

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.215

引用格式: 封士明, 邹林海, 张焱, 等. 质子交换膜燃料电池点阵型流场性能仿真[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(1): 51-59.



质子交换膜燃料电池点阵型流场性能仿真

封士明, 邹林海, 张焱, 万忠民

(湖南理工学院 机械工程学院, 湖南 岳阳 414006)

摘要: 质子交换膜燃料电池流道结构对反应气体流动、热交换、电化学反应具有重要影响。针对常见流道中反应气体分布不均, 液态水管理和输出性能等问题, 设计了3种点阵型流场。建立了传统平行流场和点阵型流场的三维质子交换膜燃料电池几何模型, 并对比了输出性能、氧气运输阻力、氧气摩尔浓度均匀性系数、氧气分布和液态水饱和度。结果表明, 相比传统平行流场, 3种点阵型流场的输出性能均高于传统平行流场, 峰值功率密度增加24.74%, 点阵型流场的氧气运输阻力显著小于传统平行流场, 氧气摩尔浓度均匀性系数显著大于传统平行流场。同时点阵型流场能明显改善电池内部氧气分布的均匀性和液态水管理, 有望为燃料电池流道结构创新提供新的思路。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 结构设计; 数值模拟; 点阵型流场

中图分类号: TM911

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)01-051-09

Simulation study of lattice flow fields in PEMFCs

FENG Shiming, ZOU Linhai, ZHANG Yan, WAN Zhongmin

(School of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang, Hunan 414006, P. R. China)

Abstract: The flow field structure of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) plays a critical role in regulating reactant transport, heat dissipation, and electrochemical reactions. To address challenges commonly observed in conventional flow channels, such as non-uniform reactant distribution, insufficient liquid water management and limited output performance, three types of lattice flow fields were newly designed. Three-dimensional PEMFC models featuring both traditional parallel and lattice-type flow fields was established, and their output performance, oxygen transport resistance, oxygen molar concentration uniformity, oxygen distribution, and liquid water saturation were comparatively analyzed. Results show that, compared with the traditional parallel flow field, all three lattice designs exhibited improved performance, achieving a maximum increase of 24.74% in peak power density. The lattice flow fields also demonstrated significantly lower oxygen transport resistance, higher oxygen concentration uniformity, and enhanced internal oxygen distribution and liquid

收稿日期: 2023-07-12 网络出版日期: 2024-07-21

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30302); 湖南省教育厅科学研究重点项目(20A216)。

Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ30302), and Key Scientific Research Project of Hunan Education Department(20A216).

作者简介: 封士明(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事质子交换膜燃料电池研究, (E-mail) feng1260304496@126.com。

通信作者: 张焱, 男, 副教授, (E-mail)12017032@hnist.edu.cn。

water management. These findings provides a promising direction for innovative PEMFC flow field design.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); flow field design; numerical simulation; lattice flow field

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)作为一种理想的能量转化系统,可以将H₂和O₂中的化学能转化为电能,不受卡诺循环的限制,具有输出功率高、响应速度快、排放物绿色无污染等优点,在世界范围内引起了广泛关注^[1-4]。PEMFC主要由阳极集流板、阳极气体扩散层(anode gas diffusion layer, GDL-A)、阳极气体催化层(anode gas catalyst layer, CL-A)、质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)、阴极气体催化层(cathode gas catalyst layer, CL-C)、阴极气体扩散层(cathode gas diffusion layer, GDL-C)、阴极集流板组成。双极板作为PEMFC的重要组成部分,其中的流场结构在PEMFC内部起到了收集电流、除水和提供机械支撑的作用,也对PEMFC内部反应的气体运输、反应效率、热扩散和电池寿命起关键性作用。对双极板中流场结构的设计优化,可显著改善PEMFC的性能。因此,对PEMFC双极板的流场设计优化,显得尤为重要^[5-8]。

近年来,越来越多的学者致力于双极板的流场结构设计。赵永豪等^[9]设计了一种双重强化传质作用的流场结构,强化了反应气体在流场内部的运输,使氧还原反应能更高效地进行。研究结果显示,这种强化传质的流场结构能够有效加快反应气体在电池内部的流速,提高电池的输出性能。孙峰等^[10]在传统平行流场内添加挡板结构,分析了不同形状的挡板结构和挡板的分布对PEMFC传质特性和输出性能的影响。研究结果表明,添加挡板可以提高反应气体在催化层的浓度,加快氧还原反应,而且采用挡板交错分布结构的电池,能提升其输出性能。Huang等^[11]针对蛇形流场存在的压降大、水管理性能差等问题,提出了一种锥形斜坡蛇形流场,通过一种可视化实验和数值模拟对该流场的性能进行研究,相比于普通蛇形流场,该新型蛇形流场下游反应气体分布均匀,压降降低了58.4%,输出性能提高了3.75%。Wang等^[12]设计出一种辅助鱼骨状流场,与传统平行流场相比,该流场能够增加肋下对流,能够使反应气体和液态水饱和度在电池内部分布更加均匀。Dong等^[13]基于生物激励原理和莫里定律,设计了一种新型流场板结构并进行数值模拟,结果表明,仿生流场内的反应气体和生成物的摩尔浓度分布比传统平行流场更加均匀,并且降低了流道内的压降,在相同的条件和几何尺度下,采用该新型流场结构的电池的最大输出功率比采用传统平行流场的电池提高了14%。

学者对双极板的流场结构设计进行了大量的研究,但是对反应气体在电池内部分布的研究很多还只是停留在对云图的分析,缺乏足够的可信度。因此,文中设计了3种点阵型流场,采用数值模拟的方法,与传统平行流场进行对比分析,引入氧气运输阻力R_t和氧气摩尔浓度分布的均匀性系数γ,其值能够清晰直接地分析出不同流场结构对反应气体的影响,量化氧气在电池内部的分布,为后续的PEMFC流场结构研究设计提供参考。

1 PEMFC 模型搭建

1.1 结构设计

传统平行流场和3种点阵型流场如图1所示。可以看出,点阵型流场是由主流道和许多的子流道组成,主流道负责将反应气体最大限度地输送到电池的各个部分,子流道负责将主流道输送过来的反应气体进行分流,输送到点阵内部进行氧还原反应。点阵I型流场由16个点阵按4×4排列,其中每一个点阵都由9个1 mm×1 mm的正方形组成,在保证提供双极板足够的机械支撑的同时,增加氧还原反应的区域。点阵II型流场是在点阵I型流场的基础上,在4个点阵中间的主流道上增加直径为1.5 mm的圆形导流块,点阵II型流场是在点阵I型流场的基础上,在4个点阵中间的主流道上增加1 mm×1 mm的正方形导流块。其他PEMFC参数如表1所示。

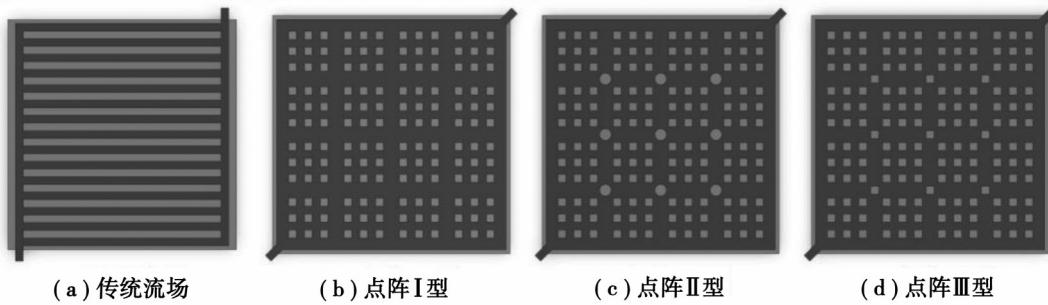


图1 不同流场结构图

Fig. 1 Structure of different flow fields

表1 PEMFC模型尺寸参数

Table 1 General size parameters of PEMFC model

参数	值	参数	值
双极板尺寸/(mm×mm)	30×30	气体扩散层厚度/mm	0.300
双极板高度/mm	1.5	气体催化层厚度/mm	0.013
流道高度/mm	1.0	质子交换膜厚度/mm	0.108
流道肋高度/mm	1.0		

1.2 网格划分

仿真计算的模型整体划分为六面体结构性网格,双极板和流道结构的网格设置成边长为0.5 mm的正六面体网格,阳极侧和阴极侧的扩散层和催化层分别划分为8层和4层,质子交换膜划分为5层,如图2所示。

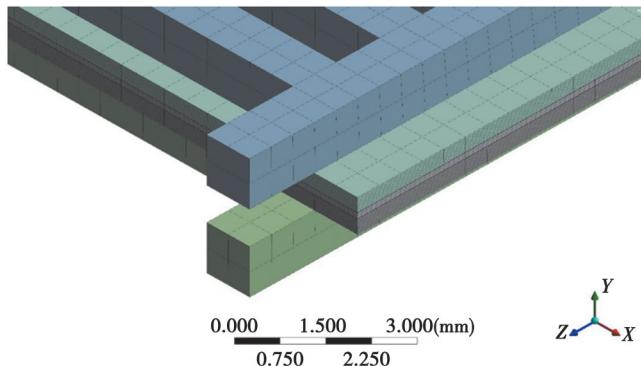


图2 网格结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid structure

在输出电压为0.6 V时,通过使用5个不同网格单元数量的PEMFC单电池模型来验证传统平行流场的网格独立性。当不同网格数量的单电池模型的计算结果小于1%,则可以忽略网格带来的差异,计算结果如表2所示。考虑到计算成本和计算精度,选择网格数量为278 658的模型作为最终方案。

表2 网格独立性检测的计算结果

Table 2 Calculation results of grid independence test

序号	网格数量	电流密度/(A·cm ⁻²)
1	138 725	1.314 064
2	178 148	1.292 425
3	278 658	1.281 202
4	485 313	1.272 233
5	1 004 939	1.264 601

1.3 模型假设

采用以下假设对所提出的PEMFC模型进行了仿真：

- 1) 在PEMFC工作过程中,电池入口和出口温度保持不变;
- 2) 在PEMFC工作时,流道中的流体的流动状态为层流且不可压缩;
- 3) 反应气体在流道中属于饱和状态,且两相之间不发生传质;
- 4) PEMFC中所有的多孔介质都是各向同性且均匀的;
- 5) 层间的接触电阻可以忽略不计,材料导电导热率恒定不变,无电流泄漏^[14-16]。

1.4 控制方程

对于流体在流道和气体扩散层中的对流与扩散,可以用连续性方程式描述,为

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

式中: ρ 是流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; \mathbf{v} 是流体的速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

计算域内的动量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla + \nabla \mathbf{v}^T + S_m, \quad (2)$$

式中: ρ 是流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ 是动态黏度, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$; P 是计算域内的压力, Pa ; S_m 是动量产生的源项,在不同的域中有所不同,在流道和气体扩散层中 S_m 为0,在多孔电极中,源项可由达西定律描述的压降给出。

计算域内的质量守恒方程为

$$\frac{\partial \varepsilon p x_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\nu \varepsilon p x_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{\text{eff}} \nabla x_i) + S_{s,i}, \quad (3)$$

式中: x_i 、 D_i^{eff} 、 $S_{s,i}$ 分别为各种物质的质量分数、有效扩散系数和试样源项。在多孔介质中,有效扩散系数为

$$D_i^{\text{eff}} = D_i \varepsilon^r. \quad (4)$$

在气体燃料中,有效扩散系数可以用Stefan-Maxwell方程来描述:

$$D_{i,j}^{\text{eff}} = \frac{a}{p} \left(\frac{T}{\sqrt{T_i T_j}} \right)^b (p_i p_j)^{\frac{1}{3}} \left(\sqrt{T_i T_j} \right)^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{0.5} \varepsilon^{1.5}. \quad (5)$$

式中: T_i 和 p_i 分别为气体燃料的温度和压力; M 为气体摩尔分数;对于 O_2 、 H_2 和 N_2 , a 和 b 通常分别为 2.745×10^{-4} 和1.832;对于水蒸气, a 和 b 分别为 3.64×10^{-4} 和 $2.334^{[17]}$ 。

电池中的电荷守恒方程为

$$\nabla \cdot (\sigma_i \nabla \varphi_i) = S_i, \quad (6)$$

式中: σ_i 是液相和固相的电导率; φ_i 是液相和固相的电势; S_i 是阴极和阳极中的源项,等于电极的交换电流密度 j_a 和 j_c ,且由Butler-Volmer方程可以得到:

$$j_a = i_{0,a} \left(\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta_a}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_c F \eta_a}{RT} \right) \right), \quad (7)$$

$$j_c = i_{0,c} \left(-\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta_c}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_c F \eta_c}{RT} \right) \right). \quad (8)$$

式中, η_a 是活化点位,由修正后的方程可得不同温度和压力下的 i_0 为

$$i_0 = i_0^{\text{ref}} \left(\frac{p_r}{p_r^{\text{ref}}} \right)^\gamma \exp \left(\left(-\frac{E_c}{RT} \right) \left(1 - \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) \right), \quad (9)$$

式中: p_r 为燃料压力; p_r^{ref} 为燃料参考压力; γ 为浓度系数,在阳极和阴极分别为0.5和1。活化能 E_c 为66 kJ/mol,电势可通过开路电压得出

$$n_{\text{oct}} = \varphi_1 - \varphi_2 - E_{\text{eq}}. \quad (10)$$

式中, E_{eq} 为平衡电位,为

$$E_{\text{eq}} = -\frac{\nabla H - TVS}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{\text{O}_2} P_{\text{H}_2}}{P_0^2} \right)^{1.2} \quad (11)$$

综合式(10)和式(11),燃料电池的电压 V_{cell} 为

$$V_{\text{cell}} = \varphi_{1,a} - \varphi_{1,c} \quad (12)$$

电池中的含水饱和度方程为

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_1 s)}{\partial t} + \nabla \left[\rho_1 \frac{K s^2}{\mu_1} \frac{dp_c}{ds} \nabla_s \right] = r_w, \quad (13)$$

式中: ε 是孔隙率; ρ_1 是液态水的密度; μ_1 是液态水的黏度; s 是水饱和度; r_w 是冷凝速率; p_c 是毛细管压力,可以表示为

$$p_c = \begin{cases} \frac{\sigma \cos \theta_c}{(K/\varepsilon)^{0.5}} [1.147(1-s) - 2.12(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3], & \theta_c < 90^\circ; \\ \frac{\sigma \cos \theta_c}{(K/\varepsilon)^{0.5}} (1.147s - 2.12s^2 + 1.263s^3), & \theta_c > 90^\circ. \end{cases} \quad (14)$$

式中: σ 是表面张力; θ_c 是接触角; K 是绝对磁导率^[18]。

1.5 边界条件和初始条件

边界条件的设置在建模过程和仿真模拟过程中发挥着至关重要的作用,在本研究中,假设PEMFC工作温度为333 K,阴极与阳极的入口设置为质量流入口,出口设置为压力出口,流场内壁采用无滑移边界条件。更多参数^[5,19]如表3所示。

表3 数值模型边界条件参数
Table 3 Numerical model boundary condition parameters

参数	值	参数	值
气体扩散层孔隙率	0.550	阳极转移系数(阳极)	0.5
气体催化层孔隙率	0.475	活化面积/mm ²	900
气体扩散层渗透率/m ⁻²	1.76×10^{-11}	工作压力阳极(阴极)/Pa	101 325(101 325)
气体催化层渗透率/m ⁻²	1.76×10^{-11}	开路电压/V	0.95
氢气参考浓度/(mol·m ⁻³)	56.40	阳极入口质量流/(kg·s ⁻¹)	5×10^{-6}
氧气参考浓度/(mol·m ⁻³)	3.39	阴极入口质量流/(kg·s ⁻¹)	3×10^{-5}
阴极转移系数(阴极)	2.0	氢气质量分数	0.112
阳极转移系数(阴极)	2.0	氧气质量分数	0.170
阴极转移系数(阳极)	0.5	接触角/(°)	135

1.6 模型验证

为了验证模型的准确性,利用FACTS-G60燃料电池测试平台对传统平行流场进行实验测试,将得到的实验数据和数值模拟计算出的数据进行对比,可以看出,实验数据和仿真数据基本一致,有轻微偏差,但是最大误差不超过2.2%,说明仿真模型具有一定的准确性,如图3所示。造成二者微小差异的原因是多因素耦合,比如实验环境中气流气压的波动、数据采集系统的响应延迟和高电流密度区域产生的水引起了明显的两相效应等。

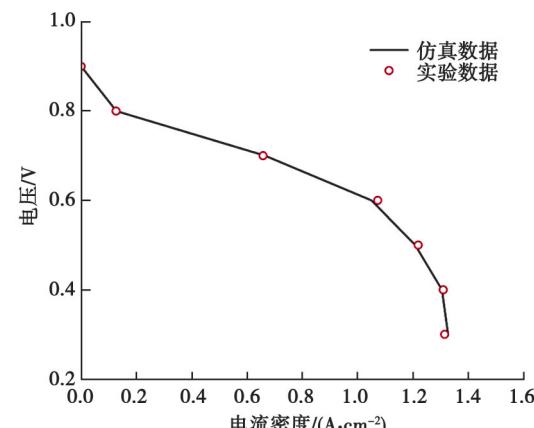


图3 模型验证

Fig. 3 Model validation

2 结果与讨论

2.1 极化曲线和功率密度曲线分析

极化曲线和功率密度曲线是评估 PEMFC 性能的关键指标,带有不同流场结构的 PEMFC 的极化曲线和功率密度曲线如图 4 所示。

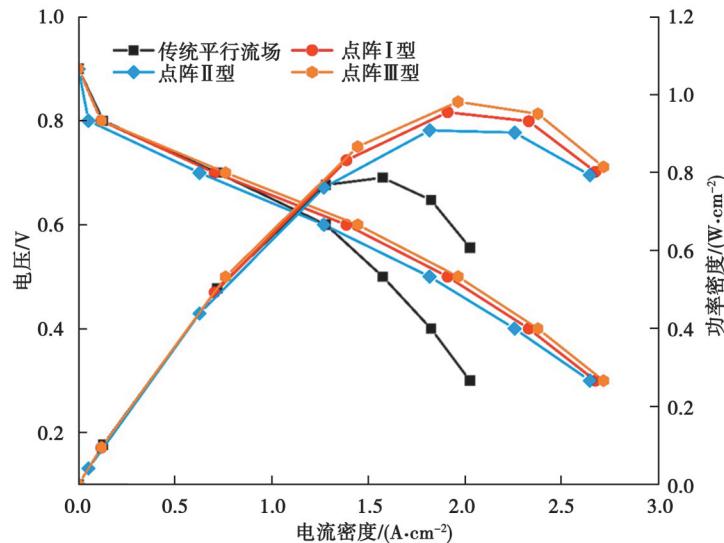


图 4 带有不同流场结构的 PEMFC 的极化曲线和功率密度曲线

Fig. 4 Polarization curves and power density curves of PEMFC with different flow field structures

由图 4 可知,在电压高于 0.7 V 的区域,4 个流场结构的电流密度相差不大;在电压小于 0.7 V 的低电压区域,随着电压的降低,不同流场之间的电流密度差异逐渐增大。传统平行流场的电流密度最小,点阵 III 型的电流密度最大。由功率密度曲线可知,相较于传统平行流场,3 种点阵型流场的整体输出功率都有显著提升,传统平行流场的峰值功率密度为 0.7873 W/cm^2 ,点阵 I 型的峰值功率密度比传统平行流场提高了 21.31%,点阵 II 型的峰值功率密度比传统平行流场提高了 15.42%,其中点阵 III 型的峰值功率密度最高,为 0.9821 W/cm^2 ,比传统平行流场提高了 24.74%。

2.2 氧气流动特性分析

阴极催化层氧气质量分数分布对 PEMFC 的输出性能和稳定性影响较大,流场结构对反应气体的传输影响较大。为研究不同流场结构对氧气分布和电池性能的影响,对氧气运输阻力和氧气摩尔浓度分布的均匀性进行分析,阴极侧 GDL-CL 交界处的氧气运输阻力与氧气分布均匀性存在相关性。氧气的运输阻力 $R_T(\text{S}/\text{cm})$ 和氧气摩尔浓度分布的均匀性系数 γ 分别^[20-21]

$$R_T = \frac{4F\Delta C_{O_2}}{i}, \quad (15)$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(C_{O_2,i} - \bar{C}_{O_2})^2}}{\bar{C}_{O_2}}, \quad (16)$$

式中: ΔC_{O_2} 为阴极侧 GDL-CL 交界面的氧气摩尔浓度差, mol/m^3 ; i 为电流密度; F 为法拉第常数; $C_{O_2,i}$ 为阴极侧 GDL-CL 交界面的局部氧气摩尔浓度; \bar{C}_{O_2} 为阴极侧 GDL-CL 交界面的平均氧气摩尔浓度。

图 5 为不同流场结构的 PEMFC 在最大功率密度下的 R_T 和 γ 值,运输阻力越大,氧气的扩散性越差,PEMFC 内部的氧气浓度越小,电池性能越差。氧气摩尔浓度分布均匀性系数越大,阴极侧 GDL-CL 交界面的氧气分布越均匀,电池性能越好。

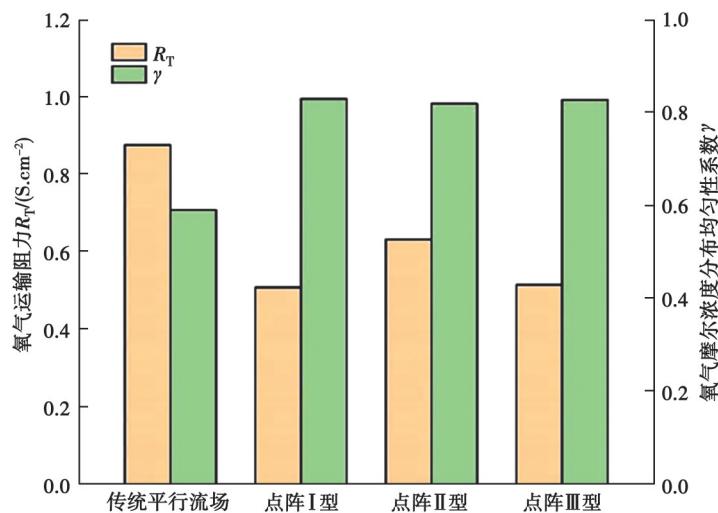


图5 不同流场结构的PEMFC在最大功率密度下的 R_T 和 γ 值
Fig. 5 R_T and γ values of PEMFC with different flow field structures

如图5所示,传统平行流场的 R_T 值比点阵I型、点阵II型和点阵III型分别大42.0%、27.9%和41.2%,传统平行流场的 γ 值比点阵I型、点阵II型和点阵III型分别小28.9%、28.0%和28.7%,由此可知,传统平行流场的 R_T 值最大, γ 值最小,流场内部氧气分布均匀性最差。图6和图7分别为不同流场在最高电流密度下GDL-CL交界处氧气质量分数分布和液态水饱和度分布。结合图6和图7来看,传统平行流场内部存在一块水淹区域,并且液态水含量比其他3种点阵型流场偏高,液态水在扩散层的聚集阻碍了氧气的运输,使该电池内部的氧还原反应无法有效进行,这是传统平行流场氧气运输阻力最大和氧气摩尔浓度分布的均匀性系数最低的原因。相较于传统平行流场,3种点阵型流场的 R_T 值都较小, γ 值都较大,其中点阵I型和点阵III型的 R_T 值和 γ 值近似,而点阵II型因为存在较大的圆形导流块,使该流场内部的氧气运输阻力大于点阵I型和点阵III型,总体的氧气分布仍优于传统平行流场。从图6和图7可以看出,虽然采用点阵型流场的PEMFC内部存在液态水,但是受益于点阵型流场独特的设计,生成的水能够被很好地通过出口排出,氧气在电池内部受到的影响较小,氧气依然可以在该流道内流动,在点阵型流场内部并不存在较大的缺氧区域。因此,点阵型流场在结构设计上优于传统平行流场。

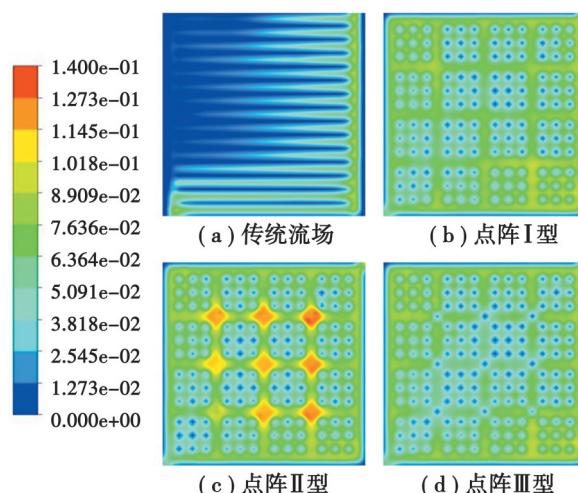


图6 不同流场在0.5 V电压下阴极侧GDL-CL交界处氧气质量分数分布
Fig. 6 Distribution of oxygen mass fraction at the GDL-CL junction on the cathode side under different flow fields at 0.5 V voltage

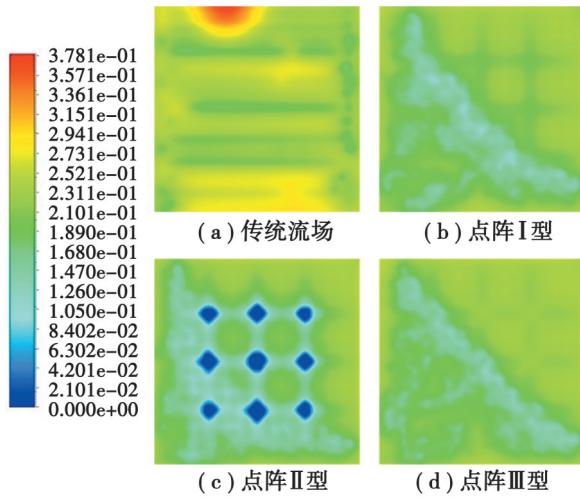


图7 不同流场在0.5 V电压下阴极侧GDL-CL交界处液态水饱和度分布

Fig. 7 Distribution of liquid water saturation at the GDL-CL junction on the cathode side under different flow fields at 0.5 V voltage

3 结 论

基于已有研究,设计出3种点阵型流场并与传统平行流场进行对比,建立了PEMFC三维数字模型,通过数值模拟计算和实验测试后,对4种流场结构的PEMFC进行性能分析。主要结论如下:

- 1)与传统平行流场相比,点阵型流场有利于反应气体的扩散,有利于促进电化学反应的进行。
- 2)点阵型流场的输出性能都高于传统平行流场,点阵I型的峰值功率密度比传统平行流场高21.31%,点阵II型的峰值功率密度比传统平行流场高15.42%,点阵III型的峰值功率密度比传统平行流场高24.74%。
- 3)3种点阵型流场的液态水饱和度都小于传统平行流场,不易发生水淹现象。

参考文献

- [1] Sharaf O Z, Orhan M F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 810-853.
- [2] Wang R F, Wang H, Luo F, et al. Core-shell-structured low-platinum electrocatalysts for fuel cell applications[J]. Electrochemical Energy Reviews, 2018, 1(3): 324-387.
- [3] Zhao C, Xing S, Chen M, et al. Optimal design of cathode flow channel for air-cooled PEMFC with open cathode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(35): 17771-17781.
- [4] 刘旺玉, 何芋钢, 罗远强, 等. 仿猪笼草结构的质子交换膜燃料电池流道设计[J]. 电源技术, 2022, 46(3): 280-283.
Liu W Y, He Y G, Luo Y Q, et al. Design of PEMFC flow channel imitating Nepenthes alata structure[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(3): 280-283. (in Chinese)
- [5] Zhang S Y, Yang Q G, Xu H T, et al. Numerical investigation on the performance of PEMFC with rib-like flow channels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(85): 36254-36263.
- [6] Liu X Y, Bai M L, Zhou Z F, et al. Three-dimensional multi-phase numerical study for the effect of coolant flow field designs on water and thermal management for the large-scale PEMFCs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(61): 23681-23705.
- [7] Tan Q, Lei H, Liu Z Q. Numerical simulation analysis of the performance on the PEMFC with a new flow field designed based on constructal-theory[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(23): 11975-11990.
- [8] Liu M X, Huang H Z, Li X, et al. Geometry optimization and performance analysis of a new tapered slope cathode flow field for PEMFC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(75): 37379-37392.

- [9] 赵永豪,袁伟,周飞鲲,等.基于双重强化传质流道的PEMFC性能研究[J].电源技术,2022,46(12): 1433-1437.
Zhao Y H, Yuan W, Zhou F K, et al. Study on performance of PEMFC based on double enhanced mass transfer channel[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(12): 1433-1437. (in Chinese)
- [10] 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 F, Su D D, Yin Y J. Effect of streamlined baffles on PEMFC performance[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 84-91. (in Chinese)
- [11] Huang H Z, Liu M X, Li X, et al. Numerical simulation and visualization study of a new tapered-slope serpentine flow field in proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy, 2022, 246: 123406.
- [12] Wang Y L, Si C, Qin Y Z, et al. Bio-inspired design of an auxiliary fishbone-shaped cathode flow field pattern for polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 227: 113588.
- [13] Dong J H, Liu S F, Liu S H. Numerical investigation of novel bio-inspired flow field design scheme for PEM fuel cell[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2020, 12(4): 044303.
- [14] Huang H Z, Lei H, Liu M X, et al. Effect of superior mesenteric artery branch structure-based flow field on PEMFC performance[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113546.
- [15] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [16] Vargaftik N B, Volkov B N, Voljak L D. International tables of the surface tension of water[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1983, 12(3): 817-820.
- [17] Barbir F. PEM fuel cells: theory and practice[M]. Pittsburgh: Academic press, 2012.
- [18] Chen X, Chen Y, Liu Q, et al. Performance study on a stepped flow field design for bipolar plate in PEMFC[J]. Energy Reports, 2021, 7: 336-347.
- [19] Perng S W, Wu H W, Chen Y B, et al. Performance enhancement of a high temperature proton exchange membrane fuel cell by bottomed-baffles in bipolar-plate channels[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113815.
- [20] Xia L C, Ni M, He Q J, et al. Optimization of gas diffusion layer in high temperature PEMFC with the focuses on thickness and porosity[J]. Applied Energy, 2021, 300: 117357.
- [21] Zhu K Q, Ding Q, Xu J H, et al. Optimization of gas diffusion layer thickness for proton exchange membrane fuel cells under steady-state and load-varying conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 267: 115915.

(编辑 詹燕平)