

# W 型火焰锅炉煤粉细度变化对燃烧影响数值模拟与试验研究

陈辉<sup>1</sup> 蔡培<sup>1</sup> 戴维葆<sup>1</sup> 王爱英<sup>1</sup> 周晓韡<sup>2</sup>

(1. 国电科学技术研究院, 南京 210031; 2. 国电泰州发电有限公司, 泰州, 225327)

## NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY ON COMBUSTION OF W TYPE FLAME BOILER ON THE INFLUENCE OF FINENESS CHANGE

CHEN Hui<sup>1</sup> CAI Pei<sup>1</sup> DAI Wei-bao<sup>1</sup> WANG Ai-ying<sup>1</sup> ZHOU Xiao-wei<sup>2</sup>

(1. GuoDian Science And Technology Research Institute, Jiangsu Nanjing 210031;

2. Guo Dian Tai Zhou Power Generation CO.,LTD, Jiangsu Taizhou 225327)

**Abstract:** Taking “W” type flame burning boiler of AS power plant as the Research object, aiming at the change of boiler running state under the condition of burning lean coal and burning low nitrogen, the influence of meagre coal fineness on boiler operation parameters is analyzed by numerical simulation and experimental. The decrease of pulverized coal fineness can obviously improve furnace combustion. Reduction of carbon content in fly ash by about 4 percentage points reduction NOX is about 13.9 percentage points. The fineness of pulverized coal burned with lean coal can be reduced by 2 percentage points compared with the values selected in the existing standard in the design and selection. Determination of recommended formula for fineness of meagre coal. The result can supplement and perfect <<the technical provisions for design and calculation of pulverizing system in thermal power plant>>-DL/T5145-2012, can provide guidance for design, calculation and operation of power station boiler and its pulverizing system.

**Keywords:** Utility Boiler; Meagre Coal; Fineness of Coal; Calculation Method

**摘要:**以 AS 电厂“W”型火焰燃烧方式锅炉为研究对象, 针对锅炉燃用贫煤且低氮燃烧状态下锅炉运行状态的变化, 通过数值模拟与试验研究分析煤粉细度变化对锅炉运行参数的影响, 煤粉细度 R90 由 5.9%降低至 3.7%, 可以明显改善炉膛燃烧, 飞灰含碳量降低约 4 个百分点, 省煤器出口氮氧化物浓度降低约 13.9%。确定贫煤最佳煤粉细度和推荐计算公式, 燃用贫煤时的煤粉细度在设计选择时可以较现有标准中选取值基础上降低 2 个百分点, 对现有《火力发电厂制粉系统设

计计算技术规定》---DL/T5145-2012 进行补充完善, 对电站锅炉及其制粉系统设计计算及运行提供指导依据。

**关键词:** 电站锅炉; 贫煤; 煤粉细度; 计算方法

### 1 背景

2002 年版《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》---DL/T5145-2002, 对煤粉细度选取规定如下: 固态排渣煤粉炉燃用贫煤时, 煤粉细度按公式  $R_{90}=2+0.5nV_{daf}$  计算。对低氮燃烧机组, 要考虑低氮燃烧对煤粉细度的要求, 但未给出具体的计算公式。2012 年版《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》---DL/T5145-2012, 对煤粉细度选取规定如下: 固态排渣煤粉炉燃用贫煤时, 煤粉细度按公式  $R_{90}=0.5nV_{daf}$  计算; 对低氮燃烧机组, 在煤粉细度选取时, 还应考虑低氮燃烧对煤粉细度的要求, 但未给出具体的计算公式。以上公式中的  $n$  为煤粉细度均匀性指数,  $V_{daf}$  为干燥无灰基挥发分。

比较两个版本的技术标准: 总体煤粉细度选择趋于下降, 具体为, 新版在针对贫煤煤粉细度选择下降了 2 个百分点。通过分析多台低氮燃烧改造后锅炉性能数据发现, 经低氮燃烧改造后, 大多机组燃用贫煤时, 飞灰含碳量增加明显, 减温水量有所提高。这表明新标准要求降低煤粉细度的方向是正确的, 但针对贫煤

煤种的煤粉细度降低程度不够，还需进一步深入研究。

除此之外，发电企业由于经济效益压力、煤炭市场短缺等原因，相当普遍地被迫燃用经济煤种，实施配煤掺烧，锅炉处在偏离设计煤质范围并趋向劣质的状态下运行。发电利用小时数显著下降，机组长期中低负荷运行，深度调峰的要求也被提出<sup>[1-3]</sup>。对于实际运行的电站锅炉，在这两种情况下，煤粉细度从理论上分析都应做出下降的调整，如何选择，同样有研究的必要。

电站锅炉实际处在低氮燃烧、燃用经济煤种和中低负荷运行相互叠加的状态下运行，产生出许多相当严重的问题：飞灰、大渣含碳量增大，减温水量升高等经济问题；受热面结焦，炉膛高温腐蚀，低负荷稳燃等安全问题；NO<sub>x</sub>生成量超标，喷氨过量，预热器堵塞等环保问题<sup>[4-5]</sup>。

通过长期的燃烧优化试验总结发现，上述问题的解决或缓解，技术关键都指向煤粉细度。更细的煤粉增加了固体颗粒比表面积，强化了析出、着火、稳燃、燃烬每个过程，对降低飞灰含碳有利，对低氮燃烧有利；相当于在主燃区更多的焦碳更快地接触到氧气，减弱了氮---氧反应生成 NO<sub>x</sub> 和增强了将 NO<sub>x</sub> 转化成 N<sub>2</sub> 的物理机率和化学动能，即进一步实现了在过剩空气系数不变条件下的缺氧燃烧，对降低 NO<sub>x</sub> 有利；意味着煤粉颗粒更小的惯性，减弱了被旋转烟气抛向边界热解、燃烧的程度，改善了炉膛壁面还原性氛围，对减轻高温腐蚀有利<sup>[6-7]</sup>。可见，研究煤粉细度的合理选择，对解决燃烧存在的问题，有现实价值。

## 2 锅炉设备概况

AS # 1 机组锅炉是东方锅炉厂制造的 DG1025/18.2- II 10 型亚临界压力，一次中间再热，自然循环，双拱形单炉膛，平衡通风，固态排渣，露天布置，全钢构架，全悬吊结构，尾部双烟道，燃煤“W”形火焰炉。

制粉系统采用双进双出球磨机正压直吹式系统，4 台磨煤机为沈阳重型机器有限责任公司生产的 BBD4060 型。

2013 年 8 月电厂对燃烧器进行低氮改造，取消双旋风筒浓淡分离燃烧系统，采用新型偏置浓缩、浓淡分离自稳燃低 NO<sub>x</sub> 燃烧器，一次风喷口由 48 只减少为 24 只。

燃烧设备采用了双拱绝热炉膛、燃烧器布置于下炉膛前后拱上、双通道浓淡分离低 NO<sub>x</sub> 煤粉燃烧器、分级配风、“W”火焰燃烧方式。炉膛分为上、下两部分，总高度 48153mm，上炉膛尺寸 24765×7620mm，下炉膛尺寸 24765×13725mm。

### 2.1 主要参数

锅炉主要设计参数见表 1：

**表 1 锅炉基本设计参数**

Tab. 1 The part of designed parameters of the boiler			
名称	单位	MCR	75%ECR
过热蒸汽流量	t/h	935	701.3
过热器出口蒸汽压力	MPa	17.42	17.14
过热器出口蒸汽温度	°C	540	540
汽包压力	MPa	18.54	17.77
再热蒸汽流量	t/h	780.66	595
再热蒸汽进/出口压力	MPa	3.60/3.44	2.76/2.63
再热蒸汽进/出口温度	°C	316/ 540	299/540
给水温度	°C	267	250
排烟温度(修正后)	°C	140	133
一级减温水量	t/h	14.6	7.1
二级减温水量	t/h	7.3	3.5
耗煤量	t/h	119.3	92.94
锅炉效率	%	90.59	90.88

### 2.2 锅炉燃料特性

锅炉设计煤种、试验煤种特性见表 2。

**表 2 锅炉煤种特性**

Tab. 2 The characteristics of coals of the boiler			
项目	单位	设计煤种	试验煤种
收到基碳	%	59.95	56.19
收到基氢	%	2.25	2.03
收到基氧	%	0.57	0.95
收到基氮	%	0.94	0.94
收到基硫	%	2.29	3.14
收到基水分	%	7	7.90
收到基灰分	%	27	28.85
收到基低位发热值	kJ/kg	21443	21100
干燥无灰基挥发分	%	12.5	13.2
可磨性系数	/	69	65

由表 2 可以看出，试验煤种和设计煤种相差不多，均为贫煤。

### 2.3 低氮燃烧改造情况

原燃烧器为引进 FW 技术设计制造的双旋风筒分离式煤粉燃烧器，由煤粉进口管、煤粉均分器、双旋风筒壳体、煤粉喷口、乏气管、乏气挡板等组成。2013 年进行低氮燃烧器改造，取消原双旋风筒浓淡分离燃烧系统，采用新型偏置浓缩，浓淡分离自稳燃低 NO<sub>x</sub> 燃烧器，一次风喷口由 48 只减少为 24 只。采用分

级配风，增加燃尽风，将部分二次风从二次风箱引至拱上燃尽风箱，并下倾一定角度进入炉膛。拱下垂直二次风 F 喷口处采取下倾一定角度的导流板，取消原布风板，封堵 F 部分喷口，降低原 F 风率。为了降低省煤器出口氮氧化物浓度，低氮改造时增加 SOFA 风层数和风率，SOFA 风率占总风量的比例为 25%，较改造前增加了 9 个百分点。SOFA 风量的增加势必会造成主燃烧器区域风量，对飞灰大渣不利。原燃烧和改造后燃烧器示意图见图 1。

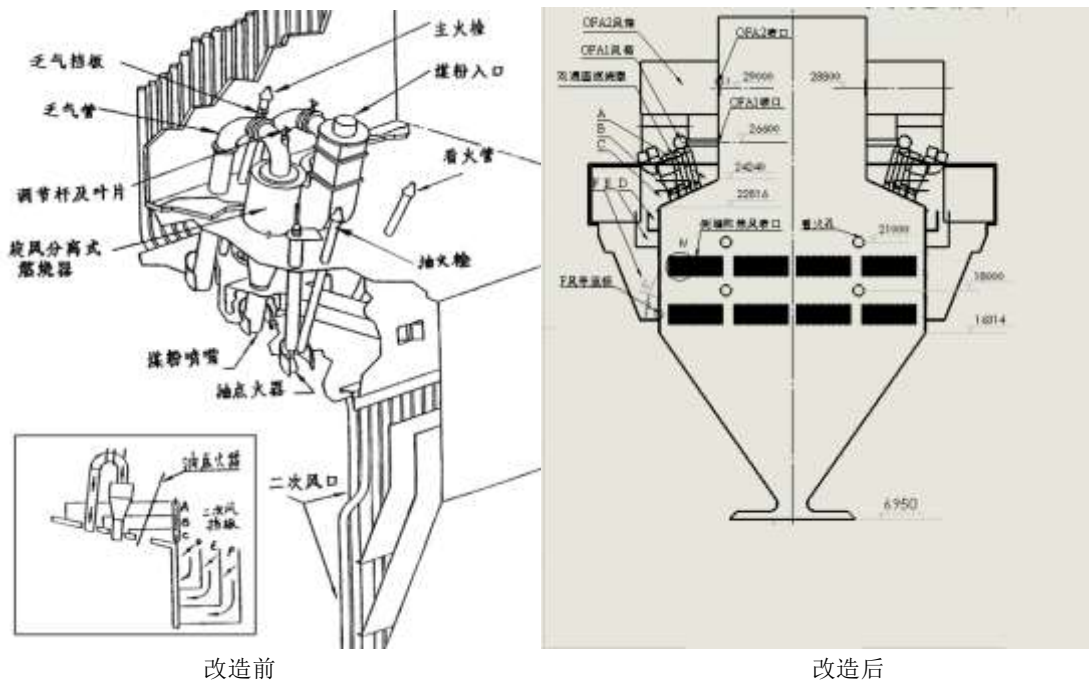


图 1 改造前后燃烧器示意图

Fig. 1 the burner diagram before and after revamping

### 3 不同煤粉细度数值模拟结果

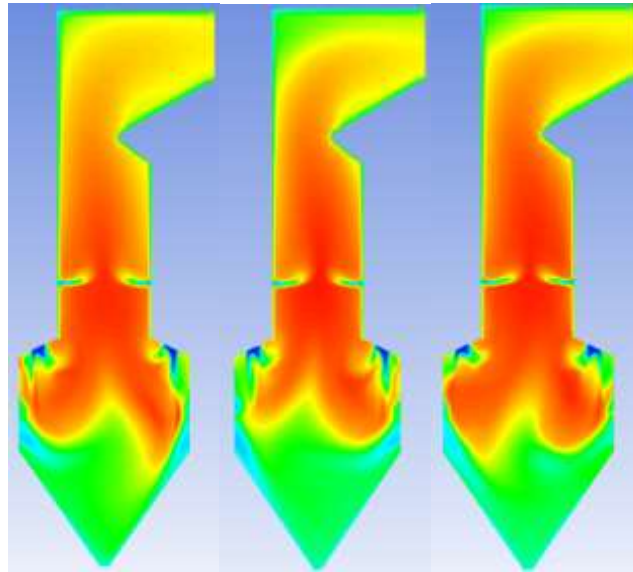
建立数值模拟模型，运行 FLUNET 数值模拟软件分析机组 260MW 负荷运行时，燃用干燥无灰基挥发分约 13.2%、收到基低位热值约 21.1MJ/kg<sub>煤</sub> 的贫煤不同煤粉细度工况下对燃烧的影响，如飞灰含碳量、省煤器出口氮氧化物浓度等变化。根据数值模拟结果确定最佳煤粉细度指导后期试验。数值模拟工况见表 3。模拟结果见表 4，图 2-图 6。

由表 3-表 4、图 2-图 6 可以看出，260MW 负荷、燃尽风比例 25% 左右、机组低氮燃烧方式下，改变煤粉细度对燃烧影响较明显。

表 3 260MW 下不同煤粉细度数值模拟工况

Tab. 3 the qualification of numerical simulation of different pulverized coal fineness under 260 MW load

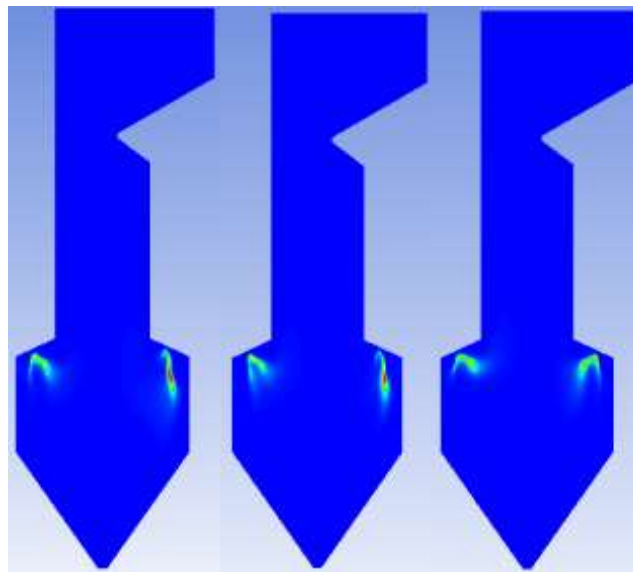
工况	工况 1	工况 2	工况 3
工况说明	$\alpha=1.25$	$\alpha=1.25$	$\alpha=1.25$
R90	5.9	4.8	3.7



工况 1          工况 2          工况 3

图 2 260MW 负荷下不同煤粉细度炉膛温度场分布

Fig. 2 the temperature field distribution of furnace with different pulverized coal fineness under 260 MW load



工况 1          工况 2          工况 3

图 3 260MW 负荷下不同煤粉细度燃烧器喷口挥发分分布

Fig.3 the distribution of nozzle volatilization with different pulverized coal fineness under 260 MW load

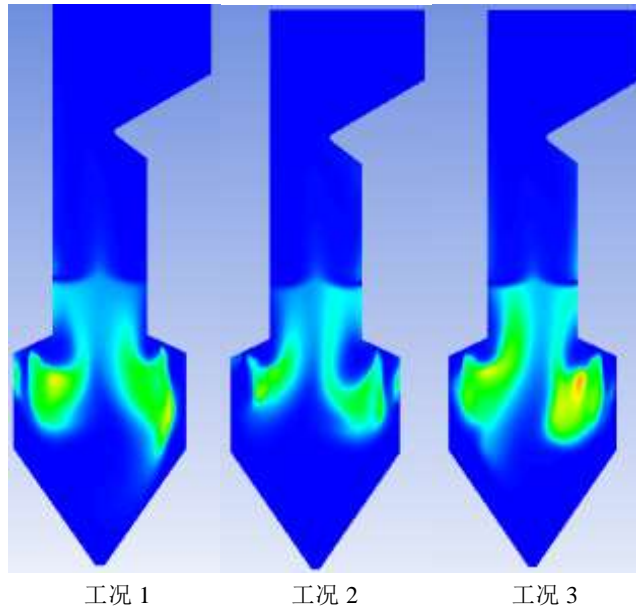


图 4 260MW 负荷下不同煤粉细度炉膛 CO 浓度分布

Fig. 4 the CO concentration distribution of furnace with different pulverized coal fineness under 260 MW load

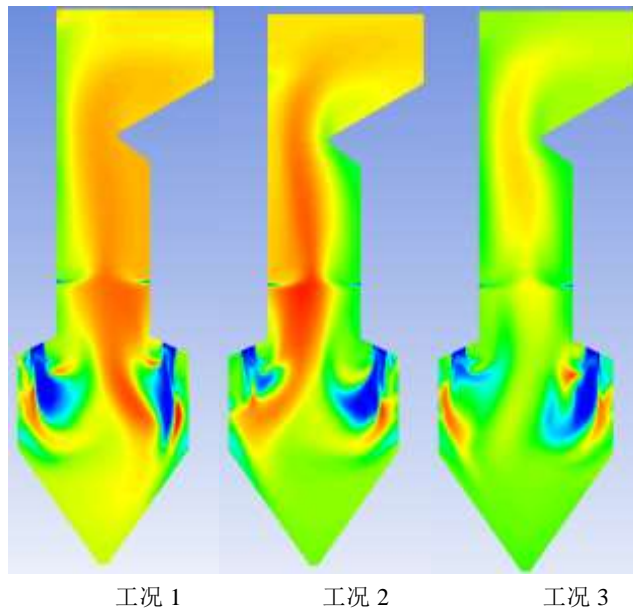


图 5 260MW 负荷下不同煤粉细度炉膛 NO<sub>x</sub> 浓度分布

Fig. 5 the NO<sub>x</sub> concentration distribution of furnace with different pulverized coal fineness under 260 MW load

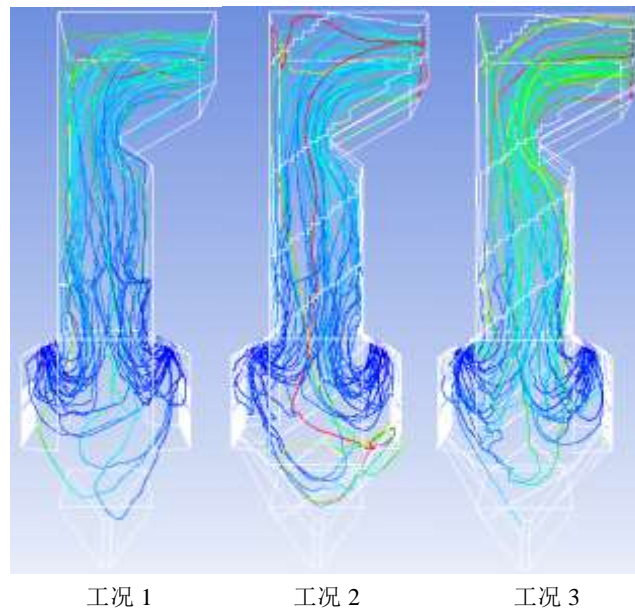


图 6 260MW 负荷下不同煤粉细度下煤粉在炉膛停留时间

Fig. 6 the residence time of pulverized coal in furnace with different pulverized coal fineness under 260 MW load

表 4 260MW 下不同煤粉细度数值模拟结果

Tab. 4 the result of numerical simulation with different pulverized coal fineness under 330 MW load

工况	工况 1	工况 2	工况 3
工况说明	R <sub>90</sub> =5.9%	R <sub>90</sub> =4.8%	R <sub>90</sub> =3.7%
炉膛出口 O <sub>2</sub> 浓度%	4.60	4.51	4.50
炉膛出口 NO <sub>x</sub> 浓度 mg/Nm <sup>3</sup>	841.97	821.91	719.18
飞灰含碳量%	10.17	8.77	6.14

(1) 随着煤粉变细的降低, 单位质量的煤粉与氧气及炉内热烟气接触的比表面积变大, 着火更早, 燃尽更彻底, 相同煤粉量的情况下放热更多, 因此炉膛整体温度水平平均较原始工况稍高。

(2) 降低煤粉粒度有利于燃尽, 飞灰含碳量由工况 1 至工况 3 逐渐降低。煤粉细度由 5.9% 降低至 3.7% 时, 飞灰含碳量由 10.17% 下降至 6.14%, 降低约 4 个百分点。

(3) 随着煤粉粒径的降低, 炉膛出口的 NO<sub>x</sub> 浓度逐渐减小。工况 2、3 较工况 1 下的炉膛出口 NO<sub>x</sub> 浓度分别降低约 2.4% 和 14.34%。

#### 4 不同煤粉细度试验结果

机组 260MW 负荷运行时, 燃用干燥无灰

基挥发分约 13.2%、收到基低位热值约 21.1MJ/kg 煤的贫煤。根据现有《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》---DL/T5145-2012 版计算贫煤所需的煤粉细度, 结合数值模拟结果并再此基础上降低煤粉细度。通过试验分析煤粉细度变化对锅炉运行参数, 如: 飞灰、大渣含碳量、排烟温度、减温水量、省煤器出口 NO<sub>x</sub>、磨煤机风机耗电量、机组供电煤耗等影响, 确定最佳煤粉细度。不同工况下试验结果见表 5-表 6。

260MW 负荷工况下, 共进行了 3 个变煤粉细度工况, 机组 ABCD 磨运行, 运行氧量 4.5% 左右。调整二次风配风方式至最佳状态, 改变磨煤机动态分离器转速调整煤粉细度。工况 1 下 ABCD 磨动态分离器频率均为 40Hz,

工况 2 下 ABCD 磨动态分离器频率均为 45Hz, 工况 3 下 ABCD 磨动态分离器频率均为 50Hz。

由表 5-表 6 可以看出,260MW 负荷下, 工况 1 的煤粉细度是根据现有《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》---DL/T5145-2012 中的公式计算得到的, 即为 5.9%。在工况 1 煤粉

细度基础上继续降低至工况 2 和工况 3, 分别降低 1.1 和 2.2 个百分点。随着煤粉细度的降低, 飞灰、大渣含碳量、减温水量、省煤器出口氮氧化物浓度和机组供电煤耗均呈降低趋势, 锅炉效率呈增加趋势。

表 5 260MW 负荷工况下炉效计算参数

Table 5 calculation parameters for furnace efficiency under 260 MW load

项目	单位	工况 1	工况 2	工况 3
煤粉细度 R90	%	5.7	4.8	3.5
试验煤质 (碳)	%	56.19	56.19	56.19
试验煤质 (氢)	%	2.03	2.03	2.03
试验煤质 (氧)	%	0.95	0.95	0.95
试验煤质 (氮)	%	0.94	0.94	0.94
试验煤质 (硫)	%	3.14	3.14	3.14
试验煤质 (灰份)	%	28.85	28.85	28.85
试验煤质 (水份)	%	7.90	7.90	7.90
挥发份 (空气干燥基)	%	11.24	11.24	11.24
试验煤质 (低位热值)	kJ/kg 煤	21100	21100	21100
排烟温度 (修正后)	℃	115.60	115.07	115.93
飞灰含碳量	%	11.30	7.51	6.33
炉渣含碳量	%	2.13	2.10	1.53
锅炉热效率	%	85.73	88.62	89.24

表 6 260MW 负荷变煤粉细度各工况下经济性比较

Table 6 pulverized coal fineness comparison under various working conditions in 260 MW load

项目	单位	工况 1	工况 2	工况 3
煤粉细度 R90 均值	%	5.9	4.8	3.7
省煤器出口 CO 浓度	ppm	0	0	0
锅炉效率	%	85.73	88.62	89.24
锅炉效率提高	/	0 (基准)	+2.89	+3.51
锅炉效率变化影响煤耗	g/kW.h	0 (基准)	-9.83	-11.94
风机、磨煤机耗电量	kW.h	13811	13879	14217
风机、磨煤机耗电量增加	kW.h	0 (基准)	68	339
磨煤机耗电量变化影响煤耗	g/kW.h	0 (基准)	+0.02	+0.17
省煤器出口 NOX	mg/m3	842	818	725
过热减温水量	t/h	56	42	42
再热减温水量	t/h	0	0	0
减温水量影响煤耗	g/kW.h	0 (基准)	0	-0.14
综合影响煤耗	g/kW.h	0 (基准)	-9.81	-11.90

在燃用贫煤时, 煤粉细度较现有标准计算值降低 2.2 个百分点, 对锅炉各系统影响为:

(a) 飞灰含碳量由 11.3% 降低至 6.33%, 变化明显, 降低约 5 个百分点。排烟温度变化不明显, 锅炉效率提高 3.51 个百分点, 影响煤耗降低约 11.94g/(KW·h)。

(b) 减温水量呈降低趋势。过热降温水量降低 14t/h。

(c) 煤粉细度降低 2.2 个百分点后, 磨煤

机耗、风机电量由 13811kW.h 增加至 14217kW.h, 增加 339kW.h, 增幅达 2.5%。

(d) 煤粉细度降低 2.2 个百分点后, 省煤器出口氮氧化物浓度降低约 117mg/Nm<sup>3</sup>, 降幅达 13.9%。

综上所述, 机组 260MW 负荷下, 煤粉细度降低后, 飞灰含碳量降低、省煤器出口氮氧化物浓度降低值的数值模拟结果和试验结果基本一致, 煤粉细度降低有利于改善炉膛燃烧,

提高机组经济性和环保性。

## 5 结论

W 型火焰锅炉在低氮燃烧状态且燃用贫煤时,煤粉细度 R90 由设计导则计算值 5.9% 降低至 3.7%,降低约 2 个百分点后,可以明显改善炉膛燃烧,降低飞灰含碳量约 4 个百分点,省煤器出口氮氧化物浓度降低约 13.9%,过热减温水量降低 14t/h。燃用贫煤时的煤粉细度在设计选择时可以较现有《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》---DL/T5145-2012 中选取值基础上降低 2 个百分点,进一步降低煤粉细度使得机组更加适应低氮燃烧状态,提高机组经济性和环保性。贫煤煤粉细度计算公式推荐为  $R90=0.5nV_{daf}^{-2}$ , 式中 n 为煤粉均匀性指数,通常为 0.8-0.9,  $V_{daf}$  为煤的干燥无灰基挥发分。

## 参考文献

- [1] 施涛,朱凌志,于若英等.电力系统灵活性评价研究综述[J].电力系统保护与控制,2016,5(44):146-151.  
Shi Tao, Zhu Lingzhi, Yu Ruoying, et al. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 5(44): 146-151.
- [2] 王春昌.电站燃煤锅炉煤粉细度控制值研究[J].热力发电,2011,1(40):44-48.  
Wang Chunchang. Study of The Fineness Controlled Value of Pulverized Coal for Coal-fired in Thermal Power Plants[J]. Thermal Power Generation, 2011, 1(40): 44-48.
- [3] 李沙,葛伟.600MW 机组锅炉掺烧澳煤飞灰含碳量高分析与

调整[J].电站系统工程,2016,32(6):73-74.

LI Sha, Ge Wei. Analysis and adjustment of high unburned carbon in flue dust for 600MW unit boilers after blending Australian coal[J]. Power System Equipment, 2016, 32(6): 73-74.

[4] 杨宏慧,杨建委.锅炉制粉系统煤粉细度大原因分析及对策[J].河南电力,2011,(2):32-34.

YANG Honghui, YANG Jianwei. Reason analysis and countermeasure on big degree of fineness of powdered coal in boiler pulverizing system[J]. He Nan Electric Power, 2013, 29(2): 37-38.

[5] 徐远鹏.锅炉水冷壁高温腐蚀原因及对策[J].中国电力,2005,38(10):76-79.

XU Yuanpeng. The caused and solution for high temperature corrosion on boiler water wall [J]. Electric Power, 2005, 38(10): 76-79.

[6] 吕洪坤,童家麟,刘建忠等.1000MW 超超临界锅炉高温腐蚀分析及对策[J].北京工业大学学报 2017,3(43):481-488.

LU Hongkun, TONG Jianlin, LIU Jianzhong, et al. Analysis and Solution of High-temperature Corrosion for a 1000 MW Ultra-supercritical Boiler [J]. Journal Of Beijing University Of Technology, 2017, 3(43): 481-488.

[7] 徐国群,陈国庆.对冲旋流燃烧锅炉炉膛壁面氛围数值模拟分析[J].电力科技与环保,2017,33(8):44-49.

XU Guoqun, CHEN Guoqing. Numerical simulation analysis of wall atmosphere in front and rear wall of posed coal-fired boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2017, 33(8): 44-49.

## 作者简介:

陈辉(1982—),男,江苏省宿迁人,高级工程师,硕士,主要从事火电机组性能试验、电站锅炉调试、燃烧优化等方面的研究。