DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.278　　**中图分类号**：TQ152　　**文献标志码**：A

一致性和连接方式对 SOFC 电堆性能影响的实验研究

刘　威[1](中国电源学会学生会员)，吕　佳[1]，孙小毛[2]，田梁玉[3]，
胡　强[2,4]，吴　剑[1,2]

(1.浙江农林大学数学与计算机科学学院，杭州 311300；2.浙江臻泰能源科技有限公司，丽水 321400；3.国网浙江省电力有限公司双创中心，杭州 310051；4.丽水学院生态学院，丽水 323000)

摘要：固体氧化物燃料电池 SOFC(solid oxide fuel cell)的一致性和连接方式是影响电堆整体性能的重要因素。通过线性扫描伏安法、电化学阻抗谱等方法评价了扁管式 SOFC 堆内电池的一致性，并结合弛豫时间分布技术研究了一致性和连接方式对电堆输出性能的综合影响及潜在的电化学机理。结果表明，一致性和连接方式共同作用于电堆性能，一致性影响电堆寿命，连接方式影响电堆输出功率。在串联方式下，电池一致性低会使性能较差的电池过度放电，加速电堆的性能衰退。相较于串联，并联会造成较大功率损失，损失主要源自欧姆电阻及氧交换、电荷转移过程的影响，但其对电堆寿命的影响较小。综上所述，串联电堆峰值功率高，但一致性低时对电堆寿命影响较大；并联电堆的功率损失明显，但对电堆寿命的影响小。

关键词：扁管 SOFC 电堆；串并联；性能一致性；功率损失；电化学阻抗谱

Experiment on Effect of Cell Uniformity and Connection Mode on Performance of SOFC Stack

LIU Wei[1], *Student Member*, *CPSS*, LÜ Jia[1], SUN Xiaomao[2], TIAN Liangyu[3], HU Qiang[2,4], WU Jian[1,2]

(1. College of Mathematics and Computer Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; 2. Zhejiang Zhentai Energy Technology Co., Ltd., Lishui 321400, China; 3. Innovation and Entrepreneurship Center, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310051, China; 4. Ecology School, Lishui University, Lishui 323000, China)

Abstract: The cell uniformity and connection mode of solid oxide fuel cell (SOFC) are important factors affecting the overall performance of the stack. The uniformity of flat-chip cells in the SOFC stack is evaluated by methods such as linear sweep voltammetry and electrochemical impedance spectroscopy. Then, the comprehensive effect of cell uniformity and connection mode on the stack's output performance and the underlying electrochemical mechanism are investigated by combining with the method of distribution of relaxation times. Results indicate that the cell uniformity and connection mode jointly affect the stack performance, i.e., the cell uniformity affects the stack lifetime, while the connection mode affects the stack's output power. In a series mode, a low cell uniformity will cause the poor-performance cell to over-discharge, which may accelerate the deterioration of the stack performance. Compared with the series mode, the parallel mode will cause a higher power loss, which mainly comes from ohm resistance, oxygen exchange and charge transfer processes but affects the stack lifetime to a small degree. In general, the peak power of the series stack is high, but the lifetime is greatly affected when the cell uniformity is

收稿日期：2022-10-28；**修回日期**：2022-12-15；**录用日期**：2023-01-19；**网络首发日期**：2023-03-01

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFB2500400)；中央引导地方科技发展专项资助项目(2021C01100)；浙江省科技计划资助项目(2020R02015)；浙江省领军型创新创业团队建设计划资助项目(2019ZY1015)；丽水市科技计划资助项目(2021ZDYF01)

This work is supported by National Key R&D Plan under the grant 2021YFB2500400; the Central Government Guides the Local Science and Technology Development Project under the grant 2021C01100; Zhejiang Provincial Science and Technology Plan under the grant 2020R02015; Zhejiang Provincial Leading Innovation and Entrepreneurship Team Construction Plan under the grant 2019ZY1015; Lishui Science and Technology Plan under the grant 2021ZDYF01

low. The power loss of the parallel stack is obvious, but the influence on the stack lifetime is weak.

Keywords: Flat-chip solid oxide fuel cell (SOFC) stack; series-parallel connection; performance uniformity; power loss; electrochemical impedance spectroscopy

固体氧化物燃料电池 SOFC(solid oxide fuel cell)是 1 种高效的能源转换装置，能够将氢气、甲烷等物质中的化学能直接转化为电能。SOFC 具备燃料适应性好、清洁环保等优点，推动其商业化发展将有利于实现我国“碳达峰、碳中和”的目标[1-2]。在实际应用中，通常将多片 SOFC 通过串/并联的方式组成电堆以提升输出功率[3]，而堆内电池的性能一致性和连接方式是影响电堆性能的重要因素[4-5]。性能一致性表现在各电池的输出功率、内阻、工作电压等方面的差异。目前，已有大量研究表明一致性同时受堆内资源分布的均匀性[6]和自身材料、制备工艺的影响[7-8]，一致性问题难以忽视[9]。另外，电池间连接方式的不同也会对电堆整体性能产生不同的作用，如串联工作电压高、并联电流密度高等。由于一致性问题的存在，串/并联的电池可能会出现不同程度的老化，从而影响整体电堆的性能[10]。

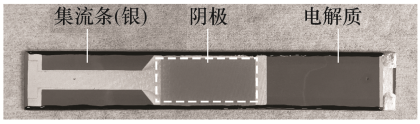
在关于电堆性能影响因素的探究中，部分学者研究了堆内电池一致性和连接方式会对电堆性能产生的影响。文献[11]发现温度会随着 SOFC 中空气流动的方向变化，气流的分布将导致某些区域的电池故障率攀升，从而影响整体电堆性能；文献[12]的研究结果表明电堆输出功率低于两单电池的代数和，该研究认为是制备技术导致电池性能不一致；文献[13]发现单电池并联组成电堆后总功率明显低于预期，该研究提出可能是因为电池性能一致性低，但未详细研究。

SOFC 工作时受多个电化学反应过程的影响[14-15]，从电化学反应机理层面研究电堆性能的影响因素是进一步发展 SOFC 电堆商业化的基础。线性扫描伏安法 LSV(linear sweep voltammetry)[16]、电化学阻抗谱 EIS(electrochemical impedance spectra)[17]和弛豫时间分布法 DRT(distribution of relaxation times)[18]是分析电化学反应机理的重要技术手段，同时也可用于区分电池性能一致性高低[19]。据相关文献[20-21]可知，一般 SOFC 的电极反应具备以下几个过程：低频部分(0.1~10 Hz)的气体扩散和转化过程，中频部分(10~1 000 Hz)的氧还原和氢氧化过程，以及高频部分(1 000 Hz~10 kHz)的电荷转移和离子运输过程等。据此，可以通过 DRT 等方法结合电极反应过程分析 SOFC 工作时各反应过程的影响。

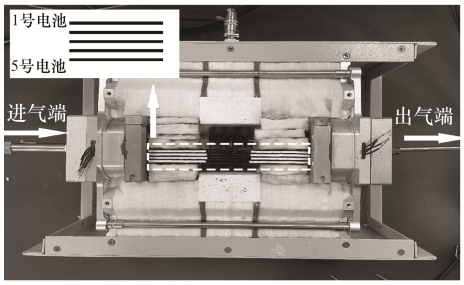
本文以 5 片同批次生产的扁管式 SOFC 组装电堆，使用 LSV、EIS、DRT 等方法综合考虑堆内电池的性能一致性和连接方式对电堆性能的影响。首先，以 EIS 和 LSV 的结果评定各电池的性能差距，并将其分为一致性高低不同的 A、B 2 组电池。其次，在串/并联 2 种连接方式下对其进行相关电化学测试，分析影响电堆性能变化的电化学反应机理。随后，对堆内不同数量电池的串并联特性进行了实验研究。本文从电化学反应机理研究出发，在此基础上研究一致性和连接方式对 SOFC 电堆性能的影响，从而为 SOFC 电堆的实际组堆方向和延寿策略研究提供可靠参考。

1　实验材料和方法

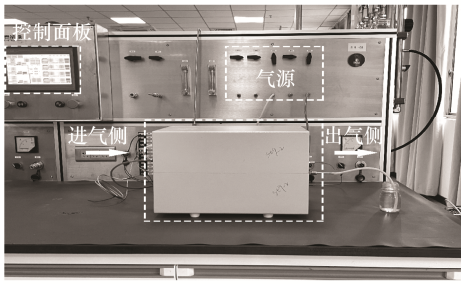
本文研究对象为扁管结构 SOFC，其多孔功能阳极由镍/钇稳定氧化锆 YSZ(yttria stabilized zirconia)构成，其间设有用于阳极气体通过的微孔道，对称阴极采用银/钐掺杂氧化铈 SDC(Ag/samarium-doped ceria)，电解质为 YSZ，双面有效活性面积为 2×(25 mm×50 mm)。单电池结构如图 1(a)所示，在平均厚度为 1.2 mm 的阳极两侧为尺寸相同、厚度约为 10 μm 的电解质层。在电解质层外侧制备较薄的 SDC 阻挡层后，使用丝网印刷工艺制备厚度约为 10 μm 的阴极。最后使用玻璃材料密封电池长边两侧，采用银浆和银丝收集电流。为尽量避免电池制备过程中材料和制备工艺等方面对电池性能的影响，本文所述电池均来自相同批次。



(a)单电池结构



(b)芯组结构



(c)升温装置及测试台

图 1 单电池结构、芯组、升温装置及测试台

Fig. 1 Structure of single cell, cell group, heating device and test bench

本文涉及的实验首先将制备好的电池组装至如图 1(b)所示的芯组中，随后在图 1(c)所示的装置和测试台中进行升温。该装置由上下 2 组加热丝提供热量，采用保温棉等密封技术保持温度恒定，配有 4 个热电偶采集电池不同位置的温度数据(包括进出气口及电池上下侧)。气体采用流量控制器控制流量后通入电堆。通过测试台使电池工作温度达到 630 ℃，阴极通入空气(气体体积流量为 5.00×10^{-6} m³/s)，阳极通入纯氢气(气体体积流量约为 6.67×10^{-7} m³/s)。

电池间的性能一致性通过电压-电流-功率(*U-I-P*)和 EIS 的相似度评价。本研究将电堆中 *U-I-P*、EIS 相似，峰值功率、欧姆电阻 R_0、极化阻抗 R_P 接近的电池定义为性能一致性高，反之一致性低。其中，*U-I-P* 及 EIS 数据由 Gamry Reference 3000/Interface 1000 电化学工作站采集，使用 LSV 收集电压、电流数据，扫描范围为开路电位至 0.01 V，扫描速度设置为 20 mV/s。采用恒电位法(Potentiostat EIS)采集 EIS 数据，频率范围为 0.1~30 000.0 Hz，扰动电压为 10 mV，采样频率为 20 点/10 倍频率，即每增加 1 个数量级(如从 1 Hz 到 10 Hz)均匀采集 20 个数据点。利用基于 MATLAB 的 DRT tools 工具箱[22]对 EIS 数据进行 DRT 分析，正则化因子 λ 取 10^{-4}。文中各串并联方式下的欧姆电阻、特征峰值等理论值的计算方法均由串/并联电路电阻计算式求得，可表示为

$$R_t=R_1+R_2+R_3+\cdots+R_n \tag{1}$$

$$\frac{1}{R_t}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\cdots+\frac{1}{R_n} \tag{2}$$

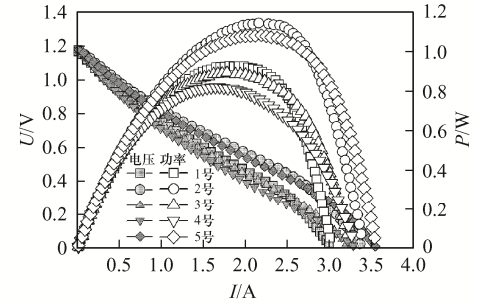
式中：R_t 为串/并联电堆总电阻；R_1、R_2、R_3、R_n 等为各单电池电阻。

2 结果与讨论

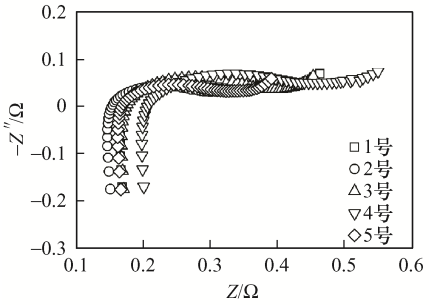
2.1 电池性能一致性对连接特性的影响

2.1.1 电池性能一致性表征

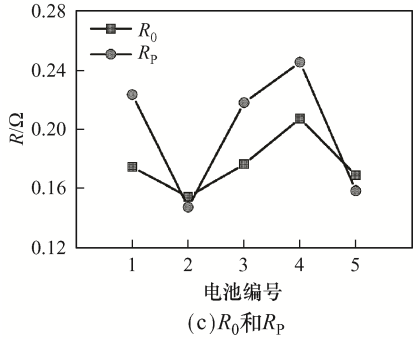
各单电池的电压-电流-功率(*U-I-P*)曲线如图 2(a)所示，从中可以观察到各单电池输出性能存在一定程度上的差异。其中，2 号电池峰值功率最高为 1.157 7 W，而 4 号电池峰值功率仅为 0.848 4 W，相差 0.309 3 W。各单电池的峰值功率对应的具体电压-电流参数见表 1。各单电池对应的 EIS 如图 2(b)所示，Z 为实部对应阻抗的电阻性分量，Z'' 为虚部对应阻抗的电抗性分量，取绝对值为 $-Z''$。该图表明各单电池在欧姆电阻 R_0 和极化阻抗 R_P 上也存在差异，造成这种差异的主要原因是各电池所处位置的气氛、温度条件略微不同，同时电池自身材料上仍然存在一定不同。R_0 和 R_P 的具体值如图 2(c)所示，能够明显观察到性能较差的 4 号电池 R_0、R_P 均最高，性能最好的 2 号电池 R_0、R_P 均最低。依据图 2 结果，选择性能一致性高的 1 号和 3 号电池作为 A 组，性能一致性低的 2 号和 4 号作为 B 组，分别进行实验，探究在电池性能一致性高低不同的 2 种情况下串联和并联方式的差异性。



(a)*U-I-P*曲线



(b)EIS



(c)R_0和R_P

图 2　各单电池的电化学性能

Fig. 2 Electrochemical performance of each single cell

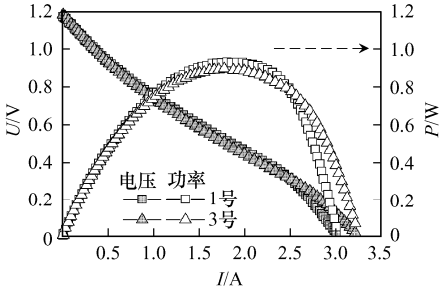
表 1　各单电池峰值功率下的电流–电压

Tab. 1 Current-voltage value at peak power of each single cell

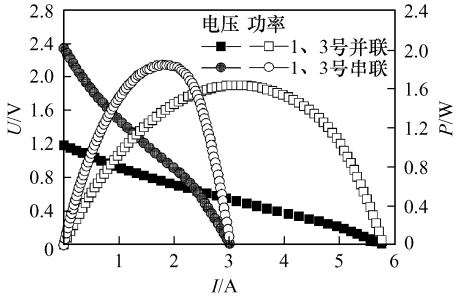
电池	*P*/W	*I*/A	*U*/V
1 号	0.927 4	1.92	0.483
2 号	1.157 7	2.27	0.510
3 号	0.891 2	1.83	0.487
4 号	0.821 7	1.73	0.475
5 号	1.110 2	2.16	0.514

2.1.2　高一致性的影响

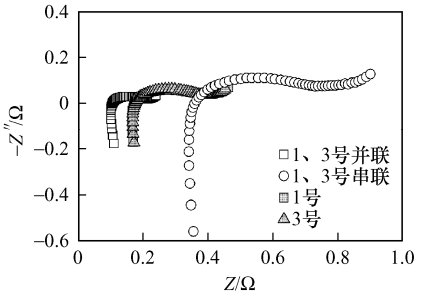
图 3(a)为 1、3 号单电池的 *U-I-P* 曲线，通过串/并联方式组合得到的 *U-I-P* 曲线如图 3(b)所示，串联后的峰值输出功率为 1.848 2 W，并联为 1.625 0 W，两者相差约 0.223 2 W。以串联峰值功率的电流(1.83 A)和并联峰值功率的电压(0.488 V)，取图 3(a)中各电池对应的 *U-I-P* 值，记为理论状态，见表 2。



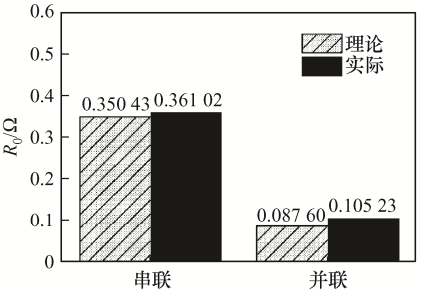
(a)1、3号电池的*U-I-P*曲线



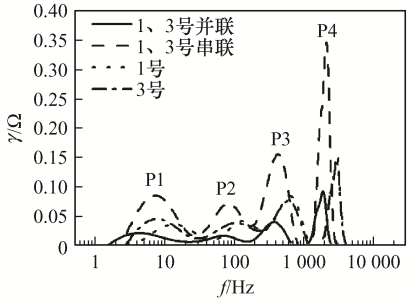
(b)1、3号电池串/并联后的*U-I-P*曲线



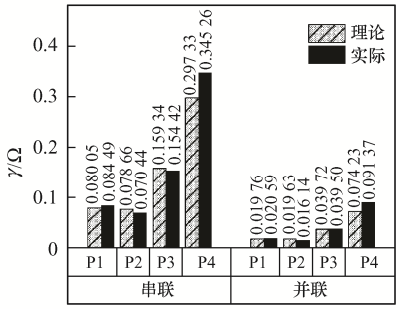
(c)1、3号电池及其串/并联后的EIS



(d)串/并联R_0与其理论值的对比



(e)1、3号电池及其串/并联后的DRT曲线



(f)各特征峰峰高变化

图 3 A 组电池相关电化学性能

Fig. 3 Relevant electrochemical performance of group A

表 2 A 组电池峰值输出状态 *U-I-P* 值及各单电池理论 *U-I-P* 值

Tab. 2 *U-I-P* values of group A in peak output state, and theoretical *U-I-P* value of each single cell

连接方式	项目	*P*/W	*I*/A	*U*/V
串联	串联电堆实测状态	1.848 30	1.83	1.010
	1 号单电池理论状态	0.929 64	1.83	0.508
	3 号单电池理论状态	0.891 21	1.83	0.487
并联	并联电堆实测状态	1.625 04	3.33	0.488
	1 号单电池理论状态	0.927 20	1.90	0.488
	3 号单电池理论状态	0.893 04	1.83	0.488

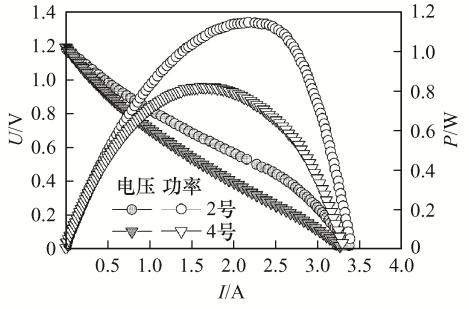
由表 2 可知，实测串联峰值功率约为理论值(1.820 9 W)的 101.50%，而并联仅为理论值(1.818 4 W)的 89.28%，并联的功率损失较大。对比图 3(c)和(d)可以分析欧姆电阻 R_0 的影响，同时由式(1)和式(2)求得理论串/并联电堆 R_0 分别为 0.350 4、0.087 6 Ω。串联实测 R_0=0.361 0 Ω，较为接近理论值；并联实测 R_0=0.105 2 Ω，比理论值高约 20%。R_0 一般包含电解质、引线及接触点的电阻，且接触点电阻的影响较大，由于连接方式的不同，并联接触点一般要比串联更多，这可能是并联 R_0 实测值更高的原因。

图 3(e)和(f)比较了 DRT 各特征峰的变化，各特征峰值 γ 为弛豫强度，对应于每个弛豫过程的幅值，γ 越大，表示该弛豫过程(即特征峰)对总阻抗的贡献越显著。其中理论值由式(1)和式(2)计算得到。2 种方式下，P4 峰均明显高于理论值。由此可知，单电池串/并联后，P4 代表的电荷转移和离子运输过程受到影响。根据张旸[23]的研究，在中低温状态下电荷转移是该过程主要的限制因素，故此时 P4 主要是电荷转移过程的影响。

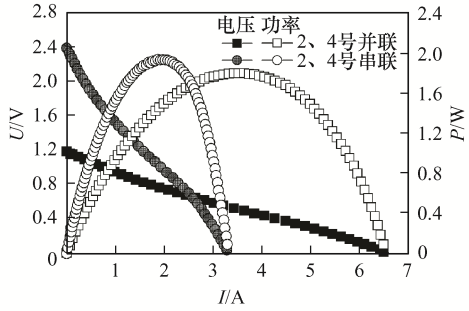
从运行稳定性考虑，电池不适宜长期处于过放电(深度放电)状态。本文将电池处于“放电电压低于其自身峰值输出的电压”的状态定义为过放电状态。关于过放电状态，Zhang 等[24]提出可能会导致燃料不足从而影响阳极结构稳定性，进而影响电池长期运行的稳定性和使用寿命。对比表 1 和表 2 的结果可知，当电池一致性较高时，串/并联电堆中的各电池状态均接近各自峰值状态，即不存在过放电状态。

2.1.3 低一致性的影响

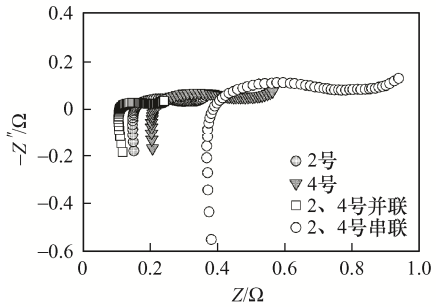
图 4(a)为 2、4 号单电池的 *U-I-P* 曲线，通过串/并联方式组合得到的 *U-I-P* 曲线如图 4(b)所示，串联后的峰值输出功率为 1.922 7 W，并联为 1.799 3 W，



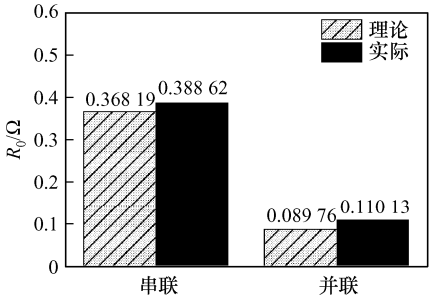
(a)2、4号电池的*U-I-P*曲线



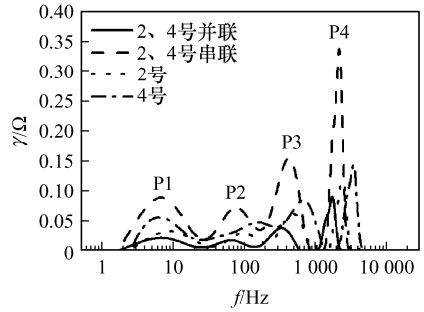
(b)2、4号电池串/并联后的*U-I-P*曲线



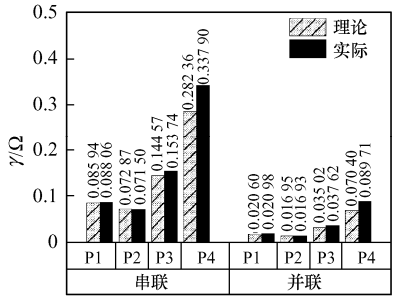
(c)2、4号电池及其串/并联后的EIS



(d) 串/并联R_0与其理论值的对比



(e) 2、4号电池及其串/并联后的DRT曲线



(f) 各特征峰峰高变化

图 4　B 组电池相关电化学性能

Fig. 4 Relevant electrochemical performance of group B

两者相差约 0.123 4 W。与 A 组的结果相比，一致性较低的 B 组串/并联 2 种方式下输出功率的相对损失较小。B 组电池串/并联的理论状态见表 3。

表 3　B 组电池峰值输出状态 *U-I-P* 值及各单电池理论 *U-I-P* 值

Tab. 3 *U-I-P* values of group B in peak output state, and theoretical *U-I-P* value of each single cell

连接方式	项目	*P*/W	*I*/A	*U*/V
串联	串联电堆实测状态	1.922 7	1.95	0.986
	2 号单电池理论状态	1.127 1	1.94	0.581
	4 号单电池理论状态	0.799 5	1.95	0.410
并联	并联电堆实测状态	1.790 4	3.49	0.513
	2 号单电池理论状态	1.144 6	2.24	0.511
	4 号单电池理论状态	0.818 9	1.59	0.515

综合图 4 和表 3 可知，与 A 组结果相似的是 B 组的串联功率较为接近理论值(1.926 6 W)，为 99.80%，而并联仅有理论值(1.963 5 W)的 91.18%。同时，并联欧姆电阻比理论值高约 18.5%。与 A 组结果不同的是 B 组 2 种连接方式的 P3 峰(阴极氧还原相关过程)均呈增加趋势，但增加的数值较小，故而未对性能造成明显损失。P3 峰增加的原因可能是两电池反应速率不同，串联时导致性能差的电池阳极氢短缺，从而影响阴极氧的还原过程。而并联时可能存在互充电现象，电池性能差异较大，并联组成电堆时可能会使性能较好的电池向较差的电池充电，从而影响阴极电子的运动，导致氧还原过程速度变缓。从电池运行稳定性考虑，如表 3 所示，串联会使 4 号电池(性能较差)处于过放电状态，这可能会使该电池以更快的速度衰退；而并联时，两电池均不存在过度放电状态。

综上所述，串联方式的峰值输出功率与理论值接近，而并联方式会产生约 10%~20%的功率损失。并联方式造成功率损失的主要原因是欧姆电阻、P3 峰对应的氧交换过程，以及 P4 峰对应的电荷转移过程与理论值的差距较大。当电池一致性低时，串联会使性能较差的电池处于过放电状态，不利于电堆长期稳定工作，而并联后一致性的影响则相对较小。

2.2　电池数量对连接特性的影响

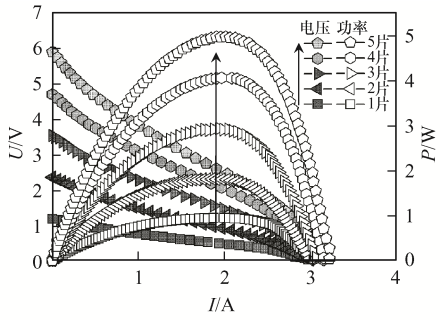
电堆内的电池数量是直接影响电堆整体输出性能的重要参数之一。本文使用前文中的 5 片电池进行堆内电池数量变化的串/并联实验，探究堆内电池数量对串/并联电堆输出性能的影响。由前文可知，性能一致性高时功率损失较小，故在电池数量变化的过程中，按性能差距从小到大的顺序组合，即按电池编号 1、3、2、5、4 的顺序依次增加电池。

2.2.1　串联方式下电池数量的影响

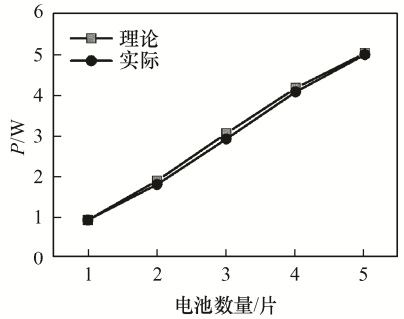
在串联方式下测量了 1~5 片电堆的 *U-I-P* 曲线及 EIS 数据，结果如图 5 所示。在图 5(a)和(b)关于串联电池数量增加其功率变化的趋势图中，1~5 片电池串联的峰值功率线性增加，每增加 1 片电

池，功率增加约 1 W。其中，电堆峰值功率的理论值由图 2(a)中各单电池峰值功率的代数和计得。这说明在串联方式下电池数量递增对输出功率损失的影响较为微弱，与 2.1 节结果一致。

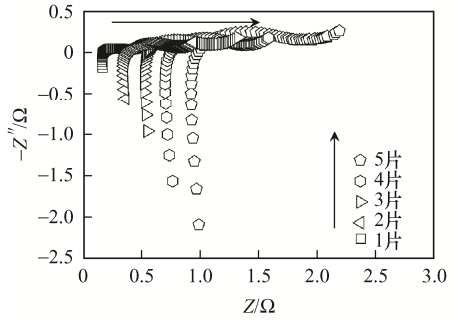
通过 EIS、DRT 数据可以分析欧姆电阻 R_0、极化阻抗 R_P 的变化，分析功率损失的来源。图 5(c)为电池数量变化下的 EIS，随着电池数量的增加，



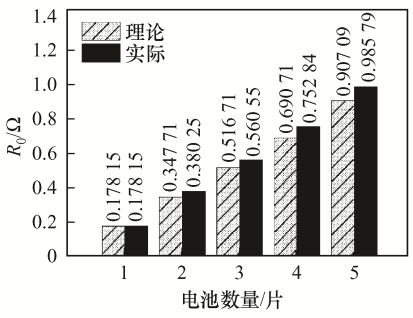
(a)1～5片电池串联的*U-I-P*曲线



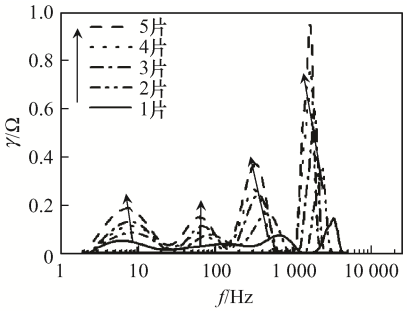
(b)功率随串联电池数量的变化



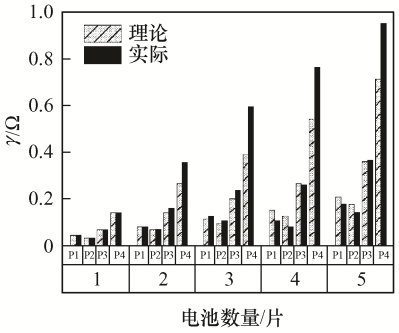
(c)1～5片电池串联的EIS



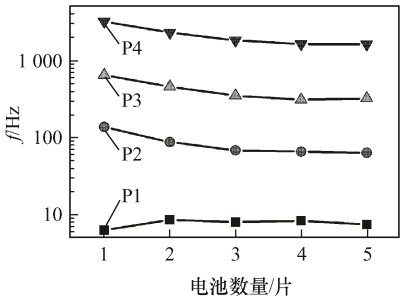
(d)R_0随串联电池数量的变化



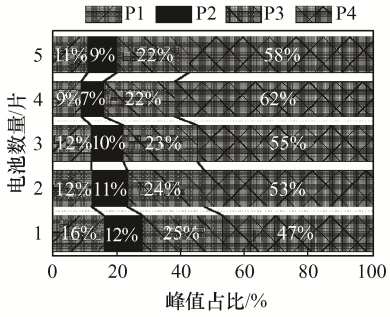
(e)1～5片电池串联的DRT



(f)特征峰峰高随串联电池数量的变化



(g)串联条件下各特征峰特征频率分布



(h)DRT各特征峰占比随串联电池数量的变化

图 5 串联电堆相关电化学性能

Fig. 5 Relevant electrochemical performance of series stack

可以观察到欧姆电阻和极化阻抗均明显增加。图 5(d)为 R_0 随电池数量的具体变化趋势，在 1~5 片电池串联的过程中，R_0 平均每片增加约 0.201 9 Ω，高于理论值约 8.86%，该部分 R_0 的偏差主要受引线、接触点的影响。图 5(e)和(f)展现了 DRT 解析结果及其和理论值的偏差，图 5(g)为各特征峰的弛豫频

率变化趋势。其中，随着片数的增加，P4 峰值平均每片增加约 0.202 9 Ω，且各片数电堆的实测值与理论值的平均偏差为+20.33%。同时，P4 峰的弛豫频率向低频转移，反应动力学变慢。P3 代表的阴极氧交换过程整体趋势与 P4 相近，但从数值上看，P3 与理论值的平均偏差仅为 0.074 6 Ω/片，带来的影响相对较小。图 5(h)为各特征峰在总极化阻抗中的占比，可以看出电荷转移过程(P4)随着片数增加在极化阻抗中的影响逐渐增大。气体扩散峰 P1 的变化并不具备规律性，这是因为堆内电池的位置存在一定偏差，其所处位置对阴/阳极气体的交换有一定影响，例如处于装置边缘的电池对空气的吸收/交换更具优势，而位于装置中心的电池则相对一般。串联过程中各电堆峰值输出功率的电流对应于各单片电池的电流-电压参数见表 4。参照表 4 和表 1 可知，在电池串联方式下，随着电池片数的增加，性能较差的电池会逐渐处于过放电状态，其中 5 片电池串联时性能最差的 4 号电池会过放电 0.065 V(14%)。

表 4　串联方式峰值输出状态下各单电池理论电压

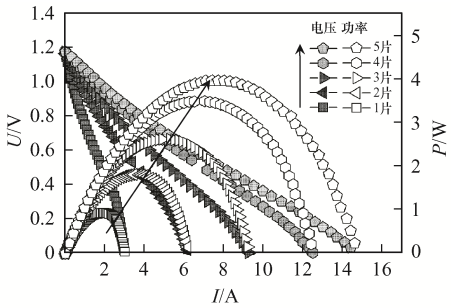
Tab. 4 Theoretical voltage value of each single cell in peak output state with series connection

电池数量	电压/V				
	1 号电池	2 号电池	3 号电池	4 号电池	5 号电池
5 片串联 (2.02 A)	0.467	0.566	0.475	0.410	0.544
4 片串联 (2.04 A)	0.467	0.566	0.475	—	0.544
3 片串联 (1.98 A)	0.477	0.576	0.485	—	—
2 片串联 (1.90 A)	0.497	—	0.505	—	—

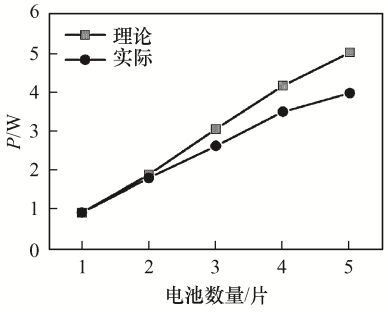
由上述结果可知，在串联方式下，随着片数的增加，电堆的峰值输出功率损失较小。损失主要来自欧姆电阻、氧交换过程(P3)、电荷转移过程(P4)。但性能相对较差的电池会处于过放电状态，这可能会影响整体电堆的性能及寿命，与前文一致性较低的 B 组电池实验结果一致。

2.2.2　并联方式下电池数量的影响

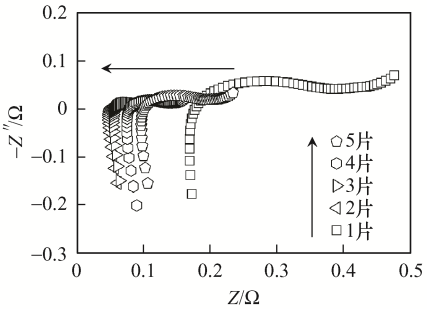
图 6(a)为并联电堆的 *U-I-P* 曲线，图 6(b)为并联电堆峰值功率的变化趋势，片数递增的影响并不呈线性变化，平均仅增加约 0.8 W/片，其中 5 片时功率损失约为 20%。图 6(c)为 1~5 片电池并联的 EIS，并联后的欧姆电阻 R_0 和极化阻抗 R_P 均明显下降。通过图 6(d)中 R_0 与理论值的对比可知，实测数据平均高于理论值约 30%。图 6(e)、(f)和(g)分别为 DRT 及其特征峰峰值、频率变化趋势。其中峰值变化较大的是对应电荷转移的 P4 峰，各并



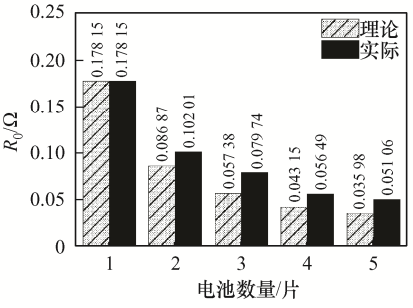
(a)1～5片电池并联的*U-I-P*曲线



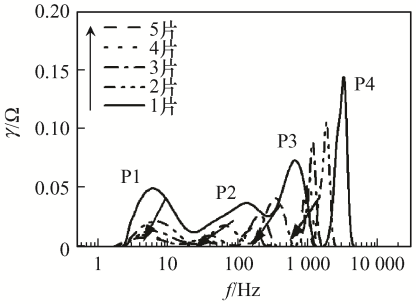
(b)功率随并联电池数量的变化



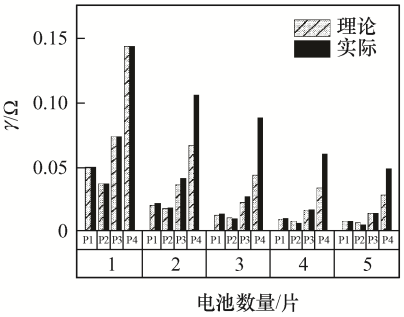
(c)1～5片电池并联的EIS



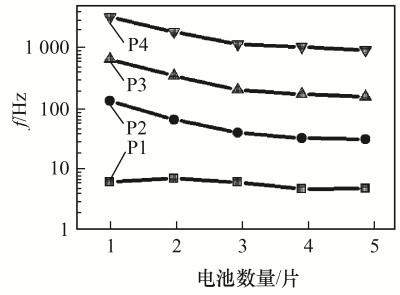
(d)R_0随并联电池数量的变化



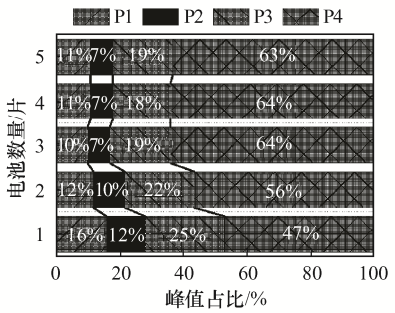
(e)1～5片电池并联的DRT



(f)特征峰峰高随电池并联数量的变化



(g)并联条件下各特征峰特征频率分布



(h)DRT各特征峰占比随并联电池数量的变化

图 6 并联电堆相关电化学性能

Fig. 6 Relevant electrochemical performance of parallel stack

联片数的实测值平均约高于理论值 77.81%，同时弛豫频率向低频移动，这代表该过程为限制性能的主要因素；气体扩散峰 P1 和阴极氧交换峰 P3 则不具备规律性。图 6(h)为各特征峰在 R_p 中的占比，P4 峰占比逐渐增大，同样表明了该峰是限制性能的主要因素。由于并联电路特性，各单电池的电压相同，各并联电堆峰值功率的电压见表 5。参照表 5 和表 1 可以观察到，在电池并联方式下，各电池放电状态均较为合适，不存在过放电状态。

表 5 并联电堆峰值输出状态的电压

Tab. 5 Voltage values in peak output state of parallel stack

电池数量	电压/V
5 片并联	0.507
4 片并联	0.518
3 片并联	0.512
2 片并联	0.507

综上所述，在电池串联、并联 2 种连接方式下，电堆内电池数量的增加均会提高电堆的整体输出功率。串联方式下电堆的峰值功率随电池片数线性增加，且与各单电池峰值功率代数和较接近；并联方式下电堆的输出功率与电池数量不呈线性关系，且低于各单电池的代数和。造成串/并联方式下峰值输出功率差距的主要原因是并联方式下的 R_0 和 P4 峰值与理论值的差距均比串联高。随着电池片数的增加，串联方式会使性能较差的电池处于过放电状态，而并联方式则未观察到上述现象。

3 结语

本文考虑了 SOFC 性能一致性存在差异的情况，借助 LSV 和 EIS 对 1 种新型扁管式 SOFC 进行了串/并联的连接特性研究。通过实验研究得出，在串联方式下能够获取更高的峰值输出功率，且与堆内电池数量呈线性相关(约 1.0 W/片)，但在电池性能一致性较低时会使性能较差的电池过放电，这可能会影响该类电池的寿命；在并联方式下，峰值输出功率略低，造成功率损失的主要原因是欧姆电阻 R_0 与理论值相差较大，以及电荷转移、离子运输过程的影响。随着堆内电池数量的增加，并联电堆的峰值输出功率仅平均增加 0.8 W/片，但该连接方式对堆内电池性能的一致性要求并不严苛，不会对性能较差的电池造成影响。以上结果表明，在堆内电池性能难以保持一致时，应充分考虑实际使用

目的选择合适的连接方式，若注重输出功率则应选择串联方式，若期望电堆长期稳定运行则应选择并联方式。

参考文献：

[1] Ashraf M A, Rashid K, Rahimipetroudi I, et al. Analyzing different planar biogas-fueled SOFC stack designs and their effects on the flow uniformity [J]. Energy, 2020, 190: 116450.

[2] Hagen A, Wulff A C, Zielke P, et al. SOFC stacks for mobile applications with excellent robustness towards thermal stresses [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(53): 29201-29211.

[3] DiGiuseppe G. The electrical performance of a 5-cell planar SOFC stack [J]. ECS Transactions, 2007, 7(1): 205-213.

[4] 汪建锋, 王荣杰, 林安辉, 等. 质子交换膜燃料电池退化预测方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3367-3378.
Wang Jianfeng, Wang Rongjie, Lin Anhui, et al. Degradation prediction method of proton exchange membrane fuel cell [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3367-3378. (in Chinese)

[5] 敖文杰, 陈家伟, 陈杰, 等. 燃料电池-锂电池混合供电系统的无源控制策略及参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 580-594.
Ao Wenjie, Chen Jiawei, Chen Jie, et al. Passivity-based control strategy and parameter design method for fuel cell-lithium battery hybrid power supply system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 580-594. (in Chinese)

[6] 张顺东. 燃料电池电堆三维温度场分布的研究与优化分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
Zhang Shundong. Research and optimization analysis of three-dimensional temperature field distribution of fuel cell [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[7] Kim D H, Bae Y, Lee S, et al. Thermal analysis of a 1-kW hydrogen-fueled solid oxide fuel cell stack by three-dimensional numerical simulation [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 222: 113213.

[8] 吴字强, 王伟, 黄亮, 等. 燃料电池稳态输出功率与效率的双目标优化[J]. 电源学报, 2019, 17(2): 32-39.
Wu Ziqiang, Wang Wei, Huang Liang, et al. Bi-objective optimization for steady-state output power and efficiency of fuel cell [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(2): 32-39. (in Chinese)

[9] Wang Tianhong, Li Qi, Wang Xiaotong, et al. A power allocation method for multistack PEMFC system considering fuel cell performance consistency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5340-5351.

[10] Hu Zunyan, Xu Liangfei, Li Jianqiu, et al. A novel diagnostic methodology for fuel cell stack health: Performance, consistency and uniformity [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 185: 611-621.

[11] Recknagle K P, Williford R E, Chick L A, et al. Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks [J]. Journal of Power Sources, 2003, 113(1): 109-114.

[12] Ding Jiao, Liu Jiang. A novel design and performance of cone-shaped tubular anode-supported segmented-in-series solid oxide fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(2): 769-773.

[13] 谢孟含. 阳极支撑型微管式固体氧化物燃料电池及小型电堆的制备与电输出性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
Xie Menghan. Preparation and output of anode-supported micro tubular solid oxide fuel cell and small-sized stacks [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017. (in Chinese)

[14] 赵富强, 祁慧青, 范晓宇, 等. PEMFC 新型压差流道传质与电化学性能研究[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 148-158.
Zhao Fuqiang, Qi Huiqing, Fan Xiaoyu, et al. Study on mass transfer and electrochemical performance of PEMFC with novel differential pressure flow channel [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 148-158. (in Chinese)

[15] 王贵荣. 阴极循环对氢燃料电池系统电压钳位及自增湿效应的研究[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 130-137.
Wang Guirong. Research on voltage clamping and

self-humidification effects of cathode circulation in hydrogen fuel cell system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 130-137. (in Chinese)

[16] Koo B, Son S, Jung S. Evaluation of the reproducibility of linear sweep voltammetry tests in microbial electrolysis cells [C]// Annual Conference of the Korean Society for Biotechnology. Seoul, South Korea, 2021: 319-319.

[17] Caliandro P, Nakajo A, Diethelm S, et al. Model-assisted identification of solid oxide cell elementary processes by electrochemical impedance spectroscopy measurements [J]. Journal of Power Sources, 2019, 436: 226838.

[18] Osinkin D A. An approach to the analysis of the impedance spectra of solid oxide fuel cell using the DRT technique [J]. Electrochimica Acta, 2021, 372: 137858.

[19] Subotić V, Königshofer B, Juričić Đ, et al. Detailed insight into processes of reversible solid oxide cells and stacks using DRT analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113509.

[20] Sumi H, Shimada H, Yamaguchi Y, et al. Distribution of relaxation times analysis for optimization of anode thickness in metal-supported microtubular solid oxide fuel cells [J]. ECS Transactions, 2017, 78(1): 2151-2157.

[21] Hong J, Bhardwaj A, Bae H, et al. Electrochemical impedance analysis of SOFC with transmission line model using distribution of relaxation times (DRT) [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(11): 114504.

[22] Wan Tinghei, Saccoccio M, Chen Chi, et al. Influence of the discretization methods on the distribution of relaxation times deconvolution: Implementing radial basis functions with DRTtools [J]. Electrochimica Acta, 2015, 184: 483-499.

[23] 张旸. 对称固体氧化物燃料电池电极材料结构及性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
Zhang Yang. Structure and properties of electrode materials for symmetrical solid oxide fuel cell [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese)

[24] Zhang Cuijuan, Ji Chengxiang, Wang Wensheng, et al. A dynamic solid oxide fuel cell empowered by the built-in iron-bed solid fuel [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(12): 3746-3753.



刘威

作者简介：

刘威(1998—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：能源利用，能源互联网。E-mail：liuwei@stu.zafu.edu.cn。

吕佳(1989—)，女，博士，讲师。研究方向：能源互联网，氢能。E-mail：jialv@zafu.edu.cn。

孙小毛(1991—)，男，硕士，工程师。研究方向：低碳能源技术。E-mail：xisu@z-etech.cn。

田梁玉(1990—)，男，硕士，工程师。研究方向：氢能示范工程管理，氢电耦合能量转化研究。E-mail：tly13645735088@163.com。

胡强(1979—)，男，博士，研究员。研究方向：能源转换。E-mail：qihu@z-etech.cn。

吴剑(1985—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：清洁能源，氢能，固体氧化物燃料电池。E-mail：wujian@zafu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)