

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

米玉鸿¹,冯林魁²,柏建华²,赵 凯²

(1. 嘉峪关宏晟电热有限责任公司,甘肃 嘉峪关 735100;2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院,甘肃 兰州 730000)

摘 要:为了减少北方供暖能耗、提高热电厂余热利用效率,构建了亚临界热电联产机组耦合吸收式热泵系统,并实测其性能,详细对比分析亚临界机组在耦合和切除热泵两种运行工况下的经济性。试验表明:热泵机组性能系数(Coefficient of Performance, COP)为 1.74,且热泵机组的制热量和回收热量随着循环水温度和驱动蒸汽压力的增大而增加;对于 2 台 330 MW 汽轮机组,热泵机组的投入可以增加供热面积 166.03 万 m²;每年节约循环水量 47.75 万 t,煤炭 4.03 万 t,经济效益良好;CO₂、SO₂ 和 NO_x 排放量分别减少 10.47 万 t、966 t 和 281.75 t,节能减排效果显著。

关 键 词:亚临界机组;吸收式热泵;热电联产;经济性;环境效益

中图分类号:TM621.3 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.04.013

[引用本文格式]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 Yu-hong, FENG Lin-kui, BAI Jian-hua, et al. Analysis of thermal economy and environmental benefits of subcritical cogeneration units coupled with absorption heat pump system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4):94-99.

Analysis of Thermal Economy and Environmental Benefits of Subcritical Cogeneration Units Coupled with Absorption Heat Pump System

MI Yu-hong¹, FENG Lin-kui², BAI Jian-hua², ZHAO Kai²

(1. Jiayuguan Hongsheng Electric Heating Co., Ltd., Jiayuguan, China, Post Code:735100;

2. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Lanzhou, China, Post Code:730000)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of heating in the north and improve the efficiency of waste heat utilization in thermal power plants, the subcritical cogeneration units coupled with absorption heat pump system were established, which operation performances were studied. Also, the economic benefits of the whole plant under the conditions with and without heat pump were compared detailedly. The research results show that the coefficient of performance (COP) of the overall absorption heat pump unit is 1.74, and the capacity of heat production and recovery increases with the raise of circulating water temperature and driving steam pressure. For the two 330 MW turbine units, when the heat pump unit is put into operation, the heating area of 1 660 300 m² is added, and the circulating water of 477 500 t and the coal of 40 300 t are saved annually, which have attractive economic benefits. Moreover, the emissions of CO₂, SO₂ and NO_x can be reduced by 104 700 t, 966 t and 281.75 t respectively, which have significant environmental benefits.

Key words: subcritical cogeneration units, absorption heat pump, combined heating and power, economic

收稿日期:2021-05-08;修订日期:2021-06-19

基金项目:宝钢集团宏晟电热公司科技项目(2121HS021, 2121HS018)

Fund-supported Project: The Projects of Jiugang Group Hongsheng Electric Heating Co., Ltd. (2121HS021, 2121HS018)

作者简介:米玉鸿(1974-),男,甘肃武威人,嘉峪关宏晟电热有限责任公司高级工程师。

performance, environmental benefits

引言

目前,我国热电厂一般采用凝汽机组供热。由于凝汽机组的凝汽压力和凝结水温都处于较低的水平,所以能源利用过程中存在较大的热量损失^[1-3]。热电厂结合高效的余热利用技术可以进一步提高其总能利用效率,减少单位能量输出的煤耗率和污染物排放量,提高经济效益,改善当地环境。

吸收式热泵由驱动力(蒸汽、高温热水、燃油或者燃气)带动,实现热量从低温热源向高温热源泵送的循环过程,是回收利用低温热能的有效装置,且其工质无毒无害,具有节约能源、保护环境的双重作用^[4-6]。吸收式热泵机组应用在热电厂进行余热回收已有很多相关研究。付林等人^[7]提出能级不匹配的大温差换热过程存在不可逆损失,将造成大量可用能的浪费,而这种大温差造成的可用势能可用于驱动吸收式热泵等逆型装置。吸收式换热适用于热能工程中存在的各种能级不匹配的换热过程,降低其不可逆损失,对能源转换和输配系统具有深远的意义。孙健等人^[8]分析了某热电厂 4 × 220 MW 燃煤供热机组采用吸收式热泵后整个供暖季的运行数据,试验数据表明,采用吸收式热泵后的热电厂节能减排效果显著。赵惠中等人^[9]对古交兴能热电厂中一项采用吸收式换热机组的供热工程进行实测,结果表明,该工程能够最大限度地利用该热电厂的余热,既提高了电厂的综合能源利用率,也为当地环境质量改善做出了贡献。冶永福^[10]的设计将吸收式热泵机组用于回收某热电厂输送干线上回水的余热,研究计算发现,吸收式热泵机组通过驱动热源驱动所回收的热量能够满足末端供热用户 500 万 m² 供热面积的需求。张广宇等人^[11]利用热电厂中热泵技术回收循环冷却水余热的技术经济性进行分析,计算结果表明,热泵供热可以提高全厂机组发电煤耗指标,提高经济性。

本文构建了典型热电厂耦合吸收式热泵的余热利用系统,通过试验详细对比分析了吸收式热泵机组投入运行与不投入运行工况下节能性与经济性,

获得集成系统实际运行性能指标,并获得年运行指标及节能减排潜力,为热电厂结合吸收式热泵机组进行节能化改造与升级提供一定指导。

1 系统原理

热电厂配置了 2 台东方汽轮机厂制造的亚临界、一次中间再热、三缸双排汽抽凝式的 330 MW 汽轮机。由于供热负荷需求逐年增加,采用 6 台 48.46 MW 增热型溴化锂吸收式热泵机组进行余热回收利用。热电厂通过溴化锂吸收式热泵将采暖用网回水从 55 ℃ 加热至 80 ℃,从而实现余热再利用,减少汽轮机侧冷源损失,系统原理如图 1 所示。

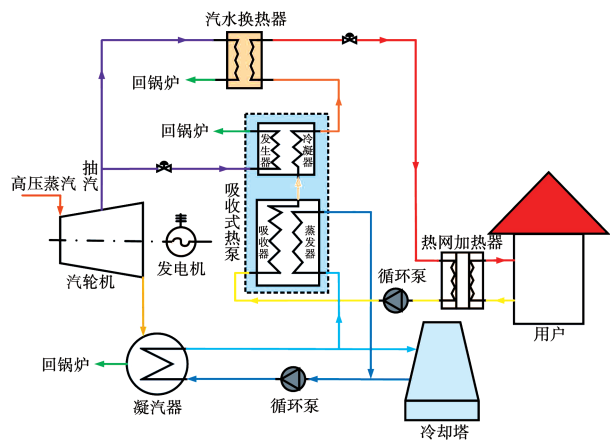


图 1 吸收式热泵回收余热循环水系统原理图

Fig.1 System principle diagram of waste heat recycling water recovered by absorption heat pump in thermal-power plant

该系统中汽轮机中间抽汽分两部分,一部分通过汽水换热器直接送入热网二次加热器,进而给用户供热;另一部分作为驱动热源,送入溴化锂吸收式热泵机组中的发生器凝结成水,并加热发生器中溴化锂溶液,产生蒸汽。凝汽器出口的循环水进入吸收式热泵中的蒸发器放热,之后再返回凝汽器吸收汽轮机乏汽的汽化潜热,完成循环;用户回水(冷却水)进入吸收器吸收循环水释放的低温热后进入冷凝器,被聚积在冷凝器中的水和水蒸气放出的热量加热,提供冷却水温度升高的另一部分热量。用户回水在系统中加热后进入城市热网为居民供热。

2 整机性能试验

为了研究热泵机组整体性能,将 1,2,3 号热泵作为一个组合,4,5,6 号热泵作为另外一个组合,分别对两个组合的性能进行研究,最后得出系统的运行性能。试验期间,测试了机组在不同驱动蒸汽压力(0.15,0.2 和 0.3 MPa)以及在不同循环水温度(32,35 和 37 ℃)下热泵的工作性能(余热回收量、热泵性能系数等)。热泵机组回收循环水余热功率需要进行参数修正,参数修正主要包括热网水进口温度和流量、循环水进口水温 and 流量以及驱动蒸汽压力的修正。溴化锂吸收式热泵技术参数如表 1 所示。

表 1 热泵机组技术参数

Tab.1 Technical parameters of heat pump unit

参 数	数 值
制热量/kW	48 460
热网热水进口温度/℃	55.0
热网热水出口温度/℃	80.0
热网热水流量/t · h ⁻¹	1 666.7
循环水进口温度/℃	35.15
循环水出口温度/℃	30.0
循环水流量/t · h ⁻¹	3 333.3
驱动蒸汽压力/MPa	0.25
驱动蒸汽流量/t · h ⁻¹	43.33

2.1 热泵机组运行性能指标

根据 GB2587-2009《用能设备能量平衡导则》以及 GB6422-2009《用能设备能量测试导则》,余热回收功率计算式为:

$$Q_{iq} = \frac{4.1868G_{rw}(t_o - t_i) - G_{wc}(h_{wc} - h_c)}{3600} \tag{1}$$

式中: Q_{iq} —热泵机组回收余热功率,MW; G_{rw} —热网水流量,t/h; G_{wc} —热泵机组驱动蒸汽流量,t/h; t_o —热泵机组热网水出口温度,℃; t_i —热泵机组热网水进口温度,℃; h_{wc} —驱动蒸汽焓,kJ/kg; h_c —驱动蒸汽疏水焓,kJ/kg。

热泵性能系数 COP 是衡量热泵性能的重要指标,是热泵输出的热量与热泵运行时消耗的能量比值,其定义为:

$$COP = \frac{4.1868G_{rw}(t_o - t_i)}{G_{wc}(h_{wc} - h_c)} \tag{2}$$

2.2 热泵机组整体性能

试验测试结果表明,1,2 和 3 号热泵组合的进出水温度分别为 45.94 和 81.34 ℃,其性能系数 COP 为1.77;4,5 和 6 号热泵组合的进出水温度分别为 46.90 和80.82 ℃,其性能系数 COP 为 1.71。两者取平均值即为 6 台热泵机组整体性能系数,热泵机组整体性能系数 COP 为 1.74,试验结果如表 2 所示。

表 2 热泵机组试验结果

Tab.2 Experimental results of heat pump unit

参 数	1,2 和 3 号 热泵组合	4,5 和 6 号 热泵组合
热泵进水温度/℃	45.94	46.90
热泵出水温度/℃	81.34	80.82
热泵进汽母管流量/t · h ⁻¹	156.45	174
热泵进水流量/t · h ⁻¹	4 635	5 169
热泵进汽焓/kJ · kg ⁻¹	2 789.36	2 785.94
热泵出水焓/kJ · kg ⁻¹	340.59	338.38
热泵总制热量/MW	190.71	203.91
COP	1.77	1.71

2.3 循环水温度变化对机组热性能影响

循环水温度变化对整个机组的影响主要有两方面:循环水温度上升会使汽轮机排汽温度升高,从而导致汽轮机热耗率上升;循环水温度上升会使热泵提取余热量增加,从而增加机组供热能力。但是循环水温度的提高对热泵造成的正面影响大于热电厂汽轮机效率降低带来的负面影响^[12-13]。

以 3 台热泵(1,2 和 3 号)作为整体研究机组在热电厂实际运行中的制热量和余热回收量。测试结果表明,当循环水温度由 36.7 降至 34.63 ℃时,单台热泵制热量由 66.89 降至 58.41 MW。当循环水温度进一步降至 32.22 ℃时,单台热泵制热量降至 50.35 MW,但是 3 种运行水温下的热泵制热量都高于设计值 48.46 MW。单台热泵在 32,35 和 37 ℃的不同循环水温下,其循环水回收热量分别为 17.36, 22.57 和 27.13 MW。随着循环水温的升高,热泵的

制热量以及余热回收热量均有所增加,其变化趋势如图 2 所示。

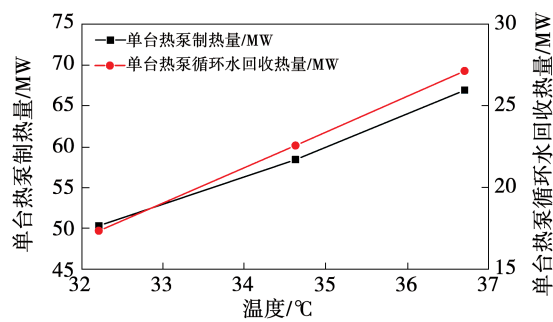


图 2 不同循环水温度下热泵制热量及循环水回收热量
Fig. 2 Heat production and heat recovery of heat pump under different circulating water temperatures

2.4 驱动蒸汽压力变化对机组热性能影响

热泵机组的制热量和循环水回收热量随着驱动蒸汽压力的上升而增加,其变化趋势如图 3 所示。当热泵驱动蒸汽压力由 0.15 增加至 0.2 MPa 时,单台热泵制热量由 47.32 增加至 52.36 MW。当驱动蒸汽压力继续增加至 0.25 MPa 时,单台热泵制热量增加至 58.40 MW。单台热泵在不同驱动压力下循环水回收热量分别为 15.64,19.37 和 22.57 MW。

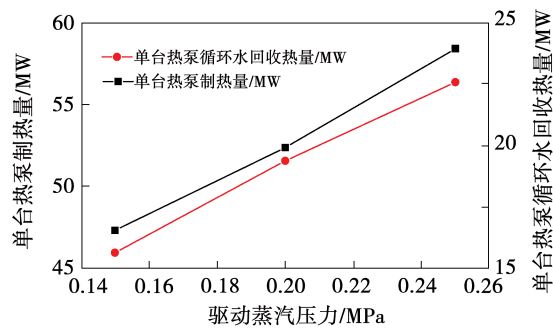


图 3 不同驱动蒸汽压力下热泵制热量及循环水回收热量
Fig. 3 Heat production and heat recovery of heat pump under different driving steam pressures

3 热泵介入对热电厂经济性及环境效益的影响

为深入研究热泵机组投产对热电厂热经济性和环境效益的影响,开展了热泵的投切试验。通过研究比较热泵介入和切除工况下,整个热电厂煤耗率、

节水率、净回收热量以及废气排放量的情况。

3.1 热电厂经济效益关键指标

煤耗率是电厂重要的经济指标,煤耗率表示在一定时间内,发电耗煤量与发电量之比:

b = \frac{B(1 - \alpha_r)}{E}

式中: b —发电煤耗率, $g/(kW \cdot h)$; B —运行期间全厂总用煤量, g ; α_r —供热比; E —运行期间全厂发电量, $kW \cdot h$ 。

机组正常运行时,循环水的损失主要包括蒸发损失、风吹损失和排污损失。热泵在投入运行时,降低了循环水温度,减少了循环水在冷却塔内的各项损失,可以根据以下公式估计年循环水节水量:

Q_m = (Q_e + Q_w + Q_b)t = \left(K_1 \Delta t Q_{sh} + K_2 Q_{sh} + \frac{K_2 \Delta t Q_{sh}}{N - 1} \right)t

式中: Q_m —循环水节水量, t/h ; Q_e —循环水蒸发损失, t/h ; Q_w —循环水风吹损失, t/h ; Q_b —循环水排污损失, t/h ; N —浓缩系数; Δt —进出塔水温差, $^{\circ}C$; K_1 和 K_2 —热量系数; Q_{sh} —循环水流量, t/h ; t —运行时间, h 。

3.2 热泵介入对煤耗率的影响

热泵投切试验时,2,3,4 和 5 号 4 台热泵同时介入运行,其出口水温为 65.96 $^{\circ}C$,热泵介入时,热电厂煤耗率下降 8.05 $g/(kW \cdot h)$ 。按照历年运行数据,机组在采暖季发电量约为 5 亿 $kW \cdot h$,则在试验工况下,热泵介入比切除热泵多节约 4.03 万 t 煤。若在供热高峰期,6 台热泵同时介入时煤耗率会更低。

3.3 投热泵工况对净回收热量的影响

热泵投入运行工况下,吸收了循环水的热量,减少了汽轮机组采暖抽汽流量,使得更多的蒸汽能够返回缸内继续做功。在 4 台热泵运行时,热泵系统的净回收热量为 298.86 GJ/h ,按照综合供热指标 180 kJ/m^2 计算,可增加供热面积 166.03 万 m^2 ,若在供热高峰期,6 台热泵同时投入,供热面积将继续增加。

3.4 热泵介入对节水量的影响

试验气温为 20 ℃,对于自然通风冷却塔,热量系数 K_1 选取 0.13%,热量系数 K_2 取 0.05%,浓缩系数 N 取 3。按热泵介入运行 3 600 h,进入热泵循环水为 10 005 t/h,在热泵介入试验工况下,每年可节约循环水量为 47.74 万 t。

3.5 热泵介入对排放量的影响

煤炭燃烧时会释放大量的废气,根据《能源基础数据汇编》,每燃烧 1.0 t 标煤 CO_2 排放量为 2.6 t, SO_2 排放量为 24 kg, NO_x 排放量为 7.0 kg。热泵整个采暖周期运行 3 600 h,机组在热泵运行期间内发电量约为 5 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。热泵介入工况下热电厂每年可以节约煤炭 4.03 万 t,每年减排 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 分别为 10.47 万,966 和 281.75 t。

3.6 热泵以额定参数介入时机组性能

6 台 48.46 MW 的溴化锂吸收式热泵同时投运时,热负荷最大可以达到 290.76 MW,其各项参数及经济性指标如表 3 所示。

表 3 额定参数下切投热泵的机组经济性对比

Tab.3 Comparison of economy with and without heat pump under rated parameters

参 数	热泵介入	热泵切除
热泵进口水温设计/℃	55	—
热泵出口水温设计/℃	80	—
单台热泵入口热网水流量设计/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	1 666.7	—
6 台热网水总流量设计/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	10 000	10 000
总供热量设计/MW	290.76	290.76
热泵进口水温试验值/℃	44.80	—
热泵出口水温试验值/℃	65.96	—
单台热泵入口热网水流量试验值/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	1 550	—
4 台热泵入口热网水流量试验值/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	6 200	6 200
总供热量试验值/MW	152.57	155.46
总供热量设计值与试验值差值/MW	138.18	135.29
主蒸汽流量试验值/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	845.95	860.89
主蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	902.38	940.88
热耗率/ $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	5 581.14	6 091.05
锅炉效率/%	93	93
管道效率/%	98	98
标准煤耗率/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	208.95	228.04
煤耗率差值/ $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	19.09	

对于所研究的热电联产机组,相同负荷下,采暖抽汽流量每增加 100 t/h,主蒸汽流量增加 50 t/h。因此热泵介入运行、相同负荷下采暖热负荷达到 290.76 MW 工况时,主蒸汽流量增加至 940.88 t/h,热耗率增加至 6 091.05 $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,标准煤耗率为 228.04 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。在热泵介入运行的试验测试中,总供热量为 152.57 MW,如果要达到设计供热量 290.76 MW,需要抽出 165.38 t/h 采暖抽汽来增加供热,相当于主蒸汽流量为 902.38 t/h,此时发电机功率相应减少 28.11 MW,修正后热耗率为 5 581.14 $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,标准煤耗率为 208.95 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。因此,投入热泵工况下将采暖负荷修正至最大值时,热电厂煤耗率下降 19.09 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,可以节约煤炭 9.55 万 t。供热负荷变化时,切投热泵时机组经济性对比如图 4 所示。投入热泵工况下,随着供热负荷的增加,整个机组的煤耗率下降明显。

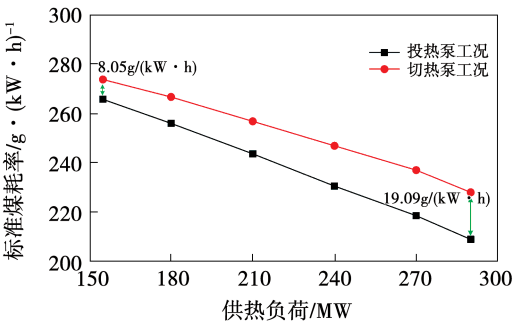


图 4 供热负荷变化时切投热泵的机组工况经济性对比

Fig.4 Comparison of economy with and without heat pump when heating load changes

4 结 论

构建了亚临界热电联产机组耦合式吸收式热泵的余热利用系统,对其整机性能及热泵介入工况进行了深入研究分析。试验结果表明,驱动蒸汽压力 0.25 MPa、循环水温 35 ℃时,热泵机组整体 COP 为 1.74,单台热泵制热量为 58.40 MW。热泵介入工况下标准煤耗率为 265.70 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,不投热泵时标准煤耗率为 273.75 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,标准煤耗率降低 8.05 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。相同的供热负荷下,热泵介入工况的经济性要比热泵切除工况的经济性好。试验工

况下,热泵系统的净回收热量为 289.86 GJ/h,可增加供热面积 166.03 万 m²;按热泵年利用 3 600 h 计算,每年可节约循环水量 47.75 万 t,节约标准煤 4.03 万 t;减排 CO₂、SO₂和 NO_x分别为 10.47 万、966 和 281.75 t,节能效果和经济效益显著。

随着用户热负荷需求越来越高,热电厂可以通过增加吸收式热泵机组来增大供热能力。采用吸收式热泵机组,提高热电厂的能源利用率,实现余热再利用;不仅可以增加供热面积,还显著降低了煤耗和水耗且在减少温室气体、有害气体等方面效果显著。由于吸收式热泵机组易损件少、维护保养方便、安装场所要求低,可以根据热电厂实际情况灵活改造。因此,亚临界热电联产机组耦合式吸收式热泵的技术方案可以在不影响发电量的前提下,有效应用余热,提高供热能力,实现能源节约,减少污染物的排放,显著提高热电厂经济效益和环境效益。

参考文献:

[1] 张 凯. 廊坊热电厂热泵系统节能改造及供热能力分析[J]. 机电信息,2019(12):70-72.
ZHANG Kai. Energy saving transformation and heating capacity analysis of heat pump system in Langfang thermal-power plant [J]. Electromechanical Information,2019(12):70-72.

[2] 徐泉桐. 热电厂热泵系统节能改造及供热能力研究[J]. 科技创新导报,2020,17(18):39-40.
XU Xiao-tong. Research on energy saving transformation and heating capacity of heat pump system in thermal-power plant [J]. Science and Technology Innovation Herald,2020,17(18):39-40.

[3] 贾丕建,孙立梅,邢学荣,等. 热电厂循环水余热利用和节能减排效益分析[J]. 能源研究与利用,2020(2):46-50.
JIA Pi-jian,SUN Li-mei,XING Xue-rong, et al. The benefits analysis of energy saving and emission reduction, and utilization of waste heat of circulating water in thermal-power plant [J]. Energy Research and Utilization,2020(2):46-50.

[4] 杜文智,郭小虎,朱晓龙,等. 吸收式热泵技术及其研究发展介绍[J]. 山东化工,2020,49(16):132-134.
DU Wen-zhi, GUO Xiao-hu, ZHU Xiao-long, et al. Introduction of absorption heat pump technology, and its research and development [J]. Shandong Chemical Industry,2020,49(16):132-134.

[5] 刘晓波. 热电厂余热利用技术综述及工程实例分析[J]. 当代化工研究,2019(16):62-63.
LIU Xiao-bo. Review of waste heat utilization technology in ther-

mal-power plant, and analysis of engineering examples [J]. Research on Modern Chemical Industry,2019(16):62-63.

[6] 李慧君,王业库,徐 进. 200 MW 机组基于吸收式热泵供暖方案优化与实践[J]. 电力科学与工程,2020,36(3):69-73.
LI Hui-jun, WANG Ye-ku, XU Jin. Optimization and practice of heating scheme for 200 MW unit based on absorption heat pump [J]. Power Science and Engineering,2020,36(3):69-73.

[7] 付 林,李 岩,张世钢,等. 吸收式换热的概念与应用[J]. 建筑科学,2010,26(10):136-140.
FU Lin, LI Yan, ZHANG Shi-gang, et al. Concept and application of absorption heat transfer [J]. Architecture Science,2010,26(10):136-140.

[8] 孙 健,戈志华,谈 政. 吸收式热泵回收湿冷热电厂循环水余热实验研究[J]. 暖通空调,2017,47(11):86-89.
SUN Jian, GE Zhi-hua, TAN Zheng. Experimental study on recovery of waste heat from circulating water of absorption heat pump with wet cooling thermal-power plant [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning,2017,47(11):86-89.

[9] 赵惠中,赵欣刚. 热电厂余热利用技术综述及工程实例[J]. 煤气与热力,2018,38(7):1-5.
ZHAO Hui-zhong, ZHAO Xin-gang. Review and engineering examples of waste heat utilization technology in thermal-power plant [J]. Gas and Heat,2018,38(7):1-5.

[10] 冶永福. 热电厂利用“吸收式热泵”进行余热供暖技术的分析研究[J]. 节能,2020,39(6):132-134.
YE Yong-fu. Analysis and research on waste heat heating technology using "absorption heat pump" in thermal-power plant [J]. Energy Saving,2020,39(6):132-134.

[11] 张广宇,郭邢军,杨海生,等. 热电厂低温热能回收热泵供热技术经济分析[J]. 热能动力工程,2020,35(4):300-304.
ZHANG Guang-yu, GUO Xing-jun, YANG Hai-sheng, et al. Techno-economic analysis of heat pump heating with low temperature heat recovery in thermal-power plant [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(4):300-304.

[12] 寇相斌,杨涌文,李琦芬. 火电厂耦合吸收式热泵的供热系统优化[J]. 汽轮机技术,2020,62(4):295-299.
KOU Xiang-bin, YANG Yong-wen, LI Qi-fen. Optimization of thermal-power plant coupled with absorption heat pump [J]. Turbine Technology,2020,62(4):295-299.

[13] 常 浩,周崇波. 溴化锂吸收式热泵回收火电厂循环水余热供热研究[J]. 现代电力,2012,29(3):70-73.
CHANG Hao, ZHOU Chong-bo. Research on recycling waste heat of circulating water in lithium bromide absorption heat pump of thermal-power plant [J]. Modern Power,2012,29(3):70-73.