

# 300 MW CFB 锅炉余热利用系统研究

白涛,靳智平,王艳玲,杜海玲,刘文辉

(山西大学 动力工程系,山西 太原 030013)

**摘要:**针对某电厂 300 MW CFB 锅炉排烟温度较高的问题,通过在锅炉尾部烟道内布置低压省煤器,来降低排烟温度,同时可提高机组热经济性。根据低压省煤器系统的设计原则及参数要求,考虑排烟温度降幅受受热面低温腐蚀、管壁磨损、回热系统级间焓升约束等因素的影响,提出布置方案,并采用等效焓降法对方案的热经济性进行分析。计算结果表明,采用方案 3 机组热经济性较高,额定负荷下,煤耗可降低 1.517 g/kWh。布置低压省煤器后,节能效果显著,可为同类型机组的节能降耗改造提供参考和依据。

**关键词:**CFB 锅炉;低压省煤器;余热利用;热经济性

中图分类号:TK223.3

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)03-0112-06

## Study on the waste heat utilization system of 300 MW CFB boiler

Bai Tao, Jin Zhiping, Wang Yanling, Du Hailing, Liu Wenhui

(Department of Power Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of excessively high temperature of exhaust gas, a low pressure economizer was installed in the tail flue to reduce the fuel gas temperature and increase the thermal economy of the unit. The layout schemes were proposed according to the design discipline and parameter requirement by systematically considering the sulfur contamination, abrasion of tube wall, and enthalpy rise constraint among the heat regenerative systems. The thermal economy of proposed schemes was evaluated using equivalent enthalpy drop method. The results show that scheme 3 achieves higher thermal economy than others. It can reduce the coal consumption to 1.517 g/kWh at rated load. The low pressure economizer presents better energy saving effect, and it can be beneficial as energy saving reference for other same type units.

**Key words:** CFB boiler; low pressure economizer; waste heat utilization; thermal economy

## 0 引 言

目前,排烟热损失占到了燃煤电站锅炉热损失总量的 70%~80%,随着锅炉排烟温度的升高,机组发电煤耗也随之增加。研究表明,锅炉排烟温度每升高 10℃,锅炉热效率将会降低 0.5%~0.7%,机组整体发电煤耗将增加 1.7~2.29 g/kWh。此外,排烟温度还是影响机组运行经济性和安全性的重要因素,锅炉排烟温度上升会造成湿法脱硫减温水量增加,烟气体积流量增大,飞灰比电阻增大,电除尘器效率下降,严重时除尘器滤袋还会出现高温

氧化腐蚀<sup>[1]</sup>。采用低压省煤器回收烟气余热,被认为是一项可降低排烟温度,提高燃煤机组热经济性的有效措施。排烟余热可用于加热回热系统凝结水、一次风、热网水、干燥燃料,还可作为水煤式烟气加热器(MGGH)的热源<sup>[2-4]</sup>。目前,应用较多的仍是利用排烟余热加热回热系统凝结水,排挤部分回热系统抽汽,返回汽轮机做功,提高机组热经济性<sup>[5]</sup>。为配合某 300 MW CFB 锅炉机组进行的超低排放改造,在锅炉尾部烟道内布置低压省煤器来降低排烟温度,并对设计方案进行优化以及热经济性分析。

收稿日期:2016-12-27;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.03.022

基金项目:山西省煤基重点科技攻关资助项目(MD2014-03)

作者简介:白涛(1981—),男,山西朔州人,讲师,博士,从事燃煤电站锅炉节能减排方面研究。E-mail:hd baitao@126.com

引用格式:白涛,靳智平,王艳玲,等.300 MW CFB 锅炉余热利用系统研究[J].洁净煤技术,2017,23(3):112-117.

Bai Tao, Jin Zhiping, Wang Yanling, et al. Study on the waste heat utilization system of 300 MW CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 112-117.

## 1 机组概况

某电厂 300 MW CFB 锅炉为上海锅炉厂有限公司制造,型号 SG-1060/17.5-M802,亚临界中间再热、单锅筒自然循环。锅炉采用岛式布置、全钢结构架悬吊结构,炉底采用水冷一次风室结构,炉膛采用气密式水冷壁,炉前布置两级破碎制煤系统,燃料由回

料腿以及炉膛两侧墙给煤口进入炉膛。锅炉实际运行排烟温度为 140 ℃,为配合电厂进行的超低排放改造,拟在锅炉尾部烟道内布置低压省煤器。考虑燃用煤质以及低温腐蚀等因素,排烟温度降至 120 ℃左右,排烟余热用于加热回热系统凝结水,回热系统如图 1 所示。锅炉设计燃用煤质数据见表 1,回热系统主要参数见表 2。

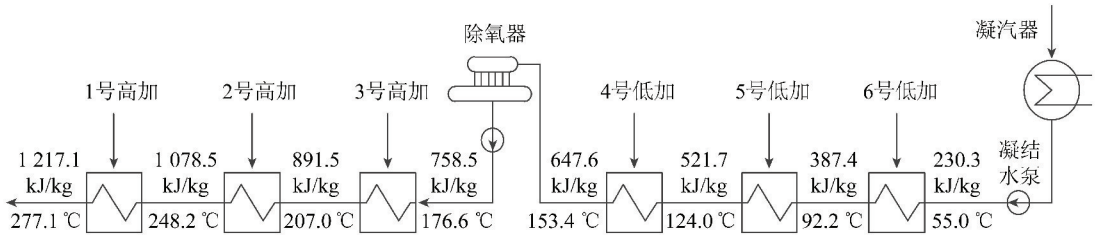


图 1 热力系统示意

Fig. 1 Thermal system schematic diagram

表 1 设计燃用煤质分析

Table 1 Coal quality analysis for combustion

工业分析/%			元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
$M_1$	$A_{\text{ar}}$	$V_{\text{daf}}$	$C_{\text{ar}}$	$H_{\text{ar}}$	$O_{\text{ar}}$	$N_{\text{ar}}$	$S_{\text{ar}}$	$(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
9.52	45.88	40.97	31.21	2.38	9.53	0.35	1.13	11.68

表 2 回热系统主要参数

Table 2 Parameters of regenerative system

参数	1 号高加	2 号高加	3 号高加	除氧器	4 号低加	5 号低加	6 号低加
抽汽温度/℃	275.5	248.2	207.0	173.0	156.2	126.8	95
抽汽焓/( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3 150.5	3 047.0	3 333.4	3 135.3	3 048.8	2 867.2	2 675.3
抽汽压力/MPa	6.999	3.860	1.797	0.851	0.561	0.245	0.085
进口水温/℃	248.2	207.0	176.6	153.4	124.0	92.2	55.0
出口水温/℃	277.1	248.2	207.0	176.6	153.4	124.0	92.2
给水质量流量/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	282.5	282.5	282.5	282.5	221.1	221.1	221.1

## 2 低压省煤器布置方案

低压省煤器一般布置于锅炉尾部烟道内,水侧与回热系统连接,通过吸收排烟余热加热回热系统凝结水,被排挤的部分抽汽,返回汽轮机中继续做功。增设低压省煤器后,可以保证机组在燃料投入量不变的情况下,提高机组热经济性<sup>[6]</sup>。

### 2.1 烟气侧布置方案

表 3 为低压省煤器布置方案的优缺点<sup>[7-9]</sup>。由表 3 可知,方案 2 和方案 4 在有效利用排烟余热的同时,可提高电除尘效率,减少脱硫减温水量。由于本次改造排烟温度降幅在 20 ℃左右,采用布置方案

2 较为合理。

### 2.2 与水侧连接方案

低压省煤器与水侧连接方案主要有串联和并联 2 种。相比于串联系统,并联系统无需增加凝结水泵的压头,采用级间压降即可保证低压省煤器内凝结水流动。因此,低压省煤器系统与回热系统一般采用并联<sup>[10]</sup>。

### 2.3 受热面管型选择

低压省煤器受热面可选用光管、螺旋肋片管和 H 型翅片管。相比于光管,螺旋肋片管和 H 型翅片管换热面积较大、传热性能较好。对于除尘器之前的换热器,烟气中灰浓度较高,螺旋肋片管易磨损和

积灰,采用H型翅片管较好;对于引风机之后的换热器,由于经除尘器后烟气中灰浓度极低,可采用换热效率更高的螺旋肋片管<sup>[11-12]</sup>。此外,在相同条件

下,顺列管束最大磨损量较错列管束少3~4倍<sup>[13-14]</sup>。因此,采用顺列布置可减轻烟气对管束的磨损。

表3 低压省煤器布置方案优缺点<sup>[7-9]</sup>

Table 3 Advantages and disadvantages of the low pressure economizer layout scheme<sup>[7-9]</sup>

方案	布置位置	优点	缺点
1	省煤器与空气预热器烟道内	可利用空预器前的高温烟气余热,排挤部分高加抽汽,无需考虑受热面低温腐蚀	省煤器出口水温已接近饱和温度,余热利用空间已不大
2	空气预热器与除尘器烟道内	排烟余热可用于加热低加凝结水,降低排烟温度有利于提高电除尘效率	烟气中飞灰浓度较高,低压省煤器磨损和积灰较为严重,并影响换热效果
3	引风机和脱硫系统之间烟道内	排烟余热可用于加热低加凝结水,烟气中灰浓度较低;同时,排烟温度降低有利于减少脱硫减温水量	排烟温度降幅较大,易造成脱硫前烟道内发生低温腐蚀;其布置位置远离主机,连接管道较长
4	方案1和方案3结合,两级布置	可阶梯利用排烟余热	与回热系统连接所需管道较长,改造成本、运行维护费用相对增加

### 3 方案设计原则及参数要求

#### 3.1 方案设计原则

低压省煤器布置在锅炉尾部烟道内,烟温降幅应结合实际排烟温度以及燃用煤中硫分,确定烟气酸露点温度,防止排烟温度过低,腐蚀受热面和除尘器滤袋。由于除尘器前烟气中飞灰浓度较高,易对受热面造成磨损,影响低压省煤器使用寿命<sup>[15]</sup>。因此,方案设计要遵循以下原则:

1)防腐原则。由于烟气侧对流放热系数远小于水侧,管壁温度与水温接近。若省煤器入口水温偏低,进口管壁温度接近水露点温度,易造成受热面严重低温腐蚀。因此,应根据燃用煤种来确定最低允许壁温并合理控制入口水温,以保证管束最低壁温高于水露点25℃以上,避开严重低温腐蚀区<sup>[16]</sup>。

2)防磨原则。除尘器前烟气具有飞灰浓度较高、流速较快的特点,由于管壁磨损量与烟气流速以及烟气中飞灰浓度成正比,若低压省煤器布置于除尘器前,应考虑受热面磨损问题,采取防磨措施。

3)强化传热原则。由于省煤器后尾部烟道内剩余空间较为紧凑,为降低排烟温度需适应烟道几何尺寸,必要时应采取强化换热的措施,来提高换热效率。同时,还应考虑烟道阻力增加对引风机出力的影响。

#### 3.2 方案参数要求

根据锅炉实际运行现状以及设计原则,在低压省煤器的优化设计中应考虑以下约束条件<sup>[17]</sup>:

1)出水温度约束。出口水温应低于低压省煤器的入口烟温 $\theta'$ 。此外,出口水温应低于所排挤第*i*级低加抽汽的出口凝结水温度 $t_i'$ <sup>[18]</sup>。因此,低压省煤器出口水温 $t_d''$ 需满足: $t_d'' \leq \min\{\theta', t_i'\}$ 。

2)烟气流速约束。当烟气流速过大,会增加对低压省煤器管壁的磨损,而烟气流速过小,会造成省煤器管间积灰。应根据低压省煤器管壁的抗磨损以及积灰程度确定烟气流速 $w_y$ 在合理区间内: $w_y^{\min} \leq w_y \leq w_y^{\max}$ 。

3)最大介质焓升约束。当低压省煤器与回热系统并联连接时,为确保省煤器引出点下一级低压加热器的抽气量不出现负值,需保证低压省煤器出口水的焓值 $h_d''$ 与低压省煤器引出点上一级低压加热器出口水的焓值 $h_i'$ 之和低于引出点下一级低压加热器出口水焓值 $h_{i+1}''$ ,即 $\beta h_d'' + (1-\beta) h_i' < h_{i+1}''$ ,其中, $\beta$ 为分水系数。

#### 3.3 设计方案提出

当考虑低温腐蚀问题时,低压省煤器进出口采用“两点取水,一点回水”的水温调节方式,即由低压加热器引出2路不同温度凝结水,通过调节2路凝结水的混合比例,可避免低负荷下低压省煤器入口水温过低,出现低温腐蚀<sup>[19]</sup>。

由于设计低压省煤器布置于除尘器前,烟气中灰浓度较高,综合考虑烟道可利用空间、烟气侧增加的流动阻力以及积灰和磨损,低压省煤器管束采用H型鳍片管顺列布置较为合理<sup>[20]</sup>。

由表2可知,4号低加抽汽温度为156.2℃,4

号低加出口水温为 124.0 ℃,表明排烟余热只能用于加热 4~6 号低压加热器之间凝结水。因此,提出

3 个低压省煤器方案进行烟气余热的回收,具体连接方案如图 2 所示。

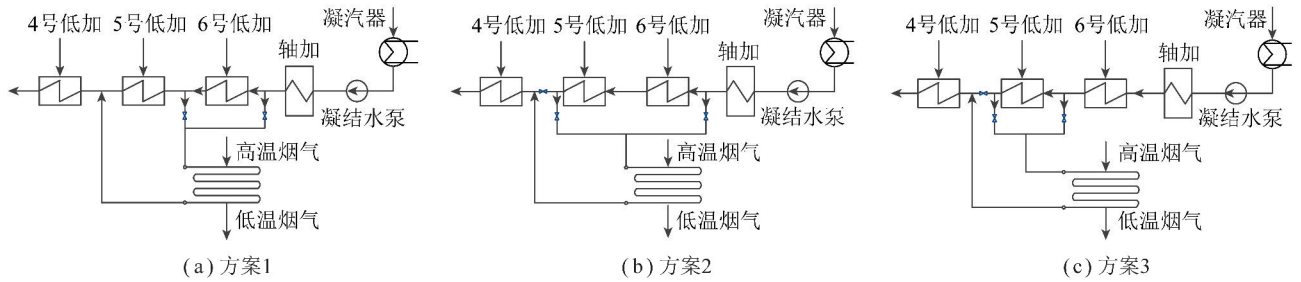


图 2 低压省煤器连接方案

Fig. 2 Connection scheme of low pressure economizer

方案 1:分别从 6 号低压加热器的进、出口取水汇集后,引入低温省煤器入口,再从低温省煤器出口引至 5 号低压加热器的出口;方案 2:分别从 6 号低压加热器的进口和 5 号低压加热器的出口取水汇集后,引入低温省煤器入口,再从低温省煤器出口引至 4 号低压加热器的进口;方案 3:分别从 5 号低压加热器的进、出口取水汇集后,引入低温省煤器入口,再从低温省煤器出口引至 4 号低压加热器的进口。

## 4 低压省煤器热经济性分析

### 4.1 热经济性计算方法

由于低压省煤器与回热系统连接方式直接影响到机组运行的经济性。本文利用等效焓降法对不同连接方式下的经济性进行分析,具体方法是:将低压省煤器吸收的排烟余热作为纯热量引入回热系统,而锅炉产生 1 kg 新汽的能耗不变,在这个前提下,系统所有排挤抽汽所增发的功率都将使汽轮机效率提高<sup>[21]</sup>。1 kg 汽轮机新汽,其全部做功量称为新汽等效焓降,记为  $H$ 。所有排挤抽汽所增发功量称为等效焓降增量,记为  $\Delta H$ ,计算公式为

$$H = \frac{3\ 600}{\eta_{jd}d} \quad (1)$$

$$\Delta H = \beta[(h''_d - h_{m-1})\eta_m + \sum \tau_j \eta_j] \quad (2)$$

式中, $d$  为机组汽耗率,kg/kWh; $\eta_{jd}$  为汽轮机电效率,%; $\tau_j$  为所绕过的各低加工质焓升,kJ/kg; $\eta_j$  为所绕过的各低加抽汽效率,%。

热耗率降低  $\Delta q$  按下式计算:

$$\Delta q = q \frac{\Delta H}{H + \Delta H} \quad (3)$$

式中, $q$  为机组热耗率,kg/kWh。

发电煤耗  $b$  为

$$b = \frac{3\ 600}{q_{net,ar}\eta_{cp}} \quad (4)$$

式中, $q_{net,ar}$  为燃煤低位发热量,kJ/kg; $\eta_{cp}$  为全厂热效率,%。

机组降低煤耗量  $\Delta b$  为

$$\Delta b = \frac{\Delta q}{29\ 270\eta_g\eta_b} \quad (5)$$

式中, $\eta_g$ 、 $\eta_b$  分别为管道效率和锅炉效率<sup>[22]</sup>。

### 4.2 酸露点计算方法

在 300 MW 工况下,锅炉排烟温度为 140 ℃,为了保证余热回收装置的安全运行,防止排烟温度过低对低压省煤器受热面的腐蚀,需对烟气酸露点进行计算,我国燃煤锅炉烟气酸露点计算普遍采用 1973 年前苏联出版的《锅炉机组热力计算标准方法》中的公式(式(6)~(9))。

$$t_p = t_{ld} + 125 \sqrt[3]{S^n} / (1.05^{\alpha_n A^n}) \quad (6)$$

$$t_{ld} = -1.2102 + 8.406\alpha(H_2O) - 0.4749\alpha^2(H_2O) + 0.01042\alpha^3(H_2O) \quad (7)$$

式中, $t_p$  为烟气酸露点温度,℃; $t_{ld}$  为烟气水露点温度,℃; $\alpha(H_2O)$  为水蒸气体积占烟气体积的百分数,%; $\alpha_{in}$  为飞灰占总灰量的份额,%; $S^n$  和  $A^n$  分别为燃料的折算硫分和灰分,采用公式(8)和(9)进行计算<sup>[23]</sup>。

$$S^n = S_{ar} / (q_{net,ar} / 4\ 187) \quad (8)$$

$$A^n = A_{ar} / (q_{net,ar} / 4\ 187) \quad (9)$$

式中, $S_{ar}$ 、 $A_{ar}$  为燃料的收到基含硫量、灰分,%。

采用式(6)~(9)对锅炉烟气酸露点进行计算,计算结果见表 4。

式(6)~(9)主要是采用苏联出版的《锅炉机组热力计算标准方法》对煤粉锅炉烟气酸露点温度进行计算,但用于循环流化床锅炉酸露点温度计算偏

保守,这主要是由于在循环流化床锅炉内,不仅煤本身具有一定的自脱硫效果,并且炉内添加石灰石进行脱硫,将有效减少烟气中  $\text{SO}_2$  的浓度以及向  $\text{SO}_3$  转化的总量,并且循环流化床锅炉飞灰颗粒孔隙率较高,对  $\text{SO}_3$  的吸附作用明显,上述两者共同作用,将使循环流化床锅炉烟气中的  $\text{SO}_3$  浓度远低于煤粉锅炉<sup>[24]</sup>。

表4 两种经验公式计算酸露点温度

Table 4 Acid dew point temperature calculated by Soviet Union's empirical formula

机组负荷/MW	水露点温度/°C	排烟温度/°C	苏联公式计算酸露点温度/°C	修正公式计算酸露点温度/°C
300	45.79	140.2	102.94	69.34
225	45.18	132.8	102.33	68.74
150	43.45	121.0	100.59	67.00
90	41.33	84.3	98.47	64.88

为了体现循环流化床锅炉的自脱硫和炉内脱硫效果,文献[24]将式(6)修正为

$$t_p = t_{id} + \frac{125 \sqrt[3]{\left(1 - \frac{\eta_{ii}}{100}\right) S^n}}{1.05 \alpha_m A^n} \quad (10)$$

式中,  $\eta_{ii}$  为循环流化床锅炉的计算炉内脱硫效率, %。

表4中酸露点的计算结果表明,采用1973年前苏联出版的《锅炉机组热力计算标准方法》中的计算方法,在BMCR工况下,排烟温度下降至120℃,与计算酸露点温度仍相差将近17℃,可有效保证低压省煤器的安全运行;如采用文献[24]对循环流化床锅炉烟气酸露点的修正计算方法(表4),在BMCR工况下,排烟温度下降至120℃,与计算酸露点温度相差将近50℃,表明该锅炉仍有进一步降低排烟温度,提高烟气余热利用的空间。因此,锅炉排烟温度由140℃降至120℃,仍高于烟气酸露点,低压省煤器运行也较为安全。

当排烟温度由140℃降至120℃时,单位烟气焓降为117.7 kJ/kg,燃煤量为245.7 t/h,烟气的总焓降为29 133.4 kJ/h。根据热平衡理论,低温省煤器吸收排烟余热30 794.58 kJ/kg。额定负荷下,各方案经济性计算结果见表5。由表5可知,方案3机组热经济性较高,发电煤耗降低相对较多,为最佳方案。机组运行按照每年4 000 h计算,选用方案3,可使发电煤耗降低1.371 g/kWh,年节省标煤量

为1 820.173 t,减排二氧化碳2 082.945 t,可有效提高机组的热经济性。

表5 低温省煤器热经济性参数

Table 5 Thermal economic parameters of low pressure economizer

项目	方案1	方案2	方案3
改造前供电煤耗/(g·kWh <sup>-1</sup> )	337.6	337.6	337.6
抽气等效焓降增量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	2.928	3.730	5.788
系统热经济性相对提高量/%	0.249	0.317	0.491
热耗降低量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	22.507	28.723	44.397
发电煤耗降低量/(g·kWh <sup>-1</sup> )	0.769	0.981	1.517
全年节省标煤量/t	922.699	1 177.603	1 820.173
减排二氧化碳量/t	1 055.906	1 347.610	2 082.945

## 5 结 论

1) 针对某电厂排烟温度较高的问题,结合电厂需进行超低排放的实际情况,将排烟温度由140℃降至120℃,回收的烟气余热进入回热系统,从而提高机组经济性。

2) 根据低压省煤器系统设计的原则及参数要求,通过优化设计,确定在空气预热器与除尘器之间顺列布置H型鳍片管省煤器,提出3个布置方案,并对方案的热经济性进行分析。

3) 结果表明,方案3的热经济性较高,可使发电煤耗降低1.371 g/kWh,年节省标煤量为1 820.173 t。

## 参考文献 (References):

- [1] 李凡,张泽,陈鸿伟,等. 某电厂300 MW机组增设低温省煤器的经济性分析[J]. 区域供热,2015(4):91-94.  
Li Fan, Zhang Ze, Chen Hongwei, et al. Economic analysis of low temperature economizer of 200 MW coal-fired boiler[J]. District Heating, 2015(4):91-94.
- [2] 韩宇,徐钢,杨勇平,等. 燃煤电站清洁高效协同的烟气余热深度利用优化系统[J]. 动力工程学报,2015,35(8):674-680.  
Han Yu, Xu Gang, Yang Yongpin, et al. An Optimized system for clean efficient and deep utilization of flue gas waste heat from coal fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015,35(8):674-680.
- [3] 魏书洲,刘喆,邵建林,等. 燃煤电站加装低温省煤器的节能环保分析[J]. 节能技术,2015,33(5):432-435.  
Wei Shuzhou, Liu Zhe, Shao Jianlin, et al. Analysis of energy saving and environmental protection with low temperature economizer in Coal Power Station[J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(5):432-435.

- [4] 胡松如,吴斌,王建强,等. 200 MW 燃煤机组锅炉低温省煤器设计及应用[J]. 浙江电力,2014,(4):38-41.  
Hu Songru, Wu Bin, Wang Jianqiang, et al. Design and application of low temperature economizer of 200 MW coal-fired boiler[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, (4): 38-41.
- [5] 何东,阎维平,许加庆. 电站锅炉低压省煤器进口水温及温升综合优化[J]. 锅炉技术,2015,46(4):18-22.  
He Dong, Yan Weiping, Xu Jiaqing. Comprehensive optimization of inlet water temperature and temperature rise of low pressure economizer in utility boiler[J]. Boiler Technology, 2015, 46(4): 18-22.
- [6] 王政先,张敏. 低压省煤器经济性对比试验研究[J]. 东北电力技术,2014,35(2):25-27.  
Wang Zhengxian, Zhang Min. Comparison test research on economy of low-pressure economizer[J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(2): 25-27.
- [7] 姚昌模,王鼎顺,向上,等. 低压省煤器在火电厂中的应用分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报,2014,(4):42-44,49.  
Yao Changmo, Wang Dingshun, Xiang Shang, et al. Analysis of the application of the low-pressure economizer in the thermal power plant[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2014, (4): 42-44, 49.
- [8] 徐顺喜,吴志祥. 1 000 MW 机组低温省煤器项目的技术经济性分析[J]. 上海电力学院学报,2014,30(1):94-100.  
Xu Shunxi, Wu Zhixiang. Technically economical analysis of low temperature economizer project of 1 000 MW unit[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(1): 94-100.
- [9] 李光,刁利,吴思竹. 火力发电厂烟气余热利用技术方案与经济分析[J]. 华东电力,2014,42(11):2461-2465.  
Li Guang, Diao Li, Wu Sizhu. Planning and economic analysis on flue gas heat utilization in thermal power plant[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11): 2461-2465.
- [10] 吴文,石奇光,曾大海. 火电机组低压省煤器节能效果的定量解析[J]. 电站辅机,2015,36(2):14-18.  
Wu Wen, Shi Qiguang, Zeng Dahai. Quantitative analysis of energy saving effect of the low-pressure economizer in the coal-fired power units[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2015, 36(2): 14-18.
- [11] 赵虹,周霭琳,施浩勋,等. 不同扩展换热面传热、积灰、磨损特性对比[J]. 热力发电,2015(4):33-38.  
Zhao Hong, Zhou Ailin, Shi Haoxun, et al. Comparative analysis of heat transfer ash deposition and attrition performances on different extended surfaces[J]. Thermal Power Generation, 2015(4): 33-38.
- [12] 马千里. 二次再热 1 000 MW 机组低温省煤器技术方案论证[J]. 机电信息,2015(12):96-97.  
Ma Qianli. Technical scheme demonstration of low temperature economizer of 1 000 MW unit with double reheat cycles[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(12): 96-97.
- [13] 张玉俊,任太和,景江峰,等. 螺旋鳍片省煤器与 H 型鳍片省煤器的应用分析[J]. 电力学报,2011,26(4):354-356.  
Zhang Yujun, Ren Taihe, Jing Jiangfeng, et al. The application a-
- nalys of spiral fin economizer and h fin economizer[J]. Journal of Electric Power, 2011, 26(4): 354-356.
- [14] 杨大哲. H 型鳍片管传热与流动特性试验研究[D]. 济南:山东大学,2009.
- [15] 郭义杰,殷立宝,赵航. 低压省煤器余热回收技术在火电机组上的应用[J]. 广东电力,2015,28(1):7-11.  
Guo Yijie, Yin Libao, Zhao Hang. Application of low pressure economizer waster heat recovery technology in thermal power unit[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(1): 7-11.
- [16] 靖长财. 锅炉低温省煤器改造系统设计的对应措施[J]. 神华科技,2015,13(5):49-52.  
Jing Changcai. Low temperature economizer of boiler transformation control and protection of the corresponding measures[J]. Shenhua Science and Technology, 2015, 13(5): 49-52.
- [17] 王立波. 萨拉齐电厂低压省煤器节能改造分析[D]. 保定:华北电力大学,2013.
- [18] 卢洪波,张超,刘锋,等. 锅炉低温省煤器水侧串并联方案的优化选择[J]. 东北电力大学学报,2015,35(4):20-25.  
Lu Hongbo, Zhang Chao, Liu Feng, et al. Optimization of series-parallel scheme of the boiler low-temperature economizer water side[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(4): 20-25.
- [19] 林俊光,罗钟高,崔云素,等. 200 MW 机组增设低温省煤器的优化设计[J]. 浙江电力,2011,30(6):28-31.  
Lin Junguang, Luo Zhonggao, Cui Yunsu, et al. Optimization design of installing low temperature economizer for 200 MW unit[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(6): 28-31.
- [20] 齐林虎,黄新元,郭峰. 低低温省煤器在 30 MW 机组的应用[J]. 华电技术,2015,37(3):49-52.
- [21] 吴浪. 100 MW 机组锅炉低压省煤器改造及经济性分析[J]. 广东电力,2015,28(5):6-9.  
Wu Lang. Analysis on transformation of low pressure economizer of 100 MW unit boiler and economical efficiency[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(5): 6-9.
- [22] 吕太,张子建,张素娟. 600 MW 锅炉排烟余热回收优化选择[J]. 锅炉技术,2013,44(2):64-68.  
Lyu Tai, Zhang Zijiang, Zhang Sujuang. The optimum choice of flue gas heat recovery of 600 MW boiler[J]. Boiler Technology, 2013, 44(2): 64-68.
- [23] 蒋安众,王罡,石书雨,等. 锅炉烟气酸露点温度计算公式的研究[J]. 锅炉技术,2009,40(5):11-13,17.  
Jiang Anzhong, Wang Gang, Shi Shuyu, et al. The calculation of the gas acid dew-point in utility boiler[J]. Boiler Technology, 2009, 40(5): 11-13, 17.
- [24] 黄中,陈罡,孙献斌,等. 循环流化床锅炉排烟 SO<sub>3</sub> 浓度测量及酸露点计算公式修正[J]. 中国电机工程学报,2016,36(S1):121-123.  
Huang Zhong, Chen Gang, Sun Xianbin, et al. CFB boiler SO<sub>3</sub> concentration measurement and acid dew point calculation formula correction[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(S1): 121-123.