

研究论文

低流速燃料电池重力辅助排水

裴后昌¹, 涂正凯², 刘志春¹, 沈俊¹, 邱子朝¹, 刘帆¹, 刘伟¹

(¹ 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;

² 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 实验研究了反应气体低流速下质子交换膜燃料电池内液滴自身重力对电池性能的影响。结果显示, 自身重力有利于液滴脱离气体扩散层, 使液态水有效排出电池堆。电池水平放置阴极向下时, 液滴重力与其脱离气体扩散层方向一致, 电池性能最佳; 电池竖直放置时, 液滴重力与气体将其吹扫出电池方向一致, 其向外排水能力最强。反应气体流速较低时, 电池在不同放置方式下, 提高其温度, 电池性能上升; 电池竖直放置时, 气体加湿对电池性能影响不大。电池测试时, 应该避免电池阴极水平向上。

关键词: 燃料电池; 排水; 低流速; 重力; 水管理

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.z1.067

中图分类号: TM 911.4

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157(2014)S1—415—06

Low gas velocity of PEMFC aided by gravity water drainage

PEI Houchang¹, TU Zhengkai², LIU Zhichun¹, SHEN Jun¹, QIU Zizhao¹, LIU Fan¹, LIU Wei¹

(¹ School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; ² State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Low gas velocity in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) can be occurred as gas distribution inconformity. Low gas velocity of PEMFC aided by gravity water drainage was investigated experimentally. It released that gravity can help droplets separate from gas diffusion layer (GDL) which help the liquid water drainage from PEMFC stack too. The experiment released that the performance of stack will be the best when the cathode downward and the droplet gravity accordance to the orientation of the droplet separate from GDL; Gravity drops consistent with the direction of purge gas in the PEMFC stack when the channel was vertical which improved the water management. In different orientation of PEMFC stack channel the output of stack would be increasing as the temperature rising when the reaction gas flow rate was low. The gas humidification had little effect on stack performance when the channel was vertical. It should be avoided that the cathode was horizontal and upwards when the stack was working.

Key words: fuel cells; drainage; low velocity; gravity; water management

2014-02-11 收到初稿, 2014-02-21 收到修改稿。

联系人: 刘伟。第一作者: 裴后昌 (1984—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2012AA1106016)。

Received date: 2014-02-11.

Corresponding author: Prof. LIU Wei, w_lju@hust.edu.cn

Foundation item: supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2012AA1106016).

引 言

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 是一种将储存在燃料中的化学能直接转化为电能的装置^[1]。PEMFC 中水在电池阴极生成, 若水无法有效排除电池外, 则会导致水淹电极, 造成电池输出功率低下甚至导致电池失效, 因此水管理对燃料电池的稳定运行起重要作用^[2-3]。常规氢空燃料电池中, 利用过量反应气体将电池内的水吹离电池, 该方法要求流场板流道内气体流速较高, 国内外对此水管理方法进行了较多研究^[4-9]。但是, 利用过量反应气体进行水管理会导致电池堆反应气体供应量较大, 不利于燃料利用率的提高。若反应气体过量系数较低, 电池流道内气体流速相应降低, 水管理条件变恶劣。同时, 燃料电池堆在运行时, 由于各单电池气体分配不均匀, 或单电池内局部流道堵水, 均会导致局部单电池内气体流速过低或缺气^[10-15]。这些情况的发生, 会造成整个燃料电池堆形成性能短板或者电池的损坏。

为实现燃料电池的高性能、稳定运行, 必须对低流速下燃料电池的运行特性进行研究。本文通过实验, 研究了电池在低流速下, 依靠液滴重力辅助排除水时不同操作条件对电池运行性能的影响。

1 实验材料和方法

本实验利用石墨板设计制作单电池, 如图 1 所示。其中阴阳极流场均为直流道, 流道宽 2.0 mm、深 1.0 mm、岸宽 2.0 mm, 电池活性面积为 20 cm²。燃料电池在运行时, 放出大量热, 温度分布不均会对电池的性能产生很大影响, 为避免电池出现热点对电池的性能产生影响, 阴阳极石墨板背面设置有冷却水流道, 电池工作时, 通过冷却液对电池进行温度控制, 使电池温度更加均匀。本实验 MEA 采用商用膜电极, 碳纸厚度为 2×10^{-4} m, 阴极为 30% 疏水, 阳极为 20% 疏水, 质子交换膜的厚度为 2.5×10^{-5} m, 阴、阳极铂载量均为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

测试中, 单电池阴阳极冷却水流道通入恒温水, 监测单电池不同电池处温度, 保证电池运行时温度在较小范围内波动。测试分如下 3 种方案进行: 方案 a, 将电池流道水平放置, 电池阴极向上, 阳极向下, 此时液滴重力指向催化层, 与反应气体沿流道方向垂直; 方案 b, 电池流道水平放置, 电池阴极向下, 阳极向上, 此时液滴重力与脱离扩散层方向一致, 与反应气体沿流道方向垂直; 方案 c, 电池流道竖直放置。

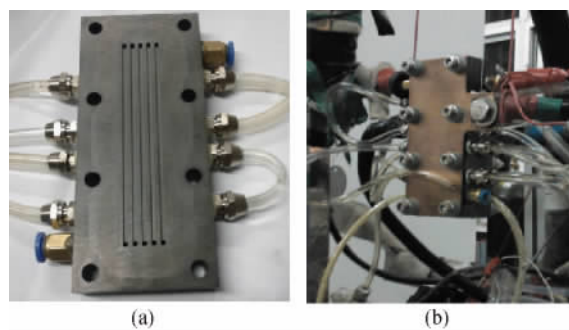


图 1 单电池及测试系统

Fig. 1 Single cell and testing system

通过计算, 得出了不同气体流量下流道内流量的分布规律, 如图 2 所示。从图中可以看出, 当气体流量为 $7.20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 电池内各流道气体流量的差值在 $0.032 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 以内; 当气体流量为 $0.36 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 电池内各流道流量值基本一致。因此, 实验中, 单电池内各流道气体流量可以近似计算为

$$v = Q/5s$$

式中 Q 为气体流量; s 为流道横截面积, 本实验单电池流道横截面积为 $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。反应气体采用氧气, 当气体流量为 $0.36 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时流道内气体流速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 此时气体过量系数不到 1.05。

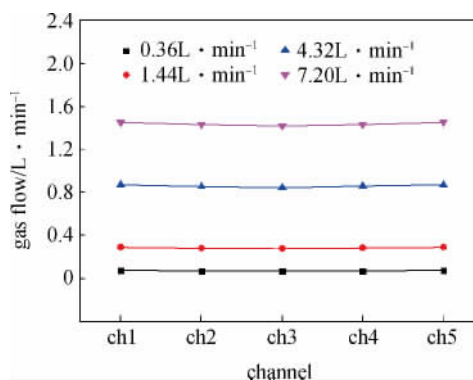


图 2 单电池各流道流量分布

Fig. 2 Flow distribution of each channel

2 实验结果与讨论

2.1 电池基本性能

图 3 为 3 种方案相同操作条件下电池极化曲线。从图中可以看出, 方案 b 电池电压最高, 方案 c 电压最低。当电池在方案 a 运行时, 阴极生成水由于自身重力的作用而附着在气体扩散层上, 气体吹扫力需克服液滴在电池内的黏滞力将水排出; 方案 b 运行时, 水的重力方向与液滴脱离扩散层表面

进入流道的方向一致，重力辅助水排出扩散层，故方案 b 电池内水的排出要优于方案 a；方案 c 运行时，电池内水的重力方向、气体吹扫的方向与水排出电池外方向一致，此时电池向外排水能力最强。在燃料电池内，液滴脱离扩散层表面的能力在方案 b 下最佳，气体扩散层被液滴覆盖概率最小，测试中电压最高；方案 c 中液滴排出电池外的能力最佳，但是若反应气体流量过大，气体将过量水带出电池外，电池性能不佳。在电池运行时，液滴自身重力将影响电池排水能力，这为燃料电池在低流速下的运行提供了可能。

2.2 低流速电池运行特性

图 4 为电池在方案 a 与 b，气体流速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的运行特性。从图中可以得出，方案 a 运行时，电池电压在运行至 1.3 min 时出现瞬时增大，然后电压缓慢恢复至增大前的值，其原因为：此时电池内水聚集堵塞流道，随着流道内堵塞段气体压力增加，电池性能升高，气体继续通入，水被吹出流道，电池性能恢复。当运行至 2.2 min 时，电池电压出现突降。方案 b 中，电池稳定运行

至 1.3min 时电压出现突降。这是由于电池在流速较低时 ($0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)，气体对电池内水的吹扫力较小，水平测试电池容易产生水的积累，导致电池内水淹，电池电压发生突降。由于液滴的重力与反应气体吹扫力同向，方案 c 运行时，没有出现因为水的积累而导致的电压波动及突降。由上述分析可知，通过液滴的重力作用，可以使电池在较低流速下实现稳定运行。

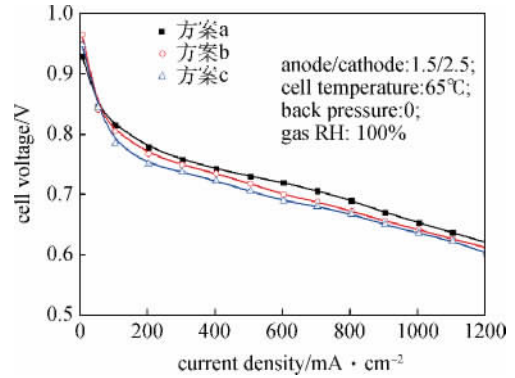


图 3 电池极化曲线

Fig 3 Polarization curve of cell

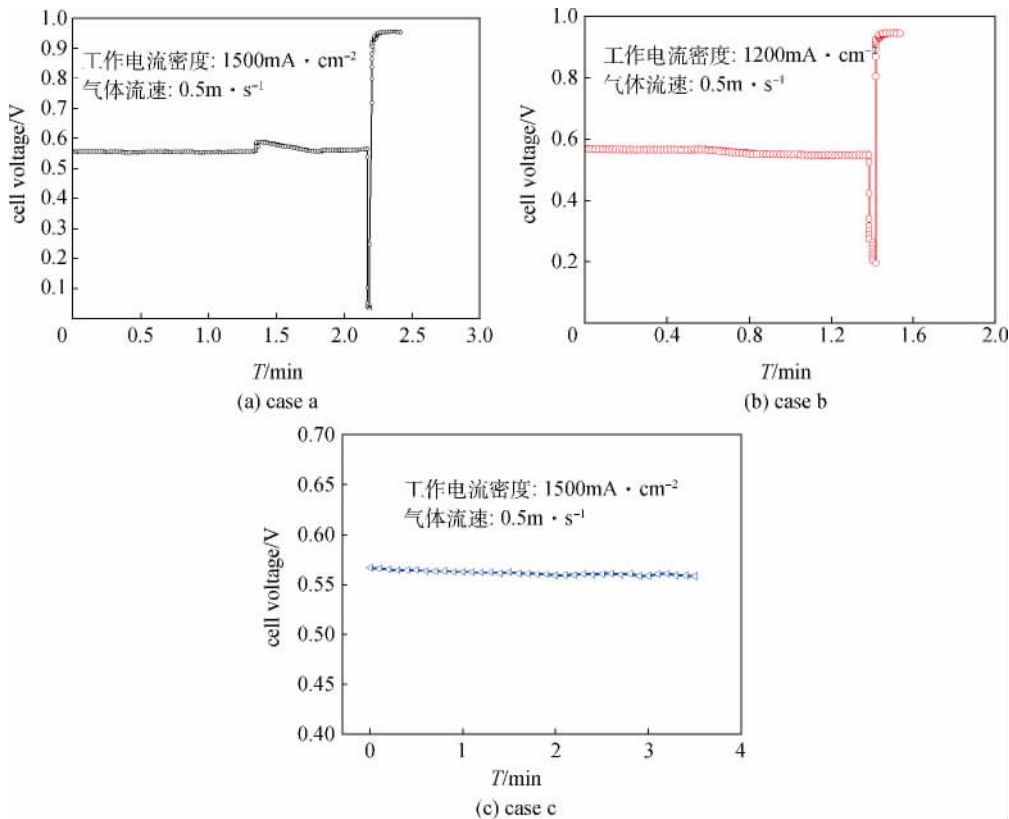


图 4 低流速电池运行特性

Fig 4 Characteristic of low mass flux

2.4 不同温度低流速电池性能

图 5 为气体流速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不同温度下的电池极化曲线。从图中可以看出，方案 b 中，电池温度越高电池电压越高。当工作电流密度为 $600 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时，不同运行温度下电池电压差值小于 0.03 V 。随着工作电流密度的升高，不同温度下电压差值变大。方案 a 中，当电流密度在 $700 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之

前，电池在 40°C 时的性能要高于其在 60°C 时的性能。其原因是：当电池在 60°C 运行时，气体扩散层被水覆盖，反应活性面积减小，电池性能降低，随着电池的运行，当工作电流密度增加至 $700 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，扩散层上的水被冲出了电池，电压出现了跳跃，电池性能升高。在测试方案 c 中，不同温度下电池性能稳定，运行温度越高，电池性能越高。

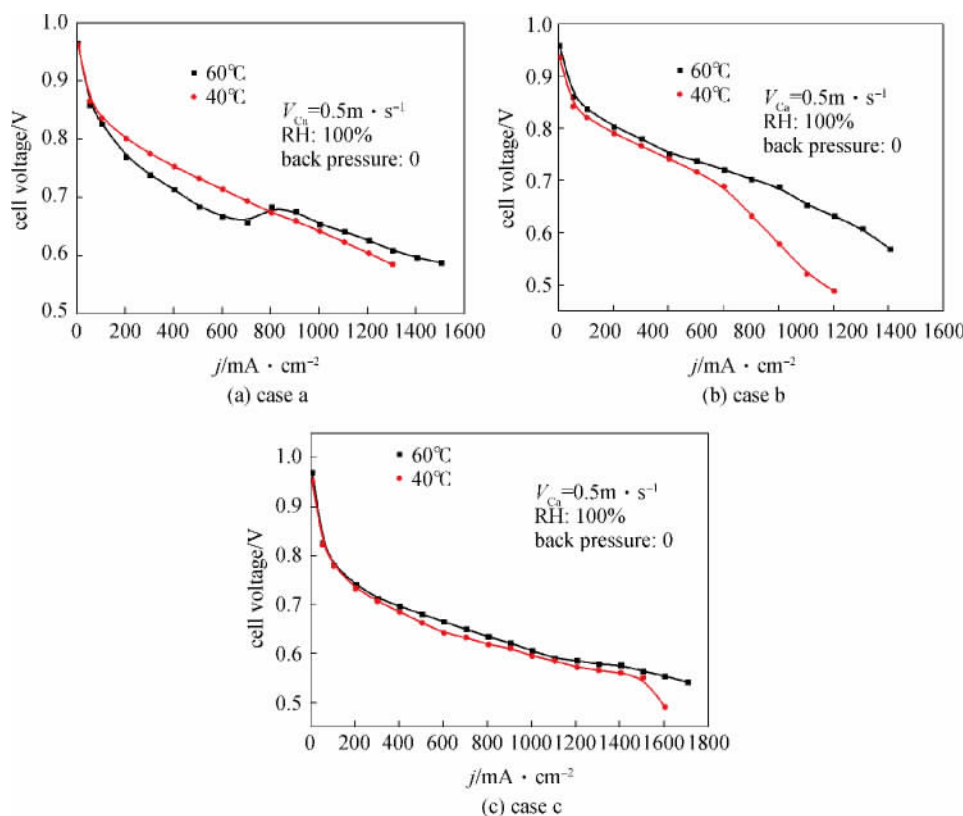


图 5 不同温度下电池性能

Fig. 5 Performance of different temperature

2.5 加湿对电池性能影响

图 6 为反应气体加湿对电池性能的影响。从图中可以看出，气体不加湿时电池性能明显低于反应气体加湿时电池性能。方案 a 测试时，电池反应气体加湿与不加湿性能相差较大，电池竖直放置时，两者性能相差不大。因此，电池竖直放置时，气体加湿对电池性能影响不大。图 6 (d) 为气体不加湿，流道内气体流速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，电池性能曲线。从图中可以看出，流道气体流速较小且不加湿时，方案 b 电池测试性能最佳，方案 a 性能最差。电池反应气体不加湿时，降低反应气体流速能提高电池性能，电池水平放置阴极向下时的性能要高于其他放置方式下的性能。

3 结 论

本文通过实验，研究了液滴自身重力对不同反应气体流速下电池性能的影响，得出以下结论：

- (1) 液滴重力有利于液滴脱离气体扩散层，有效排出电池堆；
- (2) 电池水平放置阴极向下时，液滴重力与其脱离气体扩散层方向一致，电池性能最佳；电池竖直放置时，液滴重力与其排出电池方向一致，电池向外排水能力最强；
- (3) 反应气体流速较低时，电池在不同放置方式下，提高其温度，电池性能上升；电池竖直放置时，气体加湿对电池性能影响不大；

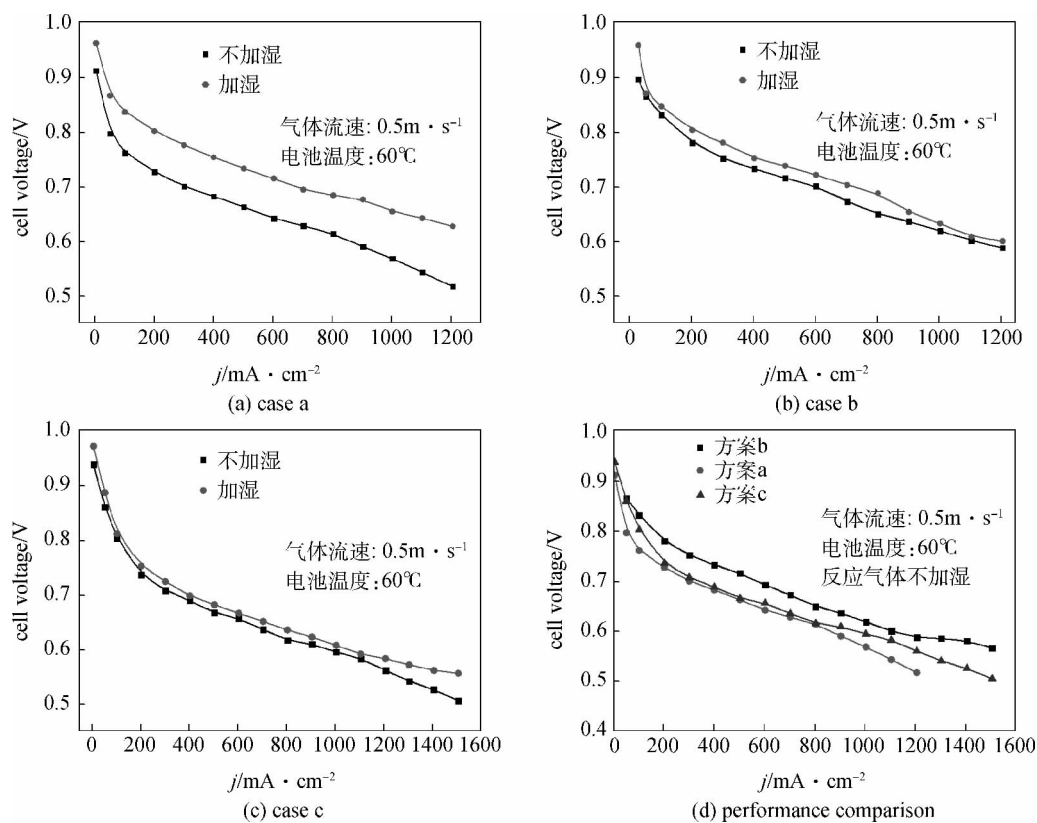


图 6 加湿对电池性能的影响

Fig. 6 Effect of humidification on cell performance

(4) 电池测试时，应该避免电池阴极水平向上。

References

- [1] Tu Z K, Zhang H N, Luo Z P, Liu J, Wan Z M, Pan M. Evaluation of 5kW proton exchange membrane fuel cell stack operated at 95°C under ambient pressure [J]. *J. Power Sources*, 2013, **222**: 277-281
- [2] Li Q, Zhang H N, Tu Z K, Yu J, Xiong C, Pan M. Impregnation of amine-tailored titanate nanotube sinpolymer electrolyte membranes [J]. *J. Membr. Sci.*, 2012, **423/424**: 284-292
- [3] Wang Y, Chen K S, Mishler J, Cho S C, Adroher X C. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research [J]. *Appl. Energ.*, 2011, **88**: 981-1007
- [4] Dai W, Wang H, Yuan X Z, Martin J J, Yang D. A review on water balance in the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2009, **34** (23): 9461-9478
- [5] Perng S W, Wu H W. Non-isothermal transport phenomenon and cell performance of a cathodic PEM fuel cell with a baffle plate in a tapered channel [J]. *Appl. Energ.*, 2011, **88**: 52-67
- [6] Wan Z M, Liu J, Tu Z K, Pan M. Water recovery and air humidification by condensing the moisture in the outlet gas of a proton exchange membrane fuel cell stack [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2012, **42**: 173-178
- [7] Yu Y, Tu Z K, Zhan Z G, Pan M. Gravity effect on the performance of PEM fuel cell stack with different gas inlet/outlet positions [J]. *Int. J. Energ. Res.*, 2012, **36** (7): 845-855
- [8] Ma H P, Zhang H M, Hu J, Cai Y H, Yi B L. Diagnostic tool to detect liquid water removal in the cathode channels of proton exchange membrane fuel cells [J]. *J. Power Sources*, 2006, **162**: 469-473
- [9] Cho E, Ko J J, Ha H Y, Hong S A, Lee K Y. Effects of water removal on the performance degradation of PEMFCs repetitively brought to 0°C [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2004, **151** (5): A661-A665
- [10] Lee S Y, Kim S U, Kim H J. Water removal characteristics of proton exchange membrane fuel cells using a dry gas purging method [J]. *J. Power Sources*, 2008, **180**: 784-790
- [11] Esposito A, Montello A D, Guezennec Y G, Pianese C. Experimental investigation of water droplet-air flow interaction in a non-reacting PEM fuel cell channel [J]. *J. Power Sources*, 2010, **195** (9): 2691-2699
- [12] Ma Haipeng (马海鹏), Zhang Huamin (张华民), Hu Jun (胡军), Cai Yinghua (才英华). Effects of humidification temperature and gas velocity on liquid water distribution and

- removal in cathode channel of PEMFC [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (9): 2357-2362
- [13] Li H, Tang Y H, Wang Z W, *et al.* A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell [J]. *J. Power Sources*, 2008, (178): 103-117
- [14] Larminie J, Dicks A. *Fuel Cell Systems Explained* [M]. New York: *John Willey & Sons Inc.*, 2006: 32-33
- [15] Wan Z M, Liu J, Luo Z P, Tu Z K, Liu Z C, Liu W. Evaluation of self-water-removal in a dead-ended proton exchange membrane fuel cell [J]. *Appl. Energ.*, 2012, DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2012. 12. 008