DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 08. 002

固体氧化物燃料电池热电联供系统设计

Design of the CHP system integrated with SOFC

罗丽琦¹,王月²,钟海军^{2*},李庆勋²,谢广元¹,王绍荣^{1*} LUO Liqi¹,WANG Yue²,ZHONG Haijun^{2*},LI Qingxun²,XIE Guangyuan¹, WANG Shaorong^{1*}

 (1.中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116;2.中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院,北京 102206)
 (1.School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;2.PetroChina Petrochemical Research Institute, Beijing 102206, China)

摘 要:研究了一种利用Aspen Plus软件模拟固体氧化物燃料电池热电联供(SOFC-CHP)系统的方法,并以1kW级系统为例进行了计算,该方法可用于快速判断不同燃料及电堆功率要求下的SOFC-CHP系统热电供应情况。试验结果表明,在理想状态下SOFC的净发电效率可达51%,热效率高达42%,CO2排放摩尔分数高达70%。所提方法可极大缩短计算速度,对进一步优化系统效率很有帮助。

关键词:固体氧化物燃料电池;热电联供系统;过程模拟;热量传递;电化学

中图分类号:TK 01 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)08-0025-08

Abstract: The software Aspen Plus is taken to simulate a combined heating and power system integrated with solid oxide fuel cells (SOFC-CHP). Taking a 1 kW SOFC-CHP system as an example, the simulation method can make quick judgement on the heat and power supply situations of the system with different fuels and under various load requirements. The test results show that in the ideal condition, the power generation efficiency of the SOFC can reach 51%, the thermal efficiency can peak at 42%, and the emitted CO_2 mole fraction can be 70%. This method can greatly shorten the calculation time and facilitate the efficiency improvement of the system.

Keywords: solid oxide fuel cell; combined heating and power; process simulation; heat transfer; electrochemical

0 引言

在碳达峰、碳中和的大背景下,全球范围内都 在开发可再生、环境友好、能量密度大的新型能源。 尽管长期以来新能源产量处于稳步上升态势,但由 于其技术和成本壁垒还难以支撑经济的发展。根 据历年的能源消耗情况分析,2010—2021年,风能、 太阳能等新型能源生产仅占25%^[1-2],化石能源在相 当长一段时间内仍将是我国的主要能源^[3-4]。化石 能源的清洁利用将起到一个承上启下的作用,可为 新能源的发展争取时间,实现新型能源替换化石能 源的平稳过渡。因此,改善能源结构,加大力度开 发清洁能源,寻找更高效率的能量转化技术已经成 为现阶段亟待解决的问题^[5-6]。化石能源中的天然 气占一次能源消费的10%左右,具有相对清洁绿 色、储量丰富、能量密度大等特点。

分布式热电联产是天然气能源利用的重要方 向之一。其污染物排放少,能量利用率可达80%,远 超普通火力发电机组的43%^[7]。在众多的分布式热 电联产技术中,燃料电池具有能量转化效率高,能 够实现CO,近零排放等优势,因此备受关注。其中 固体氧化物燃料电池(SOFC)的效率最高,废热利用 途径广,成为不错的候选技术。燃料电池是一种清 洁、高效、绿色的能量转换装置,燃料适应性广、效 率不受卡诺循环限制、废热联产性强,并可实现近 零排放。SOFC可实现直接将化学能转换为电能,曾 被列为20世纪改变人类生活的十大实用技术之一。 国际能源界预测燃料电池是21世纪最有吸引力的 发电技术之一[3]。甲烷是固体氧化物燃料电池极为 理想的燃料,有现成的供应系统,不存在氢气那样 高成本和难运输的问题。由于燃料电池具有良好 的热电联产性,在热电联供系统应用方面具有巨大 的潜力,这一点已得到世界公认^[8]。用于分布式发 电的装置顶部循环设备是燃料电池,底部循环设备

收稿日期:2022-06-06;**修回日期:**2022-08-10 **基金项目:**国家自然科学基金项目(51836004)

有燃气轮机、溴冷机、热泵等;系统可输出电能、热能、冷能,实现冷热电三联供(CCHP)或热电联供(CHP)^[9-11]。一般研究中,固体氧化物燃料电池热电联供(SOFC-CHP)系统由SOFC作为上循环,由机朗肯循环(ORC)、卡琳娜循环、汽轮机(GT)和吸收式制冷循环(ARC)作为下循环。

与传统的甲烷发电机组相比,集成了SOFC的 甲烷分布式发电即 SOFC-CHP 效率高出 50% 左 右^[5-6]。文献[12]分析了超临界 ORC 的 SOFC-CHP 系统,研究得出该系统最大发电效率为66.27%,最 大热电联产能量利用率为88.43%。文献[13]分析 集成了卡琳娜循环的 SOFC-CHP 系统的可行性。 文献[14]将双效应ORC集成到了SOFC-CCHP系统 中,得出该系统的最大能量利用率为73.99%。可 见天然气分布式发电效率高,能量利用率高,并且 该系统末端排放的CO,摩尔分数高,可以实现原地 封存,极大地减小系统对环境的影响。文献[15]研 究了用于电信部门的SOFC-CHP系统,经检测发现 该系统运行可以将CO2排放量减少至40 t/a。文献 「16]提出了一种基于SOFC-GT-CO,循环和ORC的 冷热电联供系统,结果表明该系统具有较高的能源 利用率。文献[17]提出了一种能够原位捕集CO,的 SOFC-GT系统,发现氧燃型CO,捕集系统效果最 佳。由此可见 SOFC-CHP 系统不仅能量利用效率 高,还能实现近零排放,这对碳达峰、碳中和的实现 做出了有力的推动。在实际应用和成本方面也有 学者做了一些研究,文献[18]研究了一种生产能力 为120kW的SOFC-CCHP系统在建筑当中的应用, 其净电效率为45%,电冷却效率为58%,电加热效率 为58%,该系统总效率接近60%,污染物也显著减 少,资本回收期在8.3 a内。文献[19]研究了一种新 型 SOFC-CCHP 系统在污水处理厂中的应用,该系 统能够满足27%的电力需求,并在夏季提供20kW 的冷负荷。文献[20]评价了混合制冷、SOFC和 CCHP系统集成的经济性能,该系统在发电效率为 59.9%, 热效率为 81.6% 的情况下, 结合 SOFC 价格 降低因素,使得现有结构的投资回报期从14.0a下 降至5.8 a。

由于热电联供系统涉及设备众多且造价高昂, 前期用于参考的系统模拟工作尤为重要。Aspen Plus^[21]是一个商用过程模拟软件,用于化工领域的 过程分析。其内部包含了完整的传热、传质和物性 数据并内置全面的设备模型,这为复杂化工过程分 析提供了方便高效的平台并节省了时间。该软件 包括了系统建模、集成和优化。使用Aspen Plus 模 拟含燃料电池的热电联供模型时存在的难点在于 其内置不包含SOFC模型,电化学系统与内置传质 和流动并不适应于离子、电子的传输。文献中一般 的方法是利用专业编程软件开发一个完整的反应 过程,包含了化学反应、电化学反应、传热、传质的 SOFC 栈堆程序,作为子程序链接到 Aspen Plus 软件 当中^[22]。该方法耗时费力,并难以达到预设目标, 所以本文采用更为方便省时且准确的方法,即直接 使用该软件中单元操作模块,使SOFC 栈堆反应朝 着吉布斯自由能最小的方向进行热平衡和质量平 衡计算,计入欧姆损失、活化损失、极化损失得出电 压,该法能够在不向外链接的情况下实现预设目 标^[22]。欧姆损失使用文献[23]报道的方程来计算。 活化损失采用文献[24]得出的半经验相关法计算。 极化损失采用文献[25]推导的方程计算。这样, Aspen Plus 软件就可以适用于模拟集成 SOFC 的热 电联供系统,进行电化学计算,质量平衡计算以及 热平衡计算,进而得到整个系统所需要的输出。 由于SOFC与子系统进行集成的多联产系统设计还 没有一种典型的办法[26],本文将对以往的设计方法 进行学习和总结,并得出一个优化设计,得到以甲 烷作为燃料的固体氧化物燃料电池热电联供 (SOFC-CHP)系统模型,能够实现对多种系统进行 快速的运行计算,为产品开发提供参考。

1 系统配置

以 CH₄为燃料的 SOFC-CHP 系统流程如图 1 所示。该系统由 SOFC 系统进行发电后将废热进行热回收利用,使系统可以提供热水和蒸汽。

图1中甲烷(流1)和水蒸气(流25)进行混合后 通过换热器3加热后通入重整器当中进行蒸汽重整 和水煤气转化反应,同时利用阴极高温尾气(流28) 为重整器进行加热,使重整气温度达到电池要求的 燃料入口温度。得到高温重整气之后将其通入 SOFC 阳极当中进行电化学反应。





5 对空气(流15)和自来水(流26)进行初步预热。压 缩空气(流15)通过换热器1和换热器2加热达到 SOFC燃料入口温度要求后,通入阴极中分离空气 中的氧气(0₂),使之流向阳极与重整气体在SOFC 当中经过电化学反应进行发电。将阳极尾气(流5) 通入燃烧器当中与纯氧(流32)进行充分燃烧,来自 燃烧器的烟气(流6)对空气(流15)、甲烷(流1)、纯 水(流18)和自来水(流26)进行加热得到热水和蒸 汽。为了使燃烧器的工作温度低于1050℃,将烟 气最终排出的低温尾气(流14)通入燃烧器中用来 降温。

2 模型假设

本文用Aspen Plus软件对提出的SOFC-CHP系 统进行建模和计算,并采用PENG-ROB作为整体系 统的热力学计算方法。该模型主要用于不同情况 下快速得出系统的输出情况,因此需要作出如下假 设:(1)忽略所有压降和热损;(2)输入燃料为纯甲 烷,气态且无硫;(3)输入空气含21%的氧气和79% 的氮气(体积分数);(4)所有化学反应都在化学平 衡条件下进行;(5)蒸汽与燃料的预转化过程在绝 热条件下进行;(6)阳极中只有氢气参与电化学反 应;(7)阴极提供纯氧。依照表1的输入参数进行设 置,对整体系统进行计算。该模型中换热模块的发 展已极为成熟,在Aspen Plus 当中也有成熟模块可 以进行直接应用,所以本文主要对SOFC子系统进 行设计和分析。

表1 输入参数 able 1 Input parameter

Table 1 Input param	ieters
输入参数	数值
空气摩尔流量/(mol·min⁻¹)	4.490
重整水蒸气摩尔流量/(mol·min ⁻¹)	0.358
氧气摩尔流量/(mol·min⁻¹)	0.169
甲烷摩尔流量/(mol·min⁻¹)	0.143
纯水摩尔流量/(mol·min⁻¹)	0.810
自来水体积流量/(L·min ⁻¹)	6
所需功率/kW	1
水碳摩尔比	2.5
空气过量系数	5
重整器重整比率	0.9
SOFC燃料利用率/%	70
燃烧器燃料利用率/%	100
电池入口温度/℃	700
燃料进气温度パ℃	25
纯氧进气温度/℃	25
纯水进料温度/℃	25
自来水进料温度/℃	25

3 数值模型

3.1 SOFC电化学数值模型

电流计算[27]为

$$I = 2Fn_{\mathrm{H}_2, \mathrm{EQU}}U_f, \tag{1}$$

式中:F为法拉第常数,F=96 487 C/mol;n_{H,FQU}为进入电池阳极的氢气当量;U_f为SOFC的燃料利用率,即输入SOFC中完全转化为电能的那部分燃料与输入燃料的比。

SOFC中发生的反应如下。蒸汽重整反应为

 $C_nH_{2n+2} + nH_2O \rightarrow nCO + (2n+1)H_2$, (2) 水气转换反应为

$$\mathrm{CO} + \mathrm{H}_2\mathrm{O} \to \mathrm{CO}_2 + \mathrm{H}_2, \tag{3}$$

电化学总反应为

$$\mathrm{H}_{2} + \frac{1}{2}\mathrm{O}_{2} \to \mathrm{H}_{2}\mathrm{O}_{\circ} \tag{4}$$

电化学反应中只考虑 H₂参加反应,则氢气当量为

 $n_{H_2,EQU} = n_{Fuel}(x_{H_2} + x_{CO} + 4x_{CH_4} + 7x_{C_2H_6} + 10x_{C_3H_8}), (5)$ 式中: n_{Fuel} 为进入SOFC燃料的物质的量; $x_{H_2}, x_{CO}, x_{CH_4}, x_{C_2H_6}, x_{C_3H_8}$ 为燃料中各组分(氢气、一氧化碳、甲烷、乙烷、丙烷)的摩尔分数。

电流密度计算:

$$J = \frac{I}{S},\tag{6}$$

式中:S为电池有效面积, m^2 ;I为电池电流,A;J为电 流密度, A/m^2 。

电压采用直接计算法,即通过计算能斯特 (Nernst)电压与各电压损失之差综合计算SOFC实际电压。能斯特电压是SOFC在可逆条件下所能达 到的电压最大值,而实际过程当中所有的过程并不 是可逆的,这就导致实际电压低于能斯特电压,二 者的差值即为反应不可逆导致的电压损失,即电池 极化损失。极化损失包括欧姆损失、活化损失和浓 差极化损失^[28]。

在 SOFC 运行温度下 (T_{sofc}) , 能斯特电压计算 式为^[29]

$$V_{\rm N} = V_{\rm N(T_{\rm sorc})} + \frac{R_{\rm g} T_{\rm SOFC}}{n_{\rm e} F} \ln \frac{p_{\rm H_2} \sqrt{p_{\rm O_2}}}{p_{\rm H_2O}}, \qquad (7)$$

 $V_{\rm N(SOFC)} = 1.286 - 2.887 \times 10^{-4} T_{\rm SOFC},$ (8)

式中: V_N 为能斯特电压; $V_{N(T_{sore})}$ 为SOFC标况下的工作电压; R_g 为气体摩尔体积常数, R_g =8.3145 J/(mol·K); n_e 为SOFC中参加反应的化学物质电子转移个数; p_{H_2} , p_{H_20} , p_{0_2} 为模拟系统电池内氢分压、水分压和氧分压。 阳极、阴极和电解质的欧姆损失计算式[30]为

$$V_{0\text{hm}_{A}} = \frac{J\rho_{A} (\pi A D_{\text{m}})^{2}}{8\delta_{A}}, \qquad (9)$$

$$V_{0hm_{c}} = \frac{J\rho_{c}(\pi D_{m})^{2}}{8\delta_{c}} A [A + 2(1 - A - B)], \quad (10)$$

$$V_{0hm_{E}} = J\rho_{E}\delta_{E}, \qquad (11)$$

总欧姆损失计算式为

$$V_{0hm_{T}} = V_{0hm_{A}} + V_{0hm_{C}} + V_{0hm_{E}}, \qquad (12)$$

式中:A,B为常数值, $A=0.804,B=0.130;\rho$ 为燃料电 池组件的电阻率, $\Omega \cdot m; D_m$ 为电池平均孔径, $mm;\delta$ 为电池各组件平均厚度,mm。

阳极和阴极活化损失计算式[30]为

$$V_{\text{Act}_A} = R_{\text{Act}_A}J, \qquad (13)$$

$$V_{\text{Act}_C} = R_{\text{Act}_C} J, \qquad (14)$$

$$\frac{1}{R_{\text{Act}\underline{A}}} = \frac{n_e F}{R_g T_{\text{OP}}} K_A \left(\frac{p_{\text{H}_2}}{p^0}\right)^m \exp\left(\frac{-E_A}{R_g T_{\text{OP}}}\right), \quad (15)$$

$$\frac{1}{R_{\text{Act}\underline{C}}} = \frac{2n_eF}{R_gT_{\text{OP}}} K_c \left(\frac{p_{0_2}}{p^0}\right)^m \exp\left(\frac{-E_c}{R_gT_{\text{OP}}}\right), \quad (16)$$

$$V_{\text{Act}_{T}} = V_{\text{Act}_{A}} + V_{\text{Act}_{C}}, \qquad (17)$$

式中: $R_{Aet,A}$ 为激活电阻, Ω ; T_{OP} 为燃料电池工作温度,K; p^0 为参考压力(100 kPa); K_A 和 K_c 为常系数; p_{H_2} 和 p_{O_2} 分别为氢和氧在正极和负极的分压; E_A 和 E_c 分别为阳极(110 kJ/mol)和阴极(160 kJ/mol)的活化能;m为0.25。

阳极和阴极浓差极化损失计算式[30]为

$$V_{\text{con}_{A}} = -\frac{R_{g}T_{\text{OP}}}{n_{e}F} \times \left[\ln \left[\frac{1 - \frac{R_{g}T_{\text{OP}}}{n_{e}F} t_{A} / (D_{\text{An(eff})}y_{\text{H}_{2}}^{0}P_{\text{SOFC}}J)}{1 + \frac{R_{g}T_{\text{OP}}}{n_{e}F} t_{A} / (D_{\text{An(eff)}}y_{\text{H}_{2}0}^{0}P_{\text{SOFC}}J)} \right], (18)$$

$$V_{\text{con}_G} = -\frac{R_{\text{g}}T_{\text{OP}}}{n_{e}F} \times \\ \ln \left[\frac{1 - \frac{R_{\text{g}}T_{\text{OP}}}{n_{e}F} t_{\text{A}} / (D_{\text{Ca(eff)}} y_{\text{O}_{2}}^{0} P_{\text{SOFC}}J)}{1 + \frac{R_{\text{g}}T_{\text{OP}}}{n_{e}F} t_{\text{A}} / (D_{\text{Ca(eff)}} y_{\text{H}_{2}0}^{0} P_{\text{SOFC}}J)} \right], \quad (19)$$

$$V_{\text{con}_T} = V_{\text{con}_A} + V_{\text{con}_C}, \qquad (20)$$

式中: $D_{An(eff)}$ 和 $D_{Ca(eff)}$ 分别为阳极和阴极的有效扩散 系数, m^2/s ; y_i^0 是体积流的摩尔分数,由正负极输入 和输出流量的平均值得到。

SOFC实际电压计算式为

$$V_{\text{act}} = V_{\text{N}} - \left(V_{\text{ohm}_{T}} + V_{\text{Act}_{T}} + V_{\text{con}_{T}}\right)_{\circ}$$
(21)

3.2 换热器数值建模

本研究中用于换热的换热器1-7的数值模型

依次为式(22)—(28)。

$$m_{\rm c}(h_{29} - h_{30}) = m_{\rm air}(h_{16} - h_{15}), \qquad (22)$$

$$m_{\rm c}(h_6 - h_7) = m_{\rm air}(h_{17} - h_{16}),$$
 (23)

$$m_0(h_7 - h_8) = m_{CH_4}(h_3 - h_2), \qquad (24)$$

$$m_0(h_8 - h_9) = m_{22}(h_{23} - h_{22}), \qquad (25)$$

$$m_{\rm c}(h_{30} - h_{31}) = m_{\rm purewater}(h_{19} - h_{18}),$$
 (26)

$$m_0(h_9 - h_{10}) = m_{\text{purewater}}(h_{20} - h_{19}),$$
 (27)

$$m_0(h_{10} - h_{11}) = m_{\text{tapwater}}(h_{20} - h_{19}),$$
 (28)

式中:m为流股的摩尔流量,mol/min;h为流股的比 焓,kJ/mol,以上比焓下标为换热器冷热流股编号; m。为阴极尾气的摩尔流量;m。为燃烧器燃烧后烟气 的摩尔流量。

3.3 热水和蒸汽数值建模

热水和蒸汽的数值建模依次为式(29)--(30):

$$Q_{\text{hotwater}} = m_{\text{tapwater}} (h_{27} - h_{26}),$$
 (29)

$$Q_{\text{steam}} = m_{18}(h_{20} - h_{18}) + m_{24}(h_{23} - h_{22}), \quad (30)$$

式中:Q为热负荷;本文热水(60℃)获取模块采用自 来水和空间换热器组成,水蒸气(200℃,400℃)由 纯净水与换热器组成。

3.4 性能评估标准

SOFC 净发电效率^[31]如下。SOFC 实际功率为

$$P_{\rm el,\,DC} = V_{\rm act}I,\tag{31}$$

$$W_{\rm SOFC} = IV_{\rm act}, \qquad (32)$$

SOFC净发电效率为

$$\eta_{\text{SOFC}} = \frac{W_{\text{SOFC}}}{g_{\text{fuel}}Q_{\text{LHV, fuel}}} \times 100\%, \qquad (33)$$

式中: g_{fuel} 为燃料摩尔流量, mol/s; $Q_{\text{LHV, fuel}}$ 为燃料的低热值, $Q_{\text{LHV, fuel}}$ =709.92 kJ/mol, 即最终输出产物中的水蒸气以蒸汽形式排出时的燃料热值。

系统产热为产热水与产蒸汽热负荷之和,即系 统热效率为

$$\eta_{\text{heat}} = \eta_{\text{hotwater}} + \eta_{\text{steam}},$$
 (34)

系统产热水效率为

$$\eta_{\text{hotwater}} = \frac{Q_{\text{hotwater}}}{g_{\text{fuel}}Q_{\text{LHV, fuel}}},$$
(35)

系统产蒸汽效率为

$$\eta_{\text{steam}} = \frac{Q_{\text{steam}}}{g_{\text{fuel}} Q_{\text{LHV, fuel}}},$$
(36)

系统净输出为

$$W_{\text{SOFC - CHP}} = W_{\text{SOFC}} + Q_{\text{hotwater}} + Q_{\text{steam}}, \qquad (37)$$

则系统综合能量利用率为

$$\eta_{\text{SOFC - CHP}} = \frac{W_{\text{SOFC - CHP}}}{g_{\text{fuel}}Q_{\text{LHV, fuel}}} \times 100\%, \qquad (38)$$

汽量。

尾气中CO₂的摩尔分数为

$$x_{\rm CO_2} = \frac{n_{\rm CO_2}}{n_{13}},\tag{39}$$

式中: n_{co_2} 为尾气中 CO_2 物质的量; n_{13} 为尾气的物质的量。

4 流程组件的选择

4.1 重整器

该模块用来模拟外部和阳极上发生的重整反 应,重整器实质为装填催化剂的换热器,由于该重 整反应为熵增反应需要吸热,所以需要在外部供热 的条件下发生。在Aspen Plus软件当中可以采用平 衡反应器(RStoic)在其中规定其重整比率对气体进 行重整,重整反应和水气转换反应均在此模块当中 进行,使其出口气体为氢气和未重整燃料,并串联 一个换热器(Heater)从外部引入热量对其进行供 热。调整该换热器的出口温度,使平衡反应器热负 荷为零。

4.2 阳极

SOFC 阳极采用吉布斯反应器(RGibbs)进行模 拟,该模块模糊了平衡和化学平衡计算,采用非化 学计量学方法,以吉布斯自由能最小为基础进行。 在该模块发生电化学反应,入口流中的氢气均来自 重整器产生的重整气体。重整氢气在电池中将化 学能直接转化为电能,反应后高温尾气全部通入燃 烧器中。

4.3 阴极

SOFC 阴极主要用来传输氧离子,在Aspen Plus 软件当中可采用分离器(Sep)模拟电池阴极中将氧 离子通过电解质传输至阳极的传质过程。在该模 型当中依据电池的燃料利用率规定其所需氧气量, 并传输至阳极与重整气(H₂)发生电化学反应,剩余 高温空气通入重整器模块当中的换热器模块为之 供热,剩余热量随气体排出通过换热器为燃料 供热。

4.4 燃烧器

阳极排出尾气中含有未反应的H₂, CH₄和CO, 在燃烧器中与纯氧充分燃烧。在已知反应的化学 计量数和转化率的情况下,平衡反应器(RStoic)成 为了一个很好的选择。假设尾气中所有组分都发 生了完全反应,在该反应器当中设置发生反应并调 整助燃气的流量,使之在低于1050℃的条件下运 行,放出热量为燃料以及热回收系统供热。该法可 以完全模拟燃烧器的燃烧过程。

4.5 热交换器

在该软件中采用换热器(Heater)对本研究使用 到的热交换器进行模拟,通过设置其冷流股和热流 股出口温度实现冷热流股换热。

4.6 CO2收集系统

该系统由分离器(Sep)实现水汽分离将尾气的 冷却水分离出,模拟整体系统最终得到的高摩尔分 数CO₂尾气情况。SOFC各组件使用的Aspen Plus模 块见表2。

퀸	長2	SOFC各组件使用的 Aspen Plus 模块
Table 2	Asp	en Plus modules used to simulate different SOFC

	compo	onents
组件	Aspen Plus模块	描述
阳极	RGibbs	对电化学反应进行模拟
阴极	Sep	对电池中氧离子从阴极转向阳 极进行模拟
重整器	RStoic	对重整反应和水气转化反应进 行模拟
燃烧器	RStoic	对阳极尾气与纯氧的充分燃烧 进行模拟
分离器	Sep	对水气分离进行模拟
换热器	Heater	对热流和冷流的热量交换进行 模拟

5 结果

本文采用 Aspen Plus 软件对 1 kW 级 SOFC-CHP系统进行建模以及相关计算,该系统一改以往 建模研究当中将 SOFC 阴极阳极尾气一同通入燃烧 器当中燃烧的建模方法,而是将阳极尾气通入燃烧 器中与纯氧进行充分燃烧,以提高燃料利用率并增 大产热。SOFC子系统和系统整体能量平衡运算输 出结果见表3。

表 3 输出参数 Table 3 Output parameters

1 4010 0	output putameters
输出结果	数值
电流/A	149 646.7
电压/V	0.71
SOFC输出功率/kW	1.08
热水量/kW	0.48
蒸汽量/kW	0.43
SOFC净发电效率/%	51
热水效率/%	22
蒸汽效率/%	20
系统热效率/%	42
系统综合能量利用率	93
CO ₂ 排放摩尔分数/%	70

阴极尾气由于其主要成分为氮气,所以直接将 其通入重整器为其供热,剩余热量为输入流股进行 预热。输入燃料气 CH₄的低热值(LHV)、高热值 (HHV)分别为 709.92,786.43 kJ/mol。阳极中只有 氢气发生电化学反应,其电压是由能斯特电压减去 各项压损之后得到的差值。输入的空气由 21% 的 氧气和 79% 的氮气(体积分数)组成,阴极转向阳极 的氧气量是在 SOFC 燃料利用率下能够使得阳极氢 气完全反应的量。此处用换热器的热负荷表征热 水量和蒸汽量。SOFC 子系统运行结果即电流、电 流密度、电压等与实验室结果进行了验证。系统中 各流股的热力学参数见表4。

表 4 SOFC-CHP系统各流股热力学参数 Table 4 Thermodynamic parameters of the flow strands in the SOFC-CHP system

流股 序号	温度/ ℃	摩尔焓/ (kJ·mol ⁻¹)	摩尔熵/ [kJ•(mol•K) ⁻¹]	焓流量/ kW	摩尔流量/ (mol·min ⁻¹)
1	25.000	-74.540	-0.081	-0.178	0.143
2	281.314	-184.670	-0.028	-1.542	0.501
3	700.000	-165.863	-0.003	-1.385	0.501
4	699.596	-71.432	0.046	-0.903	0.758
5	858.573	-175.334	0.033	-2.300	0.787
6	1 031.476	-214.050	0.053	-6.264	1.756
7	802.714	-224.892	0.044	-6.581	1.756
8	685.197	-230.257	0.039	-6.738	1.756
9	622.448	-233.058	0.036	-6.820	1.756
10	93.759	-254.450	0.000	-7.446	1.756
11	60.000	-266.488	-0.035	-7.799	1.756
12	60.000	-264.308	0.010	-4.898	1.112
13	60.000	-264.308	0.010	-0.933	0.212
14	60.000	-264.308	0.010	-3.965	0.900
15	25.000	-0.009	0.004	-0.001	4.490
16	570.000	16.595	0.035	1.242	4.490
17	700.000	20.835	0.040	1.559	4.490
18	25.000	-287.741	-0.168	-3.885	0.810
19	91.840	-282.275	-0.151	-3.811	0.810
20	200.000	-235.893	-0.029	-3.185	0.810
21	200.000	-235.893	-0.029	-0.511	0.130
22	200.000	-235.893	-0.029	-2.673	0.680
23	400.000	-228.660	-0.017	-2.591	0.680
24	400.000	-228.660	-0.017	-1.227	0.322
25	400.000	-228.660	-0.017	-1.364	0.358
26	25.000	-287.741	-0.168	-1 594.1	332.410
27	25.780	-287.678	-0.168	-1 593.7	332.410
28	858.573	26.084	0.044	1.871	4.304
29	656.400	19.364	0.038	1.389	4.304
30	95.112	2.043	0.009	0.147	4.304
31	60.000	1.015	0.006	0.073	4.304
32	25.000	-0.010	-0.001	0.000	0.169

依据以上结果可得出表3中的热水和蒸汽的热量。最终计算出该理想模型发电效率为51%,热水

效率为22%,蒸汽效率为20%,整体效率为93%。

6 结论

在本研究中,使用Aspen Plus软件对以甲烷为燃料的1kW级SOFC-CHP系统进行了建模和数值计算,得出其传热传质的计算结果。

优化后得到总能量利用率为93%,CO₂排放摩 尔分数高达70%的理想系统,该系统联合实际情况 设置边界条件,使之可以为SOFC-CHP系统设计提 供参考。

参考文献:

- [1]任喜洋,邓锋,高兵,等.推动能源资源结构向绿色低碳 转型[J].中国国土资源经济,2021,34(12):48-54,76.
 REN Xiyang, DENG Feng, GAO Bing, et al. Promote the transformation of energy and resource structure to green and low-carbon development [J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(12):48-54,76.
- [2]王志峰,何雅玲,康重庆,等.明确太阳能热发电战略定 位促进技术发展[J].华电技术,2021,43(11):1-4.
 WANG Zhifeng, HE Yaling, KANG Chongqing, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress [J]. Huadian Technology, 2021,43(11):1-4.
- [3]马文会,于洁,陈秀华.固体氧化物燃料电池新型材料
 [J].分析化学,2014,42 (11):1645.
 MA Wenhui,YU Jie,CHENG Xiuhua. New materials for solid oxide fuel cells [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014,42 (11):1645.
- [4]胡小夫,汪洋,田立,等.中高温SOFC/MGT联合发电技术研究进展[J].华电技术,2019,41(8):1-5.
 HU Xiaofu, WANG Yang, TIAN Li, et al. Progress in intermediate and high temperature SOFC/MGT combined power generation technology [J]. Huadian Technology,

2019, 41(8): 1-5.

- [5]刘合,梁坤,张国生,等.碳达峰、碳中和约束下我国天然 气发展策略研究[J].中国工程科学,2021,23(6):33-42.
 LIU He, LIANG Kun, ZHANG Guosheng, et al. China's natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6):33-42.
- [6]张俊锋,许文娟,王跃锜,等.面向碳中和的中国碳排放 现状调查与分析[J].华电技术,2021,43(10):1-10.
 ZHANG Junfeng, XU Wenjuan, WANG Yueqi, et al. Investigation and analysis on carbon emission status in China on the path to carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021,43(10):1-10.

[7]殷建平,王泽鹏.我国发展天然气发电产业的战略选择——天然气热电联产与气电调峰比较研究[J].价格理论与实践,2019(11):11-14.

YIN Jianping, WANG Zepeng. China's strategic choice for developing natural gas power generation industry— Comparative study on natural gas cogeneration and gas electricity peak shaving[J]. Price: Theory & Practice, 2019 (11): 11-14.

- [8]ZENG R, GUO B, ZHANG X, et al.Study on thermodynamic performance of SOFC-CCHP system integrating ORC and double-effect ARC[J].Energy Conversion and Management, 2021, 242: 114326.
- [9]宋鹏飞,单形文,李又武,等.以天然气为原料的燃料电 池分布式供能技术路径研究[J].现代化工,2020,40 (9):14-19.

SONG Pengfei, SHANG Tongwen, LI Youwu, et al. Founding paths to supply energy in a distributed way by fuel cell with natural gas as raw materials [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(9): 14–19.

[10]张尹路,李文甲,康利改.智慧供热在分布式燃气供 热中的应用与优化提升[J].华电技术,2020,42(11): 14-20.

ZHANG Yinlu, LI Wenjia, KANG Ligai. Application and optimization of intelligent heating in distribute gas heating systems[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 14–20.

- [11]朱海东,郝浩,郑剑,等.基于冷热电多能互补的园区综合能源系统设计[J].华电技术,2021,43(4):34-38.
 ZHU Haidong, HAO Hao, ZHENG Jian, et al. Design of integrated energy system for parks based on complementation of cold, heat and electricity[J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 34-38.
- [12]ZHANG S, LIU H, LIU M, et al. An efficient integration strategy for a SOFC-GT-SORC combined system with performance simulation and parametric optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 121: 314-324.
- [13]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.
- [14]PENG M Y P, CHEN C, PENG X, et al. Energy and exergy analysis of a new combined concentrating solar collector, solid oxide fuel cell, and steam turbine CCHP system [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 39: 100713.
- [15]PALOMBA V, FERRARO M, FRAZZICA A, et al. Experimental and numerical analysis of a SOFC-CHP system with adsorption and hybrid chillers for telecommunication applications [J]. Applied Energy, 2018, 216: 620-633.

- [16]LIU Y, HAN J, YOU H. Performance analysis of a CCHP system based on SOFC/GT/CO₂ cycle and ORC with LNG cold energy utilization [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(56): 29700–29710.
- [17]PARK S K, AHN J H, KIM T S. Performance evaluation of integrated gasification solid oxide fuel cell/gas turbine systems including carbon dioxide capture [J]. Applied Energy, 2011, 88(9): 2976–2987.
- [18]MEHRPOOYA M, SADEGHZADEH M, RAHIMI A, et al. Technical performance analysis of a Combined Cooling Heating and Power (CCHP) system based on Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) technology—A building application [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111767.
- [19]MEHR A S, MOSAYEBNEZHAD M, LANZINI A, et al. Thermodynamic assessment of a novel SOFC based CCHP system in a wastewater treatment plant[J]. Energy, 2018, 150: 299-309.
- [20]HOU Q, ZHAO H, YANG X. Economic performance study of the integrated MR-SOFC-CCHP system [J]. Energy, 2019, 166: 236-245.
- [21]Plus A. 11.1 user guide [J]. Aspen Technology, 2011, 2001.
- [22]ZHANG W, CROISET E, DOUGLAS P L, et al. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using Aspen Plus[™] unit operation models [J].Energy Conversion and Management, 2005, 46(2): 181-196.
- [23]SONG T W, SOHN J L, KIM J H, et al. Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/micro gas turbine hybrid power system based on a quasi - two dimensional model [J]. Journal of Power Sources, 2005, 142 (1-2): 30-42.
- [24]BAE Y, LEE S, YOON K J, et al. Three dimensional dynamic modeling and transport analysis of solid oxide fuel cells under electrical load change [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165: 405-418.
- [25]CHAN S H, KHOR K A, XIA Z T. A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness [J]. Journal of Power Sources, 2001, 93(1-2): 130-140.
- [26]MEHR A S, LANZINI A, SANTARELLI M, et al. Polygeneration systems based on high temperature fuel cell (MCFC and SOFC) technology: System design, fuel types, modeling and analysis approaches [J]. Energy, 2021, 228: 120613.
- [27]DANESHPOUR R, MEHRPOOYA M. Design and optimization of a combined solar thermophotovoltaic power generation and solid oxide electrolyser for hydrogen production [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176: 274-286.
- [28] MEHRPOOYA M, DEHGHANI H, MOOSAVIAN S M A.

Optimal design of solid oxide fuel cell, ammonia-water single effect absorption cycle and Rankine steam cycle hybrid system [J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 107-123.

- [29] MEHRPOOYA M, GHORBANI B, JAFARI B, et al. Modeling of a single cell micro proton exchange membrane fuel cell by a new hybrid neural network method [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 7: 8-19.
- [30]MEHRPOOYA M, AKBARPOUR S, VATANI A, et al. Modeling and optimum design of hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine power plants [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(36): 21196-21214.
- [31] WEINLAENDER C, ALBERT J, GABER C, et al. Investigation of subsystems for combination into a sofc based CCHP system [J]. Journal of Electrochemical Energy

Conversion and Storage, 2019, 16(2):021003.

(本文责编:张帆)

作者简介:

罗丽琦(1998),女,在读硕士研究生,从事固体氧化物燃 料电池热电联供系统模拟计算等方面的研究, ts20040107a31@cumt.cn;

王月(1990),女,高级工程师,博士,从事燃料电池、氨能 方面的工作,wangyue010@petrochina.com.cn;

钟海军*(1982),男,正高级工程师,博士,从事燃料电 池、催化剂方面的研究,zhonghaijun@petrochina.com.cn;

李庆勋(1980),男,高级工程师,博士,从事燃料电池、氨 能方面的工作,liqingxun@petrochina.com.cn;

谢广元(1962),男,教授,博士生导师,从事细粒煤分选 和微细物料高效脱水技术方面的研究,xgywl@163.com;

王绍荣*(1964),男,教授,博士生导师,从事固体氧化物 燃料电池研发和电解池方面的研究, srwang@cumt.edu.cn。

*为通信作者。

)	Ē
《综合智慧能源》	(后插	1)
公益广告(降碳节能)	(后插	2)
郑州科润机电工程有限公司	(后插	3)
华电水务科技股份有限公司(跨版)(后	旨插 4,	5)
华电环保系统工程有限公司(跨版)(后	昏插 6,	7)
中国华电科工集团有限公司新能源		
技术开发公司	(后插	8)
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术		
研发(实验)中心	(后插	9)
华电综合智慧能源科技有限公司(后插 1	0)

4 索 引

华电通用轻型燃机设备有限公司(后插 11)
郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插 12,13)
华电重工股份有限公司(跨版)(后插 14,15)
中国华电科工集团有限公司总承包
分公司(跨版)
华电科工安全环境质量科学研究所(后插 18)
山东华电节能技术有限公司
《华电技术》更名启事
华电郑州机械设计研究院有限公司(封三)
中国华电科工集团有限公司 (封底)