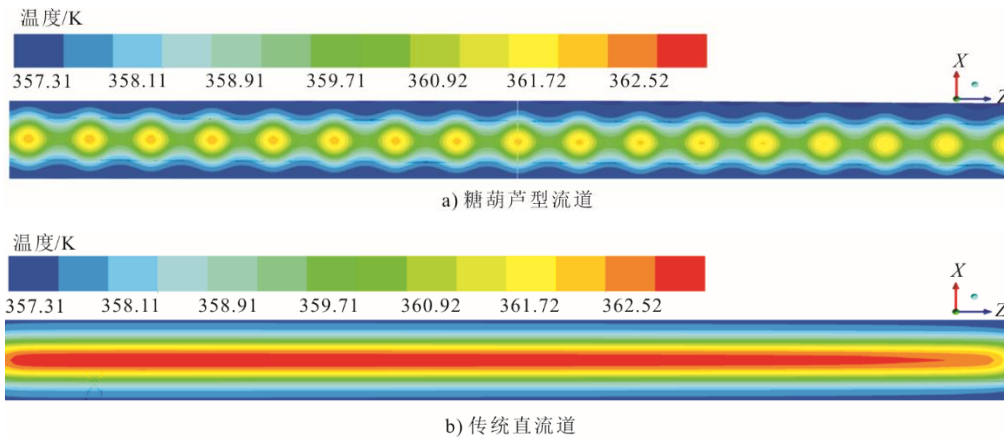


图 7 糖葫芦型流道和传统直流道阴极侧催化层与扩散层界面处温度分布

Fig.7 Temperature distribution at the interface between catalytic layer and diffusion layer at cathode side

3.4 性能比较

图 8 为传统直流道与糖葫芦型流道的极化曲线以及功率曲线。由图 8 可见：当 V_{cell} 高于 0.7 V 时，2 种流道的极化曲线几乎重合，说明在低电流密度区，改进流道和传统直流道没什么区别；当 V_{cell} 低于 0.7 V 时，极化曲线逐渐分离；当 V_{cell} 等于 0.4 V 时，糖葫芦型流道电流密度相对传统直流道电流密度提高约 8%。改进后的流道能增强气流的扰动和

降低液态水含量，进而削弱了浓度极化的影响。并且使催化层和扩散层界面间的温差小于 3 K，以此保证了催化剂的最佳活性，加快了反应的进行。

3.5 弧边梯形高度的影响

固定弧边梯形上底和下底，改变弧边梯形的高度，当高度固定后，弧边半径即固定。上底 $b=1\text{ mm}$ ， $d=2.5\text{ mm}$ ，高度 h 取 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 mm。在 $V_{cell}=0.4\text{ V}$ 的边界条件下， h 不同时

对应的电流密度如图 9 所示。

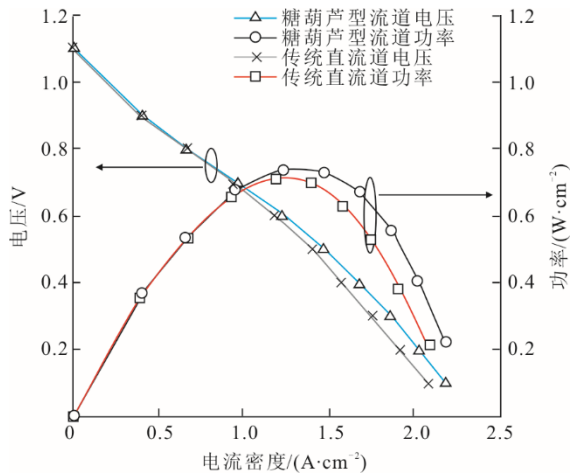
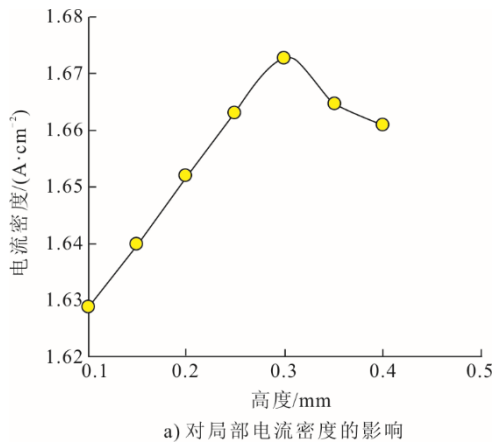
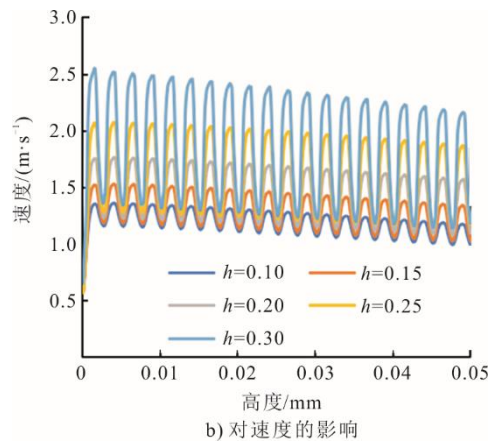


图 8 糖葫芦型流道与传统直流道极化曲线与功率曲线
Fig.8 Polarization curve and power curve of sugar gourd type channel and conventional parallel channel



a) 对局部电流密度的影响



b) 对速度的影响

图 9 弧边梯形高度对燃料电池的影响
Fig.9 Effect of arc-edge trapezoid height on PEMFC

由图 9 可以得出：当 $h < 0.30$ mm 时，电流密度随 h 增大而增大；当 $h > 0.30$ mm 时，电流密度随 h 增大反而减小；当 $h = 0.30$ mm 时，速度振幅最大。当 h 逐渐增大时，流道截面逐渐缩小，对气流的影

响慢慢增大，使得垂直扩散层方向上的气流增多，保证了在高电流密度区域的气体供给。当 h 超过 0.30 mm 后，流道横截面进一步减小，阻力增大，外部耗功增大，整体性能下降。因此，随着高度的增大，电流密度先增大后减小。

4 结 论

本文设计了一种用于质子交换膜燃料电池的糖葫芦型阴极侧流道，并建立了三维多相流 CFD 模型研究了糖葫芦型流道的整体性能，分析了影响电池性能的局部速度分布，阴极催化层与扩散层界面处的液态水分布和温度分布，并且与传统直流道参数进行比较分析，另外，还研究了弧边梯形的高对 PEMFC 性能的影响。

1) 糖葫芦型流道中的速度分布不同于以往单一降低的模式，速度大小呈现为脉冲递减的形式，Y 方向的速度明显增大，传质能力得到提升。糖葫芦型流道在速度分布形式发生变化后，气流频繁加速与减速增强了液态水的除去效果。

2) 采用弧边梯形堵块，使得阴极催化层与扩散层界面的温度更加均匀，降低了界面温度差，增强了传热能力，使其催化层能够在适应的温度下催化反应。

3) 通过研究弧边梯形堵块高度对整体性能的影响发现，随着高度的增大，电流密度先增大后减小。这说明当高度过大时，气流流道太窄而无法及时供气，当高度过小时，对气流的速度分布形式影响不大，无法增加气流向扩散层的分量。

【参 考 文 献】

- [1] 马洋洋, 宋宛泽, 王鹏宇. 质子交换膜燃料电池建模研究综述[J]. 电源技术, 2021, 45(12): 1660-1664.
MA Yangyang, SONG Wanze, WANG Pengyu. A review of proton exchange membrane fuel cell modeling[J]. Journal of Power Supply, 2021, 45(12): 1660-1664.
- [2] 贾秋红, 李超, 常英杰. 质子交换膜燃料电池两相流模型研究综述[J]. 电源技术, 2015, 39(8): 1783-1785.
JIA QiuHong, LI Chao, CHANG Yingjie. Review on two-phase flow model of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Power Supply, 2015, 39(8): 1783-1785.
- [3] 李子君, 王树博, 李微微, 等. 波形流道增强质子交换膜燃料电池性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1046-1054.
LI Zijun, WANG Shubo, LI Weiwei, et al. Wavy flow channel enhances proton exchange membrane fuel cell performance[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2021, 61(10): 1046-1054.
- [4] 侯明, 邵志刚, 俞红梅, 等. 2019 年氢燃料电池研发热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 14.
HOU Ming, SHAO Zhigang, YU Hongmei, et al. Review

- of hot research and development of hydrogen fuel cell in 2019[J]. *Science and Technology Review*, 2020, 38(1): 14.
- [5] 黄宗辉, 刘金玲, 杨代军. 脊下横流对 PEMFC 性能影响的数值分析[J]. *电源技术*, 2015, 39(11): 4. HUANG Zonghui, LIU Jinling, YANG Daijun. Numerical analysis of influence of under-ridge crossflow on PEMFC performance[J]. *Journal of Power Supply*, 2015, 39(11): 4.
- [6] 沈俊. 基于强化传质的燃料电池流场优化及水热管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 3. SHEN Jun. Research on flow field optimization and hydrothermal management of enhanced mass transfer fuel cell[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 3.
- [7] GHANBARIAN A, KERMANI M J. Enhancement of PEM fuel cell performance by flow channel indentation[J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 110: 356-366.
- [8] YIN Y, WU S, QIN Y, et al. Quantitative analysis of trapezoid baffle block sloping angles on oxygen transport and performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Applied Energy*, 2020, 271: 115257.
- [9] WAN Z M, QUAN W X, YANG C, et al. Optimal design of a novel M-like channel in bipolar plates of proton exchange membrane fuel cell based on minimum entropy generation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112386.
- [10] NIU Z, FAN L, BAO Z, et al. Numerical investigation of innovative 3D cathode flow channel in proton exchange membrane fuel cell[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(4): 3328-3338.
- [11] JSA B, ZTA B, SHC B. Performance enhancement in a proton exchange membrane fuel cell with a novel 3D flow field[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 164: 114464.
- [12] ZEHTABIYAN-REZAIE N, AREFIAN A, KERMANI M J, et al. Effect of Flow Field with Converging and Diverging Channels on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 152: 31-44.
- [13] CHOWDHURY M Z, AKANSU Y E. Novel convergent-divergent serpentine flow fields effect on PEM fuel cell performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(40): 1-9.
- [14] TIMURKUTLUK B, CHOWDHURY M Z. Numerical investigation of convergent and divergent parallel flow fields for PEMFCs[J]. *Fuel Cells*, 2018, 18: 441-448.
- [15] GHASABEHI M. Performance analysis of an innovative parallel flow field design of proton exchange membrane fuel cells using multiphysics simulation[J]. *Fuel*, 2020, 285: 119194.
- [16] WANG Y, WANG S, WANG G, et al. Numerical study of a new cathode flow-field design with a sub-channel for a parallel flow-field polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017: S0360319917346311.
- [17] KORESAWA R, UTAKA Y. Improvement of performance of polymer electrolyte fuel cell due to addition of micro-grooves as water removal mechanism[J]. *Transactions of the JSME*, 2015, 81(824): 14-00537-14-00537.
- [18] HEIDARY H, KERMANI M J, ADVANI S G, et al. Experimental investigation of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(16): 6885-6893.
- [19] CAI Y, FANG Z, CHEN B, et al. Numerical study on a novel 3D cathode flow field and evaluation criteria for the PEM fuel cell design[J]. *Energy*, 2018, 161: 28-37.
- [20] AL-BAGHDADI M. Studying the effect of material parameters on cell performance of tubular-shaped PEM fuel cell[J]. *Energy Conversion & Management*, 2008, 49(11): 2986-2996.
- [21] MARCO S, SIGNE K, NATALYA K, et al. Seeking minimum entropy production for a tree-like flow-field in a fuel cell[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22.
- [22] LITSTER S, SANTIAGO J G. Dry gas operation of proton exchange membrane fuel cells with parallel channels: non-porous versus porous plates[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(1): 82-88.
- [23] AFSHARI E, JAZAYERI S A. Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Power Sources*, 2009, 194(1): 423-432.
- [24] AFSHARI E, MOSHARAF-DEHKORDI M, RAJABIAN H. An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor[J]. *Energy* 118: 705-715.
- [25] LIANG H, PING C. Lattice Boltzmann simulations of anisotropic permeabilities in carbon paper gas diffusion layers[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 186(1): 104-114.
- [26] UM S, WANG C Y, CHEN K S. Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2000, 147(12): 4485.
- [27] 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: 738-748.
- [28] MANN R F, AMPHLETT J C, PEPPEY B A. Application of Butler-Volmer equations in the modelling of activation polarization for PEM fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(2): 775-781.
- [29] 吴明格. 燃料电池双极板仿生流场主动排水机理与表面改性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016: 3. WU Mingge. Study on active drainage mechanism and surface modification of bionic flow field for fuel cell bipolar plate[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016: 3.
- [30] 郑宇. PEMFC 传热传质研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 5. ZHENG Yu. Study on heat and mass transfer of PEMFC [D]. Jinan: Shandong University, 2021: 5.
- [31] PASAOGULLARI U. Heat and water transport models for polymer electrolyte fuel cells[M]. America: John Wiley & Sons, Ltd, 2010: 57-68.

(责任编辑 杨嘉蕾)