

# 低温省煤器对汽轮机组热力系统经济性影响研究

程东涛, 马汀山, 陈 恺, 居文平

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

**摘 要:** 以某1 000 MW机组为例, 通过热耗率试验和等效焓降算法分别计算投运低温省煤器对汽轮机组热力系统经济性的影响, 两种方法分析结果一致, 在汽轮机组1 000、900、800、700、600和500 MW试验负荷工况下, 投运低温省煤器后汽轮机热耗率下降值分别为45.1、46.5、55.6、43.9、45.3和41.1 kJ/(kW·h), 投运低温省煤器后汽轮机组节能效果明显。

**关键词:** 低温省煤器; 汽轮机; 热耗; 等效焓降

中图分类号: TK264.1 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.029

## 引 言

低温省煤器能有效降低锅炉排烟温度、减少锅炉排烟热损失, 已广泛应用于各火力发电机组中。低温省煤器主要通过锅炉排烟(空气预热器后)加热凝结水, 利用了部分锅炉余热, 相应减少了热力系统原正常吸热量, 进而达到节能降耗的目的。然而, 一直缺少合理、系统的定量评价方法来确定投运低温省煤器对机组热力系统经济性的影响。本研究以热耗率和等效焓降算法分别分析计算投运低温省煤器对机组热力系统经济性的影响, 验证两种分析方法合理性的同时, 也确定了投运低温省煤器对机组热力系统经济性的实际影响。

## 1 经济性分析思路

低温省煤器主要通过锅炉排烟加热凝结水, 其对机组热力经济性影响与锅炉和汽轮机均直接相关, 根据分析思路的不同, 其经济性分析主要有两种思路。

### 1.1 锅炉效率提高

锅炉效率提高法以锅炉为分析主体, 低温省煤器装置的主要收益为投运低温省煤器后降低锅炉排

烟温度、减少锅炉排烟损失而带来的锅炉效率提高, 进而降低了机组发、供电煤耗。同时, 需考虑汽轮机低压回热抽汽受排挤而引起的汽轮机热耗率增加值。

### 1.2 汽轮机热耗率降低

汽轮机热耗率降低法以汽轮机为分析主体, 把低温省煤器吸收的锅炉排烟热量视为锅炉的余热。分析计算以锅炉效率保持不变为原则, 凝结水通过低温省煤器吸收的热量不计入汽轮机总吸热量, 低温省煤器的主要收益为投运低温省煤器后汽轮机热耗率降低值。

## 2 经济性分析方法

低温省煤器对机组热力系统经济性影响的两种分析思路中, 锅炉效率提高法需要计算投运低温省煤器带来的锅炉效率变化, 还涉及到分析计算汽轮机热耗率变化, 无论现场试验还是理论分析都较复杂繁琐。汽轮机热耗率降低法属于汽轮机性能计算传统方法, 能真实反映投运低温省煤器对机组热力经济性的影响, 广泛应用于确定汽轮机组热力经济性。

汽轮机热耗率降低值可通过汽轮机热耗率试验法和等效焓降算法得出。

### 2.1 热耗率试验法

通过现场试验的方法在汽轮机组不同负荷工况下分别进行停运和投运低温省煤器状态下的汽轮机热耗率性能试验, 直接对比各负荷工况下汽轮机组热力系统的经济性。

### 2.2 等效焓降算法

将等效焓降算法应用于汽轮机组回热系统中, 依据等效焓降原理, 定义:

$$H_1 = h_1 - h_n$$

式中:  $H_1$  和  $h_1$  一末级加热器的等效焓降和抽汽焓,

收稿日期: 2014-05-09; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目(2011BAA04B03); 中国华能集团公司科学技术资助项目(HNKJ12-H05)

作者简介: 程东涛(1985-), 男, 河南许昌人, 西安热工研究院有限公司工程师, 硕士研究生。

kJ/kg;  $h_n$ —低压缸排汽焓, kJ/kg。

$$H_j = (h_j - h_{j-1}) + (1 - \frac{\tau_j - \tau_{j-1}}{h_{j-1} - \tau_{j-1}}) \times H_{j-1}$$

式中:  $H_j$ 、 $h_j$  和  $\tau_j$ —加热器  $j(j \geq 2)$  的等效焓降、抽汽焓和疏水焓, kJ/kg。

根据投运低温省煤器后排挤的抽汽量可计算出排挤加热器  $j$  抽汽影响汽轮机热耗率降低值:

$$\Delta HR_j = \frac{G_j \times H_j}{P} \times HR$$

式中:  $\Delta HR_j$ —排挤加热器  $j$  抽汽影响汽轮机热耗率降低值, kJ/(kW·h);  $G_j$ —排挤加热器  $j$  的抽汽量, kg/s;  $P$ —汽轮发电机组功率, kW;  $HR$ —汽轮机热耗率, kJ/(kW·h)。

### 3 实例分析

以汽轮机热耗率降低法为计算依据, 分别用热耗率试验法和等效焓降计算法分析某1 000 MW 机组投运低温省煤器对汽轮机组热力系统经济性的影响。

#### 3.1 热耗率试验法

现场试验过程中, 分别在汽轮机组 1 000、900、800、700、600 和 500 MW 负荷工况下进行停运和投运低温省煤器后的汽轮机性能试验, 热耗率试验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 1 000、900 和 800 MW 负荷工况汽轮机热耗率试验结果

Tab. 1 Test results of the heat rates of a steam turbine at a load of 1 000, 900 and 800 MW respectively

参 数	1 000 MW 负荷		900 MW 负荷		800 MW 负荷	
	停运	投运	停运	投运	停运	投运
机组负荷/kW	1 000 855	999 922	900 551	901 695	800 601	803 665
主蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	2 887.5	2 864.1	2 555.2	2 542.8	2 232.3	2 229.3
7号低加出口温度(低温省煤器进口)/°C	82.7	83.5	80.3	81.0	77.3	78.6
6号低加进口温度(低温省煤器出口)/°C	82.7	101.2	80.3	95.9	77.3	95.7
凝结水温升(经低温省煤器)/°C	0.0	17.8	0.0	14.9	0.0	17.1
试验热耗率/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	7 667.7	7 634.3	7 691.9	7 642.6	7 722.5	7 673.5
* 修正后的热耗率/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	7 614.5	7 569.3	7 667.1	7 620.6	7 716.8	7 661.2
热耗率降低值/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	45.1		46.5		55.6	

注: \* 对试验热耗率分别进行了主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、低压缸排汽压力和再热减温水流量修正

表 2 700、600 和 500 MW 负荷工况汽轮机热耗率试验结果

Tab. 2 The results of 700, 600 and 500 MW turbine heat consumption rate test in load operating condition

参 数	700 MW 负荷		600 MW 负荷		500 MW 负荷	
	停运	投运	停运	投运	停运	投运
机组负荷/kW	701 404	699 584	602 507	601 249	501 034	500 897
主蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	1 939.5	1 931.7	1 645.7	1 634.8	1 358.8	1 351.2
7号低加出口温度(低温省煤器进口)/°C	75.2	75.6	72.5	73.0	68.4	69.1
6号低加进口温度(低温省煤器出口)/°C	75.2	89.2	72.5	87.2	68.4	84.7
凝结水温升(经低温省煤器)/°C	0.0	13.6	0.0	14.2	0.0	15.6
试验热耗率/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	7 814.7	7 767.1	7 871.1	7 830.4	8 005.5	7 955.0
* 修正后的热耗率/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	7 799.8	7 755.9	7 906.8	7 861.5	8 044.9	8 003.7
热耗率降低值/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	43.9		45.3		41.1	

注: \* 对试验热耗率分别进行了主蒸汽温度、再热蒸汽温度、低压缸排汽压力和再热减温水流量修正

由表 1 和表 2 看出, 在汽轮机组 1 000、900、800、700、600 和 500 MW 试验负荷工况下, 投运低温省煤器后凝结水经低温省煤器吸热后温升分别为

17.8、14.9、17.1、13.6、14.2 和 15.6 °C, 汽轮机热耗率下降值分别为 45.1、46.5、55.6、43.9、45.3 和 41.1 kJ/(kW·h)。

### 3.2 等效焓降算法

该1 000 MW 机组投运低温省煤器后的凝结水流程为大部分凝结水从7号低压加热器出口经低温省煤器吸热后进入6号低压加热器入口,少部分凝结水保持原工作流程即由7号低压加热器出口直接进入6号低压加热器,流量分配主要取决于锅炉排

烟温度高低。投运低温省煤器后将提高6号低压加热器入口温度,进而排挤了6号低压加热器的进汽流量,同时还排挤少部分5号低压加热器进汽量。

依据停运和投运低温省煤器条件下的汽轮机性能试验数据,进行等效焓降计算,等效焓降计算结果如表3和表4所示。

表3 1 000、900和800 MW 负荷工况等效焓降计算结果

Tab.3 The equivalent enthalpy drop method results of 1 000,900 and 800 MW in load operating condition

参 数	1 000 MW 负荷		900 MW 负荷		800 MW 负荷	
	停运	投运	停运	投运	停运	投运
机组负荷/kW	1 000 855	999 922	900 551	901 695	800 601	803 665
除氧器进口凝结水流量/ $t \cdot h^{-1}$	2 049.8	2 082.3	1 867.8	1 875.6	1 682.4	1 651.1
7号低加出口温度(低温省煤器进口)/ $^{\circ}C$	82.7	83.5	80.3	81.0	77.3	78.6
6号低加进口温度(低温省煤器出口)/ $^{\circ}C$	82.7	101.2	80.3	95.9	77.3	95.7
凝结水温升(经低温省煤器)/ $^{\circ}C$	0.0	17.8	0.0	14.9	0.0	17.1
5段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	77.8	67.0	69.5	60.3	61.0	51.3
6段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	67.2	20.2	59.7	24.3	52.2	14.6
投运低温省煤器排挤五段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$		10.8		9.2		9.7
投运低温省煤器排挤六段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$		47.0		35.4		37.6
五段抽汽等效热降/ $kJ \cdot kg^{-1}$		528.1		519.9		519.9
六段抽汽等效热降/ $kJ \cdot kg^{-1}$		397.6		389.1		384.5
排挤五段抽汽至热耗率降低值/ $kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$		12.0		11.3		13.5
排挤六段抽汽至热耗率降低值/ $kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$		39.5		32.6		38.7
投运低温省煤器至热耗率总降低值/ $kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$		51.5		43.9		52.2

表4 700、600、500 MW 负荷工况等效焓降计算结果

Tab.4 The equivalent enthalpy drop method results of 700,600 and 500 MW

参 数	700 MW 负荷		600 MW 负荷		500 MW 负荷	
	停运	投运	停运	投运	停运	投运
机组负荷/kW	701 404	699 584	602 507	601 249	501 034	500 897
除氧器进口凝结水流量/ $t \cdot h^{-1}$	1 450.6	1 473.1	1 249.6	1 244.5	1 050.4	1 045.0
7号低加出口温度(低温省煤器进口)/ $^{\circ}C$	75.2	75.6	72.5	73.0	68.4	69.1
6号低加进口温度(低温省煤器出口)/ $^{\circ}C$	75.2	89.2	72.5	87.2	68.4	84.7
凝结水温升(经低温省煤器)/ $^{\circ}C$	0.0	13.6	0.0	14.2	0.0	15.6
5段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	51.2	45.8	42.7	37.1	34.5	29.9
6段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	44.2	18.7	35.7	12.8	29.9	7.8
投运低温省煤器排挤五段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$		5.5		5.5		4.6
投运低温省煤器排挤六段抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$		25.4		22.9		22.1
五段抽汽等效热降/ $kJ \cdot kg^{-1}$		500.9		498.0		477.5
六段抽汽等效热降/ $kJ \cdot kg^{-1}$		366.5		361.3		339.2
排挤五段抽汽至热耗率降低值/ $kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$		8.5		10.1		9.8
排挤六段抽汽至热耗率降低值/ $kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$		28.8		30.1		33.4
投运低温省煤器至热耗率总降低值/ $kJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$		37.3		40.2		43.1

由表3和表4看出,在汽轮机组1 000、900、800、700、600和500 MW 试验负荷工况下,用等效

焓降法计算投运低温省煤器后汽轮机热耗率下降值分别为 51.5、43.9、52.2、37.3、40.2 和 43.1 kJ/(kW·h)。

### 4 热力经济性节能效果分析

在汽轮机组 1 000、900、800、700、600 和 500 MW 负荷工况下,热耗率试验和等效焓降计算得出的投运低温省煤器对汽轮机组热力系统经济性影响

结果如表 5 所示。

由表 5 看出,在各负荷工况下,汽轮机热耗率试验法和等效焓降算法得出的低温省煤器对汽轮机组热力系统经济性影响结果基本一致,投运低温省煤器后汽轮机组热力系统经济性节能效果明显。

投运低温省煤器后汽轮机组热力系统经济性节能效果与机组负荷没有明显关系,热耗率试验法存在一定的试验误差,由等效焓降算法可看出热耗率降低值与凝结水温升基本成正比关系。

表 5 汽轮机组热力经济性节能效果

Tab.5 The energy-saving effects of turbine units

参 数	负 荷					
	1 000 MW	900 MW	800 MW	700 MW	600 MW	500 MW
凝结水温升(经低温省煤器) /℃	17.8	14.9	17.1	13.6	14.2	15.6
热耗率降低值(热耗率试验法) /kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	45.1	46.5	55.6	43.9	45.3	41.1
热耗率降低值(等效焓降算法) /kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	51.5	43.9	52.2	37.3	40.2	43.1

各试验负荷工况下凝结水温升有明显差别的主要原因为现场试验时锅炉排烟温度控制值有差别,机组实际运行过程中应控制锅炉排烟温度在低限值运行,提高凝结水温升,进而最大限度的提高节能量。

### 5 结 论

在汽轮机组 1 000、900、800、700、600 和 500 MW 试验负荷工况下,用热耗率试验法对比计算投运低温省煤器后汽轮机热耗率下降值分别为 45.1、46.5、55.6、43.9、45.3 和 41.1 kJ/(kW·h);用等效焓降法计算投运低温省煤器后汽轮机热耗率下降值分别为 51.5、43.9、52.2、37.3、40.2 和 43.1 kJ·(kW·h)。

热耗率试验法和等效焓降算法均是评价投运低温省煤器后汽轮机组热力系统经济性节能效果的有效方法。

投运低温省煤器后汽轮机组热力系统经济性节能效果明显,机组实际运行过程中应控制锅炉排烟温度在低限值运行,提高凝结水温升,进而最大限度的提高节能量。

### 参考文献:

[1] 林万超,火电厂系统节能原理 [M],西安:西安交通大学出版社,1994.  
LIN Wan-chao. Power system energy conservation principle [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994.

[2] 西安热工研究院. 发电企业节能降耗技术 [M]. 北京: 中国电力出版社,2010.  
Xi'an Thermal Power Research Institute. Power generation enterprise energy saving technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[3] 盛德仁,陈坚红,李蔚,等. 等效焓降法理论剖析与扩展 [J]. 浙江大学学报,2004,38(3): 347-350.  
SHENG De-ren, CHEN Jian-hong, LI Wei. Analysis and extension of equivalent enthalpy drops theory [J]. Journal of Zhejiang University, 2004, 38(3): 347-350

[4] 张春发,郭民臣,张明智. 等效焓降法理论基础的研究 [J]. 华北电力学院学报,1993(3): 21-27.  
ZHANG Chun-fa, GUO Min-chen, ZHANG Ming-zhi. A study on the fundamental theory of equivalent enthalpy drops [J]. Journal of North China Institute of Electric Power, 1993, (3): 21-27.

[5] 江峰,王培红. 等效焓降局部定量修正模型的算法研究 [J]. 汽轮机技术,2008,4(2): 122-125.  
JIANG Feng, WANG Pen-gong. A rithm etic research of local quantitative mod ificatory model on equivalent enthalpy drop [J]. Turbine Technology, 2008, 4(2): 122-125

(姜雪梅 编辑)

slag when discharged etc. parameters, the authors studied the influence of the slag removal system on the boiler efficiency and optimized the whole boiler system. It has been found that the critical temperature of the air fed from the bottom of the furnace should be 247.3 °C. If the temperature of the air is lower than this critical temperature, the boiler efficiency will gradually decline with an increase of the amount of cooling air. After a dry type slag removal system has been adopted for a 600 MW unit, the boiler efficiency will increase by about 0.023%, thus solving the problem that there emerged a high temperature of flue gases in the initial stage of the reconstruction and the steel belt conveyer got stuck. **Key Words:** 600 MW unit, drytype slagremoval, cooling air flow rate, boiler efficiency

低温省煤器对汽轮机组热力经济性影响研究 = **Study of the Influence of a Low Temperature Economizer on the Thermal Cost-effectiveness of a Steam Turbine Unit** [刊, 汉] CHENG Dong-tao, MA Ting-shan, CHEN Kai, JU Wen-ping ( Xi'an Thermodynamics Academy Co. Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(3). -426-429

To put a low temperature economizer into operation will directly affect the operation state of its boiler and steam turbine. The heat rate reduction method for steam turbines is regarded as an effective and practical method for analyzing and evaluating the influence of a low temperature economizer on the thermal cost-effectiveness of the whole unit. With a 1 000 MW unit serving as an example, the influence of the putting-into-operation of its low temperature economizer on the thermal cost-effectiveness of the steam turbine unit was calculated through conducting a heat rate test and by using the equivalent enthalpy drop calculation method respectively. The results calculated by using both methods are in good agreement. Under the condition of the steam turbine unit operating at a test load of 1 000 MW, 900 MW, 800 MW, 700 MW, 600 MW and 500 MW, the heat rate of the steam turbine decreased by 45.1, 46.5, 55.6, 43.9, 45.3 and 41.1 kJ/kW·h respectively after the low temperature economizer had been put into operation, thus leading to a notably high thermal cost-effectiveness of the steam turbine unit and achieving a conspicuous energy-saving result. **Key Words:** low temperature economizer, steam turbine, heat rate, equivalent enthalpy drop

燃用准东煤循环流化床锅炉结渣沾污分析研究 = **Analysis and Study of the Slagging and Contamination of a CFB Boiler Burning Zhundong-originated Coal** [刊, 汉] CHEN Heng, WANG Yun-gang, MA Hai-dong, ZHAO Qin-xin ( Education Ministry Key Laboratory on Thermo-fluids Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(3). -430-434