

# 双炉膛四角切圆煤粉锅炉分层掺烧数值模拟及性能试验研究

梁绍华<sup>1</sup>, 宁新宇<sup>1</sup>, 张恩先<sup>1</sup>, 黄磊<sup>1</sup>, 周昊<sup>2</sup>, 岑可法<sup>2</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏省南京市 211102;

2. 能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省杭州市 310027)

## Numerical Simulation and Performance Tests on Layered-combustion in a Tangential Coal-fired Double-furnace Boiler

LIANG Shaohua<sup>1</sup>, NING Xinyu<sup>1</sup>, ZHANG Enxian<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>1</sup>, ZHOU Hao<sup>2</sup>, CEN Kefa<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu Province, China;

2. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** The boiler would suffer severe ash deposition propensity when only Shenhua coal with low ash fusion temperature was supplied. Taking Shenhua coal with low ash fusion temperature and Pinghun coal with high ash fusion temperature as fuel in a 1025 t/h double-furnace boiler, the numerical simulation and performance tests of layered-combustion were performed. The velocity and temperature distribution of furnace area were analysed by numerical simulation, the characteristic of combustion, emission and economy were studied by performance tests. The research results show that the increase of Shenhua coal's quantity proportion in total coal supply and the heightening of Shenhua coal's burning layer position in the boiler combustion system would make ash deposition propensity more seriously and NO<sub>x</sub> emission decrease, but boiler efficiency wasn't influenced obviously. When Shenhua coal was fired on different burning layers or the proportion in total coal supply was changed, the optimization of distribution of secondary air should be obtained by adjustment tests.

**KEY WORDS:** double-furnace; tangential coal-fired boiler; layered-combustion; Shenhua coal; numerical simulation; performance test

**摘要:** 神华煤容易结焦, 单独燃烧可能影响锅炉的安全运行。在一台容量为 1025 t/h 的双炉膛锅炉上, 对容易结焦的神华煤和不易结焦的平混煤进行了分层掺烧的数值模拟和性能试验研究, 在数值模拟中研究了炉膛内的速度场和温度场的分布, 在性能试验中研究了不同掺烧比例下锅炉燃烧特性、

排放特性及经济性。研究结果表明: 神华煤掺烧量的增多和分层时燃烧位置的提高将导致炉膛结焦倾向增大、NO<sub>x</sub> 浓度下降, 但对锅炉热效率影响不明显。并且在不同的分层掺烧方式下, 二次风的配风方式有不同的优化值, 应通过优化调整试验确定。

**关键词:** 双炉膛; 四角切圆锅炉; 分层掺烧; 神华煤; 数值模拟; 试验研究

## 0 引言

电煤市场化程度加深, 煤价上扬, 煤炭供应紧张导致电厂来煤较杂, 造成锅炉燃烧特性、排放特性和经济性变化较大。为降低燃料成本和改善锅炉燃烧特性, 需保持锅炉炉型和煤质的耦合性, 通常有 2 种方法<sup>[1-2]</sup>: 一为配煤, 将来煤掺混成适合锅炉燃烧的目标煤种; 二为分层掺烧, 将不同煤种加入不同煤仓, 在炉内配成适合锅炉燃烧的煤种。前者需要较大场地和配煤设备, 投资和运行维护费用较大; 后者配煤方式灵活, 设备简单, 目前已成为研究的热点<sup>[3-5]</sup>, 但这些研究中针对双炉膛的还不多见。本文以一台 1025 t/h 单炉体双炉膛锅炉为对象, 进行分层掺烧的数值模拟和性能试验研究, 以期对相关研究提供参考与借鉴。

## 1 设备规范与研究方法

### 1.1 设备规范

某厂 1025 t/h 单炉体双炉膛四角切圆燃烧控制

循环汽包锅炉，型号为 SG-1025/16.77-M861，炉膛断面尺寸宽 17 m，深 8.475 m，后烟井深度 8.5 m，炉顶管标高为 46 m；燃烧系统采用直流式四角切圆燃烧布置，双炉膛共 8 组燃烧器，每组燃烧器包括甲乙丙丁 4 层一次风喷嘴和 6 层二次风喷嘴(见图 1)，中心标高 15.6 m，假想切圆直径为 500 mm。

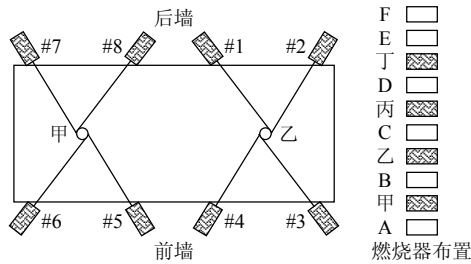


图 1 炉膛横截面和燃烧器布置图

Fig. 1 Cross-section of furnace and arrangement of the burners

1.2 试验煤质分析

分层掺烧所选用的煤种为该电厂常用煤种：神华煤和平混煤，通过对神华煤、平混煤的煤质特性进行实验室分析，发现 2 种煤都较易着火和燃尽，但神华煤具有严重的结渣和积灰倾向<sup>[6-8]</sup>，而平混煤的结渣、积灰倾向轻微，煤质常规分析结果见表 1。

基于煤质特性设计了 7 个试验工况(见表 2)，测试 2 种煤在不同分层方式下锅炉炉膛温度、炉膛出口烟温、锅炉氧量、排烟温度、NO<sub>x</sub> 排放浓度、锅炉热效率等重要参数，通过上述参数的分析，研究不同分层掺烧方式下锅炉的燃烧特性、排放特

表 1 煤质分析结果

Tab. 1 Ultimate analysis and proximate analysis of coals

检测项目	平混煤	神华煤
收到基水分/%	12.30	16.60
收到基灰分/%	19.44	6.05
收到基挥发分/%	25.25	28.34
收到基硫/%	0.73	0.40
收到基碳/%	55.44	62.94
收到基氢/%	3.68	3.97
收到基氧/%	7.44	9.31
收到基氮/%	0.97	0.73
收到基低位发热量/(MJ/kg)	20.95	24.06
焦渣特性	弱黏结	黏着
变形温度/°C	1 480	1 050
软化温度/°C	≥ 1 500	1 110
半球温度/°C	≥ 1 500	无
流动温度/°C	≥ 1 500	1 150

表 2 试验工况

Tab. 2 Tests arrangement

工况编号	负荷/MW	平混煤给粉机	神华煤给粉机
T-1	316	甲、乙、丙、丁	—
T-2	316	甲、乙、丙、丁	—
T-3	315	乙、丙、丁	甲
T-4	316	丙、丁	甲、乙
T-5	315	甲、乙、丁	丙
T-6	315	乙、丁	甲、丙
T-7	316	甲、乙、丙	丁

性、结焦特性和运行经济性。其中工况 T-1 为习惯运行工况；工况 T-2 为基于工况 T-1 进行配风和运行氧量优化后的工况，工况 T-3~T-7 分别为在下层和上层掺烧神华煤的运行优化工况。每个试验工况持续时间为 2 d，以观察锅炉结焦的状况，并在试验工况稳定后测试炉膛内壁面和空预器出口烟气的成分，具体工况说明可参见表 2。

在进行上述试验工况之前，先采用 Ansys CFX 软件，选取全部燃用神华煤和甲层燃用神华煤其他 3 层燃用平混煤这 2 种典型的分层掺烧工况进行了数值模拟，研究分析炉内的烟气流场分布和温度场分布。

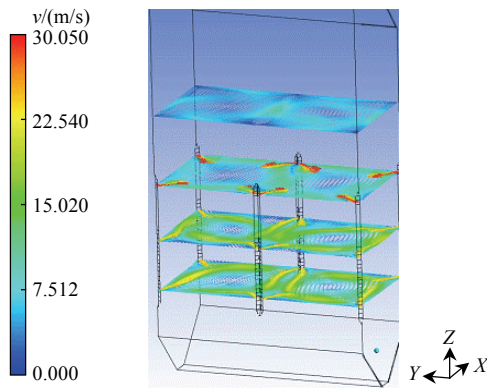
2 数值模拟

2.1 数值计算模型

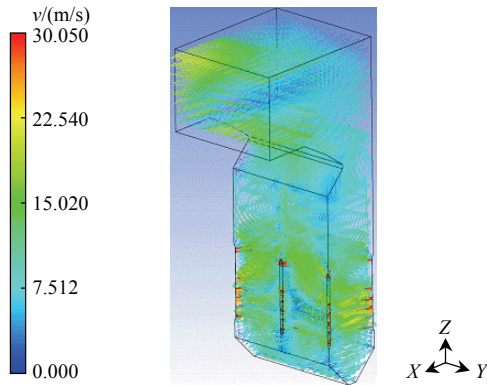
四角切向燃烧煤粉锅炉的炉内过程是一个复杂的湍流流动和燃烧化学反应过程，在数值模拟中，气相流动模型采用 *k-ε* 模型，煤粉颗粒的流动采用随机轨道模型，煤粉燃烧模型的主体采用颗粒的能量平衡方程，其中的挥发分析出过程采用两步竞争反应模型，气相燃烧采用混合分数-概率密度函数(Mixture Fraction/PDF)模型，对于流场与温度场非线性方程组的求解，通过压力-速度的耦合采用 SIMPLE 法求解。采用的软件为 Ansys CFX11.0，根据炉膛的结构特点，把炉膛分为 3 个区段：冷灰斗段、燃烧器段、上炉膛段，整个计算区域所生成的网格数共约 65 万个。

2.2 烟气流场

图 2 为炉膛内速度场分布状况。图中可以看出，燃烧器区域气流为双切圆螺旋上升，甲侧(左侧)切圆逆时针旋向，乙侧(右侧)顺时针旋向，由于补气条件的差异和双切圆的互相影响，切圆呈双椭圆形，长轴接近#2 与#4 角对角线，切圆处最大风速



(a) 炉膛水平断面速度分布



(b) 炉膛垂直断面速度分布

图 2 炉膛内速度场分布

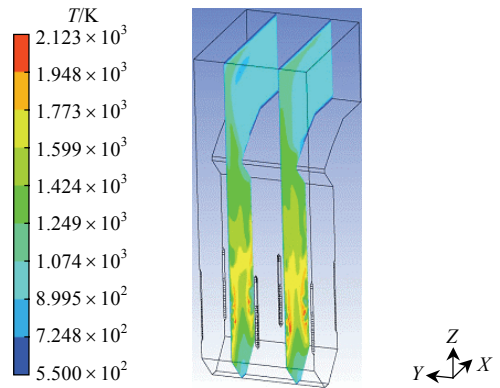
Fig. 2 Velocity distribution in the furnace

在 20 m/s 左右，贴壁风在 10 m/s 以下，在分离燃尽风(separated over fire air, SOFA)截面烟气流速降至 10 m/s 以下，旋流强度减弱，烟气趋向均匀分布。

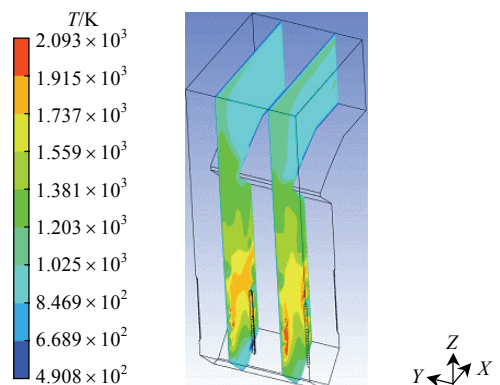
### 2.3 温度场

图 3 为温度沿炉膛高度方向的分布状况，其中工况 T-a 为全部燃用神华煤的试验工况，工况 T-b 为甲层燃用神华煤其他 3 层燃用平混煤的试验工况。从图中可知，燃烧中心在丁层一次风和 SOFA 喷口之间的区域，工况 T-a 燃烧中心温度约 1500 °C，甲、乙炉膛相差不大；工况 T-b 燃烧中心温度约 1600 °C，乙炉膛温度略高于甲炉膛。在炉膛出口，工况 T-a、T-b 烟温接近，说明工况 T-a 温度衰减较工况 T-b 慢，尾部燃尽过程较长。

图 4 为温度沿炉膛横截面方向的分布状况。由图可知，炉膛区域温度在切圆处较高，在 1700~1900 °C 之间，同时切圆长轴对应的 4 个热角#2、#4、#5、#7 角温度较其他 4 角偏高约 100~200 °C；并且在燃烧器区域，工况 T-b 总体温度水平比工况 T-a 高出 100 °C 以上，这与神华煤和平混煤的燃尽特性



(a) 工况 T-a



(b) 工况 T-b

图 3 炉膛区域高度方向温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of furnace area in vertical

有关，与前述中的分析相吻合。沿着烟气的流程，在 SOFA 风截面处，热角和冷角温度基本相当，在工况 T-a 中，温度在 1450 °C 左右；在工况 T-b 中，温度在 1400 °C 左右，与同样条件下的实际工况 T-3 相比较(见图 5)，温度实测值在 1320 °C 左右，两者结果比较接近，反应出该计算模型的合理性。当烟气达到 SOFA 风上部，甲乙炉膛温度更取样一致，基本在 1200 °C 左右。当到达炉膛出口时，工况 T-a 和工况 T-b 的烟气温度为 1100 °C 左右，并且工况 T-a 较 T-b 要稍高一些，由于神华煤软化温度较低，在 1100 °C 左右，这样将会容易导致屏底结焦。

## 3 分层掺烧试验

### 3.1 试验仪器

在分层掺烧试验中，根据 ASME PTC—1998 的试验相关规定，采用 M&C 氧分析仪和 ROSEMOUNT 烟气分析仪，对空预器进出口烟气成分进行网格法取样连续分析，对于排烟温度采用 I 级精度 T 型铠装热电偶测量，信号接入分散式智

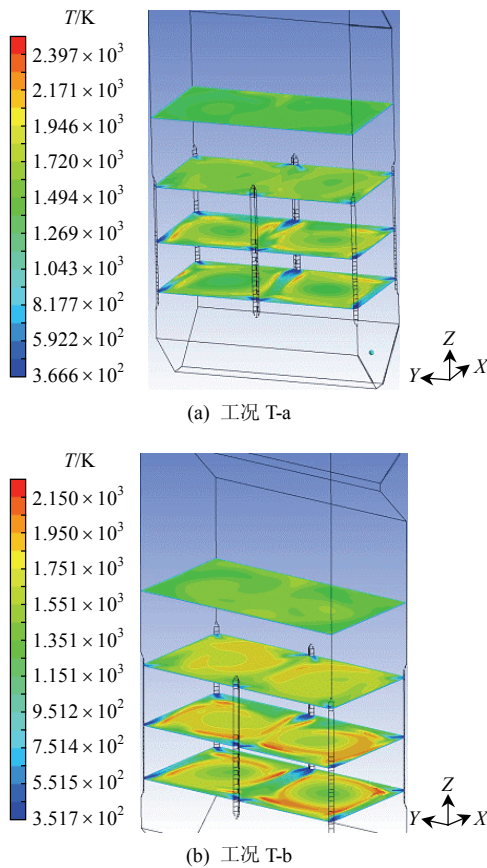


图4 炉膛区域横截面方向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of furnace area in cross-section

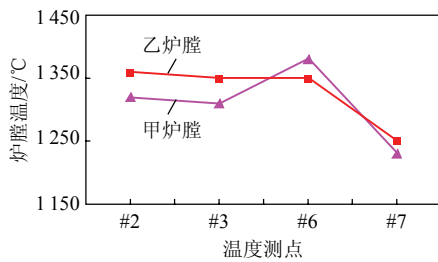


图5 炉膛 SOFA 风截面实测温度分布(工况 T-3)

Fig. 5 Actual temperature distribution of furnace area in SOFA cross-section(test T-3)

能数据采集器(isolated measurement pods, IMP)以连续采集, 仪器相关的技术参数见表3。

表3 试验测量仪器

Tab. 3 Test measure apparatus

名称	型号	量程	精度
M&C 氧分析仪	PMA30	0~21%	±0.2%
ROSEMOUNT 烟气分析仪	MLT 4.3	CO: 0~1%~10%; NO: 0~5 × 10 <sup>-4</sup> ~5 × 10 <sup>-3</sup> ; NO <sub>2</sub> : 0~5 × 10 <sup>-4</sup> ~1 × 10 <sup>-3</sup> ; CO <sub>2</sub> : 0~20%	<1%
IMP 数采系统	35951C	-200~1370 °C	<1.0 °C
热电偶	WRCK-191T	-40~350 °C	±1 °C

### 3.2 炉膛温度分布及结焦特性

图6为各工况SOFA风前后截面(按烟气流向顺序,下同)炉膛温度变化曲线。从图中可以看出,在SOFA风前断面,各工况温度偏差不大,而在SOFA风后截面,工况T-4温度水平最高,其次是T-6,然后依次是T-5、T-7和T-3, T-2和T-1温度最低。另外,经过SOFA风后温度升高幅度最大的是T-4,其次是T-6,最小的是T-1和T-2。由此可知,燃用两层神华煤的T-4和T-6前期燃烧份额较全部燃用平混煤的T-1和T-2小,而通过SOFA时燃烧份额较大,也就是说,神华煤燃尽过程较平混煤长,燃烧中心相对提高,这与前述中数值模拟的分析结果基本一致。

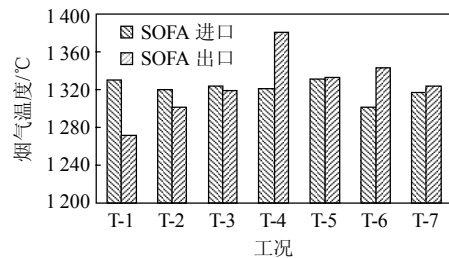


图6 SOFA 进出口截面烟气平均温度分布

Fig. 6 The flue gas average temperature distribution of import and export of SOFA section

炉膛出口烟温分布见图7, 工况T-1炉膛出口烟温最高, 其次是T-5, 然后依次是T-4、T-6、T-3、T-7、最低的是T-2。通过分析可知, T-1为习惯运行工况, 燃烧氧量偏高(见表4), SOFA的风量很小, 配风较不合理, 后期燃尽过程较长, 导致炉膛出口烟温偏高; T-5主要也是氧量偏大(见表4), 上层风量偏小, 且丙层燃用难燃尽的神华煤, 燃尽过程也有所延长; T-4和T-6有两层燃用较难燃尽的神华煤, 炉膛出口烟温也较一层燃用神华煤的工况T-3和工况T-7高, 而工况T-2由于配风较合理、全部燃用平混煤, 使得炉膛出口烟温最低。因此在进行掺烧神华煤时, 结合数值模拟的结论, 将平混煤放置在上层燃烧器, 以降低炉膛出口烟温, 避免屏底

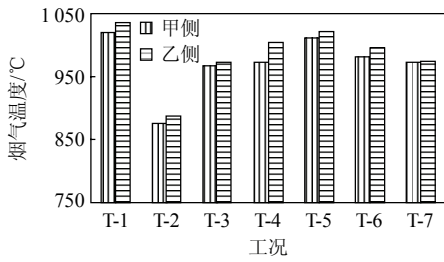


图 7 甲乙侧炉膛出口烟气温度分布

Fig. 7 The flue gas temperature distribution of furnace outlet of side A and B

表 4 工况参数及 NO<sub>x</sub> 浓度、锅炉效率汇总表

Tab. 4 The test parameters, NO<sub>x</sub> emission and boiler efficiency

工况	$\rho(\text{NO}_x)$ (mg/m <sup>3</sup> )	锅炉 效率/%	二次风速/(m/s)					OFA/ 氧量/ (m/s) %	
			A	B	C	D	E	(m/s)	%
T-1	822	92.8	33	35	30	34	35	5	5.72
T-2	679	93.3	30	31	31	32	39	15	5.01
T-4	572	93.4	31	30	33	32	40	21	5.24
T-5	642	93.1	30	30	32	31	35	20	5.47
T-6	541	93.2	30	29	32	32	39	22	4.58
T-7	554	93.3	31	30	33	33	37	24	4.96

结焦的发生。

此外，锅炉配风方式对炉膛出口烟温也有影响<sup>[9-10]</sup>。根据数值模拟和性能试验的测量结果来看，炉膛出口烟温在 1100℃ 左右，这已接近神华煤的软化温度，有可能导致屏底结焦。结合图 6 和图 7 来看，在 SOFA 风区域存在较强燃烧的工况，其炉膛出口烟温也相对较高，因此需合理控制 SOFA 风量和上层二次风量，以降低炉膛上部和出口烟温，这样有利于防止或减弱燃用神华煤较多时结焦的发生。

### 3.3 NO<sub>x</sub> 排放特性

表 4 为各性能试验工况主要运行参数、NO<sub>x</sub> 排放浓度和锅炉效率的试验结果(其中 T-3 因设备电源故障导致部分数据丢失，故未列出)。从表中可以看出，通过提高 OFA 风风速，可有效降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度，从锅炉热效率和 NO<sub>x</sub> 排放浓度综合考虑，OFA 风风速宜控制在 20 m/s 左右，另外保持上层的二次风风速稍高于下层二次风风速，这样有利于煤粉的燃尽。

图 8 为煤质变化对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响状况。从图中可知，工况 T-6 NO<sub>x</sub> 浓度最低，其次是 T-4、T-7，再次是 T-5，而 T-2 NO<sub>x</sub> 排放浓度最高。

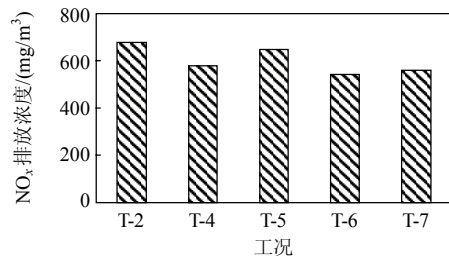


图 8 煤质变化对 NO<sub>x</sub> 排放浓度的影响

Fig. 8 Influence of the change of coal characteristic for NO<sub>x</sub> emission

这说明燃用神华煤份额越大，NO<sub>x</sub> 生成浓度越低，其原因一方面是神华煤氮含量较平混煤低，使得神华煤掺烧比例越大，总的含氮量降低，这有利于 NO<sub>x</sub> 排放浓度的降低<sup>[11-12]</sup>，另一方面是神华煤的挥发分含量较平混煤高一些，这有利于降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度<sup>[13]</sup>，此外，神华煤的灰分远较平混煤低，有利于煤粉气流的加热，加快挥发分的析出，有利于还原性气氛的形成，同样也有利于降低 NO<sub>x</sub> 排放浓度<sup>[14]</sup>。最后，结合数值模拟的分析结果来看，在燃烧器区域，掺烧神华煤比例越高，其炉膛区域的温度要相对低一些，这有利于降低热力型 NO<sub>x</sub> 的生成浓度<sup>[15]</sup>。

除了煤质对锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度有一定影响外，神华煤所在给粉层的位置对 NO<sub>x</sub> 排放浓度也有影响，从试验结果来看，神华煤所在给粉层的位置越高，其 NO<sub>x</sub> 排放浓度相对越低，这可能与神华煤燃烧特性及炉膛温度有关。

### 3.4 锅炉效率特性

从图 9 曲线可知，优化后锅炉效率燃用 2 层神华煤的工况 T-4 较全燃平混煤的 T-2 略高，而工况 T-6 也燃用 2 层神华煤，锅炉效率较工况 T-2 略低，燃用一层神华煤的工况 T-7 和 T-5 较工况 T-2 低。这反映出神华煤掺烧比例的大小对锅炉热效率影

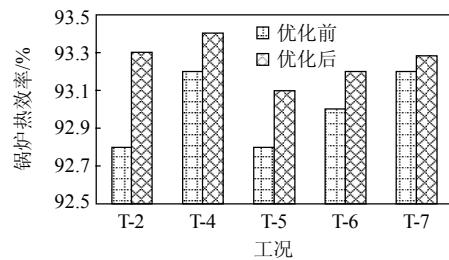


图 9 各分层掺烧工况燃烧优化前后锅炉效率对比  
Fig. 9 Contrast of five layer-combustion tests boiler efficiency before and after optimization

响较小,效率的变化主要由二次风配风方式和运行氧量决定。

## 4 结论

在一台容量为 1025 t/h 的双炉膛锅炉上,对容易结焦的神华煤和不易结焦的平混煤进行了分层掺烧的数值模拟和性能试验研究,得到如下结论:

1) 全部燃用神华煤时的炉膛温度较仅在甲层掺烧神华煤其他 3 层燃用平混煤的炉膛温度要稍低一些。

2) 不宜掺烧 3 层及以上的神华煤,以防止炉膛结焦;并且在进行分层掺烧时,宜将神华煤布置于下层、平混煤布置于上层,这可有效防止和减弱结焦,并提高煤粉燃尽效果。

3) 在进行神华煤和平混煤分层掺烧时,随着神华煤掺烧比例的增大,炉膛结焦倾向增强、 $\text{NO}_x$  生成浓度降低,但锅炉热效率变化不明显。

4) 分层掺烧时,不同的分层方式有不同的二次风优化配风方式,应通过试验确定。分层掺烧的分层方式和二次风配风的灵活性,使其对煤种具有较强的适应性。

## 参考文献

- [1] 阎维平,陈吟颖,邢德山,等. 电站煤粉锅炉掺烧强结渣煤的混煤结渣性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 93-97.  
Yan Weiping, Chen Yinying, Xing Deshan, et al. Performances of pulverized-coal boilers burning heavy slagging blending coals[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 93-97(in Chinese).
- [2] 梁绍华,郑立刚,周昊,等. 基于支持向量机与高斯分布估计的低  $\text{NO}_x$  排放[J]. 化工学报, 2009, 60(1): 223-229.  
Liang Shaohua, Zheng Ligang, Zhou Hao, et al. Low  $\text{NO}_x$  emissions based on support vector machine and Gaussian estimation of distribution[J]. CIESC Journal, 2009, 60(1): 223-229(in Chinese).
- [3] 方庆艳,黄来,姚斌,等. 采用双混合分数/PDF 方法模拟混煤在四角切圆锅炉内的燃烧[J]. 动力工程, 2006, 26(2): 185-190.  
Fang Qingyan, Huang Lai, Yao Bin, et al. Combustion process simulation with duo-mixture fraction/PDF approach of tangential coal blend fired boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(2): 185-190(in Chinese).
- [4] 贾宏禄. 利港电厂首次试烧神华煤技术分析[J]. 华东电力, 2004, 32(4): 57-60.  
Jia Honglu. Analysis on the first trial burning of shenhua coal in LiGang power plant[J]. East China Electric Power, 2004, 32(4): 57-60(in Chinese).
- [5] 陈灿,佟晋原,杜云华,等. 无烟煤和劣质烟煤分层掺烧炉内空气动力场研究[J]. 东方电气评论, 2006, 20(4): 49-56.  
Chen Can, Tong Jinyuan, Du Yunhua, et al. Aerodynamic field study on anthracite and tinpot bituminous coal in different layer burner[J]. Dongfeng Electric review, 2006, 20(4): 49-56(in Chinese).
- [6] 周俊虎,赵晓辉,杨卫娟,等. 神华煤结渣倾向和结渣机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 31-36.  
Zhou Junhu, Zhao Xiaohui, Yang Weijuan, et al. Study on the ash deposition propensity and mechanism of shenhua coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 31-36(in Chinese).
- [7] 陈怀珍,刘家利,相大光. 神华动力用煤燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(6): 53-55, 88.  
Chen Huaizhen, Liu Jiali, Xiang Daguang. Study on combustion character of Shenhua steam coal[J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(6): 53-55, 88(in Chinese).
- [8] 愈海森,曹欣玉,周俊虎,等. 再燃、喷钙对燃烧神华煤炉内沾污结焦特性的研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 7.  
Yu Haimiao, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. Effect of coal reburning and injected calcium on fouling and slagging characteristics in shenhua coal combustion[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 7(in Chinese).
- [9] 吴东垠,魏小林,盛宏至,等. 炉内配风方式对锅炉经济性的影响[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 163-166.  
Wu Dongyin, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi, et al. Influence of air distribution in the furnace on economical operation of the boiler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 163-166(in Chinese).
- [10] 李文蛟,曹欣玉. 三次风反切下二次风配风方式对水平烟道温度偏差影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 73-77.  
Li Wenjiao, Cao Xinyu. Influence of secondary air distribution on the temperature deviation in the horizontal flue pass for a tangential fired boiler[J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(14): 73-77(in Chinese).
- [11] 高小涛. 大型燃煤电站锅炉低  $\text{NO}_x$  燃烧及其排放特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.

- Gao Xiaotao. Study on low- $\text{NO}_x$  combustion and its emission characteristics in large-scale coal-fired power plant boilers[D]. Nanjing: Southeast University, 2009(in Chinese).
- [12] 宁新宇, 梁绍华, 张希光, 等. 1025 t/h 烟煤锅炉掺烧褐煤的可行性试验研究[J]. 热力发电, 2010, 39(12): 53-55, 60.  
Ning Xinyu, Liang Shaohua, Zhang Xiguang, et al. Test study on the feasibility of mixedly burning lignituous coal into bituminous coal for 1025 t/h boiler[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(12): 53-55, 60(in Chinese).
- [13] 哈尔滨普华煤燃烧技术开发中心编. 大型煤粉锅炉燃烧设备性能设计方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 41-48.  
Harbin Puhua burning technology exploitation center. Performance design method for burning equipment of large-capacity pulverized-coal-fired boilers[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 41-48(in Chinese).
- [14] Harding N S, Minkara R A, Hare J E, et al. Effects of fuel quality on  $\text{NO}_x$  emission[C]//Proceeding of International Conference on "Impact of Fuel Quality on Power Generation", Banff, Canada, 2008.
- [15] Pershing D W, Wendt J O L. Relative contribution of volatile nitrogen and char nitrogen to  $\text{NO}_x$  emission from pulverized coal flame[J]. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 1978, 18(1): 60-67.



梁绍华

收稿日期: 2010-02-15。

作者简介:

梁绍华(1972), 男, 博士, 高级工程师, 从事锅炉性能试验、节能减排及煤粉燃烧优化方面试验研究, Lsh72js@yahoo.com.cn;

宁新宇(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事煤粉锅炉燃烧优化方面的试验研究。

(责任编辑 车德竞)