

# 燃料电池内部温度接触式测试技术进展

聂志华, 郭航, 叶芳, 马重芳

(北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程节能教育部重点实验室及  
传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 温度分布是评估燃料电池性能的一个重要参数, 获得燃料电池内部的温度分布对提高电池的性能、改进电池的结构以及电池的模拟有重要的指导意义。介绍了燃料电池温度分布的各种实验测试技术, 对接触式温度测试技术在燃料电池内的应用进行了综述, 分析并评述了各种测试方法的优缺点以及适用范围。

**关键词:** 燃料电池; 温度测量; 热电偶; 温度传感器

**中图分类号:** TM911.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2011)09-0017-06

## Progress in contact measurement techniques of temperature inside fuel cells

NIE Zhi-hua, GUO Hang, YE Fang, MA Chong-fang

(The Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education; The Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Temperature distribution is an important parameter used to evaluate the performance of fuel cells. Therefore, getting the temperature distribution inside the fuel cells is significant in achieving high performance, improving the structure, modeling and simulation of the fuel cells. Various measuring and testing techniques of temperature distribution inside the fuel cells are introduced in this paper. The application of contact temperature measurement methods in fuel cells are summarized. Comments and analysis on the advantages and disadvantages, application range of these measurement methods are addressed as well.

**Key words:** fuel cells; temperature measurement; thermocouples; temperature sensor

温度对燃料电池的性能、寿命、可靠性等均有重要的影响, 影响催化剂的活性、膜的含水量、离子传导率、电极的反应速率等依赖于温度的动力学和传递现象<sup>[1]</sup>。另外, 温度分布还与电流密度分布以及燃料电池的寿命密切相关<sup>[2]</sup>。因此, 得到燃料电池内部的温度分布, 能够为电池的优化设计提供帮助, 确定电池的最佳运行工况, 为燃料电池的数值建模提供参考等。由于电化学反应过程中液态水的产生和移除, 使得燃料电池内部的温度随时间即时变化, 不会达到稳态值<sup>[3]</sup>, 因此燃料电池内部的温度测量很难。要想使电池的性能和耐久力达到最优值, 全面了解电池内的热行为极其重要。

本文介绍并评述了燃料电池温度分布的实验测试技术, 对接触式温度传感器在燃料电池内的应用进行了综述, 并分析了各种测试方法的优缺点。

接触式传感器分为自发式和可调节式2种, 自发式温度传感器不需要外界提供电源动力来检测温度信号, 例如热电偶, 但是传统的热电偶插入到燃料电池中, 不能准确测得电池内部的温度变化情

况<sup>[4]</sup>。而像热敏电阻器等可调节的温度传感器需要外界提供恒定电压或电流来检测信号<sup>[5]</sup>。接触式传感器的特性决定了传感器的位置越接近电化学反应区域, 就越能准确反映燃料电池内部的实际温度, 下面就不同的接触式测温技术进行分类探讨。

## 1 一体式燃料电池测温传感器

### 1.1 热电偶与燃料电池制作为一体

在各种各样的温度传感器中, 薄膜热电偶由于体积小、响应时间短, 最有希望用来测量运行中燃料电池内部的温度<sup>[6]</sup>。燕希强等<sup>[7]</sup>采用0.1 mm铜丝漆包线和康铜丝漆包线制作成微型热电偶, 安装在燃料电池内部膜电极(membrane electrode assembly, MEA)表面不同的位置, 与MEA制作为一体, 来测量运行中燃料电池内部的温度变化, 在加载过程中, 电池进口处温度变化最大, 而在加载瞬间, 燃料进口处温度迅速上升, 达到一定值后逐渐下降, 然后趋于平稳。另外, 在不干预燃料传递的情况下, 还可以将热电偶埋入质子交换膜燃料电池(proton exchange

收稿日期: 2011-04-12; 修回日期: 2011-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50976006); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0006)

作者简介: 聂志华(1984-), 女, 硕士, 主要研究方向为热能工程; 郭航(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为动力工程及工程热物理, 通讯联系人, 010-67391612-8311, hangguo@bjut.edu.cn。

membrane fuel cell, PEMFC) 的阴极催化层<sup>[8]</sup>, 阴、阳极催化层和电解质之间<sup>[9]</sup>, 石墨集流板流道的脊上<sup>[10]</sup>等位置, 使热电偶与燃料电池成为一体, 来获得运行中 PEMFC 内部温度分布。

Mench 等<sup>[1]</sup>采用 8 个直径为 50  $\mu\text{m}$  的 R 型热电偶热压在两片 25  $\mu\text{m}$  厚的 Nafion 膜之间形成“三明治”结构, 来测量 PEMFC 内部的局部温度。但 8 个热电偶中只有 3 个有可靠的信号输出, 其中 4 个在 MEA 的制作过程中损坏了, 1 个由于绞合线导致输出结果不准确。该方法对膜没有损坏作用, 但在 MEA 的制作过程中会有很多热电偶损坏以至于没有准确的温度信号输出。

Ali 等<sup>[11]</sup>用制作在 Kapton 基底上的 T 型薄膜热电偶测量基于聚苯并咪唑 (polybenzimidazole, PBI) 的高温 PEMFC 内部的温度, 首先用氩等离子体腐蚀处理 Kapton 箔片的表面来提高 T 型薄膜热电偶和 Kapton 基底之间的黏接性, 采用磁管溅射技术在 75  $\mu\text{m}$  厚的 Kapton 箔片上沉积 2  $\mu\text{m}$  厚的 T 型薄膜热电偶用作电池的密封垫, 能够测量运行中燃料电池 MEA 的温度变化。该传感器的优点为体积小、成本低、制作加工相对简单、能够准确测量 MEA 表面的温度、对电池的整体性能影响很小。其制作过程为, 在 Kapton 箔片上用磁电管溅射技术沉积薄膜热电偶, 用旋转涂层技术将液体 Kapton 涂在薄膜热电偶的表面进行绝缘, 将制作好的沉积有薄膜热电偶的密封垫剪切成需要的形状和尺寸。

## 1.2 微型传感器与燃料电池制作为一体

Pattekar 等<sup>[12]</sup>在微型流道板的背面印刷有铂阻抗温度传感器和加热器, 最后镀上  $\text{SiO}_2$  绝缘层, 在耐热玻璃侧用反应离子蚀刻技术制作传感器的金属导线, 用印刷技术将阻抗式温度传感器 (Resistance Temperature Detector, RTD) 与气体扩散层制作为一体, 测量微型直接甲醇燃料电池内部的温度。

He 等<sup>[13]</sup>将一个用 MEMS 技术制作的金薄膜温度传感器植入 16  $\mu\text{m}$  厚的聚对二甲苯薄膜中, 然后层压到 Nafion 膜中, 用于有效面积为 5  $\text{cm}^2$  的燃料电池的在线测温, 传感器的灵敏度为  $(3.03 \pm 0.09) \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ , 比传统的微型热电偶高一个数量级, 在 20 ~ 100 $^\circ\text{C}$  的温度范围内有很好的直线响应。传感器的存在对电池中的物理过程没有明显的影响, 但电池的性能因此降低约 20%。该薄膜传感器的制作过程为, 采用金属掩膜在 Nafion 膜上沉积 8  $\mu\text{m}$  厚的聚对二甲苯层, 接着用电子蒸镀技术沉积 0.015  $\mu\text{m}$  的铬和 0.2  $\mu\text{m}$  的金, 然后再次沉积 8  $\mu\text{m}$  厚的聚对二甲苯层将整个传感器区域覆盖 (除连接线的焊接区域外), 最后加另一片干净的 Nafion 膜在 125 $^\circ\text{C}$  和 9 800 kPa 下层压 3 min。但是, 这种测量方法加工制作复杂, 传感器极易由于膜吸水后产生的膨胀力而破坏, 并且由于传感器的面积过大而减少了电池的有效面积, 降低了电池的性能。将来可以通过运用影印石板术和蚀刻技术来降低薄膜传感器的体积, 提高传感器的性能。

(上接第 16 页)

- [12] Yee W A, Xiong S X, Ding G Q, *et al.* Supercritical carbon dioxide-treated electrospun poly (vinylidene fluoride) nanofibrous membranes: Morphology, structures and properties as an ionic-liquid host [J]. *Macromol Rapid Commun*, 2010, 31 (20): 1779 - 1784.
- [13] Michele T B, Yurii K Gun'ko. Recent advances in research on carbon nanotube polymer composites [J]. *Adv Mater*, 2010, 22 (15): 1672 - 1688.
- [14] Bellayer S, Gilman J W, Eidelman N, *et al.* Prerelation of homogeneously dispersed multiwalled carbon nanotube/polystyrene nanocomposites via melt extrusion using trialkyl imidazolium compatibilizer [J]. *Adv Func Mater*, 2005, 15 (6): 910 - 916.
- [15] Fukushima T, Kosaka Baogang A, Yamamoto Y, *et al.* Dramatic effect of dispersed carbon nanotubes on the mechanical and electro-conductive properties of polymers derived from ionic liquids [J]. *Small*, 2006, 2 (4): 554 - 560.
- [16] Pei X W, Xia Y Q, Liu W M, *et al.* Polyelectrolyte-grafted carbon nanotubes: Synthesis, reversible phase-transition behavior, and tri-

biological properties as lubricant additives [J]. *Polymer Chemistry*, 2008, 46 (21): 7225 - 7237.

- [17] Xiao C H, Chu X C, Wu B H, *et al.* Polymerized ionic liquid wrapped carbon nanotubes: The promising composites for direct electrochemistry and biosensing of redox protein [J]. *Talanta*, 2010, 80 (5): 1719 - 1724.
- [18] Susan M A, Kaneko T, Noda A, *et al.* Ion gels prepared by in situ radical polymerization of vinyl monomers in an ionic liquid and their characterization as polymer electrolytes [J]. *J Am Chem Soc*, 2005, 127 (13): 4976 - 4983.
- [19] 金高军, 黄梅. 离子液凝胶的研究进展 [J]. *高分子通报*, 2009, (4): 18 - 23.
- [20] Zhang Y J, Shen Y F, Li J H, *et al.* Electrochemical functionalization of single-walled carbon nanotubes in large quantities at a room-temperature ionic liquid supported three-dimensional network electrode [J]. *Langmuir*, 2005, 21 (11): 4797 - 4800.
- [21] Zhu J W, Qin Y, Zhang Y H. Preparation of all solid-state potentiometric ion sensors with polymer-CNT composites [J]. *Electrochem Commun*, 2009, 11 (8): 1684 - 1687. ■

Lee 等<sup>[14-16]</sup>利用微机电系统(micro electro-mechanical system, MEMS)技术把多孔硅层作为气体扩散层,用物理气相沉积法把 Pt 镀在多孔硅的表面来提高电导率,用湿法刻蚀技术来形成传导层和微型热传感器, Pt 不仅作为集流板也作为微型温度传感器,其测温范围为 20 ~ 47℃, 准确度为 0.3℃, 灵敏度为  $7.82 \times 10^{-4}/\text{℃}$ 。另外,利用 MEMS 技术在不锈钢双极板的脊上阵列微型温度传感器来测量电池内部的温度,得到传感器的准确度为 0.5℃, 灵敏度为  $3.91 \times 10^{-3}/\text{℃}$ 。由于阵列的微型 RTD 传感器体积小、准确度高、响应时间短,因此测量结果比采用热电偶测温有效,传感器的存在降低了电池的性能,当没有传感器存在时,燃料电池的最大功率密度为 142 mW/cm<sup>2</sup>, 当有微型传感器时,电池的功率密度为 56 mW/cm<sup>2</sup>。

Lee 等<sup>[17]</sup>采用 MEMS 技术以聚对二甲苯为基底制作微型温度和湿度传感器,并将传感器热压到燃料电池的 MEA 中测量流道的脊和 MEA 的温度和湿度。微型温度传感器的尺寸为 180 μm × 180 μm, 灵敏度为  $4.81 \times 10^{-3}/\text{℃}$ , 对运行中热电偶和微型温度传感器进行了对比, MEA 和双极板外表面的最大温差为 5.7℃。由此可知,通过测量燃料电池外表面的温度来估算其内部的温度是不准确的。采用这种微型温度传感器的优点为可以大量生产、体积小、灵敏度高、有较强的柔韧性并且可以准确找到测量点的位置<sup>[4]</sup>。但将具有柔韧性的多功能微型传感器放入电池中,增加了接触电阻,阻止了气体扩散的流动,或是直接阻止了质子传递的通道,使得基于 MEMS 的 PEMFC 在放入传感器后,电池的反应区域减小约 12%, 电池的性能降低约 5%, 并且该测量方法不能用于高温环境(>200℃)<sup>[17]</sup>, 不能采用引线接合器来连接导线和传感器测头。

Zhang 等<sup>[18]</sup>利用 MEMS 技术在硅基微型直接 DMFC 阴极极板的背面镀上微型加热器和温度传感器来实现温度控制,温度传感器制作在电池阳极流场板上测量稳态运行温度。温度控制系统制作在流道板的背部,提高了集流板的有效面积,从而提高了电池的性能。

Zhang 等<sup>[19]</sup>将 10 个很薄的 T 型热电偶放置在有效面积为 4 cm × 4 cm 燃料电池的阴极催化层和气体扩散层之间,测量不同电压和氢气流速下 PEMFC 内部的温度,阴极气体扩散层和催化层界面的温度与阴极端板中心的温度有很大的差别,说明通过测量电池外部的温度来估测电池内部的温度是不准

确的。

Lee 等<sup>[5]</sup>还将微型温度传感器和不锈钢铝箔制作为一体作为燃料电池的气体扩散层来测量微型燃料电池中的温度分布,传感器的准确度为 0.5℃, 灵敏度为  $1.805 \times 10^{-3}/\text{℃}$ 。

### 1.3 小结

把温度传感器与燃料电池制作为一体能够真实反映电池内部的温度分布情况,大多数研究者采用印刷技术及 MEMS 技术将微型传感器或微型热电偶制作在燃料电池流道的脊上、流道板的背面、热压到 MEA 中、制作在电池的密封垫上等来测量燃料电池内部的温度。这些测量方法需要将燃料电池的双极板、MEA 等部件进行特殊改造,以便将传感器或热电偶与燃料电池制作为一体进行测温。但这种方法不仅增加了燃料电池的接触电阻,而且增加了电池运行过程中燃料的泄露等,改变了电池运行环境,使测量结果不准确。另外,该方法还相当复杂,制作成本较高,加工难度大,需要改变燃料电池原来的结构,不能对比燃料电池放入传感器前后的性能差别,不能普遍应用于其他燃料电池。

随着 MEMS 技术及影印石板术的运用,传感器的体积可以做得更小、性能更高,以便适用于越来越微型化的燃料电池内部温度的测量。

## 2 独立于燃料电池的测温传感器

目前,将商业或经过特殊制作的温度传感器或热电偶放入燃料电池的不同部位进行温度测量的方法已经成熟<sup>[20]</sup>。该方法是将微小型温度传感器或热电偶放入燃料电池的不同位置进行测温,燃料电池和传感器分别独立。

### 2.1 独立于燃料电池的热电偶测温

Adzic 等<sup>[21]</sup>将扁平形状的薄膜热电偶与固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)平行放置,测量 SOFC 阴极板表面的温度分布,测量的温度高达 1 223 K,热电偶的灵敏度高、准确度为 0.2 K,能够满足 SOFC 热行为研究的要求。而关于在线测量基于 Nafion 膜的 PEMFC 内部温度, Vie 等<sup>[22]</sup>用热电偶测量了 MEA 表面以及气体流道中的温度,并计算了导热系数和传热系数。实验结果表明 MEA 表面的温度比气体流道中的温度高 5℃, 当膜厚为 10 μm 时,传热系数为  $(1\ 000 \pm 300) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 催化层和气体扩散层的平均传热系数为  $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

Fabian 等<sup>[23-24]</sup>采用直径为 0.003 mm 的精密线制作 K 型热电偶测量自呼吸 PEMFC 阴极表面的

温度,为了确保热电偶重复利用,将热电偶放置在阴极裸露的气体扩散层来测量电池的温度,并采用 K 型热电偶(CHAL-005,直径约  $125\ \mu\text{m}$ )测量了自呼吸管状电池阴极表面的温度分布。

另外,将热电偶从流道板脊的背面插入,并尽可能地接触到流道的脊进行测温<sup>[25]</sup>;安装在燃料电池堆的入口、中部及出口处的顶部和底部,同时测量电池堆入口和出口处气体的温度<sup>[26]</sup>;埋入阴极气体流道不同的位置测量温度分布<sup>[27-28]</sup>;以及采用经特殊制作的放有 K 型热电偶双极板,测量电池内部有效区域的温度分布<sup>[29]</sup>,均能得到电池内部比较准确的温度值。但部分热电偶在放入燃料电池的过程中因损坏而没有信号输出。

Bégot 等<sup>[30]</sup>利用热电偶测量 PEMFC 双极板外表面温度来估测电池内部的温度,避免电池内部过热对电池造成损坏,并建立了二维瞬态热传导模型,通过模拟验证了该方法的可行性。但受限于材料的传热,该方法不适合于瞬态分析。

Lee 等<sup>[31]</sup>利用 MEMS 技术在  $40\ \mu\text{m}$  可变型的不锈钢极板上制作微型温度传感器的局部插片,可以放置在 MEA 和流场板之间的任何位置,传感器的绝缘区域会降低 PEMFC 的性能,因此采用蚀刻技术来减少绝缘区域,实验测得电池内外的最大温差为  $2.6^\circ\text{C}$ 。这种传感器的优点为体积小、灵敏度高、强度较高、可以放置在 MEA 和流道之间的任何位置、对于在线测量非常有效。

Jiao 等<sup>[32]</sup>将 PEMFC 阴极流道板分为 16 部分来测量电池的电流密度和温度,利用 16 个 T 型热电偶插入流场板每部分的中心来测量电池的温度,由于 T 型热电偶与电池的电化学反应区域还有一定的距离,因此测得温度值与实际值有一定的偏差。

## 2.2 其他独立于燃料电池的测温技术

David 等<sup>[33]</sup>采用布拉格光栅光纤传感器(in-fiber Bragg grating, FBG)测量 PEMFC 内部温度分布,如图 1 所示,将 4 个 FBG 均匀放置在阴极集流板流道的脊上,当电流密度较高时,流道入口和出口之间的温差大于  $1^\circ\text{C}$ 。光纤对燃料电池的性能影响非常小,适用于电化学反应环境,不受电磁干扰的影响,并且电池在运行温度范围为  $20\sim 80^\circ\text{C}$  时,传感器的相对误差小于  $0.2^\circ\text{C}$ ,能够测得传感器之间很小的温度梯度。FBG 相对于热电偶来说,传热量小、对动态负载有很好的瞬态响应,但是这种测量技术测量的点很少,需要将更多的 FBG 制作在同一根纤维上来获得更多的测量点。

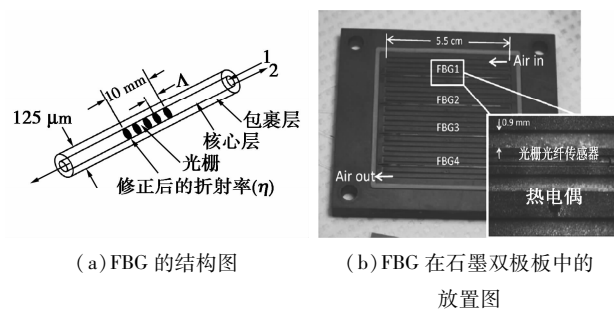


图 1 光纤传感器及其在石墨流场板中的布置图

另外一个研究是 Hinds 等<sup>[34]</sup>将石墨流场板进行改造,在石墨流场板流道的边缘设置能够同时放置 2 个传感器的凹槽处,将 16 个传感器成对固定在所设置的凹槽处,以防其中一个不能正常工作,能够在不影响燃料传递的情况下直接测量燃料的温度和湿度。但是,这种测试技术需要对燃料电池的流场板进行改造,设置专门放置传感器的凹槽,加工制作复杂,成本较高。

David 等<sup>[35]</sup>将光纤光栅传感器 FBG 安装在单个 PEMFC 石墨阴极流场板的蛇形流道中,同时测量运行中 PEMFC 的温度和湿度,如图 2 所示,FBG 的末梢被刻蚀并且涂有玻璃增强聚酰亚胺为湿度传感器,接近 FBG 的是左边没有刻蚀的,用来测量温度,纤维的直径为  $31.5\ \mu\text{m}$ 。FBG 的优点是绝缘、耐化学腐蚀、体积小、响应快、灵敏度高、对电池的性能干扰小。此外,FBG 与燃料电池极板平行安装,能够在单个纤维上布置多个传感器,可实时多点监测电池堆的温度。

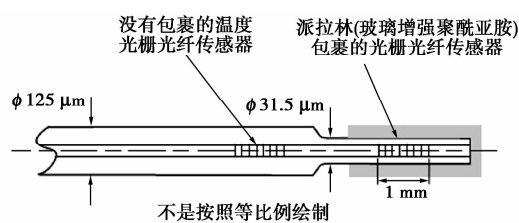


图 2 温湿度传感器的结构图

Inman 等<sup>[3]</sup>利用磷光寿命衰减原理制作温度传感器来测量有效面积为  $25\ \text{cm}^2$  的 PEMFC 阴极气体扩散层表面的温度,如图 3 所示,将 5 个误差范围为  $\pm 0.6^\circ\text{C}$  的传感器放置在燃料电池中,电池阴极流道的筋上钻有直径为  $500\ \mu\text{m}$  的洞作为光学传感器的放置位置,使得光学传感器能够直接与气体扩散层接触。由于阴极侧电化学反应产生附加热,流道出口处的温度要高于入口处。

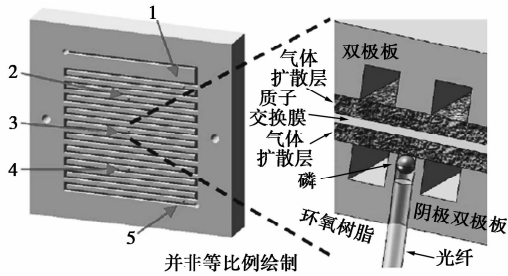


图3 传感器在PEMFC中的位置图

肖劲松等<sup>[36]</sup>提出利用薄膜技术制作热阻式微型瞬态热流计,用于燃料电池内微小空间内瞬变热流的测量,热流计测头是在厚度为0.05 mm的SiO<sub>2</sub>基片上蒸镀薄膜热电偶,测量厚度为1 μm的SiO<sub>2</sub>热阻层两侧温差,得出瞬变热流值。但该文献并未将热流计用于燃料电池内部热流值的测量。

### 2.3 小结

由于燃料电池的特殊结构使其内部的温度测量十分困难,而且传统的传感器体积较大,其引线的直径与膜电极的厚度相当,从而导致电池的燃料泄露等问题。另外,在测量过程中通过导线释放的热量也会对电池内的局部热流分布产生干扰,影响测量数据的准确性。

将微型温度传感器或热电偶独立地插入燃料电池中来测量电池内部的温度,结构简单、测量范围广、可以用于任何燃料电池的测量。但是,这种测量技术操作复杂,燃料电池拆装前后传感器的放置位置不能准确统一,其宏观引线会增加电池的密封难度,并且某个传感器或热电偶可能在插入燃料电池的过程中或电池的拆装过程中损坏而不能测温。另外,传感器或热电偶的响应时间、空间分辨率和测量精度都还不能满足目前的需求,测量的只是传感器或热电偶所在位置的局部温度,不能得到整个流道或MEA表面的温度场,也不能准确地实时测量电池内部的温度变化,传感器的存在对电池的整体性能也有影响。

燃料电池内的温度分布不均匀,至今还没有一种简单有效的方法可以准确快速地解决电池内部温度分布的测量问题。随着科技的发展、设备的小型化,以及节能的要求,需要掌握各种热设备热量的收支情况,因此采用独立于燃料电池的、响应速度快、灵敏度高、体积小的薄膜传感器测量电池内部的温度是一个重要的研究方向。

### 3 结语

燃料电池内的温度分布是影响电池性能的重要

参数之一,获得燃料电池内部的温度分布对提高电池的性能、改进电池的结构以及电池的热模拟等均有重要的指导意义。为了在不影响燃料电池整体性能的情况下,更准确地得到燃料电池内部的温度分布,需要注意以下几点:

(1) 一体式燃料电池温度传感器能够得到电池内部较为准确的温度分布,但需要改变电池原来的结构,测得的温度不能和同类电池进行比较。

(2) 将传感器或热电偶插入燃料电池中进行测温,结构简单,能够广泛用于所有的燃料电池。但是,这种测量技术需要做的准备工作很多、操作复杂、传感器或热电偶容易损坏。

(3) 随着燃料电池的微型化,采用MEMS技术及影印蚀板术制作响应速度快、灵敏度高、体积小的薄膜传感器将会是燃料电池内部温度测量的发展方向。

### 参考文献

- [1] Mench M M, Burford D J, Davis T W. In situ temperature distribution measurement in an operating polymer electrolyte fuel cell [C]. Proceedings of IMECE'03, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington, DC, Nov 16 - 21, 2003.
- [2] Lebak J, Ali S T, Møller P, 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 - 9953.
- [3] 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 - 4757.
- [4] Lee C Y, Fan W Y, Hsieh W J. In-situ Monitoring of Internal Local Temperature and Voltage of Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. Sensors, 2010, 10(7): 6395 - 6405.
- [5] Lee C Y, Lin C H. A novel integration approach for combining the micro thermal sensor and stainless steel foil as gas diffusion layer in micro fuel cell [J]. Renewable Energy, 2010, 35(4): 759 - 762.
- [6] Choi H, Li X C. Fabrication and application of micro thin film thermocouples for transient temperature measurement in nanosecond pulsed laser micromachining of nickel [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(1): 118 - 124.
- [7] 燕希强, 侯名, 孙立言, 等. 燃料电池内部温度测量方法: 中国, CN101158607A [P]. 2008 - 04 - 09.
- [8] Abdullah A M, Okajima T, Mohammad A M, et al. Temperature gradients measurements within a segmented H<sub>2</sub>/air PEM fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2007, 172(1): 209 - 214.
- [9] Vie P J S. Characterization and Optimization of the Polymer Electro-

- lyte Fuel Cell [D]. NTN University, 2002: 15 - 33.
- [10] 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 - A511.
- [11] Ali S T, Lebak J, Nielsen L P, *et al.* Thin film thermocouples for in situ membrane electrode assembly temperature measurements in a polybenzimidazole-based high temperature proton exchange membrane unit cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(15): 4835 - 4841.
- [12] Pattekar A V, Kothare M V. A Microreactor for Hydrogen Production in Micro Fuel Cell Applications [J]. *Journal of Micro Electro-mechanical Systems*, 2004, 13(1): 7 - 18.
- [13] 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 - 177.
- [14] Lee C Y, Huang R D, Chuang C W. Novel Integration Approach for In situ Monitoring of Temperature in Micro-direct Methanol Fuel Cell. *Japanese Journal of Applied Physics [J]*. 2007, 46(10A): 6911 - 6914.
- [15] Lee C Y, Lee S J, Hsieh C L. Application of Micro Sensors on Diagnosis of Micro Fuel Cells [C]//Bangkok, Thailand. *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2007: 434 - 437.
- [16] Lee C Y, Wu G W, Hsieh C L. In situ diagnosis of micrometallic proton exchange membrane fuel cells using microsensors [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(1): 363 - 367.
- [17] 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 - 243.
- [18] Zhang Q, Wang X H, Zhu Y M, *et al.* Optimized temperature control system integrated into a micro direct methanol fuel cell for extreme environments [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 192(2): 494 - 501.
- [19] Zhang G H, Guo L J, Ma L Z, *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 - 3604.
- [20] 裴媛, 郭航, 叶芳, 等. 燃料电池的微尺度测试技术 [J]. *现代化工*, 2010, 30(3): 87 - 92.
- [21] Adzic M, Heitor M V, Santos D, *et al.* Design of dedicated instrumentation for temperature distribution measurements in solid oxide fuel cells [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1997, 27(12): 1355 - 1361.
- [22] Vie P J S, Kjelstrup S. Thermal conductivities from temperature profiles in the polymer electrolyte fuel cell [J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 49(7): 1069 - 1077.
- [23] Fabian T, Posner J D, O'Hayre R, *et al.* The role of ambient conditions on the performance of a planar, air-breathing hydrogen PEM fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1): 168 - 182.
- [24] Fabian T, O'Hayre R, Prinz F B, *et al.* Measurement of Temperature and Reaction Species in the Cathode Diffusion Layer of a Free-Convection Fuel Cell [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2007, 154(9): B910 - B918.
- [25] Maranzana G, Lottin O, Colinart T, *et al.* A multi-instrumented polymer exchange membrane fuel cell; Observation of the in-plane non-homogeneities [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 180(2): 748 - 754.
- [26] Andreasen S J, Kær S K. Dynamic Model of the High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Temperature [J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2009, 6(4): 0410061 - 0410068.
- [27] Wen C Y, Huang G W. Application of a thermally conductive pyrolytic graphite sheet to thermal management of a PEM fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 178(1): 132 - 140.
- [28] Lebak J, Ali S T, Møller P, *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 - 9953.
- [29] Scholta J, Messerschmidt M, Jöissen L, *et al.* Externally cooled high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stack [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 190(1): 83 - 85.
- [30] Bégot S, Kauffmann J. Estimation of internal fuel cell temperatures from surface temperature measurements [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 178(1): 316 - 322.
- [31] Lee C Y, Weng F B, Cheng C H, *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 - 234.
- [32] 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 - 2982.
- [33] David N A, Wild P M, Hu J W, *et al.* In-fibre Bragg grating sensors for distributed temperature measurement in a polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 192(2): 376 - 380.
- [34] 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 - 57.
- [35] 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 - B1179.
- [36] 肖劲松, 李超, 郭航, 等. 微型薄膜瞬态热流计的研究与开发 [J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(12): 1116 - 1120. ■