

DOI: 10.19666/j.rlfed.202304050

# 耦合清洁热源的 Allam 循环发电系统 热力学分析

刘奕宁<sup>1</sup>, 颜晓江<sup>2</sup>, 王国忠<sup>3</sup>, 王可可<sup>2</sup>, 王江峰<sup>2</sup>

(1. 国电电力发展股份有限公司, 北京 100101;

2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100010)

**[摘要]** 为了探索低碳环保的火力发电技术, 提高清洁能源利用效率, 提出一种耦合清洁热源的 Allam 循环发电系统。建立了系统中主要设备的热力学模型, 通过与参考系统的对比阐释耦合系统的优势及原理, 并通过参数分析研究设计参数对耦合系统性能的影响机制。计算结果表明: 低品位的清洁热源可以有效解决 Allam 循环回热器的热量不平衡问题, 将循环工质加热到更高的温度, 进而提高系统性能。在典型算例下, 清洁热源耦合系统的炯效率可达 54.07%, 比参考系统高 4.01 个百分点; 耦合系统输出功率和炯效率随透平进口温度的升高先升高后降低; 随着清洁热源温度和流量的增加, 耦合系统输出功率有所增加, 炯效率先升高后降低。研究成果可以为低碳发电技术提供数据支持和理论支撑。

**[关键词]** Allam 循环; 清洁热源; 耦合系统; 热力学分析; 参数分析

**[引用本文格式]** 刘奕宁, 颜晓江, 王国忠, 等. 耦合清洁热源的 Allam 循环发电系统热力学分析[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 87-93. Liu Yining, Yan Xiaojiang, Wang Guozhong, et al. Thermodynamic Analysis of a power generation system consisting of Allam cycle and clean heat source[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 87-93.

## Thermodynamic analysis of a power generation system consisting of Allam cycle and clean heat source

LIU Yining<sup>1</sup>, YAN Xiaojiang<sup>2</sup>, WANG Guozhong<sup>3</sup>, WANG Keke<sup>2</sup>, WANG Jiangfeng<sup>2</sup>

(1. GD Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. CHN ENERGY Investment Group Co., Ltd., Beijing 100010, China)

**Abstract:** In order to explore the low-carbon and environmentally friendly thermal power generation technology and improve the utilization efficiency of clean energy, a power generation system consisting of Allam cycle and clean heat sources is proposed. The thermodynamic models of the main equipment in the system are established, the advantages and principles of the coupled system are explained by comparing with the reference system, and the influence of the design parameters on the system performance is studied through parametric analysis. The calculation results show that the low-grade clean heat source can effectively solve the heat imbalance problem of the Allam regenerator, thereby heating the recycling stream to a higher temperature. Under typical design parameters, the exergy efficiency of the coupled system can reach 54.07%, which is 4.01% higher than that of the reference system. The output power and exergy efficiency of the coupling system first increase and then decrease with the increment of the turbine inlet temperature. With the increase of the temperature and the mass flow rate of the clean heat source, the output power of the coupled system increases, while the exergy efficiency first increases and then decreases. The research results of this paper can provide data support and theoretical support for low-carbon power generation technology.

**Key words:** Allam cycle; clean heat source; coupled system; thermodynamic analysis; parametric analysis

收稿日期: 2023-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51976147)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51976147)

第一作者简介: 刘奕宁 (1987), 男, 高级工程师, 主要研究方向为低温等离子二氧化碳分解利用, 12086527@chnenergy.com.cn。

通信作者简介: 颜晓江 (1986), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为高效热力循环, yanxjtu@xjtu.edu.cn。

随着社会经济水平和人民生活质量的日益提高,国家的整体资源需求量和能源消耗量迅速增加,导致 CO<sub>2</sub> 的过量排放对生态环境造成了破坏。为了保护生产生活环境,实现经济社会的可持续发展,我国政府提出了“碳达峰、碳中和”的发展目标,对清洁高效的能源利用技术提出了更加迫切的要求,因此能够降低火力发电过程碳排放量的碳捕集技术引起了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。富氧燃烧是实现碳捕集的重要技术路线,基本原理是利用纯氧与燃料进行燃烧反应,提高烟气中 CO<sub>2</sub> 的富集程度,降低了碳捕集的难度和成本,同时去除氮氧化物等有害气体,具有较高的工程实践价值<sup>[3]</sup>。科研人员基于富氧燃烧理论设计了多种不同结构的热力发电系统,其中 Allam 循环在热效率和经济性等方面有较为突出的优势,在实现完全碳捕集的情况下,其额定热效率可达 50% 以上<sup>[4]</sup>。

国内外学者对 Allam 循环进行了深入的分析和研究。Scaccabarozzi 等人<sup>[5]</sup>建立了适用于 Allam 循环的透平冷却模型,对系统性能计算,结果表明,系统最高热效率可达 54.80%。Zhu 等人<sup>[6-7]</sup>利用液氧和液化天然气的冷能来实现 Allam 循环冷凝,提高了循环稳态性能和变工况调峰性能。Mitchell 等人<sup>[8]</sup>从热效率、收益率和碳排放等多角度分析了集成液氧存储的 Allam 循环的综合性能。Gonzalo 等人<sup>[9]</sup>对 Allam 循环采用炯经济学分析法进行分析,指出燃烧室和空气分离装置(简称空分装置)的节能潜力最大。Chan 等人<sup>[10-11]</sup>指出再热结构有助于提高 Allam 循环比功率,但会使系统热效率降低,设计了以液化天然气为冷源的 Allam 循环,其中冷凝器的可用能损失最大。在此基础上, Li 等人<sup>[12]</sup>提出液化天然气双压冷凝的 Allam 循环,大幅度降低了冷凝过程的可用能损失。

CO<sub>2</sub> 的临界参数为 304.13 K 和 7.38 MPa。在临界温度附近,CO<sub>2</sub> 的低压比热容远远小于高压比热容,这导致 Allam 循环回热器两侧的热量不平衡,换热温差较大。经典 Allam 循环中人为地取消空分装置压缩机中间冷却器,以增加空分装置功耗为代价增加其余热,并将空分装置余热与 Allam 循环回热器耦合,减少了回热过程炯损失,提高了整体净输出功率<sup>[4]</sup>。

为降低换热温差,提高系统性能,探索出各种回热器热量耦合方式。Weiland 等人<sup>[13]</sup>将煤气化过程废热与 Allam 循环耦合,使系统效率提高了

2.9 百分点。Zhao 等人<sup>[14-15]</sup>将煤气化过程、氧气压缩过程、合成气压缩过程的余热引入 Allam 循环回热器中,进一步提高了循环净输出功率。Xin 等人<sup>[16]</sup>提出了一个集成煤气化、Allam 循环和甲醇合成于一体的联产系统,其中合成气热量被用于 Allam 循环回热器中,有效改善了系统热力学性能。将其他过程的低温余热引入 Allam 循环回热器中,是提高循环回热效率和净效率的有效方式。然而,将复杂过程与 Allam 循环耦合,虽然在一定程度上提高了热效率,但给系统运行调控带来了更多的问题。

本文提出一种耦合低品位清洁能源的 Allam 循环发电系统,因地制宜地采用太阳能、地热能等低品位热源为 Allam 循环回热器补热,提高系统热性能。该系统可以提高低品位清洁能源的利用效率,有效促进电力行业向清洁化、低碳化转型。

## 1 耦合低品位清洁能源 Allam 循环发电系统

### 1.1 循环流程

耦合低品位清洁热源的 Allam 循环发电系统结构如图 1 所示。

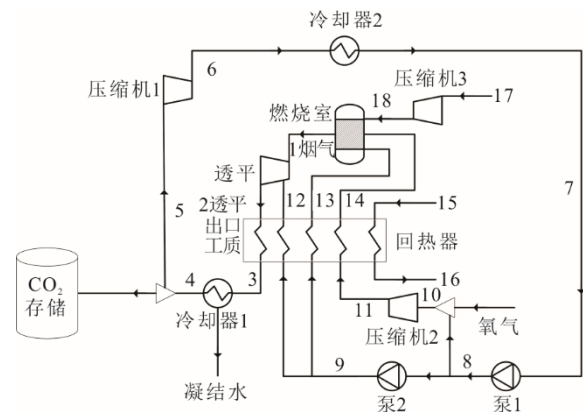


图 1 清洁热源-Allam 循环耦合系统结构示意图  
Fig.1 The schematic diagram of the Allam cycle coupled with clean heat source

由图 1 可见,燃料天然气经压缩机加压后,在燃烧室中燃烧放热,部分 CO<sub>2</sub> 作为冷却介质进入燃烧室调节反应温度,防止燃烧室结构损坏。燃烧生成的烟气进入透平膨胀做功,为保护透平叶片结构,部分 CO<sub>2</sub> 作为冷却介质降低叶片表面温度。透平出口工质进入回热器中加热另一侧的高压工质,同时低品位清洁热源的热量也被引入回热器中,从而矫正因 CO<sub>2</sub> 热物性导致的换热夹点问题。透平乏

汽中的水蒸气在冷却器中凝结为液态水并分离，从而得到高纯度的 CO<sub>2</sub>。部分 CO<sub>2</sub> 工质被捕集、封存，其余大部分 CO<sub>2</sub> 经过多级间冷压缩提高到设定压力。然后一部分 CO<sub>2</sub> 与氧气混合形成氧化剂，另一部分 CO<sub>2</sub> 作为燃烧室和透平的冷却剂，氧化剂和冷却剂在回热器中被透平乏汽和低品位清洁热源加热，分别进入燃烧室和透平。该耦合系统低品位热源可以来自地热能、太阳能等清洁能源，若采用太阳能为 Allam 循环补充热量，需要增设储热罐来保证系统的运行免受太阳能波动特性的影响。

对比参考系统如图 2 所示。参考系统由无热源补热的 Allam 循环和 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环组成，其中的 Allam 循环是在图 2 的基础上取消了清洁热源补热过程（15 到 16），其余结构均相同；与清洁热源独立驱动 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环。CO<sub>2</sub> 在加热器中吸收清洁热源的热量，然后进入透平膨胀做功。透平乏气依次在回热器和冷却器中放热降温，然后被压缩机压缩到高压状态，再依次进入回热器和加热器中吸热。本文通过对耦合系统与参考系统的对比分析，阐释耦合低品位清洁热源对 Allam 循环效率提升的机理。

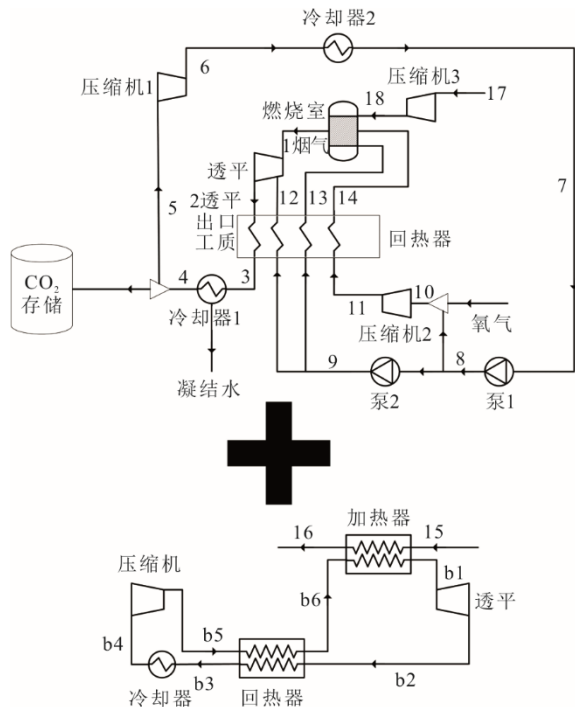


图 2 参考系统 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环结构示意图  
Fig.2 The schematic diagram of CO<sub>2</sub> Brayton cycle in the reference system

1.2 设备模型

Allam 循环中各主要设备模型均依据质量守恒

方程、能量守恒方程和设备特征方程建立<sup>[17]</sup>。由于 Allam 循环中燃烧产物温度一般高于 1 000 °C，显著高于透平叶片材料的许用温度（本文假定许用温度为 860 °C），因此必须采用冷却物流来降低叶片表面温度。为了准确模拟透平工作性能，本文根据文献[5]建立了透平冷却模型。透平冷却模型将透平工作过程分割为 N+1 个子过程：其中前 N 个子过程分别由膨胀过程、混合降温过程和节流降压过程组成，且其压比相同；最后 1 个子过程仅包含膨胀过程。在模型计算过程中，需迭代前 N 个子过程的压比使得最后 1 个子过程的进口温度等于许用温度。当 N 等于 2 时，透平冷却模型结构示意图如图 3 所示。

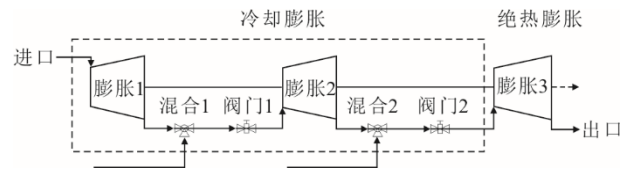


图 3 冷却透平计算模型示意  
Fig.3 The calculation model of the cooling turbine

Allam 循环回热器为复杂结构换热器，其冷流体均包含多股物流。为了准确计算回热器的换热性能，并反映 CO<sub>2</sub> 物性的变化，本文将回热器沿流动方向分为多个小的换热区间。每个区间中所有热流体的进口温度相同，出口温度也相同，所有冷流体亦然<sup>[18]</sup>。整个回热器的最小换热温差设为 5 °C。此外，考虑到回热器热端温度远高于 CO<sub>2</sub> 临界温度，比热容显著减小，换热性能恶化，所以设定回热器热端温差不得小于 20 °C<sup>[19]</sup>。

虽然本文采用低品位清洁能源代替了空分装置对回热器进行补热，但制取氧气所消耗的能量仍然需要考虑在内。当空分装置压缩机无间冷时，其制取 1 kg 氧气的功耗为 1 391 kJ<sup>[5]</sup>；当采用四级间冷压缩时，制取 1 kg 氧气的功耗降为 1 216 kJ。

压缩机和泵的压缩过程效率用等熵效率描述<sup>[20]</sup>：

$$\eta_{com} = \frac{h_{out,s} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \tag{1}$$

$$\eta_{pump} = \frac{h_{out,s} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \tag{2}$$

式中： $\eta_{com}$  和  $\eta_{pump}$  分别为压缩机和泵的等熵效率； $h_{in}$  和  $h_{out}$  分别为实际压缩过程进口和出口工质的焓值； $h_{out,s}$  为等熵压缩过程的出口工质焓值。

耦合系统或参考系统的净输出功率为：

$$W_{net} = \sum W_{tur} - \sum W_{com} - \sum W_{pump} - W_{ASU} \tag{3}$$

式中： $W_{net}$  为净输出功率； $\sum W_{tur}$ 、 $\sum W_{com}$  和  $\sum W_{pump}$

分别为所有透平、压缩机和泵功率之和； $W_{ASU}$  为空分装置消耗的功率。

因为，天然气化学能和清洁能源的品位不同，所以系统效率需要基于热力学第二定律来评价。系统焓效率为：

$$\eta_{ex} = \frac{W_{net}}{E_{NG} + (E_{15} - E_{16})} \quad (4)$$

式中： $\eta_{ex}$  为系统焓效率； $E_{NG}$  为天然气中所含化学可用能； $E_{15}-E_{16}$  为低品位热源的物理可用能。

1.3 模型验证

通过对比本文仿真模拟结果与文献中的数据，来验证模型的精度。由于目前尚未有关于耦合清洁能源的 Allam 循环系统的模拟计算或实验研究的公开报道，所以本文对采用空分装置补热的经典 Allam 循环进行验证。对比数据来源于文献[10]，该文献中所采用的燃烧室、透平、换热器模型与本文相同。计算过程基于 MATLAB 仿真计算平台展开，计算流程如图 4 所示。表 1 为经典 Allam 循环模拟结果验证。由表 1 可知，本文计算所得所有参数与文献[10]相对误差在 ±1% 内。故本文模型具有较高的精度，能够准确描述系统性能。

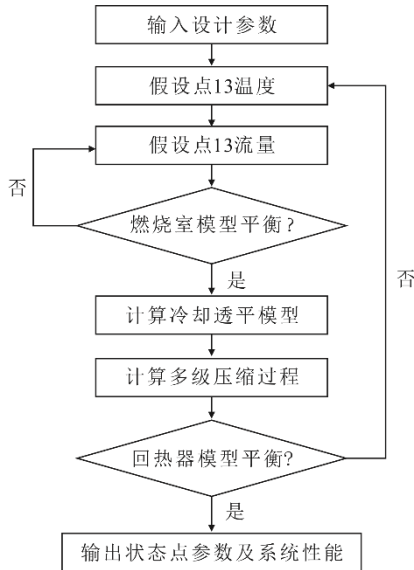


图 4 系统计算流程

Fig.4 The calculation flow chart of the proposed system

2 结果与讨论

首先，对比耦合系统和参考系统在几种典型清洁热源参数条件下的热力学性能，揭示耦合系统的优越性及其原因；然后，对耦合系统进行参数分析，进一步讨论设计参数和热源条件对系统性能的影响。

表 2<sup>[5,10,21-22]</sup> 汇总了耦合系统与参考系统的设计参数，表 3 给出了各主要设备的压力损失系数<sup>[10]</sup>。表 3 中设备压力损失比等于其进口压力与压力损失系数的乘积。

表 1 经典 Allam 循环模拟结果验证  
Tab.1 Model validation of the classical Allam cycle

参数	文献[10]数据	本文模拟结果	相对误差/%
透平输出功率/MW	610.72	606.20	0.74
循环净功率/MW	409.13	407.66	0.36
循环净效率/%	53.25	53.06	0.36
透平出口温度/℃	741.8	738.54	0.44
透平进口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	1 272.8	1270.99	0.14

表 2 系统设计参数  
Tab.2 Design parameters of the proposed system

参数	数值
环境温度/℃	25
环境压力/MPa	0.101
Allam 透平进口温度/℃	1 100
Allam 透平进口压力/MPa	30.0
Allam 透平出口压力/MPa	3.5
循环最低温度/℃	32
布雷顿循环透平入口压力/MPa	20.0
布雷顿循环透平出口压力/MPa	8.0
换热器最小温差/℃	5
天然气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	10
清洁热源温度/℃	250
清洁热源流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	100
透平效率/%	89
压缩机效率/%	85
泵效率/%	85
机械效率/%	98

表 3 设备压力损失比 单位：%  
Tab.3 Pressure loss coefficients of the equipment

设备	数值
燃烧室	1
回热器低压侧	3
回热器高压侧	1
其他换热器	2

2.1 系统性能对比

耦合系统与参考系统在 6 种典型清洁热源参数条件下的热力学性能见表 4。由表 4 可见，在所有参数条件下，耦合系统的净输出功率和焓效率均高于参考系统，且两系统间的性能差距随清洁热源的流量及温度的增加而扩大。案例 6 耦合系统的焓效率比参考系统高 4.06 个百分点。对于耦合系统而言，

其输出功率和焓效率随清洁热源温度及流量的升高而显著提高，其中案例 6 的焓效率比案例 1 高出 3.71 百分点。如前所述，引入低品位清洁热源是为了矫正 Allam 循环回热器的热量不平衡，但若热源温度过低，则只能在较小的温度范围内起到作用，若热流流量较小，则不能使回热器两侧热量达到完全平衡。随着清洁热源的温度及流量的增加，则回热器可用的热量增多，进而可以将更多的工质加热到更高的温度。这与表 4 中透平进口流量和回热器

冷侧出口温度的变化趋势相对应。

此外，案例 2 与案例 3、案例 4 与案例 5 的耦合系统输出功率及焓效率较为接近，其透平入口流量和回热器冷侧出口温度也十分接近。这揭示了清洁热源提升 Allam 循环效率的机制：通过在低温区间补充热量，使循环物流的温度和流量提高，相应的降低高品位燃料热量消耗，提高系统的焓效率。只要被 Allam 循环有效利用的低品位热量接近，则相应产生的影响也接近。

表 4 典型清洁热源参数条件下系统热力性能对比  
Tab.4 System performance comparison under typical parameters of clean heat sources

项目	案例 1	案例 2	案例 3	案例 4	案例 5	案例 6	
热源温度/°C	150	200	250	250	300	300	
热源流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	100	100	60	100	75	100	
耦合系统	输出功率/MW	237.48	248.08	247.97	260.35	262.75	270.29
	焓效率/%	50.36	51.80	51.76	53.32	53.47	54.07
	透平进口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	741.66	766.29	766.02	794.45	799.86	816.71
	回热器冷侧出口温度/°C	645.61	661.68	661.52	677.75	680.75	689.83
参考系统	总输出功率/MW	233.49	237.23	237.17	241.79	242.87	247.08
	焓效率/%	49.41	49.60	49.69	49.81	49.89	50.01
	无补热 Allam 循环输出功率/MW				230.25		
	CO <sub>2</sub> 布雷顿循环输出功率/MW	3.24	6.98	6.92	11.54	12.62	16.83
	无补热 Allam 循环透平进口流量/(kg·s <sup>-1</sup> )				724.42		
无补热 Allam 循环回热器冷侧出口温度/°C				634.33			

对于参考系统而言：虽然其输出功率和焓效率也随着清洁热源的温度及流量增加而提高，但其变化幅度不大；在参考系统中，无补热的 Allam 循环的性能不受清洁热源参数的影响，输出功率不变，其回热器冷侧出口温度低于所有的耦合系统，其透平进口流量同样小于所有的耦合系统。这说明如果没有补热，循环的回热器性能将会有显著下降，参考系统清洁热源参数的变化仅作用在 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环上，但其输出功率的规模与 Allam 循环相差甚远，所起的作用也是微乎其微。在低品位清洁能源与高品位化石能源耦合时，在适合的参数条件下，以清洁热源作为低温区间热源，以化石能源作为高温区间热源，通过清洁热源对化石能源的部分替代，提升系统的热效率，同时降低碳排放。

2.2 各参数对耦合系统热力学性能的影响

为了研究 Allam 循环透平进口参数和清洁热源参数对耦合系统热力学性能的影响，假设研究某个参数的变化时，其他参数保持表 2 中的设计值不变。图 5 展示了透平进口温度和进口压力对耦合系统焓效率的影响。

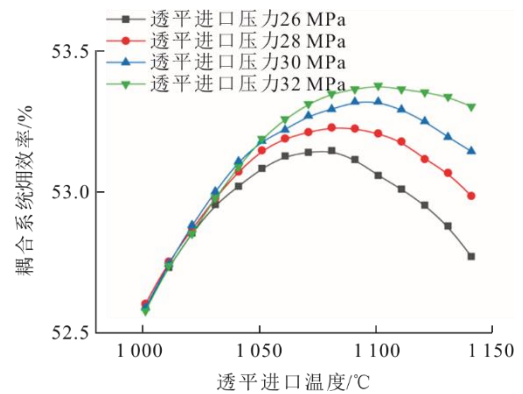


图 5 透平进口参数对耦合系统性能的影响  
Fig.5 The effects of turbine inlet parameters on the system performance

由图 5 可见，随着 Allam 循环透平进口温度的提高，耦合系统的焓效率先升高后降低。为了保证透平的运行安全，透平冷却剂流量随透平运行温度的升高而增加，但是由于冷却剂与透平主流工质的混合过程是非等温的，而且会造成一定的压力损失，因此透平冷却过程的焓损失有所增加。另一方面，因为回热器两侧流体的比热容差异随着温度的升高而逐渐缩小，透平出口工质温度越高，则比热

容差异较小的区域的比重就越大。同时,考虑到清洁热源的补热作用,当回热器热端温差达到允许的最小温差之后,透平出口温度过高只能导致乏汽余热的浪费。综合以上两方面的影响,随着透平进口温度的升高,耦合系统整体的输出功率和焓效率呈现先增加后降低的变化趋势,最佳透平进口温度为1070~1110℃,而且其随透平进口压力的升高而升高。

耦合系统的焓效率随透平进口压力的升高而升高。当透平进口压力升高时,透平和压缩机的压缩功率都增加,但前者的变化幅度略高于后者,故耦合系统输出功率和焓效率有所提高。但当透平入口压力在26~32MPa间变化时,不同压力下耦合系统最高焓效率的变化不足0.5%,而运行压力的升高会导致初始投资的显著增加。因此,需要根据实际情况选择适合的设计参数。

图6展示了清洁热源温度对耦合系统性能的影响。当温度略高于CO<sub>2</sub>临界温度时,CO<sub>2</sub>的高压比热容远大于低压比热容,而随着温度的升高,二者之间的差异逐渐缩小。因此,回热器低温段热量不足的现象较为明显,从外部引入清洁热源进行补热对系统性能的提升较为明显。随着运行温度的升高,回热器冷、热流体比热容的差异逐渐缩小,所需要的补热量也逐渐减少,难以利用温度品位越来越高的清洁热源补热。从图6可以看出,随着热源温度的升高,耦合系统输出功率的增长速率逐渐变缓。另一方面,当清洁热源温度升高时,其本身所含的可用能增大,即式(4)的分母增大。因此,随着清洁热源温度的升高,耦合系统的焓效率先升高后降低,耦合系统焓效率的最大值出现在清洁热源温度约300℃时。

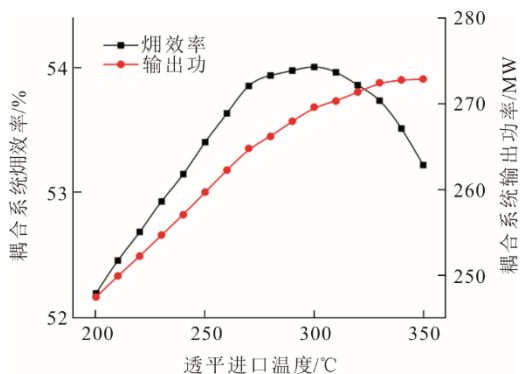


图6 清洁热源温度对耦合系统性能的影响

Fig.6 The effects of heat source temperature on the system performance

图7展示了清洁热源流量对耦合系统性能的影响。

显热,其变化趋势与清洁热源温度影响下的变化趋势有所不同。当热源温度为一定值时,外部引入的清洁热源只能纠正该温度以下区间的能量不足问题,对该温度区间之上的部分没有影响。因此如图7所示:当流量较小时,清洁热源的热量不足,系统输出功率随热源流量的增加而直线升高;当流量大于某个临界值时,原本的能量不足被完全补足,多余的补充热量只能以废热形式排出,系统输出功率基本保持不变。同样,考虑到清洁热源所含可用能随流量的增加而增加,耦合系统的焓效率呈现先升高后降低的变化趋势。耦合系统焓效率的最大值出现在清洁热源流量约为110kg/s时。

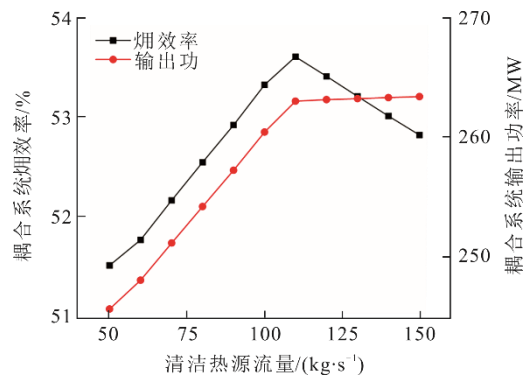


图7 清洁热源流量对耦合系统性能的影响

Fig.7 The effects of heat source mass flow rate on the system performance

### 3 结 论

本文通过将低品位清洁热源与Allam循环发电系统进行耦合,显著改善了Allam循环中回热器的换热性能,进而提高了系统的发电效率,同时使得低品位清洁能源得到高效利用。本文建立了主要设备的热力学模型,对耦合系统进行了详尽的热力学分析,取得了以下结论。

1) 在相同的清洁热源参数条件下,耦合系统的输出功率和焓效率明显高于参考系统,且二者差距随着清洁热源参数的升高而扩大,最大差距可达4.06百分点。这说明将清洁能源与化石能源耦合,在低温区间实现清洁能源对化石能源的部分替代,比直接利用清洁能源效率更高,是推动清洁能源发展的有效途径。

2) 随着透平进口温度的升高,耦合系统焓效率先升高后降低,即存在最佳透平进口温度使得系统效率最大化。耦合系统焓效率随透平进口压力的升高而升高,但变化幅度不大,实际工程中要综合考

虑热效率和经济性的平衡问题。

3) 随着热源温度和流量的增加, 耦合系统输出功率增加, 但系统焓效率先增加后降低, 这说明对于 Allam 循环而言存在最佳的热源补热条件。在本文的设计条件下, 清洁热源最佳的温度和流量分别为 300 °C 和 110 kg/s。

#### [参考文献]

- [1] 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 11-20.  
WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 11-20.
- [2] 王喜平, 唐荣. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存商业模式与政策激励研究[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 29-41.  
WANG Xiping, TANG Rong. Research on business model and policy incentives for carbon capture, utilization and storage in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 29-41.
- [3] 刘建华. 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 48-54.  
LIU Jianhua. Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 48-54.
- [4] ALLAM R, PALMERM, BROWN G, et al. High Efficiency and Low Cost of Electricity Generation from Fossil Fuels While Eliminating Atmospheric Emissions, Including Carbon Dioxide[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 1135-1149.
- [5] SCACCABAROZZI R, GATTI M, MARTELLI E. Thermodynamic analysis and numerical optimization of the NET power oxy-combustion cycle[J]. Applied Energy, 2016, 178: 505-526.
- [6] ZHU Z, CHEN Y, WU J, et al. A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO<sub>2</sub> capture[J]. Energy, 2019, 174(5): 478-487.
- [7] ZHU Z, CHEN Y, WU J, et al. Performance study on s-CO<sub>2</sub> power cycle with oxygen fired fuel of s-water gasification of coal[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 112058.
- [8] MITCHELL C, AVAGYAN V, CHALMERS H, et al. An initial assessment of the value of Allam cycle power plants with liquid oxygen storage in future GB electricity system[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 87: 1-18.
- [9] HERVAS G, PETRAKOPOULOU F. Exergoeconomic analysis of the Allam cycle[J]. Energy and Fuels, 2019, 33: 7561-7568.
- [10] CHAN W, LEI X, CHANG F, et al. Thermodynamic analysis and optimization of Allam cycle with a reheating configuration[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224: 113382.
- [11] CHAN W, LI H, LI X, et al. Exergoeconomic analysis and optimization of the Allam cycle with liquefied natural gas cold exergy utilization[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 113972.
- [12] LI B, WANG S, QIAO J, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a dual-pressure Allam cycle integrated with the regasification of liquefied natural gas[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 246: 114660.
- [13] NTW A, CWWA B. Techno-economic analysis of an integrated gasification direct-fired supercritical CO<sub>2</sub> power cycle[J]. Fuel, 2018, 212: 613-625.
- [14] ZHAO Y, WANG B, CHI J, et al. Parametric study of a direct-fired supercritical carbon dioxide power cycle coupled to coal gasification process[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 156: 733-745.
- [15] ZHAO Y, LI F. Thermodynamic analysis of a novel dual expansion coal-fueled direct-fired supercritical carbon dioxide power cycle[J]. Applied Energy, 2018, 2018(5): 480-495.
- [16] XIN T, XU C, LIU Y, et al. Thermodynamic analysis of a novel zero carbon emission coal-based polygeneration system incorporating methanol synthesis and Allam power cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114441.
- [17] 李博, 王顺森, 宋立明. Allam 循环-跨临界 CO<sub>2</sub> 循环冷电联产系统的热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10): 11-18.  
LI Bo, WANG Shunsen, SONG Limin. A thermodynamic analysis for combined cooling and power systems consisting of Allam cycle and transcritical carbon dioxide cycle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(10): 11-18.
- [18] LI B, WANG S, WANG K, et al. Thermo-economic analysis of a combined cooling, heating and power system based on carbon dioxide power cycle and absorption chiller for waste heat recovery of gas turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224: 113372.
- [19] WANG K, WANG S. Thermodynamic analysis of a comprehensive energy utilization system for natural gas pressure reduction stations based on Allam cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 205: 118033.
- [20] LI B, WANG S. Thermo-economic analysis and optimization of a cascade transcritical carbon dioxide cycle driven by the waste heat of gas turbine and cold energy of liquefied natural gas[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 214: 118861.
- [21] HASELI Y, SIFAT N. Performance modeling of Allam cycle integrated with a cryogenic air separation process[J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, 148: 107263.
- [22] SLEITI A, AL-AMMARI W. Energy and exergy analyses of novel supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles driven by direct oxy-fuel combustor[J]. Fuel, 2021, 294: 120557.

(责任编辑 杨嘉蕾)