

配风方式对四角切圆煤粉锅炉燃烧特性影响数值分析

李素芬^{*1}, 刘丽萍¹, 陈贵军¹, 段联胜²

(1. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大化集团热电厂, 辽宁 大连 116031)

摘要:借助 CFD 软件平台,利用 Fluent 对四角切圆煤粉锅炉炉内燃烧过程进行了三维稳态数值模拟,重点研究了二次风配风方式对炉内流动和燃烧过程的影响,探讨了不同配风方式下炉内流场、温度场、组分场的变化规律.结果表明:在均等配风、正宝塔配风、倒宝塔配风三种配风方式中,正宝塔配风为最佳配风方式.它不仅能保证炉内具有较好气流充满度和下二次风风速,利于煤粉与空气的混合与燃烧,减少炉渣中的可燃物含量,而且能够保证高温火焰位于燃烧区的中心位置,延长煤粉到炉膛出口的距离.研究结果对锅炉运行、设计和改造具有理论指导意义.

关键词:四角切圆煤粉锅炉;配风方式;燃烧特性;数值模拟

中图分类号:TK224 **文献标志码:**A

0 引言

四角切圆煤粉燃烧锅炉因其燃烧适应性好、风粉混合均匀,是目前我国电站锅炉应用最广、最为成熟的燃烧器.因此,研究四角切圆煤粉炉炉内的流动、燃烧、传热特性有非常重要的意义.随着计算机技术以及计算流体力学、计算传理学^[1]、计算燃烧学等学科的发展,利用数值计算方法来模拟锅炉炉内的气固两相流动^[2~4]已成为研究炉内流动、传热和燃烧的重要手段.

煤粉在炉膛内的燃烧是一个十分复杂的化学、物理过程,它不仅与燃烧器的布置和炉膛本身的结构有关,还受炉内空气动力场的影响.锅炉二次风的配风方式是影响炉内空气动力场的主要因素,因此,本文以计算流体软件 Fluent6.2 为基础,选用合适的数学物理模型和良好的网格划分,对 1 台 220 t/h 四角切向煤粉锅炉炉内燃烧过程进行三维稳态数值模拟,计算满负荷下的 3 种配风方式,深入分析四角切圆锅炉的二次风配风方式对炉内流场、温度场、组分场的影响,以期对锅炉运行、设计和改造提供理论指导.

1 数学模型

煤粉在炉膛内的燃烧包括挥发分的释放、焦炭的燃烧、辐射传热、颗粒运动和气相流动及湍流燃烧,涉及到多相流动、传热传质和燃烧等多个学科.

炉内三维气相流动、热平衡与燃烧的控制方程可写成如下统一形式^[5]:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} + S_{p\phi} \quad (1)$$

式中: ϕ 代表速度 u 、 v 、 w ,及湍流动能 k 、湍流动能耗散率 ϵ 、时均混合分数 $\bar{f}$ 、混合分数脉动均方值 g 、焓 h 和 i 组分的质量分数 Y_i ; Γ_{ϕ} 为扩散系数,当 $\phi = 1.0$ 时为连续性方程; S_{ϕ} 是由气相引起的源相; $S_{p\phi}$ 是由固体颗粒引起的源相.

本文采用分离隐式的求解方法,将气相作为连续相介质,在欧拉(Eulerian)坐标系中描述,采用可实现的 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟气相湍流输运^[1];采用非交错网格的 Simple 方法求解 N-S 方程;用守恒标量的混合分数/概率密度函数模拟气相湍

流燃烧^[6];用 P-1 辐射模型开展辐射传热模拟^[7]. 将煤粉颗粒作为离散相,采用拉格朗日-欧拉法处理煤粉颗粒的挥发分析出和煤焦燃烧过程,以及气固两相间的质量、动量和能量的相互作用;对挥发分的析出采用两步竞相模型,焦炭的燃烧采用运动/扩散控制燃烧模型^[8],煤粉颗粒的跟踪采用 Lagrangian 随机轨道模型.

2 实际模拟

2.1 模拟对象

本文所采用的模拟对象是某电厂的一台 CG-220/9.81-M 型自然循环、单锅筒集中下降管、平衡通风、固态排渣煤粉锅炉,其结构尺寸见图 1(a). 该炉采用四角切圆燃烧方式,炉膛尺寸为 7 570 mm×7 570 mm,燃烧器呈四角分布,在炉膛中心形成直径为 700 mm 的假想切圆,燃烧器自下而上排列方式为二、一、二、一、二、三次风,见图 1(b),由于本文重点考虑的是炉膛内燃烧过程的数值模拟,在热态模拟时,忽略了屏区和凝渣管

的作用. 该炉采用钢球磨中储式热风送粉系统,煤粉颗粒直径最小为 90 μm,最大为 200 μm,平均直径为 144 μm. 煤质分析见表 1.

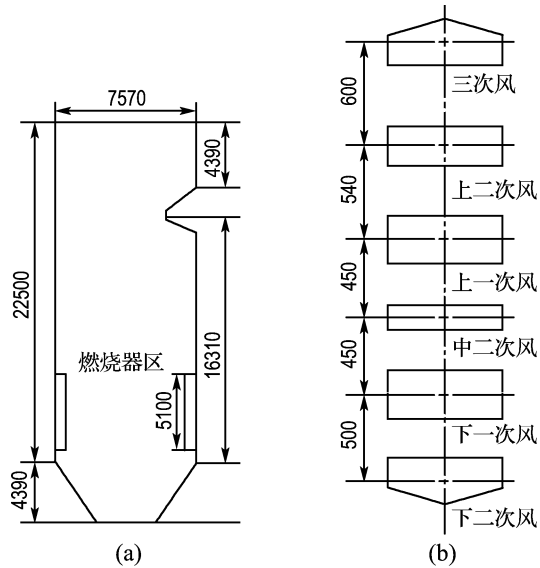


图 1 锅炉结构简图

Fig. 1 The structure diagram of boiler

表 1 煤质分析表

Tab. 1 The quality analysis of coal

元素分析/%					工业分析/%				
C	H	O	N	S	$M_{t,ar}$	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
55.24	3.93	7.51	0.58	0.15	9.6	1.14	22.99	39.31	21.34

2.2 网格划分

本文的计算模型和原型的几何比例为 1 : 1, 与原型相比,计算模型在炉膛、燃烧器结构上做了适当的简化. 数值计算的网格采用 Gambit 商业软件进行划分. 网格划分上采用了块结构化网格技术,该技术一方面可减少网格生成的数量,另一方面便于实现局部网格加密. 研究对象被划分为 5 个区段:冷灰斗区、燃烧器区、上炉膛区、冷灰斗与燃烧器交接区、燃烧器与上炉膛交接区.

为了减小数值伪扩散,采用贴体坐标法网格划分,使入口以近似垂直于网格边界的方向进入计算微元体,使流动方向与网格边界的角度远离 45°以减小伪扩散,网格总数约为 40 万,网格划分情况见图 2.

3 工况设置和边界条件

3.1 模拟工况设置

本文模拟计算主要考虑了二次风配风方式对

炉内燃烧特性的影响,计算了满负荷下均等配风、正宝塔配风、倒宝塔配风 3 种配风方式. 根据锅炉设计的基本参数及热力计算,在总供风量和供煤量相同,一次风风速和三次风风速均不变时,改变各层的二次风配比率,经过多次分配风率,具体参数设置见表 2.

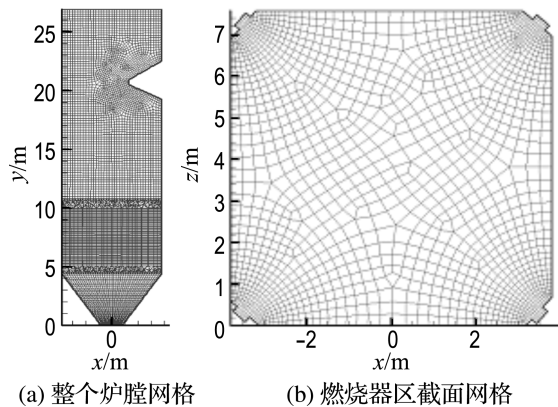


图 2 网格

Fig. 2 Mesh

表 2 计算参数设置表
Tab. 2 The calculation parameters table

配风方式	一次风速/ (m·s ⁻¹)	二次风速/(m·s ⁻¹)			三次风速/ (m·s ⁻¹)
		上二	中二	下二	
均等	28	40.2	40.15	40.15	40
正宝塔	28	28.5	35.70	48.60	40
倒宝塔	28	49.1	35.35	29.19	40

3.2 边界条件

(1)入口边界条件

布置在炉膛四角的燃烧器的喷口截面作为计算区域的入口边界,均采用第一类边界条件,即给定速度和温度.入口边界上的水力直径 D_h 、湍流强度 I 按下式计算:

$$D_h = 4A/\chi \tag{2}$$

$$I \cong 0.16(Re_{D_h})^{-1/8} \tag{3}$$

式中: χ 为接触面周长; Re_{D_h} 为入口处雷诺数.

(2)出口边界条件

假定出口平面的流动为充分发展流,所有变量在流动方向上的梯度为零.

(3)壁面边界条件

固体壁面上采用无速度滑移和无质量渗透条件,即 $\phi=0$. 为了保证计算的精度,避免壁面附近过细的网格划分,本文对近壁面的处理采用标准壁面函数法.

(4)颗粒相方程边界条件

对于颗粒相的控制方程,进口处的条件为

①颗粒直径分布遵循 Rosin-Rammler 分布律.

②给定颗粒进口温度、密度、比热容以及进口质量和其中水分、原煤和挥发分的初始含量.

③颗粒的进口速度取为一次风速度,进口温度取为一次风温度.

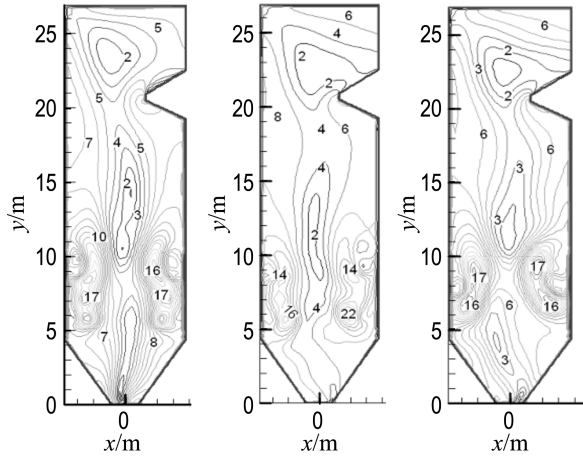
4 数值模拟结果和分析

4.1 炉内流场分布特点

炉膛内的流动情况对燃烧的优劣有很大的影响.对于四角切圆锅炉,切圆形状、气流充满度以及出口气流旋转度是评价流场质量的关键因素.

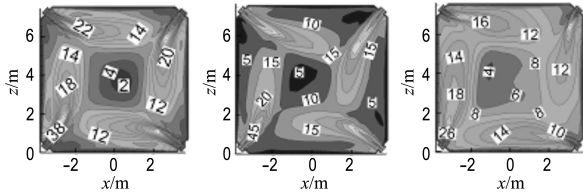
由图 3 可见,燃烧器区气流速度较大,扰动强烈,这样就使得风粉混合均匀,有利于煤粉的着火及燃烧,气流沿炉膛高度方向旋流速度逐渐减小,炉膛出口流场仍有部分残余旋转存在.由图 4 可见,3 种配风方式均能在炉膛中心形成明显的切

圆.比较可见,正宝塔配风的切圆形状优于另外两种配风方式,气流不贴壁且刚性较强,有利于加强煤粉与空气的混合和燃烧及对射流煤粉颗粒的托浮,减少落入冷灰斗的未燃尽煤粉颗粒,可减少炉渣中的可燃物含量.



(a) 均等配风 (b) 正宝塔配风 (c) 倒宝塔配风
图 3 炉膛中心截面流场(m/s)

Fig. 3 The flow field of central cross-section of the furnace (m/s)



(a) 均等配风 (b) 正宝塔配风 (c) 倒宝塔配风
图 4 下二次风截面(高 6.2 m 处)流场(m/s)

Fig. 4 The flow field of cross-section (6.2 m high) of lower secondary air (m/s)

炉内气流充满度是讨论炉内流动状况时十分重要的内容.好的气流充满度对于获得合适的炉内停留时间、防范结渣等十分重要.本文采用截面气流充满系数 φ 来评价炉内气流充满度,其定义为炉内水平截面上上升速度大于某一定值所占的面积与水平截面积的比值,定值一般取为燃烧器出口加权平均速度的 10%.本文中燃烧器出口加权平均速度为 30 m/s,定值取为 3 m/s. φ 越大,表明气流充满情况越好,一般希望 φ 位于 0.80~0.95.图 5 给出水平截面气流充满系数变化曲线,截面高度从 $y=11$ m(燃尽风以上约 2 m)至 $y=18$ m(折焰角下面),在这个区段,3 种配风方式的

平均气流上升趋势相同,具有良好的可比性.图 5 显示,正宝塔配风气流充满系数明显高于均等配风和倒宝塔配风,这是由于正宝塔配风上部(高 8.5 m 处)二次风率较小,减小了燃烧器射入炉内的气流动量,更有利于形成均匀的流场,从而改善了炉内气流充满状况.因此,正宝塔配风优于其他两种配风方式.

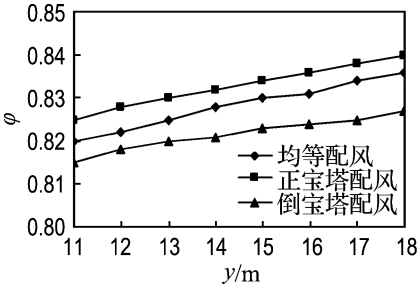
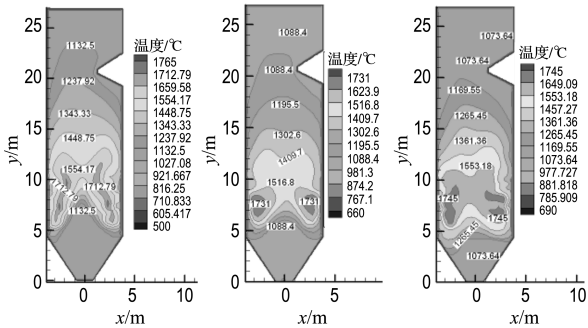


图 5 沿炉膛高度截面气流充满系数变化情况
Fig. 5 Current's spread coefficient at different cross-sections along the height of the furnace

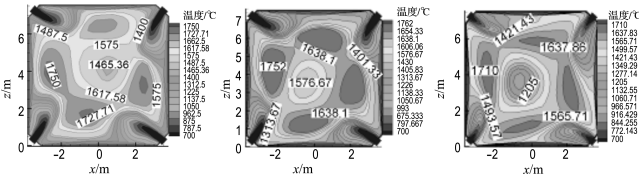
4.2 炉内温度分布特点

对于锅炉燃烧的模拟,温度场是要考虑的关键问题之一.燃烧中心的高度是整个锅炉运行以及改造的关键因素,燃烧中心过高或过低将会带来超温或者燃烧不好等一系列问题.由图 6 可见,3 种配风方式的高温区均集中在炉膛的燃烧器区域(5~10 m),温度由炉膛中心向炉膛出口及冷灰斗逐渐降低.由图 7 可见,3 种配风方式在中二次风截面处即燃烧器的中心位置均形成了明显的切圆燃烧,且温度较高.但三者相比较,正宝塔配风的温度较高,且切圆燃烧状态较好,不存在贴壁现象.



(a) 均等配风 (b) 正宝塔配风 (c) 倒宝塔配风

图 6 炉膛中心截面烟气温度分布(K)
Fig. 6 The flue-gas temperature distribution of central section of the furnace (K)



(a) 均等配风 (b) 正宝塔配风 (c) 倒宝塔配风

图 7 中二次风截面烟气温度分布(K)
Fig. 7 The flue-gas temperature distribution of middle secondary air section (K)

由图 8 可见:对于正宝塔配风、均等配风、倒宝塔配风 3 种方式,下层燃烧器处均形成了稳定的高温火焰区,但前两者的温度水平较高,火焰中心位于燃烧器区的中心位置,距离炉膛出口较远,延长了煤粉在炉内的燃尽时间,使得煤粉燃烧效率较高.倒宝塔配风的最高温度出现在上层燃烧器处,火焰中心与前两种配风方式相比,相对抬高.火焰中心抬高不仅会增加飞灰含炭量,也会造成排烟热损失.这是因为火焰中心抬高,将使炉膛上部的温度水平相应升高,到达出口的烟气温度也随之提高,这将增大排烟热损失.另外,火焰中心抬高也会减少煤粉在炉内的燃尽时间,造成燃料不完全燃烧,使飞灰含炭量增高.从这一方面来说,正宝塔和均等配风方式要优于倒宝塔型的配风.

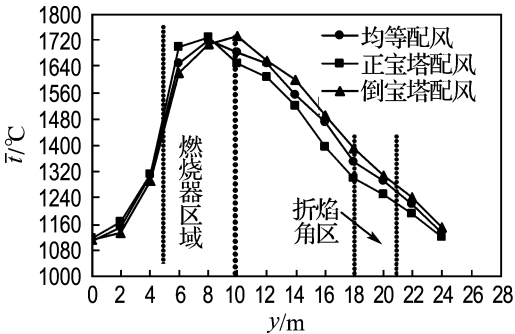


图 8 沿炉膛高度各水平截面平均烟气温度的变化情况

Fig. 8 Mean flue-gas temperature over different horizontal cross-sections along the height of the furnace

4.3 炉内组分分布特点

由图 8、9、10 可见,CO₂、CO 的浓度分布与炉内温度有很大关系.温度高的地方,CO 浓度较高,CO₂ 浓度较低,在燃烧器区以上,沿炉膛高度

方向,3 种配风方式的 CO 浓度均逐渐降低,CO₂ 浓度逐渐升高.这是由于在燃烧器区煤粉与氧气发生剧烈燃烧反应,消耗大量的 O₂ 而主要生成 CO,在炉膛上部的低温区 CO 又与过剩的 O₂ 反应生成 CO₂,消耗高温区生成的 CO,因此,在炉膛上部,CO 的浓度非常低,CO₂ 的浓度却很高.

宝塔配风时,炉膛上部 CO 与过剩的 O₂ 反应生成大量的 CO₂.均等配风 CO 和 CO₂ 浓度与正宝塔配风相近.

4.4 煤粉燃尽率

表 3 为炉膛出口处的煤粉燃尽情况和计算得到的飞灰未燃物热损失情况.从表中可以看出,3 种配风方式的挥发分均燃烧完全,倒宝塔的配风方式较之正宝塔和均等配风,飞灰未燃物热损失明显增加,比正宝塔配风增加了 1.06%,这是由于倒宝塔配风时,上层二次风率较大,使得炉膛上部的气流速率较大,减少了煤粉在炉内的燃尽时间,部分煤粉还未完全燃烧即被烟气带出炉膛,从而造成飞灰的未完全燃烧损失.

图 9 沿炉膛高度各水平截面平均 CO 质量分数变化情况

Fig. 9 Mean CO mass fraction over different horizontal cross-sections along the height of the furnace

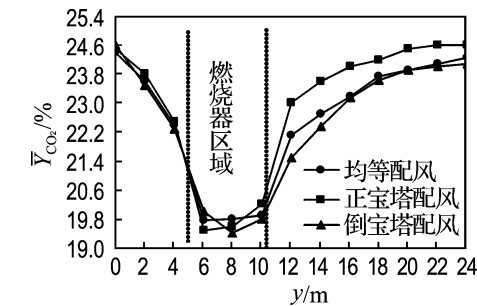


图 10 沿炉膛高度各水平截面平均 CO₂ 质量分数变化情况

Fig. 10 Mean CO₂ mass fraction over different horizontal cross-sections along the height of the furnace

由图 9、10 还可以看出,由 3 种配风方式对比发现,在炉膛上部区域,倒宝塔配风时,CO 浓度比另外两种配风方式大,CO₂ 浓度却相对较小.这是由于倒宝塔配风时,二次风送风方式呈现上部大、下部小的特点,上层燃烧器区二次风量较大,在此区域煤粉剧烈燃烧,形成高温区,同时生成较多的 CO,烟气在炉内的停留时间较短,因此,烟气中的 CO 不能及时与 O₂ 反应,就被带出了炉膛,生成的 CO₂ 相对较少.正宝塔配风时的 CO₂ 浓度较另外两种配风方式要大,这是由于正

表 3 炉膛出口处煤粉燃尽情况
Tab. 3 Burn-out rate of the pulverized coal at the furnace's exit

项目	挥发分 燃尽率/%	煤焦燃尽 率/%	飞灰未燃物 热损失/%
均等	100	93.5	2.57
正宝塔	100	94.2	2.15
倒宝塔	100	92.1	3.21

4.5 炉膛出口烟温

由于现场试验获得炉内数据相当困难,评估数值模拟的准确程度主要是与热力计算结果进行比较,其中最重要的数据就是炉膛出口平均烟温.从表 4 中可以看出:数值模拟得到的炉膛出口平均烟温与热力计算结果十分接近,偏差幅度较小,这表明数值模拟结果准确性较高.通过 3 种配风方式的比较发现,正宝塔配风数值模拟得到的炉膛出口平均烟温与热力计算结果吻合最好.

表 4 炉膛出口平均烟温
Tab. 4 Average gas temperature at the exit of the furnace

项目	模拟计算炉膛 出口平均烟温/K	热力计算炉膛 出口平均烟温/K	数值模拟与热力 计算的差值/K
均等	1 078	1 055	23
正宝塔	1 075	1 055	20
倒宝塔	1 099	1 055	44

5 结 论

(1)本文所采用的数学模型和网格划分方法,适合四角切圆锅炉燃烧过程的数值模拟,精确性较高,其中正宝塔配风方式的模拟结果与实际吻

合最好.

(2)正宝塔、倒宝塔、均等 3 种配风方式都能使四角切圆锅炉炉内形成较好的流场、温度场和组分场.但正宝塔配风使炉内的流动和燃烧效果最佳,炉内气流充满度最理想,火焰温度分布合理,炉膛最高温度范围位于燃烧区的中心位置,切圆燃烧状况良好,不存在贴壁现象.

(3)正宝塔配风延长了煤粉在炉内的停留时间,有利于煤粉的燃尽,在炉膛出口区域,氧含量以及 CO 浓度较低,煤焦燃尽率较高,飞灰可燃物热损失较小,有利于提高锅炉效率.

(4)计算分析表明:四角切圆煤粉锅炉选择配风方式时,应尽量首选正宝塔配风.

参考文献:

[1] 陶文栓. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001

[2] 刘向军. 四角切向燃烧锅炉炉内燃烧过程的数值研究[D]. 北京:清华大学, 1997

[3] 由长福,祁海鹰,徐旭常,等. 四角切圆燃烧锅炉炉膛内流体流动的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3):386-389

[4] FAN Jian-ren, QIAN Li-geng, MA Yin-liang, *et al.* Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces [J]. **Chemical Engineering Journal**, 2001, 81(2):261-269

[5] 刘泰生,周 武,叶恩清. 燃尽风对炉内流动和燃烧过程影响的数值模拟[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 116-120

[6] 范维澄,万跃鹏. 流动与燃烧的模型与计算[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1992

[7] Fluent Inc. **Fluent User's Guide: Vol. 3** [Z]. Lebanon: Fluent Inc, 2001

[8] 岑可法,姚 强,骆仲泱,等. 燃烧理论与污染控制 [M]. 北京:机械工业出版社, 2004

Numerical analyses of effect of air distribution on combustion characteristics of tangentially pulverized coal-fired boiler

LI Su-fen^{*1}, LIU Li-ping¹, CHEN Gui-jun¹, DUAN Lian-sheng²

(1.Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.DAHUA GROUP Thermal Power Plant, Dalian 116031, China)

Abstract: 3-D steady numerical simulation of combustion and flow fields in a tangentially pulverized coal-fired boiler was carried out by Fluent CFD Software to study the effect of secondary air distribution on flow and combustion. The change trends of flow, temperature and mixture field under three different air distribution modes, i.e. equal, positive pagoda and inverted pagoda-style air distribution modes, were probed. The results show that positive pagoda-style air distribution mode is the best one. This air distribution mode can not only ensure a better air full degree and a better lower secondary air speed, which enhances mixing and combusting between coal and air to reduce the contents of combustible substance of the slag, but also ensure that high temperature combustion flame is at the center of the area of burner, which prolongs the residence time of coal in the furnace and helps coal dust burn completely. The results obtained here can provide important theoretical guidance for boiler-operation, design and reconstruction in the future.

Key words: tangentially pulverized coal-fired boiler; air distribution mode; combustion characteristics; numerical simulation