

# 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物排放数值模拟

潘 维, 池作和, 李 戈, 岑可法

(浙江大学 热能工程研究所, 能源清洁利用与环境教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 借助 FLUENT 软件平台, 对镇海电厂一台 200 MW 四角切圆燃烧锅炉炉内流动、燃烧, 以及污染物  $\text{NO}_x$  的生成进行了三维数值模拟. 计算结果表明, 整个炉膛空间存在着旋转流场, 炉内最高温度出现在燃烧器区域. 温度场与各组分浓度分布有着对应关系, 高温区对应  $\text{CO}$  高浓度区和  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的低浓度区.  $\text{NO}_x$  的生成主要在炉膛的高温区. 在炉膛中心,  $\text{NO}_x$  大量生成且沿着炉膛的高度方向, 浓度逐渐降低.

**关键词:** 四角切圆燃烧锅炉; 数值模拟;  $\text{NO}_x$

中图分类号: TK223

文献标识码: A

文章编号: 1008-975X(2004)06-0761-04

## Numerical simulation of combustion and nitrogen oxides generation process in tangentially fired furnace

PAN Wei, CHI Zuo-he, LI Ge, CEN Ke-fa

(Institute for Thermal Power Engineering, Clean Energy and Environment Engineering Key Laboratory of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Numerical simulation of flow, combustion and nitrogen oxides generation process in Zhenhai 200 MW tangentially fired furnace was performed on FLUENT software platform and the results showed the existence of a swirl flow field in the boiler. The temperature of burner zone was the highest. Each species, mass fraction had close relation with the temperature distribution. The high temperature zone was characterized by high carbon monoxide concentration, and the oxygen concentration zone was characterized by low carbon dioxide concentration. A deal of nitrogen oxides is generated in the high temperature zone. With increase of furnace height, nitrogen oxides concentration decreased.

**Key words:** tangentially fired boiler; numerical simulation;  $\text{NO}_x$

四角切圆燃烧锅炉是我国目前最常用的电站锅炉之一, 研究切向燃烧锅炉炉内流动、燃烧以及污染物的生成具有重要的工程应用价值. 国内外均进行过大量的试验和计算机数值模拟研究. 随着计算机速度的迅速提高, 数值模拟已经成为研究炉内气流运行规律的一个有效辅助手段.

本文根据研究对象的特点, 选用了恰当的数学物理模型和网格拓扑结构, 对镇海电厂一台 200 MW 四角切圆锅炉炉内流动、燃烧和气相组分浓度

分布进行了计算, 并应用燃料氮和热力氮模型模拟燃烧过程中的污染物  $\text{NO}_x$  的生成. 为实施再燃技术降低  $\text{NO}_x$  排放, 提供燃烧器的改造方案.

### 1 模拟对象

本文所模拟的对象是镇海电厂的 4# 锅炉, 是东方锅炉厂生产的 DG670/140-8 型超高压、中间再热、自然循环煤粉炉. 其结构示意图见图 1. 整组燃

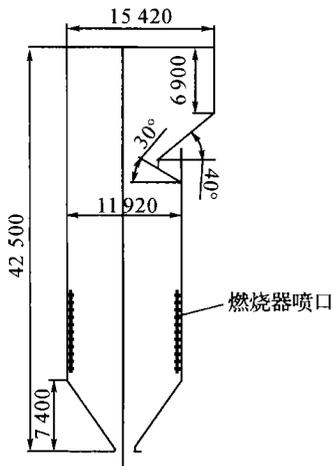


图1 锅炉(200 MW)结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 200 MW boiler

烧器分为四层一次风喷口,六层二次风喷口和一层三次风喷口,一次风和二次风间隔布置.1#角和3#角形成对冲,2#角和4#角在炉膛中心形成直径为736 mm的切圆,如图2所示.燃烧器配风情况见表1.锅炉燃用煤粉颗粒的直径最小为 $50\ \mu\text{m}$ ,最大为 $300\ \mu\text{m}$ ,平均直径为 $80\ \mu\text{m}$ ,颗粒直径分布满足

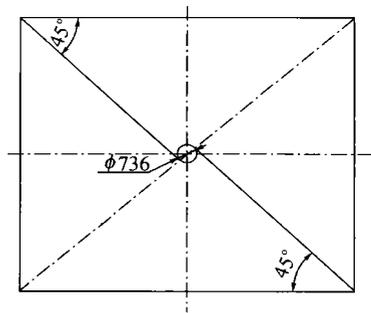


图2 燃烧器切圆示意图

Fig. 2 Schematic diagram of burners section

Rosin-Rammler 分布(见表2).

表1 燃烧器各层喷口风速

Tab. 1 Each burner injectors velocity

风类型	风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风率/%	风温/
一次风	28	28.00	222
二次风	48	33.75	291
三次风	52	19.09	60
周界风	45	15.00	291

表2 煤的元素分析和工业分析

Tab. 2 Fuel elemental and industrial analysis

空气干燥	收到基							干燥无灰	
基水分	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$	$A_{ar}$	$Q_{net,v,ar}$	$Q_{gr,v,ar}$	基挥发份
$M_{ad}/\%$	$1\%$	$1\%$	$1\%$	$1\%$	$1\%$	$1\%$	$1(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$1(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$V_{daf}/\%$
3.62	55.78	3.34	8.11	1.14	0.59	21.94	21.32	22.22	35.48

## 2 网格划分和计算方法

对于所计算的炉膛,如果采用正规的网格划分和差分离散方法,将会产生流动伪扩散.产生伪扩散的原因在于:把流过每一控制容积面的多维流动处理成了局部的一维流动.减少伪扩散的一个有效手段就是改进网格体系,使网格线与流动方向的夹角偏离 $45^\circ$ .为此,将炉膛分为三个区:燃烧器区域、燃烧器上部区域、燃烧器下部区域.其中把燃烧器区域再进一步细分,尽量使从燃烧器出来的气流方向与网格线垂直.图3为某一层燃烧器区域的水平截面网格分布图.整个炉膛划分网格为26万.

数值模拟采用三维稳态计算,数值模拟采用Simple算法.湍流模型采用可实现 $k-\epsilon$ 双方程模型(realizable  $k-\epsilon$  model);用混合分数-概率密度函数(mixture fraction/PDF)模拟气相湍流燃烧;用P-1

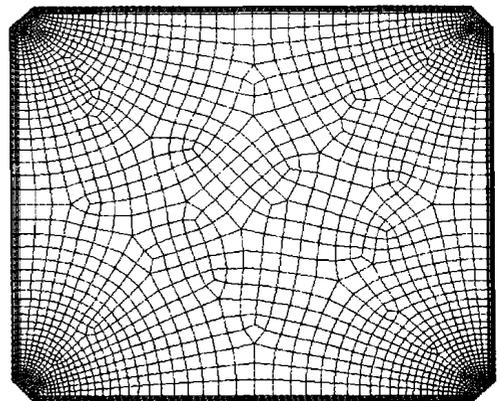


图3 燃烧器区域水平截面网格分布图

Fig. 3 Grid system of burners zone section

辐射模型(P-1 radiation model)计算辐射传热;采用双匹配速率模型(the two competing rates model)模拟煤粉挥发份的析出;焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型(kinetics/diffusion-limited char com

bustion model); 煤粉颗粒跟踪采用随即轨道 (stochastic tracking) 方法. 对于氮氧化物的生成主要考虑了燃料氮和热力氮的生成以及氮氧化物的再燃效应. 具体模型方程见文献[1].

对于方程的离散, 动量方程、能量方程、 $k$  方程、 $\epsilon$  方程均采用 Quick 格式. 在边界条件的处理上, 燃烧器进口为固定速度进口,  $k$ 、 $\epsilon$  由经验公式计算, 壁面处无速度滑移.

### 3 计算结果和分析

#### 3.1 流场

炉内的气流混合流动状态是决定燃烧优劣的决定性因素. 图 4 为某层燃烧器喷口水平截面速度分布图(二次风喷口). 从图中可以看出, 炉内气流是一个强烈旋转的气流, 炉膛中心区域存在明显的低速区, 这与大量前人的试验结果是一致的.

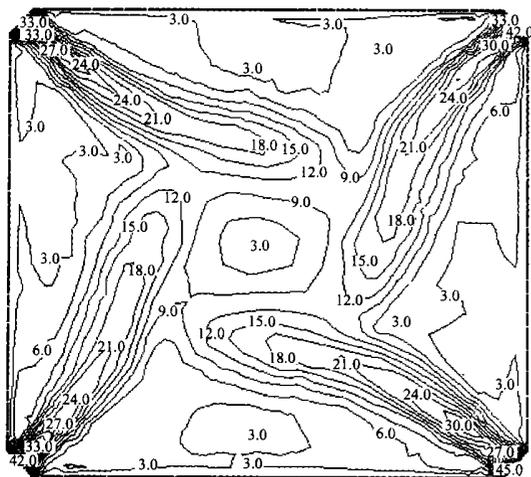


图 4 燃烧器喷口水平截面速度分布图

Fig. 4 Velocity distribution of burners zone section

#### 3.2 温度场

图 5 为燃烧器区域某水平截面上温度分布图(二次风喷口截面). 图 6 为炉膛中心截面上的温度分布图. 从图中可以看出, 炉膛中心燃烧强烈, 温度高, 而燃烧器区域是整个炉膛中温度最高的地方. 随着炉膛高度的增加, 温度水平不断下降.

#### 3.3 组分场

图 7、8、9 分别表示炉膛中心截面上的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$  的浓度分布. 从图中可以看出, 炉膛内  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$  的浓度分布与炉内的温度分布具有很大关系. 高温区对应  $\text{CO}$  高浓度区和  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  的低浓度区.

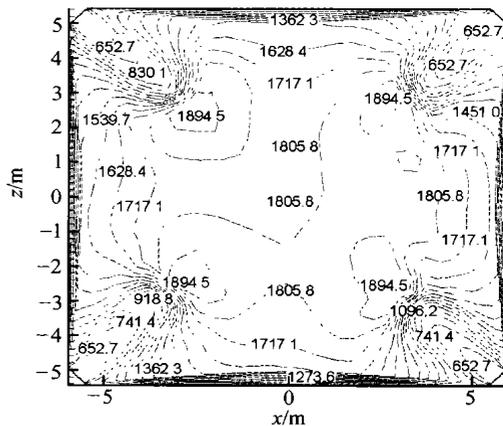


图 5 三次风截面温度等势线图

Fig. 5 Contour of primary air injector temperature

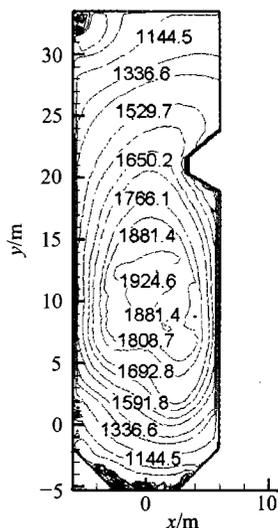


图 6 炉膛中心截面温度场等势图

Fig. 6 Contour of furnace temperature

这主要是因为温度高的燃烧器区域煤粉颗粒强烈燃烧消耗了大量的  $\text{O}_2$ , 主要生成了  $\text{CO}$ ; 而在低温区,  $\text{CO}$  和  $\text{O}_2$  反应, 生成  $\text{CO}_2$ . 随着炉膛高度的增加,  $\text{CO}$  浓度逐渐降低, 到炉膛出口处几乎为零.

#### 3.4 $\text{NO}_x$ 浓度场

图 10 为炉膛中心截面上  $\text{NO}_x$  的质量分数分布. 由图可见,  $\text{NO}_x$  的生成主要在炉膛的高温区, 其主要原因是燃料挥发份中的氮被大量的氧气氧化生成  $\text{HCN}$  等中间产物后进一步生成  $\text{NO}_x$ . 另外在温度高于  $1600\text{ K}$  时生成大量的热力氮. 图 11 为  $\text{NO}_x$  沿着炉膛高度方向的体积分数分布情况. 从图可见, 在炉膛上部区域,  $\text{NO}_x$  开始扩散, 随着三次风的喷入, 炉膛温度降低,  $\text{NO}_x$  的浓度开始削减, 到出口处达到  $426 \times 10^{-6}$  左右, 与电厂测量值  $450 \times 10^{-6}$  非常接近.

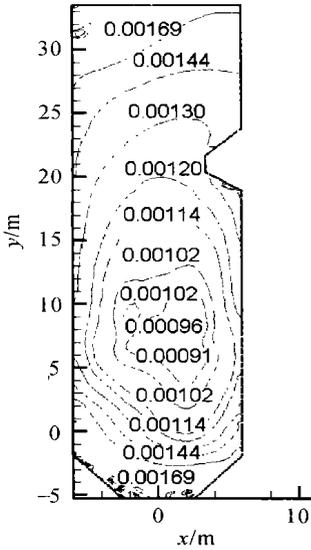


图 7 CO<sub>2</sub> 体积分数分布  
Fig.7 Contour of CO<sub>2</sub> molar concentration

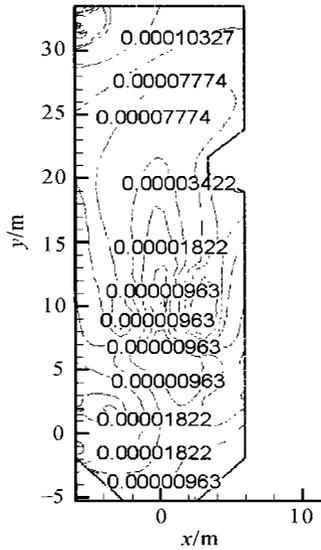


图 8 O<sub>2</sub> 体积分数分布  
Fig.8 Contour of O<sub>2</sub> molar concentration

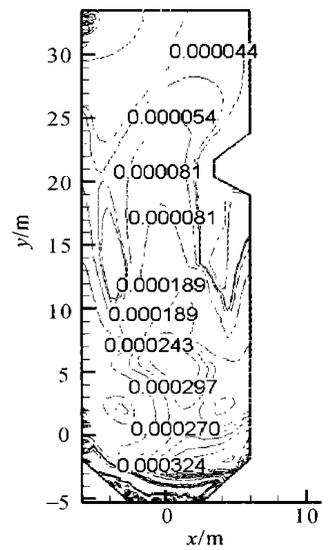


图 9 CO 体积分数分布  
Fig.9 Contour of CO molar concentration

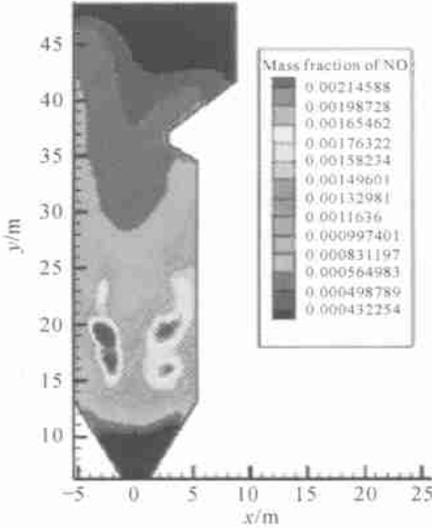


图 10 炉膛中心截面 NO 质量浓度分布  
Fig. 10 Contour of NO mass fraction

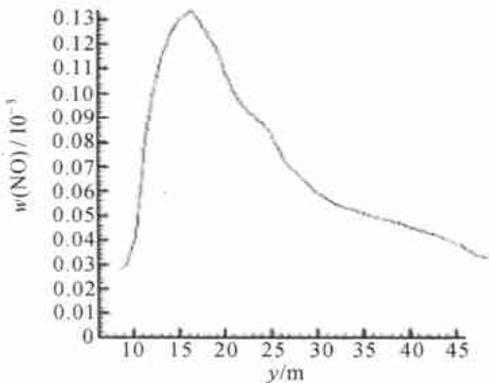


图 11 炉膛中心线上的 NO 体积分数分布

Fig. 11 NO mass fraction distribution along furnace height molar

### 4 结 语

本文采用数值模拟方法,对一台 200 MW 四角切圆燃烧煤粉锅炉炉内流动、传热、燃烧进行了计算.模拟结果较为真实地反映了炉内温度、各个不同组分的分布,以及污染物 NO<sub>x</sub> 的生成特性.结果表明温度分布与组分的分布存在很大联系,高温区对应 CO 高浓度区和 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的低浓度区. NO<sub>x</sub> 的生成主要在炉膛的高温燃烧器区域.模拟预报的 NO<sub>x</sub> 分布是合理的.模拟结果为锅炉设计、改造和运行提供理论指导.

### 参考文献 (References):

[1] SIVATHANU Y R, FEATH G M. Generalized state relationships for scalar properties in non-premixed hydrocarbon/air flames [J]. *Combust Flame*, 1990, 82 (2): 211- 230.

[2] 范贤振,郭烈锦,高晖,等. 200 MW 四角切圆燃烧煤粉炉炉内过程的数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2002, (36) 3: 241- 245.  
FANG Xian-zhen, GU O Lie-jin, GAO Hui, et al. Numerical simulation of flow and combustion process in the tangentially fired furnace of a 200 MW pulverized coal boilers [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 3: 241- 245.

[3] 李彦鹏,张强,顾幡,等. 四角切圆炉三维流动模拟中减小伪扩散的新方法 [J]. *能源研究与利用*, 2001, 2: 30- 32.  
LI Yan-peng, ZHANG Qiang, GU Fan, et al. A new method to deduce false diffusion in 3-dimension flow of tangentially fired furnace [J], *Energy Reach and Utility*, 2001, 2: 30- 32.