

# 质子交换膜燃料电池堆内温湿度测量方法进展

张新丰<sup>1</sup>, 董佐民<sup>2</sup>, 章 桐<sup>1</sup>, 孙泽昌<sup>1</sup>

(1. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 2. 维多利亚大学 综合能源研究所, 维多利亚, V8W2Y2, 加拿大)

**摘要:** 分析了燃料电池堆内温度及湿度测量的要求和难点, 总结目前燃料电池堆内温度和湿度的实验测试手段和方法, 其中温度(场)的测量方法包括微型热电偶(阵列)、热电阻(阵列)、红外热成像、光纤布拉格光栅及荧光测温法; 湿度(场)的测量方法有气相色谱法、激光吸收光谱法、小微电子式湿度传感器及光纤布拉格光栅法。通过比较各类测量方法的特点, 认为微型电子式传感器及其组合测量具有较好的推广前景, 光纤布拉格光栅由于具有信号多路复用、抗电磁/化学干扰等特点, 在未来会有较好的发展。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 堆内测量; 相对湿度; 温度测量

中图分类号: TH7

文献标志码: A

## Advance on Intra-Proton Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack Temperature and Humidity Measurement

ZHANG Xinfeng<sup>1</sup>, DONG Zuomin<sup>2</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>, SUN Zechang<sup>1</sup>

(1. Clean energy automotive engineering center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute for integrated energy system, University of Victoria, Victoria, V8W2Y2, Canada)

**Abstract:** Requirement and difficulties of intra-stack measurement are analyzed. The state of the art in intra-stack temperature and humidity measurement is presented. Methodologies in temperature(field) measurement are micro-thermocouple (array), resistive temperature detector (array), infrared image, fiber-bragg gratings and phosphor thermometry; while chromatography, tunable laser absorption spectrum, micro-electronic humidity sensor and fiber-bragg gratings are applied in humidity measurement. Comparison of the measurement technologies shows that micro sensors have good spatial and signal resolution with low cost, while optic fiber bragg gratings benefits in chemical inertness, immunity to electromagnetic interference and multiplexing capability,

which has the most brilliant future.

**Key words:** proton exchange membrane fuel cell; intra-stack measurement; relative humidity; temperature measurement

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC, 以下简称燃料电池), 具有许多潜在的用途, 比如便携式电源, 小型社区发电站等, 也被认为是交通工具中最有发展前景的洁净动力源之一。为此世界各国投入大量资金和人力研究高效率、高可靠性的燃料电池系统。温度和湿度是质子交换膜燃料电池运行最关键的操作系统, 对燃料电池的性能有很重要的意义, 更好地了解堆内温度和湿度的分布, 十分有助于进一步理解燃料电池运行时的化学物理过程:

(1) 验证数值模型。数学建模与仿真计算是研究燃料电池的一种非常重要的方法<sup>[1]</sup>, 从空间上分有一维、二维及三维模型, 从时间响应上分有静态和动态模型, 从建模方法上分有机理模型、经验模型和半经验模型等<sup>[2]</sup>, 然而模型的精度、可靠性及适用的范围, 必须要依赖实验测量的结果。

(2) 诊断与优化设计。堆内温度和湿度的分布, 相较于外部特性(出入口气体状态、电流、电压、阻抗谱等), 能够细致地反映电极的工作状态。比如将影响车用燃料电池性能衰退的宏观因素(电流循环、起停循环等<sup>[3]</sup>)转换为电堆内部温湿度参数定量变化, 就能找到影响其性能衰退的直接原因。

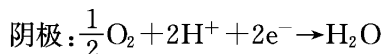
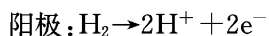
本文首先分析了燃料电池堆内温度和湿度的测量需求和难点, 然后分别对温度(场)和湿度(场)的现有实验测试方法进行了总结。通过比较各类测量方法的特点, 认为微型电子式传感器及其组合测量具有较好的推广前景, 光纤布拉格光栅由于具有信号多路复用、抗电磁/化学干扰等特点, 在未来会有

较好的发展。

## 1 燃料电池温湿度测量任务

### 1.1 电堆内温湿度测量要求

质子交换膜燃料电池的工作工程可用化学反应式描述如下:



在阳极氢气分解成氢原子,失去电子后变成质子,质子在膜中是以水合质子的形式传递,水是质子传导的载体.膜中水含量很大程度决定了电导率的大小,合适的水含量可以使电导率达到最佳,水含量过高和过低都会降低电导率,从而降低发电效率,而流道内气体的湿度直接影响电极内水的含量<sup>[4]</sup>.但是过多的水会导致气体扩散层被“水淹”,无法让气体扩散到催化剂层进行反应,结果导致输出电压降低,效率下降,寿命衰减.

在阴极催化剂的作用下氧原子得到电子,并迅速结合质子形成水,这是一个放热过程,研究表明电堆内热量的产生主要在阴极催化剂层.催化剂层的热量需要及时疏散以避免热点的产生(如烧结催化剂和分解电解质等<sup>[3]</sup>).

在质子交换膜燃料电池的建模仿真与优化设计研究实践中,除了对膜电极水含量关心以外,对流道内气体的湿度和膜电极的温度(及其分布)也十分关心,电堆内温湿度测量基本要求如图1所示.

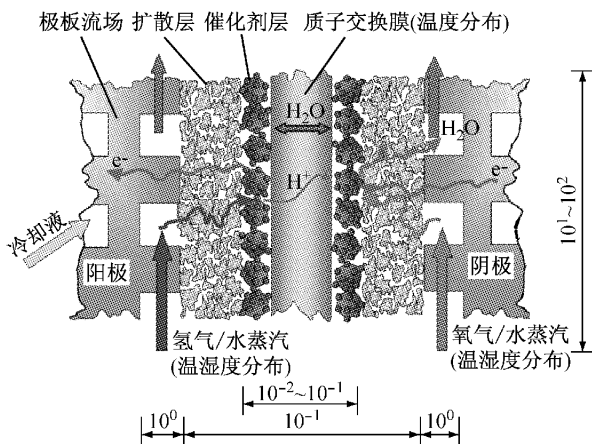


图1 燃料电池电堆内温度和湿度(单位:mm)

Fig.1 Intra-fuel cell stack temperature and humidity (unit: mm)

图1所示为一典型的单电池“三明治”结构,测量包括膜电极的温度(及分布),流道内气体温度、湿

度及组分.其测量难度在于:

(1)测量的位置处于封闭的空间,应极力避免测量对电池运行过程造成干扰;

(2)测量的位置处于狭小的空间,燃料电池单体的平面尺寸为10<sup>1</sup>~10<sup>2</sup> mm,而法向尺度非常微小,仅为10<sup>-2</sup>~10<sup>0</sup> mm,许多常规测量方法无法使用.

### 1.2 温湿度测量与标度

由于水的饱和蒸汽压特性,湿度和温度往往耦合在一起.实验中,温度经常使用开氏温度(K)或摄氏温度(°C)来表示,湿度经常使用的度量单位包括露点(霜点),体积浓度及相对湿度.露点(大于0 °C)表示水蒸气以液态形式凝结时的温度,霜点则是水蒸气以冰的形式凝结析出时的温度.相对湿度为气体中水蒸气的分压与当时温度下的饱和蒸汽压的比,受温度影响很大.露点(霜点)只与水蒸气分压有关,而与温度无关,因此可认为是绝对湿度的一种度量.以燃料电池常用的工作温度60 °C为例,湿度的不同单位度量之间的关系如图2所示.

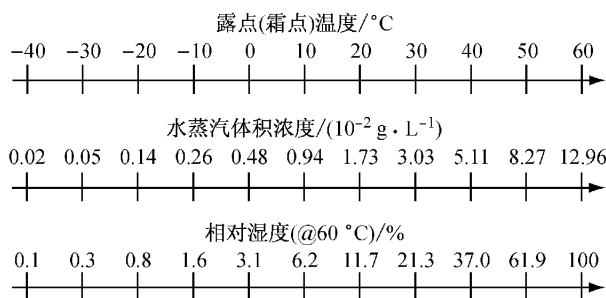


图2 不同湿度单位对照关系表

Fig.2 Correlation among humidity units: dew point, volume mass, relative humidity

如图2所示,在燃料电池工作的温度范围内,用露点(霜点)温度进行标度,能够覆盖很宽的范围;水蒸气体积浓度对于标定、模型验证等科学工作则更加直观;相对湿度容易表达较高的湿度范围,但依赖于温度的高低,往往需要和温度一起测量.

## 2 温度及温度场的测量方法

由于燃料电池电堆尺度微小,不仅需要对现有温度传感器进行选择,往往需要对传感器进行精心的改装和设计,甚至专门进行开发.

### 2.1 微型热电偶(阵列)测量法

热电偶是基于赛贝克(seeback)效应,实现温度信号转换为电压信号.最早利用微型热电偶进行燃料电池电解质内部温度场测量的报道来自宾西法尼亚大学的 Mench 等<sup>[5]</sup>的研究,他们将微型热电偶直

接夹在两片  $25\ \mu\text{m}$  厚的膜之间,用于研究受电流和流场位置影响的电解质温度. Jiao 等<sup>[6]</sup>在研究燃料电池冷启动过程时也使用了热电偶进行温度测量. Wilkinson 等<sup>[7]</sup>也采用了类似的微型热电偶阵列,对单电池流场内部温度场进行了测量. 他们将 17 片热电偶成一字型埋在极板的阳极侧和阴极侧,但实验结果显示,由于微型热电偶极其脆弱,安装后传感器仅有 9 片能正常工作. 丹麦技术大学的 Lebaek 等<sup>[8]</sup>采用 T 型热电偶,沿着蛇形流到的方向布置了 16 个传感器,热电偶埋入厚 10 mm 的双极板,传感器头部距离气体扩散层 0.7 mm,如图 3a 所示.

Herrera 等<sup>[9]</sup>不仅将热电偶装入电极,还结合压力传感器等,组成传感电极(sensing electrode);西安交大的研究团队将热电偶放置于气体扩散层和催化剂层之间(图 3b),并利用电流密度分布测量板,实现了电流密度和温度的同时测量. 通过研究发现,在不同电流密度下,催化剂层的温度和阴极端板处的温度(通常认为是燃料电池的工作温度)具有很大的差异<sup>[10-11]</sup>. 华中理工大学的 Pei 等<sup>[12]</sup>也采用微型热电偶进行电堆温度的测量,并发现电堆升温过程类似抛物线. Lee 等<sup>[13]</sup>则利用了微型热电偶进行沿膜电极平面方向上的温度分布研究,7 个微型热电偶分别埋在阴极流场板/气体扩散层(GDL)之间、GDL 中,GDL/电解质之间,膜电解质中及阳极的场板/气体扩散层(GDL)之间、GDL 中,GDL/电解质之间,在静态工作条件下发现阴极催化剂层温度最高.

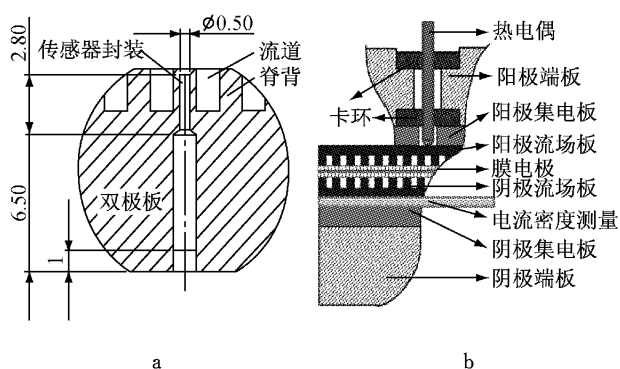


图 3 热电偶传感器布置(单位:mm)

Fig.3 Schematic of thermocouple in fuel cell(unit: mm)

## 2.2 热敏电阻(阵列)测量法

热敏电阻的测温原理是利用热敏材料将温度信号转换为电阻,利用热敏材料进行温度的测量往往需要把材料制成薄膜安装到膜电极或电池单体中.

Siegel 等<sup>[14]</sup>使用 36 个 Pt-100 热电阻,埋入阴极极板,研究了三种不同流场对高温质子交换膜工作温度分布的影响. 台湾工研院的 Lee 等<sup>[15-16]</sup>专门为

测量燃料电池温度而开发了一直称为柔性微型温度传感的原件. 在不锈钢柔性基板上,以铬(40 nm, Cr)及金(220 nm, Au)为热敏材料,以氮化铝(Aluminum nitride, ALN)为绝缘材料,在其上旋涂一层光抗蚀剂,最后微传感器的外形采用光刻法制作而成. 这种微型温度传感器能集成在燃料电池的极板结构中,能对流道内的温度进行测量.

宾夕法尼亚大学的研究团队提出利用薄膜式热敏电阻测量电解质(Nafion® 112)温度的方法,但传感器安装的工艺极为复杂. 首先为了防止传感器材料(15 nm Cr/2000 °A Au)的性能衰退,薄膜热敏电阻外表做了绝缘涂层处理;不仅如此为了防止薄膜受电解质膜拉伸力变形,在电解质贴片的部位首先增加了  $8\ \mu\text{m}$  的聚对二甲苯(Parylene)涂层,再将薄膜热敏电阻实现层压安装,再覆盖  $8\ \mu\text{m}$  的聚对二甲苯涂层,最后再覆盖一层干净的 Nafion® 112 膜(图 4<sup>[17]</sup>). 最后将这种夹有传感器的电解质做成电极及单电池,实现测量.

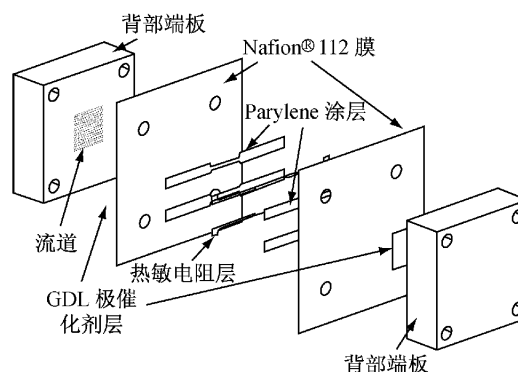


图 4 薄膜热敏电阻温度测量的设计

Fig.4 Schematic of thin film thermistor

实验结果认为,这种测量方法仅能对固体电解质的温度进行测量,其敏感性要比传统的热电偶高一个数量级.

## 2.3 红外热成像法

利用红外成像技术对可以物体表面的温度分布进行测量,端板或极板表面温度也能间接反映内部的温度特性. Wang 等<sup>[18]</sup>用红外热成像技术测量阴极板外部热分布,Zhai 等<sup>[19]</sup>对高温质子交换膜表面温度分布进行了测量研究,利用红外成像设备对电池外部温度场进行测量,这种方法可直接利用现有的设备,无需复杂的实验准备,方便快捷.

如果利用红外成像对燃料电池内部温度场进行测量,则必须对电池进行改装设计. Nishimura 等<sup>[20]</sup>研究小组利用一个带  $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$  红外窗口的单电池,进行在线测量研究气体流速对膜电极反应面

上温度分布的影响. Ishikawa 等<sup>[21]</sup>, 则将红外窗改装在单电池的纵截面上, 通过红外成像观察到零下环境中双极板脊背、流道及膜电极中的温度, 及超冷水的形成.

#### 2.4 光纤布拉格光栅法

利用光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG) 进行温度测量的原理是, 当温度变化引起光纤芯发生应变, 导致反射光的中心波长发生变化, 根据反射光中心波长的变化得出温度. David 等<sup>[22]</sup> 利用光纤进行温度测量的设计如图 5 所示, 每段 FBG 的长度为 10 mm 长, 中心波长为 1 550 nm, 在采样率为 10 Hz 时, 中心波长分辨率为 0.1 pm, 温度测量的分辨率能达到 0.01 °C. 图 5 中该直径为 0.13 mm 的微型热电偶被用来进行标定.

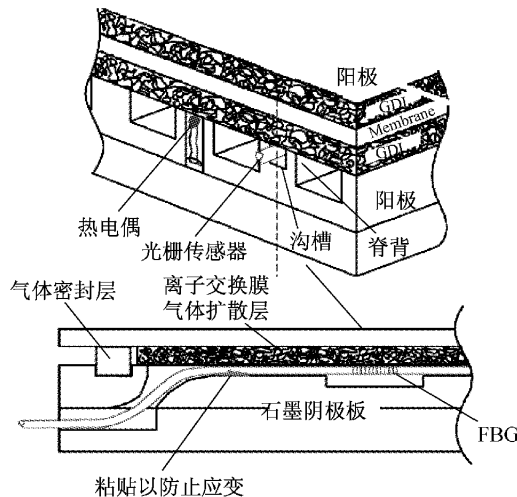


图5 采用FBG进行温度测量

Fig.5 Schematic of the in-situ FBG temperature sensor

FBG 方法受电磁场及电化学反应干扰小, 信号稳定性高, 温度敏感性好, 且能在一条光纤上实现测量信号复用 (multiplexing), 越来越受到关注.

#### 2.5 荧光测温法

荧光测温法主要原理是荧光体在光(或电)激发状态下吸收能量, 当激发源消失, 荧光体以光辐射和热辐射的形式将吸收的能量释放出来, 释放过程中光辐射强度的衰减速度与环境温度有关. 罗切斯特理工大学的 Inman 等<sup>[23]</sup> 提出了一种称为基于“生命周期衰减法”(Lifetime-decay method)的荧光测温技术, 是最近报道用于燃料电池内部温度测量一种新方法. 测量的装置设计如图 6 所示, 演示实验中, 利用该方法测定了气体扩散层表面 5 个点的温度, 精度为  $\pm 0.6$  °C. 该方法的最大的特点是对燃料电池运行参数影响非常小, 同时适用于静态和动态测量<sup>[24]</sup>.

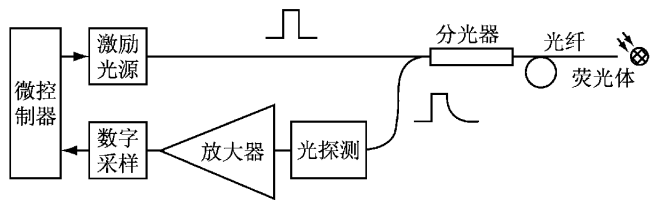


图6 荧光法温度测量

Fig.6 Schematic of phosphor thermometry

### 3 湿度及湿度场的测量方法

#### 3.1 传统湿度测量方法及局限性

传统的湿度测量方法包括: (1)机械式湿度计. 利用材料在不同湿度下发生形变制成的应变式湿度计, 常用的材料包括某些合成纤维材料, 甚至头发丝. (2)干湿球湿度计. 利用不同湿度环境中水汽的蒸发速度及吸收汽化潜热的不同, 将收到汽化潜热作用而出现下降的温度与实际温度进行对比测量. 比如干湿球湿度计 (wet and dry bulb psychrometer, WDB)、吊索时 (sling psychrometer)、阿斯曼湿度计 (Assman psychrometer) 等, 这种测量方法不利于在微小且封闭的空间中进行测量, 水蒸气的挥发对测量的气体本身有干扰作用, 影响测量精度. (3)利用水蒸气凝结的微小的结露制成的冷镜式湿度计 (chilled mirror hygrometer). 冷镜式湿度计精度高, 往往是其他湿度计的标定基准, 但价格昂贵.

传统的湿度测量仪器和仪表在无法直接用于测量质子交换膜燃料电池内部的湿度, 但其中的原理和方法为设计微小型传感器和电子测量提供了必要的理论及方法论基础. Nishikawa 等<sup>[25]</sup> 使用便携式湿度仪, 在双极板上开  $\Phi 1$  mm 的孔放置探头来进行流道内湿度的测量, 这种方法需要多个湿度仪一起工作, 试验台设定、操作、数据的记录和整理都十分繁琐.

#### 3.2 气相色谱法

色谱法 (chromatography) 是采用分离技术测定物质成分的分析方法, 通过检测空气中的氢组分和氢气中的氧组分来测定空气/氢气中水含量. 气相色谱仪目前比较成熟, 因此可以用现有的实验设备来测量燃料电池气体组分.

宾夕法尼亚大学的 Mench 等<sup>[26-27]</sup> 研究小组首次在 2003 年提出利用色谱法对燃料电池的气体组分进行测量, 该小组利用的气相色谱仪由安吉伦公司 (Agilent technologies Inc.) 赞助, 测定了入口和

出口处的气体组分,不仅包括水蒸气,还包括氧气和氮气的浓度. Partridge 等<sup>[28]</sup>利用毛细管进口抽样质谱法(capillary-inlet mass spectrometry, SpaciMS),这种方法利用毛细管对流动道内的气体进行采样(流量为  $\mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ ),然后分析样品气体中的湿度和组分. 这种方法不仅仅能用于单电池,还能用于电堆,而且毛细管探针对电池的影响很小.

### 3.3 激光吸收光谱法

可调谐二极管激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)法测量湿度的原理,是利用水蒸气对 1 471 nm 波长的强烈吸收特性实现相对湿度的测量. 作为一种新型的非接触测量方法,已被广泛应用于各种环境下的气体检测.

Ritobrata 等<sup>[29]</sup>在测定吸收光谱谐波信号时采用了一种软件锁定放大器及曲线拟合方法,使得温度和湿度的测量精度分别达到了  $\pm 2.5\%$  和  $\pm 3^\circ\text{C}$ . 与 Ritobrata 采用楔形玻璃对光谱进行观察的方法不同, Basu 等<sup>[30]</sup>则采用光纤及耦合器将光信号和吸收光谱引入电堆并从电堆引出,这种方法有利于燃料电池运行设备与光谱测量设备分离. 该研究小组并利用这种方法研究了静态工作和循环工况下燃料电池内部的温湿度特性<sup>[31]</sup>,并且对比了上述不同工况下入口和出口出温湿度变化特性<sup>[32]</sup>. Yoshinobu 等<sup>[33]</sup>分别使用 1 392 nm 和 760 nm 两种波长的光进行水蒸气和氧气浓度的测量.

## 4 温湿度组合测量

### 4.1 微型电子式温湿度测量法

微型电子式传感器的基本原理就是利用湿敏/湿敏材料在不同温湿度条件下产生的电阻或电容的变化,实现测量目的. 目前湿敏材料有陶瓷类敏感材料,半导体类敏感材料及聚合物传感材料等<sup>[34]</sup>.

Hinds 等<sup>[35]</sup>将硅带隙温度传感器(Silicon bandgap sensor)和电容聚合物湿度传感器组合在一起使用,但温度分辨率和湿度分辨率都较低,分别为  $\pm 1.2^\circ\text{C}$  和  $1.8\%$ ;该小组还将带隙式温度传感器、容性高分子湿度传感器及微型应变式压力传感器安装在一个单片上,并集成了 14 bit 数模转换接口电路,然后安装到双极板与流道相通的地方,实现了温度、湿度及压力的同时测量<sup>[36]</sup>.

台湾工研院的 Lee 等<sup>[37]</sup>开发了专门用于质子交换膜燃料电池温度和湿度测量的微型温湿度传感器:利用负温度系数的金属作为导体测量温度,利用

高分子材料吸水后介电常数的变化感应湿度. 制成的电容型温湿度传感器,尺寸分别为  $180\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m}$ 、 $180\ \mu\text{m} \times 220\ \mu\text{m}$ . 这种集成温湿度测量的专用传感器,在电堆中的安装方式与图 4 极为相似,缺点是每个传感器只能测量一个点的温湿度.

### 4.2 光纤布拉格光栅温湿度测量

光纤测量技术在抗电磁干扰,抗化学腐蚀等方面,都比基于电气原理的传感器要好;不仅如此,光纤传感器还可以实现信号的多路复用(Multiplexing),很容易实现阵列测量和远程测量<sup>[38-39]</sup>. 利用光纤进行湿度测量,根据其原理的不同,分为有几种:(1)吸收光谱法. 利用某些特殊材料对光的不同吸收特性,而这种吸收特性依赖于湿度. 将其涂在光纤表面,通过测量被测气体通过这种材料发生的光谱吸收特性实现湿度测量目的;(2)消逝波法(evanescent wave). 消逝波法的原理是利用特殊材料(比如有机材料)在不同湿度环境下对消逝波的吸收、折射率的改变及散射导致光强度变化等来判断气体的湿度;(3)干涉法(interferometric sensors). 在光纤一端涂上湿敏材料(如氧化钛  $\text{TiO}_2$ ),入射光线在该涂层上经反射后产生相位差,与原有光信号产生干涉,不同湿度下,不同波长的光会达到共振,产生最大光强,以此达到测量目的;(4)布拉格光栅法(FBG). 布拉格光栅是光纤内部的一种反射光学结构,能反射特定波长的光,且对其余的光具有透射作用. 用于湿度测量的光纤外部涂有湿敏材料,这种材料在吸收了水份之后发生应变,应变传到布拉格光栅,导致中心反射波长发生漂移,通过测量反射光谱漂移来确定外部湿度. 据报道,一种带有聚酰亚胺涂层的 FBG,具有  $13^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  范围内,  $10\% \sim 90\%$  的湿度测量范围,湿度的敏感度由涂层厚度决定<sup>[40]</sup>.

维多利亚大学的 Peter Wild 课题组<sup>[41]</sup>,成功地利用带有聚酰亚胺涂层的 FBG 实现多点温湿度的测量. 在同一光纤上,同时保留用于温度测量的原有 FBG 及外包层,又增加局部蚀刻和涂层(一种纤维素塑料, Pyralin),制作了具有特定涂层和包层结构的 FBG,实现了温度和湿度的同步测量,光纤的处理方法如图 7 所示<sup>[42]</sup>.

FBG 方法可以使用一根光纤同时测量多个点的温度和湿度,受电磁场及电化学反应干扰小,信号稳定性高,温度敏感性好,且能在一条光纤上实现测量信号复用(Multiplexing),越来越受到关注.

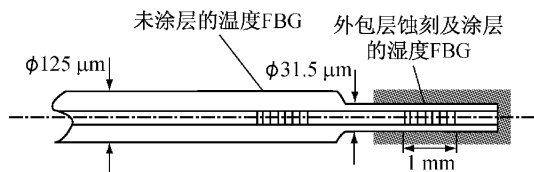


图7 温度湿度同时测量的FBG及其涂层方法

Fig.7 Schematic of temp-humidity FBG sensors and its coating

## 5 不同测量方法对比

评价一种测量方法,通常需要考虑敏感性、精度、响应时间,测量范围等,堆内温湿度测量不仅针对电堆内部单点的温湿度测量,更有意义的是温度场和湿度场的测量,因此此处选择了空间分辨率、时间分辨率、信号分辨率及测量成本等几个指标进行比较,见表1。表中,RH表示相对湿度。

表1 温湿度测量方法比较

Tab.1 Comparison of temperature and humidity measurement technology

测量信号	测量方法	空间分辨率	时间分辨率	信号分辨率	设备成本	优势	缺点
温度	热电偶(阵列)	250 $\mu\text{m}$	高	$\pm 0.19\text{ }^{\circ}\text{C}$	低	体积小	接线多,抗电磁干扰差
	热敏电阻(阵列)	110 $\mu\text{m}$	高	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	中	可制成薄片	接线多,抗电磁干扰差,材料可致膜电极中毒
	红外成像	高	低	$<0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	高	技术成熟	测内部温度需要改装电池
	荧光衰减测温	1 000 $\mu\text{m}$	1 s	$\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	高	对电池干扰小	技术十分复杂
湿度	气相色谱法	低	低	$\pm 0.5\%$ 摩尔分数	高	能测定气体组分	需要设计气流采样管道
	激光吸收光谱	低	4 s	$\pm 2.5\%$ RH	中	不干涉电堆工作	测量范围受限(40%~90%)
温度湿度	微型电子式湿度传感器	100 $\mu\text{m}$	8 s	$\pm 0.25\%$ RH	低	布置容易	接线多,抗电磁干扰差
	组合电子式微传感器	100 $\mu\text{m}$	8 s	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\pm 0.25\%$ RH	低	技术成熟	接线多,抗电磁干扰差
	光纤布拉格光栅	1 000 $\mu\text{m}$	10 s	$\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\pm 2\%$ RH	高	多路复用,耐电磁/化学干扰	技术尚不成熟,价格昂贵

注:每个电信号由两根线,特别是在布置传感器阵列时,端子引线相应地成倍增加。

从表1中可以看出经过专门设计的电子式温湿度传感器具有较高时间分辨率和空间分辨率,成本较低,容易作为堆内温湿度传感器推广,不足之处就是测量信号容易受电磁及电化学环境干扰;光纤布拉格光栅的优点是信号可以实现多路复用,温湿度可以同时测量,且受电磁/电化学环境干扰小,也是未来发展趋势。

## 6 总结

燃料电池堆内温度(场)及湿度(场)的测量对于燃料电池建模、仿真、诊断及优化具有很重要的意义。堆内温湿度测量是燃料电池研究中的关键技术。

现有的燃堆内温度测量方法有微型热电偶阵列法、热敏电阻法、红外成像法等;现有的湿度测量方法有气相色谱法、激光吸收光谱、微型电子式湿度传感器等,其中组合电子式微传感器、光纤布拉格光栅能同时测量温度和湿度。

专门设计的电子式温湿度传感器具有较高时间分辨率和空间分辨率,成本较低,容易推广,唯一不足就是当采用阵列形式测量时接线较多,容易受电

磁及电化学环境干扰;光纤布拉格光栅的优点是信号可以实现多路复用,温湿度可同时测量,且受电磁/电化学环境干扰小,也是未来发展趋势。

### 参考文献:

- [1] Siegel C. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells [J]. Energy, 2008, 33(9): 1331.
- [2] Collon Spiegel. 张新丰译. 质子交换膜燃料电池建模与 Matlab 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2013.  
Collon Spiegel. Translated by Zhang Xinfeng. PEM fuel cell modeling and Matlab simulation. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [3] 张新丰, 杨代军, 周拓. 车用燃料电池系统的性能衰退机理及影响因素分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(3): 276.  
ZHANG Xinfeng, YANG Daijun, ZHOU Tuo. Review on degradation mechanism and influence factors for vehicular fuel cell systems [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(3): 276.
- [4] 张新丰, 章桐. 质子交换膜燃料电池水含量实验测量方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2152.  
ZHANG Xinfeng, ZHANG Tong. Review on water content measurement technology for PEM fuel cell [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2152.

- [5] Mench M M, Buord D J, Davis T W. In situ temperature distribution measurement in an operating polymer electrolyte fuel cell, American Society of Mechanical Engineers[J]. Heat Transfer Division, 2003, 374(2):415.
- [6] Jiao K, Alaefour I E, Karimi G, *et al.* Simultaneous measurement of current and temperature distributions in a proton exchange membrane fuel cell during cold start processes [J]. *Electrochimica Acta*, 2011 56(8): 2967.
- [7] Wilkinson M, Blanco M, Gu E, *et al.* In situ experimental technique for measurement of temperature and current distribution in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2006, 9(11): A507.
- [8] Lebak J, Ali S T, Iler P M, *et al.* Quantification of in situ temperature measurements on a PBI-based high temperature PEMFC unit cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, 35(18): 9943.
- [9] Herrera O, Merida W, Wilkinson D P. Sensing electrodes for failures diagnostics in fuel cells[J] *Journal of Power Sources*, 2009, 190(1): 103.
- [10] Zhang G, Guo L, Ma L, *et al.* Simultaneous measurement of current and temperature distributions in a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(11): 3597.
- [11] Lin H, Cao T F, Chen L, *et al.* In situ measurement of temperature distribution within a single polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(16):11871.
- [12] Pei H C, Liu Z C, Zhang H N, *et al.* In situ measurement of temperature distribution in proton exchange membrane fuel cell in a hydrogen-air stack[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 227(1): 72.
- [13] Lee S K, Ito K, Toshihiro O, *et al.* In situ measurement of temperature distribution across a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2009, 12(9):B126.
- [14] Siegel C, Bandlamudi G, Heinzl A. Solid-phase temperature measurements in a HTPM fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(20):12977.
- [15] Lee C, Weng F, Cheng C, *et al.* Use of flexible micro-temperature sensor to determine temperature in situ and to simulate a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(1): 228.
- [16] Lee C Y, Chan P C, Lee C J. Use of multi-functional flexible micro-sensors for in situ measurement of temperature, voltage and fuel flow in a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Sensors*, 2010, 10(12): 11605.
- [17] He S, Mench M M, Tadigadapa S. Thin film temperature sensor for real-time measurement of electrolyte temperature in a polymer electrolyte fuel cell[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 125(2): 170.
- [18] Wang M H, Guo H, Ma C F, *et al.* Temperature measurement technologies and their application in the research of fuel cells [C]//*Proceedings of the 1st International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*. [S.l.]: American Society of Mechanical, 2003: 95-100.
- [19] Zhai Z Y, Shen Y G, Jia B, *et al.* Surface morphology studies on PBI membrane materials of high temperature for proton exchange membrane fuel cells [C]//*International Conference on Mechanics, Dynamic Systems and Material Engineering*. Guangzhou: [s. n], 2013, 625:239-242.
- [20] Akira N, Kenichi S, Atsushi M, *et al.* In-situ measurement of in-plane temperature distribution in a single-cell polymer electrolyte fuel cell by thermograph [J]. *Journal of Environment and Engineering*, 2011, 6(1): 1.
- [21] Ishikawa Y, Hamada H, Uehara M, *et al.* Super-cooled water behavior inside polymer electrolyte fuel cell cross-section below freezing temperature[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(2): 547.
- [22] David N A, Wild P M, Hu J, *et al.* In-fiber Bragg grating sensors for distributed temperature measurement in a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 192(2): 376.
- [23] Inman K, Wang X, Sangeorzan B. Design of an optical thermal sensor for proton exchange membrane fuel cell temperature measurement using phosphor thermometry [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(15): 4753.
- [24] Inman K, Wang X, Sangeorzan B. Design of a non-invasive optical fiber sensor for in situ measurement of temperature in a proton exchange membrane fuel cell[J]. *ECS Transactions*, 2013, 50(2): 301.
- [25] Nishikawa H, Kurihara R, Sukemori S, *et al.* Measurements of humidity and current distribution in a PEFC[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 155(2): 213.
- [26] Mench M M, Dong Q L, Wang C Y. In situ water distribution measurements in a polymer electrolyte fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 124(1):90.
- [27] Dong Q L, Kull J, Mench M M. Real-time water distribution in a polymer electrolyte fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2005 139(1-2):106.
- [28] Partridge W P, Toops T J, Green J, *et al.* Intra-fuel cell stack measurements of transient concentration distributions [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(1): 454.
- [29] Ritobrata S, Boucher T J, Renfro M W, *et al.* In situ measurements of water vapor partial pressure and temperature dynamics in a PEM fuel cell[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, 157(1): B45.
- [30] Basu S, Xu H, Renfro M W, *et al.* In situ optical diagnostics for measurements of water vapor partial pressure in PEM fuel cell[J] *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2006, 3(1): 1.
- [31] Basu S, Renfro M W, Gorgun H, *et al.* In situ simultaneous measurements of temperature and water partial pressure in a PEM fuel cell under steady state and dynamic cycling [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(2):987.
- [32] Basu S, Renfro M W, Cetegen B. Spatially resolved optical measurements of water partial pressure and temperature in a PEM fuel cell under dynamic operating conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 162(1): 286.
- [33] Yoshinobu F, Shohji T, Shuichiro H. Optical remote sensing of oxygen and water vapor concentration in PEMFC channel by using tunable diode laser absorption spectroscopy techniques [C]//*Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*. Tokyo: ASME, 2007: 71-75.

- [34] Chen Z, Lu C. Humidity sensors: a review of materials and mechanisms[J]. *Sensor Letter*, 2005, 3(4): 274.
- [35] Hinds G, Stevens M, Wilkinson J, *et al.* Novel in situ measurements of relative humidity in a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 186(1):52.
- [36] Bell S, Hinds G, De Podesta M, *et al.* Humidity, pressure, and temperature measurements in an interdigitated flow pem hydrogen fuel cell[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2012, 33(8-9):1583.
- [37] Lee C Y, Hsieh W J, Wu G W. Embedded flexible micro-sensors in MEA for measuring temperature and humidity in a micro-fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 181(2): 237.
- [38] Yeo T L, Sun T, Grattan K T V. Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 144(2): 280.
- [39] Alwis L, Sun T, Grattan K T V. Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress. *Measurement*[J]. *Journal of the International Measurement Confederation*, 2013, 46(10): 4052.
- [40] Kronenberg P, Rastogi P K, Giaccari P, *et al.* Relative humidity sensor with optical fiber bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(16): 1385.
- [41] Nigel D. Fiber optic sensors for PEM fuel cells[D]. Victoria: University of Victoria, 2011.
- [42] David N A, Wild P M, Jensen J, *et al.* Simultaneous in situ measurement of temperature and relative humidity in a PEMFC using optical fiber sensors[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2010, 157(8): B1173.

• 下期文章摘要预报 •

## 基于结点力插值的自由子结构界面自由度缩减方法

楼梦麟,唐 玉

基于有限元法中位移插值的思想,建立了基于结点力插值的自由子结构界面自由度缩减方法.该方法的基本思想是在自由子结构法的基本变换基础上,实施对接界面坐标的第二次坐标变换,并利用第二次坐标变换矩阵,有效缩减了结构体系的广义自由度,从而提高了计算效率.通过对一个两端固定梁进行模态分析,并对比缩减界面自由度前后梁的前10阶主频计算值,验证了该方法的可行性.与界面广义自由度模态缩减法相比,二者的主要精度基本相同,该方法计算效率更高,工程应用更加方便.最后,讨论了插值基点的选择方式对计算精度的影响.计算结果表明:参与模态分析的插值基点数量越多,计算精度越高;当插值基点均匀分布于对接界面上时,计算精度最高.