

不同极化电压下固体氧化物燃料电池内部状态的数值模拟

孙夏宜, 侯书增, 吕勇奇, 曾博洋

四川轻化工大学机械工程学院, 四川 宜宾

收稿日期: 2025年11月26日; 录用日期: 2025年12月31日; 发布日期: 2026年1月8日

摘要

本文基于COMSOL Multiphysics软件, 建立了一个平板式固体氧化物燃料电池(SOFC)单电池的三维多物理场耦合模型。该模型综合考虑了电化学反应、流体流动、物质浓度和传热四个场的相互作用。研究的核心是通过改变极化电压(从0.1 V到0.7 V), 系统地分析其对SOFC内部关键状态参数的影响, 包括电流密度分布、氧气和氢气的浓度分布、气体流速以及电池的温度分布。研究发现, 极化电压显著影响电流密度的分布模式、气体消耗速率、电池温度以及气体流速, 并识别出0.4 V~0.5 V区间是多个物理量变化趋势的转折点。

关键词

固体氧化物燃料电池, 多物理场耦合, 极化电压, 数值模拟

Numerical Simulation of Internal States in Solid Oxide Fuel Cells under Different Polarization Voltages

Xiayi Sun, Shuzeng Hou, Yongqi Lyu, Boyang Zeng

School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin Sichuan

Received: November 26, 2025; accepted: December 31, 2025; published: January 8, 2026

Abstract

Based on the COMSOL Multiphysics software, this paper establishes a three-dimensional multiphysics coupled model for a planar solid oxide fuel cell (SOFC) single cell. The model comprehensively considers the interactions among four fields: electrochemical reaction, fluid flow, material

文章引用: 孙夏宜, 侯书增, 吕勇奇, 曾博洋. 不同极化电压下固体氧化物燃料电池内部状态的数值模拟[J]. 化学工程与技术, 2026, 16(1): 25-40. DOI: 10.12677/hjct.2026.161004

concentration, and heat transfer. The core of the study is to systematically analyze the effects of varying polarization voltage (from 0.1 V to 0.7 V) on key state parameters within the SOFC, including current density distribution, oxygen and hydrogen concentration distribution, gas flow rate, and cell temperature distribution. The study finds that polarization voltage significantly affects the distribution pattern of current density, gas consumption rate, cell temperature, and gas flow rate, and identifies the range of 0.4 V~0.5 V as a turning point for the variation trends of multiple physical quantities.

Keywords

Solid Oxide Fuel Cells, Multi Physics Coupling, Polarization Voltage, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种工作温度在 600℃~1000℃将碳氢化合物转化为电能的新型发电设备。因其高能量转换效率、燃料选择范围广、无需昂贵的催化剂和环境友好性等优势,在分布式发电、备用电源、热电联产等领域极具发展潜力,多年来一直是国内外学者的研究热点。

SOFC 的极化电压对电池输出功率、能量转换效率和电池寿命有着重要影响。较高的极化电压会使实际输出电压远低于理论电压。降低电池输出功率。同时这也意味着更多的化学能被消耗在电池内部的不可逆过程中,而不是转化为电能输出,使得实际效率远低于理论效率。另一方面,较高的极化电压会促使电池内部的电极材料发生结构变化,如催化剂烧结、电解质破裂、电极局部腐蚀等,这些结构变化会加速电池性能的衰减,缩短电池的使用寿命。因此研究极化电压对固体氧化物燃料电池的影响规律,是燃料电池结构和性能优化的核心挑战之一。

SOFC 通常在高温密闭环境下运行,其内部涉及复杂的多物理场耦合过程,包括电化学反应、物质输运、流体动力学行为以及传热传质等相互作用[1]-[3]。传统实验方法因成本高、周期长及测量技术局限而难以全面表征燃料电池性能;数值模拟则可通过多物理场耦合分析,高效揭示关键参数的空间分布规律,从而为 SOFC 结构和性能优化提供理论支持[4]。

近年来,国内外众多专家和学者都对 SOFC 进行了大量的数值模拟研究。牛英华[5]从电池的微结构出发,建立几种 SOFC 的理论模型,研究其与燃料电池的极化的关系,并基于所发展的模型对 SOFC 电池结构进行合理设计,以降低电池极化损耗,实现燃料电池的高功率、长寿命输出。Iwata 等人[6]对平板 SOFC 的准二维(同流和逆流)和三维(交叉流)模型进行数值模拟。考虑了质量传递、电荷传递和热传递等影响条件,模拟其电流和温度的分布。Yakabe 等人[7] [8]用有限体积法模拟了在质量传递、动量传递和电荷传递下阳极支撑的平板电池在对流的情况下的阳极的浓差极化问题。Chan 等[9]提出了一个完整的极化模型,充分考虑了电池的各种极化:活化极化,浓差极化和欧姆极化。提高了模型模拟的真实性。Volker 等人[10]通过数值模拟,发现通过调节电极的微结构参数从而调控活化极化、欧姆极化和浓差极化的大小。

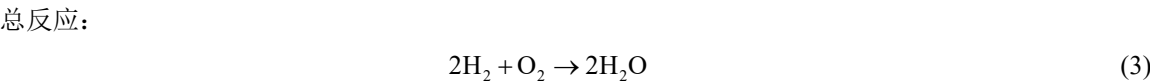
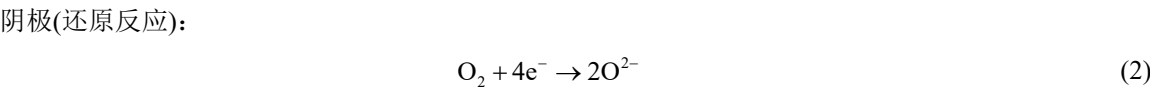
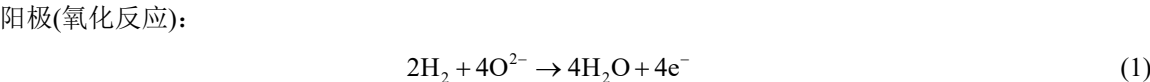
上述文献虽然从不同角度研究了极化对 SOFC 性能的影响,但面对电池内部复杂的物理化学过程,未能对不同极化电压下电池内部状态进行系统性研究。因此,本文以平板式 SOFC 单体电池为研究对象,在电化学反应场、流体流动场、物质浓度场和传热场四场耦合条件下,分析工作状态下极化电压对固体氧化物燃料电池电流密度、气体浓度、气体流速及温度的影响规律,旨在为 SOFC 的结构与性能优化设

计提供理论支持。

2. SOFC 模型的建立

2.1. 工作原理与基本假设

SOFC 的核心部件由阴极，阳极和电解质组成。在 SOFC 阳极通入氢气，氢气与通过电解质到达阳极的氧离子反应生成水并释放电子，电子流经外部电路到达阴极。在 SOFC 阴极通入氧气，与从阳极流到阴极的电子反应生成氧离子，氧离子通过电解质到达阳极。这个过程可以表示为以下电化学反应方程式：



因实际情况与模拟条件有所区别，为简化模型，提高模型适用性，故在模型的建立过程中做出以下假设：

- 1) 模型的反应过程是稳态的。
- 2) 电池内部各材料具有各向同性。
- 3) 模型中不考虑热辐射传热。
- 4) 所有气体均为理想气体。
- 5) 流体在出口处压强为标准大气压。
- 6) 电解质不能进行物质传递。

2.2. 几何模型

鉴于三维模型能够精准呈现温度分布、电流密度变化以及燃料传输特性等关键信息[11]。据此构建了 SOFC 单电池三维几何模型，几何模型如图 1、图 2 所示，它包括互连板、阳极/阴极气体通道、气体扩散电极和电解质。具体参数[12]如表 1 所示。

Table 1. SOFC geometric model parameters
表 1. SOFC 几何模型参数

元素		值(mm)
L	电池长度	100
h_a	阳极电极厚度	0.15
h_c	阴极电极厚度	0.1
h_e	电解质厚度	0.1
L_{ch}	气道高度	1
W	单个单元格宽度	4
L_{int}	互连板高度	2
W_{ch}	气体通道宽度	2

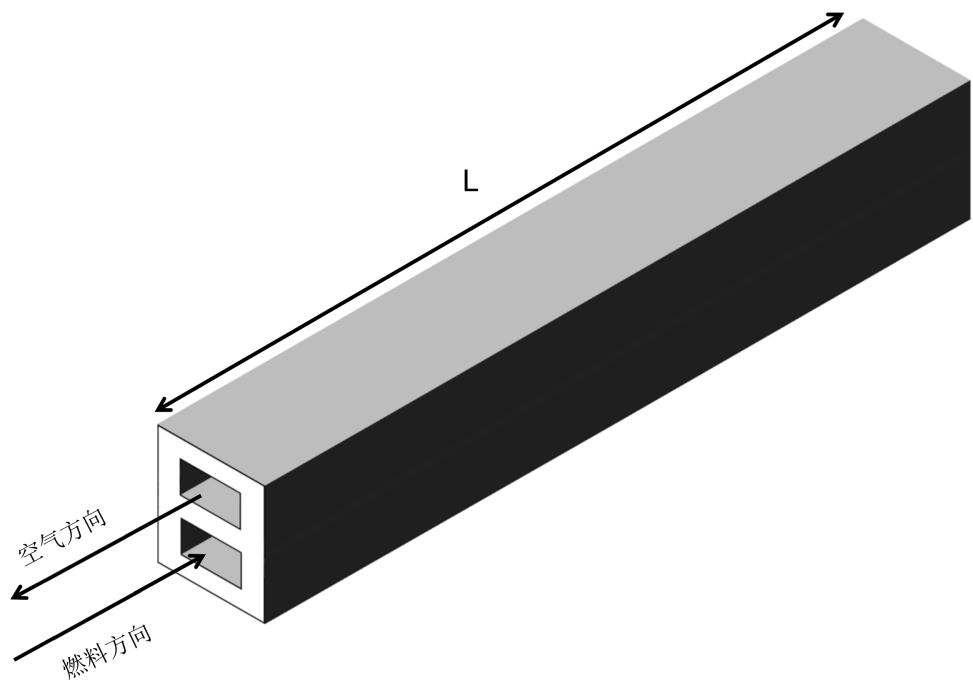


Figure 1. Geometric model diagram
图 1. 几何模型示意图

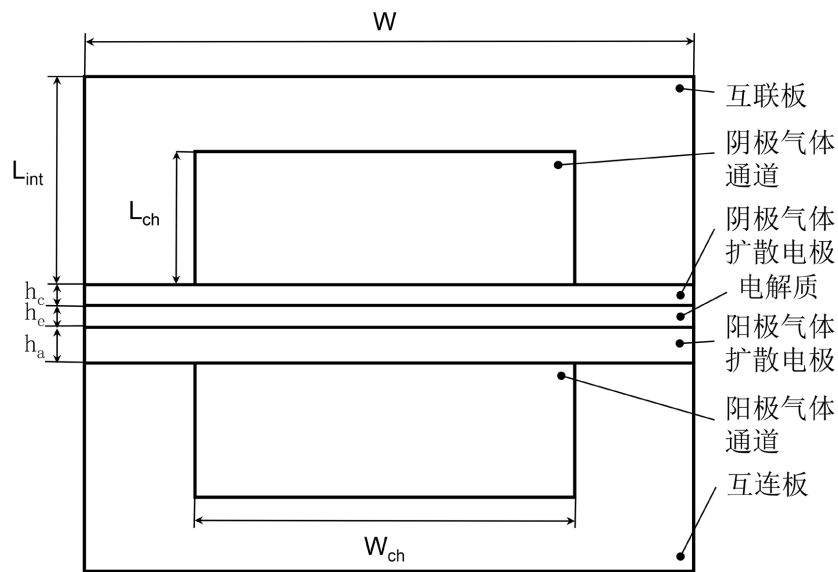


Figure 2. Geometric model cross-section diagram
图 2. 几何模型横截面示意图

2.3. 边界条件

SOFC 的多物理场耦合建模是一个高度交叉的前沿领域，深度融合了流体力学、传热学、电化学等多学科知识。在这一复杂系统中，诸多参数共同影响着 SOFC 的内部工作性能。为使模型更加贴合实际工况，精准定义各物理场的边界条件是构建可靠模型的关键环节，是确保模拟结果能够准确反映电池内部实际工作状态。边界条件[12]的设置如表 2 所示。

Table 2. Boundary condition parameters
表 2. 边界条件参数

参数	值	单位
阳极密度 ρ_a	3310	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
阴极密度 ρ_c	3030	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
电解质密度 ρ_e	5160	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
互连板密度 ρ_i	3030	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
阳极比热 $C_{p,a}$	450	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
阴极比热 $C_{p,c}$	430	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
电解质比热 $C_{p,e}$	470	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
互连板比热 $C_{p,i}$	550	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
阳极导热系数 $k_{s,a}$	11	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
阴极导热系数 $k_{s,c}$	6	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
电解质导热系数 $k_{s,e}$	2.7	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
互连板导热系数 $k_{s,i}$	20	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
孔隙率 ε_{por}	0.4	
摩尔质量 H_2	0.002	kg/mol
摩尔质量 O_2	0.032	kg/mol
摩尔质量 H_2O	0.018	kg/mol
摩尔质量 N_2	0.028	kg/mol
工作压力 P_0	101330	Pa
工作温度 T	800	$^{\circ}\text{C}$
进气速度 $u_{i,c}$	3	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
入口燃料速度 $u_{i,a}$	0.4	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
氢气入口质量分数 ω_0 , H_2 , a	0.4	
氧气入口质量分数 ω_0 , O_2 , c	0.15	

3. 物理场分析

本文多物理场耦合建模涉及四个物理场仿真模块，分别是二次电流分布、浓物质传递、Brinkman 方程和多孔介质传热。

3.1. 二次电流分布

SOFC 中的电流传输通过电解质中的离子传输和电极中的电子传输来实现。其中涉及的方程如下：

$$\nabla \cdot i_1 = Q_1 \quad (4)$$

$$i_1 = -\sigma_1 \nabla \varphi_1 \quad (5)$$

其中, i_1 为电解质和电极的电流, σ_1 为电解质和电极的电导率, ∇ 为梯度算子, φ_1 为电势。

把阴极与互连板的接触面设置为电池电势点, 把阳极与互连板的接触面设置为零电势点。SOFC 的工作电压 V_{cell} 计算如下式:

$$V_{cell} = \varphi_{eq,c} - \varphi_{eq,a} - V_{pol} \quad (6)$$

其中, V_{pol} 为极化电压, $\Delta\varphi_{eq,c}$ 和 $\Delta\varphi_{eq,a}$ 分别为阴、阳极平衡电势差。

阳极和阴极处的活性超电势 $\eta_{act,a}$ 和 $\eta_{act,c}$ 定义如下:

$$\eta_{act,a} = \varphi_{s,a} - \varphi_{1,a} - E_{eq,a} \quad (7)$$

$$\eta_{act,c} = \varphi_{s,c} - \varphi_{1,c} - E_{eq,c} \quad (8)$$

其中, $\varphi_{1,a}$ 和 $\varphi_{s,a}$ 分别为阳极电解质和阳极多孔电极的电势。 $\eta_{act,a}$ 和 $\eta_{act,c}$ 分别为阳极和阴极活性超电势。 $E_{eq,a}$ 和 $E_{eq,c}$ 分别为阳极和阴极的平衡电位。

将阴极和阳极定义为多孔电极, 选择浓度依赖性动力学表达式来表示局部电流分布, 表达局部电流密度和活性超电势的关系[13]。

多孔电极阳极的局部电流密度 $i_{loc,a}$ 表达式如下:

$$i_{loc,a} = i_0 \left(C_R \exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - C_{H_2O} \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right) \quad (9)$$

多孔电极阴极的局部电流密度 $i_{loc,c}$ 表达式如下:

$$i_{loc,c} = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - C_{O_2} \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right) \quad (10)$$

其中, i_0 为电极的交换电流密度, C_R 为 H_2 的摩尔浓度与 H_2 的参考摩尔浓度的比值, α_a 为阳极的传递系数, α_c 为阴极传递系数, 阳极表达式中的 C_{H_2O} 为 H_2O 的摩尔浓度与 H_2O 的参考浓度的比值, 阴极表达式中的 C_{O_2} 为 O_2 的摩尔浓度与 O_2 参考摩尔浓度的比值。 F 为法拉第常数, R 为理想气体常数, T 为电池温度。

3.2. Brinkman 方程

选择 Brinkman 方程模块来描述 SOFC 内部的多孔电极和气体通道中的流体流动以及计算单相自由流动与多孔介质连接在一起时的速度场和压力场。在电池的阴极和阳极各设一个 Brinkman 方程模块接口。该模块所涉及的方程如下:

$$\frac{1}{\varepsilon_p} \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} \frac{1}{\varepsilon_p} = \nabla \cdot [-\bar{p}I + K] - \left(\mu k^{-1} + \beta \rho |\bar{u}| + \frac{Q_m}{\varepsilon_p^2} \right) \bar{u} + F \quad (11)$$

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = Q_m \quad (12)$$

$$K = \mu \frac{1}{\varepsilon_p} \left(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{1}{\varepsilon_p} (\nabla \cdot \bar{u}) I \quad (13)$$

其中, ε_p 为电极孔隙率, ρ 为混合气体密度, \bar{u} 为阳极速度矢量, ∇ 为梯度算子, \bar{p} 为气体压力矢量, μ 为动力粘度, k 为渗透率, β 用于描述流体在多孔介质中的非线性流动特性, Q_m 为质量源项, F 为体

积力矢量, K 为速度场梯度, I 为单位矩阵。

3.3. 浓物质传递

在 SOFC 模型的阴极和阳极各设一个浓物质传递接口。阴极因变量设置为 O_2 、 H_2O 和 N_2 的质量分数, 阳极因变量设置为 H_2 和 H_2O 的质量分数。浓物质传递模块用于模拟氧气和氢气在电池内部的传输。在 SOFC 的工作过程中, 气体在多孔电极中的传输涉及了粘滞流、Knudsen 扩散和分子扩散等多种机制。其中涉及的方程如下:

$$\Delta \cdot J_i + \rho(u \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (14)$$

$$R_i = -\frac{\nu_i i_v}{nF} \quad (15)$$

其中, J_i 为质量扩散通量, u 为组分 i 的摩尔分数流速, ω_i 为各气体的质量分数, R_i 为物质生产和消耗的额外源项, ν_i 为化学计量系数, i_v 为电化学反应的体积电流密度, n 为电化学反应中参与电子的个数, F 为自由能。

$$J_i = -\left(\rho \omega_i \sum_k \tilde{D}_{ik} d_k + D_i^T \frac{\nabla T}{T}\right) \quad (16)$$

其中, \tilde{D}_{ik} 为 Maxwell-Stefan 扩散模型的扩散系数, D_i^T 为热扩散系数(假设为零), d_k 为二元扩散系数矩阵中的元素。

3.4. 多孔介质传热

在 SOFC 的工作过程中, 电化学反应伴随着热量的产生和传递, 多孔介质传热模块可以分析这些热量在电池内部的分布, 以及它们如何影响电池的电化学反应速率和温度场, 其中涉及的方程如下:

$$\rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T + \nabla q = Q + Q_p + Q_{vd} + Q_{geo} \quad (17)$$

$$q = -k_{eff} \nabla T \quad (18)$$

其中, ρ_f 为流体的密度, $C_{p,f}$ 为恒压热容, u 为流速, Q 为热源项, Q_p 为压力功, Q_{vd} 为由于粘性摩擦而产生的热源项, Q_{geo} 为地质热流, 是热量通过传导和对流实现平衡的源项之一, k_{eff} 为有效导热系数。

4. 结果与讨论

4.1. 模型验证

实际工况中各物理场之间并非相互独立, 而是相互影响的。多物理场耦合建模的实质就是将多个物理场间相关的偏微分方程的变量进行耦合求解。因为在 SOFC 的多物理场耦合建模中进行了多次简化与假设, 所以验证模型的有效性是十分有必要的。本文将所建模型的极化曲线与汤水等人[14]的模拟研究进行了对比, 结果如图 3。由图可知两条极化曲线有着极高的相似性, 因此所建 SOFC 的多物理场耦合模型是正确的。

4.2. 不同极化电压下电流密度的分布

在 SOFC 中电流密度的分布显著影响电池的性能、耐久性和效率。为此模拟不同极化值下的电流密度分布情况, 结果如图 4 所示。模型参数设置如表 2 所示。

由图 4 可知随着极化电压的升高电解质中电流密度峰值也随之升高, 且电流密度值从阴极气体入口处向出口方向逐渐减小。

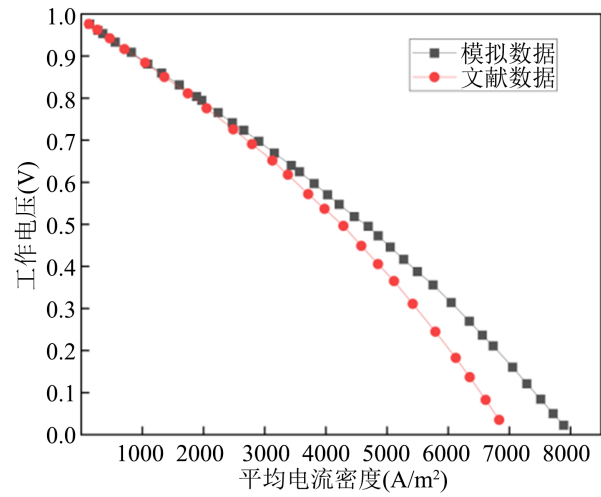
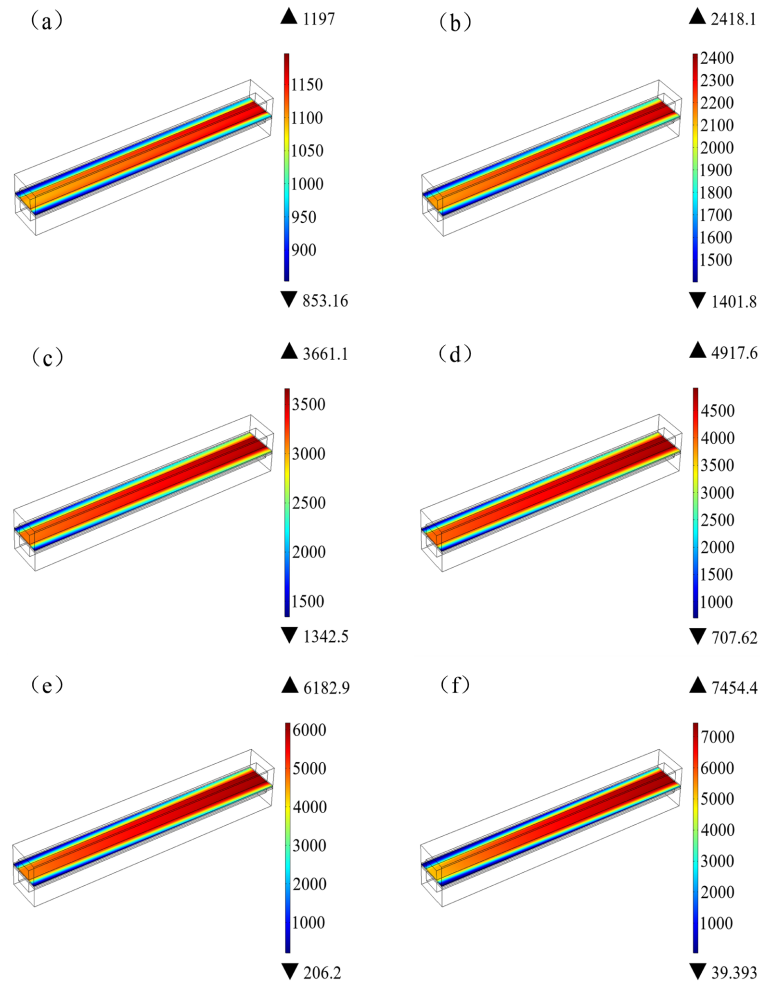


Figure 3. Polarization curve comparison chart
图 3. 极化曲线对比图



注：极化电压(V)：(a) 0.1, (b) 0.2, (c) 0.3, (d) 0.4, (e) 0.5, (f) 0.6。

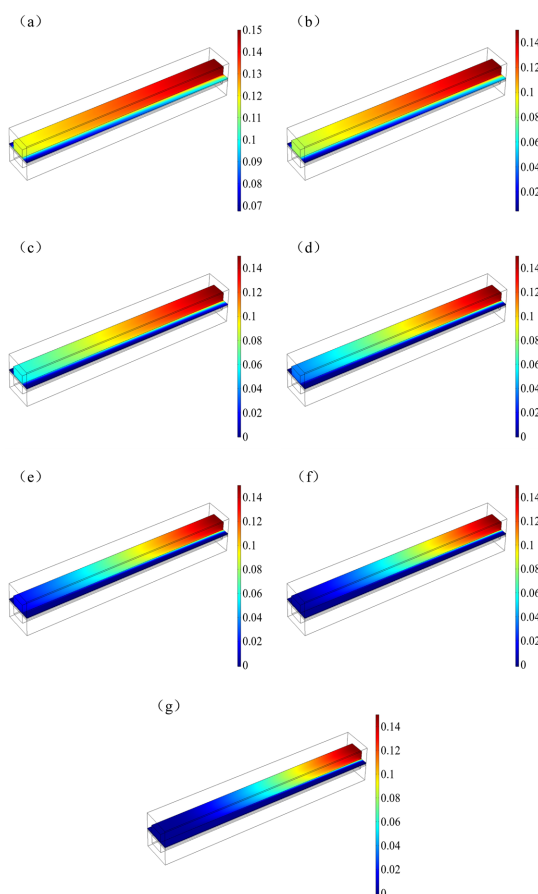
Figure 4. Current density distribution on the electrolyte plane under different polarization voltages
图 4. 不同极化电压下电解质平面上的电流密度分布

由 SOFC 工作原理可知, 氧离子在电解质中的传输主导着反应的进行。在阴极气体入口附近, 氧气浓度较高, 还原反应速率更快, 产生了更多的氧离子, 氧离子通过电解质到达阳极与氢气发生氧化反应, 形成了较大的电流。随着反应的进行, 氧气的浓度沿气体流动方向逐渐降低, 化学反应速率减缓, 从而使电流密度沿气体流动方向逐渐减小。而阳极气体入口附近, 虽然氢气浓度较高, 但参与反应的燃料气体少, 因此燃料的氧化反应速率相对较低。导致阳极处的电流密度相对较低。

当极化电压低于 0.4 V 时, 随着极化电压升高, 电流密度均匀增加, 氧气供应充足, 反应受活化极化主导。电压超过 0.4 V 后, 电流峰值接近极限, 氧耗增大。在逆流布置下, 阴极出口与阳极入口同侧, 该处氧浓度已很低, 传质无法满足反应需求, 形成浓差极化; 同时氢气未充分反应即流出, 出现燃料贫化。二者耦合导致该区域电流下降。其机制为: 反应气体消耗速率等于其对流 - 扩散传质速率, 接近传质极限时局部浓度骤降, 性能受限于传质过程。

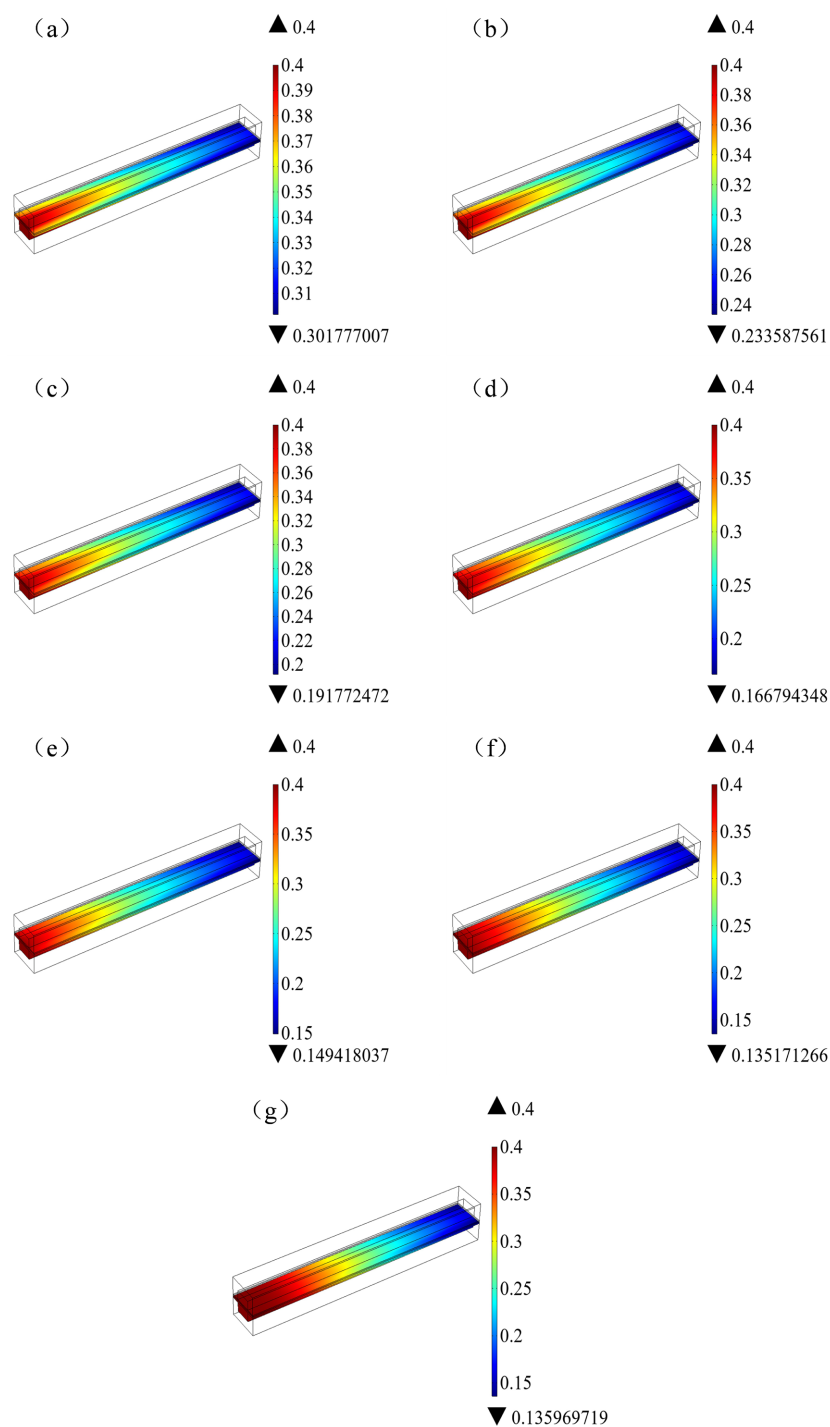
4.3. 不同极化电压下气体的分布

合理的气体分布可以显著提高电池的效率、稳定性和寿命, 而不良的气体分布可能导致性能下降甚至损坏电池。为研究不同极化电压下电池内部气体分布情况, 在温度为 1073 K, 压力为 1.0133×10^5 Pa, 其他参数如表 2 所示。入口氧气质量分数的初始值为 0.15, 入口氢气的初始值为 0.4。氧气和氢气的质量分数变化情况如图 5 和图 6。



注: 极化电压(V): (a) 0.1, (b) 0.2, (c) 0.3, (d) 0.4, (e) 0.5, (f) 0.6, (g) 0.7。

Figure 5. Mass fraction distribution of oxygen under different polarization values
图 5. 不同极化值下氧气的质量分数分布



注：极化电压(V)：(a) 0.1, (b) 0.2, (c) 0.3, (d) 0.4, (e) 0.5, (f) 0.6, (g) 0.7。

Figure 6. Mass fraction distribution of hydrogen under different polarization values
图 6. 不同极化值下氢气的质量分数分布

在阴极流道中气体流动方向为从入口到出口，在流动过程中，氧气不断参与反应并被消耗。随着气体的流动，氧气的相对含量逐渐降低。在气体通道中，氧气从入口向出口扩散的过程中，由于扩散速率有限，无法及时补充被消耗的氧气，导致其质量分数沿气体出口方向逐渐降低。

从表 3 中可以看出随着极化电压的增加出口氧气质量分数在不断减少,氧气的消耗量也在不断地增加。说明极化电压对氧气的化学反应速率有影响,极化电压越大,化学反应速率越快,气体的消耗量越大。在极化电压为 0.1 V 到 0.3 V 之间时对化学反应速率影响最为明显,极化电压为 0.3 V 到 0.5 V 之间时对化学反应速率的影响降低了一些,当极化电压在 0.5 V 到 0.7 V 之间时对化学速率的影响再次降低。说明了极化电压的增加可以加快氧气的化学反应速率,但在极化电压较低时对氧气化学反应速率影响最为明显,但在极化电压超过 0.5 V 后极化电压对氧气化学反应速率的影响已经不怎么明显。这是因为极化电压在 0.5 V 以下时,电流密度离极限值较远,浓差损失小,电流密度增加明显,氧气消耗量增加显著,极化电压在 0.5 V 以上时,电流密度接近极限值,氧气扩散通量达到极限值后不再增加,电流密度增加量极小,所以氧气消耗量的增加也极小。

Table 3. Effect of polarization voltage on the mass fraction of oxygen at the cathode
表 3. 极化电压大小对阴极氧气质量分数的影响

极化电压(V)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
入口氧气质量分数%	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
出口氧气质量分数%	0.12	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0
氧气消耗量%	0.03	0.06	0.09	0.11	0.13	0.14	0.15

从表 4 可以看出在极化电压为 0.1 到 0.2 时极化电压对氢气化学反应速率的影响最大,极化电压为 0.2 到 0.3 时极化电压对氢气化学反应速率的影响降低了一些,在极化电压为 0.3 到 0.5 时对氢气化学反应速率的影响再次降低了一些。在极化电压超过 0.5 V 后,对氢气化学速率的影响已经极小,从表 4 和表 5 可以看出极化电压对氧气和氢气质量分数影响的情况类似,都是以 0.5 V 的极化电压为界限,在 0.5 V 之前,电流密度离极限值较远电流密度增加速度快,氢气被快速消耗,因此氢气的消耗量增加明显,而在 0.5 V 之后由于电流密度逐渐接近极限值,电流密度速率的增长越来越微小,导致氢气消耗量的增长也越来越微小。

Table 4. Effect of polarization voltage on hydrogen mass fraction
表 4. 极化电压大小对氢气质量分数的影响

极化电压(V)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
入口氢气质量分数%	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
出口氢气质量分数%	0.32	0.25	0.22	0.2	0.18	0.17	0.16
氢气消耗量%	0.08	0.15	0.18	0.2	0.22	0.23	0.24

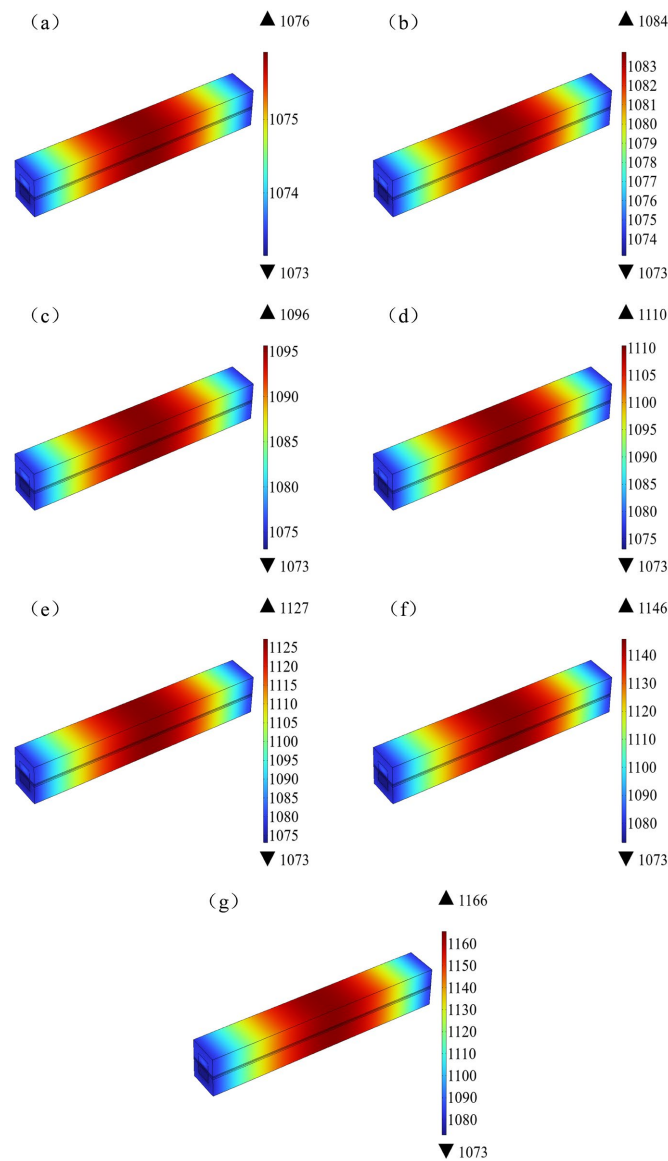
Table 5. Effect of polarization voltage on battery temperature
表 5. 极化电压大小对电池温度的影响

极化电压(V)	最高温度(K)	对应图表
0.1	1076	图 a
0.2	1084	图 b
0.3	1096	图 c
0.4	1110	图 d
0.5	1127	图 e
0.6	1146	图 f
0.7	1166	图 g

4.4. 不同极化电压下电池温度的分布

温度分布的均匀性直接影响电池的效率、寿命、稳定性和安全性。为研究不同极化电压下电池内部气体分布情况与电流密度分布情况，在温度为 1073 K，压力为 1.0133×10^5 Pa，其他参数如表 2 所示。计算不同极化电压下的电池温度分布情况。

从图 7 中可以看出 SOFC 温度场呈中间高、两端低的分布，主要因电化学反应集中在中部区域，产热量大；两端受低温进气冷却作用强，且气体热容有限，无法完全带走热量。极化电压低于 0.4 V 时，反应受活化极化控制，电流低、产热少，温度升幅小(0.1~0.4 V 间最高温度变化为 8 K、12 K、4 K)。超过 0.4 V 后，电流迅速增大，欧姆与浓差极化主导产热，温度对电压敏感性增强，升幅显著增加(0.4~0.7 V 间依次为 17 K、19 K、20 K)。



注：极化电压(V)：(a) 0.1，(b) 0.2，(c) 0.3，(d) 0.4，(e) 0.5，(f) 0.6。

Figure 7. Battery temperature distribution under different polarization values
图 7. 不同极化值下电池温度分布

4.5. 极化电压对气体流速的影响

合理的气体流速分布可以显著提高电池的效率、稳定性和寿命。为研究固体氧化物燃料电池在不同极化电压下气体流速的变化趋势，在压力为 $1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，氢气和氧气的初速度均为 3 m/s ，其他参数如表 2 所示。改变极化电压(0.1、0.2 k、0.3、0.4、0.5、0.6)进行计算，阳极氢气流速仿真结果如图 8 所示。

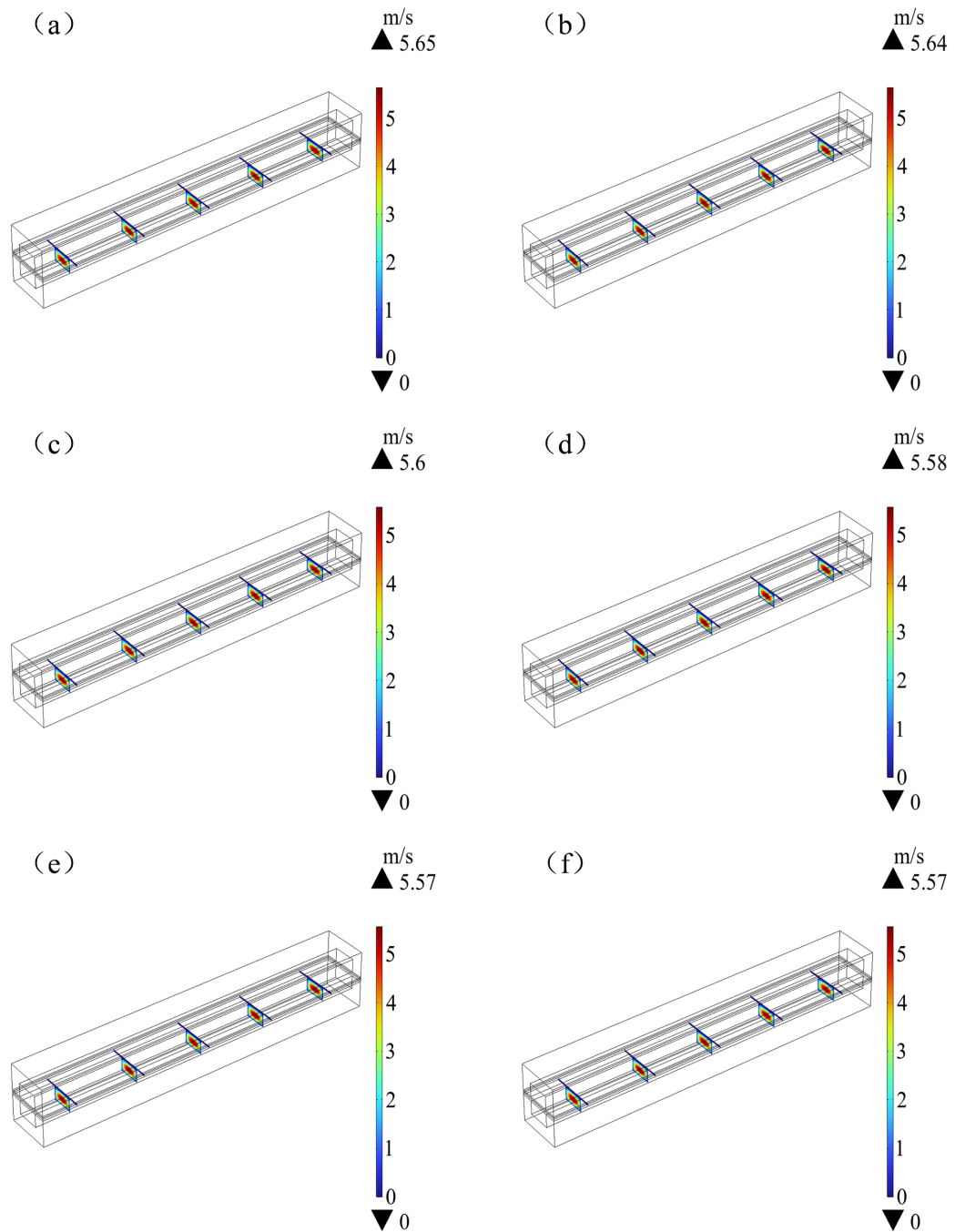


Figure 8. Anode gas velocity distribution under different polarization values
图 8. 不同极化值下阳极气体速度分布

在阳极流道内，氢气速度呈抛物线分布：中心区域最高，向壁面及电极扩散层方向逐渐降低。这是由于中心区域对流传质主导，近壁面处黏性作用增强，且靠近电极时部分动量转化为扩散通量。根据表 6 可知，极化电压低于 0.5 V 时，随电压升高，电流增大导致水生成加速，混合气体密度上升，削弱对流驱动力，速度峰值下降；电压超过 0.5 V 后，进入浓差极化区，氢气消耗与水生成趋近饱和，流场达到动态平衡，速度峰值保持稳定。阴极氧气流速仿真如图 9。

Table 6. Effect of polarization voltage on hydrogen flow rate
表 6. 极化电压对氢气流速的影响

极化电压(V)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
氢气最大流速(m/s)	5.65	5.64	5.6	5.58	5.57	5.57

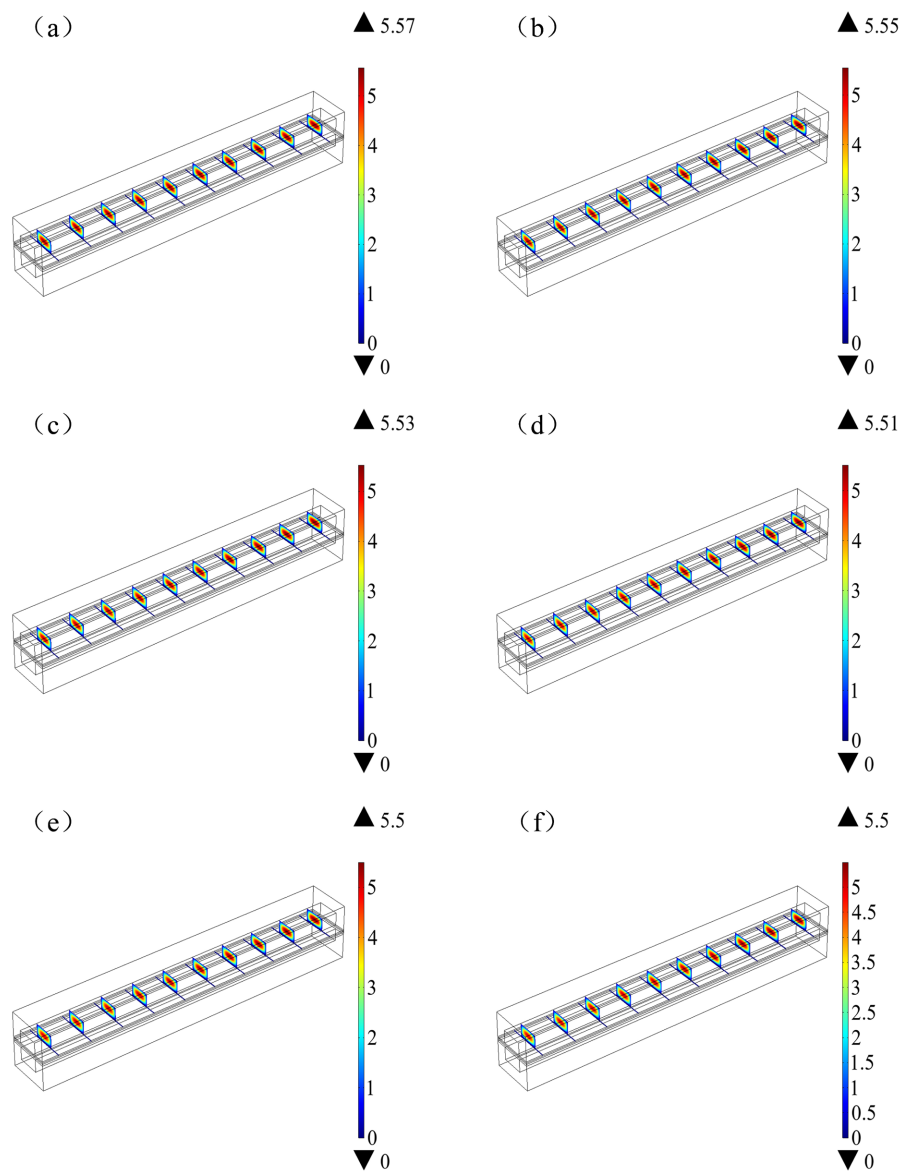


Figure 9. Cathode gas velocity distribution under different polarization values
图 9. 不同极化值下阴极气体速度分布

阴极氧气流场与氢气类似, 中心速度高, 近壁面及电极处降低, 呈抛物线分布。根据表 7 可知, 极化电压低于 0.5 V 时, 随电压升高, 电流增大使氧气消耗加速, 局部气体密度下降, 减弱轴向压力梯度与对流驱动力; 同时向电极的氧扩散增强, 扰动速度边界层, 共同导致速度峰值降低。电压超过 0.5 V 进入浓差极化区后, 氧气消耗受扩散限制趋于饱和, 流场进入动态平衡, 速度峰值保持稳定。

Table 7. Effect of polarization voltage on oxygen flow rate

表 7. 极化电压对氧气流速的影响

极化电压(V)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
氧气最大流速(m/s)	5.57	5.55	5.53	5.51	5.5	5.5

5. 讨论

本研究模型虽能反映多场耦合的定性规律, 但仍存在以下不足: 一是基于稳态假设, 未涵盖启动、变载等动态过程的瞬态响应; 二是未考虑电极活性衰减、积碳、硫中毒等长期退化机制; 三是未分析热应力对电池结构完整性的影响。未来工作可引入瞬态模型、耦合材料退化动力学方程, 并集成热-力耦合模拟, 以提升动态工况描述、寿命预测及结构可靠性评估能力。

6. 结论

本文通过 COMSOL Multiphysics 软件建立了平板式固体氧化物燃料电池单电池三维模型, 研究了在电化学反应场、流体流动场、物质浓度场和传热场四场耦合情况下平板式固体氧化物燃料电池单电池工作时极化电压对固体氧化物燃料电池的电流密度、气体浓度、气体流速和温度的影响规律, 得到如下结论:

- 1) 电流密度峰值随极化电压升高而增大。电压低于 0.4 V 时, 整个电解质面电流均匀增加; 超过 0.4 V 后, 阴极出口处氧浓度急剧降低。
- 2) 氧气与氢气质量分数随电压升高而降低, 气体消耗加快。电压在 0.5 V 前对反应速率影响显著, 超过 0.5 V 后影响趋缓。
- 3) 电压低于 0.4 V 时温度变化不明显, 超过 0.4 V 后温度显著上升。
- 4) 气体流速峰值在电压低于 0.5 V 时随电压升高而下降, 超过 0.5 V 后趋于稳定。

参考文献

- [1] Chiu, Y.T. and Lin, C.K. (2012) Thermo-Mechanical Fatigue Properties of a Ferritic Stainless Steel for Solid Oxide Fuel Cell Interconnect. *Journal of Power Sources*, **219**, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.038>
- [2] Fang, X.R. and Lin, Z.J. (2018) Numerical Study on the Mechanical Stress and Mechanical Failure of Planar Solid Oxide Fuel Cell. *Applied Energy*, **229**, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.077>
- [3] Lin, B., Shi, Y., Ni, M. and Cai, N. (2015) Numerical Investigation on Impacts on Fuel Velocity Distribution Nonuniformity among Solid Oxide Fuel Cell Unit Channels. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 3035-3047. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.088>
- [4] Liu, L., Kim, G. and Chandra, A. (2010) Modeling of Thermal Stresses and Lifetime Prediction of Planar Solid Oxide Fuel Cell under Thermal Cycling Conditions. *Journal of Power Sources*, **195**, 2310-2318. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.064>
- [5] 牛英华. 固体氧化物燃料电池中气体传输与极化的数值模拟[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [6] Iwata, M. (2000) Performance Analysis of Planar-Type Unit SOFC Considering Current and Temperature Distributions. *Solid State Ionics*, **132**, 297-308. [https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(00\)00645-7](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(00)00645-7)
- [7] Yakabe, H., Hishinuma, M., Uratani, M., Matsuzaki, Y. and Yasuda, I. (2000) Evaluation and Modeling of Performance of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, **86**, 423-431.

-
- [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(99\)00444-9](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(99)00444-9)
- [8] Yakabe, H., Ogiwara, T., Hishinuma, M. and Yasuda, I. (2001) 3-D Model Calculation for Planar SOFC. *Journal of Power Sources*, **102**, 144-154. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(01\)00792-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(01)00792-3)
- [9] Chan, S.H., Khor, K.A. and Xia, Z.T. (2001) A Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and Its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness. *Journal of Power Sources*, **93**, 130-140. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(00\)00556-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(00)00556-5)
- [10] Völker, B. and McMeeking, R.M. (2012) Impact of Particle Size Ratio and Volume Fraction on Effective Material Parameters and Performance in Solid Oxide Fuel Cell Electrodes. *Journal of Power Sources*, **215**, 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.014>
- [11] Janardhanan, V.M. and Monder, D.S. (2014) Sulfur Poisoning of Sofcs: A Model Based Explanation of Polarization Dependent Extent of Poisoning. *Journal of the Electrochemical Society*, **161**, F1427-F1436. <https://doi.org/10.1149/2.0611414jes>
- [12] Khazaei, I. and Rava, A. (2017) Numerical Simulation of the Performance of Solid Oxide Fuel Cell with Different Flow Channel Geometries. *Energy*, **119**, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.074>
- [13] Chaudhary, T.N., Saleem, U. and Chen, B. (2019) Reacting Flow Coupling with Thermal Impacts in a Single Solid Oxide Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 8425-8438. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.043>
- [14] 汤水, 张茂贵, 贾明, 等. 固体氧化物燃料电池数值仿真模型的建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(11): 2633-2644.