

## 600 MW 机组低温省煤器节能降碳研究

叶超峰

(清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215163)

**摘要:**文中对600 MW机组低温省煤器进行了设计,采用等效焓降法,计算分析了排挤抽汽发电对节能降碳的影响。结果表明,加装低温省煤器后,机组效率可以提高0.34%,供电煤耗减少约0.99 g/(kW·h),预计每年可节约标准煤3 550 t,减少二氧化碳9 444 t。

**关键词:**低温省煤器;节能减碳;等效焓降法;酸露点温度

**中图分类号:**TM 621 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2024)06-0062-03

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”目标背景下,煤电机组作为最大的能源消耗和碳排放源,是节能降碳潜力挖掘的重要方向。排烟热损失是煤电机组能源损失的重要部分,且随着排烟温度的升高而增大,实际运行排烟温度常常高出设计值10~60 °C,这不仅降低锅炉的利用率,而且影响电除尘的安全性和电厂的热经济性<sup>[1]</sup>。通过加装低温省煤器<sup>[2-5]</sup>吸收烟气余热,有效降低了排烟温度,有助于提高除尘器运行效率,并可利用烟气余热加热凝结水,提高锅炉给水温度,降低煤耗,提高锅炉的整体热效率。

## 1 机组设备情况

机组装机容量为600 MW,装备有哈尔滨锅炉厂生产的超临界一次中间再热、单炉膛墙式切圆燃烧、固态除渣、平衡通风燃煤锅炉,型号为HG 1950/25.4—HM 15和哈尔滨汽轮机厂生产的超临界、一次中间再热、两缸两排汽、直接空冷凝汽型汽轮机,机组汽轮机主要设计参数如表1所示。

表1 机组汽轮机主要技术参数

名称	参数
汽轮机型号	NZK 600-24.2/566/566
汽轮机形式	超临界、一次中间再热、两缸两排汽、直接空冷凝汽式
蒸汽压力	24.2 Mpa
再热温度	566 °C
额定进汽量	17 00.13 t/h
最大进汽量	1 950.00 t/h
排汽压力	10 kPa
加热器数	3高加+1除氧器+3低加
给水温度	274.4 °C
热耗	7 688.0 kJ/kW·h
汽耗	2.834 kg/kW·h

## 2 低温省煤器设计方案

项目为600 MW低温省煤器改造,在锅炉空预器出口与电除尘器入口烟道安装低温省煤器,将烟气温度从144 °C降低至114 °C。低温省煤器回收的烟气余热加热凝结水,再返回凝结水系统。低温省煤器系统从机组主凝结水管道7号低加进出口两路取水,两路混合成设计温度70 °C后进入低温省煤器,加热后的热水返回6号低加进口。凝结水升压泵采用两台100%容量变频泵(一运一备)。低温省煤器系统流程图如图1所示。

收稿日期:2024-09-05

作者简介:叶超峰(1987),男,硕士,工程师,研究方向节能减排和碳排放生命周期管理。

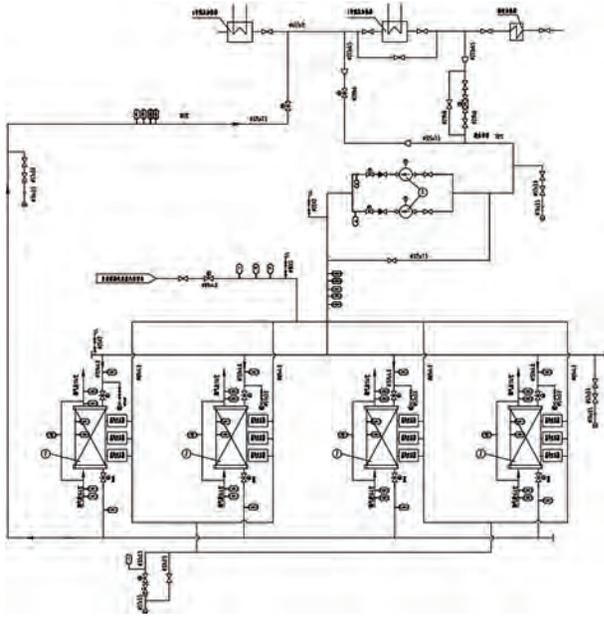


图1 低温省煤器系统流程图

为了防止低温腐蚀的影响,对烟气酸露点和设计温度进行校核。设计煤种及校核煤种如表2所示。

表2 设计煤种及校核煤种

项目	符号	单位	设计煤种	校核煤种
煤种	-	-	褐煤	褐煤
收到基碳	$C_{ar}$	%	37.58	30.74
收到基全硫	$S_{1,ar}$	%	1.45	1.45
全水分	$M_t$	%	29	32
空气干燥基水分	$M_{ad}$	%	12.01	14.41
收到基灰分	$A_{ar}$	%	18.89	22.67
干燥无灰基挥发分	$V_{daf}$	%	44.64	53.568
收到基低位发热量	$Q_{net,ar}$	MJ/kg	13.63	11.36

烟气酸露点温度<sup>[6]</sup>通过式(1)计算获得:

$$t_{sl} = t_{ld} + \frac{\beta(S_{y,zs})^{\frac{1}{3}}}{1.05^{\alpha_{in}A_{y,zs}}} \quad (1)$$

式中: $S_{y,zs}$ 为燃料折算硫分, $S_{y,zs} = \frac{S_y}{(Q_{dw}/4187)}$ ,%;

$A_{y,zs}$ 为燃料料的折算灰分, $A_{y,zs} = \frac{A_y}{(Q_{dw}/4187)}$ ,%; $t_{ld}$ 为

烟气中水蒸气露点 $t_{ld} = 42.4332P_{H_2O}$ ;  $P_{H_2O}$ 为水蒸气体分压力; $S_y$ 、 $A_y$ 为燃料的收到基含硫量、灰分,%; $Q_{dw}$ 为燃料的收到基低位发热量,kJ/kg; $\alpha_{in}$ 为飞灰占总灰的份额,固态排渣取0.95,%; $\beta$ 为与炉膛出口过量空气系数 $\alpha_T$ 有关的系数,当 $\alpha_T=1.4 \sim 1.5$ 时,此值为129;当 $\alpha_T=1.2$ 时,此值为121。此处 $\alpha_T$ 为1.3, $\beta$ 取125。

经过计算烟气的水露点温度为51.7℃,酸露点温度124.5℃。酸露点温度高于低温省煤器出口烟气温度,金属表面温度运行在酸露点温度之下,此时

烟气换热器必须选用耐酸腐蚀ND钢;同时,为避免烟气中大量的水蒸汽结露析出,金属表面的温度至少要大于水露点温度20℃左右,项目设计进水温度为70℃,出口烟气温度为114℃。低温省煤器的管排布置采用逆流换热,温度最低管壁温度为进水口的第一排换热管。通过核算,最低金属壁温大于71.7℃,满足设计要求。

低温省煤器水平布置,并联设置分别安装在电除尘入口处的四个烟道内,每组由6个换热器模块组成低温省煤器。低温省煤器主要性能参数如表3所示,主要设计参数如表4所示。

表3 低温省煤器热力性能参数

名称	符号	单位	数值
给定烟量	V	Nm <sup>3</sup> /h	2 337 500
工质(水)流量	D	t/h	680
入口烟气温度	$T_1$	℃	144
出口烟气温度	$T_2$	℃	114
进口水温	$t_1$	℃	70
出口水温	$t_2$	℃	105
换热功率	Q	MW	27.6
烟气平均流速	u	m/s	10.5
烟气流动阻力	$\Delta P$	Pa	387
换热器水侧阻力	$\Delta P_i$	Mpa	<0.1
平均烟温	$T_m$	℃	129
平均水速	$u_i$	m/s	1.05
逆流平均温差	$\Delta \theta$	℃	41.6
换热系数	k	w/m <sup>2</sup> ℃	42.1

表4 低温省煤器主要设计参数

名称	符号	单位	数值
台数(单台机组配置)	N	个	4
每台换热器前后管组数	$N_1$	个	2
每台换热器横向管组数	$N_2$	个	3
单/双侧进出水	-	-	单侧进水(双管圈)
换热器布置方式	-	-	水平
管排布置方式	-	-	顺列
管子规格	$d \times t \times l$	mm×mm×mm	Φ38×5×6 500
横向节距	$s_1$	mm	125
纵向节距	$s_2$	mm	100
管束横向排数	$Z_1$	排	40
管束纵向列数	$Z_2$	列	16
换热元件结构形式	-	-	H型双管翅片
翅片节距	P	mm	20
翅片厚度	$\delta$	mm	2.5
单台换热器尺寸(长×宽×高)	V	m×m×m	3×6.5×5.3
换热面积(单台机组)	F	m <sup>2</sup>	17 020
重量(单台机组)	m	t	320

### 3 节能减碳效果分析

在600 MW额定工况下,机组主蒸汽流量为1 731 t/h,主蒸汽压力为24.2 MPa,主蒸汽温度为566℃,排汽压力为9 kPa,排汽焓为2 394.8 kJ/kg。利用等效焓降法,对加装低温省煤器的节能效果进行估算<sup>[7-8]</sup>。

各级抽汽等效焓降为:

$$H_j = (h_j - h_c) + \sum_{r=j-1}^{m-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad (2)$$

式中： $h_j$ 为j级加热器的抽汽焓值，kJ/kg； $h_c$ 为排汽焓值，kg/kJ； $A_i$ 为疏水焓降或给水焓升，根据情况而定； $q_r$ 为加热器中的放热量。

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j} \quad (3)$$

式中： $\eta_j$ 为j级低压加热器抽汽效率，%。

如表5所示，经过计算，7号低加、6号低加、5号低加的抽汽效率分别为12.8%、16.9%和22.5%。

表5 汽轮机回热加热系统主要参数

序号	抽汽焓值/(kJ/kg)	疏水焓值/(kJ/kg)	给水焓升/(kJ/kg)	抽汽放热/(kJ/kg)	疏水放热/(kJ/kg)	入口水温/度℃	入口水焓值/(kJ/kg)	各级抽汽焓降/(kJ/kg)	抽汽效率/%
7号低加	2715.9	209.7	230.6	2506.2	220.1	44.6	186.5	321.1	12.8
6号低加	2828.7	429.8	85.5	2398.9	86.7	99.2	417.1	404.4	16.9
5号低加	2958.2	516.5	89.3	2441.7	-	119.5	502.6	548.5	22.5

凝结水从某低压加热器的入口引至低压省煤器，然后从某加热器出口返回凝结水系统，新蒸汽等效焓降增加值为：

$$\Delta H = \beta_d [(h_d - h_{m-1})\eta_m + \sum_{r=1}^{m-1} \tau_r \eta_r] \quad (4)$$

式中： $\beta_d$ 为分水系数，%； $h_d$ 为低压省煤器出口凝结水焓，kJ/kg； $h_{m-1}$ 为低压加热器 $No_{m-1}$ 出口凝结水焓，kg/kJ； $\eta_m$ 为低压加热器 $No_m$ 抽汽效率，%； $\tau_r \cdot \eta_r$ 为并联各级低压加热器的抽汽效率与凝结水焓升乘积，kJ/kg。

从7号低加进出口取水，44.6℃，焓值186.5 kJ/kg，7号低加出口温度99.2℃，焓值417.1 kJ/kg。7号低加入口流量364 t/h，7号低加出口流量316 t/h，经汇合后达到设计温度70℃，焓值293.7 kJ/kg，流量680 t/h，经过低温省煤器后出口温度105℃，焓值439.8 kJ/kg。主凝结水量为1 731.07 t/h。经计算，分水系数为0.393。7号、6号和5号低加抽汽的等效焓降为4.6 kJ/kg。

新蒸汽的等效焓降为：

$$H = \frac{3600}{\eta_b \cdot d} \quad (5)$$

式中： $\eta_b$ 为锅炉效率，此处取92%； $d$ 为汽耗率，此处为2.885 kg/kW·h。

相对效率提高：

$$\Delta \eta_i = \frac{\Delta H}{H + \Delta H} \quad (6)$$

机组的热耗量相对减少：

$$\Delta q = \Delta \eta_i \cdot q \quad (7)$$

式中： $q$ 为热耗率，此处为7 770.8 kJ/kW·h。

机组降低煤耗：

$$\Delta b = \frac{\Delta q}{\eta_b \cdot \eta_g \cdot 29270} \cdot 1000 \quad (8)$$

式中： $\eta_g$ 为管道效率，此处取99%。

如表6所示，通过余热回收提高部分凝结水温度，机组效率提高0.34%，机组供电标煤耗量降低0.99 g/(kW·h)。按照年运行6 000 h计算，每年可节约标准煤3 550 t，减少二氧化碳9 444 t。

表6 换热器热力性能参数

名称	符号	单位	数值
余热回收系统凝结水份额	$\beta_d$	/	0.393
等效焓降变化量	$\Delta H$	kJ/kg	4.6
机组效率相对变化量	$\Delta \eta_i$	%	0.34
机组热耗率变化量	$\Delta q$	kJ/(kW·h)	-26.29
供电标煤耗量变化量	$\Delta b$	g/(kW·h)	-0.99
全年节省标煤量	$\Delta B$	t	3 550
二氧化碳减排量	$\Delta C$	t	9 444

## 4 结语

通过对600 MW机组加装低温省煤器，并采用等效焓降法，对排挤抽汽发电计算节能降碳效果。结果表明，加装低温省煤器后，机组效率得到提高，供电煤耗减小。

## 参考文献：

- [1] 吴剑恒.“双碳”目标下燃煤背压机组锅炉烟气余热深度利用研究[J]. 电力学报, 2022, 37(5): 384-421.
- [2] 王森. 发电厂330 MW机组低低温省煤器节能研究[J]. 能源与节能, 2024(6): 80-82+89.
- [3] 何军, 戴玥. 低低温省煤器在650 MW火电机组的应用[J]. 节能, 2020, 39(8): 17-19.
- [4] 温宝辉. 330 MW燃煤机组低低温省煤器设计与应用[J]. 山西化工, 2022, 42(2): 230-231+250.
- [5] 马记. 1 000 MW超超临界机组加装低低温省煤器改造及热经济性分析[J]. 华电技术, 2018, 40(10): 37-39+77.
- [6] 贾明生, 凌长明. 烟气酸露点温度的影响因素及其计算方法[J]. 工业锅炉, 2003(6): 31-35.
- [7] 崔超, 邹兵, 高英伟, 等. 燃煤电厂低低温省煤器技术节能分析[J]. 东北电力技术, 2019, 40(10): 30-32.
- [8] 张红方, 王勇, 田松峰, 等. 基于等效焓降法的低低温省煤器系统经济性分析[J]. 节能技术, 2011, 29(5): 457-461.