

变孔隙泡沫金属的 PEMFC 流场设计与优化

常文俊¹, 张航¹, 张宁², 于伟^{1*}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214112; 2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要:为改善均匀泡沫金属流场(MF-FF)反应物分布不均及水淹问题,以氧浓度(2.5 mol/m³)和液体饱和度(0.05)为阈值,将MF-FF划分为区域孔隙分布的泡沫金属流场,研究质子交换膜燃料电池(PEMFC)性能变化和水气管理。进一步通过遗传算法(GA)优化,提出阴极孔隙梯度优化设计方案并验证有效性。结果显示,正梯度设计显著改善了流场反应物分布,不仅通过渗透率的梯度减小优化水管理,同时在入口区域保持高孔隙密度强化氧气垂直向渗透,提高反应速率。最优梯度方案(115-90-60 PPI)相比于均匀泡沫金属,在0.5 V下的功率密度提升了7.2%,氧气分布均匀性提升33.2%,液态水分布均匀性改善46.2%,提升了PEMFC在高载荷下的工作稳定性。

关键词:质子交换膜燃料电池;泡沫金属流场;孔径梯度;遗传算法;水管理

中图分类号:TM911.42

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0349-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.060

Design and optimization of PEMFC flow field based on non-uniform metal foam

CHANG Wen-jun¹, ZHANG Hang¹, ZHANG Ning², YU Wei^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214112, China;

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: To address the challenges of non-uniform reactant distribution and water flooding in uniform metal foam flow fields (MF-FFs), this study partitions the MF-FF into regional pore distributions using an oxygen concentration of 2.5 mol/m³ and liquid water saturation of 0.05 as thresholds to investigate PEMFC performance and water-gas management. Furthermore, a cathode pore-size gradient optimization design is proposed and verified via a genetic algorithm (GA). Results indicate that the positive gradient design significantly improves reactant distribution. It optimizes water management through a permeability gradient while enhancing vertical oxygen penetration and reaction rates by maintaining high pore density in the inlet region. Compared to uniform metal foams, the optimal gradient configuration (115-90-60 PPI) achieves a 7.2% increase in power density at 0.5 V. Specifically, the uniformity of oxygen and liquid water distribution is improved by 33.2% and 46.2%, respectively, thereby enhancing the operational stability of the PEMFC under high-load conditions.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; metal foam flow field; pore size gradient; genetic algorithm; water management

质子交换膜燃料电池(PEMFC)具备零排放、零污染的特点,是治理环境污染与实现“双碳”目标的重要途径^[1-2]。其中泡沫金属具有高孔隙率、导电性强等优势^[3-4],作为气体流场可强化PEMFC的传质特性改善其输出特性,增加电池功率密度。Khatib等^[5]通过对比泡沫金属流场和蛇形流场,发现采用泡沫金属压降更小,水气分布均匀性显著提升。Afshari^[6]将平行流场和泡沫金属流场进行对比,泡沫流场在减少传质损失和压力损失方面有较大优势。Suo等^[7]对比了传统流场和泡沫金属流场,得出多孔结构提升了氧气在流场中的停留时间,显著强化了氧气向催化层的输送效率。同时,金属泡沫作为流场,无需外处理,降低工艺成本。因此,金属

泡沫是实现氢能燃料电池高性能的较优选择。

均匀孔隙密度的泡沫金属流场(MF-FF)依旧存在着一些局限性。Jo等^[8]指出,由于氧气在沿途持续消耗,流场出口处的反应物压降会剧烈增加,导致电流密度分布极为不均。Son等^[9]发现使用泡沫金属流场,反应物不会流向反应区的角落,产生较大弱流区,导致整个反应区域的反应速率不均。Wan等^[10]采用数值模拟的方法测试不同孔隙数,发现浓差极化在低流速区域明显,严重限制电池性能。Wu等^[11]通过可视化研究证明在高湿度的工作条件下,阴极侧会产生大量液态水并滞留在泡沫金属。

通过孔径梯度设计或者多层结构来优化流场能够显著提高PEMFC输出性能和水气管理能力。

收稿日期:2025-01-22;修回日期:2026-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(12172152)

作者简介:常文俊(2001-),男,硕士生,研究方向为氢能燃料电池,2419989731@qq.com;于伟(1987-),男,博士,副教授,研究方向为分布式能源、氢能技术与装备等,通讯联系人,yuwei0301@163.com。

Kermani 等^[12]提出功能梯度材料可实现流量的按需分配,缓解局部传质死区。Tao 等^[13]进一步表明,正梯度孔径设计能够利用末端较大的物理孔径降低排水阻力,提升功率输出。Kang 等^[14]设计了具有不同孔隙率梯度的泡沫金属流场,与常规泡沫金属流场相比,具有孔隙率梯度泡沫金属流场的 PEMFC 最大功率提升了 8.23%。Sun 等^[15]证实在靠近质子交换膜 (MEA) 使用较小每英寸孔数 *PPI*、远离 MEA 使用较大 *PPI* 更有利于电池性能。Zhang 等^[16]对均匀和梯度泡沫金属进行强制对流,发现梯度结构能够减少压降并提升传热性能。Shin 等^[17]提出了一种混合流场,将两种孔径的泡沫金属拼接在一起,有效降低了浓差极化并提高了水气的均匀性。

综上所述,非均匀的泡沫金属在燃料电池中表现更佳,但缺乏基于泡沫金属分布特性的优化方案。因此,本文提出了一种基于流场分区特性的阴极孔径梯度拓扑方案。以氧浓度和液态水饱和度作为分区物理阈值建立模型,对比了不同孔隙密度排布在水气管理方面,输出性能以及反应分布均匀性的变化。基于此分区模型,以系统功耗与功率输出之比作为目标函数进行全局优化,确定了最优梯度步长方案,并对最优方案的 PEMFC 进行数值模拟,将模拟结果与优化前对比分析,验证尺寸优化的有效性。

1 模型描述

图 1 为所建立的 PEMFC 三维物理模型,从上到下分别为阴极双极板、阴极泡沫金属流场、阴极气体扩散层 (GDL)、阴极催化层 (CL)、质子交换膜 (MEA)、阳极催化层、阳极气体扩散层、阳极泡沫金属流场、阳极双极板。

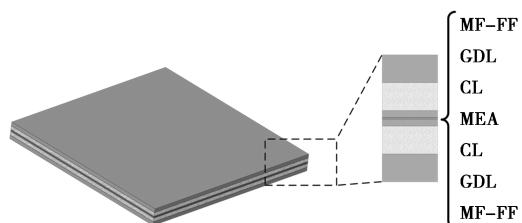


图 1 PEMFC 结构示意图

图 2 为变孔隙密度泡沫金属划分示意图,其中图 2(a) 为 0.5 V 下液体饱和度图,图 2(b) 为 0.5 V 下氧气摩尔分布图。孔径梯度设计模型的分区阈值,基于均匀泡沫金属的模拟数据确定。其中液体饱和度大于 0.05 的区域划分为高水饱和区,氧气摩

尔浓度大于 2.5 mol/m³ 划分为高氧区,剩余部分为过渡区。不同流场的主要参数如表 1 所示。

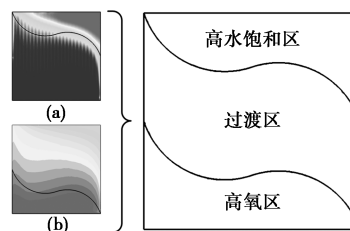


图 2 非均匀泡沫金属划分示意图

表 1 PEMFC 流场几何参数

参数	值
膜厚度/mm	0.04
CL 厚度/mm	0.01
GDL 厚度/mm	0.25
金属泡沫高/宽/长/mm	1/51/51
双极板厚度/mm	1
氢气入口宽度/mm	2
空气入口宽度/mm	4

2 数学模型

2.1 控制方程

PEMFC 是一个复杂的整体系统,其控制方程体系需要耦合多物理场过程。涵盖气液两相流动、多孔介质内反应气体运输、催化层电化学反应、液态水迁移以及电荷运输等过程。各过程由对应的控制方程描述且相互耦合,共同构成了完整的模型。

质量守恒方程如式(1)所示。

$$\partial(\varepsilon\rho)/\partial t + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\vec{u}) = S_m \quad (1)$$

式中, ε 为多孔介质的孔隙率; ρ 为气体的密度, kg/m³; t 为时间, s; ∇ 为哈密顿算子; \vec{u} 为流体的速度矢量, m/s; S_m 为质量源项, kg/(m³·s)。

动量守恒方程如式(2)所示。

$$\partial(\varepsilon\rho\vec{u})/\partial t + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\vec{u}\vec{u}) = -\varepsilon\nabla p - \varepsilon\mu\nabla u + S_u \quad (2)$$

其中, μ 是动态粘性系数; p 为流体压力, Pa; S_u 为动量源项, N/m³。

电子与质子守恒方程如式(3)、式(4)所示。

$$0 = \nabla \cdot (\kappa_e^{\text{eff}} \nabla \varphi_e) + S_e \quad (3)$$

$$0 = \nabla \cdot (\kappa_e^{\text{eff}} \nabla \varphi_{\text{ion}}) + S_{\text{ion}} \quad (4)$$

其中, κ 是电导率, S/m, S 是电势源项, A/m³。

能量守恒方程如式(5)所示。

$$\partial(\varepsilon\rho c_p T)/\partial t + (\varepsilon\rho c_p \vec{u} T) - \nabla \cdot (K^{\text{eff}} \nabla T) = S_h \quad (5)$$

式中, c_p 比热容, J/(kg·K); T 为温度, K; K^{eff} 为有效

导热系数, $W/(m \cdot K)$; S_h 为能量源项, W/m 。

2.2 模型假设及边界条件

该模型主要根据以下假设来求解 PEMFC 中的气体扩散、液体扩散、物质的传质,膜内的水转移以及质子和电子传递的耦合现象:

- (1) PEMFC 在稳态的条件下运行;
- (2) PEMFC 中的反应气体视为理想气体,且假设为不可压缩流体;
- (3) 扩散层、催化剂层和 MEA 都是各向同性;
- (4) 质子交换膜不能有反应气体通过;
- (5) 忽略重力的影响。

具体物理参数以及操作条件如表 2 所示,本研究中讨论的各种流场均采用相同的物理参数以及操作条件。

表 2 物理参数和操作条件

参数	数值
泡沫孔隙率	0.9
GDL 孔隙率	0.6
MEA 当量质量/ $(kg \cdot mol^{-1})$	1100
开路电压/V	1.05
工作压力/Pa	101325
工作温度/K	353.15
阴/阳极相对湿度/%	100/90
阴/阳极计量比	1.5/2

2.3 模型验证

为了验证数值模型的准确性,将计算得到的仿真数据与 Zhang 等^[18]实验数据对比,确保整体模型的准确性,从而提高模拟的可信度。

从图 3 可以看出,整体仿真与实验的误差并不大,虽然存在少许误差,但是模拟值与实验值的相对误差最大仅为 2.57%,均未超过 3%。上述结果表明,所建立的数值模型具有较高的精度,其计算结果能够较好地反映实际实验规律,可以为本研究后续模拟分析提供可靠支撑。

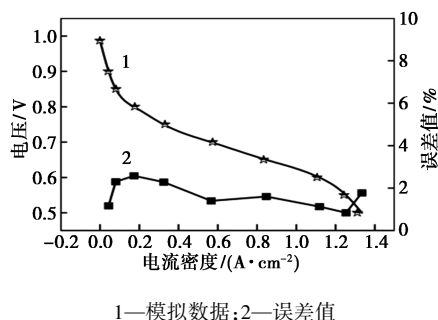


图 3 仿真与实验极化曲线对比

2.4 网格无关性验证

对泡沫金属流场进行不同网格数进行网格无关性验证,计算电压为 0.5 V 时的输出电流密度。电池的输出电流密度伴随网格数量的变化如表 3 所示,继续增加网格的数量,电流密度的误差小于 0.5%,表明电流密度有着足够的精度,综合考虑了结果的准确性以及计算成本,选定 4348976 个网格作为计算的网格单元数量,本文所有的流场模型均采用相同的网格划分方法。

表 3 网格无关性验证结果

网格数	电流密度/ $(A \cdot cm^{-2})$	相对误差/%
2311542	1.177	7.62
3156426	1.208	5.23
4348976	1.275	—
9250345	1.278	0.37

3 结果分析

3.1 孔径梯度排布对 PEMFC 的影响

如图 4 所示,为评估不同梯度设计对电池性能和水气分布均匀性的影响,从入口到出口布置 19 条平行采样线。本研究采用变异系数 ($C.V.$) 来量化分布^[19],其定义如下:

$$C.V. = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(q_k - \bar{q})/\bar{q}]^2} \quad (6)$$

其中, q_k 为第 k 个采样点的参数值; \bar{q} 为参数的平均值; N 为采样点的数量。

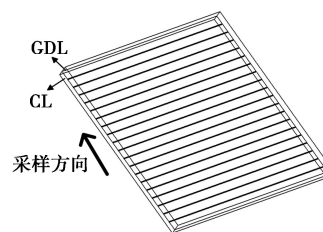


图 4 平行采样线示意图

表 4 详细列出了不同梯度方案的参数。其中 Case1 是拥有均匀泡沫金属流场的模型,其余 4 个是具有不同孔隙密度参数的梯度方案。

表 4 具有不同孔径参数的梯度方案

方案	高氧区	过渡区	高水饱和区	步长
Case1	115PPI	115PPI	115PPI	—
Case2	75PPI	55PPI	35PPI	20PPI
Case3	35PPI	55PPI	75PPI	20PPI
Case4	95PPI	75PPI	55PPI	20PPI
Case5	115PPI	95PPI	75PPI	20PPI

在本研究中,定义孔径从小到大排列为正梯度(如 Case2、Case4、Case5),反之则为负梯度(如 Case3)。比较了在高氧区域使用不同孔径参数对 PEMFC 的影响,3 个流区之间步长都为 20PPI。

如图 5 所示,高氧区 PPI 对电池性能具有显著调节作用,尽管所有正梯度设计的平均 PPI 都低于均匀泡沫金属流场 Case1,但通过有效的重新分配流量,其性能有不同程度的提升。Case5 表现出最优的输出性能,在 0.5 V 下的电流密度达到了 1.3 A/cm²,最大功率密度为 0.65 W/cm²,相较于均匀流场 Case1 提升了约 2.2%。这是因为正梯度设计通过降低渗透率,将氧气导向过渡区和高水饱和区,从而显著缩小了浓度差。相比之下,负梯度设计(Case3)会导致过量反应物集中在高氧区,加剧了不同流区之间的氧浓度梯度以及整体质量传递限制,导致其电流密度和功率密度跌至 1.2 A/cm² 和 0.60 W/cm² 的最低水平。

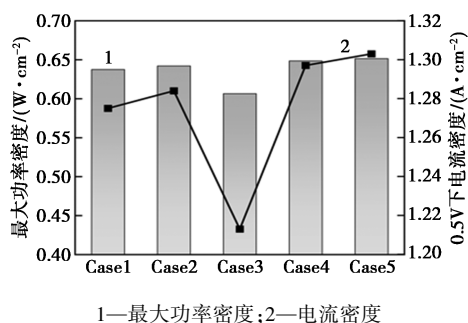


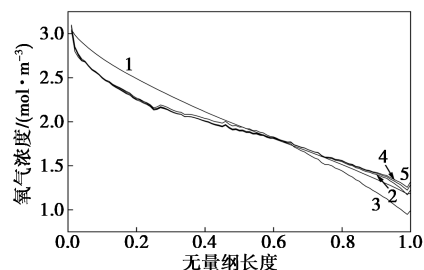
图 5 输出性能

为进一步揭示流场内部的传质特性,本研究从左下入口至右上出口的主对角线提取了氧气摩尔分数分布。图 6(a)为沿对角线氧气浓度分布,各方案起点的氧浓度均维持在 3.1 mol/m³ 左右的高位。随着电化学反应的消耗,不同梯度设计在高水饱和区有明显差异。

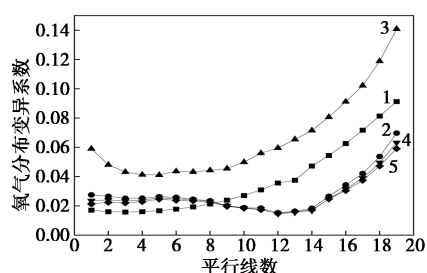
Case5 在全程都表现出最优的氧气维持能力,在对角线结尾(无量纲长度 = 100)处,Case5 的氧浓度仍然保持在 1.32 mol/m³,相较于 Case1 的 1.15 mol/m³,提升了约 11.3%。这是因为 115PPI 的高孔隙密度结构增加了流场内的流动阻力,有效降低局部流速,显著强化了氧气向催化层(CL)的渗透与输送效率,确保其反应界面的氧浓度有着较高水平^[19]。同时,通过渗透率的逐渐降低,将富余反应物导向过渡区和高水饱和区,并结合弱流区 75PPI 的大孔径优势降低了毛细排水阻力,实现了水气平衡。

与之相反的负梯度设计 Case3 在对角线末端产生了严重的氧气饥饿现象。其氧气浓度在进入过渡区后发生断崖式的下跌,末端最低值仅为 0.99 mol/m³,较 Case5 降低了约 25%。这体现了负梯度设计的缺陷,将过量的氧气限制在高氧区,无法向中下游扩散,同时高水饱和区的高 PPI 极大加剧了液态水的积聚,导致氧气传输不到位,限制了电池性能。

图 6(b)定量展示了不同孔径梯度设计下,氧气分布变异系数(C.V.)沿流动方向的动态变化规律。C.V.作为衡量传质均匀性的核心指标,其数值的升高直接反映了局部氧气浓度的剧烈波动以及传质阻力的增加。



(a) 沿对角线氧气浓度分布



(b) 氧气浓度分布均匀性

1—Case1; 2—Case2; 3—Case3; 4—Case4; 5—Case5

图 6 氧气浓度分布分析

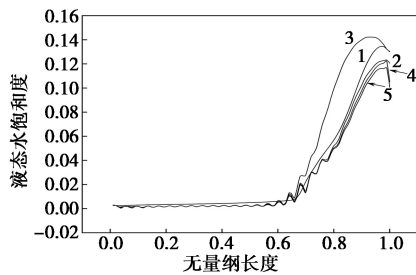
各方案在流道前端的高氧区,即采样线 1-8,均保持了较低的 C.V.值,介于 0.015 至 0.027 之间,其中 Case1 凭借恒定的高 PPI 扩散优势,在起始阶段的均匀性略优于梯度组。然而,在第 9 条平行线后表现出巨大差异,随着反应向中下游进行,水分积累与氧气消耗的叠加效应凸显,各 Case 的 C.V.曲线开始剧烈分化,负梯度设计(Case3)的 C.V.值攀升,在出口区域升至 0.14,约为初始值的 2.38 倍,这表明出口处使用高 PPI 会导致严重的水淹,造成局部氧气饥饿。

相比之下,正梯度设计展现出了卓越的调节能力。数据统计显示,Case5 在 57.89% 的流场区域内 C.V.值均低于 Case1。全部数据表明,Case5 的平均 C.V.值为 0.025,相较于均值为 0.037 的 Case1,显

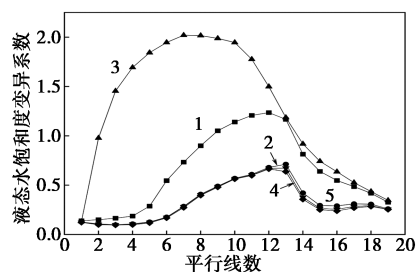
著降低了 31.02%, 同时其峰值仅为 Case3 的 38% 左右, 均匀性的显著提升证明了正梯度设计通过在出口区域提供更大的物理孔径, 有效提升流场内部的均匀性。

图 7(a) 展示了液态水饱和度沿对角线的分布特征, 定量论证了孔径梯度设计对水管理的显著影响。在对角线的前半段, 由于初期生成水极少, 各方案的饱和度均维持在 0.01 以下, 表现出良好的一致性。然而随着反应向过渡区和高水饱和区(无量纲长度 > 0.6) 推进, 水分积累效应凸显。数据表明, Case3 由于在高水饱和区布置了高 PPI 结构, 在无量纲长度 0.93 处达到最高的饱和度峰值 0.142, 导致了严重的水淹风险。相比之下, 正梯度 Case5 通过在高水饱和区采用更大孔径 PPI, 其饱和度峰值仅为 0.116, 相较于 Case3 显著降低了 18.2%, 且明显优于均匀流场 Case1 这种分布特征证明了正梯度设计的有效性。

图 7(b) 进一步定量揭示了液态水饱和度分布变异系数 (C.V.) 沿流动方向的变化特性。分析表明, 与采用均匀孔径的 Case1 相比, 采用正梯度设计的方案在全流场 19 条平行采样线上均实现了更低的变异系数。可以看出, 整体孔径梯度的调整对提升全场液态水饱和度的一致性起到了决定性的作用。



(a) 沿对角线液态水饱和度



(b) 液态水分布均匀性

1—Case1; 2—Case2; 3—Case3; 4—Case4; 5—Case5

图 7 液态水饱和度分析

3.2 基于遗传算法的孔径梯度步长优化

3.2.1 遗传算法优化

基于上文结果分析, 正梯度设计是所有孔径梯

度排布中的最佳类型, 同时在高氧区采用 $PPI = 115$ 可以高效提升电池性能。为了进一步研究不同步长对电池性能的影响, 并为过渡区和高水饱和区确定最佳孔径值, 确保电池拥有最高输出, 同时功耗尽可能小。

选取过渡区孔径 $P1$ 和高水饱和区孔径 $P2$ 作为优化变量, 数学模型如式(7)所示。

$$35 \leq P2 \leq P1 \leq 115 \quad (7)$$

对于 PEMFC, 输出功率 E_{cell} 和系统功耗 E_{con} 的计算如式(8)、式(9)所示。

$$E_{\text{cell}} = U_{\text{cell}} I_{\text{ave}} A_{\text{act}} \quad (8)$$

$$E_{\text{con}} = \Delta p_{\text{ch}} u_{\text{ch}} A_{\text{ch}}^{\text{in}} \quad (9)$$

其中, U_{cell} 为电池输出电压, V; I_{ave} 为流过反应面的平均电流密度, A/m^2 ; A_{act} 、 Δp_{ch} 、 u_{ch} 、 $A_{\text{ch}}^{\text{in}}$ 分别为电池有效反应面积 (m^2)、流道压降 (Pa)、入口流速和流道入口截面积 (m^2)。氢气由氢气罐提供, 空气由空压机提供, 所以本研究将阴极功耗作为系统功耗。为了电池输出能达到最大值, 系统功耗尽可能小, 定义系统功耗与输出功率的比值为目标函数^[20] [式(10)], 当此值达到最小的时候, 代表 PEMFC 性能最优, 其中 k 是一个常数, 本文的设置是 $1e^4$ 。

$$f = k(E_{\text{con}}/E_{\text{cell}}) \quad (10)$$

遗传算法 (GA) 可以通过模拟自然进化过程来获得最优解, 它具有较强的全局优化能力。所以本文选择计算流体动力学 (CFD) 和遗传算法相结合的方式优化孔径梯度步长设计。

使用拉丁超立方方法选取多组点作为数据集, 同时为了简便计算, 确保精度, 保证 $P1 > P2$, 样本点数总共 50 组, 样本点的分布结果如图 8 所示。

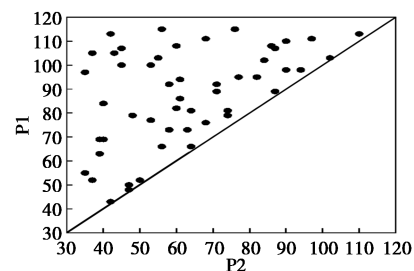


图 8 拉丁超立方抽样结果图

在优化过程中, PEMFC 的工作电压设置为定值 0.5 V, 将迭代次数设置为 50。最终优化结果如图 9 所示。优化完成后, 在适应度 94 998.1 时, 偏差值为 0, 表示此时已经找到全局最优解, 即过渡区 $P1 = 90PPI$, 高水饱和区 $P2 = 60PPI$ 。可以认为是孔径梯度步长的最优参数。

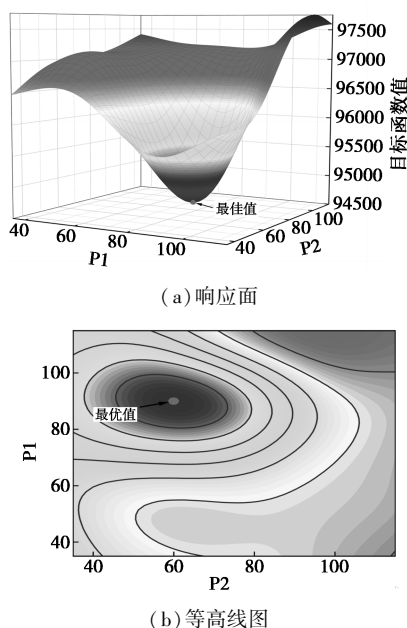


图 9 不同步长对电池性能影响结果

3.2.2 孔径梯度步长优化的验证

为了验证遗传算法优化的有效性,使用 FLU-ENT 软件对得出的最佳孔径梯度参数进行数值模拟,研究整体输出性能与水汽运输能力,并和上文的 PEMFC 的模拟结果进行对比分析。此次模型的设置和上文保持一致。

如图 10 所示,在极化曲线的初始阶段,即工作电压 $> 0.75 \text{ V}$ 的情况下,优化前后的电流密度曲线几乎重合,未表现出明显差异。这是由于在低电流密度下,反应气体消耗量较少且液态水生成率低,电池性能主要受活化极化控制,流场结构的传质优势尚未体现。然而,随着工作电压逐渐降低,电流密度随之增大,两条曲线的差距开始显著拉开,特别是在 0.6 V 以下的低电压区更为明显。这是因为在低工作电压下,由于化学反应剧烈,PEMFC 内部极易发生浓差极化。此时,氧气供应和过量的液态水限制了性能。而通过 GA 优化后的梯度排布通过在高水饱和区引入大孔径泡沫金属,以及在高氧区维持高

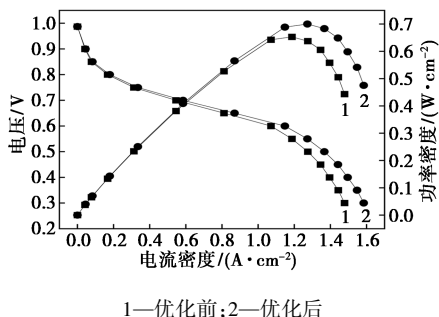
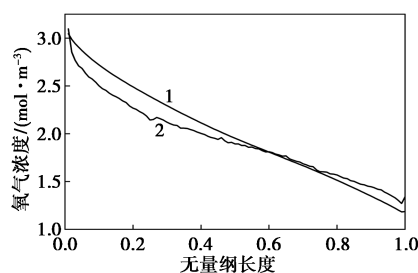


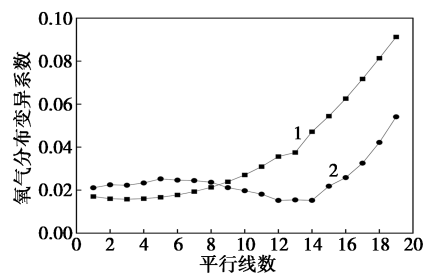
图 10 优化前后输出性能曲线

渗透压降,有效抑制了浓差极化在高电流密度下的过早发生。在 0.5 V 的工况下,优化后的流场功率密度由 0.637 W/cm^2 上升到 0.683 W/cm^2 ,实现了 7.2% 的性能增长。这充分说明针对非均匀泡沫金属的孔径梯度算法优化是有效的,提升了 PEMFC 的输出性能。

如图 11 所示,氧气摩尔浓度沿主对角线路径的分布在末端达到了 1.32145 mol/m^3 ,相较于优化前的方案,显著提升了 11.3%。同时全场平均变异系数 ($C.V.$) 由 0.037 降至 0.0247,不均匀度整体降低了约 33.2%;尤其在容易发生严重水淹的出口高水饱和区,优化后方案的 $C.V.$ 峰值仅为 0.054 左右,远低于优化前的 0.091。这主要是因为通过遗传算法选取的 $60PPI$ 提供了较大的物理孔径,能够和前面孔径梯度配合良好,确保了液态水在高载荷下能够迅速排出液态水并保证氧气传输。从而能够在低电压,高电流的区域保证较好的输出性能。



(a) 沿对角线氧气浓度分布



(b) 氧气分布均匀性

1—优化前;2—优化后

图 11 优化前后氧气分布分析

图 12 为优化前后液态水分布,通过遗传算法优化后的方案在液态水管理能力的提升上有显著的优越性。数据表明,沿主对角路线,优化后的流场的液态水饱和度峰值从 0.13459 下降到 0.11632,降幅达到 13.6%,有效降低峰值。而在分布均匀性方面,效果更为突出。 $C.V.$ 值由 1.235 锐减到 0.665,降幅高达 46.2%。表现出优化后孔径梯度排布的优越性。

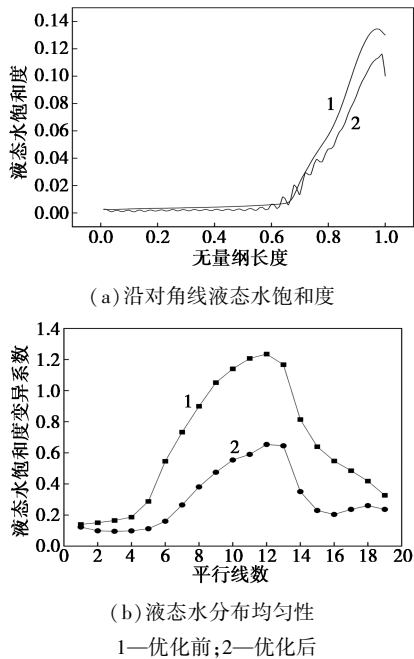


图 12 优化前后液态水分布分析

4 结论

本文设计了一种带孔径梯度的 PEMFC 泡沫金属流场,并建立三维稳态层流的等温模型。通过数值模拟的方法比较了均匀泡沫金属和非均匀泡沫金属在输出性能,氧气分布,液态水分布及其均匀性。利用遗传算法优化了孔径梯度步长参数,并得到了最优参数。具体结论如下。

(1) 研究证明流场从入口到出口采用正梯度设计是优化水气管理的最佳排布规律。相比之下,负梯度设计在高水饱和区采用了高 PPI 结构,导致出口的粘性阻力激增,液态水饱和度峰值达到 0.142,引发了严重的水淹和氧气饥饿。

(2) 正梯度设计通过在高氧区维持高 PPI ,强化氧气向催化层(CL)的垂向渗透;同时在高水饱和区利用低 PPI 的大孔径优势构建排水梯度,将全场水分的变异系数($C.V.$)峰值压在 0.665 以下,较好地避免了水淹。

(3) 通过 GA 优化获得的新孔径排布方案(115-90-60 PPI)打破了固定步长的局限性,相比于均匀流场,优化方案在 0.5 V 下的功率密度提升了 7.2%,性能提升显著。

(4) 优化后的方案在水气管理上表现优越,全场平均氧气分布不均匀度降低了 33.2%,液态水分布均匀性提升了 46.2%,这证明根据流场区域特征优化结构,能让内部反应与水气管理更协调,从而大幅度提高电池功率和运行稳定性。

参考文献

- [1] 王春博,郭亚勤,奥杰,等.基于专利数据的氢燃料电池电堆技术发展态势分析[J].现代化工,2025,45(10):6-14.
- [2] 毕希,孙仁金,张涵.中国氢燃料电池汽车产业发展影响因素及对策分析[J].现代化工,2023,43(10):1-6.
- [3] Yuan W, Tang Y, Yang X, et al. Porous metal materials for polymer electrolyte membrane fuel cells-A review [J]. Applied Energy, 2012, 94:309-329.
- [4] Park J E, Hwang W, Lim M S, et al. Achieving breakthrough performance caused by optimized metal foam flow field in fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 (39): 22074-22084.
- [5] Khatib F N, Wilberforce T, Thompson J, et al. A comparison on the dynamical performance of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with traditional serpentine and an open pore cellular foam material flow channel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(8):5984-5998.
- [6] Afshari E. Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 139(4):2423-2434.
- [7] Suo M, Sun K, Chen R, et al. Oxygen transport in proton exchange membrane fuel cells with metal foam flow fields [J]. Journal of Power Sources, 2022, 521:230937.
- [8] Jo A, Ju H. Numerical study on applicability of metal foam as flow distributor in polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(30):14012-14026.
- [9] Son J, Um S, Kim Y B. Relationship between number of turns of serpentine structure with metal foam flow field and polymer electrolyte membrane fuel cell performance [J]. Renewable Energy, 2022, 188:372-383.
- [10] Wan Z, Sun Y, Yang C, et al. Experimental performance investigation on the arrangement of metal foam as flow distributors in proton exchange membrane fuel cell [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 231:113846.
- [11] Wu Y, Cho J I S, Whiteley M, et al. Characterization of water management in metal foam flow-field based polymer electrolyte fuel cells using *in-operando* neutron radiography [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3):2195-2205.
- [12] Kermani M J, Moein-Jahromi M, Hasheminasab M R, et al. Application of a foam-based functionally graded porous material flow-distributor to PEM fuel cells [J]. Energy, 2022, 254:124230.
- [13] Tao X, Zeng Z, Liu H, et al. PEM fuel cell with non-uniform porous metal foam as cathode flow field [J]. Applied Energy, 2025, 380:124938.
- [14] Kang D G, Lee D K, Choi J M, et al. Study on the metal foam flow field with porosity gradient in the polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. Renewable Energy, 2020, 156:931-941.
- [15] Sun Y, Lin Y, Wang Q, et al. Design and optimization of bilayer structure in metal foam flow field for proton exchange membrane fuel cell [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257:124305.
- [16] Zhang Z, Yan G, Sun M, et al. Pore-scale simulation of forced convection heat transfer in metal foams with uniform and gradient structures [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225:120074.
- [17] Shin D K, Yoo J H, Kang D G, et al. Effect of cell size in metal foam inserted to the air channel of polymer electrolyte membrane fuel cell for high performance [J]. Renewable Energy, 2018, 115:663-675.
- [18] Zhang Y, Shao J, Tao Y. Numerical study of porous flow field designs for proton exchange membrane fuel cells [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(2):1894-1908.
- [19] Zeng Z, Yan C, Li Q, et al. Transport enhancement of proton exchange membrane fuel cell with non-uniform metal foam flow field [J]. Journal of Power Sources, 2025, 657:238158.
- [20] 彭超. PEMFC 流道结构优化设计及其水传输特性数值模拟研究 [D]. 杭州:中国计量大学, 2023. ■