

引文格式:孙航宇,李晓艳,苗思雨,等. 板式阳极支撑型 SOFC 模型研究进展[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(5): 40-48.

SUN Hangyu, LI Xiaoyan, MIAO Siyu, et al. Research progress of planar anode-supported SOFC modeling[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(5): 40-48.

# 板式阳极支撑型 SOFC 模型研究进展

孙航宇<sup>1</sup>, 李晓艳<sup>1</sup>, 苗思雨<sup>2</sup>, 王亚丽<sup>1</sup>, 杜国山<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 河南工业大学, 河南 郑州 450001)

[摘要] 固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种高效率,环境友好的新型发电技术,板式阳极支撑型 SOFC 因低电阻且易安装,是目前 SOFC 开发过程中最具应用潜力的结构形式,围绕板式阳极支撑型 SOFC 搭建模型,通过模拟可以对电池的开发和优化提供理论支撑和技术指导。本文围绕板式阳极支撑型 SOFC,详细介绍了几何模型和单重复单元(SRU)模型;几何模型可以实现多种典型板式阳极支撑型 SOFC 的结构和性质分析,对建立有效的模型研究具有重大意义;SRU 模型可以对电池的结构进行模拟,并基于单一单元的研究进一步得出整体电池堆的性能,但 SRU 模型大多采用理想或简化条件的方式进行研究,部分反应过程具有不确定性。未来,在板式阳极支撑型 SOFC 的模型研究中,需要从多物理场方程描述、实验数据收集、实际工况验证等方面,实现模型的拓展,推动模型可信度的进一步提升。

[关键词] 固体氧化物燃料电池(SOFC); 板式阳极支撑型 SOFC; 模型模拟; 几何模型; 重复单元(SRU)模型; 电化学反应; 热力学模型

[中图分类号] TM911

[文献标志码] A

[文章编号] 1672-6103(2025)05-0040-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.05.004

## 0 引言

固体氧化物燃料电池(SOFC)可以将  $H_2$ 、 $CH_4$  等气体转化为电能,被认为是一种可持续和环保的发电技术<sup>[1]</sup>,SOFC 在缓解可再生能源发电不稳定方面具有巨大潜力<sup>[2]</sup>。目前主要 SOFC 结构类型有板式、管式及一体式<sup>[3-4]</sup>。其中,板式 SOFC 因其结构简单、性能优越、经济有效等<sup>[5]</sup>,具有更广阔的竞争市场。板式 SOFC 主要有电解质支撑型和电极支撑型两种类型<sup>[6]</sup>,阳极支撑型 SOFC 具有电解质层薄、电阻低、电导率高等优势<sup>[3]</sup>,且生产成本低,在实际应用中具有更高的竞争优势,是当前 SOFC 的热点研究对象<sup>[6,7]</sup>。

阳极支撑型 SOFC 通常是在高温条件和封闭状态下运行,实现性能输出,其内部存在着复杂的多尺度、多相、多物理场耦合的传递过程,运行环境较为复杂,故采用实验探究的方法难以测量和研究 SOFC 内部的各种物理量的分布情况。模型研究具有解决上述问题的潜力,能够根据已知实验参数与原理,全面探讨电池运行方式、设计方案对 SOFC 性能的影响<sup>[8]</sup>。板式阳极支撑型 SOFC 形态结构特殊,模型搭建过程中模型边界定义的标准化程度高,参数选取、结构依据明晰,因而,板式阳极支撑型 SOFC 模型研究的精度相对较高。

建模是研究电池性能的重要工具,用建立模拟模型的方法研究板式阳极支撑型 SOFC 的性能有助于对其进行理解和探究,综合考虑流体流动、传质传热、电化学反应的模型,可探究分析活化极化、交换电流密度、电子电流密度、气体成分分布和浓度极化等因素的具体变化,系统理解温度、材料、几何形状、尺寸、燃料和燃料重整等对 SOFC 性能的影响,为提高 SOFC 电性能和耐久性提供可能。建模过程需要

[收稿日期] 2025-03-21

[第一作者] 孙航宇(1997—),女,江苏南通人,博士,工程师,从事新能源材料研究。

[通信作者] 杜国山(1980—),男,辽宁沈阳人,硕士,教授级高级工程师,从事稀有金属研究及设计。

[基金项目] 恩菲自研项目(内部编号 YZ2390,内部编号 YZ2436)。

耦合化学过程、电化学过程和物理过程等,本文基于现有文献对板式阳极支撑型 SOFC 的模拟研究,综合梳理了典型模型、建模步骤等,并对后续 SOFC 建模研究的新方向给出了建议。

## 1 板式阳极支撑型 SOFC

板式阳极支撑型 SOFC 是一种可以直接将化学能(如  $H_2$ 、碳氢化合物和 CO 等)转化为电能的新一代燃料电池<sup>[9]</sup>,其核心结构主要包括阳极、阴极和电解质三部分,是目前发展最为成熟的一种结构趋向<sup>[10]</sup>。如图 1 所示,板式阳极支撑型 SOFC 几何结构简单、制造工艺简单、制备成本低<sup>[4]</sup>,其电极板因与两侧的连接体相接触,被形象地称为三明治结构<sup>[10]</sup>。板式阳极支撑型 SOFC 由阳极功能层(AFL)、阴极功能层(CFL)、阳极支撑层(ASL)、阴极支撑层(CSL)、电解质层(EL)、连接体(IC)、矩形(RC)或弧形流道(AC)等几部分共同构成<sup>[11]</sup>。阳极和阴极为多孔介质,为燃料气体的扩散提供通道,电极内掺杂催化剂以促进电化学反应进行。固体电解质起传输氧离子和分隔燃料气体和空气的作用,连接板采用固体式,其主要作用是收集传导电流,分隔气体流道<sup>[12]</sup>。电解质和阴阳极电极之间的界面代表了化学反应主要位点发生的活性区域<sup>[13]</sup>。

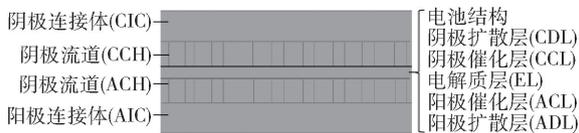


图 1 板式阳极支撑型 SOFC 结构示意图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 The schematic diagram of planar anode-supported SOFC<sup>[3]</sup>

相较于管式和平管式 SOFC、板式电解质支撑型和板式阴极支撑型 SOFC,板式阳极支撑型 SOFC 的模型模拟研究在电化学、动力学、传质等多方面都有显著优势:电路路径较短使得功率密度更高,在每个单元中归一化质量流速几乎相同且温差接近,具有周期性结构及较多的重复性结构单元,大多数模型都建立在最小电池单元的基础上,可提高计算效率,简化计算模型,用来理解和优化电池的内部过程和性能表现<sup>[9]</sup>。目前相关研究主要是通过方程建立不同的模拟模型进行探索,如几何模型和单重复单元(SRU)模型等,这些模型能够很好地对 SOFC

结构进行分析优化,探究不同参数的影响,但模型的不准确性和不全面性是亟待解决的问题。

## 2 几何模型

### 2.1 模型边界

#### 2.1.1 模型假设

根据板式阳极支撑型 SOFC 的工作环境和几何结构,构建多物理场耦合模型,需要在建模过程中进行假设和简化,以提高模型的适用性。具体简化与假设如下<sup>[7,14]</sup>:①SOFC 内部所有的混合气体都为理想气体<sup>[15]</sup>;②SOFC 内部处于绝热状态,且反应过程均为稳态过程<sup>[16]</sup>;③辐射传热可忽略不计;④多孔电极材料具有各向同性和均匀性;⑤体系温度均匀且保持不变;⑥反应均在多孔电极内发生。

#### 2.1.2 边界条件和初始参数

根据实际运行情况,将工作状态下的板式阳极支撑型 SOFC 分别设置组分传递、动量传递、热量传递和电荷传递等控制方程的边界条件<sup>[14]</sup>,以确保模拟模型的准确性。进一步将板式阳极支撑型 SOFC 内部的控制方程进行相互耦合,在求解控制方程时,针对偏微分方程的准确求解,需设置合理的边界条件<sup>[3]</sup>。

对于不同的研究目标,有不同的边界条件和初始参数,可通过求解软件对 SOFC 模型的边界条件进行求解,例如 COMSOL 和 ANSYS Fluent 可分别采用有限元法(FEM)和有限体积法(FVM)准确设定边界条件。

### 2.2 模型方程

板式阳极支撑型 SOFC 在正常运行状态下,涉及组分传递、质量传递、动量传递、热量传递、电荷传递等复杂的物理化学方程,其内部的物理场包含的守恒方程有能量守恒,质量守恒,动量守恒和电荷守恒等。如图 2 所示,板式阳极支撑型 SOFC 通常在高温条件下工作,其内部工作状态很难在试验中得到,利用合理的假设,通过条件合适的微分方程耦合多物理场进行参量求解,对其内部的反应过程进行模拟分析<sup>[10]</sup>。

完全耦合模型包含一系列控制方程,用于描述板式 SOFC 中的不同现象,包括动量、质量、气体种类和能量传输等<sup>[17-19]</sup>。在气体通道处,使用动量方程 Navier-Stokes 方程(通常应用于求解气体通道中的流体流动)描述层流和湍流状态下,不可压缩流

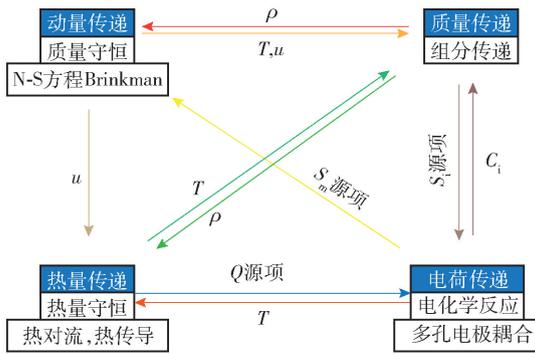


图2 多物理场耦合关系<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Multi-physical Field Coupling Analysis<sup>[8]</sup>

体的物理性质<sup>[3,20]</sup>, 见式(1)。在多孔电极处, 存在流道中的流动和电极中的渗流现象, 使用动量方程 Darcy-Brinkman 方程(通常应用于求解多孔电极中的流体流动), 可实现连续的压力场和速度场描述, 见式(2)。

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

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

式中:  $\mu$  表示混合气体的动力黏度, Pa·s;  $\kappa$  为渗透率, m<sup>2</sup>;  $\mathbf{u}$  是速度向量, m/s;  $\rho$  是密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p$  是压力, Pa;  $\varepsilon$  代表孔隙度;  $T$  为温度, K;  $\nabla$  为德尔算子, 用来描述物理场的变化与场的特性。

板式阳极支撑型 SOFC 运行温度较高, 对其运行机制的分析只考虑对流传热和热传导。基于局部热平衡法, 假设多孔介质内传热的能量守恒控制方程<sup>[20-21]</sup>, 见式(3)–(5)。

$$\rho \cdot C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T) = Q_h \quad (3)$$

$$Q_h = S_a (R_e \Delta h_{ele} + I \eta + I^2 R_{ohm}) \quad (4)$$

$$Q_h = Q_{re} + Q_{ir} + Q_r \quad (5)$$

式中:  $C_p$  为混合气体物质的比热容, J/(kg·K);  $V$  是体积, m<sup>3</sup>;  $k_{eff}$  为有效热导率, 由气体和电池各部件材质决定, W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $Q_h$  为电池运行过程中的热量源项总和, W·m<sup>-3</sup>;  $\Delta h_{ele}$  为电化学反应生成焓, J;  $R_e$  为电化学反应速率, mol/(L·s);  $R_{ohm}$  为固相电阻,  $\Omega$ ;  $Q_{re}$  是阴阳极内电化学反应放出的热量, 为可逆热源项, J;  $Q_{ir}$  是电化学反应活化极化放出的热量, 为

不可逆热源项, J;  $Q_r$  是电流经过固相电阻(包括电极, 电解质和连接体)产生的热量, 为化学反应的热源项, J;  $S_a$  为活化比表面积, m<sup>-1</sup>;  $I$  是电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $\eta$  表示活化极化所造成的电压降, V。

SOFC 在工作状态时, 反应在电极上不断进行, 但物质的总质量保持不变, 质量守恒控制方程(连续方程)见式(6)<sup>[20,22,23]</sup>。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_{br} \quad (6)$$

式中:  $Q_{br}$  表示质量源项, kg·m<sup>-3</sup>·s<sup>-1</sup>, 可由化学反应和电化学反应决定。

板式阳极支撑型 SOFC 在发生电化学反应时, 内部的电子和离子在电子电势和离子电势的作用下, 遵循欧姆定律发生迁移, 在迁移过程中保持守恒, 电荷守恒控制方程见式(7)–(8)<sup>[22,24]</sup>。

$$\nabla \cdot (-\sigma_{e,eff} \nabla \psi_e) = -S_a I \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma_{ion,eff} \nabla \psi_{ion}) = -S_a I \quad (8)$$

式中:  $\sigma_{e,eff}$  为电子的有效电导率, S/m;  $\sigma_{ion,eff}$  为离子的有效电导率, S/m;  $\psi_e$  为电子的电动势, V;  $\psi_{ion}$  为离子的电动势, V。

### 2.3 几何模型研究进展

目前, 几何模型作为一种科学有效的研究方法, 被广泛应用于板式阳极支撑型 SOFC 的性能、结构和参数优化等方面的研究, 已建立了大量的数值模型。为了量化评价阳极、阴极中的电化学反应过程, 以及材料、结构、操作条件等对板式阳极支撑型 SOFC 性能表现的影响, 许多研究者从不同角度出发建立相应的几何模型。

从燃料流向层面, Zhang 等<sup>[25]</sup>建立了三维平板式阳极支撑多通道 SOFC 模型, 以 H<sub>2</sub> 为燃料, 研究逆流、顺流、交叉流三种典型气流向对 SOFC 性能的影响, 基于模型分析, 得出逆流和顺流比交叉流更具优势。刘艺辉等<sup>[3]</sup>以 30% 预重整气为燃料, 以板式阳极支撑型 SOFC 为研究对象, 模拟分析了顺流、逆流和交叉流三种流动方式对 SOFC 温度分布、电化学性能、反应速率分布以及各组分摩尔分数分布的影响情况。

从电池结构层面, Xu 等<sup>[26]</sup>基于阳极支撑平板式 SOFC, 建立具有不同互连设计的三维模型, 通过综合考虑质量、动量、热传递及电荷传递等因素, 基于模型模拟结果, 指导电池互连尺寸的优化。Cui 等<sup>[14]</sup>结合相转化法, 搭建板式阳极支撑型 SOFC 模型, 模拟比较不同阳极支撑基板的 SOFC, 结果表明,

直通道阳极改善了气体传输,去除海绵层对电池性能的影响最小。

从运行条件层面, Nerat 等<sup>[27]</sup>建立了三维单通道板式阳极支撑型 SOFC 模型,对最大温度梯度、幅度和位置进行了模拟研究。宋等<sup>[9]</sup>考虑多场耦合作用,建立板式 SOFC 三维有限元模型,研究 SOFC 工作时的温度、电流密度、热应力与气体摩尔分数的分布规律等,发现随着气体的流动方向,  $O_2$  和  $H_2$  的摩尔分数不断降低,在电池空气入口处,电解质电流密度最大。

从流场分析层面, Iwai 等<sup>[28]</sup>开发了平面 SOFC 的数值模型,同时求解准三维多组分气体流、温度和电势/电流场。随后,将该模型应用于电池堆的数值模拟,从而预测电池堆中电荷转移分布的变化。

以上是板式阳极支撑型 SOFC 通过建立几何模型得到的实际有效的研究模型,通过几何模型的研究应用,实现了多种典型板式阳极支撑型 SOFC 的

结构和性质分析。由此可知,几何模型的建立推进了 SOFC 性能和结构的研究,对建立有效的模型研究方面具有重大意义。

### 3 单重复单元(SRU)模型

板式阳极支撑型 SOFC 中,阳极、电解质、阴极通常堆叠以构成单电池,单电池间通过互连器连接形成多层堆叠,从而实现高功率。以单重复单元(SRU)为建模对象,如图3所示,SRU是板式阳极支撑型 SOFC 堆的基本单元,在电流流动方向上具有分层结构,每个 SRU 还包括按顺序堆叠的不同功能层。板式阳极支撑型 SOFC 夹在两个互连板(ICP)之间,由阳极、电解质和阴极(PEN)组成。ICP 和 PEN 之间的空隙是气体通道。工作介质气体流过通道并参与电化学反应。电流沿垂直于 SRU 板平面的方向流动<sup>[29-31]</sup>。结合控制方程,建立 SRU 的数值模型。

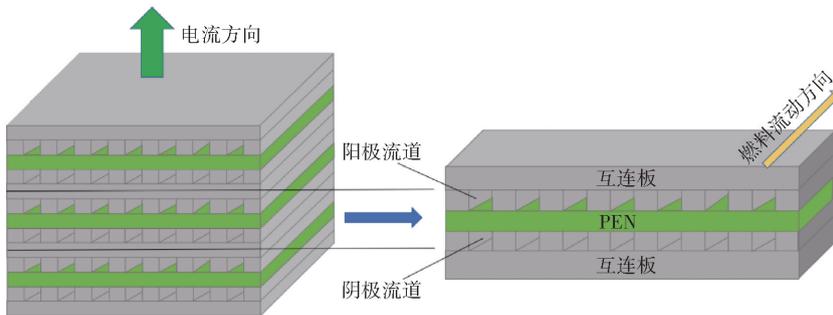


图3 板式阳极支撑型 SOFC 的堆叠和重复单元<sup>[29]</sup>

Fig. 3 The stacking assembly and repeated units of planar anode-supported SOFC<sup>[29]</sup>

#### 3.1 模型假设

利用 SRU 模型,研究板式阳极支撑型 SOFC 电池性能和结构,在搭建模型过程中,常用的简化和假设包括<sup>[32]</sup>:①工作气体均假设为理想气体;②在固体结构中没有电流(电压差)沿气体流动方向流动<sup>[33]</sup>;③气体与固体, PEN 与固体结构之间的对流换热系数均被视为常数;④假设 PEN 不会降解;⑤模型设定为稳态;⑥忽略 SOFC 堆内的辐射传热;⑦通道内的流动是不可压缩的层流;⑧电极是多孔介质。

#### 3.2 方程描述

##### 3.2.1 电化学反应

SRU 模型中,电化学反应包括电池浓度损失、电池活化损失、电池欧姆损失、能斯特电势和电池电

压等控制方程。以常用燃料  $H_2$  为例, Butler-Volmer 方程用来模拟电池活化损失<sup>[34,35]</sup>,见式(9)。

$$V_{act} = \frac{RT_{PEN}}{F} \left[ \sinh^{-1} \left( \frac{I}{2I_{H_2}} \right) + \sinh^{-1} \left( \frac{I}{2I_{O_2}} \right) \right] \quad (9)$$

式中:  $V_{act}$  是活化极化损失, V;  $I_{H_2}$  和  $I_{O_2}$  分别是氢气侧和空气侧电流密度,  $A/cm^2$ ;  $R$  为通用气体常数,  $8.314 J/(K \cdot mol)$ ;  $T_{PEN}$  是 PEN 的工作温度, K;  $F$  为法拉第常数,  $96485 C/mol$ ;  $h$  为热传递系数。

电池欧姆损耗的方程描述见式(10)<sup>[36]</sup>。

$$V_{ohm} = ASR \cdot I \quad (10)$$

式中:  $V_{ohm}$  是电池欧姆损耗, V;  $ASR$  是面积比电阻,  $\Omega \cdot cm^2$ 。

能斯特势基于能斯特方程进行描述,见式

(11)<sup>[37]</sup>。

$$E_{Nernst} = -\frac{\Delta G^0}{2F} + \frac{R \cdot T_{PEN}}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (11)$$

式中: $E_{Nernst}$ 为能斯特电位,V; $P_{H_2}$ 、 $P_{O_2}$ 和 $P_{H_2O}$ 分别为氢、氧和蒸气的分压,Pa; $\Delta G^0$ 为吉布斯自由能,kJ/mol。

电池的浓度损耗,由式(12)~(14)进行描述<sup>[37]</sup>。

$$V_{conc} = V_{conc,H_2} + V_{conc,O_2} \quad (12)$$

$$V_{conc,H_2} = \frac{R \cdot T_{PEN}}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2O,tpb} \cdot P_{H_2,bulk}}{P_{H_2O,bulk} \cdot P_{H_2,tpb}} \right) \quad (13)$$

$$V_{conc,O_2} = \frac{R \cdot T_{PEN}}{2F} \ln \left( \frac{P_{O_2,bulk}}{P_{O_2,tpb}} \right) \quad (14)$$

式中: $P_{i,bulk}$ 和 $P_{i,tpb}$ 是*i*物质在整体流中和三相边界(TPB)处的物质的分压,bar(0.1 MPa); $V_{conc}$ 是由浓度极化造成的电压损失,V; $V_{conc,H_2}$ 是由氢浓度极化造成的电压损失,V; $V_{conc,O_2}$ 是由氧浓度极化造成的电压损失,V。

电池的输出电压,在SRU模型中,基于式(15)进行描述<sup>[20,23,37,38]</sup>。

$$V_{SRU} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (15)$$

式中: $V_{ohm}$ 、 $V_{conc}$ 和 $V_{act}$ 分别是由欧姆极化、浓度极化和活化极化造成的电压损失,V; $V_{SRU}$ 是实际工作电压,V。

### 3.2.2 热力学方程

板式阳极支撑型SOFC的热力学过程可以通过热力学第一定律和第二定律来描述,整个反应过程可以根据氧化剂和还原剂反应自由焓进行热力学计算。在SRU模型中,涉及的能量输入、输出和转化,可通过热力学第一定律(能量守恒)进行建模。再根据反应的吉布斯自由能变化计算电池的理论效率。SRU模型中,假设反应是可逆反应,燃料气通入电池的阳极,氧气通入电池的阴极<sup>[39]</sup>。由热力学第一定律,可对热力学平衡进行描述,见式(16)。

$$Q_{rev} + W_{rev} = \Delta_r H \quad (16)$$

式中: $\Delta_r H$ 为电池中反应物到产物的反应焓变,kJ; $Q_{rev}$ 为电池释放的可逆热,kJ; $W_{rev}$ 是电池对外做的功,kJ。

基于热力学第二定律,导出到环境的可逆热与反应的熵变 $\Delta_r S$ 达成平衡,见式(17)。

$$\Delta_r S = \frac{Q_{rev}}{T} = 0 \quad (17)$$

式中: $\Delta_r S$ 为反应的焓变,kJ/K; $Q_{rev}$ 是导出到环境的可逆热,kJ; $T$ 为温度,K。

反应的可逆功 $W_{rev}$ 由吉布斯自由能 $\Delta_r G$ 表示,见式(18)。

$$W_{rev} = \Delta_r G = \Delta_r H - T\Delta_r S \quad (18)$$

式中: $W_{rev}$ 是反应的可逆功,kJ; $\Delta_r G$ 是吉布斯自由能,kJ; $\Delta_r H$ 为电池中反应物到产物的反应焓变,kJ。

电池的效率 $\eta_{FC}$ 是电池的在热力学状态下反应的吉布斯能变 $\Delta_r G$ 和反应焓变 $\Delta_r H$ 的比值,见式(19)。

$$\eta_{FC} = \frac{\Delta_r G}{\Delta_r H} = \frac{\Delta_r H - T\Delta_r S}{\Delta_r H} \quad (19)$$

基于式(16)~(19),在SRU模型中完成热力学相关方程的描述,从而实现板式阳极支撑型SOFC内热相关过程的量化分析和模拟。

### 3.3 模型应用

目前,针对板式阳极支撑型SOFC的SRU模型,在量化评价燃料流向效果、反应动力学评价、运行条件优化、放大性能研究等方面均有应用。

在燃料流向分析方面,Iwata等<sup>[40]</sup>开发了板式阳极支撑型SOFC的数值模拟模型,基于SRU结构方程,分析沿着流动方向的温度和电流密度分布。结果表明,在顺流情况下,温度随着流动方向增加,在逆流情况下,温度分布在燃料入口附近达到最大值。Kang等<sup>[41,42]</sup>建立了直接内重整固体氧化物燃料电池(DIR-SOFC)的简化一维动力学模型,对于板式阳极支撑型SOFC,探究顺流、逆流和横流的动力学过程。Thin等<sup>[43]</sup>通过数值研究,分析了热源对板式阳极支撑型SOFC性能的影响,在并流和逆流状态下,该模型可量化显示温度、化学物质和电流密度的分布结果。但该模型具有一定的局限性,没有考虑由于电解质和电极中电子和离子流动的阻力引起的源项。

在运行条件优化方面,Ni等<sup>[44]</sup>使用有限体积法(FVM)建立了板式阳极支撑型SOFC的二维热流模型,分析了结构参数和运行参数对SOFC性能的影响,充分考虑了电池中的层流流动和共轭传热以及电化学反应,详细研究了工作电位、进气组成、进气流速、电极渗透率和电极孔隙率等因素对电池内耦合运输、电化学反应及电输出的影响。

进一步考虑板式阳极支撑型SOFC的放大和实际应用场景,Liao等<sup>[45]</sup>建立板式阳极支撑型SOFC

的三维模型,结合电化学反应与动量、质量和热量的传输,以表征物理状态分布的单电池和堆栈,对电池放大性能差异的机制进行定性定量分析。Wang 等<sup>[29]</sup>拓展并验证了板式阳极支撑型 SOFC 的一维数学模型,考虑了 SRU 各层间的质量、能量传递和热传导,探讨了真实的工业运行场景下的电化和热力学性能,得出了板式阳极支撑型 SOFC 堆在绝热环境下的最佳运行边界,为 SOFC 的实际应用提供了理论支撑。

通过对板式阳极支撑型 SOFC 的 SRU 模型研究,可以对电池的结构进行模拟,并基于单一单元的研究,进一步得出整体电池堆的性能。但 SRU 模型大多采用理想或简化条件的方式进行研究,且板式 SOFC 内部反应过程十分复杂,部分反应过程具有不确定性。因此,有必要进一步建立更加全面的 SRU 模型以推动对其结构和性能的深入研究,从而为板式 SOFC 的结构优化和性能提高提供参考。

## 4 模型建模工具

随着计算机技术的发展,模拟模型已成为对板式阳极支撑型 SOFC 进行研究分析的重要方法。板式阳极支撑型 SOFC 的模型模拟过程涉及质量传递、热量传递、动量传递、电荷传递、气体流动以及化学动力学和电化学动力学等复杂的物理化学过程<sup>[46]</sup>,通过软件对基于物理定律的模拟模型进行求解,在分析各物理场和物理量中起着重要作用,从而对 SOFC 的开发和优化提供指导。

目前,板式阳极支撑型 SOFC 的模型应用工具可使用基于有限容积法(FVM)和有限元法(FEM)的商用计算流体动力学(CFD)软件包,如 COMSOL Multiphysics、ANSYS/Fluent 等,将数值计算和几何结构进行简化,用于流场的可视化表征性能预测等<sup>[47]</sup>。该软件能够解决具有多个偏微分方程的综合物理场建模问题,实现多个物理场耦合的有限元分析,是专门为科学及工程领域内模拟仿真而打造的多物理场模拟软件<sup>[23]</sup>。

栾凯夫等<sup>[10]</sup>通过 CFD 的方法对板式阳极支撑型 SOFC 的多物理场与电化学反应进行了仿真分析,同时,利用 Fluent 软件对其进行三维数值建模,研究了模拟模型中部分材料参数对板式 SOFC 输出特性的影响,模拟并分析了单气流通道截面形状对其电流密度和温度分布的影响,确定了最优截面形

状为矩形流道。Tikiz 等<sup>[48]</sup>建立了一个三维 CFD 模型模拟,已被开发和实验测试的具有双极电镀作为气体通道和集电器的板式阳极支撑型 SOFC,在不同的反应物流量、电池温度和压力下,对平面错流型进行实验,结果表明,电流密度和燃料气的入口速度是驱动燃料利用率和总转换效率的主要参数。Qu 等<sup>[49]</sup>建立了以波纹双极板为气体通道和集流体的板式阳极支撑型 SOFC 的三维 CFD 模型,并求解质量、动量、能量和组分守恒,研究了通过电池结构和气体通道的温度、流速、压力和气体(燃料和空气)浓度的分布。

## 5 建议与展望

板式阳极支撑型 SOFC 是目前 SOFC 开发过程中最具应用潜力的结构形式,本文对板式阳极支撑型 SOFC 模型模拟现状进行分析,重点介绍了几何模型和 SRU 模型,这些模型可以从多个方面反应电池性能,然而目前模型的拓展优化仍存在很多挑战。随着各种技术的不断发展,板式阳极支撑型 SOFC 的模型建模也在不断完善和优化,使结构优化、参数调整等更加准确有效,能够更全面真实模拟实际工作情况。

1) 板式阳极支撑型 SOFC 的模型研究主要集中在单一或有限个物理场之间的耦合建模,缺乏大量基于多物理场或全物理场耦合的模型研究,需开发更全面的模型。

2) 板式阳极支撑型 SOFC 的模型建模过程缺乏更加详细的实验数据。板式 SOFC 的实际工作情况受诸多因素影响,且在模拟模型过程中,许多参数无法直接测量,需要通过经验公式计算,导致建模缺乏更加详细的实验数据,模型准确性受到影响。

3) 板式阳极支撑型 SOFC 的模型建立与实际工作条件存在一定差异。板式 SOFC 的模型建立过程涉及模型假设,经模型假设简化后的模型与电池实际工况相比过于简单,导致模型的实际应用受限。纳入动态操作条件方程、电池电堆退化机制以及更详细的电化学反应是有效提升模型精度的方法途径。

根据以上分析,未来对板式阳极支撑型 SOFC 的模型研究中,需要从全物理场耦合相关方程描述、实验数据收集、实际工况验证等方面,建立更加全面综合的模拟模型,推动模型可信度进一步提高。

## [参考文献]

- [1] POURRAHMANI H, XU C Z, HERLE J V. The thermodynamic and life cycle assessments of a novel charging station for electric vehicles in dynamic and steady state conditions [J]. *Nature Portfolio*, 2023, 13: 11159.
- [2] 李晓艳,付云枫,陈宋璇,等.直接碳固体氧化物燃料电池研究进展[J].*绿色矿冶*,2025,41(2):10-17.  
LI Xiaoyan, FU Yunfeng, CHEN Songxuan, et al. Research progress in direct carbon solid oxide fuel cells[J]. *Sustainable Mining and Metallurgy*,2025,41(2):10-17.
- [3] 刘艺辉. 固体氧化物燃料电池电化学性能和传递特性模拟研究[D]. 大连海事大学, 2023.  
LIU Yi Hui. Simulation study on electrochemical performance and transport characteristics of solid oxide fuel cell [D]. Dalian Maritime University, 2023.
- [4] ZHANG Z, YUE D, YANG G, et al. Three dimensional CFD modeling of transport phenomena in multi channel anode supported planar SOFCs [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84: 942-954.
- [5] DING A, SUN H Z, ZHANG S Y, et al. Thermodynamic analysis and parameter optimization of a hybrid system based on SOFC and graphene collector thermionic energy converter [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 291: 117327.
- [6] MIURA Y, TAKEMIYA S, FUKUYAMA Y, et al. Improvement of the internal reforming of metal supported SOFC at low temperatures [J]. *International Journal of Hydrogen energy*, 2023, 48: 25487-25498.
- [7] 汤根土. 平板状阳极支撑固体氧化物燃料电池的实验与数值模拟 [D]. 浙江大学, 2005.  
TANG Geng Tu. Experimental and numerical simulation of solid oxide fuel cell supported by flat plate anode [D]. Zhejiang University, 2005.
- [8] 刘蓬微. 固体氧化物燃料电池内重整反应与电化学性能研究 [D]. 郑州大学, 2022.  
LIU Peng Wei. Study on reforming reaction and electrochemical performance in solid oxide fuel cell [D]. Zhengzhou University, 2022.
- [9] 宋明,王文慧,杜传胜,等. 平板式固体氧化物燃料电池多物理场耦合建模 [J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(9): 2401-2408.  
SONG Ming, WANG Wen Hui, DU Chuan Sheng, et al. Multiphysics coupling modeling of flat plate solid oxide fuel cell [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(9): 2401-2408.
- [10] 栾凯夫. 平板式固体氧化物燃料电池结构参数设计数值模拟 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.  
LUAN Kai Fu. Numerical simulation of structural parameter design of flat plate solid oxide fuel cell [D]. Inner Mongolia University of Science and Technology, 2023.
- [11] 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 Wei Qiang, ZHENG Qing Rong, YUAN Jin Liang, et al. Marine solid oxide fuel cell multiphysics coupling model and thermal stress analysis [J]. *Naval Architecture*, 2022, 44(9): 114-120.
- [12] 樊晟两. 板式固体氧化物燃料电池结构和性能优化研究 [D]. 郑州大学, 2022.  
FAN Sheng Liang. Research on structure and performance optimization of plate solid oxide fuel cell [D]. Zhengzhou University, 2022.
- [13] LU P Z, WEI S L, DU Z H, et al. Analysis and comparison of multiphysics fields for different flow field configurations in SOFC [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 229: 125708.
- [14] CUI D, YANG Y B, WANG G, et al. Modeling analysis of SOFC supported on anode employing straight channel fabricated by phase inversion method [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 69: 486-492.
- [15] ILBAS M, KUMUK B, ALEMU M, et al. Numerical investigation of a direct ammonia tubular solid oxide fuel cell in comparison with hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45: 35108-35117.
- [16] AKHTAR N, DECENT S, LOGHIN D, et al. A three dimensional numerical model of a single-chamber solid oxide fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34: 8645-8663.
- [17] LI A, SONG C, LIN Z. A multiphysics fully coupled modeling tool for the design and operation analysis of planar solid oxide fuel cell stacks [J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 1234-44.
- [18] BA L, XIONG X, YANG Z, et al. A novel multi physics and multi dimensional model for solid oxide fuel cell stacks based on international mapping of BP neural networks [J]. *Journal Power Sources*, 2021, 500: 229784.
- [19] TIKIZ I, TAYMAZ I, PEHLIVAN H. CFD modelling and experimental validation of cell performance in a 3D planar SOFC [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44: 15441-55.
- [20] NAOUAR A, FERRERO D, SANTARELLI M, et al. Numerical study of electrode permeability influence on planar SOFC performance [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 78: 189-201.
- [21] TODD B, YOUNG J B. Thermodynamic and Transport Properties of Gases for Use in Solid Oxide Fuel Cell Modelling [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(1): 186-200.
- [22] CHELLEHBARI Y M, ADAVI K, AMIN J S, et al. A numerical simulation to effectively assess impacts of flow channels characteristics on solid oxide fuel cell performance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114280.
- [23] 楚迪. 板式固体氧化物燃料电池电化学性能数值模拟研究

- [D]. 郑州大学, 2020.
- CHU Di. Numerical simulation of electrochemical performance of plate solid oxide fuel cell [D]. Zhengzhou University, 2020.
- [24] 靳红伟, 李志义, 魏伟, 等. 变工况条件下 SOFC 不可逆热力学性能研究 [J]. 电源技术, 2020, 44(11): 1604–1609.
- JIN Hong Wei, LI Zhi Yi, WEI Wei, et al. Research on irreversible thermodynamic properties of SOFC under variable working conditions [J]. Power Supply Technology, 2020, 44(11): 1604–1609.
- [25] ZHANG Z G, YUE D T, YANG G G, et al. Three dimensional CFD modeling of transport phenomena in multi channel anode supported planar SOFCs [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 942–954.
- [26] XU M, LI T S, YANG M, et al. Solid Oxide Fuel Cell Interconnect Design Optimization Considering the Thermal Stresses [J]. Science Bulletin, 2016, 61(17): 1333–1344.
- [27] NERAT M, JURICIC D. A comprehensive 3-D modeling of a single planar solid oxide fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(5): 3613–3627.
- [28] IWAI H, YAMAMOTO Y, SAITO M, et al. Numerical simulation of intermediate temperature direct internal reforming planar solid oxide fuel cell [J]. Energy, 2011, 36: 2225–2234.
- [29] WANG C Y, FAN J L, YONG Xing, et al. Thermodynamics and electrochemical performance of co and counter flow planar solid oxide fuel cells under an adiabatic operation environment [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 181–199.
- [30] BANERJEE A, WANG Y, DIERCKS J, et al. Hierarchical modeling of solid oxide cells and stacks producing syngas via  $H_2O/CO_2$  Co-electrolysis for industrial applications [J]. Applied Energy, 2018, 230: 996–1013.
- [31] BLUM L, BUCHKREMER H P, GROSS S, et al. Solid oxide fuel cell development at Forschungszentrum Juelich [J]. Fuel Cell, 2007, 7: 204–210.
- [32] NI M. 2D thermal fluid modeling and parametric analysis of a planar solid oxide fuel cell [J]. Energy Conversion Management, 2010, 51: 714–721.
- [33] SORRENTINO M, PIANSES C, GUEZENNEC Y. A hierarchical modeling approach to the simulation and control of planar solid oxide fuel cells [J]. Journal Power Sources, 2008, 180: 380–392.
- [34] PCAK H. Modeling of solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization [J]. Journal of The Electrochemical Society 1998, 145: 3995–4007.
- [35] ZENG Z, ZHAO B, HAO C, et al. Effect of radial flows in fuel channels on thermal performance of counter flow tubular solid oxide fuel cells [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119577.
- [36] SRIKANTH S, HEDDRICH M P, GUPTA S, et al. Transient reversible solid oxide cell reactor operation experimentally validated modeling and analysis [J]. Applied Energy, 2018, 232: 473–488.
- [37] CHOUDHARY T, SANJAY. Novel and optimal integration of SOFC-ICGT hybrid cycle; energy analysis and entropy generation minimization [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 15597–15612.
- [38] LI Y X, GRIMM F, KARL J. Numerical and experimental analysis of the effects of tar components on single planar SOFC under high fuel utilization [J]. Electrochimica Acta, 2023, 449: 142234.
- [39] 蒋先锋. 固体氧化物燃料电池的热力学及电化学应用基础 [J]. 化工时刊, 2012, 26(7): 54–58.
- JIANG Xian Feng. Fundamentals of thermodynamics and electrochemical application of solid oxide fuel cells [J]. Chemical Industry Times, 2012, 26(7): 54–58.
- [40] IWATA M, HIKOSAKA T, MORITA M, et al. Performance analysis of planar type unit SOFC considering current and temperature distributions [J]. Solid State Ionics, 2000, 132: 297–308.
- [41] KANG Y W, LI J, CAO G Y, et al. A reduced 1D dynamic model of a planar direct internal reforming solid oxide fuel cell for system research [J]. Journal Power Sources, 2009, 188: 170–176.
- [42] KANG Y W, LI J, CAO G Y, et al. One dimensional dynamic modeling and simulation of a planar direct internal reforming solid oxide fuel cell [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17: 304–317.
- [43] THINH X, HO P K, ALEX C, et al. Effects of heat sources on the performance of a planar solid oxide fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35: 4276–4284.
- [44] NI M. 2D thermal-fluid modeling and parametric analysis of a planar solid oxide fuel cell [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 714–721.
- [45] LIAO J W, JIE H, HU Q, et al. Understanding performance difference in the scale up of flat chip solid oxide fuel cell: An Experimental and Numerical Study [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 63: 103649.
- [46] 刘艺辉, 李世安, 魏荣强, 等. 固体氧化物燃料电池流道结构的研究进展 [J]. 化学通报, 2021, 84(7): 698–703.
- LIU Yi Hui, LI Shi An, WEI Rong Qiang, et al. Chemical Bulletin, 2021, 84(7): 698–703.
- [47] 郑建民. 基于多物理场耦合的平板式固体氧化物燃料电池堆热应力场的模拟与分析 [D]. 宁波大学, 2022.
- ZHENG Jian Ming. Simulation and analysis of thermal stress field of flat plate solid oxide fuel cell stack based on multiphysics coupling [D]. Ningbo University, 2022.
- [48] TIKIZ I, TAYMAZ I, PEHLIVAN H. CFD modelling and experimental validation of cell performance in a 3-D planar SOFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44: 15441–15455.

[49] QU Z P, ARAVIND P V, BOKSTEEN S Z, et al. Three dimensional computational fluid dynamics modeling of anode

supported planar SOFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36: 10209 - 10220.

## Research progress of planar anode-supported SOFC modeling

SUN Hangyu<sup>1</sup>, LI Xiaoyan<sup>1</sup>, MIAO Siyu<sup>2</sup>, WANG Yali<sup>1</sup>, DU Guoshan<sup>1</sup>

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Solid oxide fuel cell (SOFC) is a emerging electricity generation technology with high efficiency and environmental friendliness. Planar anode-supported SOFC is one of the promising types of SOFC because of the low electrical resistance and flexible assembly. Modeling simulation can provide theoretical support and technical guidance for the development and optimization of the planar anode-supported SOFC. This paper focused on the planar anode-supported SOFC and presented a detailed discussion of both the geometric model and the single repeat unit (SRU) model. The geometric model enabled structural and property analyses of various typical planar anode-supported SOFC configurations, which was crucial for establishing a robust foundation for modeling research. The SRU model allowed for the simulation of individual cell structures and could be used to predict the performance of the entire stack based on the behavior of a single unit. However, most existing SRU models were based on idealized or simplified assumptions, and certain electrochemical reaction mechanisms remained poorly understood. Future modeling efforts should focus on multiphysics equations description, experimental data collection, and validation under real-world operating conditions in order to improve model accuracy and reliability.

**Key words:** solid oxide fuel cell (SOFC); planar anode-supported SOFC; model simulation; geometrical model; single repeating unit (SRU) model; electrochemical reaction; thermodynamic model

## 中铝集团与嘉能可集团深化合作

9月18日,中铝集团董事长段向东在集团总部会见嘉能可集团金属、铁矿石和煤炭全球市场总裁乔蒂什·乔治。双方围绕金属、铁矿石及焦煤等领域合作前景以及国内外宏观经济形势对双方业务发展的影响等方面,进行了深入交流与探讨。中铝集团副总经理董建雄、魏成文,嘉能可集团全球铁矿石和焦煤负责人彼得·希尔参加会见。

段向东指出,中铝集团与嘉能可集团长期以来保持着稳固友好的战略合作伙伴关系,双方在铜、铝等金属矿产贸易领域合作逾十载,互信深厚,构建了成熟稳健的合作机制,在多个重要业务板块中形成了协同发展的战略格局。希望双方进一步拓展合作领域,精准把握新的发展机遇,高效整合核心资源与独特优势,携手应对市场变化与行业挑战,推动资源共享与战略协同,共同开创高质量发展新局面。

乔蒂什·乔治表示,嘉能可集团与中铝集团在发展战略上高度契合,为双方深化合作奠定了坚实基础。为进一步推动合作落地见效,嘉能可集团将依据核心业务板块成立专项工作小组,建立高效协同机制,精准对接中铝集团的战略规划与发展需求,持续拓展和深化重点领域合作,实现共赢发展。

(资料来源:中国有色金属报)