

# 质子交换膜燃料电池带载吹扫实验研究

朱嘉旭, 刘 灿, 刘金玲, 许思传

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 通过实验对质子交换膜燃料电池单电池的停机吹扫过程开展研究。基于带载吹扫的方式研究带载电流、吹扫流量、单电池温度对吹扫的影响。研究表明:带载吹扫能有效地降低单电池吹扫时的电压,带载电流越大单电池初始电压越低,且随着吹扫时间的增加电池电压持续降低,可有效避免单电池长时间处于高电位。此外,增大吹扫气体流量、提高电池温度均可提高吹扫的速率,且两者对吹扫速率影响较明显。在实验条件下,阳极进气流量 0.34 L/min,阴极进气流量 1.32 L/min,带载电流密度 0.04 A/cm<sup>2</sup>,能够同时满足吹扫时间较短、氢气消耗量较少和吹扫时电池电压较低的吹扫目标。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池;带载吹扫;带载电流密度;吹扫流量;单电池温度

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

## Experimental Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Purge with Load

ZHU Jiayu, LIU Can, LIU Jinling, XU Sichuan

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The purge of fuel cell during shutdown is very important for cold start. The purge of proton exchange membrane fuel cell was experimentally studied. The effect of current, flow rate, and single cell temperature on purge was studied by using the method of purge with load. The results show that the voltage of the single cell reduced effectively when purge with load. The voltage decreases continuously with an increase in the load current. With the increase of the purging time, the voltage of the single cell continues to decrease, which can effectively avoid the high potential of the single cell for a long time. In addition, increasing the purge gas flow rate and the cell temperature can increase the purge rate, both of which have obvious effects on the purge rate. Under the

conditions of experiment, the anode inlet flow rate was 0.34 L/min, the cathode inlet flow rate was 1.32 L/min, and the load current density was 0.04 A/cm<sup>2</sup>, which could meet the purging goal of a short purging time, less hydrogen consumption, and lower cell voltage during purging.

**Key words:** proton exchange membrane fuel cell; purge with load; load current density; intake flow rate; single cell temperature

随着能源短缺、环境污染和温室效应等问题日益突出,质子交换膜燃料电池(PEMFC)凭借其零排放、高功率密度、高能量效率等优点,被认为具有广泛的应用前景。除基础设施不完善,成本高、耐久性较低等问题之外,如何提高低温下的启动性能也是 PEMFC 在推广过程中面临的重要挑战之一。

PEMFC 电化学反应的生成物是水,在低温环境下水结冰体积膨胀,会对催化层和气体扩散层的结构造成破坏,阻碍反应气体扩散,进而影响电化学反应,甚至导致电池无法启动。因此,及时排出流道、催化层和气体扩散层中的水,能够保护燃料电池,提高其低温启动的性能。而停机吹扫就是排除电池中残余水分的一个有效措施,目前已成为 PEMFC 低温启动前的一个必备流程<sup>[1-3]</sup>。

燃料电池的吹扫过程首先是将流道中的液态水吹出,然后将扩散层、催化层的液态水吹出,最后排出膜结合水。扩散层表面的水通过对流以水蒸气的形式被带走,扩散层内部的水通过毛细力被带到表面继续以水蒸气的形式排出,催化层的干燥过程与扩散层类似<sup>[4-5]</sup>。林瑞等<sup>[6]</sup>通过对燃料电池停机后进行冻结/解冻循环研究发现,停机后进行吹扫可以有效地降低燃料电池的性能衰减速率,提高燃料电池

收稿日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(21776221)

第一作者: 朱嘉旭(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池冷启动。E-mail: 245340251@qq.com

通信作者: 许思传(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为燃料电池发动机系统。E-mail: scxu@tongji.edu.cn

论  
文  
拓  
展  
介  
绍

的耐久性。Lee 等<sup>[7]</sup>发现吹扫过程中电池内干燥并不均匀,脊下水比流道下方的水更难排出。Tang 等<sup>[8]</sup>利用中子成像技术对经过超疏水和超亲水的流道进行吹扫实验,发现对流道进行超疏水处理更有利于排出残余水,减低水含量,超亲水处理有利于排出气体扩散层脊下区域的水。Jiang 等<sup>[9]</sup>通过建立模型研究发现,阴极侧流道由于液态水的积累会阻碍气体流动,导致阴极侧流阻显著增加。Tajiri 等<sup>[10]</sup>研究了不同吹扫气体对吹扫的影响,发现氦气的吹扫效果比氮气好,因为氦气的亲水性比氮气好,吹扫时更容易带出水分。Tang 等<sup>[11]</sup>和 Kim 等<sup>[12]</sup>分别提出了真空吹扫和压力突降吹扫的方式,这两种方式都是通过压力变化来降低水的沸点,使液态水更易变成水蒸气,以此提高吹扫效率。Lee 等<sup>[13]</sup>在实验中发现,在吹扫气体量一定的情况下,大流量短时间的吹扫策略优于小流量长时间的吹扫策略,随着吹扫时间的增加,电池的含水量趋于一个稳定值。

针对车载燃料电池的工作条件,一些学者利用氢气和空气对吹扫方式进行研究。潘浩<sup>[14]</sup>利用空气对阴极进行了单侧吹扫,发现在吹扫时间、进气流量、进气温度、电堆温度和环境温度等 5 个影响因素中,电池温度对吹扫影响最显著,温度越高,吹扫速度越快。许澎等<sup>[15]</sup>提出相比于单侧吹扫,氢气和空气同时吹扫效率更高,而且降低燃料电池的初始含水量有利于提高其低温启动性能。Ding 等<sup>[16]</sup>建立了气体吹扫模型,除了研究相对湿度、流速和温度外,发现逆流条件下阳极和阴极出口侧的水分会通过膜渗透到另一侧,导致吹扫时间更长。Kim 等<sup>[17-18]</sup>采用了一种向阴极吹扫气体中加入少量氢气的吹扫方法,利用空气与氢气的催化反应产热,提高对催化层附近残余水的排出效率,可以提高吹扫效果。但上述氢气空气吹扫的研究都没有考虑到吹扫过程中燃料电池会处于较高的开路电压状态,容易造成电池性能的衰减,而带载吹扫可以有效地降低电池的开路电压,故本文针对带载吹扫的方式进行实验研究,以期探明带载条件下各因素对燃料电池吹扫效率的影响。

## 1 实验设备与方案

### 1.1 实验设备

整体的实验台主要包括进气设备、G20 燃料电池测试台架、单电池及 Gamry 电化学工作站 Interface 5000E。实验系统如图 1 所示,加湿器出口

至电池入口,以及电池出口至背压阀的管路是有保温带包裹的管路,以此保证传感器测量的准确性。氮气用于仪器关闭前排出电池内剩余的反应气体。

G20 燃料电池测试台架是针对单电池进行测试的实验台架,可以测量输出功率在 5~1 000 W 的单电池各项参数,如电流密度、电压、某时刻阻抗、电池温度等。G20 台架中所有传感器的测量值均可输出和绘图,可以在系统界面观察到所需测量值的变化趋势。图 2 所示是与该台架配套使用的单电池,采用石墨双极板,活化面积为 5 cm × 5 cm,流道为三蛇形流道,流道宽度 0.8 mm,流道深度 1.1 mm。

实验选择 Gamry 电化学工作站 Interface 5000E 测量交流阻抗。该工作站可以进行循环伏安、线性扫描伏安、循环充放电、交流阻抗等的测试。在该实验中,主要应用交流阻抗测试功能,通过吹扫过程阻抗的变化来判断单电池内部含水量的变化。

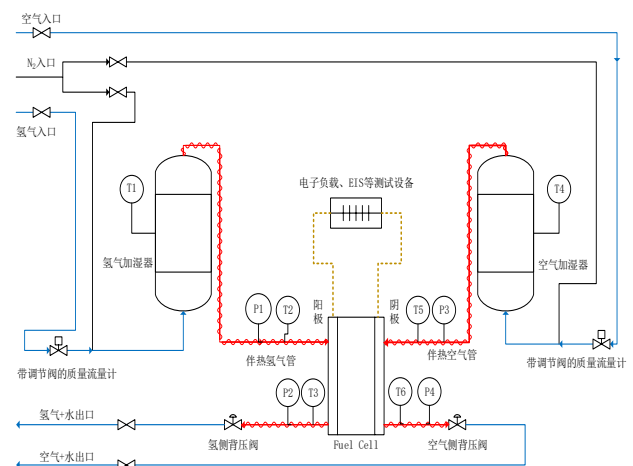


图 1 燃料电池带载吹扫实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

### 1.2 实验方案

为探究不同工况对单电池吹扫效率的影响,在阅读大量有关于燃料电池吹扫仿真和实验论文的基础上,得出一般对燃料电池吹扫实验研究影响较大的主要因素为:吹扫气体流量、燃料电池温度。实验探究的吹扫方式主要是带载和不带载两种方式,故该实验分析的影响因素为:带载电流、吹扫气体流量及电池温度,吹扫气体为氢气和空气。

每组实验都分为稳态阶段和吹扫阶段。稳态阶段是将单电池在恒定电流稳态下运行一段时间,使单电池在吹扫前达到一个湿润的初始状态。为了尽可能保证每次吹扫前的含水量一致,在每次吹扫结束后都在稳态工况下运行 20 min,再进行下一组吹扫实验。同时,为避免将膜吹得过干导致膜的性能

衰减,实验中吹扫阶段当高频阻抗达到  $160 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  左右时,即使未达到平衡状态,也停止吹扫。

## 2 实验结果分析

### 2.1 带载电流密度的影响

单电池不带载吹扫开路电压维持在  $0.94 \text{ V}$ , 这容易造成电池性能的衰减。在吹扫时施加一定的电流载荷可以降低电池的开路电压,起到保护电池的作用,虽然电流载荷越大开路电压越低,但产水也越多,会增加吹扫时间,故需要确定一个合适的带载电流密度值。稳态阶段:阴阳极进气温度和电池温度为  $70^\circ\text{C}$ ;湿度为  $30\%$ (露点温度为  $44.5^\circ\text{C}$ ),阴阳极进气压力均为  $100 \text{ kPa}$ (表压);阳极计量比为  $1.2$ ;阴极计量比为  $2.0$ ;电流密度为  $0.80 \text{ A}/\text{cm}^2$  运行时间为  $20 \text{ min}$ 。吹扫阶段:阴阳极进气温度和电池温度为  $70^\circ\text{C}$ ;湿度为  $0$ ;阴阳极进气压力均为  $100 \text{ kPa}$ (表压),阳极进气流量为  $0.17 \text{ L}/\text{min}$ ,阴极进气流量为  $0.66 \text{ L}/\text{min}$ ,带载电流密度分别为  $0$ 、 $0.04$ 、 $0.08$ 、 $0.16 \text{ A} \cdot \text{cm}^2$ 。

$70^\circ\text{C}$ 下不同的带载电流时,电压随吹扫时间的变化情况如图2所示。带载电流密度为  $0$  时(即不带载条件下),吹扫前电池电压为  $0.94 \text{ V}$ ,吹扫开始后,随着吹扫时间增加,电池电压并无明显变化,一直处在高电位状态;带载电流密度为  $0.04 \text{ A}/\text{cm}^2$  时,吹扫前电池电压为  $0.86 \text{ V}$ ,相比不带载条件其电压降低了  $0.08 \text{ V}$ ,该电压条件对电池性能衰减的影响很小,吹扫开始后,随着吹扫时间增加,电池电压持续降低。这是因为带载条件下随着吹扫时间增加,电池高频阻抗增加,欧姆损失增加,进而导致电压下降;而不带载条件下无欧姆损失,故电压基本不变。当带载电流密度增加为  $0.08 \text{ A}/\text{cm}^2$  和  $0.16 \text{ A}/\text{cm}^2$  时,吹扫前电池电压分别为  $0.84 \text{ V}$  和  $0.81 \text{ V}$ ,相比  $0 \sim 0.04 \text{ A}/\text{cm}^2$  条件下电压降低速度变缓。且由于电流增加,电池产水增加,吹扫过程中电压降低的趋势相较  $0.04 \text{ A}/\text{cm}^2$  时也更缓慢。

图3为  $70^\circ\text{C}$ 下不同的带载电流时,高频阻抗随吹扫时间的变化情况。在吹扫过程中,一开始的阻抗变化比较缓慢,到达某一时刻后阻抗迅速上升。这是因为高频阻抗测量的是膜的阻抗,一开始吹扫时主要是将流道中的液态水吹出,故阻抗变化不大。当流道中的液态水吹出后,膜结合水开始被吹出,膜变干,阻抗迅速增加<sup>[10]</sup>。这里以  $140 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  为标准,分别比较不同带载电流下达到该阻值所需的时

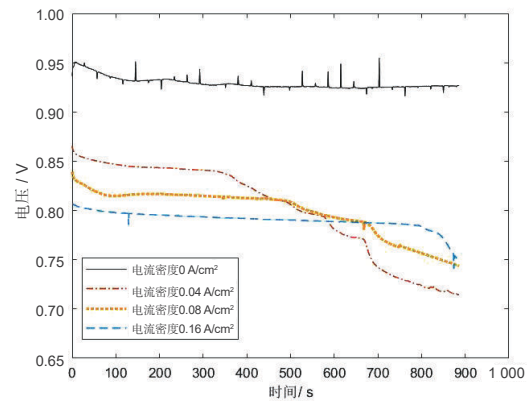


图2  $70^\circ\text{C}$ 下不同带载电流时电压随吹扫时间的变化  
Fig.2 Variation of voltage with purging time at different load currents at  $70^\circ\text{C}$

间。不带载条件下的吹扫时间为  $350 \text{ s}$ ,带载电流密度为  $0.04$ 、 $0.08$ 、 $0.16 \text{ A}/\text{cm}^2$  时,吹扫时间相对不带载条件分别增加  $100$ 、 $230$ 、 $550 \text{ s}$ 。带载电流密度为  $0.04 \text{ A}/\text{cm}^2$  时,电池电压已降为  $0.86 \text{ V}$ ,这对性能衰减影响很小。继续增加带载电流,电压降低量并不明显,且吹扫时间增量较大,故选择  $0.04 \text{ A}/\text{cm}^2$  作为后续实验的带载电流密度大小。

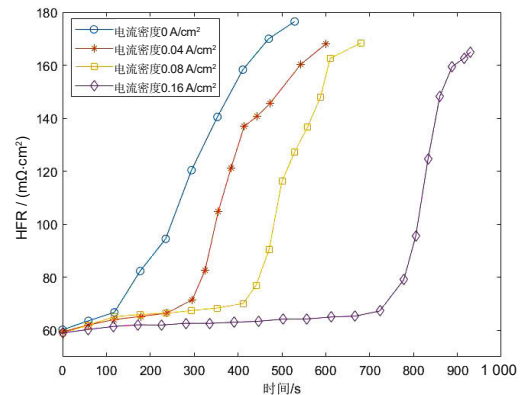


图3  $70^\circ\text{C}$ 下不同带载电流时高频阻抗随吹扫时间的变化  
Fig.3 Variation of HFR with purging time at different load currents at  $70^\circ\text{C}$

### 2.2 电池温度的影响

为避免气体进入电池后,由于电池温度与进气温度不一致导致电池温度发生变化,故试验中将电池温度与进气温度设定为相同值。由于台架对电池温度和进气温度的调节较慢,为避免温度调节过程电池含水量发生较大变化,在稳态阶段将温度设置为与吹扫阶段是温度相等。稳态阶段:阴阳极进气温度和电池温度分别为  $40$ 、 $60$ 、 $70^\circ\text{C}$ ;湿度为  $30\%$ (露点温度为  $44.5^\circ\text{C}$ );阴阳极进气压力均为  $100 \text{ kPa}$ (表压);阳极计量比为  $1.2$ ;阴极计量比为  $2.0$ ;稳态

电流密度  $0.8 \text{ A/cm}^2$ ; 运行时间为  $20 \text{ min}$ 。吹扫条件为: 阴阳极进气压力为  $100 \text{ kPa}$ ; 阴阳极进气湿度为  $0$ ; 阴阳极进气流量分别为  $0.66$ 、 $0.17 \text{ L/min}^1$ 。

图 4 为带载电流密度为  $0.04 \text{ A/cm}^2$  时, 不同温度下高频阻抗随吹扫时间的变化情况。比较高频阻抗达到  $140 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  时的吹扫时间。当温度为  $70^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  时, 吹扫时间分别为  $500$ 、 $1100 \text{ s}$ ; 温度为  $40^\circ\text{C}$  时, 吹扫时间到  $2500 \text{ s}$  时已达到平衡状态, 此时高频阻抗为  $130 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  左右。

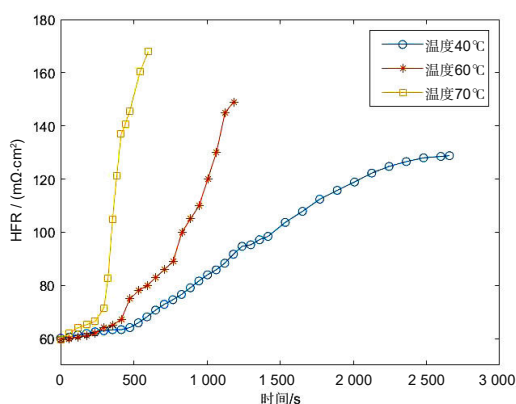


图 4 带载电流密度为  $0.04 \text{ A/cm}^2$  时不同温度下高频阻抗随吹扫时间的变化

Fig.4 Variation of high frequency impedance with purge time at different temperatures with a load current of  $1 \text{ A}$

图 5 为不带载时不同温度下高频阻抗随吹扫时间的变化情况。当温度为  $70^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  时吹扫时间分别需要  $350 \text{ s}$  和  $750 \text{ s}$ ; 当温度为  $40^\circ\text{C}$  时, 吹扫时间到  $1600 \text{ s}$  时已达到平衡状态, 此时高频阻抗为  $130 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  左右。

当电池温度为  $40^\circ\text{C}$  时, 带载与不带载工况均在高频阻抗为  $130 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  左右达到平衡状态, 但不带载达到平衡状态的时间更短。这说明施加电流载荷后, 虽然会增加吹扫时间, 但对平衡态的影响很小, 最后仍然会达到与不带载工况近似的平衡态。

综合图 4、图 5 可知, 在带载和不带载的情况下, 温度对吹扫效率的影响是一致的, 且随着温度变化, 曲线斜率变化明显, 即温度对吹扫时间的影响比较显著, 且温度越高, 吹扫速率越快。因为在相同流量和湿度的条件下, 电池温度越高, 气体对流速率越快, 水蒸气饱和蒸汽压越大, 吹扫气体的带水能力越强, 带走流道中液态水和膜中膜结合水的速度越快, 吹扫效率越高。因此, 使燃料电池保持在一个较高的温度不仅能够提高燃料电池的性能, 还能利用停

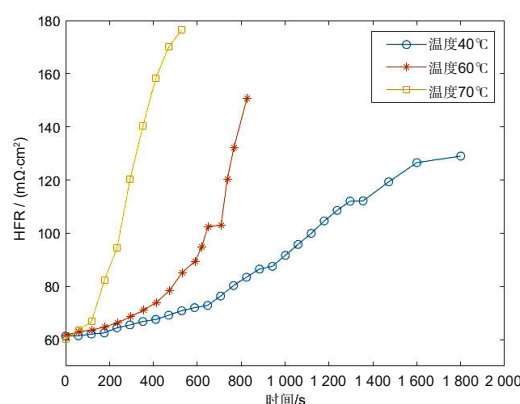


图 5 不带载时不同温度下高频阻抗随吹扫时间的变化

Fig.5 Variation of HFR with purge time at different temperatures without load

机后的余热提高吹扫效率。

### 2.3 进气流量的影响

此组实验的稳态运行工况为: 阴阳极进气温度和电池温度均为  $60^\circ\text{C}$ ; 阴阳极进气压力均为  $100 \text{ kPa}$  (表压); 阳极计量比为  $1.2$ ; 阴极计量比为  $2.0$ ; 电流密度  $0.8 \text{ A/cm}^2$ ; 湿度为  $30\%$  (露点温度为  $36.1^\circ\text{C}$ )。吹扫实验条件为: 阴阳极进气温度和电池温度均为  $60^\circ\text{C}$ ; 阴阳极进气压力均为  $100 \text{ kPa}$  (表压); 带载电流为  $1 \text{ A}$ ; 湿度为  $30\%$ ; 阳极进气流量分别为  $0.17$ 、 $0.34$ 、 $0.51 \text{ L/min}^1$ ; 阴极进气流量分别为  $0.66$ 、 $1.32$ 、 $1.98 \text{ L/min}^1$ 。

不同进气流量(阴阳极流量同时改变)下高频阻抗随吹扫时间的变化如图 6 所示。当进气流量由第一组(阳极  $0.17 \text{ L/min}^1$ 、阴极  $0.66 \text{ L/min}^1$ )增加到第二组(阳极  $0.34 \text{ L/min}^1$ 、阴极  $1.32 \text{ L/min}^1$ )时, 吹扫时间显著减少, 阻抗变化非常迅速, 在  $250 \text{ s}$  左右就能达到稳定状态。当流量增加到第三组(阳极  $0.51 \text{ L/min}^1$ 、阴极  $1.98 \text{ L/min}^1$ )时, 吹扫效率仍然有提升, 但与第二组相比, 增加流量后的影响较小。

图 7 所示是实验测得的三组流量下阴极进出口压差随时间的变化。第一组流量阴极进出口压差在  $1.5 \text{ kPa}$  左右, 随着流量倍增, 第二组和第三组流量阴极进出口压差分别达到了  $4 \text{ kPa}$  和  $7.5 \text{ kPa}$ , 故随着流量的增加, 进出口压差也是不断增大的, 且压差越大, 排水性能越好, 吹扫速率越快, 但进出口压差增加到一定程度后, 继续增加压差对吹扫效率的提高并不显著。

上面 3 组实验比较的是阴阳极流量同时变化对吹扫效率的影响。下面讨论单独改变阴极和阳极进气流量对吹扫效率的影响。不同进气流量(单侧)下

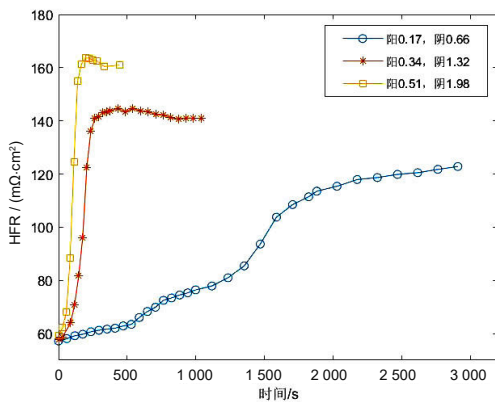


图6 不同进气流量(双侧)下高频阻抗随吹扫时间的变化  
Fig.6 Variation of HFR with purge time at different intake flow rates (bilateral)

高频阻抗随吹扫时间的变化如图8所示,单独增加阳极或者阴极的进气流量都能够提高吹扫效率,同时可以看到吹扫开始至500 s时,增加阳极或阴极流量都使得高频阻抗迅速上升,两者的干燥效果接近,这是由于虽然阳极流量更大,但氢气的带水效果比空气好,而且阳极侧不产生水,氢气直接带走膜中的结合水,使得高频阻抗上升速度迅速,但该工况下阴极侧的排水效率仍然较低,故平衡状态的阻抗值相比增加流量之前并不明显,即电池最终的干燥状态变化不大。而提高阴极进气流量可更有效地带出电池中水分,对吹扫效率的提升更明显,最终平衡状态的高频阻抗也提高较大,对电池的干燥效果更好。

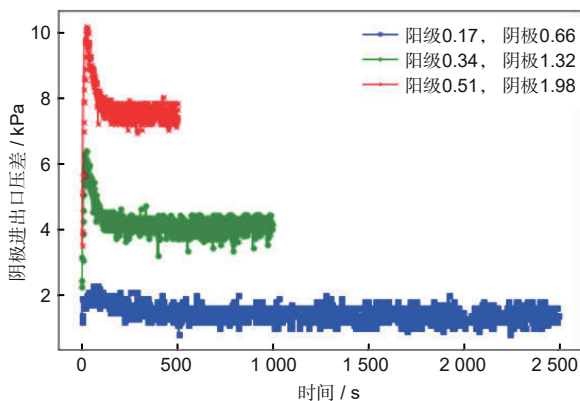


图7 不同进气流量下阴极进出口压差随吹扫时间的变化  
Fig.7 Variation of pressure between inlet and outlet of cathode with purge time under different inlet flow

除了考虑进气流量对吹扫时间的影响外,实验过程还考虑了吹扫过程氢气的消耗量,以比较吹扫过程的经济性。由于小流量工况在高频阻抗为  $120 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  时已经达到平衡状态,故以单电池高频阻抗

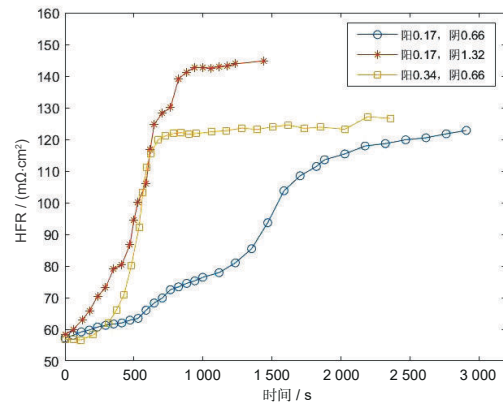


图8 不同进气流量(单侧)下高频阻抗随吹扫时间的变化  
Fig.8 Variation of high frequency impedance with purge time at different inlet flows (unilateral)

达到  $120 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  为标准,得到上述实验的吹扫时间以及氢气消耗量(见图9)。在保证吹扫效率的前提下尽可能减少氢气消耗为目标,可以得出在阴极进气流量为  $1.32 \text{ L/min}$ 、阳极进气流量为  $0.34 \text{ L/min}$  和阴极进气流量为  $1.98 \text{ L/min}$ 、阳极进气流量为  $0.51 \text{ L/min}$  条件下吹扫时间和氢气消耗量都明显优于其他工况。在上述两个工况下,虽然小流量的吹扫时间略高于后者,但阴阳极进气流量更大也意味着需要更高的寄生功率。因此,在吹扫时间接近的条件下选择小流量方案更合适,即阴极进气流量为  $1.32 \text{ L/min}$ 、阳极进气流量  $0.34 \text{ L/min}$  是上述几组实验中经济性和吹扫效率最佳的进气流量。

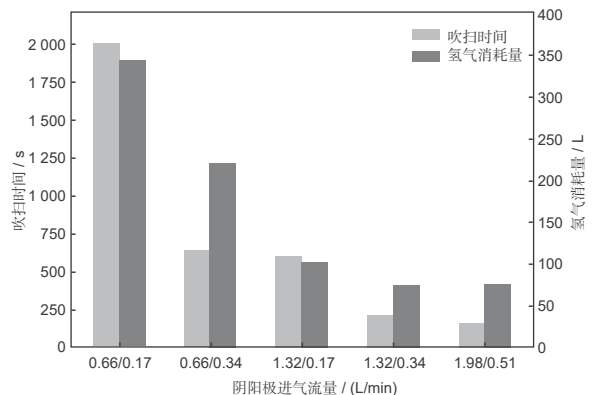


图9 不同进气流量下的吹扫时间及氢气消耗量  
Fig.9 Purge time and hydrogen consumption at different intake flow rates

### 3 结论

本研究表明,带载吹扫可有效地降低吹扫过程中的高电位,更有利于保护电池,减少性能衰减。在

实验条件下,综合考虑高电位以及吹扫时间可以得出单电池吹扫的最佳带载电流密度为  $0.04 \text{ A/cm}^2$ 。在此基础上,对其它吹扫工况进行研究发现:

(1) 吹扫温度(电池温度)越高,吹扫时间越短,电池停机后利用余热吹扫可有效提高吹扫效率。

(2) 进气流量越大,吹扫时间越短,但同时会造成氢气消耗量的增加。

(3) 综合考虑吹扫时间、吹扫经济性和电池电压大小,可以得出该实验条件下,即单电池的工况为电池温度  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 、稳态电流密度  $0.8 \text{ A/cm}^2$ 、阴阳极进气湿度  $30\%$  的条件下,最优的吹扫策略为:阳极进气流量  $0.34 \text{ L/min}$ ,阴极进气流量  $1.32 \text{ L/min}$ ,带载电流密度  $0.04 \text{ A/cm}^2$ ,此时能够同时满足吹扫时间较短、氢气消耗量较少和吹扫时电池电压较低的吹扫目标。

#### 参考文献:

- [1] MARUO T, TOIDA M, OGAWA T, *et al.* Development of fuel cell system control for sub-zero ambient conditions [J]. SAE Technical Paper, 2017. DOI:10.4271/2017-01-1189.
- [2] LUO Y Q, JIAO K. Cold start of proton exchange membrane fuel cell [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 64:29.
- [3] WANG X, TAJIRI K, AHLUWALIA R K. Water transport during startup and shutdown of polymer electrolyte fuel cell stacks[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(19):6680.
- [4] CHO K T, MENCH M M. Fundamental characterization of evaporative water removal from fuel cell diffusion media [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(12):3858.
- [5] CHO K T, MENCH M M. Effect of material properties on evaporative water removal from polymer electrolyte fuel cell diffusion media[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(19):6748.
- [6] 林瑞, 蒋正华, 任应时, 等. 低温工况下燃料电池性能衰减及策略优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(5):658. LIN Rui, JIANG Zhenghua, REN Yingshi, *et al.* Decay and strategy optimization of fuel cell performance at low temperature [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(5):658.
- [7] LEE C Y, LEE Y M, LEE S J. Local area water removal analysis of a proton exchange membrane fuel cell under gas purge conditions[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2012, 12(12):768.
- [8] TANG H Y, SANTAMARIA A, PARK J W, *et al.* Quantification of water in hydrophobic and hydrophilic flow channels subjected to gas purging via neutron imaging [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(22):9373.
- [9] JIANG F M, WANG C Y. Numerical modeling of liquid water motion in a polymer electrolyte fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(2):942.
- [10] TAJIRI K, WANG C Y, TABUCHI Y. Water removal from a PEFC during gas purge [J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(22):6337.
- [11] TANG H Y, SANTAMARIA A D, BACHMAN J, *et al.* Vacuum-assisted drying of polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Applied Energy, 2013, 107(4):264.
- [12] KIM Y S, KIM S I, LEE N W, *et al.* Study on a purge method using pressure reduction for effective water removal in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(30):9473.
- [13] LEE S Y, KIM S U, KIM H J, *et al.* Water removal characteristics of proton exchange membrane fuel cells using a dry gas purging method [J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(2):784.
- [14] 潘浩. 质子交换膜燃料电池停机吹扫过程研究[D]. 北京: 清华大学, 2017. PAN Hao. Study on downtime purge process of proton exchange membrane fuel cell [D]. Beijing: Tsinghua university, 2017.
- [15] 许澎, 张洁, 郭鑫, 等. 燃料电池电堆停机吹扫及低温冷启动性能的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(S1):126. XU Peng, ZHANG Jie, GUO Xin, *et al.* Experimental study on the performance of fuel cell stack downtime purge and low temperature cold start [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(S1):126.
- [16] DING J, MU Y T, ZHAI S, *et al.* Numerical study of gas purge in polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016(103):744.
- [17] KIM S I, LEE N W, KIM Y S, *et al.* Effective purge method with addition of hydrogen on the cathode side for cold start in PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(26):11357.
- [18] KIM S I, BAIK K D, KIM B J, *ET AL.* Experimental study on mitigating the cathode flooding at low temperature by adding hydrogen to the cathode reactant gas in PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3):1544.