

# 四角切圆锅炉炉内煤粉燃烧过程数值模拟\*

孙 锐 李争起 孙绍增 吴少华

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 利用计算流体力学软件 PHOENICS 3.5 对一台 200 MW 四角切圆水平浓淡燃烧煤粉炉进行数值模拟研究, 采用多流体两相流动模型及煤粉燃烧综合模型, 计算出在垂直方向不同二次风风量分布的工况下, 炉内各截面处的烟气温度、燃料浓度、燃烧产物组分浓度以及炉内辐射热流的分布。结果表明, 在燃烧器出口处出现了高煤粉浓度和烟气高温区, 并出现气固两相分离的现象, 使得煤粉着火及时, 燃烧器区域维持较高温度, 并防止水冷壁结渣, 炉内温度、炉膛出口氧量和飞灰可燃物的计算结果和试验结果相比, 吻合较好。二次风分级配风工况下, 下部燃烧器区烟气温度升高, 但氧气推迟混入, 相应位置飞灰可燃物有所增加。计算模型能够合理地模拟水平浓淡煤粉气流在大型锅炉炉膛内的燃烧过程, 适用于运行工况的优化和炉内污染物的控制。

关键词: 煤粉燃烧 两相流流动 四角切圆燃烧 数值模拟

中图分类号: TK224

## 0 前言

煤粉颗粒在锅炉炉膛内燃烧是非常复杂的物理和化学过程, 大型燃煤电站锅炉炉内过程的数值模拟是深入认识煤粉燃烧过程的重要理论方法, 目前已受到广泛的关注和研究。WILLIAMS 等<sup>[1]</sup>和 EATON 等<sup>[2]</sup>对粉煤燃烧过程的数学模型和算法给出了详细的综述, 预计了未来的主要研究方向。煤粉空气混合物燃烧反应过程的模拟, 利用计算流体力学(CFD)的理论和方法, 对描述煤粉锅炉炉内流动、传热、传质和化学反应的控制微分方程组进行求解, 得出炉膛内部烟气速度、温度、气相组分浓度和颗粒相浓度的空间分布, 进而指导煤粉燃烧锅炉的设计和运行。对于国内外广泛应用的四角切圆燃烧方式, 已有较多文献对其进行数值模拟研究, 李力等<sup>[3]</sup>采用双流体—轨道模型对一个四角喷燃炉内三维湍流两相流动及煤粉燃烧进行了数值模拟, 模型基于欧拉气相方程组、欧拉颗粒连续方程组和动量方程组以及拉氏颗粒能量变化方程和颗粒质量变化方程, 采用了  $k-\epsilon-k_p$  两相湍流模型, 其计算结果与冷态试验对比, 吻合较好。刘向军等<sup>[4-6]</sup>均采用了颗粒随机轨道模型对炉膛内的燃烧过程进行了模拟, 虽然随机轨道模型易于给出两相之间的速度和温度滑移, 但颗粒的浓度分布较难给出。煤粉燃烧过程的计算多采用颗粒随机轨道模型, 将颗粒相

作为离散相分成多组考虑, 而颗粒相作为连续相考虑的多流体模型的应用并不多, 另外, 针对浓淡型燃烧技术并考虑炉内燃烧器布置特点的数值模拟研究还鲜有报道。

为此, 采用双流体气固两相流动燃烧模型, 对一台 200 MW 燃用混煤采用水平浓淡燃烧器锅炉炉内燃烧过程进行了模拟计算, 给出炉内温度、气相各组分、颗粒相浓度、炉内辐射热流的空间分布以及煤粉颗粒燃尽的情况, 深入地研究煤粉气流在炉内燃烧过程。

## 1 数值模拟的对象

某电厂 1#炉系东方锅炉厂生产的 DG670/140-9 型高压、中间再热、自然循环、单锅筒锅炉, ? 型露天布置, 固态排渣, 平衡通风, 设计燃用义马长焰烟煤。制粉系统为中速磨煤机冷一次风机正压直吹系统, 配 6 台 8.5 型中速磨煤机, 一台中速磨煤机向同一层四个角部一次风口供粉, 以便减小负荷调整和切换磨煤机时对燃烧工况的影响, 在额定负荷时, 一般投运 4 层一次风口即可满足要求。炉膛每个角上的燃烧器分为上、中、下三组, 组与组之间拉开 1.35 m 布置, 每一组含两个一次风喷口和上、中、下三个二次风喷口, 一、二次风喷口呈间隔布置。一次风喷口经改造后全部采用了水平浓淡煤粉燃烧器, 利用三级叶片可调式百叶窗煤粉浓缩器对一次风出口气流进行浓淡分离, 一次风水平布置及单角下组燃烧器喷口布置分别见图 1、2<sup>[7]</sup>。

\* 国家 863 计划(2002AA526012)和 2005 年度教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目。20050818 收到初稿, 20060210 收到修改稿

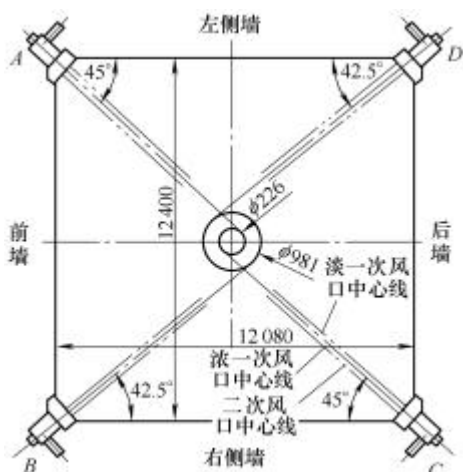


图 1 一次风炉内水平切圆布置图

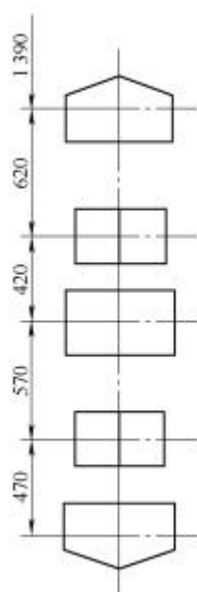


图 2 单角下组燃烧器喷口布置图

## 2 数学模型

### 2.1 两相流动和煤粉燃烧模型

煤粉燃烧过程是具有多种热传递方式和多组分化学反应的湍流气固两相流动,需要建立描述其物理、化学过程的数学模型,包括气固两相流动、相间动量传递、气固相间热传递、煤粉干燥、挥发分解和燃烧、焦炭燃烧以及气相辐射传热等模型。

利用多流体两相计算模型对气固两相分别采用连续相介质控制方程描述,两相介质分别由其速度  $u_i$  ( $i$ —第  $i$  相介质,  $i=1$  代表气相变量,  $i=2$  代表颗粒相变量)、体积浓度份额  $r_i$  (单位体积内第  $i$  相介质所占体积分数)、温度 ( $T_i$ )、化学组分、湍流量和压力等参量来描述,各待求变量写出其控制方程,联立求解。

连续相介质的体积份额  $r_i$  质量守恒方程为

$$\partial(r_i \rho_i) / \partial t + \text{div}(\rho_i \mathbf{r}_i \mathbf{u}_i - D_{ri} \text{grad}(r_i)) = m_{ji} \quad (1)$$

式中  $\rho_i$ ——第  $i$  相的真实密度

$D_{ri}$ ——第  $i$  相的相间扩散系数

$m_{ji}$ ——第  $j$  相向第  $i$  相的净质量流率

任一相参数的特性参数  $f_i$  控制方程为

$$\text{d}(r_i \rho_i f_i) / \text{d}t + \text{div}(r_i \rho_i \mathbf{u}_i f_i - \rho_i D_{fi} \text{grad}(f_i)) - \text{div}(f_i D_{ri} \text{grad}(r_i)) = S_i + S_{ip} \quad (2)$$

式中  $D_{fi}$ ——相内扩散系数

$S_i$ ——相内作用源项

$S_{ip}$ ——相间作用源项

两相间的相互作用包括动量、质量、能量传递过程,动量传递是由颗粒相和气相之间的气动阻力产生的,其表达式为

$$F = \frac{3r_1}{4d} \rho_1 C_d |u_1 - u_2| \quad (3)$$

式中  $d$ ——颗粒相平均粒径

$C_d$ ——阻力系数,由球型颗粒的标准阻力系数公式给出<sup>[8]</sup>

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & 0 < Re < 1000 \\ 0.44 & Re \geq 1000 \end{cases} \quad (4)$$

$Re$  为气固两相间相对运动的雷诺数

$$Re = r_1 d |u_1 - u_2| / \nu_1 \quad (5)$$

式中,  $r_1$  为气相密度,  $\nu_1$  为气相动力粘度。

热烟气流通过热传导、热对流和热辐射的方式加热煤粉颗粒,其中热辐射所占份额比较小,可忽略不计。采用基于努谢尔特(Nusselt)数的容积换热模型在两相焓方程中加入源项来模拟热传导和热对流的耦合传热过程,第  $i$  相向  $j$  相传热源项为

$$q_{ij} = \frac{6I r_j}{d^2} N(T_i - T_j) \quad i, j = 1, 2 \quad (6)$$

式中  $I$ ——气体的热传导系数

$Nu$ ——Nusselt 数,  $Nu = H_{ij} d / I$ ,可由下面与气相雷诺数和普朗特数( $Pr$ )的关联式计算得出<sup>[8]</sup>

$$Nu = 2 + 0.65 Re^{0.5} Pr^{0.333} \quad (7)$$

式中,  $H_{ij}$  为气相和颗粒相之间的换热系数。

煤粉燃烧包括颗粒内水分蒸发、挥发分析出、挥发分均相燃烧反应及焦炭异相燃烧反应等过程,假设煤粒为单一粒径球形颗粒,反应过程中任何时刻,煤粒由水分、原煤、焦炭和灰分这四部分组成。煤粒温度的上升导致煤粒中的水分蒸发,进入气相变成水蒸气,温度进一步升高挥发分开始析出,挥发分成分假设为碳氢化合物( $\text{CH}_x$ ),它在气相燃烧反

应中迅速耗尽,原煤随着挥发分析出而耗尽,剩余的固体可燃物为焦炭,焦炭与氧气在高温条件下发生异相反应而逐渐燃尽,灰分在煤粉颗粒中的质量分数随着焦炭的燃尽而逐渐趋向于1。

根据挥发分两步竞争反应模型<sup>[9]</sup>来计算煤粉挥发分析出过程,挥发分的生成速率  $v_{\text{vol}}$  为

$$v_{\text{vol}} = (Y_1 R_1 + Y_2 R_2) m_c \quad (8)$$

式中  $m_c$ ——煤粉颗粒中原煤质量

$Y_1, Y_2$ ——反应当量比系数,分别取为0.3和1.0

$R_1, R_2$ ——Arrhenius型反应速率系数,计算公式见文献<sup>[9]</sup>

焦炭燃烧反应采用了扩散—动力模型<sup>[9]</sup>,焦炭燃烧速率  $R_c$  受到氧扩散到焦炭表面的速率和化学反应的动力速率两个因素的控制

$$R_c = \frac{6r_2 p_{\text{O}_2}}{d} (K_c^{-1} + K_d^{-1})^{-1} \quad (9)$$

式中  $p_{\text{O}_2}$ ——焦炭表面氧分压

$K_c, K_d$ ——化学反应动力和表面扩散系数

$$K_c = A_c \exp(-E_c/RT_2) \quad (10)$$

$$K_d = \frac{Sh D_{\text{O}_2} M_c}{RT_2 d} \quad (11)$$

式中  $A_c$ ——反应前置因子,取为  $204 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{MPa})^{-1}$ <sup>[10]</sup>

$E_c$ ——反应活化能,取为  $19000 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ <sup>[10]</sup>

$Sh$ ——舍伍德(Sherwood)数,取为  $2$ <sup>[8]</sup>

$D_{\text{O}_2}$ ——氧气的质扩散率

$M_c$ ——碳的摩尔质量

$R$ ——通用气体常数

焦炭氧化产物中  $\text{CO}$  与  $\text{CO}_2$  的质量比为<sup>[11]</sup>

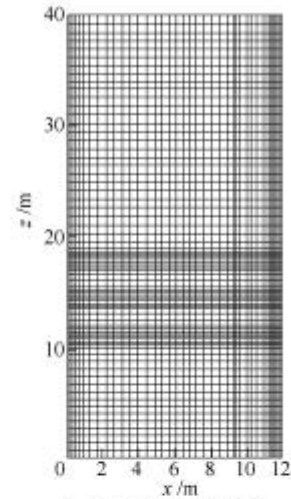
$$Y_{\text{CO}}/Y_{\text{CO}_2} = 2500 \exp(-6249/T_2) \quad (12)$$

计算模型还包括气相  $k$ - $\epsilon$  双方程湍流模型、六热流辐射传热模型、煤粉中水分蒸发的扩散模型以及挥发分燃烧的 EBU-Arrhenius 气相湍流燃烧模型等,详细计算公式见文献<sup>[12]</sup>。

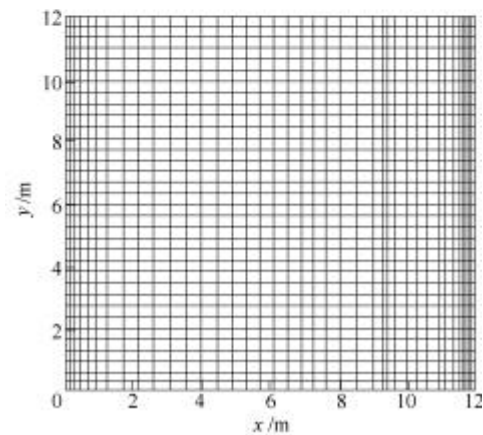
## 2.2 计算方法和边界条件

采用计算流体动力学软件 PHOENICS 3.5 作为模拟计算平台。选取从冷灰斗底部到炉膛顶部的区域作为计算域,并将出口辐射屏和遮焰角加入计算域内,由于计算域取的比较大,且考虑到燃烧区域流场变化比较剧烈,故将燃烧区域网格化分细密些,保证燃烧器各喷口在不同的网格中。为了获得与网格疏密程度无关的数值模拟结果,以便准确地反映炉内燃烧,选取三种网格划分方式进行计算,通过三种网格的优化计算<sup>[12]</sup>,选取了  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向网格数分别为  $24 \times 24 \times 60$ , 计算域及网格划分见

图3。



(a) 纵断面上网格划分



(b) 横断面上网格划分

图3 计算域内的网格划分

采用了锅炉常用煤种,即义马烟煤和贫煤的混煤进行计算,煤质分析如表1。计算工况分别为满负荷下二次风均等配风方式和“倒宝塔式”分级配风方式。均等配风条件下,二次风门除掉最上层和最下层关闭外其余均处于全开位置,全开的二次风出口风速为  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;分级配风条件下,最上面三层二次风喷口全开,下六层二次风喷口开度为  $30\% \sim 50\%$ 。两种工况下,一次风喷口投运2、3、4、5层,进入煤粉浓缩器前煤粉浓度为  $0.56 \text{ kg}(\text{粉}) \cdot \text{kg}^{-1}(\text{空气})$ ,一次风管道上的百叶窗浓缩器的三级可动叶片角度全部设在  $32^\circ$ ,保证浓淡一次风之间具有较高煤粉浓缩比,一次风出口流量和浓淡煤粉气流浓缩比按现场试验结果确定<sup>[7]</sup>,煤粉颗粒平均粒径为  $30.9 \mu\text{m}$ ,一次风温  $80^\circ\text{C}$ ,二次风温  $350^\circ\text{C}$ 。模拟计算采用的燃烧器入口参数如表2。壁面边界条件按固壁无滑移条件取值,水冷壁壁温根据管内的汽水混合物的饱和温度以及管壁的灰污情况确定,取为  $400^\circ\text{C}$ ,出口处辐射屏的表面温度取为  $600^\circ\text{C}$ ,辐

射受热面黑度取为 0.8。采用混合差分格式,该格式使得计算量较小、程序结构简单、易于程序收敛,并能保证足够计算精度<sup>[12]</sup>,应用 SimpleC 算法,迭代 8 000 步收敛。

表 1 燃用煤种的收到基工业分析和元素分析

工业分析	固定碳质量分数		灰分质量分数		水分质量分数	
	$F_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$M_{ar}/\%$	$M_{ar}/\%$	
	47.81		23.98		10.16	
元素分析	碳质量分数	氢质量分数	硫质量分数	氮质量分数	氧质量分数	低位发热值
	$C_{ar}/\%$	$H_{ar}/\%$	$S_{ar}/\%$	$N_{ar}/\%$	$O_{ar}/\%$	$Q_{net,ar}/(kJ \cdot s^{-1})$
	54.54	2.50	0.57	0.58	7.67	20 760

表 2 模拟采用的满负荷下燃烧器主要入口参数

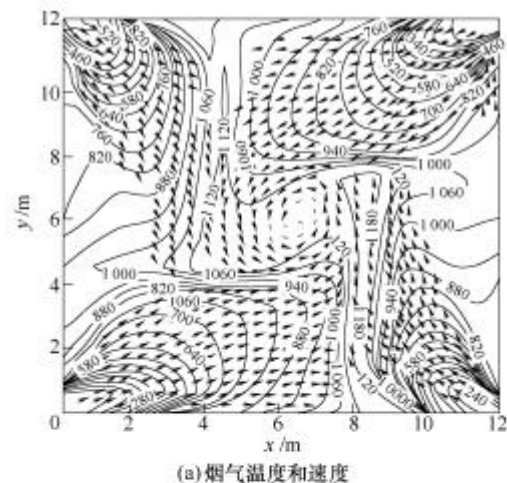
浓缩器叶片角度 $\alpha/(\circ)$	32.00
一次风速 $v_1/(m \cdot s^{-1})$	27.50
一次风率 $p_1/\%$	30.00
一次风给粉量 $q_1/(kg \cdot s^{-1})$	24.25
浓淡喷口煤粉浓缩比 $h_1$	6.0
浓淡风比 $h_2$	0.7

### 3 计算结果及分析

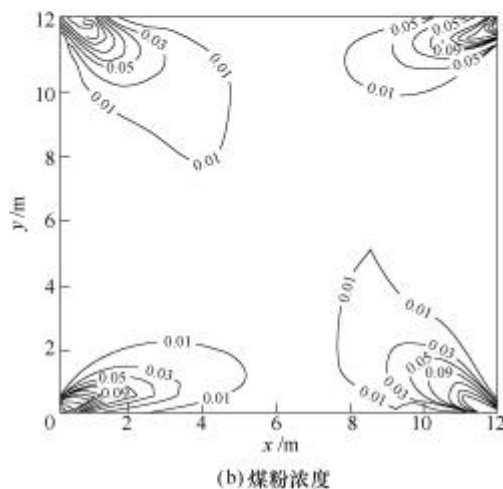
#### 3.1 均等配风下燃烧器区煤粉燃烧特性

图 4a 给出了在均等配风下,第 2 层一次风喷口所在水平断面上烟气温度分布,可见煤粉气流离开喷口后被迅速加热,在距离喷口 2 m 以内烟气温度已上升至 700 ,达到其着火温度,煤粉气流着火速度快,燃烧稳定,炉膛中心处烟气温度可达 1 200 。同时一次风在迎向上游气流的向火面具有很大温升梯度,特别是 A、C 角的向火侧温升更快,这是由于炉内切圆布置,使实际气流的切圆形成近似的平行于两侧墙的椭圆,较大流量的上游气流流至 A、C 角一次风根部,加强了上游高温气流的引燃作用。为防止炉壁结渣 A、C 角切圆在设计上与 B、D 角反切布置,但四个角出口气流仍形成逆时针旋转切圆,并未出现气流反转流动紊乱的现象,说明对炉内空气动力场起到控制作用的仍是假想切圆较大 B、D 角出口气流。冷态试验测得炉内气流形成的切圆为椭圆,沿前后墙方向长轴长度为 8 m,沿左右墙方向短轴长度为 6 m,由于热态气体受热膨胀加速作用,一次风出口气流偏转减弱,热态下计算的切圆形状与冷态结果相似,但其大小较冷态测量结果缩小<sup>[13]</sup>。图 4b 为一次风出口煤粉颗粒质量浓度分布,可见,由于一次风出口速度高,煤粉颗粒惯性大,平面内煤粉平均流动轨迹基本与气流出口轴线方向吻合,只略有偏转,B、D 角煤粉颗粒入射角度偏转大,而 A、C 角煤粉气流呈反切进入,A、

C 角的煤粉颗粒流与出口一次风气流出现偏析分离,进一步提高了在向火侧的煤粉浓度,从而使 A、C 角较其他两个角着火条件变好,煤粉着火距离缩短,烟气温度升高快。浓淡喷口之间高的浓缩比,保证了一次风出口处浓侧气流煤粉浓度可达  $0.2 kg \cdot m^{-3}$ ,提高了劣质煤的燃烧稳定性,特别是在低负荷运行条件下,煤粉气流浓侧颗粒相浓度一直保持在较高水平上,对煤粉火焰在低负荷下保持稳定具有重要意义<sup>[14]</sup>。热态低负荷试验在 80 MW 下进行,锅炉在无燃油条件下稳定运行 3.5 h,在燃烧器区观测的炉膛温度均在 1 100 ~ 1 350 之间,过热汽温 539 ,表明水平浓淡煤粉燃烧器能够在低负荷(40% ECR)无燃油条件下长时间连续运行。另外,炉内煤粉气流出口偏转角度小,直接进入炉膛中心区域燃烧,一次风浓侧煤粉浓度较低,有利于防止炉壁结渣。煤粉颗粒的弥散很快,出口下游 1 m 左右颗粒高浓度区基本消失,并均匀混入二次风和主流烟气中,保证了煤粉颗粒燃烧后期与氧气充分混合,符合随燃过程及时供风原则,达到高的燃尽度。



(a) 烟气温度和速度



(b) 煤粉浓度

图 4 燃烧器区水平截面烟气温度、速度分布及煤粉浓度分布

### 3.2 均等配风下炉内热负荷分布及煤粉燃尽特征

炉内垂直截面上烟气温度和热负荷分布特性如图5,由于煤粉着火提前、着火距离短,火焰形状饱满,充满度好,烟气温度在1300℃以上所占的区域占遮焰角以下2/3的区域,煤粉在高温条件下停留时间长,燃尽充分。在炉膛上部辐射屏区由于受到高温辐射过热器的吸热作用,烟气温度逐渐下降至700~900℃,使得进入水平烟道的烟气温度适中,避免出现高温过热器结渣或超温的问题。但屏的底部和遮焰角伸入炉内的转弯处,烟气温度高达1200℃左右,这样高的温度可使部分灰熔点低的颗粒熔化结渣,锅炉运行时应充分注意。从x方向上的热流密度 $q_x$ 的分布可见,空间热流密度最高的区域处在炉膛的中心处,高达380kW·m<sup>-2</sup>以上,辐射热量均匀向四周扩散,在第一层一次风喷口以上至炉膛

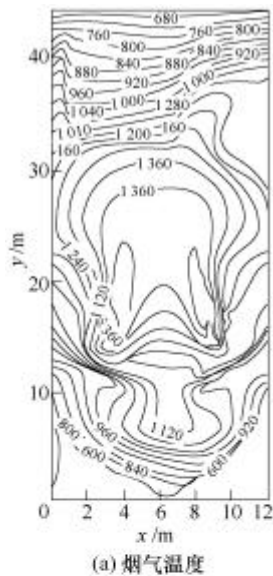
出口遮焰角,水冷壁壁面热负荷高,且分布较均匀,其值在180kW·m<sup>-2</sup>左右,保证了高强度且均匀的传热条件。在遮焰角转弯处,由于高温烟气变向转弯加速通过高温辐射屏区与遮焰角之间的喉口,使此区域壁面热负荷增加至220kW·m<sup>-2</sup>,是高壁面热负荷区域。

现场利用光学高温计在炉膛四面中间位置,对燃烧器区域不同标高处炉内烟气最高温度进行测量<sup>[7]</sup>与计算结果比较,如表3。可见,在水平浓淡燃烧器作用下,最下层燃烧器区着火状况良好,温度迅速升高到较高水平。计算结果与试验测量结果吻合较好变化趋势相同,误差均在5%以内,特别是最上层燃烧器区,计算偏差小于14%,考虑到试验工况条件波动及测量误差,计算模型能够较好地定性定量上反映炉内燃烧温度水平变化。

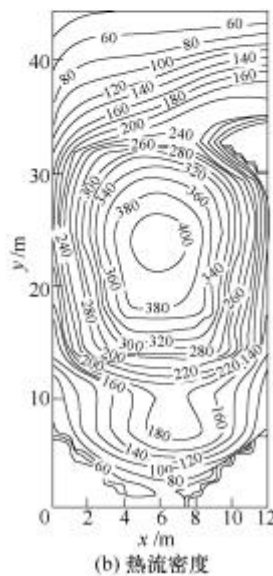
表3 二次风均等配风炉内温度的测量和模拟结果对比\*

观测位置	前墙	后墙	左侧墙	右侧墙
标高 $h_1$ 17.1m	1313(1302)	1345(1312)	1242(1289)	1313(1310)
标高 $h_2$ 20.7m	1404(1393)	1433(1386)	1379(1384)	1414(1376)
标高 $h_3$ 24.4m	1418(1421)	1417(1414)	1417(1419)	1421(1407)

注：\*——括号内的数据为数值模拟结果。



(a) 烟气温度



(b) 热流密度

图5 炉膛中心平行两侧墙纵截面上烟气温度和x方向上热流密度

图6为炉膛中心纵截面上焦炭燃尽状况和烟气含氧量分布,可见,煤粉主要集中在炉膛中心区域燃烧,在气流旋转主流区内煤粉浓度高,是焦炭主要燃烧区,由于炉内烟气温度高且氧气供应充足,焦炭燃尽充分,在遮焰角处和高温辐射屏底部,未燃尽碳质量分数已在5%以下,而热态试验测得飞灰可燃物质量分数为1.69%<sup>[15]</sup>,处于很低水平。从氧量分布来看,炉内燃烧器所在区域由于大量挥发分析出反应及部分焦炭开始燃烧,化学反应剧烈,氧气迅速消耗,变化梯度大。而在燃烧区上部,由于主要是煤中剩余焦炭的燃烧,反应速度减小,氧量变化幅度较慢,最终在炉膛出口计算得平均氧气含量为3.34%,而实测的炉膛出口平均含氧量3.5%。可见,计算模型准确地得出炉膛出口处燃烧特性参数,为新型煤粉燃烧器应用提供了定量参考数据。

### 3.3 分级配风对炉内燃烧过程的影响

在二次风分级配风条件下,实测炉膛温度和模拟计算温度对比见表4。可见,分级配风条件下模拟计算温度与实测温度吻合也较好,最大计算偏差为57%。由于炉膛下部供入空气量减少,冷空气对

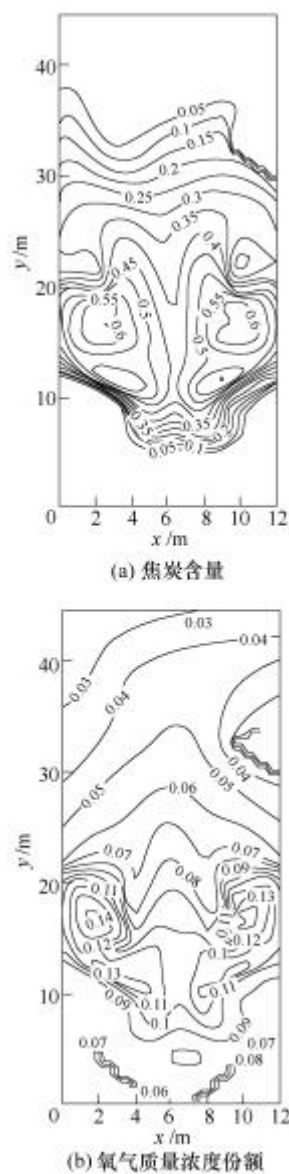


图 6 平行侧墙纵截面上煤粉焦炭质量分数和烟气中氧气质量浓度分布

高温烟气的稀释作用减弱,下层燃烧器区烟气温度水平较均等配风工况下提高,初期煤粉着火条件改善。焦炭质量分数在炉内分布如图 7,炉膛下部氧量供给量减少,氧气随火焰行程逐渐供入,在还原性气氛条件下,因焦炭表面氧气分压减小,使焦炭燃烧反应速度降低,焦炭燃尽过程与均等配风工况下相比明显推迟,炉膛内相应位置的飞灰炭质量分数均有所增加,出口处飞灰炭质量分数相应增加。实测炉膛出口飞灰炭质量分数为 5.25%<sup>[15]</sup>,有较大幅度增高,表明空气分级供入对飞灰可燃物燃尽过程具有较大影响。但是分级配风条件有利于在还原气氛下还原氮氧化物( $\text{NO}_x$ ),可降低污染物  $\text{NO}_x$  的排放,分级配风条件下热态实测  $\text{NO}_x$  排放为  $367.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  (折算  $\text{O}_2$  质量分数为 6%),比均等配风条件时减少 56.5%<sup>[15]</sup>。

表 4 二次风分级配风炉内温度的测量和模拟结果对比\*

观测位置	前墙	后墙	左侧墙	右侧墙
标高 $h_1$				
17.1m	1 344(1 336)	1 362(1 357)	1 301(1 311)	1 360(1 328)
标高 $h_2$				
20.7m	1 410(1 422)	1 394(1 397)	1 395(1 407)	1 413(1 409)
标高 $h_3$				
24.4m	1 447(1 428)	1 465(1 408)	1 433(1 406)	1 445(1 408)

注: \*——括号内的数据为数值模拟结果。

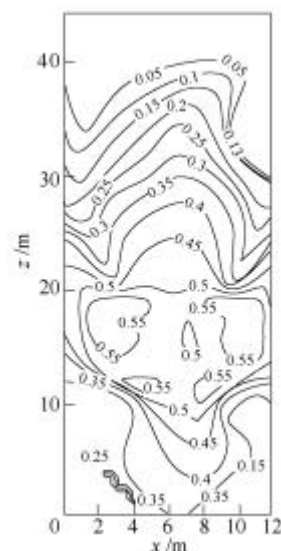


图 7 分级配风条件下平行侧墙纵截面上焦炭质量分数

## 4 结论

(1) 采用多流体两相燃烧模型能够较为准确地模拟计算煤粉燃烧炉内的温度分布、焦炭燃尽和氧气消耗过程,总体计算结果与试验结果比较定量吻合较好,变化趋势一致。

(2) 计算和试验结果表明,水平浓淡煤粉燃烧器在燃烧器出口水平面内出现煤粉颗粒和一次风气流流动偏析现象,进一步提高了浓侧煤粉颗粒浓度,增强了一次风的燃烧稳定性,使锅炉低负荷稳燃能力提高。

(3) 锅炉在均等配风条件下,炉内烟气高温区域占有空间大,壁面热负荷均匀,有利于提供良好的传热条件,并避免炉壁结渣。

(4) 在分级配风条件下,炉膛下部氧量供给量减少,使下炉膛温度水平提高,但焦炭燃尽过程明显推迟,飞灰可燃物质量分数有所增加。这种工况,有利于降低污染物  $\text{NO}_x$  的排放。

## 参 考 文 献

- [1] WILLIAMS A, POURKASHANIAN M, JONES J. M. Combustion of pulverized coal and biomass[J]. Progress

in Energy and Combustion Science, 2001, 27 : 587-610.

- [2] EATON M, SMOOT L D, HILL S C, et al. Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25 : 387-436.
- [3] 李力, 周力行, 李荣先, 等. 用双流体轨道模型模拟四角喷燃模型炉内三维湍流两相流动和煤粉燃烧[J]. 空气动力学学报, 2001, 19(1) : 30-38.
- [4] 刘向军, 徐旭常, 范宏丽. 煤粉在四角切向燃烧煤粉锅炉炉膛内的燃烧行为[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1) : 105-109.
- [5] 丘纪华, 陈刚, 张志国, 等. 粉煤锅炉燃烧过程的数值模拟[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(4) : 124-128.
- [6] 周向阳, 郑楚光, 马毓义. 大型炉膛燃烧过程的数值模拟[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(3) : 11-15.
- [7] 杨龙滨. 水平浓淡分离对煤粉燃尽及氮氧化物排放的工业试验研究 : [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2001.
- [8] ZHOU L X . Theory and numerical modeling of turbulent gas-particle flows and combustion[M]. Beijing : Science Press, CRC Press INC., 1993 : 99-119.
- [9] SMOOT L D, SMITH P J. Coal combustion and gasification[M]. New York : Plenum Press, 1985.
- [10] SMITH I W. The combustion rates of coal chars : A Review[C]//HAWARD J B ed. 19th Symposium (International) on Combustion, 19th International Conference on Combustion, Pittsburgh, PA, the Combustion Institute, 1982 : 1 045-1 065.
- [11] 傅维标, 卫景彬. 燃烧物学基础[M]. 北京 : 机械工业出版社, 1984.
- [12] 张颀. 旋流煤粉燃烧锅炉燃烧及  $\text{NO}_x$  排放特性的数值研究 : [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2003.
- [13] 李争起, 邵一鸣, 万志欣, 等. 二次风水平摆动对 670 t/h 锅炉切圆的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1) : 35-37, 45.
- [14] 秦裕琨, 李争起, 孙锐, 等. 风包粉煤粉燃烧原理及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5) : 59-62, 66.
- [15] 秦淇, 王玮, 琚海霞, 等. 首阳山电厂#1 炉燃烧器改造后性能考核试验[G]. 河南电力试验研究所, 2002.

## NUMERICAL SIMULATION ON PULVERIZED COAL COMBUSTION PROCESS IN A TANGENTIAL FIRING FURNACE

SUN Rui LI Zhengqi

SUN Shaozeng WU Shaohua

(School of Energy Science and Engineering, Harbin  
Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract :** The computational fluid dynamics (CFD) code, PHOENICS 3.5, is employed to evaluate horizontal pulverized coal bias combustion process in a 200 MW tangential firing boiler. Multi-fluid two-phase model and coal comprehensive combustion model are integrated in the code. Gas temperature, particle distribution, gas species concentration and radiation heat flux at different sections of furnace are obtained from the numerical simulation at different secondary air (SA) vertical distribution. The calculation results show that a high particle concentration and high gas temperature zone exist, together with the separation of particle and gas downstream primary air (PA) nozzles, which ensure suitable ignition time, high temperature level of PA mixture and resistance to slag on the water-cooled walls. The calculated burnout of coal particles,  $\text{O}_2$  concentration at furnace exit and gas averaged temperature in furnace are compared with in situ measurement data, resulting in good agreement. The simulation results of staged SA distribution case show that gas temperature of down part of furnace increase and the final burnout of char is decreased for the postponing mixing between fuel and oxygen. Simulation results are also compared with in situ measurement data, resulting in good agreement with each other. Thus the comprehensive coal combustion model has reasonably simulated PF combustion process in large boiler furnace, which is benefit for optimizing unit operation conditions and reducing pollutants emission.

**Key words :** Pulverized-coal bias combustion

Gas particle two-phase flow

Tangential firing

Numerical simulation

作者简介: 孙锐, 男, 1970 年出生, 教授。主要研究方向为煤粉燃烧及燃烧污染物控制方面。

E-mail : sunsr@hit.edu.cn