

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-330-07

运行参数对高温燃料电池 物质分布与启动时间的影响研究

楚笑天 谢永亮

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 使用 comsol 软件, 建立高温质子交换膜燃料电池电化学反应传质三维数值模型, 通过改变电池的电压和入口温度, 分析运行参数对电池内物质分布以及启动时间的影响。结果表明, 随着进气温度的升高和电压的降低, 电池反应物的消耗量及水的生成量在不断增加, 启动时间也随之缩短。电压低于 0.4V 以下时, 会导致阴极氧气不足产生“饥饿”现象。并且当进气温度高于 150°C 时, 提高进气温度对启动时间的影响会大幅减少。即 0.4V 的启动电压及 150°C 的进气温度是一个比较合适的启动参数。

【关键词】 高温燃料电池; 进气温度; 电压
中图分类号 TM911 文献标志码 A

Effect of Operating Parameters on Material Distribution and Start-up time of High Temperature Fuel Cells

Chu Xiaotian Xie Yongliang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In this paper, comsol software was used to establish a three-dimensional numerical calculation model for electrochemical heat and mass transfer of high temperature proton exchange membrane fuel cells. The effects of battery voltage and inlet temperature on material distribution and start-up time were analyzed by changing operated parameters. The results show that with the increase of inlet temperature and the decrease of voltage, the consumption of battery reactants and the amount of water generated increase continuously, and the start-up time decreases. When the voltage is below 0.4V, it will lead to the "hunger" phenomenon of insufficient cathode oxygen. And when the intake air temperature is higher than 150°C, the influence of increasing the intake air temperature on the starting time will be greatly reduced. That is, 0.4V starting voltage and 150°C intake temperature are a more suitable starting parameters.

【Keywords】 High temperature fuel cell; Intake air temperature; Voltage

0 引言

随着时代的发展, 人们对于能源的需求越来越高, 传统的化石能源逐渐不能满足人们的需要, 人们迫切需要找到一种更加清洁、高效、可再生的能源^[1]。与传统能源相比, 氢能具有环保、高能量密

度等优点^[2]。质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 是一种以氢为原料, 通过电化学反应将化学能转化成电能的高性能电池^[3]。常见的质子交换膜燃料电池通常采用全氟磺酸 (Nafion) 作为质子交换膜, 其中水需要作为质子在 Nafion 膜内导电的电荷载体,

作者简介: 楚笑天 (1999.11-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: chuxiaotian0601@163.com

通讯作者: 谢永亮 (1986.09-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yongliangxie17@163.com

收稿日期: 2023-12-04

因此膜需要始终保持在水合状态才能获得最佳性能^[4]。但是, 过多的水会堵塞流道, 从而导致多孔扩散电极的传输受限^[5]。而高温燃料电池通常采用以磷酸为载体的 PBI/H₃PO₄ 膜, 并不需要水来传导离子, 因此可以在 100℃ 以上的高温下使用, 且不需要进行复杂的水管理^[6]。基于以上优点, 人们逐渐开展了对高温燃料电池的研究。

数值模拟是研究高温燃料电池内部传质传热现象的重要方式。Cheddle 等^[7]建立了一个一维的数学模型用来模拟使用 PBI 膜的高温燃料电池, 得到的极化曲线跟实验吻合较好, 并且发现提高膜的导电性和提高催化剂的活性能有效提高电池的性能。Feng 等^[8]以电化学阻抗为基础建立了一个高温燃料电池二维数学模型, 以探究 PBI 含量和工作温度对电池性能的影响。Li 等^[9]建立了一个三维稳态的单通道模型, 研究了工作温度、相对湿度、操作压力对电池性能的影响, 结果表明, 操作压力和工作温度的提升会有效提高电池性能, 但是在室温下加湿气体对电池性能并没有明显改善。在对高温燃料电池的研究过程中发现, 电池的最佳工作温度在 100℃ 以上, 因此, 如何快速让电池达到工作温度成为高温燃料电池应用的一个挑战。

Ghosh 等^[10]研究了不同的加热策略所需的时间, 发现利用膜产生的欧姆热, 同时配合其他加热方式能够有效的降低启动时间。Rasheed 等^[11]研究了阳极和阴极的入口温度对温度分布和启动时间的影响, 发现阴极入口温度对膜的温度影响更大。Varghese 等^[12]分析了高温燃料电池启动过程中的热应力, 在启动过程中若膜的温差较大, 产生的热

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \frac{\bar{u}}{\varepsilon} \right) = \nabla \cdot \left\{ -pI + \mu [(\nabla \bar{u}) + (\nabla \bar{u})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \bar{u}) I \right\} - \left(\frac{\mu}{k_{br}} + \beta |\bar{u}| + \frac{Q_{br}}{\varepsilon^2} \right) \bar{u} + S \quad (2)$$

式中: ε 为多孔介质的孔隙率; ρ 表示为气体的密度; \bar{u} 为物质在多孔介质中的表观速度; Q_{br} 为混合气的质量源项; p 为气体的压力; μ 为气体的

$$\rho \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \omega_i = \nabla \cdot \left\{ \rho \omega_i \sum_{j=1}^N \overline{D_{ij}} \left[\frac{\nabla x_j}{p} + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right] + D_i^* \frac{\nabla T}{T} \right\} + B_i \quad (3)$$

其中, ω_i 为不同气体的质量分数; D_{ij} 为不同物质组分的扩散系数, 该系数可由 Bruggeman 方程修正; T 为温度; B 为物质传递的源项。

在电化学反应过程中, 电子的传递需要遵循电

应力可能会大于膜的极限强度, 对膜产生不可逆的损坏。

目前对高温燃料电池的模型研究多为单通道, 对整个单电池的模型研究较少。因此, 本文建立完整的高温燃料电池三维模型, 以研究不同运行工况对物质分布及启动时间的影响。

1 数值模型建立及验证

1.1 模型假设

为了减少计算量, 增加计算速度, 在模型建立时有如下假设^[13,14]:

(1) 阴极和阳极的气体均视为理想气体。

(2) 由于雷诺数较低, 所有的气体在流道中的流动均视为充分发展的层流。

(3) 多孔介质 (包含催化层和扩散层) 均视为各向同性。

(4) 不考虑反应物穿过质子交换膜, 反应均在催化层上进行。

(5) 阴极反应气体采用纯氢气, 阳极采用空气, 均不进行加湿。

(6) 不考虑组件之间的接触电阻。

1.2 控制方程

本文建立的三维 HT-PEMFC 模型包含质量及动量守恒方程, 电荷守恒方程, 能量守恒方程等。由于电池中的催化层和扩散层均属于多孔介质, 多孔介质的质量和动量守恒由以下方程描述:

$$\frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = Q_{br} \quad (1)$$

动力学黏度; I 为单位矩阵; S 为动量源项, 表示为多孔介质对流动的影响, 由达西定律进行描述。

电池中气体的组分守恒方程由 Maxwell-Stefan 方程进行描述, 传递方程为:

荷守恒。

$$\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \Phi_s) + j_s = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_m \nabla \Phi_m) + j_m = 0 \quad (5)$$

其中, σ_s 、 σ_m 分别为电极材料和电解质的电导率; Φ 代表电势; j_s 、 j_m 分别为固体和膜的源项, 它们均与阴极和阳极的电流交换密度有关。根据 Butler-Volmer 方程, 阴极和阳极的交换电流密度 j_a 、 j_c 分别为:

$$j_a = A_a i_{0,a}^{ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{0.5} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F \eta_a \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left((\rho C_p)_{E,sl}^{eff} T \right) + \nabla \cdot \left((\rho C_p)_{f,sl}^{eff} \overline{\mu_g T} \right) = \nabla \cdot (k_{fl,sl}^{eff} \nabla T) + S_T \quad (8)$$

式中 C_p 为混合气体的比热, 与其中组分的种类和质量分数有关; $k_{fl,sl}^{eff}$ 为有效热导率, 可由动力学相关理论求得^[15]; S_T 为电池反应中的热源项, 包含电阻热及化学反应热^[16]。

1.3 边界条件及模型参数

由于电池工作温度达到上百摄氏度, 电池表面与周围环境的热量交换除了对流换热外, 还应考虑辐射换热, 其换热量为:

$$Q = q_{conv} + q_{rad} = Ah(T - T_{amb}) + A\epsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4) \quad (9)$$

其中, Q 为电池与外界的换热量; h 为对流换热系数; A 为电池的换热面积; T 和 T_{amb} 为电池温度和环境温度。

固体和流体的传热采用流入边界条件:

$$q = \rho_g \bar{u} \left[\int_{T_{in}}^T C_p dT + \int_{p_{in}}^p \frac{1}{\rho} (1 - \chi T) dp \right] \quad (10)$$

其中, χ 为气体的热膨胀系数。

模型的进口处采用充分发展的流动, 阴阳极入口速度由下式决定:

$$U_{a,in} = \frac{\zeta_a j^{ref} A_{CL}}{2FA_{a,in} C_{H_2,in}} \quad (11)$$

$$U_{c,in} = \frac{\zeta_c j^{ref} A_{CL}}{4FA_{c,in} C_{O_2,in}} \quad (11)$$

式中, j^{ref} 代表电池的参考交换电流密度; ζ 代表化学计量数; A_{in} 为流体的入口面积; A_{CL} 为催化层表面积。

电化学方面, 采用二次电流分布, 阳极设置为接地, 阴极的工作电压由能斯特方程计算得出。

综上所述, 采用 comsol 软件求解上述方程, 通过使用二次电流模块, 自由和多孔介质流模块,

$$j_c = A_c i_{0,c}^{ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right) \exp \left(-\frac{\alpha_c}{RT} F \eta_c \right) \quad (7)$$

式中, A 代表有效活化面积; $i_{0,a}^{ref}$ 、 $i_{0,c}^{ref}$ 分别表示为阴阳极的参考交换电流密度; C 为物质的浓度; α 代表阴阳极的传递系数; F 为法拉第常数; η_a 和 η_c 分别表示反应中的过点位。

电池中的能量传递方程为:

浓物质传递模块及固体和流体传热模块, 建立了包含膜电极、流道、集流板、夹板的高温燃料单电池。本文使用的几何及物性参数如表 1 所示。

表 1 模型几何及物性参数

Table 1 Model geometry and physical properties parameters

参数	数值	参数	数值
膜电极面积 (m)	4×10^{-4}	阴极化学计量数	1.2
膜厚度 (m)	1×10^{-4}	阳极化学计量数	2
催化层厚度 (m)	5×10^{-5}	阴极交换电流密度 (A/m ²)	1
扩散层厚度 (m)	3.8×10^{-4}	阳极交换电流密度 (A/m ²)	1×10^5
流道长、宽、高 (m)	0.02; 0.002; 0.001	氢的摩尔分数	0.96
孔隙率	0.4	氧的摩尔分数	0.2
渗透率	2.36×10^{-12}	参考压力 (Pa)	1×10^5
电极电导率 [s/m]	222	对流换热系数 W/(m ² ·K)	6
膜电导率 [s/m]	9.825	发射率	0.3

1.4 网格划分和无关性研究

对于数值模拟研究, 需要进行网格无关性研究来排除网格划分对于数据的影响。模型网格采用六面体结构化网格, 由 comsol 软件划分。由于该模型核心反应区域在电极区, 因此对电极区域采取了加密, 以保证其精度。从图 1 中不难看出, 网格数量达到 134000 时, 增加网格数量, 流道出口的水浓度基本保持不变。因此, 为保证计算精度且节省计算资源, 本模型选择 134000 网格数进行计算。

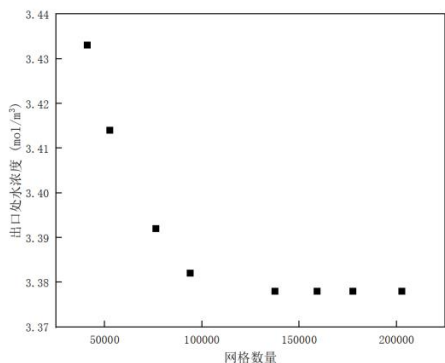


图 1 网格无关性验证

Fig.1 Effect of different mesh amounts on results

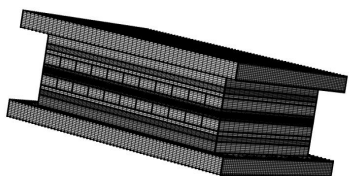


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Grid division diagram

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为了验证本文建立的三维 HT-PEMFC 模型的准确性, 将该高温燃料电池模型模拟的极化曲线与文献中的实验结果进行对比^[17]。

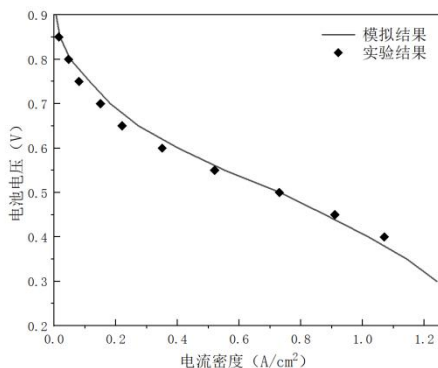


图 3 高温燃料电池模型验证

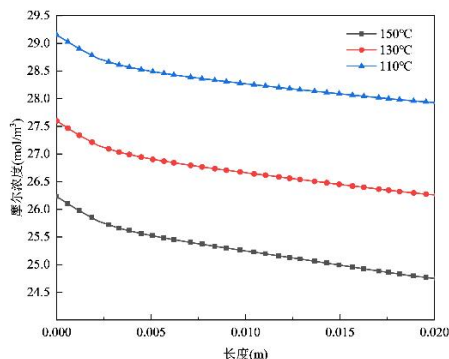
Fig.3 High temperature fuel cell model verification

从模型验证图 3 可以看出, 模型模拟的结果与实验结果趋势上保持一致, 在欧姆极化区域两者最为接近。由于实验过程中气体为非理想气体, 因此低电流区域的活化极化大于模拟中的活化极化, 但其最大误差为 5.1%。因此, 本文采用的仿真模型是可行的。

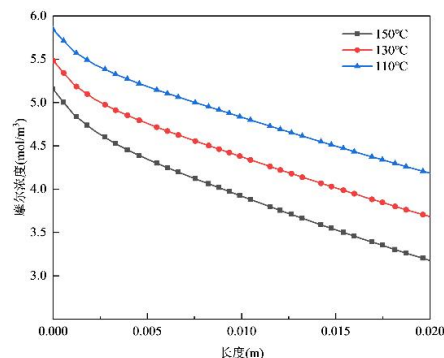
2.2 高温质子交换膜燃料电池物质分布研究

研究燃料电池内部的物质分布有助于了解燃料

电池的传输和扩散机理。通过改变进气温度来研究运行参数对反应物物质分布的影响, 结果如图 4 所示。



(a) 氢气



(b) 氧气

图 4 不同进气温度下反应物浓度分布

Fig.4 Distribution of reactant concentrations at different intake temperatures

从图 4 中可以看出, 氢气沿流道方向不断消耗, 在入口处下降速度较快。随着进口温度的变化, 氢气的最高浓度也随之变化, 从理想气体状态方程可知, 反应气体单位体积的浓度随温度的升高而降低, 因此氢气浓度的最高值出现在 110°C 进口温度下。由图中的数据可以看出, 三个温度下的氢气浓度沿着流道方向分别变化了 1.21mol/m³、1.36mol/m³、1.51mol/m³。150°C 进口温度下氢气进出口浓度变化最多, 而 110°C 进口温度下氢气浓度的变化最少。这是由于随着温度的升高, 氢气的扩散速度提高, 反应的速度也提高, 导致氢气消耗的更多。

氧气的浓度分布情况及变化趋势与氢气类似, 沿着流道方向浓度不断降低, 最高浓度出现在 110°C 进气温度条件下的入口处。由于温度的升高, 氧气的扩散速度加快, 电极的反应速度也增加, 导致 150°C 进口条件下出入口的浓度差值最大。同时, 与氢气稍有不同的是, 氧气浓度沿流道方向的变化整体上比氢气的变化略大, 这有可能是因为阴极侧

入口使用的氧气并非纯氧，而是空气，导致氧气的整体浓度偏低，且沿流道方向梯度较大。

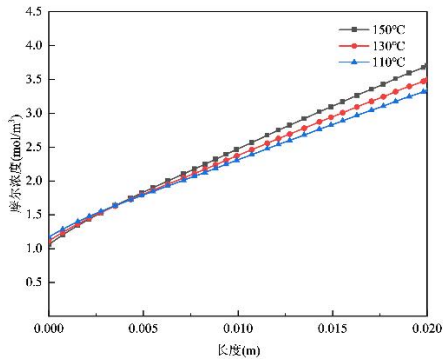
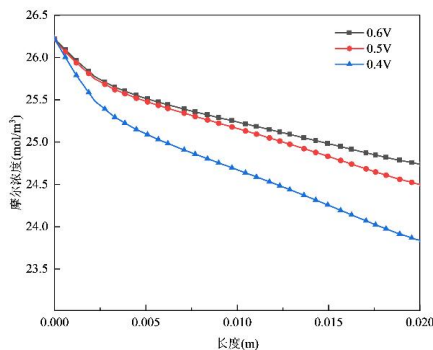


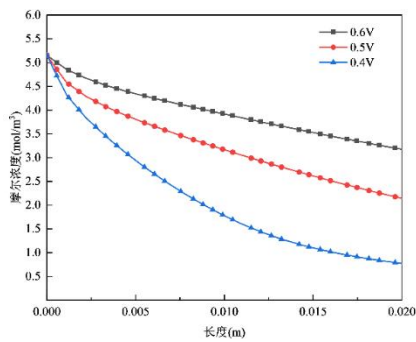
图 5 沿流道方向阴极 H₂O 摩尔浓度

Fig.5 Molar concentration of H₂O at the cathode along the flow channel

如图 5 显示了不同进口温度下阴极的水浓度，高温燃料电池的水在阴极产生，随着流道方向水逐渐累积，导致水的浓度在不断增加。进口处水的摩尔浓度随着温度的升高逐渐降低，符合气体状态方程。随着温度的升高，电池的反应速度逐渐增加，生成的水也逐渐变多，这就导致了图中曲线出现了相交。



(a) 氢气



(b) 氧气

图 6 不同电压下反应物浓度分布

Fig.6 Distribution of reactant concentration at different voltages

如图 6 (a) 显示了不同工作电压下氢气沿流道方向的摩尔浓度，从图中可以看出随着电池电压的下降，氢气的最小摩尔浓度也在不断下降。这是由于随着电压的降低，电池的电流密度升高，电化学反应速度增加，氢气的消耗也在增加。并且电压从 0.5V 降低到 0.4V 时氢气的消耗量远大于从 0.6V 降低到 0.5V，这体现了低电压对 H₂ 的浓度分布影响较大。

从图 6 (b) 可以看出氧气的浓度变化趋势与氢气基本相同，随着电压的下降，氧气的最低浓度也随之下降低，电压较低时，氧气的消耗速度更快。从图中可以看到，0.4V 电压下出口处的氧气浓度已经低至 0.42mol/m³，若电压继续降低，氧气将会出现不足，导致反应物“饥饿”现象产生。因此，若使用空气作为阴极进口气体，工作电压不应低于 0.4V。并且可以预测，若阴极通入纯氧气，电池性能会得到进一步提高，但是考虑到成本的因素，使用压缩空气更符合实际。

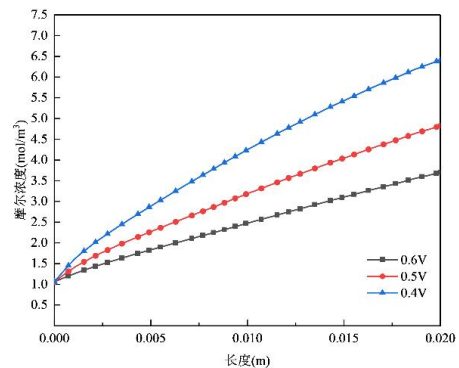


图 7 沿流道方向阴极 H₂O 摩尔浓度

Fig.7 Molar concentration of H₂O in the cathode along the flow channel

从图 7 中可以看出，随着电压的降低，水的浓度沿流道方向增加的越快。这是因为在低电压下，阴极的反应速度增加，反应产生的水也在增多。电压从 0.6V 变化到 0.4V，出口处水浓度由 3.9mol/m³ 增加到了 6.7mol/m³，对比图 2-3 改变进气温度的水浓度分布发现，电压的改变对水的摩尔浓度影响较大。

2.3 运行参数对高温燃料电池启动时间影响研究

高温质子交换膜燃料电池的工作温度在 100℃ 以上，选取膜电极最低温度为 100℃ 的时间为启动成功时间。不同运行参数下电池的启动时间如图所示：

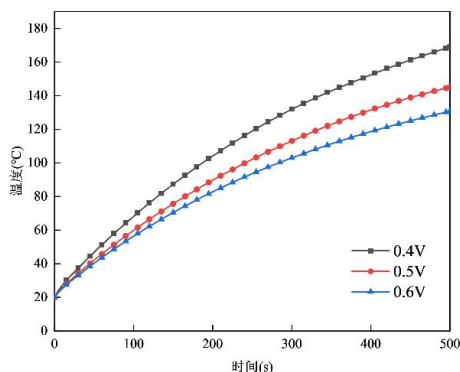


图 8 不同电压下的温度变化曲线

Fig.8 Temperature change curve under different voltages

如图 8 所示为不同电压下的温度变化曲线,从图中可以看出,启动电压从 0.6V 降至 0.5V 时电池到达 100℃ 所需时间缩短了 44s,从 0.5V 降低至 0.4V 时所需时间缩短了 58s,这表示低电压对电池温度的快速提升有很大帮助。这是由于随着电压降低,电流密度逐渐增加,阻抗产热增加,因此电池温度提升更快。但由图 4 可知,若电压继续降低,氧气将会出现“饥饿”现象,因此不应继续降低电压来提升启动时间。

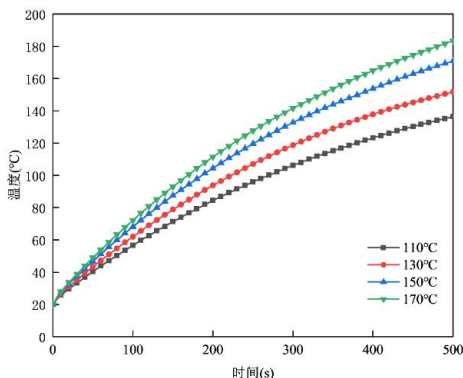


图 9 不同进气温度下的温度变化曲线

Fig.9 Temperature change curves at different intake temperatures

如图 9 所示为不同进气温度下温度变化曲线,从图中可以看出,随着进气温度的升高,电池最低温度到达 100℃ 的时间在不断缩短,但是缩短的幅度在不断减少。进气温度从 130℃ 变化到 150℃ 时,启动时间从 219s 变为 185s,缩短了 34s,而当进气温度从 150℃ 变为 170℃ 时,启动时间从 185s 变为 174s,仅缩短 11s。因此再提高进气温度对启动时间影响不大,可以看出 150℃ 是一个比较合适的入口温度。从上述结果可以看出,通过改变进气温度和启动电压,电池仍有较长时间处于 100℃ 的工作

温度下,即液态水仍有较长时间会存在于电池电极中,可能会对电池膜电极产生破坏。因此后续应考虑辅助加热方式,进一步缩短电池启动时间。

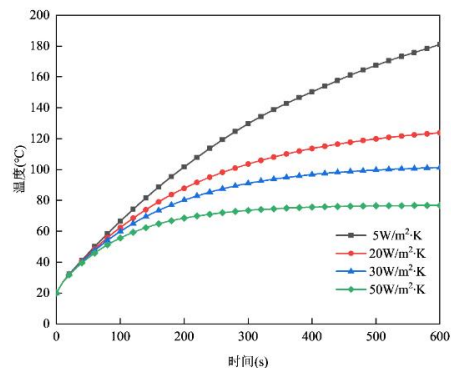


图 10 不同表面换热系数下的温度变化曲线

Fig.10 Temperature change curves with different surface heat transfer coefficients

在高温燃料电池的使用过程中存在不同的使用场景,导致电池表面的换热系数不同。换热系数的改变会对电池的启动产生较大影响,如图 10 为在 150℃ 进气温度、0.4V 的启动电压时不同换热系数下的电池温度变化曲线。从图中可以看出当电池从自然对流换热 ($h=5\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) 向强制对流换热 ($h=50\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) 变化时,电池的启动速度快速降低,当对流换热系数为 $5\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 时,电池的启动速度为 201s,换热系数提升至 $20\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 时,电池的启动时间增加为 279s。换热系数的增加导致电池向环境散热增加,降低了电池温度提升的速率。当换热系数为 $30\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 时,启动时间增加至 570s,且膜电极的最低温度稳定在 102℃,仅超过启动温度 2℃。当换热系数继续增加时,膜电极的最低温度将无法到达启动温度。换热系数增加为 $50\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 时,电池膜电极的最低温度仅为 77℃,远小于启动温度,电池启动失败。

3 结论

本文通过仿真软件建立了三维高温燃料电池模型,通过改变运行参数,探究运行参数对电池内物质分布及启动时间的影响,其主要结论如下:

(1) 改变入口温度及工作电压会影响物质的扩散与分布。随着温度的增加,氢气、氧气的消耗量以及水的生成量也在增加,氧气和氢气的最高浓度出现在最低进口温度的入口处。较低的工作电压会大幅增加反应气体的消耗量,会导致阴极氧气浓

度过低, 因此工作电压不宜低于 0.4V。

(2) 降低电压和增加进口温度可以缩短启动时间, 电压越低, 启动时间的缩短幅度越大。但随着入口温度的升高, 对启动时间的影响越来越小, 其中 150℃对于启动来说是一个比较合理的入口温度。通过调整电压和入口温度的方式来启动电池, 启动时间仍然较长, 仍需通过辅助加热来缩短启动时间。

(3) 电池表面换热系数的增加会较大程度的增加电池的启动时间。当电池的表面换热系数大于 30W/m²·K 时, 电池膜电极的最低温度无法到达 100℃, 电池将会启动失败。

参考文献:

- [1] STAFLL Iain, SCAMMA Darinl, ABAD Aitiaty Velazquez, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system [J] Energy Environment Science, 2019,12:463-491.
- [2] 韩笑,张兴华,闫华光.全球氢能产业政策现状与前景展望[J].电力信息与通信技术 2021,19(12):27-34.
- [3] 刘旭坡,张运丰,邓邵峰,等.燃料电池用聚合物质子交换膜的研究进展[J].电化学,2020,26(1):103-120.
- [4] Bose S, Kuila T. Nguyen TXH, Kim NH. Polymer membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell: Recent advances and challenges[J]. progress in polymer science, 2011,36(6):813-843.
- [5] Shin Dong Won, Guiver Michael D, Lee Young Moo, et al. Importance of Morphology on Ion Transport and Membrane Stability[J]. Chemical Reviews, 2017,117(6): 4759-4805.
- [6] 李进,李晓锦,鲁望婷,等.高温浸渍法 PBI-H₃PO₄ 复合膜特性及电池性能研究[J].电源技术,2013,37(5):758-760.
- [7] Cheddie D, Munroe N. Mathematical model of a PEMFC using a PBI membrane[J]. ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT,2006,47(11-12):1490-1504.
- [8] Su A, Ferng Y M, Hou J. Experimental and numerical investigations of the effects of PBI loading and operating temperature on a high-temperature PEMFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(9):7710-7718.
- [9] Jiao K, Li X. A Three-Dimensional Non-isothermal Model of High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Phosphoric Acid Doped Polybenzimidazole Membranes[J]. Fuel Cells, 2010,10(3):351-362.
- [10] Singdeo, Debanand Dey, Tapobrate Ghosh, et al. Modelling of start-up time for high temperature polymer electrolyte fuel cells[J]. Energy, 2011,36(10):6081-6089.
- [11] Rasheed, Raj Kamal Abdul Chan, Siew Hwa. Analysis of steady state heating configuration for high-temperature proton exchange membrane fuel cell based on multi-physical numerical modelling[J]. Electrochimica Acta, 2016,222:280-292.
- [12] Varghese, Geethu Babu, Venkatesh K P Joseph. A Numerical Investigation on Thermal Gradients and Stresses in High Temperature PEM Fuel Cell During Start-up[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021,175.
- [13] 张俊.高温质子交换膜燃料电池一氧化碳中毒与启动研究[D].重庆:重庆大学,2022.
- [14] 刘莹.基于波形流道的高温质子交换膜燃料电池性能模拟分析[D].沈阳:沈阳建筑大学,2022.
- [15] P Chippar, K Oh, D Kim, et al. Coupled mechanical stress and multi-dimensional CFD analysis for high temperature proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy 2013,38(18): 7715-7724.
- [16] Pianko-Oprych, T Zinko, Z Jaworski. A numerical investigation of the thermal stresses of a planar solid oxide fuel cell[J]. Materials, 2016,(10):814.
- [17] Ubong E, ShiZ, Wang X. Three-Dimensional Modeling and Experimental Study of a High Temperature Pbi-Based Pem Fuel Cell[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2009,156(10):1276-1282.