

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

基于分区流场调控的质子交换膜燃料电池水管理性能研究

陈承戴^{1,2}, 林涛^{1,2}, 韩凤琴^{1,2}

(¹ 广州城市理工学院电气工程学院, 广东 广州 510800; ² 广东省智能微电网多能协同控制工程技术研究中心, 广东 广州 510800)

摘要: 针对质子交换膜燃料电池阴极水淹与传质不均问题, 本文提出一种阴极分区流场, 通过局部补气实现上游和下游水、气传输的分区调控。数值模拟研究了平行、U型与分区的三种流场的输出性能, 探究了阴极化学计量比及分区湿度比对水传输效率的影响。结果表明: 得益于分区流场水气调控能力, 分区流场较平行流场的功率密度提升 10.1%; 在 1.5~3.5 化学计量比内, 分区流场输出性能明显提升, 在低计量比下优势更显著。为了优化流场水管理平衡, 分区湿度比为 60%: 30% 时, 可实现上游水淹缓解与加速下游排水, 使电流密度进一步提升 12.9%。研究验证了分区流场对水、气协同优化的灵活调控能力。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 水管理; 流场设计; 分区调控; 电流密度

中图分类号: TK91

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

Study on Water Management Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on Segmented Flow Field Regulation

CHEN Chengdai^{1,2}, LIN Tao^{1,2}, HAN Fengqin^{1,2}

(¹ School of Electrical Engineering, Guangzhou City Institute of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China; ² Guangdong Engineering Technology Research Center for Multi-Energy Collaborative Control of Smart Microgrids, Guangzhou 510800, Guangdong, China)

Abstract: Addressing the issues of cathode flooding and uneven mass transfer in proton exchange membrane fuel cells, this paper proposes a segmented cathode flow field that enables regional regulation of water and gas transport in the upstream and downstream sections through local air supplementation. Numerical simulations are conducted to investigate the output performance of three flow field configurations—parallel, U-shaped, and segmented—and to explore the effects of cathode stoichiometric ratio and segmented humidity ratio on water transport efficiency. The results show that, owing to the water and gas regulation capability of the segmented flow field, its power density is 10.1% higher than that of the parallel flow field. Within the stoichiometric ratio range of 1.5 to 3.5, the segmented flow field exhibits significantly improved output performance, with the advantage being more pronounced at low stoichiometric ratios. To optimize water management balance in the flow field, a segmented humidity ratio of 60%: 30% alleviates upstream flooding while accelerating downstream water removal, further increasing current density

收稿日期: 2026-03-29 修回日期: 2026-05-11

通信作者: 林涛(1990—), 男, 博士, 教授, kunqianlintao@163.com

第一作者: 陈承戴(1995—), 男, 博士, 讲师, chencd@geu.edu.cn

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才项目(2024KQNCX101); 广东省普通高校特色创新类项目(2024KTSX157); 广东省基础研究计划(2414050003671); 云南省基础研究计划(202301CF070031); 百人计划(B0201001、B0201014); 青年人才提升计划(K0224014、K0223021)

引用本文: 陈承戴, 林涛, 韩凤琴. 基于分区流场调控的质子交换膜燃料电池水管理性能研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–10

Citation: CHEN Chengdai, LIN Tao, HAN Fengqin. Study on Water Management Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on Segmented Flow Field Regulation[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–10

by 12.9%. The study validates the flexible regulation capability of the segmented flow field for synergistic water and gas optimization.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; water management; flow field design; segmented regulation; current density

引 言

低温质子交换膜燃料电池(PEMFC)由于具有能量密度高、启动快、可低温运行和绿色环保等特性^[1],在平衡经济快速发展和实现“双碳”战略目标的进程中具有至关重要的作用。通过氢气与氧气的电化学反应将氢能转化为电能,阴极生成水。其运行温度低于80℃,阴极水呈液态。高电流密度下,液态水阻碍氧气传输,导致反应不均,降低输出性能与温度均匀性。优化阴极流场结构可改善传质、加速排水,对提升电池性能与寿命至关重要^[2-4]。

现阶段的流场研究,虽然出现了各类新型流场结构研究,如仿生叶脉^[5-7]、仿鱼骨^[8];但仍然是以传统平行流场^[9,10]、蛇形流场^[4,11]和多孔泡沫流场^[12]等几种类型为主流,做局部结构优化研究,如设置挡板^[13]、点阵^[14]、变截面^[15,16]、波形^[17]。通常以提升排水、氧气传输,协同改善催化反应和温度分布。在阴极流场下游区,水淹问题较为严重。王等人针对大面积平行流场进行渐扩优化设计^[18],以缓解下游水淹问题,从而提升了电流密度均匀性。Li等人提出沿流场方向布置梯度分布的挡板^[19],基于遗传算法优化挡板高度和排布,通过梯度挡板结构增强空气对流效应提高催化反应界面水—气传输,以平衡阴极流场方向的氧气和水分布均匀性。但流场压降较大且加工复杂。Tao等人为解决均质泡沫流场边缘区弱流动产生的水淹问题^[20],发现沿流动方向入口到出口对角线孔隙梯度减小的非均质泡沫流场比均质的发电性能高出14%,原因是改善了氧气传输和下游水淹。Sevinc等人提出了沿着气体流动方向设置梯度的多孔泡沫布置^[21],与蛇形流场对比能将净功率输出增加17.6%。但流场结构较为复杂。在各种流场结构中,水管理需求是具有区域差异性特点的。均质/等性流场常出现非均匀性的反应和水热分布^[22]。

为了匹配流场上下游氧气分布均匀性,Yang等人提出多入口多出口的传统平行流场^[23]。通过重整氧供应机制,解决了流场下游水淹缺氧问题,显著提升电池内部的水热均衡并降低电压波动率达

30%。Wang等人^[24]提出在平行流场方向设计三个子入口重整氧气分布,利用不同入口不同干湿特性,调控流场方向水热平衡,但双极板的肋下水淹仍不可避免。Li等人对长流道流场燃料电池的研究^[25],证实阴极相对湿度的提升虽能强化传质,但在高负荷工况下会因流场末端的水淹现象明显限制电流密度的输出。综上所述,沿阴极流场方向的水管理存在区域性差异,尤其在长程或大尺寸流场中,水淹与氧浓度衰减问题较为严重。当前研究虽已初步缓解该问题,但仍缺乏高效的水、气传输主动调控。

为此,针对长流场或大面积流场上下游水管理失衡问题,本论文创新提出了一种分区水、气传输调控的分区流场,以实现对流场上游和下游的水、气传输的区域化精准调控。研究分区结构对PEMFC极化性能的影响,探究分区水气调控的可行性。再深入研究阴极化学计量比和分区湿度对水热分布调控的影响规律,阐明分区水气调控特性,为大尺寸流场的分区水热管理优化设计提供理论参考。

1 PEMFC数值模拟

1.1 分区流场几何模型

如图1a所示,质子交换膜燃料电池由阳极和阴极对称的双极板、气体扩散层、催化层组成,阴极和阳极侧之间夹着仅允许质子通过的质子交换膜。所有研究案例的阳极流场均保持一致,为多通道平行的U型流场,见图1b。如图1c、1d所示,在本次研究中涉及的阴极流场结构主要有传统平行流场以及新型分区流场。为了探究分区流场的分区水、气调控能力,还考虑分区流场中间补气位置关闭的情况,此时的阴极流场结构与阳极的U型流场一样。因此,本论文重点对比研究了阴极的平行流场、U型流场和分区流场,以阐明分区流场对流场上游和下游分区(见图1c、1d)的水、气调控规律以及燃料电池输出性能的影响。

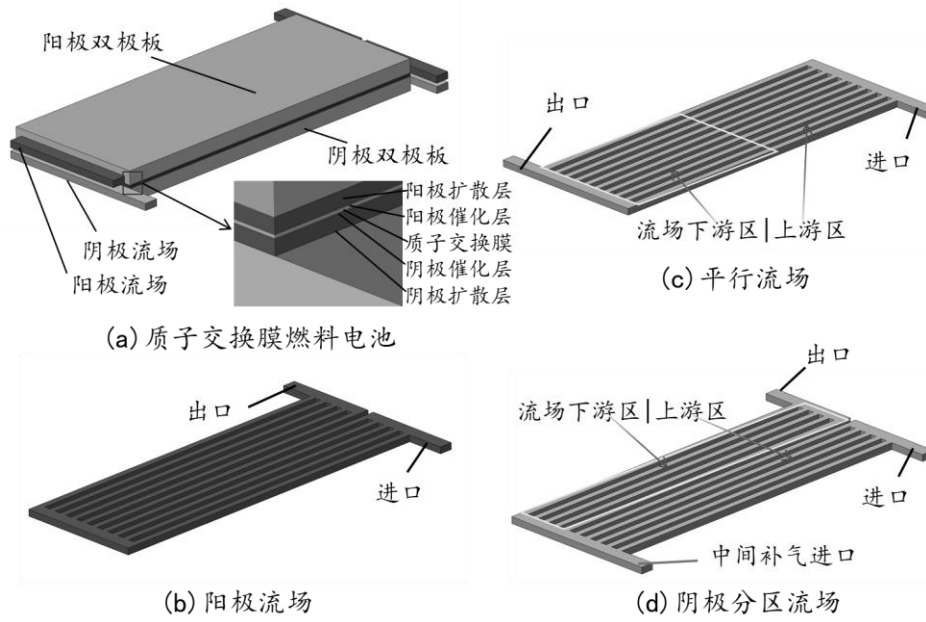


图1 质子交换膜燃料电池结构及分区流场

Figure 1 Structure and segmented flow field of proton exchange membrane fuel cell

表1 模型尺寸

Table 1 Model dimensions

几何参数	值	几何参数	值
通道截面尺寸	1mm×1mm	中间补气截面尺寸	1mm×2mm
通道长度	50mm	气体扩散层厚度	0.2mm
双极板厚度	1.5mm	催化层厚度	0.012mm
有效反应面积	21×50mm ²	质子交换膜厚度	0.036mm
阴极进出口截面尺寸	1mm×2mm	催化层孔隙率	0.2
阳极进出口截面尺寸	1mm×2mm	气体扩散层孔隙率	0.6

1.2 数学模型及主要边界条件

在这项研究当中,采用了一种三维非等温、多相流的PEMFC数值模拟模型,模型做了以下假设:燃料电池处于稳定运行状态,反应气体在通道的流动是稳定的层流和不可压缩;反应物是理想气体。质子交换膜是密不透气的。气体扩散层和催化层是均质的多孔介质材料。

所有混合气体反应物的流动与反应,首先满足以下连续性、动量和能量守恒方程:

连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程^[26, 27]:

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

$$\nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u} \vec{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_{mon} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \varepsilon c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_T \quad (3)$$

u, ρ, p, μ, T 分别是混合气体的运动速度、密度、压力、动力黏度以及温度。 ε 是多孔介质的孔隙率。 c_p 是气体的定压比热。 k_{eff} 是有效的导热系数, S

是源项。下标 m 和 mon 分别代表的是质量源项和动量源项。

气体的组分输运守恒方程,见式(4)^[26, 27]。

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{eff} \cdot \nabla Y) + S_i \quad (4)$$

i 分别表示氧气、氢气和蒸汽以及氮气。 Y 是质量分数, D_i^{eff} 表示气体有效扩散系数,见式(5)^[26, 27]。受液态水饱和度 s 、参考温度 T_{ref} 、气体温度 T 、参考压力 p_{ref} 、压力 p 、孔隙 ε 以及 D_i^0 气体参考扩散系数的共同影响。

$$D_i^{eff} = (1 - s) \varepsilon^{1.5} D_i^0 \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{1.5} \left(\frac{p_{ref}}{p} \right) \quad (5)$$

在气体扩散层与催化层中的液态水传输方程,见式(6)^[26, 27]。

$$\nabla \cdot \left(\rho_l \frac{K_s}{\mu_l} \frac{dp_c}{ds} \nabla s \right) = r_w \quad (6)$$

ρ_l, μ_l 是液态水的密度和动力黏度。 K 绝对渗透率。 r_w 冷凝速率, p_c 是毛细驱动力, b 为常数。

在阴极和阳极催化层中的催化反应速率,由 Butler-Volmer 函数描述,见式(7)和(8)^[26, 27]。

$$\text{阳极: } J_a = A J_{0,a}^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{\gamma_c} \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta_a}{RT} \right) - \exp \left(- \frac{\alpha_c F \eta_a}{RT} \right) \right] \quad (7)$$

$$\text{阴极: } J_c = A J_{0,c}^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right)^{\gamma_c} \left[\exp \left(- \frac{\alpha_c F \eta_c}{RT} \right) - \exp \left(\frac{\alpha_a F \eta_c}{RT} \right) \right] \quad (8)$$

J_0^{ref} 参考交换电流密度。 C, A, γ 和 ref 分别是氢氧浓度、反应面积、浓度指数和参考值。 α, R 和 F 为

传递系数、通用气体常数和法拉第常数。 a 、 c 分别代表阴极和阳极和阴极。

在分区流场的PEMFC数值模拟模型中,采用的关键边界条件参数,如表2所示。主要涉及电池的运行压力、电池温度、进气条件以及电催化反

应的参数。另外,还包含阴极化学计量比和补气通道与主通道相对湿度比,是本文重点研究内容之一。在研究这些参数的影响时,局部补气进口的设置为固定流量比,即阴极主进气的质量流量与局部补气的比值保持恒定。

表2 模拟所采用的边界条件参数

Table 2 Boundary condition parameters used in the simulation

参数	值
运行压力 (Pa)	101325
电池温度 (K)	333
阳极进口的湿度 RH 、化学计量比 S_t 和进口温度 T	10%、2.0、333
阴极进口的湿度 RH 、化学计量比 S_t 和进口温度 T	80%、2.0、333
局部补气进口的固定流量比和湿度、温度	0.36、10%、333
开路电压 (V)	1
运行电压 (V)	1.0~0.5
催化层和气体扩散层的绝对渗透率	10e-13/10e-12
阴极、阳极的参考交换电流密度 (A/cm^2)	0.001/1
阴极、阳极的参考浓度 (mol/m^3)	3.39/56.4
阴极、阳极的浓度指数	0.8/1
阴极、阳极的传递系数	0.8/0.5
氢气的参考扩散系数 (m^2/s)	9.15e-05
氧气的参考扩散系数 (m^2/s)	3.23e-05
水蒸气的参考扩散系数 (m^2/s)	7.35e-05
模拟变量参数:阴极化学计量比	1.5、2.0、2.5、3.0、3.5
模拟变量参数:补气通道与流场进口通道(主通道)的相对湿度比	20%:70%、30%:60%、40%:50%、50%:40%、60%:30%

1.3 网格划分与模型验证

如图2a所示,设置了5万~99万的7种网格数量,在电池电压为0.5 V的分区流场结构下进行网格无关性验证。当网格数量超过60万~99万时,电流密度输出由1.2098升高至1.2127 A/cm^2 ,电流密度输出的误差值低于5%。因此,本论文的所有反正模型的网格数量均超过60万。在实验和模拟条件保持一致,均为343K的电池温度、湿度80%、化学计量比3/5进行实验验证。单蛇流场下燃料电池极化曲线实验和模拟数据对比,见图2b。由于在高化学计量比容易发生流场上游的膜脱水现象,导致低电流区的预测误差较大。但整体上实验与模拟数据基本吻合,特别是高电流密度区基本一致,而此区域是本论文的研究重点,因此基本验证了燃料电池数值模拟模型的可靠性。在本项研究过程中,采用的数值研究数学模型、模型参数和膜电极参数均与实验验证过程保持一致,仅改变流场结构。该研究方法在燃料电池新型流场研究中被认为是可靠且广泛应用^[27, 28]

2 结果讨论与分析

2.1 不同流场结构的性能对比

图3所示为三种阴极流场的极化性能对比,研究条件为:电池温度333K、阳极和阴极的化学计量比与相对湿度分别为2.0/2.0和10%/80%。在0.5V~0.65V之间时,不同流场结构下的燃料电池极化性能出现明显差异。在0.5V的燃料电池电流密度输出性能依次为分区流场>U型流场>平行流场。相比于传统平行流场燃料电池,分区流场的电流密度输出增加了11.5%。从最大功率输出情况看,分区流场燃料电池的最大功耗输出增加了10.1%。

如图4所示,为0.5V时三种流场的阴极催化层中液态水、交换电流密度和温度的分布情况。对于液态水分布,U型流场和分区流场的液态水含量比平行流场更高,尤其是U型流场。液态水含量增加使U型和分区流场的催化反应强度更高(见图4交换电流密度分布,反映了催化反应强度),从而产生了更多液态水。特别是在流场上游区域,两种流场

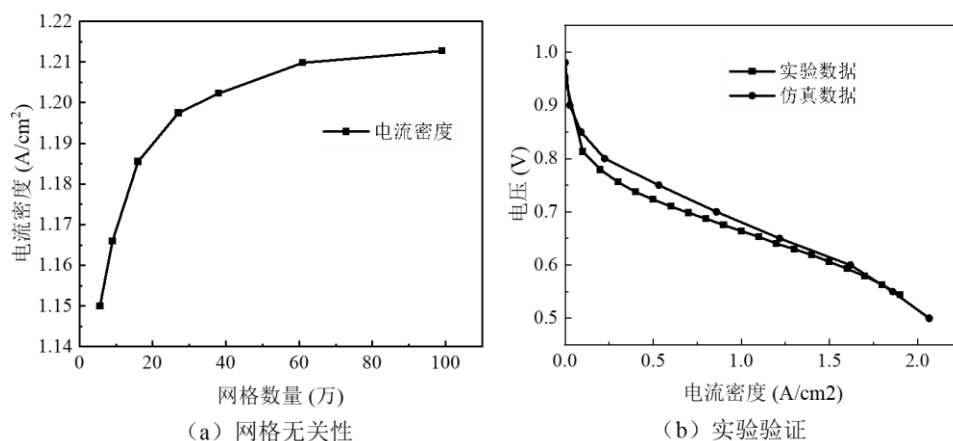


图2 网格无关性和实验验证

Figure 2 Grid independence and experimental verification

的催化反应强度明显优于传统平行流场,也就对应着存在更多液态水。在流场下游区,分区流场借助局部补气进口,为流场下游补充氧气,增加了下游区域的总流量或气体流速,加速了液态水的排出。然而,流场上游的水淹现象依然较为明显。对于温度分布,在平行流场、U型流场和分区流场,流场上游氧气浓度高,使得反应强度高因而温度较高,但

产水量较多且无法有效排水,从而阻碍了流场上游热堆积。在流场下游区域,与其他两种流场相比,分区流场下游的局部补气提高了气体流速,能更有效地将液态水和热量带出电池,避免了热量堆积或热点问题,因而温度较低。因此,如何灵活解决流场上游水管理问题有待深入解决,这在3.2和3.3中做深入讨论。

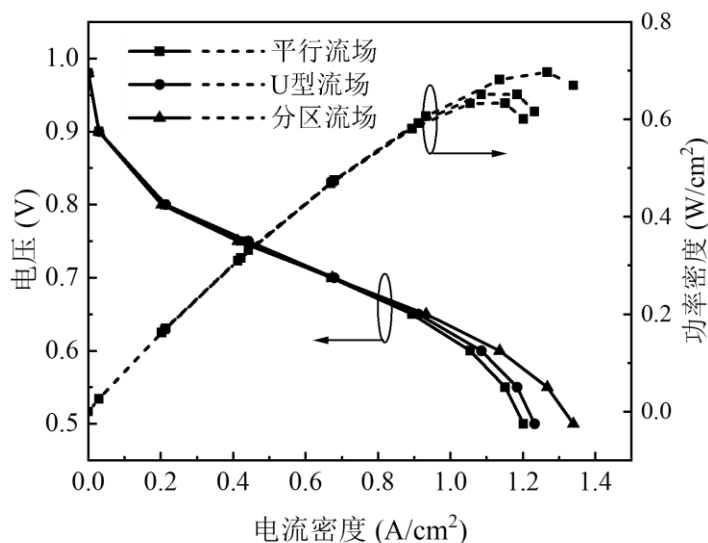


图3 不同结构下的极化曲线和功率输出特性

Figure 3 Polarization curves and power output characteristics under different structures

另外,通过研究局部补气流量比对电流密度的影响研究,见表3所示。可以发现,在其他条件不变的情况下,随着局部补气流量的增加,电流密度在不断提高,表明流场流场下游的液态水在逐渐排出。然而电流密度的增加幅度随局部流量的增加却在减少,特别是在0.46之后。原因在于,图4所示的流场下游的液态水饱和度已低于0.04,处于已接

近膜脱水的状态。因此,选择0.36或0.46作为补气流量比较为合适。因此,从减少气体补气流量的角度,后续研究均选用0.36。

2.2 阴极化学计量比对水传输和压降的影响

为了提升流场上、下游的水管理能力和提升电池发电性能。深入研究阴极化学计量比对三种流场燃料电池输出性能的影响,见图5所示。电池的

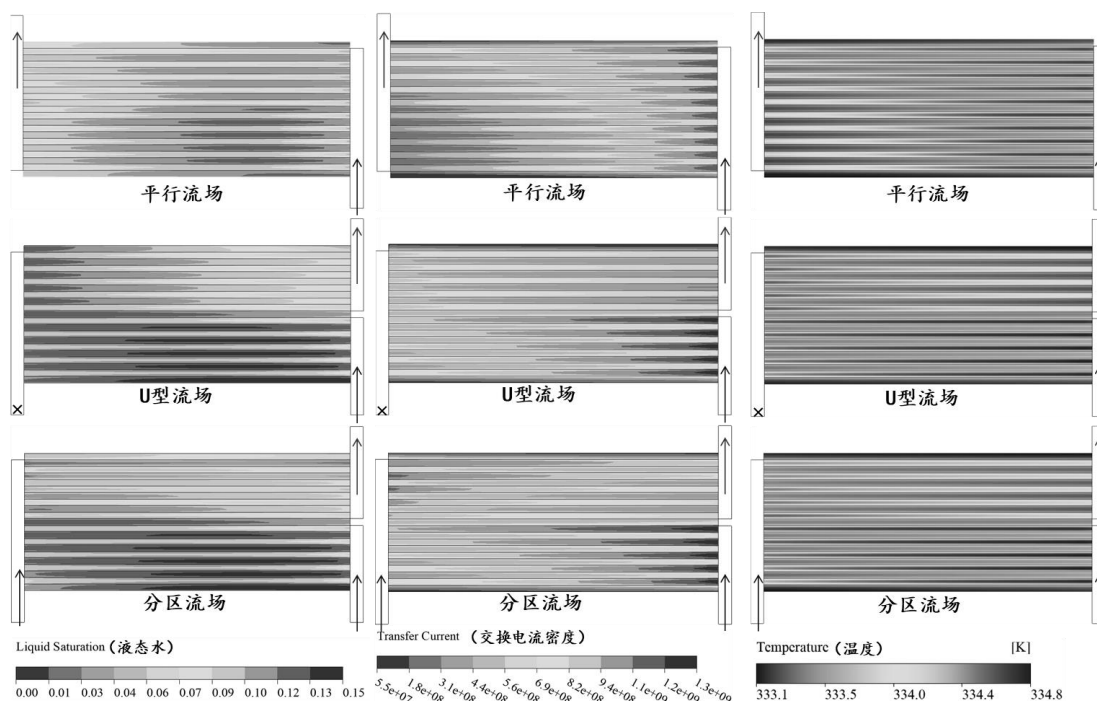


图4 在0.5V下,阴极催化层中液态水、交换电流密度和温度的分布情况

Figure 4 Distribution of liquid water, transfer current and temperature in the cathode catalyst layer at 0.5 V

表3 局部补气流量比对电流密度输出的影响

Table 3 Effect of local supplementary air flow ratio on current density output

序号	局部补气流量比	电流密度 A/cm^2
1	0.26	1.318
2	0.36	1.339
3	0.46	1.356
4	0.56	1.368
5	0.66	1.377
6	0.76	1.387

电流密度输出随着阴极化学计量比的增加而增加。因为阴极化学计量比增加,意味着氧气流量增加,从而为阴极催化层提供更多氧气,所以增加了电流密度输出。结果发现,在1.5~3.5化学计量比下,分区流场燃料电池电流密度比传统流场的提升幅度高达8.3%~13.8%,特别是在低化学计量比下的提升幅度最为明显。

另外,如表4所示,为不同化学计量比下的各流场进出口压降分析。所有流场的出口仅有一个,且出口背压为大气压101325Pa。可以看出,即使是在不同的化学计量比下,分区流场与其他流场的进出口压降相比,最高仅高出220Pa。分区流场的局部补气进出口的压降值与主进气的相比,均略低26.84~58.98Pa。这表明分区流场的局部补气口的

压力与主进气口的压力几乎相当,即补气进口后的流场压降较小。同时,从不同流场的整体压降值再对比,证实了分区流场的压降与传统流场和U型流场的压降同属于一个压降量级,都是低压降的流场结构。有利于减少辅助泵功耗。同时,也证明了该流场结构不以牺牲巨大流场压降来获得输出性能的提升。

不同化学计量比下,催化层液态水分布如图6所示。对于平行流场和分区流场,增加阴极化学计量比使得阴极流场内气体流速增加,可以加快气体扩散层和催化层的排水,并加速液态水往流场下游转移。然而,化学计量比的增加,同步提升了阴极催化层的反应强度,导致液态水生成量明显增加。显然,从催化层中液态水生成量大于流场排水量。此外,不同化学计量比下的分区流场下游排水能力优于流场上游,极大程度上解决了下游水淹问题,但分区流场上游因强烈的催化反应产生的水淹问题未能解决。

2.3 分区湿度对水气传输调控

为了解决流场上游的水淹和提升阴极水管理平衡问题,研究了阴极分区流场的局部补气与主通道的分区湿度比对电池性能的影响和水分布调控的影响。如图7所示,随着局补气进口的湿度增加和分区流场主通道进气湿度减小,燃料电池的电流

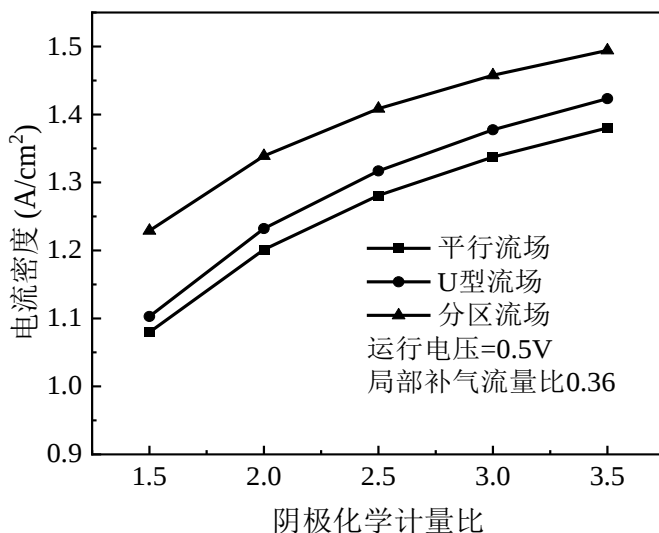


图5 阴极化学计量比对三种流场燃料电池输出性能的影响

Figure 5 Effect of cathode stoichiometric ratio on the output performance of fuel cells with three flow field configurations

表4 不同阴极化学计量比的各流场阴极进出口压降

Table 4 Cathode inlet-outlet pressure drop for various flow fields under different cathode stoichiometric ratios

阴极化学 计量比	PaUnit: Pa			
	传统流场	U型流场	分区流场	
	阴极进出口 压降	阴极进出口 压降	阴极进出口 压降	局部补气进 出口压降
1.5	42.58	87.08	114.18	87.34
2.0	62.94	126.02	168.65	133.49
2.5	86.16	169.13	228.89	185.48
3.0	112.03	216.06	295.36	244.02
3.5	140.36	266.63	368.32	309.34

输出得到了显著提升。与化学计量比为3.0的平行流场燃料电池相比,分区湿度比为60%:30%的分区流场的电流密度输出提升了12.9%。

如图8所示,为分区流场的湿度比对上下游水传输的影响。可以发现,局部补气湿度可以调控流场下游的水传输能力。而主通道湿度可以重点调控流场上游的水传输。分区湿度比30%:60%,流场下游除水能力较强,液态水饱和度明显降低,但流场上游因湿度略高,导致液态水饱和度过高和水淹现象。当分区湿度比60%:30%,流场上游的水淹问题得以缓解,同时流场下游并未因高湿度发生水淹,因为分区流场对下游的氧气含量进行了局部补充,气体流量明显升高,从而提升了流场下游的排水速度。因此,通过分区流场可以对水 and 气实现耦合调控,比传统平行流场灵活性更高,流场水管理平衡的调控能力更强。

此外,对比于平行流场下游的电流密度存在明显的衰减情况,分区流场的灵活分区水、气传输调控,催化层中电流密度的分布均匀性明显提高。具体地,通过引入变异系数作为其均匀性评价指标。变异系数是衡量数据离散程度的相对指标,定义为标准差与均值的比值,可用来评估均匀性。同时提取了不同流场下催化层的相同位置电流密度数据,计算出平行流场、分区流场分区湿度比30%:60%和60%:30%的变异系数分别为12.43%、10.61%和6.48%。湿度比为60%:30%的分区流场比传统流场均匀性提高了52.1%。综上所述,燃料电池的分区流场具备灵活的水、气分区调控特性,对提升电池内部水传输平衡和电流密度输出以及延长燃料电池使用寿命具有重要意义。

3 结论

本论文针对高电流密度下质子交换膜燃料电池阴极水淹与传质不均的问题,提出一种分区型流场,研究了分区流场结构性能及其分区调控操作参数,实现对燃料电池内部水传输分区调控管理,并提升电池输出性能,主要结论如下:

(1)相比于传统流场,分区流场通过上下游的结构与局部补气设计,其能增强流场上游和下游的水、氧气传输,从而增强了整个阴极的催化反应和加速下游的排水,使得分区流场PEMFC的功率密度最大值提高了10.1%和降低下游水饱和度。此外,该流场还具备低压降的特性。

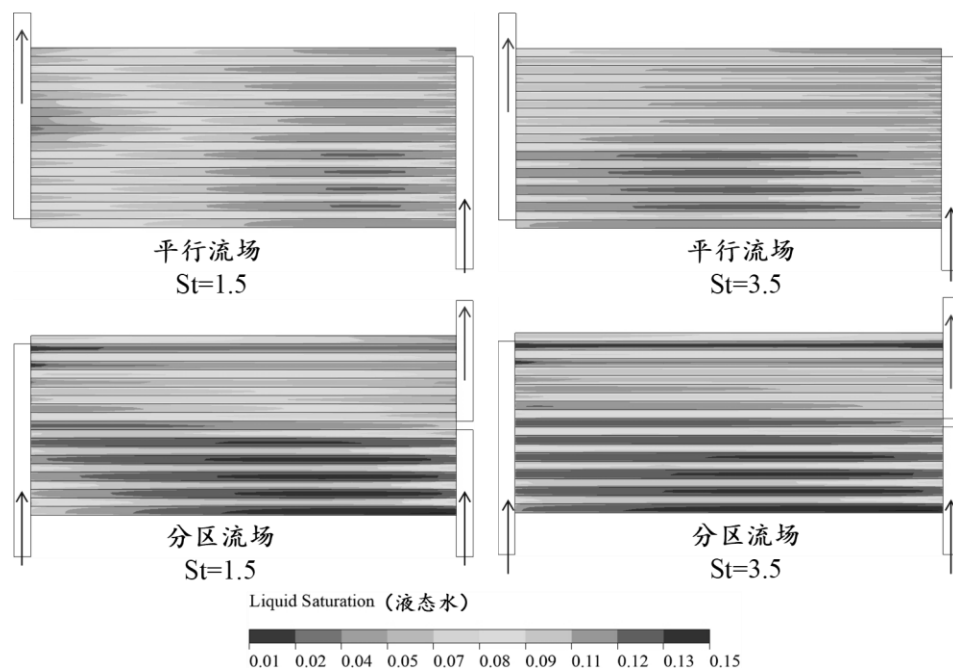


图6 不同化学计量比下的催化层液态水分布

Figure 6 Distribution of liquid water in the catalyst layer under different stoichiometric ratios

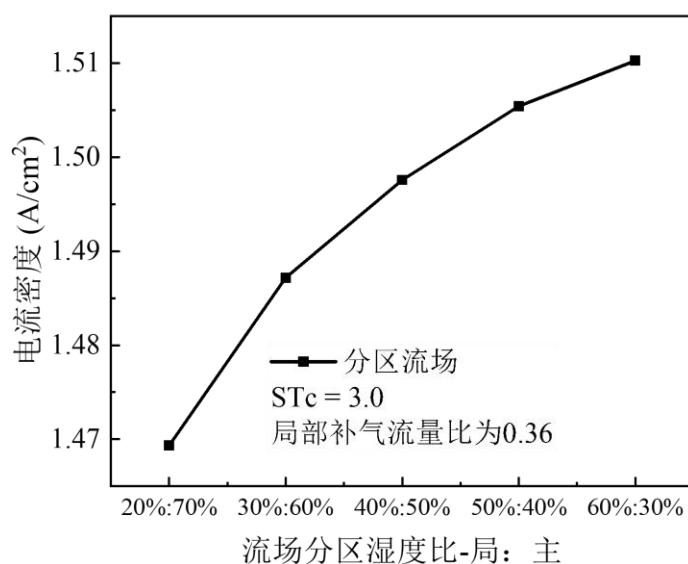


图7 分区流场的局部补气与主通道的分区湿度比对电池输出性能的影响

Figure 7 Effect of local air supplementation in the segmented flow field and the segmented humidity ratio in the main channel on cell output performance

(2)研究阴极化学计量比对分区流场的上下游水分布的影响。电流密度随着化学计量比的增加而,但流场上游水淹仍然较为严重,几乎没有明显变化。原因在于化学计量比增强反应的同时产生更多液态水,反而制约电流输出。但低化学计量比下,分区流场对缓解水淹有明显作用,因而电流密度提升幅度较大。

(3)为了深入提升流场整体的水平衡能力,探

究了分区湿度对整个流场的水传输调控。具体通过分区流场局部补气和主通道供气的湿度比,以优化上下游水分布均匀。结果表明:当分区流场局部和主进气的湿度比为60%:30%时,根据分布均匀性指标变异系数分析比平行流场提高了52.1%,从而实现了整体水分布均匀传输调控。此时,相比于传统流场,分区流场将电流密度输出提升至12.9%。

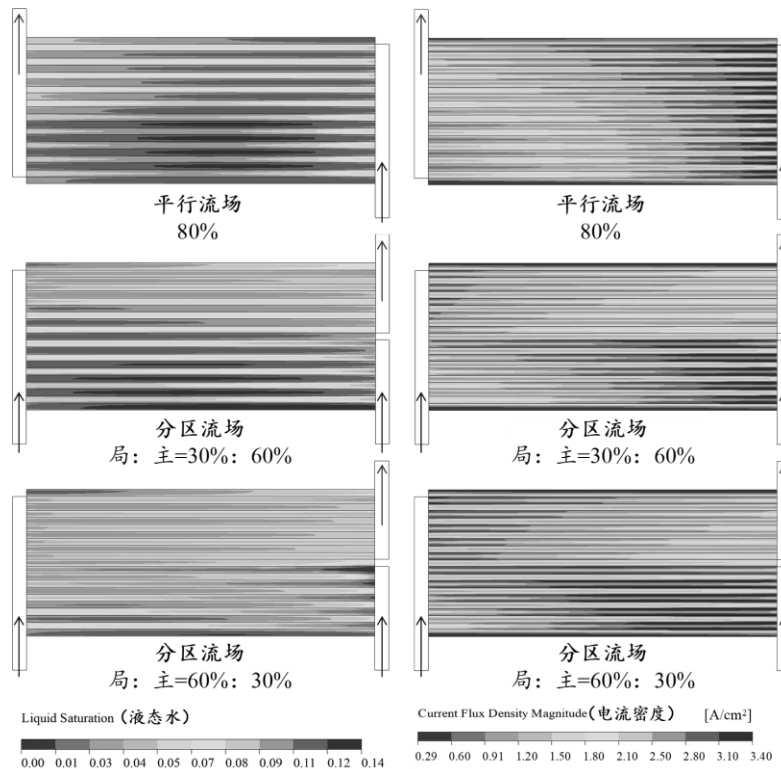


图8 分区湿度比对催化层液态水传输调控及电流密度的影响

Figure 8 Effect of segmented humidity ratio on the regulation of liquid water transport in the catalyst layer and current density

参考文献

- [1] Zhang F, Zu B F, Wang B W, et al. Developing long-durability proton-exchange membrane fuel cells[J]. Joule, 2025, 9(3): 101853.
- [2] 陈海平, 侯明, 高燕燕, 等. 质子交换膜燃料电池气体扩散层耐久性研究[J]. 电源技术, 2020, 44(5): 693-697, 735.
- [3] Rosmin A P P, Hidayat M I P, Pramata A D. Recent progress on machine learning techniques for flow field optimization toward performance and commercial scale proton exchange membrane fuel cell: a systematic review[J]. Results in Engineering, 2026, 29: 109519.
- [4] 陈森洋, 靳蒲航, 谭志明, 等. 质子交换膜燃料电池中蛇形流道液滴运动数值仿真研究[J]. 化工学报, 2024, 75(S1): 183-194.
- [5] 甘忠禹, 陈涛, 张瑞轩, 等. 质子交换膜燃料电池叶脉型流场结构设计及优化[J]. 电源技术, 2024, 48(7): 1327-1333.
- [6] 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.
- [7] 隋智科. 双银杏叶叶脉流场结构对质子交换膜燃料电池性能影响研究[硕士]. 山东建筑大学; 2025.
- [8] 杨抖. 质子交换膜燃料电池精细化鱼骨流道结构及性能分析[硕士]. 燕山大学; 2025.
- [9] 詹昕, 宋微, 丁峰, 等. 质子交换膜燃料电池不同流场结构的分布特性研究[J]. 电源技术, 2025, 49(1): 192-201.
- [10] 张智明, 陈冲, 梁启昕, 等. 多平行子流道结构质子交换膜燃料电池的新型阴极双极板流场设计(英文). 同济大学学报(自然科学版). 2025;53(S1):373-85.
- [11] 秦磊, 郭雪岩. PEMFC 阴极蛇形通道两相流动特性的数值研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 21-28.
- [12] 左启斌, 张涵, 孙传付, 等. 镍/石墨烯涂层在质子交换膜燃料电池泡沫金属流场上的应用[J]. 化工进展, 2025, 44(9): 5195-5201.
- [13] 黄锐, 曾其权, 蔡永华. 具有堵块结构的 PEMFC 阴极流场的传质性能[J]. 电池, 2024, 54(4): 455-460.
- [14] Miao W Z, Fan F, Fang H Y, et al. Characteristics of electrochemical reaction process in the proton exchange membrane fuel cell considering the bio-inspired crescent-shaped dot matrix substrate flow field structure[J]. Fuel, 2026, 404: 136231.
- [15] Binyamin, Lim O. Numerical investigation of tapered flow field configuration to improve mass transport and performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 470-491.
- [16] Li T Y, Zhou K, Lin G Y, et al. Variable cross-section flow field structure for improved water management in PEMFC[J]. Ionics, 2023, 29(1): 299-311.
- [17] Wang B, Pan W T, Hu Z C, et al. Impacts of scale-up and flow uniformity on performance of PEM fuel cells with wave flow fields[J]. Renewable Energy, 2025, 255: 123691.
- [18] 王誉霖, 张晓剑, 管超, 等. 大面积质子交换膜燃料电池平行流场优化设计[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(3): 975-981.
- [19] Li W Z, Yang W W, Wang N, et al. Optimization of blocked channel design for a proton exchange membrane fuel cell by coupled genetic algorithm and three-dimensional CFD modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(35): 17759-17770.
- [20] Tao X X, Zeng Z, Liu H Y, et al. PEM fuel cell with non-uniform

- porous metal foam as cathode flow field[J]. Applied Energy, 2025, **380**: 124938.
- [21] Sevinc H, Hazar H. Performance enhancement of PEM fuel cells using novel porous flow field designs[J]. Energy Conversion and Management, 2026, **353**: 121201.
- [22] 陈昕, 叶丁丁, 汪洋, 等. 气体扩散层梯度孔隙率结构对质子交换膜燃料电池性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2025, **46**(10): 3251–3257.
- [23] Yang H, Liu Y, Lei J L, et al. Experimental investigation of hydrogen supply characteristics for proton exchange membrane fuel cells with multi-inlet multi-outlet configuration[J]. Renewable Energy, 2026, **256**: 124510.
- [24] Wang YL, Xu H K, Wang X D, et al. Multi-sub-inlets at cathode flow-field plate for current density homogenization and enhancement of PEM fuel cells in low relative humidity[J]. Energy Conversion and Management, 2022, **252**: 115069.
- [25] Li X L, Ge ZY, Zhang R R, et al. Measurement and analysis on current density distribution of long-channel proton exchange membrane fuel cell: Insights from operational conditions and electrochemical impedance[J]. Energy, 2025, **318**: 134790.
- [26] Chen C D, Wang C H, Zhang Z H. A novel channel design and heat and mass transfer analysis of fuel cells[J]. Energy Conversion and Management, 2022, **254**: 115273.
- [27] Qi W J, Zhu M H, Zhao S C, et al. Performance enhancement of proton exchange membrane fuel cells based on semi-parallel and semi-interdigitated mixed flow field[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, **231**: 154871.
- [28] Wang N X, Cheng Y L, Zhang L, et al. Performance of proton exchange membrane fuel cell with bionic fish scale porous flow field design[J]. Energy, 2026, **344**: 139912.