

连接体肋形结构对 SOFC 流场均匀性与 电化学性能的影响规律

刘子裕¹, 赵爽², 王晓璐³, 王利刚^{1*}

1. 新型储能技术北京实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 华北电力大学国家储能技术产教融合创新平台, 北京市 昌平区 102206;
3. 电站能量传递转化与系统教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Influence of Interconnect Structure on Flow Field Uniformity and Electrochemical Properties of SOFC

LIU Ziyu¹, ZHAO Shuang², WANG Xiaolu³, WANG Ligang^{1*}

- (1. Beijing Laboratory of New Energy Storage Technology (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. National Energy Storage Industry-Education Platform, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 3. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, Ministry of Education (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The rib-type structure of the interconnect is crucial for flow field uniformity, lifespan, and performance of solid oxide fuel cell (SOFC). This article establishes a three-dimensional numerical model of a single SOFC cell, using the flow uniformity index as an indicator to evaluate the flow field design's adaptability to material flow rates. It investigates the impacts of key interconnect structural parameters, such as rib type, rib width, and rib height on flow uniformity, power density, and fuel utilization. The results demonstrate that teardrop-shaped ribs improve flow uniformity, power density, and fuel utilization compared with rectangular and cylindrical ribs. Moreover, the effects of rib width and height on power density and fuel utilization exhibit a parabolic trend that first increases and then decreases. The optimal overall cell performance is achieved when the rib width is 1.0 mm and rib height is 0.5 mm. This study provides useful recommendations for optimizing fuel cell stack design, flow field uniformity, and overall performance.

KEY WORDS: solid oxide fuel cell; interconnect; flow uniformity; power density; fuel utilization

摘要: 连接体肋形结构对固体氧化物电池(solid oxide fuel cell, SOFC)内流场的均布、寿命及性能提升至关重要。该文建立 SOFC 单电池的三维数值模型, 以流动均匀性指数作

为流场设计对物料流量适应性的评价指标, 研究肋形、肋宽、肋高等连接体结构参数对流场均匀性、功率密度和燃料利用率影响规律。结果表明, 相较矩形肋和圆柱形肋, 水滴形肋能够显著提升流动均匀性、功率密度和燃料利用率, 且肋宽和肋高对功率密度及燃料利用率的影响呈现先增加后减小的抛物线趋势; 当肋宽为 1.0 mm、肋高为 0.5 mm 时, 电池整体性能最优, 为优化流场均匀性、电堆设计和性能提升提供有益指导。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 连接体; 流动均匀性; 功率密度; 燃料利用率

0 引言

传统能源的消耗导致环境保护面临的压力增大^[1], 绿色、高效的能源技术越来越受到关注。固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是高效发电技术^[2], 它将燃料的化学能直接转换为电能, 从而突破卡诺循环对热功转化的限制。SOFC 的工作温度较高, 这使它能够有效利用电池内部不可逆损失产生的热能对燃料气体进行预处理, 如气体重整, 从而适用多种燃料, 包括氢气、天然气、沼气等^[3-4]。多燃料灵活性使 SOFC 作为分布式电源具有更大优势^[5-9], 尤其是在气体燃料供应难或野外供电的场合。然而, 电堆内部的流场分布^[10]也会影响电场与温度场的分布, 气体流动不均匀性可导致电流分布

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目)(52276186)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (General Program) (52276186).

不均匀, 导致局部过热和热应力集中, 影响电池性能和寿命^[11-12]。因此, 流场分布均匀化调控是提升电堆性能和寿命的重要手段。SOFC 电堆是由多个电池单元有序排列堆叠而成, 电池间通过连接体相互连接, 后者一方面提供电子传输通道, 另一方面实现气体分配, 并起到支撑作用, 以维持电堆结构稳定。在设计和制造连接体时, 需要考虑包括材料的选择、几何形状、流道尺寸和布局等多种要素。一个设计优良的连接体可以有效提高 SOFC 内部气体的流动和扩散效率, 减少气流阻力与压降, 提升电堆性能和寿命。

在提升连接体材料性能方面, 主要聚焦于提高涂层的致密性和抗氧化性。例如, J Sembler 等^[13]通过常压等离子喷涂技术制备致密的镧锶钴氧化 (lanthanum strontium cobalt, LSC)膜, 在 800℃ 的氧化还原环境下, 其电导率分别达到 7.2 和 1.85 S/cm, 表现出良好的相结构稳定性和导电性能; Hu 等^[14]则通过气溶胶喷涂和热处理, 沉积 5~8 μm 的致密锰钴氧化物(manganese cobalt oxide, MCO)涂层, 具备高抗氧化性, 在 1000h 的运行中保持稳定性能。

在流场优化方面, 连接体肋形结构设计对于电池性能提升具有重要意义。通过实验与数值模拟等手段开展探究, Huang 等^[15]通过透明液压平台测量不同肋结构的流场均匀性, 提出在进出口添加等距小导叶片, 使流场均匀性提高, 功率密度峰值提升 11%; Lin 等^[16]研究肋尺寸对浓差极化的影响, 发现减小肋宽可提高气体均匀性, 降低欧姆极化和浓差极化; Hao 等^[17]采用双梯形渐缩流道设计, 大幅提升质子交换膜燃料电池的输出功率、氢气利用率和膜排水能力, 催化层和膜内协同性分别提高 10.4% 和 25.3%; Su 等^[18]研究 10 层电堆的气流分布, 发现矩形燃料通道和离散圆柱形空气通道实现最佳输出性能; Wang 等^[19]通过三维热流和电化学模型发现, 同向进气有助于温度和电流密度的均匀分布, 但加快气流速或增加氢气含量会提升电流密度, 同时增加温度梯度和热应力; Li 等^[20]建立传统直肋、圆柱肋、矩形和凹形 4 种不同连接体结构 SOFC 的三维模型, 发现在不同电极孔隙率下, 圆柱形、矩形和凹形连接体结构均优于传统直肋连接体结构; Xia 等^[21]通过优化梯形流道的下底宽, 研究发现最优梯形直流道燃料电池相比矩形流道模型提升了氧气扩散效率, 使净输出功率提高 20.90%。

目前, 针对连接体的研究工作主要向减小浓差极化与欧姆极化的方向发展, 但对其结构尺寸, 以往研究仅关注单一参数对电池性能的影响, 而没有全面探讨肋形、肋宽、肋高等多个结构尺寸对流场均布和电堆性能的综合影响, 也未具体提出气流均配方式。本文旨在通过构建 SOFC 的三维数值模型, 详细研究肋形、肋宽、肋高等结构参数对阴阳两极流场均匀性和电池性能的影响规律, 以实现流场均布, 为电堆的设计与性能提升提供理论支持。

1 数值模拟

1.1 几何模型及控制方程

1.1.1 几何模型

如图 1 所示, 阳极支撑型 SOFC 主要由连接体、空气流道、燃料流道、阳极支撑层(anode support layer, ASL)、阳极功能层(anode active layer, AFL)、电解质(electrolyte, ELE)、阴极功能层(cathode active layer, CFL)和阴极集流层(cathode current collector layer, CCCL)构成。

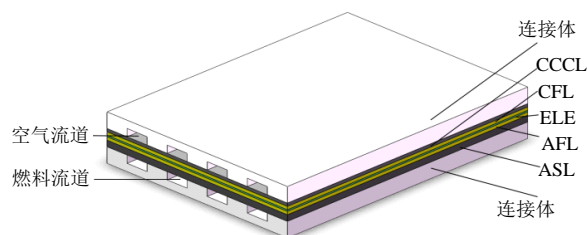
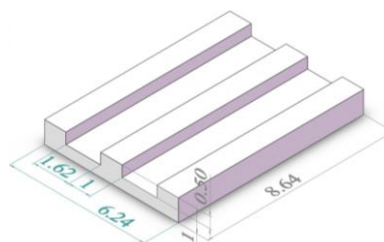


图 1 阳极支撑 SOFC 单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anodic support SOFC unit

在研究中, 矩形肋代表传统的广泛应用的类型, 圆柱形肋通过其分散布置有效增强了气流的扰动, 而水滴形肋则通过其独特的形状设计减少了流动死区。本文主要选择这 3 种肋形进行比较研究。不同连接体肋形的关键结构尺寸如图 2 所示。为确保实验的公平性, 连接体与电极之间的接触面积保持一致, 且在不同肋形下的电化学参数和边界条件设置保持不变。单电池模型的详细几何参数如表 1 所示。



(a) 矩形

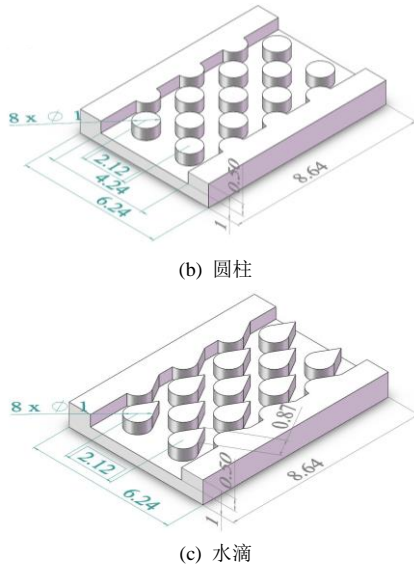


图2 不同肋形结构尺寸

Fig. 2 Different ribbed structure dimensions

表1 SOFC 几何模型参数

Table 1 SOFC geometric model parameters 单位: mm

几何参数	数值	几何参数	数值
连接体长度	67	电池长度	44
连接体宽度	57	电池宽度	44
连接体高度	1	ASL 厚度	0.4
肋高	0.5	AFL 厚度	0.015
矩形肋宽	1	ELE 厚度	0.01
圆柱直径	1	CFL 厚度	0.02
水滴直径	1	CCCL 厚度	0.05

1.1.2 模型假设

SOFC 的运行需要多种材料运输和电化学反应的耦合,为了简化该复杂系统的数值模拟,对模型做出一定假设:

- 1) 燃料与空气为理想气体;
- 2) 忽略内部辐射换热;
- 3) 该过程为稳态过程;
- 4) 多孔介质在结构上是均匀的;
- 5) 为所有壁面定义无滑移边界条件。

1.1.3 控制方程

三维多场模型主要包括动量、质量、能量、电荷等控制方程,以及 Nernst、Butler-Volmer、交换电流密度、欧姆定律等电化学反应方程。

- 1) 气体扩散。

考虑克努森扩散,多孔电极中的扩散用 Maxwell-Stefan 模型,各物质组分守恒方程^[22]为

$$\nabla \cdot (\rho \omega_i \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho D_i^{\text{eff}} \nabla \omega_i) = R_i \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; ω_i 为组分 i 的质量分数; R_i 为组分源项, $\text{mol}/(\text{m}^3 \text{s})$; D_i^{eff} 为修正后的

扩散系数, m^2/s 。

- 2) 能量守恒。

SOFC 中热量产生和运输会影响电堆温度,具体表达式^[23]如下:

$$\rho C_p \mathbf{V} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda^{\text{eff}} \nabla T) = Q_h \quad (2)$$

式中: C_p 为流体的比热容, $\text{J}/(\text{kg K})$; λ^{eff} 为电机的有效导热系数, $\text{W}/(\text{m K})$; Q_h 为热源项, W/m^3 。

- 3) 动量守恒。

动量守恒方程可以通过 Navier-Stokes 方程^[22]描述,具体表达式如下:

$$\nabla \cdot \{\mu[\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T]\} - \nabla p = \rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (3)$$

式中: μ 为流体的黏滞系数, Pa s ; \mathbf{V} 为流体流速, m/s ; p 为工作压强, Pa 。

气体扩散到电极内部的动量运输可以通过 Brinkman 方程描述,具体表达式如下:

$$\frac{\mu}{k} \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \{\mu[\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T]\} - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (4)$$

式中: k 为渗透率, m^2 ; ε 为孔隙率。

- 4) 电荷守恒。

电子流密度和离子流密度可以通过式(5)、(6)^[20]表示:

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_{\text{el}} = \nabla \cdot (-\sigma_{\text{el}}^{\text{eff}} \nabla \Phi_{\text{el}}) \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_{\text{io}} = \nabla \cdot (-\sigma_{\text{io}}^{\text{eff}} \nabla \Phi_{\text{io}}) \quad (6)$$

式中: i_{el} 和 i_{io} 分别为电子流密度和离子流密度, A/m^2 ; Φ_{el} 和 Φ_{io} 分别为局域的电子电势和离子电势, V ; $\sigma_{\text{el}}^{\text{eff}}$ 和 $\sigma_{\text{io}}^{\text{eff}}$ 分别为有效离子电导率和有效电子电导率, S/m 。

- 5) 电化学动力学。

Butler-Volmer 方程表达式^[22]如下:

$$i_v = a i_0 \left\{ \exp\left(\frac{n\alpha F \eta}{RT}\right) - \exp\left[-\frac{n(1-\alpha)F \eta}{RT}\right] \right\} \quad (7)$$

式中: a 为对应电极的比表面积, m^2/m^3 ; i_0 为交换电流密度, A/cm^2 ; n 为电子总数; α 为电荷迁移系数; η 为活化极化, V 。其中,交换电流密度 i_0 ^[22]可由式(8)得到:

$$i_{0,a} = \gamma_a \left(\frac{P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2,\text{ref}}}\right)^A \left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O},\text{ref}}}\right)^B \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

$$i_{0,c} = \gamma_c \left(\frac{P_{\text{O}_2}}{P_{\text{O}_2,\text{ref}}}\right)^C \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \quad (9)$$

式中: γ_a 、 γ_c 为阳极和阴极的指数因子; P_i 、 $P_{i,\text{ref}}$ 分别为各组分分压和参考分压, Pa ; E_a 、 E_c 分别为

阳极和阴极的活化能, J/mol。

电池平衡电动势 E_{Nernst} 可由 Nernst 方程求得:

$$E_{\text{Nernst}} = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}}}\right) \quad (10)$$

$$E_0 = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T \quad (11)$$

在实际运行中, SOFC 通常不可避免地会产生损耗, 包括活化过电势 η_{act} 、欧姆过电势 η_{ohm} 和浓差过电势 η_{conc} , 实际工作电压为

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{conc}} \quad (12)$$

式中活化过电势 η_{act} 和浓差过电势 η_{conc} 的计算如下:

$$\eta_{\text{act,an}} = \frac{RT}{\alpha n F} \sinh^{-1}\left(\frac{j_{\text{an}}^{\text{TPB}}}{2j_{\text{an},0}^{\text{TPB}}}\right) \quad (13)$$

$$\eta_{\text{act,ca}} = \frac{RT}{\alpha n F} \sinh^{-1}\left(\frac{j_{\text{ca}}^{\text{TPB}}}{2j_{\text{ca},0}^{\text{TPB}}}\right) \quad (14)$$

$$\eta_{\text{conc,an}} = -\frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{H}_2\text{O}}^0}{P_{\text{H}_2} P_{\text{H}_2\text{O}}}\right) \quad (15)$$

$$\eta_{\text{conc,ca}} = -\frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_{\text{O}_2}}{P_{\text{O}_2}^0}\right) \quad (16)$$

$$\eta_{\text{ohm}} = \sum_k \eta_{\text{ohm}}^k = \frac{d_k}{\sigma_k^{\text{eff}}} \cdot j \quad (17)$$

式中: k 为 SOFC 的第 k 个部件; σ_k 为第 k 个部件的电导率, S/m; d_k 为第 k 个部件的厚度, m。

1.2 边界条件

本研究使用 COMSOL Multiphysics 6.0 版本, 通过有限元方法对多个物理场进行耦合仿真, 设置合理的边界条件以模拟 SOFC 在实际工况下的表现。燃料侧和空气侧的气体入口流速分别为 0.2 和 4 m/s, 其中燃料由 99% 的氢气和 1% 的水蒸气组成, 空气则由 79% 的氮气和 21% 的氧气组成。入口温度设为 1023 K, 出口压力为环境大气压 0.1 MPa。温度边界条件设定为恒定 1023 K, 以模拟恒温条件下的运行。阴极连接体底面和阳极连接体底面分别设置为电势和电接地, 以模拟实际电化学反应。模型所用物性参数如表 2 所示^[25]。

1.3 流动均匀性评价指标

构建不同肋形及结构参数下的流场流速适应性表征方法。用无量纲准则数 Re ^[24] 表示流量大小, 探究流量对流动均匀性和压降的影响规律, Re 计算公式如下:

$$Re = \rho u d / \mu \quad (18)$$

表 2 SOFC 物性参数

Table 2 SOFC physical property parameters

参数	数值
支撑层孔隙率	0.44
功能层孔隙率	0.3
曲折因子	3.5
渗透率/ m^2	1.73×10^{-11}
电压/V	0.7
阳极支撑层密度/ (kg/m^3)	3300
阳极活化层密度/ (kg/m^3)	3310
电解质密度/ (kg/m^3)	5160
阴极活化层密度/ (kg/m^3)	3310
阴极集流层密度/ (kg/m^3)	3300
连接体密度/ (kg/m^3)	7850
阳极导热系数/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	11
阴极导热系数/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	6
电解质导热系数/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	2.7
连接体导热系数/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	44.5
阳极比热容/ $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	430
阴极比热容/ $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	450
电解质比热容/ $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	470

式中水力直径 d 为流道特征长度, mm。其计算公式如式(20)所示。

$$d = \frac{4A}{P_1} \quad (19)$$

式中: A 为通道截面积, mm^2 ; P_1 为通道周长, mm。

连接体流场均匀程度可由流动均匀性指数 F 评估^[10,26]:

$$F = \left\{ 1 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 \right]^{0.5} \right\} \times 100\% \quad (20)$$

式中: n 为沿流动方向上所取的截面总数; u_i 为流道截面平均流速, m/s; \bar{u} 为流场平均流速, m/s。

流动均匀性指数大小为 0~1。其中, 0 表示均匀度最差; 1 表示均匀度最好。

1.4 压降计算方法

压降的计算公式如式(10)所示, 其中, 入口处总压力、静压和动压^[27]分别为:

$$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \quad (21)$$

$$P = P_A + P_B \quad (22)$$

$$P_A = \frac{\rho u^2}{2} \quad (23)$$

$$P_B = \rho g h \quad (24)$$

式中: P 为总压, Pa; P_A 为动压, Pa; P_B 为静压, Pa; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为到顶部的距离,

mm。

1.5 网格无关性验证与模型验证

1.5.1 网格无关性验证

以具有较高灵活性和适应性的自由四面体网格对圆柱肋形结构的电池模型进行网格划分,并对圆柱肋处边界层网格进行加密。以流场平均流速和电流密度作为计算收敛参考指标,选取140万、380万、590万、750万、920万、1080万这6组网格数进行模拟对比。

由图3可知,随着网格数量的增加,计算结果的准确度显著提高,流场平均流速稳定在2.7 m/s,电流密度保持在0.84 A/cm²附近。表3所示为不同网格数量下(0.8 V)的平均流速和电流密度的相对误差。相比于140万网格,920万网格和1080万网格下的平均流速相对误差分别为0.7%和0.4%,电流密度相对误差分别为0.6%和0.2%,均低于1%。这表明这些网格数量足以保证计算结果的准确性。综合考虑计算精度和计算时间,最终选择920万单元网格作为最佳方案。

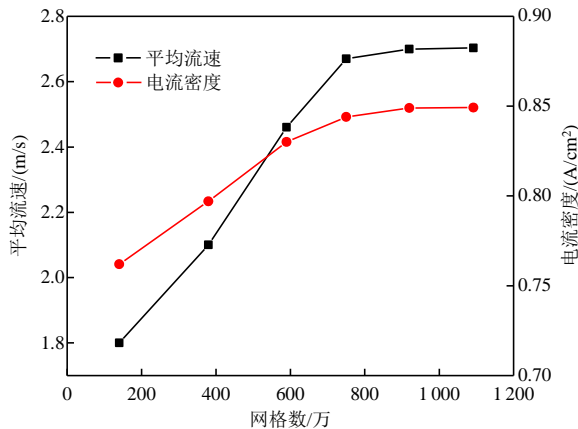


图3 平均流速和电流密度随网格数变化

Fig. 3 Average velocity and current density change with the number of grids

表3 不同网格数下模型误差分析
Table 3 Model error analysis under different grid numbers

网格数/万	平均流速/(m/s)	相对误差/%	电流密度/(A/cm ²)	相对误差/%
140	1.85	—	0.762	—
380	2.16	19.6	0.797	4.5
590	2.46	13.8	0.836	4.8
750	2.67	8.5	0.844	0.9
920	2.69	0.7	0.849	0.6
1080	2.70	0.4	0.851	0.2

1.5.2 模型验证

经网格无关性验证后,设定工作温度为750℃,

工作压力为环境大气压0.1 MPa,选取圆柱肋形结构的电池模型,并根据文献[28]中的已有工作参数设置模型,分别针对700、750、800℃运行工况下的电池模型进行I-V伏安特性模拟计算,并与实验结果进行验证。3种不同工况下的电池模型均采用同一拟合指数R评估模拟数据与实验数据的吻合程度:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{\sum(y - y^*)^2}{\sum y^2}} \quad (25)$$

式中:y为模拟数据;y*为实验数据。如图4所示,经计算3种不同工况下的R均大于0.9,模拟结果与实验数据基本吻合。

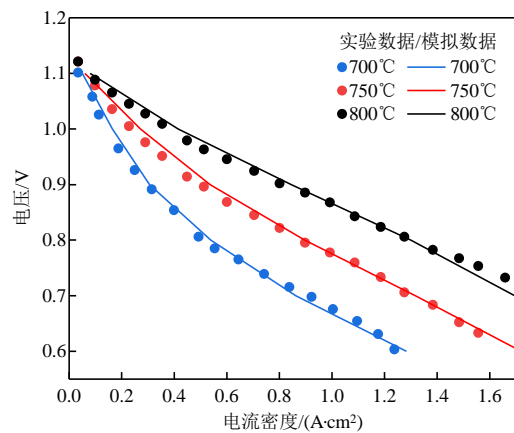


图4 可靠性验证

Fig. 4 Reliability verification

2 结果与讨论

2.1 肋形对流场均布和电池性能的影响规律

如图5所示,随着燃料侧流量的增加,流动不稳定性也随之上升,导致不同肋形的流动均匀性下降。例如,在水滴形肋下,当Re数从25增加到100时,流动均匀性指数从0.862下降至0.836,下降了

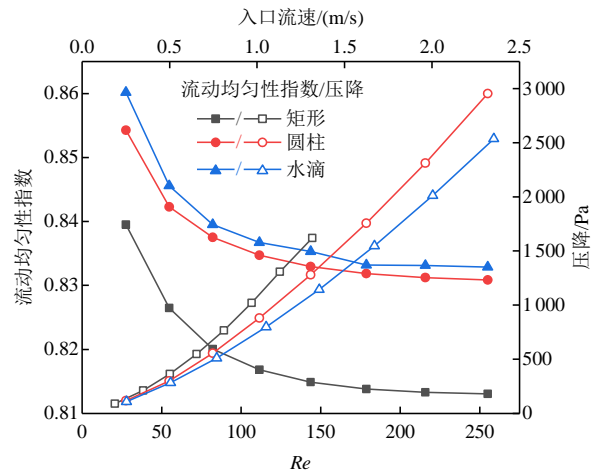


图5 不同肋形下流动均匀性和压降随Re变化关系

Fig. 5 Relationship between flow uniformity and pressure drop with Re under different rib patterns

3.1%，随着 Re 数的进一步增加，流动均匀性指数的下降趋势逐渐平缓，大致稳定在 0.833 附近。同时，压降在不同肋形下均呈上升趋势，在 $Re=150$ 时，矩形肋的 ΔP 为 1 750 Pa，圆柱肋为 1 251 Pa，水滴形肋为 1 091 Pa，其中，矩形肋因其形状特性对流体阻碍较小，因此，在流量保持不变的情况下，导致流速增大时动压增加明显，而静压变化不大，从而压降增加幅度较大^[29]。

图 6 所示为不同肋形下的流场速度分布，颜色从蓝色(代表低速区域)到红色(代表高速区域)反映了流场中速度的变化。水滴形肋凭借其流线形设计，能够有效减小流体通过肋时的分离区和涡流的形成，使流体能够更紧密地贴附在肋表面，减少了尾迹区和低速区域的范围。此外，水滴形肋逐渐收缩的尾部设计有助于保持边界层的稳定，降低边界层分离的风险，从而使表面流体速度变化更加平稳，显著提升了流动的均匀性。

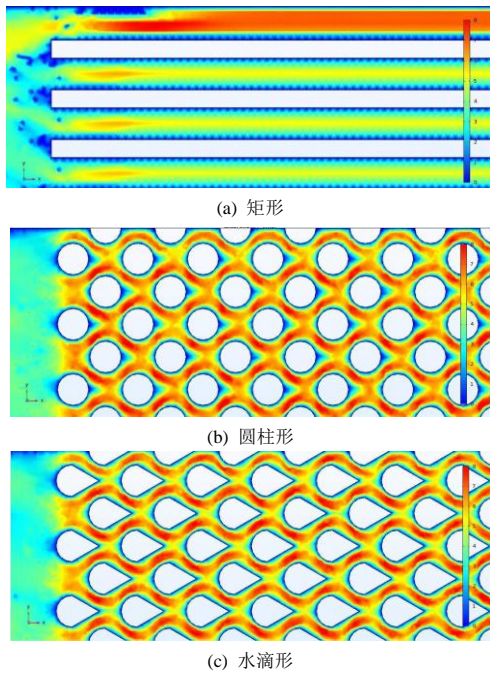
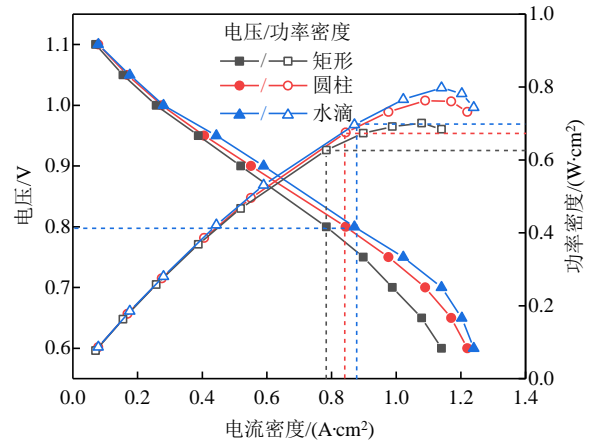


图 6 不同肋形下局部速度场云图

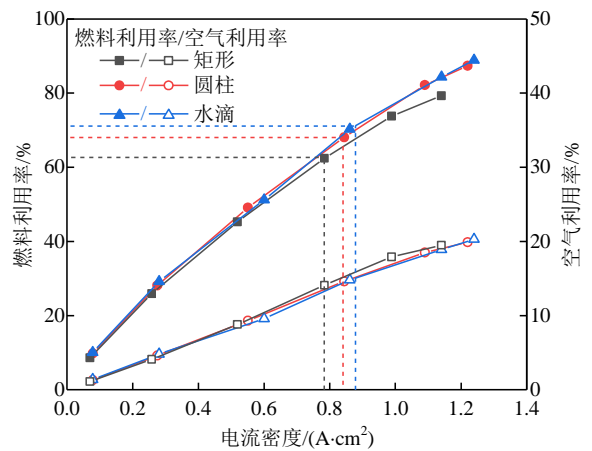
Fig. 6 Local velocity field cloud image under different rib patterns

如图 7 所示，连接体肋形对单电池的极化曲线、功率密度和燃料利用率有显著影响。保持连接体与电池接触面积不变，矩形、圆柱、水滴 3 种肋形设计下，电池功率密度与燃料利用率逐步获得提升。具体而言，在工作电压为 0.7 V 时，功率密度到达峰值后逐渐降低。在高电压下，3 种肋形设计的电化学性能差异不大，但随着电压降低，不同肋形的平均电流密度差异增大，组分浓度成为主要影响因

素。当空气利用率控制在 20% 以下时，水滴形肋的功率密度和燃料利用率(0.8 V)分别为 0.71 W/cm² 和 71.8%，高于圆柱形肋的 0.66 W/cm² 和 67.3%，与水滴形性能相差较小，但矩形肋下的功率密度和燃料利用率(0.8 V)仅为 0.59 W/cm² 和 61.2%，在 3 种肋形中性能最差。水滴形肋通过错列排布有效扰动气体流动，增强反应物扩散，延长气体在流道中的输送距离，从而改善流动死区问题，使反应物在流场分布更加均匀，提高燃料利用率和电池性能。



(a) 极化曲线和功率密度曲线



(b) 燃料利用率和空气利用率变化曲线

图 7 不同肋形下的电池性能曲线

Fig. 7 Cell performance under different rib patterns

综合来看，矩形肋的设计虽加工相对简单，但其气体流动不均匀性会降低电池性能，相比之下，圆柱形肋和水滴形肋能够更有效地提升 SOFC 单电池的流场均匀性及电池性能，其中圆柱形肋与水滴形肋的效果相近，但由于圆柱形肋的加工难度较低，因此在实际应用中更具优势。后续讨论将主要集中于圆柱形肋的性能。

2.2 圆柱形肋肋宽对流场均布和电池性能的影响规律

由图 8 可知，随着 Re 的增加，不同肋宽下的

流动均匀性指数逐渐下降。当 Re 超过 100 时, 流动均匀性指数逐渐趋于平缓, 表明在高雷诺数条件下, 肋宽对流动均匀性的影响逐渐减弱。在 $Re=100$ 的条件下, 随着肋宽从 0.8 mm 增加至 1.2 mm, 流动均匀性也从 0.818 提高至 0.865, 提升 5.7%。在连接体与电极接触面积保持不变的情况下, 随着肋宽的增加, 圆柱肋的数量减少, 这导致流道截面上的速度梯度变化较小, 从而提高了流动均匀性。然而, 随着 Re 数的增加, 各肋宽下的压降均呈上升趋势。当 $Re=200$ 时, 随着肋宽的增加, 出入口压降从 1354 Pa 增加到 2503 Pa, 这主要是由于肋宽的增加使流道面积减小, 在流量保持不变的情况下流速增大, 导致动压上升, 静压下降, 进而整体表现为出入口压降增加^[29]。

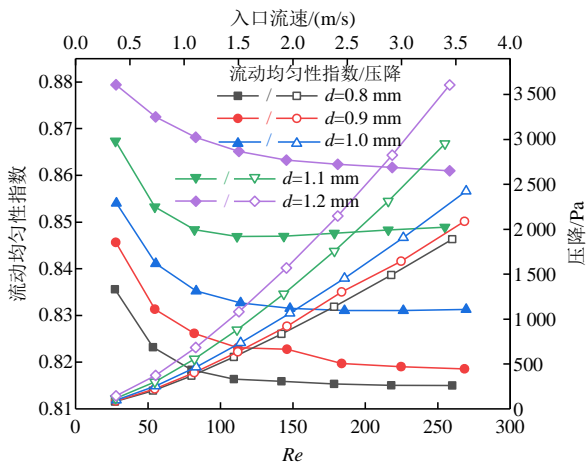


图8 不同肋宽下流动均匀性与压降随 Re 变化关系
Fig. 8 Relationship between flow uniformity and pressure drop with Re under different rib widths

缩小圆柱肋形的直径, 可缩短组分的传输路径, 从而降低传输阻力, 进而提高电极反应速率和电流输出。在调整肋宽时, 保持连接体与阴极的总接触面积不变。如图 9 所示, 随着肋宽从 0.8 mm 增加至 1.2 mm, 功率密度和燃料利用率(0.8 V)表现出先增加后降低的趋势。其中, 在肋宽为 1.0 mm 时, 二者分别达到 0.66 W/cm² 和 67.3%。增加肋宽有助于提升气体分布的均匀性, 功率密度从 0.57 W/cm² 增加至 0.66 W/cm², 燃料利用率也从 48.2% 提高到 67.3%。然而, 若肋宽过大(>1.00 mm), 气体流动速度过快, 可能导致气体在电极表面停留时间减少, 从而影响燃料的充分扩散和利用; 反之, 若肋宽过小(<1.00 mm), 气体流动速度降低, 肋的数量增加, 导致气体在流动区域中徘徊, 使其更难到达流道的中部和后部, 导致燃料堆积和利用率下

降。因此, 肋宽的选择直接影响性能的优化。

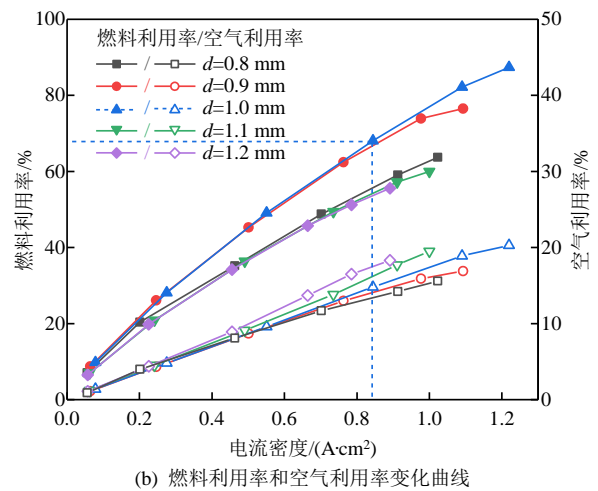
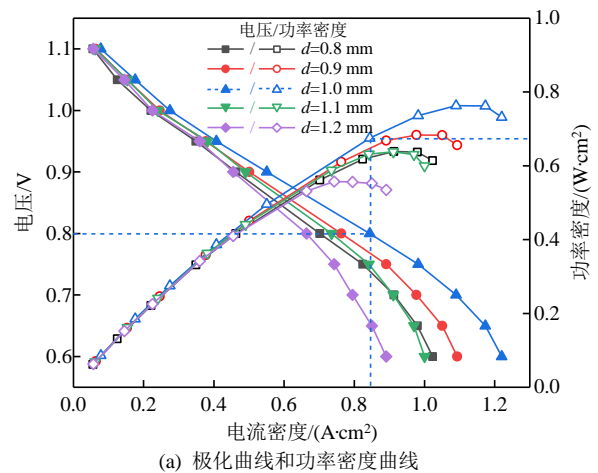


图9 不同肋宽下的电池性能曲线

Fig. 9 Cell performance with different rib widths

综上所述, 增加肋宽可以改善流场流动均匀性, 但肋宽过大或过小都会对电池功率密度和燃料利用率产生负面影响。当肋宽为 1.0 mm 时, 流动均匀性和电池性能均达到最佳状态。

2.3 圆柱形肋高对流场均布和电池性能的影响规律

由图 10 可知, 不同肋高下, 流动均匀性指数随着 Re 数的增加呈下降趋势, 但当 Re 数超过 100 时, 这一下降趋势逐渐减缓。在 $Re=100$ 时, 流动均匀性随着肋高从 0.7 mm 减小至 0.3 mm 而提升, 从 0.815 提升至 0.845。另一方面, 随着 Re 数的增加, 不同肋高下的压降呈现上升趋势, 具体而言, 当 Re 数为 200 时, 出入口压降伴随着肋高的增加, 从 3980 Pa 降低至 1865 Pa, 这主要是因为肋高增加导致肋与底部之间的间距增大, 流道的截面积也随之增大。在流量保持不变的情况下, 流速减小, 从而动压减少的幅度大于静压的变化, 导致整体的出入口压降降低。减小歧管中的压力损失有助于降

低流体流动阻力，使歧管各分支的压力分布更加均匀，从而保证不同位置的流体流速和流量更加平衡，避免局部流速过大或过小的情况，以此提高流场的流动均匀性^[30]，并降低密封泄露的风险。然而，与肋宽对流动均匀性的影响相比，改变肋高对均匀性的提升效果并不显著。

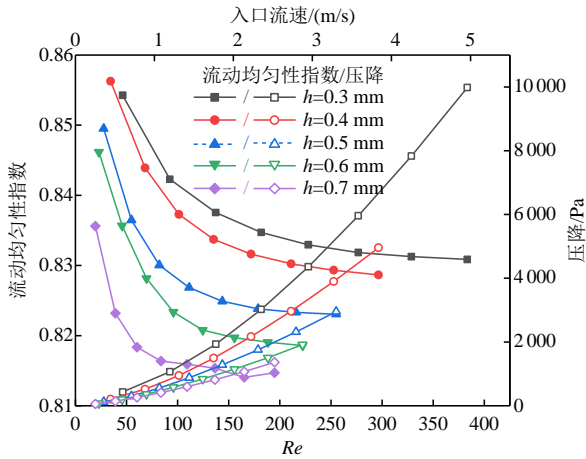
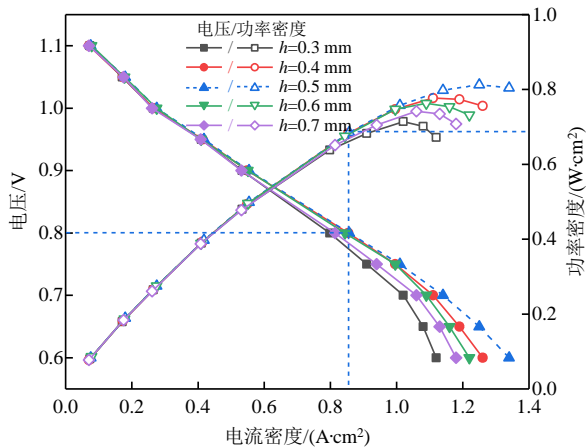
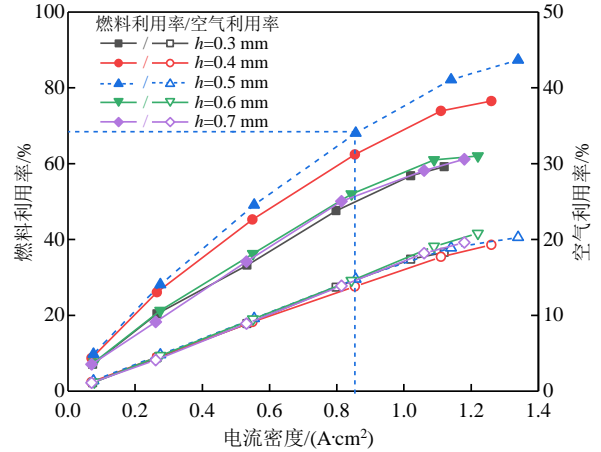


图 10 不同肋高下流动均匀性与压降随 Re 变化关系
Fig. 10 Relationship between flow uniformity and pressure drop with Re under different rib heights

如图 11 所示，随着肋高的增加，电池的功率密度和燃料利用率呈先上升后下降的趋势，其中肋高为 0.5 mm 时性能最佳，此时，功率密度达到 0.71 W/cm^2 ，燃料利用率为 70.2%，优于其他肋高设置。这表明存在一个最优肋高，可以显著提升电池的整体性能。从肋高对流动均匀性的影响角度来看，在肋高适中的情况下，反应物扩散更加充分，有利于电化学反应的进行，从而提升电池性能。然而，当肋高过小时($<0.5 \text{ mm}$)，气体缓冲区域减小，气体流动速度过快，导致反应物扩散不足，局部燃料短缺，增加阳极氧化的风险。此外，电池在反应后半段出现较大的浓差极化，导致电池性能降低。



(a) 极化曲线和功率密度曲线



(b) 燃料利用率和空气利用率变化曲线

图 11 不同肋高下的电池性能曲线

Fig. 11 Cell performance with different rib heights

总体而言，适当的肋高能够优化气体流动和反应物扩散，提高电池性能。

综上所述，适当减小肋高可改善流场的流动均匀性。然而，无论是肋高过高还是过低，都不利于提升电池的功率密度和燃料利用率。当肋高在 0.5 mm 左右时，流动均匀性较为理想，同时，出入口压降也保持在合理范围内，能有效提升电池的整体性能。

3 结论

本文构建了单电池三维数值模型，以流动均匀性指数为流场流速适应性的评价指标，结合功率密度以及燃料利用率，探究连接体的肋形、肋宽、肋高等结构参数对连接体内部流场均匀性和电池性能的影响规律。主要结论如下：

1) 不同工况下，水滴形肋结构在流动均匀性、功率密度和燃料利用率方面均优于矩形肋和圆柱形肋。当电流密度为 0.8 A/cm^2 时，采用水滴形肋设计下的电池功率密度达到 0.67 W/cm^2 ，燃料利用率达到 65.4%。

2) 肋宽与流动均匀性呈正相关，随着肋宽的增加，流动均匀性逐渐提高，更有助于反应物均匀分布，但对功率密度与燃料利用率的影响呈现先增后减的趋势，肋宽为 0.9~1.0 mm，电池整体性能较优。

3) 随着肋高减小，流动均匀性呈上升趋势，电池的功率密度和燃料利用率呈现先增后减的趋势。当肋高为 0.4~0.5 mm，不仅能够保持良好的流动均匀性，还能有效避免气体阻力过大，从而实现电池最佳性能。

参考文献

- [1] ZHANG Ziqi, XU Zhinan, WANG Xiangrong. The greenhouse effect of antibiotics: the influence pathways of antibiotics on methane release from freshwater sediment[J]. *Environment International*, 2023, 176: 107964.
- [2] 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.
- [3] RAMADHANI F, HUSSAIN M A, MOKHLIS H, et al. Optimization strategies for Solid Oxide Fuel Cell(SOFC) application: a literature survey[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 460-484.
- [4] SHABRI H A, OTHMAN M H D, MOHAMED M A, et al. Recent progress in metal-ceramic anode of solid oxide fuel cell for direct hydrocarbon fuel utilization: a review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 212: 106626.
- [5] BLUM L, BATFALSKY P, DE HAART L G J, et al. Overview on the Jülich SOFC development status[J]. *ECS Transactions*, 2013, 57(1): 23.
- [6] VORA S, WILLIAMS M, JESIONOWSKI G. (Plenary) update on the SOFC program at the DOE's National Energy Technology Laboratory[J]. *ECS Transactions*, 2021, 103(1): 3-13.
- [7] MAI A, FLEISCHHAUER F, DENZLER R, et al. Progress in HEXIS' development: Galileo 1000 N and HEXIS' next generation SOFC system[J]. *ECS Transactions*, 2017, 78(1): 97.
- [8] 滕梓源, 张海明, 吕泽伟, 等. 分布式固体氧化物燃料电池发电系统发展现状与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(20): 7959-7972.
- TENG Ziyuan, ZHANG Haiming, LU Zewei, et al. Development status and prospect of distributed solid oxide fuel cell power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(20): 7959-7972(in Chinese).
- [9] 王洪建, 王冬冬, 曹权, 等. 燃料电池分布式供能技术发展现状与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(20): 8113-8125.
- WANG Hongjian, WANG Dongdong, CAO Quan, et al. Development status and analysis of fuel cell based distributed energy supply technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(20): 8113-8125(in Chinese).
- [10] 付全荣, 魏伟, 刘凤霞, 等. 固体氧化物燃料电池连接体新结构设计及性能优化[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(5): 1-8.
- FU Quanrong, WEI Wei, LIU Fengxia, et al. New structure design and performance optimization of solid oxide fuel cell connector[J]. *Journal of Changzhou University(Natural Science Edition)*, 2019, 31(5): 1-8(in Chinese).
- [11] SEMBLER W J, KUMAR S. Modification of results from computational-fluid-dynamics simulations of single-cell solid-oxide fuel cells to estimate multicell stack performance[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2011, 8(2): 021008.
- [12] 张安安, 刘川, 黄璜, 等. 基于龙伯格-滑模观测器的固体氧化物燃料电池温度估计模型[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(S1): 191-201.
- ZHANG An'an, LIU Chuan, HUANG Huang, et al. Temperature estimation model for solid oxide fuel cell based on Luenberger-sliding mode observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(S1): 191-201(in Chinese).
- [13] CHEN Xu, ZHANG Shanlin, LI Chengxin, et al. Optimization of plasma-sprayed lanthanum chromite interconnector through powder design and critical process parameters control[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(1-2): 212-222.
- [14] HU Yingzhen, YUN Liangliang, WEI Tao, et al. Aerosol sprayed Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄ protective coatings for metallic interconnect of solid oxide fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(44): 20305-20313.
- [15] HUANG C M, SHY S S, LEE C H. On flow uniformity in various interconnects and its influence to cell performance of planar SOFC[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 183(1): 205-213.
- [16] LIN Zijing, STEVENSON J W, KHALEEL M A. The effect of interconnect rib size on the fuel cell concentration polarization in planar SOFCs[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 117(1-2): 92-97.
- [17] 郝俊红, 马腾宇, 周敬龙, 等. 基于多场协同的 PEMFC 双梯形渐缩流道结构性能分析和评价[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(13): 5208-5218.
- HAO Junhong, MA Tengyu, ZHOU Jinglong, et al. Multi-field synergistic-based PEMFC double trapezoidal tapering flow channel structure performance analysis and evaluation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(13): 5208-5218(in Chinese).
- [18] SU Shichuan, HE Huanhuan, CHEN Daifen, 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.
- [19] 王桂兰, 杨云珍, 张海鸥. 固体氧化物燃料电池三维热流电化学分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(8): 99-103.
- WANG Guilan, YANG Yunzhen, ZHANG Haiou. Three-dimension analysis of thermo-fluid electrochemical for

- solid oxide fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 99-103(in Chinese).
- [20] 李梓豪, 郭雪岩. 连接体结构对固体氧化物燃料电池性能影响的数值分析[J]. 能源研究与信息, 2023, 39(2): 128-135.
- LI Zihao, GUO Xueyan. Numerical analysis on the performance of solid oxide fuel cells with different interconnector structures[J]. Energy Research and Information, 2023, 39(2): 128-135(in Chinese).
- [21] 夏雷, 于泽庭, 许国平, 等. 基于代理模型的三维梯形流道质子交换膜燃料电池结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2238-2247.
- XIA Lei, YU Zeting, XU Guoping, et al. Optimal design of three-dimensional trapezoidal flow channel proton exchange membrane fuel cell structure based on surrogate model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2238-2247(in Chinese).
- [22] 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.
- [23] ZHANG Xiaoqiang, ESPINOZA M, LI Tingshuai, et al. Parametric study for electrode microstructure influence on SOFC performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(75): 37440-37459.
- [24] 顾中明. 刚性圆柱群绕流及涡激振动实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- GU Zhongming. Experimental study on rigid cylindrical flow and vortex-induced vibration[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018(in Chinese).
- [25] ANDERSSON M, YUAN Jinliang, SUNDÉN B. SOFC modeling considering hydrogen and carbon monoxide as electrochemical reactants[J]. Journal of Power Sources, 2013, 232: 42-54.
- [26] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 60-63, 92.
- LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: comparison and application[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 60-63, 92(in Chinese).
- [27] 沈昱明. 工程流体力学基础(III)[J]. 流体测量与控制, 2023, 4(3): 94-98.
- SHEN Yuming. Foundation of engineering fluid mechanics(III)[J]. Fluid Measurement & Control, 2023, 4(3): 94-98(in Chinese).
- [28] FU Quanrong, LI Zhiyi, WEI Wei, et al. Performance enhancement of a beam and slot interconnector for anode-supported SOFC stack[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 241: 114277.
- [29] 刘伟军, 李雄. 列管式换热器中管程介质流动均匀性数值模拟与优化[J]. 轻工机械, 2015, 33(5): 19-24.
- LIU Weijun, LI Xiong. Numerical simulation and optimization for gas flow distribution in tube side of tube heat exchanger[J]. Light Industry Machinery, 2015, 33(5): 19-24(in Chinese).
- [30] 向蔚, 杨小凡, 贺鲁炎, 等. PEMFC 歧管结构优化与流体分配均匀性研究[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1447-1450.
- XIANG Wei, YANG Xiaofan, HE Luyan, et al. Optimal study on manifold structure and uniformity of fluid distribution in PEM fuel cell[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1447-1450(in Chinese).



刘子裕

在线出版日期: 2025-04-16。

收稿日期: 2024-10-14。

作者简介:

刘子裕(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为固体氧化物电池连接体流场优化设计, 120222202216@ncepu.edu.cn;

赵爽(1996), 女, 博士研究生, 研究方向为固体氧化物燃料电池跨尺度模拟, 915773378@qq.com;

王晓璐(2000), 女, 博士研究生, 研究方向为固体氧化物电池 BOP 系统设计, wangxl0607@outlook.com;

*通信作者: 王利刚(1987), 男, 博士, 教授, 研究方向为高温电化学电氢转化器件的性能调控理论方法方法与技术, ligang.wang@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 胡琳琳)