

doi:10.3969/j.issn.1009-671X.201209017

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20130130.1333.002.html>

火力发电厂余热利用与热泵技术

刘福秋^{1,2}, 王修彦¹, 蔡文汇¹

1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206

2. 开滦集团有限责任公司 范吕社区服务中心, 河北 唐山 063100

摘 要: 电厂循环冷却水中含有大量的低位热能, 采用热泵技术, 可以将这部分热能回收利用. 结合实际, 分析了热泵技术在热电厂余热利用中的实际应用, 通过此项技术, 可使电厂节能率达 32.8%, 年节省蒸汽折算效益达 2 580 万元, 静态成本回收期仅为 2.4 a; 同时每年冬季可节省标煤 16 360 t, 大量减少了有害气体的排放, 可以有效地实现电厂的经济效益与节能减排.

关键词: 热泵; 循环冷却水; 余热利用; 节能减排

中图分类号: TK262

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X (2013) 01-0068-04

Waste heat utilization and heat pump technology in thermal power plant

LIU Fuqiu^{1,2}, WANG Xiuyan¹, CAI Wenhui¹

1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. Fan Lü Community Service Center, Kailuan Group Co., Ltd., Tangshan 063100, China

Abstract: There is a large amount of low heat energy in circulating cooling water of thermal power plant. It can be recovered by the heat pump technology. This paper analyses the practical application of heat pump technology in thermal power plant waste heat utilization. The energy-saving rate of this power plant is up to 32.8%. The conversion cost of saving steam is 25.8 million yuan per year. The static payback period is only 2.4 years. The saving standard coal consumption is 16360t per year in winter days, which can reduce the emission of harmful gases at the same time. It can effectively realize the economic benefits and energy saving and emission reduction of thermal power plant with the technology.

Keywords: heat pump; circulating cooling water; waste heat utilization; energy saving and emission reduction

火力发电厂生产中都含有大量余热, 这些余热存在于锅炉排污、除氧器排气、电厂循环冷却水等过程中. 这些热量在生产过程中被排放到大气中, 不仅降低了电厂的热能效率, 还对环境造成一定的污染. 在我国, 大型火电厂的实际热效率为 40%, 约 60% 的热量被凝汽器循环冷却水带走排到环境中^[1]. 电厂循环冷却水的温度多在 20~50℃, 属于低品位能源, 所含能量较多. 而目前余热利用作为一种新的能源节约方式, 在我国火力发电厂项目改造中越来越受到重视. 如何开展高效的余热利用技术研究成为提高节能效率的关键. 热泵技术在余热利用方面有着重要的作用, 在提高电厂能效的同时, 还能起到减少污染物排放的作用, 对于促进电厂余热利用和节能减排意义重大.

1 热泵及其工作原理

1.1 热泵的组成

热泵是一种能使热量从低温物体转移到高温物体的能量利用装置. 文中所涉及的水源热泵系统主要由 3 部分组成: 1) 热泵的驱动能源(电能)和驱动装置(电机、发动机等); 2) 热泵的工作机; 3) 低位热源(低温水)^[2]. 恰当地利用热泵可以把那些不能直接利用的低温热能变为有用的热能, 从而提高热能利用率, 节约大量燃料. 火电厂循环冷却水中的余热利用中, 采用水源热泵, 从冷却水余热中抽取热量加热工质, 从而减少燃煤的消耗, 提高系统的热利用率, 达到节能减排的目的.

1.2 热泵的工作原理

根据热力学第二定律, 热量不会自发地从低温物

收稿日期: 2012-09-23. 网络出版日期: 2013-01-30.

作者简介: 刘福秋(1972-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 火力发电设备运行优化与节能, E-mail: liufuqiu028@163.com.

体传导到高温物体, 而不引起其他变化. 所以在热泵工作过程中, 需要消耗一部分高品位能量, 将热量从低温热源中抽取再传导至高温热源. 假设在热泵工作中, 从低温热源吸收的热量为 Q_2 , 热泵的功耗为 W , 则热泵向高温热源输出的总热量为 $Q_1=Q_2+W$. 热泵的工作效率可由性能因数 (C) 或者供热因数来评价. 其中:

$$C = \frac{Q_1}{W} \quad (1)$$

在冬季热泵供热运行时, 当冷凝温度一定时, 热泵性能系数 C 取决于低位热源温度的高低, 热泵供热量 Q_1 则与流量和对应温差有关. 当冷凝温度一定时, 如果热源的的平均温度提高 5~10, 热泵装置的效率可以提高 10%~15%. 可见在火力发电厂冷却循环水中采用热泵技术对余热进行回收利用, 对于电厂节能有重大意义.

2 热泵技术在电厂中的应用

火力发电厂中冷凝循环水的水质清洁、流动稳定且温度较高, 采用热泵设备改造相对简单, 且 COP 的值可以相对较高. 虽然改造需要一定的初投资, 且热泵运行需要消耗一定的电量, 但是改造后热泵设备自动化程度高, 易于运行管理, 同时效率较高, 能使电厂在短期内回收投资成本, 有效改善电厂运行状况.

回收电厂冷凝热的热泵需要满足以下几个条件^[3]:

1) 高温水源热泵

电厂冷凝热品位低. 由于对 35 左右的冷却水难以直接利用, 必须用热泵技术将温度提升到一定值, 一般热泵热水出口温度为 40~50, 对采暖而言, 水温一般要求提高到 70~80. 因此热电厂冷凝热回收需要高温水源热泵.

2) 大容量大温差热泵

由于电厂冷凝热具有量大、集中的特点, 用热泵回收的冷凝热在电厂附近找不到足够的热用户, 必须远距离输送, 满足远方用户的要求, 因而需要大容量大温差热泵集中供热, 单机容量在 20~30 MW 以上, 热水温差在 20 以上, 冷水温差在 8 左右.

3) 高制热系数水源热泵

为提高热泵集中供热系统的经济性, 需要选择制热能效比大于 4 的热泵机组.

目前, 国内开展余热利用的电厂较少, 仅占火电厂总数的 16%, 而其中 87% 的电厂主要利用方式是水产养殖, 热利用量极少, 且效率十分低下^[4]. 在火电厂循环冷却水中采用热泵技术供热, 可以有效提高电

厂热效率, 达到节能减排的目的. 在采用热泵技术后, 从循环水中吸收的热量计算如下:

$$Q_c = m_c (h_o - h_i).$$

式中: m_c 为凝汽器循环水流量, m^3/h ; h_o 和 h_i 为凝汽器出口和进口水焓, kJ/kg , Q_c 为凝汽器循环水带走的热量, MJ/h .

确定电厂冷凝水吸收热泵的供热量之后, 可得到节省煤量 M_1 :

$$M_1 = \frac{Q_c}{\eta_1 K}.$$

式中: M_1 是节省煤量, t/h ; η_1 是锅炉效率; K 为煤的发热量, kJ/kg .

通过式 (1) 可得热泵功耗 $W = Q_c / COP$ (MJ/h); 则可得到热泵煤耗量 M_2 (t/h):

$$M_2 = \frac{W}{\eta_2 K}.$$

式中 η_2 是电厂发电效率.

所以, 采用热泵回收之后, 可得节煤量 $M^{[5]}$.

$$M = M_1 - M_2.$$

3 电厂余热利用与热泵改造工程应用

在火力发电厂有关热泵改造中, 多采用热电-热泵联合循环. 这种循环是指利用热泵装置将低品质的循环冷却水中的余热提升为高品质的可供用户利用的热能后, 输送到需要用能的场所, 即将热电正循环和热泵逆循环联合起来^[6].

以河北某热电厂余热回收供暖为例. 该电厂有 3 台 2.5 万 kW 的抽汽凝汽式机组. 冬季供暖消耗蒸汽量约为 300 t/h , 改造前该厂的抽汽供热量已经达到了机组的极限, 运行不太稳定. 采用低温余热回收技术, 能将该热电厂原来排放到环境中的循环水的余热回收, 经过余热回收机组的加热后用于冬季采暖回水的加热, 可节省用于供暖的蒸汽量, 而节省的蒸汽又可用于扩大供热面积产生收益, 同时也可使机组处于安全的运行工况下.

热电厂的余热源有 2 种, 一是电厂的冷却循环水; 二是锅炉的排污热水 (100 左右, 但量比较少, 不连续). 改造中使用冷却循环水的余热. 该水源目前在冬季进出冷却塔的水温是 30/20, 每台循环水泵给水流量为 3 300 m^3/h , 有 3 台冷却循环水泵, 水质干净, 是非常好的余热资源. 同时, 3 台汽轮机组冷却循环水的总流量为 9 900 m^3/h , 余热若按照温差 10 提取, 可回收的余热量为

$$Q = G \cdot C \cdot \Delta T = 115 \text{ MW},$$

若按照采暖指标 60 W/m^2 来计算, 该余热全部开发出来可扩大供暖 192 万 m^2 , 余热资源较大, 具有较高的节能潜力.

在冬季该热电厂实行抽汽供暖兼顾发电, 供暖采用市政热网的形式, 分为首站和二级站. 首站设在热电厂内, 采用汽水换热器的方式, 设备有 2 台, 为管壳式. 换热过程分 2 次, 一次侧是从汽机中直接抽汽加热回水, 该蒸汽为过热蒸汽, 压力约为 0.33 MPa , 消耗量约为 300 t/h , 凝结水回收进除氧器; 二次侧则采用汽机抽汽供暖之后的热水加热回水, 参数为 $110 \sim 97/70 \sim 60$, 流量为 4000 t/h , 供回水压力为 $0.32/0.07 \text{ MPa}$. 首站的泵房有 4 台供热水泵并联, 共用一根回水母管, 供回水管道为 $\text{DN}900$; 二级站个数约有 20 多个, 分布在方圆 2.5 km 内的不同小区, 内设有板式换热器和热水循环泵, 供回水温度一般是 $70/50$.

冬季首站蒸汽为压力 0.33 MPa 、温度约 146 的过热蒸汽, 采暖蒸汽耗量为 300 t/h , 折算成热量约为 186 MW , 若按照采暖指标 60 W/m^2 来计算, 再考

虑到输送损失, 供暖面积约为 310 万 m^2 . 电厂循环水水侧参数如表 1.

余热利用改造中, 从汽机中蒸汽压力为 0.33 MPa 处抽汽, 作为驱动热源, 从 $30/20$ 的循环水中提取热量, 来给首站换热器二次侧的 60 回水加热到 75 后再进入首站换热器, 再用部分 0.33 MPa 的抽汽将这些回水加热到 $100 \sim 110$ 后再去供暖, 其流程如图 1 所示.

表 1 循环水参数

参数名称	数值	
制热量/kW	24 000.0	
热媒水	水温度/ 入口: 60, 出口: 75	
	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1375.8
	压力损失/Pa	140.0
余热水	水温度/ 入口: 30, 出口: 25	
	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1642.0
	压力损失/Pa	120.0
蒸汽	蒸汽量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	17 620.0
	入口压力/MPa	0.33

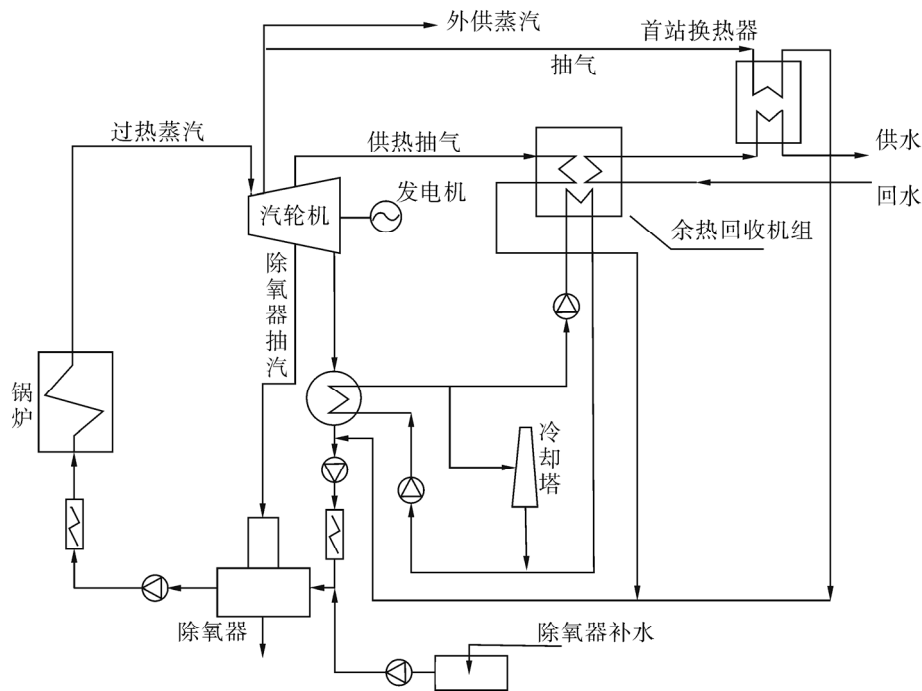


图 1 系统流程

按照采暖负荷峰值为 186 MW , 通过增加余热回收利用系统可以减少蒸汽的消耗量. 在机组供热时, 供热过程被分为 2 个阶段: 1) 余热回收机组加热阶段, 把 $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ 的供热水从 60 升高到 75 ; 2) 蒸汽加热阶段, 供热水温从 75 升高到 100 . 通过计算

可知, 2 个阶段承担的负荷分别为 70 MW 和 116 MW . 前一个阶段需要消耗蒸汽约为 52 t/h , 后一阶段需要消耗的蒸汽为 187 t/h , 两者合计为 239 t/h . 相比原来采用蒸汽直接供热所用 300 t/h 蒸汽量, 可节省蒸汽 61 t/h , 节能率可达到 $61/300=32.8\%$, 效果相当显著.

4 余热利用与热泵改造分析

4.1 经济性分析

蒸汽的价格为 54 元/GJ,电价为 0.5 元/kWh. 同时按照蒸汽节省量为 61 t/h,供热采暖抽气压力为 0.33 MPa(饱和蒸汽热值为 2720 kJ/kg),每年运行 4 个月 120 天,每天 24 小时计算,可得结果如下.

1) 热效益.

每年节省蒸汽 $61 \times 24 \times 120 = 175\ 680$ t,则每年节省蒸汽的总热值为

$$175\ 680 \times 1\ 000 \times 2\ 720 \times 1\ 000 / 1\ 000\ 000\ 000 = 477\ 849.6\ \text{GJ};$$

则每年节省蒸汽的效益为

$$477\ 849.6\ \text{GJ} \times 54 / 10\ 000 = 2580\ \text{万元}.$$

2) 节水效益.

循环水冷却塔存在飘水损失,一般为水流量的 1.5%. 采用余热回收改造后,由于冷却循环水上塔的水温比原来降低了 5℃,所以可减少飘水损失. 这一部分的节能收益可以进一步进行计算和统计.

3) 循环水泵消耗功率降低.

由于冷却循环水不用再爬上塔,所以其循环所消耗的电功率可大大减少. 因此,原来所消耗的功率和余热水泵所消耗的功率之差就成为节省的功率.

4) 凝结水泵得收益

由于每小时可以减少排凝结水 61 t/h,则可以节省水泵功率和热损失.

据统计,余热利用项目改造的投资约为 5 988 万元,每年节能的收益通过计算为 2 580 万元,所以项目的静态成本回收期为 $5\ 988 / 2\ 580 = 2.4$ 年.

4.2 环保效益分析

据统计,每节约 1 kWh 的电耗,相应节约 0.4 kg 标准煤,同时减少排放 CO_2 0.997 kg、 SO_2 0.03 kg、 NO_x 0.015 kg 和碳粉尘 0.272 kg. 通过计算,每节省 4.3 kg 蒸汽消耗相当于节省了 1 kWh 的电耗. 在采取余热节能改造之后,可节省蒸汽 61 t/h,折合成每年节省的电为

$$61 \times 1\ 000 \times 24 \times 120 / 4.3 = 4.09 \times 10^7\ \text{kWh}.$$

将上述节省的电量折合为标煤,经计算,每年冬季可节省标煤消耗为 16 360 t,可少排放 CO_2 40 777 t, SO_2 1 227 t, NO_x 614 t, 粉尘 11 125 t,起到非常有效的节能减排作用.

5 结 论

通过对该热电厂余热回收利用实际的分析,可以得到以下结论:

1) 在火力发电厂余热利用与热泵改造中,采用热泵技术可以有效提高一次能源的使用率,在提高电厂能源利用率的同时,还能促进节能减排,实现环境效益.

2) 采用热泵技术对余热进行回收,因为需要一定的初投资,且对相关设备进行改造,需要结合电厂的实际生产情况和效益. 但是此项技术仍具有很广阔的发展前途.

3) 此项技术可以促进电厂机组的稳定运行,同时有利于缓解电厂供电供热压力.

4) 由于热泵对其所需低位热源的能源品位要求不高,所以理论上,此项技术在电厂生产过程中,对大部分产生的余热均可实现有效回收利用,但是其环境效益、经济效益、工程意义需要进一步的计算和实践.

参考文献:

- [1] 刘学飞. 热泵技术在火电厂节能应用的探讨[J]. 冶金动力, 2010(6): 26-28.
- [2] 冉春雨, 李阳, 王春青. 电厂冷却水余热用于住宅供热的讨论[J]. 环境工程, 2009(27): 234-237.
- [3] 苏保青. 用热泵回收电厂冷凝热集中供热技术研究[J]. 山西能源与节能, 2007(3): 18-19.
- [4] 贺益英, 赵懿珺. 电厂循环冷却水余热高效利用的关键问题[J]. 能源与环境, 2007(6): 27-29.
- [5] 钱海燕, 李素英. 轻烧氧化镁水动力学[J]. 化学矿物与加工, 2007(12): 1-4.
- [6] 吴佐莲, 刘小春, 王萌, 等. 利用热泵技术回收热电厂余热的可行性与经济分析[J]. 山东农业大学学报, 2008, 39(1): 62-68.