

精锻余热回收利用系统工艺设计

陈 辉¹,马启成¹,王 涛¹,聂国清²,尚志军²

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

摘要 设计并实施既能满足生产工艺要求又能充分将余热回收利用的新系统. 扩大热泵的应用领域,提高热泵的使用效率. **方法** 利用吉林白城中一精锻公司锻造生产过程中产生的余热供暖. 采用工艺冷却水与蓄水池水相结合的方法设计了一个的水池,利用当地丰富的地下水来弥补所欠缺的热量. 设计新的工艺供水系统包含了冷却循环水和供暖两个系统,连接两个系统的关键组成部分是蓄水池,蓄水池不仅使两个系统成为一个整体而且还让整个系统便于控制. **结果** 冷却循环水系统主要是起到给锻件加热的中频炉感应圈通水保护的作用,计算得出可以从冷却循环水中回收的热量约为 945 kW,该部分回收热量被加入到冬季供暖系统中,不仅提高了能源的利用率,还降低了对环境的热污染. 通过对供暖需求量和可回收热量进行对比计算出水池的大小为 400 m³. **结论** 设计的系统在满足工艺循环水要求的基础上,能够有效回收生产中产生的大量余热,减少了水资源的浪费,保护了环境.

关键词 余热回收;冷却循环系统;供暖系统;蓄水池

中图分类号 TU111.19⁺5 ;TK11 文献标志码 A

Process Design of Recycling System for the Waste Heat of Precision Forging

CHEN Hui¹, MA Qicheng¹, WANG Tao¹, NIE Guoqing², SHANG Zhijun²

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

Abstract: The new system that can meet the requirements of production process and can fully utilize the waste heat recovery was designed and implemented in order to expand the field of heat pumps direction and improve the efficiency of the heat pump. The waste heat generated in the forging process of jilin baicheng is used to heat the heating, insufficient heat to be provided by ground-water. A reservoir was designed according to the heat provided by process cooling water and groundwater. A new process water supply system was designed that includes cooling and heating systems. The key component of connecting the two systems is the reservoir, which makes the two systems easy to control. The cooling water cycle system is to protect the intermediate frequency furnace to heat forging, and the heat is about 945 kW that can be recovered from the cooling cycle

收稿日期:2017-04-25

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2011BAJ 02B03)

作者简介:陈辉(1963—),男,教授,博士,主要从事节能技术和材料加工方面研究.

water. The recovered heat is used to the winter heating system, not only improving the energy efficiency, but reducing the environmental heat pollution. The volume of the reservoir is 400 m^3 according to the heating demand and recoverable heat. The system can recycle a lot of waste heat that generated during the production process and meet the requirement circulating water.

Key words: waste heat recovery; cooling cycle system; heating system; reservoir

随着经济的高速发展,我国国内在推动资源节约和综合开发利用方面取得了较大的成就^[1],但是传统的高耗能、高排放、低效率的粗放型增长方式并未根本得到解决^[2].为了改变这一经济增长方式、建设资源节约型社会的目标,必须节约有限资源、减少能源浪费,实现资源能源的高效使用.目前工业生产中产生的余热未得到合理有效地利用,并且这些热量直接排放到大气中,不仅造成能源资源严重浪费,还对环境造成热污染.因此,如何充分地利用工业资源,既满足工业生产需求,又能最大限度地降低能源消耗并可研发循环利用成为企业奋斗的目标.

目前,工业上较为常见的余热回收技术有热交换技术、热功转换技术、余热制冷制热技术^[3].热交换技术满足余热回收的原则之一,即生产中产生的余热,首先由本系统加以利用;热功转换技术是将余热当中所蕴含的能量转换成其他类型的能量,如余热发电技术等;余热制冷技术就是利用生产中产生的余热,作为制冷装置的驱动能源,使得制冷装备能正常制冷的一种技术,余热制热技术,通常讲就是余热热泵技术^[4].热泵是一种升温装置,运用热泵技术,不单单只是利用热泵这个装置,还可以将它和热功转换技术相结合,提高热泵的使用效率.热泵的种类有很多,如地源热泵,空气源热泵,水源热泵等,这些热泵按照驱动能源不同分为压缩式热泵和吸收式热泵.吸收式热泵也称增热型热泵^[5-6],消耗一定量的高位能(高温蒸汽或电能)为代价,通过热泵工质的热力循环,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^[7-8].利用热泵回收低品位热是节能、环保

的有效方式之一.目前国内热泵的使用还只是单一的制冷或者制热方面.在锻造生产工艺中利用热泵技术进行换热和制冷尚处于发展阶段,并且把热泵的热端和冷端结合起来同时利用^[9],在国内工业生产中尚处于起步阶段.吉林白城中一精锻股份有限公司是以汽车发动机连杆生产为主业的锻造企业,笔者针对中一锻造生产设计了基于热泵技术的余热回收系统,其冷热端联合控制利用,既可以利用冷端降温水满足生产工艺冷却循环水的要求,又可以将热端制热后产生的热水用于工厂供暖、生活等用水.这样可以扩大热泵的应用领域、提高热泵的使用效率.

1 余热回收工艺系统设计

中一精锻原工艺生产线中对中频炉的冷却是采用 90 m^3 水池中的水冷却,水温达到工艺冷却水上限时,启用冷却塔进行强制冷却,这样使得大量的热量直接排放到空气中,给环境造成了热污染并损失了部分冷却水.夏季,这种冷却方式的冷却效果相当不好,因此提出对原工艺进行改进.新设计目标包括:取消原有的冷却塔,改换用热泵对冷却循环水降温,并且将回收的热量用于冬季供暖.由于回收的热量不足以满足供暖需要,结合白城地区地下水温为 $8 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$,拥有丰富的地下水资源,可以利用地下水作为供暖热量的补充.因此,笔者提出了采用工艺冷却水与地下水相结合的方法,以蓄热水池为主,地下水补充为辅的供热设计方案.在工厂不生产的时候,设计的供暖系统能够持续对厂区进行供暖,提供保温负荷^[10].因此,设计一个可以储存足够量的水池,既可以对循环冷却水进

行回收,又可以将回收回来的冷却水中的热量提取出来用于供暖.根据以上考虑设计了余热回收工艺系统,该系统主要由3部分组成:冷却降温系统、供暖系统、控制系统等(见图1).图中冷却系统的对象即为中频炉,其与供暖系统通过冷却水池联系在一起,由控制部分协调整个系统运行.

冷却降温系统主要包括:水池(冷热水池)、循环水泵、补水泵、软化处理等设备.冷却降温系统如图2所示.

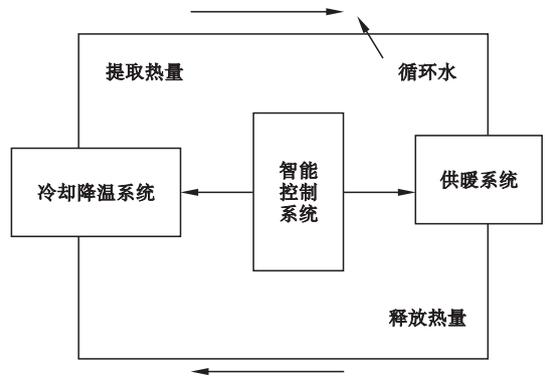


图1 余热回收系统的组成

Fig.1 Waste heat recovery system

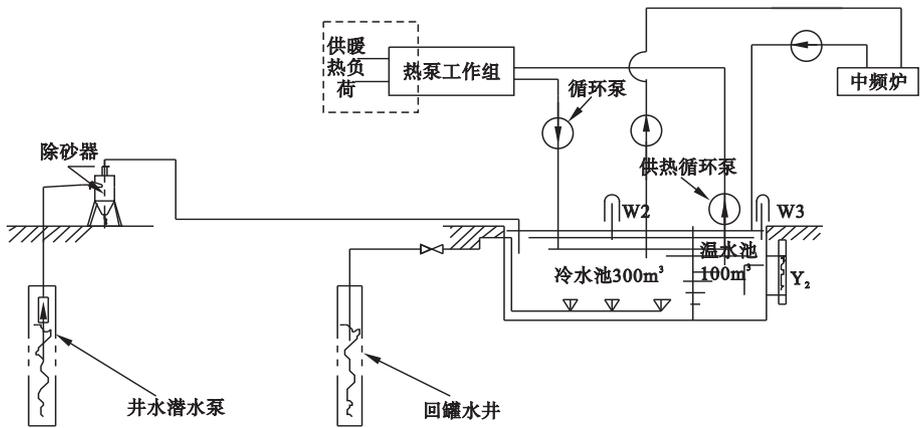


图2 冷却降温系统

Fig.2 Cooling system diagram

供暖系统主要包括:热泵供暖循环系统、处理设备(见图3).水池(冷热水池)、循环水泵、补水泵、各软化

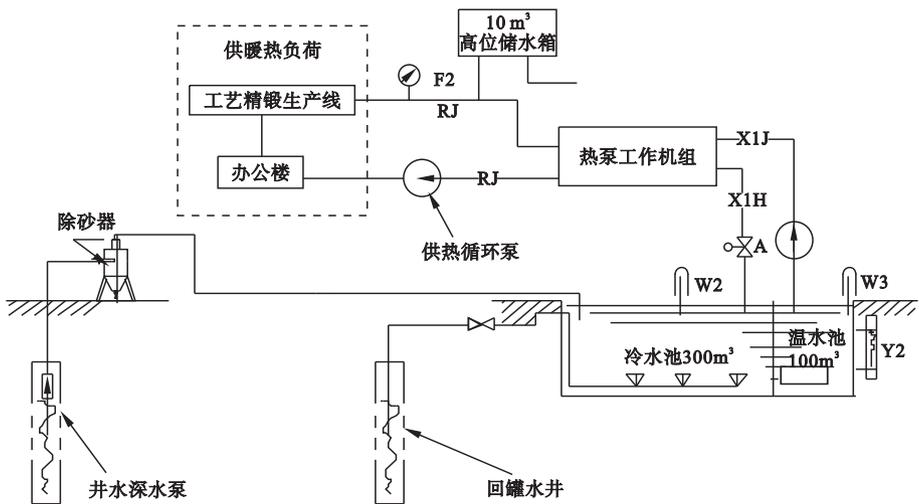


图3 供暖系统

Fig.3 Heating system diagram

供暖系统从工艺冷却水中回收的热量以及利用地下水补充的热量通过热泵提取后进入到供暖系统中. 供暖循环系统是一个闭式循环, 循环的一端连接着热泵的热端, 另一端则通到供暖水管接口处. 在热端循环泵作用下循环水经过热泵机组热端, 在冷凝器与工质 R134a^[11]的作用下放热, 供暖水管网中的水经过热泵, 吸收工质放出的热量, 循环水升温, 回流到供暖水管中, 输送到暖气片, 给整个厂区供暖. 放出热量的循环水温度下降回流到水池中, 给水池降温, 进入到降温系统

中, 进入下一个循环. 为了防止供暖过程中结垢和杂质造成的管道堵塞问题, 闭式循环系统所应用的循环水应为软化水. 供暖系统中热源水的泄漏^[12]不可避免, 因此需要补水泵对其补水以确保满水状态保证供暖效果.

水池是连接两个系统连接的桥梁, 使得两部分系统成为了一个整体. 同时, 水池也起到了缓冲的作用, 便于人为用单片机对其进行控制操作. 水池温度的变化的快慢是反映整套系统的好坏的重要参数. 整个系统的原理如图4所示.

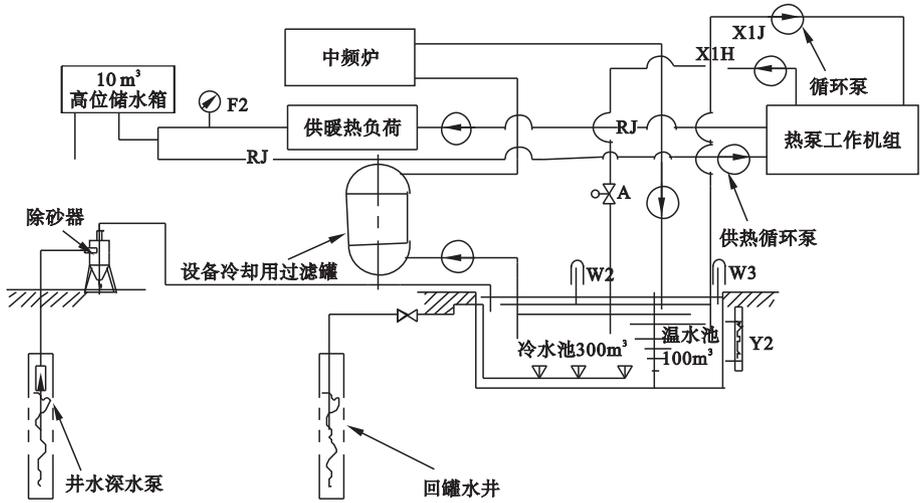


图4 余热回收系统

Fig. 4 Waste heat recovery system

2 供暖系统热量计算

2.1 冷却循环水可回收热量计算

在精锻连杆生产工艺中, 通过中频感应炉将毛坯件加热到 1 240 °C, 然后进行辊锻、模锻及正火处理. 中频感应炉的感应线圈在加热过程中自身也被加热, 其热量来源两个方面: 一是电磁涡流流经线圈产生的热量; 二是被加热的毛坯件热辐射到感应线圈对其加热. 被加热的感应线圈通过循环水得以保护, 循环水带走的热量即为可回收的热量. 循环水吸收的热量为

$$Q_r = cm\Delta t. \quad (1)$$

式中: Q_r 为循环水吸收的热量; c 为水的比热

容; m 为水的质量; Δt 为水温变化量.

精锻工艺生产线中给毛坯件加热的中频炉的额定功率为 350 kW, 冷却循环水流量为 30 t/h, 在冷却水流经中频炉过程中, 冷却循环水出口温度平均温度升高 4.5 °C, 在生产线上共有 6 台中频炉同时工作, 因此 1h 可回收热量为

$$Q_{r1} = \frac{4\,200 \times 30\,000 \times 4.5 \times 6}{3\,600\,000} = 945 \text{ kW/h.}$$

因此, 对于整个工艺生产线正常工作时, 1 h 可回收大约 945 kW 的热量.

2.2 供暖热负荷计算

吉林白城中一精锻公司占地长 215 m, 宽 170 m, 分为办公区和生活区. 总供暖面积约为 22 000 m², 厂区原锻造车间面积为

3 000 m²,层高 14 m;新建锻造车间面积为 2 140 m²,层高为 13 m;新建模具车间 1 000 m²,层高 5 m;塔筒车间 9 614 m²,层高 17 m;后序车间 2 452 m²,层高 7 m;浴池 115 m²,层高 3 m;办公楼面积 3 000 m²,层高 3 层. 厂房建筑墙体上设有玻璃窗.

整个供暖区分为厂区供暖区和办公楼供暖区. 供暖热负荷是指在冬季为了给室内温度达到相应的要求,供热系统在单位时间内向建筑物供给的热量.

2.2.1 办公楼热负荷计算

办公楼分为 3 层,面积为 3 000 m². 采用两种方法对其进行采暖热负荷的计算.

(1) 单位面积热指标法

单位面积指标法^[13]是指同类型建筑物,采暖时单位面积的耗热量的多少,单位为 W/m²,建筑采暖负荷概算值计算式为

$$Q_w = Q_f \times f. \quad (2)$$

式中: Q_w 为建筑供暖设计热负荷; f 为建筑供暖面积; Q_f 为建筑物供暖面积热指标.

采暖设计热负荷是指以室外温度为标准,为给室内温度达到规定的要求,供热系统在单位时间内向建筑物所输送的热量. 笔者采用当地气温最低的室外温度作为研究对象,确保供暖效果. 民用建筑热负荷估算指标如表 1 所示^[14].

表 1 民用建筑热负荷估算指标

Table 1 Estimation of heat load for civil buildings

房间类型	热负荷标准/(W·m ⁻²)
住宅	46~70
医院, 幼儿园	64~80
办公楼, 学校	58~80
食堂, 餐厅	116~140
旅馆	58~70
大礼堂, 体育馆	116~163

表 1 是民用建筑物热负荷指标,根据不同功能的房间,热负荷的标准不一样,总建筑面积大,外墙维护结构热工性能好,窗户面积小,采用较小指标;总建筑面积小,外墙维护

结构热工性能差,窗户面积大,采用较大指标. 由表 1 中可知,一般住宅楼等一些小面积的房间所要求的热负荷较低,较大房间的热负荷指标会较大,例如体育场. 办公楼的热负荷指标在 58~80 W/m²,实地考察可以得知办公楼的总建筑面积大,外墙维护结构功能好,窗户大,所以采用折中指标,即 Q_f 为 69 W/m². 因此,计算出办公楼所需热量为

$$Q_{w1} = 3\,000 \times 69 = 207 \text{ kW}.$$

(2) 窗墙比公式法

窗墙比是指窗户洞口面积与房间立面单元面积比值. 当已知外墙总面积,总建筑面积窗墙比时,则建筑物供暖热负荷指标 Q 为

$$Q = [(1.163 K(6a + 1.5)A)] \times (t_n - t_w) / F. \quad (3)$$

式中: K 为新风系数,1.3~1.5; a 为外窗面积与外墙面积(包括窗)之比; A 为外墙总面积, m²; F 为总建筑面积, m²; t_n 为供暖室内温度, °C; t_w 为供暖室外温度, °C.

吉林白城属于寒冷地区,国家对寒冷地区的住宅建筑窗墙比有着强制性的规定. 规定严格要求每个地区不同环境的窗墙比值不同^[15](见表 2).

表 2 窗墙面积比限值

Table 2 Window wall area ratio

朝向	窗墙面积比	
	严寒地区	寒冷地区
北	0.25	0.3
东、西	0.3	0.35
南	0.45	0.5

新办公楼只有南北有窗,东西无窗,即 a 的取值在 0.3~0.5. 通过窗墙比公式法求得办公楼的建筑热负荷为

$$Q_1 = [1.163 \times 1.5 \times (6 \times 0.4 + 1.5) \times 2\,700] \times (16 + 25) / 3\,200 = 230 \text{ kW}.$$

用两种方法算得到的建筑热负荷相差 23 kW,为了保证供暖效果,供热负荷选择 230 kW.

2.3 车间厂房热负荷计算

根据相关规定,建筑物净空高于4 m,适宜采用体积热指标法^[16]计算,车间厂房内计算温度为10~15℃.

$$Q_n = q_v \times V \times (t_n - t_w). \quad (4)$$

式中: Q_n 为建筑物供暖设计热负荷,W; V 为建筑物的外围面积, m^2 ; q_v 为建筑物的供暖体积指标, $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$,它表示各类建筑物在室内外温差为1℃时,每1 m^3 建筑物外围体积的供暖热负荷,主要与建筑物的维护、结构及外形有关,厂房一般取0.5~0.8 m^3 .

厂房体积按照21 000 $m^2 \times 8 m = 168 000 m^3$,锻造车间规定最低温度为8℃,厂区里因为有中频炉的原因,室内计算温度按照10℃、室外计算温度按照-20℃,所需总热量为

$$Q_{n2} = 0.5 m^3 \times 168 000 m^3 \times [10 - (-20)] = 2 520 kW.$$

根据办公室热负荷计算和厂区热负荷计算可以得出理论上总的热量为 $Q_1 + Q_{n2} = 230 + 2 520 = 2 750 kW$.在此基础上增加15%热负荷,作为热泵的选择依据,以保证供暖效果.

从冷却降温系统图2中可以看出,循环水从冷水池中,经过水管,流经中频炉给其冷却降温,之后回到热水池中,热泵从热水池中提取热水池中的热量用来供暖.根据供暖热负荷的计算可知,选择功率为1 200 kW的热泵,型号为SM-1200MG,选用3台热泵机组.此热泵的最低工作温度是4℃.冷水池中的一端进入到中频炉给其降温,中频炉是给毛坯件加热到1 240℃,而中频炉是感应热对其加热,其自身组成是由铜构成的,铜的熔点为1 084℃,因此铜很容易就熔化.实际操作中,当水温达到30℃时,冷却水冷却中频炉带走的热量不足以使得中频炉降到理想的温度,导致中频炉停止工作,所以水池的水温不能高于30℃.由冷却降温系统图可以发现,水池被分为了冷热水池两个部分,这样设

计是利用了热泵的特性.当热泵的冷端和热端出现温差时,热泵在启动过程中消耗的电能将减少.

通过计算可知,从工艺生产线过程中1 h可回收的量为945 kW/h,需要供暖的热负荷为2 750 kW,热泵机组需要从水池里吸收的热量为

$$2 750 - 945 = 1 805 kW$$

所欠缺的热量需要地下水来提供,已知当地地下水的温度为8~10℃,为了保证能够提供足够的热量,选用8℃作为地下水的计算温度指标.选用热泵的最低工作温度在4℃,所以地下水在提供热量时的温度下降为4℃.

因此,需要的地下水水量为

$$1 805 \times 0.86/4 = 388 m^3$$

所以水池容积大小设定为400 m^3 可以达到供暖所需热负荷的要求.

3 余热回收系统过程分析

3.1 工厂停业

假设工厂停业,不能从精锻工艺生产线当中获得热量,仅仅只靠地下水来维持供暖.根据当地的地下水源的资料可得知,地下水水温比较稳定,冬天8℃.所以水池的温度在4~8℃.为保证冬季取暖,确保热泵正常工作,则需要将水池温度控制在4℃以上,在水池中3处不同的位置安放温度计,用来测量水温的高低,以便控制水泵的智能启停.在这种情况下提取热量,水池中的水温会慢慢变低,设定5℃为警戒值,当达到警戒值的时候,深井泵打开,往水池中注地下水,同时打开溢流阀,将多余的水溢流出去,维持水池的容量一直在400 m^3 .

3.2 工厂正常生产

当可以从精锻工艺生产线中获得热量时,水池中的水温度不断升高.但是,为了满足生产工艺的要求,水温有一个上限30℃(中频炉在水温达到30℃时停止工作^[17]),

从供暖热负荷需要的热量来看,当水温低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时候,供暖系统供热量不理想,因此在工艺生产线生产过程中,水池的水温波动大概 $15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.在控制水池的温度时,设定的警戒值为 $17\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,防止出现温度过低或者过高,使得整个系统和工艺生产线停止运行.

整个运行过程:水泵提取冷却池中的冷却水进入精锻工艺生产线中,流经换热器,与换热器中的水充分接触^[18],吸收换热器中水的热量,最终返回到热水池中.换热器中的水被提取热量之后继续循环给中频炉降温,保证精锻工艺生产线的正常运行.热泵冷端得到来自热水池中的热水,提取其中的热量,热泵热端将提取的热量送给供暖管道里的供暖水.水池中的水经过循环回到冷水池中,给水池降温,这样就中频炉中的热量提取出来用于供暖,大大地节省了能源,保护了环境.在整个过程中,可能会发生水温一直升高,从生产工艺中获得的热量太多,无法及时提取出来,这就需要打开深井泵,给水池降温,保证精锻工艺生产线的正常运行.在补水的时候,泵入的地下水需要经过处理,因为水中含有大量的泥沙,将会对热泵系统造成磨损破坏、会影响热泵机组的工作效率和工作年限,所以在深井泵和水池之间加入除砂器.将水池中间用一堵带有上下两个孔的墙隔开,分为冷热2个水池,这样做的目的是创造出温差,有利于热泵的开启,减少电能的消耗.整个运行过程充分利用了热泵技术,对原工艺进行了优化,用冷却水池替代了冷却塔,用热泵对工艺中产生的余热进行了回收再利用.

4 结 论

(1)设计了以热泵技术为基础的余热回收系统,该系统除为生产提供工艺冷却水外,还可以将工艺冷却水中的余热进行回收,使热泵的冷端和热端结合起来同时利用,增加了热泵的效率.该设计减少了水资源的浪费

和对空气的局部热污染,保护了环境.

(2)计算得出在锻造生产工艺中可回收余热为 945 kW ,这些热量可以用于厂区及办公楼的供暖.对于供暖所欠缺的热量,设计了一个 400 m^3 的水池,利用当地丰富的地下水来弥补所需热量.

参考文献

- [1] 孟文静.工业余热:低品位大作为[J].供热制冷,2016(2):26-27.
(MENG Wenjing. Industrial waste heat: low grade with great effect[J]. Heating and cooling,2016(2):26-27.)
- [2] 李诚.经济增长方式转变的新思考[J].现代经济信息,2015(9):12.
(LI Cheng. New thoughts on the transformation of economic growth mode[J]. Modern economic information,2015(9):12.)
- [3] 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, SHUGUANG Yangzi, et al. Summarization of recycling technology of industrial waste heat in China[J]. Energy conservation technology, 2011, 29(2):123-128.)
- [4] 孟欣,杨永平.中国工业余热利用技术概述[J].能源与节能,2016(7):76-77.
(MENG Xin, YANG Yongping. Overview of industrial waste utilization technology in China[J]. Energy and energy saving,2016(7):76-77.)
- [5] 侯红梅.热泵技术在我国钢铁冶金行业的应用与发展[J].通用机械,2016(2):26-29.
(HOU Hongmei. Application and development of heat pump technology in China's iron and steel metallurgy industry[J]. General machinery,2016(2):26-29.)
- [6] 闫晓燕.采用热泵技术回收工业循环水余热[J].冶金动力,2014(2):31-33.
(YAN Xiaoyan. Recovery of waste heat from industrial circulating water using heat pump[J]. Metallurgical power,2014(2):31-33.)
- [7] 刘晓琳,张杰,王志国.吸收式热泵在低温余热回收中的应用研究[J].科技创新与应用,2016(16):40-41.
(LIU Xiaolin, ZHANG Jie, WANG Zhiguo. Application of absorption heat pump in low temperature waste heat recovery[J]. Science

- and technology innovation and application, 2016(16):40-41.)
- [8] 赵虎, 阎维平, 郭江龙, 等. 利用吸收式热泵回收电厂循环水余热的方案研究[J]. 电力科学与工程, 2012(8):64-69.
(ZHAO Hu, YAN Weiping, GUO Jianglong, et al. Study on recycling of circulating water from power plant by absorption heat pump[J]. Electric power science and engineering, 2012(8):64-69.)
- [9] 陈辉, 秦盼盼, 陈丽丽, 等. 基于热泵余热回收技术的58SiMn钢件生产中热工参数的分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(3):583-586.
(CHEN Hui, QIN Panpan, CHEN Lili, et al. Analysis of thermal parameters in the production of 58SiMn steel based on waste recovery technology of heat pump[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(3):583-586.)
- [10] SHIRAZI A, TAYLOR R A, WHITE S D, et al. Transient simulation and parametric study of solar-assisted heating and cooling absorption systems; an energetic, economic and environmental (3E) assessment [J]. Renewable energy, 2016, 86:955-971.
- [11] 张雷, 胡连营. 中高温热泵工质应用的现状与选择[J]. 节能, 2010(1):66-68.
(ZHANG Lei, HU Lianying. Present situation and selection of medium and high temperature heat pump[J]. Energy saving, 2010(1):66-68.)
- [12] NOVAK M D. Importance of soil heating, liquid water loss, and vapor flow enhancement for evaporation[J]. Water resources research, 2016, 52(10):8023-8038.
- [13] 张鹏超. 基于单位建筑面积负荷指标法的城市饱和负荷预测研究[J]. 湖北电力, 2015, 39(4):5-8.
(ZHANG Pengchao. Study on urban saturation forecast based on unit floor area load index method [J]. Hubei electric power, 2015, 39(4):5-8.)
- [14] 刘超, 赵天怡, 张吉礼, 等. 基于建筑信息模型的建筑热工系统与暖通空调系统设计应用分析[J]. 暖通空调, 2016, 46(3):27-32.
(LIU Chao, ZHAO Tianyi, ZHANG Jili, et al. Application of building information model to building thermodynamic system and HVAC system design [J]. HVAC, 2016, 46(3):27-32.)
- [15] 冯伟刚. 严寒和寒冷地区居住建筑节能新旧标准之比较: 学习《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ26—2010) [J]. 门窗, 2013(2):53-57.
(FENG Weigang. Comparison of old and new standards for energy saving of residential buildings in cold and cold areas—study on《energy saving design standard for residential buildings in cold and cold areas》(JGJ26—2010) [J]. Doors and windows, 2013(2):53-57.)
- [16] 罗崇来, 李炎, 刘炎举. 兰州地区住宅建筑供暖能耗影响因素分析[J]. 节能, 2016(2):41-45.
(LUO Chonglai, LI Yan, LIU Yanju. Analysis of factors affecting heating energy consumption of residential buildings in Lanzhou area [J]. Energy conversation, 2016(2):41-45.)
- [17] YAMAZAKI K, TAKI M, OHKUBO C. Safety assessment of human exposure to intermediate frequency electromagnetic fields [J]. Electrical engineering in Japan, 2016, 197(4):3-11.
- [18] O'CONNOR D, CALAUTIT J K S, HUGHES B R. A review of heat recovery technology for passive ventilation applications [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 54:1481-1493.