

受限射流的数值模拟

赵 烈

(中国科学院力学研究所)

摘要 对柱形燃烧室内的轴对称等温射流流场进行了数值模拟。回流是这类流场的普遍特征。它对于燃烧室火焰的稳定起着重要作用。本文研究了影响回流特征的各种因素。以压力-速度为主要变量,采用 $K-\epsilon$ 二方程湍流模型进行计算。计算方法特征之一是膨胀流动的阶梯边界表示法。结果包括回流区特征及预示的平均流线分布图。计算结果与实验资料相当吻合。这说明了此方法可用于燃烧室性能的分析。

1. 引言

受限射流是一种基本的流动现象,它广泛存在于不同的工程领域。受限射流特性的研究具有重要的实用意义。

燃烧室的性能跟它内部的射流流场有着密切的关系。设计师们往往将燃烧室设计成突然扩张的几何外形。有时还使其中的射流旋转或是在燃烧室中放置非流线体。所有这些措施都是为了使燃烧室内部产生回流流动,让热的燃烧产物回流到火焰根部,起到稳定火焰的作用。燃烧室内回流区的位置、形状和大小取决于燃烧室的结构以及其中受限射流的流动参数。当雷诺数较高时,这种回流区具有流线曲率大、湍流强度高以及湍流结构复杂等特点。对于这类流动无论进行实验测量或是数值模拟都比较困难。

近年来,人们越来越认识到对燃烧室流场进行数值模拟是一种必要的设计手段。它可以使实验次数适当减少以节省设计耗资。

本文应用统计平均的雷诺方程求解湍流流动的统计平均量。同时,采用涡粘性系数将湍流雷诺应力跟平均流场的剪切变形联系起来。为了确定涡粘性系数,我们需采用适当的湍流模型。计算实践证明: $K-\epsilon$ 二方程湍流模型的适用范围要比混合长度模型或一方程模型广得多。而且文献[3]指出:对于受限分离流动应用 $K-\epsilon$ 模型比对于非受限分离流动更为成功。所以,本文采用 $K-\epsilon$ 模型。

本文结合能源任务,针对不同的燃烧室构型,计算出冷态流场的回流区位置、大小和形状。计算结果与有关实验十分吻合。所有这些结果和数值模拟技巧都将有助于燃烧室的设计和运行参数的选择。

2. 基本方程

本文考虑的是受限射流的定常轴对称湍流流动。可以考虑射流的旋转但不计及化学

反应。在柱坐标下，这种流动的控制方程可写成如下的统一形式

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u r \phi) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] = S_{\phi} \quad (1)$$

它包括质量守恒、动量守恒、湍流动能及湍流耗散率等方程。每个方程含有对流项、扩散项和源项。方程组涉及的因变量及其相应的湍流交换系数与源项见表 1。此外，湍流模型常数也列于表 1。

表 1 变量、系数及源项

变 量 ϕ	系 数 Γ_{ϕ}	源 项 S_{ϕ}
1	0	0
u	μ	$-\frac{\partial F}{\partial x} + S^u$
v	μ	$-\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{\rho w^2}{r} - \frac{\partial \mu v}{r^2} + S^v$
w	μ	$\frac{\rho v w}{r} - \frac{w}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu)$
K	μ/σ_K	$G - C_D \rho \epsilon$
ϵ	μ/σ_{ϵ}	$(C_1 \epsilon G - C_2 \rho \epsilon^2)/K$

其中：

$$S^u = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$S^v = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right)$$

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

$$\mu = C_{\mu} \rho K^2 / \epsilon + \mu_{\text{层流}}$$

$$C_{\mu} = 0.09 \quad C_D = 1.0 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92$$

$$\sigma_K = 1.0 \quad \sigma_{\epsilon} = 1.217$$

3. 边界条件

为模拟燃烧室内的气流结构，本文讨论圆柱形筒内的受限射流流场。流场示意图见图(1)。入口侧壁可为 $\alpha = 45^\circ$ 的斜壁或是 $\alpha = 90^\circ$ 的直壁。采用分层台阶来近似入口斜壁是本文的特点之一。

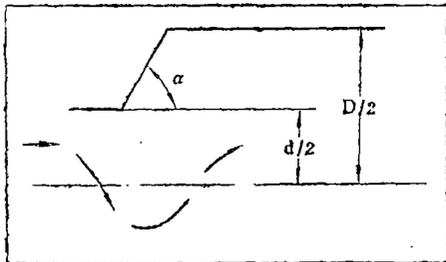


图 1 流场示意图

为求解上述椭圆型方程，在流域四周给定边界条件如下：(1) 入口：给定各变量值；(2) 出口： $v = 0$ ，调整 u 值以保证总质量守恒，其它量的法向梯度为零；(3) 对称轴： $v = w = 0$ ，其它量法向梯度为

零；(4) 壁面： ϵ 取定值。与固壁邻近的节点上，平行于壁面的速度分量及湍能用壁函数处

理之。其它量的壁面法向梯度为零。

4. 计算结果

本文针对燃烧室的多种构型, 基于 SIMPLE 算法计算分析了受限射流流场的回流特性。

单股射流膨胀进入燃烧室是燃烧工程中的基本流动现象。图(2)给出入口侧壁呈 45° 时不旋的单股射流的计算结果。图中所示的轴向速度的径向剖面跟相应的实验结果^[2]相符。图(3)给出入口侧壁呈 90° 、旋流器角度为 45° 时的旋转单股射流的轴向速度剖面。此图清楚表明流场中心形成可观的回流区, 同时存在拐角回流区。由此可见, 当射流强旋转时, 流场中可出现中心回流区。这是流场特征随流动参数变化的例证。

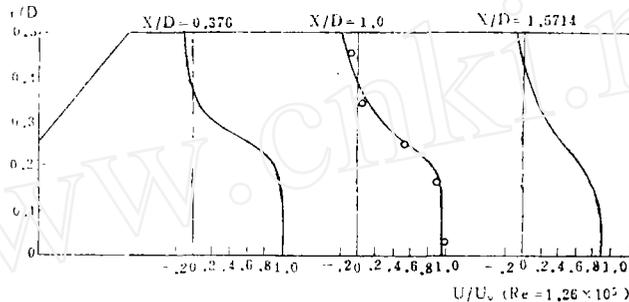


图2 单股射流轴向速度剖面
○—文献[2]实验结果

实际上, 二次风从侧壁进气是一种常见的措施。当然, 工程问题中由侧壁上若干个孔进气的状态应属三维问题。本文设想为侧壁周向环状进气, 使问题变成二维的, 以此考虑二次风引入所造成的气动效应。图(4)表明: 引入二次风使得拐角回流成了两个回流区。图中也给出与图(2)状况相应的流线分布, 可以看出: 侧向进气使流线发生偏移, 改变了流场的流动状态。

双股共轴射流是燃烧室中又一常见的流动现象。本文选择与实验^[3]类似的几何形状以及两股射流入口速度比为1的状况。图(5)给出轴上的轴向速度分布, 图(6)给出不同轴

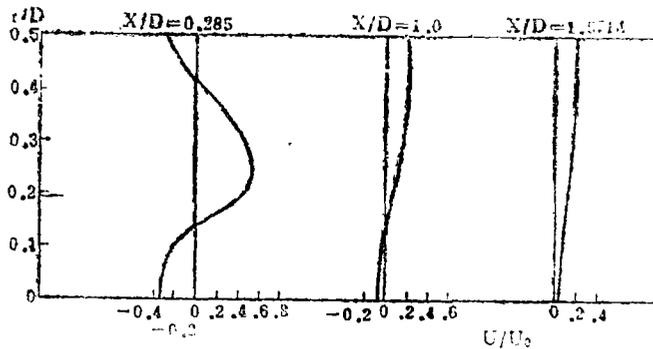


图3 单股旋转射流轴向速度剖面

向位置上的轴向速度的径向剖面。两图表明：计算结果与实验^[3]相符。

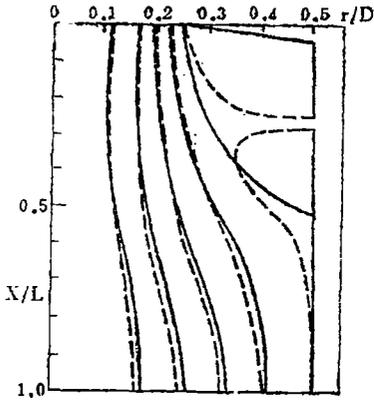


图 4 流线分布图
—— 单股射流；
--- 有二次风，

5. 讨 论

本文计算结果充分证实了本程序的通用性。本文的侧壁周向环状进气的计算结果表明了二次风的气动效果。由此可见，本程序有可能用来探讨二次风入口位置以及射流旋转等因素导致的流场特性的变化。也为进一步考虑二次风的助燃作用及温度效应打下了基础。同时，共轴双股射流的计算结果表明，本程序可用于计算分析共轴射流几何参数及速度比等流动参数的变化所引起的回流特征的变化。

对于本文所涉及的复杂湍流流动，选择更合适的湍流模型是一个公认的问题。此外，考虑温度场和浓度场等实际燃烧效应是下一步工作的目标。

本工作得到卞荫贵教授热情指导，特表感谢。

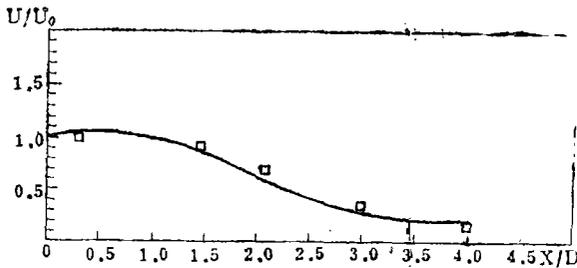


图 5 共轴射流轴向速度分布
□— 文献[3]实验结果

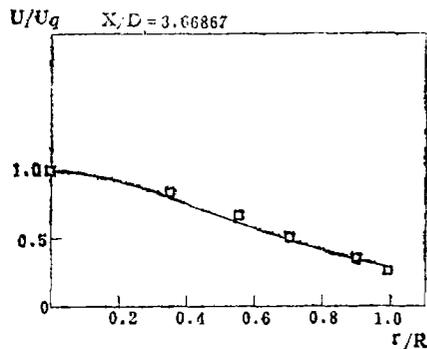


图 6 共轴射流轴向速度的径向分布
□— 文献[3]实验结果

参 考 文 献

- [1] Chieng, C. C. & Launder, B. E.; *Numerical Heat Transfer*, 3(1980), 189—207.
- [2] Singhal, A. K.; *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 25 (1981), 365—383.
- [3] Rodi, W.; *AIAA Paper* 81-0045 (1981).
- [4] Chaturvedi, M. C.; *Proceedings Journal Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 89, No. HY 3 (1963), 61—92.
- [5] Habib, H. A. & Whitelaw, J. H.; *ASME* 79-WA/FE-21(1979).

NUMERICAL SIMULATION OF CONFINED JETS

Zhao Lic

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, China*)

Abstract

The axisymmetric isothermal flow of the jet inside confined cylindrical combustor has been numerically investigated. The recirculation flow is universal feature of such flowfield. It plays an important part in the stabilization of flames in combustor. The various factors which affect the characteristics of the recirculation flow are also studied.

In this paper, velocity and pressure are used as dependent variables. Turbulence simulation is by way of a two-equation $K-\epsilon$ model. One of the characteristics is a stairstep boundary representation of the expansion flow in this program.

The results include recirculation zone characterization and predicted mean streamline pattern. The numerical results agree with the experimental data quite well. It shows that this method can be applied to the analysis of the combustor feature.