

质子交换膜燃料电池堆散热特性研究

万忠民¹ 沈俊² 裴后昌² 刘靖¹ 万军华¹
涂正凯³ 刘志春² 刘伟²

(1 湖南理工学院物理系, 湖南 岳阳 414006;
2 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;
3 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 本文通过理论分析质子交换膜燃料电池堆各种方式的散热量, 得到燃料电池堆散热主要由冷却循环水交换出电堆。同时组装 46 片电堆, 搭建实验平台, 根据实验数据, 对这一结论进行了进一步验证。结果表明: 稳态时空气流量对电堆换热量可以忽略不计, 约 97% 的产热量由冷却水通过热交换移出电堆。

关键词 质子交换膜燃料电池; 散热量; 热交换; 氢空

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)10-1952-04

Research of Characteristic of Heat Transfer About Proton Exchange Membrane Fuel Cell

WAN Zhong-Min¹ SHEN Jun² PEI Hou-Chang² LIU Jing¹ WAN Jun-Hua¹ TU Zheng-Kai³
LIU Zhi-Chun² LIU Wei²

(1. Department of Physics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China;
2. College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract Based on the theoretical analysis of heat released in PEMFC stack, it is found that heat generated in the PEMFC stack heat was mainly removed by coolant water. Meanwhile, a 46 single cell stack is designed and assembled to verify the results experimentally. The conclusion is that the effect of air flux on the heat removal in the stack could be neglected, about 97% of the heat generated in the PEMFC stack is removed by coolant water.

Key words proton exchange membrane fuel cell; heat release amount; heat exchange; hydrogen/air

0 引 言

针对当前环境污染以及化石能源不断消耗的现状, 高效、清洁的替代能源成为当今世界各国能源政策的主导方向^[1]。质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 是一种将贮存在氢燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置, 其主要产物为水, 且发电效率在 50% 以上, 因而, 质子交换膜燃料电池已广泛示范运用于汽车发动机、移动电站以及潜艇动力系统^[2,3]。燃料电池在反应过程中约 50% 的能量将以热量的形式释放出来, 电池的热管理已成为制约电池商业化发展的一个重要因数。燃料电池的冷却方式

有阴极空气冷却法、反应空气与冷却空气分离法和水冷法三种^[4]。其中, 前两种冷却方式分别使用小于 100 W 和 100 W~1 kW 的电池系统^[5]。空气冷却虽然构造简单, 但不能保证每片电池的温度的均匀性。实际应用中, 电堆多采用水冷散热方式。因其较空冷电堆有更小体积, 结构更紧凑, 且由于水的比热容较大, 其换热效果更加明显。

本文通过研究水冷质子交换膜燃料电池堆各种散热方式对总散热量的影响, 在此基础上搭建实验平台, 实验研究不同的进气参数以及冷却水流量对电

收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51036003; No.51106046; No.51376058); 湖南省自然科学基金 (No.11JJ4032)

作者简介: 万忠民 (1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事燃料电池性能优化研究。通信作者, 万军华, 副教授, E-mail: junhuawan@sohu.com.

堆换热特性的影响。

1 理论分析

燃料电池在反应过程中放出的热量主要由冷却水循环水的热交换、反应气体的对流换热作用移出电堆。

1.1 电堆的发热量

对于具有 n 节电池的电堆来说, 在电流为 I (A) 时产生的热量可表示为^[4]:

$$Q = nI(1.25 - V_c) \quad (1)$$

其中, V_c (V) 为电堆的平均电压。

1.2 电堆进口流体参数

若电堆进气温度为 T_{in} (°C), 加湿度为 RH , 过量系数为 λ , 入口压力为 p_{in} (Pa), 则入口空气的质量流量为^[6]:

$$\dot{m}_a = \frac{n\lambda I}{0.21 \times 4 \times F} M_{air} = 1.19\lambda \frac{nI}{F} M_{air} \quad (2)$$

其中, F (C·mol⁻¹) 为法拉第常数, M_{air} (kg·mol⁻¹) 为空气的摩尔质量。

入口加湿水的质量流量为:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{add,H_2O} &= \frac{M_{H_2O}}{M_{air}} \frac{p_{in,H_2O}}{p_{in} - p_{in,H_2O}} \dot{m}_a = \\ &= \frac{n\lambda I}{0.21 \times 4 \times F} \cdot \frac{RH \cdot p_{sat}(T_{in})}{p_{in} - RH \cdot p_{sat}(T_{in})} M_{H_2O} = \\ &= 1.19\lambda\phi \frac{nI}{F} M_{H_2O} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\phi = \frac{RH \cdot p_{sat}(T_{in})}{p_{in} - RH \cdot p_{sat}(T_{in})}$ 定义为进口加湿参数, M_{H_2O} (kg·mol⁻¹) 为水的摩尔质量, p_{in,H_2O} (Pa) 为水蒸气的进气分压。

1.3 电堆出口流体参数

电堆出口氧气的质量流量可表示为:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{n\lambda I}{4F} M_{O_2} - \frac{nI}{4F} M_{O_2} = 0.25(\lambda - 1) \frac{nI}{F} M_{O_2} \quad (4)$$

电堆出口氮气的质量流量可表示为:

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{0.79 n\lambda I}{0.21 \cdot 4F} M_{N_2} = \frac{0.94 n\lambda I}{F} M_{N_2} \quad (5)$$

其中, M_{O_2} (kg·mol⁻¹) 与 M_{N_2} (kg·mol⁻¹) 分别为氧气和氮气的摩尔质量。

电堆出口处的水主要来自两部分: 一部分为加湿水; 另一部分为反应生成的水(不考虑入口空气的水含量以及膜中水的扩散作用), 其组成为气态水和液态水。若电堆出口气体的总压力为 P_{out} (Pa), 温

度为 T_{out} (°C), 则电堆出口中饱和水蒸气的质量流量可表示为:

$$\dot{m}_{g,H_2O} = (1.19\lambda - 0.25) \frac{p_{sat,out}}{p_{out} - p_{sat,out}} \frac{nI}{F} M_{H_2O} \quad (6)$$

其中, $p_{sat,out}$ (Pa) 为出口水蒸气的饱和压力。

电化学反应生成的水的速率为:

$$\dot{m}_{re,H_2O} = \frac{nI}{2F} M_{H_2O} \quad (7)$$

电堆出口液态水的质量流量为:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{l,H_2O} &= [1.19\lambda\phi + 0.5 - \\ &= (1.19\lambda - 0.25) \frac{p_{sat,out}}{p_{out} - p_{sat,out}}] \frac{nI}{F} M_{H_2O} \end{aligned} \quad (8)$$

1.4 对流换热量

电池反应过程中, 电池的对流换热主要体现在未反应气体的热交换作用, 则未反应气体的对流换热量可表示为:

$$\begin{aligned} Q_{gas} &= \dot{m}_{O_2} C_{p,O_2} (T_{in} - T_{out}) + \dot{m}_{N_2} C_{p,N_2} (T_{in} - T_{out}) + \\ &= \min\{\dot{m}_{add,H_2O}, \dot{m}_{g,H_2O}\} C_{p,H_2O} (T_{in} - T_{out}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\min\{\dot{m}_{add,H_2O}, \dot{m}_{g,H_2O}\}$ 表示二者中的最小值, 表示水蒸气带走的能量。 C_{p,O_2} (J·kg⁻¹·°C⁻¹), C_{p,N_2} (J·kg⁻¹·°C⁻¹) 与 C_{p,H_2O} (J·kg⁻¹·°C⁻¹) 分别表示氧气、氮气和水蒸气的比热容。若加湿不充分, 进气中水蒸气的含量小于出口尾气中水蒸气的含量时, 则质量流量为 $(\dot{m}_{g,H_2O} - \dot{m}_{add,H_2O})$ (kg·s⁻¹) 的液态水相变吸热变成水蒸气, 其相变吸热量为:

$$Q_{hg,water} = (\dot{m}_{g,H_2O} - \dot{m}_{add,H_2O}) L_{fg,H_2O} \quad (10)$$

其中, L_{fg,H_2O} (J·kg⁻¹) 表示水的汽化潜热。

1.5 冷却水的换热量

冷却水带走的热量可表示为:

$$Q_c = C_{l,water} \dot{m}_{water} (T_{water,out} - T_{water,in}) \quad (11)$$

其中, $C_{l,water}$ (J·kg⁻¹·°C⁻¹) 为液态水的比热容, \dot{m}_{water} (kg·s⁻¹) 为循环水的流量, $T_{water,out}$ (°C) 与 $T_{water,in}$ (°C) 分别为循环水的进出口温度。

阳极氢气由于利用率达到 95%以上, 且近闭口运行, 不考虑其对流换热作用。

1.6 能量平衡方程

电堆的能量平衡方程可表示为:

$$Q = Q_{gas} + Q_{hg,water} + Q_c \quad (12)$$

2 实验

实验测试条件为: 阳极采用 99.99%高纯氢气, 阴极采用空气。在进行测试之前, 采用恒定电流模

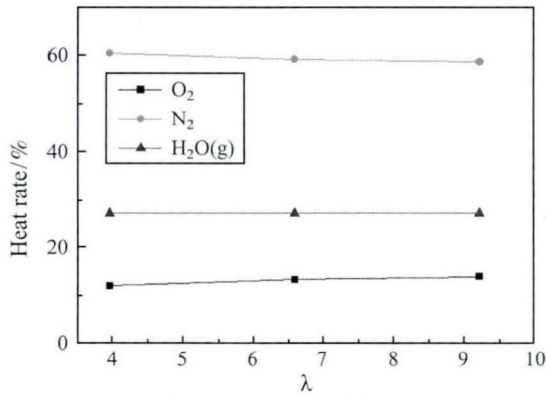
式控制负载加载，流阶跃大小方式对电池进行活化处理。实验过程中，改变电阴阳两极的进气温度为 70°C，电堆的工作电流为 100 A，出口为大气环境。

3 结果与讨论

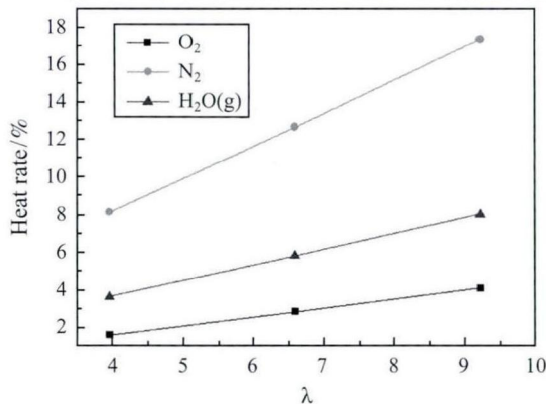
3.1 不同过量系数下对流换热量与总散热量的关系

出口气体由未参与反应的氧气、不参加反应的氮气和反应生成水蒸气三部分组成，出口气体对流换热量同样也由这三部分对流换热组成。不同过量系数下对流换热组分在发热量中的比例由实验数据可计算得出。相关实验数据，入口气体流量分别为 300 L/min (标准工况，余同)、500 L/min、700 L/min，入口温度约 70°C，出口温度约 65°C。

图 1(a) 表示出口气体各组分对流换热量占总对流换热量比例，可以看出，随着过量系数的变化，气体各组分对流换热量占总对流换热量比例变化不大。在过量系数一定的情况下，氮气对流换热量远远大于水蒸气和氢气的对流换热量。图 1(b) 表示出口气体各组分对流换热量占总产热量的比例。



(a) 出口气体各组分对流换热量占总对流换热量比例



(b) 出口气体各组分对流换热量占总产热量比例

图 1 出口气体各组分对流换热量占总对流换热量及总产热量的比例

Fig. 1 Ratios of convective heat transfer of different gas at the outlet to the total convective heat transfer and produced heat

从图 1(b) 可以看出，对流换热量占总散热量的最大比例约为 3%，对散热的影响可以忽略不计。燃料电池堆的散热，主要是由冷却水的冷却过程完成。要保证燃料电池堆良好的性能，要及时通过冷却水移出系统多余的热量，而通过加大入口气体流量强化对流换热，对此影响不明显。

3.2 空气流量对散热量的影响

实验操作中，冷却水的流量为 45 L/min，空气流量从 500 L/min 变化至 700 L/min，再由 700 L/min 变化至 300 L/min。冷却水带走的热量由冷却水流量、冷却水进出温差来决定。

从图 2 中可以看出，冷却水散热量的变化趋势同冷却水进出口温差的变化趋势一致，散热量与温差成正比。图 2 中，温差的两次突变和冷却水散热量的两次突变都是由于空气过量系数的变化。图 2 中空气流量较低时，冷却水进出口温差反而较大；而空气流量较大时，进出口温差反而小。这是由于空气流量低时，达到出口时温升较大。同时，在单位时间内冷却水流量不变的情况下，冷却水温差增大才能带走高温出口尾气的热量。

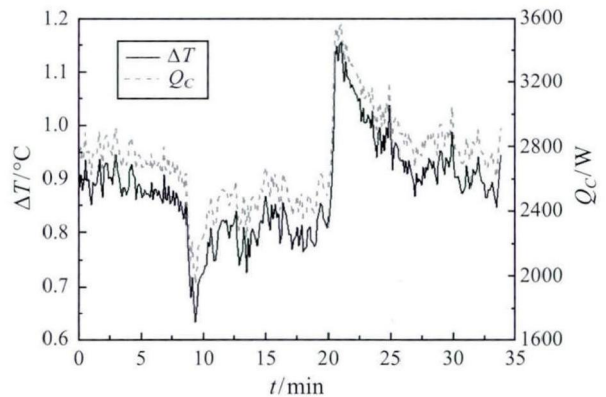


图 2 冷却水进出口温差和散热量随时间的变化曲线图 (空气流量变化)

Fig. 2 Cooling water temperature difference between inlet and outlet and dissipated heat at different air volume flow rate

3.3 不同冷却水流量下对散热量的影响

实验操作中，空气流量为 500 L/min，冷却水流量从 30 L/min 变化至 15 L/min，再由 15 L/min 变化至 45 L/min。

从图 3 中可以看出，在冷却水流量一定的区间，冷却水散热量的变化趋势同冷却水进出口温差的变化趋势一致，散热量与温差成正比。图中，温差和散热量的两次突变都是由于冷却水流量的变化。图 3 中冷却水流量较低时，冷却水进出口温差较大；冷却水

流量较大时, 进出口温差较小。这是由于在燃料电池堆产热量不变的情况下, 冷却水流量低时, 要通过提高进出口温差才能带走足够的热量使电堆冷却。

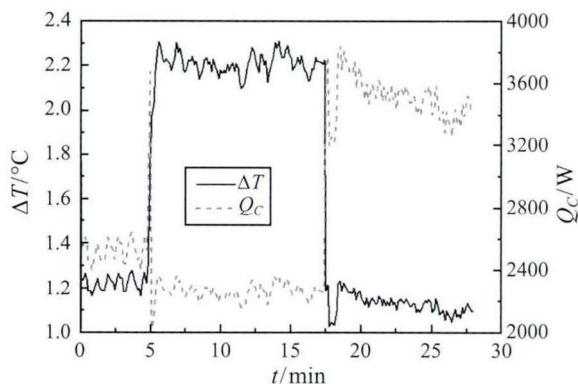


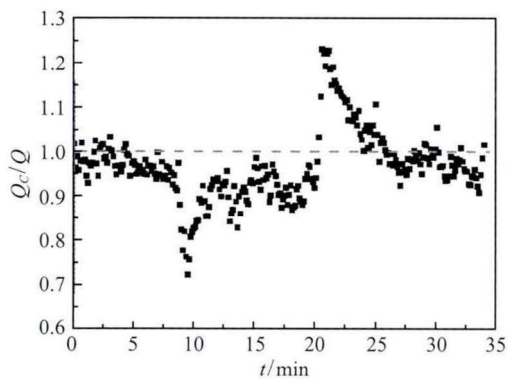
图3 冷却水进出口温差和散热量随时间的变化曲线图
(冷却水流量变化)

Fig. 3 Cooling water temperature difference between inlet and outlet and dissipated heat at different cooling water flow rate

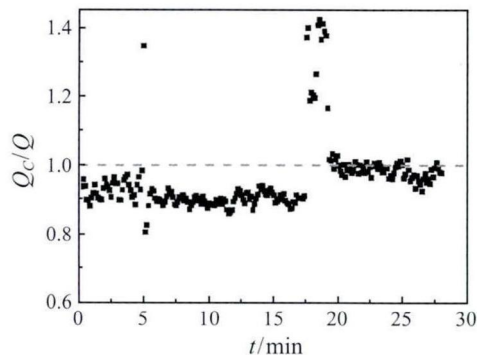
3.4 系统热平衡分析

通过以上分析, 燃料电池系统反应产生的热量, 一部分由出口气体的对流换热带出系统, 另一部分由冷却水带走。忽略其他影响燃料电池散热的因素, 上述两部分热量之和应该与电堆总的产热量趋于相等。

图4(a)中可以看出(虚线为理论值), 除去突变点, 在空气流量保持一定的情况下, 冷却水散热量与电堆产热量的比例维持在较稳定状态, 且围绕着1.0上下波动。同理, 图4(b)中冷却水流量不变时, 冷却水散热量与电堆产热量的比例较为稳定。突变点是由于空气流量或冷却水流量突然变化而造成燃料电池性能的突变, 从而导致散热量与产热量的比值过大或过小。因此, 由系统热平衡分析, 系统散热量和系统产热量在误差范围内相等, 冷却水在电堆散热过程起着主导作用。



(a) 空气流量变化



(b) 冷却水流量变化

图4 冷却水散热量与电堆产热量比值随时间的变化曲线图
Fig. 4 ratios of heat dissipated by cooling water to heat produced by fuel cell

4 结 论

通过理论分析和实验对质子交换膜燃料电池堆散热问题的研究, 可以得到以下结论:

1) 氢空燃料电池反应过程中, 由未反应的气体对流换热带走的热量中, 氮气对流换热作用效果最明显, 但全部对流换热量占总散热量的比例很小, 可以忽略。

2) 氢空燃料电池堆的两种散热方式, 气体对流换热量和冷却水冷却。其中, 气体对流换热量取决于过量系数和进出口温差; 冷却水冷却由冷却水流量和进出口温差决定。冷却水冷却是主要的散热方式, 占总散热量的97%左右。

3) 氢空燃料电池堆总散热量与反应产生热量的比值趋于1, 说明燃料电池系统散热和产热处于动态平衡中。这种动态平衡, 是维持燃料电池持续、稳定运行的保证。

参 考 文 献

- [1] S G Kandlikar, Z Lu. Thermal Management Issues in a PEMFC Stack-a Brief Review of Current Status [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 1276-1280
- [2] M Pan, H L Tang, S P Jiang, et al. Self-Assembled Membrane-Electrode-Assembly of Polymer Electrolyte Fuel Cells [J]. Electrochemistry Communication, 2005, 7(2): 119-124
- [3] S H Jung, S L Kim, M S Kim, et al. Experimental Study of Gas Humidification With Injectors for Automotive PEM Fuel Cell Systems [J]. J Power Sources, 2007, 170: 324-333
- [4] J Larminie, A Dicks. Fuel Cell Systems Explained [M]. John Wiley & Sons Inc, New York, 2000
- [5] K P Adzakpa, J Ramousse, Y Dube, et al. Transient Air Cooling Thermal Modeling of a PEM Fuel Cell [J]. Journal of Power Sources, 2008, 179: 164-176
- [6] Z M Wan, J H Wan, J Liu, et al. Water Recovery and Air Humidification by Condensing the Moisture in the Outlet Gas of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 42: 173-178