

流道脊宽对梯形流道质子交换膜 燃料电池性能的影响

王琦¹,徐晓明²,司红磊³,仝光耀²

1. 镇江市高等专科学校 交通学院,江苏 镇江 212018;

2. 江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013;

3. 镇江江雨诚石管理咨询服务有限公司,江苏 镇江 212013

摘要:为研究流道脊宽对梯形截面流道质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)性能的影响,通过流体动力学软件 Fluent 搭建 PEMFC 三维模型,分析单通道燃料电池宽度为 2 mm,流道脊宽分别为 0.6、0.8、1.4、1.6 mm 时质子交换膜温度、阴极气体扩散层和催化层接触面的水饱和度及氧气的质量分数、输出平均电流密度等参数变化对 PEMFC 性能的影响。结果表明:增大流道脊宽可以提高电池内部的温度均匀性及水管理性能,会减少气体扩散层和催化层接触面的氧气的质量分数,进而降低输出平均电流密度,在应用中需提高进气量以改善电池内部的氧气供给。该研究可为 PEMFC 的结构设计提供指导。

关键词:脊宽;梯形流道;水饱和度;氧气质量分数

中图分类号:U463.63⁺3;TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)02-0011-06

引用格式:王琦,徐晓明,司红磊,等.流道脊宽对梯形流道质子交换膜燃料电池性能的影响[J].山东交通学院学报,2022,30(2):11-16.

WANG Qi, XU Xiaoming, SI Honglei, et al. Performance influence on proton exchange membrane fuel cell with trapezoidal flow channel by ridge width[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(2): 11-16.

0 引言

近年来,随着化石燃料能源的大量消耗,急需寻找内燃机的替代品。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有不受卡诺循环限制、能量转换效率高、污染小等优点,是目前内燃机的最佳替代新能源装置之一^[1-4]。双极板作为 PEMFC 的重要组成部分,具有向膜电极组件提供反应物气体、为燃料电池堆提供结构性机械支撑及电气连接的作用,并管理电池内产生的热量和水^[5-6],因此,双极板的设计对 PEMFC 的性能和功率密度具有重要影响。

提高 PEMFC 性能有多种途径,目前研究多集中在流道设计和水热控制上^[7-9],关于脊对电池性能影响的研究相对较少。Shimpalee 等^[10]、Wang^[11]研究了 PEMFC 在稳态和暂态运行时水管理问题,但文献中缺乏流场设计对电池性能的影响。Oosthuizen 等^[12]利用有限元程序 FIDAP 中的单相非等温模型研究了 PEMFC 脊下的输运及不同渗透率下通过气体扩散层到通道的水传输现象。Yoon 等^[13]在 80 cm² 的电池上进行了不同脊宽的试验,研究不同操作条件对电池性能的影响,但试验中通道路径的长度或通道的数量取决于流场板的形状,增加了因变量。Shimpalee 等^[14]研究了有效面积为 480 cm² 的电池单体在不同湿度条件下的工况,但没有分析不同的流场结构对电池性能的影响。Wang 等^[15-16]利用三维模型研

收稿日期:2021-10-25

基金项目:江苏高校“青蓝工程”资助项目(苏教师函[2020]10号);镇江市科技创新资金重点研发计划社会发展项目(SH2020017)

第一作者简介:王琦(1976—),女,江苏东台人,教授,工学硕士,主要研究方向为汽车智能技术和新能源汽车电池,E-mail:77787681@qq.com。

究了单蛇形流场和三蛇形流场的流道结构对 PEMFC 性能的影响,发现在低工作电压下,降低通道宽高比可增大气体入口流速,能改善液水堆积现象并提高电池性能。Ghanbarian 等^[17]研究了通道高度、宽度、间距和平行通道数等参数对 PEMFC 局部输运特性的影响规律。Zehtabiyani-Rezaie 等^[18]通过在平行流场中改变流道倾角,研究横截面面积对燃料电池性能的影响,结果表明:当通道倾角为 0.3° 时,净输出功率比平行流道方案提高 16%。Cooper 等^[19]通过试验研究了交叉指流场设计中的通道宽高比对电池性能的影响,结果表明:由于寄生泵损耗的影响,净功率密度随通道宽高比的减小而增大。

本文运用流体动力学软件 Fluent 进行多相流方法模拟,研究不同脊宽的梯形截面流道 PEMFC 在 343 K 下的稳态性能,通过质子交换膜温度、阴极气体扩散层和催化层接触面的水饱和度和氧气的质量分数等参数分析脊宽对 PEMFC 性能的影响规律。

1 数学模型

PEMFC 的工作机理遵循质量守恒、动量守恒、组分守恒、能量守恒和电荷守恒^[20-23]。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = S_m,$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s ; S_m 源项为电化学反应区(阳极和阴极的催化层)中反应组分质量的消耗或生产率。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla(\varepsilon \nabla \mathbf{u}) + S_v,$$

式中: ε 为黏度系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; S_v 为多孔介质中动量的变化率, $S_v = -\frac{\varepsilon}{K} \mathbf{u}$, 其中 K 为渗透系数, m^2/s 。

组分守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho X_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} X_i) = \nabla(D_i \nabla X_i) + S_{X_i},$$

式中: X_i 为流体中各组分的质量分数; D_i 为各组分的有效扩散系数, m^2/s ; S_{X_i} 源项为催化层中每种组分(如氧、氢和水)的消耗或产生速率,气体扩散层和气体通道中为 0。

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} T) = \nabla\left(\frac{k}{c_p} \nabla T\right) + S_T,$$

式中: T 为温度, K ; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p 为比热容; S_T 为温度方程的源项,表示各种欧姆热产生热量的速率,聚合物电解质膜燃料电池工作时的相变热、化学热和过电位。

电荷守恒方程为:

$$\begin{aligned} \nabla(\sigma \nabla \varphi_{\text{H}^+}) &= S_{\varphi_{\text{H}^+}}, \\ \nabla(\kappa \nabla \varphi_{\text{e}^-}) &= S_{\varphi_{\text{e}^-}}, \end{aligned}$$

式中: σ 、 κ 分别为质子和电子电导率, S/m ; φ_{H^+} 、 φ_{e^-} 分别为质子和电子的势; $S_{\varphi_{\text{H}^+}}$ 、 $S_{\varphi_{\text{e}^-}}$ 分别为质子和电子流的源项。

2 仿真模型

2.1 网格划分

通过 Fluent 软件搭建 PEMFC 模型,如图 1 所示。为得到最佳的仿真结果,划分网格时采用六面体网

格,对于梯形流道边界、质子交换膜和催化层等几何形状较为复杂和反应剧烈的位置,网格进行细化,划分为约 91 万个网格,满足总体要求。

2.2 边界条件及参数

假设气体是理想气体,并且流体为不可压缩的层流,催化层和质子交换膜是各向同性材料。入口边界条件为质量流入口,出口为压力出口。流道脊宽分别设置为 0.6、0.8、1.4、1.6 mm。考虑环境温度为 343 K,故设置流道上下端面为 343 K 的壁面进行模拟^[24-26]。该 PEMFC 的单体开路电压为 0.95 V,实际工作电压为 0.50 V,进气方式为单通道同方向进气,几何参数如表 1 所示。

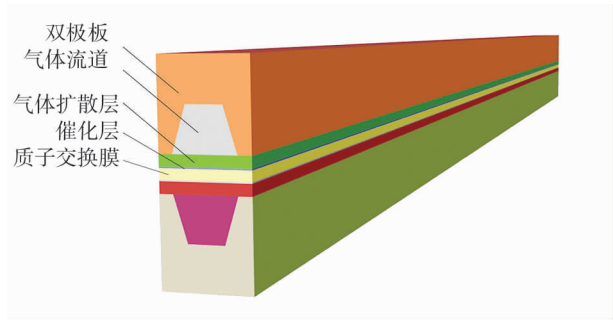


图 1 PEMFC 模型

表 1 PEMFC 的几何参数

燃料电池长度	燃料电池宽度	燃料电池高度	双极板厚度	气体扩散层厚度	催化层厚度	质子交换膜厚度	流道高度
70.00	2.00	4.81	2.00	0.26	0.03	0.23	1.00

3 计算结果分析

3.1 脊宽对质子交换膜温度的影响

质子交换膜燃料在电池工作时放出大量热量,导致电池温度过高引发结构损伤,使阴极的氢气和阳极的氧气直接接触,降低电池性能。同时,温度过高也会影响质子交换膜的润湿程度,进而影响质子的传输效率。因此,温度是衡量 PEMFC 性能的重要指标之一。

不同脊宽的质子交换膜温度分布云图如图 2 所示。由图 2 可知:随脊宽增大,质子交换膜表面温度下降;质子交换膜温度总是沿流道的方向逐渐降低;脊宽为 0.6 mm 时,质子交换膜上高温区域面积最大,其他脊宽的高温面积相似;脊宽越大,质子交换膜的温度均匀性越好。

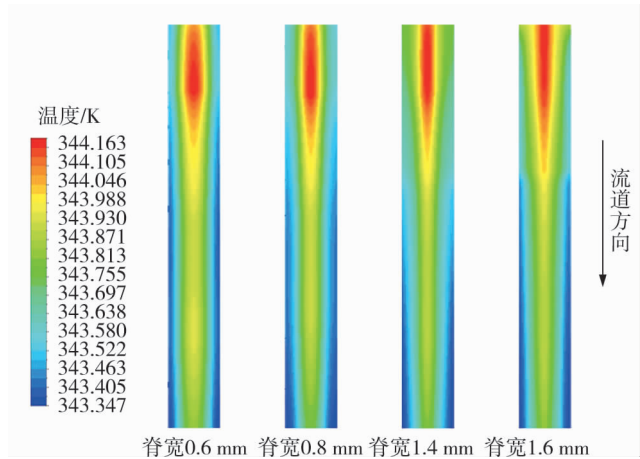


图 2 不同脊宽的质子交换膜温度分布云图

3.2 脊宽对水饱和度的影响

PEMFC 产生电流的过程也产生副产物水,有助于质子交换膜的润湿,但生成的液态水如果不能及时排出将阻塞气体扩散层的孔隙,氧气的传质能力会受到极大影响,最终阻碍电化学反应的发生。梯形截面流道优于矩形截面流道主要是前者的排水性能较好^[27]。

不同脊宽的气体扩散层和催化层接触面的水饱和度分布云图如图 3 所示。由于质子交换膜表面温度沿流道方向降低,使得电化学反应产生的气态水沿流道方向逐渐液化。由图 3 可知:随脊宽增大,沿流道方向前 30 mm 的水饱和度增

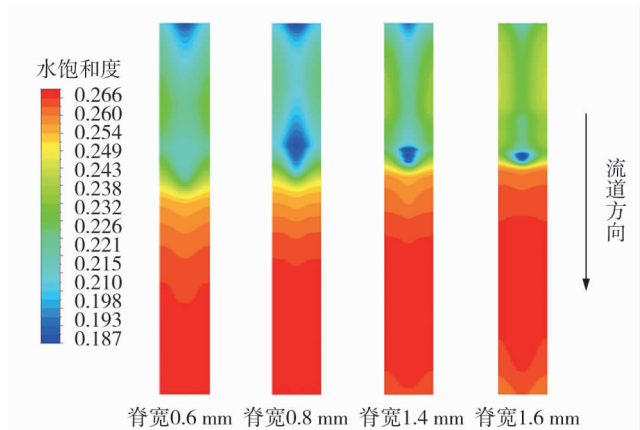


图 3 不同脊宽的水饱和度分布云图

加,尾部的水饱和度降低,说明脊宽增大有利于水的排出;随脊宽增大,高水饱和度的面积增大;在接触面中间靠前位置有一处低水饱和度区域,在脊宽为 0.6 mm 时不存在低水饱和度区域,在脊宽为 0.8 mm 时低水饱和度区域面积最大,随脊宽增大,低水饱和度区域面积逐渐减小,说明该位置处液态水量较小,氧气的润湿不足,随脊宽增大,这种情况会缓解。综上所述,脊宽增大可提高电池的水管理性能。

3.3 脊宽对氧气的质量分数的影响

脊宽增大引起流道截面减小,影响 PEMFC 内部燃料的传质能力。不同脊宽的气体扩散层和催化层接触面氧气的质量分数分布云图如图 4 所示。由图 4 可知:流道入口处氧气的质量分数最大,沿流道方向逐渐降低,脊宽越大,氧气的质量分数越低;在流道 25 mm 处氧气的质量分数有上升趋势,导致此处的水饱和度被氧气的质量分数所抑制,因此图 3 中水饱和度在该位置出现了明显的突变;随脊宽的增大,氧气的质量分数分布呈现流道截面中间高、两边低现象,原因是脊宽增大时流道截面减小,氧气在气体扩散层中传质时被消耗,无法扩散到边界处。由于 PEMFC 的供气是过量供气,因此不能只通过接触面氧气的质量分数作为评判电池性能的标准。

不同脊宽的电池输出平均电流密度如表 2 所示。由表 2 可知:随脊宽增大,平均电流密度减小,脊宽增加 1 mm,电流密度减少了 14%。结合图 4 分析可知,脊宽增大使电池两侧氧气传质能力下降,导致电池两侧电化学反应程度衰减,输出电流密度降低,说明随脊宽增大,参与反应的氧气量不足,需要加大氧气的供给。

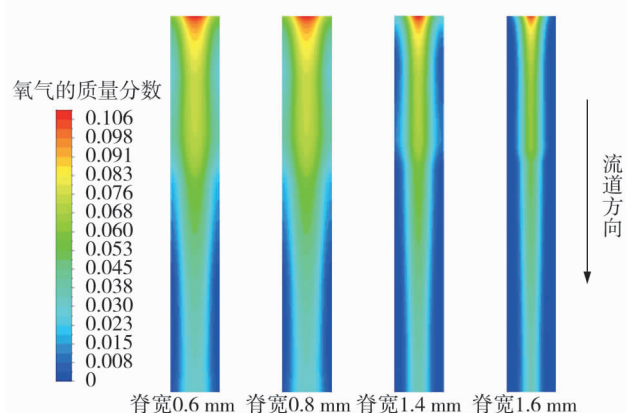


图 4 不同脊宽的氧气的质量分数分布云图

表 2 不同脊宽的电池输出平均电流密度

脊宽/mm	0.6	0.8	1.4	1.6
平均电流密度/(A·cm ⁻²)	1.04	1.02	0.99	0.89

4 结论

本文通过 Fluent 软件搭建 PEMFC 三维模型,仿真分析了脊宽对梯形截面质子交换膜燃料电池性能的影响。

- 1) 脊宽增大降低了电池质子交换膜表面的温度,提高了电池的温度均匀性。
- 2) 脊宽增大能增加电池流道靠入口位置的水饱和度,提高了电池的水管理性能。
- 3) 脊宽增大会减少气体扩散层和催化层接触面的氧气分布,尤其是电池流道截面两侧位置,同时会降低输出平均电流密度,因此在应用中需提高氧气的进气量来改善电池内部的氧气供给。

参考文献:

- [1] LIM J S, LEE H W, HONG Y S, et al. Development on fuel economy test method for hydrogen fuel cell vehicles[J]. The Korean Hydrogen and New Energy Society, 2010,21(3):207-213.
- [2] MONTERO-SOUSA J A, ALÁIZ-MORETÓN H, QUINTIÁN H, et al. Hydrogen consumption prediction of a fuel cell based system with a hybrid intelligent approach[J]. Energy, 2020, 205:117986.
- [3] HOU Y P, SHEN C Y, DONG H, et al. A dynamic model for hydrogen consumption of fuel cell stacks considering the effects of hydrogen purge operation[J]. Renewable Energy, 2014, 62:672-678.
- [4] FANG M D, CHEN M J, LU Q C, et al. Hydrogen consumption measurement research platform for fuel cell vehicles[C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan, China:ICECE, 2010.
- [5] 李建秋,方川,徐梁飞. 燃料电池汽车研究现状及发展[J]. 汽车安全与节能学报,2014,5(1):17-29.

- LI Jianqiu, FANG Chuan, XU Liangfei. Current status and trends of the research and development for fuel cell vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(1): 17-29.
- [6] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1): 1-13.
- HOU Ming, YI Baolian. Progress and perspective of fuel cell technology[J]. Electrochemistry, 2012, 18(1): 1-13.
- [7] 杨洋, 陈壁峰, 肖金生, 等. 高温 PEM 燃料电池的流场结构设计及优化[J]. 电源技术, 2011, 35(4): 476-479.
- YANG Yang, CHEN Bifeng, XIAO Jinsheng, et al. Design and optimization of flow field for high-temperature PEM fuel cells[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(4): 476-479.
- [8] 刘波, 赵锋, 李骁. 质子交换膜燃料电池热管理技术的进展[J]. 电池, 2018, 48(3): 202-205.
- LIU Bo, ZHAO Feng, LI Xiao. Review on thermal management technology of PEMFC[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(3): 202-205.
- [9] 陈海辉, 郭秀艳, 曾莹莹, 等. 质子交换膜燃料电池水管理动态模型研究[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 23-28.
- CHEN Haihui, GUO Xiuyan, ZENG Yingying, et al. Study on dynamic models of water management in proton exchange membrane fuel cell[J]. Materials Review, 2017, 31(5): 23-28.
- [10] SHIMPALEE S, LEE W K, ZEE J W V, et al. Advances in computational fluid dynamics modeling for PEM fuel cells[C]// Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Savannah, Georgia, USA: 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 2001, 2: 959-965.
- [11] WANG C Y. Fundamental models for fuel cell engineering[J]. Chemical Reviews, 2004, 104(10): 4727-4766.
- [12] OOSTHUIZEN P H, SUN L, MCAULEY K. The effect of channel-to-channel gas crossover on the pressure and temperature distribution in PEM fuel cell[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(7): 1083-1096.
- [13] YOON Y G, LEE W Y, PARK G G, et al. Effect of channel configurations of flow field plates on the performance of a PEMFC[J]. Electrochim Acta, 2004, 50(2/3): 709-712.
- [14] SHIMPALEE S, GREENWAY S, SPUCKLER D, et al. Predicting water and current distributions in a commercial-size PEMFC[J]. Journal of Power Sources, 2004, 135(1/2): 79-87.
- [15] 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.
- [16] WANG X D, DUAN Y Y, YAN W M, et al. Channel aspect ratio effect for serpentine proton exchange membrane fuel cell: role of sub-rib convection[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(2): 939-943.
- [17] GHANBARIAN A, KERMANI M J, SCHOLTA J, et al. Polymer electrolyte membrane fuel cell flow field design criteria-application to parallel serpentine flow patterns[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 166: 281-296.
- [18] ZEHTABIYAN-REZAIE N, AREFIAN A, KERMANI M J, et al. Effect of flow field with converging and diverging channels on proton exchange membrane fuel cell performance[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 152: 31-44.
- [19] 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.
- [20] CHEN C H, JUNG S P, YEN S C. Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack[J]. Journal of Power Sources, 2007, 173(1): 249-263.
- [21] ZHANG G B, FAN L H, SUN J, et al. A 3D model of PEMFC considering detailed multiphase flow and anisotropic transport properties[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2017, 115: 714-724.
- [22] YIN Y, WANG J B, YANG X L, et al. Modeling of high temperature proton exchange membrane fuel cells with novel sulfonated polybenzimidazole membranes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(25): 13671-13680.
- [23] CHANG H M, LIN C W, CHANG M H, et al. Optimization of polytetrafluoroethylene content in cathode gas diffusion layer by the evaluation of compression effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3773-3780.
- [24] 王铁, 冯鹏雨. 基于 Fluent 对 PEM 燃料电池的平行流场仿真分析[J]. 装备制造技术, 2019(12): 159-161.
- WANG Tie, FENG Pengyu. Simulation analysis of parallel flow field of PEM fuel cell based on Fluent[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(12): 159-161.
- [25] 郭苗苗, 文陈, 陈学成, 等. 基于 Fluent 的燃料电池建模及仿真研究[J]. 电源技术, 2019, 43(1): 113-116.
- GUO Miaomiao, WEN Chen, CHEN Xuecheng, et al. Modeling and simulation of fuel cell based on Fluent[J]. Chinese

Journal of Power Sources, 2019,43(1):113-116.

[26] 柯超,甘屹,王胜佳,等. 基于温度效应的空冷型质子交换膜燃料电池动态建模[J]. 太阳能学报,2021,42(8):488-495.

KE Chao, GAN Yi, WANG Shengjia, et al. Dynamic modeling of air-cooled proton exchange membrane fuel cell based on temperature effect[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021,42(8):488-495.

[27] 王场,王长辉,林震. 流道截面形状对 PEM 燃料电池性能的影响[J]. 电源技术, 2012, 36(1):21-23.

WANG Yang, WANG Changhui, LIN Zhen. Influence of different cross section channels on PEM fuel cell[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(1):21-23.

Performance influence on proton exchange membrane fuel cell with trapezoidal flow channel by ridge width

WANG Qi¹, XU Xiaoming², SI Honglei³, TONG Guangyao²

1. School of Transportation, Zhenjiang College, Zhenjiang 212018, China;

2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. Zhenjiang Jiangyuchengshi Management Consulting Co., Ltd., Zhenjiang 212013, China

Abstract: To study performance influence on ridge width to proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with trapezoidal flow channel, the PEMFC three-dimensional model is built by the fluid dynamics software Fluent, which is used to analyze the influence of parameter variation on PEMFC performance when the width of the single-channel fuel cell is 2 mm and ridge width of flow channel is 0.6, 0.8, 1.4 and 1.6 mm respectively. Parameters investigated include the temperature of proton exchange membrane, water saturation and oxygen mass fraction at the interface between cathode gas diffusion layer and catalytic layer, and average current density, etc. The results show that the larger ridge width of flow channel is, the higher temperature uniformity and the performance of water management inside the battery is. The less oxygen mass fraction at the interface between gas diffusion layer and catalytic layer is, the lower average current density is. To improve oxygen supply inside the battery, it is necessary to increase the flow of intake air in the application. This study can provide guidance for the structural design of PEMFC.

Keywords: ridge width; trapezoidal flow channel; water saturation; oxygen mass fraction

(责任编辑:郭守真)