

# 带有补燃的6F燃气-蒸汽联合循环余热锅炉性能试验研究

宋金时<sup>1</sup> 刘少厚<sup>2</sup> 郑磊<sup>1</sup> 史燕红<sup>1</sup>

1 西安热工研究院有限公司 2 华能青岛热电有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16612

**[摘要]** 以广东某新建带有补燃的6F燃气-蒸汽联合循环发电机组为例,对其主设备余热锅炉进行性能试验分析,其考核项目为补燃条件下余热锅炉的出力 and 效率。基于此,文章阐述了该试验的试验标准、试验过程、边界划分、测点布置以及计算修正方法,供后续相关试验进行参考。

**[关键词]** 带补燃; 余热锅炉; 性能试验

**中图分类号:** TK229.8 **文献标识码:** A

## Experimental Study on the Performance of 6F Gas Steam Combined Cycle Waste Heat Boiler with Supplementary Combustion

Jinshi Song<sup>1</sup> Shaohou Liu<sup>2</sup> Lei Zheng<sup>1</sup> Yanhong Shi<sup>1</sup>

1 Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd.

2 Huaneng Qingdao Thermal Power Co., Ltd.

**[Abstract]** Taking a newly built 6F gas steam combined cycle generator unit with supplementary combustion in Guangdong as an example, performance tests and analysis were conducted on its main equipment, the waste heat boiler. The assessment items were the output and efficiency of the waste heat boiler under supplementary combustion conditions. The article elaborates on the test standards, test procedures, boundary division, measurement point layout, and calculation correction methods for this test, which can be used as a reference for subsequent similar tests.

**[Key words]** supplementary combustion; waste heat boiler; performance test

### 引言

联合循环发电的主要设备为燃气轮机、余热锅炉、汽轮机和发电机。燃气轮机将排出的高温乏气通过余热锅炉回收利用,产生高温高压的蒸汽进入汽轮机发电。相比于煤电,燃气-蒸汽联合循环机组具有污染小、效率高、建设周期短、自动化程度高、调峰能力强等优点,是一种高效、节能的发电方式<sup>[1]</sup>。常规的联合循环发电机组的性能试验方法早已成熟<sup>[2]</sup>。

余热锅炉的性能试验通常按照ASME PTC 4.4标准执行,非补燃的余热锅炉性能试验流程和计算方法已非常明确,但是在带补燃的余热锅炉性能试验方面的研究和公开报导比较少,本文以广东某新建带有补燃的6F燃气-蒸汽联合循环发电机组为例,根据相关试验标准,通过研究带补燃余热锅炉与常规机组的系统设计、运行方式等方面的异同点,分析带补燃的余热锅炉机组的性能试验方法。

### 1 常规机组与带补燃机组

图1和图2分别为常规联合循环机组和带补燃的联合循环发电机组原则性热力系统图。和常规联合循环机组相比,带补燃的联合循环机组多了余热锅炉进口或内部的补燃器,主要目的是为了增加联合循环机组的出力,燃料一般是天然气或油,和进入

燃气轮机的燃料相同<sup>[3]</sup>。

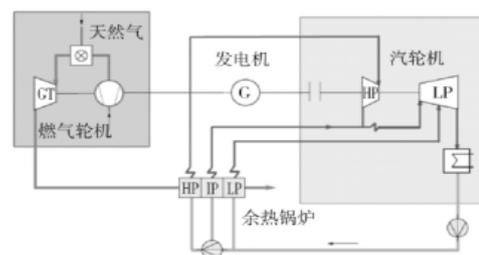


图1 常规联合循环机组系统示意图

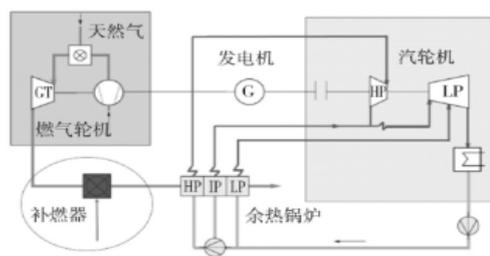


图2 带补燃联合循环机组系统示意图

### 2 试验概况

本文以广东某新建燃气-蒸汽联合循环发电机组为例。项目建设一台杭汽/西门子联合设计制造的SGT-800型燃气轮机、一台济南发电设备厂生产的WYS18Z-047LLT型燃机发电机、一台杭汽配套提供的EHNK63/3.2型蒸汽轮机、一台杭汽配套提供的QF-W40-2型汽机发电机和一台杭州锅炉厂生产的NG-SGT800-R型余热锅炉及相关辅助设备。

### 3 试验标准及保证条件

#### 3.1 试验标准

余热锅炉性能试验采用的标准为ASME PTC 4.4-2008燃气轮机余热锅炉性能试验规程。

#### 3.2 保证条件

依据技术协议书和热平衡图,性能试验的保证条件和保证值分别见表1和表2。

表1 保证条件

项目	单位	数值	
环境条件	干球温度	℃	22
	相对湿度	%	80
	大气压力	kPa	101.08
燃机排气成分 (体积百分比)	N <sub>2</sub>	%	73.02
	O <sub>2</sub>	%	14.3
	CO <sub>2</sub>	%	5.71
	H <sub>2</sub> O	%	5.74
	Ar	%	1.24
燃机排气流量	t/h	478.8	
燃机排气温度	℃	570.1	
天然气成分			
CH <sub>4</sub>	vol%	91.91	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	vol%	7.67	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	vol%	0.41	
N <sub>2</sub>	vol%	0.01	
补燃天然气热量	GJ/h	143.5	

表2 保证值

项目	单位	保证值
高压蒸汽流量	t/h	120.00
高压蒸汽压力	MPa	7.0
高压蒸汽温度	℃	541.0
低压蒸汽流量	t/h	-
低压蒸汽压力	MPa	-
低压蒸汽温度	℃	-
余热锅炉效率设计值	%	89.0

#### 3.3 试验边界和测点布置

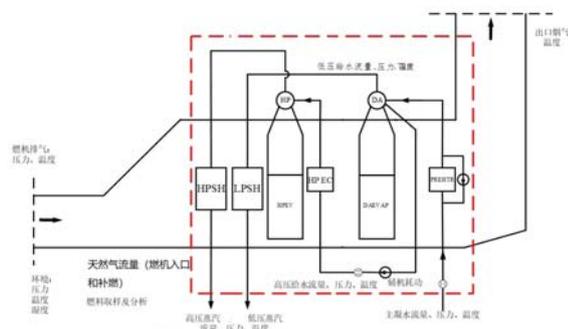


图3 试验边界和测点布置图

试验边界为：余热锅炉入口参数、补燃参数和凝结水温度作为试验边界。试验的边界决定了保证指标的修正项目。

#### 3.4 试验仪表和测量方式

##### 3.4.1 排气流量和排气(烟气)组成成分

在余热锅炉性能考核试验中燃气轮机排气流量的确定是一个关键点,一般来说排气流量的确定有两种方法:燃机热平衡法和余热锅炉热平衡法。

本试验确定燃机排气流量采用余热锅炉热平衡法,方法如下:

根据汽水侧测量的压力、温度和流量,计算HRSG输出的热量(余热锅炉的散热损失按余热锅炉换热量的0.3%考虑);

假定空气量,根据燃料气组成,计算理想燃烧后烟气的组成;

根据HRSG进、出口烟气温度和烟气化学组成计算HRSG进、出口的烟气焓;

代入HRSG热平衡方程,迭代求出燃机排气流量和排气(烟气)组成成分。

##### 3.4.2 蒸汽和给水流量

余热锅炉高压给水流量、低压给水流量、减温水流量等通过现场测量获得,各流量采用标准流量孔板或喷嘴进行测量,安装相应的流量差压和温度测点,并根据实测差压、温度和压力计算得到质量流量。

##### 3.4.3 温度测量

温度测量采用NANMAC工业I级精度E型热电偶。

##### 3.4.4 烟风系统温度

每台余热锅炉出口烟气温度采用特设的校验合格的I级K型铠装热电偶测量,测量点数根据烟道截面面积确定(共8个测点),测量信号进入IMP数据采集系统,每20秒记录一次。

在每台燃机的空气过滤器处安装6支Pt100型高精度铂电阻配合ROSEMOUNT 3144型温度变送器测量环境温度。

在每台燃机的空气过滤器附近安装1台维萨拉温湿度计测量大气相对湿度。

##### 3.4.5 压力和压降测量

蒸汽和给水压力测量采用精度为0.075级的ROSEMOUNT 3051型表压变送器进行测量。主要包括:

高压、低压蒸汽压力测量;

高压给水和主凝结水压力测量。

##### 3.4.6 余热锅炉入口烟气压力

在余热锅炉入口烟道处布置静压测孔,采用DCS远传压力表计进行测量余热锅炉入口烟气压力。

##### 3.4.7 大气压力

在每台燃机的空气过滤器附近安装1台精度为0.075级的ROSEMOUNT 3051型绝对压力变送器测量大气压力。

##### 3.4.8 燃料取样和分析

燃料气的取样方法:在每次试验开始和试验结束时取样,每次取样两份。两份燃气样中一份用于分析,另一份由业主或卖方作为备份保留。

燃气样的分析由业主和卖方共同认可的SGS燃气分析实验室进行。

## 3.4.9 辅机电耗

余热锅炉辅机主要指高压给水泵,其电耗通过电子间数据记录得出。

## 3.4.10 天然气流量

采用前置模块的质量流量计数据

## 3.5 试验过程

试验前由制造厂家代表对设备进行了检查,确认机组已具备性能考核的条件。试验前准备了足够的试验燃料,燃料符合设计要求。

在试验工况开始前4小时,负荷升到试验负荷。非试验系统进行隔离,汽水系统按照系统隔离清单进行隔离。试验开始时间2小时前由制造厂家提出锅炉运行工况,试验三方确认可行后由电厂运行人员调整工况至试验要求。调整机组运行参数至设计值附近,偏差及波动值符合试验规程要求。按规定统一开始试验数据采集和记录,考核工况需持续1小时。

在测试过程中,在没有得到试验各方一致同意的情况下不得改变控制方式。

数据记录期间严密监视运行工况是否偏离要求,测试数据是否异常。

## 4 试验计算和修正公式

## 4.1 余热锅炉效率计算

余热锅炉效率按照反平衡方法计算。

$$\eta = \left(1 - \frac{L_T}{Q_T}\right) \times 100\%$$

式中:

$\eta$ ——余热锅炉效率, %;

$L_T$ ——总的热损失, kJ/h;

$Q_T$ ——总的输入热量, kJ/h。

试验时锅炉排污等排放门关闭,总的热损失  $L_T$  主要是排烟热损失和散热损失之和。

$$L_T = L_{EX,G} + L_R$$

式中:

$L_{EX,G}$ ——余热锅炉排烟热损失, kJ/h;

$L_R$ ——余热锅炉散热损失, kJ/h。

总的输入热量应等于燃机排气输入热量、补燃带入热量、高压给水泵带入热量和省煤器再循环泵带入热量之和。

$$Q_T = Q_{GT,G} + Q_{BFP} + Q_{RCP} + Q_{补燃}$$

式中:

$Q_{GT,G}$ ——燃机排气输入热量, kJ/h;

$Q_{BFP}$ ——高压给水泵带入的热量, kJ/h;

$Q_{RCP}$ ——凝结水再循环泵带入的热量, kJ/h;

$Q_{补燃}$ ——补燃带入的热量, kJ/h。

高压给水泵、省煤器再循环泵带入热量通过测量相应的电机输入功率折算得到(按输入功率95%进行折算)。

## 4.2 余热锅炉出力和余热锅炉效率修正

余热锅炉各段蒸汽流量参数和余热锅炉效率按照余热锅炉厂家提供的修正曲线进行修正。

以补燃工况设计条件为基准点,当燃机排气流量、燃机排气温度、燃机排气水分比重、凝结水温度、补燃热量等参数偏离设计值,根据厂家提供的修正曲线修正余热锅炉高、低压蒸汽流量和余热锅炉效率,修正方法均采用除法修正,以余热锅炉效率修正为例进行说明,其他参数修正方法相同。

$$\eta_{Cr} = \frac{\eta}{\eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \times \eta_5}$$

式中:

$\eta_{Cr}$ ——为修正后余热锅炉效率, %;

$\eta$ ——为实测余热锅炉效率, %;

$\eta_1$ ——燃机排气流量变化对余热锅炉效率的修正系数;

$\eta_2$ ——燃机排气温度变化对余热锅炉效率的修正系数;

$\eta_3$ ——燃机排气水分比重变化对余热锅炉效率的修正系

数;

$\eta_4$ ——凝结水温度对余热锅炉效率的修正系数;

$\eta_5$ ——补燃热量对余热锅炉效率的修正系数。

## 5 试验计算结果

试验计算结果见表3所示。

余热锅炉效率实测值为92.01%,修正到补燃工况设计条件下为91.90%,达到设计值要求,余热锅炉排烟温度达到设计值要求。高压蒸汽流量实测值为120.19t/h,修正到设计条件下的流量为122.00t/h,达到设计值要求;高温蒸汽温度实测值为535.6℃,修正后为545.3℃,达到设计值要求。

表3 余热锅炉试验结果

主要测量数据		
大气压力	kPa	101.71
干球温度	°C	23.5
大气湿度	%	50.6
燃料气质量流量	kg/h	10314.5
补燃燃料气流量	Nm <sup>3</sup> /h	3935.5
燃料气成分		
CH <sub>4</sub>	%mol	91.60
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%mol	4.92
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%mol	1.36
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	%mol	0.24
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	%mol	0.28
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	%mol	0.02
n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	%mol	0.01
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	%mol	0.02
N <sub>2</sub>	%mol	0.24
CO <sub>2</sub>	%mol	1.34
试验性能计算		
燃机排气成分(质量份额)		
N <sub>2</sub>	%	73.24
O <sub>2</sub>	%	14.28
CO <sub>2</sub>	%	5.85
H <sub>2</sub> O	%	5.37
Ar	%	1.25
燃机排气流量		
余热锅炉入口烟温	°C	574.4
余热锅炉入口烟气焓	kJ/kg	616.9
余热锅炉出口烟温	°C	81.9
HRSG汽水侧吸热量	kJ/h	4.02E+08
高压蒸汽流量	t/h	120.19
高压蒸汽焓	kJ/kg	3496.5
低压蒸汽流量	t/h	0.00
低压蒸汽焓	kJ/kg	2892.4
主凝结水流量	t/h	120.19
主凝结水焓	kJ/kg	152.97
给水泵带入热量	kJ/h	1.33E+06
余热锅炉热效率试验值	%	92.01
修正后的试验结果		
修正后的高压蒸汽流量	t/h	121.95
修正后的高压主蒸汽温度	°C	545.3
修正后的锅炉效率	%	91.90

## 6 结论

补燃式余热锅炉试验采用的标准为ASME PTC 4.4; 试验边界包含热锅炉入口参数、补燃参数和凝结水温度; 修正项目包含燃机排气流量、燃机排气温度、燃机排气水分比重、凝结水温度、补燃热量。本次试验余热锅炉效率实测值为92.01%, 修正到补燃工况设计条件下为91.90%, 达到设计值要求。高压蒸汽流量实测值为120.19t/h, 修正到设计条件下的流量为122.00t/h, 达到设计值要求; 高温蒸汽温度实测值为535.6°C, 修正后为545.3°C, 达到设计值要求。

### [参考文献]

[1]行新学,张鲁.某分布式能源站燃气-蒸汽联合循环性能试验研究[J].科技创新与应用,2020,33(33):59-61.

[2]焦树建.浅论联合循环热力性能的验收试验[J].燃气轮机技术,2004,17(01):1-14.

[3]陈赛科,于兰兰.带补燃联合循环机组性能试验方法研究[J].通热力透平,2019,48(02):105-108.

### 作者简介:

宋金时(1990--),男,汉族,江苏徐州人,硕士,工程师,电站设备及热力系统优化。