

# 1000 MW 机组锅炉掺烧贫煤 NO<sub>x</sub> 排放的燃烧优化

高小涛<sup>1</sup>, 盛昌栋<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**国内大型燃煤电站锅炉在低负荷运行工况下 NO<sub>x</sub> 排放浓度往往偏高。文中采用燃烧优化运行技术, 降低某电厂 1000 MW 超超临界机组锅炉部分负荷运行时 NO<sub>x</sub> 排放浓度。通过进行现场试验并与历史运行数据比较分析发现, 锅炉运行氧量偏高和掺烧贫煤是该锅炉部分负荷运行时 NO<sub>x</sub> 排放浓度偏高的主要原因。试验结果表明, 采用燃烧优化技术可有效控制该锅炉低负荷时 NO<sub>x</sub> 排放浓度。无论是单烧烟煤还是掺烧贫煤, 在机组负荷为 700 MW 时, 采用中间 4 台磨(B、C、D、E 磨)运行的磨组运行方式代替习惯 5 台磨运行方式, 可实现较低的 NO<sub>x</sub> 排放浓度目标和较高的锅炉效率。

**关键词:**1000 MW; 超超临界锅炉; 掺烧; NO<sub>x</sub> 排放; 燃烧优化

**中图分类号:** TM621.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)03-0014-07

## 0 引言

为了达到日益严格的污染物排放限制要求, 我国大型燃煤电厂普遍采用低 NO<sub>x</sub> 燃烧和选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)烟气脱硝技术控制氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的排放。锅炉燃烧系统采用低 NO<sub>x</sub> 燃烧器结合大量燃尽风的炉内分级燃烧技术<sup>[1-5]</sup>, 将炉内主燃烧区过量空气系数控制在较低水平(一般在 0.95 以下), 以抑制 NO<sub>x</sub> 的生成<sup>[5-10]</sup>, 从而降低 SCR 系统的脱硝成本。通常, 在机组满负荷工况运行时, 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放可达到设计水平<sup>[6-8]</sup>。近年来因我国发电装机容量特别是火电机组装机总量的迅速增加和可再生能源发电(如水电、风电)的竞争, 大型燃煤发电机组常常运行在较低的负荷下, 受限于低 NO<sub>x</sub> 燃烧锅炉的运行特性, 锅炉燃烧 NO<sub>x</sub> 排放浓度随运行负荷的降低明显增加的现象较常见。虽然低负荷运行时 SCR 需处理的烟气量减少, 但锅炉 NO<sub>x</sub> 生成浓度的明显升高增加了 SCR 的运行成本, 影响机组低负荷运行的经济性。

目前, 部分燃煤电厂一方面为了保持煤质稳定、改善煤质某方面的特性而主动进行配煤, 另一方面通过采用掺烧劣质煤方式以达到降低燃料成本提高机组运行经济性的目的<sup>[11-12]</sup>。掺烧劣质煤往往会影响锅炉运行的经济性、安全性和 NO<sub>x</sub> 排放特性<sup>[11-12]</sup>, 采用分磨制粉掺烧有利于优化混煤燃烧特性和减少污染物排放<sup>[12]</sup>。某电厂 1 台 1000 MW 超超临界直流塔式锅炉设计燃用烟煤, 但为节约燃

料成本, 日常运行时还部分掺烧廉价优质(高热值、低硫)的贫煤, 造成锅炉 SCR 入口 NO<sub>x</sub> 排放浓度明显升高(特别是低负荷运行时)<sup>[13-17]</sup>。本文基于该电厂锅炉运行的分布式控制系统(distributed control system, DCS)历史数据, 对其低负荷运行特性特别是燃烧 NO<sub>x</sub> 排放特性进行系统的分析, 开展锅炉掺烧贫煤的燃烧优化运行试验研究, 探讨 NO<sub>x</sub> 排放高的主要原因及掺烧贫煤的影响, 为锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的燃烧优化运行控制提供依据。

## 1 设备简介

该 1000 MW 机组锅炉为 3049 t/h 超超临界参数、变压运行、螺旋管圈直流锅炉, 采用单炉膛塔式, 一次中间再热, 四角切圆燃烧, 平衡通风, 固态排渣, 设计燃用煤种为烟煤, 主燃烧区过量空气系数设计为 0.92<sup>[5-6]</sup>。该锅炉采用低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统, 燃烧系统主要包括: 12 层强化着火煤粉喷嘴(四角共有 48 只煤粉喷嘴), 每两层连接 1 台磨煤机, 从下往上分别为 A、B、C、D、E 和 F 磨, 满负荷时 5 台运行 1 台备用; 预置水平偏角的辅助风(二次风)喷嘴(CFS); 紧凑燃尽风(CCOFA); 在主燃烧器风箱上部布置分离燃尽风(SOFA)喷嘴, 包括 6 层可水平摆动的 SOFA 喷嘴。锅炉设计采用燃烧器垂直方向的摆动作为再热汽温的主要调节方式, 煤粉喷嘴垂直摆动范围为 ±30°。

## 2 煤质特性和试验工况

### 2.1 煤质特性分析

试验期间锅炉燃煤的煤质特性综合在表 1 中,

收稿日期: 2018-01-24; 修回日期: 2018-02-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600601)

为了比较,表 1 中也给出了锅炉设计煤种和校核煤种的特性。

表 1 试验期间燃煤及锅炉设计和校核煤的煤质特性

Tab.1 Properties of the as-fired coals compared to those for boiler design

名称	全水份 $M_{ar} / \%$	灰份 $A_{ar} / \%$	挥发份 $V_{daf} / \%$	硫份 $S_{t,ad} / \%$	低位发热量 $Q_{net,ar} /$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
设计煤种	11.4	19.31	33.01	0.52	21.58
校核煤种	8.31	28.42	27.30	0.92	20.47
烟煤 A	11.1	19.65	39.61	0.62	21.02
烟煤 B	9.0	27.34	40.98	1.03	19.98
烟煤 C	9.0	26.85	40.01	0.70	19.20
贫煤	7.4	21.40	17.38	0.30	24.40

锅炉燃用煤种的发热量和挥发分含量是与煤的燃烧特性、NO<sub>x</sub>生成特性密切相关的主要煤质特性参数。从表 1 中燃煤的挥发分含量和发热量来看,试验期间燃用的 3 种烟煤的特性很相似。三者主要的差异是灰分含量,但都在设计和校核煤种确定的灰分范围内,灰分含量的差异导致发热量略有不同。因此,从燃烧特性和 NO<sub>x</sub>生成特性的角度看,可以认为试验期间燃用的 3 种烟煤特性是很相似的。相比起来,贫煤的特性与 3 种烟煤及设计、校核煤都有显著的差异,主要表现为挥发分含量很低、发热量高和水分含量低。因此,从与燃烧和 NO<sub>x</sub>生

成特性有关的煤质特性的比较来看,本次试验过程中,锅炉掺烧贫煤与单烧烟煤试验时,入炉燃料特性的差异主要是由掺烧贫煤引起的。

## 2.2 试验工况安排情况

以锅炉习惯的运行控制方式为基础,参照蒸汽锅炉性能试验规程<sup>[18]</sup>进行该锅炉掺烧贫煤 NO<sub>x</sub> 排放的燃烧优化调整试验,燃烧优化调整试验工况见表 2。本次试验除了比较燃煤的影响之外,还考察两种负荷下磨煤机组合方式、炉膛氧量、CCOFA 及 SOFA 风门开度等运行条件的变化对锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度及运行性能的影响。

## 3 锅炉燃烧优化试验结果及其分析

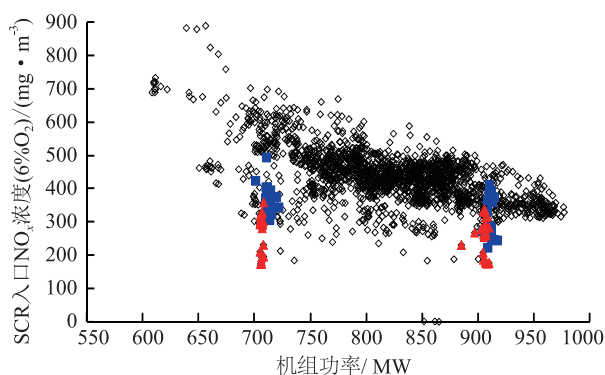
### 3.1 试验期间数据和历史运行数据对比

为了便于分析锅炉燃烧主要运行因素改变对锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响,将试验期间 DCS 记录的 SCR 入口 NO<sub>x</sub> 浓度与锅炉日常运行时的 NO<sub>x</sub> 浓度水平进行比较,如图 1 所示。其中,机组日常运行时的 NO<sub>x</sub> 浓度水平以 DCS 系统试验前后一周时间的全部历史记录数据值来反映。此外,锅炉燃烧运行工况条件变化也会带来锅炉主要运行参数的变化,为此,将试验期间 DCS 记录的过热汽温、再热汽温与试验前后一周时间全部历史记录值进行比较,其结果如图 2 所示。

表 2 燃烧优化调整试验工况

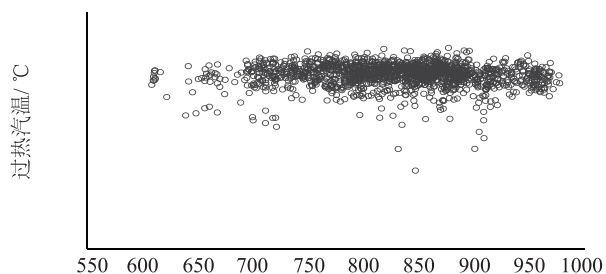
Tab.2 Test cases for optimizing combustion

工况号	机组负荷 / MW	燃用煤种 情况	磨组运行 方式	SOFA 开度 / %	CCOFA 开度 / %	运行氧量 调整情况	备注
1	900	掺烧贫煤	B-F 5 台磨	100	100	习惯控制	
2	900	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	100	100	习惯控制	
3	900	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	100	100	增加 0.5%	
4	700	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	75	75	习惯控制	
5	700	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	75	75	降低 0.5%	
6	700	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	75	75	同工况 5	改变各层燃料分配
7	700	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	100	75	同工况 5	C 磨(贫瘦煤)减少 20 t/h
8	700	掺烧贫煤	A-E 5 台磨	100	75	增加 0.5%	同工况 5
9	700	掺烧贫煤	B-E 4 台磨	100	75	同工况 8	
10	700	掺烧贫煤	B-E 4 台磨	100	75	降低 0.5%	
11	900	单烧烟煤	B-F 5 台磨	100	100	习惯方式	习惯方式
12	900	单烧烟煤	B-F 5 台磨	100	100	降低 0.5%	F 磨减少 5 t/h, C 层磨煤量增加 5 t/h
13	900	单烧烟煤	A-E 5 台磨	100	100	同工况 12	习惯方式
14	700	单烧烟煤	B-F 5 台磨	100	80	习惯方式	习惯方式
15	700	单烧烟煤	B-F 5 台磨	100	80	同工况 14	F 磨减少 20 t/h, 相应增加 B、C 磨煤量
16	700	单烧烟煤	B-F 5 台磨	100	80	同工况 15	在工况 15 基础上, E 磨减少, 5 t/h 相应增加 B 磨煤量
17	700	单烧烟煤	B-E 4 台磨	100	80	同工况 16	各层煤量均等分配



◇ SCR入口修正后NO<sub>x</sub>浓度EDNA.1DCS.A12509  
 ■ 多煤种掺烧试验阶段(2014-10-30)  
 ▲ 单烧烟煤试验阶段(2014-10-31)

图1 锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度随机组负荷变化的情况  
 Fig.1 NO<sub>x</sub> emissions from the furnace varying with unit operation load



◇ 多煤种试验阶段(2014-10-30)  
 ▲ 单烧烟煤试验阶段(2014-10-31)  
 (a) 过热汽温

(b) 再热汽温

图2 过热汽温和再热汽温随机组负荷变化的情况  
 Fig.2 Main steam temperature and reheat steam temperature varying with unit operation load

### 3.2 锅炉掺烧贫煤NO<sub>x</sub>排放的优化调整试验

#### 3.2.1 习惯性工况试验

在900 MW机组负荷下,进行了锅炉习惯性运行控制方式时的掺烧贫煤试验(工况1),试验主要结果如表3所示。

表3 习惯性运行掺烧贫煤工况试验结果

Tab.3 Results under co-firing lean coal with bituminous coal during usual operation and testing

项目	数值	项目	数值
负荷/MW	900	E磨煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	71
主汽压/MPa	23.9	F磨煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	75
A磨煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	—	炉膛氧量/%	2.35
B磨煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	69	SCR入口氧量/%	3.60
C磨煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	72	NO <sub>x</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	365
D磨煤量/(t·h <sup>-1</sup> )	75	锅炉效率/%	94.44

从表3可见,锅炉在习惯性运行条件(其中磨组运行方式为上五层即对应B-F磨组合方式运行)下掺烧贫煤运行,高负荷(900 MW,工况1)时测量的锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度为365 mg/m<sup>3</sup>(SCR入口处,折算到6%O<sub>2</sub>;下同),接近于相同负荷水平下机组正常运行时的平均水平,但略高于锅炉的设计保证值(350 mg/m<sup>3</sup>)。

#### 3.2.2 燃烧调整试验结果

分别在900 MW,700 MW两种机组负荷下,进行变磨煤机组合方式、变炉膛氧量、变CCOFA及SOFA风门开度等运行控制方式改变的锅炉掺烧贫煤运行优化调整试验,试验结果如表4所示。

工况2试验结果表明:在相同的燃烧氧量水平下,采用A-E磨组合运行方式运行时锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度可降至246 mg/m<sup>3</sup>,与习惯性运行控制工况(工况1)相比降低了近120 mg/m<sup>3</sup>;即使是在燃烧氧量提高0.5%的条件下(工况3),锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度仍比习惯运行工况低近80 mg/m<sup>3</sup>。出现这样的结果是符合预期的,因为与B-F磨组合方式运行控制方式相比,A-E磨组合运行控制方式会导致炉内主燃烧区域的下移,显著增加了主燃烧区与SOFA风之间的还原区范围,其间烟气流动时间的延长有利于主燃烧区生成的NO<sub>x</sub>的还原。因此,最终NO<sub>x</sub>排放浓度显著降低。当采用A-E磨组合运行方式运行时(工况2),锅炉效率有一定程度的提高。

从工况4试验结果看出,在机组负荷为700 MW时,采用下5台磨组合运行方式掺烧贫煤运行,锅炉NO<sub>x</sub>排放浓度仍然高达404 mg/m<sup>3</sup>。工况9试验结果表明:当采用中间4台磨(B、C、D、E磨)组合运行控制方式时,可实现较低NO<sub>x</sub>排放浓度(335 mg/m<sup>3</sup>,工况9)。

#### 3.2.3 低NO<sub>x</sub>排放燃烧优化控制分析

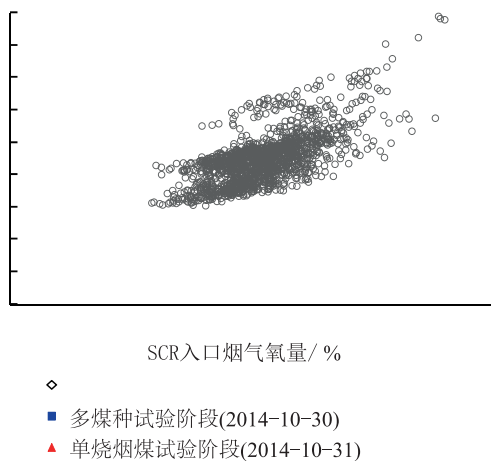
从表3可看出,当调整小风门的开度和降低燃烧氧量时(工况5),NO<sub>x</sub>排放浓度显著降低至362 mg/m<sup>3</sup>;这时再调整燃料分配即提高中间3层磨的

表 4 锅炉掺烧贫煤运行优化调整试验结果

Tab.4 Results for optimizing the operations tests under co-firing lean coal with bituminous coal

工况号	负荷 /MW	主汽压 /MPa	A 磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	B 磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	C 磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	D 磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	E 磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	F 磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	炉膛氧量 /%	SCR 入口氧量 /%	NO <sub>x</sub> / $(mg \cdot m^{-3})$	锅炉效率 /%
2	900	24.0	66	71	76	74	75	—	2.37	3.20	246	94.53
3	900	24.6	66	71	76	74	75	—	2.80	3.66	284	94.45
4	700	18.8	46	42	61	69	64	—	2.96	4.25	404	93.91
5	700	19.2	46	42	64	68	64	—	2.57	3.86	362	94.23
6	700	18.9	43	61	62	67	52	—	2.51	3.78	356	94.23
7	700	18.9	51	61	48	65	60	—	2.45	3.55	313	94.32
8	700	18.6	51	61	48	65	60	—	2.77	4.14	371	94.24
9	700	19.6	—	61	74	77	71	—	2.62	3.91	335	94.82
10	700	18.7	—	61	74	77	71	—	2.12	3.30	305	94.80

燃料量(工况 6)虽可降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度,但作用并不明显。值得指出的是,降低 C 磨燃料量(工况 7),即降低掺烧的贫煤量,可进一步显著降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度至 313 mg/m<sup>3</sup>,显示出贫煤掺烧对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的显著影响。而此时增加燃烧氧量(工况 8)也导致 NO<sub>x</sub> 排放浓度的显著增加,其变化幅度进一步表明低负荷时运行氧量的控制对锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度控制的重要性。图 3 中所示的试验结果表明:通过进行燃烧调整,能在降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度的同时提高锅炉热效率,这主要是由于运行氧量水平适当降低了排烟热损失。

图 3 锅炉 NO<sub>x</sub> 浓度随运行氧量变化情况Fig.3 NO<sub>x</sub> emissions from the furnace varying with combustion excess O<sub>2</sub> level

从表 2、表 3 所示试验结果可以看出,该锅炉在低负荷(700 MW)掺烧贫煤的条件下,采用下 5 台磨(A、B、C、D、E 磨)组合运行方式下的 NO<sub>x</sub> 排放浓度范围为 310 ~ 410 mg/m<sup>3</sup>,远低于日常采用上 5 台磨(B、C、D、E、F 磨)组合方式运行控制方式时的平均水平,且通过燃烧优化可实现较低的 NO<sub>x</sub> 排放

浓度目标;但是,此时锅炉的过、再热汽温均明显低于日常运行水平。当采用中间 4 台磨(B、C、D、E 磨)组合运行控制方式时(工况 9、10),也可实现与下 4 台磨组合运行方式(A-E 磨组合运行方式)时相当的较低 NO<sub>x</sub> 排放浓度(335 mg/m<sup>3</sup>,工况 9),在燃烧氧量控制较低时可达 305 mg/m<sup>3</sup>(工况 10),而且过、再热汽温都可接近于锅炉日常运行(上 5 台磨运行)时的平均水平。这是因为,与下 5 台运行相比,中间 4 台磨运行时虽然火焰中心上移,但还原区范围并没有明显变化,且燃烧集中而燃烧区域氧量相对低还可能导致主燃烧区的 NO<sub>x</sub> 生成量减少,所以 NO<sub>x</sub> 排放浓度也较低,但火焰中心的上移显然有利于维持较高的过、再热汽温。此外,与采用 A-E 磨组合运行方式下相比较,工况 9、工况 10 的锅炉效率也有所提高。这主要得益于燃烧集中,火焰温度相对较高,炉膛辐射放热显著加强,不但有利于维持过、再热汽温,而且也导致排烟温度的显著降低,从而提高了锅炉热效率。因此,在低负荷(700 MW)掺烧贫煤的条件下,推荐采用中间 4 台磨(B、C、D、E 磨)组合运行控制方式。

### 3.3 单烧烟煤的运行优化试验

#### 3.3.1 惯性工况试验

分别在 900 MW, 700 MW 两种机组负荷下,进行锅炉习惯性运行控制方式时的单烧烟煤试验(工况 13、工况 14),试验主要结果如表 5 所示。从表 5 可见,锅炉在习惯运行条件(其中磨组运行方式为上 5 层即 B、C、D、E、F 磨组合运行方式,工况 11)下单烧烟煤运行,锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度为 310 mg/m<sup>3</sup>,比掺烧贫煤时低近 50 mg/m<sup>3</sup>。从锅炉的效率来看,习惯运行条件下(工况 11)效率为 94.36%,与掺烧贫煤时(工况 1)几乎一致。

#### 3.3.2 燃烧调整试验结果

表5 单烧烟煤习惯性运行工况试验结果

Tab.5 Results under firing bituminous coal during usual operation and testing

工况号	负荷 /MW	主汽压 /MPa	A磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	B磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	C磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	D磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	E磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	F磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	炉膛氧量/%	SCR入口氧量/%	NO <sub>x</sub> / $(mg \cdot m^{-3})$	锅炉效率/%
11	900	24.4	—	68	78	76	75	66	2.30	3.14	310	94.36
14	700	19.1	—	41	56	61	62	53	2.29	3.09	305	94.31

分别在 900 MW, 700 MW 两种机组负荷下, 进行变磨煤机组合方式、变炉膛氧量、变 CCOFA 及 SOFA 风门开度等运行控制方式改变的锅炉单烧烟煤运行优化调整试验, 试验结果如表 6 所示。工况 12 试验结果表明, 通过降低燃烧运行氧量, 可进一步再降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度约 50 mg/m<sup>3</sup>。在机组负荷为 700 MW 负荷下, 即使采用上 5 台磨组合方式(即 B、C、D、E、F 磨组合运行方式)运行, 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度也可控制在 300 mg/m<sup>3</sup> 左右(工况 14—16), 处于相同负荷水平时日常习惯性运行方式下的下限水平, 而蒸汽参数则基本保持在额定值, 特别是再热汽温可达到日常习惯性运行方式下的上限处。

### 3.3.3 低 NO<sub>x</sub> 排放燃烧优化控制分析

表 5 中, 在机组负荷为 900 MW 下, 当降低运行氧量后(工况 12) 锅炉效率略升高至 94.52%, 这主要是因为烟气量减少导致排烟损失减少; 而下 5 台磨组合运行时锅炉效率则可以提高至 94.72%, 这是炉内燃烧区域降低最终导致锅炉排烟温度明显降低因而排烟损失小的结果。因此, 单烧烟煤条件下, 高负荷时推荐采用下 5 台磨组合运行方式, 不仅可显著降低锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放浓度, 还可实现更高的锅炉效率。

试验结果表明: 在机组负荷为 700 MW 下, 锅炉单烧烟煤采用下五磨组合运行方式(工况 13), NO<sub>x</sub> 排放浓度可降至 200 mg/m<sup>3</sup> 以下(183 mg/m<sup>3</sup>, 工况 13), 并且下 5 台磨组合运行方式对蒸汽参数的影响较小(见图 2), 锅炉效率则能提高至 94.72%。通过调整各磨的燃料量分配一定程度上还可实现较

低的 NO<sub>x</sub> 排放浓度(工况 16), 而锅炉效率与相同负荷水平下掺烧贫煤运行时基本一致。当采用中间 4 台磨(B、C、D、E 磨)运行时(工况 17), 实测锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度为 187 mg/m<sup>3</sup>。与上 5 台磨运行方式相比, 这显然是火焰中心下移、炉内还原区域显著扩大的结果, 而这种运行方式对蒸汽参数影响也很小。此外, 与掺烧贫煤时一样, 中间 4 台磨组合运行方式时锅炉效率也较高。因此, 在机组负荷为 700 MW 下, 采用中间 4 台磨(B、C、D、E 磨)运行方式是值得推荐的磨煤机组合运行方式。

### 3.4 掺烧贫煤试验与单烧烟煤试验比较分析

从表 2—5 可以看出, 在机组负荷为 900 MW 下, 该 1000 MW 锅炉单烧烟煤在习惯运行条件下(工况 11) NO<sub>x</sub> 排放浓度为 310 mg/m<sup>3</sup>, 锅炉效率为 94.44%。与相近条件下锅炉掺烧贫煤试验工况(工况 1)相比, 锅炉效率相近, 但 NO<sub>x</sub> 排放浓度低近 50 mg/m<sup>3</sup>。锅炉单烧烟煤试验工况 13, 采用下 5 台磨组合运行方式, NO<sub>x</sub> 排放浓度为 183 mg/m<sup>3</sup>; 而掺烧贫煤时工况 2 锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度为 246 mg/m<sup>3</sup>, 比单烧烟煤时高得多。工况 2 与工况 13 的主要差异是前者的燃烧氧量高近 0.5%, 这意味着在与工况 13 相同氧量水平下, 工况 2 对应的 NO<sub>x</sub> 排放浓度会有所降低。但根据工况 2 与工况 3 的比较来看, 在工况 2 基础上降低燃烧氧量 0.5% 可导致 NO<sub>x</sub> 排放降低约 40~50 mg/m<sup>3</sup>, 这与工况 13 相比 NO<sub>x</sub> 排放浓度仍然较高。因此, 在高负荷(900 MW)运行时, 在相同条件下掺烧贫煤时 NO<sub>x</sub> 排放浓度比单烧烟煤时高, 只是在下 5 台磨组合运行方式时二者的差异

表6 锅炉单烧烟煤运行优化调整试验结果

Tab.6 Results for optimizing the operations tests under firing bituminous coal

工况号	负荷 /MW	主汽压 /MPa	A磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	B磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	C磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	D磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	E磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	F磨煤量 / $(t \cdot h^{-1})$	炉膛氧量/%	SCR入口氧量/%	NO <sub>x</sub> / $(mg \cdot m^{-3})$	锅炉效率/%
11	900	24.4	—	68	78	76	75	66	2.30	3.14	310	94.36
12	900	24.1	—	68	78	76	75	66	1.91	2.86	262	94.52
13	900	23.5	63	72	82	78	79	—	1.83	2.60	183	94.72
14	700	19.1	—	41	56	61	62	63	2.29	3.09	305	94.31
15	700	18.7	—	55	60	61	62	47	2.19	3.40	308	94.26
16	700	18.8	—	60	60	60	57	47	2.44	3.26	297	94.28
17	700	19.0	—	70	70	70	66	—	2.33	3.41	187	94.82

相对较小。

对于机组负荷为 700 MW 时,单烧烟煤的工况 17 与掺烧贫煤的工况 10 燃烧运行条件相近,二者均采用中间 4 台磨运行,燃烧氧量水平接近。结果显示,虽然二者的锅炉效率一致,但掺烧贫煤时 NO<sub>x</sub> 排放浓度比单烧烟煤时高近 120 mg/m<sup>3</sup>。因此,在机组低负荷运行时,锅炉采用单烧烟煤运行对于控制低 NO<sub>x</sub> 排放具有明显的优势。

### 3.5 燃烧运行氧量及其对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响

燃烧运行氧量显著影响锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度,氧量越高一般生成 NO<sub>x</sub> 也越多<sup>[5-7]</sup>,试验过程中燃烧氧量调整时的结果充分体现出这一影响,因此运行氧量的合理控制十分重要<sup>[18-20]</sup>。

根据试验时 DCS 数据和锅炉日常运行数据,图 3 给出了在 SCR 入口处锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度随 SCR 入口烟气氧量变化情况。相同氧量时,掺烧贫煤时锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度比日常运行的平均值约低 100 mg/m<sup>3</sup>。一个重要的原因是,除工况 1 之外,试验都是在停上层 F 磨条件下进行的,这与日常磨煤机组合运行控制方式不同。停 F 磨时火焰中心的降低和炉内还原区的扩大是导致锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度降低的主要原因。另外,单烧烟煤试验时 NO<sub>x</sub> 排放浓度比掺烧贫煤时明显低,其中一个原因是试验过程中采用的燃烧氧量水平较低,但低负荷时相同氧量水平下单烧烟煤 NO<sub>x</sub> 排放浓度明显低,这显然是燃煤煤质差异导致的。

## 4 结论

基于机组 DCS 系统中历史运行数据分析,对某电厂 1000 MW 超超临界机组锅炉开展掺烧贫煤 NO<sub>x</sub> 排放的燃烧优化试验研究,得到以下结论:

(1) 试验结果与历史运行数据比较分析发现,运行氧量偏高是锅炉低负荷运行时 NO<sub>x</sub> 排放浓度偏高的主要原因之一。另外,适当降低氧量运行,将能降低锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度的同时,提高锅炉热效率,同时也能降低厂用电率。

(2) 在锅炉低负荷运行时,无论是单烧烟煤还是掺烧贫煤,采用中间 4 台磨(B、C、D、E 磨)运行的磨组运行方式代替习惯 5 台磨组合运行方式,均可实现较低的 NO<sub>x</sub> 排放浓度目标和较高的锅炉效率。

(3) 锅炉在采用合理磨组运行方式和运行氧量下,对于单烧烟煤,无论是在高负荷还是低负荷运行时,锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度均可能控制在 200 mg/m<sup>3</sup> 以下;对于掺烧贫煤,高负荷时可实现在 250 mg/m<sup>3</sup> 以下的 NO<sub>x</sub> 排放浓度水平,低负荷时锅炉 NO<sub>x</sub> 排放

浓度控制到 300 mg/m<sup>3</sup>,锅炉效率也较高。

(4) 在低负荷工况下,锅炉掺烧贫煤运行时,通过适当减少掺烧的贫煤量,能够达到进一步降低锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度的目的。

### 参考文献:

- [1] GAO X, ZHANG M. NO<sub>x</sub> emissions of an opposed wall-fired pulverized coal utility boiler [J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2010, 5(2): 447-453.
- [2] KIM W, LEE D J, PARK S W. Experimental study on optimization of over-fire air in modified combustion condition with selective catalytic reduction [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(4): 901-909.
- [3] DE A J, SJOBERG C E. The effect of coal quality on meeting the 1995 ozone season NO<sub>x</sub> cap at New York state electric & gas [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, 25(4): 341-352.
- [4] HILL S C, SMOOT L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4): 417-458.
- [5] 李鹏翔. 空气分级燃烧技术的原理及工程应用与分析 [J]. *锅炉技术*, 2017, 48(4): 45-50.  
LI Pengxiang. Principle and application of air stage combustion technology [J]. *Boiler Technology*, 2017, 48(4): 45-50.
- [6] 高小涛. 大型燃煤电站锅炉低 NO<sub>x</sub> 燃烧及其排放特性的研究 [R]. 南京: 东南大学, 2009, 9.  
GAO Xiaotao. Study on low NO<sub>x</sub> combustion and emission characteristics of large coal-fired power plant boiler [R]. Nanjing: Southeast University, 2009, 9.
- [7] 张世山, 陈振宇, 郑鹏, 等. 国电泰州电厂 2×1000 MW 二次再热机组 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 超低排放技术应用 [J]. *中国电力*, 2017, 50(6): 32-35.  
ZHANG Shishan, CHEN Zhenyu, ZHENG Peng, et al. Application of ultra-low emission technology of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> for 2×1000 MW two reheater unit of Guodian Taizhou power plant [J]. *China Electric Power*, 2017, 50(6): 32-35.
- [8] 邵建明, 曹慰, 周勇. 600 MW 四角切圆燃烧锅炉低氮燃烧改造技术优化 [J]. *锅炉技术*, 2014, 45(4): 45-48.  
SHAO Jianming, CAO Wei, ZHOU Yong. Low-NO<sub>x</sub> combustion technology optimization on 600 MW tangential firing boiler [J]. *Boiler Technology*, 2014, 45(4): 45-48.
- [9] 沈跃云, 高小涛. 1000 MW 超超临界锅炉 NO<sub>x</sub> 生成特性的数值模拟研究 [J]. *锅炉技术*, 2012, 42(3): 47-52.  
SHEN Yueyun, GAO Xiaotao. Numerical simulation of NO<sub>x</sub> generation characteristics of 1000 MW ultra supercritical boiler [J]. *Boiler Technology*, 2012, 42(3): 47-52.
- [10] 杨娇, 孙宝民. 600 MW 机组锅炉空气分级低 NO<sub>x</sub> 燃烧数值模拟 [J]. *热力发电*, 2014, 43(10): 79-84.  
YANG Jiao, SUN Baomin. Numerical simulation of low rank NO<sub>x</sub> combustion for 600 MW unit boiler [J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(10): 79-84.
- [11] 沈跃云, 高小涛. 燃煤电站锅炉运行过程中 NO<sub>x</sub> 排放的预

- 测方法[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(6):73-76.  
SHEN Yueyun, GAO Xiaotao. Prediction method of NO<sub>x</sub> emission during operation of coal-fired power plant boiler[J]. Jiangsu Electric Engineering, 2011, 30(6):73-76.
- [12] 蒋序东, 许金峰. 1000 MW 超超临界机组汽轮机低转速轴承烧瓦的分析及处理[J]. 浙江电力, 2016, 35(1):42-45.  
JIANG Xudong, XU Jinfeng. Analysis and treatment on bearing pad burning of steam turbine with low rotational speed of 1 000 MW ultra-supercritical[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(1):42-45.
- [13] KUROSE R, IKEDA M, MAKINO H, KIMOTO M, MIYAZAKI T. Pulverized coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals [J]. Fuel, 2004, 83: 1777-1785.
- [14] COELHO P J, CARVALHO M G. Mathematical modeling of NO formation in a power station boiler [J]. Combustion Science and Technology, 1995, 108:363-82.
- [15] 李捍华, 郑卫东, 梁海腾, 等. 1000 MW 火电机组外置蒸汽冷却器及控制保护逻辑[J]. 浙江电力, 2016, 35(1):46-49.  
LI Hanhua, ZHENG Weidong, LIANG Haiteng, et al. External steam cooler of 1000 MW thermal power units and its control and protection logic [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(1):46-49.
- [16] BEER J B. Low NO<sub>x</sub> burners for boilers, furnaces and gas turbines: drive towards lower bounds of NO<sub>x</sub> emission [J]. Combustion Science and Technology, 1996, 121(1/2):169-191.
- [17] AFONSO R, DUSATKO G C, POHL J N. Measurements of NO<sub>x</sub> emissions from coal boilers [J]. Combustion Science and Technology, 1993, 93:41-51.
- [18] 陈勤根, 茅建波, 应明良. 某 300 MW 机组锅炉低氮燃烧器改造后再热汽温偏差大原因分析及调整[J]. 浙江电力, 2016, 35(3):42-45.  
CHEN Qingen, MAO Jianbo, YING Mingliang. Cause analysis and adjustment of reheat steam temperature deviation after low NO<sub>x</sub> boiler burner retrofit of 300 MW unit [J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(3):42-45.
- [19] 高小涛. 江苏电力节能减排的技术途径[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1):65-68.  
GAO Xiaotao. Technical approaches for energy-saving and emission reduction of Jiangsu power[J]. Jiangsu Electric Engineering, 2015, 34(1):65-68.
- [20] 高小涛, 黄磊, 张恩先, 等. 600 MW 前后墙布置燃烧器锅炉 NO<sub>x</sub> 排放及其影响因素的试验研究[J]. 动力工程, 2009, 29(9):806-812.  
GAO Xiaotao, HUANG Lei, ZHANG Enxian, et al. Experimental research on NO<sub>x</sub> emissions and influencing factors of 600 MW burner boiler with front and back wall arrangement [J]. Power Engineering, 2009, 29(9):806-812.

作者简介:



高小涛

高小涛(1967—),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力节能减排技术、低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术等研究工作(E-mail:gaoxt@163.com);

盛昌栋(1967—),男,教授,博士生导师,研究方向为电站锅炉燃烧和运行性能。

## Combustion Optimization for Controlling NO<sub>x</sub> Emission from 1000 MW Ultra-supercritical Boiler Operated at Lean Coal Blending

GAO Xiaotao<sup>1</sup>, SHENG Changdong<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

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

**Abstract:** Large-scale pulverized coal-fired power plants in China are frequently operated at partial loads, where NO<sub>x</sub> emission from the furnace is generally high. The present work aimed at controlling NO<sub>x</sub> emissions from a 1000 MW ultra supercritical boiler at partial load operation through combustion optimization. In-situ tests were conducted to optimize the combustion through evaluating the impacts of varying major operation parameters on NO<sub>x</sub> emission and boiler efficiency and comparing testing results with historic operational data extracted from the unit digital control system. High combustion excess O<sub>2</sub> level and blending lean coal with bituminous coal were identified to be the major factors leading to high NO<sub>x</sub> emissions of usual operation particularly at low loads. The optimization successfully reduced NO<sub>x</sub> emissions from the furnace co-firing lean coal with bituminous coal at both high and low loads, significantly lower than the averages of usual operation. It demonstrated the effectiveness of combustion optimization in controlling NO<sub>x</sub> emissions for low load operation. Additionally, it was found that, for 700 MW load operation, applying the mode of mid four mills (B, C, D and E) in service to replace the often used mode of five mills in service achieved not only low NO<sub>x</sub> emissions but also good boiler performance.

**Key words:** 1000 MW; ultra-supercritical boiler; coal blending; NO<sub>x</sub> emission; combustion optimization

(编辑 钱悦)