



管式 SOFC 双管串联结构的实验验证与数值模拟

刘晶晶¹, 林泽宇¹, 简俊辉¹, 罗 栩¹, 姚 越², 陶 涛¹, 鲁圣国¹, 梁 波¹

(¹广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006; ²北京工业大学机电学院, 北京 100081)

摘 要: 本研究采用冷等静压与无心研磨工艺制备出厚度为 88 μm 的 3YSZ 电解质管。该制备方法使电解质管的断裂载荷为 56.64 MPa, 显著超过电堆组装所需的 20 MPa 的强度要求, 展现出优异的机械稳定性。基于此, 在电解质管两端加工十字形凹槽, 并使用银浆和银线作为连接体, 构建双管串联固体氧化物燃料电池单元。该设计不仅提供了稳定的机械支撑, 而且通过银线环形集流取电, 实现了稳定的电流传导。实验结果表明, 在 900 $^{\circ}\text{C}$ 氢气氛下运行时, 串联单元的开路电压达到 2.01 V, 峰值功率输出为 1.92 W, 性能接近单电池的 2 倍。在 1.3 V 恒压条件下对串联双管电池进行 60 h 放电测试, 电流密度稳定维持在约 120 mA/cm^2 且无显著衰减, 这表明串联结构在长周期放电中, 电化学过程具有优异的稳定性。通过结合实验测试与三维多物理场数值模拟, 实现了对内部电流密度、气体分布及扩散流线的可视化分析, 清晰揭示了电流经十字形凹槽与环形结构的完整传导路径, 并证实了反应区域与传输特性的均匀性。模拟结果与实验数据的高度一致性, 充分验证了该串联连接设计的有效性。这项工作不仅提出了一种管式 SOFC 串联结构方案, 还通过多物理场仿真深入揭示了其内部工作机制, 为高性能固体氧化物燃料电池系统的优化设计提供了重要依据。

关键词: 管式 SOFC; 电解质支撑; 串联连接; 数值分析

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1125

中图分类号: TM 911.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2130-09

Experimental investigation and numerical on twin-tube series-connected tubular SOFC

LIU Jingjing¹, LIN Zeyu¹, JIAN Junhui¹, LUO Xu¹, YAO Yue², TAO Tao¹, LU Shengguo¹, LIANG Bo¹

(¹School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; ²School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In this study, we fabricated electrolyte tubes of 3% yttria-stabilized zirconia (3YSZ) with a precisely controlled thickness of 88 μm through a synergistic fabrication approach that combines cold isostatic pressing (CIP) with centerless grinding. The resulting electrolyte tubes exhibited high mechanical strength, achieving a fracture load of 56.64 MPa, significantly surpassing the 20 MPa threshold required for stack assembly, thereby demonstrating exceptional structural integrity. The thickness of the electrolyte layer is approximately $(88.0 \pm 3.5) \mu\text{m}$, representing a reduction of about 40% compare to the 20 μm typically used in conventional electrolyte-supported solid-oxide fuel cells (SOFCs); we expect this to lower the ohmic resistance and improve the overall performance of the cell. Scanning electron

收稿日期: 2025-12-15; 修改稿日期: 2025-01-29。

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4002603)。

第一作者: 刘晶晶 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为氨基催化剂和固体氧化物燃料电池, E-mail: Liujiangjing0914@163.com; 通信作者: 梁波, 副教授, 博士生导师, 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: 刘晶晶, 林泽宇, 简俊辉, 等. 管式 SOFC 双管串联结构的实验验证与数值模拟[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2130-2138.

Citation: LIU Jingjing, LIN Zeyu, JIAN Junhui, et al. Experimental investigation and numerical on twin-tube series-connected tubular SOFC[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2130-2138.

microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy analyses reveal the uniform distribution of zirconium (Zr) and yttrium (Y) in the YSZ electrolyte layer and at the interface. Optimized CIP and gradient-sintering processes increased the length of the triple-phase boundary, suppressed side reactions and crack formation, and significantly enhanced ionic transport kinetics and structural stability. Building on this mechanical reliability, we precision machined cross-shaped grooves at both ends of the electrolyte tubes, and we employed silver paste combined with silver wires as the interconnect to construct a twin-tube series SOFC unit. This design not only ensures robust mechanical anchoring but also facilitates efficient current conduction through a ring-shaped silver-wire current collector, thereby enhancing overall electrical continuity. The experimental characterizations revealed that when operated at 900°C under a hydrogen (H_2) atmosphere, the series-connected unit achieved an open-circuit voltage of 2.01 V and attained a peak power output of 1.92 W, with performance metrics nearly doubling those of a single-cell counterpart. Furthermore, under a sustained constant voltage of 1.3 V, the series-connected twin-tube assembly underwent a rigorous 60-hour discharge test, during which the current density remained remarkably stable at approximately 120 mA/cm² without discernible performance degradation. This shows that the series structure has excellent electrochemical-process stability during long-period discharges. By integrating experimental measurements with three-dimensional multiphysics numerical simulations, we achieved visualization of the internal current density, gas distributions, and diffusion streamlines. These analyses clearly revealed the complete current-conduction pathway through the cross-groove and annular structures and confirmed the uniformity of the reaction zones and mass-transport characteristics. The close agreement between the simulation results and the experimental results validates the effectiveness of the proposed series-connection design. In this work, we not only have proposed a novel tubular SOFC series configuration but also have provided mechanistic insights through multiphysics modeling, offering a critical foundation for the optimization of high-performance solid-oxide fuel-cell systems.

Keywords: tubular SOFC; electrolyte-support; series-connection; numerical analysis

在全球减排与碳中和目标的推动下, 能源体系正在加速向高效、低碳的发电技术转型, 对碳中和发电技术的需求日益增长。固体氧化物燃料电池 (solid oxide fuel cell, SOFC) 因其卓越的燃料灵活性、高能量转换效率 (超过 60%) 以及与氢气和氨气等无碳燃料的兼容性, 在下一代清洁能源系统中具有重要地位^[1-2]。

在众多 SOFC 结构中, 管式 SOFC 在机械强度、抗热震性、快速启动能力和动态响应特性等方面表现出优越的性能。迄今为止, 已开发出多种管式设计, 包括传统圆柱管、微管结构和扁平几何形状。每种设计都具有独特的优势, 并在不同的运行环境中得到应用^[3-4]。然而, 根据能斯特 (Nernst) 方程, 单个 SOFC 的理论开路电压受限, 约为

1.23 V。由于单电池运行的输出电压低、欧姆损耗大的问题, 实际工程中通常将多个电池单元串联成电堆, 以提高整体电压和功率输出, 从而满足各种实际应用的需求^[5-6]。

近年来, 管式 SOFC 的串联集成技术取得显著进展。例如, 梁波课题组^[7]提出了一种将多电池凸台连接体作为电流收集器, 将 8 节单电池组成电堆, 使用丙烷燃料进行测试, 实现了超过 8 V 的开路电压和 20.7 W 的最大输出功率。Kim 等^[8]制作了用于中温工况的扁平管状分段式系列 SOFC 单元束, 5 个单电池串联的电堆在使用 300 sccm (1 sccm 即 1 mL/min 的标准体积流量) 的加湿氢气作为燃料时, OCV 达到 5.07 V, 800°C 下输出功率为 2.47 W。Yamaguchi 团队^[9]成功研制了一种采用

金属互连和导电浆料密封的蜂窝状SOFC模块,在600℃温度下,双电池实现了2.0 V的开路电压,其总功率输出是单个单元的2倍,并展示了约0.6 W/cm²的功率密度。然而,这些研究都集中在中低温运行的阳极支撑结构上,其力学性能相对较低,在长时间运行中容易发生结构失效。相比之下,电解质支撑的SOFC表现出显著增强的机械强度,约为氧化镍(NiO)基阳极支撑的30倍,且在YSZ(yttria stabilized zirconia, 氧化钇稳定氧化锆)电解质厚度为100 μm时仍能保持56.64 MPa的抗压强度,远高于组堆系统最低要求^[10]。

数值模拟是实验研究的重要补充,已广泛用于揭示SOFC中难以直接测量的关键内部物理场分布。这些参数包括电流密度、气体摩尔分数、温度和电势等。例如,Cui等^[11]模拟了阳极尺寸对扁平管SOFC电压均匀性的影响;Li等^[12]研究了管式电池在电堆相关运行条件下的传热传质行为;Liu等^[13]建立了锥形管SOFC的多物理场耦合模型以评估其性能,从数值分析单个角度研究。然而,现有的研究多局限于孤立的模拟或者实验,缺乏深度融合与互相验证,限制了对复杂电-热-化学耦合过程的全面理解,并限制了对结构优化的有效指导。因此,有必要采用实验制备、性能表征和三维多物理场模拟相结合的综合方法,实现从宏观性能到微观机制的全链条分析。

针对上述问题,本研究提出基于管两端凹槽结构的双管串联电解质支撑的SOFC结构。在管的两端设计了对称的十字形凹槽,并通过内外环形集流取电,实现了稳固的机械互连和高效的电流收集,减少长路径电流损耗和燃料的稀释。通过将实验测试和三维多物理场的数值模拟相结合,系统评估双管串联SOFC结构电化学性能并揭示了其内部反应分布特性,为适用于中高温(850~900℃)、高可靠性的管式SOFC串联提供了连接方式。

1 方法

1.1 实验部分

1.1.1 电解质支撑体制备

将物质的量分数3%的氧化钇稳定氧化锆[YSZ, $d_{50} = (0.5 \pm 0.2) \mu\text{m}$; 宁波索福人能源技术有限公司]粉末与分散剂(PVB; 麦克林试剂公司)按预定比例掺杂,随后加入去离子水形成均匀的浆

料。固体氧化物含量控制在50%左右,分散剂用量为粉末质量的1%~3%。然后将浆料进行喷雾造粒,以获得流动性良好的前驱体粉末。将造粒后的粉末均匀填充到模具中,并在5~10 MPa的压力下进行预压,形成具有一定机械强度的生坯。将预先压制的生坯密封后放入压力缸中,以液压油作为压力介质逐渐加压,直至达到目标压力(120~180 MPa),维持20~30 min后将其从缸中取出^[14]。之后将生坯放在管式炉(GSL-1100X; 合肥科晶材料技术有限公司)中进行脱气以实现致密化,然后在高温烧结马弗炉(KSL-1700X; 合肥科晶材料技术有限公司)中于1600℃下烧结2~4 h。这一过程提高了电解质的机械强度和硬度。最后,采用无心研磨工艺将烧结管减薄至外径6 mm、内径5.6 mm、长8 cm。所得的电解质管被用作固体氧化物燃料电池的支撑体^[15]。

1.1.2 电极制备

按质量比7:3(Ag:GDC)合成Ag-GDC复合浆料。具体称取1 g GDC(gadolinia-doped ceria, 钆掺杂二氧化铈)粉末($d_{50}=0.8 \mu\text{m}$; 燃料电池材料公司)和2.92 g银浆(DAD-87, Ag质量分数80%; 上海合成树脂研究所),在玛瑙研钵中充分研磨,实现Ag纳米颗粒在GDC基质中的初步分散^[16]。随后加入3.92 g PVB(PVB质量分数10%; 麦克林试剂公司),在持续搅拌下研磨1 h,获得均匀稳定的Ag-GDC浆料^[17]。

1.1.3 阴阳极涂覆与集流

将浆料均匀涂覆在电解质管内外表面,分别作为阳极和阴极。涂层样品在140℃环境下干燥。将此涂覆过程重复4~6次以确保厚度均匀。干燥后,将电极在马弗炉(KSL-1700X; 合肥科晶材料技术有限公司)中于880℃下烧结2 h,获得所需电极形貌和结构完整性^[18]。烧结后,银环附着于电解质支撑管内外表面,作为连接体以有效降低接触电阻,提高电子电导率。

1.1.4 串联方法

在电解质支撑管两端设计十字形对称凹槽(宽1 mm×深1 mm)。选择银线(昆山盛世景新材料有限公司)构建双电池管串联结构。三根银线对称绞合延伸,一端插入单电池阳极侧并用银浆固定,另一端通过凹槽连接相邻电池阴极侧,同样用银浆和银线固定。组装的双电池置于120℃干燥箱

中固化超过 2 h。随后在连接部分涂覆绝缘密封材料以防止漏气和短路。阴阳极均采用银浆和银线互连的环形集流方式。

1.1.5 实验方法

管式电池使用陶瓷胶黏剂（YK-8912；益康姆有限公司）机械黏接氧化铝管，串联接口用相同胶黏剂密封。电池横截面微观结构形貌通过扫描电镜（SEM；Helios Nanolab 600）表征。电化学性能评估使用 DH7002 电化学工作站（江苏东华分析仪器有限公司）进行。电流-电压（ I - V ）曲线、OCV 和电化学阻抗谱（EIS）在 0.1~10 kHz 频率范围内进行。阳极燃料：水电解产生的经干燥后的 H_2 ，供给速率 150 mL/min。阴极：干燥空气（纯度 99.999%），连续供给速率 150 mL/min。系统记录电流-电压-功率（ I - V - P ）特性以评估在受控操作条件下的性能指标。力学性能测试使用电液万能试验机（Z250；德国兹维克·罗尔集团）记录管状试样的断裂载荷（ F_{max} ），直接测量其在拉压复合应力下的机械失效强度。

1.2 数值模拟控制方程

1.2.1 Butler-Volmer 方程

Butler-Volmer 方程用于描述电极反应的电流密度，其一般形式为^[19-21]

$$i = i_0 \left\{ \exp \left(\frac{\alpha F}{RT} \eta \right) - \exp \left[\frac{(1 - \alpha) F}{RT} \eta \right] \right\} \quad (1)$$

式中， i_0 是局部电流密度； α 是交换电流密度； F 是法拉第常数； R 是通用气体常数； T 是模型的温度，K； η 是过电位。

方程分别应用于阳极和阴极的电极反应，形式为

$$i_a = i_{0,a} \left\{ \frac{p_{H_2}}{p_{H_2,ref}} \exp \left(\frac{\alpha F}{RT} \eta \right) - \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O,ref}} \exp \left[\frac{(1 - \alpha) F}{RT} \eta \right] \right\} \quad (2)$$

$$i_{ca} = i_{0,ca} \left\{ \exp \left(\frac{\alpha F}{RT} \eta \right) - \frac{p_{O_2}}{p_{O_2,ref}} \exp \left[\frac{(1 - \alpha) F}{RT} \eta \right] \right\} \quad (3)$$

式中， $i_{0,a}$ 和 $i_{0,ca}$ 分别是阳极和阴极在参考状态和温度条件下的交换电流密度， A/m^2 ； p_{H_2} 、 p_{H_2O} 和 p_{O_2} 分别是氢气、水蒸气以及氧气在三相界面（triple-phase boundary, TPB）上的分压； $p_{H_2,ref}$ 、 $p_{H_2O,ref}$ 和 $p_{O_2,ref}$ 分别是氢气、水蒸气以及氧气的参考分压。过电位 η 可被定义为

$$\eta = \varphi_{\text{electronic}} - \varphi_{\text{ionic}} - E_{eq} \quad (4)$$

式中， $\varphi_{\text{electronic}}$ 是电极相的电势； φ_{ionic} 是电解质

相的电势； E_{eq} 是平衡电极电位。

1.2.2 Nernst 方程

计算燃料电池电化学体系的电动势可由 Nernst 方程表示，具体表达式为^[22]

$$E_{\text{Nernst}} = E_{\text{ref}} - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (5)$$

式中， E_{ref} 是参考状态下的电压； F 为法拉第常数； R 为气体常数； T 是模型所处的温度，K； n 是电荷转移数。此处的 H_2 、 O_2 和 H_2O 分压与上一节提到的 Butler-Volmer 方程中的 p_{H_2} 、 p_{O_2} 和 p_{H_2O} 所表达的物理意义一样，均是指在三相界面的分压。 E_{ref} 表达式为^[23]

$$E_{\text{ref}} = 1.273 - 2.7645 \times 10^{-4} T \quad (6)$$

输出电压表达式为

$$V = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohmic}} - \eta_{\text{con}} \quad (7)$$

式中， η_{act} 是电池电化学反应产生的活化过电位； η_{ohmic} 是因电池各组件的电阻引起的欧姆极化过电位； η_{con} 是电池的浓差极化所产生的过电位。

1.2.3 质量与动量守恒方程

Maxwell-Stefan 方程是描述多组分混合物在扩散中的核心理论模型^[20]：

$$\nabla \cdot \left(-\rho \omega_i \sum_{j \neq i} \left\{ D_{\text{eff},ij} \left[\nabla x_j + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right] \right\} \right) + \rho (u \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (8)$$

式中， ρ 是密度； ω_i 是 i 的质量分数； x_j 是 j 的摩尔分数； p 为压力； R_i 为电化学引起的质量源项。 $D_{\text{eff},ij}$ 是气体有效扩散系数，通过孔隙度（ ε_p ）和曲折度（ τ ）进行修正，其表达式为

$$D_{\text{eff},ij} = \frac{\varepsilon_p}{\tau} \left(\frac{D_{ij} + D_{k,ij}}{D_{ij} D_{k,ij}} \right) \quad (9)$$

式中， $D_{k,ij}$ 是克努森（Knudsen）扩散系数。多孔电极中的流体流动由连续性方程和动量守恒方程共同控制，形成 Brinkman 方程^[24]：

$$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon_p} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{\varepsilon_p} [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u}) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] \right\} - \left(\kappa^{-1} \mu + \frac{Q_m}{\varepsilon_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m \quad (11)$$

式中， ρ 为流体密度； μ 为流体动力黏度； ε_p 为多孔介质的孔隙率； p 为流体压力； $\mathbf{u}$ 为流体速

度矢量； κ 为多孔电极的渗透率； Q_m 为质量源项； F 为体积力矢量。

综上，数值模型的主要输入参数如表 1 所示。

表 1 数值模型输入参数		
Table 1 The numerical model input parameters		
参数名称	参数值	单位
基本参数	工作温度	773.15 K
	工作压力	1.013×10^5 Pa
	电池长度	80 mm
	阳极燃料成分	3% H_2 , 97% H_2O
	阳极燃料流量	100 sccm
	阴极燃料成分	22% O_2 , 78% N_2
阴极	阴极燃料流量	200 sccm
	电池厚度	64 μm
	电子电导率	73000 S/m
	离子电导率	$3.16\times10^6\exp[-53300/(8.3147)]$ S/m
	电解质厚度	88 μm
	离子电导率	$3.34\times10^4\exp(-10300/T)$ S/m
阳极	电极厚度	30 μm
	电子电导率	73000 S/m
电解质	离子电导率	$3.16\times10^6\exp[-53300/(8.3147)]$ S/m

2 结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 形貌分析

YSZ 电解质支撑管通过冷等静压（cold isostatic pressing, CIP）工艺制备，经 1600℃ 高温烧结获得相对密度超过 96% 的致密结构。随后对烧结后的 YSZ 管进行精密加工，采用无心研磨工艺进行处理，以获得所需的尺寸精度。最终实物如图 1 (b)所示，尺寸外径为 (6.00 ± 0.02) mm，内径为 (5.85 ± 0.03) mm，长度为 (80.00 ± 0.5) mm。表面凹槽宽度为 (0.88 ± 0.05) mm，深度为 (0.45 ± 0.03) mm[图 1(a)]。图 1(c)为串联双管电池的实物图，这种设计便于银线连接和集流，并可以灵活地进行串并联。采用 SEM 对横截面表面进行表征[图 1(d)]，可以清晰地看到阴极/电解质/阳极界面分明，无扩散层。电解质层厚度约 (88.0 ± 3.5) μm ，较传统电解质支撑 SOFC 的 200 μm 减少约 56%^[25]。此外，Ag-GDC 复合电极由均匀分布的银纳米颗粒（200 nm）嵌入 GDC 基质中构成。该结构促进了高密度 TPBs 的形成和高的致密度，

有效防止 H_2 和 O_2 漏气。该体系在 850℃ 下实现 OCV 为 1.21 V。阴阳极结构均具有三维互连孔通道；这种形貌显著增强了气体扩散、表面反应动力学和表面解离效率，从而加速了氧还原反应（ORR）和氢氧化反应（HOR）^[26-27]。双管串联连接电池的宏观结构照片以及通过扫描电镜获得的横截面形貌图像，共同构成了后续三维多物理场仿真的几何建模基础。

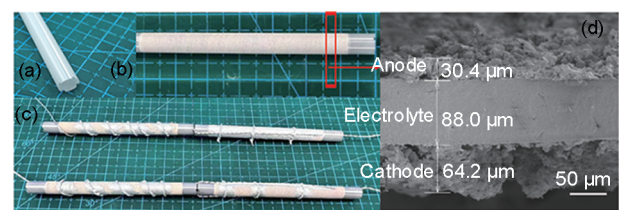


图 1 (a) 管口细节；(b) Ag-GDC/YSZ/Ag-GDC 单电池实物；(c) 双管串联电池单元；(d) 单电池的截面图
Fig. 1 (a) Detailed view of the end faces of the YSZ tubes; (b) Ag-GDC/YSZ/Ag-GDC single cell; (c) Twin-tube series-connected SOFC; (d) The cross-section microstructure of a single cell

2.1.2 元素组成分析

SEM 结合 EDS 元素分布表征 YSZ 电解质和电极界面的微观结构及元素分布如图 2 所示。定量 EDS 图谱显示锆（Zr）和钇（Y）在 YSZ 电解质层内高度均匀分布，电解质和电极界面组成的均匀性有助于增加 TPB 有效长度，最大限度地减少副反应，增强离子传输动力学^[28]。这些增强特性归因于优化制备工艺，200~300 MPa 压力 CIP 确保粉末均匀压实和密度分布，1600℃ 控制梯度烧结保温 2 h。电解质和电极界面表现出优异的结构相容性，优化界面结构可显著抑制裂纹萌生和扩展^[29]。

2.1.3 力学性能

电子万能试验机的计算机系统（Z250；Zwick Roell Group, Germany）记录样品的断裂载荷（ F_{max} ），该值直接表征测试样品在拉伸或压缩条件下能承受的最大载荷能力。通过公式来计算断裂压强（ σ_{max} ）：

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \tag{12}$$

式中， F_{max} 为断裂载荷； A 为接触面积。由于样品管为空心结构，接触面积（ A ）计算公式为

$$A = \Pi t(D - t) \tag{13}$$

式中， D 为试样的外径； t 为壁厚， Π 为圆周

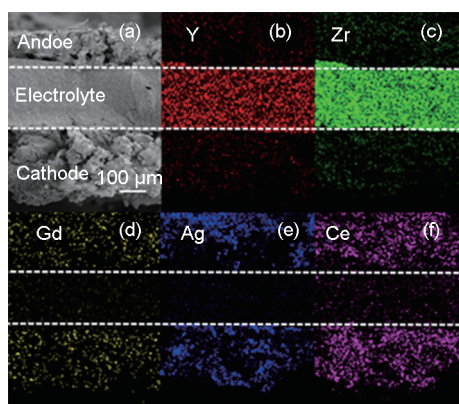


图 2 (a) 阴极/电解质/阳极截面 SEM 图像; (b)~(f) 阴极/电解质/阳极的 SEM-EDS 元素分布图

Fig. 2 (a) Cross-sectional SEM image of the cathode/electrolyte/anode; (b)~(f) SEM-EDS elemental mapping of the cathode/electrolyte/anode

率, 取值为 3.1416。

薄壁圆管的 YSZ 材料理论塑性坍塌压力 P_y 可由下式计算:

$$P_y = 2\sigma_y \frac{t}{D} \quad (14)$$

式中, σ_y 为 3YSZ 的抗拉屈服强度, 经典值为 1.2~1.5 GPa^[21]。取 $\sigma_y = 1.5$ GPa, $t = 100$ μm , 计算得 P_y 为 50 MPa。如表 2 所示, YSZ 试样的断裂载荷达到了 206.31 N, 较 NiO 胚管的 8.24 N 提升了 24.04 倍。经环形横截面积换算后, 壁厚为 100 μm 的 YSZ 圆管实际断裂压强为 56.64 MPa, 与理论值相近。相比之下, 200 μm 的 NiO 基支撑管的断裂压强仅为 1.93 MPa, 约为 YSZ 结构的 1/30。这些结果证明, 与传统 NiO 基设计相比, YSZ 电解质支撑构型具有显著更优的力学性能。值得注意的是, 壁厚 100 μm 的 YSZ 管不仅满足而且超过了实际 SOFC 电堆组装要求的最小抗压强度 (≥ 20 MPa)^[11,30]。而 NiO 支撑结构需要将壁厚增加至 1800 μm 才能达到同等的力学性能。根据数据中的抗压强度测试结果, 这些数值明显超出了 SOFC 系统电堆组装的要求, 确保了串联连接结构的稳定性, 并为数值模拟分析提供了坚实基础。

表 2 压力测试各项参数

Table 2 Performance parameters in stress testing

支撑体	壁厚/mm	外径/mm	断裂载荷/N	断裂压强/MPa
YSZ 电解质支撑	0.1	6	206.31	56.64
NiO 阳极支撑	0.2	7	8.24	1.93

2.1.4 单电池与串联双管电池电化学性能

如图 3(a)所示, 在 850℃ 氢气燃料条件下, 单电池系统的开路电压 (OCV) 达到 1.12 V, 最大功率输出为 0.59 W。值得注意的是, 双管串联系统性能表现出显著提升, 开路电压大幅增加至 2.01 V (增幅 79.5%), 功率输出提高至 0.99 W (增幅 67.8%)。在 900℃ 下, 单电池功率输出达到 1.12 W, 而双管串联系统同时实现 1.92 W。串联后的开路电压和输出功率都较单电池接近翻倍, 符合串联电路的基本规律, 有效地实现了电压的叠加, 说明该电路模型取得成功。串联电路通常会导致内阻增大, 从而限制电流, 但该双管系统仍然实现了接近翻倍的输出功率, 说明集流材料有着优异的稳定性和良好的导电性, 同时内外环形取电这种方式能够有效地收集电流。尽管如此, 还是要指出, 以 YSZ 为电解质的 SOFC 是高温型 SOFC。在高温条件下 ($>800^\circ\text{C}$), 氧空位迁移的活化能显著降低 (约 0.98 eV)^[31], 晶界阻抗同时降低 40%。相应地, 离子电导率从 850℃ 时的 0.08 S/cm 指数增长到 900℃ 时的 0.12 S/cm, 有效减轻了欧姆极化损失^[32]。操作温度越高, 电化学性能越好, 但银的熔点为 961.8℃, 故在实际测试和应用中最好不要超过 900℃, 否则长年累月的热集聚会将集流材料熔化。电压和功率输出证实了串联配置中无显著气体泄漏或电池间干扰, 这一现象与串联电路理论中的电压和功率叠加预期一致。电压和功率的增长未完全达到理论上的 2 倍, 除了串联内阻的增大外, 这可能与实际制备工艺中阴阳极涂覆层的厚度或均匀性存在微小差异有关, 即单管的有效面积并非绝对均一, 这种细微的不一致性累积导致了总性能的微小偏差。为验证串联结构提升电池输出与维持稳定性能, 对串联双管电池进行 1.3 V 恒压长时间放电测试。如图 3(c)所示, 在持续 60 h 的恒压放电过程中, 电池电流密度始终稳定维持在 120 mA/cm² 左右, 整体性能衰退幅度极微弱。这一结果表明, 串联结构不仅能够实现输出特性的优化, 更在长周期电化学过程中展现出优异的稳定性, 电流密度的稳定输出直接反映了电极反应动力学、界面电荷传输以及材料结构在长时间充放电下的耐久性。由此可见, 本研究所采用的串联方案在保持恒定电压、提升输出功率的同时, 有效保障了电池的长循环稳定性。

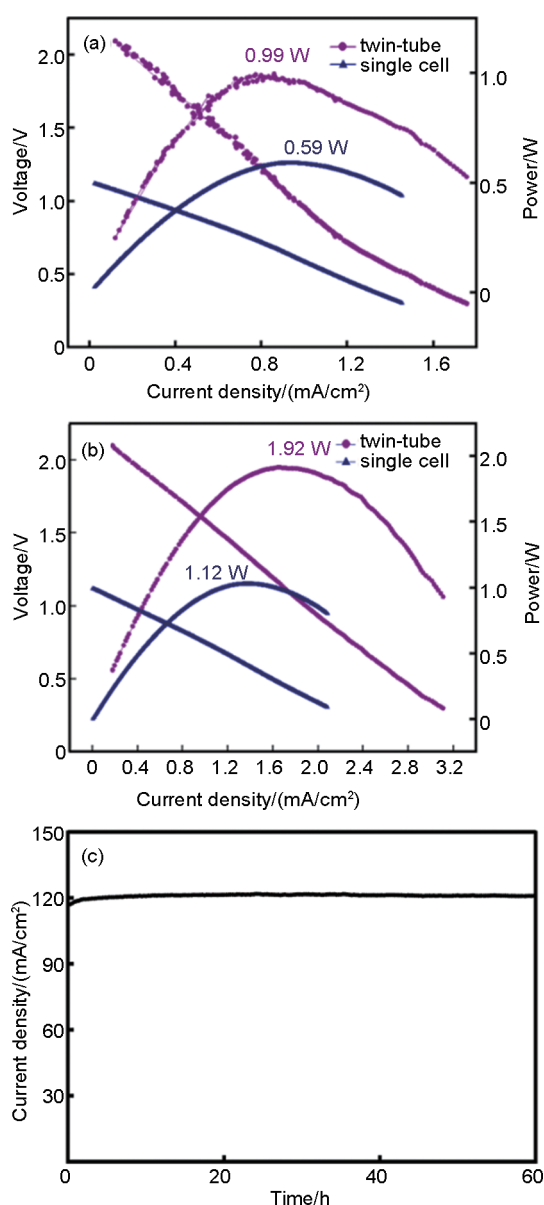


图3 单电池与双管串联SOFC在850℃ (a) 和900℃ (b) 下的电流-电压-功率特性曲线; (c) 串联双管在900℃高温条件下1.3 V恒压放电的曲线

Fig. 3 I-V-P (Current-Voltage-Power) characteristics of single cell and twin-tube series-connected SOFCs under 850℃ (a) and 900℃ (b); (c) The discharge curve of twin-tube at 900℃ under a constant voltage of 1.3 V

2.2 模拟验证

2.2.1 模拟验证方法

三维数值模型采用商业软件 COMSOL Multiphysics 建立并求解。双管串联 SOFC 的电化学性能数据来源于前文所述的实验方法, 当计算结果相对容差量低于 10^{-4} 时终止计算并输出计算结

果。为在理想化条件下进行模拟, 采用了以下假设: ①流入气体视为理想气体; ②忽略材料性能变化; ③三相界面在多孔电极中均匀分布; ④仅考虑模型内部的热交换; ⑤模拟在稳态条件下进行^[13]; ⑥凹槽区域在模型中进行几何简化, 因其不直接参与电化学反应。

2.2.2 H_2 和 H_2O 的摩尔分数分布与扩散流线

如图4(a)和(b)所示, 氢气摩尔分数从入口处的0.97略微下降至出口处的0.96, 表明整个系统燃料供应充足且未出现燃料耗竭现象。与之相反, 水蒸气向出口区域逐渐累积, 呈现出与氢气分布相反的分佈特征。这一现象源于电化学反应 ($H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$) 中氢气的持续消耗, 以及生成的水蒸气沿流动方向向下游迁移和累积^[3]。观测到的分布规律与管式 SOFC 在稳态运行条件下的特征传质行为一致。通过扩散流线的可视化分析, 电池内电化学反应的空间分布规律得以清晰揭示。如图4(b)所示, 氢气扩散流线在靠近气体入口的阳极区域呈现高密度, 反映出强化传质、反应物最大浓度梯度的作用, 由此产生电化学反应最活跃的区域。如图4(d)所示, 由于水蒸气浓度沿流动方向逐渐增加, 其扩散流线起源于反应界面, 由轴向传播至出口。反应区域与产物传输路径之间的这种空间一致性进一步证明电化学活性主要集中于入口区域^[34], 经由可视化模拟可精准辨识电化学反应剧烈区域与微弱区域, 结合环形取电方式进行电流收集, 有效规避长路径电流传输过程中由欧姆损耗引发的能量耗散。

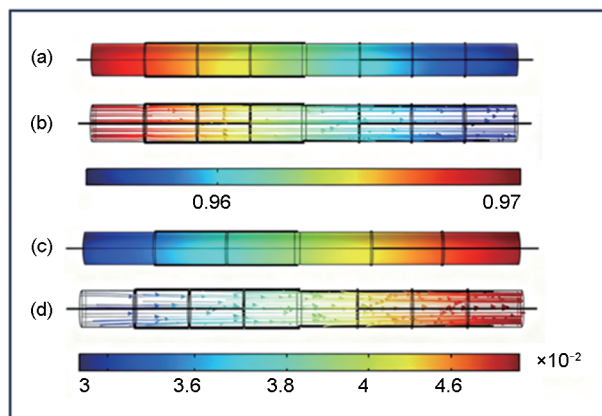


图4 (a) 氢气摩尔分数分布与 (b) 扩散流线; (c) 水蒸气摩尔分数分布与 (d) 扩散流线

Fig. 4 (a) Hydrogen mole fraction distribution and (b) diffusion streamlines; (c) water vapor mole fraction distribution and (d) diffusion streamlines

2.2.3 电流密度分布

如图5(a)所示, 模拟结果显示串联电池的电流密度呈现均匀的轴向分布, 无显著波动或局部积累, 表明电化学反应过程平衡良好, 电流传导路径上无明显阻抗不连续或能量耗散。特别是在凹槽连接处电流没有出现显著的波动。如图5(b)所示, 通过双环形取电, 将电池前端发生强烈电化学反应产生的电流和后半部分较弱的电流进行有效的收集, 减少了传统长路径上的电流损失, 从而提高了电池的输出功率。综上所述, 电流分布的均匀性源于对称十字形凹槽与环形集流的协同作用, 增强了界面机械稳定性并促进了均匀电流流动, 环形集流缩短了电流路径, 从而使欧姆损失最小化。稳定的电流密度分布表明无局部过热或反应异常风险, 进一步证实了传导系统的高效率^[35]。总之, 通过数值模拟对内部电流密度分布的可视化与实验性能验证相结合, 共同证实了凹槽设计和环形集流策略用于管式SOFC串联集成的合理性和可行性。

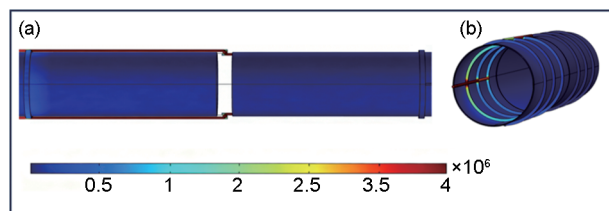


图5 工作电压1 V下串联双管电池的电流密度分布

Fig. 5 Current density distribution in the twin-tube series-connected cell structure operating at 1 V

3 结 论

本研究提出了一种基于88 μm 的3YSZ电解质管的双管串联SOFC结构, 通过在管两端加工十字形凹槽并集成内外环形集流, 实现了高效的互连导电。在900 $^{\circ}\text{C}$ 氢气燃料条件下, 系统获得2.01 V的开路电压和1.92 W的最大输出功率, 相较于单电池单元展现出显著的性能提升。通过1.3 V长时间恒压放电测试, 电流密度比较稳定, 说明串联结构有长循环稳定性。通过实验测量与三维多物理场模拟的结合, 系统验证了该设计的可行性。模拟结果清晰地展示了电流分布、气体传输行为和电流密度分布, 证实十字形凹槽能够建立稳定、低电阻的电流传导路径。该结构设计简单而坚固, 实验验证与多物理场模拟相结合的集成方法为研究管式SOFC

内部机理和串联结构优化提供了有效的方案。

参 考 文 献

- [1] 郑新宇, 徐咏, 谢睿杰, 等. 中国氢能发展路径及突破口: 基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(12): 4654-4671. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575.
- ZHENG X Y, XU Y, XIE R J, et al. Pathways and breakthroughs in China's hydrogen development: Lessons from US strategy evolution and China-US comparative analysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4654-4671. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575.
- [2] 万燕鸣, 熊亚林, 王雪颖. 全球主要国家氢能发展战略分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3401-3410. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0132.
- WAN Y M, XIONG Y L, WANG X Y. Strategic analysis of hydrogen energy development in major countries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3401-3410. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0132.
- [3] 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. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0896.
- JIAN J H, LIN Z Y, ZHENG J H, 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. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0896.
- [4] 董乐贤, 郑群, 黄悦, 等. 管状固体氧化物燃料电池前沿技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 131-138. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0528.
- DONG L X, ZHENG Q, HUANG Y, et al. Research progress on cutting-edge technology of tubular solid oxide fuel cells[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(1): 131-138. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0528.
- [5] GOHAR O, KHAN M Z, SALEEM M, et al. Navigating the future of solid oxide fuel cell: Comprehensive insights into fuel electrode related degradation mechanisms and mitigation strategies[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 331: 103241. DOI: 10.1016/j.cis.2024.103241.
- [6] WANG Y, JIANG W C, SONG M, et al. Effect of inhomogeneous oxidation on the mechanical degradation of anode supported solid oxide fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2020, 450: 227663. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227663.
- [7] LIANG B, YAO Y, GUO J, et al. Propane-fuelled microtubular solid oxide fuel cell stack electrically connected by an anodic rectangular window[J]. Applied Energy, 2022, 309: 118404. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118404.
- [8] KIM D W, YUN U J, LEE J W, et al. Fabrication and operating characteristics of a flat tubular segmented-in-series solid oxide fuel cell unit bundle[J]. Energy, 2014, 72: 215-221. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.026.
- [9] YAMAGUCHI T, SHIMIZU S, SUZUKI T, et al. Fabrication and evaluation of a novel cathode-supported honeycomb SOFC stack [J]. Materials Letters, 2009, 63(29): 2577-2580. DOI: 10.1016/j.

- matlet.2009.09.009.
- [10] YAN D, LIANG L J, YANG J J, et al. Performance degradation and analysis of 10-cell anode-supported SOFC stack with external manifold structure[J]. *Energy*, 2017, 125: 663-670. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.107.
- [11] CUI D A, JI Y L, CHANG C, et al. Influence of structure size on voltage uniformity of flat tubular segmented-in-series solid oxide fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 460: 228092. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228092.
- [12] LI P W, CHYU M K. Simulation of the chemical/electrochemical reactions and heat/mass transfer for a tubular SOFC in a stack [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 124(2): 487-498. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2003.06.001.
- [13] LIU X, SUN S D, DAI Y, et al. Numerical study of temperature distribution in tubular segmented-in-series SOFC with co-flow and counter-flow arrangements[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 74: 447-458. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.145.
- [14] CHEN S N, GU D G, ZHENG Y F, et al. Enhanced performance of NiO-3YSZ planar anode-supported SOFC with an anode functional layer[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(1): 88-98. DOI:10.1007/s10853-019-04007-4.
- [15] YILDIRIM F, TIMURKUTLUK C, TIMURKUTLUK B. Investigation and optimization of infiltration parameters for nanostructured cathode electrodes in solid oxide fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 114: 172-185. DOI:10.1016/j.ijhydene.2025.03.013.
- [16] YU H Y, FRANTZ C, SAVIOZ L, et al. Characterization of Ni-GDC based electrolyte-supported cell under processed biogas composition: Electrochemical performance, degradation and recovery[J]. *Electrochimica Acta*, 2025, 526: 146163. DOI: 10.1016/j.electacta.2025.146163.
- [17] HU L Y, ZENG X, WEI X Q, et al. Interface engineering for enhancing electrocatalytic oxygen evolution of NiFe LDH/NiTe heterostructures[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 273: 119014. DOI:10.1016/j.apcatb.2020.119014.
- [18] 许晓茹, 欧建臻, 刘佳伟, 等. 带嵌入式微通道陶瓷裂解反应器的管式氨燃料电池[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(5): 1818-1828.
- XU X R, OU J Z, LIU J W, et al. Direct ammonia tubular fuel cell with an embedded microchannel ceramic cracking reactor[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(5): 1818-1828.
- [19] ZHANG X Q, ESPINOZA M, LI T S, et al. Parametric study for electrode microstructure influence on SOFC performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(75): 37440-37459. DOI:10.1016/j.ijhydene.2021.09.057.
- [20] ANDERSSON M, YUAN J L, SUNDÉN B. SOFC modeling considering hydrogen and carbon monoxide as electrochemical reactants[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 232: 42-54. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.12.122.
- [21] KISHIMOTO M, KISHIDA S, SEO H, et al. Prediction of electrochemical characteristics of practical-size solid oxide fuel cells based on database of unit cell performance[J]. *Applied Energy*, 2021, 283: 116305. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.116305.
- [22] XU H R, CHEN B, TAN P, et al. Modeling of all porous solid oxide fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2018, 219: 105-113. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.03.037.
- [23] ZHAO B G, JIAN H Y, QIAN Y P, et al. Analyzing the thermal and electrical performance of a tubular SOFC with inserts by mass transfer coefficients[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 242: 122536. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.122536.
- [24] NAQVI S B, BOTTARO A. Interfacial conditions between a free-fluid region and a porous medium[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 141: 103585. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103585.
- [25] HOWE K S, THOMPSON G J, KENDALL K. Micro-tubular solid oxide fuel cells and stacks[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(4): 1677-1686. DOI:10.1016/j.jpowsour.2010.09.043.
- [26] TORABI A, ETSSELL T H, SARKAR P. Dip coating fabrication process for micro-tubular SOFCs[J]. *Solid State Ionics*, 2011, 192(1): 372-375. DOI:10.1016/j.ssi.2010.09.050.
- [27] SUMI H, YAMAGUCHI T, HAMAMOTO K, et al. Electrochemical analysis for anode-supported microtubular solid oxide fuel cells in partial reducing and oxidizing conditions[J]. *Solid State Ionics*, 2014, 262: 407-410. DOI:10.1016/j.ssi.2014.01.012.
- [28] LI T, DEVARAJ A, KRUSE N. Atomic-scale characterization of (electro-) catalysts and battery materials by atom probe tomography [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(12): 101188. DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.101188.
- [29] LIM Y, LEE H, PARK J, et al. Low-temperature constrained sintering of YSZ electrolyte with Bi₂O₃ sintering sacrificial layer for anode-supported solid oxide fuel cells[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(7): 9673-9680. DOI:10.1016/j.ceramint.2021.12.168.
- [30] DONG S K, JUNG W N, RASHID K, et al. Design and numerical analysis of a planar anode-supported SOFC stack[J]. *Renewable Energy*, 2016, 94: 637-650. DOI:10.1016/j.renene.2016.03.098.
- [31] ROBLES-FERNÁNDEZ A, ORERA A, PEÑA J I, et al. Probing high oxygen activity in YSZ electrolyte[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2022, 169(4): 044503. DOI: 10.1149/1945-7111/ac60f2.
- [32] RAGHVENDRA, SINGH P. Electrical conductivity of YSZ-SDC composite solid electrolyte synthesized via glycine-nitrate method [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(15): 11692-11698. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.05.359.
- [33] CUI D A, LIU L, DONG Y L, et al. Comparison of different current collecting modes of anode supported micro-tubular SOFC through mathematical modeling[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 174(1): 246-254. DOI:10.1016/j.jpowsour.2007.08.094.
- [34] LIU Y L, JIAN J H, XU X R, et al. An anode-supported tubular proton conductor fuel cell with an inner ceramic ammonia cracking component[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2025, 22(2): e14969. DOI:10.1111/ijac.14969.
- [35] HAN D G, ERDEM K, MIDILLI A. Conceptual design and performance analysis of a hybrid power generation plant integrating fluidized bed gasification, methanol production and tubular solid oxide fuel cell systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 648: 237380. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.237380.