文章编号:1674-7607(2026)10-0062-12 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250177

质子交换膜燃料电池反应流道仿生设计与性能强化

刘 赟[1,2], 杨大江[1,2], 曾 梁[1,2], 孔钰函[1,2], 李永华[1,2]
(1. 华北电力大学 燕赵电力实验室, 河北保定 071003;
2. 华北电力大学 动力工程系, 河北保定 071003)

摘 要: 构建了新型仿生叶脉反应流道结构,并进一步探究了叶脉弯曲幅度和分支角度对燃料电池性能的影响。结果表明:仿生叶脉反应流道能够显著提升燃料电池性能,同时增大弯曲幅度,可显著提升燃料电池反应性能与电输出性能;而分支角度的强化依赖于弯曲幅度,即小幅度下增大角度可提升性能,大幅度时则产生抑制作用。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 仿生流道; 传热传质性能强化; 电输出性能
中图分类号:TK91 **文献标志码:**A **学科分类号:**480.40

Biomimetic Design and Performance Enhancement of Reaction Channel for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

LIU Yun[1,2], *YANG Dajiang*[1,2], *ZENG Liang*[1,2], *KONG Yuhan*[1,2], *LI Yonghua*[1,2]
(1. Yanzhao Electric Power Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

Abstract: A novel bionic leaf vein reaction channel structure was constructed, and further investigated the effects of leaf vein bending amplitude and branching angle on the performance of fuel cell. Results show that the bionic leaf vein reaction channel can significantly enhance the performance of fuel cell, and increasing the bending amplitude substantially improves the reaction performance and electrical output performance of the fuel cell. The enhancement of the branching angle is dependent on the bending amplitude, i. e. slightly increasing the bending angle can improve performance, but increasing it significantly produces an inhibitory effect.

Key words: proton exchange membrane hydrogen fuel cell; bionic flow channel; heat and mass transfer performance enhancement; electrical output properties

燃料电池作为一种高效能量转化装置,凭借其模块化设计、低噪音运行和能量转化率高等优点,已成为氢能的重要利用方式之一[1-2]。相比于其他类型的燃料电池,氢燃料电池因具备运行稳定、无污染物排放以及可低温运行等优势而备受关注[3]。目前常见的氢燃料电池有碱性燃料电池(AFC)与质子

收稿日期:2025-03-28 修订日期:2025-05-20
作者简介:刘 赟(1980—),女,湖南安化人,副教授,博士,研究方向为太阳能热化学制燃料,E-mail: liuyunlucia@ncepu. edu. cn。

交换膜燃料电池（PEMFC）。但需注意的是，AFC 使用的电解液会与二氧化碳反应从而降低电池性能，对反应物纯度要求严苛。相比之下，PEMFC 在功率密度、使用寿命和运行效率等方面更具优势，已被广泛应用于交通动力和分布式供能系统[4-5]。尽管 PEMFC 技术日趋成熟，但其实际应用仍面临两大技术瓶颈。第一，系统热管理问题：当工作温度超过 60～80 ℃的适宜区间时，质子交换膜和催化层将加速老化，直接影响电池使用寿命，导致电堆性能降低。第二，反应效率提升受限：生成水在电极表面堆积引发的“水淹”现象会阻碍反应物传输，进而削弱电池反应性能[6-7]。因此，为了防止 PEMFC 中的重要组件过热并提高内部反应性能，有效的冷却散热以及反应流道内高效的传质性能至关重要。

为改善燃料电池反应性能，一些学者尝试强化扩散层性能来改善反应气体和水管理特性。Mortazavi 等[8]通过调控扩散层表面聚四氟乙烯（PTFE）涂层含量，揭示了疏水性对液滴动力学的影响规律。结果表明，高 PTFE 涂层形成的低粗糙度扩散层表面可促使液滴以更小直径脱离。Koresawa 等[9]发现所构建的疏水/亲水混合分布扩散层的亲水区和疏水区边界附近会形成氧扩散路径，从而证实在异质润湿界面可构建高效氧扩散通道。Forner-Cuenca 等[10]通过辐射诱导将亲水性化合物聚合到疏水聚合物涂层上，以生成具有局部疏水性变化的扩散层，并进一步开发了一种具有不规则疏水区域的扩散层[11]。学者们还系统探究了梯度孔隙率分布对气体扩散层疏水特性的调控机制。Vijay 等[12]利用毛细效应制备了聚四氟乙烯基梯度孔隙扩散层。结果表明，相较于均匀孔隙结构，级孔隙率扩散层的疏水性能更佳，可显著强化燃料电池的水管理效率。Zhan 等[13]通过数学模型揭示了孔隙梯度定向设计的优势：沿流动方向设置梯级孔隙率可有效降低扩散层内部水饱和度。Zhang 等[14]发现阴极扩散层梯度孔隙扩散层的最优孔隙率受工况参数影响：随着 PEMFC 工作温度的降低以及空气相对湿度、电池工作电压的增加，最佳孔隙率将升高，而工作压力对最佳孔隙率没有直接影响。在催化层结构优化方面，Ahn 等[15]发现低 Pt 含量催化层的厚度增加会导致传质受阻，造成“水淹”现象，从而影响燃料电池的性能。

另一方面，流道结构设计是提高燃料电池性能的重要途径。合理的燃料电池流道设计可以提高燃料电池整体性能。Xu 等[16]研发的对流增强蛇形流道（CESFF）是通过改进流体运动模式，使电池性能稳定性和冷却效率得到双重提升。Nam 等[17]提出了一种多通道蛇形流通道（MPSFF）设计，并将其应用于反应流道以改善肋下对流。储旭等[18]采用流道内使用挡板堵塞的方法，研究了凸字排布、顺排和逆排三种挡板排布方式，并发现顺排布置性能最优。Sasmito 等[19]提出的复合式流道集成了多种流道优势特征。数值模拟结果显示该流道的泵功损耗较传统流道降低 18%，且实现了热场分布、水气输运等多物理场协同优化。Li 等[20]通过梯度变化设计截面尺寸，提出了渐变式非均匀流道。该设计显著降低了流道的极值温度。

良好的反应流道结构能够提升反应物在膜电极内的传输效率，同时能够使反应物分布更均匀，从而提升整体电池输出性能。因此，本文借鉴植物叶脉的高效传质特性，构建仿生叶脉反应流道结构。通过对比不同流道结构对燃料电池反应性能以及电输出特性的影响，确定 PEMFC 反应流道性能强化方案。

1　仿生流道模型

为提高质子交换膜燃料电池内部反应物的流动传输并改善反应物分布情况，强化燃料电池性能，本文将反应流道划分成多个主流与支流耦合的小区域，各分支按一定比例分布，将叶脉弯曲幅度与分支角度两大形貌特征相结合，设计了一种新型仿生叶脉反应流道。

1.1　物理模型

单层质子交换膜燃料电池由双极板、扩散层、电化学催化层以及质子交换膜组成，基本结构如图 1 所示。为强化反应气体在反应流道内的流动传输，与常见的 Y 型叶脉仿生结构不同，本文提出了一种具有叶脉结构的反应流道。单个质子交换膜燃料电池物理模型如图 2 所示。其中：a 为流道分支角度；l 为叶脉弯曲幅度；d_1 为反应流道长度；d_2 为弯曲流道的波长；d_3 为双极板长度；d_4 为双极板厚度；d_5 为单个质子交换膜燃料电池厚度；d_6 为反应流道间距；d_7 为反应流道截面长度。

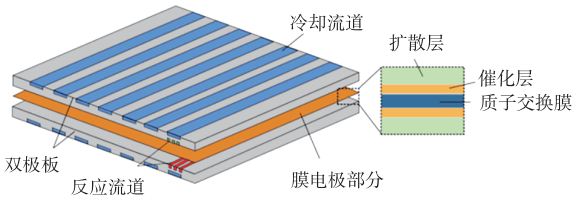
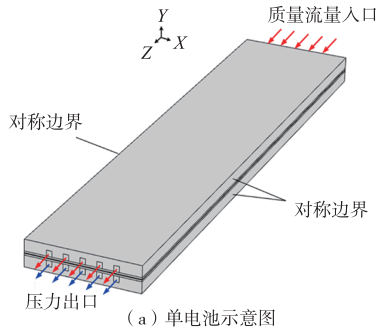
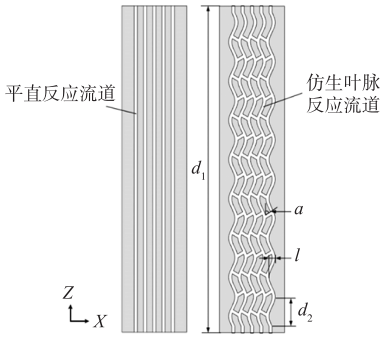


图 1　质子交换膜燃料电池示意图

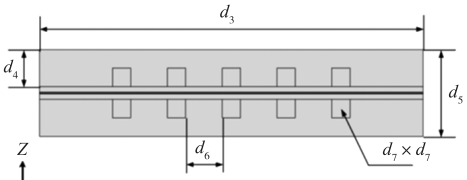
Fig. 1　Schematic diagram of PEMFC



(a) 单电池示意图



(b) 平直反应流道与仿生叶脉反应流道



(c) 单电池模型关键尺寸

图 2 单个质子交换膜燃料电池物理模型

Fig. 2 Physical model of single PEMFC

为深入解析流道形貌参数对质子交换膜燃料电池反应性能的影响,特别构建了包含 3 种弯曲幅度和 3 种叶脉分支角度的组合方案,形成了 9 组特征化模型系统,并与平直反应流道进行了对比分析。单电池模型尺寸参数如表 1 所示。不同反应流道结构尺寸如表 2 所示。其中,Case0 为平直反应流道。单电池模型材料关键参数如表 3 所示。

表 1 单电池模型尺寸参数

Tab. 1 Size parameters of single cell model 单位:mm

几何参数	数值
d_1	100
d_2	30
d_3	21
d_4	2
d_5	4.69
d_6	2
d_7	1
气体扩散层(GDL)厚度	0.3
催化层(CL)厚度	0.02
质子交换膜厚度	0.05

表 2 不同反应流道的结构尺寸

Tab. 2 Structure size of different flow channels

模型	l/mm	a/(°)
Case0		
Case1	10	30
Case2	10	45
Case3	10	60
Case4	20	30
Case5	20	45
Case6	20	60
Case7	30	30
Case8	30	45
Case9	30	60

表 3 单电池模型材料关键参数

Tab. 3 Key parameters of single cell model material

部件	参数	数值
双极板	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	100
	电导率/(S·m^{-1})	1 000 000
催化层	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	10
	电导率/(S·m^{-1})	5 000
气体扩散层	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	10
	电导率/(S·m^{-1})	5 000
质子交换膜	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	2
	电导率(S·m^{-1})	10^{-16}

1.2 数学模型

假设质子交换膜燃料电池内的流体是连续的,则连续性方程为

$$\nabla\cdot(\varepsilon\rho U)=S_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中:ε 为孔隙率;ρ 为密度,kg/m^3;U 为速度,m/s;S_{m} 为质量源项。

对于阴阳极流道区域,孔隙率 ε 为 1。质量源项 S_{m} 只存在于阴阳极催化层中,其余区域均为 0。

对于阳极催化层,有

$$S_{\mathrm{m}}=S_{\mathrm{H_2}}=-\frac{M_{\mathrm{H_2}}}{2F}i_{\mathrm{a}} \tag{2}$$

对于阴极催化层,有

$$S_{\mathrm{m}}=S_{\mathrm{H_2O}}+S_{\mathrm{O_2}}=\frac{M_{\mathrm{H_2O}}}{2F}i_{\mathrm{c}}-\frac{M_{\mathrm{O_2}}}{4F}i_{\mathrm{c}} \tag{3}$$

式中:$S_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气的消耗速率,kg/(m^2·s);$S_{\mathrm{H_2O}}$ 为气态水的生成速率,kg/(m^2·s);$S_{\mathrm{O_2}}$ 为氧气的消耗速率,kg/(m^2·s);$M_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气的摩尔质量,kg/mol;$M_{\mathrm{H_2O}}$ 为水的摩尔质量,kg/mol;$M_{\mathrm{O_2}}$ 为氧气的摩尔质量,kg/mol;F 为法拉第常数,C/mol;i_{a} 为阳极电流密度,A/m^2;i_{c} 为阴极电流密度,A/m^2。

动量方程为

$$\nabla\cdot(\varepsilon\rho UU)=-\varepsilon\nabla p+\nabla\cdot(\varepsilon\mu\nabla U)+S_{\mathrm{u}} \tag{4}$$

式中：p 为压力，Pa；μ 为动力黏度，Pa·s；S_{u} 为动量源项。

对于阴阳极流道区域，动量源项为 0，而对于多孔介质区域，动量源项为

$$S_{\mathrm{u}}=-\frac{\mu}{K}\varepsilon\rho U \tag{5}$$

式中：K 为渗透率。

能量方程为

$$\nabla\cdot(\varepsilon\rho c_p UT)=\nabla\cdot(k_{\mathrm{eff}}\nabla T)+S_{\mathrm{Q}} \tag{6}$$

式中：k_{eff} 为有效导热系数，W/(m·K)；S_{Q} 为能量源项；c_p 为流体在恒压下的比热容，J/(kg·K)；T 为温度，K。

能量源项包括化学反应产生的热、欧姆热以及过电位产生的热量，计算式为

$$S_{\mathrm{Q}}=i_2R_{\mathrm{ohm}}+\beta S_{\mathrm{H_2O}}h_{\mathrm{reaction}}+i_{\mathrm{o,a}}\eta+i_{\mathrm{o,c}}\eta \tag{7}$$

式中：β 为化学能转化为热能的比率；h_{reaction} 为反应焓，kJ/kg；η 为过电位；R_{ohm} 为单位体积的欧姆电阻，Ω·m；i_2 为离子电流密度，A/m²；$i_{\mathrm{o,a}}$ 为阳极的交换电流密度，A/m²；$i_{\mathrm{o,c}}$ 为阴极的交换电流密度，A/m²。

反应气体在反应流道流动的同时，会向扩散层和催化层渗透。氢气经过扩散层到达催化层后，会在催化层表面的铂催化下进行反应。氢气失去电子变成氢离子，并经湿润的质子交换膜到达阴极。反应方程式为

$$2H_2=4H^++4e^- \tag{8}$$

阴极空气中的氧气到达催化层后，同样在铂的催化下，与阳极扩散而来的氢离子以及双极板输运来的电子进行反应，生成水。反应方程式为

$$O_2+4H^++4e^-=2H_2O \tag{9}$$

总反应方程为

$$2H_2+O_2=2H_2O \tag{10}$$

组分方程为

$$\nabla\cdot(\varepsilon\rho c_k)=\nabla\cdot(D_{\mathrm{eff},k}\nabla c_k)+S_k \tag{11}$$

式中：c_k 为组分浓度，下标 k 在燃料电池阳极中表示氢气和水蒸气，阴极中表示氧气、氮气和水蒸气；$D_{\mathrm{eff},k}$ 为组分有效扩散系数；S_k 为组分源项，除催化层外，其余区域组分源项均为 0。

催化层中氢气、氧气和水的组分源项分别为

$$S_{\mathrm{H_2}}=-\frac{M_{\mathrm{H_2}}}{2F}i_{\mathrm{a}} \tag{12}$$

$$S_{\mathrm{O_2}}=-\frac{M_{\mathrm{O_2}}}{4F}i_{\mathrm{c}} \tag{13}$$

$$S_{\mathrm{H_2O}}=-\frac{M_{\mathrm{H_2O}}}{2F}i_{\mathrm{c}} \tag{14}$$

Butler-Volmer 方程为

$$R_{\mathrm{a}}=(\xi_{\mathrm{a}}j_{\mathrm{ref}})\left(\frac{c_{\mathrm{H_2}}}{c_{\mathrm{H_2,ref}}}\right)^{\gamma_{\mathrm{a}}}\left(\mathrm{e}^{\frac{\alpha_{\mathrm{a}}F\eta_{\mathrm{a}}}{RT}}-\mathrm{e}^{\frac{\alpha_{\mathrm{c}}F\eta_{\mathrm{c}}}{RT}}\right) \tag{15}$$

$$R_{\mathrm{c}}=(\xi_{\mathrm{c}}j_{\mathrm{ref}})\left(\frac{c_{\mathrm{O_2}}}{c_{\mathrm{O_2,ref}}}\right)^{\gamma_{\mathrm{c}}}\left(\mathrm{e}^{\frac{\alpha_{\mathrm{a}}F\eta_{\mathrm{c}}}{RT}}-\mathrm{e}^{\frac{\alpha_{\mathrm{c}}F\eta_{\mathrm{a}}}{RT}}\right) \tag{16}$$

式中：ξ_{a}、ξ_{c} 分别为阳极和阴极活性比表面积系数，m^{-1}；j_{ref} 为参考交换电流密度，A/m²；$c_{\mathrm{H_2}}$、$c_{\mathrm{O_2}}$ 分别为氢气和氧气的实际浓度，kmol/m³；$c_{\mathrm{H_2,ref}}$、$c_{\mathrm{O_2,ref}}$ 分别为氢气和氧气的参考浓度，kmol/m³；γ_{a}、γ_{c} 分别为阳极和阴极浓度指数；α_{a}、α_{c} 分别为阳极和阴极传递系数；η_{a}、η_{c} 分别为阳极和阴极活化过电位，V；R 为气体常数；R_{a}、R_{c} 分别为阳极和阴极反应速率，A/m³。

电流守恒方程为

对于电流：

$$\nabla\cdot(\sigma_{\mathrm{sol}}\nabla\phi_{\mathrm{sol}})+R_{\mathrm{sol}}=0 \tag{17}$$

对于离子电流：

$$\nabla\cdot(\sigma_{\mathrm{mem}}\nabla\phi_{\mathrm{mem}})+R_{\mathrm{mem}}=0 \tag{18}$$

式中：σ_{sol} 为固相中的电导率，S/m；ϕ_{sol} 为固相电势，V；R_{sol} 为电子电流源项，A/m³；σ_{mem} 为膜相中的电导率，S/m；ϕ_{mem} 为膜相电势，V；R_{mem} 为质子电流源项，A/m³。

在阴阳极任一体积元内，有

$$R_{\mathrm{sol}}+R_{\mathrm{mem}}=0 \tag{19}$$

对于固相阳极侧：$R_{\mathrm{sol}}=-R_{\mathrm{a}}(<0)$；阴极侧：$R_{\mathrm{mem}}=+R_{\mathrm{a}}(>0)$。

对于膜相阳极侧：$R_{\mathrm{sol}}=+R_{\mathrm{c}}(<0)$；阴极侧：$R_{\mathrm{mem}}=+R_{\mathrm{c}}(<0)$。

阴阳极活化过电位为

$$\eta_{\mathrm{a}}=\phi_{\mathrm{sol}}-\phi_{\mathrm{mem}} \tag{20}$$

$$\eta_{\mathrm{c}}=\phi_{\mathrm{sol}}-\phi_{\mathrm{mem}}-V_{\mathrm{oc}} \tag{21}$$

式中：V_{oc} 为开路电压，V。

为了综合考虑不同反应流道的输出性能和流动阻力，评价不同结构反应流道的性能差异，本文引入净输出功率 W_{net}[21]。

$$W_{\mathrm{net}}=W_{\mathrm{FC}}-W_{\mathrm{P}} \tag{22}$$

式中：W_{FC} 为输出功率，W；W_{P} 为寄生功率[22]，W。

寄生功率为

$$W_P=\Delta p u_{in} A_{ch,in}/\xi_p \tag{23}$$

式中：u_{in}为入口流速，m/s；$A_{ch,in}$为入口截面积，m^2；Δp 为进出口压差，Pa；ξ_p 为压缩机效率，本研究中为 70%[23-24]。

1.3 边界条件

阴阳极反应流道入口采用质量流量入口边界条件。

$$\begin{cases} q_m=q_{m,in,a} \\ T=T_0 \\ w_{H_2}=\dfrac{q_{m,H_2}}{q_{m,in,a}} \\ w_{H_2O}=\dfrac{q_{m,H_2O,a}}{q_{m,in,a}} \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} q_m=q_{m,in,c} \\ T=T_0 \\ w_{H_2}=\dfrac{q_{m,O_2}}{q_{m,in,c}} \\ w_{H_2O}=\dfrac{q_{m,H_2O,c}}{q_{m,in,c}} \end{cases} \tag{25}$$

式中：q_m 为质量流量，kg/s；$q_{m,in,a}$、$q_{m,in,c}$分别为阳极和阴极入口总质量流量，kg/s；T_0 为初始温度，K；w_{H_2}、w_{H_2O}分别为氢气和水蒸气质量分数；q_{m,H_2}、q_{m,O_2}分别为阳极入口氢气和阴极入口氧气质量流量，kg/s；$q_{m,H_2O,a}$、$q_{m,H_2O,c}$分别为阳极和阴极入口水蒸气质量流量，kg/s。

阴阳极反应流道出口采用压力出口边界条件。

$$p=p_{out},\ \nabla w_i=0 \tag{26}$$

式中：p_{out}为出口压力，Pa；w_i 为混合气体中第 i 种组分的质量分数。

阳极双极板端面设为接地，阴极双极板端面设为工作电压，侧表面设为对称边界，其余壁面均为无滑移条件。

1.4 数值方法

首先使用 COMSOL 6.0 软件绘制燃料电池的仿生叶脉反应流道结构，并进一步将流道导入 Ansys Fluent 2022R2 软件进行数值模拟，采用 PEM Fuel Cell 模块来对单个质子交换膜燃料电池进行多物理场耦合求解。动量方程对流项和能量方程项均采用一阶迎风格式离散，速度与压力的耦合算法为 SIMPLE 算法。当残差曲线趋于稳定且整个方程的残差小于 10^{-4}时，可以认为计算收敛。质子交换膜燃料电池的工作和电化学参数如表 4 所示。

表 4 质子交换膜燃料电池的工作和电化学参数

Tab. 4 Working and electrochemical parameters of PEMFC

参数	数值
工作温度/K	353
阳极氢气过量系数	2
阴极空气过量系数	2.5
阳极交换系数	0.5
阴极交换系数	1
入口气体相对湿度/%	100
工作压力/Pa	2×10^5
气体扩散层孔隙率	0.6
催化层孔隙率	0.2
膜当量/(kg·kmol^{-1})	1 100
阳极参考交换电流密度/(A·m^{-2})	10^4
阴极参考交换电流密度/(A·m^{-2})	10
催化层活性比表面积/m^{-1}	2×10^5

2 独立性验证

2.1 模型验证

利用 Gong 等[21]得到的实验数据，验证本文数值模型的准确性。图 3 为数值模拟结果与实验数据对比。数值模拟得出的极化曲线与实验数据的趋势接近，且二者相对误差仅为 3.9%，在允许范围内。因此，可认为本文所采用的数值模型可靠。

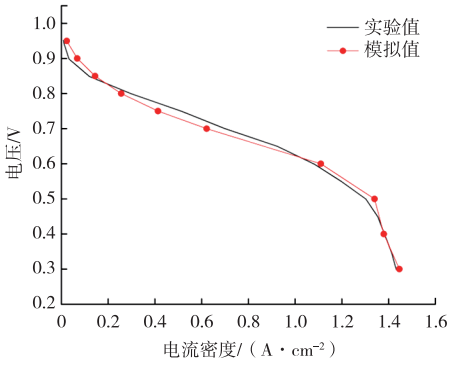


图 3 数值模拟结果与实验数据对比

Fig. 3 Comparison between numerical simulation results and experimental data

2.2 网格无关性验证

为了考察网格密度对数值模拟结果的影响，采用合适的网格系统对网格进行细化。采用 3 710（XY 横截面）×199（Z 方向）、3 710×248、3 710×284、3 710×330、3 710×496 共 5 种不同网格数量对质子交换膜燃料电池的三维网格进行无关性验证。图 4 为相同边界条件、不同网格数量下的数值

模拟结果。在 0.7 V 工作电压下，网格数量 3 710×330 与 3 710×496 的相对误差仅为 0.027%。因此，为了兼顾计算精度和计算效率，选择 3 710×330 的网格数量进行后续计算。

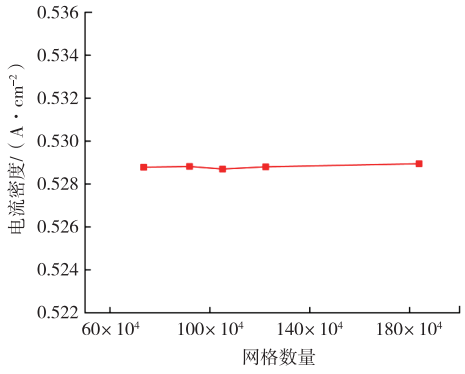


图 4　0.7 V 工作电压下电流密度随网格数量的变化

Fig. 4　Variation of current density with grid number at 0.7 V operating voltage

3　结构尺寸对 PEMFC 性能的影响

3.1　叶脉弯曲幅度对反应性能的影响

催化层中反应物浓度是影响燃料电池反应的重要因素之一，因此首先需探讨反应流道对反应物浓度分布的影响。为了研究仿生叶脉反应流道中叶脉弯曲幅度 l 对质子交换膜燃料电池反应性能的影响，设计了 3 种不同弯曲幅度的流道，并在相同的叶脉分支角度 a 下进行对比。

图 5 为叶脉弯曲幅度对 GDL 和 CL 交界处氧气质量分数分布的影响。当叶脉分支角度为 30°、不同叶脉弯曲幅度时，与 Case0 相比，仿生叶脉反应流道设计能够显著提升氧气扩散到催化层的能力，且 3 种仿生反应流道均使得扩散层附近氧气质量分数更大且更加均匀。在仿生叶脉反应流道中，当叶脉分支角度为 30°时，随着叶脉弯曲幅度的增大，氧气质量分数更大且整体分布更加均匀。这是因为反应流道较大的弯曲幅度能够增加反应物的扰动，提升反应物通过扩散层的能力。反应物浓度的增加且分布均匀有利于燃料电池反应的进行，因此可以得出：当叶脉分支角度为 30°时，Case7 结构更优。当叶脉分支角度分别为 45°和 60°时，3 种仿生反应流道的氧气质量分数以及整体分布均匀性同样显著高于平直反应流道。对比不同弯曲幅度的反应流道时可以看出，当分支角度不变时，随着弯曲幅度的增大，氧气质量分数逐渐增加，整体分布变得更加均匀。

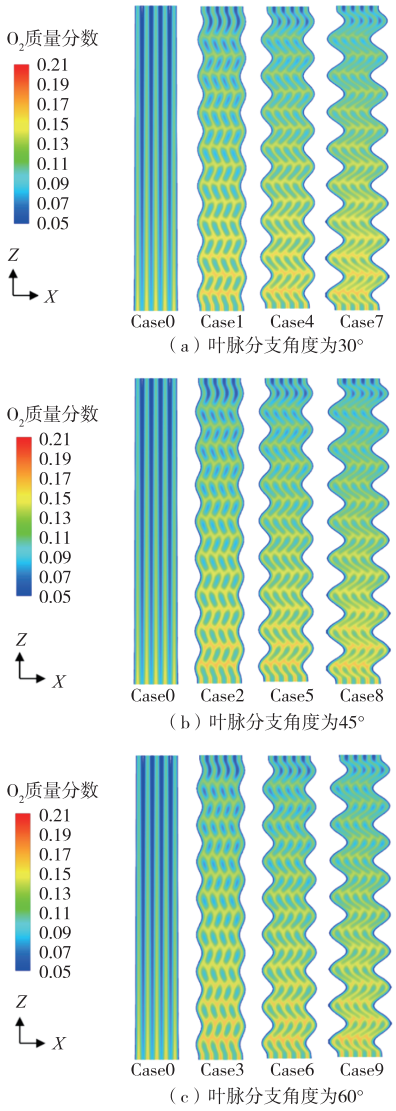


图 5　叶脉弯曲幅度对 GDL 和 CL 交界处氧气质量分数的影响

Fig. 5　Effect of leaf vein bending amplitude on oxygen mass fraction at GDL and CL junction

探讨质子交换膜燃料电池反应性能优劣时，质子交换膜电流密度是一个重要参考指标。电流密度越大，且整体分布越均匀，则燃料电池反应流道的反应性能越好，进而影响燃料电池整体性能。图 6 为叶脉分支角度分别为 30°、45°和 60°，不同叶脉弯曲幅度时质子交换膜电流密度分布云图。相对于平直反应流道，其他 3 种仿生叶脉反应流道的电流密度更大且整体分布更加均匀。对比 3 种仿生反应流道可以得出：在叶脉分支角度不变时，叶脉弯曲幅度越大，整体电流密度分布越均匀，且叶脉分支角度的变化对其影响不明显。这是因为反应物浓度分布会对电流密度分布产生一定影响。当反应物浓度增加且分布较均匀时，燃料电池的反应性能会提高，相应的电流密度同样也会增大且分布更加均匀。此外，结合图 5 来看，在高电流密度区域，这种仿生叶脉结构

的反应流道内氧气质量分数更大且分布较平直反应流道内的更加均匀，说明仿生叶脉结构能够一定程度上促进反应物传输并且改善燃料电池在高电流密度区域的“水淹”现象。

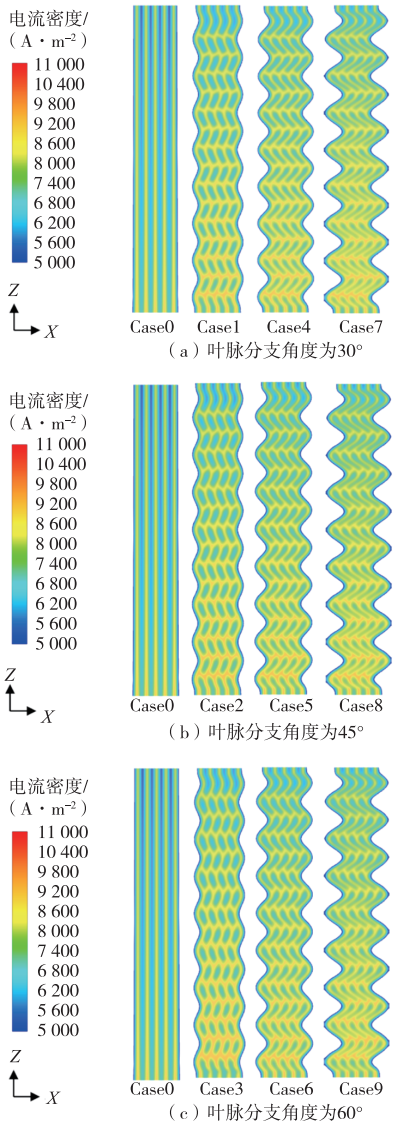


图 6 叶脉弯曲幅度对质子交换膜电流密度分布的影响

Fig. 6 Effect of leaf vein bending amplitude on current density distribution of proton exchange membrane

图 7 为平直反应流道和 3 种不同弯曲幅度的反应流道在叶脉分支角度均为 30°时的极化曲线和功率密度。电流密度总体趋势是随着工作电压降低而逐渐升高。工作电压在极化曲线前后均有骤降趋势。这是因为在低电流密度时，燃料电池内部的活化极化损失较大，而在高电流密度时，燃料电池内部浓度极化损失较大。功率密度随着电流密度增大呈先增大后减小的趋势。在工作电压为 0.5～0.7 V 时，燃料电池能达到较大的输出功率。在低电流密度时，3 种弯曲幅度的反应流道与平直反应流道的极化曲线和功率密度曲线几乎重合；而在高电流密度时，3 种弯曲幅度下反应流道的燃料电池输出功率均明显高于平直反应流道。随着反应流道弯曲幅度的增大，质子交换膜燃料电池的输出功率逐渐增大，其中 Case7 结构的功率密度最大，达到 0.56 W/cm²。

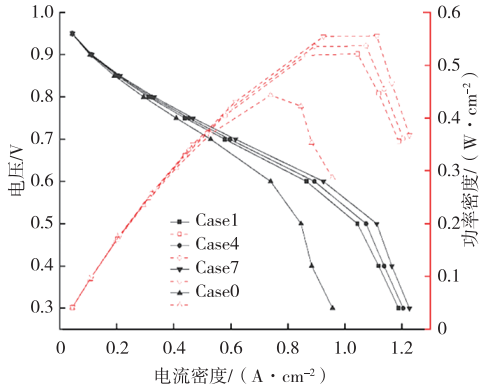


图 7 分支角度为 30°下弯曲幅度对极化曲线和功率密度的影响

Fig. 7 Effect of bending amplitude on polarization curve and power density at the branch angle of 30 °

图 8 为平直反应流道和 3 种弯曲幅度的反应流道在叶脉分支角度均为 45°时的极化曲线和功率密度。3 种仿生反应流道燃料电池的极化曲线随着工作电压的减小到达高电流密度区的速度更快，反应性能更佳。而在 3 种仿生反应流道中，弯曲幅度最大的 Case8 的极化曲线随着工作电压的减小到达高电流密度区的速度最快，说明 Case8 结构的燃料电池反应性能较好。但是三者差距在电流密度到达 1.2 A/cm² 后变得很小。同样，3 种仿生反应流道的最大输出功率密度均明显高于平直反应流道。这是由于仿生反应流道的反应性能更佳，燃料电池在高工作电压下仍然保持较高的电流密度。对比 3 种反应流道的功率密度曲线可以得出，在叶脉分支角度均为 45°时，Case8 结构的燃料电池输出功率密度最高，达到 0.55 W/cm²。图 9 展示了平直反应流道和 3 种弯曲幅度的反应流道在叶脉分支角度均为 60°时的极化曲线和功率密度。与叶脉分支角度为 30°和 45°的极化曲线相比，叶脉分支角度为 60°时 3 种反应流道结构的极化曲线整体趋势接近。同样，3 种功率密度曲线差距也有所缩小。可见，叶脉弯曲幅度对燃料电池反应及输出性能的影响会随着叶脉分支角度的减小而减小。这是因为在大叶脉分支角度时，叶脉分支相当于划分出一条相对较直的流道，因此反应气体可更多地从弯曲的叶脉主流道流向叶脉分支，使得主流道的影响变小。

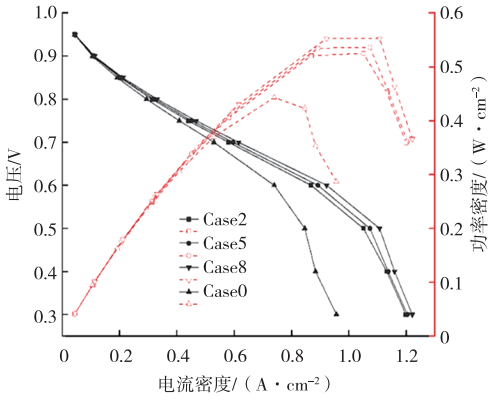


图 8　分支角度为 45°下弯曲幅度对极化曲线和功率密度的影响

Fig. 8　Effect of bending amplitude on polarization curve and power density at the branch angle of 45 °

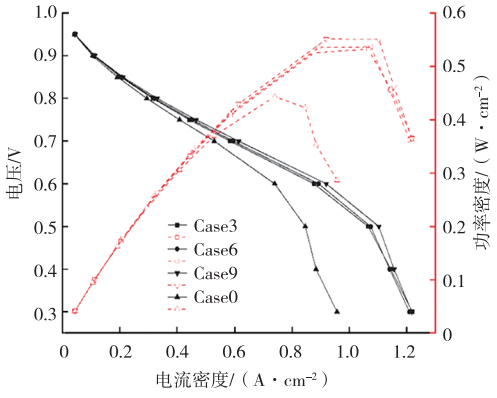


图 9　分支角度为 60°下弯曲幅度对极化曲线和功率密度的影响

Fig. 9　Effect of bending amplitude on polarization curve and power density at the branch angle of 60 °

3.2　叶脉分支角度对反应性能的影响

为了研究仿生叶脉反应流道中的叶脉分支角度对质子交换膜燃料电池反应性能的影响，设计了 3 种不同分支角度的反应流道，并在相同的叶脉弯曲幅度下进行了对比。

图10 为不同叶脉分支角度对 GDL 和 CL 交界处氧气质量分数分布的影响。如图 10(a)所示，在弯曲幅度均为 10 mm 时，叶脉分支的变化对氧气扩散几乎没有影响，扩散层与催化层交界处整体氧气质量分数分布基本没有变化。这是由于相对于整体反应流道来说，分支角度的变化并不能显著增大流道内反应物的扰动。在弯曲幅度分别为 20 和 30 mm 时，扩散层与催化层交界处氧气质量分数的变化同样不明显。分支角度为 30°时氧气质量分数分布比分支角度为 45°和 60°时整体更加均匀。这说明随着叶脉弯曲幅度的增加，叶脉分支角度对反应物的扰动会逐渐增加，对氧气扩散的影响也会逐渐增加。

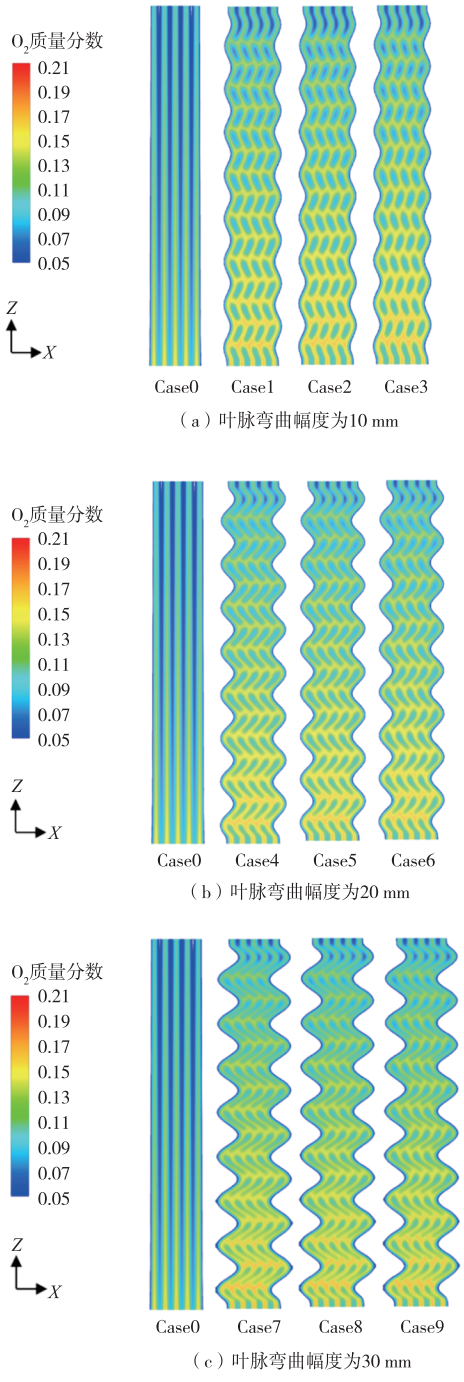


图 10　叶脉分支角度对 GDL 和 CL 交界处氧气质量分数的影响

Fig. 10　Effects of different branch angles of leaf vein on oxygen mass fraction at GDL and CL junction

图 11 为不同叶脉分支角度对质子交换膜电流密度分布的影响。当叶脉弯曲幅度为 10 mm 时，随着叶脉分支角度的增大，质子交换膜电流密度整体逐渐增大，当分支角度为 60°时电流密度达到最大；当叶脉弯曲幅度分别为 20 和 30 mm 时，质子交换膜电流密度随叶脉分支角度的变化并不明显。这是由于分支角度的变化对反应物扰动较小，对反应物的扩散能力提升效果不明显。

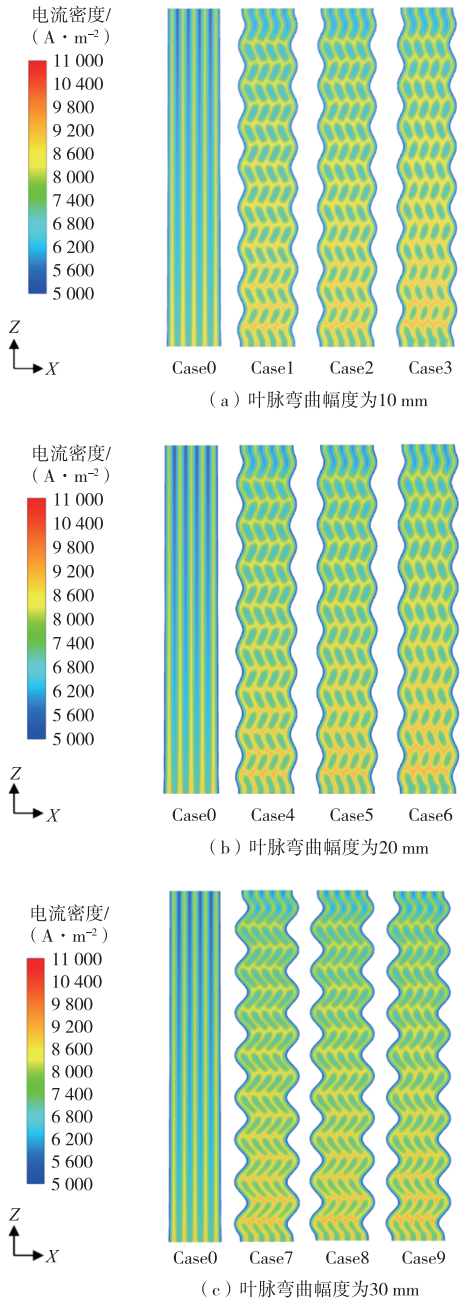


图 11 不同叶脉分支角度对质子交换膜电流密度分布的影响

Fig. 11 Effect of different leaf vein branch angles on current density distribution of proton exchange membrane

图 12 为不同弯曲幅度下分支角度对极化曲线和功率密度的影响。由图 12(a)可知，弯曲幅度为 10 mm 时，相对于平直反应流道，3 种仿生反应流道结构的极化曲线随着工作电压的降低能更快地到达高电流密度区，反应性能更好。而 3 种分支角度仿生反应流道的极化曲线在低电流密度时相差不明显，在高电流密度时区别有所增大，其中 Case3 结构的反应性能较好。在功率密度曲线中，3 种仿生反应流道的最大输出功率密度均明显高于平直反应流道，但 3 种仿生反应流道之间相差较小。这是因为叶脉分支角度的变化对阴极氧气的扩散及分布影响较小，使得反应性能变化较小，导致最终的输出功率密度变化也不大，其中 Case3 结构的燃料电池输出功率密度最高，达到 0.53 W/cm^2。

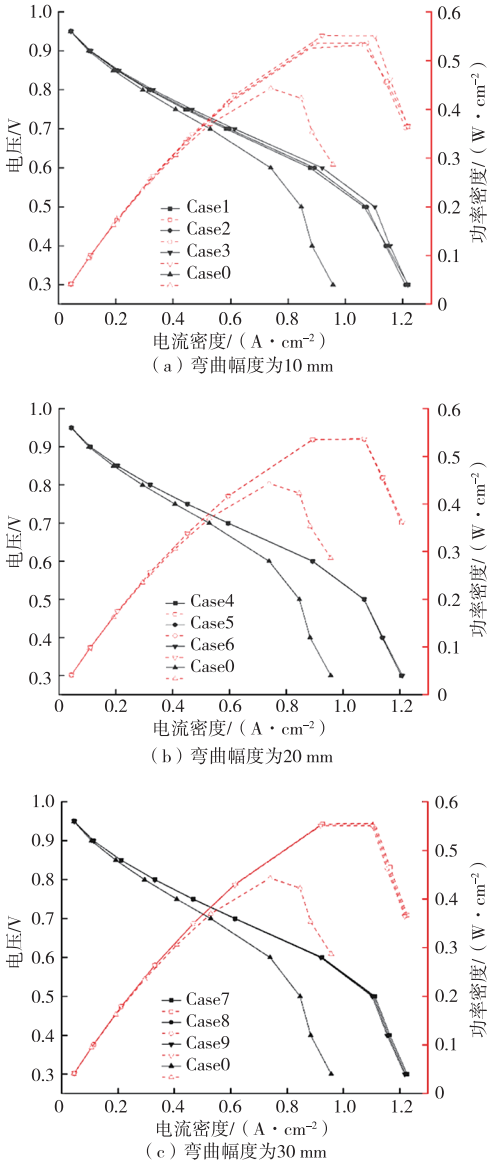


图 12 不同弯曲幅度下分支角度对极化曲线和功率密度的影响

Fig. 12 Effect of branch angle on polarization curve and power density under different bending amplitude

弯曲幅度为 20 和 30 mm 时反应流道的极化曲线和功率密度随分支角度的变化均并不明显。这是因为相对于叶脉分支角度，弯曲幅度对反应物的扰动效果更好。在弯曲幅度较小时，叶脉分支角度对反应物的扰动相对较大，而在弯曲幅度较大时，弯曲幅度的影响远大于分支角度变化的影响，使得分支角度变化对燃料电池的输出性能影响较小。

3.3 不同结构尺寸对电输出性能的影响

研究质子交换膜燃料电池的电输出性能时需考

虑在电池工作过程中产生的寄生功率的影响，而反应流道流动阻力在很大程度上会影响寄生功率的大小。因此，首先要对比各反应流道的进出口压降，探究结构变化对反应流道流动阻力的影响。

图 13 为平直反应流道和不同结构仿生反应流道的进出口压降。由图 13 可知，在同一叶脉分支角度下，随着叶脉弯曲幅度的增大，反应流道进出口压降明显增加。这是由于弯曲幅度增大时，反应物通过流道的路径长度增加，且流经弯折处的转向角度增大，导致流动阻力上升。而在同一弯曲幅度下，随着叶脉分支角度的增大，反应流道进出口压降逐渐减小。这是由于随着叶脉分支角度的增大，流道弯曲更加平缓，反应物在分支处流动方向变化减小，从而降低了局部流动阻力。相比于弯曲幅度为10 mm，弯曲幅度为 20 和 30 mm 时分支角度对进出口压降的影响更大。这是由于在大弯曲幅度下，较大的叶脉分支角度相当于为反应物建立了一条相对扰动较小的通道，因此能有效减小流动阻力，降低进出口压降。

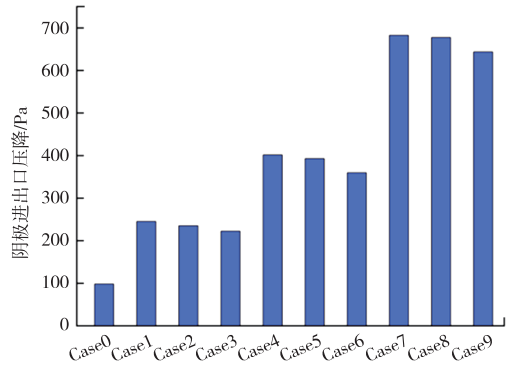


图 13　不同反应流道结构下的阴极进出口压降

Fig. 13　Pressure drop at cathode inlet and outlet for different reaction channel structures

综合考虑流动阻力后，采用净输出功率来评判不同结构反应流道的质子交换膜燃料电池输出性能。图 14 为在 0.7 V 工作电压下，不同反应流道结构下的质子交换膜燃料电池净输出功率以及各仿生反应流道结构相对于平直反应流道对燃料电池输出性能的提升率。可以看出，仿生反应流道结构对质子交换膜燃料电池的净输出功率有较大的提升，平均提升率可达 12.77%。不同尺寸仿生反应流道结构中，随着反应流道弯曲幅度的增加，质子交换膜燃料电池的净输出功率显著提高。这是因为大弯曲幅度会增大对反应物的扰动，提高反应物进入催化层的效率，从而提升电池输出性能。在同一弯曲幅度下，弯曲幅度为 10 mm 时，随着分支角度的增大，燃料电池的净输出功率逐渐增大。弯曲幅度较大时，随着分支角度的增大，燃料电池的净输出功率反而逐渐减小。可见，叶脉弯曲幅度越大，质子交换膜燃料电池输出性能越好。在叶脉弯曲幅度较小时，叶脉分支角度的增大能促进质子交换膜燃料电池输出性能的提升，而在叶脉弯曲幅度较大时，叶脉分支角度的增大反而会限制质子交换膜燃料电池的输出。

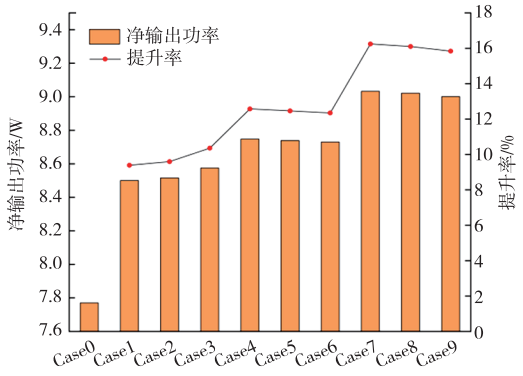


图 14　不同反应流道结构下 PEMFC 的净输出功率与提升率

Fig. 14　Net output power and lift rate of PEMFC with different reaction channel structures

4　结论

（1）仿生叶脉流道相较于传统平直反应流道，展现出显著的传质强化效应，其更能促进反应物的运输，提高电池内部水管理性能，缓解“水淹”现象，从而提高质子交换膜电流密度及其分布均匀性，并提高质子交换膜燃料电池的净输出功率，平均提升率达到 12.77%。

（2）叶脉分支角度一定时，反应流道的弯曲幅度与反应性能正相关：反应流道的弯曲幅度越大，反应物扩散到催化层的速率越快，使得催化层反应物整体分布与电流密度分布也更加均匀。

（3）叶脉弯曲幅度一定且较小时，分支角度对反应物运输能力的影响较小。随着叶脉弯曲幅度的增加，叶脉分支角度对反应物的扰动会逐渐增加，对反应物输送能力的影响也会增强。在叶脉弯曲幅度一定且较大时，随着叶脉分支角度的增加，电流密度的分布均匀性逐渐增强，$a=60°$时电流密度分布最均匀，且这种影响会随着叶脉弯曲幅度的增大而降低。

（4）叶脉弯曲幅度越大，质子交换膜燃料电池输出性能越好；在叶脉弯曲幅度较小时，叶脉分支角度的增加能促进质子交换膜燃料电池输出性能的提升，而在叶脉弯曲幅度较大时，叶脉分支角度的增加反而会限制质子交换膜燃料电池的输出。在弯曲幅度为 30 mm、分支角度为 30°时，燃料电池净输出功率最高。

参考文献：

[1] LIU Junpeng, ZHOU Zhengruo, YUE Bolun, et al. Chemical looping induced CH_3OH-H_2-PEMFC scheme for fuel cell vehicle: parameter optimization and feasibility analysis[J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 228790.

[2] 张钟，安吉振，潘佩媛，等. 基于甲醇重整的燃料电池与有机朗肯循环耦合热电联产系统性能分析[J]. 动力工程学报，2023，43(8)：1068-1076.
ZHANG Zhong, AN Jizhen, PAN Peiyuan, et al. Performance analysis of combined heat and power system coupling fuel cell and organic Rankine cycle based on methanol reforming[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(8): 1068-1076.

[3] 马明俊，张成义. 大流量氢燃料电池用离心式空气压缩机气动设计与性能试验[J]. 动力工程学报，2021，41(12)：1090-1095.
MA Mingjun, ZHANG Chengyi. Aerodynamic design and performance test of high flow centrifugal air compressor for hydrogen fuel cell[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(12): 1090-1095.

[4] HAMADA A T, ORHAN M F, KANNAN A M. Alkaline fuel cells: status and prospects[J]. Energy Reports, 2023, 9: 6396-6418.

[5] ZHAO Jing, CHENG Xinxuan, ZHOU Caiting, et al. Effect of vapor chamber on thermo-electrical characteristics of proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122766.

[6] ZHANG Jianlu, XIE Zhong, ZHANG Jiujun, et al. High temperature PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 160(2): 872-891.

[7] RODATZ P, BÜCHI F, ONDER C, et al. Operational aspects of a large PEFC stack under practical conditions[J]. Journal of Power Sources, 2004, 128(2): 208-217.

[8] MORTAZAVI M, TAJIRI K. Effect of the PTFE content in the gas diffusion layer on water transport in polymer electrolyte fuel cells (PEFCs)[J]. Journal of Power Sources, 2014, 245: 236-244.

[9] KORESAWA R, UTAKA Y. Improvement of oxygen diffusion characteristic in gas diffusion layer with planar-distributed wettability for polymer electrolyte fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271: 16-24.

[10] FORNER-CUENCA A, MANZI-OREZZOLI V, BIESDORF J, et al. Advanced water management in PEFCs: diffusion layers with patterned wettability I. Synthetic routes, wettability tuning and thermal stability[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016, 163(8): F788.

[11] FORNER-CUENCA A, BIESDORF J, GUBLER L, et al. Engineered water highways in fuel cells: radiation grafting of gas diffusion layers[J]. Advanced Materials, 2015, 27(41): 6317-6322.

[12] VIJAY R, SESHADRI S K, HARIDOSS P. Gas diffusion layer with PTFE gradients for effective water management in PEM fuel cells[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2011, 64(1/2): 175-179.

[13] ZHAN Zhigang, XIAO Jinsheng, LI Dayong, et al. Effects of porosity distribution variation on the liquid water flux through gas diffusion layers of PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 160(2): 1041-1048.

[14] ZHANG Y, VERMA A, PITCHUMANI R. Optimum design of polymer electrolyte membrane fuel cell with graded porosity gas diffusion layer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(20): 8412-8426.

[15] AHN S H, JEON S, PARK H Y, et al. Effects of platinum loading on the performance of proton exchange membrane fuel cells with high ionomer content in catalyst layers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(23): 9826-9834.

[16] XU Chao, ZHAO Tianshou. A new flow field design for polymer electrolyte-based fuel cells[J]. Electrochemistry Communications, 2007, 9(3): 497-503.

[17] NAM J H, LEE K J, SOHN S, et al. Multi-pass serpentine flow-fields to enhance under-rib convection in polymer electrolyte membrane fuel cells: design and geometrical characterization[J]. Journal of Power Sources, 2009, 188(1): 14-23.

[18] 储旭，郭雪岩. 阴极挡板排列对 PEMFC 反应物输运和性能的影响[J]. 动力工程学报，2023，43(3)：359-364，379.
CHU Xu, GUO Xueyan. Effect of cathode baffle arrangement on PEMFC reactant transport and performance[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(3): 359-364, 379.

[19] SASMITO A P, KURNIA J C, MUJUMDAR A S. Numerical evaluation of various gas and coolant channel designs for high performance liquid-cooled proton exchange membrane fuel cell stacks[J]. Energy, 2012, 44(1): 278-291.

[20] LI SHIAN, SUNDÉN B. Numerical study on thermal performance of non-uniform flow channel designs

for cooling plates of PEM fuel cells[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2018, 74(1): 917-930.

[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] PERNG S W, WU H W. A three-dimensional numerical investigation of trapezoid baffles effect on non-isothermal reactant transport and cell net power in a PEMFC[J]. Applied Energy, 2015, 143: 81-95.

[23] ZHANG G, FAN L, 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.

[24] NAJMI A U H, ANYANWU I S, XIE X, et al. Experimental investigation and optimization of proton exchange membrane fuel cell using different flow fields [J]. Energy, 2021, 217: 119313.

(上接第 43 页)

[15] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2023.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[16] ZHUANG Yaping, WU Fang, MIAO Zhengqiang, et al. Research on radiation monitoring schemes for industrial steam supply from the secondary loop of PWR[J]. Progress in Nuclear Energy, 2025, 188: 105887.

[17] 田里，王永庆. 200 MW 核供热堆汽电联供的经济分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2000，40(6)：95-98.
TIAN Li, WANG Yongqing. Economic analysis of process steam and electricity generation by a 200 MW NHR[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(6): 95-98.

[18] 张玉祯，廖佰凤，汪静，等. 压水堆核电站工业供汽系统技术可行性研究[J]. 南方能源建设，2022，9(2)：120-124.
ZHANG Yuzhen, LIAO Baifeng, WANG Jing, et al. Feasibility research in the technology for industrial steam supply by PWR nuclear power plant[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(2): 120-124.

[19] SONG Xiaolei, LI Xin, JIAO Songkun. Analysis of the economic prospect of nuclear heat supply by megawatt-class nuclear power units from the perspective of carbon peaking and carbon neutrality[C]//Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference. Beijing & Chengdu: Springer, 2023: 589-595.

[20] 周传锦. 长距离蒸汽管道供热技术及其应用实践探微[J]. 中国电业(技术版)，2016(1)：42-44.
ZHOU Chuanjin. Explore of technology and application of heat supply system with long distance steam pipe[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2016(1): 42-44.

[21] 张伟. 一种长输大直径蒸汽管道温降、压降计算方法[J]. 区域供热，2018(2)：110-113，123.
ZHANG Wei. A method for calculating temperature drop and pressure drop of long-distance large-diameter steam pipeline[J]. District Heating, 2018(2): 110-113, 123.

[22] 薛永明，朱九喜，付小平. 长输蒸汽管道的温降和压降的计算方法研究[J]. 节能，2018，37(8)：40-43.
XUE Yongming, ZHU Jiuxi, FU Xiaoping. Study on the calculation method for the temperature drop and pressure drop of the long-distance steam pipeline[J]. Energy Conservation, 2018, 37(8): 40-43.