

# 角置式切向燃烧锅炉炉膛内 等温流场的数值模拟

郭宏生 徐通模 许晋源

(西安交通大学)

**【摘要】** 利用 SIMPLE 算法对一角置式切向燃烧锅炉炉膛模型内三维等温流场进行了数值模拟。差分方式为乘方格式,计算网格取为  $19 \times 17 \times 26$ 。文中给出了几个截面的速度分布及湍流动能分布,得出了炉膛内实际切圆的大小。计算结果在定性上是合理的,切圆大小与实际情况很接近。

**关键词** 锅炉炉膛 等温流场 数值模拟

## 1 前言

角置式切向燃烧锅炉炉膛在电站锅炉中广为应用,其内是一复杂的湍流流动、传热及燃烧的三维过程。由于这一过程和复杂性及燃煤锅炉燃料的多变性,迄今为止对于这类锅炉的设计、运行尚缺乏成熟的经验及理论,往往需要依靠冷态及热态试验来确定运行和设计参数。这类试验周期长,耗资巨大,且很难获得全面、满意的数据,因此深入研究这类锅炉炉内过程的物理机理,建立一套完善的理论模型是十分必要的。

随着计算机技术的发展,大型计算机的出现,使得对复杂的炉内过程进行数值模拟成为可能。全面的炉内过程由流动、传热及燃烧三部分组成,研究过程中分别对三个子模型进行研究,最后合成。

本文是炉内过程流动子模型,即等温、三

维湍流流动模型。求解过程是对各相关守恒方程进行差分求解。湍流模型使用了  $K-\epsilon$  双方程模型,具体求解利用了文献[1]的 SIMPLE 方法。

计算对象是一个角置式切向燃烧炉膛冷态试验模型。炉膛横截面积为  $750 \times 680 \text{ mm}^2$ ,高是 1400 mm。燃烧器正四角布置,假想切圆直径是 72 mm。燃烧器喷口示于图 1。

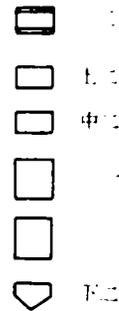


图 1 燃烧器

## 2 数学模型

炉膛内是三维湍流流动,可以由时均的质量及动量守恒方程描述。方程组的封闭通过选取合适的湍流模型来达到<sup>[2]</sup>。

收稿日期 1992-05-11 收修改稿 1992-07-18

本文联系人 郭宏生 男 30 讲师 710049 西安交通大学锅炉教研室

半个多世纪以来,人们发展了各种各样的湍流模型。在实际应用过程中应该本着精度高、应用简单、节省计算时间,同时又具有通用性的原则来选择合适的模型。比较几个最具代表性的湍流模型发现,混和长度模型简单,计算工作量小,在简单射流的计算中获得了满意的结果。然而,对于具有回流区的流动,由于缺乏足够的计算混和长度的知识而一直未能令人满意;  $K-\epsilon$  双方程模型计算工作量比混和长度模型大,但在多数情况下(各

向同性,且  $Re$  数较高)可得到近乎真实的解,并且有一定的通用性;湍流应力模型抛弃了传统的湍流粘性系数的假设,可以考虑流场的各向异性,但计算工作量太大。根据炉内流动过程的实际情况,本文选取了 Launder-Spalding 的  $K-\epsilon$  双方程模型<sup>[3]</sup>。

时均的质量、动量守恒方程以及湍流动能  $K$  和耗散率  $\epsilon$  的守恒方程可写成如下的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varphi) = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varphi}} \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varphi}} \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varphi}} \frac{\partial \varphi}{\partial z}) + S_{\varphi} \quad (1)$$

$\varphi$  所代表的变量及各个方程中源项的具体形式见表(1)。

表 1

| $\varphi$  | $\sigma_{\varphi}$ | $S_{\varphi}$  |
|------------|--------------------|--|
| 1.0        | $\infty$           | 0  |
| $u$        | 1.0                | $\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x}$ |
| $v$        | 1.0                | $\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial y}$ |
| $w$        | 1.0                | $\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial z}$ |
| $k$        | 1.0                | $G - \rho \epsilon$  |
| $\epsilon$ | 1.22               | $\frac{\epsilon}{k}(c_1 G - c_2 \rho \epsilon)$  |

其中

$$G = \mu_t \{ 2 [ (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2 ] + (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 + (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})^2 \} \quad (2)$$

$$\mu_t = c_{\mu} \rho k^2 / \epsilon \quad (3)$$

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (4)$$

模型中各个常数为:

$$c_p = 0.09 \quad c_1 = 1.49 \quad c_2 = 1.92$$

### 3 数值方法

计算过程采用了 SIMPLE 方法。将计算

区域划分成  $19 \times 17 \times 26$  的不等距网格系统, 如图 2 所示。在燃烧器区域, 网格划分恰好使每个喷口及间距各为一个网格, 距离炉墙处网格较密, 而中间区域较为稀疏。

将通用控制方程(1)沿某个控制体进行

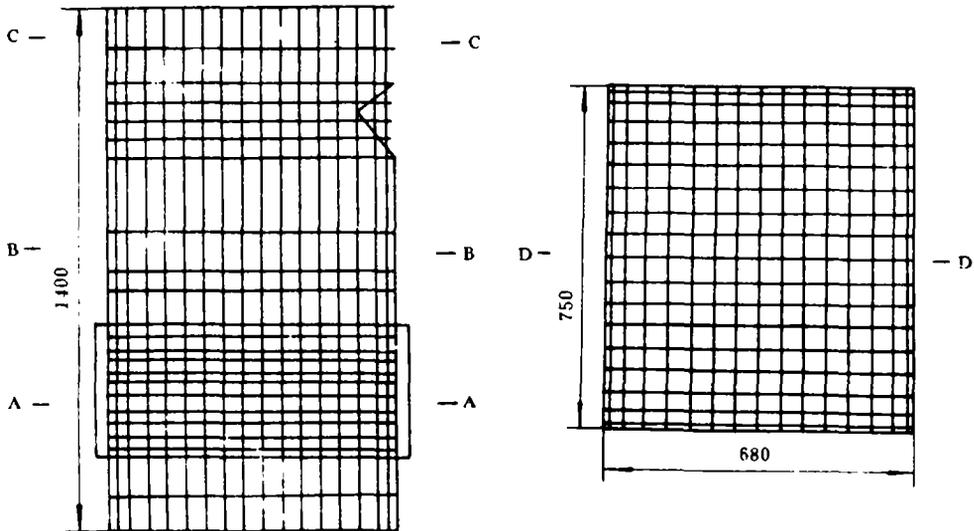


图 2 计算网格

积分, 采用合适的差分方式计算出界面上的变量值, 最后整理可得离散化方程为:

$$a_p \varphi_p = a_w \varphi_w + a_E \varphi_E + a_S \varphi_S + a_N \varphi_N + a_T \varphi_T + a_B \varphi_B + b \quad (5)$$

利用交替方向的逐线 TDMA 方法求解这一差分方程。差分方式选用了乘方格式。

在炉壁附近, 为了避免采用过细的网格系统, 使用了壁面函数法<sup>[4]</sup>。假设在壁面附近湍流动能的产生及耗散趋于平衡, 并且在壁面附近速度分布满足对数分布率, 则得:

$$\tau_w = \frac{K \rho c_p^{0.25} K_p V_p}{l_n [E c_p^{0.25} K_p^{0.5} Y_p / \nu]} \quad (6)$$

式中  $E = 9.0$ ,  $K = 0.40$  是 VonKarmon 常

数, 由此计算壁面切应力及  $\mu_t$ 。下标 P 表示靠近壁面第一个内节点。湍流动能  $K_p$  仍按控制方程求解得出, 边界条件为  $2K/\partial y = 0$ 。而湍流动能耗散率  $\epsilon_p$  按下式计算:

$$\epsilon_p = C_\mu^{0.75} K_p^{1.5} / KY_p \quad (7)$$

将燃烧器喷口射流  $V$  分解为  $u_{in}$  及  $v_{in}$  两个分速度, 分别位于两个网格上, 如图 3 所示。按如下方式确定  $u_{in}$  及  $v_{in}$  :

$$\Delta y \cdot \rho \cdot u_{in} + \Delta x \cdot \rho \cdot v_{in} = \rho \cdot V \cdot B \quad (8a)$$

$$u_{in}^2 \Delta y / v_{in}^2 \Delta x = \lg \alpha \quad (8b)$$

$V$  是燃烧器出口速度,  $\alpha$  是射流中心线与  $x$  轴的夹角, 即射流中心线背火侧与炉墙

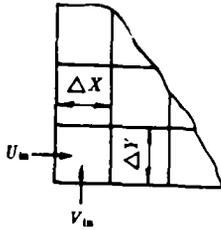


图3 进口条件

燃烧器各次风喷口流速如表2所列, 取自对某一燃用劣质煤锅炉炉膛进行空气动力工况模化的试验数据。

表2 各个喷口风速(m/s)

| 一次风   | 下二次风  | 中二次风  | 上二次风  | 三次风   |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12.97 | 16.91 | 16.91 | 16.91 | 23.93 |

根据每个控制体内的流动是否达到连续, 即每个控制体的进出口流量差值来判断计算过程是否收敛。当整个计算区域内这一差值的最大值小于预定值时, 计算终止。计算在西安交通大学计算中心 ELXSI-6400 计算机上进行, 迭代460次后计算过程收敛。

### 4 计算结果

计算得出了整个炉膛内的流场分布及湍流动能、湍流动能耗散率的分布, 给出了实际切圆的大小。

图4是一次风喷口中心线横截面上的速度分布, 可见计算结果在定性上是基本合理的。当然, 在燃烧器出口不远处气流偏转过早, 这与实际情况略有差异。这可能是由于此处速度主流方向与网格几乎为45°斜交叉, 因而引起的数值假扩散造成的<sup>(5)</sup>。在燃烧器区

域, 由于考虑到燃烧器各个喷口进口流速不同, 采取了较密的网格, 因而形成了网格分布不均匀, 这可能也是引起这一结果的原因之一。

图5是离开燃烧器一定距离后某一横截面上的速度分布。此处, 气流在炉膛内形成了一个对称的旋转气流。

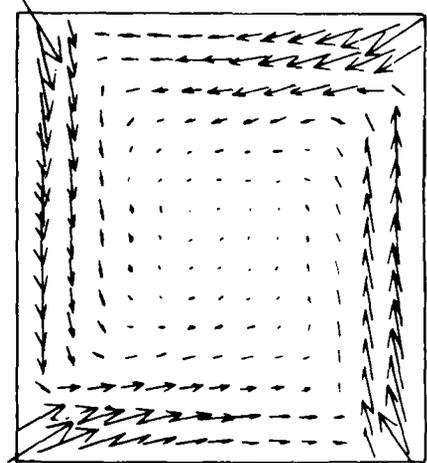


图4 A-A 截面速度分布

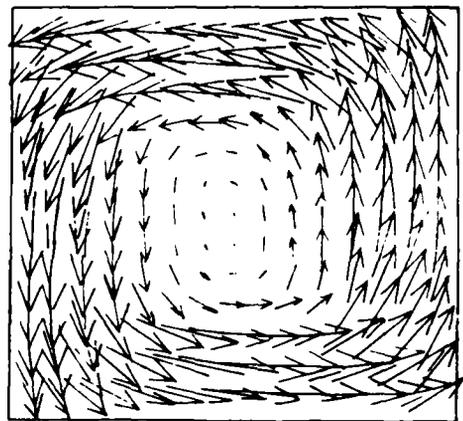


图5 B-B 截面速度分布

图6是炉膛出口处某一截面 C-C 上的速度分布。此处, 流场的旋转对称性已不复存在。

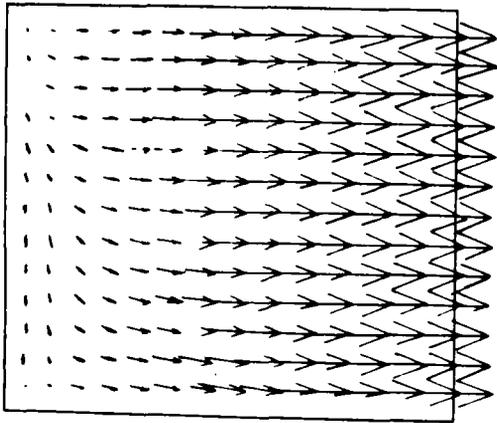


图6 C-C截面速度分布

图7是炉膛中心纵断面速度分布。

实际切圆直径的大小是影响角置式切向燃烧炉膛内燃烧过程的主要因素,也是炉膛冷模试验要确定的一个重要参数。图8给出了计算得出的实际切圆,其长轴为600 mm,

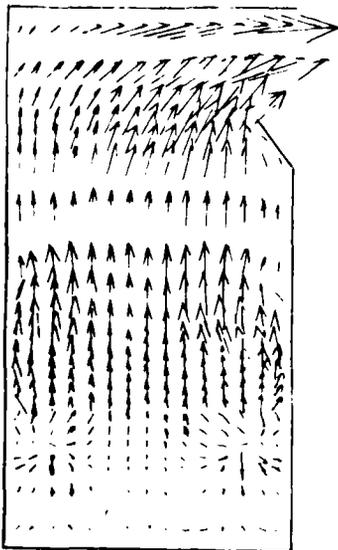


图7 纵断面(D-D)速度分布

短轴是585.5 mm,平均直径为592.75 mm,是假想切圆直径的8.2倍,略偏大。

湍流强度是影响燃料着火及燃烧的又一重要因素。图9给出了燃烧器一次风中心线横截面上的湍流动能分布图。

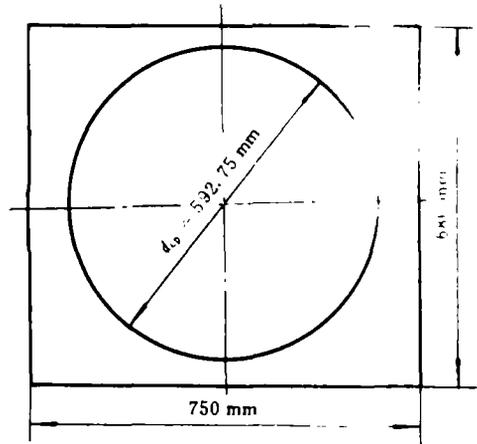


图8 实际切圆

四个角上较高的湍流动能可能是人为地输入进口条件所致。可以看出,离开喷口之后湍流动能急骤减小,表明进口条件对整个计

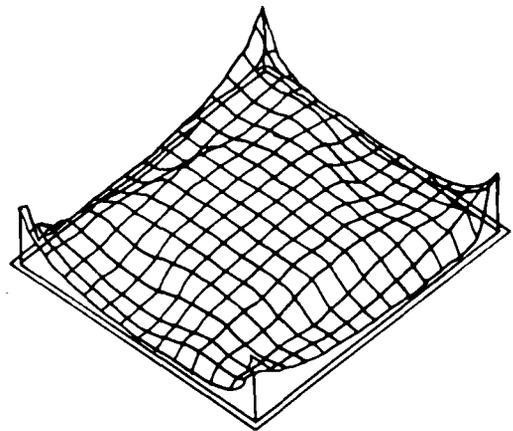


图9 湍流动能分布

算结果的影响不大。D. R. Honnery<sup>(6)</sup>曾利用LDV对类似的炉膛内的湍流动能的分布进行了试验测量,结果如图10所示。对此发现,

本文的计算结果与实际情况尚有一定差异,表明本文所述计算方法对湍流动能的计算还不能令人满意.这可能是由于  $K-\epsilon$  模型适用于各向同性的湍流流场,而在此类炉膛内存在着各向异性湍流现象。

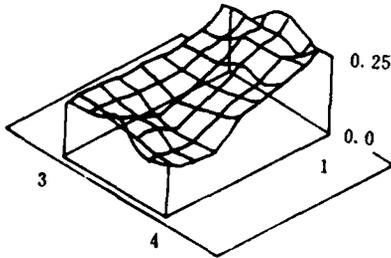


图10 湍流强度分布<sup>(7)</sup>

通过本文的计算,笔者认为利用 SIMPLE 算法和  $K-\epsilon$  双方程湍流模型进行角置式切向燃烧锅炉炉膛内流场分布的计算时,可以获得定性上基本合理的计算结果.在燃烧器区域,由于数值扩散的存在,造成了气流偏转贴墙现象,如何减小数值扩散的影响是进一步提高这类计算精度的一项主要任务.当然,进一步完善湍流模型也是计算燃烧学所面临的重要课题.为了更完整地进行炉内过程的计算,还必须进行炉内燃烧、传热及气-固两相流动特性的研究。

## 5 结论

- 1 本文所述计算方法对于切向燃烧锅炉炉膛内流场的计算在定性上可获得合理的结果;
- 2 在燃烧器区域有一定的假扩散.如何减小假扩散的影响是进一步提高这类计算精度的一项主要任务;
- 3 计算所得湍流动能分布结果尚不能令人满意。

## 参 考 文 献

- 1 Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, 1980
- 2 Schlichting H. Boundary-layer theory ( seventh edition ). McGraw-Hill Book Company, 1979
- 3 Launder B E, et al . The numerical computation of turbulent flow. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. , 1979(3) ; 269~289.
- 4 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1988
- 5 Han T, et al . A comparison of hybrid and quadratic-upstream differencing in applied mechanics and engineering, Vol. 29, pp. 81~95, 1981
- 6 Honnery D R, et al. Furnace flow modelling ; physical and computational . J. of the Institute of Energy, pp. 169~177, 1989



### 简 讯

## 冷凝器管束寿命的预测

据“Электрические Станции”1992年8月号报导,当今电站大型动力装置的大修前寿命已增加到3万—3万5千小时.冷凝器管子的寿命取决于其材料、冷却水成分及其运行条件可以在1—2年到10—20年间变化。

基于对冷凝器管子腐蚀过程的统计分析,可以根据运行资料预测其寿命,从而可以确定更换管束的最佳期限.在运行过程中电站的工作人员应该对冷凝器管子的腐蚀速度规定统计检验.应该继续研究热动力设备各个部件蠕变破损的统计预测,以便确定其寿命和损坏概率。

(吉 桂 明 供稿)

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1993 Vol. 8 No. 3

---

## CONTENTS

- (57) **Design of the Combustion Equipment and System for Daya Bay Nuclear Power Station Preoperational Test Boilers**.....Li Zongxi (*Harbin Marine Boiler & turbine Research Institute*)

A brief account is given of the design highlights of the combustion equipment and system for Daya Bay Nuclear Power Station preoperational test boilers. The said equipment and system has met the operation requirements of the boilers under various load conditions. **Key words:** boiler, burner, air register, oil jet atomizer, relay, efficiency, characteristics

- (63) **Numerical Simulation of an Isothermal Flow Field in the Isothermal Furnace of a Tangential-fired Boiler**.....Guo Hongsheng (*Xian Communications University*)

By the use of SIMPLE algorithm a numerical simulation has been conducted of the three-dimensional isothermal flow field in a tangential-fired boiler furnace model. The difference scheme is of an involution one with a calculation net of  $19 \times 17 \times 16$  being adopted. Presented in the paper are the speed profile and turbulent flow kinetic energy profile of several sections with the actual inscribed circle dimension within the furnace being shown. The calculation results have been found to be qualitatively rational and the inscribed circle size is in quite good agreement with the actual conditions. **Key words:** boiler furnace, isothermal flow field, numerical simulation

- (69) **On the Recycling Ratio of Circulating Fluidized Bed Boilers**.....Lu Huilin, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Recycling ratio is one of the major parameters for the design and operating adjustment of circulating fluidized bed boilers. This paper presents the variation of the recycling ratio with the boiler combustion efficiency and dense-phase zone bed temperature characteristics. The conception of a sensitive recycling ration is proposed with the basic principles governing its selection being discussed. **Key words:** recycling ratio circulating fluidized bed, sensitive recycling ratio, combustion efficiency

- (75) **The development and application of oil-gas mixed combustion technology for Model AWD turning cup combustion equipment**.....Liu Yi (*Jiang Xi Sea-going Instrument Factory*)