第 49 卷第 1 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 1
2021 年 1 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　Juanuary，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200566

# 表面修饰对镧锶钴铁阴极材料电化学性能的影响

蔡长焜[1,2]，谢满意[1,2]，刘媛媛[1,2]，薛　柯[1,2]，李舒婷[1,2]，安胜利[1,2]

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院 内蒙古 包头 014010；
2. 内蒙古自治区先进陶瓷材料与器件重点实验室 内蒙古 包头　014010)

**摘　要：**通过柠檬酸-EDTA 络合法制备固体氧化物燃料电池阴极材料 $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$(LSCF)粉体。以 $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$(SDC)为电解质，制备了 LSCF/SDC/LSCF 对称电极。采用浸渍法在 LSCF/SDC/LSCF 两侧浸渍 $La(NO_3)_3$、$Ni(NO_3)_2$、$Fe(NO_3)_3$ 混合溶液，850 ℃烧结后得到表面修饰后的阴极材料。研究了浸渍烧结后表面修饰阴极材料的物相结构特征、电化学交流阻抗、电化学催化活性及单电池输出性能。结果表明：通过浸渍法在 LSCF 阴极表面形成了与 LSCF 结构相似的 $La_{0.62}Sr_{0.38}Ni_{0.03}Co_{0.19}Fe_{0.78}O_{3-\delta}$(LSNCF)固溶体，在表面产生的纳米颗粒提升了阴极材料对 $O_2$ 的吸附解离能力，并表现出较低的极化阻抗，在 800 ℃时 LSNCF 阴极材料的极化面电阻为 0.083 Ω·cm$^2$，在 800 ℃连续工作 7 200 min 后，LSNCF 阴极材料对称电池极化阻抗为 0.117 Ω·cm$^2$。以 Ni-SDC 为阳极，SDC 为电解质，LSNCF 为阴极组装阳极支撑单电池，在 750 ℃时最大功率密度为 693 mW/cm$^2$。

**关键词：**固体氧化物燃料电池；阴极；钙钛矿；表面修饰
**中图分类号：**TM911.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0454–5648(2021)01–0049–07
**网络出版时间：**2020–12–17



## Effect of Surface Modification on Electrochemical Performance of $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\sigma}$ Cathode Material

*CAI Changkun*[1,2], *XIE Manyi*[1,2], *LIU Yuanyuan*[1,2], *XUE Ke*[1,2], *LI Shuting*[1,2], *AN Shengli*[1,2]
(1. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Advanced Ceramic Materials and Devices, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** A solid oxide fuel cell cathode material $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$ (LSCF) powder was prepared by a citric acid-EDTA complex method. $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$ (SDC) was used as an electrolyte to prepare LSCF/SDC/LSCF symmetric electrode cells. The mixed solution of $La(NO_3)_3$、$Ni(NO_3)_2$ and $Fe(NO_3)_3$ was impregnated on both electrodes of LSCF/SDC/LSCF, and the surface-modified cathodes were obtained after sintering at 850 ℃. The phase structure characteristics, electrochemical AC impedance, electrochemical catalytic activity and single cell output performance of the surface-modified cathode material after impregnation were investigated. The results show that $La_{0.62}Sr_{0.38}Ni_{0.03}Co_{0.19}Fe_{0.78}O_{3-\delta}$ solid solution with the similar structure to LSCF is formed by the impregnation method. The nanoparticles generated on the surface enhances the ability of the cathode material to adsorb and dissociate $O_2$, and exhibits a lower polarization resistance. The polarization resistance of LSNCF cathode material is 0.083 Ω·cm$^2$ at 800 ℃, the polarization impedance of LSNCF cathode material is 0.117 Ω·cm$^2$ at 800 ℃ after 7 200-min continuous operation. For assemble anode-supported cells with Ni-SDC as an anode, SDC as an electrolyte and LSNCF as a cathode, the maximum power density is 693 mW/cm$^2$ at 750 ℃.

**Keywords:** solid oxide fuel cells; cathode; perovskite; surface modification

化石燃料燃烧所产生的环境污染已成为人类生存发展的巨大阻碍，对人类生活和社会经济的可持续发展提出了巨大的挑战，寻找高效清洁的可再生能源已成为当今社会的热门话题。固体氧化物燃料电池(SOFCs)是一种可将化学能转化为电能的全固态高效装置，由于其对环境友好，且燃料利用率高,

收稿日期：2020–07–31。　修订日期：2020–09–21。
基金项目：国家自然科学基金(51974167)。
第一作者：蔡长焜(1990—)，男，博士研究生。
通信作者：安胜利(1961—)，男，博士，教授。

**Reveived date:** 2020–07–31.　**Revised date:** 2020–09–21.
**First author:** CAI Changkun (1990–), male, Doctorial candidate.
**E-mail:** changkun_cai@126.com
**Correspondentauthor:** An Shengli (1961–), male, Ph. D.,Professor
**E-mail:** shengli_an@126.com

成为了解决这些问题的有效途径之一[1–2]。近年来，由于传统高温 SOFC 工作温度较高，而造成 SOFC 关键材料化学相容性差、界面之间反应及长时间运行寿命降低的问题，阻碍了固体氧化物燃料电池的发展。如何将固体氧化物燃料电池的工作温度降至中温范围(600~800℃)是目前研究的热点问题[3–4]。

传统 SOFC 阴极材料广泛使用 LSM/YSZ 复合电极，但随着 SOFC 工作温度的降低,会使 LSM 阴极材料的催化活性下降，从而使燃料电池的性能出现严重的衰退。$La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$(LSCF)阴极材料因在中温工作环境下具有较高的电导率和氧催化活性，并与 LSGM、SDC 等中温电解质热膨胀系数匹配，被认为是中温最具有潜力的阴极材料[5–7]。近年来，有研究发现在 LSCF 电极表面通过浸渍纳米颗粒，可以有效增大 LSCF 阴极材料三相界面的长度，降低电极的极化阻抗，提高阴极材料的氧还原活性[8–9]，并提高 LSCF 阴极材料的电化学稳定性[10]。

本研究以 $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$(LSCF)为阴极骨架，采用浸渍法在 LSCF 阴极表面浸渍 $La(NO_3)_3$、$Ni(NO_3)_2$、$Fe(NO_3)_3$ 混合溶液，在 850 ℃烧结后得到表面修饰的 LSCF 阴极材料。分析了表面修饰阴极材料晶体结构的变化，通过 TEM-Mapping 分析了表面修饰后阴极材料的微观结构。通过电化学阻抗法分析了表面修饰后 LSCF 阴极材料的电化学特性。

# 1 实验

## 1.1 样品制备

采用柠檬酸-乙二胺四乙酸(EDTA)络合法制备 LSCF 阴极粉体。依次将 $La(NO_3)_3·6H_2O$ (分析纯，上海阿拉丁试剂)、$Sr(NO_3)_2$ (分析纯，上海阿拉丁试剂)、$Co(NO_3)_2·6H_2O$ (分析纯、上海阿拉丁试剂)、$Fe(NO_3)_3·9H_2O$ (分析纯，上海阿拉丁试剂)、柠檬酸(分析纯，上海阿拉丁试剂)、乙二胺四乙酸(分析纯，上海阿拉丁试剂)分别溶于去离子水中，金属离子、柠檬酸、EDTA 的摩尔比为 1∶1∶1.5，并用氨水将 pH 值调至 7~8，在 80 ℃水浴锅中加热搅拌蒸发至形成凝胶。将凝胶在电炉加热至自燃烧后得到前驱体粉体，将前驱体粉体在 1 000 ℃煅烧 2 h 后得到 LSCF 粉体。将制得的 LSCF 阴极粉体加入固相含量(质量分数)40%松油醇及 4%乙基纤维素，在球磨机中球磨 24 h 得到阴极浆料。采用丝网印刷法，以 $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$(SDC)为电解质，将 LSCF 阴极浆料涂敷在电解质两侧，并在 1 000 ℃烧结 2 h 得到多孔的 LSCF 对称电池。

将 $La(NO_3)_3·6H_2O$、$Ni(NO_3)_2·6H_2O$、$Fe(NO_3)_3·9H_2O$ 依次加入 60%乙醇溶液中，加入摩尔比为 1.0∶0.6∶0.4，在混合溶液中加入甘氨酸，金属离子与甘氨酸摩尔比为 1∶3，制得 0.1 mol/L 的混合溶液，使用移液枪量取 40 μL 混合溶液滴加到 LSCF 对称电极两侧，真空干燥 1 h 后在 850 ℃烧结 2 h 得到表面修饰的对称电极，称取制备的对称电极质量，获得浸渍量在阴极所占的质量分数为 8%。

以 Ni-SDC 为复合阳极，质量比为 6∶4，SDC 为电解质，220 MPa 共压后在 1 450 ℃烧结 2 h 得到阳极支撑半电池。采用丝网印刷的方法将 LSCF 涂敷在 SDC 电解质的另一侧，阴极圆环直径为 8 mm，在 1 000 ℃烧结后阴极侧滴加硝酸盐-甘氨酸混合溶液，真空干燥后在空气气氛下 850 ℃烧结 2 h，得到阳极支撑单电池。

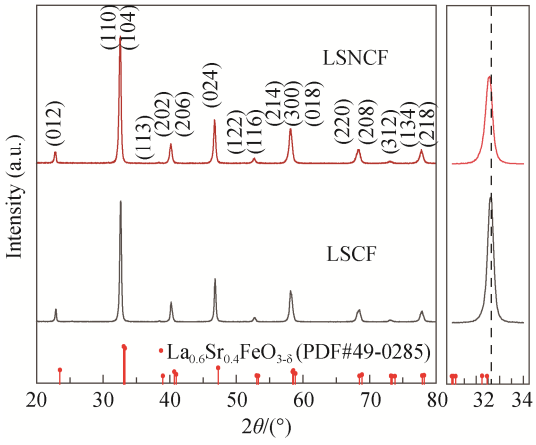
## 1.2 材料表征

采用日本 Rigaku MiniFlex600 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction,XRD)分析材料的物相结构；采用德国 Carl Zeiss SIMGA-300 型场发射扫描电镜观察电极及单电池的微观形貌；采用 JEM-2100F 透射电镜及 Oxford X-max80 能谱仪对表面修饰后的 LSCF 阴极材料进行结构及元素分布分析；采用荷兰 IviumStat 电化学工作站测试对称电池的交流阻抗谱及单电池功率特性，交流幅值为 10 mV，测试频率范围为 0.1 Hz~1 MHz，对交流阻抗所得出的结果用 ZView 软件进行处理拟合。

# 2 结果与讨论

## 2.1 XRD 物相分析

图 1a 为浸渍前 LSCF 及浸渍后经 850℃烧结得




(a) LSCF and LSNCF cathode material (b) Local amplifications

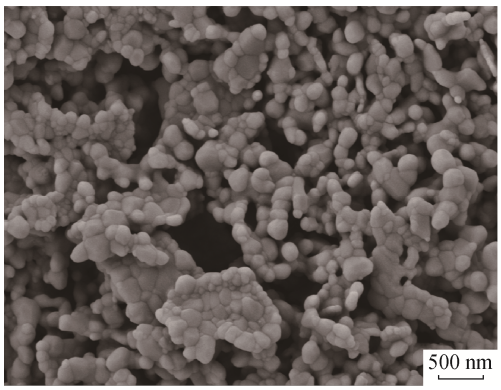
图 1 不同阴极材料的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of different cathode materials

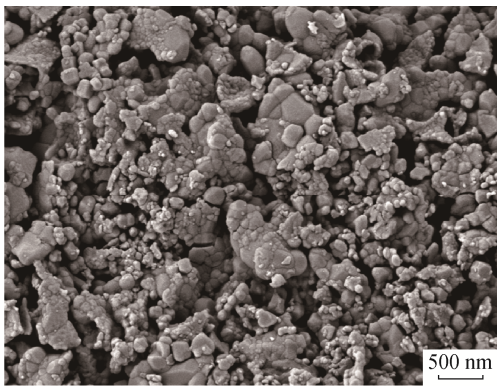
到阴极材料的 XRD 谱。由图 1a 可以看出：浸渍修饰后的阴极材料与 LSCF 阴极材料的特征峰一致，并无杂质产生，仍能够保持钙钛矿结构。图 1b 为阴极材料在衍射角度为 32°~33°的局部放大图。从图 1b 可以看出，浸渍后的阴极材料的衍射峰较 LSCF 阴极材料略微向低角度偏移，说明浸渍后阴极材料的晶格体积膨胀。由于 $Ni^{2+}$的离子半径为 7.2 nm，而 $Fe^{3+}$与 $Co^{2+}$的离子半径分别为6.4 nm和7.4 nm，在 LSCF 的 B 位引入少量 $Ni^{2+}$，使得阴极材料的晶胞体积增大，证明了浸渍的材料与 LSCF 阴极骨架在烧结后重排形成了 $La_{0.62}Sr_{0.38}Ni_{0.03}Co_{0.19}Fe_{0.78}O_{3-\delta}$(LSNCF)。

### 2.2　表面修饰阴极微观结构分析

图 2 为 LSCF 阴极材料(图 2a)与修饰后 LSNCF (图 2b)阴极材料的 SEM 照片。可以看出，LSCF 阴极材料的粒径比较均匀，并保持多孔的形貌。而浸渍后的阴极材料表面生长出很多纳米级小颗粒。这种在甘氨酸作用下得到的纳米颗粒，可以增加阴极材料的三相界面，提高阴极材料对 $O_2$ 的催化活性。




(a) LSCF cathode

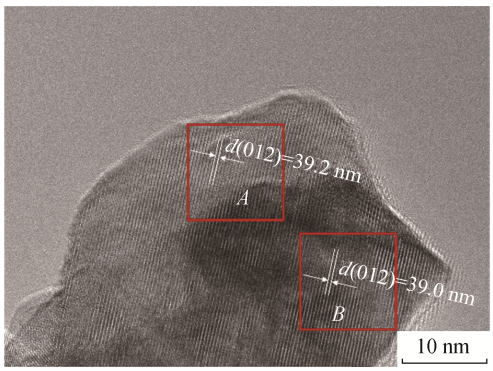



(b) LSNCF cathode after surface modification

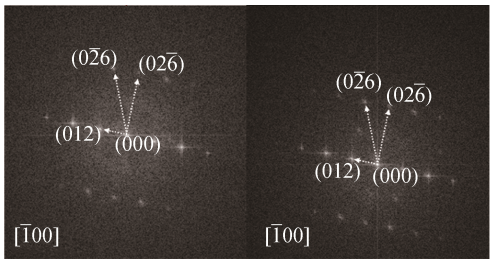
图 2　烧结后阴极材料的微观 SEM 照片

Fig. 2　SEM images of cathode materials after sintering

图 3 为阴极材料表面修饰后纳米颗粒的高分辨 TEM(HR-TEM)和 HR-TEM 中选择区域的快速 Fourier 变换(FTT)图。从图 3a 可以看出，所选择 2 个区域内(012)晶面的晶面间距分别为 0.392 nm 和 0.390 nm，说明材料的结晶度良好。图 3b 为沿[$\bar{1}$00]晶带轴所对应的 FTT 图像，可以看出 LSNCF 为菱方钙钛矿结构。图 4 为表面修饰后的 LSNCF 阴极材料 TEM-Mapping 元素分布图。从图 4 可以看到在表面修饰后产生的纳米颗粒元素分布均匀。这与 XRD 分析结果吻合，说明浸渍材料与 LSCF 阴极材料形成了 LSNCF 固溶体。




(a) HR-TEM image of the LSNCF lattice




(b) Corresponding FFT patterns along [ $\bar{1}$00 ] zone axis

图 3　LSNCF 阴极材料的晶体结构

Fig. 3　Crystalline structure of LSNCF cathode material

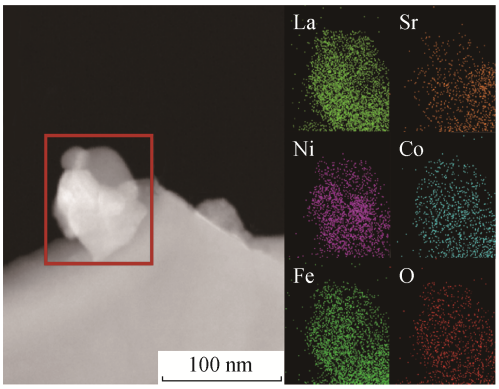



图 4　LSNCF 阴极材料的 TEM-Mapping 图

Fig. 4　TEM-mapping image of LSNCF cathode material

### 2.3　表面修饰阴极材料极化阻抗分析

LSCF 阴极材料与 LSNCF 阴极材料对称电池在

650~800 ℃的典型交流阻抗谱如图 6 所示。由图 6 可见，阴极材料在不同温度下的交流阻抗谱由高频的感应弧及中频和低频部分压扁的半圆弧组成，且半圆弧随温度的升高而减小。根据 Adler[11–12]的理论，钙钛矿阴极的阻抗由中频部分的电荷迁移阻抗和低频部分的氧离子迁移阻抗组成，其中低频部分阻抗反映的是氧在阴极表面吸附/解离过程，因此阴极的阻抗可用图 5 所示的等效电路进行拟合。其中 $L$ 为测试装置和电极引线的电感；$R_1$ 为电解质和电极引线的 Ohmic 电阻；$R_2$ 为阴极中频部分的极化电阻；CPE1 为描述阴极的容抗特性的恒相角阻抗；$R_3$ 为阴极低频部分的极化电阻；CPE2 为描述阴极的容抗特性的恒相角阻抗[13]。阴极材料的面积比极化阻抗 $R_{ASR}$ 由公式(1)求得。

$$R_{ASR}=Rp\cdot S/2 \quad (1)$$

其中：$Rp=R_2+R_3$；$S$ 为阴极的有效面积。LSCF 阴极材料与 LSNCF 阴极材料对称电池极化阻抗的拟合结果表 2 所示。

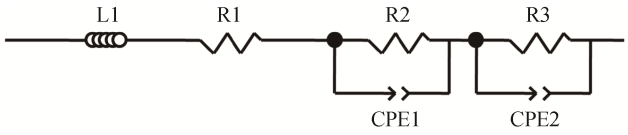
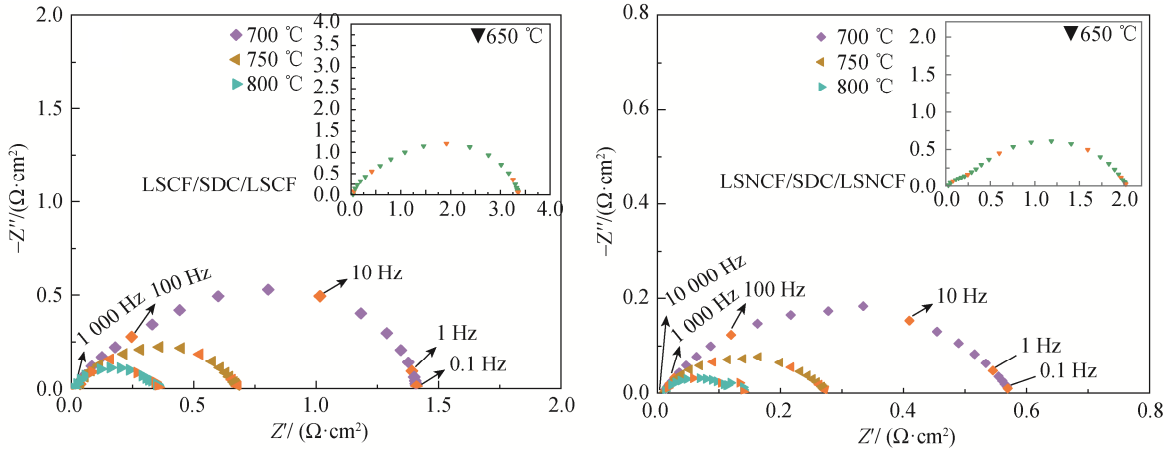



图 5　对称电池的等效电路

Fig. 5　Equivalent circuit diagram of symmetrical cell




(a) LSCF symmetric electrode　(b) LSCF@LSNCF symmetric electrode

图 6　不同阴极材料的对称电池在不同温度的阻抗谱

Fig. 6　Impedance spectra of symmetrical cells with different cathode materials at different temperatures ($Z'$: Real part of impedance, $Z''$: Imaginary part of impedance)

图 6 中为便于对比不同温度下的极化阻抗变化规律，已经将导线及电解质等因素产生的电感和 Ohmic 阻抗去除。经拟合后 LSCF 对称电池在 650、700、750、800 ℃的极化面电阻分别为 1.958、0.823、0.403、0.211 Ω·cm$^2$，而经过表修饰的 LSNCF 对称电池在 650、700、750、800 ℃下的极化面电阻为 1.292、0.329、0.161、0.083 Ω·cm$^2$(表 1)，在各温度下均比未经表面修饰的 LSCF 阴极材料表现出更低的极化阻抗值。LSNCF 阴极材料在中频弧 $R^2$ 比 LSCF 略微增大，这样会牺牲阴极材料部分电荷转移能力。经表面修饰的 LSNCF 阴极材料低频弧 $R_3$ 显著降低，这说明附着阴极材料表面的纳米颗粒显著改善了阴极材料的氧表面交换能力，有利于提升氧分子在阴极材料的表吸附解离和向阴极内部扩散的能力，而使极化面电阻 $R_{ASR}$ 明显降低，这样有利于提升燃料电池的电化学性能。对 LSCF 和 LSNCF 阴极材料作 Arrhenius 曲线(图 7)，可计算得到两种阴极材料的氧还原反应(ORR)的反应活化能。从图 7 可以看出，通过表面修饰后降低了阴极材料的氧还原反应活化能。以上数据都表明通过浸渍表面修饰阴极材料，增加了阴极材料三相界面的长度，提高阴极材料对氧的催化能力。

**表 1　不同温度下 LSCF/SDC/LSCF 与 LSNCF/SDC/LSNCF 对称电池极化阻抗**

**Table 2　Polarization resistances of the symmetrical cell of LSCF/SDC/LSCF & LSNCF/SDC/LSNCF at different temperatures**

| Sample | $T$/℃ | $R_2$/(Ω·cm$^2$) | $R_3$/(Ω·cm$^2$) | $R_{ASR}$/(Ω·cm$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| LSCF | 650 | 0.751 | 2.606 | 1.958 |
| | 700 | 0.360 | 1.052 | 0.823 |
| | 750 | 0.071 | 0.620 | 0.403 |
| | 800 | 0.015 | 0.346 | 0.211 |
| LSNCF | 650 | 0.622 | 1.596 | 1.292 |
| | 700 | 0.554 | 0.015 | 0.329 |
| | 750 | 0.264 | 0.012 | 0.161 |
| | 800 | 0.128 | 0.011 | 0.083 |

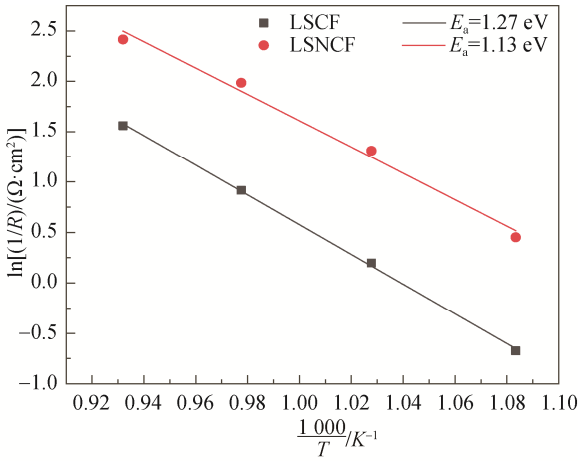



图 7　不同阴极材料的极化阻抗与温度的 Arrhenius 曲线

Fig. 7　Arrhenius curves of polarization resistance and temperature of different cathode materials

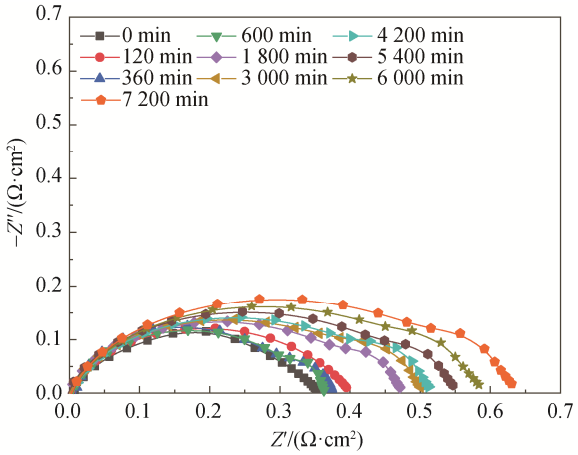
图 8a 和图 8b 分别为 LSCF 和 LSNCF 阴极材料的对称电池在 800 ℃无电流通过条件下短期运行阻抗谱。数据结果由图 5 的等效电路拟合，得到在不同工作时间的阴极材料极化阻抗随时间的柱状图，如图 8c 所示。由图 8c 可以看出，在经过 7 200 min 短期运行后，LSCF 为阴极的对称电池极化阻抗由 0.211 Ω·cm$^2$ 增长至 0.376 Ω·cm$^2$，而同等条件下 LSNCF 阴极材料的极化阻抗由 0.083 Ω·cm$^2$ 增长至 0.117 Ω·cm$^2$，说明通过表面修饰得到的 LSNCF 阴极材料在持续 7 200 min 工作后，仍具有较高的稳定性。

## 2.4　单电池性能

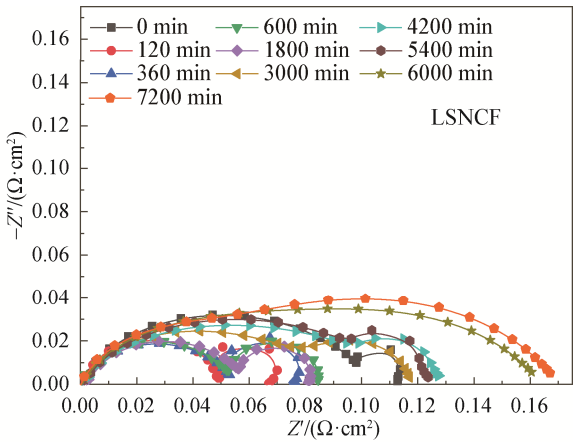
以 Ni-SDC 为阳极，SDC 为电解质，LSNCF 为阴极，制备了阳极支撑型单电池 NiO-SDC/SDC/LSNCF。以含 3% $H_2O$ 的湿润 $H_2$ 为燃料(流速为 60 mL/min)，空气为氧化剂，测试的单电池的功率密度如图 9a 所示。

从图 9a 可见，在 750、700、650 ℃时，单电池的最高功率分别可以达到 693、535、315 mW/cm$^2$。图 9b 为未经表面修饰的 LSCF 阴极单电池性能，对比 2 种阴极材料所制备的单电池性能，由于采用浸渍表面修饰增加了反应界面，增强了阴极材料表面对 $O_2$ 的催化能力，使得采用表面修饰阴极材料的单电池具有更加优良的电化学性能。但是单电池在 650 ℃的最高开路电压处于 0.83 V 附近，开路电压随着温度的升高在 750 ℃下降到 0.76 V 附近，这是由于 SDC 电解质在高温还原气氛下 $Ce^{4+}$还原成 $Ce^{3+}$，$Ce^{3+}$产生的电子电导使单电池的开路电压降低。

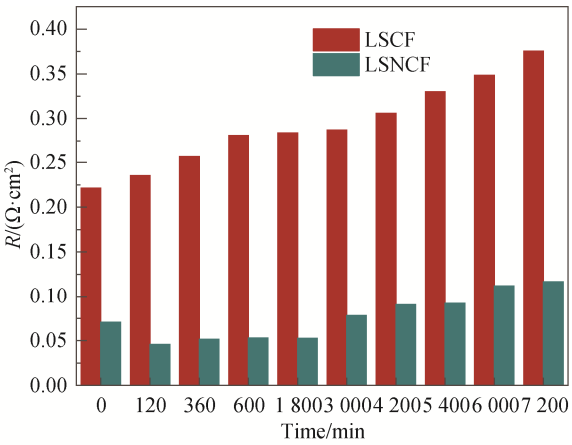
图 10 为 Ni/SDC/LSNCF 单电池在不同温度下的阻抗谱。从图 10 可以看出，由于电池采用阳极支撑电池结构，单电池的阻抗较小，但在低温(650 ℃)时电池的欧姆阻抗较大，若改进工艺进一步减小电解质的厚度，可以使电池具有更加优良的电化学性能。图 11 为 Ni/SDC/LSNCF 单电池测试后的断面微观电镜照片。从图 11 可以看出，阳极和阴极均呈多孔结构。由于采用共压烧结的工艺，阳极与电解质紧密结合，在单电池测试完后，阴极侧也并未发生脱落。




(a) LSCF cathode



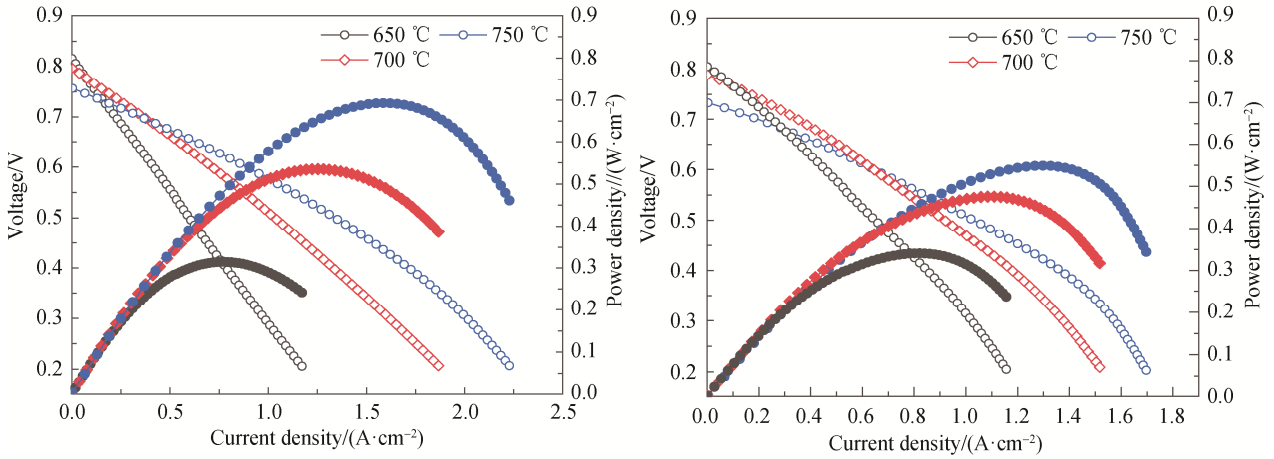

(b) LSNCF cathode




(c) ASR variation

图 8　不同阴极材料在 800 ℃短期运行阻抗谱

Fig. 8　Short - term operation impedance spectra of different cathode materials at 800 ℃




(a) Ni-SDC/SDC/LSNCF single cell　(b) Ni-SDC/SDC/LSCF single cell

图 9　不同温度下单电池的开路电压与功率密度

Fig. 9　Diagram of open circuit voltage and power density of single cell at different temperatures

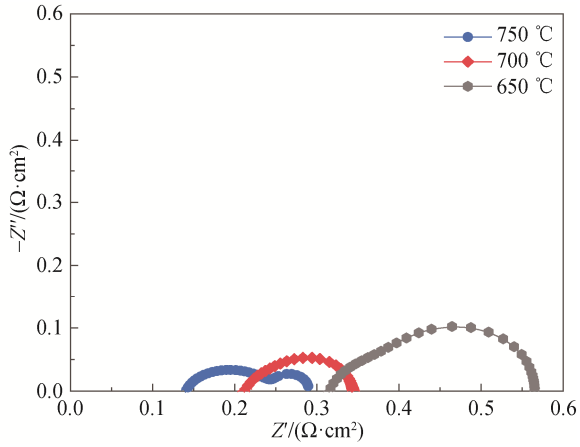



图 10　不同温度下单电池的交流阻抗谱

Fig. 10　AC impedance spectra of single cell at different temperatures

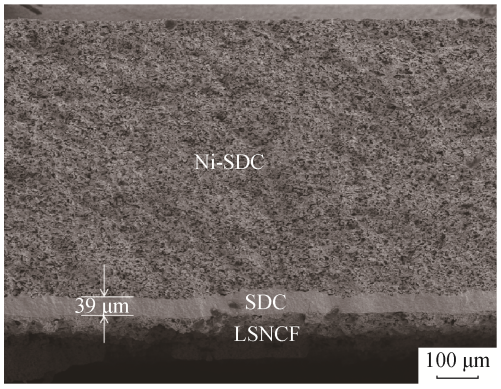



图 11　单电池测试后的断面 SEM 照片

Fig. 11　SEM image of cross-section after single cell test

## 3　结论

1) 浸渍的硝酸盐与 LSCF 阴极形成了 $La_{0.62}Sr_{0.38}Ni_{0.03}$ $Co_{0.19}Fe_{0.78}O_{3-\sigma}$ 阴极材料，且无杂相生成，LSNCF 为菱方钙钛矿结构。

2) 表面修饰的 LSNCF 阴极材料相比 LSCF 阴极材料具有更小的极化阻抗，增强了氧分子在阴极材料的表面吸附解离和向阴极内部扩散的能力，在 800 ℃时的极化阻抗为 0.083 Ω·cm$^2$，经 800 ℃连续工作 7 200 min 后，LSNCF 阴极材料的极化阻抗为 0.117 Ω·cm$^2$，具有出色的稳定性。采用 Ni-SDC 为阳极，SDC 为电解质制备的阳极支撑型单电池在 750 ℃最大功率密度为 693 mW/cm$^2$，表明通过浸渍法对 LSCF 阴极材料进行表面修饰可以增强燃料电池的电化学性能。

**参考文献**:

[1] 毛宗强, 王诚. 低温固体氧化物燃料电池[M]. 上海, 上海科学技术出版社, 2013.

[2] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1): 1–13.
HOU M, YI B L. J Electrochem (in Chinese), 2012, 18 (1): 1–13.

[3] TANIGUCHI S, KADOWAKI M, KAWAMURA H. Degradation phenomena in the cathode of a solid oxide fuel cell with an alloy separator[J]. J Power Sources, 1995, 55: 73–79.

[4] SAN Pingjiang. Development of lanthanum strontium manganite perovskite cathode materials of solid oxide fuel cells: a review[J]. J Mater Sci, 2008, 43: 6799–6833.

[5] WANG SHUANGYIN, SAN Pingjiang. Prospects of fuel cell technologies[J]. Nat Sci Rev, 2017(4):15–18.

[6] SHAO Z, TADE M O. Intermediate-temperature solid oxide fuel cells[J]. Chem Soc Rev, 2016, 37(8): 1568.

[7] MURRAY E P, SEVER M J, BARNETT S A. Electrochemical performance of (La,Sr)(Co,Fe)$O_3$–(Ce,Gd)$O_3$ composite cathodes[J]. Solid State Ionics Diffusion React, 2002, 148(1/2): 27–34.

[8] SHAH M, BARNETT S A. Solid oxide fuel cell cathodes by infiltration of $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$ into Gd-Doped Ceria[J]. Solid State Ionics, 2008, 179: 2059–2064.

[9] BURYE T E, NICHOLAS J D. Precursor solution additives improve desiccated $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$ infiltrated solid oxide fuel cell cathode performance[J]. J Power Sources, 2016, 301: 287–298.

[10] DING Dong, LI Xiaxi, LAI S Y, et al. Enhancing SOFC cathode performance by surface modification through infiltration[J]. Energy Environ Sci, 2014(7): 552–575.

[11] ADLER S B. Limitations of charge-transfer models for mixed-conducting oxygen electrodes[J]. Solid State Ionics Diff React, 2000, 135(1/4): 603–612.

[12] BAEK S W, BAE J, YOO Y S. Cathode reaction mechanism of porous-structured $Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-\delta}$ and $Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-\delta}/Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$ for solid oxide fuel cells[J]. J Power Sources, 2009, 193(2): 431–440.

[13] ZHANG Y, CHEN Y, LI M, et al. A high-precision approach to reconstruct distribution of relaxation times from electrochemical impedance spectroscopy[J]. J Power Sources, 2016, 308: 1–6.