

零碳/低碳燃料固体氧化物燃料电池-发动机 联合动力系统热力学分析

马万达, 魏胜利, 杜振华, 倪士栋

(江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 为响应能源动力领域低碳节能的战略需求,促进固体氧化物燃料电池(SOFC)商业化应用,设计了一种 SOFC-发动机联合动力系统,以 NH_3 、 H_2 、天然气为燃料,并结合尾气余热梯级利用技术。首先建立并验证了系统的数学模型,然后对系统模型进行了热力学分析,探究了不同零碳燃料、低碳燃料应用时关键参数对系统性能的影响。结果表明:燃料流率增大时系统效率无明显变化, H_2 作燃料时 SOFC 与发动机子模块效率最佳,但使用 NH_3 系统总效率最高,可达 81.96%;当量比保持在 1 时可使系统整体效率达到最优;蒸汽燃料比从 0.8 降低到 0.2 时系统总效率随之升高,但其过低也会导致系统经济性变差;理想条件下,该系统应用在动力机械装置中时,考虑到 SOFC 装置与发动机模块的耦合性,SOFC 工作温度维持在 $600\text{ }^\circ\text{C}\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$ 为宜。

关键词: 燃料电池;发动机;零碳燃料;低碳燃料;热力学分析

中图分类号: TM911.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202301010 **文章编号:** 0253-987X(2023)01-0100-10

Thermodynamic Analysis for Zero-Carbon and Low-Carbon Fuel on SOFC-Engine Hybrid Power System

MA Wanda, WEI Shengli, DU Zhenhua, NI Shidong

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: To respond to the current strategic demand for low-carbon and energy conservation in the energy power field and promote the commercialization of solid oxide fuel cell (SOFC), a SOFC-engine hybrid system is put forward by taking NH_3 , H_2 and natural gas as fuels and using the cascade utilization technology of residual heat from tail gas. First, the mathematical model of the hybrid system is established and verified. Then, the thermodynamic analysis of the system model is carried out to explore and analyze the influence of key parameters on system performance in the application of different zero-carbon or low-carbon fuels. The results show that the increase of fuel flow rate has no obvious effect on system efficiency; the efficiency of both SOFC and engine modules reach the best when H_2 is used as the fuel, and the overall system efficiency achieves the highest, up to 81.96%, when NH_3 is used as the fuel; the most optimal overall system efficiency can be achieved when the equivalent ratio is kept at 1; the overall system efficiency increases with the decrease of the steam-fuel ratio from 0.8 to 0.2, but the too low steam-fuel ra-

收稿日期: 2022-05-19。 作者简介: 马万达(1997—),男,硕士生;魏胜利(通信作者),男,教授,硕士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0103402)。

网络出版时间: 2022-07-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220727.1143.002.html>

tio will still lead to poor system economy. Under ideal conditions, considering the coupling between the SOFC device and engine module, the SOFC operating temperature should be maintained at 600—650 °C when the system is applied to power mechanical devices.

Keywords: fuel cell; engine; zero-carbon fuel; low-carbon fuel; thermodynamic analysis

在能源危机与环境污染问题日益严峻的背景下,2021年两会《政府工作报告》中提出了“2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”的目标。开发和利用高效、清洁的新型能源逐渐成为社会发展的必然趋势。固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)具有全固态结构,能将燃料化学能直接转化成电能,其发电效率高,可应用在分布式发电、热电联产等场合^[1];且其燃料适应性强,为H₂、NH₃、天然气等零碳/低碳燃料的发展与应用提供新途径。

目前,关于不同燃料对SOFC性能影响等方面的探索已经成为研究热点。Perna等^[2]提出了一种小型热电联产系统并使用NH₃燃料,系统效率最高可达81%。Shy等^[3]同样使用NH₃燃料对加压阳极支撑SOFC的功率和阻抗进行了实验测量,发现加压NH₃-SOFC在集成微燃机的混合动力系统中具有较好的应用潜力。Wan等^[4]在总结时发现,NH₃-SOFC与H₂-SOFC在性能上并无明显差异。NH₃作为一种良好的氢载体,在SOFC-H⁺和SOFC-O²⁻中均具有实际应用潜力^[5]。Tu等^[6]使用天然气燃料,探究了CH₄组分对电池性能的影响。Zhu等^[7]将天然气应用到SOFC与内燃机混合动力系统中,并对系统的效率、经济性能进行了分析,结果显示这种混动系统在能量转换利用方面具有广阔的发展前景。Yang等^[8]用液化天然气(LNG)燃料,提出了一种SOFC与湿气涡轮机耦合的冷电联供系统,使废冷能得到合理利用的同时降低了CO₂排放。此外,甲烷^[9]、甲醇^[10]、天然气^[11]等低碳燃料在SOFC三维模型中的性能表现同样得到了研究者的广泛关注。

零碳/低碳燃料在SOFC系统中的应用已经得到充分的关注及认可。在此基础上,若将SOFC与燃气轮机、斯特林发动机、内燃机等耦合成混合动力系统^[12-14]并回收利用SOFC尾气能量,则可进一步提高系统效率。此外,内燃机额定工况下各热量的占比如图1所示,发动机尾气废热约占燃料燃烧所产生能量的1/3^[15],通常其被直接排放到大气中,造成能量浪费。目前在尾气余热利用方面,较成熟的废气涡轮增压技术并不能很好地解决热量浪费问题,而其他相关技术,例如温差发电、尾气制冷等,还

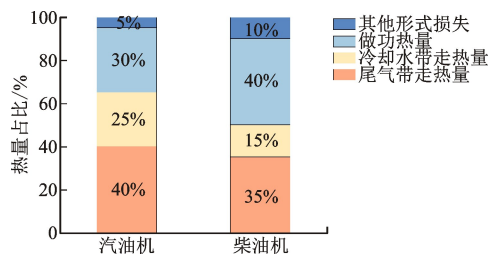


图1 内燃机额定工况下热平衡示意图

Fig.1 Heat balance diagram of internal combustion engine at rated operating condition

有待进一步完善。此外,SOFC燃料重整温度为650 °C~750 °C^[16],与发动机排气温度高度吻合,若将SOFC与发动机组成联合动力系统,并梯级利用发动机尾气余热使其为SOFC燃料重整等提供温度环境,则可进一步提高能量利用率及经济性能。虽然已有学者对SOFC与发动机联合动力系统进行了研究^[17-18],但都仅将发动机作为SOFC尾气后燃装置,而没有使其应用SOFC同等运行条件,且上述研究中并未采用NH₃、H₂等零碳燃料,即使氨、氢发动机相关技术已具有一定的积累^[19-20]。

综上所述,本文提出一种以NH₃、H₂、天然气为燃料的SOFC-发动机联合动力系统,探究不同燃料对SOFC与发动机子模块及系统整体效率的影响,为零碳/低碳燃料在动力系统中的应用以及SOFC商业化发展提供参考。

1 系统运行原理

该新型SOFC-发动机联合动力系统如图2所示^[21-22],其中箭头所指方向为各物质及能量的传输方向。

在系统运行时,燃料气体从存储装置中分别同时通向SOFC模块与发动机模块,其中燃料流(1)、(2)的流量比为1:1,以便于在边界条件相同的情况下比较SOFC装置与发动机装置的功率、效率以及联合动力系统的应用对二者性能的影响。燃料气体(1)与水蒸气在混合装置中形成混合气(3),然后通入到重整装置中进行重整。重整后的燃料混合气(5)通入SOFC的阳极,与通入阴极的空气(6)在SOFC装置中进行氧化还原反应来实现电能输出。

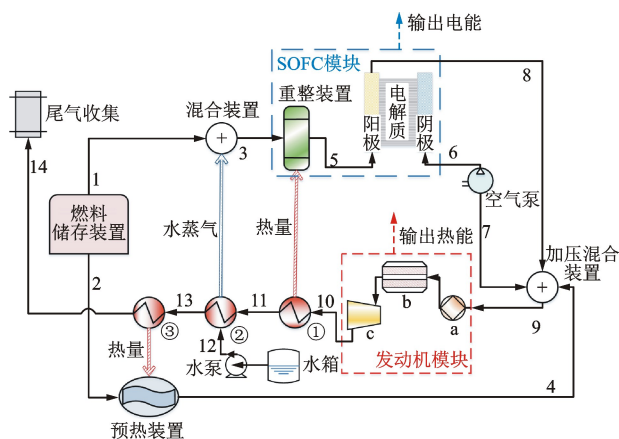


图 2 零碳/低碳燃料 SOFC-发动机联合动力系统

Fig. 2 Schematic diagram of zero-carbon/low-carbon SOFC-engine hybrid power system

反应后的 SOFC 尾气(8)与空气(7),以及通过预热装置后的燃料流(4)在加压混合装置中混合形成燃料混合气(9)。混合气通入到发动机中燃烧放出热能,发动机尾气(10)通入到热交换器①中实现第 1 级余热回收,该能量用于为重整装置提供温度环境。随后,发动机尾气(11)通入到热交换器②中实现第 2 级余热回收,该能量用于将水泵输送的水(12)汽化成水蒸气,使其与燃料(1)混合以实现 SOFC 阳极燃料气重整前的乳化。然后,发动机尾气(13)经过热交换器③实现第 3 级余热回收,该能量用于预热燃料(2)。最后,发动机尾气(14)通入到尾气收集装置中,降低污染的同时以便进一步回收利用。该联合动力系统应用在动力机械装置中时,SOFC 模块为装置内部用电器提供电能,发动机模块为动力机械装置的运行提供动力输出。

2 系统模型

2.1 模型假设

对该 SOFC-发动机联合动力系统做如下假设,以便于系统分析与建模:

(1)忽略系统中的所有压力损失及换热损失,忽略流体的流动阻力^[23];

(2)系统内所有物料均为稳流状态,所有化学反应均达到平衡;

(3)系统各部件均为零维模型,内部热力学参数分布均匀^[14];

(4)燃料重整装置与 SOFC 模块采用 Gibbs 反应器模拟,即反应遵循 Gibbs 自由能最小化的原则计算平衡,燃料在发动机燃烧室内被认为完全氧化

燃烧^[24],SOFC 电解质为氧离子导体电解质;

(5)空气由 21% O₂ 和 79% N₂ 组成,NH₃、H₂、天然气均为理想气体,其中天然气组分参考文献[25]与文献[26]中所述,并在表 1 中给出。

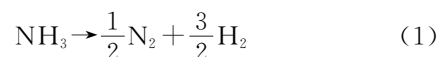
表 1 天然气各组分的体积分数

Table 1 Component content of natural gas

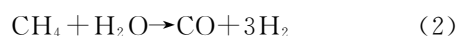
组分	体积分数/%	组分	体积分数/%
甲烷	72.11	正丁烷	1.77
乙烷	10.11	异丁烷	3.98
丙烷	6.95	正戊烷	0.45
一氧化碳	0.20	异戊烷	1.77
二氧化碳	0.37	新戊烷	0.88
氢	0.38	氮	1.03

2.2 SOFC 子系统模型

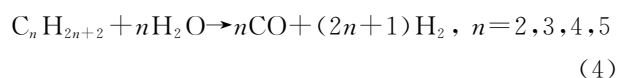
NH₃ 为燃料时,在重整装置中发生的重整反应如下式



阳极燃料为天然气时,CH₄ 会发生水蒸气重整反应以及水汽置换反应^[27]如下式



燃料中的其他可燃组分与水蒸气高温混合后也会被重整生成 H₂ 及 CO^[28]



3 种燃料情况下,SOFC 内发生的电化学反应可表示为



SOFC 工作时产生的理论电压可以用 Nernst 方程表示为

$$E = E_{\text{Nernst}}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{\text{O}_2}}{p_0} \quad (7)$$

式中, E_{Nernst}^0 为标准 Nernst 势,主要由温度决定,其可以表示为^[29]

$$E_{\text{Nernst}}^0 = 1.253 - 2.4516 \times 10^{-4} T \quad (8)$$

实际运行中,电池内会由于活化极化、欧姆极化、浓差极化而损失电压,因此 SOFC 实际输出电压的计算式为

$$U = E - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (9)$$

式中:活化极化损失 V_{act} 、欧姆极化损失 V_{ohm} 、浓差极化损失 V_{conc} 的具体计算公式可以参考文献[30]。

SOFC 工作时的电流密度关系式为

$$J = \frac{I}{NA} = \frac{2\mu F n_{H_2}}{NA} \quad (10)$$

式中: μ 为燃料利用率; F 为法拉第常数; n_{H_2} 为电池内部 H_2 摩尔流率; N 为单电池数; A 为单电池活化面积。

因此,SOFC 输出的直流电功率可表示为

$$W_{SOFC} = 2\mu F n_{H_2} U \quad (11)$$

2.3 发动机子系统模型

在软件中使用压缩装置 a、燃烧装置 b、膨胀装置 c,使其分别完成循环中的等熵压缩、定容燃烧、等熵膨胀过程,以对 HCCI 发动机完成建模^[18,31]。发动机工作循环的 P - V 图如图 3 所示。

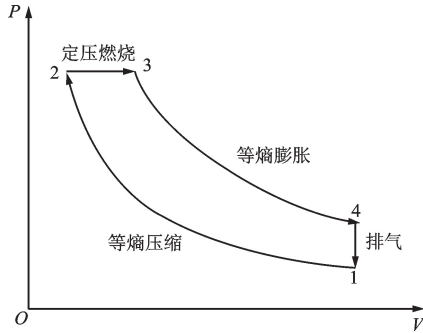


图 3 HCCI 发动机工作循环 P - V 图

Fig. 3 P - V diagram of HCCI Engine working cycle

等熵压缩过程的功率为

$$W_{1-2} = \frac{n_{fuel} C_p T_1 (\epsilon^\kappa - 1)}{\eta_{ISE} \eta_{MEC}} \quad (12)$$

式中: n_{fuel} 为燃料摩尔流率; C_p 为燃料比定压热容; T_1 为燃料入口温度; ϵ 为压缩比; κ 为多变指数; η_{ISE} 为等熵效率; η_{MEC} 为机械效率。

同理,膨胀过程输出功率为

$$W_{3-4} = n_{fuel} C_p T_3 (1 - \epsilon^{-\kappa}) \eta_{ISE} \eta_{MEC} \quad (13)$$

2.4 性能分析模型

SOFC 模块效率、发动机模块效率及系统总效率表达式如下

$$\eta_{SOFC} = \frac{W_{SOFC} - W_{REF} - W_{WP} - (W_{AP}/2)}{n_{fuel} Q_{LHV, fuel}} \quad (14)$$

$$\eta_{ENG} = \frac{W_{ENG} - W_{COM} - W_{PRE} - (W_{AP}/2)}{n_{fuel} Q_{LHV, fuel}} \quad (15)$$

$$\eta_{system} = \frac{W_{SOFC} + W_{ENG} - W_{COM} - W_{AP}}{n_{fuel} Q_{LHV, fuel}} \quad (16)$$

式中: W_{SOFC} 与 W_{ENG} 分别为 SOFC 和发动机模块的

输出功率; W_{REF} 为燃料重整耗功; W_{WP} 为水泵耗功; W_{COM} 为加压混合装置耗功; W_{PRE} 为预热装置耗功; W_{AP} 为空气泵耗功; $q_{LHV, fuel}$ 为燃料的低位热值,其中天然气的低位热值计算式如下

$$q_{LHV, NG} = \sum \alpha_i q_{LHV, i} \quad (17)$$

其中 α_i 为各组分的体积分数, $q_{LHV, i}$ 为各组分对应的低位热值。

建模时所涉及的其他关键参数取值如表 2 所示。

表 2 系统关键参数取值

Table 2 Value of system key parameters

参数	取值	参数	取值
空气进口温度 $T_{air}/^{\circ}\text{C}$	25	等熵效率 η_{ISE}	0.92
空气进口压力 p_{air}/MPa	0.101 3	机械效率 η_{MEC}	0.95
燃料进口温度 $T_{fuel}/^{\circ}\text{C}$	25	发动机压缩比 ϵ	16
燃料进口压力 p_{fuel}/MPa	0.101 3	SOFC 工作温度 $T_{SOFC}/^{\circ}\text{C}$	600~750
水进口温度 $T_{water}/^{\circ}\text{C}$	25	SOFC 工作压力 p_{SOFC}/MPa	0.108

在该 SOFC-发动机联合动力系统稳态运行时,遴选了燃料流率、当量比、蒸汽燃料比、SOFC 工作温度 4 个边界条件作为系统性能的影响因素。标准工况下的边界条件取值包括:燃料流率取 22.4 kmol/h,当量比取 1,蒸汽燃料比取 0.5,SOFC 工作温度取 600 $^{\circ}\text{C}$ 。在探究某边界条件对系统性能的影响时,均在标准工况的基础上保证其他 3 个边界条件不变。其中,当量比定义为理论所需空气流率与实际所需空气流率之比;蒸汽燃料比定义为入口燃料中水的流率与 NH_3 、 H_2 、天然气燃料流率之比。

2.5 模型验证

考虑到该联合动力系统由 SOFC 子系统和发动机子系统耦合而成,分别对 SOFC 模块及 HCCI 发动机模块进行单独验证。将 SOFC 模块模拟结果与文献[32]实验值作比较,将 HCCI 发动机模块模拟结果与文献[33]实验值作比较,且将模型边界条件根据文献中的实验条件进行适当调整。其验证结果分别如表 3、表 4 所示。其中相对误差为本文模拟值与文献实验值之间的误差。

表 3 SOFC 模块模型验证结果

Table 3 SOFC module model verification results

SOFC 工作温度/℃	功率/W		相对误差/%
	文献[32]	本文	
600	338.03	354.01	4.72
700	389.73	404.85	3.88
750	397.67	370.37	6.87

表 4 HCCI 发动机模块模型验证结果

Table 4 HCCI engine module model verification results

燃料组分	效率/%		相对误差/%
	文献[33]	本文	
65% NH ₃ + 35% H ₂	57.24	55.85	2.42
H ₂	72.46	75.73	4.52

其中,当 SOFC 运行温度达到 750 ℃ 时,用于维持 SOFC 装置运行所消耗的能量过多,造成热量损失,使得 SOFC 功率降低,与实验相比误差较大,所以在本研究中 SOFC 工作温度最高取到 725 ℃。

此外,NH₃ 实际重整结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,N₂ 与 H₂ 物质的量之比约为 1:3,伴有极少量 NO 生成,但可忽略不计,实际重整结果较为符合反应式(1)。总之,本文研究工作旨在从系统层面探究不同零碳/低碳燃料对联合系统性能的影响。子系统验证结果以及重整结果表明,本文建立的仿真模型对于系统的热力学分析是准确可靠的。

表 5 NH₃ 燃料实际重整结果Table 5 Actual reforming results of NH₃ fuel

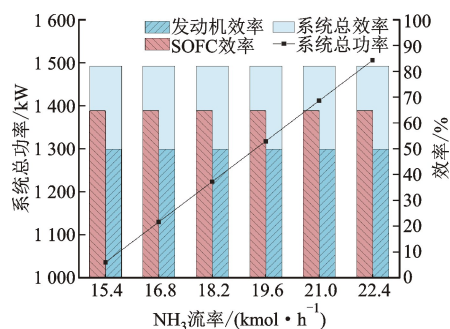
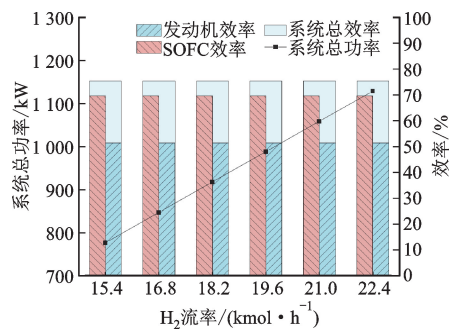
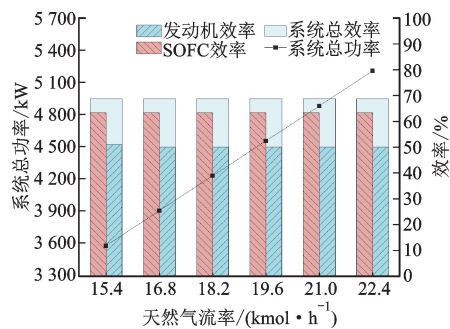
组分	体积分数/%	
	重整前	重整后
NH ₃	56.7	0.8
H ₂ O	43.3	27.9
H ₂	0	53.5
N ₂	0	17.8
NO	0	$1.261 \times 10^{-2.5}$

3 结果与讨论

3.1 燃料流率对系统性能的影响

NH₃、H₂、天然气流率对 SOFC 效率、发动机效率、系统总效率及系统总功率的影响分别如图 4(a)、4(b)、4(c)所示。从图 4 可以看出,使用天然气作燃料时,系统总功率明显高于 NH₃ 与 H₂。由于系统功率主要取决于燃料自身热值,本文中天然气低热值为 1 217.064 kJ/mol,远高于 NH₃ 和 H₂,因此系

统总功率也相对较高,故后文将重点分析系统层面上燃料对 SOFC、发动机和系统整体的效率影响。同时当燃料流率改变而燃料组分、当量比等条件恒定时,子模块效率及系统总效率均无明显变化。燃料流率增加时,系统中发生反应的燃料量增加,SOFC 模块输出功率与发动机模块输出功率同时增加,且为加压装置和空气泵所增加耗功量的近 3 倍,因此系统总功率随燃料流率的增加而增大。与此同时,燃料燃烧所产生的理论总热量也随燃料流率的增加而增大,且在该理想系统模型中,燃料随流率增大而产生的额外损失几乎为 0,系统功率与理论燃料燃烧产生热量的增加幅度几乎相同。因此结果显示 NH₃、H₂、天然气流率增加时,系统功率均随之增加而效率无明显变化。

(a) NH₃ 流率对系统性能的影响(b) H₂ 流率对系统性能的影响

(c) 天然气流率对系统性能的影响

图 4 燃料流率对联合动力系统性能的影响

Fig. 4 Effects of fuel flow rate on the performance of hybrid power system

在相同工况下,不同燃料种类对系统性能的影响如图 5 所示。由图 5 可以看出, H_2 作燃料时 SOFC 和发动机效率均高于其他两种燃料,但使用 NH_3 时系统总效率最高,可达 81.96%。因为此时发动机尾气温度较低,经梯级换热之后尾气中的残余能量较少,系统整体能量利用率高,效率最佳。此外,归因于发动机尾气余热梯级回收技术的应用,将 SOFC 与发动机组成联合动力系统相较于二者单独使用时其效率均有显著提高。

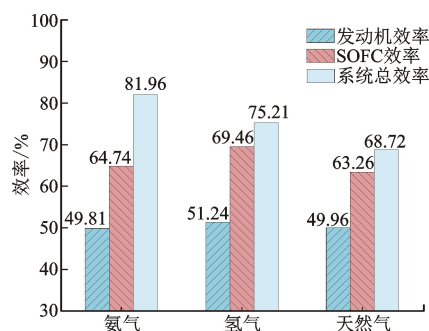


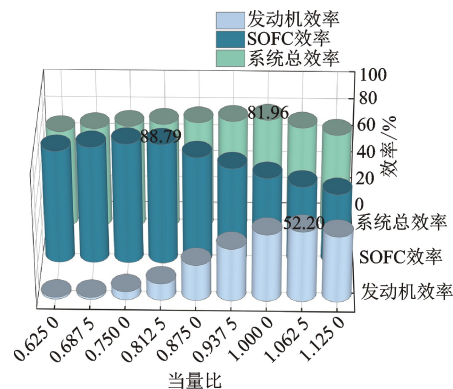
图 5 燃料种类对联合动力系统性能的影响

Fig. 5 Effects of fuel type on the performance of hybrid power system

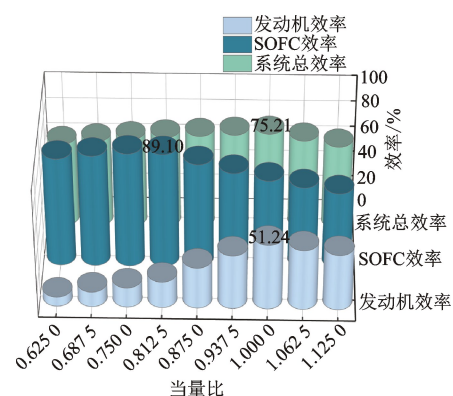
3.2 当量比对系统性能的影响

保证阳极燃料流率等边界条件不变,仅改变入口燃料中的空气流率以改变当量比。当量比对系统性能的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出,SOFC 效率随当量比的增加而提高,当量比为 0.812 5 时 SOFC 效率在 3 种燃料下均达到最高,分别为 88.79%、89.10%、86.52%。此后 SOFC 效率随当量比的增加而大幅下降。在当量比从 0.625 增加到 1 的过程中,发动机效率随当量比的增加而增大。当量比超过 1.062 5 时,发动机效率开始降低。系统总效率在当量比为 1 时达到峰值,分别为 81.96%、75.21%、68.72%。

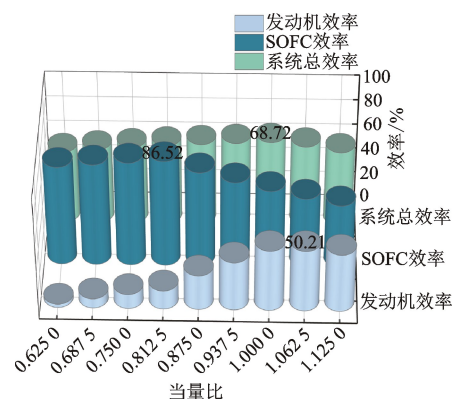
当量比低于 1 即空气过量时,空气泵耗功与加压装置耗功增加,同时发动机中部分燃料燃烧产生的热量被剩余空气带走,发动机输出功率降低。从而系统总功率降低,但是理论输出功率不变,因此系统总效率下降。当量比高于 1 即空气量不足时,虽空气泵耗功与加压装置耗功略有下降,但是燃料在 SOFC 装置及发动机中未完全反应,SOFC 与 HCCI 发动机模块输出功率均会降低,导致系统总输出功率减少,效率随之下降。因此,从系统整体层面看,在理想情况下该联合动力系统稳定工作时,当量比应维持在 1。



(a) NH_3 燃料下当量比对系统性能的影响



(b) H_2 燃料下当量比对系统性能的影响



(c) 天然气燃料下当量比对系统性能的影响

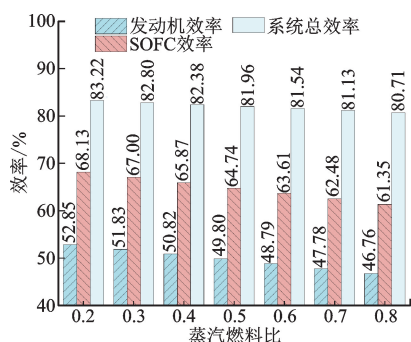
图 6 当量比对联合动力系统性能的影响

Fig. 6 Effects of equivalent ratio on the performance of hybrid power system

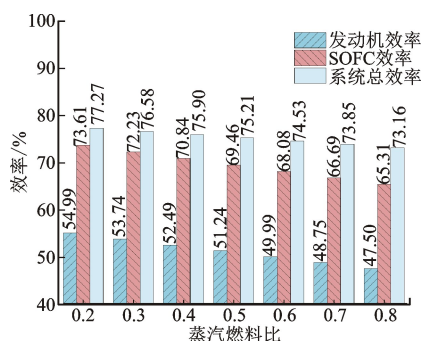
3.3 蒸汽燃料比对系统性能的影响

保证阳极燃料流率等边界条件不变,仅改变入口燃料中的水蒸气流率,以改变蒸汽燃料比。蒸汽燃料比对系统性能的影响如图 7 所示。系统中水蒸气主要用于在 SOFC 模块乳化阳极燃料,使其重整转化更完全。由式(3)可知,高水蒸气体积浓度可促进 CO 水汽变换反应的正向进行,提高系统燃料利用率。燃料中 H_2O 过多时,未反应的燃料组分带走的热量较高,发动机效率、SOFC 效率及系统总效率均会降低,如图 7 所

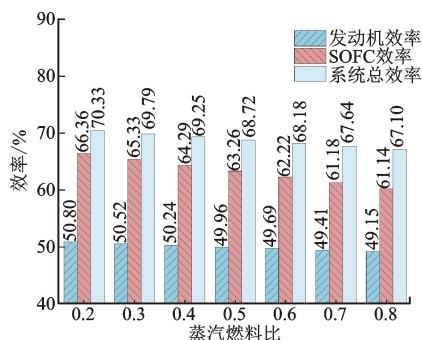
示。同时在图 7(c)中可以看出,与 NH_3 、 H_2 相比,使用天然气时,蒸汽燃料比的增加对发动机效率影响较小,因为此时天然气重整反应更完全,即发动机入口燃料中的 H_2 体积浓度增加,其功率没有明显降低。



(a) NH_3 燃料下蒸汽燃料比对系统性能的影响



(b) H_2 燃料下蒸汽燃料比对系统性能的影响



(c) 天然气燃料下蒸汽燃料比对系统性能的影响

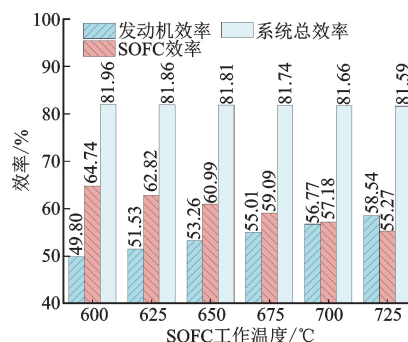
图 7 蒸汽燃料比对联合动力性能的影响

Fig. 7 Effects of steam-fuel ratio on the performance of hybrid power system

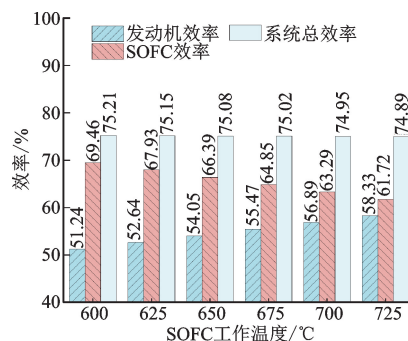
从系统层面看,联合系统效率随蒸汽燃料比的降低而增大,其为 0.2 时 3 种燃料的系统效率分别达到 83.22%、77.27%、70.33%。蒸汽燃料比低即水蒸气输入量减少时,压缩装置耗功降低,系统总输出功率增加,而阳极燃料流率恒定,理论总输出功率不变,故系统效率随之提高。蒸汽燃料比过低不利于阳极燃料重整,进而导致系统燃料利用率下降,经济性变差,因此要同时兼顾系统整体效率与经济性,需要对二者进行综合权衡。

3.4 SOFC 工作温度对系统性能的影响

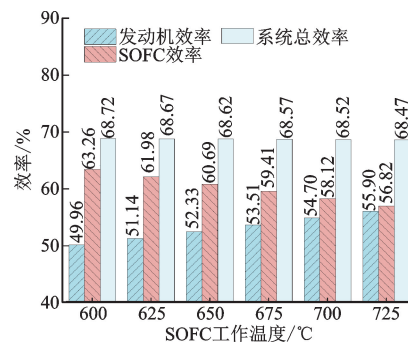
在保证燃料流率等边界条件不变的情况下,将 SOFC 工作温度从标准工况下的 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高到 $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。SOFC 工作温度对系统性能的影响如图 8 所示。随着 SOFC 工作温度的增加,SOFC 效率逐渐降低,发动机效率逐渐提高。系统中 SOFC 作为主要功率输出单元,其效率的降低程度高于发动机效率增加的程度。虽然 SOFC 工作温度的升高在一定程度上可以提高燃料在 SOFC 中的反应速率,然而维持 SOFC 运行所耗能量也随之增加,故 SOFC 净效率随工作温度的升高而降低。另外,SOFC 尾气余热随工作温度的升高而增大,使得通入发动机中的混合气热量增加,从而发动机效率增大,但这并不能弥补 SOFC 效率的损失。



(a) NH_3 燃料



(b) H_2 燃料



(c) 天然气燃料

图 8 SOFC 工作温度对联合动力性能的影响

Fig. 8 Effects of SOFC operating temperature on the performance of hybrid power system

同时在图 8(c)中发现,相较于 NH_3 、 H_2 ,使用天然气时 SOFC 工作温度的提高对效率影响最小,因为高温条件可促进天然气重整反应。然而当 SOFC 工作温度超过 725°C 、当量比为 1 的条件下,系统中氧气不足,燃料在发动机中不能完全燃烧,而通入过量的空气则会降低系统效率。虽然目前在实验与仿真应用中 SOFC 工作温度仍主要为 800°C 左右,但在理想情况下,忽略低温条件对电极材料等活性的影响,考虑到该联合动力系统在动力机械装置中应用时 SOFC 装置与发动机模块的耦合性,SOFC 工作温度维持在 $600^\circ\text{C}\sim 650^\circ\text{C}$ 为宜。尽管 SOFC 低温化(小于等于 650°C)是其发展趋势^[34],但 SOFC 在中低温环境中实际工作时的相关材料改性^[35]、提高发电效率等问题,仍待进一步研究。

4 结 论

将零碳/低碳燃料应用在 SOFC-发动机联合动力系统中,实现高效能量利用的同时降低温室气体排放,符合当前“碳达峰”、“碳中和”目标的发展主旨。本文设计了一种 SOFC-发动机联合动力系统并进行建模,使用 NH_3 、 H_2 、天然气作燃料,探究了燃料种类、燃料流率、当量比、蒸汽燃料比、SOFC 工作温度对系统性能的影响,主要结论如下。

(1)燃料流率增大时系统效率无明显变化,而系统功率的大小主要取决于燃料本身的热值。 H_2 作燃料时 SOFC 和发动机效率最佳,但使用 NH_3 系统总效率最高。将发动机与 SOFC 耦合组成联合动力系统并应用尾气余热梯级利用技术,可显著提高二者效率。

(2)发动机子系统效率随当量比的增加而升高,而 SOFC 效率先缓慢增加后迅速下降,当量比为 0.812 5 时,SOFC 子系统效率达到最优。当量比为 1 时,3 种燃料情况下系统整体效率均达到最高,分别为 81.96%、75.21%、68.72%。

(3)蒸汽燃料比增加有利于天然气重整反应的进行,然而 3 种燃料情况下系统整体效率均会随蒸汽燃料比的增加而降低。降低蒸汽燃料比可使联合系统性能更佳,但蒸汽燃料比过低时系统燃料利用率下降,经济性变差。

(4)提高 SOFC 工作温度时系统效率随之降低,且超过 725°C 时当量比为 1 的条件下燃料在发动机中无法完全燃烧。在理想条件下,考虑到该联合动力系统应用在动力机械装置中时 SOFC 装置与发动机模块的耦合性,SOFC 工作温度维持在

$600^\circ\text{C}\sim 650^\circ\text{C}$ 为宜。

(5) NH_3 作为一种零碳燃料应用在 SOFC-发动机联合动力系统中时,系统整体性能表现良好且无碳排放,同时其安全性高,具有较好应用前景。此外,本文未考虑到实际系统压降、热损失及部件与燃料成本对系统整体经济性能的影响,有待进一步探索。

参考文献:

- [1] 刘少名,邓占锋,徐桂芝,等. 欧洲固体氧化物燃料电池(SOFC)产业化现状 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(3): 278-288.
LIU Shaoming, DENG Zhanfeng, XU Guizhi, et al. Commercialization and future development of the solid oxide fuel cell (SOFC) in Europe [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(3): 278-288.
- [2] PERNA A, MINUTILLO M, JANNELLI E, et al. Design and performance assessment of a combined heat, hydrogen and power (CHHP) system based on ammonia-fueled SOFC [J]. Applied Energy, 2018, 231: 1216-1229.
- [3] SHY S S, HSIEH S C, CHANG H Y. A pressurized ammonia-fueled anode-supported solid oxide fuel cell: power performance and electrochemical impedance measurements [J]. Journal of Power Sources, 2018, 396: 80-87.
- [4] WAN Zhijian, TAO Youkun, SHAO Jing, et al. Ammonia as an effective hydrogen carrier and a clean fuel for solid oxide fuel cells [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113729.
- [5] KALINCI Y, DINCER I. Analysis and performance assessment of NH_3 and H_2 fed SOFC with proton-conducting electrolyte [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(11): 5795-5807.
- [6] TU Baofeng, WEN Hao, YIN Yanxia, et al. Thermodynamic analysis and experimental study of electrode reactions and open circuit voltages for methane-fuelled SOFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(58): 34069-34079.
- [7] ZHU Pengfei, YAO Jing, QIAN Chenhui, et al. High-efficiency conversion of natural gas fuel to power by an integrated system of SOFC, HCCI engine, and waste heat recovery: thermodynamic and thermo-economic analyses [J]. Fuel, 2020, 275: 117883.
- [8] YANG Xiaoyu, ZHAO Hongbin, HOU Qinlong. Proposal and thermodynamic performance study of a novel LNG-fueled SOFC-HAT-CCHP system with near-zero CO_2 emissions [J]. International Journal of Hydrogen

- Energy, 2020, 45(38): 19691-19706.
- [9] 陈宇瑶, 魏明锐. 甲烷内部重整的固体氧化物燃料电池三维多物理场数值模拟 [J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(2): 243-250.
- CHEN Yuyao, WEI Mingrui. Three-dimensional multiphysics numerical simulation of solid oxide fuel cell for internal methane reforming [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(2): 243-250.
- [10] 田文涛. 以碳氢化合物为燃料的固体氧化物燃料电池性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [11] 谢静, 徐明益, 班帅, 等. 天然气内重整和外重整下 SOFC 多场耦合三维模拟分析 [J]. 化工学报, 2019, 70(1): 214-226.
- XIE Jing, XU Mingyi, BAN Shuai, et al. Simulation analysis of multi-physics coupling SOFC fueled nature gas in the way of internal reforming and external reforming [J]. CIESC Journal, 2019, 70(1): 214-226.
- [12] CHENG Cai, CHERIAN J, SIAL M S, et al. Performance assessment of a novel biomass-based solid oxide fuel cell power generation cycle; economic analysis and optimization [J]. Energy, 2021, 224: 120134.
- [13] ROKNI M. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a system with biomass gasification, solid oxide fuel cell (SOFC) and Stirling engine [J]. Energy, 2014, 76: 19-31.
- [14] WU Zhen, ZHU Pengfei, YAO Jing, et al. Combined biomass gasification, SOFC, IC engine, and waste heat recovery system for power and heat generation; energy, exergy, exergoeconomic, environmental (4E) evaluations [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115794.
- [15] 赵明, 梁锐, 邓敏, 等. 发动机尾气废热循环利用系统 [J]. 机械制造, 2015, 53(4): 33.
- ZHAO Ming, LIANG Rui, DENG Min, et al. Engine exhaust waste heat recycling system [J]. Machinery, 2015, 53(4): 33.
- [16] 徐明益. 重整方式对天然气 SOFC 及其热电联供系统性能的影响研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [17] CHOI W, KIM J, KIM Y, et al. Experimental study of homogeneous charge compression ignition engine operation fuelled by emulated solid oxide fuel cell anode off-gas [J]. Applied Energy, 2018, 229: 42-62.
- [18] 朱鹏飞, 郭磊磊, 尧兢, 等. 以生物质为燃料的 SOFC 和发动机热电联供系统: 参数分析和性能优化 [J]. 化工学报, 2021, 72(2): 1089-1099.
- ZHU Pengfei, GUO Leilei, YAO Jing, et al. Parameter analysis and optimization of power and heat cogeneration system with biomass fueled SOFC and engine [J]. CIESC Journal, 2021, 72(2): 1089-1099.
- [19] 郭致成, 高忠权, 鲍彦同, 等. 直流电场对甲烷/氨/空气预混层流火焰的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10): 164-173.
- GUO Zhicheng, GAO Zhongquan, BAO Yantong, et al. Influence of DC electric field on methane/ammonia/air premixed laminar flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(10): 164-173.
- [20] 杨振中, 秦朝举, 张卫正, 等. 柴油引燃直线氢内燃机稀薄燃烧特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 31-36.
- YANG Zhenzhong, QIN Zhaoju, ZHANG Weizheng, et al. Diesel pilot-ignited lean combustion characteristics of a linear hydrogen engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 31-36.
- [21] 江苏大学. 一种发动机和固体氧化物燃料电池联合动力系统: 中国, CN202110236163. X[P]. 2021-06-25.
- [22] 江苏大学. 一种发动机和固体氧化物燃料电池联合动力系统: 中国, CN202110633441. 5[P]. 2021-09-07.
- [23] 何丽美, 王开科, 曹岗林, 等. 采用可逆质子交换膜燃料电池/膨胀机的综合能源系统性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 97-105.
- HE Limei, WANG Kaike, CAO Ganglin, et al. Integrated energy system based on reversible proton exchange membrane fuel cell and expander [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 97-105.
- [24] HABIBOLLAHZADE A, GHOLAMIAN E, HOUSHFAR E, et al. Multi-objective optimization of biomass-based solid oxide fuel cell integrated with Stirling engine and electrolyzer [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 1116-1133.
- [25] GAO Ying, DAI Liankui, ZHU Huadong, et al. Quantitative analysis of main components of natural gas based on Raman spectroscopy [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2019, 47(1): 67-76.
- [26] 杨强, 梁恩广, 赵乌恩, 等. 天然气组分变化对双燃料燃烧室性能影响试验研究 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(4): 49-54.
- YANG Qiang, LIANG Enguang, ZHAO Wuen, et al. Experimental study of impact of natural gas component N_2 variation on dual-fuel combustion performance [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(4): 49-54.
- [27] 樊鹏飞, 张兄文, 李国君, 等. 板式固体氧化物燃料电池的热应力分析 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 75-81.
- FAN Pengfei, ZHANG Xiongwen, LI Guojun, et al. Analysis on thermal stress of a planar solid oxide fuel

- cell [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 75-81.
- [28] 江婷. 以焦炉煤气为燃料的高效 SOFC-CCHP 联产系统性能研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- [29] 李裕, 叶爽, 王蔚国. 基于天然气自热重整的 SOFC 系统性能分析 [J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1557-1564.
- LI Yu, YE Shuang, WANG Weiguo. Performance analysis of SOFC system based on natural gas autothermal reforming [J]. CIESC Journal, 2016, 67(4): 1557-1564.
- [30] 孔为, 潘泽华, 韩雷涛, 等. 固体氧化物燃料电池理论分析与结构优化设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [31] DJERMOUNI M, OUADHA A. Thermodynamic analysis of an HCCI engine based system running on natural gas [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88: 723-731.
- [32] WANG Yuanhui, YANG Jun, WANG Jianxin, et al. Low temperature ammonia decomposition catalyst and its application for direct ammonia-fueled solid oxide fuel cells [J]. ECS Transactions, 2019, 91(1): 1611-1619.
- [33] POCHET M, TRUEDSSON I, FOUCHER F, et al. Ammonia-hydrogen blends in homogeneous-charge compression-ignition engine [C]//13th International Conference on Engines & Vehicles. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2017: 2017-24-0087.
- [34] SU Hanrui, HU Yunhang. Progress in low-temperature solid oxide fuel cells with hydrocarbon fuels [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 402: 126235.
- [35] 吴春, 陈刚, 彭勃. 中温固体氧化物燃料电池 $\text{LaNiO}_{2.5}\text{-Ba}(\text{Zr}_{0.1}\text{Ce}_{0.7}\text{Y}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ 阴极的制备和表征 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 92-96.
- WU Chun, CHEN Gang, PENG Bo. Preparation and characterization of $\text{LaNiO}_{2.5}\text{-Ba}(\text{Zr}_{0.1}\text{Ce}_{0.7}\text{Y}_{0.2})\text{O}_{3-\delta}$ composite cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cells [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 92-96.

(编辑 武红江 亢列梅)