

研究论文

质子交换膜燃料电池温度和电流分布同步测定

曹涛锋, 林 鸿, 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室(筹), 陕西 西安 710049)

摘要: 发展了一种新的质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 局部特性测试方法, 该方法实现了在不改变 PEMFC 膜电极和电池结构的情况下对 PEMFC 电流密度和局部温度分布的同步测量。对一种 PEMFC 在自然冷却状态下, 阳极流场板背面温度分布以及阴极电流密度分布进行了实验测定。实验结果表明, 阳极流场板背面最大温差小于 1°C; 电流密度分布主要受电极内液态水分布影响; 同时, 水蒸气冷凝放热导致电池局部温度升高是造成电池温度分布不均的主要因素。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 电流密度分布; 局部温度分布; 自然冷却

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) S1-174-05

Synchronous measurement of temperature and current density distribution of PEMFC

CAO Taofeng, LIN Hong, TAO Wenquan

(Key Laboratory of Thermal Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: A novel local performance measurement method of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) was developed. With this method, current density and local temperature distribution of PEMFC can be assayed simultaneously without modifying the membrane electrode assembly (MEA) structure. Local temperature on back side of the anode flow field plate and cathode current density distribution was tested under nature convection cooling condition. The experiment results showed that, temperature difference in backside of the anode flow field plate was less than 1°C. Current density distribution was mainly affected by the liquid water distribution within the MEA, meanwhile, heat released from water vapor condensation caused local temperature elevation and uneven temperature distribution.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; current density distribution; local temperature distribution; nature convection cooling condition

引 言

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 通过电化学

反应直接将化学能转化为电能, 具有能量转化效率高, 低排放、工作条件温和、室温启动速度快等优点, 在分布式电站、电动汽车、便携式电源等领域

2011-03-20 收到初稿, 2011-03-27 收到修改稿。

联系人: 陶文铨。第一作者: 曹涛锋 (1987—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50636050)。

Received date: 2011-03-20.

Corresponding author: Prof. TAO Wenquan, wqtao@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50636050).

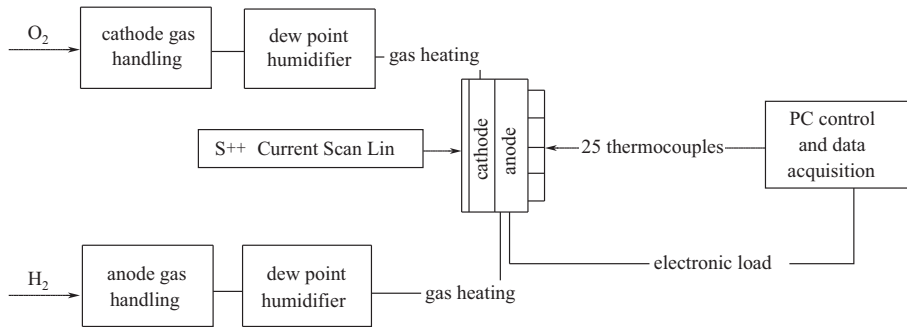


图 1 电池测试系统

Fig. 1 Fuel cell test system

具有广阔的应用前景。在 PEMFC 工作过程中，气体流量在流场板中分配不均，并且膜电极（MEA）为各向异性材质，使得 PEMFC 内电流、温度等参数都呈现出非均匀分布的特点，对电池性能以及运行寿命有着极其重要的影响。因此，对电流分布和温度分布进行实验研究在理解电池运行机理以及优化电池结构方面都具有十分重要的意义。

局部电流分布的测试方法有子电池^[1]、印刷电路板（PCB）^[2]、分割电极^[3-4]、电磁感应^[5-6]等方法；局部温度分布的实验方法有红外热像仪^[7]和热电偶（包括微热电偶^[8]、薄膜热电偶^[9]以及普通热电偶^[10]）等方法，温度测点包括质子交换膜表面^[9]、扩散层表面^[8]以及流场板背面等位置^[7, 10]。上述局部电流及温度分布的测试方法都不同程度地改变了 MEA 结构或电池自身结构，本文利用一种新的局部电流密度测试装置和热电偶对电池阴极电流分布和阳极流场板背面温度分布进行了实验研究，实验过程中没有改变膜电极的结构。

1 实验系统与装置

1.1 燃料电池测试系统

本实验使用 Arbin 公司制造的 FCTS 燃料电池测试系统，该测试系统主要包括气路控制、电子负载以及数据测量和采集等模块。测试系统如图 1 所示。通过该测试系统可以对燃料电池运行工况进行精确控制，如进气流量、温度、加湿器温度以及电池温度、操作压力等运行参数。测试过程中实时采集电池工作电流、电压、温度、压力等信息。

1.2 电流测试装置

实验中使用德国 S++ Simulation 公司制造的 Current Scan Lin Test 50 燃料电池局部电流测试装置对阴极局部电流分布进行测量，该设备的参数以及

安装使用等详细信息见文献 [6]。

实验中使用自行设计并制作的阳极集流板和端板对测试热电偶进行固定。如图 2 所示，热电偶穿过电池阳极端板和集流板上的温度测孔，通过 O 型橡胶圈固定在流场板背面。温度测孔稍大于测试热电偶的直径，使得热电偶和端板之间有一层空气膜，以降低端板温度对热电偶的影响。图 3 给出了温度测点在流场板上的分布情况，25 个温度测点均匀分布在流场板表面。

1.3 温度测试装置

实验用的热电偶为 OMEGA[®] TJ72-CASS-116U-6，误差等级为一级，精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。在正

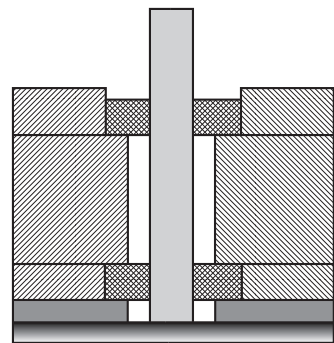


图 2 热电偶安装细节图

Fig. 2 Detail assemble of thermocouple

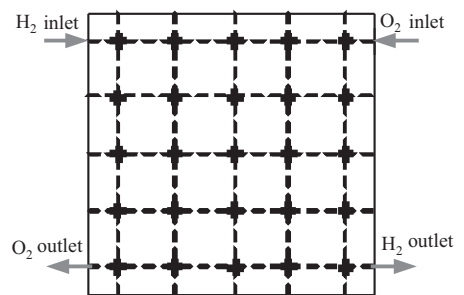


图 3 温度测点和气流方向

Fig. 3 Temperature test point and gas flow directions

式进行温度测试以前用精度 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 的JULABO® ME F26 恒温水槽, 对热电偶进行校核。

2 测试工况和步骤

本实验中使用的 MEA 活化面积 $70\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ 。电解质采用 Nafionk® NER 212 型质子交换膜; 催化剂采用 Pt/C, 60% (质量分数), 阴极和阳极用量均为 $0.4\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$; 气体扩散层采用 Toray® 060 型碳纸。流场板为厚度 2 mm 的石墨板, 流道结构为六蛇形, 流道宽与脊宽均为 1.16 mm, 流道深 1.2 mm, 实物如图 4 所示。

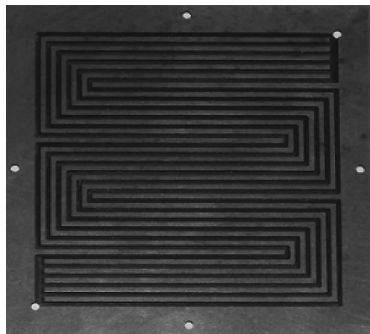


图 4 流场板实物

Fig. 4 Picture of flow plate

实验中采用交叉进气方式, 如图 3 所示。阳极通入高纯氢气, 化学计量比为 2, 加湿度为 100%; 阴极通入高纯氧气, 化学计量比为 4, 加湿度为 25%。进气温度均为 40°C 。电池初始温度 40°C , 操作压力为 101325 Pa, 电池外部热环境为封闭空间自然对流。

在上述相同的运行条件下, 分别测定了 0.3 ~ 0.9 V 条件下燃料电池阴极局部电流分布和阳极局部温度的分布以及变化情况。

3 实验结果与讨论

3.1 测试过程中阳极温度变化

图 5 给出了测试过程中阳极温度随时间的变化情况。随着电池电压的升高, 即电流减小, 电池稳态温度降低。这是因为, 电压越低, 电流越大, 电化学反应放热越多, 欧姆热效应越大, 所以, 在电池散热能力一定的情况下, 电池稳态温度越高; 反之, 电压越高, 电流越小, 则电化学反应放热越少, 欧姆热效应也越小, 所以, 电池稳态温度越低。当电压升高到 0.5 V 时, 电池稳态温度已经和电池初温相同, 稳定在 40°C 左右, 说明, 电池自

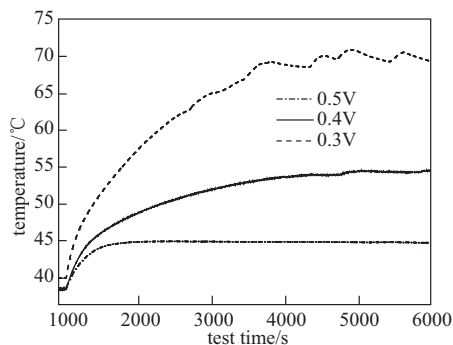


图 5 阳极温度随测试时间的变化

Fig. 5 Variation of anode temperature with time

然冷却所带走的热量已经大于电化学反应本身所放出的热量, 燃料电池测试系统对电池温度的精确控制使得电池温度一直稳定在 40°C 。0.6~0.9 V 的情况与 0.5 V 时相同, 图中没有给出。在电压为 0.3 V 时, 电池温度呈现出周期性升高和降低的特点。这是由于, 在大电流状态下, 电池阴极会产生大量的水, 水蒸气在阴极聚集、冷凝成液态水, 放出热量, 电池温度升高; 与此同时, 液态水阻塞气体扩散层, 阻碍电化学反应进行, 使得电流减小, 电池温度降低; 当水聚集到一定程度, 堵塞流道时, 被反应气体排出电池, 使得更多的氧气进入催化层, 电化学反应加快, 电流增大, 电池温度升高。电池内水的聚集和排空呈周期性, 所以电池温度也表现出周期性升高和降低。其次, 在自然冷却状态下, 电池温度达到稳态时所需时间较长, 大概在 30~50 min 之间, 所以建议在测定电池性能时要对电池进行主动温度控制或者适当延长测试时间, 以保证电池达到稳定状态。

图 6 给出了测定极化曲线过程中阳极温度的

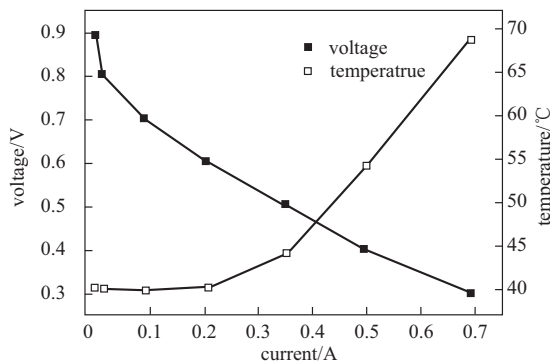


图 6 极化曲线与温度的关系

Fig. 6 Relationship between polarization curve and temperature

变化情况。随着电流的增大，电池温度升高 30℃ 左右。由此可见，在自然冷却条件下测得的电池极化曲线伴随着电池温度的升高。因此，在比较电池极化曲线时，应给出电池温度的变化。因为，相同的极化曲线可能是在不同的电池温度下得到的，即使测试时电池的初始温度是相同的。

3.2 阴极局部电流分布

图 7 给出了燃料电池阴极局部电流密度分布。限于篇幅，只给出了 0.3 V 和 0.8 V 两个典型工况的电流密度分布，其他电压下也具有类似的规律。

各不同电压下，氧气进口区域电流密度最高，电池中心偏左及右下方区域电流密度较低，出口区域具有较高的电流密度水平。这是由于，氧气进口区域，氧气浓度最高，高的氧气浓度有利于提高电化学反应速率，因此电流密度高；在电池中心偏左及右下方区域，根据图 4 所示流场板，此区域对应六蛇形流场板流道拐弯区域，根据文献 [11] 的研究结果，在此类区域液态水容易聚集，造成催化层活性点减少，扩散层传质阻力增大，甚至流道被水淹没的现象，阻碍电化学反应的发生，使得电流密度较低。本文的测试结果进一步验证了文献 [11] 的研究结果。出口区域电流密度较高，这是因为阴极氧气化学计量比设定为 4，因此在整个区域都能保证较高的氧气浓度，从而说明本实验中决定电流密度分布的主要因

素为水的分布情况。随着电压升高，电流降低，局部电流最大值和最小值之间的差值减小，由 0.3 V 的 $0.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降低到 0.8 V 的 $0.01 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，即局部电流密度的不均匀性相对减小，这是由于电池总电流随着电压升高不断降低，使得电流密度局部差异减小，实验测试结果表明 0.8 V 时电池平均电流密度只有 $0.013 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

3.3 阳极局部温度分布

图 8 给出了燃料电池阳极流场板背面温度的分布，此温度为最终稳态温度。限于篇幅只给出了 0.3 V 和 0.8 V 两个典型工况的分布。其他电压下也具有类似规律。

整个区域温度分布比较均匀，最大温差在 1℃ 以内，0.3 V 时最大温差稍大于 0.8 V 时。温度的不均匀性是由电池内产热不均造成的，电池内主要的热源有电化学反应放热、欧姆热以及水蒸气冷凝放热。氧气和质子在电池阴极发生反应生成水并放热，水的冷凝也会首先在阴极发生，因此大部分热量将在阴极产生，而且石墨板具有较高的热导率，造成阳极石墨板背面温度分布比较均匀。对比图 7 和图 8 可以发现，温度相对较高的区域对应电流相对较低区域，前面的分析表明，电流主要受水分布的影响，电流较低区域，有相对较多的液态水分布，因此水蒸气冷凝放热是造成电池温度分布不均的主要因素。与文献 [12] 研究结果类似。如果能用可视化的方法同时研究电池内液态水的分布，会得到更好的结果。

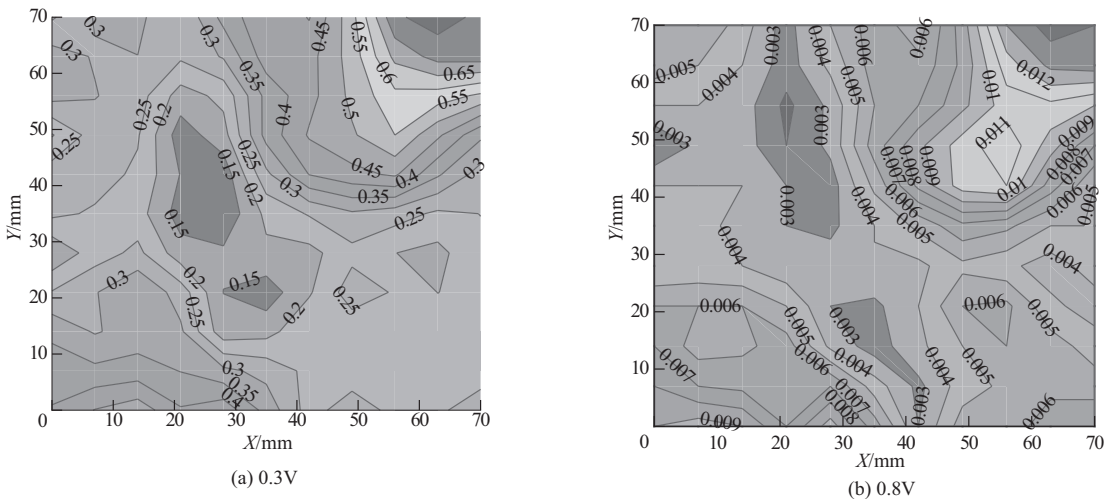


图 7 阴极电流密度分布

Fig. 7 Current distribution of cathode

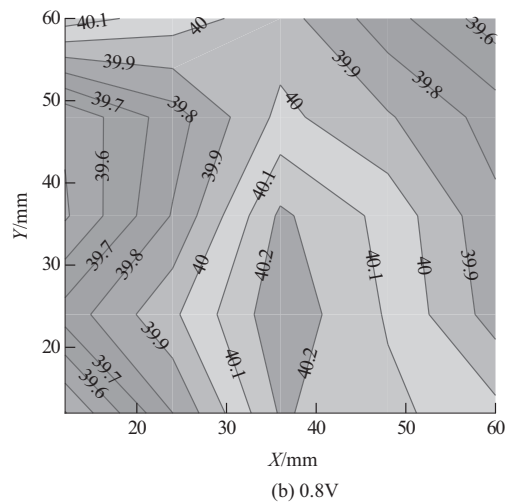
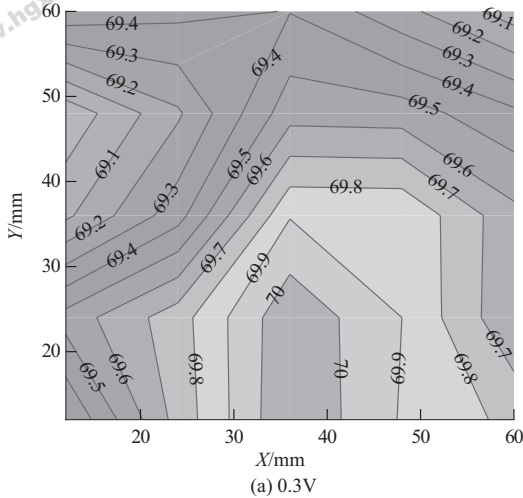


图 8 阳极温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of anode

4 结 论

本文用一种新的局部电流测试方法结合热电偶对一种质子交换膜燃料电池在自然冷却状态下的阴极电流密度分布和阳极流场板背面温度分布进行了实验研究, 得出主要结论如下:

(1) 电池电压为 0.3 V 时, 电池最大温升为 30℃, 随着电流减小, 电池最大温升降低, 升至 0.6 V 时电池保持初始温度不变;

(2) 氧气进口处电流密度最高, 六蛇形流场板流道拐弯处电流密度相对较低, 电流密度分布不均主要是由液态水在电池内的分布造成的;

(3) 阳极流场板背面温度分布比较均匀, 温度相对较高的区域对应电流相对较低区域, 温度分布不均主要由水蒸气冷凝放热造成。

References

[1] Stumper J, Campbell S A, Wilkinson D P, Johnson M C, Davis M. *In-situ* methods for the determination of current distributions in PEM fuel cells [J]. *Electrochimica Acta*, 1998, **43**(24): 3773-3783

[2] Cleghorn S J C, Derouin C R, Wilson M S, Gottesfeld S. A printed circuit board approach to measuring current distribution in a fuel cell [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1998, **28**(7): 663-672

[3] Mench M M, Wang C Y, Ishikawa M. *In situ* current distribution measurements in polymer electrolyte fuel cells [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, **150**(8): A1052-A1059

[4] Yoon Y G, Lee W Y, Yang T H, Park G G, Kim C S. Current

distribution in a single cell of PEMFC [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, **118**(1/2): 193-199

[5] Hauer K H, Potthast R, Wüster T, Stolten D. Magnetotomography—a new method for analysing fuel cell performance and quality [J]. *Journal of Power Sources*, 2005, **143**(1/2): 67-74

[6] Yu Le (于乐), Fan Jinxuan (樊进宣), Tao Wenquan (陶文铨). Experiment study of PEMFC current density distribution [J]. *Journal of Engineering Thermalphysics* (工程热物理学报), 2009, **30**(10): 1378-1740

[7] Wang M H, Guo H, Ma C F. Temperature distribution on the MEA surface of a PEMFC with serpentine channel flow bed [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, **157**(1): 181-187

[8] Vie P J S, Kjelstrup S. Thermal conductivities from temperature profiles in the polymer electrolyte fuel cell [J]. *Electrochimica Acta*, 2004, **49**(7): 1069-1077

[9] He S H, Mench M M, Tadigadapa S. Thin film temperature sensor for real-time measurement of electrolyte temperature in a polymer electrolyte fuel cell [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2006, **125**(2): 170-177

[10] Wilkinson M, Blanco M, Gu E, Martin J J, Wilkinson D P, Zhang J J, Wang H. *In situ* experimental technique for measurement of temperature and current distribution in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2006, **9**(11): A507-A511

[11] Owejan J P, Trabold T A, Jacobson D L, Arif M, Kandlikar S G. Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, **32**(17): 4489-4502

[12] Hakenjos A, Muentert H, Wittstadt U, Hebling C. A PEM fuel cell for combined measurement of current and temperature distribution, and flow field flooding [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, **131**(1/2): 213-216