

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.07.006

阳极封闭式质子交换膜燃料电池性能稳定性分析

贾秋红^{1,2}, 韩明³, 邓斌¹, 柯坚¹

(1.西南交通大学机械工程学院,成都 610031;2.重庆理工大学机械工程学院,重庆 400054;
3.新加坡淡马锡理工学院清洁能源中心,新加坡 529757)

摘要:保证阳极封闭式质子交换膜燃料电池性能的稳定性的主要问题,阳极流道的水累积是导致其性能不稳定的关键因素之一。根据电池中水传递机理、沿程损失等分析水累积引起电池性能不稳定的原因,从原理上评价了周期性排气法和周期性排气与脉动技术结合的方法对提高电池性能稳定性及避免阳极流道水累积等有效性,通过实验考察了两种方法对改善电池性能的效果,结果表明两种方法都可以改善电池性能的稳定性的,在同样操作条件下第 2 种方法由于引入脉动氢,效果更好,周期性排气频率降低为原来的 1/10,电池的电流密度增加了 8.4%。通过计算得出,在一个公共排气周期,第 2 种方法氢气的排放量仅为第 1 种的 12.3%。

关键词:质子交换膜燃料电池;周期性排气;脉动技术;稳定性

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)07-046-07

Analysis on performance stability of proton exchange membrane fuel cell in the dead-end mode

JIA Qiuhong^{1,2}, HAN Ming³, DENG Bin¹, KE Jian¹

(1.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2.School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
3.Clean Energy Center, Temasek Engineering School, Temasek Polytechnic, 529757, Singapore)

Abstract: It's a main problem to guarantee the performance stability of proton exchange membrane fuel cell in the dead-end mode. The water accumulation of the anode channel is one of the key factors affecting the performance stability of fuel cells. The reason why water accumulation affects performance instability of fuel cell is analyzed according to water transfer mechanism and linear loss. The effectiveness of the two methods, purging cycle and combined purging cycle with pulsating technology, are evaluated on improving the performance of fuel cell and avoiding the water accumulation in the anode channel, and the effectiveness of them are investigated by experiments. The results indicate that both methods can improve the stability of performance of fuel cell, and under the same operating conditions, the second methods has a better effect as the pulsating hydrogen is introduced, which makes the frequency of purging be reduced to 1/10 of only purging used, and the current density of fuel cell increased by 8.4%. In a common purging cycle, the emission of hydrogen used in the second method is only 12.3% of that of used in the first method according to calculation results.

Key words: proton exchange membrane fuel cells (PEMFC); purging cycle; pulsating technology; stability

收稿日期:2014-03-12

基金项目:重庆市科委自然科学基金计划项目(CSTC, 2010BB4302);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ110810)

作者简介:贾秋红(1974-),男,重庆理工大学副教授,西南交通大学博士研究生,主要从事燃料电池系统,机械设计与理论等研究,(E-mail)jqh.01@163.com。

环境保护是当今人类社会可持续发展战略的核心,是影响当前世界各国能源决策和科技导向的关键因素。20 世纪所建立的庞大能源研究系统已经无法适应未来社会高效、清洁、经济及安全能源体系的要求,其发展正面临着巨大的挑战。而燃料电池(Fuel Cell,FC)作为一种将储存于燃料和氧化剂中的化学能通过电化学反应直接转化为电能的发电装置,以其特有的高效率、高可靠性和良好的环境友好性等优点,成为 21 世纪能源和环境领域的研究热点。各种燃料电池中质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell,以下简称 PEMFC)除具有其他类型燃料电池所共有的优点外,还具有可低温快速启动,能量密度高,结构简单等优点^[1]。PEMFC 有望替代目前常用的一次电池和可充电电池,用于常温下使用的各类仪表和通讯设备。

阳极封闭式 PEMFC 是一种通过改进电池结构、操作条件、膜电极等,免去部分辅助子系统如加湿、温控等的燃料电池系统。它使电池系统大大简化,结构更加紧凑^[2],是目前燃料电池研究热点之一。Matsuura 等^[3]研究了阳极封闭操作方式 PEMFC 性能退化现象,发现接近阳极出口端存在严重“干涸”现象。其他学者对阳极封闭式 PEMFC 的研究发现^[4-5]有大量的液态水累积在通道内,集聚在电池堆阳极出口端,阳极入口处有更高的氢气分压,液态水堵塞多孔介质,电池性能严重下降。Siegel 等^[6]利用中子成像技术监测周期性排水阳极流道水分布变化情况。结果表明,阳极出口端周期性排水引起 PEMFC 阳极流道燃料分布不均,距氢气进气口越远,氢气浓度越低,导致电流、电势等在阳极流道的分布不均,但可在一定程度上改善电池性能。由以上研究发现,阳极封闭式 PEMFC 阳极流道的水累积是影响其性能的关键因素之一,阳极合理的水管理是提高阳极封闭式 PEMFC 性能的研究重点。目前人们提出了有关改善阳极封闭式 PEMFC 性能技术的方法,如周期性排气、脉动技术等,并进行了一些相关的实验研究,但对于其机理的研究甚少。

笔者从 PEMFC 中水的传递机理、沿程损失等分析引起电池性能下降的原因,讨论周期性排气改善电池性能的原理,结合多孔介质孔隙系数、有效扩散系数等探讨周期性排气和脉动技术相结合的方法对改善电池性能稳定性的原理,开展周期性排气、脉动技术与周期性排气结合两种情况下电池性能的实验研究,并分析两种操作方式对电池氢气利用率的影响。

1 电池性能不稳定原因分析

影响电池性能的各种因素中,合理的水管理是 PEMC 获得高性能的关键因素之一,一方面,足够的水可保持电解质充分润湿,以保证电解质膜具有良好的质子传导率;另一方面,过量的液态水会导致燃料电池发生水淹现象,阻碍内部反应物的输送,影响电池运行的稳定性和耐久性,从而导致电池性能下降^[7]。PEMFC 膜中水传递有 3 种形式^[2]:1)由于电解质膜中质子的迁移,导致电解质膜中的水从阳极向阴极电渗拖曳;2)阴极的水的浓度高于阳极时形成浓度梯度,水由阴极扩散到阳极(反扩散),扩散速度正比于浓度梯度;3)电极之间的压差推动水在膜中的传递。电渗作用和扩散作用分别使水向相反的方向运动,如果两者的速率相等,质子交换膜中的水仍处于平衡状态。一般情况下,阴极水的浓度高于阳极,其反扩散起主导作用,水由阴极扩散到阳极。

阳极封闭式 PEMFC 阳极流道出现水累积,特别是阳极出口端水集聚现象更严重。这是由于随着反应的进行,阴极侧催化层产生大量的溶解水,阴阳两极水的浓度差引起水的反向扩散起了主导作用,溶解水从阴极扩散到阳极,然后溶解水转化为水蒸气,导致阳极侧水蒸气的摩尔浓度不断升高,氢气的摩尔浓度下降。且随着反应的进行,氢气在流道中不断消耗,入口端与出口端的压力差驱动流体从入口向出口端流动。而阳极流道本身直径较小,且燃料电池在装配过程中扩散层会侵入(如图 1 所示)到阳极和阴极流道中,引起水力直径更小,按照式(1)水力直径 d 减少,压力损失系数增加,氢气沿程压力损失增加,增加了氢气流道入口到出口的压力差。阳极流道入口与出口的压力差利于氢气在流道中的对流流动,同时由于阳极流道出口端压力较低,反扩散到阳极流道的水蒸汽向阳极流道的出口端集聚,出现水累积在阳极出口端的现象。而累积水的存在将阻塞多孔介质(扩散层),使扩

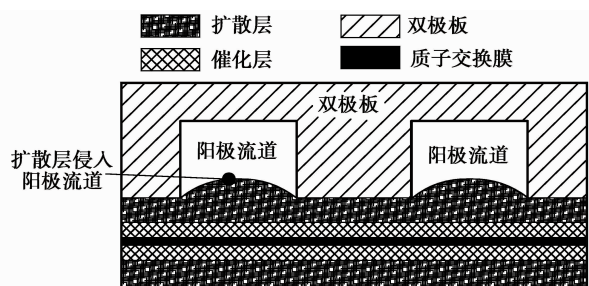


图 1 扩散层侵入阳极流道示意图

散层毛细孔的水含量 s 增加,按照公式(2),将导致多孔介质孔隙率 ϵ 减小,氢气在多孔介质中的有效扩散率降低。

$$\Delta p = \frac{64}{Re} \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} = \lambda_p \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

式中: $\lambda_p = \frac{64l}{Re d}$, 为压力损失系数; Re 为雷诺数; l 为管道长度; d 为水力直径; ρ 为流体密度; v 为管道内平均流速。

$$\epsilon = \epsilon_{\text{dry}}(1 - s), \quad (2)$$

式中: ϵ_{dry} 表示气体扩散层干态下的孔隙率; s 表示扩散层毛细孔的水含量。

综合以上分析,阳极封闭式 PEMFC 当反扩散起主导作用时,阳极流道出现水累积,由于电池堆装配等引起扩散层向阳极流道的侵入,使得压差增加,在流道入口与出口端氢气压力差作用下驱动累积水向出口端集聚。阳极流道的水累积引起扩散层孔隙被液态水阻塞,其孔隙率下降,导致氢气从阳极向阴极方向的有效扩散系数下降,最终导致电池性能下降影响其稳定性。

2 性能改善方法及排气量

2.1 周期性排气

作为供电装置,阳极封闭式 PEMFC 需长时间运行,周期性排气显得尤为重要。周期性排气是指 PEMFC 阳极恒压进气,阳极出口端周期性打开,多余的水分被带走。周期性排气通过在阳极出口端安装电磁阀控制出口的打开或者关闭及其开关周期。Himanen 等^[8]研究发现,如阳极出口端长时间封闭,阳极流道出现累积水,使氢气沿流道的分布不均匀,氢在阳极流道的体积分数将减少,同时累积水将阻塞多孔介质,影响气体的扩散,合理的周期性排气可在一定程度上缓解阳极水累积问题,改善电池的性能。分析其原因,阳极出口端打开瞬间,出口端压力骤减,阳极进出口形成较大压力差,阳极出口端部分累积水被释放的氢气带走,同时对阳极流道薄膜水产生扰动,延缓其向柱状流的发展进程,削弱累积水对电池性能稳定性的影响。待出口端关闭后,氢气在阳极流道的体积分数增加,电池性能得到改善;在随后的时间,阳极流道将再度出现累积水,需要继续排出累积水。阳极出口端打开与关闭周期性进行。采用周期性排气方法带走累积水在一定程度上可以改善电池性能,但会有部分氢气被释放到大气中,降低其利用率。同时当电池载荷,操作条件等改变时,如果不能合理地控制其排放周期,电池性能改善效果也不是很明显,因此排放周期的实时控制技术是其研究难点。

2.2 脉动技术与周期性排气结合

流动按照流体运动状态分为稳态流动和非稳态流动。近年来非稳态流动以其特有的物理性质和研究价值吸引了众多燃料电池学者关注,脉动技术是流体非稳态流动流体力学基础研究的一类典型代表。国外学者^[9-10]将流动参数,如压力、速度等,周期变化的流体划分为时均速度为零的“振荡流”和时均速度不为零的“脉动流”,后者通常由前者与稳态流叠加而成。目前人们对于流体传动中脉动技术的研究较少,主要研究包括脉动流动强化换热机理及相关的数值分析等^[11-15]。研究结果表明,脉动流动有助于强化换热。也有少量研究成果^[16-18]通过实验证明了在燃料电池中脉动技术对延长排水周期、提高氢气的利用率,改善电池性能具有积极作用。下面对脉动技术引入阳极封闭式 PEMFC 后对电池性能的影响进行分析。主要从阳极流道和气体扩散层两个部分进行。在阳极流道,由于脉动氢气的引入,在脉动波驱动力的作用下,引起阳极流道累积水的分布趋于均匀,能有效地减少累积水向局部集中,有助于氢气在阳极流道均匀分布;在气体扩散层,在脉动波的作用下氢气在多孔介质中的有效扩散率将增加,从而氢气沿着多孔介质的质量传输率将增加。下面从理论上做一些分析。

文献[19]认为气体的有效扩散率可以表示成式(3):

$$D_{\text{eff}} = D(1 + R), \quad (3)$$

式中 D_{eff} 和 D 分别表示气体的有效扩散系数和气体的扩散系数。

在脉动气体的作用下,式(3)中 R 可以用式(4)和(5)来表示:

$$R = f_s \left(\frac{l^2 \omega}{v}, S_{\text{ch}} \right) \left(\frac{V}{Al} \right) \sim C_s S_{\text{ch}}^2 \left(\frac{l^2 \omega}{v} \right)^2 \left(\frac{V}{Al} \right)^2, \quad (4)$$

$$V \propto \frac{PA}{\omega^2 \rho}, \quad (5)$$

式中 f_s 取决于管道截面形状 S , $(l^2 \omega / \nu)$ 和施密特数 S_{ch} ; l, ω, ν, V, ρ 分别表示流道长度, 角速度, 动力粘度, 潮气量以及气体的密度。 C_s 是一个取决于截面形状 S 的数, $(l^2 \omega / \nu)$ 是一个无量纲频率数。

而燃料电池的电流密度满足如下关系^[20]

$$i = -nFD_{eff} \frac{c_R^* - c_R^0}{\delta}, \quad (6)$$

式中 i, n, F, c_R^*, c_R^0 和 δ 分别表示电流密度, 反应中电子的转移数, 法拉第常数 (96 485 C/mol), 反应表面浓度, 流道中反应物浓度和扩散层的厚度。

根据式(3)、(4)和(5): 由于脉动氢气引入, $(1+R) > 1$, 使得氢气在多孔介质中的有效扩散率 D_{eff} 增加, 将有助于其在多孔介质的扩散, 进一步, 按照公式(6), D_{eff} 增加, 在脉动气体作用下 $(c_R^0 - c_R^*)$ 的差值增加, 最终导致电池的电流密度将增加。

2.3 氢气排气量的计算

电池堆阳极出口端周期性打开, 氢气排出类似于收缩型喷管的气体流动, 氢气排出过程, 由于时间短, 摩擦影响可忽略, 可近似看作等熵流动。另因在阳极尾端打开过程中, 同时可能有氢气和水排出, 因此仅对氢气排出量进行粗略估算并对氢气利用率进行定性分析, 因为氢气实际的消耗量不仅包括反应所消耗的氢气还涉及反应过程中氢气的损耗等。假设阳极尾端打开时仅排出氢气, 对收缩喷管流量进行计算时, 首先按式(7)判断是否出现壅塞。

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)}, \quad (7)$$

式中 p^*, p_0, γ 分别为临界压强、滞止压强和气体的比热容。氢气在标准状态下的比热容为 1.4。因此 $p^* / p_0 = 0.528$ 。

阳极尾端打开时氢气的流速 v 和质量流量 \dot{m} 可按式(8)和式(9)计算^[21]。

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} RT_n \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_{ni}} \right)^{(\gamma - 1) / \gamma} \right]}, \quad (8)$$

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \frac{p_{ni}}{RT_n} \left(\frac{p_e}{p_{ni}} \right)^{1/\gamma}, \quad (9)$$

式中: \dot{m}, V, A, T_n 分别为喷管出口的质量流量 (kg/s), 喷管出口流速 (m/s), 阳极尾端出口截面积 (m^2), 电池工作温度 (K); p_e 和 p_{ni} 为环境压强和阳极流道氢气压强, $i = 1, 2$; R 为气体常数 (287 J/(kg · K))。

由以上理论分析可知: 采用脉动技术与周期性排气结合的方法, 可通过提高氢气的排气周期, 减少氢气的排放量, 提高氢气的利用率; 同时该方法可使氢气和水在氢气流道的分布更加均匀, 增加氢气在多孔介质的有效扩散系数, 增强其质量传输率, 将更加有利于提高电池性能, 改善电池性能的稳定性的。

3 实验研究

实验系统组成如图 2 所示, 主要包括质子交换膜燃料电池堆, 高压氢气罐, 2 个调压阀, 3 个电磁阀, 2 个风扇, 1 个电子负载等。质子交换膜燃料电池堆由 17 个单电池组成, 活化面积 17.25 cm^2 ; 电磁阀通过控制程序控制管道的打开或者关闭, 可以实现阳极入口或阳极出口的脉动进氢, 也可以实现阳极出口的周期性排气; 调压阀能满足所需气体压力; 两个风扇通过吸或吹的方式实现空气的供应; 电子负载用于不同载荷的施加; 控制程序通过控制指令实现对电磁阀的控制, 满足所需脉动氢气频率和排气周期等。

本实验中, 连续氢气的压力为 40 kPa, 电子负载设定为 11.7 V (恒压), 测试持续 10 h, 取电池处于稳定状态时的 1 h 进行分析 (如图 3 所示为实验时间在第 6~7 h 时的 $i-t$ 曲线图), 电池堆工作温度 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_n = 338 \text{ K}$), 风扇的工作电压为 12 V, 脉动氢气的压力为 60 kPa, 脉动频率为 0.5 Hz, 阳极出口端排气口的内径 d 为 2.8 mm。该实验研究了仅有连续氢气, 脉动氢气施加于阳极的入口, 脉动氢气施加于阳极的出口 3 种情况下电池的 $i-t$ 曲线, 对比分析了电池的性能。在 3 种情况下, 阳极入口都有 40 kPa 的连续氢气供给。第 1 个实验 (仅有连续氢气) 的排气周期为每 30 s 排气 1 次。第 2 和第 3 个实验 (脉动氢气与周期性排气结合)

的排气周期为每 5 min 排气 1 次。本实验中阳极出口每次打开排气时长为 400 ms。

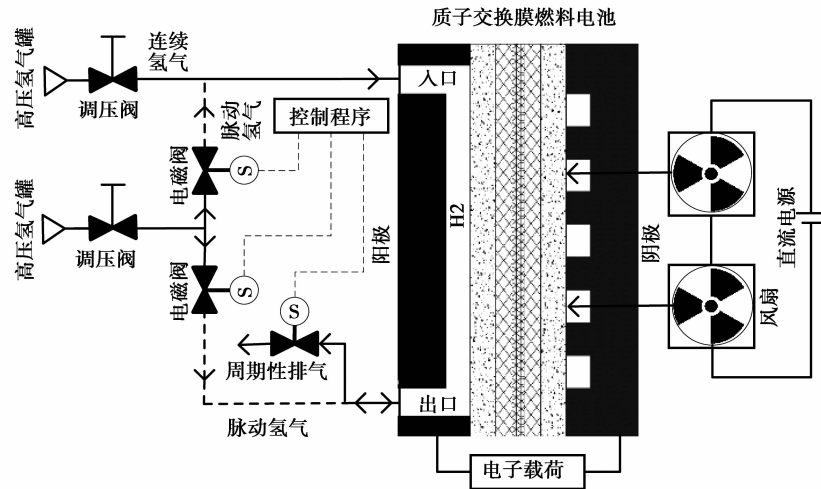


图 2 实验系统组成

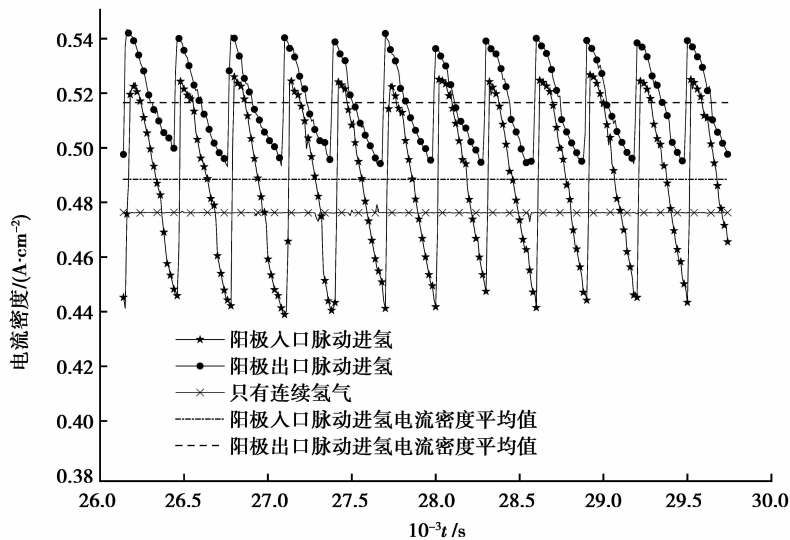


图 3 阳极出口端周期性排气和脉动进氢的实验研究

由图 3 可得出:仅由连续氢气供给时,燃料电池的电流密度为 0.478 A/cm^2 ,在阳极流道入口端通入 60 kPa 的脉动氢气后电池的电流密度为 0.490 A/cm^2 ,在阳极流道出口端通入 60 kPa 的脉动氢气候电池的电流密度为 0.518 A/cm^2 。该结果说明,由于脉动氢气的引入,使得电池的电流密度提高,提高幅度明显。在只有连续氢气供给时,电流密度为 0.478 A/cm^2 ,在入口端通入 0.6 kPa 的脉动氢气后电池电流密度增加了 2.5% ,而在出口端通入同样压力的脉动氢气后,电池电流密度增加了 8.4% ,电池性能的改善更加明显。这与前面的分析结果一致,仅由连续氢气作用保证电池性能的稳定性的需要高的排气频率(每 30 s 排气 1 次),释放到大气中的氢气较多,且电池的电流密度仅有 0.478 A/cm^2 ;当脉动技术与周期性排气结合后,由于脉动波的作用引起氢气在阳极流道趋于均匀,同时氢气在扩散层的有效扩散系数增加,提高了电池性能的稳定性的,因此在脉动氢气与周期性排气的共同作用下,阳极出口端的周期性排气频率(每 5 min 1 次)降低为仅有连续氢气时的 $1/10$,而电池的电流密度得到了提高,阳极入口引入脉动氢气后的电流密度为 0.490 A/cm^2 ,阳极出口端引入脉动氢气后的电流密度为 0.518 A/cm^2 ,表明在阳极出口端引入脉动氢气更有助于该电池的性能稳定性。

4 阳极出口端氢气排放量估算

4.1 是否出现壅塞判断

阳极流道出口端外部压力为大气压 $p_e = 1.01 \times 10^5$ Pa, 流道内氢气压力, 仅有连续氢气时为 $p_{n_1} = 1.4 \times 10^5$ Pa, 通入脉动氢气时为 $p_{n_2} = 1.6 \times 10^5$ Pa。

1) 阳极仅由连续氢气供给。

$$p_e/p_{n_1} = 1.01 \times 10^5 / 1.4 \times 10^5 \approx 0.7214。$$

2) 阳极脉动进氢和连续氢气共同供气。

$$p_e/p_{n_2} = 1.01 \times 10^5 / 1.6 \times 10^5 = 0.63125。$$

两种情况 p_e/p_{n_1} , p_e/p_{n_2} 均大于 $p^*/p_0 = 0.528$, 因此流道内为亚音速流动, 出口压强等于大气压强。

4.2 两种情况下燃料电池氢气排放量估算

阳极流道出口质量流量和流速可按式(8)和式(9)计算。以下按阳极由连续氢气和脉动氢气共同供气, 阳极仅由连续氢气供气两种情况进行分析, 因两种情况燃料电池的排气周期分别为 5 min 和 30 s, 根据图 3, 电池整个的工作过程, 可看作是以 5 min 为公共周期的反复作用过程, 因此以燃料电池在一个公共排气周期 (5 min) 为时间长计算氢气的排放量, 可反映整体工作过程氢气的排放情况。

1) 阳极仅由连续氢气供气, 阳极出口 30 s 排气 1 次, 每次排气 0.4 s。

将已知数据代入得:

$$v_1 = 245.9 \text{ m/s}, A = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times 10^{-6} \approx 6.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2,$$

$$\dot{m}_1 = v_1 \cdot A \cdot \frac{p_{n_1}}{RT_n} \left(\frac{p_e}{p_{n_1}} \right)^{1/\gamma} = 0.00173 \text{ kg/s}。$$

该种供气方式, 30 s 排气 1 次, 5 min 排气 $n_1 = 10$ 次, 每次排气时长 $t = 0.4$ s, 因此其在 5 min 的公共周期氢气的排气量为: $Q_1 = \dot{m}_1 \times n_1 \times t = 6.92 \text{ g}$ 。

2) 阳极脉动进氢和连续氢气共同供气, 阳极出口 5 min 排气 1 次, 每次排气 0.4 s。

将已知数据代入得:

$$v_2 = 289.2 \text{ m/s},$$

$$\dot{m}_2 = v_2 \cdot A \cdot \frac{p_{n_2}}{RT_n} \left(\frac{p_e}{p_{n_2}} \right)^{1/\gamma} = 0.00212 \text{ kg/s}。$$

该种供气方式, 5 min 排气内 $n_2 = 1$ 次, 每次排气时长 $t = 0.4$ s, 因此其在 5 min 公共周期其氢气的排气量为: $Q_2 = \dot{m}_2 \times n_2 \times t = 0.848 \text{ g}$ 。

综合以上计算结果, 阳极出口脉动进氢和连续氢气共同供气, 电池的电流密度为 0.518 A/cm^2 , 5 min 氢气的排气量为 0.848 g ; 阳极仅由连续氢气供气, 电池的电流密度为 0.476 A/cm^2 , 5 min 氢气的排气量为 6.92 g 。脉动进氢和连续氢气共同供气方式比仅由连续氢气供气方式不仅使其电流密度增加了 8.4% , 而且在 5 min 的公共周期内, 第 2 种方式氢气的排放量为第 1 种方式氢气排放量的 12.3% , 可以反映整个工作过程两种情况下阳极出口氢气释放的情况。因此可分析得出阳极脉动进氢和连续氢气共同供气有利于提高电池堆中氢气整体利用率。

5 结 论

笔者分析了阳极流道水累积产生的原因, 从理论上解释了周期性排气、脉动技术和周期性排气结合等方法对于改善电池性能稳定性的机理, 说明了其对缓解阳极流道水累积、提高气体在扩散层有效扩散系数的影响。通过实验说明解释的合理性和两种方法对于改善电池性能稳定性的效果, 得出了如下结论: 周期性排气可以有效缓解阳极流道的水累积问题, 提高电池性能, 但在一定程度上降低了氢气的利用率, 因此实时合理的排放周期控制技术需进一步研究; 周期性排气和脉动技术结合可以更加有效地缓解阳极流道水累积问题, 使氢气在流道中的分布更均匀, 可提高氢气在扩散层中的有效扩散系数, 能更加有效地提高电池性能稳定性和提高电池氢气的利用率。

参考文献:

- [1] Wang Y, Chen K S, Mishler J, et al. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(4): 981-1007.
- [2] 王诚, 毛宗强, 徐景明, 等. 阳极封闭式自增湿质子交换膜燃料电池-水分布及其性能[J]. *电源技术*, 2003, 27(5): 413-418.
WANG Cheng, MAO Zongqiang, XU Jingming, et al. Self humidifying proton exchange membrane fuel cell at anode blockage operating-Performance and water distribution[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2003, 27(5): 413-418.
- [3] Matsuura T, Chen J X, Siegel J B, et al. Degradation phenomena in PEM fuel cell with dead-ended anode[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(26): 11346-11356.
- [4] Lee Y, Kim B, Kim Y. An experimental study on water transport through the membrane of a PEFC operating in the dead-end mode [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(18): 7768-7779.
- [5] Siegel J B, McKay D A, Stefanopoulou A G. Measurement of liquid water accumulation in a PEMFC with dead-ended anode[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2008, 155(11): 1168-1178.
- [6] Siegel J B, Bohac S V, Stefanopoulou A G. Nitrogen front evolution in purged polymer electrolyte membrane fuel cell with dead-ended anode [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2010, 157(7): 1081-1093.
- [7] 吴玉厚, 陈士忠. 质子交换膜燃料电池的水管理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [8] Himanen O, Hottinen T, Tuurala S. Operation of a planar free-breathing PEMFC in a dead-end mode[J]. *Electrochemistry Communications*, 2007, 9(5): 891-894.
- [9] Nasiri M, Moorhem W K V. An investigation of heat and mass transfer in oscillating flows at high acoustic Reynolds numbers[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1996, 23(5): 613-622.
- [10] Carpinlioglu M O, Gundogdu M Y. A critical review on pulsatile pipe flow studies directing towards future research topics[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2001, 12(3): 163-174.
- [11] 李国能, 项忠晓, 郑友取, 等. 层流中脉动气流横掠平板强化传热[J]. *化工学报*, 2012, 63(6): 1717-1722.
LI Guoneng, XIANG Zhongxiao, ZHENG Youqu, et al. Heat transfer enhancement with a flat plane in laminar pulsating flow[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(6): 1717-1722.
- [12] 王畅, 高璞珍, 许超. 层流脉动流动对流换热数值分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2011, 32(7): 890-894.
WANG Chang, GAO Puzhen, XU Chao. Numerical analysis on convective heat transfer characteristics in a pulsating laminar flow[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011, 32(7): 890-894.
- [13] Yuan H S, Tan S C, Zhuang N L, et al. Theoretical analysis of wall thermal inertial effects on heat transfer of pulsating laminar flow in a channel[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 53: 14-17.
- [14] 杨卫卫, 何雅玲, 徐超, 等. 平直通道中层流脉动流动的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(9): 925-928.
YANG Weiwei, HE Yaling, XU Chao, et al. Numerical study of laminar pulsating flow in a channel[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(9): 925-928.
- [15] 翟明, 董芑, 王希影, 等. 圆管湍流脉动流动与换热的数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(20): 85-91.
ZHAI Ming, DONG Peng, WANG Xiyang, et al. Numerical simulation of turbulent pulsating flow and heat transfer in tubes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(20): 85-91.
- [16] Choi J W, Hwang Y S, Seo J H, et al. An experimental study on the purge characteristics of the cathodic dead-end mode PEMFC for the submarine or aerospace applications and performance improvement with the pulsation effects [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8): 3698-3711.
- [17] Choi J W, Hwang Y S, Cha S W, et al. Experimental study on enhancing the fuel efficiency of an anodic dead-end mode polymer electrolyte membrane fuel cell by oscillating the hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(22): 12469-12479.
- [18] Hwang Y S, Lee D Y, Choi J W, et al. Enhanced diffusion in polymer electrolyte membrane fuel cells using oscillating flow[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8): 3676-3683.
- [19] Watson E T. Diffusion in oscillatory pipe flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 133: 233-244.
- [20] O'Hayre R, Cha S W, Colella W, et al. *Fuel cell Fundamentals*[M]. 2nd. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [21] 张鸣远. *流体力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 469-473.