

W 火焰锅炉高温腐蚀问题分析及调整策略

张 锋¹,宋立斌²,严俊山¹,田占军²

(1. 西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710054;2. 华能国际电力有限公司 上安电厂,河北 石家庄 050310)

摘 要:为缓解上安电厂2号锅炉完成低氮燃烧改造后下炉膛水冷壁出现的严重硫化物高温腐蚀问题,针对该厂2号W火焰锅炉燃烧方式的特点及设备状况,分析得出锅炉进行分级送风、煤粉浓淡分离、增加燃烬风等低氮燃烧改造,使得下炉膛区域由过氧燃烧转变为欠氧燃烧是引起高温腐蚀的主要原因,并提出从运行氧含量、燃烬风门开度、外二次风旋流强度、煤质和运行磨煤机组合等几个方面寻优的燃烧调整策略。结果表明,根据各项测试最优结果进行优化组合后满足O₂含量>2%,CO含量<0.2%条件的测点个数明显增加,下炉膛壁面还原性气氛明显减弱,高温腐蚀问题得到较大缓解,提高了机组运行的安全性,保证最优工况下选择性催化还原法(SCR)入口的NO_x浓度低于改造设计值的800 mg/m³,表明调整策略同时兼顾了环保运行的要求。

关键词: W火焰锅炉;高温腐蚀;低氮燃烧;燃烧调整;还原性气氛

中图分类号:TM621.2 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)05-0041-07

Solutions to sulfide high temperature corrosion problem in W flame boiler

ZHANG Feng¹, SONG Libin², YAN Junshan¹, TIAN Zhanjun²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Shang'an Power Plant, Huaneng Power International Co., Ltd., Shijiazhuang 050310, China)

Abstract: To resolve sulfide high temperature corrosion problem with water wall of combustion chamber of No. 2 boiler in Shang'an Power Plant, the combustion mode and equipments condition of W flame boiler were analyzed. The results showed that some low-nitrogen combustion methods such as staged air, separation of pulverized rich-lean coal powder, increase of burn-out wind led to the problem. Under the condition, the combustion turned to oxygen-poor combustion from oxygen-excess combustion. Some solutions were provided from the aspects of operation oxygen content, open of burn-out wind door, swirl intensity of outer secondary air, coal properties and combination of running coal mill. After transformation, the measured points in which the O₂ was above 2%, CO was below 0.2% were increased obviously, and the reducing atmosphere and high temperature corrosion were weakened which improved the safety of unit operation remarkably. Under the best condition, the NO_x concentration of selective catalytic reduction method was below 800 mg/m³ which was lower than the design value for transformation.

Key words: W-shape flame boiler; high temperature corrosion; low-nitrogen combustion; combustion adjustment; reducing atmosphere

0 引 言

为满足日益严格的环保要求,众多发电企业对锅炉进行了低氮燃烧改造^[1]。切圆燃烧方式及对冲燃烧方式的锅炉水冷壁高温腐蚀问题主要是由于

低氮燃烧的基本原理即分级燃烧,致使改造后锅炉运行出现局部缺风,部分水冷壁区域还原性气氛强而引起的^[2-4]。但对于以燃用低挥发分煤为主的W火焰锅炉其研究方向主要在:锅炉的高效低NO_x燃烧原理及技术,如双通道叶片式浓淡分离技术、浓淡

收稿日期:2016-04-23;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.05.008

作者简介:张 锋(1983—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,从事电站锅炉运行优化技术的研究。E-mail:zhangfeng@tpri.com.cn

引用格式:张 锋,宋立斌,严俊山,等. W火焰锅炉高温腐蚀问题分析及调整策略[J]. 洁净煤技术,2016,22(5):41-47.

ZHANG Feng, SONG Libin, YAN Junshan, et al. Solutions to sulfide high temperature corrosion problem in W flame boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(5):41-47.

煤粉气流合理布置技术、二次风下倾技术、燃烬风技术^[5-6];缓解锅炉结渣的方法,如采取削减侧墙卫燃带、切停靠侧墙燃烧器运行或降低靠侧墙燃烧器功率、保持良好的风粉均匀性、恰当的配风方式等^[7-8]以及改变缝隙燃烧器形式、严格控制入炉煤质等稳定燃烧措施^[9-10]等方面,而对其水冷壁高温腐蚀问题的分析和研究还鲜见报道。因此,本文从现场实际出发,分析了W火焰锅炉发生水冷壁高温腐蚀的原因,并根据测试结果总结了缓解W火焰锅炉水冷壁高温腐蚀问题的燃烧调整策略,为后续W火焰锅炉水冷壁高温腐蚀问题的研究提供参考。

1 问题分析

上安电厂2号350 MW火电机组,配备加拿大Babcock & Wilcox公司制造的亚临界压力、一次中间再热、固态排渣、自然循环辐射式锅炉,原设计燃用25%阳泉+75%寿阳的混煤。锅炉配有ABCD四台中速磨煤机,每台磨煤机有编号1~5的5根煤粉管道。锅炉完成低氮燃烧器改造后共装有20只EI-XCL型浓缩煤粉燃烧器,分2排布置在标高27.6 m炉膛拱部前后墙斜坡上,燃烧器轴线与水平方向呈75°。两排燃烧器分别向炉底中心线斜下方喷射,在冷灰斗向上折回,使火焰成“W”形。同时在燃烧器风箱拱上标高1 276 mm处增设1层OFA(分离燃烬风)喷口,前后墙各11只。

运行后发现2号锅炉下炉膛水冷壁出现严重的高温腐蚀问题,分布区域为前后墙从冷灰斗斜坡向下0.8 m至冷灰斗斜坡弯头向上3 m区域,左右侧墙自标高15.4~24 m中间部位区域。水冷壁管原壁厚为6.4 mm,剩余壁厚大部分小于4.5 mm。腐蚀区域的具体分布如图1所示。

2 原因分析

根据高温腐蚀发生的原因及腐蚀产物的成分差别,煤粉锅炉水冷壁高温腐蚀一般有以下形式:硫酸盐型高温腐蚀、氯化物型高温腐蚀和硫化物型高温腐蚀。其中硫化物型高温腐蚀是锅炉水冷壁高温腐蚀中较为常见的类型,引起硫化物型高温腐蚀的主要原因是腐蚀区域烟气中含有游离态硫以及烟气呈还原性气氛,腐蚀产物主要是铁的氧化物和硫化物^[11]。采用扫描电镜对实际腐蚀产物进行分析,腐蚀产物的电镜形貌如图2所示。从图2中可以看出腐蚀产物主要为铁的氧化物和硫化物,这与发生硫

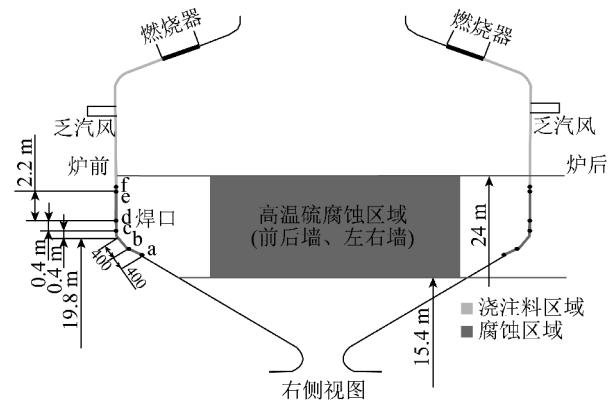


图1 高温腐蚀区域

Fig. 1 Area of high temperature corrosion



图2 腐蚀产物的能谱面扫描结果

Fig. 2 The energy spectrum scan results of the corrosion products

化物高温腐蚀的特点相符。

与切圆燃烧方式和对冲燃烧方式不同,W火焰锅炉进行分级送风、煤粉浓淡分离、增加燃烬风等低氮燃烧改造后,出现高温腐蚀主要是由于下炉膛区域过氧燃烧转变为欠氧燃烧,在本锅炉标高15.4~24 m区域尤为突出。燃煤中硫在缺氧的情况下以 H_2S 形式释放的比例在75%以上。 H_2S 产生速率随着还原性气氛程度的增加而明显增大。相同温度下,随着还原性气氛程度的增加, H_2S 含量逐渐增加。烟气中CO含量越多, H_2S 的含量也越多。 H_2S 可直接与水冷壁中纯金属反应形成 FeS ,造成水冷壁腐蚀。沾灰层温度较高时, FeS 又会再次与介质中的氧作用,转变为 Fe_3O_4 ,进一步加剧腐蚀。锅炉燃烧气流中的大量灰粒会不断去除旧的腐蚀产物将纯金属暴露于腐蚀介质下,加速腐蚀过程。

3 测试方法

H_2S 气体主要存在于还原性气氛环境。烟气中的 H_2S 含量与CO含量成正比关系,因此可以通过测量氧含量及CO浓度间接判断 H_2S 浓度的相对高低。利用停炉机会在发生高温腐蚀区域的四面水冷壁上加装壁面气氛测点,用烟气分析仪实测各工况下水冷壁壁面气氛。

迄今为止尚无经过科学论证的判定水冷壁腐蚀的氧含量和 CO 含量的极限值^[12]。原因是烟气成分、烟气流动情况以及腐蚀机理错综复杂。此外燃烧条件也对水冷壁腐蚀有重要作用。但是,也有国外电力公司对此提出评定准则,如德国 VKR 公司提出应保证 O₂ 含量>2%,CO 含量<0.2%。国内判定标准相对宽松,认为水冷壁附近烟气成分 O₂ 含量<1.0%,CO 含量>0.5%时才判断为还原性气氛。

4 调整策略

为判断不同运行方式对水冷壁高温腐蚀的影响,特测量不同运行方式下壁面气氛的变化情况。每次调整仅改变某一个运行参数而保证锅炉其他运行条件基本不变,并以 O₂ 含量>2%,CO 含量<0.2%为条件判断运行方式是否有利于缓解水冷壁高温腐蚀。燃烧调整的内容包括锅炉运行氧含量、燃烬风、外二次风旋流强度、调风盘开度、燃用煤种和运行磨煤机组合^[13]。

锅炉燃烧调整策略除需考虑对水冷壁高温腐蚀安全性的影响外,还需整体考虑对锅炉运行经济性 & 环保特性的影响。因此在测量壁面气氛的同时,要兼顾考察锅炉燃烬性、锅炉效率及 SCR 入口 NO_x 浓度等指标。

4.1 运行氧含量调整

锅炉 185 MW 负荷运行时调整空气预热器入口氧含量分别为 7.05%、6.80% 和 6.15%,测试结果如图 3 所示。图中 1~6 点为炉左墙测点,7~14 点为炉后墙测点,15~20 点为炉右墙测点,21~27 点为炉前墙测点。试验所用烟气分析仪 CO 量程最大为 $5\,000 \times 10^{-6}$,图中壁面 CO 含量为 $5\,000 \times 10^{-6}$ 即已超过烟气分析仪量程。从图 3 中结果来看,随着锅炉整体运行氧含量的降低,壁面氧含量也降低,CO 含量升高,壁面还原性气氛增强。特别是锅炉整体运行氧含量低于 6.15% 时,壁面 CO 含量高,几乎所有值都超过 $5\,000 \times 10^{-6}$,氧浓度低,还原性气氛急剧增强,发生水冷壁高温腐蚀的风险激增。提高锅炉运行氧含量能起到缓解下炉膛局部区域水冷壁面还原性气氛的作用,因此原则上应适当提高锅炉整体的运行氧含量。

表 1 为锅炉效率及 SCR 入口 NO_x 浓度变化结果。从表 1 结果看随着锅炉运行氧含量的提高,排烟损失增加而固体不完全燃烧热损失减小,但在试验调整氧含量范围内锅炉整体效率随运行氧含量的

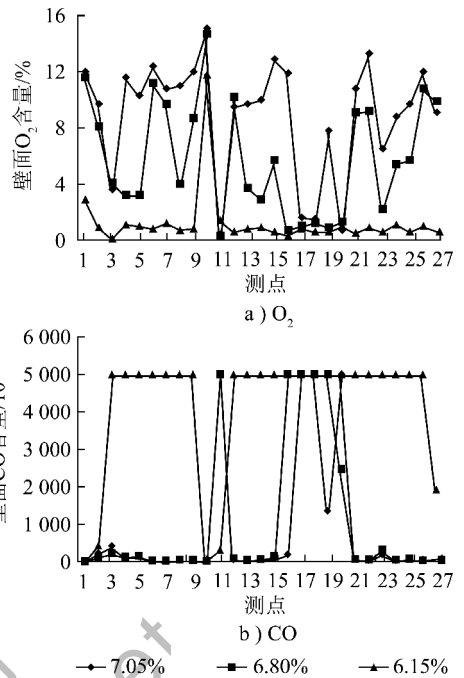


图 3 锅炉运行氧含量调整测试结果

Fig. 3 Measurement results of oxygen concentration

增加而提高,同时 SCR 入口 NO_x 浓度也随运行氧含量的提高而增加。

表 1 锅炉效率及 NO_x 浓度随运行氧含量的变化

Table 1 The boiler efficiency and NO_x concentration along with the change of oxygen concentration

空气预热器 入口平均 氧含量/%	排烟热损 失 q_2 /%	固体不完 全燃烧热 损失 q_4 /%	锅炉热效 率 η /%	SCR 入口平 均 NO _x 浓度/ (mg · m ⁻³)
7.05	6.624 9	2.467 1	90.40	621.3
6.80	6.218 8	3.008 8	89.27	531.5
6.15	5.912 3	3.488 3	89.09	429.1

4.2 燃烬风门调整

锅炉 350 MW 负荷运行时,分别调整燃烬风门开度为 10%、26% 和 40%,测试结果如图 4 及表 2 所示。

由图 4 可知,关小燃烬风门开度能小幅提高炉膛中下部氧含量,有利于缓解壁面还原性气氛,减轻水冷壁高温腐蚀问题,但与提高锅炉整体运行氧含量相比其作用相对较小。从表 2 结果中看,在试验调整范围内关小燃烬风门对锅炉效率影响也较小,但会提高 SCR 入口 NO_x 浓度。

4.3 外二次风旋流强度调整

浓缩型 EI-XCL 燃烧器外二次风设置有可调叶

片,可以对外二次风旋流强度进行调节。调节杆刻度值越大旋流强度越强。锅炉350 MW负荷运行时调整外二次风旋流强度调节杆位置分别为50、60、70和80 mm,测试结果如图5及表3所示。

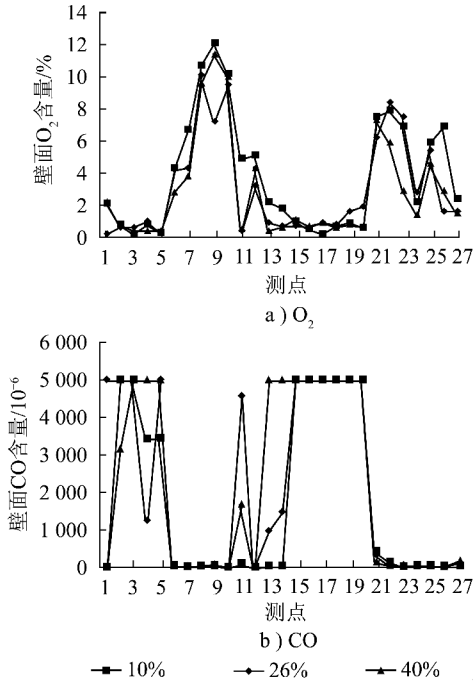


图4 燃烬风门调整测试结果

Fig. 4 Measurement results of SOFA

表2 锅炉效率及NO_x浓度随运行氧含量的变化

Table 2 The boiler efficiency and NO_x concentration along with the change of SOFA

燃烬风门开度/%	排烟热损失 q ₂ /%	固体不完全燃烧热损失 q ₄ /%	锅炉热效率 η/%	SCR入口平均NO _x 浓度/(mg·m ⁻³)
10	7.059 4	1.783 8	90.74	598.2
26	7.427 9	1.535 5	90.62	561.6
40	7.071 7	1.989 4	90.52	556.7

表3 锅炉效率及NO_x浓度随外二次风旋流强度的变化

Table 3 The boiler efficiency and NO_x concentration along with the change of outer secondary air swirl intensity

外二次风旋流调节杆位置/mm	排烟热损失 q ₂ /%	固体不完全燃烧热损失 q ₄ /%	锅炉热效率 η/%	SCR入口平均NO _x 浓度/(mg·m ⁻³)
50	6.616 0	2.105 1	90.76	629.7
60	6.649 3	2.323 8	90.51	627.1
70	6.929 1	2.385 3	90.26	594.2
80	6.749 0	2.474 6	90.36	586.6

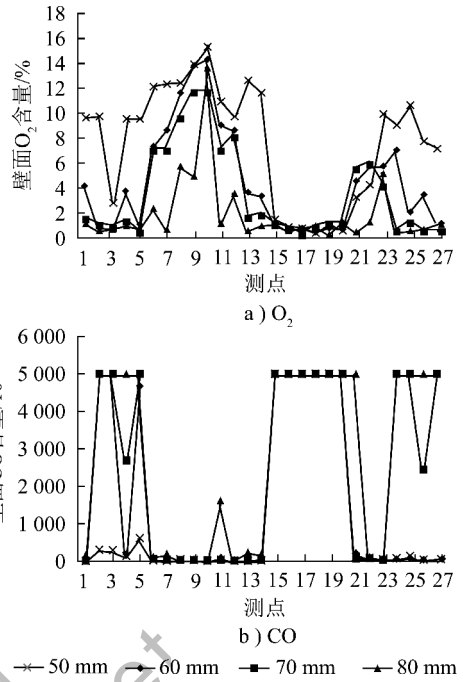


图5 外二次风旋流强度调整测试结果

Fig. 5 Measurement results of outer secondary air swirl intensity

从图5中测试结果来看,随着旋流强度的减弱,壁面氧含量提高,CO浓度降低。这主要是由于减弱外二次风旋流强度,火焰刚性变强,气流下冲距离加长,从而提高了炉膛下部的氧浓度。需要注意的是,由于外二次风旋流强度的减弱,火焰卷吸高温烟气的的能力下降,可能造成锅炉燃烧不稳。但在具体试验过程中,通过就地观察看火孔及监测炉膛负压和火检,各工况下均未发现锅炉燃烧不稳的现象。

由表3可见,随着外二次风旋流强度的减弱,锅炉固体不完全燃烧损失降低,整体效率有所提高。锅炉固体不完全燃烧损失降低的主要原因是随着外二次风旋流强度的减弱,煤粉燃烧行程增加。因此,出于经济性和安全性考虑,在锅炉无燃烧不稳的前提下,应适当减弱燃烧器外二次风旋流强度。

4.4 调风盘开度调整

浓缩型EI-XCL燃烧器的内二次风入口端设有调风盘,改变调风盘的位置(即开度)可以调节进入内二次风通道的风量,从而改变单个燃烧器内、外二次风的风量比。锅炉350 MW负荷运行时调整调风盘开度分别为120、150和180 mm,测试结果如图6和表4所示。

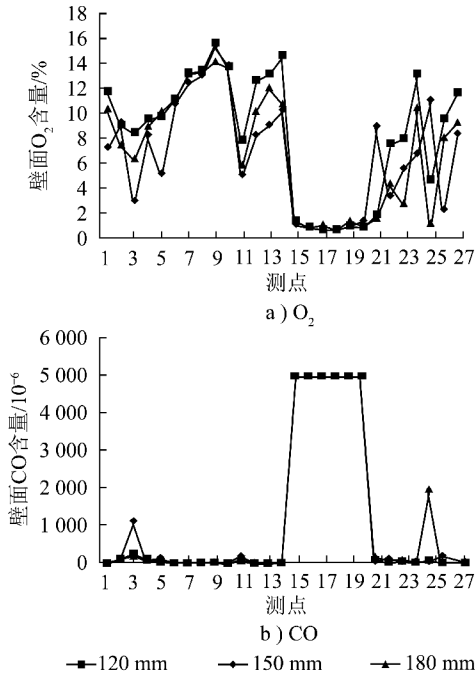


图 6 调风盘开度调整测试结果

Fig. 6 Measurement results of secondary air distribution

理论上调风盘开度减小时,使内二次风减小的同时,内二次风的旋流强度也减弱;外二次风增大的同时,外二次风刚性变强,外二次风气流向下牵引增大,炉膛下部氧浓度提高,其效果应与减弱外二次风

表 4 锅炉效率及 NO_x 浓度随调风盘开度的变化Table 4 The boiler efficiency and NO_x concentration along with the change of secondary air distribution

调风盘位置/mm	排烟热损失 $q_2/\%$	固体不完全燃烧热损失 $q_4/\%$	锅炉热效率 $\eta/\%$	SCR 入口平均 NO_x 浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$
120	6.8176	3.1448	89.62	722.7
150	6.9565	2.3834	90.24	701.3
180	6.5941	2.4463	90.13	712.7

旋流强度类似。但是从图 6 中实际测量结果看,不同调风盘开度对下壁面各点的气氛影响相对较小,其减轻炉膛下部还原性气氛的调节作用不如外二次风旋流强度明显。从表 4 中结果看,在调整范围内调风盘开度对锅炉效率及 SCR 入口的 NO_x 浓度的影响也较小。

4.5 燃用煤质调整

锅炉常用煤质为纯贫煤(前述试验所燃用煤质皆为纯贫煤),但有时也需掺混无烟煤。表 5 为纯贫煤和 30% 无烟煤+70% 贫煤混煤的煤质数据。从煤质对比来看,掺混 30% 无烟煤后,煤的全水分和灰分增加,干燥无灰基挥发分和热值均有所降低。

表 5 煤质特性

Table 5 The coal properties

煤样	工业分析/ $\%$				元素分析/ $\%$					$Q_{gr,ar}/$ $(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$Q_{net,ar}/$ $(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	M_1	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	$w(C_{ar})$	$w(H_{ar})$	$w(N_{ar})$	$w(O_{ar})$	$w(S_{t,ar})$		
纯贫煤	5.50	1.26	19.72	15.89	66.53	3.17	0.93	3.42	0.73	26.15	25.37
30% 无烟煤+ 70% 贫煤的混煤	6.60	0.88	24.14	14.03	61.22	2.84	1.00	2.53	1.67	23.93	23.19

图 7 为掺混 30% 无烟煤且变化运行氧含量时壁面气氛测试结果。结合图 3 及图 7 中煤质调整前后壁面气氛变化可以发现,在其他运行条件基本不变的情况下,与燃用纯贫煤相比,掺混 30% 无烟煤后,锅炉壁面还原性气氛明显增强。这主要是由于煤质变差后,煤粉着火距离变长,燃烧消耗下炉膛区域的氧更多。

但壁面气氛随锅炉整体运行氧含量变化的特性与燃用纯贫煤时基本一致,即随着整体运行氧含量的降低,壁面还原性气氛增强。锅炉整体运行氧含量低于 5.95% 时,壁面 CO 含量极高,还原性气氛急

剧增强,容易发生水冷壁高温腐蚀。

4.6 磨煤机组合调整

磨煤机组合不同即投入运行的燃烧器组合不同。350 MW 负荷时,结合上述试验中对缓解壁面还原性气氛有利的试验条件和原则,在燃用纯贫煤条件下,控制空气预热器入口氧含量在 5.2% (在设计值基础上提高 1%),燃烬风门开度为 10%,外二次风旋流调节杆和调风盘位置分别为 50 mm 和 120 mm,分别采用 BCD、ABCD 和 ABC 3 种不同的磨煤机组合方式运行并进行测试,结果如图 8 及表 6 所示。

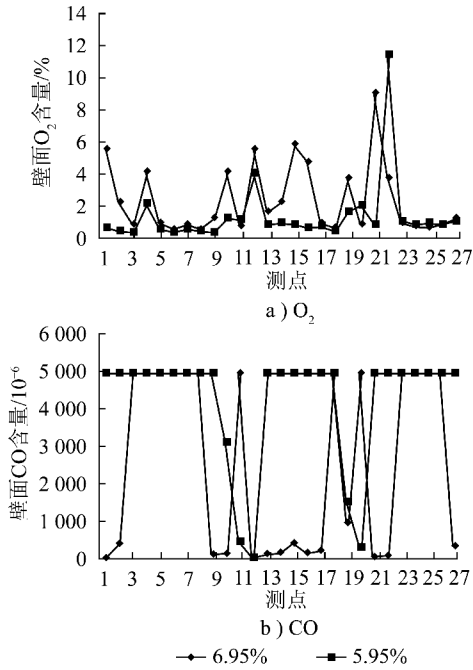


图7 燃用煤质调整测试结果

Fig. 7 Measurement results of different coals

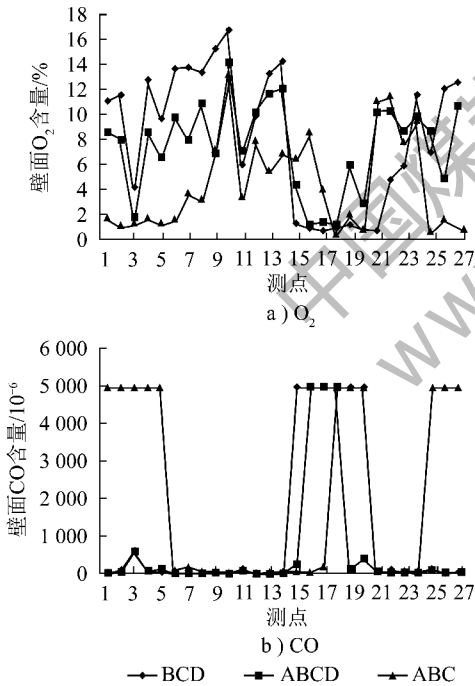


图8 运行磨煤机组合调整测试结果

Fig. 8 Measurement results of combination of running coal mill

从测试结果看,4台磨煤机运行时,满足 O₂ 含量 >2%、CO 含量 <0.2% 条件的点分别为 23 和 24 个,较前述所有试验工况都多,而 BCD 和 ABC 运行时则分别为 20、20 和 16、15 个。这主要是由于 4 台磨煤机运行时炉膛整体充满度较好,风量分布相对

均匀,壁面还原性气氛减弱,发生水冷壁高温腐蚀问题的风险减小。因此可以认为,该 4 台磨煤机运行的工况条件即为缓解壁面还原性气氛最有利的工况条件。从表 6 中测试结果来看,尽管该 4 台磨煤机运行工况条件对缓解壁面还原性气氛有利,且锅炉运行效率也较高,但 SCR 入口的 NO_x 浓度较其他运行要高出许多。

表6 锅炉效率及 NO_x 浓度随运行磨煤机组合的变化Table 6 The boiler efficiency and NO_x concentration along with the change of combination of running coal mill

磨煤机组合方式	排烟热损失 $q_2/\%$	固体不完全燃烧热损失 $q_4/\%$	锅炉热效率 $\eta/\%$	SCR 入口平均 NO _x 浓度 / (mg · m ⁻³)
BCD	6.834 1	2.071 7	90.67	610.7
ABCD	6.602 6	2.091 5	90.89	782.0
ABC	6.812 2	2.079 1	90.69	593.6

5 两侧墙强还原性气氛

综合上述测试结果可以发现,锅炉下炉膛区域两侧墙的还原性气氛要强于前后墙。这主要是由于 W 火焰锅炉自身各个燃烧器相互独立,炉膛整体横向混合较差,两侧墙区域相对缺风造成的。通过整体提高锅炉运行氧含量等手段,能缓解左侧墙还原性气氛强的问题,但各调整方式下,右侧墙还原性气氛始终较强。通过测试分析发现,B 磨煤机各煤粉管道间煤粉量分配偏差较大,其中 B1 和 B2 煤粉管道(B 磨煤机对应编号为 1、2 的煤粉管道)的相对煤粉量偏差分别为 28.3% 和 19.1%,而与 B1 和 B2 煤粉管道对应的正是靠近右墙的 2 组燃烧器,因此煤粉量分配不均应是右侧墙还原性气氛较强的主要原因。但由于电厂目前缺乏调节各煤粉管道风量和煤粉量偏差的有效手段,因此也无法缓解下炉膛右侧墙局部区域的还原性气氛。

6 结 论

1) 基于其自身燃烧方式的特点,W 火焰锅炉低氮燃烧改造后,出现高温腐蚀的主要是下炉膛区域,因此缓解高温腐蚀的思路是在尽可能将风量和煤粉量均匀分配的基础上,将更多的风量引入该区域。

2) 缓解 W 火焰锅炉下炉膛壁面还原性气氛的调整策略为在运行氧含量、燃烬风门开度、外二次风旋流强度、煤质和运行磨煤机组合等几个方面的寻

优。这也为解决 W 火焰锅炉高温腐蚀的燃烧调整指明了方向。

3) 根据最优工况的试验结果,下炉膛壁面还原性气氛明显减弱, O_2 含量 $>2\%$ 测点个数从最差工况的 4 个,提高到最优工况的 23 个, CO 含量 $<0.2\%$ 测点个数从最差工况的 4 个,增加到最优工况的 24 个,高温腐蚀问题得到缓解,机组运行的安全性得到了提高。最优工况下锅炉运行效率较高,锅炉经济性也得到了提高。

4) 由于上文所述调整策略并不利于分级燃烧,所以最优工况下 SCR 入口的 NO_x 浓度较其他运行要高出许多。尽管如此,其最高 SCR 入口的 NO_x 浓度也低于改造设计值的 800 mg/m^3 。因此,调整策略能较好地满足锅炉安全、经济、环保的运行要求。

参考文献(References):

- [1] 贾宏禄. 国外几种锅炉低氮燃烧改造方案及业绩考察[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(3): 81-84.
Jia Honglu. Over seas boiler low- NO_x combustion system retrofits and their application survey [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(3): 81-84.
- [2] 柳宏刚, 张广才, 王志刚, 等. 墙式对冲燃烧锅炉高温腐蚀原因分析及治理[J]. 热力发电, 2013, 42(12): 129-131.
Liu Honggang, Zhang Guangcai, Wang Zhigang, et al. High temperature corrosion in wall-firing boiler: reason analysis and treatment [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(12): 129-131.
- [3] 钟万里, 吴爽登, 曾凡云. 超临界锅炉水冷壁高温腐蚀分析及对策[J]. 热力发电, 2009, 38(12): 106-108.
Zhong Wanli, Wu Shideng, Zeng Fanyun. Cause an alysis of high temperature corosion on water wall of supercritical once-through boilers and countermeasures thereof [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(12): 106-108.
- [4] 周颖驰. 锅炉水冷壁高温腐蚀原因分析及对策[J]. 热力发电, 2013, 42(7): 138-141.
Zhou Yingchi. High-temperature corrosion of water wall tubes in a supercritical boiler: cause analysis and countermeasures [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(7): 138-141.
- [5] 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): 649-651.
Li Zhengqi, Ren Feng, Liu Guangkui, et al. Combustion technologies of down-fired boilers with high efficiency and low- NO_x emissions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(9): 649-651.
- [6] 柳宏刚, 白少林. 现役各类 W 火焰锅炉 NO_x 排放对比分析研究[J]. 热力发电, 2009, 38(3): 1-4.
Liu Honggang, Bai Shaolin. Comparison and analytical study on NO_x emission from various w-shaped flame boilers in service [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(3): 1-4.
- [7] 方庆艳, 周怀春, 汪华剑, 等. W 火焰锅炉结渣特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 1-7.
Fang Qingyan, Zhou Huaichun, Wang Huajian, et al. Numerical simulation of the ash deposition characteristics in a w-flame boiler furnace [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(23): 1-7.
- [8] 钱 宇, 郑 野, 胡 昊, 等. FW 型 W 火焰锅炉的结渣特点与防治对策[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(3): 73-75.
Qian Yu, Zheng Ye, Hu Hao, et al. Slagging characteristics and control countermeasures of FW type W-shaped flame boiler [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(3): 73-75.
- [9] 孙超凡, 李乃钊, 杨 华, 等. W 火焰锅炉燃用劣质无烟煤的稳定燃烧技术[J]. 动力工程学报, 2005, 25(2): 201-206.
Sun Chaofan, Li Naizhao, Yang Hua, et al. Technical research on stable combustion of the lambskin-fired W-flame boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2005, 25(2): 201-206.
- [10] 王春昌. 缝隙式燃烧器与“W”火焰锅炉的燃烧稳定性[J]. 中国电力, 2009, 42(1): 58-61.
Wang Chunchang. Split burner and the combustion stability of W-flame boiler [J]. Electric Power, 2009, 42(1): 58-61.
- [11] 韩奎华, 路春美, 李官鹏, 等. 大型锅炉水冷壁防腐现状与防腐措施探讨[J]. 电站系统工程, 2004, 20(2): 37-39.
Han Kuihua, Lu Chunmei, Li Guanpeng, et al. Curent situation and discussion about preventive measure to the high-temperature corosion of water wall tubes in large boilers [J]. Power System Engineering, 2004, 20(2): 37-39.
- [12] 焦庆丰, 姚 斌. 电厂锅炉水冷壁高温腐蚀程度判别技术研究[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 46-49.
Jiao Qingfeng, Yao Bin. Research on the identification technology of water walls high-temperature corrosion exetent in the utility boiler [J]. Electric Power, 2004, 37(10): 46-49.
- [13] 李文军, 彭 敏, 黄 伟, 等. 超临界 W 火焰锅炉旋流燃烧器燃烧调整试验[J]. 湖南电力, 2014, 34(3): 15-17.
Li Wenjun, Peng Min, Huang Wei, et al. Experimental research and combustion adjustment on swirlburner in supercritical W-shaped flame boiler [J]. Hunan Electric Power, 2014, 34(3): 15-17.