DOI:10.20038/j.cnki.mra.2024.000104

# 基于 BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-8</sub>空气电极的可逆 质子陶瓷膜电池性能研究

### 宋雅雯,张小珍\*,周成志,袁列鹏,王禧斌 (景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院,江西景德镇 333403)

摘要:采用柠檬酸络合-硝酸盐燃烧法合成的BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3.8</sub> (BCFZY)作为空气电极材料,组装了 燃料电极支撑的可逆质子陶瓷膜电池(R-HCMC),并且探讨了单电池在不同工作模式下的电化学性能。结 果表明:在900℃下合成的BCFZY表现为单一立方钙钛矿结构,在700℃燃料电池模式下,单电池最大输 出功率为424.7 mW·cm<sup>-2</sup>、最低的极化阻抗为0.23 Ω·cm<sup>2</sup>;在电解模式下,电解电压为1.4 V时,最大电流 密度为1084 mW·cm<sup>-2</sup>、氢气产率为3.1 mL·min<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>。说明,BCFZY空气电极在中低温条件下表现出良 好的电催化活性和结构与性能稳定性。

关键词:可逆陶瓷膜电池;质子导体;极化电阻;输出功率;产氢率;电化学性能;燃烧法;电极材料
 中图分类号:TB34
 文献标志码: A
 文章编号:1673-9981(2024)01-0024-07

**引文格式:**宋雅雯,张小珍,周成志,等. 基于 BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-8</sub>空气电极的可逆质子陶瓷膜电池性能研究[J]. 材料研究 与应用,2024,18(1):24-30.

SONG Yawen, ZHANG Xiaozhen, ZHOU Chengzhi, et al. Research on the Performance of Reversible Proton Ceramic Membrane Cell Based on  $BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-\vartheta}$  Air Electrode[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(1):24-30.

### 0 引言

为减少化石燃料带来的环境问题,太阳能、风能和氢能等清洁能源正逐渐成为社会生产过程中的重要资源,然而这些能源存在不稳定、不连续的缺点。可逆质子陶瓷膜电池(R-HCMC)是一种可实现化学能和电能的有效循环转化的绿色能源装置,其可在燃料电池模式下(Full Cell,FC)运行以产生电能,而在电力充足时可以和基础电力网络设施结合,在电解模式下(Electrolysis Cell,EC)可电解水蒸气制备出清洁燃料氢气<sup>[12]</sup>。因此,R-HCMC的开发对减缓能源危机具有重要意义。

在很大程度上,R-HCMC的整体性能由空气电极的稳定性及对氧还原(ORR)和氧析出(OER)反应催化活性决定。R-HCMCs的工作温度相对较低,这有助于提高电池材料的耐用性和降低运行成本,然而也会导致空气电极的ORR/OER电催化活性降低<sup>[34]</sup>。因此,开发中低温下具有高催化活性的空气电极材料对提高 R-HCMC 的性能具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

目前,研究较多的R-HCMC空气电极材料主

要是离子-电子混合导体(MIECs)钙钛矿材料,如  $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$   $Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$  $PrBaCo_2O_{5+\delta}$ 、 $Ba_{0.9}Co_{0.7}Fe_{0.2}Nb_{0.1}O_{3-\delta}$ 等<sup>[7-9]</sup>。 然 而,这些钴基钙钛矿材料为电子或电子-氧离子混合 导体,不利于改善R-HCMC的空气电极的催化活性, 并且高温相结构稳定性差,存在与热膨胀系数较小的 电解质层的热机械相容性不匹配等问题,影响电池的 结构稳定性。最近, Duan等<sup>[10]</sup>新开发了具有H<sup>+</sup>/ O<sup>2-</sup>/e<sup>-</sup>三重传导特性的BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-ð</sub>钙 钛矿(BCFZY)材料,该材料有良好的氧还原催化活 性。Wang 等<sup>[11]</sup>更进一步的使用 A 位缺位和 F<sup>-</sup>掺杂 的BCFZY作为氧离子传导陶瓷膜电池的空气电极 材料,该材料表现出良好的氧还原反应(ORR)催化 活性。BCFZY空气电极在燃料电池模式下显示了 较好的电化学反应活性和稳定性,为实现具有电子-质子传导性能的 BCFZY 在 R-HCMC 空气电极上的 实际应用,其在电解水制氢中的电化学性能及结构 稳定性仍是一个值得探讨的问题<sup>[12]</sup>。

本文通过柠檬酸络合-硝酸盐燃烧法合成了钙 钛矿结构氧化物BCFZY,并将其作为R-HCMC的

收稿日期:2023-05-17

通信作者:张小珍,博士,教授,研究方向为陶瓷膜与膜反应器的研究。E-mail:zhangxz05@126.com。

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ211303);景德镇陶瓷大学研究生创新基金(JYC202126);江西省大学生 创新训练计划项目(S202210408036)

作者简介:宋雅雯,硕士研究生,研究方向为陶瓷膜燃料电池与电解池的研究。E-mail:1804329287@qq.com。

空气电极,探讨以BCFZY为空气电极的单电池分 别在燃料电池模式和电解池模式下的电化学性能及 稳定性,为BCFZY材料在R-HCMC中的应用提供 了实验参考。

#### 1 实验部分

#### 1.1 粉体合成及电池制备

原料选用分析纯 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O、  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O_3Zr(NO_3)_4 \cdot 5H_2O_3Y(NO_3)_3 \cdot 5H_2O_3$ 和柠檬酸(C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>),原料的纯度≥99%,采用柠檬 酸络合-硝酸盐燃烧法制备 BCFZY 材料。首先,按 照化学计量比精确称取硝酸盐,将其加入去离子水 中溶解得到混合溶液,按照金属离子与柠檬酸的摩 尔比1:1.5向混合溶液中加入柠檬酸作为络合剂, 充分溶解后加入适量硝酸作为助燃剂,再加入氨水 调节溶液 pH=7左右。然后,将溶液置于80℃水浴 锅中搅拌4h,再转移至蒸发皿中蒸发水分,直至自 蔓延燃烧得到红褐色前驱体。最后,将得到前驱体 经 900—1 000 ℃保温 3 h 煅烧后得到 BCFZY 粉体。 为了解 BCFZY 与电解质材料 BaZr<sub>0.3</sub>Ce<sub>0.5</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3-8</sub> (BZCY)的化学相容性,将两者按质量比为1:1研磨 混合均匀,经1100℃保温3h热处理,进一步研究 BCFZY与BZCY材料复合后的高温稳定性和化学 相容性。

称取适量 BCFZY 粉体,在研钵中研磨均匀后, 按质量比1:1加入乙基纤维素和松油醇混合物(质 量比1:9),手工研磨成拉丝状,即可得到 BCFZY 空 气电极浆料。通过涂刷法将电极浆料涂刷到通过共 压共烧法制备的 NiO-BZCY|BZCY 半电池的 BZCY 电解质表面,经1000 ℃保温3h热处理后得到结构 为 NiO-BZCY|BZCY|BCFZY 的完整单电池,其 空气电极有效面积为0.28 cm<sup>2</sup>(BCFZY 负载量 约3 mg)。

#### 1.2 测试与表征

采用德国布鲁克公司的 D8 Advance型X射线 衍射分析仪(XRD)分析样品的物相组成,使用日本 HITACHI公司生产的 SU-8010型扫描电子显微镜 (SEM)观察电池微观结构。采用德国 Zahner公司 的 Zahner Pro电化学工作站进行单电池电化学性能 测试,测试前在两侧电极层上涂覆银浆集流,并通 过银丝与电化学工作站工作电极相连,测试条件为 温度 550—700 ℃、频率0.01 Hz—8 MHz、扰动电压 5 mV 及空气电极通入静态空气、燃料电极侧通入 加湿 H<sub>2</sub>(3%H<sub>2</sub>O)。电解模式下,测试条件控制为 空气电极通入含 5%H<sub>2</sub>O 的湿空气、电解电压 1.0—1.6 V,通过在线气相色谱仪(GC-2014型,日 本岛津公司)测试产生的氢气浓度。

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 XRD 物相分析

图 1 为不同温度合成的 BCFZY 粉体材料的 XRD 图谱。从图 1 可见:在 900—1 000 ℃煅烧 3 h 后,得到单一立方钙钛矿结构 BCFZY 材料,该材料 无杂相衍射峰存在,与文献[7,13]报道的一致;随着 温度的提高,特征峰强度增大且更为尖锐,表明晶粒 增大和晶化程度提高。通过 Scherrer 公式<sup>[14-15]</sup>,计算 得到在 900、950 和 1 000 ℃下合成粉体的原始晶粒 尺寸分别为 97、108 和 132 nm。为减小合成 BCFZY 粉体的粒径,选择空气电极粉体的合成温度为 900 ℃。



图 2 为经热处理后 BCFZY 与 BZCY 混合样品的 XRD 图 谱。从图 2 可见, BCFZY、BZCY 和 BCFZY+BZCY 均呈现单一立方钙钛矿结构,并且 BCFZY 和 BZCY 两相衍射峰峰的角度均未改变。表明, BCFZY 与质子导体 BZCY 间未发生明显化学反应, 两者具有良好的稳定性和化学相容性<sup>[16-17]</sup>。



Figure 2 XRD patterns of heat-treated BCFZY-BZCY mixture powder

#### 2.2 单电池电化学性能分析

图 3 为以 BCFZY 为空气电极的单电池在燃料 电池模式下的电化学性能。从图 3(a)燃料电极支 撑的 Ni-BZCY |BZCY |BCFZY 单电池在不同温度下 的 *I-V-P* 曲线可见,单电池的开路电压为1.05 V左 右,接近于理论开路电压,说明 BZCY 电解质较为致 密且电池封装情况良好,无漏气现象发生<sup>[18]</sup>。单电 池在 700 ℃时对应的最大输出功率密度为 424.7 mW·cm<sup>-2</sup>,这与最近文献[9,19]报道的H-CMFC 相 当甚至更好,表现出较好 ORR性能。单电池的电化 学阻抗谱图主要表征空气电极材料氧还原活性及氧 在电极表面吸附解离的过程<sup>[20]</sup>,并依据电化学过程 使用 Z-View 软件的等效电路进行拟合。电化学阻抗 谱中,曲线与实轴的第一个交点表示欧姆阻抗  $R_0$ ,包括电池导线、电解质界面等相关阻抗的总和,曲线与实轴的两个交点之间的差值表示电池的极化 阻抗  $R_p^{[21]}$ 。从图 3(b)单电池不同温度下电化学阻抗 谱图可见,随着温度的升高单电池极化阻抗  $R_p$ 呈现出减小的趋势,在550—700 °C下 BCFZY 单电池的极化电阻  $R_p$ 依次为 12.2、4.1、1.47和 0.23  $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>,而欧姆阻抗随工作温度提高变化较小,说明欧姆阻抗对单电池性能的影响较小,极化阻抗是影响电池性能的主要因素<sup>[22]</sup>。单电池在中低温下表现较高的功率输出,这可归功于 BCFZY 空气电极相对较小的极化损失。



## 图 3 以BCFZY为空气电极的单电池在燃料电池模式下的电化学性能 Figure 3 Electrochemical property of the single cell with BCFZY air electrode

图4为NiO+BZCY|BZCY|BCFZY单电池在电 解模式下的电化学性能。从图4可以看出:在相同 的电解电压下,随着温度的升高电流密度逐渐增大, 在700℃下电解电压为1.4V时,最大电流密度可达到1084mW·cm<sup>-2</sup>,这是因为在较高的运行温度下电极催化活性增强、蒸汽裂解速率加快,加速了电极





反应速率<sup>[23]</sup>;随着施加电压从1.0 V提高到1.4 V 极化阻抗明显减小,但进一步从1.4 V增大至1.6 V 时极化阻抗变化相对较小,表明过高的电解电压不 仅对提高电池的电解性能效果不明显,还可能影响 空气电极材料的稳定性。

通过公式 $J = \frac{-I}{2F} \times V_m$ 计算电解电流密度,其 中J为理论氢气产率(mL·min<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>)、I为测得的电流 密度(mA·cm<sup>-2</sup>)、F为法拉第常数(96 485 C·mol<sup>-1</sup>)、  $V_m$ 为气体摩尔体积(22.4 L·mol<sup>-1</sup>)。图5为以 BCFZY为空气电极单电池的电解性能。从图5可 见:电池的理论氢气产率随着工作温度和电解电压 的增加而明显提高,当温度700 ℃、电压1.4 V时,产 氢速率为7.5 mL·min<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>;实际产氢率随电解电 压和工作温度的变化规律与理论产氢率相似,在 700 ℃、1.4 V电解工作条件下,实际测得的最高产

氢率为 $3.1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,仅为理论产率的41%, 这是由于电池存在一定的极化阻抗及空气电极内水 蒸气供应不足,使实际测量的产氢率明显低于理论 值,为充分发挥电子-质子混合导体 BCFZY 空气电 极性能优点,有必要进一步优化电极微结构和其他 电解操作条件(如水蒸气浓度和流速等);电池在 1.1 V、550 ℃条件下电解效率最高为65%,当电解 电压继续增加时不同温度下的电池电解效率没有改 善反而降低,这是由于电解过程中BCFZY空气电 极侧水蒸气浓度相对较低(浓度5%),随着电解电 压的增加电极的催化活性增强,导致电极 TPB 界面 处的水蒸气浓度过低而出现浓差极化,从而降低了 电池的电解效率;在700℃、1.2V电解条件下,单电 池电流密度在初始运行阶段出现小幅下降,运行2h 后趋于稳定,表明BCFZY空气电极材料在高温水 蒸气电解制氢过程中具有较好稳定性。



(a)—theoretical hydrogen production rates;(b)—actual hydrogen production rates;(c)—calculated faradic efficiencies;(d)—stability.

图 5 以 BCFZY 为空气电极单电池的电解性能 Figure 5 Electrolytic property of the single cell with BCFZY air cathode

#### 2.3 电池微观结构分析

图 6 为测试后 Ni-BZCY |BZCY |BCFZY 单电池 的断面 SEM 图。从图 6 可见:电池为三层结构,各 部分之间界面连接良好,Ni-BZCY 燃料电极为均匀 多孔结构,能够有效地满足气体扩散需求;BZCY 电 解质层非常致密,无明显裂纹或气孔存在,厚度约为 20 μm 左右,致密电解质层不仅可有效防止电池两 侧气体之间的相互泄漏及提高质子电导率,更是能 保证单电池结构完整及高效安全运行<sup>[24]</sup>;此外, Ni-BZCY和BCFZY电极的多孔结构有利于气相 在电极内部扩散、吸附和解离等过程进行,但与 Ni-BZCY燃料电极相比,BCFZY空气电极孔隙的 均匀性相对较差,这也是影响电池电解效率的重要 因素;经10h运行后单电池仍保持完好结构, BCFZY电极未产生剥落或电极/电解质界面开裂等 可能对电池长期稳定性产生致命影响的现象。



(a)—全貌;(b)—电解质层;(c)—燃料电极;(d)—空气电极。
(a)—overview;(b)—electrolyte layer;(c)—fuel electrode;(d)—air electrode.

#### 图6 测试后单电池断面SEM照片



#### 3 结论

本文通过柠檬酸络合-硝酸盐燃烧法,合成了 单一立方钙钛矿结构 BCFZY 材料。BCFZY 与质 子导体材料 BZCY 均表现出良好的化学相容性。 以 BCFZY 为空气电极制备的 Ni-BZCY | BZCY | BCFZY 单电池,在燃料电池模式下工作温度为 700 ℃时的最大输出功率可达到 424.7 mW·cm<sup>-2</sup>, 表现出低的极化阻抗;在电解模式下,电池的电 流密度和氢气产率随工作温度、电解电压的提高 而明显增大,在700 ℃、1.4 V 工作条件下的最大 电流密度为1 084 mA·cm<sup>-2</sup>、氢气产率为3.1 mL· min<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>。BCFZY 空气电极在高温电解条件下, 表现出良好的电催化活性和结构与性能稳定性,在 R-HCMC中具有良好的应用前景。为进一步改善性能 R-HCMC 的电化学性能,有必要进一步优化 BCFZY 空气电极的微结构。

#### 参考文献:

- BI L, BOULFRAD S. TRAVERSA E. Steam electrolysis by solid oxide electrolysis cells (SOECs) with proton-conducting oxides [J]. Chem Soc Rev, 2014, 43(24): 8255-8270.
- [2] 王子鸣,谭婷,宋琛,等.原位析出法制备CoCu纳米颗 粒均匀修饰PrSr(CoCu)<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.8</sub>O<sub>4.8</sub>陶瓷阳极材料[J]. 材料研究与应用,2021,15(2):94-101.
- $\label{eq:gamma} \begin{array}{c} [\ 3\ ] \end{array} QI \ H, ZHAO \ Z, TU \ B, \ et \ al. \ Reaction \ tuned \ formation \ of \ hierarchical \ BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-\delta} \ \ cathode \ \ [\ J]. \end{array}$

Journal of Power Sources, 2020, 455: 227971.

- [4] 邹建波,江舟,文魁,等.大气等离子喷涂制备锰钴尖 晶石涂层及其电导率[J].材料研究与应用,2021,15 (1):16-26.
- [5] SAQIB M, LEE J I, SHIN J S, et al. Modification of oxygen-ionic transport barrier of BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> Steam (Air) electrode by impregnating samarium-doped ceria nanoparticles for proton-conducting reversible solid oxide cells [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166 (12): F746-F754.
- [6] ANWAR S, KHAN F, ZHANG Y, et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (63): 32284-32317.
- ZHANG D, ZHANG X, JIANG Y, et al. A stable Zr-Y co-doped perovskite BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> ceramic membrane for highly efficient oxygen separation [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 295: 121206.
- [8] SEONG A, JEONG D, KIM M, et al. Performance comparison of composite cathode: Mixed ionic and electronic conductor and triple ionic and electronic conductor with BaZr<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.7</sub>Y<sub>0.1</sub>Yb<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> for highly efficient protonic ceramic fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2022, 530: 231241.
- [9] LIANG M, HE F, ZHOU C, et al. Nickel-doped BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> as a new high-performance cathode for both oxygen-ion and proton conducting fuel cells [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 127717.
- [10] DUAN C, KEE R J, ZHU H, et al. Highly durable, coking and sulfur tolerant, fuel-flexible protonic ceramic fuel cells [J]. Nature, 2018, 557 (7704): 217-222.
- [11] WANG W, ZHANG X, KHAN K, et al. Enhanced ORR activity of A-site deficiency engineered BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> cathode in practical YSZ fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (7): 5593-5603.
- [12] 李勇勇,马征,冷志忠,等.固体氧化物电解池氧电极的研究进展[J].陶瓷学报,2021,42(4):523-536.
- [13] 司龙涛,李康,王子安,等.质子陶瓷燃料电池 BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-∂</sub>阴极材料电性能的优化[J]. 陶瓷学报,2022,43(5):862-869.
- [14] XING Z, LUO X, QI Y, et al. Nitrogen-doped nanoporous graphenic carbon: An efficient conducting support for O<sub>2</sub> cathode [J]. Chem Nano Mat, 2016, 2

(7): 692-697.

- [15] LI W, PENG D, HUANG W, et al. Adjusting coherence length of expanded graphite by selfactivation and its electrochemical implication in potassium ion battery [J]. Carbon, 2023, 204: 315-324.
- [16] JING J, PANG J, CHEN L, et al. Structure, synthesis, properties and solid oxide electrolysis cells application of Ba (Ce, Zr) O<sub>3</sub> based proton conducting materials [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132314.
- [17] CHEN M, ZHOU M, LIU Z, et al. A comparative investigation on protonic ceramic fuel cell electrolytes BaZr<sub>0.8</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub> and BaZr<sub>0.1</sub>Ce<sub>0.7</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub> with NiO as sintering aid [J]. Ceramics International, 2022, 48 (12): 17208-17216.
- [18] REN R, YU X, WANG Z, et al. Fluorination inductive effect enables rapid bulk proton diffusion in BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub> perovskite oxide for highactivity protonic ceramic fuel cell cathode [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2022, 317: 121759.
- [19] YU Y, YU L, SHAO K, et al. BaZr<sub>0.1</sub>Co<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3</sub>-SDC composite as quasi-symmetrical electrode for proton conducting solid oxide fuel cells [J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 11811-11818.
- [20] CAI W, GUO Y, ZHANG T, et al. Characterization and polarization DRT analysis of a stable and highly active proton-conducting cathode [J]. Ceramics International, 2018, 44(12): 14297-14302.
- [21] 赵鸿飞,陈前昌,宗正,等.可逆固体氧化物电池发电-电解条件下的运行特性分析[J].电工电能新技术, 2022,41(3):23-32.
- [22] 覃铭霞,杨洪字,谭婷,等.A位缺陷对 (Pr<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>)<sub>1-x</sub>Fe<sub>0.9</sub>Ru<sub>0.1</sub>O<sub>3-δ</sub>(0≪x≪0.2)阳极 材料电化学性能及稳定性影响的研究[J].材料研 究与应用,2021,15(2):102-110.
- [23] KUAI X, YANG G, CHEN Y, et al. Boosting the activity of BaCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.1</sub>O<sub>3-∂</sub> perovskite for oxygen reduction reactions at low-to-intermediate temperatures through tuning B-site cation deficiency
   [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9 (38) : 1902384.
- [24] ANWAR S, KHAN F, ZHANG Y, et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (63) : 32284-32317.

## Research on the Performance of Reversible Proton Ceramic Membrane Cell Based on $BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-\delta}$ Air Electrode

## SONG Yawen, ZHANG Xiaozhen\*, ZHOU Chengzhi, YUAN Liepeng, WANG Xibing

(School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, China)

**Abstract**:  $BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-\delta}$  (BCFZY) was synthesized by the citric acid complexation-nitrate combustion method, and then used as the air electrode material to fabricate a fuel electrode-supported reversible proton ceramic membrane cell (R-HCMC). The electrochemical performance of obtained R-HCMC under different operating modes was investigated. The results show that the BCFZY synthesized at 900 °C exhibits a single cubic perovskite structure. In fuel cell mode at 700 °C, the maximum output power was 424.7 mW·cm<sup>-2</sup>, and the lowest polarization impedance was 0.23  $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>. In the electrolysis mode, when the electrolysis voltage is 1.4 V, the maximum current density was 1 084 mW·cm<sup>-2</sup>, and the hydrogen production rate was 3.1 mL·min<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>. The prepared BCFZY air electrode showed good electrical catalytical activity, and structure and performance stabilities under medium and low temperature conditions.

**Keywords**: reversible ceramic membrane cell; proton conductor; polarization resistance; output power; hydrogen production rate; electrochemical performance; combustion method; electrode material

(学术编辑:宋琛)