

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.01.017

湿度循环下 PEMFC 催化层裂纹生成与扩展规律研究

贺文杰¹, 郭定域², 王建超¹, 王青¹, 秦彦周²

(1. 天津内燃机研究所(天津摩托车技术中心), 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: 质子交换膜燃料电池具有效率高、能量密度高、启动速度快和零污染物排放等优点, 是有前途的道路车辆动力源。成本和寿命是制约燃料电池技术大规模商业化应用的重要影响因素。车辆在频繁启停和燃料电池动态工况中的湿度变化会引起催化层和质子交换膜因湿胀而造成的机械破坏, 会显著降低该燃料电池的寿命。通过 ANSYS Workbench 软件 Static Structure 模块、CZM 模型和 PEIRCE 模型对质子交换膜燃料电池催化层微观结构进行了仿真模拟, 研究了动态工况中不同相对湿度变化幅度(60%, 50%, 40%和30%)对催化层裂纹生成与扩展的影响。结果表明: 相对湿度变化幅度越大, 燃料电池催化层中离聚物与 Pt/C 接触面之间裂纹生成的时间越早, 在相对湿度变化幅度分别为 60%, 50%和 40%时的裂纹产生初始时间分别为 348, 380, 789 s, 在相对湿度变化幅度为 30%时, 离聚物与 Pt/C 接触面之间则不会产生裂纹; 裂纹的扩展程度随相对湿度幅度的增加而变得更加严重; 大幅度长时间的湿度循环还会导致聚合物内部塑性应变累积至强度极限, 从而造成离聚物的机械破坏。

关键词: 汽车工程; 裂纹扩展机理; 仿真模拟; 燃料电池催化层; 湿度循环; 离聚物

中图分类号: U463.63+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2022)01-0130-06

Study on Crack Initiation and Propagation Rule in PEMFC Catalyst Layer under Humidity Cycling

HE Wen-jie¹, GUO Ding-yu², WANG Jian-chao¹, WANG Qing¹, QIN Yan-zhou²

(1. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute (Tianjin Motorcycle Technical Center), Tianjin 300072, China;

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

Abstract: Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has the properties of high efficiency, high power density, fast start-up and zero-emissions, making it a promising power source for road vehicles. Cost and lifetime are key influencing factors confining vast commercialization of fuel cell technology in vehicles. Humidity changes caused by frequent startup/shutdown and dynamic load variations of fuel cell can lead to mechanical damages of the catalyst layer and the proton exchange membrane due to moisture expansion and it will significantly reduce the lifetime of PEMFC. The microstructure of the catalytic layer are simulated through the Static Structure module of ANSYS Workbench software as well as the CZM model and PEIRCE model, and the influences of different relative humidity (RH) variation ranges (60%, 50%, 40% and 30%) on the formation and propagation of cracks in the catalytic layer under dynamic conditions are studied. The result shows that (1) Higher variation amplitude of RH leads to earlier crack initiation at the interface of the ionomer and Pt/C. The crack initiation times for the RH variation amplitudes of 60%, 50% and 40% are

收稿日期: 2021-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51706153); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208003)

作者简介: 贺文杰(1974-), 男, 山西文水人, 硕士, 高级工程师. (tmtchwj@tju.edu.cn)

348, 380, 789 s respectively, while no crack appears at the interface of the ionomer and Pt/C for the RH variation amplitude of 30%. (2) Higher RH amplitude also leads to severer crack propagation. (3) The accumulation of plastic strain inside the ionomer induced by the high magnitude and long-term RH cycles can exceed the material's strength limit, hence mechanically damaging the ionomer.

Key words: automobile engineering; crack propagation mechanism; simulation; fuel cell catalyst layer; humidity cycling; ionomer

0 引言

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 由于其高效率、零排放等特点, 已成为汽车动力源、小规模分布式发电站和便携式电源应用的重要解决方案。PEMFC 由膜电极 (membrane electrode assembly, MEA)、流场双极板、密封垫片、端板及外围输送、控制系统端板组成。MEA 是燃料电池的核心部件, 它由包含催化层和气体扩散层的电极及电解质离子交换膜组成。催化层是电化学反应发生的场所, 由电解质离聚物和催化剂构成, 离聚物一般为全氟磺酸树脂, 催化剂一般为 Pt/C 催化剂^[1]。目前, 耐久性问题是阻碍 PEMFC 进一步商业化的重要因素之一, 催化层作为化学反应发生的核心区域, 其因启停、振动、工况变化等因素造成的内部破裂、分离等机械衰减直接影响到 PEMFC 的寿命^[2]。此外, 因膨胀收缩系数不同, 动态工况中湿度、pH 值和温度的变化会使催化层离聚物内部产生残余应力, 最终产生裂纹并扩展, 导致电池性能下降。

图 1 为催化层表面的扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM) 图片, 表面裂纹清晰可见。催化层表面裂纹及其扩展可能会引起三相反应界面面积减少, 膜的接触应力集中, 接触电阻增加, 热分布不均, 水气传输特性改变等一系列重要影响^[3], 因此, 需要研究催化层裂纹的产生及扩展规律并施加适当的控制, 改进电极的综合性能。White 等^[4]通过可视化方法研究了燃料电池电压循环过程中的局部电极退化效应, 观察到碳腐蚀和催化层坍塌和减薄引起的密度和成分的变化。Silva 等^[5]通过特定负载循环测试条件下的老化试验, 发现 1 500 h 后电堆功率衰减 34%, 催化剂的活性面积降低 17.6%, 并观察到催化层的开裂、分层和催化剂迁移。此外, 随着碳的腐蚀, 电极厚度减小, 用作催化层黏结剂的离聚物严重降解, 导致氟化物含量显著下降。Zhao 等^[6]设计了催化层机械衰减的离线试验, 试验中模拟了催化层在实际工作中液态水的流入流出及蒸发的过程, 发现催化层出现了裂纹萌生、团聚物变大

及孔隙变大的现象, 导致活化损失和欧姆损失的增加, 从而降低燃料电池的性能。Zhang 等^[7]研究发现, 在高工作相对湿度的加速应力试验中, 催化层结构发生明显变化, 离聚体的聚集和迁移导致了裂纹的产生。Banan 等^[8]基于内聚区模型 (cohesive zone model, CZM), 采用各向同性线性弹塑性模型研究了湿热循环和外界振动对燃料电池内部机械损伤传播的综合影响, 发现与外界振动相比, 湿热循环对机械破坏起主导作用。Rong 等^[9]研究了启停过程中温度和相对湿度循环对催化层中离聚体与 Pt/C 团聚体之间界面行为的影响, 发现离聚体中的裂纹萌生和不同相之间的分层存在竞争, 这种竞争对催化层微观结构的变化起着重要作用。Chang 等^[10]研究了催化层在湿热循环和装配力载荷作用下的分层, 发现相对湿度是界面分层的主要驱动力。Qin 等^[11]研究发现启停工况湿度循环下催化层宏观裂纹的存在加剧了膜/催化层界面分层的扩展。Zhang 等^[12]研究了离聚物与催化剂团聚体之间的分层过程, 发现夹紧力的增加延迟了分层的发生, 而湿热循环的幅值是导致分层的主要因素。这些关于 PEMFC 催化层裂纹初始和扩展的研究为动态加载循环引起的催化层机械衰减提供了重要的直观信息。然而, 目前关于 PEMFC 催化层宏观和微观裂纹产生和发展及其内部塑性应变规律的研究还非常少, 湿度循环幅度对催化层微观裂纹的产生和扩展影响规律尚不明确, 相关机理有待进一步揭示。

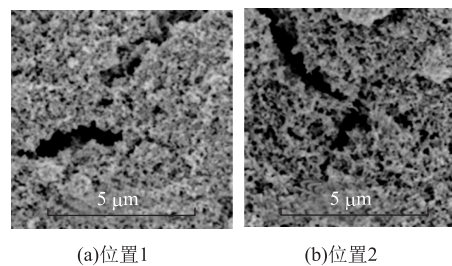


图 1 催化层表面裂纹示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surface crack of catalyst layer

由于催化层的微观结构具有随机性和异质性, 并且 Pt/C 团聚物及表面包裹离聚物的尺度十分微

小,在催化层微观结构破坏机理的试验研究方面存在较大挑战,目前几乎没有相关的试验研究,而更多地是运用模拟仿真的方法揭示相关规律。本研究基于有限单元法,建立 PEMFC 催化层的微观模型,并分别采用 CZM 模型和 PEIRCE 模型研究启停工况下(固定温度 85 ℃)不同相对湿度变化幅度(60%,50%,40%和30%)的湿度循环对催化层内离聚物和 Pt/C 颗粒的分离及裂纹产生和扩展状况等微观变化的影响,以获得相对湿度变化幅度对 PEMFC 催化层机械衰减的作用机制并揭示相关机理。

1 模型构建过程

1.1 计算域

在燃料电池催化层中,离聚物包裹并连接 Pt/C 颗粒或团聚物,在离聚物、催化剂和孔隙的三相界面处发生有效的电化学反应。离聚物和 Pt/C 颗粒的分离是导致催化层裂纹产生和电池耐久性下降的重要因素。为研究离聚物与 Pt/C 颗粒的分离过程,选取如图 2 所示的模型简化计算区域,Pt/C 颗粒部分与离聚物连接,部分暴露于孔隙。Pt/C 颗粒半径取为 0.15 μm,离聚物简化成厚度 0.45 μm、高度 0.9 μm 的矩形(下表面为对称面)。

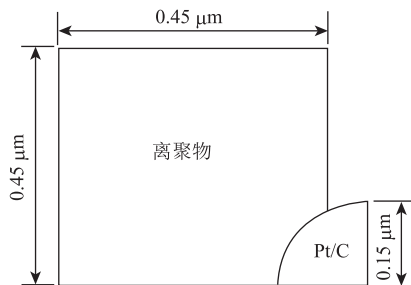


图2 计算域示意图

Fig.2 Schematic diagram of calculation domain

1.2 数学模型

本研究建立的是二维模型,可假设为平面应力和应变问题,并假设材料各向同性,控制方程如下^[10]。

平衡方程:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + F_{bx} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_{by} = 0; \quad (2)$$

协调方程:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; \quad (3)$$

本构方程:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y], \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[\nu\varepsilon_x + (1-\nu)\varepsilon_y], \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y), \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}. \quad (7)$$

式中, σ 为法向应力; τ 为剪切应力; x 和 y 为向量的不同分量; F_{bx} 和 F_{by} 分别为体积力的 x 和 y 分量; ε 为法向应变; γ 为切向应变; E 为弹性模量; G 为剪切模量; ν 为泊松比。

Pt/C 催化剂可认为是弹性材料,试验表明离聚物具有明显的屈服阶段,因此,离聚物可看作弹塑性材料,需要考虑塑性变形的影响。此外,还需考虑温度、湿度引起的应变变化,总应变可表示为:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^{pl} + \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^S, \quad (8)$$

式中, ε_{ij}^e 为弹性应变; ε_{ij}^{pl} 为塑性应变; ε_{ij}^T 为温度引起的应变; ε_{ij}^S 为湿度引起的应变。温度、湿度引起的应变可表示为^[13]:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\varepsilon_{ij} \\ \varepsilon_{ij}^S = \beta(RH - RH_0)\varepsilon_{ij} \end{cases}, \quad \varepsilon_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } i=j \\ 0 & \text{如果 } i \neq j \end{cases}, \quad (9)$$

式中, α 为热膨胀系数,即恒定湿度下温度升高 1 ℃ 所对应的应变变量; β 为相对湿度膨胀系数,即恒定温度下相对湿度提升 1% 所对应的应变变量; T 为温度; T_0 为参考温度; RH 为相对湿度; RH_0 为参考相对湿度。

1.3 黏塑性模型

材料的应变发展是应变率的函数,本研究中采用 PEIRCE 模型来模拟催化层内离聚物的黏塑性:

$$\sigma_p = \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\gamma^*}\right)^m \sigma_{p0}, \quad (10)$$

式中, σ_p 为材料的屈服应力; σ_{p0} 为材料在准静态载荷下的屈服应力; $\dot{\varepsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变率; γ^* 为材料的运动黏度系数; m 为应变率强化参数。Lu 等^[14]对全氟磺酸质子交换膜(Nafion 211)在不同应变率、温度和湿度条件下性质参数的变化进行了研究,在 45 ℃、相对湿度为 50% 条件下,利用应变率为 5 min 和 0.2 min 情况下的应力应变数据,代入方程(1)进行求解,得到 m 和 γ^* 的取值: $m = 0.119$, $\gamma^* = 4.4 \times 10^{-6}$ 。

1.4 CZM 模型

CZM 模型^[15]运用牵引-分离规律来表征材料的分离现象,将微结构失效机制与连续变形区结合起来,该理论引发了一种新的模拟裂纹扩展的数值模拟方

法。内聚区代表由无应力传递的实际裂纹和有虚拟表面作用力的虚拟裂纹 2 部分组成的扩展裂纹。在外部载荷作用下, 相邻虚拟表面间材料强度逐渐衰减, 内聚力不断增加, 直到临界分离之后, 内聚力下降为零, 裂纹尖端就产生了, 如图 3 所示。由于缺乏微观尺度的试验, 本研究主要通过建立与 Jia 等^[16]进行的双悬臂梁试验相同条件的模型来进行宏观 CZM 参数的验证, 而 CZM 参数是与研究对象的尺寸相关的, 为此通过引用 Turon 等^[17]提出的界面刚度的定义对 CZM 参数进行修正, 这些在我们之前的研究中都已经详细介绍^[10]。本研究中内聚区模型理论及相关参数的选取参考 Chang 等^[10]的研究结果, 通过对比该模型模拟结果与双悬臂梁的试验结果发现, 二者取得了较好的一致性, 从而验证了模型的有效性^[10]。

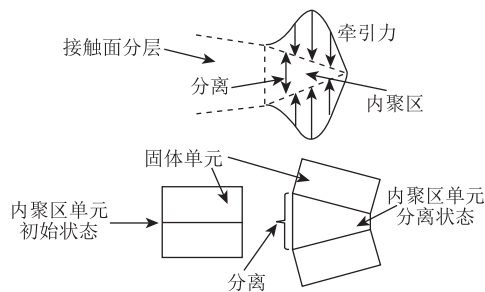


图 3 内聚区原理图

Fig. 3 Principle diagram of cohesive zone

1.5 参数设置

催化层中离聚物的性质也受到温度的影响, 需要在恒定温度下研究相对湿度这一单变量的影响。采用双线性各向同性形式的拉伸曲线, 从 Tang 等^[18]的试验结果可得出离聚物的拉伸曲线两端的斜率, 即为屈服强度和切向模量, 具体数值如表 1 所示。Pt/C 团聚体的强度比聚合物的大很多, 且温度和湿度对于 Pt/C 团聚体的影响相对很小, 所以将 Pt/C 团聚体近似认为是弹性材料, 并且不考虑失效和塑性累积, Pt/C 团聚体颗粒的物理性质如表 2 所示。CZM 模型通过比较法向位移与设定值判断裂纹的产生。设定的最大法向分离值是通过试验曲线与软件仿真的曲线进行拟合, 不断缩小试验与仿真曲线的误差获得, 本模型接触面的法向分离值为 8×10^{-10} m, 对应的最大法向牵引力为 1.1 MPa。

1.6 边界条件和计算工况

本研究运用 ANSYS Workbench 软件中的 Static Structure 模块对 PEMFC 催化层微观结构进行建模仿真。在模型中需要施加与实际相符的边界条件, 才能够在仿真中得出正确的结论。燃料电池在工作时,

表 1 催化层离聚物的物理性质

Tab. 1 Physical properties of ionomer in catalyst layer

温度/℃	屈服强度/MPa	切向模量/MPa
25	4.2	12.37
45	3.6	8.89
65	2.8	7.55
85	2.6	3.35

表 2 Pt/C 团聚体的物理性质

Tab. 2 Physical properties of Pt/C aggregates

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	弹性模量/MPa	泊松比
3 885	1.23×10^{-5}	4 800	0.18

内部的压力在 0.4 ~ 2.0 MPa 之间, 为了简化模型, 对模型施加对称边界条件。对聚合物和 Pt/C 的摩擦类型接触面, 设置摩擦系数 μ 为 0.2^[19], 并将接触面划分成 1 643 个网格单元, 以满足仿真计算的精度。湿度循环在固定的最大相对湿度 90% 和研究的最小相对湿度之间进行, 相对湿度变化幅度 $\Delta RH = RH_{\max} - RH_{\min}$, ΔRH 的取值分别为 30%, 40%, 50%, 60%。研究中温度恒定为 85 °C, 单个循环时间为 400 s, 程序设定如图 4 所示。由于相对湿度的变化对于 Pt/C 的影响非常小, 模拟时忽略了相对湿度变化对其变形的影响。

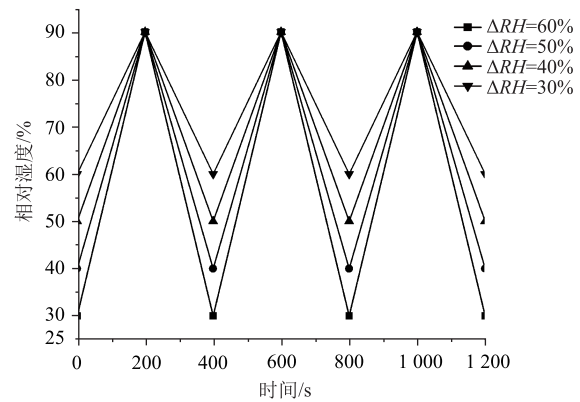


图 4 湿度循环计算条件

Fig. 4 Humidity cycle calculation conditions

2 结果与讨论

2.1 湿度变化幅度对裂纹产生时间的影响

图 5 为不同幅度的湿度循环下裂纹产生的初始时间。湿度循环变化幅度为 60% 时, 产生初始裂纹的时间为 348 s, 变化幅度 50% 产生裂纹的时间为 380 s, 变化幅度 40% 产生裂纹的时间为 789 s, 初始裂纹产生时间随湿度循环幅度减小而增加, 而当变化幅度减小到 30% 时, 经历 100 个湿度循环

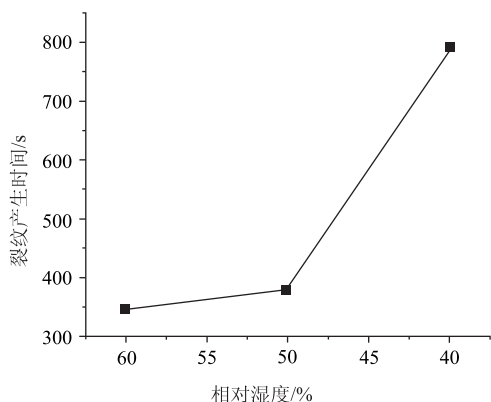


图5 不同幅度湿度循环下裂纹产生的时间

Fig. 5 Time of crack formation under different humidity cycles

(40 000 s) 后仍然无裂纹产生。因此, 启停工况下湿度变化幅度越小, PEMFC 催化层表面裂纹的产生时间越晚, 直至某个较小湿度变化幅度时无裂纹产生。由此可知, 在燃料电池实际工作中, 应尽量避免大幅度的湿度涨落以延缓催化层的衰减。

2.2 湿度变化对裂纹扩展及催化层塑性应变的影响

通过对模型施加不同幅度 (60%, 50%, 40%) 的湿度循环 100 次, 分别观察 1, 2, 10, 30, 50, 70, 90 个循环后, 裂纹产生部位最大分离值的变化, 如图 6 所示。不同湿度循环幅度下界面处都出现了宏观裂纹, 幅度为 60% 时, 随着循环次数的增加, 分离界面之间的分离距离不断增加。当幅度降低为 50% 和 40% 时, 分离界面间的分离距离都呈现出先增后降的趋势, 此可归因于结构变形和塑性硬化 2 个方面。该图中, 水平横线为 CZM 模型裂纹产生的判定值。

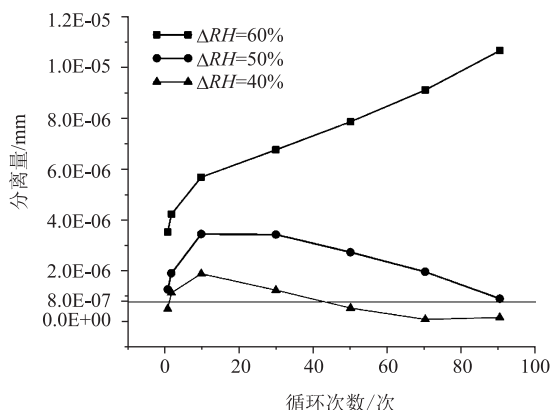
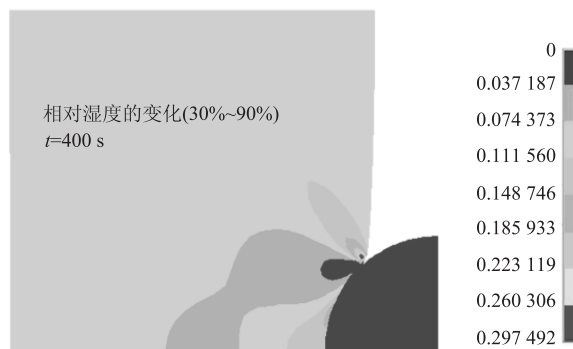


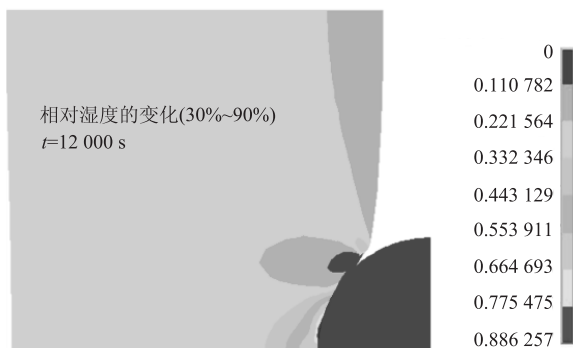
图6 不同幅度湿度循环对于裂纹处分离量的影响

Fig. 6 Influence of humidity cycles with different amplitudes on amount of crack separation

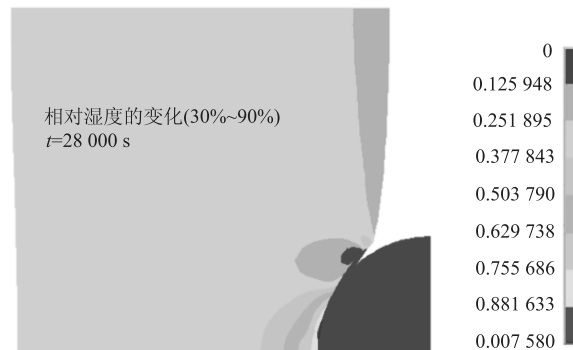
湿度变化不仅会使催化层中离聚物与 Pt/C 之间界面内产生裂纹, 还会在离聚物内部不断累积塑性应变。如图 7 所示, 在 60% 幅度的湿度循环下, 随



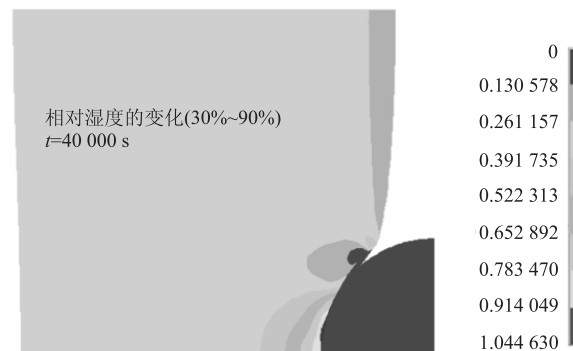
(a) 1个循环后的塑性应变



(b) 30个循环后的塑性应变



(c) 70个循环后的塑性应变



(d) 100个循环后的塑性应变

图7 60%幅度湿度循环之后离聚物的塑性应变

Fig. 7 Plastic strain of ionomer after 60% humidity cycle

着循环次数的增加, 塑性应变在离聚物内部的累积不断增加, 且最大塑性应变的位置也在不断发展变

化。而 100 个湿度循环之后塑性应变的最大值为 1.04, 仍小于其破坏极限 (约 1.7), 因此离聚物不会发生断裂破坏。但是随着循环次数的增加, 塑性应变的累积将有可能达到其破坏极限。

若不考虑其他因素的影响, 离聚物中塑性应变的累积会最终导致离聚物内裂纹的产生和传播扩展, 这是与接触面之间产生裂纹不同的破坏机制。图 8 为不同幅度湿度循环下离聚物内部最大塑性应变的发展变化情况, 较大变化幅度 (60%) 的湿度循环作用下, 塑性应变的累积与上升更加明显与迅速。湿度变化幅度减小时, 随着循环次数的增多, 塑性应变基本趋于稳定。湿度变化不仅会导致离聚物内部塑性应变的累积, 还会导致内聚区域断裂能量的累积, 离聚物内部产生裂纹说明累积的塑性应变超过了强度极限, 内聚区产生裂纹说明内聚区累积的应力达到了应力-分离曲线的最大值, 宏观裂纹开始产生了。因此为避免这种情况的发生, 一方面应当采用更有韧性的材料, 提高破坏极限; 另一方面应当减小湿度变化幅度, 可以研究低湿度下保持良好性能的聚合物膜。

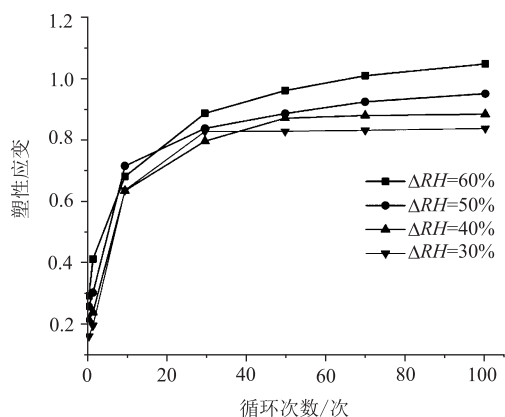


图 8 不同幅度的湿度循环下离聚物中的塑性应变累积

Fig. 8 Plastic strain accumulation in ionomers under humidity cycles with different amplitudes

3 结论

本研究运用 ANSYS Workbench 软件中的 Static Structure 模块对 PEMFC 催化层微观结构进行了建模仿真。研究了 4 个不同幅度 (60%, 50%, 40% 和 30%) 的湿度循环对离聚物与 Pt/C 接触面之间裂纹的产生和离聚物内部塑性应变累积的影响。结果表明, 湿度变化的幅度越大, 接触面之间越容易产生裂纹。湿度循环对裂纹扩展也有很大的影响, 在 60% 幅度湿度循环下, 接触面之间的分离量随着循

环次数的增加不断增大, 而 50% 和 40% 幅度下接触面分离量先增大后减少。湿度循环也会对离聚物内部产生塑性应变的累积, 且这一影响在大幅度的湿度循环下比较明显, 当塑性应变累积达到强度极限之后, 就会产生离聚物的破坏。在燃料电池工作过程中, 应尽量避免大幅度的湿度变化以延缓催化层的机械性能衰减。

参考文献:

References:

- [1] WILSON M S, GOTTESFELD S. High Performance Catalyzed Membranes of Ultralow Pt Loadings for PEFC [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1992, 139 (2): L28-L30.
- [2] CHENG X, ZHANG J L, TANG Y H, et al. Hydrogen Crossover in High-temperature PEM Fuel Cells [J]. Journal of Power Sources, 2007, 167 (1): 25-31.
- [3] 常亚飞. 质子交换膜燃料电池催化层机械衰减的实验与模拟研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
CHANG Ya-fei. Experimental and Simulation Study on Mechanical Degradation of Catalyst Layers in Proton Exchange Membrane Fuel Cells [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [4] WHITE R T, WU A, NAJM M, et al. 4D in Situ Visualization of Electrode Morphology Changes during Accelerated Degradation in Fuel Cells by X-ray Computed Tomography [J]. Journal of Power Sources, 2017, 350: 94-102.
- [5] SILVA R A, HASHIMOTO T, THOMPSON G E, et al. Characterization of MEA Degradation for an Open Air Cathode PEM Fuel Cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37 (8): 7299-7308.
- [6] ZHAO J, SHAHGALDI S, LI X G, et al. Experimental Observations of Microstructure Changes in the Catalyst Layers of Proton Exchange Membrane Fuel Cells under Wet-dry Cycles [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165 (6): F3337-F3345.
- [7] ZHANG J F, LI R T, YIN Y, et al. Ionomer Migration within PEMFC Catalyst Layers Induced by Humidity Changes [J]. Electrochemistry Communications, 2019, 109: 106590.
- [8] BANAN R, BAZYLA A, ZU J. Combined Effects of Environmental Vibrations and Hygrothermal Fatigue on Mechanical Damage in PEM Fuel Cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (4): 1911-22.

(下转第 145 页)

- Aerodynamic Drag Reduction of Heavy Vehicles Using Append Devices by CFD Analysis [J]. Journal of Central South University, 2015, 22 (12): 4645-4652.
- [12] 杨帆, 胡阳洋, 王建华. 重型卡车风阻优化 [J]. 交通运输工程学报, 2013, 13 (6): 54-60.
YANG Fan, HU Yang-yang, WANG Jian-hua. Optimization of Wind Resistance for Heavy Truck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13 (6): 54-60.
- [13] HUANG T, LI S, WAN Z, et al. Investigation of Vehicle Stability under Crosswind Conditions Based on Coupling Methods [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233 (13): 3305-3317.
- [14] MCARTHUR D, BURTON D, THOMPSON M, et al. An Experimental Characterisation of the Wake of a Detailed Heavy Vehicle in Cross-wind [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 364-375.
- [15] 王威, 王军, 李佳峻, 等. 基于涡粘性模型的翼型湍流流场熵产率计算 [J]. 计算力学学报, 2018, 35 (3): 387-392.
- WANG Wei, WANG Jun, LI Jia-jun, et al. Entropy Generation Rates Calculation in Turbulent Flow through an Airfoil Based on Eddy Viscosity Models [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35 (3): 387-392.
- [16] 许建民, 范健明. 厢式货车气动减阻装置的减阻效果研究 [J]. 汽车工程, 2019, 41 (6): 688-695.
XU Jian-min, FAN Jian-ming. A Research on Drag Reduction Effect of Aerodynamic Drag Reducing Device for Van Truck [J]. Automotive Engineering, 2019, 41 (6): 688-695.
- [17] CORALLO M, SHERIDAN J, THOMPSON M C. Effect of Aspect Ratio on the Near-wake Flow Structure of an Ahmed Body [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147: 95-103.
- [18] 许建民, 范健明. 厢式半挂汽车列车附加减阻装置的减阻效果及机理研究 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (12): 134-144.
XU Jian-min, FAN Jian-ming. Study on Drag Reduction Effect and Mechanism of Additional Drag Reduction Device for Van Type Semi-trailer Truck [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (12): 134-144.
-
- (上接第135页)
- [9] RONG F, HUANG C, LIU Z S, et al. Microstructure Changes in the Catalyst Layers of PEM Fuel Cells Induced by Load Cycling. Part I. Mechanical Model [J]. Journal of Power Sources, 2008, 175 (2): 699-711.
- [10] CHANG Y, ZHAO J, SHAHGALDI S, et al. Modelling of Mechanical Microstructure Changes in the Catalyst Layer of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45 (54): 29904-29916.
- [11] QIN Y Z, MA S H, CHANG Y F, et al. Modeling the Membrane/CL Delamination with the Existence of CL Crack under RH Cycling Conditions of PEM Fuel Cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (12): 8722-8735.
- [12] ZHANG Y X, LI X G, KLINKOVA A. Numerical Investigation of Delamination Onset and Propagation in Catalyst Layers of PEM Fuel Cells under Hygrothermal Cycles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (19): 11071-11083.
- [13] KUSOGLU A, KARLSSON A M, SANTARE M H, et al. Mechanical Response of Fuel Cell Membranes Subjected to a Hygro-thermal Cycle [J]. Journal of Power Sources, 2006, 161 (2): 987-996.
- [14] LU Z W, LUGO M, SANTARE M H, et al. An Experimental Investigation of Strain Rate, Temperature and Humidity Effects on the Mechanical Behavior of a Perfluorosulfonic Acid Membrane [J]. Journal of Power Sources, 2012, 214: 130-136.
- [15] JIANG H D. Cohesive Zone Model for Carbon Nanotube Adhesive Simulation and Fracture/Fatigue Crack Growth [D]. Akron: University of Akron, 2010.
- [16] JIA R L, DONG S M, HASEGAWA T, et al. Contamination and Moisture Absorption Effects on the Mechanical Properties of Catalyst Coated Membranes in PEM Fuel Cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37 (8): 6790-6797.
- [17] TURON A, D VILA C G, CAMANHO P P, et al. An Engineering Solution for Mesh Size Effects in the Simulation of Delamination Using Cohesive Zone Models [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74 (10): 1665-1682.
- [18] TANG Y L, KARLSSON A M, SANTARE M H, et al. An Experimental Investigation of Humidity and Temperature Effects on the Mechanical Properties of Perfluorosulfonic Acid Membrane [J]. Materials Science & Engineering: A, 2006, 425 (1/2): 297-304.
- [19] RONG F, HUANG C, LIU Z S, et al. Microstructure Changes in the Catalyst Layers of PEM Fuel Cells Induced by Load Cycling: Part II. Simulation and Understanding [J]. Journal of Power Sources, 2008, 175 (2): 712-723.