DOI: 10.19666/j.rlfd.202507051

可逆固体氧化物电池系统多变量参数优化及性能分析

于诗魁[1]，孙树敏[2]，郭登科[1]，张雨檬[1]，王士柏[2]，孙立群[2]，
秦晓辉[3]，刘前卫[4]，王利刚[1]
（1. 华北电力大学能源电力创新研究院新型储能技术北京实验室，北京 102206；
2. 国网山东省电力公司电力科学研究院，山东 济南 250003；
3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；
4. 国网电力工程研究院有限公司，北京 100069）

［摘 要］【目的】固体氧化物电池具有可逆运行、高效及燃料适用性广等特点，在可再生能源大规模存储领域应用潜力巨大，针对可逆固体氧化物电池系统展开多变量参数优化研究，分析多变量参数对系统效率的影响规律。【方法】通过混合整数线性规划方法，在不同电流下以系统效率最高为目标优化电堆进出口温度及空气流量，实现系统最大热回收，计算最优系统效率。【结果】优化结果显示，在发电模式下，系统效率随电流升高呈现先增大后减小的趋势，峰值达 53.5%；在制氢模式吸热状态下，电堆效率随电流增大而减小，最大值为 119.5%，系统效率则随电流升高而增大，最大值为 79.2%；在制氢模式放热状态下，电堆效率随电流升高而增大，最大值为 95.4%，系统效率稳定在 79.3%左右。【结论】研究揭示了电流与操作参数对系统性能的影响规律，为其在实际储能应用中的高效、灵活运行提供了理论依据与优化策略。

［关 键 词］可逆固体氧化物电池；电流密度；参数优化；性能分析；余热利用

［引用本文格式］于诗魁，孙树敏，郭登科，等. 可逆固体氧化物电池系统多变量参数优化及性能分析[J]. 热力发电，2026，55(4)：21-29. YU Shikui, SUN Shumin, GUO Dengke, et al. Multivariable optimization and performance analysis for reversible solid oxide cell system[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(4): 21-29.

Multivariable optimization and performance analysis for reversible solid oxide cell system

YU Shikui[1], SUN Shumin[2], GUO Dengke[1], ZHANG Yumeng[1], WANG Shibai[2], SUN Liqun[2], QIN Xiaohui[3], LIU Qianwei[4], WANG Ligang[1]
(1. Institute of Energy Power Innovation, Beijing Laboratory of New Energy Storage Technology, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;
3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;
4. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100069, China)

Abstract: [Objective] In response to the growing environmental concerns and the depletion of fossil fuels, the global installed capacity of renewable energy sources such as wind and solar power continues to rise rapidly. However, the intermittent and variable nature of these energy sources poses significant challenges to power grid stability and the effective integration of clean energy. Solid oxide cells offer a promising pathway toward resolving these issues, owing to their ability to operate reversibly, high energy conversion efficiency, and compatibility with a wide range of fuels. By flexibly switching between solid oxide fuel cell mode and solid oxide electrolysis cell mode, they enable efficient electrical energy storage and chemical fuel production, demonstrating considerable potential for large-scale renewable energy storage and grid-balancing applications. This study conducts

收 稿 日 期：2025-07-19 修 回 日 期：2025-10-17 接 受 日 期：2025-10-21
基 金 项 目：国家电网有限公司科技项目（1400-202455280A-1-1-ZN）
Supported by: Science and Technology Project of the State Grid Corporation of China (1400-202455280A-1-1-ZN)
第一作者简介：于诗魁（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为燃料电池系统模拟与优化，y120181030708@163.com。
通信作者简介：张雨檬（1992），女，副教授，主要研究方向为能量系统能效灵活性提升与高温电化学电氢转化性能调控，zhang.yumeng@ncepu.edu.cn。

multivariable parameter optimization for a reversible solid oxide cell system, aiming to investigate the effect of multivariable parameters on the performance of reversible solid oxide cell systems. [Methods] A stack-level model is established and integrated with auxiliary components, such as fans, heat exchangers, and separators. The Aspen Plus software is used to construct a full system model. Using mixed-integer linear programming with an objective function that minimizes total energy demand, along with a pinch analysis technique, the thermal integration of the system is optimized for a given current density. This approach determines the optimal operating temperature under different current conditions, calculates the required air flow rate to satisfy stack temperature limits under optimized heat recovery, and evaluates the resulting auxiliary power consumption, ultimately leading to the computation of optimal system efficiency. [Results] The results show that in the power generation mode, the system efficiency increases at first and then decreases with the increase of current, and the maximum value is 53.5%. In the endothermic state of hydrogen production mode, the stack efficiency decreases with the increase of current, and the maximum value is 119.5%. While the system efficiency increases with the current, the maximum value reaches 79.2%. In the exothermic state of hydrogen production mode, the stack efficiency increases with the current, with the maximum value of 95.4%, and the system efficiency is stable at about 79.3%. [Conclusion] This research clarifies how operating current and other key parameters influence the performance of reversible solid oxide cell systems. The findings offer theoretical insights and practical optimization strategies to enhance the efficiency and operational flexibility of such systems in real-world energy storage applications, supporting the broader integration of intermittent renewable energy sources into the power grid.

Key words: reversible solid oxide cell; current density; parameter optimization; performance analysis; waste heat utilization

为应对日益严峻的环境污染和化石能源短缺问题，风能、光伏等可再生能源装机容量持续快速增长[1]。然而，此类间歇性能源的波动性对电力系统清洁能源消纳能力带来严峻挑战[2]。在此背景下，化学储能系统因其选址灵活、自放电率低、兼具分布式与规模化储能潜力等优点，受到了广泛关注。其中，可逆固体氧化物电池（reversible solid oxide cell，RSOC）是当前的研究热点[3]。RSOC 具有可逆运行特性、系统效率高和燃料适用性广等优势，能够灵活切换于固体氧化物燃料电池（solid oxide fuel cell，SOFC）模式和固体氧化物电解池（solid oxide electrolytic cell，SOEC）模式，从而实现能量的高效存储与转化[4]。

RSOC 系统由核心部件固体氧化物电堆及泵、风机、高温换热器和燃烧器等辅助部件组成，辅助部件为电堆运行提供稳定的高温运行环境和燃料、空气供应。RSOC 系统效率受电堆性能（发电功率或制氢耗功）、辅机及换热网络的综合影响，电流密度、燃料利用率和工作温度等参数与系统效率存在强耦合关系，进而影响系统的质量流与能量流分布、设备运行性能和整体换热策略。因此，探究最优系统效率的前提是定量分析输入参数对电堆及辅机性能的影响。

针对 SOFC 发电系统，刘汉宇等[5]基于 500 W 实验台定量研究了燃料流量、进气比例对氢、甲烷燃料 SOFC 系统开路电压和功率的影响，并分析了降低积碳的最佳入口燃料比例。Selvam 等人[6]提出阳极尾气分离再循环设计可将氨燃料 SOFC 发电系统燃料利用率提升至 100%，系统能量效率提高 12.17%，并通过参数分析和基于人工神经网络−遗传算法的优化方法解析了电流密度、工作温度等参数对系统效率的影响。李青山等[7]针对甲醇重整 SOFC 热电联产系统中水醇比及反应器温度、SOFC 燃料利用率及工作温度双参数协同调节的影响进行了分析，确定了系统最佳运行工况点。

针对 SOEC 制氢系统，Chen 等人[8]基于三维电化学−流动−传热耦合 SOEC 电池仿真模型对不同工况下的电解池性能和温度分布进行了分析，指出提高温度可显著改善电解性能，空气流速对性能的影响较小。靳壮杰等[9]分析了反应温度、反应压力、水蒸气含量和电流密度等因素对制氢系统电解电压和制氢效率的影响，并探索了多因素影响下的最佳反应条件。Chen 等人[10]则基于 3 kW 系统模型全面分析了运行参数对电堆电压和功率、电堆出口温度、产氢量、比能耗、系统效率及辅机功耗的影响，并在考虑系统耐用性的前提下以工作电流、温度、流量和燃料利用率为优化变量对制氢系统效率进行了优化。

针对 RSOC 系统，Wang 等人[11]建立了 RSOC 系统的动态集总参数模型，分析了模式切换过程中入口温度、电流密度和切换频率等参数对电堆性能的影响。Wang 等人[12]考虑了 RSOC 系统多品位热量梯级高效利用，讨论了电−X（氢气、合成气、甲烷、甲醇和氨）−电过程中不同中间物质导致的系统

效率的变化。Wei 等人[13]则开展了 RSOC 系统换热网络优化设计，最大化系统热回收并降低热交换器数量，对含纯氧燃烧的 SOFC 系统和 SOEC 共电解制甲烷系统进行了优化。

综上所述，学者已研究了燃料利用率、电堆工作温度及电流密度等参数对多元燃料 SOFC 发电系统或 SOEC 电解系统性能的影响，仍需进一步研究 RSOC 系统效率多参数优化。针对此问题，本文构建了 RSOC 发电/制氢系统仿真模型，基于夹点分析技术，采用混合整数线性规划方法优化给定电流密度下系统热集成，指出不同电流密度下系统最佳运行温度，并计算系统最优热集成下满足电堆温度约束的空气流量，从而获得系统辅机功耗，计算系统效率。

1 系统流程及其评价指标

1.1 RSOC 系统流程

图 1 为 RSOC 系统流程。SOFC 模式系统流程如图 1a)所示，氢气经过加压、升温后通入电堆氢电极，与来自氧电极的氧气发生电化学反应；空气经加压、升温后通入电堆氧电极，参与电化学反应的同时维持电堆工作温度稳定；电堆出口尾气通入燃烧器充分燃烧，燃烧器出口高温尾气经充分换热后排出系统。SOEC 模式系统流程如图 1b)所示，水经加压、汽化后与部分氢气混合以维持还原性气氛，混合气经进一步加热后通入电堆氢电极，经电化学反应生成氢气与氧气；空气经加压、升温后通入电堆氧电极，带走电化学反应生成的氧气同时维持电堆工作温度稳定；电堆氢电极出口尾气换热降温至合适温度后通入汽水分离器分离出纯净的氢气，电堆氧电极出口尾气则经换热后直接排出系统。在双模式切换过程中，首先通过换热器维持电堆处于热备用状态，然后通过调节电流、入口物流组分、流量及燃料利用率等参数实现模式切换，并同步观测电堆电压等数据，保障切换过程的安全和系统运行的稳定。

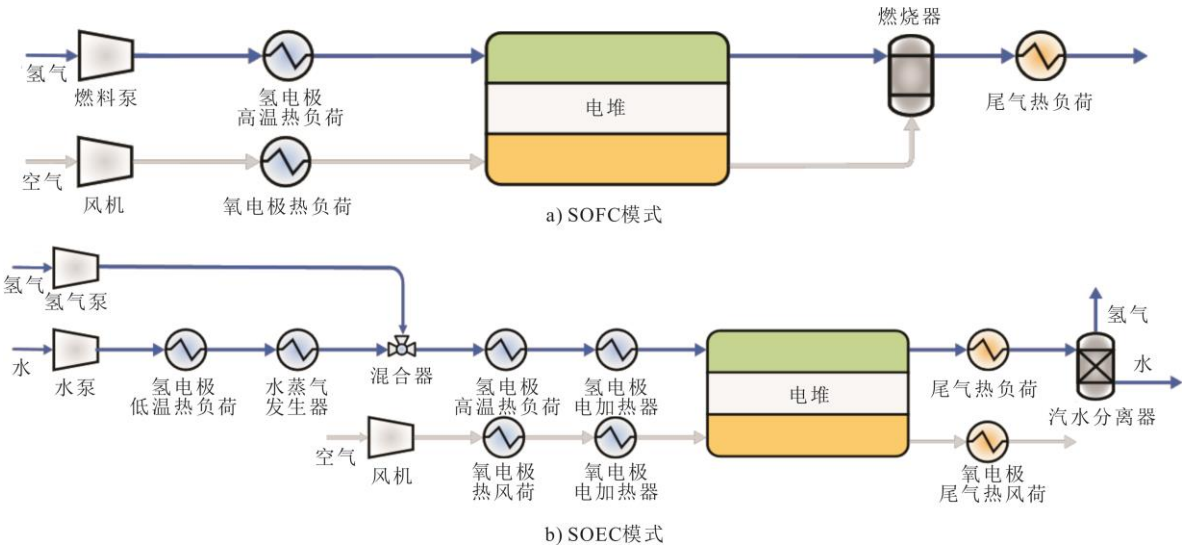


图 1 RSOC 系统流程

Fig.1 The RSOC system process

RSOC 系统中，系统入口燃料流量通过电流密度、电池活化面积和燃料利用率计算得出，入口空气流量则在电堆进出口温度满足设定要求的条件下迭代计算得出，燃料流量 $\dot{F}_{\text{in}}$ 计算公式如下：

$$\dot{F}_{\text{in}} = \frac{J \cdot A_{\text{cell}}}{2F \cdot U_{\text{F}}} \tag{1}$$

式中：J 为电流密度，A/cm^2；A_{cell} 为电池活化面积，cm^2；F 为法拉第常数；U_{F} 为燃料利用率。

1.2 系统性能评价指标

RSOC 系统双模式效率计算公式为：

$$\eta_{\text{SOFC}} = \frac{W_{\text{STACK}} - W_{\text{FUEL}} - W_{\text{AIR}} - W_{\text{ELEC}}}{E_{\text{HYD}}} \tag{2}$$

$$\eta_{\text{SOEC}} = \frac{E_{\text{HYD}}}{W_{\text{STACK}} + W_{\text{FUEL}} + W_{\text{AIR}} + W_{\text{ELEC}}} \tag{3}$$

式中：W_{STACK} 为燃料电池模式下电堆输出功率或制氢模式下制氢耗功，kW；W_{FUEL} 为燃料泵耗功，kW；W_{AIR} 为风机耗功，kW；W_{ELEC} 为系统所需额外电加热耗功，kW；E_{HYD} 为燃料电池模式下系统输入能量或电解池模式下系统输出能量，kJ/s。

$$E_{\text{HYD}} = m_{\text{H}_2} \cdot Q_{\text{LHV}} \tag{4}$$

式中：m_{H_2} 为燃料电池模式下消耗或电解池模式制取的氢气的质量流量，kg/s；Q_{LHV} 为氢气的低位热值。

此外，本文同样关注 SOEC 模式下电堆效率的变化，其计算公式如下：

$$\eta_{SOEC,\,stack}=\frac{E_{HYD}}{W_{STACK}} \tag{5}$$

2 建模方法

2.1 电堆模型

RSOC 电堆的电压由能斯特电压、活化过电势、浓差过电势、欧姆过电势以及由连接体引起的过电势共同决定。氢气作为燃料的条件下，电堆电压由下式计算，SOFC 模式下过电势项为负数，SOEC 模式下过电势项为正数[14]：

$$V=V_{nernst}+V_{act}+V_{ohm}+V_{mic} \tag{6}$$

式中：V_{nernst} 为能斯特电压，V；V_{act} 为活化过电势，V；V_{ohm} 为欧姆过电势，V；V_{mic} 为连接体过电势，V。

其中，电堆活化过电势分为氢电极侧活化过电势和氧电极侧活化过电势 2 部分，计算公式如下：

$$V_{act}=V_{act,her}+V_{act,oer} \tag{7}$$

式中：$V_{act,her}$ 为氢电极活化过电势，V；$V_{act,oer}$ 为氧电极活化过电势，V。

电堆考虑浓差过电势项的能斯特电压计算公式如下：

$$V_{Nernst}=-\frac{\Delta G_{H_2O,0}}{2F}+\frac{RT_K}{2F}\ln\left[\frac{P_{H_2}\times P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right]+\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{Z_{H_2,her,TPB}\sqrt{P_{oer}Z_{O_2,oer,TPB}}}{Z_{H_2O,her,TPB}}\right) \tag{8}$$

式中：$\Delta G_{H_2O,0}$ 为氢氧化反应的标准摩尔吉布斯自由能变，J/mol；R 为理想气体常数；T_K 为电堆运行温度，K；P_{H_2}、P_{O_2}、P_{H_2O} 分别为电堆入口氢、水蒸气和氧气的分压，Pa；$Z_{H_2,her,TPB}$、$Z_{O_2,oer,TPB}$、$Z_{H_2O,her,TPB}$ 为各物质在三相界面处的摩尔分数；P_{oer} 为氧电极侧气体压力，Pa。

电堆活化过电势通过巴特勒-伏尔摩方程计算：

$$J=J_{0,H_2}\left(e^{\frac{F(1+\beta_{oer})V_{act,her}}{RT_K}}-e^{-\frac{F\beta_{her}V_{act,her}}{RT_K}}\right) \tag{9}$$

$$J=J_{0,O_2}\left(e^{\frac{F\beta_{oer}V_{act,oer}}{RT_K}}-e^{-\frac{F\beta_{her}V_{act,oer}}{RT_K}}\right) \tag{10}$$

式中：J 为氢气作为燃料时的电流密度，A/cm^2；J_{0,H_2}、J_{0,O_2} 为交换电流密度，A/cm^2；β_{oer}、β_{her} 为氧、氢电极的不对称电荷转移系数。

电堆欧姆过电势与连接体导致的过电势参考文献[14]进行计算。利用不同电流密度、温度及流量下的单电池与短堆实验数据，对电堆模型参数进行校准。以电解池模式为例验证模型的准确性，具体如图 2 所示[14]。由图 2 可知，在温度 973、1 023、1 073 K 下，IV 曲线模拟数据与电堆测试数据吻合度较好，模型准确度高[14-15]，燃料电池模式验证可参考文献[12]。

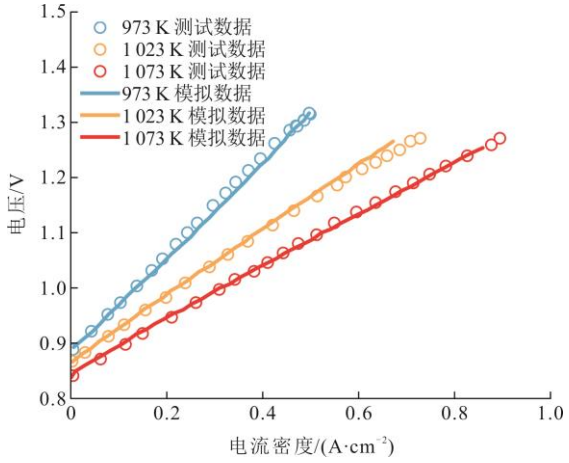


图 2 模型准确性验证

Fig.2 Accuracy verification for the model

系统中除电堆以外的辅助部件，包括泵、风机、换热器与燃烧器，其模拟工作均基于 Aspen Plus 软件的基础模块完成，并通过与实验数据对比来验证模型的准确性。在参数设定方面，泵的模型效率与电机效率分别取值为 0.85 和 0.95；而风机模型的绝热效率及机械效率也同样设置为 0.85 和 0.95。

2.2 模型优化思路

本文在给定电流密度、电堆进出口温度条件下，对 RSOC 系统热集成进行了优化，确定了不同电流密度下系统最佳运行温度，并以此实现了系统效率的最大化。采用夹点分析技术进行系统热集成优化，以实现最大热回收，该优化过程通过混合整数线性规划实现。夹点分析技术为过程集成的核心方法之一，基于“温度对口，梯级利用”原则，通过对系统中所有冷物流与热物流综合分析，以识别

系统热能回收瓶颈，并获得系统所需的最小公用工程。本文优化方法如图 3 所示，首先确定 RSOC 系统的工作模式建立系统模型，并设定电流密度、电堆进出口温度等关键运行参数，然后基于 Aspen Plus 仿真模拟获得系统质量流、能量流。基于混合整数线性规划（mixed integer linear programming，MILP）以最小能源需求为目标函数对所有能流进行系统过程集成分析，模型中的 0-1 变量用于热、冷物流与冷、热共用工程换热量的非负约束[16]。本文采用 AMPL（a mathematical programming language）数学规划平台并调用 CPLEX 求解器，实现系统最大热回收，获得系统总组合曲线及最小热源或者热阱需求并计算系统效率。进一步，通过遗传算法确定系统最佳运行温度，实现系统多工况下效率最优。

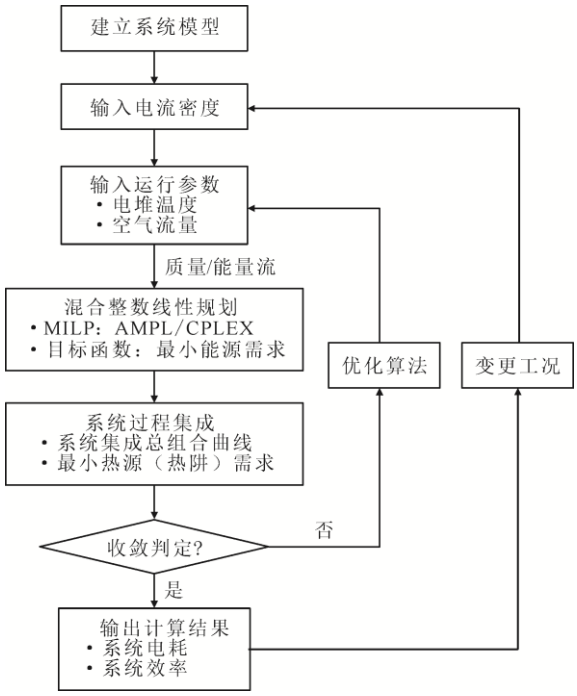


图 3 RSOC 系统多工况效率优化方法

Fig.3 Efficiency optimization method for RSOC systems under multiple operating conditions

2.3 边界条件

电堆部件各参数设定及约束见表 1。为保障电堆在不同电流密度下的安全高效运行，避免因燃料未充分反应导致的效率下降，或燃料利用率过高引发的燃料不足和电池寿命衰减，本文将固体氧化物电堆的燃料利用率设置为固定值 80%[17]。基于此，改变电堆电流密度，电堆入口燃料流量可通过式(1)计算得出。

表 1 固体氧化物电堆参数

Tab.1 Specified parameters of the solid oxide cell stack

模式	变量	下限	上限	定值
基本变量	电池活化面积/cm^2			240
	电堆运行压力/Pa			1.1×10^5
	燃料利用率/%			80
	电堆最大进出口温差/K			120
SOFC	电流密度/(A cm^{-2})	0.06	0.50	
	电堆进口温度/K	953.15	1 073.15	
	电堆出口温度/K			1 073.15
SOEC（吸热）	电流密度/(A cm^{-2})	0.02	0.70	
	电堆进口温度/K			1 073.15
	电堆出口温度/K	953.15	1 073.15	
SOEC（放热）	电流密度/(A cm^{-2})	0.62	0.70	
	电堆进口温度/K			953.15
	电堆出口温度/K	953.15	1 073.15	

3 仿真结果及分析

3.1 SOFC 模式

SOFC 模式系统效率随电流的变化如图 4 所示。由图 4 可知，电流从 14.4 A 提高至 120.0 A，系统效率由 51.9%变化至 46.1%，系统效率随电流增加呈现先升高后降低的趋势，在电流为 36 A 时达到峰值，最高系统效率为 53.5%。

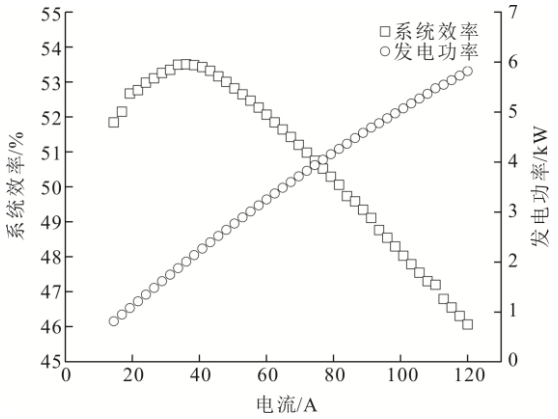


图 4 SOFC 模式下系统效率与发电功率

Fig.4 The system efficiency and generation power in SOFC mode

进一步解析系统效率变化趋势，电流从 14.4 A 提高至 120 A，电堆发电功率从 0.81 kW 增大到 5.82 kW。SOFC 模式电堆进出口温度及系统入口流量如图 5 所示。电堆出口温度保持 1 073 K 不变，入口温度随电流的提高从 1 018 K 逐渐降低，当电流提高至 36 A 后，受电堆温差约束入口温度稳定在 953 K。本文从电堆安全和效率角度考虑，将燃料利用率设定为固定值 80%，则根据式(1)，系统入口燃料流量随电流的提高从 2.81 L/min（标准状态，

下同）增大到 23.47 L/min，系统输入能量增大（式(3)）。受堆内电化学反应和不可逆损失放热的影响，电堆冷却所需空气流量从 90.38 L/min 持续增大到 441.73 L/min，风机耗功从 0.057 kW 增大到 0.280 kW。但电流增大至 36 A 后，受电堆入口温度变化的影响，空气流量增长速度加快。

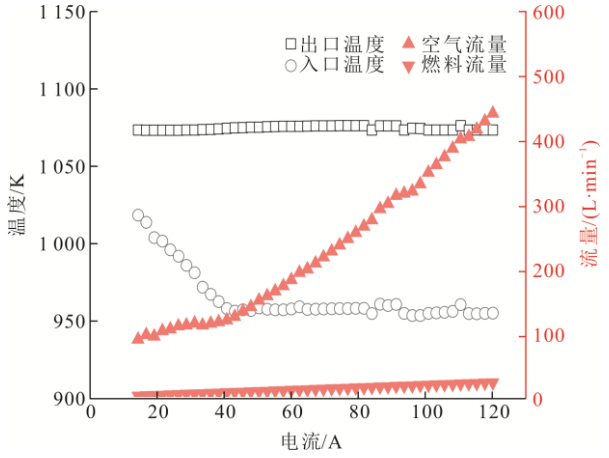


图 5 SOFC 模式下电堆进出口温度及入口流量
Fig.5 The inlet and outlet temperatures and inlet flow rates of the stack in SOFC mode

本文采用总组合曲线展示系统热集成优化结果，总组合曲线展示了不同温度下，整个系统所需的净加热或者净冷却负荷。SOFC 模式系统热集成如图 6 所示，各电流密度下系统均无需外部热源，因此 SOFC 模式系统效率计算无需考虑电加热器耗功。

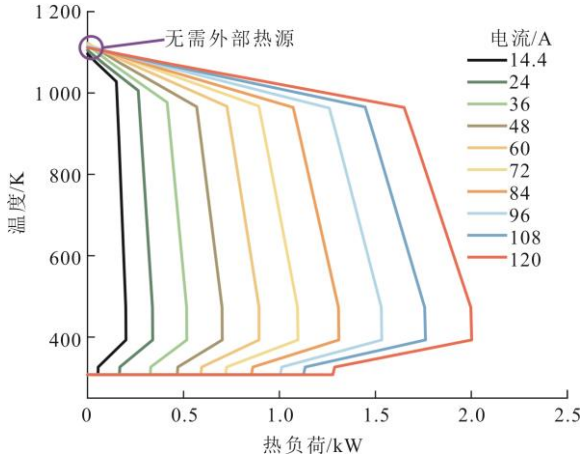


图 6 SOFC 模式系统热集成总组合曲线
Fig.6 The system thermal integration grand composite curves in SOFC mode

基于上述分析，在电流从 14.4 A 提高至 120 A 的过程中，电堆发电功率、燃料泵功及系统输入能量均持续增大；风机耗功虽持续上升，但到达转折点后，入口温度的变化导致其增速加快，系统效率因此开始呈现下降趋势。

3.2 SOEC 模式

由于 SOEC 模式电堆存在热中性电压，系统运行分为放热状态和吸热状态。在工作电压低于热中性电压时，电化学反应吸热量大于电堆不可逆损失放热，此时系统为吸热状态，电堆出口温度低于入口温度；在工作电压高于热中性电压时，电化学反应吸热量小于电堆不可逆损失放热，此时系统为放热状态，电堆出口温度高于入口温度。

3.2.1 吸热状态

SOEC 模式吸热状态下系统效率与电堆效率随电流的变化如图 7 所示。电流从 4.8 A 提高至 168 A 时，电堆效率从 119.5%减小到 98.4%，系统效率从 73.3%增大到 79.2%。

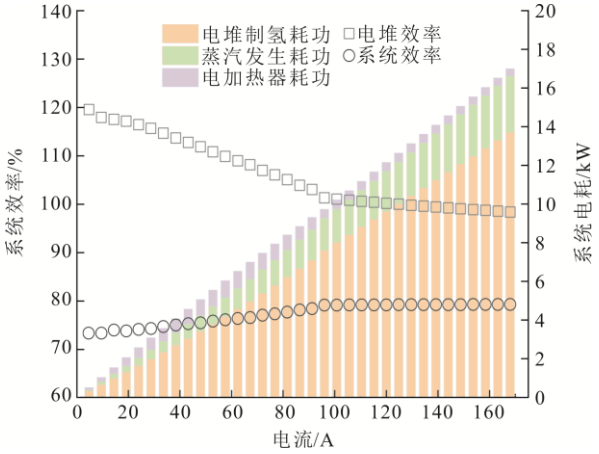


图 7 SOEC 模式吸热状态下系统效率与电耗
Fig.7 The system efficiency and power consumptions in SOEC mode under endothermic state

进一步解析吸热状态下系统效率变化趋势，电流从 4.8 A 提高至 168 A，系统各部分电耗如图 7 所示。电堆制氢耗功从 0.32 kW 增大到 13.70 kW，产氢量从 2.16 L/min 增大到 86.02 L/min，系统输出能量增大。根据式(1)及燃料利用率设定值 80%，入口水流量随电流变化从 2.68 L/min 增大到 93.65 L/min（图 8），蒸汽发生器耗功因此从 0.083 kW 增大到 2.920 kW。电加热器耗功先增大后减小，电流提高至 72 A 前，电堆入口流量增大导致电加热器耗功从 0.12 kW 增大到 0.89 kW；进一步提高电流，入口空气流量逐渐减小导致电加热器耗功从 0.89 kW 减小到 0.47 kW；电流提高至 96 A 后，电堆出口温度升高导致电堆尾气余热增大，电加热器耗功从 0.47 kW 减小到 0.39 kW。

SOEC 模式吸热状态下电堆进出口温度及系统入口流量如图 8 所示。入口温度保持 1 073 K 不变；出口温度在小电流条件下受电堆最大温差约束维持在 953 K 左右，当电流提高至 96 A 后，电堆不可逆损失放热量增大导致出口温度逐渐增大到 1 017 K。空气流量受电化学反应吸热和不可逆损失放热影响，电流提高至 48 A 前，电堆通过高温空气维持其温度，入口空气流量从 21.23 L/min 增大到 134.47 L/min，风机耗功从 0.005 2 kW 增大到 0.033 0 kW；进一步提高电流，不可逆损失放热增大导致所需空气流量减小，入口空气流量逐渐减小到 21.23 L/min，风机耗功逐渐减小到 0.005 2 kW；电流提高至 96 A 后，电堆出口温度升高，入口空气流量和风机耗功不变。

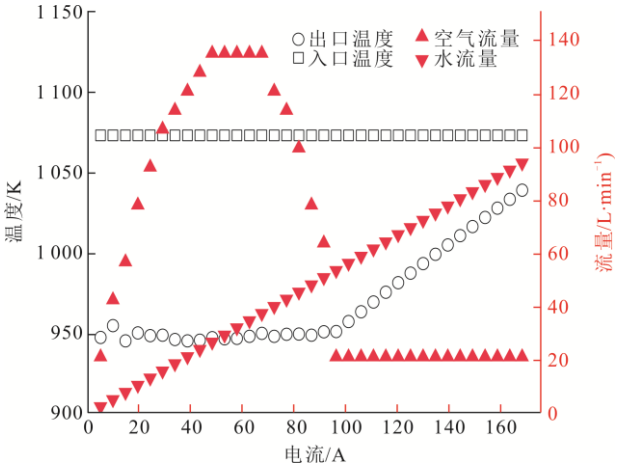


图 8 SOEC 模式吸热状态下电堆进出口温度及系统入口流量
Fig.8 The inlet and outlet temperatures of the stack and inlet flow rates of the system in SOEC mode under endothermic state

此外，SOEC 模式吸热状态系统热集成总组合曲线如图 9 所示，系统热源需求随电流的提高从 0.26 kW 增大到 1.03 kW，其增速与空气流量变化相对应，呈现出先增大、再减小后稳定的变化趋势。

基于上述分析，在电流从 4.8 A 提高至 120 A 的过程中，系统输出能量与电堆制氢功率均保持增大趋势。在电流达到 96 A 拐点前，空气流量的变化导致风机耗功与系统电加热耗功呈现先增大后减小的趋势，但由于电堆制氢耗功与蒸汽发生耗功为效率的主要影响因素，因此电堆效率与系统效率的变化趋势保持不变；到达拐点后，电堆出口温度升高、空气流量不变导致电堆制氢耗功增长放缓，电堆效率下降速率减缓，系统效率的提升幅度也随之减小。

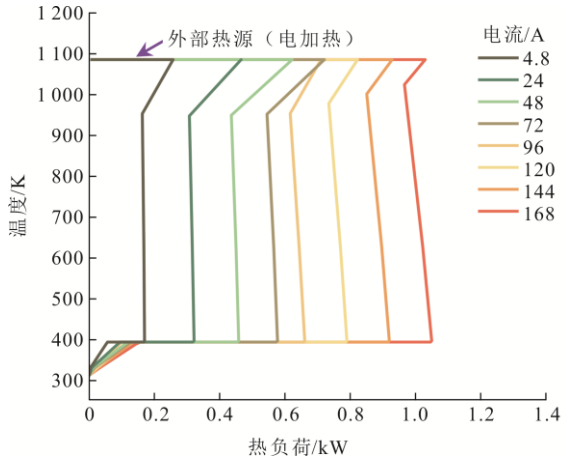


图 9 SOEC 模式吸热状态下系统热集成总组合曲线
Fig.9 The system thermal integration grand composite curves in SOEC mode under endothermic state

3.2.2 放热状态

SOEC 模式放热状态系统效率随电流的变化如图 10 所示。由于小电流难以维持电堆工作温度，因此将工作电流范围设定为 148.8~168.0 A，在此电流区间内，电堆效率从 94.6%升高至 95.4%，系统效率则基本保持不变（79.3%）。

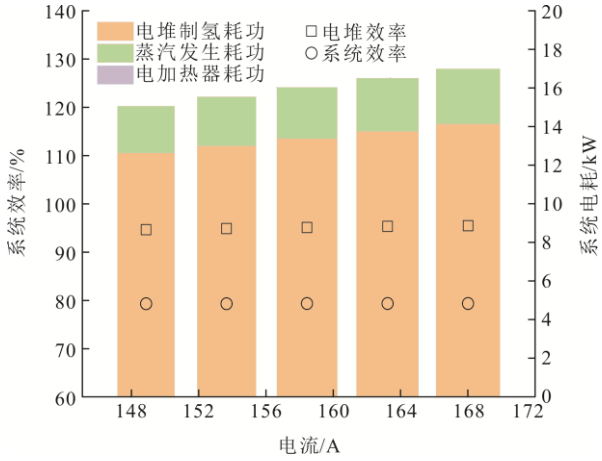


图 10 SOEC 放热状态下系统效率与电耗
Fig.10 The system efficiency and power consumptions in SOEC mode under exothermic state

进一步解析放热状态下系统效率变化趋势，电流从 148.8 A 提高至 168.0 A，系统热源需求随电流的提高从 0.81 kW 增大到 0.96 kW（图 11），电堆制氢耗功从 12.62 kW 升高至 14.12 kW（图 10），产氢量从 75.94 L/min 增大到 86.02 L/min，系统输出能量增大，水流量从 82.94 L/min 增大到 93.65 L/min（图 12，式(1)），蒸汽发生器耗功因此从 2.44 kW 增大到 2.87 kW。系统在放热模式下可通过尾气余热加热入口物流，因此电加热器耗功为零。

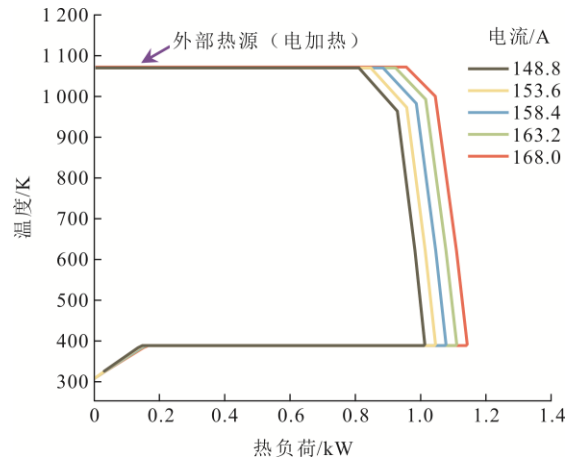


图 11 SOEC 模式放热状态下系统热集成总组合曲线

Fig.11 The system thermal integration grand composite curves in SOEC mode under exothermic state

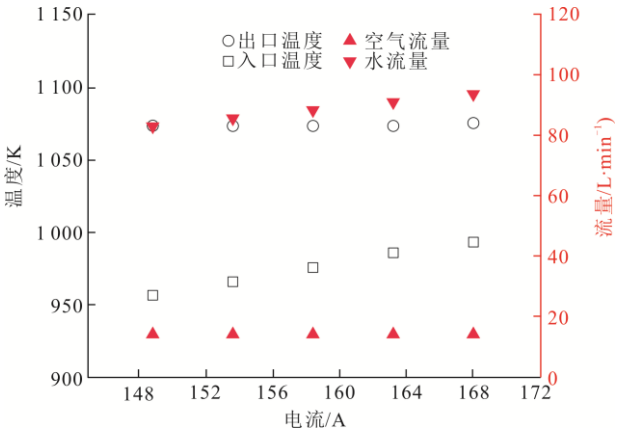


图 12 SOEC 模式放热状态下电堆进出口温度及系统入口流量

Fig.12 The inlet and outlet temperatures of the stack and inlet flow rates of the system in SOEC mode under exothermic state

同时由图 12 可知，放热状态下电堆出口温度保持 1 073 K 不变，电堆不可逆损失放热量增大导致入口温度从增大到 993 K，入口空气流量和风机耗功保持不变，系统热源需求因此呈现均匀增大的变化趋势（图 11）。

基于上述分析，在电流从 148.8 A 提高至 168.0 A 的变化过程中，系统输出能量增大、电堆制氢功率增大、风机耗功不变，综合作用下导致电堆功率呈现升高趋势，而蒸汽发生耗功增大则导致系统效率基本不变。

4 结　论

本文构建了可逆固体氧化物电池系统，采用数学规划方法优化不同电流密度和运行温度下的系统热集成，计算系统最小能源需求和系统效率，并通过优化算法确定系统最佳运行温度，获得最优系统效率，得出结论如下。

1）在燃料电池发电模式下，提高电流导致系统输入能量、电堆发电功率及风机耗功均增大，系统效率在电流增大至拐点 0.15 A/cm^2 前呈现增大趋势，到达拐点后，系统效率最大，为 53.5%，此后电堆入口温度不变导致风机耗功增长速度加快，系统效率因此呈现下降趋势。

2）在电解池制氢模式下，吸热状态下，提高电流导致系统输出能量、电堆制氢耗功增大，电堆出口温度不变导致风机耗功与系统电加热耗功先增大后减小，但由于二者非效率的主要影响因素，电堆效率与系统效率仍维持稳定的降低与增大趋势。电流增大至拐点值 0.4 A/cm^2 后，电堆出口温度升高导致电堆制氢耗功增长速度减缓，电堆效率与系统效率的变化趋势不变，但变化速率降低，系统效率最高达到 79.2%；放热状态下，提高电流导致系统输出能量、电堆制氢耗功增大，电堆出口温度升高而风机耗功不变，电堆功率呈现增大趋势，系统效率基本维持在 79.3%不变。

［参 考 文 献］

［1］ 张帆, 王博文, 樊林浩, 等. 光伏发电制氢储能系统仿真及性能分析研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(10): 2653-2658.
ZHANG Fan, WANG Bowen, FAN Linhao, et al. Development of photovoltaic-electrolyzer-fuel cell system for hydrogen production and power generation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(10): 2653-2658.

［2］ KRISHAN O, SUHAG S. An updated review of energy storage systems: classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(12): 6171-6210.

［3］ 李强强, 薛顶喜, 马帅, 等. 固体氧化物燃料电池阳极微结构三维数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(5): 1309-1315.
LI Qiangqiang, XUE Dingxi, MA Shuai, et al. Three-dimensional numerical simulation of solid oxide fuel cell anode microstructure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(5): 1309-1315.

［4］ WANG L, ZHANG Y, LI C, et al. Triple-mode grid-balancing plants via biomass gasification and reversible solid-oxide cell stack: Concept and thermodynamic performance[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115987.

［5］ 刘汉宇, 季炫宇, 周雄, 等. 燃料气参数对固体氧化物燃料电池放电特性影响研究[J]. 湖南电力, 2023, 43(6): 31-36.
LIU Hanyu, JI Xuanyu, ZHOU Xiong, et al. Study on effects of fuel gas parameters on discharge characteristics of solid oxide fuel cells[J]. Hunan Electric Power, 2023, 43(6): 31-36.

［6］ SELVAM K, KOMATSU Y, SCIAZKO A, et al. Thermodynamic analysis of 100% system fuel utilization

solid oxide fuel cell (SOFC) system fueled with ammonia[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 249: 114839.

[7] 李青山, 郝勇生, 翁方龙, 等. 甲醇重整固体氧化物燃料电池热电联产系统热力学分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 502-512.
LI Qingshan, HAO Yongsheng, WENG Fanglong, et al. Thermodynamic analysis and optimal design of cogeneration system for methanol reforming solid oxide fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 502-512.

[8] CHEN H, WANG J, XU X. Parametric study of operating conditions on performances of a solid oxide electrolysis cell[J]. Journal of Thermal Science, 2023, 32(6): 1973-1988.

[9] 靳壮杰, 杨雁, 张伟, 等. 固体氧化物电解池电解水制氢效率影响因素数值分析[J]. 化学工程, 2023, 51(12): 20-24.
JIN Zhuangjie, YANG Yan, ZHANG Wei, et al. Numerical analysis of factors influencing efficiency of hydrogen production by solid oxide electrolysis of water[J]. Chemical Engineering, 2023, 51(12): 20-24.

[10] CHEN Y, WU X, HU H, et al. System level performance analysis and parameter optimization of hydrogen production based on solid oxide electrolytic cell[J]. Applied Energy, 2023, 347: 121329.

[11] WANG C, CHEN M, LIU M, et al. Dynamic modeling and parameter analysis study on reversible solid oxide cells during mode switching transient processes[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114601.

[12] WANG L, ZHANG Y, PÉREZ-FORTES M, et al. Reversible solid-oxide cell stack based power-to-x-to-power systems: comparison of thermodynamic performance[J] . Applied Energy, 2020, 275: 115330.

[13] WEI X, SHARMA S, MARECHAL F, et al. Design and optimization of a shared heat exchanger network for an integrated rSOC system[J]. Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, 2023, 52: 1065-1070.

[14] WANG L, RAO M, DIETHELM S, et al. Power-to-methane via co-electrolysis of H_2O and CO_2: the effects of pressurized operation and internal methanation[J]. Applied Energy, 2019, 250: 1432-1445.

[15] WANG L, PÉREZ-FORTES M, MADI H, et al. Optimal design of solid-oxide electrolyzer cased power-to-methane systems: a comprehensive comparison between steam electrolysis and co-electrolysis[J]. Applied Energy, 2018, 211: 1060-1079.

[16] KERMANI M, ZOÉ PÉRIN-LEVASSEUR, BENALI M, et al. A novel MILP approach for simultaneous optimization of water and energy: application to a Canadian softwood Kraft pulping mill[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 102: 238-257.

[17] WU Z, ZHU P, HUANG Y, et al. A comprehensive review of modeling of solid oxide fuel cells: from large systems to fine electrodes[J]. Chemical Reviews, 2025, 125(4): 2184-2268.

（责任编辑　邓玲惠）