

# 大速差预燃室的流场特征

吴承康 包琪 赵烈

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 一种新型的大速差同向射流预燃室已经研制成功。本文基于 SIMPLE 算法, 发展了计算这种流场的数值解法。文中介绍了算法、边界条件的详细说明以及计算结果。计算结果证明存在大面积回流区; 呈现了重要的三维特征。本文初步讨论了设计参数对回流特性的影响。

**关键词** 预燃室, 数值模拟, 稳燃, 回流, 反流, 大速差同向射流。

## 一、引言

我国已研制出多种用于锅炉点火的预燃室, 但它们都具有常规的构型。最近, 我们研制了一种新型预燃室。大速差同向射流的布局导致高湍流强度的大面积回流区。

这种流场具有跟大速差复式同心射流流场类似的回流机理<sup>[1]</sup>。然而, 它显示了明显的三维特性。而且, 通过射流的布局以及射流参数的选择就可改变流场。有必要仔细研究这种具有复杂湍流特性的三维回流流场。

因此, 我们对这种流场进行了数值模拟。目的在于: 阐明回流的特征与机理; 考察影响回流特征的若干因素。从而提供确立设计准则的理论依据。

## 二、数学模型与解法

基于时平均 Navier-Stokes 方程组的 SIMPLE 算法, 我们发展了计算三维湍流流场的数值方法。用  $K-\epsilon$  模型描述湍流。所求解的方程组具有下列统一形式:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) - \nabla \cdot (\Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

其中;  $\Gamma_{\phi}$  及  $S_{\phi}$  为相应方程的交换系数与源项。它们各自的表达式列于表 1。

$$\text{其中, } G_K = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{r \partial \theta} + \frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \right)^2 \right\}$$

本文采用交错网格。鉴于构型的对称性, 可以只算半个预燃室。计算域的节点数为  $20 \times 15 \times 13$ 。 $x$  及  $r$  向的网格是非均匀分布的, 但在  $\theta$  向是均布的。计算域周向分为 12 等分; 每个子区域的张角为  $15^\circ$ 。K = 1 和 K = 13 两个周向切面构成对称面。

在“控制体积”上积分原方程组, 导出控制方程组的离散形式。

本文于 1986 年 7 月 3 日收到, 中国科学院科学基金资助的课题。

表 1

$\phi$	$\Gamma$	$S$
$u$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{\partial \omega}{\partial x})$
$v$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{\partial \omega}{\partial r})$ $+ \rho \frac{w^2}{r} - \frac{2\mu}{r}(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} + \frac{v}{r}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\mu \frac{w}{r})$
$w$	$\mu$	$-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[\mu r (\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r})]$ $- \rho \frac{v\omega}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}[\frac{\mu}{r}(\frac{\partial \omega}{\partial \theta} + 2v)] + \frac{\mu}{r}(\frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r})$
$K$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{K,eff}}$	$G_K - C_D \rho \varepsilon$
$\varepsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varepsilon,eff}}$	$(C_1 G_K - C_2 \rho \varepsilon) \varepsilon / K$

对于流动变量  $\phi$ , 它的差分方程为:

$$\phi_p = \frac{A_{x-}\phi_{x-} + A_{x+}\phi_{x+} + A_{y-}\phi_{y-} + A_{y+}\phi_{y+} + A_{z-}\phi_{z-} + A_{z+}\phi_{z+} + S_d \Delta V}{A_p} \quad (2)$$

此处,

$$A_p = A_{x-} + A_{x+} + A_{y-} + A_{y+} + A_{z-} + A_{z+} - S_p \Delta V$$

$$A_i = \text{Max}[\pm F_i, D_i \pm F_i/2, 0]$$

$$F_i = (\rho V a_i) \quad D_i = \Gamma a_i / \delta_i$$

本文算法的主要特征是: 基于猜测的压力场算出速度场; 而后, 校正压力与速度, 直至满足连续方程, 从而确定压力场. 组合连续方程与动量方程可得压力校正方程. 它的差分形式与 (2) 式一样, 但方程的系数与 (2) 式不同.

离散化以后得到的代数方程组采用具有对称边界条件的 TDMA 算法求解.

### 三、计算对象与边界条件

燃烧实验中, 煤粉和一次风沿着预燃室的轴, 以大约 20m/s 的速度进入预燃室. 端面配置有小喷口, 它们离轴一定距离, 由此引入蒸汽或空气的高速射流. 为证实这种预燃室的流场特性, 本文选用了上述构型. 选择的几何尺寸如下: 预燃室长度  $L = 1.1\text{m}$ ; 直径  $D = 0.48\text{m}$ ; 小孔离轴距离  $r = 0.21\text{m}$ .

我们算了四种工况. 它们的结构及物理参数列于表 2.

表 2

工况号	I	II	III	IV
一次风速度	20m/s	10	9.5	9.6
一次风直径	0.17m	0.17	0.125	0.17
小孔所在平面	60°	60	90	60
小孔风速	350m/s	248	248	248
小孔面积	$2.75 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$	$6.87 \cdot 10^{-5}$	$6.87 \cdot 10^{-5}$	$6.87 \cdot 10^{-5}$

由于微分方程是椭圆型的, 在所有边界上都要给出边界条件。

流动变量的入口值是给定的。

出口处, 有关变量的梯度为零。然而要注意保证质量连续。这种边界条件通常用于渠道的层流或湍流膨胀流动问题。大体上, 在预燃室短的情况下, 除了出口附近外, 出流边界条件对流动特征的影响是不重要<sup>[4]</sup>。

对称面上, 法向速度分量为零; 其它量的法向导数为零。当然, 预燃室轴线 ( $J=1$ ) 上的条件需特别处理以满足对称面条件。我们用跟对称面垂直的面上跟轴平行的最邻近的网格线上相应节点的周向速度分量来给出轴上的径向速度分量。

壁面附近, 因变量的变化往往十分剧烈。我们采用壁函数计及壁面通量。

#### 四、结果与讨论

图 1 画出所选的若干纵、横截面上的速度矢量场。对于所示的四号工况, 小孔射流位

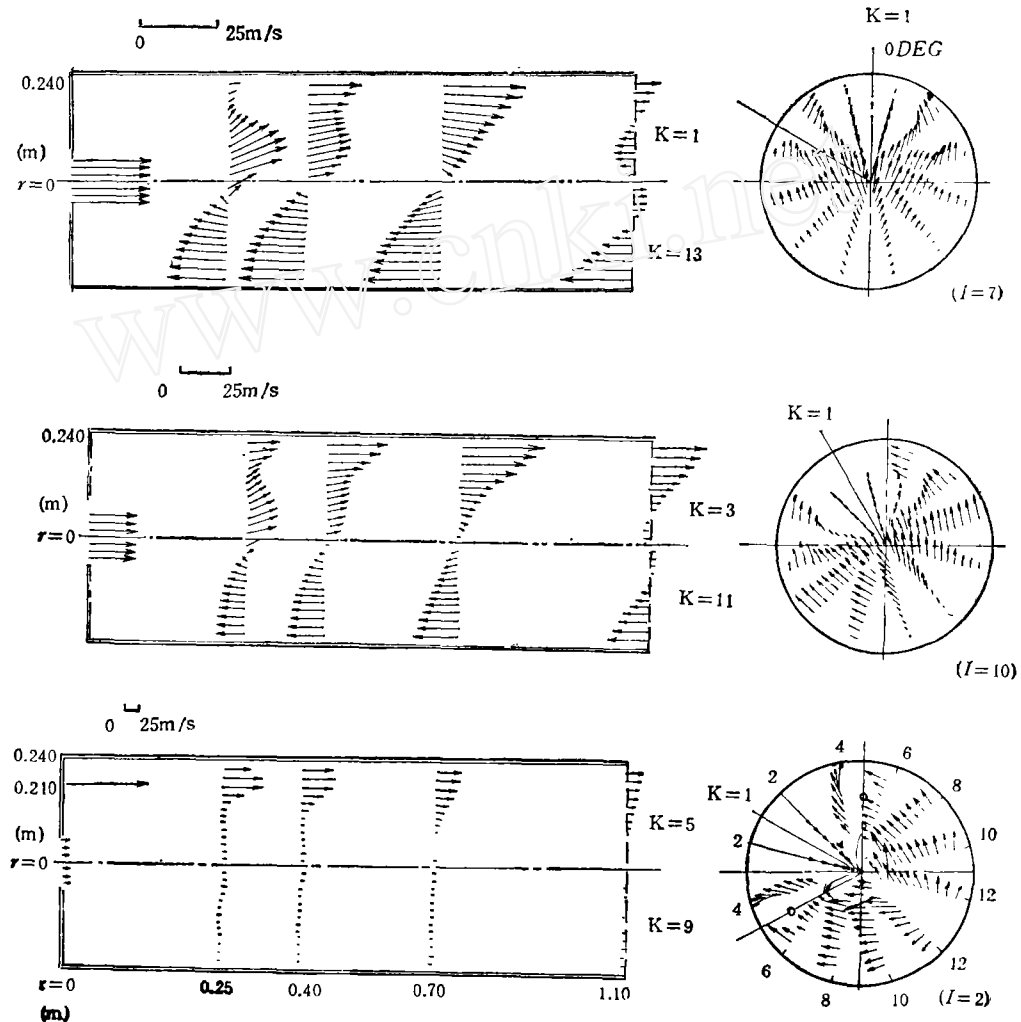


图 1 不同纵横截面上的速度场(四号工况)

于  $K=5$  的截面上。此时,  $K=5$  的截面上, 所有速度都朝着出口。同时看出: 在  $K=3$  的截面上, 没有明显反流。随之, 离小孔所在截面越远则截面上的反流范围与反流速度的大小增大。本文所有计算都证实了这种有规律的图象。这跟轴对称复式同心射流显然不同, 充分说明了这种流场的三维特征。

上述迴流流场的不对称性取决于高速小孔射流的结构与流动特征。本质上, 这种特性起因于同向射流的干扰以及壁面的限制作用。

四号工况下, 纵向迴流在不同的  $x$  位置上的周向分布情况示于图 2。它再次证实了周向不对称性。

图 3、4 及 5 分别表示第三、二及四号工况下的对称面上的流动。所有计算工况的迴流率随  $x$  向距离的改变示于图 6。

比较图 3 与 5, 证明二者的  $K=1$  截面上的反流特性显著不同。这种差别起因于入

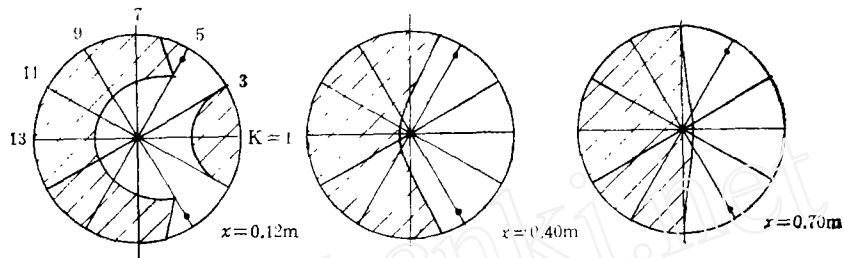


图 2 不同横截面上的纵向迴流区分布(四号工况)

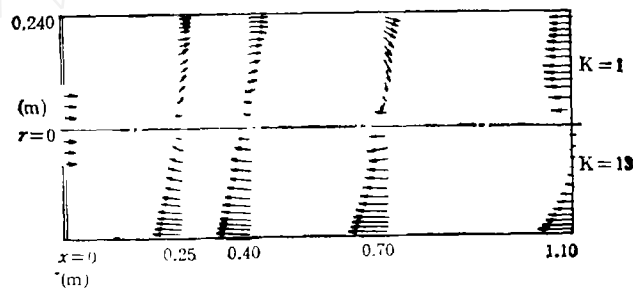


图 3 对称面上的流动(三号工况)

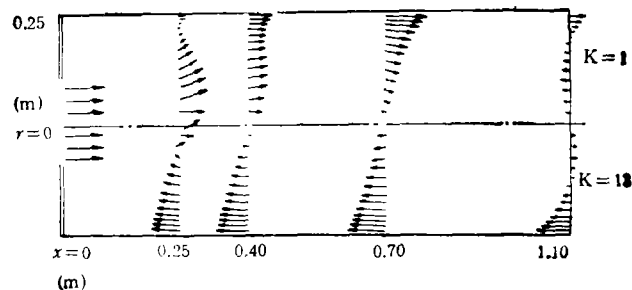


图 4 对称面上的流动(二号工况)

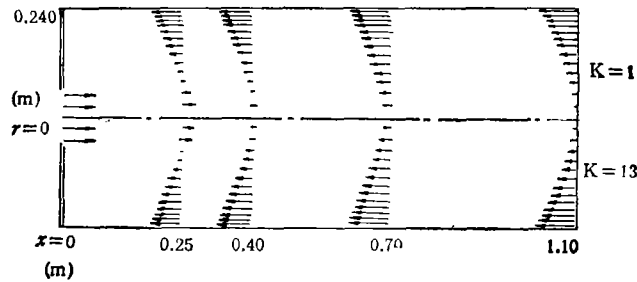
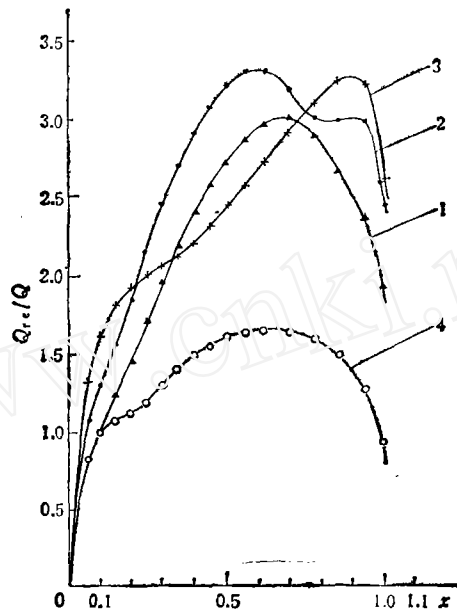


图 5 对称面上的流动(四号工况)

图 6 不同工况下,  $x$  向的迴流率变化

口处小孔的位置不同。通过移动端壁上的小孔位置, 可以改变预燃室内的迴流区分布状况。然而, 图 6 表明二者迴流率的差别不大。

第二与四号工况的一次风速度不同。比较图 4 与图 5, 可以看出二号工况下,  $K=1$  截面上的正向流动较弱而出口附近的迴流区比较明显并且在  $K=13$  截面上的反流速度也更为显著。

这正是由于二号工况的一次风速过小以致没有足够的动量来克服小孔高速射流扩张所造成的逆压梯度所致。

跟二号工况相比, 一号工况的一次风动量较大但射流的速差较小。图 6 表明一号工况的迴流率较小。

由本文计算结果可以看出二号工况下, 所有纵截面上的迴流范围与大小都比一号工况的相应值大。由此可见, 射流的大速差是产生大面积迴流区的重要原因。

## 五、结 论

本文所得的结果定性估价了预燃室中大速差同向射流诱导的流场。

所有结果都预示了大面积迴流区,这种流动特征是稳燃的主要机理

通过调节小孔位置,预燃室中的迴流区分布将发生重大改变。但是,这对迴流率没有显著影响

只要射流的速差及流量比超过某一阈值,总能形成大面积迴流区。可见,大速差是影响迴流强度的主要因素。

我们将进一步研究大速差同向射流的稳焰机理。

## 参 考 文 献

- [1] 赵烈,燃烧室迴流流场的数值模拟,空气动力学学报 4(1986), 31—35.
- [2] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow (1980)
- [3] Turan, A., A Three-Dimensional Model for Gas Turbine Combustors, Ph. D. Thesis Sheffield (1978)
- [4] Law, H. S., and Masliyah, J. H., *Computer & Fluids*, 12, 3(1984), 199
- [5] 吴文东,简化燃气轮机燃烧室内三元流动的数值计算,中国工程热物理学会第三届年会学术论文(1982-10)

## THE FLOWFIELD CHARACTERISTICS OF A PRECOMBUSTION CHAMBER OF COFLOWING JETS WITH LARGE VELOCITY DIFFERENCES

Wu Chengkang, Bao Qi, Zhao Lie  
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

**Abstract** A new type of precombustion chamber has been developed in which coflowing jets with large velocity differences are used. A finite difference calculation procedure is developed for the calculation of this flowfield. The computational results demonstrate the existence of the large recirculation regions. The effects of design parameters on the flowfield are discussed.

**Key words:** precombustion chamber, numerical simulation, Recirculation, reverse flow, combustion stabilization, coflowing jets with large velocity differences.