

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.229

引用格式: 邵轩宇, 黄治平, 许杰, 等. 质子交换膜燃料电池微孔层微结构力学特性分析[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(1): 40-50.



质子交换膜燃料电池微孔层微结构力学特性分析

邵轩宇^{1a}, 黄治平^{1a}, 许杰^{1b}, 张恒^{1a,2}, 詹志刚^{1a,2}

(1. 武汉理工大学 a. 材料复合新技术国家重点实验室; b. 汽车工程学院, 武汉 430070;
2. 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心, 广东 佛山 528200)

摘要: 微孔层在质子交换膜燃料电池中起着水-气-热-电传输的重要作用, 在机械应力作用下的变形及微结构的破坏将严重影响这种传输作用。通过实验制备微孔层并进行表征, 量测其应力-应变关系; 基于实验表征获得的特性参数, 随机数值重构出微孔层的三维微观结构; 使用有限元方法模拟其在不同机械作用下的形变, 分别获得碳颗粒和聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)在不同应变下的位移-应力分布。结果表明: 机械作用会使微孔层微结构产生显著应变, 且位于应力施加侧表面应力和应变最大, 更易产生应力集中现象; 随着机械应变的增加, 在受力方向上, 应力会呈指数形式增大; 当应变为 10% 时, 碳颗粒和 PTFE 上的应力的最大值约为 31.385 MPa 和 14.873 MPa; 当应变增加到 40% 时, 应力的最大值变为 160.03 MPa 和 96.165 MPa, 此时应力集中最为明显; 微孔层中应力集中区域会随着应变的增大而明显变大。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 微孔层; 机械应力; 有限元分析

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)01-040-11

Mechanical properties and microstructural response of the microporous layer in PEMFCs

SHAO Xuanyu^{1a}, HUANG Zhiping^{1a}, XU Jie^{1b}, ZHANG Heng^{1a,2}, ZHAN Zhigang^{1a,2}

(1a. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing; 1b. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China; 2. Foshan Xianhu Laboratory of the Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Foshan, Guangdong 528200, P. R. China)

Abstract: The microporous layer (MPL) of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) plays an important role in the transport of water, gas, heat and charge. Mechanical deformation and microstructural damage can significantly impair these transport processes. In this study, the stress-strain relationship of the MPL was experimentally determined after material fabrication and microstructural characterization. A numerical

收稿日期: 2023-08-28 网络出版日期: 2024-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52306270, 22179103, 21676207); 广东省基础与应用基础研究资助项目(2022A1515110456)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52306270, 22179103, 21676207), and Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2022A1515110456).

作者简介: 邵轩宇(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源材料与器件研究, (E-mail)2974304191@qq.com。

通信作者: 张恒, 男, 博士, (E-mail)hzhang1027@163.com。

reconstruction of the MPL was then developed based on the extracted microstructural parameters, and finite element simulations were conducted to evaluate the displacement-stress distributions of carbon particles and polytetrafluoroethylene (PTFE) under different mechanical strains. Results show that mechanical loading induces substantial strain within the MPL, with the highest stress occurring at the surface, where stress concentration is most likely to form. Stress was found to increase exponentially with applied strain. At 10% strain, the maximum stress on carbon particles and PTFE was about 31.385 MPa and 14.873 MPa, respectively; when strain increased to 40%, the corresponding stresses rose to 160.03 MPa and 96.165 MPa, accompanied by a pronounced intensification of stress concentration regions.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; microporous layer; mechanical stress; finite element analysis

随着环境污染和化石能源枯竭等问题日益突出,开发高效环保的新能源变得尤为重要。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)作为一种可以将氢气中的化学能转化为电能的能源转化装置,因其拥有较高的能源转化率和功率密度及绿色无污染等独特的优势,受到了人们的广泛关注^[1-2]。PEMFC主要是由阴、阳两极的双极板(bipolar plate, BPP)和膜电极组件(membrane electrode assembly, MEA)组成。其中MEA作为PEMFC中的核心部件,由气体扩散层(gas diffusion layer, GDL)、微孔层(microporous layer, MPL)、催化层(catalytic layer, CL)和质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)组成^[3-5]。MPL位于GDL基底和CL之间作为两者之间的过渡/缓冲层,主要由炭黑和聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)组成。MPL可以为PEM和CL提供机械支撑,降低GDL和CL之间的接触电阻,促进电池内部的电子转移和热传导。此外,MPL不仅可在低电流密度工况下对膜电极进行保水,防止PEM内脱水导致MEA失效。在高电流密度条件下对CL进行疏水,有效防止MEA水淹,是实现MEA内部实现高效水管理的关键^[6]。

目前,已经有较多关于MPL对燃料电池性能影响的相关研究。Thomas等^[7]通过实验测试研究了MPL对PEMFC中热传导和水传递的影响。结果表明,添加MPL可以提高电池内部的热阻,使电极处温度升高。较高的温度能够避免电极处发生堵水并改善了流场中水的排出,对PEMFC的热传导和水传递有重要作用。Kim等^[8]通过实验测试,研究了电池阴极MPL对PEMFC性能的影响。结果表明,在阴极添加MPL不仅会增加从阴极到阳极的水通量,并且会降低电池中氧传质阻力,进而促进液态水从阴极传输到阳极。高电流密度下会显著降低GDL中的液态水饱和度,有助于维持PEM中的水含量,并降低PEMFC中的阴极带电粒子和气体传输阻力,从而提高了PEMFC的性能。Tseng等^[9]研究了MPL微结构对PEMFC性能的影响,分析了MPL的微观结构,包括孔径分布、疏水处理、气体渗透性和其他因素对PEMFC水的管理和性能的影响。结果表明,MPL的存在减少了传质阻抗,提高了电池在高电流密度工况下性能,此外,增加MPL的烧结时间,可以增大MPL的孔径和气体渗透性,从而提升电池性能。Lin等^[10]通过实验对MPL的微结构进行优化处理,采用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)作为一种能形成特定尺寸和规则形状的造孔剂,来形成MPL的特殊孔结构,并测试其对PEMFC性能的影响。结果表明,液态水可以均匀进出MPL,不阻碍气体与催化剂活性位点之间的接触。降低了传质阻力,提高了排水能力。Burheim等^[11]考虑到压力对MPL的影响,通过实验测量了MPL的热导率和厚度随压力的变化。结果表明,当压力从0.4 MPa增加到1.6 MPa时,MPL的热导率从0.05 W/(m·K)增加至0.12 W/(m·K),厚度减小约40%,并且厚度和热导率随压力的变化是不可逆的。除了实验表征研究以外,模拟仿真也是研究MPL的另一有力工具。Nam等^[12]采用Boltzmann方法(lattice Boltzmann method, LBM)研究了润湿非均匀性和压缩对MPL的影响,结果表明,对于10%的亲水性纤维和10%的压缩,与纯疏水性无压缩的MPL相比,达到稳态所需的液态水饱和度和时间分别降低了5.2%和22%^[13]。Moslemi等^[14]采用LBM模拟不同机械压缩的MPL的液态水传输情况。结果表明,增加MPL的压缩程度并不总是有助于液态水的排出,但存在一个最佳值,并且发现在85%的压缩程度下,液态水排出更快并且MPL中的水含量最小。

目前,有关MPL对PEMFC中传输特性和电池性能影响的研究较多,但MPL自身机械不稳定的易碎属性,使得实验量测和表征非常具有挑战性,有关力学特性相关的实验研究较为缺乏。除了实验研究,模拟仿

真是对 MPL 进行力学特性分析的一种有效工具。在关于 MPL 对 PEMFC 影响的模拟研究中也存在诸多假设,使得构建的计算模型不够准确,无法深层次揭示机械应力对 MPL 微结构特性的影响。文中通过实验制备获得 MPL 样品,通过电子万能试验机进行单轴机械压缩得到 MPL 在不同机械应力下的应变变化情况。通过扫描电镜和压汞仪的相关测试,得到 MPL 的微观结构形貌和孔隙率等微结构参数。根据实验测得的微结构参数,对 MPL 进行随机数值重构。使用有限元分析方法模拟 MPL 在不同机械压力下的位移-应力分布,并和实验测试的结果进行对比,模拟和实验的结果拟合较好,验证了模拟结果的可靠性。当机械应力值大于材料本身的屈服极限时,材料会出现机械损坏甚至失效。而 MPL 在 PEMFC 中又起着水-气-热-电传输的重要作用,因此,分析机械应力对 MPL 的影响对于提高 PEMFC 的性能和耐久性有着重大意义。

1 MPL 实验方法

1.1 MPL 样品的制备

本研究中,MPL 样本是由实验制备而来,MPL 浆料各组分的具体配方为:0.5 g 碳粉、5 g 去离子水、0.12 g 分散剂溶液和 0.3 g PTFE 溶液。MPL 制备流程如图 1 所示。第一步为浆料成型:将配制好的 MPL 浆料放至直径 20 mm、深度 3 mm 的定制模具中成型。为确保样品制备的一致性,应保证浆料首先填满模具中所有孔槽,随后用刮刀对样品进行平整化处理使其均匀分布。第二步为烘干脱水:将成型后的样品置于模具中放入烘干箱进行烘干,烘干机内的温度设置为 60 °C,时长为 90 min,去除样品中的水分后进行脱模处理。第三步为烧结,将 PTFE 熔化,使碳颗粒更好地黏结;脱模完成后,将样品放入马弗炉中进行烧结。烧结程序设定为:前 20 min,将温度从 30 °C 升至 240 °C,维持 40 min;随后 20 min,将温度从 240 °C 升至 380 °C,维持 40 min;最后,将样品置于 20 °C 室温中冷却 240 min,完成 MPL 样品的制备。



图 1 MPL 制备流程图

Fig. 1 Flowchart of MPL fabrication

1.2 MPL 形貌表征

为深入了解真实 MPL 内部的微结构分布情况,有效指导其微结构重构。文中利用武汉理工大学材料测试中心场发射扫描电镜附加 X-MAX N80 能谱仪 JSM-7500F 对 MPL 的微观结构形貌进行 SEM 图像表征。分别获取分辨率为 1 μm 和 0.1 μm,放大倍数为 20 000 和 50 000 的 MPL 的 SEM 图像如图 2(a)、(b) 所示。

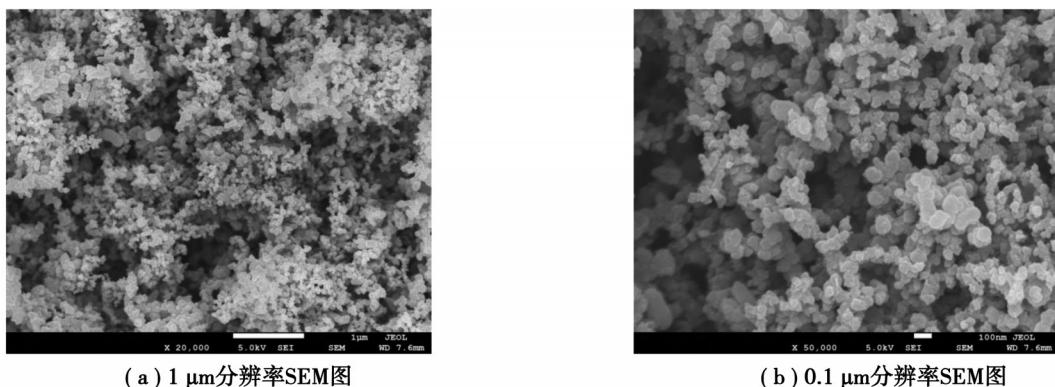


图 2 MPL 样品 SEM 图

Fig. 2 SEM image of MPL sample

1.3 MPL孔隙率测试

为给后续MPL的数值重构提供有效合理的微结构参数输入,现对实验制备的MPL进行实验量测。为减少样品制备及实验量测的随机性,对同一批次的5个样品通过压汞仪进行孔隙率量测,结果如图3所示。从图中可以看出,实验制备的MPL孔隙率为0.5~0.7,平均孔隙率约为0.6,这一量测结果也是本研究MPL数值重构过程中,孔隙率值的重要依据和来源。

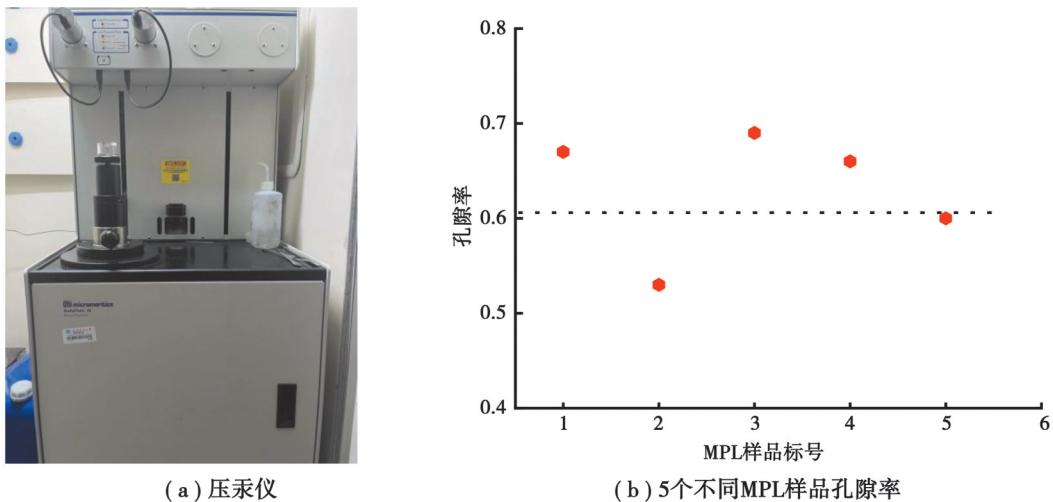


图3 压汞仪和5个不同MPL样品孔隙率

Fig. 3 Mercury injection apparatus and porosity of five different MPL samples

1.4 MPL力学性能测试

为了解MPL的力学特性,现采用武汉理工大学材料测试中心的电子万能材料试验机进行实验如图4(a)所示。通过电子万能材料试验机来获得MPL在不同机械应力作用下的应变,获得的应力-应变曲线如图4(b)所示。在实验过程中,通过调节电子万能材料试验机可以给样品施加不同应力值,然后测量不同压力下的样品厚度的形变量,该形变量与样品原始厚度的比值即为应变,从而获得应力-应变的对应关系。为了准确得到MPL样品的应力应变曲线,实验选用同一批模具制得的3个MPL样品进行机械压缩测试,测试条件设为:压缩最大位移为1.35 mm(45%应变),压缩速率设置为0.1 mm/min,均进行一次单轴压缩,获得其应力-应变曲线。并在此基础上,求得3条应力应变曲线的平均值曲线,其结果如图4(b)所示。

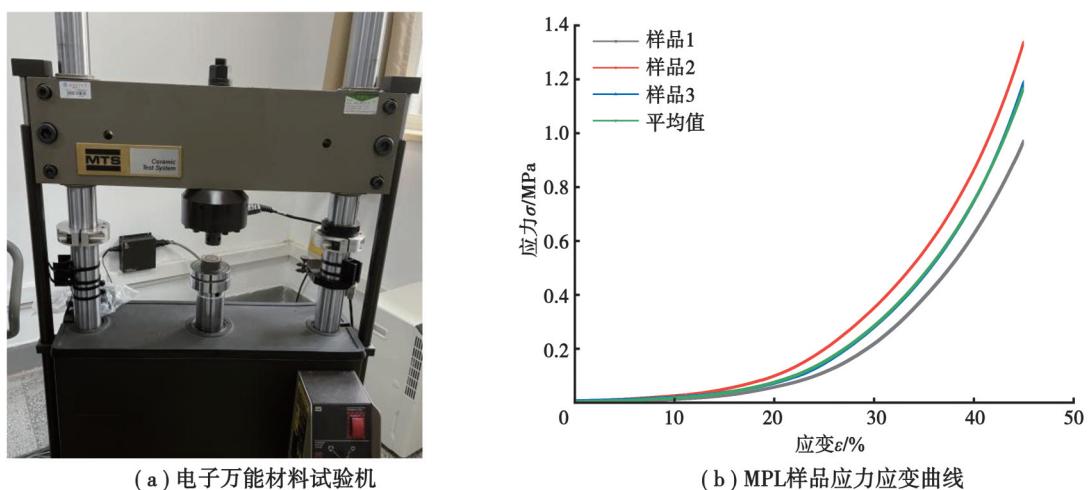


图4 电子万能材料试验机和MPL样品应力应变曲线

Fig. 4 Electronic universal material testing machine and MPL sample stress-strain curve

从图中可以看出,3个MPL样品的应力应变曲线趋势一致,应力随着应变的增加呈指数形式增加。说明MPL在应变量较小时,内部的应力较小。然而,随着应变量的进一步增加,应力会显著变大。该研究结果在燃料电池堆装配过程中可以起到指导作用:在电堆装配过程中,MPL的应变量一旦超过某个临界值,MPL内部的应力值将会急剧增加,从而导致MEA出现机械损伤甚至破坏,导致燃料电池失效。

2 MPL仿真分析

2.1 微孔层数值重构和网格划分方法

对MPL的微结构重构,是基于MATLAB代码进行数值重构,再导入Avizo进行可视化处理,其重构的三维渲染图如图5(a)所示,具体的重构过程及流程图详见参考文献[15]。其中,红色球状固体代表碳颗粒,绿色球状固体表示PTFE添加物。重构获得的MPL孔隙率是0.6,PTFE的质量分数0.4,与实验制得的MPL样品基本保持一致。有限元模型的网格划分采用多区域划分方法,上下2块压板是规则的长方体结构,采用六面体网格进行划分,碳颗粒和PTFE由于是不规则的几何结构,采用四面体网格来进行网格处理,最终划分完的有限元模型网格图如图5(b)所示,网格节点总数为45 058,网格单元总数为119 230。

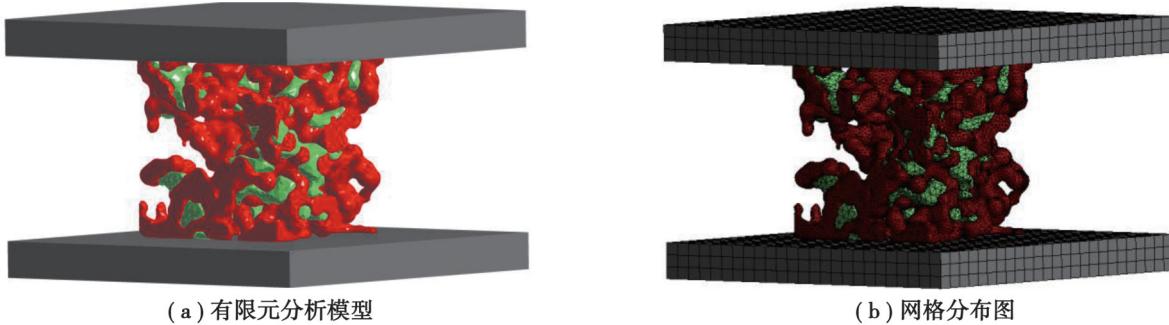


图5 有限元分析模型和网格分布图

Fig. 5 Finite element analysis model and grid distribution

2.2 微孔层压缩有限元分析

2.2.1 数学模型

应力应变模拟的控制方程包括运动学方程、几何方程和物理方程。

运动学方程

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}, \quad (1)$$

式中: σ 是应力; ρ 是材料密度; f_i 是由于夹紧力而产生的体积力; \ddot{u} 是有限元的加速度。

几何方程

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (2)$$

式中: ε 是应变; u 是碳颗粒和PTFE的位移。

物理方程

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \beta \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \\ \sigma_{kk} = (3\beta + 2\mu) \varepsilon_{kk}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 是克罗内彻符号; β 和 μ 分别是材料的第一、第二拉姆常数,为

$$\beta = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad (4)$$

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

式中, E 和 ν 分别为材料的杨氏模量和泊松比。

2.2.2 结构尺寸和材料参数

如图5(a)是MPL机械压缩的几何模型,由碳颗粒和PTFE组成,其有限元机械压缩模型的计算域为

$50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。上、下两压板的压缩模拟 MPL 在燃料电池中受到的机械应力,压板的截面尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,厚度为 $10 \mu\text{m}$ 。模型中的所有材料机械属性参数汇总如表 1 所示。

表 1 材料物性参数

Table 1 Physical property parameters of materials

材料	密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/MPa	泊松比
压板	7 850	200 000	0.30
碳颗粒	2 059	100	0.30
PTFE	2 190	110	0.26

2.2.3 边界条件

机械压缩示意图如图 6 所示,采用单向压缩的施力方式,上侧端板给定一个 $20 \mu\text{m}$ 的沿着 Z 轴负方向的指定位移压缩,下端板设置为固定约束,其他 4 个面设置为自由。同时,MPL 计算域中网格节点间的接触,设置为摩擦接触,其摩擦系数设置为 0.3。随后,采用 ANSYS WORKBENCH 中的显式动力学进行力学分析,用于模拟 MPL 在受到机械应力作用下的压缩形变过程。

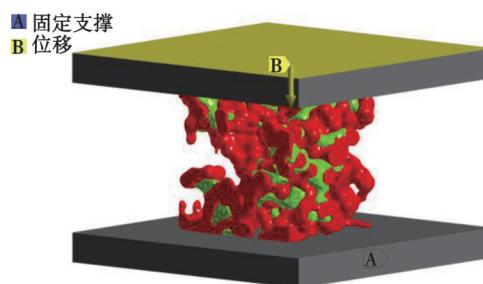


图 6 MPL 机械压缩示意图

Fig. 6 Schematic diagram of MPL mechanical compression

3 结果与讨论

MPL 数值重构模型包括碳颗粒、PTFE 和孔,文中研究了 MPL 在 4 种(10%、20%、30%、40%)不同应变下,MPL 内部的微结构、应力和应变分布情况。为了更加准确获得内部的变化情况,将 MPL 中的碳颗粒和 PTFE 分别进行展示研究。

3.1 MPL 力学性能试验与模拟验证

为了验证模拟的可靠性,现对模拟和实验的结果进行分析对比,实验的应力-应变曲线采用 1.4 节提到的 3 个 MPL 样品压缩得到的平均值曲线,仿真模拟的应力-应变曲线定义为,应变为上压板的位移和 MPL 厚度的比值,应力为上压板的等效平均应力。图 7 为 MPL 中应力-应变实验和模拟的结果对比图,从图中可以看出,实验和模拟结果拟合较好,可以认为 MPL 重构模型和有限元计算的合理性。应力应变曲线变化趋势一致,呈指数形式分布。随着机械应力的增加,MPL 中的应变先缓慢后显著增加。

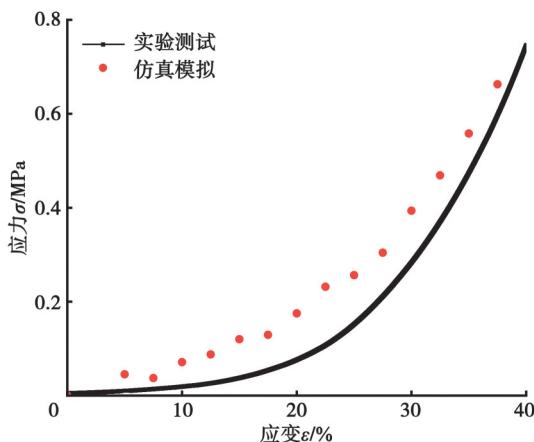


图 7 应力应变的模拟和实验的对比图

Fig. 7 Comparison of simulation and experimental results for stress-strain

3.2 MPL 微结构不同压缩比下的位移分析

图 8 显示了碳颗粒和 PTFE 分别在 0、10%、20%、30%、40% 这 5 个不同应变下沿着 Z 方向(压缩方向)的位移分布云图,从左至右依次对应上述应变水平。从云图结果可以发现,位于顶部的碳颗粒和 PTFE 发生了较大的位移,相比之下,位于底部的碳颗粒和 PTFE 发生的位移较小。这主要是因为压力施加在上压板上,下压板是固定约束。随着应变的增加,碳颗粒和 PTFE 发生的位移幅度逐渐变大。在应变为 10% 时,碳颗粒和 PTFE 的位移较小,随着应变的增加,位移量逐渐增加。当应变为 40% 时,碳颗粒和 PTFE 的位移量非常显著,且固相颗粒发生明显的形变。此外,还观察到随着应变的增加,多孔结构的体积损失逐渐增大,许多碳颗粒和 PTFE 被挤压到孔隙结构中。

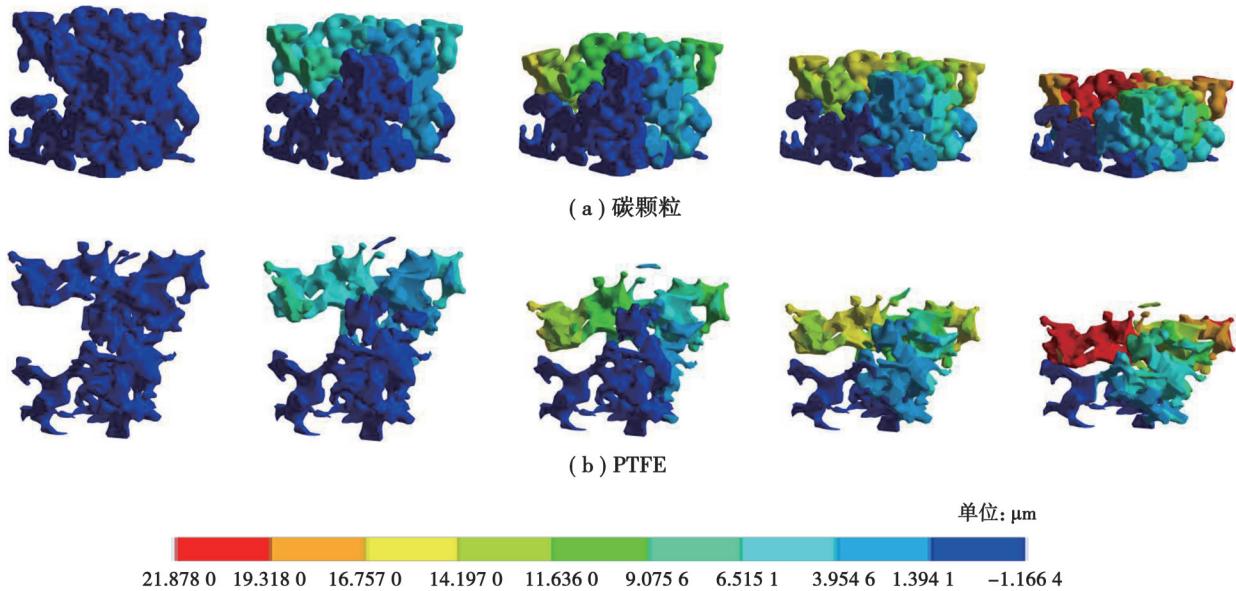


图 8 碳颗粒和 PTFE 的位移分布

Fig. 8 Carbon particles and PTFE displacement distribution

为了量化机械压缩对 MPL 中碳颗粒和 PTFE 的影响,图 9 中展示了在 10%、20%、30% 和 40% 这 4 种不同应变下在压缩方向上的位移分布频率图。其中,频率是指由计算域中的节点总数归一化后的模型中的碳颗粒和 PTFE 的节点总数比值。从频率分布图可以看出,在同一应变下,位移分布均有 2 个峰值,一个峰值在零位移处,另一个峰值在设置的对应位移值附近。零位移处是在 MPL 受机械压缩的固定约束的一侧,另一个则是 MPL 受机械压缩与端板接触的界面。随着应变的增加,发生较小位移的碳颗粒和 PTFE 的比例减小,发生较大位移的比例增加。

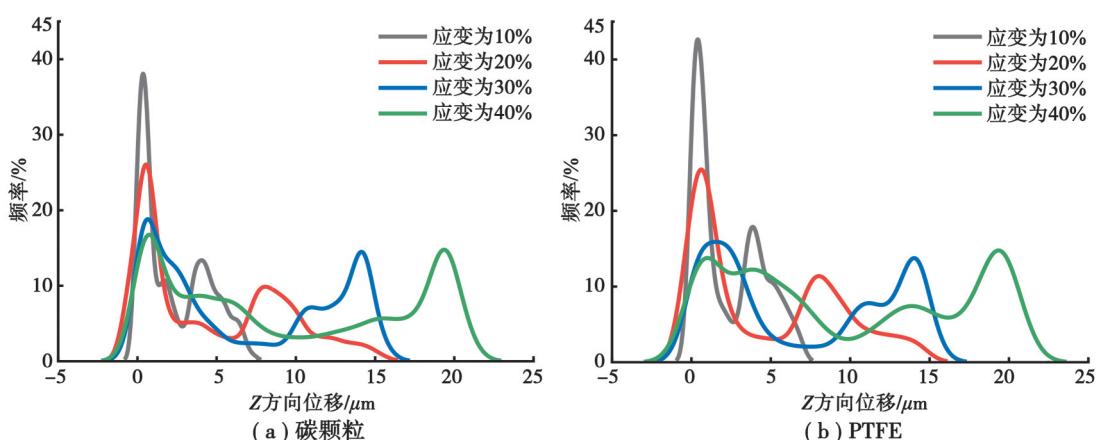


图 9 碳颗粒和 PTFE 在 4 个不同应变下位移频率图

Fig. 9 Displacement frequency of carbon particles and PTFE under four different strains

应变为10%时,碳颗粒零位移处的频率值约为38%;当应变增加到20%时,对应的频率值下降到25%;当应变增加到40%时,其零位移处的频率下降至15%左右,PTFE也表现出相同的变化趋势。发生这种趋势可能是由于随着应变的增加,有更多的碳颗粒和PTFE发生位移形变,并且碳颗粒和PTFE之间的相互作用程度也逐渐加大。

3.3 MPL微结构不同压缩比下的应力分析

当MPL内的局部应力超过材料的强度极限时,MPL会发生破裂,严重影响电池工作的性能和寿命,因此,分析MPL的微结构的应力分布情况对提高PEMFC性能和安全性有着至关重要的作用,模拟结果分析了压缩对MPL微结构力学性能的影响。图10是碳颗粒和PTFE在0、10%、20%、30%、40%这5种不同应变下的应力分布云图,从左至右依次对应上述应变水平。从图中可以看出,随着应变的增大,碳颗粒和PTFE的局部的应力分布也发生变化,靠近压板处的碳颗粒和PTFE应力较大,存在局部应力集中的现象,这一结果表明,机械压缩严重影响碳颗粒和PTFE的应力分布,随着应变的增大,应力分布的不均性提高,局部应力集中的现象也明显增多,对MPL的安全性产生影响。

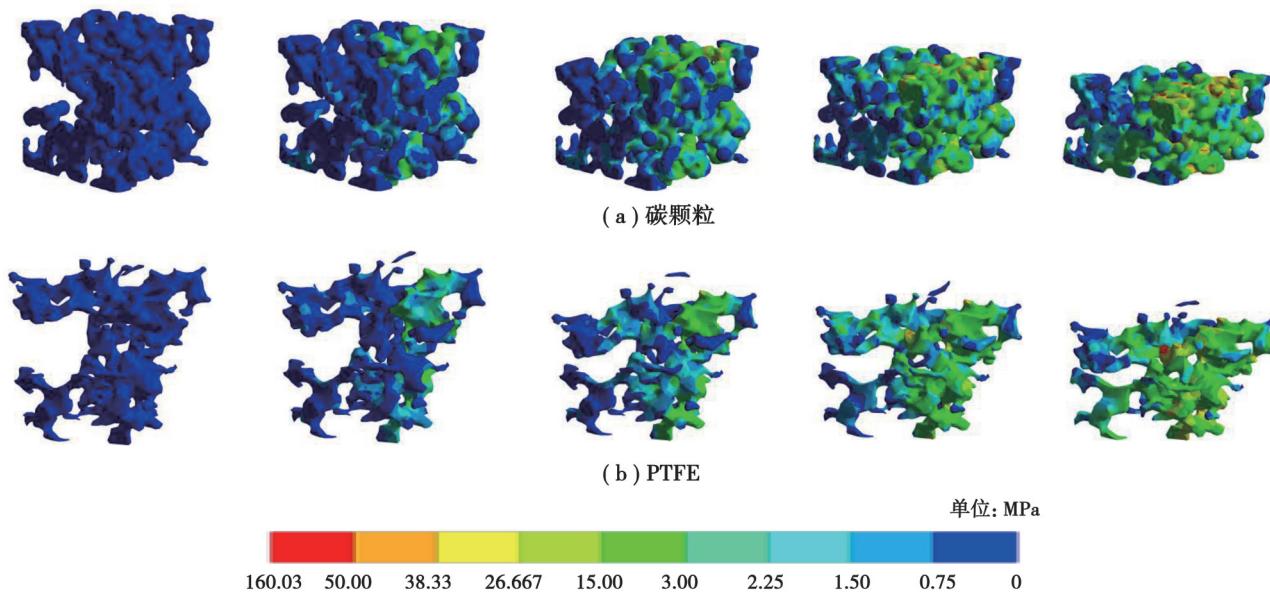


图10 碳颗粒和PTFE的应力分布
Fig. 10 Stress frequency at four different strains of carbon particles and PTFE

为了量化机械压力对MPL内的应力分布的影响,还研究了MPL中碳颗粒和PTFE分别在10%、20%、30%、40%这4种不同应变下应力频率分布图如图11所示。从图可以看出,4种不同应变下的应力频率分布呈泊松分布。固相上应力峰值主要出现在0~10 MPa之间,并将0~5 MPa的应力频率分布的区间局部放大,以获得更多应力分布细节,从图中可以看出,随着应变的增大,应力频率曲线的峰值向右下方移动,这表明了MPL内部的应力最大值和平均值都在增加。MPL在4种不同应变下的应力变化情况如图12所示,从图中可以看出,随着应变的增大,MPL内部的应力最大值和平均值都在增加,应力的分布也更加均匀。当应变为10%时,碳颗粒上的应力的平均值约为1.128 MPa,最大值约为31.385 MPa;随着应变继续增加到20%,内部的平均值增加了132%,最大值增加了126%;当应变进一步增加到40%时,平均值变为7.572 MPa,最大值变为160.03 MPa。与碳颗粒上面的应力分布相比,PTFE上面的应力值变化趋势与其几乎一致。应变为10%时,PTFE上的平均值约为0.933 MPa,最大值约为14.873 MPa;随着应变继续增加到20%,内部的平均值增加了131%,最大值增加了200%;当应变进一步增加到40%时,平均值变为7.091 MPa,最大值变为96.165 MPa。

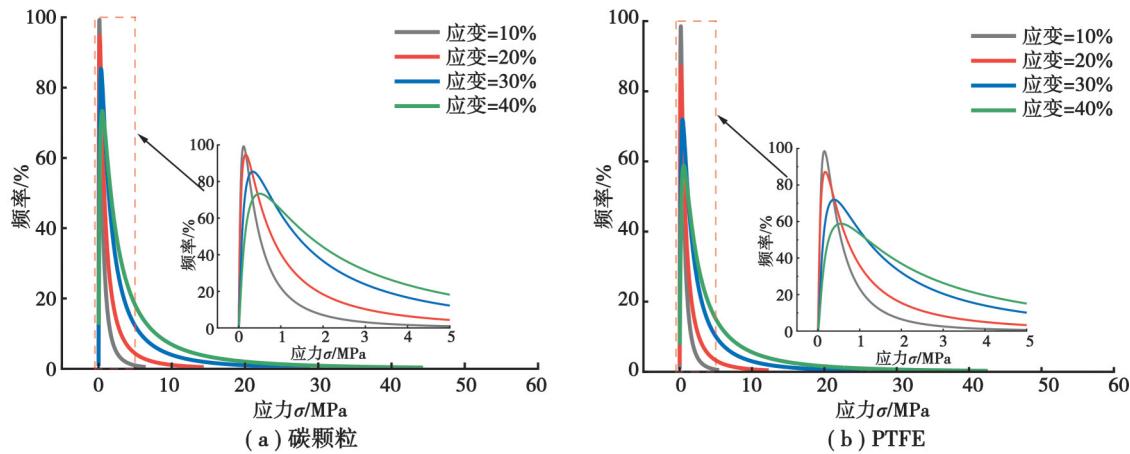


图 11 碳颗粒和 PTFE 在 4 个不同应变下应力频率图

Fig. 11 Stress frequency of carbon particles and PTFE under four different strains

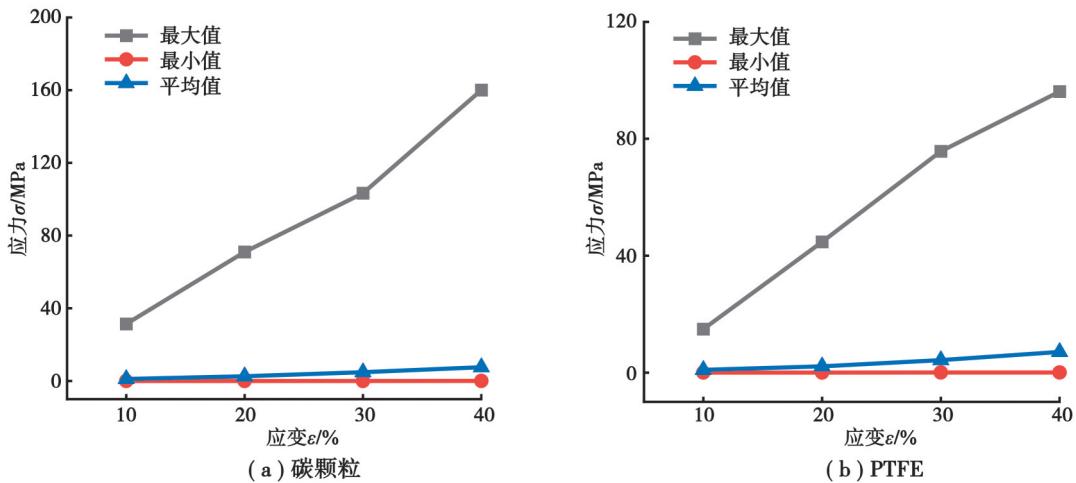


图 12 碳颗粒和 PTFE 应变应力关系曲线

Fig. 12 The relationship between stress and strain of carbon particles and PTFE

从图 12 中可以看出, 碳颗粒和 PTFE 中的应力平均值比应力最大值小得多, 并随着应变的增加, 这种差异会更显著。这是因为 MPL 在受到机械压缩时, 内部的碳颗粒和 PTFE 组分中, 会出现局部应力集中的现象。应力集中会出现在碳颗粒、PTFE 与上下压板接触的界面上, 这些区域的应力值是最大的。但相对于整个 MPL, 应力集中的区域占比不大, 对应力平均值变化的影响不大。因此, 应力平均值会比应力最大值小得多, 并且随着应变的增加, 这种差异也会更明显。当机械应力值大于材料本身的屈服极限的时候, 材料会出现机械损坏甚至失效。因此, 在燃料电池电堆装配过程中, 选择合适的装夹力对提高电堆的安全性十分重要^[16]。

4 结 论

通过实验制备获得 MPL 样品, 随后进行相关测试, 得到 MPL 的应力-应变曲线、微观结构形貌和孔隙率等参数。根据实验测得的微结构参数, 对 MPL 进行随机数值重构。再使用有限元分析方法模拟 MPL 在不同机械作用下的位移-应力分布, 并和实验测试的结果进行对比, 二者拟合情况较好, 验证了模拟结果的可靠性。研究的结论如下:

1) 机械作用使碳颗粒和 PTFE 微结构产生较大形变, 位于顶部的碳颗粒和 PTFE 会发生较大的位移形变, 随着应变的增加, 发生较小位移的碳颗粒和 PTFE 的比例减小, 发生较大位移的比例增加。应变为 10%

时,碳颗粒零位移处的频率值约为38%;当应变增加到20%时,对应的频率值下降到25%;当应变增加到40%时,其零位移处的频率下降至15%左右,PTFE也表现出相同的变化趋势。

2)机械作用对碳颗粒和PTFE微结构应力分布有很大影响,随着应变逐渐增加,MPL局部应力集中现象加剧,随着应变的增大,MPL内部的应力最大值和平均值都在增加,应力的分布也更加均匀。当应变为10%时,碳颗粒上的应力的平均值约为1.128 MPa,最大值约为31.385 MPa;随着应变继续增加到20%,内部的平均值增加了132%,最大值增加了126%;当应变进一步增加到40%时,平均值变为7.572 MPa,最大值变为160.03 MPa。

3)与碳颗粒上面的应力分布相比,PTFE上面的应力值变化趋势与其几乎一致。应变为10%时,PTFE上的平均值约为0.933 MPa,最大值约为14.873 MPa;随着应变继续增加到20%,内部的平均值增加了131%,最大值增加了200%;当应变进一步增加到40%时,平均值变为7.091 MPa,最大值变为96.165 MPa,此时应力集中最为明显。

4)MPL在PEMFC中起着水-气-热-电传输的重要作用,当机械应力值大于材料本身的屈服极限的时候,材料会出现机械损坏甚至失效,破坏MPL微结构进而影响其水-气-热-电的传输。文中研究对于提高PEMFC的性能及耐久性有着重大意义,也为燃料电池的装配过程中选择合适的装夹力提供重要参考。

参考文献

- [1] 金守一,盛夏,潘兴龙,等.车用质子交换膜燃料电池膜电极组件综述[J].汽车文摘,2019(12): 5-12.
Jin S Y, Sheng X, Pan X L, et al. An review of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cell vehicles [J]. Automotive Digest, 2019(12): 5-12. (in Chinese)
- [2] 杜真真,王珺,王晶,等.质子交换膜燃料电池关键材料的研究进展[J].材料工程,2022, 50(12): 35-50.
Du Z Z, Wang J, Wang J, et al. Research progress of key materials in proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(12): 35-50. (in Chinese)
- [3] 张恒,詹志刚,陈奔,等.气体扩散层各向异性传输特性的孔尺度模拟[J].吉林大学学报(工学版),2022, 52(9): 2055-2062.
Zhang H, Zhan Z G, Chen B, et al. Anisotropic transport properties of gas diffusion layer based on pore-scale model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(9): 2055-2062. (in Chinese)
- [4] Okonkwo P C, Otor C. A review of gas diffusion layer properties and water management in proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(3): 3780-3800.
- [5] 李子坤,颜聿聪.燃料电池气体扩散层中微孔层用炭材料研究进展[J].炭素技术,2022, 41(6): 1-4, 61.
Li Z K, Yan Y C. Research progress on the carbon materials for micropore layers in gas diffusion layers for PEMFC[J]. Carbon Techniques, 2022, 41(6): 1-4, 61. (in Chinese)
- [6] 陈梦言,杜少杰,张恒,等.分散方式对PEMFC微孔层油墨流变特性与微结构的影响研究[J].工程热物理学报,2023, 44(6): 1473-1480.
Chen M Y, Du S J, Zhang H, et al. Effect of dispersion on rheological properties and microstructure of PEMFC microporous layer ink[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6): 1473-1480. (in Chinese)
- [7] Thomas A, Maranzana G, Didierjean S, et al. Thermal and water transfer in PEMFCs: Investigating the role of the microporous layer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(6): 2649-2658.
- [8] Kim T, Lee S, Park H. A study of water transport as a function of the micro-porous layer arrangement in PEMFCs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(16): 8631-8643.
- [9] Tseng C J, Lo S K. Effects of microstructure characteristics of gas diffusion layer and microporous layer on the performance of PEMFC[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(4): 677-684.
- [10] Lin R, Yu X T, Chen L, et al. Structure majorization on the surface of microporous layer in polymer electrolyte membrane fuel cells to optimize performance and durability[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 243: 114319.
- [11] Burheim O S, Su H N, Pasupathi S, et al. Thermal conductivity and temperature profiles of the micro porous layers used for the

- polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(20): 8437-8447.
- [12] Nam K, Ho K, Gun L, et al. Lattice Boltzmann simulation of liquid water transport in microporous and gas diffusion layers of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2015, 278: 703-717.
- [13] Ira Y, Bakhshan Y, Khorshidimalahmadi J. Effect of wettability heterogeneity and compression on liquid water transport in gas diffusion layer coated with microporous layer of PEMFC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(33): 17397-17413.
- [14] Moslemi M, Javaherdeh K, Ashorynejad H R. Effect of compression of microporous and gas diffusion layers on liquid water transport of PEMFC with interdigitated flow field by Lattice Boltzmann method[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 642: 128623.
- [15] Zhang H, Shao X Y, Zhan Z G, et al. Pore-scale modeling of microporous layer for proton exchange membrane fuel cell: effective transport properties[J]. Membranes, 2023, 13(2): 219.
- [16] Zhang J, Hu Y, Han C J, et al. Stress response and contact behavior of PEMFC during the assembly and working condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(59): 30467-30478.

(编辑 詹燕平)