

高温高压条件下质子交换膜燃料电池性能仿真模型与实验研究

文/吴浩宇¹ 卢奕睿¹ 杨代军¹ 诸葛伟林² 明平文¹ 张扬军²

1. 同济大学汽车学院; 2. 清华大学车辆与运载学院

摘要: 质子交换膜燃料电池PEMFC在航空飞行器上应用时, 需要提高工作温度与进气压力, 以提高系统功率密度。本文基于Nafion[®]膜的10 kW电堆作为研究对象, 通过宏观半经验模型和实验手段, 研究了PEMFC在高于常规运行温度和压强下的运行状况与发电性能的关联关系, 并通过净水迁移系数表征水在膜内的传输过程。该研究为PEMFC性能改善提供可靠依据, 并指导后续PEMFC在航空领域的开发应用。

关键词: PEM燃料电池堆; 高温高压; 半经验模型; 水平衡

在中国新时代的能源发展进程中, 减少CO₂排放, 摆脱传统化石能源, 大力发展新能源迫在眉睫^[1-2]。质子交换膜燃料电池作为新型电源, 具有理论效率高、启动速度快、污染小、工作范围广、功率密度大和寿命长等优点, 是一种极具研究价值的新型能量转化装置, 是氢能推广应用的重要载体。

常规PEMFC的工作温度为60~80℃, 工作压力为1.0~1.5 bar, 在此温度、压力下, 反应产物气态水易发生冷凝, 对反应气体传质起阻碍作用, 造成PEMFC水管理困难。提升PEMFC的工作温度, 一方面可以提高PEMFC与环境温度的散热温差, 冷却系统的尺寸及质量可以减少50%以上^[3]; 另一方面温度的提升, 可以加快电化学反应速度, 减轻催化剂CO中毒情况^[4], 提高膜的电导率和交换电流密度等^[5]。因此, 工作温度和压强的提升能改善PEMFC发电性能。但在高温条件下, PEMFC流道内部反应气体分压降低, 加剧了传质和浓度损失。120℃运行时水的饱和蒸汽压已高达2 bar, 考虑氢气或空气的分压, 总压可能高达4 bar以上, 否则易

引起浓差极化, 导致PEMFC输出功率下降; 同时也更容易导致膜干等现象出现, 电池的水管理问题变得更加困难^[6]。

航空业一直以来面临严重的脱碳挑战, 航空氢能的使用可以减少碳排放、降低噪声污染, 是未来空中交通的重要选择。PEMFC的瞬时功率相比于其他动力方式相对较低, 难以支持大型飞机在起飞、爬升等需要快速提供动力的阶段所需的功率密度。在航空飞行器上应用时, 需要提高PEMFC的工作温度与进气压力以提高系统功率密度。而当PEMFC作为大型飞机的辅助动力源时, 可利用航空涡轮发动机产生的余热余压, 提高PEMFC的工作温度与进气压力。当燃料电池的进气压强提升到3 bar时, 可以改善温度升高造成的PEMFC发电性能衰退的负面影响。而膜干等问题也可通过增大反应气的压力、降低其气化比例等方式改善。不仅可以改善海拔升高带来的负面影响, 还避免了额外的能量消耗, 有助于提高燃料电池整体系统效率。目前, 车用PEMFC已开始逐步采取高温高压的技术路线, 通

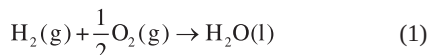
致谢: 江苏清能公司提供电堆的定制加工; 上海智能新能源汽车科创功能平台提供的实验场地和设施; 国家自然科学基金委(No. 22179099)的资助

用、本田的车用PEMFC运行参数分别设定为95 ℃、2.5 atm和95 ℃、3.5 atm，丰田推出的氢燃料电池汽车Marai II的工作温度已达到105 ℃。然而，相关技术及实验数据未公开，并且针对Nafion®聚合膜在高温高压条件下的研究较少。

基于上述分析，本文通过仿真及实验手段，研究了PEMFC在高于常规运行温度和压强下（即85~95 ℃，2~3 bar，本文称高温高压）运行状况与发电性能的关联关系。首先，建立宏观零维半经验模型，验证半经验模型的有效性，并分析工作温度、进气压力运行参数的提高对PEMFC发电性能的影响；通过实验测量燃料电池堆的极化曲线，采集电堆发电时的各项参数数据，探究影响燃料电池堆运行的关键参数，为PEMFC性能改善提供可靠依据，指导后续PEMFC在航空领域的开发应用。

PEMFC半经验模型开发

PEMFC内部发生的电化学反应为



针对PEMFC的简单半经验模型，研究燃料电池实际电压偏离理论电压的原因，燃料电池的开路电压由对应压力和温度下的能斯特方程给出。当电路闭合时，不同的现象引起各种电压损失。因此，燃料电池的实际电压为

$$V = E_{\text{thermo}} + \eta_{\text{act,a}} + \eta_{\text{act,c}} + \eta_{\text{ohmic}} + \eta_{\text{conc}} \quad (2)$$

式中， E_{thermo} 为热力学电动势； $\eta_{\text{act,a}}$ 为阳极的活化损失； $\eta_{\text{act,c}}$ 为阴极的活化损失； η_{ohmic} 为欧姆损失； η_{conc} 为浓差损失。

1. 热力学电动势

热力学电动势给出了单个电池可能的最大电压^[7]，对于可逆的电化学反应，最大电输出等于吉布斯自由能的变化，即

$$\Delta g_{\text{rxn}} = nFE \quad (3)$$

式中， Δg_{rxn} 为反应的吉布斯自由能变化（kJ/

mol）； n 为化学反应转移的电子数； F 为法拉第常数（C/mol）； E 为热力学电动势。

标准状态下的 $\Delta g_{\text{rxn}}^0 = -237.17 \text{ kJ/mol}$ ，根据式（3），标准状态下的热力学电动势 $E^0 = 1.229 \text{ V}$ 。 Δg_{rxn} 受温度和压强的影响，因此，实际的热力学电动势由能斯特方程给出

$$E_{\text{thermo}} = E^0 - \frac{\Delta s^0}{nF}(T - 298.15) + \frac{RT}{nF}(\ln p_{\text{H}_2}^* + 0.5 \ln p_{\text{O}_2}^*) \quad (4)$$

式中， Δs^0 为标准状态下反应的熵变，取值130.68 J/K； T 为温度（K）； R 为气体常数，取值8.314 J/(mol·K)； $p_{\text{H}_2}^*$ 为氢气在阳极催化剂/气体界面的分压（atm）； $p_{\text{O}_2}^*$ 为阴极催化剂/气体界面的分压（atm）。

代入数值后得到

$$E_{\text{thermo}} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T(\ln p_{\text{H}_2}^* + 0.5 \ln p_{\text{O}_2}^*) \quad (5)$$

2. 活化过电位

活化过电位是克服催化剂表面上电化学反应的活化能所需的过电势，在较低的电流密度下占主导地位。氧化还原反应的动力学比氢的氧化反应高一个数量级，其过电位也更大^[8]。

阳极过电位可以表示为

$$\eta_{\text{act,a}} = -\frac{\Delta G_{\text{ec}}}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln(4FAk_a^0 C_{\text{H}_2}^*) - \frac{RT}{2F} \ln i \quad (6)$$

式中， ΔG_{ec} 为标准状态下阴极反应化学吸附作用的活化自由能（J/mol）； k_a^0 为阳极反应本征速率常数（cm/s）； A 为电池的活性区域面积（cm²）； $C_{\text{H}_2}^*$ 为阳极膜/气体界面氢气的液相浓度（mol/cm²），由电中性定律确定，为常量； i 为电流（A）。

代入数值后得到

$$\eta_{\text{act,a}} = -5.18 \times 10^{-6} \times \Delta G_{\text{ec}} + 4.308 \times 10^{-5} \times T \left[12.863 + \ln \left(\frac{Ak_a^0 C_{\text{H}_2}^*}{i} \right) \right] \quad (7)$$

阴极过电位表示为

$$\eta_{\text{act,c}} = \frac{RT}{na_c F} \left\{ \ln \left[nFAk_c^0 \exp \left(-\frac{\Delta G_c}{RF} \right) \times (C_{\text{O}_2}^*)^{1-a_c} \times (C_{\text{H}^+}^*)^{1-a_c} \times (C_{\text{H}_2\text{O}}^*)^{a_c} \right] - \ln i \right\} \quad (8)$$

式中，速度控制步骤的反应式为 $\text{M}(\text{OH}) + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$ ； n 取1；令常数 $k_c' = k_c^0 C_{\text{H}^+}^* + C_{\text{H}_2\text{O}}^*$ ； ΔG_c 为标准状态下阳极反应的活化自由能（J/mol）；为阴极反应本征速率常数（cm/s）。 a_c 为阴极传输系数。

代入数值后得到

$$\eta_{\text{act,c}} = \frac{1}{a_c} [-(10.36 \times 10^{-6}) \Delta G_c + (8.62 \times 10^{-5}) \times T(12.863 + \ln A + \ln k_c' + (1 - a_c) \ln C_{\text{O}_2}^* - \ln i)] \quad (9)$$

将阴极和阳极的活化过电位结合起来，将常量用经验参数代替得到

$$\eta_{\text{act}} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln c_{\text{O}_2}^* + \xi_4 T \ln i \quad (10)$$

其中

$$\xi_1 = -\frac{\Delta G_{\text{ec}}}{2F} - \frac{\Delta G_{\text{c}}}{na_{\text{c}}F} \quad (11)$$

$$\xi_2 = \frac{R}{na_{\text{c}}F} \ln \left[nFAk_{\text{c}}^0 (c_{\text{H}^+}^*)^{1-a_{\text{c}}} (c_{\text{H}_2\text{O}}^*)^{a_{\text{c}}} \right] + \frac{R}{2F} \ln (4FAk_{\text{a}}^0 c_{\text{H}_2}^*) \quad (12)$$

$$\xi_3 = \frac{R(1-a_{\text{c}})}{a_{\text{c}}nF} \quad (13)$$

$$\xi_4 = -\left(\frac{R}{2F} + \frac{R}{a_{\text{c}}nF} \right) \quad (14)$$

其中, 氧气浓度可以由亨利公式得到

$$c_{\text{O}_2}^* = \frac{P_{\text{O}_2}}{5.08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (15)$$

3. 欧姆过电压

欧姆损失由燃料电池的所有组件构成, 材料对电子传输具有天然的阻力。欧姆过电压表示为

$$\eta_{\text{ohmic}} = -i(R^{\text{electronic}} + R^{\text{proton}}) \quad (16)$$

式中, $R^{\text{electronic}}$ 是包括接触电阻和电极处的电阻在内的阻值 (Ω), 对于PEMFC相对较窄的工作温度范围而言, 对电子流的阻力可以认为是近似恒定的, 视为一个未知的常数; R^{proton} 是在聚合物膜中质子转移的阻力 (Ω), 是一个相关于膜内水含量和分布的复杂函数, 同时受制于温度、电流等操作参数。

此处使用经验公式来预测其阻值, 即

$$R^{\text{proton}} = \frac{r_{\text{M}} l}{A} \quad (17)$$

式中, r_{M} 为水合质子流动时的膜电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)。

基于半经验模型进行预测, r_{M} 表达式为

$$r_{\text{M}} = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \left(\frac{i}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{i}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda - 0.634 - 3 \left(\frac{i}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \quad (18)$$

式中, $\frac{181.6}{[\lambda - 0.634]}$ 是零电流、30 °C 时的比电阻率;

$-3 \left(\frac{i}{A} \right)$ 对电阻率进行了经验修正; $\exp \left(\frac{T-303}{T} \right)$ 项

为温度修正因子; $\left[1 + 0.03 \left(\frac{i}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{i}{A} \right)^2 \right]$ 为电阻的数据拟合; λ 为膜的参数, 可表达膜的含水量信息, 定义为每个磺酸盐 ($-\text{SO}_3^-\text{H}^+$) 的水分子数。由下式给出^[9-10]

$$\lambda = 0.043 + 17.81a - 39.81a^2 + 36a^3 \quad (19)$$

式中, a 是入口气流的相对湿度, 定义为蒸汽分压与总压之比。

4. 浓差过电位

浓差极化受制于传质极限, 电流密度较大时, 气体的补充不能及时补偿反应物的消耗。浓差极化项可以表示为^[11]

$$\eta_{\text{conc}} = -c \ln \left(\frac{j_{\text{L}}}{j_{\text{L}} - j} \right) \quad (20)$$

式中, c 为经验常数, 通常取 $c = \frac{RT}{nF}$; j_{L} 为极限电流密度。

实验装置与方法

1. 实验装置

(1) 电堆极化曲线实验

电堆极化曲线实验使用HS-10000W (群翌公司) 燃料电池堆测试台, 可精确控制阴阳极露点、进气流量、工作温度及压力、冷却剂流量及温度等, 并实时记录 (100 ms/点) 各项运行参数, 包括电流密度、电压、温度、压力和高频阻抗等, 测试系统界面如图1所示。测试用电堆的额定功率为10.0 kW (江苏清能公司订制加工), 具体参数见表1。实验过程中环境温度为20~25 °C, 采用恒流 (Constant Current) 模式进行负载控制, 阳极所用气体为99.999%的高纯氢气, 阴极所用气体为空气, 冷却剂流量设置为15 L/min, 并与进气温度维持相同。

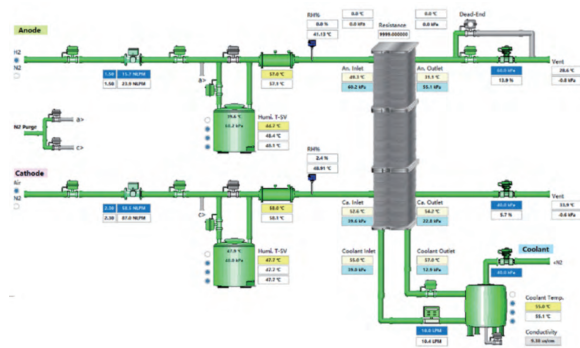


图1 燃料电池堆测试系统

表1 电堆参数信息

参数	数值
额定功率/kW	10.0
电堆节数/节	20
Nafion®复合膜厚度/ μm	12
活性面积/ cm^2	375
催化剂	50% Pt/C

(2) 水平衡实验

水平衡实验使用东扬精测水平衡测试系统，采用Scribner制890e型电子负载，885-HS型电化学工作站。测试所用单电池活性面积为25 cm²，其余相关材料参数均与本文中电堆一致，采用水浴加热方式控制单电池工作温度。图2为实验装置系统示意图。水平衡测试系统在阴阳极气体出口处设置加热器，将气水混合物加热至170 ℃以上，使液态水全部转化为气态水。通过镜面式高精度露点仪测取露点，计算阴阳极出口处的相对湿度，精确表征通过膜的水通量。可采用净水迁移系数来表征水在膜内

的通过情况^[12-13]

$$a_{\text{NWD}} = \frac{n_{\text{water,an}}^{\text{in}} - n_{\text{water,an}}^{\text{out}}}{jA/F} \quad (21)$$

基于燃料电池中水的平衡公式为

$$n_{\text{water,an}}^{\text{in}} + n_{\text{water,ca}}^{\text{in}} + n_{\text{water}}^{\text{gen}} = n_{\text{water,an}}^{\text{out}} + n_{\text{water,ca}}^{\text{out}} \quad (22)$$

式中， $n_{\text{water,an}}^{\text{in}}$ 、 $n_{\text{water,ca}}^{\text{in}}$ 分别表示单位时间内阳极、阴极进入的水量； $n_{\text{water,an}}^{\text{out}}$ 、 $n_{\text{water,ca}}^{\text{out}}$ 分别表示单位时间内阳极、阴极排出的水量； $n_{\text{water}}^{\text{gen}}$ 表示单位时间内电化学反应在阴极产生的水量，单位均为mol/s。进排水量误差在5%以内。

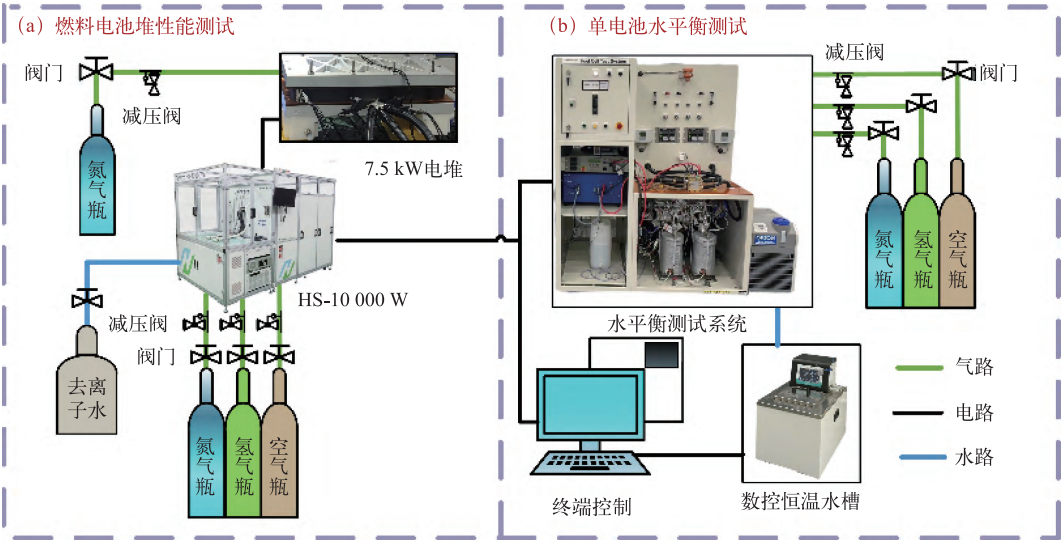


图2 实验装置系统示意图

2. 实验方法

将PEMFC电堆装载在HS-10000W电堆测试台上，通过欠氧活化的方式完成电堆初始性能的活化。基于未来航空燃料电池辅助电源应用场景，通过改变工作温度、压力和湿度等，评估从常规条件

(75 ℃、1 bar) 到高温高压 (95 ℃、2.8 bar) 下电堆的性能变化规律，具体操作条件设置见表2。电堆极化曲线测试过程中，待操作条件达到稳定后，进行电流密度的加载（步长为100 mA/cm²），并在该电流密度下维持5 min。

表2 燃料电池堆的操作条件

序号	工作温度/(℃)	压强/bar	阳/阴极计量比	阳极湿度 (%)	阴极湿度 (%)
1	75,80,85,90,95	1	1.5/2.5	50	50
2	75,80,85,90,95	2.5	1.5/2.5	50	50
3	75	1,1.5,2,2.5	1.5/2.5	50	50
4	95	1,1.5,2,2.5,2.8	1.5/2.5	50	50
5	95	2.8	1.5/2.5	20,50,80	20,50,80

结果与讨论

1. 电堆极化曲线预测

图3为基于上述公式的推演，在Simulink中

搭建半经验模型图，如图3所示。与在工作温度为75 ℃、阴阳极进气压力分别为100 kPa和80 kPa条件下实际测试的燃料电池堆极化曲线进行对比，并预

测了在工作温度为95℃、阴阳极进气压力分别为100 kPa/80 kPa和250 kPa/230 kPa条件下燃料电池的发电性能，如图4所示。

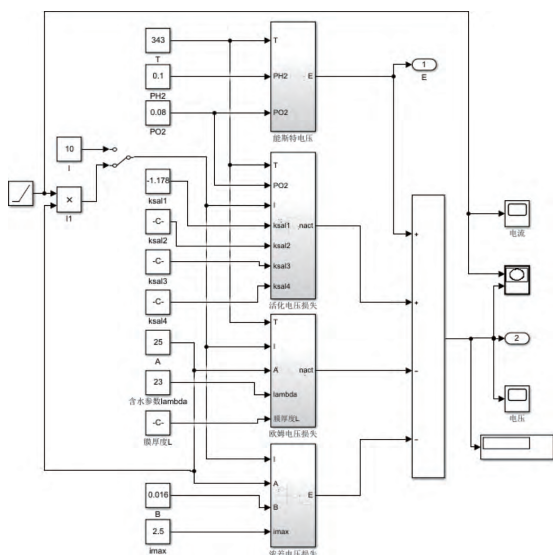


图3 Simulink搭建的燃料电池模型图

由图4可见，半经验模型的模拟数据与实验数据的拟合情况较为良好。在低电流密度区域，由于在燃料电池实际运行过程中，其工作状况较为复杂，而传统半经验模型过于理想化，难以完全反映电化学反应机理，近似较多，难以反映电堆中各部件的衰减现象^[14]。模型预测结果显示，常压下，燃料电池的发电性能随着温度的提升而略微下降。虽然根据式(18)所计算的膜电阻率会随着温度的增加而减少，使得欧姆损失减少，有助于增加发电性能；但不足以弥补由于提升温度导致的能斯特可逆电动势下降，以及相对湿度维持在50%条件下水的饱和蒸汽压上升（即水蒸气的分压上升，反应气氢气和氧气的分压下降），导致亨利公式(15)中活化过电位的浓度项减小，使得活化损失增加，致使在高温条件下燃料电池的发电性能下降。而对反应气体加压，可以明显改善PEMFC电堆的发电性能。提升反应气体的总压力，能斯特电动势增加，还可以改善高温带来水饱和蒸汽压上升的影响；式(15)计算的活化过电位中的浓度项也会增加，使得活化损失减少，燃料电池的发电性能提高。因此，当工作温度升高至95℃、阴阳极进气压力增加至250 kPa/230 kPa时，燃料电池堆的极化曲线明显上升，工作温度和进气压力同时升高有助于改善燃料

电池的发电性能，这为实验提供了指南。

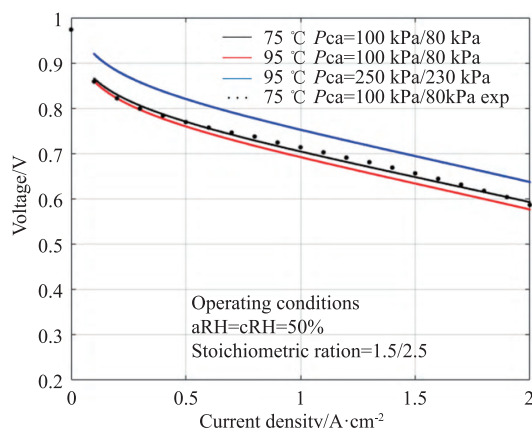


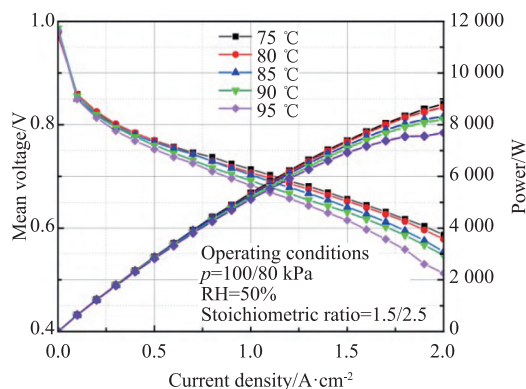
图4 高温高压下燃料电池半经验模型极化曲线

2. 电堆极化曲线测试

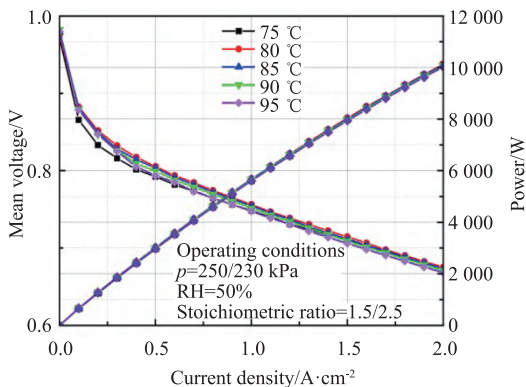
(1) 温度的影响

工作温度对PEMFC电堆发电性能的影响较大，由于电堆内部的温度分布不均匀，难以直接测量^[15]，本文选取冷却液进出口的平均温度作为电堆的工作温度。在1 bar和2.5 bar条件下测量了不同工作温度对电堆极化曲线的影响，选取堆内20节单电池的平均电压绘制极化曲线与功率曲线，结果如图5所示。由图5可见，在电堆每个测试条件下，电池的输出电压和功率密度以类似的方式随着电流密度变化而变化。随着电流密度的增加，各电池的输出电压逐渐降低，功率密度逐渐提高。

由图5a可见，电堆在常规工作温度(75℃)的基础上继续提高工作温度，电堆的极化曲线随着工作温度的增加，呈逐渐降低的趋势。当工作温度从75℃升高至95℃时，在低电流密度区域电堆的极化曲线未见明显的降低，而在高电流密度区域电压下降可达12.6%。由图5b可见，进气压力的提高，不同工作温度下电堆的发电性能仅下降了约1%。PEMFC中的催化剂活性受电池温度的影响，在常规压力下，虽然提高工作温度可以增强催化剂的活性，加快电化学反应速率，但会导致水的饱和蒸汽压上升，从而降低了氢气、空气的分压；并且氧化还原反应的吉布斯自由能也会下降，造成开路电压降低。此外，膜也更容易出现脱水现象，导致离子阻抗增加。通过提高进气压力，有助于增加反应气体的分压，减少传质损失和浓度损失，使得PEMFC在高温条件下的发电性能改善。



(a) 阳极/阴极压强100 kPa/80 kPa



(b) 阳极/阴极压强250 kPa/230 kPa

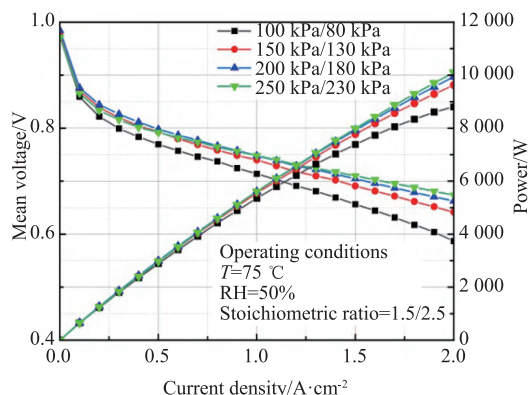
图5 不同温度下电堆的极化曲线与功率曲线

(2) 进气压力的影响

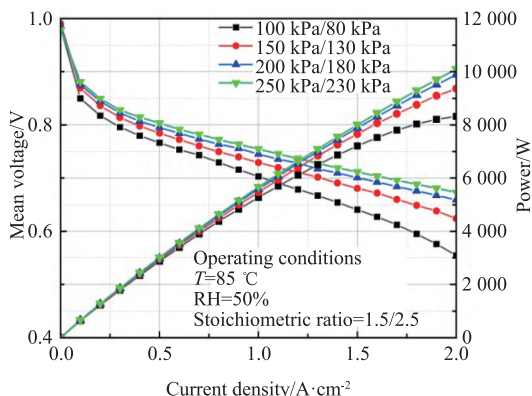
工作压力的提高可明显改善PEMFC电堆发电性能。本实验中设置的阳极和阴极进气压力差为20 kPa,这有助于促进氢气的扩散和传输。图6分别为75 °C、85 °C和95 °C的工作温度下,电堆在不同进气压力的极化曲线与功率曲线。

由图6可见,在75 °C、85 °C和95 °C工作温度下,进气压力的增加均可以改善PEMFC堆的发电性能,在电流密度为 $2 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,输出电压分别提升了14.6%、21.4%和30.4%。这是因为反应气体的分压增加,由式(5)能斯特方程计算的开路电压上升,气流的扩散阻力降低。输出电压随着进气压力的提高,呈先增大后逐渐减缓直至未见明显增加的趋势。以工作温度为95 °C、电流密度为 $2 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为例,当阴阳极进气压力从100 kPa/80 kPa提高至250 kPa/230 kPa的过程中,电压随进气压力的增加(每50 kPa)分别提升了0.089 V、0.037 V和0.030 V,而进气压力从250 kPa/230 kPa增加至280 kPa/260 kPa时,输出电压仅提升了0.006 V。这表明当氢气、空气分压较低时,增加压力对

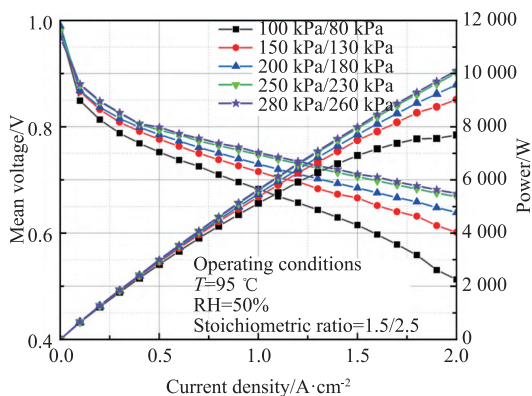
PEMFC发电性能的改善较为显著。



(a) 75 °C



(b) 85 °C



(c) 95 °C

图6 不同温度、压力条件下电堆的极化曲线与功率曲线

(3) 湿度的影响

质子在质子交换膜上的传输取决于膜的含水量,氢气的相对湿度主要通过影响膜的水合程度进而影响PEMFC电堆的发电性能。图7a为在进气压力为2 bar、相对湿度为50%条件下,工作温度对净水迁移系数的影响规律;图7b为在工作温度为

95 ℃、进气压力为200 kPa条件下，相对湿度对净水迁移系数的影响规律。

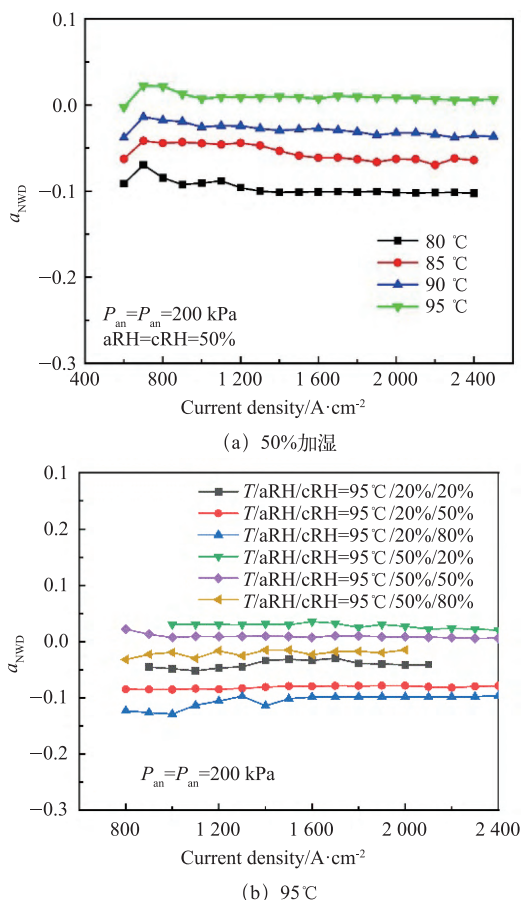


图7 不同湿度、温度下的净水迁移系数

图7展现了净水迁移系数与温度和湿度的关系。净水迁移系数由式(21)得到，其数值含义为：数值越负，燃料电池内水从阴极向阳极的传输越多。影响净水迁移系数的三种形式为：一是由于电渗作用，水分子被载流质子从阳极拖到阴极；二是水的反向扩散，燃料电池内的电化学反应产生水并在阴极侧堆积，由于水浓度梯度引起水从阴极向阳极的反向扩散；三是由于阳极和阴极的压力梯度引起的对流扩散。由图7a可见，净水迁移系数随温度的增加而增加，这是由于温度的升高改善了反应的电动力学，电迁移作用更加显著。由图7b可见，阳极和阴极的湿度差距显著影响了水在膜内的传输过程。阳极湿度越高，阴极湿度越低， α_{NWD} 的值越正，水从阳极向阴极的传输作用越强，反之亦然。但 α_{NWD} 的值大多为负值，这是由于PEMFC发电时会在阴极侧生成水，并且膜的阴极侧水合程度通常

较高，水倾向于从阴极向阳极扩散。因此，对阴极反应气体进行加湿，不仅可以润湿膜的阴极侧，还可以通过增强水的反向扩散来对膜的阳极侧进行润湿。这就为良好的系统控制策略下取消增湿器提供了可能。

图8为在工作温度为95 ℃、进气压力为2.8 bar条件下，相对湿度的变化对电堆发电性能的影响。由图8可见，阳极湿度对燃料电池堆的发电性能的影响并不明显。这是因为与通过电渗透作用即从阳极侧向阴极侧的水迁移相比，水向阳极的反向扩散占主导地位，有效弥补了阳极加湿不足的缺陷。相比于阳极湿度，阴极湿度的变化对PEMFC发电性能的影响更为显著。对于给定的阳极湿度，阴极湿度为50%时，燃料电池堆的发电性能最好，当阴极湿度增加至80%时，电堆的输出电压略有下降；而当阴极湿度降低至20%时，电堆的输出电压呈明显下降趋势。相较于阳极侧，阴极侧的气流量较大，电堆对阴极湿度比对阳极湿度更为敏感。在阴极低湿的条件下，膜内的含水量较低，极大地增加了聚合物膜的离子电导率，导致较高的膜电阻，使得输出电压下降。而阴极湿度过高，由于水在阴极中的积聚和电拖曳效应，可能会引起“水淹”现象，从而减少反应气向催化剂层的传质，使电堆的发电性能降低。

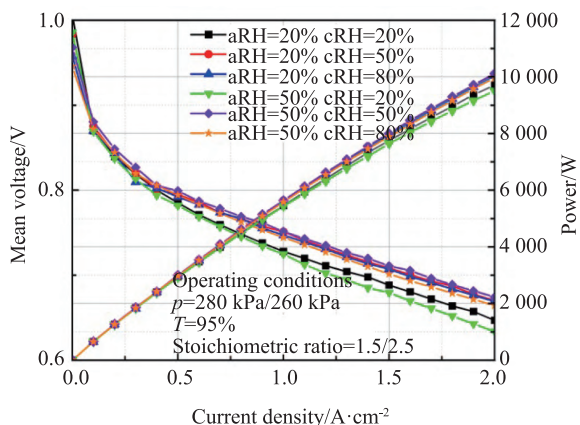


图8 不同湿度下电堆的极化曲线与功率曲线

结束语

本文通过宏观零维半经验模型，预测了PEMFC在高温高压条件下的发电性能；在电堆75~95 ℃的工作温度、1~2.8 bar的压力及20%~50%湿度操作

条件下进行了电堆极化曲线测试的实验研究。

1) 与实验测得的极化曲线相比, 现有的半经验模型存在局限性。当工作温度高于PEMFC常规工作温度(75℃)时, 质子交换膜在高温下容易脱水, 导致传质阻力增加, 电导率下降。需要针对欧姆过电位, 对膜电阻进行修正, 正确预测高温带来的电压变化。

2) 通过电堆极化曲线实验发现, 提高PEMFC堆工作温度时, 其输出电压显著降低, 相应地增加进气压力可有效改善电堆的发电性能。在工作温度为95℃、电流密度为2 A·cm²时, 进气压力从100 kPa提升到280 kPa, 电堆的功率输出提升了30%以上。

3) 净水迁移系数可表征水在膜内的传输过程, 其与工作温度的升高呈正相关, 阴极加湿条件下, 水从阴极向阳极的反向扩散较为显著; 在工作温度为95℃、阴阳极进气压力为280 kPa/260 kPa时, 相对湿度的增加有利于改善发电性能, 并且相比于阳极湿度, 阴极湿度的变化对PEMFC发电性能的影响更为显著。EA

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 新时代的中国能源发展[R/OL]. (2020-12) [2023-4-25]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm
- [2] 张艳红, 杨静, 韩雅芳. 我国燃料电池汽车用质子交换膜产业发展分析[J]. 中外能源, 2023, 28(4): 23-28.
- [3] HyPoint, Inc. Technical White Paper [R/OL]. (2021-11) [2023-4-25]. <https://docsend.com/view/t9aw2mk>
- [4] BUJLO P, PASUPATHI S, ULLEBERG O, et al. Validation of an externally oil-cooled 1 kW_(el) HT-PEMFC stack operating at various experimental conditions.
- [5] CHUGH S, CHAUDHARI C, SONKAR K, et al. Experimental and modelling studies of low temperature PEMFC performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8866-8874.
- [6] 宋佳桐. 高温高压下质子交换膜燃料电池的数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.002264.
- [7] JEFERSON M CORREA, FELIX A FARRET, LUCIANE N, et al. An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering Automation Approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5).
- [8] RONALD F MANN, JOHN C AMPHLETT, Michael A. I. Hooper, et al. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1).
- [9] SPRINGER T E, ZAWODZINSKI T A, GOTTESFELD S. Polymer electrolyte fuel cell model[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1991, 138(8): 2334.
- [10] THOMAS A, ZAWODZINSKI Jr. Charles Derouin, et al. Water uptake by and transport through nafion® 117 membranes[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 140(4).
- [11] 任静影, 章桐, 胡潇. 面向仿真的质子交换膜燃料电池经验模型研究综述[J]. 机电一体化, 2022, 28(1): 3-14. DOI: 10.16413/j.cnki.issn.1007-080x.2022.01.001.
- [12] Ito Hiroshi, Mimoto Taiki, Someya Satoshi, et al. Net water drag coefficient during high temperature operation of polymer electrolyte fuel cells[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2021, 168(12).
- [13] Hiroshi Ito, Tatsuya Ishikawa, Masayoshi Ishida, et al. Measurement of net water drag coefficients in polymer electrolyte fuel cells under cathode[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(15).
- [14] WU H W. A review of recent development; Transport and performance modeling of PEM fuel cells[J]. Applied Energy, 2016, 165: 81-106.
- [15] 肖伟强. 质子交换膜燃料电池电堆操作条件的评估[J]. 电池, 2021, 51(4): 429-432. DOI: 10.19535/j.1001-1579.2021.04.025.