研究论文

质子交换膜燃料电池强化传质

沈俊[1]，周兵[2]，邱子朝[1]，涂正凯[3]，刘志春[1]，刘伟[1]
([1] 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074；[2] 清华大学航天航空学院，北京 100084；
[3]武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室，湖北 武汉 430070)

摘要：传质问题制约着燃料电池性能的提高。通过理论分析、Fluent 模拟，针对质子交换膜燃料电池流道中加凸台和电极扩散层开孔两种方法，分别研究其对强化电池内部传质的效果。结果表明，上述两种方式均能有效强化电池内部传质，提高电池性能。但是加凸台增加了风机的寄生功率，综合性能提升不显著。

关键词：质子交换膜燃料电池；加凸台；扩散层开孔；传质强化
DOI：10.3969/j.issn.0438-1157.2014.zl.068
中图分类号：O 6-1 **文献标志码**：A **文章编号**：0438—1157(2014)S1—421—05

Mass transfer enhancement of proton exchange membrane fuel cell

SHEN Jun[1], ZHOU Bing[2], QIU Zizhao[1], TU Zhengkai[3], LIU Zhichun[1], LIU Wei[1]

([1] *College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074, *Hubei, China*; [2] *School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*; [3] *State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei, China*)

Abstract: The improvement of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) performance depends on the ability of mass transfer. Based on the theoretical analysis, the investigation focusing on the enhancement of mass transfer has been carried out using three dimension model through two methods, adding blocks in gas channel and perforation of gas diffusion layer (GDL). The results show that the two methods above would effectively strengthen the ability of mass transfer and improve the performance of the PEMFC. What's more, extra parasitic power would be needed and the effect of adding blocks should be comprehensively evaluated.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; adding blocks; perforation of gas diffusion layer; mass transfer enhancement

引 言

质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell，PEMFC）由于其高效、低污染物排放、适用范围广等优势，已成为化石燃料的理想替代。电池运行过程中，活化损失、欧姆损失和传质损失是造成电压降的主要原因[1]。活化极化和欧姆极化与物性及初始条件相关，传质损失与结

2014－02－11 收到初稿，2014－02－14 收到修改稿。
联系人：刘志春。第一作者：沈俊（1986—），女，博士研究生。
基金项目：国家高技术研究发展计划项目（2012AA1106016）。

Received date: 2014－02－11.
Corresponding author: Prof. LIU Zhichun, zcliu@hust.edu.cn
Foundation item: supported by the National High Technology Research and Developement Program of China (2012AA1106016).

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

构和过程相关。优化电池结构，强化传质过程，是提高电池效率的有效途径。

刘福利等[2]通过建立二维、稳态、等温的数学模型，研究 PEMFC 阳极内的流动和传质特性，结果表明，增大氢气的流速和质量分数，降低催化层厚度有利于氢气的质量传输。刘璿等[3]采用透明电池可视化方法研究了质子交换膜燃料电池流道淹没现象，发现提高反应物流量能够强化气体传质，且提高阴极侧反应物流量更为有效。于景荣等[4]采用不同厚度的 Nafion 膜，研究 Nafion 膜厚度对电池性能的影响，发现厚膜组装电池由于传质极化在低电流密度时极化曲线就偏离了线性。Kuo 等[5-7]用数值模拟方法评估新型波浪形流道对燃料电池对流换热和速度特性的影响，基于场协同原理分析了新型流道对电池换热的强化，且新型流道气体流速的提高增强了催化层的催化反应。Gerteisen 等[8]对燃料电池扩散层进行激光开孔处理。开孔后的扩散层减少了水分的积聚，增强了氧气的传输，提高了电池性能。目前，对燃料电池的强化传质方面的研究已经不少，本文应用理论分析与模拟相结合，在波浪型流道的基础上，进一步研究了不同的凸台形状和凸台排列密度对电池性能的影响；同时，针对扩散层开孔，采用不同的孔直径和孔间距来比较研究。

1 理论分析

1.1 传质微分方程

二维、稳态、常物性的扩散传质微分方程[9]

$$D\left(\frac{\partial^2\rho}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\rho}{\partial y^2}\right)+\dot{n}=0 \tag{1}$$

式中 D、ρ 和 $\dot{n}$ 分别为扩散系数、密度和内部生成率。

二维、稳态、常物性、无内部生成率的对流传质微分方程

$$u\frac{\partial\rho}{\partial x}+v\frac{\partial\rho}{\partial y}=D\left(\frac{\partial^2\rho}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\rho}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

由于 $\frac{\partial^2\rho}{\partial x^2}<<\frac{\partial^2\rho}{\partial y^2}$，式（2）简化为

$$u\frac{\partial\rho}{\partial x}+v\frac{\partial\rho}{\partial y}=D\frac{\partial^2\rho}{\partial y^2} \tag{3}$$

根据浓度边界层的对流传质质量与贴壁层的扩散传质量相等[9]，即

$$\int_0^\delta[\boldsymbol{U}\cdot\nabla\rho]\mathrm{d}y=\cos\partial\int_0^\delta[|\boldsymbol{U}|\cdot|\nabla\rho|]\mathrm{d}y=-D_{\mathrm{grad}}\rho\Big|_0^\delta \tag{4}$$

对流传质的强弱取决于流速的大小、密度（浓度）梯度以及两者之间的夹角。

1.2 燃料电池的对流传质

1.2.1 光滑流道和加凸台流道（图 1） 加凸台的流道：流体经过凸台时，流动方向发生改变，产生与水平速度方向垂直的分量，即 $\cos\partial=1$，$\boldsymbol{U}\cdot\nabla\rho=|\boldsymbol{U}_y|\cdot|\nabla\rho|$。对流引起的传质量大于 0，系统的传质量为扩散传质和对流传质之和。

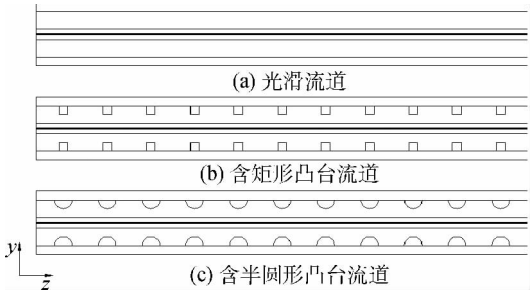

图 1 光滑流道和加凸台流道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flow channel

1.2.2 扩散层开孔（图 2） PEMFC 运行时，电池扩散层存在的液态水对气体的质量传输产生不利影响。在扩散层开孔，利用开孔处的毛细抽力，产生“水井”效果，使液态水在孔中聚集，降低周围其他部位的含水量，减少“水堵”。根据达西定律，扩散传质增强。

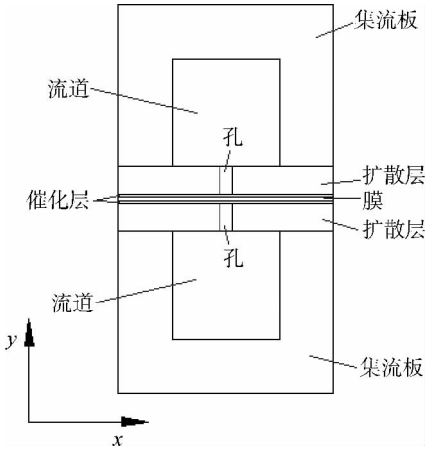

图 2 扩散层开孔

Fig. 2 Schematic diagram of perforation of gas diffusion layer

2 数值模拟

2.1 流道中加凸台

2.1.1 方案设计 半圆形凸台和矩形凸台，分别

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有以下 4 种布置方案：

①case-1：凸台在流道中等间距布置，且两凸台中心间距 10 mm；

②case-2：凸台在流道中采用前疏后密的方式布置，靠近尾端处两凸台中心间距 2.5 mm，前面间距依次按 1.2 倍等比例增加；

③case-3：凸台在流道中等间距布置，且两凸台中心间距 2.5 mm；

④case-4：凸台在流道中等间距布置，两凸台之间空留长度等于凸台所占长度。

2.1.2　结果分析

（1）不同凸台布置下速度场的分布

图 3 给出了电流密度为 1 A·cm^{-2}时，流道中加矩形凸台后燃料电池速度场图。在通道中添加凸台后，通道截面积变小，流速有所增加。这不仅有利于电池的排水；而且与光滑流道相比，加凸台后的流道中，垂直并指向扩散层内部的速度分量增加，这样将更加有利于反应气在扩散层的扩散。尤为重要的是，反应气在流经凸台时，通道截面积先减小后增大，这将有利于流道内的传质过程，尽可能地使流道中反应气的浓度在垂直于流道的方向上分布更加均匀，从而减小由于靠近扩散层处反应气的消耗而带来的浓差损失。

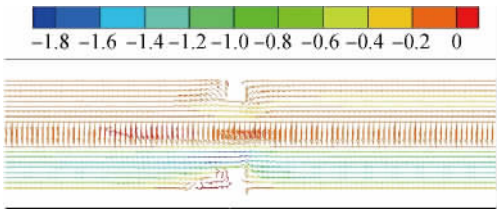

图 3　加矩形凸台燃料电池速度场

Fig. 3　Velocity contour of PEMFC with rectangle blocks addition

（2）不同凸台布置方案下电池性能

图 4 给出了在电流密度为 1 A·cm^{-2}时，流道中布置不同间距的矩形和半圆形凸台时，燃料电池的性能比较。其中 plain 代表的是没有加凸台的燃料电池。可以看出在流道中加入凸台后，燃料电池的性能均较光滑流道有所提高，并且凸台布置越密，电池性能提高越多。此外，与半圆形凸台相比，通道中加入矩形凸台对电池性能的提升效果更好。

图 5 和图 6 分别为流道中加矩形凸台时，阴极流道与扩散层交界面以及扩散层与催化层交界面中心的氧气浓度。可以看出，对于光滑流道，沿着流动方向，氧气浓度直线下降；而对于加矩形凸台的流道，在每个凸台处氧气的浓度都有所提高，凸台布置越密，通道中氧气浓度增加的位置就越多，最终使区域内氧气浓度整体提高，从而电池性能得到提高。

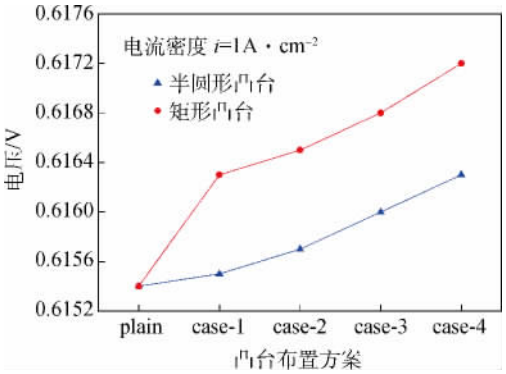

图 4　不同凸台布置方案下电池性能

Fig. 4　Performance curves of different cases

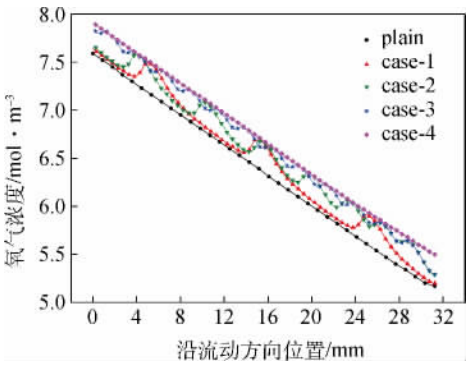

图 5　阴极流道/扩散层交界面中心氧气浓度

Fig. 5　O_2 mole concentration of interface between cathode gas channel and GDL

（3）不同凸台布置方案下阴极流道压降

图 7 为流道中布置不同间距的矩形和半圆形凸台时，燃料电池阴极流道的进出口压降。凸台布置越密，阴极流道压降越大；且矩形凸台的流道压降高于半圆形凸台的流道。这是由于气体流过矩形凸台时，会在凸台周围形成横向涡，从而使气体流过时的形状阻力较大。而在流道内流量不变的情况下，流道内的压降直接影响风机的功耗，压降越大，风机的寄生功率越大。

2.2　扩散层开孔

2.2.1　方案设计　采用以下 4 种开孔方案来研究

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

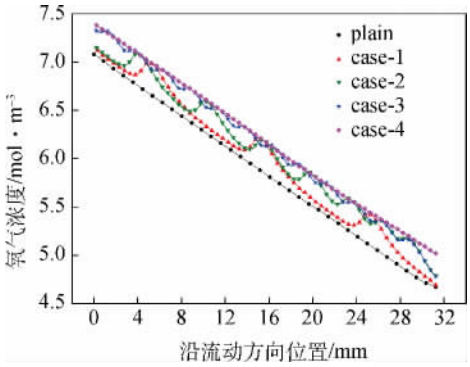

图 6　阴极扩散层/催化层交界面中心氧气浓度

Fig. 6　O_2 mole concentration of interface between cathode GDL and CL

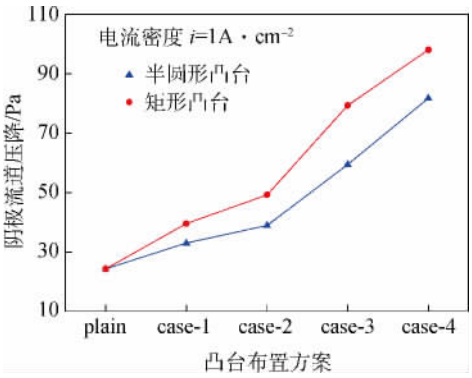

图 7　不同凸台布置方案下的阴极流道压降

Fig. 7　Cathode pressure drop (current density 1 A · cm^{-2})

在不同的孔直径和孔间距下，扩散层开孔对电池性能的影响：case-a，孔径 0.08 mm，孔间距 1 mm；case-b，孔径 0.10 mm，孔间距 1 mm；case-c，孔径 0.12 mm，孔间距 1 mm；case-d，孔径 0.10 mm，孔间距 0.5 mm。

2.2.2　结果与分析

（1）开孔对于扩散层排水性能的影响

图 8 给出了电流密度为 1 A · cm^{-2}时，在不同的扩散层开孔方案下，燃料电池阴极扩散层中间表面上的水饱和度分布。可以看出，岸对应的扩散层中的水饱和度比流道对应的扩散层中的水饱和度大，沿着流动方向，扩散层的水饱和度逐渐增加。这是由于流道中气体流速较大，有利于使反应生成的水向尾部流动并排出。另外，扩散层开孔以后，有利于生成的水分的排出，使扩散层中的水饱和度降低。特别是孔周围的扩散层区域。

（2）开孔对电池性能的影响

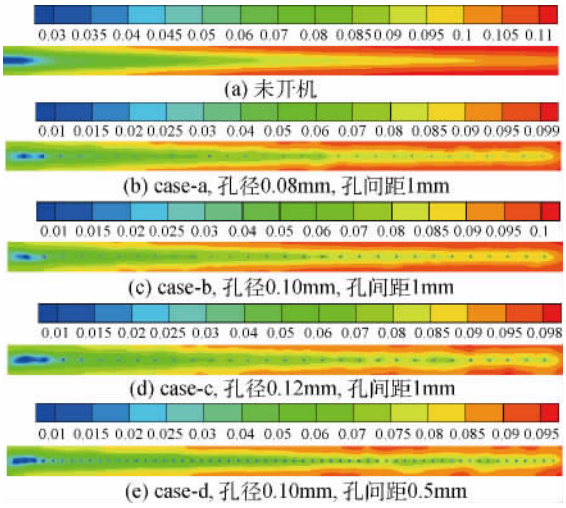

图 8　不同开孔方案下扩散层中间截面的水饱和度云图

Fig. 8　Water saturation contour of midsection of GDL

图 9 给出了在不同的开孔方案下，电流密度为 1 A · cm^{-2}时，燃料电池的性能比较。可见，在扩散层开孔之后，电池的性能均较原来的有所提高。同时在孔间距保持不变为 1 mm 时，孔径越小，电池性能越高，这是由于孔径越小，其毛细抽力作用体现越明显，更有利于水分在孔处的汇集排出。在孔径为 0.10 mm 不变时，孔的数目越多，电池性能越好。

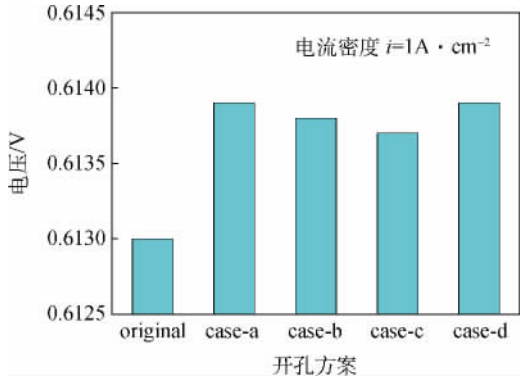

图 9　不同开孔方案下的电池性能比较

Fig. 9　Performance of different cases

3　结　论

通过理论分析和数值模拟燃料电池加凸台流道和扩散层开孔两种方式对质量传输的影响，得到以下结论。

（1）在流道中加凸台可以提高反应气体流速，强化流道中的对流传质过程，减少靠近扩散层处反应气

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

体消耗引起的浓差损失，提高燃料电池性能，并且凸台间距越小，性能提高越明显；但是，随着凸台的增加，阴极流道压降增大，增加了风机的寄生功率，加凸台流道对电池性能的提高效果需综合考虑。

（2）在扩散层开孔，利用开孔处的毛细抽力，使扩散层中的水分聚集，可以提高扩散层中的排水性能，强化扩散传质，提高燃料电池性能；同时，孔间距越小，孔径越小，电池性能越好。但是采用 Fluent 对其进行模拟时，受内部模型的限制，模拟结果性能提升不大。

加凸台流道和扩散层开孔均可提高燃料电池性能，但受模型限制，模拟结果和实际可能存在差别。应用新的模型，分析水分在电池内部的复杂传输过程是进一步的研究方向。

References

[1] Yi Baolian（衣宝廉）. Fuel Cell（燃料电池）[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 6

[2] Liu Fuli（刘福利）, Xin Mingdao（辛明道）. Simulation of flow and mass transfer characteristics in anode of PEMFC [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*（热科学与技术）, 2005, **4**（3）: 233-236

[3] Liu Xuan（刘璿）, Guo Hang（郭航）, Ye Fang（叶芳）, Ma Chongfang（马重芳）. Water flooding and mass transfer enhancement in flow channels of PEMFCs [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*（工程热物理学报）, 2006, **27**（s2）: 53-56

[4] Yu Jingrong（于景荣）, Yi Baolian（衣宝廉）, Han Ming（韩明）, Bi Kewan（毕可万）, Du Xuezhong（杜学忠）, Ming Pingwen（明平文）. Influence of the Nafion membrane thickness on the performance of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Chinese Journal of Power Sources*（电源技术）, 2001, **25**（6）: 384-386

[5] Kuo J K, Chen C K. Evaluating the enhanced performance of a novel wave-like form gas flow channel in the PEMFC using the field synergy principle [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, **162**（2）: 1122-1129

[6] Kuo J K, Yen T H, Chen C K. Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, **177**（1）: 96-103

[7] Kuo J K, Yen T H, Chen C K. Improvement of performance of gas flow channel in PEM fuel cells [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, **49**（10）: 2776-2787

[8] Gerteisen D, Heilmann T, Ziegler C. Enhancing liquid water transport by laser perforation of a GDL in a PEM fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, **177**（1）: 348-354

[9] Cheng Weiliang（程伟良）, Han Xiaojuan（韩晓娟）, Sun Hongyu（孙宏玉）. Field synergy action in mass transfer process [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*（中国电机工程学报）, 2005, **25**（13）: 105-108

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net