

流道宽度和脊宽度对燃料电池极板流通特性的影响

刘斌,白书战*

山东大学 能源与动力工程学院,山东 济南 250061

摘要:为研究蛇形流道结构燃料电池流道宽度和脊宽度对燃料电池极板流道流通特性的影响,运用多物理场仿真软件 Comsol 对不同流道宽度和脊宽度的蛇形流道结构进行仿真,分析流道宽度和脊宽度对流道压降和流道内流体质量流量的影响。结果表明:脊宽度对流道压降和流体质量流量分布的影响小于流道宽度的影响;增大流道宽度可以降低流道压降,增大流道内流体的质量流量;增大脊宽度可以使质量流量小幅减小。综合考虑流道宽度和脊宽度对流道压降和流体质量流量分布的影响,应在合理范围内尽量增大流道宽度,且脊宽度不应过小。

关键词:燃料电池;双极板;流道宽度;脊宽度;压降;流量分布

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)02-0036-06

引用格式:刘斌,白书战.流道宽度和脊宽度对燃料电池极板流通特性的影响[J].内燃机与动力装置,2023,40(2):36-41.

LIU Bin, BAI Shuzhan. Influence of channel width and ridge width on flow characteristics of fuel cell electrode plate[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(2):36-41.

0 引言

近年来由于环境污染和能源危机等问题的出现,清洁能源逐渐得到广泛应用,燃料电池成为乘用车的动力选择之一。极板作为燃料电池中气体反应的场所,其流道结构影响电池整体的性能和稳定性,传统的流场结构包括点状流场、平行直流道流场、单通道蛇形流道流场和交指形流道流场等,其中,蛇形流道的使用和研究较多。蛇形流道结构对电池的流动性能影响极大,主要包括流道宽度、脊宽度和流道深度^[1]。Berning 等^[2]建立了质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)非等温模型,研究了其内部的传质现象和温度、压力对性能的影响,在给定相同接触电阻时,仿真比较了3组不同流道宽度和脊宽度电池的输出性能,结果表明当流道宽度为0.8 mm、脊宽度为1.2 mm时电池性能较好;Watkins 等^[3]对单通道蛇形流道的几何尺寸进行优化设计,得到流道宽度、脊宽度、流道深度的最佳范围,指出流道深度为2.04 mm时电池的排水性能最佳;Vazifeshenas 等^[4]在蛇形流道的基础上结合平行流道的优点设计出复合流道,并且在出口处设置了低压通道,提升了气体反应速度和电池的排水性能;Young 等^[5]研究了在一定范围内流道宽度、脊宽度对电池性能的影响,结果表明,脊宽度为0.5~3.0 mm时,降低脊宽度可以提升电池反应性能;Kumar 等^[6]研究了阳极单通道蛇形流道中流道尺寸对气体利用率和电池输出性能的影响,结果表明,当流道宽度为1.5 mm、脊宽度为0.5 mm、流道深度为1.5 mm时电池的气体利用率较高,电池的反应效率较高,输出性能较好;韩建等^[7]研究了流道宽度、深度以及脊宽度对电流密度、电池流道内压差的影响;叶志杰等^[8]在传统的蛇形流道上进行了优化,设计了传质效果更好的变径蛇形流道,研究表明,变径蛇形流道拥有更优的排水性、电流密度和气体均匀性,但同时压降也较大。

收稿日期:2022-05-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB0106603)

第一作者简介:刘斌(2001—),男,合肥人,主要研究方向为新能源汽车,E-mail:18953191290@163.com。

*通信作者简介:白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发及可靠性、新能源汽车技术等,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

针对电池的输出性能、排水性能和气体反应性能对蛇形流场的设计优化较多,但对流道流通性能的分析较少。本文中针对流道的流通性能进行仿真试验分析,研究流道宽度和脊宽度对流道的压降和流道内流体质量流量的影响。

1 燃料电池的极板流道形式及特点

燃料电池双极板作为电池内部不可或缺的组成部分,起到分配反应气体、收集电流、排水导热等重要作用^[9],极板流场结构决定流道内气体有效反应面积、气体反应速率等,影响电池的功率损耗、电流密度,从而影响电池整体的性能和制造成本。典型的双极板流场如图1所示。

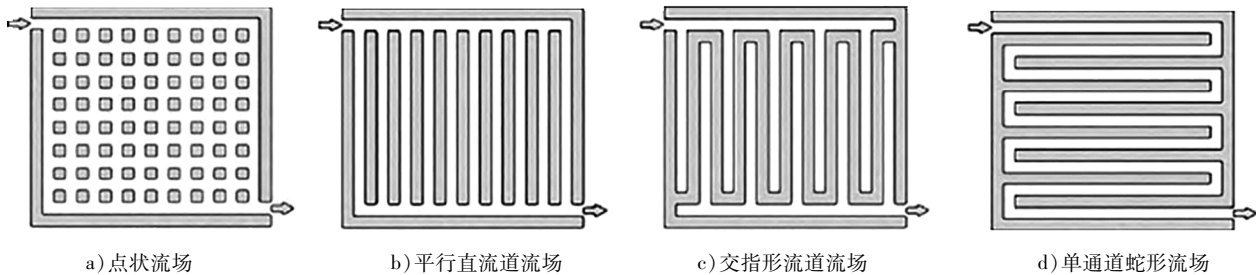


图1 双极板流场结构示意图

根据通道数量流道流场分为单通道和多通道,多通道流场中流体进入通道的位置不同,距离入口较远通道内流体的流量较小。车载燃料电池体积较大,蛇形和交指形流道长度相对较长,长通道的摩擦阻力损失不可忽略,摩擦阻力导致流道内压降增大,压降产生作用于电池整体的机械应力,影响电池效率^[10]。平行直道流场的通道较短,沿程的摩擦损失较小,机械应力较低,总效率较大;此外,平行的直通道结构更简单,生产成本更低^[11]。但平行通道流场因多通道中每条流道流量不可能完全相同,影响燃料电池性能。

通过计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)方法可以仿真分析各流场的气体分布均匀性、气体湿化性能、流体压降、排水导热以及电池使用寿命等^[10]。Um等^[12]对PEMFC进行动力学建模,研究了双极板流场传热和传质现象,指出相较于平行直道流场,交指形流场在扩散层的传递运动更加快速和完全,同时电池的排水性能也更好;Feng等^[13]、Hashemi等^[14]构建了3D流体动力学计算模型,发现蛇形流场比平行直道流场的气体反应均匀性和电流密度分布更好;肖宽等^[15]对目前常规流场和新型流场结构进行了对比分析,指出应将流道分为入口区、过渡区、反应区3部分,采用不同的结构设计。

蛇形流道具有更好的气体反应性能和电流密度,本文中利用多物理场耦合计算软件Comsol,对流道的宽度、脊宽度等参数进行数值仿真分析,比较不同情况下流道的压降和流体质量流量分布,选择电池性能最高的流道宽度、脊宽度组合,为燃料电池双极板流场的优化设计提供依据和参考。

2 建模

2.1 网格模型

使用Comsol软件进行蛇形流道电池极板网格划分,计算中设置模型的流道深度均为1mm。网格划分后的几何模型如图2所示,包含1237345个域单元、174744个边界单元和15490个边单元。对于不同流道宽度、脊宽度,网格随着几何形状的变化而自动变化。采用流体动力学模型,对电池中的阳极流道按照定流道宽和定脊宽度进行稳态流动模拟。

2.2 模型假设

2.2.1 条件

1) 电池全程稳定运行,忽略重力的影响。2) 电池中流动的气体为不可压缩流,密度不随位置和温度

变化,反应过程中无相变。3)反应生成的水快速雾化,在反应气体中分布良好,将通道中的气液混合物处理为气体。4)计算流体雷诺数,通道内的流动形式为层流,计算模式为层流流动^[16]。

2.2.2 流体方程

基本方程来源于仿真软件的内置流体方程,主要包括黏性应力方程、动量守恒方程、质量守恒方程。

黏性应力方程为:

$$K = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T),$$

式中: K 为黏性应力,Pa; μ 运动黏度, m^2/s ; \mathbf{u} 为速度, m/s 。

动量守恒方程为:

$$\rho(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{u} = \nabla \cdot (-\mathbf{p} + \mathbf{K}) + \mathbf{F},$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; \mathbf{p} 为流体压力,Pa; \mathbf{F} 为作用在流体中所有流体质点的质量力总和,N。

质量守恒方程为:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

2.3 模型参数

仿真试验中所用到的模型参数如表1所示。

表1 仿真模型主要参数

通道长度/mm	阳极入口流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	阳极动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	空气的摩尔质量/ $(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$	水的摩尔质量/ $(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$	通道层数
20	1	1.9×10^{-5}	0.029	0.018	24

2.4 网格无关性验证

网格细化可以提升计算精度,网格划分的越密越小,整体计算精度就越高,但在实际工程应用中,网格数量增加导致计算时间大幅增加,且当网格达到一定数量后,计算精度不会明显提升,可认为有网格无关性^[17]。

以通道宽度和脊宽度均为0.4 mm通道的仿真计算为例,分4个精度进行细化,不同网格时几何模型流体的质量流量如表2所示。由表2可知:当域单元数由437 746增加至1 237 345时,流体质量流量的变化已不明显,相对误差小于1%,在工程实际中影响不大,因此该模型具有网格无关性。

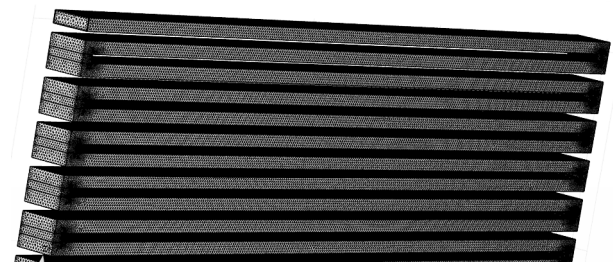


图2 极板通道网格模型

表2 通道宽度和脊宽度均为0.4 mm时流体的质量流量

网格	域单元数	流体质量流量/ $(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$
粗化	105 285	0.414
常规	271 086	0.432
细化	437 746	0.440
超细化	1 237 345	0.442

3 仿真结果分析

3.1 脊宽度和通道宽度对压降的影响

脊宽度和通道宽度对通道的压降影响如图3、4所示。由图3可知:脊宽度变化时通道的压降变化不大;通道宽度为0.3 mm,压降随着脊宽度的增加有轻微增加趋势;通道宽度为0.4 mm,脊宽度为0.3 mm时压降出现了轻微下降;通道宽度为0.5 mm,通道压降几乎不随脊宽度变化而变化,脊宽度的变化对压降的影响很小,当通道宽度增大时压降变化较小;脊宽度不变,通道宽度发生变化时,压降随着通道宽度增加明显下降。

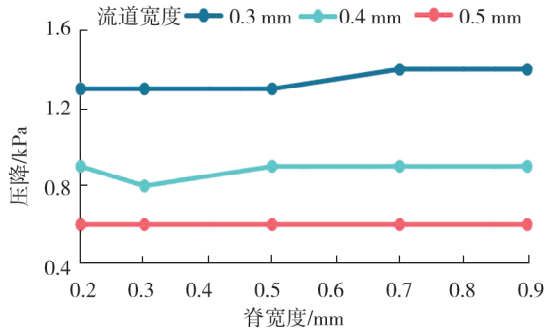


图 3 脊宽度对压降的影响

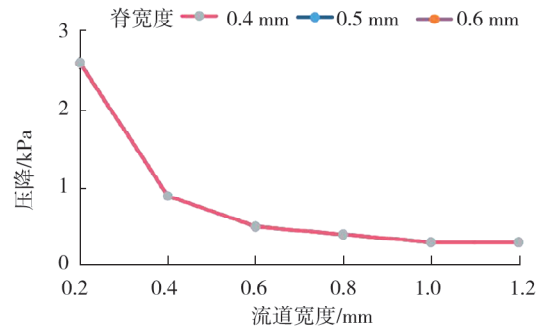


图 4 流道宽度对压降的影响

由图 4 可知:脊宽度为 0.4、0.5、0.6 mm 时,流道的压降几乎一致,随流道宽度增大,压降均逐渐减小,并且压降的降低速率逐渐减小,流道宽度大于 1.0 mm 后,压降几乎保持稳定。这是因为管道流动中,产生压降的主要原因是摩擦损失,当流道宽度增大时,流道壁面的相对粗糙度降低,摩擦因数减小,压降减小。由于相对粗糙度和流道宽度的成反比例关系,压降降低速率逐步减小。脊宽度增加仅稍微增加了整体的流道长度,对整体影响不大,因此压降变化微小。

电池极板流场的压降增大,损耗增加,电池效率降低,进气量相同时,流道内的压降与进气功耗成正比^[18]。因此考虑极板流道压降对电池性能的影响时,应该尽可能选用流道宽度较大的结构;由于脊宽度对于压降的影响不明显,为减轻电池质量,使空间更加紧凑得以高效利用,应尽可能减小脊宽度。

3.2 流道宽度和脊宽度对流量分布的影响

脊宽度和流道宽度对流体质量流量分布的影响如图 5、6 所示。

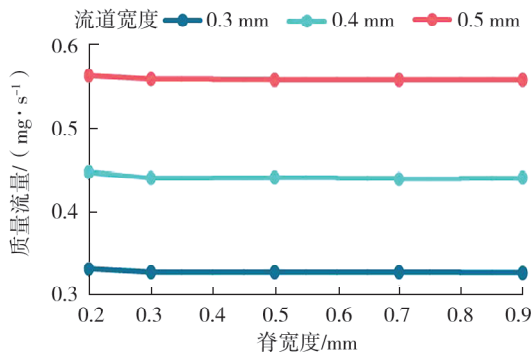


图 5 不同脊宽度下流体质量流量分布

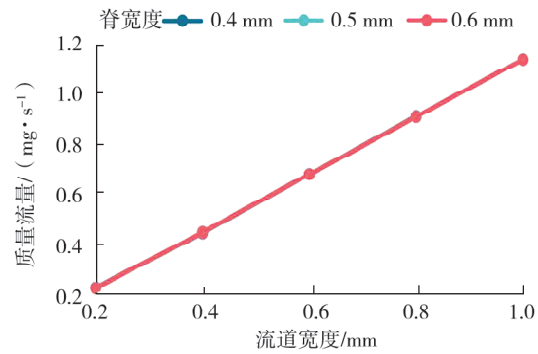


图 6 不同流道宽度下流体质量流量分布

由图 5、6 可知:脊宽度增大,不同流道宽度下流体的质量流量均出现了小幅度下降,且随着脊宽度的增大,流体质量流量逐渐趋于稳定;流道宽度增大,流体的质量流量明显增加,并且这种增加趋势几乎呈线性。

不同流道宽度和脊宽度下流体的质量流量如表 3 所示。

表 3 不同流道宽度和脊宽度下流体的质量流量

脊宽度/mm	质量流量/(mg·s ⁻¹)				
	流道宽度 0.2 mm	流道宽度 0.4 mm	流道宽度 0.6 mm	流道宽度 0.8 mm	流道宽度 1.0 mm
0.4	0.217	0.440	0.676	0.912	1.140
0.5	0.215	0.442	0.676	0.910	1.140
0.6	0.215	0.442	0.676	0.910	1.140

由表3可知:脊宽度不同、流道宽度相同时流体的质量流量几乎一致,仅出现了非常轻微的变化,表明脊宽度对流体质量流量的影响非常小。

燃料电池流道内流体质量流量增大,单位时间内有更多空气参与反应,电池内部燃料反应更加充分,可以提高燃料利用效率,产生更多能量。流体质量流量随流道宽度增加呈接近线性增长,在脊宽度增大时仅出现微小下降,因此考虑流量分布对电池性能的影响时,应保证流道宽度尽量大,但脊宽度不必过大。

4 结论

使用 Comsol 软件对蛇形流道电池极板进行了网格划分,通过仿真试验研究了燃料电池极板蛇形流道的宽度和脊宽度对流体压降和质量流量的影响。

1) 流道宽度对流道的压降及流体质量流量分布的影响较大,脊宽度的影响较小。

2) 综合考虑压降以及流量分布 2 个因素,流道宽度和脊宽度设计均应趋于较大,使电池内流体性能更优,但电池设计时还应考虑电流密度,流道宽度和脊宽度过大都会导致电流密度下降,影响电池的使用性能。极板材料在一定程度上影响电池整体性能,不同的材料表现出不同的特征。

3) 脊宽度和流道宽度过大导致电池整体尺寸增大,降低汽车空间的利用率,电池设计时应综合考虑相关因素。

参考文献:

- [1] 朱万超. 质子交换膜燃料电池圆形双极板径向流场数值建模与性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [2] BERNING T, DJILALI N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell: a parametric study[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 124(2): 440-452.
- [3] WATKINS D S, DIRCKS K W, EPP D G. Novel fuel cell fluid flow field plate: US04988583A[P]. 1991-01-29.
- [4] VAZFESHDENAS Y, SEDIGHI K, SHAKERI M. Numerical investigation of a novel compound flow-field for PEMFC performance improvement[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(43): 15032-15039.
- [5] YOUNG G, LEE W, PARK G, et al. Effects of channel and rib widths of flow field plates on the performance of a PEMFC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005(30): 1363-1366.
- [6] 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.
- [7] 韩建, 崔龙, 苏中辉, 等. 燃料电池双极板流道尺寸数值仿真[J]. *汽车文摘*, 2020(8): 22-27.
- [8] 叶志杰, 袁晓红, 陶琦. 质子交换膜燃料电池变径蛇形流道设计与仿真[J]. *武汉理工大学学报*, 2021, 43(11): 89-96.
- [9] 华日升, 张文泉, 程利冬, 等. 燃料电池金属双极板设计与成形技术综述[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(3): 25-33.
- [10] 陈振兴, 郭树杰, 胡科峰, 等. 燃料电池双极板流场及电堆结构研究现状[J]. *电池工业*, 2020, 24(5): 264-268.
- [11] 马小杰, 方卫民. 质子交换膜燃料电池双极板研究进展[J]. *材料导报*, 2006(1): 26-30.
- [12] UM S, WANG C Y. Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 125(1): 40-51.
- [13] FERNG Y M, SU A. A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(17): 4466-4476.
- [14] HASHEMI F, ROWSHANZAMIR S, REZAKAZEMI M. CFD Simulation of PEM fuel cell performance: effect of straight and serpentine flow fields[J]. *Math Comput Model*, 2012, 55: 1540-1557.
- [15] 肖宽, 潘牧, 詹志刚, 等. PEMFC 双极板流场结构研究现状[J]. *电源技术*, 2018, 42(1): 153-156.
- [16] 程植源, 周荣良, 李嘉硕, 等. 气体扩散层孔隙率梯度对质子交换膜燃料电池水管理的影响[J]. *内燃机与动力装置*, 2022, 39(3): 41-47.
- [17] 何良, 李华, 赵原, 等. 基于辐射场梯度变化的变权重网格划分方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(10): 861-865.
- [18] 刘志春, 涂正凯, 周兵, 等. 质子交换膜燃料电池阴极气场设计优化[J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(8): 1375-1379.

Influence of channel width and ridge width on flow characteristics of fuel cell electrode plate

LIU Bin, BAI Shuzhan*

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

Abstract: In order to study the influence of channel width and ridge width on the flow characteristics of fuel cell electrode plate channel, multi-physical field simulation software Comsol is used to simulate the snake channel structure with different channel width and ridge width, and analyze the convection-inlet pressure drop and the mass flow of gas in the channel with channel width and ridge width. The results show that increasing the width of the passage could reduce the pressure drop at the inlet and outlet of the passage and increase the mass flow rate of gas in the passage. The mass flow rate decreases slightly with the increase of ridge width. The influence of ridge width on pressure drop and flow distribution is less than that of channel width. Considering the influence of channel width and ridge width on pressure drop and flow distribution, the channel width should be increased within a reasonable range, and the ridge width should not be too small.

Keywords: fuel cell; double electrode plate; runner width; ridge width; pressure drop; flow distribution

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第 12 页)

Experimental study on N₂O emission characteristics of non-road diesel engine

BAI Fengyue¹, WANG Zhenyu¹, SHEN Fuqiang², ZHANG Youyuan^{2*},
WU Chunling¹, ZHANG Lin¹, JING Xiaojun¹

1. CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

2. Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou 545000, China

Abstract: Based on the non-road steady cycle and the non-road transient cycle, N₂O emissions of the diesel engine equipped with copper based selective catalytic reduction system are studied. The results show that N₂O emissions are relatively high under steady-state cycle, cold start transient cycle and hot start transient cycle, with specific emissions of 147.1, 130.2 and 150.2 mg/(kW·h) respectively. In the steady-state cycle, the N₂O emissions increase when engine load decreases. In the transient cycle, N₂O emissions have the same trend as the NO_x emissions of the original engine. N₂O emissions during the cold start mainly result from the oxidation of NH₃. Active regeneration of DPF greatly reduces N₂O emissions.

Keywords: non-road diesel engine; N₂O; selective catalytic reduction; copper based catalyst

(责任编辑:刘丽君)