

7-2-2020

Effect of Assembly Force on Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Yibo Zhou

1. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300072, China;;2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

Jianjian Wang

1. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300072, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

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

Effect of Assembly Force on Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Abstract

Abstract: A three-dimensional multi-flow channel proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) model has been developed to investigate the deformation of gas diffusion layer (GDL) with different assembly force and different contact ratio of channel. *The results indicate that the GDL under the land part changes significantly while the central region under the flow channel almost has no deformation with increasing assembly force. When the contact ratio of channel is not 100%, the deformation of GDL is not symmetrical due to the shear stress, and the thickness of GDL under the flow channel even exceeds its initial thickness, which produces the phenomenon of "embossment" in the flow channel. And with the increasing of assembly force, this phenomenon is more obviously.* Finally, the porous structure of gas diffusion layer changes and thus the transport parameters such as porosity and permeability begin to change, which will bring new problems for water and thermal management of PEMFC.

Keywords

proton exchange membrane fuel cell, gas diffusion layer, assembly force, contact ratio of flow channel

Recommended Citation

Zhou Yibo, Wang Jianjian. Effect of Assembly Force on Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 991-996.

装配压力对燃料电池扩散层影响的研究

周怡博^{1,2}, 王 Jianjian¹

(1. 中国汽车技术研究中心, 天津 300072; 2. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 通过建立三维多流道质子交换膜燃料电池模型, 对装配压力和流道重合度影响下气体扩散层产生的弹性形变进行研究。研究表明, 随着装配压力的增加, 脊部下方的气体扩散层会发生不同程度形变, 而流道下方则基本不发生形变。当流道重合度不为 100% 时, 气体扩散层的形变会产生了一定程度的偏移, 并使流道下方气体扩散层最大厚度超过其初始厚度, 在流道中产生“堆积”现象, 而且这种现象随着装配压力的增加而越来越严重。最终导致气体扩散层内部多孔结构发生变化, 从而引起孔隙率、渗透率等传输参数的变化, 给燃料电池水热管理带来新的问题。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 气体扩散层; 装配压力; 流道重合度

中图分类号: TK91

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 04-0991-06

Effect of Assembly Force on Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Zhou Yibo^{1,2}, Wang Jianjian¹

(1. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A three-dimensional multi-flow channel proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) model has been developed to investigate the deformation of gas diffusion layer (GDL) with different assembly force and different contact ratio of channel. *The results indicate that the GDL under the land part changes significantly while the central region under the flow channel almost has no deformation with increasing assembly force. When the contact ratio of channel is not 100%, the deformation of GDL is not symmetrical due to the shear stress, and the thickness of GDL under the flow channel even exceeds its initial thickness, which produces the phenomenon of “embossment” in the flow channel. And with the increasing of assembly force, this phenomenon is more obviously.* Finally, the porous structure of gas diffusion layer changes and thus the transport parameters such as porosity and permeability begin to change, which will bring new problems for water and thermal management of PEMFC.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; gas diffusion layer; assembly force; contact ratio of flow channel

引言

质子交换膜燃料电池 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) 由于具有能量转换效

率高、工作温度低、功率密度高、启动快、对环境友好等优点, 被广泛认为是未来最有发展前途的清洁能源转换装置。而在燃料电池各组件通过装配压力连接在一起的过程中, 如果装配压力过低, 会导致气体或液体泄露; 如果装配压力过高, 则会导致气体扩散层 (Gas Diffusion Layer, GDL) 多孔结构的破坏, 进而会影响到 GDL 的传输特性, 给水热管理带来新的问题。因此, 针对装配压力对燃料电池



收稿日期: 2014-11-13 修回日期: 2015-01-23;
作者简介: 周怡博(1987-), 男, 天津, 博士, 研究方向为质子交换膜燃料电池水热管理、电堆性能优化与计算机仿真; 王 Jianjian(1987-), 男, 天津, 硕士, 助理, 研究方向为汽车行业市场营销与战略规划。

<http://www.china-simulation.com>

GDL 影响的研究,吸引了越来越多研究者的目光。

早在 1999 年,美国的 Lee 等^[1]第一次利用实验方法指出由装配压力产生的压缩载荷是 PEMFC 性能的函数,即装配压力过高或者过低都会影响电池的性能。Kandikar 等^[2]则利用光学方法研究了平行流道单电池中 GDL 受到挤压后浸入流道的情況,认为流道内部气体压力分布不均匀造成了电池性能的下降。此外,研究者们还通过实验进一步研究了装配压力对 GDL 接触电阻^[3],导热系数^[4]等宏观参数的影响。

然而由于在技术和成本上的限制,数值仿真技术被更多的利用在燃料电池研发过程中。

Roshandel 等^[5]建立了一个形式为 $\sin^{2n}(x)$ 的函数来近似表示孔隙率的分布模型,模拟装配压力以及水对 GDL 孔隙率变化的影响。Su 等人^[6]在模型中分别模拟了均匀分布未被压缩的 GDL,均匀分布被压缩 GDL 以及不均匀分布的 GDL 情况。此外,还有研究者关注了极板的材料和形状变化带来的影响^[7]以及装配压力对电堆性能的影响^[8-9]。

本文建立了包含有 3 个流道的 PEMFC 单电池模型,深入模拟研究由于装配压力变化引起的燃料电池内部 GDL 发生的力学变形,得到装配压力大小对 GDL 最大变形量的影响,以及由于流道重合度不同造成的 GDL 变形,并确定了装配压力和流道重合度对 GDL 变形的影响规律,为进一步深入研究 GDL 内部孔隙率、渗透率、扩散率等传输参数的变化,以及揭示装配压力影响下 PEMFC 内部气液两相流动和传热传质问题提供了重要的理论基础。

1 模型建立

1.1 模型计算域

图 1 为本文建立的三维多流道 PEMFC 模型,其中包括了阴阳两极的极板、流道、扩散层、催化层以及质子交换膜,并假设阴阳两极的流道和脊部位置是对称分布的。

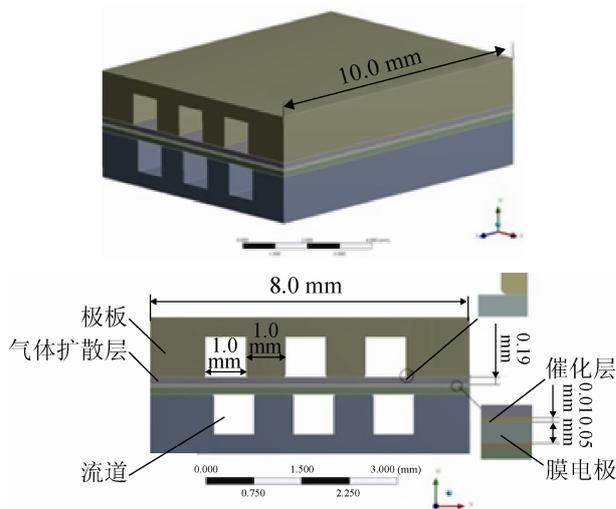


图 1 模型计算域

由于在燃料电池的装配过程中,装配压力是通过作用在端板上均匀分布的螺栓来施加的,而其中阴阳极不同层就会发生一定程度的偏移,即阴阳极的流道不可能完全重合。因此,本文首先定义一个流道重合度的概念,即:在燃料电池中,上极板流道与下极板流道在流道宽度方向上重合的长度与流道宽度的比为流道重合度。如图 2 所示,上下极板重合的宽度为 0.8 mm,而流道的宽度为 1.0 mm,则流道重合度为:

$$\frac{0.8 \text{ mm}}{1.0 \text{ mm}} \times 100\% = 80\% \quad (1)$$

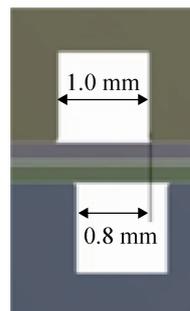


图 2 流道重合度示意图

1.2 模型中的基本假设

GDL 通常是由导电的碳纤维通过粘结剂结合形成具有高孔隙度的多孔材料,其内部碳纤维束的交织与孔隙的大小是随机分布的。而如果很准确的考虑到各种细微因素的影响,问题就会变得很

复杂而无法解决。由于本研究是针对 GDL 在外力载荷作用下发生的应力、应变以及位移变化情况, 因此需要通过以下假设来利用线性弹性力学相关概念对 GDL 压缩变形问题进行具体分析:

(1) GDL 是连续的。这样, 一些物理量如应力、应变、位移等在物体中的分布就可视为连续的, 并可用坐标的连续函数表示。

(2) GDL 是完全弹性的。完全弹性的物体服从胡克定律, 即应变与应力成正比。

(3) GDL 是均匀的和各向同性的。因此介质的物理性质如弹性模量、泊松比等常数不随坐标和方向而变化。

(4) GDL 的位移和变形是微小的。因此在建立 GDL 受力作用后的平衡方程时, 弹性力学中的微分方程可简化为线性关系而利于计算。

(5) GDL 内无原始应力。由弹性理论计算的应力仅是由于外加载荷作用的结果。

1.3 模型中的守恒方程

本研究利用弹性力学方法解决空间三维问题时, 必须从 3 个方面加以分析: 静力学方面、几何学方面以及物理学方面, 并最终导出 GDL 内应力分量与体力、面力分量之间的关系, 应变与位移之间的关系以及应变与应力分量之间的关系, 分别为平衡微分方程、几何方程以及物理方程。

$$\frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} + F_i = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ii}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jj}}{\partial x_i^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{ii} = \lambda e + 2G\varepsilon_{ii} \quad (4)$$

式中, σ_{ii} (Pa) 为正应力, τ_{ij} (Pa) 为切应力, F_i (Pa) 为体力, ε_{ii} 为正应变, γ_{ij} 为切应变, G (Pa) 为剪切弹性模量, λ (Pa) 为拉梅常数, 如下所示。

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (6)$$

$$\gamma_{ij} = \tau_{ij} / G, e = \varepsilon_i + \varepsilon_j + \varepsilon_k \quad (7)$$

式中: E (Pa) 是杨氏模量; μ 是泊松比; i, j, k 分别代表 x, y, z 方向。本节中给出了弹性力学空间三维问题的 15 个基本方程和未知量, 在求解这些未知量时, 并非同时解出它们, 而是将某些未知量先行求出, 在根据它们由这些基本方程解出其他未知量。

1.4 GDL 传输参数方程

对于多孔结构的 GDL 来讲, 装配压力对其厚度的影响必然会进一步影响到其内部孔隙率、渗透率等传输参数。并进而影响到 PEMFC 中液态水的分布情况, 最终对电池性能造成一定程度的影响。因此, 本研究得到的装配压力对 GDL 变形情况的影响, 将进一步利用相关经验公式对 GDL 内部孔隙率、渗透率等传输参数的变化进行计算, 并在接下来的研究中建立 GDL 的压缩变形模型, 将该模拟结果作为下一步计算流体力学分析的初始条件, 为进一步分析燃料电池内部的传输情况和整体输出性能提供支持。其中孔隙率的变化可以根据式(8)中的厚度变化来进行计算^[10]:

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{\delta_0}{\delta_y} \quad (8)$$

式中: ε 是变化后的孔隙率; δ_0 (m) 和 ε_0 是 GDL 初始的厚度和孔隙率; δ_y (m) 是压缩变形后的 GDL 厚度。此外, GDL 中的相关传输参数都是孔隙率的函数, 渗透率的计算公式与 Carman-Kozeny 模型有关。Tomadaki 和 Robertson 对此模型进行了简述^[11]并且与其他文献资料进行了对比, 基于这个多孔介质渗透率的综合模型, 提出了绝对渗透率可以由以下公式计算得到:

$$K_0 = \frac{\varepsilon(\varepsilon - 0.037)^{2.661} d_f^2}{8(\ln \varepsilon)^2 0.975(1.661\varepsilon - 0.0037)^2} \quad (9)$$

其中, d_f (m) 是 GDL 中固体碳纤维的直径。一般采用东丽系列 TPG-H 碳纸的情况下, 此参数为 $9.75\mu\text{m}$ 。有效的气体扩散率在控制模型中起着重要作用。现在 Bruggeman 的校正系数被广泛使用, 以

得到气体在 GDL 中的有效扩散系数:

$$D^{eff} = D_0 \varepsilon^{1.5} \quad (10)$$

式中: D_0 是初始扩散率; ε 是有效孔隙率。GDL 中多孔碳纸中的电子传导对于燃料电池总体性能同样起到了至关重要的作用。由于其也是孔隙率的函数, 本文选择广泛应用于燃料电池模型中的 Bruggeman 的方法来近似估算 GDL 中的电导率:

$$\kappa^{eff} = \kappa_0 (1 - \varepsilon)^{1.5} \quad (11)$$

由以上的公式可以看出, GDL 厚度的变化会引起其内部孔隙体积的变化, 继而会引起渗透率、扩散系数等传输参数的变化。

1.5 边界条件

本文在计算过程中, 除了给出在上下表面均匀分布的装配压力以外, 还假设计算域左右两个表面是对称边界条件, 并且其他面为自由表面。即在计算域全部边界上的面力是已知的, 从而通过以上的守恒方程计算得到 GDL 的位移变化。此外, 考虑到在装配压力作用下, 流道脊部下方与 GDL 接触的地方会产生一定的应力集中, 这对于模拟计算是一个很大的阻碍, 因此在此处设置了半径为 0.05 mm 的过渡圆角, 并且在计算过程中忽略了剪切力造成的扭曲现象以及各层之间的相对滑动现象。

2 结果与讨论

2.1 不同装配压力对 PEMFC 扩散层最大变形量的影响

图 3 为不同装配压力下 GDL 的变形情况。如图所示, 随着装配压力的不断增大, 脊部下方的 GDL 发生了明显的变形, 但是流道下方的 GDL 则几乎没有发生任何变化。这是由于 100% 流道重合度使得阴阳两极的脊部和流道是完全对称的, 在这种情况下, 施加在双极板上的装配压力就完全通过脊部传递到 GDL 表面, 而流道下方的 GDL 则不会受到太大的装配压力而产生变形。

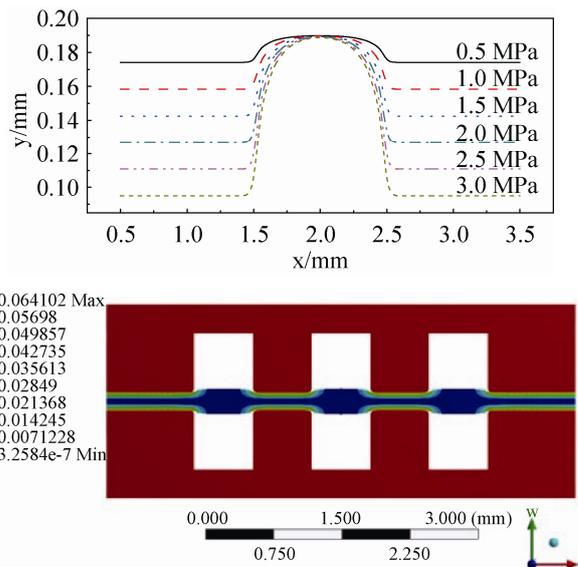


图 3 100% 流道重合度模型 GDL 变形情况

2.2 流道重合度对 GDL 变形的影响

本研究充分考虑了 0%~100% 共 11 种不同流道重合度在不同装配压力下的变形情况。图 4 为不同流道重合度的 GDL 随着装配压力变化而产生的最大变形量分布情况。从图 4 中可以看出, 在相同的重合度下, 随着装配压力的逐渐增加, GDL 的最大变形量是不断增加的, 并且随着流道重合度的增加, 这种变化的趋势是缓慢变小的。此外, 在同一个装配压力下, 随着流道重合度的逐渐减小, GDL 的最大变形量是逐渐增加的, 而且这种现象随着装配压力的增加越来越明显。这是由于流道重合度的不断减小, 造成了流道与脊部的不对称分布逐渐增加, 加载在极板两边的装配压力不会全部转化为正应力, 就必然会增加剪切应力的产生; 随着不对称性的逐渐增加, 上下极板接触面积的不断减小, 使得接触处压强逐渐增大从而导致变形量的增大。

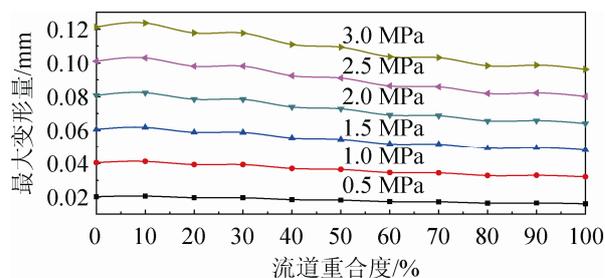


图 4 流道重合度对 GDL 变形的影响

以上研究表明, 流道重合度越大, 在相同的装配压力下, GDL 的最大变形量就越小, 对于物质的传输越有利。但是与此同时, 如果流道重合度过大, 对于流道间的横向流动又会有很大影响, 对于物质的传输又会有抑制作用。为了能够更好的研究流道重合度对 GDL 带来的影响, 本文进一步分析了不同情况下, 装配压力对整个 GDL 带来的变形情况。图 5 所示是在 1.0 MPa 装配压力下, 具有典型代表意义的 0%、50% 流道重合度的变形云图。从图中可以看出, 对于 0% 流道重合度的模型来说, 其在各流道下方 GDL 的变形是基本相同的, GDL 在阴阳两极的变形也是对称的, 但是对于 50% 流道重合度的模型来说, GDL 在流道中的变形量并不是对称的。

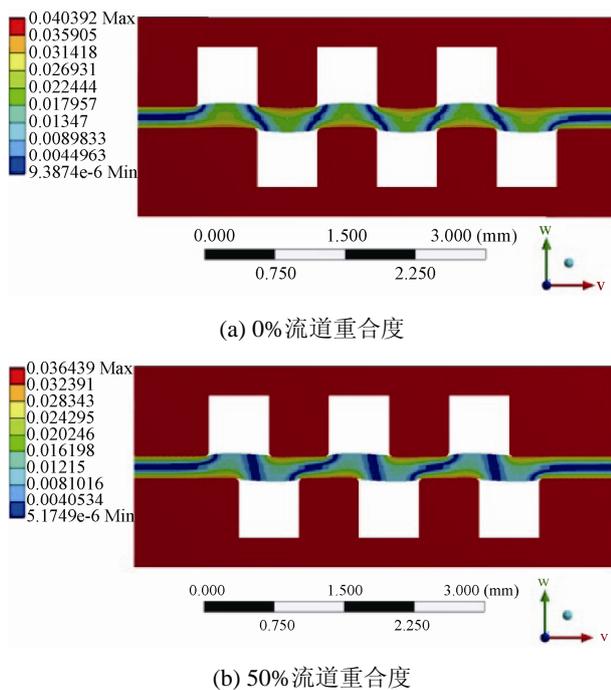


图 5 1.0MPa 装配压力下的 GDL 变形云图

图 6 对 1.0 MPa 压力时 11 种不同流道重合度的模型进行了对比。从图中可以看出, 当流道重合度为 100% 时, 流道下方 GDL 的最大厚度基本保持不变, 而其他流道重合度的模型中, 流道下方 GDL 的最大厚度都超过了其初始厚度 0.19 mm, 并在流道中产生了“堆积”现象。例如: 60% 流道

重合度的模型其流道下方 GDL 的最大厚度为 0.198 mm; 而 0% 流道重合度的模型其流道下方 GDL 的最大厚度更是达到了 0.211 mm。这是因为只有在流道重合度为 100% 时, 装配压力才能够比较对称的作用在 GDL 上, 即装配压力基本上都是以正应力的形式作用在脊部下方 GDL 上, 因此, 在流道下方 GDL 处受到很小的应力, 所以基本不发生变形。而对于流道重合度为 0% 的模型, 由于其阴阳两极脊部和流道的交错对应, 造成了在这种情况下, 流道下方 GDL 受到了很大的正应力, 由此而造成了流道下方的 GDL 最大厚度很大, 从图 6 中还可以发现, 尽管其变形量很大, 但是仍然是对称分布的, 这就说明了这种情况下, 流道下方 GDL 处受到的仍然是正应力。而对于其他流道重合度的模型, 流道下方 GDL 的变形是不对称的, 并且随着流道重合度的不断减小, 这种不对称性更加明显。这是由于装配压力不但在垂直流道方向产生正应力, 而且产生了一定的切应力, 并且切应力的大小是随着流道重合度的增加而减小, 直到 100% 时, 突然减小到一定范围而对 GDL 的变形不产生影响。

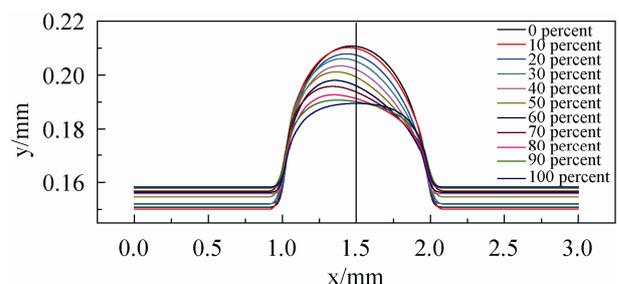


图 6 1.0 MPa 装配压力下不同流道重合度的 GDL 变形曲线图

图 7 所示为流道重合度为 50% 时, 不同装配压力下, GDL 的变形情况。从图中可以看出, 随着装配压力的不断增加, 流道下方 GDL 的厚度也逐渐增加, 而且 GDL 的不对称性越来越明显, 当装配压力达到 3.0 MPa 时, 流道下方的 GDL 的最大厚度达到了 0.22 mm, 比初始的 GDL 厚度增加了 17.8%。

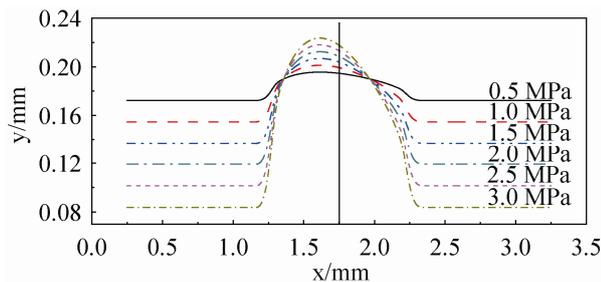


图 7 50% 流道重合度的变形曲线

3 结论

本文建立了三维多流道的 PEMFC 全电池模型, 对受到装配压力影响后 PEMFC 中 GDL 产生的弹性变形进行了具体研究。并通过定义“流道重合度”概念, 对流道重合度引起的 GDL 变形特性的影响进行了探索和研究。研究表明, 对于阴阳两极对称分布的流道和脊部来讲, 随着装配压力的不断增加, 脊部下方的 GDL 会发生不同程度的变形, 而流道下方的 GDL 则基本不发生变形。但是当流道不能够完全对称分布, 即流道重合度不为 100% 时, 流道下方 GDL 的最大厚度都超过了其初始厚度, 在流道中产生了“堆积”现象。并且这种现象随着装配压力的增加而更加明显。此外, 由于剪切应力的作用, 在流道下方的 GDL 变形并不是对称发生的, 而是发生了一定程度的偏移。这种不对称性变形会对 GDL 的孔隙率、渗透率等传输参数产生一定的影响, 从而使得物质传输遭到破坏, 并影响燃料电池内部液态水的分布情况以及电池性能。因此, 本研究得到的装配压力对 GDL 变形情况的影响, 对于今后研究中充分考虑并建立 GDL 压缩变形模型, 以及进一步分析燃料电池内部的传输情况和整体输出性能提供良好的理论和数据支持。对进一步深入分析 PEMFC 内部的水热管理问题可以起到重要的理论意义和指导价值。

参考文献:

[1] Lee W K, Ho C H, Van Zee J W, et al. The Effects of Compression and Gas Diffusion Layers on the Performance of a PEM Fuel Cell [J]. Journal of Power

Sources (S0378-7753), 1999, 84(1): 45-51.

- [2] Kandlikar S G, Lu Z, Lin T Y, et al. Uneven Gas Diffusion Layer Intrusion in Gas Channel Arrays of Proton Exchange Membrane Fuel Cell and Its Effects on Flow Distribution [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2009, 194(1): 328-337.
- [2] Mason T J, Millichamp J, Shearing P R, et al. A Study of the Effect of Compression on the Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cells Using Electrochemical Impedance Spectroscopy and Dimensional Change Analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2013, 38(18): 7414-7422.
- [4] Sadeghi E, Djilali N, Bahrami M. Effective Thermal Conductivity and Thermal Contact Resistance of Gas Diffusion Layers in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. Part 1: Effect of Compressive Load [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2011, 196(1): 246-254.
- [5] Roshandel R, Farhanieh B, Saievar-Iranizad E. The Effects of Porosity Distribution Variation on PEM Fuel Cell Performance [J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2005, 30(10): 1557-1572.
- [6] Su Z Y, Liu C T, Chang H P, et al. A Numerical Investigation of the Effects of Compression Force on PEM Fuel Cell Performance [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2008, 183(1): 182-192.
- [7] Mikkola M, Tingelof T, Ihonen J K. Modelling Compression Pressure Distribution in Fuel Cell Stacks [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2009, 193(1): 269-275.
- [8] Bates A, Mukherjee A, Hwang S, et al. Simulation and Experimental Analysis of the Clamping Pressure Distribution in a PEM Fuel Cell Stack [J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2013, 15(38): 6481-6493.
- [9] Carral C, Mele P. A Numerical Analysis of PEMFC Stack Assembly through a 3D Finite Element Model [J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2014, 39(9): 4516-4530.
- [10] Jiao K, Park J, Li X. Experimental investigations on liquid water removal from the gas diffusion layer by reactant flow in a PEM fuel cell [J]. Applied Energy (S0306-2619), 2010, 87(9): 2770-2777.
- [11] Tomadakis M M, Robertson T J. Viscous permeability of random fiber structures: comparison of electrical and diffusional estimates with experimental and analytical results [J]. Journal of Composite Materials (S0021-9983), 2005, 39(2): 163-188.