

发电设备优化

W 火焰锅炉中低负荷燃烧优化试验研究

何明红¹, 尹强¹, 田贵航¹, 吴少旭¹, 宁尤华¹, 马达夫², 赖金平², 周文台², 何翔²

(1. 贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州毕节 551700;

2. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

摘 要: 针对某 W 火焰锅炉燃用贵州地区高碱无烟煤时, 由于炉膛下部燃烧推迟导致经常出现大量结焦问题, 开展燃烧优化试验研究, 重点分析乏气风门开度、磨煤机折向挡板开度、二次风总风门挡板开度、磨煤机出口温度等因素的影响。结果表明: 乏气风对温度影响不大; 开大单台磨煤机的折向挡板开度, 可以在一定程度上提高下炉膛的温度, 尤其是 21.2 m 处的烟温; 中间燃烧器 F 挡板开度开大有利于提升下炉膛燃烧强度; 降低磨煤机出口温度后, 24.5 m 处烟气温度下降。研究结果可为燃用低挥发分煤种 W 火焰锅炉低负荷燃烧优化措施提供参考。

关键词: W 火焰锅炉; 中低负荷; 燃烧优化

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 1671-086X(2026)05-0342-10

DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2026.05.002

Experimental Study on Combustion Optimization of W-flame Boiler at Medium and Low Loads

HE Minghong¹, YIN Qiang¹, TIAN Guihang¹, WU Shaoxu¹, NING Youhua¹, MA Dafa²,
LAI Jinping², ZHOU Wentai², HE Xiang²

(1. Guizhou Jinyuan Chayuan Power Generation Co., Ltd., Bijie 551700, Guizhou Province, China;

2. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: In response to the frequent occurrence of severe coking because of the delay of the ignition point in the lower part of the furnace when a W-flame boiler burns high-alkali anthracite from Guizhou Province, combustion optimization tests were carried out. The influences of factors such as the exhaust air damper opening, coal mill deflection baffle opening, secondary air total damper opening, and coal mill outlet temperature were emphatically analyzed. The results indicate that the exhaust air has a negligible impact on the temperature. Increasing the deflection baffle opening of a single coal mill can partly elevate the temperature in the lower part of the furnace, particularly the flue gas temperature at a height of 21.2 m. Augmenting the F damper opening of the middle burner proves beneficial for enhancing the combustion intensity in the lower part of the furnace. Lowering the outlet temperature of the coal mill results in a decrease in the flue gas temperature at 24.5 m. The research results can provide a reference for low-load combustion optimization measures of W-flame boilers burning low-volatile coal.

Key words: W-flame boiler; medium and low load; combustion optimization

W 火焰锅炉作为燃用低挥发分煤种(如无烟煤、贫煤)的关键装备, 凭借双拱近乎绝热下炉膛结构和分级燃烧原理, 可显著提升低反应活性煤种的燃尽效率^[1-2]。其核心设计通过扩大下部燃烧室容积(较常规锅炉增加 80%~120%)、延长

煤粉停留时间(3~4 s)及强化气流扰动, 能有效解决低反应活性煤种的着火稳定性问题^[3-12]。

结渣现象集中发生于下炉膛侧墙及翼墙区域。低负荷运行时, 高温烟气偏转撞击壁面形成初始渣层, 卫燃带强化了炉膛局部高温氛围;

收稿日期: 2025-10-13; 修回日期: 2025-12-02

作者简介: 何明红(1983—), 男, 工程师, 从事火电厂运行管理工作。

E-mail: 284858223@qq.com

结渣引发连锁反应,受热面传热效率降低会导致炉膛出口烟温升高,引发低灰熔点煤的结渣问题;锅炉效率下降,机组供电煤耗率将会上升 15%~20%。现有防结渣技术在低负荷工况下存在局限:传统配风策略易引发气流短路;浓淡分离燃烧器改造可能加剧火焰刷墙;燃烧参数动态调控缺乏实时响应机制。

某发电公司 1 号机组锅炉当前燃用煤质种类繁多,热值较低,下炉膛、折焰角区域容易发生结焦。鉴于此,对 1 号锅炉开展燃烧调整试验,目的是在结焦可控的前提下,为 1 号锅炉在较高负荷下的安全稳定运行提供保障。

1 设备简介

1.1 锅炉概述

研究对象为东方锅炉股份有限公司制造的超临界参数变压直流炉、单炉膛、W 型火焰燃烧锅炉,采用一次再热,尾部双烟道结构,挡板调节再热汽温,固态排渣,II 型布置,锅炉型号为 DG2020/25.31-Ⅱ 12。锅炉水冷壁为膜式水冷壁,采用具有正流量响应特性的低质量流速垂直管圈,下部水冷壁采用优化内螺纹管,上部水冷壁采用光管,上、下炉膛之间采用全混合集箱。锅炉设计燃用贵州无烟煤。

锅炉设计采用双进双出钢球磨煤机正压直吹冷一次风制粉系统,共配有 6 台 MGS4360 型双进双出钢球磨煤机,设计煤粉细度 $R_{90}=8\%$,每台

磨煤机带 4 只双旋风煤粉燃烧器。24 只煤粉燃烧器顺列布置在下炉膛的前后墙炉拱上;前、后墙水冷壁上还布置有 26 个燃尽风调风器。磨煤机与燃烧器匹配关系如图 1 所示。

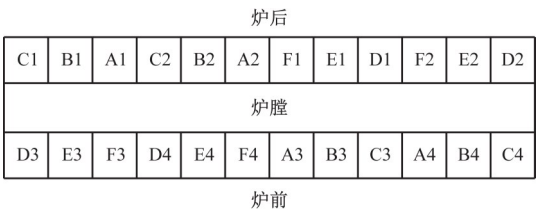


图 1 DG2020/25.31-Ⅱ12 燃烧器布置

1.2 燃烧系统概述

锅炉所配的双旋风煤粉浓缩型燃烧器是专门设计用于燃烧低挥发分燃料的燃烧器。其设计的重点是采用旋风筒进行煤粉浓缩,并提供多种调节手段,以适应无烟煤着火、稳燃的要求。双旋风煤粉燃烧器由煤粉进口管、煤粉均分器、双旋风筒壳体、煤粉喷口、乏气管、乏气调节蝶阀等组成。

旋风微油煤粉燃烧器既具有锅炉启、停及锅炉低负荷稳燃功能,又具有主燃烧器功能。通过合理布置各浓缩环位置,提高进入中心燃烧筒内的煤粉气流浓度(浓相煤粉气流);然后由火焰将中心筒内的浓相煤粉气流点燃。同时,稀相煤粉气流从中心燃烧筒及燃烧器内壁之间的环形通道进入燃烧器前端,起到了冷却中心筒及燃烧器的作用;稀相煤粉气流由中心筒内的煤粉火焰点燃。煤粉燃烧器如图 2 所示。

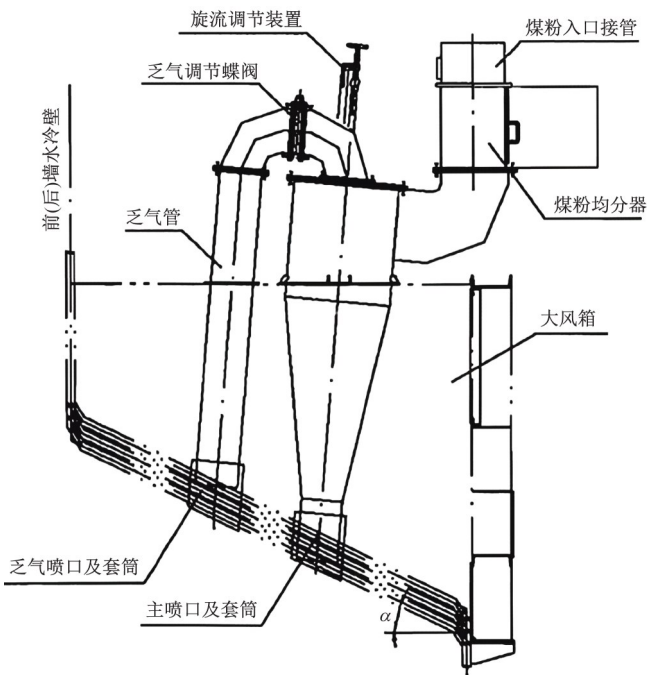


图 2 双旋风煤粉浓缩型燃烧器结构

1.3 实际燃用煤种

当前,入炉煤的煤质种类较多,常用的煤质超过 20 种,总体按 3 400 kcal 和 4 100 kcal 为基准进行掺配,并同时兼顾硫分和灰熔点。除此以外,灰熔点最低的几种煤,目前总的掺烧比例约 10%,均匀加仓至各台磨煤机中。

目前入厂煤的软化温度 ST 在 1 116~1 311 °C 之间,平均软化温度为 1 232 °C;当 ST 小于 1 260 °C 时,属于严重结渣型煤。其中,兴吉和鑫达矿的煤软化温度较低,大量掺烧后炉膛出现了沾污结渣现象。采用灰渣流动温度 FT 和变形温度 DT 差值来衡量灰渣在水冷壁上的附着力:当 $FT-DT \leq 149$ °C 时,水冷壁结渣附着力较强,不易用吹灰器清除掉,吹灰效果差;当 $FT-DT > 149$ °C 时,水冷壁结渣呈疏松状,易于用吹灰器清除掉,吹灰器使用效果较好。

日常用煤中飞灰、大渣的 Na_2O 含量(质量分数,下同)约为 1.87%, K_2O 含量约为 3.77%,当灰中 Na、K 含量超过 0.5% 时属于高碱煤^[13]。

2 燃烧优化试验内容

试验内容包括以下几个方面:① 煤粉细度调整试验。在不影响制粉系统出力的情况下,调整煤粉细度,提高煤粉气流着火能力。② 磨煤机出口温度调整试验。在保证磨煤机运行安全的情况下,调整磨煤机出口温度,强化煤粉气流着火。③ 主乏气分配调整试验。调整燃烧器主乏气分

配比例,进而调整燃烧器喷口主燃区的一次风速,找出合适的主乏气分配比例。④ 二次风分配调整试验。通过调整油枪风门、F 风门、燃尽风风门、二次风箱压力,提高拱上气流下冲动量及刚性,提高炉膛火焰充满程度。

在调整过程中或调整前后,对炉膛温度及着火距离进行测量:采用高温热电偶,从拱上在燃烧器附近测试火焰行程方向的烟气温度(由于测试过程中温度有波动,因此统一记录烟气的最高温度),掌握火焰下冲深度,以此为依据,判断燃烧优化的调整方向。

3 现状摸底试验

3.1 制粉系统试验

对常用 4 100 kcal 煤质的 B 磨煤机、3 400 kcal 煤质的 F 磨煤机和中热值煤(3 550 kcal)的 D 磨煤机进行制粉系统试验,对其他磨煤机进行分离器折向挡板开度的试验,旨在掌握煤粉细度和粒度的分布特性。

在各工况的煤粉取样时,每分钟对煤粉的平均取粉量如图 3 所示,可见 A1、B3、C3、D2、F2 号粉管的粉量较大,超过各磨煤机粉量的 40%;而 A2、C2、D3、E3 等粉管的粉量较小,未超过各磨煤机粉量的 15%。此外,B 墙的粉量是 A 墙的 1.56 倍,而且 A 前墙、A 后墙、B 前墙、B 后墙的煤粉比例为 1:1.14:1.46:1.88,说明 B 后墙的粉量最大。

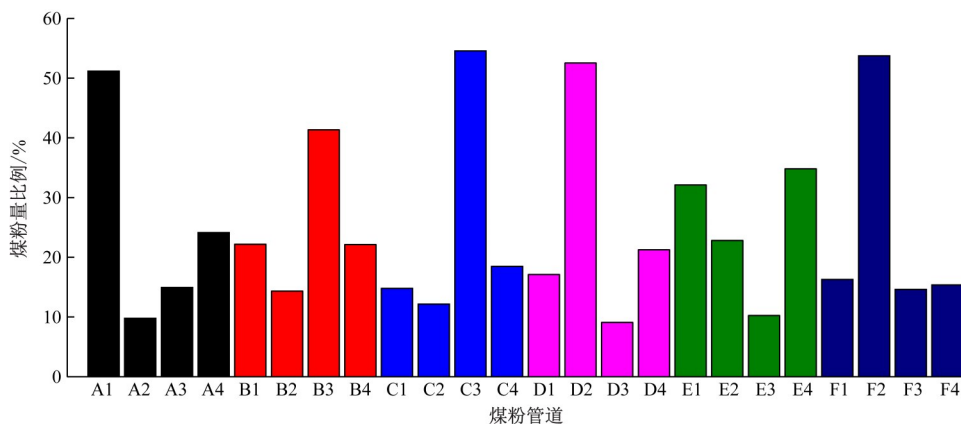


图3 各粉管的煤粉量对比

各磨煤机煤粉细度情况见表 1,在 A 磨煤机折向挡板开度为 30°、40°、45° 时,煤粉细度 R_{90} 平均值为 8.49%、9.76%、12.17%;在其他因素不变的情况下,折向挡板开度由 30° 开至 45°,煤粉细度变粗,均匀性变好,考虑到现燃用煤质情况,建议 A 磨煤机折向挡板开度维持在 40°。

B 磨煤机整体煤粉细度 R_{90} 为 7.10%,平均煤粉粒径为 45.38 μm ,不同粉管的煤粉差别较大。3 号粉管粉量、 R_{90} 和平均粒径都是最大的,而 1 号粉管中 $R_{61} \sim R_{75}$ 粉量最高, R_{90} 最小。因此,3 号粉管煤粉最粗,1 号粉管煤粉最细。

在 C 磨煤机折向挡板开度为 30°、40°、45° 时,

表 1 各磨煤机煤粉细度情况

磨煤机	$R_{90}/\%$	平均煤粉粒径/ μm
A	10.14	55.90
B	7.10	45.38
C	4.83	49.00
D	5.94	48.20
E	7.77	52.79
F	9.78	49.46

煤粉细度 R_{90} 平均值为 4.32%、4.78%、5.6%。在其他因素不变的情况下,折向挡板开度由 30° 开至 45°,煤粉细度变粗,均匀性变好,考虑到现燃用煤质情况,建议 C 磨煤机折向挡板开度维持在 40°。

D 磨煤机煤粉细度 R_{90} 为 5.94%,平均煤粉粒径为 48.20 μm ,不同粉管的 R_{90} 差别不大,但是通过平均煤粉粒径发现 1 号粉管煤粉较粗(主要是由于 1 号粉管 $R_{61}\sim R_{175}$ 区间粉量较多),而 3、4 号煤粉较细。

在 E 磨煤机折向挡板开度为 30°、40°、45° 时,煤粉细度 R_{90} 平均值为 3.94%、9.16%、9.46%。在其他因素不变的情况下,折向挡板开度由 30° 开至 45°,煤粉细度变粗,均匀性变好,考虑到现燃用煤质情况,建议 E 磨煤机折向挡板开度维持在 35°。

F 磨煤机整体煤粉细度 R_{90} 为 9.78%,这是因为大部分工况是在折向挡板开度为 40° 时完成的,平均煤粉粒径为 49.46 μm ,不同粉管的 R_{90} 差别较大,1、2 号粉管煤粉比 3、4 号粉管的粗;3 号粉管 $< R_{61}$ 的煤粉较多、平均粒径较小,而 4 号粉管的 R_{90} 仅为 4.8%。

3.2 炉膛温度测试试验

当前上煤的方式主要是 A 磨煤机、F 磨煤机的配煤热值为 3 400 kcal;B 磨煤机的配煤热值为 4 100 kcal;C~E 磨煤机则根据情况,配煤热值在 3 500~3 700 kcal。467 MW 负荷工况下,通过光学测温仪测量得到的下炉膛温度在 1 100~1 340 °C,屏底温度在 1 100~1 250 °C 之间,部分区域温度已经高于软化温度,结焦风险较大。通过近期配煤调整、运行参数调整,500 MW 负荷下,屏底温度基本控制在 1 180 °C 以下。

但是,随着次日调度负荷曲线的变化,配煤方式相应改变,若次日的负荷高,则 4 100 kcal 的煤加仓多,若次日的负荷低,则 3 400 kcal 的煤加仓多。而掺配出这 3 大类煤质的原煤则来自多达几十个矿点,单个矿点出煤的热值在 1 800~5 000 kcal 均存在,即便同一个矿点,不同的开采矿号出煤的热值也有差异。除此以外,这些煤的灰熔点也

分布不均,存在高灰熔点的煤,也存在软化温度在 1 200 °C 以下的煤。综上,这些煤实际上是由无烟煤和劣质无烟煤综合组成的。

一次风压由机组负荷指令和实测压力值计算,给出一次风压指令,目前投入自动,但是由于炉膛结焦风险隐患的原因,当前一次风压设定值上限为 6.1 kPa,下限为 5.8 kPa。6 台磨煤机容量风挡板开度普遍在手动 40%~55% 之间,磨煤机分离器出口温度设定值为 110~115 °C,通常热风挡板开度全开,冷风投自动调节温度。送风机手动运行,所以送风量、氧量均未投入自动。磨煤机静态分离器折向挡板就地开度均为 30°,旁路风均关闭,磨煤机电流维持在 180 A 附近,筒体燃料料位维持在 700~800 Pa。380 MW 以下的机组一般采用 5 台磨煤机运行,由于入炉煤综合热值低且尽可能多掺烧低热值煤(3 400 kcal 的煤为主),因此 400 MW 以上的机组常采用 6 台磨煤机运行。就地观察测试炉膛烟温,发现下炉膛烟温略偏低。尤其 21.2 m 的 B 侧烟温普遍比 24.5 m 的要低。表 2、表 3 是 450 MW 负荷下屏底和炉膛烟温的摸底测试数据。

表 2 450 MW 负荷屏底烟温测量

单位:°C	
项目	屏底烟温
测孔 1	1 050
测孔 2	1 097
测孔 3	1 059
测孔 4	1 094
测孔 5	1 139
测孔 6	1 130
测孔 7	1 168
测孔 8	1 106
测孔 9	1 143
测孔 10	1 139
测孔 11	1 123
测孔 12	1 088
平均	1 111

表 3 450 MW 负荷炉膛烟温测量

单位:°C							
炉膛位置	A 前	A 中	A 后	B 前	B 中	B 后	平均
24.5 m	高	1 342	1 305	937	1 260	1 434	1 028
	低	1 180	800	560	1 153	1 063	613
21.2 m	高	1 161	1 350	1 327	1 133	1 176	781
	低	800	1 184	886	810	760	550

另外,不同负荷下,尽管理论上一次风压应该随负荷变化,但是当前实际情况并不如此,运

行手动设置使得一次风压固定在一个小的范围内,体现不出应有的差别。低负荷下(330 MW),由于C磨煤机停机,5台磨煤机运行,单台磨的煤量不一定小,而中高负荷下(460 MW)6台磨煤机运行,又存在4 100 kcal的煤质加仓,所以单台磨的煤量不一定大。这就存在负荷增大,一次风压不变甚至还会降低的情况,所以对于单台磨煤机来说,入磨的一次风压还略有下降(启磨后,通流特性发生变化)。根据实际情况,一次风压的设定值,反而要考虑磨煤机最大给煤量的携带能力,要更加侧重磨煤机的风煤比,合理调整风压和容量风挡板开度,使得在任何负荷下,磨煤机一次风风煤比均在合理范围。

还应注意配煤的干燥无灰基挥发分的值,每天要关注配煤的情况以及工业分析的数据。目前加仓煤的干燥无灰基挥发分其实普遍在15%

左右,需要针对3 400、4 100 kcal及其他热值下,以A/F、B、C/D/E磨煤机(常见加仓方式)为试验对象,得出合理的风煤比以及煤粉的细度、粒度分布特性,不能单看 R_{90} 值。

1号炉挤渣门改造前的炉底漏风量应该比改造后大。当前一次风压保持不变,送风量手动操作略有增加,而引风设定值始终是一50 Pa没有变化,所以可以推断,现在炉内气流的抽吸力+送风“推力”比挤渣门技改前要大,那么煤粉气流,尤其是碳颗粒的停留时间会减少,燃烧行程可能缩短。

燃烧器前后墙风箱经过改造,风室分别向A侧管左边4个边上燃烧器、B侧管右边4个边上燃烧器以及中间管中间4个燃烧器供给二次风。两侧边上的风箱进口风门挡板开度并未全开,中部的全开,如图4所示。

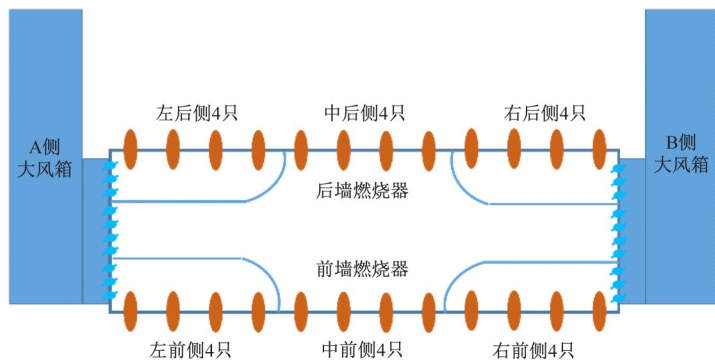


图4 燃烧器前后墙风箱

从风箱改造的结构来看,A、B侧同时往中部进风,加上就地风门手动挡板的调整方式,推测中间燃烧器的二次风可能比两边的大。摸底调整期间,B侧墙发生了大焦块卡在7.3 m标高处的现象,就地多次观测,B侧墙后标高24.5、21.2 m处燃烧情况都不太好,烟温在400~900℃波动,经常可以看见未燃烧的煤粉。

采集历史数据,二次风燃烧器风箱普遍压力情况为前侧>后侧,A侧>B侧。而B墙后侧D2燃烧器正好在B后的位置,推测该位置是最缺二次风的地方。此外,当6台磨煤机运行的时候,通常切除C4燃烧器、E1燃烧器,由于E1和E2的煤粉从同一个静态分离器出来,当切除E1时,磨煤机筒体气流阻力特性发生变化,这时候E2的粉量也会减少。在D2的旁边是E2,对面是C4,D2的煤粉缺乏E2和C4的有效支持后,它的着火存在困难,周围的火焰温度对其支持不足,从历次的24.5 m和21.2 m温度摸底测试就可以得出这个结论。

就地燃烧器乏气开度全部在20%,4个角部燃烧器的调风盘相应提高(A3、F3也相应提高),其他燃烧器则全部放在底部;D磨煤机挡板开度普遍在15%~30%,A磨煤机挡板、B磨煤机挡板开度普遍在45%。

综上,推测当前存在的主要问题是:风粉气流整体下冲不足,下炉膛温度偏低,使得炉膛上部烟温偏高;B侧缺风以及D2燃烧不充分不及时,是造成B侧结焦的主要原因。即便在D2切除投C4的时候,由于B侧缺风,B侧墙标高25 m及以下也会结焦。因此,缓解当前1号炉容易结焦问题的调整措施方向是提高风粉气流的整体下冲动量,将21.2 m下炉膛的烟温提升。改善不同工况下B墙后侧尤其是D2的燃烧状态。

3.3 拱下温度测试试验

由于A/F磨煤机加仓3 400 kcal、B磨煤机加仓4 100 kcal、C/D/E磨煤机加仓3 500~3 700 kcal的煤质,有针对性地开展摸底测试。选取的

边上、中间不同位置 and 不同磨煤机对应燃烧器测试的结果如图5所示,分别是A4、D3、F4和B3,

以及D2、C1、F1和A1。图5中,横轴是已经扣除拱上风箱保温厚度的距燃烧器喷口的净距离。

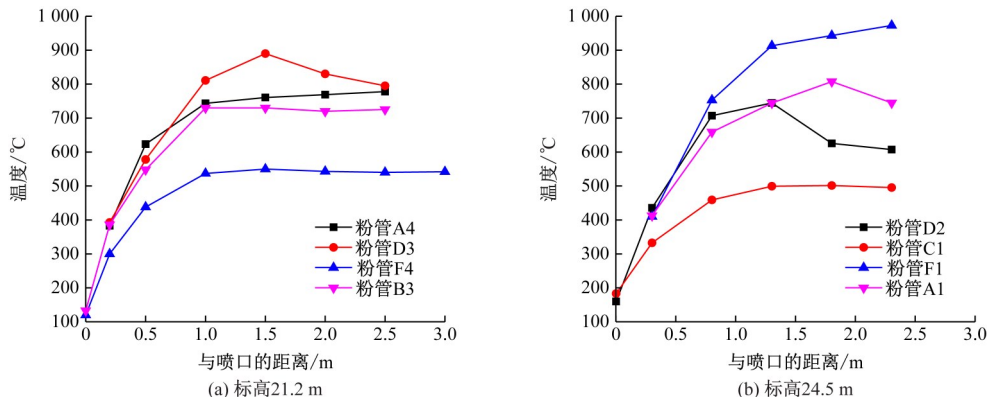


图5 拱上燃烧器看火孔温度测试结果

图5中,F4燃烧器在热电偶距离深入1 m后,其烟温在550℃附近波动,说明F4喷口的煤粉尚未着火(根据图6,着火点在617℃附近),这是由于F4粉管在折向挡板开度为40°时 R_{90} 仅为4.8%。由于下冲不足,挤渣门改造后,F4中超细的煤粉非常容易还未着火便被烟气带至炉膛上部燃烧。另外,几个燃烧器总体正常,当烟温高于700℃时,根据热重试验数据,确认煤粉开始着火,着火距离在1.0~1.5 m之间属于正常范围。B3和D3随距离的变化,烟温开始下降,推断可能一次风率偏小,煤粉早期释放的挥发分燃烧不充分,或者拱上的二次风量偏小,从拱上的风门开度可以判断这个可能性也是存在的。

范围。

4 燃烧优化试验

W火焰锅炉燃烧要充分考虑拱上煤粉气流下冲深度与煤粉气流着火位置之间的平衡。一般来说,煤粉着火过早,煤粉气流膨胀,下冲动量减弱,火焰充满程度低,火焰中心上移;煤粉着火过迟,下冲动量增强,碳颗粒燃尽推迟,也易造成火焰中心上移。故本次调整思路是在保证煤粉合理着火距离的同时,尽量提高拱上气流下冲动量,提高下炉膛水冷壁吸热量。烟气温度可以作为评判着火延时的参考^[14],本文接下来重点分析不同因素对烟气温度的影响。

4.1 乏气风门开度试验

根据前文推测,主要原因是风粉气流下冲动量不足,因此首先展开乏气风门关闭的试验。

在420 MW负荷下,6台磨煤机运行,将C1、F4乏气风门开度从20%关至0。调整后的测试结果如图7所示,C1先调整,F4随后调整。

执行C1、F4乏气风门开度从20%关闭至0的试验,发现C1(A后)在2个标高处的烟温明显上升,说明C1风粉气流下冲的动量略有加强,但是B后(D2)则属于固有问题,两次调整后烟温下降,B中2个标高处烟温升高,原因之一很可能是D2燃烧偏差引起的。

在380 MW负荷下,5台磨煤机运行,C磨煤机停运。将D3乏气风门开度从20%关至0。调整后的测试结果如图8所示。

图8中,D3(A前)乏气风门关闭后,2个标高处A前侧烟温略有降低,说明D3的燃烧略有弱化,可以推测出D3燃烧器需要分离主燃区定量的一次风。另外,当D2温度下降时,B中的烟

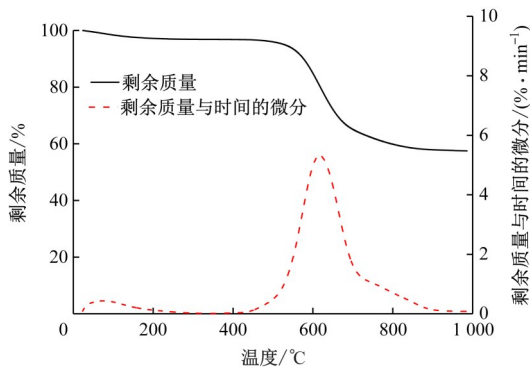


图6 煤的热重曲线

图5(b)中,C1燃烧器的着火距离明显偏远,而F1燃烧器则呈现烟温逐渐升高的情况,这说明各个燃烧器煤粉量存在偏差大的可能,所以对磨煤机出口粉管的煤粉调平是十分必要的。注意到F4燃烧器在中间,而C1燃烧器在边上,从烟温的测试结果来看趋势是一致的。

综上,根据选取的8个燃烧器看火孔温度测试结果,有6个燃烧器的煤粉着火距离在合理

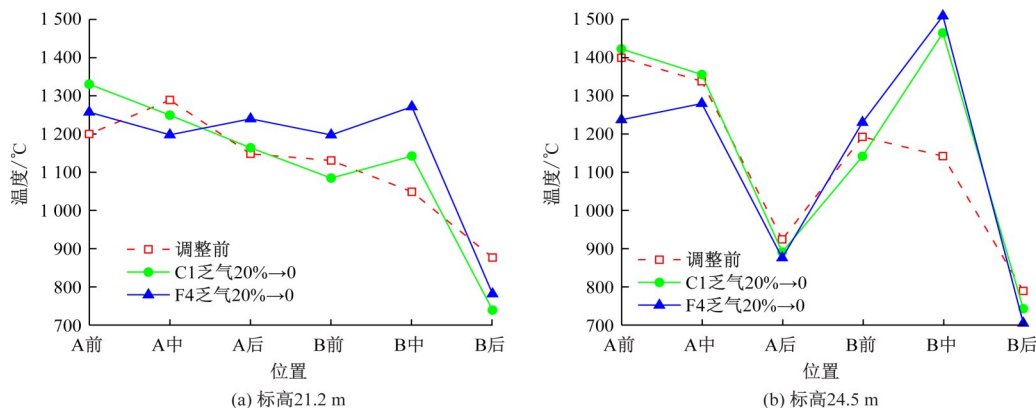


图7 C1、F4乏气风门开度依次调整前后烟气温度

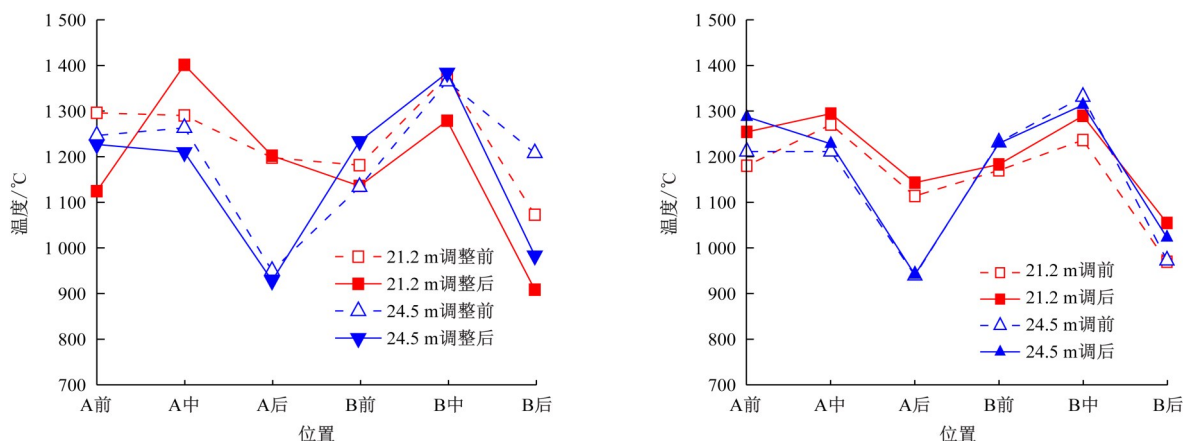


图8 D3乏气风门开度调整前后烟气温度

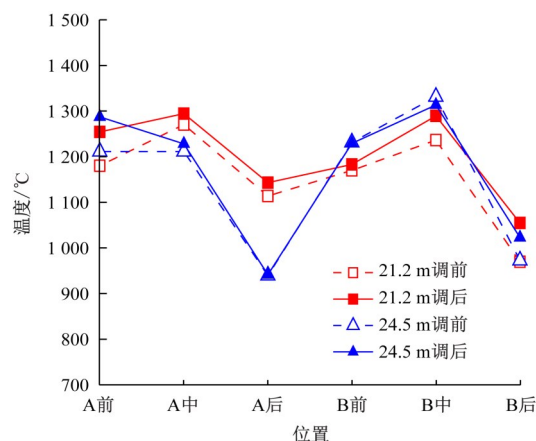


图9 F磨煤机折向挡板开度调整试验结果

温就提高,说明D2燃烧情况不太理想,从而引起B中烟温提高。

因此,乏气风门开度对下炉膛的烟气温度影响不大,此外,乏气20%的开度旨在对乏气喷口进行适当冷却以保护其不被烧坏,20%的开度实际上并不大,所以后续未再执行乏气风门关至0的试验。

4.2 磨煤机折向挡板开度试验

各台磨的分离器折向挡板开度从30°调整至45°。为提升下炉膛的吸热量,必须提升21.2 m处的烟温。F磨煤机折向挡板开度调整试验结果如图9所示,图9中温度均是测试所得的最高值。

在390 MW负荷下,F磨煤机折向挡板开度由30°开大至45°后,21.2 m的温度平均上升100℃,且基本超过了24.5 m的温度,盘面显示水冷壁温度上升5℃。24.5 m处烟温普遍变化不大,但是B后的烟温略有提升,说明风粉气流的下冲动量得以增强。在440 MW负荷下,B磨煤机分离器折向挡板开度由30°开至45°,标高24.5 m温度增加58℃,尤其是A侧增加了118℃;21.2 m处上限温度提升55℃。在330 MW负荷下,A磨

煤机折向挡板开度由30°开至45°,标高24.5 m的温度略有降低,21.2 m处温度略有提升。说明折向挡板开大后,煤粉气流阻力降低,风粉动量得到提升,且煤粉适当变粗后,着火点下移,21.2 m炉膛下部的燃烧加强,燃烧行程增加。在350 MW负荷下,停D磨煤机,C磨煤机折向挡板开度由30°开至45°,标高24.5 m的温度略有降低,21.2 m处平均温度略有提升。说明折向挡板开大后,煤粉气流阻力降低,风粉动量得到提升,且煤粉适当变粗后,着火点下移,21.2 m炉膛下部燃烧加强,燃烧行程增加。

在400 MW负荷下,6台磨煤机运行,D磨煤机折向挡板开度由30°开至45°,标高24.5 m温度变化不大,21.2 m处上限温度提升75℃。随后恢复了折向挡板开度,再次测试了下炉膛烟温:D磨煤机折向挡板开度由45°关小至30°,标高24.5 m处温度变化不大,21.2 m处上限温度下降。说明折向挡板开度关小后,煤粉气流阻力增加,风粉动量减少,且煤粉变细后,着火点上移,燃烧行程缩短,验证了煤粉细度对着火行程的影响。

同时,进行了E磨煤机分离器折向挡板开度由30°开至45°的试验。2个标高处烟温变化并不

特别明显,21.2 m处烟温有升高有降低,但是平均是提高的。24.5 m处烟温变化不大。

D磨煤机分离器折向挡板开度的开、关试验前后对比如图10所示。可以明显看出,折向挡板开度开大后,24.5 m和21.2 m的烟温提升。

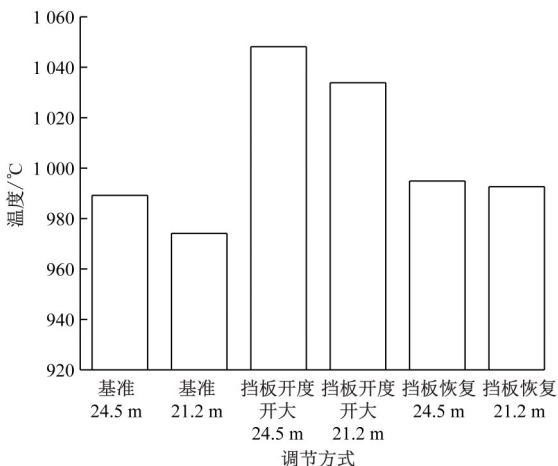


图10 D磨煤机折向挡板开度开大、恢复后下炉膛温度

综上,开大单台磨煤机的折向挡板开度,可以一定程度上提高下炉膛的温度,尤其是21.2 m处的烟温。若多台磨煤机同时采用分离器折向挡板开度提高的运行方式,则下炉膛的烟温会得到进一步的提升。可以判断,在一次风压、容量风门等不变的前提下,将磨煤机折向挡板开度开大,降低气流的离心分离作用力,减少磨煤机分离器的通流阻力,可以有效提升风粉气流下冲动量,使得下炉膛尤其是21.2 m处烟温提高。

上述试验结果验证了1号炉目前主要问题是风粉阻力大,煤粉偏细,气流刚性不足。只有E磨煤机的2个标高烟温明显有所下降(A后、B中),这是因为试验的时候切除E1,此时在B侧的E2粉量减少,对试验结果有一定影响。

4.3 二次风总风门挡板开度试验

从摸底分析可知,两侧尤其是B侧缺风的可能性较大,针对这个问题开展了相应的调整试验。盘上风烟画面显示A侧前、后二次风静压高于B侧,同时B侧24.5 m中部看火孔流焦情况频繁,判断B侧可能相对缺风。首先,将A侧的燃烧器二次风总风门开度由100%关小至80%;其次,就地将B后角部风箱单只风门开度从0开至50%;最后进一步将A后角部风箱单只风门开度从0开至50%。

图11中,风门调整后A侧21.2 m的温度略有上升,而24.5 m处烟温明显下降,说明A侧燃烧器风箱总风门关小后,A侧的燃烧器风粉气流在

24.5 m处的燃烧有一定弱化,所以燃烧行程加长,直到21.2 m处烟温才有所提升;B侧2个标高处烟温变化不大,图11中第6点(B后)始终温度较低,这是B后存在的固有问题。除此以外,24.5 m处A后的燃烧情况不算理想,温度偏低,推测此处也存在缺风的可能。

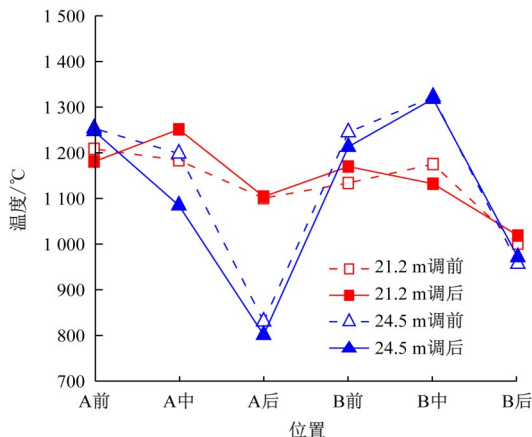


图11 A侧燃烧器前后墙总风门关小(从100%关至80%)试验结果

图12是440 MW时,B后就地角部风门开大的试验结果。B后角部风门共5只,且均未全开,其中一只关闭的,本次是将关闭的那只风门开至50%。

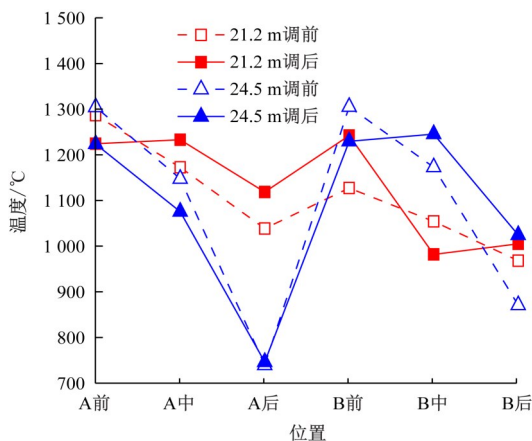


图12 B后就地角部风门开度试验结果

试验结果显示,B侧烟气温度平均略有提升,21.2~24.5 m处B后侧温度增加45℃,尤其是B后侧烟温明显提升。说明B后供风增强后,下部炉膛燃烧加强。但是注意到A侧24.5 m处烟温小幅下降,说明当B就地角部风门开大后,A侧的二次风量略有降低,燃烧行程拉长,使得21.2 m处A侧烟温小幅提升。此外,就地的B后风压波动减小。

以上结果说明两侧缺风的可能性较大,就地角部风门调整带来的最大效果是24.5 m处,而

21.2 m 处的烟温则需要风粉气流的下冲动量提升才能更有效地调整。

图 13 中,在 440 MW 负荷下,A 后就地角部风门开大后,标高 24.5 m 处温度略有提升,但是 21.2 m 处的烟温略有下降。说明 A 侧供风增强后,下部炉膛 24.5 m 处风粉气流的燃烧加强,这与 B 侧调整的试验和推测结果是相同的。这说明 A 侧边上的燃烧器风粉下冲动量略有不足。24.5 m 处 B 侧烟温小幅下降,说明 A 侧就地角部风门开大后,B 侧的二次风风量略有降低,影响了 B 侧 24.5 m 处风粉气流的燃烧。所以两侧的二次风量偏低,24.5 m 处的烟温非常敏感。

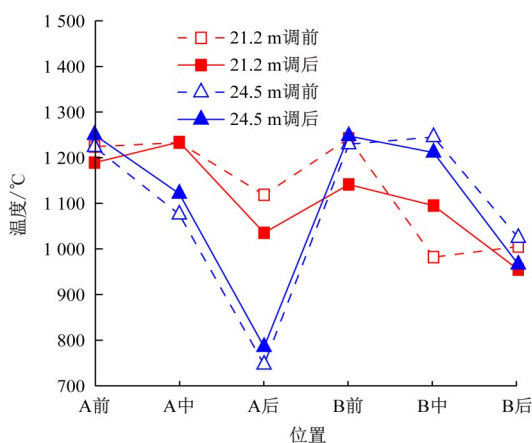


图 13 A 后就地角部风门开度试验结果

综上,从 3 组试验结果对比分析,可以明确得出 1 号炉当前两侧的燃烧非常敏感,风量适当提升或者减少,带来的影响是明显的。24.5 m 处受到的影响最为直接,21.2 m 处则更受限于风粉气流下冲动量的影响。所以当前判断两侧风量可能偏低,结合两侧的结焦频次,以及分散控制系统(DCS)盘面风箱静压值的变化趋势,说明 B 侧缺风更明显,但是 A 侧的风量也不充足。

4.4 F 挡板开度试验

在 410 MW 负荷下,6 台磨煤机运行时将中间前墙 4 个和后墙 4 个燃烧器 F 挡板开度从 55°关至 40°。图 14 中是将中间前墙 4 个与后墙 4 个燃烧器 F 挡板开度从 50°关至 40°时的试验结果。调整后 A 前和 A 中的 2 个标高处烟温下降,说明 A 侧的燃烧受到了影响,而 B 前和 B 中的 21.2 m 处烟温提升。

由图 15 中第 2 次调整前后的烟温对比可以明显看出,24.5 m 处两侧的烟温得到提升,但是 21.2 m 处的烟温整体略有下降,说明下炉膛的燃烧得到了加强。

综上,2 组试验得到了不同的结果,说明 2 个

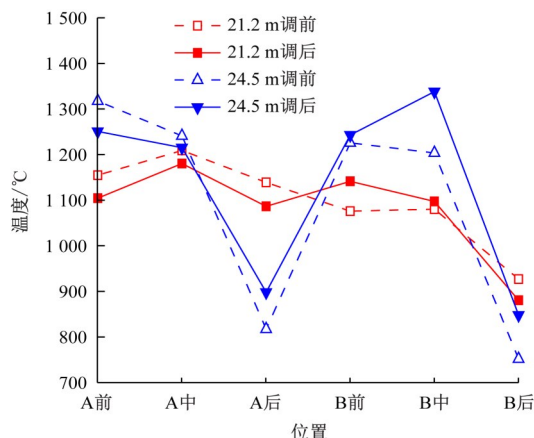


图 14 F 挡板中间燃烧器开度减小试验结果

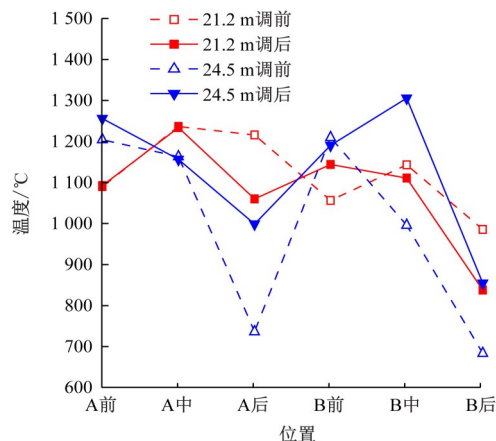


图 15 第 2 次 F 挡板中间燃烧器开度减小试验结果

负荷下送风量不同等因素存在影响,后续将进一步验证 F 挡板开度调整的影响。

图 16 是在 400 MW 负荷下,6 台磨煤机运行时,将中间前墙 4 个和后墙 4 个燃烧器 F 挡板开度由 55°关小至 40°,从拱上看火孔测试烟温的结果。

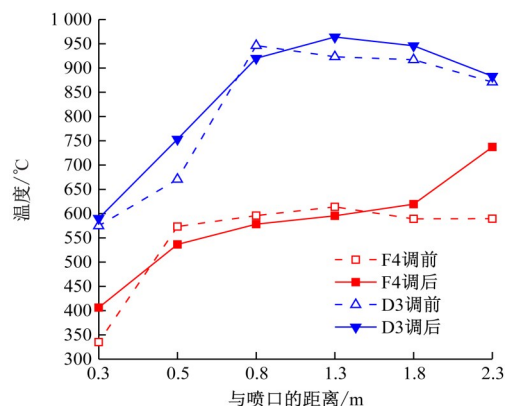


图 16 F 挡板中间燃烧器开度减小拱上测试

由图 16 可知,F4 燃烧器喷口距离 0.3 m 处和 2.3 m 处温度较调整前升高,尤其是 2.3 m 处,煤粉的状态由未着火变为着火(烟温超过 700 °C),着火点提前。由拱上看火孔不同距离的温度测

试中看出,F4燃烧器也是这个特性,说明之前认为中部二次风偏大的判断是符合预期的。

这是因为燃烧器二次风风箱进行了改造,两侧往中部4只燃烧器供风,且边上(A前、B前)的角部二次风风门挡板就地开度尚未全部开启,而中部的则是全开,同时为了防止炉膛严重结焦将送风量适当提高,所以推测中部实际风量略偏大。另外,一次风压设定值在5.8~6.0 kPa且不随负荷变化,磨煤机分离器的折向挡板开度全部在30°,推测风粉气流下冲动量不足,煤粉偏细,F4燃烧器的煤粉细颗粒尚未冲到合理位置,便被中间的送风托起,这就是上部炉膛温度偏高的主要原因。因此,当F风门中间适当关小后,F4燃烧器在2.3 m处的燃烧开始好转。

D3燃烧器的温度总体小幅提升,中间F风门适当关小后,边上的F风份额提高,对D3燃烧器的燃烧加强、着火提前是有利的。同时注意到,D3燃烧器喷口断面不到1 m的位置烟温就超过900℃,说明着火偏强。这与图8的乏气调整结果是吻合的,D3燃烧器着火太强,燃烧相对提前。当乏气风门关闭时,2个标高处烟温降低(图8),说明主风粉气流一次风欠缺,乏气风门关闭后,补充了小部分一次风,强化了燃烧,而当F风门中部关小后,边上的二次风得到了一定的补充,煤粉的燃烧进一步得到加强,使D3燃烧器沿燃烧器喷口断面不同位置的烟温提高。可以考虑后续将D3燃烧器的调风盘调节至最底部,提升D3燃烧器风粉气流的下冲动量,推迟着火。

综上,F挡板中间开度适当关小,对两侧的影响尚需进一步验证和分析,对拱上烟温的影响与预期相符。

5 结语

(1) 上部结焦是由于底部燃烧不充分、燃烧滞后导致的。而下炉膛B侧后墙区域温度较低,是由于D2、F2粉管粉量较大,局部缺氧导致着火点严重延时造成的。此外,由于下冲动量不足,挤渣门改造后,一些中部燃烧器(例如F4)粉管中煤粉非常细,且中部二次风量很大,会出现煤粉还未着火便被烟气带走至炉膛中上部燃烧的现象。

(2) 乏气风对着火时间的影响不大;开大单台磨煤机的折向挡板开度,可以在一定程度上提高下炉膛的温度,尤其是21.2 m处的烟温;中间燃烧器F挡板开度开大有利于提升下炉膛燃烧

强度,使煤粉提前着火;当降低磨煤机出口温度后,24.5 m处烟气温度下降,发生着火延时。

下一步研究工作是在高负荷过程开展燃烧调整,从降低磨煤机出口温度、提高一次风压和相关风门挡板开度着手,标定尾部烟道横截面的氧量和CO等含量,找出中部缺氧的其他原因,并进一步提升下炉膛烟温,降低屏底烟温。实现火焰中心高度降低后,可稳步提高锅炉负荷。

参考文献:

- [1] 高正阳,宋玮,赵锦,等.变负荷下W型火焰锅炉燃烧特性的数值模拟研究[J].华北电力大学学报,2010,37(2):63-67.
- [2] 周文台,程智海,金鑫,等.600 MW超临界W火焰锅炉防超温燃烧调整试验研究[J].动力工程学报,2013,33(10):753-758.
- [3] 张广柱,程智海,周文台,等.600 MW W形火焰锅炉微油点火的启动优化研究[J].发电设备,2012,26(3):179-182.
- [4] 张晖,刘成成,于鹏峰,等.超临界W火焰锅炉燃用劣质燃料燃烧优化研究[J].热能动力工程,2022,37(10):104-111.
- [5] 杨文闯,杨卫娟,周志军,等.不同二次风角度的W炉冷态流场实验研究[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(1):139-145.
- [6] 王青祥,陈智超,关硕,等.燃尽风率对新型W火焰锅炉主燃区气固流动特性的影响[J].工程热物理学报,2020,41(1):20-28.
- [7] 徐鹏志,廖永浩,杨超,等.W型火焰锅炉低氮燃烧改造技术研究[J].锅炉制造,2017(6):1-5.
- [8] 杨赛兵,蒋建,曾臻.W火焰锅炉燃用劣质煤的燃烧调整——以大唐华银株洲发电有限公司为例[J].湖南农机,2011,38(11):64-65.
- [9] 李文博,曾令艳,蒋炳坤,等.燃烧器倾斜角度对W火焰锅炉燃烧特性影响的研究[J].电站系统工程,2015,31(4):35-38,42.
- [10] 李争起,任枫,刘光奎,等.W火焰锅炉高效低NO_x燃烧技术[J].动力工程学报,2010,30(9):645-651,662.
- [11] 刘光奎,朱群益,钱林峰,等.拱上燃尽风入射角度对W火焰锅炉气固流动特性的影响[J].中国电机工程学报,2015,35(12):3081-3088.
- [12] 曾令艳,李晓光,张宁,等.三次风摆角影响W火焰锅炉低负荷燃烧及NO_x排放特性的试验研究[J].电力科技与环保,2021,37(6):18-23.
- [13] MT/T 1074—2008煤中碱金属(钾、钠)含量分级[S].
- [14] 周俊虎,聂欣,周志军,等.无油点火燃烧器内煤粉浓度与着火点关系试验研究[J].热力发电,2004,33(11):14-16.