

1 kW 自呼吸 PEMFC 堆控制因素试验

张传升^{1,2}, 陈凤祥¹, 高昆鹏¹, 周 苏¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 自呼吸质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 阴极侧湿度和温度耦合严重, 且空气流量对湿度和温度影响不同, 从而使得对电池输出电压的控制变得复杂. 以氢气压力和提供阴极空气流量的风扇转速为影响因素, 对相应的工作点集进行了正交试验研究. 分析结果表明, 风扇转速高于极值电压转速时, 空气会带走更多的水分, 从而使得质子交换膜逐渐干燥, 阻抗增大, 电池性能衰减; 风扇转速低于极值电压转速时, 空气流量带走的热量减少, 使得阴极表面温度升高, 阴极端相对湿度迅速减低, 从而导致质子交换膜迅速干燥, 电池性能衰减迅速. 因此, 每个工作点存在一个使电池电压最高的风扇转速值.

关键词: 自呼吸; 自增湿; 风冷; 质子交换膜燃料电池; 正交试验

中图分类号: TK 91

文献标识码: A

Experimental Study on Control Factors for a 1kW Air-breathing PEMFC Stack

ZHANG Chuansheng^{1,2}, CHEN Fengxiang¹, GAO Kunpeng¹, ZHOU Su¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Information & Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: In an air-breathing proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), the air flow effect is different on the strongly coupled temperature and humidity, and uncertain on the stack voltage. To study the stack performance in detail, the inlet hydrogen pressure and the rotation rate of fans are investigated as effect factors, and the orthogonal experiments are carried out at the corresponding working points. The results show that, when the fans rate is above the optimal value, the air takes more water from the cathode away and the membrane becomes dried slowly, and then membrane

impedance increases, therefore the stack voltage declines; in the other hand, when the fans rate is below the optimal value, the heat quantity carried out with air is reduced, making the cathode surface temperature higher, the air relative humidity decreases rapidly, and then the membrane dries quickly, therefore the stack voltage drops sharply. Therefore, there is an optimal fans rate value which makes the stack voltage highest at each working point.

Key words: air-breathing; self-humidifying; air-cooling; proton exchange membrane fuel cell; orthogonal experiment

风冷式自呼吸质子交换膜燃料电池 (proton exchange member fuel cell, PEMFC) 阴极采用敞开式空气流场, 通过风扇供应空气, 这种强制对流方式一方面起到散热 (或加热) 作用, 另一方面影响阴极端空气的湿度. 因此, 空气流量对温度和湿度都有重要的影响, 而且电池性能往往低于外部加湿方式的燃料电池^[1]. 但是, 由于在结构上省去了空气压缩机和水冷环, 结构简单、体积小、重量轻, 这类燃料电池较适用于移动电子设备电源和便携式应急电源, 同时在低速运输工具方面 (如电动自行车、场地车辆或作为增程器等) 的应用潜力也不可忽视, 具有重要的研究价值.

国内外研究多集中于质子交换膜自呼吸性能^[2]和单片或者多片自呼吸燃料电池性能^[3-7], 针对千瓦级电堆的研究鲜有报道. 为更好地掌握风冷式自呼吸 PEMFC 堆的输入输出外特性和动态特性, 本文对一款 1 kW 电堆的入口氢气压力和风扇转速进行了正交试验研究, 分析了上述控制量对电堆输出电压的影响, 相应结果可以用于验证这类电堆的机理模型, 为完善电堆经验模型和相应的控制模型提供实验依据.

收稿日期: 2010-02-05

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2008AA050403); 上海市重点学科基金资助项目 (B303)

第一作者: 张传升 (1973—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为燃料电池系统建模、仿真与控制. E-mail: sdzcs@hotmail.com

通讯作者: 周 苏 (1962—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为新型车辆动力系统, 燃料电池系统建模、仿真与控制.

E-mail: suzhou@tongji.edu.cn

1 试验方案

1.1 试验平台

试验电堆为一款自增湿风冷式自呼吸 PEMFC 堆,72 片单池串联,峰值功率为 1.1 kW,燃料为纯氢,氢气工作压力推荐值为 150~165 kPa,最高工作温度为 65 ℃.4 个风扇一方面保证反应所需的氧气量(空气量),另一方面则起到调节电堆温度的作用.单个风扇最高转速为 4 800 r · min⁻¹,最大流量为 3.12 m³ · min⁻¹,最大电功率为 12 W.氢气贮存在压力为 15 MPa 的钢瓶,经过两级减压至氢气入口电磁开关阀,二级减压阀压力调节由手动操作.试验负载由一款 12 kW 电子负载提供.风扇转速由电子控制器采用脉冲宽度调制(PWM)调压法控制.环境温度为 8 ℃,空气湿度为 80%.平台结构如图 1 所示.

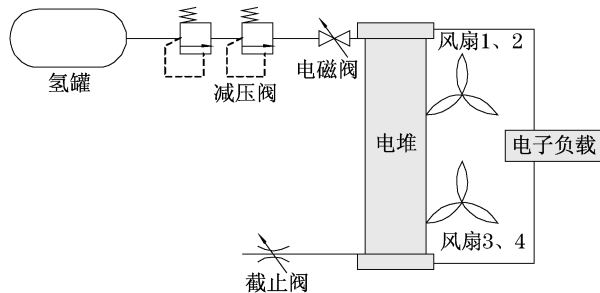


图 1 测试平台结构
Fig.1 Structure of test bench

表 1 氢气压力水平值与不同工况点风扇转速水平值

Tab.1 Level-values of hydrogen pressure and fan rate at each work point

水平	P/kPa	2 A		5 A		10 A		15 A		20 A		22.5 A	
		$n/(r \cdot \min^{-1})$	λ	$n/(r \cdot \min^{-1})$	λ	$n/(r \cdot \min^{-1})$	λ	$n/(r \cdot \min^{-1})$	λ	$n/(r \cdot \min^{-1})$	λ	$n/(r \cdot \min^{-1})$	λ
1	150	192	49	369	37	686	34	686	23	1 200	30	1 412	31
2	160	282	72	453	46	960	48	960	32	1 412	35	1 600	35
3	170	369	94	533	54	1 200	60	1 200	40	1 600	40	1 768	39
4		453	116	611	61	1 412	70	1 412	47	1 768	44	1 920	42
5		533	136	686	69	1 600	80	1 600	53	1 920	48	2 057	45

2 试验结果与处理

剔除 6 个工作点试验数据中的异常数据,然后计算每个因素各个水平的电压均值,并进一步计算相应

1.2 试验指标、试验因素和水平

本文的试验指标选择燃料电池电堆输出电压.在应用场合,电堆内部的温度、湿度和反应气体浓度难以测量,本文的测试平台采用控制入口氢气压力改变阳极氢气浓度,控制风扇转速改变阴极氧气浓度、反应区域温度和湿度.因此,选择入口氢气压力和风扇转速为试验因素.测试工况点按照给定的极化曲线,分别在低、中、高电流区域选择两个工作点,即(2 A 和 5 A)、(10 A 和 15 A)和(20 A 和 22.5 A).入口氢气压力因素水平在电堆推荐的工作压力范围附近,设定为 3 个水平值.转速因素水平根据不同的工作点分别选择相应的 5 个水平值,具体数值见表 1.表中, P 为入口氢气压力,kPa; n 为风扇转速,r · min⁻¹; λ 为空气过量系数.

1.3 试验方法

每一个工况点的试验步骤为:①调节氢气减压阀至指定水平;②打开氢气进气截止阀;③调节风扇转速使其达到相应水平值;④按照相应工况点,设定电子负载电流值;⑤加载;⑥观察电堆输出功率,稳定后运行 2 min;⑦记录电堆输出功率、电压,风扇转速,氢气入口压力;⑧重新设定风扇转速至另一水平;⑨重复⑥~⑧步骤;⑩卸载,关闭氢气入口截止阀,关闭风扇;⑪调节氢气入口压力至另一水平,重复②~⑩步骤.整个试验过程需要 90 次试验.

的极差,计算得出的数据见表 2~表 7 所示.从表中可以看出在低电流工作区氢气入口压力因素的极差较大(>3).将两个因素在全部工作点的均值分别绘制于图 2 和图 3.

表 2 2 A 极差分析

Tab.2 Range analysis of 2 A

因素	电压/V						优选方案
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差	
氢气入口压力	45.54	52.74	52.83			7.29	3
风扇转速	51.10	50.16	50.22	50.22	50.12	0.94	1

表 3 5 A 极差分析
Tab.3 Range analysis of 5 A

因素	电压/V						优选方案
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差	
氢气入口压力	48.94	49.04	47.35			1.69	2
风扇转速	48.42	48.98	48.78	48.13	47.9	1.08	2

表 4 10 A 极差分析
Tab.4 Range analysis of 10 A

因素	电压/V						优选方案
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差	
氢气入口压力	44.39	45.83	44.7			1.44	2
风扇转速	45.73	45.02	44.95	44.64	44.54	1.19	1

表 5 15A 极差分析
Tab.5 Range analysis of 15A

因素	电压/V						优选方案
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差	
氢气入口压力	43.23	42.76	43.55			0.79	3
风扇转速	42.83	43.46	43.54	43.14	42.92	0.71	3

表 6 20 A 极差分析
Tab.6 Range analysis of 20 A

因素	电压/V						优选方案
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差	
氢气入口压力	40.32	38.66	40.31			1.66	1
风扇转速	39.77	39.86	39.76	39.72	39.70	0.16	2

表 7 22.5 A 极差分析
Tab.7 Range analysis of 22.5 A

因素	电压/V						优选方案
	均值 1	均值 2	均值 3	均值 4	均值 5	极差	
氢气入口压力	38.21	38.28	38.20			0.08	2
风扇转速	38.13	38.28	38.32	38.25	38.17	0.19	3

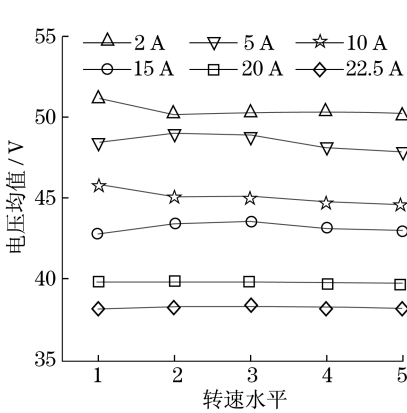


图 2 风扇转速因素分析
Fig.2 Analysis of fan rate factor

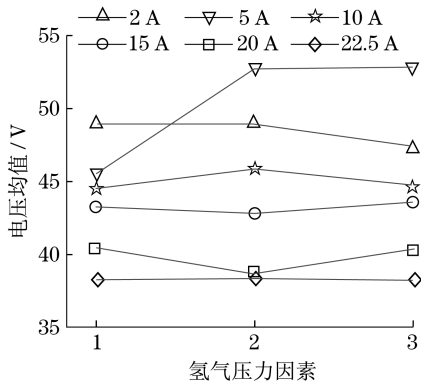


图 3 氢气压力因素分析
Fig.3 Analysis of hydrogen pressure

3 讨论

3.1 转速和过量系数的影响

从图 2 可以看出,各点大体呈现如下规律:风扇转速(即空气流量)存在一个使得电堆性能最优的极值,高于和低于该极值,电堆输出电压都会衰减。

为验证这一现象,在 10 A 工作点扩大风扇转速范围进行了验证,转速分别为 369, 452, 533, 1 768 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 试验结果如图 4 所示。可以看出,在 10 A 处,最优转速为水平 1 即 686 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。转速高于该值时,电压下降,1 768 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时电压为最低,但降幅很小。转速低于转速最优值时,电压也下降,但转速低于 533 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,电压急剧下降,而且无法稳定。从表 1 可知,每一工作点的风扇所提供的空气过量系数均大于 23,表明作为反应气体的氧气量是充足的。因此,可以排除空气流量不足对电压变化的影响。

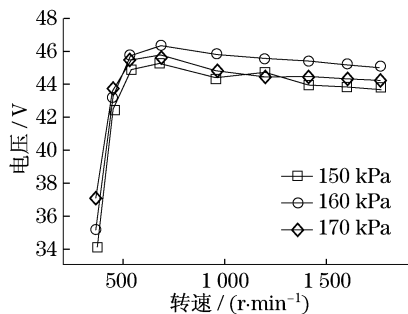


图 4 10 A 工作点的电压与转速试验曲线

Fig.4 Curve of voltage and fan rate at 10 A

风扇转速(空气流量)对电堆温度的影响,根据传热原理,可计算如下:

$$T = T_{\text{amp}} + \frac{C_{p_1} n_{\text{cell}} i (1.25 - u/n_{\text{cell}})}{1 + C_{p_1} C_{p_2} v_{\text{air}}} \quad (1)$$

式中: T 为电堆内部温度, K; T_{amp} 为环境温度, K; C_{p_1} , C_{p_2} 分别为电堆和空气热容, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; n_{cell} 为电堆单池数量, 量纲一; i 为电流, A; u 为电堆输出电压, V; v_{air} 为空气流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由式(1)可知,在相同的环境和工况条件下,入口空气湿度和电化学反应后水生成量不变,空气流量减少导致堆内温度升高,从而使得饱和蒸汽压剧烈升高,致使阴极侧相对湿度急剧下降。阴极侧相对湿度下降会导致质子交换膜干燥,从而降低了膜中的质子传导率,以致造成电堆电压遽然下降。电压下降同时极化电势升高,使得内部产出更多热量,反过

来使得温度进一步升高,形成正循环,电压不断下降。如果持续工作最终导致膜完全干燥成为绝缘体^[8],燃料电池停止工作。

与此相反,空气流量增大会导致温度下降,使得相对湿度具有增大趋势。但是,过多的空气流量会带走阴极侧的更多水分,阴极侧相对湿度具有降低的趋势。综合两者对于膜相对湿度的影响结果,可以看出较高空气流量使得膜相对湿度略有减少,导致电堆输出电压有所下降。

由此可见,风扇转速因素对于电堆性能具有决定性影响,考虑到高转速还会增加额外的功耗,因此风扇转速应该按照最优值进行控制。对 160 kPa 压力下的最优转速和电流数据进行回归分析,得到最优转速计算公式:

$$n^* = 1.1108 i^2 + 45.5181 i + 109.5741 \quad (2)$$

式中: n^* 为风扇最优转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$; i 为电流, A。拟合曲线如图 5 所示。

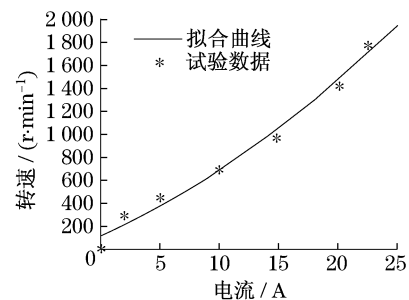


图 5 160 kPa 条件下,风扇最优转速与电流拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of optimal fan rate and current at 160 kPa

3.2 氢气压力影响

从图 3 中可以看出,在不同工作点,氢气压力对电堆电压的影响不同。在 2 A 和 5 A 低电流工况下,高水平氢气压力因素的电堆性能好于低水平氢气压力因素。高电流工况下,不同氢气压力因素的电堆性能无明显差异,如图 6 所示。由此,认为低电流工况时,氢气扩散在反应过程中具有重要影响,氢气入口压力提高加快了扩散速度,提高了电极反应表面的反应物浓度,从而表现为电池电动势升高。在高电流工况下,氢气压力因素对性能的影响减弱。由于,电堆采用定时排氢策略来解决阳极积水和积氮问题,高压工作条件下排氢消耗比低压大。因此,从提高电堆性能和降低氢耗考虑,自呼吸 PEMFC 堆的氢气压力调节宜遵循低电流工况采用高水平氢压值而高电流工况采用低水平氢压值的原则。

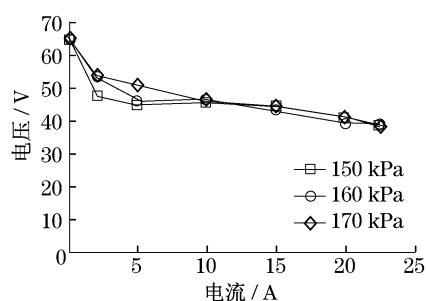


图 6 电堆电流—电压曲线

Fig. 6 Curve of stack voltage and current

4 结论

针对风冷式自呼吸 PEMFC 堆,本文介绍了氢气压力和风扇转速对电堆电压影响的正交试验. 试验数据分析表明,自呼吸自增湿风冷式 PEMFC 堆每个工作点的空气流量存在一个使电池电压最高的优化值,高于该值电压会衰减缓慢,低于该值电压性能会迅速衰减;改变氢气端压力,电池电压在低电流工况时有一定差异,在高电流工况没有明显变化. 造成该现象的原因在于空气流量高于极值时,空气会带走更多的水分,从而使得质子交换膜逐渐干燥,阻抗增大,电池电压衰减;空气流量低于极值时,空气流量带走的热量减少,使得阴极表面温度升高,阴极端相对湿度迅速减低,从而导致质子交换膜迅速干燥,电池电压衰减迅速. 电堆风扇转速控制应该按照文中提出的最优值计算式进行控制以实现电堆最高效率. 本文研究中环境温度和湿度未有改变,下一步的研究工作将通过控制环境温度和湿度来进一步研究电堆的性能.

参考文献:

- [1] Buchi F N, Srinivasan S. Operating proton exchange membrane fuel cells without external humidification of the reactant gases [J]. *Journal of the Electrochemical Society* 1997, 144(8): 2767.
- [2] Watanabe M, Uchida H, Seki Y, et al. Self-humidifying polymer electrolyte membranes for fuel cells [J]. *J Electrochem Soc*, 1996, 143(12): 3847.
- [3] Jung Guobin, Lo Kaifan, Su Ay, et al. Experimental evaluation of an ambient forced-feed air-supply PEM fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(12): 2980.
- [4] Morner S O, Klein S A. Experimental evaluation of the dynamic behavior of an air-breathing fuel cell stack [J]. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 2001, 123(3): 225.
- [5] Williams M V, Kunz H R, Fenton J M. Operation of nafion based PEM fuel cells with no external humidification: influence of operating conditions and gas diffusion layers [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 135(1-2): 122.
- [6] Lee Y, Kim B, Kim Y. Effects of self-humidification on the dynamic behavior of polymer electrolyte fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(4): 1999.
- [7] Santa Rosa D T, Pinto D G, Silva V S, et al. High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient pressure and temperature conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(17): 4350.
- [8] 张妮, 刘惠玲, 李君敬, 等. 用于燃料电池的磺化聚芳醚酮质子交换膜材料的直接合成与性能研究 [J]. *高分子学报*, 2009, 4: 375.
ZHANG Ni, LIU Huiling, LI Junjing, et al. Direct synthesis and properties of sulfonated poly (arylene ether sulfone) copolymers for proton exchange membranes in fuel cells [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2009, 4: 375.