

中一精锻余热回收供暖系统构建

陈 辉¹,刘金朋¹,张丽秀¹,聂国清²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 中一精锻股份有限公司,吉林 白城 137000)

摘 要 目的 利用中一精锻有限公司锻造工艺中高频加热冷却水余热及当地丰富的地下水资源,建立可以为厂区供暖的余热回收系统,解决工厂在冬季无配套设施的供暖需求. 方法 构建基于水源热泵技术为基础的高效余热回收系统,主要包含五个子系统,该系统将低品位热源进行转移、集中以满足供暖需求,并运用蓄热水池对供暖温度进行调节. 结果 在冬季放假与正常工作期间两种工况进行实地测量,在无余热情况下,工厂室内温度可以达到 7℃ 以上,满足工厂保温要求;当环境温度为 -25℃,三台热泵机组同时运行时,稳定供暖出水温度为 55℃、供暖回水温度为 51℃,其厂房温度稳定在 15℃ 以上,达到设计要求;通过数据计算在热泵稳定状态下制热能效比保持在 6.0 左右. 结论 通过锻造余热回收系统,保证了锻造生产中冷却水的供应,为厂房和办公室的供暖和生活用水提供了生活保障,减少了对环境的热污染.

关键词 余热回收;冬季供暖;COP;水源型热泵;锻造余热

中图分类号 TK11⁺5

文献标志码 A

Heating System Design for Zhongyi Precision Based on Forging Waste Heat Recovery

CHEN Hui¹, LIU Jinpeng¹, ZHANG Lixiu¹, NIE Guoqing²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. ZhongYi Precision Forging Co. Ltd., Baicheng, China, 137000)

Abstract: Using the waste heat of high - frequency heating, cooling water and the abundant groundwater resources in the forging process of Zhong Yi Precise Forging Co. Ltd. , a waste heat recovery system for heating the plant in winter was established. A high - efficiency waste heat recovery system based on water source heat pump technology is constructed, which mainly includes five subsystems, which transfer and concentrate low - grade heat source energy to meet heating demand and monitor heating temperature. In the winter holiday and normal working period, the two conditions are measured in the field. In the absence of residual heat, the indoor temperature of the factory can reach about 7℃, which can achieve the effect of the factory insulation gas. When the ambient temperature is -25℃, when the three heat pump units are running at the same time

收稿日期:2019-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51375317)

作者简介:陈辉(1963—),男,教授,博士,主要从事材料加工和余热回收等方面研究.

heating water is 55 °C, the heating return water is 51 °C, and the plant temperature can above 15 °C, meeting the design requirements. According to the data calculation, the COP is maintained at about 6.0 in the steady state of the heat pump.

Key words: waste heat recovery; winter heating; coefficient of performance; water source heat pump; forging waste heat

环境状况决定着人们生活的舒适程度,党的十九大报告强调,要着力解决突出环境问题,坚持全民共治、源头防治,持续实施大气污染防治行动,打赢蓝天保卫战^[1]。目前我国环境污染的主要原因是生活中大量应用煤和石油等化石燃料,而作为北方城市,冬天的供暖不得不使用化石燃料,这使得城市雾霾愈演愈烈,对环境造成严重污染^[2]。为有效推进北方地区绿色取暖,国务院下发通知,坚持从实际出发,宜电则电、宜气则气、宜煤则煤、宜热则热,确保北方地区群众安全取暖过冬^[3]。在工业生产中,水资源的消耗、热量的流失,对环境造成了一定程度的破坏,而余热回收利用是对资源重新利用的方法之一。

目前,常见的工业余热回收利用有多种分类方式,根据余热资源利用过程中能量的传递或转换的特点,可以将国内的工业余热利用技术分为热交换技术、热功转换技术、余热制冷制热技术^[4]。在应用的余热回收系统中,对热源的选择有着很大的差异,余热利用的方法也不尽相同。付林^[5]研究的热电联产烟气余热回收系统通过回收汽轮机排汽的余热达到了提升热电厂供热能力和能源利用效率。董辉^[6]借鉴于干燥提出的一种变革性烧结余热回收系统,其具有余热回收率较高、漏风率低等优点。杨昭^[7]利用燃气机热泵对冬季建筑进行供暖有了很好的帮助。在铸造厂中空压机铸造工厂空压机站房及余热回用系统设计研究方面^[8];李素芬^[9]利用太阳能辅助地源热泵系统进行供暖;刘玲玲等^[10]对锻铸车间热处理炉烟气余热利用进行仿真研究;李岩^[11],杨昭^[12]对多热源联合热泵余热回收,提升了单一余热回收技术的能力。利用水

源热泵回收火力发电厂循环水的余热,挖掘低品位热能,能提高电厂的综合能源利用效率,同时该项目设计了采用蓄热水池为主、井水补充为辅的方案来解决冬季供暖问题^[13-14]。

中一精锻公司在新厂区建设搬迁中,因社会供暖管网配套工程尚未启动,需自行解决冬季供暖问题。基于此,笔者构建以热泵技术为基础的余热回收系统,利用锻造生产中的工艺冷却水和当地丰富的地下水资源提取热量,用于厂区供暖以及生活用水。笔者通过对厂区的热负荷与地热资源的分析,设计并计算选用余热与地下水混合热源的系统,该余热回收系统包含5个子系统,结合5个子系统可以将锻造冷却工艺与供暖结合。该系统解决了新厂区内的供暖问题,并且厂房在不工作情况下至少达到7°C;同时为工人们的生活用水提供了保障。该系统替代化石燃料的使用,还减少了热损失对环境的热污染。

1 精锻余热回收系统

1.1 精锻加工工艺

白城中一精锻股份有限公司是生产轻轿车发动机连杆毛坯精密锻件专业厂。连杆制造时,原材料通过棒料剪裁成为毛坯,毛坯经过机械手运送到中频炉,在中频炉里加热至1 240 ~ 1 260 °C,再经过辊锻制坯、模锻成型、切边、锻件回火、锻件静压、余热淬火、空冷等工艺成型,其工艺流程如图1所示。

工艺中中频炉加热装置内的感应线圈(工业纯铜)需要通工艺冷却水将其降温保护,冷却水温度在5 ~ 25 °C,通过冷却水循环,可以将感应线圈所产生的热量带出,并将其回收应用于供暖系统。

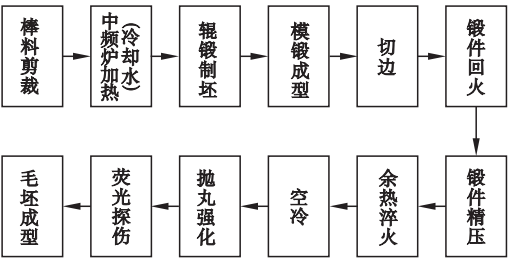


图1 锻造连杆生产工艺

Fig.1 Production process of connecting rod

1.2 余热回收系统方案设计

中一精锻股份有限公司实际供暖面积为27 000 m²(包括办公区、生产区、食堂). 根据设计院对厂房的结构、供热量、制冷量进行设计与计算,得到单位建筑面积在单位时间内消耗的、需由室内采暖设备供给的最大热量为 $Q_1=3\ 650\text{ kW}$,最小热负荷为 $Q_2=1\ 400\text{ kW}$. 在原冷却水工艺中采用换热器、冷却池、冷却塔3部分组成的冷却降温系统,属于开式循环系统. 在冷却降温过程中,换热器使得水池内的温度越来越高,冷却塔无法达到冷却标准时,溢流阀打开,将水池内的热水排出,会造成水污染和热污染. 经实地测量中一精锻公司当地有丰沛的地下水资源,地下水温9~11℃. 该厂正常生产为两班制(8:00~24:00),此段时间内热泵持续提取工艺冷却水的余热,完成不间断供暖. 在00:00~8:00没有工艺余热,因此为了满足厂房最低供暖温度要求,设计一个足够大的水池,当水池温度低于5℃时可由地下水补充到水池中将热量提取后再回灌到地下,以满足供暖需求.

新工艺采用3种水池连接的方式,其中3种水池分别为蓄热水池、冷水池、热水池. 蓄热水池以地下水为主,冷水池与热水池以软水为主. 冷水池内的水为管路中的水,所以设计供暖管路中的水量为100 m³.

精锻工艺生产线的中频炉额定功率为350 kW,冷却循环水量总量为240 t/h,冷却水系统工作压力为0.4 MPa,冷却循环水出口温度平均温度升高5℃,管路压力为0.6 MPa.

$$Q_r = cm\Delta t_1.$$
 (1)

式中: Q_r 为冷却循环水吸收的热量; c 为水的比热容; m 为水的质量; Δt_1 为水温的变化量.

根据式(1)计算可知,余热只占工厂热负荷的1/3左右,不能满足厂房供暖,剩余热量需从地下水中提取并进行供暖. 蓄水池是新循环工艺冷却水的重要组成部分. 经计算,为满足车间的保温需求,热泵满负荷开启时,地下水提取热量最小温差为5℃,冬季热泵机组制热能效比(Coefficient Of Performance, COP)最低为3.4,则需要的热源水量为

$$G = Q_3 / (1.163 \times \Delta t_2) \times (1 - 1/COP).$$
 (2)

式中: G 为蓄热水池体积,m³; Q_3 为工艺冷却水热量,kW; Δt_2 为水池内最小温差,℃; COP 为水源热泵机组在 Δt 工况下的制热能效比.

由式(2)算出蓄热水池水量为447 m³,因此,蓄热水池容积设定为450 m³,足以满足供暖需求. 蓄水池的剖面图如图2所示.

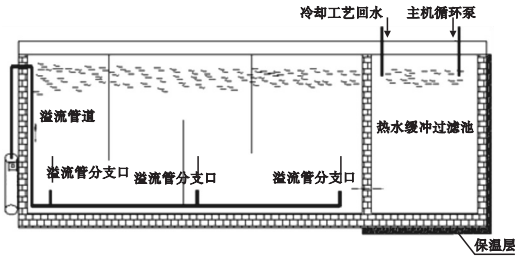


图2 蓄热水池剖面图

Fig.2 Sectional view of the heat storage pool

为了达到缓冲目的,需要在蓄热水池中设有隔流板,可增加冷热水混合时间,使得水池温度均衡. 满足工艺冷却水的要求,水池内设置两种工况:第一种工况,在蓄热水池不达到25℃时,不用开启热泵;第二种工况,在水池温度高于25℃时,热泵开启将水池温度降到25℃以下,保持水温的恒定,保证厂房生产有序进行. 当热泵无法满足供暖热负荷时,需要水池内设置两种工况:第一种工况,工厂温度较低时,开启热泵吸收水池的热量进行供暖;第二种工况,当水池温度低于5℃时,深井泵开启,地下水注入水池中,将低于5℃

的水回灌到地下,保证热泵正常运行。

地下水源热泵系统以地下水为储能载体,利用地下水温度常年变化幅度小且不易受外界环境干扰的特点,冬季取暖,夏季制冷^[15]。地下水水样检测分析得出:地下水中硅的质量浓度正常范围是不超过 100 mg/L,本次检测中硅的质量浓度为 195.4 mg/L 超出正常范围,这样会影响设备的运行并且在管路中容易产生硅垢。

表 1 列出了国内针对不同地下水含水层情况,典型的灌抽比、井的布置和单井出水量情况^[16]。

表 1 不同地质条件下的地下水系统设计参数
Table 1 Design parameters of groundwater system with different geological conditions

含水层 类型	灌抽比/%	井的布置	进水的流量/ (t·h ⁻¹)
砾石	>80	一抽一灌	200
中粗砂	50~70	一抽二灌	100
细砂	30~50	一抽三灌	50

在无余热情况下,厂房需要保证在 7℃ 以上,需要 3 台深井泵(100 m³/h)提供热量。根据表 1 实际情况可知,厂区位置所在的地下水中硅的含量过高,且细砂含量较多,适用于一抽三灌的回灌井方式。抽水井与回灌井的排布方式由地理位置、水纹条件、水流方向所决定的,要保证回灌的地下水水质水量符合国家标准《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)。

热泵以消耗一定量的高位能(高温蒸汽或电能)为代价,运用热力循环方式降将低品位热源提升到高品位热源,从而提高热能的利用效率^[17]。根据以上条件,笔者选用高温螺杆水源热泵机组,其油冷系统与螺杆压缩机相结合,在高温工况下性能良好,出口水温高于常规热泵的水温,适用于工业供暖和余热回收系统^[18-19]。

2 精锻余热回收子系统分化

在余热回收系统上进行细致分化,将整

个余热回收系统分为 5 个子系统:工艺水循环管网系统、热泵机组外循环管网系统、热泵机组内循环管网系统、冷水池与管网软化水补水系统、热水池管网系统。这 5 个子系统分别有不同的作用,并相互关联。

2.1 工艺水循环管网系统

工艺水循环管网系统如图 3 所示。大量的余热取自于在连杆精锻过程中,中频炉内产生大量的热,通过冷却水将热量带走。板式换热器的一端与中频炉冷却水管路形成闭式系统,为保证闭式系统内冷却管不结垢,所以采用软水作为工质。板式换热器的另一端与蓄热水池相连,将低温热源传递到中频炉冷却水箱。

2.2 热泵机组外循环管网系统

热泵机组外循环管网系统如图 4 所示。蓄热水池的温度由余热与地下水共同提供。蒸发器将池内的热量吸收,使水池内的温度降低。水池内的水会溢流回地下,所以此统为开式系统。

2.3 热泵机组内循环管网系统

热泵机组内循环管网系统如图 5 所示。供暖管网内输出的热量与厂区总负荷持平。厂区供暖输出方式为风机盘管。压缩机将蒸发器内低温低压制冷剂(R134a)吸入气缸,经过压缩机做功,制冷剂蒸气被压缩成为高温高压气体,在经过冷凝器释放至供暖水中,水在经泵体的输送至供热输出端的空调系统中完成热量交换,输出暖风。

2.4 冷水池与管网软化水补水系统

冷水池与管网软化水补水系统如图 6 所示。管道内的水由冷水池提供,当管道中的水量减少时,冷水池中的水补给到供暖管道内,冷水池的水量低于 70 m³ 将开启软化水处理设备向水池中补水。因软化水处理器每小时最多提供 3 m³ 的水量,所以需要供暖前两天对冷水池注水,保证热泵系统正常运行。

2.5 热水池管网系统

热水池管网系统如图 7 所示。在工厂正

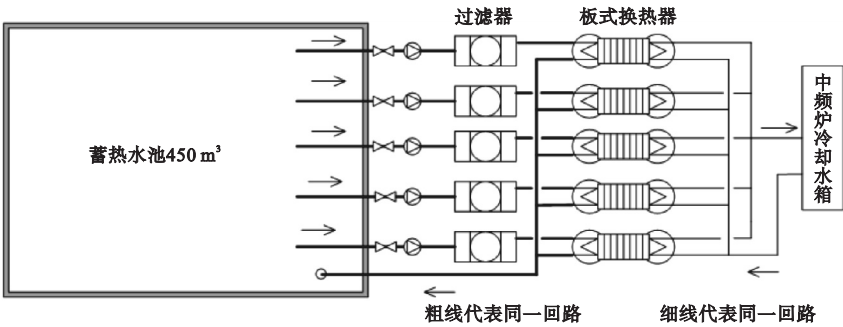


图3 工艺水循环管网系统

Fig. 3 Pipeline network system for water circulation

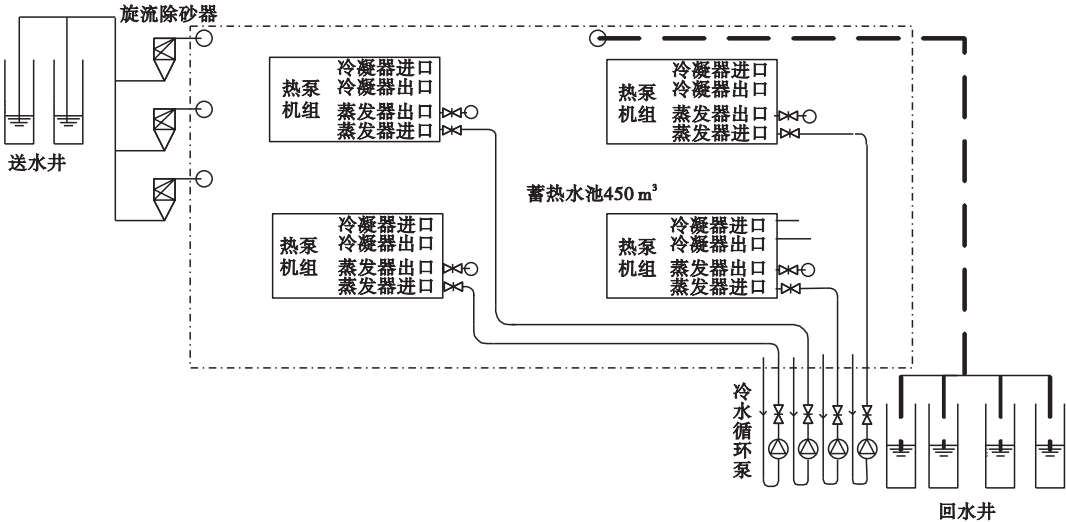


图4 热泵机组外循环管网系统

Fig. 4 Pipeline network system of heat pump unit for external circulation

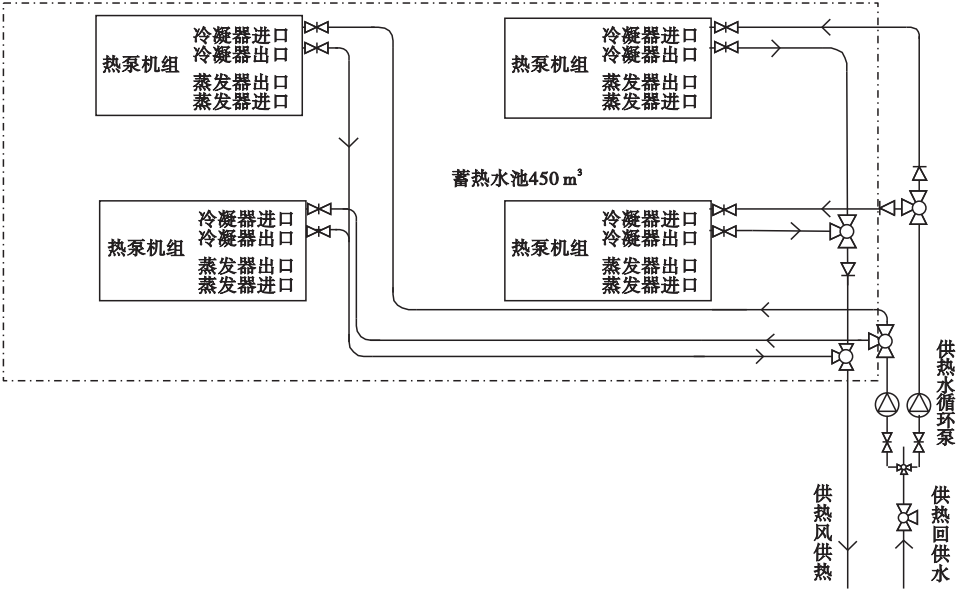


图5 热泵机组内循环管网系统

Fig. 5 Pipeline network system of heat pump unit for internal circulation

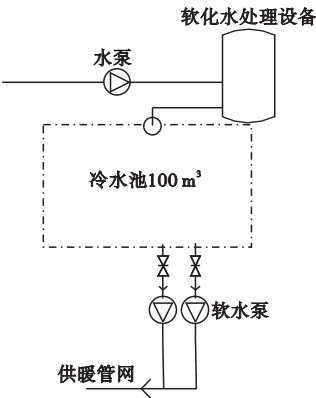


图6 冷水池与管网软化水补水系统

Fig. 6 Water-supplying system from cold water pool and pipeline network

常工作时,车间提供的余热足以帮助厂区供暖,多余的热水传递至热水池内. 利用热泵技术将具有保温效果的水箱内的水温升高,足

够车间工人使用.

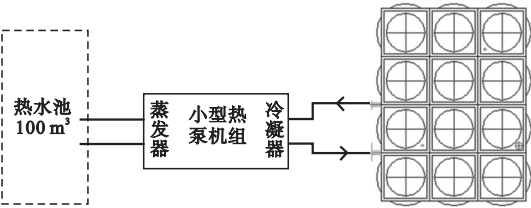


图7 热水池管网系统

Fig. 7 Pipeline network system for hot water pool

热水池系统是将利用的余热输出至生活用水中,最明显的体现在职工的洗澡用水得到基本的保障. 其热水池系统是余热输出的衍生产品,这将其余热更大利益化.

2.6 余热回收系统

根据以上5个子系统设计出整个余热回收系统,如图8所示.

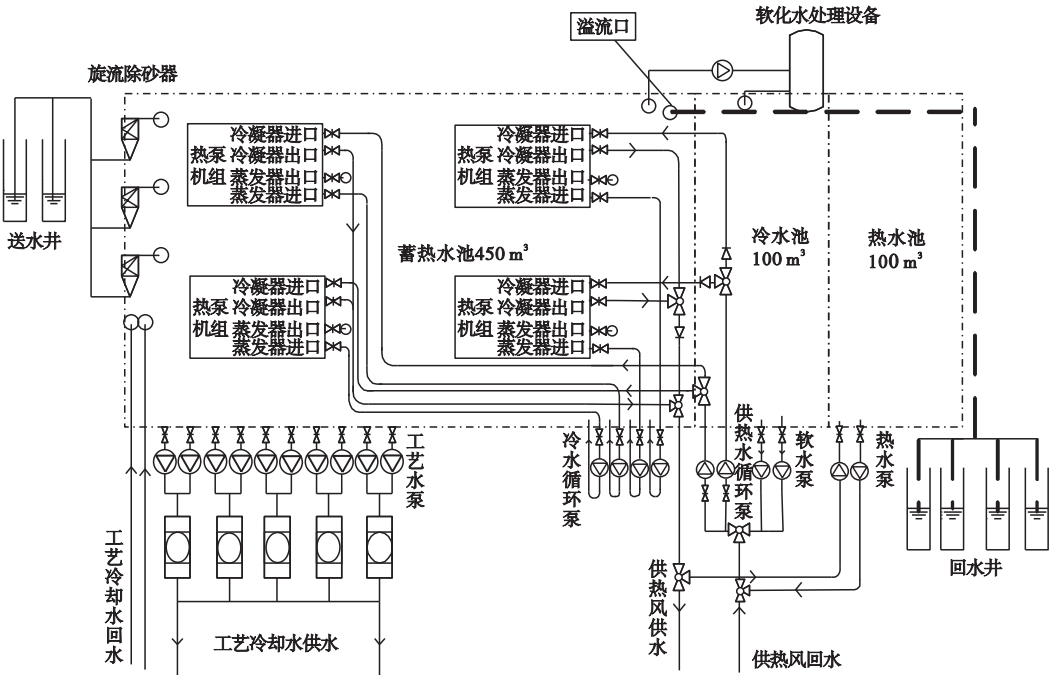


图8 工厂余热回收系统平面图

Fig. 8 Waste heat recovery system in the factory

3 余热回收系统构建分析

3.1 供暖系统构建分析

当锻造工艺热水进入水池时,水池内的温度升高,避免了因为水温过低导致热泵机组无法提取能量后停机. 温度过高时利用热

泵循环的冷水、地下水、余热水进行融合,保护热泵机组正常运行. 供暖系统如图9所示.

中频炉的磁感线圈通过工艺冷却水冷却降温,冷却水经由板式换热器将这部分热量转移到蓄热水池的蒸发器循环回路. 这部分回收的热量储存到了水池中,随时可作为热

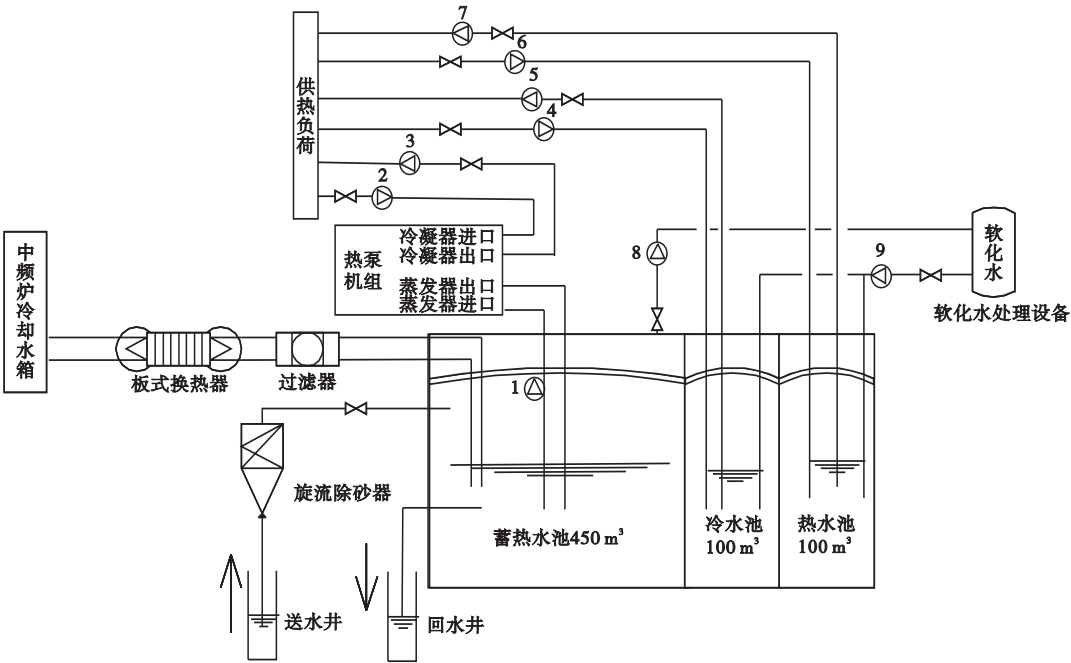


图 9 供暖系统图

Fig. 9 Heating system platform

源水供热泵机组进行制热. 工艺冷却水为系统提供的热量不能满足供暖期的热量需求, 可取地下水作为补充. 水源热泵系统向用户提供热水温度越低, 其热泵机组的能效比越高. 因此, 设计冷凝器出水温度不高于 55 ℃, 对热泵机组起到保护作用. 在供暖输

出端, 选用低功率新型风机盘管, 经济节能.

3.2 供暖系统能效分析

热泵的性能可以通过 COP 能量与热量之间比较对系统做出评价. 热泵的基础参数如表 2 所示.

表 2 热泵基础参数

Table 2 Heat pump parameters

制冷			制热		
制冷量/kW	额定电流/A	输入功率/kW	制冷量/kW	额定电流/A	输入功率/kW
971	278	153.6	941	474	277.8

在冬季室外温度为 -15 ℃, 车间正常工作时, 余热回收系统正常工作, 此时 3 台热泵机组开启, 室内风机盘管出风温度可以达到 20 ℃, 室内温度达到 18 ℃, 热泵机组运行数据如图 10 所示.

图 10 为正常工作下的运行状态, 以及各台热泵机组所使用的状况和参数. 根据以上参数可以计算出相应吸热量与热泵机组的运行效率, 同时反映出机组的瞬时温度.

$$Q_h = (V \times \rho \times c \times \Delta t_3) / 3\ 600. \tag{3}$$

式中: Q_h 为热泵机组的制热量, kW; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; c 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V 为用户侧循环水流量, m^3/h ; Δt_3 为管网供回水温差, $^\circ\text{C}$.

$$COP = Q_h / P_h. \tag{4}$$

式中: COP 为水源热泵机组制热能效比; P_h 为系统各循环水泵实时功率, kW.

通过式(4)得出 2 号热泵 COP 为 6.4, 3 号热泵 COP 为 5.5, 4 号热泵 COP 为 5.9.



图 10 热泵机组运行数据

Fig. 10 Operating data of the heat pump unit

4 结 论

(1)构建了以水源热泵为基础的余热回收系统,该系统在工艺中提供冷却循环水,对锻造工艺中产生的余热进行回收利用,将工艺冷却水与生活生产紧密联系在一起,同时满足了用户供暖和生活用水的需求。

(2)在锻造生产工艺过程中,当 8 条生产线同时开启时,可回收利用的余热为 1 400 kW,这些热量在室外温度为 - 25 °C,仅满足对厂房、办公楼内 1/3 的热负荷需求,其余 2/3 热量由地下水提供。当无余热时,需要地下水的热量满足室内 7 °C 的供暖需求。设计一个 450 m³ 蓄热缓冲水池,不仅将余热回收在池子内供暖,还为锻造冷却系统提供冷却循环的保障。

(3)通过热泵稳定运行的数据计算出三台工作热泵 COP 为 6.4、5.5、5.9,均比热泵自身 COP 要高,且保证室内温度在 15 °C 以上。

参考文献

[1] 刘华军,雷名雨. 中国雾霾污染区域协同治理

困境及其破解思路[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):88 - 95.
(LIU Huajun, LEI Mingyu. The dilemma of the regional collaborative governance of haze pollution and its solution ideas in China[J]. China population, resources and environment, 2018,28(10):88 - 95.)
[2] 覃露才,孙纪康,陈江娜. 北方供热地区清洁供暖规划技术路线与案例[J]. 煤气与热力, 2018,38(4):A04 - A09.
(QIN Lucai, SUN Jikang, CHEN Jiangna. Technical route and case of clean heating planning in northern heating area[J]. Gas & heat, 2018,38(4):A04 - A09.)
[3] 倪鹏飞,王雨飞,丁如曦. 中国大城市综合发展水平的层级与方阵:基于新发展理念测度与分析[J]. 城市与环境研究,2017(4):5 - 28.
(NI Pengfei, WANG Yufei, DING Ruxi. The comprehensive development levels of Chinese big cities hierarchy and matrix: measure and analysis based on the new concept of development[J]. Urban and environmental studies, 2017(4):5 - 28.)
[4] 连红奎,李艳,束光阳,等. 我国工业余热回收利用技术综述[J]. 节能技术,2011,29(2):123 - 128.
(LIAN Hongkui, LI Yan, SHU Guangyangzi, et al. An overview of domestic technologies for waste heat utilization[J]. Energy conservation technology, 2011,29(2):123 - 128.)
[5] 付林,江亿,张世钢. 基于 Co - ah 循环的热电联产集中供热方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2008(9):1377 - 1380.
(FU Lin, JIANG Yi, ZHANG Shigang. District heating system based on Co - ah cycles in

- combined heating and power systems [J]. Journal of tsinghua university (science and technology), 2008(9): 1377 - 1380.)
- [6] 冯军胜,董辉. 烧结矿余热回收竖罐内关键问题研究[J]. 冶金能源, 2017, 36(增刊2): 34 - 39.
(FENG Junsheng, DONG Hui. Study on key problems of vertical tank for sinter waste heat recovery [J]. Energy for metallurgical industry, 2017, 36(S2): 34 - 39.)
- [7] 杨昭,高铁德,张强,等. 带储能单元的燃气机热泵供暖季运行分析[J]. 天津大学学报, 2018, 51(5): 460 - 465.
(YANG Zhao, GAO Yide, ZHANG Qiang, et al. Performance analysis of gas engine heat pump retrofitted with energy storage unit in heating season[J]. Journal of Tianjin university, 2018, 51(5): 460 - 465.)
- [8] 苏见波,秦洪建,姜宗营. 铸造工厂空压机站房及余热回用系统设计[J]. 铸造技术, 2018, 39(9): 2062 - 2064.
(SU Jianbo, QIN Hongjian, JIANG Zongying. Design of air compressor station room and waste heat reuse system in foundry [J]. Foundry technology, 2018, 39(9): 2062 - 2064.)
- [9] 李素芬,代兰花,尚妍,等. 基于不同动态负荷的太阳能辅助地源热泵系统供暖特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 243 - 251.
(LI Sufen, DAI Lanhua, SHANG Yan, et al. Research on heating characteristics of a solar assisted ground source heat pump system under different dynamic loads [J]. Journal of Dalian university of technology, 2015, 55(3): 243 - 251.)
- [10] 刘玲玲,王东霞,李保强,等. 锻铸车间热处理炉烟气余热二次回收利用系统[J]. 铸造技术, 2017(7): 235 - 238.
(LIU Lingling, WANG Dongxia, LI Baoqiang, et al. Secondary recovery and utilization system of flue gas waste heat from heat treatment furnace in foundry workshop [J]. Foundry technology, 2017(7): 235 - 238.)
- [11] 李岩,马懿峰,李文涛. 湿冷机组乏汽余热利用的新型热电联产系统集成优化[J]. 中国电机工程学报, 2017(19): 172 - 179.
(LI Yan, MA Yifeng, LI Wentao. Integrated optimization of a new cogeneration system based on waste heat recovery of water-cooled unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2017(19): 172 - 179.)
- [12] 杨昭,马常胜,陈贺. 多热源联合热泵的性能模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017(2): 34 - 38.
(YANG ZHAO, MA Changsheng, CHEN He. Performance simulation of combined heat pump driven by multi-heat sources [J]. Journal of Tianjin university (science and technology), 2017(2): 34 - 38.)
- [13] 孙天宇,任建兴,张健,等. 水源热泵在火电厂循环水余热利用中的应用[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(3): 206 - 208.
(SUN Tianyu, REN Jianxing, ZHANG Jian, et al. Application of water source heat pump utilizing the waste heat from the power plant circulating water [J]. Turbine technology, 2014, 56(3): 206 - 208.)
- [14] CHO Y, YUN R. A raw water source heat pump air-conditioning system [J]. Energy & buildings, 2011, 43(11): 3068 - 3073.
- [15] 王家乐,贾宝杰,王志刚. 岩溶含水层地下水热泵运行对地下水温度场的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2): 55 - 58.
(WANG Jiale, JIA Baojie, WANG Zhigang. Influence of water source heat pump on groundwater temperature field in karst aquifer [J]. Water resources and power, 2019, 37(2): 55 - 58.)
- [16] 陈翔燕,张华北. 水源热泵系统双管制双井回灌技术分析[J]. 建筑节能, 2011, 39(10): 28 - 31.
(CHEN Xiangyan, ZHANG Huabei. Recharging technology of double wells with pumping and returning pipes in water-source heat pump systems [J]. Building energy efficiency. 2011, 39(10): 28 - 31.)
- [17] BUKER M S, RIFFAT S B. Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications; a systematic review [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 55: 399 - 413.
- [18] WANG Kai, CAO Feng, XING Ziwen. Development and experimental validation of a high-temperature heat pump for heat recovery and building heating [J]. Energy and buildings, 2009, 41: 732 - 737.
- [19] 苏相成,黄波. 凌钢高炉冲渣水余热回收与利用[J]. 冶金动力, 2019(2): 46 - 49.
(SU Xiangcheng, HUANG Bo. Recovery and utilization of waste heat from slag washing water in blast furnace at Lingyuan steel [J]. Metallurgical power, 2019(2): 46 - 49.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)