

Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ}-Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ}中低温固体 氧化物燃料电池复相阴极的研究

罗凌虹, 胡佳幸, 程 亮, 徐 序, 吴也凡, 林圃辰

(景德镇陶瓷大学 江西省燃料电池材料与器件重点实验室, 景德镇 333403)

摘 要: 采用溶胶-凝胶法制备 Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ}(BSCF)粉体后, 使用 Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ}(GDC)溶胶包裹 BSCF 粉的方法制备疏松多孔的 BSCF-xGDC(x=30wt%, 40wt%, 50wt%)复相阴极。通过 X 射线衍射仪、场发射扫描电镜和透射电镜对复相阴极的物相组成、单电池断面形貌及 GDC 对 BSCF 颗粒的包裹形貌进行表征。利用阻抗谱测试研究了复相阴极材料的电化学性能, 讨论了掺入 GDC 量对阴极性能的影响。结果表明: 通过 GDC 溶胶包裹 BSCF 粉体的制备方法改善了阴极的电化学性能, 在同一温度下, BSCF-40GDC 阴极的极化电阻最小, 在 650℃时阴极极化阻抗约为 0.397 Ω·cm²; 以 BSCF-40GDC 为阴极制备的单电池, 以 H₂+3%H₂O 为燃料气、空气为氧化气体, 650℃下电池的最大功率密度为 0.514 W/cm², 欧姆电阻为 0.257 Ω·cm², 两极极化电阻为 0.0588 Ω·cm²。

关 键 词: SOFC; 复相阴极材料; BSCF-GDC; 电化学性能

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

Performance of the Composite Cathode Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ}-Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ} for Medium-low Temperature Solid Oxide Fuel Cell

LUO Ling-Hong, HU Jia-Xing, CHENG Liang, XU Xu, WU Ye-Fan, LIN You-Chen

(Key Laboratory of Fuel Cell Materials and Devices, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China)

Abstract: Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-δ}(BSCF) powder was prepared *via* Sol-Gel method. Porous BSCF-xGDC(x=30wt%, 40wt%, 50wt%) composite cathodes were prepared *via* wrapping BSCF powders with Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ}(GDC) sol. The phase composition of the composite cathodes, the morphology of the cross section of the cell, as well as the BSCF particles coated with GDC were characterized with X-ray diffraction, field emission scanning electron microscopy, and transmission electron microscopy, respectively. The electrochemical performances of the composite cathodes were studied by impedance spectroscopy. The effects of the amount of GDC on the electrochemical performance of the composite cathode were studied by impedance spectroscopy. All results showed that the electrochemical performance of the composite cathode greatly improved. Electrode polarization resistance of the BSCF-40GDC was the minimum, with the value of 0.397 Ω·cm² at 650℃. The maximum power density of the single cell was 0.514 W/cm² with the values of Ohmic resistance at 0.257 Ω·cm² and the polarization resistance at 0.0588 Ω·cm², by using H₂+3%H₂O as fuel and air as oxidizing gas at 650℃.

Key words: SOFC; composite cathode materials; BSCF-GDC; electrochemical performance

收稿日期: 2017-05-09; 收到修改稿日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(51662015, 51462011); 江西省教育厅科技落地计划(KJLD13072); 研究生创新专项基金(YC2016-S378)

National Natural Science Foundation of China (51662015, 51462011); Project of Jiangxi Provincial Department of Science and Technology (KJLD13072); Innovation Program of Graduate Students in Jiangxi Province (YC2016-S378)

作者简介: 罗凌虹(1966-), 女, 教授. E-mail: luolinghong@tsinghua.org.cn

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种将燃料所具有的化学能直接转换成电能的发电装置,具有清洁、高效、可靠性高和全固态结构的特点,不存在液态电解质带来的腐蚀和电解液流失等问题^[1-2]。

SOFC 是世界公认的 21 世纪绿色能源技术,国内外在降低 SOFC 的工作温度、提高电极的催化活性等方面开展了很多研究,中低温(600~800℃)工作的 SOFC 可以有效地提高电池的长期稳定性和减少电池的高温损耗,是目前 SOFC 的发展方向。SOFC 单电池由阳极、电解质、阴极三部分组成,其中阴极阻抗对电池阻抗的贡献最大,是电池电化学反应的速度控制步骤^[3],这是因为阴极氧的吸附、还原及电荷转移过程的活化能较高所致。通常要求 SOFC 的阴极材料具有尽可能高的离子电导能力和电子电导能力,同时要与电解质材料具有相容性和高的氧催化活性^[4]。Shao 等^[5]最近报道使用 BSCF 作为一种新型阴极材料用于 LT-SOFC。钙钛矿结构的 BSCF 中由于 A 位全部是二价离子,比 LSM 和 LSCF 等阴极材料具有更高的氧离子电导率,一直用作氧离子传感器材料或电解质材料。近年来有研究者将其用于制备 SOFC 阴极,取得了较好的性能^[6]。在 BSCF 的基础上掺入适量的电解质材料或者具有更高电导率的材料,可以有效地提高阴极的电子导电能力。Hieu 等^[7]报道的 BSCF 粉体阴极材料在 600℃下测试的面电阻为 $0.468\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,在相同的测试条件下,BSCF 纳米纤维的面电阻为 $0.094\ \Omega\cdot\text{cm}^2$;Shao 等^[5]以 BSCF|SDC|BSCF 为对称电池,在 500℃下测试的极化电阻为 $0.6\ \Omega\cdot\text{cm}^2$;然而 Zhou 等^[8]报道的 70 vol% BSCF-30vol% LaCoO_3 阴极在 600℃下的面电阻 $0.21\ \Omega\cdot\text{cm}^2$;Chen 等^[9]报道的 BSCF+ Co_3O_4 复相阴极材料在 600℃下的面电阻仅为 $0.049\ \Omega\cdot\text{cm}^2$;Lee 等^[10]以 BSCF-ScSZ|YSZ|BSCF-ScSZ 为对称电池,在 700℃下测得的极化电阻为 $0.06\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。以上文献表明,复相材料比纯 BSCF 表现出更好的电化学性能。

溶胶-凝胶法是在溶液状态下将各组分混合,获得的原料具有高的纯度、颗粒均匀且高活性的特点^[11-12]。本工作将不同比例的高电导率的 GDC 包裹到 BSCF 中,制成复相电极材料,对复相材料的电化学性能进行比较。

1 实验方法

1.1 样品制备

采用柠檬酸与 EDTA 双络合的方法合成 BSCF 粉体,具体步骤如下:首先按摩尔比为硝酸钡:硝酸

锶:硝酸钴:硝酸铁=5:5:8:2 配料,加适量的去离子水溶解,配置成含四种硝酸盐的混合溶液,然后按摩尔比为 EDTA:金属离子:柠檬酸=1:1:1.5,混合四种金属离子的硝酸盐和络合剂(EDTA 与柠檬酸),在 EDTA 与硝酸盐混合的溶液中加入适量柠檬酸,用氨水调节溶液至 $\text{pH}=8$,放入 80℃的水浴锅中搅拌,直至成为凝胶状,最后在 950℃煅烧保温 3 h。

本研究讨论了 BSCF 与 GDC 三种配比,BSCF 与 GDC 重量百分比分别为 7/3、6/4 和 5/5,由于 BSCF 是电子导电相,为了阴极内电子的连续导通,其百分含量设计为等于或略高于 GDC 百分含量。GDC 包裹 BSCF 粉复相阴极材料的制备是将溶胶-凝胶法制备的 BSCF 粉体在配置的 GDC 溶胶中混合均匀,然后在 70℃剧烈搅拌,经烧结除去有机物成分,将聚合物溶胶在 200℃下煅烧以获得溶胶包裹的 BSCF 粉体,粉体在 800℃煅烧 3 h,最终形成 BSCF-30GDC、BSCF-40GDC 和 BSCF-50GDC 三种复相阴极粉体。

为了确认 GDC 与 BSCF 在焙烧成阴极时两相不会发生反应,将混合粉体在 1050℃煅烧,保温 3 h 后随炉冷却至室温。

1.2 对称电池及单电池的制备

GDC 粉体通过干压成型并经 1560℃高温烧结,保温 3 h 后随炉冷却至室温,制备致密 GDC 电解质片;利用多层水系流延及共烧的技术制备 GDC|GDC+NiO 阳极支撑型的半电池。

将制备的阴极粉体球磨得到阴极浆料,用喷枪喷至 GDC 电解质的两侧和流延制得的 GDC|GDC+NiO 半电池的一侧,再置于高温电炉中 1050℃焙烧 3 h,制成阴极对称电池及单电池。

1.3 粉体表征及电池测试

采用德国 Bruker AXS D8-Advance 型 X 射线衍射仪对复相阴极粉体的物相进行分析,JSM-2010(HR)型透射电子显微镜分析粉体结构,SU8010 型场发射扫描电子显微镜观察单电池的形貌,上海辰华 CHI604C 电化学工作站对称电池和单电池的电性能进行测试。

2 结果与讨论

2.1 阴极粉体的 XRD 分析

图 1 为不同温度煅烧的 BSCF-40GDC 阴极粉体的 XRD 图谱,从图中可以看出,200℃煅烧粉体只有 BSCF 对应的钙钛矿结构,这是在此温度下溶胶 GDC 仍然以无定形态存在,没有形成晶相。而 800℃

煅烧粉体形成了具有斜方六面体晶系钙钛矿晶体结构的 BSCF 晶相以及立方萤石结构的 GDC 晶相的 BSCF-GDC 复相阴极粉体; 1050℃煅烧粉体形成了结晶程度高的 BSCF 晶相以及 GDC 晶相的 BSCF-GDC 复相阴极, 并没有生成其他新峰, 这说明 BSCF 和 GDC 二者在烧结过程中没有发生反应。此方法证明采用 GDC 溶胶(非晶物质)包裹 BSCF 粉体(晶相物质)通过高温煅烧可以获得 GDC 和 BSCF 两种晶相, 没有其他杂相, 因此可以采用该方法制备 BSCF 复相阴极材料。

2.2 阴极粉体的 TEM 分析

对于 BSCF-GDC 复相阴极材料而言, 两种原料的混合均匀程度对燃料电池阴极的性能有很大的影响。图 2 为包裹之后获得的干凝胶在 800℃煅烧得到的 BSCF-40GDC 粉体的 TEM 照片, 从图中可以看到形成了 GDC 包裹 BSCF 的结构。在 BSCF-40GDC 粉体中 BSCF 的晶粒尺寸在 300 nm 左右, GDC 颗粒尺寸较小, 约 20~30 nm, 纳米级的 GDC 成连续的线状或者片状包裹在 BSCF 颗粒周围, 构成连续的通道, 从而形成了网络状的 BSCF-GDC 复相阴极。

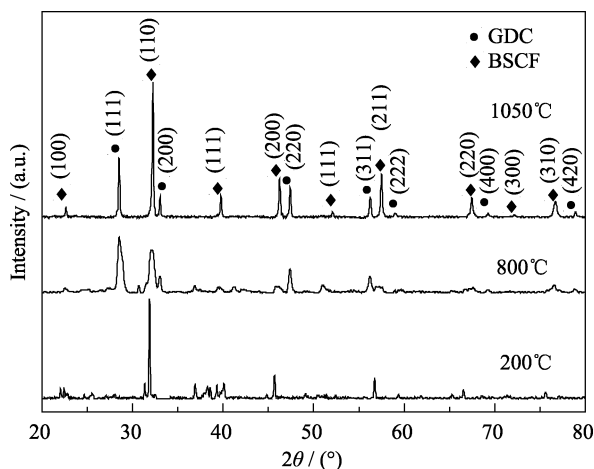


图1 不同温度煅烧的 BSCF-40GDC 阴极粉体的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of BSCF-40GDC cathode powder calcined at different temperatures

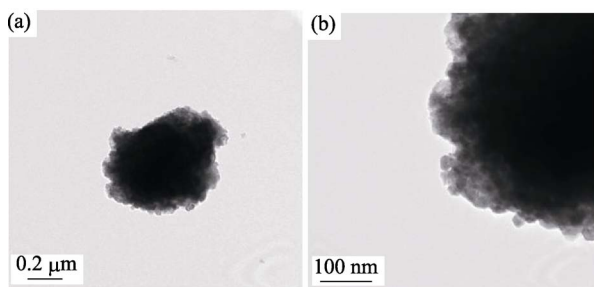


图2 GDC 包裹 BSCF 颗粒的 TEM 照片
Fig. 2 TEM images of BSCF particles coated by GDC

GDC 溶胶形成过程是在一定温度下水介质中的柠檬酸络合住 Ce^{4+} 和 Gd^{3+} , 通过乙二醇与柠檬酸的酯化反应进行缩聚形成一定大小的溶胶分子, 具有丁达尔现象。由前面的实验可知, BSCF 粉体不溶于水, 且不与 GDC 溶胶发生反应, 所以将事先合成好的一定量 BSCF 粉体加入 GDC 溶胶中, 该溶胶继续在一定温度下加热, 水分逐渐蒸发, 溶胶聚合分子越来越大, 形成了网络状的聚合大分子, 粘度明显增大, 基本失去流动性, 这时称为(湿)凝胶。在整个反应过程中, 随着水分的逐渐蒸发以及不间断的搅拌, 溶胶逐渐吸附在 BSCF 粉体上形成均匀混合的 GDC 溶胶包裹 BSCF 的特殊形貌^[13]。

2.3 对称电池交流阻抗分析

图 3 为 BSCF-xGDC 复相阴极在 650℃空气气氛中测试的电化学阻抗图和等效电路图, 图中 R_1 对应于电解质和引线的欧姆阻抗; R_2 对应于电极/电解质界面的电荷转移电阻(半圆与实轴的高频截距); R_3 代表阴极的氧表面交换和扩散过程中的折合电阻(半圆与实轴的低频截距部分); CPE1 和 CPE2 代表相应的恒相角元件; R_1 和 R_2 的总和的 1/2 为 R_{el} , 即为单个电极的极化电阻^[14-15]。表 1 为等效电路拟合出来的阻抗结果, 拟合误差控制在 10% 范围内。从图 3 中可以看出, BSCF-40GDC 的阻抗明显小, 为 $0.397 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。该值与文献所报道的数据 $0.468 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 相比^[7], 比 BSCF 单相阴极的阻抗低很多。在三种复相阴极中, BSCF-40GDC 的阻抗明显小, 主要是因为加入 GDC 提供了快速的氧离子传输通道, 减小了因电荷转移带来的电极阻抗(R_2 部分)。但当掺入 50wt% GDC 时, R_2 值增大, 极化电阻增加, 可能是因为 GDC 粉体的大量团聚导致电子传输受阻, 故而影响了电极的极化电阻; R_3 值均小于 R_2 , 说明阴极材料的活性较好, 氧的吸附解离等速度较快。图 4 给出了 BSCF-xGDC 复相阴极极化电阻的 Arrhenius 图, 从图中可以看出 $\ln(R/T)$ 与 $1000/T$ 基本呈线性关系, 随着温度的升高, 极化电阻降低。在 550~750℃测试范围内, 单一斜率表明相同的反应机理控制整个电极行为, 由图中 E_a 值的大小可以看出, BSCF-40GDC 电极的氧催化能力最强, 温度升高有利于电子和小极化子的跃迁, 对电极的电化学性能影响重大。

2.4 单电池形貌分析

BSCF-40GDC 单电池断面形貌的 SEM 照片如图 5 所示。从图中可以看出, BSCF-40GDC 阴极和 GDC 电解质界面彼此融合, 结合紧密, 使得电池的稳定性得到提高, 且阴极具备高的孔隙率, 这有利于氧气的传输。通过掺入 GDC 更有利于增加反应三相界面的数量, 从而保证实现高而稳定的性能。

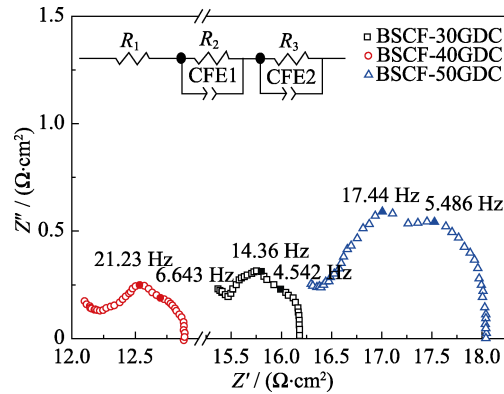


图 3 BSCF-*x*GDC 复相阴极在 650℃ 极化阻抗图
Fig. 3 Impedance spectra for BSCF-*x*GDC cathode measured at 650℃

表 1 BSCF-*x*GDC 复相阴极在 650℃ 测试的阻抗拟合结果
Table 1 Impedance spectra fitting results of the BSCF-*x*GDC cathode measured at 650℃

Sample	$R/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$			
	R_1	R_2	R_3	$R_{\text{el}}=(R_2+R_3)/2$
BSCF-30GDC	15.24	0.595	0.338	0.466
BSCF-40GDC	12.10	0.494	0.301	0.397
BSCF-50GDC	16.31	1.463	0.305	0.884

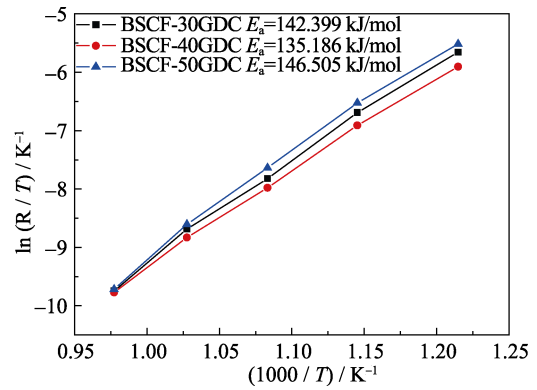


图 4 BSCF-GDC 样品的 Arrhenius 图(测试温度在 550℃~750℃)
Fig. 4 Arrhenius plots of resistance of BSCF-GDC composites measured at temperature from 550℃ to 750℃

2.5 单电池的电流与电压、功率的关系

以 H₂(3% H₂O) 为燃料, 空气为氧化剂, 在不同工作温度下对单电池的电流-电压(*I*-*V*)、电流-功率(*I*-*P*)的关系进行了测试, 测试结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 的 BSCF-GDC 单电池在 650℃ 下的最大功率密度图可以看出, 以 BSCF-30GDC、BSCF-

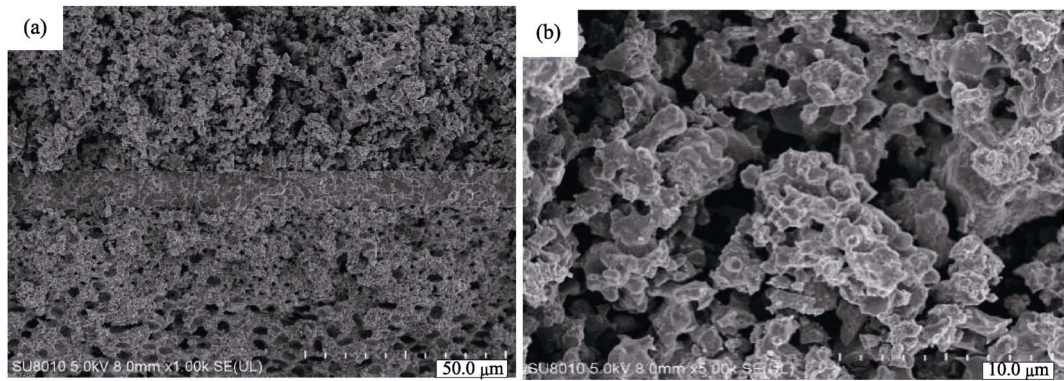


图 5 BSCF-40GDC 单电池的断面 SEM 照片
Fig. 5 SEM images of the fracture section for the single-cell with BSCF-40GDC cathode
(a) Cross section of whole cell; (b) Cross section of the cathode

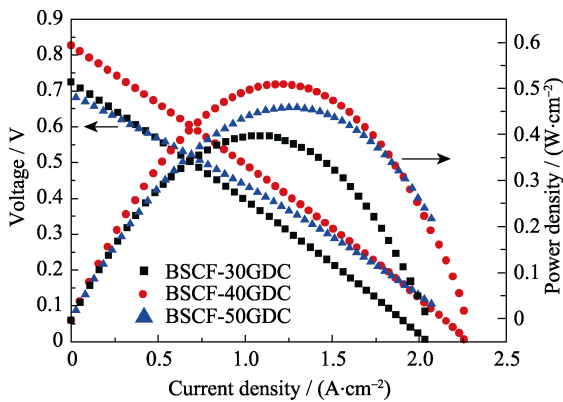


图 6 不同比例的 BSCF-GDC 单电池在 650℃ 下的 *I*-*P*、*I*-*V* 曲线
Fig. 6 *I*-*V* and *I*-*P* characteristics of the cells for different ratios of BSCF-GDC at 650℃

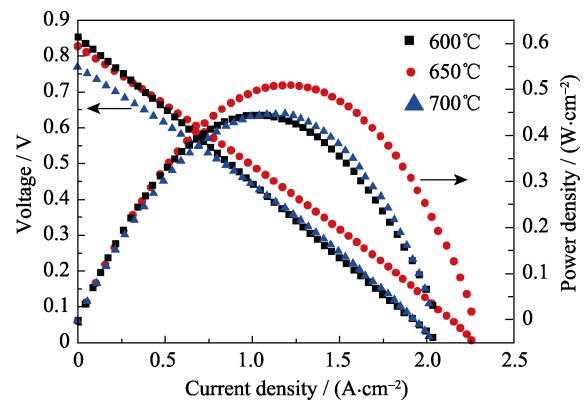


图 7 电池 BSCF-40GDC|GDC|NiO-GDC 在不同温度下的 *I*-*P*、*I*-*V* 曲线
Fig. 7 *I*-*V* and *I*-*P* curves of BSCF-40GDC|GDC|NiO-GDC single cell at different operation temperatures

50GDC 作为阴极的单电池在 650°C 下的最大功率密度均低于以 BSCF-40GDC 作为阴极的单电池。从图中还可以发现, 不同电池在 650°C 下的开路电压不同, 这主要是因为电池电解质的致密度不同产生的。对以 BSCF-40GDC 为阴极的单电池的功率密度进行测试, 获得单电池的 I - V 、 I - P 曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 随着测试温度的升高, 电池的最大功率密度先增加后降低, 在 600°C 、 650°C 、 700°C 工作温度下最大功率密度分别为 0.471 、 0.514 、 0.448 W/cm^2 , 对应的开路电压分别为 0.858 、 0.831 、 0.771 V 。高于 650°C 时, 单电池的功率密度反而降低。主要原因可能是 Ce 在高温环境下不稳定, 铈离子的变价导致电子导电, 并且在 700°C 下电池的开路电压降低比较严重, 这将极大影响(降低)单电池的性能。 650°C 的开路电压比 600°C 的略低, 这对电池性能影响不是很明显。以 BSCF-40GDC 为阴极的单电池在 650°C 获得最佳电性能, 主要是因为离子电子混合电导的 BSCF 材料中添加尺寸较小的离子电导材料 GDC, 能有效地降低阴极的极化阻抗, 当其作为电催化剂时, 能够加速氧分子在高催化活性阴极表面的反应, 更加有利于氧的吸附、解离和氧离子的迁移, 从而提高阴极反应速率、阴极的催化性能及电池的电性能。

2.6 单电池的电阻抗性能

电池的极化是由欧姆极化、浓差极化和活化极化三部分构成。欧姆极化主要由电解质的离子导电率决定, 浓差极化与电极的显微结构有关, 而电极的催化活性、反应速率影响活化极化^[15-16]。由于本研究所有配方的电池均采用相同的电解质、阳极及造孔剂, 因此其极化电阻的变化基本是由阴极的催化活性和反应速率引起的。为了更好地研究影响电池性能的因素, 以 $\text{H}_2(3\%\text{H}_2\text{O})$ 为燃料气, 空气为氧化剂, 对分别以 BSCF-30GDC、BSCF-40GDC、BSCF-50GDC 为阴极的单电池进行了阻抗谱测试, 如图 8 所示。以 BSCF-30GDC、BSCF-40GDC、BSCF-50GDC 为阴极制备的电池其电极的极化电阻分别为 0.0793 、 0.0588 、 $0.0748 \Omega\cdot\text{cm}^2$, 因此同样说明了 BSCF-40GDC 阴极的阻抗最小。进一步分析 BSCF-40GDC 阴极在不同温度下的阻抗, 以 $\text{H}_2(3\%\text{H}_2\text{O})$ 为燃料气, 空气为氧化剂, 在不同工作温度下对以 BSCF-40GDC 为阴极单电池进行阻抗谱测试, 结果如图 9 所示。从图中可以看出, 在工作温度分别为 600 、 650 、 700°C 时, 电池的欧姆电阻分别为 0.323 、 0.257 和 $0.308 \Omega\cdot\text{cm}^2$, 650°C 下欧姆阻抗最低, 这与其最大输出功率密度最高相一致(图 7 结果)。而极化电阻分别为 0.103 、 0.0588 和 $0.054 \Omega\cdot\text{cm}^2$, 这说明了随测试温度的升

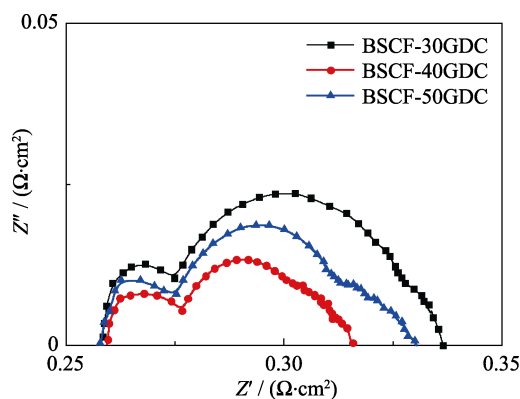


图 8 不同比例的 BSCF-GDC 单电池在 650°C 测试的单电池阻抗谱图

Fig. 8 Impedance spectra of the single cell for different ratios of BSCF-GDC tested at 650°C

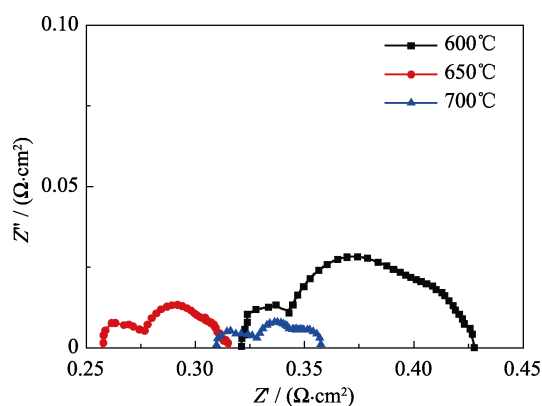


图 9 不同运行温度下 BSCF-40GDC|GDC|NiO-GDC 单电池的阻抗谱图

Fig. 9 Impedance spectra of BSCF-40GDC|GDC|NiO-GDC single cell at different operation temperature

高, 电极的阻抗降低, 这与相关原理相符。以 BSCF-40GDC 为阴极制备的电池, 其极化电阻比另外两种电池低, 说明适当加入 GDC 可以加快阴极的催化活性, 有利于氧的吸附和解离, 加快电极反应, 降低电池的极化电阻, 从而使电池的性能得到提高。因此, 通过掺杂一定比例的离子电导材料对阴极粉体的催化行为有一定影响。

3 结论

采用 GDC 溶胶包裹, 通过溶胶-凝胶法制备了 BSCF 粉体, 用该粉体制备了疏松多孔的 BSCF-GDC 复相阴极材料。经 800°C 煅烧获得了分散度高、颗粒形状较规则的 BSCF-GDC 复相阴极粉体, 其中具有斜方六面体晶系钙钛矿晶体结构的 BSCF 颗粒尺寸约 300 nm , 立方萤石结构 GDC 颗粒尺寸约 20 nm 。采用电化学阻抗谱对不同 GDC 掺杂量复相阴极的阻

抗进行测试,在同一温度下, BSCF-40GDC 的极化电阻最小,在 650℃时极化阻抗约为 $0.397 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。将 BSCF-GDC 浆料喷涂在通过水系流延及共烧技术制备的半电池上,经 1050℃煅烧制成单电池,电池的电化学性能测试结果表明,功率密度随着测试温度的升高先增大后减小,开路电压随温度的升高而降低,在 650℃时, BSCF-40GDC 获得最佳的电性能,最大功率密度为 0.514 W/cm^2 ,欧姆电阻为 $0.257 \Omega \cdot \text{cm}^2$,极化电阻为 $0.0588 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

参考文献:

- [1] ZHAO Z, LIU L, ZHANG X, *et al.* Carbonates formed during BSCF preparation and their effects on performance of SOFCs with BSCF cathode. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2012, **37(24)**: 19036–19044.
- [2] RACHADEL P L, MOTUZAS J, MACHADO R A F, *et al.* Influence of porous structures on O_2 flux of BSCF asymmetric membranes. *Separation & Purification Technology*, 2017, **175**: 164–169.
- [3] NUERNBERG R B, MORELLI M R. Synthesis of BSCF perovskites using a microwave-assisted combustion method. *Ceramics International*, 2016, **42(3)**: 4204–4211.
- [4] SUN S, CHENG Z. Effects of H_2O and CO_2 on electrochemical behaviors of BSCF cathode for proton conducting IT-SOFC. *J. Electrochem. Soc.*, 2017, **164(2)**: 81–88.
- [5] SHAO Z, HAILE S M. A High-performance Cathode for the Next Generation of Solid-oxide Fuel Cells. *Materials for Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group*, 2004; 255–258.
- [6] ZHU W X, ZHE LV, LI S Y, *et al.* Study on $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ - $\text{Sm}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$ composite cathode materials for IT-SOFCs. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, **465(1)**: 274–279.
- [7] HIEU N T, PARK J, TAE B. Synthesis and characterization of nanofiber-structured $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite oxide used as a cathode material for low-temperature solid oxide fuel cells. *Materials Science & Engineering B*, 2012, **177(2)**: 205–209.
- [8] ZHOU W, SHAO Z, RAN R, *et al.* $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ + LaCoO_3 composite cathode for $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{1.9}$ -electrolyte based intermediate-temperature solid-oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2007, **168(2)**: 330–337.
- [9] CHEN D, HUANG C, RAN R, *et al.* New $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ + Co_3O_4 composite electrode for IT-SOFCs with improved electrical conductivity and catalytic activity. *Electrochemistry Communications*, 2011, **13(2)**: 197–199.
- [10] LEE S O, LEE D, JUNG I, *et al.* Ceria interlayer-free $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ - $\text{Sc}_{0.1}\text{Zr}_{0.9}\text{O}_{1.95}$ composite cathode on zirconia based electrolyte for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38(22)**: 9320–9329.
- [11] SHAO Z, MEDEROS J, CHUEH W C. High power-density single-chamber fuel cells operated on methane. *J. Power Sources*, 2006, **162(1)**: 589–596.
- [12] JIN G L, PARK M G, HYUN S H, *et al.* Nano-composite $\text{Ni-Gd}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{1.95}$ anode functional layer for low temperature solid oxide fuel cells. *Electrochimica Acta*, 2014, **129(10)**: 100–106.
- [13] WANG L Y, LUO L H, WU Y F, *et al.* Ni-YSZ on properties of solid oxide fuel cell. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, **40(4)**: 542–547.
- [14] HABIBALLAH A S, JANI A M M, MAHMUD A H, *et al.* Facile synthesis of $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (BSCF) perovskite nanowires by templating from nanoporous anodic aluminium oxide membranes. *Materials Chemistry & Physics*, 2016, **177**: 371–378.
- [15] MURRAY E P, SEVER M J, BARNETT S A. Electrochemical performance of $(\text{La}, \text{Sr})(\text{Co}, \text{Fe})\text{O}_3$ -($\text{Ce}, \text{Gd})\text{O}_3$ composite cathodes. *Solid State Ionics*, 2002, **148(1/2)**: 27–34.