

## 不同负荷下 SOFA 系统调整策略的试验研究

夏文静<sup>1</sup>, 何长征<sup>2</sup>, 韦红旗<sup>3</sup>

(1.中冶华天工程技术有限公司,江苏南京 210019;2.南京博沃科技有限公司,江苏南京 210001;

3.东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096)

**摘要:**分离燃尽风(SOFA)系统作为控制 NO<sub>x</sub> 排放的主要调整设备,其调整策略的制订对于锅炉运行至关重要。以某 660 MW 超临界燃煤锅炉为研究对象,基于调整试验,分析 SOFA 系统对炉效、NO<sub>x</sub> 排放及其运行成本的影响规律,结果表明不同负荷下的调整策略不尽相同,运行中应进行差异化调整。

**关键词:**SOFA;NO<sub>x</sub>;炉效;调整策略

**中图分类号:**TK227.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2015)05-0068-04

随着环保力度的加强,低氮燃烧器已成为大型锅炉的标准配置,然而低 NO<sub>x</sub> 的控制原理却与煤粉燃烬的原则有所背离,易出现飞灰可燃物及烟气 CO 浓度上升的现象<sup>[1,2]</sup>,使得经济运行与环保达标不能同时满足。分离燃尽风(SOFA)系统作为控制 NO<sub>x</sub> 排放的主要调整设备,其调整策略的制订对于锅炉运行至关重要,然而目前国内关于大型机组 SOFA 试验调整的文献<sup>[2,3]</sup>较少,多为 SOFA 的数值模拟研究<sup>[4-6]</sup>。针对 660 MW 超临界燃煤锅炉,进行了不同负荷下 SOFA 系统的专项试验研究,以分析该系统对炉效、NO<sub>x</sub> 排放及其运行成本的影响规律,并制定相关调整策略。

## 1 设备概述

试验锅炉为上海锅炉厂有限公司制造,型号 SG-2090/25.4-M975,为超临界参数变压运行直流炉,一次中间再热,四角切圆燃烧,单炉膛,固态排渣,全钢构架,全悬吊结构,平衡通风,露天布置,Π 型锅炉。主要设计参数、设计煤种如表 1、表 2 所示。该锅炉燃烧系统为低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统(LFNCSTM),共 24 只直流式燃烧器,分 6 层布置于炉膛 4 角,煤粉和空气从四角送入,在炉膛中呈四角切圆方式燃烧,而主燃烧器之上设置有 5 层 SOFA,由 1 台气动执行器集中带动 SOFA 作上下摆动。

## 2 研究方法及内容

试验在不同负荷下对运行氧量、主燃烧器系统、SOFA 系统及制粉系统进行单因素燃烧调整。为避免其他运行因素参与调整,允许部分参数在较大范围内波动,如主汽温度、再热汽温度、选择性催化反应器(SCR)出口 NO<sub>x</sub> 等,并尽量通过水煤比或减温水量对汽温进行调整。

通过众多运行因素的大幅调整,分析其对燃煤成

表 1 主要设计参数

数名称	数值	数名称	数值
连续蒸发量/(t·h <sup>-1</sup> )	1988	再热蒸汽温度/°C	569
过热蒸汽压力/MPa	25.28	省煤器出口烟温/°C	364
再热蒸汽压力/MPa	4.19	空预器出口烟温/°C	126
再热蒸汽压力/MPa	571		

表 2 煤质分析数据

项目	数值	项目	数值
Car/%	52.65	Aar/%	29.44
Har/%	3.4	Mt/%	7.1
Oar/%	6.17	Vdaf/%	36.6
Nar/%	0.92	Qnet,ar/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	20.44
Sar/%	0.32		

本、尿素成本及其波动幅度的影响规律。针对典型负荷下的 SOFA 系统进行较为全面的调整试验,以了解不同负荷下 SOFA 系统运行方式对炉效与 NO<sub>x</sub> 排放的关系及规律特性。

试验调整中,机组保持定负荷运行、煤质尽量稳定,各工况均对多个重要参数与指标进行测试及计算,其中包括 SCR 进口烟气成分、空预器出口烟气成分、排烟温度及环境参数的测量;煤粉、飞灰及炉渣的取样及分析;修正炉效、各项热损失、脱硝效率、烟气总量、燃煤量及尿素量等性能指标的计算。

## 3 研究分析及结果

### 3.1 燃煤与尿素成本对调整策略的影响

针对高、中、低负荷下的试验工况(对运行氧量、主燃烧系统、SOFA 系统及制粉系统进行燃烧调整),对燃煤及尿素成本进行了核算及统计,得出不同负荷下相关成本的变化曲线,如图 1 所示。

由图 1 可知,高、中、低负荷各工况尿素成本最大波动幅度分别为 200、217、230 元/h,而燃煤成本最大波动幅度分别为 2832、3066、2718 元/h。随着运行因素

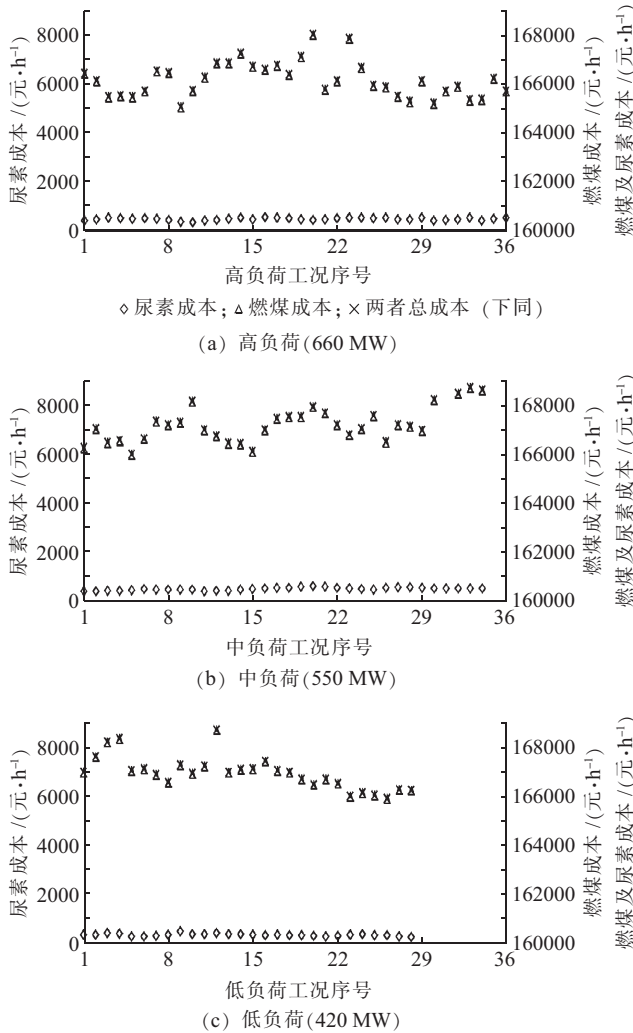


图1 燃煤成本、尿素成本及两者总成本变化曲线

的调整,尿素成本波动幅度远小于燃煤成本,两者总成本几乎完全取决于燃煤成本。可见从经济运行角度出发,在满足 SCR 进口  $\text{NO}_x$  不超设计值、出口  $\text{NO}_x$  达标的情况下,合理炉效应为 SOFA 调整策略的主导方向。

### 3.2 锅炉负荷对调整策略的影响

针对高、中、低负荷下的试验工况,选择各负荷运行氧量相对接近的 10 个典型工况,对其炉效、SCR 进口  $\text{NO}_x$  等相关参数进行平均,以分析负荷对炉效及 SCR 进口  $\text{NO}_x$  的变化规律,如表 3 所示。随着机组负荷的降低,炉内温度下降、煤粉停留时间增长,导致  $\text{NO}_x$  排放降低、炉效上升,且变化幅度较大。同时,SCR 进口烟温也随之降低,在 420 MW 负荷时已降至 304  $^{\circ}\text{C}$ ,略高于最低设计运行值(300  $^{\circ}\text{C}$ ),若负荷继续下降,则 SCR 退停的可能性很大,进而导致  $\text{NO}_x$  排放严重超标。

由此可见,高负荷运行时,炉效相对较低,上升空间较大,在  $\text{NO}_x$  排放不超标的情况下,炉效应为 SOFA 调整策略的主导方向。低负荷运行时,炉效相对较高,而 SCR 退停的可能性又较大,控制  $\text{NO}_x$  排放应为 SOFA 调整策略的主导方向。

表3 不同负荷试验工况数据汇总

参数名称	高负荷	中负荷	低低负
省煤器出口氧量 /%	2.8	2.8	4.4
排烟 $\text{CO}$ 含量 /( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	586.3	227.5	10.0
排烟温度 / $^{\circ}\text{C}$	122.4	120.6	108.3
飞灰含碳量 /%	3.4	3.5	3.4
炉渣含碳量 /%	8.7	10.5	9.2
干烟气热损失 /%	4.42	4.15	4.26
未燃尽碳热损失 /%	1.50	1.40	1.25
未燃尽 $\text{CO}$ 热损失 /%	0.18	0.07	0.00
锅炉效率 /%	93.01	93.48	93.53
SCR 进口 $\text{NO}_x$ /( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	303	257	249
SCR 进口烟温 / $^{\circ}\text{C}$	337	329	304

### 3.3 SOFA 运行方式对调整策略的影响

#### 3.3.1 SOFA 风门开度

在高、低两种典型负荷下(运行氧量分别维持在 2.7%、3.8%),仅对 5 层 SOFA 开度进行单因素调整,以考察其对炉效、 $\text{NO}_x$  排放的影响规律,相关曲线如表 4 所示。SOFA 风门开度的调整,可有效降低  $\text{NO}_x$  排放,整体呈现开度越大, $\text{NO}_x$  排放越小的趋势,然而对炉效的影响不大。可见,该炉型 SOFA 系统设计较为合理,能有效调整 SOFA 风和烟气的混合过程,降低飞灰含碳量和  $\text{CO}$  含量。因此,为保证 SCR 进口  $\text{NO}_x$  不超设计值,不同负荷下 SOFA 可保持在大开度下运行。

表4 不同 SOFA 风门开度试验工况数据汇总

参数名称	高负荷试验工况				低负荷试验工况			
	42	61	77	96	39	59	78	96
SOFA 风门开度 /%	42	61	77	96	39	59	78	96
省煤器出口氧量 /%	2.8	2.7	2.7	2.6	4.3	4.2	4.4	4.2
排烟 $\text{CO}$ 含量 /( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	542.5	560.0	617.5	1063.8	6.3	6.3	7.5	7.5
排烟温度 / $^{\circ}\text{C}$	122.6	123.9	125.2	123.4	109.8	109.7	109.4	109.8
飞灰含碳量 /%	3.4	4.5	4.2	3.5	1.8	1.9	2.8	2.4
炉渣含碳量 /%	12.2	11.6	9.3	11.0	9.0	9.8	9.3	8.8
干烟气热损失 /%	4.29	4.33	4.40	4.30	4.33	4.35	1.30	4.31
未燃尽碳热损失 /%	1.67	1.91	1.67	1.60	0.92	0.99	1.18	1.06
未燃尽 $\text{CO}$ 热损失 /%	0.16	0.17	0.19	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
锅炉效率 /%	93.11	92.82	92.96	93.00	93.81	93.72	93.58	93.68
SCR 进口 $\text{NO}_x$ /( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	329	294	289	280	261	224	214	216

#### 3.3.2 SOFA 风投运层

在高、低两种典型负荷下(运行氧量分别维持在 2.3%、4.2%),仅对 SOFA 投运层的运行方式进行单因素调整,以考察其对炉效、 $\text{NO}_x$  排放的影响规律,如表 5

所示(该炉型 SOFA 系统共 5 层 SOFA 喷口,试验中各层 SOFA 喷口一旦投运,则保持 100%开度,否则保持 10%开度,以便冷却喷口)。

表 5 不同 SOFA 风投运层试验工况数据汇总

参数名称	高负荷试验工况			低负荷试验工况		
	投 5 层	投上 3 层	投下 3 层	投 5 层	投上 3 层	投下 3 层
省煤器出口氧量 / %	2.4	2.2	2.2	4.2	4.1	4.1
排烟 CO 含量 / (mg·m <sup>-3</sup> )	1128.8	41.3	21.3	7.5	12.5	11.3
排烟温度 / °C	123.5	124.1	124.0	109.8	108.1	107.1
飞灰含碳量 / %	3.4	5.0	4.0	2.4	5.2	4.6
炉渣含碳量 / %	13.6	12.1	11.3	8.8	9.6	9.0
干烟气热损失 / %	4.27	4.35	4.34	4.31	4.28	4.28
未燃烬碳热损失 / %	1.75	2.09	1.76	1.06	1.80	1.59
未燃尽 CO 热损失 / %	0.33	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
锅炉效率 / %	92.87	92.77	93.12	93.68	92.98	93.21
SCR 进口 NO <sub>x</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> )	279	315	337	216	302	306

(1) 高低负荷下,随着 SOFA 风投运层数的增加,SOFA 风量有所增加,NO<sub>x</sub> 排放呈现明显下降趋势;

(2) 高低负荷下,5 层 SOFA 风全投,会导致主燃烧器区域的空气量减小,CO 排放可能会有所增加(如 660 MW 试验工况),但飞灰含碳量呈明显下降趋势,说明 SOFA 风量的增加对飞灰燃烬有改善作用,因此 5 层 SOFA 全投时炉效较高;

(3) 通过投运上 3 层 SOFA 与投运下 3 层的对比,可知上层 SOFA 由于与主燃烧器距离相对较大、NO<sub>x</sub> 还原时间更长,其降 NO<sub>x</sub> 的效果相对明显,但炉效会有所损失。

综上所述,该炉 SOFA 设计较为合理,投 5 层 SOFA 后 NO<sub>x</sub> 排放最低、炉效较高。因此,为了保证 SCR 进口 NO<sub>x</sub> 不超设计值,不同负荷下 SOFA 可保持 5 层全投状态。

### 3.3.3 SOFA 风箱 / 炉膛差压

在高、低两种典型负荷下(运行氧量分别维持在 2.6%、4.5%),5 层 SOFA 全部投运、各层开度均为 100%时,仅对主燃烧器二次风门开度(25%~50%)进行单因素调整,以改变 SOFA 风箱 / 炉膛差压,考察其对炉效、NO<sub>x</sub> 排放的影响规律,如表 6 所示。

由表 6 可知,随着二次风开度减小、风箱 / 炉膛差压上升、SOFA 风量增加,导致 NO<sub>x</sub> 排放降低,但下降幅度较为有限。同时,差压与炉效不呈线性变化,规律性及变化幅度均较弱。分析认为,出于运行安全及降氮需要,运行中需保持较高的风箱 / 炉膛差压,加之二次风

门(除 SOFA、CCOFA 风以外)多达 72 个、组合方式众多,不便快速调整,因此二次风开度及调整范围均较小。

表 6 不同 SOFA 风箱/炉膛差压试验工况数据汇总

参数名称	高负荷试验工况			低负荷试验工况		
	623	719	988	235	292	431
风箱 / 炉膛差压 / Pa	623	719	988	235	292	431
省煤器出口氧量 / %	2.6	2.6	2.7	4.7	4.6	4.7
排烟 CO 含量 / (mg·m <sup>-3</sup> )	217.5	198.8	107.5	11.3	10.0	11.3
排烟温度 / °C	122.8	122.7	123.9	105.6	105.7	105.8
飞灰含碳量 / %	3.7	3.8	3.8	4.3	3.7	3.9
炉渣含碳量 / %	6.1	7.0	5.2	7.4	8.3	10.8
干烟气热损失 / %	4.45	4.47	4.56	4.11	4.13	4.14
未燃烬碳热损失 / %	1.42	1.51	1.38	1.35	1.25	1.46
未燃尽 CO 热损失 / %	0.07	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00
锅炉效率 / %	93.16	93.05	93.12	93.59	93.66	93.45
SCR 进口 NO <sub>x</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> )	317	314	303	235	228	212

由此可见,试验条件下 SOFA 风箱 / 炉膛差压对炉效及 NO<sub>x</sub> 排放影响较弱,因此锅炉的安全运行应作为该因素的主导方向。

### 3.3.4 SOFA 风上下摆角

在高、低两种典型负荷下(运行氧量分别维持在 3.0%、4.6%),5 层 SOFA 全部投运、各层开度均为 100%时,仅对 5 层 SOFA 上下摆角进行单因素调整,考察其对炉效、NO<sub>x</sub> 排放的影响规律,如表 7 所示。

表 7 不同 SOFA 上下摆角试验工况数据汇总

参数名称	高负荷试验工况				低负荷试验工况			
	27	49	77	83	0	50	75	90
SOFA 上下摆角 / °	27	49	77	83	0	50	75	90
省煤器出口氧量 / %	3.1	3.0	3.0	2.8	4.5	4.7	4.7	4.7
排烟 CO 含量 / (mg·m <sup>-3</sup> )	1301.0	292.5	617.5	112.5	6.3	10.0	10.0	11.3
排烟温度 / °C	118.4	119.6	118.3	118.3	106.1	107.6	108.3	109.0
飞灰含碳量 / %	3.3	3.2	3.6	3.6	3.4	4.0	4.3	4.7
炉渣含碳量 / %	11.1	12.1	8.5	8.5	7.4	9.6	9.4	9.3
干烟气热损失 / %	4.18	4.31	4.21	4.22	4.21	4.25	4.26	4.25
未燃烬碳热损失 / %	1.81	1.85	1.70	1.70	1.13	1.39	1.47	1.55
未燃尽 CO 热损失 / %	0.39	0.09	0.19	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
锅炉效率 / %	92.85	92.87	93.04	93.18	93.70	93.40	93.31	93.24
SCR 进口 NO <sub>x</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> )	333	330	299	301	308	272	268	258



(1) 高低负荷下,SOFA 上摆, $\text{NO}_x$  还原区高度增加,进而  $\text{NO}_x$  还原时间增加、降氮效果增强,整体来看 SOFA 每上摆 25%, $\text{NO}_x$  约下降  $14 \text{ mg/m}^3$ ;

(2) 高负荷下,SOFA 上摆,炉效呈明显上升趋势;低负荷下,SOFA 上摆,炉效却呈明显下降趋势,说明不同负荷下摆角对炉效的影响规律有所差异。

分析认为,高负荷运行时,炉内火焰中心较高,由于 SOFA 自身及存在的故障,当 SOFA 下摆时,可能对炉内燃烧形成了一定的干扰,导致炉效有所下降。低负荷运行时,炉内火焰中心明显下移(上两层燃烧器停用),当 SOFA 下摆时,对炉内燃烧的干扰作用已不存在,但对炉内火焰的下压作用却有所突显,导致排烟温度、飞灰含碳量均有较为明显的下降,进而炉效上升。

在不考虑汽温及其偏差的情况下<sup>[7]</sup>,由于 SOFA 风上下摆角在不同负荷下对炉效及  $\text{NO}_x$  排放的影响较大,且调节迅速,因此可作为 SOFA 系统调整的主要手段。同时,由于上下摆角在不同负荷下对炉效的影响规律不同,进而其调整策略也有所不同,建议不同负荷下的调整策略如下:

(1) 高负荷运行时,SOFA 可上摆至最高位置,以同时满足高效与低  $\text{NO}_x$  排放的要求;

(2) 低负荷运行时,总  $\text{NO}_x$  排放较低,为保证较高的炉效,SOFA 可下摆至最低位置;

(3) SCR 退停时, $\text{NO}_x$  排放严重超标前,SOFA 可迅速上摆至最高位置,以控制  $\text{NO}_x$  排放,但运行中应注意炉内稳燃状况。

## 4 结束语

对于试验机组而言,通过 SOFA 系统调整策略的试验研究,发现其低氮燃烧器设计合理,正常运行方式下,对炉效的影响较小,但不同负荷下仍需采用不同的调整策略。在炉效与低  $\text{NO}_x$  排放的联合优化中,合理的炉效应为调整的主导因素,也即在满足 SCR 进口  $\text{NO}_x$  不超设计值、SCR 出口  $\text{NO}_x$  达标及生产安全的情

况下,运行调整应以炉效为主导;高负荷运行时,炉效相对较低,上升空间较大,应通过燃烧调整优化,在保证  $\text{NO}_x$  排放不超标的情况下,尽可能高效运行;低负荷运行时,炉效相对较高,但 SCR 退停的可能性明显增大,为避免  $\text{NO}_x$  严重超标,应通过燃烧调整优化,保证较低的  $\text{NO}_x$  排放,以保持一定的调节余量;为保证不同负荷较高的炉效及 SCR 进口  $\text{NO}_x$  不超设计值,SOFA 系统应维持 5 层全投、大开度及较大差压运行,同时将其上下摆角作为 SOFA 系统调整的主要手段,试验数据表明该摆角对炉效的调整幅度为  $0.3\% \sim 0.5\%$ ,对  $\text{NO}_x$  的调整幅度可达到  $50 \text{ mg/m}^3$ ;SCR 退停时,对  $\text{NO}_x$  排放控制及炉内稳燃的要求很高,在对 SOFA 系统调整的基础上,还应结合运行氧量、磨煤机运行方式等其他调整手段进行联合控制。

## 参考文献:

- [1] 夏文静,衡丽君,何长征,等. 660 MW 超超临界燃煤锅炉降低 CO 排放的试验研究[J]. 热能动力工程,2014,29(1):58-64.
- [2] 何小平,文力. SOFA 对  $\text{NO}_x$  排放及燃烧的影响[J]. 陕西电力,2014,42(12):91-93.
- [3] 卞康麟. 1000 MW 机组塔式锅炉  $\text{NO}_x$  排放的试验研究[J]. 江苏电机工程,2014,33(5):73-75.
- [4] 吕太,闫晨帅,路昆,等. 不同负荷下变 SOFA 风率对低  $\text{NO}_x$  燃烧特性影响分析[J]. 热能动力工程,2014,29(4):67-72.
- [5] 钟亚峰,孙保民. 600 MW 锅炉 SOFA 风率降低  $\text{NO}_x$  影响研究[J]. 电站系统工程,2013,29(6):33-36.
- [6] 赵振宁,童家麟,叶学民. 燃尽风对 300 MW 锅炉燃烧特性影响的数值模拟[J]. 华东电力,2013,41(1):219-224.
- [7] 周立群,张碧珠. 600 MW 超临界机组燃烧调整中 SOFA 摆角的作用[J]. 华电技术,2010,32(4):08-11.

## 作者简介:

夏文静(1978),女,江西南昌人,高级工程师,从事电厂热力系统设计工作;

何长征(1978),男,江西新余人,工程师,从事电力热力设备性能测试及优化运行;

韦红旗(1966),男,安徽霍山人,副教授,研究方向为电力热力设备性能测试及优化运行。

## Experimental Study of SOFA System Adjusting Strategy under Different Loads

XIA Wenjing<sup>1</sup>, HE Changzheng<sup>2</sup>, WEI Hongqi<sup>3</sup>

(1. Huatian Engineering & Technology Corporation, MCC, Nanjing 210019, China;

2. Nanjing Bowo Technology Co. Ltd., Nanjing 210001, China;

3. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As the main adjusting method for reducing  $\text{NO}_x$  emission, the adjusting strategy of SOFA system is essential for boiler operation. Using 600 MW supercritical coal-fired boiler as the research object, analysis on the influence of SOFA system on the boiler efficiency, the  $\text{NO}_x$  emission, and the operating cost has been carried out based on combustion adjustment tests. The results indicated that variable adjusting strategies for SOFA system should be adopted under different loads.

**Key words:** SOFA;  $\text{NO}_x$ ; boiler efficiency; adjusting strategy