

# 410 t/h 循环流化床锅炉燃烧调整试验

韩 应<sup>1</sup>, 惠小龙<sup>1</sup>, 刘 冬<sup>1</sup>, 张世鑫<sup>1</sup>, 黄海鹏<sup>2</sup>, 徐海涛<sup>3</sup>

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 100098; 2. 中国石油化工股份有限公司  
茂名分公司, 广东 茂名 525000; 3. 华能伊敏煤电有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021134)

**摘要:**针对国内 A 电厂 410 t/h 循环流化床(CFB)锅炉灰渣含碳量偏高、运行稳定性较差等问题,对锅炉一次风量、返料风量、入炉煤粒度等主要运行参数进行优化调整,探索锅炉最佳运行参数组合。结果表明:入炉煤粒度偏细,中位径仅约为 1 037.97  $\mu\text{m}$ ,锅炉底渣中位径仅为 375.64  $\mu\text{m}$ ,表明入炉煤的成灰特性较好;炉膛上部灰浓度差压值高达约 2.5 kPa,表明炉内细颗粒组分偏多,循环灰量受到一次风量的影响波动较大。为保证锅炉返料的稳定运行,控制穿过布风板的一次风量仅约为 102 300  $\text{m}^3/\text{h}$ ,远低于设计值 183 000  $\text{m}^3/\text{h}$ ,较同类型机组严重偏低。过低的一次流化风量使密相区燃烧缺氧严重,是引起灰渣含碳量偏高的主要原因。此外过低的一次风量,致使布风板阻力仅为 2.1 kPa。与同类型锅炉布风板的阻力相比,布风板阻力偏小,造成锅炉局部流化不良、温度分布不均匀等。建议合理调节入炉煤粒度,控制其中位径在 2 000~3 000  $\mu\text{m}$ ,优化炉内灰浓度分布,提高一次运行风量,可有效提高锅炉燃烧效率。

**关键词:**循环流化床锅炉;燃烧调整;含碳量;煤粒度;布风板;灰渣

中图分类号:TM621.2;TK227 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)05-0112-06

## Experimental analysis on combustion adjustment of 410 t/h CFB boiler

HAN Ying<sup>1</sup>, HUI Xiaolong<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>1</sup>, ZHANG Shixin<sup>1</sup>, HUANG Haipeng<sup>2</sup>, XU Haitao<sup>3</sup>

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 100098, China; 2. Maoming Branch of China  
Petroleum Chemical Co., Ltd., Maoming 525000, China; 3. Huaneng Yimin Coal Power Co., Ltd., Hulun Buir 021134, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high carbon content in ash and poor operation stability of 410 t/h circulating fluidized bed (CFB) boilers in A power plant, the main operation parameters such as primary air volume, return air volume and coal particle size were optimized and adjusted, and the optimum combination of boiler operation parameters was explored. The test results show that the size of the coal entering the furnace is slightly fine and the median diameter is only about 1 037.97  $\mu\text{m}$ . The median diameter of the boiler bottom slag is only 375.64  $\mu\text{m}$ , which indicates that the ash-forming characteristics of the coal entering the furnace are better. The running picture shows that the differential pressure value of ash concentration in the upper part of the furnace is as high as about 2.5 kPa. The excessive fine ash particles in the furnace make the circulating ash volume fluctuate greatly under the influence of primary air volume. In order to ensure the stable operation of the return material of the boiler, the primary air flow through the air distribution plate controlled by the operator is only 102 300  $\text{m}^3/\text{h}$ , which is much lower than the design value of 183 000  $\text{m}^3/\text{h}$ , and is also seriously lower than that of the same type of units. The results show that the main reason for the high carbon content of ash slag is that the low primary fluidized air volume makes the combustion in dense phase zone seriously anoxic. In addition, the low primary air flow makes the resistance of the distributor only 2.1 kPa. Compared with the resistance of the air distributor of the same type of boiler, the resistance of the air distributor is smaller, which results in poor local fluidization and uneven temperature distribution of the boiler. It is suggested that the combustion efficiency of the boiler can be effectively improved by adjusting the size of coal into the furnace reasonably, controlling the median diameter between 2 000-3 000  $\mu\text{m}$ , optimizing the ash concentration distribution in the furnace and increasing the primary air flow.

**Key words:** CFB boiler; combustion adjustment; carbon content; coal particle size; grid; ash and slag

收稿日期:2018-10-15;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18101502

基金项目:中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司循环流化床锅炉技术部 2016 年部门基金资助项目

作者简介:韩 应(1981—),男,湖北应城人,高级工程师,硕士,从事 CFB 锅炉设计,锅炉性能诊断、优化、节能及 CFB 锅炉的烟气脱硫、脱硝技术研究等。E-mail:Y\_Han@qny.chng.com.cn

引用格式:韩应,惠小龙,刘冬,等.410 t/h 循环流化床锅炉燃烧调整试验[J].洁净煤技术,2019,25(4):112-117.

HAN Ying, HUI Xiaolong, LIU Dong, et al. Experimental analysis on combustion adjustment of 410 t/h CFB boiler[J].  
Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 112-117.



移动阅读

## 0 引 言

CFB 锅炉是目前发展最快、应用最广的一种流化床燃烧技术,具有良好的经济性、环保性和调峰控制能力,能适应多种煤种<sup>[1]</sup>。自 20 世纪末,CFB 锅炉技术在我国经历了由技术引进到自主研发的阶段。据统计现阶段具有自主知识产权的不同容量机组的 CFB 锅炉已经投运近 3 000 台。目前约 60% 的 CFB 锅炉都不同程度存在出力不足、运行周期短、灰渣不完全燃烧损失高、排烟损失大等问题,部分原因是由于设计不当或运行煤质差异较大,运行方式不合理等,可通过优化调整改善 CFB 锅炉运行性能<sup>[2-5]</sup>。李士瑾等<sup>[2]</sup>通过技术优化进一步提高了循环流化床锅炉的燃烧效率。张敏<sup>[3]</sup>建立完善 CFB 锅炉燃烧调整试验方法,优化调整 CFB 锅炉运行参数,实现 CFB 锅炉安全、稳定、长周期运行和节能减排。杨勇等<sup>[4]</sup>对 1 台 1 177 t/h CFB 锅炉燃烧优化调整试验,锅炉热效率提高 1.5%~2.0%,每年可节约燃料成本约 840 万元;降低燃烧总风量可减轻炉膛内受热面的磨损,稀相区空截面烟气速度由调整前的 4.22 m/s 降低至调整后的 3.87 m/s,计算磨损量减少约 25%。孟志东<sup>[6]</sup>采用 Muschelknautz 计算法的 Hoffmann 旋风筒模型计算分离器的设计效率,在运行中也可通过锅炉的运行参数计算分离器运行效率,再辅以飞灰粒度分析作为计算结果可靠性的佐证。

A 厂 CFB 锅炉飞灰含碳量 20.82%、底渣含碳量 9.72%,锅炉效率远低于设计保证效率。锅炉稳定性较差,严重影响锅炉带负荷能力。因此,本文以 410 t/h CFB 锅炉为例,通过一次风量、返料系统、燃料粒度试验查找锅炉飞灰、底渣含碳量过高的原因。

## 1 试 验

### 1.1 试验锅炉概况

A 厂锅炉为哈尔滨锅炉厂有限责任公司设计制造的 410 t/h CFB 锅炉,主蒸汽温度 540 ℃、压力 9.81 MPa。锅炉主要由炉膛、汽冷分离器、自平衡“U”形回料阀和尾部对流烟道组成。燃烧室蒸发受热面采用膜式水冷壁,水循环采用单汽包、自然循环、单段蒸发系统。布风板为水冷方式,大直径钟罩式风帽,2 台直径约 7 m 的汽冷分离器。锅炉主要设计参数见表 1。

### 1.2 试验内容

对锅炉一次风量、返料风量、床温、床压、入炉煤粒度等主要运行参数进行优化调整,确定锅炉最佳

表 1 锅炉主要设计参数

Table 1 Main design parameters of boiler

项目	设计煤种	校核煤种
锅炉负荷/%	100% BMCR	100% BMCR
过热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	410	410
过热蒸汽出口压力/MPa	9.81	9.81
过热蒸汽出口温度/℃	540	540
给水温度/℃	215	215
燃煤量/(kg·s <sup>-1</sup> )	10.86	13.78
实际燃煤量/(kg·s <sup>-1</sup> )	11.23	14.11
锅炉总风量/(kg·s <sup>-1</sup> )	128.3	130.2
烟气流/(kg·s <sup>-1</sup> )	138.5	141.4

运行参数组合,以降低灰渣可燃物含量、减轻磨损、提高锅炉热效率,改善锅炉运行稳定性等<sup>[7]</sup>。

### 1.2.1 一次风量试验

CFB 锅炉氧量调节到最佳状态,随着氧量提高,燃尽程度提高,即灰渣含碳量降低<sup>[8-9]</sup>。

A 厂现阶段燃用燃料为烟煤+石油焦,掺烧比例为 1:1。试验发现,穿过布风板的实际运行一次风量仅为 130~140 t/h,远低于设计风量值,具体见表 2。410 t/h 等级不同厂一次风量运行值对比见表 3。

表 2 一次风量设计值与运行值对比

Table 2 Comparison of primary air volume design value with operation value

项目	一次流化风量		密相区流化	布风板
	/(t·h <sup>-1</sup> )	/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	阻力/Pa
设计值	231.1	183 000	5.66	6 522
运行值	135.0	104 000	3.53	2 114

表 3 410 t/h 等级不同厂一次风量运行值对比

Table 3 Operational value comparison of primary air volume in 410 t/h grade different plants

型号	一次流化风量运行值/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
HG-410/9.8-L.SYJ25	104 000
FW-410/12.5	178 000
HG-440/13.7-L.MG8	205 000
SG-440/13.7-M565	190 000
SG-440/13.6-M566	185 000
UG-480/13.7-M	185 000

由表 2、3 可知,A 厂锅炉一次流化风量实际运行值严重偏离设计值,也远低于同类型锅炉运行参数。过低的一次流化风量使得密相区缺氧严重,是

导致底渣含碳量偏高的主要原因。因此,进行提高一次风量试验研究。

一次风量变化对底渣含碳量的影响如图1所示。随着一次风率的增大,底渣可燃物呈下降趋势。表明密相区一次风量的增大,提高了密相区的氧含量,有利于底渣的燃尽。

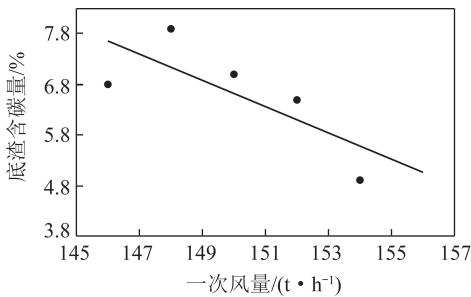


图1 一次流化风量对底渣含碳量的影响

Fig. 1 Effect of primary fluidized air volume on carbon content of bottom slag

同时发现,随着一次风量的升高,锅炉的运行稳定性降低,主要表现在返料器运行不稳定。据了解,该锅炉2014年投运后,频繁出现运行不稳定,导致汽温汽压大幅波动。实践证明一次风量最大值低于150 t/h有利于缓解运行的不稳定性,也是目前锅炉一次风量偏低的主要原因。为了保证锅炉运行的安全稳定,未继续增大一次风量进行相关试验。

过低的一次风量虽有利于缓解运行的不稳定性,但造成布风板阻力过低,锅炉炉内均匀性较差。一次风量控制在135 t/h时,锅炉布风板阻力偏低

(仅为2 100 Pa),布风均匀性较差,局部流化不良,主要表现有:密相区温度分布均匀性较差,密相区左侧床温显示仅为497和750℃,提高一次风量后,该温度测点显示值在数分钟内回升至与其他密相区温度测点无显著差异(提取锅炉历史运行数据得到)。

综上所述,一次运行风量显著偏低是底渣含碳量过高的主要原因<sup>[10]</sup>。为有效提高一次风量,需分析锅炉运行不稳定的原因,进行返料系统调整试验。

### 1.2.2 返料系统试验

回料阀阻力特性和通流特性决定了工作的稳定性。回料阀的通流能力既要保证锅炉整个循环系统对循环流率的要求,还要有合适的阻力以克服系统压力波动可能造成的流量波动和不稳定运行<sup>[11]</sup>。

在锅炉运行不稳定条件下,返料器各压力点波动幅度剧烈。A厂试验重点分析了返料器内各参数波动情况。锅炉运行的不稳定性主要表现在返料器运行不正常。主要原因为:①炉内细颗粒物料过多,外循环物料量受一次风量影响较大。过高的一次风量易导致进入分离器的循环灰量显著增大,堵塞在分离器锥段,造成回料不畅,引起锅炉汽温汽压大幅波动。②返料器运行参数不合理,当循环灰量增大时,致使分离器堵塞。③返料器结构设计不合理,致使分离器易出现堵塞现象。

对返料器运行参数进行调整,返料器运行参数设计与运行值对比见表4。

表4 返料器运行参数设计与运行值对比

Table 4 Comparison of design value and operation value of operating parameters of recycler

项目	回料器 温度/℃	回料阀 总风量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	松动风 布风面 积/m <sup>2</sup>	松动风量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	松动风 风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	返料风 布风面积/ m <sup>2</sup>	返料风量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	返料风风速/ (m·s <sup>-1</sup> )
设计值 (经验值)	880	7 088	2.21	2×1 227	0.2~0.3	2.49	4×1 158	0.5~0.7
运行值	860	8 800		2×1 200	0.59		4×1 600	0.69

由表4可知,除了松动风速为0.59 m/s,与设计值有所偏差外,其他运行参数均在合理范围内。试验对返料风及松动风进行相应调整,并未取得显著效果。根据设计值及其他厂运行经验值,建议返料风量可适当增大,控制在1 800~2 000 m<sup>3</sup>/h;松动风可适当降低,控制在800~1 000 m<sup>3</sup>/h。

影响循环稳定性的因素除回料阀运行参数外,还包括分离器,立管及回料管的结构。参考CFB锅炉返料器设计尺寸,A厂返料器设计尺寸与常规尺

寸无较大差异。A、B、C厂锅炉立管直径对比见表5。与同等级机组比,A厂锅炉设计返料器立管直径较粗,排除了立管设计偏细导致返料器堵塞。

### 1.2.3 煤粒度试验

#### 1) 煤粒度对炉膛灰浓度的影响

CFB锅炉燃料粒度需控制在合适范围,粒度过大,要保证良好流化,需加大一次流化风量,可能导致磨损增大及燃烧不完全,严重时导致无法流化(死床);粒度过小,料层难以维持,锅炉运行

稳定性差,底渣含碳量增大,严重时会导致无法运行<sup>[12]</sup>。

表 5 CFB 锅炉返料器立管设计尺寸对比

Table 5 Design size comparison of stand pipe of CFB boiler feedback device

项目	锅炉型号	立管直径/mm
推荐尺寸	—	0.5~2.0
A 厂(试验锅炉)	HG-410/9.8-L.SYJ25	1.91
B 厂	HG-440/13.7-L.MG8	1.30
C 厂	DG-480/9.8-III	1.51

由一次风量对锅炉炉内上中下部灰浓度的影响可知:密相区压力(床压)随一次风量的增加而降低,随一次风量的降低而增大,呈反向趋势。而密相区中部压力及密相区上部压力随一次风量的增加而增大。炉内灰浓度分布受一次风影响较大,表明炉内细颗粒较多。一次风增大时,密相区细颗粒上扬量较多,使密相区下部床压下降,较多细颗粒上升到炉膛密相区中上部,使炉膛密相区中上部压差增大。

对入炉煤及底渣进行筛分试验,粒度分布见表 6。

表 6 粒度分布

Table 6 Particle size distribution

项目	筛余量/%	
	入炉煤	底渣
筛孔孔径/ $\mu\text{m}$		
10 000	4.60	0.80
5 600	14.80	3.80
4 000	22.60	8.10
2 800	28.50	12.30
1 000	49.70	19.00
450	63.30	39.60
98	88.40	86.50
0	100	100
中位径 $d_{50}/\mu\text{m}$	1 037.97	375.64
均匀性指数 $n$	0.610 46	0.847 03
细度系数 $b$	0.009 99	0.004 57

由表 6 可知,入炉煤中位径仅为 1 037.97  $\mu\text{m}$ ,与同类型机组相比,该入炉煤粒度偏细,入炉煤粒度应控制在 2 000~3 000  $\mu\text{m}$  较为合理;底渣中位径仅为 375.64  $\mu\text{m}$ ,通常底渣的中位径在 1 000~2 000  $\mu\text{m}$  较为合理。说明入炉煤和炉内物料均偏细,致使炉内物料浓度分布易受到一次风量的影响。因此进行入炉煤粒度调整试验,通过加大入炉煤粒度,提高炉内粗颗粒物料量,降低炉膛上部细灰浓度,降低一次风量对炉内灰浓度分布的影响。分析认为物

料粒度分布合理后,可提高一次流化风量至设计参数。增大一次风量能有效提高布风板的阻力(设计一次风量下对应布风板阻力约 6 000 Pa),提高炉膛的布风均匀性,消除两侧循环灰量的不均匀性;增大一次风量还能有效提高密相区的氧浓度,显著降低底渣含碳量。

## 2) 煤粒度调整试验

A 厂入炉煤破碎流程为:原煤—一级筛分—一级破碎—二级筛分—二级破碎—入炉煤。试验前取 3 处煤样,取样点分别为原煤、一级破碎后、二级破碎后入炉煤。

入炉煤破碎前后粒度对比见表 7,可知原煤粒度较细,通过合理调节可将入炉煤适当增大,满足运行要求。

表 7 入炉煤破碎前后粒度对比

Table 7 Particle size comparison of coal before and after crushing

项目	筛余量/%		
	原煤	一级破碎煤样	二级破碎入炉煤
10 000	62.46	58.69	3.39
5 600	69.80	67.50	12.95
4 000	73.52	72.45	21.04
筛孔孔径/ $\mu\text{m}$			
2 800	76.46	76.35	27.46
1 000	85.37	84.33	50.22
450	90.11	89.55	63.82
98	96.77	95.83	88.96
0	100	100	100
中位径 $d_{50}/\mu\text{m}$	21 113	16 914	1 032
均匀性指数 $n$	0.491 92	0.514 90	0.640 25
细度系数 $b$	0.005 17	0.004 61	0.008 15

A 厂煤破碎系统通过调节锤头间隙实现入炉煤粒度调节。经数次调整,入炉煤及底渣粒度有所增加,但受限于设备可调性,未达到预期效果。调节后入炉煤及底渣粒度分布和粒度对比见表 8、9。可知入炉煤粒度及底渣粒度有所增加,但远小于常规经验值。破碎系统二级筛网孔径为 8 mm,为固定不可调式。为便于提高入炉煤粒度,建议重新定制二级筛网,孔径调整为 12 mm。

## 1.2.4 床压调整试验

炉内床压是 CFB 锅炉稳定运行的重要参数之一,对锅炉床温及燃烧等产生影响<sup>[13]</sup>。考虑 A 厂机组的安全性,不具备低床压试验条件,为此选取低床压运行参数进行对比,具体见表 10。



表8 调整后入炉煤及底渣粒度分布

Table 8 Particle size distribution of coal and bottom slag after adjustment

项目	筛余量/%	
	入炉煤	底渣
10 000	9.64	5.38
5 600	18.83	12.07
4 000	27.10	18.41
筛孔孔 径/ $\mu\text{m}$	2 800	34.00
	1 000	58.49
	450	71.88
	98	95.37
	0	100
中位径 $d_{50}/\mu\text{m}$	1 528.39	459.14
均匀性指数 $n$	0.683 72	0.491 78
细度系数 $b$	0.004 61	0.034 02

表9 调整前后入炉煤及底渣粒度对比

Table 9 Size comparison of coal and bottom slag before and after adjustment

项目	中位径 $d_{50}/\mu\text{m}$	
	入炉煤	底渣
调整前	1 037.97	375.64
调整后	1 528.39	459.14
经验值	2 000~3 000	1 000~2 000

表10 高低床压运行参数对比

Table 10 Comparisons of operating parameters of high and low bed pressure

项目	低床压	高床压
风室压力/kPa	8.6	12.1
密相区床压/kPa	6.50	7.73
中下部压力/kPa	1.05	1.59
中上部压力/kPa	1.08	1.23
平均床温/ $^{\circ}\text{C}$	913.0	885.7
一次风量/ $(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	142.4	136.3
飞灰含碳量/%	12.4	18.7
底渣含碳量/%	8.7	5.6

由表10可知,低床压运行,提高了炉内燃烧温度,有利于飞灰燃尽,但不利于底渣燃尽。高床压运行,炉内燃烧温度会降低,不利于飞灰燃尽,但有利于降低底渣含碳量。但目前的飞灰底渣含碳量均高于同类型其他锅炉。试验选取某年纯烧烟煤的工况,分析发现纯烧烟煤低床压运行条件下,飞灰 $\geq 12\%$ ,底渣 $\geq 4\%$ 。排除石油焦燃尽性较差的特点,

该锅炉纯烧烟煤的工况下,灰渣含碳量也远高于其他锅炉。

目前机组采用高床压运行,有利于锅炉的均匀性,但弊端是过高的灰浓度降低了整体床温,不利于灰渣的燃尽性<sup>[6]</sup>。

### 1.2.5 床温调整试验

提高燃烧温度可直接提高燃烧反应速度,有利于燃尽。A厂过高床温易造成结焦,影响安全运行。此外随着运行床温升高,烟气中 $\text{SO}_2$ 排放增加,只有加入更多石灰石量来控制 $\text{SO}_2$ 排放,相当于同时增加了入炉煤的灰分,降低了锅炉热效率。因此,此次床温试验不予考虑。

## 2 锅炉燃烧调整及改造建议

1)目前锅炉运行稳定性较差,主要原因为入炉煤粒度过细。建议对筛分系统及破碎系统进行相应调整改造,调节入炉煤粒度至合理范围,彻底解决锅炉运行不稳定现象。

2)入炉煤粒度合理,实现锅炉稳定运行要求后,进行燃烧优化调整试验,对锅炉的运行风量、床压、床温、氧量等参数进行优化,降低灰渣含碳量,提高机组的经济性。

3)对布风板风帽进行改造,低风量运行条件下提高布风板的阻力,提高锅炉的布风均匀性<sup>[14]</sup>。布风板均匀性增加后,可通过降低床压运行来减少炉内灰浓度,缓解返料器堵塞;进入两侧分离器的循环物料量更加均匀,避免出现一侧流化不良、一侧循环物料量过大,致使返料器堵塞。

4)因炉内细颗粒过多,循环灰量较大,易造成分离器堵塞,可在分离器锥段增加扰动风,一是适当降低分离器效率,减少循环灰量;二是发生堵塞时,可起到吹扫、疏通的作用,缓解锅炉运行稳定性较差的情况。弊端是会适当增加飞灰含碳量<sup>[15]</sup>。

## 3 结 论

1)A电厂410 t/h循环流化床锅炉存在灰渣含碳量偏高(飞灰含碳量20.79%、底渣含碳量9.72%)、运行稳定性较差等问题,结果表明一次风量偏少是引起灰渣含碳量偏高的主要原因;入炉煤粒度偏细及煤的成灰特性较好,致使炉内物料偏细,循环灰量较大是造成分离器堵塞和返料器运行不畅的根本原因。

2)一次流化风量设计值183 000  $\text{m}^3/\text{h}$ (231.1 t/h)条件下,布风板阻力约为6.5 kPa;目前实际运行风量102 300  $\text{m}^3/\text{h}$ (130 t/h),布风板阻力为

2.1 kPa。与同类型锅炉布风板的阻力相比,布风板阻力偏小,锅炉出现局部流化不良、温度分布不均匀等现象。过低的一次流化风量使密相区缺氧燃烧,是底渣含碳量偏高的主要原因。底渣含碳量随着一次风量的增大有所降低,但因一次风量调整幅度受限,底渣含碳量降幅有限。

3) 入炉煤的中位径为 1 037.97  $\mu\text{m}$ , 与同类型锅炉相比煤粒度偏细。考虑入炉煤的成灰特性较好,建议入炉煤粒度中位径控制在 2 000~3 000  $\mu\text{m}$  较为合理;底渣的中位径为 375.64  $\mu\text{m}$ , 与同类型机组比底渣粒度偏细,底渣的中位径在 1 000~2 000  $\mu\text{m}$  较为合理。试验得出入炉煤偏细及成灰特性较好,致使炉内物料偏细,循环灰量较大,易受到一次风量的影响,是造成分离器堵塞的根本原因。

### 参考文献 (References):

- [1] 张芳,汤平平,张朋. 基于循环流化床锅炉理论设计及运行研究[J]. 科技资讯,2012(22):85.
- [2] 李士瑾,王悦强,楚文师. 循环流化床锅炉运行效率的分析与研究[J]. 科技与企业,2013(11):342.
- [3] 张敏. CFB 锅炉燃烧优化调整试验方法研究与应用[J]. 热力发电,2009,38(9):63-69.  
ZHANG Min. Research and application of tuning test for optimizing CFB boiler combustion[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(9):63-69.
- [4] 杨 勇,刘海峰,王海涛,等. 1 177 t/h 循环流化床锅炉燃烧优化调整试验及结果分析[J]. 热力发电,2012,41(1):53-55.  
YANG Yong, LIU Haifeng, WANG Haitao, et al. Debugging test of combustion optimization and result analysis for one 1 177 t/h cfb boiler[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(1):53-55.
- [5] 张建胜,吕俊复,刘青,等. CFB 锅炉设计方法研究[J]. 锅炉制造,2003(1):1-6.  
ZHANG Jiansheng, LYU Junfu, LIU Qing, et al. Investigation on design rule of CFB boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2003(1):1-6.
- [6] 孟志东. 循环流化床锅炉炉内灰浓度降低的原因[J]. 华北电力技术,2014(7):67-69.  
MENG Zhidong. Analysis of ash concentration reduction in circulating fluidized bed boiler[J]. North China Electric Power, 2014(7):67-69.
- [7] 孙剑. 大型循环流化床锅炉燃烧系统特性与建模研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2010:96-98.
- [8] 李均昊. 循环流化床锅炉运行特性及过程优化研究[D]. 唐山:河北联合大学,2012:42-45.
- [9] 孔垂茂,赵斌,王雨,等. 循环流化床锅炉燃烧工况考评分析[J]. 电力科学与工程,2012,28(4):34-38.  
KONG Chuimao, ZHAO Bin, WANG Yu, et al. Assessment analysis of CFB boiler combustion conditions[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(4):34-38.
- [10] 毛玉如,方梦祥,骆仲泱,等. 循环流化床富氧燃烧技术的试验研究[J]. 锅炉技术,2004,35(6):27-31.  
MAO Yuru, FANG Mengxiang, LUO Zhongyang, et al. Experimental Study on oxygen-enriched combustion technology on circulating fluidized bed test-facility[J]. Boiler Technology, 2004, 35(6):27-31.
- [11] 冉宏. CFB 锅炉降低灰渣含碳量的探讨[J]. 电力建设,2008(11):89-94.
- [12] 张宝旺. 提高 YG-75/5.29 循环流化床锅炉返料效率的措施与方法[J]. 科技信息,2009(9):632-635.
- [13] 单娟娟,陈荣生,杨亚平. 粒度对循环流化床锅炉燃烧影响的试验研究[J]. 能源研究与信息,2007,23(1):40-45.  
SHAN Juanjuan, CHEN Rongsheng, YANG Yaping. Experiments on the effects of coal particle size on the combustion processes in the circulating fluidized bed boiler[J]. Energy Research and Information, 2007, 23(1):40-45.
- [14] 谭志茜,邝伟,苟建兵,等. 300 MW 循环流化床锅炉上部差压及床压优化试验[J]. 热力发电,2014,43(4):128-130.  
TAN Zhiqian, KUANG Wei, GOU Jianbing, et al. Optimization of bed pressure and its upper pressure different for a 300 MW CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(4):128-130.
- [15] 王智微. 循环流化床锅炉物料平衡分析[J]. 发电设备,2003(3):20-23.  
WANG Zhiwei. Balancing analysis of charges of circulating fluidized bed boilers[J]. Power Equipment, 2003(3):20-23.