

2021-10-28

Numerical Study on the Influences of Flow Channel and Rib Width Ratio on the Performance of Gas Diffusion Layer

Rong-Qiang Wei

Shi-An Li

1. School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; 2. The Institute of New Energy Technologies for Ship Power System, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China; lishian@dlnu.edu.cn

Yi-Hui Liu

Zhi Yang

Qiu-Wan Shen

Guo-Gang Yang

Recommended Citation

Rong-Qiang Wei, Shi-An Li, Yi-Hui Liu, Zhi Yang, Qiu-Wan Shen, Guo-Gang Yang. Numerical Study on the Influences of Flow Channel and Rib Width Ratio on the Performance of Gas Diffusion Layer[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2021, 27(5): 579-585.

DOI: 10.13208/j.electrochem.201026

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol27/iss5/6>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

流道与肋宽比对气体扩散层性能影响的数值研究

魏荣强¹, 李世安^{1,2*}, 刘艺辉¹, 杨 治¹, 沈秋婉^{1,2}, 杨国刚^{1,2}

(1. 大连海事大学轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连海事大学新能源船舶动力技术研究院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 由于装配压力的作用, 气体扩散层产生形变, 对质子交换膜燃料电池性能产生影响。国内外学者主要研究气体扩散层形变后对燃料电池性能产生的影响, 但对不同流道宽度的燃料电池探究尚不明确。本文采用有限元法建立一个单流道质子交换膜燃料电池三维模型, 研究了不同装配压力以及三种流道与肋度比(流道与肋宽比分别为 3:2、1:1、2:3)下, 气体扩散层厚度变化规律以及它们对孔隙率和电导率的影响。结果显示, 随着装配压力的增加, 肋下气体扩散层厚度变薄, 孔隙率减小, 电导率增加; 在相同装配压力下, 流道与肋宽度比值越大, 肋下孔隙率越小, 电导率越大。

关键词: 气体扩散层; 装配压力; 质子交换膜燃料电池; 性能

1 引言

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 具有噪声小、功率密度高、零排放等优点, 因此被广泛应用在船舶、汽车、航空等领域。PEMFC 由阴、阳极双极板 (bipolar plate, BP)、阴、阳极气体扩散层 (gas diffusion layer, GDL)、阴、阳极催化层 (catalyst layer, CL)、质子交换膜 (proton exchange membrane, PEM) 组成, 其结构如图 1 所示。GDL 的材料一般由具有一定机械强度、良好导电率的石墨碳纸或碳布组成。GDL 有着支撑催化层和质子交换膜、为反应进行提供气体扩散和反应产生水的通道, 传递阳极氧化反应产生的电子和阴极还原反应所需的电子等作用。

在燃料电池的装配中, 需要一定的装配压力保证气密性及有效导电率, 装配压力会导致 GDL 变形^[1], 造成疏水性材料损失^[2]; 较小的装配压力可以提高电池的耐久性。过小的装配压力会导致电池

密封性不足、接触电阻过高等不良结果^[3], 较大的装配压力可以提高氢气利用率同时保障电池稳定运行^[4]; 随装配压力的增加, 液态水积累较多^[5]; 装配压力过大会导致孔隙率减小, 反应速率降低^[6]; 甚至导致膜电极 (membrane electrode assembly, MEA)

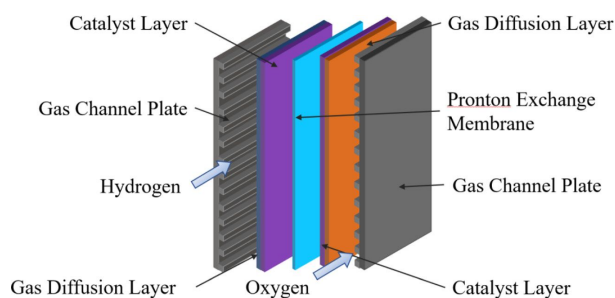


图 1 质子交换膜燃料电池结构图 (网络版彩图)
Figure 1 Proton exchange membrane fuel cell structure diagram (color on line)

引用格式: Wei R Q, Li S A, Liu Y H, Yang Z, Shen Q W, Yang G G. Numerical study on the influences of flow channel and rib width ratio on the performance of gas diffusion layer. *J. Electrochem.*, 2021, 27(5): 579-585.

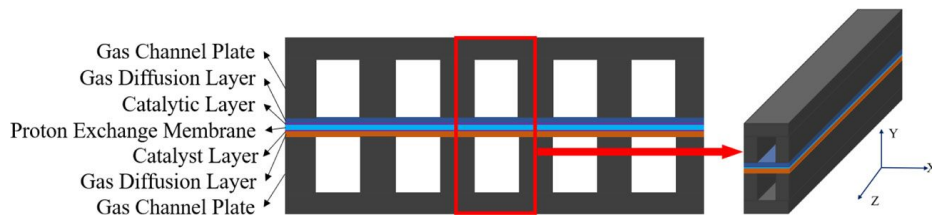


图 2 单流道三维模型(网络版彩图)

Figure 2 Three-dimensional model of single channel for fuel cells (color on line)

损坏^[7]。同时,不均匀分布的装配压力可以增强GDL内部对流,进而加强水分去除,增强导热率^[8],但GDL非均匀压缩导致电池内部反应速率不同,产生温度梯度,流道下的热接触电阻过高而导致反应速率下降,温度升高^[9]。因此,存在最佳的装配压力,在压缩GDL时,获得较低的接触电阻,同时拥有相对较高的孔隙率^[10]。

以往学者对GDL在装配压力下物理性质变化进行了细致全面的研究,但没有考虑在不同装配压力下,不同流道与肋宽比对GDL性能影响。本文基于有限元法建立三维模型,研究了三种不同流道与肋宽比在装配压力下的厚度变化及其孔隙率与电导率变化,综合分析孔隙率和电导率,有助于确定最佳的装配压力,提高PEMFC性能,对探究不同流道燃料电池最佳装配压力具有指导意义。

2 GDL 压缩模型

2.1 模型的建立

由于GDL的多孔结构,在装配压力作用下,GDL的形变最为明显。首先利用FEM建立单个直流道的三维模型,其中包含BP、GDL、CL和PEM,如图2所示。该直流道被认为是燃料电池平行流道居中的一条流道,保证装配压力均匀作用在阴、阳极BP表面。建立宽度为2mm的单流道模型,流道宽度与肋宽度比例分别为3:2,1:1,2:3,模型尺寸在表1中列出。

GDL材料为TGP-H-090,为了更加全面探究装配压力对GDL物理性能的影响,探究装配压力分别为0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2 MPa下模型变形结果。模型中的相关物理参数如表2所示。

2.2 基本假设

为简化各种细微因素的影响,在弹性力学问题研究中做了如下假设:物体是连续的;物体是完全弹性的;物体是均匀的和各向同性的;物体内无原

表 1 模型几何尺寸

Table 1 Model geometric dimensions

Parameter	Value/mm
Channel length	50
Channel width	1.2/1/0.8
Channel depth	1
Rib width	0.4/0.5/0.6
Double plate height	1.5
Catalytic layer thickness	0.01
Gas diffusion layer thickness	0.28

表 2 相关物理参数^[11]

Table 2 Relevant physical parameters^[11]

Component	Elasticity modulus/MPa	Poisson ratio	Porosity
BP	13000	0.26	0
GDL	5.54	0.256	0.8
PEM	232	0.253	-
CL	249	0.3	0.3

始应力。同时,假设左右两面是对称的边界条件。

2.3 模型的计算

从静力学、几何学以及物理学三个方面分析,解决弹性力学在三维空间中的位移问题,分别应用平衡微分方程、几何方程以及物理方程^[11]。

2.3.1 平衡微分方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

在上式中, σ_x 、 ∂_y 、 ∂_z 分别为不同方向的正应力, X 、 Y 、 Z 则分别为单位体积上作用的体积力。

2.3.2 几何方程

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (2)$$

上式中, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为不同方向的正应变, 而 γ_{xy} 、 γ_{yz} 、 γ_{zx} 等则为相应方向的剪应变。以上六个微分方程式又称为变形连续方程或者相容方程。其反应了六个应变分量与位移之间的关系。

2.3.3 物理方程

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \quad (3)$$

上式在弹性力学中又称为胡克定律, 其表示应变分量与应力分量之间的线性关系。其中, E 为拉压弹性模量, μ 为泊松比。

计算过程中, 利用 ANSYS 软件静力学模型, 在双极板上下表面施加均匀的装配压力, 左右两个面对称约束, 其余面为自由平面。因催化层的厚度仅为 0.01 mm, 且在实际中多采用喷涂方式与质子交换膜制备在一起形成膜电极, 故将催化层与质子交换膜结合到一起。GDL 与膜电极采用热压的方式制备成 MEA, 彼此之间无相对滑动, 设置其为面接触, 采用刚性面和柔性面的接触方法, 设置接触刚度为 1, 较小的接触刚度有助于收敛, 较大的接触刚度可以减少虚假穿透, 但会使刚度矩阵成为病态。通过守恒方程计算。流道采用 0.05 mm 的过渡圆角, 防止流道与 GDL 接触部分造成应力集中和单元过度扭曲。施加装配压力分别为 0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1 MPa、1.5

MPa、2 MPa。模型采用静力学结构分析, 采用严格收敛准则。所得结果导出, 得到 GDL 在不同压力下的厚度曲线, 更改模型尺寸, 得到不同流道与肋宽度比例的数据。

3 结果与讨论

3.1 装配压力对 GDL 形变的影响

不同的装配压力下, GDL 的变形如图 3 所示。由于 BP 和 PEM 的杨氏模量远大于 GDL 的杨氏模量, 催化层的厚度又非常薄, 因此装配压力产生的形变主要发生在 GDL。从图中我们可以看出, GDL 形变随装配压力的增加而增大, 流道与肋宽比越高形变程度越大。流道下方 GDL 在小压力和较小的流道与肋宽比情况下不会发生明显变化, 在较大装配压力和较大的流道与肋宽比的情况下, 由于材料力学性质会产生向上形变。

在图 3(A)中, 流道与肋宽比为 3:2, 装配压力为 0.2 MPa 时, 压缩比为 0.92; 装配压力为 1 MPa 时, 压缩比为 0.64, 装配压力为 2 MPa 时, 压缩比仅为 0.3, 由此可见, 随着装配压力增加, GDL 厚度变化减慢。图 3(B)中可以看出, 装配压力为 1 MPa 时, 压缩比为 0.72, 装配压力为 2 MPa 时, 压缩比为 0.45; 从图 3(C)中可以看出, 装配压力为 1 MPa 时, 压缩比为 0.76, 装配压力为 2 MPa 时, 压缩比为 0.54。不同的流道与肋宽比, 相同装配压力下, 压缩比差别很大。流道与肋宽比为 3:2 时, 在相同装配压力下, 压缩比变化速率比其他两种情况更快, 所以针对不同流道与肋宽度比例需要确定相应的装配压力保证其最佳的压缩比。

3.2 装配压力对 GDL 孔隙率的影响

装配压力的作用会导致 GDL 孔隙率的大小发生变化, 进而影响 PEMFC 的传质和液态水的传输。孔隙率减小会导致横向氧气传质阻力增加, GDL 内最小氧气浓度值减小。同时, 孔隙率降低会影响液态水的运输。孔隙率与 GDL 厚度存在函数关系, 如公式(4)所示:

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{\delta_0}{\delta_y} \quad (4)$$

ε 是变化后的孔隙率, δ_0 和 ε_0 是 GDL 初始的厚度和孔隙率, δ_y 是压缩变形后的 GDL 厚度。

孔隙率变化如图 4 所示。图 4(A)中, 流道与肋宽比为 3:2, 装配压力为 0.2 MPa 时, 肋下孔隙率变化为 0.02; 装配压力为 1 MPa 时, 肋下孔隙率变化为 0.11, 装配压力为 2 MPa 时, 肋下孔隙率变化为

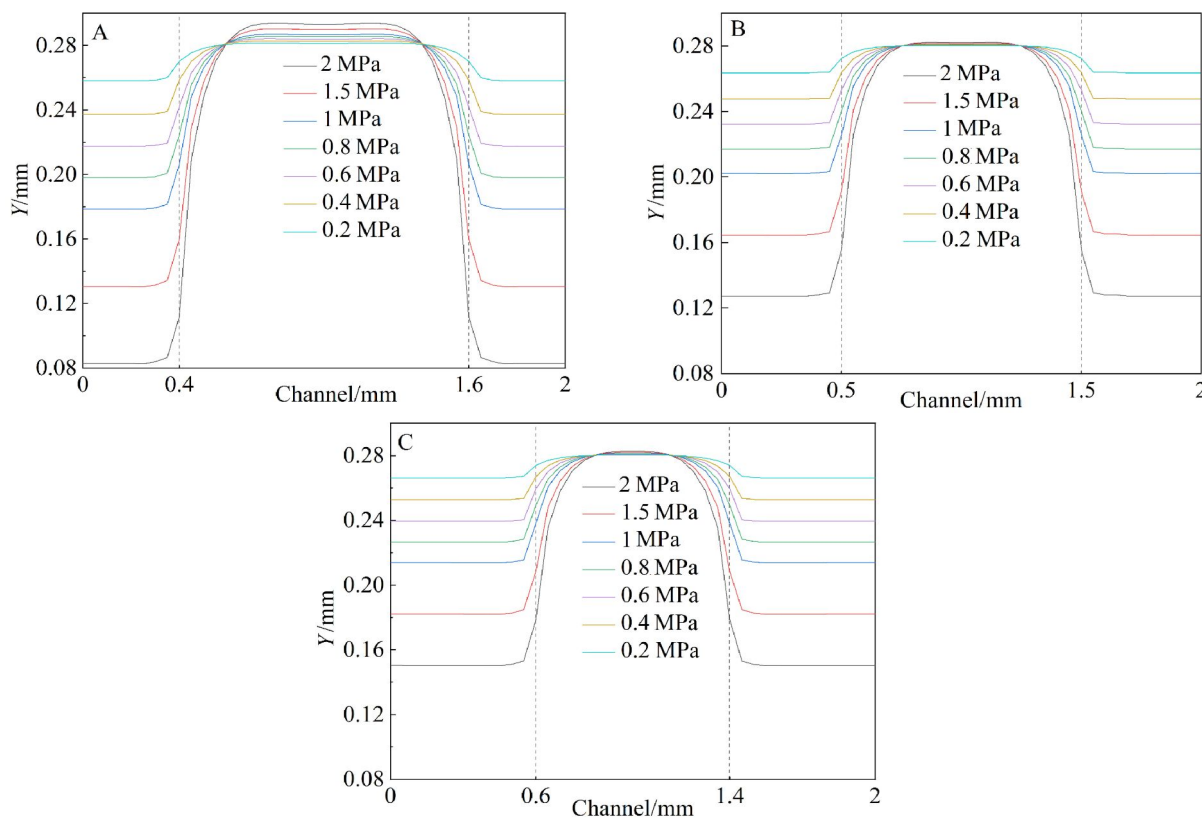


图 3 流道与肋宽度比为(A)3:2、(B)1:1、(C)2:3 在不同装配压力下 GDL 厚度曲线(网络版彩图)

Figure 3 GDL thickness curves under different assembly pressures with channel to land width ratio of (A) 3:2, (B) 1:1, (C) 2:3 (color on line)

0.48;孔隙率在 2 MPa 时变化速度快,远远超过在 1 MPa 时孔隙率变化速度,孔隙率变化与装配压力之间非线性关系,随着装配压力增大,肋下孔隙率变化速率加快。图 4(B)中,流道与肋宽比为 1:1,装配压力为 1 MPa 时,肋下孔隙率变化为 0.08,装配压力为 2 MPa 时,孔隙率变化为 0.24;图 4(C)中,装配压力为 1 MPa 时,肋下孔隙率变化为 0.06,装配压力为 2 MPa 时,肋下孔隙率变化为 0.17;相同的装配压力变化,不同的流道与肋宽比对应的孔隙率变化量不同。流道与肋宽比越大,孔隙率随装配压力变化速率越快。因此,更需要确定其最佳装配压力。在图 4 的三幅图中,流道下方的孔隙率几乎没有变化。

3.3 装配压力对 GDL 电导率的影响

装配压力导致 GDL 发生形变,影响其物理性质。电导率和孔隙率之间存在密切关系,由 GDL 形变及其孔隙率变化规律可知流道下方孔隙率几乎不变,故只研究其肋下电导率变化。可通过孔隙率计算电导率:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma(1-\varepsilon)^{1.5} \tag{5}$$

式中, σ 是原材料电导率,由公式可以算出形变后电导率与形变前电导率比值与装配压力以及不同流道与肋宽度比之间的关系,得到电导率变化如图 5 所示。图 5 中曲线更容易观察其电导率随装配压力的变化规律,相同装配压力下,流道与肋宽度比增加,电导率在增加。流道与肋宽度之比为 2:3,装配压力 2 MPa 时,电导率是 1.5 MPa 时的 1.3 倍。流道与肋宽度之比为 3:2,装配压力 2 MPa 时,电导率是 1.5 MPa 时的 2 倍,电导率变化速率加快。

将肋下孔隙率和电导率综合分析,如图 6 所示,根据肋下电导率与孔隙率的变化趋势,随装配压力的增加,电导率曲线与孔隙率曲线会存在交点。流道与肋宽度比值为 3:2 时,在 1.5 ~ 2 MPa 时存在交点,其最佳装配压力可能在此区间。

4 结 论

在装配压力作用下,GDL 发生形变,导致其物

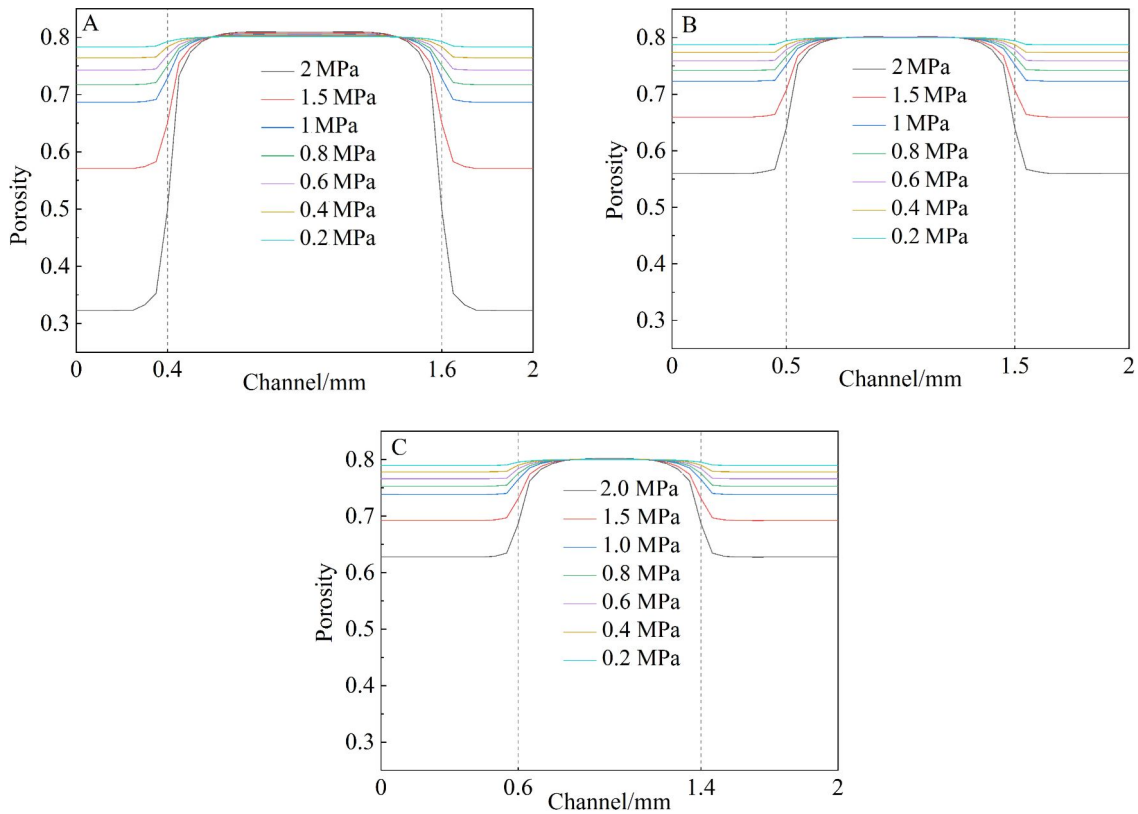


图 4 流道与肋宽度比为(A)3:2、(B) 1:1、(C) 2:3 在不同装配压力下 GDL 孔隙率曲线(网络版彩图)

Figure 4 GDL porosity curves under different assembly pressures with channel to land width ratio: (A) 3:2, (B) 1:1, (C) 2:3 (color on line)

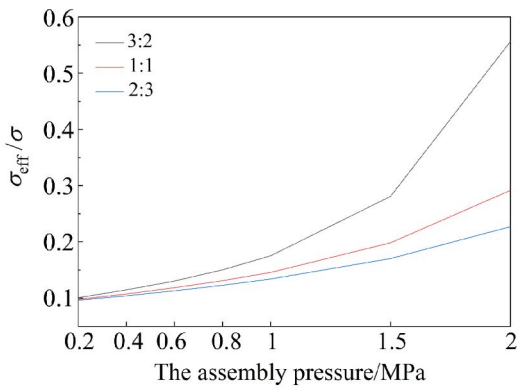


图 5 不同装配压力下肋下电导率曲线(网络版彩图)

Figure 5 Subcostal conductivity curves under different assembly pressures (color on line)

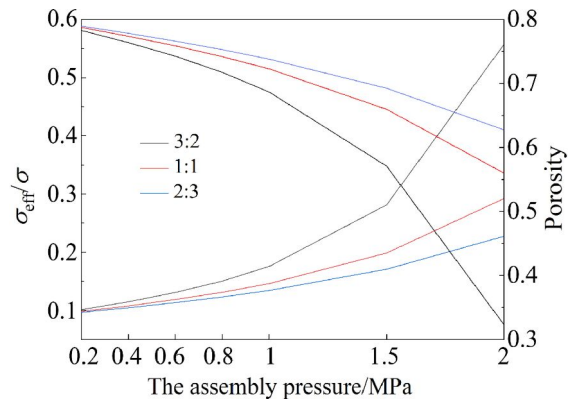


图 6 不同装配压力下肋下电导率与孔隙率曲线(网络版彩图)

Figure 6 Subcostal conductivity and porosity curves under different assembly pressures (color on line)

理参数发生变化,进而影响 PEMFC 性能。本文研究了不同装配压力下,不同流道肋宽比对 GDL 物理参数的影响,主要得出如下结论:

(1) GDL 形变量随流道与肋宽度比例增加而增大,随装配压力的增加而增大,但变化速率逐渐减慢。

(2) GDL 肋下的孔隙率随着装配压力的增加而减小,且减小速率不断加快。相同装配压力下,流道与肋宽比越大,孔隙率变化越显著。

(3) 电导率随着装配压力的增加而增大,且变化速率随装配压力的增加而加快; 相同装配压力

下,流道与肋宽度的比值越大,电导率越大。

将肋下的孔隙率和电导率综合分析,当流道与肋宽度比值为 3:2 时,在 1.5 ~ 2 MPa 时存在交点,根据孔隙率与电导率之间存在平衡关系,其最佳装配压力可能在此区间,将在下一步工作中分析装配压力与电池性能之间的关系,验证此猜想。

参考文献(References):

- [1] Bazylak A, Sinton D, Liu Z S, Djilali N. Effect of compression on liquid water transport and microstructure of PEMFC gas diffusion layers[J]. *J. Power Sources*, 2006, 163(2): 784-792.
- [2] Escribano S, Blachot J F, Etheve J. Characterization of PEMFCs gas diffusion layers properties[J]. *J. Power Sources*, 2005, 156(1): 8-13.
- [3] Lee W K, Ho C H, Van Zee J W, Murthy M. The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell[J]. *J. Power Sources*, 1999, 84(1): 45-51.
- [4] Yim S D, Kim B J, Sohn Y J, Yoon Y G, Park G G, Lee W Y, Kim C S, Kim Y C. The influence of stack clamping pressure on the performance of PEM fuel cell stack[J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2009, 10(2): S59-S61.
- [5] Wu Y, Cho J I S, Lu X, Rasha L, Neville T P, Millichamp J, Ziesche R, Kardjilov N, Markotter H, Shearing P, Brett D J L. Effect of compression on the water management of polymer electrolyte fuel cells: An in-operando neutron radiography study[J]. *J. Power Sources*, 2019, 412: 597-605.
- [6] Toghyani S, Nafchi F M, Afshari E, Hasanpour K, Bani-asadi E, Atyabi S A. Thermal and electrochemical performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell under assembly pressure on gas diffusion layer[J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2018, 43(9): 4534-4545.
- [7] Tnymaz I, Benli M. Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. *Energy*, 2010, 35(5): 2134-2140.
- [8] Yan X H, Lin C, Zheng Z F, Chen, J R, Wei G H, Zhang J L. Effect of clamping pressure on liquid-cooled PEMFC stack performance considering inhomogeneous gas diffusion layer compression[J]. *Appl. Energy*, 2020, 258: 114073.
- [9] Hottinen T, Himanen O. PEMFC temperature distribution caused by inhomogeneous compression of GDL[J]. *Electrochem. Commun.*, 2006, 9(5): 1047-1052.
- [10] Zhou P, Wu P C. Numerical study on the compression effect of gas diffusion layer on PEMFC performance[J]. *J. Power Sources*, 2007, 170(1): 93-100.
- [11] Zhou Y B(周怡博). Study on the deformation of the diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell and its influence on the transport characteristics and performance of the cell[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

Numerical Study on the Influences of Flow Channel and Rib Width Ratio on the Performance of Gas Diffusion Layer

Rong-Qiang Wei¹, Shi-An Li^{1,2*}, Yi-Hui Liu¹, Zhi Yang¹,
Qiu-Wan Shen^{1,2}, Guo-Gang Yang^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. The Institute of New Energy Technologies for Ship Power System, Dalian Maritime University,
Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has the advantages of low noise, high power density, and zero emission. It is widely used in ships, automobiles, aviation and other fields. PEMFC is composed of bipolar plate (BP), gas diffusion layer (GDL), catalytic layer (CL) and proton exchange membrane (PEM). GDL has a supporting catalytic layer and proton exchange membrane, which provides gas diffusion for the reaction and a channel for the reaction to produce water, and transmits the anodic oxidation reaction. In the assembly of fuel cells, a certain assembly pressure is required to ensure air-tightness and effective conductivity. The assembly pressure will cause the GDL deformation and the loss of hydrophobic materials; however, the assembly pressure can improve the durability of the battery. Too small assembly pressure will lead to insufficient battery sealing, high contact resistance and other undesirable results. Larger assembly pressure can improve the hydrogen utilization rate and ensure the stable operation of the battery as the assembly pressure increases, Liquid water accumulates more; excessive assembly pressure leads to reduced porosity and lower reaction rate, and even damage of membrane electrode assembly (MEA). Therefore, there is an optimal assembly pressure to obtain lower contact resistance when compressing GDL. At the same time, it has a relatively high porosity. Scholars at home and abroad have mainly studied the effect of GDL deformation on the battery performance, but the exploration of fuel cells with different flow channel widths is not clear. This paper uses the finite element method to establish a single flow. Three-dimensional model of the PEMFC channel has been studied, and the GDL thickness changes and their impacts on the pores under different assembly pressures and three kinds of flow channel to rib ratios (the channel and rib width ratios of 3:2, 1:1, 2:3) were investigated. The results show that: (1) GDL deformation increased with the increases of the ratio of flow channel to rib width and assembly pressure, but the rate of change gradually slowed down. (2) Under the ribs, the porosity of GDL decreased with the increase of assembly pressure, and the decreased change rate continued to be accelerated; under the same assembly pressure, the greater the ratio of channel to rib width, the more significant the porosity change. (3) Conductivity increased with the increase of assembly pressure, and the rate of change was also accelerated with the increase of assembly pressure; under the same assembly pressure, the greater the ratio of the flow channel to the rib width, the greater the electrical conductivity. When the ratio of channel to rib width was 3:2, there was an intersection point at 1.5 ~ 2.0 MPa. According to the balanced relationship between porosity and conductivity, the optimal assembly pressure may be in this interval, which needs to be further verified.

Key words: gas diffusion layer; assembly pressure; proton exchange membrane fuel cell; performance