

基于仿生学的新型波形流场对 PEMFC 电堆性能影响模拟研究

金蒙宇¹, 张拴羊², 徐洪涛¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 宁波工程学院 机械与汽车工程学院, 宁波 315336)

摘要: 为了提高质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)在实际电堆运行条件下的输出性能, 提出了一种变疏密度的仿生墨鱼鳍波形流场的新型流场, 并构建了涵盖进出口、膜电极组件及气体流场的三维单相 PEMFC 电堆模型, 着重探究波形流场疏密分布对电池多物理场性能的影响。通过对比直线型、均匀波形、先密后疏及先疏后密 4 类流场, 深入揭示了流场疏密度对反应气体分布、水排出、压力分布均匀性、电流密度和输出功率的影响规律。研究表明, 先疏后密型流场能够显著增强反应气体传输的均匀性与水管理能力, 优化电流密度分布提升输出功率。在 0.6 V 工作电压下, 该流场结构的输出功率密度相较于传统直线流场的提升了 8.5%, 充分证明变疏密度仿生流场在协同优化 PEMFC 综合性能方面具有重要价值与广阔的应用前景。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 流场设计; 仿生流场; 数值模拟; 电堆

中图分类号: TM 911.4 **文献标志码:** A

Simulation study on the impact of a novel bionic wave-shaped flow field on the performance of PEMFC stacks

Jin Mengyu¹, Zhang Shuanyang², Xu Hongtao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Ningbo University of Engineering, Ningbo 315336, China)

Abstract: To enhance the output performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under practical stack operating conditions, a novel flow field with variable-density bionic cuttlefish-fin wave-shaped flow field was proposed and a three-dimensional single-phase PEMFC stack model covering

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQN25E060009)

第一作者: 金蒙宇(2001—), 女, 硕士研究生。研究方向: 质子交换膜燃料电池电堆性能研究。E-mail: 1597203974@qq.com

通信作者: 徐洪涛(1976—), 男, 教授。研究方向: 新能源高效利用及储能技术。E-mail: htxu@usst.edu.cn

引文格式: 金蒙宇, 张拴羊, 徐洪涛. 基于仿生学的新型波形流场对 PEMFC 电堆性能影响模拟研究[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(4): 484-493.

Citation: Jin Mengyu, Zhang Shuanyang, Xu Hongtao. Simulation study on the impact of a novel bionic wave-shaped flow field on the performance of PEMFC stacks[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(4): 484-493.

inlets and outlets, membrane electrode assembly, and gas flow fields was established. The effects of the density distribution of wave-shaped flow fields on the multi-physics performance of the fuel cell were systematically investigated. By comparing four types of flow fields, namely linear, uniform-wave, dense-to-sparse, and sparse-to-dense flow fields, the influence laws of flow field density on reactant gas distribution, water removal, pressure distribution uniformity, current density, and output power were thoroughly revealed. The results demonstrate that the sparse-to-dense flow field can significantly improve the transport uniformity of reactant gases and enhance water management capability, optimizing the current density distribution and improving the output power. At an operating voltage of 0.6 V, the power density of this flow field structure is 8.5% higher than that of the traditional linear flow field, which fully verifies that the variable-density bionic flow field has important application value and broad application prospects in synergistically optimizing the comprehensive performance of PEMFC stacks.

Keywords: *proton exchange membrane fuel cell; flow field design; bionic flow fields; numerical simulation; stack*

随着能源危机的加剧和环境污染问题的日益严重,清洁能源技术逐渐成为全球关注的核心议题^[1]。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)因其具有转化效率高、零排放以及快速响应等特性,被广泛认为是未来能源体系的重要组成部分^[2-3]。

作为 PEMFC 的核心部件,双极板中的流场设计对 PEMFC 的输出功率、气体分布和排水能力等关键性能具有重要影响。因此,双极板流场设计的优劣直接影响 PEMFC 的整体性能和使用寿命。Ghadhban 等^[4]将设计的叶脉形流场与树形流场、单蛇形流场进行了对比实验。结果表明,采用叶脉形流场的 PEMFC 输出性能最佳,比单蛇形和树形流场的分别提升 5.12% 和 3.75%。王泽英等^[5]基于银杏叶设计的新型仿生流场,其峰值功率密度较平行流场的显著提升 28.85%(仅比五蛇形流场的低 4.36%)。此外,该流场内较高的气体压力促使反应产物与电流密度分布更均匀。谢启真等^[6]探讨了仿生流场中流场夹角对 PEMFC 性能的影响,研究发现:适当增大夹角能有效促进支流内的氧气分布和水分排出;综合对比 10 种方案后得出,30°夹角的仿生叶脉流场提升阴极性能的效果最优。杨蕊等^[7]梳理了国内外相关文献,基于仿生学原理,将仿生流场分为叶形、肺形和非常规形 3 类,剖析了各设计阶段的侧重点,探讨了不同流场特征对电池性能的影响,并从优化方法与制造技术两个维度,总结了近年来双极板领域的新趋势。陈涛等^[8]通过

分析植物叶脉的结构特性,设计了一种仿生流场结构,并通过仿真模拟研究了分支位置和分支数量对 PEMFC 性能的影响。研究发现,改进后的流场结构能够显著降低欧姆热量的产生(减少了 19.4%),从而有效减缓极化现象的发生,提高 PEMFC 的整体输出效率。Lorenzini-Gutierrez 等^[9]研究了 3 种不同分支级别的流场几何结构,并传统蛇形和并联流场进行比较。结果表明,树形流场设计能提供较低的压力降,且能实现均匀的流动分布。李子君等^[10]对三维波形流场与直流场的性能进行了对比,结果表明,波形流场在高电流密度下能显著强化氧气传输效率,改善排水能力,最终使峰值功率密度提高 10.16%。Zhang 等^[11]提出的蜂窝状流场在 PEMFC 中表现出优异性能:氧气不均匀性为 0.59,电流密度达到 8 034.9 A/m²,比平行和蛇形流场的分别高出 14.0% 和 10.4%;当孔隙率为 0.6 时,电流密度提高至 8 787.0 A/m²,比低孔隙率时的高出 60%。姚健^[12]通过对波浪形流场几何参数进行优化分析发现,调整波高和波长能显著提高气体传质效率和输出功率,其优化后的波浪形流场输出功率相比传统设计的提高 7.6%。刘莹^[13]基于高温 PEMFC 进行仿真研究得出:波形数量、长度和高度均显著影响 PEMFC 的输出性能;波形数量增加时,氧气浓度提高,水浓度降低,输出性能增强;波形长度适度增加时,其输出性能也有一定提升;波形高度为 0.03 cm 时,输出性能最佳。

综上所述，尽管仿生流场对 PEMFC 单体性能的影响已有深入研究，但关于墨鱼鳍仿生波形流场疏密度分布对 PEMFC 电堆性能的影响却鲜有报道。为此，本文设计了 3 种不同疏密度的墨鱼鳍仿生波形流场，通过模拟来对比其与传统平行流场在电流密度及气-水-压力分布等方面的性能差异。本研究旨在为 PEMFC 的流场优化提供理论指导，进一步拓展仿生学在流场设计中的应用。

1 模型建立

1.1 几何模型

本文所研究的 PEMFC 电堆结构模型如图 1 所示，构成电堆的单体模型几何尺寸为 25 mm × 6.71 mm × 25 mm，其余部件几何尺寸见表 1。

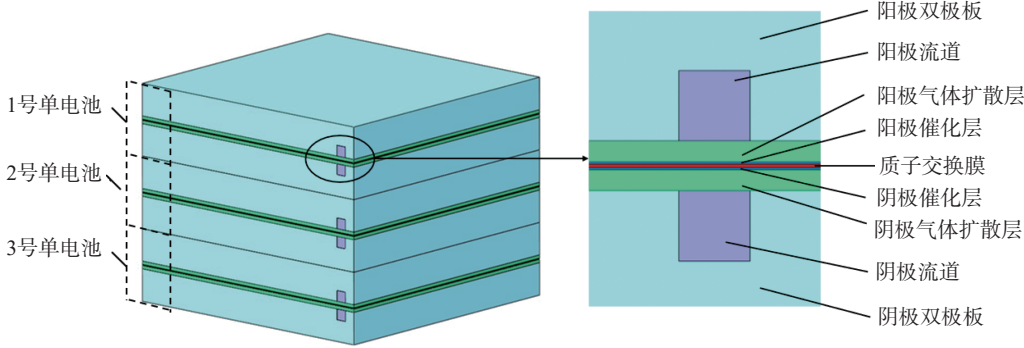


图 1 电堆结构模型图

Fig. 1 Stack structure model diagram

表 1 电堆结构模型几何参数及工作条件^[14]

Tab. 1 Geometric parameters and operating conditions of the PEMFC stack structure model^[14]

参数类别	参数	数值
几何参数	燃料电池活性面积/mm ²	625
	极板厚度/mm	3.0
	气体扩散层厚度/mm	0.3
	气体扩散层孔隙率	0.6
	催化层厚度/mm	0.03
	催化层孔隙率	0.2
	质子交换膜厚度/mm	0.05
	流场深度/mm	1
	脊宽度/mm	1
	入口宽度/mm	1
	工作温度/K	353.15
	工作压力/kPa	101.325
工作条件	阳极/阴极化学计量比	1.5/2.0
	阳极/阴极入口相对湿度	100%/100%
	背压/kPa	0

PEMFC 电堆所采用的流场是受墨鱼鳍形状启发的新型波形流场，分别为均匀的波形流场 (uniform wave-shaped flow field, UWFF)、先密后疏的波形流场 (dense-to-sparse wave-shaped flow field, DSWFF)、先疏后密的波形流场 (sparse-to-dense wave-shaped flow field, SDWFF)。其中，如图 2 所示，DSWFF 和 SDWFF 的设计灵感源于墨鱼鳍的波动特性。墨鱼通过鳍的波动调节流体，实现高效推进。DSWFF 的“先密后疏”是模拟其起始阶段密集结构优化流动，类似墨鱼在高密度流体中的初期调节；SDWFF 的“先疏后密”是模仿墨鱼逐渐扩展波形，逐步优化流体分布，减小局部压力损失，提高传质效率。将上述 3 种新型波形流场与采用直线流场 (linear flow field, LFF) 的 PEMFC 电堆结构进行对比分析。4 种流场的具体结构如图 3 所示。

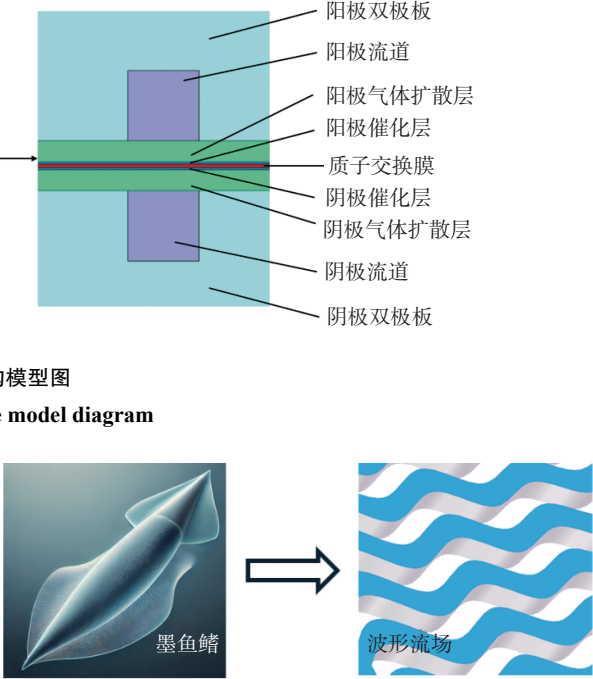


图 2 仿生墨鱼鳍波形流场

Fig. 2 Bionic cuttlefish-fin wave-shaped flow field

1.2 数学模型

本文的模型为三维、稳态、单相、非等温的 PEMFC 电堆模型。为了简化数值计算，采用如下假设^[14]：

- a. PEMFC 在稳态条件下运行；
- b. 将混合气体视为不可压缩的理想气体，且气体在流场内的流动为层流状态；
- c. 多孔介质为各向同性的均质材料，其物理属性保持不变；
- d. 生成的反应产物可看作细小的雾滴状；

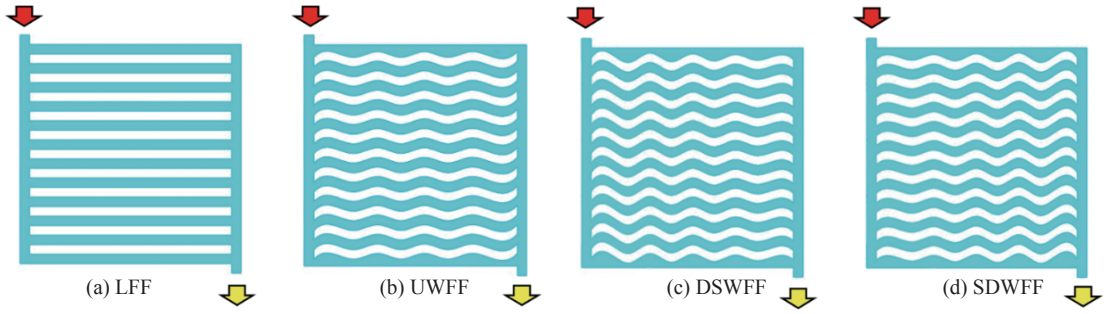


图3 PEMFC 气体流场

Fig. 3 PEMFC gas flow field

e. 反应气体无法穿过质子交换膜;

f. 整个模拟过程中, 忽略重力效应和各组件之间的接触电阻。

PEMFC 的基本控制方程主要包括连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分守恒方程等。基于上述假设, PEMFC 的基本控制方程可以描述为

连续性方程^[15-16]:

$$\nabla(\varepsilon \rho \mathbf{u}) = S_q \quad (1)$$

式中: ε 为多孔介质的孔隙率; ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; S_q 为质量源项。

动量守恒方程^[17-18]

$$\nabla(\varepsilon \rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla(\varepsilon \mu \nabla \mathbf{u}) + S_M \quad (2)$$

式中: p 为压力; μ 为动力黏度; S_M 为动量源项。

能量守恒方程^[19]

$$\nabla(\varepsilon \rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla(k_{\text{eff}} \nabla T) + S_Q \quad (3)$$

式中: c_p 为定压比热容; T 为温度; k_{eff} 为有效热导率; S_Q 为能量源项。

组分守恒方程

$$\nabla(\varepsilon \rho \mathbf{u} C_k) = \nabla(D_k^{\text{eff}} \nabla C_k) + S_k \quad (4)$$

式中: C_k 为组分 k 的浓度; D_k^{eff} 为组分 k 的有效扩散系数; S_k 为组分源项。

电荷守恒方程

$$\nabla(\sigma_s \nabla \phi_s) + R_s = 0 \quad (5)$$

$$\nabla(\sigma_m \nabla \phi_m) + R_m = 0 \quad (6)$$

式中: σ 为电导率; ϕ 为相电势; R 为电势源项; 下标 s 和 m 分别为固相和膜相。

Bulter-Volmer 方程

$$R_{\text{an}} = \xi_{\text{an}} j_{\text{an}}^{\text{ref}} \left(\frac{C_{\text{H}_2}}{C_{\text{H}_2}^{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{an}}} \left[e^{\left(\frac{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}}}{RT} \right)} - e^{\left(\frac{\alpha_{\text{cat}} F \eta_{\text{cat}}}{RT} \right)} \right] \quad (7)$$

$$R_{\text{cat}} = \xi_{\text{cat}} j_{\text{cat}}^{\text{ref}} \left(\frac{C_{\text{O}_2}}{C_{\text{O}_2}^{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{cat}}} \left[e^{\left(\frac{\alpha_{\text{cat}} F \eta_{\text{cat}}}{RT} \right)} - e^{\left(\frac{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}}}{RT} \right)} \right] \quad (8)$$

式中: ζ 为比活性面积; j^{ref} 为阴极参考交换电流密度(电化学本征动力学参数); C 和 C^{ref} 为摩尔浓度和参考摩尔浓度; γ 为浓度指数; α 为传递系数; F 为法拉第常数; η 为活化过电位; R 为通用气体常数; an 和 cat 分别为阳极和阴极。

1.3 边界条件

在本研究中, 采用 Ansys Fluent 2023R1 对 PEMFC 电堆进行了计算模拟。PEMFC 的入口边界条件设定为质量流量, 可由式 (9)~(10) 计算可得^[14], 出口边界条件设定为压力出口。侧壁均采用墙面边界条件, 且不发生质量传递和热交换。除阳极和阴极的入口与出口外, 其余边界均设定为零流量边界条件, 阳极端的电位设为 0, 阴极端的电位设为工作电压。

$$m_{\text{an}} = \frac{\rho_{\text{gas}}^{\text{an}} \lambda_{\text{an}} I_{\text{ref}} A_{\text{MEA}}}{2 F C_{\text{H}_2} A_{\text{in}}^{\text{an}}} \quad (9)$$

$$m_{\text{cat}} = \frac{\rho_{\text{gas}}^{\text{cat}} \lambda_{\text{cat}} I_{\text{ref}} A_{\text{MEA}}}{4 F C_{\text{O}_2} A_{\text{in}}^{\text{cat}}} \quad (10)$$

式中: λ 为化学计量比; A_{MEA} 为膜面积; I_{ref} 为参考工况下的总工作电流; A_{in} 为通道的横截面积。

1.4 模型验证和网格无关性验证

为验证本研究中所建立的 PEMFC 数值模型的准确性, 将本文 LFF 模型模拟的极化曲线与郑德利^[20]提出的传统平行流场 (conventional parallel flow field, CPFF) 模型的模拟结果进行对比。两者设置相同的边界条件, 包括反应气体化学计量比、反应温度和湿度等, 并对两者极化曲线结果进行对比。由图 4 可见, 本文的模拟数据和文献 [20] 的模拟数据的趋势基本保持一致的, 表明本文所构建的数值模型具有较高的可靠性, 可用于后续研究工作。

为验证工作电压为 0.6 V 时，PEMFC 的模拟结果与网格数量无关，对 SDWFF 结构进行了网格无关性分析。表 2 给出了 SDWFF 在网格数量分别为 974 506、1 305 060、2 109 288 和 3 498 060 下的电流密度。网格 3 和 4 的相对偏差仅差 0.07%。因此，考虑到计算成本和精确度，后续模拟采用 2 109 288 的网格精度。

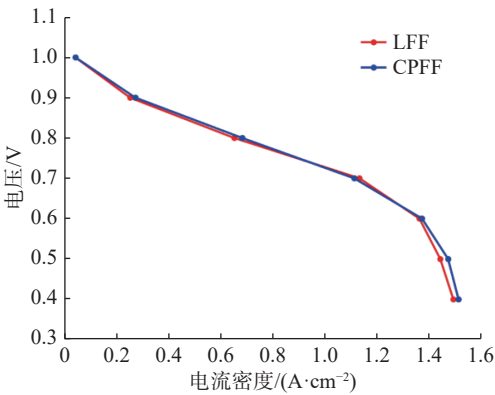


图 4 模型验证极化曲线对照图

Fig. 4 Model validation polarization curve comparison chart

表 2 网格无关性验证

Tab. 2 Mesh independence verification

网格编号	网格数量	电流密度/(A·cm ⁻²)	相对偏差/%
网格1	974 506	0.850 26	0.70
网格2	1 305 060	0.851 69	0.61
网格3	2 109 288	0.856 92	—
网格4	3 498 060	0.857 55	0.07

2 结果与讨论

本研究采用 3 片单电池串联的 PEMFC 电堆，选取中间第 2 片单电池作为分析对象，以消除端板效应。该单电池两侧均与其他电池串联，工作环境更接近大型电堆的实际运行工况，代表性更强，可为大规模电堆研究提供可靠参考。

2.1 对反应气体分布的影响

反应物的分布直接决定电化学反应的均匀性和稳定性。图 5(a) 为不同流场设计的氧气质量分数方差：LFF 为 1.251×10^{-3} ，UWFF 为 1.167×10^{-3} ，DSWFF 为 9.850×10^{-4} ，SDWFF 为 9.630×10^{-4} 。方差越小，表明氧气分布均匀性越好。结果表明，经流场疏密度优化的 DSWFF 和 SDWFF 的氧气质量分数分布方差更小，表明氧气分布更加均匀。

与 UWFF、DSWFF 和 SDWFF 相比，LFF 的流场结构由于对反应气体几乎无阻碍作用，并且对反应物的流动扰动较小，导致入口处氧气质量分数偏低。而波形流场设计通过增加流动扰动和流速差异，促进了气体的混合和扩散，使得氧气在入口区域的分布更均匀。因此，波形流场设计在入口区域通常表现出较高的氧气质量分数。UWFF 采用均匀的波形结构，即流场波峰和波谷高度相等，波形变化较均匀，该设计提供了一定的扰动，有助于气体的扩散和混合。DSWFF 入口区域的密集流场结构极大地提升了扰动效果和氧气传质效率，使得氧气能够在初始区域内快速扩散并参与反应，进而提高了入口处的反应速率。SDWFF 则采用了与 DSWFF 相反的结构。入口区域采用疏松设计，减少了压降，增强了气体的扩散能力，使氧气能够更快速地扩散到电极活性区域，从而提高了入口处的电化学反应效率。在出口处，随着流场逐渐变得密集，流速差异增大，导致较大的压力差，增强了流场之间的流速差和流动扰动，进一步促进了气体的对流。通过这种疏密度的变化，SDWFF 流场设计确保了氧气在整个流场中的充分利用，尤其是在出口处的连接通道，氧气浓度较为均匀，反应效率得到了显著提升。综上所述，DSWFF 和 SDWFF 流场设计通过合理的疏密度结构优化流体扰动，提升了氧气的扩散效率。

由于氢气的扩散能力比氧气的更强，改变波形流场的疏密度对阳极氢气分布的改善作用并不显著。从图 5(c) 数据可知，各模型中氢气质量分数分布的方差分别为：LFF 为 $1.299\ 6\times10^{-6}$ ，UWFF 为 $8.521\ 0\times10^{-7}$ ，DSWFF 为 $1.135\ 4\times10^{-6}$ ，SDWFF 为 $9.507\ 0\times10^{-7}$ 。可以明显看出，UWFF 的氢气分布最均匀。结合图 5(d) 的云图结果可知，LFF 入口处呈现出较高的氢气质量分数。这主要是由于 LFF 流场的平行直流场结构缺乏有效的气体扰动能力，导致氢气未能充分扩散至催化剂层参与反应，而是在流场入口处发生堆积。相比之下，UWFF、DSWFF 等波形流场通过增强流体扰动，有效促进了氢气向膜电极方向的传输与利用，使得入口处氢气分布更为均匀，局部反应速率更高，从而避免了反应物的局部积聚现象。

2.2 对 PEMFC 水管理的影响

流场中水的分布状态是评估其水管理能力的的关键指标。图 6 展示了阴极流场中水的质量分数

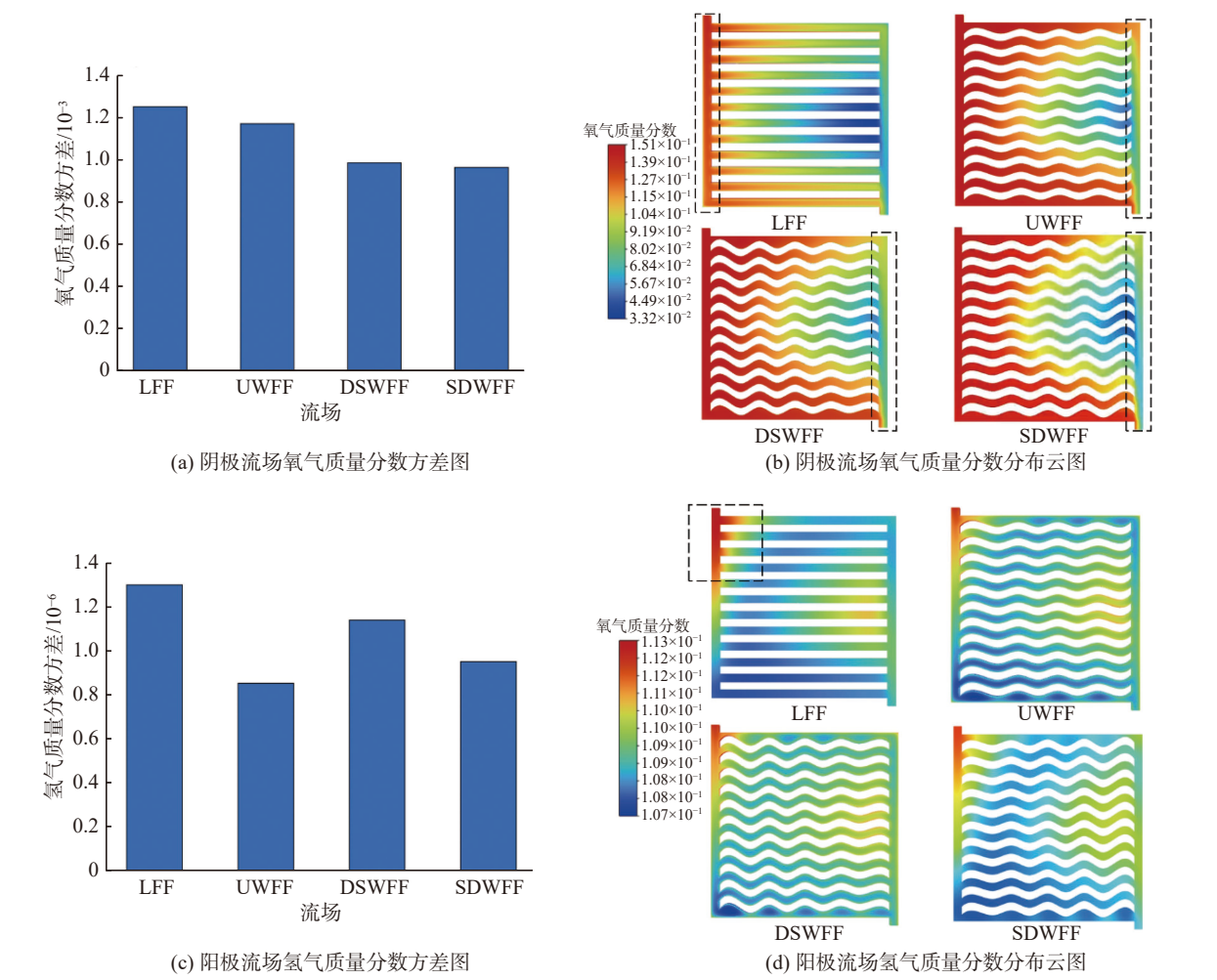


图 5 反应气体质量分数方差图及分布云图

Fig. 5 Variance plots and distribution cloud plots of the mass fraction of reactive gas

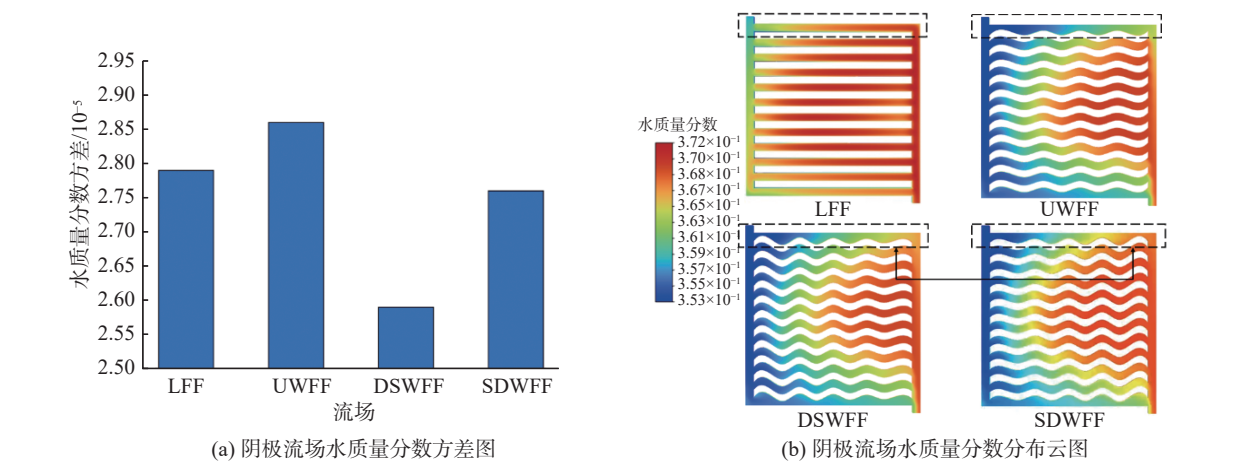


图 6 阴极流场水质量分数方差图及分布云图

Fig. 6 Variance plot and distribution cloud plots of water mass fraction in cathode flow field

分布方差及云图。从图 6(a) 可以看出, LFF 流场中水的质量分数较高, 这主要归因于其平行直流场构型缺乏有效的气流扰动, 并且压降较小, 导致流体无法充分移除电化学反应生成的水, 从而造

成产物水分布不均。图 6(b) 的云图显示, PEMFC 内部出现局部“干区”与“水淹区”并存的现象, 严重影响了电池的输出性能和运行稳定性。相比之下, UWFF、DSWFF 和 SDWFF 3 种

波形流场通过结构优化显著改善了排水性能。UWFF 流场虽具有均匀的周期性波形结构，在一定程度上增强了传质，但仍存在局部液体聚集，导致水分布均匀性欠佳。DSWFF 流场在入口处采用密集波形设计，增强流动扰动，促进反应气体分布与传质，提高了反应速率，有利于反应初期水的生成与转移；其出口区域的疏松结构则为水提供了顺畅的排出通道，有效避免积水。SDWFF 流场则在入口段采用较为疏松的流场，向出口逐渐加密，限制水的快速排出，易造成出口区域水分聚集，影响排水性能。综上所述，DSWFF 流场在水分布均匀性方面表现最优，表明其具备更高效的水管理能力。

2.3 对压力分布的影响

图 7 为阴极气体扩散层压力系数分布立体云图。压力系数 C_p 定义为

$$C_p = \frac{P - P_{\text{ref}}}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2} \tag{11}$$

式中： P 为静压力； P_{ref} 为参考压力，即自由流压力 1 atm(101 325 Pa)； ρ 为流体密度； V_{∞} 为自由流速率，即入口平均速率； $\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2$ 为动态压力即动能

项。压力系数是无量纲数，分析流场时可以独立于特定的压力和速率尺度。

从图 7 可以看出，LFF 的平行流场结构，由于缺乏波形变化，导致整体压力分布较为平衡，流动阻力较小。LFF 的压力分布相对均匀，等压线间隔较大，表明流场中的压力梯度较小。相比之下，UWFF 由于其均匀波形的设计，局部流动受到扰动影响较大，使得等压线的分布比 LFF 的更加密集，流场的压力变化也更为剧烈。

DSWFF 通过增强入口处的流动扰动，使得流场内的压力变化更为显著，等压线分布较为密集。SDWFF 则具有入口处疏松的流场结构，有效减小了入口区域的压力负担，而在出口波形密集区，压力明显降低，呈现较大的压力梯度变化。与 UWFF 和 DSWFF 的波形流场设计相比，SDWFF 通过优化压力分布，改善了流动的平稳性。

与 LFF 相比，UWFF、DSWFF 和 SDWFF 波形流场显著增强了反应气体的传质效率，并改善了电化学反应的均匀性，从而提升了整体的输出性能。然而，波形流场设计也带来了更大的流动阻力，尤其在 UWFF 中表现尤为明显，其入口压力显著上升，进出口压差系数达到 137.76，比 LFF

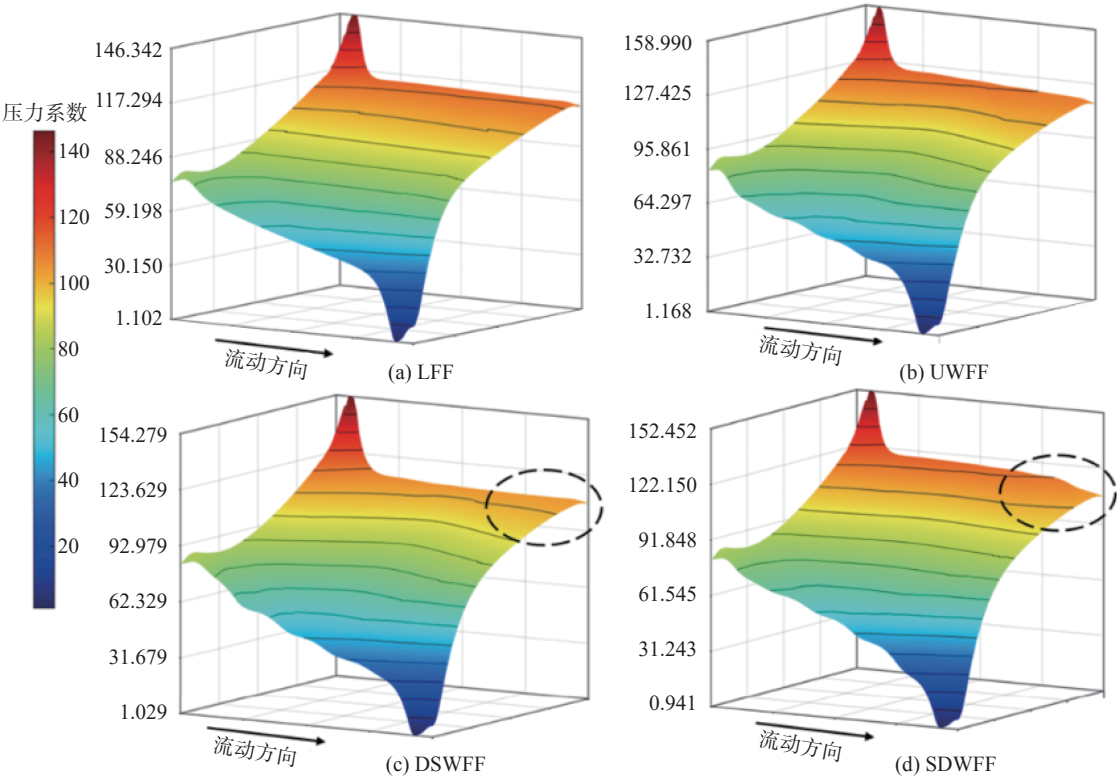


图 7 阴极气体扩散层压力系数分布立体云图

Fig. 7 Stereoscopic cloud maps of the pressure coefficient distribution of the cathode gas diffusion layer

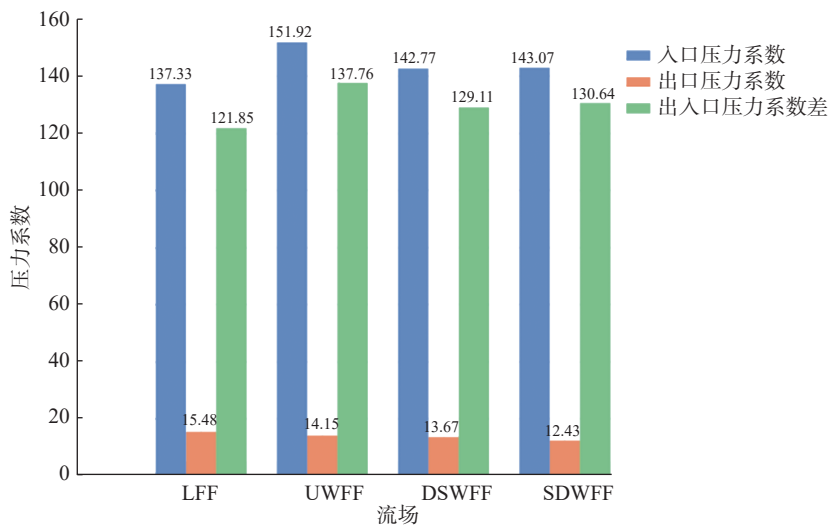


图 8 阴极气体扩散层出入口压力系数分析

Fig. 8 Analysis of pressure coefficients at the inlet and outlet of the cathode gas diffusion layer

增加了 13.06%。这表明, 尽管波形流场能提高输出功率, 但也带来了额外的流动能耗。

相比之下, DSWFF 和 SDWFF 因采用变疏密流场设计, 压降问题得到缓解, 压力分布更为均衡。由图 8 可知: DSWFF 的进出口压力系数差为 129.11, 较 UWFF 的降低 8.65; SDWFF 的压差系数进一步降至 130.64, 出口压力系数仅为 12.43, 表明其流动阻力显著降低, 且压力分布均匀性保持良好。

2.4 对电流密度和输出功率的影响

为了深入探究流场结构对 PEMFC 电流密度分布的影响, 图 9 展示了不同流场构型下的电流密度分布云图。可以观察到, 与 UWFF、DSWFF 和

SDWFF 流场设计相比, LFF 出口处的电流密度更低, 低电流密度区域的面积更大。这主要是由于 LFF 流场的结构较为平直, 导致反应气体的供应和电化学反应的进程不如其他模型均匀, 从而在出口区域造成电流密度偏低。相比之下, UWFF 通过引入周期性波形结构增强了流体的扰动与混合效果, 使得低电流密度区域面积有所减小。然而, 与 DSWFF 和 SDWFF 相比, 由于 UWFF 在局部区域的反应效率提升仍较为有限, 低电流密度区域面积仍相对较大。DSWFF 与 SDWFF 通过采用变密度流场设计, 有效增强了气体的扩散能力与反应速率, 并优化了水管理, 从而显著减小了低电流密度区域范围。

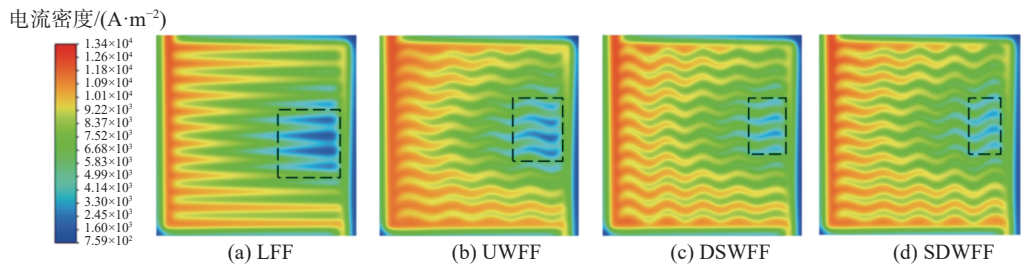


图 9 PEMFC 电流密度分布云图

Fig. 9 PEMFC current density distribution cloud maps

图 10 对比了不同波形流场结构对电池输出功率的影响。结果显示, SDWFF 流场在工作电压为 0.6 V 时输出功率密度最高, 达到 0.51 W/cm², 相比 LFF 的 0.47 W/cm² 提升了 8.5%。UWFF 流场虽在一定程度上改善了流体分布均匀性, 但由于未能充分优化不同区域的传质需求, 其输出功率提

升较小, 仅提升 1.5%。DSWFF 流场入口加密增强了气体扩散, 出口疏松改善了排水能力, 二者协同使功率密度提高 4.7%。SDWFF 流场则通过入口疏松、出口密集的相反布局, 在气体扩散、反应速率和电流分布均匀性方面均表现最佳, 整体性能提升最为显著。

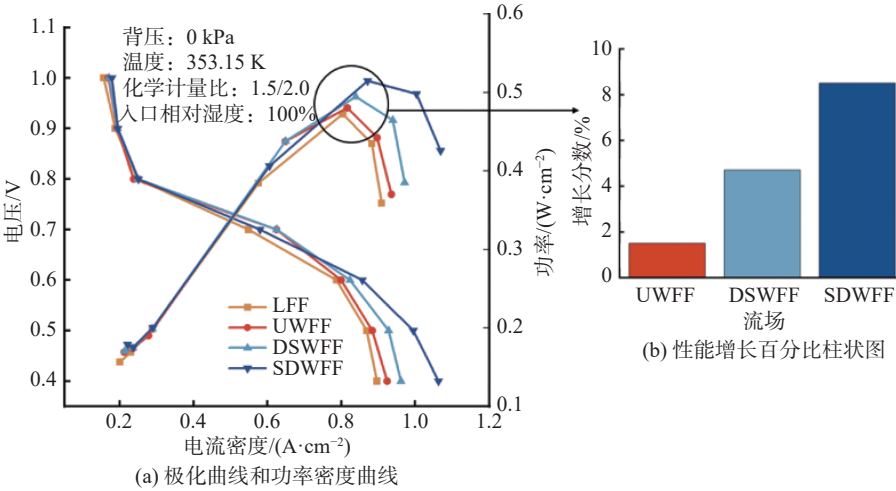


图 10 输出功率结果图
Fig. 10 Output power results

3 结 论

为探究流场设计对 PEMFC 电堆输出性能的影响, 本文基于仿生学原理, 设计了具有不同疏密分布的墨鱼鳍状波形流场结构, 并构建了相应的电堆模型。首先, 建立了三维全尺寸电堆数值模型并完成了网格划分。在此基础上, 采用计算流体动力学方法对各流场方案进行了系统的数值模拟, 重点分析了波形流场疏密分布对 PEMFC 内部反应气体传输特性、水管理能力、压力分布均匀性及整体输出性能的作用机制。本研究主要获得以下结论:

- a. 在反应气体分布方面, SDWFF 流场采用入口疏、出口密的差异化设计, 有效提升了阴极侧氧气分布的均匀性, 其氧气质量分数方差为 9.63×10^{-4} , 气体分布性能最优。由于氢气扩散能力强于氧气的, 改变流场疏密度对阳极氢气分布的改善效果不显著。
- b. 在水管理性能方面, DSWFF 流场表现最佳。水质量分数分布云图及方差分析表明, DSWFF 通过增强入口扰动与优化出口排液能力, 显著改善了水分布的均匀性, 实现了生成水与排出过程的协同调控, 从而大幅提升电池的水管理效率。
- c. 在压力分布方面, SDWFF 流场压降特性最优, 进出口压差系数为 130.64, 较 UWFF 流场降低 7.07%。SDWFF 通过在出口区域布置高密度流场, 增强局部流动阻力, 改善反应气体滞留, 从而显著降低整体流动能耗。相比之下, DSWFF 流场因入口区域扰动较强, 压力梯度较大。

d. 在输出性能方面, SDWFF 流场整体表现最优。在电池工作电压为 0.6 V 时, 其输出功率密度达到 $0.51 W/cm^2$, 相比 LFF 流场提升 8.5%; 而 UWFF 与 DSWFF 流场的功率提升率分别为 1.5% 和 4.7%。

综上所述, 合理设计波形流场的疏密分布, 可有效缓解水分布不均所导致的积液问题, 避免气体传输受阻与反应不完全, 从而提升反应区内物质利用效率及电化学反应均匀性, 显著增强 PEMFC 的输出功率与长期稳定性。本研究为未来电池流场设计提供了理论依据与实践指导。

参考文献:

[1] 熊瑛. 我国工业化中的能源问题与生态文明建设 [J]. 宏观经济管理, 2021(2): 51–58.

[2] 郝明晟, 李印实, 何雅玲. 质子交换膜燃料电池催化层模型研究进展与展望 [J]. 科学通报, 2022, 67(19): 2192–2211.

[3] 清泉. 我国能源问题讨论中的三种“关系” [J]. 石油知识, 2023(2): 4–5.

[4] Ghadhbani S A, Alawee W H, Dhahad H A. Study effects of bio-inspired flow filed design on polymer electrolyte membrane fuel cell performance[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 24: 100841.

[5] 王泽英, 陈涛, 张继伟, 等. 基于仿生结构流场的质子交换膜燃料电池的性能 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2022, 62(10): 1697–1705.

[6] 谢启真, 郑明刚. PEMFC 叶脉型仿生流道夹角参数研究 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 361–366.

[7] 杨蕊, 谢旭良. 质子交换膜燃料电池仿生流道研究进展 [J]. 电源技术, 2023, 47(7): 848–851.

- [8] 陈涛, 乔运乾, 李昌平, 等. 基于植物叶脉的 PEMFC 流场结构设计[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 453–458.
- [9] Lorenzini-Gutierrez D, Hernandez-Guerrero A, Ramos-Alvarado B, et al. Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell using tree-shaped designs for flow distribution[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(34): 14750–14763.
- [10] 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.
- [11] Zhang S Y, Liu S, Xu H T, et al. Performance of proton exchange membrane fuel cells with honeycomb-like flow channel design[J]. *Energy*, 2022, 239: 122102.
- [12] 姚健. 质子交换膜燃料电池波浪型流场研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [13] 刘莹. 基于波形流场的高温质子交换膜燃料电池性能模拟分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
- [14] Zhang G B, Fan L H, Sun J, et al. A 3D model of PEMFC considering detailed multiphase flow and anisotropic transport properties[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 714–724.
- [15] Wang Y L, Wang S X, Liu S C, et al. Three-dimensional simulation of a PEM fuel cell with experimentally measured through-plane gas effective diffusivity considering Knudsen diffusion and the liquid water effect in porous electrodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 318: 770–782.
- [16] Mahyari H, Afrouzi H H, Shams M. Three dimensional transient multiphase flow simulation in a dead end anode polymer electrolyte fuel cell[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 225: 391–405.
- [17] Spingler F B, Phillips A, Schuler T, et al. Investigating fuel-cell transport limitations using hydrogen limiting current[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 13960–13969.
- [18] Ramin F, Sadeghifar H, Torkavannejad A. Flow field plates with trap-shape channels to enhance power density of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 1151–1160.
- [19] Zhou Y, Chen B, Chen W S, et al. A novel opposite sinusoidal wave flow channel for performance enhancement of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Energy*, 2022, 261: 125383.
- [20] 郑德利. 具有交互通道的仿生正弦波双极板流场设计与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.

(编辑: 何代华)