

# 余热发电双压锅炉主、副汽参数干涉规律研究

王子兵 黄 博 常 建 秦万阔

(华北理工大学 冶金与能源学院 河北 唐山 063210)

**摘 要:** 在余热双压发电系统中, 压力式热力除氧器的除氧水箱兼做低压锅筒, 中压系统做功工质取自低压系统, 导致主、副汽参数存在复杂的内在耦合关系, 使得主、副汽参数的调节存在相互干涉现象。明确主、副汽蒸汽焓之间存在最佳焓分配关系, 是优化发电系统运行参数、提高系统发电效率的前提。以某余热发电系统为例, 建立一定热源条件下余热锅炉主、副汽参数干涉模型, 研究了主、副汽压力匹配对蒸汽参数、焓和焓效率的影响规律。论文的研究结果可以为余热发电双压锅炉主、副汽参数的运行优化提供指导。

**关键词:** 余热发电; 双压余热锅炉; 蒸汽参数; 运行优化

中图分类号: TK11+5; TK229.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-8764(2017)04-0054-04

doi: 10.13403/j.sjqt.2017.04.051

## Study on interference regularity of main and vice steam parameters of double pressure boiler for waste heat power generation

Wang Zibing, Huang Bo, Chang Jian, Qin Wankuo

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei)

**Abstract** In the waste heat double pressure power generation system, an oxygen removing water tank for a pressure type heat deaerator and a low-pressure boiler barrel, and the medium pressure system works from the low voltage system, thus lead to the mutual interference phenomenon exist in main and vice steam parameters because of the internal complex coupling relationship between each other. The clear optimum energy distribution relationship between the main and auxiliary steam energy is the premise of optimizing the operation parameters and improving the efficiency of power generation system of power system. Take a waste heat power generation system as an example, the interference regularity of main and vice steam parameters matching for steam parameters, energy and energy efficiency was studied through establishing a Interference model of main and vice steam parameters under the condition of the waste heat boiler. The guidance for optimizing operation of main and vice steam parameters in waste heat power generation boiler was provided by the research results in this paper.

**Key words** waste heat power generation; dual-pressure waste heat boiler; steam parameter; operation optimization

## 1 前 言

余热锅炉作为余热发电系统中的能量交换

设备,是系统整体优化的关键设备。已投运的烧结余热发电系统普遍存在吨矿发电量偏离系统设计值的问题<sup>[1]</sup>。目前,国内外针对余热锅

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0601403), 河北省自然科学基金项目(E2015209140), 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2015098)

作者简介: 王子兵(1966-),男,教授,主要从事低温余热发电技术和低阶煤提质方面的研究。

通讯作者: 黄 博(1990-),男,硕士研究生,研究方向: 冶金过程系统节能。

炉运行参数优化的研究较多。张福滨<sup>[2]</sup>等对水泥行业余热发电的双压、闪蒸等系统形式的配置方式进行了详细分析,并对各热力系统中蒸汽参数问题进行了研究;赵斌<sup>[3]</sup>等对环冷机双压余热锅炉进行焓分析并实施了参数优化。但目前缺乏蒸汽参数干涉模型做指导的优化策略<sup>[4,5]</sup>。本文以某公司双压余热锅炉为对象,建立了主、副汽参数干涉模型,研究了主、副汽匹配策略对蒸汽焓及锅炉焓效率的影响规律。

## 2 系统结构及基础参数

某公司已投产的烧结余热发电系统汽水流程如图 1 所示,其运行特点为中压锅筒的给水由低压锅筒提供,中、低压工质采用串联运行方式,中压系统工质取自低压系统。中压省煤器布置在低压过热器和低压蒸发器之间,受热面采用中、低压交叉布置。环冷机双压余热锅炉的设计参数如表 1 所示。

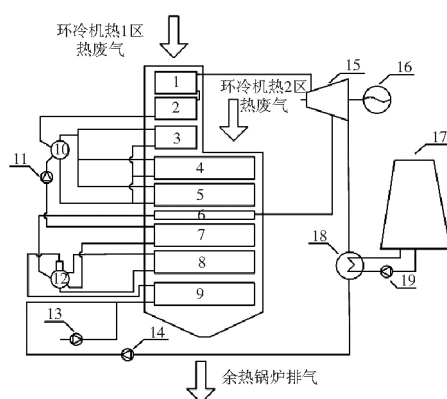


图 1 烧结余热发电系统汽水流程图

1 - 中压高温过热器; 2 - 中压低温过热器; 3 - 中压蒸发器 1; 4 - 中压蒸发器 2; 5 - 中压蒸发器 3; 6 - 低压过热器; 7 - 中压省煤器; 8 - 低压蒸发器; 9 - 凝结水加热器; 10 - 中压锅筒; 11 - 中压给水泵; 12 - 低压锅筒(带除氧器); 13 - 补水泵; 14 - 循环水泵; 15 - 补气凝汽式汽轮机; 16 - 发电机; 17 - 冷却塔; 18 - 冷凝器; 19 - 冷却水泵

表1 环冷机双压锅炉设计参数

烟 气				蒸 汽					
一 区		二 区		中 压			低 压		
温度	流量	温度	流量	压力	温度	流量	压力	温度	流量
/℃	/t·h <sup>-1</sup>	/℃	/t·h <sup>-1</sup>	/MPa	/℃	/t·h <sup>-1</sup>	/MPa	/℃	/t·h <sup>-1</sup>
380	230 000	380	230 000	2.1	360	30.1	0.5	205	8.8

### 3 蒸汽参数干涉模型

### 3.1 余热锅炉换热模型

根据图 1 将余热锅炉换热模型分为两部分建立: 低压过热器之前受热面称为“A 部分”, 低压过热器及之后的受热面称为“B 部分”。

### A 部分受热面热平衡模型:

$$\begin{aligned} \varphi G_1 (I_{11} - I_{31}) + \varphi (G_1 + G_2) (I_{31} - I_{61}) &= D_z \\ (h_{12} - h_{32}) + D_z (1 + \rho) (h_{32} - h_{72}) & \quad (1) \end{aligned}$$

### B 部分受热面热平衡模型:

$$\begin{aligned} \varphi( G_1 + G_2 ) ( I_{61} - I_{92} ) = D_f( h_{62} - h_{61} ) + D_z( 1 \\ + \rho ) ( h_{72} - h_{82} ) + ( 1 + \rho ) ( D_{cy} + D_f ) ( h_{82} - h_{81} ) + \\ ( ( 1 + \rho ) D_z + ( 1 + \rho ) D_f ) ( 1 + \rho ) ( h_{92} - h_{91} ) \quad ( 2 ) \end{aligned}$$

式中:  $\varphi$  为锅炉保热系数;  $G_1$ 、 $G_2$  分别为环冷机 1、2 区热废气流量,  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ;  $D_z$ 、 $D_f$  分别为中

压、低压蒸汽流量, t/h;  $\rho$  为锅炉排污率, %;  $I_{ij}$  中  $I$  为热废气焓值, kJ/Nm<sup>3</sup>, 第一个下角标  $i$  表示受热面位置, 第二个下角标  $j$  表示受热面热废气进出口编号  $j$  为 1 时表示入口  $j$  为 2 时表示出口;  $h_{ij}$  中  $h$  为工质焓值, kJ/kg, 第一个下角标  $i$  表示受热面位置, 第二个下角标  $j$  表示受热面工质进出口编号  $j$  为 1 时表示出口  $j$  为 2 时表示入口。受热面编号情况如图 1 所示。

### 3.2 蒸汽参数干涉模型

双压余热锅炉蒸汽温度、压力、流量三参数之间存在复杂的耦合关系。三个参数通过锅炉传热结构决定机制归一为单一参数,现以主副蒸汽压力为研究对象,研究蒸汽压力对蒸汽温度和流量的影响。表2和表3为某公司已投产的双压余热锅炉在额定热源条件下的热力计算

结果。其中:  $\varphi = 98\%$ ;  $\rho = 1\%$ ;  $t_{91} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 副汽压力为 0.3 MPa 余热锅炉蒸汽参数热力计算数据

压力 /MPa	中压		低压		排烟温度 / $^{\circ}\text{C}$
	温度 / $^{\circ}\text{C}$	流量 /t	温度 / $^{\circ}\text{C}$	流量 /t	
2.1	360.85	30.17	203.20	10.47	133.77
2	360.26	30.64	202.40	10.11	133.00
1.9	359.65	31.11	201.60	9.73	132.28
1.8	359.03	31.62	200.80	9.33	131.52
1.7	358.37	32.13	199.90	8.92	130.74
1.6	357.66	32.68	198.92	8.479	129.91

由表 2 可知,随着主汽压力的升高,主汽流量降低,副汽温度升高,副汽流量增加;锅炉排烟温度升高。主汽压力平均每升高 0.1 MPa,主汽温度升高 0.18%,主汽流量降低 1.62%,副汽

温度提高 0.62%,副汽流量增加 10.23%,排烟温度升高 0.74%。保持副汽压力不变,主汽压力的变化对副汽温度、流量的影响高于对主汽的影响。

表 3 主汽压力为 2.1 MPa 余热锅炉蒸汽参数热力计算数据

压力 /MPa	中压		低压		排烟温度 / $^{\circ}\text{C}$
	温度 / $^{\circ}\text{C}$	流量 /t	温度 / $^{\circ}\text{C}$	流量 /t	
0.3	360.85	30.17	203.20	10.47	133.77
0.4	360.65	30.28	210.07	8.96	138.58
0.5	360.55	30.39	214.43	7.71	142.54
0.6	360.44	30.49	218.03	6.63	145.93

由表 3 可知,主汽压力不变,随着副汽压力的升高,主汽温度降低而流量增加,副汽温度升高而流量减少,排烟温度升高。副汽压力平均每升高 0.1 MPa,主汽温度降低 0.02%,主汽流量升高 0.35%;副汽温度升高 2.43%,副汽流量降低 12.22%,排烟温度升高 2.99%。副汽压力变化对副汽温度和流量的影响程度比主汽明显;副汽压力的升高,副汽温度升高的程度小于流量减少的程度和排烟温度的升高程度。

### 3.2.1 蒸汽参数合一化模型

针对双压余热锅炉蒸汽温度、压力、流量三参数之间存在复杂的耦合关系和热力计算的繁琐性问题,以主副汽压力为自变量,主副汽温度、流量为因变量,采用最小二乘法建立以蒸汽参数合一化为基础的蒸汽参数干涉模型。得出如表 4 所示主副汽参数间相互关系的拟合公式表。

表 4 主、副汽压力变化对蒸汽参数的拟合公式表

拟合公式	相关系数
$T_z = f(P_z, P_f) = 0.807P_z^3 - 6.419P_z^2 + 21.876P_z - 2.683P_f^3 + 4.663P_f^2 - 4.037P_f + 336.633$	0.99
$D_z = f(P_z, P_f) = 0.165P_z^3 + 0.154P_z^2 + 21.876P_z - 2.683P_f^3 + 4.662P_f^2 - 4.037P_f + 336.633$	0.99
$T_f = f(P_z, P_f) = 1.906P_z^3 - 14.186P_z^2 + 42.853P_z + 142.786P_f^3 - 265.511P_f^2 + 196.068P_f + 119.940$	0.99
$D_f = f(P_z, P_f) = -0.261P_z^3 + 0.708P_z^2 + 4.186P_z - 11.731P_f^3 + 27.197P_f^2 - 30.046P_f + 7.893$	0.99

3.2.2 蒸汽参数干涉模型的验证

由表 5 的余热锅炉模型计算结果与设计参数可知,蒸汽参数干涉模型计算结果与锅炉设

计参数的相对误差在 5% 以内,符合工程计算要求。

表 5 余热锅炉模型计算结果与设计参数对比

项目	主汽			副汽		
	压力/MPa	温度/℃	流量/t·h <sup>-1</sup>	压力/MPa	温度/℃	流量/t·h <sup>-1</sup>
模型计算结果	2.2	361.2	29.9	0.48	214.4	8.4
设计蒸汽参数	2.1	360	30.1	0.5	205	8.8
相对误差/%	4.8	0.3	-0.7	-4	4.6	-4.5

4 工质压力变化对蒸汽做功能力的影响规律

以焓和焓效率作为衡量锅炉蒸汽做功能力的评价指标<sup>[6]</sup>,研究主、副汽压力变化对锅炉蒸汽做功能力的影响规律,确定额定热源条件下的蒸汽参数优化值。

4.1 主、副汽压力耦合变化对副汽做功能力的影响

图 2 是主、副汽压力变化对副汽做功能力的影响。由图可知,副汽压力一定时,副汽焓值随着主汽压力的升高而增大;主汽压力一定时,副汽焓值随着副汽压力的升高而降低,副汽压力每升高 0.1 MPa,副汽焓平均降低 9.36%,主汽压力每升高 0.1 MPa,副汽焓值平均增加 10.51%。

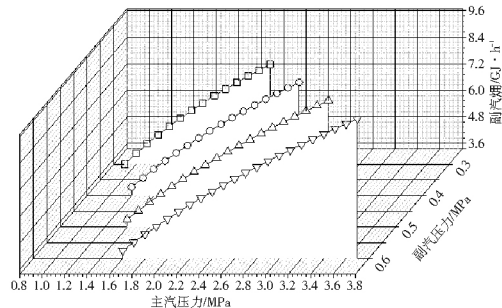


图 2 主、副汽压力变化对副汽做功能力的影响

4.2 主、副汽压力耦合变化对主汽做功能力的影响

图 3 为主、副汽压力变化对主汽做功能力的影响。由图可知,副汽压力一定时,主汽焓值随着主汽压力的升高而减小;主汽压力一定时,主汽焓值随着副汽压力的升高而增大。主汽压力每升高 0.1 MPa,主汽焓平均降低 0.88%;副

汽每升高 0.1 MPa,主汽焓值平均增加 0.34%。

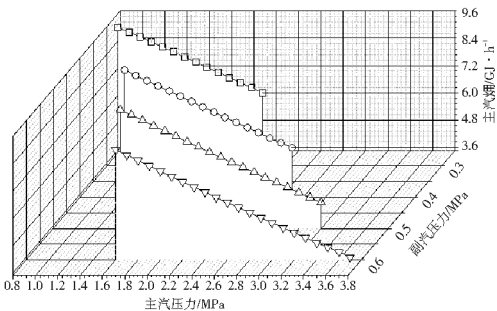


图 3 主、副汽压力变化对主汽做功能力的影响

4.3 主、副汽压力耦合变化对蒸汽总做功能力的影响

图 4 为主、副汽压力变化对蒸汽总做功能力的影响规律。由图可知,副汽压力一定时,蒸汽总焓值随着主汽压力的升高先升高后降低,蒸汽总焓最大值为 41.59 GJ/h,对应主汽压力 1.4 MPa,副汽压力 0.3 MPa。此时,蒸汽的做功能力最大、锅炉的焓效率最高,对应图 5 中最高焓效率 31.11%。其中主汽焓值为 36.14 GJ/h,占总焓值的 86%,副汽焓值为 5.45 GJ/h,占总焓值的 14%。蒸汽参数优化后的蒸汽总焓值与锅炉设计蒸汽参数下的蒸汽总焓值的比较结果如表 6 所示。可见,优化后的蒸汽总焓值较设计值提高了 3.56%。其中,主汽焓值所占比例增加 2.26%,副汽焓值所占比例减少 2.26%。

5 结 论

(1) 余热发电双压锅炉采用降低副汽运行压力的干涉手段,有利于增加蒸汽总焓值、提高锅炉焓效率。

(下转第 61 页)

表 2 环冷余热(平均吨矿发电量)提升效果(kW·h/t)

项目	2015 年	2016 年	2017 年 3~5 月
5 <sup>#</sup> 烧结机	11.68	14.58	16.80
6 <sup>#</sup> 烧结机	13.08	16.10	17.76
烧结工序	12.34	15.33	17.29

5 结 论

经过各个方面的管理进步和技术改造,特别是阶梯式自密封技术的改造,以及加强烧结工序与电站的协同管理,韶钢烧结余热电站的发电效率得到质的飞跃。在 2017 年 3~5 月期间,平均吨矿发电量达到 17.29 kW·h/t,比 2015 年提高了 40%,比 2016 年提高了 12%。随着完成技改后调试工作,同时进入夏季气候

条件进一步向有利于余热回收的方向变化,月平均吨矿发电量还会进一步提高。韶钢在烧结环冷机余热发电的技术改造和运行管理方面都取得巨大的进步,可为同行提供借鉴。

参考文献

[1] 李丽,马庆爽,王莹,等. 230 m<sup>2</sup> 烧结环冷机余热综合利用[J]. 天津冶金 2016 (s1): 78-81.

[2] 周勇平,刘海明,黄华,等. 环冷机上部密封对余热发电的影响[J]. 发电设备 2013 27(2): 136-138.

[3] 赵斌,屈婷婷,晁双双,等. 烧结矿显热发电负荷提升方法研究[J]. 烧结球团 2016 41(1): 57-61.

[4] 胡松. 烧结余热发电工程环冷机密封技术的改进优化[J]. 中国水运 2013 13(6): 137-138.

[5] 孙彦强,刘江. 一种环冷机密封装置在烧结发电的应用[J]. 冶金设备 2015 224(2): 78-79.

(上接第 57 页)

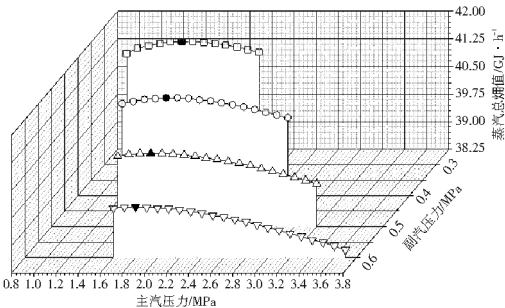


图 4 主、副汽压力变化对蒸汽总做功能力的影响

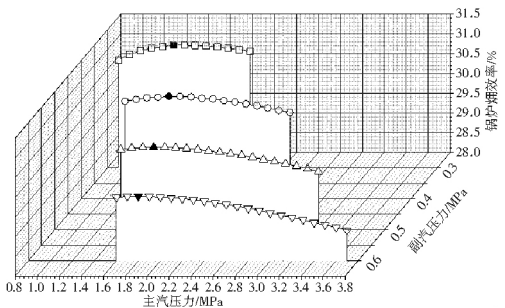


图 5 主、副汽压力变化对锅炉效率的影响

表 6 余热锅炉设计值与优化值对比

项目	主汽压力/MPa	副汽压力/MPa	蒸汽总焓/GJ·h <sup>-1</sup>	主汽焓值比例/%	副汽焓值比例/%
设计值	2.1	0.5	40.16	84.63	15.37
优化值	1.4	0.3	41.59	86.89	13.11
变化率/%	-33.33	-40.00	3.56	2.26	-2.26

(2) 主汽压力决定锅炉焓效率和蒸汽总焓值处于峰值点时主副汽压力耦合值的位置。

(3) 余热锅炉的蒸汽总焓值存在主、副汽之间最佳焓分配关系。在额定热源条件下,副汽压力在 0.3~0.6 MPa 范围内,蒸汽总焓最高值为 41.59 GJ/h,最大焓效率为 31.11%,对应的主汽压力为 1.4 MPa,副汽压力为 0.3 MPa。蒸汽总焓值较设计值提高了 3.56%。

参考文献

[1] 卢红军,戚云峰. 烧结余热的基本特点及对烧结余热发

电的影响[J]. 烧结球团 2008(6): 37-38.

[2] 张福滨. 纯低温余热发电采用双压技术的应用分析[J]. 水泥 2007(1): 19-21.

[3] 赵斌,徐鸿,路晓雯,等. 烧结余热发电系统的热力学分析和系统优化[J]. 华北电力大学学报 2010(37): 43-48.

[4] 肖衍党,李晨飞,韩涛. 烧结余热发电技术及系统的优化分析[J]. 烧结球团 2011 36(3): 47-53.

[5] 岳伟挺. 联合循环余热锅炉蒸汽参数优化与动态特性研究[D]. 大连理工大学 2001: 44-48.

[6] 汤学忠. 热能转换与利用(第二版)[M]. 北京: 冶金工业出版社 2004: 21-22.