

煤炭洁净燃烧

# 神华煤锅炉低氮燃烧特性研究

杨明<sup>1</sup>, 谷红伟<sup>1</sup>, 李晓伟<sup>1</sup>, 刘家利<sup>2</sup>

(1. 神华集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 神华煤极易着火、燃尽, 燃烧性能优良, 且煤中氮、硫含量低, 使神华煤在低氧和低氮结合的燃烧条件下, 保持了较高的燃尽性能和较一般烟煤偏低的  $\text{NO}_x$  生成量。神华煤的低硫特性保证了在贫氧(没有足够的氧气保证充分燃烧)条件下, 炉内  $\text{H}_2\text{S}$  含量不是太高, 没有明显的高温腐蚀倾向。采用低氮燃烧后, 燃烧器区燃烧强度降低, 缓解了炉内结渣, 部分锅炉屏区的结渣也有所缓解, 提高了具有严重结渣倾向的神华煤的掺烧比例。神华煤采用低氧燃烧和低氮燃烧相结合的技术, 保证了锅炉的燃烧经济性、安全性和低  $\text{NO}_x$  生成特性, 指标明显优于国内其他典型烟煤。

**关键词:** 神华煤; 低氮燃烧; 高温腐蚀

中图分类号: TM621.2; TD849 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2014)04-0068-05

## Combustion characteristics of Shenhua coal boiler under low $\text{NO}_x$ combustion

YANG Ming<sup>1</sup>, GU Hongwei<sup>1</sup>, LI Xiaowei<sup>1</sup>, LIU Jiali<sup>2</sup>

(1. Shenhua Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Shannxi 710032, China)

**Abstract:** The ignition and burn-out properties of Shenhua coal are very well, and its nitrogen and sulfur content is very low, which allows the Shenhua coal boiler use low oxygen and large-scale low  $\text{NO}_x$  combustion techniques to obtain high economic benefits and to make low  $\text{NO}_x$  emission. The low content of sulfur characteristic of Shenhua coal can make sure that the  $\text{H}_2\text{S}$  content is not high and there is no obvious high temperature corrosion tendencies in the boilers under hypoxic conditions. Under low  $\text{NO}_x$  combustion, the combustion intensity of the burners zone can be reduced, the slagging in the boiler can be alleviated, and the blending proportion of Shenhua coal is increased. Some boilers can use total Shenhua coal while they could not before. Using low oxygen technique combined with low  $\text{NO}_x$  combustion technology can make sure that the Shenhua coal boiler has better economy and security, and lower  $\text{NO}_x$  emission than other typical bitumite boilers. The research shows the advantages of Shenhua coal and also provide technology support for Shenhua coal boilers under low  $\text{NO}_x$  combustion in domestic.

**Key words:** Shenhua coal; low  $\text{NO}_x$  combustion; high temperature corrosion

## 0 引言

据统计, 中国大气污染物中  $\text{SO}_2$  的 90% 和  $\text{NO}_x$  的 60% 来自煤的燃烧。其中, 火电厂发电用煤占据了全国燃煤的 70%。电站锅炉普遍安装高效脱硫装置后,  $\text{NO}_x$  控制将是继脱硫之后的治理重点<sup>[1]</sup>。中国排放的  $\text{NO}_x$  中, 火力发电产生的  $\text{NO}_x$  所占比例逐年增加, 2002 年占 25.2%, 2004 年占 35% 左右, 2007 年占 36%<sup>[2]</sup>。2010 年 1 月, 国家环境保护部

发布了《火电厂氮氧化物防治技术政策》, 要求低氮燃烧是电站锅炉治理  $\text{NO}_x$  排放的首选技术, 对  $\text{NO}_x$  排放不达标的现役机组进行低氮燃烧系统改造。随着环保要求日趋提高, 低氮燃烧技术已越来越多的用于电厂锅炉, 低氮燃烧技术具有技术成熟、投资和运行费用少、 $\text{NO}_x$  减排效果明显等优点<sup>[3]</sup>。神华集团的神府东胜煤田(俗称“神华煤”)属世界八大煤田之一<sup>[4]</sup>, 神华煤储量达 600 亿 t, 神华集团 2013 年煤炭销售总量达 66261 万 t, 广泛应用在国内各大中

收稿日期: 2014-04-11; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.04.021

作者简介: 杨明(1962—), 男, 黑龙江鸡西人, 副总经理, 高级工程师, 从事煤炭生产和销售管理工作。E-mail: yangm@shenhua.cc

引用格式: 杨明, 谷红伟, 李晓伟, 等. 神华煤锅炉低氮燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(4): 68-72.

YANG Ming, GU Hongwei, LI Xiaowei et al. Combustion characteristics of Shenhua coal boiler under low  $\text{NO}_x$  combustion[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(4): 68-72.

型火电机组中,在低氮燃烧条件下,急需对低氮燃烧关键技术及低氮燃烧特性,包括燃尽风比例和低氮燃烧条件下的锅炉燃烧效率、 $\text{NO}_x$ 最低生成浓度、水冷壁腐蚀、炉膛结焦特性等进行深入研究。笔者以典型神华煤为研究对象,对神华煤锅炉的低氮燃烧特性进行研究,对于指导神华煤锅炉低氮燃烧系统设计和锅炉运行具有重要的现实意义。

## 1 空气深度分级技术

燃烧过程生成的  $\text{NO}_x$  主要有热力型、燃料型及快速型 3 种<sup>[5]</sup>。燃料型  $\text{NO}_x$  是指燃料中的有机氮化合物在燃烧过程中氧化生成的  $\text{NO}_x$ <sup>[6]</sup>,在煤粉锅炉中,燃料型  $\text{NO}_x$  占总生成量的 60%~80%,最高可达 90%,燃料型  $\text{NO}_x$  生成主要与煤中氮含量有关。目前低  $\text{NO}_x$  燃烧器加深度分级送风已成为燃煤电站锅炉炉内控制  $\text{NO}_x$  生成的最佳组合<sup>[7]</sup>。分级燃烧将燃烧过程分级,初期为贫氧,以贫氧气氛抑制  $\text{NO}_x$  生成以及对已生成的  $\text{NO}_x$  造成低氧的还原区。在保证较大的还原区后,引入后期空气,以便未燃尽的焦炭继续燃烧,使燃煤有较好的燃尽性能。空气分级程度及分级风喷口与主燃烧器区域的距离,决定了燃烧器区域的还原性气氛程度及煤粉在贫氧条件下的停留时间,从而决定了  $\text{NO}_x$  的生成量以及煤粉的燃尽性能。

采用低氮燃烧方式后,对锅炉燃烧影响最大的是:①燃烧器区为贫氧燃烧,对于难燃煤种,采用较低的过剩空气系数,将导致燃烧稳定性变差,甚至引起锅炉熄火,故该项技术一般适用于着火性能优良的煤种。②空气分级延迟了煤粉的燃烧,降低了煤粉的燃尽程度,需强化燃烧器喷口附近的初期燃烧及后期的分级风与烟气的混合程度。锅炉采用空气深度分级技术后,将导致飞灰含碳量增加,锅炉燃烧经济性下降<sup>[8]</sup>。因此在实施低氮改造时,将燃烧器整体下移,给后期燃尽保证足够的空间是目前常用的方法之一,但对于严重结渣煤种,可能导致冷灰斗区域的结渣加重以及大渣含碳量的升高。③采用低氮燃烧技术后,容易在炉内局部区域形成较为严重的还原性气氛,加重水冷壁结渣或高温腐蚀。对于

高硫煤,还将导致水冷壁区域的  $\text{H}_2\text{S}$  含量升高,从而增加高温腐蚀危险。④屏底和炉膛出口烟温乃至排烟温度可能升高,增加屏区结渣和沾污,同时可能引起减温水量增大、金属管壁超温等现象。

## 2 神华煤的煤质特性与低氮燃烧

影响  $\text{NO}_x$  生成浓度的主要因素包括燃煤本身的煤质特征、炉膛结构参数及低氮燃烧器的设计、运行参数(燃烧器区的过剩空气系数、炉膛出口过剩空气系数、煤粉细度、一次风率、配风方式、磨组合方式)等。锅炉设备确定后,对  $\text{NO}_x$  排放影响最大的主要是燃煤的煤质特点和运行参数。

### 2.1 神华煤的基本煤质特性

燃料型  $\text{NO}_x$  主要与燃料中的 N 含量有关。神华煤属于低硫、低氮煤,且煤中微量元素与有害元素含量较低,环保性能良好<sup>[9]</sup>。表 1 为国内典型烟煤的基本煤质特性。由表 1 可知,在热值基本接近的情况下,神华煤氮含量较低(煤中  $N_{ar}$  在 0.60%~0.75%,而其他烟煤多在 0.8%~1.2%),热值相对较高,即在同样的输入热量下,神华煤锅炉的入炉氮含量更低,使  $\text{NO}_x$  生成较低。神华煤的这一特点使锅炉无论在低氮改造前后都可以取得较其他煤种锅炉更低的  $\text{NO}_x$  生成浓度。表 2 列出了深圳妈湾电厂在低氮改造前后燃用神华煤和大同煤的  $\text{NO}_x$  生成浓度比较。在相同设备和运行条件下,神华煤的  $\text{NO}_x$  生成浓度均比大同煤低。台山电厂在低氮改造后燃用神华煤及其与石炭煤的混煤,低氮神华煤掺烧含氮量较高的石炭煤后, $\text{NO}_x$  生成浓度较单烧神华煤有所升高。

表 1 国内典型烟煤的基本煤质特性

项目	神华煤	大同	石炭	准格尔	淮南	平朔	锦界
$M_1/\%$	16.00	9.10	7.20	11.50	7.40	9.96	13.10
$A_{ar}/\%$	6.68	21.82	19.76	15.48	25.97	20.56	12.27
$V_{daf}/\%$	34.13	39.08	38.16	38.17	41.65	36.80	38.38
$w(N_{ar})/\%$	0.67	0.84	1.17	0.92	0.82	0.99	0.82
$w(O_{ar})/\%$	10.25	7.51	7.81	9.60	7.21	9.53	8.98
$w(S_{t,ar})/\%$	0.45	0.91	0.50	0.57	0.29	0.89	0.27
$Q_{net,ar}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	23.23	21.50	22.80	22.28	21.07	21.84	23.16

表 2 国内典型烟煤的  $\text{NO}_x$  生成量

项目	深圳妈湾电厂(改造前)		深圳妈湾电厂(改造后)		台山电厂	
	神华煤	大同煤	神华煤	大同煤	神华煤	神华和石炭质量比 8:2
$\text{NO}_x$ 质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	565	645.5	160	250	121.0	143.8

## 2.2 神华煤的燃烧性能与低氮燃烧

不同煤种的分级燃烧效果与煤的燃烧性能相关。为进一步掌握神华煤的燃烧性能,在西安热工研究院有限公司一维火焰炉上进行了国内典型烟煤的燃烧性能试验,表3给出了神华煤与国内其他燃烧性能较好的典型烟煤的着火、燃尽性能比较。由表3可知,神华煤的着火温度为540℃,低于灰分较高的大同、平朔、准格尔、兖州等烟煤,着火性能优良。同时神华煤具有优良的燃尽性能,一维火焰炉燃尽率达到99.72%。神华煤优良的着火和燃尽性能保证了其在采用深度分级燃烧技术时仍具有良好的燃烧稳定性和燃尽性能。

表3 国内典型烟煤的燃烧特性比较

项目	大同烟煤	平朔烟煤	准格尔烟煤	兖州烟煤	神华烟煤	石炭烟煤
煤粉气流着火温度 $T_f/^\circ\text{C}$	600	620	580	600	540	600
一维炉燃尽率 $B_p/\%$	98.88	98.13	98.83	98.67	99.72	98.52
结渣指数 $S_c$	0.272	0.105	0.089	0.415	1.048	0.123

## 2.3 神华煤锅炉的低氧燃烧与 $\text{NO}_x$ 生成

炉膛出口氧量对  $\text{NO}_x$  生成有明显影响,较低的运行氧量可有效降低  $\text{NO}_x$  的生成量。但对于一般煤种,特别是无烟煤等难燃尽煤种,需要较大的空气量来促进煤粉的充分燃尽,较低的运行氧量会导致飞灰可燃物上升,影响锅炉效率。而神华煤具有优异的燃烧特性,采用低氧燃烧时飞灰含碳量增加不多,由于运行氧量降低,排烟热损失降低,在保证低氮燃烧效果的同时锅炉热效率反而略有升高,从而获得较好的经济与环保效益<sup>[10]</sup>。

2005年11月国华台山电厂2号炉变氧量工况试验如图1所示。由图1可知,①神华煤属于燃烧性能优异的煤种,运行氧量对锅炉实际运行的飞灰与大渣可燃物影响较小。与高氧量运行工况相比,低氧量工况由于排烟热损失较小,锅炉热效率反而较高。②低氧燃烧明显减少了  $\text{NO}_x$  生成,与4.8%的高氧量工况相比较,2.8%的低氧量工况  $\text{NO}_x$  排放量明显降低,降幅达到了42.6%。可见,低氧燃烧技术在提高锅炉运行的经济性的同时,也体现了燃用神华煤的低  $\text{NO}_x$  排放特性。③锅炉燃用神华煤,采用低氮燃烧技术,推荐炉膛出口运行氧量控制在2.7%左右,对应的炉膛出口过量空气系数为1.15左右,较国内一般烟煤偏低,国内燃用大同、准格尔煤的锅炉实际运行时一般炉膛出口的过剩空气

系数为1.2左右。

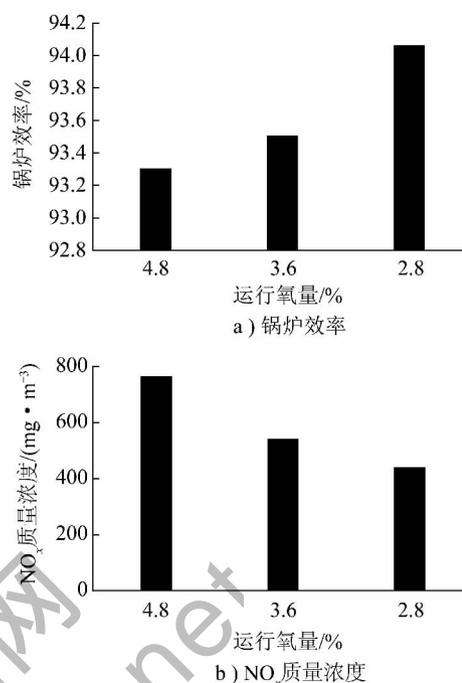


图1 台山2号炉运行氧量与锅炉效率、 $\text{NO}_x$ 生成量的关系(低氮燃烧改造前,仅有燃尽风(OFA))

## 2.4 神华煤锅炉的大尺寸分级燃烧与 $\text{NO}_x$ 生成

有关研究表明,热力型  $\text{NO}_x$  的生成浓度与  $\text{O}_2$  含量的平方成正比,因此低氮燃烧的核心运行参数控制之一就是燃烧器区的过剩空气系数。燃烧器区采用较小的过剩空气系数,能有效降低  $\text{NO}_x$  排放,但将出现燃烧不稳、飞灰含碳量增加以及高温腐蚀趋势增加等问题,由于低氮燃烧与强化燃烧相悖,因此有一个理论最佳燃烧器区过剩空气系数,此时能有效降低  $\text{NO}_x$  生成量,又能保证锅炉的燃烧稳定性和经济性。国内大多烟煤锅炉在低氮燃烧改造时将过剩空气系数控制在0.7~0.9,过剩空气系数的确定与煤质及燃烧特性相关。神华煤优良的燃烧特性和低硫特性,保证了神华煤在低氮燃烧条件下可以采取较一般烟煤更为偏低的燃烧器区过剩空气系数,仅为0.7~0.8,结合前面的低氧燃烧技术,不仅能使神华煤的  $\text{NO}_x$  生成远低于国内其他典型烟煤,还能保证燃烧稳定性和经济性,且不会出现严重的高温腐蚀问题。

2013年台山电厂进行了低氮燃烧改造,采用了上海锅炉厂的复合空气分级低  $\text{NO}_x$  燃烧技术。台山电厂2号炉全烧神华煤在600 MW 负荷实测 SCR(选择性催化还原法)系统入口烟气中  $\text{NO}_x$  质量浓度为121.0  $\text{mg}/\text{m}^3$ (标准状态下,下同),基本达到目

前烟煤锅炉采用低氮燃烧的极限值。这与其采用大尺度的分级风有关,燃烧器区的过剩空气系数在 0.72 左右<sup>[11]</sup>。

## 2.5 神华煤锅炉的高温腐蚀性能

当锅炉采用低氮燃烧方式时,燃烧器区过剩空气系数和炉膛出口过剩空气系数是影响  $\text{NO}_x$  排放的重要因素,即燃烧器区和炉膛出口氧量越小时, $\text{NO}_x$  生成降低的效果越好。

需要注意的是低  $\text{NO}_x$  燃烧技术所采取的低氧与分级燃烧方式将使主燃烧器区处于贫氧气氛,水冷壁面氧量降低造成还原性气氛,易导致高温腐蚀。在局部还原性气氛条件下,煤中硫会生成少量  $\text{H}_2\text{S}$ 。当燃煤硫含量较高时, $\text{H}_2\text{S}$  含量也较高。 $\text{H}_2\text{S}$  是导致受热面高温腐蚀的主要因素之一。 $\text{H}_2\text{S}$  主要存在于较强的还原性气氛环境,与燃烧条件以及煤的含硫量有关。一般煤的  $S_{1, \text{air}}$  在 1.0% 以上即存在腐蚀的趋势,而  $S_{1, \text{air}}$  超过 1.5%,锅炉投运后 1~2 a 则会出现较严重腐蚀,前述为燃烧器区并非贫氧运行的情况,而贫氧运行则腐蚀加剧。

神华煤为低~极低硫煤,对水冷壁高温腐蚀小。图 2 为台山电厂 2 号炉全烧神华煤时的  $\text{CO}$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  测试结果,可见燃用  $S_{1, \text{air}}$  小于 0.55% 神华煤时,在烟气中  $\text{O}_2$  体积分数小于 0.1%、 $\text{CO}$  体积分数为 3.87% 的强还原气氛中,炉内实测  $\text{H}_2\text{S}$  体积分数为 0.01%~0.016%,仅少数测点  $\text{H}_2\text{S}$  体积分数超过了 0.03%,水冷壁高温腐蚀轻微。采用对冲燃烧方式的国华盘山 500 MW 锅炉低氮改造后,贴壁气氛中的  $\text{H}_2\text{S}$  体积分数不到 0.01%,腐蚀较轻。台山电厂燃烧大尺度低氮燃烧方式,炉内并不存在严重的高温腐蚀倾向。国华太仓电厂 600 MW 超临界锅炉燃用神华煤,采用低氮燃烧方式,主燃烧器区过剩空气系数小于 1.0,水冷壁有部分区域  $\text{O}_2$  体积分数小于 0.1%,但 2005 年底投运至今未出现高温腐蚀<sup>[12]</sup>。国内其他燃用神华煤锅炉也未见出现严重高温腐蚀的报道。因此对于神华煤,可采用较低的燃烧器区过剩空气系数,一般推荐燃烧器区过剩空气系数在 0.70~0.80 较为合适,以有效降低  $\text{NO}_x$  排放。

## 2.6 神华煤锅炉的结渣性能

神华煤具有灰熔融性较低的特点,容易引起炉膛水冷壁结渣,影响锅炉安全稳定运行。在低氮燃烧条件下,由于主燃烧器区过量空气系数较低,使得煤粉燃烧速度受到抑制,燃烧器区炉温水平下降,煤粉气流处于低温燃烧状态,可减轻炉膛结渣,而神华

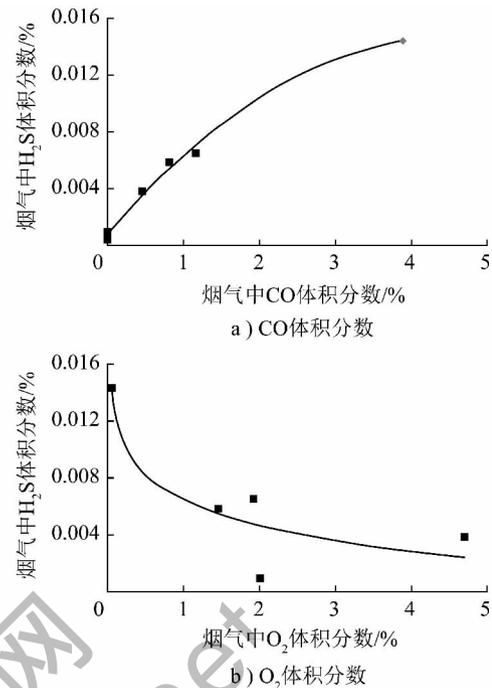


图 2 台山 600 MW 机组神华煤烟气成分与  $\text{H}_2\text{S}$  体积分数的关系

煤的短渣特性,进一步缓解了炉膛结渣。低氮改造的国华台山、宁海、陈家港电厂的运行经验表明,在低氮燃烧条件下,锅炉尖峰温度水平下降,炉膛结渣减轻,锅炉燃用神华煤的比例从 70%~80% 提高至 100%,克服了神华煤锅炉结渣的弊端,锅炉对神华煤的适应能力增强。

## 2.7 汽水系统参数

神华煤锅炉低氮改造后,在满负荷时,主蒸汽参数正常,主要是再热器减温水量增加,对锅炉燃烧经济性有一定影响。在中低负荷时有时存在再热汽温偏低现象,可通过调整燃烧器摆角来解决,对锅炉正常运行影响不大。

## 2.8 现有神华煤锅炉的低氮性能

神华煤优良的燃烧性能和低氮、低硫性能,使得神华煤锅炉在低氮燃烧技术的应用上具有较大优势,将低氧燃烧与大尺度分级燃烧技术相结合,神华煤锅炉可以较同类型的烟煤锅炉取得更好的低氮燃烧性能。切圆燃烧锅炉方面,燃用神华煤的台山电厂 600 MW 锅炉四角切圆采用上海锅炉厂的低氮燃烧技术,可将燃尽风率提高至 40%,分两段布置,而且最上层燃烧器至分级燃尽风的距离也有所提高,使得空气分级产生的低氮效果大为提高,满负荷时  $\text{NO}_x$  质量浓度可低至  $121.0 \text{ mg/m}^3$ ,降幅近 70%;国华太仓 600 MW 锅炉改造后, $\text{NO}_x$  质量浓度可低至

150 mg/m<sup>3</sup>。在墙式对冲燃烧方式锅炉低氮燃烧改造过程中,也存在类似情况,如国华盘山 500 MW、中电投钦州 600 MW 锅炉采用低氮燃烧后 NO<sub>x</sub>生成量分别在 200~300 mg/m<sup>3</sup>和 200 mg/m<sup>3</sup>左右,燃用其他烟煤如大同、靖远、劣烟煤的类似锅炉 NO<sub>x</sub>质量

浓度在 300~350 mg/m<sup>3</sup>。表 4 为目前国内典型烟煤锅炉低氮改造后的 NO<sub>x</sub>排放及锅炉效率、炉内结渣对比。由表 4 可知,神华煤的低氮效果明显较国内其他烟煤好,能达到更低 NO<sub>x</sub>排放量,且锅炉效率保持较高值。

表 4 国内典型烟煤的锅炉低氮改造后的效果对比

机组名称	炉号	容量/MW	燃用煤种	低氮燃烧改造后 NO <sub>x</sub> 质量浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )(φ(O <sub>2</sub> )=6%)	炉内及屏区 结渣状况	锅炉效率/%
大同	1	200	大同煤	388	不结渣	92.30
唐山	7	300	劣烟煤	220~240	不结渣	92.00
靖远	4	200	靖远煤	320	缓解,能全烧	93.40
妈湾	3	300	神华煤	160	缓解,能全烧	93.95
			大友煤	250	不结渣	93.47
台山	2	600	神华煤	120	缓解,能全烧	94.00
国华太仓	7、8	600	神华煤	150	燃烧器区缓解屏区略有加重,能全烧	93.80

### 3 结 论

1) 神华煤为优质动力用煤,煤中氮含量、硫含量低,燃烧性能优良,可以大幅度减少燃料氮的生成;与其他煤种锅炉相比,神华煤锅炉可以采用更低氧量、更大尺度的空气分级条件运行,不仅能够取得更低的低氮效果,还能保证锅炉效率,又不至于加重水冷壁高温腐蚀,可有效规避低氮燃烧带来的负面影响。

2) 在低氮燃烧条件下,燃烧器区的燃烧强度降低,温度水平下降,对缓解炉内结渣有利,锅炉结渣问题大大缓解,原主要燃用神华煤的锅炉在低氮改造后神华煤比例均大幅提高,甚至达到 100%。

3) 神华煤在低氮燃烧条件下具有较好的低氮效果,同时也能保证运行的经济性与安全性,适合大力推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 李绍辉. 氮氧化物排放控制的探讨[J]. 华北电力技术, 2007(2): 1-2.
- [2] 朱法华, 刘大钧, 王 圣, 等. 火电厂 NO<sub>x</sub> 排放及控制对策审视[J]. 环境保护, 2009(21): 40-41.
- [3] 刘慧亮, 张 晶, 郝利霞, 等. 我国燃煤电厂氮氧化物控制现状及建议[J]. 内蒙古环境科学, 2009, 21(5): 67-68.
- [4] 韩建国. 神华煤炭[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] 吴碧君, 刘晓勤. 燃烧过程 NO<sub>x</sub> 的控制技术与原理[J]. 电力环境保护, 2004, 20(2): 9-12.
- [6] 曾培强, 郑伟林, 刘道鹏, 等. 采用低氧燃烧促进锅炉环保经济运行[J]. 节能与环保, 2010(6): 33-36.

- [7] 徐程宏, 温智勇. 燃煤锅炉进行空气分级低 NO<sub>x</sub> 燃烧改造的有关问题探讨[J]. 广东电力, 2010, 23(8): 34-39.
- [8] 杨光军, 刘吉臻, 谭 文, 等. 燃煤电厂控制氮氧化物的原则性方法及燃烧优化技术[J]. 华东电力, 2007, 35(2): 15-18.
- [9] 陈怀珍, 刘家利, 相大光, 等. 神华动力用煤燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(6): 53-56.
- [10] 陈振龙. 神华煤低氧燃烧效果及应注意的问题[J]. 热力发电, 2011, 40(1): 55-57.
- [11] 蒙 毅. 广东国华粤电台山发电厂 2 号炉低氮燃烧改造后运行性能验收试验报告[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2012: 14-21.
- [12] 薛 宁. 国华太仓发电有限公司 No. 7 锅炉结焦问题现场试验研究[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2007: 19-30.

#### (上接第 50 页)

- [8] 余楚勇, 盛建文. 高硫气肥煤替代煤炼焦的研究和应用[J]. 煤化工, 2013(1): 61-57.
- [9] 刘彬彬, 吴贤熙. 煤岩学在焦化行业中的应用概述[J]. 冶金丛刊, 2009(6): 45-47.
- [10] 齐 炜. 炼焦过程中硫元素迁移规律研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 34-36.
- [11] 薛改凤, 项 茹, 陈 鹏, 等. 贫瘦煤替代瘦煤制备优质焦炭性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(4): 418-422.
- [12] 王福先, 刘永新, 梁英华. 焦炭热性质的影响因素分析[J]. 煤化工, 2007, 129(2): 16-19.
- [13] 陈洪博, 白向飞, 王大力, 等. 焦炭光学组织与煤、焦质量关系研究[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(6): 78-81.
- [14] 姚昭章, 郑明东. 炼焦学[M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 72.
- [15] 周师庸. 应用煤岩学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 300-303.