



肋部嵌有多孔材料的PEMFC流场设计及多工况实验

王五月¹, 黄宗明², 李孟涵¹, 刘新健¹, 刘晓日¹, 饶中浩¹

(¹河北工业大学能源与环境工程学院, 先进储能技术与装备河北省工程研究中心,
天津 300401; ²北京汽车研究总院有限公司, 北京 101300)

摘要: 针对质子交换膜燃料电池常规流场存在的肋下传质困难、液态水易积聚等问题, 本研究提出了一种在流场肋部嵌入多孔材料的结构优化方法, 系统研究了该设计对电池输出性能的影响。实验采用蛇形流场 (SFF) 和平行流场 (PFF) 的单电池, 在阴极流场肋部嵌入泡沫镍基碳多孔材料 (孔隙率为0.9, 孔密度为110 ppi, 1 ppi=0.3937 孔/cm), 通过恒电压模式测试了不同工况下的电流密度、功率密度及流场压降, 并分析了进入空气湿度 (0%~100%相对湿度) 和背压 (100~200 kPa) 对电池性能的影响机制。结果表明, 肋部嵌入多孔材料可显著改善肋下传质性能并强化排水能力, 在低电压工况下性能提升尤为明显; 与基础流场相比, 肋部嵌有多孔材料平行流场 (RPPFF) 的电流密度和功率密度分别提高22.1%和24.1%, 肋部嵌有多孔材料蛇形流场 (RPSFF) 电流密度和功率密度分别提高13.8%和15.8%。进入空气相对湿度从0%增至70%时, RPPFF和RPSFF的功率密度分别提升9.8%和7.8%, 继续增湿至100%时性能无明显变化。背压从100 kPa提升至150 kPa可使RPPFF和RPSFF的电流密度分别提升7.1%和5.8%, 但过高背压 (200 kPa) 会抑制高电流密度工况下的液态水排出, 导致输出功率下降。此外, 肋部多孔材料的引入降低了流场压降, 使功率转化效率 (PCE) 提升42% (RPPFF) 和74.4% (RPSFF)。本研究为质子交换膜燃料电池流场结构优化提供了有效的实验依据和技术参考。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 多孔材料; 流场优化; 强化传质; 功耗比

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1178

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2118-12

Design of a proton exchange membrane fuel cell flow field with porous material embedded in the ribs and experimental study on performance under multiple operating conditions

WANG Wuyue¹, HUANG Zongming², LI Menghan¹, LIU Xinjian¹, LIU Xiaori¹, RAO Zhonghao¹

(¹School of Energy and Environmental Engineering, Hebei Engineering Research Center of Advanced Energy Storage Technology and Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; ²Beijing Automotive Research Institute Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: This study addresses the issues of poor mass transfer and liquid water accumulation under the ribs in conventional flow fields of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). A structural optimization method is proposed by embedding porous materials into the rib regions. The impact of this design on cell output performance was investigated.

收稿日期: 2025-12-31; 修改稿日期: 2026-03-06。

第一作者: 王五月 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为质子交换膜燃料电池水热管理, E-mail: 202421301001@stu.hebut.edu.cn; 通信作者: 刘晓日, 教授, 研究方向为燃料电池水热管理, E-mail: liuxiaori@hebut.edu.cn。

引用本文: 王五月, 黄宗明, 李孟涵, 等. 肋部嵌有多孔材料的PEMFC流场设计及多工况实验[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2118-2129.

Citation: WANG Wuyue, HUANG Zongming, LI Menghan, et al. Design of a proton exchange membrane fuel cell flow field with porous material embedded in the ribs and experimental study on performance under multiple operating conditions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2118-2129.

Single cells with serpentine flow field (SFF) and parallel flow field (PFF) were tested using nickel foam-based carbon porous materials (0.9 porosity, 110 ppi pore density) embedded in the cathode rib regions. The current density, power density, and flow field pressure drop were measured under constant voltage mode. The influence mechanisms of air inlet humidity (0%—100% RH) and back pressure (100—200 kPa) on cell performance were analyzed. The findings indicate that the incorporation of porous materials within the ribs significantly enhances under-rib mass transfer and augments water drainage capacity. This is particularly evident under low-voltage conditions. A comparison of baseline flow fields with the current density and power density of rib-embedded PFF (RPPFF) reveals an increase of 22.1% and 24.1%, respectively. Similarly, the current density and power density of rib-embedded SFF (RPSFF) increased by 13.8% and 15.8%, respectively. As the relative humidity increased from 0% to 70%, power densities of RPPFF and RPSFF exhibited enhancements of 9.8% and 7.8%, respectively, with minimal alterations observed at 100% RH. An increase in back pressure from 100 to 150 kPa resulted in enhancements of 7.1% and 5.8% in the power densities of RPPFF and RPSFF, respectively. However, at back pressures exceeding 200 kPa, the suppression of liquid water removal at high current densities led to a reduction in output power. Furthermore, the incorporation of rib-embedded porous materials led to a substantial reduction in flow field pressure drop, resulting in a notable enhancement in power conversion efficiency by 42% for RPPFF and 74.4% for RPSFF. This study offers compelling experimental evidence and technical references for flow field structural optimization in PEMFCs.

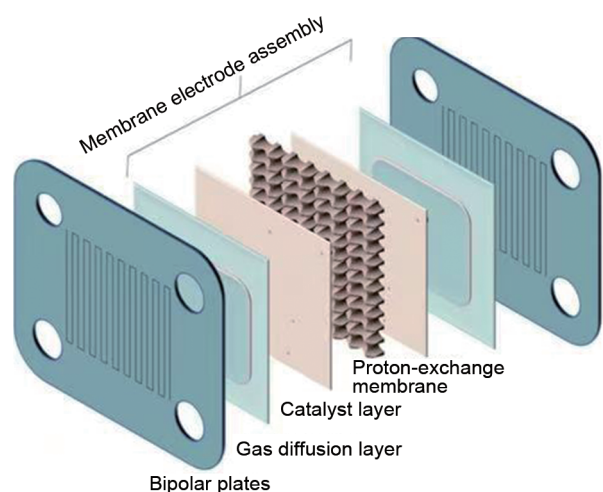
Keywords: hydrogen fuel cell; porous material; flow field optimization; enhanced mass transfer; power consumption ratio

随着工业化和城市化进程的加快, 人类对能源的需求与日俱增, 发展清洁的可持续能源是能源未来发展的重要方向^[1]。氢气的燃烧热值很高, 与其他传统燃料相比, 相同质量的氢气在燃烧时能释放出更大的能量^[2]。氢气燃烧的产物只有水, 对环境十分友好。此外, 氢气属于可再生能源, 可以通过电解水制取, 风能、太阳能、水能等可再生能源是制取氢气的重要来源^[3]。综上可得, 氢能非常有希望取代传统化石能源成为人类未来社会的主要能源^[4]。

质子交换膜燃料电池是氢能的主要利用形式之一。质子交换膜燃料电池的工作原理可以简单概括为: 氢气和氧气进入电池内部后发生电化学反应并生成水^[5], 同时向外电路输出电流^[6]。质子交换膜燃料电池单电池主要由气体扩散层 (gas diffusion layer, GDL)、催化剂层 (catalyst layer, CL)、质子交换膜 (proton-exchange membrane, PEM)、双极板 (bipolar plate, BP) 这几部分构成^[7-9], 电池阴阳两极对称分布。电池结构如图1所示^[10]。双极板

的作用是支撑膜电极, 为反应气体的输送提供流场以及传导电流。双极板需要有良好的导电性和气密性, 同时还要耐腐蚀。常用的双极板材料有石墨和金属。质子交换膜起着传输氢离子和隔绝阴阳两极的作用, 是电池的核心部件, 需要有良好的导电性、较高的机械强度和优异的质子传导性。气体扩散层为反应气体和水提供了传输通道, 同时还起到了支撑催化剂层和传导电流的作用^[11]。气体扩散层需要具有适宜的透气性、良好的导电性和柔韧性, 通常由碳多孔材料制成。催化剂层是金属催化剂的载体, 为电化学反应的进行提供了场所, 电化学反应速率的高低取决于其内部三相接触点的特性^[12]。氢燃料电池电堆由多个单电池堆叠而成, 阳极流场板和阴极流场板的另一侧均有冷却水流场^[13]。组装完成后阴阳两极的流场板不仅起到输送反应气体的作用, 同时还起到输送冷却水的作用^[14]。

作为电池的关键组件, 双极板流场结构直接影响着反应气体的分布均匀性、传质效率和电池输出

图1 质子交换膜燃料电池结构^[10]Fig.1 Proton exchange membrane fuel cell structure diagram^[10]

性能。为了克服传统平行、蛇形及交指流场存在的气体传输路径长、分布不均等方面的局限性,近年来研究者在三维多孔流场(如泡沫金属/碳/石墨烯)的设计、优化及应用方面开展了大量工作。Jiao等^[15]系统评估了三维多孔流场在质子交换膜燃料电池中的应用潜力。研究表明,相较于传统平行、蛇形或交指流场,多孔金属/碳/石墨烯泡沫可显著缩短气体传输路径、促使反应气均匀分布并降低接触电阻,从而将单电池峰值功率密度提升10%~50%。进一步地,当把多孔材料与肋部或流道整合形成“泡沫-肋”复合结构,或在肋内插入梯度孔隙率泡沫时,极限电流密度和最大功率密度可再提高5%~25%,同时保持适中的压降。针对不同的多孔材料,学者通过数值模拟与实验验证相结合的方法进行了深入探讨。Kumar等^[16]建立了采用三维多孔金属流场的电池数值模型,系统研究了多孔金属不同渗透率对电池输出性能的影响。Li等^[17]则通过实验和仿真的方法研究了三维多孔铜流场下电池的输出性能。结果显示,与蛇形流场相比,三维多孔铜流场下气体扩散更均匀,电子传输能力更强。Kim等^[18]的实验测试进一步表明,具有80 ppi(1 ppi=0.3937孔/cm)的三维多孔碳流场下电池表现出最佳性能。多项研究通过对比分析验证了三维多孔流场的优越性。Azarafza等^[19]通过数值模拟对比了平行流场、蛇形流场、交指流场和泡沫金属流场。结果显示,泡沫金属流场下电池输出性能最佳,流场压降适中,电流密度分布更均匀,与平行

流场相比,最高输出功率密度提升了约50%。Jo等^[20]的研究表明,三维多孔金属流场不仅输出性能优于平行蛇形流场,而且更适合在较低湿度条件下使用。为进一步提升电池性能,研究者们对多孔流场结构进行了多方面优化。Lee等^[21]将多孔金属插入阴极平行流场内部,有效减少了电池内部的水分流失,提升了物质和电流密度分布均匀性。Kang等^[22]研究了不同孔隙率梯度对电池输出性能的影响,发现在拥有适宜孔隙率梯度的三维金属多孔流场下,电池最大输出功率密度相比于传统三维均匀多孔金属流场提升了8.23%。Deng等^[23]对比分析了采用多孔肋部与传统肋部的单通道质子交换膜燃料电池。结果表明,多孔肋部可使极限电流密度和最高功率密度分别提升15%和9%,同时改善物质和电流密度分布均匀性。Kariya等^[24]研究了由球形合金粉末组成的多孔流场结构,发现通过安装分隔板可显著提高电池输出性能和氧气输送能力,改进后的多孔流场功率密度提升40%,流场压降减小50%。Gao等^[25]将泡沫金属填充在单通道电池的肋下,形成了复合式泡沫-肋流场结构。研究表明,当泡沫金属填充率为75%、孔隙率为0.85时,电池极限电流密度和最高功率密度相比于基础流场分别提升5.2%和22.68%。Zhao等^[26]设计了一种三维混合润湿性鳍片通道(HFC),用于提升质子交换膜燃料电池(PEMFC)的排水与传质性能。通过模拟优化鳍片的倾斜角度、楔形宽度和间距等关键参数,最优HFC使排水距离、排水率、平均氧质量分数和净功率密度分别提升72.49%、536.94%、11.51%和1.73%。实验表明,在平行流场和蛇形流场中加入混合润湿性鳍片后,峰值功率密度分别提高15.56%和7.94%,显著改善了水管理能力和电池稳定性。García-Salaberri等^[27]分析了质子交换膜燃料电池中多孔流场相比传统肋/通道流场的优缺点。结合实验与数值模拟,研究发现多孔流场能显著提升氧传输效率,降低阴极膜电极组件(MEA)水淹风险并改善物理参数(如电流密度和温度)的面内分布均匀性。但其主要缺点包括多孔界面间的接触电阻增大以及阴极通道内水流拖曳力下降。该研究提出了采用薄型泡沫、增加组装压缩度及设计混合多孔-肋流场等策略以缓解这些问题。Sun等^[28]提出了一种新型多孔晶格流场结构以提升质子交换膜燃料电池性能。通过三维数值模拟与实验验证,设计了8种

多孔晶格流场结构, 其中Kelvin晶格流场表现最佳, 可提高气体传质均匀性、优化氧气分布并提高排水能力, 最终使峰值功率密度达到 0.7074 W/cm^2 , 较传统平行流场提升22.90%。

上述研究侧重于通过数值模拟的方法比较三维多孔/泡沫-肋复合流场与传统流场, 聚焦渗透率、孔隙率、填充率等结构参数对传质均匀性、压降及输出功率的定量影响, 而对肋部嵌入多孔材料流场的实验研究和特性阐明有待进一步开展。本研究搭建了基于蛇形流场和平行流场的氢燃料单电池, 在恒电压条件下测试了其电流密度和功率密度。在各流场肋部嵌入碳多孔材料, 研究加入多孔材料后电池的输出性能变化和流场压降变化, 并定义了功率转化效率(PCE)来评估电池消耗单位泵功率所得到的输出功率, 进一步研究了在不同湿度和压力条件下电池输出性能的变化。

1 实验条件及电池结构

1.1 实验设备及测试条件

本实验采用型号为QTFC-0001T/MEA的氢燃料单电池测试平台, 主要由供气系统、电子负载、水循环加热系统、鼓泡增湿器及控制系统组成。阳极侧由氢气瓶供给氢气(输出压力约 0.5 MPa), 阴极侧通过空气压缩机向储罐(压力约 0.6 MPa)充气后供给空气。实验采用水循环加热方式维持电池温度; 通过鼓泡增湿器与干湿调节阀协同调节入口气体湿度, 背压阀精确控制阴阳极工作压力。鉴于氢气易燃、易爆特性, 实验前必须检查管路气密性以防泄漏; 实验前通入氮气吹扫管路, 杜绝氢气与残留氧气混合引发爆炸。电池工作温度 60°C 、阴阳极背压均为 150 kPa 、氢气进气流量 0.8 L/min (干态)、空气进气流量 3 L/min (相对湿度100%)。测试时电子负载设定为恒电压模式, 待输出功率稳定后记录数据。

1.2 电池结构及工作原理

实验所用单电池结构如图2所示, 核心组件包括极板、MEA、水加热板、集流板及紧固件。其中, MEA由气体扩散层、催化剂层与质子交换膜构成。

氢气与空气经极板流场均匀分配后进入电池内部, 在催化剂层发生电化学反应生成水并向外电路输出功率。反应生成的水在气体吹扫作用下经流道

排出。气体扩散层为反应气体渗透至催化剂层提供多孔通道并传导电子; 质子交换膜则起到隔绝阴阳极气体(防止氢氧混合)与传导质子的双重作用。反应产生的电流经集流板传输至电子负载, 阴极集流板接电子负载正极, 阳极集流板接电子负载负极, 形成完整回路。各组件通过螺栓紧固, 螺栓有绝缘套以防止电池短路。

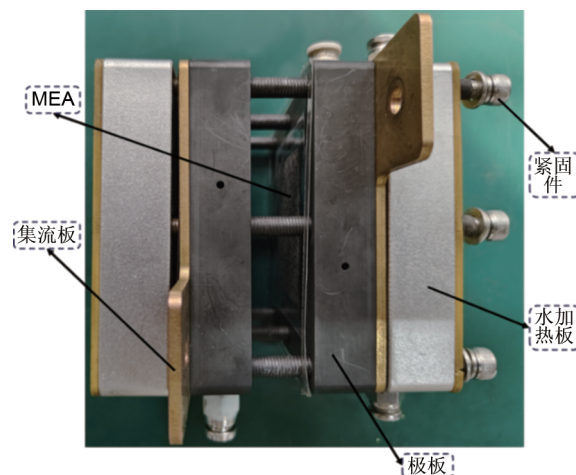


图2 燃料电池结构

Fig. 2 Structural diagram of the fuel cell

石墨具有良好的导电性, 可以高效地传导电化学反应产生的电流, 从而减小电池的内阻, 避免过多的电能损耗。因此, 本研究采用石墨材料制作极板, 在极板上机械加工出流场结构。平行流场和蛇形流场是较为传统的两种常规流场。平行流场结构较为简单, 是由多个相互平行的流道组合而成的, 各流道的间距相同, 整体压降较小。蛇形流场只有一条主流道, 流道较长并且呈蛇形蜿蜒向前, 整体压降较大。本实验在平行流场和蛇形流场的基础上展开。极板的主要结构如图3所示。蛇形流场和平行流场的极板结构尺寸一致, 二者插入多孔材料的区域面积相同, 所嵌入的多孔材料为泡沫镍基碳材料, 其孔隙率为0.9、孔密度为 110 ppi 、密度为 0.55 kg/m^3 。具体几何参数见表1。

本实验在极板上的阴极流场肋部添加多孔材料, 研究添加多孔材料前后电池的输出性能变化。所添加的多孔材料以碳为基底, 具有良好的导电性能。在流场肋部添加多孔材料的示意如图4所示。嵌入多孔材料后的流场结构示意如图5所示。多孔材料嵌块是由一整块多孔材料切割而成的, 多孔材

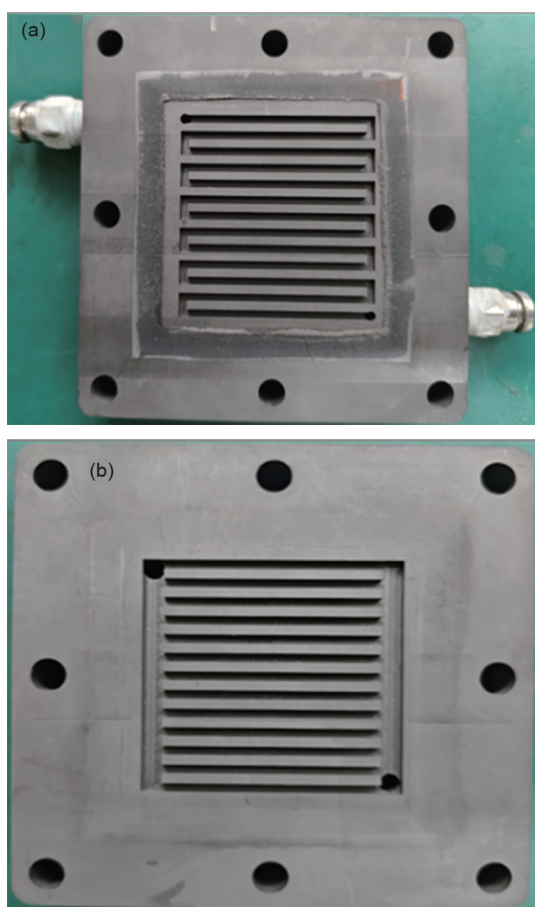


图3 极板结构图 (a) 蛇形流场; (b) 平行流场
Fig. 3 Structural diagram of (a) the plate serpentine flow field, (b) parallel flow field

表1 极板结构几何参数

Table 1 Geometric parameters of the plate structure

参数名称	数值
极板长度/cm	10
极板宽度/cm	10
流场区域长度/cm	5
流场区域宽度/cm	5
流道宽度/cm	0.2
肋部宽度/cm	0.2
流道深度/cm	0.2
极板高度/cm	2
进气孔直径/cm	0.9
电池极化面积/cm ²	25

料嵌块的长度均为0.5 cm、宽度均为0.2 cm。多孔材料嵌块平行且均匀地分布在平行流场和蛇形流场的肋部。

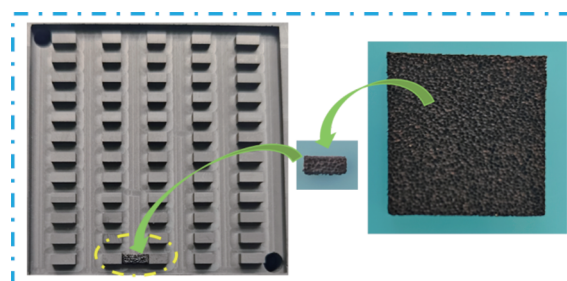


图4 流场肋部嵌入多孔材料示意
Fig. 4 Schematic diagram of embedding porous materials into the rib part of the flow field

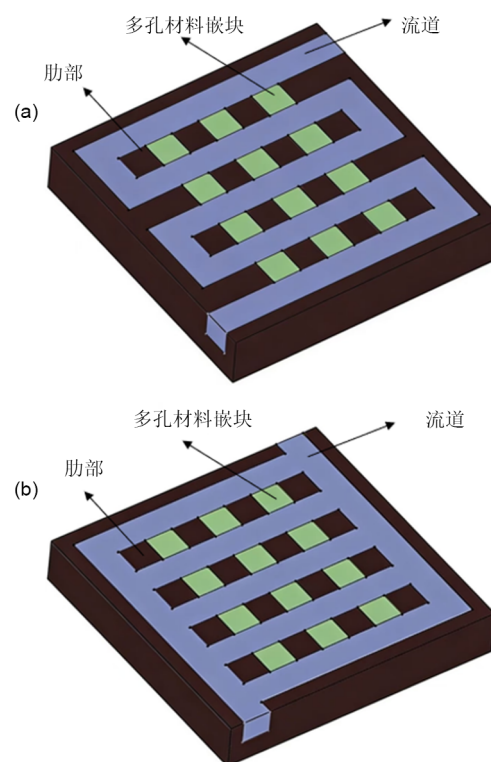


图5 流场结构示意图 (a) 肋部嵌有多孔材料蛇形流场; (b) 肋部嵌有多孔材料平行流场

Fig. 5 Schematic illustration of flow-field configurations (a) serpentine flow field with rib-embedded porous medium, (b) parallel flow field with rib-embedded porous medium

2 实验结果

2.1 电池输出性能

各流场在肋部添加多孔材料前后的极化曲线如图6所示。为了方便描述,下文中将原平行流场简称为PFF,将肋部嵌有多孔材料平行流场简称为RPPFF;将原蛇形流场简称为SFF,将肋部嵌有多孔材料蛇形流场简称为RPSFF。高电压工况属

于活化损失区域, 这个区域内电压随电流密度下降速度较快, 并且无法体现传质损失, 流场结构的改变对这个区域的电池性能影响较小。因此, 在图6中可以观察到, 在高电压工况下, 在各流场肋部添加多孔材料对电池的输出电流密度影响较小。而低电压工况属于传质损失区域, 这个区域内电池对反应气体的消耗较大, 对反应气体的供给速率要求较高, 并且如果电化学反应产生的液态水无法及时排出电池, 还会堵塞多孔电极, 进一步影响反应气体的输送, 因此流场结构的改变对这个区域的电池输出性能有较大影响。从图6中可以观察到, 低电压工况下在肋部添加多孔材料后, 电池的电流密度有明显提升。

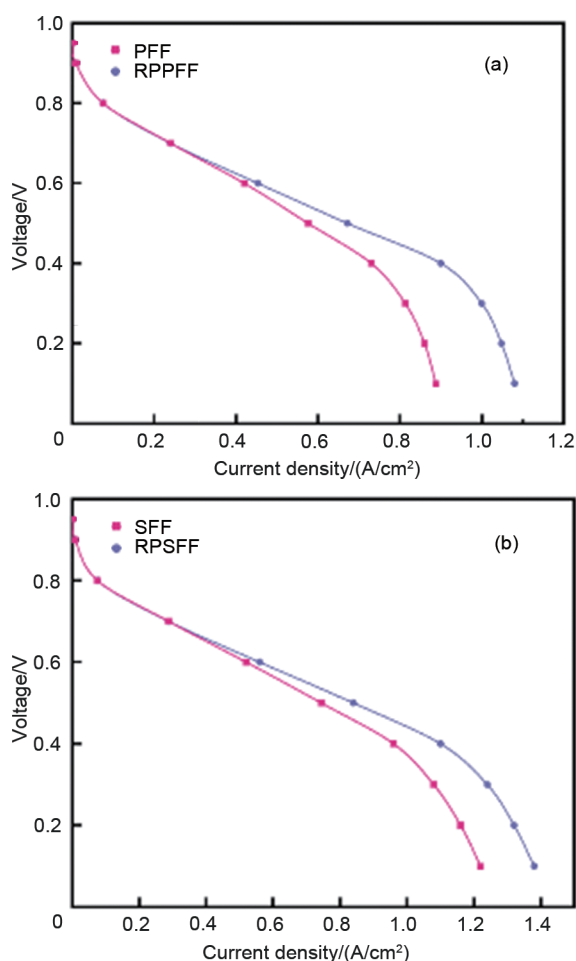


图6 极化曲线 (a) PFF和RPPFF; (b) SFF和RPSFF
Fig. 6 Polarization curves (a) PFF and RPPFF, (b) SFF and RPSFF

在电压为0.2 V的工况下, RPPFF和PFF的电池输出电流密度分别为1.05 A/cm²和0.86 A/cm²,

RPPFF的输出电流密度相较PFF提升了22.1%。在电压为0.2 V的工况下, RPSFF和SFF的电池输出电流密度分别为1.32 A/cm²和1.16 A/cm², RPSFF的输出电流密度相较SFF提升了13.8%。随着电压的逐渐降低, RPPFF相较PFF、RPSFF相较SFF的输出电流密度提升也逐渐增加。这是因为常规流场肋下传质效果较差, 反应气体主要是在流道的流动过程中与气体扩散层进行对流传质并逐渐渗透至催化剂层。在流场肋部添加多孔材料后, 相当于在肋部增加了额外的传质通道, 会有一定量的反应气体通过多孔材料渗透至气体扩散层, 这变相地增加了反应气体和气体扩散层的接触面积, 进而提升了反应气体的供给效率。反应气体的充足供应可以有效提升电池的输出性能。而在低电压工况下, 输出电流密度较高, 因此对反应气体的需求量也较大, 因而性能提升更加明显。综上可得, 在流场肋部添加多孔材料可以有效提升质子交换膜燃料电池的输出性能, 这种提升在低电压工况下更为明显。

各流场在肋部添加多孔材料前后的功率密度曲线如图7所示。由图7可知, PFF的最高功率密度为0.29 W/cm², SFF的最高功率密度为0.38 W/cm², SFF的最高功率密度相比于PFF提升了31%。SFF相比PFF只有一条主流道, 并且流道存在多个弯曲拐角, 因此气体在流道内的停留时间更长且整体压降更大。更大的压降更有利于排出电化学反应生成的液态水, 减少多孔电极被堵塞的概率; 并且可以增强肋下传质, 提高传质效率和反应气体分布均匀性。因此, SFF相比PFF, 拥有更高的输出性能。对流场进行结构优化可以有效提升电池的输出性能。

在图7中可以观察到, 在各流场肋部加入多孔材料后, 电池的输出功率密度均得到了一定提升, 并且RPPFF相比RPSFF, 提升幅度更大。RPPFF的最高功率密度为0.36 W/cm², 相比于PFF提升了24.1%; RPSFF的最高功率密度为0.44 W/cm², 相比于SFF提升了15.8%。在电池运行过程中, 内部发生的电化学反应会生成液态水, 如果生成的液态水不能及时排出电池, 就会堵塞多孔电极, 影响反应气体的传质和电化学反应的进行。在流场肋部嵌入多孔材料后, 肋下区域的液态水可通过多孔材料的孔隙进入流道并被排出。这一改进改善了流场肋下区域的水分布, 还降低了多孔电极被液态水堵

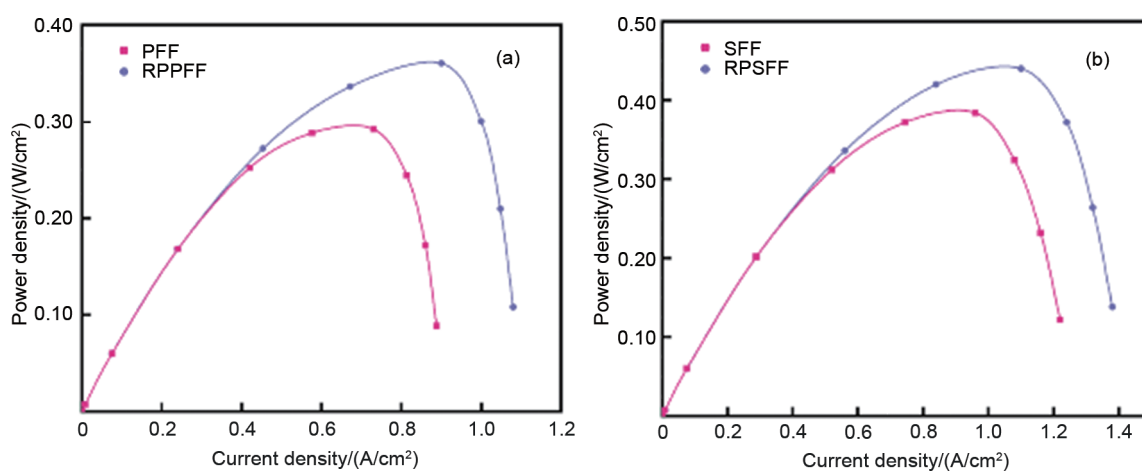


图7 功率密度曲线 (a) PFF 和 RPPFF; (b) SFF 和 RPSFF

Fig. 7 Power density curves (a) PFF and RPPFF; (b) SFF and RPSFF

塞的概率,有效抑制了水淹现象的发生,最终实现电池内部气体传质效率及整体性能的提升。

在流场肋部添加多孔材料可以提升反应气体向气体扩散层的传质效率,降低液态水堵塞多孔电极的概率,进而提升电池的输出性能,但是也会对流场的压降产生一定的影响。在流场肋部加入多孔材料,相当于在相邻流道间增加了额外的流通通道,会有一定的反应气体通过多孔材料渗透至相邻流道,而不是沿原流道前进,这会降低流场的压降。SFF 只有一条主流道并且蜿蜒向前,整体流场压降更大且流道间压差更大,因此在其肋部添加多孔材料后压降的降低幅度更大。流场的压降降低会使肋下传质效率降低,对电池输出性能的提升有一定负面影响。因此,RPSFF 相比 RPPFF 所得到的输出功率密度,提升幅度更小。

2.2 不同进入空气湿度对电池输出性能的影响

本小节研究了不同的进入空气相对湿度 (relative humidity, RH) 对电池输出性能的影响,实验过程中除进入空气湿度改变外,其他实验条件均与初始实验条件相同。进入空气 RH 取值分别为 0%、30%、70%、100%。本实验通过鼓泡增湿器来增加空气的湿度,加湿空气前在鼓泡增湿器内加入去离子水。空气通过管路进入去离子水中形成气泡,然后气泡逐渐上升并和水充分接触,加湿后的气体进入排气管路时已成为饱和湿空气。鼓泡增湿器的示意如图 8 所示,主要由电加热盘、温度传感器、液位计、气体进出口管路、水进出口管路等部件组成。

不同 RH 下 RPPFF 和 RPSFF 的极化曲线如

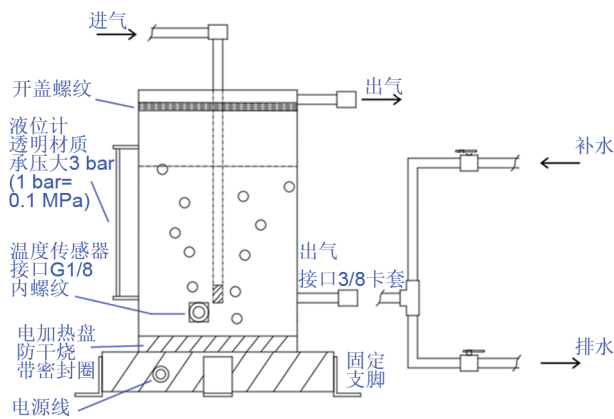


图8 鼓泡增湿器

Fig. 8 Bubble humidifier

图 9 所示。由图 9 可知,RPPFF 和 RPSFF 各电压工况下的输出电流密度在 RH 为 0% 时最低。随着 RH 由 0% 逐渐增加至 70%,RPPFF 和 RPSFF 在相同电压下的输出电流密度也逐渐增加。当 RH 由 70% 增加至 100% 时,各流场的输出电流密度变化不大。在电压为 0.3 V 的工况下,RPPFF 在 RH 为 30%、70% 条件下的电池输出电流密度分别为 0.96 A/cm²、1 A/cm²,相比于 RH 为 0% 条件下的 0.92 A/cm² 分别提升了 4.3% 和 8.7%。在电压为 0.3 V 的工况下,RPSFF 在 RH 为 30%、70% 条件下的输出电流密度分别为 1.2 A/cm²、1.24 A/cm²,相比于 RH 为 0% 条件下的 1.16 A/cm² 分别提升了 3.4% 和 6.9%。由此可知,适当提升进入空气湿度有利于提升质子交换膜燃料电池的输出性能。

不同 RH 下 RPPFF 和 RPSFF 的功率密度曲线如图 10 所示。由图 10 可知,随着 RH 由 0% 逐渐增

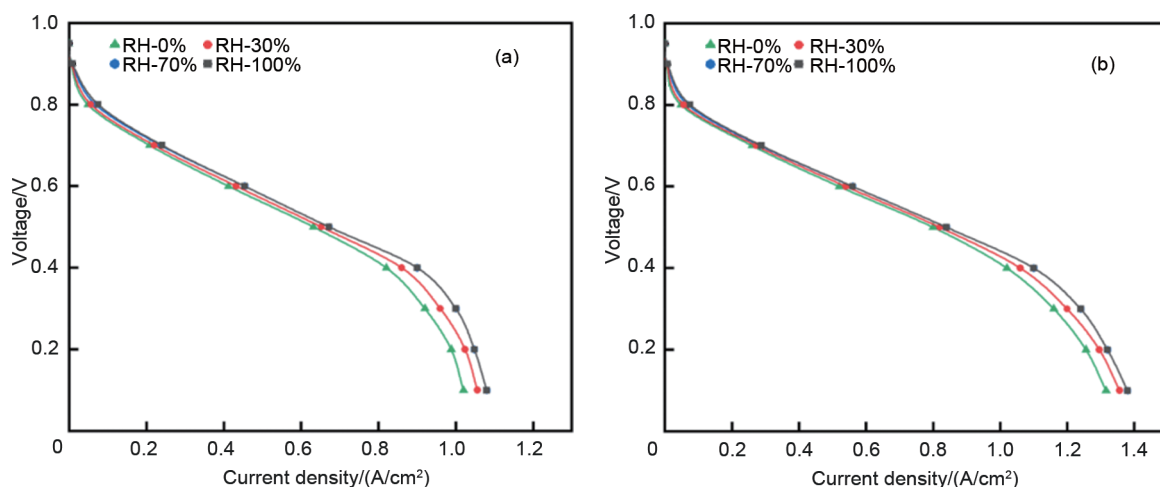


图9 极化曲线 (a) RPPFF; (b) RPSFF
Fig. 9 Polarization curves (a) RPPFF, (b) RPSFF

加至70%, RPPFF和RPSFF的最高功率密度均逐渐增大。当RH由70%增加至100%, 各流场的输出功率密度变化不大。进入空气湿度的变化会影响电池内部质子交换膜和催化剂层的湿度。质子交换膜在电池内部起到传递质子的作用, 对电化学反应的进行有着重要的影响。当质子交换膜湿度不足时, 会因含水量的降低而增大膜电阻, 导致传递质子能力下降, 影响电化学反应的速率, 降低电池输出性能。同时, 由于电池是在高温下运行的, 质子交换膜湿度过低会导致其因过干而变脆, 容易出现损坏, 进而影响电池的使用寿命。同时, 合适的湿度也有利于促进反应气体在催化剂层中的吸附和反应, 提高电化学反应的速率。在实验过程中发现, RH为0%条件下电池的初始开路电压为0.93 V, 在运行一段时间后逐渐增加到正常值0.95 V。这可能是因为阴阳两极进入的为干空气和干氢气, 电池内部过干导致电化学反应速率较低, 因此开路电压较低; 而电化学反应的进行会生成一定量的水, 增加了质子交换膜的湿度, 促进了电化学反应的进行, 因此开路电压逐渐恢复正常。

在图10中可以观察到, RPPFF在RH为30%、70%条件下的最高电池输出功率密度分别为0.344 W/cm²、0.36 W/cm², 相比于RH为0%条件下的0.328 W/cm², 分别提升了4.9%和9.8%。RPSFF在RH为30%、70%条件下的最高电池输出功率密度分别为0.424 W/cm²、0.44 W/cm², 相比于RH为0%条件下的0.408 W/cm², 分别提升了3.9%和7.8%。由此可知, 增加进入空气湿度可以

增加电池内部湿度, 为电化学反应的进行提供一个良好的条件, 提升电池的输出性能。同时, 将RPPFF在RH为30%和70%条件下的功率密度曲线进行对比, 可以发现在高电流密度区域的功率密度差异较中电流密度区域更小, RPSFF的情况也是如此。这可能是因为高电流密度区域电池内部的电化学反应速率更高, 产水量更大, 可以更好弥补进入空气湿度不同带来的电池内部湿度差异。将RPPFF在RH为70%和100%条件下的功率密度曲线进行对比, 可以发现在低电流密度区域的功率密度存在些许差异, 在其余区域功率密度无太大差异, RPSFF也是如此。这可能是因为RH为70%时所提供的电池内部湿度条件已经基本能满足电池运行的要求, 同时随着电流密度的升高, 电化学反应的产水量也在增加, 可以进一步增加电池内部湿度以保证电化学反应的正常进行。

2.3 不同背压对电池性能的影响

本节研究了不同背压条件下电池性能的变化, 阴极和阳极的气体背压大小保持一致, 背压取值分别为100 kPa、150 kPa和200 kPa。背压的大小实际就是电池出口处气体压力的大小, 也会影响到电池内部各处的压力大小, 背压越大, 电池内部各处的压力也就越大。不同背压条件下, RPPFF和RPSFF的极化曲线如图11所示。

由图11可知, 当背压由100 kPa提升至150 kPa时, 各流场的电流密度均有所提升。在0.4 V工况下, RPPFF在背压为150 kPa条件下的输出电流密度为0.9 A/cm², 相比于背压为100 kPa条件下的

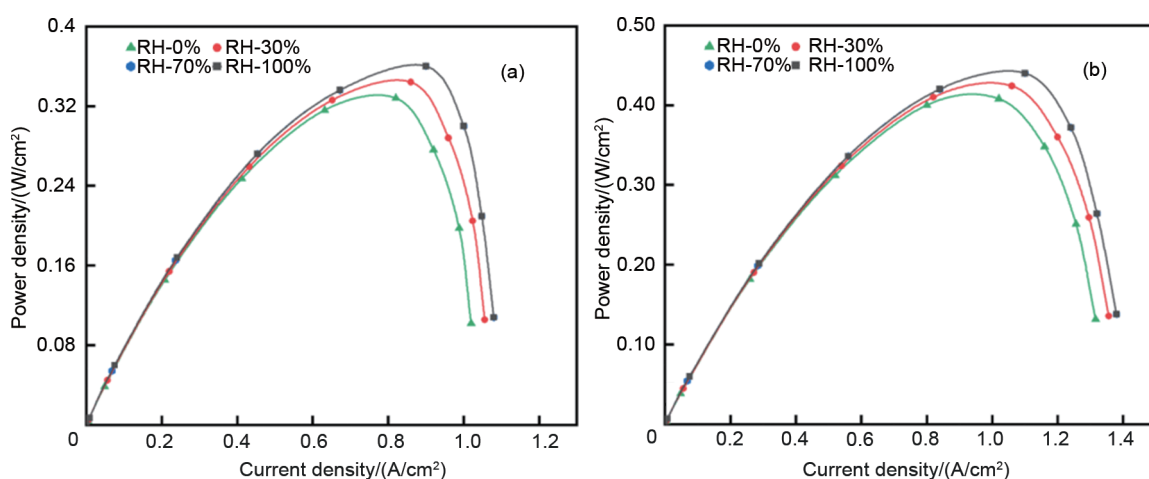


图10 功率密度曲线 (a) RPPFF; (b) RPSFF
Fig.10 Power density curves (a) RPPFF, (b) RPSFF

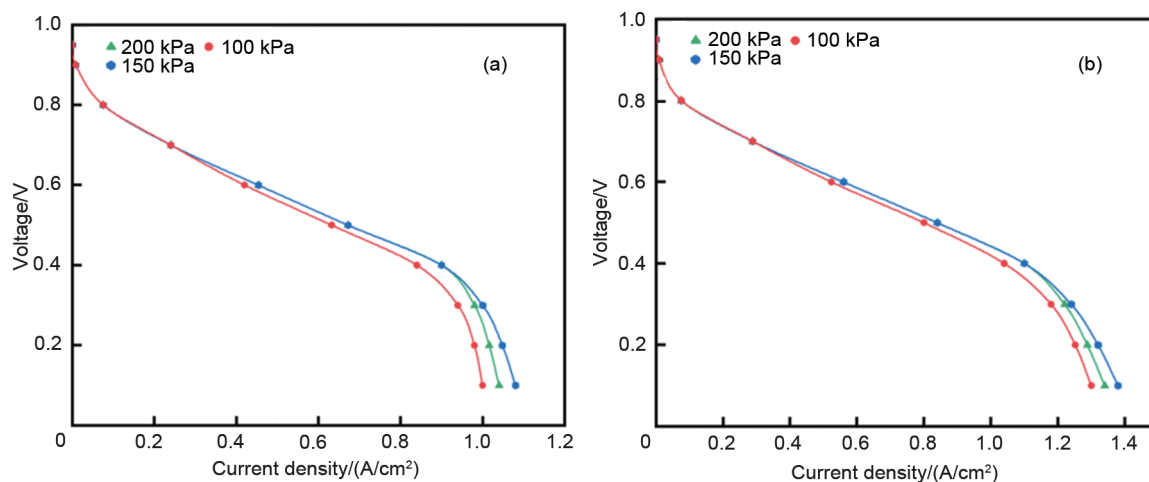


图11 极化曲线 (a) RPPFF; (b) RPSFF
Fig. 11 Polarization curves (a) RPPFF, (b) RPSFF

0.84 A/cm², 提升了7.1%。在0.4 V工况下, RPSFF在背压为150 kPa条件下的输出电流密度为1.1 A/cm², 相比背压为100 kPa条件下的1.04 A/cm², 提升了5.8%。同时, 可以观察到RPPFF和RPSFF在背压由150 kPa提升至200 kPa后, 在高电压工况下的电流密度无明显变化, 在低电压工况下的电流密度有所减小。在0.1 V工况下, RPPFF在背压为200 kPa条件下的输出电流密度为1.04 A/cm², 相比于背压为150 kPa条件下的1.09 A/cm², 减小了4.6%。在0.1 V工况下, RPSFF在背压为200 kPa条件下的输出电流密度为1.34 A/cm², 相比背压为150 kPa条件下的1.38 A/cm², 减小了2.9%。

不同背压条件下, RPPFF和RPSFF的功率密度曲线如图12所示。由图12可知, 当背压由100 kPa

提升至150 kPa, 各流场的最高输出功率密度均有所提升。RPPFF在背压为150 kPa条件下的最高输出功率密度为0.36 W/cm², 相比背压为100 kPa条件下的0.334 W/cm², 提升了7.8%。RPSFF在背压为150 kPa条件下的最高输出功率密度为0.44 W/cm², 相比背压为100 kPa条件下的0.416 W/cm², 提升了5.8%。电池阴极和阳极背压的增加, 意味着电池内部各处气体分压增加。反应气体分压的增加会增大反应气体的浓度, 并可以促进反应气体向气体扩散层的渗透, 提高气体传质效率。因此, 随着电池背压的增加, 电池内部的电化学反应能得到更充足的反应气体供应, 输出性能也随之增加。当电池背压由150 kPa提升至200 kPa后, 各流场的最高功率密度无明显变化, 说明背压为150 kPa时反应气

体已经能充分满足电化学反应的需要。

在 1 A/cm^2 工况下, RPPFF 在背压为 200 kPa 条件下的输出功率密度为 0.271 W/cm^2 , 相比于背压为 150 kPa 条件下的 0.293 W/cm^2 , 减小了 7.5% 。在 1.2 A/cm^2 工况下, RPSFF 在背压为 200 kPa 条件下的输出功率密度为 0.378 W/cm^2 , 相比背压为 150 kPa 条件下的 0.391 W/cm^2 , 减小了 3.3% 。背压的增加虽然可以提高气体的传质效率, 但是也会对电池的水管理产生一定的影响。电池内部的电化学反应会生成液态水, 如果生成的液态水不能及时排出电池, 就可能堵塞多孔电极, 造成电池性能下降。如果电池背压过大, 电池内部过大的分压会抑制液态水排出多孔电极并进入流道, 增大多孔电极被液态水堵塞的概率。同时, 在高电流密度(低电压)工况下, 电化学反应速率与低电流密度(高电压)工况相比更高, 会生成更多的液态水。因此, 在图 12 中可以发现, 当电池背压由 150 kPa 提升至 200 kPa 后, 各流场在低电流密度工况下的功率密度无明显变化, 在高电流密度工况下的功率密度明显有所减小。

2.4 功率转化效率

在流场肋部添加多孔材料不仅会影响电池的输出性能, 同时还会对流场的压降产生一定的影响。对质子交换膜燃料电池来说, 流场压降越大也就意味着需要更大的泵送功率, 这会增加电池的功率消耗。因此, 本节通过功率转化效率这一参数来衡量不同流场下电池消耗单位泵功率所得到的输出功率大小。PCE 的具体计算方法见式(1)。

$$\text{PCE} = \frac{P_i}{\Delta p_i v_i} \quad (1)$$

式中, v 表示入口气体的流量; P 表示质子交换膜燃料电池输出的总功率; Δp 表示流场压降; 下角标 i 表示各流场。

各流场消耗的泵功率由 $\Delta p_i v_i$ 计算得出。PCE 表示燃料电池输出的净电功率与驱动气体流动所需的理论水力功率之比, 即电功产出与消耗泵功之比, 可视为流场结构的“能量投入产出比”。各流场肋部添加多孔材料前后不同电压工况下的功率转化效率如图 13 所示。

由图 13 可知, RPPFF 相比于 PFF、RPSFF 相比于 SFF, 在各电压工况下的 PCE 均要更高。在

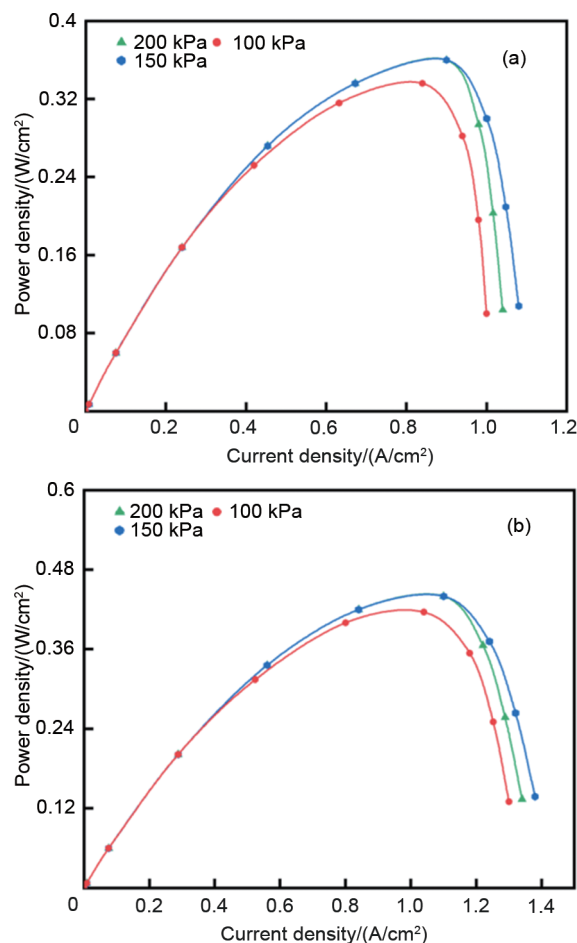


图 12 功率密度曲线 (a) RPPFF; (b) RPSFF
Fig.12 Power density curves (a) RPPFF, (b) RPSFF

0.4 V 工况下, RPPFF 的 PCE 为 45 , 相比于 PFF 的 31.7 , 提升了 42% 。在 0.4 V 工况下, RPSFF 的 PCE 为 47.83 , 相比于 SFF 的 27.43 , 提升了 74.4% 。这是因为在流场肋部添加多孔材料后, 不仅提升了电池的输出性能, 同时还降低了流场压降, 减小了电池所消耗的泵功率, 因此提升了功率转化效率。同时, 可以观察到, 与各自的原流场相比, 高电压工况下 RPSFF 的 PCE 提升幅度更大。这是因为与 PFF 相比, SFF 只有一条主流道并且流道存在多个弯曲拐角, 流场压降和流道间压差更大, 在肋部添加多孔材料后压降下降幅度更大, 计算所得的 PCE 提升幅度更大。此外, RPPFF 与 PFF 相比、RPSFF 与 SFF 相比, 在高电压工况下的 PCE 变化较小。这是因为高电压工况属于活化损失区, 在这个区域内电池输出性能受流场变化影响很小, 因此各流场在肋部添加多孔材料前后计算所得的 PCE 变化较小。

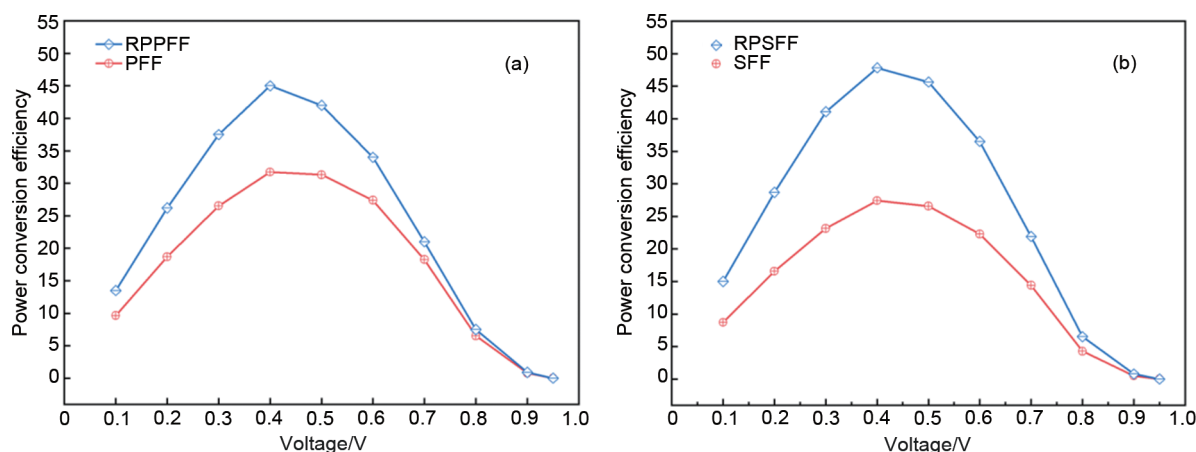


图13 功率转化效率 (a) PFF和RPPFF; (b) SFF和RPSFF
Fig.13 Power conversion efficiency (a) PFF and RPPFF, (b) SFF and RPSFF

3 结 论

本工作主要在蛇形流场和平行流场的基础上研究了在流场肋部添加多孔材料对电池性能的影响。此外,还研究了不同进入空气湿度和不同背压条件下,电池输出性能的变化,主要结论如下。

(1) 在流场肋部添加多孔材料可以有效提升电池的输出生性能,这种性能提升在低电压工况下更加明显。此外,与RPPFF相比,RPSFF所得到的电池性能提升更小。RPPFF相比PFF的极限电流密度提升了22.1%;最大功率密度提升了24.1%。RPSFF相比于SFF的极限电流密度提升了13.8%,最大功率密度提升了15.8%。

(2) 提升进入空气湿度可以提升质子交换膜和催化剂层的湿度,为电化学反应的进行提供一个良好的环境,进而有效提升电池输出性能。RPPFF在RH为30%和70%条件下的极限电流密度相比RH为0%条件下分别提升了4.3%和8.7%。RPSFF在RH为30%和70%条件下的极限电流密度相比RH为0%条件下分别提升了3.4%和6.9%。此外,质子交换膜燃料电池内部电化学反应产生的水可以有效地改善电池内部湿度条件。

(3) 适当提升电池背压可以提升电池的输出生性能,但是背压过大会导致电池在高电流密度(低电压)区域的输出性能下降。当电池背压由100 kPa提升至150 kPa时,RPPFF的最高输出电流密度提升了7.1%,RPSFF的最高输出电流密度提升了5.8%。当电池背压由150 kPa提升至200 kPa时,RPPFF和RPSFF的最高输出功率密度没有明显变

化,在1 A/cm²工况下,RPPFF的输出功率密度减小了7.5%;在1.2 A/cm²工况下,RPSFF的输出功率密减小了3.3%。

(4) 在流场肋部添加多孔材料可以有效降低流场压降,提升电池输出性能,进而提升电池的功率转化效率。在0.4 V工况下,RPPFF的PCE相比PFF提升了42%,RPSFF的PCE相比SFF提升了74.4%。由此可知,在流场肋部添加多孔材料后,电池消耗单位泵功率可以得到更高的输出功率。这是因为PCE表示电功产出与消耗泵功率之比。当PCE提高时,意味着气体输送环节的能量投入产出比改善,即消耗单位泵功率可获得更高的输出功率。

参 考 文 献

- [1] ZHANG S F, HU T T, LI J B, et al. The effects of energy price, technology, and disaster shocks on China's Energy-Environment-Economy system[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 204-213. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.09.256.
- [2] YANG Y J, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Numerical simulation for non-uniform PtCo catalyst degradation under different coolant conditions and its effect on PEMFC performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 64: 965-980. DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.03.309.
- [3] LI C, GAO Y Z, LIU H T, et al. Energy, exergy, environmental, and economic analysis of a novel hydrogen production system integrating concentrated photovoltaic thermal collectors and wind turbines[J]. Energy, 2025, 322: 135670. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135670.
- [4] ZHAO J J, TU Z K, CHAN S H. Carbon corrosion mechanism and mitigation strategies in a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC): A review[J]. Journal of Power Sources, 2021, 488:

229434. DOI:10.1016/j.jpowsour.2020.229434.
- [5] BERNING T, LU D M, DJILALI N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 106(1/2): 284-294. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)01057-6.
- [6] DING R, CHENG Y L, FAN X C, et al. Many-objective optimization of graded cathode catalyst layer for PEMFC on performance, gas distribution quality, and cost via AI-based model [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 58: 1514-1525. DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.01.309.
- [7] HUANG H Z, LI X, LI S W, et al. Evaluating the effect of refined flow channels in a developed biomimetic flow field on PEMFC performance[J]. *Energy*, 2023, 266: 126442. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126442.
- [8] 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. DOI:10.1016/j.egy.2021.01.003.
- [9] LIAO Z H, WEI L, DAFALLA A M, et al. Analysis of the impact of flow field arrangement on the performance of PEMFC with zigzag-shaped channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 181: 121900. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121900.
- [10] ZENG W B, GUAN B, ZHUANG Z Q, et al. Comprehensive review on the advances and comparisons of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) and anion exchange membrane fuel cells (AFCs): From fundamental principles to key component technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 102: 222-246. DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.12.513.
- [11] ZHOU F, ZHANG H, GUAN S M, et al. Experimental probing of the effect of PFSA ionomer poisoning at different Pt loadings in a PEMFC[J]. *Journal of Catalysis*, 2022, 414: 330-335. DOI: 10.1016/j.jcat.2022.09.019.
- [12] LIU J X, GUO H, YE F, et al. Two-dimensional analytical model of a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Energy*, 2017, 119: 299-308. DOI:10.1016/j.energy.2016.12.075.
- [13] YAN F Y, YAO J, PEI X J. CFD numerical study of a new crossed inverse Z flow field for PEMFC[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(7): 220721. DOI: 10.20964/2022.07.12.
- [14] 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. DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.03.134.
- [15] JIAO K, XUAN J, DU Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells[J]. *Nature*, 2021, 595 (7867): 361-369. DOI:10.1038/s41586-021-03482-7.
- [16] KUMAR A, REDDY R G. Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the flow-field of the bipolar/end plates[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 114(1): 54-62. DOI:10.1016/S0378-7753(02)00540-2.
- [17] LI S L, ZHOU W, LIU R L, et al. Fabrication of porous metal fiber sintered sheet as a flow field for proton exchange membrane fuel cell[J]. *Current Applied Physics*, 2020, 20(5): 686-695. DOI: 10.1016/j.cap.2020.03.001.
- [18] KIM J, CUNNINGHAM N. Development of porous carbon foam polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(8): 2291-2300. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.10.053.
- [19] AZARAFZA A, ISMAIL M S, REZAKAZEMI M, et al. Comparative study of conventional and unconventional designs of cathode flow fields in PEM fuel cell[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 109420. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109420.
- [20] 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. DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.01.003.
- [21] LEE N, SALIHI H, YU B, et al. Metal-foam-based cathode flow-field design to improve H₂O retention capability of passive air cooled polymer electrolyte fuel cells[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 161: 106702. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106702.
- [22] 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. DOI:10.1016/j.renene.2020.04.142.
- [23] DENG S P, LI Y S. A porous-rib flow field for performance enhancement in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 263: 115707. DOI:10.1016/j.enconman.2022.115707.
- [24] KARIYA T, HIRONO T, FUNAKUBO H, et al. Effects of the porous structures in the porous flow field type separators on fuel cell performances[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(27): 15072-15080. DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.07.070.
- [25] GAO W, LI Q F, SUN K, et al. Mass transfer and water management in proton exchange membrane fuel cells with a composite foam-rib flow field[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 216: 124595. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124595.
- [26] ZHAO T T, FAN W X, CUI H, et al. 3D hybrid-wettability fin channel with dual enhancement of drainage and mass transfer to improve PEMFC performance[J]. *Energy*, 2025, 315: 134378. DOI:10.1016/j.energy.2025.134378.
- [27] GARCÍA-SALABERRI P A, PEREGO A, WU R, et al. Boosting the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells with porous flow fields: Pros and cons[J]. *Energy*, 2025, 318: 134728. DOI:10.1016/j.energy.2025.134728.
- [28] SUN F, MA Z H, XIN S H, et al. Porous lattice type flow field enable more uniform gas distribution and higher power density of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Energy*, 2025, 320: 135240. DOI:10.1016/j.energy.2025.135240.