

DOI: 10.19666/j.rlfed.202401034

流道扰流体对固体氧化物燃料电池 温度梯度的影响研究

戴潼雨, 李鸿坤

(西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031)

[摘要] 固体氧化物燃料电池 (solid oxide fuel cell, SOFC) 内部过高的温度梯度会导致电池失效, 如何降低 SOFC 温度梯度、提高电池温度分布的均匀性至关重要。结合电、热、流动和传质物理场建立了 SOFC 多物理场耦合模型, 通过与实验数据对比验证了模型准确性; 通过 SOFC 模型研究了 SOFC 温度和温度梯度分布情况, 确定了电池反应区最大温度梯度为优化指标, 提出了扰流体流道结构设计, 并在考虑功率密度的影响情况下, 证明了扰流体结构的有效性。对扰流体结构的形状、高度和宽度进行了分析讨论, 分析发现: 扰流体主要是通过改变流体流速和反应层氧气浓度来影响反应区最大温度梯度的, 扰流体对于流道压降的改变主要影响了损失功率密度; 最终确定了圆弧扰流体结构 ($h=0.8$ mm, $d_1=4.0$ mm) 为较优结构, 在净功率密度与传统直流道相同时, 最大温度梯度为 43.35 K/cm, 相比传统直流道, 降低了 9.4%。

[关键词] 固体氧化物燃料电池; 多场耦合仿真; 温度梯度; 扰流体结构

[引用本文格式] 戴潼雨, 李鸿坤. 流道扰流体对固体氧化物燃料电池温度梯度的影响研究[J]. 热力发电, 2024, 53(7): 53-61.
DAI Tongyu, LI Hongkun. Study on effect of flow channel obstacles on temperature gradient of SOFC[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(7): 53-61.

Study on effect of flow channel obstacles on temperature gradient of SOFC

DAI Tongyu, LI Hongkun

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The excessively high temperature gradient inside solid oxide fuel cell (SOFC) can lead to failure of the cell, so it is critical to reduce the temperature gradient in the SOFC and enhance the uniformity of the cell temperature. By combining with the electrical, thermal, flow, and mass transfer physical fields, a multi-physics field coupling model of the SOFC is established. The accuracy of the model is verified by comparing with the experimental data. The SOFC temperature and temperature gradient distributions are investigated by the SOFC model and the maximum temperature gradient in the cell reaction zone is determined as the optimization objective. The obstacle structure in flow channel is designed, and the effectiveness is proved. The shape, height and width of the obstacle structure are discussed and analyzed. It is found that the obstacle affects the maximum temperature gradient in the reaction zone mainly by changing the fluid flow rate and the oxygen molar concentration in the reaction layer. The change of the obstacle for the pressure drop in the flow path mainly affects the power density loss. Finally, the circular obstacle ($h=0.8$ mm, $d_1=4.0$ mm) is identified as the optimal structure. With the same net power density as the conventional channel, the maximum temperature gradient is 43.35 K/cm, which is 9.4% lower than that of the conventional channel.

Key words: solid oxide fuel cell; multiphysics field coupling simulation; temperature gradient; structure of the obstacle

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52306115); 四川省自然科学基金项目 (2023NSFSC0832)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52306115); Natural Science Foundation of Sichuan Province (2023NSFSC0832)

第一作者简介: 戴潼雨 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 SOFC 热管理技术, dtty2021@my.swjtu.edu.cn.

通信作者简介: 李鸿坤 (1991), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源系统热管理技术, lhk@swjtu.edu.cn.

目前,全球人口和经济逐步增长,气候变化和能源短缺问题日益凸显,可持续发展和环境保护的关注度越来越高,因此改善传统能源结构形式,研究和发新型能源转换和存储技术,探索使用可再生能源具有极其重大的现实意义。燃料电池技术是一种具有显著优势和发展潜力的新能源技术,是氢工业和氢经济的关键组成元素^[1]。燃料电池不需要燃烧就可以将燃料的化学能直接转化为电能,其不受卡诺循环的限制^[2-3]。在众多燃料电池中,固体氧化物燃料电池作为第三代燃料电池,单机时其能源转化效率可达70%,对高品质废热进行利用时,系统效率甚至可达80%以上^[4],且可以避免使用贵金属催化剂,降低了生产成本。

目前,固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)技术仍存在瓶颈,克服技术瓶颈的关键在于平衡SOFC运行过程中出现的不均匀的热应力^[5]。已有研究表明了温度梯度与热应力关系密切,温度梯度的增加会导致热应力升高^[6]。SOFC堆中的热应力升高会导致机械结构不稳定和缺陷,如变形、蠕变和裂缝^[7-8],增加了结构失效的概率。因此,如何降低电池的温度梯度,使电池温度更均匀,防止电池损坏至关重要。

传统SOFC散热方式主要是通过空气作为冷却气体带走电池的热量、降低电池的温度梯度。Recknagle等人^[9]用计算流体动力学(CFD)软件对三维板式SOFC进行模拟,得到了3种流体流动形式对温度、电流密度和燃料组分的影响,结果显示顺流情况具有最小的温度梯度,比其他2种情况更具优势。Zheng等人^[10]进行了三维模拟,定量比较了顺流和逆流布置对平面SOFC中温度梯度的影响,逆流布置的SOFC中最大温度梯度约为55℃/cm,比顺流布置的SOFC高10℃/cm,表明从温度梯度角度出发,顺流布置要好于逆流布置。Wu等人^[11]从空气冷却的角度出发,研究了一个控制系统模型,通过调整阴极空气流速来确保温度梯度在合适的范围内。

流体流道结构对SOFC模块的温度场分布具有较大影响,适当的流场设计有利于降低电池内部温度梯度。Manglik等人^[12]对矩形、梯形、三角形3种不同截面形状的通道的SOFC进行了对比,相比于另外2种形状的截面,矩形截面通道的平面电池堆冷却效果更好。蔡伟强等^[13]设计了一种弧形截面流道,对比传统矩形截面流道,弧形流道在气体组分和温度分布上更均匀,弧形截面可以有效减小

原先矩形截面在直角处出现较大的等效力。XU等人^[14]通过模拟研究了3种不同的形状连接体的SOFC,结果表明2种梯形的连接体都可以有效地降低热应力,同时连接体肋较厚,会使阴极连接体热应力增加,但也可降低阳极侧的热应力。ANDERSSON等人^[15]研究了矩形通道的宽度和高度比对平面SOFC温度分布的影响,结果显示宽度为2.0mm、高度为0.5mm的气体通道与宽度为1.0mm、高度为1.0mm的通道表现出相同的温度梯度。BI等人^[16]为分析几何参数对平面SOFC堆中流动均匀性的影响,发现了相对较大的气体集管宽度和适当的出口集管宽度与入口集管宽度对大尺寸平板型SOFC中气体流动的均匀性有利。

虽然扰流体结构在换热器中的强化传热作用已被证实,但对SOFC流道的影响目前研究较少。SOFC流道中扰流体结构不仅可以强化传热,也会对SOFC的输出性能产生影响。然而,以往文献缺少扰流体结构对SOFC温度梯度和输出功率的综合影响分析。由于实验研究温度梯度成本和难度较大,本文采用数值模拟方法建立了平面阳极支撑型SOFC的三维多物理场耦合模型,求解了质量、动量、能量和电荷守恒和扩散方程;在考虑功率密度的情况下,研究了在阴极气体通道内设置扰流体结构后对电池最大温度梯度的影响,并与直流通道进行了比较;且对不同扰流体的形状、高度和宽度下的电池最大温度梯度结果进行了对比分析,最终提出一种较优扰流体结构。

1 模型建立

1.1 几何结构

本文以实际生产的4cm×4cm平板式阳极支撑SOFC单电池为对象,按照其结构尺寸和材料参数建立了单通道SOFC三维稳态几何及多物理场耦合模型。SOFC模型结构如图1所示。

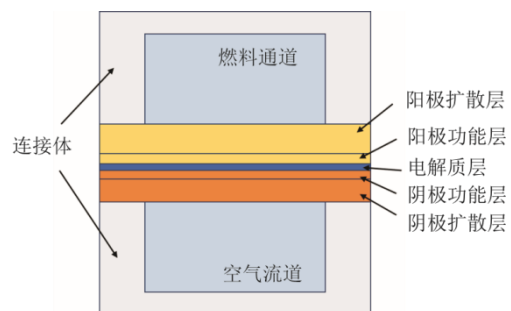


图1 SOFC结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the SOFC structure

模型考虑了 SOFC 内的电化学反应,以及质量、动量、能量、电荷等传递过程。模型结构包括阳极连接体、阴极连接体、阳极扩散层、阴极扩散层、阳极功能层、阴极功能层和电解质层。具体尺寸参数参考表 1。

表 1 SOFC 结构参数 单位: mm
Tab.1 Parameters of the SOFC structure

项目	数值
电池长度	40.00
通道宽度	2.00
通道高度	1.00
连接体厚度	1.30
阳极扩散层厚度	0.38
阳极功能层厚度	0.02
阴极扩散层厚度	0.05
阴极功能层厚度	0.02
电解质层厚度	0.01

本文建立的多物理场耦合模型包含如下假设:

1) SOFC 运行阶段视为稳态过程; 2) 反应气体为理想不可压缩气体; 3) 阳极、阴极、电解质、连接体均为各向同性; 4) 流体流动为层流; 5) 由于热辐射在传热中占比较小, 因此忽略热辐射^[17]。

1.2 多物理场耦合模型

1.2.1 电化学模型

SOFC 的开路电压是在给定条件下电池所能达到的理论最大电压, 但由于电池中存在各种极化损失, 所以实际电压小于开路电压。开路电压和实际电压计算公式为^[18]:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{OCV}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{conc}} \quad (1)$$

$$E_{\text{OCV}} = E_0 - \frac{RT}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}}} \right) \quad (2)$$

$$E_0 = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T \quad (3)$$

式中: V_{cell} 为实际电池工作电压, V; E_{OCV} 为电池的能斯特电压, V; η_{act} 为活化极化电压, V; η_{ohm} 为欧姆极化电压, V; η_{conc} 为浓差极化电压, V; E_0 为标准压力下的电势, V; p_i 为燃料和空气里各项物质的分压, Pa。阳极和阴极的活化极化电压分别由下式计算^[19]:

$$\eta_{\text{act,a}} = \phi_s - \phi_1 - E_{\text{eq,a}} \quad (4)$$

$$\eta_{\text{act,c}} = \phi_s - \phi_1 - E_{\text{eq,c}} \quad (5)$$

式中: 下标 1 和 s 分别表示电解质材料和电极材料, 下标 a 和 c 分别表示阳极和阴极; ϕ 为电势; E_{eq} 为

平衡电位, $E_{\text{eq,a}}=0 \text{ V}$, $E_{\text{eq,a}}=E_{\text{OCV}}$ 。活化极化损失与电流密度之间的关系由 Butler-Volmer 公式得出:

$$i_{\text{loc}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{\text{R}}}{C_{\text{OR}}} \exp \left(\frac{\alpha n F \eta_{\text{act}}}{RT} \right) - \\ \frac{C_{\text{O}}}{C_{\text{OO}}} \exp \left(\frac{-(1-\alpha) n F \eta_{\text{act}}}{RT} \right) \end{array} \right\} \quad (6)$$

式中: i_0 为交换电流密度, A/m^2 ; C_{OR} 、 C_{OO} 分别为还原物和氧化物的参考浓度; C_{R} 、 C_{O} 分别为还原物和氧化物的实际浓度, mol/m^3 ; α 为传递系数, 文中 $\alpha=0.5$; F 为法拉第常数, $F=96485 \text{ C}/\text{mol}$ 。阳极和阴极的交换电流密度用下式计算^[20]:

$$i_{0,a} = A_a \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (7)$$

$$i_{0,c} = A_c \exp \left(-\frac{E_c}{RT} \right) \quad (8)$$

式中: A_a 、 A_c 分别为阳极和阴极的指前因子, $A_a=1.5 \times 10^{10} \text{ A}/\text{m}^2$, $A_c=2.1 \times 10^{11} \text{ A}/\text{m}^2$; E_a 、 E_c 分别为阳极和阴极的活化能, $E_a=1.5 \times 10^5 \text{ J}/\text{mol}$, $E_c=1.74 \times 10^5 \text{ J}/\text{mol}$ 。

电极中的离子和电子传输方程表示为:

$$\nabla \cdot i_k = Q_k \quad (9)$$

$$i_k = -\sigma_k \nabla \phi_k \quad (10)$$

式中: σ_k 表示 1 个通用的源项; 下标 k 表示指数, 1 表示离子传递, s 表示对于电子传递; ϕ_k 表示电势; σ_k 表示电导率, 可由下式计算^[21-22]:

$$\sigma_{s,a} = \frac{9.5 \times 10^7}{T} \cdot \exp \left(-\frac{1150}{T} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{s,c} = \frac{4.2 \times 10^7}{T} \cdot \exp \left(-\frac{1200}{T} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_{1,el} = 3.34 \times 10^4 \cdot \exp \left(-\frac{10300}{T} \right) \quad (13)$$

式中: $\sigma_{s,a}$ 、 $\sigma_{s,c}$ 分别为阳极中的 Ni 和阴极中的阴极材料 LSM 的电导率, S/m ; $\sigma_{1,el}$ 为 YSZ 电解质材料的电导率, S/m 。有效电子和离子电导率表达式为^[23]:

$$\sigma_k^{\text{eff}} = \left(\frac{1-\varepsilon}{\tau} \right) \sigma_k \cdot V_{\text{eff}} \quad (14)$$

式中: τ 为电子或离子传导的曲折度; ε 为多孔电极的孔隙率; V_{eff} 为各种材料占电极的体积百分比, 对于 SOFC 多孔电极而言, 就是 Ni、YSZ、LSM 占多孔电极的体积分数。表 2 给出了多孔电极的结构参数。

表 2 SOFC 多孔电极结构参数

Tab.2 Structural parameters of the SOFC porous electrode

	V_{YSZ}	$V_{\text{Ni}}/V_{\text{LSM}}$	ε	τ
阳极	0.6	0.4	0.3	10.0
阴极	0.6	0.4	0.3	10.0

1.2.2 质量传递模型

质量守恒方程，即连续性方程：

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = Q_m \quad (15)$$

式中： Q_m 为质量源项， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

1.2.3 动量传递模型

采用考虑 Darcy 项的 Navier-Stokes 方程，描述 SOFC 中的动量传递过程：

$$\frac{\rho}{\varepsilon} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left\{ \begin{array}{l} (\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) \\ -\frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \end{array} \right\} \right] - \quad (16)$$

$$\left(\frac{\mu}{\lambda} + \beta \rho |\mathbf{u}| + \frac{Q_m}{\varepsilon^2} \right) \cdot \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

式中： ρ 为混合气体密度， kg/m^3 ； \mathbf{u} 为速度矢量， m/s ； p 为混合气体压力， Pa ； \mathbf{I} 为单位矩阵； μ 为混合气体动力黏度， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ； \mathbf{F} 为体积力向量； λ 为多孔介质渗透率。混合气体动力黏度由下式计算：

$$\mu_i = 10^{-7} \sum_{k=0}^6 \alpha_k \left(\frac{T}{1000} \right)^k \quad (17)$$

$$\mu = \sum x_i \mu_i \quad (18)$$

式中： μ_i 为组分 i 的动力黏度， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ； T 为混合气体温度， K ； α_k 为组分参数。

1.2.4 气体扩散模型

在多孔介质中，存在 2 种扩散机制：分子扩散和克努森扩散。分子扩散描述不同气体分子之间的碰撞，克努森扩散描述分子与孔壁之间的碰撞。当同时考虑了克努森扩散和分子扩散时，有效扩散系数 $D_{\text{eff},ij}$ 的计算公式为：

$$D_{\text{eff},ij} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{D_{ij} \cdot D_{k,ij}}{D_{ij} + D_{k,ij}} \right) \quad (19)$$

式中： ε 为孔隙率； τ 为电极曲折度； D_{ij} 为 Stefan-Maxwell 二元扩散系数； $D_{k,ij}$ 为克努森扩散，可由下式计算：

$$D_{k,ij} = \frac{2}{3} r_e \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_{ij}}} \quad (20)$$

式中： r_e 为多孔电极的平均孔隙半径， m ； M_{ij} 为混合气体的摩尔质量， kg/mol 。

菲克定律用于描述 SOFC 内部的扩散过程，菲克定律表示为：

$$J_i = \rho D_{\text{eff},ij} \nabla \cdot \omega_i \quad (21)$$

式中： ω_i 为气体组分 i 的质量分数； $D_{\text{eff},ij}$ 为有效扩散系数。

1.2.5 热量传递模型

电池内部的热量传递包括了气体与固体表面之间的对流传热、固体内部的热传导和电池内部的热辐射。相比于前 2 种传热方式，热辐射所占的量很小，因此本模型的热量传递过程忽略热辐射。

SOFC 燃料电池中的能量守恒方程表示为：

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_{\text{eff}} \cdot \nabla T) = Q_h \quad (22)$$

式中： Q_h 为热量源项包括了欧姆热源、活化热源和电化学反应热源， W/m^3 ； ρ 为混合气体密度， kg/m^3 ； c_p 为混合气体定压比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； k_{eff} 为有效热导率， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，由固相热导率 k_s 、气相热导率 k_g 以及孔隙率 ε 计算：

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_g + (1 - \varepsilon) k_s \quad (23)$$

SOFC 各元件具体参数由表 3 列出。

1.2.6 边界条件

为提高模型的真实性和准确性，需要反应真实运行情况的边界条件，本模型的具体边界条件见表 4。

表 3 材料属性

Tab.3 The material properties

项目	渗透率 λ/m^2	比表面积 $A_v/(\text{m}^2/\text{m}^3)$	导热率 $K/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	比热容 $c_p/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$
阳极功能层	2×10^{-10}	1.08×10^5	11.0	450
阳极扩散层	2×10^{-11}	1.3×10^5	11.0	450
电解质层			2.7	550
阴极功能层	2×10^{-10}	1.08×10^6	6.0	430
阴极扩散层	2×10^{-11}	2.6×10^6	6.0	430
连接体			20.0	550

表 4 模型边界条件
Tab.4 Boundary conditions of the model

项目	质量传递	热量传递/K	动量传递	电荷传递/V
阳极流道入口	$x_{H_2} = 0.95$ $x_{H_2O} = 0.05$	$T=1\ 073$	$m_a=2 \times 10^{-8}$ kg/s	
阴极流道入口	$x_{N_2} = 0.79$ $x_{O_2} = 0.21$	$T=1\ 073$	$m_c=8 \times 10^{-7}$ kg/s	
阳极流道出口	对流	对流	$p_a=0.1$ MPa	
阴极流道出口	对流	对流	$p_c=0.1$ MPa	
阳极连接体顶部		绝热		0
阴极连接体底部		绝热		0.7

2 仿真结果与验证

2.1 网格无关性验证

数值模拟需要确定网格数量与计算结果的关系，即网格无关性验证。本文以 0.7 V 工作电压下的电流密度和电池最大温度作为网格无关性验证的 2 个参数，结果如图 2 所示。从图 2 可以看到，在网格数到达 45 600 之后，电流密度和电池最大温度的数值基本稳定，因此可以认为网格数在 45 600 时已达到网格无关。为减小计算内存和计算速度，选取 45 600 网格数作为模型的计算网格数。

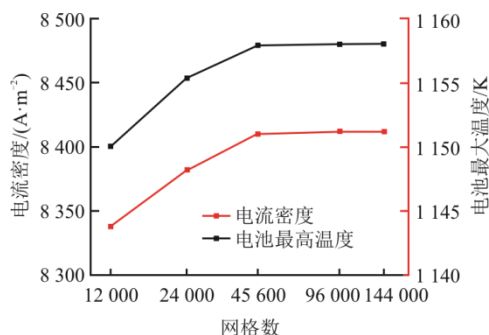


图 2 网格无关性验证结果
Fig.2 Grid independence verification result

2.2 模型验证及仿真结果

对本文的模型验证分成电流密度验证和温度特性验证。将本文仿真结果与文献[26]中的实验和仿真结果进行对比，结果如图 3 所示。由图 3 可见，相同工况下本文仿真结果与实验数据的误差不超过 3.5%，比文献[26]中仿真结果更接近实验数据。这表明本文 SOFC 模型电流密度的模拟结果准确性较高。为验证模型温度特性的准确性，参考了文献[27]的模拟结果，若将本文的几何结构和物性参数修改为与文献[27]一致，对比其温度仿真结果如图 4 所示。由图 4 可见，模型温度模拟准确性较高。

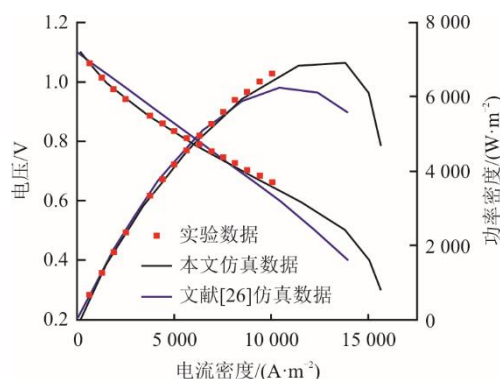


图 3 本文电流密度仿真结果与文献[26]实验数据和仿真结果对比验证

Fig.3 Comparative validation of the simulation results of this paper with the experimental data and simulation results of reference [26]

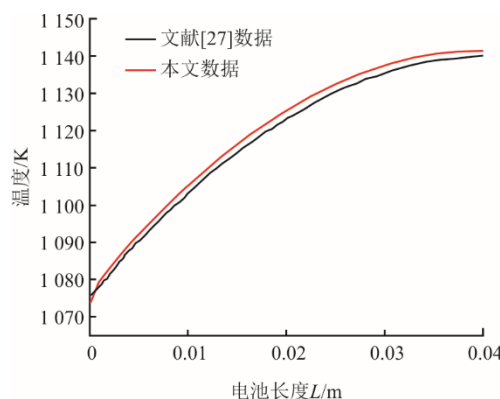


图 4 温度仿真结果与文献[27]结果对比验证

Fig.4 Validation of temperature simulation results against that in reference [27]

SOFC 中的电化学反应主要集中在电解质附近区域，本文模型设定电化学反应发生在电解质附近 20 μm 距离的阳极阴极区域，即阳极、阴极功能层。SOFC 最核心的部分就是由阳极功能、电解质层和阴极功能层组成的反应区，该区域的变形损坏将会直接影响电化学反应，甚至导致气体泄漏，造成爆炸风险，其余阳极、阴极区域的功能主要是气体的

扩散和电池支撑作用。

图 5 为 0.7 V 工作电压下反应区的温度及其梯度分布。从图 5 可以看出：电池入口处温度最低，沿着电池长度方向逐渐升高；在入口处温度梯度最高，出口处最低。这是因为入口处燃料和空气温度最低，与电池内部温度的差异最大，导致入口处温度梯度最高，而随着气体的流动，气体与电池的温度逐渐接近，温度梯度也逐渐变小，在出口处达到最小。反应区温度及其梯度沿电池长度方向分布如图 6 所示，与图 5 结果一致。

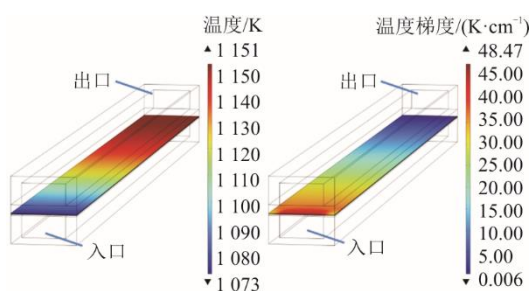


图 5 SOFC 反应区温度及其梯度分布

Fig.5 Temperature and temperature gradient distribution in the SOFC reaction zone

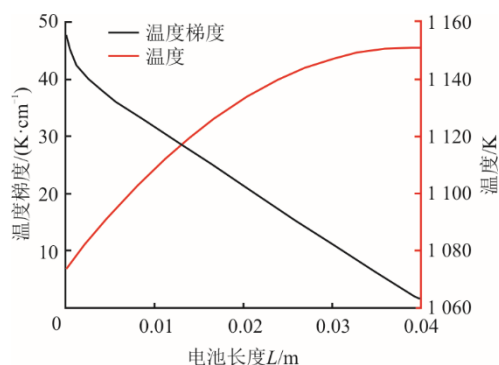


图 6 反应区温度和温度梯度沿长度方向分布

Fig.6 Temperature and temperature gradient distribution along the length direction of the reaction zone

衡量反应区温度和温度梯度分布最关键的参数是最大温度梯度，它代表了电池受损的最大可能性，因此如何降低反应区最大温度梯度是本文要探讨的目标。

3 流道扰流体结构设计

3.1 流道扰流体结构

为减小 SOFC 的最大温度梯度，本文提出一种扰流体结构设计思路，其结构示意如图 7 所示。扰流体放置在空气流道上方，这是因为 SOFC 的热量

主要由空气带出。扰流体设计可以改变局部流场流速，从而提高 SOFC 的对流散热能力。

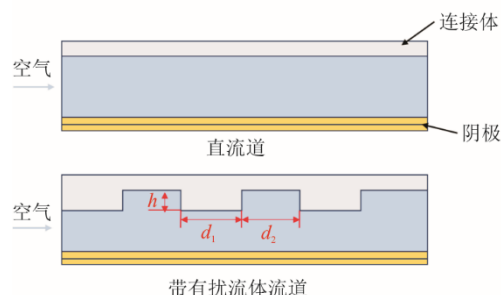
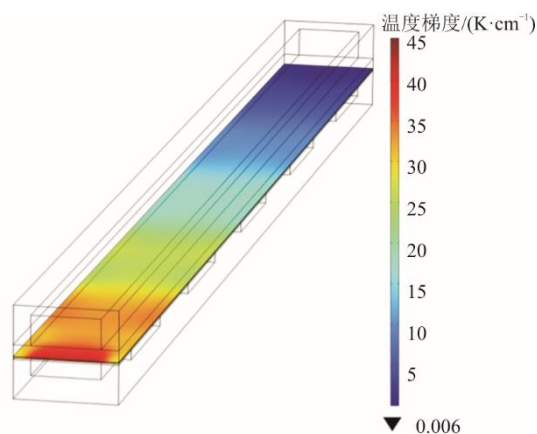
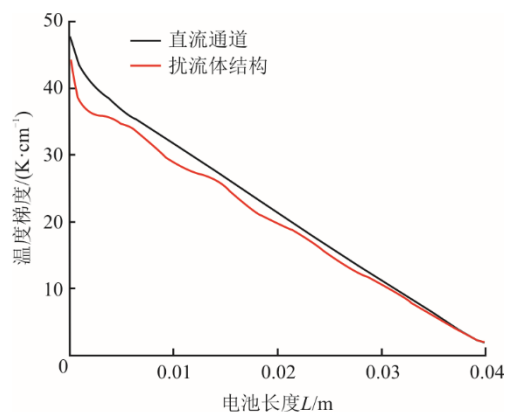


图 7 扰流体结构示意图和尺寸

Fig.7 Schematic diagram and dimensions of the disturbed fluid structure



a) 扰流体结构反应区温度梯度



b) 温度梯度对比

图 8 扰流体结构温度梯度分布与温度梯度对比

Fig.8 Temperature gradient distribution of disturbed fluid structure and temperature gradient comparison

为验证扰流体设计的有效性，假设扰流体尺寸为： $h=0.5\text{ mm}$ ， $d_1=4.0\text{ mm}$ ， $d_1:d_2=1:1$ 。在 0.7 V 工作电压下，扰流体流道的仿真结果如图 8 所示。由图 8 可见：扰流体流道最大温度梯度为 45.11 K/cm，与直通道的 48.47 K/cm 相比，降低了 5.7%；扰

流体结构温度梯度沿流道长度方向均低于直流通道。然而，0.7 V 电压下扰流体结构的功率密度为 5 846.8 W/m²，低于直流通道功率密度 (5 936.3 W/m²)，可见扰流体在降低最大温度梯度的同时也带来了功率损失。

为了说明扰流体流道的优势，本文通过微调氢气流量来弥补压损导致的功率损失，在保持净功率密度不变的情况下，对比两者的最大温度梯度值。

SOFC 净功率密度计算公式为：

$$W_{net} = W_{cell} - W_{pumping} \quad (24)$$

$$W_{pumping} = \Delta p \cdot Q / 60 / A_{cell} \quad (25)$$

式中： W_{net} 为净功率密度，W/m²； W_{cell} 为输出功率密度，W/m²； $W_{pumping}$ 为泵送功率密度，W/m²； Δp 为压降，MPa； Q 为流量，sccm； A_{cell} 为表面积，m²。

图 9 为扰流体流道功率密度和最大温度随氢气流量变化关系。由图 9 可见，输出功率密度、净功率密度和最大温度梯度均随氢气的增加而增大。输出功率密度和净功率密度的差距主要来自于扰流体结构带来的压降损失。计算得到直流通道的净功率密度为 5 924.5 W/m²，在同等净功率密度下，扰流体结构最大温度梯度为 45.8 K/cm，与直流通道相比降低了 4.3%，这进一步表明扰流体结构有效降低了最大温度梯度。

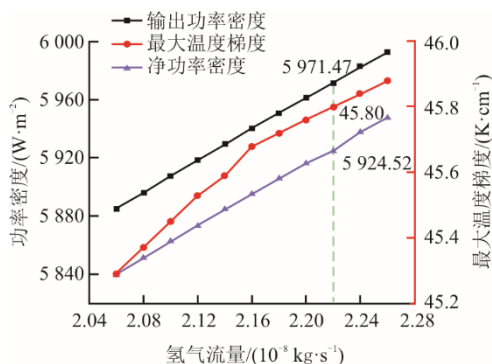


图 9 扰流体流道输出功率密度、净功率密度、最大温度随氢气流量变化

Fig.9 Variations of output power density, net power density, and maximum temperature with hydrogen flow rate in disturbed fluid flow channel

3.2 扰流体形状影响分析

选取矩形、圆弧形、梯形和三角形结构的扰流体进行对比，4 种形状的尺寸如图 10 所示。保持 $h=0.5 \text{ mm}$ 、 $d_1=d_2=4.0 \text{ mm}$ 不变，调整 4 种形状扰流体流道的净功率密度在 5 924.5 W/m² 时，其最大温度梯度结果如图 11 所示。

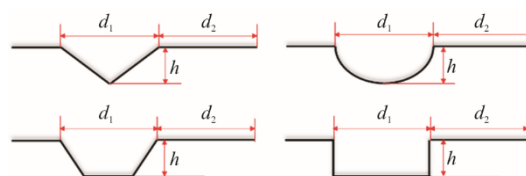


图 10 不同形状扰流体结构尺寸示意
Fig.10 Schematic diagram of dimensions of different shapes of disturbed fluid structures

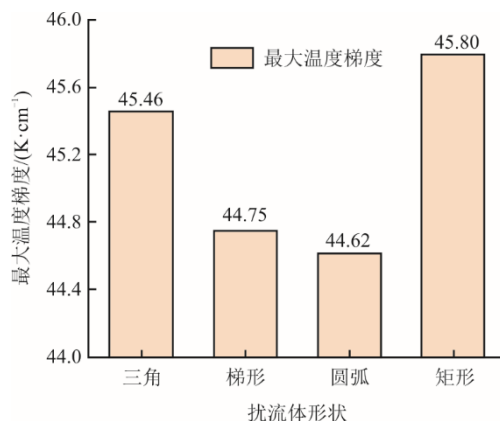


图 11 4 种形状扰流体最大温度梯度对比结果
Fig.11 Comparison results of maximum temperature gradient for four shapes of disturbed fluid

不同扰流体结构对流速、反应层氧气浓度分布和压降的影响不同。流速代表流道的对流散热能力；反应层氧气浓度代表反应强度和产热强度；压降代表功率损失大小。由于最大温度梯度出现在电池入口，因此入口处的流速和反应层氧气浓度直接影响最大温度梯度，压降则是通过功率损失间接影响温度梯度。矩形扰流体流道入口处的流速最高，梯形和圆弧形其次，三角形最小，这表示矩形散热能力最好；矩形扰流体入口处的反应层氧气浓度最高，梯形和圆弧形其次，梯形最低，这代表矩形同时具有最高的产热能力。在 2 种参数综合的影响下，圆弧和梯形表现出来较小的温度梯度，三角形和矩形则表现出了较大的温度梯度。

圆弧形扰流体压降比梯形更小，其功率损失更小，调整氢气所需的量更小，由于氢气流量增加而增加的温度梯度值更小。因此，调整氢气流量后圆弧形表现出了最低的最大温度梯度，其次为梯形、三角形，矩形效果最差。

在不同净功率密度下的最大温度梯度对比结果如图 12 所示。由图 12 可见，在所有净功率密度下，4 种扰流体中圆弧形扰流体的效果最好。

3.3 扰流体高度影响分析

保持 $d_1=d_2=4.0 \text{ mm}$ 不变，不同高度下圆弧形扰

流体净功率密度为 $5\,924.5\text{ W/m}^2$ 时, 最大温度梯度对比结果如图 13 所示。

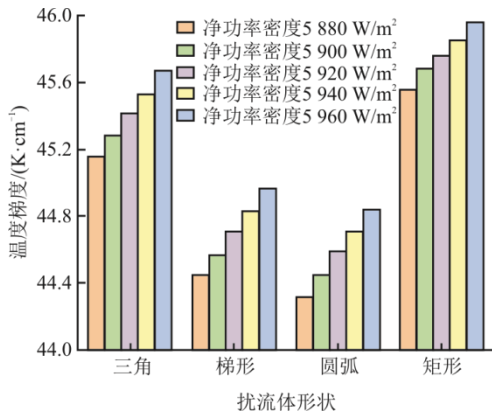


图 12 不同净功率密度下 4 种扰流体最大温度梯度对比
Fig.12 Comparison of the maximum temperature gradient of four shapes of disturbed fluid structures at different net power densities

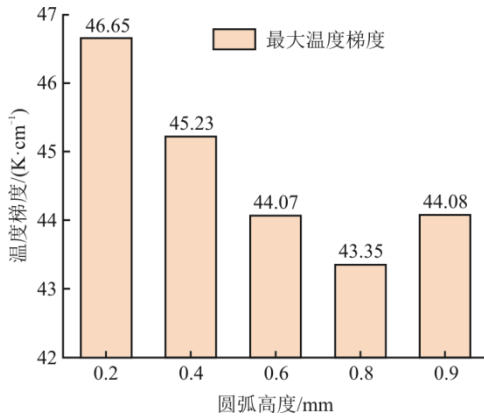


图 13 不同高度下扰流体最大温度梯度对比结果
Fig.13 Comparison results of the maximum temperature gradient of the perturbed fluid at different heights

下面分析结果形成的原因: 随着高度的增加, 入口处的流速、反应层氧气浓度在增加, 流道压降也在增加。在不同高度下, 流速提高所带来的散热能力增强总是强于由氧气浓度提高所带来的产热, 也就是说在原始工况条件下, 扰流体高度越高, 入口处散热效果越强, 最大温度梯度越低。但是, 随着高度的增加, 压降呈现指数级增加, 这表示高度越高, 损失功率越严重, 为调整净功率密度所增加的温度梯度越多。因此, 综合了压降影响之后, $h=0.8\text{ mm}$ 时 SOFC 的最大温度梯度为最低值。

3.4 扰流体宽度影响分析

保持 $h=0.8\text{ mm}$, $d_1:d_2=1:1$ 不变, 不同宽度 d_1 下圆弧形扰流体净功率密度为 $5\,924.5\text{ W/m}^2$ 时最大温度梯度对比结果如图 14 所示。下面分析结果形

成的原因: 2.0 mm 宽度扰流体反应区氧气浓度最高, 其次是 4.0 、 6.0 、 8.0 mm , 但整体差别不大。扰流体宽度改变后, 流道最高流速基本不变, 但是最高流速点距离入口的距离随宽度的增加而变远。在 4 种宽度中, 2.0 mm 宽度扰流体在入口处获得了最高的流速, 这表示 2.0 mm 宽度扰流体入口处的对流散热能力最强, 但同时 2.0 mm 宽度扰流体压降损失最高、输出功率最低。因此 2.0 mm 宽度扰流体调整净功率密度时所增加的温度梯度最大, 在调整净功率密度后温度梯度高于 4.0 mm 宽度的扰流体。而 4.0 mm 宽度的扰流体由于入口流速较高且压降损失在 4 种宽度中最低, 因此在净功率密度相同时, 取得了最低的最大温度梯度。

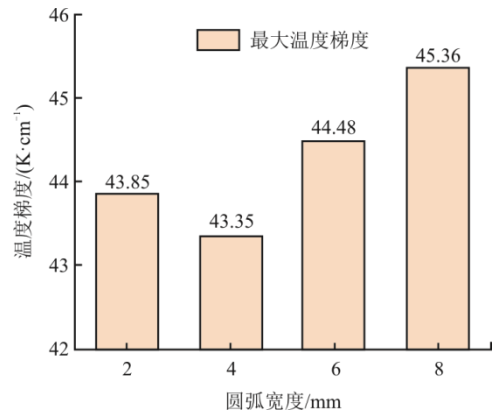


图 14 不同宽度下扰流体最大温度梯度对比结果
Fig.14 Comparison results of the maximum temperature gradient of the perturbed fluid with different widths

总结可得, 当扰流体选择圆弧形、高度 $h=0.8\text{ mm}$ 、宽度 $d_1=4.0\text{ mm}$ 时, SOFC 反应区的最大温度梯度最低, 相比传统直流通道的最大温度梯度降低了 9.4%。

4 结 论

1) 本文建立 SOFC 多物理场耦合模型, 研究了燃料电池的温度场和温度梯度分布, 确立了电池反应区最大温度梯度的优化目标。

2) 提出了扰流体结构设计, 考虑了压损带来的功率损失, 证明了扰流体结构对最大温度梯度的优化效果。

3) 对抗流体的形状、高度和宽度的分析表明, 圆弧形扰流体且高度 $h=0.8\text{ mm}$ 、宽度 $d_1=4.0\text{ mm}$ 为较优结构, 在净功率密度和传统直流通道的同时, 反应区最大温度梯度为 43.35 K/cm , 比传统直流通道的降低了 9.4%。

[参考文献]

- [1] 陈烁烁. 固体氧化物燃料电池产业的发展现状及展望[J]. 陶瓷学报, 2020, 41(5): 627-632.
CHEN Shuoshuo. Development status and outlook of solid oxide fuel cell industry[J]. Journal of Ceramics, 2020, 41(5): 627-632.
- [2] HOSSAIN S, ABDALLA A M, JAMAIN S N B, et al. A review on proton conducting electrolytes for clean energy and intermediate temperature-solid oxide fuel cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 750-764.
- [3] NISHIDA R T. Computational fluid dynamics modelling of solid oxide fuel cell stacks[M]. Canada: Queen's University, 2013: 1.
- [4] KUMAR P, SINGH O. A review of solid oxide fuel cell based hybrid cycles[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(7): 8560-8589.
- [5] 韩越, 王家堂, 苗鹤, 等. 固体氧化物燃料电池热应力研究进展[J]. 电源技术, 2020, 44(3): 464-468.
HAN Yue, WANG Jiatang, MIAO He, et al. Progress of thermal stress in solid oxide fuel cells[J]. Power Technology, 2020, 44(3): 464-468.
- [6] KHANAFER K, AL MASRI A, VAFAI K, et al. Heat up impact on thermal stresses in SOFC for mobile APU applications: thermo-structural analysis[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102159.
- [7] 陈弦, 杨杰, 蒲健, 等. 平板式 SOFC 结构热应力的有限元分析[J]. 无机材料学报, 2007, 22(2): 339-343.
CHEN Xian, YANG Jie, PU Jian, et al. Finite element analysis of thermal stresses in flat plate SOFC structures[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(2): 339-343.
- [8] LUO Y, JIANG W, ZHANG Q, et al. Effects of anode porosity on thermal stress and failure probability of planar solid oxide fuel cell with bonded compliant seal[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(18): 7464-7474.
- [9] 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.
- [10] ZHANG Z, YUE D, HE C, et al. Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena in anode-supported planar SOFCs[J]. Heat and Mass Transfer, 2014, 50(11): 1575-1586.
- [11] WU X, YANG D, WANG J, et al. Temperature gradient control of a solid oxide fuel cell stack[J]. Journal of Power Sources, 2019, 414: 345-353.
- [12] DILLIG M, PLANKENBÜHLER T, KARL J. Thermal effects of planar high temperature heat pipes in solid oxide cell stacks operated with internal methane reforming[J]. Journal of Power Sources, 2018, 373: 139-149.
- [13] 蔡伟强, 郑青榕, 袁金良, 等. 船用固体氧化物燃料电池多物理场耦合模型与热应力分析[J]. 船舶工程, 2022, 44(9): 114-120.
CAI Weiqiang, ZHENG Qingrong, YUAN Jinliang, et al. Multi-physics field coupling model and thermal stress analysis of marine SOFC[J]. Marine Engineering, 2022, 44(9): 114-120.
- [14] XU M, LI T, YANG M, et al. Solid oxide fuel cell interconnect design optimization considering the thermal stresses[J]. Science Bulletin, 2016, 61(17): 1333-1344.
- [15] ANDERSSON M, YUAN J, SUNDÉN B. SOFC cell design optimization using the finite element method based CFD approach[J]. Fuel Cells, 2014, 14(2): 177-188.
- [16] BI W, LI J, LIN Z. Flow uniformity optimization for large size planar solid oxide fuel cells with U-type parallel channel designs[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(10): 3207-3214.
- [17] DAUN K J, BEALE S B, LIU F, et al. Radiation heat transfer in planar SOFC electrolytes[J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(1): 302-310.
- [18] WINKLER W, NEHTER P. Thermodynamics of fuel cells[M]//Modeling Solid Oxide Fuel Cells: Methods, Procedures and Techniques. London: Springer Netherlands, 2008: 13-50.
- [19] KHAZAEI I, RAVA A. Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries[J]. Energy, 2017, 119: 235-244.
- [20] FUKUMOTO T, ENDO N, NATSUKOSHI K, et al. Exchange current density of reversible solid oxide cell electrodes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(37): 16626-16639.
- [21] FERGUSON J R, FIARD J M, HERBIN R. Three-dimensional numerical simulation for various geometries of solid oxide fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 1996, 58(2): 109-122.
- [22] HAJIMOLANA S A, HUSSAIN M A, DAUD W M A W, et al. Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 1893-1917.
- [23] HUSSAIN M M, LI X, DINCER I. Mathematical modeling of transport phenomena in porous SOFC anodes[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(1): 48-56.
- [24] ZHANG Z, YUE D, HE C, et al. Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena in anode-supported planar SOFCs[J]. Heat and Mass Transfer, 2014, 50: 1575-1586.
- [25] 杜传胜. 多场耦合作用下 SOFC 电化学性能及热应力研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021: 1.
DU Chuansheng. Study on electrochemical performance and thermal stress of flat-plate SOFC under multi-field coupling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021: 1.
- [26] 张中刚. 多通道 SOFC 内部传递过程研究与数值分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2015: 1.
ZHANG Zhonggang. Research and numerical analysis on the internal transfer process of multi-channel SOFC[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015: 1.
- [27] 郭常福. 固体氧化物燃料电池输运特性和性能模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 1.
GUO Changfu. Simulation study of transport characteristics and performance of solid oxide fuel cell[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 1.

(责任编辑 杨嘉蕾)