

# 高燃料氮烟煤空气分级燃烧氮氧化物排放特性实验研究

杨建成<sup>1</sup> 吴江全<sup>1</sup> 胡亚民<sup>2</sup> 孙绍增<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 燃煤污染物减排国家工程实验室 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国电力投资集团公司 北京 100032)

**摘要:** 针对两种燃料氮含量较高的烟煤空气分级燃烧情况下氮氧化物排放及燃尽情况进行了实验研究。研究表明, 不分级燃烧情况下燃料氮含量越高的煤, 氮氧化物排放越高; 其空气分级燃烧情况下燃料氮向燃料型  $\text{NO}_x$  的转化率越低。空气分级情况下, 还原区停留时间为 0.8 - 1.0 s 及化学当量比为 0.75 的时候, 大同烟煤及俄罗斯烟煤的氮氧化物排放均较低。同时, 空气分级燃烧条件下俄罗斯烟煤的燃尽情况与大同烟煤类似, 燃尽效果较好。

**关键词:** 燃料氮; 氮氧化物; 煤粉燃烧; 空气分级; 燃尽

中图分类号: TK223 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.028

## 引言

燃煤锅炉煤粉燃烧过程中生成的氮氧化物主要由含氮的有机化合物热裂解产生的  $\text{N}$ 、 $\text{CN}$ 、 $\text{HCN}$  及  $\text{NH}_3$  等中间产物基团燃烧再氧化而成的燃料型  $\text{NO}_x$  为主要来源, 占到总量的约 80%, 其含量与燃料氮的含量密切相关。燃料中  $\text{N}$  的含量因燃料的种类和产地而异, 其含量在 0.2% - 3.4% 之间<sup>[1]</sup>, 有研究表明, 中国 90% 的煤的干燥基燃料氮含量范围为 0.52% - 1.41%<sup>[2]</sup>。若燃料氮全部转化为  $\text{NO}_x$ , 其含量最高可能达到 7 000  $\text{mg}/\text{m}^3$  以上。因此, 控制燃料型  $\text{NO}_x$  的排放就能有效控制燃煤锅炉  $\text{NO}_x$  的排放。

燃煤发电空气分级技术是目前比较普遍的低  $\text{NO}_x$  燃烧技术。文献 [3 - 8] 已经研究了空气分级对氮氧化物减排的影响。影响空气分级技术氮氧化物减排的主要因素有燃料氮含量、孔隙结构、还原区化学当量比及停留时间等。在空气分级情况下, 随着燃料氮含量的增加, 氮氧化物的还原率会增加。同时, 氮氧化物还原率还会随着还原区停留时间的延长及化学当量比的降低而增加。在不分级的情况

下, 燃料氮的含量越高, 燃料型  $\text{NO}_x$  的排放越高。燃料氮的含量对空气分级氮氧化物的减排至关重要, 而专门针对燃料氮含量较高煤种的分级燃烧对比研究不多, 因此本研究选取了两种燃料氮含量均较高的煤种, 旨在探讨高含氮量的烟煤空气分级情况下, 不同的还原区化学当量比及停留时间对氮氧化物排放及燃尽的影响。其结果对高含氮量煤种的低氮燃烧具有重要的意义。

## 1 实验概况

该实验在携带流反应器上进行<sup>[7]</sup>, 实验系统如图 1 所示。

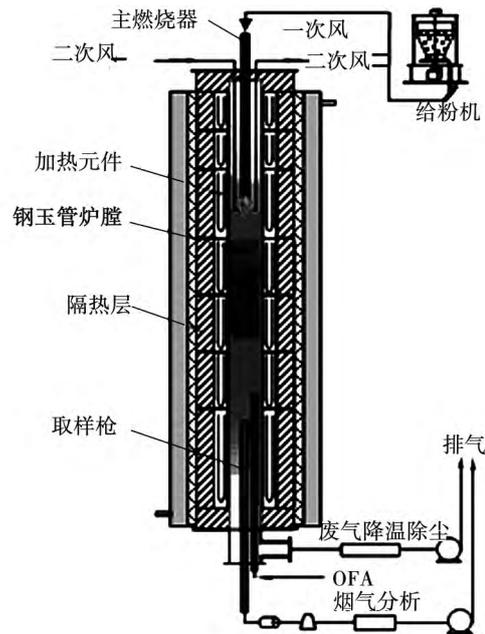


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

收稿日期: 2014-07-23; 修订日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076039); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51121004)

作者简介: 杨建成(1981-), 男, 四川自贡人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

炉膛内径 175 mm ,加热区长度 2.7 m ,加热部分共分为 7 段 ,采用硅钼棒加热 ,最高工作温度可达到 1 600 ℃。在该实验中 ,将炉膛分为两个温度区域 ,还原区 1 300 ℃ 燃尽区 1 250 ℃。实验过程模拟实际锅炉燃烧过程沿垂直方向上的一维工况 ,研究如何通过炉内空气分级对含较高元素 N 含量煤

种降低 NO<sub>x</sub> 排放。选取具有较高燃料氮含量的典型动力用煤中国大同烟煤( DT) 及一种俄罗斯烟煤( Ru) ,其中俄罗斯烟煤的干燥基燃料氮含量达到了 2.01% ,远高于中国的平均水平<sup>[2]</sup>。煤质特性及工况如表 1 - 表 3 所示。

表 1 燃煤特性( ar ,wt%)

Tab.1 Characteristics of coal burned ( ar ,wt%)

煤种	C	H	O	N	N <sub>d</sub>	S	M	A	V <sub>daf</sub>	FC	Q <sub>net.ar</sub> /kJ·kg <sup>-1</sup>
Ru	61.9	4.17	10.36	1.79	2.01	0.31	11	10.48	38.61	48.21	24380
DT	63.24	4.05	10.45	1.16	1.28	0.43	9.21	11.47	31.53	54.31	26230

表 2 煤粉孔隙结构( 压汞法)

Tab.2 Structure of pores in coal( mercury intrusion porosimetry)

煤种	孔隙总表面积 S/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	孔隙率/%	汞浸入总体积 V/mL·g <sup>-1</sup>
Ru	5.69	42.24	0.58
DT	3.68	42.68	0.54

表 3 实验工况参数

Tab.3 Parameters under the operating conditions of the test

煤种	还原区化学当量比 λ <sub>1</sub>	还原区停留时间 τ <sub>1</sub> /s	炉膛壁面温度 t/℃
Ru	0.65 0.75 0.85 0.95	0.60 0.80 1.00 1.50	还原区:1300 燃尽区:1250
DT	0.65 0.75 0.85 0.95	0.60 0.80 1.00 1.50	还原区:1300 燃尽区:1250

## 2 实验结果及分析

### 2.1 不分级煤粉燃烧情况分析

从图 2 可知 ,在不分级情况之下 ,俄罗斯烟煤 NO<sub>x</sub> 排放量高于大同烟煤。在煤粉喷入炉膛 1.0 s 后 ,NO<sub>x</sub> 排放浓度达到最高值 ,并随着燃烧的进行逐渐降低。这是因为在燃烧初期大量的氧的存在促使煤粉中的 N 元素与空气中的 O<sub>2</sub> 发生反应:



同时 ,在整个燃烧过程中 ,始终是氧化性气氛 ,煤粉燃烧过程中生成的 HCN 及 NH<sub>3</sub> 等物质在氧气充足的情况下 ,均被氧化成 NO<sub>x</sub> ,从而在燃烧初期生成大量的 NO<sub>x</sub>。在燃烧初期 ,燃料型 NO<sub>x</sub> 的浓度是随着燃料氮的增加而增加的<sup>[9]</sup> ,特别是在煤中含有较高的挥发分 N 的情况下。煤质分析表明 ,俄罗斯烟煤比大同烟煤具有更高的燃料氮 ,在不分级燃烧的情况下 NO<sub>x</sub> 排放浓度大于大同烟煤。

燃料氮的转化率计算式<sup>[10]</sup>:

$$\xi = \frac{10^{-2} \times NO_{x\text{测量}} \times V_y / 46}{(N_{ad} / 14) \times (15 / (21 - O_{2\text{实测}}))} \tag{2}$$

式中: ξ—燃料氮转化率 %; NO<sub>x测量</sub>—实测氮氧化物浓度 ,mg/m<sup>3</sup> ; V<sub>y</sub>—烟气流 ,m<sup>3</sup>/kg ; N<sub>ad</sub>—燃料氮空气干燥基含量 %; O<sub>2实测</sub>—当地实测氧气浓度 %。

C、H、N 元素消耗率计算式为<sup>[11]</sup>:

$$\eta_k = [1 - k_1 A_0 / k_0 A_1] \times 100\% \tag{3}$$

式中: η<sub>k</sub>—k 元素( k = C ,H ,N) 的消耗率 %; k<sub>0</sub> 和 k<sub>1</sub>—元素 k 分别在原煤和灰样品中的质量分数 %; A<sub>0</sub> 和 A<sub>1</sub>—原煤以及灰样品中的灰分含量 %。

从图 2 可知 ,俄罗斯烟煤的 NO<sub>x</sub> 排放量始终大于大同烟煤 ,其燃料 N 转化率却小于大同烟煤。

从图 3 可知 ,不分级情况下 3 种元素在反应初期消耗率变化较大 ,当反应时间大于 1.5 s 之后 ,消耗率的变化趋于平缓。俄罗斯烟煤的 N 元素随反应时间的消耗率大于大同烟煤。同时 N、C 两种元素的消耗情况接近 ,H 元素的消耗快于 N、C 两种元素。

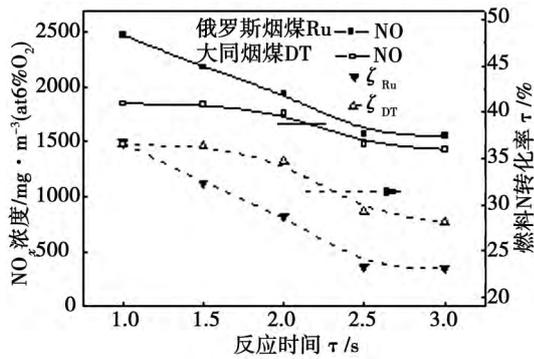


图 2 不分级情况下反应时间对 NO<sub>x</sub> 排放及燃料氮转化的影响

Fig. 2 The influence of the reaction time on NO<sub>x</sub> emissions and fuel-nitrogen conversion under the condition of having no stage division

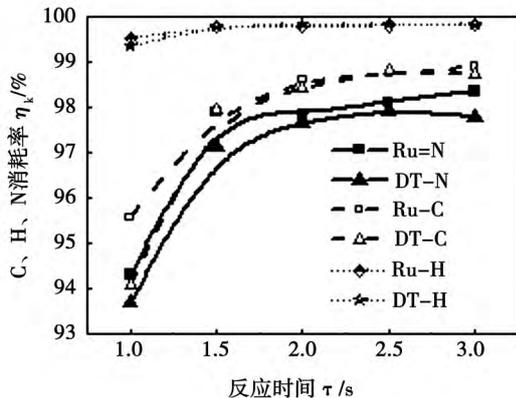


图 3 不分级情况下 N、C、H 释放情况分析

Fig. 3 Analysis of the nitrogen, carbon and hydrogen release under the condition of having no stage division

## 2.2 空气分级 NO<sub>x</sub> 排放试验研究结果与分析

### 2.2.1 还原区停留时间对 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响

从图 4 可以看出,大同烟煤燃料氮转化率远大于俄罗斯烟煤。一方面,俄罗斯烟煤比大同烟煤具有更高的挥发分含量及更高的燃料氮含量,在分级燃烧过程中还原区会生成更多的含 N 型还原性中间产物与 NO<sub>x</sub> 的均相反应更剧烈,文献[12]也验证了这一规律。另一方面,对原煤孔隙结构进行定性分析可知,俄罗斯烟煤具有更发达的孔隙结构,也利于煤焦对 NO<sub>x</sub> 的还原。根据煤的孔隙特性数据,可通过简单类比的方法进行分析。假设煤粉的孔结构均为圆柱孔,两种煤的圆柱孔相似,即  $r/R = h/H$ , 则

可采用式(4)计算两种煤孔结构的对比情况:

$$x = (v/V) / (s/S) \tag{4}$$

$$y = (s/S)^3 / (v/V)^2 \tag{5}$$

式中:  $r, R$ —俄罗斯烟煤及大同烟煤的圆柱孔内径, mm;  $h, H$ —俄罗斯烟煤及大同煤的圆柱孔高度,  $\mu\text{m}$ ; 俄罗斯烟煤的样品孔数为  $n$ , 大同烟煤的样品孔数为  $N$ ;  $v, V$ —俄罗斯烟煤及大同烟煤的孔容积, mL/g;  $s, S$ —俄罗斯烟煤及大同烟煤的孔比表面积,  $\text{m}^2/\text{g}$ ;  $x$ —俄罗斯烟煤与大同烟煤的孔径比  $r/R$ ;  $y$ —俄罗斯烟煤与大同烟煤的孔数比  $n/N$ 。

通过计算可知,  $x = 0.7$ ,  $y = 3.2$ , 即俄罗斯煤样孔数是大同煤样孔数的 3.2 倍; 俄罗斯煤样孔径是大同煤样孔径的 0.7 倍。

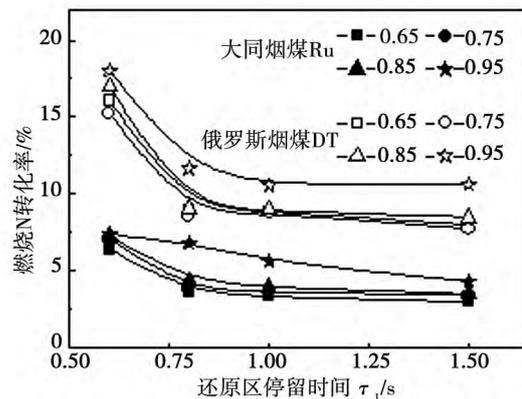


图 4 还原区停留时间对燃料氮转化率的影响

Fig. 4 Influence of the residence time in the reduction zone on the fuel-nitrogen conversion rate

煤粉燃烧过程中的氮氧化物还原率计算式为<sup>[11]</sup>:

$$\eta = 100(1 - [\text{NO}_{\text{out}}] / [\text{NO}_{\text{un-staged}}]) \tag{6}$$

式中:  $\eta$ —氮氧化物的还原率, %;  $[\text{NO}_{\text{out}}]$  和  $[\text{NO}_{\text{un-staged}}]$ —炉膛出口空气分级以及不分级情况下的氮氧化物排放量,  $\text{mg}/\text{m}^3(6\% \text{O}_2)$ 。

从图 5 可知,大同烟煤空气分级燃烧还原区停留时间为 0.6 s 时,氮氧化物排量明显高于其它停留时间的值,其还原率约为 20%;在还原区停留时间大于等于 0.8 s 之后,其还原率才约为 60%,并随着停留时间的继续延长,最终还原率约 70%。而俄罗斯烟煤在还原区停留时间大于等于 0.6 s 时,其还原率达到 70%,在停留时间等于 0.8 s 的时候升至约 85%。继续增加还原区停留时间对 NO<sub>x</sub> 排放的影响已经不明显。这表明,空气分级情况下俄罗斯

烟煤氮氧化物还原效果好于大同烟煤,且在更短的停留时间比大同烟煤具有更高的氮氧化物还原率。

这是因为,在煤粉分级燃烧过程中,随着还原区停留时间的延长,还原区内生成的大量气态还原性物质(HCN、NH<sub>3</sub>、CO等)与NO<sub>x</sub>之间的均相化学反应得以充分进行;另一方面,因为焦炭与NO之间的异相化学反应所需要的时间远比NO与气态还原性物质之间的均相化学反应更长,所以还原区停留时间延长,促进了焦炭与NO之间的异相化学反应,使得更多的NO得以被还原。但是,还原区停留时间的长短也是有一个优化值。从图中可以看出,还原区最佳停留时间为0.8-1.0s,这个时间范围对NO的还原已经足够,继续增加还原区停留时间对降低NO<sub>x</sub>浓度的意义不大,反而还会徒然增加炉膛容积。

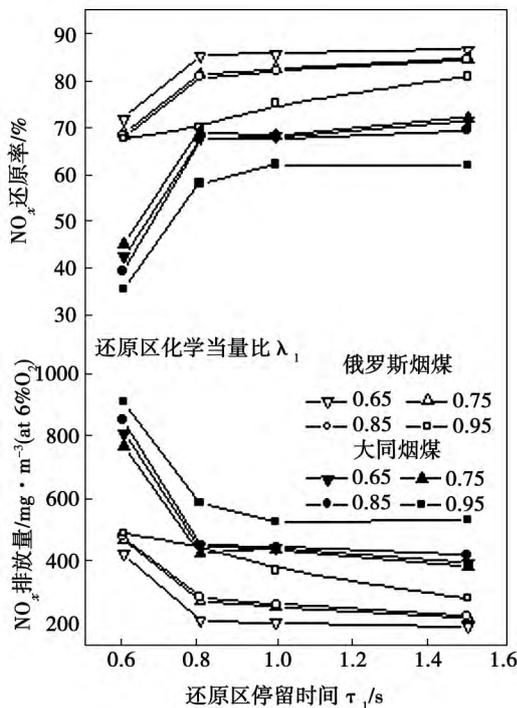


图5 还原区停留时间对NO<sub>x</sub>排放的影响

Fig. 5 Influence of the residence time in the reduction zone on the NO<sub>x</sub> emissions

### 2.2.2 还原区化学当量比对NO<sub>x</sub>排放的影响

在保持输入热功率一定的情况下,还原区内的化学当量比降低,NO<sub>x</sub>的生成量降低,如图6所示,空气分级燃烧时,随着化学当量比的增加,氮氧化物排放量逐渐增加。采用俄罗斯烟煤空气分级燃烧时,当还原区化学当量比大于等于0.65之后,规律

与采用大同烟煤空气分级燃烧基本相同,当化学当量比为0.75的时候,NO<sub>x</sub>的生成量比化学当量比为正常值(λ=1.15)时降低约80%。采用俄罗斯烟煤分级燃烧氮氧化物排放低于大同烟煤,这是因为俄罗斯烟煤具有更高的N含量及挥发分含量,随着还原区化学当量比的降低,挥发分中的含N物质析出后不能快速的被氧化成大量的NO<sub>x</sub>,在还原区内生成相对更多的利于氮氧化物还原的中间物质,从而在还原区出口容易得到更低的NO<sub>x</sub>生成量,在燃尽区出口也就能获得更低的氮氧化物排放。燃料氮转化率与还原区化学当量比有关,化学当量比越低,转化率越低<sup>[10]</sup>。

### 2.2.3 煤质对NO<sub>x</sub>排放的影响

俄罗斯烟煤、大同烟煤还原区停留时间分别为0.6及0.8s时,不同工况尾部氮氧化物排放情况对比如图6所示。

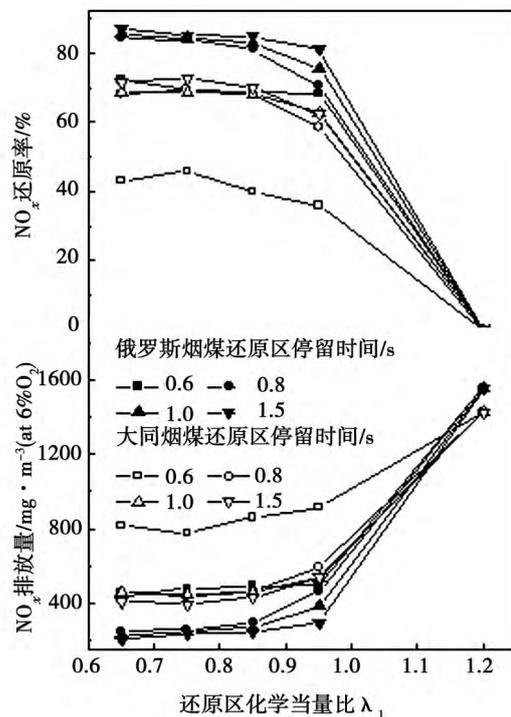


图6 还原区化学当量比对NO<sub>x</sub>排放的影响

Fig. 6 Influence of the chemical equivalent ratio in the reduction zone on the NO<sub>x</sub> emissions

可以看出,在不分级的时候,氮氧化物的排放均是最高的,而随着分级的进一步深入,氮氧化物排放逐渐降低,当还原区化学当量比降至0.75之后,氮氧化物排放基本稳定,进一步降低还原区化学当量

比对氮氧化物的排放影响已经不太明显。在还原区化学当量比小于 1 的情况下,俄罗斯烟煤由于本身具有更高的挥发分含量,其分级燃烧后的  $NO_x$  排放值略低于大同烟煤。在分级燃烧过程中,挥发分含量以及燃料氮的含量与氮氧化物的还原效果成正比,即挥发分含量越高以及燃料氮越高,在分级燃烧过程中就越容易获得较低的氮氧化物排放浓度。

图 7(a) 及图 7(b) 为分级燃烧过程中,不同还原区化学当量比情况下 N 元素消耗规律。

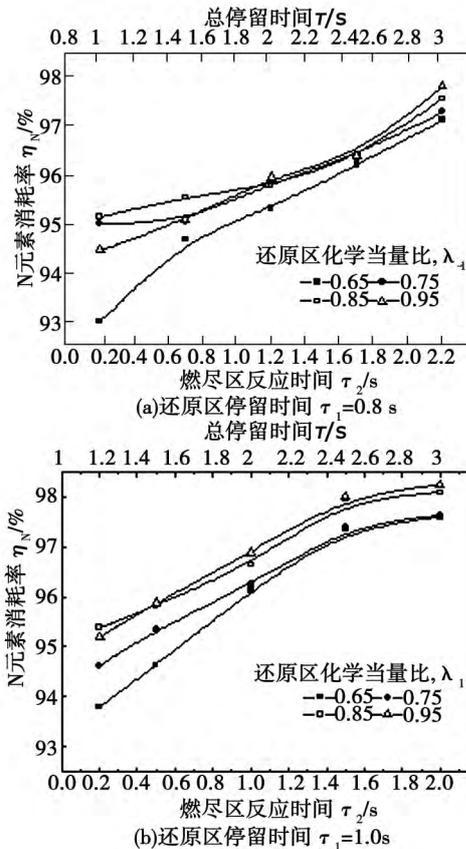


图 7 俄罗斯烟煤分级燃烧 N 元素消耗规律  
Fig. 7 Law governing the nitrogen element consumption during a staged combustion of Russia-originated bituminous coal

随着燃尽区反应时间的增加,N 元素的消耗率增加。在还原区停留时间较长的情况,即还原区停留时间等于 1.0 s 时,此时当燃尽区反应时间小于等于 1.0 s,N 元素消耗比较迅速,当燃尽区反应时间大于 1.5 s 之后,N 元素消耗率趋于平稳。在还原区停留时间较短的情况,即还原区停留时间为 0.8 s 时,N 元素消耗率整体较慢,需要更长的时间才能实现稳定,这是因为还原区停留时间过短,煤粉

在还原区的挥发析出及焦炭的燃烧均没有充分进行的情况下燃尽风就进入了,燃烧滞后。从图 7(a) 及图 7(b) 还可以看出,燃尽区 N 元素的消耗率与化学当量比也有一定关系,整体上看,还原区化学当量比越高,进入燃尽区后,N 元素消耗率越大。这是因为随着还原区化学当量比的增加,还原性氛围变弱,进入到燃尽区的剩余焦炭变少,残留在焦炭中的 N 也就更少,更多的 N 释放出来的缘故<sup>[13]</sup>。当还原区化学当量比为 0.95,在燃尽区初始阶段( $\tau_2 \leq 0.7$  s)时,元素 N 的释放率呈现出不同的规律。这可能与燃尽区初期燃尽风加入后,由于还原区化学当量比较高,因此补充进入的燃尽风量相对较少,从而进入燃尽区的残留焦炭 N 的释放延迟导致。

2.2.4 分级燃烧对燃尽情况的影响

在分级燃烧情况下,要综合考虑  $NO_x$  的排放与煤粉的燃尽情况。煤粉燃烧过程中的燃尽率计算式为:

$$\eta_b = 100(1 - A_0) / (A_1 / 1 - A_0) \quad (7)$$

式中:  $\eta_b$ —燃尽率,%;  $A_0$ —煤样干燥基灰分含量;  $A_1$ —灰样干燥基灰分含量。

图 8 所示为不分级燃烧情况下,两种烟煤燃尽情况随反应时间的变化。随着反应的进行,燃尽率迅速提高,在大约 1.5 s 之后,均能实现 98% 以上的燃尽效果,随着燃烧时间的进一步增加,燃尽率没有显著变化。当反应时间相同时,俄罗斯烟煤飞灰可燃物含量大于大同烟煤,燃尽率也略低于大同烟煤,即俄罗斯烟煤的燃尽比大同烟煤的略慢,燃尽效果略差。

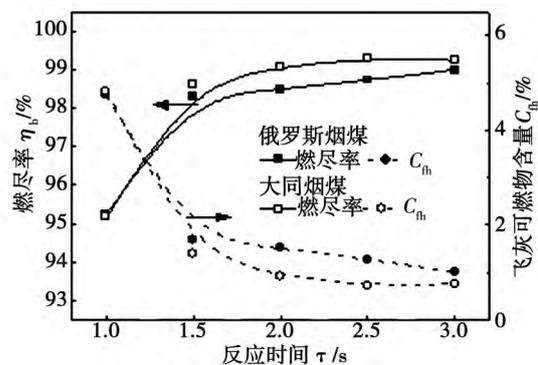


图 8 不分级燃烧情况下反应时间对燃尽效果的影响

Fig. 8 The influence of the reaction time on burn-out result under the condition of no-staged combustion

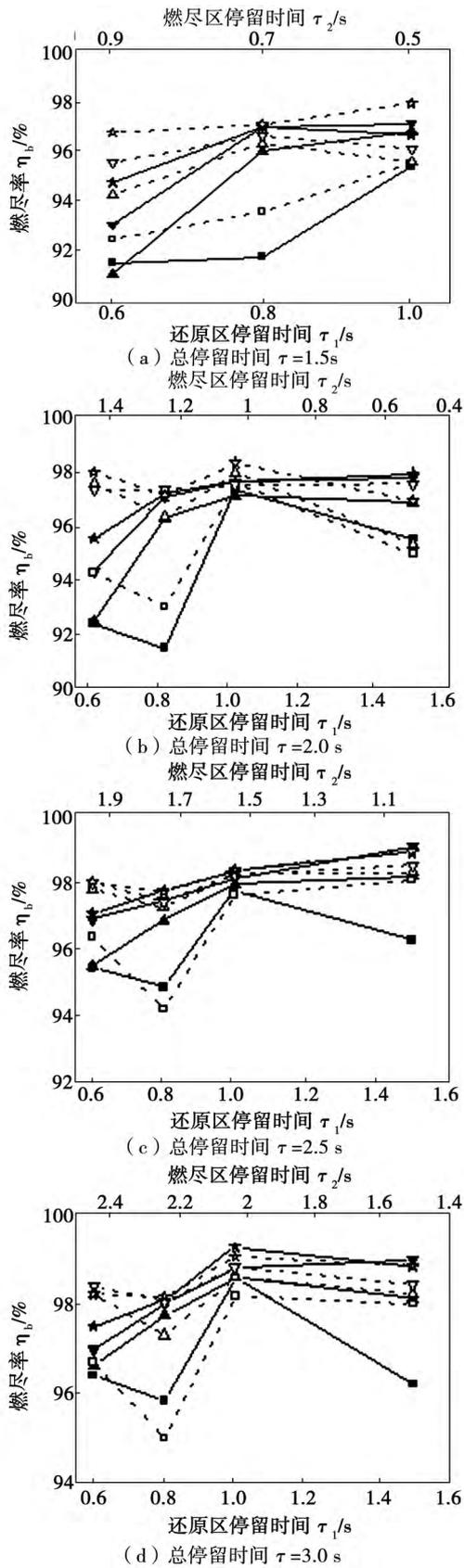


图9 停留时间对燃尽情况的影响  
 Fig.9 Influence of the residence time on the burn-out conditions

从图9可以看出,俄罗斯烟煤及大同烟煤分级燃烧之后,在相同条件(还原区化学当量比及停留时间相同)下,俄罗斯烟煤燃尽率略差于大同烟煤,炉膛总停留时间越短,这种差别越明显。从图中还可以看出,还原区停留时间越短,会增加燃尽区的燃尽负担,从而在燃尽区需要更长的燃尽时间才可以实现较高的燃尽率。还原区停留时间也不宜过长,有一个优化值,即 $\tau_1 = 1.0\text{ s}$ ,继续增加还原区停留时间,会因为燃尽区停留时间被过度削减,从而影响到整体的燃尽效果。整体上看,采用空气分级后两种烟煤燃尽效果较不分级情况均有明显降低,这与本实验所选用的炉膛壁面温度较低(还原区炉膛壁温为 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ )有关,从燃尽情况看,需要更高的壁面温度方可实现更优的燃尽效果。针对更高的炉膛壁面温度情况下烟煤分级燃烧降低氮氧化物排放的研究,将在后续工作中进行分析。从图9(a)可以看出,在总停留时间 $\tau = 1.5\text{ s}$ 时,随着还原区停留时间的增加,煤粉燃尽率增加,但燃尽效果较差。从图9(b) - 图9(d)可知,当总停留时间 $\tau \geq 2.0\text{ s}$ 之后,可以实现约98%以上的燃尽率,分级燃烧对燃尽效果的影响减弱。

#### 4 结论

通过对燃料氮含量较高的俄罗斯烟煤及大同烟煤在携带流反应器上进行的空气分级实验研究,得出结论:

- (1) 烟煤燃料氮的含量影响着分级燃烧氮氧化物的排放,燃料氮含量高的烟煤在分级燃烧情况下氮氧化物排放不一定高。
- (2) 俄罗斯烟煤空气分级的情况下,还原区停留时间越长,主燃化学当量比越低,越能获得更低的 $\text{NO}_x$ 排放浓度。大同烟煤空气分级也有相似的规律。还原区停留时间大于 $0.8\text{ s}$ ,化学当量比为 $0.75$ 及 $0.85$ 的时候, $\text{NO}_x$ 的排放均较低。
- (3) 分级燃烧过程中,还原区化学当量比越高,停留时间越长,在燃尽区各元素的消耗越快,当燃尽区反应时间大于 $1.5\text{ s}$ 之后,各元素的消耗基本趋于稳定水平。
- (4) 采用空气分级燃烧之后,在保证较低氮氧化物排放的情况下,可以实现较好的燃尽。当总停

留时间大于等于 2.0 s 之后燃尽率约为 98%。还原区停留时间有一个最优值,即 1.0 s,过长的还原区停留时间会导致燃尽区反应时间减少,从而影响到整体的燃尽效果。

#### 参考文献:

- [1] 周永刚,邹平国,赵虹. 燃煤特性影响燃料 N 转化率试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 63-67.  
ZHOU Yong-gang, ZOU Ping-guo, ZHAO Hong. Experimental study of the effect of the characteristics of coal burned on the fuel-nitrogen conversion rate [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2006, 26(15): 63-67.
- [2] 吴代赦,郑宝山,唐修义,等. 中国煤中氮的含量及其分布[J]. 地球与环境, 2006, 34(01): 1-6.  
WU Dai-she, ZHENG Bao-shan, TANG Xiu-yi, et al. Nitrogen content of coal in China and its distribution [J]. Earth and Environment, 2006, 34(01): 1-6.
- [3] 尚校,高士秋,汪印,等. 不同煤燃烧方式降低 NO<sub>x</sub> 排放比较及解耦燃烧应用[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(06): 672-679.  
SHANG Xiao, GAO Shi-qiu, WANG Yin, et al. Comparison of various coal combustion modes for reducing NO<sub>x</sub> emissions and applications of the decoupling combustion [J]. Journal of Fuel Chemistry, 2012, 40(06): 672-679.
- [4] 冯兆兴,安连锁,李永华,等. 空气分级燃烧降低 NO<sub>x</sub> 排放试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(25): 88-92.  
FENG Zhao-xing, AN Lian-suo, LI Yong-hua, et al. Experimental study on the reduction of NO<sub>x</sub> emissions during the air staged combustion [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2006, 26(25): 88-92.
- [5] Fan Wei-dong, Lin Zheng-chun, Kuang Jin-guo, et al. Impact of air staging along furnace height on NO<sub>x</sub> emissions from pulverized coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(6): 625-634.
- [6] Li Sen, Xu Tong-mo, Sun Peng, et al. NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions of a high sulfur self-retention coal during air-staged combustion [J]. Fuel, 2008, 87(6): 723-731.
- [7] Yang Jian-cheng, Sun Rui, Sun Shao-zeng, et al. Experimental study on NO<sub>x</sub> reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 1. Air staging [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 126(0): 266-275.
- [8] 张晓辉,孙锐,孙绍增,等. 200 MW 锅炉空气分级低 NO<sub>x</sub> 燃烧改造实验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(6): 676-681.  
ZHANG Xiao-hui, SUN Rui, SUN Shao-zeng, et al. Experimental study of an air-staged and low NO<sub>x</sub> emission-based combustion modification to a 200 MW boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(6): 676-681.
- [9] 杨冬,路春美,王永征. 不同种类煤粉燃烧 NO<sub>x</sub> 排放特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(05): 18-21.  
YANG Dong, LU Chun-mei, WANG Yong-zheng. Experimental study on the characteristics of NO<sub>x</sub> emission with different pulverized coal combusting [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(05): 18-21.
- [10] Kurose R, Ikeda M, Makino H, Kimoto M, Miyazaki T. Pulverized coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals [J]. Fuel, 2004, 83(13): 1777-1785.
- [11] Smoot L-D, Hedman P-O, Smith P-J. Pulverized-coal combustion research at Brigham Young University [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1984, 10(4): 359-441.
- [12] Lee Byoung-hwa, Song Ju-hun, Kim Rang-gyoon, et al. Simulation of the influence of the coal volatile matter content on fuel NO emissions in a drop-tube furnace [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(8): 4333-4340.
- [13] 高正阳,阎维平,刘忠. 再燃过程再燃煤粉燃料 N 释放规律的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 238-242.  
GAO Zheng-yang, YAN Wei-ping, LIU Zhong. Experimental investigation on the law governing the fuel-nitrogen release of pulverized coal reburned during the reburning process [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2004, 24(8): 238-242.

(丛敏编辑)

struction process of the three-dimensional temperature field inside a boiler. **Key Words:** acoustic method ,temperature field reconstruction algorithm ,GMRES algorithm

水溶液电导率测量系统的研究 = **Study of a Water Solution Electric Conductivity Measurement System** [刊 , 汉] YANG Wei-guo ( Military Representative Office of the Naval Forces of Chinese PLA Resident in Shanghai Region Responsible for Naval Vessel Design and Research ,Shanghai ,China ,Post Code: 200011) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30( 1) . -95 -100

Electric conductivity is deemed as an important parameter for evaluating water quality. In compliance with the requirement to check and measure the electric conductivity of a water solution ,designed was a water solution electric conductivity measurement system with a high measurement precision ,including an excitation source system with the output parameters being controllable and a temperature compensation module to reduce the measurement error arisen from the electrode polarization effect and temperature effect. In this connection ,the authors studied the influence of the selection of the frequency of the single-frequency excitation signals and dual-frequency excitation signals on the electric conductivity measuring precision and stability of the system. It has been found that the excitation signal frequency can affect the accuracy of the measurements of the electric conductivity. When the frequency of the excitation source is chosen ,it is commonly higher than 1 kHz and in such a case ,the measuring value will be stable and the error is relatively small. Under the dual-frequency mode ,it is relatively accurate to use the dual-frequency excitation source with its frequencies being 1 kHz and 10 kHz to measure under the tandem mode the water solution with a relatively high electric conductivity. In the measurement range from 200 to 2 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ,the electric conductivity measurement system such designed can obtain a consistent and repeatable measuring result with its error being less than 3%. **Key Words:** electric conductivity ,excitation source ,frequency ,dual-frequency measurement

高燃料氮烟煤空气分级燃烧氮氧化物排放特性实验研究 = **Experimental Study of the Nitrogen Oxide Emissions Characteristics of a Bituminous Coal With a High Fuel Nitrogen Content Under the Condition of the Air Staged Combustion** [刊 ,汉] YANG Jian-cheng ,WU Jiang-quan ,SUN Shao-zeng ( National Laboratory on Engineering for Reducing Pollutant Emissions from Coal Combustion ,Harbin Institute of Technology ,Harbin ,China , Post Code: 150001) ,HU Ya-min ( China Electric Power Investment Group Corporation ,Beijing ,China ,Post Code: 100032) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30( 1) . -101 -107

Experimentally studied were the nitrogen oxide emissions and burn-out conditions under the condition of the air

staged combustion of two kinds of bituminous coal with a relatively high fuel nitrogen content. It has been found that under the condition of coal combustion with air being not staged, the higher the fuel nitrogen content of the coal, the higher the amount of the nitrogen oxide emissions and under the condition of the air staged combustion, the lower the conversion rate of the fuel nitrogen to  $\text{NO}_x$ . Under the condition of the air staged combustion, when the residence time in the reduction zone is between 0.8 s and 1.0 s and the chemical equivalent ratio is 0.75, both Datong-originated and Russia-originated bituminous coal can achieve a relatively low amount of nitrogen oxide emissions. In the meantime, under the condition of the air staged combustion, the burn-out degree of Russia-originated bituminous coal is similar to that of Datong-originated bituminous coal, featuring a relatively good burn-out degree. **Key Words:** fuel nitrogen, nitrogen oxide, pulverized coal combustion, air staged, burn-out

660 MW 旋流对冲锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧优化数值模拟 = **Numerical Simulation of the Optimization of the Low- $\text{NO}_x$  Combustion of a 660 MW Swirling Opposed-firing Boiler** [刊, 汉] ZHONG Yong-lu, LI Hai-shan (National Power Grid Jiangxi Provincial Academy of Electric Power Science, Nanchang, China, Post Code: 330096), ZENG Guo-fang (Xinchang Power Generation Co., Ltd., China Electric Power Investment Corporation, Nanchang, China, Post Code: 330088), FANG Qing-yan (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(1). -108-112

A numerical simulation of the in-furnace flow, combustion and  $\text{NO}_x$  emissions characteristics of a 660 MW swirling opposed-firing boiler was conducted to optimize its low  $\text{NO}_x$  combustion operating condition under the condition of burners in various layers operating in a combination mode. The relative error between the simulation results and the test values was less than 10%, indicating relatively good agreement. It has been found that at the rated load, when burners in all five layers are in operation, if the burners on the front and rear wall in the same layer are shut down respectively, the  $\text{NO}_x$  emissions and the carbon content of flying ash are basically identical. When to shut down the burners in the upper layer is compared with to shut down the burners in the middle layer, the former has a better air staging effectiveness and a longer pulverized coal particle residence time and the  $\text{NO}_x$  emissions and the carbon content of flying ash decrease by 9.5% and 9.8% respectively. In the practical operation of boilers, to shut down the burners in the upper layer will be favorable for reducing the  $\text{NO}_x$  emissions and enhancing the combustion efficiency. **Key Words:** coal mill combination, nitrogen oxide emissions, combustion, numerical simulation

天然气再燃降低  $\text{NO}_x$  排放的热态工业试验研究 = **Hot-state Industrial Experimental Study of the Reburning**