

燃料电池系统氢气利用率的试验研究

翟俊香，何广利，熊亚林

（北京低碳清洁能源研究院，北京102211）

摘要：为了提高燃料电池系统全工况下的氢气利用率，以空冷型开放式燃料电池系统为实验对象进行了研究。实验结果显示：燃料电池系统运行时，如果阳极出口闭死，电流越高，电压衰减越快。因此，阳极出口须定时排气，以保证燃料电池系统稳定运行。改变阳极进气气压，进气气压越高，系统氢气利用率越低。为了提高氢气利用率，同时保证燃料电池系统稳定运行，低电流放电时，排氢间隔可以适当延长，高电流放电时候，排氢间隔须缩短。全工况下采用统一的排氢间隔（10s），燃料电池系统放电电流依次为2A、5A及8A的氢气利用率分别为0.6421、0.9280及0.9746；优化排氢模式，采用变化的排氢间隔，低电流2A时排氢间隔延长到30s，5A时排氢间隔延长到20s，高电流时的排氢间隔不变，全工况下系统氢气利用率均超过了0.95。在实验研究的时间段内（约1h），两种排氢模式的实际耗氢量分别为0.1241g、0.1317g，优化排氢模式后的实际耗氢量节约了约5.77%。

质子交换膜燃料电池的基本原理是经过电化学反应，将氢气化学能转化为电能，生成水。它具有高效、清洁、噪音小、工作温度低、启动速度快、应用范围广等突出优点，是新一代变革性的发电技术。氢气利用率是燃料电池系统的

[1-2]

[3]

。流通模式是阳极出口直接与大气连通，阳极内部气压低，影响电池性能，同时未反应的氢气直接流出，氢气利用率低。循环模式是利用阳极出口安装的循环泵或引射器、气水分离器进行尾气循环，提高了氢气利用率，但是增加了系统的复杂性^[4]

。同时阳极尾气无限期循环，会积累惰性气体、液态水，影响电池性能。因此，循环模式中需要在阳极出口增加电磁阀，进行定期排放。脉冲排放模式利用阳极出口的电磁阀进行定期排放，能够提高氢气利用率，稳定电池性能。相对来讲，系统结构简单，尤其适用于小功率的燃料电池系统。

燃料电池系统实际运行过程中会经历启动

、怠速、低载、高功率等工况^[5]

，每一个工况下，燃料电池系统内部参数如膜的润湿程度、气体流速、生成水量都有很大不同，这些参数直接或间接的影响了电池性能、氢气利用率等^[6]

，脉冲排放能够一定程度上解决上述问题。当前燃料电池系统总是在全工况范围内采取统一的脉冲排放周期，呈现出了一定弊端。燃料电池系统低载时候，统一的排放周期导致氢气利用率低，高载时候，阳极累积水、惰性气体无法及时排出^[7]

。本文以百瓦级的空类型开放式燃料电池系统为对象，分析了变化周期的脉冲排放对燃料电池系统氢气利用率的影响，同时查看了进气气压的影响。

1 实验

1.1 测试平台

实验采用商业化的空冷型质子交换膜燃料电池系统（额定功率200W），单电池片数为40。采用可编程负载调节电池系统功率输出，采用可编程直流电源，给燃料电池控制器、质量流量计及排氢阀提供13V和12V电压，通过控制直流电源的电压变化，控制排氢阀的周期性排放，继而改变阳极出口排氢频率。采用调节阀调节氢气进气气压。实验测试平台示意图如图1所示。

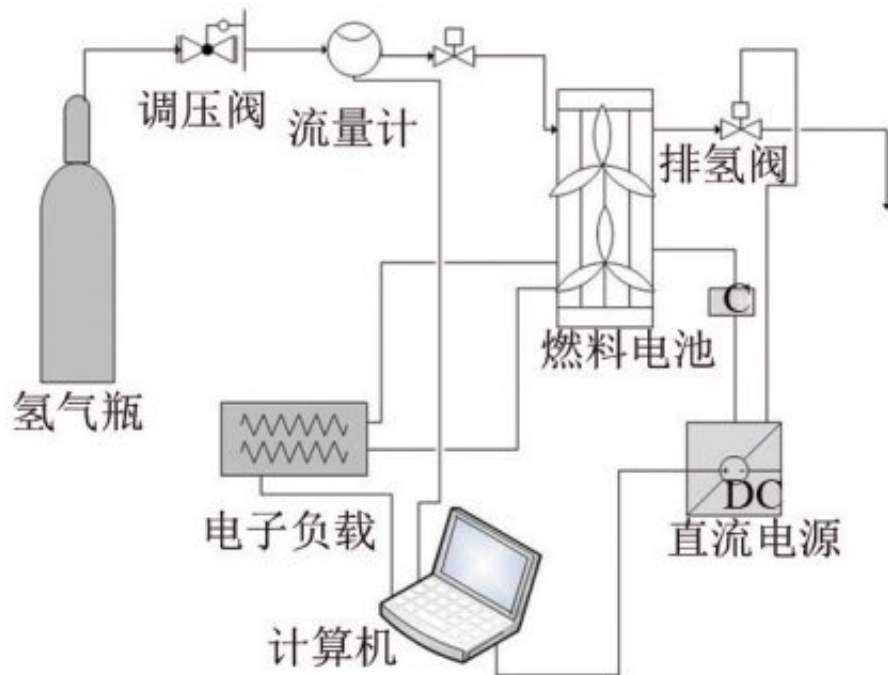


图1 实验测试平台示意图

Fig.1 Sketch diagram of experimental test platform

1.2 氢气利用率计算

氢气利用率计算式^[2]

$$\eta = \frac{N \times \frac{mI}{nF}}{H_{\text{flow}}} \quad (1)$$

式中， η 为氢气利用率； H_{flow} 为实际耗氢量，g/s；由图1中的氢气流量计计量； m 为氢气摩尔质量，2.016； n 为电化学反应的电子数，2； F 为法拉第常数，96485 C/mol； N 为电堆单电池数量，40； I 为燃料电池系统电流，A，由图1中的放电负载进行加载。所有数据均由图1中的计算机自动记录。

2 实验结果与分析

2.1 阳极尾气定期排放的必要性

燃料电池系统阳极出口电磁阀关闭即阳极出口闭死，电池恒电流放电运行，放电电流分别为低载电流2A、中等电

流5A及额定功率下的电流8A，运行结果如图2所示。由于阳极出口闭死，则燃料电池系统运行过程中，无氢气外排。

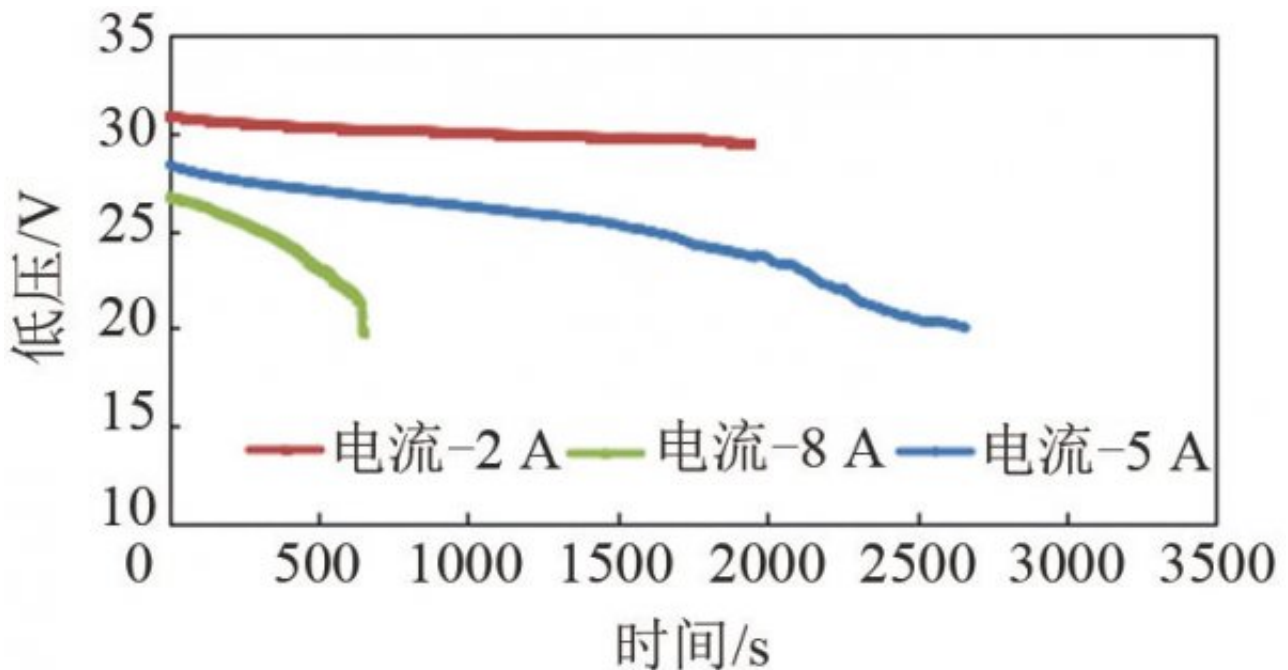


图2 电压-时间曲线

Fig.2 Curves of voltage-time

图2显示，燃料电池系统电池电压均有不同程度下降。对图2曲线进行简单线性拟合，放电电流2A、5A及8A下电压曲线的拟合斜率分别是-0.0006、-0.0029及-0.0084。燃料电池系统加载电流越高，电压衰减率越大。燃料电池系统放电电流越高，生成水越多，反渗透到阳极侧的水也会增多，集聚的水一方面会影响气体扩散，一方面也会覆盖部分催化剂活性区，降低电池系统发电性能。

同时，反渗透过来的惰性气体也会影响电池性能^[8]

，因此，高电流运行的燃料电池系统更需要定期排放。运行后期，将电磁阀设置成周期性的开/关，阳极尾气得以周期性的排放。由图3可知，阳极尾气周期性排放后，电池电压均有不同程度恢复，因此，燃料电池系统放电时候，阳极电磁阀必须进行周期性的开/关。

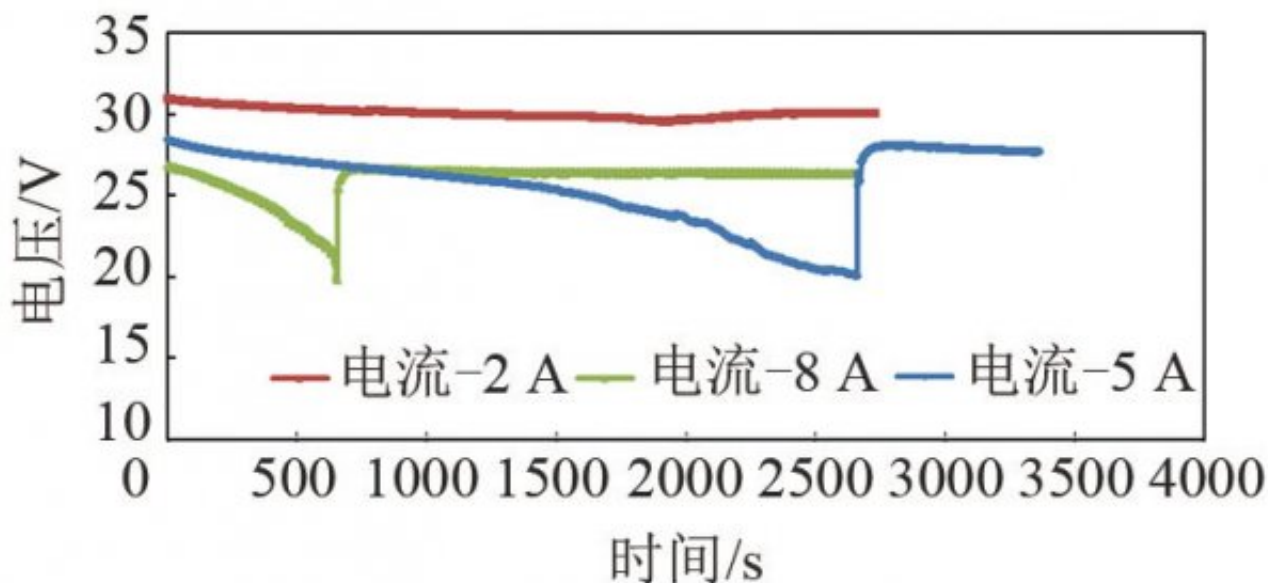


图3 脉冲排氢后电压-时间曲线

Fig.3 Curves of voltage-time after purge

2.2 氢气利用率的试验研究

氢气利用率由计算式(1)获得。全工况范围内阳极尾排统一排放周期（排氢频率统一为10s/0.1s，表述的意思是电磁阀门间隔10s，排放0.1s，以下排氢频率为相同表述）时，各个电流下的燃料电池系统氢气利用率如图4所示。燃料电池系统高电流（8A）放电时候，系统的氢气利用率为0.9746；低电流（2A）放电时候，系统的氢气利用率只有0.6421，非常低；放电电流5A时候，系统氢气利用率为0.9280。

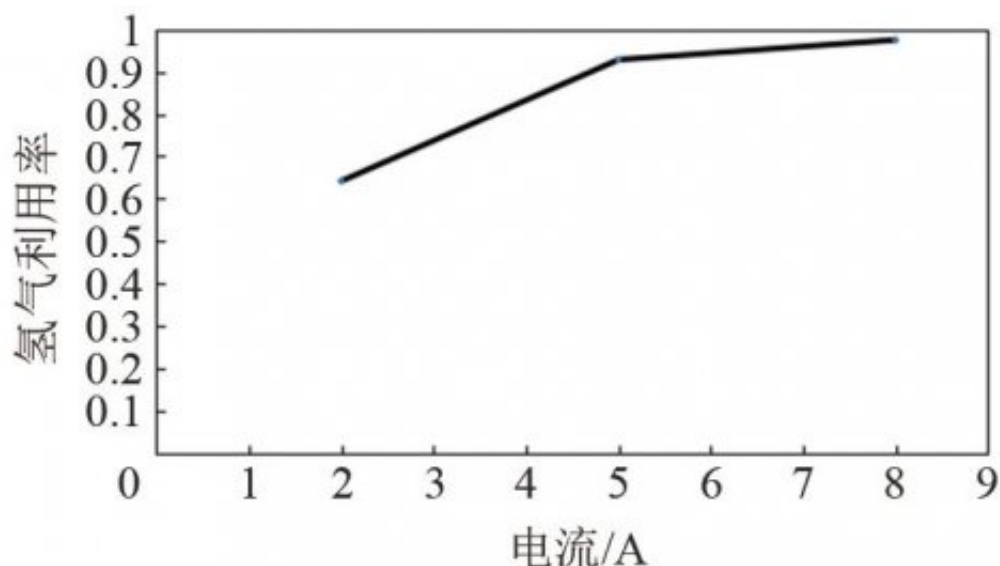


图4 统一排放周期时全工况下的氢气利用率

Fig.4 Hydrogen utilization of fuel cell system with same purge period at overall condition

将燃料电池系统全工况下的排氢频率设置为变化模式，即2A、5A及8A下的排氢间隔改变为30s/0.1s、20s/0.1s及10s/0.1s，此排氢方案下，燃料电池系统氢气利用率如图5所示。由图可知，放电电流2A及5A时燃料电池系统的氢气利用率提高到了0.9578和0.9811，分别提高了0.3157、0.0531。利用排氢方案，全工况下燃料电池系统的氢气利用率均超过了0.95。同时对比了燃料电池系统放电电流2A及5A下改变排氢间隔后燃料电池电压变化情况，如图6(a)和图6(b)所示。图6(a)显示，阳极出口排氢间隔由10s/0.1s改变为30s/0.1s后，电池电压曲线几乎重合，电压衰减率变化不大；图6(b)显示，排氢间隔由10s/0.1s改变20s/0.1s后，电池电压曲线比较分离（这是由于开始记录的初始电压不同造成的），电池电压衰减幅度相近即电池电压衰减率也比较相近。为了量化电池电压衰减情况，将电压-时间曲线也进行简单线性拟合，获得了各种条件下的拟合斜率，如表1所示。表1显示，燃料电池系统在两个电流下线性拟合斜率变化都在0.0001，因此，在试验所选取的排氢间隔下，排氢间隔对燃料电池电压衰减影响不大。

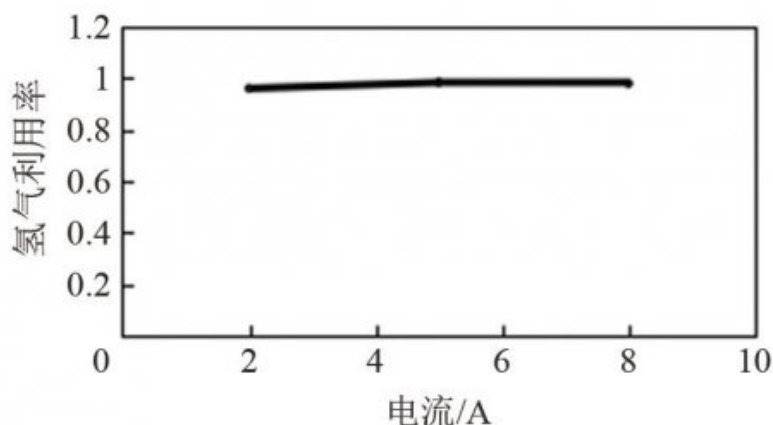
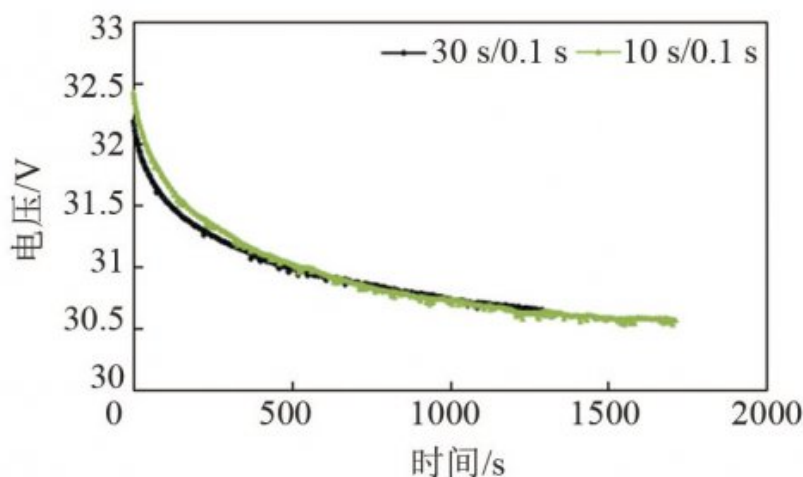
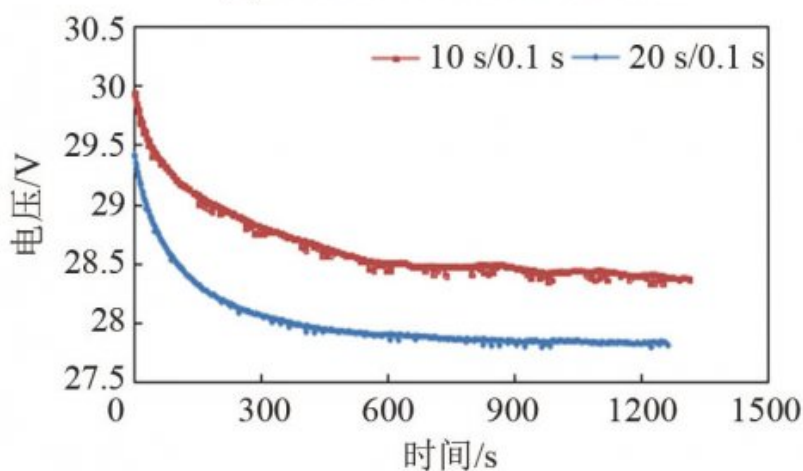


图5 变化排放周期时全工况下的氢气利用率

Fig.5 Hydrogen utilization of fuel cell system with variable purge period at overall condition



(a) 燃料电池系统放电电流2 A



(b) 燃料电池系统放电电流5 A

图6 不同排氢间隔电压-时间曲线

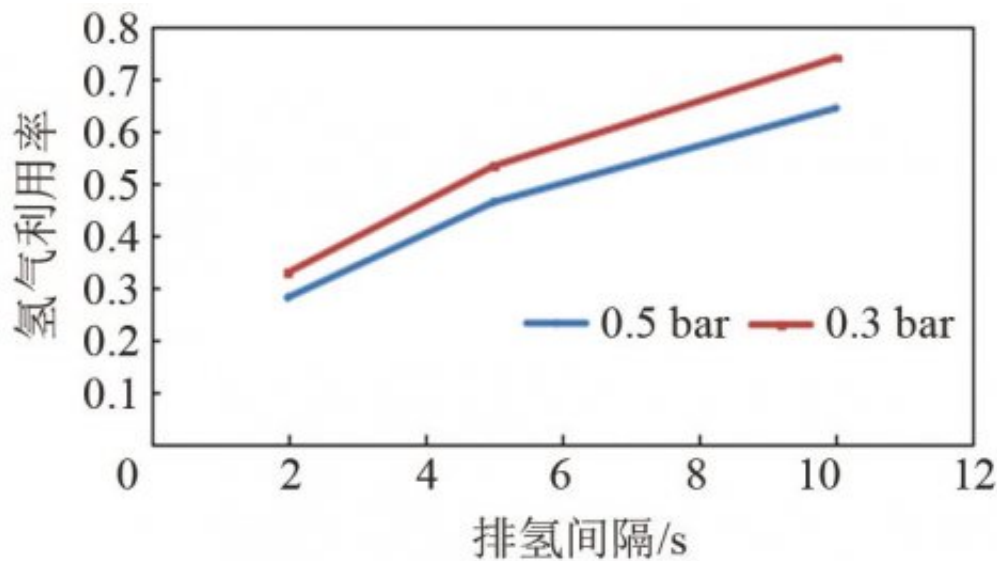
Fig.6 Variable purge period voltage-time curves

表1 不同条件下线性拟合结果

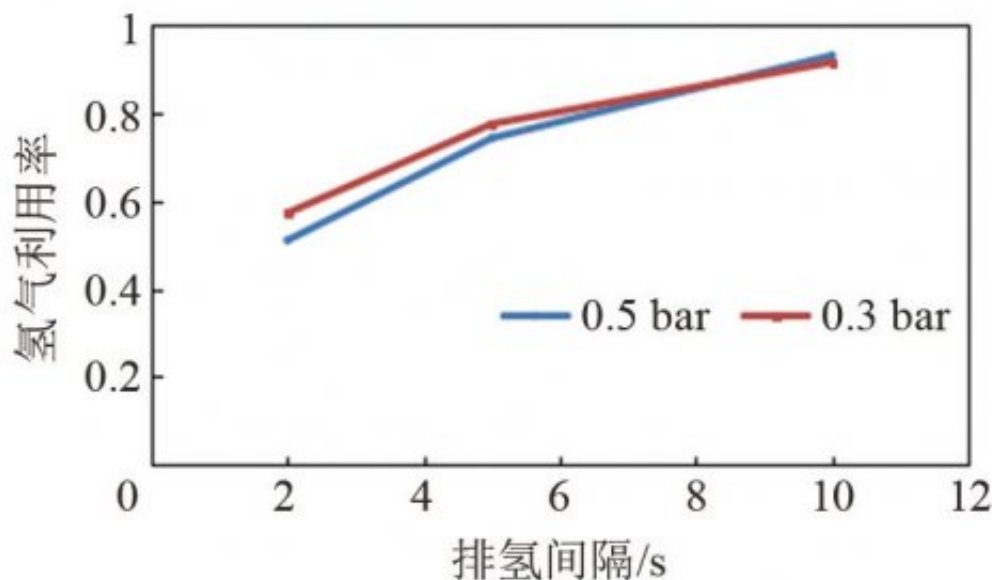
Table 1 Results of linear fit at variable conditions

电流	排氢间隔	斜率	变化
2	10 s/0.1 s	-0.0007	
	30 s/0.1 s	-0.0008	增大 0.0001
5	10 s/0.1 s	-0.0007	
	20 s/0.1 s	-0.0006	减小 0.0001

同时研究了阳极进气气压对燃料电池系统氢气利用率的影响，如图7所示。图7(a)和图7(b)为两个燃料电池放电电流下的结果图，两个图均显示，燃料电池阳极进口气压越高，氢气利用率越低。进气气压越高，阳极进口与出口气压差大。排氢时刻即电池阀打开瞬间，外排氢气量越多，因此氢气利用率越小。图7(a)和图7(b)显示，燃料电池低电流工况下，进气气压影响更加显著。



(a) 放电电流：2 A



(b) 放电电流：5 A

图7 进气气压对氢气利用率影响

Fig.7 Effect of inlet gas pressure on hydrogen utilization

2.3耗氢量对比

将优化后的阳极排氢模式（变化排氢间隔、合适的进气气压约0.3bar，1bar=100kPa）和当前常用的排氢模式（统一排氢间隔）分别作为燃料电池系统全工况运行的设计策略，运行燃料电池系统，燃料电池系统性能曲线如图8所示。由图8可知，在所设计的排氢模式下，燃料电池性能几乎不受影响。同时在燃料电池运行过程中，实测两种设计策略下的实际耗氢量。在试验的时间段内，两种设计策略的实际耗氢量分别为：0.1241g氢气（变化排氢间隔的供氢模式）以及0.1317g氢气（统一排氢间隔的供给模式）。优化的变化排氢间隔的排氢策略节省了用氢量，节约了约5.77%。

3结论

燃料电池系统运行时候，阳极出口必须进行定时排放，排出累积的液态水及惰性气体，保证燃料电池系统稳定输出

。在燃料电池系统全工况范围内，可以依据放电电流大小，优化排氢间隔，提高氢气利用率，降低实际用氢量；同时，在不影响燃料电池放电性能的情况下，尽可能的以较低气压进气，减少外排的氢气量，提高氢气利用率。

参考文献

- [1] NISHIKAWA H, SASOU H, KUNHARA R, et al. High fuel utilization operation of pure hydrogen fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(21): 6262-6269.
- [2] 侯永平, 刘亚楠, 蔡强真. 燃料电池发动机启动过程效率特性分析[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(2): 89-93.
HOU Yongping, LIU Yanan, CAI Qiangzhen. Study on efficiency characteristics of fuel cell engine during start-up[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2013, 3(2): 89-93.
- [3] HWANG J. Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency [J]. Journal of Power Sources, 239: 54-63.
- [4] BRUNNER D A, MARCKS S, BAJPAI M, et al. Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(5): 4457-4466.
- [5] 衣宝廉, 侯明. 车用燃料电池耐久性的解决策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, 2(2): 91-100.
YI Baolian, HOU Ming. Solutions of the durability of fuel cells in vehicle applications[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2011, 2(2): 91-100.
- [6] 陈奔, 王俊, 涂正凯, 等. 基于高氢气利用率的质子交换膜燃料电池运行特性研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(2): 373-377.
CHEN Ben, WANG Jun, TU Zhengkai, et al. Study on operating characteristics of PEM fuel cell based on high hydrogen utilization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(2): 373-377.
- [7] 朱晓舟, 陈民武, 刘湘东, 等. 空冷型 PEMFC 阳极排气方法实验研究 [J]. 储能科学与技术, 2018, 7(1): 118-124.
ZHU X Z, CHEN M W, LIU X D, et al. Experimental study on anode exhaust methods of air-cooled PEMFC[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(1): 118-124.
- [8] 王俊, 陈奔, 席清海. 脉冲排放对 PEMFC 性能影响的研究进展[J]. 电池, 2015, 45(6): 333-335.
WANG Jun, CHEN Ben, XI Qinghai. Research progress in effect of purging on the performance of PRMFC[J]. Battery Bimonthly, 2015, 45 (6): 333-335.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/160685.html>