

DOI: 10.13208/j.electrochem.160815

Artical ID:1006-3471(2018)02-0189-05

Cite this: *J. Electrochem.* 2018, 24(2): 189-193

Http://electrochem.xmu.edu.cn

旋转磁场对质子交换膜燃料电池工作性能的影响

吴懋亮*, 王恩泽, 潘广德, 刘中俊, 谢 飞

(上海电力学院, 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘要: 外加磁场可以提高 PEM(Proton Exchange Membrane, 质子交换膜)燃料电池的工作性能, 本文通过在 PEM 燃料电池表面分别附加正方形梯度磁场、同极性组合圆柱形磁场以及异极性组合圆柱形磁场, 分析旋转磁场、静态磁场以及未加磁场 3 种磁场环境下燃料电池的输出功率密度变化. 研究发现, 外部磁场的分布规律不同, 磁场的变动对燃料电池的影响也不相同, 尤其是异极性组合磁场, 旋转的磁场使燃料电池的最大功率密度提高了 21.27%, 明显高于加载静态磁场时提高的 11.70%. 旋转磁场产生的效果与磁场旋转速度有关, 提高转速有利于增强磁场对燃料电池工作性能的影响, 当转速为 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时影响最大, 随着转速进一步提高, 影响效果逐渐变差.

关键词: PEM 燃料电池; 旋转磁场; 旋转速度; 工作性能

中图分类号: O646; TM911.42

文献标识码: A

PEM 燃料电池具有能量转化率高、运行噪音低、可靠性能高、工作温度低以及设计拓展性强等优点, 可设计成规模从几瓦到几兆瓦的不同电压等级和电流等级的电源^[1-2]. 但其高昂的生产成本极大地限制了它的普及利用, 降低燃料电池的制造成本和进一步提高燃料电池的工作性能显得尤为重要.

PEM 燃料电池的工作性能不仅与燃料电池的催化剂材料^[3]、流道形式^[4]等有关, 还与外部操作环境如温度、操作压力及湿度等因素有关^[5-6]. 进一步研究表明, 磁场对燃料电池的工作性能具有重要的影响, 从微观角度来看, 带电粒子的运动产生物质的原磁矩, 这些原磁矩有序排列时, 便形成了物质的磁性^[7-9]. PEM 燃料电池中的反应气体都是弱磁性气体, 其中氧气是顺磁性气体, 氢气为逆磁性气体, 磁场环境中顺磁性的氧气沿着磁感应强度减小的方向运动, 而氢气则沿着磁感应强度增大的方向运动^[8], 同时价电子在磁场中运动时, 会受到洛伦兹力的作用^[9]. Matsushima 等研究了梯度磁场对燃料电池工作性能影响的作用机理, 通过附加磁场变更燃料电池的外部工作环境, 提高了燃料电池的工作性能. 磁场方向、磁场强度、磁场极性等的变化都将改变燃料电池输出功率^[10]. Okada 等研究了磁场对燃料电池内部氧气消耗的影响,

通过实验验证了磁场对氧气的吸引以及提高燃料电池工作性能的作用^[11].

本文通过在 PEM 燃料电池加载磁场, 并通过实验研究在不同磁场形式如梯度磁场、同极性组合磁场、异极性组合磁场在静止和旋转的不同磁场状态下 PEM 燃料电池极化曲线和功率密度的变化, 以及磁场转速对磁场作用效果的影响规律.

1 实验

实验测试系统主要由 PEM 燃料电池、磁场生成系统和燃料电池测试系统 3 部分组成, 燃料电池工作过程中加载磁场如图 1 所示.

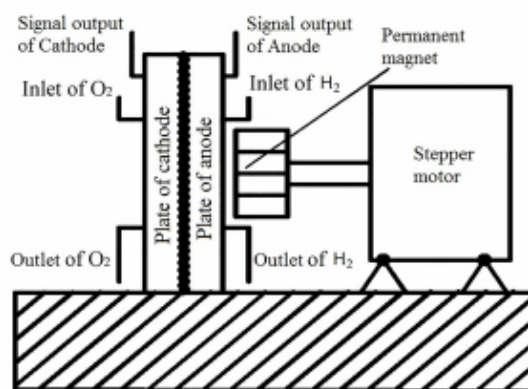


图 1 实验测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment test system

平板形 PEM 燃料电池中双极板流道分别由 7×7 共 49 个方形柱体间隔, 使气流产生充分扰动, 保证氢气与氧气在极板内的均匀分布以及使膜电极组件附近始终有充足的氢气和氧气参与电化学反应. 采用 Nafion-115 (Dupond) 膜电极, 膜电极中的催化剂层的铂载量为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 有效活性面积为 4.84 cm^2 . 采用 20 目不锈钢网做集流板, 保证了孔隙率和导电性之间的平衡.

梯度磁场由钕铁硼永磁体产生, 本实验采用的永磁体有两种形式, 一是长宽高分别为 20 mm、20 mm、10 mm 的矩形钕铁硼磁铁, 且磁场强度随着远离磁铁表面逐渐减小, 形成梯度磁场. 二是由直径 5mm、高 10mm 的圆柱形钕铁硼磁铁组成, 4×4 阵列的圆柱形磁铁组合成与矩形磁铁尺寸相同的 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的磁铁阵列, 根据磁极的不同, 分别采用 N 极同向的同极性组合 (图 2A) 和 N 极与 S 极交替排列的异极性组合 (图 2B). 实验中磁铁放置在氢气侧, 磁铁背面与步进电机主轴相连, 通过控制步进电机的转动, 使得磁铁同步旋转, 在燃料电池内部产生变化的梯度磁场.

实验过程的监控和数据采集是由 ARBIN 燃料电池测试系统 (FCTS-50H) 完成, 主要用于控制燃料电池中的操作温度、操作压力、进气流量以及背压等控制参数, 通过控制操作参数监测燃料电池的工作性能的变化, 自动测量数据并记录存盘. 实验过程中每隔 5 秒自动采集一次数据, 通过这些数据可以绘制燃料电池的极化曲线和功率密度曲线等. 实验中采用的操作参数如下: 加热温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 操作温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 环境温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$. 氢气、氧气及氮气的纯度均为 99.99%. 氢气流量固定为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 氧气流量为 $0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 梯度磁场对 PEM 燃料电池工作性能的影响

根据磁化理论, 梯度磁场产生的磁梯度力, 顺磁性的氧气沿着磁感应强度减小的方向运动, 而氢气则沿着磁感应强度增大的方向运动, 旋转的磁场能实现对顺磁质和逆磁质的搅拌并使反应物分配均匀反应充分. 磁场作用于燃料电池电化学反应不仅与磁梯度力有关, 而且与磁流体力学有关, 价电子 e 以速度 v 在磁感应强度为 B 的磁场中运动时, 会受到洛伦兹力的作用. 由于价电子在运动过程中受到的洛伦兹力与其运动方向垂直,

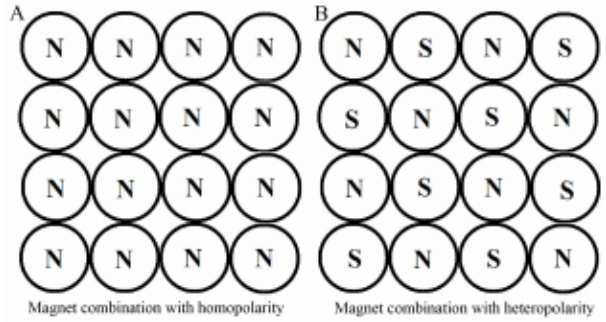


图 2 圆柱形磁铁的组合形式
Fig. 2 Combination types of cylinder magnets

因此洛伦兹力对价电子的运动影响较大. 在 PEM 燃料电池中的电化学反应中, 旋转磁场将影响膜电极组件附近的电子及氢气和氧气的流动.

图 3 是采用矩形钕铁硼磁铁 (表面中心的磁场强度为 310 mT) 作为梯度磁场源, 对比不加磁场、静态梯度磁场和转速为 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的旋转梯度磁场情况下燃料电池的极化曲线和功率密度曲线, 不加载磁场、静态磁场和旋转磁场时燃料电池输出的最大功率密度分别为 $81.51 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $89.93 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $93.27 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. 静态梯度磁场和旋转梯度磁场分别提高燃料电池的功率密度 10.29%、14.39%. 在矩形磁铁的作用下, 梯度磁场是否旋转对燃料电池的最大功率密度提升具有一定的影响, 输出功率的差值为 4.10%. 从图 3 可以看出, 外加磁场提高了燃料电池的输出功率, 与静态磁场相比, 旋转磁场效果更加明显.

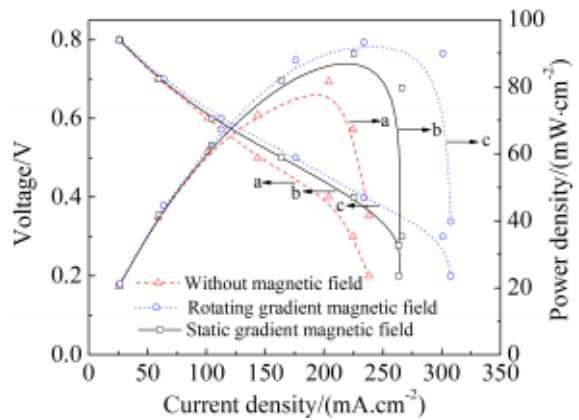


图 3 矩形磁铁对燃料电池的极化曲线与功率密度曲线的影响
Fig. 3 Effects of rectangle magnet on polarization and power density curves in a PEM fuel cell

2.2 同极性组合磁场对 PEM 燃料电池工作性能的影响

同极性组合磁铁(图 2A)的 N 极朝向燃料电池, S 极背离燃料电池, 放在燃料电池的氢气侧. 从图 4 可以看出, 不加载磁场、加载静态同极性磁场、加载旋转同极性磁场 3 种情况下输出的最大功率密度分别是 $81.51 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $86.13 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $89.96 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. 加载静态同极性磁场时功率密度比不加磁场时提高了 5.67%, 加载旋转的同向磁场时功率密度比不加磁场时提高了 10.37%, 输出功率差值为 4.7%, 这说明旋转组合磁场优于静态同极性磁场, 与图 3 所示的矩形磁铁产生的旋转磁场相比, 旋转的同向组合磁场提高功率数值比率更大一些.

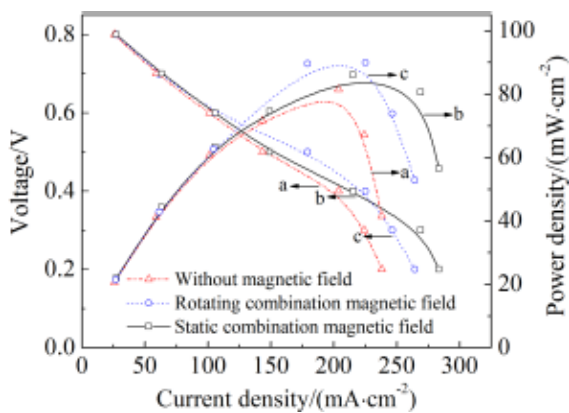


图 4 同极性组合磁铁对燃料电池的极化曲线与功率密度曲线的影响

Fig. 4 Effects of magnet with homopolarity on polarization and power density curves in a PEM fuel cell

2.3 异极性组合磁场对 PEM 燃料电池工作性能的影响

异极性组合磁铁的 N、S 极交替排列, 同样放在燃料电池的氢气侧, 实验测定了不加载磁场、加载静态异极性组合磁场和加载旋转异极性组合磁场 3 种状态下的平板型 PEM 燃料电池的极化曲线和功率密度曲线如图 5 所示. 不加载磁场时的最大功率密度为 $81.51 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, 加载静态异极性组合磁场时最大功率密度提高到 $93.25 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, 加载旋转异极性组合磁场时的最大功率密度为 $98.85 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. 燃料电池加载静态磁场比不加磁场时功率密度提高了 11.70%. 当将加载在燃料电

池上的磁场旋转后, 旋转的磁场能进一步提高燃料电池的功率密度, 最大功率密度比不加磁场时提高了 21.27%. 研究燃料电池的极化曲线发现, 当不加载磁场、加载静态交变磁场、加载旋转交变磁场 3 种状态下, PEM 燃料电池的极化曲线斜率的绝对值依次逐渐减小, 这说明 PEM 燃料在相同的输出电压下, 电流的输出能力逐渐加强, 加载旋转的异极性组合磁场提高了 PEM 燃料电池的电流输出能力.

图 3 至图 5 显示了磁场对提高燃料电池的输出功率密度以及提高燃料电池工作的稳定性具有良好的效果. 研究发现, 燃料电池工作性能的提高与磁场总强度有关, 对于组合磁场, 尽管圆柱形磁铁表面磁场强度与矩形相同, 但由于表面磁场不连续, 部分区域磁场强度较低, 因此, 同极性组合磁场相较于相对均匀分布的矩形磁场提高燃料电池的功率密度幅度要小一些. 同时, 磁场对燃料电池工作性能的影响与磁场梯度有关, 异极性组合磁场的磁场梯度大于同极性组合磁场, 因此, 工作性能增强效果更明显. 旋转状态下的磁场对燃料电池工作性能提高尤为显著, 磁场旋转效果与磁场的类型有关, 对于均匀磁场(如矩形磁场), 旋转产生的影响较小, 而对于梯度变化较大的磁场, 尤其是异极性的组合磁场, 旋转进一步提高输出功率密度.

2.4 磁场旋转速度与 PEM 燃料电池工作性能的关系

图 3 至图 5 显示了磁场对提高燃料电池的作

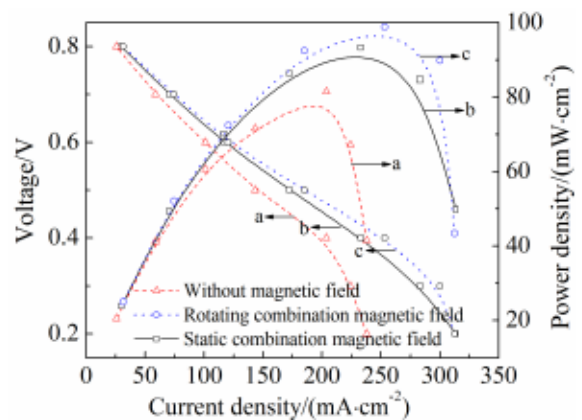


图 5 异极性组合磁场时燃料电池的极化曲线与功率密度曲线

Fig. 5 Effects of magnet with heteropolarity on polarization and power density curves in a PEM fuel cell

用,尤其可以看出旋转磁场对燃料电池工作性能的影响.研究采用图 2B 所示的异极性组合磁铁产生磁场,分别以 $0 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $15 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速旋转磁铁,观察转速与 PEM 燃料电池工作性能的关系.由图 6 可知,燃料电池在不同转速条件下,最大功率密度分别是 $93.25 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $95.61 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $98.85 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $95.76 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$.从功率密度曲线可以发现, $15 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速条件下,与静态磁场作用相比,燃料电池输出功率密度提高了 2.53%、6.01%、2.69%.可以看出,在低速范围内,随着转速的增加,磁场对燃料电池内部的流体流动搅拌效果逐渐增强,磁场的影响效果逐渐提高,在 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 达到最大值,随着转速进一步提高,反而弱化了磁场的作用,转速继续增大燃料电池的性能反而会逐渐下滑.在本实验条件下当磁铁以 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速变化时,燃料电池可以获得更加优化的工作性能.

3 结 论

通过在燃料电池上分别加载静态和旋转两种状态下的梯度磁场、同极性组合磁场以及异极性组合磁场,研究磁场对 PEM 燃料电池工作性能的影响,得出如下结论:

1) 外加磁场提高了燃料电池的工作性能,静态磁场条件下,磁场影响与磁场强度和磁场梯度有关,梯度磁场、同极性组合磁场和异极性组合磁场分别提高燃料电池的最大功率密度 10.29%、5.67%、11.70%.

2) 磁场旋转可以进一步提高燃料电池的工作性能,燃料电池输出功率密度的提高幅度与磁场

性质有关,磁场分布变化越大,旋转产生的效果越好.对于磁场分布变化较大的组合磁场,特别是异极性组合磁场,加载旋转磁场比加载静态磁场时燃料电池输出的功率密度增大 9.57%,而对于磁场分布相对均匀的矩形梯度磁场,在磁场旋转时只比静态时提高了燃料电池输出功率密度的 4.10%.

3) 磁场对燃料电池输出功率密度的提高效果与磁铁转速有关,转速为 $15 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,燃料电池的功率密度相比静态磁场进一步提升 2.53%、6.01%、2.69%.

参考文献(References):

- [1] Hou M(侯明), Yi B L(衣宝廉). Progress and perspective of fuel cell technology[J]. Journal of Electrochemistry(电化学), 2012, 18(1): 1-13.
- [2] Kloess J P, Wang X, Liu J, et al. Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2009, 188(1): 132-140.
- [3] Li S(李赏), Zhou F(周芬), Chen L(陈磊), et al. Dynamic simulation of oxygen reduction reaction INPT/C electrode for proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Electrochemistry(电化学), 2016, 22(2): 129-134.
- [4] Chen S Z(陈士忠), Liu J(刘健), Chen N(陈宁), et al. Research status on flow field of PEM fuel cell[J]. Renewable Energy Resources(可再生能源), 2014, 32(12): 1908-1916.
- [5] Sun J(孙佳), Guo H(郭桦), Chen S Z(陈士忠), et al. Experimental analysis of operating performance of PEM fuel cell(I)—effect of temperature on performance of PEM fuel cell[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)(沈阳建筑大学学报(自然科学版)), 2006, 22(3): 518-523.
- [6] Wang W D(王文东), Chen S(陈实), Wu F(吴锋). Effects of temperature, pressure and humidity on the performance of proton exchange membrane fuel cells[J]. Energy Research and Information(能源研究与信息), 2003, 19(1): 39-46.
- [7] Cai J(蔡军), Wang L(王立), Wu P(吴平). Experimental research on oxygen enrichment using gradient magnetic field [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing(北京科技大学学报), 2006, 28(11): 1058-1063.
- [8] Monzon L M, Coey J M. Magnetic field in electrochemistry: The Kelvin force. A mini-review[J]. Electrochemistry Communications, 2014, 42(5): 42-45.
- [9] Monzon L M, Coey J M. Magnetic field in electrochemistry: The Lorentz force. A mini-review[J]. Electrochemistry Communications, 2014, 42(5): 38-41.

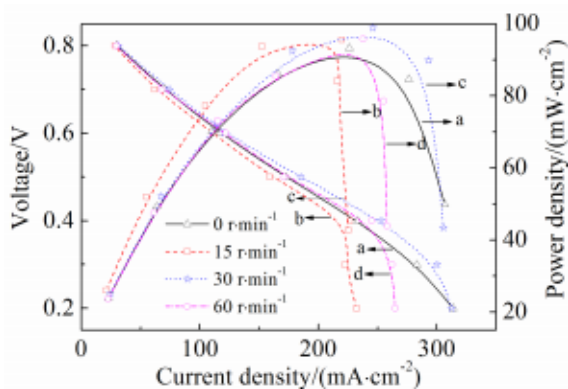


图 6 不同转速时燃料电池的极化曲线与功率密度曲线
Fig. 6 Polarization and power density curves measured in a PEM fuel cell under different revolution speeds

- [10] Matsushima H, Lida T, Fukunaka Y. PEMFC performance in a magnetic field[J]. *Fuel Cells*, 2008, 8(1): 33-36.
- [11] Okada T, Wakayama N, Wang L, et al. The effect of magnetic field on the oxygen reduction reaction and its application in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2003, 48(5): 531-539.

Effects of Rotating Magnetic Fields on PEM Fuel Cell Performance

WU Mao-liang*, WANG En-ze, PAN Guang-de, LIU Zhong-jun, XIE Fei

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, 200090)

Abstract: Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell performance may be improved by application of additional magnetic fields. In this work, one square permanent magnet, made of either 16 combination cylinder magnets with homopolarity or 16 combination cylinder magnets with heteropolarity, was exerted on the fuel cell surface to produce additional magnetic field affecting PEM fuel cell performance. The influences of magnetic field status (rotating, static and none) on polarization and power density curves measured in a PEM fuel cell were investigated. The results verified the benefit of magnetic field, proving that the magnetic field distribution could improve the fuel cell output. Especially, the rotating combination magnet with heteropolarity enlarged the power density by 21.27%, which has advantage to the static magnetic field of 11.70% enhancement. Finally, the rotating speed was related to the fuel cell output power. High rotating speed was beneficial to the performance improvement, and the maximum power density was obtained at $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. However, the performance became worse upon further acceleration.

Key words: PEM fuel cell; rotating magnetic field; rotating speed; performance