

7-20-2022

Modeling and Simulation of SOFC System with Heat Transfer among BoP Components

Ling Hong

Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solar Energy Utilization & Energy Saving Technology, Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China; hongl_92@163.com

Rongmin Wu

Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solar Energy Utilization & Energy Saving Technology, Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China;

Jianwu Zhou

Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solar Energy Utilization & Energy Saving Technology, Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China;

Tian Xia

Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solar Energy Utilization & Energy Saving Technology, Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Invited Papers & Special Columns is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of SOFC System with Heat Transfer among BoP Components

Abstract

Abstract: High temperature solid oxide fuel cell (SOFC) is a high temperature and efficient hydrogen-electric conversion device. Its high temperature operating environment puts forward higher requirements for thermal insulation of stack and balance of plants(BoP) in the system. In this paper, *a lumped SOFC system model is established based on the thermal efficiency-heat transfer unit number method (ϵ -NTU method), in combination with limited measurable parameters for high-temperature system. Quantitative analysis of components temperature and heat transfer among components can be achieved by heat exchange simulation between components and BoP hot-box environment.* A simple feedback controller is designed for system self-starting and operation. Results show that the BoP hot-box plays the role of temperature balance, which is benefit for waste heat utilization by heating the inlet gas, and lower the highest equipment temperature for a longer system lifetime.

Keywords

SOFC(solid oxide fuel cell), lumped model, heat transfer, thermal insulation, feedback control

Authors

Ling Hong, Rongmin Wu, Jianwu Zhou, Tian Xia, Xiaojie Li, Pengjie Tian, Hao Peng, and Chunhui Shou

Recommended Citation

Ling Hong, Rongmin Wu, Jianwu Zhou, Tian Xia, Xiaojie Li, Pengjie Tian, Hao Peng, Chunhui Shou. Modeling and Simulation of SOFC System with Heat Transfer among BoP Components[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(7): 1383-1392.

编者按 在全球共同倡导低碳环保发展,我国大力推进“碳中和,碳达峰”目标的共同背景下,电力和能源系统承担着低碳转型发展的核心任务。然而,电力与能源系统具有范围广、规模大、复杂性强等特点,对传统仿真平台与方法的性能和效率提出了严峻的挑战。在信息物理系统、数字孪生、元宇宙等新概念不断产生和人工智能、大数据等新工具发展成熟的进程中,提出高效率的电力和能源自动化仿真新技术,建立电力和能源自动化仿真新平台,有望全面加速电力和能源系统的转型发展,快速推进电力和能源自动化仿真新生态的全面实现。

为推动我国和全球电力和能源自动化仿真领域的交流、合作与突破,《系统仿真学报》本期推出“电力和能源自动化仿真”专栏,专题编辑团队由来自上海大学、中国科学院深圳先进技术研究院、中国科学技术大学、英国利兹大学、英国华威大学等国内外电力和能源系统仿真的六位资深和青年专家担任。专栏征稿推出后,受到了包括中国、英国、美国、丹麦等国内外电力和能源自动化仿真领域专家和学者的广泛关注,共收到了20篇高质量原创性成果投稿,经过学报编委会组织的严格同行评议和审查,本期精选出5篇紧扣专栏的高水平成果,以飨读者。

杨之乐,中国科学院深圳先进技术研究院副研究员; Kailong Liu, 英国华威大学助理教授; 杜大军, 上海大学机电工程与自动化学院教授; 汪玉洁, 中国科学技术大学自动化系副研究员; Kang Li, 英国利兹大学智慧能源系统组主任, 讲座教授; 费敏锐, 上海大学机电工程与自动化学院教授

考虑 BoP 热区内部件间热传递的 SOFC 系统建模仿真

洪凌, 邬荣敏, 周剑武, 夏天, 李晓洁, 田彭杰, 彭浩, 寿春晖*

(浙江省太阳能利用及节能技术重点实验室 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121)

摘要: 高温固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是一种高温高效的氢电转换装置,其高温工作环境对系统电堆和辅助部件(balance of plants, BoP)的保温绝热提出极高要求。考虑 SOFC 系统 BoP 热区内多部件之间存在的热交换,结合高温系统有限的可测数据,开展基于热效率-传热单元数法(ε -NTU 法)的高温 SOFC 系统集总建模;通过模拟 BoP 热区内零部件与环境的热交换,实现 BoP 热区内多部件间的传热和温度定量分析;通过设计简洁的反馈控制器实现系统的自启动和稳定运行仿真。仿真结果表明,BoP 热区整体保温绝热起温度均衡作用,有利于尾气余热对进气气体的进一步加热,也可适当降低设备最高温度,有利于系统长期运行。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 集总模型; 热传递; 保温绝热; 反馈控制

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)07-1383-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0281

Modeling and Simulation of SOFC System with Heat Transfer among BoP Components

Hong Ling, Wu Rongmin, Zhou Jianwu, Xia Tian, Li Xiaojie, Tian Pengjie, Peng Hao, Shou Chunhui*

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solar Energy Utilization & Energy Saving Technology, Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China)

Abstract: High temperature solid oxide fuel cell (SOFC) is a high temperature and efficient hydrogen-electric conversion device. Its high temperature operating environment puts forward higher requirements for thermal insulation of stack and balance of plants(BoP) in the system. In this paper, a lumped SOFC system model is established based on the thermal efficiency-heat transfer unit number method (ε -NTU method), in combination with limited measurable parameters for high-temperature system. Quantitative analysis of components temperature and heat transfer among components can be achieved by heat

收稿日期: 2022-03-29

修回日期: 2022-06-01

第一作者: 洪凌(1992-),女,硕士,工程师,研究方向为光伏性能测试评价、燃料电池系统分析等。E-mail: hongl_92@163.com

通讯作者: 寿春晖(1985-),男,博士,高工,研究方向为环保及新能源技术开发。E-mail: shouchunhui@zjenergy.com.cn

exchange simulation between components and BoP hot-box environment. A simple feedback controller is designed for system self-starting and operation. Results show that the BoP hot-box plays the role of temperature balance, which is benefit for waste heat utilization by heating the inlet gas, and lower the highest equipment temperature for a longer system lifetime.

Keywords: SOFC(solid oxide fuel cell); lumped model; heat transfer; thermal insulation; feedback control

引言

随着双碳目标的提出和推进,清洁能源在国内快速发展,太阳能、风能等可再生能源在能源结构中的占比快速增加。氢能作为一种重要的清洁能源和储能方式,也日渐受到关注。氢燃料电池是一种将氢能转换为电能的能量转换装置,具有高效、静音、零排等优点,是氢能利用的主要手段之一。

高温固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是一种中高温燃料电池,在多种燃料电池中具有燃料纯度耐受性高、能量转换效率高和材料成本低等独特优势,其热电联供利用效率可达 80% 以上^[1],在大规模和固定式应用上具有极大发展前景。目前美国、韩国、日本等地已有大规模 200 MW SOFC 电站及小规模 700 W 高温 SOFC 热电联用产品^[2]。国内 SOFC 技术研发相对先进国家起步较晚,目前系统规模通常在 1~20 kW 区间,以示范运行为主,电堆部件稳定性仍需进一步改善,高温系统长期稳定运行尚待验证。系统的高温运行对零部件的耐受性和数据准确采集等带来较大挑战,因此数学建模分析、数值模拟与控制策略研究等也成为协助探索 SOFC 系统运行情况的重要工具^[3],可用于更好地理解 SOFC 在实际操作条件下的气体浓度、温度等参数分布^[4]。

作为一个热学、电化学、流体力学耦合的复杂系统,多物理域耦合增加了 SOFC 性能预测的难度,较高的工作温度则阻碍了对 SOFC 内部条件的全面检测^[5]。因此,有大量研究人员针对 SOFC 系统开展建模和仿真工作。考虑高温热力学

传递,高阶的 SOFC 系统模型可以分析系统及零部件参数的空间分布特性,对器件设计和结构仿真具有重大意义,如 C. Schluckner 等^[6]用 CFD (computational fluid dynamics)建立了 SOFC 柴油重整系统仿真模型,并实验验证模型的一致性;李琛^[7]对单电池内部传热传质过程进行数值模拟,提出电池堆结构设计准则。但分布式模型的计算量大,耦合度高,在控制分析中通常采用“降阶模型”或“集中参数模型”,有针对性忽略部分空间分布影响。如张琳等^[8]开展了面向控制的 SOFC 系统降阶模型研究,测试分析不同温度层模型的输出特性和降阶系统误差;苏煊埔^[9]结合 Aspen 软件开展 SOFC 系统建模,并利用 Matlab/Simulink 平台开展系统空气流量控制研究;谭勋琼等^[10]建立 SOFC 系统电堆集总模型,分析 SOFC 电堆气体分压和功率输出的相关关系;吴肖龙^[11]开展 SOFC 系统多模态建模,考虑系统存在的过渡状态,分析系统故障状态。大部分模型以燃料电池的核心部件电堆为重点开展建模工作,对燃料电池辅助部件(balance of plants,BoP)(如重整器、多个换热器、汽化器等)进行部分简化,也有部分文献针对燃烧重整器开展研究,分析重整效果对电堆发电的影响。如康鑫^[12]针对内部蒸汽重整的 SOFC 系统建模并开展单输入系统和多输入系统的控制器设计;张兴梅等^[13]开展天然气预重整器和直接内部重整 SOFC 电堆的数学模型,分析重整效果与电堆性能关系等;闫东等^[14]开展基于 Simulink 的 SOFC-MGT 集总参数模型并分析联合发电系统的发电效率等。但多数模型未提及部件与环境温度间的热传递,一般认为部件的保温绝热良好,仅通过流

通的气体传递热量。如果将BoP热区看作一个整体, 并将热区内的多个零部件看作冷源或热源, 则多个零部件在热区内一定会因热平衡存在一定的能量传递。Taehyung Koo等^[15]对韩国机械材料研究院SOFC-HCCI发动机混合系统的实验数据进行了热能和焓能分析, 针对SOFC电堆热区、HCCI(homo geneous charge compression ignition)发动机和BoP热区, 定量分析了区域间和区域内各部件间的能量流动, 从其数据可见BoP热区内的换热器、管道、燃烧器等部件与热区环境间存在焓能流转, 其中的部分能量被再利用来做功或者加热气体。由此引申, 针对SOFC系统BoP热区内多部件之间的热平衡开展建模和仿真分析, 可以有针对性地分析高温热区内部件间的能量流转方向、传递能量大小等并探讨其利弊。所得的分析结果可以助益BoP热区内的保温结构设计, 引导有利的能量传递, 阻隔不利的能量损失, 有利于系统结构和效率优化、材料成本降低和经济效益提升^[16]。

本文基于高温SOFC系统基本特性, 利用系统可测量的流量、温度、电流电压等物理量, 结合热效率-传热单元数法(e-NTU法)在Matlab/Simulink平台上开展高温SOFC系统集总建模和仿真。对比常规集总建模仿真, 模型考虑了BoP热区内换热器、重整器等多个零部件与热区环境的热交换, 实现了BoP热区内多部件间的传热和温度状态分析; 基于SOFC系统多物理域耦合的复杂运行状态, 设计了简单的反馈控制器来实现系统的自启动和稳定运行仿真, 以进一步分析BoP热区内多部件间热传递的温度影响程度。

1 高温SOFC系统

高温SOFC系统包含热交换器、汽化器、重整器、电堆等零部件和气体热交换、重整反应、电化学反应等复杂流体过程, 是一个多物理域耦合的复杂系统, 考虑超高的工作温度, SOFC系统

通常采用换热器对高温尾气回收再利用, 对相对低温的进气流体进行加热。高温尾气流经热交换器的顺序差异或换热器自身设计差异直接影响系统热利用效果, 导致系统整体效率降低。杨博然等^[17]开展SOFC外围热管理系统研究, 对直接尾气燃烧、加旁路燃料气和阳极尾气回收联合尾气燃烧等多种SOFC系统流程图进行整理, 提出子系统可合理利用反应产生的热能来平衡系统热量, 提高整个系统的效率。本文采用的典型高温SOFC系统结构以25 kW SOFC发电实物系统为原型, 设备外观如图1所示, 系统结构示意图如图2所示。



图1 25 kW SOFC发电系统

Fig. 1 25 kW SOFC system

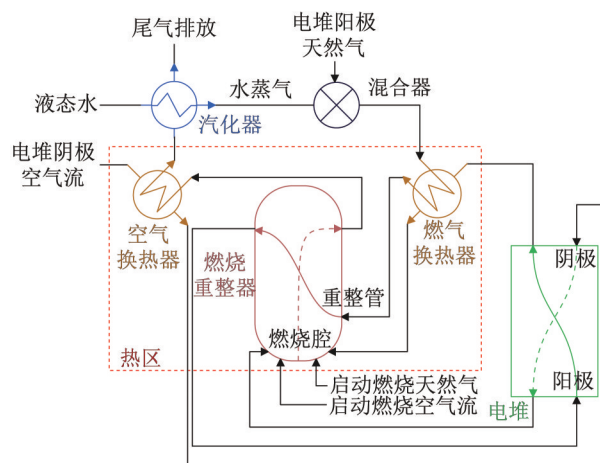


图2 典型高温SOFC系统

Fig. 2 Schematic of typical SOFC system

SOFC电堆为SOFC系统的关键零部件, 需要用以氢气为主的高温燃料气和热空气为原料进行电化学反应, 高温燃料气主要通过天然气重整反

应获得。在多种氢气重整技术中，蒸汽重整相对普遍，且与SOFC系统的工作温度较为吻合，是高温SOFC常用的系统配套装置。

电化学反应属于放热反应，重整反应为吸热反应，反应后的气体温度通常有600~800℃。为提高系统效率，通常将反应后的混合气体作为换热器的高温气流，给系统的常温进气气体加热。

2 系统模型和控制器设计

高温SOFC系统运行涉及的气体包括甲烷(CH₄)、氧气(O₂)、氮气(N₂)、水蒸气、氢气(H₂)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)等，混合气体的组分和流量在反应过程中会发生变化。为便于混合气体在模型中的数据传递，定义混合气体组为

$$\dot{n}_{\text{mix}} = [\dot{n}_{\text{CH}_4}, \dot{n}_{\text{O}_2}, \dot{n}_{\text{N}_2}, \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}, \dot{n}_{\text{H}_2}, \dot{n}_{\text{CO}}, \dot{n}_{\text{CO}_2}]$$

相应地，定义混合气体的比热容组为

$$C_{p,\text{mix}} = [C_{p,\text{CH}_4}, C_{p,\text{O}_2}, C_{p,\text{N}_2}, C_{p,\text{H}_2\text{O}}, C_{p,\text{H}_2}, C_{p,\text{CO}}, C_{p,\text{CO}_2}]$$

建模中忽略部分干扰因素，做如下假设：

- (1) 所有气体均为理想气体，系统压力稳定；
- (2) 热量传递集中在部件出口，忽略管道热损。

本文变量符号、上下标及单位详见表1。

表1 符号表
Table 1 Symbol table

变量	含义
$n/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	摩尔流量
$C_p/(\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1})$	比热容
$q/(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$	单位时间传热量
T/K	温度
$C/(\text{K} \cdot \text{s})$	热容量率
$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	焓变
F/SLM	体积流量
k	传热系数
r	比例系数

2.1 单部件模型

系统部件除电堆外，还有包括在BoP热区内的换热器、汽化器、重整器等。

2.1.1 换热器模型

系统换热器是高温系统的常用部件，相关研究和建模方法众多，其中平均对数温差法(logarithmic mean temperature difference, LMTD)和 ε -NTU(number of transfer units)法相对普遍。本模型主要采用 ε -NTU法，可以通过换热器进口温度直接推算出口温度，有利于系统结构分析、参数估计和数据拟合。且根据相关研究，在余热锅炉传热计算中的应用中，从计算稳定性、初值敏感性和计算效率上考虑， ε -NTU法比LMTD法更受推荐^[18]。

系统内换热器含空气换热器和燃料换热器，结合图1所示流程，空气换热器通过重整器尾气对系统冷空气进气加热，燃料换热器通过电堆阳极尾气对系统水碳混合气进行二次加热。

基于 ε -NTU法，换热器极限传热量 q_{max} 和实际传热量 q 为

$$q_{\text{max}} = C_{\text{min}}(T_{\text{h},\text{in}} - T_{\text{l},\text{in}}), q = \varepsilon \cdot q_{\text{max}} \quad (1)$$

式中： C_{min} 为冷热流体中较小的热容量率； $T_{\text{h},\text{in}}$ 、 $T_{\text{l},\text{in}}$ 分别为换热器入口的高温、低温流体的进口温度； ε 为传热有效性，是实际传热量和最大传热量的比例，在0~1之间。热容量率定义为

$$C = \dot{n}_{\text{mix}} C_{p,\text{mix}}^T$$

则冷热流体的热容量率及 C_{min} 可表示为

$$C_{\text{h}} = \dot{n}_{\text{h}} C_{p,\text{mix}}^T, C_{\text{l}} = \dot{n}_{\text{l}} C_{p,\text{mix}}^T, \\ C_{\text{min}} = \min \{C_{\text{h}}, C_{\text{l}}\}$$

而实际传热量 q 同时还可以表示为冷热流体进出口的换热量：

$$q = C_{\text{h}}(T_{\text{h},\text{in}} - T_{\text{h},\text{out}}) = C_{\text{l}}(T_{\text{l},\text{out}} - T_{\text{l},\text{in}}) \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)，可得换热器高温、低温流体的出口温度计算公式为

$$T_{\text{h},\text{out}} = T_{\text{h},\text{in}} - q/C_{\text{h}} = T_{\text{h},\text{in}} - \varepsilon \cdot C_{\text{min}}(T_{\text{h},\text{in}} - T_{\text{l},\text{in}})/C_{\text{h}} \\ T_{\text{l},\text{out}} = T_{\text{l},\text{in}} + q/C_{\text{l}} = T_{\text{l},\text{in}} + \varepsilon \cdot C_{\text{min}}(T_{\text{h},\text{in}} - T_{\text{l},\text{in}})/C_{\text{l}}$$

ε -NTU法中有效性 ε 的数值与换热器传热单元数NTU、传热系数 U 、传热面积 A 以及最小热容量率 C_{min} 等相关，本文一般取0.95。

2.1.2 汽化器

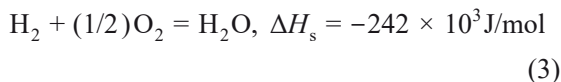
汽化器将低温液态水加热为高温水蒸气, 属于一侧流体有相变的特殊换热器。因涉及流体相变, 汽化器的极限传热量 $q_{\max}$ 需要考虑相变潜热。因此, 汽化器相变侧的最大热交换量为

$$q_{\max} = \begin{cases} C_w(T_{h,\text{in}} - T_{l,\text{in}}), & T_{h,\text{in}} < T_{\text{eva}} \\ C_w(T_{\text{eva}} - T_{l,\text{in}}) + \dot{n}_w \Delta H_{\text{eva}} + C_v(T_{h,\text{in}} - T_{\text{eva}}) \\ T_{h,\text{in}} \geq T_{\text{eva}} \end{cases}$$

式中: C_w, C_v 分别为液态水和水蒸气的热容量率; T_{eva} 为水的汽化温度汽化温度一般在 100°C 左右, 会受压力影响变化; ΔH_{eva} 为在 T_{eva} 温度下的汽化潜热。

2.1.3 电堆

电堆的电化学反应过程:



反应后电堆两侧流道的气体组分变化为

$$\Delta \dot{n}_{\text{a,H}_2} = -\frac{N}{2F}i, \Delta \dot{n}_{\text{a,H}_2\text{O}} = \frac{N}{2F}i, \Delta \dot{n}_{\text{c,O}_2} = -\frac{N}{4F}i$$

式中, $\Delta \dot{n}$ 为物料在电化学反应前后的变化量, i 为电堆外部测量的电流; N 为电堆的电池片数; F 为法拉第常数, 取 96485.34 C/mol 。

反应放出的热量在电堆的阴极和阳极间进行热交换。Saeid Amiri 等^[19]通过建模分析了 SOFC 的温度、压力和浓度变化, 发现对一般 SOFC 而言, 阳极反应对电池吸热, 阴极反应对电池放热。将该放热过程简化为反应在阴极侧放热, 阴极侧气体升温, 结合能量守恒定律, 阴极侧气体温度应满足:

$$\dot{n}_{\text{c,rec}} C_{p,\text{mix}}^T T_{\text{c,rec}} = \dot{n}_{\text{c,in}} C_{p,\text{mix}}^T T_{\text{c,in}} + \Delta H_s$$

阴极气体升温后, 与阳极气体进行热交换, 结合换热器模块的 ε -NTU 法开展换热计算, 更新电堆阳极和阴极出口的气体温度。

2.1.4 燃烧重整器

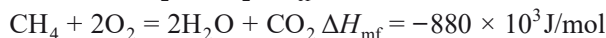
重整器是 SOFC 的重要部件, 用以实现系统启动、燃料重整等关键步骤。燃烧重整器包含燃

烧腔和重整管道两个气体流道, 以及燃烧供热、热交换和重整三个过程, 复杂度较高。

燃烧腔主要作用是启动供热和尾气处理, 其进口气体由启动燃气、启动空气、电堆阳极尾气和阴极尾气混合而成, 按能量守恒定律, 混合进气的组分和温度计算公式为

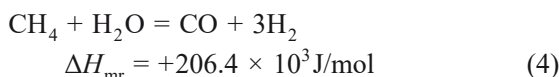
$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{ato,in}} &= \dot{n}_{\text{qd,air}} + \dot{n}_{\text{qd,CH}_4} + \dot{n}_{\text{fh,out}} + \dot{n}_{\text{st,c,out}} \\ T_{\text{ato,in}} &= (\dot{n}_{\text{qd,air}} T_{\text{qd,air}} + \dot{n}_{\text{qd,CH}_4} T_{\text{qd,CH}_4} + \dot{n}_{\text{fh,out}} T_{\text{fh,out}} + \\ &\quad \dot{n}_{\text{st,c,out}} T_{\text{st,c,out}}) C_{p,\text{mix}}^T / (\dot{n}_{\text{ato,in}} C_{p,\text{mix}}^T) \end{aligned}$$

通入腔体的启动甲烷气或电堆尾气在腔内充分燃烧, 消耗 H_2 , CO 和 CH_4 , 全部转化为水蒸气和 CO_2 , 并放出大量热量, 使燃烧腔快速升温。该过程涉及的燃烧反应除式(3)外, 还有一氧化碳和甲烷的燃烧反应, 表示为

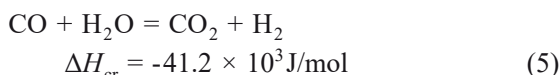


燃烧腔升温后, 与重整管道换热, 换热部分建模参照换热器模型。重整管道吸热后, 管道内的水碳混合气发生重整反应。

甲烷重整主反应为



水蒸气过量的情况下, 发生水煤气反应为



火煤气反应有利于提高氢气产率^[20]。蒸汽重整反应理想的输出气体组分如表 2 所示(干燥气体)^[21]。

水碳摩尔比为 1:1。为了防止水碳混合气中的甲烷遇高温碳化并产生尽可能多的氢气, 混合气一般会保持过量的水蒸气, 使混合气水碳比在 3~3.5。

表 2 蒸汽重整输出气体组分(干燥气体)

Table 2 Output gas components of steam reforming (dry) %

元素	比重
H_2	76
CO	9
CO_2	15
$\text{NH}_3, \text{CH}_4, \text{SO}_x$	少许

2.2 部件与热区环境热交换

将空气换热器、燃气换热器和燃烧重整器置于一个BoP热区内进行整体保温绝热,则热区内部件与环境之间存在热交换。考虑到系统工作温度主要在800℃左右,环境与部件间没有气体流通,结合Zezhi Zeng等^[22]对SOFC电堆温度内部热传递情况研究,认为部件和环境间的热交换以辐射换热为主,表示为

$$q_h = k_{\text{env}} \delta A_b (T_{\text{env}}^4 - \bar{T}_h^4),$$

$$q_l = k_{\text{env}} \delta A_b (T_{\text{env}}^4 - \bar{T}_l^4)$$

式中: A_b 为部件与环境之间热辐射的等效面积; $\bar{T}_h, \bar{T}_l$ 分别为部件热、冷流体的平均温度; k_{env} 为部件与环境换热的修正因子,也称系统发射率,与参与辐射物体的性质、物体的形状等相关; $\delta = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 为黑体辐射常数。

系统稳态下,热区环境温度保持不变,则环境与部件间的总体换热量为0,满足:

$$q_{\text{ah,h}} + q_{\text{ah,l}} + q_{\text{fh,h}} + q_{\text{fh,l}} + q_{\text{ato,h}} + q_{\text{ato,l}} = 0$$

依此可求得热区环境温度为

$$T_{\text{env}} = \left(\frac{k_{\text{env}}^{\text{ah}} A_b^{\text{ah}} \Delta T_{\text{ah}}' + k_{\text{env}}^{\text{fh}} A_b^{\text{fh}} \Delta T_{\text{fh}}' + k_{\text{env}}^{\text{ato}} A_b^{\text{ato}} \Delta T_{\text{ato}}'}{2(k_{\text{env}}^{\text{ah}} A_b^{\text{ah}} + k_{\text{env}}^{\text{fh}} A_b^{\text{fh}} + k_{\text{env}}^{\text{ato}} A_b^{\text{ato}})} \right)^{1/4}$$

式中: 系数 $\Delta T_{\text{ah}}', \Delta T_{\text{fh}}', \Delta T_{\text{ato}}'$ 表示为

$$\Delta T_{\text{ah}}' = T_{\text{ah,h}}^4 + T_{\text{ah,l}}^4, \Delta T_{\text{fh}}' = T_{\text{fh,h}}^4 + T_{\text{fh,l}}^4$$

$$\Delta T_{\text{ato}}' = T_{\text{ato,h}}^4 + T_{\text{ato,l}}^4$$

2.3 反馈控制算法设计

考虑到系统的耦合度较高,对系统进气燃料、空气和水的单步调控较难实现SOFC系统稳定运行,本文设计简单的反馈控制算法,对系统启动空气、启动燃气、电堆空气、电堆燃气及供水量等进行调控,满足预设的系统部件温度和电堆电流输出。控制器的输入 y 、输出 u 和控制目标 y_d 如式(6)所示:

$$y = [i, T_{\text{ato,wq}}, T_{\text{st,c,out}}]^T$$

$$u = [u_1, \dots, u_5] = [F_{\text{qd,air}}, F_{\text{qd,CH}_4}, F_{\text{st,air}}, F_{\text{st,CH}_4}, F_w]^T$$

$$y_d = [i_d, T_{\text{ato,wq}}^d, T_{\text{st,c,out}}^d]^T$$

(6)

结合式(6),可得误差为

$$e = y - y_d = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i - i_d \\ T_{\text{ato,wq}} - T_{\text{ato,wq}}^d \\ T_{\text{st,c,out}} - T_{\text{st,c,out}}^d \end{bmatrix}$$

同时,根据系统原理分析,控制器输出量有约束条件为

$$u_1 \geq r_{\text{af,min}} F_{\text{qd,CH}_4}, u_4 \geq \frac{\lambda N}{6F\eta_{\text{SR}}} i,$$

$$u_5 \geq r_{\text{vc,min}} F_{\text{st,CH}_4}$$

式中: η_{SR} 为甲烷转化率,表示反应的甲烷量和总甲烷量的比值,在0~1之间;最小空燃比 $r_{\text{af,min}}$ 一般取20,最小水碳比 $r_{\text{vc,min}}$ 一般取3。 λ 为阳极燃料过量比, $\lambda \geq 1$ 。

结合系统运行情况,为了保障电堆电流输出,设计控制器输出变化量 $\dot{u}_4, \dot{u}_5$ 为

$$\dot{u}_4 = -k_{\text{st,CH}_4} \frac{\lambda N}{6F\eta_{\text{SR}}} e_1$$

$$\dot{u}_5 = r_{\text{vc}} \dot{u}_4$$

进一步地,通过调节电堆空气流量来控制电堆阴极出口温度,考虑温度变化在临近目标附近应减速控制,设计控制器输出变化量 $\dot{u}_3$ 为

$$\dot{u}_3 = -k_{\text{st,air}} e_3 |e_3|$$

最后,通过调整启动燃料和启动空气对重整器燃烧腔出口控温。通过误差的幂次方设置,在启动空气流可调节范围内,优先通过调整风机流量控温设计,保障系统在温度差异较大时快速跟踪,在温度接近目标时缓慢靠近。基于上述思路,设计控制器输出变化量 $\dot{u}_1, \dot{u}_2$ 为

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{cases} [k_{\text{qd,air}} e_2 |e_2|^3, 0]^T, & (e_2 \geq 0 \& u_1 < r_{\text{af,max}} u_2) \\ [k_{\text{qd,air}} e_2 |e_2|, 0]^T, & (e_2 < 0 \& u_1 > r_{\text{af,min}} u_2) \\ [0, -k_{\text{qd,CH}_4} e_2 |e_2|^3]^T, & (e_2 \geq 0 \& u_1 \geq r_{\text{af,max}} u_2) \\ [0, -k_{\text{qd,CH}_4} e_2 |e_2|]^T, & (e_2 < 0 \& u_1 \leq r_{\text{af,min}} u_2) \end{cases}$$

3 建模实例与仿真

通过Matlab/Simulink工具进行建模和仿真分析,建立如图2所示的6个零部件模块。Simulink模型如图3所示。

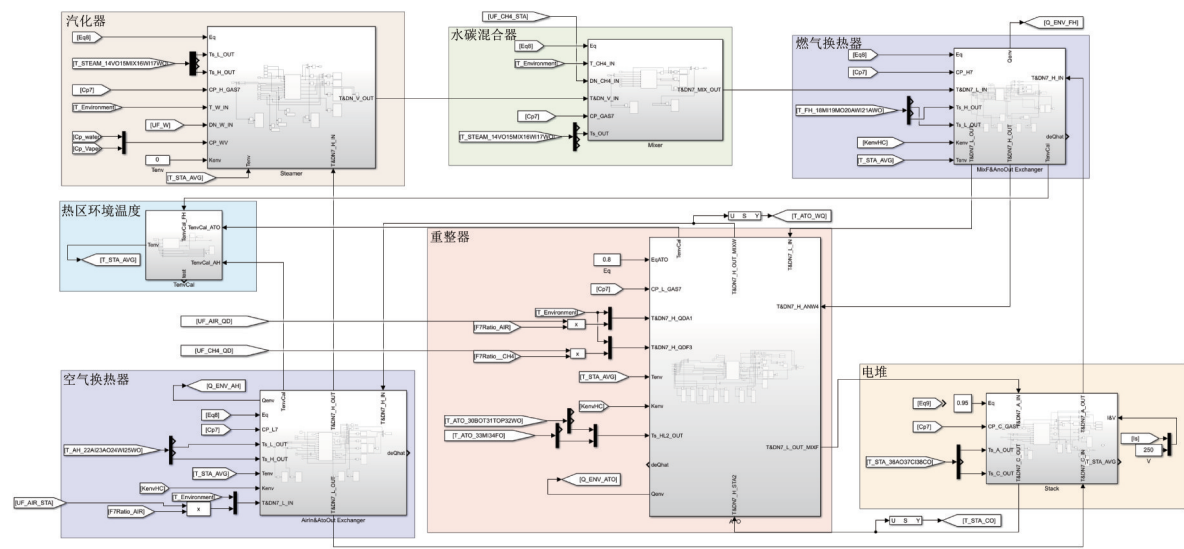


图3 高温 SOFC 系统 Simulink 模型图
Fig. 3 Simulink model of SOFC system

通过实例说明文章模型的可行性及仿真结果。以 25 kW SOFC 发电系统为原型, 模型主要参数如表 3 所示。

表 3 模型主要参数 Table 3 Main model parameters		
序号	主要参数	量值
1	电堆电池片数/片	300
2	周边环境温度/°C	25.00
3	环境换热效率 k_{env}	0.20
4	汽化潜热温度/°C	108.74
5	汽化潜热焓值/ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	2 311.50
6	重整器等效面积 A_b/m^2	2.5
7	重整反应效率 η_{SR}	0.68
8	换热器换热效率 ε	0.80
9	燃气换热器等效面积 A_b/m^2	1.0
10	空气换热器等效面积 A_b/m^2	1.8

3.1 控制器效果分析

设置重整器燃烧腔出口目标温度 $T_{ato,wq}^d=850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电堆阴极出口气体目标温度 $T_{st,c,out}^d=700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及目标电流曲线, 开展基于控制器的自启动模型仿真, 仿真结果如图4~6所示, 虚线均为目标曲线。

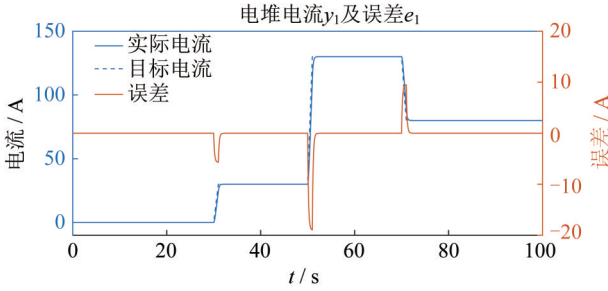


图4 电堆实际输出电流、目标值及误差
Fig. 4 Stack output current, target and error

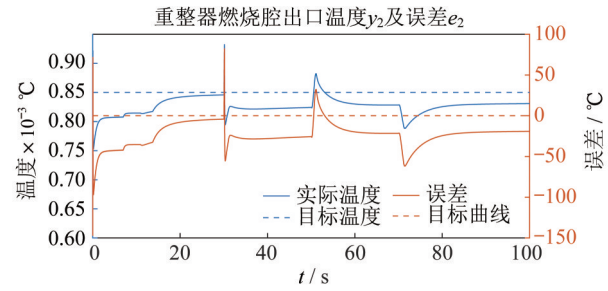


图5 重整器燃烧腔出口实际温度、目标值及二者误差
Fig. 5 Reformer combustion chamber outlet temperature, target and error

图4为电堆实际输出电流、目标电流和二者误差图, 易得系统可以在较短时间实现输出需求电流。图5为重整器燃烧腔出口设定温度、实际温度和二者误差图, 易得系统可以在较短时间实现输出需求温度。

者误差图。可见0~30 s状态下,系统实现自启动升温,重整器燃烧腔出口温度接近850 °C;电堆输出电流在30 s, 50 s和70 s左右发生变化,对重整器燃烧腔温度影响较大,但系统可在较短时间内恢复到接近850 °C的状态,温度误差在 ± 30 °C内。对误差原因开展分析,认为在不同电堆输出能量和进气流量比值约束下,系统重整器的稳定温度是存在限制的。所设定的重整器850 °C目标温度可能存在不完全合理的情况;同时,简单的反馈控制器较难体现重整器和电堆之间的复杂机理,也因此较难实现重整器温度的精确控制。图6为电堆阴极目标温度、实际温度和二者误差。与图5类似,在0~30 s可见控制器实现系统自启动过程,阴极出口温度接近700 °C;在电流需求变化下,阴极出口温度快速变化,但控制器作用下,温度可以迅速回调,温度接近稳定后,与设定温度差距大约在 ± 40 °C内。

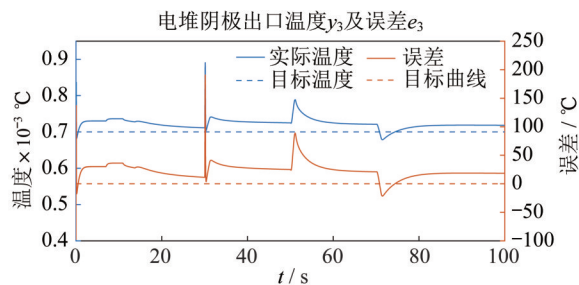


图6 电堆阴极出口温度、目标值及误差
Fig. 6 Stack cathode outlet temperature, target and error

综上,所设计的反馈控制器在可调范围内能初步实现输出电流的无差跟踪,并基本实现温度调控需求,总体基本实现设计目标。

3.2 热区整体保温后器件温差分析

针对控制器下的系统稳定运行状态开展BoP热区内多部件间的传热和温度状态分析,分为多部件整体保温绝热、单独保温绝热两种情况对比,具体如图7~9所示。

由图7可见,热区环境温度在720 °C左右,与整体保温的重整管出口温度相近。因为重整器整体温度高于环境温度,在热区整体保温的情况下,

重整器向环境放热,重整器燃烧腔出口温度由单独保温的近850 °C降至整体保温下的830 °C左右;而重整管出口温度因与环境温度相近,温度差异相对较小,温差大约在10 °C左右。

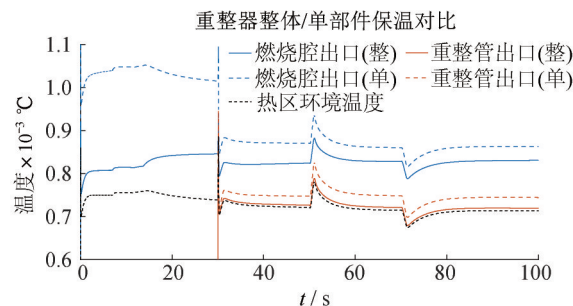


图7 燃烧重整器燃烧腔出口温度、重整管出口在单独保温或整体保温下的温度对比

Fig. 7 Outlet temperature comparison under integral and separate insulation in combustion chamber and reforming tube of the reformer

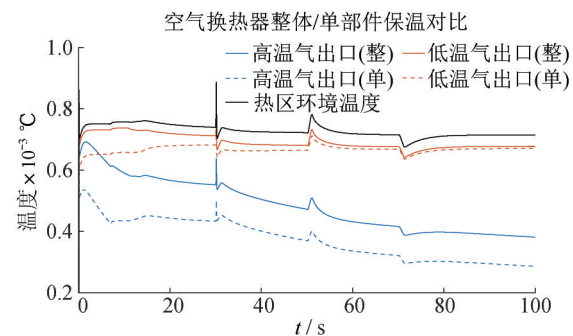


图8 空气换热器高低温气体出口在单独保温或整体保温下的温度对比

Fig. 8 Outlet temperature comparison under integral and separate insulation in higher and lower gas of air exchanger

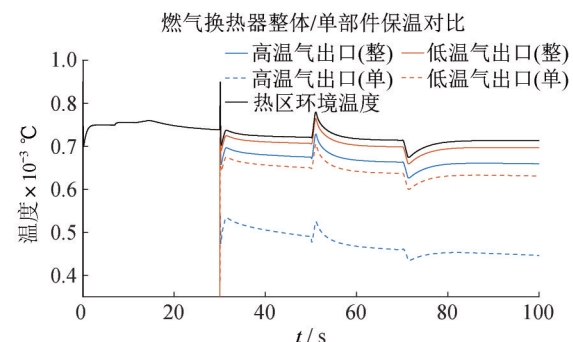


图9 燃气换热器高低温气体出口在单独保温或整体保温下的温度对比

Fig. 9 Outlet temperature comparison under integral and separate insulation in higher and lower gas of fuel exchanger

由图 8~9 可见, 因热区环境温度基本大于换热器气体温度, 空气换热器高低温气体在整体保温的情况下, 温度比单独保温上浮 15~25 °C。燃气换热器上浮幅度更大, 在 70~100 °C 左右, 在与环境温差较大的情况下, 甚至可能超过 100 °C。

综上, 将 BoP 热区内多个零部件进行整体保温绝热, 部件温度与其单独绝热下的温差可达数十摄氏度。热区环境在其中起到温度均衡的作用, 可以降低系统内高温部件和低温部件的温度差值, 有利于减缓材料因高温导致的寿命衰减, 保障系统的长期运行; 同时, 整体保温可以进一步拉高换热器出口的热空气/燃料气温度, 有助于系统进气的余热利用。但整体保温绝热也会给系统设计带来更多的不确定性, 温度均衡可能导致系统启动/停止的持续时间延长, 重整器温度降低可能导致重整反应处于非最佳工作状态等, 这对于系统控制器设计也提出了更高的要求。

4 结论

本文以高温 SOFC 系统特性为基础, 结合高温系统有限的可测量量(流量、温度、电流电压等)结合 ε -NTU 法开展高温 SOFC 系统集总建模和仿真, 该模拟仿真具有如下特点:

(1) 通过引入 BoP 热区内换热器、重整器等多个零部件与热区环境的热交换, 实现了 BoP 热区内多部件间的传热和温度状态的定量分析;

(2) 在模拟仿真过程中, 考虑 SOFC 系统多物理域耦合的复杂运行状态, 设计了简单的反馈控制器来实现系统的自启动和稳定运行仿真;

(3) 利用 ε -NTU 法、高温系统的温度数据和低温系统的流量、气压、电流、电压数据, 数据来源在实际系统中具有可获得性, 便于后续与实际系统进行拟合和还原。

仿真结果表明, BoP 热区整体保温绝热下, 热区内零部件间的换热以热区整体均衡为主要方

向, 会有利于尾气余热对进气气体的进一步加热, 也可适当降低高温设备如重整器的上限环境, 保障系统更长期稳定运行; 但整体保温可能导致系统启动/停机时间变长, 重整器温度降低也可能导致重整反应效率降低, 因此采用系统整体保温的方案情况下, 温度和流量控制会要求更高。

考虑到实际系统运行情况会更加复杂, 模型后续优化方向包括实际系统运行数据与模型的拟合匹配、不同系统结构下的零部件间传热及热损分析、结合系统经济性的结构和设计选型等。

参考文献:

- [1] 吴傲寒. 家用 SOFC 热电联供系统的动态建模与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Wu Aohan. Dynamic Modeling and Analysis of Domestic SOFC-CHP Systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [2] 王雅, 王傲. 中高温固体氧化物燃料电池发电系统发展现状及展望[J]. 船电技术, 2018, 38(7): 1-5.
Wang Ya, Wang Ao. Current Status and Perspective of Intermediate-temperature Solid Oxide Fuel Cell[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2018, 38(7): 1-5.
- [3] 宋少辉. 固体氧化物燃料电池建模与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Song Shaohui. Research on Modeling and Control Strategy of Solid Oxide Fuel Cell[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [4] Takino K, Tachikawa Y, Mori K, et al. Simulation of SOFC Performance using a Modified Exchange Current Density for Pre-reformed Methane-based Fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2020, 45(11): 6912-6925.
- [5] Song Shaohui, Xiong Xingyu, Wu Xin, et al. Modeling the SOFC by BP Neural Network Algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2021, 46(38): 20065-20077.
- [6] Schluckner C, Subotić V, Lawlor V, et al. Three-Dimensional Numerical and Experimental Investigation of an Industrial-Sized SOFC Fueled by Diesel Reformate-Part I: Creation of a Base Model for Further Carbon Deposition Modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2014, 39(33): 19102-19118.
- [7] 李琛. 固体氧化物燃料电池传热传质数值分析[D]. 长

- 沙: 国防科学技术大学, 2008.
- Li Chen. A Numerical Analysis of Heat-mass Transfer for Solid Oxide Fuel Cells[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2008.
- [8] 张琳, 刘润华, 周伟彬, 等. SOFC电堆降阶建模研究及其仿真测试[J]. 电源技术, 2021, 45(4): 470-473.
- Zhang Lin, Liu Runhua, Zhou Weibin, et al. Reduced-Order Modeling of SOFC Stack and Its Simulation Test [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(4): 470-473.
- [9] 苏煊埔. 固体氧化物燃料电池发电系统建模与空气流量控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- Su Xuanpu. Modeling and Air Flow Control of Solid Oxide Fuel Cell Power Generation System[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [10] 谭勋琼, 吴政球, 周野, 等. 固体氧化物燃料电池的集总建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 104-110.
- Tan Xunqiong, Wu Zhengqiu, Zhou Ye, et al. Solid Oxide Fuel Cell Lumped Modeling and Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 104-110.
- [11] 吴肖龙. 固体氧化物燃料电池系统的性能评估与健康管控研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- Wu Xiaolong. Research of Performance Evaluation, Health Management and Control for SOFC System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [12] 康鑫. 高温固体氧化物燃料电池建模与控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- Kang Xin. Modeling and Control of High Temperature Solid Oxide Fuel Cells[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [13] 张兴梅, 赵玺灵, 苗艳姝, 等. 天然气预重整固体氧化物燃料电池性能模拟[J]. 煤气与热力, 2008(3): 35-39.
- Zhang Xingmei, Zhao Xiling, Miao Yanshu, et al. Performance Simulation of Natural Gas Pre-reforming Solid Oxide Fuel Cell[J]. GAS&HEAT, 2008(3): 35-39.
- [14] 闫东, 梁前超. 基于simulink的SOFC-MGT联合发电系统建模与仿真[J]. 装备制造技术, 2017(7): 175-178.
- Yan Dong, Liang Qianchao. Modeling and Simulation for SOFC-MGT Combined Power Generation System on the Basis of Simulink[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(7): 175-178.
- [15] Koo Taehyung, Kim Young Sang, Lee Young Duk, et al. Exergetic Evaluation of Operation Results of 5-kW-class SOFC-HCCI Engine Hybrid Power Generation System [J]. Applied Energy (S0306-2619), 2021, 295: 1-15.
- [16] Emadi Mohammad Ali, Chitgar Nazanin, Oyewunmi Oyeniyi A, et al. Working-Fluid Selection and Thermoeconomic Optimisation of a Combined Cycle Cogeneration Dual-Loop Organic Rankine Cycle (ORC) System for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Waste-heat Recovery[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2020, 261: 1-20.
- [17] 杨博然, 陈志光, 秦朝葵. 固体氧化物燃料电池(SOFC)外围热管理系统研究进展[J]. 城市燃气, 2019(3): 4-10.
- Yang Boran, Chen Zhiguang, Qin Chaokui. Progress of SOFC Balance of Plant(BOP)[J]. Gas Technology, 2019 (3): 4-10.
- [18] 阳开应. LMTD法和 ϵ -NTU法在余热锅炉传热计算中的对比应用及整体迭代优化[J]. 锅炉技术, 2018, 49(4): 20-26, 56.
- Yang Kaiying. Comparison of LMTD and ϵ -NTU in Heat Transfer Calculation of Heat Recovery Steam Generator and Its Integrated Iteration Optimization[J]. Boiler Technology, 2018, 49(4): 20-26, 56.
- [19] Amiri S, Hayes R E, Sarkar P. A Thermodynamically Consistent Framework for Non-Isothermal Modelling of Local Heat Generation and Electromotive Force in SOFC Single Electrodes[J]. Can J Chem Eng (S1939-019X), 2020, 98: 525-535.
- [20] Kosa E. Dynamic and Steady-state Analysis of Steam Reforming of Methane to Hydrogen in a Reformer for Electric-powered Unmanned Aerial Vehicle[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies (S1748-1325), 2020, 16(2), 384-392.
- [21] Cha SW, O'Hayre R, Colella W, et al. Fuel Cell Fundamentals[M]. Hoboken New Jersey, USA: Springer US, 2009: 393-422.
- [22] Zeng Zezhi, Qian Yuping, Zhang Yangjun, et al. A Review of Heat Transfer and Thermal Management Methods for Temperature Gradient Reduction in Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Stacks[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2020, 280: 1-19.
- [23] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 351-393.
- Yang Shiming, Tao Wenshuan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 351-393.