

# 600 MW 锅炉低压省煤器水侧连接优化选择

吕 太<sup>1</sup> 张子建<sup>1</sup> 张素娟<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学 能源与机械工程学院 吉林 吉林 132012; 2. 承德钢铁公司 河北 承德 067002)

**摘 要:** 依据某电厂 600 MW 发电机组性能试验数据, 利用等效焓降原理对低压省煤器在汽轮机回热系统中 5 种连接方式进行经济性分析, 计算结果表明: 低压省煤器与 7 号低压加热器并联的连接方式经济性最佳, 可降低标准煤耗 1.79 g/(kW·h); 并根据某电厂低压省煤器改造后实际运行数据分析计算, 实际改造效果与理论计算相一致, 优化计算结果对 600 MW 锅炉低压省煤器连接方式的设计选择具有一定的指导意义。

**关 键 词:** 排烟余热; 低压省煤器; 等效热降; 连接方式

中图分类号: TK223 文献标识码: B

## 引 言

现阶段由于发电标煤价格居高不下, 国内很多电厂多采用褐煤掺烧或采用纯烧褐煤的方式来降低发电成本, 由于褐煤水分大、发热值低等原因, 燃煤煤种严重偏离设计煤种, 出现锅炉排烟温度高、排烟热损失增大、磨煤机出力不足、燃烧器喷口结焦等问题, 不仅对锅炉运行经济性造成巨大影响, 而且严重影响机组的运行安全性<sup>[1]</sup>。

针对褐煤掺烧造成锅炉排烟温度严重高于设计值问题, 为了充分吸收锅炉排烟余热, 常采用加装低压省煤器来提高机组运行经济性, 由于低压省煤器在汽轮机回热系统中具有诸多连接方式, 并且不同连接方式对机组热经济性具有不同的影响程度。本研究针对某电厂褐煤掺烧实际运行状况, 利用等效焓降原理对低压省煤器水侧 5 种连接方式进行热经济性分析, 提出 600 MW 燃煤锅炉低压省煤器水侧最佳连接方案。

## 1 相关数据分析

某电厂 600 MW 发电机组锅炉为 HG - 1795 / 26.15 - YM4 型。该电厂汽轮机型号为 CCLN600 -

25/600/600 的超超临界、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、凝汽式汽轮机。

为了分析机组存在的问题, 在机组大修前, 对锅炉、汽轮机进行性能诊断试验。锅炉侧, 由于进行褐煤掺烧, 锅炉年平均排烟温度年高达 159℃, 排烟热损失为 7.17%, 锅炉效率为 91.2%, 发电标准煤耗为 294.7 g/(kW·h)。锅炉性能试验数据如表 1 所示。

表 1 锅炉性能试验结果

Tab. 1 Test results of the boiler performance test

项目	设计值	ASME 算法
机组负荷 /MW	THA	600
干烟气热损失 / 排烟热损失 (%)	4.75	7.17
燃料中氢燃烧损失 /%	0.15	0.27
燃料中水分损失 /%	0.25	0.27
空气中水分损失 /%	0.07	0.044
未燃尽碳损失 /%	1.00	0.36
辐射及散热热损失 /%	0.18	0.20
灰渣显热损失 /%	/	0.19
不可测量热损失 /%	0.30	0.30
总热损失 /%	6.70	8.80
排烟温度 /℃	129	159
锅炉效率 /%	93.3	91.20

试验时, 燃煤煤种元素分析、工业分析结果如表 2 所示。

通过分析, 由于入炉煤种水分的增加引起烟气体积大量增加, 烟气体积比热增大, 烟气在对流受热面温降减小, 造成排烟温度高较设计值升高 30℃, 排烟热损失增加 2.42%, 锅炉效率降低 2.1%。

表 3 为 THA 工况下汽轮机回热系统低压加热器经济性数据。

收稿日期: 2012 - 10 - 29; 修订日期: 2013 - 01 - 28

作者简介: 吕 太(1957 -), 男, 吉林吉林人。东北电力大学教授。

表 2 试验煤种元素、工业分析结果

Tab. 2 Results of the elementary and industrial analysis of coal rank under the test

项目	设计煤种	燃用煤种
收到基碳 $C_{ar}/\%$	39.54	37.02
收到基氢 $H_{ar}/\%$	2.67	2.61
收到基氧 $O_{ar}/\%$	8.48	8.98
收到基氮 $N_{ar}/\%$	0.53	0.72
收到基硫 $S_{ar}/\%$	0.39	0.48
收到基灰分 $A_{ar}/\%$	33.97	22.20
收到基水分 $M_{ar}/\%$	14.42	27.90
挥发分(干燥无灰分) $V_{daf}/\%$	40.51	39.53
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	14 863	13 670

表 3 THA 工况汽轮机低压加热器经济性数据

Tab. 3 Cost-effectiveness data of the low pressure heaters of a steam turbine under the THA operating condition

项目	8号低加	7号低加	6号低加	5号低加	除氧器
抽汽放热 $q_r/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2 400.7	2 516.49	2 570.54	2 557.52	2 472.59
凝结水吸热 $\tau_r/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	127.05	115.23	134.73	155.35	99.83
疏水放热 $\gamma_r/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	117.17	106.75	149.53	0	60.17
等效焓降 $H_r/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	109.47	336.4	482.01	593.26	665.62
抽汽效率 $\eta_r/\%$	4.56	13.34	18.75	23.20	26.92

## 2 低压省煤器水侧连接方式分析

通过技术分析,该电厂拟采用加装低压省煤器来降低排烟温度,提高机组热经济性,但是低压省煤器在汽轮机回热系统中的连接方式直接影响到经济效果及运行安全、可靠性,因此低压省煤器水侧连接方式对于低压省煤器优化设计至关重要。分析低压省煤器的热经济性时,可利用等效热降原理将低压省煤器在锅炉尾部烟道吸收的排烟余热视为余热利用,这将给定量计算分析带来很大的方便<sup>[2]</sup>。

### 2.1 低压省煤器串联方式及定性分析

低压省煤器的串联系统,如图 1 所示。

从低压加热器  $No. j-1$  出口引出全部凝结水  $D_H$ , 进入低压省煤器系统,在低压省煤器吸收排烟余热加热升温后,全部返回至低压加热器  $No. j$  入口,从凝结水系统看,低压省煤器串联在低压加热器之间,成为热力系统的一个组成部分。

对于串联低压省煤器系统,有热量  $Q_d$  利用低

压省煤器回收进入汽轮机回热系统,如图 1 所示。相对 1 kg 新蒸汽来说,热系统得到的低压省煤器热量为:

$$q_d = \frac{Q_d}{D} = \frac{D_H(h''_d - h'_d)}{D} = \alpha_H(h''_d - h'_d) \quad (1)$$

式中:  $D$ —新蒸汽量  $\text{kg/s}$ ;  $h'_d$ 、 $h''_d$ —低压省煤器进出口水焓值  $\text{kJ/kg}$ ;

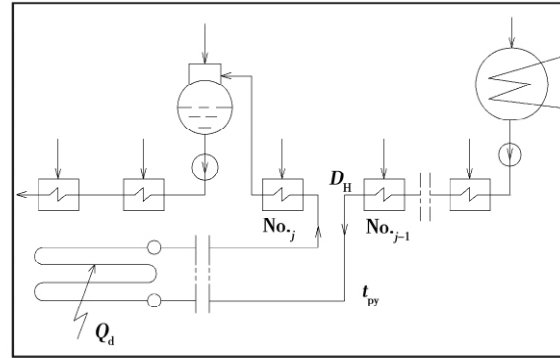


图 1 低压省煤器串联系统图

Fig. 1 Systematic diagram of low pressure economizers connected in series

$q_d$  为低压省煤器的单位工质热负荷,是一个纯热量,并利用  $No. j$  能级,按等效热降的基本法则,其新蒸汽等效热降增加:

$$\Delta H = q_d \eta_j \quad (2)$$

式中:  $q_d$ —低压省煤器的单位工质热负荷  $\text{kJ/kg}$ ;  $\eta_j$ — $j$  级低压加热器抽汽效率,%;  $\Delta H$ —新蒸汽等效热降增加值  $\text{kJ/kg}$ 。

低压省煤器使机组热经济性相对提高,则  $\delta\eta_j$ (%) :

$$\delta\eta_j = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $H$ —新蒸汽等效热降值  $\text{kJ/kg}$ ;

从式(3)看出,对于串联系统,低压省煤器的热经济性取决于  $q_d$  和  $\eta_j$  的大小,  $q_d$  越大,低压省煤器的热负荷越大,则排烟温度降低幅度越大,排烟余热利用程度越高,低压省煤器的热经济性收益越高;  $\eta_j$  越大,排烟余热利用能级越高,经济效益越大。但是在提高余热利用能级  $\eta_j$  的同时,低压省煤器出口烟气温将会提高,这样会降低排烟余热利用程度。

### 2.2 低压省煤器并联方式及定性分析

低压省煤器的并联系统,如图 2 所示。

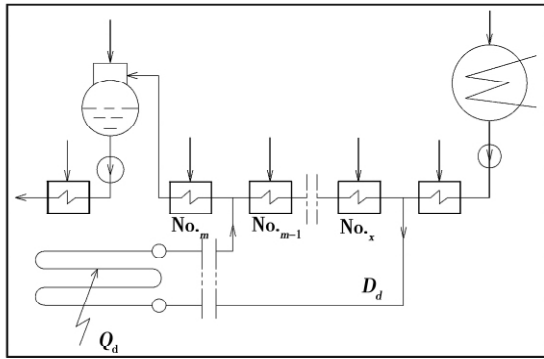


图 2 低压省煤器并联系统图

Fig. 2 Systematic diagram of low pressure economizers connected in parallel

低压省煤器并联系统从低压加热器 No. x 入口分流部分凝结水  $D_d$  流经低压省煤器, 吸收排烟余热被加热升温后返回汽轮机回热系统, 在低温加热器 No. m-1 的出口处与主凝结水相汇合。从凝结水流程看, 低压省煤器与 No. x 至 No. m-1 低压加热器成并联方式。

对于并联式低压省煤器系统, 如图 2 所示, 低压省煤器可以并联一个或几个低压加热器, 经过低压省煤器的凝结水量  $D_d$  相对于 1 kg 新蒸汽的份额为:

$$\alpha_d = D_d / D \quad (4)$$

式中,  $D_d$ —经过低压省煤器的凝结水量, kg/s;  $D$ —主蒸汽流量, kg/s;

依据等效热降原理, 份额  $\alpha_d$  的热水从低压加热器 No. x 入口引出热系统, 从低压加热器 No. m-1 的出口进入热系统, 整个系统获得的实际做功收益为:

$$\Delta H = \beta_d [(h_d - h_{m-1})\eta_m + \sum_{r=1}^{m-1} \tau_r \eta_r] \quad (5)$$

式中:  $\beta_d$ —分水流量系数, %;  $h_d$ —低压省煤器出口凝结水焓, kJ/kg;  $h_{m-1}$ —低压加热器 No. m-1 出口凝结水焓, kJ/kg;  $\eta_m$ —低压加热器 No. m 抽汽效率, %;  $\sum_{r=1}^{m-1} \tau_r \eta_r$ —并联各级低压加热器的抽汽效率与凝结水焓升乘积之和, kJ/kg;

低压省煤器将机组热经济性提高相对量:

$$\delta \eta_i = \frac{\Delta H}{H} \times 100 \quad (6)$$

式中,  $\Delta H$ —新蒸汽等效热降增加值, kJ/kg;  $H$ —新蒸汽等效热降值, kJ/kg;

对于余热利用装置来讲, 低压省煤器并联系统

为典型的梯度开发、多级利用系统, 将排烟余热分级利用在  $\eta_x \sim \eta_{m-1}$  之间的各个能级上, 该系统是一种最佳的利用形式, 就系统来说, 它充分利用了热系统拥有多能级的特点, 简单又自然地实现了排烟余热的多级梯级开发利用。

### 3 低压省煤器连接方案的经济性分析

#### 3.1 低压省煤器连接方式选择

针对低压省煤器连接方案的多样性, 拟采取 5 种连接方案: 串联在 7、8 号低压加热器之间、与 7 号低压加热器并联、与 6 号低压加热器并联、与 6、7 号低压加热器并联、与 5、6、7 号低压加热器并联。具体连接方案如表 4 所示。

表 4 600 MW 煤粉锅炉低压省煤器水侧连接方案

Tab. 4 Scheme for connecting the low pressure economizers at the water side of a 600 MW pulverized coal boiler

方案	低压省煤器 取进水点	低压省煤器 回水汇合点	连接方式
1	8 号低加出口	8 号低加出口	串联在 7 号、8 号低加之间
2	8 号低加出口	7 号低加出口	与 7 号低加并联
3	7 号低加出口	6 号低加出口	与 6 号低加并联
4	8 号低加出口	6 号低加出口	与 6、7 号低加并联
5	8 号低加出口	除氧器	与 5、6、7 号低加并联

#### 3.2 低压省煤器连接方式经济性分析

在 600 MW 工况下, 锅炉排烟温度试验值为 160 °C, 拟定将排烟温度降至 130 °C 时, 单位烟气焓降为 223 kJ/kg, 燃煤量为 345 t/h, 则烟气总焓降为 21 370 kJ。根据热平衡, 低压省煤器吸收排烟余热为 21 370 kJ<sup>[3]</sup>。考虑到汽轮机低压加热器运行安全性, 低压省煤器分水流量系数  $\beta_d$  小于等于 0.5; 同时考虑到受热面布置情况, 低压省煤器出口温度拟定为 110 °C, 防止因传热温差小引起低压省煤器受热面积增大, 改造成本增加。

根据各个连接方案吸收排烟余热相等的前提下, 利用等效焓降原理对表 4 中 5 种连接方案进行热经济性定量分析计算。各方案低压省煤器参数如表 5 所示。各个连接方式经济性计算结果如表 6 所示。

表 5 低压省煤器水侧各连接方案参数

Tab.5 Parameters of various schemes for connecting the low pressure economizers at the water side

	连接方式				
	1	2	3	4	5
低压省煤器入口水焓/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	285.57	285.57	410.38	285.57	285.57
低压省煤器入口水温/ $^{\circ}\text{C}$	67.83	67.83	97.9	67.83	67.83
低压省煤器出口水焓/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	331.61	377.42	493.71	463.48	458.78
低压省煤器出口水温/ $^{\circ}\text{C}$	67.81	89.84	117.4	110.3	109.8
分水流量系数/%	/	0.5	0.5	0.26	0.22

表 6 低压省煤器水侧连接方案经济参数

Tab.6 Cost-effectiveness parameters of various schemes for connecting the low pressure economizers at the water side

	连接方式				
	1	2	3	4	5
抽汽等效焓降增加 $\Delta H/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	6.16	7.71	7.69	6.18	5.27
系统经济性相对提高率 $\eta_i/\%$	0.49	0.61	0.61	0.48	0.42
热耗降低量 $\Delta q/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	37.87	47.33	47.20	38.01	32.42
发电煤耗降低量 $\Delta b/\text{kJ}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	1.43	1.79	1.78	1.44	1.22
全年节省标煤量 $\Delta B/\text{t}$	5148	6444	6408	5184	4392

由表 6 可以看出,方案 2 和方案 3 为机组效率提高值和煤耗降低量大约相等,但是方案 3 中低压省煤器出口水温高达  $117.4^{\circ}\text{C}$ ,低压省煤器受热面增大,增加改造成本,故方案 3 不可行。方案 4 和方案 5 随着分水流量系数的减小,经济性增加,但是由于受到低压省煤器出口水温的制约,经济性均低于方案 2。故方案 2 为 600 MW 锅炉低压省煤器水侧连接最佳连接方式。

### 3.3 低压省煤器优化连接方案实际应用

根据连接方式优化结果,该电厂进行加装低压省煤器改造后,对运行数据分析计算,低压省煤器出口温度降至  $130^{\circ}\text{C}$ ,发电煤耗为  $292.9\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。与改造前相比,煤耗降低  $1.8\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,实际改造应用结果与方案 2 发电煤耗理论计算值偏差  $0.01\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;机组按照年运行  $6\ 000\text{ h}$  计算,年节省标煤量为  $6\ 480\text{ t}$ ,大大降低了发电成本,提高了机组运行经济性。

## 4 结 论

(1) 通过计算分析,采用加装低压省煤器措施

来吸收排烟余热、提高机组热经济性具有现实可行性,但是低压省煤器水侧连接方式的选择至关重要;

(2) 通过对 600 MW 锅炉低压省煤器在汽轮机回热系统中 5 种连接方案热经济性分析结果表明,低压省煤器与 7 号低压加热器并联的连接方式可降低发电煤耗  $1.79\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,经济性最大,为最佳连接方式;

(3) 依据对 600 MW 低压省煤器水侧连接方式优化结果进行低压省煤器改造,改造效果与理论分析计算相符合,达到了预期的改造目标,低压省煤器连接优化方案具有现实可行性。

### 参考文献:

[1] 夏学敏,王文东. 600 MW 超超临界锅炉褐煤掺烧分析[J]. 华电技术 2011, 33(12): 18-19.  
XIA Xue-min, WANG Wen-dong. Analysis of the mixing-dilution combustion of brown coal in a 600 MW Ultra-supercritical boiler [J]. Huadian Technology 2011, 33(12): 18-19.

[2] 周新军,房林铁. 330 MW 机组增装低压省煤器及经济性分析[J]. 节能 2011, 34(6): 16-20.  
ZHOU Xin-jun, FANG Lin-tie. Additional installation of low pressure economizers for a 330 MW unit and cost-effectiveness analysis [J]. Energy Conservation 2011, 34(6): 16-20.

[3] 黄嘉骊,李 杨. 低压省煤器水侧系统连接方案优化分析[J]. 热力发电 2011, 40(3): 62-64.  
HUANG Jia-si, LI Yang. Optimization analysis of the scheme for connecting the low pressure economizers at the water side [J]. Thermal Power Generation 2011, 40(3): 62-64.

(陈 滨 编辑)

### • 书 讯 •

## 《含缺陷结构断裂力学》

本书系统论述了含缺陷结构的断裂问题,包括基本理论、力学原理、分析方法以及工程应用等。作为失效学体系的理论之一,本书在吸取前人研究成果的基础上,阐述了工程中典型的含缺陷结构的断裂行为。全书共 9 章,第 1 章介绍断裂力学的研究对象、研究内容及脆性破坏特征;第 2 章介绍杂交位移不连续法的基本理论;第 3~8 章论述多种含缺陷结构的裂纹问题;第 9 章论述复合型裂纹的断裂与疲劳扩展问题。本书适合从事断裂力学研究和应用的科技工作者及工程师使用和参考,也可供力学专业的研究生和高年级本科生阅读参考。

作者:刘宝良

哈尔滨工业大学出版社

出版时间:2012 年 10 月

To the needs to develop various high precision simulation models with a low calculation work load and facilitate to use, established was a three-layer nested model for single-phase heated tubes of a boiler and a study was performed of the heated tubes. The theoretically analytic results based on the Taylor series development method of the transfer functions show that for a disturbance to the enthalpy, flow rate and heat flux at the inlet, the calculation results of the three-layer nested model can approach to those of the distributed parameter model at the third-order, first-order and second-order precision respectively. The simulation results with the superheater of a 600 MW subcritical pressure boiler serving as the object show that the dynamic response of the model in question is in very well agreement with that of the distributed parameter model. Under the three kinds of disturbance, the performance of the three-layer nested model has been improved most conspicuously when compared with that of the two-layer nested model. The three-layer nested model can offer a competitive model choice for simulating real-time full-load simulation and control systems. **Key words:** boiler, single-phase heated tube, lumped parameter, nested structure, model

600 MW 锅炉低压省煤器水侧连接优化选择 = **Optimized Choice for the Connection Mode of the Water Side of the Low Pressure Economizer of a 600 MW Boiler** [刊 汉] LU Tai, ZHANG Zi-jian (Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012), ZHANG Su-juan (Chengde Iron and Steel Corporation, Chengde, China, Post Code: 067002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(4). - 368 ~ 371

According to the test data of a 600 MW power generator unit in a power plant, a cost-effectiveness analysis was performed of the five connection modes of a low pressure economizer in a steam turbine recuperator system by making use of the equivalent enthalpy drop theory. The calculation results show that the parallel connection mode of the low pressure economizer and No. 7 low pressure heater can achieve the best cost-effectiveness, lowering the standard coal consumption rate by 1.79 g/(kW·h). The practical modification effectiveness when analyzed and calculated by using the actual operation data of the low pressure economizer in a power plant after reconstruction was in agreement with the theoretical calculation result. The optimized and calculated results can offer certain guidance for designing and choosing the connection mode of the low pressure economizer of a 600 MW boiler. **Key words:** exhaust gas waste heat, low pressure economizer, equivalent heat drop, connection mode

火力发电厂低压省煤器系统的节能效果研究 = **Study of the Energy-saving Effectiveness of a Low Pressure**