2021 年 第 21 卷 第 35 期
2021, 21(35): 15035-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:时国华, 林俊华, 田志敏, 等. 降低热网回水温度的钢厂余热回收供暖分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15035-15042.
Shi Guohua, Lin Junhua, Tian Zhimin, et al. Analysis of waste heat recovery from steel plant for heating by reducing return water temperature [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15035-15042.

能源与动力工程

降低热网回水温度的钢厂余热回收供暖分析

时国华[1], 林俊华[1], 田志敏[1], 李永红[2*], 苗 青[3,4]

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 保定 071003; 2. 清华大学建筑节能研究中心, 北京 100084;
3. 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300350; 4. 北京热科能源技术研究有限公司, 北京 100084)

摘 要 余热回收供暖是实现节能减排和清洁供暖的重要手段。定量分析了降低热网回水温度对钢厂低品位余热回收率的影响,提出了基于降低热网回水温度的钢厂余热回收供暖系统,研究了系统内各余热回收单元及内部换热网络的确定原则,构建余热供暖系统等效性能系数(coefficient of performance,COP)作为系统性能评价指标,并以某钢厂为例确定了低品位余热回收流程及经济性。结果表明,当热网回水温度降低至 15 ℃时,钢厂低品位余热回收率达 100%;余热回收供暖系统等效 COP 为 6.1;余热回收供暖系统使得一次热网供热能力达到 798 MW;基于降低热网回水温度的钢厂余热回收供暖系统静态回收期约为 4 年,具有良好的经济效益。

关键词 钢厂; 低品位余热; 余热回收; 供暖; 等效 COP; 经济性

中图法分类号 TK115; **文献标志码** A

Analysis of Waste Heat Recovery from Steel Plant for Heating by Reducing Return Water Temperature

SHI Guo-hua[1], LIN Jun-hua[1], TIAN Zhi-min[1], LI Yong-hong[2*], MIAO Qing[3,4]

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Building Energy Efficiency Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Key Laboratory of the Ministry of Education for Efficient Utilization of Medium and Low Temperature Thermal Energy, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 4. Reke Energy Technology Research Company, Beijing 100084, China)

[**Abstract**] Waste heat recovery for heating is an important means to realize energy saving, emission reduction and clean heating. The effect of low return water temperature of heating network on waste heat recovery rate for the steel plant was quantitatively analyzed. A waste heat recovery system for heating by reducing return water temperature was also developed. The principles was proposed to guide how to determine the internal heat exchange networks in each waste heat recovery unit. The equivalent coefficient of performance (COP) of the novel waste heat recovery heating system was introduced as the performance index. The whole low-grade waste heat recovery heating process was exemplified in a particular case study and its economic character was analyzed in detail. The results show that if the return water temperature of heating network decreases to 15 ℃, the low-grade waste heat recovery rate of the steel plant would reach up to 100%, and the equivalent COP is 6.1. Utilizing the waste heat recovery heating system increases the heating capacity of the primary heating network up to 798 MW. The static payback period of the waste heat recovery heating system for steel plant is 4 years, so it has good economic benefits.

[**Keywords**] steel plant; low-grade waste heat; heat recovery; heating; equivalent COP; economic

自 2000 年以来,中国粗钢产量增长了 6.25 倍[1],钢铁企业能耗长期以来居高不下,2018 年吨钢能耗指标高达 700 kg[2],而能源利用率不足 50%[3],大量低品位余热排放至环境中,2020 年中国钢铁行业低品位余热量约 27.5 亿 GJ[4]。

随着城镇化进程不断推进,中国城镇供热能耗需求增加与碳排放控制之间的矛盾日益加剧。2015 年,发改委印发《余热暖民工程实施方案》,动员各

收稿日期: 2021-07-06; **修订日期**: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(51706115);河北省重点研发计划(21374501D)

第一作者: 时国华(1980—),男,汉族,江苏无锡人,博士,副教授。研究方向:工业领域能效提升、节能减排。E-mail:lucksgh@126.com。

* **通信作者**: 李永红(1977—),男,汉族,山西运城人,博士,教授级高级工程师。研究方向:电厂及工业余热供热技术。E-mail:383656894@qq.com。

地回收工业低品位余热,替代燃煤锅炉供暖,从而在满足供暖需求的同时,达到节能减排、清洁供暖的效果[5]。

近年来,中外学者对烟气、循环冷却水、乏汽等低品位余热回收供暖做了大量研究工作。赵玺灵等[6]定量分析了天然气烟气余热回收潜力,指出天然气烟气排烟温度低于露点温度后,余热量随排烟温度降低呈线性增加,且排烟温度降低至 20 ℃,余热回收效果较好。时国华等[7]对不同天然气烟气余热回收技术进行了定量比较,结果表明,基于全热交换的烟气余热回收技术可提升 9% 以上的供热能力。张群力[8-9]利用喷淋塔直接接触式换热方式回收烟气冷凝余热,并与助燃空气加湿相结合,能够有效提高热网余热利用效率和燃气锅炉效率。顾煜炯等[10]提出了利用吸收式热泵与有机朗肯循环发电综合回收循环冷却水余热的方案。Xu 等[11]针对传统吸收式热泵存在蒸发温度低的问题,提出利用双段吸收式热泵回收低品位余热,性能系数可达 1.77。Ramirez 等[12]将有机朗肯循环与钢厂余热回收相结合,回收电弧炉的高温烟气,用于采暖季供蒸汽和非采暖季发电,每年可减少 7 990 t 二氧化碳排放。Li 等[13]针对乏汽余热提出了一种基于余热利用的多热源梯级供热系统,通过抽汽和乏汽来实现热网水的串联温升。综上可知,工业领域常见余热载体均有较为成熟的余热回收技术。

针对钢厂低品位余热,缺乏余热品位和量方面的详细分析,且余热回收研究多集中于单一种类余热。钢厂低品位余热种类繁多,涉及多个工艺环节,需要从全局角度出发,遵循能级匹配、梯级利用的原则,综合、合理、高效地回收各类余热。付林等[14]指出降低热网回水温度有利于回收更多低品位余热,提高能源利用效率。因此,在分析钢厂低品位余热特点的基础上,基于降低热网回水温度的思路,以热交换方式回收钢厂低品位余热,构建余热回收供暖系统,并以某钢厂为例,对余热回收供暖系统进行性能评价和经济性分析。

1 热网回水温度对钢厂低品位余热回收的影响

1.1 钢厂低品位余热特点

钢厂低品位余热主要来源于温度低于 100 ℃的循环水、低于 260 ℃的烟气以及厂内发电机组(由钢厂中高温余热产生的蒸汽驱动发电)乏汽等,低品位余热种类多。以年产量 400 万 t 的某钢厂为例,其低品位余热进行分温度区段统计和分析,如图 1 所示,钢厂 40 ℃以下的余热较多(约占 64%),

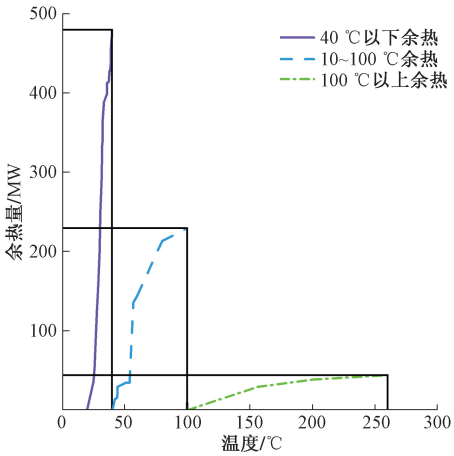


图 1 钢厂分温度区间余热资源情况

Fig. 1 Waste heat resources in different temperature ranges in a steel plant

40 ~ 100 ℃的余热次之,100 ~ 260 ℃的余热较少(占 6% 左右)。可见,钢厂低品位余热温度普遍偏低,若要通过热网水直接换热充分回收钢厂低品位余热,热网回水温度必须低于 40 ℃。

1.2 低热网回水温度比较分析

由图 2 可知,中国北方典型城市供热一次网回水温度一般为 50 ℃左右。但是,50 ℃以上的余热约占钢厂低品位余热的 30%(图 1),若采用常规温度的热网回水直接换热回收余热,忽略换热损失,则余热回收率仅为 30%,剩余约 70% 的余热需要利用热泵技术回收,这将降低余热供暖的经济效益,甚至导致余热供暖方案经济不可行。

根据温度高于一次网回水温度的余热量占低品位余热总量的比例,可得到不同回水温度下基于直接换热的钢厂余热回收率。不难发现,通过直接换热方式,当一次网回水温度降低至 40 ℃时,余热回收率约为 36%;当回水温度降低至 30 ℃时,余热回收率为 50%;理论上当回水温度降低至 20 ℃时就可回收全部余热,但考虑到充裕的换热端差,回水温度降低至 15 ℃时,余热回收率才达到 100%。

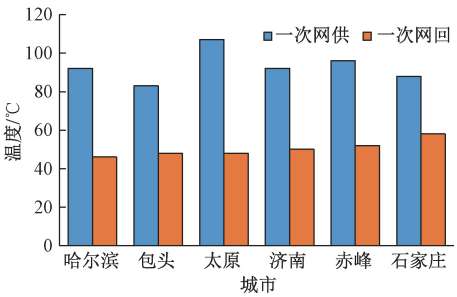


图 2 北方典型城市供热一次网回水温度

Fig. 2 Primary heating network supply and return water temperature of typical cities in northern China

热网回水温度越低,较低品位余热的直接换热回收量越大,提高余热回收率,降低余热回收成本。此外,降低热网回水温度,可以拉大热网供回水温差,提高热网供热能力。因此,降低一次网回水温度对于回收钢厂低品位余热具有重要的意义[15]。

2　基于降低热网回水温度的钢厂低品位余热回收供暖

2.1　余热回收流程确定

应用温度-热量(*T*-*Q*)图结合夹点法与火积分析的回收余热方法[16],针对钢厂低品位余热种类繁多、温度低的特点,提出了降低热网回水温度的余热回收供暖系统(图3),以直接换热的方式回收钢厂全部低品位余热。根据钢厂内部低品位余热种类和换热环节划分,该系统由循环水余热回收单元、烟气余热回收单元和乏汽余热回收单元组成。具体余热回收供暖系统流程和构建原则如下。

(1)利用吸收式热泵或电热泵降低一次网回水温度,一次热网回水降温释放的热量用于加热二次热网回水。由于钢厂缺乏驱动吸收式热泵的高温蒸汽(一般已用于厂内发电机组发电),本文中构建的系统采用电热泵。

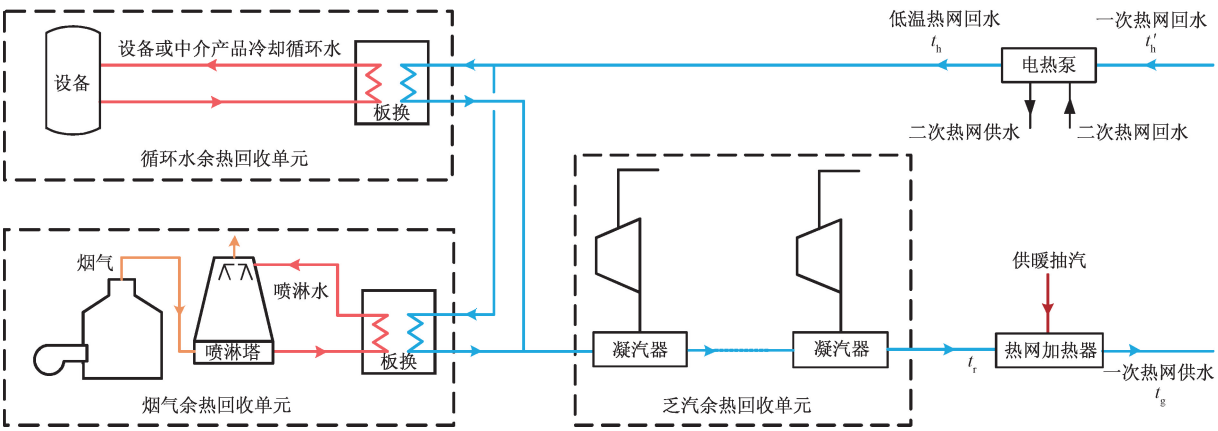
(2)循环水余热回收单元采用间壁式换热回收技术。余热按照梯级加热的原则回收,但全部以串联的方式回收钢厂循环水余热难以实现,原因有:①循环水种类繁多,温度一般为30~50 ℃,不同来源的循环水存在温度区间重叠的现象;②循环水余热分布在钢厂内不同位置,若以串联方式回收全厂循环水余热,则管路复杂,进而增大管路压降,并且易受到场地制约;③若采用串联回收全厂循环水余热,热网水温度逐级提高,无法有效降低后续的循环水温度,进而不利于相应钢厂设备或中间产品的散热,影响钢厂正常生产。因此,循环水余热回收单元内应采用串、并联相结式。单个工艺中有多个循环水来源的环节(如炼铁、炼钢、轧钢)作为并联支路,若某支路内存在温度明显偏高或偏低的循环水,应调整该循环水至其他支路,使得各并联支路的热网出水温度接近,从而减少混水不可逆损失。同时,支路内温度重叠的循环水热源采用并联方式。单个工艺环节中仅有一个循环水来源的环节(如焦化、制氧),则根据厂内实际位置和循环水温度串联在距离较近的支路内。

(3)烟气余热回收单元采用直接接触式喷淋冷却+间壁式换热回收技术。烟气从下部进入喷淋塔,与喷淋塔内上部喷淋的低温循环水直接接触换热。喷淋水的初始水温决定了烟气被冷却的极限温度[17],一次热网回水与升温后的喷淋水通过间壁式换热实现烟气余热的全热回收。烟气余热主要为焦炉烟气、烧结烟气、炼铁热风炉烟气、轧钢加热炉烟气以及富余煤气锅炉烟气,由于烟气余热位置在厂内较为分散,且各工艺环节内烟气来源较单一,为了降低余热回收管线的复杂程度,本系统各烟气余热采用并联回收方式。

(4)乏汽余热回收单元采用高背压直接换热方式。为尽可能减小各换热过程的不可逆损失,根据"梯级加热"的基本原则,本系统对乏汽余热采用凝汽器串联回收的方式。

(5)利用钢厂内工艺产生的低压饱和蒸汽(发电效率较低,一般未利用,且对机组发电量影响较小,成本可忽略),从钢厂蒸汽管网内抽出,并通过尖峰加热器将回收钢厂低品位余热的一次热网回水加热至要求的供水温度。

乏汽参数可通过调节机组背压来适应不同的取热温度。因此,本系统中循环水余热回收单元和烟气余热回收单元采用并联结构,再与乏汽余热回收单元串联,实现整个钢厂低品位余热资源的梯级利用。



t_h为低温热网回水温度;t_h'为一次热网回水温度;t_r为余热回收后热网水温度;t_g为一次热网供水温度

图3　基于降低热网回水温度的钢厂低品位余热回收供暖系统

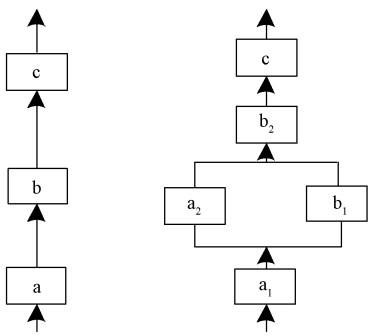
Fig. 3　Low-grade waste heat recovery system of steel mill by reducing return water temperature of heating network

2.2 循环水余热回收单元内部换热网络确定

由2.1节的分析可知,本文中提出的钢厂低品位余热回收系统中仅循环水余热回收单元存在串、并联结合的方式,需要进一步确定其内部换热网络。确定循环水余热回收单元内部换热网络,实质是确定热网回水与余热物流的串、并联结合方式。

对于没有温度重叠区间(即 $t_a < t_b < t_c$)的循环水,如图4(a)所示,按照梯级加热的原则,热网水依次与余热物流a、b、c串联取热。

对于存在温度重叠的循环水,如图4(b)所示,余热物流a、b、c(即 $t_{a1} < t_{a2} = t_{b1} < t_{b2} < t_c$)中有温度重叠区域段 a_2 和 b_1,利用夹点法确定热网回水从温度重叠的循环水中取热的流程。热网回水先与余热物流a的低温段(a_1)串联换热,再并联分别与余热物流a的高温段(a_2)及余热物流b的低温段(b_1)换热,然后串联余热物流b的高温段(b_2)换热,最终与余热物流c换热。夹点法以梯级回收最大热量为目的,在实际应用中还需综合考虑管路敷设、钢厂内场地限制、成本来确定循环水换热流程。



(a) 换热流程一 (b) 换热流程二

图4 换热流程的确定

Fig. 4 Determination of heat transfer process

2.3 钢厂低品位余热回收系统余热量计算

2.3.1 循环水余热回收量

单个循环水换热环节的余热回收量为

$$Q_{w,i} = c_{heat,i} m_{heat,i} (T_{in,i} - T_{out,i}) = c_{cold,i} m_{cold,i} (t_{out,i} - t_{in,i}) \quad (1)$$

式(1)中:$T_{in,i}$、$T_{out,i}$ 分别为第 i 换热环节热物流的进、出口温度,℃,$T_{out,i}$ 必须达到钢厂温度要求;cm 为物流的热容流率,(kJ·h)/℃;$t_{in,i}$、$t_{out,i}$ 分别为第 i 换热环节冷物流(热网回水)的进出、口温度,℃,考虑换热端差对换热效率的影响,热网水出口温度 $t_{out,i}$ 设定为比余热物流进口温度 $T_{in,i}$ 低3 ℃。

2.3.2 烟气余热回收量

单个烟气余热回收环节的余热回收量为

$$Q_{g,j} = v_{g,j} (h_{g,in,j} - h_{g,out,j}) \quad (2)$$

$$E_{total,j} = \frac{h_{c,out,j} - h_{c,in,j}}{h_{g,in,j} - h_{g,out,j}} \quad (3)$$

式中:$v_{g,j}$ 为第 j 换热环节的烟气质量流量,kg/h;$h_{g,in,j}$、$h_{g,out,j}$ 分别为第 j 换热环节烟气冷却前、后的焓值,kJ/kg;E_{total} 为喷淋过程的全热效率,即喷淋水实际获得的热量和喷淋水最大可获得热量之间的比值[7];$h_{c,in,j}$、$h_{c,out,j}$ 分别为喷淋水进、出喷淋塔的焓值,kJ/kg。

在烟气余热回收单元,考虑到热网水的水质要求,不适宜直接采用热网水喷淋,因而需要引进中间媒介循环水喷淋。其中,考虑到回收烟气潜热以及换热器换热端差的影响,规定喷淋水进入换热器的温度比烟气露点温度低5 ℃,热网水出换热器的温度与喷淋循环水的出水温度有5 ℃的换热端差。

2.3.3 乏汽余热回收量

单个乏汽余热回收环节的余热回收量为

$$Q_{v,k} = v_{v,k} (h_{v,in,k} - h_{v,out,k}) \quad (4)$$

式(4)中:v_k 为第 k 环节乏汽的质量流量,kg/h;$h_{v,in,k}$、$h_{v,out,k}$ 分别为乏汽冷却前、后的焓值,kJ/kg。

2.3.4 整个系统余热回收量

钢厂低品位余热回收供暖系统的余热回收总量为

$$Q_r = \frac{\sum_i Q_{w,i} + \sum_j Q_{g,j} + \sum_k Q_{v,k}}{3.6 \times 10^6} \quad (5)$$

式(5)中:Q_r 为整个系统的单位时间余热回收量,MW。

2.4 钢厂低品位余热回收系统余热量计算

基于降低热网回水温度的钢厂低品位余热回收供暖系统中采用低压饱和蒸汽将热网水加热至供水温度,及采用电热泵降低一次热网回水温度,需要消耗蒸汽和电能。因此,本文中引入等效性能系数(coefficient of performance,COP),即余热供暖系统的供热量 Q_g 与余热供暖系统消耗能量 Q_h 的比值,来评价钢厂低品位余热回收供暖系统,即

$$C_{OP} = \frac{Q_g}{Q_h} = \frac{Q_r + Q_h}{Q_h} = 1 + \frac{Q_r}{Q_h} \quad (6)$$

$$Q_h = Q_{h,v} + W_{h,hp} + W_{h,wp} \quad (7)$$

式中:C_{OP} 为性能系数;$Q_{h,v}$ 为钢厂富裕低压饱和蒸汽的耗能功率,MW;$W_{h,hp}$ 为电热泵降温耗能功率,MW;$W_{h,wp}$ 为热网水输配的水泵耗能功率,MW。原回水温度 t'_h 由电热泵降温至低温一次热网回水 t_h,经过三部分余热回收单元加热,温度升至 t_r,然后,由钢厂富裕蒸汽通过尖峰加热器加热至热网供水需求温度 t_g,若忽略水泵输配耗能,则有

$$\frac{Q_r}{Q_h} \approx \frac{t_r - t_h}{t_g - t_r + \frac{t'_h - t_h}{C_{OP,hp} - 1}} \quad (8)$$

$$C_{OP}=1+\frac{t_r-t_h}{t_g-t_r+\dfrac{t'_h-t_h}{C_{OP,hp}-1}} \tag{9}$$

3　案例分析

以1.1节中所述年产量400万t的某钢厂为例,低品位余热资源汇总如表1所示。

3.1　基于降低热网回水温度的余热回收换热网络确定

根据2.1节中余热回收流程确定原则,在热力站使用电热泵降低一次热网回水温度。余热源最低温度为25 ℃,考虑充裕的换热端差,一次热网回水设定降低至15 ℃。

对于循环水余热回收单元,由表1可见,炼铁(序号2、3)、炼钢(序号4、5、6)、轧钢(序号7、8、9)环节的循环水来源较多,焦化(序号1)与制氧(序号10)循环水种类单一。根据2.1节中原则(2),初步将炼铁、炼钢、轧钢三个环节的循环水余热回收组成并联支路。为了使并联支路的热网出水温度较为接近,进一步确定循环水余热回收单元内部换热网络。对于循环水种类单一的焦化与制氧环节,根据2.1节中原则(2),制氧(序号10)并入较近的炼钢支路。至此,循环水余热回收单元的三条并联支路分别为:并联支路Ⅰ包含序号1、2、3;并联支路Ⅱ包含序号7、8、9;并联支路Ⅲ包含序号4、5、6、10。然而,由表1知,并联支路Ⅰ中各来源循环水温度较低,并联支路Ⅲ各来源循环水温度偏高,为了使各并联支路的热网出水温度接近,减少混水损失,根据2.1节中原则(2),将温度最高的炼钢软水(序号6)调整至并联支路Ⅰ内,与焦化冷却水、炼铁软水、炼铁净环水串联,实现余热梯级利用,如图5所示。

由表1可知,仅并联支路Ⅰ内炼铁软水(序号2)与炼铁净环水(序号3)存在温度重叠,但两余热物流仅有1 ℃的温度不重叠区间,为了简化换热流程,因此,不区分两余热物流换热的高温段与低温段。由2.2节知,循环水余热回收单元中,炼铁软水和炼铁净环水余热回收采用并联方式。其他循环水均按照夹点法确定的换热顺序加热热网水。

对于烟气余热回收单元,根据2.1节中原则(3),所有烟气余热回收采用并联方式,如图5所示。根据各烟气成分,可确定焦炉烟气、烧结烟气、热风炉烟气、燃煤气锅炉烟气和轧钢加热炉烟气露点温度分别为58、54、54、46、57 ℃。烟气采用20 ℃喷淋水喷淋,喷淋水喷淋后的温度比烟气露点温度低5 ℃。一次热网回水与喷淋水换热,且有5 ℃换热端差。对于乏汽余热回收单元,根据2.1节中原则(4),所有乏汽余热回收采用串联方式,见图5。最后,由钢厂工艺产生的低压饱和蒸汽将热网水加热至供水温度。

表1　某钢厂分种类低品位余热资源情况

Table 1　Low-grade waste heat resources of a steel plant

余热介质	来源	序号	冷却前温度/℃	需求温度/℃	流量/(t·h^{-1})	热量/MW	热量合计/MW
循环水	焦化冷却水	1	30	25	6 373	37	210
	炼铁软水	2	40	36	7 105	33	
	炼铁净环水	3	41	36	1 033	6	
	炼钢浊环水	4	42	40	6 890	16	
	炼钢净环水	5	47	42	4 134	24	
	炼钢软水	6	52	48	2 584	12	
	轧钢浊环水	7	35	32	1 722	6	
	轧钢净环水	8	38	36	2 273	19	
	轧钢层流水	9	44	39	383	8	
	制氧净环水	10	34	27	6 029	49	
	来源	序号	温度/℃		流量/(10^4Nm^3·h^{-1})	热量/MW	热量合计/MW
烟气	焦炉烟气	11	200		28	28	171
	烧结烟气	12	57		104	100	
	热风炉烟气	13	260		30	24	
	燃煤气锅炉烟气	14	112		40	12	
	轧钢加热炉烟气	15	156		20	7	
	来源	序号	温度/℃	排汽压力/kPa	流量/(t·h^{-1})	热量/MW	热量合计/MW
乏汽	2×N65机组乏汽	16	39	6.28	333	200	287
	N45干熄焦机组乏汽	17	39	7	80	48	
	烧结发电机组乏汽	18	39	5	23	14	
	转炉发电机组乏汽	19	39	5	42	25	
钢厂低品位余热量合计/MW							668

3.2 余热回收系统的余热量确定

由表1中各循环水冷却前温度、需求温度和流量,根据式(1),可确定循环水的总余热回收量为210 MW。

由烟气温度、流量、各烟气成分和露点温度,利用CoolPack软件确定烟气余热回收前、后焓值,根据式(2)和式(3)确定烟气的总余热回收量为171 MW。

由表1中乏汽温度、乏汽压力及流量,利用WaterPro软件,确定乏汽余热回收前、后的焓值,根据公式(4)确定乏汽的总余热回收量为287 MW。

经计算,如图5所示,流量为11 805 t/h的一次热网回水经电热泵将热量传递至二次热网,温度由原回收温度45 ℃(t_h')降低至15 ℃(t_h)后,进入钢厂,其中,6 711 t/h的一次热网回水回收循环水余热,温度升至42 ℃,剩余一次热网回水回收烟气余热,温度升至44 ℃,两股一次热网回水混水后,再串联回收乏汽余热,温度升至64 ℃(t_r),最后由钢厂工艺产生的富裕低压饱和蒸汽加热至70 ℃(t_g),以满足供热要求。电热泵的COP为8.5(一次热网侧参数为45/15 ℃,二次热网侧参数为50/40 ℃),由式(9)可得此工况下,余热供暖系统等效COP为6.1。

该系统回收668 MW的低品位余热,低压饱和蒸的耗能功率为82 MW,同时电热泵耗能功率为48 MW,因而整个系统的供热能力为798 MW。

4 经济效益分析

该系统费用包括投资费用和运行费用。其中,投资费用包括:设备投资费用(喷淋塔、换热器、水泵、电热泵等设备投资及相应的安装费用)和管道投资费用。由钢厂实际布置情况,系统管道总长度取10 km,其他具体参数取值见表2。运行费用包括:水泵运行费用、电热泵运行费用及乏汽余热回收的运行代价费用。水泵和电热泵运行时间取2 880 h(当地年供暖时间),假定每一个换热过程的阻力损失为5 mH_2O[15],管道和阀门的阻力损失为换热过程阻力损失的50%,水泵效率η取70%。水泵电耗功率为

$$W_{h,wp} = \frac{mg\Delta H}{3\,600\eta} \tag{10}$$

式(10)中:g为当地重力加速度;m为一次热网水流量,t/h;ΔH为总压降,mH_2O。

乏汽回收需抬高背压,影响钢厂内发电机组单位发电量的汽耗率,则回收乏汽的运行代价成本K_{cost}为

$$K_{cost} = 3.6 \times 10^6 w\tau K_e \sum Q_{v,k} \tag{11}$$

表2 余热回收系统初投资估算参数取值

Table 2 Reference parameter for initial investment estimation of waste heat recovery systems

参数	取值
喷淋塔费用/(元·W^{-1})	0.225
板式换热器费用/(元·m^{-2})	800
水泵及附件费用占主要换热设备费用比例/%	10
建筑安装、工程费占设备费用比例/%	50
电热泵初投资/(元·W^{-1})	0.5
管道费用/(元·m^{-1})	25 000

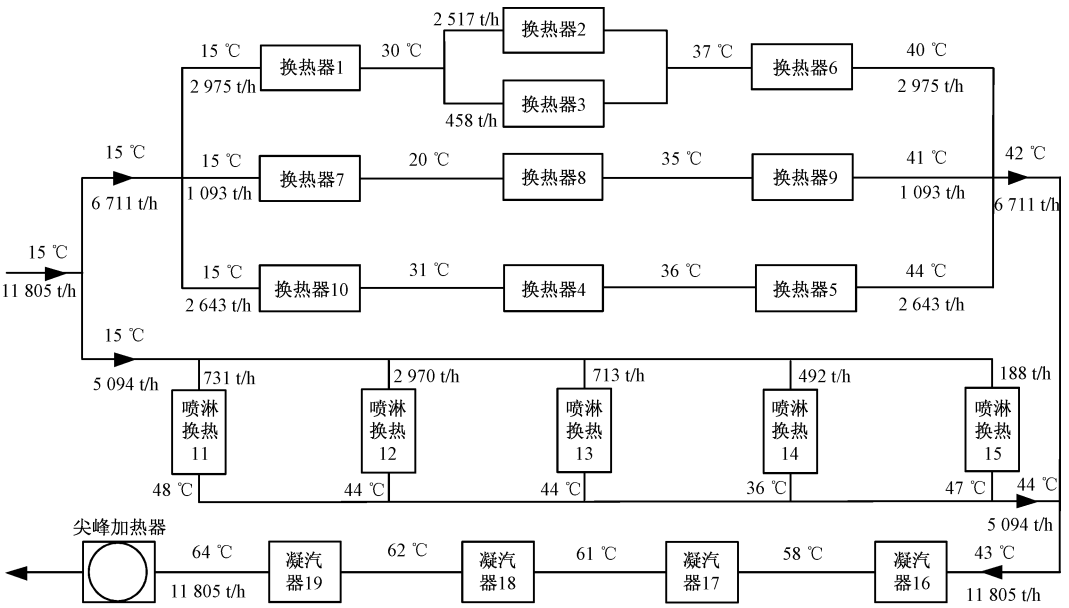


图5 某钢厂基于降低热网回水温度的余热回收流程图

Fig. 5 Flow chart of waste heat recovery of a steel mill by reducing the temperature of heat network return water

式(11)中:K_{cost}为乏汽回收影响的发电量运行成本,元;w为回收单位乏汽余热量所影响的发电量,一般为3.5×10^{-5} kW·h/kJ;τ为当地年供暖时间,h;K_e为电价,元/kW·h。

系统年运行费用K_{op}为

$$K_{op}=1\ 000(W_{h,wp}+W_{h,hp})\tau K_e+K_{cost} \tag{12}$$

式(12)中:K_{op}为年运行费用,元;$W_{h,hp}$为电热泵的年耗能功率,由3.3节可知,$W_{h,hp}=48$ MW。

根据式(10)~式(12)可得,年运行费用为15 674万元,其中,水泵运行费用1 130万元,电热泵年运行费用8 294万元,乏汽回收年运行代价费用6 249万元。由于余热热源成本为零,供热价格取35元/GJ,由系统供热量(798 MW)和年供暖时间,可得年供热收益(K_h)为28 958万元。该系统经济性参数如表3所示。

表3　余热回收技术经济性

Table 3　Economy of waste heat recovery technologies

参数	数值
余热回收量/MW	668
供热量/MW	798
年供热量/万GJ	827
供热价格/(元·GJ^{-1})	35
年供热收益/万元	28 958
电费/[元·(kW·h)$^{-1}$]	0.6
年运行成本/万元	16 019
年净收益/万元	13 284

投资回收期Y为

$$Y=\frac{K_{int}}{K_{net}}=\frac{K_{int}}{K_h-K_{op}} \tag{13}$$

式(13)中:K_{int}、K_{net}分别为供暖系统初始投资、净收益。由表2、表3及式(10)~式(13)可知,钢厂余热供暖系统$K_{net}=13\ 284$万元,$K_{int}=54\ 728$万元,静态回收期约为4年,回收期较短,具有良好的经济性。

5　结论

(1)当仅通过直接换热回收余热时,降低热网回水温度可以提高钢厂低品位余热回收率。当回水温度降低至15 ℃时,基于直接换热技术的钢厂低品位余热回收率可达100%。

(2)基于降低热网回水温度的钢厂低品位余热回收供暖系统包含循环水、烟气、乏汽三个余热回收单元,以低温热网回水并联换热方式回收循环水、烟气余热后再串联回收乏汽余热,可实现钢厂低品位余热的梯级利用。

(3)针对实例研究的钢厂,基于降低热网回水温度的钢厂低品位余热回收供暖系统的余热回收量达798 MW,系统等效COP可达6.1。

(4)基于降低热网回水温度的钢厂低品位余热回收供暖系统年净收益达13 284万元,用于供暖的静态回收期约为4年,经济效益显著,具有良好应用前景。

参　考　文　献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴——2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
National Bureau of Statistics. Chinastatistical yearbook: 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.

[2] 史　磊, 李　楠, 刘海峰, 等. 钢铁企业能源回收及利用模式综述[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 80-83.
Shi Lei, Li Nan, Liu Haifeng, et al. Overview of energy recovery and utilization modes in iron and steel enterprises[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(5): 80-83.

[3] Qin P P, Chen H, Chen L L, et al. Analysis of recoverable waste heat of circulating cooling water in hot-stamping power system[J]. Clean Techn Environ Policy, 2013, 15(4): 741-746.

[4] 方　豪, 王春林, 林波荣. 我国钢铁余热清洁供暖现状和产能调整下的余热潜力预测[J]. 建筑节能, 2019, 47(6): 106-111.
Fang Hao, Wang Chunlin, Lin Borong. Current status of my country's iron and steel waste heat clean heating and prediction of waste heat potential under capacity adjustment[J]. Building Energy Efficiency, 2019, 47(6): 106-111.

[5] 国家发展改革委住房城乡建设部. 关于印发《余热暖民工程实施方案》的通知: 发改环资[2015]2491号[A/OL]. (2015-10-29)[2021-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151104_963493.html?code=&state=123.
Notice of the Ministry of Housing and Urban-rural Development of the National Development and Reform Commission. The ssuance of the implementation plan of the waste heat warming project: development and reform of Environmental Resources No. 2491[A/OL]. (2015-10-29)[2021-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151104_963493.html?code=&state=123.

[6] 赵玺灵, 付　林, 江　亿. 天然气供热中烟气余热利用的潜力及途径[J]. 区域供热, 2013(3): 41-45.
Zhao Xiling, Fu Lin, Jiang Yi. Potential and approach of flue gas waste heat utilization in natural gas heating[J]. District Heating, 2013(3): 41-45.

[7] 时国华, 刘彦琛, 李晓静, 等. 天然气烟气余热高效回收技术研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 1-9.
Shi Guohua, Liu Yanchen, Li Xiaojing, et al. Research advances on waste heat recovery technology of natural gas-fired fuue gas[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 1-9.

[8] 张群力, 牛　宇, 孙东晗, 等. 喷淋塔式烟气冷凝余热回收与低氮排放协同处理系统实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2321-2327.
Zhang Qunli, Niu Yun, Sun Donghan, et al. Experimental study on the synergetic treatment for waste heat recovery and low nitrogen emission from spray tower flue gas[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2321-2327.

[9] 张群力, 王明爽, 矫育青, 等. 喷淋式助燃空气加湿型烟气冷凝余热回收系统实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 123-129.
Zhang Qunli, Wang Mingshuang, Jiao Yuqing, et al. Experimental research on spray type flue gas condensation waste heat recovery system integrating combustion air humidification[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 123-129.

[10] 顾煜炯, 耿 直, 谢 典, 等. 电厂循环冷却水余热利用分析[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 35-40.
Gu Yujiong, Geng Zhi, Xie Dian, et al. Analysis of waste heat utilization of circulating cooling water in power plant[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 35-40.

[11] Xu Z Y, Gao J T, Mao H C, et al. Double-section absorption heat pump for the deep recovery of low-grade waste heat[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220: 110-113.

[12] Ramperz M, Epelde M, Gomez de Arteche M, et al. Performance evaluation of an ORC unit integrated to a waste heat recovery system in a steel mill[J]. Energy Procedia, 2017, 129: 535-542.

[13] Li Y, Wang W, Ma Y, et al. Study of new cascade heating system with multi-heat sources based on exhausted steam waste heat utilization in power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 475-483.

[14] 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, 2008, 48(9): 40-42.
Fu Lin, Jiang Yi, Zhang Shigang. Cogeneration district heating method based on Co-ah cycle[J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(9): 40-42.

[15] 方 豪, 夏建军. 降低热网回水温度对工业余热利用系统热利用率的影响[J]. 区域供热, 2015(4): 18-22.
Fang Hao, Xia Jianjun. Effect of reducing the temperature of backwater of heat network on the heat utilization rate of industrial waste heat utilization system[J]. District Heating, 2015(4): 18-22.

[16] 方 豪. 低品位工业余热应用于城镇集中供暖关键问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
Fang Hao. Research on the issues of low-grade industrial waste heat utilization for distric heating[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[17] 李 锋, 端木琳, 付 林, 等. 烟气-水直接接触式换热性能研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(12): 91-96.
Li Feng, Duan Mulin, Fu Lin, et al. Study on heat transfer performance of direct contact flue gas to water[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(12): 91-96.