

DOI: 10.19666/j.rlfed.202608020

流道高度公差对固体氧化物电池堆性能影响的数值研究

王晓艾¹, 熊星宇^{2*}, 吴云飞², 胡亮², 张瑞云³, 彭苏萍⁴

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 机械与电气工程学院, 北京 100083; 3. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209; 4. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

[摘要] 【目的】针对固体氧化物电池 (SOC) 电堆制造装配中金属连接体流道高度尺寸公差引发的内部流动非均匀性问题, 评估其对单层及多层电堆性能与长期稳定性的影响, 为公差合理设定提供依据。【方法】本文构建热-质-电-化多场耦合数值模型, 针对单层电堆设置流道均匀高度、随机高度、向两侧递减和向两侧递增四种分布, 并对比三层电堆层间高度一致 (DN1) 与不一致 (DN2) 工况, 在 0.8 V 恒压工况下分析电流、流动与传质特性。【结果】单层电堆中, 四种高度分布的宏观电流密度差异小于 0.5%, 界面电流密度标准差最大相对偏差仅 0.18%, 电流分布对高度公差敏感; 然而, 进一步的流动与传质分析揭示了隐藏的不均匀性。与均匀案例相比, 所有存在高度偏差案例的燃料极流道压降均增加了约 28.6%。三层电堆中, DN1 各层电压近乎相等, 层间电压误差仅 0.4%, 气流变异系数为 1.8%, 气体分配均匀; DN2 顶层流道后部氢气完全耗尽, 浓差极化加剧, 电压持续衰减, 层间电压误差达 6.7%, 气流变异系数升至 18.7%。【结论】单层电池流道高度公差可在当前范围内适度放宽以降低制造成本, 但电堆装配须严格控制层间尺寸一致性。本文的研究为 SOC 电堆制造公差合理设定提供理论依据。

[关键词] 固体氧化物电池; 流道高度; 均匀性; 数值模拟

[引用本文格式] (本段作者勿动) 作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Numerical Study on the Effects of Flow Channel Height Tolerances on the Performance of Solid Oxide Cell Stacks

Wang Xiaoi¹, Xiong Xingyu^{2*}, Wu Yunfei², Hu Liang², Zhang Ruiyun³, Peng Suping⁴

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 4. State Key Laboratory Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: **Purpose:** Dimensional tolerances in the flow-channel height of metallic interconnects are unavoidable during the manufacturing and assembly of solid oxide cell (SOC) stacks. Such tolerances can lead to non-uniform internal flow distribution and may threaten cell performance and long-term stability. This study aims to evaluate the effects of flow-channel height tolerance on the coupled electrical, flow, and mass-transfer behavior in single-layer and three-layer SOC stacks, and to provide a theoretical basis for rational tolerance specification. **Methods:** A

收稿日期: XXXX-XX-XX 修回日期: XXXX-XX-XX 接受日期: XXXX-XX-XX 网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 自治区重点研发任务专项项目 (2025B01013); 国家自然科学基金面上项目 (52576247)

Supported by: Key Research and Development Task Special Project of the Autonomous Region (2025B01013); General Program of the National Natural Science Foundation of China (52576247)

第一作者简介: 王晓艾 (1997 年), 女, 在读博士, 固体氧化物电池多场模拟仿真, ai1984935126@126.com。

通信作者简介: 熊星宇 (1985 年), 男, 博士, 教授, 固体氧化物电池, xiongxingyu@hotmail.com。

coupled thermal-mass-electrical-chemical multiphysics model was developed for SOC stacks. The model integrates an electrochemical model with momentum, species, and energy conservation equations, allowing analysis of current density, gas-flow distribution, pressure drop, and temperature. For the single-layer stack, four flow-channel height profiles were considered: uniform height, random height, height decreasing toward both sides, and height increasing toward both sides. For the three-layer stack, two comparative cases were further examined: consistent layer heights (DN1) and inconsistent layer heights (DN2). All simulations were performed under constant-voltage operation at 0.8 V. Macroscopic and interfacial current-density distributions, gas distribution, fuel-channel pressure drop, interlayer voltage variation, and the coefficient of variation (C_v) of gas flow were systematically compared. **Results:** For the single-layer stack, the difference in macroscopic current density among the four flow-channel height profiles was less than 0.5%, and the maximum relative deviation of the standard deviation of the interfacial current density was only 0.18%. This indicates that the current distribution was insensitive to flow-channel height tolerance within the studied range. However, further analysis of flow and mass transfer revealed hidden non-uniformity. Under all height-deviation scenarios, the fuel-side channel pressure drop increased by approximately 28.6% compared with the uniform case, indicating that the flow field was far more sensitive to height tolerance than the electrical performance. For the three-layer stack, the layer voltages in DN1 were nearly identical, with an interlayer voltage error of only 0.4% and a gas-flow C_v of 1.8%, indicating excellent gas-distribution uniformity. In contrast, in DN2, complete hydrogen depletion occurred in the rear region of the top-layer flow channel, concentration polarization intensified, and the voltage decreased continuously; the interlayer voltage error reached 6.7%, and the gas-flow C_v was 18.7%, indicating a highly non-uniform gas distribution. These results show that although the current distribution in a single cell is relatively tolerant of flow-channel height deviations, the flow and mass-transfer fields are strongly affected. In multilayer stacks, interlayer height inconsistency can lead to severe local fuel starvation and performance degradation. **Conclusions:** Within the range studied, the flow-channel height tolerance for single cells can be moderately relaxed to reduce manufacturing costs. However, interlayer dimensional consistency must be strictly controlled during stack assembly. The proposed coupled model and findings provide a theoretical basis for formulating reasonable manufacturing tolerances for SOC stacks.

Key words: Solid oxide cell(SOC); Flow channel height; Uniformity; Numerical simulation

固体氧化物电池(SOC)以其清洁运行和高效率著称,近年来作为一种前景广阔的能源转换技术受到广泛关注^[1]。凭借其优异的能源效率、全固态构型和燃料灵活性,SOC已成为发电应用领域的领先候选技术^[2]。过去几十年间,SOC技术取得了长足发展,当前的挑战在于如何在保持效率和可靠性的前提下降低成本,推动该技术走向商业化应用^[3]。其中,电堆内部的流动均匀性与热管理是决定长期稳定性的关键因素之一^[4]。

在SOC电堆的实际制造与装配过程中,电池生产、电堆组装环节存在的尺寸公差及安装误差,显著影响了电池性能与长期运行稳定性。生产过程中的尺寸公差会导致电池组中各单体电池性能的差异,进而可能在运行中引发严重问题。金属连接体对尺寸公差尤为敏感,其肋片结构、流道宽度与高度直接影响电化学性能与热-电分布^[5, 6]。连接体制造中常用的加工技术包括机加工、蚀刻和热压成型^[7];其中,机加工精度可达微米级别;蚀刻精度通常与材料厚度相关,例如0.1mm厚材料的蚀刻精度在 $\pm 0.01\text{mm}$,而0.5mm厚材料的蚀刻精度则为 $\pm 0.05\text{mm}$;热压成型过程中存在的回弹效应^[8],这些

均会导致实际流道高度出现随机误差或系统性变形。

大量研究已证实,流道几何与歧管构型对电堆内部燃料分布、温度梯度及电流密度均匀性具有决定性影响。不同歧管设计会导致显著不同的流动均匀性^[9]。歧管进出口宽度比是影响大尺寸平板SOFC流动均匀性的关键参数^[10]。内外歧管对比研究表明,流动不均匀会引发局部燃料饥饿,增加过电位和热梯度,进而提高热应力机械失效风险^[11]。在U型与Z型内歧管对比中^[12],优化构型可降低峰值电流密度,即使总功率输出相近,内部多物理场分布的不均匀性仍会对长期耐久性产生决定性影响。高燃料利用率运行条件下,这种不均匀性会导致更显著的性能衰减^[13]。热-机械耦合模拟也表明,不均匀温度分布可诱发显著的拉伸热应力,成为机械失效的主要诱因^[14, 15]。

在共享进气歧管的电堆构型下,连接体上流道高度公差会直接改变各层或各流道的局部流动阻力,由于层流条件下压降对高度变化高度敏感,微小的高度偏差即可引起明显的流量再分配,使低阻力通道获得更多燃料、高阻力通道供气不足,从而

形成显著的层间流动非均匀性，进一步造成燃料分配不均^[16]，使各区域电化学反应速率不一致，进而造成电流密度分布不均，电流密度的非均匀分布会引起局部热点^[17, 18]以及显著增大温度梯度^[19]。因此，控制尺寸公差以维持流动与温度场均匀性，是保证电化性能结构和结构完整性的前提。

近年来，高精度测量技术的发展为公差控制提供了新手段。基于激光三角测量的非接触方法^[20]已被证明可实现微米级轮廓重建。Yuan 等人^[21]提出了一种基于激光三角测量和小波变换的自动检测算法，在板片整体变形条件下可实现 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 的测量偏差，该思路为 SOC 金属连接体的尺寸公差控制提供了可借鉴的技术路径，有助于降低装配误差、提升电堆一致性。

然而，目前研究多侧重于歧管与流道宏观几何对均匀性的影响，针对金属连接体流道高度的微观尺寸公差，特别是不同公差分布模式（如随机误差与系统性变形）对电池内部流动、传质及电化行为的作用机制尚不清晰。为此，本文构建一个集热-质-电-化多场耦合的数值模型，系统考察燃料极流道高度误差对 SOC 性能的影响。在单层电池堆层面，设计均匀高度、随机高度、高度向两侧逐渐增加及向两侧逐渐减小四种案例；在多片电池堆层面，针对三层电堆设置各层流道高度完全一致与各层高度不一致的对比工况。通过仿真对比不同公差模式下的多物理场分布与整体性能差异，揭示流道高度公差分布的影响规律，以为为连接体制造公差的合理设定提供理论参考。

1 模型与方法

1.1 几何模型与计算域

本文模型从单层电池堆和三层电池堆变化，如图 1，详细展示了模型流道高度幅值在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内变化示意图、单层堆结构示意图以及三层堆结构示意图。在单层电池堆层面设置 4 种模型案例，详细尺寸设置见表 1。表 1 所设定的流道高度变化趋势，均指沿同一截面内不同平行流道之间的高度差异。表 1 中的案例随机指的是单片堆中每根流道的高度在 $0.35\text{--}0.45\text{mm}$ 的范围内随机；案例向两侧递减指的是中间流道高度 0.45mm ，其余流道高度向两侧线性递减至 0.35mm ；案例向两侧递增指的是中间流道高度 0.35mm ，其余流道高度向两侧线性增加至 0.45mm 的高度分布。三层堆层面设置 2 种案例，

详细尺寸设置见表 2。三层堆模型结构采用同一进气歧管结构，案例 1 为三层电堆各层流道高度一致，案例 2 为三层电堆各层流道高度不一致，顶层、中间层、底层流道高度分别为 0.35mm 、 0.4mm 、 0.45mm 。

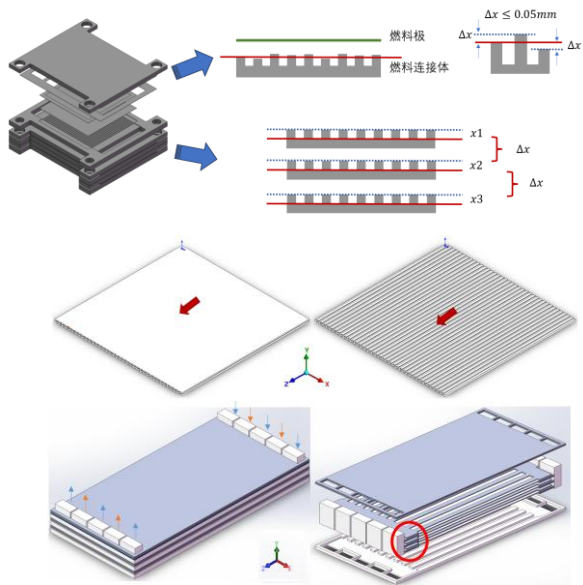


图 1 模型设计示意图、单层堆模型结构以及三层堆结构示意图

Figure 1. Schematic diagrams of the model design, the single-cell stack structure, and the three-cell stack structure.

表 1 单片堆模型案例
Table 1. Single-stack model cases

DN	均匀性	高度变化趋势	流道高度 (mm)
a	是	无	0.4
b	否	随机	0.35-0.45
c	否	向两侧递减	0.35-0.45
d	否	向两侧递增	0.35-0.45

表 2 三层电堆模型案例
Table 2. Multi-stack model cases

DN	顶层流道高度 (mm)	中间层流道高度 (mm)	底层流道高度 (mm)
1	0.4	0.4	0.4
2	0.35	0.4	0.45

1.2 边界条件

数值模拟中规定电堆入口条件为质量流量入口，出口侧为压力出口，压力为 1 个大气压，除此之外，外边界为对流和辐射混合边界，主要为与外界保温环境进行对流和辐射换热，传热系数 $10\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ，辐射系数 0.8，电堆上下两个面主要

与导电电压板连接^[22]。阳极和阴极侧的固相电位有外边界，代表外部电路，由电池产生的电流通过规定的边界，即电流集电极。在阴极侧设为常数值，代表恒电位边界条件。

表 3 数值模拟几何参数值

Table 3. Geometric parameter values used in numerical simulation

变量(mm)	数值
流道宽度, W a-channel	1.6
阳极流道高度, H a-channel	0.35-0.45
阴极流道高度, H c-channel	0.8
流道(肋)宽度, Wrib	1.6
连接体高度	0.5
阳极扩散层厚度	0.23
阳极功能层厚度	0.02
电解质厚度	0.016
阴极功能层厚度	0.02
阴极扩散层厚度	0.03
电池长度	120
电池宽度	120

1.3 计算过程

采用商业软件 ANSYS Fluent 2024R1 内置的全耦合燃料电池模块，基于有限体积法（FVM）实现了完全耦合的控制方程。在计算过程中，通过软件的用户界面设置了燃料电池模型中使用的参数值和适当的边界条件。当所有求解变量的迭代残差在连续两个步骤之间小于 10^{-6} 时，认为解已经收敛。

1.4 气流分布均匀性评价指标

流道均匀性指数 C_V (Coefficient of Variation) 是一个用来衡量流道中气体分布均匀性的指标。它通过量化流道中心速度之间的差异来评估流道的均匀性。

$$C_V = \frac{S_T}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i} \quad (1)$$

其中， u_i 是流道 i 中心处的速度大小。 n 是相关流道的总数。 S_T 是 u_i 的标准差，定义为：

$$S_T = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(u_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

C_V 值越大，表明流道中心气体流速之间的差异越大，即流道的均匀性越差； C_V 值越小，表明流道的均匀性越好。在研究中，通过优化流道设计，可

以降低 C_V 值，从而提高 SOC 的效率和性能。

1.5 数学模型

1.5.1 电化模型

考虑到 SOFC 电池运行期间的各种可能的能量损失，SOFC 损耗模型电压方程可以写成如下形式：

$$V_{out} = E_N - \eta_{act,a} - \eta_{act,c} - \eta_{ohm} - \eta_{conc,a} - \eta_{conc,c} \quad (3)$$

式中 E_N 表示 SOFC 电池的能斯特电压， η_{ohm} 部分是欧姆极化损失， $\eta_{conc,a}$ 和 $\eta_{conc,c}$ 分别表示阳极侧和阴极侧的浓差损失， $\eta_{act,a}$ 和 $\eta_{act,c}$ 是分别是阳极与阴极的活化损失。Nernst 平衡电动势计算公式如下：

$$E_N = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right) + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right) \quad (4)$$

其中， E_0 为标准能斯特电动势， R 为气体常数 ($8.314 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$)， F 是法拉第常数 (96485 C/mol)， P_{H_2} 、 P_{O_2} 、 P_{H_2O} 为不同物质的分压， P_0 系统初始压力， T 是电池的工作温度 (K)。

使用 Butler-Volmer 方程表达电流密度与活化电势之间的联系，表达如下：

$$J = J_{0,i} \left[\exp \left(\alpha_i \frac{nF}{RT} \eta_{act,i} \right) - \exp \left(-\beta_i \frac{nF}{RT} \eta_{act,i} \right) \right] \quad (5)$$

$i = a, c.$

其中， J_0 为交换电流密度， α_i 、 β_i 为 BV 方程相关系数， n 为反应转移电荷数。

根据欧姆定律，欧姆极化损耗表示如下：

$$\eta_{ohm} = j \left(\frac{L}{\sigma_{eff} S} \right) = \frac{j}{S} \left(\frac{L}{\sigma_{eff}} \right) = i \cdot ASR \quad (6)$$

其中， j 是电流强度， i 为电流密度， S 是导电材料的横截面积， σ_{eff} 为材料的有效导电率， L 为导体长度， ASR 为材料的面电阻。

1.5.2 流体动力学模型

气体的传输采用混合物平均扩散模型进行描述，同时考虑了分子扩散与 Knudsen 扩散的影响，物质的质量守恒采用如下方程进行描述：

$$\nabla N_i + \rho(u \cdot \nabla) \omega_i = S_{m,i} \quad (7)$$

N_i 为物质 i 的质量流率， ρ 为物质密度； u 为气体的速度矢量， ω_i 为物质 i 的质量分数， $S_{m,i}$ 为质量源项，在 SOFC 中质量源项为电化学反应的物质的产生与消耗的表达式。

$$N_i = - \left(\rho D_{i,mK} \nabla \omega_i + \rho \omega_i D_{i,mK} \frac{\nabla M}{M} \right) \quad (8)$$

其中, $D_{i,mK}$ 为混合平均扩散系数, 由于阴极侧和阳极侧的混合气体都只有两种气体, 故而该扩散系数可以采用二元有效扩散系数 $D_{ij,eff}$ 与有效 Knudsen 系数 $D_{iK,eff}$ 进行表示。

$$D_{i,mK} = \frac{D_{ij,eff} D_{iK,eff}}{D_{ij,eff} + x_i D_{iK,eff} + x_j D_{iK,eff}} \quad (9)$$

混合气体的二元扩散系数与温度压力以及分子量相关。计算方程如下:

$$D_{ij} = 3.198 \times 10^{-8} \times \frac{T^{1.75}}{P(V_i^{1/3} + V_j^{1/3})^2} \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中, V_i 和 V_j 为物质 i 和物质 j 的动力学扩散体积。 M_i 和 M_j 为两种物质的摩尔质量。

质量源项由电化学反应产生, 只存在于电极反应功能区, 其余位置不存在物质的生成与消耗, SOFC 中氢气、氧气和水的质量源项如下所示:

$$\begin{aligned} S_{m,H_2} &= -\frac{j}{2F} M_{H_2} \\ S_{m,H_2O} &= \frac{j}{2F} M_{H_2O} \\ S_{m,O_2} &= -\frac{j}{4F} M_{O_2} \end{aligned} \quad (11)$$

动量方程应用 Navier-Stokes 方程进行描述, 方程如下:

$$\varepsilon \nabla \cdot (\rho u u) = -\varepsilon \nabla P + \nabla \cdot (\varepsilon \mu_{eff} \nabla u) + S_u \quad (12)$$

μ_{eff} 是有效动力粘性系数, S_u 是动量源项。基于达西定律, 多孔介质中的动量源项为:

$$S_u = -\frac{\mu_{eff}}{K} \varepsilon^2 u \quad (13)$$

K 为多孔材料渗透率。对于气体的有效动力粘性系数, 由理想气体定律可得:

$$\mu_{eff} = \sum_i \frac{y_i \mu_i}{\sum_k y_i \phi_{ik}} \quad (14)$$

$$\phi_{ik} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_k} \right)^{1/2} \left(\frac{M_k}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_i}{M_k} \right) \right]^{1/2}} \quad (15)$$

其中, μ 和 M 分别为各气体单质的动力粘度系数和分子量。

表 4 数值模拟相关参数设置^[22]

Table 4. Parameter settings for the numerical simulation^[22]

参数	值
阳极气体粘度	1.6e-5
阴极气体粘度	2.7e-5
阳极/阴极孔隙率	0.3/0.3
阳极/阴极交换电流密度(A/m ²)	5500/61
阳极 BV 方程系数	0.6,0.45
阴极 BV 方程系数	0.4,1.55
阳极/阴极活化比表面积(m ⁻¹)	1.5e5/2.9e5
H ₂ 扩散体积(m ² /mol)	6.12e-6
H ₂ O 扩散体积(m ² /mol)	1.31e-5
O ₂ 扩散体积(m ² /mol)	1.63e-5
N ₂ 扩散体积(m ² /mol)	1.85e-5
阳极/阴极电导率(S/m)	100000/7700
电解质电导率(S/m)	1.4
阳极/阴极密度(kg/m ³)	6870/6570
电解质密度(kg/m ³)	5900
阳极/阴极热导率(W/mk)	6/11
电解质热导率(W/mk)	2.7
阳极/阴极比热(J/kg·K)	595/573
电解质比热(J/kg·K)	606
阳极/阴极渗透率(m ²)	2e-10/2e-10
阳极进气量(kg/s)	1.52e-6
阴极进气量(kg/s)	8.26e-4

1.5.3 能量守恒方程

SOFC 中的能量守恒方程表示为:

$$\rho c_p u \nabla T - \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) = S_h \quad (16)$$

其中, 左侧第一项为热传导, 第二项为流体热对流, 在固体区域内只存在热传导, 右侧为能量源项, k_{eff} 为混合气体有效热传导系数, c_p 是比热容。混合气体比热容由混合定律可得:

$$c_p = \sum_i x_i c_{i,p} \quad (17)$$

x_i 为组分 i 的摩尔分数, $c_{i,p}$ 是组分 i 的摩尔热容, 物质的摩尔热容是与温度相关的特性^[23]:

$$c_{i,p} = \sum_{k=0}^6 \alpha_k \left(\frac{T}{1000} \right)^k \quad (18)$$

α_k 为摩尔热容系数。热源由三部分组成, 欧姆热、活化热以及熵热。在电极中三种热源同时存在, 在连接体部分由于只有电流通过只存在相应的欧姆发热。

1.6 模型验证与网格独立性检验

本文进行 10 cm×10 cm 单片电池堆实验以验证模型准确性。实验在 750℃ 下运行, 燃料侧进气量为 0.2L/min N₂ 加 0.5L/min H₂, 空气侧进气量是 10L/min 空气, 具体实物图及数据见图 2。为确保模型验证的可靠性, 数值模型的入口边界条件与实验工况严格一致。根据质量流量控制器标准状态

(25 °C, 1 atm) 折算, 燃料侧 N_2 和 H_2 的质量流量分别设为 3.8×10^{-6} kg/s 和 6.9×10^{-7} kg/s。需特别指出的是, 本文为完成后续研究, 另设了燃料进气量 (如表 4 所示), 该值不参与本节的模型验证过程。

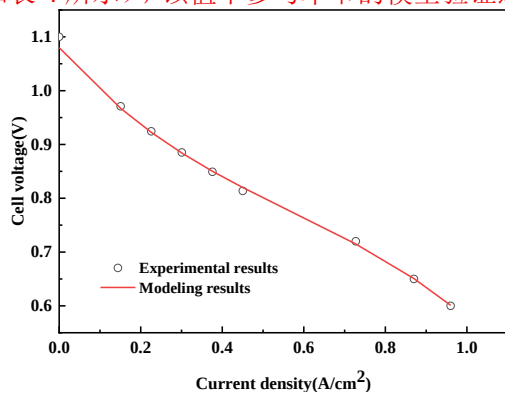


图 2 数值模拟与实验数据图。

Figure 2. Comparison of numerical simulation results with experimental data.

数值模拟通过与实验结果进行拟合, 可以观察到, 随着电流密度的增加, 电池电压呈现典型的下降趋势。建模结果与实验数据结果吻合良好。进行了网格独立性研究, 随着网格的逐渐细化, 与网格相关的计算误差会消失。

2 结果与讨论

2.1 流道高度公差对单片电池堆的影响

2.1.1 对电性能和温度的影响

图 3 展示了 0.8 V 恒压条件下, 四种流道高度分布案例的燃料极-电解质界面电流密度云图与电解质温度分布云图。0.8V 运行工况下, 电堆已处在中高电流密度阶段, 燃料利用率较高, 欧姆极化与浓差极化显著, 但四种案例的总电流密度差异小于 0.5%, 表明单片堆流道间高度公差对宏观电性能影响不大。进一步统计表征显示, 四种案例的电流密度分布直方图高度重合, 标准差最大相对偏差仅 0.18%。这表明, 在当前公差范围内, 流道高度的微观几何偏差对界面电流分布均匀性未产生显著影响。

各案例的温度分布模式基本一致, 均呈现入口区域温度略低、沿流道方向逐渐升高的趋势, 与电化学反应放热及燃料浓度沿程递减的特征相符。四种案例的整体温差与温度梯度未表现出显著差异。但需注意, 电流分布的不敏感性并不等同于传质过程的无差异性, 流道高度偏差对氢气浓度分布及电堆层间流量分配的影响仍需进一步考察。

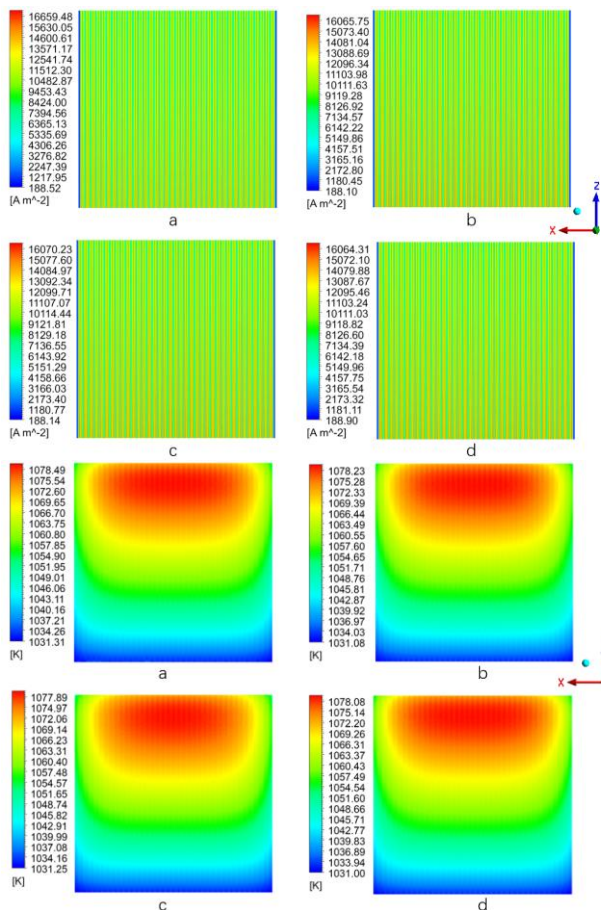


图 3 燃料极-电解质界面电流密度云图以及温度云图 (a, 直线形; b, 随机; c, 递减; d, 递增;)。

Figure 3. Contour plots of current density and temperature at the fuel electrode-electrolyte interface: (a) linear, (b) random, (c) decreasing, (d) increasing.

2.1.2 对气体分布和过电势的影响

尽管界面电流密度分布对四种流道高度模式不敏感, 但燃料极侧传质过程已呈现可辨识的差异。图 4 和 5 为燃料极-电解质界面氢气摩尔分数与燃料极极过电势的云图对比。可以观察到, 均匀高度案例的氢气浓度沿流道方向均匀递减, 过电势分布亦较为均一; 而向两侧增加案例的中间流道区域氢气摩尔分数明显降低, 对应位置的浓差过电势显著升高。

值得注意的是, 在 0.8 V 工作电压下, 上述传质差异尚未引发电流密度分布的显著响应。然而, 局部氢气摩尔分数的降低与过电势的升高预示了潜在风险: 若电池运行于更高电流密度或更高燃料利用率条件下, 边缘区域的传质限制可能进一步加剧, 甚至触发局部燃料饥饿, 进而诱发燃料极氧化、热应力集中等长期衰减问题。因此, 在连接体流道高度的公差设计中, 需关注边缘流道尺寸偏差对局

部传质的潜在影响。

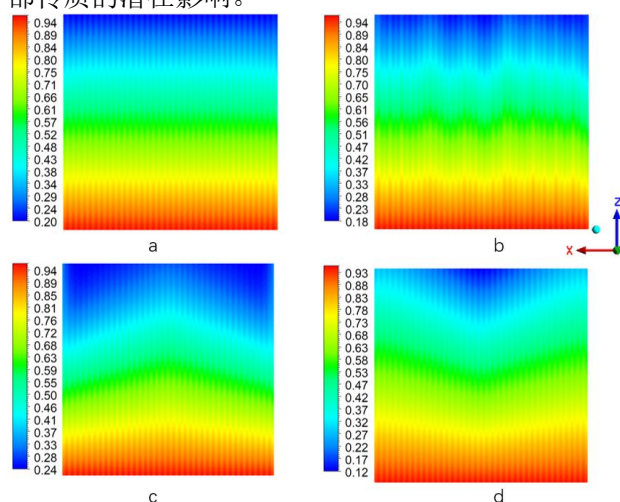


图 4 燃料极功能层中间截面氢气分布云图 (a, 直线形; b, 随机; c, 递减; d, 递增;)。

Figure 4. Contour plots of hydrogen gas distribution at the middle cross-section of the fuel electrode functional layer: (a) linear, (b) random, (c) decreasing, (d) increasing.

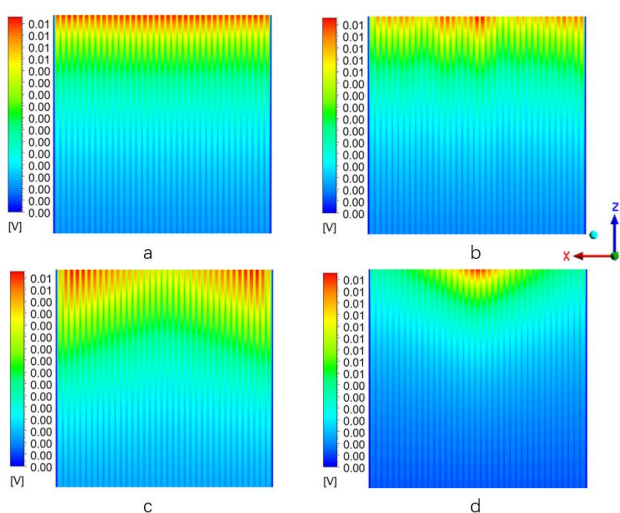


图 5 燃料极功能层中间截面过电势云图 (a, 直线形; b, 随机; c, 递减; d, 递增;)。

Figure 5. Contour plots of overpotential at the middle cross-section of the fuel electrode functional layer: (a) linear, (b) random, (c) decreasing, (d) increasing.

2.1.3 对压降的影响

图 6 为四种流道高度分布案例下, 燃料极侧流道内部的压力分布云图。所有案例均呈现入口压力最高、沿流道方向逐渐递减的分布特征。其中, 均匀高度案例的流道压降最低, 约 210 Pa; 随机高度、向两侧减小及向两侧增加案例的压降均升至 270 Pa 左右, 三者差异不大。

对于矩形截面流道, 压降对高度变化较为敏感。一旦流道高度出现偏差, 阻力增量并非随高度

线性变化, 而是由较小截面区域的阻力非线性主导。均匀高度案例各流道高度一致, 流动分配均衡, 整体压损最小; 三种非均匀高度分布虽流道高度的排列顺序不同, 但各自模型中的高度公差幅值一致, 使得各工况中均存在相同或相近的局部最小高度特征。因此, 三种不同的空间分布形态产生了几乎相同的流动阻力增加幅度, 约 28.6%。这一增幅虽不会导致电池性能的急剧衰减, 但在长寿命运行中可能造成额外的系统能耗。因此, 在制定连接体流道高度公差标准时, 除电流分布均匀性外, 也将流动阻力纳入考量。

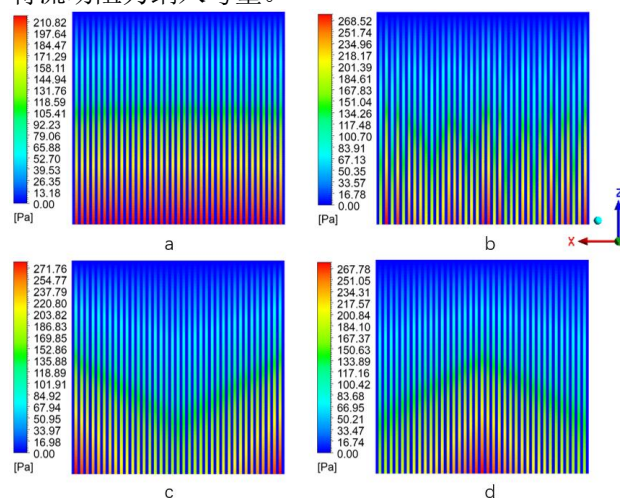


图 6 沿燃料极通道的压降分布云图 (a, 直线形; b, 随机; c, 递减; d, 递增;)。

Figure 6. Contour plots of pressure drop distribution along the fuel electrode channel: (a) linear, (b) random, (c) decreasing, (d) increasing.

2.2 流道高度公差对多片电池堆的影响

上述单堆数值结果分析表明, 单片电池堆内部的流道高度偏差主要影响流动阻力与局部传质, 对宏观电性能的扰动有限。然而, 实际电堆由多层电池串联而成, 层间尺寸偏差可能引发各层工作流量的重新分配, 其耦合效应远非单层结果的简单叠加。为此, 本节进一步对比三层电堆在各层高度一致 (DN1) 与不一致 (DN2) 工况下的性能差异。

2.2.1 对电性能的影响

DN1 各层级电压表现出高度的一致性, 其电压值近乎相等; 相比之下, DN2 的电压值则呈现出显著的递减趋势, 具体表现为底层电压为 0.738V, 中间层电压降至 0.729V, 而顶层电压进一步降低至 0.689V。通过电堆一致性方法的计算, 得出 DN1 的层间电压误差维持在约 0.4% 的较低水平; 然而, DN2 的层间电压误差却高达 6.7%, 这一显著差异

凸显了 DN2 在层间电压一致性方面的显著缺陷,进而反映出其一致性效果不佳的问题。

在电堆系统中,层间存在的电压差异可能对电池堆的长期结构稳定性构成潜在威胁,最终可能导致整个电池堆的失效,平面 SOC 电堆内电池电压的分布特性主要由质量流率分布和温度分布的综合影响决定。接下来我们将深入分析短堆内部的气体分布特性和温度分布特性。

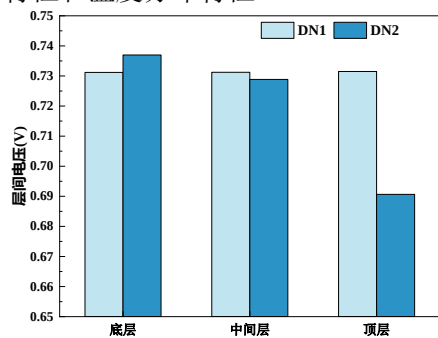


图 7 DN1 和 DN2 层间电压分布图。

Figure 7. Voltage distribution of the DN1 and DN2 layers.

2.2.2 对流速均匀性的影响

通过对 DN1 与 DN2 两种模型在流道流速方面的详细对比分析, DN1 模型: $STD=0.01229$, $C_v=1.8\%$ 。DN2 模型: $STD=0.124312$, $C_v=18.7\%$ 。相比之下, DN2 的 C_v 值远大于 DN1 的 C_v 值,清晰地揭示了 DN2 模型中气体分布的高度不均匀性。

流速的显著不均匀性不仅反映了流道内气体流动的复杂性,更重要的是,它直接关联到电堆的性能稳定性与长期运行可靠性。在 DN2 模型中,流速的高度不均匀导致局部区域氢气供应不足,进而引发浓差极化现象的加剧,增加电池内阻,降低电压输出,并最终损害电堆的整体效率与使用寿命。从实际工程应用的角度出发, DN2 模型流速分布的不均匀性侧面验证了电堆在实际加工中可能存在的误差或不一致性,这些细微的差异在累积效应下,可能显著影响气体的均匀分配与流动,从而成为电堆性能下降的重要诱因。

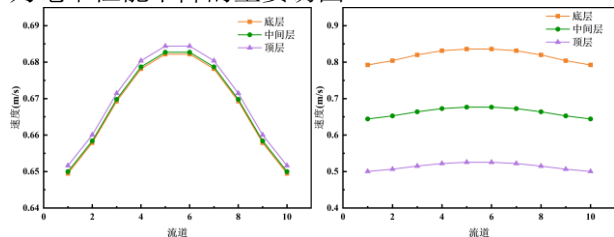


图 8 DN1 和 DN2 每层流道速度分布 (上、下)。

Figure 8. Velocity distribution in flow channels of each layer of DN1 and DN2 (up and down).

2.2.3 对气体分布的影响

根据图 9 发现, DN2 顶层电池随着反应的进行浓差极化对性能的影响越来越高,导致电压出现明显的下降趋势。基于图上每层的氢气分布观测量结果,注意到在 DN2 流道的后部区域,氢气已经完全耗尽。这一现象揭示了随着电化学反应的持续进行,氢气在顶层燃料电池中的浓度梯度显著增大,进而加剧了浓差极化的效应。浓差极化的加剧会直接导致电池内部电阻的增加,从而引发电池电压的显著下降。具体而言,由于氢气在流道后部的缺乏,顶层电池中的电化学反应速率受到限制,未能充分利用活性物质进行能量转换,这不仅降低了 SOC 的整体效率,还加速了电池性能的衰退。

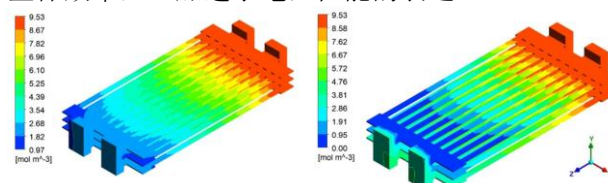


图 9 DN1 和 DN2 燃料极流道 H2 摩尔分布云图 (上、下)。

Figure 9. Contour plots of H₂ mole fraction distribution in fuel electrode flow channels of DN1 and DN2 (up and down).

2.2.4 对温度的影响

在图 10 中观察到 DN1 与 DN2 两种模型在流道温度分布上呈现出相似的趋势,具体表现为温度最高点均位于流道的中间部位。然而,在对比两者的整体温度水平时,观察图例发现 DN2 模型相较于 DN1 模型,其整体温度高出约 4K。这一温度差异的根源在于 DN2 模型中气体分布的不均匀性。由于气体在 DN2 流道内的流动呈现出显著的非均匀性,导致每一层燃料电池单元的热源强度存在差异。在上述分析中,在 DN2 的运行过程中,顶层氢气供应出现了局部饥饿现象,即部分区域氢气浓度显著降低,从而引发了浓差极化的加剧,进而产生更多的热量,使得顶层热源的温度显著升高。

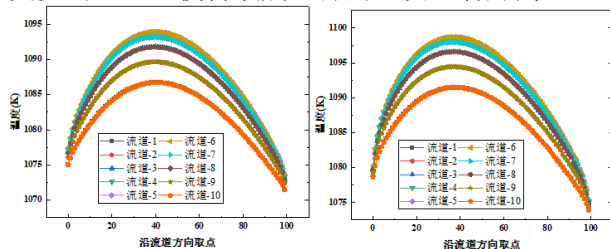


图 10 DN1 和 DN2 顶层各流道温度分布 (上、下)。

Figure 10. Temperature distribution in each flow channel of

the top layer of DN1 and DN2 (up and down).

结论

本文通过多物理场耦合仿真,系统研究了金属连接体流道高度公差对 SOC 单层电池堆及三层电堆性能的影响,得到以下主要结论:

(1) 在 0.8 V 恒压放电条件下,四种流道高度分布模式的单层电池宏观电流密度差异小于 0.5%,阳极-电解质界面电流密度标准差最大相对偏差仅 0.18%,分布直方图高度重合。单层电池的电化学输出与电流分布均匀性对当前公差范围内的流道高度偏差不敏感。

(2) 尽管电流分布差异不显著,燃料极侧传质与流动过程已呈现规律性差异。向两侧减小案例的边缘流道氢气摩尔分数最低,浓差过电势最高,流

道压降较均匀基准增加约 28.6%。

(3) 三层电堆对比表明, DN1 层间电压误差仅 0.4%, C_v 为 1.8%, 气体分配均匀性优异; 而 DN2 顶层流道后部氢气完全耗尽, 浓差极化加剧, 电压持续衰减, 层间电压误差高达 6.7%, C_v 值升至 18.7%。这一差异表明, 层间尺寸失配会导致电堆严重偏离设计工况, 其负面效应呈系统性放大, 远大于单层内部局部偏差的影响。此外, DN2 顶层平均温度较 DN1 升高约 4 K, 温度非均匀性进一步加剧了热应力风险。对于单层电池堆而言, 适度放宽公差要求以降低制造成本具有工程可行性。但在多片电池堆层面, 必须严格控制各重复单元之间的流道高度一致性, 避免因层间尺寸失配引发系统性的流动不均与性能衰减。

[参 考 文 献]

- [1] WANG Z, TANG H, WU Z, et al. Evaluating fuel cell power systems for coastal and inland waterway vessels: Technical and economic perspectives [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 323.
- [2] MA Y, YANG C, WANG Z, et al. 5E analysis and optimization of marine parallel SOFC-engine-WHR integrated systems supplied with different low carbon fuel combinations [J]. *Energy*, 2025, 332.
- [3] TANG H, WANG Z, LI S, et al. A 3D energy topology network modeling approach for cross-flow SOFCs: comprehensive evaluation of multi-physics field coupling and synergistic responses [J]. *Applied Energy*, 2026, 409.
- [4] BLUM L, PACKBIER U, VINKE I C, et al. Long-Term Testing of SOFC Stacks at Forschungszentrum Jülich [J]. *Fuel Cells*, 2012, 13(4): 646-53.
- [5] KONG W, LI J, LIU S, et al. The influence of interconnect ribs on the performance of planar solid oxide fuel cell and formulae for optimal rib sizes [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 204: 106-15.
- [6] GUO M, HE Q, CHENG C, et al. New interconnector designs for electrical performance enhancement of solid oxide fuel cells: A 3D modelling study [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 533.
- [7] 王瑞川, 张杰, 王继. 质子交换膜燃料电池金属双极板流道结构及制造工艺[J]. *新能源进展*, 2024, 12(1): 82-90.
Wang R.C., Zhang J., Wang J. Flow channel structure and manufacturing process of metal bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Advances in New Energy*, 2024, 12(1): 82-90.
- [8] 王涌纲, 何仕荣, 顾猛, 高枫, 熊可辉. 金属双极板冲压成形数值分析及回弹补偿[J]. *塑性工程学报*, 2024, 31(2): 43-50.
Wang Y.G., He S.R., Gu M., Gao F., Xiong K.H. Numerical analysis and springback compensation of stamping forming of metal bipolar plates[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2024, 31(2): 43-50.
- [9] 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.
- [10] BI W, CHEN D, LIN Z. A key geometric parameter for the flow uniformity in planar solid oxide fuel cell stacks [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(9): 3873-84.
- [11] BLESZNOWSKI M, BOISKI M, KUPECKI J. Numerical Analysis of Gas Distribution in 1000 W-Class Solid Oxide Fuel Cell Stack With Internal and External Manifolding [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2021, 143(7).
- [12] CHOI H, LIM J, LEE W, et al. The effect of internal manifold configuration on thermal and electrochemical distributions in commercial scale solid oxide fuel cell stacks fueled by hydrogen and hydrocarbon [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 645.
- [13] FANG Q, BLUM L, PETERS R, et al. SOFC stack performance under high fuel utilization [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(2): 1128-36.
- [14] PEKSEN M. Numerical thermomechanical modelling of solid oxide fuel cells [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 48: 1-20.
- [15] PIANKO-OPRYCH P, ZINKO T, JAWORSKI Z. Modeling of thermal stresses in a microtubular Solid Oxide Fuel Cell stack [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 300: 10-23.
- [16] CAI S, LI R, XU S, et al. Innovative isomorphic metal bipolar plates for enhanced flow uniformity in high-power-density fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 140: 900-10.
- [17] LENSER C, ZUREK J, NAUMENKO D, et al. Performance analysis of a planar solid oxide fuel cell stack between 750 °C and 500 °C [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 474.
- [18] SHEN M, ZHANG P. Progress and challenges of cathode contact layer for solid oxide fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(58): 33876-94.
- [19] RIZVANDI O B, CHMURA C, SULLIVAN N, et al. Comparative numerical analysis of solid oxide fuel cell stacks using internal and external manifolds [J]. *Journal of*

- Power Sources, 2026, 676.
- [20] 韩飞, 尚伟勇. 基于激光三角法的辊弯成形回弹测量与评价[J]. 锻压技术, 2023, 48(1): 229-236.
- Han F., Shang W.Y. Measurement and evaluation of springback in roll forming based on laser triangulation method[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48(1): 229-236.
- [21] YUAN H, LIU P, GE Q, et al. Research on a high-precision algorithm for flow channel height measurement of metal bipolar plates [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2026, 220.
- [22] XIONG X, LIANG K, MA G, et al. Three-dimensional multi-physics modelling and structural optimization of SOFC large-scale stack and stack tower [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(7): 2742-61.
- [23] TODD B. Y J B T. Thermodynamic and transport properties of gases for use in solid oxide fuel cell modelling. [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110: 86-200.

(责任编辑 XXX)