

1 000 MW 双切圆锅炉低氮同轴燃烧系统的模拟分析

蒋晓锋

(上海发电设备成套设计研究院, 上海 200240)

摘要: 以某电厂 1 000 MW 单炉膛双切圆锅炉为例, 分析了炉膛内低氮同轴燃烧系统的流场特性。得到了单炉膛双切圆炉膛内温度、速度等物理量分布, 得到了 CFS(偏置风)、SOFA(分离燃尽风)对锅炉结渣性、烟温偏差、NO 排放等的影响。结果表明: 双切圆燃烧方式的烟速偏差小于单切圆燃烧方式; 炉膛按温度分热角和冷角; 受冷角布置的影响, 适中的 CFS 风速才能形成“风包煤”特性, 防止结渣; SOFA 反切使受热面热偏差减小, 火焰中心上移, NO 浓度逐渐增大; SOFA 摆角位置应根据受热面安全性、煤质特性、NO 排放综合考虑。

关键词: 单炉膛双切圆; 低氮同轴燃烧系统; 偏置风; 分离燃尽风; 结渣; 热偏差

中图分类号: TK223 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.01.017

引言

随着 2007 年华能玉环电厂一号机组并网发电, 我国火电机组由此迈入 1 000 MW 级别^[1]。目前我国在运 1 000 MW 火电机组中的锅炉设备按炉膛结构形式分为塔式、II 型两种, 按燃烧方式分为切圆、对冲两类。玉环电厂锅炉采用了双切圆燃烧方式, II 型炉膛布置形式。此类锅炉国内目前主要由哈尔滨锅炉厂(哈锅)和上海锅炉厂(上锅)设计制造。上锅区别于哈锅, 在于燃烧系统上采用了美国 ABB2CE 公司的 LNCFS(低氮同轴燃烧系统)技术。炉膛燃烧状况的好坏与锅炉性能、安全有直接联系。国内以哈锅锅炉为对象, 模拟研究了炉膛的燃烧特性、NO 生成和风量配比^[2-4]。但对采用 LNCFS 燃烧分析很少。本研究以某电厂 SG-3102/27.46-M 型锅炉为例, 分析了炉膛内低氮同轴燃烧系统的流场特性。为锅炉的运行调态提供参考。

1 设备概述

SG-3102/27.46-M 型锅炉为超超临界参数、

变压运行、单炉膛双切圆燃烧、一次中间再热、平衡通风、固态排渣、全悬吊钢结构、半露天 II 型布置、螺旋管圈直流锅炉。锅炉设计参数见表 1。锅炉设计燃煤特性见表 2。

表 1 锅炉设计参数

Tab. 1 Design parameters of the boiler

设计参数	锅炉最大 连续出力	汽机额定 工况的锅炉出力
过热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	3102	2940
过热器出口蒸汽压力/MPa	27.46	27.33
过热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	605	605
再热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	2563	2420
再热器进口蒸汽压力/MPa	6.31	5.94
再热器出口蒸汽压力/MPa	6.11	5.75
再热器进口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	378	367
再热器出口蒸汽温度/ $^{\circ}C$	603	603
省煤器进口给水温度/ $^{\circ}C$	299	295

表 2 燃煤特性

Tab. 2 Characteristics of coal burned

参数	数值
全水分/%	7.3
干燥基水分/%	2.4
收到基灰分/%	21.3
干燥无灰基挥发分/%	37.7
收到基碳/%	57.37
收到基氢/%	4.19
收到基氧/%	7.57
收到基氮/%	1.4
收到基硫/%	<0.87
收到基低位发热量/ $kJ \cdot kg^{-1}$	22 000

LNCFS 根据煤粉燃烧时 NO 的生成机理设计, 主要任务是通过建立早期着火和燃料/空气分级燃

收稿日期: 2014-02-18

作者简介: 蒋晓锋(1982-), 男, 四川达州人, 上海发电设备成套设计研究院工程师。

炉膛燃烧模拟计算由 FLUENT(流体计算) 软件完成。湍流模型选用带旋流修正的 Realizable $k - \epsilon$ 模型。气相反应模型选用适用于炉膛快速反应、非预混的 β /PDF(非预混端流燃烧) 模型。激活适用于煤粉燃烧细微颗粒输送流动的 DPM(颗粒边界条件) 模型。辐射模型选择考虑气体与颗粒间辐射、计算量较小、精度足够的 P - 1 模型。污染物排放考虑煤粉燃烧形成的热力型 NO 和燃料型 NO。

3 单炉膛的双切圆的燃烧特性

经典的四角切圆锅炉将燃烧器布置于炉膛四个角部, 而本台锅炉由于结构的限制, 中间四组燃烧器无法布置于角部。综合考虑, 该炉型将八组燃烧器对称布置于前后墙, 中间四组保持一定距离, 靠墙四组离侧墙也有一定距离。最终构成两个旋转方向相反的假想切圆。

3.1 温度场

图 4 为第 c 层一次风温度分布。炉膛截面高温区出现在靠墙位置, 特别是炉膛中部高温区范围最大, 这主要是由于没有设计中间隔墙水冷壁。燃烧器的位置与切圆方向构成的流场特性, 使得炉膛 2 号、4 号、5 号、7 号角温度较高, 1 号、3 号、6 号、8 号角温度较低。行业上分别称为热角和冷角(下文 2 号、4 号、5 号、7 号角统称热角, 1 号、3 号、6 号、8 号角统称冷角)。对整个炉膛而言, 由于 SOFA 风的设计, 炉膛燃烧火焰中心被抬高。炉膛高温区域(≥ 1800 K) 大致位于燃烧器与 SOFA 风之间的区域。

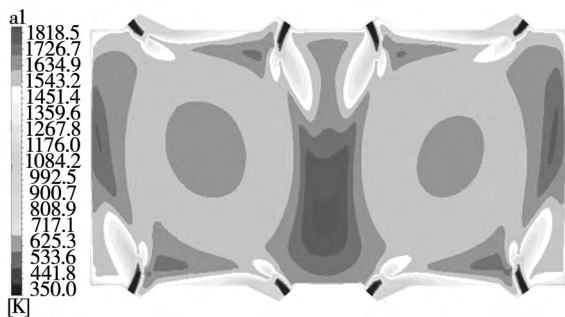


图 4 第 c 层一次风温度分布
Fig. 4 Temperature distribution of the c-layer primary air

燃烧产生的中间组份 OH 的浓度, 直接反映了燃烧的反应区域。各截面剧烈反应区域与高温区域相似。反应区域大部分位于两个切圆边界区域, 小

部分位于切圆中心, 特别是炉膛中部反应最为剧烈。

3.2 速度场

图 5 - 图 7 为一次风、CFS、直吹二次风截面速度矢量, 各层风均在炉膛内形成了左右对称的旋转流动。流场特性与单炉膛四角切圆炉膛的流场近似, 主要区别在冷角形成的旋涡回流。由于惯性和偏置风的引导作用, 一次风最大烟气流速大约位于 0.8 倍炉膛水力半径位置, 实际燃烧切圆是假想切圆的 7 倍左右。一、二次风主流烟气流速都介于 18 m/s 与 22 m/s 之间。另外, 切圆呈现微椭圆形状, 椭圆长轴近似位于 2 号、4 号对角线与 5 号、7 号对角线。

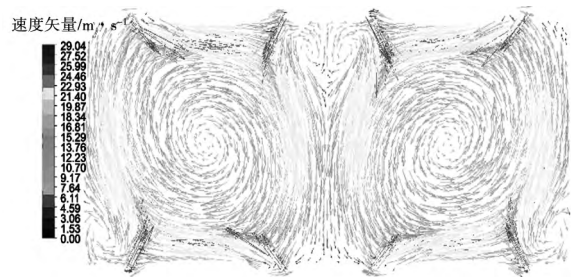


图 5 第 c 层一次风速度矢量
Fig. 5 Velocity vector of the c-layer primary air

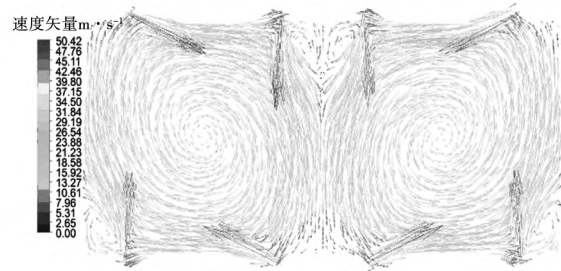


图 6 第 c1 层 CFS 速度矢量
Fig. 6 Velocity vector in CFS in the c1 layer

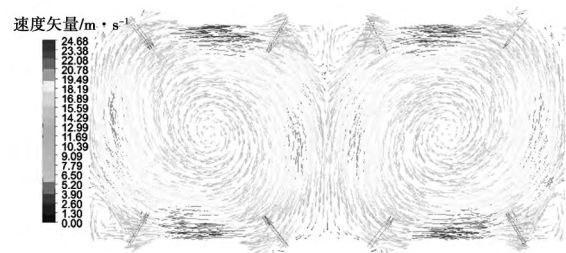


图 7 第 cd 层直吹二次风速度矢量
Fig. 7 Velocity vector of the cd-layer straightly-blown secondary air

图 8 - 图 10 为 3 层 SOFA 速度分布。随着 SOFA 离炉膛烟窗越来越近, 旋转气流受屏式过热器和炉膛出口速度的影响也越来越大。SOFA 在保持水平旋转上升的同时, 切圆的椭圆度逐渐增大(长轴拉长, 短轴缩短)。

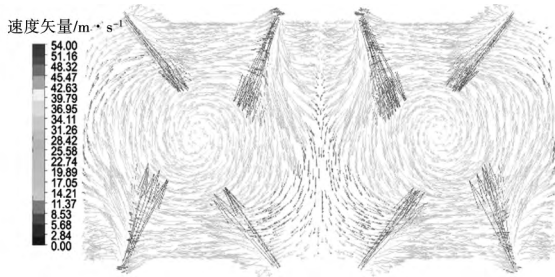


图 8 第 1 层 SOFA 速度矢量

Fig. 8 Velocity vector of the 1st-layer SOFA

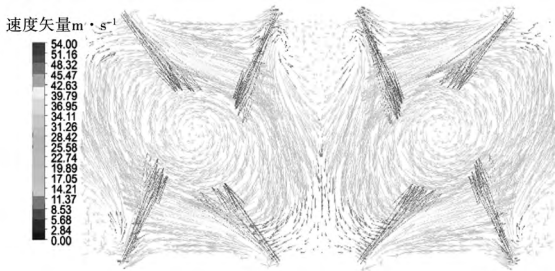


图 9 第 3 层 SOFA 速度矢量

Fig. 9 Velocity vector of the 3rd-layer SOFA

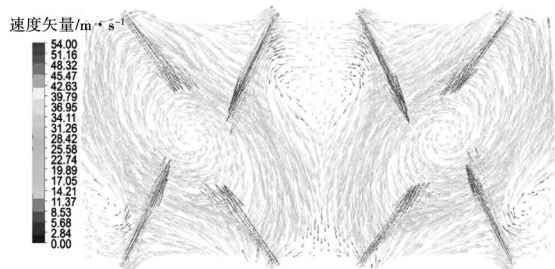


图 10 第 5 层 SOFA 速度矢量

Fig. 10 Velocity vector of the 5th-layer SOFA

下部炉膛烟气的旋转动量一直保持到分隔屏下部, 但受到分隔屏消旋作用的影响, 旋转强度下降明显。当烟气上升到烟窗中部位置, 烟气旋转基本消失, 同时炉膛出口烟气速度沿炉膛宽度方向的分布明显不均。炉膛左右两侧烟气速度在 15 m/s 左右, 而炉膛中部最小只有 2 m/s。高温再热器中部出现较大范围的回流, 靠左右墙也有小范围回流。图 11 - 图 12 为炉膛出口中部和侧墙烟气速度矢量, 两侧

与中部有着截然不同的流动特征, 两侧烟气斜向炉前流动, 而中部烟气斜向炉后流动。

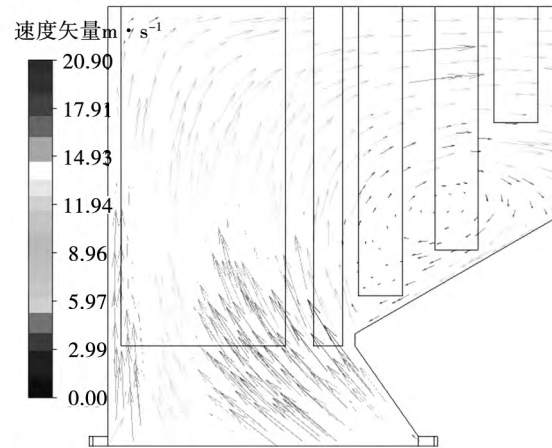


图 11 炉膛出口中间截面速度矢量

Fig. 11 Velocity vector of the middle section at the outlet of the furnace

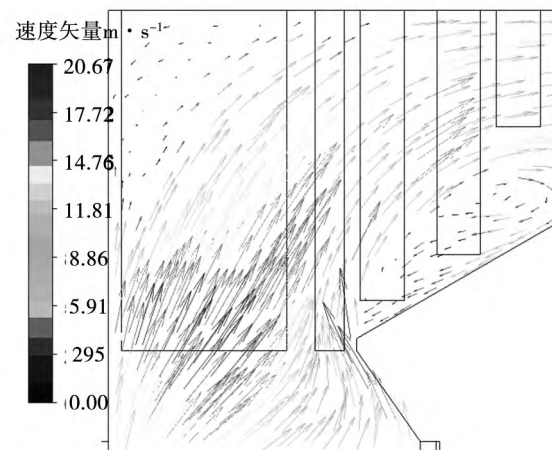


图 12 炉膛出口侧墙截面速度矢量

Fig. 12 Velocity vector of the cross section of the side wall at the outlet of the furnace

3.3 屏式过热器热负荷

双切圆燃烧在炉膛中形成两个火焰中心。相对于单切圆, 双切圆的中部高负荷辐射区域更为宽阔, 但两侧靠墙管屏的热负荷仍明显低于平均值。受炉膛辐射直接影响的分隔屏过热器热负荷分布就反映这一特征(图 13)。后屏过热器位于炉膛出口, 两侧对流换热强烈, 同时受到炉膛辐射与烟气辐射, 热负荷呈马鞍形分布(图 14)。正如早期专家预料^[4], 双切圆烟气热偏差小于单切圆。

3.4 O₂ 摩尔浓度

最后, 通过图 15 一次风 O₂ 摩尔浓度来分析空

气的流动与消耗过程。热角喷口流出的空气均匀贴墙覆盖炉膛前后墙,而冷角喷口流出的空气在到达左右墙后迅速消耗,未能完全覆盖水冷壁。两类喷口有截然不同的布置特点,热角与常规四角切圆锅炉相同,气体下游直接贴墙,而冷角气体下游与侧墙存在一段距离。冷角的布置特点使得空气不能切向掠过贴覆侧墙,而是随离心力作用呈小角度撞击侧墙。撞击作用强化了燃料与空气的混合,燃烧加剧,氧气消耗也快。侧墙的空气分布使炉膛存在结渣隐患。

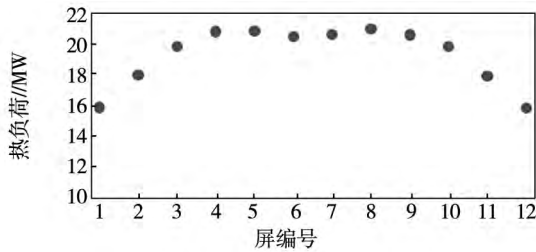


图 13 分隔屏过热器热负荷沿炉膛分布

Fig. 13 Heat load distribution on the superheater of the division platen along the direction of the furnace

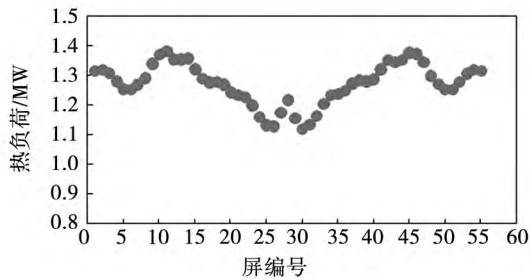


图 14 后屏过热器沿炉膛热负荷分布

Fig. 14 Heat load distribution on the superheater of the rear platen along the direction of the furnace

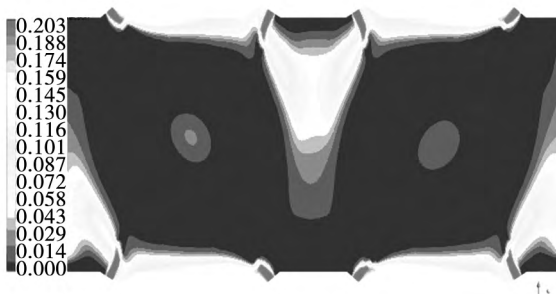


图 15 第 c 层一次风 O₂ 摩尔浓度 (%)

Fig. 15 O₂ molar concentration of the c-layer primary air (%)

4 CFS 风速对结渣的影响

由前面温度场和速度场得知,炉膛切圆大,烟气有明显贴壁旋转的态势,贴壁的烟温高,这样高的壁温,在燃用灰熔点较低的煤时容易产生结焦现象。再者,由于冷角喷口下游不是贴墙布置,设计工况下的 CFS 未能在左右侧墙形成完全的富空气区,有结渣隐患。可以设想,通过调节 CFS 的方式能够减小烟气离心力,进而扩大侧墙富空气区。本例减小 CFS 风速,计算 9 个不同的工况,各工况二次风风速如表 4 所示。

表 4 二次风风速 (m/s)

Tab. 4 Air speed of the secondary air

工况编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
直吹二次风风速	23	25	27	29	31	33	35	37	39
CFS 风速	54	52	50	48	46	44	42	40	38

4.1 基本物理场

不同二次风配比的 9 个工况均在炉膛内形成了左右对称的旋转流动,燃烧的稳定可以得到保证。随着 CFS 风速的减小,实际的燃烧切圆半径减小并不明显。一次风主流烟气流速都维持在 18 m/s - 22 m/s 的范围。截面高温区也都位于靠墙及炉膛中部位置。但随着 CFS 风速的减小,高温区相应减小。

4.2 防结渣性能分析

图 16 为各工况一次风截面 O₂ 摩尔浓度,当减小 CFS 风速,侧墙富空气区也相应扩大。这是由于烟气的旋转强度的减小,避免了冷角直接冲刷水冷壁,减弱了空气与燃料的混合。但是,当 CFS 风速过低时,水平分级不明显,二次风不能完全将一次风煤粉气流裹在炉膛中央。工况 8、工况 9 侧墙、前后墙形成的富空气区都过小,不能形成“风包煤”。因此,合理的 CFS 风速即需要形成空气水平分级以减少灰渣在水冷壁上的沉积,使灰渣疏松,防止结渣。也需要避免过大的旋转强度,工况 5 的 CFS 风速 46 m/s 对于防止结渣最为有效。

4.3 NO 排放比较分析

锅炉燃烧所产生的 NO 主要有热力型 NO 和燃料型 NO。热力型 NO 很大程度上依赖于温度而不

是燃料种类。模型 5 的一次风截面高温区域(1 770 K - 1 849 K) 相对较小, 热力型 NO 形成区域也最小。燃料型 NO 来源于残留于煤中的氮, 形成速率会随着氧浓度的增加而增加。工况 5 的 CFS 风速在炉膛截面形成最佳的空气水平分级, 初始燃烧阶段推迟了空气和煤粉的混合, 从而减少了挥发份氮转化为 NO 的几率。图 17 为炉膛出口的 NO 质量浓度, 工况 5 对于降低 NO 更为有利。

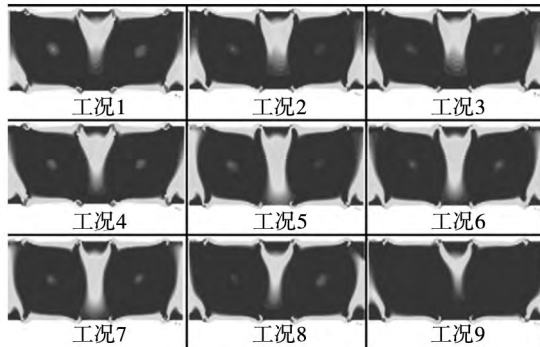


图 16 第 c 层一次风截面 O₂ 摩尔浓度 (%)

Fig. 16 O₂ molar concentration of the c-layer primary air

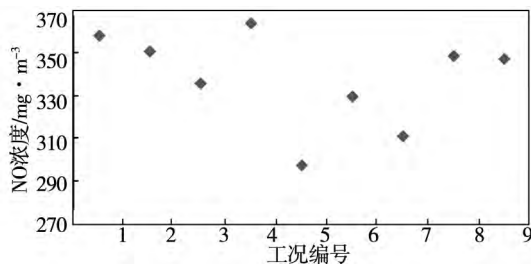


图 17 炉膛出口 NO 浓度

Fig. 17 NO concentration at the outlet of the furnace

5 SOFA 摆角对偏差与 NO 排放的影响

LNCFS 的 SOFA 通过空气垂直分级, 控制炉膛温度, 控制 NO 排放。水平摆动调节的 SOFA 喷嘴可用于控制炉膛出口的烟温烟速偏差。锅炉 SOFA 喷嘴可水平摆动 ±20°。下面以炉膛出口烟温偏差为重点, 分析 9 个 SOFA 摆角对炉内燃烧的影响, 如表 5 所列。二次风采用 46 m/s 的 CFS、31 m/s 的直吹二次风。

5.1 速度偏差分析

SOFA 摆角对主燃烧区域影响有限, 一、二次风保持良好的对称旋转流动特性。SOFA 层速度分布受摆角影响比较明显, 图 18 为左炉膛第 5 层 SOFA 速度矢量。工况 1 - 工况 4 说明, SOFA 反切并不能改变炉膛烟气主流场的旋转方向, 不会影响燃烧的稳定性。随着摆角由 +20° - 20°, 烟气旋转强度逐渐减小, 切圆变小, 主流速度逐渐减小。

表 5 各工况 SOFA 摆角

Tab. 5 Swaying angle of SOFA under various operating conditions

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
角度	-20°	-15°	-10°	-5°	0°	+5°	+10°	+15°	+20°

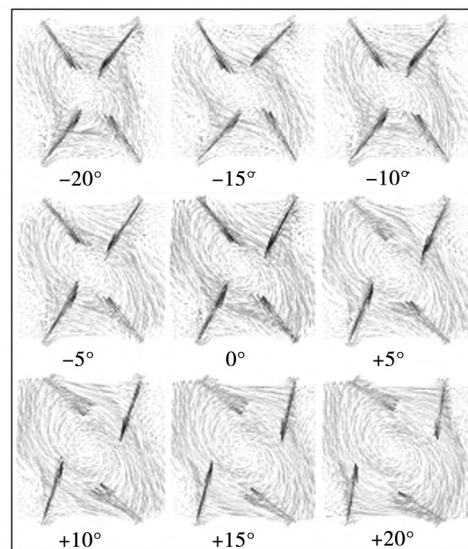


图 18 第 5 层 SOFA 速度矢量

Fig. 18 Velocity vector of the 5th-layer SOFA

切圆燃烧锅炉炉膛出口受热面热负荷偏差由残余旋转造成。由 SOFA 速度分布可见, SOFA 摆角由正切到反切, 炉膛出口烟气的速度偏差将逐渐减小。烟气残余旋转可以用动量矩评判指标 δ 表示:

$$\delta = \frac{\int_0^R wur^2 dr}{R \int_0^R w^2 r dr} = \frac{\iint_A wur dA}{\iint_A R w^2 dA} \quad (1)$$

式中: R —炉膛截面当量半径, m; u —烟气轴向速度, m/s; w —烟气切向速度, m/s; r —气流旋转半径, m; A —炉膛截面面积, m²。

式(1)中分子表示炉膛某一截面上烟气的残余

旋转动量矩 分母表示燃烧器断面上全部烟气的旋转动量矩。 $\delta = 0$ 表示没有残余旋转 δ 越大残余旋转所占的份额越大,可根据数值计算结果积分求得。各工况 δ 值随炉膛高度变化如图 19 所示。一方面,炉内旋转气流沿炉膛高度逐步衰减,因此若延长 SOFA 至炉膛出口的行程,则气流到达炉膛出口的旋转强度也相对减弱,速度分布趋于均匀。另一方面,SOFA 反切减小了炉膛上部的切圆直径,使炉膛出口气流残余旋转明显减小,从而减小烟速偏差。最后,由于主燃烧区形成了很强的旋转流场,SOFA 反切可以减弱偏差,不能消除。

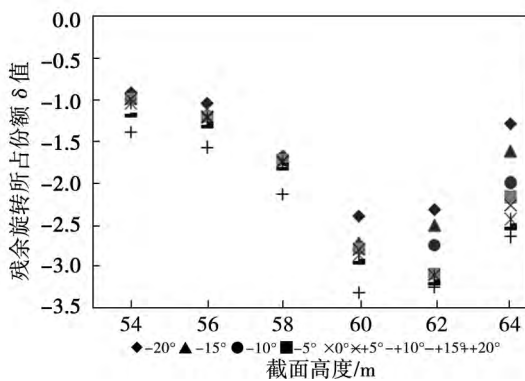


图 19 δ 随炉膛高度变化

Fig. 19 Changes of δ with the furnace height

5.2 温度分布

图 20 表示分隔屏入口、SOFA 上部截面烟气温度随 SOFA 摆角的变化趋势。随着 SOFA 风由 $+20^\circ$ 变化到 -20° ,炉膛内的旋转强度逐渐减小,火焰中心逐渐上移 2 个截面的烟气温度逐渐上升。

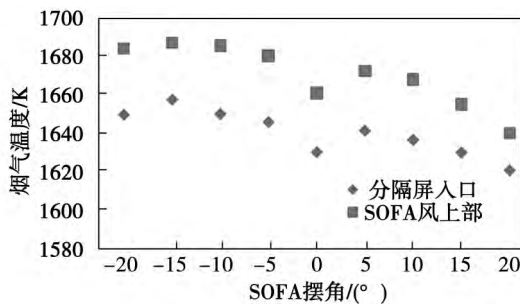


图 20 不同 SOFA 摆角的炉膛截面温度

Fig. 20 Temperature in the section of the furnace at different swaying angles of SOFA

再者,从图 25 可见,虽然火焰中心随着 SOFA

摆角的减小而上移,但未级再热器出口平均烟气温度变化不大。这是由于超大型锅炉炉膛热容量很大,燃烧非常稳定,虽然火焰中心稍有上移,锅炉的燃焓率并不会增大,锅炉的固体燃烧热损失变化不大,锅炉燃烧效率未受影响。

5.3 NO 排放

图 26 为炉膛出口 NO 浓度随 SOFA 摆角的变化趋势。随着 SOFA 摆角逐渐减小,NO 浓度表现出逐渐增大的趋势。这是由于当 SOFA 反切的时候,燃烧组织均匀性差于正切,空气水平、垂直分级特性变弱,助长了 NO 的生成。

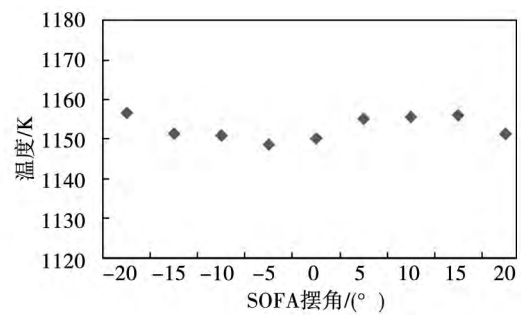


图 21 末级再热器出口平均烟气温度

Fig. 21 Average temperature of the flue gases at the outlet of the last-stage reheater

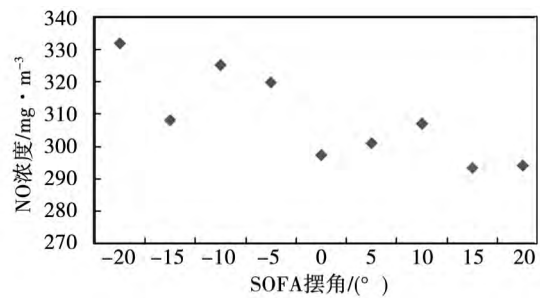


图 22 炉膛出口 NO 浓度

Fig. 22 NO concentration at the outlet of the furnace

综合考虑,当受热面有超温现象时,为了控制偏差,将 SOFA 摆角控制在 $-10^\circ - 0^\circ$ 之间较为合理;当燃用低挥发分煤时,为了稳定燃烧,将 SOFA 摆角控制在 $0^\circ - 10^\circ$ 之间较为合理。

6 结 论

针对炉膛的燃烧特点,分析 CFS 与 SOFA 对炉

膛的防渣性和受热面的热偏差等的影响,得到 LNCFS 的燃烧特性:

(1) 烟气在炉膛形成对称微椭圆旋转流动。综合辐射与对流,炉膛上部受热面热负荷偏差小于单切圆燃烧方式。炉膛按温度分热角和冷角。

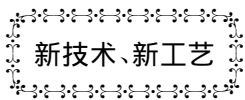
(2) 受冷角布置的影响,合理的 CFS 风速 46 m/s 才能形成“风包煤”特性,防止结渣,NO 生成量也少。

(3) SOFA 反切使受热面热偏差减小,火焰中心上移,NO 浓度逐渐增大。SOFA 摆角位置应根据受热面安全性、煤质特性、NO 排放综合考虑。

参考文献:

- [1] 王新生. 华能玉环电厂超超临界 1000 MW 机组锅炉特点[J]. 热力发电, 2008, 37(3): 1-4.
WANG Xin-sheng. Specific features of a 1 000 MW ultra-supercritical boiler unit in Huaneng Yuhuan Power Plant [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(3): 1-4.
- [2] 辛娜娜. 1000 MW 超超临界褐煤锅炉炉内燃烧过程的数值模拟[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
XIN Na-na. Numerical simulation of the combustion process inside a 1 000 MW ultra-supercritical lignite-fired boiler[D]. Harbin Institute of Technology, 2008.
- [3] 焦峰. 1 000 MW 褐煤锅炉炉内空气动力场和燃烧过程数值模拟[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
JIAO Feng. Numerical simulation of the aerodynamic field and combustion process inside a 1 000 MW lignite-fired boiler [D]. Harbin Institute of Technology, 2010.
- [4] 高正阳, 宋玮, 方立军, 等. 1 000 MW 超超临界机组双切圆锅炉 NO 排放特性的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 12-18.
GAO Zheng-yang, SONG Wei, FANG Li-jun, et al. Numerical simulation of the NO emissions characteristics of a 1 000 MW ultra-supercritical dual tangentially-fired boiler unit [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2009, 29(32): 12-18.
- [5] 章明川, 牛天况, 范卫东, 等. II 型布置切圆燃烧锅炉超大型化发展的一些动向及分析展望[J]. 锅炉技术, 2001, 32(2): 1-6.
ZHANG Ming-chuan, NIU Tian-kuang, FAN Wei-dong, et al. Latest research findings in the ultra large-scale-oriented development and analysis of II-type arrangement tangentially-fired boilers [J]. Boiler Technology, 2001, 32(2): 1-6.

(陈滨 编辑)



新技术、新工艺

超临界循环流化床锅炉

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.018

据《Электрические станции》2013 年 9 月刊报道,全俄热工研究所的专家研究了超临界循环流化床锅炉内的燃烧过程。

分析了在循环流化床锅炉内燃烧固体燃料时涉及超临界蒸汽参数的问题。

研究表明,在很久以前的实践中,采用循环流化床工艺时就掌握和使用提高了蒸汽参数的方法。

给出了与 600-800 MW 功率相似的循环流化床锅炉装置的国外研究成果。

根据一些局部条件的经济论证结论,分析了选择蒸汽参数的方法。

提供了高参数循环流化床锅炉的管材和炉墙材料选择的数据资料。

给出了俄罗斯超临界蒸汽参数大功率装置采用循环流化床锅炉的条件。

(吉桂明 摘译)

steam. When the working medium is water, in the case of the pressure difference of the first-stage lithium bromide steam and the intermediate solution is between 3.5 kPa and 3.8 kPa, the dual-stage solution pump can be put into operation and the start-up time duration will decrease with an increase of the submerging height. When the working medium is lithium bromide solution, with an increase of the solution concentration, the pressure difference required for starting up the dual-stage bubble pump will increase and be greater than that when the working medium is water. The start-up time duration will increase with an increase of the concentration when the lithium bromide solution concentration is in a range from 45.5% to 54% while it will decrease with an increase of the concentration when the lithium bromide concentration falls in a range from 54% to 59.5%. When the lithium bromide solution concentration is 54%, the start-up time duration arrives at its maximum value. **Key Words:** dual-stage bubble pump, pump start-up phenomenon, intermediate solution, absorption type refrigeration, pressure difference

1 000 MW 双切圆锅炉低氮同轴燃烧系统的模拟分析 = **Simulation and Analysis of the Low Nitrogen Coaxial Combustion System of a 1 000 MW dual-tangentially-fired Boiler** [刊 汉]JIANG Xiao-feng (Shanghai Power Generation Complete Equipment Design Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(1). -58 -65

With a 1 000 MW single furnace and dual-tangentially-fired boiler in a power plant serving as an example, a numerical simulation method was used to analyze the characteristics of the flow field in its low nitrogen coaxial combustion system in the furnace. In this process, the distribution of physical variables such as the temperature and speed etc. in the single furnace dual-tangentially-fired boiler was obtained with the influence of the horizontally offset overfire air and separated overfire air (SOFA) on the slagging, flue gas temperature deviation and NO emissions etc. being identified. It has been found that the deviation of the flue gas speed of the dual-tangentially-fired combustion mode is less than that of the single-tangentially-fired combustion mode. The corners of a furnace are divided into hot corners and cold ones. Influenced by the distribution of the cold corners, only a moderate air speed of the horizontally offset overfire air can lead to the “coal-surrounded-by-air” characteristics and prevent from slagging. The reverse tangential supply of the separated overfire air can force the thermal deviation of the heating surfaces to decrease, the center of the flame to move upwards and NO concentration to gradually increase. In such a case, the setting of the SOFA swaying angle should be taken into consideration in a comprehensive way depending on the safety of the heating surfaces, coal characteristics and NO emissions. **Key Words:** single furnace and dual-tangential, low nitrogen coaxial combustion system, horizontally offset overfire air, separated overfire air (SOFA), slagging, thermal deviation