

渐扩通道内湍流流动与混合的数值模拟^{*}

张 健 周力行

(清华大学工程力学系, 北京, 100084)

摘 要: 应用标准形式的 $k-\epsilon$ 湍流模型, 对具有逆向压力梯度的渐扩通道内两股等温或不等温射流的湍流流动与混合进行了数值模拟。结果表明, 时均速度场与温度场的计算结果与实验测量数据相符合。

主题词: 湍流模型, 湍流混合, 管道流, 数值仿真

分类号: V235.213

SIMULATION ON FLOW AND MIXING OF TURBULENT IN DIVERGING DUCT

Zhang Jian Zhou Lixing

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua Univ., Beijing 100084)

Abstract: The standard form of the $k-\epsilon$ turbulence model was utilized. Numerical simulations were performed for the turbulent flow and mixing of two coaxial isothermal or non-isothermal jets in a diverging duct with adverse pressure gradient. The calculated distributions of the time-averaged gas velocity and temperature were compared with the measured test data.

Subject terms: Turbulent model, Turbulent mixing, Channel flow, Numerical simulation

1 引 言

渐扩截面的流动通道在各种流体机械、扩压器和燃烧室中有许多应用。渐扩通道内湍流流动的特点是具有逆向压力梯度。对此类流动进行较为准确的数值模拟, 对于有渐扩流动通道工程装置的研制和优化设计有重要的实际应用价值。文献 [1, 2] 采用修正的 $k-\epsilon$ 模型对渐扩通道内的湍流流动进行了数值模拟。为了检验标准 $k-\epsilon$ 湍流模型^[3] 的适用范围, 本文应用该模型对有逆向压力梯度的渐扩通道内两股等温或不等温射流的湍流流动与混合进行了数值模拟, 并将计算结果与文献 [4] 的实测时均速度场与温度场数据进行了对比。

2 湍流模型

两股不等温射流在渐扩通道内的湍流流动与混合可用包括连续、轴向与径向动量和能量方程在内的时均定常控制方程组描述。对时均方程组中的未知 Reynolds 应力 $\overline{v_i v_j}$ 和热流量 $\overline{v_j h}$ 利用如下的广义 Boussinesq 假定进行模拟:

$$-\rho \overline{v_i v_j} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial v_j} + \frac{\partial v_j}{\partial v_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial v_1}{\partial v_1} + \rho k \right) \delta_{ij} \quad (1)$$

* 收稿日期: 1998-06-12, 修回日期: 1998-08-26, 本课题获国家教委科技进步一等奖

$$-\rho \overline{v_i h'} = \frac{\mu_t}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (2)$$

上式中略去了一阶矩的时均符号“—”, μ_t 和 σ_h 分别为湍流粘性系数和湍流 Prandtl 数。对湍流封闭采用标准形式的 k - ϵ 模型, 因此有 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 。湍流动能 k 及其耗散率 ϵ 的控制方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon) \quad (4)$$

其中 $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ 。各湍流模型常数的取值分别为: $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_h = 0.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.22$ 。

各控制方程用混合格式^[5]进行差分离散, 用 SIMPLE 算法^[6]对方程组进行数值求解。壁面处取无滑移和绝热边界条件, 并用壁面函数^[3]对壁面切应力和近壁结点上的湍能及其耗散率进行修正。

3 计算结果与讨论

本文模拟的渐扩通道由环形渐扩段和圆管段组成。通道全长 1.03 m, 圆管段半径 0.184 m。通道进口处有内外环两股射流, 其中内环射流通道的内、外半径分别为 0.109 m 和 0.151 m。计算选取与文献 [4] 实验相同的工况参数, 对一组等温射流工况 (即工况 1) 和两组不等温射流工况 (即工况 2 和 3) 进行了数值模拟。工况 1 进口处的内外环射流速度分别为 134 m/s 和 37 m/s。工况 2 进口处的内外环射流速度分别为 137 m/s 和 18 m/s, 温度分别为 520 K 和 320 K。工况 3 进口处的内外环射流速度分别为 128 m/s 和 35 m/s, 温度分别为 520 K 和 310 K。工况 4 进口处内外环射流速度分别为 131 m/s 和 35 m/s, 温度分别为 926 K 和 410 K。四组工况的计算均沿轴向和径向选取 36×24 个不均匀的交错式网格结点。

图 1 为工况 1 即等温射流工况条件下渐扩通道内气体轴向速度场的计算结果与文献 [4] 实验测量数据的对比。由图 1 可见, 二者符合得较好。由于进口处内环射流速度较外环射流速度高, 因而在渐扩通道内靠近渐扩壁及中心轴线附近气体轴向速度较高, 而外壁附近的气体轴向速度则较低。气体轴向速度的峰值位于两股射流的剪切混合层内。随着流动的发展, 轴向速度的峰值逐渐降低, 两股射流的混合逐渐趋于均匀。

图 2 (a) 与 (b) 为工况 2 即两组不

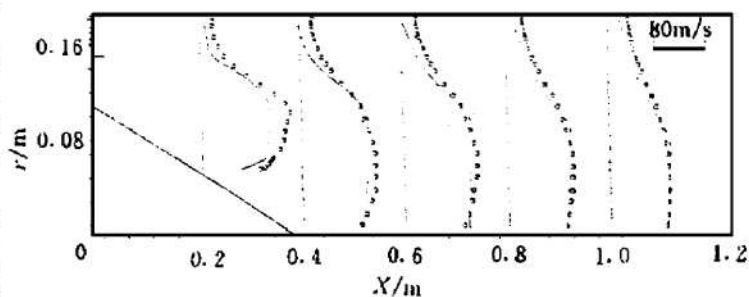


Fig. 1 Comparison of calculated gas axial velocity with measured data (case 1)

— Calculation • Experiment

Fig. 1 Comparison of calculated gas axial velocity with measured data (case 1)

— Calculation • Experiment

等温射流工况条件下, 渐扩通道内气体轴向速度场和温度场的计算结果与实验测量数据的对比。由此图 2 可见, 在两组不等温射流的工况下, 无论是气体轴向速度场还是温度场, 计算

与实验均符合较好。表明标准 $k-\epsilon$ 模型可用于渐扩通道内湍流流动与混合的数值模拟。由图 2 还可以看到,在所研究的工况条件下,渐扩通道内两股射流温度场的混合比速度场的混合更快趋于均匀。而工况 2 中两股射流温度场的混合又比工况 3 快,这与工况 2 较工况 3 内外环射流速度比大,从而有利于加快两股射流间的湍流混合有关。由图 1 和图 2 可以看到,在有逆向压力梯度的渐扩通道内,由于流动存在径向速度分量,两股射流的扩展与混合要快于相应等截面通道内两股射流的混合^[7]。

图 3 给出工况 4 气体流线的计算结果。由图可见,在所研究的渐扩通道扩张角 (15°) 范围内,沿渐扩壁表面流动未发生分离,流线变化较为平缓。在图 1 和图 2(a) 气体轴向速度场计算结果中出现了外壁附近局部较小的反向速度区,这可能是由于动量较大的内环射流对动量较小的外环射流的引射所致,而实验则未测出这一较小的负速度区。

4 结 论

对两股等温或不等温射流在渐扩通道内的湍流流动与混合的数值模拟表明,将标准 $k-\epsilon$ 模型用于计算有逆向压力梯度的湍流流动与混合,可得到与实验相符合的时均速度场与温度场分布。

参 考 文 献

- 1 Rodi W, Scheuerer G. Scrutinizing the $k-\epsilon$ turbulence model under adverse pressure gradient conditions. ASME J Fluids Eng, 1986, 108: 174~179
- 2 Nagano Y, Hishida M. Improved form of the $k-\epsilon$ model for wall turbulent shear flows. ASME J Fluids Eng, 1987, 109: 156~160
- 3 Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows. Comp Meth in Appl Mech and Eng, 1974, 3: 269~289
- 4 谢启明. 涡扇发动机加力室平行进气环形扩压器流动相似性的实验研究. 中国航空学会第三届航空发动机燃烧会议论文集. 乐山: 1982.
- 5 Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington: Hemi-Sphere Publishing Corp, 1980.
- 6 Van Doormaal J P, Raithby G D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow. Numerical Heat Transfer, 1984, 7: 147~163
- 7 Choi D W, Gessner F B, Oates G C. Measurements of confined, coaxial jet mixing with pressure gradient. ASME J Fluids Eng, 1986, 108: 39~46

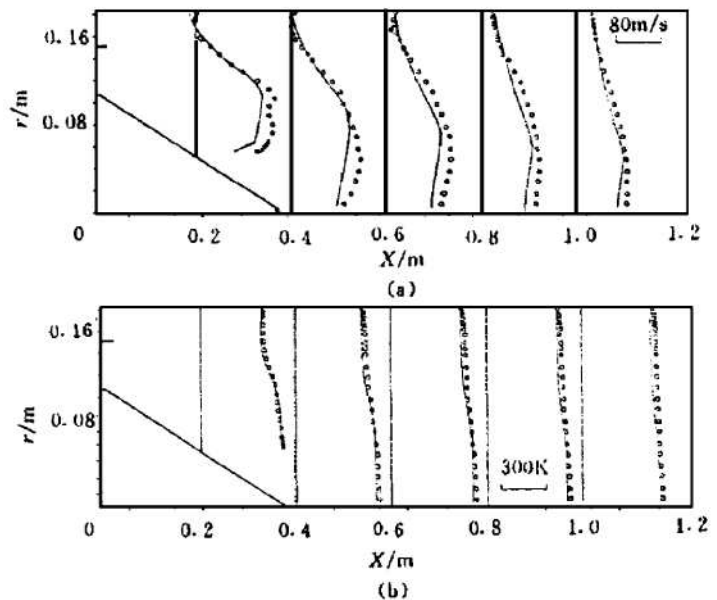


Fig. 2 Comparison of calculated gas axial velocity with measured data (case 2)
(a) Axial velocity (b) Temperature
— Calculation · Experiment

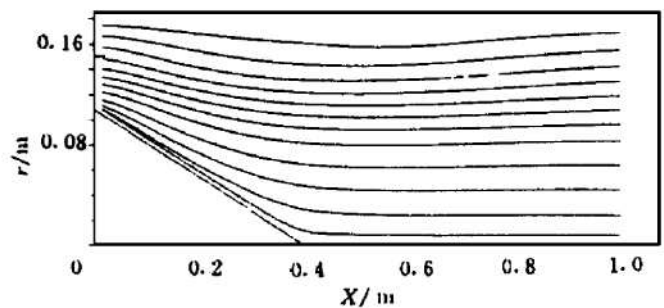


Fig. 3 Gas streamline (case 4)