第 49 卷第 9 期
2021 年 9 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 9
September，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210027

对称双阴极固体氧化物燃料电池阴极流道影响的数值模拟

许竞翔[1,4]，唐 磊[1,2]，杨 钧[2]，谷宇晨[2,3]，李玉清[1]，官万兵[2]

(1. 上海海洋大学工程学院，上海 201306；2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所，浙江 宁波 315201；
3. 同济大学航空航天与力学学院，上海 20092；4. 上海海洋可再生能源工程技术研究中心，上海 201306)

摘 要：基于热–电–力–化学多物理场耦合理论，针对对称双阴极固体氧化物燃料电池建立了一个三维数值模型，设计出一种具有强化传质能力的 *I* 型流道，并与传统 Z 型阴极流道电池中流道的气体流动速率、氧气摩尔分数、压损、温度、应力分布以及电化学性能进行了对比研究。结果表明：在 0.6 V 工作电压下结构优化后的阴极 *I* 型流道与传统 *Z* 型流道相比，传统 *Z* 型的氧气浓度分布差约为 58.6%，优化 *I* 型流道的氧气浓度分布差约为 38%，氧气分布更加均匀，优化 *I* 型流道相较于传统 *Z* 型流道压降损失减少约 36%，随着工作电压的减少，电池的浓差极化损失越小，能够有效提升电池性能。

关键词：阴极流道；对称双阴极固体氧化物燃料电池；数值模拟；结构优化
中图分类号：TM911　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)09–1907–09
网络出版时间：2021–07–23



Numerical Simulation of Cathode Channel Optimization for Double Side Cathode Solid Oxide Fuel Cell

XU Jingxiang[1,4], *TANG Lei*[1,2], *YANG Jun*[2], *GU Yuchen*[2,3], *LI Yuqing*[1], *GUAN Wanbing*[2]

(1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China; 3. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Marine Renewable Energy, Shanghai 201306, China)

Abstract: A three-dimensional numerical model was proposed for double cathode solid oxide fuel cells based on the thermo-electro-mechanical-chemical multi-physics coupling theory. A novel *I*-type cathode flow channel with an enhanced mass transfer capability was developed. The gas flow velocity, oxygen molar fraction, pressure loss, temperature, stress distribution, and electrochemical properties of the *I*-type cathode flow channel and the conventional *Z*-type cathode flow channel were investigated. The results show that compared to the conventional *Z*-type flow channel, the optimized cathode flow channel has more uniform distribution of oxygen and less pressure loss in the gas flow, and the loss of concentration polarization reduces with the decrease of working voltage.

Keywords: cathode flow channel; double cathode solid oxide fuel cells; numerical simulation; structural optimization

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种新型的能源转换装置，能将燃料的化学能转换为热能和电能，因其具有高效、清洁等优点受到广泛关注[1–4]。固体氧化物燃料电池在过去几十年的发展历程中出现了几种不同类型的几何结构，其中，平板式 SOFC 由于其更加易于制造、堆叠以及拥有着较高的功率密

收稿日期：2021–01–18。　修订日期：2021–02–22。
基金项目：上海市科委“浦江人才”项目(18PJ1404200)；上海市自然科学基金(20ZR1424000)；上海海洋大学校专项基金(A2-0203-00-100231)；国家自然科学基金(U20A20251)；浙江省重点研发计划(2021C01101)；上海市科学技术委员会资助项目(19DZ2254800)。
第一作者：许竞翔(1985—)，男，博士，副教授。
通信作者：杨 钧(1982—)，男，博士，研究员。

Received date: 2021–01–18.　**Revised date:** 2021–02–22.
First author: XU Jingxiang(1985–), male,Ph,D., Associate Professor.
E-mail: jxxu@shou.edu.cn
Correspondent author: YANG Jun(1982–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: yangjun@nimte.ac.cn

度而成为目前商用最为广泛的结构之一[5]。对于固体氧化物燃料电池来说为了保证其物种、电流密度和温度的均匀性，适当的气体通道结构的设计至关重要[6]。

目前，不同气体通道结构类型已有不少，其中，最常见的 2 类：一类是覆盖燃料电池整个电化学活性区的单个或者多个蛇形通道；另一类是由一组平行通道组成的 *U* 型通道和 *Z* 型通道[7]。蛇形通道虽然能保持良好的气体流动均匀性，但是会造成较大的压损，在功率较大的电池和电堆中这是无法接受的[8]。平行流道虽然相较于蛇形流道，极大地降低了压损，但是中间通道可能会出现严重的气体流动不畅。这种现象会对电化学活性表面积其中很大一部分产生不利影响，并严重影响燃料电池的性能[9]。研究如何优化连接板内部流道从而改善燃料与氧化剂的均匀分布至关重要。

Zhang 等[10]通过调整平行通道的宽度来增加中间通道的流量，成功地改善了 *Z* 型流道中气体分布的不均匀性，然而这种优化方法是基于一种特殊的方式提出的，因为作者没有提供一个适用于任何几何体的通用解，考虑到研究的参数不同，这是一个比较重要的问题。Janusz 等[11]对比了 *U* 型流道与 *Z* 型流道，研究发现当流道的深度变深，气体压降损失会出现不同程度的降低，但会加剧气体分布的不均匀性。Jackson 等[12]通过增加流道宽度改善了 *Z* 型流道的流量分布情况，但增加了连接板的面积，并不适用于所有电池。对于平行流道，根据入口位置以及气体流道方向，可分为 *I*、*U*、*Z* 型流道，如图 1 所示，刘振彬等[13]对比了 *I*、*U*、*Z* 型流道，研究发现 *I* 型流道相对于其他 2 种流道具有较低的压损和较好的气体分布均匀性，但作者只进行了流道的模拟并未考虑电化学反应的影响，同时 *I* 型流道也存在一定的气体流动不均匀性的问题。对称双阴极固体氧化物燃料电池是中国科学院宁波材料所提出的一种新型结构的固体氧化物燃料电池，由于其对称结构而具有良好的热稳定性[14]。Jiang 等[6–15]基于双阴极固体氧化物燃料电池建立了一个三维数值模型，模拟了不同温度、电流密度、燃料气体和热应力的分布，数值结果表明，电池在现有 *Z* 型流道下的温度、电流密度、燃料气体和热应力分布是不均匀的，如何优化流场结构、提高电池性能、推动其产业化，是目前亟待解决的问题。

本工作利用 ANSYS FLUENT，基于对称双阴极固体氧化物燃料电池的原有阴极流道，设计了一种新的流道结构，考虑了多孔介质多组分流动与扩散、固体传热及电化学反应，建立了一个三维数值模型进行数值模拟，以改善阴极流道流量分布和压损等问题。

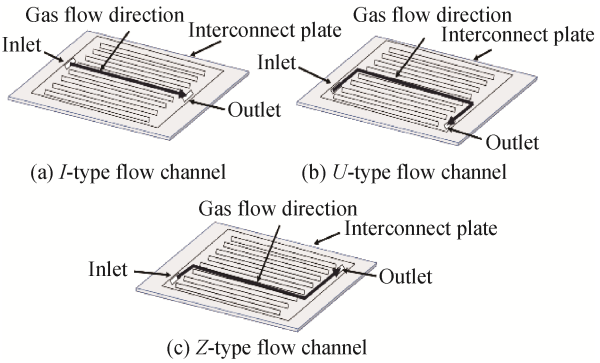


图 1 *I*、*U*、*Z* 型流道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of *I*-, *U*- and *Z*-types flow channel

1 数值模型

1.1 几何模型

对称双阴极固体氧化物燃料电池图 2a，由于其结构上下对称，为提高计算率，只选取上部分进行建模。根据电池的实际尺寸建立如图 2b 几何模型，其中包括：阳极支撑体 NiO+3YSZ(98.6 mm×46 mm×4.7 mm)以及由 13 个支撑体孔道(98.6 mm×2.5 mm×2.3 mm)组成的阳极气体通道，阳极活化层 NiO+8YSZ(85.5 mm×41 mm×0.02 mm)，电解质层 YSZ(85.5 mm×41 mm×0.01 mm)，阴极 $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$(LSCF)(85.5 mm×41 mm×0.02 mm)，含气体通道的阴极金属盖板如图 2c，为了更好的对比空气

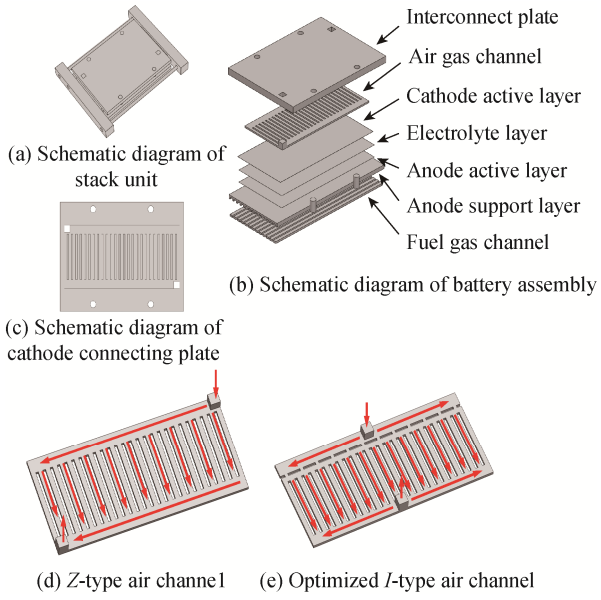


图 2 对称双阴极固体氧化物燃料电池结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double side cathode solid oxide fuel cell structure

的流动性，绘制了图 2d 所示的 *Z* 型流道和图 2e 所示的优化 *I* 型流道的几何形状模型。在该模型中，有 27 个平行流道。

在以往的研究中发现，*I* 型流道虽然相较于传统的 *Z* 型和 *U* 型平行通道气体分布均匀性表现较好，但两边流道气体流量较少[15]。为此，在 *I* 型流道的基础上增加了一个气体分布器 *B* 来改善气体流量的分布，而对于气体分布器，开孔的比例和分布都会影响流量分配效果[16]。为了确定优化结构，引入“开孔率”这一概念，同时假设开孔均匀分布，以简化计算。

$$A=\frac{12C\cdot K}{L\cdot K} \tag{1}$$

经简化为

$$A=\frac{12C}{L} \tag{2}$$

其中：*A* 为开孔率；*C* 为单个孔径的宽度；*L* 为阴极流道的宽度；*H* 为气体分布器的高度；*K* 为阴极流道的厚度。具体结构如图 3 所示：

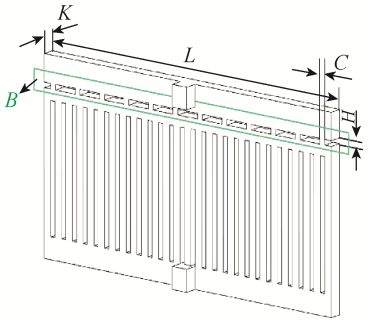


图 3　优化阴极流道示意图

Fig. 3　Schematic diagram of optimized cathode flow channel

1.2　控制方程

数值模型考虑了燃料电池实际工作状态下的电化学反应、气体流动、物种扩散和传热，上述多场耦合的控制方程如下：

1.2.1　电化学模型

阳极直接通入氢气，阴极提供空气。下列电化学反应分别发生在阳极和阴极三相边界层(TPB)中：

$$H_2+O^{2-}\rightarrow H_2O+2e^- \tag{3}$$

$$\frac{1}{2}O_2+2e^-\rightarrow O^{2-} \tag{4}$$

在阴极 TPB 中，氧气被还原为氧离子，然后通过电解质传到阳极 TPB，之后与氢反应形成水并释放电子，电子通过外部电路到达负载，然后回到阴极形成闭环电路。

考虑到电池内部的活化极化、Ohm 极化和浓差极化，电池的实际电压可表示为：

$$E=E^{\mathrm{OCV}}-(\eta_{\mathrm{act}}+\eta_{\mathrm{ohm}}+\eta_{\mathrm{conc}}) \tag{5}$$

其中：E^{OCV} 为 Nernst 电势；η_{act}、η_{ohm} 和 η_{conc} 分别为活化过电位、Ohm 过电位和浓差极化引起的过电位。燃料气体为氢气与水蒸气，因此 Nernst 电压可以计算为：

$$E^{\mathrm{OCV}}=E_0-\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{p^{\mathrm{H_2O}}}{p^{\mathrm{H_2}}(p^{\mathrm{O_2}})^{0.5}}\right) \tag{6}$$

其中：*R* 为通用气体常数；*T* 为温度；*F* 为 Faraday 常数；p^i 为组分 *i* 的分压[17]；E_0 为平衡电位。活化极化和电流密度的关系用 Butler-Volmer 方程表示：

$$i^{\mathrm{an}}=(\zeta_{\mathrm{an}}j_{\mathrm{an}}^{\mathrm{ref}})\left[\left(\frac{c^{\mathrm{H_2}}}{c_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{H_2}}}\right)^{\gamma_{\mathrm{an}}}\left(\mathrm{e}^{\alpha_{\mathrm{an}}\frac{F\eta_{\mathrm{an}}}{RT}}\right)-\left(\frac{c^{\mathrm{H_2O}}}{c_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{H_2O}}}\right)^{\gamma_{\mathrm{an}}}\left(\mathrm{e}^{-\alpha_{\mathrm{cat}}\frac{F\eta_{\mathrm{an}}}{RT}}\right)\right] \tag{7}$$

$$i^{\mathrm{cat}}=(\zeta_{\mathrm{cat}}j_{\mathrm{cat}}^{\mathrm{ref}})\left[\left(\frac{c^{\mathrm{O_2}}}{c_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{O_2}}}\right)^{\gamma_{an}}\left(-\mathrm{e}^{\alpha_{\mathrm{an}}\frac{F\eta_{\mathrm{cat}}}{RT}}\right)+\left(\mathrm{e}^{-\alpha_{\mathrm{cat}}\frac{F\eta_{\mathrm{cat}}}{RT}}\right)\right] \tag{8}$$

其中：j^{ref} 为每个活性表面积的参考交换电流密度 ($\mathrm{A/m^2}$)；ζ为活性比表面积；c^i 为组分 *i* 的浓度，上标 an 和 cat 为阳极和阴极；η为电池的活化极化和浓差极化；α为转换系数[18]。活化极化与离子和电子的传递有关[19]：

$$\eta_{\mathrm{an}}=\varphi_{\mathrm{e}}-\varphi_{\mathrm{i}}-E_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{a}} \tag{9}$$

$$\eta_{\mathrm{cat}}=\varphi_{\mathrm{e}}-\varphi_{\mathrm{i}}-E_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{c}} \tag{10}$$

其中：φ_e 和 φ_i 分别为电子和离子的电势；$E_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{a}}$ 和 $E_{\mathrm{eq}}^{\mathrm{c}}$ 分别为阳极和阴极的平衡电位，阳极的平衡电位定义为 0 V，阴极的平衡电位定义 E^{OCV}。

由多孔介质引起的浓度极化可计算为[17]：

$$\eta_{\mathrm{conc}}^{\mathrm{an}}=\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{P_{\mathrm{H_2O,TPB}}\cdot P_{\mathrm{H_2,b}}}{P_{\mathrm{H_2O,b}}\cdot P_{\mathrm{H_2,TPB}}}\right) \tag{11}$$

$$\eta_{\mathrm{conc}}^{\mathrm{cat}}=\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{P_{\mathrm{O_2,gc}}}{P_{\mathrm{O_2,TPB}}}\right) \tag{12}$$

其中：*b* 和 g_c 分别为阳极和阴极的表面。

SOFC 中的 Ohm 过电位是由离子或电子的转移引起的。电子和离子输运的控制方程可以表示为[19]：

$$\begin{aligned} i_{\mathrm{i}}&=-\sigma_{\mathrm{i}}^{\mathrm{e}}\Delta\varphi_{\mathrm{i}}\\ i_{\mathrm{e}}&=-\sigma_{\mathrm{e}}^{\mathrm{e}}\Delta\varphi_{\mathrm{e}} \end{aligned} \tag{13}$$

电化学模型中的相关参数见表 1 所示。

1.2.2　气体流道模型

考虑到燃料电池气体的流动速率较低，经计算最大雷诺 *Re*=1 720<2 300，流态判断为层流，为了描述

表 1 电化学模型参数[13,18–20]

Table 1 Parameters of electrochemical reaction model[13,18–20]

Parameter	Effective ionic conductivity/(S·m^{-1})	Electronic conductivity/(S·m^{-1})	TPB length per unit volume/(m·m^{-3})	Electronic transfer coefficients/(m·m^{-3})
Anode	$\frac{9.5\times10^7}{T}\exp\left(-\frac{1\ 150}{T}\right)$	30 300	2.14×10^5	0.5
Electrolyte	$33.4\times10^3\exp\left(-\frac{10\ 300}{T}\right)$			
Eathode	$\frac{4.2\times10^7}{T}\exp\left(-\frac{1\ 200}{T}\right)$	17 000	2.14×10^5	0.5
Interconnect		769 000		

多孔介质对气体流动造成的影响，我们在 Navier-Stokes 定律中引入 Darcy 来修正，同时考虑了孔隙率的影响[1–18]。

$$\nabla\cdot(\rho V)=S_{\text{mass}} \tag{14}$$

$$\rho v\cdot\nabla v=-\nabla p+\nabla\left[\mu(\nabla v+v\nabla)-\frac{2}{3}\mu\nabla v\right]-\frac{\varepsilon\mu v}{k} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}&\text{Anode}: S_{\text{mass}}=\frac{(M_{\text{H}_2\text{O}}-M_{\text{H}_2})\cdot i}{2F}\\&\text{Cathode}: S_{\text{mass}}=-\frac{M_{\text{O}_2}\cdot i}{4F}\end{aligned} \tag{16}$$

其中：v 为速度矢量；S_{mass} 为质量源项，ε为多孔介质的孔隙率；k 为多孔介质的渗透率；ρ 和 μ 为与气体成分有关的总气体密度和气体动态黏度，ρ 和 μ 的值由下面方程计算：

$$\rho=\frac{p\Sigma x_iM_i}{RT} \tag{17}$$

$$\mu=\Sigma x_i\mu_i \tag{18}$$

其中：x_i，M_i和μ_i分别为组分 i 的摩尔分数、分子量和动态黏度。

1.2.3 物质扩散模型

质量传递方程描述了电池阴极和阳极气体通道以及多孔电极(支撑层、活化层)各个气体组分的传输过程。控制方程如下[19]：

$$\nabla\cdot j_i+\rho(\varepsilon v\cdot\nabla)\omega_i=S_i \tag{19}$$

$$S_{\text{H}_2}=M_{\text{H}_2}\frac{i}{2F} \tag{20}$$

$$S_{\text{H}_2\text{O}}=-M_{\text{H}_2\text{O}}\frac{i}{2F} \tag{21}$$

$$S_{\text{O}_2}=M_{\text{O}_2}\frac{i}{4F} \tag{22}$$

其中：组分 i 的质量源项 S_i 由单位时间内单位体积上的电化学反应速率所决定的；j_i 为组分 i 的流量，在该电池中，气体通过电极的扩散需要考虑气体分子之间的自由扩散和与多孔介质碰撞的 Knudsen 扩散，因此其扩散行为可表示为[19]：

$$j_i=-\rho D_i^{\text{mk}}\nabla\omega_i-\rho\omega_iD_i^{\text{mk}}\frac{\nabla M}{M}+\rho\omega_iD_i^{\text{mk}}\Sigma\frac{M_i}{M}\nabla x_i \tag{23}$$

$$D_i^{\text{mk}}=\frac{\varepsilon}{\tau}\left(\frac{1}{D_i^{\text{m}}}+\frac{1}{D_i^{\text{k}}}\right)^{-1} \tag{24}$$

$$M=\left(\sum\nolimits_i\frac{\omega_i}{M_i}\right)^{-1} \tag{25}$$

其中：ω_i为组分 i 的质量分数；D^{mk} 为总的扩散系数，由 Fick 扩散系数和 Knudsen 扩散系数共同决定。

1.2.4 传热模型

电化学模型中的能量守恒方程为[23]：

$$\rho C_{\text{p}}v\cdot\nabla T=\nabla(\lambda_{\text{eff}}\nabla T)+Q \tag{26}$$

其中：C_{p} 为比热容；Q 为电池的热源项；λ_{eff} 为多孔介质的有效导热系数，其表达式为：

$$\lambda_{\text{eff}}=\varepsilon\lambda_{\text{f}}+(1-\varepsilon)\lambda_s \tag{27}$$

其中：λ_{f} 为气体的有效导热系数；λ_s 为固体的导热系数，其材料属性如表 2 所示。

表 2 材料属性[22]

Table 2 Material properties[22]

Parameters	Porosity	Permeability×10^{12}/m^2	Thermal Conductivity/(W·m^{-1}·K^{-1})	Thermal capacity/(J·Kg^{-1}·K^{-1})
Anode active layer	0.23	1	11	450
Anode support layer	0.46	1	11	450
Electrolyte			2.7	550
Cathode layer	0.3	1	6	430
Interconnect			20	550

1.2.5 热应力模型

对称双阴极固体氧化物燃料电池的运行温度很高，随着反应的进行，电池会因为材料的热膨胀不匹配以及电池内部温度分布的不均而产生一定的应

变，应变和热应力之间的关系遵循 Hook 定律[26]，该式可表示为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_x &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_x - \frac{\alpha E}{1-2\upsilon}T\\ \sigma_y &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_y - \frac{\alpha E}{1-2\upsilon}T\\ \sigma_z &= \lambda\theta + 2G\varepsilon_z - \frac{\alpha E}{1-2\upsilon}T\\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy}\\ \tau_{yz} &= G\gamma_{yz}\\ \tau_{xz} &= G\gamma_{xz}\end{aligned}\right\} \tag{28}$$

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{29}$$

其中：E 为电池材料的弹性模量；σ_i 为沿 i 方向的应力；υ为 Poisson's 比；α为电池材料的热膨胀系数；θ为体积应变，与热应力有关的材料参数如表 3 所示。使用 Von Mises 屈服准则，等效应力

$$\sigma_{\mathrm{eq}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} \tag{30}$$

其中：σ_{eq} 为等效应力；σ_1 为第一应力；σ_2 为第二应力；σ_3 为第三应力。

表 3　热力学模型参数[17–23]

Table 3　Thermodynamic model parameters[17–23]

Layer	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	CTE×10^6/K^{-1}
Anode active layer	220	0.3	12.2
Anode support layer	213	0.3	12.2
Electrolyte	205	0.3	10.3
Cathode layer	30	0.3	12.5
Interconnect	205	0.3	12.3

CTE—Coefficient of thermal expansion.

1.3　边界条件

为了确保模拟的准确性，需要设置一个接近实际环境的边界条件，根据电池实际运行的工况，设置电池的边界条件如表 4 所示。

表 4　边界条件

Table 4　Boundary conditions

Parameters	Operation temperature/K	Operation voltage/V	Operating pressure/atm	Anode inlet components/mole fraction	Cathode inlet components/ mole fraction	Anode inlet flow/(L·min^{-1})	Cathode inlet flow/(L·min^{-1})
Value	1023	0.6	1	0.2% H_2O 99.8% H_2	21% O_2 79% N_2	0.6	5

2　结果与讨论

2.1　模型验证

为了验证模型的正确性，模拟计算了工作电压在 0.50V~1.15 V 时电解质层的平均电流密度，通过图 4 可知，实验数据与仿真结果基本吻合，因而验证了模型的准确性。

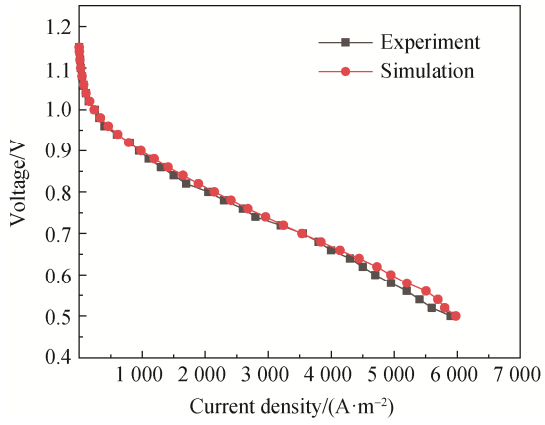


图 4　*I–V* 曲线

Fig. 4　*I–V* curve

2.2　开孔率和气体分布器厚度的结构设计

在 SOFC 工作状态下，开孔率和孔的高度会同时影响各子流道内的流量分配，模拟工作电压为 0.6 V 时，在不同开孔率和高度下电池的最终输出功率，这里电池的最终输出功率为电池的电功率减去压降所造成的功率损失如下式[15]。

$$P_{\mathrm{pd}} = \frac{q\Delta p}{\eta_{\mathrm{pump}}} \tag{31}$$

$$P_{\mathrm{output}} = (IV - P_{\mathrm{pd}})/S_{\mathrm{eff}} \tag{32}$$

其中：式(31)为压降所造成功率损失；η_{pump} 为流动效率，为了简化计算，假设效率为 1；q 为气体流量；Δp 为压降，式(32)为电池的最终输出功率；I 为总电流；S_{eff}为有效电化学反应面积。结果如图 5 所示。

当开孔率在 20%、高度为 1 mm 左右时，电池的最终输出功率最高，电池性能最好。这是因为当开孔率为 20%左右时，电池受浓度极化的损失相对较少了，继续减少孔径后电池的浓度极化的损失变化几乎可以忽略不计，但电池压降所造成的损失将随着孔径的减少而增大。相较之下气体分布器高度对电池性能影响较小，因此选择开孔率为 20%，气

体分布器高度 H 为 1 mm 的结构设计。

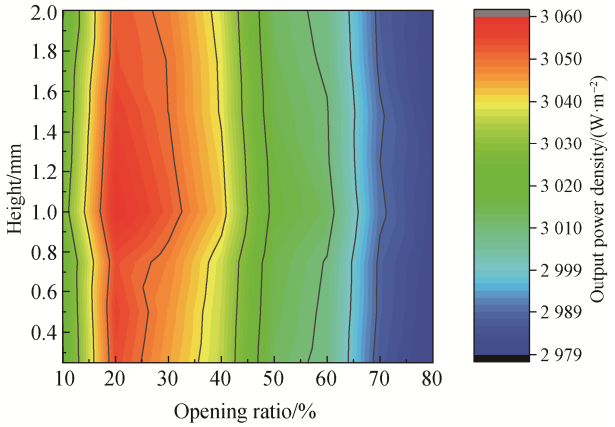
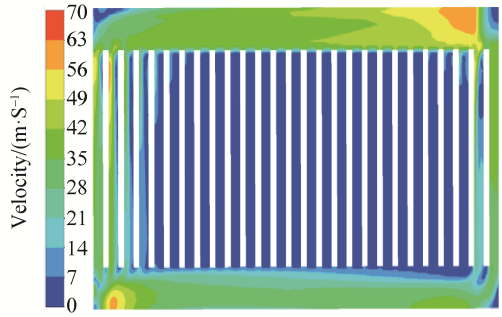


图5 不同气体分布器高度和开孔率的输出功率密度等值曲线

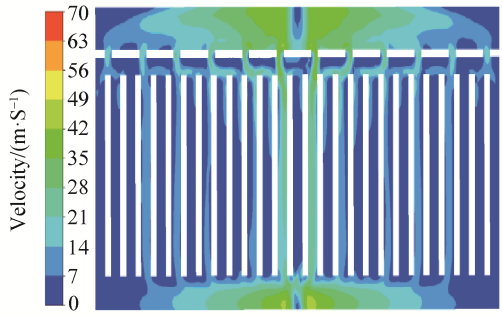
Fig. 5 Contour plot of output power density vs height, opening ratio

2.3 阴极流道气体流速与压力在对称双阴极 SOFC 中的分布

不同的通道结构的气体流速是不同的，如图 5 所示。当工作电压为 0.6 V 时，Z 型结构的中间流道气体流速很小，而两端流道的气体流速远远大于中间流道的气体流速，如图 6a 所示，所以 Z 型流道中气体流速的分布是不均匀的。而在优化改进的 I 型结构中，27 个流道中的气体流速分布相对均匀，如图 6b。



(a) Velocity of *Z*-type

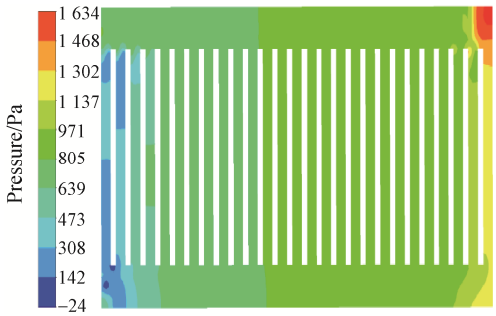


(b) Velocity of *I*-type

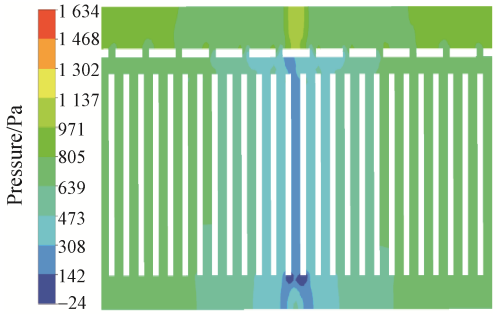
图 6 不同气体流道中的速率分布

Fig. 6 Velocity distribution of air in different gas channels

对于气体通道，气体分布均匀性是影响电池性能的原因之一，而压损是评估流道好坏的另一个重要因素，在相同的电流密度下，流道压损越高，电池总输出功率越少。因此在设计流道的时候需要充分的考虑压损的影响，本节模拟了 0.6 V 工作电压时 2 种流道的压力分布。如图 7 所示，Z 型流道压降为 1 611 Pa，优化 I 型流道压降为 1 030 Pa。显然改进后 I 型流道的压降损失更小，说明采用改进后 I 型流道可以提升最终输出功率。



(a) Pressure of *Z*-type



(b) Pressure of *I*-type

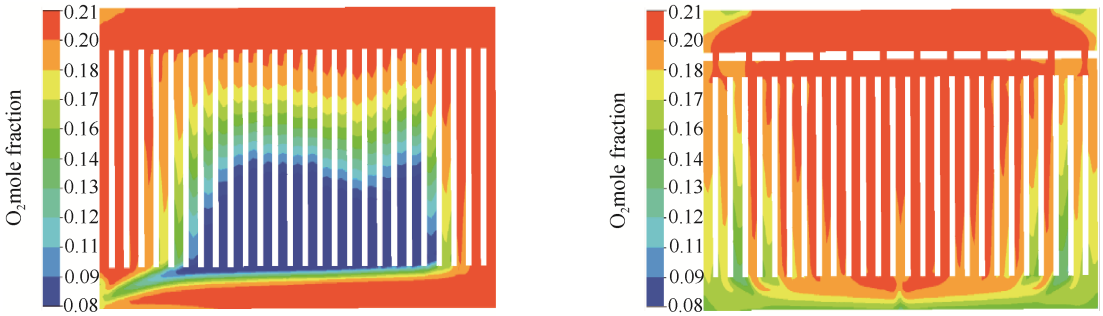
图 7 不同气体流道中的压力分布

Fig. 7 Pressure distribution in different gas channels

2.4 氧气摩尔分布与电流密度

阴极中氧气摩尔分数的分布受流道内空气流动影响很大，结果表明：2 种流道的速度和压力的分布是不同的，因此需要探究 2 种不同流道内氧气摩尔分数的分布。图 8a 和图 8b 分别为原 Z 型流道和优化 I 型流道在 0.6 V 工作电压下阴极流道的氧气摩尔分数分布图。由图 8 可以看出，在相似的电流密度下，传统 Z 型结构中间流道的氧气浓度含量过低，和入口处的含量相比降低了 58.6%，这表明在传统 Z 型流道中，SOFC 工作状态下电化学反应所消耗的氧气不能及时通过对流来提供，从而降低电池性能。而在 I 型流道中，流道中氧气浓度含量相对传统 Z 型流道有较大的改善，最低含量和入口处的含量相

比降低了 38%，说明传质能力得到提升。电池的电流密度受氧气分布的影响，本工作模拟计算了工作电压在 0.5 V~1.15 V 时 2 种不同流道电解质层的平均电流密度分布情况。如图 9 可知，当电压越低时(尤其是低压)优化 *I* 型流道的电解质的平均电流密度比传统 *Z* 型流道的要高，这是因为当电压越低时，由于传统 *Z* 型流道的氧气浓度分布不均导致极化损失就越大。



(a) O_2 mole Fraction of *Z*-type　　(b) O_2 mole Fraction of *I*-type

图 8　不同气体流道中氧气摩尔分数分布

Fig. 8　Distribution of oxygen mole fraction in different gas channels

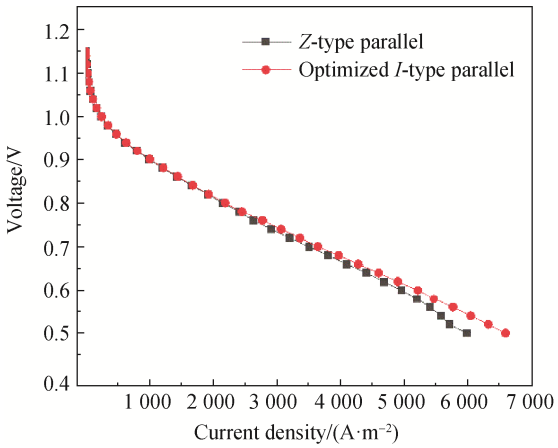


图 9　不同流道电解质层的 *I*–*V* 曲线

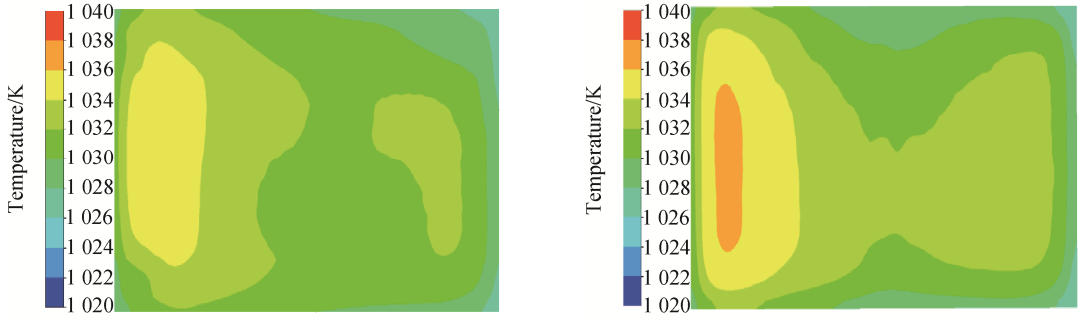
Fig. 9　*I*–*V* curves of electrolyte layers in different channels

2.5　温度与应力分布

电池的温度一方面受 Joule 效应和离子电子流动的影响，另一方面传热也受气体流动的影响[15]。在不同的通道中，对称双阴极 SOFC 的电场和流场分布不同，温度分布和应力分布也不相同。在优化设计 SOFC 流道的同时，考虑温度分布和应力分布对其寿命也至关重要。

模拟了 0.9 V 时 SOFC 电解质层的温度分布如图 10。*Z* 型流道和优化 *I* 型流道的高温区域主要集中在阳极气体的入口处，主要原因是阳极入口处燃料的含量较高，电化学反应相对剧烈，所产生的温度较高。电池中不均匀的温度分布会产生热应力，影响电池性能甚至导致电池失效。根据所测的温度进行了热应力建模和分析。等效应力考虑了第一、第二和第三主应力，通常可以用它来表达热应力的分布。

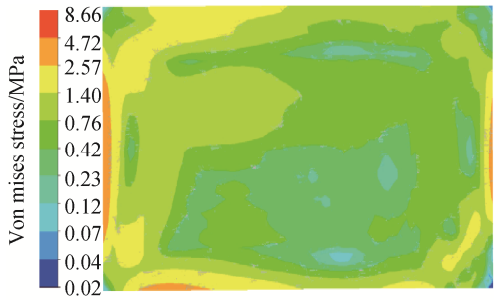
图 11 为电解质中等效应力的分布，由图 11 中可知，优化 *I* 型的应力大于传统 *Z* 型流道，且在电解质层的四边有一定的应力集中现象。



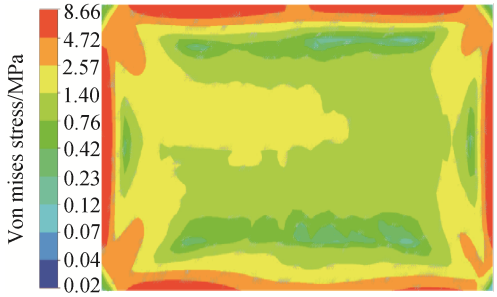
(a) Temperature of *Z*-type　　(b) Temperature of *I*-type

图 10　不同气体流道中电解质层的温度分布

Fig. 10　Temperature distribution of electrolyte layer in different gas channels



(a) Von Mise Stress of *Z*-type



(b) Von Mise Stress of *I*-type

图 11 不同气体流道电解质层的应力分布

Fig. 11 Stress distribution of electrolyte layer in different gas channels

3 结论

1) 建立了一个三维数值模拟，用来模拟对称双阴极固体氧化物燃料电池内部物理场，基于电–热–化学–力的耦合理论，模拟了电池流道的气体流速，氧气摩尔分数分布，温度以及压力。

2) 基于 *I* 型流道提出了一种新型结构的流道，通过模拟不同开孔率和气体分布器高度下电池的最终输出功率来确定结构尺寸。

3) 分别模拟对比了 *Z* 型流道和优化 *I* 型流道下电池的性能，研究发现优化 *I* 型流道相比传统 *Z* 型流道有着较为良好的气体分布均匀性，特别是在低电压时优化 *I* 型流道有着更加良好的电池性能。

4) 表征了 2 种流道温度和等效应力的分布，研究发现两者流道的高温区域都出现在阳极的入口处，但在 0.9 V 工作电压下优化 *I* 型的最大等效应力值要大于传统 *Z* 型流道。

参考文献:

[1] 周玉存, 李军良, 聂怀文, 等. 金属支撑固体氧化物燃料电池研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 936–943.
ZHOU Yucun, LI Junliang, NIE Huaiwen, et al. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(7): 936–943.

[2] 于建国, 王玉璋, 惠宇, 等. 阳极孔隙率对固体氧化物燃料电池性能影响的数值分析[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(2): 246–251.
YU Jianguo, Wan Yuzhang, HUI Yu, et al. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(2): 246–251.

[3] 韩敏芳, 张永亮. 固体氧化物燃料电池中的陶瓷材料[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1548–1554.
HAN Minfang, ZHANG Yongliang. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(11): 1548–1554.

[4] 王一帆, 孙毅飞, 盖鑫磊, 等. 纳/微异构型钙钛矿氧化物电极在固体氧化物燃料电池的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(1): 70–82.
WANG Yifan, SUN Yifei, GE Xinlei, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(1): 70–82.

[5] YAKABE H, OGIWARA T, HISHINUMA M, et al. 3–D model calculation for planar SOFC[J]. J Power Sources, 2001, 102(1–2): 144–154.

[6] JIANG C Y, GU Y C, GUAN W B, et al. 3D thermo–electro–chemo–mechanical coupled mode-ling of solid oxide fuel cell with double-sided cathodes[J]. Int J Hydrogen Energ, 2020, 45(1): 904–915.

[7] SAIED M, AHMED K, NEMATALLA M, et al. Performance study of solid oxide fuel cell with various flow field designs: numerical study[J]. Int J Hydrogen Energ, 2018, 43(45): 20931–20946.

[8] WANG X D, YAN W M, DUAN Y Y, et al. Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field[J]. Energy Convers Manage, 2010, 51(5): 959–968.

[9] WANG J. Pressure drop and flow distribution in parallel–channel configurations of fuel cells: *Z*-type arrangement[J]. Int J Hydrogen Energ, 2010, 35(11): P. 5498–5509.

[10] ZHANG W, HU P, LAI X, et al. Analysis and optimization of flow distribution in parallel channel configurations for proton exchange membrane fuel cells[J]. J Power Sources, 2009, 194(2): 931–940.

[11] JANUSZ J, MARCIN B, MICHAL S. Flow distribution analysis of the solid oxide fuel cell stack under electric load conditions[J]. Fuel cell, 2009.

[12] JACKSON J M, HUPERT M L, Soper S A. Discrete geometry optimization for reducing flow non–uniformity, asymmetry, and parasiticminor loss pressure drops in Z–type configurations of fuel cells[J]. J Power Sources, 2014, 269(dec. 10): 274–283.

[13] 刘振彬, 王蔚国, 陈涛. 固体氧化物燃料电池堆用连接板的新型结构探究与模拟[J]. 化学工程与装备, 2014(2): 11–13–23.
LIU Zhenbing, WANG Weiguo, CHEN Tao. Chem Eng Equip(in Chinese), 2014(2): 11–13–23.

[14] 卜瑶, 官万兵, 刘武, 等. 稀薄燃料气氛下中空全对称双阴极 SOFC 的电化学特性[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(6): 867–872.
BU Yao, GUAN Wanbing, LIU wu, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(6): 867–872.

[15] JIANG C Y, GU Y C, GUAN W B, et al. Thermal stress analysis of solid oxide fuel cell with Z–type and serpentine–type channels considering pressure drop[J]. J Electrochem Soc, 2020, 167(4): 044517.

[16] 胡滨, 朱海兰, 吴兆亮. 气体分布器孔径对泡沫分离过程影响的研究[J]. 高校化学工程学报, 2014, 28(2): 246–251.
HU Bin, ZHU Hailan, WU zhaoliang. J Chem Eng Chin Univ(in Chinese), 2014, 28(02): 246–251.

[17] ZENG S, YU G, PARBEY J, et al. Effect of the electrochemical active site on thermal stress in solid oxide fuel cells[J]. J Electrochem Soc, 2018, 165(2): F105–F113.

[18] LI J, LIN Z. Effects of electrode composition on the electrochemical performance and mechanical property of micro-tubular solid oxide fuel cell[J]. Int J Hydrogen Energ, 2012, 37(17): 12925–12940.

[19] XU M, Li T S, YANG M, et al. Modeling of an anode supported solid oxide fuel cell focusing on thermal stresses[J]. Int J Hydrogen Energ, 2016, 41(33): 14927–14940.

[20] PIAOKO–OPRYVCH P, ZINKO T, JAWORSKI Z. A numerical investigation of the thermal stresses of a planar solid oxide fuel cell[J]. Materials, 2016, 9(10). 2016;9: 814.

[21] STEVENSON J W, ARMSTROING I, CAMEIM R D, et al. Electro–chemical properties of mixed conducting perovskites (M=Sr, Ba, Ca)[J]. J Electrochem Soc, 1996, 143(9): 2722–2729.

[22] XU H, CHEN B, LIU J, et al. Modeling of direct carbon solid oxide fuel cell for CO and electricity cogeneration[J]. Appl Energ, 2016, 178: 353–362.

[23] 杨超. 阳极支撑型固体氧化物燃料电池内多物理场传递过程的机理与数值分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
YANG Chao. Mechanism and numerical analysis of multi-physics transport processes in anode–supported solid oxide fuel cells (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Maritime, 2013.

[24] ZHANG Z, YUE D, HE C, et al. Three–dimensional CFD modeling of transport phenomena in anode–supported planar SOFCs[J]. Heat Mass Transfer, 2014;50: 1575.

[25] MASINI A, et al. Elastic properties of multi–layered ceramic systems for SOCs[J]. Int J Appl Ceram Tec, 2018, 15(2): 370–379.

[26] 宋明, 王文慧, 杜传胜, 等. 平板式固体氧化物燃料电池的热机械行为[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(3): 476–482.
SONG Ming, WANG Wenhui, DU Chuansheng, et al.　J Chin Ceram Soc, 2021, 49(3): 476–48.