



有无电化学反应下 SOFC 流道流动均匀性对比研究

崔珊珊, 王鑫钰, 葛园梦, 朱润森, 董文彬, 张雅晶
(安徽科技工程大学智能制造学院, 安徽 滁州 239000)

摘要: 针对固体氧化物燃料电池 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 流道内气体分配不均导致的反应物供应不足、局部贫氧和运行稳定性下降问题, 建立了 SOFC 单元电池三维多物理场耦合模型。通过设置无反应纯流动工况和电化学反应耦合工况, 对比分析两类工况下阳极与阴极流道压力损失和流动均匀性差异; 结合不同燃料利用率工况, 分析阴极氧气浓度分布和反应区域变化特征, 并建立阳极压降误差预测模型。结果表明, 燃料利用率升高会使反应中心向入口侧偏移, 阴极氧气消耗区域前移, 氧气摩尔分数分布不均匀程度加剧。与无反应纯流动工况相比, 电化学反应耦合工况下阳极和阴极压降分别降低 15.7% 和 22.6%, 说明反应物消耗、产物生成及局部物性变化会改变原有压力分布。基于 5%~70% 燃料利用率工况建立的阳极压降误差预测模型拟合优度为 0.99698, 在 80% 燃料利用率下预测偏差为 0.228%, 可为相同结构和运行条件下的阳极压降修正提供参考。流动均匀性分析表明, 反应耦合作用会引起速度场重新分配, 使纵向截面和横向并联流道的流动均匀性均出现下降, 最大下降幅度为 1.3%。结果表明, 电化学反应耦合会同时影响 SOFC 内部气体浓度、压降和流动均匀性, 相关结论可为 SOFC 流场结构设计和运行参数优化提供理论依据。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 电化学反应; 多物理场耦合; 流动均匀性; 燃料利用率

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0468

中图分类号: TM 911.42

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-14

Comparative Study on Flow Uniformity in SOFC Channels with and without Electrochemical Reactions

Cui Shanshan, Wang Xinyu, Ge Yuanmeng, Zhu Runsen, Dong Wenbin, Zhang Yajing
(College of Intelligent Manufacturing, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 239000, Anhui Province, China)

Abstract: To address the problems of insufficient reactant supply, local oxygen depletion, and reduced operating stability caused by uneven gas distribution in solid oxide fuel cell (SOFC) channels, a three-dimensional multiphysics coupled model of an SOFC unit cell was established. By setting a non-reaction pure-flow condition and an electrochemical-reaction coupled condition, the differences in pressure loss and flow uniformity in the anode and cathode channels under the two conditions were compared. Combined with different fuel utilization conditions, the cathode oxygen concentration distribution and reaction region variation were analyzed, and an anode pressure drop error prediction model was established. The results show that increasing fuel utilization shifts the reaction center toward the inlet side,

收稿日期: 2026-05-28; 修改稿日期: 2026-07-05。

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目 (No. 2023AH051880); 企业委托横向项目 (No. 882211)。

第一作者: 崔珊珊 (2002—), 女, 硕士研究生 (在读), 燃料电池, E-mail: 1537494076@qq.com; 通信作者: 董文彬, 讲师, 先进材料成型, E-mail: dongwb@ahstu.edu.cn。

引用本文: 崔珊珊, 王鑫钰, 葛园梦, 等. 有无电化学反应下 SOFC 流道流动均匀性对比研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-14.

Citation: Cui Shanshan, Wang Xinyu, Ge Yuanmeng, et al. Comparative Study on Flow Uniformity in SOFC Channels with and without Electrochemical Reactions[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-14.

moves the cathode oxygen consumption region upstream, and intensifies the nonuniformity of oxygen mole fraction distribution. Compared with the non-reaction pure-flow condition, the anode and cathode pressure drops under the electrochemical-reaction coupled condition decrease by 15.7% and 22.6%, respectively, indicating that reactant consumption, product generation, and local property variations modify the original pressure distribution. The anode pressure drop error prediction model established based on 5% - 70% fuel utilization conditions has a goodness of fit of 0.99698, and the prediction deviation at 80% fuel utilization is 0.228%, which can provide a reference for anode pressure drop correction under the same structure and operating conditions. Flow uniformity analysis shows that reaction coupling causes redistribution of the velocity field, leading to decreases in flow uniformity in both longitudinal sections and transverse parallel channels, with a maximum decrease of 1.3%. The results indicate that electrochemical-reaction coupling simultaneously affects gas concentration, pressure drop, and flow uniformity inside the SOFC, providing a theoretical basis for SOFC flow field structure design and operating parameter optimization.

Keywords: solid oxide fuel cell; electrochemical reaction; multiphysics coupling; flow uniformity; fuel utilization

在全球能源结构向低碳、高效转型的背景下, 固体氧化物燃料电池 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 作为一种能将燃料化学能直接转化为电能的高效装置, 凭借其清洁环保及燃料适应性广等优势^[1], 在分布式发电和大规模储能等领域展现出巨大的应用潜力。

然而, SOFC 通常运行在 600-1000℃ 的高温环境下^[2-3], 长期的高温运行会影响电池的发电性能和长期稳定性^[4], 这仍是制约其广泛应用的核心瓶颈。在影响 SOFC 综合性能与服役寿命的众多因素中, 内部反应气体的分配均匀性至关重要。若流道内部出现气体分配不均, 将会引发一系列严重的连锁负面效应。具体而言, 局部缺氧引发的“气体饥饿”会导致功率骤降与阳极降解; 同时, 气流不畅会削弱散热, 引发热应力集中^[5-7], 造成组件开裂等破坏。因此, 提升气体分配均匀性是突破 SOFC 性能瓶颈、延长寿命的关键。

合理的流场结构设计是确保反应气体均匀分配、提升 SOFC 综合性能的关键。近年来, 众多学者针对进出口歧管形状、流场整体结构以及流道几何尺寸等进行了广泛的优化设计^[8-10]。然而, 目前多数关于流动均匀性的评估与优化, 往往建立在无化学反应的纯流体力学假设之上, 这种分析方法认为电池结构决定了气体的分配, 而忽略了实际运行中电化学反应对流场的动态反作用。例如, Zhao

等人^[11-12]针对外部歧管的设计进行了系统的数值模拟研究。在其早期的研究中, 重点探讨了歧管腔体的几何形状对气流分配的影响。随后, 他们在后续研究中不仅调整了进气口扩口管和出气管的尺寸, 还在歧管内部放置了一个带孔的圆柱状部件以提升整体气流分配的均匀度。Yin 等人^[13]则将研究视角扩大到了由多片电池组成的电堆层面, 利用三维数值模拟方法进行了深入探讨。Zhang 等人^[14]对 SOFC 双级缓冲腔供气结构参数进行了多目标优化, 在减小电堆表面积以降低热损耗的同时, 显著提升了出口气流的分配均匀性。Chen 等人^[15]并优化了一种底部进气式外部集流管 SOFC 电堆结构, 通过引入导流板和缓冲腔等结构设计, 成功降低了电堆内部流量的不均匀度。Zhang 等人^[16]分析了歧管深度、进出口管径等参数对 20 片电池 SOFC 电堆流量分配的影响, 并通过设计多孔隔板成功在降低压降的同时显著提升了电堆内部的流动均匀性。

在评估流动均匀性方面, 大多数研究侧重于分析沿流动方向的均匀性, 往往忽略了流道之间的流量分配差异。例如, Liu 等人^[17]对比了不同连接体肋型结构对 SOFC 内部特性的影响, 发现交错肋结构相比平行肋和点状肋能显著提升气体流动的均匀性并降低电池内部的温差, 从而有效增强了电解质电势分布的均匀性与电池的综合电化学性能。Dong 等人^[18]对平板型 SOFC 电堆的流动特性和反

应性能进行了数值模拟，观察到每个电池的电流密度分布沿阳极流动方向变化。Su 等人^[19]对比了矩形、对称圆柱和交错圆柱三种肋片结构对 10 片电池 SOFC 电堆流场分布的影响，发现交错圆柱肋片结构在提升气体分配均匀性的同时，能更有效地缓解阴极侧的“耗氧”现象并降低电堆内部温差，从而提升了电化学性能。Shao 等人^[20]提出了一种新型分层连接体构型，该结构能显著提升 SOFC 内部反应气体的流动均匀性并优化温度分布。

基于上述背景，为明确电化学反应对 SOFC 内部流动特性的作用机制，本文采用数值计算方法，建立了平行直流通 SOFC 的三维多物理场耦合模型。与已有研究相比，本文通过设置无反应纯流动工况和电化学反应耦合工况，构建了两类工况的对照分析方法，以揭示反应物消耗、产物生成及局部组分变化对流场分布的反馈作用。研究首先分析了燃料利用率对阴极氧气浓度分布的影响，阐明反应中心偏移与局部贫氧区形成之间的关系；随后对比分析阳极与阴极流道的压降特性，并构建阳极流道压降误差预测公式，实现对反应耦合引起压降偏差的定量评估；最后引入流动均匀性评估指数，从纵向截面与横向并联流道两个维度探讨反应耦合作用下流场不均匀现象及其产生机理。本文研究结果可为 SOFC 流场结构的精确设计与运行参数优化提供更加贴合实际的理论依据。

1 研究方法

1.1 几何与网格模型

本文通过 SolidWorks 软件对单元电池进行三维建模，采用平板式阳极支撑型 SOFC 单元电池结构，电池结构参照论文^[21]，由正极集电器、空气流道、阴极导体、阳极导体、燃料流道、负极集电器组成，其结构如图 1 所示。其中，阳极为主要支撑层，材料采用 Ni-YSZ，主要承担燃料传输、电子传导和氢气氧化反应；电解质层材料采用 YSZ，用于传导氧离子并隔离燃料与氧化剂；阴极层材料采用 LSM，主要承担空气传输、电子传导和氧还原反应。

单元电池的活性区域尺寸为 100 mm×100 mm，该区域为电化学反应区域。阳极侧总长度为 118 mm，总宽度为 106 mm，流道采用平行布置的直通道设计，流道高度为 0.4 mm，相邻流道中

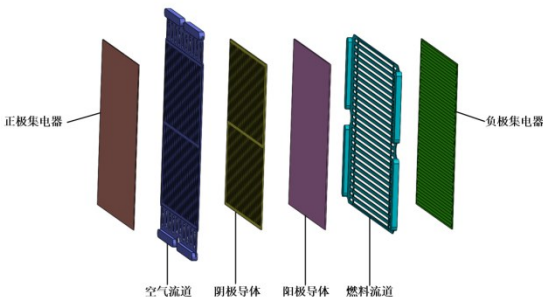


图1 单元电池结构
Fig.1 The Single Cell Structure

心间距为 2 mm；阴极总长度为 103 mm，宽度与阳极保持一致，阴极流道同样为平行直通道，流道高度为 0.74 mm，流道间距与阳极相同。具体数值如表 1 所示。

表 1 模型参数
Table 1 Model Parameters

几何参数		数值
总长度/mm	阳极	118
	阴极	103
总宽度/mm	阳极	106
	阴极	106
活性区域尺寸/mm×mm		100×100
流道间距/mm		2
阴极集流体高度/mm		0.47
空气流道高度/mm		0.74
阴极导体高度/mm		0.67
阳极导体高度/mm		0.67
燃料流道高度/mm		0.4
阳极集流体高度/mm		0.47

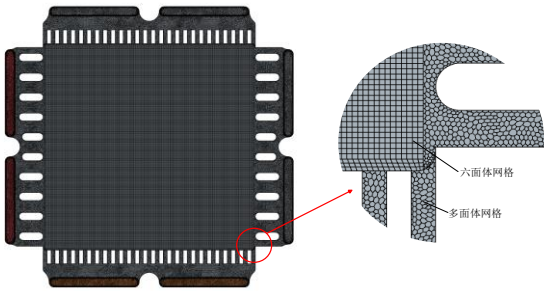


图2 单元电池网格模型
Fig.2 The Single Cell Mesh Model

为精准捕捉 SOFC 单元电池内多物理场耦合行为，本文基于 STAR CCM+ 软件进行网格划分，针对不同几何区域的流动与传质特征采用了不同的网格配置。针对气体进出口等不规则几何区域，采用

多面体网格；对于集电器、电极导体及直流道等规则几何区域，采用六面体网格，并在近壁面区域采用棱柱层网格捕捉近壁效应，提升流动边界层的计算稳定性。单元电池网格模型如图2所示。经网格划分与质量优化，最终模型的总网格数为177万，满足计算的网格质量要求。

1.2 控制方程

本文主要针对无反应纯流动工况与电化学反应耦合工况下SOFC流道流动均匀性展开研究。因此，分析工作基于以下基本假设：

1. 燃料与空气均视为理想气体混合物；

2. 电池运行处于稳态；

3. 无反应纯流动工况中不引入由电化学反应产生的反应物消耗、产物生成、质量源项、组分源项、电荷源项和反应热源项；电化学反应耦合工况则进一步考虑组分传输、能量传递、电荷传导和电化动力学过程，用于描述反应源项对流场的反馈影响。

基于上述假设，本文通过求解质量、动量、组分、能量及电荷守恒方程来描述SOFC内部的物理过程。针对无反应纯流动工况和电化学反应耦合工况，方程组的开启与源项设置有所不同，控制方程组如下所述。

1.2.1 质量守恒方程

电池内部的气体流动遵循质量守恒定律。流体密度的变化及电化学反应引起的质量消耗与生成通过连续性方程描述：

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

式中， ∇ 为哈密顿算子， ρ 为混合气体密度， kg/m^3 ； $\vec{u}$ 为速度矢量， m/s ； S_m 为质量源项， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。在电化学反应耦合工况下， S_m 表示由反应物消耗和产物生成引起的质量变化速率；在无反应纯流动工况下，不考虑反应导致的气相质量变化， S_m 为0。

1.2.2 动量守恒方程

流道等开放区域的动量传递遵循Navier-Stokes方程，该方程综合描述了流体惯性力、压力梯度与黏性应力的平衡关系，其表达式为：

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} \right) \right] \quad (2)$$

式中， p 为静压力， Pa ； μ 为混合气体动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $\mathbf{I}$ 为单位张量。

在多孔阳极和阴极内，流体流经微小的孔隙，受到固体区域的几何约束和表面摩擦阻力。为了准确描述这一物理过程，采用Brinkman方程修正，在Navier-Stokes方程基础上引入孔隙率来调整惯性项和黏性项，并增加了阻力源项。如式(3)所示，

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{\mu}{\varepsilon} \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \mathbf{I} \right) \right] - \frac{\mu}{\kappa} \vec{u} \quad (3)$$

式中， ε 为多孔介质的孔隙率； κ 为渗透率， m^2 。

1.2.3 组分传输方程

在SOFC运行过程中，反应气体和生成产物在流道内的对流作用以及在多孔电极内的扩散作用共同决定了各组分的浓度分布。各组分*i*的质量分数 Y_i 由对流-扩散方程描述：

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{i,\text{eff}} \nabla Y_i) + S_i \quad (4)$$

式中， Y_i 为组分*i*的质量分数； $D_{i,\text{eff}}$ 为组分*i*在混合气中的有效扩散系数， m^2/s ； S_i 为由于电化学反应引起的组分*i*质量源项， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。方程左侧为对流项，代表宏观流动带走的组分质量通量。方程右侧为扩散项和反应源项，分别代表由浓度梯度驱动的组分扩散通量和组分的生成与消耗。在无反应纯流动工况下，不考虑电化学反应导致的组分生成与消耗， S_i 为0；在电化学反应耦合工况下，开启组分传输方程，并通过组分源项描述反应物消耗和产物生成过程。

由于多孔介质中存在固体结构，气体分子的扩散路径变得曲折且截面积减小。为了在连续介质模型中反映这一微观几何特征，必须对分子扩散系数 $D_{i,m}$ 进行修正：

$$D_{i,\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_{i,m} \quad (5)$$

式中， τ 为曲折度， $D_{i,m}$ 为组分*i*在混合气中的分子扩散系数。根据法拉第定律，组分源项 S_i 可表示为：

$$S_i = \begin{cases} -\frac{j}{2F} M_{H_2} & i = H_2 \\ \frac{j}{2F} M_{H_2O} & i = H_2O \\ -\frac{j}{4F} M_{O_2} & i = O_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中， F 为法拉第常数， C/mol ； M_i 为组分*i*的摩尔质量， kg/mol ； j 为局部体积电流密度， A/m^3 。

1.2.4 能量守恒方程

在 SOFC 运行过程中，热量的传递包含气体的对流传热、固体基质与气体的热传导以及电化学反应产生的内热源。能量传递遵循局部热平衡假设，表达式为

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q_h \quad (7)$$

式中， T 为温度，K； c_p 为混合气体的定压比热容，J/(kg·K)； k_{eff} 为多孔介质的有效热导率，W/(m·K)； Q_h 为总体积热源项，W/m³。

在多孔介质区域，热量同时通过固体基质和孔隙内的气体传导。因此， k_{eff} 必须综合考虑气相 k_f 和固相 k_s 的贡献，通常采用体积平均法计算：

$$k_{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s \quad (8)$$

式中， k_f 为气相的热导率； k_s 为固相的热导率。

在无反应纯流动工况下，不引入电化学反应热源，热源项 Q_h 为 0。在电化学反应耦合工况下，热源项主要由活化极化热、欧姆焦耳热和可逆熵热组成：

$$Q_h = j \cdot \eta + \left(\frac{j_{el}^2}{\sigma_{el}} + \frac{j_{io}^2}{\sigma_{io}} \right) - j \cdot \frac{T \Delta S}{nF} \quad (9)$$

式中， η 为活化过电位，V； j_{el} 和 j_{io} 分别为电子和离子电流密度矢量，A/m²； σ_{el} 和 σ_{io} 分别为电子和离子电导率，S/m； ΔS 为反应摩尔熵变，J/(mol·K)； n 为反应转移电子数。

1.2.5 电荷守恒方程

在电化学反应耦合工况下，电池内部存在电子和氧离子的定向迁移。电荷的传输过程遵循欧姆定律，但在多孔介质中需考虑有效电导率的修正。电荷守恒可以通过以下方程来表示：

$$\nabla \cdot (-\sigma_{el,eff} \nabla \phi_{el}) = S_{el} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma_{io,eff} \nabla \phi_{io}) = S_{io} \quad (11)$$

式中， ϕ_{el} 和 ϕ_{io} 分别为电子相和离子相电势，V； $\sigma_{el,eff}$ 和 $\sigma_{io,eff}$ 分别为多孔介质内的电子和离子有效电导率，S/m； S_{el} 和 S_{io} 分别为电子相和离子相电荷源项，A/m³。电荷守恒方程主要用于电化学反应耦合工况；在无反应纯流动工况下，不求解电荷传导过程，电荷源项设为 0。此外，公式(9)中用于计算欧姆焦耳热的传导电流密度矢量 j_{el} 和 j_{io} 根据欧姆定律定义为：

$$j_{el} = -\sigma_{el,eff} \nabla \phi_{el}, j_{io} = -\sigma_{io,eff} \nabla \phi_{io} \quad (12)$$

1.2.6 电动力学

局部传递电流密度 j 是连接宏观物理场与微观反应速率的核心变量，其数值由 Butler-Volmer 方程计算：

$$j = A_v \cdot j_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a n F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c n F \eta}{RT}\right) \right] \quad (13)$$

式中， A_v 为活性比表面积，m²/m³； α_a 和 α_c 分别为阳极和阴极的电荷传递系数； j_0 为交换电流密度，A/m²。Butler-Volmer 电动力学模型仅用于电化学反应耦合工况；在无反应纯流动工况下，不引入电化学反应源项。阳极侧与阴极侧的交换电流密度由式(14)(15)计算：

$$j_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right)^A \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right)^B \exp\left(-\frac{E_{act,an}}{RT}\right) \quad (14)$$

$$j_{0,cat} = \gamma_{cat} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^C \exp\left(-\frac{E_{act,cat}}{RT}\right) \quad (15)$$

式中， γ_{an} 和 γ_{cat} 分别为阳极和阴极交换电流密度前因子，A/m²； P_{H_2} 、 P_{H_2O} 和 P_{O_2} 为三相界面处的局部气体分压，Pa； P_{ref} 为参考压力，Pa； $E_{act,an}$ 和 $E_{act,cat}$ 分别为阳极和阴极电化学反应活化能，J/mol； R 为通用气体常数，8.314 J/(mol·K)； A 、 B 和 C 为反应级数指数。

1.3 操作参数

为了确保模拟结果具有实际的工程参考价值，本文根据 SOFC 的真实运行工况设定了各项操作参数，具体操作参数如表 2 所示。将环境温度设定为 750℃，同时设置恒温边界条件维持该温度，为电化学反应提供稳定的热力学环境。阳极与阴极出口压力均设定为大气压（101325 Pa），采用压力出口边界；入口采用速度入口边界，其中阳极燃料侧入口速度为 0.102 m/s，阴极空气侧入口速度为 0.236 m/s，所有壁面边界均建为无滑移面，以真实反映气体在管道内部的流动阻力。

阳极入口燃料以氢气为核心反应组分，其摩尔分数为 0.97，同时伴随摩尔分数 0.03 的水蒸气；阴极入口氧化剂为空气组分，其中氧气摩尔分数为 0.21，是电化学反应的核心反应物，氮气摩尔分数为 0.79，作为惰性组分随空气进入阴极参与流动。燃料利用率为 20%，氧气利用率为 20%。阳极孔隙率设定为 0.5，阴极孔隙率设定为 0.6。阴极连接体底面设为电势边界，阳极连接体底面设为电接地边界，构建 SOFC 的实际电化学回路；单元电池的

运行电压设定为0.9 V，符合其典型输出特性。

表2 操作参数

Table 2 Operating Parameters

参数	数值
环境温度/℃	750
出口压力/Pa	101325
阳极	101325
阴极	101325
入口摩尔分数	H ₂ 0.97
阳极	H ₂ O 0.03
入口速度/m/s	O ₂ 0.21
阴极	N ₂ 0.79
入口速度/m/s	阳极 0.102
阴极	0.236
孔隙率	阳极 0.5
阴极	0.6
利用率	阳极燃料 20%
阴极氧气	20%
曲折度	0.35
电压/V	0.9

1.4 流动均匀性评价指标

为量化单元电池内流场的流动均匀程度，本文引入流动均匀性指数 F_u 作为核心评价指标，其计算公式如式(16)所示：

$$F_u = \left\{ 1 - \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \times 100\% \quad (16)$$

式中， N 为参与计算的流道截面总数； u_i 为第 i 个流道截面的平均流速，单位为m/s； $\bar{u}$ 为 N 个流道截面的平均流速，单位为m/s。流动均匀性指数 F_u 的取值范围为0~100%，其数值越接近100%，代表流场中各截面的流速分布偏差越小、均匀性越好。

本文从纵向和横向两个方向评价流动均匀性。纵向均匀性主要表征沿气体主流动方向不同截面间平均流速的一致性，反映气体沿程输运过程中的速度波动；横向均匀性主要表征垂直于主流动方向的并联流道间平均流速的一致性，反映各流道之间的气体分配差异。二者结合可更全面地评价SOFC流道内气体输运稳定性和通道分配均衡性。本文中所取截面如图3、图4所示，在沿流体流动方向上，阳极等间距选取了5个特征截面；阴极侧为消除结构带来的干扰，将流道分为两组，每组各提取3个特征截面进行流动均匀性指数的计算。此外，在垂

直于流动方向上对流道进行编号，来计算该方向上的流动均匀性指数。

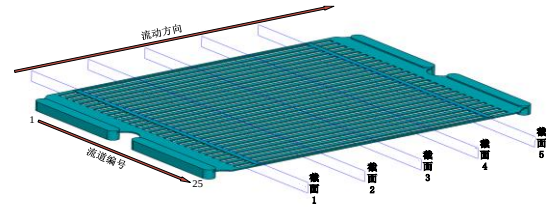


图3 阳极流道截面

Fig.3 Cross-section of the anode channel

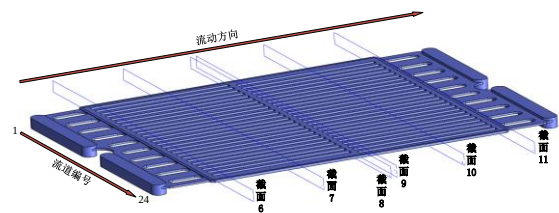


图4 阴极流道截面

Fig.4 Cross-section of the cathode flow channel

1.5 独立性验证

本文采用商用计算流体动力学软件Star CCM+完成网格划分，针对单元通道与流道区域的几何特征，分别采用修剪单元网格与多面体网格构建流体域网格。为消除网格密度对计算结果的干扰，需对阳极、阴极区域分别开展网格独立性验证，以压降为核心验证指标，构建4种不同尺寸的网格进行CFD仿真，网格尺寸分别为0.75 mm（粗网格），0.6 mm（中网格），0.45 mm（细网格），0.35 mm（超细网格）。

验证结果显示，随着网格尺寸细化，阳极、阴极的压降结果逐渐收敛，如图5所示。当网格尺寸从0.75 mm细化至0.45 mm时，阳极压降从185.6Pa收敛至188.95Pa，阴极压降从208.07Pa收敛至187.39Pa；进一步将网格细化至0.35mm时，阳极、阴极压降的相对误差分别降至0.68%、1.53%。

同时，采用Roache^[22]提出的网格收敛指数（GCI）方法，如式(17)所示，该方法是用于量化CFD仿真中网格离散误差的经典方法，其核心通过多套等比细化网格的物理量差异，评估结果对网格密度的敏感性。本文以压降为关键指标，通过对两组连续网格组合进行交叉验证。判定标准为“GCI

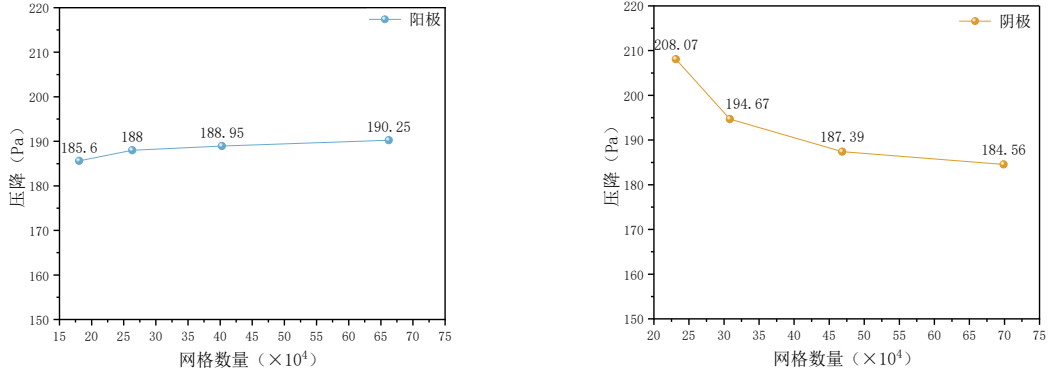


图5 阳极与阴极流道不同网格尺寸的压降情况

Fig.5 Pressure drop situation of anode and cathode flow channels with different mesh sizes

<5%”，此时网格离散误差处于工程可接受范围，结果具有可靠性。

$$GCI^{21} = \frac{F_s \cdot e_a^{21}}{r_{21}^{p_{GCI}} - 1} \quad (17)$$

式中， F_s 为安全因子，仿真中通常取1.25，用于覆盖误差估计的不确定性； r_{21} 为网格细化比（计算过程如式(18)所示）， e_a^{21} 为近似相对误差（计算过程如式(23)所示）。

$$r_{ij} = \frac{h_i}{h_j} \quad (18)$$

h 为网格的特征尺寸， r_{ij} 表示相邻两套网格的细化比例。 $\delta_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$, $\delta_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$ (19)

$$s = \text{sign}\left(\frac{\delta_{32}}{\delta_{21}}\right) \quad (20)$$

φ_i 为不同细化程度网格对应的压力值。

$$p_{GCI} = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left[\ln\left(\left|\frac{\delta_{32}}{\delta_{21}}\right| + q(p_{GCI})\right) \right] \quad (21)$$

$$q(p_{GCI}) = \ln\left(\frac{r_{21}^{p_{GCI}} - s}{r_{32}^{p_{GCI}} - s}\right) \quad (22)$$

根据式(21)得到收敛阶数 p_{GCI} ，反映数值解随网格细化的收敛速度：

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right| \quad (23)$$

$$\varphi_{ext}^{21} = \frac{r_{21}^{p_{GCI}} \cdot \varphi_1 - \varphi_2}{r_{21}^{p_{GCI}} - 1} \quad (24)$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\varphi_{ext}^{21} - \varphi_1}{\varphi_{ext}^{21}} \right| \quad (25)$$

通过式(24)和(25)估算出外推解（ φ_{ext}^{21} ）、外推相对误差（ e_{ext}^{21} ）。外推解是外推得到的网格无限细

化时的理论压降值，可视为数值模拟中的等效真实值。外推相对误差通过量化组合中粗网格压降与外推解的相对偏差，直接反映粗网格结果与等效真实值的偏离程度。

选取相邻三组网格组合计算GCI，四组数据共有两个组合，组合1为0.75mm、0.6mm、0.45mm，组合2为0.6mm、0.45mm、0.35mm，结果见表3和表4。

表3 阳极与阴极网格组合1的GCI验证结果

Table 3 GCI validation results of mesh combination 1 for anode and cathode

	Anode	Cathode
N_1, N_2, N_3	180 545; 263 361; 402 854	231 269; 308 440; 468 497
r_{21}		1.25
r_{32}		1.333
φ_1	185.6	208.07
φ_2	188	194.67
φ_3	188.95	187.39
p_{GCI}	1.92	1.85
φ_{ext}^{21}	191.23	179.24
e_a^{21}	0.012 9	0.068 8
e_{ext}^{21}	0.029 4	0.160 9
GCI^{21}	0.043 2	0.057 2

由表3可知，组合1中阳极GCI为4.32%，满足5%的工程收敛阈值；阴极GCI为5.72%，略高于5%，说明粗网格组合下阴极压降结果仍具有一定网格敏感性。进一步采用组合2进行验证后，阳极和阴极GCI分别降至1.68%和2.98%，均小于5%的工程收敛阈值，表明当网格细化至0.45 mm

表4 阳极与阴极网格组合2的GCI验证结果
Table 4 GCI validation results of mesh combination 2 for anode and cathode

	Anode	Cathode
N_2, N_3, N_4	263 361; 402 854; 662 488	231 269; 308 440; 468 497
r^{32}		1.333
r^{43}		1.2857
φ_2	188	194.67
φ_3	188.95	187.39
φ_4	190.25	184.56
ρ_{GCI}	2.15	2.22
φ_{ext}^{32}	191.57	181.02
e_a^{32}	0.0051	0.0389
e_{ext}^{32}	0.0186	0.0754
GCI^{32}	0.0168	0.0298

及以下时, 阳极和阴极压降计算结果均满足工程收敛要求。同时, 阳极网格两组组合的外推解分别为 191.23Pa 与 191.57Pa, 阴极网格两组组合的外推解分别为 179.24Pa 与 181.02Pa, 一致性良好, 反映了数值解的稳定性。综合考虑计算精度与时间成本, 0.45mm 特征尺寸网格与 0.35mm 网格的压降偏差小于 2%, 0.45mm 尺寸的网格已能保证结果稳定性, 且无须额外消耗计算资源, 因此后续仿真统一采用 0.45mm 网格作为标准配置。

此外, 本文所采用的单元电池结构和多物理场耦合模型参考文献^[21]中已验证的 1 kW SOFC 电堆模型。文献^[21]建立了由 40 片单元电池组成的全尺度三维 SOFC 电堆模型, 并将不同燃料利用率工况下的数值计算结果与实验测试结果进行了对比, 最大偏差小于 3.2%, 验证了该电堆模型的可靠性。本文研究对象为该电堆中的基本重复单元, 其流道结构、反应区域设置、控制方程、电化学反应模型及主要操作参数均与文献^[21]保持一致。因此, 文献^[21]的电堆级实验验证结果可为本文单元电池模型提供可靠性依据。结合前述网格独立性分析可知, 本文建立的 SOFC 单元电池模型能够满足无反应纯流动工况与电化学反应耦合工况下流道流动均匀性对比分析的精度要求。

2 结果与讨论

2.1 电化学反应耦合工况下的热场分布特征

温度是决定 SOFC 电化学性能与结构稳定性的关键因素。图6展示了单电池在电化学反应耦合工

况下, 阳极与阴极流道的温度分布云图。从模拟结果可以看出, 电化学反应的引入导致电池内部形成了显著的非均匀温度分布。

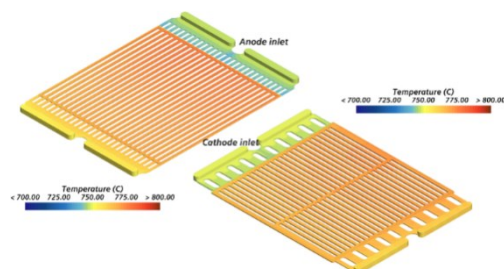


图6 电化学反应耦合工况下的阳极与阴极流道温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution contours of anode and cathode channels under the electrochemical-reaction coupled condition

电池整体运行温度主要集中在 700℃ 至 800℃ 这一范围内。阳极与阴极的气体入口区域温度最低, 维持在约 700℃-725℃, 这与设定的入口气体温度基本一致。随着气体沿流道方向流动, 温度逐渐升高, 最终在电池中心附近形成了明显的高温聚集区, 局部最高温度逼近 770℃。

造成流道内温度沿流道方向升高的原因, 主要归结于 SOFC 运行过程中两种热效应的叠加: 首先是反应放热, 氢气与氧气发生的电化学反应是一个强烈的放热过程。反应释放的能量除了转化为电能外, 其余部分均以热能形式释放, 这是导致电池升温的最主要热源。其次, 当电流通过电极和电解质时, 由于材料本身存在电阻, 会不可避免地产生焦耳热。由于电池中心区域的反应活性通常最高, 上述两种热源在此处最为集中, 从而导致了该区域热量的显著累积。

2.2 反应物组分浓度分布特性

反应气体的有效传输与均匀分布是 SOFC 维持高效电化学反应的物质基础。图7展示了在电化学反应耦合工况下, 阳极侧氢气与阴极侧氧气的摩尔分数空间分布云图, 该分布特征揭示了流场内的质量传输路径以及不同区域的反应消耗程度。总体来看, 反应气体的浓度沿流动方向呈现出显著的递减趋势, 这证实了流道内气体在流动中不断被消耗。

阳极侧氢气摩尔分数由入口处的 0.97 逐渐下降, 至出口区域降至约 0.56。这一浓度落差表明,

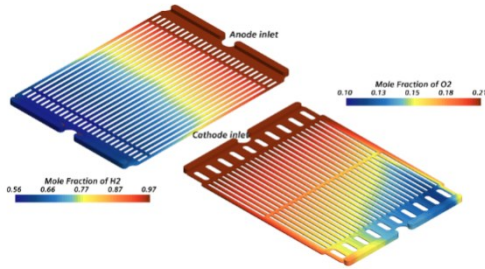


图7 阳极侧氢气与阴极侧氧气的摩尔分数分布云图
Fig.7 Mole fraction distribution contours of hydrogen at the anode side and oxygen at the cathode side

约有 40% 的氢气燃料在传输过程中穿过扩散层，进入阳极功能层参与了氧化反应。阴极侧氧气摩尔分数从入口的 0.21 降至出口区域的 0.10-0.15 范围，体现了持续的氧还原反应消耗。值得关注的是，阴极侧氧气分布表现出了明显的不均匀性。对比出口截面的区域可以发现，部分区域氧气摩尔分数降至 0.13 左右，相比之下，出口下半部分区域保持在 0.15 左右。这种分布特征初步表明，阴极气流在流道内的几何分配存在一定偏差。空气更倾向于流经下部流道，导致上部流道内气体流速较慢或流量不足。由于气流更新缓慢，上部流道内气体更新缓慢，氧气被过度消耗，从而形成了局部的“贫氧区”。

为了进一步探寻这种局部“贫氧区”的形成原因，并验证电化学反应强弱对氧气空间分布的干扰，本文在保持空气利用率 0.2 不变的前提下，开展了不同燃料利用率工况下的流场仿真对比。

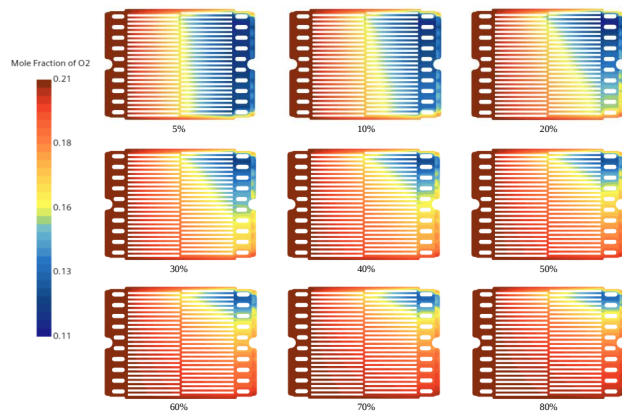


图8 不同燃料利用率下的阴极侧氧气摩尔分数分布
Fig.8 Distribution of Oxygen Mole Fraction at the Cathode Side Under Different Fuel Utilization Ratios

通过观察图 8 可发现，随着燃料利用率的逐步升高，阴极侧氧气浓度最低的区域并没有固定在气流分配较少的流道末端，而是逐渐向燃料进口侧发生偏移。这一动态变化证明了，导致阴极分布不均的核心原因并非单纯的物理气流分配偏差，而是流体输运与局部电化学反应速率的耦合效应。当设定的燃料利用率较低时，阳极流道内全局燃料相对充足，整体反应分布较为平稳。然而，随着燃料利用率的显著升高，意味着相同进流量下有更多的燃料被消耗。高利用率导致下游燃料枯竭，电池内部的有效电化学反应区域会向燃料充足的进口侧高度集中。这种局部剧烈的电化学反应，急剧消耗了该区域的氧气。因此，“贫氧区”跟随着电化学反应中心的转移而发生了游移。

综上所述，高燃料利用率下局部反应中心偏移所引发的强烈耗氧，才是导致阴极出口端氧气分布不均匀程度加剧的根本原因。

2.3 流道内压力分析

流道压降是表征 SOFC 流动特性的关键指标，本文在相同操作条件下，对比了阳极、阴极流道在无反应纯流动工况与电化学反应耦合工况下的进出口压降，从图 9 可以看出，阳极流道与阴极流道的压力均沿气体流动方向逐渐降低，但变化幅度与梯度存在显著差异。

进出口具体压力数值如表 5 所示。这一对比结果清晰表明，与无反应纯流动工况相比，电化学反应耦合工况下阳极与阴极流道压降均明显降低。引入反应后，阳极压降下降幅度约 15.7%，阴极下降幅度约 22.6%。

这一现象是 SOFC 反应耦合过程对气体流动产生反馈影响的体现，反应气体氢气与氧气在沿程流动中不断透过扩散层进入电极参与反应，导致主流道内的流体质量流量逐渐减少，这种流量的实质性减少直接导致了沿程动量损耗的降低，从而减小了进出口压差。

在流道出口出现负压区域，最低达 -0.8Pa。以无反应纯流动工况下的阴极流道为例，图 10 的局部放大结果进一步清晰呈现了该区域的压力分布特征。结合流道结构与流动规律，气体从平行流道汇入宽大的出口集流管时，气流经历了一个几何结构的急剧变化。在流道末端的直角棱边处，流体无法完全贴壁流动，从而产生了流动分离。在分离点附

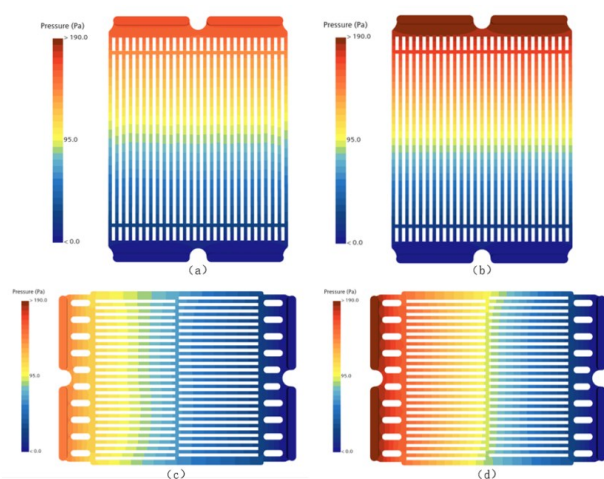


图9 压力分布云图: (a) 电化学反应耦合工况下的阳极流道; (b) 无反应纯流动工况下的阳极流道; (c) 电化学反应耦合工况下的阴极流道; (d) 无反应纯流动工况下的阴极流道

Fig. 9 Pressure distribution contours: (a) Anode channel under the electrochemical-reaction coupled condition; (b) Anode channel under the non-reaction pure-flow condition; (c) Cathode channel under the electrochemical-reaction coupled condition; (d) Cathode channel under the non-reaction pure-flow condition

表5 阳极和阴极在两种工况下的压降
Table 5 Pressure drops of anode and cathode under two operating conditions

流道类型	工况	进口压力/ Pa	出口压力/ Pa	总压降 ΔP / Pa
阳极	电化学反应耦合	159.4	-0.3	159.7
	无反应纯流动	189.2	-0.2	189.4
阴极	电化学反应耦合	144.1	-0.8	144.9
	无反应纯流动	186.5	-0.8	187.3

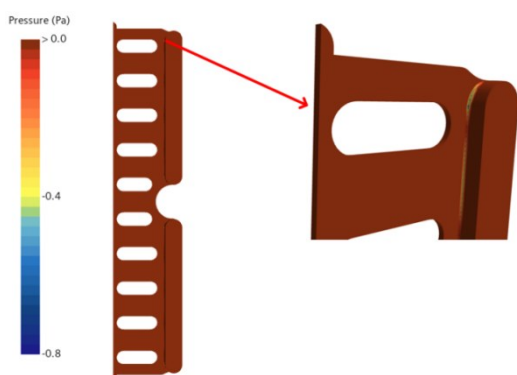


图10 无反应纯流动工况下阴极流道的局部放大图
Fig.10 Local enlarged view of the cathode channel under the non-reaction pure-flow condition

近, 气流为了绕过拐角, 局部流速会发生瞬时增加。根据伯努利原理, 流速的增加会导致静压能的降低, 从而出现负压区域。

为了进一步探究化学反应对流道压力的动态影响, 图11展示了在不同燃料利用条件下, 阳极流道在两类工况下的压力分布云图。通过对比分析可以发现, 随着燃料利用率从5%逐渐增加到70%, 两类工况下压力分布差异呈现出随利用率增大而减小的趋势。在较低的燃料利用率工况下, 由于入口气流速度较快, 化学反应引起的组分变化对流场产生的干扰更为显著, 导致无反应仿真的偏差较大。虽然随着燃料利用率的提升, 这种相对误差有所减小并趋于平缓, 但即便在高利用率工况下, 约12%的误差依然说明仅依赖纯流体力学分析无法提供精确的压降预估。因此, 引入多物理场耦合模型对于SOFC流场的精确设计具有重要意义。

为了定量评估无反应纯流动模型在SOFC阳极压降预测中的偏差, 本文定义了压降误差率(如式(26)所示), 并系统分析了其随燃料利用率的变化规律。本文以燃料利用率5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%和70%共8组工况下的阳极压降误差率作为拟合样本, 利用Origin软件内置的Exponential类别函数, 通过Levenberg-Marquardt迭代算法进行非线性回归分析, 最终选定ExpAssocDelay1模型对压降偏差进行了高精度拟合。该模型通过分段函数形式, 能够精准捕捉低利用率下的平稳期以及随后出现的指数衰减特征。拟合结果如图12所示。

$$E_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{无化学}} - \Delta P_{\text{有化学}}}{\Delta P_{\text{无化学}}} \times 100\% \quad (26)$$

式中, $E_{\Delta P}$ 为压降误差率, $\Delta P_{\text{有化学}}$ 为电化学反应耦合工况下的阳极压降, $\Delta P_{\text{无化学}}$ 为相同入口条件下无反应纯流动工况的阳极压降。

拟合结果显示, 该模型的决定系数 R^2 高达0.99698, 表明模型与数据具有极高的拟合优度。采用未参与拟合的80%燃料利用率工况进行初步验证, 模型预测值为12.598%, 与实际仿真值12.37%的偏差仅为0.228%, 进一步证实了该数学模型的准确性。研究结果表明, 随着燃料利用率的提高, 两类工况下总压降差异趋于稳定。需要说明的是, 该拟合关系属于基于本文特定几何结构和操作条件得到的经验修正公式, 主要适用于本文单元

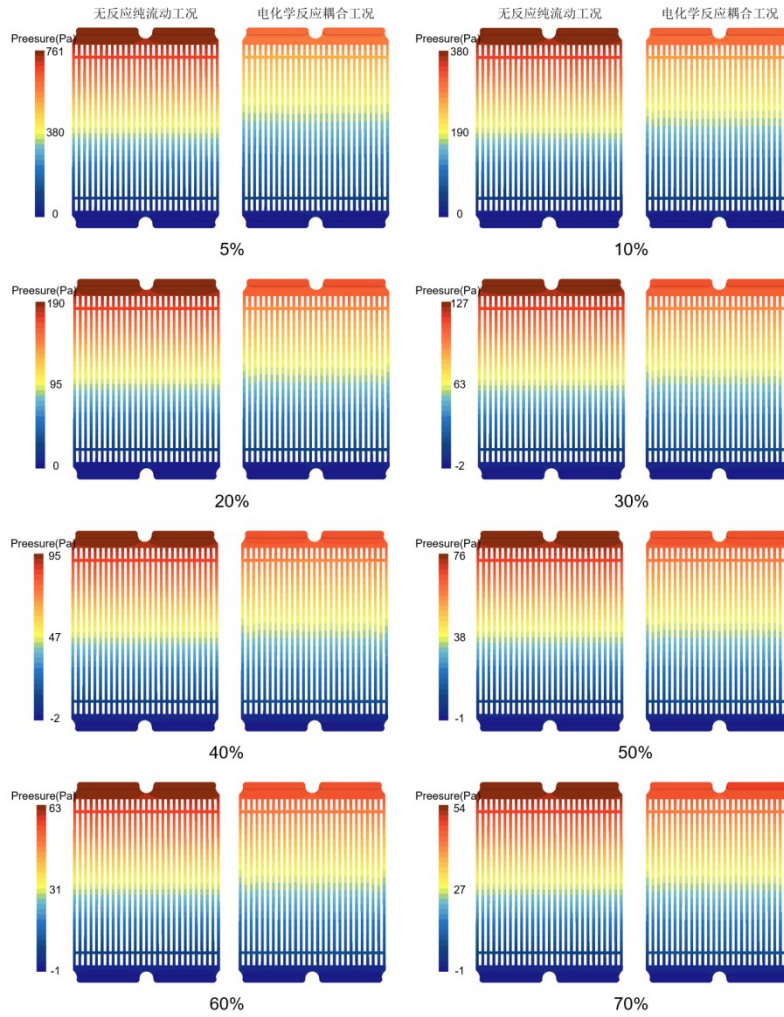


图 11 不同燃料利用率下阳极流道在两类工况中的压力分布

Fig.11 Pressure distribution in the anode channel under two operating conditions at different fuel utilization rates

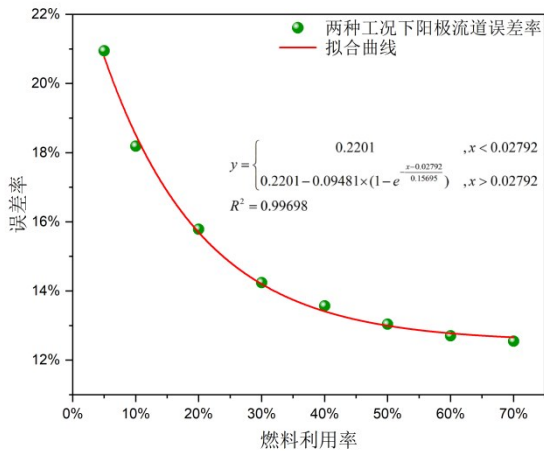


图 12 不同燃料利用率下阳极压降误差率的非线性拟合曲线

Fig.12 Nonlinear fitting curve of anode pressure drop error rate at different fuel utilization rates

电池结构、入口边界条件、操作温度及5%—80%燃料利用率范围内的阳极压降误差估算，不宜直接外推至其他流道结构、电堆尺度或更高燃料利用率工况。

2.4 流动均匀性的评估分析

为深入探究多物理场耦合对燃料电池内部气体分配特性的影响，本文基于流动均匀性指数 F_u ，分别从沿流动方向（纵向）和垂直于流动方向（横向）两个维度，对无反应纯流动工况与电化学反应耦合工况下的流场均匀性进行了评估。图13、14为纵向和横向方向上计算的各特征截面平均速度。

根据式(16)计算得到各评价对象的流动均匀性指数，如图15所示。其中，前三组数据为纵向流动均匀性评价结果，后两组数据为横向流动均匀性

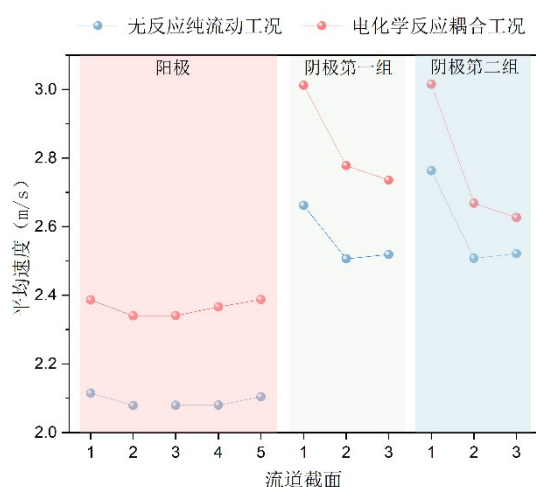


图13 纵向流道截面平均速度变化图
Fig.13 Graph of Average Velocity Variations in the Longitudinal Flow Channel Cross-Section

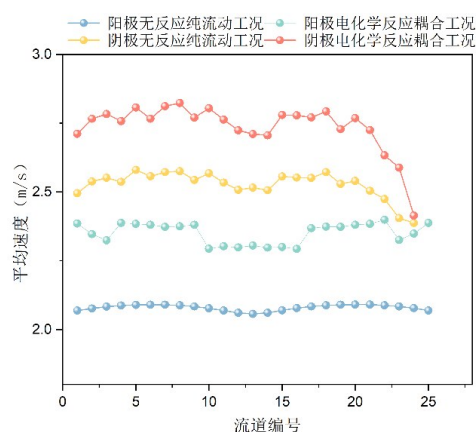


图14 横向各并联流道平均速度分布图
Fig.14 Distribution diagram of average velocity in each parallel transverse channel

评价结果。结果表明, 与无反应纯流动工况相比, 电化学反应耦合工况下纵向流动均匀性呈现出下降趋势。在阳极侧, 无反应纯流动工况的 F_u 值为 99.28%, 而电化学反应耦合工况略降至 99.12%。阴极侧的趋势更为显著: 无反应纯流动工况下第一、二组的 F_u 值分别为 97.87% 和 96.6%, 而在电化学反应耦合工况下, 两组数值分别下降至 96.69% 和 95.3%。在横向上, 本文提取了最中间截面各流道的平均速度进行计算, 发现阳极侧的横向 F_u 值从无反应时的 99.50% 降至 98.43%; 阴极侧则从 95.28% 降至 94.59%。

产生这一现象的原因在于, 电化学反应耦合工况下反应物消耗、产物生成及局部组分变化改变了

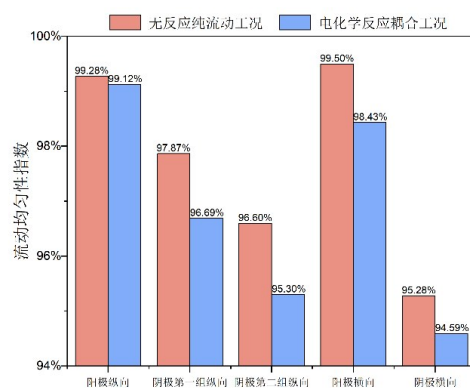


图15 两类工况下流动均匀性指数 F_u 对比图
Figure 15 Comparison of flow uniformity index F_u under two operating conditions

原有气流分布, 使流道内速度场发生重新分配。纵向来看, 无反应纯流动工况下气体流动主要受流道结构约束, 速度分布相对稳定; 引入电化学反应后, 反应物沿程不断消耗、产物持续生成, 导致局部气体流速、密度和黏度发生变化, 从而破坏了原有的纵向速度分布。横向来看, 各并联流道内氧气浓度存在差异, 导致局部反应速率和气体消耗量不同, 进而改变各流道的局部流动阻力。为维持并联流道间的压力平衡, 气体会在不同通道之间重新分配, 最终导致横向流速均匀性下降。

需要指出的是, SOFC 内部气体流动、组分传输、电化学反应和温度分布之间存在强耦合关系。局部流速差异会进一步影响反应物供应, 进而引起局部浓度极化、电流密度分布不均和温度梯度增大等问题。因此, F_u 的变化不应仅从数值幅度大小进行判断, 而应结合氧气摩尔分数分布、局部贫氧区和压降变化共同分析。从本文结果可以看出, 电化学反应耦合工况下流动均匀性下降与阴极局部贫氧、反应中心偏移和压降变化具有一致性, 说明该指标能够有效反映反应耦合作用下气体分配稳定性的变化。

3 结论与展望

3.1 结论

本文通过建立 SOFC 单元电池的多物理场耦合模型, 系统探究了电化学反应对电池内部流场分布与压降特性的反馈影响。主要研究结论如下:

(1) 随燃料利用率升高, 阴极低氧区逐渐向燃料进口侧偏移。模拟结果表明, 高利用率下局部反

应中心偏移引发的强烈耗氧，是导致阴极氧气分布极度不均的根本原因。

(2) 与无反应纯流动工况相比，电化学反应耦合工况下流道压降明显降低，并且两类工况之间的压力分布差异随燃料利用率提高而逐渐减小。同时，构建了压降误差预测公式，该模型拟合优度 R^2 达 0.99698，在燃料利用率达到 80% 时，模型预测偏差仅为 0.228%。

(3) 与无反应纯流动工况相比，电化学反应耦合工况下流场的纵、横向流动均匀性普遍下降。其原因在于反应物消耗、产物生成及局部组分变化改变了原有气流分布，从而破坏了流动的稳定性。同时，各通道间组分浓度差异引起的反应速率不一，最终导致均匀性恶化。

3.2 展望

本文重点揭示了电化学反应对 SOFC 单元电池内部流动均匀性的影响机理。结果表明，反应物消耗和产物生成会引起局部贫氧、反应区域偏移和流动均匀性下降，从而可能进一步影响反应物供应、电流密度分布和电池输出稳定性。后续研究将结合流道结构优化和运行参数调控，分析不同改进措施对功率密度、电流密度均匀性、温度梯度和压降损失的影响，定量评估流动均匀性改善对电池性能提升的作用，为 SOFC 气体分配优化方案的有效性评价提供依据。

符号说明

A 、 B 、 C —— 反应级数指数，量纲为 1

A_v —— 活性比表面积， m^2/m^3

c_p —— 混合气体定压比热容， $J/(kg \cdot K)$

$D_{i,eff}$ —— 组分 i 在混合气中的有效扩散系数， m^2/s

$D_{i,m}$ —— 组分 i 在混合气中的分子扩散系数， m^2/s

$E_{act,an}$ —— 阳极电化学反应活化能， J/mol

$E_{act,cath}$ —— 阴极电化学反应活化能， J/mol

e_a^{21} —— 近似相对误差，量纲为 1

e_{ext}^{21} —— 外推相对误差，量纲为 1

F —— 法拉第常数， C/mol

F_s —— 安全因子，量纲为 1

F_u —— 流动均匀性指数，%

GCI —— 网格收敛指数，%

h —— 网格的特征尺寸， mm

h_i —— 第 i 套网格的特征尺寸， mm

I —— 单位张量，量纲为 1

i_{el} —— 电子电流密度矢量， A/m^2

i_{io} —— 离子电流密度矢量， A/m^2

j —— 局部体积电流密度， A/m^3

j_0 —— 交换电流密度， A/m^2

$j_{0,an}$ —— 阳极交换电流密度， A/m^2

$j_{0,cath}$ —— 阴极交换电流密度， A/m^2

k_{eff} —— 多孔介质有效热导率， $W/(m \cdot K)$

k_f —— 气相热导率， $W/(m \cdot K)$

k_s —— 固相热导率， $W/(m \cdot K)$

M_i —— 组分 i 的摩尔质量， kg/mol

N —— 流动均匀性计算中选取的流道截面总数，量纲为 1

n —— 反应转移电子数，量纲为 1

P_{H_2} —— 三相界面处氢气局部分压， Pa

P_{H_2O} —— 三相界面处水蒸气局部分压， Pa

P_{O_2} —— 三相界面处氧气局部分压， Pa

P_{ref} —— 参考压力， Pa

p —— 静压力， Pa

ρ_{GCI} —— 网格收敛阶数，量纲为 1

Q_h —— 总体积热源项， W/m^3

R —— 通用气体常数， $J/(mol \cdot K)$

r_{ij} —— 相邻两套网格的细化比例，量纲为 1

S_{el} —— 电子相电荷源项， A/m^3

S_i —— 组分 i 的质量源项， $kg/(m^3 \cdot s)$

S_{io} —— 离子相电荷源项， A/m^3

S_m —— 质量源项， $kg/(m^3 \cdot s)$

T —— 温度， K

$\bar{u}$ —— N 个流道截面的平均流速， m/s

u_i —— 第 i 个流道截面的平均流速， m/s

$\vec{u}$ —— 速度矢量， m/s

Y_i —— 组分 i 的质量分数，量纲为 1

α_a —— 阳极电荷传递系数，量纲为 1

α_c —— 阴极电荷传递系数，量纲为 1

γ_{an} —— 阳极交换电流密度前因子， A/m^2

γ_{cat} —— 阴极交换电流密度前因子， A/m^2

ΔS —— 反应摩尔熵变， $J/(mol \cdot K)$

ε_{21} 、 ε_{32} —— 相邻网格计算结果差值， Pa

ε —— 多孔介质孔隙率，量纲为 1

η —— 活化过电位， V

κ —— 多孔介质渗透率， m^2

μ —— 混合气体动力黏度， $Pa \cdot s$

ρ —— 混合气体密度， kg/m^3

σ_{el} —— 电子电导率， S/m

$\sigma_{el,eff}$ —— 电子有效电导率， S/m

σ_{io} —— 离子电导率， S/m

$\sigma_{io,eff}$ —— 离子有效电导率， S/m

- r —— 曲折度, 量纲为 1
 ϕ_{el} —— 电子相电势, V
 ϕ_{io} —— 离子相电势, V
 ϕ_i —— 第 i 套网格对应的压降值, Pa
 φ_{ext}^{21} —— 外推解, Pa

参 考 文 献

- [1] ÖZGÜR T, YAKARYILMAZ A C. A review: Exergy analysis of PEM and PEM fuel cell based CHP systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018,43(38): 17993-18000.
- [2] 王洪建, 王冬冬, 曹权, 等. 燃料电池分布式供能技术发展现状及分析[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(20): 8113-8125.
WANG H J, WANG D D, CAO Q, et al. Development status and analysis of fuel cell based distributed energy supply technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8113-8125.
- [3] 舒正龙, 陈启章, 史翔翔. 国内固体氧化物燃料电池发展现状[J]. 电源技术, 2025,49(11): 2216-2223.
SHU Z L, CHEN Q Z, SHI Y X. Development status of solid oxide fuel cell in China[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49 (11): 2216-2223.
- [4] 栾凯夫, 蔡长焜, 谢满意, 等. 固体氧化物燃料电池气流和热场的宏观尺度数值模拟研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023,12(9):2985-3002.
LUAN K F, CAI C K, XIE M Y, et al. Research progress of macroscale numerical simulation of fluid and thermal fields of solid oxide fuel cells[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2985-3002.
- [5] ZHOU R D, CAI W Q, SUN K H, et al. Analysis of assembly and thermal stress in kW scaled SOFC stacks[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025,163: 108702.
- [6] LUO Y, FENG D Z, ZHENG Y T, et al. High-temperature creep damage and failure of symmetrical flat-tube solid oxide fuel cell [J]. Fuel, 2025,385: 134081.
- [7] 薛顶喜, 伊炳尧, 李国君, 等. 功能梯度阳极固体氧化物燃料电池热应力数值模拟研究[J]. 无机材料学报, 2024,39(11): 1189-1196.
XUE D X, YI B Y, LI G J, et al. Numerical simulation of thermal stress in solid oxide fuel cells with functional gradient anode[J]. Journal of Inorganic Materials, 2024, 39(11): 1189-1196.
- [8] 唐雷, 卢华林, 邢孔钊, 等. 固体氧化物燃料电池流场结构设计及优化[J]. 电源技术, 2025,49(11): 2311-2317.
TANG L, LU H L, XING K Z, et al. Optimized design and enhancement of flow field structures in solid oxide fuel cells [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(11): 2311-2317.
- [9] 李展鹏, 廖家伟, 许超轶, 等. 平管式固体氧化物燃料电池组堆结构与优化[J]. 高校化学工程学报, 2026,40(3):509-520.
LI Z P, LIAO J W, XU C Y, et al. Structural design and optimization of flat-tube solid oxide fuel cell stack[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2026, 40(3): 509-520.
- [10] 熊星宇, 马桂良, 吴云飞, 等. 基于热应力分析的固体氧化物燃料电池结构优化[J]. 洁净煤技术, 2025,31(1): 126-137.
XIONG X Y, MA G L, WU Y F, et al. Thermal stress of solid oxide fuel cell stack via length to width ratio structural optimization[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 126-137.
- [11] ZHAO C, YANG J J, ZHANG T, et al. Numerical simulation of flow distribution for external manifold design in solid oxide fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017,42(10): 7003-7013.
- [12] ZHAO C, YANG J J, ZHANG T, et al. Numerical modeling of manifold design and flow uniformity analysis of an external manifold solid oxide fuel cell stack[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(28): 14440-14451.
- [13] YIN H Y, YI K W, KIM Y J, et al. Research on Internal Flow Uniformity of U-Flow Pattern and Z-Flow Pattern SOFC Stacks Based on Numerical Analysis[J]. Energies , 2025,18(7):1682.
- [14] ZHANG Y H, XIONG X Y, WU X, et al. Optimization of SOFC stack gas distribution structure based on BP Neural network and CFD[J]. E3S Web of Conferences, 2021,245: 3007.
- [15] CHEN X D, JI Y, YANG J J, et al. Flow uniformity analysis and optimization of a 60-cell external manifold solid oxide cell stack with bottom-accesses[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023,48(82): 32056-32067.
- [16] ZHANG W Y, ZENG Y, ZHANG H W, et al. Structural design and optimization for a 20-cell solid oxide fuel cell stack based on flow uniformity and pressure drop[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023,48(94): 36900-36917.
- [17] 刘子裕, 赵爽, 王晓璐, 等. 连接体肋型结构对 SOFC 流场均匀性与电化学性能的影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2026,46(4): 1486-1495.
LIU Z Y, ZHAO S, WANG X L, et al. Influence of Interconnect Structure on Flow Field Uniformity and Electrochemical Properties of SOFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(4): 1486-1495.
- [18] 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.
- [19] SU S C, HE H H, CHEN D F, et al. Flow distribution analyzing for the solid oxide fuel cell short stacks with rectangular and discrete cylindrical rib configurations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40(1): 577-592.
- [20] 邵金秋, 刘子裕, 徐珊珊, 等. 分层连接体构型对固体氧化物燃料电池性能影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2026: 1-10.
SHAO J Q, LIU Z Y, XU S S, et al. Study on the influence of layered flow configuration of interconnector on Solid Oxide Fuel Cells performance [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-10[2026-07-05].
- [21] YI K, YIN H, KIM Y, et al. Impact of Fuel Utilization on Flow and Reaction Uniformity in a 1 kWe SOFC Stack: A CFD-Based Study [J]. FUEL CELLS, 2025,25(3):e70007.
- [22] ROACHE P J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies[J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116(3): 405-413.