

# 燃烧室回流流场的数值模拟

赵 烈

(中国科学院力学研究所)

**摘 要:** 本文涉及燃烧室设计者感兴趣的流体力学研究课题。一些不同类型的回流区存在于燃烧室中。本文对各种回流流场进行了数值计算。

本文旨在研究非流线体火焰稳焰器周围的流场以及同向射流产生中心回流区的条件。编制了适于模拟许多燃烧室构型的通用程序。其特征之一是稳焰器侧壁的分层台阶表示法。计算采用压力-速度原始变量以及  $k-\epsilon$  湍流模型。

计算结果表明了燃烧室设计参数的有趣的影响。可采用的实验数据与计算结果的比较,进一步证实了程序的通用性。

## 一、前 言

计算流体力学的发展,为进行工业装置中流动过程的数值模拟提供了有效的手段。它有助于减少实验次数,节省设计耗资。然而,针对具体的模拟对象,寻求准确可靠的计算方法仍是计算流体工作者的努力目标。

燃烧室流场的共同特征是存在回流区。它们可以分为固定的与自由的两大类。前者,是指由于燃烧室突然扩张的几何形,或是由于其中放置钝体等因素致使气流在一定位置上发生分离所造成的回流区。自由回流区,则起因于相伴流动的速度比、射流的强旋转等因素。燃烧室回流流动的数值模拟适于探讨流动参数对回流区特征的影响,为燃烧工程师选择设计参数提供必要的依据。

本文采用以压力-速度为变量的数值计算方法。作者在以往工作的基础上,进一步改善程序的通用性,得到了适用于多种燃烧室结构的通用程序。同时对于稳焰器回流流场等多种工况进行了探讨。

## 二、计算对象

为模拟燃烧室流场,我们可以分为平面和轴对称两种情况。本文着重讨论下述两类问题:

1. 三角形截面形状、杆放置在渠道中作为稳焰器的燃烧室流场。稳焰器距进口一定

本文于1985年7月19日收到。

距离。稳焰器顶角可以有不同的值,而且可以选取不同的阻塞比以便讨论这些参数对回流特征的影响。

2. 配置有二次风的燃烧室轴对称流动,探讨射流参数的变动对回流区的影响。

### 三、基本方程及边界条件

描述二维湍流回流流场的定常椭圆型偏微分方程组,可写成如下的统一形式<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r^i} \frac{\partial}{\partial y}(\rho r^i v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^i} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} r^i \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}$$

其中,  $\Gamma_{\phi}$  为变量  $\phi$  的湍流扩散系数,  $\Gamma_{\phi} = \mu_{eff} / \sigma_{\phi}$ ;  $\sigma_{\phi}$  为湍流 Prandtl 数。各变量  $\phi$  及其相应的源项  $S_{\phi}$  列于表 1。

表 1

$\phi$	$S_{\phi}$
1	0
$u$	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r^i} \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} r^i \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial p}{\partial x}$
$v$	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{1}{r^i} \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} r^i \frac{\partial v}{\partial y}) - 2\mu_{eff} \frac{v}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial y}$
$k$	$G - \rho \epsilon C_D$
$\epsilon$	$(C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \epsilon / k$

表中,  $G = \mu \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{v}{r^i} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$ ,  
 $\mu_{eff}^* = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon + \mu_0$

$$C_{\mu} = 0.09, C_D = 1.0, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_K = 1.0, \sigma_{\epsilon} = 1.217$$

为求解上述椭圆型方程组,需在流动区域四周及稳焰器边界给定边界条件。

1. 固壁邻近的网格节点上的  $u$ 、 $k$ 、 $\epsilon$  皆用壁函数处理,与壁面垂直的  $v$  值无需作特殊处理;

2. 中心线为对称面或对称轴  $\partial \phi / \partial y = 0$ ;

3. 进口处  $u$  值给定  $v = 0$ ,  $k = i u^2$  ( $i$ —湍流强度),  $\epsilon = k/l$ ,  $l = \lambda D/2$  ( $\lambda$ —长度因子,  $D$ —半径);

4. 出口流动为抛物型无需给边界值,但速度梯度为零,出口流量应等于入口流量;

5. 稳焰器边壁按固壁处理,但存在“尖角”问题需考虑网格面积的修正。

### 四、计算方法

#### 1. 差分方程

在控制体积上积分上述基本方程,可以得到通用的差分方程:

$$(a_p + S_p)\phi_p = \sum_n a_n \phi_n + S_u \quad (1)$$

其中,  $\phi_p$ — $p$  结点变量值;  $a_n$ —控制体不同表面上的对流扩散通量;  $a_p = \sum_n a_n$ ;  $n$ —控制体东、南、西、北四面。

## 2. 线性源项

从差分方程的通用形式, 可见源项

$$S = S_u + S_p(\phi)$$

其中,  $S_u$  为源项的常数项;  $S_p$  为源项线性方程的斜率。计算实践证明: 这种做法有利于迭代过程的收敛。

## 3. 压力修正

流场压力  $p$  用下式计算:

$$p = p^* + p p$$

其中,  $p^*$  为“猜测”的压力值, 随着迭代过程而更新;  $p p$  为压力修正值。修正压力值  $p p$  满足泊松方程(压力修正方程)。在逐步迭代过程中求出  $p p$  而更新压力值。实质上, 所求的是压差  $p - p_{i,n}$ , 其中  $p_{i,n}$  为入口压力。

## 4. 湍流模型的选择

本文采用  $k-\varepsilon$  二方程湍流模型, 因而有效的粘性系数  $\mu_{eff}$  按照下式计算:

$$\mu_{eff} = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon + \mu_l$$

其中  $\mu_l$  为层流粘性系数。

对于钝体近尾回流区, 采用哪种湍流模型更为合适仍是一个值得探讨的问题。然而, 比较起来,  $k-\varepsilon$  模型简便, 可节省机时, 又有一定的准确度。当然, 在模型参数的修正方面仍可作些改进。

## 5. 壁函数的应用

壁函数是湍流数值计算中处理近壁区域的常用办法之一。即在差分方程的源项  $S_p$  中加一修正项。对  $u$  动量方程而言, 这个修正项包括湍流剪切力  $F_s$  及由压力梯度产生的压力。

$$F_s = \tau_s \delta x_{c,w} = -\rho C_\mu^{1/2} k^{1/2} u_p k \delta x_{c,w} / \ln(E y^+)$$

其中,  $y^+ = \rho C_\mu^{1/2} k^{1/2} y_p / \mu_c$ ;  $\delta x_{c,w}$  为  $x$  向两节点间距;  $y_p$  为邻近壁面的节点的离壁距离。

若  $x$  向压力梯度大到使  $y_p (dp/dx)$  与  $\tau_s$  同一量级时, 则需作压力项修正:  $0.5 y_p DP / \delta x_{c,w}$ , 其中  $DP$  为两节点间压差。  $k, \varepsilon$  的方程用类似的壁函数处理。同时设壁面法向通量为零。

## 6. 低松弛技巧

采用低松弛技巧使方程系数在迭代过程中缓慢更新, 从而保证迭代过程的收敛。即

$$\phi_p^R = \phi_p^{o^{i+1}} + uRF(\phi_p - \phi_p^{o^{i+1}})$$

或

$$\phi_p^R = uRF\phi_p + (1-uRF)\phi_p^{o^{i+1}}$$

其中,  $\phi_p^{o^{i+1}}$  为前一次迭代值;  $\phi_p, \phi_p^R$  分别为未加松弛及已松弛值。低松弛因子  $uRF < 1$ ,

所以  $\phi_p^R < \phi_p$  而  $> \phi_p^{old}$ 。方程之源项作同样处理。方程中各系数处理后得：

$$a_p^R = a_p / uRF$$

松弛因子的选择，存在一个最佳值问题。然而，只有通过计算实践才有可能选取适用于不同参数的各种最佳松弛因子。

### 7. 迭代方法

对于得到的差分方程采用 TDMA (三对角矩阵算法) 分别在南北、西东方向扫描若干次，直到满足收敛准则。

## 五、计算结果及讨论

本文结合有关实验，着重讨论两类流动：

1. 针对文献[2]的稳焰器冷态流场测量，我们计算了相应的流动。这是一个三角形截面的杆，放在平面渠道中的平面回流流场。渠道横截面为 50 毫米 × 50 毫米，入口流速为 10 米/秒。对于稳焰器截面的斜边，用多层台阶近似。从稳焰器上游的渠道入口处算起。具体几何形状见图 1。该图给出了稳焰器底部回流区的形状和大小。用零流线包络的区域表示回流区。但是，由于中心线上没有网格节点，我们只能近似地定出回流区长度。与实验结果相比，计算出的回流区比较短。国外文献也有类似结论。

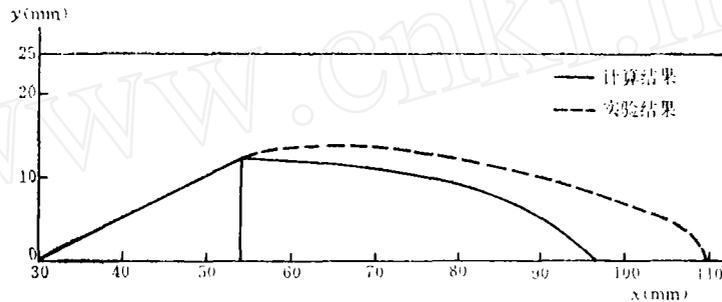


图 1 稳焰器底部回流区

近尾流场数值模拟除了在计算精度上需设法改进外，通过数值模拟，探讨不同因素对回流区特征的影响也是一项有实用价值的工作。图 2 给出稳焰器倾角  $\alpha$  不同时的计算结果。与图 1 相比，由于  $\alpha$  增大，回流区明显变长。这与实验结果趋势是一致的。

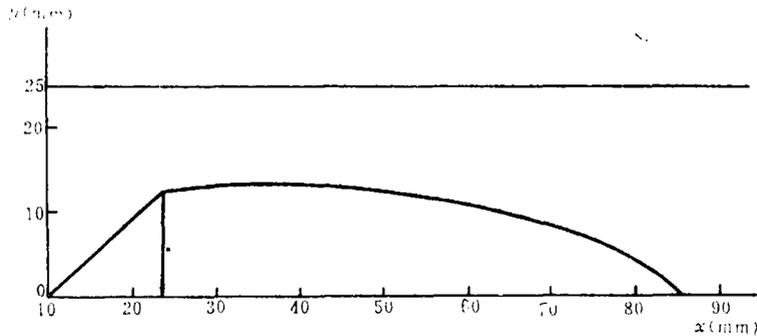


图 2 稳焰器倾角对底部回流区的影响

总的看来,近尾流场计算仍是一个十分困难的课题。从湍流模型来说,各向同性的  $k-\varepsilon$  模型必然引起误差。尤其是  $\varepsilon$  方程不太准确,有待改进。对  $k-\varepsilon$  模型作修改或是采用雷诺应力模型都是正在探讨的问题。此外,也有人认为,迎风差分或混合差分格式不适用于回流区计算。但尚未在计算实践中作出必要的改进。当然,管壁压力的影响等因素也是值得改进的地方。

2. 共轴射流是燃烧室中常见的流动方式。受限相伴流动的卷吸,是导致这类流场形成回流的起因。我们结合预燃室的设计,计算分析了一次风速为 20 米/秒,二次风速为 300 米/秒的情况(见图 3)。由图 3 可见,此时可以形成显著的中心回流区。此外,我们计算了与图 3 所示的一、二次风速相同,但燃烧器环变窄的情况(图 4)。比较图 3 与图 4 可知:虽然都有中心回流区,但后者要小得多。结合混合特性及燃烧性能的研究,选择最佳的一、二次风入口间距也是有待深入研究的问题之一。

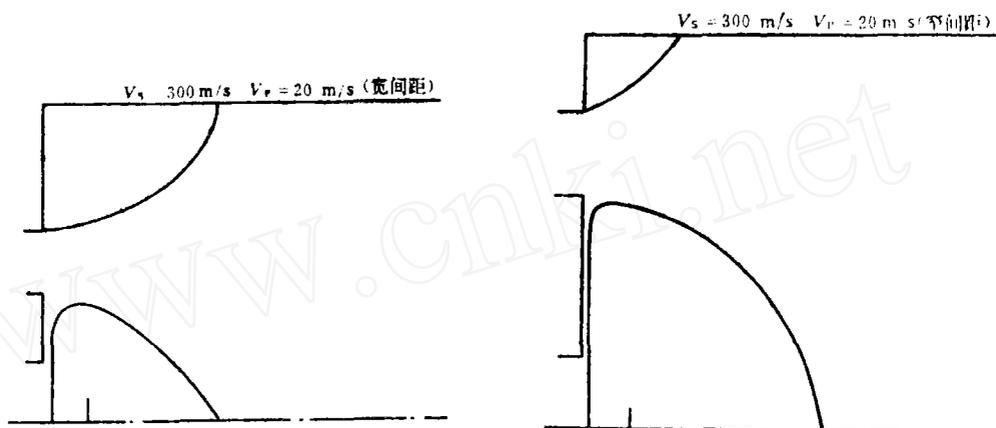


图 3 同向射流中心回流区

图 4 同向射流流场

本文的计算结果,证实了程序的通用性,为数值模拟燃烧室冷态流场的多种工况提供了有效的手段。结合能源课题,开展燃烧问题的理论研究是本工作的目标。

### 参 考 文 献

- [1] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere-McGraw-Hill, New York. (1980).
- [2] Fujii, S., Gomi, M., and Eguchi, K., ASME J. Fluids Engineering, Vol. 100 (1978) 323.
- [3] Novick, A. S., et al., J. Energy Vol. 3, 2 (1979), 95.

## NUMERICAL MODELING OF COMBUSTOR RECIRCULATION FLOWFIELD

Zhao Lie

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

### Abstract

The present study is concerned with a fluid dynamic research task of interest to the combustor designer. A number of different types of recirculation region are observed in combustors. In this paper, numerical computations have been undertaken for variant recirculation flowfield.

The purpose of this paper is to investigate the flowfields around bluff-body flame stabilizer and the conditions under which the parallel jets in the same direction generate centerline recirculation.

An universal program which is suitable to simulate many configurations at combustor is formulated. One of the characteristics is a stairstep boundary representation of the sidewall of stabilizer. Primitive variables of pressure and velocity are used. Turbulence simulation is by way of a two-equation  $k$ - $\epsilon$  model.

Computational results show the interesting effects of combustor design parameters. Available experimental data provide confirmatory comparisons. The universality of the program is further confirmed.