

氢燃料电池复合流场中气-液传输对极化特性的影响

崔万鑫¹, 商显上¹, 王璐², 孔祥安¹, 刁艳涛³, 李新海^{1*}

1. 山东建筑大学机电工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061;
3. 山东菏泽华星油泵油嘴有限公司, 山东 菏泽 274000

摘要:为了明确氢燃料电池极板内气-液流动规律,提高氢燃料电池的输出性能,优化电池输出特性,设计径向流通蛇形流场方案,仿真分析流场分路和面积对气-液传递及电池输出特性的影响。仿真结果表明:在不同分路数量的流场中,3条分路的流场结构水堵塞面积更小,更利于氧气传输,输出性能更佳,电流输出范围比5条分路扩宽14.1%,但在电流密度较大时流场内部气体输送不及时,功率输出受浓差极化电压的影响较大;流场面积主要影响欧姆控制区和浓差控制区,大面积流场在欧姆控制区输出性能较好,小面积流场在浓差控制区输出性能较好。

关键词:氢燃料电池;流场设计;气液流动;极化特性

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)04-0011-09

引用格式:崔万鑫, 商显上, 王璐, 等. 氢燃料电池复合流场中气-液传输对极化特性的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(4): 11-19.

CUI Wanxin, SHANG Xianshang, WANG Lu, et al. Effect of gas-liquid transportation on polarization characteristics in hydrogen fuel cell complex flow field [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(4): 11-19.

0 引言

随着碳排放等环境问题日益凸显,燃料电池作为一种新型低碳动力装置,具有零排放、功率高等优势,在减排脱碳方面发挥着重要作用。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFC)技术虽然在交通、储能等领域已得到初步应用^[1],但目前PEMFC仍存在电池物理场分布不均、大电流密度下性能易失稳、稳定输出范围小、电池体积比功率低等亟待解决的关键技术问题。为应对当前PEMFC大功率迭代升级的发展需求,大功率、长寿命燃料电池的研究开发已成为能源技术竞争的重点^[2]。

氢燃料电池双极板气-液相传输优化是提高功率密度的必然要求,双极板是燃料电池重要组成部分,其流场结构直接影响电堆的气-液相传输,进而决定物质传递、传热、电化学反应等过程^[3]。研究表明,作为气-液传递过程的主要场所,流场的长度、脊槽比和截面形状对PEMFC性能具有重要影响^[4]。精细化的流场设计可有效改善流场局部压力,使电池物理场分布更均匀,更利于气体的扩散和水排出^[5]。随

收稿日期:2024-04-18

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021QE065);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2041, 2023TSGC0855)

第一作者简介:崔万鑫(1999—),男,济南人,硕士研究生,主要研究方向为氢燃料电池CFD数值解析应用,E-mail:1325963743@qq.com。

*通信作者简介:李新海(1989—),男,济南人,工学博士,副教授,主要研究方向为氢燃料电池电堆系统及关键部件技术,E-mail:lixinhai19@sdjzu.edu.cn。

着电堆体积比功率的进一步提高以及材料和制备技术的不断完善,流场肋板可以设计得更窄,从而减小单体电池厚度^[6]。

目前,燃料电池极板结构多采用平行流场、蛇形流场等传统型流场设计,其中,蛇形流场应用较广泛,多路蛇形流场能够有效改善流场内压降和气体分布均匀性,但由于多流场原因,流场内气体流速不足易造成水淹现象^[7]。新兴的仿生流场、3D 流场等异型流场比传统型流场具有更加突出的优点及缺点:仿生流场设计使反应物分布更加均匀,获得更高的输出功率;3D 流场采用特殊供气方式,增强反应气体向扩散层的传质效果,有效减小电池的浓差极化损失;但仿生流场、3D 流场结构复杂,加工成本较高。常见的仿生流场有叶形流场、肺形流场、树形流场^[8]。Damian-Ascencio 等^[9]研究表明,流场中树状二级分叉型结构能够有效去除阴极流场中的液态水,使电堆产生更高的输出功率;Badduri 等^[10]对三蛇形、肺形和叶形流场进行了对比研究,发现叶形流场的性能最佳,且叶形流场交指设计的电堆净功率密度比非交指设计大 5.58%。仿生流场中的多分支结构能使反应气体分布均匀,有利于水的排出^[11];3D 流场设计多采用特殊的供气方式,沈俊^[12]设计了一种内有主流场和副流场的 3D 流场,实现了水气分离,有效避免了流场内的水淹现象。复杂的 3D 流场使气体传输不被限制在固定的流场中,相邻流场之间的气体交互更自由,增强了反应气体向扩散层的传质效果,可有效减小电池的浓差极化损失^[13]。径向型流场最早由 Diethelm^[14]设计,解决了燃料电池电堆组装过程中极板脆弱易断裂的问题;Cano-Andrade 等^[15]设计的径向流场,既避免较大压降又兼具较好的排水性能,并验证了径向流场可以取代目前使用的传统流场。随着极板制造技术的改进,未来异型流场设计实际应用价值潜力巨大。

流场设计应保证气体分布的均匀性,加强传质效果,提高气体的利用率,还应兼顾良好的水热管理能力。异型流场内流动特性优化是提高气体利用率、解决电池物理场均匀性、降低极化损失的有效方法。因此,本文中提出一种兼具蛇形流场与径向流场特点的复合流场,建立该流场不同方案的三维模型,将流场分路及面积作为研究关键,分析流场内部气液两相流状态对电池性能的影响,为提高燃料电池性能和功率密度、推动燃料电池技术的商业化和规模化应用提供参考。

1 模型描述

1.1 几何模型

结合蛇形流场特点和径向流场特殊的供气方式,采用三维两相流计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法设计的复合式流场流体域模型及结构参数如图 1 所示,流场计算域网格划分模型如图 2 所示。

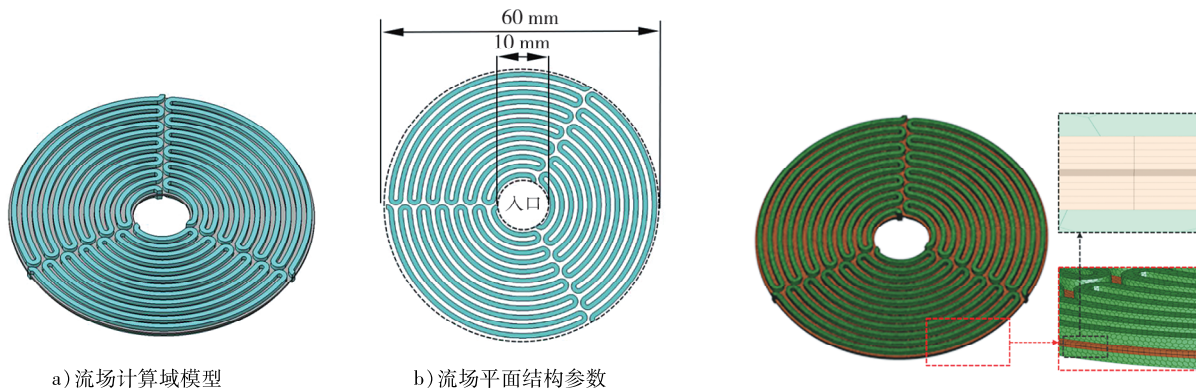


图 1 三维模型及结构参数

图 2 计算域网格模型

气体流通截面积为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,不同方案流场参数如表 1 所示。由表 1 可知:方案 A、B、C 分别采用 3、4、5 条分路径向流通设计,方案 A、D、E 为计算域直径不同的复合式流场。

计算域由流体流场、质子交换膜 (proton exchange membrane, PEM)、催化层 (catalytic layer, CL)、气体

扩散层(gas diffusion layer,GDL)组成,计算域边界条件及材料属性如表 2、3 所示。

表 1 设计方案参数

方案	进气孔直径/mm	计算域直径/mm	蛇形流场数	方案	进气孔直径/mm	计算域直径/mm	蛇形流场数
A	10	60	3	D	10	52	3
B	10	60	4	E	10	44	3
C	10	60	5				

表 2 模型边界条件

工作温度/ K	阴极入口相对湿度/ %	阳极入口相对湿度/ %	阴极入口化学 计量比	阳极入口化学 计量比	阴极出口压强/ kPa	阳极出处压强/ kPa
343.15	100	100	2.0	1.4	230	250

表 3 材料属性

气体扩散层厚度/mm	膜厚度/mm	催化层厚度/mm	流场宽度/mm	GDL 渗透率/m ²	CL 渗透率/m ²	阴极传递系数
0.300	0.035	0.010	0.035	6.5×10 ⁻¹²	2.0×10 ⁻¹⁵	1.0
阳极传递系数	CL 孔隙度	GDL 孔隙度	CL 密度/(kg·m ⁻³)	GDL 密度/ (kg·m ⁻³)	CL 导电性/ [A·(V·m) ⁻¹]	GDL 导电性/ [A·(V·m) ⁻¹]
0.5	0.38	0.40	1 350	2 000	5 000.18	16 500
交换膜导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	CL 导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	GDL 导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	参考阴极交换电流密度/ (A·cm ⁻²)		参考阳极交换电流密度/ (A·cm ⁻²)	
0.2	1.698 8	0.50	3.397		5×10 ⁸	

1.2 数学模型

在三维控制方程的设定中,假设三维模型中多孔介质属性为各向同性,气体为不可压缩且层流流入的理想气体,扩散层及催化层边界条件对称,壁面无滑移。用于模拟 PEMFC 气-液两相流传递方程包括基本控制方程及流体和电化学方程^[16-19]。

1.2.1 单体电池实际输出电压

能斯特电压 V_E 的计算式为:

$$\{V_E\} = \frac{\{\Delta_G\}}{2\{F\}} + \frac{\{\Delta_S\}}{2\{F\}}(\{T\} - \{T_{ref}\}) + \frac{\{R\}}{2\{F\}}\frac{\{T\}}{T} \left[\ln\{p(H_2)\} + \frac{1}{2}\ln\{p(O_2)\} \right],$$

式中: $\{V_E\}$ 为以 V 为单位的 V_E 的数值; $\{\Delta_G\}$ 为以 J/mol 为单位的吉布斯自由能变化 Δ_G 的数值; $\{\Delta_S\}$ 为以 J/(mol·K)为单位的熵变 Δ_S 的数值; $\{T\}$ 为以 K 为单位的电池的工作温度 T 的数值; $\{T_{ref}\}$ 为 K 为单位的电池参考温度 T_{ref} 的数值; $\{p(H_2)\}$ 为以 Pa 为单位的氢气气体分压 $p(H_2)$ 的数值; $\{p(O_2)\}$ 为以 Pa 为单位的氧气气体分压 $p(O_2)$ 的数值; $\{R\}$ 为以 J/(mol·K)为单位的气体常数 R 的数值; $\{F\}$ 为以 C/mol 为单位的法拉第常数 F 的数值。

活化过电压 V_A 的数值

$$\{V_A\} = \zeta_1 + \zeta_2\{T\} + \zeta_3\{T\}\ln\{c(O_2)\} + \zeta_4\{T\}\ln\{c(H_2)\} + \zeta_5\{T\}\ln\{I\} + \zeta_6\{T\}\ln\{A\},$$

式中: $\{V_A\}$ 为以 V 为单位的 V_A 的数值; ζ_j 为经验因数, $j=1,2,\cdots,6$; $\{c(O_2)\}$ 为以 mol/cm³ 为单位的氧气浓度 $c(O_2)$ 的数值; $\{c(H_2)\}$ 为以 mol/cm³ 为单位的氢气浓度 $c(H_2)$ 的数值; $\{I\}$ 为以 A 为单位的电流 I 的数值; $\{A\}$ 为以 cm² 为单位的电池有效活化面积 A 的数值。

欧姆过电压

$$V_O = J(R_m + R_c),$$

式中: R_m 为等效膜电阻, Ω ; R_c 膜阻抗, Ω ; J 为电流密度, A/cm^2 。

浓差过电压

$$V_c = B \ln(1 - J/J_{\max}),$$

式中: B 为取决于工作状态的常量; $J_{\max}$ 为最大电流密度, 即反应物消耗达到供应的最大速率时的电流密度, A/cm^2 。

单体电池实际输出电压

$$V_R = V_E - V_A - V_O - V_C.$$

1.2.2 组分守恒方程

组分守恒方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon C_k)}{\partial t} + \nabla \cdot \varepsilon C_k \bar{u} = \nabla \cdot (D_{k,\text{eff}} \nabla C_k) + S_k,$$

式中: ε 为孔隙率; C_k 为各气体组分密度, kg/m^3 ; S_k 为组分源项; $D_{k,\text{eff}}$ 为组分有效扩散系数, m^2/s ; t 为时间, s ; $\bar{u}$ 为各相平均速度, m/s 。

气体在多孔介质材料中的扩散系数

$$D_k = e^{1.5} (1 - s)^{r_s} D_{k,0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{r_p} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{r_t},$$

式中: s 为液态水饱和度; T_{ref} 为参考温度, K ; p_0 为参考压力, Pa ; p 为气体压力, Pa ; $D_{k,0}$ 为气体组分在 T_{ref} 和 p_0 时的扩散系数, m^2/s ; r_s 、 r_p 、 r_t 分别为饱和指数因子、压力因子、温度指数因子。

在两极 CL 表示的组分 O_2 的源项

$$S(O_2) = -J_{\text{cat}}/(4F),$$

式中: J_{cat} 为阴极电流密度, A/cm^2 。

在两极 CL 表示的组分 H_2 的源项

$$S(H_2) = -J_{\text{an}}/(2F),$$

式中: J_{an} 为阳极电流密度, A/cm^2 。

在两极 CL 表示的组分 H_2O 的源项

$$S(H_2O) = J_{\text{cat}}/(2F).$$

1.2.3 电化学反应

电池阳极电流密度

$$J_{\text{an}} = (\tau_{\text{an}} J_{\text{an,ref}}) \left(\frac{A}{A_{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{an}}} \left[\exp\left(\frac{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_{\text{cat}} F \eta_{\text{an}}}{RT}\right) \right],$$

式中: τ_{an} 为阳极活性比表面积, m^2 ; $J_{\text{an,ref}}$ 为阳极参考体积交换电流密度, A/m^2 ; γ_{an} 为阳极浓度指数; α_{an} 为阳极传递系数; α_{cat} 为阴极传递系数; A_{ref} 为电池参考有效活化面积, cm^2 ; η_{an} 为阳极局部活化过电位, $\eta_{\text{an}} = \varphi_s - \varphi_m$, 其中 φ_s 、 φ_m 分别为固体和质子交换膜上电位, V 。

电池阴极电流密度

$$J_{\text{cat}} = (\tau_{\text{cat}} J_{\text{cat,ref}}) \left(\frac{C}{C_{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{cat}}} \left[\exp\left(\frac{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{cat}}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_{\text{cat}} F \eta_{\text{cat}}}{RT}\right) \right],$$

式中: τ_{cat} 为阴极活性比表面积, m^2 ; $J_{\text{cat,ref}}$ 为阴极参考体积交换电流密度, A/m^2 ; γ_{cat} 为阴极浓度指数; C_{ref} 为参考摩尔浓度, $kmol/m^3$; η_{cat} 为阴极局部活化过电位, $\eta_{\text{cat}} = \varphi_s - \varphi_m - V_{E0}$ 。

1.2.4 电荷守恒方程

电荷守恒方程为:

$$\nabla \cdot (\sigma_{s,\text{eff}} \nabla \varphi_s) = -J_s,$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{m,eff} \nabla \varphi_m) = -J_m,$$

式中: J_s 和 J_m 分别为电子和质子流源项, A/m^2 ; $\sigma_{s,eff}$ 、 $\sigma_{m,eff}$ 分别为固体和质子交换膜上的有效电导率, S/m 。

1.2.5 液态水传输方程

液态水在流场和多孔介质中的传递表示为:

$$\frac{\partial(\varepsilon s \rho_l)}{\partial t} + \nabla(\rho_l s \bar{u}_l) = S_l,$$
$$\frac{\partial(\varepsilon s \rho_l)}{\partial t} + \nabla\left(\rho_l \frac{K s^3}{\mu_l} \frac{dp_c}{ds} \nabla s\right) = S_l,$$

式中: ρ_l 为液态水密度, kg/m^3 ; p_c 为毛细压力, Pa ; K 为渗透率, m^2 ; $\bar{u}_l$ 为液态水速度, m/s ; μ_l 为液态水动力黏度, $kg/(m \cdot s)$ 。

水蒸气冷凝率

$$r_w = \begin{cases} (1-s) c_r \frac{p_w - p_s}{RT} M(H_2O), & p_w \geq p_s \\ s c_r \frac{p_w - p_s}{RT} M(H_2O), & p_w < p_s \end{cases},$$

式中: c_r 为凝结常数; p_w 为水蒸气压, Pa ; p_s 为饱和蒸气压, Pa ; $M(H_2O)$ 为水的摩尔质量, $M(H_2O) = 18.02 \text{ g/mol}$ 。

1.3 模型验证

基于方案 A 模型电池进行网格无关性验证,创建 5 种不同网格数的模型,以输出电压为 0.3 V 时的电流密度为例,不同网格数计算的电流密度与试验结果(电流密度为 1.65 A/cm^2)对比如表 4 所示,表中相对误差为仿真计算的电流密度与试验结果的差和试验结果的比。由表 4 可知:随着网格数增多,电流密度收敛于 1.65 A/cm^2 附近;当网格数为 453 456 时,电流密度相对误差为 0。考虑到模型计算效率及精度,网格数选择 453 456。为了验证仿真模型的有效性,建立与 Cheng 等^[20]相同的平行流场三维模型,边界条件为:阴、阳极入口气体流速分别为 0.5、0.3 m/s,电池温度为 323 K,电池压力为 101.325 kPa,仿真与试验结果对比如图 3 所示。由图 3 可知:仿真结果整体略低于试验结果,数值解析模型与试验数据偏差不超过 5%,本文中的模型有效。

表 4 不同网格数时的电流密度与试验结果对比		
网格数	仿真电流密度/($A \cdot cm^{-2}$)	相对误差/%
175 241	1.54	6.67
251 045	1.58	4.24
340 857	1.62	1.82
453 456	1.65	0
541 786	1.66	0.61

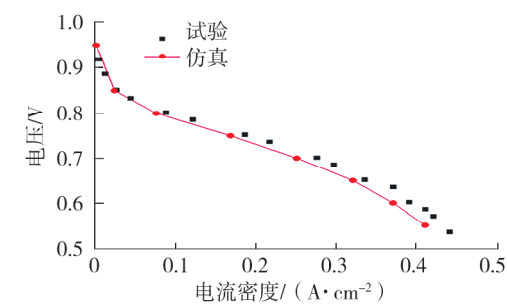


图 3 仿真与试验数据对比

2 仿真结果与分析

2.1 流场分路数对 PEMFC 性能的影响

2.1.1 复合式流场传质性能

输出电压为 0.5 V 时阴极侧 GDL-CL 交接面处液态水的摩尔分数分布如图 4 所示。由图 4 可知:1) 采用蜿蜒的扇形蛇形流场设计可以较好地去除液态水。2) 在扇形区域内,由于流场内气流的吹扫作用,流场覆盖区域液态水的摩尔分数明显低于双极板肋下覆盖区域。3) 由于液态水毛细扩散特性,在流场末

端液态水扩散系数增大,液态水传递阻力更大,电极中液态水的输运具有积聚效应,容易在靠近电池出口处的电极处积聚,因此,液态水在电池内的传输有再分布的特征,电池中心区域电化学反应更强烈,反应产生的水在气流吹扫下更易在流场末端积聚并排出,使得流场外围水含量明显高于中心部位。4) 由于流场采用径向设计,整体流场呈现为蜿蜒的扇形蛇形流场,使得气体流动不仅有沿流场的速度分量,还有流向四周的径向速度分量,可以高效地将肋下部分水分吹扫向外围相邻流场,进而在一层层的吹扫作用下使液态水流向最外围;在相邻扇形流场的交接处肋下部位,由于两侧气体流向相反,使液态水均向此区域堆积,气体难以向 CL 扩散,造成了肋下部位区域液态水含量较高;3 种流场设计中,出现类似肋下区域液态水的摩尔分数过高的现象均无法避免,由于流场设计本身的局限性,方案 C 流场肋下区域面积最大,方案 B 次之,方案 A 最小。

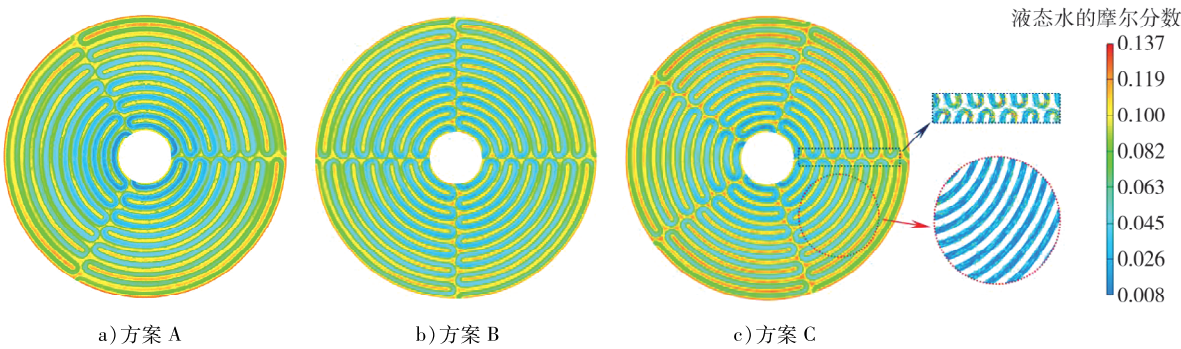


图 4 方案 A、B、C 在输出电压为 0.5 V 时阴极侧 GDL-CL 交接面处液态水的摩尔分数分布

输出电压为 0.5 V 时阴极侧 CL 电流密度分布如图 5 所示。由图 5 可知: 3 种流场电流密度分布为由中心至四周逐渐下降,且流场覆盖区域电流密度高于肋下区域;由于流场采用径向流场布置,在流场靠近中心部位流阻更大,更多的氧气扩散至靠近中心部位的催化层,液态水更少的区域更有利于氧的扩散,其电化学反应更强烈,方案 A 各区域电流密度普遍高于方案 B、C。

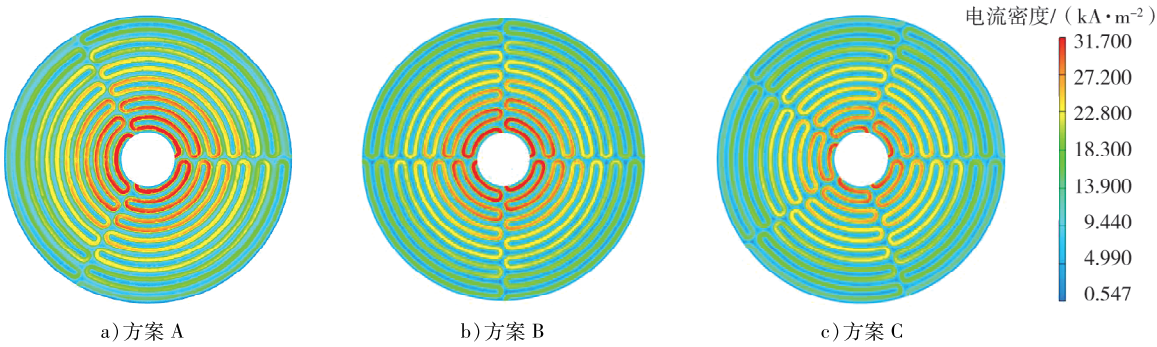


图 5 方案 A、B、C 在输出电压为 0.5 V 时阴极侧 CL 处电流密度分布

2.1.2 复合式流场输出特性

方案 A、B、C 3 种流场电池的输出特性曲线如图 6 所示。由图 6 可知: 由于各模型边界条件及材料配置均一致,所以 3 种模型受到活化极化影响的差距较小,在活化控制区域,输出特性曲线重合度较高,输出性能差异较小;在欧姆控制区和浓差控制区,输出性能出现差异,输出电压相同时,输出功率由低到高依次为方案 C、B、A;由于方案 A 各区域氧气浓度普遍较高,液态水的摩尔分数偏大时肋下面积更小,方案 A 流场的输出性能更优,其电流输出范围比方案 B、C 扩

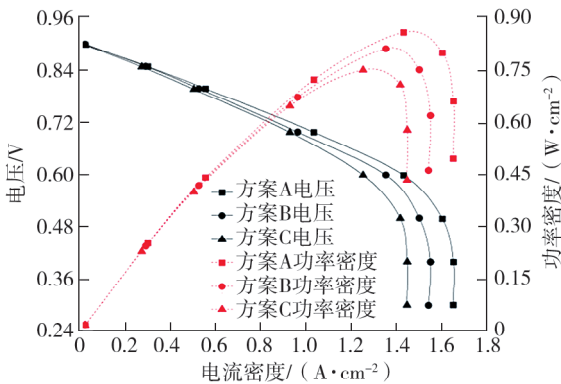


图 6 方案 A、B、C 输出性能曲线

宽 6.5%和 14.1%;方案 A 电池输出性能在高电流密度时下降过快,说明此时电池内部物质传输不及时,反应物浓度变化导致电池浓差极化电压变大,可通过适当减小电池面积进行优化,以缓解电池在大电流密度时的反应物输送难度特别是对流场末端的输送不及时现象。

2.2 流场面积对 PEMFC 性能的影响

2.2.1 不同面积流场极化特性

由于反应动力学特性不随电池面积改变,电池的放大效应与其传质特性密切相关,仿真分析方案 A、D、E 的输出特性,结果如图 7 所示。由图 7 可知:电池流场面积的改变造成的输出性能差异主要在欧姆控制区和浓差控制区,欧姆控制区受氢离子传递效率的影响,浓差控制区主要受气-液传输过程的影响;流场面积增大使电池有效输出范围变小;以面积最小的方案 E 为参考基准,方案 A、D 电流输出范围降低 9.1%和 4.7%;输出电压为 0.7 V 时,方案 A、D 较方案 E 的电流密度增大 13.2%和 5.5%。原因为:流场面积增大,膜内的水更充足,氢离子传递得到强化,在欧姆控制区更利于提高电池的输出性能。

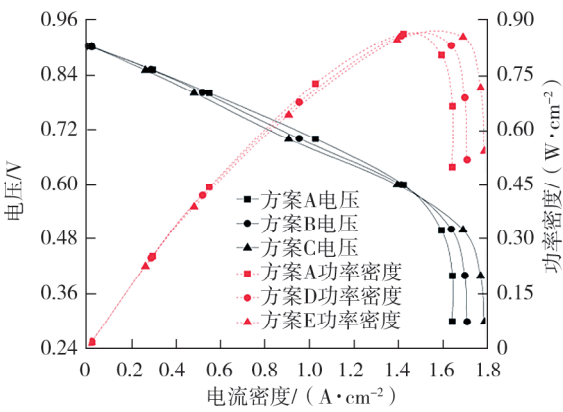


图 7 方案 A、D、E 输出性能对比

2.2.2 欧姆控制区对 PEMFC 输出特性的影响

氢离子的传输效率影响欧姆控制区电化学反应效率,氢离子的传输很大程度上是由膜内水的摩尔分数决定,膜内水的摩尔分数越大,氢离子传输速率越快,输出电流密度也就越大。在燃料电池面积放大过程中,电池整体反应物进料量增加,被带入的水蒸气也随之增加,电池内含水量更为充分。3 种不同面积电池的膜内水的摩尔分数分布如图 8 所示。由图 8 可知:大面积电池膜内水的摩尔分数明显更大,有利于提高氢离子的传递速率与电池的电流输出。

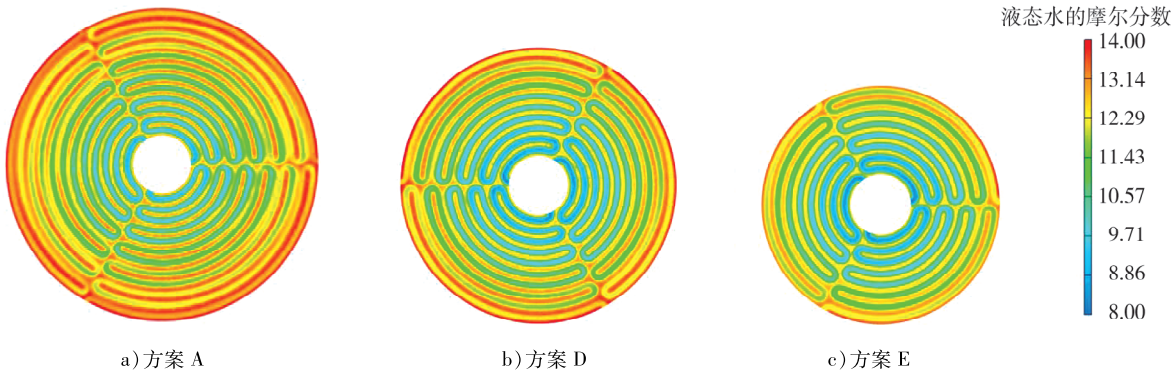


图 8 在输出电压为 0.7 V 时,方案 A、D、E 质子交换膜液态水的摩尔分数分布

2.2.3 浓差控制区对 PEMFC 输出特性的影响

输出电压为 0.5 V 时,不同面积电池中 CL 处电流密度分布如图 9 所示,阴极侧 CL-GDL 交接面处水的摩尔分数分布如图 10 所示。

由图 9 可知:随着电池面积增加,电流密度在外围显著下降,说明反应物在电池外围的传质受阻,原因是电极中的液态水积聚,氧气向 CL 处扩散的阻力增加。由图 10 可知:在 CL-GDL 交接面处液态水的摩尔分数由内到外逐渐增加;面积越大的流场外围水含量越高,这一现象表明液态水的传输与电池的面积紧密相关。当电池面积扩大后,对应流场流程变长,电极中液态水毛细扩散的距离增加,传递阻力变大,排水更加困难,液态水的积聚更为明显。输出电压为 0.5 V 时,方案 D、E 较方案 A 电流密度提高了 3.1%和 6.3%。面积更大的电池流场外围液态水的摩尔分数更大,阻碍反应物供给,使外围流场反应效

率降低,从而导致电池性能下降。

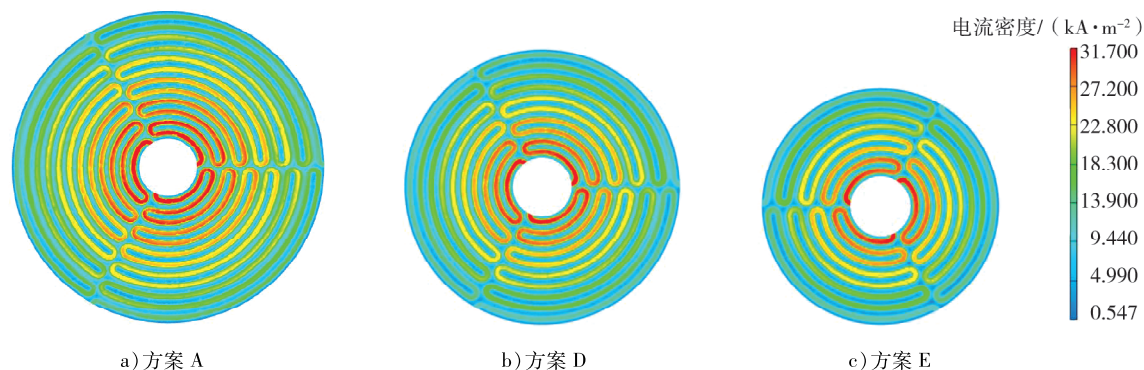


图 9 输出电压为 0.5 V 时,方案 A、D、E 阴极侧 CL 电流密度分布

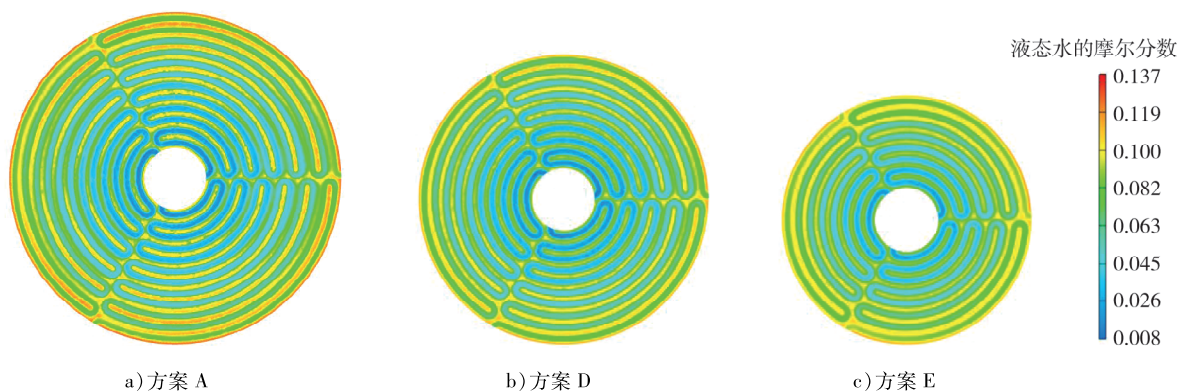


图 10 输出电压为 0.5 V 时,方案 A、D、E 阴极侧 CL-GDL 交接面处水的摩尔分数分布

3 结论

采用三维两相流 CFD 模型,设计复合式流场电池并仿真分析了复合式流场在气-液流动、极化特性等方面的性能。

1) 3 种不同分路数量流场电池中,方案 A 因水阻塞造成的低效率面积较小,输出性能最佳,方案 A 流场的电流输出范围比方案 B、C 增大 6.5% 和 14.1%;但由于流场采用径向设计,外圈流场过长,在电流密度较大时,对气体的输送能力不足,导致输出性能受浓差过电压的影响较大。

2) 不同面积流场电池,电池尺寸与电池内部的气-液两相流传递直接相关,主要影响欧姆控制区和浓差控制区;在大面积流场中,由于膜内水含量更充分,氢离子传递加强,大面积流场性能在欧姆控制区更佳;但在浓差控制区,膜内水分饱和,大面积流场液态水在多孔电极内积聚反而更严重,阻碍反应物供给,导致大面积流场输出性能下降;方案 A、D 较方案 E 电流密度范围降低 9.1% 和 4.7%。

3) 流场末端排水能力不足是电池面积放大过程的共性机制,是导致流动分布不均进而导致电池性能下降的直接原因,只有解决电池排水能力与流动均布等关键问题,才能实现燃料电池的大功率发展。

参考文献:

- [1] YIN C, GAO Y, LI T, et al. Study of internal multi-parameter distributions of proton exchange membrane fuel cell with segmented cell device and coupled three-dimensional model[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 650-662.
- [2] KANG H C, JUM K M, SOHN Y J. Performance of unit PEM fuel cells with a leaf-vein-simulating flow field-patterned bipolar plate[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(43): 24036-24042.
- [3] PAN W T, CHEN X L, WANG F C, et al. Mass transfer enhancement of PEM fuel cells with optimized flow channel

- dimensions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(57): 29541–29555.
- [4] GÉNEVÉ T, RÉGNIER J, TURPIN C. Fuel cell flooding diagnosis based on time-constant spectrum analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 41(1): 516–523.
- [5] WAN Z M, QUAN W X, YANG C, et al. Optimal design of a novel M-like channel in bipolar plates of proton exchange membrane fuel cell based on minimum entropy generation[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 112386.
- [6] 吴玲. 高性能的新款 MIRAI 燃料电池堆的研究进展[J]. 汽车与新动力, 2021, 4(6): 15–19.
- [7] 胡弦. 基于 VOF 模型的 PEMFC 流道数值模拟研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [8] ZHANG S Y, XU H T, QU Z G, et al. Bio-inspired flow channel designs for proton exchange membrane fuel cells: review [J]. Journal of Power Sources, 2022, 522: 231003.
- [9] DAMIAN-ASCENCIO C E, SALDAÑA-ROBLES A, HERNANDEZ-GUERRERO A, et al. Numerical modeling of a proton exchange membrane fuel cell with tree-like flow field channels based on an entropy generation analysis[J]. Energy, 2017, 133: 306–316.
- [10] BADDURI S R, SRINIVASULU G N, RAO S S. Influence of bio-inspired flow channel designs on the performance of a PEM fuel cell[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(3): 824–831.
- [11] LIAN Y T, XIE Q Z, ZHENG M G. Investigation on the optimal angle of a flow-field design based on the leaf-vein structure for PEMFC[J]. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2020, 23(4): 262–268.
- [12] 沈俊. 基于强化传质的燃料电池流场优化及水热管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [13] YOSHIDA T, KOJIMA K. MIRAI fuel cell vehicle and progress toward a future hydrogen society [J]. Electrochemical Society Interface, 2015, 24(2): 45–49.
- [14] DIETHELM R, BRUN J, BARP B. Module for a fuel cell battery: US5270131 [P]. 1993–12–14.
- [15] CANO-ANDRADE S, HERNANDEZ-GUERRERO A, SPAKOVSKY S C, et al. Current density and polarization curves for radial flow field patterns applied to PEMFCs (proton exchange membrane fuel cells) [J]. Energy, 2009, 35(2): 920–927.
- [16] LAPEÑA-REY N, BLANCO J A, FERREYRA E, et al. A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(10): 6926–6940.
- [17] WANG Y, SUN Z Y, YANG L. Enhancement effects of the obstacle arrangement and gradient height distribution in serpentine flow-field on the performances of a PEMFC [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115077.
- [18] XIA L C, XU Q D, HE Q J, et al. Numerical study of high temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) with a focus on rib design [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(40): 21098–21111.
- [19] PENG Y M, YAN X H, LIN C, et al. Effects of flow field on thermal management in proton exchange membrane fuel cell stacks: a numerical study [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(5): 7617–7630.
- [20] CHENG C H, LIN H H, LAI G J. Design for geometric parameters of PEM fuel cell by integrating computational fluid dynamics code with optimization method [J]. Journal of Power Sources, 2007, 165: 803–813.

Effect of gas-liquid transportation on polarization characteristics in hydrogen fuel cell complex flow field

CUI Wanxin¹, SHANG Xianshang¹, WANG Lu², KONG Xiang'an¹,
DIAO Yantao³, LI Xinhai^{1*}

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. Shandong Heze Huaxing Fuel Injection Equipment Co., Ltd., Heze 274000, China

Abstract: In order to clarify the gas-liquid flow law in the plate of hydrogen fuel cell, improve the output performance of hydrogen fuel cell, optimize the output characteristics of the battery from the flow field structure,

(下转第 26 页)