

DOI: 10.13208/j.electrochem.121206

Cite this: *J. Electrochem.* 2014, 20(1): 45-50

Artical ID:1006-3471(2014)01-0045-06

Http://electrochem.xmu.edu.cn

# 中温固体氧化物燃料电池 $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ - $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ 梯度复合阴极制备及交流阻抗性能

李 扬, 黄 波\*, 袁 梦, 张志秋, 刘宗尧, 唐旭晨, 朱新坚

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 燃料电池研究所, 上海 200240)

**摘要:** 应用丝网印刷和共烧结制备  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ (LNF)- $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ (GDC)梯度复合阴极/ $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ /Sc<sub>0.1</sub>Zr<sub>0.9</sub>O<sub>1.95</sub>(ScSZ)/ $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ /LaNi<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>O<sub>3-δ</sub>(LNF)- $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ (GDC), 组成梯度复合阴极对称电池. 实验表明, 在 750 °C 工作温度下单层 70%LNF-30%GDC (文中均指质量百分比) 复合阴极的极化电阻为 0.581 Ω·cm<sup>2</sup>, 而三层 60%LNF-40%GDC/70%LNF-30%GDC/100%LNF 复合阴极的极化电阻最小 (0.452 Ω·cm<sup>2</sup>). 由于阴极组成在 ScSZ 电解质和 LNF 阴极之间呈梯度变化, 因此获得了最佳的阴极/电解质界面, 大大加快了三相界面或气体/阴极/电解质三相接触点反应区的扩散, 其电荷传递电阻  $R_{ct}$  和浓差极化电阻  $R_d$  均减小, 因而具有最低的阴极极化电阻值.

**关键词:** 固体氧化物燃料电池;  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$  阴极; 梯度阴极; 极化电阻; 交流阻抗

**中图分类号:** O646

**文献标识码:** A

中温 ( $\leq 800$  °C) 固体氧化物燃料电池 (Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell, IT-SOFC) 使用廉价的金属合金作为电池的双极板材料, 可使其稳定运行, 提高电极的稳定性、减小热应力和延长电池寿命<sup>[1-3]</sup>. Cr 基合金因具有成本低、易加工、电子电导率和热导率高、机械稳定性高、耐高温以及抗氧化等优点而成为最有前景的双极板材料<sup>[4-6]</sup>. Cr 基合金用于 SOFC 的双极板时, 高价态 Cr 化合物易挥发. 低导电性的  $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$  在阴极/电解质界面的生成与聚集又会降低 SOFC 的电输出性能<sup>[7-10]</sup>, 且  $\text{CrO}_3(\text{g})$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$  可与传统阴极材料如  $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$ <sup>[10-11]</sup>、 $(\text{La}, \text{Sr})(\text{Co}, \text{Fe})\text{O}_3$ <sup>[12]</sup> 反应生成绝缘的尖晶石相  $(\text{Cr}, \text{Mn})_3\text{O}_4(\text{s})$ 、 $(\text{Sr}, \text{Cr})_3\text{O}_4(\text{s})$ , 即发生阴极“Cr 中毒”<sup>[12-13]</sup>, 使电池性能急剧下降. 据 Chiba 等<sup>[14]</sup>报道  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ (LNF) 800 °C 电导率为 580 S·cm, 为传统阴极  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$ (LSM) (180 S·cm) 的 3 倍, 其室温 ~ 1000 °C 热膨胀系数为  $11.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , 更接近于 YSZ 电解质 (Yttria Stabilized Zirconia,  $\text{Y}_{0.08}\text{Zr}_{0.92}\text{O}_{1.95}$ ) 的热膨胀系数  $10.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Zhen 等<sup>[15]</sup>研究也表明 LNF 比 LSM 具有更稳定的电化学性能, Fe-Cr 合金存在时, 其界面上没有 Cr 沉积, LNF 有抗 Cr 毒化作用. 然而, 在相同的烧结

温度 LNF 较 LSM 更易与  $\text{ZrO}_2$  基电解质反应<sup>[16-17]</sup>, 如高于 1000 °C 时 LNF 与  $\text{ZrO}_2$  基电解质反应生成绝缘的  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ , 降低电池性能. 由于 LNF 阴极材料在工作温度下的再氧化以及随之的氧空位浓度的下降<sup>[18]</sup>, 致使 LNF 阴极的初始性能下降. 因此, LNF 作为极具应用前景的中低温阴极材料, 其性能还需要进一步改善.

本文采用 LNF 构筑梯度结构设计, 将目前已知的催化性能优良、电子电导率高、物理化学稳定性优异的阴极材料  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ (LNF) 和催化性能优良、具有突出的氧离子储存、释放和传输能力的氧化钪掺杂  $\text{CeO}_2(\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2, \text{GDC})$  这两种材料组合起来. 使其对高性能 SOFC 阴极的多种要求由不同的组成梯度阴极层来承担, 并使各层间相互配合, 利用协同作用达到优势互补的效果. 如此, 可显著改善 LNF 组成梯度复合阴极的氧气还原反应动力学, 从而达到提高 SOFC 性能的目的.

## 1 实 验

### 1.1 LNF 基梯度阴极的制备

按摩尔比  $\text{La}:\text{Ni}:\text{Fe} = 1:0.6:0.4$  称取一定量的  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  和  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  配成混合溶液, 加入一定比例的柠檬酸 (参见文献<sup>[19]</sup>), 用

氨水将混合液调至中性. 将其 120 °C 加热蒸发, 得褐色干凝胶, 置于坩埚电炉(300 °C 预热)燃烧, 升温至 600 °C 煅烧 2 h 可得黑色  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3.8}$ (LNF) 粉体材料. 详细的粉体制备方法参见文献<sup>[20]</sup>.

GDC 溶液(见文献<sup>[21]</sup>): 按摩尔比  $\text{Gd}:\text{Ce} = 1:4$  取一定量的  $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  与一定化学计量比的柠檬酸溶于蒸馏水中(柠檬酸与硝酸盐的化学配比计算方法参见文献<sup>[19]</sup>), 用氨水将混合液调至中性. 将上述溶液置于烘箱 75 °C 烘干, 移入预热至 450 °C 的坩埚电炉内即升温至 600 °C, 保温 2 h 可得淡黄色的  $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ (GDC) 粉体材料.

将 GDC 浆料通过丝网印刷覆盖于 ScSZ 片(厚约 200  $\mu\text{m}$ ) 两侧, 1300 °C 煅烧 2 h 印制成 GDC/ScSZ/GDC, 其中 GDC 层厚约 2  $\mu\text{m}$ .

按质量比  $\text{LNF}:\text{GDC} = 70:30$  称取一定量的 LNF 和 GDC 粉体的混合物, 与松油醇混合成浆料, 经丝网印刷覆盖于 GDC 层两侧并于 110 °C 干燥 0.5 h. 将得到的 70%LNF-30%GDC 复合阴极的坯体在 1050 °C 烧结 2 h, 即得到 70%LNF-30%GDC/GDC/ScSZ/GDC/70%LNF-30%GDC 对称电池, 70%LNF-30%GDC 复合阴极记为 Cathode A, 厚度 30  $\mu\text{m}$ .

按质量比  $\text{LNF}:\text{GDC} = 60:40$  称取一定量的 LNF 和 GDC 粉体的混合物, 与松油醇混合成浆料, 经丝网印刷覆盖于 GDC 层两侧并于 110 °C 干燥 0.5 h. 然后将 LNF 粉体与松油醇混合成浆料, 经丝网印刷法沉积在 LNF-GDC 两侧并于 110 °C 干燥 0.5 h. 最后, 将得到的 60%LNF-40%GDC/100%LNF 梯度阴极的坯体在 1050 °C 烧结 2 h, 即得 100%LNF/60%LNF-40%GDC/GDC/ScSZ/GDC/60%LNF-40%GDC/100%LNF 对称电池, 60%LNF-40%

GDC/100%LNF 复合阴极标记为 Cathode B, 其中 60%LNF-40%GDC 层 10  $\mu\text{m}$ , LNF 层 20  $\mu\text{m}$ .

按质量比  $\text{LNF}:\text{GDC} = 60:40$  称取一定量的 LNF 和 GDC 粉体的混合物, 与松油醇混合成浆料, 经丝网印刷覆盖于 GDC 层两侧并于 110 °C 干燥 0.5 h. 然后按质量比  $\text{LNF}:\text{GDC} = 70:30$  称取一定量的 LNF 和 GDC 粉体的混合物, 与松油醇混合成浆料, 经丝网印刷覆盖于 60%LNF-40%GDC 层两侧并于 110 °C 干燥 0.5 h. 然后将 LNF 粉体与松油醇混合成浆料, 经丝网印刷法沉积在 70%LNF-30%GDC 两侧并于 110 °C 干燥 0.5 h. 最后, 将得到的 60%LNF-40%GDC/70%LNF-30%GDC/100%LNF 梯度阴极的坯体在 1050 °C 烧结 2 h, 即得 100%LNF/70%LNF-30%GDC/60%LNF-40%GDC/GDC/ScSZ/GDC/60%LNF-40%GDC/70%LNF-30%GDC/100%LNF 对称电池, 60%LNF-40%GDC/70%LNF-30%GDC/100%LNF 复合阴极标记为 Cathode C, 其中 60%LNF-40%GDC 层 10  $\mu\text{m}$ , 70%LNF-30%GDC 层 10  $\mu\text{m}$ , LNF 层 10  $\mu\text{m}$ . 含有三种阴极 Cathode A、Cathode B 和 Cathode C 的对称电池的结构示意图如图 1 所示.

## 1.2 LNF 基梯度阴极的表征

使用 Solartron 1260 阻抗仪测试电池交流阻抗(开路), 测试频率 10 mHz ~ 100 kHz, 交流阻抗输入信号 20 mV, 工作温度为 650 °C、700 °C、750 °C、800 °C 和 850 °C. 使用扫描电子显微镜(SEM, S4800 型, Japan)观察材料微观形貌.

## 2 结果与讨论

图 2 给出 LNF 基梯度阴极 (Cathode A、B、C) 分别在 750 °C(A) 和 800 °C(B) 工作温度下的交流阻抗谱图和等效电路图(C). 为清晰地表示 LNF 基梯度阴极的阴极极化行为的差异, 对称电池的欧姆

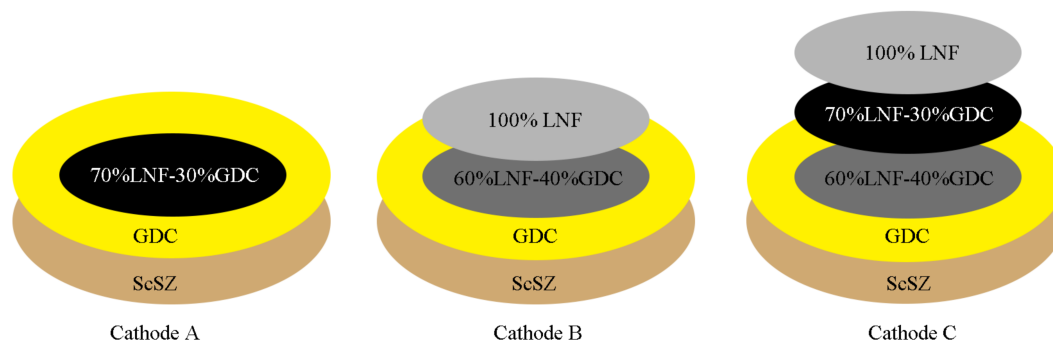


图 1 分别含有三种阴极 Cathode A、Cathode B 和 Cathode C 对称电池的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of one side of the symmetric cell structure for Cathode A, Cathode B, and Cathode C

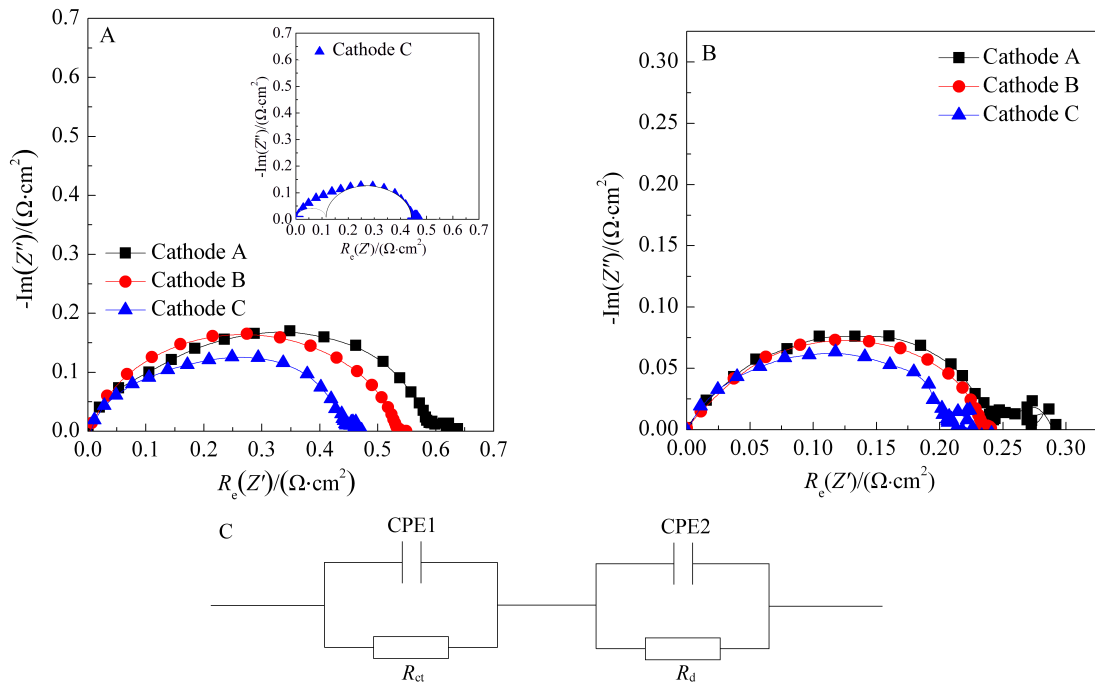


图 2 LNF 基阴极工作温度 750 °C(A)和 800 °C(B)的电化学阻抗谱图及等效电路图(C)

图 2A 插图显示 Cathode C 的交流阻抗的实测值和拟和值的比较

Fig. 2 Electrochemical impedance spectroscopic curves of LNF-based cathodes measured at 750 °C (A), 800 °C (B) in air at open circuit and the equivalent circuit for data fitting (C) The inset in Fig. 2A shows the measured impedance spectrum of Cathode C compared to that calculated using the equivalent circuit (C)

电阻  $R_{\Omega}$  暂未标出. 由图 2 可知, 该阻抗谱图是由高频弧和低频弧组成. 其高频弧相应阴极/电解质界面的电化学反应过程(界面极化电阻或电荷传递电阻  $R_{ct}$ ), 低频弧相应气体扩散过程(浓差极化电阻  $R_d$ ), 阴极极化电阻  $R_p = R_{ct} + R_d$ <sup>[22-25]</sup>. 随阴极层数的增加, 其阴极的电荷传递电阻  $R_{ct}$  和浓差极化电阻  $R_d$  皆渐减, 相应地阴极极化电阻也皆渐减. 650 °C、700 °C 以及 850 °C 工作温度下 LNF 梯度阴极的交流阻抗谱图也有同样的趋势.

图 3 和图 4 分别给出 LNF 基阴极(Cathode A、B、C)极化电阻、电荷传递电阻  $R_{ct}$  和浓差极化电阻  $R_d$ -工作温度曲线. 从图中发现, 相同工作温度下 LNF 基阴极层数由 1 层增至 3 层, 其阴极极化电阻逐渐降低. 单层阴极 70% LNF-30% GDC (Cathode A), 其在 850 °C、800 °C、750 °C、700 °C 和 650 °C 工作温度时的极化电阻分别为 0.101、0.242、0.581、1.363、3.405  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ . 两层阴极 60% LNF-40% GDC/100% LNF (Cathode B) 的极化电阻在相应工作温度下分别减至 0.093、0.230、0.541、1.176、2.951  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 相对于 Cathode A 其极化电阻

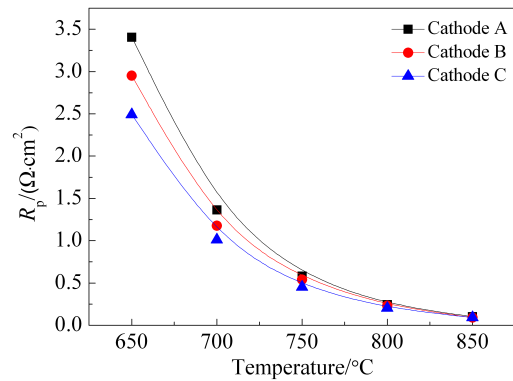


图 3 LNF 基阴极极化电阻-工作温度曲线

Fig. 3 Polarization resistance of LNF-based cathodes versus working temperature

减小 5% ~ 15%. 而三层阴极 60% LNF-40% GDC/70% LNF-30% GDC/100% LNF (Cathode C) 的极化电阻在相应工作温度下又进一步分别降至 0.091、0.202、0.452、1.009 和 2.489  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 相对于 Cathode A 其极化电阻减小 10% ~ 30% (图 3). LNF 基阴极的浓差极化电阻  $R_d$  皆远大于电荷传递电阻  $R_{ct}$ , 说明浓差极化电阻  $R_d$  在阴极极化电阻  $R_p$

中居于支配地位. 随阴极层数的增加, 其阴极的电荷传递电阻  $R_{ct}$  和浓差极化电阻  $R_d$  皆渐减(图 4).

图 5 示出经 1050 °C 煅烧后含有三种阴极 (Cathode A、B、C) 的对称电池纵截面的 SEM 形貌照片. 可以看出, 对于 70%LNF-30%GDC/GDC/ScSZ, 阴极层与电解质层的界面结合不紧密; 随阴极层数的增加, 对于 100%LNF/60%LNF-40%GDC/GDC/ScSZ, 界面结合趋于紧密; 增至三层, 对于 100%LNF/70%LNF-30%GDC/60%LNF-40%GDC/GDC/ScSZ, 阴极层与电解质层的界面结合更加紧密. 显然, 阴极层数的增加改善了阴极/电解质界面的微观结构, 电荷传递电阻  $R_{ct}$  减小, 也加速气体/阴极/电解质三相界面反应区的扩散过程, 浓差极化电阻  $R_d$  同样减小. 因此, 降低了阴极极化电阻, 极大地改善阴极的电化学性能. 综上所述, 三层阴极 Cathode C 中 ScSZ 电解质和 LNF 阴极间的组成呈梯度变化, 可获得最佳的阴极/电解质界面, 大大加快了三相界面或气体/阴极/电解质三相接触点反应区的扩散, 电荷传递电阻  $R_{ct}$  和浓差极化电阻  $R_d$

均减小, 故其阴极极化电阻值最低.

### 3 结 论

应用丝网印刷和共烧结制备 LNF-GDC 组成梯度复合阴极 /GDC/ScSZ/GDC/LNF-GDC 组成梯度复合阴极对称电池. 随梯度阴极层数的增加, 其阴极的电荷传递电阻和浓差极化电阻皆减小, 因而极化电阻也减小.

60%LNF-40%GDC/70%LNF-30%GDC/100%LNF 梯度复合三层阴极性能最佳. 在 850 °C、800 °C、750 °C、700 °C 和 650 °C 工作温度其极化电阻分别为 0.091、0.202、0.452、1.009 和 2.489  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 小于 70%LNF-30%GDC 复合阴极的极化电阻, 其在相应工作温度下分别为 0.101、0.242、0.581、1.363 和 3.405  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ . 梯度复合阴极层数增加改善了阴极/电解质界面的微观结构, 加快了三相界面或气体/阴极/电解质三相接触点反应区的扩散, 降低了阴极的极化电阻.

### 参考文献(References):

- [1] Lv S Q (吕世权), Long G H (龙国徽), Meng X W (孟祥伟), et al. Perovskite cathode for solid oxide fuel cells[J]. Chinese Journal of Power Source (电源技术), 2010, 34(7): 734-737.
- [2] Guo Y B (郭友斌), Lu L H (陆丽华), Chu L (储凌), et al. Research progress in perovskite-like cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cells[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society (硅酸盐通报), 2009, 28(5): 991-996.
- [3] Wu L W (邬理伟), Zheng Y P (郑颖平), Sun Y M (孙岳明), et al. Research progress in composite cathode of SOFC[J]. Chinese Battery Industry (电池工业), 2010, 15 (1): 53-56.
- [4] Kadowaki T, Shiomitsu T, Marsuda E, et al. Applicability of heat resisting alloys to the separator of planar type solid oxide fuel cell[J]. Solid State Ionics, 1993, 67(1/2): 65-69.

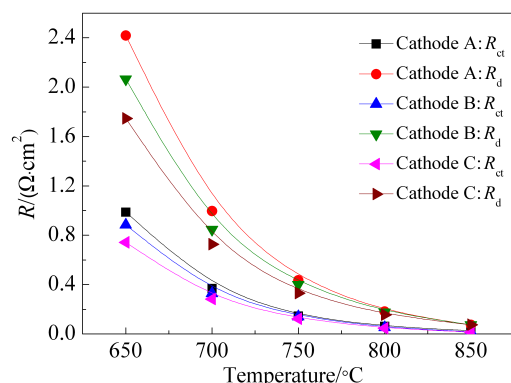


图 4 LNF 基阴极电荷传递电阻  $R_{ct}$  和浓差极化电阻  $R_d$  工作温度曲线

Fig. 4 Charge transfer resistance ( $R_{ct}$ ) and gas phase diffusion resistance ( $R_d$ ) of LNF-based cathodes versus working temperature

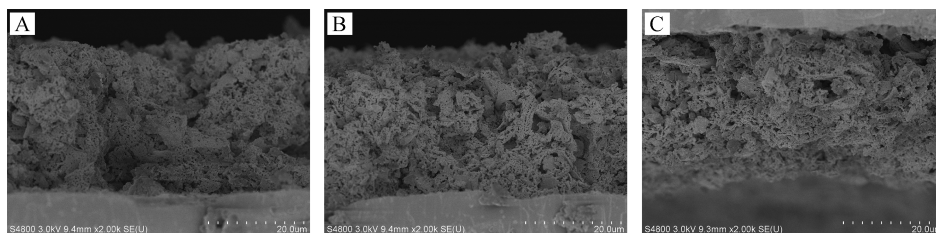


图 5 含有三种阴极 Cathode A、B 和 C 对称电池的纵截面 SEM 形貌照片

Fig. 5 SEM micrographs showing the interfaces of the symmetric cell structure for Cathode A, Cathode B, and

- [5] Yang Z, Weil K S, Paxton D M, et al. Selection and evaluation of heat-resistant alloys for SOFC interconnect applications[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2003, 150(9): A1188-A1201.
- [6] Horita T, Xiong Y, Kishimoto H, et al. Application of Fe-Cr alloys to solid oxide fuel cells for cost-reduction: Oxidation behavior of alloys in methane fuel[J]. Journal of Power Sources, 2004, 131(1/2): 293-298.
- [7] Tucker M C, Kurokawa H, Jacobson C P, et al. A fundamental study of chromium deposition on solid oxide fuel cell cathode materials[J]. Journal of Power Sources, 2006, 160(1): 130-138.
- [8] Konyshova E, Penkalla H, Wessel E, et al. Chromium poisoning of perovskite cathodes by the ODS alloy  $\text{Cr}_5\text{Fe}_1\text{Y}_2\text{O}_3$  and the high chromium ferritic steel crofer22APU[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(4): A765-A773.
- [9] Yokokawa H, Horita T, Sakai N, et al. Thermodynamic considerations on Cr poisoning in SOFC cathodes[J]. Solid State Ionics, 2006, 177(35/36): 3193-3198.
- [10] Liu D J, Almer J, Cruse T. Characterization of Cr poisoning in a solid oxide fuel cell cathode using a high energy X-ray microbeam[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(5): B744-B750.
- [11] Badwal S P S, Deller R, Foger K, et al. Interaction between chromia forming alloy interconnects and air electrode of solid oxide fuel cells[J]. Solid State Ionics, 1997, 99(3/4): 297-310.
- [12] Horita T, Xiong Y P, Kishimoto H, et al. Chromium poisoning and degradation at  $(\text{La}, \text{Sr})\text{MnO}_3$  and  $(\text{La}, \text{Sr})\text{FeO}_3$  cathodes for solid oxide fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(5): B614-B620.
- [13] Jiang S P, Zhang J P, Apateanu L, et al. Deposition of chromium species at Sr-Doped  $\text{LaMnO}_3$  electrodes in solid oxide fuel cells: III. Effect of air flow[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(7): C447-C455.
- [14] Chiba R, Yoshimura F, Sakurai Y. An investigation of  $\text{LaNi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  as a cathode material for solid oxide fuel cells[J]. Solid State Ionics, 1999, 124(3/4): 281-288.
- [15] Zhen Y D, Tok A I Y, Jiang S P, et al.  $\text{La}(\text{Ni}, \text{Fe})\text{O}_3$  as a cathode material with high tolerance to chromium poisoning for solid oxide fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(1): 61-66.
- [16] Orui H, Watanabe K, Chiba R, et al. Application of  $\text{LaNi}(\text{Fe})\text{O}_3$  as SOFC cathode[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151(9): A1412-A1417.
- [17] Bevilacqua M, Montini T, Tavagnacco C, et al. Preparation, characterization, and electrochemical properties of pure and composite  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ -based cathodes for IT-SOFC [J]. Chemistry of Materials, 2007, 19: 5926-5936.
- [18] Hashimoto S I, Kammer K, Larsen P H, et al. A study of  $\text{Pr}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3-\delta}$  as a cathode material for SOFCs with intermediate operating temperature[J]. Solid State Ionics, 2005, 176: 1013-1020.
- [19] Jain S R, Adiga K C, Vemeker V R P. A new approach to thermochemical calculation of condensed fuel-oxidizer mixtures[J]. Combustion and Flame, 1981, 40(1): 71-76.
- [20] Liu H (刘珩), Huang B (黄波), Zhu X J (朱新坚). Preparation and Characterization of the  $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$  cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cell[J]. Journal of Electrochemistry(电化学), 2011, 17(4): 421-426.
- [21] Huang B, Ye X F, Wang S R, et al. Performance of Ni/ScSZ cermet anode modified by coating with  $\text{Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$  for a SOFC running on methane fuel[J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(2): 1172-1181.
- [22] Zhou W, Ran R, Shao Z, et al. Electrochemical performance of silver-modified  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  cathodes prepared via electrodes deposition[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(13): 4370-4380.
- [23] Adler S B. Limitations of charge-transfer models for mixed-conducting oxygen electrodes[J]. Solid State Ionics, 2000, 135(1/4): 603-612.
- [24] Fu C, Sun K, Zhang N, et al. Electrochemical characteristics of LSCF-GDC composite cathodes for intermediate temperature SOFC[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(13): 4589-4594.
- [25] Qiang F, Sun K N, Zhang N Q, et al. Characterization of electrical properties of GDC doped A-site deficient LSCF based composite cathode using impedance spectroscopy [J]. Journal of Power Sources, 2007, 168: 338-345.

## Fabrication and Impedance Performance of Gradient $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}\text{-Gd}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ Composite Cathodes for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell

LI Yang, HUANG Bo\*, YUAN Meng, ZHANG Zhi-qiu, LIU Zong-yao,  
TANG Xu-chen, ZHU Xin-jian

*(Institute of Fuel Cell, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)*

**Abstract:** A LNF-GDC composite cathode with a gradual change in the composition between ScSZ electrolyte and LNF cathode was fabricated to reduce the cathode polarization resistance ( $R_p$ ). The gradual change in composition between ScSZ electrolyte and LNF cathode shows the decreases in the charge transfer resistance ( $R_d$ ) and gas phase diffusion resistance ( $R_d$ ). The results revealed that the  $R_p$  value, measuring  $0.452 \Omega \cdot \text{cm}^2$  at  $750^\circ\text{C}$ , was the lowest for LNF-GDC composite cathodes with three layers and gradient changes in composition between ScSZ and LNF (Cathode C), whereas the  $R_p$  value of 70%LNF-30%GDC composite cathodes with one layer (Cathode A) was  $0.581 \Omega \cdot \text{cm}^2$ . The reduction in  $R_p$  for the LNF-GDC composite cathodes with three layers and gradient changes in composition between ScSZ and LNF may be related to the fact that the microstructure of the cathode/electrolyte interfaces is significantly improved, resulting in the increase in the area of triple phase boundaries (TPBs), which enhanced the surface exchange of oxygen. This implied that the gradient LNF-GDC composite cathodes showed excellent performance in terms of its electrochemical properties.