

PEMFC 水淹的阳极气体压力降变化特征预警技术*

宋满存 裴普成 曾 夏 查鸿山

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 通过观察阳极气体压力降对一个两片的质子交换膜燃料电池堆进行水淹预警的研究发现,其在水淹过程中阳极气体压力降具有“两级台阶”的变化特征。结合流道内水积聚过程的研究成果以及电压的变化特点,可以将水淹过程分为良好期、湿润期、过渡期和水淹期4个阶段。对比实验表明电流和温度对于两级台阶的相对幅度影响不大,气体压力和阳极过量系数对台阶相对幅度有较显著的影响。提高气体压力和增大阳极过量系数可以提高 PEMFC 抵抗水淹的能力,但增大阳极过量系数则会造成氢气浪费。调整电池堆工作温度是一种有效的水淹自愈手段,通过调整温度可以使 PEMFC 工作在“微湿未淹”的状态下。阳极脉冲排气或增大阳极气体过量系数则可作为 PEMFC 严重水淹时的辅助处理措施。

关键词: 质子交换膜燃料电池 水淹预警 阳极气体压力降

中图分类号: TM911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0340-07

引言

质子交换膜燃料电池(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有清洁环保、能量效率高等优点,适合用于混合动力汽车等作为动力装置^[1]。质子交换膜需要足够的湿润才能保证良好的质子传导率,因此需要对燃料气体进行充足的增湿^[2],另外电化学反应会有水的生成,因而易出现液态水在 PEMFC 内部的积聚即水淹现象。水淹会阻碍燃料气体的流动和扩散,阻碍热的传输造成局部热点^[3],加速材料的腐蚀和催化剂的流失^[4],影响 PEMFC 性能^[5]。因此如何有效地防止 PEMFC 发生水淹是其车用化的重要课题。

PEMFC 运行参数如气体流量、增湿程度、电流密度等^[6-7]以及 PEMFC 设计参数如流道形状、气体扩散层参数等^[8-9]都对水淹具有影响,并且各因素之间存在着复杂的耦合性,因而对水淹的诊断具有很大的难度。通过建立 PEMFC 水管理模型的方法^[10-11]可以对适宜 PEMFC 的工况条件和控制策略给出建议,但由于目前尚无准确且普遍适用的模型,因而对水淹的预测准确度不高;通过工程化故障诊断方法例如神经网络方法^[12]可以提高水淹诊断的可靠性,但需要大量的样本数据,且对水淹发生的过程缺乏足够的解释性;通过参数测量的方法^[13-14]—

般可使用电压或气体进出口压力降等参数来诊断水淹,是目前水淹诊断最主要的方式,但对于如何从水淹趋势上进行预警还缺乏研究。

本课题组通过理论推导和实验验证,提出了 PEMFC 理论阳极气体压力降(Δp_t)的计算公式^[15]。本文通过监测 PEMFC 水淹过程中阳极气体压力降(Δp_{H_2})变化并讨论不同的电流(I)、温度(T)、气体压力(p_{H_2})以及阳极气体过量系数(λ_{H_2})对阳极气体压力降(Δp_{H_2})变化特征的影响,以期提出使用阳极气体压力降进行 PEMFC 水淹预警的技术。

1 研究基础

PEMFC 水淹故障不应以 PEMFC 内某一局部的液态水含量来表示,而应该以某一局部液态水不断积聚而趋向难以排除甚至影响性能来进行定义。尽管 PEMFC 在阴极侧生成水,且电子拖曳作用会使水从阳极迁移到阴极,但车用 PEMFC 的质子交换膜较薄,尤其是阴极微孔层的存在,使得水从阴极到阳极的反渗作用被大大加强^[16-17],因而使用阳极气体压力降比阴极气体压力降诊断水淹具有优势:

(1) 未水淹时阳极几乎无液态水存在,而阴极始终会有水的生成,呈现气-液两相流状态,因此当阳极出现液态水积聚时,可以很快从压力降的变化中得到反馈,诊断更敏感。

收稿日期: 2013-10-16 修回日期: 2013-11-24

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215505)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA1106012、2012AA053402)

作者简介: 宋满存,博士生,主要从事质子交换膜燃料电池测试、故障诊断及车用优化控制研究, E-mail: songmcd@163.com

通讯作者: 裴普成,教授,博士生导师,主要从事燃料电池与发动机优化研究, E-mail: pchpei@tsinghua.edu.cn

(2) 阳极氢气过量系数很小,几乎全部在电化学反应中消耗,对液态水的吹扫能力远弱于阴极,因而对水淹的抵抗能力更弱,需要优先诊断。

(3) 阴极水淹易发生在大电流条件下,而阳极由于气体流量过小,在各个工况下都可能发生水淹,因而阳极对水淹的诊断范围更广。

本课题组通过理论推导和实验验证,提出了 PEMFC 理论阳极气体压力降的公式^[16]

$$\Delta p_f = \begin{cases} \frac{6.32 \times 10^{-11} (C_w + C_d)^2 L T^{1.6835}}{n (C_w C_d)^3 (p_{H_2} - p_{sat})} (\lambda_{H_2} - 0.5) I & (273 \text{ K} \leq T \leq 313 \text{ K}) \\ \frac{1.1748 \times 10^{-9} (C_w + C_d)^2 L e^{T/275.7} T}{n (C_w C_d)^3 (p_{H_2} - p_{sat}) p_{H_2}^{0.0263}} (\lambda_{H_2} - 0.5) I & (313 \text{ K} < T \leq 373 \text{ K}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 Δp_f ——阳极气体压力降的理论计算值(未水淹时)

- C_w ——流道宽度

C_d ——流道高度
- L ——流道长度

n ——流道条数
- p_{H_2} ——阳极气体进口压力

T ——PEMFC 温度
- p_{sat} ——当前温度下的饱和蒸汽压

λ_{H_2} ——阳极气体过量系数
- I ——电流

PEMFC 运行温度通常高于 313 K,因此只需使用式(1)中 $313 \text{ K} < T \leq 373 \text{ K}$ 的公式。本文通过燃料电池测试台对一个两片的 PEMFC 进行水淹实验并监测 Δp_{H_2} 的变化规律,PEMFC 的单片活性面积为 274 cm^2 。燃料电池测试台主要包括供气系统、气体增湿器、电池冷却系统以及相关的传感器和管道等,用于 PEMFC 的相关实验,如图 1 所示。

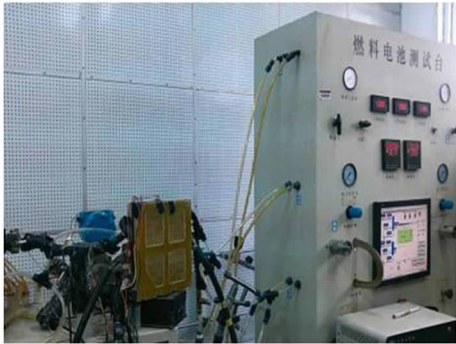


图 1 燃料电池实验照片

Fig.1 Picture of PEMFC experiments

此外,电压是 PEMFC 最重要的输出参数,也是诊断水淹发生的重要依据^[13-14],在实验中也做了采集与记录。

2 实验设计与结果

为了加速 PEMFC 的水淹,在 PEMFC 运行中对燃料气体均采用 100% 增湿,并设定 PEMFC 不同的 I 、 T 、 p_{H_2} 和 λ_{H_2} ,进行水淹过程的对比实验。实验参数设计如表 1 所示。

表 1 水淹实验工况条件

Tab.1 Operation conditions of flooding experiments

水淹实验序号	电流 I/A	电池温度 T/K	氢气压力 p_{H_2}/kPa	氢气过量系数 λ_{H_2}
1-1	50	318	120	1.2
1-2	25	318	120	1.2
1-3	75	318	120	1.2
2-1	50	318	120	1.2
2-2	50	328	120	1.2
2-3	50	313	120	1.2
3-1	50	318	120	1.2
3-2	50	318	135	1.2
3-3	50	318	150	1.2
4-1	50	318	120	1.2
4-2	50	318	120	1.5
4-3	50	318	120	2.0

实验中阴极气体压力与阳极相等,阴极气体过量系数为 2.0。

其中水淹实验 1-1、2-1、3-1 和 4-1 实为同一实验,下文统一以编号 0-1 表示,共计 9 个水淹实验(每组中的 3 个实验为对比实验,共 4 组)。实验中采集了 PEMFC 的电压、阳极气体压力降 Δp_{H_2} ,据此拟合了阳极气体压力降的变化趋势,并与未水淹时的理论阳极气体压力降 Δp_f 一同绘制成实验结果曲线,所有实验结果如图 2。

3 分析与讨论

3.1 水淹过程分析

在 PEMFC 的流道内,经常呈现气-液两相流,两相的流速、流量等因素会影响液相的形态^[18],很多可视化的实验也对 PEMFC 流道内水形成、积聚和随着气体而流动的状态进行了研究^[19]。研究表明液态水在流道内的积聚将经历离散的小液滴、稳定的较大液滴、液体薄膜和堵塞流道的水团 4 个阶段^[20],如图 3。

从图 2 中可以看出,在整个水淹过程中, Δp_{H_2} 呈现较为明显的“两级台阶”的特征,具有 2 个平台段和 2 个上升段(仅水淹实验 4-3 未出现第 2 个上升段)。电压在 Δp_{H_2} 第 2 个上升段时会有明显下降,而在前两个特征段里基本可以较稳定的保持。综合 Δp_{H_2} 的“两级台阶”变化特征以及流道内水积聚过

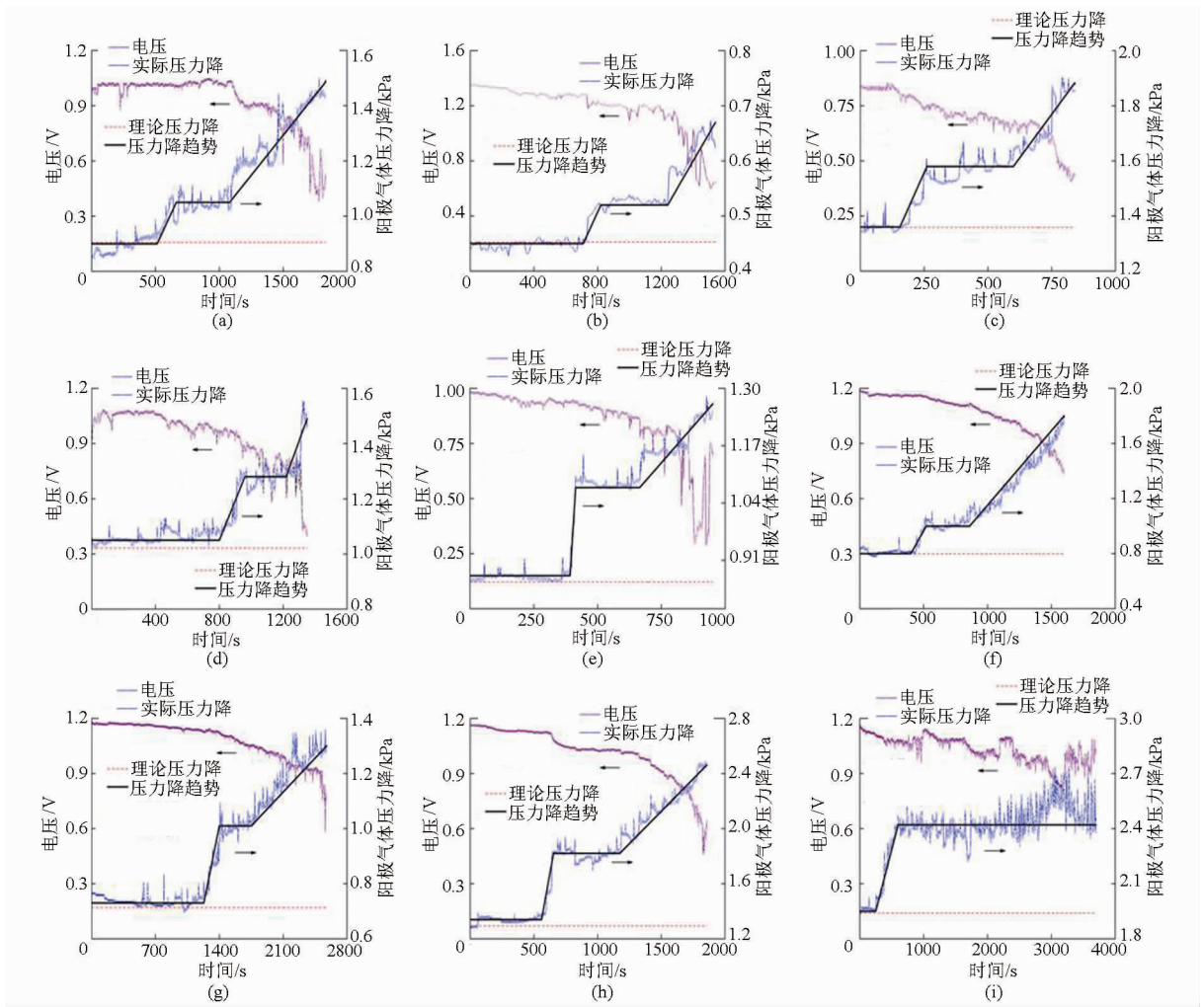


图 2 水淹实验结果曲线
Fig.2 Results of flooding experiments

(a) 实验 0-1 (b) 实验 1-2 (c) 实验 1-3 (d) 实验 2-2 (e) 实验 2-3
(f) 实验 3-2 (g) 实验 3-3 (h) 实验 4-2 (i) 实验 4-3

程的相关研究成果,发现两者可以很好地吻合,并将 PEMFC 从未水淹到陷入水淹的整个过程分为良好期、湿润期、过渡期和水淹期 4 个阶段。

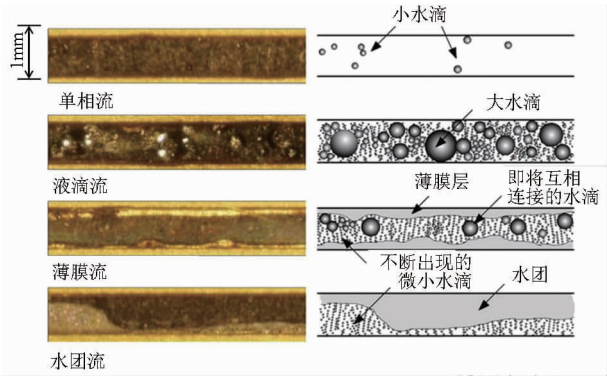


图 3 流道内水形成与积聚过程

Fig.3 Formation and accumulation of water in channels

良好期:未发生水淹时,阳极流道内无液态水或仅存在少量离散的小液滴,基本如图 3 中单相流的状态,因而 Δp_{H_2} 与 Δp_f 相吻合,最大误差不超过

3%,处于第 1 个平台段,整个 PEMFC 保持稳定的运行电压,处于良好的运行状态。

湿润期:随着阳极流道内的液滴数量越来越多、体积越来越大,单相流逐渐向液滴流过渡,这个过程中,流道内积聚的液滴对气流的阻碍作用不断增强,因而 Δp_{H_2} 不断升高,逐渐偏离 Δp_f ,表现为第 1 个上升段。但此时无论是流道还是气体扩散层内,大部分空间仍可保证反应气体的畅通流量,充分的水量甚至还能促进膜的水合作用,因此电压不会因水量的增加而受明显影响,保持相对稳定,整个 PEMFC 处于湿润的较为良好的运行状态。

过渡期:随着流道内的液态水滴继续增多,水滴间就会互相连接和合并,气-液两相呈现薄膜流的状态。此时液态水的含量仍不足以阻挡气体在流道内的流动,会为气体留出流动的通道, Δp_{H_2} 在这个过程中会由于薄膜层的存在而保持在一个较稳定的范围内,即第 2 个平台段。在这此期间,流道内和气体扩

散层内的液态水不断侵占气体流动和扩散的空间,顺畅的电化学反应也经受着挑战,整个 PEMFC 处于向水淹过渡的过程。

水淹期:随着液态水越聚越多,液态水在流道内会形成足以堵塞流道的水团,气体流动转成被阻塞的水团流状态。在水团不断形成壮大的趋势中也会不断伴随着水团被冲散(气体与液体不断竞争),因而 Δp_{H_2} 会存在不规则的较大波动。但由于水淹已经难以阻挡,因而阳极气压力降整体呈现上升趋势,即第 2 个上升段。此时流道内与气体扩散层内已经大量积聚了液态水,严重阻碍了电化学反应的进行,因而 PEMFC 的电压也会在波动中快速下降,整个 PEMFC 陷入水淹。

值得一提的是,由于阴极侧气体流量远大于阳极,阴极侧在 PEMFC 正常工况运行过程中几乎均处于薄膜流的状态,远不如阳极侧变化特征这么显著,因此使用 Δp_{H_2} 的变化特征来诊断水淹具有更高的敏感性和实用性。

3.2 运行条件对“台阶”相对幅度 φ_{DP} 的影响

从图 2b-2i 的结果可以看出,在不同的 I 、 T 、 p_{H_2} 和 λ_{H_2} 下的水淹实验中,第 1 个平台段均与 Δp_i 很好地吻合。

由于两级“台阶”之间即为保证 PEMFC 电压稳定的湿润段,因此有必要计算两级“台阶”之间的幅度,并研究不同运行参数对此幅度的影响。不同条件下的 Δp_i 不同,因此“台阶”幅度采用比例数值来表征,定义为

$$\varphi_{DP} = \left(\frac{\Delta p_{H_2-2}}{\Delta p_i} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中 Δp_{H_2-2} ——第 2 个“台阶”的阳极气体压力降

图 2a-2i 9 组水淹实验的 φ_{DP} 的结果分别为 16.7%、15.6%、16.2%、21.9%、22.9%、25.0%、38.4%、35.8% 和 24.1%。可以看出, I 对于 φ_{DP} 几乎没有影响, T 的影响也较小。这是由于 I 在阳极气体压力降的计算和液态水的生成上都是比例因子,因而在 φ_{DP} 的计算中恰好可以等比例约去;而在适宜 PEMFC 工作的 40~80℃ 之间,随着 T 的升高,一方面会增加进入阳极流道的混合气体流量从而提高气体流速,另一方面也会因氢气的反应消耗而冷凝出更多的液态水,存在着相互制约的作用,计算可知在此温度范围内氢气的分压仍占据着主要的部分,因而 T 对于 φ_{DP} 的影响较小。

p_{H_2} 对于 φ_{DP} 存在显著影响,随着 p_{H_2} 的提高, φ_{DP} 明显增大,说明 PEMFC 抵抗水淹能力提升,这是由于 p_{H_2} 是一种表征气体能量的参数,提高 p_{H_2} 就意味着加强了气体对于液态水的吹扫能力。同时,由于

阴阳极需要同时提升 p_{H_2} , 阴极侧也相应提高了抗水淹的能力。因此,提高 p_{H_2} 是提高 PEMFC 抗水淹能力的有效手段,从而提供了更宽广的湿润段用于水淹的预警和调节。当然,对于 PEMFC 不能随意提高其 p_{H_2} , 应按照其设计参数运行,否则容易对膜和结构部件造成冲击。

不同 λ_{H_2} 下的 PEMFC 水淹实验结果呈现了较为复杂的变化特征。当 λ_{H_2} 从 1.2 提高至 1.5 时, φ_{DP} 从 16.7% 提升至 35.8%, 这表明随着 λ_{H_2} 的增加,气体可以更有效地阻止水团的形成,从而延缓严重水淹情况的发生;当 λ_{H_2} 继续提高至 2.0 时, φ_{DP} 反而降低至 24.1%, 这是由于很大的 λ_{H_2} 不仅使流道内可以容纳更大的水含量而不形成水团,更可以压制薄膜层的厚度,吹扫出更多的水,以致于流动形式长期处于薄膜流状态而不形成水团流,此时阳极流道内的气-液两相流形式与阴极流道内的状态颇为相似。

尽管提高 λ_{H_2} 可以防止 PEMFC 陷入严重水淹导致电压迅速下降,但并不适合用于提高 PEMFC 抗水淹能力。首先,这会造成氢气的浪费,严重降低系统的效率;其次,提高 λ_{H_2} 尽管可以保持电压,但并不是通过减少 PEMFC 内的水含量,而是依靠大流量的气体与液态水的竞争以维持基本的电化学反应,如图 4,在水淹实验 4-3 中的第 2 个平台段时,若将 λ_{H_2} 从 2.0 调节至 1.2,则电压会立即下降,只有再将 λ_{H_2} 升高至 2.0 时,电压才能得到恢复,这说明此时 PEMFC 内部已经积存了大量的液态水,实际上已经处于水淹状态。

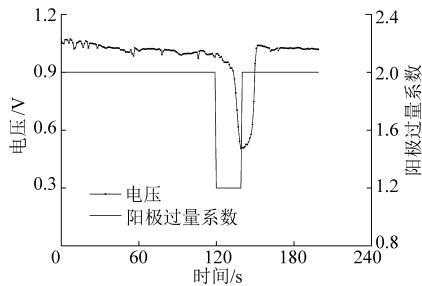


图 4 水淹实验 4-3 中 λ_{H_2} 调节过程中的电压响应

Fig.4 Voltage response as λ_{H_2} hanges in flooding 4-3

4 水淹预警与自愈研究

根据 Δp_{H_2} 的变化特征,可以将 PEMFC 整个的水淹过程分为良好段、湿润段、过渡段和水淹段 4 个阶段,并且在适宜此 PEMFC 工作的条件(气体压力 120 kPa,阳极气体过量系数 1.2)下, φ_{DP} 约为 20%。另外,根据电压的相应变化趋势可以看出,当 PEMFC 处于良好段和湿润段时,PEMFC 输出性能

仍较好;当 PEMFC 处于水淹段时,电压会迅速下降。因此,可以用 Δp_{H_2} 的上升作为 PEMFC 水淹发生的预警,并且严格控制 Δp_{H_2} 超过 Δp_f 的幅度 φ_{H_2} 不大于 20%。实际上,为了实现 PEMFC 既不水淹也不缺水,可以进一步控制 φ_{H_2} 位于 5% ~ 10% (可根据实际工况需要进行适当调整),使 PEMFC 工作在一个“微湿未淹”的状态下,如图 5 为 PEMFC 水

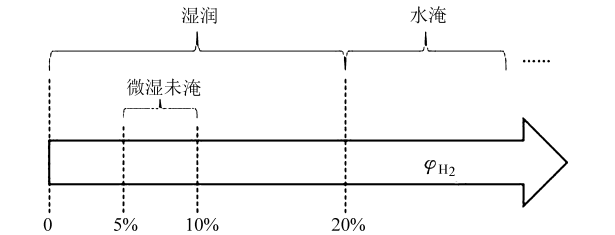


图 5 PEMFC 水淹控制区划分示意图

Fig. 5 Flooding control zones of PEMFC

淹控制区划分的示意图。当 PEMFC 的 Δp_{H_2} 处于湿润期但未处于最理想的“微湿未淹”范围内时,可以通过控制电池反应温度的方法来改变气体的相对湿度并进而调节 PEMFC 内部的液态水含量,经过一段时间 PEMFC 将达到新的水含量状态,很多学者的研究也证实了这个方法的可行性。由于 PEMFC 的 φ_{DP} 为 20%,因此通过公式(1)进行反计算可知在 PEMFC 运行温度范围内,调节约 5℃ 即可实现“微湿未淹”的控制,具有很好的实用性。同时采取直接调节气体增湿的方法也可以对水淹现象进行缓解。

若 PEMFC 已经处于过渡期甚至水淹期时,由于 PEMFC 内部水含量很多,电池性能随时存在迅速下降的风险,因此仅通过电池温度的调整难以及时防止 PEMFC 陷入水淹,需要更直接的手段排除 PEMFC 内的液态水。阳极脉冲排气是一个较为有效的手段,可以通过瞬间的大气流吹散甚至吹扫出阳极流道内的水团,使 Δp_{H_2} 恢复到理想数值,电压也迅速回升,图 6 即为在水淹实验 2-2 中当 PEMFC 处于水淹期后采用脉冲排气的效果。

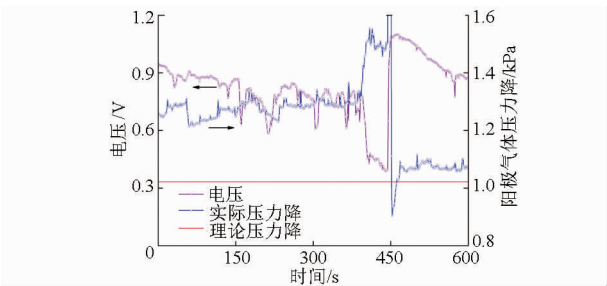


图 6 水淹实验 2-2 中脉冲排气效果图

Fig. 6 Effect of purge in flooding 2-2

但脉冲排气的方法存在 3 个主要问题:首先,脉冲排气会在阳极产生瞬间的压力波动,导致质子交

换膜两侧压力的不平衡,甚至可能会因此而造成膜的损坏;其次,脉冲排气虽然可以有效地吹扫水团,使 Δp_{H_2} 和电压恢复到理想的数值,但并未从根本上改变产生水淹的运行条件,也无法吹扫出全部的多余液态水,因而 PEMFC 还将重新陷入水淹,因此脉冲排气仅是防止 PEMFC 陷入完全水淹的暂时性手段,而不是解除水淹的根本方法;再次,当 PEMFC 进入水淹段形成水团后,脉冲排气才能起到很好的排水效果,而当 PEMFC 处于过渡期时,由于薄膜形态的液态水对于快速气流的剪切力不敏感,因而脉冲排气效果不佳,所以脉冲排气在水淹发生的中前期效果不佳,仅应作为 PEMFC 发生严重水淹后的补充应急方法。

另外,从实验的结果中可以看出,增大 λ_{H_2} 可以较有效地防止 PEMFC 陷入水淹段,暂时保持性能输出的稳定,因而当 PEMFC 进入过渡段甚至水淹段时,可以在迅速调节电池温度的同时暂时加大 λ_{H_2} 以保持电池性能输出,直到通过温度调节的方式使得 PEMFC 解除水淹现象为止。

5 结论

水淹研究是车用质子交换膜燃料电池发动机控制的重要课题,而气体压力降是诊断 PEMFC 水淹的重要参数,本文通过对一个两片的 PEMFC 电池进行不同 I 、 T 、 p_{H_2} 和 λ_{H_2} 条件下的水淹实验,观察 Δp_{H_2} 的变化特征并分析水淹发生过程,提出了利用 Δp_{H_2} 进行 PEMFC 水淹预警的方法,并对水淹的调节和自愈方案进行了研究,得到了以下结论:

(1) 水淹过程中 Δp_{H_2} 具有“两级台阶”的变化特征,很好地对应于流道内液态水积聚过程所经历的离散的小液滴、稳定的较大液滴、液体薄膜和堵塞流道的水团 4 个状态。因此,可以根据此特征将 PEMFC 的水淹过程分为良好期、湿润期、过渡期和水淹期 4 个阶段,电压也在 PEMFC 陷入水淹后迅速下降。

(2) 研究 φ_{DP} 对于防止 PEMFC 陷入水淹具有重要意义。实验表明, I 和 T 对于 φ_{DP} 的影响很小;增大 p_{H_2} 可以显著提高 φ_{DP} ,说明增大 p_{H_2} 可以提高 PEMFC 抵抗水淹的能力;增大 λ_{H_2} 也可以影响 φ_{DP} 的数值,并防止 PEMFC 性能因水淹而迅速下降,但却浪费了氢气,降低了系统效率。

(3) 在 p_{H_2} 为 120 kPa, λ_{H_2} 为 1.2 的条件下,本研究所使用 PEMFC 的 φ_{DP} 约为 20%。为了保证 PEMFC 内部既不水淹也不缺水,可以考虑进一步控制 φ_{H_2} 为 5% ~ 10%,使其工作在“微湿未淹”条件

下,在湿润段内可以通过调节 PEMFC 工作的温度来控制 PEMFC 内部水含量。

(4) 阳极脉冲排气可以暂时使陷入水淹的 PEMFC 的 Δp_{H_2} 和电压恢复到理想状态,但并未从根本上改变 PEMFC 发生水淹的条件,无法解除

PEMFC 发生水淹的状态,并且会在排气瞬间对质子交换膜造成压力冲击,可作为水淹应急方案。水淹时增大 λ_{H_2} ,可以为调节 PEMFC 温度来解除水淹提供更多的时间,是暂时防止 PEMFC 陷入严重水淹的方法之一。

参 考 文 献

- 1 陈静,王登峰,刘彬娜. 燃料电池-蓄电池-超级电容混合动力汽车控制策略[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10):36-39.
Chen Jing, Wang Dengfeng, Liu Binna. Control strategy of fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):36-39. (in Chinese)
- 2 Yan Q G, Hossein T, Wu J X. Investigation of water transport through membrane in a PEM fuel cell by water balance experiments [J]. Journal of Power Sources, 2006, 158(1): 316-325.
- 3 He G L, Yamazaki Y, Abudula A. A droplet size dependent multiphase mixture model for two phase flow in PEMFCs[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 190-198.
- 4 St-Pierre J, Wilkinson D, Knights S. Relationships between water management, contamination and lifetime degradation in PEMFC [J]. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2000, 3(2): 99-106.
- 5 Najjari M, Khemili F, Nasrallah S B. The effects of the cathode flooding on the transient responses of a PEM fuel cell[J]. Renewable Energy, 2008, 33(8): 1824-1831.
- 6 Ous T, Arcoumanis C. Visualisation of water accumulation in the flow channels of PEMFC under various operating conditions[J]. Journal of Power Sources, 2009, 187(1): 182-189.
- 7 Weng F B, Su Y, Hsu C Y. The study of the effect of gas stoichiometric flow rate on the channel flooding and performance in a transparent fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(6): 666-676.
- 8 Owejan J P, Trabold T A, Jacobson D L, et al. Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(17): 4489-4502.
- 9 Chen F L, Chang M H, Fang C F. Analysis of water transport in a five-layer model of PEMFC[J]. Journal of Power Sources, 2007, 164(2): 649-658.
- 10 Karnik A Y, Stefanopoulou A G, Sun J. Water equilibria and management using a two-volume model of a polymer electrolyte fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2007, 164(2): 590-605.
- 11 Paquin M, Frechette L G. Understanding cathode flooding and dry-out for water management in air breathing PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(1): 440-451.
- 12 Steiner N Y, Hissel D, Mocoteguy P, et al. Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes (flooding & drying out) by neural networks modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(4): 3067-3075.
- 13 Gorgun H, Arcak M, Barbir F. An algorithm for estimation of membrane water content in PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(1): 389-394.
- 14 Liu X, Guo H, Ye F, et al. Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(11): 3607-3614.
- 15 Pei P C, Ouyang M G, Feng W, et al. Hydrogen pressure drop characteristics in a fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(3): 371-377.
- 16 Janssen G J M, Overvelde M L J. Water transport in the proton-exchange-membrane fuel cell: measurements of the effective drag coefficient[J]. Journal of Power Sources, 2001, 101(1): 117-125.
- 17 Lee D, Bae J. Evaluation of the net water transport through electrolytes in proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2009, 191(2): 390-399.
- 18 Govier G W, Aziz K. The flow of complex mixtures in pipes[D]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1972.
- 19 Ous T, Arcoumainis C. Visualisation of water droplets during the operation of PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 173(1): 137-148.
- 20 Carton J G, Lawlor V, Olabi A G, et al. Water droplet accumulation and motion in PEM (proton exchange membrane) fuel cell mini-channels[J]. Energy, 2012, 39(1): 63-73.

Flooding Prediction Based on Characteristics of Hydrogen Pressure Drop in PEMFC

Song Mancun Pei Pucheng Zeng Xia Zha Hongshan

(*State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Flooding diagnosis is the key issue of PEM fuel cell. Flooding prediction through hydrogen pressure drop is investigated in this study on a two-piece PEMFC stack. Pressure drop is a key parameter to diagnose water content of PEM fuel cell. The hydrogen pressure drop is more suitable for flooding prediction because it can reflect not only the content but also the water harm on PEM fuel cell. Furthermore, the ideal hydrogen pressure drop is calculated through the operation conditions. Flooding experiments are organized and a two-level characteristic on hydrogen pressure drop is observed. At first, the actual hydrogen pressure drop keeps steady nearly the same as the ideal value, and the voltage is pretty high and constant. Next, the hydrogen pressure drop rises gradually because of the appearance of water droplets. Then, the hydrogen pressure drop performs the second steady level because the water droplets form a liquid film. Finally, the hydrogen pressure drop rises quickly and the voltage drops rapidly as the formation of slug flow. Combining with the visualization results of water droplet accumulation in channels and the tendency of hydrogen pressure drop and voltage, the flooding process can be divided into four continuous periods, which are proper period, humid period, transitional period and flooding period. The growth rate of the hydrogen pressure drop is defined and four groups of flooding experiments are completed, in which the effects of current, temperature, pressure and hydrogen stoichiometry can be discussed. Experiment results show that current and temperature influence little on the growth rate of two levels, while the effect of pressure and hydrogen stoichiometry is remarkable. Increasing the gas pressure can improve the ability for anti-flooding in PEMFC, increasing the hydrogen stoichiometry will waste hydrogen as consideration. The hydrogen purge can take a part for a while in the flooding period to prevent the fuel cell from falling into total flooding, while it does not change the operation conditions which lead to flooding. The hydrogen pressure drop should be controlled before the transitional period. The moist section can be planned out in the first half of the humid period based on hydrogen pressure drop. In the moist section, PEM fuel cell is supposed to be far from the occurrence of flooding. Adjusting the fuel cell stack working temperature may be an effective method to realize the flooding prediction.

Key words: PEMFC Flooding prediction Hydrogen pressure drop