

# 煤粉工业锅炉燃烧的数值模拟

纪任山

(煤炭科学研究总院 北京煤化工研究分院, 北京 100013)

**摘要:** 为了更好地把握锅炉的性能, 应用 Fluent 软件对某新型高效煤粉工业锅炉内的燃烧过程进行了三维数值模拟。采用非预混燃烧模型模拟化学反应过程, 用 P-1 辐射模型计算辐射传热, 用 Realizable  $\kappa-\varepsilon$  湍流模型模拟气相运动, 对固体颗粒相的求解采用随机轨道模型。模拟所得到的炉内温度场、离散相和连续相轨迹分布合理, 温度场和实测值较为吻合。模拟结果表明, 通过适当降低锅炉的负荷, 能够进一步改善煤粉燃烧温度场分布。

**关键词:** 工业锅炉; 煤粉燃烧; 数值模拟

**中图分类号:** TK229.6 **文献标识码:** A

## Numerical simulation of combustion in the industrial pulverized-coal boiler

Ji Ren-shan

(Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The software Fluent was used to simulate the coal powder combustion in three-dimension for the better performance of the boiler. The non-premixed combustion model and the P-1 radiation model were employed to simulate the chemical reaction and heat transfer respectively. The gas phase transportation was simulated by the Realizable  $\kappa-\varepsilon$  turbulence model while particle phase used the stochastic model. The distribution of the temperature in the furnace is agreement with the measured values. The simulation results show that it can get a better distribution of the temperature in the furnace by reducing the load of the boiler.

**Key words:** industrial boiler; pulverized-coal combustion; numerical simulation

我国的能源结构中, 煤是主要能源, 而且在可预见的将来, 我国主要燃料仍将是煤。中小型燃煤工业锅炉是我国除电站锅炉外的主要用煤装备, 总数约 50 万台, 总容量达 126 万 MW, 年消耗煤炭约 4 亿 t。大量统计和研究表明, 我国中小型燃煤工业锅炉实际平均热效率大多不超过 60%, 而发达国家的中小型燃煤锅炉的运行效率一般接近 80%。中小型燃煤工业锅炉的技术进步已成为亟待解决的问题。

长期以来, 人们对于中小型工业锅炉的研究主要依赖试验。由于炉内工况复杂, 试验的成本高, 难度大, 测量的结果不宜外推等原因, 对工业锅炉的系统开发和改造优化带来了巨大困难<sup>[1]</sup>。随着计算机技术的发展和商业软件的日趋成熟, 数值模拟研究方法在国内锅炉领域迅速发展, 其中 Fluent 软件的应用较广。近年来, 英、美等国家均已开始对大型锅炉的炉膛内三维两相流动和煤粉燃烧进行模拟, 探讨将数值模拟用于炉膛的优化及放大设计的途径<sup>[2]</sup>。Srdjan Belosevic 等<sup>[3]</sup>、西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室和清华大学热能工程系<sup>[4]</sup>都借助 Fluent 软件平台模拟四角切向燃烧煤粉锅炉, 模拟结果和实测值较为吻合, 为锅炉的优化改造提供了参考。

目前, 国内用 Fluent 软件模拟四角切向燃烧煤粉锅炉运行工况的比较多, 而针对旋流燃烧煤粉工业锅

炉的热态模拟较少, 本文针对某旋流式煤粉锅炉用 Fluent 软件进行了全三维燃烧数值模拟, 采用相对成熟的物理数学模型, 对锅炉的额定运行工况进行模拟, 得到了该锅炉内部的详细流场、温度场等信息. 实际测试得到的温度和模拟值较吻合, 模拟结果为锅炉的运行操控提供了有益的参考.

## 1 数学模型和计算方法

通过试算及查阅文献 [5-9], 采用非预混燃烧模型, 用 Realizable  $\kappa-\varepsilon$  紊流模型模拟气相湍流运动, 对固体颗粒相的求解采用随机颗粒轨道模型, 用 P-1 辐射模型计算辐射传热, 对煤粉挥发分释放采用双匹配速率模型, 对焦炭的燃烧采用动力学/有限扩散速度模型来模拟.

对于离散后的代数方程组一般不能直接用来求解, 必须对离散方程进行一些调整, 对未知量的求解顺序及方式进行特殊处理. 目前工程上应用最广泛的流场数值计算方法为 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 算法, 其全称为压力耦合方程组的半隐式解法, 其优点是可直接求出压力场和速度场, 并且收敛性好, 边界条件处理也方便.

## 2 模拟对象及网格划分

锅炉的结构如图 1 所示. 一次风携带着煤粉由喷枪喷入, 二次风在一定的风压下经导向叶片导入预燃室, 与经过喷枪末端反射帽反射的煤粉充分混合, 以某种方式点火, 预燃室末端变窄, 使得燃烧的火焰达到较高的速度, 形成的火焰束在炉膛内燃烧, 在炉膛中形成强大的热气流, 通过炉膛壁与周围的水发生热交换, 燃烧后的烟气经回燃室进入烟管, 大部分飞灰随烟气排出, 少量飞灰落入回转室中经吹灰器排出. 本文选择预燃室和炉膛作为模拟研究的对象. 由于锅炉结构较复杂, 且有较多不规则几何体, 所以网格采用结构网格与非结构网格的混合网格, 如图 2 所示.

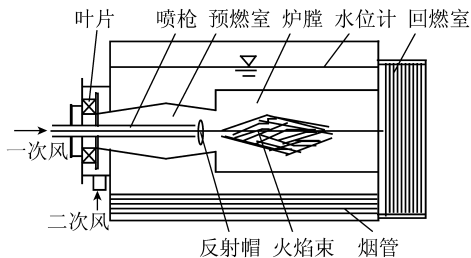


图 1 某新型锅炉结构

Fig. 1 The structure of the new style boiler

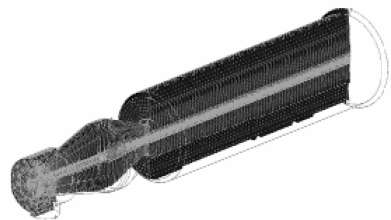


图 2 模拟对象网格划分

Fig. 2 The girding of the simulation object

## 3 温度场验证和模拟结果分析

模拟计算了额定工况下煤粉锅炉的燃烧过程, 分析了炉膛内的温度场、一次风流线、二次风流线和煤粉颗粒的运动轨迹. 模拟工况的各项运行参数见表 1, 煤粉的工业分析和元素分析见表 2.

表 1 锅炉进出口边界条件

Table 1 The boundary conditions of the boiler's outlet

一次风流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	二次风流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	出口压 力/Pa	煤粉流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	空气温 度/K
18	10	0	0.21	300

表 2 煤粉特性分析

Table 2 The characteristics of the coal powder

工业分析/%				$Q_{gr,ad}/$ ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	元素分析/%				
$A_{ad}$	$M_{ad}$	$V_d$	$FC_d$		$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(O_d)$	$w(N_d)$	$w(S_{t,d})$
12.62	0.48	27.94	59.38	28.77	71.24	4.22	10.36	0.75	0.75

### 3.1 温度场验证

为了验证数值模拟结果的准确性, 将计算结果与实际测试结果进行对比. 锅炉燃烧时炉内完全处在高温的环境中, 其温度也就成了最直接最有效的参考数据, 测试过程在炉膛内不同位置设置热电偶, 测量其稳定燃烧时的温度, 模拟计算的温度场和测量点位置如图 3 所示, 由图 4 数据对比可知, 5 个测点的测量值和计算值很接近, 相对误差都在 5% 以内, 认为模拟结果基本符合实际.

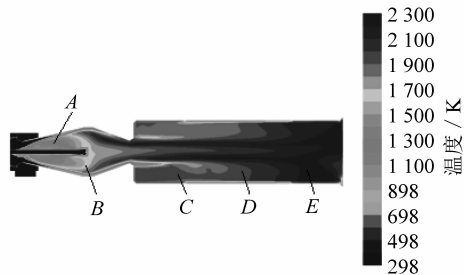


图 3 温度场和测点分布

Fig. 3 The distribution of temperature and measure points position

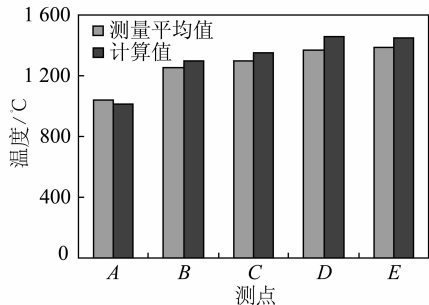


图 4 计算值和测量值的对比

Fig. 4 The comparison between calculated and tested values

### 3.2 连续相和离散相轨迹分析

图 5 为一次风和二次风的流线图, 由图 5 可以看出, 一次风经反射帽反射进入预燃室后, 在预燃室的前段部分与二次风相遇; 二次风在一定的风压下以一定速度沿导流叶片旋转进入预燃室, 既有轴向速度又有切向速度, 主要在预燃室内壁做旋流运动; 在二次风的影响下, 一次风在预燃室中心做旋流运动, 二者相互作用, 相互结合使得煤粉颗粒和空气达到充分的混合, 然后一起进入炉膛燃烧.

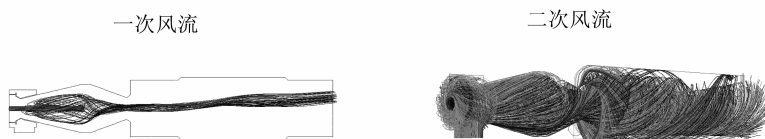


图 5 一次风和二次风流线

Fig. 5 The flow lines of transport air and combustion air

图 6 为煤粉颗粒的运动轨迹, 10 种不同粒径的煤粉颗粒在预燃室内经反射帽反射后, 在一、二次风的旋流作用下也在炉膛内做旋流运动; 大小不同的颗粒质量不同, 惯性不同, 导致反射折回点的位置也有所差异; 由图 6 可知, 颗粒在炉膛中的分散性较好, 有利于煤粉的燃烧; 煤粉颗粒的轨迹对燃烧的影响很大, 为点火枪的安装位置提供了重要参考.

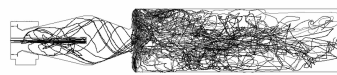


图 6 煤粉颗粒轨迹

Fig. 6 The figure of coal particle track

## 4 锅炉运行参数优化

优化前后的参数见表 3. 通过对旋流燃烧煤粉锅炉额定工况的三维数值模拟, 温度场计算结果得到了很好的验证, 但炉内温度场分布还有待改进, 炉膛尾部温度过高, 易结焦; 预燃室后锥温度较低, 稳燃性较差. 锅炉的给风量和供粉量可以在标准运行参数的  $\pm 30\%$  范围内调整. 为了改善温度场分布, 可以考虑适当减少风量和供粉量, 从而提高预燃室后锥燃烧温

表 3 煤粉锅炉进出口边界条件优化

Table 3 The comparison of optimization cross-reference for the boiler's outlet condition

项目	一次风流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	二次风流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	煤粉流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
优化前	18	10	0.21
优化后	16	8	0.18

度, 增加稳燃性, 降低炉尾温度.

图 7 为优化运行参数前后的温度场对比. 适当降低煤粉锅炉的给风量和给粉量以后, 炉尾温度和近炉膛壁面的温度降低, 减少了锅炉结焦的程度; 预燃室后锥高温区域变大, 使煤粉锅炉的稳燃性得到改善.

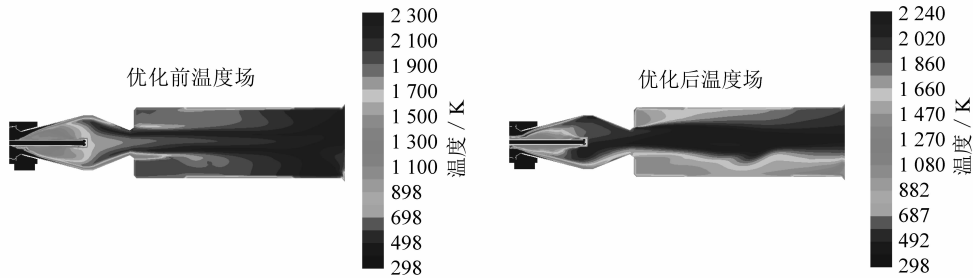


图 7 优化前后温度场对比

Fig. 7 The comparison of temperature field before and after optimized

## 5 结 论

以计算流体动力学软件 Fluent 为基础, 对某新型煤粉工业锅炉的燃烧过程进行了模拟, 结果表明, 新型煤粉工业锅炉的结构合理, 煤粉在炉内具有良好的分散性和稳燃性, 额定工况下各项操控条件基本合适; 通过适当降低锅炉运行参数, 能够进一步改善煤粉燃烧温度场分布.

## 参考文献:

- [1] 吴治永, 李文彦. 某新型旋流燃烧锅炉的数值模拟 [J]. 现代电力, 2004, 21 (1): 11-16.  
Wu Zhiyong, Li Wenyan. Numerical simulation for a new-style boiler featured with swirling combustor [J]. Modern Electric Power, 2004, 21 (1): 11-16.
- [2] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 280.  
Zhou Lixing. Two-phase turbulent flow and simulation of combustion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 280.
- [3] Srdjan B, Miroslav S, Simeon O, et al. Three-dimensional modeling of utility boiler pulverized coal tangentially fired furnace [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49 (3): 3 371-3 378.
- [4] 刘霞, 葛新锋. FLUENT 软件及其在我国的应用 [J]. 能源研究与利用, 2003 (2): 36-38.  
Liu Xia, Ge Xinfeng. The application of fluent software in China [J]. Energy Research and Application, 2003 (2): 36-38.
- [5] Jones J M, Pourkashanian M, Williams A, et al. Modeling the combustion of pulverized biomass in an industrial combustion test furnace [J]. Fuel, 2007, 10 (5): 16-19.
- [6] Hu Z J, Lu J D, Huang L, et al. Numerical simulation study on gas-solid two-phase flow in precalciner [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2006, 11 (4): 440-451.
- [7] Zhou L X, Li L, Li R X, et al. Simulation of 3-D gas-particle flows and coal combustion in a tangentially fired furnace using a two-fluid-trajectory model [J]. Powder Technology, 2002, 125 (3): 226-233.
- [8] Xie Junling, He Feng, Yuan Runzhang. Relationship between coal powder and its combustibility [J]. Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 2002, 17 (1): 72-75.
- [9] Fluent Inc.. Fluent 6.0 User's Guide [M]. 2001.