中低温固体氧化物燃料电池CeO2基电解质改性 研究进展

葛静静¹,程建睿¹,宋贤燚¹,张 洁^{1,2,3*}

¹郑州师范学院物理与电子工程学院,河南 郑州 ²郑州大学物理学院,河南 郑州 ³郑州威科姆科技股份有限公司,河南 郑州

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月21日

摘要

固体氧化物燃料电池(SOFC)因高效率、环境友好等优点受到广泛关注,中低温化是其未来发展的必然趋势。CeO2基电解质因其独特的物理化学性质,在中低温SOFC领域展现出巨大潜力,但其性能仍需进一步提升。本文综述了CeO2基电解质的四种改性方法:掺杂(单掺、双掺、多掺)、复合(与碳酸盐、硫酸盐、氧化物、钙钛矿复合)、表面处理及包覆型结构,并讨论了每种改性方法对电解质及电池性能的影响。研究表明,掺杂可引入氧空位,显著提高CeO2基的离子电导率;复合电解质则能综合利用各组分优势及界面效应提升CeO2基电解质的离子电导率;表面处理能有效改善CeO2基电解质表面性质,提高其电导率;包覆型结构则能有效保护CeO2基电解质颗粒,同时包覆层还可以作为离子传输的快速通道,提高电池的稳定性和功率密度。本综述期望为实验上制备高性能CeO2基电解质材料提供理论指导。

关键词

中低温固体氧化物燃料电池,离子电导率,表面处理,包覆型

Research Progress on the Modification of CeO₂-Based Electrolytes for Intermediate and Low Temperature Solid Oxide Fuel Cells

Jingjing Ge¹, Jianrui Cheng¹, Xianyi Song¹, Jie Zhang^{1,2,3*}

¹School of Physics and Electrical Engineering, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou Henan
 ²School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan
 ³Zhengzhou Vcom Technology Co., Ltd., Zhengzhou Henan

*通讯作者。

文章引用: 葛静静, 程建睿, 宋贤燚, 张洁. 中低温固体氧化物燃料电池 CeO₂ 基电解质改性研究进展[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(3): 372-382. DOI: 10.12677/amc.2025.133039

Received: Jun. 21st, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 21st, 2025

Abstract

Solid oxide fuel cells (SOFCs) have garnered significant attention due to their high efficiency and environmental friendliness, with intermediate and low temperature operation being an inevitable trend for future development. CeO₂-based electrolytes exhibit immense potential in the field of intermediate and low temperature SOFCs owing to their unique physicochemical properties. However, their performance still requires further enhancement. This paper reviews four modification methods for CeO₂-based electrolytes: doping (single, double, and multi-doping), compounding (with carbonates, sulfates, oxides, perovskites), surface treatment, and coated structures. The influence of each modification method on the electrolyte and cell performance is discussed. Research indicates that doping can introduce oxygen vacancies, significantly improving the ionic conductivity of CeO₂based electrolytes. Compound electrolytes can leverage the advantages of each component and interfacial effects to enhance the ionic conductivity of CeO₂-based electrolytes. Surface treatment effectively improves the surface properties of CeO₂-based electrolytes, thereby increasing their conductivity. Coated structures can effectively protect CeO₂-based electrolyte particles, and the coating layer can also serve as a fast channel for ion transport, improving the stability and power density of the cells. This review aims to provide theoretical guidance for the experimental preparation of highperformance CeO₂-based electrolyte materials.

Keywords

Intermediate and Low Temperature Solid Oxide Fuel Cells, Ionic Conductivity, Surface Treatment, Coated Structure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

固体氧化物燃料电池(SOFC)作为一种先进的能量转换装置,凭借其高效率、低排放及低噪音等显著 优势,被视为 21 世纪最具潜力的绿色能源技术之一。然而,传统 SOFC 的工作温度较高(800℃~1000℃), 这不仅增加了材料成本,还限制了其商业化进程。因此,开发中低温(通常指 600℃以下) SOFC 成为未来 的发展趋势。在中低温 SOFC 的发展过程中,电解质材料作为 SOFC 的核心组件之一,其性能直接影响 到电池的整体性能。

CeO₂ 基电解质因其独特的物理化学性质,如较高的离子电导率、良好的化学稳定性和热稳定性等, 在中低温 SOFC 领域展现出巨大的应用潜力。然而,纯 CeO₂电解质的离子电导率仍然较低,难以满足中 低温 SOFC 对电解质性能的要求。因此,对 CeO₂基电解质进行改性,提升其离子电导率和电池性能,成 为推动中低温 SOFC 商业化应用的关键。为了提升 CeO₂基电解质的离子电导率,研究者们采用了多种改 性方法,本文将对掺杂(包括单掺[1]-[4]、双掺[2][5]-[9]和多掺[9]-[14])、复合(与碳酸盐[16]-[18]、硫酸盐 [8] [19]、氧化物[17] [20]-[23]、钙钛矿复合[18] [23] [25]-[27])、表面处理[28]-[32]和包覆型结构[24] [33]-[36]等改性方法进行综述,分析各种改性方法对 CeO₂基电解质性能的影响机制,为未来实验上制备出性 能优异的 CeO₂基电解质材料提供理论指导。

2. 掺杂

2.1. 单掺

于江宇通过甘氨酸 - 硝酸盐法制备了 La³⁺掺杂 CeO₂ 的 Ce_{1-x}La_xO_{2-δ} (x = 0, 0.1, 0.2, 0.3)电解质材料。 结果表明,在 550℃时带有最佳掺杂比例 x=0.2 的 Ce_{0.8}La_{0.2}O_{2-δ} (LDC)电解质显示出了最佳的性能,其最 大功率密度达到 859 mW/cm²,且开路电压和欧姆阻抗分别为 1.085 V 和 0.1508 Ω·cm²,比未掺杂 La³⁺的 纯 CeO₂ 电解质电池的最大功率密度(722 mW/cm²)提升了 18.9% [1]。陈麒百通过共沉淀法制备 Sm 掺杂 CeO₂ 基得到 Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{1.9} (SDC20),研究表明 SDC20 在 1200℃ (50℃/min)下烧结,650℃时电导率最佳 为 1.66 × 10⁻² S/cm,最低活化能为 0.759 eV [2]。

高小薇通过甘氨酸硝酸盐法将 Pr 掺杂 CeO₂ 制备了 Ce_{1-x}Pr_xO_{2-δ} (x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)电解质,并制备出了相应的单电池。测试结果表明,相较于纯 CeO₂的 SOFC 样品,基于 Ce_{1-x}Pr_xO_{2-δ}电解质的 SOFC 样品在 550℃的测试温度下均展现出更高的最大输出功率和更低的电池的欧姆阻抗。其中,掺杂比例 x = 0.2 的样品性能最优,其单电池的欧姆阻抗仅为 0.14186 Ω·cm²,电池的最大输出功率可达 1083 mW/cm²,这比纯 CeO₂,电解质的单电池(646 mW/cm²)有很大的提升[3]。张予新利用柠檬酸 - 硝酸盐法制备了 Gd³⁺ 离子掺杂的氧化铈基电解质材料 Ce_{1-x}Gd_xO_{2-δ} ($x = 0.05 \sim 0.25$), x = 0.20 时电导率出现极大值,在 700℃的最高电导率为 0.058 S/cm [4]。

表 1 列出了不同课题组制备的单掺氧化铈性能对比,从表 1 可以看出高小薇通过甘氨酸硝酸盐法制成的 Ce_{1-x}Pr_xO_{2-∂}所制备的电池功率密度最高,550℃时最大功率密度达到 1083 mW/cm² [3]。

掺杂 CeO2 电解质	开路电压 (V)	最大电导率 (S/cm)	最低活化能 (eV)	最大输出功率 密度(mW/cm ²)	欧姆阻抗 (Ω·cm ²)	温度	备注
Ce0.8La0.202-8	1.085			859		550℃	Ref.1
Ce0.8Sm0.2O1.9		1.66×10^{-2}	0.759			650℃	Ref.2
Ce0.8Pr0.2O2-8				1083	0.14186	550℃	Ref.3
Ce0.8Gd0.2O2-8		0.058				700℃	Ref.4

 Table 1. Performance comparison of single-doped CeO₂ electrolytes

 表 1. 单掺 CeO₂ 电解质性能对比

2.2. 双掺

徐荣昊通过溶胶凝胶法制备了 Gd, Ba 共掺 CeO₂ 电解质材料 Ce_{0.8}Gd_{0.2-x}Ba_xO_{2-δ} (*x* = 0.00, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08)。研究表明,在 1400℃下烧结 4h 的电解质 Ce_{0.8}Gd_{0.16}Ba_{0.04}O_{1.9}在 800℃时的电导率最高为 0.051 S/cm。并且电解质材料 Ce_{0.8}Gd_{0.2-x}Ba_xO_{2-δ} (*x* = 0.02~0.06)具有良好的线膨胀系数,能够为电池的组装提供 良好的热稳定性[5]。薛优采用溶胶 - 凝胶法合成 Dy, Sc 共掺 CeO₂ 电解质材料 Ce_{0.75}Sc_xDy_{0.25-x}O_{1.875} (*x* = 0.03, 0.04, 0.05, 0.06) CSD,研究表明 750℃下, Ce_{0.75}Sc_{0.04}Dy_{0.21}电导率最高为 9.39×10⁻² S/cm,活化能为 0.80 eV,与电极材料有良好的热熔性,为组装电池创造了良好的条件[6]。

陈麒百通过共沉淀法制备了 Sm、Gd 共掺杂的 CeO₂ 基 Ce_{0.8}Sm_{0.2-x}O_{1.9}(SGDCX),研究表明,在所有 比例的 Sm、Gd 共掺杂 CeO₂基电解质中,SGDC1 (Ce_{0.8}Sm_{0.19}Gd_{0.01}O_{1.9})的电导率最高,在650℃时为1.59 ×10⁻² S/cm,且活化能最小,为0.75 eV [2]。胡文丽等人采用柠檬酸 - 硝酸盐燃烧法合成了 Yb³⁺、Gd³⁺双 掺杂 CeO₂ 电解质材料 Yb_{0.1}Gd_{0.1}Ce_{0.8}O_{2-a},研究表明,Yb_{0.1}Gd_{0.1}Ce_{0.8}O_{2-a}在750℃电导率达到 1.3 × 10⁻² S/cm,最大输出功率密度分别为12.6 mW/cm²,开路电压为1.02 V [7]。 陈卫等人采用硝酸盐 - 柠檬酸燃烧法合成了单一电解质材料 Ce_{0.8}Gd_{0.1}Tm_{0.1}O_{2-a},研究表明,在 800℃时,单一电解质电导率达到 5.1 × 10⁻³ S/cm,双掺杂单一电解质 Ce_{0.8}Gd_{0.1}Tm_{0.1}O_{2-a}电导率高于单掺单一电解质[8]。李舒婷采用溶胶凝胶法合成 Ca²⁺掺杂 GDC (Gd³⁺掺杂的 CeO₂)电解质材料 Ca_xGd_{0.2-x}Ce_{0.8}O_{1.9-δ} (*x* = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1,简写为 CGDCx);研究结果表明,在 750℃时,CGDC0.03 的电导率为 0.069 S/cm,是 GDC 电导率的 1.4 倍,最大功率密度为 399 mW/cm²,比同样条件下使用 GDC 作为电解质的单电池提高 41%。此外,在 550℃时,电池的开路电压也从 0.904 V 提升至 0.983 V, Ca²⁺掺杂有效抑制了 电池的内短路,改善了电池性能[9]。张庆彪等采用沉淀法制备了 Sr 和 Sm 共掺杂的 Ce_{0.8}(Sm_{1-x}Sr_x)_{0.2}O_{2-δ} 样品在 700℃时电导率最大为 5.4 × 10⁻² S/cm。随 Sr²⁺掺杂量 的增加,样品的热膨胀系数先增大后减小,热膨胀系数为(10.16 – 11.38) × 10⁻⁶ K⁻¹ [10]。

表 2 列出了不同课题组制备的双掺氧化铈性能对比,由表可知薛优采用溶胶-凝胶法合成的 Ce0.75Sc0.04Dy0.21电导率最高,750℃时达到0.0939 S/cm[6];李舒婷通过溶胶凝胶法制成的Ca0.03Gd0.17Ce0.8O1.9-δ 所制备的电池功率密度最高,750℃时最大功率密度达到 399 mW/cm²[9]。

CeO2 电解质掺杂	开路电压 (V)	最大电导率 (S/cm)	最低活化能 (eV)	最大输出功率 密度(mW/cm²)	欧姆阻抗 (Ω·cm ²)	温度	备注
$Ce_{0.8}Gd_{0.16}Ba_{0.04}O_{1.9}$		0.051				800℃	Ref.5
$Ce_{0.75}Sc_{0.04}Dy_{0.21}$		9.39×10^{-2}	0.80			750℃	Ref.6
$Ce_{0.8}Sm_{0.19}Gd_{0.01}O_{1.9}$		1.59×10^{-2}	0.75			650℃	Ref.2
$Yb_{0.1}Gd_{0.1}Ce_{0.8}O_{2-\alpha}$	1.02	$1.3 imes 10^{-2}$		12.6		750℃	Ref.7
$Ce_{0.8}Gd_{0.1}Tm_{0.1}O_{2^{-\alpha}}$		$5.1 imes 10^{-3}$				650℃	Ref.8
$Ca_{0.03}Gd_{0.17}Ce_{0.8}O_{1.9-\delta}$	0.983	0.069		399		750℃	Ref.9
$Ce_{0.8}(Sm_{0.8}Sr_{0.2})_{0.2}O_{2-\delta}$		$5.4 imes 10^{-2}$				700℃	Ref.10

 Table 2. Performance comparison of co-doped CeO2 electrolytes prepared by different research groups

 表 2. 不同课题组制备双掺 CeO2 电解质性能对比

2.3. 多掺

王灿灿采用柠檬酸 - 硝酸盐法合成 Nd、Sm 及过渡金属共掺 CeO₂ 电解质材料 Nd_{0.1}Sm_{0.1}Ce_{0.79}M_{0.01}O_{1.9-δ} (M = Fe, Co, Ni, Zn, 简称 SNDCM),研究表明, SNDCFe 在 650℃时,开路电压为 0.78 V,最大输出功率 密度为 458 mW/cm²,欧姆阻抗为 0.384 Ω·cm²; SNDCCo 在 650℃时,开路电压为 0.78 V,最大输出功率 密度为 452 mW/cm²,欧姆阻抗为 0.276 Ω·cm²; SNDCNi 在 650℃时,开路电压为 0.78 V,最大输出功率 密度为 331 mW/cm²,欧姆阻抗为 0.402 Ω·cm²; SNDCZn 在 650℃时开路电压为 0.75 V,最大输出功率密 度为 413 mW/cm²,欧姆阻抗为 0.328Ω·cm²均是有潜力的电解质材料[11]。

门引妮采用溶胶 - 凝胶法制备了 La、Ga、Sm 掺杂 CeO₂ 电解质材料 Ga_{0.08}La_{0.02}Ce_{0.8}Sm_{0.2-δ} (8Ca-2La-10SDC),研究表明,8Ca-2La-10SDC 在 750℃时电导率最大为 0.0322 S/cm,最低活化能为 0.588 eV [12]。 王广泽等人运用甘氨酸 - 硝酸盐法(GNP)合成 Pr、Sm、Gd 共掺杂的 CeO₂基 Pr_xGd_xSm_{0.2-2x}Ce_{0.8}O_{2-δ} (PGSC0-PGSC10, *x* 取值不同)电解质材料。研究表明,PGSC10 电解质在 800℃时电导率约 0.1 S/cm,与 SDC (0.115 S/cm)大致相当;活化能 0.377 eV,明显低于 SDC 的 0.626 eV [13]。

李舒婷用溶胶 - 凝胶法合成 Gd、Ca、F 掺杂 CeO₂ 得到一系列 Ca_xGd_{0.2-x}Ce_{0.8}F_{2x}O_{1.9-2x-δ} (x = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 简写为 CGDCFx)电解质材料。研究表明, 750℃时 CGDCF0.03 的电导率为 0.084 S/cm, 最大功率密度为 433 mW/cm²。同样条件下,功率密度比 Gd 掺杂 CeO₂ (GDC)电解质单电池提高 53%,

电导率是 GDC 的 1.7 倍[9]。王广泽利用甘氨酸 - 硝酸盐法制备了 Pr、La、Sm 共掺杂的 Pr_xLa_xSm_{0.2-2x}Ce_{0.8}O_{2- δ} (*x*=0,0.02,0.04,0.06,0.08,0.10)电解质材料(PLSC)。经 600℃烧结 10 h 后,PLSC6 具有较高的氧空位浓度,800℃时电导率为 0.058 S/cm,活化能为 0.477 eV,掺杂后的样品在低温下具有更好的电化学性能,是一种很有前途的电解质材料[14]。武泽栋等采用共沉淀法制备了 Ce_{0.8}Sm_{0.15-x}Nd_xBi_{0.05}O_{2- δ} (*x* = 0, 0.05, 0.10, 0.15)系列电解质粉体。在 700℃时, Ce_{0.8}Sm_{0.1}Nd_{0.05}Bi_{0.05}O_{1.5} 的电导率最大,为 2.84 × 10⁻² S/cm,而且随着 Nd³⁺掺杂量的增加,不同组分电解质的电导率先升高后降低[15]。

表 3 列出了不同课题组制备的多掺氧化铈性能对比,由表可知王广泽等人采用甘氨酸 - 硝酸盐法合成的 Pr_xGd_xSm_{0.2-2x}Ce_{0.8}O_{2-δ}电导率最高,800℃时达到 0.377 S/cm [13];王灿灿采用柠檬酸 - 硝酸盐法制成的 Nd_{0.1}Sm_{0.1}Ce_{0.79}Fe_{0.01}O_{1.9-δ}所制备的电池功率密度最高,650℃时最大功率密度达到 458 mW/cm² [11]。

CeO2 电解质掺杂	开路电压 (V)	最大电导率 (S/cm)	最低活化能 (eV)	最大输出功率 密度(mW/cm ²)	欧姆阻抗 (Ω·cm ²)	温度 (℃)	备注
$Nd_{0.1}Sm_{0.1}Ce_{0.79}Fe_{0.01}O_{1.9-\delta}$	0.78			458	0.384	650℃	Ref.11
$Nd_{0.1}Sm_{0.1}Ce_{0.79}Co_{0.01}O_{1.9-\delta}$	0.78			452	0.276	650℃	Ref.11
$Nd_{0.1}Sm_{0.1}Ce_{0.79}Ni_{0.01}O_{1.9-\delta}$	0.78			331	0.402	650℃	Ref.11
$Nd_{0.1}Sm_{0.1}Ce_{0.79}Zn_{0.01}O_{1.9-\delta}$	0.75			413	0.328	650℃	Ref.11
$Ga_{0.08}La_{0.02}Ce_{0.8}Sm_{0.2-\delta}$		0.0322	0.588				Ref.12
$Pr_{x}Gd_{x}Sm_{0.2-2x}Ce_{0.8}O_{2-\delta} (PGSC10)$		0.1	0.377			800°C	Ref.13
$Pr_{x}La_{x}Sm_{0.2-2x}Ce_{0.8}O_{2-\delta} (x = 0.06)$		0.058	0.477			800°C	Ref.14
$Ca_xGd_{0.2-x}Ce_{0.8}F_{2x}O_{1.9-2x-\delta}$ (x = 0.03)		0.084		433		750℃	Ref.9
$Ce_{0.8}Sm_{0.1}Nd_{0.05}Bi_{0.05}O_{1.5}$		2.84×10^{-2}				700℃	Ref.15

Table 3. Performance Comparison of multi-doped CeO₂ electrolytes prepared by different research groups 表 3. 不同课题组制备多掺 CeO₂电解质性能对比

3. 复合

3.1. 掺杂 CeO₂-碳酸盐、硫酸盐复合电解质

田力采用草酸盐共沉淀法制备了 Ce_{0.78}Sm_{0.2}Sr_{0.02}O_{2-δ} (SSDC), 与 30 wt.% (Li_{0.52}Na_{0.48})₂CO₃ 混合得到 SSDC-30LN 复合电解质。650℃下,复合电解质的氧离子电导率为 0.564 S/cm,质子电导率为 0.662 S/cm,制备出的单电池在 650℃、600℃和 550℃下,以 CO₂-O₂ 为阴极气,开路电压均高于 0.9 V,最大输出功 率分别为 1600、900 和 600 mW/cm [16]。余章宏以 SDC-(Li_{0.52}Na_{0.48})₂CO₃ 构建的 SLFC,550℃下功率输 出 145 mW/cm²,能够以 100 mA/cm² (0.064 A)工作超过 30 h [17]。

苗育铭采用熔融碳酸盐材料(52 mol% Li/48 mol% Na)₂CO₃ - 双钙钛矿 La_{1.5}Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{1.5}Fe_{0.5}O_{2-δ} - GDC 组成的三元电解质 LBSCF-LNGDC 构建了半导体 - 离子隔膜燃料电池(SIMFC)在 480℃~550℃下开路电压均保持在 1V 以上,最大功率密度为 395~562 mW/cm²。该电池在 550℃,200 mA/cm²的电流密度下能够稳定运行 15 小时[18]。陈卫等将 Ce_{0.8}Gd_{0.1}Tm_{0.1}O_{2-α}和二元硫酸盐(K₂SO₄, Li₂SO₄)混合,制备出 Ce_{0.8}Gd_{0.1}Tm_{0.1}O_{2-α}-KLiSO₄ 复合电解质,在 800℃时电导率达到 1.0 × 10⁻² S/cm [8]。陈卫等又将 Lu³⁺、Gd³⁺共掺杂的 CeO₂ 粉末与二元硫酸盐制 Ce_{0.8}Gd_{0.1}Lu_{0.1}O_{2-α}-KLiSO₄ 复合电解质,在 800℃时,电导率达到 4.1 × 10⁻³ S/cm [19]。

表 4 列出了不同课题组制备的掺杂 CeO2-碳酸盐、硫酸盐复合电解质性能的对比,从表 4 可以看出

田力通过使用 SSDC-30LN 复合电解质所制备的电池在 650℃时最大功率密度达到 1600 mW/cm², 复合电解质的质子电导率达到 0.662 S/cm [16], 性能最优。

 Table 4. Performance comparison of doped CeO₂-carbonate/sulfate composite electrolytes prepared by different research groups

 表 4. 不同课题组制备掺杂 CeO₂-碳酸盐、硫酸盐复合电解质性能对比

掺杂的 CeO2-碳酸盐、硫酸盐复合	开路电压(V)	最大电导率(S/cm)	最大输出功率 密度(mW/cm ²)	温度	备注
$Ce_{0.78}Sm_{0.2}Sr_{0.02}O_{2-\delta}\text{-}(Li_{0.52}Na_{0.48})_2CO_3$	66	0.662	1600	650°C	Ref.16
$Ce_{0.78}Sm_{0.2}Sr_{0.02}O_{2-\delta}\text{-}(Li_{0.52}Na_{0.48})_2CO_3$	高于 0.9		600	550°C	Ref.16
SDC-(Li _{0.52} Na _{0.48}) ₂ CO ₃			145	550°C	Ref.17
$GDC\text{-}(Li_{0.52}Na_{0.48})_2CO_3\text{-}La_{1.5}Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{1.5}Fe_{0.5}O_{2\text{-}\delta}$			395~562	480°C~550°C	Ref.18
$Ce_{0.8}Gd_{0.1}Tm_{0.1}O_{2\alpha}KLiSO_4$		$1.0 imes 10^{-2}$		800°C	Ref.8
$Ce_{0.8}Gd_{0.1}Lu_{0.1}O_{2-\alpha}\text{-}KLiSO_4$		$4.1 imes 10^{-3}$		800°C	Ref.19

3.2. 掺杂 CeO₂-氧化物复合电解质

刘开采用共沉淀法制备离子导体材料 Sm 掺杂氧化铈(SDC),将其与半导体材料 SnO₂ 复合构筑半导体离子导体隔膜燃料电池(SIMFC),在 550℃下,20SnO₂-80SDC (质量比为 20:80)电池的最大输出功率可达 1059 mW/cm²,没有发生短路问题[20]。刘开同时以 Ce 掺杂 SnO₂/SDC 复合材料为电解质来构筑燃料电池。以 20Sn_{0.975}Ce_{0.025}O_{2-δ}-80SDC 为电解质的电池,在 550℃下开路电压达到 1.088 V,最大输出功率达到 1177 mW/cm² [20]。

邵康将 NaCoO₂ (NCO)与 SDC 研磨成 NCO-SDC 混合材料,550℃时最大离子电导率约为0.204 S/cm, 构成的电池开路电压 1.025 V,最大功率密度为631 mW/cm²。400℃时,开路电压达到1.06 V,最大功率 密度能达到420 mW/cm²,具有优异的性能[21]。 应有全将 SDC 和 LiCo_{0.8}Fe_{0.2}O₂(LCF)研磨得到 LCF-SDC 纳米复合粉体,构成的电池在460℃也能获得770 mW/cm²的功率输出,在550℃下开路电压1.1 V,最大 功率密度1150 mW/cm²,离子导电率达到0.23 S/cm,高于 SDC (0.015 S/cm)一个多量级[22]。

张毅飞构造出 SDC-Li_{0.05}ZnO 复合电解质,并以此组装电池,520℃时有 765 mW/cm² 的功率密度和 0.195 S/cm 的离子电导率。在 490℃, SDC-Li_{0.05}ZnO 电池在保持 312.5 mA/cm² 大电流密度的情况下,持 续稳定工作了 6 h,期间电压维持 10⁻³ V/h 衰减量级,表明 SDC-Li_{0.05}ZnO 电池在低温下具有维持较大电 流密度工作的能力[23]。

余章宏以 Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{1.95}(SDC)-LiNiO₂(LNO)构建的 SLFC,550℃下,开路电压为 0.995 V,最大输出 功率密度为 468 mW/cm² [17];余章宏又基于 SIC 材料所构建的新型电池 Ni-7LNO-3SDC/7SDC-3LNO/7LNO-3SDC-Ni,在550℃下开路电压为 1.059 V,最大功率密度为 1064 mW/cm² [17];余章宏同时 以 SDC-Li_{0.5}Na_{0.5}CoO₂(LNCO)构建的 SLFC,550℃下可以取得 0.95 V 的 OCV 和 417 mW/cm² 的 Pmax 的 优异性能,并且能够以 100 mA/cm²工作超过 151 h [17]。杨鑫磊制备 La_{0.33}Ce_{0.62}Pr_{0.05}O_{2-δ}(LCP)-SnO₂ 异质 结构复合材料,在520℃~480℃下,离子电导率 0.183~0.173 S/cm,燃料电池在520℃下的最大功率密度 为 821.9 mW/cm²,开路电压为 1.056 V [24]。

表 5 列出了不同课题组制备的掺杂 CeO₂-氧化物复合电解质性能的对比,从表 5 可以看出刘开制备 出以 20Sn_{0.975}Ce_{0.025}O_{2-δ}-80SDC 为电解质的电池在 550℃下开路电压达到 1.088 V,最大输出功率达到 1177

mW/cm² [20]。

掺杂的 CeO2-氧化物复合	开路电压(V)	最大电导率 (S/cm)	最大输出功率密度 (mW/cm ²)	温度	备注
SDC-Sn0.975Ce0.025O2-δ	1.088		1177	550°C	Ref.20
SDC-SnO ₂			1059	550°C	Ref.20
SDC-NaCoO ₂	1.06		420	400°C	Ref.21
SDC-NaCoO ₂	1.025		631	550°C	Ref.21
SDC-LiCo _{0.8} Fe _{0.2} O ₂	1.1	0.23	1150	550°C	Ref.22
SDC-LiCo _{0.8} Fe _{0.2} O ₂			770	460°C	Ref.22
SDC-Li _{0.05} ZnO		0.195	765	520°C	Ref.23
SDC-LiNiO ₂	0.995		468	550°C	Ref.17
SDC-LiNiO ₂	1.059		1064	550°C	Ref.17
SDC-Li _{0.5} Na _{0.5} CoO ₂	0.95		417	550°C	Ref.17
$La_{0.33}Ce_{0.62}Pr_{0.05}O_{2-\delta}\text{-}SnO_{2}$		0.173~0.183		480°C~520°C	Ref.24
$La_{0.33}Ce_{0.62}Pr_{0.05}O_{2-\delta}\text{-}SnO_{2}$	1.056		851.9	520°C	Ref.24

 Table 5. Performance comparison of doped CeO₂-oxide composite electrolytes prepared by different research groups

 表 5. 不同课题组制备的掺杂 CeO₂-氧化物复合电解质性能对比

3.3. 掺杂 CeO2-钙钛矿复合电解质

苗育铭采用 Pr 系无钴钙钛矿材料 Pr_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.8}Cu_{0.2}O_{3-δ} (PSFC)和 Gd 掺杂的氧化铈材料 Gd_{0.1}Ce_{0.9}O_{2-δ} (GDC)以及添加 Ni-NCAL 的催化层构建了半导体 - 离子隔膜燃料电池(SIMFC),质量比为 2:8 混合的 2PSFC-8GDC 电池,在 550℃时开路电压 1.026 V,最大功率密度为 551 mW/cm²,450℃时仍有开路电压 1.059 V,最大功率密度为 301 mW/cm² [18]。

孟元靖将溶胶 - 凝胶法制得的半导体 La_{0.65}Sr_{0.3}Ce_{0.05}Cr_{0.5}Fe_{0.5}O_{3-δ} (CLSCrF)与离子导体 SDC 均匀复合,制得了低温下具有高离子电导率的 CLSCrF-SDC 半导体 - 离子复合电解质隔膜。基于 3CLSCrF-7SDC (重量比为 3:7)隔膜的 EFFC 在 550℃获得最优性能,其最大功率密度为 837 mW/cm²,且此隔膜的离子电导率达到 0.15 S/cm,是 SDC 电解质隔膜离子电导率数值的将近 2 倍。3CLSCrF-7SDC 电池在 550℃下以 234 mA/cm² 的恒定电流密度可以连续运行了 18 个多小时[25]。

张毅飞合成 SDC、La_{0.6}Sr_{0.4}Fe_{0.8}Cu_{0.2}O_{3-δ} (LSFC)构造出 SDC-LSFC 半导体离子电解质,在470℃~550℃, 具有 0.122~0.204 S/cm 的离子电导率以及 0.554 eV 的迁移活化能,其中 3SDC-LSFC (质量比 3:1)电池最 大功率密度为 523~1062 mW/cm² [23]。Mushaq 等人构建了一种由半导体钙钛矿 Ba_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.8}Sb_{0.2}O_{3-δ} (BSFSb)和离子型萤石结构 SDC 组成的异质结构,对于 5BSFSb-5SDC 电解质的电池,在 550℃时获得了 1.12 V 的开路电压(OCV)和 1012 mW/cm² 的最大功率密度[26]。

Meng Y.J.等人将钙钛矿氧化物 La_{0.7}Sr_{0.3}Cr_{0.5}Fe_{0.5}O_{3-δ} (LSCrF)与离子导体 Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-δ} (SDC)混合, 质量比为 4:6 的 4LSCrF-6SDC 电池,在 470℃~550℃时,电压均在 1.0 V 以上,功率密度 553 mW/cm²~1059 mW/cm²。该电池在 470℃时,开路电压 1.074 V,功率密度达到 553 mW/cm²,表明 4LSCrF-6SDC 复合 材料在低温下具有良好潜力[27]。

表 6 列出了掺杂 CeO2-钙钛矿复合电解质性能的对比,从表 6 可以看出该类复合电解质所制备的电

池在 550℃时的功率密度均超过 500 mW/cm² [18] [23] [25]-[27],其中张毅飞构造的 SDC-LSFC 半导体离 子电解质 550℃时电导率最高达到 0.204 S/cm,所制备电池的最大输出功率密度达到 1062 mW/cm² [23]。

掺杂的 CeO2-钙钛矿复合	开路电压(V)	最大电导率 (S/cm)	最大输出功率密度 (mW/cm ²)	温度	备注
$Gd_{0.1}Ce_{0.9}O_{2-\delta}\text{-}Pr_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.8}Cu_{0.2}O_{3-\delta}$	1.026		551	550℃	Ref.18
SDC-La0.65Sr0.3Ce0.05Cr0.5Fe0.5O3-8		0.15	837	550℃	Ref.25
$SDC\text{-}La_{0.6}Sr_{0.4}Fe_{0.8}Cu_{0.2}O_{3-\delta}$		0.122~0.204	523~1062	470°C~550°C	Ref.23
$SDC\text{-}Ba_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.8}Sb_{0.2}O_{3\text{-}\delta}$	1.12		1012	550°C	Ref.26
$SDC\text{-}Lao.7Sro.3Cro.5Feo.5O_{3-\delta}$	高于1		553-1059	470℃~550℃	Ref.27
$SDC-La_{0.7}Sr_{0.3}Cr_{0.5}Fe_{0.5}O_{3-\delta}$	1.074		553	470°C	Ref.27

 Table 6. Performance comparison of doped CeO₂-perovskite composite electrolytes prepared by different research groups

 表 6. 不同课题组制备掺杂 CeO₂-钙钛矿复合电解质性能对比

4. 表面处理

刘东源通过使用第一性原理热力学方法考虑 CO 分子覆盖度效应,对 CeO₂表面进行 Cu 团簇修饰,结果表明 Cu 和 CeO₂交界面区域对于 CO 氧化反应具有最高活性。结果表明 Cu 和 CeO₂交界面区域对于 CO 氧化反应具有最高活性[28]。鞠江伟以常用的电解质/浸渍氧化钐掺杂的氧化铈 Sm_{0.2}Ce_{1.8}O_{1.9} (SDC)作为研究对象,以纯氧化铈作为衬底,通过浸渍相 SDC 的电导率并与体材料 SDC 作比较。发现渍样本的表观电导率随着浸渍量的增大而增大。体材料 SDC 在 700℃的表观电导率为 2.09×10⁻² S/cm,致密浸渍相 SDC 的本质电导率约为 5.88×10⁻² S/cm。高于体材料 SDC 的电导率。通过比较浸渍相 SDC 与体材料 SDC 的交流阻抗谱发现:浸渍相 SDC 的晶界电阻对总电阻的贡献小于晶粒电阻对总电阻的贡献[29]。

尹一凡用稀硝酸对分子式 Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{2-δ} (SDC)电解质表面进行酸浸处理,在550℃下时,发现稀硝酸处理五分钟的时候,电池性能达到700 mW/cm²的最佳功率输出,在450℃环境下也能达到200 mW/cm², 燃料电池在低温环境下工作也成为了可能[30]。王玥采用水热法合成 Ni²⁺掺杂 CeO_{2-δ}纳米棒(Ce_{1-x}Ni_xO_{2-δ}),在600℃和 H₂条件下,Ce_{1-x}Ni_xO_{2-δ}纳米棒表面析出少量直径为11 nm 的 Ni 金属颗粒,析出的纳米镍颗粒促进了氧化铈表面晶格氧的脱出反应。在600℃下,以Ce_{0.9}Ni_{0.1}O₂和 CeO_{2-δ}纳米棒为阳极的单电池在97% H₂~3% H₂O 中的峰值输出功率分别为820 和442 mW/cm²,在68% CH₃OH~32% N₂中的峰值输出功率则分别为598 和 331 mW/cm² [31]。邢月明采用共沉淀法方法制备了CeO₂离子传导核壳结构,用于氢燃料电池的电解质,测试表明在520℃时离子电导率为0.16 S/cm,用该电解质制备的单电池最大输出功率697 mW/cm²,开路电压为1.08 V [32]。

表 7 列出了不同课题组通过不同的表面处理方法制备的复合电解质的性能对比,由表可知邢月明通 过共沉淀法方法制备的 CeO₂ 离子传导核壳结构电导率最高,520℃时达到 0.16 S/cm [32]; 王玥通过水热 法制备的以 Ce_{1-x}Ni_xO_{2-δ}97%H₂ 为电解质的电池功率密度最高,600℃时最大功率密度达到 820 mW/cm² [31]。

5. 包覆型结构

杨鑫磊通过向 La_{0.33}Ce_{0.62}Pr_{2-δ}(LCP)中主动引入碳酸盐,制备 LCP-Na₂CO₃复合材料(NLCP),Na₂CO₃在 NLCP 中以非晶态存在,并包覆在 LCP 颗粒表面,形成"核 - 壳"结构。Na₂CO₃含量为 20%时, LCP-Na₂CO₃(NLCP20)在 520℃时,最大功率密度为 409 mW/cm²,开路电压为 1.045 V,电导率为 0.077

S/cm [24].

表面处理的 CeO2 电解质	开路电压(V)	最大电导率 (S/cm)	最大输出功率密度 (mW/cm ²)	温度	备注
体材料 SDC		0.0209		700℃	Ref.29
致密浸渍相 SDC		0.0588		700℃	Ref.29
SDC-Ce0.8Sm0.2O2-δ 酸浸			700	550℃	Ref.30
SDC-Ce0.8Sm0.2O2-δ 酸浸			200	450℃	Ref.30
$Ce_{1-x}Ni_xO_{2-\delta}97\%H_2$			820	600℃	Ref.31
$Ce_{1-x}Ni_xO_{2-\delta}35H_2O$			442	600℃	Ref.31
Ce _{1-x} Ni _x O _{2-δ} 68%CH ₃ OH			598	600°C	Ref.31
$Ce_{1-x}Ni_xO_{2-\delta}32\%N_2$			331	600℃	Ref.31
CeO ₂ /CeO _{2-δ}	1.08	0.16	697	520°C	Ref.32

 Table 7. Performance comparison of surface-treated CeO2 electrolytes prepared by different research groups

 表 7. 不同课题组表面处理的 CeO2 电解质性能对比

宫正通过改进的柠檬酸盐法结合原位固相反应法首次合成了 BaCe0₃修饰的 Sm_{0.2}Ce_{1.8}O_{1.9} (SDC)复合 电解质。XRD 和 TEM 实验表明复合电解质由钙钛矿相的 SDC-BaCe_{0.8}Nd_{0.2}O_{3-δ} (BCS)和萤石相的 SDC 两 相组成,无其他杂相存在。其中 BCS 包覆在了 SDC 颗粒表面,形成了具有核壳结构的复合电解质中的 BCS 相有效保护了 SDC 颗粒,阻碍了 SDC 中的电子传输路径,BSC-SDC (20:80 wt.%)在 650℃时最大功 率密度为 782 mW/cm²,最大开路电压为 0.812 V [33]。

朱延俊采用共沉淀法制备了 1 mol%和 10 mol% Gd 掺杂的 CeO₂ (1-GDC 和 10-GDC)固溶掺杂粉末样品,通过晶界包覆掺杂法在 1-GDC 和 10-GDC 中掺杂 0.5 mol% Fe,得到 GDC-0.5Fe (GBS)。在 800℃下烧结 1 h 得到 GDC 陶瓷样品,发现电导率会升高。在 300℃~650℃下测量的 1-GDC-0.5Fe (GBS)和 10-GDC-0.5Fe (GBS)样品的离子迁移数均超过了 0.95 [34];同时朱延俊又通过晶界包覆掺杂法在 10-GDC 中掺杂 1 mol% Co,得到 10-GDC-1Co (GBS)。在 1000℃下烧结 1 h 得到 GDC 陶瓷样品,在较低测试温度下,经包覆掺杂 Co 元素的 10-GDC 样品的电导率最大值随着温度的升高,其电导率和 10-GDC 样品的非常接近。在 650℃下,GBS 的离子迁移数接近 0.8 [34]。

邸婧采用 SDC 与(Li/Na)₂CO₃、(Li/k)₂CO₃和(K/Na)₂CO₃制备了 SDC-碳酸盐复合电解质。碳酸盐包覆 在 SDC 颗粒上形成稳定的电解质。发现电解质的电导率与纯 SDC 相比有明显增大,并在熔点附近显著 提高。碳酸盐含量为 20 wt%时的燃料电池具有最高的开路电压和功率密度,650℃最大功率密度可达 580 mW/cm²,开路电压 1.0 V [35]。刘彦贝等人采用溶剂热法制备核壳结构 CeO₂@La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ} (CeO₂@LSCE)复合电解质材料,结果表明:550℃时,CeO₂@LSFC 作为燃料电池的电解质,在 1.08 V 开 路电压下,获得 942.2 mW/cm² 的最大输出功率密度[36]。

表 8 列出了不同课题组制备的包覆型电解质的性能对比,由表可知杨鑫磊制备的 NLCP20 电解质电 导率最高,520℃时达到 0.077 S/cm [24];刘彦贝等人制备以 CeO₂@LSFC 为电解质的电池功率密度最高,550℃时最大功率密度达到 942 mW/cm² [36]。

6. 小结

CeO2 基在中低温 SOFC 领域展现出巨大的应用潜力。对 CeO2 基电解质进行改性,提升其离子电导率和电池性能,成为推动中低温 SOFC 商业化应用的关键。本文对掺杂(包括单掺、双掺和多掺)、复合(与

碳酸盐、硫酸盐、氧化物、钙钛矿复合)、表面处理和包覆型结构等改性方法进行了综述,结论如下:

包覆型 CeO2 基电解质	开路电压(V)	最大电导率 (S/cm)	最大输出功率密 度(mW/cm ²)	温度	备注
NLCP20	1.045	0.077	409	520°C	Ref.24
BSD-SDC20:80wt.%	0.812		782	650℃	Ref.33
SDC-碳酸盐	1.0		580	650℃	Ref.35
CeO2@LSFC	1.08		942	550℃	Ref.36

 Table 8. Performance comparison of coated CeO₂-based composite electrolytes prepared by different research groups

 表 8. 不同课题组制备的包覆型 CeO₂基电解质性能对比

1) 通过掺杂可以在 CeO₂ 晶格中引入氧空位,增加载流子浓度,从而显著提高电解质的离子电导率。 双掺和多掺通过协同作用,能进一步提升 CeO₂ 基电解质的性能。

2) 掺杂 CeO₂ 与碳酸盐、硫酸盐、氧化物、钙钛矿材料进行复合,不仅可以综合利用各组分的优势, 而且还通过界面效应等机制进一步提升复合电解质的离子电导率。

3) 通过表面处理(如酸浸、浸渍、水热法等)可以改善 CeO₂ 基电解质的表面性质,如去除表面杂质、 增加表面粗糙度、引入活性位点等,从而提高其电导率。

4) 通过包覆型结构(如碳酸盐包覆、钙钛矿包覆等)可以形成具有核壳结构的复合电解质。这种结构 可以有效保护电解质颗粒,防止颗粒团聚,提高电解质的稳定性;同时,包覆层还可以作为离子传输的 快速通道,提高电池的功率密度和开路电压。

综述结果期望未来为实验制备出性能优异的 CeO2 基电解质材料提供理论指导。

基金项目

本项目由河南省高等学校重点科研项目(23B140008),河南省教师教育课程改革重点项目(2024-JSJYZD-027),河南省大学生创新训练计划项目(202412949013),河南省一流本科课程建设项目 (SHHYLKC2221718),郑州师范学院数智化课程建设项目(SZHKC-0001242756),郑州师范学院大学生创 新训练计划项目(DCZ2023003)提供经费支持。

参考文献

- [1] 于江宇. 基于氧化铈与铝酸镧的离子掺杂及异质结构电解质的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古 大学, 2024.
- [2] 陈麒百. 稀土元素掺杂氧化铈基电解质的离子导电性能研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [3] 高小薇. 基于 Pr、Ce 氧化物设计的低温固体氧化物燃料电池电解质的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [4] 张予新. Gd³⁺掺杂氧化铈和 Gd³⁺、Ca³⁺共掺氧化铈固体电解质的制备及电性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [5] 徐荣昊. 掺杂氧化铈电解质材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥学院, 2022.
- [6] 薛优. 氧化钪和氧化镝掺杂 CeO₂ 基电解质材料制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- [7] 胡文丽, 陈卫, 王洪涛. 高致密性 Yb³⁺和 Gd³⁺双掺杂 CeO₂中温电解质的合成及其电性能研究[J]. 安阳师范学院 学报, 2023(2): 13-17.

[8]	陈卫,	胡文丽.	Tm ³⁺ 和 (Gd ³⁺ 双掺	参杂 CeO2	复合电	解质的合	成及其中	户温电性能[J].	北部湾大学	学学报,	2021,	36(4): 26-
	30.												

- [9] 李舒婷. 固体氧化物燃料电池 CeO₂ 固体电解质 Ca、F 离子掺杂改性研究[D]: [博士学位论文]. 包头: 内蒙古科 技大学, 2024.
- [10] 张庆彪,周芬,郜建全,等. Ce_{0.8}(Sm_{1-x}Sr_x)_{0.2}O_{2-δ} 电解质的制备及其性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(1): 70-75.
- [11] 王灿灿. 过渡金属掺杂的 CeO2 基电解质材料的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- [12] 门引妮. La-Ca-Sm 多元掺杂 CeO2 电解质材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2022.
- [13] 王广泽,韩飞,刘晗,等. Pr、Sm、Gd 共掺杂 CeO2 基中温固体氧化物燃料电池电解质材料的制备与电化学性能 研究[J]. 长春师范大学学报, 2024, 43(2): 38-42.
- [14] 王广泽. 多重阳离子共掺杂 CeO₂ 基中温固体氧化物燃料电池电解质材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春师范大学, 2024.
- [15] 武泽栋,周芬,郜建全,等. Ceo.8Smo.15-xNdxBio.05O2-6电解质的制备及性能[J]. 电源技术, 2025, 49(2): 396-402.
- [16] 田力. 钐掺杂氧化铈-碳酸盐复合电解质的优化和电性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [17] 余章宏. 基于含锂过渡金属氧化物的单层燃料电池构建及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北大学, 2023.
- [18] 苗育铭. 基于钙钛矿与掺杂氧化铈的半导体-离子材料在低温 SOFC 中的应用[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林 大学, 2024.
- [19] 陈卫, 胡文丽, 张利. 柠檬酸-硝酸盐燃烧法合成 Lu³⁺和 Gd³⁺共掺杂 CeO₂ 及其复合电解质的中温电性能[J]. 阜阳师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 40-44.
- [20] 刘开. 氧化锡基半导体-离子导体在 SOFC 中的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北大学, 2021.
- [21] 邵康. 混合半导体-离子型燃料电池新材料开发与电化学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2020.
- [22] 宓有全. 基于新型功能半导体离子材料的低温固体氧化物燃料电池[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北大学, 2019.
- [23] 张毅飞. 氧化铈基半导体离子燃料电池的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [24] 杨鑫磊. 基于镧镨共掺杂氧化铈的半导体隔膜燃料电池研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2023.
- [25] 孟元靖. 钐掺杂氧化铈与钙钛矿复合电解质在低温固体氧化物燃料电池中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [26] Mushtaq, N., Lu, Y., Xia, C., *et al.* (2021) Promoted Electrocatalytic Activity and Ionic Transport Simultaneously in Dual Functional Ba_{0.5}Sr_{0.5}Fe_{0.8}Sb_{0.2}O_{3-δ}-Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-δ} Heterostructure. *Applied Catalysis B: Environmental*, **298**, Article ID: 120503.
- [27] Meng, Y.J., Xu, F.Z., Wang, X.Y., *et al.* (2017) Low-Temperature Fuel Cells Using a Composite of Redox-Stable perovskite Oxide La_{0.7}Sr_{0.3}Cr_{0.5}Fe_{0.5}O_{3-δ} and Ionic Conductor. *Journal of Power Sources*, **366**, 259-264.
- [28] 刘东源. 稀土掺杂和 Cu 团簇修饰 CeO₂(111)表面催化氧化反应机理的理论研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国 石油大学(华东), 2021.
- [29] 鞠江伟. 固体氧化物燃料电池复合电极浸渍相的电导性能[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [30] 尹一凡. 酸处理优化固体氧化物燃料电池电化学性能[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北大学, 2024.
- [31] 邢月明. CeO2基半导体异质结材料的离子传输特性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2022.
- [32] 王玥. 固体氧化物电池的纳米电极制备与性能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所), 2021.
- [33] 宫正. 氧化铈基固体氧化物燃料电池结构设计及其电化学研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [34] 朱延俊. 晶界包覆对 CeO2 基固态电解质导电行为的影响[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [35] 邸婧. 中低温固体氧化物燃料电池新型 CeO2 基电解质的研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2010.
- [36] 刘彦贝, 王若名, 刘娟, 等. CeO₂@La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ}电解质的制备及半导体离子燃料电池性能研究[J]. 化工 学报, 2025, 76(3): 1353-1362.