

质子交换膜燃料电池停机后吹扫仿真

许 澎, 高 源, 许思传

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于单电池内部水相变和传递的机理建立了燃料电池一维吹扫水传递模型, 研究了空气同时吹扫阴阳极方法中电池温度、吹扫气体流量对吹扫的影响, 并且对比了氢气和氧气分别作为阳极吹扫气体对吹扫效果的影响。仿真结果表明: 吹扫初始时刻存在水从阴极到阳极的反扩散现象; 电池温度对吹扫的影响程度大于流量对吹扫的影响程度, 并且温度越高, 膜含水量减少越快; 空气吹扫阳极气体既节能又省时。

关键词: 质子交换膜燃料电池(PEMFC); 吹扫; 含水量

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

Numerical Simulation on Gas Purge After Shutdown in Proton Exchange Membrane Fuel Cell

XU Peng, GAO Yuan, XU Sichuan

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

Abstract: Based on water phase change and water transport phenomenon during gas purge in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), a one-dimensional water transport model during gas purge is developed to investigate the effect of two important factors, i. e., stack temperature and gas flow rate on the purge effectiveness. The impact of hydrogen or oxygen as anode purge gas is also compared. The simulation results show that the back-diffusion from cathode to anode is significant during initial gas purge and the impact of stack temperature is much greater than flow rate. It is efficient to use oxygen as purge gas in anode.

Key words: proton exchange membrane fuel cell(PEMFC); gas purge; membrane water content

功率密度高、响应快、效率高等优点被视为未来最有前景的车用替代能源之一。燃料电池内部的电化学反应伴随着大量水的产生, 因此使得其在低温环境下的启动变成一个挑战。因为在低温环境下, 生成的水会立刻变成冰, 堵塞反应气体的传质通道, 短期带来电化学反应速率降低、启动缓慢、启动失败等问题。长久来看, 水到冰的循环相变过程造成膜刺穿、接触电阻变大等破坏, 给多孔介质和膜带来不可逆的性能衰减。因此, 停机后进行吹扫, 降低燃料电池内部的残余水对提高燃料电池低温冷启动能显得尤为必要。另一方面, 燃料经济性对氢气的使用提出了更高的要求, 实际车用燃料电池一般要求吹扫时间限制在 2 min 以内^[1-2], 由于吹扫过程中需要消耗氢气和空压机电功, 节能且省时的吹扫方案和策略成为重点。

Sinha 等^[3]和 Ito 等^[4]建立了质子交换膜、阴极催化层(CL)、阴极扩散层(GDL)、阴极流道的阴极吹扫模型, 将吹扫过程中 GDL 内部的水迁移定义为气液分界线前端的水蒸气和其扩散以及分界线后端的液态水传递和之后膜内的水迁移过程。Sinha 等^[5]在 Wang 等^[6]的 M^2 燃料电池常温运行瞬态模型的基础上建立了三维单流道吹扫模型, 并且验证了该模型的准确性。Wang 等^[7]在两相流基础上建立了三维单流道吹扫模型, 发现温度是影响吹扫时间的重要参数。Ding 等^[8]发展了 Sinha 等^[3]建立的阴极吹扫模型, 建立了包含阳极、膜、阴极的吹扫模型, 研究了不同吹扫工况对吹扫效果的影响。实验方面, Cho 等^[9-10]以扩散层为研究对象, 设计了专门的多孔介质吹扫装置, 研究了吹扫过程中扩散层内部的水变化现象, 并且讨论了聚四氟乙烯(PTFE)含量、孔隙结构等设计参数对吹扫的影响。Tajiri 等^[11]采用多孔介质内部的水蒸气扩散运动和流道与 GDL 界面处

质子交换膜燃料电池(PEMFC)由于其零污染、

收稿日期: 2017-01-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAG06B01)

第一作者: 许 澎(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为燃料电池水热管理、冷启动。E-mail: xpxp1991@126.com

通讯作者: 许思传(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为燃料电池发动机系统、整车热管理。

E-mail: scxu@tongji.edu.cn

的水蒸气对流运动 2 个参数研究氮气和氦气吹扫方案中水的变化和水的再分配过程. 罗马吉等^[12]和刘威^[13]采用实验方法对吹扫进行研究. 上述文献提到的吹扫过程中多孔介质内部主要以水蒸气扩散形式存在的论述对于本文的建模非常重要.

一些学者对强化吹扫效果的吹扫方法进行验证. Kim 等^[14]研究了将适量氢气通入到阴极的吹扫方法, 该方法利用在阴极产生催化反应的大量热量来提高水蒸气的饱和蒸气压从而强化吹扫. Kim 等^[15]提出在阴极气体出口加装电磁阀, 通过短时关闭电磁阀形成的高压在其开启瞬间形成的从流道到催化层的压差来减少吹扫时间. 本田公司^[16-20]申请了大量的吹扫专利, 为了减少吹扫时间和能耗, 将大流量的廉价空气引入到电堆阳极进行吹扫, 从而达到车用的节能省时的要求.

目前关于燃料电池吹扫过程中水传递的研究有限, 且有关空气吹扫阳极的吹扫方法研究甚少, 所建立的吹扫模型需要较长的计算吹扫时间. 本文在 Pukrushpan 等^[21]模型的基础上建立了一个快速预估吹扫时间、评价吹扫方法及策略的一维吹扫水传递模型, 研究电池温度、吹扫气体流量 2 个重要吹扫参数的影响, 对比分析氢气和氧气分别作为阳极吹扫气体的吹扫方法, 给出吹扫气体流量和耗时、耗能的关系.

1 PEMFC 吹扫模型

根据图 1 所示的燃料电池单电池内部吹扫水传递示意图建立了吹扫一维水传递模型. 单电池由流道、GDL、CL、膜组成, 由于吹扫阶段电池温度较高, 假设多孔介质内部主要是以水蒸气的扩散为主进行水迁移的活动, 该假设与 Wang 等^[6]建立的以均相为基础的 M² 模型不谋而合; CL、膜内部由于有聚合物, 液态水在膜电极 (MEA) 里以溶解水形式存在, 并且横跨质子交换膜有溶解水的扩散现象存在.

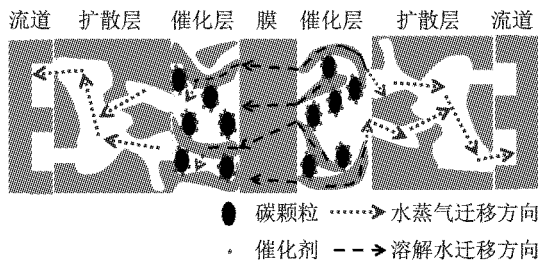


图 1 质子交换膜燃料电池吹扫水传递示意图

Fig.1 Schematic diagram of water transport during gas purge in PEMFC

1.1 MEA 模型

MEA 包括质子交换膜、阳极催化层、阴极催化层. 由于质子交换膜和催化层中含有聚合物, 因此两者都有溶解水的存在, 且溶解水遵循扩散规律 (由于是停机吹扫, 不考虑电渗水). 除此之外, 催化层还是多孔介质结构, 吹扫过程中伴随着大量由聚合物中溶解水到水蒸气的相变过程变化, 所以催化层要联合建立溶解水和水蒸气 2 个扩散方程. 本文首先建立膜的溶解水传递方程来表示吹扫过程中膜内含水量的动态变化, 如下所示:

$$d_{m,avg} \frac{\rho_{m,d}}{M} \frac{d\lambda_m}{dt} = J_{cl,m} - J_{al,m} \quad (1)$$

式中: $\rho_{m,d}$ 为干燥膜的密度; M 为膜的摩尔质量; λ_m 为量纲一参数, 表示膜含水量. λ_m 的计算式如下所示:

$$\lambda_m = \frac{m_{em}}{\rho_{m,d}} c_{H_2O} \quad (2)$$

式中: m_{em} 为膜的等效质量; c_{H_2O} 为水的浓度.

假设催化层和质子交换膜中含水量分布集中在各层的中心, 因此膜厚 $d_{m,avg}$ 计算式如下所示:

$$d_{m,avg} = \left(\frac{d_{cl}}{2} + \frac{d_m}{2} \right) \quad (3)$$

式中: d_{cl} 为催化层的厚度; d_m 为质子交换膜的厚度.

膜中水去往阴、阳极催化层的溶解水扩散通量 $J_{cl,m}$ 和 $J_{al,m}$ 分别为

$$J_{cl,m} = (\lambda_{cl} - \lambda_m) \frac{\rho_{m,d}}{M} \frac{D_{m-cl,eff}}{d_{cl,c} \varphi_c} \quad (4)$$

$$J_{al,m} = (\lambda_m - \lambda_{al}) \frac{\rho_{m,d}}{M} \frac{D_{m-cl,eff}}{d_{cl,a} \varphi_a} \quad (5)$$

式中: λ_{cl} 为阴极催化层的含水量; λ_{al} 为阳极催化层的含水量; $d_{cl,c}$ 为阴极催化层的厚度; $d_{cl,a}$ 为阳极催化层的厚度; φ_c 为阴极催化层中聚合物的体积分数; φ_a 为阳极催化层中聚合物的体积分数; $D_{m-cl,eff}$ 为溶解水扩散系数. $D_{m-cl,eff}$ 表达式^[22]如下所示:

$$D_{m-cl,eff} = \frac{(d_{cl}/2 + d_m/2)}{(d_m/2)/D_{ion} + (d_{cl}/2)/D_{ion}} \quad (6)$$

式中: D_{ion} 为聚合物中溶解水的扩散系数. D_{ion} 可以通过以下方程计算:

$$D_{ion} = \begin{cases} 0, & \lambda < 0 \\ 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{-\frac{2.346}{T}}, & 0 \leq \lambda < 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (161e^{-\lambda} + 1) e^{-\frac{2.346}{T}}, & 3 \leq \lambda \leq 17 \\ 17, & \lambda > 17 \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ 表示含水量; T 表示温度.

阴、阳极催化层中溶解水的动态方程分别为

$$d_{cl,a} \varphi_a \frac{\rho_{m,d}}{M} \frac{d\lambda_{acl}}{dt} = J_{\lambda_{acl,m}} - J_{a,ion-p} \quad (8)$$

$$d_{cl,c} \varphi_c \frac{\rho_{m,d}}{M} \frac{d\lambda_{ccl}}{dt} = -J_{c,l,m} - J_{c,ion-p} \quad (9)$$

式中: $J_{c,ion-p}$ 、 $J_{a,ion-p}$ 分别为阴、阳极催化层聚合物中溶解水去往催化层多孔介质的通量. $J_{a,ion-p}$ 和 $J_{c,ion-p}$ 的计算式分别如下所示:

$$J_{a,ion-p} = (\lambda_{acl} - \lambda_{acl,eff}) \frac{\rho_{m,d}}{M} \epsilon_{acl} \quad (10)$$

$$J_{c,ion-p} = (\lambda_{ccl} - \lambda_{ccl,eff}) \frac{\rho_{m,d}}{M} \epsilon_{ccl} \quad (11)$$

式中: ϵ_{ccl} 和 ϵ_{acl} 分别为阴、阳极催化层多孔介质的孔隙率; $\lambda_{ccl,eff}$ 和 $\lambda_{acl,eff}$ 分别为阴、阳极催化层聚合物中的饱和含水量. 饱合含水量

$$\lambda_{eff} = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36a^3, & 0 < a \leq 1 \\ 14.0 + 1.4(a - 1), & 1 < a < 3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: a 为水蒸气的活度.

阴阳极催化层中水蒸气的动态方程为

$$d_{cl} \epsilon_{cl} \frac{dc_{cl}}{dt} = J_{ion-p} - J_{cl-gdl} \quad (13)$$

式中: c_{cl} 为催化层中水蒸气的浓度; J_{ion-p} 为催化层中聚合物溶解水到水蒸气的通量; J_{cl-gdl} 为水蒸气从催化层多孔介质到扩散层的通量. J_{cl-gdl} 的计算式如下所示:

$$J_{cl-gdl} = \frac{(c_{cl} - c_{gdl})}{(d_{cl}/2 + d_{gdl}/2)} D_{cl-gdl,eff} \quad (14)$$

式中: c_{gdl} 为扩散层中水蒸气的浓度; $D_{cl-gdl,eff}$ 为水蒸气从催化层到扩散层的扩散系数; d_{gdl} 为气体扩散层厚度.

1.2 扩散层和流道模型

燃料电池内部的对流主要发生在电池流道的平面方向,对于厚度方向,绝大多数模型假设为扩散运动. 在吹扫过程中,由于温度较高,多孔介质内部存在大量的水蒸气,水蒸气在浓度梯度存在的条件下扩散至 GDL 和流道的交界面,在此交界面发生流道中的吹扫气体与多孔介质内扩散至此的水蒸气对流运动,从而水蒸气被吹走,这就是电池内部水迁移的最终形态. GDL 内部水蒸气的动态方程为

$$d_{gdl} \epsilon_{gdl} \frac{dc_{gdl}}{dt} = J_{cl-gdl} - J_{gdl-f} \quad (15)$$

式中: ϵ_{gdl} 为扩散层的孔隙率; J_{gdl-f} 为水蒸气从扩散层到流道的扩散通量. J_{gdl-f} 的计算式如下所示:

$$J_{gdl-f} = \frac{(c_{gdl} - c_f)}{d_{gdl}/2} D_{gdl,eff} \quad (16)$$

式中: $D_{gdl,eff}$ 为水蒸气从扩散层到流道的扩散系数; c_f 为流道中水蒸气的浓度. 流道中水蒸气的动态方程为

$$d_f A_f \frac{dc_f}{dt} = A_{act} J_{gdl-f} - J_f \quad (17)$$

式中: d_f 为流道的深度; A_f 为流道和扩散层接触面积; A_{act} 为有效反应面积; J_f 为流道中吹扫通量. J_f 的计算式如下所示:

$$J_f = Q_{f,in} c_f \quad (18)$$

式中: $Q_{f,in}$ 为单流道中吹扫气体的流量.

2 结果分析与讨论

在 Visual C++ 6.0 软件中编程实现了燃料电池吹扫一维水传递的模型计算. 为了验证本文所用模型的有效性和实用性,将模型的计算结果与 Tajiri 等^[11]的实验结果和 Sinha 等^[5]的仿真结果分别进行了对比. 工况选取了电池温度 55.5 °C、吹扫气体流量 4.48 L · min⁻¹. 从图 2 可以看出,仿真和实验数据符合较好,表明本文建立的模型可以用来研究吹扫的影响因素和水传递现象.

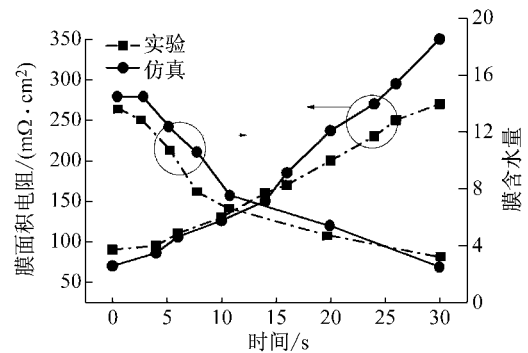


图 2 膜电阻和膜含水量的实验和仿真对比

Fig. 2 Comparison of membrane resistance and water content between simulation and experiment results

电池温度和吹扫气体流量是影响燃料电池停机后吹扫的 2 个重要因素. 如图 3 所示,随着初始电池温度的减小,膜含水量降低得越慢. 如果用膜含水量 3 作为吹扫结束时刻的表征,可以发现吹扫温度越低,吹扫时间越长,并且这种趋势在低电池温度下表现得尤为明显. 对于车用燃料电池来说,停机以后立即吹扫可以有效减小吹扫时间,降低吹扫能耗. 同时,吹扫初始阶段出现的峰值,主要是由阴极水的反扩散引起的,并且电池温度越低,反扩散的程度越严重,这在后面会展开来阐述. 图 4 表示的是不同吹扫

流量下膜含水量变化情况. 从图 4 可以发现, 膜含水量随着吹扫流量的变化不大, 从吹扫流量 $1.87 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $11.22 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 吹扫时间增加了 10 s. 然而, 这是在吹扫气体流量增加 10 倍的情况下, 在实际的车用燃料电池系统上, 空压机是无法满足这种要求的, 并且吹扫气体流量和空压机能耗是近乎成正比的. 总之, 电池温度的影响大于流量对吹扫过程中膜含水量的影响. 在实际车用燃料电池系统中, 低温环境下停机吹扫以后应当立即进行吹扫或者考虑停机前电堆拉高电流来升高温度, 从而保证停机吹扫时电堆有较高的温度. 针对停机吹扫, 应当同时考虑到吹扫时间和耗能的影响, 理想的吹扫方案应该兼具两者. 吹扫流量越大, 质子交换膜含水量减少得越快, 但是空压机消耗的蓄电池能量也会增加, 对于接下来要面临低温冷启动的电堆来说, 此时留给蓄电池的能量越多, 低温冷启动成功的可能性更大(低温启动蓄电池给空压机或者加热元素供电). 另外, 吹扫气体流量过大, 易导致膜吹扫干燥过度, 膜均匀性变差.

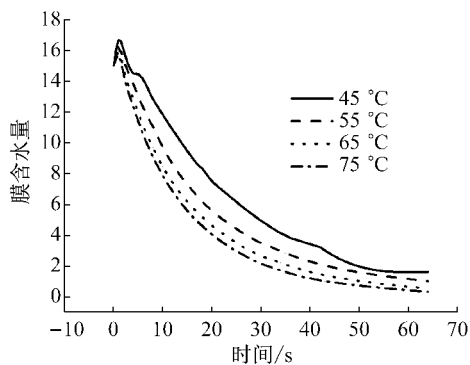


图 3 不同初始温度下膜含水量随时间的变化
Fig. 3 Change of membrane water content with time at different initial stack temperatures

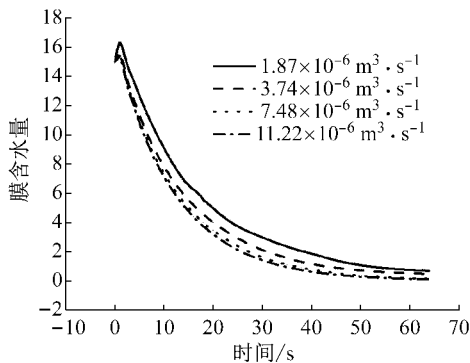


图 4 不同吹扫流量下膜含水量随时间的变化
Fig. 4 Change of membrane water content with time at different purge gas flow rates

在燃料电池正常运行的情况下, 电化学反应生

成的水是在阴极催化层产生的, 水在浓度梯度存在的条件下会反扩散至阳极. 类似地, 由于本文的计算模型初始条件就设定为阴极催化层含水量大于膜含水量, 膜含水量大于阳极催化层含水量. 从图 5 可以看出, 吹扫的初始阶段, 阳极催化层和膜的含水量都出现了增加的现象, 原因就是停机时刻的阴极催化层含水量大于膜从而反扩散引起的. 当 MEA 内部含水量较为均匀的时候, MEA 总的平均含水量开始下降.

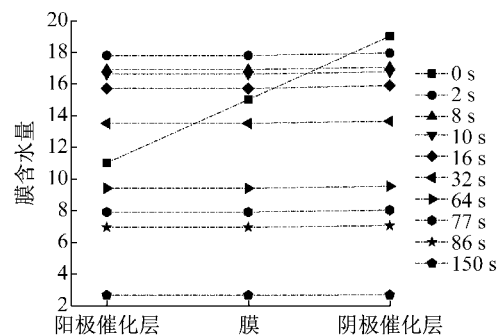


图 5 吹扫气体流量 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 下 MEA 水传递现象
Fig. 5 Water transport phenomenon during gas purge in MEA when flow rate is $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

图 5 揭示了吹扫过程初始时刻水从阴极到阳极的反扩散现象. 阳极催化层的含水量在 0~2 s 之内呈现增加现象, 直到与质子交换膜的含水量一致的时候才开始减少. 因此, 增加阳极气体吹扫流量会减缓吹扫初始时刻阳极催化层含水量增加的情况, 进而减小 MEA 吹扫时间. 图 6 反映的是多孔介质内部水蒸气浓度变化的情况. 阳极扩散层的水蒸气浓度在初始时刻也伴随着增加的趋势, 而阳极催化层内多孔介质的水蒸气浓度增加较慢, 这主要是由于初始时刻反扩散导致的阳极催化层溶解水增加且伴随着催化层内溶解水向水蒸气的相变, 初始时刻在反应气体的吹扫下催化层内部的水蒸气向扩散层扩散的结果. 另外, 吹扫的前 30 s 内水蒸气浓度降低较慢, 原因是此阶段膜中溶解水不断向催化层传递且催化层中溶解水向水蒸气相变的结果.

图 7 展示了实际车用燃料电池中 3 种不同阳极吹扫气体流量对膜含水量的影响, 此时阴极吹扫气体流量不变. 从图 7 可以发现, 随着阳极吹扫气体流量的增加, MEA 吹扫时间减小, 阳极吹扫气体流量从 $2 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $6 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以后, 吹扫时间减少了一半.

虽然空气作为一种廉价的气体适宜于当今越来越注重环保和节能的燃料电池汽车, 但在实际车用燃料电池发动机当中, 大部分还是采用氢气作为阳

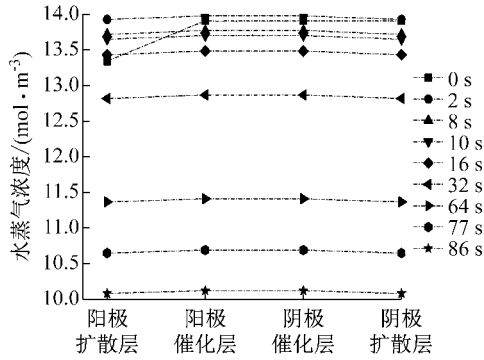


图 6 吹扫气体流量 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 下多孔介质内水传递现象

Fig. 6 Water transport phenomenon during gas purge in porous media when flow rate is $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

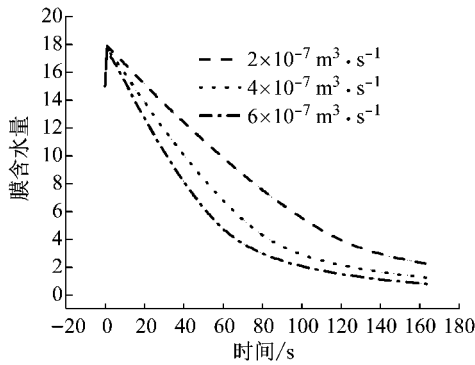


图 7 不同阳极吹扫流量下膜含水量随时间的变化

Fig. 7 Change of membrane water content with time at different anode purge gas flow rates

极的吹扫气体. 图 8 对比了阳极分别采用氢气和空气作为吹扫气体的模拟情况. 实际燃料电池系统中, 阳极氢气的流量和阴极空气的流量相差一个数量级, 以膜含水量 5 为吹扫目标的情况下, 吹扫时间减少了 40 s 左右, 因此将空气作为吹扫气体的吹扫方法可以有效减少吹扫时间. 同时, 将空气作为阳极的吹扫气体可以大幅度降低耗能, 这主要是由于氢气较高的热值引起的. 基于以上分析, 本田公司^[16-20]采用空气作为阴阳极的吹扫气体, 但是要注意到, 空气的引入会在燃料电池阳极端形成氢空界面, 氢空界面对电池有很大的破坏作用, 要采取一定的措施去消除这种影响, 如停机吹扫结束后用氢气再次吹扫阳极端残余空气等方法. 总而言之, 其对燃料电池的系统控制策略和电堆的耐久性提出挑战, 只有在解决了以上 2 个问题的基础上采用此种方法才更加有效.

图 9 是燃料电池停机吹扫耗时和耗能随着流量的变化关系, 此时初始电池温度为 $75 \text{ }^\circ\text{C}$. 可以看出, 耗能和流量近乎成正比关系, 而流量增加耗时减少.

该图可以作为工程实际应用的参考.

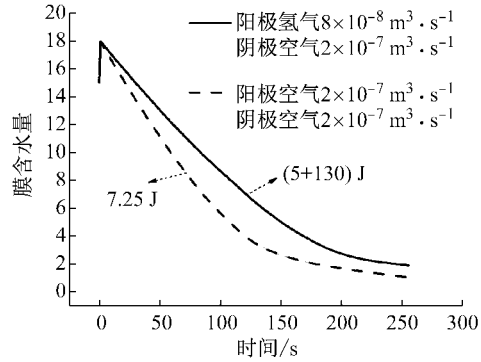


图 8 不同阳极吹扫气体下膜含水量变化情况

Fig. 8 Change of membrane water content with different purge gases of anode

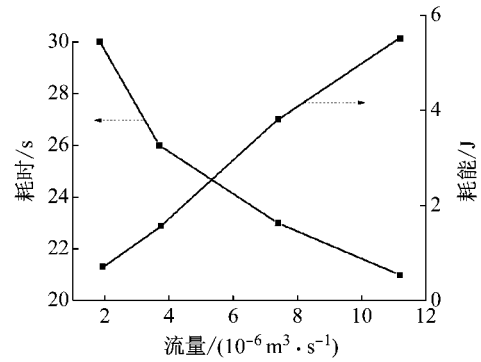


图 9 吹扫耗能和耗时随流量的变化

Fig. 9 Change of energy requirement and time consumption with flow rate during gas purge

3 结论

本文建立了一维燃料电池吹扫水传递模型, 揭示了吹扫过程中水从阴极到阳极的反扩散现象, 研究了初始电池温度、吹扫气体流量、阳极吹扫气体等因素对吹扫效果的影响, 得到以下结论:

(1) 膜中含水量随着初始电池温度的增加而增加. 在实际车用燃料电池系统当中, 停机以后当立即吹扫或者停机前采用大电流运行将电堆温度提高.

(2) 膜中含水量随吹扫气体流量的增加而降低的效果有限, 并且其影响程度比温度小. 实际车用燃料电池系统中, 不宜采用大流量吹扫电堆. 此外, 大电流吹扫增加耗能.

(3) 由于吹扫过程中水从阴极到阳极的反扩散现象, 可以采用增加阳极气体流量的方法来减缓这种影响, 并且可以显著减少 MEA 吹扫时间.

(4) 不考虑吹扫对燃料电池系统复杂程度的影响下, 采用空气作为阳极的吹扫气体不仅可以显著

减少耗能,还可以减少吹扫时间.

本文建立的燃料电池一维吹扫模型具有较高的正确性和实用性,能够用来研究不同工况对燃料电池吹扫效果的影响,相关结论可以作为燃料电池发动机或系统等实际工程应用的指导.

参考文献:

- [1] TAJIRI K, WANG C Y. Cold start of polymer electrolyte fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(8): 2636.
- [2] BORUP R, DAVEY J, GARZON F, *et al.* PEM fuel cell durability with transportation transient operation[J]. *ECS Transactions*, 2006, 3(1): 6773.
- [3] SINHA P K, WANG C Y. Gas purge in a polymer electrolyte fuel cell[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2007, 154(11): B1158.
- [4] ITO H, MAEDA T, KATO A, *et al.* Gas purge for switching from electrolysis to fuel cell operation in polymer electrolyte unitized reversible fuel cells[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2010, 157(7): B1072.
- [5] SINHA P K, WANG C Y. Two-phase modeling of gas purge in a polymer electrolyte fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 183(2): 609.
- [6] WANG Y, WANG C Y. Two-phase transients of polymer electrolyte fuel cells[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 2007, 154(7): B636.
- [7] WANG J B, YIN Y, DU Q. Modeling of water removal from PEM fuel cell during gas purge[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 548/549: 910.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] TAJIRI K, WANG C Y, TABUCHI Y. Water removal from a PEFC during gas purge[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53(22): 6337.
- [12] 罗马吉,王芳芳,刘威,等. 二次吹扫条件下的 PEMFC冷启动实验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 116.
- LUO Maji, WANG Fangfang, LIU Wei, *et al.* PEMFC cold start performance after twice purge[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2011, 39(6): 116.
- [13] 刘威. 质子交换膜燃料电池吹扫除水与低温冷启动研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- LIU Wei. Research on prepurge and cold start of proton exchange membrane fuel cells[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [14] KIM S I, LEE N W, YOUNG S K, *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.
- [15] KIM Y S, KING 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.
- [16] MATSUMOTO Y, UEHARA J, UEDA K. Fuel cell system and control method thereof; US0286116A1[P]. 2009-11-19.
- [17] MIYATA K, WAKE C, OGAWA J. Fuel cell system and method for scavenging fuel cell; US8007945B2[P]. 2011-08-30.
- [18] MORIKAWA H, ASANO Y, TAKANO J, *et al.* Fuel cell system and scavenging method therefor; US8691459B2[P]. 2014-09-08.
- [19] OGAWA J, WAKA C. Fuel cell system; US0045374A1[P]. 2011-02-24.
- [20] INAI S, HAYASHI K, JINBA R. Stop method for fuel cell system; US7857399B2[P]. 2011-01-25.
- [21] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G, PENG H. Control of fuel cell power systems-principals models analysis and feedback design[M]. London: Springer-Verlag, 2004.
- [22] KUI J. Experimental and modeling studies of cold start processes in proton exchange membrane fuel cells [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2011.