DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.127 **中图分类号**：TM911.4 **文献标志码**：A

阻块导流面与抑制面对 PEMFC 输出性能的影响

刘 强，程天才，姜广君，赵 亓，穆东明，王鹏凯
(内蒙古工业大学机械工程学院，呼和浩特 010051)

摘要：针对质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton-exchange membrane fuel cell)性能受到燃料输送及水管理影响的问题，以单通道 PEMFC 为基础，采用三维数值解析方法，对比研究了 3 种阻块迎风面与背风面的导流或抑制作用对 PEMFC 性能的影响。结果表明，添加阻块的流道较传统流道输出性能有所提升，其中扇形截面阻块效果最佳。对于扇形截面阻块的流道，当输出电压为 0.5 V 时，电流密度较传统流道提升 6.52%。当阻块迎风面起导流作用且背风面起抑制作用时，可以最大限度地提升 PEMFC 输出性能；当阻块迎风面与背风面都起导流作用时，性能提升最不显著。该研究成果为阻块的选择提供了 1 种新的参考，对提升 PEMFC 净功率密度具有一定的指导意义。

关键词：质子交换膜燃料电池；水管理；优化设计；数值模拟

Influences of Diversion and Suppression Surfaces of Blocking Block on Output Performance of PEMFC

LIU Qiang, CHENG Tiancai, JIANG Guangjun, ZHAO Qi, MU Dongming, WANG Pengkai
(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Aimed at the problem that the performance of a proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC) is affected by fuel delivery and water management, based on a single-channel PEMFC, a three-dimensional numerical analysis method is used to compare and study the effects of three types of blocking blocks on the performance of PEMFC due to the diversion or suppression effect on the windward and leeward surfaces. Results show that the output performance of the channel with added blocking blocks is improved compared with those of traditional channels, with a fan shaped section block having the best effect. For a flow channel with the fan shaped section block, when the output voltage is 0.5 V, the current density increases by 6.52% compared with the traditional flow channels. Moreover, when the blocking block acts as a guide on the windward side and suppresses the gas flow on the leeward side, it can maximize the output performance of PEMFC. When both the windward and leeward sides of the blocking block serve as a guide, the performance improvement is the least significant. This research provides a novel standard for the selection of blocking blocks and has certain guiding significance for improving the net power density of PEMFC.

Keywords: Proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC); water management; optimal design; numerical simulation

收稿日期：2023-06-29；**修回日期**：2023-10-10；**录用日期**：2023-11-04；**网络首发日期**：2024-01-16
基金项目：内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ 23075)；自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220267)
This work is supported by Scientific Research Project of Colleges and Universities in Inner Mongolia Autonomous Region under the grant NJZZ23075; Basic Scientific Research Business Fee Project of Universities Directly under the Autonomous Region under the grant JY20220267

由于传统能源短缺和环境污染加剧，质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton-exchange membrane fuel cell)以其高功率密度、快速启动和零排放等特点，成为最具吸引力的替代能源之一[1-5]。双极板提供燃料和氧化剂，除去产生的水，收集产生的电流并为脆性膜电极组件提供机械支持[6]。双极板中流场结构的优化设计是提升 PEMFC 性能的重要途径[7]。

国内外众多学者针对流场结构进行了优化设计。李伟卓等[8]结合全因子设计法及遗传算法研究了阻块高度并进行了优化，结果表明增加出口位置的阻块高度可以最大程度地提升电池性能；Chen 等[9]提出了 1 种多孔阻塞流线型挡板，分析了挡板的孔隙率效应，发现孔隙度为 0 时净功率提高更多；Dang 等[10]对比了圆形、菱形和方形 3 种销形流场，结果表明菱形阻块除水速度最快，压降最小；Wilberforce 等[11]采用自适应神经模糊推理系统对电池输出功率进行预测，然后将其与前馈反向传播神经网络进行比较，发现方形折流板的氢气质量分数提高了 22.6%；Fahruddin 等[12]在叶型流场的基础上，在母通道中加入 V 型、矩形和束状挡板进行对比分析，结果表明束状挡板可使电流密度提高 18%；Chen 等[13]研究了阻块高度和位置对定向型流道质量输运的影响，结果表明均匀分布的阻块既能促进反应物的输送，又有助于排出更多的液态水，从而提高净功率；Cai 等[14]讨论了阻块截面形状和无量纲堵塞长度的影响，结果表明当阻块长度为间隔长度的 50%且总阻块长度为流道长度的 30%时，PEMFC 的性能最佳；孙峰等[15]研究了流道出口处挡板的分布对 PEMFC 特性的影响，结果表明挡板优化分布后的峰值功率密度比无挡板流道提升了 4.96%；孙峰等[16]建立了新型流线型挡板结构，发现采用交错分布平行流场的电流密度比常规平行流场提高了 3.4%；叶可等[17]对比了 3 种传统流场在气体均匀性、扫气排水及热平衡方面的差异；武生威等[18]提出 1 种新型扩展流道，结果表明当扩展长度为 2 mm 时，气体分布更均匀，除水能力更强。另外，增加拓展区域数量能进一步提升燃料电池性能。目前部分学者的研究大都集中于阻块分布、高度及形状等参数，却忽略了不同截面形状阻块的迎风面与背风面对气体流动状态的影响。

本文建立 PEMFC 单通道三维模型，对比研究了不同阻块的迎/背风面的导流或抑制作用对电池性能的影响。运用流体力学软件 Fluent 进行了传质模拟并进行实验对比验证，分析对比了 PEMFC 内部各参数的分布情况，最后讨论了 PEMFC 性能提升的机理。

1 数学模型

1.1 几何模型

假设反应气体流量分配均匀，则每个流道中反应气体的流动、传质和化学反应的强度大致相同。本文采用单一直流道作为研究对象，如图 1 所示。以无阻块的流道作为传统模型(方案 A)，在方案 A 的基础上添加数量相同、截面面积相同及间隔相同的阻块来提升 PEMFC 的输出性能。方案 B~方案 D 的阻块截面形状分别为方形、扇形和半圆形，方案 B 的阻块迎风面和背风面对气体流动均起抑制作用；方案 C 的阻块迎风面对气体流动起导流作用，背风面则相反；方案 D 的阻块迎风面和背风面对气体流动均起导流作用。具体的模型参数及操作条件见表 1。

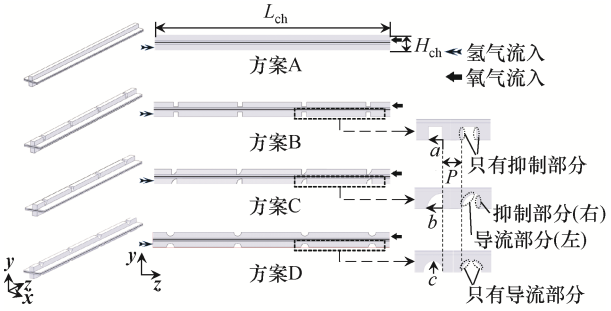


图 1 各方案的单通道示意

Fig. 1 Schematic of single-channel under each scheme

1.2 模型假设

本文模型基于以下假设条件：燃料电池始终在多相、稳态条件下工作；反应气体不可压缩，属于理想气体，并且流道中流体流动状态始终为层流；多孔介质(如气体扩散层、催化剂层和质子交换膜)的材料是各向同性；电池在 353.15 K 的恒定温度下工作。

1.3 控制方程

模型的质量守恒方程为

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

式中：ε 为孔隙率；ρ 为密度，kg·m^{-3}；v 为速度，

$m\cdot s^{-1}$；t 为时间，s。

表 1　几何建模参数及操作条件

Tab. 1 Geometric modeling parameters and operating conditions

参数类型/条件	参数	数值
单电池参数	单电池的总厚度 H_s/mm	2.89
	集流板厚度 H_{cc}/mm	1.20
	气体扩散层厚度 H_{gdl}/mm	0.20
	催化剂层厚度 H_{cl}/mm	0.02
	膜厚度 H_{mem}/mm	0.05
计算域参数	计算域宽度 W_{cd}/mm	1
	计算域长度 L_{cd}/mm	40
	计算域高度 H_{cd}/mm	1
流道参数	流道宽度 W_{ch}/mm	1
	流道深度 H_{ch}/mm	1
	流道长度 L_{ch}/mm	40
阻块参数	方形阻块边长 a/mm	0.80
	扇形阻块半径 b/mm	0.90
	半圆形阻块半径 c/mm	0.64
	截面面积 S/mm^2	0.64
	阻块间距 P/mm	10.00
操作条件	电池温度 T/K	353.15
	阳极入口相对湿度 R_{Ha}/%	100
	阴极入口相对湿度 R_{Hc}/%	100
	阳极压力 P_a/atm	1
	阴极压力 P_c/atm	1

模型的组分守恒方程为

$$\frac{\partial(\varepsilon c_i)}{\partial t}+\nabla\cdot(\varepsilon v c_i)=\nabla\cdot(D_i^{\text{eff}}\nabla c_i)+S_{\text{i}} \tag{2}$$

式中：c_i 为组分 i 的浓度；D_i^{eff} 为组分 i 的扩散率；S_{i} 为组分源项。

模型的动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho v)}{\partial t}+\nabla\cdot(\varepsilon\rho v\cdot v)=-\varepsilon\nabla p+\nabla\cdot(\varepsilon\mu\nabla v)+S_{\text{u}} \tag{3}$$

式中：p 为气体压强，Pa；μ 为黏度，Pa·s；S_{u} 为动量源项。

模型的能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\cdot\rho\cdot c_p T)+\nabla\cdot(\varepsilon\cdot\rho\cdot c_p v T)=\nabla\cdot(k^{\text{eff}}\nabla T)+S_{\text{h}} \tag{4}$$

式中：c_p 为定压比热容，$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$；T 为温度，K；k^{eff} 为有效导热系数；S_{h} 为能量源项。

模型的电荷守恒方程为

$$\nabla\cdot(\sigma_{\text{sol}}\nabla\phi_{\text{sol}})+S_{\text{e}}=0 \tag{5}$$

$$\nabla\cdot(\sigma_{\text{mem}}\nabla\phi_{\text{mem}})+S_{\text{m}}=0 \tag{6}$$

式中：σ_{sol}、σ_{mem} 分别为固相、膜相电导率，$(\Omega\cdot m)^{-1}$；ϕ_{sol}、ϕ_{mem} 分别为固相、膜相电势，V；S_{e} 为电子电流源项；S_{m} 为质子电流源项。

1.4 电化学模型

PEMFC 的工作原理如图 2 所示，氢气从阳极侧进入，通过气体扩散层到达催化剂层，在催化剂层发生氧化反应生成氢离子和电子。质子交换膜具有高的质子渗透性及电子绝缘性，故氢离子可直接透过电解质膜进入到阴极催化剂层，而电子需通过多孔电极输送到集流板，流经外部负载到达阴极催化剂层。同理，氧气在阴极侧的催化剂层发生还原反应生成水，水通过多孔介质进入阴极流道，最终在气体的吹扫下排出电池[19-20]。该过程可表示为

$$\text{H}_2\rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \tag{7}$$

$$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} \tag{8}$$

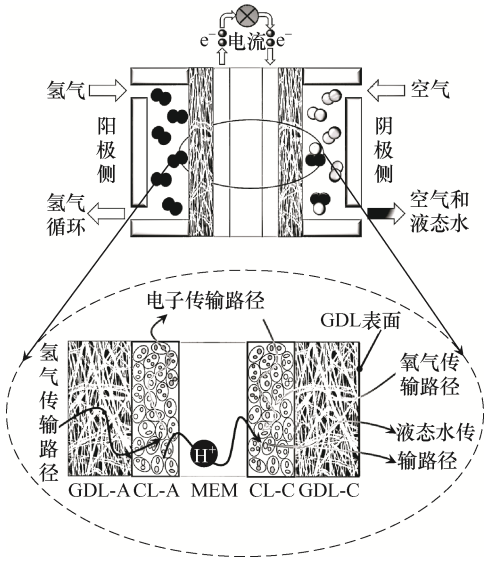


图 2　PEMFC 工作原理

Fig. 2 Working principle for PEMFC

1.5 液态水输送方程

本文模型工作温度为 353.15 K，水蒸气会凝结为液态水，当输出功率大时，过多液态水会造成“水淹”现象。液态水在电池内部的传输可分为以

下 2 种情况。

(1)液态水在流道中的传输可表示为

$$\frac{\partial(\varepsilon s\rho_{\mathrm{l}})}{\partial t}+\nabla(\rho_{\mathrm{l}}sv_{\mathrm{l}})=S_{\mathrm{l}} \tag{9}$$

(2)液态水在多孔介质中的传输可表示为

$$\frac{\partial(\varepsilon s\rho_{\mathrm{l}})}{\partial t}+\nabla\left(\rho_{\mathrm{l}}\frac{Ks^3}{\mu_{\mathrm{l}}}\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}s}\nabla s\right)=S_{\mathrm{l}} \tag{10}$$

式中：ρ_{l} 为水的密度，kg·m^{-3}；p_{c} 为毛细压力，Pa；K 为渗透率，m^2；s 为饱和度；v_{l} 为水的流速，m·s^{-1}；μ_{l} 为水的黏度，Pa·s；S_{l} 为水饱和度源项。

1.6 阴极粒子模型

阴极粒子模型考虑了催化剂微孔结构中的质量传递阻力，由以下 2 部分组成。

(1)由聚合物薄膜引起的电阻可表示为

$$R_{\mathrm{cat}}=4F\frac{c_{\mathrm{o_2}}}{c_{\mathrm{o_2}}/j_{\mathrm{o_2}}^{\mathrm{ideal}}+R_{\mathrm{ion}}+R_{\mathrm{liq}}} \tag{11}$$

式中：$c_{\mathrm{o_2}}$ 为壁面的氧气物质的量浓度；R_{ion} 为阴极离聚物电阻；R_{liq} 为颗粒周围的液态水膜导致的阻力，s·m^{-1}；F 为法拉第常数，C·mol^{-1}；$j_{\mathrm{o_2}}^{\mathrm{ideal}}$ 为阴极高聚物中氧气的有效系数，其计算公式为

$$j_{\mathrm{o_2}}^{\mathrm{ideal}}=\frac{R_{\mathrm{cat}}}{4F} \tag{12}$$

(2)由催化剂中颗粒物质周围液态水膜导致的阻力可表示为

$$R_{\mathrm{liq}}=\frac{\zeta_{\mathrm{cat}}r_{\mathrm{p}}^2}{K_{\mathrm{w}}D_{\mathrm{w}}}\cdot\frac{\sqrt[3]{1+s\varepsilon/(1-\varepsilon)}-1}{3(1-\varepsilon)} \tag{13}$$

式中：ζ_{cat} 为阴极催化剂层比活性表面积，m^{-1}；r_{p} 为催化剂颗粒半径，m；$K_{\mathrm{w}}D_{\mathrm{w}}$ 为液态水中的氧气溶解度和扩散率的乘积，m^2·s^{-1}。

1.7 边界条件

边界条件对燃料电池模型的求解结果非常重要。在尽量接近真实物理状态的基础上，设置以下边界条件[21]：阴阳极气体流向相反；入口采用质量流入口边界；出口采用压力出口边界；壁面采用静止壁面；流速采用无滑移；规定连续性方程和水含量的残差分别达到 10^{-4}、10^{-3} 时判定为收敛。

2 模型验证

2.1 仿真模型

电池的活化区域为 1.6 cm^2，阳极过量系数为 2.0，阴极过量系数为 2.5。其他材料参数和物性参数见表 2[22]。

表 2 材料参数和物性参数

Tab. 2 Material and physical parameters

参数	数值
集流板密度/(kg·m^{-3})	1 880
集流板比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	875
集流板热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	10.7
集流板电导率/(S·m^{-1})	8.3×10^4
气体扩散层密度/(kg·m^{-3})	490
气体扩散层比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	710
气体扩散层热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	1.6
气体扩散层电导率/(S·m^{-1})	5 000
催化层密度/(kg·m^{-3})	2 010
催化层比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	710
催化层热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	8
催化层电导率/(S·m^{-1})	1 000
气体扩散层孔隙率	0.55
压力指数	1
温度指数	1
接触电阻/(Ω·m^2)	2×10^{-6}
阳极浓度指数	0.5
阴极浓度指数	1.0
阳极交换系数	1.00
阴极交换系数	1.25
孔隙堵塞饱和系数	2
氢气参考扩散系数/(m^2·s^{-1})	11.00×10^{-5}
氧气参考扩散系数/(m^2·s^{-1})	3.20×10^{-5}
水参考扩散系数/(m^2·s^{-1})	7.35×10^{-5}
其他参考扩散系数/(m^2·s^{-1})	1.10×10^{-5}
催化剂层孔隙率	0.475

2.2 模型有效性验证

为验证模型的准确性和可靠性，将仿真得到的极化曲线与文献[22]的实验结果进行对比，参照对象为常规单流道，极化曲线对比结果如图 3 所示。实验条件为：温度 353.15 K，阴阳极相对湿度为 100%，阳极过量系数为 1.5，阴极过量系数为 2.0。

并且文献[22]采用电流阶跃法进行了 1 组放电试验，得到了电池电压与电流密度的函数关系。本文模拟计算时所用材料的物性参数、边界条件等均参照文献[22]进行选取设置。从图 3 可以看出，仿真结果整体上略优于实验结果，因仿真实验是在理想材料和完美反应过程的基础上进行的。仿真结果与实验结果在活化损失区(电压 0.7 V 以上)较为吻合，而在欧姆损失区和传质损失区(电压 0.7 V 以下)误差逐渐增大，在电流密度为 0.8 A·cm^{-2} 时达到最大误差 7.2%，且平均误差为 0.5%，此最大误差在可接受的范围内，因此本文建立的仿真模型是准确、有效的。

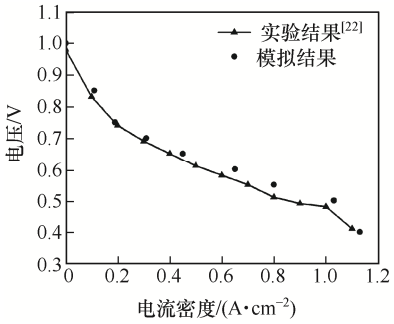


图 3　仿真结果与实验结果对比

Fig. 3 Comparison between simulation result and experimental result

2.3　网格无关性验证

本模型采用结构化网格，提高计算精度的同时节省计算资源。此外，采用差异化网格将阴极侧的网格进行加密。为排除网格数量对计算结果的影响，分别采用 124 123、226 223、305 626 的网格数进行模拟计算，图 4 为对应的极化曲线。可以看出，在中高电流密度下，与 226 223 网格数相比，124 123 和 305 626 网格数的相对误差为 8%和 3%，随着网格数量的不断增加，相对误差逐渐减少。为节省计算资源，选择网格数为 226 223 的网格模型。

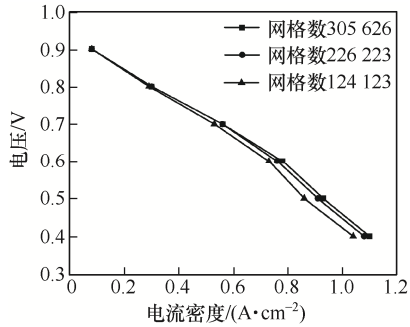


图 4　不同网格数极化曲线对比

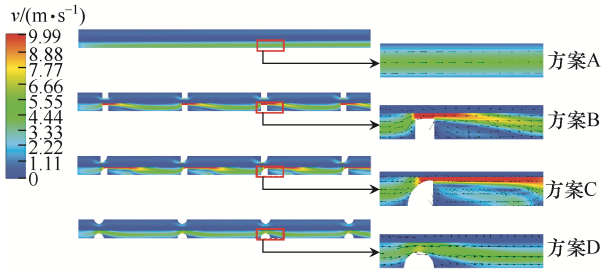
Fig. 4 Comparison among polarization curves with different numbers of grids

3　模拟结果与分析

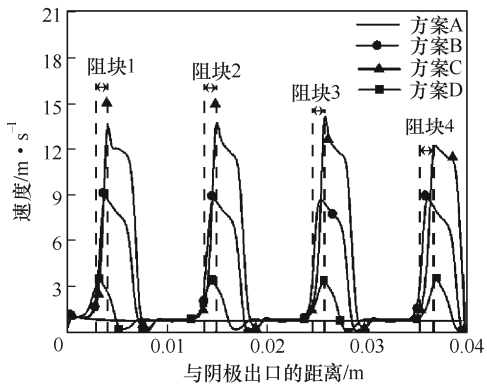
为分析燃料电池的性能，定义输出性能(极化曲线和功率密度曲线)及反应物和产物的分布(气体流速、水分布和氧气分布)作为评估指标。

3.1　气体流速分布

图 5 为 0.5 V 输出电压下阴极侧流道和气体扩散层 GDL(gas diffusion layer)交接面处气体流速分布及相应的速度曲线图。可以看出，传统流道内的气体流动平缓，而加有阻块的流道，气体会产生垂直速度分量，局部流速变高，利于气体向 GDL 扩散。方案 C 中，在导流部分和抑制部分共同作用下，



(a) 气体流速分布



(b) 速度曲线

图 5　0.5 V 输出电压下阴极侧流道和 GDL 交接面处气体流速分布及相应的速度曲线

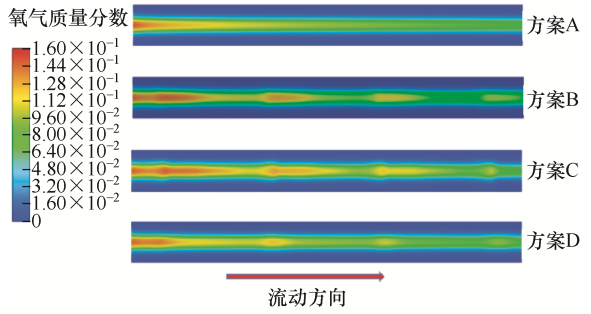
Fig. 5 Gas velocity distribution and corresponding velocity curve at interface between cathode side flow channel and GDL under output voltage of 0.5 V

反应物的高速区域面积最大，传质效果最明显，局部流速达到了 13 m·s^{-1}；方案 B 中，在只有抑制部分作用下，局部最高流速为 9 m·s^{-1}；方案 D 中，在只有导流部分作用下，局部最高流速为 3 m·s^{-1}，且流道中反应气体的流速较方案 A 变化不大，传质效果不显著。

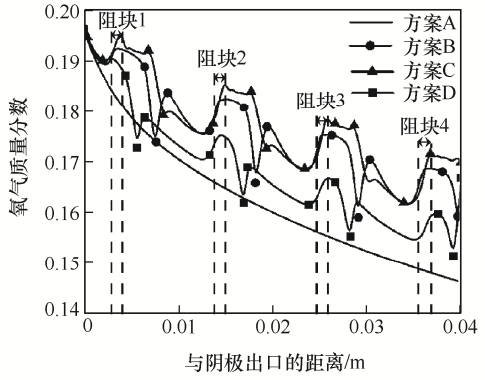
方案 A 的传质过程只依赖于浓度扩散，表现为流道与催化剂层中气体浓度的差值。反之，方案 B~方案 D 的传质过程不仅由浓度扩散作为驱动力，而且还有阻块造成的强制对流作用。从图 5(a)中可以看出，方案 B~方案 D 均在阻块的背风面形成了 1 个明显的气体回流区，其面积大小为：方案 C>方案 B>方案 D。回流区会加强阻块处传质性能，产生更多电流。综上所述，方案 C 的气体回流最明显，传质性能最好。

3.2 氧气分布

图 6 为 0.5 V 输出电压下阴极侧催化剂层 CL(catalyst layer)/GDL 交接面处氧气质量分数分布及相应的氧气分布曲线。可以看出，在流道上游氧气含量较多，电化学反应更剧烈，各方案的氧气质量分数从上游至下游均逐渐下降，带有阻块的流道在阻块周围氧气质量分数较传统流道有明显提高。方案 C 的上游区域最明显，氧气质量分数最高，在阻块 1 处最高达到 19.5%；方案 B 氧气质量分数高于方案 D。方案 C 在阻块处的氧气上升速率及上升幅度最大，反映出其传质性能最佳。



(a) 氧气质量分数分布



(b) 氧气分布曲线

图 6 0.5 V 输出电压下阴极侧 CL/GDL 交接面处氧气质量分数分布及相应的氧气分布曲线

Fig. 6 Distribution of oxygen mass fraction at CL/GDL interface on cathode side under output voltage of 0.5 V, and corresponding oxygen distribution curve

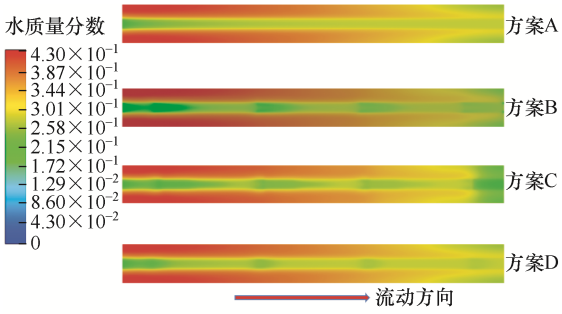
氧气质量分数的高低与流道内局部流速的大小有相同规律，在阻块的迎风面，强制对流的作用使反应气体更容易通过气体扩散层进入催化剂层，致使阻块周围的氧气含量较多，也揭示了强制对流效应比基于浓度差的扩散效应传质性能好，流道内整体氧气含量水平由大到小依次为：方案 C>方案 B>方案 D。

3.3 液态水去除性能分析

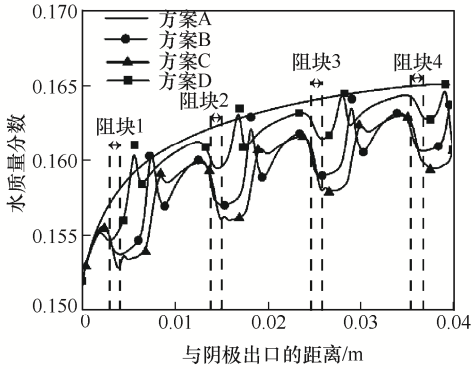
图 7 为 0.5 V 输出电压下阴极侧 CL/GDL 交接面水质量分数分布、水变化曲线及压力变化曲线。如图 7(a)所示，在流道下游区域水含量较多，是由于在气体吹扫的作用下上游的水被吹到了下游。肋下部分由于处于吹扫盲区，含水量较多。从图 7(b)和(c)中可以看出，流道进出口压降与流场除水能力有紧密的联系。方案 C 的压降最大，达到 3 000 Pa，故除水能力最强，方案 B 次之，达到 1 100 Pa，方案 A 和方案 D 最差。另外，与传统流道相比，由于气体在阻块的背风面涌出会产生与迎风面方向相反的速度分量，这种速度分量更利于带走多孔电极中的水分，其中方案 C 效果最显著。

3.4 电池性能曲线

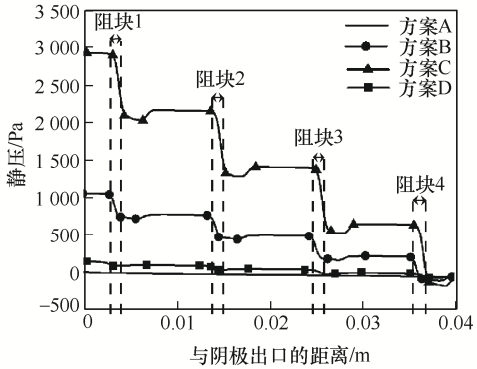
图 8 为电池性能曲线，可以看出，在低电流密度下的活化极化区域，所有模型的极化曲线和功率密度曲线重合度均较高，4 种流道之间的区别不明显。但在中高电流密度下的欧姆极化区和浓度极化区，带有阻块的流道表现出更好的性能。相比方案 A，方案 B~方案 D 的电流密度提高的百分比分别



(a) 水质量分数分布



(b) 水分布曲线



(c) 压力变化曲线

图 7　0.5 V 输出电压下阴极侧 CL/GDL 交接面水质量分数分布、水分布曲线及压力变化曲线

Fig. 7 Water mass fraction distribution, water distribution curve and pressure change curve at CL/GDL interface on cathode side under output voltage of 0.5 V

为 5.43%、6.52%和 1.10%。这一规律同样适用于功率密度。其中方案 A 和方案 D 的性能相对差值不超过 3.00%。方案 C 在更低的输出电压下表现出更大的性能提升，明显优于方案 A 和方案 D。综合来看，尽管扇形阻块的流道会导致更大的压力损失，但这样的阻块可以使得反应物有更多机会进行充分扩散，同时增加了局部流速，提升了排水性能。因此，方案 C 的输出性能优于其他方案。

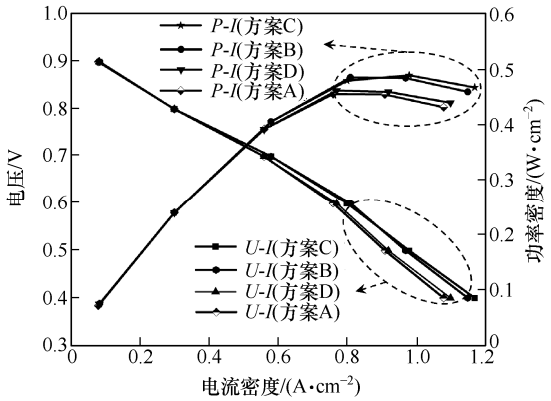


图 8　极化曲线与功率密度曲线

Fig. 8 Polarization curve and power density curve

4　结论

通过仿真研究，对 PEMFC 的传统流道、方形截面流道、扇形截面流道和半圆形截面流道的极化曲线、功率密度曲线、阴极侧速度分布、氧气浓度分布和水分布进行了比较和讨论。研究得出主要结论如下。

(1)阻块的迎风面与背风面所起的作用不可忽视。当阻块迎风面对气体流动状态起导流作用，且背风面起到抑制作用时，PEMFC 输出性能提高最大。当阻块迎风面及背风面都起导流作用时，性能提升最不显著。

(2)当输出电压为 0.5 V 时，以传统流道为参照，方形截面阻块的流道电流密度提升 5.43%，扇形截面阻块的流道电流密度提升 6.52%，半圆形截面阻块的流道电流密度提升 1.10%。

(3)扇形截面阻块迎风面对气体起导流作用，更易于气体向多孔介质扩散，提高了催化剂层表面的氧气含量，并且有更强的排水能力。

参考文献：

[1] Tie S F, Tan C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 82-102.

[2] 焦魁. 质子交换膜燃料电池水热管理[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

Jiao Kui. Water and Thermal Management of Proton

Exchange Membrane Fuel Cells [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)

[3] Ziogou C, Voutetakis S, Papadopoulou S, et al. Modeling, simulation and experimental validation of a PEM fuel cell system [J]. Computers & Chemical Engineering, 2011, 35(9): 1886-1900.

[4] 高清振, 潘道远, 黄胜洲, 等. 氢燃料电池扩散层温度场演变研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 130-140.
Gao Qingzhen, Pan Daoyuan, Huang Shengzhou, et al. Study on temperature field evolution in hydrogen fuel cell diffusion layer [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 130-140. (in Chinese)

[5] 文陈, 冯磊, 王景润, 等. 空间燃料电池静态排水技术现状研究[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 247-252.
Wen Chen, Feng Lei, Wang Jingrun, et al. Research status of non-flow through water management technology for space fuel cells [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 247-252. (in Chinese)

[6] Roshandel R, Arbabi F, Moghaddam G K. Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells [J]. Renewable Energy, 2012, 41: 86-95.

[7] Lundström N L P, Aidanpää J O. Dynamic consequences of electromagnetic pull due to deviations in generator shape [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(1-2): 207-225.

[8] 李伟卓, 闫飞宇, 邓一鸣, 等. PEMFC 阴极流道中阻块高度的敏度分析与优化[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(3): 697-703.
Li Weizhuo, Yan Feiyu, Deng Yiming, et al. Sensitivity analysis and optimization of blockages height in PEMFC cathode flow channel [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(3): 697-703. (in Chinese)

[9] Chen Hao, Guo Hang, Ye Fang, et al. A numerical study of orientated-type flow channels with porous-blocked baffles of proton exchange membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(57): 29443-29458.

[10] Dang D K, Zhou Biao. Effects of pin shapes on gas-liquid transport behaviors in PEMFC cathode [J]. Journal of Power Sources, 2023, 557: 232584.

[11] Wilberforce T, Olabi A G, Monopoli D, et al. Design optimization of proton exchange membrane fuel cell bipolar plate [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116586.

[12] Fahruddin A, Ichsani D, Taufany F, et al. The effect of baffle shape on the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell with a biometric flow field [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(8): 6028-6036.

[13] Chen Hao, Guo Hang, Ye Fang, et al. A numerical study of baffle height and location effects on mass transfer of proton exchange membrane fuel cells with orientated-type flow channels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(10): 7528-7545.

[14] Cai Yonghua, Wu Di, Sun Jingming, et al. The effect of cathode channel blockages on the enhanced mass transfer and performance of PEMFC [J]. Energy, 2021, 222: 119951.

[15] 孙峰, 苏丹丹, 张志国, 等. 挡板分布对 PEMFC 传质特性的影响[J]. 电池, 2023, 53(1): 29-32.
Sun Feng, Su Dandan, Zhang Zhiguo, et al. Effect of baffle distribution on mass transfer characteristics of PEMFC [J]. Battery Bimonthly, 2023, 53(1): 29-32. (in Chinese)

[16] 孙峰, 苏丹丹, 殷宇捷. 流线型挡板对 PEMFC 性能的影响[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 84-91.
Sun Feng, Su Dandan, Yin Yujie. Effect of streamlined baffles on PEMFC performance [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 84-91. (in Chinese)

[17] 叶可, 颜永文, 李君, 等. 基于不同流道的 PEMFC 传质与水热平衡数值模拟[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 349-354.
Ye Ke, Yan Yongwen, Li Jun, et al. Numerical simulation of mass transfer and hydrothermal balance in PEMFC based on different flow channels [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 349-354. (in Chinese)

[18] 武生威, 付丽荣, 刘维峰, 等. 新型拓展流道 PEMFC 传质模拟与性能研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 74-79.
Wu Shengwei, Fu Lirong, Liu Weifeng, et al. Mass transfer simulation and performance study of PEMFC

with new extended flow channel [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(5): 74-79. (in Chinese)

[19] Le A D, Zhou Biao. A numerical investigation on multi-phase transport phenomena in a proton exchange membrane fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(16): 5278-5291.

[20] Jiao Kui, Bachman J, Zhou Yibo, et al. Effect of induced cross flow on flow pattern and performance of proton exchange membrane fuel cell [J]. Applied Energy, 2014, 115: 75-82.

[21] Bilgili M, Bosomoiu M, Tsotridis G. Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(5): 2303-2311.

[22] Yuan Wei, Tang Yong, Pan Minqiang, et al. Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance [J]. Renewable Energy, 2010, 35(3): 656-666.



刘强

作者简介：

刘强(1999—)，男，硕士。研究方向：燃料电池水热管理。E-mail：20221100017@imut.edu.cn。

程天才(1990—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：燃料电池电源变换技术。E-mail：tiancai0926@126.com。

姜广君(1980—)，男，博士，教授。研究方向：燃料电池实时仿真与应用。E-mail：2798725371@qq.com。

赵亓(1988—)，男，博士，讲师。研究方向：燃料电池流场结构优化。E-mail：731494023@qq.com。

穆东明(1975—)，男，硕士，讲师。研究方向：燃料电池系统测试。E-mail：3024994583@qq.com。

王鹏凯(2001—)，男，本科。研究方向：新能源发电技术。E-mail：736896982@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)



公益广告来源：重庆市人民政府网