

## 有限空间内平面相交射流的数值模拟

章 旋 徐通模 郭宏生 惠世恩  
(西安交通大学)

〔摘要〕 本文利用 SIMPLE 算法对有限空间内平面相交射流的等温流场进行了数值模拟。差分格式为乘方格式,文中计算和分析了相交射流的夹角、间距和截面突扩比对流场和射流汇合的影响。计算结果在定性上是合理的。

关键词 平面相交射流 等温流 流场模拟 数学模型  
分类号 TK16

## 1 前言

随着湍流射流在工程中的广泛应用,关于它的研究前人已进行了大量有益的工作。但是有关有限空间内的相交射流,研究的还远远不够,特别是小空间内的平面相交射流尚未见报道。然而,工程实际中,由于混合、工艺等方面的要求,这种情况运用很广。例如燃气和空气呈相交射流在燃烧室内组织燃烧。

本文采用数值计算的方法研究了矩形区域内相交射流的等温流场,计算和分析了射流夹角、射流间距和截面突扩比对流场和射流汇合点的影响。模拟的对象是两股对称布置的等温、等密度、等速的平面相交射流。

## 2 数学模型

平面射流是二维湍流流动,可以由时均的质量和动量守恒方程描述。方程组通过选取合适的湍流模型来达到封闭<sup>[1]</sup>。

比较几个具有代表性的湍流模型发现,混合长度模型简单,计算工作量小,在简单射流的计算中可以获得满意的结果。但对于具

有回流区的流动,因缺乏足够的计算混合长度的知识而无法得到满意的结果; $K - \epsilon$  双方程模型计算工作量比混合长度模型大,但多数情况下(各向同性,且  $Re$  数较高)可得到近乎真实的解,并且通用性好;湍流应力模型可以考虑流场的各向异性,但计算工作量太大。根据本文计算对象的实际情况,选取了 Launder - Spalding 的  $K - \epsilon$  双方程模型<sup>[2]</sup>。

时均的质量、动量守恒方程及湍动能  $K$  和耗散率  $\epsilon$  的守恒方案可写成如下通用形式<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + S \end{aligned}$$

上式中  $\varphi$  所代表的变量及各方程的扩散系数  $\Gamma$  和源项  $S$  见表 1。

表 1

$\varphi$	$\Gamma$	$S$
1.0	0	0
$U$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x})$
$V$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y})$
$K$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
$\epsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon)$

① 收稿日期 1993 - 09 - 21

② 本文联系人 章 旋 男 25 研究生 710049 西安交通大学 9275#

其中

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

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

模型中各常数为:

$$C_\mu = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92$$

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

### 3 数值方法

计算过程采用了文献[4]的 SIMPLE 方法,交错网格系统,基本方程离散化后为:

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_s \phi_s + a_N \phi_N + b$$

利用交替方向的逐线 TDMA 方法求解该差分方程。差分方式采用乘方格式。

用壁面函数法计算近壁参数<sup>[3]</sup>。

将射流入口速度  $V$  分解为  $U_{in}$  和  $V_{in}$  两个分速度分别作为两个动量方程的入口边界条件。

### 4 计算结果及分析

#### 4.1 两种布置方式的比较

针对无外侧突扩区域和有突扩区域的两种布置方式,进行速度场计算,获得速度分布(图1、2)。

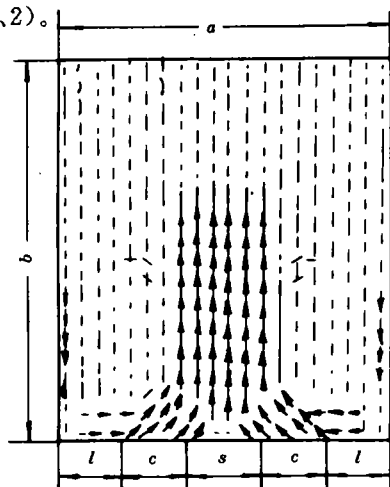


图1 有突扩区域的速度分布

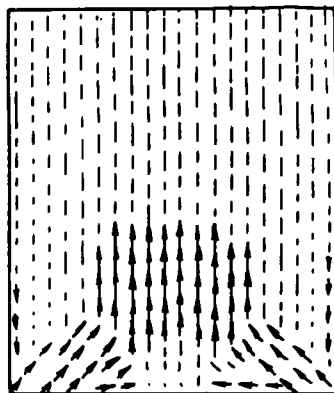


图2 无外侧突扩区域的速度分布

由计算结果可见,无论有、无外侧突扩区域,都存在回流区。所不同的是前者的回流作用较后者更大更强。当射流进入突扩的矩形区域后,由于射流对周围介质的卷吸作用,如果周围介质没有或较少,不足以提供足够的卷吸量,就会形成逆向压力梯度,从而产生回流作用。对相交射流来讲,射流倾斜射入,由于水平方向的动量分量,使射流横向卷吸能力增强。因此无论是否有外侧突扩区域,都能产生明显的回流区。可见,射流倾角,对产生回流区具有重要作用。

#### 4.2 夹角的影响

针对截面突扩比( $\bar{1} = 1/c$ )为0和1.0两种布置方式,在射流夹角  $\theta$  为  $30^\circ \sim 120^\circ$  范围内变化时的流场分布进行计算。用回流区面积占整个矩形区域的百分比——回流区面积比( $\bar{A}_b = A_b / (a \cdot b)$ )来表示回流区大小;用最大截面回流量占入口流量的百分比——最大截面回流率( $\bar{F}_m = F_m / F_{in}$ )和回流区内平均截面回流量占入口流量的百分比——平均截面回流率( $\bar{F}_a = F_a / F_{in}$ )来反映回流量大小;定义矩形区域的中轴线上纵向速度首先达到入口纵向速度的一半处为相交射流的汇合点(C点),并以C点至入口截面的距离占整个区域长度的百分比——相对汇合距离( $\bar{C} = lc/b$ )表示汇合点位置。

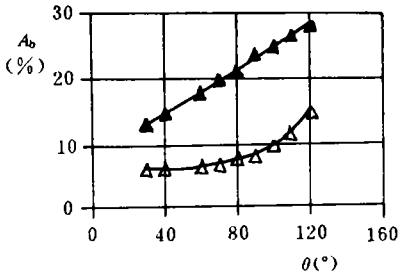


图 3 夹角对回流区面积的影响

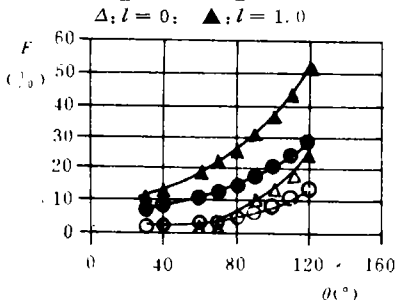


图 4 夹角对回流量的影响

$F_m$ :  $\Delta$ ,  $\bar{l} = 0$ ;  $\blacktriangle$ ,  $\bar{l} = 1.0$ ;  $F_r$ :  $\circ$ ,  $\bar{l} = 0$ ;  $\bullet$ ,  $\bar{l} = 1.0$

计算结果(图 3、4、5)表明,随着相交射流夹角的增大,回流区和回流量都相应增加,其中具有突扩区域的情况,其增长更显著。分析原因在于随夹角增长,射流水平方向动量分量增加,水平方向引射作用加强,横向卷吸能力提高;同时,由于射流斜向内侧行进,在外侧提供了宽广的可形成回流区的区域,所以使回流区和回流量都明显增加。

夹角增大,几何关系本身使汇合点提前;同时,由于夹角增大引起水平分速度增加,也迫使汇合点提前,从而综合效果是使相对汇合距离呈指数规律变化。

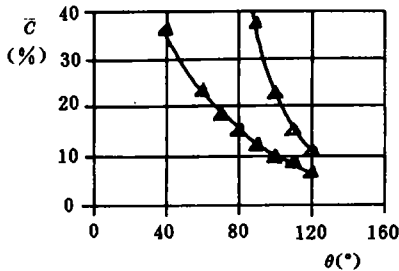


图 5 夹角对汇合点的影响

$\Delta$ ,  $\bar{l} = 0$ ;  $\blacktriangle$ ,  $\bar{l} = 1.0$

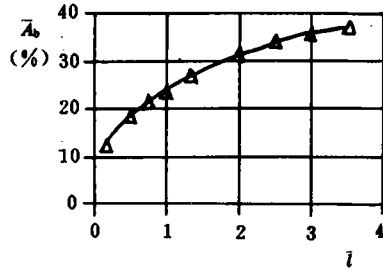


图 6 截面突扩比对回流区面积的影响

$\Delta$ ,  $\bar{s} = 1.0$ ,  $\theta = 90^\circ$

### 4.3 截面突扩比的影响

在保持间距比( $\bar{S} = S/C$ )为 1.0 和射流夹角  $\theta$  为  $90^\circ$  的前提下,改变截面突扩比  $\bar{l}$  从 0.17 到 3.5,进行了九种情况的计算(图 6、7、8)。

结果表明,随着截面突扩比增大,回流区和回流量都呈增长趋势。与文献[5]的实验数值相比较,一方面,两者具有一致的变化趋势;另一方面,由于本文研究的是两股相交射流,其回流情况还受到射流间距、夹角的影响,所以并非象文献中显示的完全线性变化。

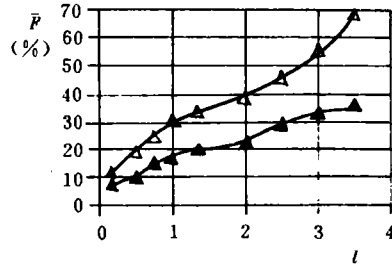


图 7 截面突扩比对回流量的影响

$F_m$ :  $\Delta$ ,  $F_r$ :  $\blacktriangle$ ;  $\bar{s} = 1.0$ ,  $\theta = 90^\circ$

截面突扩比增大,汇合点逐渐提前,这是由于在  $\bar{S} = 1.0$  的前提下,当  $\bar{l} < 1.0$  时,内侧补气条件比外侧好,故射流易于向外偏,造成汇合点推迟;当  $\bar{l} > 1.0$  时,外侧补气条件好,所以射流向内偏,使汇合点提前。

### 4.4 射流间距的影响

在保持截面突扩比  $\bar{l} = 1.0$  和射流夹角  $\theta = 90^\circ$  的条件下,计算了  $\bar{S}$  从 0.5 到 4.0 内的各种流场分布。

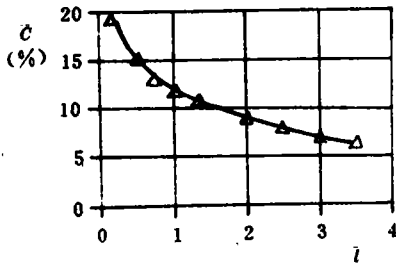


图8 截面突扩比对汇合点的影响  
 $\Delta, \bar{l} = 1.0, \theta = 90^\circ$

由计算结果(图9、10、11)可见,随间距比 $\bar{S}$ 增大,回流区面积减小,而回流量增大。

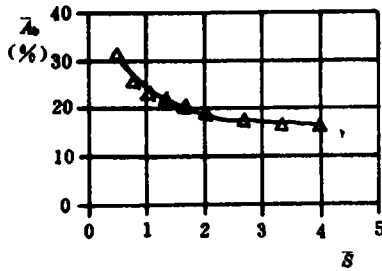


图9 间距比对回流区面积的影响  
 $\Delta, \bar{l} = 1.0, \theta = 90^\circ$

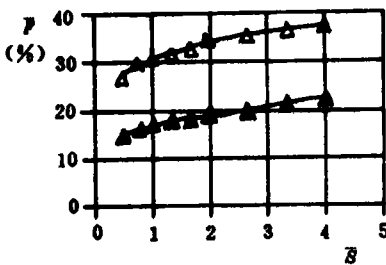


图10 间距比对回流量的影响

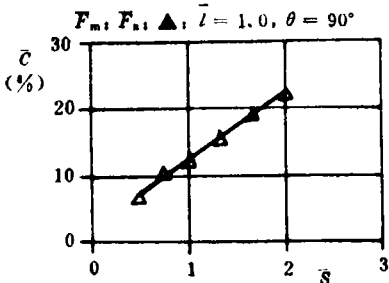


图11 间距比对汇合点的影响  
 $\Delta, \bar{l}, \theta = 90^\circ$

究其原因在于,随着间距增大,虽然 $\bar{l} = 1.0$ 保持不变,但突扩区域相对所占比例减小,使回流区减小,而 $\bar{S} > 2.67$ 后,回流区基本上

不再变化。间距增大,两股射流的互相对冲程度减弱,由此引起的动量消耗减小,所以每股射流都保持有较大的动量,从而具有较大的卷吸能力,使回流量有所增加。但这种增大是十分缓慢的,即射流间距对回流量影响不大。

射流间距对汇合点位置有很大影响。间距增大,汇合点迅速推迟,当 $\bar{S} > 2.0$ 后,两股射流无法形成汇合点。图11所示为线性关系,这与文献[6]的实验结果一致。

## 5 结 论

- 1 有限空间内平面相交射流在无外侧突扩区域情况下,仍然能够形成回流区。
- 2 相交射流的夹角对流场有显著影响。夹角增大,回流区和回流量都增大,汇合点提前。
- 3 外侧突扩区域的大小对回流也有明显影响。在 $\bar{l} < 3.5$ 范围内,增大突扩区域,可以使回流区和回流量增大,使汇合点提前。
- 4 相交射流间距对回流有一定影响。间距增大,回流区域减小,而回流量略有增加,间距比和相对汇合距离之间有线性关系。

## 参 考 文 献

- 1 Schlichting H. Boundary-layer theory (seventh edition). McGraw-Hill book company, 1979
- 2 Launder B E, et al. The numerical computation of turbulent flow. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1979(3), P269-289
- 3 陶文栓. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1968
- 4 Patanker S V, Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 5 Beer J M & Chigier N A. Combustion aerodynamics. Applied Science Publishers Ltd, 1972, P30.
- 6 王俊民. 相交射流的实验研究. 西安交通大学硕士学位论文, 1987, P36-37

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1994 Vol. 9 No. 6

---

## CONTENTS

- (313) **The Numerical Simulation of Two Planar-Intersecting Jets in a Finite Space**.....Zhang Xuan, Xu Tongmu, Guo Hongsheng, Hui Shi'en (*Xi'an Jiaotong University*)

Through the use of a SIMPLE algorithm a numerical simulation has been conducted of the isothermal flow field of two planar-intersecting jets in a finite space. The difference scheme is of an involution one. The authors have calculated and analysed the included angle, the spacing between the two jets and the influence of a section sudden expansion ratio on the flow field and the convergence of the jets. The calculation results have been found to be qualitatively rational.

**Key words:** *planar-intersecting jets, isothermal flow, flow field simulation, mathematical model*

- (317) **An Experimental Investigation of the Flow Field in a Large-sized Boiler Furnace**.....Guo Hongsheng, Xu Tongmu, Hui Shi'en, Che Defu, Chen Tie (*Xi'an Jiaotong University*)

This paper presents the cold-state aerodynamic field simulation test results for a WG 300 MW boiler furnace. The test results have shown that the different dynamic pressure ratio of the primary air and secondary air, the feeding mode of the primary air and the layout format of the burners will all exercise a certain influence on the in-furnace aerodynamic field. The said results can be employed to guide the furnace design and operation of the home-made 300 MW boiler units and other tangentially fired boilers. **Key words:** *boiler, model, aerodynamic test*

- (324) **The Fatigue Life Analysis of the Drums of Three 65 t/h Boilers Installed in a Factory**.....Jiang Jialing, Lin Xinghua, et al. (*Zhejiang University*)

This paper deals with the low-cycle fatigue life analysis of the drums of three medium-pressure 65t/h boilers. **Key words:** *boiler drum, low-cycle fatigue, service life*

- (329) **A Fuzzy Pore Model for Pulverized Coal Particle Combustion**.....chen Hong, Sun Xuexin, et al. (*National Key Laboratory for Coal Combustion under the Central China Polytechnical University*)

I. W. Smith (*CSIRO Division of coal and Energy Technology, Australia*)

With the help of a mercury injection device the authors have studied the pore structure of 8 types of raw coals and their coking samples with different burn-out rates. It has been found that the pore volume of large holes constitutes the absolute majority of the coal pore volume while the pore area of small holes the absolute majority of coal pore area. Based on the test results and theoretical deduction the authors have come up with a new type of pore structure model, the so-called fuzzy pore model. The fuzzy large pores and fuzzy small pores control respectively the mass transfer and chemical combustion process in the pores. In this paper is given the control equation of coal particle combustion process and a numerical solution of the coal single particle internal combustion process. Also studied is the effect on coal coking reactivity of such