

300MW 煤粉锅炉低 NO_x 正反切 同轴燃烧试验研究

张惠娟, 惠世恩, 周屈兰, 高振强, 赵科, 陶明
(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西省 西安市 710049)

EXPERIMENT STUDY OF LOW NO_x POSITIVE/OPPOSING CONCENTRIC TANGENTIAL FIRING SYSTEM IN A 300 MW PULVERIZED FUEL BOILER

ZHANG Hui-juan, HUI Shi-en, ZHOU Qu-lan, GAO Zhen-qiang, ZHAO Ke, TAO Ming
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Particular model experiment was carried out to study the aerodynamic field of low NO_x positive/opposing concentric tangential firing system in a 300MW pulverized fuel boiler. The effect of deflected secondary air and opposing primary air on the relative diameter of the tangential firing, rotation momentum flux, turbulence magnitude and the velocity variation in horizontal flueway and the effect of layout form of OFA on flow characteristics in furnace are analyzed. The experimental result shows that, concentric opposing tangential firing system and wall disposal high velocity OFA will be of help to lower NO_x emission, ensure high efficiency of combustion, and lighten thermal variation of superheater and reheater.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Low NO_x firing; The concentric firing system; Pulverized fuel boiler

摘要: 该文对 300MW 四角切圆煤粉锅炉采用低 NO_x 正、反切同轴燃烧系统进行了详细的炉内空气动力学模拟试验研究。通过对比分析偏置二次风与反切一次风对炉内气流相对切圆直径、旋转动量流率矩、湍动度和水平烟道沿宽度方向的速度偏差比等的影响, 以及燃尽风布置方式对炉内气流特性的影响进行的分析研究, 得出了大容量四角切圆煤粉锅炉采用同轴反切燃烧系统、配以高速分离墙置燃尽风, 对降低 NO_x 排放、保证锅炉较高燃烧效率、减轻锅炉过热器和再热器热偏差均有利的结论。

关键词: 热能动力工程; 低 NO_x 燃烧; 同轴燃烧; 煤粉锅炉

1 引言

低 NO_x 同轴燃烧系统——LNCFS 是美国 CE 公

司于上世纪 90 年代初开发的四角切圆煤粉炉低 NO_x 燃烧技术, 最早应用于美国犹他州亨特电厂 2 号炉的改造中, 取得了成功。由于它采用整体炉膛空气分级 (OFA) 与同轴燃烧系统相结合的配风方式, 组织燃料在炉内实现轴向与径向的空气分级燃烧, 燃烧效果好, 不仅使锅炉 NO_x 排放量降低明显, 同时, 改善了水冷壁附近的气氛, 有利于防止水冷壁的高温腐蚀和结焦。因此, 广泛应用于 ABB、CE 等一些国外大公司供货的锅炉上。

LNCFS 在我国大容量四角切圆煤粉锅炉上的应用始于上世纪 80 年代末。石洞口二电厂两台瑞士苏尔寿公司与 ABB—CE 合作设计的 600MW 机组以及引进美国 CE 技术由上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂设计生产的吴泾电厂 11、12 号炉、妈湾电厂 2 号炉等锅炉都采用了低 NO_x 同轴燃烧系统。国家电力公司热工研究院、煤燃烧国家重点实验室、内蒙古工业大学电力学院等单位对我国部分在役机组进行了低 NO_x 同轴燃烧系统改造及试验研究, 部分大学和锅炉厂对大容量锅炉采用正反切燃烧方式对减轻过热器、再热器热偏差等问题进行了一定的炉内模拟试验和数值计算^[1-10], 但对大容量锅炉低 NO_x 同轴燃烧技术尚未进行深入、系统地研究。西安交通大学锅炉实验室率先以我国自行设计的 300MW 锅炉为模型, 进行低 NO_x 同轴燃烧系统详细的炉内空气动力学模拟试验, 获得了有价值的试验数据, 总结出了一定的规律, 这对低 NO_x 同轴燃烧技术在我国大容量电站锅炉上的进一步推广应用、减轻对环境造成的污染具有重大的意义。

2 试验方法及系统

以引进型 300MW 机组的 1008t/h 四角切圆固态排渣煤粉锅炉为原型，采用冷态等温模化技术进行研究。为了保证燃烧器出口的边界条件相似，使燃烧器区域的气流分布更接近实际，采用纯几何相似模化方法，并满足模型与原型燃烧器出口一、二次风动量流率比相等，按 1:40 比例建立冷态模型。使用美国 TSI 公司的 1050A 型双通道热线风速仪测量炉内和水平烟道的气流速度及湍动度。采用热电偶测量燃烧器出口轴线上气流温度，根据热平衡方法计算出燃烧器各喷口附近沿射流轴线上、二次风和燃尽风的浓度分布。

炉膛模化试验装置及其测孔布置如图 1 所示。

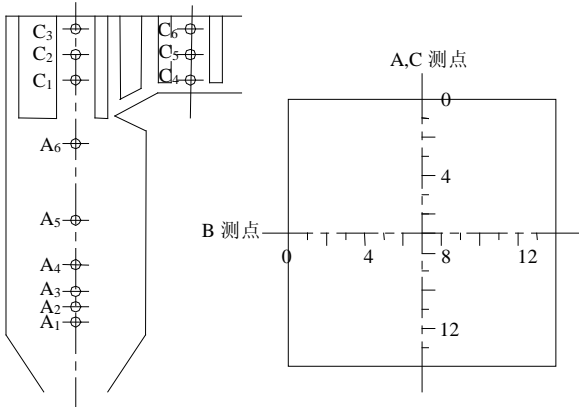


图 1 炉膛模化试验装置及其测孔布置简图

Fig. 1 The model test system of furnace and its arrangement of measuring points

3 低 NO_x 正、反切同轴燃烧系统

3.1 轴向空气分级燃烧

组织四角切圆煤粉炉低 NO_x 同轴燃烧的主要原理是：同时在炉膛内组织轴向和径向空气分级燃烧。

在距燃烧器上方一定位置处开设一层或两层所谓燃尽风 (OFA) 喷口，将助燃空气沿炉膛轴向即烟气流动方向分级送入炉内，使燃料的燃烧过程沿炉膛轴向分级分阶段进行。在第一阶段，将从燃烧器供入炉膛的空气量减少到总燃烧空气量的 70%~75% (相当于理论空气量的 80% 左右) 使燃料先在贫氧条件下燃烧，此时，第一燃烧区内过剩空气系数 $\alpha < 1$ ，因而降低了燃烧区内的燃烧速度和温度水平，这不但延迟了燃烧过程，使燃料中的 N 在还原性气氛中转化成 NO_x 的量减少，而且将已生成 NO_x 部分还原，因而使 NO_x 排放量减少。在燃尽风喷口附近的第二燃烧区内，喷入的空气与第一燃烧

区内生成的烟气混合，剩余燃料在 $\alpha > 1$ 的富氧条件下完成燃烧过程。

试验中，燃尽风喷口采用四角布置 (简称角置)、四面墙水平布置 (简称墙置) 两种方式进行对比研究，墙置燃尽风喷口布置如图 2 所示。

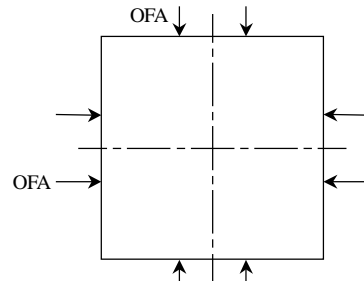


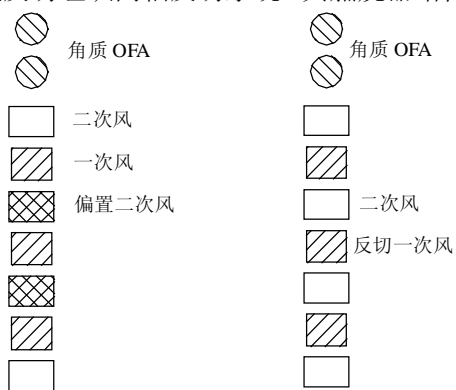
图 2 墙置燃尽风喷口布置示意图

Fig. 2 Wall disposal OFA

3.2 径向同轴正、反切空气分级燃烧

在主燃烧区，将一、二次风射流轴线同向或反向分别与两个直径不同的假想圆相切，形成一次风煤粉气流在内、二次风在外的同轴正切或反切燃烧系统。使沿炉膛水平径向把煤粉的燃烧区域分成位于炉膛中心的煤粉富集的贫氧区和水冷壁附近的富氧区。由于二次风射流在外环，且与一次风煤粉气流组成异面交叉射流，不仅推迟了二者之间的混合，降低了燃烧中心氧气浓度，使燃烧中心 $\alpha < 1$ ，抑制了 NO_x 的生成，同时保证水冷壁附近形成氧化性气氛，可有效防止或减轻水冷壁的高温腐蚀和结焦。

本试验采用偏置二次风组织同轴正切系统，一次风反切组织同轴反切系统。其燃烧器结构见图 3。



(a) 二次风偏置同轴正切燃烧 (b) 一次风反切同轴反切燃烧

图 3 正、反切同轴燃烧系统燃烧器结构示意图

Fig. 3 Burner of positive/opposing concentric firing system

4 试验结果与分析

4.1 试验分析数据简介

炉内气流相对切圆直径定义为

$$D_{xd} = (d_1 / A + d_2 / B) / 2$$

式中 d_1 为炉宽方向两个切向速度最大值的距离, mm; d_2 为炉深方向两个切向速度最大值的距离, mm; A 为炉膛宽度, mm; B 为炉膛深度, mm。

$$\text{湍动度为 } e = \sqrt{u'^2} / \bar{W}$$

式中 $\sqrt{u'^2}$ 为测量截面各测点脉动速度均方根值, m/s; \bar{W} 为测量截面平均上升速度, m/s。

一次风浓度指燃烧器喷口附近一次风射流轴线上一次风所占的容积百分数; 燃尽风浓度指 OFA 喷口附近的射流轴线上燃尽风所占的容积百分数。

4.2 组织径向分级燃烧时主燃烧区的空气动力特性

试验中主燃烧区平均相对切圆直径 D_{xd} 变化见表 1。试验结果见图 4、图 5。图 4、图 5 表明: ①

在二次风、一次风动压比 P_2/P_1 相同情况下, D_{xd} 明显高于反切燃烧系统; ②偏置二次风角度 a_2 增大, D_{xd} 随之增大; 以上是由于正切燃烧系统的假想切圆直径大于反切燃烧系统、组织正切燃烧时二次风偏置角度 a_2 增大, 主燃烧区假想切圆直径相应增大, 对四角切圆燃烧煤粉炉而言的, 假想切圆直径越大, 上游气流对射流的冲击点距喷口就越近, 射流偏转越明显, 实际切圆直径和 D_{xd} 就越大; ③正、反切燃烧系统中, P_2/P_1 提高, 一方面上游气流对射流的冲击力加大, 另一方面一次风射流刚性相对减弱, 使射流向背火侧偏转加重, 主燃烧区实际切圆直径增大, D_{xd} 增大; ④一次风反切 15° 时, 反切

表 1 径向分级燃烧时主燃烧区平均相对切圆直径 D_{xd} 变化情况

Tab. 1 Variation of D_{xd} of main burning zone when radial air-staged combustion adopted

	$a_2=21^\circ$			$P_2/P_1=1.1168$		
	$P_2/P_1=1.1168$	$P_2/P_1=1.2818$	$P_2/P_1=1.4588$	$a_2=15^\circ$	$a_2=21^\circ$	$a_2=27^\circ$
同轴正切	0.6356	0.7078	0.7222	0.5633	0.6356	0.7222
	$a_1=15^\circ$			$P_2/P_1=1.1168$		
	$P_2/P_1=1.1168$	$P_2/P_1=1.2818$	$P_2/P_1=1.4588$	$a_1=15^\circ$	$a_1=21^\circ$	
同轴反切	0.3443	0.4337	0.4749	0.3443	-0.4749	

燃烧系统的主燃烧区气流逆时针旋转, D_{xd} 随 P_2/P_1 增加而增大; 一次风反切 21° 时, 二次风被一次风牵引, 主燃烧区气流由逆时针转为顺时针旋转, 并且 D_{xd} 反向增大。

受切圆直径影响, 主燃烧区气流平均旋转动量流率矩 J_{ZQL} 在采用正切燃烧时明显大于反切燃烧, 并随二次风、一次风动压比增大而增大, 见表 2。

表 2 主燃烧区气流平均旋转动量流率矩

$J_{ZQL}(N\cdot m)$ 变化情况

Tab. 2 Variation of $J_{ZQL}(N\cdot m)$ of main burning zone

同轴正切 $a_2=21^\circ$			同轴反切 $a_1=15^\circ$		
$P_2/P_1=1.1168$	$P_2/P_1=1.2818$	$P_2/P_1=1.4588$	$P_2/P_1=1.1168$	$P_2/P_1=1.2818$	$P_2/P_1=1.4588$
1.2424	1.5104	1.6839	0.2644	0.3004	0.3272

通过对锅炉模型单角燃烧器射流组的流动特性试验分析发现: 一、二次风同切圆时一次风浓度在射流初始段就开始沿其轴线很快衰减, 表明二次风很快混入一次风射流并且二者混合强烈; 采用二次风偏置或一次风反切的异面交叉射流时, 燃烧器喷口附近一次风射流沿轴线的浓度衰减推迟且减缓, 一次风反切 21° 时最明显。说明正、反切同轴燃烧系统可以有效地推迟燃烧器喷口附近一、二次风的

混合, 这对降低挥发分 NO_x 的生成十分有利。

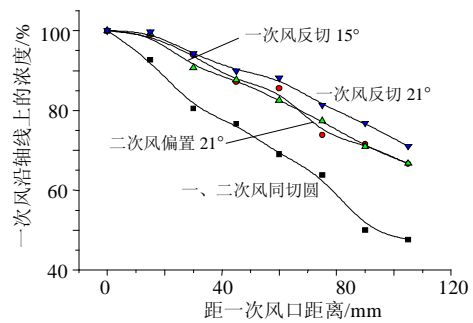


图 4 同轴燃烧一次风轴线上其浓度的变化情况
Fig. 4 Concentration distribution along axis of primary air

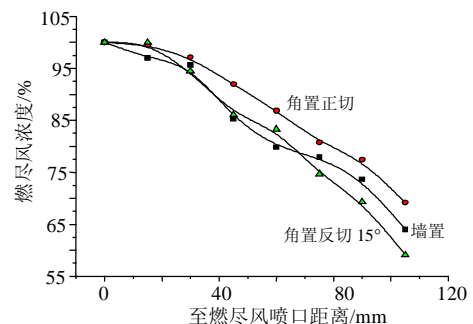


图 5 燃尽风布置方式对燃尽风轴线上其浓度的影响
Fig. 5 The effect of OFA disposal on concentration distribution along axis of OFA

4.3 燃尽风截面气流特性

燃尽风 (OFA) 采用四角布置与主气流同向 (简称角置正切)、四角布置与主气流反向 (简称角置反切)、四墙布置轴线与水冷壁垂直 (简称墙置) 的布置方式进行对比试验, 结果见表 3。

表 3 燃尽风布置方式对其轴线截面上 D_{OFA} 、 e_{OFA} 、 J_{OFA} 的影响

Tab. 3 The effect of OFA disposal on D_{OFA} , e_{OFA} , J_{OFA} of furnace cross-section at the height of OFA axis

燃尽风布置方式	墙置	角置反切 15°	角置反切 21°	角置正切
D_{OFA}	0.2167	0.3467	0.2833	0.6933
e_{OFA}	0.2156	0.2683	0.2759	0.1991
J_{OFA}	0.4128	0.3781	0.3520	1.9212

注: D_{OFA} 为燃尽风轴线截面上相对切圆直径; e_{OFA} 为燃尽风轴线截面上平均湍动度; J_{OFA} 为燃尽风轴线截面上气流旋转动量流率矩, N·m。

采用墙置式 OFA 时, 燃尽风喷入炉内与旋转上升的主气流形成正交射流, 由于它对主气流有一个推向炉膛中心的横向推力, 使其相对切圆直径减小; 同时, 正交射流之间的混合较强烈, 因此, 燃尽风轴线截面上气流的相对切圆直径明显小于角置正切式, 燃尽风浓度衰减较快, 而湍动度则较大。较小的相对切圆直径会减小炉内气流的旋转动量流率矩, 可减轻或消除大容量锅炉炉膛出口的残余旋转, 而刚性较强的高速墙置燃尽风, 能穿过主气流到达炉膛中心, 并与主气流之间强烈混合, 能促进燃料的燃尽, 提高锅炉效率。反切燃尽风喷入炉内后, 先是被逆向主气流推向炉膛中心, 然后随其一起流动, 气流相对切圆直径较小, 则旋转动量流率矩就小, 但因逆向射流之间混合非常强烈, 燃尽风轴线上其浓度衰减很快, 气流的湍动度很大。在一定的范围内, 燃尽风反切角度增大, 效果更显著。

对于墙置燃尽风, 其 W_{OFA} (燃尽风速)、 P_{OFA}/P_1 变化对燃尽风轴线上气流特性的影响较大。 W_{OFA} 大, P_{OFA}/P_1 就大, 燃尽风刚性增强, 穿透能力也就增强, 同时它对主气流的横向推力增大, 因此, 炉内气流的相对切圆直径明显减小, 旋转动量流率矩也减小 (见表 4), 而平均湍动度则由于燃尽风与主气流混合加强而有所增大^[11-13]。

表 4 W_{OFA} 、 P_{OFA}/P_1 对燃尽风截面 D_{OFA} 、 J_{OFA} 、 e_{OFA} 的影响

Tab. 4 The effect of W_{OFA} 、 P_{OFA}/P_1 on D_{OFA} 、 J_{OFA} 、 e_{OFA} of furnace cross-section at the height of OFA

参数	数值		
W_{OFA}	40.5	48.6	56
P_{OFA}/P_1	0.8093	1.1654	1.5862
D_{OFA}	0.3033	0.2600	0.2467
J_{OFA}	0.1105	0.1048	0.0940
e_{OFA}	0.1589	0.1640	0.1662

注: W_{OFA} 为燃尽风速, m/s; P_{OFA}/P_1 为燃尽风与一次风动压比。

4.4 折焰角前及水平烟道空气动力特性

目前, 国内大容量四角切圆煤粉锅炉运行中存在的主要问题之一就是: 炉膛出口水平烟道左右两侧烟速、烟温偏差过大, 引起过热器、再热器局部超温爆管, 严重影响锅炉机组的安全运行。其主要原因就是随锅炉容量增大, 四角切圆煤粉炉气流初始旋转动量流率矩显著增加, 致使大容量锅炉炉膛出口残余旋转较大, 大部分烟气流从右侧进入屏区和水平烟道, 使得水平烟道左右两侧存在较大的速度偏差及温度偏差, 从而造成两侧对流换热系数及传热温压不同, 引起受热面内工质气温偏差过大, 造成受热面局部超温爆管^[14]。

由表 5 可看出, 炉内组织不同的低 NO_x 同轴燃烧方式, 对炉膛出口及水平烟道气流特性的影响十分明显。试验结果表明: ①由于反切燃烧 ($a_1=15^\circ$) 与正切燃烧相比, 炉内气流具有较小的相对切圆直径和旋转动量流率矩, 因此, 在燃尽风布置方式相同时, 折焰角前气流旋转动量流率矩和水平烟道左右两侧平均速度偏差比较小; ②采用墙置式燃尽风也能降低炉内气流的相对切圆直径和旋转动量流率矩, 从而降低折焰角前气流旋转动量流率矩和水平烟道平均速度偏差比。这对降低炉膛出口残余旋转, 减轻水平烟道左右两侧的速度偏差, 从而减小过热器、再热器的热偏差都是非常有利的, 二者结合效果更明显。

表 5 不同燃烧方式对折焰角前及水平烟道空气动力特性的影响

Tab. 5 The effect of combustion mode on aerodynamic character of flue gas before furnace arch and in horizontal flueway

燃烧方式	同轴正切		
	$a_2=15^\circ$ OFA 墙置	$a_2=21^\circ$ OFA 墙置	$a_2=21^\circ$ OFA 角置
J_{ZYJ}	0.2144	0.3602	0.4901
E_{SPYD}	1.1240	1.1308	1.3029
燃烧方式	同轴反切		
	$a_1=15^\circ$ OFA 角置	$a_1=15^\circ$ OFA 墙置	$a_2=21^\circ$ OFA 墙置
J_{ZYJ}	0.1512	0.0267	-0.0154
E_{SPYD}	1.1495	1.0587	1.0153

注: J_{ZYJ} 为折焰角前气流旋转动量流率矩, N·m; E_{SPYD} 为水平烟道平均速度偏差比。

5 结论

(1) 采用偏置二次风或一次风反切都能推迟燃烧初期一、二次风的混合, 对降低燃烧中心氧气体积浓度, 抑制 NO_x 的生成有利。但偏置二次风会使炉内气流相对切圆直径、旋转动量流率矩和水平烟道平均速度偏差比增大, 这对防止或减轻大容量锅炉过

热器、再热器热偏差非常不利。而在一、二次风动压比合适的情况下,一次风反切不仅能使炉膛中心一、二次风之间的混合加强,促进燃尽,同时,使炉内气流相对切圆直径、旋转动量流率矩、水平烟道平均速度偏差比明显低于正切燃烧系统和传统四角切圆燃烧系统;

(2)采用分离墙置式燃尽风,并且其流速较高($W_{OFA} > 50\text{m/s}$)时,由于燃尽风刚性较强,同时它与炉内螺旋上升的主气流形成正交射流,一方面,它对主气流有一个较强的向炉膛中心的横向推力,使其相对切圆直径减小,另一方面,燃尽风在炉内有很强的穿透力,与主气流之间的混合强烈,同时旋转减弱,这样,不仅可以降低炉膛出口的残余旋转、水平烟道左右两侧的速度偏差比,并且,能促进燃料的燃尽。

综上所述,大容量四角切圆煤粉锅炉采用同轴反切燃烧系统、配以高速分离墙置燃尽风,对降低 NO_x 排放,保证锅炉较高效率,减轻锅炉结渣、过热器和再热器热偏差均有利。

参考文献

- [1] 张惠娟,宋洪鹏,惠世恩.四角切圆空气分级燃烧技术及其在我国的应用[J].热能动力工程,2003,18(3):224-228.
Zhang Huijuan, Song Hongpeng, Hui Shian. Graded air feeding-based tangential corner firing technology and its applications[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(3): 224-228.
- [2] 毕玉森.低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J].热力发电,2000,29(2):2-9.
Bi Yusen. Developing condition of low NO_x combustion technology [J]. Heat Power Generation, 2000, 29(2): 2-9.
- [3] 曾汉才.大型锅炉高效低 NO_x 燃烧技术的研究[J].锅炉制造,2001,23(1):1-11.
Zeng Hancan. Study on large-capacity boiler high efficiency low NO_x combustion technology[J]. Boiler Making, 2001, 23(1): 1-11.
- [4] 王恩禄,张海燕,罗永浩,等.低 NO_x 燃烧技术及其在我国燃煤电站锅炉中的应用[J].动力工程,2004,24(1):23-28.
Wang Enlu, Zhang Haiyan, Luo Yonghao et al. Analysis of low NO_x combustion techniques and its application for the coal fired power plants in China[J]. Power Engineering, 2004, 24(1): 23-28.
- [5] 曹红加,唐必光,许洪波,等.煤粉浓淡燃烧方式对电站锅炉 NO_x 排放影响的试验研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):229-232.
Cao Hongjia, Tang Biguang, Xu Hongbo, et al. The influence of coal bias combustion mode on NO_x emission from power station boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 229-232.
- [6] 程俊峰,曾汉才,熊蔚立,等.降低300MW贫煤锅炉 NO_x 排放的试验研究[J].中国电机工程学报,2002,22(5):157-160.
Cheng Junfeng, Zeng Hancan, Xiong Weili et al. Experimental Investigation on reduction of NO_x emission in 300MW lean coal boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 157-160.
- [7] 刘泰生,姚本荣,许晋源,等.切向燃烧锅炉水平烟道中烟速偏差成因的试验研究[J].中国电机工程学报,2002,22(1):49-53.
Liu Taisheng, Yao Benrong, Xu Jinyuan et al. The research of the cause of velocity imbalance in a tangentially-fired furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 49-53.
- [8] 周昊,童汇源,胡伟峰,等.600MW锅炉偏转二次风系统降低 NO_x 排放的试验研究[J].锅炉技术,2000,31(9):13-16.
Zhou Haoong Huiyan, Hu Weifeng et al. Experimental investigation on reduction of NO_x emission by deflected secondary air system in 600mw utility boiler[J]. Boiler Technology, 2000, 31(9): 13-16.
- [9] 毕玉森.低 NO_x 同轴燃烧系统在我国的应用[J].中国电力,1994,27(10):30-44.
Bi Yusen. Application of the low NO_x concentric firing system [J]. Electric Power, 1994, 27(10): 30-44.
- [10] 闫志勇,魏恩宗,张惠娟,等.四角燃烧煤粉锅炉采用分级燃烧减低 NO_x 排放的试验研究[J].锅炉技术,2000,31(9):17-22.
Yan Zhiyong, Wei Enzong, Zhang Huijuan et al. Research on reduction of NO_x emission by staged combustion for tangential firing pulverized coal boiler[J]. Boiler Technology, 2000, 31(9): 17-22.
- [11] 岑可法,周昊,池作和.大型电站锅炉安全及优化运行技术[M].中国电力出版社,2003.
- [12] 岑可法,樊建人.燃烧流体力学[M].北京:水利电力出版社,1991.
- [13] Bruggeman H, Scheffknecht G T, F J Marx et al. Experience after retrofitting the firing system in the bebbach I power station, Int[J]. Journal for Power Plant Technology, 1998 (12): 338-346.
- [14] 上海锅炉厂,哈尔滨锅炉厂.300MW、600MW引进型切向燃烧锅炉温度偏差的研究鉴定技术资料[R].上海:上海锅炉厂.
Shanghai Boiler Factory, Harbin Boiler Factory. Authentication documents of the research on temperature variation of 300MW and 600MW introduced tangential firing boiler[R]. Shanghai: Shanghai Boiler Factory.

收稿日期:2005-02-14。

作者简介:

张惠娟(1966-),女,博士研究生,副教授,从事燃烧理论与技术、清洁燃烧与污染控制方面的研究;

惠世恩(1955-),男,教授,博士生导师,研究方向为气固多相流、煤的清洁燃烧与污染防治;

周屈兰(1974-),女,博士,副教授,研究方向为气固多相流、煤的清洁燃烧与污染防治。