

LaNi_{0.6}Fe_{0.4}O₃ 阴极接触材料导电特性调控及其对 SOFC 电化学性能的影响

张 琨¹, 王 宇¹, 朱腾龙¹, 孙凯华², 韩敏芳³, 钟 秦¹

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 南京 210094; 2. 徐州华清京昆能源有限公司, 徐州 221005; 3. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084)

摘 要: 鉴于平板式固体氧化物燃料电池(SOFC)电堆对低面电阻、高稳定性阴极接触材料的需求, 本研究阐明了 LaNi_{0.6}Fe_{0.4}O₃(LNF)颗粒尺寸调控对导电和 SOFC 单电池性能演变的影响机制, 优化了 LNF 预处理工艺, 降低了接触组件面电阻, 提升了 SOFC 单电池性能及热循环稳定性。结果表明: 预压造粒的样品(LNF-2)与高温烧结预处理的样品(LNF-3)的面电阻更小, 分别为 0.074 和 0.076 $\Omega \cdot \text{cm}^2$; 在 750 $^{\circ}\text{C}$ 施加 1 A/cm^2 电流负载后, 能够更快地进入稳态, 并保持颗粒尺寸稳定。其中, LNF-2 单电池在 750 $^{\circ}\text{C}$ 下的峰值功率密度 0.94 W/cm^2 较未处理的 LNF 的 0.66 W/cm^2 高, 但在热循环过程中性能衰减较大, 下降了 20%; 而 LNF-3 单电池在 20 次热循环后峰值功率密度仅下降了 4%。本研究对高可靠 SOFC 电堆装配及其长寿命稳定运行具有指导及参考价值。

关 键 词: 固体氧化物燃料电池(SOFC); 阴极接触材料; LaNi_{0.6}Fe_{0.4}O₃; 热循环

中图分类号: TQ174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)04-0367-07

LaNi_{0.6}Fe_{0.4}O₃ Cathode Contact Material: Electrical Conducting Property Manipulation and Its Effect on SOFC Electrochemical Performance

ZHANG Kun¹, WANG Yu¹, ZHU Tenglong¹, SUN Kaihua², HAN Minfang³, ZHONG Qin¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Xuzhou Huatsing Jingkun Energy Co., Ltd., Xuzhou 221005, China; 3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to fulfil the requirement of low area specific resistance and highly stable cathode contact material in planar type solid oxide fuel cell (SOFC) stack assembling, this work investigated the electrical property evolution of LaNi_{0.6}Fe_{0.4}O₃ (LNF) with manipulated particle size and its effect on SOFC electrochemical performance. The optimized pre-treatment strategies of LNF were obtained with decreasing ASR, improving SOFC single cell performance and thermal cycling stability. Results show that, the dry-pressed LNF-2 and the high-temperature sintering-pre-treated LNF-3 possess smaller area specific resistances of 0.074 and 0.076 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, respectively, more stable particle sizes with shorter conditioning state and faster transfer into steady state after applying 1 A/cm^2 current load at 750 $^{\circ}\text{C}$. Specifically, the single cell with LNF-2 shows improved peak power density of 0.94 W/cm^2 compared to 0.66 W/cm^2 of LNF without treatment at 750 $^{\circ}\text{C}$. However, it exhibits significant performance degradation during

收稿日期: 2023-08-03; 收到修改稿日期: 2023-09-04; 网络出版日期: 2023-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1502203); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022029)

National Key R&D Program of China (2018YFB1502203); Key R&D Program of Jiangsu Province (BE2022029)

作者简介: 张 琨(1999-), 男, 硕士研究生. E-mail: 2498249631@qq.com

ZHANG Kun (1999-), male, Master candidate. E-mail: 2498249631@qq.com

通信作者: 朱腾龙, 副教授. E-mail: zhutenglong@njust.edu.cn

ZHU Tenglong, associate professor. E-mail: zhutenglong@njust.edu.cn

thermal cycling, decreasing by 20%. In contrast, the peak power density of LNF-3 single cell decreases by only 4% after 20 thermal cycles. This work is expected to provide guideline and valued reference for reliable SOFC stack assembling and stable operation.

Key words: solid oxide fuel cell (SOFC); cathode contact material; $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$; thermal cycling

在平板式固体氧化物燃料电池(SOFC)电堆的装配过程中,陶瓷阴极和金属连接体的直接接触效果差、应力大,容易产生较大的界面接触阻抗,进而影响电堆的性能和稳定性^[1-2]。因此,在阴极和连接体之间通常需要添加阴极接触层来改善界面接触;而且阴极接触层还具有电流收集和氧气扩散等作用^[3],如图 1 所示。研究表明,增加 10~100 μm 厚的接触层可以明显改善阴极和连接体之间的接触,大幅降低电堆的面电阻(ASR)^[2, 4-5]。

贵金属如 Ag、Au、Pd 和 Pt 等在高温下具有良好的耐腐蚀抗氧化性、高电导率、良好的延展性等优势^[6-9],但成本较高。此外,在高温工况下 SOFC 中的 Ag 易挥发流失,导致电堆性能降低^[10]。部分具有高电导率的尖晶石材料也表现出与其他电堆组件较合适的热膨胀匹配性和兼容性^[11],能够用于制备阴极接触层。除此之外,最常见的阴极接触材料为钙钛矿结构阴极,如 $(\text{La},\text{Sr})\text{MnO}_3$ 、 $(\text{La},\text{Sr})\text{CoO}_3$ 、 $(\text{La},\text{Sr})\text{FeO}_3$ 、 $(\text{La},\text{Sr})(\text{Co},\text{Fe})\text{O}_3$ 等^[2-3, 12]。相比于贵金属和尖晶石材料,钙钛矿阴极材料一般具有电导率高、烧结容易、成本低等优势。但是, $(\text{La},\text{Sr})\text{MnO}_3$ 在中低温的电导率较差; $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_3$ (LSC)和 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF)等 Co 基材料的热膨胀系数较大($22.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)。研究人员^[13-16]系统评价了 $\text{La}(\text{Ni},\text{M})\text{O}_3$ ($\text{M}=\text{Al}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ga}$)材料体系,发现 $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ (LNF)在 800 $^{\circ}\text{C}$ 的电导率达到 580 S/cm,热膨胀系数($11.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)与常用的 SOFC 电解质材料及连接体材料相近。此外,研究还发现 LNF 阴极具有较好的抗 Cr 毒化的性能^[17-18],并表现出较好的长期稳定性^[19-20]。

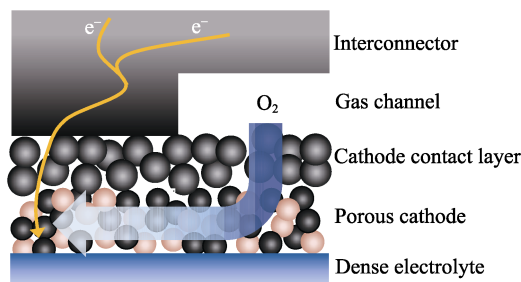


图 1 SOFC 电堆中阴极与连接体接触界面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the cathode and interconnector contact interface

研究表明,除单电池性能衰减及金属连接体氧化之外,电堆性能衰减还与阴极/连接体之间的界面接触紧密相关^[21]。在电堆装配过程中,接触层的制备温度低,导致其机械强度较低,在电堆运行过程的多种应力作用下容易发生结构性破坏,造成电堆性能衰减^[22-23]。

根据电堆装配需求,阴极接触组件要同时具备较小的面电阻、较低的空气扩散阻力以及较高的机械强度。在前期工作中,本课题组采用 LNF 作为 SOFC 阴极接触和集电材料,系统研究了材料制备、高温长期运行过程中的元素迁移及电导性能演变等问题^[24-25]。同时还发现,在 0.3 A/cm² 电流负载下,LNF 接触组件的初期面电阻显著降低;在超过 3000 h 长期运行后还出现了 LNF 颗粒尺寸增长的现象。然而,材料微观结构过度变化容易损坏接触界面,甚至导致组件粉化流失等问题。基于此,本研究采用干压造粒和高温烧结两种方法,制备了大颗粒 LNF 材料,并研究在电流负载下的面电阻演变规律及其对 SOFC 单电池电化学性能的影响。

1 实验方法

1.1 材料制备

本研究使用的 LNF 粉体来自华清能源。将 LNF 粉体于行星式球磨机中球磨 24 h,干燥后用 75 μm (200 目)筛网筛分,记为 LNF-1;将球磨后的 LNF 粉体在 10 MPa 的压力下干压 5 min,破碎后重复干压两次,最后用 147 μm (100 目)和 75 μm (200 目)筛网筛分出 75~147 μm 的粉体,记为 LNF-2;将球磨后的 LNF 粉体在 1100 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧 5 h,研磨后取 75~147 μm 之间的粉体,记为 LNF-3。将上述不同粒径的 LNF 粉体和丝印胶以 1 : 1.5 的质量比在研钵中混合均匀后,通过三辊机制备出 LNF 浆料。在厚度约 400 μm 的云母板中切割一个面积为 1 cm² 的圆孔,采用干湿结合工艺在圆孔内涂覆 LNF 浆料,表面采用银网取电,上下采用氧化铝板固定并使用螺栓紧固^[24]。通过直流四端子法(ITech 6412)测试 LNF 接触组件的电导率,然后计算 ASR。

1.2 单电池制备与性能测试

采用华清能源生产的 $\text{NiO-YSZ}|\text{YSZ}((\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.08}-$

$(\text{ZrO}_2)_{0.92}$ 阳极支撑半电池, 通过丝网印刷并在 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧制备 $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$ (GDC) 隔离层; 然后丝印 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}-\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$ (LSCF-GDC) 阴极, 并将阴极在 $1075\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧 3 h 获得单电池。在阴极表面分别丝印三种不同粒径的 LNF 接触浆料并在 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧; 最后在 LNF 表面丝印 Ag 网格作为电流收集层。

采用文献[24]报道的流程进行单电池密封及升温测试。将单电池阳极在 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 还原 5 h、活化 15 h 且稳定 1 h 后进行电化性能测试。单电池阳极燃料为室温加湿氢气 ($\sim 3\%$ H_2O (体积分数), $\sim 97\%$ H_2 (体积分数), 50 mL/min), 阴极侧空气总流量为 100 mL/min , 通过调节 O_2/N_2 比例使氧分压为 1×10^5 、 2.1×10^4 、 1.4×10^4 、 7×10^3 和 $3\times 10^3\text{ Pa}$ (图中分别以 $\text{p}1\text{O}_2$ 、 $\text{p}0.21\text{O}_2$ 、 $\text{p}0.14\text{O}_2$ 、 $\text{p}0.07\text{O}_2$ 和 $\text{p}0.03\text{O}_2$ 代替)。在 0.8 V 下测试单电池的电化学交流阻抗谱图 (EIS, Princeton P4000A, $0.1\sim 1\text{ MHz}$, 50 mV), 然后采用 5 mV/s 的速率进行线性电压扫描。为研究热循环稳定性, 对 LNF-2 与 LNF-3 单电池进行热循环性能测试 ($400\sim 750\text{ }^\circ\text{C}$)。采用扫描电子显微镜 (SEM, JEOL JSM-IT500HR) 表征 LNF 接触材料微观形貌及单电池阴极与接触层的界面微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 LNF 颗粒调控对面电阻演变规律的影响

在 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 模拟实际工况下测试 LNF 面电阻演变规律, 结果如图 2 所示。LNF-1 的初始

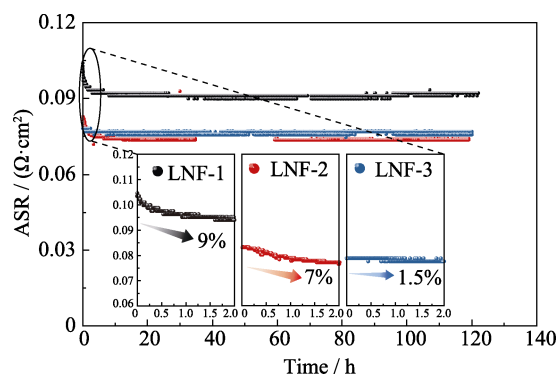


图2 在 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 和 1 A/cm^2 工况下 LNF 的 ASR 随时间的变化规律

Fig. 2 ASR evolution of LNF versus time under the conditions of $750\text{ }^\circ\text{C}$ and 1 A/cm^2

ASR 最大, 经过干压造粒处理的 LNF-2 及高温烧结处理的 LNF-3 则初始 ASR 较小, 表明增大 LNF 颗粒尺寸可以降低接触组件的 ASR。在施加 1 A/cm^2 电流负载后, LNF-1 和 LNF-2 的 ASR 均快速减小, 并在 $\sim 10\text{ h}$ 后进入稳定区间; LNF-3 的 ASR 变化较小。结果表明, 增大 LNF 颗粒尺寸能够降低电流负载对接触组件面电阻的影响, 大颗粒接触组件在电堆运行过程中能较快进入稳态。约 120 h 后, LNF-1、LNF-2 和 LNF-3 的 ASR 分别为 0.093 、 0.074 和 $0.076\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

图 3 为 ASR 测试前后 LNF 的微观形貌 SEM 照片, 图中标注为采用 Image J 软件统计获得的 LNF 平均粒径。LNF-1 的平均粒径由 $(0.35\pm 0.06)\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $(0.50\pm 0.07)\text{ }\mu\text{m}$; LNF-2 的平均粒径由 $(1.44\pm 0.34)\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $(1.79\pm 0.34)\text{ }\mu\text{m}$, 而且颗粒尺寸分布范围较

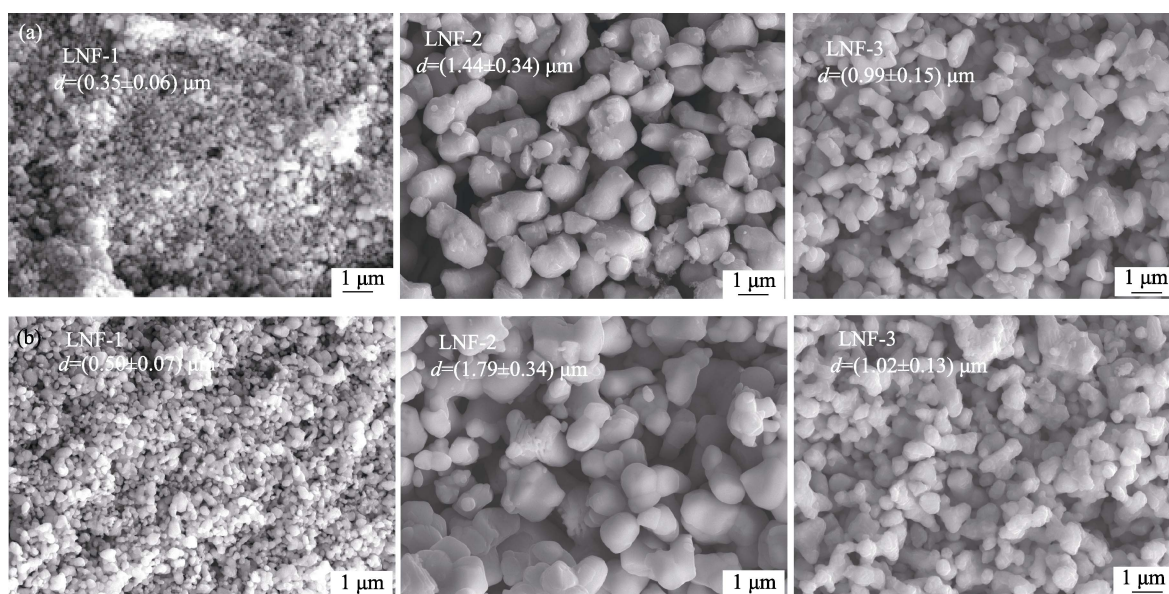


图3 ASR 测试前后 LNF 的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of LNF before and after ASR test

(a) Initial; (b) Post-test

宽; LNF-3 的粒径变化较小且颗粒尺寸分布较均匀。结果表明: 小粒径 LNF 在电流负载下的颗粒尺寸会显著增长; 经过干压造粒的 LNF-2 虽然具有较大颗粒尺寸, 但保留了较好的烧结活性, 因此在电流负载下也表现出较明显的烧结现象, 从而导致 ASR 减

小。而经过高温烧结预处理的 LNF-3 则基本失去了烧结活性, 在电流作用下的颗粒尺寸变化较小, 因此其 ASR 保持稳定^[26]。

2.2 LNF 颗粒调控对单电池电化学性能的影响

图 4 和图 5 为阳极支撑单电池在 750 °C、0.8 V

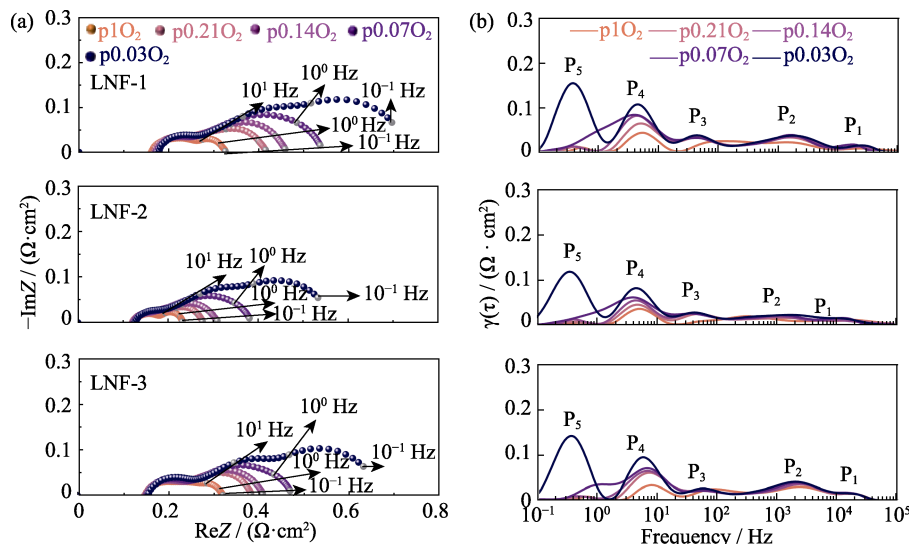


图 4 单电池在 750 °C 和不同氧气分压下的(a)EIS 阻抗谱图和(b)DRT 拟合图

Fig. 4 (a) EIS spectra and (b) DRT fitting plots for single cells tested at 750 °C and varied oxygen partial pressures
Colorful images are available on website

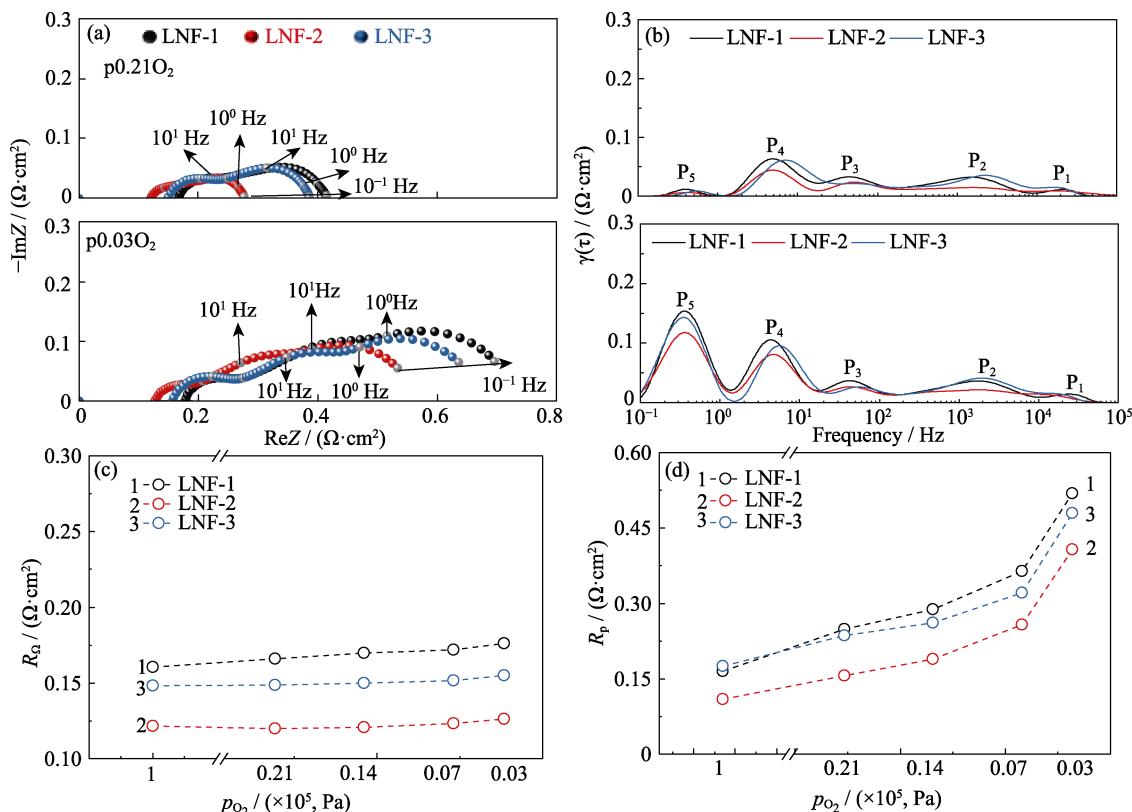


图 5 单电池在 2.1×10^4 及 3×10^3 Pa 阴极氧分压下的(a)EIS 阻抗谱图和(b)DRT 拟合图;

拟合得到的(c)欧姆阻抗及(d)极化阻抗对比

Fig. 5 (a) EIS spectra and (b) DRT fitting plots of single cells under oxygen partial pressure of 2.1×10^4 and 3×10^3 Pa, and comparison of corresponding (c) Ohmic resistance and (d) polarization resistance

Colorful images are available on website

和阴极侧不同氧分压下的 EIS 图谱及弛豫时间分布 (DRT) 拟合对比^[27-29]。结果表明, 具有较大颗粒尺寸的 LNF-2 和 LNF-3 单电池欧姆阻抗均小于 LNF-1, 这与其较低的接触组件 ASR 和较好的阴极界面接触有关。随着阴极侧氧分压降低, 单电池的极化阻抗均逐渐增大, 且主要表现在 P4(10~1 Hz) 和 P5(1~0.1 Hz) 频段, 表明 P4 和 P5 响应主要代表氧在阴极侧的扩散和吸附过程。经过干压处理的 LNF-2 和经过高温烧结处理的 LNF-3 均具有更大的颗粒尺寸, 颗粒间孔隙较大, 能够降低氧气扩散阻力。因此, LNF-2 和 LNF-3 单电池均表现出较小的极化阻抗, 表明增大 LNF 颗粒尺寸能够改善阴极侧空气中氧的传输扩散。其中, LNF-2 单电池还表现出最小的欧姆阻抗和极化阻抗, 这可能与干压造粒的 LNF-2 具有一定的阴极氧还原催化活性有关。当阴极侧氧分压降低至小于 7×10^3 Pa 时, 所有单电池的极化阻抗均显著增大, 主要与 LSCF-GDC 阴极特性有关。

图 6 为单电池在 750 °C 不同阴极氧分压下的电化学输出性能及对比。结果表明, 随着氧分压降低, 单电池开路电压、极限电流密度和峰值功率密度均有所降低。LNF-2 单电池的性能输出最好, 在 2.1×10^4 Pa 氧分压下的峰值功率密度达到 0.94 W/cm^2 , 相比于 LNF-1(0.66 W/cm^2) 提高了 30%。从 $j-V-P$ 曲线的演

变规律可以看出, 在大电流工况下, LNF-2 和 LNF-3 单电池的浓差极化现象相较于 LNF-1 单电池有一定改善^[30], 表明大颗粒尺寸 LNF 接触材料有利于氧扩散, 从而提高单电池的输出性能。

2.3 单电池热循环性能演变与稳定机制

图 7 为 LNF-2 和 LNF-3 单电池在 2.1×10^4 Pa 阴极氧分压和 750~400 °C 热循环过程中的性能演变。从图中可以看出, 虽然 LNF-2 单电池的初始性能较好, 但在热循环过程中的欧姆阻抗和极化阻抗逐渐增大, 峰值功率密度也随之降低。循环 20 次后, 单电池峰值功率密度从 0.94 W/cm^2 下降到 0.75 W/cm^2 , 下降了 20%。相比之下, LNF-3 单电池的初始性能较低, 但在热循环过程中的变化较小, 循环 20 次后峰值功率密度从 0.75 W/cm^2 减小到 0.72 W/cm^2 , 降低了 4%。

结果表明, 虽然 LNF-2 的初始性能较好, 但由于其仅经过干压造粒, 材料自身仍然保留较好的烧结活性, 在长期高温运行和多次电化学性能测试过程中, 其颗粒更容易粗化, 从而在多次热循环作用下发生孔隙破坏和界面剥离等现象, 导致单电池性能明显衰减, 如图 8 所示。相比之下, 经过高温烧结预处理的 LNF-3 材料烧结活性较差, 在高温热循环过程中能够保持较好的结构稳定性。

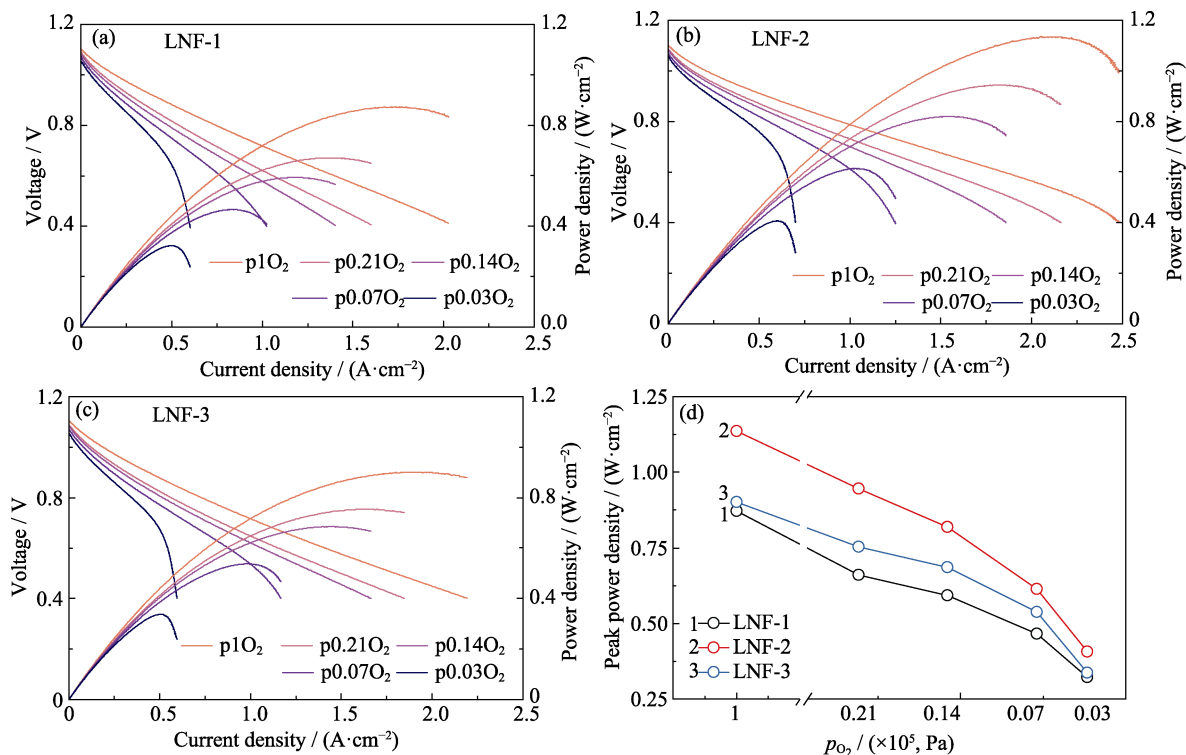


图 6 单电池在 750 °C 和不同阴极侧氧分压下的(a~c) $j-V-P$ 曲线及(d)峰值功率密度对比

Fig. 6 (a-c) $j-V-P$ curves and (d) peak power density comparison of single cells versus different oxygen partial pressure on cathode sides at 750 °C

Colorful images are available on website

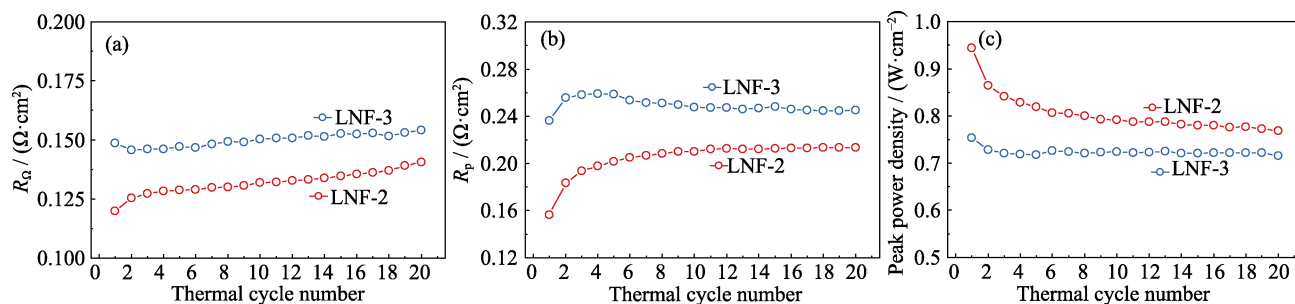


图 7 单电池在热循环过程中的电化性能演变

Fig. 7 Evolution of electrochemical performances for single cells under thermal cycling

(a) R_a ; (b) R_p ; (c) Peak power density
 Colorful images are available on website

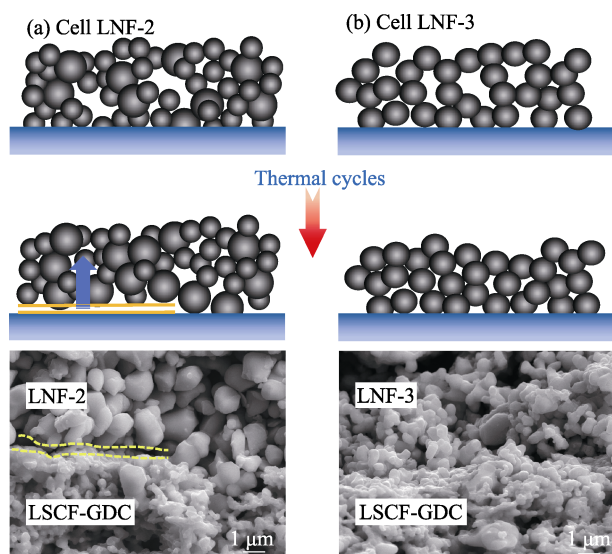


图 8 热循环前后单电池阴极接触界面变化示意图及微观形貌
 Fig. 8 Schematic diagrams and SEM images for cathode contact interfaces of single cells before and after thermal cycling

(a) LNF-2; (b) LNF-3

3 结论

本研究通过调控 LNF 材料颗粒尺寸, 阐明了阴极接触组件 ASR 演变规律及其对 SOFC 单电池电化性能及稳定性的影响机制, 主要结论如下:

1) 增大 LNF 颗粒尺寸可以降低阴极接触组件的 ASR, 相比于干压造粒, 高温烧结预处理能够有效降低 LNF 的烧结活性, 在电流负载下接触组件的 ASR 可以快速达到稳态, 并在长期电流负载工况下保持结构稳定。

2) 大颗粒尺寸 LNF 接触材料能够优化阴极界面接触, 促进阴极侧的氧扩散运输, 提高单电池输出性能; 在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.1 \times 10^4\text{ Pa}$ 阴极氧分压下, 相比于 LNF-1 单电池, 干压造粒 LNF-2 单电池的峰值功率密度从 0.66 W/cm^2 增加到 0.94 W/cm^2 。

3) 干压造粒的 LNF 材料仍保留一定的烧结活

性, 导致热循环稳定性较差; 高温烧结预处理能够显著提升 LNF 阴极接触材料在热循环和放电过程中的结构稳定性, 20 次热循环之后仍能保持较高的性能输出。

参考文献:

- [1] KENNOUCHE D, FANG Q, BLUM L, *et al.* Analysis of the cathode electrical contact in SOFC stacks. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, **165**(9): F677.
- [2] ZHU J H, GHEZEL-AYAGH H. Cathode-side electrical contact and contact materials for solid oxide fuel cell stacking: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(38): 24278.
- [3] SHEN M, ZHANG P. Progress and challenges of cathode contact layer for solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, **45**(58): 33876.
- [4] WANG Y, WANG L, GAN N, *et al.* Evaluation of $\text{Ni/Y}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalysts for hydrogen production by autothermal reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(21): 10971.
- [5] YANG Z, XIA G, SINGH P, *et al.* Electrical contacts between cathodes and metallic interconnects in solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2005, **155**(2): 246.
- [6] GUAN W, WANG G, ZHOU X D. Mechanism of the cathode current collector on cell performance in a solid oxide fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 2017, **351**: 169.
- [7] SIMNER S P, ANDERSON M D, PEDERSON L R, *et al.* Performance variability of $\text{La}(\text{Sr})\text{FeO}_3$ SOFC cathode with Pt, Ag, and Au current collectors. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, **152**(9): A1851.
- [8] ZHANG W, HUA B, YANG J, *et al.* Performance evaluation of a new Fe-Cr-Mn alloy in the reducing atmosphere of solid oxide fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **769**: 866.
- [9] WILKINSON L T, ZHU J H. Ag-perovskite composite materials for SOFC cathode-interconnect contact. *Journal of the Electrochemical Society*, 2009, **156**(8): B905.
- [10] GONG Y, QIN C, HUANG K. Can silver be a reliable current collector for electrochemical tests? *ECS Electrochemistry Letters*, 2012, **2**(1): F4.
- [11] YU Y T, LU Y, GUAN C Z, *et al.* Evaluation of the reactive-sintered $(\text{Mn}, \text{Co})_3\text{O}_4$ spinel layer for SOFC cathode-side contact application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, **47**(87): 36964.
- [12] JIANG S P. Development of lanthanum strontium cobalt ferrite perovskite electrodes of solid oxide fuel cells—a review. *International*

- Journal of Hydrogen Energy*, 2019, **44**(14): 7448.
- [13] SUGITA S, YOSHIDA Y, ORUI H, *et al.* Cathode contact optimization and performance evaluation of intermediate temperature-operating solid oxide fuel cell stacks based on anode-supported planar cells with $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ cathode. *Journal of Power Sources*, 2008, **185**(2): 932.
- [14] MORÁN-RUIZ A, VIDAL K, LAGUNA-BERCERO M Á, *et al.* Effects of using $(\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2})_{0.95}\text{Fe}_{0.6}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.1}\text{O}_3$ (LSFMC), $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ (LNF) and $\text{LaNi}_{0.6}\text{Co}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ (LNC) as contact materials on solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2014, **248**: 1067.
- [15] 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. *Solid State Ionics*, 1999, **124**(3): 281.
- [16] YANG J, LI Z, YAN D, *et al.* The investigation of Ag & $\text{LaCo}_{0.6}\text{Ni}_{0.4}\text{O}_{3-\delta}$ composites as cathode contact material for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, **43**(28): 12705.
- [17] ZHOU L, MASON J H, LI W, *et al.* Comprehensive review of chromium deposition and poisoning of solid oxide fuel cells (SOFCs) cathode materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, **134**: 110320.
- [18] ZHEN Y D, TOK A I Y, JIANG S P, *et al.* $\text{La}(\text{Ni,Fe})\text{O}_3$ as a cathode material with high tolerance to chromium poisoning for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2007, **170**(1): 61.
- [19] SHAUR A, REHMAN S U, KIM H S, *et al.* Hybrid electrochemical deposition route for the facile nanofabrication of a Cr-poisoning-tolerant $\text{La}(\text{Ni,Fe})\text{O}_{3-\delta}$ cathode for solid oxide fuel cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(5): 5730.
- [20] SOLOVYEV A A, SHILOVA A V, RABOTKIN S V, *et al.* Study of the efficiency of composite $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ -based cathodes in intermediate-temperature anode-supported SOFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(59): 22594.
- [21] WANG G, GUAN W, MIAO F, *et al.* Factors of cathode current-collecting layer affecting cell performance inside solid oxide fuel cell stacks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(31): 17836.
- [22] KARRI N K, KOEPEL B J, NGUYEN B N, *et al.* Structural reliability of cathode ccontact materials in planar SOFCs. *ECS Transactions*, 2017, **78**(1): 1701.
- [23] LIN C K, CHEN T T, CHYOU Y P. Thermal stress analysis of a planar SOFC stack. *Journal of Power Sources*, 2007, **164**(1): 238.
- [24] WANG Y, LYU Q, ZHU T L, *et al.* Electrical and electrochemical performances evaluation of $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ cathode contact and current collecting layer in SOFCs. *Journal of the Electrochemical Society*, 2022, **169**(4): 044531.
- [25] LYU Q, WANG Y, ZHU T L, *et al.* Conducting property and performance evaluation of LNF as cathode current contact layer in solid oxide fuel cell. *ECS Transactions*, 2021, **103**(1): 1461.
- [26] CHIBA R, TABATA Y, KOMATSU T, *et al.* Property change of a $\text{LaNi}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{O}_3$ cathode in the initial current loading process and the influence of a ceria interlayer. *Solid State Ionics*, 2008, **178**(31): 1701.
- [27] WAN T H, SACCOCCIO M, CHEN C, *et al.* Influence of the discretization methods on the distribution of relaxation times deconvolution: implementing radial basis functions with DRTtools. *Electrochimica Acta*, 2015, **184**: 483.
- [28] SHI W, JIA C, ZHANG Y, *et al.* Differentiation and decomposition of solid oxide fuel cell electrochemical impedance spectra. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2019, **35**(5): 509.
- [29] XIA J, WANG C, WANG X, *et al.* A perspective on DRT applications for the analysis of solid oxide cell electrodes. *Electrochimica Acta*, 2020, **349**: 136328.
- [30] ZHANG J, LEI L, LI H, *et al.* Experimental investigations of cell resistances to characterize the concentration polarization behavior of $10\times 10\text{ cm}^2$ solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2021, **516**: 230678.