

质子交换膜燃料电池双极板流动结构仿生设计探究

石自航¹, 杨亚晶², 魏衍举¹, 张晨杨¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安)

摘要: 针对质子交换膜燃料电池(PEMFC)内部燃料分布不均匀以及水管理能力不足导致的性能受限问题,基于海棠叶的叶脉结构,设计了一种新型仿生流场,采用数值方法深入研究了其性能。首先,通过观察海棠叶脉的自然流动形态,设计仿生流场;然后,通过数值模拟对比分析仿生流场、传统蛇形流场和平行流场的流场性能;最后,探究极限电流密度、峰值功率密度及内部氧气和电流密度的分布特性。研究结果表明:与传统的蛇形流场和平行流场相比,仿生流场的压降更低,催化层氧气浓度分布更均匀,供气质量更高;相较于平行流场和蛇形流场,仿生流场的电池极限电流密度分别提升了35.42%、6.81%,峰值功率密度分别增加了29.71%、5.22%,且除水能力较平行流场有所提升。该研究为PEMFC流场设计的优化提供了新思路,对提升燃料电池的整体性能和效率具有重要的实际应用价值。

关键词: 质子交换膜燃料电池;仿生流场;海棠叶脉;双极板

中图分类号: TM911 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202504007 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0070-11

Biomimetic Design Exploration of Flow Field Structure in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plates

SHI Zihang¹, YANG Yajing², WEI Yanju¹, ZHANG Chenyang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Astronautics Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In response to performance limitations caused by uneven fuel distribution and inadequate water management capabilities in proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), a novel bionic flow field is designed based on the vein structure of begonia leaves, and its performance is systematically investigated through numerical simulation. Firstly, the bionic flow field is developed by mimicking the natural flow patterns of begonia leaf veins. Then, numerical simulation techniques are employed to compare and analyze the flow field performance of the biomimetic flow field, traditional serpentine flow field, and parallel flow field. Finally, the distribution characteristics of limiting current density, peak power density, internal oxygen concentration, and current density are explored. The research results demonstrate that compared to traditional serpentine and parallel

收稿日期: 2024-07-20。 作者简介: 石自航(2000—),男,硕士生;魏衍举(通信作者),男,副教授,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176128)。

网络出版时间: 2024-12-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241215.0814.002>

flow fields, the biomimetic flow field exhibits lower pressure drop, more uniform oxygen concentration distribution in the catalyst layer, and higher gas supply quality. Furthermore, the biomimetic flow field shows a 35.42% and 6.81% increase in limiting current density, a 29.71% and 5.22% increase in peak power density compared to the parallel and serpentine flow fields, respectively, with improved water retention capabilities compared to the parallel flow field. This research provides a new perspective for optimizing the design of flow fields in PEMFCs, offering significant practical value for enhancing the overall performance and efficiency of fuel cells.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; biomimetic flow field; begonia leaf veins; bipolar plate

近年来,能源消耗量的持续攀升加剧了环境污染^[1]。由于拥有较高能量密度和转换效率、体积小、重量轻及快速充能等优点^[2-4],燃料电池已逐渐成为极具潜力的可再生能源装置。双极板作为质子交换膜燃料电池(PEMFC)内部的关键组件,其结构不仅决定了流场的形状,还负责将反应气体高效传输至催化层,调控气体的分布与流动状态^[5-6]。

燃料电池传统流场主要包括平行、蛇形、点状以及交错4种构型^[7],其中平行和点状流场压降较小但容易发生堵塞,这在一定程度上阻碍了物质的传递效率^[8];与平行流场相比,蛇形与交错流场除水能力和电化学性能明显提高,但均存在压降显著的缺点^[9-10]。目前,对传统流场的改进思路主要集中在流场结构的设计和优化上^[11-13],旨在优化反应气体的分布状态及流动路径。

除了优化传统流场结构外,还可以运用仿生流场的概念来设计流场。Kloess等^[14]根据自然界的叶片设计了一款流场,结果表明:与蛇形和交叉流动模式相比,仿生流动模式性能更好,压降最低,物质分布非常均匀,功率密度峰值相较于传统流场提升了30%。Chen等^[15]受叶脉结构启发设计了一款仿生流场,相较于传统平行流场,反应物的分布均匀性更好,消耗比更高,欧姆热生成量更少,且制造成本可控。Kahraman等^[16]遵循穆雷定律设计了仿生流场,与标准蛇形设计相比,新设计的流场在0.4 V工作电压下,功率提升了42.1%,电流分布均匀性、温度优化分布及有效除水这3方面性能也得到了提升。

上述研究表明:仿叶脉流场可有效提升燃料电池电流密度、功率输出及稳定性,改进水传输与排除,减少水淹现象。然而,现有设计多聚焦于形态模仿,缺乏对流动特性与性能提升关联的深入分析。本文基于海棠叶脉设计新型仿生流场,通过仿真研究其性能,并在相同条件下与平行流场和蛇形流场

对比,分析了仿生流场的优势及流动特性对电化学性能的影响。

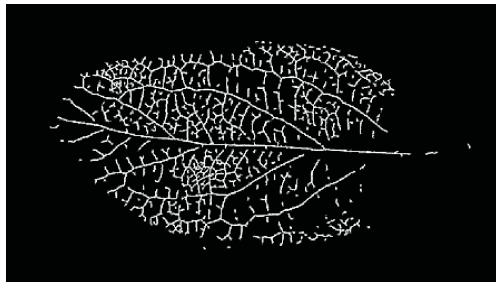
1 模型建立

1.1 几何模型

在漫长的自然选择和进化中,植物叶脉形成了高效且均匀的物质传输网络^[17],叶片中的导管类似毛细管,通过毛细现象产生毛细压力,促进水分的被动吸收,由于导管内水分的内聚力小于与管壁的附着力,因此能够推动水分沿叶脉上升,确保叶片得到充足水分;而叶脉中的水分流动呈不可压缩稳定层流状态,有助于水分高效且均匀地分布到叶片各部分。海棠,因其出色的抗寒、抗旱、抗涝、抗盐碱和抗病虫能力,成为重点研究对象,其高效营养运输能力可为流场结构设计提供重要启示。本文采用荧光溶液示踪法,通过电子显微镜观察海棠叶脉网格中水分分布随时间演变的动态过程,如图1所示,其中白色为荧光溶液流经区域,黑色为其他区域。



(a) $t=240\text{ s}$



(b) $t=720\text{ s}$

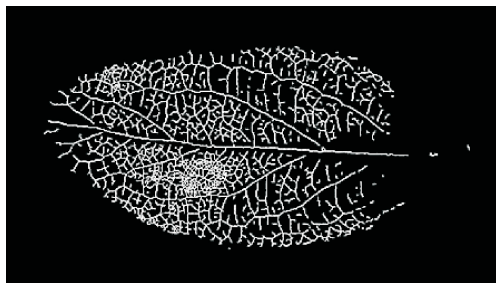
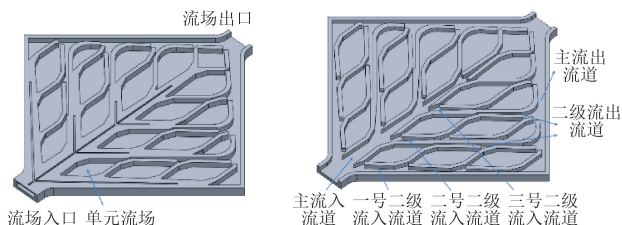
(c) $t=1\ 200\text{ s}$

图1 不同时刻荧光溶液在海棠叶片叶脉中的分布

Fig. 1 Distribution of fluorescent solution in the leaf veins of crabapple at different times

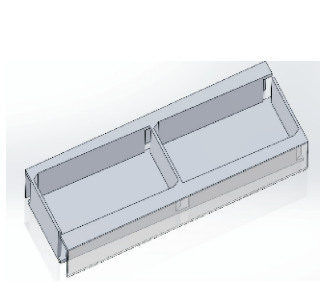
基于观察到的海棠叶脉流动特点,本文在极板设计过程中,创新性地采用将流入流道与单元流场相结合的设计理念。具体来说,流入流道的设计灵感来源于海棠叶脉结构,而单元流场则借鉴了离散化微脉网格区域的设计思想。

图2展示了燃料电池仿生流场的极板模型、极板剖面 and 流体域。图2(a)为仿叶脉结构的燃料电池双极板模型。图2(b)为仿叶脉结构的流场,包括流场入口、流场出口和两组流道,流场入口设置在叶柄处,出口设置在叶尖处,两组流道对称设置在主脉两侧,流道包括主流入流道、多个二级流入流道、多个二级流出流道、主流出流道和若干个单元流场通道。图2(c)为两个单元间的流道构造。图2(d)为仿生流场流体域与扩散层接触的一面,图中红色部分是流道下方流场与扩散层被隔开的区域,蓝色部分是流场与气体扩散层相接触的区域。在流场设计中,不同的单元流场之间采用并联连接方式,每一个单元的流场入口都通过流入流道与流场入口相连,每一个单元的流场出口都通过流出流道与流场出口相连。相较于各单元串联,并联结构的反应物浓度均匀性更好;同时,采用逆流模式操作电池,使氧气和氢气的入口位于电池对角线的两端,既利用了逆流布置的自加湿功能,也进一步提升了反应物浓度分布的均匀性^[18]。

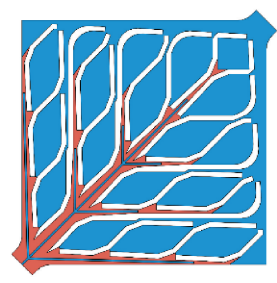


(a) 仿生极板模型

(b) 仿生极板剖面



(c) 两单元间流道构造



(d) 仿生流场流体域扩散层

图2 燃料电池仿生流场结构及内部流动轨迹

Fig. 2 Structure and internal flow trajectory of biomimetic flow field in fuel cells

与 PEMFC 常用的平行流场和蛇形流场构型相比,上述仿生流场构型内部压力适中,具有多条流路设计,在一定程度上有效解决了平行流场中由于压差较小而导致的堵塞问题,提高了物质传递效率,同时也缓解了蛇形流场中单一回路导致的压降过大问题。此外,仿生流场独特的单元流场并联设计能够在理想情况下实现反应物的单元化,从而促进反应物浓度分布更均匀。

通过对流道进行流动仿真,不断优化,最终对仿生流场的结构特征做出如下设置:①由于入口形状为矩形,因此流道形状可近似为一个细长四棱锥;②流场入口尺寸和流场面积之间不存在直接关联;③为了简化流场构造,使流场两侧流动对称,将二级流入流道和主流入流道分支角度设置为 45° ;④二级流入流道末端宽度为 0.2 mm ,为了尽可能保证每个单元流场中的流量相同,将流道两侧壁面与水平线的夹角设置为 1.6° ;⑤将气体扩散层与流体流入通道隔开,为了避免被隔开的部分出现反应气体饥渴区,留下一条宽为 0.2 mm 的缝隙使气体与扩散层接触,缝隙与两侧单元流场的距离保持在 0.1 mm 以上;⑥单元流场轮廓近似于边长为 7 mm 的菱形,各个流场轮廓形状根据流入流出流道、流场边缘和单元流场出入口微调;⑦为了减小流动阻力,对靠近主流出流道的单元流场轮廓适当进行圆角处理。

PEMFC 仿真模型的几何参数如表1所示,参考文献[19-20]选择合适的扩散层厚度、质子交换膜厚度及流场高度等参数,且在建模时保持不变。

表 1 PEMFC 仿真模型的几何参数
Table 1 Geometric parameters of PEMFC simulation model

参数	数值
流场宽度/mm	25
流场长度/mm	25
流场高度/mm	0.80
扩散层厚度/mm	0.38
催化层厚度/mm	0.05
质子交换膜厚度/mm	0.10
流道分叉角/(°)	45
流场出、入口宽度/mm	1.20, 1.20
单元流场出、入口宽度/mm	0.20, 0.20

为了更好地评估叶脉仿生流场燃料电池性能,构建实际工程应用中广泛使用的平行流场和双通道蛇形流场燃料电池模型用于对比。图 3(a)和 3(b)分别展示了平行流场和双通道蛇形流场的流体域模型。为使这两种流场燃料电池中反应物与气体扩散层的接触面积与仿生流场燃料电池一致,平行流场通道宽度统一设定为 1.00 mm,通道间距为 1.00 mm;蛇形流场通道宽度设为 0.80 mm,通道间距为 0.75 mm。除此之外,其余模型几何参数均与叶脉仿生流场燃料电池模型保持一致,以确保对比的公正性和准确性。

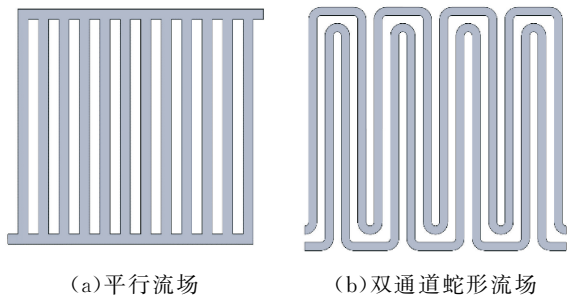


图 3 平行流场和蛇形流场流体域示意图
Fig. 3 Schematic diagram of parallel flow field and serpentine flow field fluid domain

1.2 数学模型

PEMFC 在运行过程中涉及复杂的多物理场耦合过程,为了精准地模拟 PEMFC 内部流动、传热、传质和电化学反应过程,本节构建三维、稳态的数学模型,并对其进行了严格验证。模型涵盖如下所示的控制方程。

质量守恒方程^[21-23]可写为

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{u}) = S_m \tag{1}$$

式中: ϵ 为孔隙率; ρ 为密度; $\mathbf{u}$ 为速度; S_m 为质量源

项,为模拟中引入或移除质量的速率^[24],在气体扩散层和流道中 $S_m = 0$ 。阳极催化层的质量源项 S_{ma} 和阴极催化层的质量源项 S_{mc} 分别表示如下

$$S_{ma} = -\frac{M(\text{H}_2)}{2F}j_a \tag{2}$$

$$S_{mc} = \left(\frac{M(\text{H}_2\text{O})}{2F} - \frac{M(\text{O}_2)}{4F}\right)j_c \tag{3}$$

式中: 下标 a、c 分别表示阳极和阴极; $M(\text{H}_2)$ 、 $M(\text{H}_2\text{O})$ 、 $M(\text{O}_2)$ 分别为氢气、水蒸气、氧气的摩尔质量; j 为体积电流密度; F 为法拉第常数。

动量守恒方程^[21-23]可写为

$$\frac{\partial(\epsilon\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\epsilon\nabla p + \nabla \cdot (\epsilon\mu\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{S}_u \tag{4}$$

式中: p 为流体压力; μ 为流体动力黏度; $\mathbf{S}_u$ 为动量源项。气体流场中 $\mathbf{S}_u = 0$ 。催化剂层(CL)和气体扩散层(GDL)的孔隙中, $\mathbf{S}_u$ ^[24]可由下式表示

$$\mathbf{S}_u = -\frac{\mu}{K}\epsilon\mathbf{u} \tag{5}$$

式中: K 为 GDL 和 CL 的渗透率。

能量守恒方程可写为

$$\frac{\partial(\epsilon\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\lambda\nabla T) + S_Q \tag{6}$$

式中: c_p 为比定压热容; T 为温度; λ 为热导率; S_Q 为能量源项。 S_Q 表示 PEMFC 运行时耗散的能量^[24],涵盖了欧姆损失、化学反应损失、相变损失和过电位损失等,可由下式表示

$$S_Q = I^2 R_{ohm} + \eta I_{change} + h_{phase} + h_{reaction} \tag{7}$$

式中: I 为电流密度; R_{ohm} 为电池内阻; η 为过电位; I_{change} 为交换电流密度; h_{phase} 为水的相变热; $h_{reaction}$ 为化学反应焓。

组分守恒方程可写为

$$\frac{\partial(\epsilon\rho c_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{u}c_k) = \nabla \cdot (\rho D_k^{eff}\nabla c_k) + S_k \tag{8}$$

式中: c_k 为第 k 种组分的浓度; D_k^{eff} 为自由流质量扩散系数的有效值; S_k 为组分源项。

电荷守恒方程可写为

$$\nabla \cdot (\sigma_s\nabla\varphi_s) + S_s = 0 \tag{9}$$

$$\nabla \cdot (\sigma_m\nabla\varphi_m) + S_m = 0 \tag{10}$$

式中: σ_s 、 σ_m 分别为固相、膜相电导率; φ_s 、 φ_m 分别为固相、膜相电势; S_s 、 S_m 分别为固相、膜相电流源项。

交换电流密度是对阴、阳极化学反应速率的直

观表达,由于电路中的电子传导效率以及膜电极组件中的离子传导效率共同决定了反应速率,因此可以由活化过电势得到交换电流密度。Butler-Volmer 方程为电极上的氧化还原反应过程以及上述化学反应速率与电位之间的关系提供了有效数学描述,常被用于求解交换电流密度^[25],可由下式表示

$$R_a = (\xi_a j_a^{\text{ref}}) \left(\frac{c(\text{H}_2)}{c^{\text{ref}}(\text{H}_2)} \right)^{\gamma_a} (e^{a_a F \eta_a / RT} - e^{-a_c F \eta_a / RT})$$

(11)

$$R_c = (\xi_c j_c^{\text{ref}}) \left(\frac{c(\text{O}_2)}{c^{\text{ref}}(\text{O}_2)} \right)^{\gamma_c} (-e^{a_a F \eta_c / RT} + e^{-a_c F \eta_c / RT})$$

(12)

式中: ξ 为活化比表面积; j^{ref} 为参考交换电流密度; $c^{\text{ref}}(\text{H}_2)$ 、 $c^{\text{ref}}(\text{O}_2)$ 、 $c(\text{H}_2)$ 、 $c(\text{O}_2)$ 分别为 H_2 和 O_2 的参考浓度及浓度; γ 为浓度指数; α 为电荷传输系数; η 为活化过电位; R 为理想气体常数。

1.3 边界条件与模型假设

在相同边界条件下,对 3 种流场的 PEMFC 进行仿真。仿真采用质量流量入口和压力出口设定,入口流动为层流,出口为压力出口,以确保化学反应稳定。离子流仅限于膜电极组件内部,外部不穿越边界。为简化计算,膜相电势设为 0,电子仅在阴阳极外部电流中流动;阳极电势设为 0,阴极电势为电池电压;其他壁面采用无滑移边界条件。燃料电池模型的主要参数如表 2 所示。

表 2 燃料电池模型主要参数

Table 2 Main parameters of fuel cell model

参数	数值
工作压力/Pa	101 325
工作温度/K	353.15
开路电压/V	1.05
出口背压/Pa	0
阴、阳极气体相对湿度/%	60, 30
阴、阳极入口温度/K	353.15, 353.15
阴、阳极化学计量数	2.0, 1.2
阴、阳极质量流量/(kg · s ⁻¹)	8.724 2 × 10 ⁻⁸ , 1.410 3 × 10 ⁻⁶
膜电导率/(S · mm ⁻¹)	0.009
参考电流密度/(A · cm ⁻²)	1.5
扩散层、催化层孔隙率	0.4, 0.3
参考电流/A	1.8

为了简化计算,同时确保化学反应稳定,假设燃料电池不受外力影响,工作环境保持稳态;忽略材料

性质的影响和不可逆损失;氢气和氧气均设为不可压缩的理想气体且在 PEMFC 流道内层流流动;模拟过程不考虑重力的影响。

1.4 模型验证

为确保所构建燃料电池模型的科学性和可靠性,基于实验数据对模型进行了详尽且严格的验证工作。以汤梦琪等^[26]的实验数据为基础,构建了一个单流道燃料电池模型,模型结构的示意图如图 4 所示,具体的几何参数如表 3 所示。

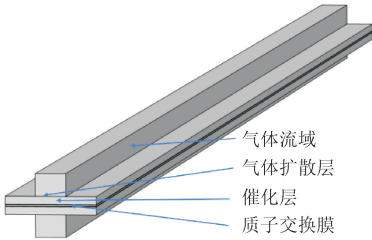


图 4 单流道质子交换膜燃料电池模型

Fig. 4 Single channel proton exchange membrane fuel cell model

表 3 单流道质子交换膜燃料电池模型几何参数

Table 3 Geometric parameters of a single channel proton exchange membrane fuel cell model

部件名称	长度/mm	宽度/mm	高度/mm
流道	62.5	0.8	0.600
扩散层	62.5	2.4	0.210
催化层	62.5	2.4	0.012
质子交换膜	62.5	2.4	0.036

在设定模型边界条件时,严格遵循 1.2 和 1.3 节中确定的源项配置、模型设定、简化策略以及网格划分方案,以确保模型的准确性和一致性。验证模型所选取的操作参数、主要物理性质参数及仿真环境均与既有实验研究的数据完全一致。

图 5 展示了经过网格独立性验证后的数值结果与文献^[26]实验结果的对比。可以看出,在低电流密度(小于 1.2 A · cm⁻²)下,模拟与实验结果一致性较好;但随着电流密度增大,偏差增大,特别是在高电流密度时,由于电渗作用,水的生成增加且难以排除,导致“水淹”现象发生。这是由于当前模型未考虑液态水在气体扩散层中的占比,造成水的状态未能被准确模拟,可能导致低压条件下的性能被高估。总体来看,模拟与实验结果的误差不超过 3.78%,拟合度较好,验证了仿真模型的可靠性。

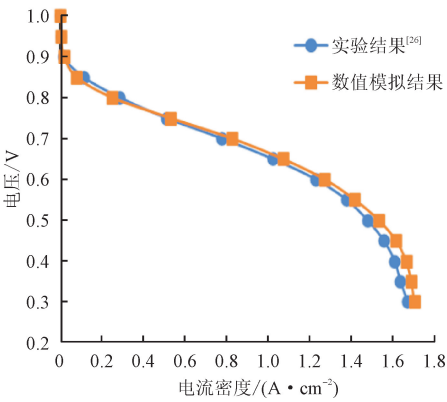


图 5 数值模拟结果与文献[26]实验结果的对比

Fig. 5 Comparison between numerical simulation results and experimental results of Ref. [26]

为了验证本文仿生流场模型的网格独立性,设置 4 种网格划分方案。根据模型中质子交换膜 (PEM) 和 CL 部件的形状规则,采用六面体网格对其进行划分,以保证计算精度和效率。仿生流场的形状呈现高度复杂性,故流体域部分采用自由四面体网格划分以适应复杂的几何形态。GDL 需要和气体流场共享拓扑网格,因此采取共节点网格策略使用自由四面体网格划分。对于平行流场,由于形状规则,不同部件均采用六面体网格划分。蛇形流场中圆角部分采用自由四面体网格划分,以适应其几何变化。流体域直通道和其他部件均采用正六面体网格扫描,以提高网格质量和计算精度。不同流场结构的 PEMFC 网格划分方案见表 4。

表 4 不同流场的 4 种网格划分方案

Table 4 Four grid partitioning schemes for different flow fields

方案	网格数/万		
	仿生流场	平行流场	蛇形流场
1	126	92	96
2	274	187	234
3	583	385	477
4	870	657	785

采用上述 4 种网格划分方案对不同流场的燃料电池进行独立性检验,在工作电压 0.5 V 条件下比较电流密度的变化趋势,如图 6 所示。结果显示:仿生流场网格数达 274 万时,与 583 万网格的相对误差为 0.15%;平行流场网格数为 187 万时,与 385 万网格的误差为 0.99%;蛇形流场网格数为 234 万时,与 477 万网格的误差仅为 0.03%。为兼顾精度和计算效率,后续模型计算均采用方案 2。

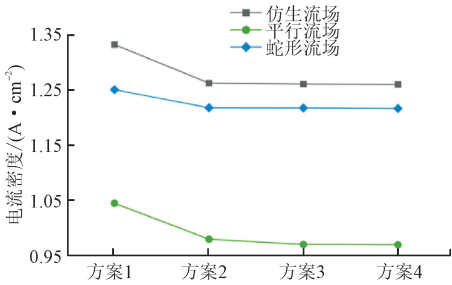


图 6 0.5 V 工作电压下不同流场电流密度随网格数的变化

Fig. 6 Variation of current density in different flow fields with grid number under 0.5 V operating voltage

2 结果讨论

2.1 氧气流动与氧气浓度的分布

在燃料电池运行中,阴极 GDL 与 CL 交界面的氧气浓度分布是影响电化学反应和水生成的关键因素。为确保反应高效进行,必须将交界面氧气浓度维持在适当且均匀的水平。

图 7 给出了工作电压为 0.6 V 时,不同流场阴极 GDL 与 CL 交界面处的氧气浓度分布。由图可见,仿生流场、平行流场和蛇形流场的氧气浓度峰值分别为 4.40、4.03、4.98 mol · m⁻³,最小值分别为 0.46、1.58 × 10⁻³、1.19 × 10⁻² mol · m⁻³,仿生流场的氧气浓度峰值最低,且是唯一未出现氧饥渴区的。

进一步分析仿生流场中的氧气浓度分布可见,每个单元流场的入口氧气浓度较高,出口较低,但远离入口区域浓度仍较高,整体分布较为均匀。流道与反应区隔离使得部分区域氧气浓度较低,氧气分布呈现先骨架化流动,再离散区域扩散的特征。相比之下,平行流场在入口及连接流道处氧气浓度最高,但周围和中部供氧不足;蛇形流场氧气浓度差最大,浓度从入口向出口逐渐递减,梯度明显。

图 8 展示了电压为 0.6 V 时,氧气在阴极流道内的流动轨迹和速度分布。由图可见,在仿生流场中,主流道和各二级流道的流速较高,表明氧气自进入流场后就迅速充满整个“骨架”,抵达每个单元流场入口,随后顺利进入各个单元流场。不同单元流场之间的流速相近,为氧气的均匀输送奠定了基础。

由图 8 还可以看出,在平行流场中,由于中部竖直流道流速较慢,氧气通量降低,催化层与扩散层交界处易形成大面积供氧不足区域;而在双通道蛇形流场中,在相同的质量流量下,由于全流程仅有两个流道,流场流通截面积较小,因此流道中氧气的流速非常高,展现出良好的氧气运输能力。

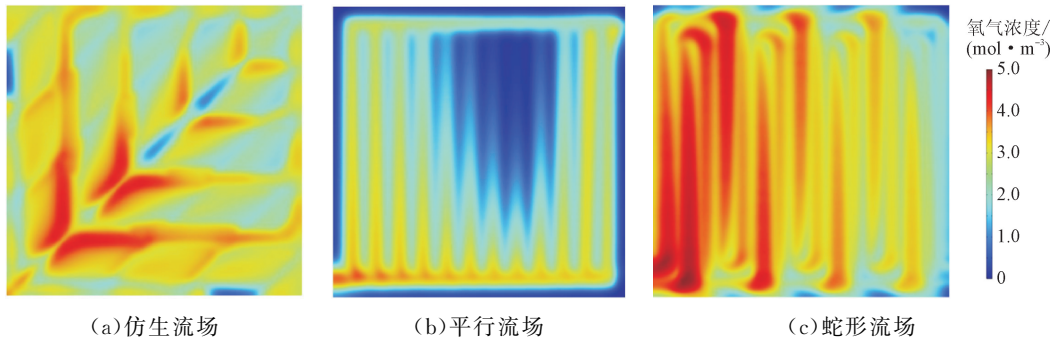


图 7 不同流场下阴极 GDL 与 CL 交界面的氧气浓度分布

Fig. 7 Oxygen concentration distribution at the interface between cathode GDL and CL in different flow fields

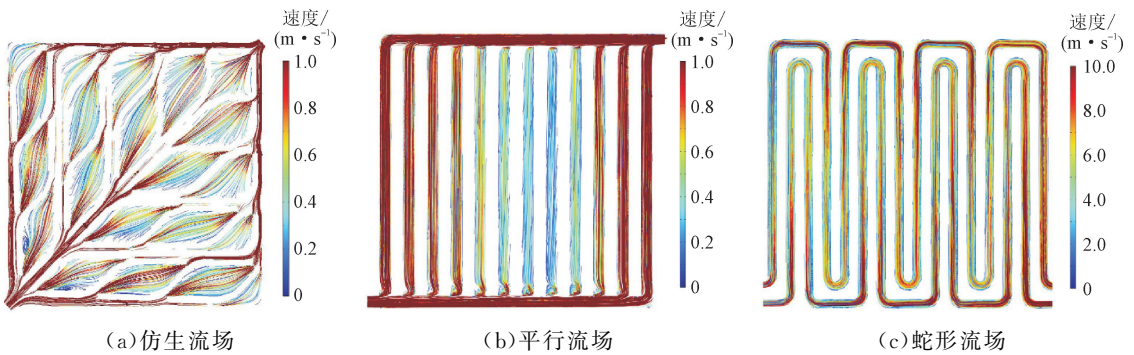


图 8 不同流场下氧气在阴极流道内的流动轨迹及不同位置的速度分布

Fig. 8 Flow trajectory of oxygen in the cathode channel and the velocity distribution at different positions in different flow fields

为了评估燃料电池反应物及电流密度在阴极侧扩散层与催化层交界面中分布的均匀性,引入面加权均匀度指数^[27],可写为

$$\omega_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [C|X_i - \bar{X}_a|)A_i]}{2|\bar{X}_a| \sum_{i=1}^n A_i} \quad (13)$$

式中: X_i 、 $\bar{X}_a$ 分别为区域 A_i 内物质 X 的浓度 / 电流密度及平均浓度 / 平均电流密度; n 为区域数。

图 9 展示了工作电压从 1.0 V 降至 0.3 V 时,不同流场阴极侧 GDL 与 CL 交界面氧气浓度分布均匀度指数的变化趋势。结果显示:当工作电压高于 0.85 V 时,3 种流场的氧气浓度均匀度相近且较高;当电压降至 0.85 V 以下,平行流场的均匀度指数开始下降,速度逐渐减缓,而仿生流场和蛇形流场的均匀度指数呈单调下降趋势。值得注意的是,在所有工作电压下,仿生流场的氧气浓度均匀度指数均优于平行流场和蛇形流场。

在燃料电池的催化层,氧气浓度受到流场氧气分配和氧气消耗速率的影响。高工作电压下,电流较小,氧气消耗速率低,各流场的氧气较为充足,均匀度较高。随着电压降低,电流增大,氧气消耗速率

上升。当电压降至 0.4 V 时,仿生流场和平行流场的电流密度增长放缓,氧气消耗速率减慢,均匀度指数下降速度减缓。相反,蛇形流场在低电压下仍保持较快的电流增长,导致氧气浓度均匀度指数持续快速下降。

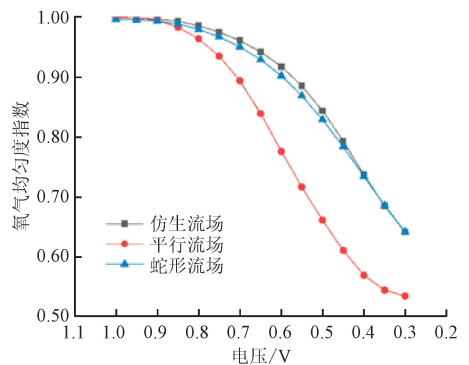


图 9 不同流场阴极侧 GDL 与 CL 交界面氧气浓度分布均匀度指数随电压的变化

Fig. 9 Uniformity index of oxygen concentration distribution at the interface between cathode side GDL and CL in different flow fields varies with voltage

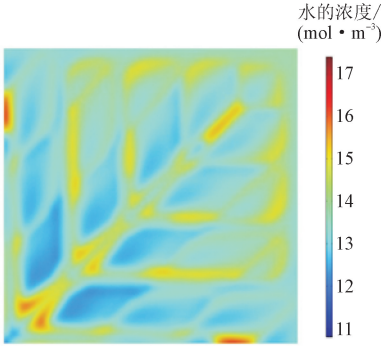
综上所述,3 种流场中,仿生流场的氧气浓度分布最为均匀,供气质量最佳,这一结果对于优化燃料

电池性能、提高氧气利用效率具有重要意义。

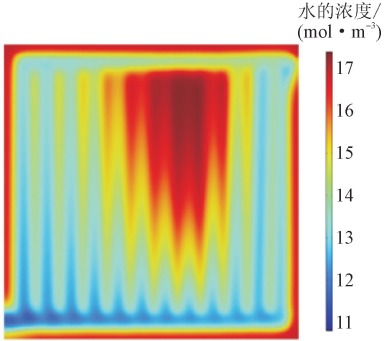
2.2 气体扩散层与催化层交界面处水的浓度分布

燃料电池的排水性能对反应物传质、化学反应和离子传导有重要影响。为了评估新型流场的排水能力,需对比分析阴极 GDL 与 CL 交界面处水的浓度。

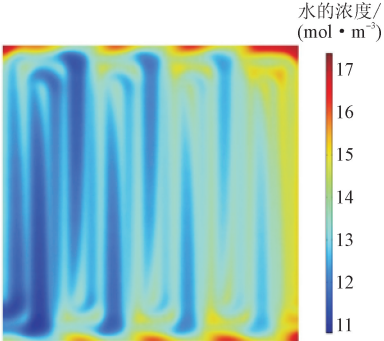
图 10 展示了 0.6 V 工作电压下阴极 GDL 与 CL 交界面处水的浓度分布,结果显示水的浓度与氧气流场的流动状态密切相关。在仿生流场中,由于氧气流入通道与气体扩散层的隔离,流道下方的扩散层和催化层缺乏对流现象,导致水的浓度较高。此外,由于水的排出方向与气体流向一致,单元流场出口及流出流道下方催化层的水的浓度也较高。



(a) 仿生流场



(b) 平行流场



(c) 蛇形流场

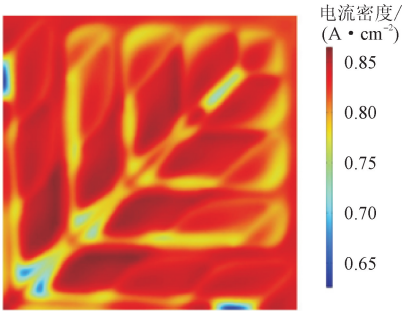
图 10 不同流场阴极侧 GDL 与 CL 交界面处水的浓度分布
Fig. 10 Water concentration distribution at the interface between cathode side GDL and CL in different flow fields

在平行流场中,水的浓度较高的区域主要集中在边缘和中部。边缘区域因缺乏流道,水难以排出;中部由于氧气流速较低,缺乏对流,导致水排除不充分。相比之下,由于流速较高,蛇形流场强烈的对流现象能有效排水,水的浓度从入口到出口逐渐增高,除边缘少量高浓度区域外,其余部分的水均得到了有效去除。经过计算,3 种流场中阴极侧 GDL 与 CL 交界面处水的浓度均值分别为 13.206、14.547、13.098 mol · m⁻³,表明蛇形流场的除水能力最佳,仿生流场的除水能力仅次于蛇形流场。

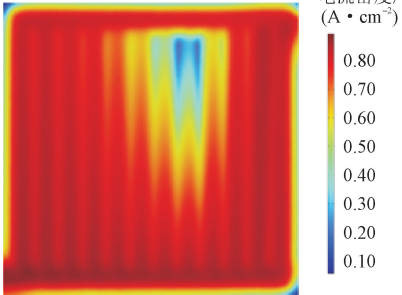
2.3 气体扩散层与催化层交界面的电流密度分布

电流密度分布的均匀性对燃料电池的稳定运行至关重要。过高或过低的电流密度会导致局部反应过快或过慢,不仅降低整体性能,还会缩短质子交换膜的寿命,影响燃料电池的长期使用。

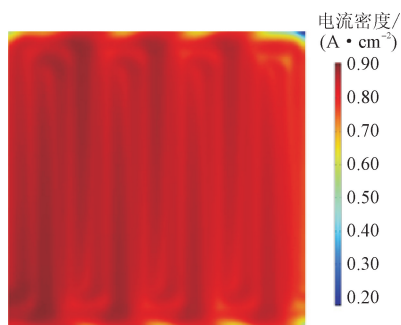
图 11 展示了 0.6 V 工作电压下,不同流场阴极侧 GDL 与 CL 交界面的电流密度分布。由图可见,仿生流场和蛇形流场的电流密度分布较为均匀,几乎没有过低区域,而平行流场中部由于氧气流速较低,导致电流密度过低,反应较慢。进一步分析显示,仿生流场的电流密度峰值与最低值之差为 0.232 0 A · cm⁻²,平行流场为 0.836 4 A · cm⁻²,蛇形流场为 0.731 0 A · cm⁻²,表明仿生流场没有局部反应过快或过慢的区域。与平行流场和蛇形流场相比,仿生流场的峰值电流密度分别降低了 31.35% 和 46.31%,这进一步证明其电流密度分布优越,有助于提升燃料电池性能。



(a) 仿生流场



(b) 平行流场



(c) 蛇形流场

图 11 不同流场阴极侧 GDL 与 CL 交界面的电流密度分布
Fig. 11 Current density distribution at the interface between cathode side GDL and CL in different flow fields

工作电压从 1.0 V 降低至 0.3 V 的过程中,不同流场阴极侧气体 GDL 与 CL 交界面处电流密度分布均匀度指数随电压的变化趋势如图 12 所示。由图可见,随着工作电压降低,3 种流场结构的电流密度均呈现上升趋势,化学反应速率加快,导致氧气消耗速率显著增强。这一现象使得催化层中不同区域的氧气浓度梯度逐渐增大,进而影响了电流密度分布,使其均匀性逐渐降低。

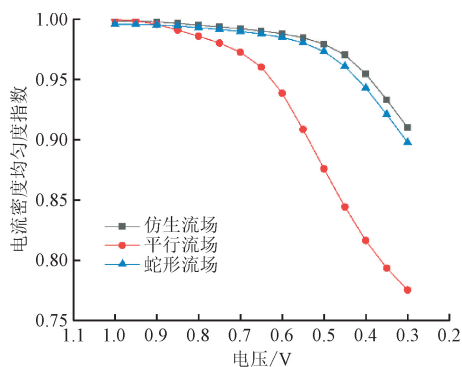


图 12 不同流场阴极侧 GDL 与 CL 交界面电流密度分布均匀度指数随电压的变化

Fig. 12 Uniformity index of current density distribution at the interface between cathode side GDL and CL in different flow fields varies with voltage

在所有模拟工况下,仿生流场均表现出较好的电流密度分布均匀性,这是由于仿生流场的设计能够使氧气分布更为均匀,有效降低了浓差极化损失,为电流密度的均匀分布奠定了坚实基础。这一特性使得仿生流场在燃料电池运行过程中的性能更为稳定,从而具有潜在的应用优势。

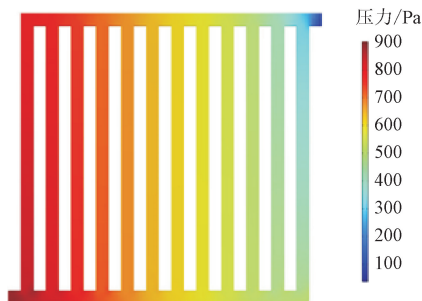
2.4 流场压降

图 13 展示了不同流场阴极侧气体通道的压力分布

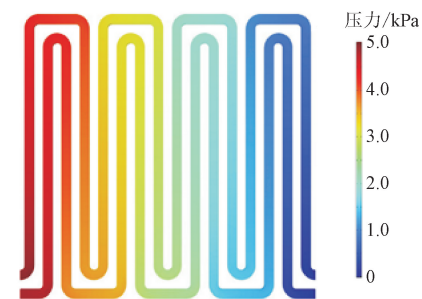
分布。由图可见,仿生流场的压降为 444.36 Pa,平行流场为 864.80 Pa,蛇形流场为 5 021.40 Pa,显示出仿生流场在压降控制上的明显优势。这一优势主要归结于仿生流场独特的结构特点,由于其内部具有众多分叉,使得气体在流场内的流速相对较低,且流动时的拐角基本小于 45° ,因此有效减少了局部压力损失。蛇形流场仅包含两条独立的流通路径,气体流速较高,且存在多个 90° 拐角,因而导致大量的局部和沿程压力损失。平行流场虽然流速不高,但其拐角同样为 90° ,流道拐角处产生较多旋涡,因此也造成了较大的局部压力损失。综合比较后可知:平行流场的压降最小,仿生流场次之,蛇形流场压降最大,这一结果验证了仿生流场在燃料电池设计中的优越性,特别是在承受更高入口流速方面展现出巨大潜力,为燃料电池流场结构的设计和优化提供了有益参考。



(a) 仿生流场



(b) 平行流场



(c) 蛇形流场

图 13 不同流场阴极侧气体通道中的压力分布
Fig. 13 Pressure distribution of the cathode gas channel in different flow fields

2.5 电化性能

极化曲线与功率密度曲线作为燃料电池电化性能的重要表征方式,能够体现出不同流场设计方案对燃料电池性能的影响。图 14 显示了不同流场的极化与功率密度曲线随电流密度的变化情况。

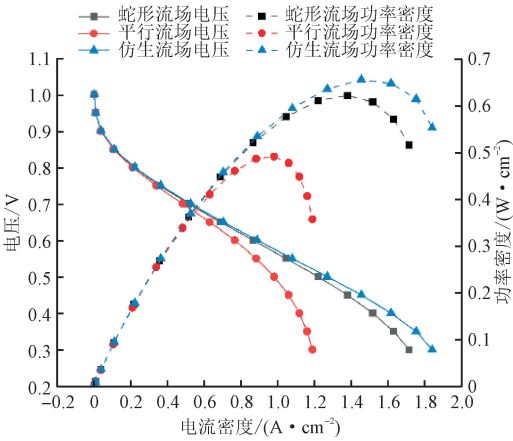


图 14 不同流场极化曲线与功率密度曲线随电流密度的变化

Fig. 14 Polarization curves and power density curves in different flow fields as a function of current density

由图 14 可见,在低电流密度区域,3 种流场的功率密度与极化曲线差异不大,这一现象主要归因于数值模拟过程中,与膜的特性紧密相关的活化损失占主导地位,而在高电压工况下,膜的特性变化通常被忽略。随着电压降低,浓差极化效应逐渐占据主导地位,3 种流场间的性能差异逐渐扩大,特别是在低工作电压条件下,平行流场的输出性能相较于蛇形和仿生流场呈现显著下降趋势;而仿生流场则展现出最为优越的输出性能,相较于平行流场和蛇形流场,仿生流场的极限电流密度分别提高了 35.42%、6.81%,峰值功率密度分别提高了 29.71%、5.22%。

3 结 论

为深入探究不同流场结构对质子交换膜燃料电池性能的影响,本文基于海棠叶脉仿生结构设计了一种新型仿生流场,采用数值模拟软件构建了仿生流场、平行流场及蛇形流场 3 种燃料电池仿真模型,并进行对比分析,得到如下结论。

(1)与传统的蛇形流场和平行流场相比,叶脉仿生流场压降更低,催化层氧气浓度分布更均匀,供气质量更高,有利于降低泵送功率和提升燃料电池电流密度的分布均匀性。

(2)相较于传统的蛇形流场和平行流场,仿生流场有着较强的除水能力,虽略低于蛇形流场,但强于平行流场,在低电压工况下运行时,较强的除水能力能有效减少水淹现象。

(3)仿生流场的电化输出性能最为优越,相较于平行流场和蛇形流场,仿生流场的极限电流密度分别提高了 35.42%、6.81%,峰值功率密度分别提高了 29.71%、5.22%。

参考文献:

[1] FICHMAN B T. Annual energy review 2011 [EB/OL]. (2012-09-01)[2024-05-12]. <https://www.oستي.gov/biblio/1212312/>.

[2] 叶好,韩丁波,张剑波,等. 车用燃料电池质子交换膜研究进展 [J]. 时代汽车, 2024(6): 126-128.

YE Hao, HAN Dingbo, ZHANG Jianbo, et al. Advances in proton exchange membrane research for automotive fuel cells [J]. Auto Time, 2024(6): 126-128.

[3] WANG Yun, RUIZ DIAZ D F, CHEN K S, et al. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells: a review [J]. Materials Today, 2020, 32: 178-203.

[4] XIAO Fei, WANG Yucheng, WU Zhipeng, et al. Recent advances in electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cells and alkaline membrane fuel cells [J]. Advanced Materials, 2021, 33(50): 2006292.

[5] 胡翀. 质子交换膜燃料电池多物理场耦合仿真研究与流场结构优化设计 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.

[6] HEIDARY H, KERMANI M J, DABIR B. Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 51-60.

[7] 赵永志, 蒙波, 陈霖新, 等. 氢能源的利用现状分析 [J]. 化工进展, 2015, 34(9): 3248-3255.

ZHAO Yongzhi, MENG Bo, CHEN Linxin, et al. Utilization status of hydrogen energy [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(9): 3248-3255.

[8] 赵强, 郭航, 叶芳, 等. 质子交换膜燃料电池流场板研究进展 [J]. 化工学报, 2020, 71(5): 1943-1963.

ZHAO Qiang, GUO Hang, YE Fang, et al. State of the art of flow field plates of proton exchange membrane fuel cells [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 1943-1963.

[9] LI W Z, YANG W W, ZHANG W Y, et al. Three-dimensional modeling of a PEMFC with serpentine flow field incorporating the impacts of electrode inho-

- ogeneous compression deformation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44 (39): 22194-22209.
- [10] MANSO A P, MARZO F F, BARRANCO J, et al. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell: a review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37 (20): 15256-15287.
- [11] 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.
- [12] LIU Haichao, YANG Weimin, TAN Jing, et al. Numerical analysis of parallel flow fields improved by micro-distributor in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 176: 99-109.
- [13] ABDULLA S, PATNAIKUNI V S. Detailed analysis of polymer electrolyte membrane fuel cell with enhanced cross-flow split serpentine flow field design [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(7): 2806-2820.
- [14] KLOESS J P, WANG Xia, LIU J, et al. Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(1): 132-140.
- [15] CHEN Tao, XIAO Yong, CHEN Tiezhu. The impact on PEMFC of bionic flow field with a different branch [J]. *Energy Procedia*, 2012, 28: 134-139.
- [16] KAHRAMAN H, HAŞIMOĞLU C, ÇEVİK C, et al. A different flow field design approach for performance improvement of a PEMFC [J]. *Acta Physica Polonica: A*, 2017, 131(3): 484-486.
- [17] COCHARD H, NARDINI A, COLL L. Hydraulic architecture of leaf blades: where is the main resistance? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2004, 27 (10): 1257-1267.
- [18] KHAZAEI I, SABADBAFAN H. Effect of humidity content and direction of the flow of reactant gases on water management in the 4-serpentine and 1-serpentine flow channel in a PEM (proton exchange membrane) fuel cell [J]. *Energy*, 2016, 101: 252-265.
- [19] WANG Yun, CHEN K S, MISHLER J, et al. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 981-1007.
- [20] 陶慧芳. 基于多物理场耦合的氢燃料电池极板流道分析及优化 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [21] GONG Fan, YANG Xiaolong, ZHANG Xun, et al. The study of Tesla valve flow field on the net power of proton exchange membrane fuel cell [J]. *Applied Energy*, 2023, 329: 120276.
- [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.
- [23] FAN Linhao, ZHANG Guobin, JIAO Kui. Characteristics of PEMFC operating at high current density with low external humidification [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 763-774.
- [24] 弗朗诺·巴尔伯. PEM 燃料电池: 理论与实践 [M]. 李东红, 连晓峰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [25] LIM B H, MAJLAN E H, DAUD W R W, et al. Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(14): 9210-9218.
- [26] 汤梦琪. 质子交换膜燃料电池双极板热导率的仿真研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [27] TAO Hongge, CHEN Huanxin, XIE Junlong, et al. An alternative approach to quantifying fluid flow uniformity based on area-weighted average velocity and mass-weighted average velocity [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 45: 116-123.

(编辑 李慧敏)