



管式 ScSZ 电解质支撑固体氧化物燃料电池的电化学性能研究及其串联验证

简俊辉¹, 林泽宇¹, 郑家辉¹, 鲁圣国^{1,2}, 陶涛¹, 姚英邦², 赵小波², 吕建兵³, 冯力³,
梁波^{1,4}

(¹广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006; ²广东工业大学集成电路学院, 广东 广州 510006; ³广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; ⁴佛山索弗克氢能有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要:为解决基于传统的钇稳定氧化锆(YSZ)电解质的阳极支撑管式固体氧化物燃料电池(SOFC)中因高工作温度的需求所带来的热机械应力问题,本研究制备了一种基于钪稳定氧化锆(ScSZ)电解质支撑的管式固体氧化物燃料电池(SOFC)。采用冷等静压与无芯磨技术制备高致密 ScSZ 电解质管,其厚度约为 220 μm 。并涂覆 Ag-ScSZ 浆料并烧结充当对称电极以提升界面兼容性与电化学性能,成功制备得到 Ag-ScSZ|ScSZ|Ag-ScSZ 单电池。使用 X 射线衍射仪(XRD)对 ScSZ 电解质和 Ag-ScSZ 电极进行相分析,ScSZ 电解质维持萤石立方结构,且 Ag-ScSZ 没有产生副相,为 ScSZ 电解质支撑管式 SOFC 的高性能提供物相基础。使用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对单电池截面进行结构分析和元素分析,观察到致密的 ScSZ 电解质以及分布结构良好的 Ag-ScSZ 电极,为 ScSZ 电解质支撑管式 SOFC 提供优秀的离子传导路径和结构合理的反应区域。电化学性能方面,ScSZ 电解质支撑的对称电池显著优于传统 YSZ 的电解质支撑对称电池。850 $^{\circ}\text{C}$ 下的 ScSZ 电解质支撑 SOFC 相较于 YSZ 电解质支撑的 SOFC,功率密度提升约 98%;欧姆电阻降低 17%,极化电阻降低了 93%。同时单管 ScSZ 电解质支撑的 SOFC 在 900 $^{\circ}\text{C}$ 下能够达到约 244 mW/cm^2 的功率密度。且 ScSZ 电解质支撑的单电池在 0.7 V 的电压下进行 35 小时恒压放电,能够稳定输出约 300 mA/cm^2 的电流密度,无明显性能衰弱。此外,为提升电压和功率,使用螺旋取电方式将两根管式 ScSZ 电解质支撑单电池进行串联,构建了最基础的双管串联电堆,实现了约 2 倍的电压提升和 1.9 倍的功率增强,验证了该结构在电堆集成中的应用潜力。本研究为管式电解质支撑 SOFC 领域后续的发展提供了实验依据。

关键词: 钪稳定的氧化锆; 电解质支撑; 固体氧化物燃料电池; 串联

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0896

中图分类号: TM 911.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-398-09

Electrochemical performance study and series verification of solid oxide fuel cells supported by ScSZ electrolyte tube

JIAN Junhui¹, LIN Zeyu¹, ZHENG Jiahui¹, LU Shengguo^{1,2}, TAO Tao¹, YAO Yingbang²,
ZHAO Xiaobo², LV Jianbing³, FENG Li³, LIANG Bo^{1,4}

(¹School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; ²School of Integrated Circuits, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong,

收稿日期: 2025-10-10; 修改稿日期: 2025-10-27。

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4002603)。

第一作者: 简俊辉 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为固体氧化物燃料电池, E-mail: 867105037@qq.com; 通信作者: 梁波, 博士, 副教授, 研究方向为重整制氢技术和固体氧化物燃料电池及电堆的研发, E-mail: liangbo@gdut.edu.cn。

引用本文: 简俊辉, 林泽宇, 郑家辉, 等. 管式 ScSZ 电解质支撑固体氧化物燃料电池的电化学性能研究及其串联验证[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 398-406.

Citation: JIAN Junhui, LIN Zeyu, ZHENG Jiahui, et al. Electrochemical performance study and series verification of solid oxide fuel cells supported by ScSZ electrolyte tube[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 398-406.

China; ³School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; ⁴Foshan ISOFC Dynamic Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: High operating temperatures often cause thermal mechanical stress in anode-supported tubular solid oxide fuel cells (SOFCs) using traditional yttrium-stabilized zirconia (YSZ) electrolytes. To overcome this issue, this study developed a new type of tubular SOFC supported by a scandium-stabilized zirconia (ScSZ) electrolyte. High-density ScSZ electrolyte tubes were prepared using cold isostatic pressing and coreless grinding techniques and then sintered at high temperatures to achieve a thickness of approximately 220 μm . The Ag-ScSZ|ScSZ|Ag-ScSZ single cells were successfully prepared by coating a Ag-ScSZ slurry on the ScSZ electrolyte and then sintering it at a high temperature to form a symmetrical electrode to improve interface compatibility and electrochemical performance. Phase analysis of the ScSZ electrolyte and Ag-ScSZ electrode was carried out by X-ray diffraction. The ScSZ electrolyte retains its fluorite cubic structure, while no secondary phases appears in Ag-ScSZ, providing a solid foundation for the high performance of tubular SOFCs. Scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy were used to analyze the structure and elemental distribution of the single-cell cross section. Dense layers of the ScSZ electrolyte and a well-distributed Ag-ScSZ electrode were observed, which create excellent pathways for ion conduction. Notably, the ScSZ electrolyte-supported symmetric tubular single cell showed significantly better electrochemical performance than the traditional YSZ electrolyte-supported symmetric single cell, verifying the excellent ionic conductivity of the ScSZ electrolyte compared to the YSZ electrolyte. The power density of the ScSZ electrolyte-supported SOFC at 850 $^{\circ}\text{C}$ increased by approximately 87% compared to that of the YSZ electrolyte-supported SOFC. Meanwhile, the Ohmic and polarization resistances of the ScSZ electrolyte-supported SOFC decreased by 17% and 93%, respectively. This cell can also achieve a power density of approximately 244 mW/cm^2 at 900 $^{\circ}\text{C}$ and stably output the current density of 300 mA/cm^2 without significant performance degradation after 35 hours of constant voltage discharge at 0.7 V. These findings demonstrate the excellent electrochemical stability of the ScSZ electrolyte-supported tubular single cells. In addition, to improve electrochemical performance, a basic dual-tube series stack was constructed by connecting two ScSZ electrolyte-supported single cells in series using a spiral current collecting method. This stack achieved a two-fold voltage increase and a power enhancement of 1.9 times, demonstrating its potential in stack integration. This study provides experimental evidence for the future development of tubular electrolyte-supported SOFCs.

Keywords: scandium stabilized zirconia; electrolyte support; solid oxide fuel cell; in series

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种在高温(700~1000 $^{\circ}\text{C}$)下高效(能量转换效率>60%)利用氢能的全固态能量转换装置,能够在不需要贵金属催化剂的条件下直接将氢气的化学能转换为电能,被广泛认为是一种极具应用前景的清洁发电技术^[1-3]。

SOFC的常见结构主要包括平板式和管式两种构型^[4]。平板式SOFC功率密度高、制备成本低,

具备良好的应用潜力,但其存在密封困难、热循环稳定性较差以及机械强度不足等问题^[5-6]。相比之下,管式SOFC具有密封结构简单、抗热应力能力强和易于模块化集成等优势,更适用于工程化应用场景,是一种前景广阔的燃料电池构型^[7-8]。同时,按照主要应力承受支撑体的不同,主要可以分为阴极支撑SOFC、电解质支撑SOFC和阳极支撑

SOFC。管式 SOFC 支撑体的制备方法包括挤出成型^[9]、等静压^[10]、相反转法^[11]等。

目前主流的管式 SOFC 多采用阳极支撑型结构,虽表现出优良的电化学性能,却受困于各组件间热膨胀系数(CTE)不匹配所带来的热机械应力问题,从而导致其面临长期稳定性、界面分层、电解质破损等严峻挑战^[12-14]。NiO-陶瓷阳极会在氢气氛围下还原为 Ni-陶瓷阳极,还原过程中存在着约 40% 的体积膨胀,明显的体积变化会使得较薄的电解质受到较大的机械应力,使其出现破损,分层等问题,严重影响 SOFC 的寿命和性能^[15-17]。而对于使用较厚的致密坚固的电解质充当支撑体的电解质支撑 SOFC 来说,较厚的电解质可显著提升气体密封性和机械稳定性,尤其利于高温下的系统耐久性,但其厚度增加会延长离子传输路径,增大欧姆阻抗,从而限制功率输出^[18-20]。

在 SOFC 中广泛使用的钇稳定氧化锆(YSZ)具有萤石型立方结构,是一种优良的氧离子导体^[21]。氧化钇的引入使得氧化锆的机械稳定性、化学稳定性、离子电导率大大提高,可达到 0.1 S/cm 以上的氧离子电导率^[22-25]。但需在较高温度(>800℃)下运行才能获得良好性能,这不仅对密封材料提出苛刻要求,也显著增加热管理复杂度和系统成本^[26]。因此,引入一种在较低工作温度下具有较高离子电导率的电解质来降低启动温度,降低热管理成本就成为了 SOFC 的重要研究方向。使用氧化铈替代氧化钇进行氧化锆的掺杂,能够得到更高电导率和更低启动温度的铈稳定的氧化锆(ScSZ)^[27]。因 Sc^{3+} 与 Zr^{4+} 之间的尺寸更加接近适配,ScSZ 能够提供活化能更低的氧离子迁移通道,从而拥有较低的启动温度,使其成为一种优秀的中温氧离子导体材料^[28-29]。

同时,根据能斯特方程,单根 SOFC 的电压维持在 1 V 左右,发电功率仅在 W 级,远不足以满足实际电压和功率需求^[30-31]。运用串联方法对多个 SOFC 进行集成,组成 SOFC 电堆,提升电压和功率是实现 SOFC 商业化的必经道路。

本研究提出一种基于 ScSZ 电解质支撑的管式 SOFC 新结构。采用冷等静压与无芯磨技术制备具有高致密性和良好机械强度的 ScSZ 电解质厚管,并选用 Ag-ScSZ 对称电极构建全电池。ScSZ 电解质在中温区(700~800℃)具有高于 YSZ 约 30% 的氧离子电导率,有助于降低运行温度、减轻热应

力,并补偿因电解质增厚带来的欧姆损失。Ag-ScSZ 对称电极利用银优良的氧还原反应(ORR)催化活性及与 ScSZ 电解质良好的化学和热匹配性,有效降低极化阻抗,提升电池输出性能。此外,本研究还初步开展了双管串联堆的实验研究,为其后续工程应用提供实验依据。

1 实验部分

1.1 单电池制备

ScSZ 电解质支撑陶瓷管使用冷等静压法压制成型和无芯磨磨薄的方法制备而成。将 10ScSZ (10~30 nm, 东莞市科路得实验器材有限公司)与 3% 的聚乙烯醇缩丁醛(PVB)混合,装入管状模具中,在等静压机中施加压力,使得陶瓷粉末均匀受力成型,得到半成品 SCSZ 电解质管。将胚管置于无芯磨车床上进行减薄,并置于马弗炉中进行 1550℃ 煅烧 5 h,得到 ScSZ 电解质管成品。电解质管成品的长度为 101.9 mm,外径为 5.2 mm,内径为 4.7 mm。

在 ScSZ 电解质支撑管上使用涂刷浆料的方式制备电极。称取 1:9 的 PVB 和松油醇,在 70℃ 下磁力搅拌溶解得到含 10%PVB 的松油醇溶液。称取 1 g 的 SCSZ 粉末、2.92 g 的银浆(DAD-87, Shanghai Institute of Synthetic Resin)和 3.92 g 含 10%PVB 的松油醇,使用研钵进行研磨混合,持续一小时得到 Ag-ScSZ 电极浆料。将浆料涂在电解质管上,并在 140℃ 的烘箱中干燥 5 min,重复两次后,在 880℃ 的温度下烧结 2 h 得到完整的 Ag-ScSZ|ScSZ|Ag-ScSZ 电池。如图 1(a)所示,制备得到用于单管测试和用于双管串联测试的三根完整电池,分别将其标记为 A、B 和 C,其有效面积约为 12 cm²。

1.2 电池组装

SOFC 阴阳极都采取螺旋银线的取电方式。使用银线螺旋缠绕出符合 ScSZ 电解质管内径和外径尺寸的导电线。将银线缠绕在电极处,并使用银浆将其固定后,放入 200℃ 烘箱将其干燥。得到集流完成的 ScSZ 电解质支撑 SOFC。使用上述方法对电池 A 进行集流。对电池 B 和电池 C 采取同样的方法进行串联连接。电池 B 的阴极部分和电池 C 的阳极部分按照上述方法正常集流。电池 B 阳极部分和电池 C 的阴极部分则需要使用较长银线进行螺旋串

联,如图 1(b)所示。

使用高温陶瓷胶(YK-8912, YiKum)将电池 A 固定在两个氧化铝陶瓷管之间,方便进行气路连

接。而电池 B 和电池 C 在使用上述气路连接方法的同时,还需要使用高温陶瓷胶将电池之间的孔隙填补,防止漏气。

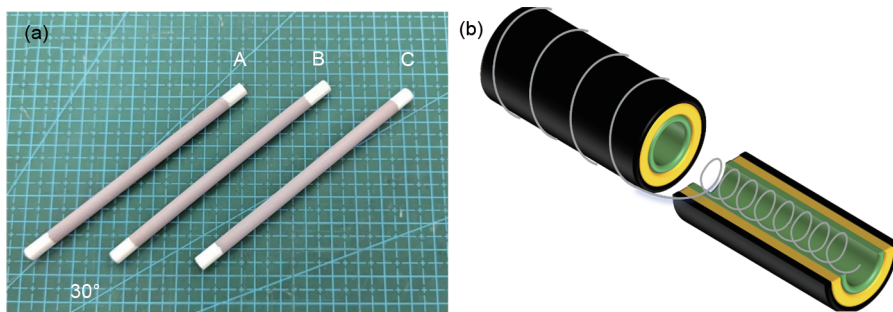


图 1 (a) ScSZ 电解质支撑 SOFC 实物图; (b) SOFC 双管串联示意图

Fig. 1 (a) ScSZ electrolyte supported SOFC physical diagram; (b) SOFC double tube series diagram

1.3 表征与测试

使用多种仪器对本研究的电池进行多个维度的表征分析。使用 X 射线衍射仪(Rigaku, Ultima-IV)对电解质以及电极进行相分析。使用扫描电子显微镜(SU8010, HITACHI)和能谱仪对 SOFC 的微观结构和元素分布进行详细分析。同时使用燃料电池测试系统(AutoSOFC2 TEST System, TOYO Corporation)检测电化学性能。

将电池整体置于燃料电池测试系统的加热炉中。持续通入 200 mL/min 的 N_2 , 让电池在 N_2 氛围下以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 300°C 。然后,切断氮气通路,并往阳极通入 H_2 和往阴极通入干燥空气,并继续以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 600°C 。其中 H_2 流速为 200 mL/min, 干燥空气流速为 300 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 表征分析

使用 XRD 对 SOFC 各部分进行物相分析,得到各部分 XRD 衍射峰图谱,结果如图 2(a)所示。通过与标准 PDF 卡片(Ag PDF#04-0783、ScSZ PDF#51-1603)进行对比。ScSZ 电解质以及 Ag-ScSZ 电极的衍射峰位置均分别与各自的 PDF 标准卡片相吻合。值得注意的是,在 Ag-ScSZ 复合电极的图谱中,仅观察到 Ag 相和 ScSZ 相的衍射峰,未检测到任何源自 Ag 与 ScSZ 之间固相反应的新生杂相。这表明在高温煅烧过程中,各组分之间具有良好的化学相容性,未发生相互反应或晶格坍塌。同时,XRD 物相分析表明所制备的 ScSZ 样品为纯

的立方萤石结构。其主要依据为:①样品衍射峰与立方萤石结构衍射峰相对应;②在 28.2° 和 31.5° 处未出现单斜相的特征衍射峰;③在 $34^\circ\sim 35^\circ$ 范围内未观察到四方相导致的峰分裂现象。综上所述,XRD 分析结果表明,本研究成功制备了具有高离子电导率的纯立方相 ScSZ 电解质。同时,Ag-ScSZ 复合电极在经历高温工艺后仍保持了其化学稳定性,两相共存且无反应发生,这为 SOFC 的电化学性能提供了坚实的结构基础。

使用 SEM 对 SOFC 的截面和表面微观结构进行表征。如图 2(b)所示,电池截面呈现出清晰的三层结构,从内到外依次为阳极、电解质和阴极。其中 ScSZ 电解质尺寸约 $220\ \mu\text{m}$,为整个 SOFC 最厚的部分。内外管壁上则附着有较薄的 Ag-ScSZ 部分,尺寸为 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 。对 ScSZ 电解质部分进行局部放大,如图 2(c)所示。结合图 2(b)和(c)能够观察到本研究制备的 ScSZ 电解质整体较为致密,致密度能达到 90% 以上。在 $100\ \mu\text{m}$ 尺度下无明显的宏观缺陷,放大至 $5\ \mu\text{m}$ 尺度下可观察到细小的孤立闭孔。这种高致密度使得 ScSZ 电解质能够拥有良好的 O^{2-} 传输路径,降低了 SOFC 的欧姆阻抗。同时较高的致密度和较大的厚度还有效阻隔了两边电极的燃料气和氧气,使其不会直接燃烧反应。图 2(d)为 $5\ \mu\text{m}$ 尺度下的 Ag-ScSZ 电极表面微观结构。可以观察到,ScSZ 形成了传导路径连续的多孔氧离子传导骨架,并且将 Ag 颗粒包裹在骨架中。对于氧气侧的 Ag-ScSZ 阴极,Ag 颗粒不仅作为电子导体,还是阴极催化活性的主要来源,促进 O_2

分子的解离还原反应($\text{O}_2 + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{O}^{2-}$)。而多孔 ScSZ 骨架提供了广泛的三相反应边界(TPB), 保障了反应界面与 O^{2-} 的顺利传导。而在氢气侧的 Ag-ScSZ 阳极, 多孔 ScSZ 骨架承接了从 ScSZ 电解质

传输过来的 O^{2-} , 并将其传导至反应区域。而 Ag 颗粒则主要起电子导出作用, 促进 H_2 与 O^{2-} 发生电化学反应($\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$), 并将产生的电子传递至外电路。

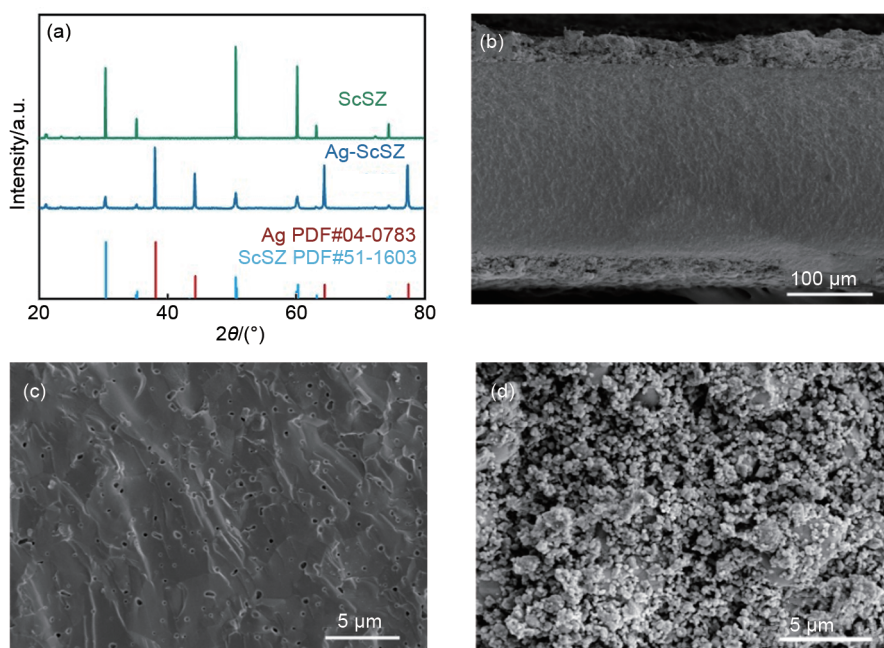


图2 (a) ScSZ电解质支撑SOFC各组件XRD衍射图谱;(b) SOFC截面结构;(c) ScSZ电解质截面微观结构;(d) Ag-ScSZ电极的表面微观结构

Fig. 2 (a) XRD diffraction patterns of SOFC components supported by ScSZ electrolyte; (b) SOFC cross-sectional structure; (c) Cross-sectional microstructure of ScSZ electrolyte; (d) Surface microstructure of Ag-ScSZ electrode

使用 SEM 和 EDS 对 SOFC 的 ScSZ 电解质和 Ag-ScSZ 电极的截面进行形貌分析和元素分布分析, 结果如图 3 所示。Ag-ScSZ 电极与 ScSZ 电解质结合紧密、连续, 无明显缺陷或剥离, 形成了有效连接, 确保了 O^{2-} 的有效传输, 降低了 SOFC 的极化阻抗。从截面 SEM 能更清晰地观察到 Ag-ScSZ 电极的微观结构: ScSZ 形成连续的多孔骨架, 并将 Ag 颗粒包裹其中。其中的 ScSZ 骨架与电解质结合良好, 结构连续并且保有适当的孔隙结构。不仅在机械上增强了界面稳定性, 还为 O^{2-} 的迁移提供了连续通道, 同时保障了反应气体的充分扩散与接触。EDS 面扫描结果进一步支持上述形貌观察。其中, Sc 和 Zr 元素在电解质与电极骨架区域分布连续且重叠良好, 证实了 ScSZ 相在界面处的连贯性, 表明电极与电解质间实现了良好的机械连接。与此同时, Ag 元素均匀分布于电极区域, 其分散状态与 ScSZ 骨架形成互补分布, 未出现明

显团聚。这表明 Ag-ScSZ 电极中形成了大量连续的三相界面(TPB), 为电化学反应提供了丰富活性位点, 从而显著降低了电池的极化阻抗, 提升了电化性能。

2.2 单管性能

为了系统评估钪稳定氧化锆(ScSZ)电解质相较于传统 8%(物质的量浓度)氧化钇稳定氧化锆(8YSZ)在燃料电池应用中的电化性能优势, 本研究采用电解质支撑型单电池结构, 分别单独制备了 Ag-ScSZ|ScSZ|Ag-ScSZ 和 Ag-YSZ|YSZ|Ag-YSZ 两种对称电池, 并利用燃料电池测试系统对其性能进行了表征。图 4 展示了在 700℃ 和 850℃ 下测得的电流-电压(I - V)曲线与功率密度曲线, 以及相应的电化阻抗谱。

从图 4(a)可以看出, 基于 YSZ 电解质的 SOFC 在 700℃ 和 850℃ 下的峰值功率密度分别为 33 mW/cm^2 和 118 mW/cm^2 ; 而 ScSZ 基电池在相

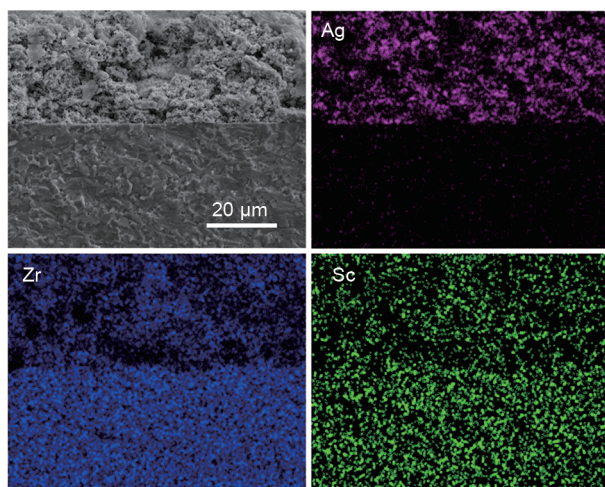


图 3 ScSZ 电解质与 Ag-ScSZ 电极截面 SEM 及其 EDS 元素分布图

Fig. 3 SEM and EDS element distribution of ScSZ electrolyte and Ag-ScSZ electrode cross section

同温度下则表现出显著更高的峰值功率密度，分别达到 105 mW/cm^2 和 234 mW/cm^2 ， 850°C 下的功率密度提升幅度达到约 98%。这一结果表明，ScSZ 电解质在中低温至高温区间内均具有优于 YSZ 的电池输出性能。性能的提升主要归因于 Sc^{3+} 离子与 Zr^{4+} 离子之间更匹配的离子半径，显著降低了氧空位的迁移能垒，从而大幅提高了 ScSZ 电解质的氧离子电导率。因此，ScSZ 基电池不仅具备更低的启动温度，还能在相同工作温度下提供更高的离子传导能力，或在较低温度下保持较高电导率，这使其特别适用于中低温型 SOFC 的应用场景。

图 4(b) 中的电化学阻抗谱进一步验证了上述结论。在 850°C 的测试温度下，ScSZ 电池谱图的高频区与实轴截距(对应于欧姆阻抗)，约为 $0.84 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，

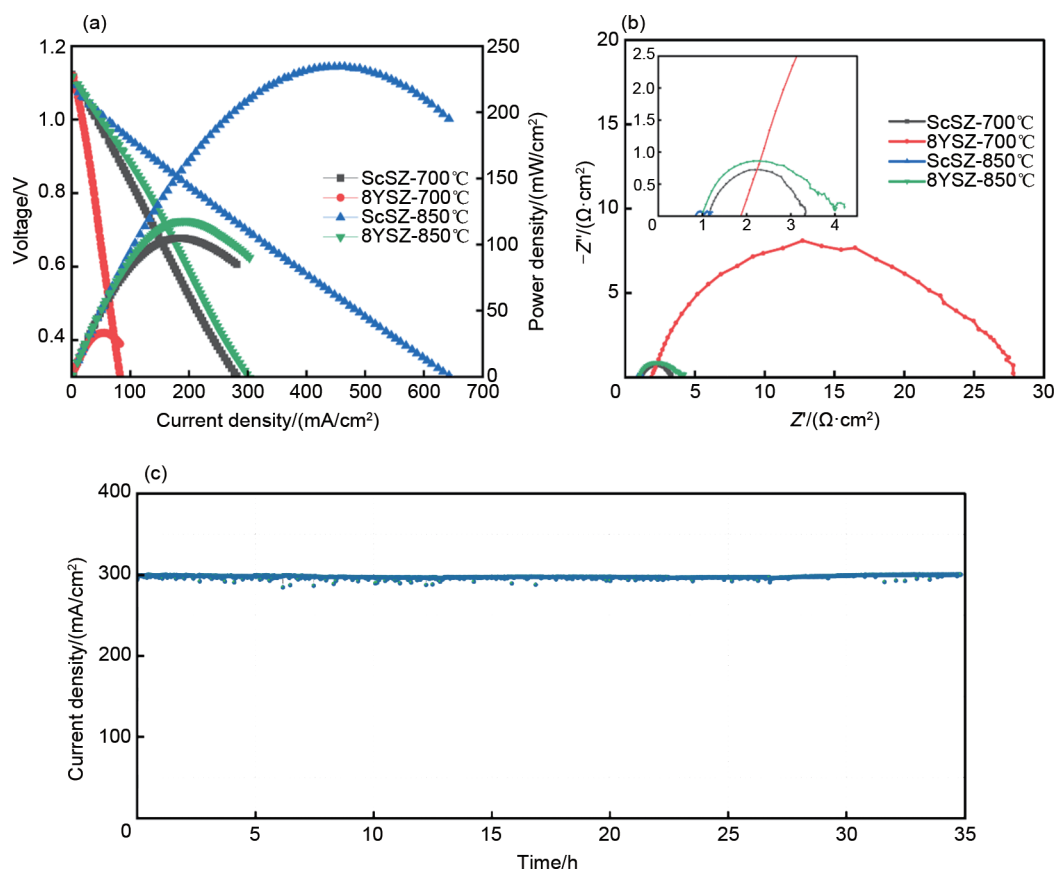


图 4 (a) ScSZ 电解质支撑 SOFC 与 8YSZ 电解质支撑 SOFC 在不同温度下的 I - V - P 曲线; (b) ScSZ 电解质支撑 SOFC 与 8YSZ 电解质支撑 SOFC 在不同温度下的电化学阻抗谱图; (c) ScSZ 电解质支撑的 SOFC (电池 A) 在 0.7 V 恒压放电曲线
Fig. 4 (a) I - V - P curves of ScSZ electrolyte supported SOFC and 8YSZ electrolyte supported SOFC at different temperatures; (b) Electrochemical impedance spectra of ScSZ electrolyte supported SOFC and 8YSZ electrolyte supported SOFC at different temperatures; (c) The discharge curve of ScSZ electrolyte supported SOFC (fuel cell A) at 0.7 V constant voltage

容抗弧直径(对应于总极化阻抗)约为 $0.19 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 均明显小于 YSZ 电池的 $1.01 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $2.97 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。ScSZ 电池的欧姆阻抗因其高离子电导率而降低了约 17%, 同时其极化阻抗降低约 93%。说明其欧姆损耗和电极过程动力学阻力均显著降低。ScSZ 的高离子电导率不仅有效降低了体相与界面欧姆损失, 还加速了电极反应中氧离子的传输与交换过程, 减轻了浓差极化现象, 从而全面提升了电池的电化学性能。

为进一步评估 ScSZ 电解质支撑 SOFC 在实际运行条件下的性能稳定性, 本研究对电池 A 在 850°C 、 0.7 V 恒电压下进行了持续 35 小时的长时放电测试, 结果如图 4(c) 所示。在整个测试期间, 电池的输出电流密度在约 $300 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 保持稳定, 性能衰减微弱。该结果表明所制备的 ScSZ 单电池在一段时间内保持了优良的电化学稳定性。

2.3 双管串联性能

为解决单一 SOFC 电压不高于 1.23 V 的缺陷, 对 SOFC 进行串联电堆集成来提高输出电压是将其投入实际使用的必要条件。因此, 本研究基于 ScSZ 电解质使用螺旋取电方式构建了最基本的双管串联电堆结构, 螺旋取电方式可以有效提升集流体取电范围, 提升电流密度。使用燃料电池测试系统分别对单管的和双管串联的 ScSZ 电解质支撑 SOFC 进行电化学性能测试, 测试得到其对应的 I - V - P 曲线和电化学阻抗谱图, 如图 5 所示。图 5(a) 和 (b) 分别是 ScSZ 电解质支撑单管 SOFC (电池 A) 和双管串联 SOFC (电池 B-C) 在 $600 \sim 900^\circ\text{C}$ 下的 I - V - P 曲线。最显著的对比便是双管串联 SOFC 实现了电压的提升: 在 900°C 下, 从单管的 1.09 V 提升至双管串联的 2.18 V 。而功率峰值密度则出现了一定的损耗, 由单管峰值功率密度的 $244 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 降

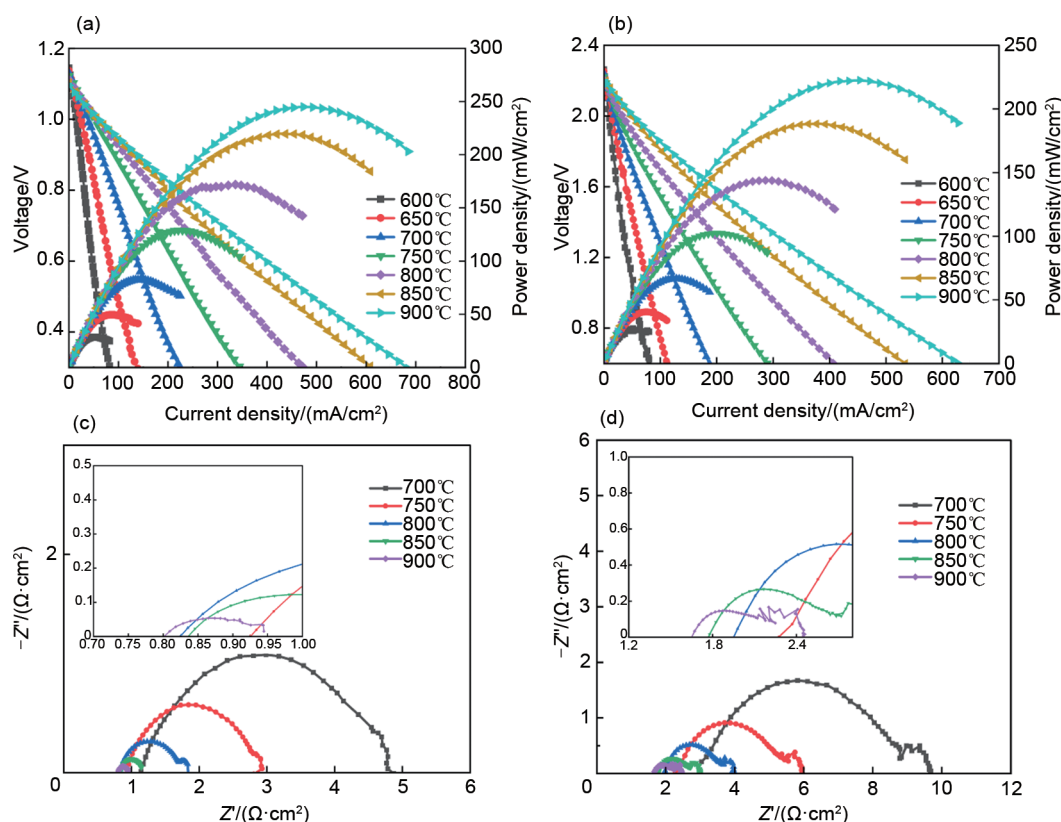


图 5 (a) 单管 ScSZ 电解质支撑 SOFC (电池 A) 在不同温度下的 I - V - P 曲线; (b) 双管串联 ScSZ 电解质支撑 SOFC (电池 B-C) 在不同温度下的 I - V - P 曲线; (c) 单管 ScSZ 电解质支撑 SOFC (电池 A) 在不同温度下的电化学阻抗谱图; (d) 双管串联 ScSZ 电解质支撑 SOFC (电池 B-C) 在不同温度下的电化学阻抗谱图

Fig. 5 (a) I - V - P curves of single-tube ScSZ electrolyte supported SOFC (fuel cell A) at different temperatures; (b) I - V - P curves of double-tube series ScSZ electrolyte supported SOFC (fuel cell B-C) at different temperatures; (c) Electrochemical impedance spectroscopy of single-tube ScSZ electrolyte supported SOFC (fuel cell A) at different temperatures; (d) Electrochemical impedance spectroscopy of double-tube series ScSZ electrolyte supported SOFC (fuel cell B-C) at different temperatures

低至双管串联的 222 mW/cm^2 ，出现约 9% 的功率损耗。通过 EIS 测试进一步分析了性能差异的来源。图 5(c)(d) 表明，在 900°C 下，单管 SOFC 的欧姆阻抗约为 $0.8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，极化阻抗约为 $0.15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ；而双管串联系统的欧姆阻抗与极化阻抗分别为 $1.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $0.9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。欧姆阻抗大致符合两倍关系，说明串联连接本身未引入显著额外欧姆损耗；然而，极化阻抗显著增加，其主要原因可归结为氢气浓度的局部下降与反应产物水的积累：串联结构中前一级电池持续消耗氢气，并在阳极侧生成水蒸气，导致后一级电池反应气中氢气分压降低，从而加剧浓度极化。为解决这个问题，可以加大阳极处氢气的流量，保证单电池能有足够的氢气量进行反应；也可以进行工程创新，使用气体分配器将氢气平均分配给双管，使得串联双管不用局限于简单的前后结构。综上所述，本研究成功验证了 ScSZ 基双管串联 SOFC 在结构设计与输出电压提升方面的可行性，实现了约 2 倍的电压提升和 1.9 倍的功率增强。尽管当前存在因气路配置导致的极化损失，该问题仍可通过改进进气方式和调整串联策略予以缓解，为后续多管集成研究提供了重要依据。

3 结 论

本研究采用冷等静压结合无芯磨加工技术，成功制备了 ScSZ 电解质管，并在此基础上构建了以 Ag-ScSZ 为对称电极的电解质支撑的管式 SOFC 单电池 (Ag-ScSZ|ScSZ|Ag-ScSZ)，并使用各种仪器对其进行表征分析。物相分析得到 ScSZ 电解质呈现萤石立方结构，同时 Ag-ScSZ 电极内部间不产生第二相，验证了 ScSZ 的高离子电导率和化学稳定性。结构表征结果表明，所制备的 ScSZ 电解质管致密度高，电极与电解质界面结合良好，电极结构优异，良好的结构提高了其电化学性能表现。在电化学性能方面，ScSZ 基电解质支撑的 SOFC 在 700°C 和 850°C 下均表现出优于传统 YSZ 基电池的性能， 850°C 下的功率密度提升幅度达到 98%。单管 ScSZ 电解质支撑的 SOFC 在 900°C 下能够达到约 244 mW/cm^2 的功率密度。并在长达 35 小时的 0.7 V 恒压放电测试中维持约 300 mA/cm^2 的电流密度输出，表现出极其稳定的输出性能，无明显衰减。此外，本研究进一步开展了双管串联电堆实验，分别实现了输出电压和功率密度约 2 倍和 1.9

倍的提升，验证了管式 ScSZ 电解质支撑 SOFC 在电堆集成中的应用潜力。综上，本研究不仅证实了 ScSZ 电解质支撑型 SOFC 具备优异的高温输出性能和稳定性，还通过双管串联测试验证其电堆可行性，为其后续走向实际应用提供了重要的实验依据和技术支撑。

参 考 文 献

- [1] LU X Y, GANG W J, TU Z K. Recent developments in control and integration of solid oxide fuel cells: From stack to system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 223: 116000. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116000.
- [2] SUBBIAH G, TRIPATHY S, GUNTAJ J, et al. Advancements in electrocatalytic technologies for metal-supported solid oxide fuel cells: Enhancing efficiency and durability for biofuel-powered mobility applications[J]. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 2025, 14(3): 51. DOI: 10.1007/s40243-025-00322-w.
- [3] LIU A Q, GU Y Y. Carbon dioxide poisoning of solid oxide fuel cells cathode material—A review[J]. Materials Science and Engineering: B, 2025, 322: 118638. DOI: 10.1016/j.mseb.2025.118638.
- [4] ZENG Z Z, QIAN Y P, ZHANG Y J, et al. A review of heat transfer and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115899. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115899.
- [5] JIANG Y Y, HUAN D M, XIA C R. A robust tubular solid oxide fuel cell through bifunctional praseodymium oxide nanocatalyst infiltration[J]. Ceramics International, 2024, 50(7): 12489-12497. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.01.158.
- [6] TAN Z, ISHIHARA T. Infiltrated nano-CeO₂ and inserted Ni-Fe active layer in a tubular cathode substrate for high temperature CO₂ electrolysis on solid oxide cells using La_{0.9}Sr_{0.1}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-δ} thin film electrolyte[J]. Electrochimica Acta, 2022, 424: 140506. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.140506.
- [7] DEEPI A S, PRIYA S D, NESARAJ A S, et al. Component fabrication techniques for solid oxide fuel cell (SOFC) -A comprehensive review and future prospects[J]. International Journal of Green Energy, 2022, 19(14): 1600-1612. DOI: 10.1080/15435075.2021.2018320.
- [8] ZOU M D, CONRAD J, SHERIDAN B, et al. 3D printing enabled highly scalable tubular protonic ceramic fuel cells[J]. ACS Energy Letters, 2023, 8(8): 3545-3551. DOI: 10.1021/acsenenergylett.3c01345.
- [9] LÓPEZ-ROBLEDO M J, LAGUNA-BERCERO M A, LARREA A, et al. Reversible operation of microtubular solid oxide cells using La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ}-Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ} oxygen electrodes[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 184-189. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.12.035.
- [10] TIMURKUTLUK C, ALTAN T, ONBILGIN S, et al. Design and optimization of functionally graded anode electrode with integrated functional layer for microtubular solid oxide fuel cells

- [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(20): 38118-38127. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.07.175.
- [11] WANG S F, TSAI Y C, LIAO Y L, et al. Electrode effects on the cell performance of anode-supported $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{2-\delta}$ -based microtubular solid oxide fuel cells built using phase inversion method[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 169: 151110. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.151110.
- [12] GONG C Y, XU Y H, CHI B, et al. Temperature distribution uniformity enhancement in solid oxide fuel cell with geometry and flow field optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2026, 255: 127720. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127720.
- [13] WINIARZ P, LACH J, LING Y H, et al. Stable and active nanofiber electrodes tuned via a negative thermal expansion strategy for designing high-performance solid oxide fuel cells[J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2026, 382: 125950. DOI: 10.1016/j.apcatb.2025.125950.
- [14] HANIF M B. Tailoring thermal expansion for next-generation energy systems: Integrating the potential of NTE materials in SOFCs and beyond[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 633: 236460. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.236460.
- [15] WALDBILLIG D, WOOD A, IVEY D G. Electrochemical and microstructural characterization of the redox tolerance of solid oxide fuel cell anodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 145 (2): 206-215. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.071.
- [16] 王亚丽, 李晓艳, 孙航宇, 等. 固体氧化物燃料电池支撑体研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(7): 2590-2601. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0042.
- WANG Y L, LI X Y, SUN H Y, et al. Research progress of solid oxide fuel cell support[J]. *Energy storage science and technology*, 2025, 14(7): 2590-601. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0042.
- [17] HEO Y H, LEE J W, LEE S B, et al. Redox-induced performance degradation of anode-supported tubular solid oxide fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(1): 797-804. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.10.038.
- [18] CHELMEHSARA M E, MAHMOUDIMEHR J. Techno-economic comparison of anode-supported, cathode-supported, and electrolyte-supported SOFCs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(32): 15521-15530. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.114.
- [19] MATHUR L, NAMGUNG Y, KIM H, et al. Recent progress in electrolyte-supported solid oxide fuel cells: A review[J]. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 2023, 60(4): 614-636. DOI: 10.1007/s43207-023-00296-3.
- [20] DROUSHIOTIS N, GRANDE F D, DZARFAN OTHMAN M H, et al. Comparison between anode-supported and electrolyte-supported Ni-CGO-LSCF micro-tubular solid oxide fuel cells[J]. *Fuel Cells*, 2014, 14(2): 200-211. DOI: 10.1002/fuce.201300024.
- [21] VINCHHI P, KHANDLA M, CHAUDHARY K, et al. Recent advances on electrolyte materials for SOFC: A review[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, 152: 110724. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.110724.
- [22] JAIPAL M, CHATTERJEE A. Relative occurrence of oxygen-vacancy pairs in yttrium-containing environments of Y_2O_3 -doped ZrO_2 can be crucial to ionic conductivity[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(27): 14534-14543. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b05329.
- [23] ZAKARIA Z, ABU HASSAN S H, SHAARI N, et al. A review on recent status and challenges of yttria stabilized zirconia modification to lowering the temperature of solid oxide fuel cells operation[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44 (2): 631-650. DOI: 10.1002/er.4944.
- [24] BAGCHI B, BASU R N. A simple Sol - gel approach to synthesize nanocrystalline 8 mol% yttria stabilized zirconia from metal-chelate precursors: Microstructural evolution and conductivity studies[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 647: 620-626. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.06.082.
- [25] SINGH M, ZAPPA D, COMINI E. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(54): 27643-27674. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.020.
- [26] WACHSMAN E D, LEE K T. Lowering the temperature of solid oxide fuel cells[J]. *Science*, 2011, 334(6058): 935-939. DOI: 10.1126/science.1204090.
- [27] SPIRIN A, IVANOV V, NIKONOV A, et al. Scandia-stabilized zirconia doped with yttria: Synthesis, properties, and ageing behavior[J]. *Solid State Ionics*, 2012, 225: 448-452. DOI: 10.1016/j.ssi.2012.02.022.
- [28] KHARTON V V, MARQUES F M B, ATKINSON A. Transport properties of solid oxide electrolyte ceramics: A brief review[J]. *Solid State Ionics*, 2004, 174(1/2/3/4): 135-149. DOI: 10.1016/j.ssi.2004.06.015.
- [29] DWIVEDI S. Solid oxide fuel cell: Materials for anode, cathode and electrolyte[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(44): 23988-24013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.234.
- [30] CHEN R Y, GAO Y, GAO J T, et al. From concept to commercialization: A review of tubular solid oxide fuel cell technology[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 97: 79-109. DOI: 10.1016/j.jechem.2024.05.026.
- [31] 杜柯, 林凯生, 宋琛, 等. 固体氧化物燃料电池电堆及相关系统发展现状与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2025(10): 3877-3891. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232375.
- DU K, LIN K S, SONG C, et al. Development status and prospect of solid oxide fuel cell stack and related systems[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2025, 45(10): 3877-3891. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.232375.