

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-351-04

# 大型自配胶球装置溴化锂吸收式热泵 余热供热系统超定拟合研究

周崇波<sup>1,2</sup> 鲍官军<sup>1</sup> 高峰<sup>1</sup> 叶智<sup>2</sup> 杨庆华<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 杭州 310006; 2. 华电电力科学研究院有限公司 杭州 310030)

**【摘要】** 以大型自配胶球装置溴化锂吸收式热泵余热供热系统为研究对象, 基于近三个采暖季运行数据, 选取各采暖季中热网循环水及余热循环水流量接近设计值的 8 个工况, 建立超定函数模型, 并通过 MATLAB 采用最小二乘拟合进行理论计算, 结果表明, 热网水进水温度每降低 1℃, 热泵供热量提高 1.37%, 余热水进水温度每升高 1℃, 热泵供热量提高 7.93%, 驱动蒸汽压力每降低 0.01MPa, 热泵供热量降低 3.99%, 回收余热降低 10.33%。该定量拟合研究结果对火电厂大型吸收式热泵余热供热系统设计及优化运行具有重要的指导意义。

**【关键词】** 余热利用; 吸收式热泵; 胶球清洗; 理论拟合; 超定方程组  
中图分类号 TK11+5 文献标识码 A

## An Application Study of Waste Heat Utilization by an Absorption Heat Pump System with Self-equipped Rubber Ball Device in 300MW Thermal Power Plant

Zhou Chongbo<sup>1,2</sup> Bao Guanjun<sup>1</sup> Gao Feng<sup>1</sup> Ye Zhi<sup>2</sup> Yang Qinghua<sup>1</sup>

(1. Zhejiang University of technology, Hangzhou, 310006; 2. Hua Dian Electric Power Research Institute, Hangzhou, 310030)

**【Abstract】** An application study was performed for an absorption heat pump system with self-equipped rubber ball device, which can recover waste heat from open circulating water in a 300MW thermal power plant. The eight working conditions, in which the flow rates of heat-supply water and circulating water were close to the design values, were selected to make overdetermined equations. Using least squares fitting through MATLAB, the results showed that the heat pump heating load can be increased by 1.37%, as the inlet temperature of heat-supply water decreases by 1℃; the load increases by 7.93% when the inlet temperature of circulating water increases by 1℃. The heat pump heating load reduces by 3.99% and the recovery of waste heat by 10.33%, as the driven steam pressure decreases by 0.01MPa.

**【Keywords】** waste heat utilizing; absorption heat pump; rubber ball cleaning; simulation calculation; overdetermined equation

## 0 引言

当前, 我国经济发展步入新常态, 能源发展质量和效率问题突出, 供给侧结构性改革刻不容缓。“十三五”能源规划的主要目标提出单位国内生产总值能耗比 2015 年下降 15%, 单位国内生产总值二氧化碳排放比 2015 年下降 18%, 煤电平均供电煤耗下降到

每千瓦时 310 克标准煤以下。传统抽汽热电联产机组虽然较纯凝机组的能源利用效率高、环保效益好, 但仍有部分冷凝余热通过冷却或其他方式塔散失掉, 以一台 300MW 供热机组为例, 其可资利用冷端潜热约占燃料耗能总量的 10%, 充分利用这部分余热是传统热电联产突破发展的新方向。

作者简介: 周崇波 (1984-), 男, 研究生, 高级工程师, E-mail: zhouchongbo122@126.com

通讯作者: 杨庆华 (1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

收稿日期: 2018-08-06

### 1 余热利用技术

目前，余热供热已具有多种可选技术，通过压缩式热泵技术<sup>[1]</sup>、水冷机组吸收式热泵技术<sup>[2]</sup>、空冷机组吸收式热泵技术<sup>[3]</sup>、基于 Co-ah 循环技术<sup>[4]</sup>、高背压真空改造技术<sup>[5]</sup>等，突破传统抽汽供热的局限，在发电功率等级不变的前提下，充分利用冷端余热，提升供热能力。清华大学基于吸收式热泵回收循环水余热的大温差供热技术<sup>[6]</sup>先后在内蒙古赤峰及山西大同等电厂实施，大大提高了其供热能力；北京、黑龙江等地多家电厂采用吸收式热泵机组回收循环水余热用于供热项目具备了良好的经济效益和社会效益<sup>[7]</sup>。

近年来，对吸收式热泵技术的研究方兴未艾，主要从理论模拟与试验研究两方面入手，如郭中旭等人采用 Epsilon 软件建立 2×350MW 耦合吸收式热泵的供热机组模型并进行变工况分析<sup>[8]</sup>，刘刚建立吸收式热泵热经济性计算模型，并研究了热泵投切的负荷转折点<sup>[9]</sup>，赵玺灵等人研究评价热泵对燃气烟气余热供热的节能效果<sup>[10]</sup>，王斌等人对乏汽吸收式热泵进行了动态特性实验<sup>[11]</sup>，周崇波等人对大型吸收式热泵系统进行试验研究<sup>[12]</sup>。本文以 300MW 开式循环水自配置胶球清洗装置吸收式热泵余热供热系统为研究对象，通过近三年采暖季历史数据分析其供热方式和节能效果，并建立超定函数模型探讨三个主要边界条件对热泵功率及提取余热能力的定量影响。

### 2 系统构成及现状

本文原则性系统图如图 1 所示，现场布置图如图 2 所示，300MW 开式循环水自配胶球装置吸收式热泵系统在原 300MW 抽汽供热机组基础上，将部分采暖抽汽作为大型吸收式热泵机组的驱动热源，驱动热泵回收汽轮机排汽冷凝热，加热市政一次热网回水，供暖初末期取代原热加热器供热，供暖高寒期作为基础负荷供热。本系统的循环水采用开式，直接取自江水，本系统通过将胶球清洗装置嵌入吸收式热泵系统在线实时清洗淤泥、微生物等在传热管中的堵塞，从而增加循环水通流量，提高换热效率，使得大型吸收式热泵机组提取循环水余热增加近一倍<sup>[13,14]</sup>。

热泵机组启动时自动启动胶球清洗装置，在抽汽量一定的情况下，由于新增了从循环水中回

收的余热，系统供热能力增强，并带来良好的节能收益和社会效益。表 1 列出了各采暖季每月实际回收余热量，统计计算年均回收循环水余热 169 万吉焦，按当地近年燃烧煤种热值计算，相当于年节煤 10.12 万吨，按照标煤热值计算，相当于节煤 5.78 万吨，根据有关资料<sup>[15]</sup>，经计算，减少排放二氧化碳 2.54 万吨，减少排放二氧化硫 1156 吨，减少排放烟尘 867 吨，减少排放灰渣 1.5 万吨。

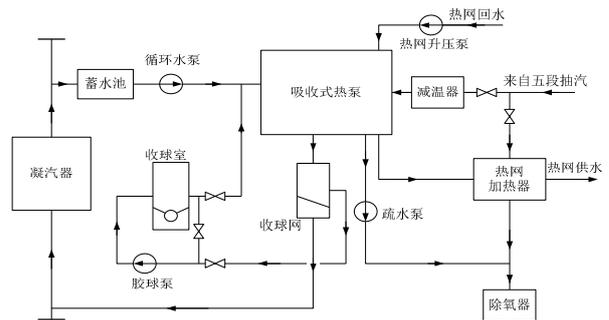


图 1 自配置胶球清洗装置余热供热原则性系统图

Fig.1 The principle systematic diagram



图 2 自配置胶球清洗装置吸收式热泵余热供热系统现场布置图

Fig.2 The site layout of heat pump system

表 1 近三个采暖季每月实际回收余热量（单位：GJ）

Table 1 The recovery heat load in nearly three heating seasons (GJ)

采暖季	2014-2015	2015-2016	2016-2017
10 月份	128501.6	84329	159775.6
11 月份	262068.8	328398.1	361289.8
12 月份	257551.6	389635.5	332127.4
1 月份	280160.3	377913.7	293972.7
2 月份	279394.4	346449.8	223081.1
3 月份	230479.3	271294.4	220734.7
4 月份	80543.8	89143.2	84843.5

### 3 超定拟合研究

近三个采暖季热泵系统的各边界参数表 2 所示, 热网进水温度较设计值低, 余热水进水温度较设计值略高, 都是有利于系统整体性能提升, 但驱动蒸汽压力偏低, 降低了系统出力。

表 2 近三个采暖季三个主要边界条件差异表

Table 2 The three main boundary conditions in nearly three heating seasons

边界参数\采暖季	2014-2015	2015-2016	2016-2017	设计值
热网水进水温度/℃	46.30	43.94	48.28	60
余热水进水温度/℃	34.88	36.77	40.34	35
驱动蒸汽压力/MPa	0.22	0.30	0.33	0.37

表 3 列出了各月回收余热占热泵供热量的比例, 平均占比 36.63%, 理论设计值为 42.39%, 差距约 6%, 结合表 2 分析原因, 虽然热网水及余热水进水条件有利于提取余热, 但由于驱动蒸汽压力偏低造成负面影响, 而且驱动蒸汽压力要大于其余两个边界参数对热泵系统出力及提取余热能力的影响, 因此总体回收余热在热泵供热量中还是没有达到设计值。

表 3 近三个采暖季回收余热占热泵供热量比例表

Table 3 Proportion of recovery waste heat from circulating water in heat pump

采暖季	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
2014-2015	40.23%	39.53%	38.61%	39.94%	37.98%	34.19%	31.19%
2015-2016	33.43%	49.34%	34.34%	29.77%	34.26%	41.77%	46.86%
2016-2017	44.47%	37.51%	28.09%	25.66%	26.13%	38.72%	37.29%
平均值	39.38%	42.13%	33.68%	31.79%	32.79%	38.23%	38.45%

为了进一步研究三个主要边界条件对热泵出力及提取余热能力的定量影响, 本文筛选出每个采暖季中热网循环水及余热循环水流量接近设计值的工况, 从而最大限度排除流量对热泵供热量与回收余热量的影响, 共选取了 8 个工况, 如表 4 所示。

表 4 选取的实际运行工况表

Table 4 The actual operating conditions

参数	热网水温 /℃	余热水温 /℃	蒸汽压 /MPa	供热量 /MW	余热量 /MW
工况一	59.42	38.82	0.3003	249.75	96.43
工况二	56.42	39.05	0.3035	261.48	104.43
工况三	49.97	41.80	0.3397	423.43	145.41
工况四	52.40	43.44	0.3493	474.01	141.09
工况五	53.31	43.30	0.3444	441.13	123.90
工况六	54.36	42.67	0.3406	427.30	109.64
工况七	49.07	39.72	0.2932	304.88	115.79
工况八	49.51	42.92	0.3603	403.78	138.33

分别对热网水进水温度降低、余热水进水温度升高、驱动蒸汽压力降低三个边界条件参数变化引发热泵供热量与回收余热量组成超定方程组, 将三个边界条件作为自变量, 热量作为因变量, 构造函数。

假设:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})^T \in R^{n \times m} \quad (1)$$

$$Y_i = f(X_i), i = 1, 2, \dots, m$$

上式 (1) 中  $X_i$  表示选取的工况,  $x_{ik}$  表示第  $i$  种工况中边界参数与设计值偏差量,  $Y_i$  表示第  $i$  种工况热泵供热量或回收余热量与设计值的偏差量。本文在以上给定的原始数据基础上, 拟求解一个线性依赖于某影响参数向量:

$$b = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T \quad (2)$$

使得:

$$F(b, X) = \sum_{j=1}^k b_j \phi_j(x) = [\phi(x)]^T b \quad (3)$$

其中:  $\{\phi_i(X)\}_1^n$  为  $n$  个线性无关的基函数。

上式 (3) 并不存在精确解, 求解过程应使其误差向量  $r(b)$  的  $L_p$  模极小化, 即求向量  $b$  使得:

$$\left( \sum_{i=1}^m |r_i|^p \right)^{1/p} = \|y - \tilde{F}(b, X)\|_p = \min_{b \in R^n} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 y &= (y_1, y_2, \dots, y_m)^T \in R^m \\
 b &= (b_1, b_2, \dots, b_n)^T \in R^n \\
 \tilde{F}(b, X) &= (F(b, X_1), \dots, F(b, X_m))^T \in R^m \\
 r(b) &= y - \tilde{F}(b, X) = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T \in R^m \quad (5)
 \end{aligned}$$

当式(4)中  $p=2$ , 即为最小二乘解。最小二乘解虽然可使总体误差较小, 但可能使个别点的误差过大, 超过允许值, 本文采用直接修正法<sup>[6]</sup>降低最大误差, 从而使超定方程组的解得到优化。假设  $X^0$  是超定方程组的初始解, 不妨设前  $k$  个点误差最大, 即:

$$|r_i^0| = \dots = |r_k^0| > |r_{k+i}^0| \quad (6)$$

其中:  $i \geq 1, k \leq n$ 。

设:

$$X^1 = X^0 + \lambda(\Delta X) \quad (7)$$

其中  $\lambda > 0$ , 为步长因子,  $\Delta X$  为  $X^0$  的修正方向, 修正量  $\lambda(\Delta X)$  根据下式(8) - (10) 进行选取:

$$Sgnf(\Delta X_i) = -Sgnr_i(X^0), 1 \leq i \leq k \quad (8)$$

$$0 < \lambda \leq \max |r_i^0|, 1 \leq i \leq k \quad (9)$$

$$0 < \lambda \leq \frac{\max |r_i^0|_1^k - |r_i^0|_{k+1}^m}{|f(\Delta X_i)|_{k+1}^m} \quad (10)$$

其中:  $Sgn$  为符号函数。

在求解式(2)边界参数对热泵供热量影响的拟合过程中, 对未知数直接赋予非负条件, 而在求解对回收余热量影响的拟合过程中, 对未知数需赋予不小于影响热泵供热量的参数值。

基于 MATLAB 最小二乘拟合计算, 结果表明, 热网水进水温度每降低  $1^\circ\text{C}$ , 热泵供热量提高 1.37%; 余热水进水温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 热泵供热量提高 7.93%; 驱动蒸汽压力每降低 0.01MPa, 热泵供热量降低 3.99%。热网水进水温度降低和余热水进水温度升高  $1^\circ\text{C}$ , 在输入条件限制下, 对回收余热量的影响与对热泵供热量的影响一致, 但驱动蒸汽压力每降低 0.01MPa, 回收余热量降低 10.33%。

#### 4 结论

本文针对 300MW 开式循环水自配胶球装备吸

收式热泵余热供热系统进行了系统研究, 对重要边界条件定量影响热泵出力及提取余热能力进行了理论拟合分析。

(1) 本系统自配置胶球清洗在线装备大型吸收式热泵系统尚属国内第一次集成应用, 基于近三个采暖季的历史运行数据分析, 年均回收余热量 169 万吉焦, 按当地近年燃烧煤种热值计算, 相当于年节煤 10.12 万吨; 按照标煤热值计算, 相当于节煤 5.78 万吨, 减少排放二氧化碳 2.54 万吨, 减少排放二氧化硫 1156 吨, 减少排放烟尘 867 吨, 减少排放灰渣 1.5 万吨。

(2) 选取每个采暖季中热网循环水及余热循环水流量接近设计值的 8 个工况, 建立超定函数, 并通过 MATLAB 采用最小二乘拟合计算, 结果表明, 热网水进水温度每降低  $1^\circ\text{C}$ , 热泵供热量提高 1.37%, 余热水进水温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 热泵供热量提高 7.93%, 驱动蒸汽压力每降低 0.01MPa, 热泵供热量降低 3.99%, 回收余热量降低 10.33%。该结果表明驱动蒸汽压力对提取余热能力的影响至为关键, 余热水进水温度对系统出力和提取余热能力的影响小于驱动蒸汽压力的影响。

#### 参考文献:

- [1] 王宝玉, 周崇波. 热泵技术回收火电厂循环水余热的研究[J]. 现代电力, 2011, 4: 73-77.
- [2] 鲁敬妮, 屠珊, 王红娟, 等. 吸收式热泵回收机组余热经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 136-140.
- [3] 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.
- [4] 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, 48(9): 1377-1380.
- [5] 王学栋, 姚飞, 郑威, 等. 两种汽轮机高背压供热改造技术的分析[J]. 电站系统工程, 2013, 29(2): 47-50.
- [6] 张世钢, 付林, 李世一, 等. 赤峰市基于吸收式换热的热电联产集中供热师示范工程 [J]. 暖通空调, 2010, 40(11): 71-75.
- [7] 周崇波, 赵明德, 郑立军, 等. 新型带吸收式热泵热电联产机组的技术经济分析[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 61-63.
- [8] 郭中旭, 戈志华, 赵世飞, 等. 耦合吸收式热泵机组变工况分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(2): 25-32.

(下转第 359 页)