第 49 卷第 1 期
2021 年 1 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 44，No. 1
Junuary，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200580

固体氧化物燃料电池堆的稳定工况特性

刘少名[1]，邓占锋[1]，宋 洁[1]，梁丹曦[1]，康 伟[1]，孙晓彤[1]，骆 婷[2]，杨小春[3]，王绍荣[3]

(1. 先进输电技术国家重点实验室，全球能源互联网研究院有限公司，北京 102209；
2. 中国科学院上海硅酸盐研究所，上海 201800；3. 中国矿业大学化工学院，江苏 徐州 221116)

摘 要：以大面积电池和千瓦级电堆为对象，研究了温度、燃料成分、流量等对阳极支撑型电堆性能的影响。结果表明：温度的影响最大，复数阻抗谱中高频弧对应的活化能最高；欧姆阻抗的活化能较低，表明其不全是离子电导的电阻，还包括双极板的表面电阻和可能的接触电阻。利用干氢气燃料测试时，在开路电压附近表现出较大的活化极化，且其活化能很小，表明该活化极化的速率控制步骤并非是电荷转移过程，而是对应某种表面扩散过程。模拟重整气燃料测试过程中活化极化不明显，但开路电压较低，性能比氢气燃料差。随着电堆工作电流的增加，燃料尾气的温度增加，表现出明显的热效应。

关键词：固体氧化物燃料电池；电堆；变工况；碳基燃料
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)01–0026–08
网络出版时间：2020–12–21

Performance of Solid Oxide Fuel Cell and Stack for Stable Operation

LIU Shaomin[1], *DENG Zhanfeng*[1], *SONG Jie*[1], *LIANG Danxi*[1], *KANG Wei*[1], *SUN Xiaotong*[1], *LUO Ting*[2], *YANG Xiaochun*[3], *WANG Shaorong*[3]

(1. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd), Beijing 102209, China; 2. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
3. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: Effects of temperature, fuel composition and flow rate on the performance of an anode-supported cell and a stack were studied. The results show that in the complex impedance spectrum, the activation energy corresponding to high frequency arc is the highest; that of the Ohmic loss is lower, which indicates that not only the ionic conductivity resistance, but also the surface resistance and possible contact resistance are included. With dry hydrogen as fuel, the results show that the activation polarization near the open circuit voltage is large and the activation energy is very small, which indicates that the rate control step of the activation polarization is not a charge transfer process, but a surface diffusion process. For simulated reforming gas fuels, the results show the activation polarization is small, but the open circuit voltage is lower, so that the performance is worse than that of hydrogen fuel. With the increase of the stack current, the temperature of the fuel exhaust gas increases, showing obvious thermal effect.

Keywords: solid oxide fuel cell; stack; various operating condition; carbon containing fuel

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种直接将化学能转化为电能的能量转化装置[1–2]。其能量转化效率高，发电效率可达 60%，热电联供效率可达 85%以上，且可以使用多种燃料，因此受到了人们的广泛关注[3–6]。SOFC 的运行温度高，电催化活性好，因此不需要使用贵金属催化剂，材料成本低。由于其低噪音的优点，SOFC 不扰民，作为分布式电源具有广泛的应用前景。此外，我国稀土资源具有一定的优势，SOFC 的制造成本会低于发达国家，具有很大的产业化潜力，但核心技术必须取得突破[7]。

收稿日期：2020–08–05。　修订日期：2020–09–17。
基金项目：国家电网有限公司科技资助项目-固体氧化物燃料电池发电系统关键技术研究(SGRIDLKJ[2017]720)。
第一作者：刘少名(1986—)，男，博士。
通信作者：王绍荣(1964—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–08–05.　**Revised date:** 2020–09–17.
First author: LIU Shaomin (1986–), male, Ph.D.
E-mail: lsm-1234@163.com
Correspondent author: WANG Shaorong (1964–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: srwang@cumt.edu.cn

目前我国的 SOFC 技术现状与发达国家相比还有很大差距。国际上已经有了成熟的产品并在开拓市场，而我国目前还停留在样机开发阶段。前期很多研究集中在材料和工艺方面的基础研究，更多地关注纽扣电池的功率密度[8−10]，对大面积电池的性能、寿命、运行工况等的研究非常少。考虑到电堆是系统集成的心脏，电堆的各种性能参数及其稳定性是影响系统功能的最重要因素，本工作以电堆为对象开展研究，主要从运行温度、燃料成分与流量变化等方面探讨电堆运行的规律。

SOFC 电堆具有重要的“承上启下”的作用。它由单电池、双极板串联而成，并依靠密封材料实现与周围大气的隔离，得到独立的空气通道和燃料通道。电堆完全综合了单电池材料、合金双极板材料、密封材料与技术、电堆结构设计和电堆控制技术的研究基础。

1　实验

本研究的对象是中国科学院上海硅酸盐研究所自主研发的阳极支撑型单电池和全球能源互联网研究院有限公司提供的采用相似结构的阳极支撑型单电池构成的千瓦级电堆。单电池的电解质为 8%(摩尔分数)氧化钇稳定的氧化锆(YSZ)，阳极为 Ni-YSZ，阴极与电解质之间的阻隔层为 $Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9}$(CGO)，阴极为 $La_{0.8}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_3$(LSCF)与 CGO 的复合电极，阴极活性面积为 55 cm^2。图 1 为测试后电堆中的电池结构断面显微照片。电堆由 60 片相似结构的单电池构成，工作温度 750 ℃。所采用的电池阳极和阴极均具有足够的孔隙率；电解质完全致密，厚度约 8 μm；阻挡层有少量孔隙，厚度约 3 μm。各层之间结合紧密，没有分层现象。

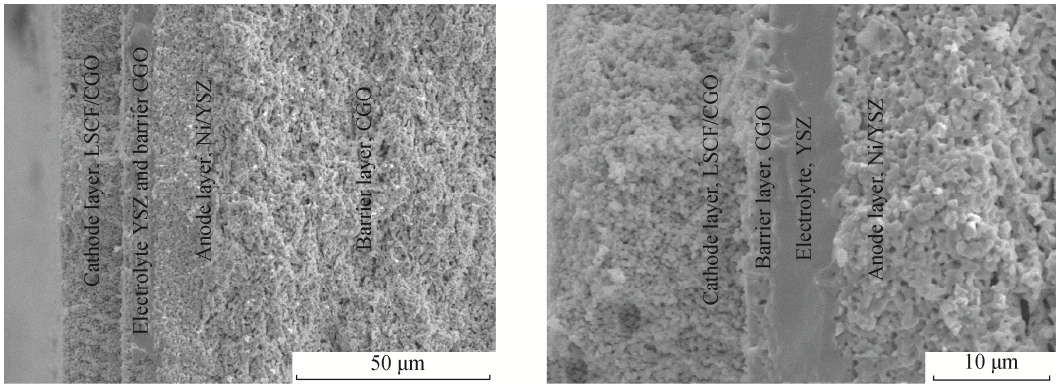


图 1　测试后的电池结构

Fig. 1　SEM images of the tested single cell

SOFC 工作在 750 ℃，为完成实验需要将电堆置入电炉中进行升温。工作气体需要提前预热，以便保证进入电堆时温度不能低于 700 ℃。电堆的密封通常采用玻璃陶瓷密封材料，具有脆性特征，因此需要保持机械压力。电堆的电流和电压引出线需要正确地反映电堆的电信号。因此电流线与电压线需要分离。采用图 2 所示的方法，利用高温螺栓对电堆施加机械压力，利用盘管换热器对工作气体进行预热，同时将工作气体的接入和接出端口引出到冷端，用法兰与外界进行对接。电流的引出由正负极上的接线柱实现，电压的引出直接从端板实现，避免测试时由于电流回路上的电阻引起的电压损失。

将图 2 所示的电堆组合放入电炉中，控制升降

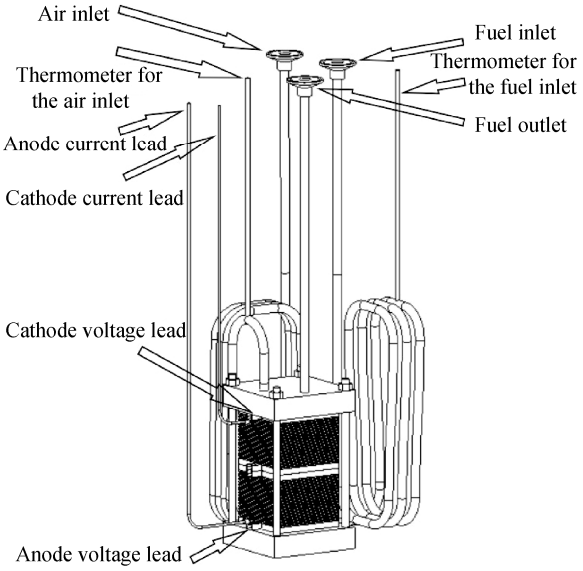


图 2　电堆的预热、加压和电流收集示意图

Fig. 2　Schematic of the testing setup of the stack

温程序及电堆中的气氛，避免阳极的氧化还原循环。单电池的测试在直流电源的帮助下，通过电子负载放电，同时测试复数阻抗谱(Zahner IM6eX)。电堆的测试无需直流电源的帮助，直接采用成套的电子负载和阻抗谱仪(KFM2150-PLZ1004)进行。

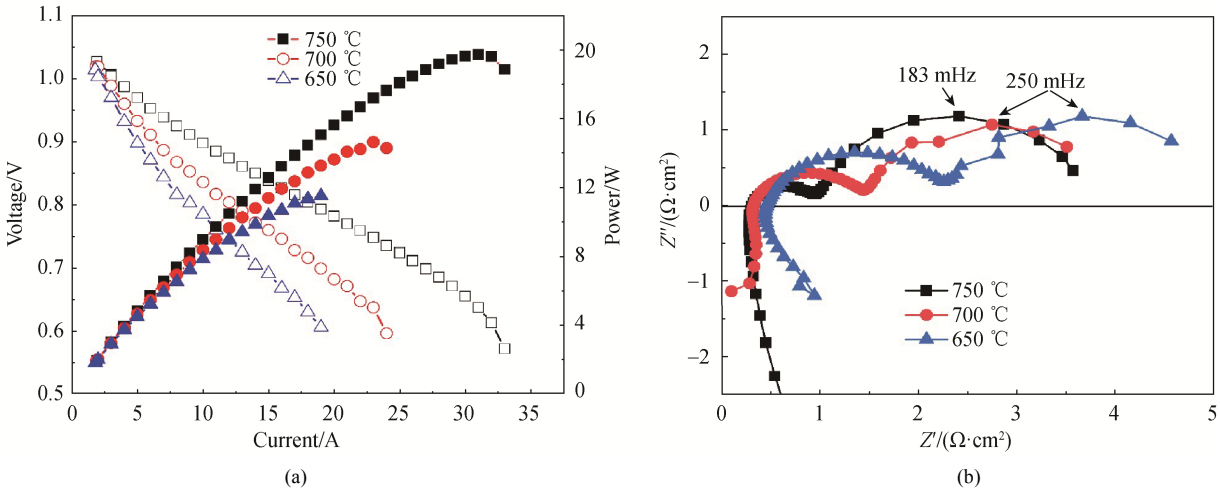
测试前的密封、检漏、N_2吹扫置换以及电池和电堆还原的步骤根据文献要求和国家标准的规定执行[11]。测试平台配置了必要的传感报警设备，保证测试工作的安全进行。工作气体流量通过质量流量计进行计量，对于模拟的碳基燃料采用质量流量计进行配气混合后通入电堆。由于在预备实验时水蒸气的进样出现明显波动，导致电压信号紊乱，难以测出阻抗谱，所以在本实验中燃料气体直接采用干气体，忽略了加湿过程。

针对设置的各种测试条件，重点进行 *I–V* 工作曲线和复数阻抗谱的测试，以期全面地分析电堆性能。

2 结果与讨论

2.1 温度对于电池性能的影响

控制 H_2 流量 0.3 L/min 空气流量 1.2 L/min 稳定，设定工作温度为 750、700、650 ℃，按照降温顺序分别测试了不同温度下的单电池性能。图 3 为单电池的电流-电压曲线(图 3a)和复数阻抗谱(图 3b)。从图 3 可见，温度对单电池的性能有显著影响，而且最大的影响在于阻抗谱中的高频弧，即电化学极化阻抗。温度对电解质的电阻有较大影响，特别是 650 ℃的欧姆阻抗比较大，这是由于单电池采用了 YSZ 电解质，其离子电导的活化能较高，导致中低温下的电阻增加。低频的扩散弧总体比较大，但是其随着温度的变化并不显著，表示该过程的活化能低，对应某一扩散过程。由于该电池属于阳极支撑型，阳极相对较厚，因此推测该低频弧主要来自于阳极。图 4 为电堆的电流-电压曲线(图 4a)和复数阻抗谱(图 4b)。

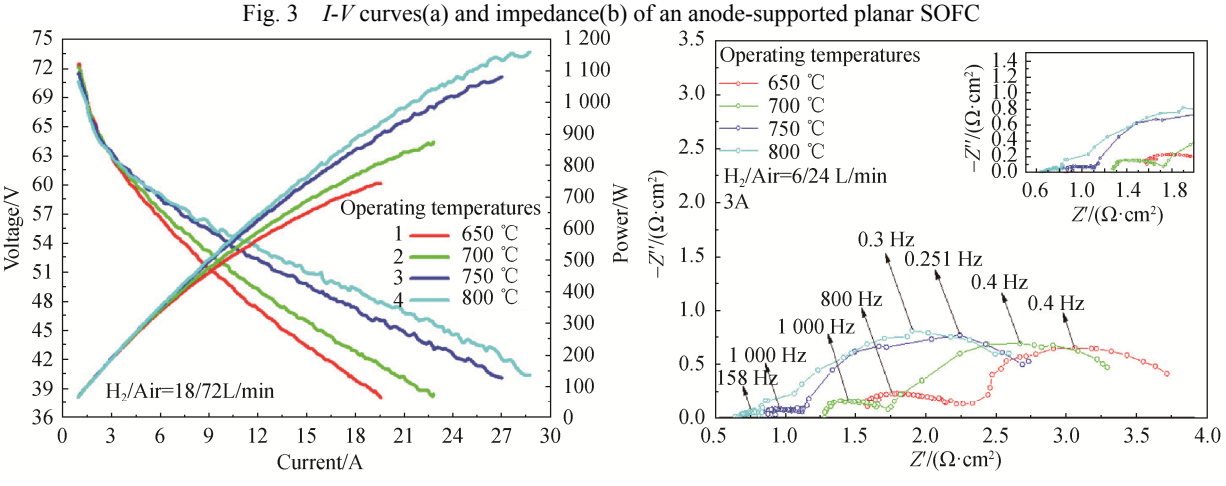


(a) (b)

Z′ and *Z″* are real part and imaginary part of impedance, respectively.

图 3 阳极支撑平板式 SOFC 中的 *I–V* 曲线(a)和阻抗谱(b)

Fig. 3 *I-V* curves(a) and impedance(b) of an anode-supported planar SOFC



(a) (b)

图 4 阳极支撑平板式 SOFC 电堆的 *I–V* 曲线(a)和阻抗谱(b)

Fig. 4 *I-V* curves(a) and impedance(b) of an anode-supported planar SOFC stack

表 1　不同温度下电堆的极化阻抗

Table 1　Polarization resistance of the SOFC stack at different temperatures

Temperature/℃	Polarization resistance/(Ω cm^2)			
	Ohmic polarization	Polarization at high frequency	Polarization at low frequency	Total polarization resistance
650	1.50	0.80	1.72	2.52
700	1.28	0.50	1.97	2.47
750	0.88	0.27	2.00	2.27
800	0.65	0.15	2.05	2.20

与单电池的性能相比较，发现其影响规律是一样的。温度的影响非常明显，直接影响了 *I*–*V* 曲线的斜率和最大功率密度。而在阻抗谱的构成中，高频截距对应的欧姆阻抗和高频范围的极化阻抗对温度非常敏感，低频的大圆弧对温度不敏感。

对图 4b 的阻抗谱进行解析，高频截距对应的欧姆阻抗对应了电解质的电阻、双极板的表面电阻和可能的接触电阻，其随着温度的降低而显著增加(见表 1)，高频的极化阻抗对温度也非常敏感，但总体而言所占的比例不大。低频的阻抗随温度变化不敏感，甚至低温下反而略有降低(该异常现象可能是由于圆弧不完整而带来的误差效应)。为了进一步分析各阻抗随温度的变化，对表 1 的数据进行 Arrhenius 曲线分析，得到图 5。

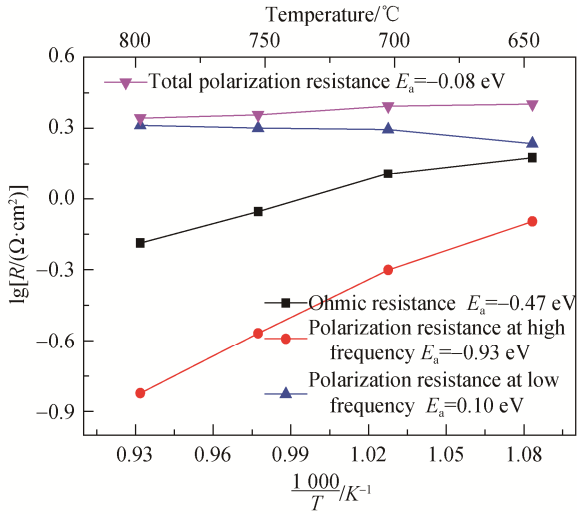


图 5　各阻抗构成成分的 Arrhenius 曲线

Fig. 5　Arrhenius plots for each impedance components

从图 5 可以看出低频弧对阻抗贡献最大，是影响电堆性能的主要因素，而且其随着温度的变化不大，意味着即使升高温度也不会有大的改善。欧姆阻抗是第 2 大影响因素，但其随着温度升高而逐渐变小。从活化能数据看，该活化能比普通电解质的离子传导活化能要小(YSZ 电解质的电导活化能约 0.7 eV[12])，说明其构成比较复杂，可能包含了双极板的氧化膜电阻和接触电阻等电子传导成分，表现为总电阻的表观活化能。高频弧的极化电阻的活化能比较正常[13]，可能对应电极上的反应。但是其对总阻抗的贡献并不大，说明该电堆的电极材料活性足够高，且电极构造比较合理。在 650 ℃高频极化阻抗值基本可以接受，说明该电堆如果能够在欧姆阻抗和低频弧方面有所突破的话，还可以进一步提高性能。鉴于该电堆采用的是阳极支撑电池，阳极低频弧与阳极反应的某一扩散过程相关。

2.2　燃料成分对于电池性能的影响

固体氧化物燃料电池的最大优势在于其广泛的燃料适应性，被称为吃粗粮的大力士。结合我国国情，应重视煤基合成气、沼气、垃圾填埋气、甲醇裂解气等在 SOFC 中的应用。本工作在保证足够氢气含量的前提下，模拟几种典型的含碳燃料气，采用质量流量计配气，对电堆进行了测试。

表 2 为模拟的几种燃料成分，其中氢气含量不低于 46%，其他的成分分别突出了 CO、CO_2 和 CH_4 浓度的变化。测试结果如图 6、图 7 所示。图 6 阻抗谱中模拟合成气与纯 H_2 燃料相比，低频弧显著变小，对应的总阻抗变小。从弛豫时间分布看，表现为 P_1 峰的显著变小。由于复数阻抗谱代表了 *I*–*V* 曲线的斜率。对比图 7 可以发现在低电流区域，氢气燃料的 *I*–*V* 曲线存在一个明显的活化极化阶段，对应的斜率比较大。而其它模拟燃料的 *I*–*V* 曲线直接进入缓慢的变化阶段，对应的活化极化较小，因此图 6 和图 7 是一致的。当采用不同燃料时，空气一侧的情况没有发生变化，因此图 7 中阻抗谱的变化应归因为燃料组成对阳极侧的影响。

关于为什么活化极化对应一个较大的扩散步骤的解释，有必要回顾文献中关于燃料电极反应速率控制步骤的研究内容。关于 SOFC 阳极的反应机理，Mizusaki 等[14–15]最先研究了 Ni-单晶 YSZ 图案电极，在 700~850 ℃测试了不同三相界面(TPB)长度的极化随 H_2 和 H_2O 分压变化的规律，发现电池阻抗与

TPB 长度呈线性关系，且随 H_2O 分压增大而显著减小，但对 H_2 分压不敏感，表现为 H_2O 对电极反应具有催化作用。随后他们首次提出了阳极反应的氧溢出机理，即 YSZ 中氧填隙原子 O^{2-}(YSZ)在三相界面处释放电子，并在 Ni 表面生成吸附态 O(Ni)，后者再与吸附的氢原子反应生成水。

Bieberle 等[16]进一步总结了氧溢出机理，提出如下基元反应：

表 2　不同燃料的配气比例

Table 2　Gas composition of different fuels

Fuel	Flow rate/(L·min^{-1})				
	Total gas	CH_4	H_2	CO	CO_2
Hydrogen	18	0	18	0	0
Methane reforming gas	18	0.64	9	3.62	4.74
Methanol reforming gas	18	0.18	8.44	0.56	8.82
Coke oven gas	18	3.34	8.6	1.74	4.32

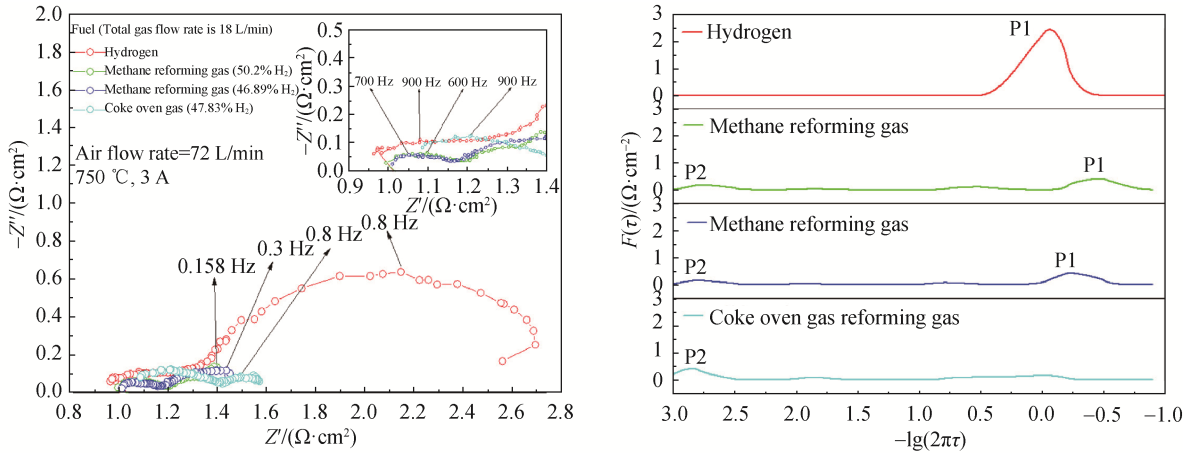


图 6　不同模拟气体成分下的电堆复数阻抗谱(a)和迟豫时间(b)

Fig. 6　Impedance spectra(a) and DRT(b) of the stack for different fuels

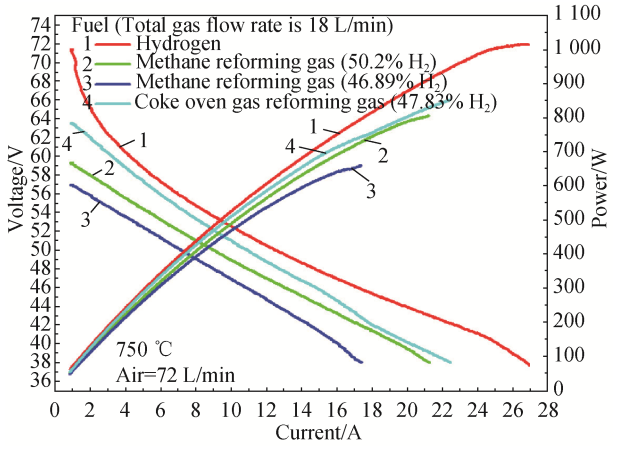


图 7　不同模拟气体成分下的电堆功率特性

Fig. 7　Performance of the stack for different fuels

(1) H_2 和 H_2O 在 Ni 表面吸附和解吸附：

$$H_2(g)+2(Ni)=2H(Ni) \quad (1)$$

$$H_2O(g)+(Ni)=H_2O(Ni) \quad (2)$$

(2) Ni 表面反应：

$$H(Ni)+O(Ni)\rightleftharpoons OH(Ni)+(Ni) \quad (3)$$

$$H_2O(Ni)+O(Ni)\rightleftharpoons 2OH(Ni) \quad (4)$$

$$H_2O(Ni)+(Ni)\rightleftharpoons OH(Ni)+H(Ni) \quad (5)$$

(3) 三相界面处的电荷转移反应：

$$O^{2-}(YSZ)+(Ni)\rightleftharpoons O(Ni)+(YSZ)+2e^- \quad (6)$$

Bessler[17]在上述模型的基础上增加了气相扩散和表面扩散过程，建立了多孔电极 SOFC 基元反应模型，认为反应的速率控制步骤不是电荷转移反应本身，更可能是表面吸附/解吸附过程；高极化电压时阻抗增大主要与 OH(Ni)和 H(Ni)合成 H_2O(Ni)的反应速率较慢有关。

Mogensen 等[18]在 1993 年根据 Ni-YSZ 陶瓷电极的电化学阻抗谱实验结果提出氢溢出机理，认为 H_2 先在 Ni 表面吸附，随后释放电子生成 H^+，扩散至三相界面，与 YSZ 上的氧离子反应，生成吸附态的 OH^-(YSZ)；后者再结合放出水蒸气。后续的一些研究[19]也表明 H_2O 在 YSZ 上的解吸附以及 OH^- 在 YSZ 上的表面扩散过程在电极反应中扮演着重要的角色。

综上所述，尽管两种机理意见不太一致，但均认为 OH^-或 OH(Ni)在电极反应中起着重要作用。由于在测试时采用了干氢气，其中的含氧组分很少，故反应初期 OH^-或 OH(Ni)的生成量有限，这可能成为实验中观察到大的低频扩散弧产生的原因。

与此相反，在模拟燃料中，虽然也未加入水蒸汽，但其中含有足够多的含氧成分 CO、CO_2，它们可以在高温下与 H_2 发生转化反应生成足够的 H_2O，

从而促进了电化学反应。表现为 P_1 峰的降低。但是，众所周知，CO、CH_4 的反应活性低，在高频处出现了 P_2 峰，且甲烷含量越高该峰越大，表明模拟合成气的反应活性较差。

从图 7 还可看出，随着燃料中含氧成分的增加，*I–V* 曲线明显下移，表现为开路电压的下降。这是因为燃料侧的平衡氧分压随着总的含氧组分浓度升高而升高，导致其与空气侧的氧分压差值变小，开路电压变小。在高电流密度下氢气燃料的 *I–V* 曲线基本与其它燃料平行，说明电堆的欧姆阻抗与燃料种类无关，这与图 6 一致。

2.3　气体流量对于电堆性能的影响

根据 SOFC 工作原理，氢气流量与电堆输出功率强相关，为了确定其中的影响机制，可由参考电流 27 A 计算实际氢气消耗量 Q_H。电堆包含的电池片为 n=60，Q_H 可由下式计算得到：

$$Q_H = n22.4\frac{It}{2F} = 11.3\ \mathrm{L/min} \qquad (7)$$

其中：Q_H 为实际氢气消耗量；n 为电池片片数；I 为电流；t 为放电时间。

式中：设定空气流量为 72 L/min。H_2 流量分别为 $1.3Q_H$、$1.5Q_H$、$2Q_H$、$3Q_H$，按从小到大的顺序依次测试，结果如图 8b 所示。

当 H_2 流量分别为 $1.3Q_H$、$1.5Q_H$、$2Q_H$、$3Q_H$ 时，开路电压分别为 70.6、71、72、73 V，当电压为 42 V 时，功率分别约为 1 010、1 090、1 180、1 280 W。氢气流量越大，开路电压越高。从 *I–V* 曲线斜率变化趋势可见，在低电流密度下曲线基本相似，但在高电流密度下，当氢气流量较小时，存在比较明显的浓差极化现象，说明此时燃料利用率比较高。

从 *I–P* 曲线分析，随着氢气流量增大，最大功率也逐渐增大，但功率增大幅度并没有非常明显的差异，说明当氢气供应满足实际氢气消耗后，继续增大氢气流量对电堆输出功率并没有很大的改善。电堆在实际工作过程中，燃料利用率也是重要的指标，因为其与电堆的能量效率直接相关，预计氢气实际流量在 $1.3Q_H$ 左右。

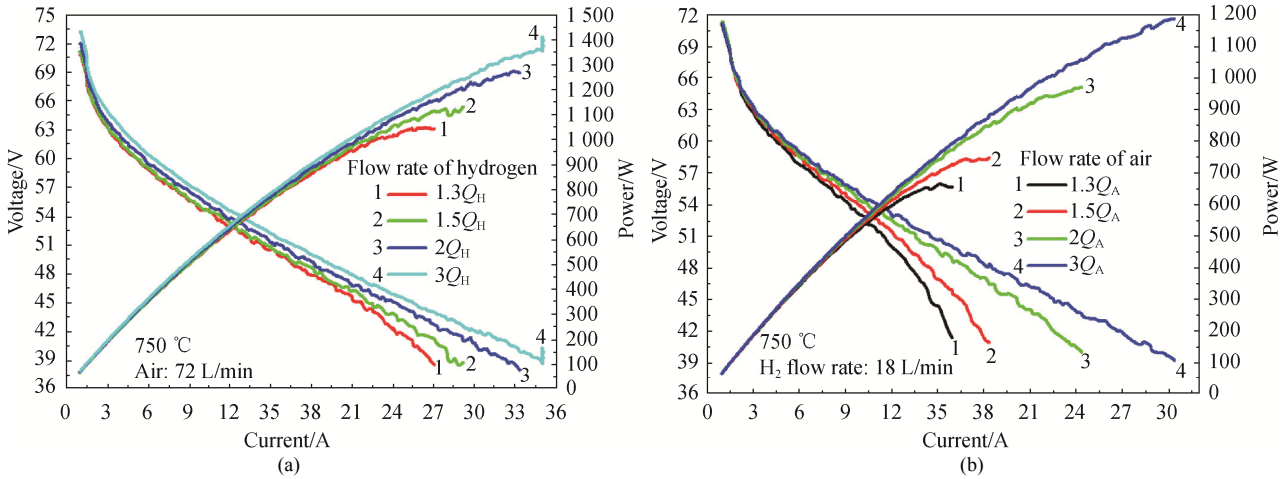


图 8　不同氢气流量(a)和不同空气流量(b)下的电堆功率特性

Fig. 8　Performance of the stack for different flow rate of fuel (a) and air (b)

根据参考电流 27 A 计算氧气实际消耗量 Q_O，再根据空气中的氧含量计算空气实际消耗量 Q_A。

根据参考工况，设定工作温度为 750℃、H_2 流量为 18 L/min，空气流量分别为 $1.3Q_A$、$1.5Q_A$、$2Q_A$、$3Q_A$，并按从小到大的顺序依次测试，结果见图 8b。

从 *I–V* 曲线可知，空气流量分别为 $1.3Q_A$、$1.5Q_A$、$2Q_A$、$3Q_A$ 时，开路电压分别为 71.08、71.34、71.34、71.22 V，当电压为 42 V 时，功率分别约为 660、750、940、1 120 W。

随着空气流量增大，开路电压基本没有变化。但 *I–V* 曲线的斜率随着空气流量的增大而在高电流密度阶段表现出较大差异。高电流密度下空气流量较小的 *I–V* 曲线表现出较明显的浓差极化现象。*I–P* 曲线显示，随着空气流量增大，电堆输出功率明显增大，且功率增幅非常明显。

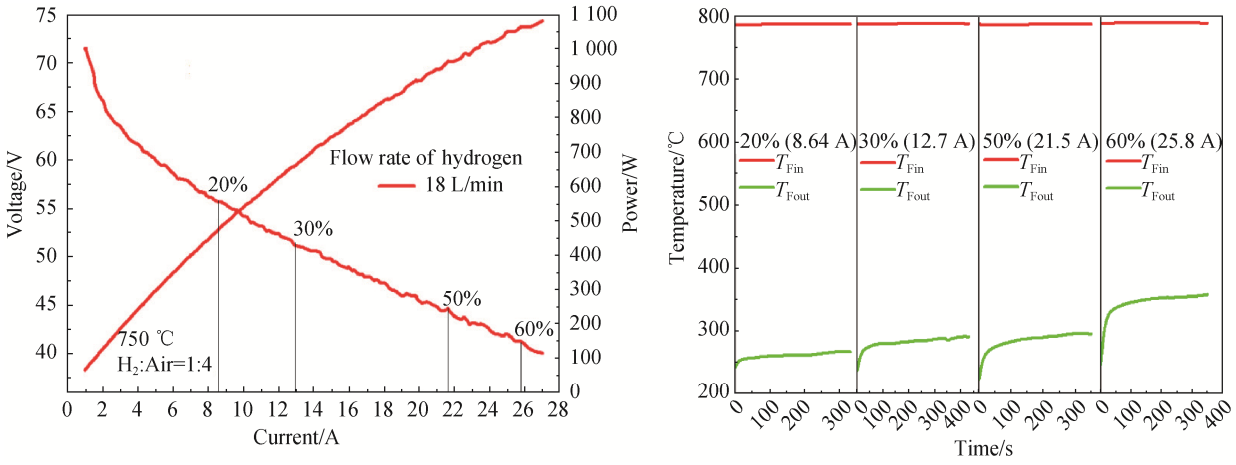
空气流量的增大意味着氧气供应能力的增强，在低电流密度下，氧气消耗有限，因此对活化极化没有影响，但在高电流密度下，氧离子的消耗相对较大，供氧能力越强则电堆输出功率就越大。结合 *I–V* 和 *I–P* 曲线，为降低浓差极化的影响，且考虑到供应空气的成本较低，建议在满足压差等前提条件下，空气流量可保持在 $3Q_A$ 左右，即空气流量保

持在实际消耗量的 3 倍左右。

2.4　工作电流对于出口温度的影响

SOFC 放电时，由于存在欧姆阻抗和极化阻抗，表现为电能的损失。根据能量守恒原理，损失的电能必然表现为焦耳热效应，即随着电流的增加，反应气体和电堆温度升高。以氢气为燃料、空气为氧化剂，在 H_2 流量 18 L/min、空气流量 72 L/min 工况下考察了放电电流对燃料气体出口温度的影响，发现随着电流的增加，燃料气体出口温度明显增加。

虽然由于燃料气体出口测温点设置在电炉外面，距离电堆出口较远，导致温度值与电堆温度差别很大，但是其变化仍然说明了电流导致的热效应。从图 9a 可见气体温度的上升有 1 个弛豫过程，需要大约 20 s 左右才慢慢趋于平缓，说明热传导比较慢，这从一个侧面说明利用温度对电堆进行控制是一个慢响应过程。



(a)　(b)

图 9　电堆的不同放电电流对应的燃料利用率(a)及燃料尾气温度变化(b)

Fig. 9　Fuel utilization(a) and fuel outlet temperature change(b) against the current

3　结论

1) 温度、燃料成分、气体流量对 SOFC 电堆性能有显著影响，其中温度的影响最大，复数阻抗谱的高频弧对应的活化能最高。

2) 欧姆阻抗的活化能明显降低，表明其不全是离子电导的成分，还包括双极板的表面电阻和可能的接触电阻。

3) 干氢气燃料由于缺少含氧成分，在开路电压附近表现出较大的活化极化，且其活化能很小，表明活化极化的速率控制步骤并非是电荷转移过程，而是对应某种扩散过程，很可能与 OH 物种有关。

4) 模拟重整气燃料的低频弧变小，但高频弧变大，开路电压降低，性能低于氢气燃料。随着电堆工作电流增加，燃料出口温度升高，表现出明显的热效应。这些结论对电堆运行控制策略的制订具有重要的参考意义。

参考文献:

[1] MINH N Q. Ceramic fuel cells[J]. J Am Ceram Soc, 1993, 76(3): 563–588.

[2] WACHSMAN E D, KANG T L. Lowering the temperature of solid oxide fuel cells[J]. Science, 2011, 334(6058): 935–939.

[3] SINGHAL S C. Advances in solid oxide fuel cell technology[J]. Solid State Ionic, 2000, 135(1–4): 305–313.

[4] HUIJSMANS J P P, BERKEL F P F V, CHRISTIE G M. Intermediate temperature SOFC–a promise for the 21st century[J]. J Power Sources, 1998, 71(1/2): 107–110.

[5] STAMBOULI A B, TRAVERSA E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy [J]. Renew Sust Energ Rev, 2002, 6(5): 433–455.

[6] YAMAMOTO O. Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects [J]. Electrochim Acta, 2000, 45(15/16): 2423–2435.

[7] LU Yuzheng, CAI Yixiao, SOUAMY L, et al. Solid oxide fuel cell technology for sustainable development in China: An over-view[J]. Int J Hydrogen Energy, 2018, 43: 12870–12891.

[8] NADEEM M, HU Bobing, XIA Changrong. Effect of NiO addition on oxygen reduction reaction at lanthanum strontium cobalt ferrite cathode for solid oxide fuel cell[J]. Int J Hydrogen Energy, 2018, 43: 8079–8087

[9] ZHENG Keqing, XIE Kecheng, LI Li, et al. Numerical modeling and parametric analysis of solid oxide fuel cell button cell testing process[J]. Int J Energy Res, 2019, 43: 2635–2642.

[10] WANG Yaqi, YANG Zhibin, HAN Minfang, et al. Optimization of

$Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-\delta}$-infiltrated YSZ electrodes for solid oxide fuel cell/electrolysis cell[J]. RSC Adv, 2016, 113(6): 112253–112259.

[11] GBT 34582—2017, 固体氧化物燃料电池单电池和电池堆性能试验方法, 2017 年 9 月 29 日发布。

[12] PORNPRASERTSUK R, RAMANARAYANAN P, MUSGRAVE C B, et al. Predicting ionic conductivity of solid oxide fuel cell electrolyte from first principles[J]. J Appl Phys, 2005, 98(10): 103513(1–8).

[13] BAUMANN F S, MAIER J, FLEIG J. The polarization resistance of mixed conducting SOFC cathodes: A comparative study using thin film model electrodes[J]. Solid State Ionics, 2008, 179:1198–1204.

[14] MIZUSAKI J, TAGAWA H, SAITO T, et al. Preparation of nickel pattern electrodes on YSZ and their electrochemical properties in H_2-H_2O atmospheres[J]. J Electrochem Soc, 1994, 141(8): 2129–2134.

[15] MIZUSAKI J, TAGAWA H, SAITO T, et al. Kinectic studies of the reaction at the nickel pattern electrode on YSZ in H_2-H_2O atmosphere[J]. Solid State Ionics, 1994, 70/71: 52–58.

[16] BIEBERLE A, GAUCKLER L J. State-space modeling of the anodic SOFC system Ni, H_2-H_2O|YSZ[J]. Solid State Ionics, 2002, 146(1): 23–41.

[17] BESSLER W G. A new computational approach for SOFC impedance from detailed electrochemical reaction-diffusion models[J]. Solid State Ionics, 2005, 176: 997–1011.

[18] MOGENSEN M, LINDEGAARD T. The kinectics of hydrogen oxidation on a Ni/YSZ SOFC electrode at 1 000 ℃[C]. Solid Oxide Fuel Cells III, Honolulu, Hawaii, USA, 1993[C].

[19] BESSLER W G, VOGLER M, STÖRMER H, et al. Model anodes and anode models for understanding the mechanism of hydrogen oxidation in solid oxide fuel cells[J]. Phys Chem Chem Phys, 2010, 12(42): 13888.