

DOI: 10.19666/j.rlfed.202309153

耦合太阳能氨气分解制氢过程的 MGT-ORC 动力系统热力性能分析

席学章¹, 王秋实², 张汉飞², 段立强²

(1. 国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100095;

2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 构建高效、无污染的电力发电系统是解决目前能源紧缺和环境污染问题的有效手段。以 Capstone 公司生产的 C65 型微型燃气轮机为核心发电部件, 耦合了太阳能驱动氨气分解制氢的热化学过程, 实现了可再生能源和氨气化学能之间的多能互补, 采用有机朗肯循环 (ORC) 作为底循环回收微型燃气轮机 (微燃机, MGT) 产生的烟气余热并发电, 实现能量梯级利用。在化工模拟软件 Aspen Plus 中构建了详细的模拟流程, 进行系统热力性能分析, 结果表明: 通过太阳能和氨气的互补提高了富氢合成气热值, 微燃机输出功率为 89.95 kW, 比参考系统中的 C65 微燃机多 24.95 kW; 该系统在设计工况下的电效率达到了 44.81%, 焓效率为 47.97%, 分别比参考系统高出 8.51 个百分点和 9.67 个百分点; 系统中最大的焓损部件为燃烧室, 占到了总焓损的 41.67%, 其次蒸发器和回热器分别占 14.31% 和 11.15%; 系统电效率和焓效率随着太阳能集热量的增加分别呈减小和增大的趋势。该研究结果可为以氨气为燃料并耦合太阳能的分布式微燃机发电系统提供参考。

[关键词] 太阳能; 氨气; 制氢; 热力性能; 微型燃气轮机-有机朗肯循环

[引用本文格式] 席学章, 王秋实, 张汉飞, 等. 耦合太阳能氨气分解制氢过程的 MGT-ORC 动力系统热力性能分析[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 59-66. XI Xuezhang, WANG Qiushi, ZHANG Hanfei, et al. Thermodynamic performance analysis of MGT-ORC power system coupled with solar ammonia decomposition for hydrogen production[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 59-66.

Thermodynamic performance analysis of MGT-ORC power system coupled with solar ammonia decomposition for hydrogen production

XI Xuezhang¹, WANG Qiushi², ZHANG Hanfei², DUAN Liqiang²

(1. State Nuclear Power Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100095, China;

2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Building an efficient and pollution-free power generation system is an effective means to solve the current energy shortage and environmental pollution problems. By taking the C65 micro gas turbine produced by Capstone Company as the core power generation component, and coupling with the thermochemical process of solar powered ammonia decomposition to produce hydrogen, this article achieves multi-energy complementarity between renewable energy and ammonia chemical energy. The organic Rankine cycle is used as the bottom cycle to recover the waste heat from the flue gas generated by the micro gas turbine and generate electricity, achieving cascade energy utilization. A detailed simulation process is constructed in the chemical simulation software Aspen Plus. The results show that the complementary use of solar energy and ammonia has improved the calorific value of the generated hydrogen rich synthesis gas. The output power of the micro combustion engine is 89.95 kW, which is 24.95 kW more than the C65 micro combustion engine in the reference system. The electrical efficiency of the system under design conditions reaches 44.81%, and the thermal efficiency is 47.97%, which are 8.51 percentage

收稿日期: 2023-09-29

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (52090064)

Supported by: Major Project of National Natural Science Foundation of China (52090064)

第一作者简介: 席学章 (1980), 男, 高级工程师, 主要研究方向为核电火电新能源发电项目设计, xixuezhang@snpdri.com.

通信作者简介: 张汉飞 (1986), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为先进能量系统集成优化, hanfei.zhang@ncepu.edu.cn.

points and 9.67 percentage points higher than that of the reference system, respectively. The component having the largest exergy loss in the system is the combustion chamber, accounting for 41.67% of the total damage, followed by the evaporator and regenerator, accounting for 14.31% and 11.15%, respectively. Sensitivity analysis shows that the electrical efficiency and thermal efficiency of the system decrease and increase with the increase of solar energy collection, respectively. The research results provide a reference for a distributed micro turbine power generation system using ammonia gas as fuel and coupled with solar energy.

Key words: solar energy; ammonia; hydrogen production; thermodynamic performance; MGT-ORC

能源高效利用与环境协调相容是实现经济社会可持续发展的关键,目前化石燃料的大量使用导致能源匮乏和环境污染 2 大问题^[1]。遵循温度对口、能量梯级利用的原则,分布式能源系统是实现能源转型和能源技术变革的重要方向^[2]。传统单一的能源系统能源利用效率低下以及在技术和经济等方面存在很多不足之处,已经不能满足目前能源短缺这一大背景下的能源可持续发展目标^[3]。因此,综合利用已有多种能源作为热力系统的输入能量,实现源头的多能互补成为了减少化石能源使用和缓解环境问题的有效手段。

太阳能是目前储量最大、利用技术最成熟的可再生能源^[4],将太阳能引入分布式发电系统是目前实现多能互补高效清洁发电的重要手段。发电部件的选取同样是实现分布式发电系统高效运转的重要环节。目前,主要用于小型分布式系统的原动机种类包括燃料电池(fuel cell, FC)^[4]、微型燃气轮机(micro gas turbine, MGT)^[5]、内燃机(internal combustion engine, ICE)^[6]以及斯特林引擎(Stirling engine, SE)^[7]等。燃料电池能直接将燃料的化学能转化为电能输出。高温燃料电池如固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)^[8]、熔融碳酸盐燃料电池(molten carbonate fuel cell, MCFC)^[9]的发电效率超过 50%,是目前最理想的发电原动机,然而由于其技术不够成熟、启动时间长、投资成本高等缺点^[4],还未大规模投入使用。与其他原动机相比,微型燃气轮机具有发电效率高、噪声低、排放低、寿命长、燃料适应性广等优点,同时还配有回热器回收烟气余热以预热空气,提高效率^[10]。此外,有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)、卡林那循环(Kalina cycle, KC)等低温发电循环被用作底循环,以吸收原动机产生的低品位余热,实现能量的梯级利用。

基于此,学者们进行了广泛研究。Ren 等人^[4]对分布式能源系统的集成和优化进行了综述,详细介绍了现有的分布式能源系统的集成方式与优化方法,为后续对分布式系统的研究指明了方向。

Wang 等人^[6]构建了以内燃机为核心发电部件,并用 ORC 回收烟气余热的热力系统,同时以热互补的形式耦合了太阳能,实现了多能互补,对系统从热力性能和经济性能的角度进行了分析。Lu 等人^[9]提出了整合太阳能辅助燃气蒸汽联合循环并耦合 MCFC 的热力系统,采用汽轮机抽汽驱动溴化锂制冷机,结果表明,新系统焓效率和热效率分别达到 61.69% 和 61.64%。Zhang 等人^[11]提出了集成低温太阳能的分布式冷热电三联供(combined cooling heating and power, CCHP)系统,该系统实现了低温太阳能和化石燃料甲醇之间的多能互补,以及能量的梯级利用,结果表明,系统净太阳能发电效率预计 26%~29%,节省了 30.4% 的化石燃料,减少了碳排放,典型日分析表明该系统的冷热电输出能够满足大部分时间内的用户需求。杨倩^[12]提出了以甲烷为燃料的集成 SOFC-MGT-KC 混合发电系统,实现了系统高效发电,并对底循环的余热利用方式进行了优化,提出新的评价指标,结果表明,新系统发电效率达到 73.13%,焓效率达到 70.69%。Wang 等人^[13]提出了一种新型耦合太阳能甲烷重整制氢的分布式冷热电三联供系统,并从能量、焓、环境、经济 4 个角度对系统进行分析,该系统实现了太阳能品位的提升与甲烷品位的梯级降低,且污染物排放量相对于参考系统明显减小,同时通过主动蓄能方式调控系统输出,使得冷热电输出能够完全满足用户负荷需求。范峻铭等^[14]研究了中温太阳能驱动甲烷化学链重整冷热电联供系统的性能,在设计点工况条件下系统总能效可达 80.9%,太阳能集热面积节约率达 53.2%,太阳能净发电效率可达 27.3%。许达等^[15]提出了低温太阳能与化石燃料甲醇互补的分布式能源系统,并探讨了系统的能量平衡和焓平衡及变太阳辐照下系统的热力学性能变化趋势,为高效利用中低温太阳能热化学技术与分布式能源系统的集成提供了新途径。Yan 等人^[16]对比分析了以 ORC 和卡林那循环作为底循环回收以天然气为燃料的 SOFC-MGT 发电系统的余热性能,结果表明以 ORC 作为底循环的发电系统性能优于卡林那循环。

氨气作为一种新型的二次能源,具有巨大的发展潜力和市场前景。

大多数分布式发电系统广泛以天然气作为燃料,而相比于天然气,氨气具有零碳的优势,其理论燃烧产物是清洁无污染的氮气和水^[17]。此外,氨气密度大,容易液化储存^[18],同时氨气含氢率高^[19],1 mol 的氨气分解能产生 1.5 mol 的氢气^[20]。因此,用氨气作为微型燃气轮机(微燃机, MGT)的燃料是一种新型发电方式。

基于以上分析,本文构建了以微型燃气轮机发电机组为核心的耦合了太阳能氨气分解制氢热化

学过程的动力发电系统,实现了多能互补,并采用高效的 ORC 作为底循环,将低品位的烟气余热转化为高品质的电能,并基于热力学第一、第二定律对系统的能量、焓等热力性能进行了全面分析。

1 系统描述

耦合太阳能氨气分解制氢的微型燃气轮机-有机朗肯循环(MGT-ORC)动力系统主要由太阳能氨气分解制氢子系统、微型燃气轮机发电子系统及 ORC 发电子系统 3 部分组成,其结构示意图如图 1 所示。

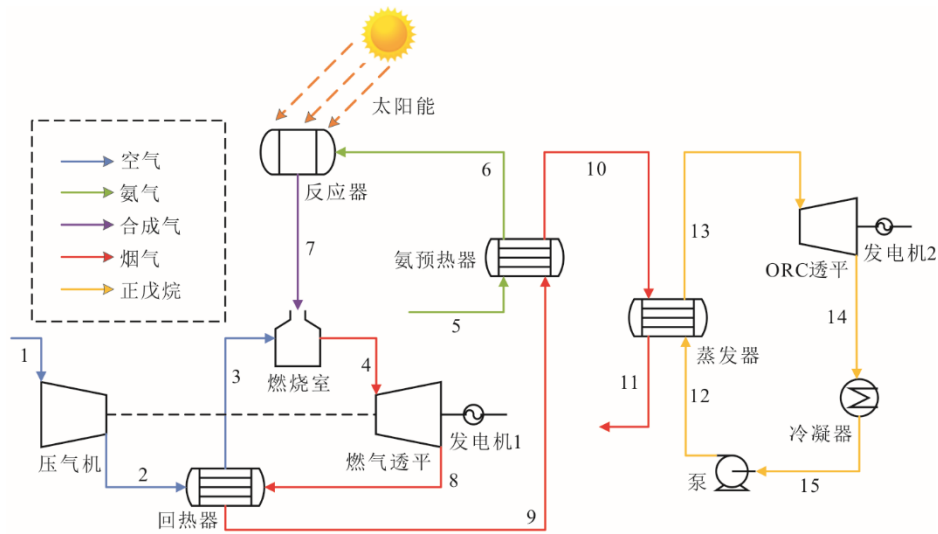


图 1 耦合太阳能氨气分解制氢的 MGT-ORC 动力系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram the MGT-ORC power system coupled with hydrogen production using solar ammonia decomposition

环境条件下的氨气 5 经过烟气 9 预热后送入氨分解反应器发生分解反应,分解所需反应热由槽式太阳能集热器提供。氨气产生的氢气和氮气 7 被送入微型燃气轮机燃烧室中,与经过烟气回热加热的高温、高压空气 3 混合燃烧,产生高温、高压烟气 4 进入微燃机透平中膨胀做功带动发电机向外输出电能。

MGT 排烟 9 预热氨气后,仍具有较高的温度,因此可用高效 ORC 回收这部分热量。烟气 10 在蒸发器中蒸发高压的有机流体 12,产生的高温、高压蒸汽 13 进入 ORC 透平中膨胀做功,向外输出电能。乏汽 14 在冷凝器中冷凝,后经高压泵压缩后进入蒸发器吸热,完成下一次循环。

2 系统建模

本研究中的系统模型构建均采用化工模拟软件 Aspen Plus。

2.1 槽式太阳能集热器

本文采用文献[21]中研制的中温槽式太阳能热化学接受反应器,其能够实现利用集中收集的中温太阳能热直接驱动反应器中的分解反应。太阳能接收反应器沿着聚光器的焦点线安装,驱动反应的太阳能热量为 Q_{sol} ^[22]:

$$Q_{sol} = I \times S \times \eta_{PTC} \times K(\theta) \quad (1)$$

式中: I 表示太阳直射辐射, W/m^2 ; S 表示槽式集热器面积, m^2 ; η_{PTC} 表示槽式集热器实际集热效率,其与截距系数、镜面反射率、镜面利用率、玻璃透过率、太阳吸收率、清洁系数等因素有关; θ 表示入射角; $K(\theta)$ 表示入射角修正量^[6]。

$$K(\theta) = \cos(\theta) - 5.25097 \times 10^{-4} \times \theta - 2.859621 \times 10^{-5} \times \theta^2 \quad (2)$$

2.2 微型燃气轮机发电机组

1) 压气机

由于空气在实际压缩过程中并不是绝热等熵的, 存在熵增, 因此压缩后的空气温度可表达为:

$$T_2 = T_1 [1 + (\gamma_{AC}^{k-1/k} - 1) / \eta_{AC}] \quad (3)$$

式中: γ_{AC} 和 k 分别为压气机的压缩比和空气的比热容比; η_{AC} 为压气机的等熵效率。

压气机耗功 W_{AC} 可表示为:

$$W_{AC} = m_a \times \frac{k}{k-1} RT_0 (\pi^{k-1/k} - 1) / \eta_{AC} \quad (4)$$

式中: m_a 表示空气质量流量, kg/s; T_0 表示环境温度, °C。

2) 回热器

回热器回热度 σ 表示为:

$$\sigma = \frac{T_3 - T_2}{T_8 - T_2} \quad (5)$$

式中: T_2 、 T_3 、 T_8 分别为流股 2、3、8 的温度, K。

回热器烟气与空气能量守恒, 可表示为:

$$c_{pa} m_a (T_3 - T_2) = c_{pg} m_g (T_8 - T_2) \quad (6)$$

式中: c_p 表示比热容, kJ/(kg·K); 下标 a、g 分别表示空气和烟气; m_g 表示烟气的质量流量, kg/s。

3) 燃烧室

忽略气体流量和热量的损失, 燃烧室的能量平衡可表示为:

$$m_{syn} \cdot Q_{LHV_{syn}} + c_{pa} m_a (T_3 - T_b) = c_{pg} m_g (T_8 - T_b) \quad (7)$$

式中: T_b 为基准温度, K; $Q_{LHV_{syn}}$ 表示合成气低位热值, kJ/kg。

4) 透平

烟气在透平内膨胀后的温度 T_8 可表示为:

$$T_8 = T_4 [1 - (1 - \gamma_{GT}^{k_g-1/k_g}) / \eta_{GT}] \quad (8)$$

式中: γ_{GT} 和 k_g 分别为压气机的压缩比和空气的比热容比; η_{GT} 为压气机的等熵效率; T_4 为进入燃气透平的烟气温度, K。

则烟气在透平中膨胀输出功为^[23]:

$$W_{MGT} = m_{gas} (h_4 - h_8) \quad (9)$$

式中: m_{gas} 表示烟气质量流量, kg/s; h_4 、 h_8 表示燃气透平进、出口烟气比焓, kJ/kg。

微燃机发电机组实际输出功 $W_{MGT,NET}$ 为:

$$W_{MGT,NET} = W_{MGT} - W_{AC} \quad (10)$$

本文所用微燃机模型是在 Capstone 公司生产的 C65 型微燃机基础上进行改进, 因此在建模时与该公司给出的 C65 的设计参数进行了对比, 结果见表 1。由表 1 可以看出, 二者关键设计参数的误差都很小, 均在允许范围内, 从而证明了模型的准确性。

表 1 微燃机发电机组模型验证结果对比
Tab.1 Comparison of model validation results for micro gas turbine generator units

项目	模拟值	C65 设计值
额定输出功率/kW	65.88	65.00
烟气流量/(kg·s ⁻¹)	0.49	0.49
排烟温度/°C	329.63	329.00
电效率/%	28.29	28.00

2.3 ORC

ORC 中的工质为有机化合物正戊烷, 循环主要设备包括蒸发器、透平、冷凝器和高压泵。蒸发器的 $T-Q$ 图如图 2 所示。蒸发器冷热两端的能量平衡方程可表示为:

$$m_{10} (h_{10} - h_{11}) = m_{12} (h_{13} - h_{12}) \quad (11)$$

式中: m_{10} 、 m_{12} 为流股 10、12 的烟气流量, kg/s; h_{10} 、 h_{11} 、 h_{12} 、 h_{13} 为流股 10、11、12、13 的比焓, kJ/kg。

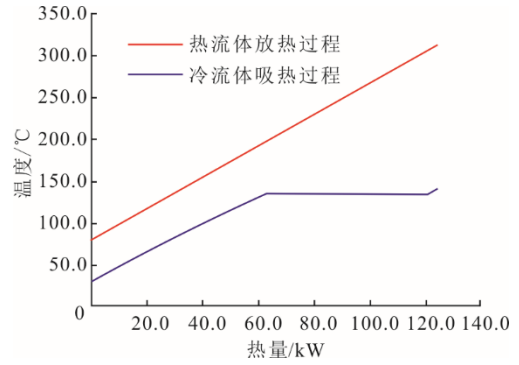


图 2 蒸发器 $T-Q$ 图
Fig.2 $T-Q$ diagram of the evaporator

高温高压蒸汽在透平中膨胀, 忽略泵耗功, 则 ORC 输出功 W_{ORC} 可表示为:

$$W_{ORC} = m_{13} (h_{13} - h_{14}) \quad (12)$$

本文中所采用的 ORC 模型已在文献[24]中经过验证, 因此不再赘述。

新系统的主要设计参数见表 2^[11,13,25]。

表 2 设计工况下新系统主要模拟参数
Tab.2 Main simulation parameters of the new system under design conditions

项目	数值
氨气流量/(kmol·h ⁻¹)	2.35
设计点太阳辐照强度/(W·m ⁻²)	800
氨气分解温度/°C	374
氨气分解压力/Pa	405 000
燃气透平入口温度/°C	94
压气机入口空气流量/(kg·s ⁻¹)	0.49
ORC 透平入口压力/Pa	1 200 000
ORC 透平等熵效率/%	85

2.4 评价指标

本文选用以下性能指标来评价新型混合动力系统的性能。

1) 氢气收率表示太阳能驱动氨气分解反应产生的氢气量与反应燃料的折合产氢量之比^[26]:

$$X_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{1.5 \times n_{NH_3}} \times 100\% \quad (13)$$

式中: n_{H_2} 、 n_{NH_3} 表示 H_2 、 NH_3 摩尔流量, kmol/h。

2) 系统电效率, 定义为^[27]:

$$\eta_{ele} = \frac{W_{MGT,NET} + W_{ORC}}{Q_{sol} + m_{NH_3} \times Q_{LHV,NH_3}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: Q_{sol} 为系统利用的太阳能热量, kW; m_{NH_3} 为氨气质量流量, kg/s; Q_{LHV,NH_3} 为氨气低位热值, kJ/kg。

3) 系统产品均为电能, 其品位为 1, 因此在数量上电焓与电能相等, 焓效率 η_{exe} 可表示为^[21]:

$$\eta_{exe} = \frac{W_{MGT,NET} + W_{ORC}}{Q_{sol} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sol}}\right) + m_{NH_3} \times Q_{LHV,NH_3}} \quad (15)$$

式中: T_0 和 T_{sol} 分别表示环境温度和太阳能集热温度, °C。

4) 对于某一部件, 其过程中产生的焓损失可表示为:

$$E_{D,k} = E_{F,k} - E_{P,k} \quad (16)$$

式中: $E_{D,k}$ 、 $E_{F,k}$ 和 $E_{P,k}$ 表示部件 k 的焓损、燃料焓和产品焓, kW。

5) 太阳能-化学能效率 $\eta_{sol-che}$ 为^[21]:

$$\eta_{sol-che} = \frac{Q_{LHV,syn} - Q_{LHV,NH_3}}{Q_{sol}} \times 100\% \quad (17)$$

6) 化学能-电效率 $\eta_{che-ele}$ 为^[21]:

$$\eta_{che-ele} = \frac{W_{MGT,NET} + W_{ORC}}{Q_{LHV,syn}} \times 100\% \quad (18)$$

7) 太阳能-电效率 $\eta_{sol-ele}$ 为^[21]:

$$\eta_{sol-ele} = \eta_{sol-che} \times \eta_{che-ele} \times 100\% \quad (19)$$

8) ORC 发电效率 η_{ORC} 为^[28]:

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{ORC}}{m_{10}(h_{10} - h_{11})} \times 100\% \quad (20)$$

3 结果与分析

本文建立了耦合太阳能氨气分解制氢过程的 MGT-ORC 混合动力系统, 在化工模拟软件 Aspen Plus 中建立了模拟流程, 其各流股主要参数见表 3。

3.1 能量分析

表 4 列出了新系统和参考系统的能量平衡。其

中, 参考系统为 Capstone C65 微型燃气轮机发电机组为核心的动力发电机组, 其余热同样用 ORC 回收用以发电。模拟时保证两对比系统的燃气透平入口温度相同、压气机入口空气流量相同^[11]。由表 4 可见: 新系统的能量总输入量为 242.87 kW 包括 206.82 kW 的氨气化学能和 36.05 kW 的太阳能, 其中太阳能占比达到 14.84%; 系统输出电力中, 微燃机净功率为 89.95 kW, ORC 输出功率为 18.89 kW, 系统设计工况下的电效率为 44.81%, 参考系统的电效率仅有 36.3%, 总输出功率比新系统少 24.29 kW。新系统耦合太阳能氨气分解的热化学反应, 其系统输出能量和效率均优于参考系统。

表 3 动力系统各流股主要参数

Tab.3 Main parameters of each stream in the power system

流股	温度/°C	压力/Pa	摩尔流量/(kmol·h ⁻¹)	焓/kW
1	25.00	101 000	61.14	-0.14
2	193.67	405 000	61.14	84.03
3	510.00	405 000	61.14	249.27
4	904.18	405 000	64.08	261.06
5	25.00	405 000	2.35	-30.12
6	250.00	405 000	2.35	-24.27
7	374.73	405 000	4.59	11.78
8	614.21	101 000	64.08	86.94
9	322.39	101 000	64.08	-78.30
10	311.70	101 000	64.08	-84.15
11	80.00	101 000	64.08	-208.07
12	143.51	1 200 000	11.23	-413.71
13	88.31	101 000	11.23	-432.60
14	30.00	101 000	11.23	-538.21
15	0.09	1 200 000	11.23	-537.64

表 4 新系统和参考系统能量平衡

Tab.4 Energy balance table for the new system and reference system

项目	新系统	参考系统
总输入/kW	242.87	232.92
燃料化学能/kW	206.82 (氨气)	232.92 (天然气)
太阳能/kW	36.05	
总输出/kW	108.84	84.55
$W_{MGT,NET}$ /kW	89.95	65.00
W_{ORC} /kW	18.89	19.55
电效率/%	44.81	36.30

3.2 焓分析

图 3 展示了新型动力系统的焓流图, 图 4 展示了系统各主要部件的焓损失大小和焓损占比。由图 3、图 4 可见, 系统的焓效率为 47.97%, 总焓损失 118.07 kW, 其中焓损失最大的部件为燃烧室, 占比

达到了 41.67%，其余部件焓损占比均小于 10%。这主要是因为燃烧室内发生了合成气燃烧反应，由化学能转化为物理热能的过程中能量品位大幅度降低，产生了较大的焓损。蒸发器和回热器的焓损占比分别达到了 14.31% 和 11.15%，这主要是因为在这二者的换热过程中存在较大的换热温差。由此可见，提高焓效率应从改进燃烧室、回热器和蒸发器的性能入手。

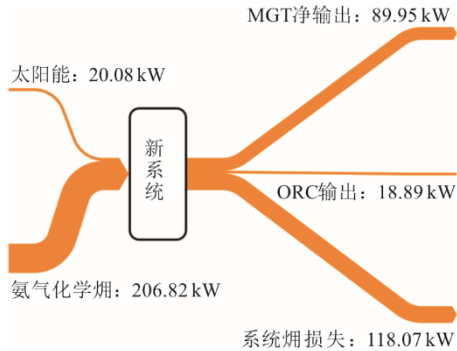


图 3 动力系统焓流图

Fig.3 Exergy flow diagram of the power system

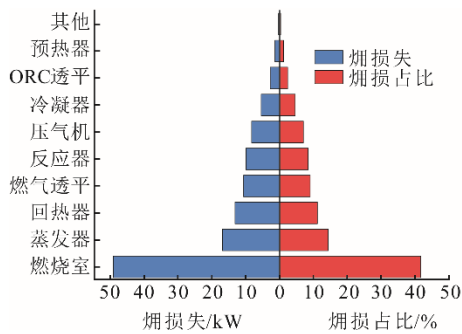


图 4 各主要部件焓损失和焓损占比

Fig.4 Exergy loss and exergy loss ratio of the components

3.3 太阳能敏感性分析

太阳能集热量对氢气收率和合成气热值的影响如图 5 所示。由图 5 可见，当太阳能集热量从 20 kW 增至 40 kW 时，由于氨气分解是吸热反应，氢气收率逐渐增高，最终接近 100%。这是因为在高吸热量情况下，氨气分解接近完全，其中的氢元素全部转化为氢气。合成气的热值从 225.66 kW 增至 236.25 kW，表明通过热化学反应，低品位的太阳能转化到了高品位的燃料化学能之中。

图 6 为太阳能集热量对系统输出功率的影响。由图 6 可见，当太阳能集热量从 20 kW 增至 40 kW 时，微燃机的输出功率也不断增加，同时排烟温度升高，ORC 回收余热增加，ORC 输出功率也增加，系统总输出功率从 103.17 kW 增至 110.19 kW。

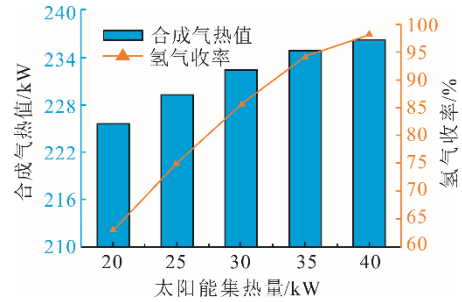


图 5 太阳能集热量对氢气收率和合成气热值的影响

Fig.5 The effect of solar energy collection on hydrogen yield and syngas calorific value

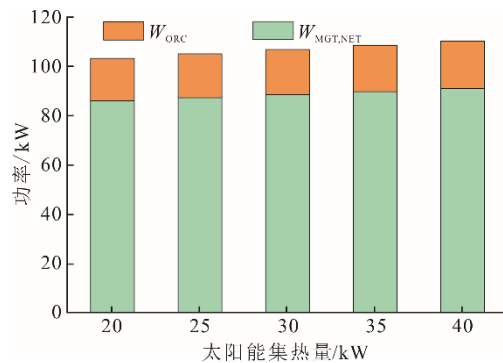


图 6 太阳能集热量对系统输出功率影响

Fig.6 The influence of solar energy collection on system output power

图 7 展示了系统电效率、新系统焓效率和 ORC 发电效率随太阳能集热量增加的变化。由图 7 可见，当太阳能集热量从 20 kW 增至 40 kW 时，系统电效率从 45.48% 降至 44.64%，而系统焓效率 47.33% 增至 48.1%。这主要是因为太阳能输入量增幅大于输出功率增幅，而焓输入的增幅小于输出焓增幅。同样地，烟气余热增幅也大于 ORC 发电功率，因为 ORC 的发电效率逐渐减小。

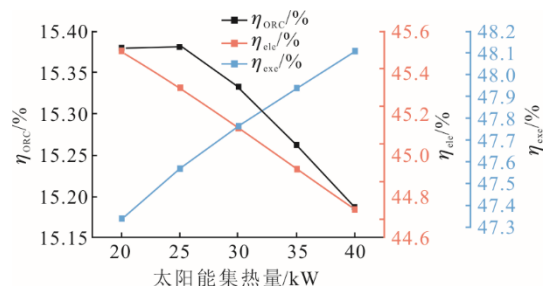


图 7 太阳能集热量对系统效率的影响

Fig.7 The effect of solar energy collection on system efficiency

图 8 展示了太阳能热化学性能随太阳能集热量增加的变化趋势。由图 8 可见，当太阳能集热量从 20 kW 增至 40 kW 时，太阳能热化学效率从 94.20% 降至 73.58%。这主要是因为随着太阳能集热量的增

加, 氨气分解程度逐渐加深到完全分解, 而此时太阳能热量更多的转化为合成气的物理热能, 因此太阳能热化学效率逐渐降低。当太阳能集热量从 20 kW 增至 40 kW 时化学能发电效率从 45.71% 增至 46.64%, 太阳能发电效率从 43.07% 降至 34.32%。

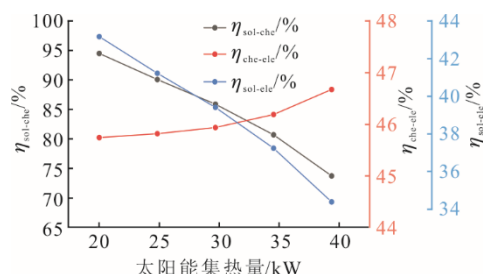


图8 太阳能集热量对太阳能热化学效率的影响
Fig.8 The effect of solar energy collection on solar thermochemistry efficiency

4 结 论

本文提出了一种新型的以氨气为燃料的多能互补动力发电系统, 该系统以高效微型燃气轮机作为核心原动机, 以太阳能驱动氨气分解产生的富氢合成气作为微型燃气轮机燃料, 并耦合了有机朗肯循环作为底循环, 回收微型燃气轮机产生的烟气余热进行发电。

1) 相对于传统以天然气为燃料的微型燃气轮机, 本研究以氨气为燃料, 并耦合了太阳能, 实现了多能互补与零碳排放。

2) 新系统的电效率和焓效率分别达到 44.81% 和 47.97%, 比参考系统多出 8.51 个百分点和 9.67 个百分点, 以氨气作为燃料的优势明显。

3) 系统最大的焓损失在燃烧室, 占总焓损的 41.67%, 其次是蒸发器和回热器, 分别占 14.31% 和 11.15%。因此, 应着重关注燃烧室、蒸发器和回热器, 提高系统效率。

4) 随着太阳能集热量的增加, 系统输出功率逐渐增加, 但电效率逐渐减小, 焓效率逐渐增加。

[参 考 文 献]

[1] WANG Q, DUAN L, LU Z, et al. Thermodynamic and economic analysis of a multi-energy complementary distributed CCHP system coupled with solar thermochemistry and active energy storage regulation process[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 292: 117429.

[2] 杨勇平, 段立强, 杜小泽, 等. 多能源互补分布式能源的研究基础与展望[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 281-288.

YANG Yongping, DUAN Liqiang, DU Xiaozhe, et al. Research foundation and prospect on distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. China Science Foundation, 2020, 34(3): 281-288.

[3] 屈小云, 吴鸣, 李奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.

QU Xiaoyun, WU Ming, LI Qi, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 153-163.

[4] REN F, WEI Z, ZHAI X. A review on the integration and optimization of distributed energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 162: 112440.

[5] LI J, LI Y. Micro gas turbine: Developments, applications, and key technologies on components[J]. Propulsion and Power Research, 2023, 12(1): 1-43.

[6] WANG S, FU Z. Thermodynamic and economic analysis of solar assisted CCHP-ORC system with DME as fuel[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 535-545.

[7] EBRAHIMI M, KESHAVARZ A. Prime mover selection for a residential micro-CCHP by using two multi-criteria decision-making methods[J]. Energy and Buildings, 2012, 55: 322-331.

[8] LI Y, WANG L, SHARMA S, et al. Design and optimization of a solid oxide fuel cell-inverted gas turbine integrated system with zero carbon emission for distributed cogeneration[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 268: 116036.

[9] LU Z, DUAN L, WANG Z. Performance evaluation of a novel CCHP system integrated with MCFC, ISCC and LiBr refrigeration system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(48): 20957-20972.

[10] 李莹莹. 30 kW 微燃机冷热电联供系统的性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1.

LI Yingying. The performance study on combined cooling heating and power system based on 30 kW micro turbine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 1.

[11] ZHANG N, WANG Z, LIOR N, et al. Advancement of distributed energy methods by a novel high efficiency solar-assisted combined cooling, heating and power system[J]. Applied Energy, 2018, 219: 179-186.

[12] 杨倩. SOFC-GT-Kalina 联合循环系统性能研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 1.

YANG Qian. Performance analysis of the SOFC-GT-Kalina integrated power generation system[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 1.

[13] WANG Q, DUAN L, ZHENG N, LU Z. 4E Analysis of a novel combined cooling, heating and power system coupled with solar thermochemical process and energy storage[J]. Energy, 2023, 275: 127498.

[14] 范峻铭, 洪慧, 张浩, 等. 中温太阳能驱动甲烷化学链重整冷热电系统及性能研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(3): 465-470.

FAN Junming, HONG Hui, ZHANG Hao, et al. Analysis of combined cooling, heating and power generation system based on methane chemical looping reforming driven by mid-temp solar energy[J]. Journal of

- Engineering Thermophysics, 2018, 39(3): 465-470.
- [15] 许达, 刘启斌, 隋军, 等. 太阳能与甲醇热化学互补的分布式能源系统研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(9): 1601-1605.
XU Da, LIU Qibin, SUI Jun, et al. Research on distributed energy system with solar-methanol thermochemical hybridization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(9): 1601-1605.
- [16] YAN Z, ZHAO P, WANG J, et al. Thermodynamic analysis of an SOFC-GT-ORC integrated power system with liquefied natural gas as heat sink[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(8): 3352-3363.
- [17] ISHAQ H, DINCER I. Design and simulation of a new cascaded ammonia synthesis system driven by renewables[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 40: 100725.
- [18] ASSUMPCÃO M, DA S S, DE S R, et al. Direct ammonia fuel cell performance using PtIr/C as anode electrocatalysts[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(10): 5148-5152.
- [19] KOUMI N S, AYINA O L, KEMAJOU A, et al. Design and simulation of hybrid solar high-temperature hydrogen production system using both solar photovoltaic and thermal energy[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 7: 279-293.
- [20] CHEN W H, CHOU W S, CHEIN R Y, et al. Multiple-objective optimization on ammonia decomposition using membrane reactor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 52: 1002-1017.
- [21] ZHENG Z, LIU T, LIU Q, et al. A distributed energy system integrating SOFC-MGT with mid-and-low temperature solar thermochemical hydrogen fuel production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(38): 19846-19860.
- [22] LI Y, YANG Y. Impacts of solar multiples on the performance of integrated solar combined cycle systems with two direct steam generation fields[J]. Applied Energy, 2015, 160: 673-680.
- [23] WANG J, YAN Z, MA S, et al. Thermodynamic analysis of an integrated power generation system driven by solid oxide fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(3): 2535-2545.
- [24] DING X, DUAN L, ZHOU Y, et al. Energy, exergy, and economic analyses of a new liquid air energy storage system coupled with solar heat and organic Rankine cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 266: 115828.
- [25] LI D, DANG L. Techno-economic analysis of solar aided liquid air energy storage system with a new air compression heat utilization method[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 278: 116729.
- [26] 李勇霞. 太阳能热重整制氢实验及燃料电池复合系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
LI Yongxia. Research on solar thermal reforming hydrogen production experiment and fuel cell hybrid system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021:1.
- [27] ZHANG N, LIOR N. Use of low/mid-temperature solar heat for thermochemical upgrading of energy, with application to a novel chemically-recuperated gas-turbine power generation (SOLRGT) system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power-transactions of the ASME, 2012, 134(7): 072301.
- [28] KUMAR P, SINGH O. Thermoeconomic analysis of SOFC-GT-VARS-ORC combined power and cooling system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(50): 27575-27586.

(责任编辑 杨嘉蕾)