

# 余热电站热力系统建模及蒸汽参数优化

赵 斌<sup>1</sup>, 徐 鸿<sup>1</sup>, 路晓雯<sup>2</sup>, 张彩娟<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206

2. 河北理工大学 河北省现代冶金技术重点实验室, 河北唐山 063009)

**摘 要:** 热力系统及蒸汽参数的选取是余热电站设计中首要的基础工作。以济钢烧结余热电站双压系统为例, 建立了以最大发电净功率为目标函数的热力系统计算和蒸汽压力优化模型, 编程验算了模型的正确性, 分析了影响主汽压力优化的主要因素, 研究了发电净功率随主汽压力的变化规律。结果表明, 实例计算优化的最佳主汽压力为 2.2 MPa, 比电站设计主汽压力高 0.14 MPa。其研究结果可为低压余热电站的优化设计与运行提供较为科学的依据。

**关 键 词:** 余热电站; 热力系统; 数学模型; 程序计算; 主汽压力优化

中图分类号: TK123

文献标识码: A

符号说明

- G—废气流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;
- $\varphi$ —保热系数 /%;
- $\rho$ —汽包排污率 /%;
- $\theta_i$ —各区段出口废气温度 / $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_i$ —各区段废气焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ;
- $t_{i-}$ —各区段进出口工质温度 / $^{\circ}\text{C}$ ;
- $h_i$ —各区段进出口工质焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- $D_1$ —余热锅炉主蒸汽流量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;
- $D_2$ —余热锅炉副汽流量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;
- $D_{\text{O}_2}$ —除氧器加热用蒸汽流量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;
- $D_{\text{ns}}$ —冷凝器出口饱和水流量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ;
- $\Delta t$ —余热锅炉热端温差 / $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\delta$ —余热锅炉窄点温差 / $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\Delta t_s$ —余热锅炉接近点温差 / $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_{\text{gs}}$ —给水温度 / $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\eta_{\text{O}_2}$ —除氧器效率 /%;
- $P_1$ —主汽与补汽混合前做功末点压力 /MPa;
- $P_2$ —汽轮机补汽压力 /MPa;
- $h_0$ —主汽进入汽轮机时焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- $h_1$ —主汽与补汽混合前做功末点焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- $h_2$ —补汽进入汽轮机时焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- $h_3$ —主汽和补汽在汽轮机内混合后的焓值 / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- $P_z$ —余热锅炉出口中压蒸汽压力 /MPa;

- $P_d$ —余热锅炉出口低压蒸汽压力 /MPa;
- $N_{\text{st}}$ —汽轮机内功率 /kW;
- $N_p$ —水泵消耗功率 /kW;
- $P_{\text{pt}}$ —排汽压力 /kPa;
- $\eta_m$ —机械效率 /%;
- $\eta_g$ —发电机效率 /%;
- $\eta_p$ —给水泵效率 /%;
- $q_m$ —给水泵工质质量流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $g$ —重力加速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;
- $H$ —给水泵扬程 /m;
- $x$ —排汽干度。

## 引 言

烧结工序作为钢铁工业第二大耗能工序, 能耗占整个企业能耗的 10% 左右<sup>[1]</sup>。回收烧结余热用于发电是钢铁企业开展节能减排、降耗增效的有效措施。中低参数余热电站热力循环系统主要有单压、双压和闪蒸 3 种系统配置方式, 各热力系统受热面布置方案及蒸汽参数的优化既影响到余热利用率和系统发电功率, 又关系到系统投资和汽轮机运行的安全性。目前, C. J. Butcher 利用热力学第二定律对影响余热发电系统的关键因素进行了分析<sup>[2]</sup>, 焦树建、温立等人则对联合循环系统中蒸汽参数以及节点温差的选取进行了分析及优化<sup>[3-4]</sup>, 而国内外针对中低参数余热发电系统的理论研究较少, 已投产的烧结余热电站热力循环系统和蒸汽参数的确定缺少理论的支撑。因此, 在电站建设前期开展余热电站热力系统方案的比选及蒸汽参数的优化研究非常重要。以济钢烧结余热电站双压系统为研究对象, 建立热力系统计算和优化模型进行研究。

## 1 余热发电机组热力系统建模

由于余热发电双压系统遵循了能量梯级利用原

收稿日期: 2009-09-03 修订日期: 2009-10-23

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目 (2008 BAF67B01)

作者简介: 赵 斌 (1968—), 男, 吉林公主岭人, 华北电力大学博士研究生, 现工作在河北理工大学, 教授。

理,中低品位热能得到了高效利用<sup>[5]</sup>,但双压系统各区段受热面存在着交叉布置问题,受热面布置种类较多<sup>[9]</sup>,需要分析的因素也过多,导致双压系统很难用一组数学模型来统一。济钢烧结合余热发电双压系统流程如图 1 所示。

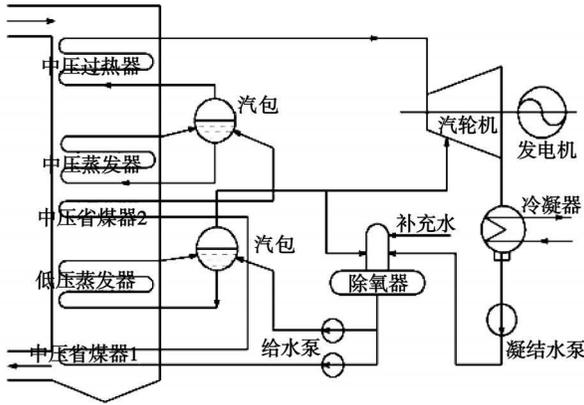


图 1 济钢烧结合余热发电双压系统流程

1.1 热力系统计算模型

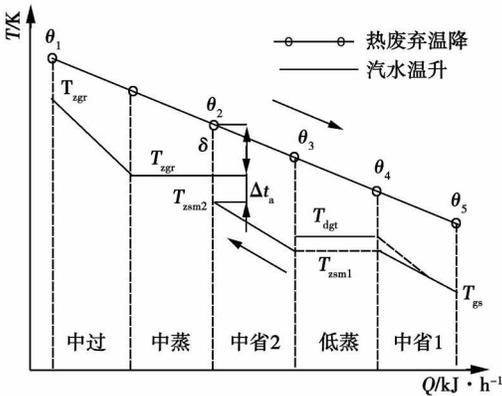


图 2 余热锅炉换热过程 T-Q图

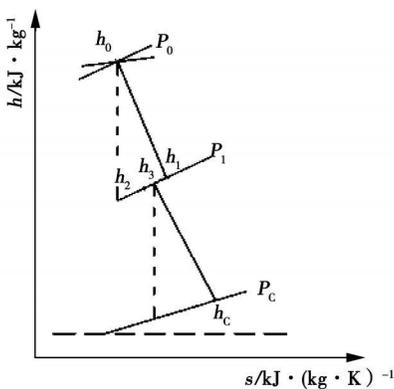


图 3 汽轮机热力过程 h-s图

电站双压系统热力计算模型。余热锅炉中热废气侧与工质侧换热过程如图 2 所示, 低压汽轮机热力过程如图 3 所示。

1.1.1 余热锅炉计算模型

由余热锅炉中废气侧与工质侧换热过程可知: 中压蒸发器和过热器区段:

$$\Phi(I - J) = D_1 (h_{gr} - h_{gts}) + (1 + \rho) D_1 \times (h_{gts} - h_{sm2})$$

中压省煤器 2 区段:

$$\Phi(I - J) = (1 + \rho) D_1 (h_{sm2} - h_{sm1})$$

低压蒸发器区段:

$$\Phi(I - J) = D_2 (h_{lgt1} - h_{gts}) + (1 + \rho) D_2 \times (h_{gts} - h_{gs})$$

中压省煤器 1 区段:

$$\Phi(I - J) = (1 + \rho) D_2 (h_{sm1} - h_{gs})$$

除氧器:

$$(1 + \rho) (D_1 + D_2) h'_{cy} = \eta_{cy} [ D_{cy} h_{lgt1} + \rho (D_1 + D_2) h_b + D_{hs} h_{hs} ]$$

$$(1 + \rho) (D_1 + D_2) = D_{cy} + \rho (D_1 + D_2) + D_{hs}$$

1.1.2 汽轮机内功率

由低压汽轮机热功转换过程可知:

$$N_{st} = [ D_1 (h_0 - h_1) + (D_1 + D_2 - D_{cy}) \times (h_2 - h_3) ] / 3600$$

补汽与主汽混合时压力:

$$P_1 = P_2 - 0.04$$

1.1.3 发电净功率

机组发电净功率:

$$N_{net} = N_{st} \eta_m \eta_g - N_b$$

其中水泵 (给水泵、凝结水泵) 消耗功:

$$N_b = q_h \text{ kWh} / (1000 \eta_p)$$

$$N_{net} = f ( P_0, \Delta t_1, \delta_1, \Delta t_2, P_0, \Delta t_3, \delta_2, \Delta t_4 )$$

1.2 热力系统优化模型

热力系统优化模型包括受热面布置优化模型和蒸汽参数优化模型, 选取济钢电站双压系统为分析对象, 即在该系统受热面布置方式下建立蒸汽参数优化模型。

优化的参数是指双压余热锅炉主蒸汽压力、温度和补汽压力, 优化的目标是使双压系统发电净功率最大。建立以发电净功率为目标函数, 主、副蒸汽压力为决策变量的余热发电系统参数优化模型:

$$N_{net \max} = f ( P_0, \Delta t_1, \delta_1, \Delta t_2, P_0, \Delta t_3, \delta_2, \Delta t_4 )$$

优化变量:

$$P_{zmin} < P_0 < P_{zmax}$$

$$P_{dmin} < P_d < P_{dmax}$$

以质量平衡与能量平衡方程为基础, 建立余热

约束条件:

$$\Delta t \leq \Delta t_{\max} < \Delta t_{\min}$$

$$\dot{q}_{\min} < \dot{q} < \dot{q}_{\max}$$

$$\Delta t_{\max} < \Delta t_{\#} < \Delta t_{\min}$$

$$x > x_{\min}$$

改变蒸汽压力, 进行多组发电净功率计算, 从而确定最佳的蒸汽参数。

## 2 余热发电机组热力系统程序计算

### 2.1 程序计算过程

以建立的热力系统计算和优化模型为基础, 用 Visual Basic 语言, 采用模块化结构, 开发余热电站热力系统设计计算程序。模块分为数据输入检验模块、计算模块、数据输出模块、参数优化模块和出错管理模块等。其中计算模块包括余热锅炉主蒸汽流量和出口废气温度、汽轮机补汽流量、发电功率及各种效率的计算。出错管理模块包括输入的不是数字、小数点、退格键或输入的数据不在规定范围时弹出的出错信息。如在文本框中输入的数据不在规定范围内, 则系统弹出“范围不合法”的出错信息。数据计算流程如图 4 所示。

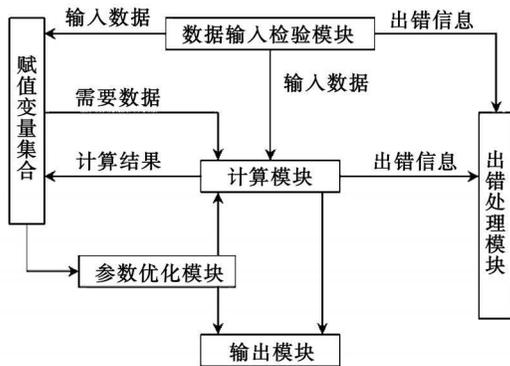


图 4 数据计算流程图

### 2.2 程序验证实例

以图 1 所示的济钢余热电站热力系统为例进行计算, 以验证模型的正确性。

#### 2.2.1 原始计算数据选定

程序计算变量选用如表 1 所示。另排污率 2%, 保热系数取 0.98 主蒸汽管道压降取 5%, 温降取 5 °C; 排汽压力 8 kPa; 给水温度 104 °C, 给水压力取余热锅炉主蒸汽压力的 1.2 倍; 两级中压省煤器之间的压损和补汽管道压损及温降忽略不计。

表 1 热力系统计算变量选取

	变量取值
锅炉进口废气温度 / °C	400
废气流量 / m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	390 000
中压段热端温差 / °C	25
中压段窄点温差 / °C	20
中压段接近点温差 / °C	10
低压段窄点温差 / °C	20
低压段热端温差 / °C	54
相对内效率 / %	82
机械效率 / %	96
发电机效率 / %	97

### 2.2.2 计算结果

分析表 2 程序计算参数与文献 [ 7 ] 给定的济钢余热电站设计参数基本吻合。

表 2 文献 [ 7 ] 与程序计算主要参数对比

	文献数据	程序数据
主蒸汽压力 / MPa	2.06	2.06
主蒸汽温度 / °C	375	375
主蒸汽流量 / t · h <sup>-1</sup>	36.4	36.4
副汽压力 / MPa	0.39	0.39
副汽温度 / °C	141.1	142.7
副汽流量 / t · h <sup>-1</sup>	10.4	10.4
废气排出温度 / °C	161	161.3
发电功率 / MW	8.2	8.238
装机容量 / MW	9	9

研究表明, 基于 VB 语言编制的余热电站热力计算程序界面友好、易用, 与传统手工计算比较, 具有较高的可信度, 能满足用户对计算快速、准确的要求, 并可实现热发电系统蒸气参数的优化。

## 3 余热锅炉主蒸汽参数优化

蒸汽参数主要包括温度和压力。济钢余热发电系统补汽为饱和蒸汽, 通过程序计算可以得到, 在一定条件下补汽压力越低越好, 综合考虑省煤器传热温差、给水泵耗功、汽轮机结构设计等因素的制约, 在济钢发电双压系统蒸汽参数优化过程中, 低压系统饱和蒸汽压力下限值确定为 0.39 MPa。

### 3.1 主蒸汽温度优化

在其它条件相同时, 余热锅炉主蒸汽温度提高, 主蒸汽流量相对减少, 但发电净功率相对增加, 另外主蒸汽温度的提高还可增加排汽干度, 因此主蒸汽

温度通常要选用上限值。余热锅炉主蒸汽温度受余热锅炉进口废气温度波动范围及热端温差的影响,而进口废气温度取决于烧结工序生产的稳定性,其正常波动范围为 20~40℃,通常热端温差取 20~30℃。在济钢双压发电系统蒸汽参数优化过程中,热端温差取 25℃,主蒸汽温度确定为 375℃。

### 3.2 主蒸汽压力优化

汽轮机进口主蒸汽压力并非越高越好,对于该配置方式下的双压余热锅炉,受节点温差的限制,随着主蒸汽压力的增加,中压蒸发器出口废气温度也相应增加,主蒸汽流量下降,低压段蒸汽流量增加;主蒸汽压力增加也将使系统水泵耗功增加,这些因素抵消了部分做功量,因此存在着最佳的主蒸汽压力使系统发电净功率为最大。在其它设计参数一定时,对主蒸汽压力进行优化,如图 5 所示,当主蒸汽压力为 2.44 MPa 时,系统发电净功率达到最大值。由图 6 可知,在主蒸汽温度不变的条件下,随着主蒸汽压力的增加,蒸汽过热度降低,汽轮机排汽干度下降,对末级叶片的安全性和经济性不利,由于进汽比容减小,高压叶片损失增加,汽轮机内效率降低。因此,主蒸汽压力优化同样受到排汽干度的影响。

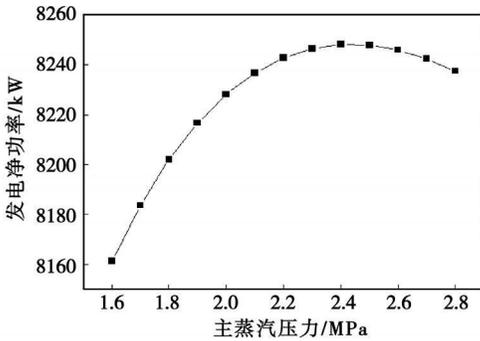


图 5 发电净功率随主蒸汽压力的变化

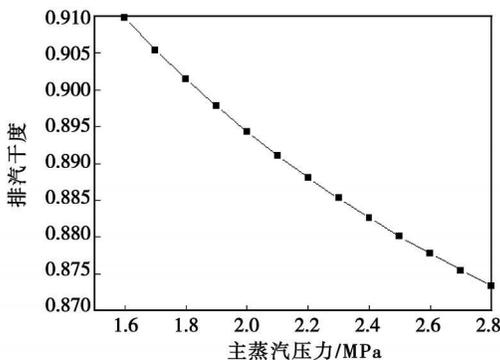


图 6 排汽干度随主蒸汽压力的变化

### 3.3 影响主蒸汽压力优化的主要因素

在给定其它设计参数时,存在使发电净功率达到最大的主蒸汽压力,但主蒸汽压力也随热端、窄点、接近点 3 个温差变量及进口废气温度的变化而变化。

由图 7 可知,进口废气温度越高,系统发电净功率越大;进口废气温度由 395℃增加到 405℃,对应的最佳主蒸汽压力从 2.39 MPa 升高到 2.49 MPa,相应发电净功率增加了 435 kW。由图 8 可知,窄点温差越高,系统发电净功率越小;窄点温差从 10℃增加到 20℃,对应的最佳主蒸汽压力从 2.59 MPa 降低到 2.44 MPa,对应发电净功率降低了 315 kW。在进口废气温度和窄点温差一定时,随着主蒸汽压力的提高,系统发电净功率变化渐缓。因此,进口废气温度和窄点温差的变化对系统发电净功率的影响较大。

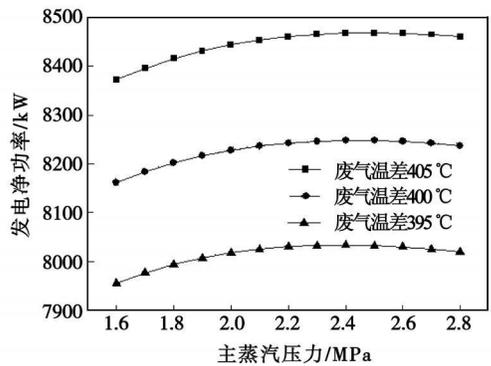


图 7 发电净功率随进口废气温度的变化

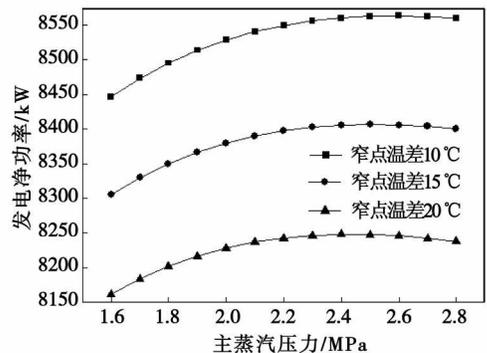


图 8 发电净功率随窄点温差的变化

由图 9 和图 10 可知热端温差和接近点温差越高,系统发电净功率越小。随着热端温差和接近点温差增大,最佳主蒸汽压力变化幅度较小。其中热端温差从 20℃增加到 30℃,在主蒸汽压力为 2.44

MPa 对应的发电净功率降低了 31 kW。接近点温差从 10 °C 增加到 20 °C, 对应的最佳主蒸汽压力从 2.59 MPa 降低到 2.44 MPa, 对应发电净功率降低了 45 kW。因此, 热端温差和接近点温差的变化对系统发电净功率的影响都较小。

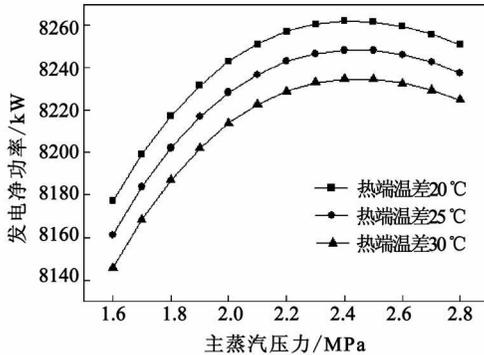


图 9 发电净功率随热端温差的变化

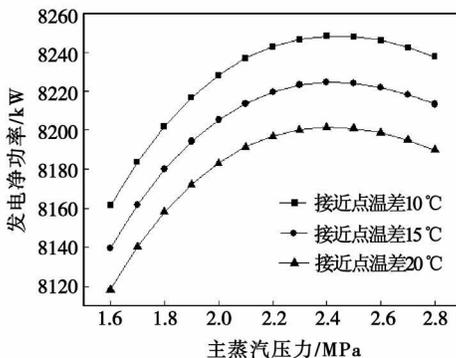


图 10 发电净功率随接近点温差的变化

## 4 结 论

(1) 本研究以济钢烧结余热电站双压系统为例, 依据质量和能量平衡建立了以最大发电净功率为目标函数的热力系统计算和蒸汽压力优化模型, 程序计算的发电功率 8 238.3 kW 和电站设计发电功率 8 200 kW 基本一致, 验证了模型的正确性。

(2) 分析了主蒸汽压力随余热锅炉进口废气温度、节点温差、热端温差和接近点温差的变化规律, 得出进口废气温度和窄点温差对发电净功率的影响较大, 主蒸汽压力在 2.2~2.5 MPa 范围内, 发电净功率较大。另外考虑到排汽干度等影响, 程序方法确定的最佳主汽压力为 2.2 MPa, 比电站设计主汽压力高 0.14 MPa。

(3) 余热电站设计中, 应结合余热资源特性, 首先选取合理的热力系统及受热面布置方案, 对选定的热力系统再进行蒸汽参数优化以确定余热锅炉主汽压力, 此方法可为低压余热电站的优化设计与运行提供较为科学的依据。

## 参考文献:

- [1] 王兆鹏, 胡晓民. 烧结余热回收发电系统现状及发展趋势[J]. 烧结球团, 2008, 33(1): 31-34
- [2] BUTCHER C J, REDDY B V. Second law analysis of a waste heat recovery based power generation system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 2355-2363
- [3] 焦树建. 论余热锅炉型联合循环中双压无再热的余热锅炉之特性与汽轮机特性的优化匹配问题[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(3): 10-16
- [4] 温 立, 李正阳, 王丽莉. 燃气-蒸汽联合循环余热锅炉蒸汽参数优化[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(3): 71-73
- [5] WANG JIANGFENG, DAIYIPING, GAO LIN. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry[J]. Applied Energy, 2009, 86: 941-948
- [6] 王学斌, 赵钦新, 惠世恩, 等. 纯低温余热发电系统的优化分析[J]. 动力工程, 2009, 29(1): 95-98
- [7] 张瑞堂, 傅国水, 李真明, 等. 济钢 320 m<sup>2</sup> 烧结机余热发电投产实践[J]. 烧结球团, 2007, 32(5): 47-50

(编辑 辉)

## · 书 讯 ·

### 《工业锅炉水处理》

本书为工业锅炉水处理作业人员培训教材。分为锅炉水处理基础知识和专业基础知识两部分。其中锅炉水处理基础知识包括化学基础知识、锅炉基础知识、锅炉用水、化学分析基础知识、水质分析法 5 章。专业知识包括水质预处理、炉内水处理、水的离子交换处理、水的降碱处理、锅炉的结垢及清除、锅炉腐蚀及其预防、生产回水 7 章。书后附有常用表格、常用水质分析测定方法及相关管理制度。

读者对象: 工业锅炉水处理作业人员, 相关专业人员。

2010 年 3 月出版

overall dimensions of the combustor and the opening hole dimensions of the flame tube were determined. On this basis, a performance test of the combustor was conducted to a certain extent. The test and application results show that the combustor thus designed features a safe and reliable operation, a simple structure, as well as a high space utilization rate, a quick temperature rise speed and a clean exhaust gas. In the whole operation range, the combustion efficiency can reach 0.95 ~ 0.97 and the non-uniformity of the temperature field at the outlet is lower than 0.09, thus meeting the design requirements. Key words: gas turbine, high temperature rise, evaporation type combustor.

余热电站热力系统建模及蒸汽参数优化 = Modeling and Steam Parameter Optimization for the Thermodynamic System of a Waste Heat Power Plant [刊, 汉] / ZHAO Bin, XU Hong, ZHANG Caijuan (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206), LU Xiaowen (Hebei Provincial Key Laboratory on Modern Metallurgical Technologies, Hebei University of Science and Technology, Tangshan, China, Post Code: 063009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 389 ~ 393

The choice of a thermodynamic system and its steam parameters is the most important basic work for designing a waste heat power plant. With the dual pressure system in a sintering waste heat power plant in Jinan Iron and Steel Works serving as an example, established was a model for calculating a thermodynamic system and optimizing its steam pressures with a maximum net power output serving as the target function. In addition, a program was designed and the correctness of the model was verified through calculations. The main factors influencing the optimization of the main steam pressure were analyzed and the law governing the change of net power output with the main steam pressure was studied. The research results show that the optimum main steam pressure of a case calculation is 2.2 MPa, 0.14 MPa higher than the main steam design pressure of the power plant. The research findings can offer a relatively scientific basis for the optimized design and operation of low pressure waste heat power plants. Key words: waste heat power plant, thermodynamic system, mathematical model, program computation, main steam pressure optimization.

Ω型惯性气液分离器性能研究 = Performance Study of a Ω Type Inertia Gas-Liquid Separator [刊, 汉] / LUAN Yigang, SUN Haiou, WANG Song et al (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 394 ~ 398

With the help of a numerical simulation method, predicted was the status of the flow field inside a Ω type gas-liquid separator. In the calculation, the two-dimensional Reynolds time-averaged N-S equation was adopted and the standard model has been used as the turbulent flow model to obtain and understand the distribution characteristics of the flow field inside the separator. Moreover, the performance of the separator with different clearances was studied and a model was fabricated to conduct a test in a wind tunnel. The theoretical calculation results were verified and the resistance and efficiency characteristics of the separator obtained. It has been found that the separator has a relatively high gas-liquid separation efficiency and the blade spacing exercises a very big influence on the separation efficiency. When the Ω type blade spacing is 18.2 mm, the average separation efficiency can reach over 90%. Key words: Ω type gas-liquid separator, numerical simulation, model test, drag force, separation efficiency.

造气炉渣与无烟煤混合燃料燃烧特性分析 = Analysis of Combustion Characteristics of a Gas Production Slag and Anthracite Mixed Fuel [刊, 汉] / GAO Yufen, WANG Peng, LI Hongjun (Engineering Project Installation Team, Department of Combined Service Forces, Shenyang Military Region, Liaoyuan, China, Post Code: 11994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net