

## 温度对PEM燃料电池性能的影响

孙佳<sup>1</sup>, 郭桦<sup>2</sup>, 陈士忠<sup>1,3</sup>, 吴玉厚<sup>1</sup>

(1.沈阳建筑大学交通与机械学院, 辽宁沈阳110168; 2.沈阳工程学院经济管理系, 辽宁沈阳110034; 3.大连理工大学机械学院, 辽宁大连116024)

**摘要：**目的研究质子交换膜燃料电池运行中的电池温度、两极加湿温度对电池性能的影响。方法运用质子交换膜电池单体的测试系统进行了不同工作温度、气体加湿温度对电池性能影响的测试实验。结果得到了3个温度在实验条件下,在一定范围、一定间隔内的所有数据组合。结论固定除温度外的所有操作参数条件下,电池工作温度、阴极和阳极的加湿温度对电池性能的影响顺序也是固定的;低电流工作下,电池性能不受操作温度的影响,只与其几何参数有关;电池的极化曲线中存在两个过渡区,过渡区是在一定范围内出现的。实验结果对质子交换膜燃料电池结构的优化和设计具有重要的指导意义。

对质子交换膜(PEM)的研究和应用日益受到人们的重视,其将逐步成为石化燃料的替代能源。在质子交换膜的研究领域,关于模型方面的研究,已经分别建立了二维、三维等数学模型,并且在理论方面获得了令人满意的模拟结果。在实验方面,衣宝廉等人从膜组成、电池的结果等方面对PEM燃料电池性能的影响作了研究。吴玉厚等人研究了操作参数如背压、输入气体流量、输入气体加湿温度和电池温度等对PEM燃料电池伏安特性和功率密度的影响。

WangLin等人对PEM燃料电池进行了参数实验,得到了不同参数下的电池性能变化趋势。但对电池操作条件间的相互关系及对电池性能的影响还未见报道。同时,日趋商业化的质子交换膜燃料电池迫切需要建立一套不同操作条件下的系统化实验数据。这样的一套系统化实验数据可以加速新型燃料电池的开发和优化,还可以指导商业化PEM燃料电池的操作。基于上述目的,笔者对质子交换膜燃料电池单体在不同的操作温度下进行了系统化测试,对获得的数据进行了分析,得到了3个影响温度之间可能存在的内在关系。并通过数学计算方法对温度之间的关系进行了更深入的探索。

### 1实验装置

燃料电池测试系统是采用美国电化学公司生产的MTS150型质子交换膜燃料电池单体测试仪。该设备可以完成对电池工作温度、气体加湿温度、反应压力及气体流量的控制过程。图1为实验装置示意图。表1为实验测试PEM燃料电池单体的基本几何参数,电池中质子交换膜采用Nafion112质子交换膜,其厚度为0.051mm。

**表 1 实验电池单体的几何参数**

气体扩散 层孔隙 率/%	催化剂 层孔隙 率/%	活性 面积 /cm <sup>2</sup>	气体流 道总长 度/cm	气体流 道截面 积/cm <sup>2</sup>	气道扩 散面积 /cm <sup>2</sup>	催化剂的 Pt 载量/ (mg·cm <sup>-2</sup> )	
40	25	5	34	0.09	0.1	3.06	0.4

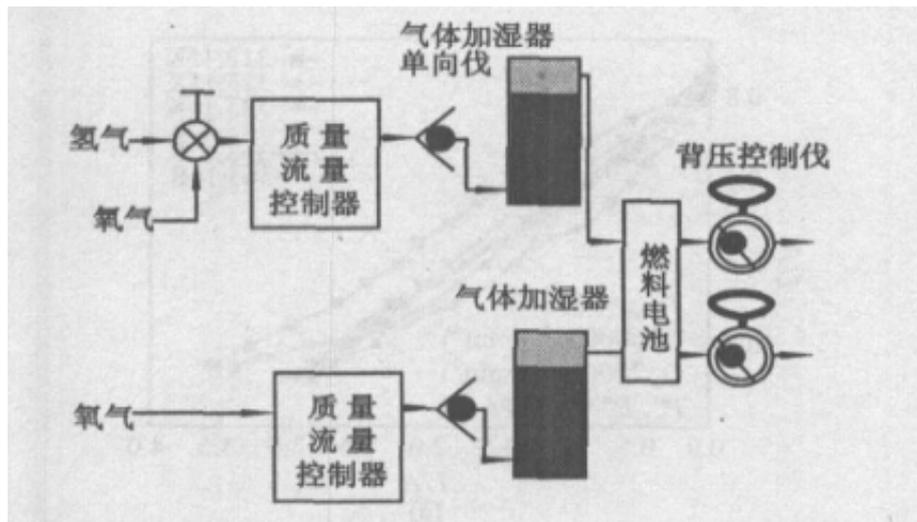


图 1 PEM 燃料电池测试系统示意图

## 2实验结果与分析

### 2.1温度影响的实验分析

这里所指的温度包括：电池的工作温度、阴极气体的加湿温度、阳极气体的加湿温度。

3个温度同时影响着燃料电池膜电三合一组件的水合度，高电流工作下，膜电三合一组件水平衡的好坏直接关系到膜的传导率，而提高膜的传导率是改善PEM燃料电池性能的重要途径。并且3个温度之间也存在着相互改善和制约的关系。所以笔者特别地将燃料电池的3个温度作为一个整体进行了测试和分析。所有实验中除温度外其他操作参数均为定值：氢气质量流量是 $600\text{cm}^3/\text{min}$ ，实验所用的氧化剂为氧气其质量流量为 $200\text{cm}^3/\text{min}$ ，反应气体的背压为 $0.1\text{MPa}$ 。

#### 2.1.1加湿温度对电池性能的影响

研究不同电池温度下，电池性能与反应气体加湿温度的关系。电池温度在 $323.15\sim 353.15\text{K}$ 间变化，每次变化 $10\text{K}$ 。每组数据是在保持电池设定温度不变，同时使阴极和阳极的加湿温度在 $313.15\sim 363.15\text{K}$ 范围内变化，每次升高 $10\text{K}$ ，在两侧电极加湿温度变化之后，电池性能趋于稳定时开始数据记录，而且，通过改变电池的工作电压来测试不同电池温度和两极加湿温度下的电池性能，记录间隔约为 $200\text{s}$ 。并将实验数据在0-rigin软件下绘制成电池的性能曲线(极化曲线)如图2所示。

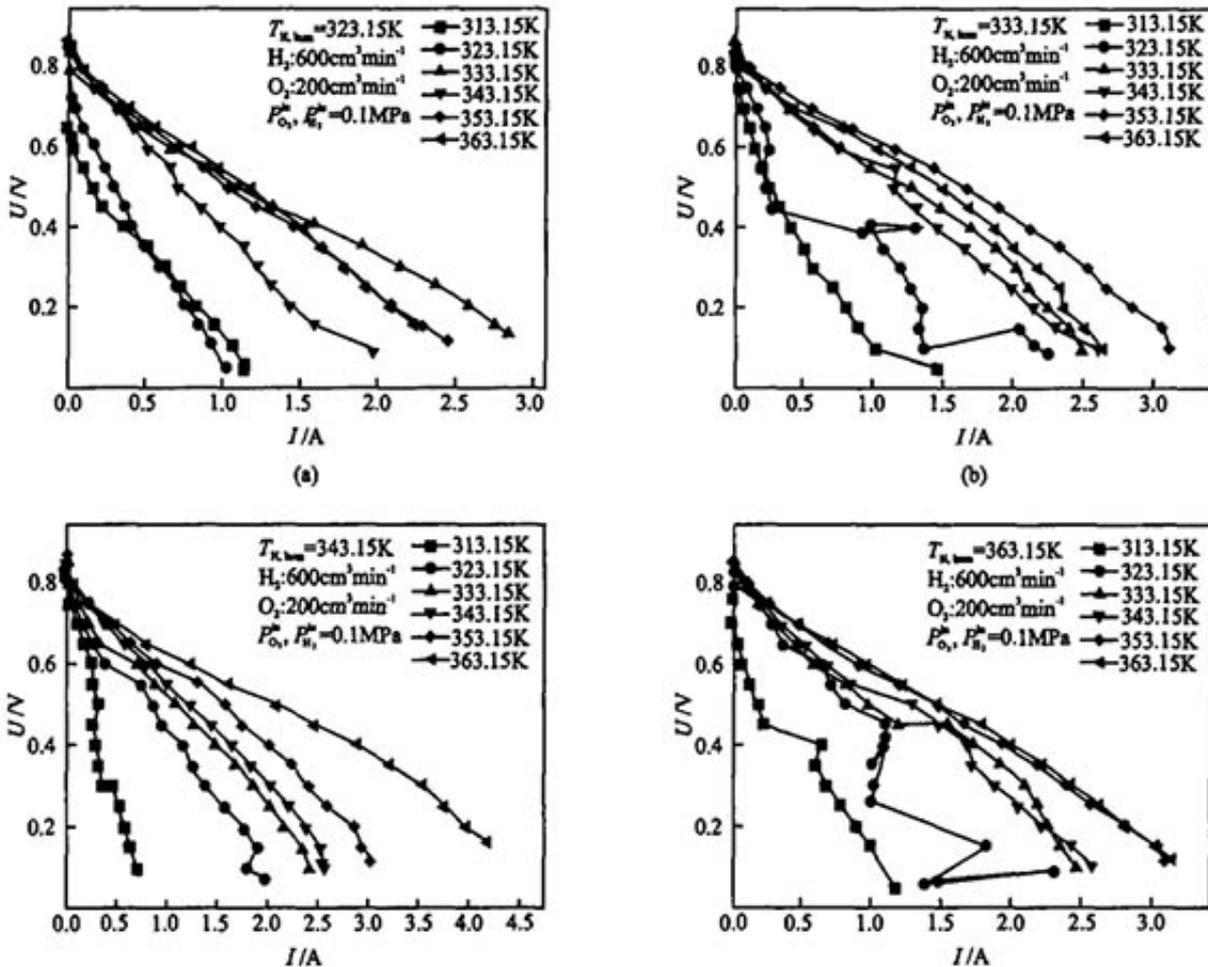


图2 两极加湿温度对电池性能的影响

从数据整体来看，随着两极加湿温度的升高电池的性能得到了不断的改善，这是由于加湿温度升高使质子交换膜中的水分布得到了改善，膜的性能在很大程度上取决于膜中水的含量，控制适当的水分布可以显著的提高电池的性能。同时在低温型PEM燃料电池中，电化学热力学和电化学动力学共同作用条件下，动力学因素起主导作用的结果。图2中，各图对比得出电池温度升高，电池性能是先升高后下降的趋势，343.15K是变化的顶点。在电池温度较高条件下，加湿温度的升高将不会出现“淹没”现象。但在低加湿温度下，则可能出现干枯现象。同时从4幅图中还可以发现在每一幅图中都会出现明显或不明显的振荡曲线，称其为临界线，临界线被认为是在3种状态(干枯态、饱和态、淹没态)的过渡范围内的振荡曲线，并将干枯态与饱和态之间称为一类临界线，饱和态与淹没态之间成为二类临界线。图2中临界线且均为一类临界线。

在一类临界线以下是膜处于缺水状态，该临界线之上膜的含水量得到提高，使电池性能好转。而在加湿温度过高的时候，则会出现二类临界线来控制膜含水量由饱和到“淹没”的过渡。

### 2.1.2 氧气加湿温度对电池性能的影响

5组实验数据分别是在阴极温度由323.15K~363.15K变化，每次变化10K得到的，每一组电池阴极加湿温度保持不变，改变电池温度和阳极加湿温度在323.15K~363.15K变化，每次升高10K。同样是通过电子负载改变电池的工作电压来描述电池的性能，如图3所示。

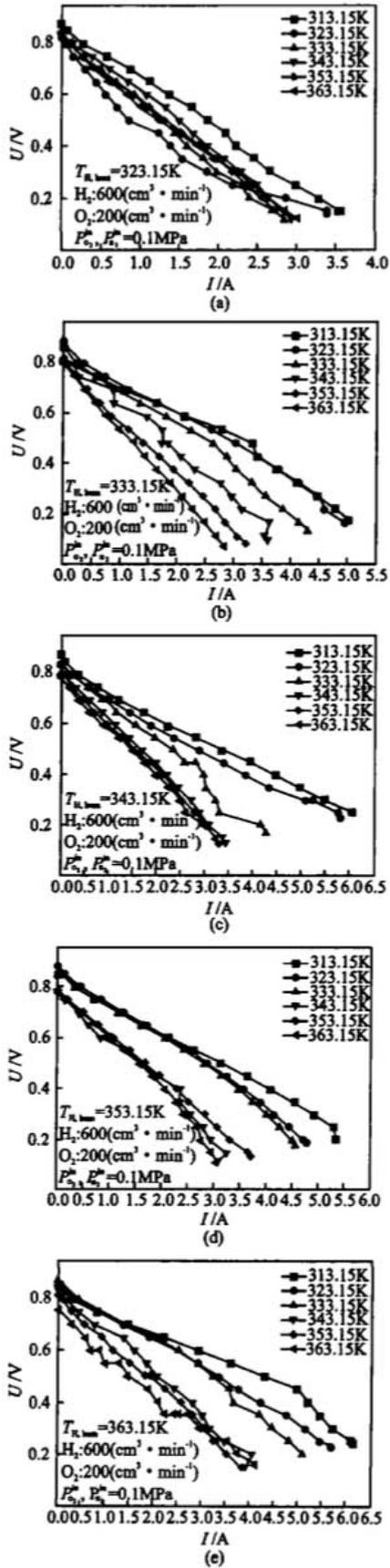


图3 阳极加湿温度与电池温度同时改变对电池性能的影响

从这5幅图中可以看出电池阴极加湿温度变化过程中电池的最好状态均出现在电池和阳极加湿温度最低条件下。这是由于阴极氧气的质量流量比较小，加湿温度对气体携水量影响不大。图3中随阴极加湿温度升高，电池性能同样是先升后降，343.15K为其最佳状态。

5组数据中除阴极加湿温度为323.15K时是整体动荡过程外(变化趋势为先高后低，再高再低的过程)，其他数据均存在着同类临界曲线。

### 2.1.3 氢气加湿温度对电池性能的影响

通过实验获取5组数据，每组数据是在电池阳极氢气的加湿温度分别恒定在323.15K、333.15K、343.15K、353.15K、363.15K下测得的。每组是将电池温度和阳极的加湿温度在323.15K~363.15K内变化，变化梯度为10K。在3个温度的各个配合下，通过改变电池工作电压，再对电流的变化进行记录作为实验的数据，如图4所示。

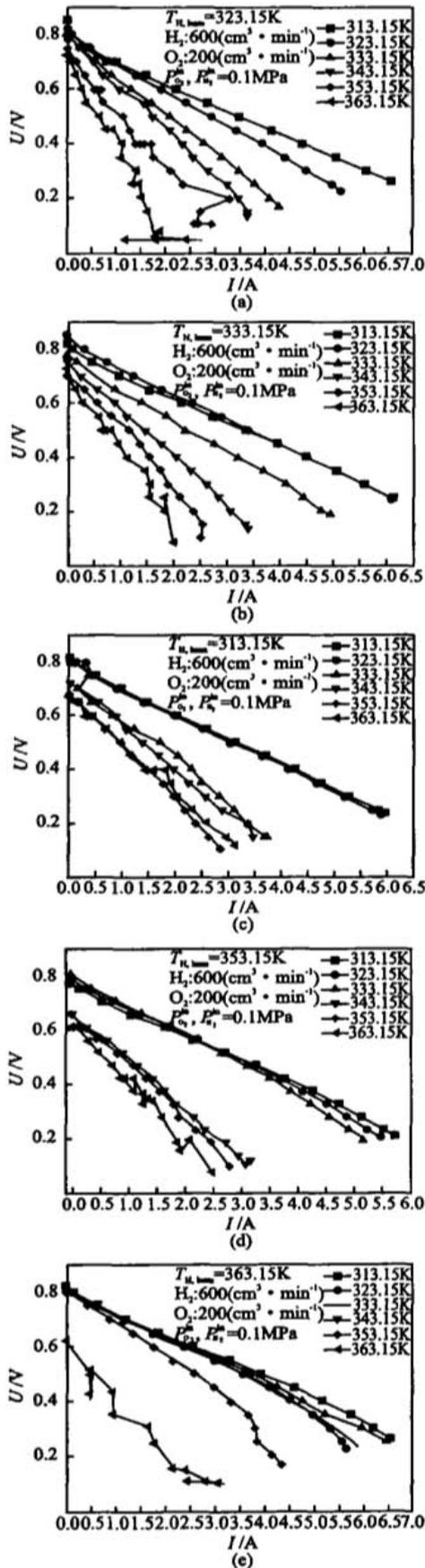


图4 阴极加湿温度与电池温度同时改变对电池性能的影响

当阳极加湿温度为323.15K与333.15K时，阳极一侧的膜没能达到完全饱和。因此电池性能会随电池温度和阴极加湿温度的升高出现等比例的下降。而当阳极加湿温度继续升高使膜在阳极一侧的含水量得到改善，进而使性能得到了提高，如图4(c)(d)(e)所示。图4中随阳极加湿温度的升高电池性能变化不明显，这与电池阳极气体流量较大有关。图4中出现了明显的过渡区，并且随阳极加湿温度的升高在向下移动。

电池的3个控制温度对电池性能的影响顺序受许多因素影响，如两个气体的流量等。但在固定了除温度外的所有操作参数的条件下，这个影响顺序也是固定的。从图2、3、4中可以看出当3个温度分别变化时对电池性能影响的先后顺序为阴极加湿温度，阳极加湿温度，电池工作温度。

## 2.2 温度影响的理论分析

通过掌握和控制3个温度的相互关系，使电池内工作的水环境得到改善和提高，对实现燃料电池的优化设计具有十分重要的意义。下面通过理论方法研究阴极加湿温度对阴极水状态的影响。

### 2.2.1 温度对电池中水的影响

假设：瞬时排出电池的气体中不携带液态水。首先，通过对电池几何参数的计算可得到了电池单侧气体流道的总体积为

$$A_s \cdot L_c = 0.09 \quad 0.1 \quad 34 \quad (1)$$

其中,  $A_s$  为气体流道截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $L_c$  为气体流道总长度,  $\text{cm}$ .

其次, 计算反应气体在进入电池单体和离开电池单体时的携水量为

$$U = C_{g, \text{sat}}^{H_2O} \rho_{O_2} \cdot u_{in/out} \cdot A_s \quad (2)$$

其中水蒸气在饱和状态下的平衡条件:  $C_{g, \text{sat}}^{H_2O} = \frac{M^{H_2O} P_v(T)}{R \rho_g T}$ ,  $P_v(T)$  为水蒸气的饱和蒸汽压.

水蒸气的密度:  $\rho_g = \frac{P_v}{RT} M_{H_2O}$ ;  $T$  为水蒸气进入电池时为气体加湿温度  $T_{O_2/H_2, \text{hum}}$ , 在离开电池时为电池温度  $T_{FC}$ .

加湿温度下水蒸气分压为

$$\log_{10} P_v = -2.1794 + 0.02953 T - 9.1837 \cdot 10^{-5} T^2 + 1.4454 \cdot 10^{-7} T^3 \quad (3)$$

水蒸气从加湿器出来进入电池内部的加湿气体的总压力为

$$P = P_m + P_v \quad (4)$$

加湿后氧气的密度为

$$\rho_{O_2} = \frac{P}{RT} M_{O_2} \quad (5)$$

加湿后氧气的摩尔质量:

$$M_{O_2} = \frac{1}{\frac{1 - C_{g, \text{sat}}^{H_2O}}{M_{O_2}} + \frac{C_{g, \text{sat}}^{H_2O}}{M^{H_2O}}} \quad (6)$$

在电池阴极上形成的比率(反应生成的水和通过质子膜净迁移水)为:

$$j_{H_2O}^{M\&O} = - \frac{M^{H_2O} (1 + 2\alpha)}{2F} \quad (7)$$

其中,  $\alpha$  为净水迁移系数, 它包括电渗力作用、浓度差的反向扩散力和压力差的对流扩散作用组成.

$$\alpha = N_w^{net} \frac{F}{i} = n_{H_2O} - n_{diff} - n_{hyd} = 2.5 \frac{D_w}{l} - \frac{F}{l} \frac{dC_w}{dy} - C_w \frac{F}{l} \frac{dC_w}{dy} - C_w \frac{K_m F}{\mu l} \frac{dP_w}{dy} \quad (8)$$

初始条件: 入口氧气流速  $u_{in}^{O_2} = 21 \text{ cm/s}$ , 出口氧气流速  $u_{out}^{O_2} = 16 \text{ cm/s}$ ; 入口氢气压力:  $P_{in}^{H_2} = 1.0315 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ; 入口氧气压力:  $P_{in}^{O_2} = 1.0315 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ; 电池温度  $T_{FC} = 353.15 \text{ K}$ ; 阴极扩散系数  $\alpha_c = 2$ ; Faraday 常数  $F = 96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 气体常数  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ .

阳极一侧的计算公式与此相同.

通过式(1)~(8)及初始条件, 可以计算出在不同温度及电流下, 加湿气体在加湿温度下带入电池内的净水量、加湿气体在电池温度下带出电池的净水量及电池内部传递和生成的水. 通过与电池内容水量进行比较, 可以得到电池在不同温度下工作时电极加湿温度的最佳工作范围, 由于篇幅有限文中只给出了  $T_{FC} = 353.15 \text{ K}$  时计算所得的最终结果:

$$T_{FC} = 353.15 \text{ K} \begin{cases} T_{v, \text{hum}} = 336.15 \sim 361.15 \text{ K} \\ T_{a, \text{hum}} = 343.15 \sim 373.15 \text{ K} \end{cases}$$

图 2(d), 电池温度为  $353.15 \text{ K}$  时, 其阴极和阳极的加湿温度共同变化, 温度在  $343.15 \sim 363.15 \text{ K}$  性能处于最佳状态. 图 3、4 中电池温度为  $353.15 \text{ K}$  的曲线,  $343.15 \sim 363.15 \text{ K}$  内性能偏高. 该计算结果应用在其他实验结果中同样得到了很好的验证.

### 2.2.2温度的相互影响

通过计算出的结果及经验数据可以绘出3个温度的相互关系图，如图5所示。图中还分析了其主要控制因素和影响程度。该图还对电池在实际应用中的操作给出了参考性指导。

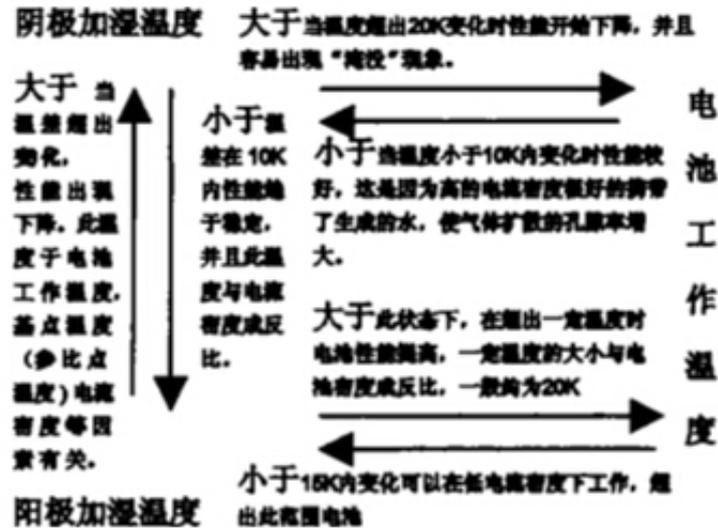


图5 3个温度对电池性能影响的相互关系图(  $T_{FC} = 353.15\text{ K}$  )

### 3结论

(1)操作条件固定，3个温度对电池性能的影响程度的顺序也是固定的，本实验的影响顺序为阴极加湿温度，阳极加湿温度，电池工作温度。

(2)由于在低的工作电流下电池的动力学特性是由电化学极化控制。在该区中活化极化比离子极化更大，所以低的工作电流下，电池性能不受操作参数影响，只于电池结构的几何参数有关。

(3)在改变操作参数时，在特定的变化范围内会出现从膜的干枯区到性能改善区，及从膜的饱和区到“淹没”区的两个临界状态。

(4)计算得到了电池温度为353.15K时，阴极加湿温度的最佳工作范围为336.15~361.15K，阳极加湿的最佳工作范围为343.15~373.15K。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/97260.html>