

PEMFC 尾气冷凝的自增湿运行

涂正凯¹ 潘牧¹ 丁刚强² 刘志春³ 刘伟³

- (1. 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;
2. 华中科技大学化学与化工学院, 湖北 武汉 430074;
3. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为增强质子交换膜的导电特性, 在燃料电池, 特别是大功率长时间运行的电堆中, 需要有大量的加湿水。本文提出用冷凝器来冷却出口尾气, 以收集大量的液态水并实现电池自增湿的方法。结果表明: 尾气经冷凝降到一定温度分离出的液态水能有效满足反应气体的加湿要求, 实现电堆的自增湿运行。

关键词 质子交换膜燃料电池; 电堆; 尾气; 冷凝; 自增湿

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2012)12-2130-03

Water Recovery and Self-Humidification by Condensing the Moisture in the Outlet Gas of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack

TU Zheng-Kai¹ PAN Mu¹ DING Gang-Qiang² LIU Zhi-Chun³ LIU Wei³

- (1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract To maintain the membrane at hydrated state, plenty of water is needed for the state-of-the-art of PEMFC technology, especially in large power applications or long time operation. A condenser is introduced to separate liquid water from the outlet gas for self-humidification of the stack in this study. With the introduction of the condenser, the recovered amount of water can easily satisfy the air self-humidification by condensing the outlet gas to a proper temperature.

Key words proton exchange membrane fuel cells; stack; moisture; condensing; self-humidification

0 引言

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 以其低噪音、零污染、无腐蚀、寿命长、可靠性及维修性好、工作电流大、比功率高、能量效率高、冷启动快等一些独特的优点, 成为当今各国研究发展并广泛应用的热点^[1-4]。燃料电池发电不经过燃烧过程, 不受卡诺循环的限制, 不仅具有很高的能量转换效率, 而且因为其产物是纯水, 不会造成环境污染, 被公认为 21 世纪最有前途的清洁能源。质子交换膜燃料电池在运行过程中为增强膜中质子的传导能力, 通常对电池进行加湿^[5]。外加湿以其简便易行的特点已广泛运用于电堆系统, 例如, 汽车发动机、固定电站等^[6]。在电池运行过程中, 加湿和反应生成的水主要以气体的形式随尾气排出, 本文提出了一种基于冷凝降温的水汽回收方法, 通过控制冷凝器风扇的转速来强化对流换热效果以实现尾气的降温,

使得大量水蒸气从尾气中分离并回收用于加湿, 以实现电池的自增湿运行。

1 实验设计

1.1 实验系统

本实验采用的是武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室自制的活性面积为 200 cm² 的 84 片电堆, 采用平行流场。测试系统为加拿大 Greenlight 公司生产的燃料电池测试台 FCA TS G500, 测试系统示意图如图 1 所示。

1.2 实验方案

测试条件为: 阴极采用净化空气, 阳极采用 99.99% 高纯氢气, 阴阳两极的流量分别为 500 和 150 L/min; 电堆工作电流为 100 A, 进气温度为 70°C。表 1 给出了不同的测试和冷凝条件的组合方式, 在

收稿日期: 2011-12-8; 修订日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金 (No.50876035; No.51036003); 中国博士后科学基金 (No.20100471165)

作者简介: 涂正凯 (1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事多孔介质传热传质及燃料电池的研究。

冷凝器出口布置温度传感器和压力表来监测尾气的温度和压力, 冷凝回收示意图如图 2 所示。在进行以上测试之前, 实验用 PEMFC 电堆先进行 10 h 的活化处理, 活化过程采用恒定电流模式控制负载加载, 改变电流阶跃大小, 活化完成后, 测试 PEMFC 电堆的极化曲线以表征电池的性能。

水从冷凝器中分离出来, 而开风扇后, 大量的液态水将从空气中冷凝并分离出来, 其中开一个风扇与两个风扇时, 冷凝回收水的速率相差不大。结果表明, 对尾气进行冷却处理能分离出大量的高品质的液态水, 而将这些冷凝水用于燃料电池的电堆的反应气体的加湿时, 能有效解决加湿水的品质与来源问题, 从而实现大功率燃料电池的高性能、长时间的运行。

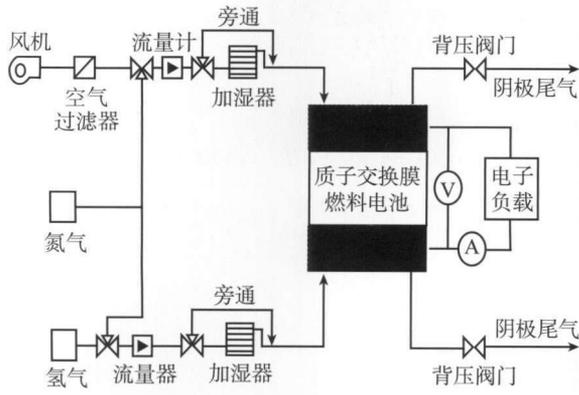


图 1 PEMFC 测试系统示意图
Fig. 1 Schematic of PEMFC test system

表 1 不同的测试组合

Table 1 Different combinations of test

组合	风扇个数	$RH_{air}/\%$	$RH_{H_2}/\%$
Case1	0	100	100
Case2	0	100	0
Case3	1	100	100
Case4	2	100	100
Case5	2	60	100
Case6	2	100	0

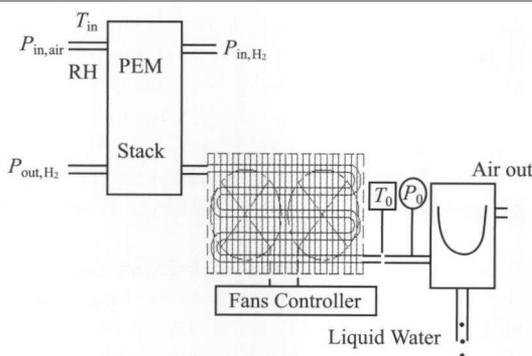


图 2 液态水冷凝回收示意图
Fig. 2 Schematic of water recovery by condensing

2 结果与讨论

2.1 液态水的回收量

图 3 给出了不同条件下液态水的回收量。从图中可以看出, 当不开冷凝风扇时, 仅少量的液态

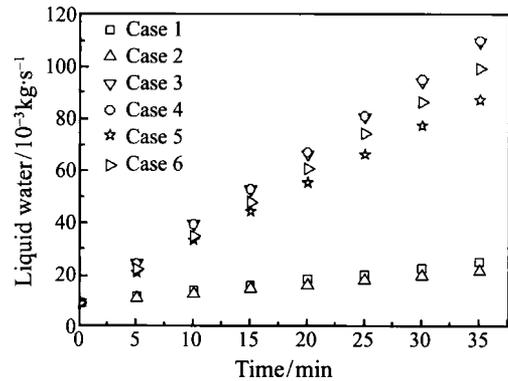


图 3 液态水的回收量
Fig. 3 Liquid water recovery

2.2 加湿水与电化学生成水的速率

电堆出口处的水主要来自于两部分: 一部分为加湿水; 另一部分为反应生成的水。若电堆的单电池数为 n , 稳定工作的电流为 $I(A)$, 进气温度为 T_{in} , 加湿度为 RH , 过量系数为 λ , 入口压力为 p_{in} , 则入口空气的质量流量为 [2]:

$$\dot{m}_a = \frac{n\lambda I}{0.21 \times 4 \times F} M_{air} = 1.19\lambda \frac{nI}{F} M_{air} \quad (1)$$

入口加湿水的质量流量为:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{w,add} &= \frac{M_{H_2O}}{M_{air}} \frac{p_{in,H_2O}}{p_{in} - p_{in,H_2O}} \dot{m}_a = \\ &= \frac{n\lambda I}{0.21 \times 4 \times F} \cdot \frac{RH \cdot p_{sat}(T_{in})}{p_{in} - RH \cdot p_{sat}(T_{in})} M_{H_2O} = \\ &= 1.19\lambda\phi \frac{nI}{F} M_{H_2O} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\phi = \frac{RH \cdot p_{sat}(T_{in})}{p_{in} - RH \cdot p_{sat}(T_{in})}$ 为进口加湿参数。电化学反应生成的水的速率为:

$$\dot{m}_{w,re} = \frac{nI}{2F} M_{H_2O} \quad (3)$$

表 2 给出了测试过程中的物理参数, 表 3 给出了各种组合下不同方式的水速率。从表 3 可以看出,

表 2 不同组合进气参数 ($I=100\text{ A}$, $T_{\text{in}}=343\text{ K}$)Table 2 Inlet parameters with different combination temperatures ($I=100\text{ A}$, $T_{\text{in}}=343\text{ K}$)

组合	p_{in}/kPa	$p_{\text{in,H}_2}/\text{kPa}$	$p_{\text{out,H}_2}/\text{kPa}$	T_0/K
Case 1	116.4	118.0	103.5	339
Case 2	115.2	114.2	101.8	336
Case 3	115.0	118.0	103.5	288
Case 4	115.2	117.9	103.5	281
Case 5	109.2	116.8	103.5	280
Case 6	114.6	115.6	102.8	282

表 3 不同组合下的水量 ($I=100\text{ A}$, $T_{\text{in}}=343\text{ K}$)Table 3 The water volume of different combination ($I=100\text{ A}$, $T_{\text{in}}=343\text{ K}$)

组合	ϕ_{air}	空气加湿水量 ^a ($10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	电化学生成水量 ^b ($10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	ϕ_{H_2}	氢气加湿水量 ^c ($10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	冷凝器回收水量 ^d ($10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
Case 1	0.358	2.397	0.785	0.352	0.707	0.435
Case 2	0.363	2.430	0.790	0	0	0.348
Case 3	0.364	2.438	0.788	0.352	0.707	2.838
Case 4	0.363	2.430	0.787	0.352	0.707	2.850
Case 5	0.198	1.327	0.793	0.357	0.712	2.233
Case 6	0.365	2.445	0.792	0	0	2.577

注: a. 由公式 (2) 计算; b. 由公式 (3) 计算; c. 同空气处理方式; d. 由图 3 线性处理

当尾气不经过降温处理时, 收集到的液态水速率远小于空气的加湿水速率; 而气体经过降温处理 (开 1 或 2 个风扇) 时, 回收的液态水量超过加湿水量, 可满足加湿要求。表 2 中组合 3 的出口温度为 15°C , 而组合 4 中为 8°C , 但从表 3 可以看出, 其生成的水量仅提高了 0.4%, 因而液态水的分离主要是初级降温实现的。此外, 可以看出, 组合 5 中, 当空气 60% 加湿, 氢气完全加湿时, 空气的加湿水量与电化学反应生成的水量之和小于回收的液态水, 此时表明, 阳极中氢气的加湿水由于“电拖”的作用从膜中扩散到阴极^[7]; 而组合 6 中, 当氢气不加湿时, 回收的液态水小于加湿水和电化学生成水量的总和, 此时, 阴极生成的水可能反渗到阳极以充分润湿质子交换膜。

3 结 论

本文通过将冷凝器引入质子交换膜燃料电池的尾气出口, 通过尾气的降温实现液态水的分离回收, 主要结论如下:

1) 尾气经降温后分离出的液态水完全可以满足进气的加湿要求, 此方法可实现电池的自增湿运行。

2) 较高的冷凝器出口温度可以满足自增湿要求, 该方法简便易行, 可用于大功率长时间运行的燃料电池电堆。

参 考 文 献

- [1] HAN M, CHAN S H, JIANG S P. Investigation of Self-humidifying Anode in Polymer Electrolyte Fuel Cells [J]. Int J Hydrogen Energy, 2007, 32: 385-391
- [2] Larminie J A Dicks. Fuel Cell Systems Explained [M]. John Willey & Sons Inc., New York, 2000
- [3] PAN M, TANG H L, JIANG S P, et al. Self-Assembled Membrane-Electrode-Assembly of Polymer Electrolyte Fuel Cells [J]. Electrochemistry Communication, 2005, 7(2): 119-124
- [4] Springer T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model [J]. J Electrochem Soc, 1991, 138: 2334-2342
- [5] Jung S H, Kim S L, Kim M S, et al. Experimental Study of Gas Humidification With Injectors for Automotive PEM Fuel Cell Systems [J]. J Power Sources, 2007, 170: 324-333
- [6] Hyun D, Kim J. Study of External Humidification Method in Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. J Power Sources, 2004, 126: 98-103
- [7] Nam J H, Kaviany M. Effective Diffusivity and Water-Saturation Distribution in Single and Two-Layer PEMFC Diffusion Medium [J]. Int J Heat Mass Tran, 2003, 46: 4595-4611