

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.07.004

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

Study on the performance of new air-source high-temperature hot water units driven by heat supply network in integrated energy systems

孙健,秦宇,王寅武,吴可欣,郝俊红,杨勇平

SUN Jian, QIN Yu, WANG Yinwu, WU Kexin, HAO Junhong, YANG Yongping

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:常规电动热泵应用于寒冷地区能效较低,且溴化锂吸收式热泵机组的蒸发极限运行温度为5℃,因此基于吸收式循环的空气源热泵在我国东北地区零下气温环境中无法工作。提出一种将压缩式循环与吸收式循环进行耦合的创新型低环温空气源热泵,旨在综合能源系统中利用城市热网驱动高效制取高温热水,解决了电动热泵在低温环境中性能差及电费成本高的技术难题。首先分析耦合热泵机组的运行原理,其次对提出的新型热泵机组进行仿真模拟。通过模拟计算得出双相变换热器蒸发温度、热水出口温度、环境温度以及水蒸气压缩机压比热泵制热性能的影响规律。通过对4种不同工况的理论计算和分析以及与压缩式热泵的对比,验证了所提出新型低温空气源热泵系统具有良好的性能优势和工业应用推广价值。

关键词:综合能源系统;吸收式热泵;压缩式热泵;双相变换热器;耦合循环;空气源热泵;热网驱动

中图分类号:TK 01:TU 83 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)07-0033-07

Abstract: Conventional electric heat pumps are of low energy efficiency in cold regions. Since the lowest operation temperature of lithium bromide absorption heat pumps is 5℃, they cannot work in sub-zero areas of Northeast China. By coupling compression cycle with absorption cycle, a new low-temperature air-source heat pump is proposed. The pump driven by the municipal heat network in an integrated energy system can produce domestic hot water effectively and solve the problems of conventional pumps' poor performance in cold areas and high electricity cost. The operation principle of the coupled heat pump unit is analyzed, and the proposed new heat pump unit is simulated. The effect of the evaporation temperature of a dual-phase heat exchanger, hot water outlet temperature, ambient temperature and steam compressor pressure ratio on the heating performance of the heat pump is obtained through simulation calculations. Through theoretical calculation and comparative analysis on the compression heat pump and the proposed new low-temperature air-source heat pump under four different working conditions, the high performance and industrial value of the latter pump is verified.

Keywords: integrated energy systems; absorption heat pump; compression heat pump; dual-phase heat exchanger; coupled cycle; air-source heat pump; driven by heat-supply network

0 引言

能源是人类生存和社会经济发展的基石。近些年能源短缺与相应的环境污染已经成为制约人类发展的重要问题。目前,我国工业能源消耗约占全国能源消耗总量的70%^[1-2],建筑能耗已超过社会

总能耗的23%,我国北方地区由于气候寒冷,供暖面积大、周期长,使得其供暖能耗所占建筑能耗比例最大^[3]。随着我国能源转型的不断加速,清洁制热的需求逐渐增加。在日常生活中我们需要用到大量生活热水,我国居民制取生活热水的方式主要为电热水器和太阳能热水器,前者制取热水需要大量高品位的电能,因此运行耗能较高。后者受气温和天气因素影响,运行不稳定,出水量较小,表现较差。以低品位热能为驱动,具有耗电量小、可以回收废热、减少碳排放等特点的吸收式热泵在清洁制

收稿日期:2022-04-29;修回日期:2022-06-20

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)

热方面的潜力很大^[4]。若采用吸收式热泵制取热水,则存在无法在零下气温环境中运行的问题。

为了提升吸收式热泵和电动压缩式热泵的性能和工作范围,国内外针对 2 种热泵的性能与组合方式进行了研究。冯慧敏等人^[5]提出将水蒸气压缩机引入吸收式热泵系统,以解决系统中存在的对驱动热源温度要求较高的问题,同时提高系统输出热源温度,进而扩大系统的适用范围。Ayala 等人^[6]将压缩机与溶液吸收循环采用并联的方式进行了试验研究。Fukuta 等人^[7]在单效吸收式循环中蒸发器和吸收器之间加入压缩机以降低稀溶液质量浓度从而提升放气范围。王长庆^[8]介绍了一种制取更高温热水或蒸汽的两级式第二类溴化锂吸收式热泵。姜秀华^[9]将单效和双效吸收式热泵相结合,根据用热需求和低品位热源的溫度确定运行形式。张红岩^[10]等人对第一类溴化锂吸收式热泵和蒸汽压缩式热泵进行了综合对比,得出 2 种热泵各自最佳的工作范围。米玉鸿等人^[11]构建了亚临界热电联产机组耦合吸收式热泵系统,测试其工作性能得出在相同热负荷下,热泵介入工况的经济性好于热泵切除的工况。薛小军等人^[12]提出用燃气热电联产与地源热泵耦合替代燃气锅炉供热,结果表明不仅可以有效减少天然气的消耗量以及二氧化碳的排放量,而且燃气热电联产耦合地源热泵供热方案具有良好的经济性。Kohlenbacha 等人^[13]研究了热惯性对吸收式热泵动态特性的影响,系统的动态响应时间随系统热惯性的增加而变长。熊军等人^[4]建立考虑传质和分布参数的溴化锂吸收式热泵动态仿真模型,结果表明;热源工质入口温度的上限受到系统制热能效比(COP)及结晶风险的双重影响;冷却水入口温度的下降可增大系统 COP,其下限受结晶风险的限制。周勇等人^[14]提出采用能效分析的方法对比传统换热与吸收式热泵换热方式,对吸收式热泵建立了模拟模型,发现低溶液质量浓度、低发生器压力及高一次网温度有利于提高吸收式热泵的供热能力。陈清等人^[15]通过对单效溴化锂吸收式热泵系统进行热力计算,通过改变设计工况下某单一变量,分别分析了机组效率变化情况。

综上所述,为了提升溴化锂吸收式热泵机组的制热性能和工作范围,本文提出一种将吸收式与压缩式深度耦合的新型空气源耦合热泵机组^[16],系统中将吸收式循环中的蒸发器与压缩式循环中的冷凝器耦合成为双相变换热器。该系统采用城市热网一次水驱动,同时实现吸收式和压缩式循环,由于利用城市热网一次水驱动,在相同制热量下,相比于常规电加热制取生活热水,利用热泵制取热水

的方式显著降低了制热成本。考虑到机组循环运行的安全稳定性,吸收式循环以无毒无味的溴化锂水溶液为工质,压缩式循环以常用的安全环保工质 R134a 为工质。

1 空气源耦合热泵机组模型建立

空气源耦合热泵系统循环流程如图 1 所示,为了提高吸收式热泵系统的工作范围,在系统循环内嵌入了氟利昂压缩机,还额外增加了水蒸气压缩机和双相变换热器^[17-21]。由于耦合循环采用城市热网一次水驱动,所以吸收式循环中浓溶液的质量浓度较低,为了保证吸收式循环的循环倍率在一个合理安全的范围内,通过在发生器出口设置水蒸气压缩机以降低发生器压力,进而提升浓溶液的质量浓度。

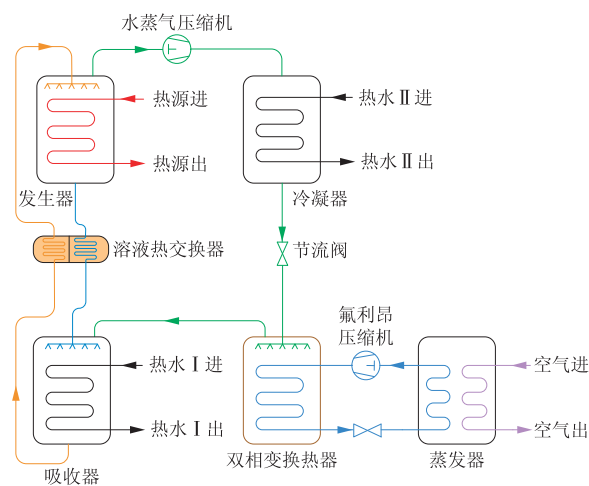


图 1 机组耦合循环流程

Fig. 1 Coupling cycle of the unit

建立机组循环过程如下:首先,对循环中每个设备建立能量和质量平衡方程;其次,建立水蒸气压缩机和氟利昂压缩机模型;最后,联立各设备相应的方程组进行求解,以获得每个设备的进出口状态参数。系统中每个方程组的求解采用 EES 软件来完成^[18],系统循环数学模型假设如下^[19]。

(1)工质的蒸发与冷凝为等压过程,忽略蒸发与冷凝过程压降的影响。

(2)节流前后为等焓过程。

(3)工质在相变过程以及管道流动过程中与外界没有热量交换。

(4)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。

系统循环中设备模拟的数学模型如下。

(1)发生器。能量守恒方程为

$$Q_g = q_{m,c,sol} h_{c,sol,in} + q_{m,d} h_d - q_{m,d,sol} h_{d,sol,out}, \quad (1)$$

式中: Q_g 为发生器热负荷, kW; $q_{m,d}$ 为冷剂蒸汽流量, kg/s; h_d 为冷剂蒸汽比焓, kJ/kg; $q_{m,d,sol}$, $q_{m,c,sol}$ 分别为稀溶液与浓溶液的质量流量, kg/s; $h_{d,sol,out}$, $h_{c,sol,in}$ 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) 溶液热交换器。能量守恒方程为

$$q_{m,d,sol}(h_{d,sol,out} - h_{d,sol,in}) = q_{m,c,sol}(h_{c,sol,in} - h_{c,sol,out}), \quad (2)$$

式中: $h_{d,sol,in}$ 为溶液热交换器入口稀溶液比焓, kJ/kg; $h_{c,sol,out}$ 为溶液热交换器出口浓溶液比焓, kJ/kg。

(3) 冷凝器。能量守恒方程为

$$Q_c = q_{m,w}(h_{com,1,out} - h_{w,con,out}), \quad (3)$$

式中: Q_c 为冷凝器热负荷, kW; $h_{com,1,out}$ 为水蒸气压缩机出口冷剂蒸汽比焓, kJ/kg; $h_{w,con,out}$ 为冷凝器出口冷剂比焓, kJ/kg。

(4) 吸收器。能量守恒方程为

$$Q_a = q_{m,w}h_{w,abs,out} + q_{m,c,sol}h_{c,sol,out} - q_{m,d,sol}h_{d,sol,in}, \quad (4)$$

式中: Q_a 为吸收器热负荷, kW; $q_{m,w}$ 为制冷剂(水)流量, kg/s; $h_{w,abs,out}$ 为双相变换热器出口冷剂蒸汽比焓, kJ/kg。

(5) 双相变换热器的换热量为

$$Q_{c-e} = q_{m,w}(h_{w,abs,out} - h_{w,con,out}) = q_{m,r}(h_{com,2,out} - h_{v,in}), \quad (5)$$

式中: $q_{m,r}$ 为氟利昂工质流量, kg/s; $h_{com,2,out}$ 为氟利昂压缩机出口制冷剂工质比焓, kJ/kg; $h_{v,in}$ 为双相变换热器出口制冷剂工质比焓, kJ/kg。

(6) 蒸发器。能量平衡方程为

$$Q_e = q_{m,r}(h_{com,2,in} - h_{v,out}), \quad (6)$$

式中: Q_e 为蒸发器热负荷, kW; $h_{com,2,in}$, $h_{v,out}$ 分别为蒸发器进出口的制冷剂工质焓, kJ/kg。

(7) 节流装置。能量平衡方程为

$$h_{v,in} = h_{v,out} \quad (7)$$

(8) 水蒸气压缩机的功耗计算公式为

$$W_I = q_{m,w}(h_{com,1,out} - h_{com,1,in}), \quad (8)$$

式中: W_I 为水蒸气压缩机功耗, kW。

(9) 水蒸气压缩机的效率为

$$\eta = \frac{h_{com,1,ins} - h_{com,1,in}}{h_{com,1,out} - h_{com,1,in}}, \quad (9)$$

式中: η 为压缩机压缩效率; $h_{com,1,ins}$ 为水蒸气压缩机入口冷剂蒸汽等熵压缩后的比焓, kJ/kg。

(10) 氟利昂压缩机的功耗为

$$W_{II} = q_{m,r}(h_{com,2,out} - h_{com,2,in}), \quad (10)$$

式中: W_{II} 为氟利昂压缩机功耗, kW。

(11) 氟利昂压缩机的效率为

$$\eta = \frac{h_{com,2,ins} - h_{com,2,in}}{h_{com,2,out} - h_{com,2,in}} \quad (11)$$

(12) 溴化锂溶液的质量守恒方程

$$q_{m,d,sol}\omega_{d,sol} = q_{m,c,sol}\omega_{c,sol}, \quad (12)$$

式中: $\omega_{d,sol}$, $\omega_{c,sol}$ 为溴化锂溶液中浓溶液和稀溶液的质量分数, %。

热泵机组循环性能系数

$$C_{OP} = \frac{Q_c + Q_a}{W_I + W_{II} + \eta_e Q_g}, \quad (13)$$

式中: η_e 为发电效率。

$$\eta_e Q_g = q_{m,h}[(h_{heat,in} - h_{heat,out}) - T_0(s_{heat,in} - s_{heat,out})], \quad (14)$$

式中: $q_{m,h}$ 为驱动热源流量, kg/s; $h_{heat,in}$, $h_{heat,out}$ 为驱动热源进出口比焓, kJ/kg; T_0 为室外环境温度, K; $s_{heat,in}$, $s_{heat,out}$ 为驱动热源进出口比熵, J/(kg·K)。

2 空气源耦合热泵机组性能分析

耦合机组能在低温下运行的重要原因是嵌入了压缩式循环系统, 耦合机组循环中双相变换热器是由吸收式循环中的蒸发器与压缩式循环中的冷凝器耦合而成, 避免了吸收式热泵的蒸发器在低温条件下无法工作的问题。双相变换热器中吸收式循环的蒸发温度与压缩式循环的冷凝温度互相影响, 两者的变化影响着机组的性能系数。当制取生活热水的温度一定时, 随着双相变换热器内蒸发温度的上升, 吸收式循环的蒸发温度与吸收式循环的性能系数成正比, 与水蒸气压缩机功耗成反比。与此同时, 压缩式循环的冷凝温度与压缩式循环的性能系数成反比, 与氟利昂压缩机功耗成正比。

2.1 双相变换热器中蒸发温度对机组性能的影响分析

首先, 设定机组运行的条件为: 驱动热源进出口温度为 120/100 °C, 其流量为 13 kg/s。制取的生活热水首先进入吸收器内吸收热量, 再经过冷凝器二次吸热。室外冷空气进出口温度为 -10/-25 °C。设定双相变换热器内换热温差为 2 °C。吸收式循环中的水蒸气压缩机压比取 4, 吸收式循环工质为溴化锂溶液, 压缩式循环工质为 R134a, 分析不同蒸发温度对系统性能的影响, 结果如图 2 所示。

系统制热量来自于吸收式循环中冷凝器与吸收器的热负荷, 当双相变换热器内蒸发温度上升时, 吸收式循环冷凝温度不变, 蒸发冷凝的温差减小, 热泵机组性能提升, 制热量显著升高。

分析可知, 水蒸气压缩机压比取值为 4 (当水蒸气压缩机压比过低时, 导致浓溶液浓度过低, 吸收式循环无法正常运转), 水蒸气压缩机功耗变化取决于压缩机进出口的水蒸气参数, 因而蒸发温度的变化对于其影响较小, 功耗变化幅度较小。由于双相变换热器内设定了固定的换热温差, 压缩式循环冷凝温度与蒸发温度相关联, 冷凝温度的升高, 使

氟利昂压缩机功耗提升较大,从 69.6 kW 增加至 107.6 kW,如图 3 所示。

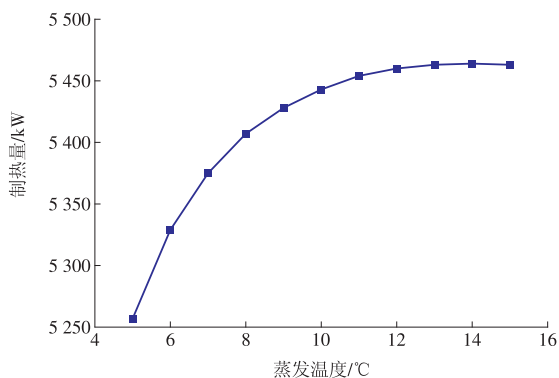


图 2 机组制热量随蒸发温度的变化情况

Fig. 2 Variation of heat production of the unit with evaporation temperature

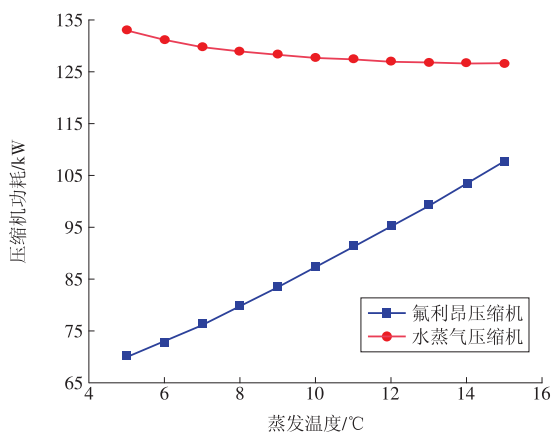


图 3 2 台压缩机功耗随蒸发温度的变化情况

Fig. 3 Variation of the power consumption of the two compressors with evaporation temperature

由图 4 分析可知,蒸发温度越高,对机组的制热能力越不利。由于吸收式循环中采用的制冷工质为水,接近 0 °C 时水易结冰,影响机组循环的安全稳定性,所以蒸发温度取 5 °C。

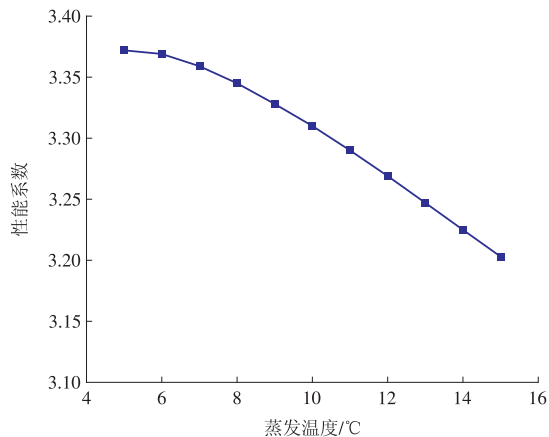


图 4 机组性能系数随蒸发温度的变化情况

Fig. 4 Variation of the unit performance coefficient with evaporation temperature

2.2 制取热水温度对机组性能的影响分析

在机组实际使用过程中,制取热水温度随着用户的用热需求不断变化,以最低制取热水温度 60 °C 为例(压缩机压比设为 8),分析热水温度上升时对机组性能的影响。由图 5 分析可知,随着制取热水温度的提升,机组的性能系数呈现下降趋势,热水温度从 60 °C 提升至 76 °C,其性能系数从 2.90 下降至 2.70。

由图 6 分析可知,制取热水温度不断升高时,冷凝压力随之升高。在相同水蒸气压缩机压比情况下,冷凝压力升高,水蒸气压缩机功耗随之增加。耦合循环内 2 台压缩机的功耗均有上升趋势,在热水温度为 75 °C 前压缩机的功耗比较平稳。

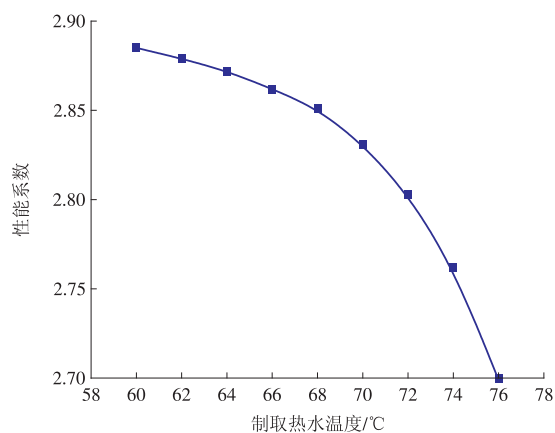


图 5 机组性能系数随制取热水温度的变化情况

Fig. 5 Variation of the unit performance coefficient with the temperature of produced hot water

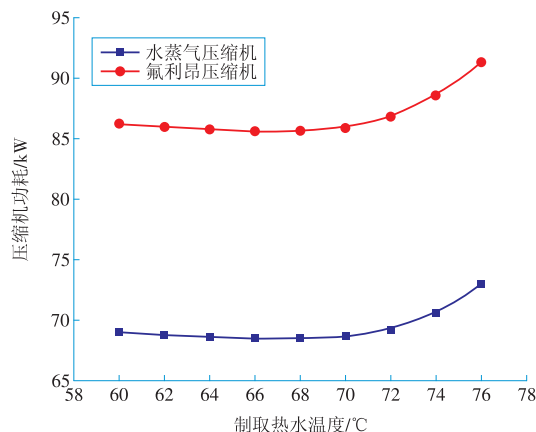


图 6 压缩机功耗随制取热水温度的变化情况

Fig. 6 Variation of the compressor power consumption with the temperature of produced hot water

由图 7 分析可知,随着制取热水温度的升高,系统制热量呈现下降趋势。主要原因是制取热水温度升高,压缩机功耗增加,机组的制热性能下降。

2.3 环境温度对机组性能的影响分析

耦合热泵机组工作在低温地区时,环境温度主要影响系统中压缩式循环的运行情况。由图 8 分析

可知,随着室外温度下降,压缩式循环的蒸发压力下降,需要氟利昂压缩机来做更多的功,随之压缩机功耗呈现极大的上升趋势。当环境温度从 -10°C 下降至 -25°C 时,压缩机的功耗从 87.4 kW 上升至 151.6 kW 。

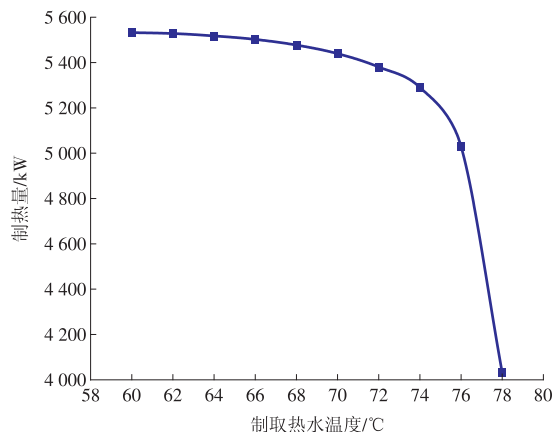


图7 机组制热量随制取热水温度的变化情况

Fig. 7 Variation of heat production of the unit with the temperature of produced hot water

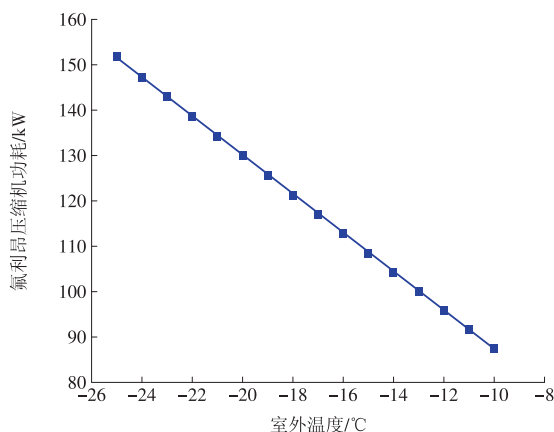


图8 氟利昂压缩机功耗随室外温度的变化情况

Fig. 8 Variation of Freon compressor power consumption with outdoor temperature

由图9分析可知,随着室外温度的下降,氟利昂压缩机功耗增加,机组性能系数呈现下降趋势,当环境温度从 -10°C 下降至 -25°C 时,机组性能系数从 3.31 下降至 2.75 。

2.4 水蒸气压缩机压比对机组性能的影响分析

在耦合机组系统循环中,通过不断调整水蒸气压缩机的压比可以调整吸收式循环内冷凝器的冷凝压力,当压比增加时冷凝器压力上升,吸收式循环浓溶液浓度上升,从而溶液循环倍率增大,进而提升了吸收式循环的性能。但压比增大后,水蒸气压缩机功耗显著上升而导致机组性能系数下降。取双相变换热器蒸发温度为 2°C 时,不同水蒸气压缩机压比机组性能的计算结果如图10所示。随着水蒸气压缩机压比增加,机组性能系数呈现下降趋

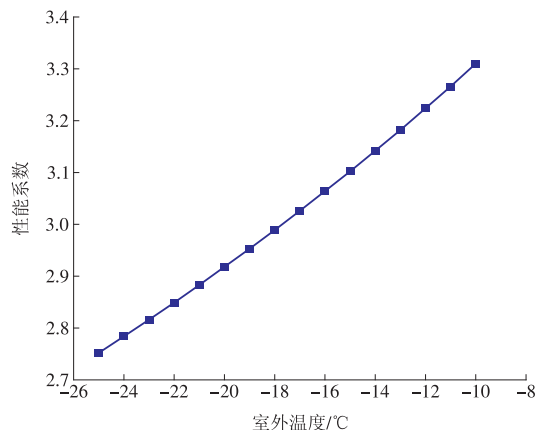


图9 机组性能系数随室外温度的变化情况

Fig. 9 Variation of the unit performance coefficient with outdoor temperature

势。在吸收式循环中,需要一定的溶液质量浓度差以确保循环安全稳定运行,压缩机压比不宜过高,否则会引起浓溶液浓度过高产生结晶问题,影响机组运行的安全性。

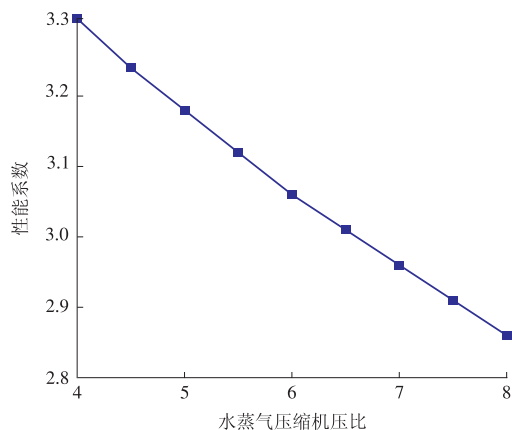


图10 机组性能系数随水蒸气压缩机压比的变化情况

Fig. 10 Unit performance coefficient varying with the pressure ratio of the steam compressor

由图11分析可知,随着水蒸气压缩机压比不断增大,其功耗呈上升趋势,但系统的制热量趋于稳定,与水蒸气压缩机压比关联不大。

3 机组运行的节能特性分析

耦合机组的提出是为了在低温地区也能付出较小的代价来制取生活热水,吸收式热泵由于工作时温度条件的限制无法工作,故不与耦合机组进行比较。以制取 60°C 生活热水为例,本文将耦合机组与压缩式热泵进行比较,见表1。在制取相同温度的热水时,耦合循环机组的性能系数高,压缩机功耗小。在相同冷负荷的条件下,制取相同温度热水时,耦合机组的热水流量更大。

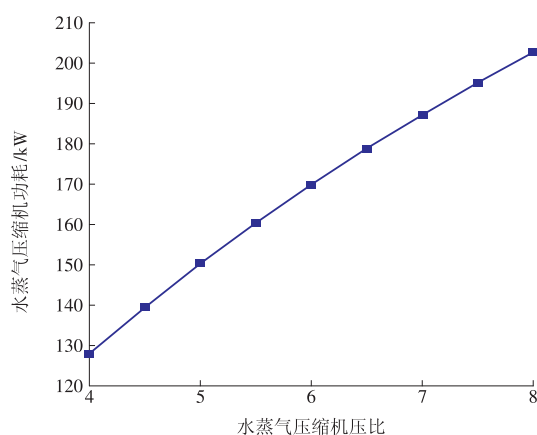


图 11 水蒸气压缩机功耗随压缩机压比的变化情况

Fig. 11 Power consumption of the steam compressor varying with its pressure ratio

表 1 耦合循环机组与压缩式热泵运行情况比较

Table 1 Comparison of the working situations of coupled cycle units and compression heat pumps

项目	耦合循环机组	压缩式热泵
性能系数	3.31	2.24
压缩机耗功率/kW	215	418
热水流量/(kg·s ⁻¹)	13.0	7.5

4 结论

吸收式热泵机组在我国东北地区零下气温环境中无法工作,该研究提出一种新型耦合循环机组,其将吸收式循环与压缩式循环进行深度耦合,相比现有热泵机组,显著地提升了其工作范围和性能系数,该研究通过对耦合机组进行运行模拟,分析了几个关键参数对耦合循环系统性能的影响,并与常规压缩式热泵进行了对比,具体结论如下。

(1)向吸收式循环中嵌入水蒸气压缩机以及设立双相变换热器的耦合循环相比现有的吸收式热泵显著提升了热泵机组的工作范围,采用安全环保的溴化锂溶液为工质时可高效制取 60℃ 以上生活热水满足家庭生活需求。

(2)在耦合循环中设置了水蒸气压缩机与氟利昂压缩机,增大水蒸气压缩机的压比时吸收式循环性能略微下降,但制取的热水温度显著提高。设置的氟利昂压缩机可提升双相变换热器内的蒸发冷凝温度,提高耦合机组的工作范围。

(3)双相变换热器内蒸发温度的高低对机组循环的性能具有显著影响,当蒸发温度升高时,吸收式循环由于蒸发温度上升导致性能提升,但压缩式循环的冷凝温度随之上升进而性能下降。双相变换热器的推荐蒸发温度分别为 5℃。

(4)与常规压缩式热泵相比,耦合循环的机组

运行优势较为显著,制取热水温度为 60℃,其性能系数、循环功耗与制取热水流量均好于同状态下压缩式热泵,具有较好的市场推广应用前景。

参考文献:

- [1]孙健,马世财,霍成,等.碳中和目标下热泵技术应用现状及前景分析[J].华电技术,2021,43(10):22-30.
SUN Jian, MA Shicai, HUO Cheng, et al. Application analysis and prospect of heat pump technology under the goal of carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (10):22-30.
- [2]陈健勇,李浩,陈颖,等.空气源热泵空调技术应用现状及发展前景[J].华电技术,2021,43(11):25-39.
CHEN Jianyong, LI Hao, CHEN Ying, et al. Application status and perspectives of air-source heat pump air conditioning technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (11):25-39.
- [3]清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2008[M].北京:中国建筑工业出版社.
- [4]熊军,廖晔,胡宪法,等.溴化锂吸收式热泵的动态建模及运行特性分析[J].热能动力工程,2022,37(2):122-128,159.
XIONG Jun, LIAO Ye, HU Xianfa, et al. Dynamic modeling and operating characteristics analysis of lithium bromide absorption heat pump [J]. Thermal Power Engineering, 2022, 37(2):122-128,159.
- [5]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(9):45-47.
FENG Huimin, BAO Ruiqi, LIU Fangchen, et al. Research on a new type II lithium bromide absorption compression composite heat pump system [J]. Energy and Energy Conservation, 2019(9):45-47.
- [6]AYALA R, HEARD C, HOLLAND F. Ammonia/lithium nitrate absorption/compression refrigeration cycle. Part I. Simulation [J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(3):223-233.
- [7]MITSUHIRO F, TADASHI Y, HIROAKI I, et al. Performance of compression/absorption hybrid refrigeration cycle with propane/mineral oil combination [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25 (7):907-915.
- [8]王长庆.溴化锂两级高温吸收式热泵及其设计[J].节能技术,2000(1):6-8.
WANG Changqing. Lithium bromide two-stage high-temperature absorption heat pump and its design [J]. Energy Saving Technology, 2000(1):6-8.
- [9]姜秀华.单双效结合运行的溴化锂第一类吸收式热泵 [J]. 节能,2009,28(12):21-24,2.

JIANG Xiuhua. Single and double effect combined operation

- of lithium bromide type I absorption heat pumps[J].Energy Conservation, 2009, 28(12):21-24, 2.
- [10]张红岩,夏克盛,赵明海.第一类溴化锂吸收式热泵最佳工作域[J].制冷技术, 2012, 32(4):46-50.
- ZHANG Hongyan, XIA Kesheng, ZHAO Minghai. Optimal working domain of the first type of lithium bromide absorption heat pump[J].Refrigeration Technology, 2012, 32(4):46-50.
- [11]米玉鸿,冯林魁,柏建华,等.亚临界热电联产机组耦合吸收式热泵系统热经济性及环境效益分析[J].热能动力工程, 2022, 37(4):94-99.
- MI Yuhong, FENG Linkui, BAI Jianhua, et al. Analysis of thermal economy and environmental benefits of coupled absorption heat pump system for subcritical cogeneration units[J].Thermal Power Engineering, 2022, 37(4):94-99.
- [12]薛小军,侯智华,张红昌,等.碳中和背景下燃气热电联产与地源热泵耦合替代燃气锅炉供热研究[J].动力工程学报, 2022, 42(4):359-364, 386.
- XUE Xiaojun, HOU Zhihua, ZHANG Hongchang, et al. Study of gas-fired cogeneration with ground source heat pump coupling to replace gas boilers for heat supply in a carbon neutral context[J].Journal of Power Engineering, 2022, 42(4):359-364, 386.
- [13]KOHLENBACH P, ZIEGLER F. A dynamic simulation model for transient absorption chiller performance. Part II: The model[J].International Journal of Refrigeration, 2007, 31(2):226-233.
- [14]周勇,魏航,李永田,等.吸收式热泵能效分析及模拟研究[J].上海节能, 2021(11):1257-1262.
- ZHOU Yong, WEI Hang, LI Yongtian, et al. Energy efficiency analysis and simulation study of absorption heat pump[J].Shanghai Energy Conservation, 2021(11):1257-1262.
- [15]陈清,王锡.溴化锂吸收式热泵变设计工况分析[J].建筑热能通风空调, 2020, 39(3):49-53, 11.
- CHEN Qing, WANG Xi. Analysis of variable design conditions of lithium bromide absorption heat pump[J].Building Thermal Ventilation and Air Conditioning, 2020, 39(3):49-53, 11.
- [16]孙健,戈志华,杜小泽,等.一种高效工业余热回收变负荷冷热水机组制造技术:ZL201910089196.9[P].2019.
- [17]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. Performance study of a new coupled absorption and compression cycle[J].Journal of Solar Energy, 2020, 41(10):375-380.
- [18]KLEIN S, NELLIS G. Thermodynamics [M]. England: Ambridge University Press, 2012.
- [19]孙健,董小波,戈志华,等.余热回收型高温热泵非共沸工质循环性能研究[J].工程热物理学报, 2019, 40(9):1949-1957.
- SUN Jian, DONG Xiaobo, GE Zhihua, et al. Study on the performance of waste heat recovery type high temperature heat pump with non-azeotropic work cycle[J].Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(9):1949-1957.
- [20]方旭,彭雪风,张凯,等.燃煤热电联产系统冷端余能供热改造研究进展[J].华电技术, 2021, 43(3):48-56.
- FANG Xu, PENG Xuefeng, ZHANG Kai, et al. Development of heating retrofit using waste heat from coal-fired CHP system cold end[J].Huadian Technology, 2021, 43(3):48-56.
- [21]余莉,徐静静,马兰芳,等.综合能源服务项目新增热泵系统的案例分析[J].综合智慧能源, 2022, 44(1):72-79.
- YU Li, XU Jingjing, MA Lanfang, et al. Case study on the integrated energy service project with newly installed heat pumps[J].Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1):72-79.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

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

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等方面的研究,yyp@ncepu.edu.cn。