

Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环冷电联产系统的热力学分析

李博, 王顺森, 宋立明

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了实现碳中和目标和液化天然气冷能的充分利用,提出了一种由 Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环所组成的冷电联产系统。对联产系统中所涉及的热力设备进行了详细建模,并对系统进行了热力学分析和参数敏感性分析。仿真结果表明,在设计工况下,冷电联产系统的净输出功率比单独的 Allam 循环提高了 9.54%,而且可以输出 5.15 MW 制冷量。参数分析的结果表明,联合循环的净输出功率随顶循环透平入口温度和透平出口压力的增高先增大后减小,即存在最佳的顶循环透平入口温度和透平出口压力使得联合循环净输出功率最大;当底循环透平出口压力增高时,系统的输出功率和制冷量都明显减小。本文所提出的联产系统具有模块化设计的特点,可以灵活调节容量参数以适应不同的设计条件,且可以实现碳捕集,具有良好的工程前景。

关键词: Allam 循环;二氧化碳循环;冷电联产;液化天然气;碳中和

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202110002 **文章编号:** 0253-987X(2021)10-0011-08



OSID 码

A Thermodynamic Analysis for Combined Cooling and Power Systems Consisting of Allam Cycle and Transcritical Carbon Dioxide Cycle

LI Bo, WANG Shunsen, SONG Liming

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A combined cooling and power system composed of the Allam cycle and transcritical carbon dioxide cycle is proposed to achieve the goal of carbon neutrality and full use of the cold energy of liquefied natural gas. The components in the proposed system are modeled in detail, and the thermodynamic analysis as well as parameter sensitivity analysis of the system is conducted. Simulation results show that the net output power of the cogeneration system is 9.54% higher than that of the single Allam cycle and the cooling capacity of the system is 5.15 MW under the design condition. The results of parametric analysis show that the net output power of the combined cycle increases first then decreases with the increase of the inlet temperature and outlet pressure of the top-cycle turbine, that is, there are optimal inlet temperature and outlet pressure of the top-cycle turbine to maximize the net power output of the combined cycle. When the outlet pressure of the bottom cycle turbine increases, the output power and refrigeration capacity of the system decrease significantly. The proposed cogeneration system has the characteristics of modular design. Thus, this system can flexibly adjust the capacity parameters to adapt to different design conditions, and has a good engineering prospect.

Keywords: Allam cycle; CO₂ cycle; combined cooling and power system; liquefied natural gas; carbon neutrality

近年来,CO₂ 过量排放导致的全球变暖现象日益明显,由此引发的生态问题和环保问题给人类的可持续发展带来严峻挑战^[1]。采用化石燃料燃烧发电所导致的碳排放是 CO₂ 的重要来源之一。为了实现我国碳达峰和碳中和的规划目标,低碳发电技术将是未来先进发电技术的发展和热门领域。富氧燃烧是一种非常具有前景的清洁发电技术^[2],其基本原理是用高浓度氧气代替空气作为燃烧反应的氧化剂,既去除了氮气的存在,减少有害气体排放,同时使得燃烧产物中 CO₂ 的富集程度大大提升,从而降低碳捕集的功耗。经过几十年的相关研究,科研工作者基于富氧燃烧的原理提出了许多不同形式的发电系统。国际能源署温室气体课题组对几种典型的富氧燃烧系统进行了热力学分析和对比,其结果表明,相比于其他循环结构,Allam 循环的热效率和经济性具有明显优势^[3]。Allam 循环是由 NET Power 公司的工程师 Allam 首先提出的,根据理论计算结果,Allam 循环可以在完全碳捕集的情况下实现较高的热效率^[4]。目前,50 MW 级别的 Allam 循环示范电站已在美国得克萨斯州完成建设并实际运行^[5]。

由于 Allam 循环良好的热力学性能和环保特性,相关领域的研究如火如荼。Scaccabarozzi 等人对以天然气为燃料的 Allam 循环进行了热力学分析和数值优化,揭示了透平进出口参数和回热效率对系统性能的影响^[6]。Zhao 等对一种 Allam 循环与煤气化过程相结合的系统进行了参数分析,指出当透平入口温度为 1 200 ℃ 时,系统效率可达 38.87%^[7];随后他们将空分装置压缩过程余热、合成气余热和氧气压缩机余热等引入 Allam 循环回热器中,解决了由于 CO₂ 物性剧烈变化导致的夹点问题,并成功地将系统效率提高到 43.7%^[8]。Zhu 等通过提高透平排气压力使得 CO₂ 可以被冷凝为液态,进而用泵替代压缩机实现压缩过程,降低了系统的复杂度,改善了系统的调峰性能^[9]。Mitchell 等利用液氧储存,大大改善了 Allam 循环的运行灵活性,并提高了系统的峰值功率^[10]。Fernandes 等利用动态矩阵法对 Allam 循环进行控制,有效地提高了 CO₂ 纯度和系统输出功率^[11]。Chan 等对再热 Allam 循环进行了热力学分析和优化,发现相比于经典 Allam 循环,再热循环的效率减小了 5 个百分点,但系统的比功是原来的 2.2 倍^[12]。章建徽等对 Allam 循环性能及其燃烧特性的相关研究进行了总结,指出了我国发展 Allam 循环的主要问题和有效

路径^[13]。

经典 Allam 循环采用天然气作为燃料,而液化天然气(LNG)是存储、运输和供给天然气的重要形式。因为 LNG 的温度很低,其低温能量回收利用问题一直是研究热点^[14]。一种常见的利用 LNG 的方式是将 LNG 直接作为动力循环冷源,从而增大冷热源温差,提高循环效率^[15]。Ahmadi 等对一种以太阳能为热源且以 LNG 为冷源的跨临界 CO₂ 系统进行了热经济性分析,指出冷源温度对系统性能影响很大^[16]。Cha 等提出了一种以液化天然气站为冷源的 CO₂ 循环余热回收系统,其计算结果表明,LNG 的利用使得系统效率提高了 9.2%^[17]。除了直接将 LNG 作为动力循环的冷源之外,还可以采用串级系统,通过底循环的方式间接利用 LNG 的冷量。吴毅等人提出了一种超临界 CO₂-跨临界 CO₂ 循环联产系统,其中跨临界循环以超临界循环余热为热源,以 LNG 为冷源,系统设计效率可达 54.47%^[18]。类似地,Cao 等提出用超临界 CO₂-跨临界 CO₂ 循环串级系统回收燃气轮机烟气热量,其中跨临界 CO₂ 循环作为超临界 CO₂ 循环的底循环,以充分利用 LNG 的冷能^[19]。Sadreddini 等提出一种由有机朗肯循环-跨临界 CO₂ 循环组成的发电系统,指出单级动力循环难以有效回收 LNG 的冷能,而底循环的使用可以大大减小冷凝器中的换热温差,提高系统效率^[20]。

由以上可知,采用串级系统以 LNG 为冷能是一种常见且有效的方式。文献[6,8,10]都指出,对于 Allam 循环而言,CO₂ 物性变化导致的回热器夹点问题是影响其系统效率的关键问题。串级系统的使用,可以在实现 LNG 冷能充分利用的同时,又不会导致回热过程的恶化。而跨临界 CO₂ 循环由于其优异的热力学性能和结构紧凑性而被选作底循环。本文提出一种基于液化天然气站的 Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环冷电联产系统,以实现能量的高效转化和清洁利用。本文对系统中所涉及的主要设备进行了建模,并分析了主要热力学参数对系统性能的影响。本系统不仅可以实现碳捕集,而且能够满足不同的负荷条件,具有良好的工程前景。

1 系统描述

1.1 循环流程

本文所提出的 Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环冷电联产系统的结构如图 1 所示。其中 Allam 循环为顶循环,跨临界 CO₂ 循环为底循环,二者通过底循

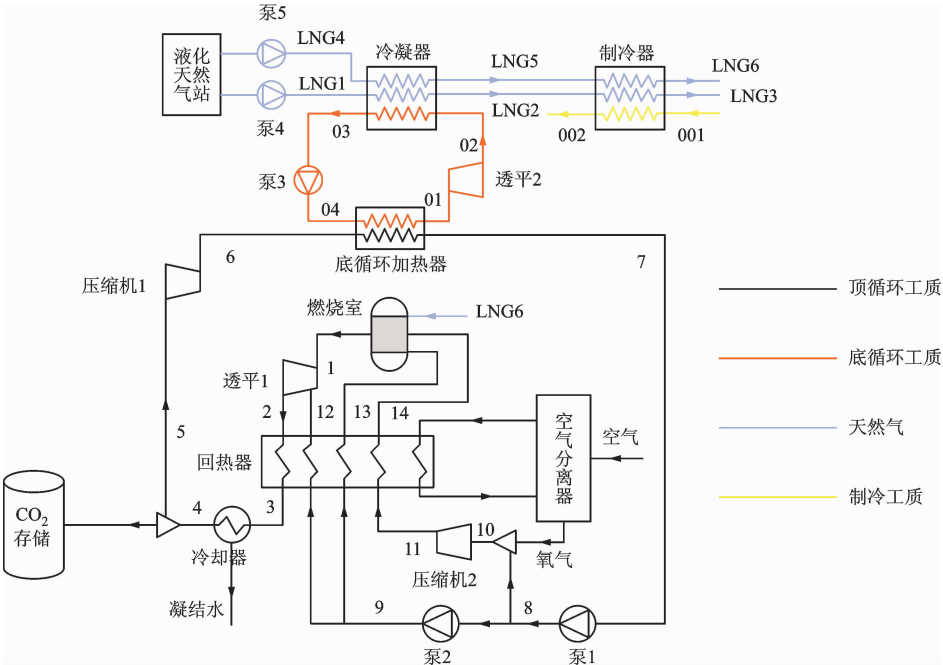


图 1 Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环冷电联产系统流程图
Fig. 1 A flowchart of the proposed combined cooling and power system

环加热器耦合。天然气燃料(LNG6)与氧化剂物流 14 在燃烧室中进行燃烧反应,一股 CO₂ 循环物流 13 作为燃烧室冷却剂。反应产物进入透平膨胀做功,因为燃烧室反应产物 1 的温度远高于叶片材料的耐受温度,所以需要另一股 CO₂ 循环物流 12 作为冷却剂给透平降温。透平排气进入回热器预热循环物流,同时空分装置中的压缩空气也进入回热器放热。燃烧产物中的水蒸气在冷凝器中冷凝为液体并排除,得到高纯度的 CO₂。之后,部分 CO₂ 被捕集并储存,部分 CO₂ 被压缩到更高压力,充当循环物流。循环物流 5 首先被压缩到超临界状态,本文中压缩机 1 出口压力固定为 8 MPa。超临界工质对底循环放热,同时使自身冷却。经泵 1 初步压缩后,CO₂ 循环物流再次被分为两部分,一部分与氧气混合作为燃烧反应的氧化剂,另一部分作为燃烧室和透平的冷却剂。氧化剂和冷却剂被进一步压缩,进入到回热器中加热,完成顶层的 Allam 循环。

在底层的跨临界 CO₂ 循环中,CO₂ 被液化天然气冷凝,而后经过泵压缩,进入底循环加热器吸收 Allam 循环余热,转化为高温高压状态。之后 CO₂ 在透平 2 中膨胀,乏汽进入冷凝器中被 LNG 冷凝。有两股液化天然气进入冷凝器中,其中一股天然气(LNG1~3)进入管道输送给用户,另一股(LNG4~6)作为燃料进入 Allam 循环燃烧室燃烧。本文中,燃烧室燃料的流量为 1 kg/s,输送给用户的天然气

流量为 30 kg/s。

1.2 设备模型

Allam 循环中透平进口温度一般高于 1 000 ℃,远远超过叶片材料的耐受温度(本文中取叶片材料耐受温度为 860 ℃)。为保证透平的正常运行,需要引入低温工质对透平叶片进行冷却。因此,本文建立了透平冷却模型来模拟 Allam 循环中透平的运行情况。在透平冷却模型中,膨胀过程被分为 $N+1$ 个子过程,在前 N 个子过程中,透平先进行膨胀再与冷却物流混合,且假设其压比相同,最后一个子过程仅进行膨胀。具体计算公式见文献[6]。显然,需要对前 N 级膨胀过程的压比进行迭代来满足第 $N+1$ 级膨胀过程进口温度为 860 ℃。

Allam 循环中的回热器是多股流换热器,同时有多种流体进行换热过程。为了准确地描述其复杂的换热过程,采用分段法确定换热过程的夹点和换热器效率^[21]。冷热流体按流动方向可分为许多小区间,在每个区间内流体物性设为定值,而且冷热流体温差不得小于所允许的最小换热温差。在本文中,回热器的最小换热温差设为 5 ℃。此外,考虑到回热器高温区间的换热性能和材料特性,回热器上端差设为 20 ℃^[6]。

燃烧室运行参数可由物料平衡和能量平衡导出。其中燃烧室出口温度,即透平进口温度,通过控制冷却物流 13 的流量来进行调节。

空分装置(ASU)在本文中采用黑箱模型,不考虑内部的具体结构。空气分离装置采用绝热压缩,可以提供压力为 12 MPa 的氧气,功耗为 1 391 kJ/kg^[6]。

跨临界 CO₂ 循环的透平性能可以用透平膨胀的等熵效率表征

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

同理,压缩机和泵的性能可用压缩效率表示为

$$\eta_{\text{com}} = \frac{h_{\text{out},\text{s}} - h_{\text{in}}}{h_{\text{out}} - h_{\text{in}}}, \quad \eta_{\text{p}} = \frac{h_{\text{out},\text{s}} - h_{\text{in}}}{h_{\text{out}} - h_{\text{in}}} \tag{2}$$

式中: η_{tur} 为透平等熵效率; h_{in} 、 h_{out} 分别为进、出口焓; $h_{\text{out},\text{s}}$ 为等熵出口焓; η_{com} 、 η_{p} 分别为压缩机、泵的等熵效率。

顶循环(Allam 循环)的输出功率为

$$W_{\text{net, Allam}} = W_{\text{tur1}} - W_{\text{com1}} - W_{\text{com2}} - W_{\text{p1}} - W_{\text{p2}} - W_{\text{ASU}} - W_{\text{p5}} \tag{3}$$

式中: $W_{\text{net, Allam}}$ 为 Allam 循环的净输出功率; W_{tur1} 为透平 1 输出功率; W_{com1} 、 W_{com2} 为压缩机 1 和压缩机 2 消耗的功率; W_{p1} 、 W_{p2} 、 W_{p5} 为泵 1、泵 2 和泵 5 消耗的功率; W_{ASU} 为空气分离装置消耗的功率。

底循环(跨临界 CO₂ 循环)的输出功率为

$$W_{\text{net, tCO}_2} = W_{\text{tur2}} - W_{\text{p3}} - W_{\text{p4}} \tag{4}$$

冷电联产系统的输出功率为

$$W_{\text{net}} = W_{\text{net, Allam}} + W_{\text{net, tCO}_2} \tag{5}$$

冷电联产系统的制冷量为

$$Q_{\text{c}} = m_{001} (h_{001} - h_{002}) \tag{6}$$

式中: m_{001} 、 h_{001} 、 h_{002} 分别是向用户供冷的循环水流量、回水焓和供水焓。

1.3 模型验证

为确保文中所建立模型的准确性,需要将仿真结果与已有文献中的数据进行对比。因为目前尚鲜见关于 Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环联合循环的实验研究或仿真模拟,所以,本文分别对 Allam 循环和跨临界 CO₂ 循环进行模型验证,对比结果分别列于表 1 和表 2。可以看出,系统主要指标的相对误差均在可接受范围内,从而证明了模型的准确性。

2 结果与讨论

首先给出了联合循环在设计工况下的性能,通过分析本文所提出的冷电联产系统在设计工况下的运行情况,从不同角度揭示其性能优势。然后,探究了典型热力学参数对联合循环性能的影响,为实际工程设计提供参考。联合循环设计参数如表 3 所示,各设备压力损失系数如表 4 所示。

表 1 Allam 循环模型验证结果

Table 1 Validation of Allam cycle model

参数	文献[12]	本文
透平功率/MW	610.72	606.20
系统净输出功率/MW	409.13	407.98
透平出口温度/℃	741.8	738.54
循环物流预热温度/℃	721.8	718.54
透平进口流量/(kg·s ⁻¹)	1 272.8	1 270.99
透平冷却流量/(kg·s ⁻¹)	99	98.49

表 2 跨临界 CO₂ 循环模型验证结果

Table 2 Validation of transcritical CO₂ cycle model

参数	文献[22]	本文
透平进口温度/℃	120	120
透平出口温度/℃	46	46
泵进口温度/℃	47.31	47.31
泵出口温度/℃	41.18	41.18

表 3 联合循环设计参数表^[6,23-24]

Table 3 Design parameters of the cogeneration system

参数	数值
环境温度/℃	15
环境压力/MPa	0.101 3
顶循环透平进口温度/℃	1 150
顶循环透平进口压力/MPa	30
顶循环透平出口压力/MPa	4
顶循环最低温度/℃	25
底循环透平进口压力/MPa	10
底循环透平出口压力/MPa	2
液化天然气温度/℃	-162
液化天然气压力/MPa	0.1
换热器最小温差/℃	5
透平效率/%	89
压缩机效率/%	85
泵效率/%	85
机械效率/%	98

表 4 联合循环压力损失表^[12]

Table 4 Pressure loss of the cogeneration system^[12]

参数	数值
燃烧室压力损失系数	1
回热器低压侧压力损失系数	3
回热器高压侧压力损失系数	1
其他换热器压力损失系数	2

2.1 设计性能分析

本文所提出的 Allam 循环-跨临界 CO₂ 循环冷电联产系统在设计工况下的性能如表 5 所示。

表 5 冷电联产系统设计性能

Table 5 Design performance of the cogeneration system

MW	
参数	数值
顶循环膨胀功率	35.72
顶循环压缩功率	12.24
顶循环净功率	23.48
底循环膨胀功率	3.39
底循环压缩功率	1.15
底循环净功率	2.24
联产系统净功率	25.72
制冷量	5.15

从基本原理上讲,跨临界 CO₂ 循环以 Allam 循环压缩过程余热为热源,以液化天然气为冷源,起到了回收余热和冷能的作用,显然会使得系统的净输出功率增加。计算结果表明,顶循环的净输出功率为 23.48 MW,底循环的净输出功率为 2.24 MW,联合循环的净输出功率为 25.72 MW。采用跨临界 CO₂ 循环作为底循环的布置使得系统净输出功率提高了 9.54%,而且可以对外供应 5.15 MW 的制冷量。同时,由于 Allam 循环的循环物流被底循环冷却,因此所需冷却水的量也有所减少。

2.2 参数分析

顶循环透平进口温度对联合循环功率的影响见图 2。当顶循环透平进口温度增高时,顶循环的净输出功率先增大后减小,而底循环的净输出功率略微增大。随着透平进口温度的增高,单位工质在透平中膨胀的比功会增大。同时,燃烧室出口温度增高,则所需的冷却物流 13 的流量减小,导致透平进口流量减小。透平进口温度增高还会导致透平冷却物流 12 的流量增大,透平中由于不等温混合过程导致的可用能损失增大。因此,随着透平进口温度的升高,透平输出功率先增大后减小。从整体上看,透平冷却物流 12 流量的增大与燃烧室冷却物流 13 流量的减小相比而言,其变化更为剧烈,因此,联合循环物流的流量略微增大,顶循环压缩过程的功耗也是有所增大的。综合以上变化趋势,顶循环净输出功率先增大后减小。

如前所述,循环物流 6 的流量有所增大,而其温度和压力并没有变化,因此,顶循环向底循环释放的

余热会增大,底循环的输出功率也会增大。与此同时,底循环冷凝过程需要的冷量也有所上升,而液化天然气所提供的总冷量不变,因此冷电联产系统的制冷量随顶循环透平入口温度的增高而减小。综合顶底循环输出功率的变化趋势,当顶循环透平入口温度增高时,联产系统总输出功率先增大后减小,大约在 1 130 ℃ 时取到极值。

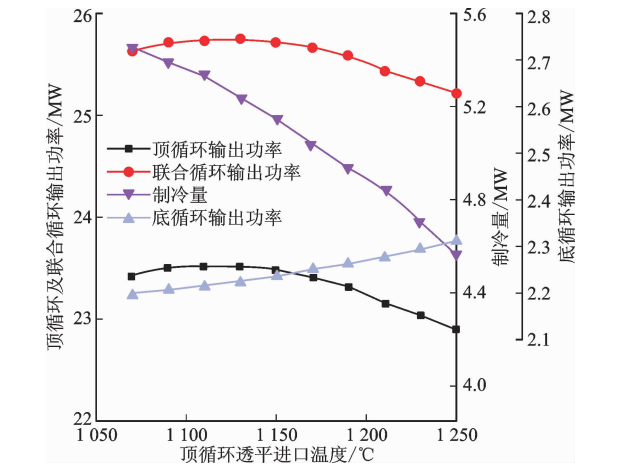


图 2 系统性能随顶循环透平进口温度的变化

Fig. 2 Variation of the system performance with inlet temperature of the top-cycle turbine

图 3 给出了顶循环透平出口压力对顶循环和底循环输出功率的影响。如图所示,当顶循环透平出口压力从 3 MPa 增大到 5 MPa 时,顶循环的净输出功率呈现先增大后减小的变化趋势,而跨临界 CO₂ 底循环的输出功率持续减小。随着顶循环透平出口压力的增高,单位工质在透平中的膨胀做功减小,但透平出口气流温度增高,进而使得回热器冷侧的循环物流出口温度也增高。因此,燃烧室冷却物流的温度和流量增大,进入透平做功的总流量增大。对

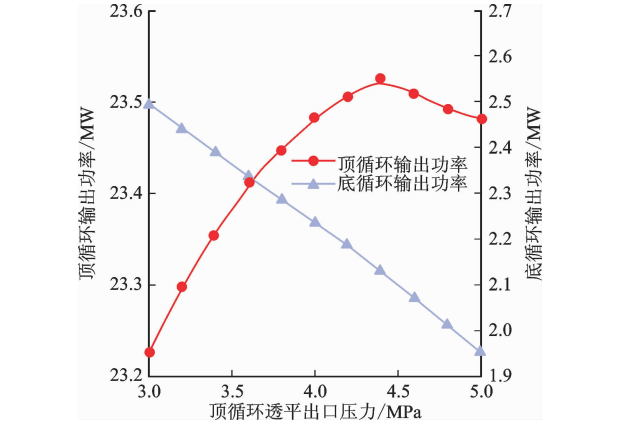


图 3 顶循环和底循环性能随顶循环透平出口压力的变化

Fig. 3 Variation of output power of top-cycle and bottom-cycle with the outlet pressure of the top-cycle

于 Allam 循环的压缩过程而言,尽管循环物流流量增大,但由于压比的降低,总的压缩功率随透平出口压力的增高而减小。整体而言,顶循环的净输出功率随透平出口压力的增高先增大后减小。

图 4 给出了联合循环总输出功率和制冷量随顶循环透平出口压力的变化趋势。由于压缩机 1 出口压力固定,因此当顶循环透平出口压力增加时,压缩机 1 的压比减小,其出口温度降低,余热的总量和品位都有所下降,底循环透平膨胀功大大减小,最终底循环的净输出功率随顶循环透平出口压力的增高而减小。顶循环余热的减少使得底循环冷凝过程消耗的冷量减小,因此联产系统制冷量增大。综合顶、底循环输出功率的变化,联合循环总输出功率先增大后减小,当顶循环透平出口压力在 3.5 MPa 左右时取得最大值。

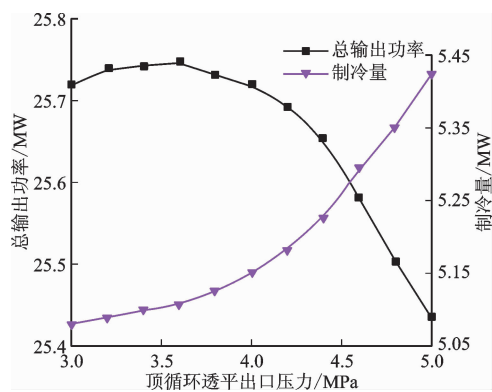


图 4 联产系统性能随顶循环透平出口压力的变化

Fig. 4 Variation of the cogeneration system performance with the outlet pressure of the top-cycle turbine

图 5 给出了底循环透平出口压力对联合循环系统性能的影响。可以看出,跨临界 CO_2 循环净输出功率随底循环透平出口压力的增高而减小。显然,

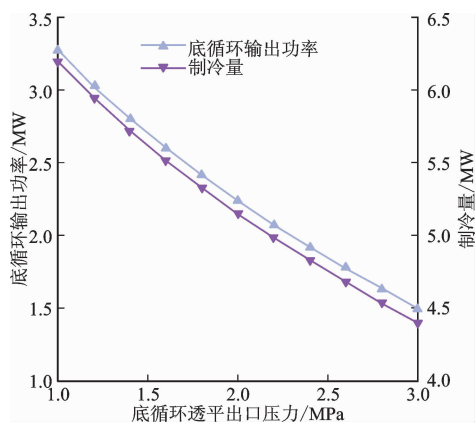


图 5 底循环透平出口压力对系统性能的影响

Fig. 5 Influence of outlet pressure of the bottom-cycle turbine on the system performance

透平出口压力越高,底循环压比越小,透平输出功率也会减小。尽管泵的功率略有减小,但变化幅度相对较小,所以底循环净功率仍然减小。由于底循环吸热量不变,输出功率减小,根据能量守恒定律,其冷凝过程所需热量增大,所以联产系统输出的制冷量也同步减小。可以得出结论,底循环透平出口压力的增高会使联合循环性能明显恶化。这主要是因为当底循环透平出口压力过高时,冷凝器冷凝过程的平均换热温差会明显增大,可用能损失也明显增大。此外,顶循环的输出功率显然不受底循环的影响,联合循环的总输出功率的变化趋势和底循环是一致的。这两个指标的变化趋势未绘于图中,此处不予讨论。

图 6 为输送给用户的液化天然气流量对系统性能的影响。如图所示,在液化天然气流量大约为 27 kg/s 时,底循环输出功率和制冷量的变化曲线发生明显转折。这是因为当天然气流量高于此临界值时,底循环可以完全吸收 Allam 循环余热,底循环的工质流量和输出功率受制于顶循环余热的数量。这种情况下,过多的液化天然气冷能只能全部作为制冷量输出,底循环的净功率不会增大,反而因为天然气压缩泵功的增大而略微减小。当液化天然气流量小于临界值时,底循环不能充分利用余热,需要在顶循环增加冷却器,用冷却水进一步将压缩机出口物流冷却到预设温度。底循环的工质流量和输出功率受制于液化天然气的流量。因此,当天然气流量较小时,底循环输出功率随天然气流量的增大而迅速增大。同时,由于液化天然气的大部分冷量都用于冷凝 CO_2 ,因此此时制冷量的增加速度较为平缓。

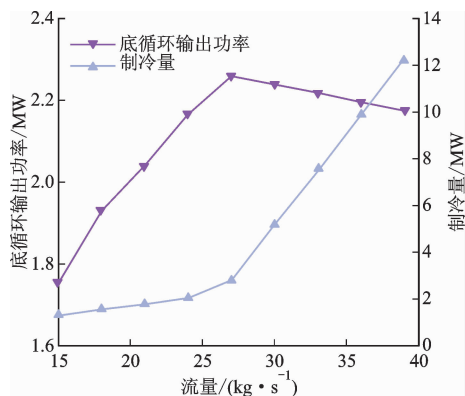


图 6 天然气流量对系统性能的影响

Fig. 6 Influence of the mass flow rate of LNG on the system performance

本文所提出的冷电联合循环遵循模块化设计思想,顶循环和底循环容量可以根据实际的工程要求

来选取。当向用户输送的天然气较少时,可以启用备用的冷却器保持顶循环运行状态不变;当向用户输送的天然气较多时,可以进一步利用回热器余热作为底循环热源,以充分利用天然气冷能。综上所述,本文所提出的冷电联产系统可以满足各种实际的设计条件,具有良好的工程前景。

3 结 论

本文提出了一种基于液化天然气站的全 Am 循环-跨临界 CO₂ 循环冷电联产系统,对主要设备建立了详细的数学模型。通过仿真计算,分析了联合循环在设计点的性能,并进一步对系统进行了参数分析,讨论了主要热力学参数对系统性能的影响,主要结论如下。

(1)跨临界 CO₂ 循环利用了顶层 Am 循环的余热和液化天然气的冷能,在设计工况下,联合循环的净输出功率比单独的 Am 循环增大了 9.54%,而且还可以输出制冷量 5.15 MW。

(2)当顶循环透平入口温度或顶循环透平出口压力增高时,联合循环总输出功率先增大后减小。联产系统的制冷量随顶循环透平入口温度的升高而减小,随顶循环透平出口压力的增高而增大。

(3)底循环透平出口压力增高时,底循环冷凝过程换热不可逆性大大增加,底循环输出功率和联产系统制冷量都有明显减小。

(4)本文所提出的联合循环中顶循环和底循环具有模块化设计的特点,可以根据实际工程的需求调节顶循环和底循环的容量和参数,同时可以实现碳捕集,具有良好的工程前景。

参考文献:

[1] 邱硕,王雪强,毕胜山,等. LEAP 模型下的陕西省节能与温室气体减排潜力分析 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 28-35.

QIU Shuo, WANG Xueqiang, BI Shengshan, et al. Analysis of energy conservation and GHG emission reduction potential of Shaanxi province under the LEAP model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 28-35.

[2] 冯雪佳,王顺森. 在煤富氧燃烧下的超临界 CO₂ 再压缩循环的热力学分析 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 100-105.

FENG Xuejia, WANG Shunsen. Thermodynamic analysis of the supercritical CO₂ recompression cycle in oxygen-enriched combustion of coal [J]. Journal of

Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 100-105.

[3] MANCUSO L F, CHIESA P, MARTELLI E, et al. Oxy-combustion turbine power plants [R/OL]. (2015-08-01) [2021-03-01]. <http://ieaghg.org/terms-of-use/49-publications/technical-reports/599-2015-05-oxy-combustion-turbine-power-plants>.

[4] ALLAM R J, PALMER M R, BROWN G W, 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] ALLAM R, MARTIN S, FORREST B, et al. Demonstration of the Allam cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture [J]. Energy Procedia, 2017, 114: 5948-5966.

[6] 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.

[7] ZHAO Yongming, WANG Bo, CHI Jinling, 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.

[8] ZHAO Yongming, ZHAO Lifeng, WANG Bo, et al. Thermodynamic analysis of a novel dual expansion coal-fueled direct-fired supercritical carbon dioxide power cycle [J]. Applied Energy, 2018, 217: 480-495.

[9] ZHU Zilong, CHEN Yaping, WU Jiafeng, et al. A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO₂ capture [J]. Energy, 2019, 174: 478-487.

[10] 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.

[11] FERNANDES D, HAQUE M E, PALANKI S, et al. DMC controller design for an integrated Allam cycle and air separation plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 141: 107019.

[12] CHAN Wen, LEI Xianliang, CHANG Fucheng, et al. Thermodynamic analysis and optimization of Allam cycle with a reheating configuration [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224: 113382.

[13] 章建徽,张子君,胡羽,等. 关于超临界 CO₂-Allam

- 循环及燃烧的研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2019(14): 4172-4188.
- ZHANG Jianhui, ZHANG Zijun, HU Yu, et al. Review on supercritical CO₂-Allam cycle and combustion research [J]. Proceeding of the CSEE, 2019(14): 4172-4188.
- [14] 燕娜, 厉彦忠, 脱瀚斐. 基于液化天然气冷量的液体空分新流程 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 122-124.
- YAN Na, LI Yanzhong, TUO Hanfei. Novel liquid product air separation system based on cold energy of liquefied natural gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 122-124.
- [15] 曹兴起, 赵晖, 杨卫卫, 等. 综合利用低品位余热与 LNG 冷能的复合循环系统 [J]. 热力发电, 2014(12): 49-55.
- CAO Xingqi, ZHAO Hui, YANG Weiwei, et al. A combined energy recovery system for comprehensive utilization of both low-grade waste heat and cold energy in LNG [J]. Thermal Power Generation, 2014 (12): 49-55.
- [16] AHMADI M H, MEHRPOOYA M, ABBASI S, et al. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of a transcritical CO₂ power cycle driven by solar energy and LNG cold recovery [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2017, 4: 185-196.
- [17] CHA S H, NA S I, LEE Y H, et al. Thermodynamic analysis of a gas turbine inlet air cooling and recovering system in gas turbine and CO₂ combined cycle using cold energy from LNG terminal [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 230: 113802.
- [18] 吴毅, 王旭荣, 杨翼, 等. 以液化天然气为冷源的超临界 CO₂-跨临界 CO₂ 冷电联供系统 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(9): 58-62, 146.
- WU Yi, WANG Xurong, YANG Yi, et al. A combined cooling and power system of supercritical/transcritical CO₂ cycle with liquefied natural gas as cool source [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(9): 58-62, 146.
- [19] CAO Yue, REN Jingqi, SANG Yiqian, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a gas turbine and cascade CO₂ combined cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 144: 193-204.
- [20] SADREDDINI A, ASHJARI M, FANI M, et al. Thermodynamic analysis of a new cascade ORC and transcritical CO₂ cycle to recover energy from medium temperature heat source and liquefied natural gas [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 167: 9-20.
- [21] LI Bo, WANG Shunsen, WANG Keke, et al. Comparative investigation on the supercritical carbon dioxide power cycle for waste heat recovery of gas turbine [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113670.
- [22] WANG Jianyong, WANG Jiangfeng, DAI Yiping, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a transcritical CO₂ geothermal power generation system based on the cold energy utilization of LNG [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 531-540.
- [23] LI Bo, WANG Shunsen. Thermo-economic analysis and optimization of a novel carbon dioxide based combined cooling and power system [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 112048.
- [24] LUO J, EMELOGU O, MOROSUK T, et al. Exergy-based investigation of a coal-fired Allam cycle [J]. Energy, 2021, 218: 119471.

(编辑 亢列梅)