

四角切圆无烟煤燃烧系统灵活性改造优化研究

熊英莹^{1,2}, 谭厚章²

(1. 山西大学 动力工程系, 山西 太原 030006; 2. 西安交通大学 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:为解决无烟煤锅炉燃烧中存在的着火性能差、燃尽率低、锅炉设备燃烧不稳、效率下降、受热面结渣严重等问题,对某220 t/h燃烧无烟煤锅炉进行燃烧系统灵活性改造优化研究。通过热态试验,研究煤粉细度、锅炉负荷、磨煤机启停、三次风、二次风、瓦斯等因素对煤粉着火的影响;通过冷态试验,计算冷态下一、二、三次风风速,试验包括飘带试验、炉膛速度场的测量、贴壁速度场的测量。220 t/h无烟煤锅炉灵活性改造方案为:假想切圆直径为700 mm,对应的实际切圆直径为4 000 mm;下一次风喷口的V型由垂直方向改为水平方向;将原上一次风百叶窗水平浓淡燃烧器喷口V型稳燃体去除,改为直板型;卫燃带面积由80.64 m²调整为63.36 m²;加装4台瓦斯流量表。通过优化研究,提出了修正后的冷态实际切圆大小的计算公式,确定修正系数 $K_{ss}=1.132$,并做出实际切圆与一次风速、二次风速的关系曲线。改造后试验机组最大限度地减轻锅炉受热面结焦,掺烧劣质煤的运行特性明显改善,飞灰含碳量平均控制在3.29%,优化方案可在无烟煤燃烧锅炉灵活性改造中推广。

关键词:四角切圆;无烟煤锅炉;灵活性改造;热态试验;冷态试验

中图分类号:X701 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2018)01-0108-07

Optimize flexibility of four-angle cut round anthracite boiler combustion system

XIONG Yingying^{1,2}, TAN Houzhang²

(1. Department of Power Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve problems in the anthracite boiler combustion, such as poor ignition performance, low burnout rate, unstable combustion of boiler, efficiency decline, large area of heating surface and so on. Optimize flexibility of combustion system in a 220 t/h anthracite boiler was researched. Influence of coal powder fineness, boiler load, coal mill start and stop, tertiary air, secondary air, gas and other factors on coal fire was studied in thermal test. Tertiary air, secondary air and primary air were obtained, and tie-floating test, hearth and wall velocity were studied in cold test. Scheme of optimize flexibility in a 220 t/h anthracite boiler is confirmed. Imaginary cut circle size and actual cut circle size are 700 mm and 4 000 mm, respectively. V type of lower primary air is changed from vertical to level, and V-gutter of upper primary air horizontal bias burner is replaced by straight plate. Refractory belt area is adjusted from 80.64 m² to 63.36 m², and four mashgas flow meter are installed. According to experimental results, calculation formula of actual cut circle size is obtained, and correction factor K_{ss} is determined to 1.132, moreover, the relationship between actual cut circle and primary air speed, secondary air speed is made. After transforming, test unit reduces boiler heating surface coking maximally, improves operation properties of mixed burning inferior coal, and unburned carbon content is controlled to 3.29%. The optimization scheme can be popularized in the flexible transformation of anthracite combustion boiler.

Key words: four-angle cut round; anthracite boiler; flexible transformation; thermal test; cold test

收稿日期:2018-01-02;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.01.019

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91544108,51306142)

作者简介:熊英莹(1979—),女,山西太原人,讲师,博士,从事火电厂高效燃烧及污染物排放治理研究工作。E-mail:xiogy@sxu.edu.cn

引用格式:熊英莹,谭厚章.四角切圆无烟煤燃烧系统灵活性改造优化研究[J].洁净煤技术,2018,24(1):108-114.

XIONG Yingying, TAN Houzhang. Optimize flexibility of four-angle cut round anthracite boiler combustion system[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1):108-114.

0 引言

我国电力工业中70%以上的燃料来自于煤炭,无烟煤和贫煤在电站锅炉燃用煤量中占40%以上。难燃煤的煤化程度高,挥发分低,可磨性能差,反应性低,着火与燃尽都比较困难,需要较高的着火与燃尽温度,以及较长的燃尽时间。燃烧无烟煤锅炉基本存在燃煤着火性能差、燃尽率低、锅炉设备燃烧不稳、效率下降、受热面结渣严重等一系列问题。有些电厂由于现有燃用煤种与设计煤种严重偏离,为电厂运行安全带来极大隐患。此外,由于电厂普遍承担着调峰任务,调峰意味着现有设备可以在较低负荷下安全工作,所以必须适时结合锅炉实际情况进行优化调整,维持锅炉安全高效运转。

对于无烟煤锅炉改造研究较多。王春昌等^[1]将燃用无烟煤锅炉进行了改烧烟煤的改造。崔永忠等^[2]对420 t/h燃烧无烟煤锅炉进行稳燃改造,包括燃烧器改造、增加卫燃带等。目前改善锅炉对煤种、低负荷运行适应性的主要办法是:采用对煤种、负荷具有良好适应性的宽调节比高稳燃性能的燃烧器;在燃烧器区域的水冷壁炉墙上敷设一定厚度和面积的隔热材料——卫燃带。采用设计性能良好的燃烧器可取得一定成果,但由于烟气温度会随锅炉负荷下降而降低,当负荷下降到某一极限值时,烟气温度过低,不能满足煤粉气流着火要求,为避免出现燃烧不稳定及熄火,必须投油运行,不利于电厂低成本运行^[3],所以燃用低挥发分劣质煤的锅炉大多在燃烧器区域附近的水冷壁炉墙上敷设卫燃带。但是,卫燃带的面积和敷设方式很难把握,敷设面积过大,燃烧器区域烟温过高会加剧结渣,面积过小,其稳燃作用不明显。敷设方式不当,可能形成结渣源,影响正常运行。因此有必要对卫燃带敷设面积进行系统研究,特别从稳定着火和燃烧角度等方面。本文针对某220 t/h燃烧无烟煤锅炉,进行燃烧系统灵活性改造优化研究,以期望最大限度减轻锅炉受热面结焦情况,同时改善热电站锅炉掺烧劣质煤的运行特性,为同类锅炉改造提供借鉴作用。

1 系统概况

某220 t/h锅炉采用北京巴布科克·威尔科克斯(Babcock & Wilcox,简称B & WB)公司设计生产的B&WB-220/9.81-M型四角切圆固态排渣煤粉锅炉,锅炉采用II型布置,自然循环,单汽包、单段

蒸发、集中下降管循环蒸发系统。锅炉为全钢结构,锅炉前部为炉膛,四周布满膜式水冷壁,炉膛出口处布置屏式过热器,水平烟道内装设高低温两级过热器,尾部竖井交错布置两级省煤器和两级空气预热器。锅炉设计煤种为无烟煤,采用球磨机、中间粉仓、热风送粉的制粉系统。该锅炉炉膛断面为正方形,宽度和深度均为7 570 mm。四周由光管和扁钢焊成全密封的膜式水冷壁。

锅炉燃烧器为四角切圆布置,各风口从上到下分别是三、上二、中二、上一、下一、下二,其中在下二次风口内设有蒸汽雾化的助燃油枪,在锅炉运行时引入了瓦斯燃烧系统,在各组喷燃器的下二次风口加入了瓦斯喷嘴,燃用瓦斯量为0~4 200 m³/h,正常情况下瓦斯气用量为1 500 m³/h。燃烧器布置如图1所示。

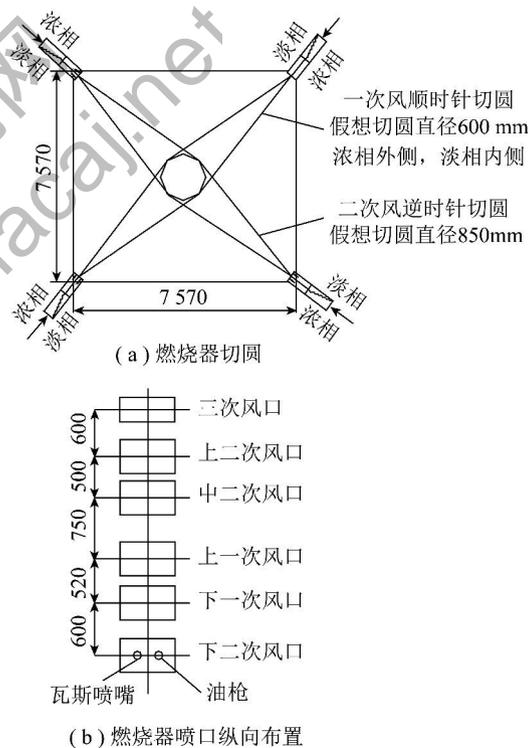


图1 燃烧器切圆示意及喷口布置

Fig. 1 Burner cutting circle schematic and nozzle layout

2 存在问题

由于燃用煤种和设计煤种之间的差异,煤质挥发分降至7%~8%时,锅炉飞灰可燃物含量由5%增至25%,锅炉煤种适应性差,燃用超低挥发分无烟煤时燃烧稳定性较差,易出现锅炉灭火事故;下一次风和下二次风的实际切圆可能偏大,燃烧器区域有明显结焦现象,水冷壁、屏式过热器结焦严重;制

粉系统起停对炉内燃烧扰动太大,制粉系统起停能对炉膛出口温度造成近 100 °C 波动。

3 热、冷态试验及结果分析

3.1 热态试验

根据影响煤粉着火的因素,对煤粉细度变化、锅炉负荷、磨煤机启停、三次风、二次风、瓦斯等进行研究。试验工况为停甲乙磨煤机,停瓦斯,关甲排粉机时,观察三次风对炉膛出口烟温偏差的影响,测得乙侧温度与甲侧温度间的温差,结果如图 2 所示。由图 2 可知,三次风对炉膛出口烟温偏差的影响很大,接近 100 °C 左右。

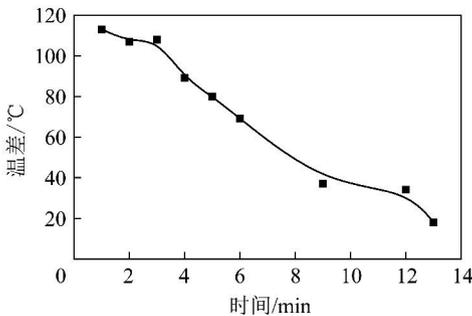


图 2 三次风对炉膛出口烟温偏差的影响

Fig. 2 Influence of tertiary air on deviation of furnace exit temperature

停甲乙磨煤机、停瓦斯、关甲乙排粉机,观测乙侧炉膛出口温度与甲侧炉膛出口温度差,研究二次风对炉膛出口温度偏差的影响,如图 3 所示。由图 3 可知,没有三次风影响时,烟温偏差为 60 °C 左右,说明二次风的切圆直径仍很大,造成出口残余旋转大,温差偏大。

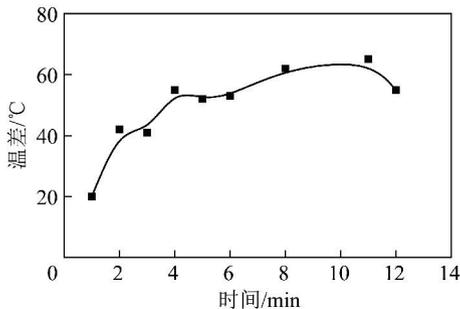


图 3 二次风对炉膛出口烟温偏差的影响

Fig. 3 Influence of secondary air on deviation of furnace exit temperature

停甲乙磨煤机、停甲乙排粉机后,停瓦斯与供瓦斯的炉膛出口温度偏差(乙侧炉膛出口温度-甲侧炉膛出口温度)和平均温度(甲侧炉膛出口温度和

乙侧炉膛出口温度的平均值)如图 4 所示。由图 4 (a)可知,瓦斯供入时会影响炉膛出口温度偏差。供入瓦斯后,炉膛出口温度偏差波动 20 °C,因此要合理控制瓦斯供入,尽量减少其对燃烧工况的影响。由图 4(b)可知,加入瓦斯后,炉膛出口平均温度升高,对屏式过热器挂渣不利,因为瓦斯的通入,煤粉着火推迟,飞灰可燃物升高,影响热经济性。

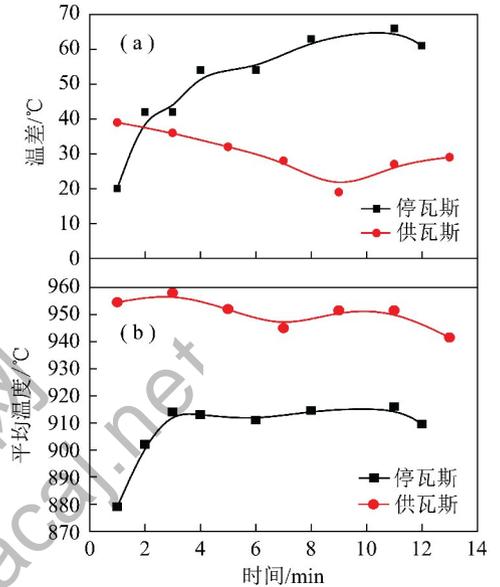


图 4 瓦斯对炉膛出口温度偏差影响

Fig. 4 Influence of mashgas on deviation of furnace exit temperature

热态试验结果表明:①煤粉变细后,煤粉着火提前,炉膛温度升高,机械未完全燃烧热损失下降明显,飞灰含碳量和大渣含碳量都有所降低,有利于稳定燃烧和提高锅炉经济性。②大负荷时,燃烧状况良好,炉膛温度升高,而出口烟温基本不变;飞灰含碳量和大渣含碳量下降明显,化学未完全燃烧热损失降低明显,散热损失小,锅炉效率上升,热经济性好。③停某侧磨煤机时,对炉膛出口温度影响很大,炉膛出口温度下降 100 °C 左右;停掉排粉机,炉膛温度升高,有利于燃烧,机械未完全燃烧损失降低,锅炉热经济性好。

3.2 冷态试验

冷态试验是热态试验的补充,根据冷热态模化条件——动量相等的原则,计算得出冷态下一、二、三次风风速,试验包括飘带试验、炉膛速度场的测量、贴壁速度场的测量。

改前飘带试验如图 5 所示(0 表示贴墙)。冷态试验中,下一次风和上一次风贴壁严重,切圆燃烧方式的流场组织较差,切圆直径过大,引起锅炉结渣。

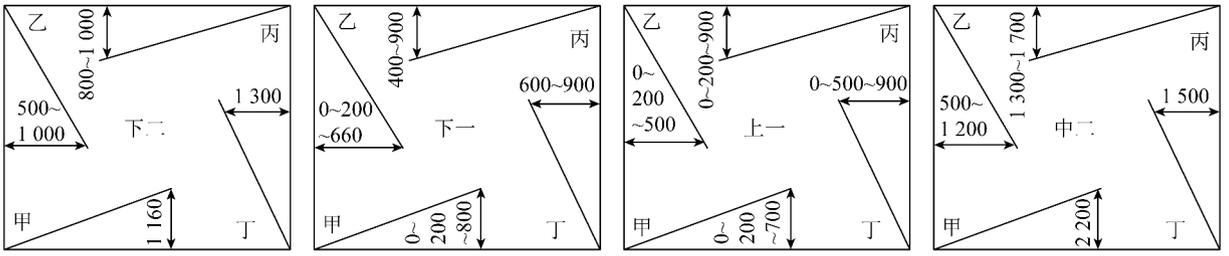


图5 飘带试验

Fig. 5 Tie-floating test

根据试验数据绘制下二次风和下一次风速度分布如图6所示。由图6得冷态时实际切圆直径分别为5407.2和5240.8 mm,明显偏大。冷态试验说明炉膛内流场组织不好,切圆直径偏大,燃烧贴壁,这也是结渣的原因之一。

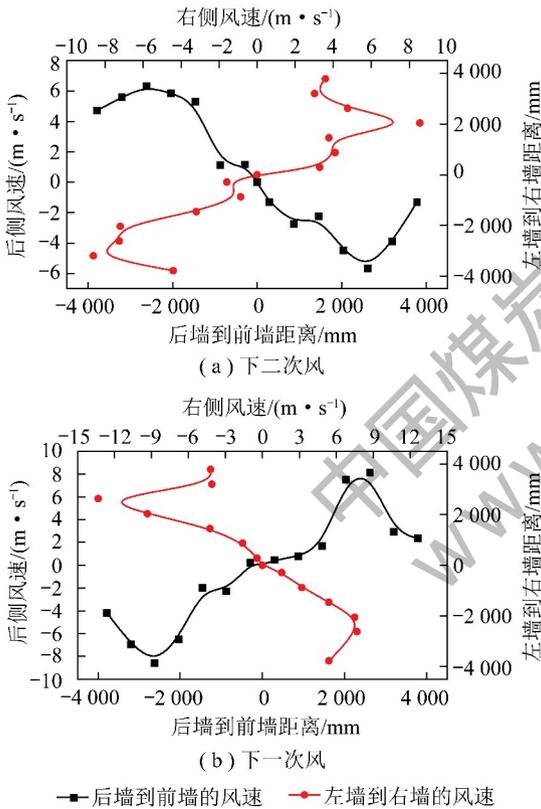


图6 风速分布

Fig. 6 Wind velocity distribution

4 灵活性改造优化方案

4.1 炉内实际切圆直径计算

试验机组燃烧系统为直流式四角切圆燃烧方式,双切圆燃烧,其中一次风煤粉气流为反切(顺时针旋向),假想切圆直径为600 mm;二次风气流为正切(逆时针旋向),假想切圆直径为850 mm;投运以来炉内受热面结焦严重影响锅炉安全、经济运行。

影响炉内结渣的因素繁多,但炉内空气动力场不良是导致燃烧器区结渣的最主要因素之一。而炉内假想切圆大小又直接影响了炉内空气动力场。如果假想切圆太大,锅炉运行时,从燃烧器喷口喷出的射流容易偏转,造成炽热的煤粉气流直接冲刷水冷壁,导致结渣。但假想切圆直径越大,从上游邻角过来的火焰气流更靠近射流根部,越有利于着火,混合更强烈,炉内充满度更好。相反,若假想切圆直径过小,高温火焰集中在炉膛中部,炉膛四周温度水平低,不利于煤粉着火、混合和燃尽^[4-5]。

文献[6]推荐假想切圆直径 $D_0 = (0.05 \sim 0.12) \times B_0$ (B_0 为炉膛平均宽度)。但对于不同容量不同形式的锅炉并没有精确的计算公式,无法指导实际锅炉调整与改造,因此,有必要针对锅炉找到相对精确的实际切圆计算公式,对于锅炉改造与运行指导具有重要意义。

4.2 影响实际切圆直径的因素

影响实际切圆直径的因素主要有:假想切圆大小,射流动量矩流率、气流偏斜、燃烧器组高宽比及燃烧器喷口间隙、一次风和二次风的动量比、一次风射流刚性、燃烧煤种及燃烧过程、四角风粉均匀性。

假想切圆直径越大,其实际切圆直径越大。射流沿喷口轴线方向随距离的增长,其射流动量逐步减弱,对圆形射流轴线上速度为^[7]

$$\frac{u_m}{u_0} = K_u \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{d_0}{x} \quad (1)$$

式中, u_m 为离喷口出口 x 距离处轴向速度, m/s; u_0 为喷口出口处轴向速度, m/s; K_u 为系数(对等温射流 $K_u = 6.3$); ρ_0 为喷出流体密度, kg/m^3 ; ρ_a 为周围流体密度, kg/m^3 ; d_0 为喷嘴直径, mm; x 为离喷口轴向距离, mm。

由式(1)可知,射流进入炉膛后,沿轴线上速度逐渐变小,射流刚性逐渐减弱,受到上邻角气流冲击时射流产生偏斜,导致实际切圆直径比假想切圆直

径大。假想切圆直径越大,其射流受上邻角射流冲击偏移就越大。

对已定尺寸的炉膛,从喷口到达切圆边缘的距离是固定的,如式(1)中的 x 为定值,此时,射流动量矩流率越大,表明射流出口速度越高, u_0 越大, u_m 值就会越大。 u_m 值(即射流到达切圆边的速度)越高,其射流刚性就越好,射流偏移减小,因此,射流动量矩流率越大,实际切圆相对就会越小。

影响因素可从设计和运行两方面考虑^[8-10]。设计方面考虑因素:① 假想切圆直径与炉膛等效直径之比 D_0/D_{dl} ($D_{dl}=2AB/(A+B)$),其中 A 为炉膛宽, B 为炉膛深;② 燃烧器的高宽比 h/b (h 为燃烧器高度, b 为燃烧器喷口宽度);③ 燃烧器总面积与炉膛截面积之比 $\Sigma A_i/A$;④ 燃烧器间隙率 s/b 。运行方面考虑因素:① 二、一次风动量比 $(m_2v_2)/(m_1v_1)$;② 燃烧器摆角 α 。

对以上影响因素进行分析,得出实际切圆的关联式为^[11-12]

$$\frac{D_y}{D_{dl}} = K_{xs} \left(\frac{D_0}{D_{dl}} \right)^{1.56} \left(\frac{s}{h} \right)^{-0.7} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.87} \left(\frac{m_2v_2}{m_1v_1} \right)^{0.25} \quad (2)$$

式中, D_y 为实际切圆直径, mm; K_{xs} 为修正系数。

经过计算(下二次风)得修正系数 $K_{xs}=1.132$ 。

在设计一、二次风速状态下,冷态时实际切圆直径为 5 407.2 mm,炉膛宽度为 7 570 mm,切圆上气流速度最大点离水冷壁只有 1 000 mm 左右,若一次风速稍微降低(热态时经常发生),炉内切圆就会刷墙,加上热态时煤粉燃烧膨胀将进一步降低射流刚性,热态时射流偏斜将更加严重,因此,原设计工况下实际切圆太大,有必要通过降低燃烧器喷口假想切圆直径来降低炉内实际切圆直径。

根据已有改造经验,将实际切圆直径控制在 3 600 ~ 4 000 mm,使冷态下切圆边缘离水冷壁的距离保持在 2 000 mm 左右。由式(2)可得到假想切圆直径 D_0 为 653.5 ~ 699.3 mm,考虑保证炉膛内煤粉气流既不冲刷水冷壁而引起结渣,又有较大的火焰充满度,最后选定改造后假想切圆直径为 $D_0=700$ mm,实际切圆直径为 4 000 mm。

在冷态下依据式(2)计算实际切圆直径随二次风、一次风风速的变化,一次风速度为 23、25、27 m/s 下,实际切圆大小随二次风速的变化如图 7 所示。

由图 7 可知,总风量一定的情况下,二次风速增大时,一次风速减小,则实际切圆直径变大,容易引

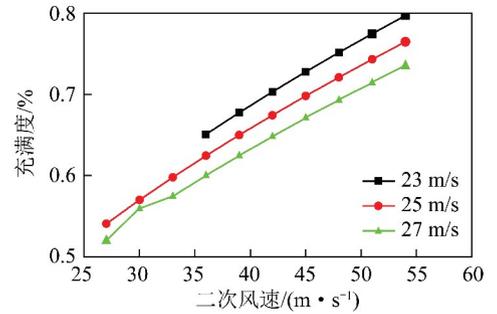


图 7 实际切圆大小与二次风速的关系

Fig. 7 Relationship between the actual cut circle size and the secondary air speed

起结渣;一次风速增大时,一次风刚性增强,则实际切圆直径变小;一次风射流偏转的主要原因之一是由于上游邻角横扫过来的惯性力,惯性力是由上游一、二、三次风混合后形成的综合动量所决定,特别是一、二次风混合后形成的综合动量,二、一次风动量比越大,则一次风射流偏转程度越大,炉内实际切圆越大,越易引起结焦。

在热态设计状态下,一次风速 $v_1=25$ m/s,二次风速 $v_2=45$ m/s 时,充满度为 0.697 9,一次风不会刷墙,但如果一次风速降低,火焰充满度快速增加,还会引起结渣。

4.3 燃煤特性分析

在实际燃用煤种方面,根据热电站数据,选取试验期间 14 d 数据进行统计,具体见表 1。由表 1 可知,入炉煤挥发分 V_{daf} 为 8.33% ~ 14.78%,平均为 10.99%, $Q_{net,ar}$ 为 20.19 ~ 25.32 kJ/g,平均为 23.46 kJ/g,基本可以代表该机组日常的燃料情况。

表 1 热电站日常燃用煤种性质

Table 1 Coal sample properties in thermal power plant

项目	$M_1/$ %	$M_{ad}/$ %	$A_{ad}/$ %	$V_{daf}/$ %	$w(S_{t,ad})/$ %	$Q_{net,ar}/$ (kJ·g ⁻¹)
最低	5.77	0.44	18.6	8.33	0.26	20.19
最高	14.31	1.51	31.5	14.78	0.53	25.32
平均	8.16	0.98	22.86	10.99	0.39	23.46

由于现场条件有限,无法对燃煤进行细致测试,采用普华煤质特性判别准则(文献[8])进行判断,结果如下:

1) 着火稳定性指数 R_w

$$R_w = 3.59 + 0.054V_{daf} \quad (3)$$

R_w 判断依据见表 2。试验期间入炉煤 $R_w=4.146 \sim 4.617$,设计煤种 $R_w=4.058$,校核煤种 $R_w=$

4.272,因此,该机组燃用的无烟煤着火稳定难。

表2 着火稳定性指数判断依据

Table 2 Decision fundament on fire stability index

R_w	<4	4~4.65	4.65~5	5~5.7	>5.7
着火稳定性	极难	难	中等	易	极易

2) 燃料燃尽性指数 R_j

$$R_j = 1.22 + 0.11V_{daf} \quad (4)$$

R_j 判断依据见表3。试验期间入炉煤 $R_j = 2.353 \sim 3.313$, 设计煤种 $R_j = 2.174$, 校核煤种 $R_j = 2.609$, 因此,该机组燃用的无烟煤燃尽指数为中等~极难。

表3 燃料燃尽性指数判断依据

Table 3 Decision fundament on fuel burnout index

R_j	<2.5	2.5~3.0	3.0~4.4	4.4~5.7	>5.7
燃料燃尽性	极难	难	中等	易	极易

3) 着火温度指数 T_d

$$T_d = 654 - 1.9V_{daf} + 0.43A_{ad} - 4.5M_{ad} \quad (5)$$

T_d 判断依据见表4。试验期间入炉煤 $T_d = 621 \sim 640 \text{ }^\circ\text{C}$, 设计煤种 $T_d = 630 \text{ }^\circ\text{C}$, 校核煤种 $T_d = 632 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此,该机组燃用的无烟煤燃烧稳定性为难~极难。

表4 着火温度指数判断依据

Table 4 Decision fundament on ignition temperature index

$T_d/^\circ\text{C}$	560~593	593~613	613~638	>638
燃烧稳定性	易稳定区	中等稳定区	难稳定区	极难稳定区

由上述分析可知,该机组设计煤种、校核煤种与现有燃煤差别较大,原有设计方案在实际使用中要重新考量。对于燃料供给方面,要适时根据煤种调整煤粉细度。考虑到瓦斯气体在四角供应不均匀的情况和瓦斯自身特点(瓦斯的流量在 $3\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时供应热量可占到整个热负荷的 15.15% 左右,运行时对出口烟温的影响在 $30 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$),建议加装 4 台瓦斯流量表。

4.4 卫燃带面积计算

试验机组采用约 80 m^2 的销钉式卫燃带,卫燃带表面采用耐火材料,卫燃带敷设方式为在四面炉墙中部各敷设 $5\,600 \text{ mm} \times 2\,800 \text{ mm}$ 长方形,其中卫燃带最高处与三次风喷口下沿持平。该卫燃带主要敷设在燃烧器区域,预期目的是减少辐射换热,提高

敷设区域炉膛中心区域温度,最大限度地保证燃料着火,稳定燃烧。卫燃带敷设情况如图8所示。

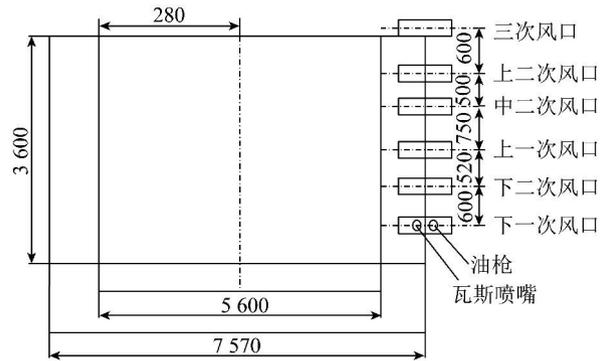


图8 卫燃带敷设情况

Fig. 8 Refractory belt laying condition

卫燃带敷设面积为^[13-15]

$$F_r = \frac{F_1}{1 - \xi} - \frac{D_{\min} r}{\varphi \sigma_0 (1 - \xi) (\alpha_1 T_{lm}^4 - T_w^4)} \quad (6)$$

式中, F_r 为卫燃带面积, m^2 ; F_1 为炉内水冷壁管面积, m^2 ; D_{\min} 为最低稳燃负荷, %; r 为气化潜热, kJ/kg ; T_{lm} 为炉内最低平均温度, K ; T_w 为水冷壁管外表温度, K ; φ 为炉膛保温系数; ξ 为相对灰污系数; σ_0 为玻尔茨曼常数, J/K ; α_1 为水冷壁管与炉内火焰间系统黑度。

设入炉煤挥发分为 10%, 锅炉设计出力为 $220 \text{ t}/\text{h}$, 考虑最低稳燃负荷为 75%。炉内稳定燃烧的最低温度为 $1\,159 \text{ K}$, 相应 $T_w = 650 \text{ K}$, $r = 1\,300 \text{ kJ}/\text{kg}$, 对于 ξ 、 α_1 , 均采用相关资料的推荐值 $\xi = 0.5$, $\varphi = 0.98$, $\alpha_1 = 0.98$, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J}/\text{K}$, 可以计算出 F_r 在 75% 负荷情况下的数值为 50.79 m^2 。若锅炉运行在 75% 以下时, 卫燃带还有必要增加部分面积, 目前锅炉多数时间在满负荷 $220 \text{ t}/\text{h}$ 状态下运行, 现有卫燃带面积约为 80 m^2 , 显然偏高, 有必要减少部分面积。

按上述卫燃带面积计算公式, 可得不同卫燃带敷设面积下, 燃烧器区域的平均温度 T 随锅炉负荷 D 的变化, 具体如图9所示。

对图9曲线进行拟合, 结果为: ① 不敷设卫燃带时, $T = 683.643\,79 + 740.136\,21D - 487.183\,45D^2 + 162.738\,26D^3$; ② 敷设 30 m^2 卫燃带, $T = 717.563\,57 + 990.826\,59D - 710.627\,56D^2 + 246.569\,26D^3$; ③ 敷设 60 m^2 卫燃带, $T = 738.696\,29 + 1\,108.232\,85D - 816.283\,31D^2 + 286.548\,51D^3$; ④ 敷设 90 m^2 卫燃带时, $T = 753.087\,54 + 1\,178.945\,11D - 879.876\,06D^2 + 310.649\,44D^3$ 。

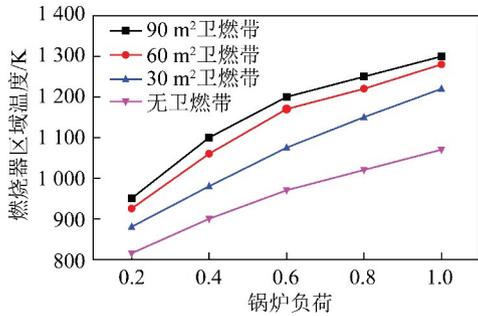


图9 卫燃带敷设面积关联图

Fig. 9 Association graph of refractory belt laying area

调整前卫燃带面积为 80.64 m^2 , 根据图9计算调整后卫燃带面积为 63.36 m^2 , 减小了约20%, 通过利用两侧结焦特性不同的特点, 减小焦块大小, 可在一定程度上缓解结焦严重的现象。

5 结 论

1) 220 t/h 无烟煤锅炉灵活性改造方案如下: ① 假想切圆直径为 700 mm, 对应的实际切圆直径为 4 000 mm; ② 下一次风喷口的 V 型由垂直方向改为水平方向; ③ 将原上一次风百叶窗水平浓淡燃烧器喷口 V 型稳燃体去除, 改为直板型; ④ 卫燃带面积由 80.64 m^2 调整为 63.36 m^2 ; ⑤ 由于瓦斯气体在四角供应不均匀, 建议加装 4 台瓦斯流量表。

2) 该机组经过灵活性燃烧优化改造后, 锅炉燃尽性能较好, 风粉浓度在线监测装置显示, 飞灰含碳量平均控制在 3.29%; 锅炉结焦特性也得到改善。

3) 通过优化研究, 提出了修正后的冷态实际切圆计算公式。通过试验数据得到主气流(下二次风)修正系数 $K_{\text{ss}} = 1.132$, 并做出实际切圆与一次风速、二次风速的关系曲线, 这对热态时实际切圆大小的预测有指导意义。

参考文献 (References):

[1] 王春昌, 王恩泽, 张伟. 燃用无烟煤锅炉改烧烟煤的实践[J]. 热力发电, 2013, 42(5): 69-71.
WANG Chunchang, WANG Enze, ZHANG Wei. Retrofitting of firing bituminous coal for boilers burning anthracite coal[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(5): 69-71.

[2] 崔永忠, 高苑辉, 王力, 等. 燃烧无烟煤锅炉稳定燃烧的治理[J]. 电力建设, 2002, 23(8): 25-27.

CUI Yongzhong, GAO Yuanhui, WANG Li, et al. Control on stability of combustion of anthracite coal fired boiler[J]. Electric Power Construction, 2002, 23(8): 25-27.

[3] 魏博, 文彪, 谭厚章, 等. 准东煤掺混焦炭燃烧特性研究[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 51-55.
WEI Bo, WEN Biao, TAN Houzhang, et al. Co-combustion characteristics of Zhundong coal mixed with coke powder[J]. Electric Power Construction, 2017, 46(6): 51-55.

[4] 周志军, 黄镇宇, 朱自力, 等. 射流偏转及实际炉膛切圆的分析计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, 34(6): 642-646.
ZHOU Zhijun, HUANG Zhenyu, ZHU Zili, et al. Jet deflection and analytic calculation of the actual furnace tangential circle[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2000, 34(6): 642-646.

[5] 岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.

[6] 陈学俊, 陈听宽. 锅炉原理[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1991.

[7] 陈刚, 丘纪华, 张志国, 等. 稳燃腔煤粉燃烧器的试验研究及应用[J]. 动力工程, 1994(6): 37-41, 63.
CHEN Gang, QIU Jihua, ZHANG Zhiguo, et al. Experimental research on tubular pulverized coal burners[J]. Power Engineering, 1994(6): 37-41, 63.

[8] 陈刚. 四角切向燃煤锅炉炉内实际切圆的计算[J]. 电站系统工程, 2002, 18(4): 17-18.
CHEN Gang. Calculation of actual tangential circle diameter in tangential PC-fired boiler furnace[J]. Power System Engineering, 2002, 18(4): 17-18.

[9] 胡光, 金正淑. 四角切圆锅炉浓淡燃烧器的应用研究[J]. 华东电力, 2003, 31(1): 32-33.

[10] 刘福国, 潘凤国. 切向燃烧炉内实际切圆直径的回归分析[J]. 锅炉技术, 1999, 30(2): 7-9.
LIU Fuguo, PAN Fengguo. Regression analysis of the actual tangential circle diameter in furnace for tangential-firing boiler[J]. Boiler Technology, 1999, 30(2): 7-9.

[11] 何佩繁, 赵仲虎, 秦裕昆. 煤粉燃烧器的设计和运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[12] 岑可法, 樊建人. 燃烧流体力学[M]. 北京: 水力电力出版社, 1991.

[13] 陈冬林, 李慧勇, 周臻. 确定燃煤锅炉卫燃带敷设面积的一种代数计算方法[J]. 动力工程, 2006, 26(5): 638-640, 675.
CHEN Donglin, LI Huiyong, ZHOU Zhen. An algebraic method for determining the refractory belt area of coal fired boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(5): 638-640, 675.

[14] 陈冬林. 准恒的燃烧理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.

[15] 赵铁军, 曹际恒. 火电厂锅炉卫燃带的改造[J]. 中国电力, 1997, 30(12): 68-69.