

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.04.001

PEMFC 流道结构研究现状及发展趋势

梁凤丽, 闻冉冉, 毛军逵, 贺振宗, 王任廷

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 质子交换膜燃料电池(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)被认为是提高小型无人机续航能力的最有前景的动力源,也是未来绿色航空发展的方向之一,它的性能决定了无人机的任务能力。双极板是 PEMFC 中的关键组件,其中流道结构更是决定着 PEMFC 的水热管理、质量输运和电流密度分布,深刻影响燃料电池的综合性能。不同流道结构各有优缺点,充分了解流道结构对性能的影响可以对不同应用背景下的流道设计以及改进工作提供参考。本文对现有的常规和新型双极板流道结构进行了总结,归纳和分析了不同流道结构特征对 PEMFC 性能的影响。从流道横截面形状、长度、数量、宽度和挡板位置等方面入手探究增强 PEMFC 性能的高效流道结构设计方案。

关键词: 质子交换膜燃料电池;双极板;流道结构;3D 流道;净功率

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)04-0477-27

Status and Development Trend of PEMFC Flow Channel Structure

LIANG Fengli, WEN Ranran, MAO Junkui, HE Zhenzong, WANG Renting

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is considered as the most promising power source for improving the endurance of small unmanned aerial vehicles, and it is also one of the future development directions of green aviation. Its performance determines the mission capabilities of unmanned aerial vehicles. The bipolar plate is a key component in PEMFC, and the flow channel structure in the bipolar plate also determines the water and heat management, mass transport and current density distribution of PEMFC, which profoundly affects the overall performance of the fuel cell. Different structures have their own advantages and disadvantages. In order to provide important guidance for channel design and improvement under different application backgrounds, we need to fully understand the effect of channel structures on fuel cell's performance. Therefore, in this paper, the existing conventional and new bipolar channel structures are summarized and the influence of different channel structure characteristics on PEMFC performance is also analyzed. In addition, this paper explores the efficient channel structure design scheme, including the cross-section shape, length and number, width and baffle position and so on, to enhance the performance of PEMFC.

Key words: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); bipolar plate; flow channel structure; 3D flow field; net power

近年来,具有噪音低、耐久性高和可操作性强等优点的小型无人机(Unmanned aerial vehicles, UAVs)已经广泛应用于各个领域以满足民用需求

和军事目的,例如快递服务、灾区救援和军事侦察。无人机设备影响任务能力的最重要因素就是动力源,动力源应具有高的功率和能量密度。功率

基金项目: 国防基础科研计划重点(JCKY2018605B006)资助项目;航空科学基金(201928052002)资助项目。

收稿日期: 2020-08-28; **修订日期:** 2021-03-22

通信作者: 毛军逵,男,教授,博士生导师, E-mail: mjke@nuaa.edu.cn。

引用格式: 梁凤丽, 闻冉冉, 毛军逵, 等. PEMFC 流道结构研究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(4): 477-503. LIANG Fengli, WEN Ranran, MAO Junkui, et al. Status and development trend of PEMFC flow channel structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(4): 477-503.

密度对最大速度、负载能力、飞行高度和爬升速度具有决定性影响,而能量密度会影响所覆盖的飞行范围^[1]。常规内燃机作为目前无人机动力的主要来源,尽管可以通过燃烧化石燃料产生动力,但是效率低下且噪音大,在此过程中产生的废气排放也会引起严重的环境问题。采用锂电池的电推进方案中,由于锂电池组重量大、能量密度低,限制了小型无人机的任务能力,而太阳能电池受天气条件影响大。相较于锂电池和太阳能电池,燃料电池具有兼顾高能量密度和高功率密度的优点。此外,燃料电池无人机低噪声、无污染和长航时等特性使其应用领域广泛,并且它有较低的热红外特性,不易被发现,非常适合长时间侦察任务^[2],有望作为下一代小型无人机而引起了极大的关注^[3]。

相比于直接甲醇燃料电池^[4],固体氧化物燃料电池^[5]等其他常见燃料电池,质子交换膜燃料电池(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有许多优势,它的反应温度适合无人机的工作环境,并且有较高的能量密度、功率密度以及短启动时间。此外,它的副产物仅是水和热^[6],也十分环保,因此是目前最适合小型无人机的燃料电池类型。研究人员对燃料电池无人机的设计和试飞进行了大量研究工作,2009年,美国海军实验室研发的“Ion Tiger”型燃料电池无人机已经在载有2.3 kg有效载荷条件下完成26 h的飞行任务^[7],2013年的改进版本更是实现了48 h以上的飞行时间^[8]。2010年,韩国航空航天研究所将Horizon燃料电池技术公司的AeroPak动力系统集成到一架2.4 m翼展6.5 kg的EAV-1无人机中,并实现了4.5 h的续航能力^[9]。2017年,Lapeñ-Rey等^[10]设计并制造了用于低空监视任务的燃料电池无人机,验证了该型飞机可以应用于海拔5 000 m以上高空的低温低压条件。

质子交换膜燃料电池主要由质子交换膜、催化层、扩散层、双极板和流道组成,其中质子交换膜、阴/阳极催化层和气体扩散层合称为膜电极组件(Membrane electrode assemblies, MEAs)。PEMFC系统的工作原理为:氢气和氧气(或空气)分别被阳/阴极流道送进燃料电池,再经过气体扩散层(Gas diffusion layer, GDL)到达催化层(Catalyst layer, CL)发生电化学反应。在阳极催化剂的作用下,1个氢分子被氧化成为2个质子,并释放出2个电子,该电极反应产生的电子经外电路到达阴极,质子经电解质膜到达阴极,在阴极催化剂的作用下,氧气、质子及电子发生反应生成水和热,生成的水随反应尾气排出。其中,质子交换膜燃料电池的化学反应可以描述为:阳极反应: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$;

阴极反应: $1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{热}$; 电池总反应: $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{电力} + \text{热}$,工作原理如图1所示^[11]。在PEMFC中,限制性能的主要因素是发生在阴极的较缓慢的反应输运过程^[12]。首先,受到反应动力学的限制,阴极发生的氧气还原反应的速率远远低于阳极发生的氢气氧化反应,前者通常是后者的百万分之一,因而阴极的反应速率限制了整个电池的工作效率^[13]。阴极传质效果不佳,也是性能损失的重要原因,气体扩散层和催化层中的氧气传质效果不佳使得电压损失增加了一倍^[14]。

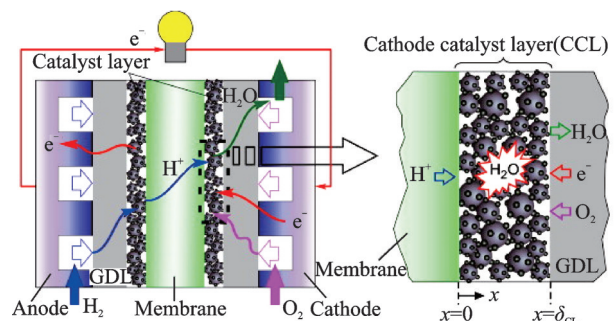


图1 PEMFC工作原理示意图^[11]

Fig.1 Schematic diagram of PEMFC working principle^[11]

双极板(Bipolar plate, BP)是PEMFC的关键组件之一,其在PEMFC中的位置见图2^[15],单电池串联组成电堆,每个电池单元由双极板和膜电极组成。一般经机械加工在板表面形成一片区域的沟槽,被称为流道,通过它均匀分配反应气体,确保电池催化层各处获得充足且均匀的反应气体供给;同时,排出未参加反应的气体和生成的副产物——水^[16]。电堆性能的直接体现是电堆的功率密度和工作效率,而反应气的分布均匀性、传质性能以及运行稳定性决定着最终性能。尽管电堆的性能与电极动力学以及流体动力学有更直接的关系,但它

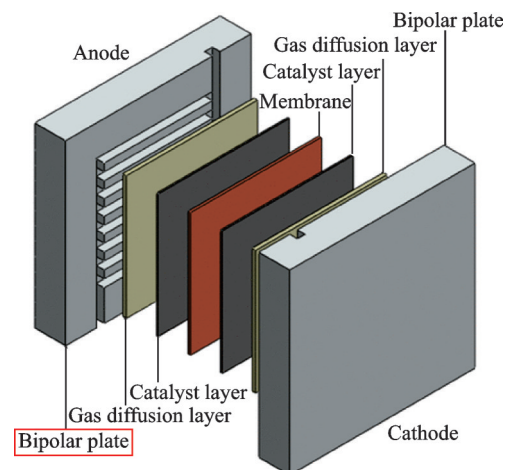


图2 PEMFC结构图^[15]

Fig.2 Structure diagram of PEMFC^[15]

们本质上与BP流道几何结构密切相关。流道结构形式构成了双极板最重要的特征,决定反应气体与生成物在流场内的流动状态,直接影响电堆的性能,此外,它们为电堆提供了必要的机械支撑,保持彼此隔离的不同反应物通过气体扩散层分布在MEA的催化层表面上,并有助于管理电池内部产生的水和热量。因此,流道结构的设计至关重要。

气-水-热综合管理是PEMFC高效、稳定运行的关键问题,流道结构深刻影响着PEMFC的气水输运和热传递。流道结构不佳的双极板会导致流场中反应气体的不均匀分配,从扩散层到达催化层的反应气体分布不均匀,造成电解质表面各处电化学反应强度大小不一,进而导致反应生成水和热量产生较大差异,电流密度均匀性变差,影响电池性能,严重时更可能会造成水淹(气体扩散层内孔隙体积大部分被液态水占据)以及电解质产生局部热点等问题。水淹会对大部分活性区域的气体输运产生负反馈,进一步造成燃料电池性能下降^[17]。除了影响反应物运输,水淹还会对燃料电池造成不可逆损伤而导致安全问题,比如:电池在0℃以下工作时,积累的液态水形成冰可能会刺穿膜,阴阳极反应物直接接触可能会导致催化燃烧的严重后果^[18]。除水气管理问题外,局部热点也是进行

PEMFC流道结构设计必须要考虑的因素,否则可能会造成膜的湿热变形和蠕变、铂溶解以及双极板腐蚀^[19]。质子交换膜燃料电池的商业化受到诸如上述技术问题的阻碍,为了达到预期的PEMFC性能,必须将反应物均匀分布并有效扩散到发生电化学反应的催化层中,流道结构设计和优化是减轻这些问题的一种重要方法,合理的流道结构设计可以保证燃料电池具有较好的性能和稳定性。研究表明良好且有效的双极板流道结构能够使整体燃料电池性能提高近50%^[20]。

本文归纳了不同类型(平行流道、蛇形流道、插指型流道、新型流道等)流道结构对PEMFC性能影响的研究进展,主要从流道横截面形状、长度、数量、宽度和挡板位置等方面阐述了基于常规流道结构特征下改进措施的研究现状,重点剖析了目前PEMFC流道结构设计中面临的挑战,展望了未来高效流道结构设计的发展方向。

1 常规流道类型

PEMFC流道类型包括常规流道和新型流道,常规流道包括平行流道、蛇形流道、插指型流道等^[21-23](图3),针对常规流道的研究相对较多并且已经应用于PEMFC商用产品中^[24]。

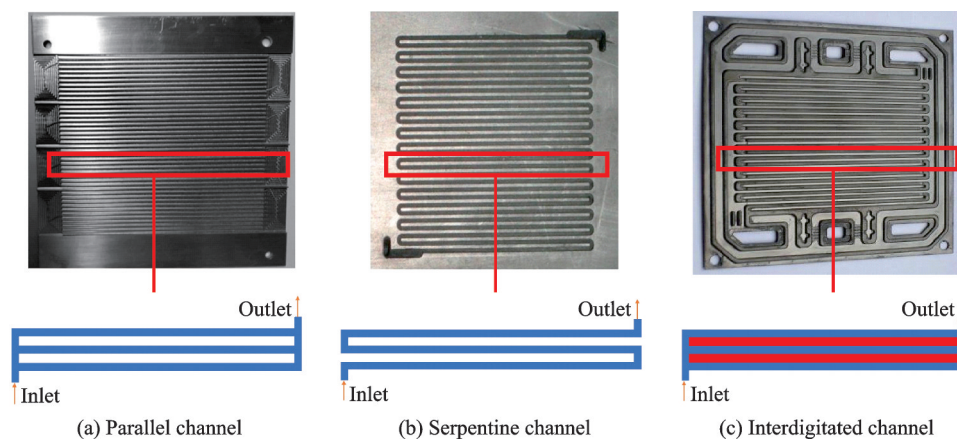


图3 3种常规流道实物图及其示意图^[21-23]

Fig.3 Physical drawings and schematic diagrams of three conventional channels^[21-23]

多年来,学者们已经详细研究了这几种常规流道结构,并在给定的燃料电池单电池或电堆的操作条件下,获得了不同流道结构的性能特性。一般来说,每种流道结构都有其优缺点,这取决于燃料电池在设计中的应用。常规流道结构下的流场特征是PEMFC内反应气体的基本流动形式,在此基础上,许多学者针对常规流道结构也进行了大量结构改进工作,旨在充分利用其优势的条件下规避其固有缺陷从而更加高效地提高电堆性能和运行稳定性。

1.1 平行流道

平行流道(图4(a))是最简单也是最常见的一种流道结构,通过对分流入口和汇流出口进行不同的配置又形成了Z形平行流道(图4(b))、U形平行流道(图4(c))等。它们一般都由多个平行直通道组成,所有通道以并联的形式存在。

在对PEMFC流道结构对性能的影响的研究中,当确定分析某一具体常规流道类型之后,该流道自身的结构几何参数就成了影响PEMFC性能的最核心的问题之一。流道结构深刻地影响

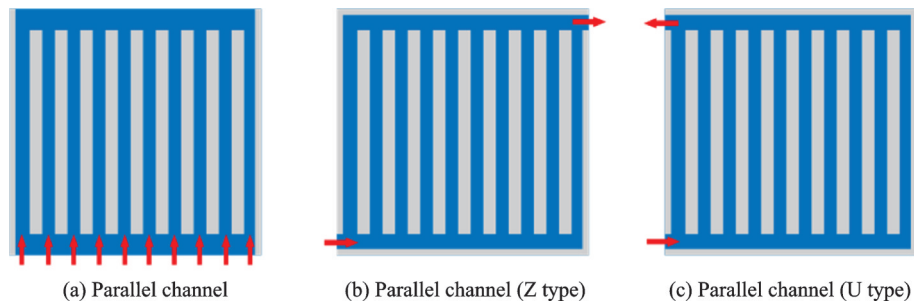


图4 3种平行流道示意图

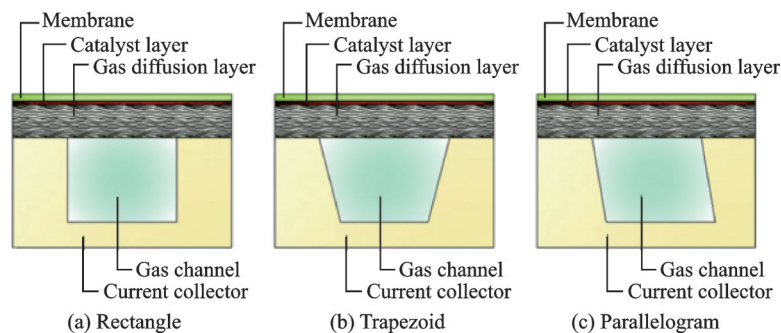
Fig.4 Schematic diagram of three parallel flow channels

着 PEMFC 内部的水气运输,针对流道的结构几何参数对性能的影响规律进行研究是流道结构研究中的重要方向之一。考虑到平行流道 PEMFC 燃料利用率较低、水去除能力低而带来的性能下降的问题,目前学者们主要通过研究不同流道截面和在气流方向增加挡板等措施来进行改进工作。

1.1.1 横截面形状

流动通道的横截面通常为矩形,其他形状也有一定研究,例如梯形,三角形和半圆形等,流道的横截面形状显著影响燃料电池性能和除水效率,但最

合适的形状尚未达成共识^[25]。Kumar 和 Reddy^[26]数值分析了流道形状对阳极氢气消耗的影响。结果表明,三角形和半圆形的横截面导致阳极处的氢气消耗增加了约 9%,从而提高了燃料电池的工作效率。Ahmed 等^[27]研究了在高电流密度下的单直通道上 3 种不同的通道横截面(图 5)对 PEMFC 性能的影响,与梯形和平行四边形的通道横截面相比,矩形的通道横截面 PEMFC 具有更高的电池电压。但是,梯形通道横截面促进了反应物的扩散,反应区域上反应物和局部电流密度的分布更加均匀,提升了性能。

图5 不同流道横截面示意图^[27]Fig.5 Cross section diagram of different channels^[27]

除分析流道反应物传质效果,Wang 等^[28]使用矩形通道作为对照,进一步研究具有三角形、梯形和半圆形横截面通道电池的局部传输特性和性能,极化曲线和功率密度曲线如图 6 所示。在高工作电压下,具有各种沟道形状的电池具有相似的性能。但是,在低工作电压下,燃料电池的性能将遵循:三角形>半圆形>梯形>矩形通道。对电池中局部输运现象的分析表明,三角形、梯形和半圆形通道设计显著提高了反应物的流速,从而提高了液体水的去除和氧气的利用。因此,与矩形通道设计相比,其他 3 种通道截面设计增加了极限电流密度并改善了电池性能。另外,从研究中可以看出流道截面在不同工作条件下对性能的影响效果会有差异。

为进一步研究流道截面对 PEMFC 性能的影响,

学者基于上述基本流道截面形状的特性开展了组合流道横截面的研究。Mohammedi 等^[29]研究了 30 种阳极和阴极都具有相同面积的流道横截面形状的 PEMFC 的性能差异,其中包括 5 种基本形状(矩形、梯形、倒梯形、椭圆形和倒椭圆形)和 25 种以基本形状为底座的横截面形状(图 7)。仿真结果表明:在低电流密度下,流道横截面形状对功率密度(电池性能)的影响很小;但是在高电流密度下,横截面形状会对 PEMFC 性能产生重要影响。所有具有梯形和半椭圆形作为底座的横截面形状都比矩形横截面形状 PEMFC 具有更高的功率密度。相反,具有倒梯形和倒半椭圆形底座的横截面形状比具有矩形的横截面形状具有更差的电池性能。Trp-Itrp 流道形状有着所有研究截面中(包括之前认为是最佳截面的三角形截面形状)最高的功

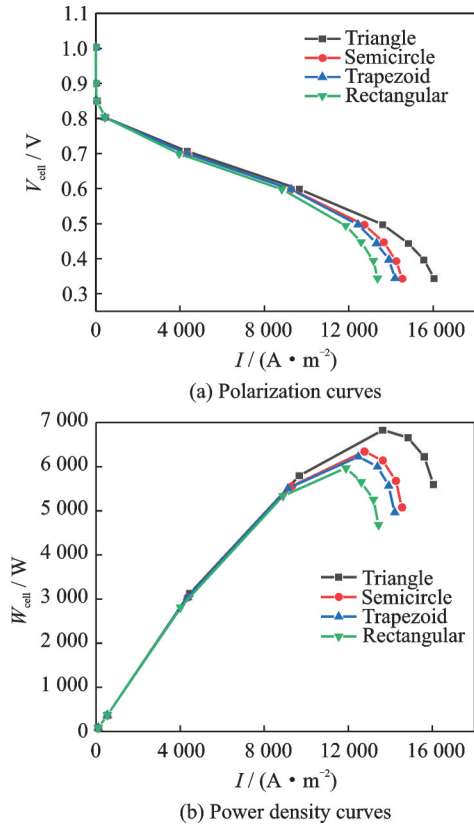


图 6 具有不同阴极流动通道截面形状 PEMFC 的极化曲线和功率密度曲线^[28]

Fig.6 Polarization curves and power density curves of PEMFC with different cathode flow channel cross section shapes^[28]

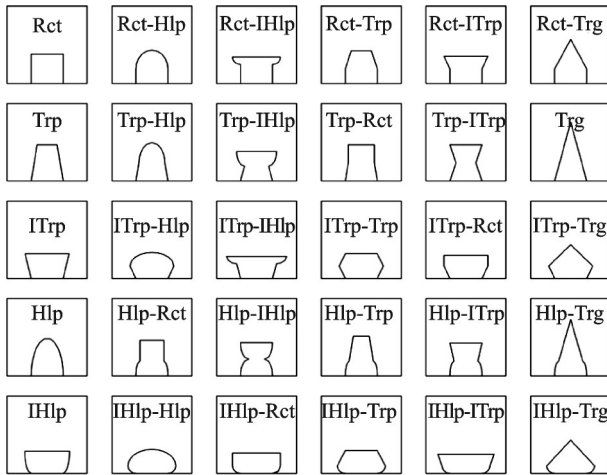


图 7 30 种不同流道横截面形状^[29]

Fig.7 Thirty different channel cross-section shapes^[29]

率密度,但是也导致了最大的压降,加大了辅助系统的耗功,从而降低了整体系统性能。

上述研究都是定性研究截面类型对性能的影响,无法获得性能输出与截面几何参数的定量关系。为了确定高性能输出下的最优截面参数,Zeng 等^[30]以 PEMFC 的净输出功率为目标函数,选择阳极和阴极侧的通道底部和顶部边缘的宽度

作为变量,使用遗传算法获得了通道截面的最优设计。获得的最佳设计是梯形通道,在 0.4 V 的工作电压下,与矩形通道相比,电流密度增加了 10.92%。而且,与矩形通道相比,梯形通道 PEMFC 显示出更均匀的反应物分布和电流密度。

考虑到水积累对 PEMFC 的性能的重要影响,一些学者应用实验或数值模拟的方法研究了流道形状对 PEMFC 阴极除水效率的影响。Owejan 等^[31]用中子成像技术通过实验观测了 PEMFC 的 GDL 和流动通道中的液态水积累。他们发现,与具有相同横截面积的矩形通道相比,具有三角形几何形状的通道积累的水更少。Zhu 等^[32]开展了具有不同横截面的通道中水滴动力学的数值研究,结果表明通道水的去除时间分别为:三角形 < 梯形 < 矩形。Lorenzini-Gutierrez 等^[33]进行了 VOF (Volume of fluid) 模拟,进一步研究通道壁的润湿性和横截面形状对直通通道 PEMFC 的液态水去除的影响。他们得出结论:与矩形截面形状相比,开角为 50° 和 60° 的梯形截面具有更好的除水性能。

上述针对流道横截面的研究在流动方向上横截面都是恒定不变的,是对平行流道“恒截面通道”结构的研究,没有考虑流动方向上横截面积改变对性能的影响。Fontana 等^[34]数值研究了不同通道角度的锥形流动通道(0°, 0.5° 和 0.75°)对 PEMFC 性能的影响。结果表明:随着倾角的增加,观察到更均匀的氧分布。随着通道面积的减少,氧气被迫扩散到催化剂层中,从而增强了电池性能。Man-cusi 等^[35]随后继续用 VOF 方法对 PEMFC 锥形通道中的气水两相流进行了数值模拟,结构如图 8 所示。结果表明,由于气流速度的增加,向下游逐渐减小的通道可以提高除水能力。

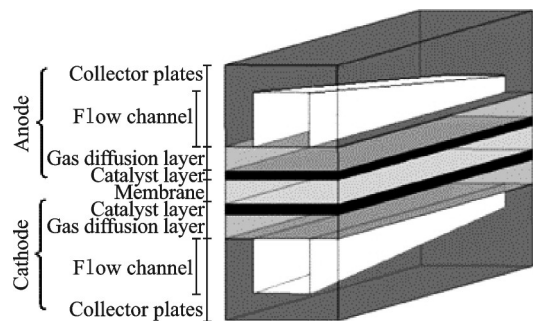


图 8 锥形通道燃料电池模型示意图^[35]

Fig.8 Schematic diagram of conical channel fuel cell model^[35]

即便横截面保持不变,不同的平行流道横截面布置方式可能也会对性能产生重要的影响。Atyabi 等^[36]使用有限体积方法对平行正弦流道进行了数值模拟,并与直平行流道进行了比较,如图 9 所示。结果表明:在工作电压下,正弦流道的最大速

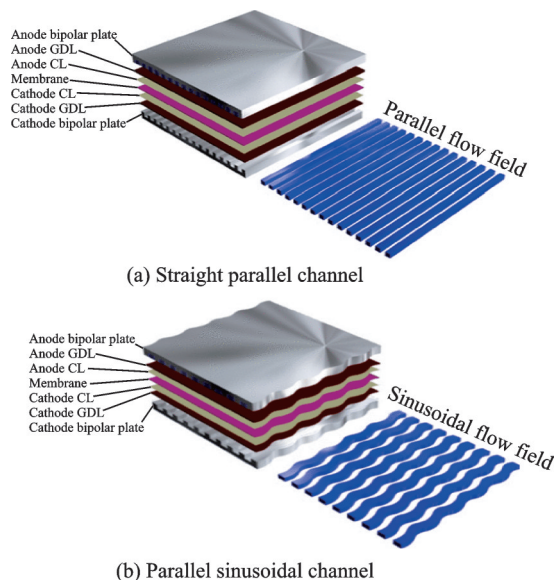


图9 两个具有不同流道的PEMFC示意图^[36]

Fig.9 Schematic of two PEMFCs with different flow channels^[36]

度和压降分别是GDL/CL界面的平行流道的1.18倍和6倍,正弦流道具有更好的性能。

针对平行流道或单直通道不同横截面的PEMFC流道结构改进研究在高电流密度条件下能够一定程度上获得更高的功率密度和水去除效果。但是,由于反应气体的输运方式仍然是扩散,反应气体进入扩散层的比例有限,仍然没有使发生电化学反应的催化层得到充分利用,进而获得的性能提升也十分有限。在考虑PEMFC内部传质的特征后,许多研究学者重点针对提高平行流道PEMFC气体压降和增加气体在肋下的对流,提出了多种强化传质的优化方法。

1.1.2 挡板位置和形状

常规流道中沿流道流动的反应物到达MEA中的GDL,然后气体通过它扩散以到达发生电化学反应的催化层。另一方面,部分反应物从气体扩散层流走不参与反应。结果,浓度损失和电池出口处未反应气体的量增加,低的燃料利用率降低了系统的工作效率。由于与扩散层接触的流道表面积占电池总反应表面积的比例不到60%,依靠气体扩散所能达到反应区的气体相对有限,这成为PEMFC性能提升的瓶颈之一^[37]。因此设法提高反应气体进入催化层过程中的对流流动至关重要^[38](图10),以此提高电池的工作效率,同样,除水能力也会因此得到改善^[39]。

许多研究发现,在通道中添加挡板可以有效地促进向CL的反应物供应,从而改善PEMFC的性能,但是通道中的压降也有所增加^[40-41]。另外,由于增强了气体对流效应,带有挡板的PEMFC的液

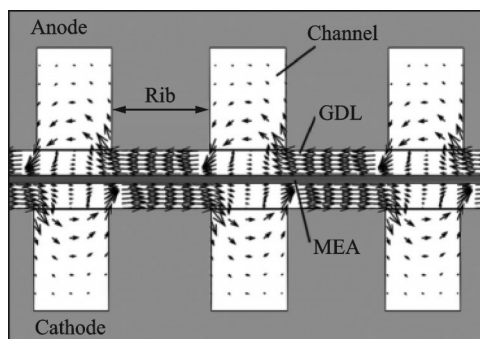


图10 肋下通过气体扩散层的对流^[38]

Fig.10 Convection through gas diffusion layer under rib^[38]

态水和温度分布更加均匀^[42]。上述研究证实流道中添加挡板可以提升电池性能,但是针对传质效果的原理没有深入剖析,尤其缺乏相关物理量的评价指标来指导电池的优化设计,Shen等^[43]对比研究了4种不同堵塞的PEMFC的性能,根据场协同原理定义了协同角和有效传质系数,以验证结果。结果表明:随着堵塞的增加,气体速度与阴极处的浓度梯度之间的平均协同角减小,而有效传质系数得到改善,从而增强了PEMFC的性能。

此外,流道中挡板数目、形状、阻塞程度等参数也对PEMFC的性能有较大影响,Jang等^[41]以数值模拟研究挡板数对PEMFC运输现象的影响(图11)。由于挡板的阻塞,迫使更多的反应气体进入GDL和催化剂层发生了电化学反应,从而增强了燃料电池的性能。然而,随着挡板数量的增加,低电压下电流密度的增加量减小。因此,应当存在对应于最高净输出功率的最佳挡板数量。蔡永华等^[44]研究了挡板高度和形状对电池传质性能的影响,结果表明,挡板高度占流道高度的70%,挡板形状为1/4圆时,流道的传质性能最好,电池性能最优。

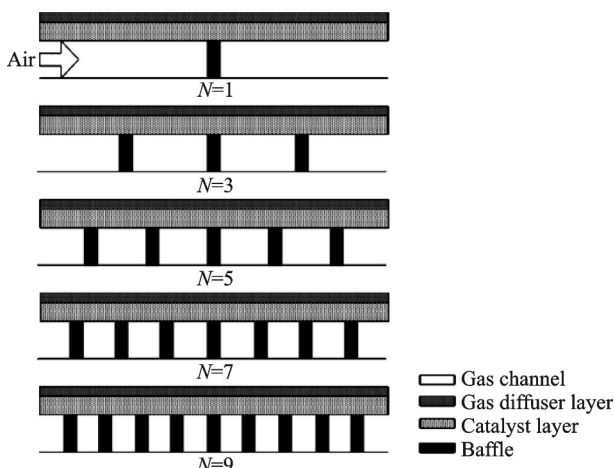


图11 不同挡板数(1,3,5,7)的PEMFC半电池示意图^[41]

Fig.11 Schematic of the half cell of PEMFC with different baffle numbers(1,3,5,7)^[41]

Heidary 等^[45]研究了部分或全部堵塞对燃料电池性能的影响。结果表明,尽管压降较高,但完全堵塞相比于部分堵塞的情况,迫使更多的反应物进入 CL,促进反应气体的供应,更能提高净电功率。在他们后续对于挡板位置排列的研究中(图 12),结果表明,平行流道中的交错堵塞表现要比连续堵塞挡板效果更好^[46]。

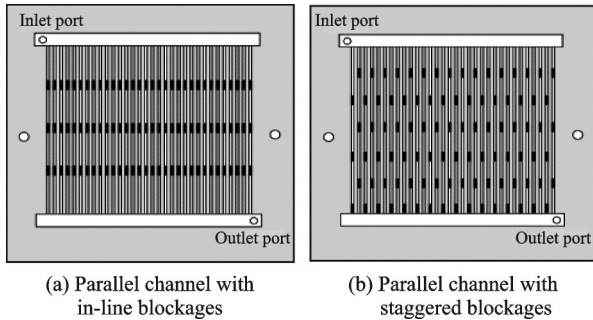


图 12 阴极侧流道结构示意图^[46]

Fig.12 Schematic diagram of cathode side channel structure^[46]

以上针对挡板的研究中,集中于使用挡板来增强 PEMFC 的发电功率,但是很少考虑挡板引起的压力损失的影响。这种压力损失会导致输送燃料的额外耗功,因此,实质性增强 PEMFC 电池性能的流道结构,必须考虑通过通道的入口和出口之间的压降。挡板形状是影响挡板流道的重要影响因素,Perng 等^[47]研究了带有梯形挡板的流动通道(图 13),发现在双极板流道中的梯形挡板周围会产生更好的局部 PEMFC 电池性能,反应物传输,传热性能和液态水去除效果,尤其是在梯形挡板的角度和高度较大的情况下。但是,它也会导致局部高温($> 372\text{ K}$)可能损坏 PEMFC 的膜,并且大压降(大约 $424\ 000\ \text{Pa}$)需要较高的辅助系统耗功来

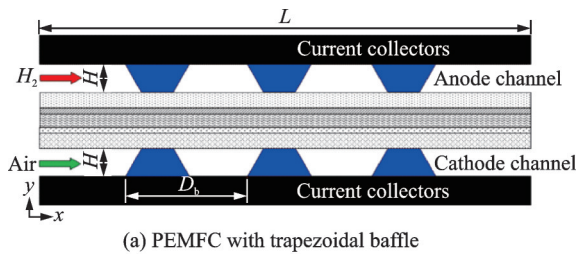


图 13 梯形挡板流动通道示意图^[47]

Fig.13 Schematic diagram of flow channel of trapezoidal baffle^[47]

输送反应物。综合考虑压降因素,发现当 PEMFC 的梯形挡板角度为 60° 时,比具有传统流动通道(无挡板)的 PEMFC 净功率提升了约 90% 。高强等^[48]综合考虑常规挡板结构对 PEMFC 性能的影响,认为相对于挡板角度、体积等因素,堵塞程度的增加可以显著地提升性能。

除上述常规挡板形状外,Fan 等^[49]研究两种新颖的阴极挡板流道设计(多板结构流道和集成结构流道),并通过三维两相数值模拟进行了研究(图 14)。数值结果表明,具有 30° 角、 $0.5\ \text{mm}$ 宽度和 $6.0\ \text{mm}$ 距离的 PEMFC 表现出最好的性能,并且板角度对 PEMFC 性能的影响最大。与常规直流道相比,新颖的流道设计能够迫使更多的氧气流向阴极催化剂层,从而提高电化学反应速率。此外,这两个新颖的流道设计能够从 PEMFC 中去除更多的液态水,从而有效避免水淹。根据仿真结果,对于多板结构和集成结构,PEMFC 净功率密度的最大提高分别为 4.7% 和 7.5% 。

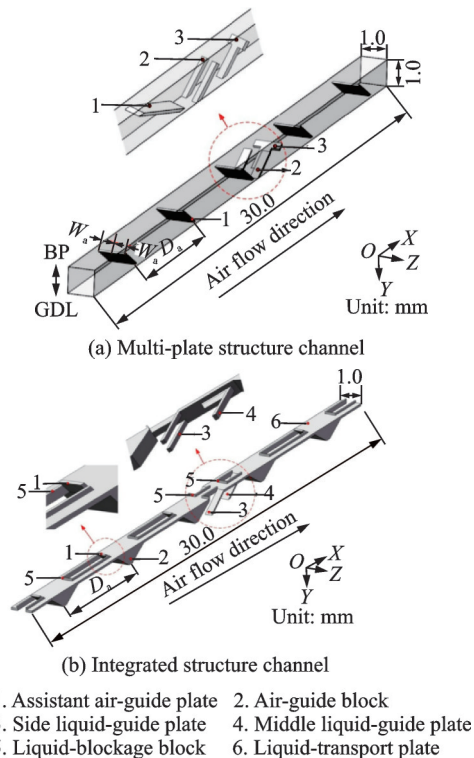


图 14 流道结构示意图^[49]

对于直通道或平行流道,已经对挡板流道中的反应物传输机理进行了深入研究,也对不同阻塞程度、挡板形状和挡板个数等参数对性能的影响进行了较为系统的研究,有助于设计时的快速工程预估。但是,这些研究方法不能很好地针对确定形状挡板进行进一步地优化。为了解决这一问题,相关学者引入了算法工具协助流道结构的优化,曾祥兵

等^[50]采用遗传算法对挡板在流道中位置进行了优化,使得 PEM 燃料电池的净功率最大化。Cai 等^[51]设计了一种具有生物启发性的波浪状结构 PEMFC(图 15),通过遗传算法研究了通道中心振幅和波周期数对燃料电池电流密度和压降的影响。结果表明,最佳流道尺寸可将输出功率密度提高 2.2%。综合考虑净功率并利用优化算法等数学工具进一步确定挡板位置和挡板布置方式是未来挡板流道研究的重要方向。

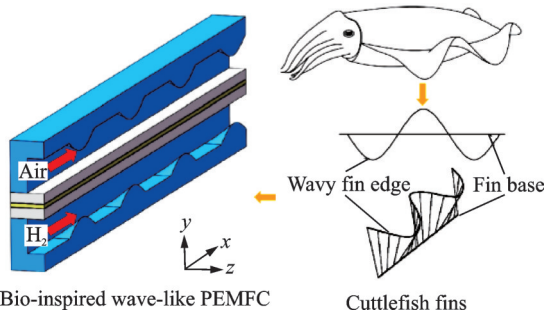


图 15 墨鱼鳍和以生物为灵感的波浪状 PEMFC^[51]
Fig.15 Cuttlefish fins and bio-inspired wave-like PEMFC^[51]

1.1.3 流道与肋板的宽度比

双极板中的流道用于将反应物输送和分配到 MEA 以及水的去除。流道之间的肋板除了传递由于电化学反应而在 MEA 中产生的热量之外,还用于电流的收集和从一个电池到另一个电池的传输。因此,可以说较宽的流动通道确保了良好的反应物输送和除水,而宽的肋板则确保了良好的电导率和导热率以及机械稳定性^[24]。为便于研究流道宽度和肋宽对于 PEMFC 性能的影响,通常定义流道与肋板的宽度比为流道宽度和肋板宽度之比(Channel to rib width ratio),也有部分文献定义为肋板宽度和流道宽度之比(Land to channel width ratio)。总流道面积比(总流道面积/电池活性面积)和总流道宽度比(总流道宽度/总电池宽度)一定程度上也能体现不同流道与肋板的宽度比对 PEMFC 性能的影响。

Wang 等^[52]建立了具有平行流道设计的 PEMFC 的三维模型,其横截面示意图如图 16 所示。该模型用于研究流道面积比和阴极流速对电池性能和局部传输特性的影响。对于平行流道设计,随着总流道面积比的增加,燃料被传输到扩散层中,进而到达催化剂层的过程主要依靠扩散。较大的流道面积比增加了燃料与扩散层之间的接触面积,这允许更多的燃料直接扩散到多孔层中以参与电化学反应,从而提高了反应速率。

除了对传质的影响外,流道与肋板的宽度比直接影响电压损耗和机械稳定性。Kahraman

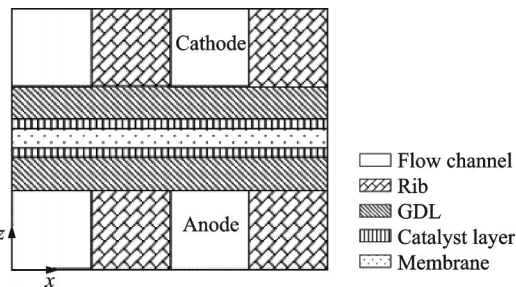


图 16 PEMFC 的横截面示意图^[52]
Fig.16 Cross-sectional schematic diagram of PEMFC^[52]

等^[24]计算得出 MEA 进入流动通道的最大挠度和电压损耗与肋板/流道宽度比的关系。结果表明:在一定范围内,随着肋板/流道宽度比的减小,电压损耗也减小。这种对应关系是由于减少肋板宽度和增加流道宽度将增加反应物和 GDL 之间的接触面积,并增强了 GDL 中的除水。但是,另一方面,它将减少电流和热量的传递。并且随着流道宽度的增加(或肋板宽度的减小),由于对 MEA 的机械支撑减少,因此 MEA 进入流道的最大挠度增加。综合来说,流道宽度应保持在 1.5 mm 以下,以保持机械稳定性,而肋板/流道宽度的值应保持尽可能低,以最大程度地降低电压损耗。他们还建议将肋板与流道宽度之比设为 1~2 以实现最佳性能。

经过多年的研究,目前通过改进平行流道结构以提高 PEMFC 性能的设计方法已经较为成熟,为分析不同流道结构对反应物分布的影响机理和液态水的去除奠定了基础,同时也可作为蛇形流道、插指型流道等流道结构的设计研究以及其他新型流道的开发研究提供相应的技术支撑。

1.2 蛇形流道

为了解决反应物在平行直流道中可能遇到的分布不均这一问题,学者们提出了蛇形流道结构(图 17),迫使反应气体流经一条横跨整个活性区域的长而曲折的单一路径。蛇形流道设计可以看作是许多并联的流道串联在一起。它具有从一

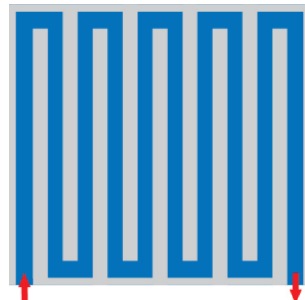


图 17 蛇形流道设计示意图(单蛇形流道)
Fig.17 Schematic diagram of serpentine channel design (Single serpentine channel)

端的入口到另一端的出口的连续流动通道。尽管反应物的浓度沿通道减小,较长的反应物流动路径会造成更显著的压降^[53],但这样的通道确保了整个区域都被覆盖。实际上,大的压降既可以看作是优点也是缺点,需要研究如何在保持已经获得的反应物传输速率的提高和高效去除液体水的优势的同时有效减少沿通道的压降带来的辅助系统耗电,可通过对流道结构的改进以获得适当的流场。

1.2.1 流道截面尺寸

与直平行流道类似,研究人员也研究了蛇形流道截面的不同特征尺寸对性能产生的影响。Freire等^[54]通过不同横截面形状(矩形和梯形)的蛇形流动通道,研究了运行参数对PEMFC性能的影响。研究表明:加湿温度对于梯形横截面流动通道PEMFC性能影响较大,而对于矩形横截面的蛇形流道的影响可忽略不计。Kumar等^[26]不仅数值分析了流道形状对阳极氢气消耗的影响,还进一步研究了可以获得最优性能的流道尺寸。他们针对不同流道尺寸(流道宽度、流道深度和流道高度)进行了排列和组合,总共得到216种情况,并绘制了阳极处氢消耗量随流道宽度和肋板宽度变化的等高线图。最后得出结论:对于高氢消耗量(80%)的情况,流道宽度、流道深度和流道高度的最佳尺寸值分别约为1.5、0.5和1.5 mm。

考虑到横截面在流动方向变化上对PEMFC的影响,Yan等^[55]研究了锥形通道设计(高度或宽度逐渐减小)PEMFC蛇形流道。结果表明,锥形通道设计在PEM燃料电池双极板中的应用可提高燃料利用率,促进反应气体传输,高效去除液态水,从而提高PEM燃料电池的性能。Wang等^[56]提出并研究了两种具有锥形通道的蛇形流道,如图18所示。他们的实验结果表明:与传统矩形通道蛇形流道相比,在高电流密度下的锥形通道可实现更高的性能。锥形的通道可以增加出口区域的气体流速,从而去除在强制对流驱动下的通道中积聚的水。其次,锥形通道设计加强了相邻通道之间的肋下对流,这促进了氧气的质量传输,也促进了GDL肋下区域积聚的水的去除,进而减小了肋板和通道区域之间的氧气浓度不均匀性。但是,较大的压降也会增加寄生功率损耗。朱万超等^[57]对于渐变蛇形流场的性能研究也得出了类似的结论。综合来看,在流道结构设计中,应该考虑PEMFC运行参数(电流密度的工作范围、加湿温度等)的影响,以平衡压降、水去除和电池输出性能。

上述许多研究证实了横截面对PEMFC性能

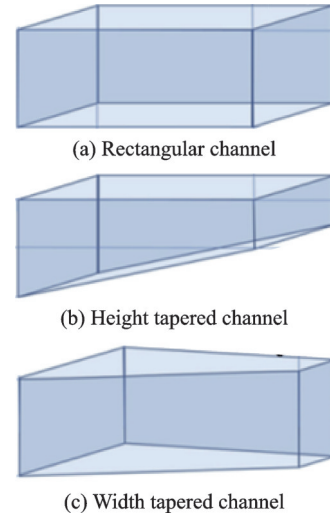


图18 具有锥形通道的蛇形流道^[56]

Fig.18 Serpentine flow channel designed with conical channel^[56]

的影响机理,考虑到实际研究设计中需要建立具体且效果显著的设计方案。近年来已经有研究人员从优化算法的角度,建立优化方案并开展流道横截面结构优化相关研究。Wang等^[58]通过在宽度恒定条件下改变流道高度,针对单个蛇形PEM燃料电池的流道截面尺寸进行了优化,如图19中 $H_0 \sim H_4$ 所示。与具有直流道的燃料电池相比,优化后的最佳流道结构设计可使电池输出功率增加11.9%。该流道由3个锥形通道(通道2~4)和最终的渐扩通道(通道5)组成。锥形通道增强了流道内流动和肋下对流,这都增加了局部氧气的传输速率,增强了除水能力,从而提高了局部电流密度及其分布均匀性。另一方面,出口旁的强肋下对流会导致大量氧气泄漏,最后的渐扩通道可最大程度地减少反应物在出口处的泄漏。

基于前面所说的挡板对平行流道的影响,学者们也开展了挡板对蛇形流道性能影响的工作,

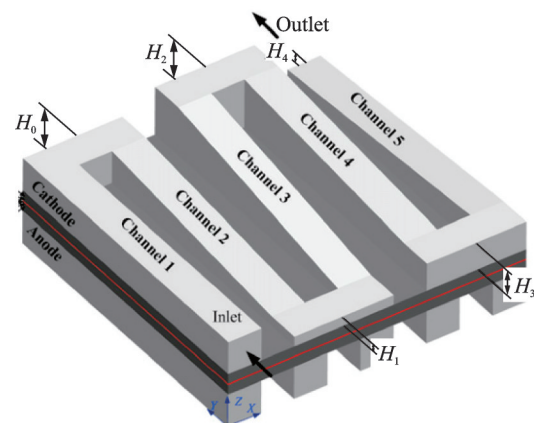


图19 具有变通道高度的蛇形流道示意图^[58]

Fig.19 Schematic diagram of a serpentine flow channel with varying channel height^[58]

但研究的目的是为了解决压降过大和克服下游区域的严重水淹和缺氧现象。Yan等^[59]基于蛇形流道设计了两类波浪形流道,如图20所示,特别是图20(b)中对波浪形流道的优化,结合了锥形通道特征提出“梯度深度”波浪形流道以提高燃料电池的性能。得出结论:波浪形流道的几何形状能够在贯穿平面方向上诱发对流量,从而极大地增强了从流道到催化剂层的氧气供应,从而形成了更高的局部浓度,从而提升了性能。并且,当氧气流过波浪状阻挡后,Z方向速度(即贯穿平面方向的流速)从正变为负,表明存在局部漩涡。这种漩涡能够通过惯性效应去除GDL中积聚的水,从而改善水的管理。另外,“梯度深度”波浪形流道可以沿流向和贯穿平面方向增加流速,从而能够克服下游区域的严重水淹和缺氧现象,从而实现更均匀的电流密度分布。

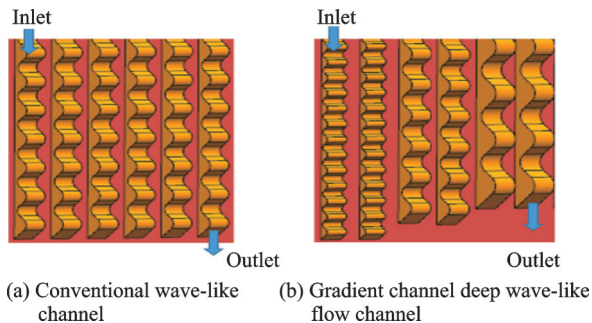


图20 不同波浪形流道结构示意图^[59]

Fig.20 Schematic diagram of different wave-like channel structures^[59]

对蛇形流道改变横截面以及增加挡板的研究取得了许多重要成果,但是由于蛇形流道自身的特点与平行流道不同,上述改进方案并不能解决它固有的缺点。因此,考虑蛇形流道流动特性结构改进工作具有更加实际的意义。

1.2.2 流道长度和流道数

蛇形流道、流道长度和流道数量是对燃料电池性能有重要影响的几何参数。在PEMFC中,反应气体传输和电极的电化学反应会受到相邻流道间的肋下对流特性的强烈影响。具体而言,当

对流代替扩散成为传质的主要形式,可以同时增加反应物浓度并降低催化剂层中的产物浓度,从而提高性能和避免水淹。比如,在不改变其有效面积的条件下,可以通过增加流动通道的长度,在单蛇形流道中增加对流,进而提高性能^[60]。Shimpalee等^[61]也做了类似的研究,结果表明:通过更改PEMFC的路径长度会影响其性能。具有较短路径长度的PEMFC显示出更均匀的电流密度分布和较小的积水程度。Limjeerajarus等^[62]研究了流道数量对小型PEMFC的传输特性和性能的影响(图21)。从极化曲线来看,他们的结论是:性能随着通道数量的增加而趋于降低,单通道蛇形流道PEMFC具有最佳性能。Boddu等^[63]类似地通过数值模拟分析了不同蛇形流道结构和压降的关系。结果表明:与反应物和水更均匀的分布的单蛇形通道相比,通道数量的增加可以改善高压降的情况。陈士忠等^[64]研究了蛇形流道PEMFC不同流道数对输出性能的影响,得出了类似的结论。结果表明:三流道蛇形流场PEMFC的输出性能优于单蛇形流道,增加并联的蛇形通道数减少了流道弯折数,进而降低了气体流程,不仅可以使流道进出口压力降控制在合理的范围内,而且可以使流道内反应气体分布的均匀性更好。这种存在部分差异的结论表明:一方面流道数量的影响在使用不同的MEA和PEMFC尺寸时,PEMFC性能可能发生显著变化;另一方面考虑不同的性能评价指标,结论也会发生变化。

有效的水管理是PEMFC的关键设计目标之一,上述针对流道长度和流道数的研究大都停留在数值模拟上,能够在运行期间对电池中液态水的分布实现可视化显得非常重要,中子成像技术是可视化PEMFC的强大工具,许多研究人员已经陆续进行了相关工作。Wu等^[65]使用中子成像等技术手段研究了不同通道数蛇形流道的PEMFC的水分布和积聚(图22)。结果表明,在不同的电流密度下,单通道蛇形流道有着最佳的性能和最均匀的水分布,也能更有效地去除液态水。通道中水总量的

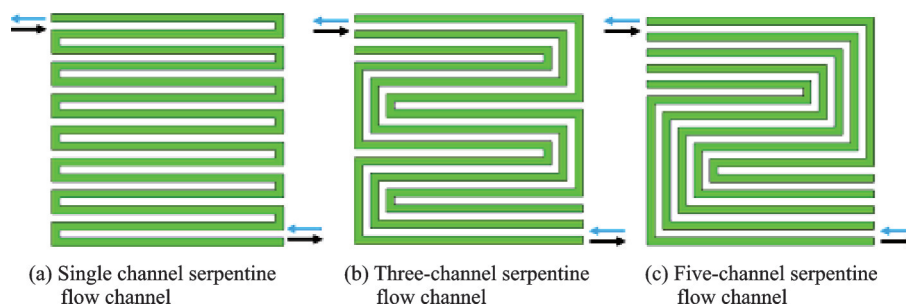


图21 不同通道数量PEMFC示意图^[62]

Fig.21 Schematic diagram of PEMFC with different channel numbers^[62]

减少可归因于更快的气体速度和更高的电池温度,而四通道设计由于最低的压降存在发生水淹的趋势。然而,单通道设计需要更高的辅助系统功耗来加压/再循环反应物。因此,对于更需要有效去除

水的小反应区域燃料电池,单通道蛇形流道更适合。多通道设计则更加合适于大反应区域,因为它的压降与单通道设计相比低得多,有利于提高工作效率。

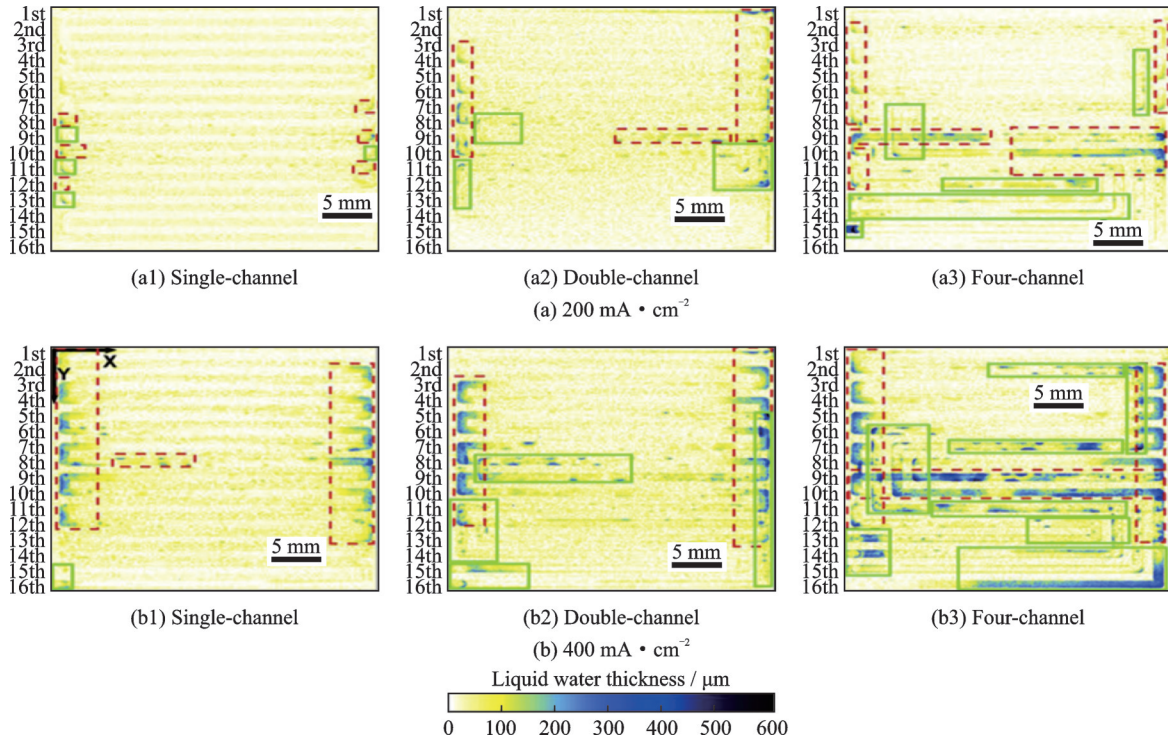


图 22 在两种不同恒定电流下运行 10 min,单通道、双通道和四通道蛇形流道中的平均液态水厚度分布中子图像^[65]
 Fig.22 Neutron images of average liquid water thickness distribution in single-channel, double-channel and four-channel serpentine flow channels under two constant currents operation for 10 min^[65]

如 Kandlikar 等所述^[66],文献中的大多数针对液态水的研究都集中在 PEMFC 中水的稳态行为上,而相对较少的研究涉及水积累和迁移的瞬态行为。为进一步完善流道参数对液态水影响的研究,Spemjak 等^[67]进行了与 PEMFC 中液态水的形成和迁移的可视化有关研究。他们通过直接可视化研究了透明的单蛇形流道 PEMFC,以获得液态水的形成和运输行为特性。

从流道长度和流道数角度的结构优化方案考虑了蛇形流道的流动特征,相较于单蛇形流道一方面保留了其可全覆盖流场区域、有效地去除液态水等优点,另一方面减轻了系统的高压降问题,降低了流道堵塞的风险,是更具针对性的优化方案。但是可优化参数单一且范围有限,针对不同运行条件的 PEMFC,结论也不尽相同,需要进一步开展典型工况下 PEMFC 的统一研究,从而落实其对流道设计的实际指导意义。

1.2.3 流道宽度

Wang 等^[68]研究了蛇形和平行流道的总流道宽度比(总流道宽度与总电池宽度之比)对性能的影响(图 23)。他们的分析表明:与蛇形流道相比,

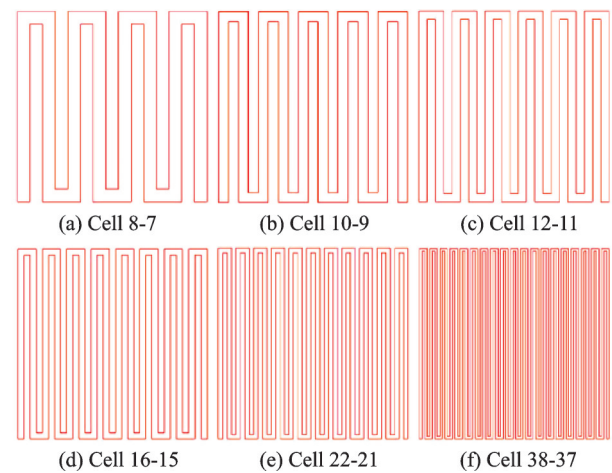


图 23 不同总流道宽度比的蛇形流道示意图^[68]
 Fig.23 Schematic diagram of serpentine channels with different total channel width ratio^[68]

增加流道宽度比对平行流道性能的影响更大。因为随着平行流道宽度的增加,气体扩散层与反应物之间的接触面积增大,促进了反应物向气体扩散层和催化剂层中的扩散。相反地,流道宽度比的增加会减小蛇形流道的肋下对流或强制对流能力的影响,导致 PEMFC 中的反应物扩散和除水能力下

降。除了对传质的影响,较大的肋板面积增加了接触表面从而增强了散热,MEA的热量可以更高效地传递至双极板。

Rahimi-Esbo等^[69]分析了不同肋板宽度的蛇形流道燃料电池性能。与平行流道的研究获得了相似的结论:通道宽为1.8 mm,通道宽度/肋板宽度的值为1.5时,PEMFC获得了最佳性能,如图24所示。

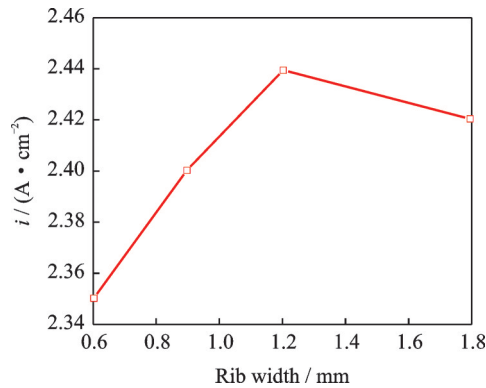


图24 不同通道宽度下的电流密度^[69](电压=0.4 V,通道宽=1.8 mm)

Fig.24 Current density at different rib widths (voltage = 0.4 V, channel width = 1.8 mm)^[69]

值得指出的是,在最佳通道宽度的基础上,他们进一步在流道设计中引入减少流道数量的设计。结果表明这一新设计可以实现局部化学计量比和速度的提高,并且可以实现压降减小以及更高效的除水。

1.3 插指型流道

为了进一步加强反应气体在扩散层中的传输过程,研究人员提出了插指型流道(图25)^[70]。与平行和蛇形流道相比,插指型流道的设计是不连续的。它的相邻两个流道组成一个单元,一个是进口流道,另一个是出口流道,进口流道的末端和出口流道的起始端均被堵死。

在插指型流道中,反应物被迫从两个流道中间的肋下方的GDL流入出口流道,一部分反应气体在GDL中的传输机制由扩散转变为对流,使得反

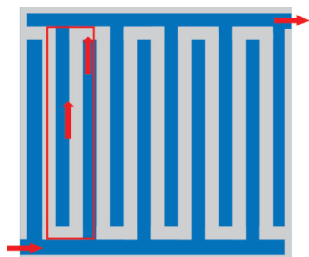
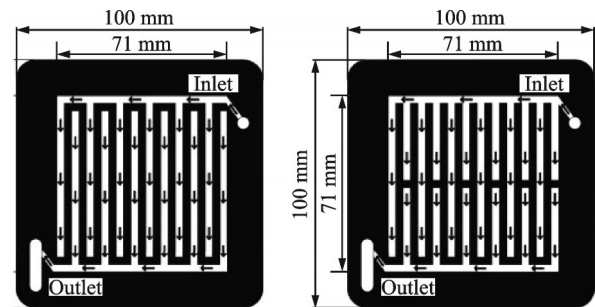


图25 插指型流道设计示意图^[70]

Fig.25 Schematic diagram of interdigitated flow channel design^[70]

应物充分地流过扩散层提高了气体利用率,进而提高了功率密度^[70]。同时这种结构也增强了反应物在催化层上的均匀分布,较快的流速促进了这些区域的液态水去除^[71-72]。但反应气体经过扩散层的强制对流,会产生较大的压降,提高辅助系统的功耗,同时由于气体流速比较大,可能会损伤气体扩散层,降低电池性能^[73]。因此,许多研究人员在挡板方面开展了相关优化工作,与挡板流道结构优化工作类似,Ku等^[74]研究了挡板数对PEMFC性能带来的影响。数值结果同样表明,随着挡板数的增加,性能得到增强,但是压降的增加导致了辅助系统的耗功。Thitakamol等^[75]提出了一种新的中挡板插指流道设计,并测试了其对PEMFC性能的影响。实验结果表明,当使用空气作为阴极反应物时,在插指型流道的中间位置处增加挡板的电池性能要优于常规插指型流道燃料电池,如图26所示。根据空气流速的不同,其功率输出大约高出1.2~1.3倍。但是,当阴极反应气体为O₂时,两个流道的性能几乎相同。特别地,他们的工作表明流道设计优化工作还要充分考虑PEMFC自身的工作条件。进一步地,Jang等^[76]用简化的共轭梯度法与商业CFD代码相结合,构建了一个优化器以平均电流密度最大化为目标优化插指中的挡板位置,优化结果可使得燃料电池输出的功率明显增加14%。



(a) Conventional interdigitated flow channel (b) Mid-baffle interdigitated flow channel

图26 常规插指型流道和中挡板插指型流道示意图^[75]

Fig.26 Schematic diagram of conventional interdigitated flow channel and mid-baffle interdigitated flow channel^[75]

在其他流道几何参数优化方面,研究人员做了很多与前面类似的工作并将优化效果与平行流道、蛇形流道进行了对比。除平行流道、蛇形流道外,通道长度增加也会对插指型流道PEMFC中流动气体分布和电池性能产生影响。Santamaria等^[77]设计了两种不同长度的插指型流道结构并通过数值模拟进行了研究,如图27所示。得出结论:更短的通道插指型流道可以产生更高的最大功率,短插指情况下的最大功率密度分别比正常和高流量情

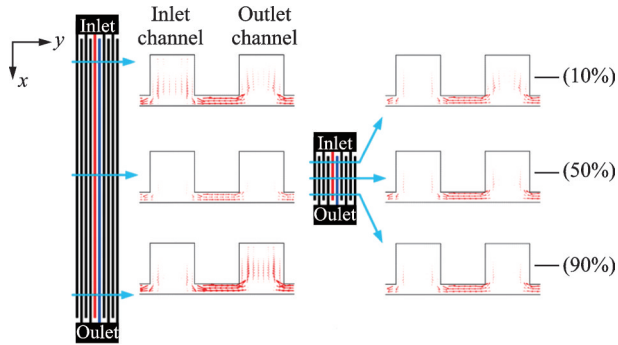


图 27 在长/短插指流道的 x/L_c 分别为 10%, 50% 和 90% 位置的横流速度剖面图^[77]

Fig.27 Sectional views of cross flow velocity at x/L_c positions of approximately 10%, 50% and 90% of both long and short interdigitated flow channels^[77]

况下的最大功率密度情况分别大 33.9% 和 12.7%。从图中可以看出,长插指流道尽管在入口($x/L_c = 10%$,其中 L_c 为电池长度。)和出口($x/L_c = 90%$)区域有较高的肋下对流,但在整个长度范围内却比短插指流道对流流动程度要低,而短插指流道在整个长度上都存在相对一致的横流。短插指流道肋下对流速率的中心区域比长插指流道燃料电池的肋下对流中心区域($x/L_c = 50%$)高约 20%,短插指型流道中肋下相对均匀的对流输运更有利于肋下液态水的去除。在设计 PEMFC 时,在决定使用插指型流道设计还是平行流道设计时应考虑通道长宽比。降低插指型流道的长宽比对流道性能改善更有利。

Cooper 等^[78]随后在电流密度为 $0.6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的情况下,进一步研究了减小的通道长宽比与插指型流道 PEMFC 性能改善之间的关系。结果表明低长宽比的插指型流道往往优于高长宽比的设计,他们通过中子成像技术确定,与低长宽比流道相比,高长宽比流道中的水积累增加(图 28)。这样的观察结果表明,随着长宽比的降低,液体水的去除可能是性能改善的主要原因,结合单相数值模拟进行了验证。由于横流不均匀导致的性能损失明显小于实验中测量的长宽比增加时的性能损失,得出结

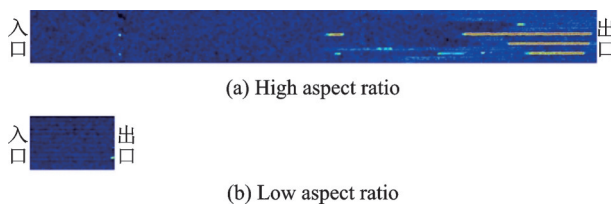


图 28 高长宽比与低长宽比插指流道中子照相的水分布图像^[78]

Fig.28 Water distribution images of neutron radiography in interdigitated flow channel with high aspect ratio and low aspect ratio^[78]

论:液态水是高长宽比流道性能损失的主要原因。

针对流道宽度和肋板宽度比,Kerkoub 等^[79]进行了三维数值模拟分析了其对 PEMFC 性能和局部传输现象的影响。研究了双极板的插指型流道 6 种流道与肋板的宽度之比(0.25~2.66)。得出结论:在高工作电压下,肋宽比对于电池性能几乎没有影响。相反,在低电压下流道宽度和肋宽度比对电池影响很大。增大肋板的宽度和减小流道的宽度可改善电池性能。此外,最佳流道与肋宽度之比 $\eta = 0.25$ 。减小流道与肋的宽度比会增加肋板下方的对流,气态反应物在电池的有效面积上能够更好地分布,从而得到均匀的电流密度分布和更好的电池性能,如图 29 所示。杨立新等^[80]针对流道面积比对插指型流道 PEMFC 性能影响的研究也得出了类似的结论。为了进一步研究在流道宽度和肋板宽度之比,流道深度两者的关系,Cooper 等^[81]在不同操作条件下通过实验研究了流道/肋板宽度比和流道深度对电池性能的影响。结果表明,对于化学计量分别为 1.5、2.0 的阳极和阴极,净系统功率密度的理想水力直径约为 0.4 mm。总的来说,尽管针对插指流道的优化设计相对较少,但插指流道结构作为一种优秀的设计理念既可以与常规流道形成对比和验证,也可以为新型流道的设计提供灵感。

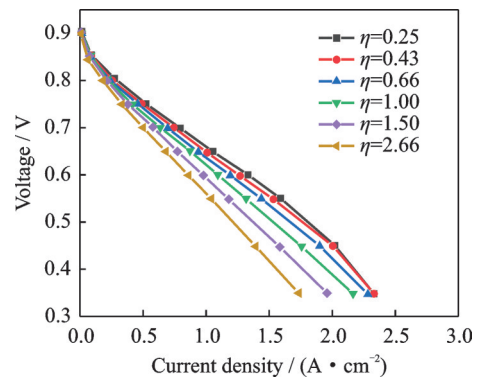


图 29 具有不同的流道与肋板宽度比的极化曲线^[79]

Fig.29 Polarization curves with different channel-to-rib width ratios^[79]

1.4 流道设计方案的横向对比

各常规流道结构均有其优缺点,适用于不同的设计要求。学者除了研究常规流道不同结构下的性能特性,为设计者在各种工作条件下的流道结构设计提供依据外,也对不同常规流道结构进行了大量对比研究工作,进一步指导对流道结构的选型。Hsieh 等^[82]在不同操作参数(操作温度、阳极流道背压)下,探究了 3 种常规双极板流道结构对 PEMFC 性能的影响,如图 30 所示。研究表明,具有这些流道结构的燃料电池对不同温度和背压的性能

响应规律相似。其中,点状流场在相同MEA有效面积条件下的压降最小,插指型流道比其余结构有着更好的电池性能。点状流场中没有固定的流道,而是由许多阻挡物在流场进出口间规则排列,阻挡物根据特定图案布置以产生一系列平行和弯曲的路径^[83]。点状流场结构简单,但是流体流经流场板时易发生短路,使流体分布不均匀,双极板得不到充分利用,影响电池性能^[84]。Kahraman等^[24]的研究得出了类似的结论,指出这种类型流场的主要问题就是反应物流量的分布不均,这造成了反应物分布不均和电流密度分布不均的问题。为了改善分布不均的情况,Guo等^[85]开发了基于网络的PEMFC点状流场优化模型,证明优化设计比常规点状流场具有更高的性能。除了对常规点状流场的优化,Atyabi等^[83]还设计了一种蜂窝型点状流场,通过将一组六边形挡板以规则排列的方式在PEMFC的阴极通道处创建了一系列平行和螺旋形路径,结果表明,该设计有效地增强了扩散和促进了反应物分布的均匀性。

Li等^[86]对具有平行流道和蛇形流道的PEMFC进行了数值研究,流道结构如图31所示。他们得出结论:蛇形流动通道的燃料电池表现出最佳性能,但伴随高压降。对于平行流道(Z形)的燃料电

池,尤其是在低电池电压下,存在氧气质量分数,温度和局部电流密度的高度不均匀分布的情况,这会严重影响燃料电池的性能和寿命。以氧气质量分数为例,平行流道(Z形)的氧气质量分数在燃料电池下游区域接近于零,此时从气流通道运输到催化层的氧气量不足以满足电化学反应的需要,氧气质量分数的高度不均匀性不仅意味着催化层中的催化剂没有得到有效利用而降低电池性能,并且由于不均匀的电化学反应速率引起的温度分布不均匀会影响燃料电池的耐久性。

Lakshminarayanan等^[87]研究了蛇形和插指型流道PEMFC的性能差异。结果表明:插指型流道无论在数值模拟中还是在实验中,最高功率密度均高于蛇形流道。Sousa等^[88]建立了PEMFC的三维等温模型并进行了实验,重点研究并对比了4种不同常规流道结构(平行流道、双通道蛇形流道、插指型流道和点状流场)对性能的影响。结果表明,插指型流道PEMFC具有最高的功率输出。但是,由于电流密度分布不均匀,可能会产生热点。因此插指型作为实际燃料电池系统的应用方案还需要进一步研究。随后Tajiri等^[89]对插指型流道中的传质机理进行了实验研究,如图32所示。结果表明:插指型流道促进了氧气通过肋下GDL的对流作

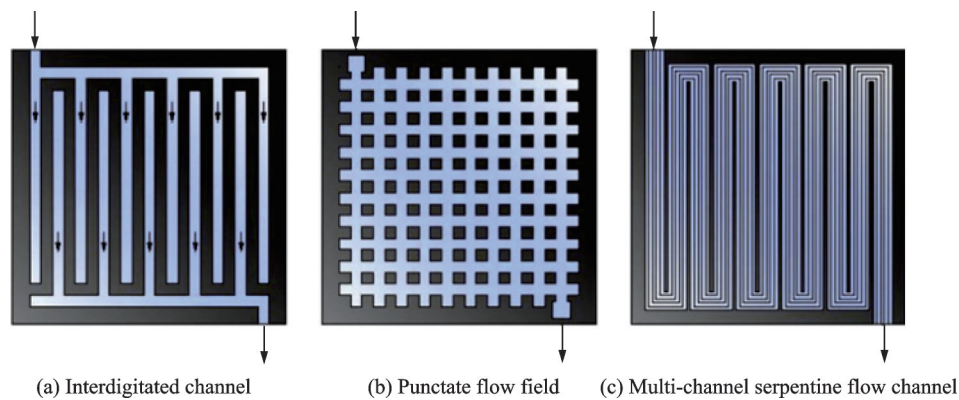


图30 双极板的几何结构设计^[82]

Fig.30 Geometric structure design of the bipolar plate^[82]

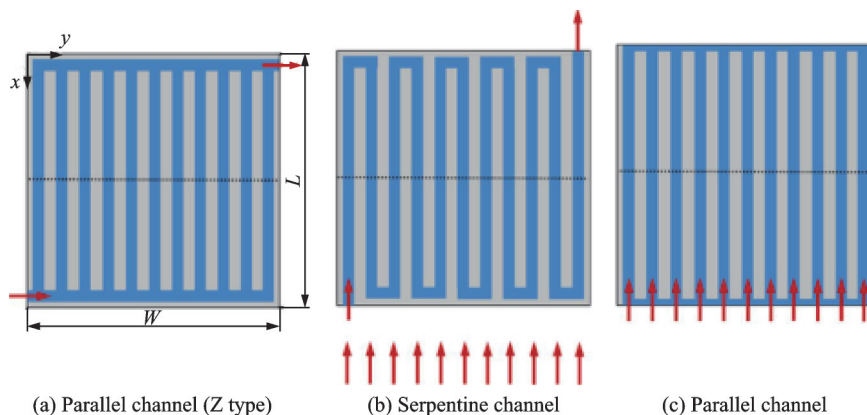


图31 流道结构示意图^[86]

Fig.31 Schematic diagrams of channel structures^[86]

用,这能够有效地排除扩散层中的液态水,防止水淹现象的发生,但这种对流作用主要发生在GDL厚度方向上靠近流道的部分,通过GDL厚度方向上剩余位置的输运仍然依赖于扩散。同时,插指型流道的使用也大大缩短了扩散路径长度,这与蛇形流道相比大大降低了传质阻力。不过在较高的电流密度下,因为在入口通道的堵死端和GDL中会积累大量的液态水,会导致电堆性能不稳定。另一方面,尽管插指型流道在稳态条件下性能高于其他两种常规流道,如果PEMFC操作条件要求对突然的负载变化具有快速响应,则必须考虑堵塞对瞬态响应的影响。Li等^[90]的研究表明堵塞的设计,与没有堵塞的流道相比,它们表现出明显更差的瞬态响应。

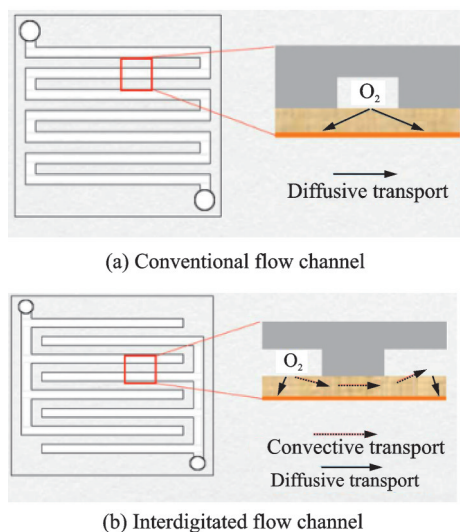


图32 不同类型流道之间的氧气传输机制(对流或扩散)比较^[89]

Fig.32 Comparison of oxygen transport mechanisms (convection or diffusion) between different flow channels^[89]

双极板流道的设计是高效PEMFC研发中的关键工作,良好的流道可以促进向多孔电极的氧气供应,改善氧气分布并因此增加电流密度。在所提到的4种常规流道中,蛇形和插指型流道结构表现出比平行流道和点状流场更好的性能,因为它们的设计增强了强制对流,这促进了氧气的输送,进而增强了反应物在催化层上的均匀分布。然而,较高的反应气体压降一方面有利于对积水的去除,另一方面也增加了辅助系统的功耗。尤其对于插指型流道来说,过高的流动阻力降低了系统净功率^[91]。尽管平行流道通常允许优先的流路,导致反应物在MEA的有效表面积上分布不均,因此降低了电化学反应效率和PEMFC性能;但同时较低的压降和简单的设计可以降低制造成

本并降低燃料电池中的工作压力,更有利于燃料电池的商业化应用^[92]。

综合来看,在流道结构参数优化设计研究中:

(1)矩形仍是双极板最常用的横截面通道设计,其他横截面形状可促使燃料电池运行过程中某些特定方面的改进,比如三角形提高了液体水的去除和氧气的利用,但也伴随着压降的提高。通过算法进行截面参数的优化的设计方法尚处于起步发展阶段,大部分简单采用通道宽度、高度等作为决策变量,优化效果不显著且会导致计算资源激增。流道横截面优化中如何高效引入截面参数信息,建立精度高且工程可应用的优化算法是目前亟需突破的技术难题。

(2)就挡板通道来说,大多数结果表明,由于挡板对气流造成的堵塞强化了肋下对流效应,迫使大量气体流过GDL到达催化剂层,这增加了反应有效面积,提高了性能,但是随着压降的增加,燃料电池的整体性能下降。此外,与无挡板设计相比,挡板设计显示出明显更差的瞬态响应。如何在压降可控的前提下设计适合系统长期稳定运行的挡板布置策略是未来重要的研究方向。

(3)在通道长度和通道数量方面,较长的通道会在相邻通道之间产生更高的压差,这会增强肋下对流和燃料电池的性能。另外,具有较短路径长度或较多平行通道数量的流道设计比具有较长路径通道或较少平行通道数量的流道具有更好的反应物分布。但是由于各自研究的PEMFC的具体参数不同,结论有相悖的情况,研究中需要结合运行条件进行分析。

(4)流道与肋板的宽度比方面,对于平行流道,流道宽度的增加,气体扩散层与反应物之间的接触面积增大,促进了反应物向气体扩散层和催化剂层中的扩散。但是对于存在肋下对流的蛇形流道等,会导致PEMFC中的除水能力下降。同时,较大的肋板面积可以增强散热,MEA的热量可以更高效的传递至双极板。另外,大多数研究基本确定其值为1.5时(通道宽度/肋宽=1.5)PEMFC获得最佳性能。在此数据支撑下,通过和PEMFC其他结构参数的协同研究是未来流道与肋板的宽度比方面高效结构设计的重要方向之一。

2 新型流道

学者们对最常见的平行流道、蛇形流道、插指型流道等有大量研究,结果表明常规流道往往都有着明显的优缺点,某种流道结构一方面性能的提升往往意味着另一方面性能的下降,许多设计参数对

总体燃料电池效率会产生相互矛盾的影响,设计一个高效流道并不是一件容易的事。因此,对流道优化设计的主要限制是这些参数之间复杂的平衡关系。比如:平行流道具有较低的压降可以减少辅助系统耗功,但是较低的流速也就不能有效地吹扫液态水。另一方面,很多学者也在不断开发新型流道结构,如基于仿生学的仿生流道、螺旋流道和3D流道等,旨在寻找能同时实现低压降、反应物均匀分布以及更高性能等优于常规流道的新型流动模式^[93]。尤其是最近的3D流道双极板,它能够有效提高电池的质量传输,同时促进液态水从电池中排出,是目前流道结构研究的热点之一^[94]。

2.1 仿生流道

燃料电池双极板流道的功能之一就是分配反应物并排出产物,许多活生物体中存在可以高效完成这一功能的结构。这些基于自然生物的通道几何结构,如图33所示的叶脉系统^[95],其中营养物质流过母通道并分配到较小的子通道。由于这些流动网络的自然演变,以最小的压降最大化了营养物质分布^[96]。因此,近些年,基于分形设计、生物启发等设计理论,越来越多的研究者旨在寻找具有仿生特点的高性能双极板流道结构。

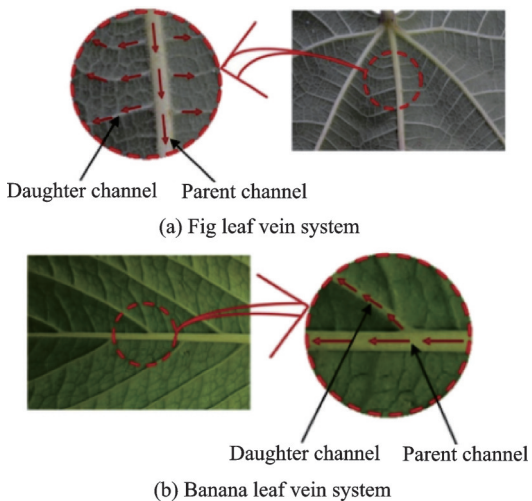


图33 自然流动结构示例^[95]

Fig.33 Examples of natural flow structures^[95]

Kloess等^[97]提出了一种以叶片和肺为灵感的流道结构,如图34、35所示。总共分析了4种流道结构,即单蛇形、插指型、肺和叶型流道并进行了数值模拟和实验测试,相对于常规的插指型或单蛇形流道(38~41 Pa),在叶或肺型设计中获得了更低的压降(26~27 Pa),通过气体扩散层的气体传输也更加均匀。实验测试结果也发现,在相同的工作条件下,采用叶或肺型流道的燃料电池的性能要优于常规流道结构,峰值功率密度提高了30%。

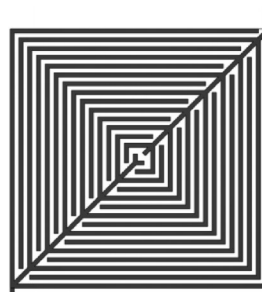


图34 生物启发的新型叶型流道^[97]

Fig.34 New bio-inspired leaf flow channel^[97]

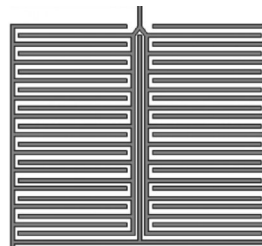


图35 生物启发的新型肺型流道^[97]

Fig.35 New bio-inspired lung flow channel^[97]

Ouellette等^[98]在随后将常规流道中插指流道增强肋下对流的理念和生物灵感进行了有机结合,使用常规的蛇形流道作为参照,分析了使用基于树状结构的插指流道和非插指流道作为阳极或阴极板对性能的影响。在所有流道组合中,蛇形流道(阳极)和基于树状结构的插指流道(阴极)的组合表现出最佳性能,并且催化层表面的反应物均匀性最好,他们认为这归因于这两个流道构成流道的肋下对流增强。图36描绘了生物启发式树状结构。树状结构非插指流道提供了所研究结构中的最低压降,但是也造成反应物更易于直接从进口流向出口,导致该结构的PEMFC性能下降。国内学者易伟^[99]以 Murray 定律为基础,通过模拟四叶草叶片

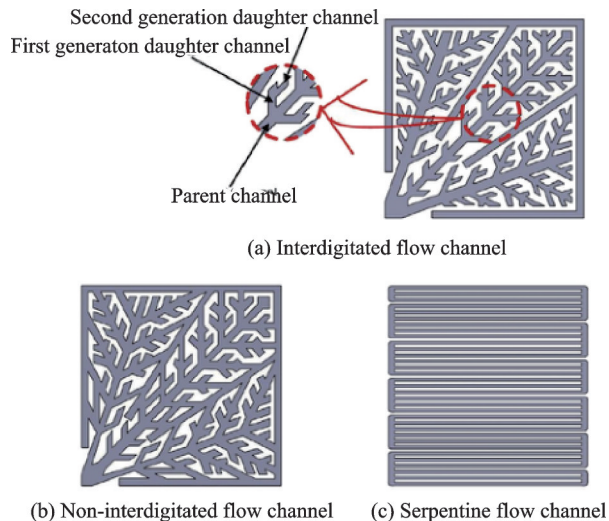


图36 生物启发式树状结构^[98]

Fig.36 Bio-inspired tree structure^[98]

形状和叶脉结构,设计了一种新型仿生流道结构。比较了其与传统蛇形流道电池的水管理性能。结果也表明新型仿生流道内压降更小,反应气体和水的分布更加均匀,电池性能更好。

Trogadas 等^[100]在针对肺型流道的进一步研究中发现可以应用肺的分形几何形状来克服反应物分布不均问题,如图 37 所示, N 代表分支代数。在 50% 和 75% 相对湿度下,基于肺部流道的 PEMFC($N=4$)的性能优于传统的蛇形流道设计,其最大功率密度分别提高了 25% 和 30%,反应物分布均匀性也最好。在压降方面, $N=3$ 和 $N=4$ 的流道比常规蛇形流道设计在不同相对湿度条件下的压降都分别降低了 75% 和 50%,降低了反应物加压的功率要求。但在高湿度水平(100%)下, $N=5$ 的流道的性能明显恶化,多分支肺型流道中空气流速的降低阻碍了气体在多孔介质中的有效扩散,导致对液态水去除不足。

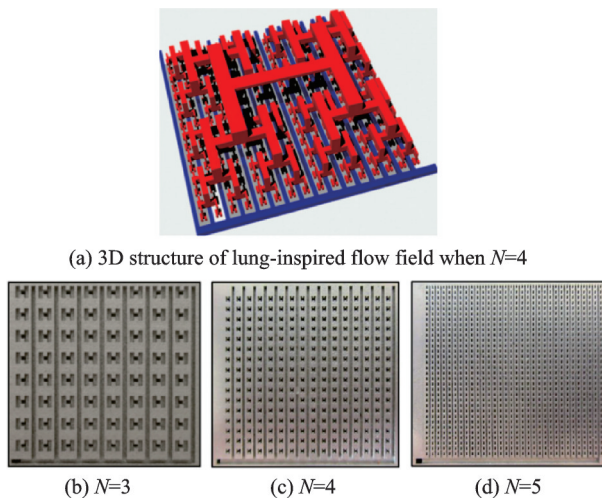


图 37 具有不同分支数量 N 的肺启发性流道^[100]
Fig.37 Pulmonary inspired flow channels with different number of branches N ^[100]

考虑到多孔金属结构类似于某些生物结构特征,例如海洋中的海绵,所以也可将多孔金属视为具有生物启发性的流道设计。多孔金属材料不仅继承了原材料的固有特性(如导电性、导热性和可塑性),而且在孔隙分布、孔隙率和渗透率、比表面积、毛细性能等方面显示出许多新的优势。基于这些优秀的性质,它们已被广泛应用于流量分配、换热和催化剂载体等领域,在 PEMFC 上的应用主要是金属泡沫的形式^[101]。前文所提到的各种流道结构,本质上也就是双极板表面上加工出的流量分配器,在 PEMFC 中起到对反应气体合理分配的作用。由于在提升性能上有良好的潜力,近些年已经有很多研究将其作为 PEMFC 中气体分配器的潜在候选者,它在 PEMFC 中的应用如图 38 所示。

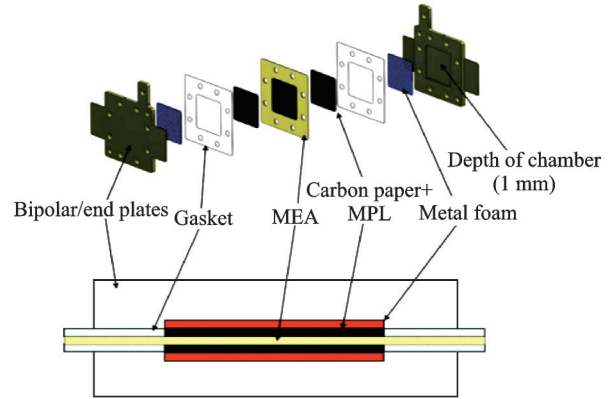


图 38 金属泡沫作为流量分配器的 PEMFC 示意图^[101]
Fig.38 Schematic diagram of PEMFC with metal foam as flow distributor^[101]

Tseng 等^[102]使用金属泡沫(图 39)作为流量分配器对 PEMFC 进行了实验,并与石墨双极板流道的 PEMFC 单电池进行了对比。结果表明,由于金属泡沫的高孔隙率(高达 95%)加上通过金属泡沫内的对流,流动阻力很小,因此分布不均现象比传统的带有“流道-肋”几何形状的双极板流道作为流量分配器的 PEM 单元电池明显减轻。类似于前面对流道与肋板的宽度比的分析,采用石墨双极板流道时,肋板与流道面积之比约为 1:1,因此,通过肋下区域进入催化层的反应气体比流道区域的少,导致电池性能下降。此外,产物水容易在肋板和 GDL 界面附近积聚。泡沫金属作为流量分配器具有良好的反应物气体浓度分布均匀性,但是由于金属泡沫的表面面积很大,防止腐蚀也是未来进一步发展中的一个重要挑战。

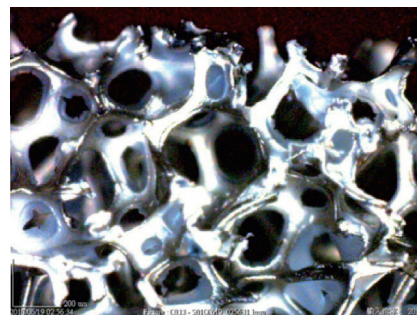


图 39 金属泡沫的侧视图^[102]
Fig.39 Side view of metal foam^[102]

金属泡沫独特的传质特性及其重量轻的特性作为流量分配器有着很大的发展潜力,但是对基于金属泡沫流场的 PEMFC 中水运输的机理了解有限。最近,Wu 等^[103]使用中子射线照相法研究了金属泡沫流场的 PEMFC 中的水的运输。结果表明,当电池工作在高电流密度下($1000 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)时,与蛇形流道设计相比,基于金属泡沫流场的 PEM-

FC具有更高的耐脱水能力以及更均匀的水分布,最大功率密度也比蛇形设计提高了约101%。当然,在低电流密度区域金属泡沫流场由于除水能力较弱,表现出较高的水积聚,但是可以通过优化燃料电池的工作条件和金属泡沫微结构部分缓解水淹的情况。在温度零下环境中,水分集聚在肋板下,造成电池排水困难,结冰严重和冷启动性能低下。霍森等^[104]对零下环境中金属泡沫流场PEMFC冷启动过程中传热传质现象的探究结果表明:与平行流道相比,泡沫流场电池由于其更优越的排水性能和均分气体能力,阴极催化层内结冰速度更慢,冷启动性能更优越,但金属泡沫良好的导热性不利于零下环境中电池温度的提升和保持。

可以观察到,与常规流道相比,仿生流道通常可以实现相关的性能提升,尤其是在反应物均匀分布和降低压降方面有很突出的表现,可以证明该型流道结构的巨大潜力。考虑到分形结构与其他设计相比没有表现出特别显著的性能提升,目前的研究似乎更多地集中在叶型和肺型等设计上。另一方面,这些工作大都停留在实验室水平,由于催化剂、GDL和操作条件在各类文献中不尽相同,缺乏电池组件的标准化,因此要确定该类双极板设计对真实电池最终性能的影响十分困难。此外,由于结构自身的缺陷,更具挑战性的是其在耐腐蚀、制造、成本经济性以及可回收性等方面的问题^[24]。

2.2 螺旋流道

在传统的流道型式如平行、蛇形和插指型流道等情况下,会出现一些急转弯,造成转角处的流动损失,导致流道出现较大的压降。为了改善传统流道的缺陷,螺旋或弯曲流道是可以考虑的结构形式。

之前的一些关于弯曲流道特性的研究表明弯曲流道中的二次流可以增加传热传质。此外,采用螺旋设计可以降低气体在流动过程中的压降^[105]。Rodman和Trenc^[106]对不同曲率的螺旋流道压力损失进行了实验研究。结果表明,对弯曲通道中发生的二次流对传热传质有一定的促进作用

Jang等^[107]通过数值和实验研究了具有螺旋通道几何形状的PEMFC的性能,并将其与具有蛇形流道的电池进行了比较,流道结构如图40所示。得出结论:他们发现前者的形状可以减少压降,同时,螺旋形流道产生了次级涡流,这促进了弯曲通道中的传热传质的增强,并明显改善了燃料电池的性能。

与常规流道类似,Abdallah等^[108]设计了一种新型的具有螺旋流道的质子交换膜燃料电池,以研究流道横截面形状(矩形,梯形和三角形横截面)对

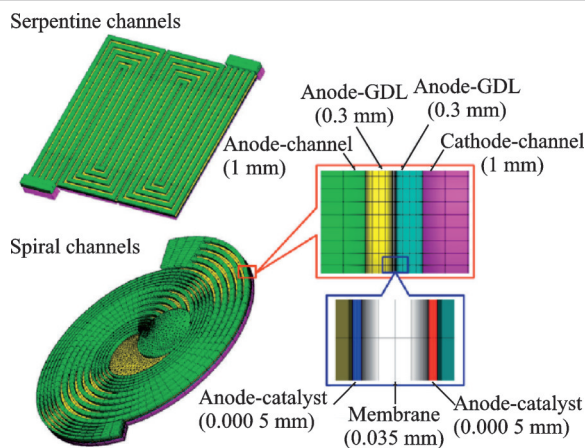


图40 螺旋和蛇形流道的仿真模型^[107]

Fig.40 Simulation model for both spiral and serpentine channels^[107]

反应物的转移和消耗以及电池性能的影响,如图41所示。结果表明,相对于梯形和矩形横截面,三角形截面流道结构显示出最佳性能,该截面大大增加了反应物的流速,从而增强了除水过程和反应物的消耗,矩形横截面的电池性能最差。Juarez-Robles等^[109]开发了具有同心螺旋结构的PEMFC三维、单相和非等温模型,以研究流道数量对电池性能的影响。他们发现,四流道模型在较低的压降、均匀的反应物分布和电流密度方面具有最佳性能,并且获得了更高的功率,而八流道模型产生了最差的性能。Monsaf等^[110]研究了流道-肋板的宽度比对电池性能的影响,类似地,他们的研究表明:流道-肋宽度的比率越高,流道与GDL之间的接触面积越大,扩散进入GDL的反应物数量越多,反应物分布越均匀。螺旋流道数的增加提高了反应物分布的均匀性。当反应物从螺旋流道的外侧流入并从其内部流道流出时,螺旋流道会产生离心力,从而增强电池性能。在流道挡板方面,Cheng等^[111]的研究表明挡板的加入产生了垂直和水平方向的涡流,可以增加弯曲流道中气体的传质。

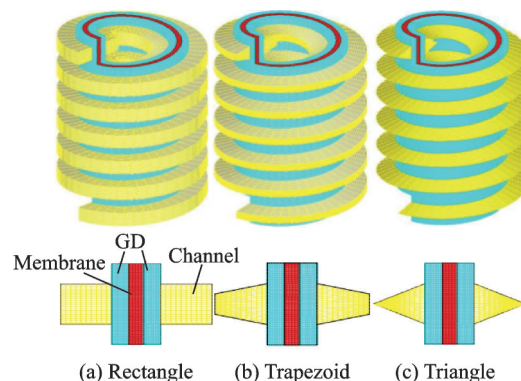


图41 3种不同研究截面的计算域^[108]

Fig.41 Computational domains of three different research sections^[108]

由于气体的速度和压力分布是均匀的,螺旋流场减小了流场单位长度的压降。因此,与其他流场设计相比,螺旋流场可以有效地降低辅助系统功耗。尽管如此,螺旋流场同样存在自身的固有缺陷,螺旋流场具有相当大的欧姆损耗^[112]。并且,与蛇形流场类似,由于路径较长,在流道长度方向上的后端可能会出现气体供应不足的情况。

2.3 3D 流道

相较于在双极板上以二维平面几何为特征加工出的流道,3D流道是在双极板的整个三维(3D)区域进行设计的,它既是一种新的流道结构形式,也是一种先进的设计方法。最简单的3D流道是在流道中嵌入了一定数量的挡板,这部分在流道结构参数章节中进行总结。2014年末,日本丰田汽车公司推出燃料电池车“MIRAI”,同时也提出了一种新的双极板结构设计,即三维细网格结构流道^[113-114],其结构如图42所示。它可以借助倾斜结构促进氧气在整个平面方向上的传输,并同时促进液态水从电池中排出,减轻PEMFC中积累的水对反应气体传输的影响。在结构设计中,没有固定的气体流动通道,流体在三维细网格结构中不断进行分流流动,使气体在扩散层中均匀分布。

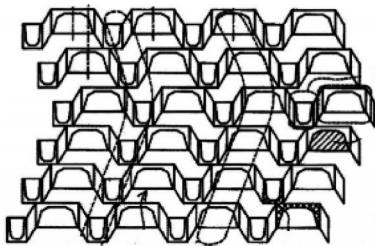


图42 三维细网格流道^[113]

Fig.42 Three-dimensional fine mesh flow channel^[113]

Shen等^[115]用数值模拟的方法研究了3D流道PEMFC中水的输运和性能表现,结构如图43所示。结合场协同原理,得出结论:通过3D流道的子通道可以有效地去除液态水,增大反应物入口速度有利于去除液态水。并且与常规流道相比,3D流道也可以增强质子交换膜燃料电池的传质能力,改

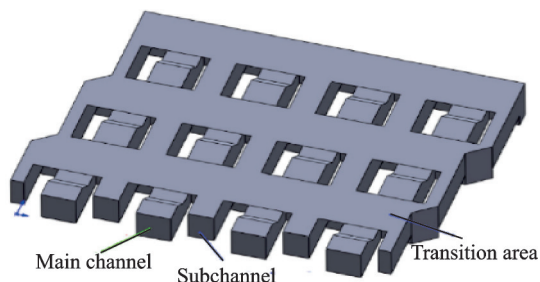


图43 3D流道结构示意图^[115]

Fig.43 Schematic diagram of 3D flow channel structure^[115]

善其性能,特别是在高电流密度下。

3D流道成为近年来的研究热点,但由于这类流道的PEMFC制造难度较大,许多工作大多停留在模拟层面,实验数据很少。He等^[116]结合试验和模拟研究不同倾角结构的3D流道的运输机理,如图44所示,并得出结论:在高电流密度下,所设计的3D流道结构能够显著提高电池性能。与常规平行流道相比,倾斜角为15°的3D流道提升了15%的净功率输出。实验结果表明,大倾角流道更适合于相对湿度低、化学计量比高以及工作压力小等含水量较低的情况,因为其具有较大的氧输运量。而小倾角的流道水管理能力强,因此更适合于高含水量情况。

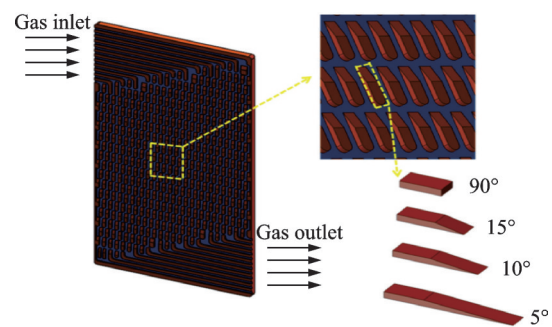


图44 三维流道设计示意图^[116]

Fig.44 Schematic diagram of 3D designed flow channel^[116]

这种流道相对于常规流道,气体的分流作用使得气体在流道上分布更为均匀,气体在流动中对扩散层表面有一定的冲击作用,产生的强制对流效应使得更多的气体能进入催化层发生反应。同时,与常规流道相比,流道间的肋板基本消失,催化层高活性反应面积增加,肋下对流作用使得催化层及扩散层中的水容易排出,不易产生水淹。

综合来说,新型流道设计具有突出的优势,面向未来高性能PEMFC的设计和开发,具有着巨大的发展潜力。但是与传统流道比较,结构相对复杂、制造难度较大,因此未来结合制造工艺发展,实现结构-工艺-性能一体化设计,将是上述新构型流道发展和应用的核心所在。

新型流道与传统流道设计间的优缺点如表1所示。不同流道结构的优化设计与制造都是为了实现更好的传质在燃料电池上的应用,因此,研究多通过数值模拟和实验相结合的手段,以期达到对PEMFC设计的实际指导意义。综合来看,目前研究中主要是通过在整个流动域进行流体组织,促进反应物分布均匀;其次添加挡板产生扰动,增强对流;再者提高流速,加强液态水吹扫能力来优化流场的传质性能。具体而言,不同的流道类型实现了在整个活性区域的流场流动的重新组织,其中,平

表1 不同流道设计之间的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different channel designs

流道设计类型	流道优点	流道缺点
平行流道	结构简单,易加工; 低压降;气体分布均匀	反应气体供应不足;液态水吹扫能力弱;
蛇形流道	覆盖全流场;水去除能力较强	高压降;流道后段供气不足; 单流道堵塞风险大
插指型流道	气体利用率高;水去除能力强; 气体分布均匀	高压降;高流速可能损伤气体扩散层
点状流场	低压降;适用于高反应物流速	反应物分布不均;水去除不均匀电流密度分布不均
仿生型流道	低压降;反应物分布均匀; 高性能	制造难度较大;易腐蚀;成本经济性低
螺旋流道	较低压降;传质传热增强	欧姆损失大;流道后段供气不足
3D流道	气体分布均匀;水去除能力强	制造难度较大;成本经济性低

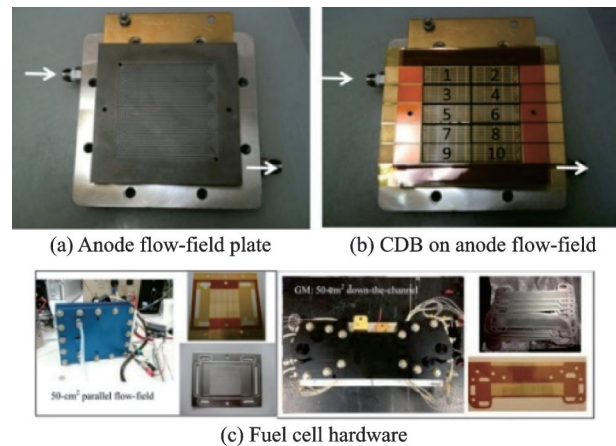
行流道、插指型流道及仿生型流道气体分布均匀性更好;流道宽度的增加,增大了燃料与扩散层之间的接触面积,允许更多的燃料直接扩散到催化层,降低了反应物分布的不均匀性;梯形横截面流道结构在反应区域上反应物更加均匀,提升了性能。挡板的添加可以有效地促进向CL的反应物供应,增强肋下对流效应,但是也带来了较大的压降,降低了系统的净功率。锥形流道设计和梯形挡板设计等措施提高了反应气体流速,提高了燃料利用率,促进反应气体传输,更高效地去除了液态水。尽管这些措施实现了强化传质的目的,但是更优异的PEMFC输出性能和系统的安全性、高稳定性及耐久性具有更实际的意义。因此,强化传质各项措施的研究需要考虑商用PEMFC生产的限制从而作出综合评价。

3 流道结构研究展望

从常规流道结构研究可以看出,即便是相同的流道结构在不同工作条件下也可能产生相悖的结果,因此,进行双极板流道结构的设计时一个重要挑战是缺乏燃料电池组件和工作条件的标准化。由于大多数已发表的文献通常都使用不同的电池组件(例如CL或GDL)以及不同的工作条件,研究人员很难利用文献研究中的最新成果^[117]。因此,作为面向未来的PEMFC流道结构研究需要有具体定义的几何形状和组件,那么建立符合行业标准的典型PEMFC单电池模型就显得尤为重要。定义明确且可用的设计基准将更有利于评估未来研究中新颖流道结构的性能。

另外,对新型流道中的水管理研究相对不足,鉴于新型流道制造难度大和成本高的问题,新型流道未来的研究工作将继续依赖CFD方法进行模拟。因此,需要进一步推进的研究工作包括考虑液态水的形成和液滴传输的更准确的

CFD建模,以及更详细的模型验证。在新型流道实验研究方面也需要进一步推进,针对研究目的要更多地使用诸如中子射线照相、电流密度映射(Current distribution mapping, CDM)、电化学阻抗谱(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)等先进的实验技术,进一步挖掘3D流道等新型流道的设计潜力^[118-119]。虽然目前这些技术在新型流道研究上的应用很少,但是在常规流道上的应用经验^[120-122]足够让我们相信这类技术一定会让研究者在未来的工作中获得更深入的见解以及更具创新性的灵感。图45给出了CDM应用示例。

图45 燃料电池CDM测量实物图^[121]Fig.45 Actual pictures of fuel cell CDM measurement^[121]

在未来流道结构设计趋势方面,通过对流道结构研究的综述已经表明,各种流道均有其优势和伴随的缺陷,片面采用某种流道结构都欠缺稳妥。因此,未来以设计需求为导向并在考虑各流道结构特性的基础上对流道进行有效结合形成“组合流道”将是未来中短期一个重要的设计方向^[123]。这种组合要以提高性能为核心,以减轻设计缺陷为突破点,最终还要考虑燃料电池在实际生产制造中的应

用。在形式上,既可以是不同流道类型的组合^[124-125],也可以是不同改进措施的组合^[126]。但是,这种组合可以提升的空间明显有限,随着未来计算机硬件和3D打印制造技术的发展^[127-128],长远来看,PEMFC流道结构更可能是向尺寸精密化及结构三维化的方向发展,脱离二维平面常规流场特征的束缚,更可能达到PEMFC极致性能的目标^[129]。最后,人为设计的流道结构需要充分利用数学工具,有必要引入面向高效PEMFC流道结构的多目标优化算法^[130],以实现PEMFC流道结构设计上的性能极致。

4 结 论

本文综述了BP流道结构对PEMFC性能的影响,讨论了双极板的类型,并总结了双极板流道结构优化设计时必须考虑的一些特定参数,例如流道长度、横截面参数和挡板的使用等。剖析了这些双极板流道结构与传质、传热、电导率及输出功率密度等的关系。结果表明,电池性能与所使用的流道结构直接相关,设计者可以使用精心设计的双极板流道结构来解决电池性能有关的一些挑战和困难。通过选择合适且有效的双极板几何设计,可以解决不良的水管理、不均匀的反应物分布及不均匀的电流分布等难题,这些问题不仅决定了整体电池性能,而且还可以降低膜电极组件上的机械应力,从而延长电池的使用寿命。因此,适当的流道结构可以有效地保证电池的性能和运行稳定性,并降低电池成本,特别是长时间以高电流密度运行的燃料电池必须具有良好的双极板几何结构。在燃料电池流道结构未来的研究和发展中,不同双极板流道结构对PEMFC性能有不同的影响,这些影响互相制约,对于不同的设计目的必须要根据自身的需求而舍弃相对次要的因素。因此,从结构参数设计和优化的角度出发,流道结构的设计应是一个考虑电池水热管理和电池净功率输出等性能特征的多目标协同优化的过程,从而达到使PEMFC长期稳定高效运行的目的。同时,面向未来的流道结构需要更精密的三维结构设计以及更高效的算法支撑。

参考文献:

- [1] FINN R L, WRIGHT D. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications[J]. *Computer Law & Security Review*, 2012, 28(2): 184-194.
- [2] 戴月领,贺云涛,刘莉,等. 燃料电池无人机发展及关键技术分析[J]. *战术导弹技术*, 2018(1): 65-71.
- [3] DAI Yueling, HE Yuntao, LIU Li, et al. Development of fuel cell UAV and analysis of key technology[J]. *Tactical Missile Technology*, 2018(1): 65-71.
- [4] BRADLEY T H, MOFFITT B A, FULLER T F, et al. Comparison of design methods for fuel-cell-powered unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 46(6): 1945-1956.
- [5] KANG K, PARK S, CHO S O, et al. Development of lightweight 200-W direct methanol fuel cell system for unmanned aerial vehicle applications and flight demonstration[J]. *Fuel Cells*, 2014, 14(5): 694-700.
- [6] WATERS D F, CADOU C P. Engine-integrated solid oxide fuel cells for efficient electrical power generation on aircraft[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 284: 588-605.
- [7] GONG A, VERSTRAETE D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(33): 21311-21333.
- [8] SWIDER-LYONS K E, MACKRELL J A, RODGERS J A, et al. Hydrogen fuel cell propulsion for long endurance small UAVs[C]//*Proceedings of AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress"*. Virginia Beach, VA: AIAA, 2011:AIAA 2011-6975.
- [9] STROMAN R O, SCHUETTE M W, SWIDER-LYONS K, et al. Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(21): 11279-11290.
- [10] LEE B, PARK P, KIM C. Power managements of a hybrid electric propulsion system powered by solar cells, fuel cells, and batteries for UAVs[M]. [S.l.]: Springer Netherlands, 2015: 495-524.
- [11] LAPENA-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.
- [12] DAS P K, LI X, LIU Z S. Analysis of liquid water transport in cathode catalyst layer of PEM fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(6): 2403-2416.
- [13] SONG C E, PARK Y S. Improved catalytic performances of supported catalysts[J]. *Advances in Organic Synthesis*, 2005, 1(1): 233-260.
- [14] ESFANDIARI A, KAZEMEINI M, BASTANI D. Synthesis, characterization and performance determination of an Ag@ Pt/C electrocatalyst for the ORR in

- a PEM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(45): 20720-20730.
- [14] LIU D, LIN R, FENG B, et al. Investigation of the effect of cathode stoichiometry of proton exchange membrane fuel cell using localized electrochemical impedance spectroscopy based on print circuit board[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(14): 7564-7573.
- [15] KONE J P, ZHANG X, YAN Y, et al. Three-dimensional multiphase flow computational fluid dynamics models for proton exchange membrane fuel cell: A theoretical development[J]. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2017, 9(1): 3-25.
- [16] 陈黎. 能源与环境学科中的多尺度多物理化学耦合反应输运过程数值模拟研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- CHEN Li. Numerical investigation of multiscale multiple physicochemical coupled reactive transport processes in energy and environmental discipline[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2017.
- [17] JITHESH P K, BANSODE A S, SUNDARARAJAN T, et al. The effect of flow distributors on the liquid water distribution and performance of a PEM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22): 17158-17171.
- [18] OUS T, ARCOUMANIS C. Degradation aspects of water formation and transport in proton exchange membrane fuel cell: A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 240: 558-582.
- [19] NANDJOU F, POIROT-CROUVEZIER J P, CHANDESRI M, et al. Impact of heat and water management on proton exchange membrane fuel cells degradation in automotive application[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 326: 182-192.
- [20] DYER C K, MOSELEY P T, OGUMI Z, et al. *Encyclopedia of electrochemical power sources*[M]. [S. l.]: Newnes, 2013.
- [21] HOSSAIN M S, SHABANI B. Reticulated porous and parallel channel cathode flow fields in real scale polymer electrolyte membrane fuel cells: A comparative experimental study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(47): 25905-25917.
- [22] SHEN J, TU Z, CHAN S H. Enhancement of mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with blockage in the flow channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 1408-1418.
- [23] PENG L, MAI J, HU P, et al. Optimum design of the slotted-interdigitated channels flow field for proton exchange membrane fuel cells with consideration of the gas diffusion layer intrusion[J]. *Renewable energy*, 2011, 36(5): 1413-1420.
- [24] KAHRAMAN H, ORHAN M F. Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 133: 363-384.
- [25] AIYEJINA A, SASTRY M K S. PEMFC flow channel geometry optimization: A review[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2012, 9(1): 1-24.
- [26] KUMAR A, REDDY R G. Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 113(1): 11-18.
- [27] AHMED D H, SUNG H J. Effects of channel geometrical configuration and shoulder width on PEMFC performance at high current density[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 162(1): 327-339.
- [28] WANG X D, LU G, DUAN Y Y, et al. Numerical analysis on performances of polymer electrolyte membrane fuel cells with various cathode flow channel geometries[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(20): 15778-15786.
- [29] MOHAMMEDI A, SAHLI Y, MOUSSA H B. 3D investigation of the channel cross-section configuration effect on the power delivered by PEMFCs with straight channels[J]. *Fuel*, 2020, 263: 116713.
- [30] ZENG X, GE Y, SHEN J, et al. The optimization of channels for a proton exchange membrane fuel cell applying genetic algorithm[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 81-89.
- [31] OWEJAN J P, TRABOLD T A, JACOBSON D L, et al. Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(17): 4489-4502.
- [32] ZHU X, LIAO Q, SUI P C, et al. Numerical investigation of water droplet dynamics in a low-temperature fuel cell microchannel: Effect of channel geometry[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 195(3): 801-812.
- [33] LORENZINI-GUTIERREZ D, KANDLIKAR S G, HERNANDEZ-GUERRERO A, et al. Residence time of water film and slug flow features in fuel cell gas channels and their effect on instantaneous area coverage ratio[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 279: 567-580.
- [34] FONTANA É, MANCUSI E, DA SILVA A, et al. Study of the effects of flow channel with non-uniform cross-sectional area on PEMFC species and heat trans-

- fer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(21/22): 4462-4472.
- [35] MANCUSI E, FONTANA É, DE SOUZA A A U, et al. Numerical study of two-phase flow patterns in the gas channel of PEM fuel cells with tapered flow field design[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(5): 2261-2273.
- [36] ATYABI S A, AFSHARI E. A numerical multi-phase CFD simulation for PEMFC with parallel sinusoidal flow fields[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 135(3): 1823-1833.
- [37] MANSO A P, MARZO F F, BARRANCO J, et al. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(20): 15256-15287.
- [38] WILBERFORCE T, HASSAN Z E, OGUNGBEMI E, et al. A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 236-260.
- [39] PERNG S W, WU H W, JUE T C, et al. Numerical predictions of a PEM fuel cell performance enhancement by a rectangular cylinder installed transversely in the flow channel[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9): 1541-1554.
- [40] PERNG S W, WU H W. Effects of internal flow modification on the cell performance enhancement of a PEM fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 175(2): 806-816.
- [41] JANG J H, YAN W M, LI H Y, et al. Humidity of reactant fuel on the cell performance of PEM fuel cell with baffle-blocked flow field designs[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(1): 468-477.
- [42] WU H W, KU H W. The optimal parameters estimation for rectangular cylinders installed transversely in the flow channel of PEMFC from a three-dimensional PEMFC model and the Taguchi method[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4879-4890.
- [43] SHEN J, TU Z, CHAN S H. Enhancement of mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with blockage in the flow channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 1408-1418.
- [44] 蔡永华, 朱宇烽, 方舟. 高电流密度下 PEMFC 阴极流场结构优化[J]. *电池*, 2019, 49(1): 8-12.
CAI Yonghua, ZHU Yufeng, FANG Zhou. Optimization of cathode flow field structure of PEMFC under high current density[J]. *Battery*, 2019, 49(1): 8-12.
- [45] HEIDARY H, KERMANI M J, DABIR B. Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 124: 51-60.
- [46] HEIDARY H, KERMANI M J, PRASAD A K, et al. Numerical modelling of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(4): 2265-2277.
- [47] 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.
- [48] 高强, 张拴羊, 徐洪涛, 等. 肋片结构对质子交换膜燃料电池性能影响模拟研究[J]. *热能动力工程*, 2020, 35(7): 215-222.
GAO Qiang, ZHANG Shuanyang, XU Hongtao, et al. Simulation study on the effect of fin structure on the performance of proton exchange membrane fuel cell [J]. *Thermal Power Engineering*, 2020, 35(7): 215-222.
- [49] FAN L, NIU Z, ZHANG G, et al. Optimization design of the cathode flow channel for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Energy conversion and management*, 2018, 171: 1813-1821.
- [50] 曾祥兵. 基于遗传算法的 PEMFC 优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
ZENG Xiangbing. PEMFC optimization based on genetic algorithm [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [51] CAI G, LIANG Y, LIU Z, et al. Design and optimization of bio-inspired wave-like channel for a PEM fuel cell applying genetic algorithm[J]. *Energy*, 2020, 192: 116670.1-116670.11.
- [52] WANG X D, DUAN Y Y, YAN W M. Numerical study of cell performance and local transport phenomena in PEM fuel cells with various flow channel area ratios[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(1): 265-277.
- [53] ERNI M, RAMLI W, HERIANTO M E. Review on serpentine flow field design for PEM fuel cell system[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 447/448: 559-563.
- [54] FREIRE L S, ANTOLINI E, LINARDI M, et al. Influence of operational parameters on the performance of PEMFCs with serpentine flow field channels having different (rectangular and trapezoidal) cross-section shape[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(23): 12052-12060.

- [55] YAN W M, LIU H C, SOONG C Y, et al. Numerical study on cell performance and local transport phenomena of PEM fuel cells with novel flow field designs[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(2): 907-919.
- [56] WANG C, ZHANG Q, LU J, et al. Effect of height/width-tapered flow fields on the cell performance of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(36): 23107-23117.
- [57] 朱万超,郑明刚. 质子交换膜燃料电池渐变蛇形流场的性能研究[J]. *电源技术*, 2020, 44(8): 1123-1125, 1198.
ZHU Wanchao, ZHENG Minggang. Performance study of gradual serpentine flow field in proton exchange membrane fuel cell[J]. *Power Technology*, 2020, 44(8): 1123-1125, 1198.
- [58] WANG X D, HUANG Y X, CHENG C H, et al. An inverse geometry design problem for optimization of single serpentine flow field of PEM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(9): 4247-4257.
- [59] YAN X, GUAN C, ZHANG Y, et al. Flow field design with 3D geometry for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 1107-1114.
- [60] FESER J P, PRASAD A K, ADVANI S G. On the relative influence of convection in serpentine flow fields of PEM fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1): 404-412.
- [61] SHIMPALEE S, GREENWAY S, ZEE J W V. The impact of channel path length on PEMFC flow-field design[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(1): 398-406.
- [62] LIMJEERAJARUS N, CHAROEN-AMORNKITT P. Effect of different flow field designs and number of channels on performance of a small PEFC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(22): 7144-7158.
- [63] BODDU R, MARUPAKULA U K, SUMMERS B, et al. Development of bipolar plates with different flow channel configurations for fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 189(2): 1083-1092.
- [64] 陈士忠,夏忠贤,王艺澄,等. 蛇形流场 PEMFC 性能影响因素的数值模拟[J]. *电源技术*, 2017, 41(2): 230-233.
CHEN Shizhong, XIA Zhongxian, WANG Yicheng, et al. Numerical simulation of factors affecting PEMFC performance in serpentine flow field[J]. *Power Technology*, 2017, 41(2): 230-233.
- [65] WU Y, CHO J I S, NEVILLE T P, et al. Effect of serpentine flow-field design on the water management of polymer electrolyte fuel cells: An in-operando neutron radiography study[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 399: 254-263.
- [66] KANDLIKAR S G, SEE E J, KOZ M, et al. Two-phase flow in GDL and reactant channels of a proton exchange membrane fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(12): 6620-6636.
- [67] SPERNJAK D, PRASAD A K, ADVANI S G. Experimental investigation of liquid water formation and transport in a transparent single-serpentine PEM fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 170(2): 334-344.
- [68] WANG X D, YAN W M, DUAN Y Y, et al. Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field[J]. *Energy Conversion & Management*, 2010, 51(5): 959-968.
- [69] RAHIMI-ESBO M, RANJBAR A A, RAMIAR A, et al. Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4): 3023-3037.
- [70] YU L, REN G, QIN M, et al. Transport mechanisms and performance simulations of a PEM fuel cell with interdigitated flow field[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 530-543.
- [71] HEIDARY H, KERMANI M J, ADVANI S G, et al. Experimental investigation of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(16): 6885-6893.
- [72] SACO S A, THUNDIL K, KARTHIKEYAN P. A study on scaled up proton exchange membrane fuel cell with various flow channels for optimizing power output by effective water management using numerical technique[J]. *Energy*, 2016, 113: 558-573.
- [73] 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.
- [74] KU H W, WU H W. Influences of operational factors on proton exchange membrane fuel cell performance with modified interdigitated flow field design[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 232: 199-208.
- [75] THITAKAMOL V, THERDTHIANWONG A,

- THERDTHIANWONG S. Mid-baffle interdigitated flow fields for proton exchange membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(5): 3614-3622.
- [76] JANG J Y, CHENG C H, HUANG Y X. Optimal design of baffles locations with interdigitated flow channels of a centimeter-scale proton exchange membrane fuel cell[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(4): 732-743.
- [77] SANTAMARIA A D, COOPER N J, BECTON M K, et al. Effect of channel length on interdigitated flow-field PEMFC performance: A computational and experimental study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(36): 16253-16263.
- [78] COOPER N J, SANTAMARIA A D, BECTON M K, et al. Investigation of the performance improvement in decreasing aspect ratio interdigitated flow field PEMFCs[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 136: 307-317.
- [79] KERKOUB Y, BENZAOUY A, HADDAD F, et al. Channel to rib width ratio influence with various flow field designs on performance of PEM fuel cell[J]. *Energy Conversion & Management*, 2018, 174: 260-275.
- [80] 杨立新, 王晓东, 李升进, 等. 流道面积比与阴极流量对交叉型流道 PEMFC 性能的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008(6): 127-137.
- YANG Lixin, WANG Xiaodong, LI Shengjin, et al. Effects of channel area ratio and cathode flow rate on the performance of cross channel PEMFC[J]. *Journal of Applied Foundation and Engineering Sciences*, 2008(6): 127-137.
- [81] COOPER N J, SMITH T, SANTAMARIA A D, et al. Experimental optimization of parallel and interdigitated PEMFC flow-field channel geometry[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(2): 1213-1223.
- [82] HSIEH S S, YANG S H, KUO J K, et al. Study of operational parameters on the performance of micro PEMFCs with different flow fields[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(13/14): 1868-1878.
- [83] ATYABI S A, AFSHARI E. Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 738-748.
- [84] 刘健. HT-PEM 燃料电池流场传质分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
- LIU Jian. Mass transfer analysis of flow field in HT-PEM fuel cell[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.
- [85] GUO N, LEU M C, KOYLU U O. Network based optimization model for pin-type flow field of polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(16): 6750-6761.
- [86] LI S, YUAN J, XIE G, et al. Numerical investigation of transport phenomena in high temperature proton exchange membrane fuel cells with different flow field designs[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2017, 72(11): 807-820.
- [87] LAKSHMINARAYANAN V, KARTHIKEYAN P. Investigation of PEMFC performance with various configurations of serpentine and interdigitated flow channel[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2019, 19(5): 328-336.
- [88] SOUSA T, MAMLOUK M, SCOTT K, et al. Three dimensional model of a high temperature PEMFC. Study of the flow field effect on performance[J]. *Fuel Cells*, 2012, 12(4): 566-576.
- [89] TAJIRI K, KARANI J, SHRIVASTAVA U N. Experimental study of oxygen transport mechanisms in PEMFC interdigitated flow field[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(16): 1385-1391.
- [90] LI H Y, WENG W C, YAN W M, et al. Transient characteristics of proton exchange membrane fuel cells with different flow field designs[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(1): 235-245.
- [91] WANG B, CHEN W, PAN F, et al. A dot matrix and sloping baffle cathode flow field of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 434: 226741.
- [92] LIM B H, MAJLAN E H, DAUD W R W, et al. Effects of flow field design on water management and reactant distribution in PEMFC: A review[J]. *Ionics*, 2016, 22(3): 301-316.
- [93] ASADZADE M, SHAMLOO A. Design and simulation of a novel bipolar plate based on lung-shaped bio-inspired flow pattern for PEM fuel cell[J]. *International Journal of Energy Research*, 2017, 41(12): 1730-1739.
- [94] HE L, HOU M, GAO Y, et al. A novel three-dimensional flow field design and experimental research for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112335.
- [95] HAMILTON P J, POLLET B G. Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) flow field plate: Design, materials and characterization[J]. *Fuel Cells*, 2010, 10(4): 489-509.
- [96] ROSHANDEL R, ARBABI F, MOGHADDAM G

- K. Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells[J]. *Renewable Energy*, 2012, 41: 86-95.
- [97] KLOESS J P, WANG X, LIU J, et al. Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(1): 132-140.
- [98] OUELLETTE D, OZDEN A, ERCELIK M, et al. Assessment of different bio-inspired flow fields for direct methanol fuel cells through 3D modeling and experimental studies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(2): 1152-1170.
- [99] 易伟. 质子交换膜燃料电池流道内水传输过程的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
YI Wei. Study on water transport in the channel of proton exchange membrane fuel cell[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [100] TROGADAS P, CHO J I S, NEVILLE T P, et al. A lung-inspired approach to scalable and robust fuel cell design[J]. *Energy & Environmental Science*, 2018, 11(1): 136-143.
- [101] 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.
- [102] TSENG C J, TSAI B T, LIU Z S, et al. A PEM fuel cell with metal foam as flow distributor[J]. *Energy Conversion & Management*, 2012, 62: 14-21.
- [103] 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.
- [104] 霍森. 金属泡沫燃料电池冷启动与结冰机理的理论实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
HUO Sen. Theoretical and experimental study on cold start and icing mechanism of Hodson metal foam fuel cell[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [105] JANG J Y, CHENG C H, LIAO W T, et al. Experimental and numerical study of proton exchange membrane fuel cell with spiral flow channels[J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 67-79.
- [106] RODMAN S, TRENC F. Pressure drop of laminar oil-flow in curved rectangular channels[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2002, 26(1): 25-32.
- [107] JANG J Y, CHENG C H, LIAO W T, et al. Experimental and numerical study of proton exchange membrane fuel cell with spiral flow channels[J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 67-79.
- [108] ABDALLAH M, HOCINE B M, MONSAF T, et al. Numerical Investigation of the effects of channel cross section shape on the tubular PEMFC performance[M]. [S.l.]: [s.n.], 2020.
- [109] JUAREZ-ROBLES D, HERNANDEZ-GUERREIRO A, RAMOS-ALVARADO B, et al. Multiple concentric spirals for the flow field of a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(19): 8019-8030.
- [110] MONSAF T, HOCINE B M, YUCEF S, et al. Unsteady three-dimensional numerical study of mass transfer in PEM fuel cell with spiral flow field[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(2): 1237-1251.
- [111] CHENG J, GUO W, CAI C, et al. Alternatively permuted conic baffles generate vortex flow field to improve microalgal productivity in a raceway pond[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249: 212-218.
- [112] IBRAHIMOGLU B, YILMAZOGLU M Z, CELENK S. Investigation of spiral flow-field design on the performance of a PEM fuel cell[J]. *Fuel Cells*, 2017, 17(6): 786-793.
- [113] SUZUKI Y, HASHIMOTO K. Fuel cell with gas passage forming member and water ingress prevention means: U.S. Patent 8,445,160[P]. 2013-05-21.
- [114] KONDO T. Gas channel forming member in fuel cell: U.S. Patent 8,518,600[P]. 2013-08-27.
- [115] SHEN J, TU Z, CHAN S H. Performance enhancement in a proton exchange membrane fuel with a novel 3D flow field[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 164: 114464.
- [116] HE L, HOU M, GAO Y, et al. A novel three-dimensional flow field design and experimental research for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112335.
- [117] HUANG F, QIU D, LAN S, et al. Performance evaluation of commercial-size proton exchange membrane fuel cell stacks considering air flow distribution in the manifold[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 203: 112256.
- [118] CHO J I S, NEVILLE T P, TROGADAS P, et al. Visualization of liquid water in a lung-inspired flow-field based polymer electrolyte membrane fuel cell via neutron radiography[J]. *Energy*, 2019, 170: 14-21.
- [119] 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.
- [120] WU Y, CHO J I S, LU X, et al. Effect of compression on the water management of polymer electrolyte

- fuel cells: An in-operando neutron radiography study[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 412: 597-605.
- [121] LILAVIVAT V, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W, et al. Current distribution mapping for PEMFCs[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 174: 1253-1260.
- [122] IMMERZ C, BENSMANN B, TRINKE P, et al. Local current density and electrochemical impedance measurements within 50 cm single-channel PEM electrolysis cell[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(16): 1292-1299.
- [123] HENG X Z, WANG P C, AN H, et al. Novel design of anode flow field in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)[M]. Singapore: Springer Press, 2019.
- [124] LIM B H, MAJLAN E H, DAUD W R W, et al. Numerical investigation of the effect of three-dimensional modified parallel flow field designs on proton exchange membrane fuel cell performance[J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 217: 115499.
- [125] 罗鑫, 陈士忠, 夏忠贤. 不同流场的 PEMFC 性能研究[J]. *电池*, 2017, 47(4): 208-211.
LUO Xin, CHEN Shizhong, XIA Zhongxian. Study on PEMFC performance under different flow fields [J]. *Battery*, 2017, 47(4): 208-211.
- [126] 石磊, 郑明刚, 孔祥利. 8通道复合蛇形流道质子交换膜燃料电池综合优化研究[J]. *可再生能源*, 2020, 38(4): 434-439.
SHI Lei, ZHENG Minggang, KONG Xiangli. Comprehensive optimization of 8-channel hybrid serpentine channel proton exchange membrane fuel cell[J]. *Renewable Energy*, 2020, 38(4): 434-439.
- [127] CANNIO M, RIGHI S, SANTANGELO P E, et al. Smart catalyst deposition by 3D printing for polymer electrolyte membrane fuel cell manufacturing[J]. *Renewable Energy*, 2020, 163: 414-422.
- [128] PIRI H. Flow visualization in 3D printed PEM fuel cell bipolar plates[D]. Vancouver, Canada: University of British Columbia, 2017.
- [129] BAO Z, NIU Z, JIAO K. Analysis of single-and two-phase flow characteristics of 3-D fine mesh flow field of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 438: 226995.
- [130] 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.

(编辑:孙静)