

以煤气化合成气为燃料的 平板式固体氧化物燃料电池性能

于建国, 王玉璋, 翁史烈

(动力机械与工程教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

Performance of Planar Electrode Supported Solid Oxide Fuel Cell With Syngas as Fuel

YU Jianguo, WANG Yuzhang, WENG Shilie

(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering (Shanghai Jiaotong University), Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Integrated gasification fuel cell combined cycle (IGFC-CC) is the optimal choice of coal utilization with its high energy efficiency and low pollution emission. Based on the commercial computational fluid dynamic software (CFX4.4) and program relating to chemical/electrochemical reactions, mass/heat transfer, current and electric potential, the performance of planar electrode supported solid oxide fuel cell (PES-SOFC) with syngas as fuel was investigated. As the result shows, under all calculation conditions, the temperature gradient is large and the maximum temperature difference is about 300 K in SOFC. And the decrement of molar fraction of hydrogen is larger than that of carbon monoxide. The variation of current density in electrolyte layer is relatively slow in the direction of gas flow but obvious in the direction vertical to gas flow. Under the same conditions, the Nernst potential of SOFC with syngas as fuel is lower than that with hydrogen as fuel but similar to that with natural gas as fuel.

KEY WORDS: solid oxide fuel cell (SOFC); syngas; output voltage; performance

摘要: 煤气化燃料电池联合发电系统以其高效率、低排放等优点成为煤炭高效清洁利用的理想方式之一。利用商用计算流体力学软件(CFX4.4)以及针对化学反应、电化学反应、传热传质和电流电势开发的程序,研究了煤气化合成气为燃料的平板式电极支撑高温固体氧化物燃料电池性能。在计算工况下,以煤气合成气为燃料,有较大温差,约为 300 K。沿气流方向,电解质层电流密度变化较缓慢,但在电池横截面

方向电流密度波动剧烈。在相同电流密度下,煤气化合成气为燃料的燃料电池 Nernst 电动势和功率比纯氢气情况要低,但和以天然气(CH₄)为燃料情况相当。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 煤气化合成气; 输出电压; 性能

0 引言

中国是世界上少数几个(还包括南非、印度等国)主要依赖煤炭资源的国家。传统利用煤炭的方式面临着低效率、高污染等问题,其中,烟尘和 CO₂ 排放量的 70%、SO₂ 的 90%、氮氧化物的 67%来自于燃煤,因此,需要优质和高效地利用化石能源。煤气化燃料电池联合循环(integrated gasification fuel cell combined cycle, IGFC-CC)是煤炭的最佳利用形式^[1]。虽然煤气化工艺相当成熟,但是其中空分等环节造成了大量的能量消耗,导致系统效率不高,在很大程度上阻碍了其市场化的进程。在 IGFC-CC 联合循环中,高效率的燃料电池在一定程度上提高了系统的效率。相比于其他燃料电池,固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)在从碳氢化合物燃料转化为电能和热的方面上有着高效率、低噪音和低污染排放的特点,有很强的可用燃料的灵活性,另外其在固定和移动设备上优良的发电效率、系统的简化性和长期稳定性都有很大的优势^[2-3]。此外,由于相对较高的工作温度(700~1 000 °C),它可以在阳极直接转化碳氢化合物^[4-5]。

很多研究人员开展了以煤气化合成气为燃料的 SOFC 性能的研究。K. Sasaki 等^[6]研究了在不同 H₂ 和 CO 比例情况下 SOFC 电流电压特性,以此来

基金项目: 上海市科委科技攻关计划(08DZ1200102); 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2007CB210102)。

Project Supported by the Key Technologies R&D Program of Shanghai (08DZ1200102); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB210102).

模拟煤气为燃料的 SOFC 电池性能。以煤气化合成气为燃料，SOFC 系统效率高于 50%，但是在煤中含有的多种微量组分会影响 SOFC 性能。O. A. Marina 等^[7]研究了煤气化合成气中含有磷对燃料电池阳极的影响。J. P. Trembly 等^[8]研究了去除煤气中微量组分的方法以及杂质对 SOFC 阳极的影响。

在前期工作中，本课题组基于开发的材料以及新型结构，进行了以 H₂ 和甲烷为燃料的实验^[9-10]和模拟计算^[4,10-16]。并进行了煤气化多联产系统的优化和仿真^[17]。本文对以煤气化合成气为燃料的平板式电极支撑 SOFC(planar electrode supported SOFC, PES-SOFC)进行模拟计算，利用商用计算流体动力学软件(CFX4.4)和对应化学和电化学开发的程序，构建平板式 PES-SOFC 全三维数学模型，得到温度、化学组分、局部过电势、电势和电流密度的详细空间分布，以期对 IGFC 系统的设计提供一定帮助。

1 计算模型

1.1 气体组分扩散

实际中 SOFC 电池堆是由很多相同结构的单电池叠加而成，每个单电池以串联方式连接，大多数单电池工作在相同的环境下，具有相同的性能，因此可以通过对单个电池的性能进行分析，来评估整个电池堆的性能。在 SOFC 单电池内部气体是由多组分构成的，空气(主要考虑 O₂ 和 N₂)流过阴极通道，合成气流过阳极通道，在电解质和电极接触面发生电化学反应，通过电解质在阴极和阳极之间进行质量和热量的交换。气体流动和传热传质的控制方程为全三维 N-S 方程组，湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型。在多孔介质的电极内，除了应用全三维 N-S 方程组外，还要结合应用具有相同孔隙率和渗透性的 Darcy's 方程。

在多孔介质中，气体组分的扩散经常用分子扩散或努森扩散来描述。当多孔介质的孔径小于气体分子的平均自由程时(即努森数 $K_n \gg 1$)，气体组分扩散主要是努森扩散；而当多孔介质的孔径大于气体分子的平均自由程时(即努森数 $K_n \ll 1$)气体组分扩散主要是分子扩散。对于 SOFC 燃料电池的多孔介质电极，一般 $K_n \approx 1$ ，因此必须要考虑分子扩散和努森扩散。混合物中组分 i 的质量扩散系数 $D_{i,m}$ 可由下式求得：

$$D_{i,m} = (1 - X_i) / \left(\sum_{j,j \neq i} X_j / D_{i,j} \right) \quad (1)$$

式中 X_i 为组分 i 的摩尔分数，组分 i 和组分 j 的二

元扩散系数 D_{ij} 由 Fuller 公式求解^[18]。

在直圆孔的多孔介质中，努森扩散系数 D_K 可以表示为

$$D_K = \frac{1}{3} d_p \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_i}} \quad (2)$$

式中： d_p 为多孔介质的孔径； R 为通用气体常数； T 为温度； M_i 为组分 i 的摩尔质量。

由于孔的曲折性和收缩性，气体组分的扩散系数应该通过孔的曲折系数和孔隙率来修正，其数值见表 1。那么总的有效扩散系数

$$D_{i,e} = \frac{\varepsilon_p}{\tau_p} \left(\frac{1}{D_{i,m}} + \frac{1}{D_K} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中： ε_p 为多孔介质的孔隙率； τ_p 为多孔介质的迂曲度。

表 1 SOFC 的几何尺寸及参数

Tab. 1 Geometry and performance parameters of SOFC

参数	数值
长度/mm	80
宽度/mm	80
阳极厚度/mm	1
阴极厚度/mm	0.05
电解质厚度/mm	0.03
连接器厚度/mm	0.5
阳极导热系数/(W/(m·K))	6.23
阴极导热系数/(W/(m·K))	9.6
电解质导热系数/(W/(m·K))	2.7
连接器导热系数/(W/(m·K))	9.6
阳极电阻率/(Ω·m)	$2.98 \times 10^{-5} \exp(-1392/T)$
阴极电阻率/(Ω·m)	$8.11 \times 10^{-5} \exp(600/T)$
电解质离子电阻率/(Ω·m)	$2.94 \times 10^{-5} \exp(10350/T)$
连接器电阻率/(Ω·m)	6.41×10^{-8}
阳极孔隙率	0.38
阴极孔隙率	0.5
阳极渗透性	1.0×10^{-12}
阴极渗透性	1.0×10^{-12}
阳极迂曲度	1.5
阴极迂曲度	1.5
阳极孔径/mm	2.0×10^{-6}
阴极孔径/mm	2.0×10^{-6}

为了考虑多孔介质内固体的导热系数，在多孔电极内的有效导热系数 λ 采用流体导热系数和固体导热系数的体积平均值：

$$\lambda = \varepsilon_p \lambda_g + (1 - \varepsilon_p) \lambda_s \quad (4)$$

式中： λ_g 为气体混合物的导热系数； λ_s 为等方向的固体导热系数，实验数据见表 1。

1.2 电化学反应模型

在电池内燃料和空气采取顺流形式，电化学反应模型用来计算电流功率输出和阴、阳极通道内流体控制体的摩尔组分。除非纯 CO 作为燃料气体供应于 SOFC 阳极，CO 在阳极通过电化学反应被氧化，否

则,混合气提供的 H_2 以及通过水转化反应生成的 H_2 足以提供电化学反应^[19]。因此,本文只考虑 H_2 参与电化学反应。

活化极化取决于电极表面的电极动力学,其直接导致电化学反应中参加反应的其他组分必须要克服的活化能。在阴极和阳极上都存在活化损失 η^{act} ,体现了电化学反应的动力学。在较高的工作温度下,电极反应迅速,活化损失通常很小;而当工作温度降低,它就开始变成影响电压下降的主因。活化损失通常由 B-V 方程来求解^[18]:

$$\frac{j}{j_0} = \exp\left(\alpha \frac{n_e F \eta^{\text{act}}}{RT}\right) - \exp\left[-(1.0 - \alpha) \frac{n_e F \eta^{\text{act}}}{RT}\right] \quad (5)$$

式中: j 为电流密度; j_0 为交换电流密度; n_e 为电子数; α 为电子传导系数; F 为法拉第常数。有:

$$j_0^a = 5.5 \times 10^8 \cdot \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{Ref}}} \cdot \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{Ref}}} \exp\left(-\frac{100 \times 10^3}{RT}\right) \quad (6)$$

$$j_0^c = 7.0 \times 10^8 \left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{Ref}}}\right)^{0.25} \exp\left(-\frac{120 \times 10^3}{RT}\right) \quad (7)$$

式中: j_0^a 和 j_0^c 分别为阳极和阴极交换电流密度; p_{Ref} 为参考压力; p_i 为各组分分压力。

非线性 B-V 方程利用 Newton-Raphson 方法进行数值求解,计算精度为 1.0×10^{-6} 。

通过以 H_2 为燃料,在进气温度为 1273.15 K、进口燃料流量为 300 mL/min(标准状态)、进口空气流量为 1000 mL/min 的工况条件下,对比计算结果与同等条件下的实验结果,本文所用模型得到了很好的验证,详细对比情况见文献[10]。虽然煤气合成气中甲烷的含量很少,对结果影响不大,但是,除了电化学反应,SOFC 阳极中还考虑了 CO 的水转化反应以及甲烷的蒸汽重整反应,其反应速率及平衡常数等参数见文献[15]。基于以 H_2 以及甲烷为燃料的数值计算,电流密度为 4000 A/m² 时有较好的功率密度输出,因此,本文中以煤气合成气为燃料同样选取电流密度为 4000 A/m² 的工况条件。

2 结果和讨论

2.1 SOFC 结构及进气条件

图 1 为平板式电极支撑 SOFC 结构示意图,其几何尺寸及实验测量所得各部件的性能见表 1^[15]。在阳极,燃料为煤气合成气,由 CO 、 H_2 、 CO_2 、 H_2O 和 CH_4 等组成,其中,CO 摩尔分数为 39.58%, H_2 的摩尔分数为 30.28%, CO_2 的摩尔分数为 10.78%, H_2O 的摩尔分数为 16.45%, CH_4 的摩尔分

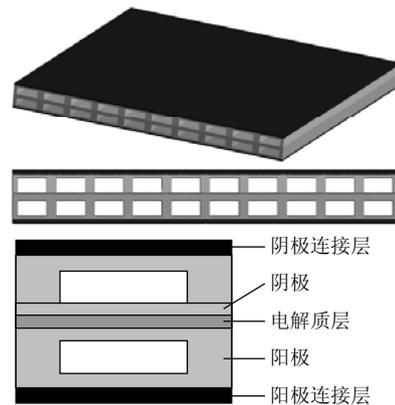


图 1 平板式电极支撑 SOFC 结构示意图
Fig. 1 Schematic view of planar electrode supported SOFC

数为 0.079%。其中,甲烷含量很少,对燃料电池性能影响有限;在阴极,氧化剂为空气(主要为 O_2 和 N_2 的混合物)。在常压下,工况温度为 1273.15 K,阳极燃料进口质量流率为 4.58×10^{-6} kg/s,阴极空气进口质量流率 4.30×10^{-5} kg/s,设定燃料利用率为 80%。

本文模拟计算煤气合成气成分来自德士古炉 (Texaco/Illinois 6) 产出煤气成分^[17,20],不考虑微量杂质影响。

2.2 温度分布

对于由金属陶瓷构成的多孔介质电极以及电解质来说,温度对其电阻率的影响较大,因此,提高燃料电池的温度有助于降低固体氧化物燃料电池的欧姆过电势。但是由于固体氧化物燃料电池陶瓷结构的易碎性,其对温度梯度的承受力以及敏感度要求燃料电池的温度分布要尽量均匀,温度梯度要尽可能降低。同时,过高的温度会造成具有不同膨胀特性的材料之间出现难以密封的问题。因此,有必要对固体氧化物燃料电池的温度特性进行研究,并根据其温度分布特征,对今后电池设计以及燃料组分提供一定选择依据。

图 2 是沿流动方向 SOFC 的温度分布特征。由图 2 可以看出,沿气体流动方向,电池温度逐渐升高,在阳极近出口位置达到最高。原因可能是,电化学反应以及水转化反应均为放热反应,沿着流动方向,热量不断积累,温度逐渐上升。在气体流道区域,图 2(a)中所示,在距离入口相同距离,阳极的温度要远远高于阴极,但是,阳极在该方向的温度梯度要小得多。其原因可能是,在气体流道区域,对流换热起到主要作用,而阴极中空气的流量要远远高于阳极中燃料的流量,因此,在阴极中形成较

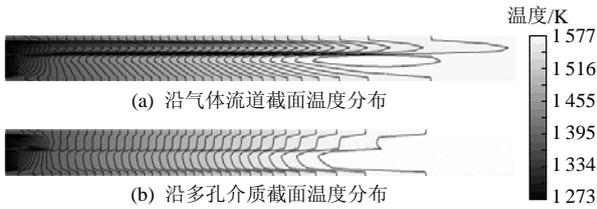


图 2 沿流动方向 SOFC 温度分布

Fig. 2 Distribution of temperature along gas flow

大的温度梯度。在多孔介质区域，图 2(b)中所示，温度梯度情况刚好相反。原因可能是，在多孔介质区域，以导热为主，温度梯度的大小主要由介质的导热系数决定。相比较阴极来说，阳极材料的导热系数较小，因此在阳极形成了一定的温度梯度。

图 3 显示了电解质层的温度分布。相比较多孔电极来说，电解质层所产生的欧姆过电势要大得多，对温度敏感性也较强。因此，有必要单独分析电解质层的温度分布。由于电解质层非常薄，本文计算中取 30 μm，因此，温度的不均匀分布很容易造成电解质层的断裂，从而影响燃料电池整体的性能。从图中可以看出，电解质层温度沿着气流方向逐渐上升，在出口附近到达最大值，并且在出口附近上升趋势逐渐降低。原因可能是，在燃料电池入口附近，煤气合成气中充足的 H₂ 以及 CO 保证电化学反应充分进行，电池温度逐渐升高，而在近燃料电池出口附近，燃料消耗殆尽，电化学反应减弱，因此上升幅度减缓。

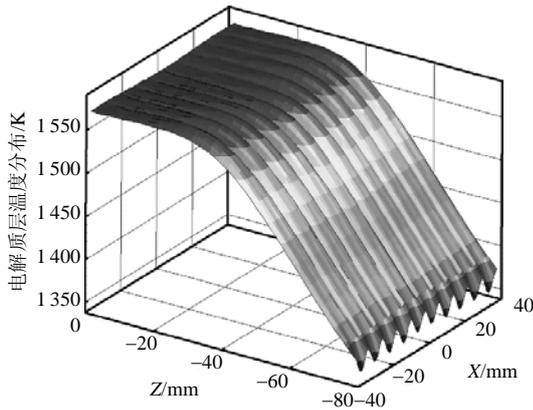


图 3 SOFC 电解质层上温度分布

Fig. 3 Distribution of temperature in electrolyte layer

2.3 气体组分分布

在煤气化合成气中，含量极少的甲烷在充足的催化剂作用下，参与蒸汽重整反应，逐渐消耗尽。而主体燃料 H₂ 以及 CO 参与电化学反应，分别生成水和 CO₂。与此同时，CO 与水蒸气经过水转化反应，生成 H₂ 以及 CO₂。如图 4 所示，随着反应的进行，CO 含量随之减少，而 CO₂ 含量不断增加。

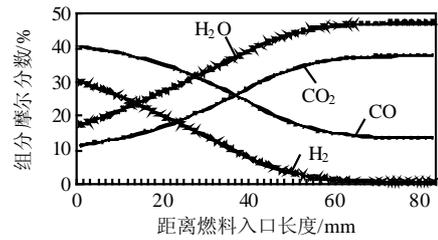


图 4 沿气流方向 SOFC 阳极组分分布

Fig. 4 Distribution of species in anode along gas flow

参与电化学反应的 H₂，在混合气中摩尔分数逐渐下降。相较于 CO，H₂ 消耗幅度较大，几乎消耗尽，而 CO 也消耗大约 25% 左右。由于 CO 的水转化反应为放热反应，沿着流动方向不断升高的温度对该反应起到一定的抑制作用，因此，阳极中 CO 和水蒸气并未完全发生反应。燃料电池出口气体主要含极少量的 H₂、13.7% 的 CO、37.9% 的 CO₂ 以及 47.5% 的水蒸气。

2.4 电流密度分布

电解质层电流密度分布受到浓度过电势、欧姆过电势、活化过电势、电池结构等多重因素影响。图 5 为电解质层电流密度总体分布图，由图可以看出，沿垂直于气体流动方向，电流密度波动比较明显，引起该波动的主要原因之一可能是在气体流动区域与多孔介质区域到电解质层的扩散程度不同，同时，由于电流必须绕过气体流动而在固体导电介质中传输，因此，气体流道的尺寸也影响电流密度分布。对于浓度过电势而言，主体流动区域相比较多孔介质区域来说气体浓度更高，因此扩散更容易，引起的浓度过电势就小，而从主体流动区域扩散到相邻多孔介质区域然后再扩散到电解质层所引起的浓度过电势较大，电流密度沿该方向呈波动趋势。因此，选取一定的电极孔隙率以及合理的气体流道尺寸，对于提高气体扩散效果，降低浓度过

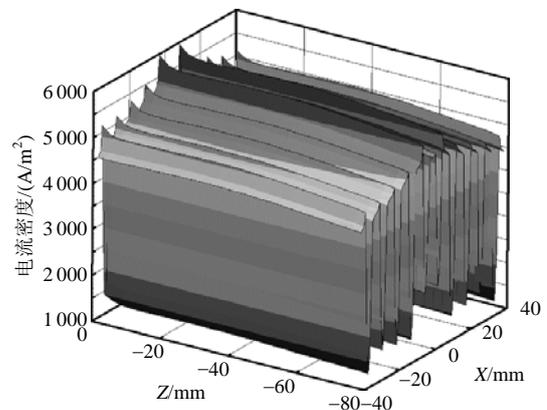


图 5 SOFC 电解质层电流密度分布

Fig. 5 Distribution of current density in electrolyte layer

电势,优化电流密度分布有重要作用。但是电极孔隙率并不能选取过大,过大的孔隙率会降低电极的机械强度。

沿燃料流动该方向,电解质层平均电流密度变化较不明显,变化量在 2.5% 之内。随着燃料流动方向,平均电流密度逐渐增加。主要原因可能在于,随着燃料的流动,电池温度逐渐升高,欧姆过电势及活化过电势逐渐降低,因此平均电流密度在该方向逐渐升高。在出口附近,温度升到最大值,平均电流密度最高。但是沿着燃料流动方向,平均电流密度增幅逐并不明显,原因可能是由于电化学反应的进行,燃料逐渐消耗,因此浓度过电势增加,造成平均电流密度增幅降低。

2.5 电势分布

图 6 显示了燃料电池多孔电极的电势分布,分别包含阴极电势分布和阳极电势分布。图 6(a)显示了多孔介质阴极总体的电势分布,可以看出,多孔介质中心区域电势差很小,而气体通道附近电势差明显。图 6(b)显示了多孔介质中心区域电势差的细微变化,其差别在 1%V 左右。图 6(c)显示了多孔介质阳极的电势分布,电势差变化也比较小,相比较而言,在气体通道壁面附近,电势差相对较大。造成该差别的主要原因可能是,在多孔介质电极中,电势差的形成主要是欧姆过电势的影响,在多孔电极中心区域,欧姆过电势较低,因此形成的电势差也就小,而在近气体通道壁面附近,由于电流需绕过该区域,在一定程度上就形成了较大的电流,因此电势差也就明显。在设计燃料电池结构时,既要考虑气体通道过小带来的浓度过电势增大的影响,又要考虑气体通道过大带来的欧姆过电势的影响。

煤气化合成气应用于固体氧化物燃料电池,对于高效利用能源有着重要的作用,但相比较 H_2 以

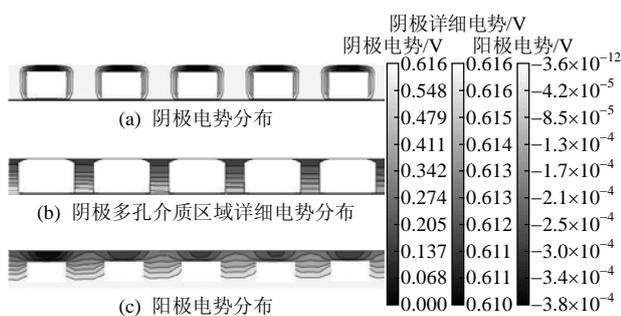


图 6 SOFC 多孔介质区域电势分布
Fig. 6 Distribution of electric potential

及天然气(主要成分 CH_4)作为燃料而言,在 Nernst 电动势方面有一定的差别。由图 7 可以看出,在相同电流密度($4000A/m^2$)情况下, H_2 作为燃料得到的 Nernst 电动势最大,煤气合成气和天然气作为燃料情况基本相似,平均 Nernst 电动势分别为 0.704 和 0.763 V,以煤气合成气为燃料平均 Nernst 电动势略小。在燃料入口附近,以煤气合成气为燃料的 Nernst 电动势高于以天然气为燃料的 Nernst 电动势,而在电池中部,情况正好相反。其原因可能是,煤气合成气中的 H_2 以及 CO 为电化学反应提供了充足的反应物,使 SOFC 在入口附近有较高的 Nernst 电动势,而以天然气为燃料的 SOFC 电化学反应所需反应物要通过强烈吸热的蒸汽重整反应得到,因此,在 SOFC 中部区域,甲烷重整提供充足的 H_2 使其 Nernst 电动势高于以煤气为燃料的 Nernst 电动势。

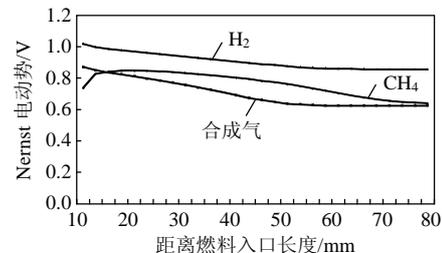


图 7 相同电流密度($4000 A/m^2$)分别以 H_2 /合成气/天然气为燃料情况下,SOFC 的 Nernst 电动势
Fig. 7 Comparison of Nernst potential with hydrogen/syngas/natural gas as fuel

3 结论

本文研究了以煤气化合成气为燃料的平板式电极支撑高温固体氧化物燃料电池性能,分析了其温度分布、组分分布、电流密度分布以及电势分布,可以得出以下结论:

1) 在计算工况下,燃料电池有较大的温度差,最大温差达到 300 K,而其在电解质层上也达到了 200 K。

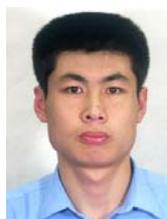
2) 在计算工况下,随着反应的进行, H_2 消耗幅度要高于 CO ,并且 CO 并未完全转化。

3) 多孔介质中的气体组分扩散以及电极结构对电流密度有一定影响,因此选取最优的电极孔隙率以及气体流道尺寸,对燃料电池性能提高有重要作用。

4) 根据该电池结构以及性能参数,在同等工况条件下,煤气化合成气作为燃料,SOFC 的平均 Nernst 电动势低于以 H_2 作为燃料情况,也比天然气作为燃料情况略低。

参考文献

- [1] Eric G. Technical Assessment of an integrated gasification fuel cell combined cycle with carbon capture[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 4307-4334.
- [2] Robert J K, Zhu H Y, David G. Solid-oxide fuel cells with hydrocarbon fuels[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2005, 30(II): 2379-2404.
- [3] 王桂兰, 杨云珍, 张海鸥. 固体氧化物燃料电池三维热流电化学分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 99-103.
Wang Guilian, Yang Yunzhen, Zhang Haiou. Three-dimension analysis of thermo-fluid electrochemical for solid oxide fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 99-103(in Chinese).
- [4] Yu J G, Wang Y Z, Xu L, et al. Development and investigation on the study state of solid oxide fuel cell and hybrid power system[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: SUPERGEN 09, 2009: 1-5.
- [5] Peters R, Dahl R, Kluttgen U, et al. Internal reforming of methane in solid oxide fuel cell systems[J]. Journal of Power Sources, 2002, 106(1-2): 238-244.
- [6] Sasaki K, Hori Y, Kikuchi R, et al. Current-voltage characteristics and impedance analysis of solid oxide fuel cells for mixed H₂ and CO gases[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2002, 149(3): A227-A233.
- [7] Marina O A, Coyle C A, Thomsen E C, et al. Degradation mechanisms of SOFC anodes in coal gas containing phosphorus[J]. Solid State Ionics, 2010, 181(8-10): 430-440.
- [8] Tremblay J P, Gemmen R S, Bayless D J. The effect of IGFC warm gas cleanup system conditions on the gas-solid partitioning and form of trace species in coal syngas and their interactions with SOFC anodes[J]. Journal of Power Sources, 2007, 163(2): 986-996.
- [9] 王玉璋, 惠宇, 于建国, 等. 平板式固体氧化物燃料电池 Ni/YSZ 阳极上甲烷重整过程实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 104-108.
Wang Yuzhang, Hui Yu, Yu Jianguo, et al. Experimental investigation on methane steam reforming over a Ni/YSZ anode of planar solid oxide fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 104-108(in Chinese).
- [10] Wang Y Z, Yoshiba F, Watanabe T, et al. Numerical analysis of electrochemical characteristics and heat/species transport for planar porous-electrode-supported SOFC[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(1): 101-110.
- [11] 于建国, 王玉璋, 惠宇, 等. 阳极孔隙率对固体氧化物燃料电池性能影响的数值分析[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(2): 246-251.
Yu Jianguo, Wang Yuzhang, Hui Yu, et al. [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(11): 247-251(in Chinese).
- [12] 王玉璋, 于建国, 惠宇, 等. 新型平板式固体氧化物燃料电池的开发和性能分析[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 949-954.
Wang Yuzhang, Yu Jianguo, Hui Yu, et al. Development and performance analysis of new planar solid oxide fuel cell[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 949-954(in Chinese).
- [13] 于建国, 惠宇, 王玉璋, 等. SOFC 阳极上甲烷重整过程的性能和有效动力学模型[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(5): 777-782.
Yu Jianguo, Hui Yu, Wang Yuzhang, et al. Performance and effective kinetic models of methane steam reforming over a Ni-YSZ anode of planar SOFC[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(5): 777-782(in Chinese).
- [14] Yu J G, Wang Y Z, Hui Y, et al. The effect of anode porosity on the performance of planar electrode supported solid oxide fuel cell[C]// Proceedings of ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference. Shanghai, China: MNHMT2009 2, 2009: 259-264.
- [15] Wang Y Z, Yoshiba F, Makoto K, et al. Performance and effective kinetic models of methane steam reforming over Ni/YSZ anode of planar SOFC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(9): 3885-3893.
- [16] Wang Y Z, Yoshiba F, Watanabe T. Performance analysis of planar porous-electrode-supported SOFC[C]//Proceedings of the International Conference on Clean Coal Technology and Fuel Cells, Yokosuka, Japan: CRIEPI, 2006: 10.
- [17] Xu L, Wang Y Z, Weng Y W, et al. Simulation and optimization on gasifier in the poly-generation system with IGCC[C]//Proceedings of the International Conference on Clean Coal Technology and Fuel Cells. Daejeon, Korea: ICEPCO, 2009: 5.
- [18] Chan S H, Khor K A, Xia Z T. A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity of the change of cell component thickness[J]. Journal of Power Sources, 2001, 93(1-2): 130-140.
- [19] Andre W, Bastian S, Axel C, et al. Oxidation of H₂, CO and methane in SOFCs with Ni/YSZ-cermet anodes[J]. Solid State Ionics, 2002, (152-153): 543-550.
- [20] Simbeck D R, Korens N, Biasca F E, et al. Coal Gasification guidebook: status, applications, and technologies[EB/OL]. California: SFA Pacific, Inc. 1993[2010-05-01]. <http://my.epri.com>.



于建国

收稿日期: 2010-06-11。

作者简介:

于建国(1983), 男, 博士研究生, 主要研究方向为燃料电池及 IGFC 发电系统, ferret@sjtu.edu.cn;

王玉璋(1973), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多相流、传热传质、燃料电池及氢能利用, yuzhangwang@sjtu.edu.cn;

翁史烈(1932), 男, 中国工程院院士, 主要研究方向为热力系统的稳态动态性能及计算机仿真。

(责任编辑 王庆霞)