**Integrated Intelligent Energy** 

DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 07. 005

# 基于工业余热的高温空气源耦合热泵循环性能 分析

Performance analysis on high temperature air source heat pump coupling cycle based on industrial waste heat

孙健,秦宇,郝俊红,杨勇平 SUN Jian,QIN Yu,HAO Junhong,YANG Yongping

(华北电力大学新能源电力国家重点实验室,北京102206)

(State Key Laboratory of New Energy Electric Power, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘 要:工业余热的温度分布范围广,常规余热利用方式难以对中低温余热进行有效回收利用,热泵用于回收中低温工业余热具有效率高、能耗低、安全环保等优点。传统的吸收式热泵与压缩式热泵由于热力学循环、工作介质热力性以及压缩机耐温耐压程度的限制导致其只能在窄温域内工作,无法满足工业余热回收背景下的"高制热温度""宽温域换热"需求。为解决上述问题,提出一种基于吸收-压缩式耦合循环的超高温空气源热泵机组,回收工业废蒸汽(120°C)和空气热量,制取160°C热水(蒸汽)。通过使用工程方程求解器软件(EES)对提出的新型耦合循环进行数学建模和仿真分析,结果表明:最优工况为制取热水温度130°C,室外环境温度30°C时热泵机组热泵性能系数(COP)达到最大值1.600。在制取热水温度160°C下,热泵机组COP最高达1.400。研究的结果拓宽了热泵的工作温度范围,提高了热泵的制热温度。研究结果对热泵用于工业余热回收领域具有一定参考价值,对于提高工业领域一次能源利用率具有重要的研究意义。

关键词:吸收式热泵;压缩式热泵;耦合循环;余热回收;空气源热泵

中图分类号:TK 115 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)07-0040-08

Abstract: Industrial waste heat, with a wide range of temperature, can be hardly utilized by conventional ways. Heat pumps can recovery medium and low temperature waste heat effectively, safely and environmental-friendly with low energy consumption. However, traditional absorption heat pumps and compressive heat pumps can only work in a narrow temperature range due to the limitations of thermodynamic cycle, thermodynamic properties of their working mediums and temperature and pressure resistance of their compressors, which cannot meet the requirements of "high heating temperature" and "wide temperature range heat transfer" of industrial waste heat recovery. To solve the problems above, an ultra-high temperature air source heat pump unit based on absorption and compression coupling cycle is proposed. The unit can recover heat from industrial waste steam (120 °C) and air to produce 160 °C hot water (vapor). The proposed coupling cycle is modelled and simulated by Engineering Equation Solver (EES). The results show that the COP of the heat pump unit peaks at 1.600 under the optimal working condition under which hot water temperature is 130 °C and outdoor temperature is 30 °C. When the hot water temperature rises to 160 °C, the COP of the heat pump unit will be 1.400. The coupling cycle greatly broadens the working temperature range of heat pumps and improves their heating temperature. The study is of certain reference value for heat pumps in industrial waste heat recovery, and can significantly improve the utilization rate of primary energy in industrial field.

Keywords: absorption heat pump; compressive heat pump; coupling cycle; waste heat recovery; air source heat pump

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0104900);国家自然科学基金项目(52090062);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020MS009)

National Key Research and Development Program of China (2019YFE0104900); National Natural Science Foundation of China (Major Program) (52090062); Special Fund for Basic Scientific Research of Central University (2020MS009)

## 0 引言

如何提高能源利用效率和节约能源是当今全 球亟须解决的问题,随着全球的经济与工业化不断 发展,人们对能源的需求量不断增长,同时加快了 一次能源消耗和环境污染的严重程度。在大量一

次能源消费中,工业行业消费占比居高不下。国际 能源机构(IEA)2021年发布的数据显示[1],2022年 全球工业能耗将达到2640万t标准煤,比2020年增 长约4.4%。在2020年发布的报告中显示[2],全球 工业行业的平均能源利用效率仅为35.6%,相比 2018年发布的能源利用效率 33.0% 稍有提高[3]。 这表明全球的工业企业开始在提高工业领域能源 利用效率方面投入研发。我国工业行业能源消费 量约占全社会能源消费总量的70%,而能源利用率 只有33.0%。我国余热资源潜力巨大,可回收利用 的余热资源占工业行业能源消费总量的10%~ 40%[4]。大量工业余热未被有效回收利用导致能源 效率低下,在浪费了一次能源的同时产生了大量的 碳排放<sup>[5]</sup>。工业余热主要分为高温余热(>500 ℃)、 中温余热(200~500 ℃)、低温余热(<200 ℃)[6]。高 温余热主要用于蒸汽发电、燃烧利用、循环利用等, 目前对于中低温余热的有效利用是一个技术难题。

热泵是一种通过逆卡诺循环将热量从低温环 境中提取,并提升为可利用的高品位热能的一种高 效清洁能源装置,主要分为吸收式热泵与压缩式热 泵两大类[7]。压缩式热泵通过电能驱动压缩机完成 压缩循环,将低温热量转换为高温热能。受压缩机 耐温耐压、润滑油高温碳化失效等因素限制,压缩 式热泵制热温度低于100℃且压缩机耗能高[8]。吸 收式热泵通过废热驱动完成热力学循环。吸收式 热泵分为第一类吸收式热泵与第二类吸收式热泵, 前者利用少量的高温热量与大量的低温热量来制 取中温热能,又称为增热型热泵。后者利用大量的 中温热量与低温热量制取少量的高温热能,又称为 升温型热泵。吸收式热泵虽然耗电部件极少,由于 其热力循环的限制,吸收式热泵的热泵性能系数 (COP)较低[9]。压缩式热泵与吸收式热泵均可以用 于回收工业余热,由于各自工作的温域、制热温度、 效率不同,使得这2种热泵在工业余热回收领域应 用的范围较小。

为了提升吸收式热泵与压缩式热泵的工作范围与运行性能,国内外学者针对2种热泵的运行方式、工作性能、组合方式等展开了广泛的研究。其中,采用不同的热泵组合方式、制热温度、回收废热等措施,能提升其工作范围、运行性能和普适性。马世财<sup>[10]</sup>提出一种吸收-压缩式耦合制冷循环,制冷温度-20 °C时 COP达到2.550。马震西等<sup>[11]</sup>提出一种燃气压缩式与双效吸收式耦合热泵,模拟结果表明,耦合热泵的制冷能力提高了57%,一次能源利用率提高了34%。孙健等<sup>[12]</sup>提出一种吸收-压缩式耦合制冷循环用于制取0 °C以下盐水,通过与常式耦合制冷循环用于制取0 °C以下盐水,通过与常

规电制冷比较得出新型耦合制冷循环具有良好的循环性能与经济性。Zhang等[13]提出三级构型吸收-压缩式耦合循环,实现超过150℃的温升,COP高达2.100。Gao等[14]提出了一种新型的空气源吸收-压缩式热泵实现阶梯式升温。该系统温升超过90℃,COP最高达1.700。

通过模拟试验,延伸的三元工质、耦合循环、反 复精馏、过冷器等新技术手段,可以提高耦合热泵 的能效和经济性。同时,利用该系统可以回收电 厂、低温烟气等余热,实现节能减排。孙健等[15]提 出一种回收废热制取蒸汽的高温压缩式热泵系统, 使用一种性能优异的三元工质 R365mfc/R124/ R141b,在余热温度80℃、蒸发温度70℃、制热温度 120 ℃下, COP达到4.900。安美燕[16]等提出利用热 耦合压缩-吸收式热泵进行高温输出,回收30~40℃ 余热时,COP最高达2.580,在高温输出型循环回收 60~70℃余热时,COP最高达2.830。张冲等[17]提出 一种利用吸收-压缩式耦合热泵回收电厂余热进行 供热的运行系统,模拟结果显示,新系统可节省蒸 汽量63 t/h,增加供热面积11.4万㎡。陈金峰[18]提 出一种运用压缩式热泵制取热量后驱动吸收式热 泵的新型耦合循环,用于改善太阳能空调的稳定 性。试验结果表明,耦合循环最大COP达4.280,耦 合循环的蓄冷效率高达2.81。姜迎春[19]提出一种 吸收-压缩复合热泵系统用于回收低温烟气。模拟 结果表明,该系统可以节约53%的一次能源消耗, 一次能源利用率高达67.3%,降低排烟损失78%。 Xu等[20]对吸收式与压缩式热泵在相同工作条件下 进行㶲效率分析。结果表明,压缩式热泵COP较高 但其㶲效率较低。吸收式热泵㶲效率较高,其回收 余热能力更强,适用于大温升条件下的余热回收场 景。Wang等[21]提出一种新型的开式吸收-压缩式 热泵用于回收烟气余热,模拟结果表明耦合循环的 烟气余热回收率为82.4%,相较于常规的开式吸收 式热泵效率高出12.3%。Wu等[22]提出一种用于超 低温环境的新型水离子液体吸收式与CO。压缩式耦 合热泵。模拟结果表明,当环境温度由-30℃上升 至0℃时,一次能源效率从1.064增加到1.256,相 较于燃气锅炉高 18%~40%。Ji 等[23]提出了一种新 型的空气源吸收-压缩式耦合热泵用于在低温环境 下供暖。模拟结果表明,该热泵最大COP为1.200~ 1.400。环境温度低于-10℃时仍可提供高于60℃ 的热水。Gao等[24]通过在吸收-压缩式循环中加入 过冷器与两级精馏装置提高耦合循环的热效率。 模拟结果表明,在加热温度180℃、溶液热交换器效 率为0.8的情况下,该热泵比常规热泵能效提高

17.4%。Hadi等[25]提出使用海水淡化系统产生的余热驱动吸收-压缩式耦合热泵。模拟结果表明,该系统可以通过降低吸收器的终端温差与压缩式压缩机的压缩比来实现降低生产淡水的成本。

综上所述,提高吸收式热泵与压缩式热泵工作 温度与范围大多数研究集中于将2种循环进行耦 合。本文提出一种基于第二类吸收式热泵与压缩 式热泵耦合的新型超高温空气源耦合热泵机组。 该热泵机组中吸收式循环使用工业废热进行驱动, 压缩式循环使用电能驱动,在提高热泵机组制热温 度的基础上降低其耗能。其中吸收式循环采用无 毒稳定的溴化锂水溶液作为工作介质,压缩式循环 采用安全环保的R134a为工作介质。

# 1 高温耦合循环概述

本文提出的新型超高温耦合热泵循环系统流程如图1所示。该循环由第二类吸收式循环与压缩式循环相耦合,利用第二类吸收式循环高制热温度的特性来制取高温热水(蒸汽),采用压缩式循环来提高吸收式循环的蒸发温度,保证吸收式循环的溴化锂溶液浓度差,进一步改善吸收式循环的工作性能,提高吸收式循环COP,工作原理如下。

废热蒸汽加热发生器内的溴化锂稀溶液产生冷剂蒸汽,冷剂蒸汽进入冷凝器放出热量后变为冷剂水。冷剂水通过水泵加压进入耦合换热器内吸收来自压缩式循环工质冷凝放出的热量变为冷剂蒸汽,耦合换热器出口的冷剂蒸汽经水蒸气压缩机进一步压缩后,进入吸收器内与溴化锂浓溶液进行混合放出大量热量,用于制备热水。该耦合循环通过在吸收式循环内嵌入水蒸气压缩机提高吸收器内压力<sup>[26]</sup>,降低稀溶液浓度,使吸收式循环维持一个安全运行的范围。通过压缩式循环提取空气中的热量释放到吸收式循环蒸发器中<sup>[27]</sup>,提高吸收式

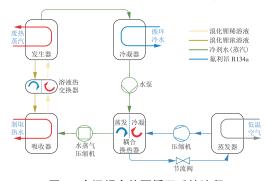


图1 高温耦合热泵循环系统流程

Fig. 1 Flow of the high temperature coupling heat pump circulation system

循环的蒸发温度,改善吸收式机组运行工况,提高 耦合热泵机组 COP。

## 2 高温耦合热泵热力学模型

本研究对高温耦合热泵循环进行热力学建模。首先对耦合循环中各传热部件建立能量平衡与质量平衡方程,对氟利昂压缩机、水蒸气压缩机进行建模。通过联立各方程组以求解循环中各部件状态点热力学参数。使用热力学方程求解软件<sup>[28]</sup>(Engineering Equation Solver, EES),方程中相关循环工质的热力学参数使用 REFPROP 软件<sup>[29]</sup>(流体热力学和输运性质数据库, V9. 1)进行调用。为了方便方程求解,提高模型精度,现对该模型做出如下假设。

蒸发、冷凝器中的换热为等压过程,忽略蒸发与冷凝过程中压降的影响<sup>[30]</sup>;节流阀、溶液泵前后为等焓过程;工质相变前后以及管道流动过程为绝热过程<sup>[31]</sup>;压缩过程的循环效率为电机效率、机械效率和等熵效率的乘积。其中,电机效率为0.85,机械效率为0.85,等熵效率为0.90<sup>[32]</sup>。

下面给出高温耦合热泵循环中各部件数学模型。

## (1)发生器

$$Q_{\rm g} = q_{\rm m, x1} h_{\rm 8} + q_{\rm m, d} h_{\rm 1} - q_{\rm m, x2} h_{\rm 6},$$
 (1)  
式中:  $Q_{\rm g}$  为发生器热负荷, kW;  $q_{\rm m, d}$  为冷剂蒸汽流量, kg/s;  $h_{\rm 1}$  为冷剂蒸汽比焓, kJ/kg;  $q_{\rm m, x1}$ ,  $q_{\rm m, x2}$  分别为

量,kg/s; $h_1$ 为冷剂蒸汽比焓,kJ/kg; $q_{m,x1}$ , $q_{m,x2}$ 分别为浓溶液与稀溶液的质量流量,kg/s; $h_6$ , $h_8$ 分别为发生器入口稀溶液与发生器出口浓溶液的比焓,kJ/kg。

#### (2)溶液换热器

$$q_{m,x1}(h_9 - h_8) = q_{m,x2}(h_7 - h_6),$$
 (2)

式中: $h_7$ 为溶液热交换器人口稀溶液比焓,kJ/kg; $h_9$ 为溶液热交换器出口浓溶液比焓,kJ/kg。

### (3)冷凝器

$$Q_{c} = q_{m,d}(h_{2} - h_{1}), \tag{3}$$

式中: $Q_{\circ}$ 为冷凝器热负荷,kW; $h_{2}$ 为冷凝器出口冷剂 比焓, $kJ/kg_{\circ}$ 

#### (4)溶液泵

$$h_2 = h_3, \tag{4}$$

式中:h3为蒸发器入口冷剂比焓,kJ/kg。

#### (5)耦合换热器

$$Q_{\text{c-e}} = q_{\text{m,d}}(h_4 - h_3) = q_{\text{m,r}}(h_{11} - h_{13}),$$
 (5)  
中: $q$  为氟利昂工质流量, $kg/s$ ; $h_1$ 为氟利昂压缩

式中: $q_{m,r}$ 为氟利昂工质流量,kg/s; $h_{11}$ 为氟利昂压缩机出口氟利昂工质比焓,kJ/kg; $h_{13}$ 为耦合换热器出口氟利昂工质比焓,kJ/kg; $h_{4}$ 为水蒸气压缩机入口冷剂蒸汽比焓,kJ/kg。

# (6)吸收器

$$Q_{a} = q_{m,d} h_{5} + q_{m,x1} h_{9} - q_{m,x2} h_{7}, \tag{6}$$

式中: $Q_a$ 为吸收器热负荷,kW; $h_s$ 为水蒸气压缩机出口冷剂蒸汽比焓,kJ/kg。

### (7)水蒸气压缩机

$$P_{s} = q_{d}(h_{5} - h_{4}), \tag{7}$$

式中:P。为水蒸气压缩机功耗,kW。

水蒸气压缩机效率计算式

$$\eta_{s} = \frac{h_{4s} - h_{4}}{h_{5} - h_{4}},\tag{8}$$

式中:η<sub>s</sub>为水蒸气压缩机压缩效率;h<sub>4s</sub>为水蒸气压缩机入口冷剂蒸汽等熵压缩后的比焓,kJ/kg。

### (8)氟利昂压缩机

$$P_2 = q_{m,r}(h_{10} - h_{11}), (9)$$

式中: $P_2$ 为氟利昂压缩机功耗,kW; $h_{10}$ 为耦合换热器入口氟利昂工质的比焓,kJ/kg。

氟利昂压缩机效率

$$\eta_1 = \frac{h_{11s} - h_{11}}{h_{10} - h_{11}},\tag{10}$$

式中: $\eta_1$ 为氟利昂压缩机压缩效率; $h_{11s}$ 为氟利昂压缩机入口氟利昂工质等熵压缩后的比焓,kJ/kg。

## (9)热泵机组COP计算方式

$$C_{\rm OP} = \frac{Q_{\rm a}}{P_{\rm S} + P_2 + \lambda Q_{\rm g}},\tag{11}$$

式中: $C_{OP}$ 为热泵机组的性能系数; $\lambda$ 为热电转化系数。

## 3 模拟结果与分析

# 3.1 耦合温度对循环性能的影响

耦合温度是指耦合换热器内的换热温度,它既影响着吸收式循环的蒸发温度,也影响压缩式循环的冷凝温度。耦合温度的变化会同时影响2个循环的运行性能,对于耦合循环运行性能也会带来影响。本文在加热蒸汽(0.2 MPa,5 kg/s)、环境温度25℃、水蒸气压缩机压比为5情况下,探究在制热温度130℃时耦合温度的变化对于耦合循环及其子循环性能变化的规律。耦合温度既考虑到吸收式循环的蒸发温度,又与压缩式循环的冷凝温度有关。为了避免因压缩式循环冷凝温度过高导致机组性能下降,耦合温度选取范围设定在70~85℃。

相关参数随耦合温度变化趋势如图 2 所示。耦合温度升高,吸收式循环的蒸发温度随之升高。蒸发压力随蒸发温度升高而增加,进入吸收器内的水蒸气压力增加引起吸收器内压力增加。在吸收器内温度不变的情况下,根据溴化锂溶液溶解特性,压力升高,溶液质量分数下降。当耦合温度由 70 ℃升高到 85 ℃时,溴化锂稀溶液质量分数由 56.2%下降至 46.6%。

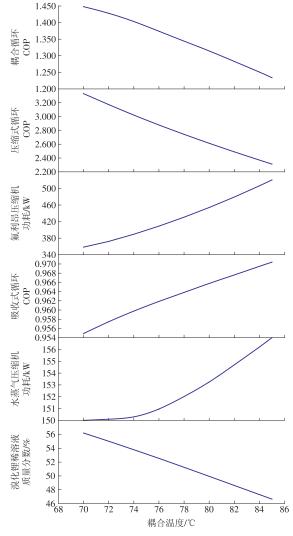


图 2 相关参数随耦合温度变化趋势

Fig. 2 Relevant parameters variation with the coupling temperature

稀溶液浓度下降,浓溶液浓度不变,溶液的放气范围增大。吸收式循环的溶液循环量增加,更多的水蒸气进入循环。由于耦合温度升高引起的蒸发温度升高,进入水蒸气压缩机的水蒸气入口温度、压力升高。进入水蒸气压缩机的水蒸气流量增加,导致水蒸气压缩机功耗增加,由150kW增加至157kW。

当溶液浓度差增加引起的放气范围增加时,吸收器热负荷增加。在水蒸气压缩机功耗增加,吸收器热负荷也增加的情况下,吸收式COP呈现小幅度上升趋势。吸收器热负荷的增速大于水蒸气压缩机功耗的增速,当耦合温度由70℃升高至85℃时,吸收式COP由0.950增加至0.970。

耦合温度的升高使压缩式冷凝温度升高,冷凝压力随之增加。氟利昂压缩机人口工质参数不变,出口压力、温度增加需要压缩机进一步增加。氟利昂压缩机功耗从358.4kW增加至520.6kW。

耦合换热器内吸收器循环蒸发器负荷与压缩式循环冷凝器负荷相等。由于耦合温度增加导致溴化锂溶液放气范围增加,吸收式循环蒸发器热负荷增加,压缩式循环冷凝器热负荷随之增加。由于氟利昂压缩机功耗增加剧烈,压缩式循环 COP呈下降趋势,由3.300下降至2.300。耦合循环 COP 受吸收式循环热负荷、发生器热负荷、水蒸气压缩机功耗、氟利昂压缩机功耗几个因素影响。由上文分析,水蒸气压缩机与氟利昂压缩机功耗增加,发生器热负荷与吸收器热负荷变化相对稳定,耦合循环COP由1.450下降至1.240。

#### 3.2 水蒸气压缩机压比对循环性能的影响

在本节内,水蒸气压缩机的压比选取范围为常规压缩机压比范围。考虑到机组承压能力,将水蒸气压缩机的压比选取为2~5。相关参数随压比变化趋势如图3所示。随着压比逐渐增加,冷凝器内压力逐渐升高。由溴化锂溶液溶解特性曲线可知,溴化 锂 稀 溶 液 质量 分数 下降,由 61.0% 下降至48.7%。

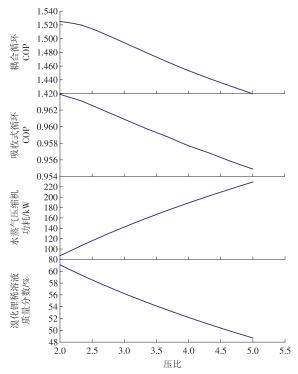


图3 相关参数随压比变化趋势

Fig. 3 Relevant parameters variation with pressure ratio

压比升高,压缩后的冷剂蒸汽压力、温度均升高。水蒸气压缩机出力增加,相应功耗也增加,由87.0 kW增加至229.3 kW。压比增加导致溶液放气范围增加,吸收器热负荷增加。同时水蒸气压缩机功耗增加,两者相比变化幅度相近,吸收循环COP由0.960降低至0.950。由于溶液放气范围增加导致吸收器、发生器热负荷、水蒸气压缩机功耗

增加,耦合循环COP由1.530下降至1.420。

#### 3.3 制热温度对循环性能的影响

本文采用第二类吸收式热泵制热系统,制热温度应高于热源温度,相关参数随制热温度变化趋势如图 4 所示。经过系统的模拟计算,该热泵最高制热温度可达 160 ℃。为详细分析机组的制热性能,将制热温度选取为 130~160 ℃。制热温度上升随之吸收器内溴化锂溶液温度上升。由图 4 可知,压力不变的情况下提升温度后溴化锂稀溶液浓度上升,由 49.2%上升至 61.5%。

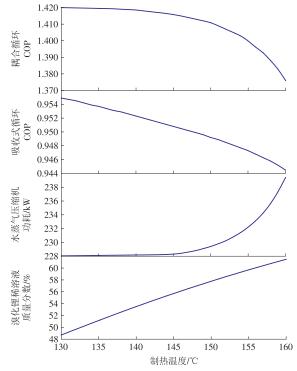


图 4 相关参数随制热温度变化趋势

Fig. 4 Relevant parameters variation with the heatintemperature

溶液放气范围下降,溶液循环量下降。吸收器、蒸发器等换热器热负荷下降,由于制热温度升高后吸收器内温度升高,水蒸气压缩机需要额外做功,由228 kW升高至240 kW。

当吸收器热负荷下降,水蒸气压缩机功耗上升,吸收式COP由0.960下降至0.940。由于升高制热温度对压缩式循环影响不大,耦合循环COP的变化趋势与吸收式循环COP变化趋势相同,由1.420下降至1.370。

#### 3.4 室外温度对循环性能的影响

耦合循环由吸收式与压缩式循环耦合而成,两者相互独立运行。室外温度的变化主要影响压缩式循环的运行,相关参数随室外温度变化趋势如图 5 所示。考虑到热泵机组需在全工况下运行,选取室外空气的平均温度进行分析,冬季时平均为  $10 \, ^{\circ}$  、夏季时平均为  $30 \, ^{\circ}$  。当室外温度升高时,压

缩式循环的蒸发温度升高,进入压缩机的氟利昂工质温度、压力升高,压缩机功耗由440.6 kW降低至279.3 kW。压缩式循环的耗功主要受冷凝器热负荷和压缩机功耗影响,由于压缩式循环的冷凝器与吸收式循环的蒸发器耦合在一起,冷凝负荷变化幅度很小。压缩机功耗下降,压缩式循环COP由2.700上升至4.200。耦合循环COP受吸收式循环与压缩式循环共同影响,在室外温度变化情况下吸收式循环COP保持稳定,耦合循环COP变化趋势与压缩式循环变化趋势一致,由1.300上升至1.600。

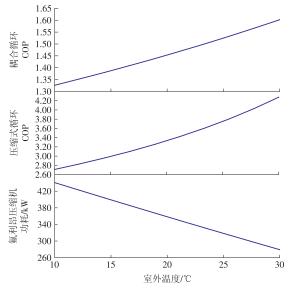


图 5 相关参数随室外温度变化趋势

Fig. 5 Relevant parameters variation with outdoor temperature

#### 4 结论

本文提出一种吸收-压缩式超高温耦合热泵机组,利用工业废热制取高温热水,降低工业行业对一次能源的消耗同时提高能源利用率,减少碳排放。相比现有热泵机组,提出的新型吸收-压缩式耦合循环制热温度更高、工作范围更广、性能系数优异。通过对该耦合循环内几个关键参数进行模拟分析得出以下结论。

- (1)耦合温度的变化同时影响吸收式循环和压缩式循环的运行。当耦合温度由 70 ℃上升至 85 ℃时,吸收式循环 COP由 0.950增加至 0.970,压缩式循环 COP由 3.300下降至 2.300,耦合循环 COP由 1.530下降至 1.420。
- (2)向吸收式循环内嵌入水蒸气压缩机是为了更好地提高吸收器的制热温度,当水蒸气压缩机的压比由2升高至5时,溴化锂稀溶液质量分数由61.0%下降至48.7%,吸收循环COP由0.960降低至0.950,耦合循环COP由1.530下降至1.420。
- (3)吸收式循环的吸收器作为制取热水的热设备,制热温度的变化对吸收式循环的影响最大。制

热温度由 130 ℃上升至 160 ℃时, 溴化锂稀溶液浓度由 49.2%上升至 61.5%。吸收式 COP由 0.960下降至 0.940, 耦合循环 COP由 1.420下降至 1.370。

(4)室外温度主要影响压缩式循环。当室外温度由 10 ℃上升至 30 ℃时,压缩式循环 COP由 2.700上升至 4.200。耦合循环 COP由 1.300上升至 1.600。

#### 参考文献:

- [1]国际能源署.《2021年世界能源展望》[R].
- [2]国际能源署.《2020年全球能源评论》[R].
- [3]国际能源署.《2018年世界能源展望》[R].
- [4]陈彬,杨延春,张建海.低温工业余热回收利用典型场景与应用案例[J].节能与环保,2023,342(1):87-88.

CHEN Bin, YANG Yanchun, ZHANG Jianhai. Typical scenarios and application cases of waste heat recovery and utilization in low-temperature industry [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023, 342(1): 87–88.

- [5]夏建军.流程工业余热资源及利用[J].可持续发展经济导刊,2022,34(4):30-31.
  - XIA Jianjun. Waste heat resources and utilization of process industry [J]. Economic Guide for Sustainable Development, 2022, 34(4);30–31.
- [6] 余龙清, 马锋, 胡学伟. 低温工业余热综合利用[J]. 资源 节约与环保, 2018, 197(4): 13, 17.
  - YU Longqing, MA Feng, HU Xuewei. Comprehensive utilization of industrial waste heat at low temperature [J]. Journal of Resource Saving and Environmental Protection, 2018, 197(4):13,17.
- [7]孙健,王寅武,吴可欣,等.综合能源系统中热泵技术研究与应用[J].综合智慧能源,2023,45(4):1-11.
  - SUN Jian, WANG Yinwu, WU Kexin, et al. Research and Application of heat pump technology in integrated energy system[J].Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(4):1-11.
- [8]刘伟,牛栓文,徐涛,等.油田采出水驱动带经济器的高温 压缩式热泵分析[J].工业加热,2022,51(9):15-19,23. LIU Wei, NIU Shuanwen, XU Tao, et al. Analysis of high temperature compression heat pump driven by oil field produced water with economizer [J]. Industrial Heating, 2022,51(9):15-19,23.
- [9]张俊博,金旭,刘忠彦,等.吸收式热泵余热回收先进技术 综述[J].发电技术,2020,41(3):269-280.
  - ZHANG Junbo, JIN Xu, LIU Zhongyan, et al. Review of advanced technologies for waste heat recovery of absorption heat pumps[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 269–280.
- [10]马世财.新型耦合热泵热力学循环特性研究[D].北京: 华北电力大学,2022.

- MA Shicai. New coupling heat pump thermodynamic cycle characteristics research [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [11]马振西,刘凤国,张蕊,等.燃气压缩式与双效吸收式耦合热泵的制冷性能[J].天津城建大学学报,2020,26 (2):137-141,154.
  - MA Zhenxi, LIU Fengguo, ZHANG Rui, et al. Refrigeration performance of gas compression coupled with dual-effect absorption heat pump [J]. Journal of Tianjin Urban Construction University, 2020, 26(2):137–141, 154.
- [12]孙健, 马世财, 霍成, 等. 新型吸收式与压缩式耦合循环性能研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 375-380.

  SUN Jian, MA Shicai, HUO Cheng, et al. Research on performance of novel absorption and compression coupling cycles [J]. Acta Solar Energy Sinica, 2019, 41 (10): 375-380.
- [13]ZHANG X, WANG R, XU Z.Air-source hybrid absorption-compression heat pumps with three-stage thermal coupling configuration for temperature lift over 150 °C [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 271:116304.
- [14]GAO J, XU Z, WANG R. An air-source hybrid absorption-compression heat pump with large temperature lift [J]. Applied Energy, 2021, 291:116810.
- [15]孙健,刘靖宇,戈志华,等.基于三元混合工质高温压缩式热泵循环性能研究[J].工程热物理学报,2020,41(5):1043-1049.
  - SUN Jian, LIU Jingyu, GE Zhihua, et al. Research on cycle performance of high temperature compression Heat pump based on ternary mixing medium [J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 20,41(5):1043–1049.
- [16]安美燕,赵心蕊,徐震原,等.工业余热回收的耦合压缩-吸收式高温热泵循环[J].上海交通大学学报,2021,55(4):434-443.
  - AN Meiyan, ZHAO Xinrui, XU Zhenyuan, et al. Coupling compression-absorption high temperature heat pump cycle for industrial waste heat recovery [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(4):434–443.
- [17]张冲,张涛,王光林.基于吸收式-压缩式热泵耦合技术的热电厂余热回收系统研究[J].节能,2019,38(10):27-28.
  - ZHANG Chong, ZHANG Tao, WANG Guanglin. Research on waste heat recovery system of thermal power plant based on absorption-compression heat pump coupling technology [J]. Energy Saving, 2019, 38(10):27–28.
- [18] 陈金峰. 太阳能吸收制冷与蒸汽压缩空调耦合循环机理与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

  CHEN Jinfeng. Experimental study on the coupling cycle mechanism of solar absorption refrigeration and steam compression air conditioning [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.

- [19]姜迎春.回收低温烟气余热的吸收-压缩复合热泵系统 集成与分析[D].北京:中国科学院大学(中国科学院工 程热物理研究所),2017.
  - JIANG Yingchun. Integration and analysis of absorption-compression combined heat pump system for recovering waste heat from low-temperature flue gas [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2017.
- [20]XU Z, GAO J, HU B. Multi-criterion comparison of compression and absorption heat pumps for ultra-low grade waste heat recovery[J]. Energy, 2022, 238:121804.
- [21]XIAO W, HAO Z, LIN C, et al. Simulation study of an open compression absorption heat pump in water and heat recovery of low-temperature and high-humidity flue gas[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269:116180.
- [22] WEI W, CHONG Z, SI H, et al. A hybrid H<sub>2</sub>O/IL absorption and CO<sub>2</sub> compression air-source heat pump for ultra-low ambient temperatures [J]. Energy, 2022, 239:122180.
- [23]QIANG J, HAN Z, ZHANG X, et al. Study on the heating performance of absorption-compression hybrid heat pump in severe cold regions [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185:116419.
- [24]GAO P, QING C, CHANG M, et al. Hybrid absorptioncompression heat pump with two-stage rectification and subcooler [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 116027.
- [25] ROSTAMZADEH H, NAMIN S, GHAEBI H, et al. Performance assessment and optimization of a humidification dehumidification (HDH) system driven by absorption-compression heat pump cycle [J]. Desalination, 2018,447:84-101.
- [26] 冯慧敏,包睿祺,刘舫辰,等.新型第二类溴化锂吸收压缩复合式热泵系统研究[J].能源与节能,2019,168(9):45-47.
  - FENG Huimin, BAO Ruiqi, LIU Fangchen, et al. New type of the second type of lithium bromide absorption compressed composite heat pump system research [J]. Energy and Energy Conservation, 2019, 168(9):45–47.
- [27]孙健,秦宇,王寅武,等.基于热网驱动的综合能源新型空气源高温热水机组性能研究[J].综合智慧能源,2022,44(7):33-39.
  - SUN Jian, QIN Yu, WANG Yinwu, et al. Research on performance of new air source high temperature water heater with comprehensive energy based on heat network drive [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44 (7): 33–39.
- [28] 聂东梅. 准二级压缩热泵干燥系统性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
  - NIE Dongmei. Quasi secondary compression heat pump drying system performance study [D]. Mianyang: Southwest

University of Science and Technology, 2021.

[29]王斌.基于R134a-DMF工质对吸收式热泵的数值模拟和性能研究[D].济南:山东建筑大学,2022.

WANG Bin. Numerical simulation and performance study of absorption heat pump based on R134a-DMF working medium [D]. Jinan: Shandong Construction University, 2022.

[30]马世财,周少祥,王寅武,等.基于吸收-压缩新型热泵循 环变工况性能分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(4):105-112.

MA Shicai, ZHOU Shaoxiang, WANG Yinwu, et al. Performance analysis of a new heat pump based on absorption-compression cycles [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(4):105-112.

[31]孙健,霍成,马世财,等.基于电动热泵的天然气锅炉余 热深度回收研究[J].中国电机工程学报,2022,42(11): 4060-4069.

SUN Jian, HUO Cheng, MA Shicai, et al.Research on deep recovery of waste heat from natural gas boilers based on electric heat pump[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (11):4060-4069.

[32]孙健,马世财,霍成,等.烟气余热回收高温电动热泵混

合工质性能研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):120-126.

SUN Jian, MA Shicai, HUO Cheng, et al. Study on mixed working medium performance of high temperature electric heat pump with flue gas waste heat recovery [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(2):120-126.

(本文责编: 齐琳)

收稿日期:2023-05-26;修回日期:2023-06-25 上网日期:2023-07-03;附录网址;www.iienergy.cn

#### 作者简介:

孙健(1985),男,副教授,硕士生导师,博士,从事建筑节能、零能耗建筑、可再生能源及关键设备方面的研究,stu@188.com;

秦宇(1998),男,在读硕士研究生,从事建筑节能、热泵方面的研究,qinyu980603@163.com;

郝俊红(1988),男,副教授,博士,从事储能与燃料电池、分布式能源系统、能效碳效诊断等方面的研究,hjh@ncepu.edu.cn:

杨勇平(1967),男,教授,博士生导师,博士,从事热力学、火力发电节能理论与技术、太阳能辅助燃煤发电、 $CO_2$ 减排、IGCC等方面的研究,yyp@ncepu.edu.cn。