

# 煤粉旋风燃烧过程流场特性研究

林伯川<sup>1</sup> 陈恩鉴<sup>1</sup> 吴承康<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510070; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 煤粉旋风燃烧器可用于工业加热过程, 实现以煤代油, 本论文根据旋流燃烧流动特点, 采用能考虑非均向湍流应力的雷诺应力模型, 对煤粉旋风燃烧器内气流流动过程场进行数值模拟计算, 流场计算结果表明, 燃烧室几何参数对其内部的流动特性有很大的影响, 计算结果与流场实验测试相吻合。

**关键词** 旋流燃烧器; 流场特性; 数值模拟

**中图分类号**: TK16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2001)04-0523-03

## RESEARCH ON THE FLOW-STRUCTURE OF PULVERIZED COAL CYCLONE COMBUSTOR

LIN Bo-Chuan<sup>1</sup> CHEN En-Jian<sup>1</sup> WU Cheng-Kang<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The pulverized coal cyclone combustor could capture melting fly ash and give a flame without much fly ash, so it could be used in the coal burning kiln. Considering the strong swirling flow inside the cyclone combustor, A numerical simulation based on the Reynolds Stress Model for the flow structure of a pulverized coal cyclone combustor is reported in this paper. The results show that, the geometric parameters of combustor would affect the flow-structure greatly. The comparison of numerical simulation result to experiments is good.

**Key words** cyclone combustor; flow structure; numerical simulation

### 1 前言

我国一次能源中, 煤炭占 75%, 以煤代油为我国的长期能源政策。煤粉旋风燃烧技术, 利用高温液态捕渣等技术手段, 实现煤粉燃烧过程中的灰渣捕集, 可向工业窑炉提供含尘量低的洁净火焰, 适用于燃油工业窑炉进行以煤代油改造, 具有广阔的应用前景。在旋风燃烧过程中, 由于燃烧室中心轴线上存在反向压力梯度, 形成中心回流区及环室回流, 对煤粉的着火稳燃以及灰渣的捕获起到关键作用。本文利用流场数值计算, 对燃烧室内气动过程进行模拟, 以分析燃烧室结构对回流率的影响, 提出燃烧室几何结构优化参数。

### 2 燃烧器内流动过程数值模拟

本文数值模拟对象为燃煤量为 200 kg/h 的燃烧

器, 其二次风从燃烧器端面旋流进入, 可简化为如下轴对称结构 (见图 1)。

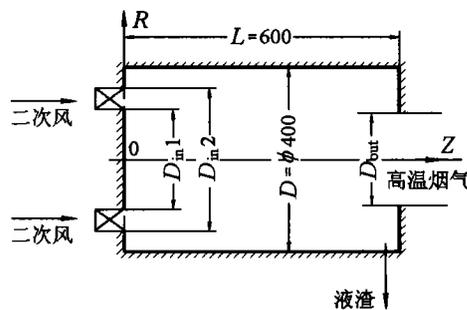


图 1 旋流燃烧器结构示意图

考虑常温流动, 忽略重力作用, 旋流煤粉燃烧器内湍流流动基本控制方程如下<sup>[1~3]</sup>:

连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial X_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2001-01-15; 修订日期: 2001-03-27

基金项目: 国家计委“九五”重点攻关基金资助项目 (No.96-120-53) 和广东省自然科学基金资助项目 (No.950670)

作者简介: 林伯川 (1962-) 男, 广东江门人, 中科院广州能源研究所节能室研究员, 硕士, 主要从事煤燃烧及工业节能方向的研究。

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial X_j}(\mu \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - \overline{\rho u'_i u'_j}) - \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j}[\mu(\frac{\partial U_j}{\partial X_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \delta_{ij})] \quad (2)$$

对于湍流应力的模拟, 采用 Reynolds 应力模型:

$$\rho \frac{D \overline{u'_i u'_j}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} [\mu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial X_k} + D_{ij}] + P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{D \epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} [C_\epsilon \frac{k}{\epsilon} \overline{u'_k u'_l} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_l}] + (\frac{1}{2} C_{1\epsilon} P_{kk} - C_{2\epsilon} \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \quad (4)$$

本文采在 SIMPLE 基础上改进的 SIMPLEST 算法<sup>[1,4]</sup>, 对流场进行计算。结果显示, 燃烧器轴向速度分布存在明显的中心回流及环室回流(图2)。切向速度显示(图3), 燃烧器内部沿径向分成两个区, 即中心部分的涡核区和环室部分的势流区。

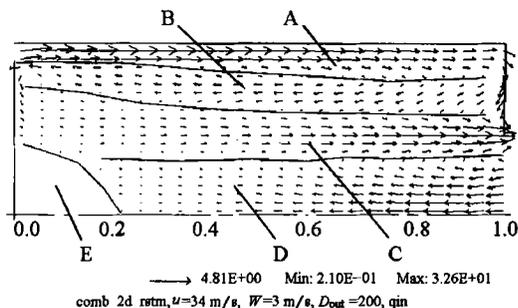


图2 燃烧器纵截面速度矢量投影分布图 (sw = 10.7)

A 主气流区 B 环室回流区  
C 出口气流区 D 中心回流区 E 滞流区

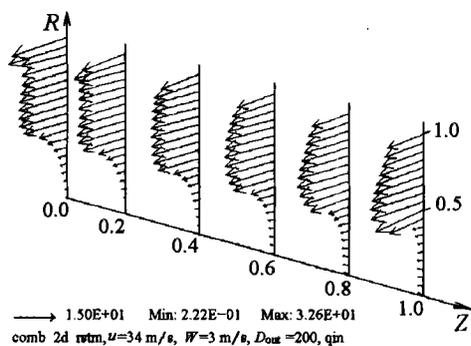


图3 燃烧器横截面速度矢量投影分布图 (sw = 10.7)

计算结果与模型实验测试<sup>[5]</sup>结果十分接近, 燃烧室内回流区的位置相仿, 速度的峰值大小也相当接近(图4)。而在中心回流区的测试结果与数值模拟有略微区别, 这是由于中心回流区处气流速度低, 导致五孔探针测试误差增大所造成。总体而言, 所

采用的数值模型及计算方法能较好地模拟燃烧器内气动过程。

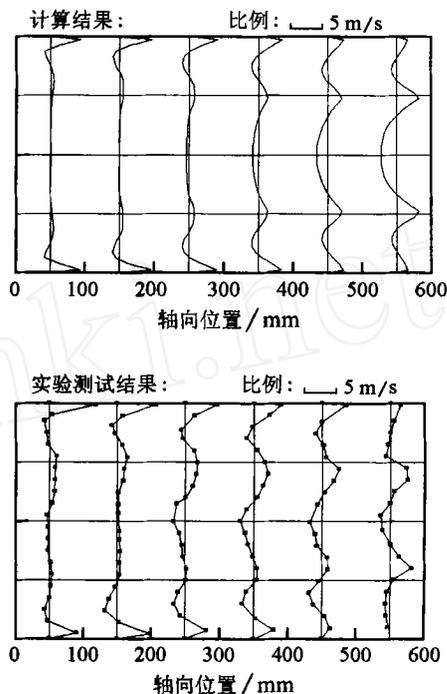


图4 轴向速度计算结果与流场测试结果的比较进口条件  
切向速度  $U_t = 34.5 \text{ m/s}$ , 轴向速度  $W_z = 3.5 \text{ m/s}$

### 3 燃烧器几何结构对流场特性的影响

本文着重分析燃烧器长径比, 出口直径及二次风入口直径对环室回流率和中心回流率的影响。

#### 3.1 燃烧室长径比对回流的影响(图5~8)

由计算结果可见, 中心回流随着长径比的减少而增加, 而环室回流的变化较为复杂, 当  $L/D = 1$  时, 燃烧室内的环室回流比较均匀, 当  $L/D$  增大时, 环室回流呈现头部增强, 尾部减弱的特征, 当长径比  $L/D$  大于 2.5 时, 尾部环室回流最小值为 5%, 接近阻断状态。从保持稳定燃烧及提高捕渣率角度出发, 需要较高的中心回流及较强且均匀的环室回流, 由计算, 合适的长径比为  $L/D = 1 \sim 1.5$ 。

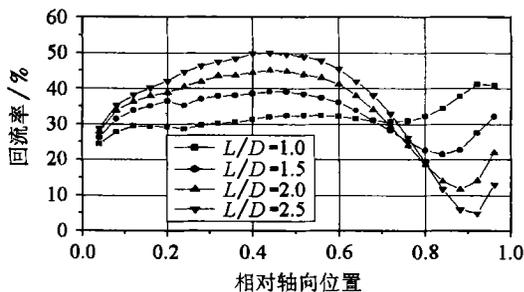


图5 不同长径比下环室回流率变化曲线

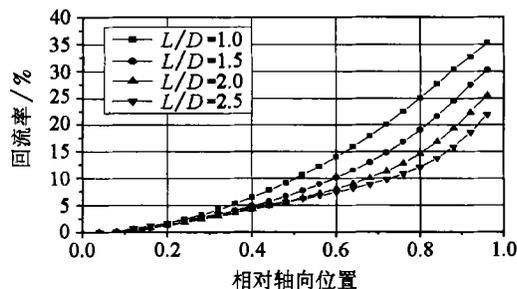


图6 不同长径比下中心回流率变化曲线

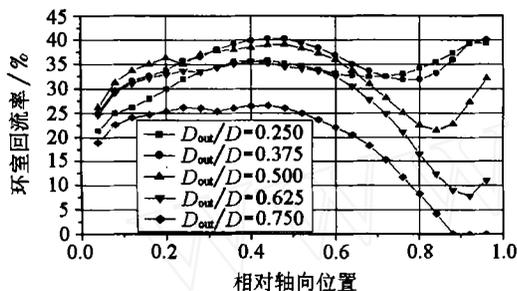


图7 不同出口直径下环室回流率变化曲线

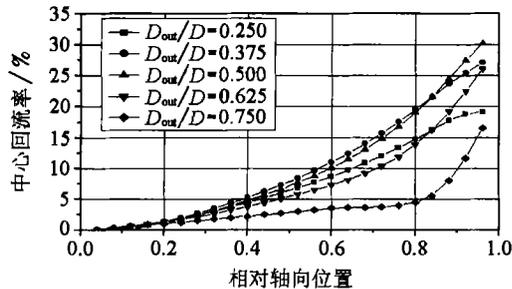


图8 不同出口直径下中心回流率变化曲线

### 3.2 燃烧室出口直径对回流的影响 (图9)

随着出口直径的增加, 环室回流减弱, 而中心回流先增后减, 在出口直径  $D_{out} = 200$ , (相对直径  $D_{out}/D = 0.5$ ) 时, 中心回流达到最大值。

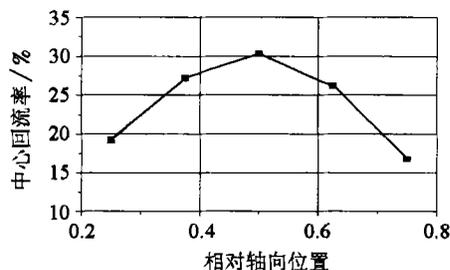


图9 出口中心回流率随出口直径变化曲线

### 3.3 二次风入口直径对回流的影响 (图10, 11)

随着  $D_{in}$  减小, 环室回流在燃烧室尾部减弱, 而在头部逐渐与中心回流接近, 当  $D_{in} = 200$  ( $D_{in}/D = 0.5$ ) 时, 在燃烧室头部, 中心回流扩张, 环室回流完全消失。当二次风入口外圆与燃烧室内径相等 ( $D_{in} =$

380) 时, 环室回流均匀贯穿燃烧室。

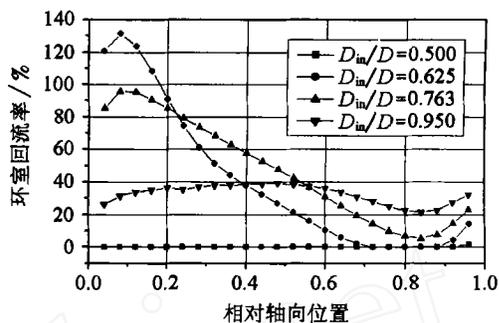


图10 二次风入口直径对环室回流率的影响

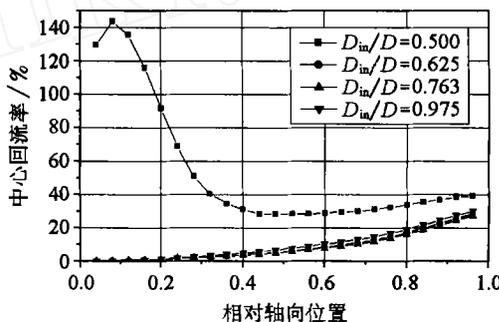


图11 入口直径对中心回流率的影响

## 4 结 论

(1) 利用雷诺湍流应力模型对煤粉低尘燃烧器内的流动过程模拟是成功的。计算结果与实验测试能较好吻合。

(2) 燃烧室几何结构对流场形态有重要影响。1) 长径比  $L/D$  增加, 环室回流均匀性降低, 中心回流减弱; 2) 燃烧室出口直径增加, 环室回流减弱。在  $D_{in}/D = 0.5$  时, 中心回流达到最大值; 3) 随着二次风入口直径  $D_{in}$  增加, 环室回流均匀性改善, 当  $D_{in}/D = 0.5$  时, 环室回流消失。

(3) 燃烧室合适几何结构参数为:  $L/D = 1 \sim 1.5$ ,  $D_{out}/D = 0.5$ ,  $D_{in}/D \approx 1$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 范维澄, 万跃鹏. 流动及燃烧的模型和计算. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992. 75: 316-317
- [2] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟. 北京: 科学出版社, 1994. 167-169
- [3] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engg., 1974, 3: 269-289
- [4] S V 帕坦卡. 传热与流体流动的数值计算. 北京: 科学出版社, 1984. 146-151
- [5] 蒋利桥, 陈恩鉴, 林伯川. 液排渣燃烧器冷态单相流场试验. 工业炉, 2000, 22(3): 4-6