DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 08. 004

La/Ni 共掺杂 SrTi_{0.35}Fe_{0.65}O₃₋₈对称电极用于 SOEC 共电解 H₂O/CO₂研究

Study on La/Ni co-doped $\rm SrTi_{0.35}Fe_{0.65}O_{3-\delta}$ symmetric electrode for $\rm H_2O/CO_2$ co-electrolysis in SOECs

韩倩雯¹,张琨¹,陈晓阳^{1,2},朱腾龙^{1*} HAN Qianwen¹,ZHANG Kun¹,CHEN Xiaoyang^{1,2},ZHU Tenglong^{1*}

(1.南京理工大学化学与化工学院,南京210094;2.哈尔滨工业大学(深圳)材料科学与工程学院,

广东 深圳 518055)

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

摘 要:通过固体氧化物电解池(SOEC)电解水蒸气制氢及共电解H₂O/CO₂生产合成气是拓展可再生能源应用、促进化学工业绿色低碳转型的重要技术路线。面向SOEC对高性能、稳定电极的需求,采用La/Ni共掺杂SrTi_{0.35}Fe_{0.65}O₃₋₆的电极策略,设计并制备了La_{0.1}Sr_{0.85}Ti_{0.35}Fe_{0.6}Ni_{0.05}O₃(LSTFN),并将其同时作为SOEC的氢电极和氧电极。通过扫描电子显微镜(SEM)、能量分散光谱(EDS)和X射线衍射(XRD)等方法,对LSTFN电极结构组成及微观形貌演化进行研究,并考察了单电池共电解H₂O/CO₂性能和可逆运行稳定性。结果表明,在还原气氛中,LSTFN氢电极表面原位析出了纳米Ni-Fe合金颗粒,并在含水和含碳复杂气氛中稳定存在;在800°C,10%H₂保护气和1.8V的条件下(H₂/H₂O/CO₂=10:45:45),LSTFN的共电解电流达到了1.8 A/cm²,并在发电/电解可逆条件下稳定运行,表现出良好的应用前景。

关键词:固体氧化物电解池;CO₂/H₂O共电解;对称电极;SrTi₀₃₃Fe_{0.65}O₃₋₈;绿色低碳转型;制氢;钙钛矿;可再生能源 中图分类号:TK 91:TM 911 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)08-0043-07

Abstract: Hydrogen production from water steam electrolysis powered by solid oxide electrolysis cells (SOECs) and syngas production by co-electrolysis of H_2O/CO_2 are important routes to promote the application of renewable energy and development of green and low-carbon chemical industry. To meet the demands for high performance and stable operation of SOECs, La/Ni co-doped SrTi_{0.35}Fe_{0.65}O_{3.6} strategy was adopted, and La_{0.1}Sr_{0.85}Ti_{0.35}Fe_{0.6}Ni_{0.05}O₃ (LSTFN) was designed and prepared as both hydrogen and oxygen electrodes for SOECs. The structural composition and micromorphological evolution of LSTFN electrode were investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The H_2O/CO_2 co-electrolysis performance and reversible operation stability were examined. The results show that, Ni–Fe alloy nanoparticles in-situ precipitated on LSTFN hydrogen electrode surface are stable in complex steam and carbon-containing atmospheres. The LSTFN co-electrolysis current reaches 1.8 A/cm² in 800 °C, 1.8 V and 10% H_2 protective atmosphere ($H_2/H_2O/CO_2$ =10: 45: 45). LSTFN symmetric cell performs stably in reversible operations between power generation and co-electrolysis, showing good application prospects.

0 引言

为实现碳达峰、碳中和目标,需要统筹推进可

再生能源发展、提高能源转化效率、开发CO₂转化与 资源化利用等碳减排技术。CO₂转化途径包括热化 学、光化学、生物和电化学转化等^[1]。其中,电化学 催化转化可以利用可再生能源(风能、太阳能等)或 核能供电^[2-4],通过固体氧化物电解池(SOEC)技术 电解 CO₂制备 CO,或共电解 CO₂/H₂O 制备合成气 (CO/H₂),是一种可行性高、实用前景好的技术

收稿日期:2022-07-17;修回日期:2022-08-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1502203);中央 高校基本科研业务费专项资金资助项目 (30920041108)

路径[5-6]。

由于SOEC共电解H₂O/CO₂的运行温度高,电极 反应复杂,尤其是氢电极还极易发生逆向水煤气变 换反应(Reverse Water Gas Shift Reaction,RWGS)^[7-8], 即电解产生的H₂与CO₂反应生成CO和H₂O。目前, RWGS的反应机理及产物调控机制仍需深入解析, 尚无法准确判断H₂O和CO₂为单独电解,还是水蒸 气首先电解产生H₂,然后H₂与CO₂经RWGS产生 CO^[9-12]。已有研究结果表明,在H₂O/CO₂共电解过程 中,水蒸气的电解效率更高^[13-14]。Zhan等^[15]通过试 验与理论计算结合,提出H₂O/CO₂共电解的竞争机 制,即水电解相较于CO₂电解更具优势;在高温下, 水电解占主导,CO的产生主要是由于发生了RWGS。

H,0/CO,的共电解反应主要发生在氢电极,目 前,SOEC 氢电极采用与固体氧化物燃料电池 (SOFC)阳极基本一致的结构及材料体系^[16]。其中, 应用最广的是Ni基氧化钇掺杂的氧化锆(Ni-YSZ), 它在高温电解中表现出优异的性能,但必须采用较 高浓度的H₂作为保护气,避免电解过程中Ni的氧 化。此外,在长期运行过程中,Ni基材料会出现碳 沉积、镍粗化等问题。因此,研究人员开始探索采 用高温导电的钙钛矿氧化物替代金属 Ni,或直接将 其作为氢电极^[17]。但钙钛矿氧化物的催化活性与 金属Ni相比仍显不足,而且稳定性较高的钛酸盐和 铬酸盐基钙钛矿氧化物的氧离子传导能力和催化 活性较差。通过在钙钛矿的B位掺入一定量过渡金 属元素,如Mn,Fe,Co等,可以显著提高其氧离子和 电子混合传导性能;通过在表面浸渍 Ni, Ru, Co等也 可以提升钙钛矿氧化物氢电极的催化活性,但高温 运行后极易发生团聚^[3]。

最近研究发现,部分钙钛矿结构氧化物在还原 性气氛中可原位析出B位的过渡金属元素,并在电 极表面形成纳米金属颗粒,组成均匀负载催化位点 的高活性纳微异构氢电极体系^[18-19]。在前期工作 中,文献[20-21]基于Sr(Ti,Fe)O₃钙钛矿氧化物体 系,系统探究了B位Ni和Co掺杂对原位析出Ni-Fe 和Co-Fe纳米合金颗粒的过程机理及调控机制,并 研究了其作为SOFC对称电极的电化学性能。此 外,文献[22]还初步探索了A位La掺杂的(La,Sr) (Ti,Fe,Ni)O_{3-s}作为氢电极在电解水制氢及可逆运 行方面的性能。

本文在前期研究的基础上,采用La/Ni共掺杂Sr (Ti, Fe)O₃₋₈的策略,构建A位少量La掺杂的 $La_{0.1}Sr_{0.85}Ti_{0.35}Fe_{0.6}Ni_{0.05}O_3(LSTFN),同时用于SOEC$ 氢电极和氧电极,并系统研究了低浓度H₂保护气下,不同H₂O/CO₂原料气配比下的共电解性能、产物 组成演化及SOFC/SOEC可逆运行稳定性。

1 试验

1.1 样品制备

试验采用固相合成法制备LSTFN。按化学计 量比称量相应质量的La(NO₃)₃·6H₂O(分析纯,上海 阿拉丁生化科技股份有限公司)、SrCO₃(分析纯,国 药集团化学试剂有限公司)、TiO₂(分析纯,上海阿拉 丁生化科技股份有限公司)、Fe₂O₃(分析纯,西陇化 工股份有限公司)和NiO(分析纯,上海阿拉丁生化 科技股份有限公司),并将其分散在一定量的乙醇 中,加入少量氧化锆球,在行星球磨机上球磨48h; 然后将球磨后的前驱体烘干,在1200℃下煅烧10 h;再次球磨48h后得到LSTFN电极粉体;过筛后加 入1.5倍粉体质量的丝印胶(徐州华清京昆能源有 限公司),在研钵中研磨30min后,用三辊机研磨制 备成电极浆料。电解质采用La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O₃₋₈ (LSGM):首先用流延法制得电解质坯体,在 1 450 ℃下高温煅烧 10 h,最终得到厚度约为 300 μm、直径为15 mm的电解质片。将电极浆料丝网印 刷在印有La_{0.4}Ce_{0.6}O₂(LDC)隔离层的LSGM电解质 两侧,分别作为氢电极和氧电极,电极有效面积为 0.5 cm²,最后在1150 ℃煅烧3h得到单电池。

1.2 单电池测试

使用陶瓷胶(Aremco-552)将单电池密封于氧 化铝管顶端,从阴/阳极分别延伸出银丝用于测试。 在室温加湿氮气气氛下(约3%H₂O/97%N₂(摩尔分 数,下同),50 mL/min)以2℃/min升温至800℃;然 后将阳极气氛切换为湿氢气(约3%H₂O/97%H₂,50 mL/min),将电池阳极还原2h。采用电化学工作站 (Princeton P4000A)在开路模式下测试电化学交流 阻抗谱(EIS,0.1 Hz~1 MHz,50 mV);然后采用5 mV/s的速率进行线性电压扫描。通过改变阳极侧 H₂,H₂O以及CO₂的进气量来测试不同原料气下电 极的性能;通过注射泵(TYD01-01)控制进入蒸汽发 生器(FD-HG)的水,从而获得相应的水蒸气流量, 以保证阳极进气总流量为50 mL/min。

1.3 表征方法

用X射线衍射仪(XRD, Brucker D8 Advance)研 究了LSTFN电极粉体的晶体结构(如图1所示)。采 用扫描电子显微镜(JEOL JSM-IT500HR)结合能谱 仪(Oxford X-max 80)分析测试后单电池与氢电极 的微观形貌。采用电化学工作站(Princeton P4000) 测试了单电池在不同温度以及原料气下的电解性 能及 SOFC/SOEC 循环运行稳定性,并采用气相色谱 (GC,GC-8890)对电解尾气产物进行检测。



Fig. 1 Features of the LSTFN powder

2 试验结果与分析

2.1 LSTFN 物相结构与微观形貌演化

采用XRD表征LSTFN粉体及其在不同H₂气氛 下还原后的相结构,结果如图1a所示。与SrFeO₃标 准图谱进行比对可以发现,合成的LSTFN粉体在 1150℃(即电极丝印后煅烧温度)煅烧后呈立方钙 钛矿结构。室温加湿H₂还原并没有破坏钙钛矿结 构,且在衍射角2*θ*≈44.8°时出现了Ni-Fe金属衍 射峰。

采用SEM观察单电池性能测试后的LSTFN氢 电极断面,如图1b-1c所示。可以看出,氢电极表 面原位生长了纳米颗粒,结合文献与XRD结果分 析,析出的纳米颗粒为Ni-Fe合金^[23-25]。通过对比可以发现,40% H₂条件下还原的LSTFN析出的Ni-Fe合金颗粒尺寸略大,约为120 nm,且数量较多;而10% H₂条件下析出的合金颗粒粒径约为80 nm。

观察含有 10% H₂作为保护气下单电池性能测 试后氢电极侧的断面图,如图 2a 所示。图中可以明 显观察到多孔LSTFN电极层、LDC隔离层和LSGM电 解质层。LSTFN电极层孔径均匀,厚度约为11 μm。 电极、隔离层和电解质之间界面接触良好,无热膨 胀系数不匹配而导致的分层现象。图 2b—2d分别 为Fe,Ga,Ce元素的能量分散光谱(EDS),从图中可 以看出明显的3层结构,LDC隔离层在一定程度上 阻隔了电极与电解质之间的元素扩散。



图 2 10% H₂保护气工作后单电池氢电极侧

Fig. 2 Post-test hydrogen electrode in 10% H, protection gas

2.2 共电解H₂O/CO₂性能及循环运行稳定性

图 3a 为 H₂O/CO₂比为1的氢电极原料气的共电 解性能。可以看到 800,750 °C下,分别在 85 mA/cm² 和 96 mA/cm²附近出现电压陡增的现象。这主要是 因为随电流密度增大,氢电极侧产生 H₂和 CO,显著 提升了电池电动势。为了避免氢电极中纳米金属 颗粒的氧化,进一步在电解过程中加入 H₂保 护气^[26-28]。

图 3b—3d 为通入 10% H₂保护气,不同 H₂O/CO₂ 比原料气下的 *I*-V曲线图。可以看出,单电池的开 路电压(OCV)显著上升,并在 800 °C时达到了 0.83 V。随着电解电压增大,电流密度显著提高,与电压 成类抛物线关系。当提高 H₂O/CO₂比时,单电池的 电解性能有所提升,但变化不显著;当水蒸气比例 达到 30% 且电解电压较高时, *I-V*曲线几乎相同。 此外,在一定电压、750 °C下的电流密度随水蒸气比 例的变化并不明显,这主要是因为随着水蒸气比例 的升高,水电解过程趋近于饱和,继续增加水蒸气 的比例对电解过程的影响极小。在H₂O/CO₂比为1 和1.8 V的电解电压下,750 °C和800 °C时的电流密 度分别达到了1.18,1.80 A/cm²,表现出优异的共电 解性能。

图4为上述测试条件下单电池的电化学交流阻抗谱(EIS)。在800℃,随H₂O比例的增加,单电池 欧姆阻抗(Z')几乎不变,约为490mΩ·cm²,但极化 阻抗(Z'')明显减小。而在750℃,随着H₂O的比例 由15%增加至45%,Z'从661mΩ·cm²增大为717 mΩ·cm²,Z''则表现出减小趋势。



図3 小回原科ストSOEC 共电解1-V 曲线 Fig. 3 *I-V* curves of SOEC co-electrolysis under different feed gas

从 Bode 图可以看出,在共电解模式下,单电池 电化学阻抗谱响应主要集中在1~10 Hz,且随H₂O比 的增大向高频偏移,表明增大H₂O/CO₂比可以强化 氢电极电化学反应速率;也从侧面说明在共电解模 式下,H₂O相较于CO,更容易发生解离生成H₂。

在 500 mA/cm²的电解电流密度下,采用气相色 谱检测氢电极的尾气组成,进一步分析了H₂O/CO₂ 比对共电解产物的影响。从图 5a—5b 可以看出,随 着水蒸气摩尔分数的增加,尾气中的H₂和 CO 的摩 尔分数也逐渐增加,且H₂的增加更加明显。根据共 电解理论^[29],产生的H₂会与 CO₂发生 RWGS 反应生 成 CO,因此 CO 的摩尔分数也随H₂的增加而增加; 但水蒸气的比例增加到一定限度后,RWGS 反应逐 渐达到平衡,导致 CO 的增加速率较缓。











从图 5c 可以看出,随着水蒸气比例的增加,尾 气中 H₂/CO 比逐渐升高。这主要是因为 H₂O 电解 比 CO₂的电解更容易发生,电解过程以 H₂O 的电解 为主。但随着温度的升高,相同水蒸气组成下的 H₂/CO 比降低,主要原因可能高温更有利于 RWGS 反应^[30],消耗 H₂生成更多的 CO,导致 H₂/CO 比 降低。

进一步地,测试了40% H₂保护气下的电解性 能,如图6所示。与10% H₂保护气下的结果类似, Z''随水蒸气比例的提高而下降;在800 °C时,当水 蒸气的比例从15%提高到30%,相应的Z''从183 mΩ·cm²降低到175 mΩ·cm²。Bode图中可以看出, 40% H₂下的响应峰值相比10% H₂出现在更高频的 区域,说明提高H₂比例会在一定程度上抑制电极的 极化。



图 7 为 40% H₂下的电解 I-V曲线。在水蒸气比 例到达 25% 且电解电压较大时,不同 H₂O 比例的原 料气 I-V曲线几乎重合在一起,说明 H₂O/CO₂比例对 电解性能影响较小。在 800 ℃且 H₂O/CO₂比为1的 气氛下,当电压为1.6 V时,随着保护气中 H₂比例从 10% 提高到 40%,电流密度从 1 312 mA/cm²降低到 1 242 mA/cm²,说明过高比例的 H₂在一定程度上稀 释了原料气,导致电解电流有所降低。

最后,采用40% H₂+30% CO₂+30% H₂O 的原料 气,进行了 SOFC/SOEC 可逆循环运行(上方 SOEC, 下方 SOFC),结果如图 8 所示(紫线为 OCV)。单电 池在 SOFC 和 SOEC 模式下循环 9 次,运行约 90 h,虽 然表现出了一定的初始衰减,但在运行 40 h后基本 趋于稳定,表现出较好的可逆运行稳定性。









3 结论

本文研究了LSTFN钙钛矿氧化物用于SOEC对称电极在共电解H₂O/CO₂时的性能和可逆运行稳定性。结果表明,在H₂保护气下,LSTFN能保持典型的立方钙钛矿结构,同时原位析出Ni-Fe纳米合金

颗粒;在800℃和1.8V下,采用10%H₂+45%H₂O+ 45%CO₂原料气的电解电流密度达到了1.80A/cm²; 同时发现,随着水蒸气比例的增加,H₂/CO的比例逐 渐升高;但提高电解温度,则降低了产物中H₂/CO的 比例。上述结果为SOEC共电解H₂O/CO₂技术的发 展提供了参考。

参考文献:

- [1]SONG Y, ZHANG X, XIE K, et al. High-temperature CO₂ electrolysis in solid oxide electrolysis cells: Developments, challenges, and prospects [J]. Advanced Materials, 2019, 31(50): 1902033.
- [2]MILLER H A, LAVACCHI A, VIZZA F. Storage of renewable energy in fuels and chemicals through electrochemical reforming of bioalcohols [J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2020, 21: 140-145.
- [3]张一民,康建立,赵乃勤.过渡金属基电解水催化剂的发展现状及展望[J].综合智慧能源,2022,44(5):15-29.
 ZHANG Yimin,KANG Jianli,ZHAO Naiqin. Development and perspectives of the transition metal-based catalysts for water splitting[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44 (5):15-29.
- [4]吴林芮,刘璐,孟瑜,等.锌-空气电池阴极碳基催化剂材料研究进展[J].综合智慧能源,2022,44(4):65-70.
 WU Linrui, LIU Lu, MENG Yu, et al. Research progress of carbon-based catalyst materials for cathodes of Zn-air batteries[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(4):65-70.
- [5]GOEPPERT A, CZAUN M, JONES J-P, et al. Recycling of carbon dioxide to methanol and derived products— Closing the loop [J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43 (23): 7995-8048.
- [6]HARTVIGSEN J, ELANGOVAN S, FROST L, et al. Carbon dioxide recycling by high temperature co-electrolysis and hydrocarbon synthesis [J]. Ecs Transactions, 2008, 12 (1):625.
- [7]STOOTS C, O'BRIEN J, HARTVIGSEN J. Results of recent high temperature coelectrolysis studies at the Idaho National Laboratory [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(9): 4208-4215.
- [8]范慧.可逆燃料电池——电解池氧电极复合改性研究 [D].北京:中国矿业大学,2014.
- [9]BIAN L, DUAN C, WANG L, et al. An all-oxide electrolysis cells for syngas production with tunable H₂/CO yield via co-electrolysis of H₂O and CO₂ [J]. Journal of Power Sources, 2021, 482: 228887.
- [10]KAMKENG A D, WANG M. Long-term performance prediction of solid oxide electrolysis cell (SOEC) for CO₂/

 $\rm H_2O$ co-electrolysis considering structural degradation through modelling and simulation [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132158.

- [11]KAZEMPOOR P, ASADI J, BRAUN R. Validation challenges in solid oxide electrolysis cell modeling fueled by low steam/CO₂ ratio [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(36): 15952–15959.
- [12]MENON V, FU Q, JANARDHANAN V M, et al. A modelbased understanding of solid-oxide electrolysis cells (SOECs) for syngas production by H₂O/CO₂ co-electrolysis
 [J]. Journal of Power Sources, 2015, 274: 768–781.
- [13]NI M. An electrochemical model for syngas production by co-electrolysis of H₂O and CO₂ [J]. Journal of Power Sources, 2012, 202: 209–216.
- [14]LI S, LI Y, GAN Y, et al. Electrolysis of H₂O and CO₂ in an oxygen-ion conducting solid oxide electrolyzer with a La_{0.2}Sr_{0.8}TiO₃₊₈ composite cathode [J]. Journal of Power Sources, 2012, 218: 244–249.
- [15]ZHAN Z, KOBSIRIPHAT W, WILSON J R, et al. Syngas production by coelectrolysis of CO₂/H₂O: The basis for a renewable energy cycle [J]. Energy & Fuels, 2009, 23 (6): 3089-3096.
- [16]ZHANG L, ZHU X, CAO Z, et al. Pr and Ti co-doped strontium ferrite as a novel hydrogen electrode for solid oxide electrolysis cell [J]. Electrochimica Acta, 2017, 232: 542-549.
- [17]SHU L, SUNARSO J, HASHIM S S, et al. Advanced perovskite anodes for solid oxide fuel cells: A review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(59): 31275-31304.
- [18]IRVINE J T, NEAGU D, VERBRAEKEN M C, et al. Evolution of the electrochemical interface in hightemperature fuel cells and electrolysers [J]. Nature Energy, 2016, 1(1): 1-13.
- [19]SUN Y, LI J, ZENG Y, et al. A-site deficient perovskite: The parent for in situ exsolution of highly active, regenerable nano-particles as SOFC anodes [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(20): 11048-11056.
- [20]ZHU T, TROIANI H E, MOGNI L V, et al. Ni-substituted Sr(Ti, Fe)O₃ SOFC anodes: Achieving high performance via metal alloy nanoparticle exsolution [J]. Joule, 2018, 2 (3): 478-496.
- [21] 倪维婕,朱腾龙,陈晓阳,等. Co/Ni 掺杂 SrTi_{0.3}Fe_{0.7}O₃₋₈
 钙钛矿电极材料制备及性能[J].硅酸盐学报,2019,47
 (3):313-319.

NI Weijie, ZHU Tenglong, CHEN Xiaoyang, et al. Fabrication and characterization of Co/Ni substituted $SrTi_{0.3}Fe_{0.7}O_{3-\delta}$ perovskite electrode [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(3): 313–319.

[22]ZHANG L, LI Y, ZHANG B, et al. (La, Sr)(Ti, Fe) $O_{3-\delta}$

perovskite with in-situ constructed FeNi_3 nanoparticles as fuel electrode for reversible solid oxide cell [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(15): 21264–21273.

- [23]LI Y, XIE K, CHEN S, et al. Efficient carbon dioxide electrolysis based on perovskite cathode enhanced with nickel nanocatalyst [J]. Electrochimica Acta, 2015, 153: 325-333.
- [24]LV H, LIN L, ZHANG X, et al. In situ investigation of reversible exsolution/dissolution of CoFe alloy nanoparticles in a co-doped Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_{6-δ} cathode for CO₂ electrolysis [J]. Advanced Materials, 2020, 32 (6) : 1906193.
- [25]PARK S, KIM Y, HAN H, et al. In situ exsolved Co nanoparticles on Ruddlesden–Popper material as highly active catalyst for CO₂ electrolysis to CO [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 248: 147–156.
- [26] LIANG J, HAN M. Different performance and mechanisms of CO₂ electrolysis with CO and H₂ as protective gases in solid oxide electrolysis cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022.
- [27]TORRELL M, GARCÍA-RODRÍGUEZ S, MORATA A, et al. Co-electrolysis of steam and CO₂ in full-ceramic symmetrical SOECs: A strategy for avoiding the use of hydrogen as a safe gas [J]. Faraday Discussions, 2015, 182: 241-255.
- [28]WANG Y, LIU T, FANG S, et al. Syngas production on a symmetrical solid oxide H₂O/CO₂ co-electrolysis cell with Sr₂Fe_{1.5}Mo_{0.5}O₆-Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9} electrodes [J]. Journal of Power Sources, 2016, 305: 240–248.
- [29]LI Q, ZHENG Y, SUN Y, et al. Understanding the occurrence of the individual CO₂ electrolysis during H₂O-CO₂ co-electrolysis in classic planar Ni-YSZ/YSZ/LSM-YSZ solid oxide cells [J]. Electrochimica Acta, 2019, 318: 440-448.
- [30]ZHENG H, TIAN Y, ZHANG L, et al. La_{0.8}Sr_{0.2}Co_{0.8}Ni_{0.2}O_{3-δ} impregnated oxygen electrode for H₂O/CO₂ co-electrolysis in solid oxide electrolysis cells [J]. Journal of Power Sources, 2018, 383: 93-101.

(本文责编:陆华)

作者简介:

韩倩雯(1998),女,在读硕士研究生,从事固体氧化物燃料电池方面的研究,hanqw1998@163.com;

张琨(1999),男,在读硕士研究生,从事固体氧化物燃料 电池方面的研究,2498249631@qq.com;

陈晓阳(1998),男,在读硕士研究生,从事电催化、锌离 子电池的研究,21S155060@stu.hit.edu.cn;

朱腾龙^{*}(1988),男,副教授,博士,从事固体氧化物燃料 电池方面的研究,zhutenglong@njust.edu.cn。

*为通信作者。