

# 固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合动力系统建模仿真研究进展

连琰珂, 明平文, 蔡黎明

(同济大学 汽车学院, 上海 201800)

**摘要:** 固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)工作温度高, 阳极可发生燃料内重整反应, 具有较高的燃料灵活性, 同时可与燃气轮机(Gas Turbine, GT)构成固体氧化物燃料电池/燃气轮机(SOFC/GT)混合动力系统进一步提高系统效率。SOFC/GT混合动力系统一般分为底层和顶层循环2种, 考虑到SOFC/GT示范性工程有限且建造成本高, 一般采用数学建模仿真方法开展SOFC/GT研究。与单独SOFC或GT模型不同, 常采用热力学建模仿真对SOFC/GT系统性能进行分析优化。介绍了SOFC/GT混合动力系统常用热力学模型, 并对目前SOFC/GT混合动力系统常见稳态和动态热力学建模工作展开综述, 考虑到现阶段SOFC/GT混合动力系统多采用商业化软件(Aspen Plus、COMSOL、gPROMs等)建模, 建模功能有限、不易拓展, 后续工作可基于Matlab、Python等软件进行开源代码的编程; 现阶段主要围绕系统级集总模型开展分析, 无法准确描述燃料电池的局部特性, 后续工作可在SOFC/GT建模中引入一维甚至更高维度的SOFC模型进一步提高建模精度。

**关键词:** 固体氧化物燃料电池; 燃气轮机; 混合动力系统; 建模仿真

中图分类号: TQ152; TK14; TK91 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2023)03-0026-14

## Recent research progresses of mathematical modeling and simulation of solid oxide fuel cell/gas turbine (SOFC/GT) hybrid systems

LIAN Yanke, MING Pingwen, CAI Liming

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Anode of solid oxide fuel cell (SOFC) can take internally reforming reaction due to the high operating temperature, which provides high fuel flexibility. The SOFC can also be combined with gas turbine (GT) to form a hybrid power system to further improve performance efficiency. The SOFC/GT hybrid system can be operated with bottom or top cycle. Considering the limited demonstration projects and high construction costs of SOFC/GT, mathematical modeling and simulation methods are generally used to carry out SOFC/GT related research work. Different from separate SOFC or GT models, thermodynamic modeling and simulation studies are often conducted to analyze and optimize the performance of SOFC/GT systems. In this paper, the commonly applied thermodynamic modeling approaches of SOFC/GT hybrid system were first introduced and summarized. Following that, the common steady state and dynamic thermodynamic modeling work for SOFC/GT hybrid systems at present were reviewed. Considering that commercial software (Aspen Plus, COMSOL, gPROMs) is commonly used for modeling SOFC/GT hybrid systems at this stage, and the modeling functions are limited and not easy to expand, open source code programming can be performed based on Matlab, Python and other software. At the same time, the analysis mainly focuses on SOFC/GT lumped models, which cannot accurately describe the local characteristics of fuel cells. One-dimensional or even higher dimensional SOFC models can be introduced into SOFC/GT modeling to further improve modeling accuracy.

**Key words:** solid oxide fuel cell; gas turbine; hybrid system; modeling and simulation

收稿日期: 2023-02-15; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.H23021501

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52276133)

作者简介: 连琰珂(1999—), 女, 河南长垣人, 博士研究生。E-mail: 2211250@tongji.edu.cn

通讯作者: 蔡黎明(1985—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: lcai@tongji.edu.cn

引用格式: 连琰珂, 明平文, 蔡黎明. 固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合动力系统建模仿真研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(3): 26-39.

LIAN Yanke, MING Pingwen, CAI Liming. Recent research progresses of mathematical modeling and simulation of solid oxide fuel cell/gas turbine (SOFC/GT) hybrid systems[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(3): 26-39.



移动阅读

## 0 引言

国家发展改革委在《“十四五”可再生能源发展规划》中提出,实现能源低碳化、清洁化、高效化利用是现阶段主要发展目标<sup>[1]</sup>。分布式发电具有投资少、安装地点灵活、建设周期短、能源利用率高及环境污染小等优势<sup>[2]</sup>,同时可结合余热回收利用进一步提高能源利用效率<sup>[3]</sup>。常见的分布式发电装置主要有微型燃气轮机(Micro Gas Turbine, MGT)、内燃机、燃料电池(Fuel Cell, FC)等。其中,燃料电池是一种直接将燃料中化学能转化为电能的发电装置,由于发电效率不受卡诺循环效率限制,FC与传统热机相比能量利用效率可提高10%~20%,且污染物排放明显低于传统火力发电<sup>[4]</sup>,因此燃料电池分布式发电技术是适应未来能源低碳化、清洁化、高效化发展趋势的重要方向。根据电解质不同,燃料电池可分为质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)、固体氧化物燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)、磷酸燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)和碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC) 5类。SOFC、MCFC、AFC反应产物在阳极生成,PAFC、PEMFC反应产物在阴极生成。同时,PEMFC、PAFC、AFC均需使用H<sub>2</sub>作为燃料,如果使用碳氢化合物如CH<sub>4</sub>、乙醇等作为燃料则需在系统中额外引入外部燃料重整器,不仅增加系统复杂性和成本,还会降低整体效率<sup>[5]</sup>。与之相比,SOFC、MCFC作为高温燃料电池,电池内部可发生燃料重整,可直接使用碳氢化合物作为燃料,燃料灵活性更高。其中,SOFC可使用H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>等作为燃料,主要用于小型分布式发电站<sup>[6]</sup>。考虑到SOFC尾气温度高,具有高品位废热,因此可与采用有机朗肯循环(ORC)<sup>[7]</sup>、布雷顿循环<sup>[8-9]</sup>或底层蒸汽循环<sup>[10]</sup>等热机耦合构建热电联产(CHP)装置,用来额外发电或供热。研究表明,SOFC混合发电系统最大效率可达90%<sup>[11]</sup>。

常见热机有燃气轮机、蒸汽机等。燃气轮机是21世纪动力设备的核心<sup>[12]</sup>。SOFC/GT混合动力系统中,GT可回收利用SOFC尾气中的废热从而提高系统效率。关于SOFC/GT混合动力系统研究较多,考虑到SOFC/GT测试平台的建造成本,数学建模仿真为SOFC/GT混合系统提供了一种经济高效的方法。学者已基于gPROMs、Aspen Plus、Matlab/Simulink等商业化软件,针对SOFC/GT系统开展了前瞻性热力学建模和仿真分析工作,从而优化混合

系统性能。但目前仍局限于利用已有商业化软件对SOFC/GT系统开展模块化建模工作,缺少相关开源代码,而基于商业化软件搭建的模型功能有限、针对性受限。目前亟需针对SOFC/GT系统建模和仿真技术开展进一步研究。

针对SOFC/GT混合动力系统的建模与仿真研究,笔者介绍了SOFC、GT基本结构、工作原理与数学建模研究现状;论述了SOFC/GT混合发电系统布置方式及SOFC/GT数学仿真模型;综述了现阶段SOFC/GT相关研究工作、SOFC/GT混合发电系统示范工程与相关建模仿真工作,其中SOFC/GT混合动力系统建模仿真工作按照SOFC/GT建模方法展开;最后对未来SOFC/GT混合动力系统建模仿真工作发展方向进行展望。

## 1 固体氧化物燃料电池及燃气轮机

### 1.1 固体氧化物燃料电池简介

#### 1.1.1 SOFC基本结构及工作原理

SOFC作为高温燃料电池,主要部件为阳极、阴极、电解质构成的膜电极结构(Membrane-electrode Assembly, MEA),工作原理<sup>[13]</sup>如图1所示。其中,O<sup>2-</sup>为电化学反应中的离子导体,燃料(H<sub>2</sub>、CO)在阳极发生氧化反应并向外电路释放电子,氧化剂(O<sub>2</sub>)在阴极接受来自外部电路的电子并进行还原反应<sup>[14]</sup>。

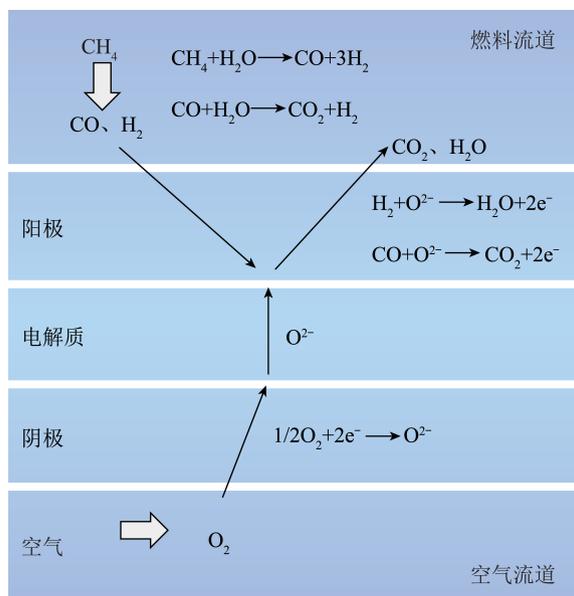


图1 SOFC工作原理<sup>[13]</sup>

Fig.1 Schematic principle of SOFC<sup>[13]</sup>

根据物理结构不同,SOFC可分为管式(TSOFC)和平板式(PSOFC)2种<sup>[15]</sup>。Westinghouse公司于1980年成功研制出具有高耐久性的TSOFC,

不存在高温密封问题,但输出功率较低且成本较高,与之相比 PSOFC 成本相对低廉,且输出功率密度和性能较好,是目前主流商用化 SOFC 类型。

由于 SOFC 工作温度高,阳极可发生燃料内重整反应,具有较高的燃料灵活性,CH<sub>4</sub><sup>[16-17]</sup>、生物燃料<sup>[18]</sup>等烃类燃料均可经燃料重整反应后作为 SOFC 反应物<sup>[19]</sup>,Bloom Energy 公司推出的 Bloom Box 固体氧化物燃料电池微型电站几乎可以使用所有烃类燃料(如乙醇、生物机油、沼气、天然气)发电,且在使用石油、煤气层等化石能源发电时,碳排量仅为传统火电厂的 40%<sup>[20]</sup>。由于与 H<sub>2</sub>相比,CH<sub>4</sub>价格低廉且更易管理,SOFC/GT 混合系统常采用 CH<sub>4</sub>作为燃料<sup>[15]</sup>。CH<sub>4</sub>作为燃料的 SOFC/GT 系统首先需进行燃料重整,根据重整反应发生位置不同,SOFC 系统可分为内部燃料重整(Internal Reforming, IR)和引入外部燃料重整器 2 种。IRSOFC 系统由于不需引入额外的重整器,成本低,且燃料重整反应作为吸热过程可对 SOFC 电堆进行冷却,因此更常用<sup>[21-24]</sup>,较多 SOFC/GT 混合动力系统建模仿真研究工作涉及 SOFC 内部重整过程建模<sup>[25-29]</sup>。在 CH<sub>4</sub>作为燃料的 IRSOFC 系统中,阳极除发生 H<sub>2</sub>电化学反应外,还发生 CH<sub>4</sub>蒸汽重整反应(Methane Steam Reforming Reaction, MSRR)和水煤气变换反应(Water Gas Shift Reaction, WGSR),电池内部发生的反应方程见表 1。

表 1 CH<sub>4</sub>作为燃料的 SOFC 系统内部反应方程式<sup>[17]</sup>

Table 1 Internal reaction equation of SOFC system with CH<sub>4</sub> as fuel<sup>[17]</sup>

SOFC 内部反应	反应方程式
MSRR	(I) CH <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O ⇌ CO+3H <sub>2</sub>
WGSR	(II) CO+H <sub>2</sub> O ⇌ CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>
氧化反应	(III) H <sub>2</sub> +O <sup>2-</sup> ⇌ H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup>
还原反应	(VI) 1/2O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> → O <sup>2-</sup>

表 2 SOFC 建模举例

Table 2 Examples of SOFC models

模型维度(CFD)	燃料电池类型 (板式/管式、瞬态/稳态)	燃料种类	是否考虑燃料重整	文献
3D(ANSYS)	管式稳态模型	CH <sub>4</sub>	是	[26]
3D(STAR-CD)	板式稳态模型	CO/H <sub>2</sub>	否	[30]
3D(COMSOL)	板式稳态模型	沼气(CH <sub>4</sub> /CO/H <sub>2</sub> )	是	[27]
3D(STAR-CD)	板式稳态模型	CH <sub>4</sub>	是	[25]
2D(FLUENT)	稳态模型	CH <sub>4</sub>	是	[28]
2D(COMSOL)	管式稳态模型	H <sub>2</sub>	否	[31]
2D(FLUENT)	板式稳态模型	CH <sub>4</sub>	是	[32]
1D(PEN)	纽扣电池瞬态模型	CH <sub>4</sub>	是	[33]

### 1.1.2 SOFC 建模工作现状

SOFC 建模工作主要围绕多孔电极中的气体流动、传热、多组分传质、化学和电化学反应展开,并对电池极化曲线(V-I 曲线)、稳态运行状况、瞬态行为进行分析。按照建模对象不同,SOFC 模型可分为 SOFC 电极机理模型、SOFC 单电池模型、SOFC 电堆模型、系统级 SOFC 模型等<sup>[14]</sup>。

近年来,计算机技术进步使 SOFC 仿真可实现从量子(亚原子)到原子再到连续尺度的多尺度建模<sup>[30]</sup>,建模方法分为微观尺度方法(如密度泛函理论、分子动力学、量子化学等)、中尺度方法(玻尔兹曼法、格点法、蒙特卡罗法)、宏观尺度方法(如有限元法、有限差分法、有限体积法)<sup>[14]</sup>。

对于宏观 SOFC 建模而言,按照建模维度划分可将 SOFC 分为零维(0D)、一维(1D)、二维(2D)、三维(3D)<sup>[31]</sup>,按照建模维度,列举了一些已有的 SOFC 仿真模型<sup>[25-28,30-33]</sup>(表 2)。以 3D 建模为例,SOFC 三维模型主要利用已有商业 CFD 软件(如 Fluent、COMSOL、CFD-ACE+、gPROMs、STAR-CD<sup>[32]</sup>等)对燃料电池全空间长度进行建模,进而实现 CFD 仿真计算。如 BESSETTE 等<sup>[26]</sup>较早开展 TSOFC 三维建模工作,对 SOFC 建立单管稳态三维电学、热力学数学模型;ZHU 等<sup>[33]</sup>利用 STAR-CD 软件开展 PSOFC 电堆稳态建模,研究了 SOFC 电堆中燃料浓度、温度、局部电流浓度等参数的分布。RAMÍREZ-MINGUELA 等<sup>[27]</sup>对 SOFC 采用 COMSOL 软件建立了三维 CFD 模型,分析了 H<sub>2</sub>、CO 的电化学反应,燃料重整反应及水煤气变换反应对 SOFC 系统熵产率和性能的影响,突出燃料电池内部发生的主要不可逆性。

高维度模型(如 2D、3D 模型)需要使用 CFD 软件,并基于 SOFC 中详细的传热过程及质量传输方程展开计算。高维度模型的优点是可用于捕捉局部

物质浓度、局部电流密度、SOFC 热梯度分布等重要参数<sup>[13,31]</sup>,但计算量较大,成本较高,因此 SOFC/GT 混合动力系统多采用 SOFC 0D、1D 模型进行热力学建模。0D 模型是将 SOFC 单电池或电堆视为集总模型,即不考虑相关参数(物质浓度、电流密度、电压等)沿空间坐标的变化;1D 模型仅考虑相关参数沿主要维度的参数分布;因此 0D、1D CFD 模型计算量较小,适合于 SOFC 系统性能优化,尤其是控制方面的研究。

同时,不同维度 SOFC 模型按照是否考虑各参数随时间变化分为稳态模型及瞬态模型 2 种。在 SOFC/GT 混合动力系统中引入 SOFC 动态模型工作量大且计算成本较高,因此现有模型中 SOFC 稳态模型较多<sup>[13]</sup>。相关研究常基于 Matlab、Aspen Plus 等软件建立系统级 SOFC 稳态模型,即不考虑温度、物质浓度等参数随时间变化。因此第 3.2 节主要基于 SOFC 的 0D 稳态模型对 SOFC/GT 混合动力系统数学模型展开介绍。

## 1.2 燃气轮机简介

### 1.2.1 燃气轮机基本结构与工作原理

燃气轮机是目前技术较成熟的分布式发电装置,系统循环以布雷顿循环为基础,包括压缩机、燃烧室、透平、回热器、发电机等部件<sup>[34]</sup>,常见单轴式燃气轮机结构如图 2 所示。空气经压缩机压缩后送至燃烧室燃烧,废气送至涡轮膨胀驱动发电机和压缩机,热交换器可预热进入燃烧室的气体<sup>[35]</sup>。换热器部件有助于进一步提高燃气轮机效率,实现节能减排。常见燃料包括天然气、汽油、柴油等。

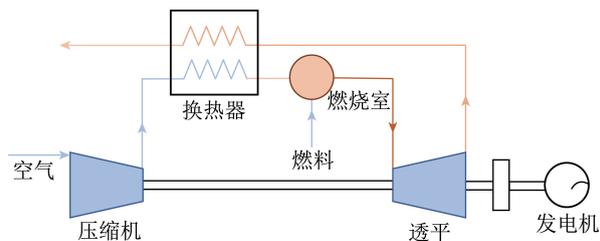


图 2 单轴式燃气轮机(含换热器)

Fig.2 Single-shaft gas turbine (including heat exchanger)

燃气轮机系统可分为重型燃气轮机发电系统、小型燃气轮机发电系统、微型燃气轮机发电系统。其中,MGT 常见功率为 25~300 kW,具有结构紧凑、维修成本低、振动小等优点;换热器部件有助于进一步提高 MGT 效率,实现节能减排。基于以上特点,MGT 应用范围广,适用于分布式发电、CHP 系统和 FC/MGT 联合发电系统。

### 1.2.2 燃气轮机建模现状

燃气轮机整体性能主要取决于压缩机、燃烧室、

透平等重要部件<sup>[36]</sup>,因此建模工作主要围绕 GT 系统中的压缩机、透平、燃烧室等展开。常见的燃气轮机建模仿真按照侧重点不同分为系统级建模与针对某一部件开展多维 CFD 仿真。

燃气轮机系统级建模包括机理建模与黑箱建模 2 种,黑箱建模是基于试验数据库建立,不需要机理,建模更常用<sup>[37]</sup>。机理建模是基于系统机理得出的数学模型,如林向雨<sup>[37]</sup>基于 PAnysimu 仿真平台采用模块化机理建模方法建立了 SGT5-4000F 型重型燃气轮机的仿真模型。张元哲等<sup>[38]</sup>在 Matlab/Simulink 中基于能量守恒、质量守恒及热力学分析采用模块化建模方法建立了单轴重型燃气轮机的数学模型。目前针对燃气轮机系统级的研究多从热动力学角度建立数学模型,一般采用状态方程描述<sup>[39]</sup>。考虑到系统级 GT 建模中未表征燃烧室部件的燃烧行为,相关研究针对燃烧室部件建立 CFD 模型进行分析。如 CHIARIELLO 等<sup>[40]</sup>使用商业软件 ANSYS 对 GT 系统燃烧室部件在不同负载下的热力学和流体动力学行为进行三维 CFD 仿真分析。GOBBATO 等<sup>[41]</sup>对 H<sub>2</sub>作为燃料的单轴燃气轮机系统燃烧室部件内的空气-氢反应流动进行 CFD 分析,并评估了所提出的 CFD 模型预测燃烧室内部温度场的能力。考虑到 CFD 模型计算量大等问题,一般不适用于 SOFC/GT 混合动力系统的仿真。

在 GT 系统级建模仿真中,根据研究需要可分为稳态模型和动态模型 2 种,等熵效率模型<sup>[35]</sup>是常见稳态模型,性能曲线拟合模型<sup>[42]</sup>是常见动态模型。

压缩机、透平作为燃气轮机系统中关键部件,压缩机、透平部件的稳态模型基于等熵过程热力学公式建立<sup>[14]</sup>,考虑到压缩机和透平实际工作过程并非等熵,因此常引入等熵效率、多变量效率表示循环过程的不可逆性和热损失,虽然多变量效率模型相比等熵效率模型更精确,但由于计算过程较复杂,因此等熵效率模型更适用于系统级建模<sup>[43]</sup>。压缩机、透平性能曲线拟合模型通过引入压缩机、透平的性能曲线进行系统级 GT 瞬态建模。性能曲线图是在试验台测试中获得的压缩机、透平详细信息<sup>[42]</sup>,通常包括压缩比、无量纲质量流量、转速之间关系图及等熵效率与无量纲质量流量之间效率图<sup>[44]</sup>。以压缩机为例,压缩机性能图中,4 个基本性能参数压缩比  $\varepsilon$ 、效率  $\eta$ 、质量流量  $\dot{m}$  (或校正后的质量流量  $\phi = \dot{m} \sqrt{T_m} p_0 / p_m$ ,  $T_m$  为进入 GT 燃料/空气的温度,  $p_0$

为大气压强,  $p_{in}$  为 GT 进气压强)、转速  $N$  (或校正后的转速  $N_{cr} = N / \sqrt{T_{in}}$ ) 已知任意 2 个变量, 即可计算其余变量。压缩机进行数学建模时, 需要特定格式的映射数据<sup>[45]</sup>, 因此需对压缩机性能图进行预处理生成相关映射数据, 然后作为数学建模的半经验模型输入。由于压缩机性能图中, 喘振区附近的速度轮廓几乎垂直于压力比轴 ( $y$  轴), 缺乏高速与低速数据, 因此需借助相关数据处理方法对性能图进行预处理, 进而对数据合理外推。KURZKE<sup>[45]</sup> 引入辅助坐标 ( $\beta$  线) 对性能曲线图进行处理,  $\beta$  线模型是性能曲线图处理中应用最广泛的方法。此外还有 Jensen & Kristensen 法<sup>[46]</sup>、穆勒法 (Mueller method)、神经网络法等<sup>[47]</sup>。

换热器、燃烧室等部件常近似为等压开口系统。GT 系统级建模中, 常忽略燃烧室的燃烧过程, 将燃烧室近似作为与外界有热交换的控制体处理, 因此常基于质量守恒、能量守恒方程采用简单热力学公式对燃烧室进行零维简单建模分析<sup>[13]</sup>, 按相关进气参数 (空气、燃料的质量流量、比热容等) 计算燃烧室出口温度。换热器部件常基于对数平均温差法<sup>[48]</sup>、 $\varepsilon$ -NTU 法<sup>[49-50]</sup> 进行设计分析, 如薛提微<sup>[51]</sup> 基于改进的传热有效度-传热单元法 ( $\varepsilon$ - $\varphi$  NTU 法) 对换热器进行设计分析。但为简化计算, 燃气轮机进行系统级建模仿真时一般假设换热器无热损失, 近似认为冷热流热交换量相同。

## 2 SOFC/GT 系统布置方式及控制方程

### 2.1 SOFC/GT 混合动力系统布置方式

SOFC/GT 混合动力系统根据 SOFC 与 GT 布置位置不同, 可分为底层循环、顶层循环 2 种。顶层循环是在 SOFC/GT 混合系统中将燃料电池置于燃气轮机系统中燃烧室前, SOFC 反应后尾气进入 GT 燃烧室燃烧后进入透平膨胀做功, 通过发电机对外发电并为压缩机提供动力<sup>[52-53]</sup>。底层循环是燃气轮机位于燃料电池上游, 透平排气作为燃料电池阴极空气来源。燃料电池与燃气轮机之间通过换热器耦合, 即空气经压缩机压缩后, 先经由换热器与燃料电池高温尾气发生热交换, 回收利用 SOFC 尾气中废热后再进入透平膨胀做功<sup>[52]</sup>。

由于燃料电池工作压力不同, 顶层循环又称为增压型 SOFC/GT 系统, 如图 3 所示, 底层循环又称为常压型 SOFC/GT 系统, 如图 4 所示。其中, 底层循环效率要低于顶层循环, 且底层循环换热器部件成本比较高, SOFC/GT 混合动力系统常采用顶层循环。

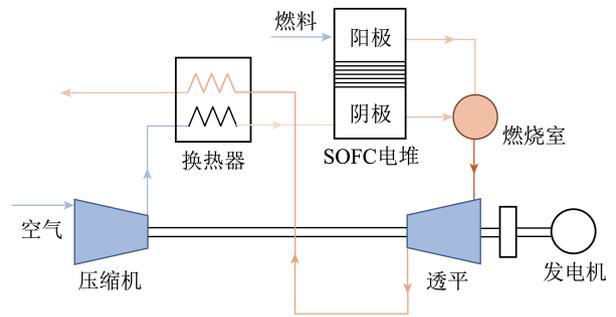


图 3 增压式 SOFC/GT 系统

Fig.3 Pressurized SOFC/GT hybrid system

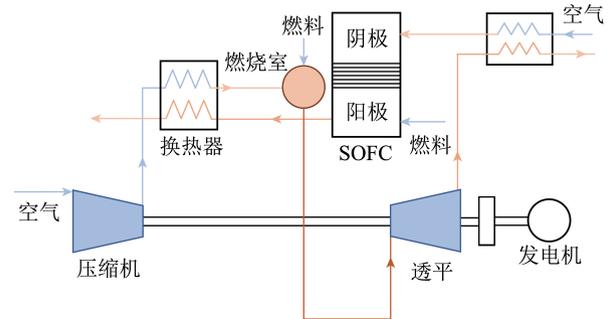


图 4 常压式 SOFC/GT 系统

Fig.4 Non-pressurized SOFC/GT hybrid system

### 2.2 SOFC/GT 混合动力系统数学模型

常见 SOFC/GT 系统建模按照研究目的可分为稳态模型与动态模型 2 种, 稳态模型主要研究设计工况下的 SOFC/GT 系统, 有时为分析非设计工况下系统行为, 会对比分析不同负载下 SOFC/GT 系统稳态特性。动态模型与稳态模型的区别在于动态模型考虑了相关参数随时间变化, 但仍以稳态模型相关数学公式作为基础。本节模型主要计算 SOFC 输出电压、排气温度、输出功率与 GT 各部件的排气温度、输出功率, 最后计算系统效率, 以下分别从建模的基本假设、建模方法和数学模型公式展开介绍。

#### 2.2.1 SOFC 建模及基本假设

主要论述 SOFC/GT 混合动力系统中 SOFC 稳态模型的电化学反应及热力学相关数学模型公式。该模型以 SOFC 进气温度、各物质分压、电流密度作为输入, 计算 SOFC 工作电压、工作电流, SOFC 对外输出电功的功率可根据工作电流、工作电压计算, 通过反复迭代确定 SOFC 排气温度。

为简化计算, SOFC 建模时常做如下假设: ① SOFC 单电池绝热<sup>[4,17]</sup>; ② 阴极出口气体温度等于阳极气体出口温度; ③ 阴极气体由  $O_2$  (21%)、 $N_2$  (79%) 组成, 阳极气体由  $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $H_2O$  组成<sup>[54]</sup>, 均为不可压缩理想气体; ④  $CH_4$  作为燃料的 SOFC 中, 假设阳极只有  $H_2$  参与电化学反应,  $CH_4$  只参与蒸汽重整反应, 燃料中所有  $CO$  均通过水煤

气变换反应消耗<sup>[17]</sup>,且上述反应均处于化学平衡状态<sup>[54]</sup>;⑤ 燃料电池内部气体流动均为层流状态,为不可压缩牛顿理想气体混合物,且具有恒定努塞尔数<sup>[17]</sup>。

### 2.2.2 SOFC 电化学反应数学模型

在 CH<sub>4</sub> 作为燃料的 SOFC/GT 混合动力系统中,SOFC 只考虑 H<sub>2</sub> 参与的电化学反应(假设④),因此基于能斯特方程可求得 SOFC 在某一特定工作温度(800~1 000 °C)下的开路电压  $E$  :

$$E = E_0 + \frac{RT_{\text{SOFC}}}{2F} \ln \left( \frac{p(\text{H}_2)p(\text{O}_2)^{\frac{1}{2}}}{p(\text{H}_2\text{O})} \right), \quad (1)$$

式中,  $E_0$  为 SOFC 在某一工作温度下的可逆电动势,常基于经验公式计算<sup>[55-56]</sup>,也可基于某一特定温度下该反应的吉布斯自由能  $\Delta G$  计算; $F$  为法拉第常数,取 96 500 C/mol; $R$  为理想气体常数,取 8.314 J/(mol · K); $p(i)$  为  $i$  物质的分压, $i$  表示 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O; $T_{\text{SOFC}}$  为 SOFC 工作温度。

$$E_0 = 1.272 3 - 2.764 5 \times 10^{-4} T_{\text{SOFC}}, \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{\Delta G}{2F}, \quad (3)$$

式中,  $T_{\text{SOFC}}$  计算时可使用  $T_{\text{SOFC}}^{\text{in}}$  SOFC 阴极空气的进气温度作为初始值进行迭代计算。

但 SOFC 实际输出工作电压需考虑各种损耗(活化损耗  $\eta_{\text{act}}$ 、欧姆损耗  $\eta_{\text{ohmic}}$ 、浓度损耗  $\eta_{\text{con}}$ <sup>[57]</sup>)引起的电压下降,因此实际工作电压  $V_{\text{cell}}$  表示为

$$V_{\text{cell}} = E - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{con}} - \eta_{\text{ohmic}}. \quad (4)$$

活化损耗  $\eta_{\text{act}}$  可借助巴特勒-沃尔默(B-V)方程确定:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left( \alpha \frac{n_e F \eta_{\text{act}}}{RT_{\text{SOFC}}} \right) - \exp \left[ - (1 - \alpha) \frac{n_e F \eta_{\text{act}}}{RT_{\text{SOFC}}} \right] \right\}, \quad (5)$$

式中,  $j$  为 SOFC 工作电流密度; $j_0$  为交换电流密度; $\alpha$  为传输系数; $n_e$  为电化学反应转移的电子数; $T_{\text{SOFC}}$  为燃料电池工作温度。

在高电流密度下,可用塔菲尔公式近似简化计算活化损耗  $\eta_{\text{act}}$ :

$$\eta_{\text{act}} = \frac{RT}{\alpha n_e F} \ln \frac{j}{j_0}, \quad (6)$$

浓度损耗  $\eta_{\text{con}}$  计算公式为

$$\eta_{\text{con}} = - \frac{RT}{n_e F} \ln \left( 1 - \frac{j}{j_L} \right), \quad (7)$$

式中,  $j_L$  为极限电流密度,表示物质传输的极限情况下(催化层内的反应物浓度降至 0 时)对应的电流密度。

欧姆损耗  $\eta_{\text{ohmic}}$  为

$$\eta_{\text{ohmic}} = jR_{\text{eff}}, \quad (8)$$

式中,  $R_{\text{eff}}$  为电堆的有效电阻。

SOFC 对外所做电功的功率  $P_{\text{el}}$  可根据 SOFC 的输出电流、实际工作电压  $V_{\text{cell}}$  计算:

$$P_{\text{el}} = N_{\text{cell}} V_{\text{cell}} I. \quad (9)$$

其中,  $N_{\text{cell}}$  为电堆中单电池个数; $I$  为 SOFC 的输出电流,可基于单电池有效工作面积  $A_{\text{cell}}$  计算。建模过程中一般会给出 SOFC 交换电流密度  $j_0$ 、极限电流密度  $j_L$ 、有效总电池电阻  $R_{\text{eff}}$ 、传输系数  $\alpha$  等重要参数,可确定 SOFC 电堆的工作电压、工作电流,进而确定  $P_{\text{el}}$ 。

$$I = jA_{\text{cell}}. \quad (10)$$

### 2.2.3 SOFC 稳态热力学模型

基于 SOFC 电堆能量守恒方程,可计算 SOFC 排气温度  $T_{\text{SOFC}}^{\text{out}}$ :

$$T_{\text{SOFC}}^{\text{out}} = \frac{\sum_i \dot{m}_i^{\text{in}} c_{p,i} T_{\text{SOFC}}^{\text{in}} + \sum_k R_k (-\Delta H_k) - P_{\text{el}}}{\sum_i \dot{m}_i^{\text{out}} c_{p,i}}. \quad (11)$$

其中,  $\Delta H_k$  为 SOFC 内部反应焓变,可查表获得参与反应物质的标准生成焓  $\Delta_f H_m^\theta$ ,结合盖斯定律计算获得;下标  $i$  为电堆中的化学物质,在 IRSOFC 系统中, $i$  为空气通道中的 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>,燃料通道中的 H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 等物质;下标  $k$  为电堆中发生的化学反应或电化学反应(表 1); $R_k$  为第  $k$  个反应的化学反应速率; $c_{p,i}$  为 SOFC 中  $i$  物质的定压比热容;上标 in、out 分别表示进气、排气过程; $\dot{m}_i^{\text{in}}$  为  $i$  物质的进气摩尔流量,kmol/s,作为输入量已知; $\dot{m}_i^{\text{out}}$  为  $i$  物质的排气摩尔流量,kmol/s,可根据 SOFC 系统的物料守恒计算:

$$\Delta H_k = \sum v_{i,k} \Delta_f H_m^\theta, \quad (12)$$

$$\dot{m}_i^{\text{out}} = \dot{m}_i^{\text{in}} + \sum_k v_{i,k} R_k, \quad (13)$$

式中,  $v_{i,k}$  为  $i$  物质在  $k$  反应(I、II、III、IV)中的化学计量数。

IRSOFC 内部  $k$  反应的速率  $R_k$  为

$$R_{(\text{I})} = k_{\text{act}} p(\text{CH}_4) \exp \left( - \frac{E_{\text{act}}}{RT_{\text{SOFC}}^{\text{out}}} \right), \quad (14)$$

$$R_{(\text{II})} = k_{\text{WCSR}} p(\text{CO}) \left( 1 - \frac{p(\text{CO}_2)p(\text{H}_2)}{k_{\text{shift}} p(\text{CO})p(\text{H}_2\text{O})} \right), \quad (15)$$

$$R_{(\text{III,IV})} = \frac{j}{2F}. \quad (16)$$

其中, II、II、III、IV表示具体反应方程(表1);  $k_{act}$  为 MSRR 的速率常数;  $E_{act}$  为 MSRR 的活化能, 取  $82 \times 10^3 \text{ J/mol}$ ;  $k_{shift}$  为 WGSR 反应平衡常数;  $k_{act}$ 、 $k_{WGSR}$  分别为 MSRR、WGSR 的反应速率常数, 与 SOFC 电池内部温度  $T_{SOFC}$  有关, 计算公式为

$$\lg k_i = AT_{SOFC}^4 + BT_{SOFC}^3 + CT_{SOFC}^2 + DT_{SOFC} + E_o \quad (17)$$

其中,  $k_i$  为  $k_{act}$ 、 $k_{WGSR}$ ; 相关系数 A、B、C、D、E 取值见表 3<sup>[21,58]</sup>。

表 3 重整反应及水气变换反应的平衡常数计算公式参数

Table 3 Values of equilibrium constants of reforming and shifting processes

参数	重整反应	水气变换反应
A	-2.631 21×10 <sup>-11</sup>	5.473 01×10 <sup>-12</sup>
B	1.240 65×10 <sup>-7</sup>	-2.574 79×10 <sup>-8</sup>
C	-2.252 32×10 <sup>-4</sup>	4.637 42×10 <sup>-5</sup>
D	1.950 28×10 <sup>-1</sup>	-3.915 00×10 <sup>-2</sup>
E	-6.613 95×10	1.320 97×10

在增压式 SOFC/GT 混合动力系统中, SOFC 排气温度  $T_{SOFC}^{out}$  即为 GT 中燃烧室的进气温度  $T_{in,comb}$ , 因此可通过 SOFC 排气温度将 2 个系统耦合, 进行 SOFC/GT 系统分析计算。同时, 燃料电池功率已知, 可进一步计算系统效率。

#### 2.2.4 GT 建模及基本假设

SOFC/GT 混合动力系统中的 GT 数学模型主要是对压缩机、透平、换热器等部件进行热力学相关分析。燃气轮机系统每个部件都可看作开口系统。压缩机、透平作为燃气轮机系统中关键部件, 排气压力、排气温度、等熵效率和质量流量取决于轴速、进气温度、进气压力和气体热力学特性。一般压缩机进气压力、进气温度作为输入参数已知, 通过热力学分析, 可计算压缩机、透平的排气压力, 通过相关方程联立获得压缩机、燃烧室、换热器、透平各个部件的进气、排气温度。

为简化计算, 进行 GT 建模时做出如下假设:

- ① 压缩机压缩过程和透平膨胀过程近似认为绝热;
- ② 忽略各部件入口出口工作流体动能、势能变化, 忽略各部件连接管道的压力损失;
- ③ 工作流体认为是具有恒定比热的理想气体;
- ④ 假设换热器中冷热流热传递为绝热过程, 因此冷测与热测的热交换量相同;
- ⑤ 燃烧室燃烧过程近似为恒压热交换控制体处理。

#### 2.2.5 GT 控制方程

在 SOFC/GT 混合系统中, 针对 GT 研究大多是建立热力学模型。其中, 压缩机和透平常基于压缩

比和等熵效率给出输入输出关系的热力学方程。

以压缩机为例, 排气压力  $p_{out,c}$  为

$$p_{out,c} = \varepsilon_c p_{in,c}, \quad (18)$$

式中,  $\varepsilon_c$  为压缩机压缩比, 一般以表格形式列出;  $p_{in,c}$  为压缩机进气压力, 常取环境压力, 作为已知输入条件。

压缩机排气温度  $T_{out,c}$  为

$$T_{out,c} = T_{in,c} + \frac{T_{in,c}}{\eta_c} \left[ \left( \frac{p_{out,c}}{p_{in,c}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right], \quad (19)$$

式中,  $T_{in,c}$  为压缩机进气温度, 常取环境温度, 作为已知输入条件;  $\eta_c$  为压缩机效率, 一般以表格形式列出;  $\kappa$  为气体比热容比, 对于空气取  $\kappa = 1.4$ 。

压缩机对外做功的功率  $P_c$  计算为式(20), 需要注意的是压缩机消耗系统中透平产能, 对外做负功。

$$P_c = \dot{m}_{air} c_p (T_{in,c} - T_{out,c}). \quad (20)$$

其中,  $\dot{m}_{air}$  为压缩机中空气质量流量, 透平压缩比、转速已知的情况下可通过透平图获得;  $c_p$  为空气定压比热, 根据工作温度确定。在整个 GT 系统中, 为简化计算, 一般近似认为  $c_p$  为定值, 不考虑随温度的变化。

在 GT 控制方程中, 压缩机进气温度、进气压力为环境温度、环境大气压。相关研究通常会注明 GT 型号并给出 GT 在设计工况下的重要参数, 如压缩比、压缩机等熵效率、透平等熵效率、空气质量流量、燃料质量流量、换热器效率等, 这些参数常作为系统输入参数给出<sup>[59]</sup>。LI 等<sup>[16]</sup>在工作中以表格形式给出了 CAPSTONE 公司的 C30 型单轴微型燃气轮机设计工况相关参数。ROSSI 等<sup>[59]</sup>给出了 Turbec T100 燃气轮机设计工况下相关参数。常引入压缩机性能曲线图、透平性能曲线图对不同负载下非设计工况进行分析。

与压缩机类似, 透平排气压力  $p_{out,t}$  为

$$p_{out,t} = \varepsilon_t p_{in,t}, \quad (21)$$

式中,  $\varepsilon_t$  为表示透平压缩比;  $p_{in,t}$  为透平进气压力。

透平排气温度  $T_{out,t}$  为

$$T_{out,t} = T_{in,t} + \eta_t T_{in,t} \left[ 1 - \left( \frac{p_{out,t}}{p_{in,t}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right], \quad (22)$$

式中,  $T_{in,t}$  为透平的进气温度, 近似等于燃烧室排气温度;  $\eta_t$  为透平效率, 相关研究一般会以表格形式列出。

透平对外做功的功率  $P_t$  为

$$P_t = \dot{m}_{air} c_p (T_{in,t} - T_{out,t}). \quad (23)$$

换热器可基于假设④对冷流、热流之间的热交

换进行计算:

$$P_l = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{out,l} - T_{in,l}), \quad (24)$$

$$P_h = m_2 c_{p2} (T_{out,h} - T_{in,h}), \quad (25)$$

$$T_{in,l} = T_{out,c}, \quad (26)$$

$$T_{in,h} = T_{out,t}, \quad (27)$$

式中,  $P_l$  为冷流的热交换功率;  $P_h$  为热流的热交换功率;  $T_{in,l}$  为换热器冷流的进气温度, 近似等于压缩机排气温度;  $T_{out,l}$  为冷流排气温度;  $T_{in,h}$  为热流的进气温度, 近似等于透平的排气温度;  $T_{out,h}$  为热流的排气温度;  $c_{p1}$ 、 $c_{p2}$  分别为冷流和热流工作温度下对应的定压比热容;  $\dot{m}_1$ 、 $\dot{m}_2$  分别为冷流、热流的质量流量。

甲烷作为燃料的燃烧室部件排气温度  $T_{out,comb}$  为

$$T_{out,comb} = T_{in,comb} + \frac{LHV(\text{CH}_4)}{c_p n a_t}. \quad (28)$$

式中,  $T_{in,comb}$  近似等于 SOFC 的排气温度;  $a_t$  为完全燃烧 1 kg 燃料所需理论空气质量, kg;  $n$  为过量空气系数;  $LHV(\text{CH}_4)$  为甲烷的低热值, MJ/kg。

$$T_{in,comb} = T_{SOFC}^{out}, \quad (29)$$

$$T_{in,t} = T_{out,comb}, \quad (30)$$

$$a_t = 11.56x_C + 34.48x_H, \quad (31)$$

$$LHV(\text{CH}_4) = 37.966 \text{ MJ/kg}. \quad (32)$$

式中,  $x_i$  为甲烷中  $i$  元素的质量分数 ( $i$  为 C、H)。

联立式 (19) (22) (26) (27) (28) (29) (30) 可计算各部件的进气、排气温度, 并与试验数据进行对比, 进而验证所建模型的准确性, 有助于进一步分析 SOFC/GT 系统性能。

## 2.2.6 SOFC/GT 混合动力系统效率计算

常见 SOFC/GT 系统性能分析主要用于优化 SOFC/GT 系统效率, 因此需对系统各部件效率进行分析计算, 以确定造成系统效率低下的部件及原因。因此, 可基于 SOFC 燃料利用率、实际工作电压、电化学反应的吉布斯自由能变、焓变等参数计算 SOFC 效率, 结合 GT 的效率计算 SOFC/GT 混合动力系统的总体效率。

SOFC 效率  $\varepsilon_{SOFC}$  为

$$\varepsilon_{SOFC} = \varepsilon_{thermo} \varepsilon_{voltage} \varepsilon_{fuel} \quad (33)$$

式中,  $\varepsilon_{thermo}$  为燃料电池的可逆热效率;  $\varepsilon_{voltage}$  为燃料电池的电压效率;  $\varepsilon_{fuel}$  为燃料电池的燃料利用率。

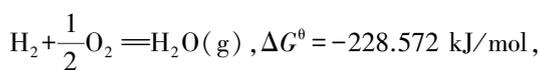
$$\varepsilon_{thermo} = \frac{\Delta G}{\Delta H}, \quad (34)$$

$$\varepsilon_{voltage} = \frac{V_{cell}}{E_0}, \quad (35)$$

$$\varepsilon_{fuel} = U_f, \quad (36)$$

式中,  $\Delta H$  为 SOFC 工作温度下内部电化学反应的焓变;  $E_0$  为 SOFC 热力学可逆电压;  $U_f$  为燃料利用率, 一般设为固定值。

其中, 对于氢作为反应物的电化学反应, 在标准状况下, 反应方程式对应的吉布斯自由能变  $\Delta G^0$  与焓变  $\Delta H^0$  如式 (37) 所示, 显然 SOFC 实际工作温度远高于标准态 (298.15 K), 因此对于 SOFC 在某一特定工作温度 (800~1 000 °C)、工作压力下效率的计算可考虑查找水蒸气的焓熵图确定焓、熵值<sup>[60]</sup>, 进而计算该条件下的吉布斯自由能变, 或通过引入 NASA 多项式计算某一特定工作温度下的反应焓变<sup>[61]</sup>。



$$\Delta H^0 = -241.818 \text{ kJ/mol}. \quad (37)$$

对于燃气轮机而言, 效率表示为实际做功与通入燃料化学能的比值, 其中燃料化学能用  $LHV$  表示, 因此, 燃气轮机效率  $\varepsilon_{GT}$  为

$$\varepsilon_{GT} = \frac{P_t - P_c}{\dot{m}_{fuel}(1 - U_f)LHV(\text{CH}_4)}. \quad (38)$$

其中,  $\dot{m}_{fuel}$  为进入 SOFC 燃料的质量流量, 等于燃料中各组分的进气摩尔流量  $\dot{m}_i^{in}$  之和, kmol/s, 具体为

$$\dot{m}_{fuel} = \sum \dot{m}_i^{in}. \quad (39)$$

$\text{CH}_4$  作为燃料的 SOFC/GT 混合动力系统效率  $\varepsilon_{SOFC/GT}$  为

$$\varepsilon_{SOFC/GT} = \frac{P_t - P_c + P_{el}}{\dot{m}_{fuel}LHV(\text{CH}_4)}, \quad (40)$$

式中,  $P_{el}$  为 GT 对外输出电功的功率。

基于上述公式可以初步分析 SOFC、GT 及混合动力系统效率。

## 3 SOFC/GT 系统示范性工程及相关建模仿真

### 3.1 SOFC/GT 混合动力系统示范性工程

Westinghouse Electric 公司较早开始 SOFC 研究, 并在此基础上研发了 100 kW 级 SOFC/CHP 系统<sup>[62]</sup>。同时, Siemens Westinghouse Power 公司与加州大学合作在加州大学国家燃料电池中心安装了第 1 台 220 kW TSOFC/GT 混合发电系统, 该系统为典型的顶层循环 SOFC/GT 混合动力系统, 效率为 53%, 其中 SOFC 功率为 180 kW, 燃气轮机功率为 40 kW<sup>[44]</sup>, 该混合动力系统也是目前应用最广泛的

示范模型,广泛用于数学仿真模型验证<sup>[44,63-65]</sup>。作为瑞典高温燃料电池国家计划的一部分,瑞典隆德大学热能与动力工程系开展了 SOFC/GT 联合循环的理论研究<sup>[66]</sup>。Ceres Power 公司开发了一种微型热电联产 SOFC 发电装置,其中采用金属支撑的 SOFC 燃料电池电堆,工作温度为 450~600 °C<sup>[67]</sup>。日本三菱重工公司于 2012 年开发了 1 种三联合循环发电系统<sup>[68]</sup>,该系统经燃料电池、燃气轮机和蒸汽轮机 3 个子系统发电,由此产生的燃料电池联合循环系统在天然气作为燃料时发电效率预计超过 60%;于 2015 年向九州大学交付了 SOFC-MGT 混合循环系统<sup>[69]</sup>,该系统与九州大学校园电力系统连接,发电功率为 250 kW,效率为 55%。总体而言,SOFC/GT 混合动力系统发电效率高,可作为小型分布式发电系统普及推广。

### 3.2 SOFC/GT 系统相关建模仿真

考虑到 SOFC/GT 混合动力系统示范性工程的建造成本,开展 SOFC/GT 数学建模仿真是一种高效、低成本的研究方法<sup>[44,65]</sup>。鉴于 BUONOMANO 等<sup>[15]</sup>详细综述 2015 年及以前 SOFC/GT 混合动力系统的布局、耦合方式,且 BAO 等<sup>[13]</sup>论述了 2018 年及以前 SOFC/GT 混合动力系统布局<sup>[70-71]</sup>、安全运行工况及约束参数<sup>[72-75]</sup>、部分负载非设计工况<sup>[22,54,76]</sup>、控制策略等<sup>[77-79]</sup>研究工作,因此本文重点关注 2019 年及以后的 SOFC/GT 混合动力系统数学建模仿真工作,同时围绕 SOFC/GT 混合动力系统不同建模方法展开综述。

大部分 SOFC/GT 混合动力系统建模仿真工作围绕稳态热力学建模仿真展开。如 WILSON 等<sup>[80]</sup>基于 ProMax 仿真软件建立并验证了用于电动航空的 SOFC/GT 混合动力系统稳态热力学模型,分析 SOFC 设计和运行对混合动力系统性能的影响。DING 等<sup>[6]</sup>基于 Matlab/simulink 建立了 SOFC/GT 热力学模型,对以不同类型生物质气体为燃料的 IT-SOFC/GT 混合动力系统进行热力学分析。NI 等<sup>[9]</sup>对 SOFC/GT 各子系统(包括 SOFC、后燃烧室、压缩机、透平和换热器)分别进行热力学分析,设计了一种顶部循环为布雷顿超临界 CO<sub>2</sub> 循环,底部循环为 ORC 的 SOFC/GT 系统,进一步提高系统效率。NI 等<sup>[9]</sup>基于 Matlab 软件对 SOFC/GT 进行热力学建模,分析了燃料利用率、最大压力、最高温度等参数对系统性能的影响。同时,由于该模型对 SOFC 进行了简化,还与其他文献仿真结果进行对比以确保模型的可靠性。BADUR 等<sup>[81]</sup>基于非开源代码 COM-GAS 建立 IR-TSOFC 零维鲁棒模型对 SOFC

电流、电压、电压损失、燃烧成分、功率输出、效率等基本参数进行预测,并与现有试验数据进行比较。结果表明仿真差异不超过 5%;SOFC/GT 顶层循环混合动力系统可显著提高效率(提升至 55%~58%)。

为进一步提升 SOFC/GT 混合动力系统效率,需关注造成系统效率低下的部件,同时确定该部件造成系统效率低下的程度、原因。相关研究常在 SOFC/GT 稳态热力学模型中引入焓分析,即确定各部件能的品位,进而评估效率提升的潜力与可行性<sup>[82]</sup>。GHOLAMIAN 等<sup>[23]</sup>基于热力学第一和第二定律建立了 SOFC/GT 系统热力学模型,并使用工程方程求解器 EES 进行求解,研究 SOFC/GT 系统耦合 2 种循环(ORC、卡丽娜循环)对系统效率的影响。结果表明,SOFC/GT-ORC 复合体系的焓效率更高(达 62.35%)。EISAVI 等<sup>[24]</sup>在 EES 中对建立的 SOFC/GT 热力学模型进行求解,通过参数化研究模拟循环性能,从能源、焓、环境和经济等方面对 3 种不同配置的 SOFC/GT 内重整混合动力系统进行对比分析。结果表明,相较单电堆的 SOFC/GT 系统,使用双电堆(每个电堆的单电池数量减半)的 SOFC/GT 系统经济性更好;同时采用空气串联进给的双电堆 SOFC/GT 系统的系统效率相较采用平行进给系统更高,能量效率和焓效率分别达 63.22% 和 60.81%,比传统单电堆 SOFC/GT 系统分别提高 20.30% 和 8.89%。CALISE 等<sup>[83]</sup>利用 Matlab 软件对 IRSOFC/GT 混合动力系统进行热力学建模仿真,在不同操作压力、燃料利用率、燃料空气比、蒸汽燃料比和电流密度下对系统及各部件进行能量和焓分析,确定系统效率低下的来源。结果表明,由于化学和电化学反应(蒸汽重整和电化学氧化)的发生导致 IRSOFC 电堆成为系统焓破坏的最重要来源,电堆也是不可逆性最高组分,因此 SOFC/GT 混合动力系统设计需重点关注 SOFC 电堆部分。BEIGZADEH 等<sup>[84]</sup>利用 Matlab 软件基于能量平衡方程对 SOFC/GT 混合动力系统各部件进行热力学建模,考虑蒸汽重整情况下对系统进行能量和焓分析。从热力学角度比较天然气和其他生物燃料(包括污水沼气、农业和工业废物沼气、合成气、生物燃料和气化生物质)对单个设备和整个系统性能的影响,发现以天然气为燃料的系统电力效率最高,而生物燃料的总电力效率最低。

由于 SOFC 集总模型(OD)中电池温度、电流密度和燃料利用率等参数均采用集总平均值<sup>[85]</sup>,而 SOFC 工作温度较高,沿电池长度方向的温度梯度对电池正常工作十分重要,此时热力学平衡和集

总模型的预测结果会存在较大偏差,且无法考虑顺流和逆流等流动形式的影响<sup>[65]</sup>,因此无法准确描述燃料电池的局部特性。为进一步提高建模精度以获得更真实的温度分布等性能参数,对 SOFC/GT 混合动力系统进行性能分析时,通常引入 SOFC 一维模型<sup>[86]</sup>。因此 CHEN 等<sup>[86]</sup>基于 Matlab 软件建立 SOFC、后燃烧室、重整器集总模型,同时基于 Epsilon 软件建立 GT 模型,并与 NETL 开发的 1D SOFC 模型进行耦合,研究燃料利用率和燃料重整过程对 100 kW SOFC/GT 混合动力系统性能的影响。结果表明,燃料电池  $U_f$  越高,系统效率越高;同时 SOFC/GT 系统采用阳极重整效率高于外部重整。LIU 等<sup>[87]</sup>通过建立 SOFC 一维模型,预测了 O/C 比、S/C 比(原子比)和重整温度等重整条件对正癸烷重整 SOFC/GT 混合动力航空系统性能的影响。结果表明,高 O/C 比、S/C 比和转化温度对碳的形成有抑制作用;改变转化温度或 O/C 比、S/C 比是减小 SOFC 温度梯度的有效途径。HUANG 等<sup>[88]</sup>基于平衡态重整器模型、一维 SOFC 模型及搭建于 Epsilon 软件中的燃气轮机系统模型,分析了不同燃料预重整份额和 SOFC 燃料利用率在设计工况下对 SOFC/GT 混合发电系统的性能影响,仿真结果表明,通过合理配置 SOFC 燃料利用率和燃料重整过程有望在不依赖燃料内重整的情况下提高混合发电系统的发电效率。同时, HUANG 等<sup>[89]</sup>还建立了包括基于 Matlab 软件的 SOFC 一维动态模型、蒸汽甲烷重整器集总模型及基于 Epsilon 软件的 GT 循环模型的 100 kW 级 NG SOFC/GT 混合动力系统模型,分析了 SOFC 工作温度和燃料利用率对 SOFC/GT 混合动力系统净发电效率的影响。结果表明,较高的工作温度可提高整个混合动力系统效率,但过高的燃料利用率可能会导致系统效率降低。CHEN 等<sup>[90]</sup>基于 Epsilon 软件建立了燃料重整器及顶层一维 SOFC/GT 混合循环系统模型,对回热式燃气轮机循环相关性能进行模拟。发现与阳极内部重整相比,燃料外部重整器可灵活实现低燃料利用率、高燃料预重整率,同时保持较高系统效率。

大多数研究工作集中于 SOFC/GT 混合动力装置的稳态建模仿真,以确定实现混合动力系统的最佳性能系统配置<sup>[9]</sup>,与之相比,关于 SOFC/GT 动态建模文献较少<sup>[64]</sup>。SOFC/GT 的动态建模仿真是系统进行负荷跟随控制的基础<sup>[65]</sup>,混合动力系统动态行为的建模、优化与控制研究对于系统集成和商业化普及具有重要意义<sup>[91]</sup>。相关研究常基于 Matlab<sup>[64]</sup>软件建立 SOFC/GT 动态模型,同时常以热

那亚大学的热化学电力集团(TPG)<sup>[92]</sup>、德国航空航天中心<sup>[93]</sup>和美国国家能源技术实验室(NETL)<sup>[59,94]</sup>开发的 SOFC/GT 半实物动态仿真平台获得的试验数据作为参考,对所建立动态模型的准确性进行验证<sup>[44,59,95]</sup>,进而分析系统动态特性。ROBERTS 等<sup>[44]</sup>基于 Matlab/Simulink 建立了顶层循环 TSOFC/GT 混合动力系统模型对 Siemens Westinghouse Power 公司开发的 220 kW TSOFC/GT 系统进行启动过程的动态仿真,并与 NETL 开发的 220 kW SOFC/GT 动态模型及运行测试过程中收集的试验数据进行比较。结果表明,该动态模型可以很好捕捉启动期间系统的动态性能,但未捕捉到旁通阀相关系统动力学。FERRARI 等<sup>[95]</sup>展示了 NETL 基于 Matlab/Simulink 开发的瞬态模型,并与 TPG 基于 TRANSEO 工具开发的瞬态模型进行对比,结果表明,NETL 开发的瞬态模型整体上可以对系统非设计工况下的瞬态响应进行实时预测,与之相比,TPG 开发的瞬态模型精确度更高,但计算时间较长。在完成 SOFC/GT 动态模型的搭建后常对 SOFC/GT 系统瞬态过程(如启停工况<sup>[44,59]</sup>)的动态特性及非设计工况进行分析、优化。BARELLI 等<sup>[64]</sup>基于 Matlab/Simulink 建立 SOFC/GT 动态模型进行建模仿真进而对整个混合动力系统进行动力学分析。考虑到 SOFC 与 GT 之间的相互作用以优化系统组件,同时对系统效率、时间响应进行评估,特别关注燃气轮机和热交换器对燃料电池的惯性效应。开发的动态模型可用于分析 SOFC/GT 混合动力系统的整体性能,在燃气轮机部分负载下优化设备组件及控制逻辑,并填补 SOFC/GT 混合系统组件之间动态相互作用分析。

除基于 Matlab 软件开发 SOFC/GT 动态模型外,ZHANG 等<sup>[96]</sup>基于质量守恒方程、能量守恒方程和动量守恒方程在仿真工具 Aspen Custom Modeler 中建立了 SOFC/GT 动态模型。其中,SOFC 模型基于指数衰减函数和指数关联函数建立。利用所建动态模型进行动态仿真时,选取电流密度作为扰动变量,计算结果表明,该动态模型能较好拟合系统的动态特性。包成等<sup>[65]</sup>基于 gPROMS 平台建立 PSOFC/GT 动态模型,并将仿真结果与 SWPC 220 kW TSOFC/GT 示范系统额定工况试验数据、美国燃料电池工程中心 APSAT 工具预测结果进行对比。结果表明,该文献中模型相比于 APSAT 具有更好预测精度,可用于系统动态特性分析,为后续控制器设计奠定基础。同时,考虑到 Matlab 等软件对技术人员要求较高,难以商业化推广,ROSSI 等<sup>[59]</sup>基于经验

参数在 Microsoft Excel/Visual Basic 中建立了 SOFC/GT 混合动力系统动态模型的简化框架,分析系统启动工况,同时将该模型的响应与 NETL 瞬态模型的数据进行比较。结果表明,该模型能实现快速响应的同时具有良好的预测精确度,因此更适于商业化推广。

## 4 结语与展望

1) 燃料电池分布式发电技术是适应未来能源低碳化、清洁化、高效化发展趋势的重要应用方向。其中 SOFC 作为高温燃料电池,可发生燃料内部重整反应,燃料适应性好;同时,SOFC 可与 GT 等装置构成混合发电系统,GT 回收利用 SOFC 高温尾气中的能量进一步提高发电效率。

2) 考虑到 SOFC/GT 示范性工程有限且建造成本较高,一般采用数学建模仿真方法开展相关工作。数学建模仿真对 SOFC/GT 混合发电系统发展有重要影响。与单独 SOFC 或 GT 模型不同,SOFC/GT 混合动力系统常基于宏观尺度进行热力学分析。SOFC/GT 集总模型通过计算温度、压力等主要参数对系统稳态性能进行分析优化。由于集总模型无法准确描述燃料电池的局部特性,常引入一维 SOFC 的 CFD 模型对燃料重整过程进行分析,但现阶段 SOFC/GT 混合系统建模中引入一维 SOFC 模型研究较少,后续工作中可考虑在 SOFC/GT 系统中引入一维甚至更高维度的 SOFC 模型以提高建模精度。

3) SOFC/GT 动态建模仿真是系统进行负荷跟随控制的基础,对于 SOFC/GT 混合发电系统商业化普及具有重要意义。现阶段进行瞬态及非设计工况下的建模仿真工作较少,在后续工作中可考虑进行瞬态/非设计工况的相关建模工作。

4) 现阶段 SOFC/GT 混合动力系统建模主要基于 Matlab/Simulink、Aspen Plus 等商业化软件开展模块化建模,因此功能有限、不易拓展,建立的模型针对性有限,很难对 SOFC/GT 中某一特定部件进行参数调整,难以实现某些特定功能的仿真。同时,基于商业化软件建立的 SOFC/GT 混合系统模型较难耦合 SOFC、GT 的高维 CFD 仿真模型,计算精度很难提高。后续工作中可尝试对 SOFC/GT 混合动力系统开发专用仿真软件,提高模型的拓展性和针对性;同时耦合高维度 SOFC、GT CFD 仿真模型进一步提高计算精度。

## 参考文献 (References):

[1] 国家发展改革委、国家能源局等.“十四五”可再生能源发展规

- 划[EB/OL].(2022-06-01)[2023-02-10] <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220601501054858882.pdf>.
- [2] 皇甫成,郭金智,贾非,等.一种考虑新能源出力相关性及不确定性的分布式发电规划策略[J].电网与清洁能源,2022,38(3):105-110,118.  
HUANG Pucheng, GUO Jinzhi, JIA Fei, et al. A distributed generation planning strategy considering the correlation and uncertainty of renewable energy output[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2022,38(3):105-110,118.
- [3] 钟财富.国内外分布式燃料电池发电应用现状及前景分析[J].中国能源,2021,43(2):34-37,73.  
ZHONG Caifu. Application status and prospect analysis of distributed fuel cell power generation at home and abroad[J]. Energy of China,2021,43(2):34-37,73.
- [4] 李卓言,段丽平,李少华,等.基于 AspenPlus 的兆瓦级燃料电池分布式发电系统建模及仿真分析[J].南方能源建设,2022,9(4):78-86.  
LI Zhuoyan, DUAN Liping, LI Shaohua, et al. Modeling and simulation analysis of MW-level fuel cell distributed generation system based on AspenPlus[J]. Southern Energy Construction, 2022,9(4):78-86.
- [5] STEELE B C H, HEINZEL A. Materials for fuel-cell technologies[J]. Nature, 2001, 414: 345-352.
- [6] DING X, LV X, WENG Y. Fuel-adaptability analysis of intermediate-temperature-SOFC/gas turbine hybrid system with biomass gas[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143(2): 022104-1-022104-10.
- [7] DUONG P A, RYU B, JUNG J, et al. Thermal evaluation of a novel integrated system based on solid oxide fuel cells and combined heat and power production using ammonia as fuel[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6287.
- [8] TOONSEN R, SOLLAI S, ARAVIND P V, et al. Alternative system designs of biomass gasification SOFC/GT hybrid systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(16): 10414-10425.
- [9] NI T M, SI J W, GONG X H, et al. Thermodynamic and economic analysis of a novel cascade waste heat recovery system for solid oxide fuel cell[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 259:115562-1-115562-14.
- [10] LI Z, ZHANG X, HE X, et al. Comparative analysis of thermal economy of two SOFC-GT-ST triple hybrid power systems with carbon capture and LNG cold energy utilization[J]. Energy conversion and management, 2022, 256: 115385-1-115385-25.
- [11] CHOUDHURY A, CHANDRA H, ARORA A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 430-442.
- [12] SARAVANAMUTTOO H I, ROGERS G F C, COHEN H. Gas turbine theory[M]. London: Pearson Education, 2001.
- [13] BAO C, WANG Y, FENG D, et al. Macroscopic modeling of solid oxide fuel cell (SOFC) and model-based control of SOFC

- and gas turbine hybrid system [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 66: 83-140.
- [14] ZHOU X, PRAMUANJAROENKIJ A, KAKAÇ S. A review on miniaturization of solid oxide fuel cell power sources-II: From system to material [J]. *Mini-Micro Fuel Cells*, 2008: 319-347. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8295-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8295-5_22).
- [15] BUONOMANO A, CALISE F, D'ACCADIA M D, et al. Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power: A review [J]. *Applied Energy*, 2015, 156: 32-85.
- [16] LI Y, WENG Y. Performance study of a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system designed for methane operating with non-designed fuels [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(8): 3824-3835.
- [17] WANG L, ZHANG H, WENG S. Modeling and simulation of solid oxide fuel cell based on the volume-resistance characteristic modeling technique [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 177(2): 579-589.
- [18] KANEKO T, BROUWER J, SAMUELSEN G S. Power and temperature control of fluctuating biomass gas fueled solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(1): 316-325.
- [19] SERVICES E G G, RALPH M. *Fuel Cell Handbook*[M]. [S.l.]: DIANE Publishing, 2000.
- [20] 贾旭平.美国 Bloom energy 公司 Bloomenergy 推出固体氧化物燃料电池微型电站[EB/OL].(2021-01-29)[2023-02-10]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=559bea83d19c7cb37ff2b874a46bd90b>.
- [21] CHAN S, HO H, TIAN Y. Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 109(1): 111-120.
- [22] CHAN S H, HO H K, TIAN Y. Modelling for part-load operation of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power plant [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 114(2): 213-227.
- [23] GHOLAMIAN E, ZARE V. A comparative thermodynamic investigation with environmental analysis of SOFC waste heat to power conversion employing Kalina and Organic Rankine Cycles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 150-161.
- [24] EISAVI B, CHITSAZ A, HOSSEINPOUR J, et al. Thermo-environmental and economic comparison of three different arrangements of solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 168: 343-356.
- [25] YAKABE H, OGIWARA T, HISHINUMA M, et al. 3-D model calculation for planar SOFC [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 102(1): 144-154.
- [26] BESSETTE N F, WEPFER W J, WINNICK J. A mathematical model of a solid oxide fuel cell [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1995, 142(11): 3792-3800.
- [27] RAMÍREZ-MINGUELA J J, RANGEL-HERNÁNDEZ V H, ALFARO-AYALA J A, et al. Energy and entropy study of a SOFC using biogas from different sources considering internal reforming of methane [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120: 1044-1054.
- [28] JANARDHANAN V M, DEUTSCHMANN O. CFD analysis of a solid oxide fuel cell with internal reforming: Coupled interactions of transport, heterogeneous catalysis and electrochemical processes [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 162(2): 1192-1202.
- [29] CHAN S H, HO H K, TIAN Y. Multi-level modeling of SOFC-gas turbine hybrid system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003, 28(8): 889-900.
- [30] RECKNAGLE K P, WILLIFORD R E, CHICK L A, et al. Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 113(1): 109-114.
- [31] SUWANWARANGKUL R, CROISSET E, PRITZKER M D, et al. Mechanistic modelling of a cathode-supported tubular solid oxide fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 154(1): 74-85.
- [32] ACKMANN T, DE HAART L G J, LEHNERT W, et al. Modeling of mass and heat transport in planar substrate type SOFCs [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2003, 150(6): A783-A789.
- [33] ZHU H, KEE R J. Modeling electrochemical impedance spectra in SOFC button cells with internal methane reforming [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2006, 153(9): A1765.
- [34] SARAVANAMUTTOO H I H, ROGERS G F C, COHEN H. *Gas turbine theory*[M]. London: Pearson Education, 2001.
- [35] CHINDA P, BRAULT P. The hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) systems steady state modeling [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(11): 9237-9248.
- [36] SONG T, KIM T, KIM J, et al. Performance prediction of axial flow compressors using stage characteristics and simultaneous calculation of interstage parameters[J]. *Journal of Power and Energy*, 2001, 215(1): 89-98.
- [37] 林向雨. SGT5-4000F 燃气轮机本体建模与仿真[D].北京:华北电力大学,2015.
- [38] 张元哲,刘培,李政.燃气轮机机理建模与性能监测[J].*工程热物理学报*,2020,41(3): 548-553.  
ZHANG Yuanzhe, LIU Pei, LI Zheng. Mechanism modeling and performance monitoring of gas turbine. [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020,41(3): 548-553.
- [39] ROSSI I, TRAVERSO A, HOHLOCH M, et al. Physics-based dynamic models of three SOFC/GT emulator test rigs[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(5): 051702-1-051702-10.
- [40] CHIARIELLO F, REALE F, CALABRIA R, et al. Off design behavior of a 100 kW turbec T100P micro gas turbine[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 390: 275-280.
- [41] GOBBATO P, MASI M, TOFFOLO A, et al. Numerical simulation of a hydrogen fuelled gas turbine combustor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(13): 7993-8002.
- [42] TSOUTSANIS E, MESKIN N, BENAMMAR M, et al. An efficient component map generation method for prediction of gas tur-

- bine performance[C]//Proceedings of the Turbo expo: Power for Land, Sea, and Air. Düsseldorf; American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [43] CUNNEL C, PANGALIS M, MARTINEZ-BOTAS R. Integration of solid oxide fuel cells into gas turbine power generation cycles. Part 2: Hybrid model for various integration schemes[J]. Journal of Power and Energy, 2002, 216(2): 145-154.
- [44] ROBERTS R A, BROUWER J. Dynamic simulation of a pressurized 220 kW solid oxide fuel - cell - gas - turbine hybrid system; Modeled performance compared to measured results [J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2006, 3(1): 18-25.
- [45] KURZKE J. How to get component maps for aircraft gas turbine performance calculations [C]//Proceedings of the Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Düsseldorf; American Society of Mechanical Engineers, 1996.
- [46] JENSEN J P, KRISTENSEN A, SORENSON S C, et al. Mean value modeling of a small turbocharged diesel engine [R]. Detroit, Michigan; SAE Technical Paper, 1991.
- [47] MORAAL P, KOLMANOVSKY I. Turbocharger modeling for automotive control applications [R]. Detroit, Michigan; SAE Technical Paper, 1999.
- [48] CARTAXO S J, FERNANDES F A. Counterflow logarithmic mean temperature difference is actually the upper bound: A demonstration [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(6/7): 1172-1175.
- [49] NAVARRO H, CABEZAS-GÓMEZ L. Effectiveness-NTU computation with a mathematical model for cross - flow heat exchangers [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2007, 24: 509-521.
- [50] NAVARRO H A, CABEZAS-GÓMEZ L. A new approach for thermal performance calculation of cross - flow heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(18): 3880-3888.
- [51] 薛提微. 换热器的热力设计方法与性能评价[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [52] SAMUELSEN S, BROUWER J. Fuel cell/gas turbine hybrid[J]. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, 2009; DOI: 10.1016/B978-044452745-5.00911-4.
- [53] 翁一武, 苏明, 翁史烈. 先进微型燃气轮机的特点与应用前景 [J]. 热能动力工程, 2003, 6(2): 111-116, 212. WENG Yiwu, SU Ming, WENG Shilie. Specific features of advanced micro gas turbines and their application prospects [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 6(2): 111-116, 212.
- [54] COSTAMAGNA P, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine [J]. Journal of Power Sources, 2001, 96(2): 352-368.
- [55] APPLEBY A J, FOULKES F R. Fuel cell handbook [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [56] CAMPANARI S, IORA P. Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry [J]. Journal of Power Sources, 2004, 132(1/2): 113-126.
- [57] O'HAYRE Ryan, 车硕源, COLELLA Whitney, 等. 燃料电池基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [58] MASSARDO A F, LUBELLI F. Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT): Part A: Cell model and cycle thermodynamic analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(1): 27-35.
- [59] ROSSI I, TRAVERSO A, TUCKER D. SOFC/Gas Turbine Hybrid System: A simplified framework for dynamic simulation [J]. Applied Energy, 2019, 238: 1543-1550.
- [60] 金康, 付照中, 吴滨, 等. 基于 Soave-Redlich-Kwong 气体物态方程的 CH<sub>4</sub> 焓、熵图数值计算及关联应用程序开发 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 485-491.
- [61] SHAFAGH I, HUGHES K J, POURKASHANIAN M. Modified enthalpies of formation for hydrocarbons from DFT and ab initio thermal energies [J]. Computational and Theoretical Chemistry, 2011, 964(1/3): 100-107.
- [62] HUANG K, SINGHAL S C. Cathode-supported tubular solid oxide fuel cell technology: A critical review [J]. Journal of Power Sources, 2013, 237: 84-97.
- [63] YI Y. Simulation of a 220 kW hybrid SOFC gas turbine system and data comparison [J]. ECS Proceedings Volumes, 2003, 7(1): 1442-1454.
- [64] BARELLI L, BIDINI G, OTTAVIANO A. Part load operation of a SOFC/GT hybrid system: Dynamic analysis [J]. Applied Energy, 2013, 110: 173-189.
- [65] 包成, 史翊翔, 李晨, 等. SOFC-GT 混合系统的参数分布与动态特性数值模拟 [J]. 工程热物理论, 2010, 31(3): 469-472. BAO Cheng, SHI Yixiang, LI Chen, et al. Numeric simulation of parameter distribution and transient behaviors for SOFC - GT hybrid system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(3): 469-472.
- [66] PALSSON J, SELIMOVIC A, SJUNNESSON L. Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation [J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2): 442-448.
- [67] LEAH R T, BONE A, SELCUK A, et al. Development of highly robust, volume-manufacturable metal-supported SOFCs for operation below 600 °C [J]. ECS Transactions, 2011, 35(1): 351.
- [68] None. Mitsubishi to develop SOFC-turbine triple combined cycle system [J]. Fuel Cells Bulletin, 2012, 2012(7): 5-6.
- [69] ANDO Y, OZAWA H, MIHARA M, et al. Demonstration of SOFC-micro gas turbine (MGT) hybrid systems for commercialization [J]. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2015, 52(4): 47-52.
- [70] MASSARDO A F, LUBELLI F. Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT): Part A. Cell model and cycle thermodynamic analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(1): 27-35.
- [71] RAO A D, SAMUELSEN G S. A thermodynamic analysis of tubular solid oxide fuel cell based hybrid systems [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(1):

- 59-66.
- [72] STILLER C, THORUD B, BOLLAND O. Safe dynamic operation of a simple SOFC/GT hybrid system [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(3): 551-559.
- [73] LV X, LIU X, GU C, et al. Determination of safe operation zone for an intermediate-temperature solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system [J]. *Energy*, 2016, 99: 91-102.
- [74] STILLER C. Design, operation and control modelling of SOFC/GT hybrid systems [M]. Tromsø: Norges Arktiske Universitet, 2006.
- [75] COSTAMAGNA P, HONEGGER K. Modeling of solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1998, 145(11): 3995-4007.
- [76] BAVARSAD P G. Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(17): 4591-4599.
- [77] STILLER C, THORUD B, BOLLAND O, et al. Control strategy for a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(1): 303-315.
- [78] ROBERTS R, BROUWER J, JABBARI F, et al. Control design of an atmospheric solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system: Variable versus fixed speed gas turbine operation [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 161(1): 484-491.
- [79] ROBERTS R A, BROUWER J, LIESE E, et al. Dynamic simulation of carbonate fuel cell-gas turbine hybrid systems [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(2): 294-301.
- [80] WILSON J A, WANG Y, CARROLL J, et al. Hybrid solid oxide fuel cell/gas turbine model development for electric aviation [J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2885.
- [81] BADUR J, LEMAŃSKI M, KOWALCZYK T, et al. Zero-dimensional robust model of an SOFC with internal reforming for hybrid energy cycles [J]. *Energy*, 2018, 158: 128-138.
- [82] KOTAS T J. The exergy method of thermal plant analysis [M]. New York: Paragon Publishing, 2012.
- [83] CALISE F, D'ACCADIA M D, PALOMBO A, et al. Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxide fuel cell (SOFC)-gas turbine system [J]. *Energy*, 2006, 31(15): 3278-3299.
- [84] BEIGZADEH M, POURFAYAZ F, GHAZVINI M, et al. Energy and exergy analyses of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid systems fed by different renewable biofuels: A comparative study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124383.
- [85] ORYSHCHYN D, HARUN N F, TUCKER D, et al. Fuel utilization effects on system efficiency in solid oxide fuel cell gas turbine hybrid systems [J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 1953-1965.
- [86] CHEN H, YANG C, ZHANG B, et al. Coupling effects of fuel reforming process and fuel utilization on the system performance of a natural gas solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(12): 17664-17690.
- [87] LIU H, QIN J, LI C J, et al. Influence of fuel reforming with low water to carbon ratio on thermodynamic performance of aviation solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 546: 231978-1-231978-12.
- [88] HUANG S, YANG C, CHEN H, et al. Effects of fuel pre-reforming ratio on system design performance of a natural gas solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2022, 42(10): 3691-3700.
- [89] HUANG S, YANG C, CHEN H, et al. Coupling impacts of SOFC operating temperature and fuel utilization on system net efficiency in natural gas hybrid SOFC/GT system [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 31: 101868.
- [90] CHEN H, YANG C, ZHOU N, et al. High efficiencies with low fuel utilization and thermally integrated fuel reforming in a hybrid solid oxide fuel cell gas turbine system [J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 115160-1-115160-16.
- [91] 包成, 蔡宁生. 固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统建模与控制的研究现状与进展 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(2): 1-7.
- BAO Cheng, CAI Ningsheng. Research status and advances in modeling and control of solid oxide fuel cell gas turbine hybrid generation system [J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2008, 44(2): 1-7.
- [92] ROBERTS R A, ROSSI I, TRAVERSO A. Dynamic simulation of energy systems: Comparison of a physics-based against time constant based approach applied to a microturbine test rig [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2015: 23-31.
- [93] HOHLOCH M, HUBER A, AIGNER M. Experimental investigation of a SOFC/MGT hybrid power plant test rig: Impact and characterization of a fuel cell emulator [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2016: 6-18.
- [94] ZHOU N N, YANG C, TUCKER D, et al. Transfer function development for control of cathode airflow transients in fuel cell gas turbine hybrid systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(4): 1967-1979.
- [95] FERRARI M L, LIESE E, TUCKER D, et al. Transient modeling of the NETL hybrid fuel cell/gas turbine facility and experimental validation [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, 129(4): 1012-1019.
- [96] ZHANG X, LI J, LI G, et al. Dynamic modeling of a hybrid system of the solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 163(1): 523-531.