

# 固体火箭发动机燃烧室冷态突扩气固多相流动的数值模拟

刘阳<sup>1,3</sup>, 姜利祥<sup>2</sup>, 李涛<sup>2</sup>, 邓洋波<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 轮机学院, 大连 116026; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;  
3. 清华大学 工程力学系, 北京 100084)

**摘要:** 基于欧拉-欧拉双流体方法, 建立固体火箭发动机燃烧室轴对称突扩气固多相流动的统一二阶矩两相湍流模型, 采用  $k-\varepsilon$  双方程模拟气相湍流流动和颗粒相湍流雷诺应力  $k_{pg}$  方程描述大尺度颗粒湍流运动、小尺度颗粒各向异性弥散特性以及气固相间作用。数值模拟了突扩流动中的颗粒轴向、径向平均速度和脉动速度以及颗粒-气相脉动速度关联轴向分量的分布特性, 计算结果与试验吻合较好。研究表明: 颗粒轴向速度脉动大于径向速度脉动, 轴向平均速度梯度影响脉动速度峰值的发生位置和大小; 两相脉动速度关联轴向分量大约是径向分量的 2 倍。

**关键词:** 燃烧室; 突扩气固流动; 二阶矩两相湍流模型; 数值模拟

中图分类号: TK123

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2008)05-0432-03

## 1 引言

固体火箭发动机燃烧室固体粉末介质的流动和燃烧, 是一种典型的具有回流和分离流动的气固突扩的湍流流动。因此, 深入揭示颗粒各向异性弥散特性以及湍流的调制规律, 已成为当前研究的热点。

Shahnam 和 Morris<sup>[1]</sup> 使用 LDA 针对水平轴对称管在不同突扩比情况下, 分析了轴向和径向气相和颗粒相速度和湍流动能的分布, 发现粒径  $30\ \mu\text{m}$  颗粒在回流区域削弱颗粒湍流, 而在剪切流动区域增加颗粒湍流。但是在文中并没有给出两相脉动速度轴向和径向关联的分析。

于勇和周力行<sup>[2]</sup> 使用 PDPA 测量了竖直轴对称突扩通道中两相流动中的气体湍流变动, 阐明了颗粒对气体湍流变动规律, 发现粒径  $150\ \mu\text{m}$  的颗粒在流场的不同位置造成的湍流变动现象有所不同。为了克服实验条件的限制, 从机理上更加深入地来揭示流动的特性, 数值模拟技术成为重要的研究手段。模拟气固流动的欧拉-

欧拉双流体模型比欧拉-拉格朗日模型模拟的计算量小, 在工程上有更大的应用价值, 但对于颗粒相湍流模型和气固两相模型的封闭有待深入研究。

Liao 和 Zhou<sup>[3]</sup> 建立了双流体两相湍流的  $k-\varepsilon-k_p$  模型, 预报了文献[1]中回流区颗粒湍流对气相湍流的调制作用, 研究发现质量载荷比对气相湍流影响较大而对气相比较小, 并验证了预报精度优于  $A_p$  模型。

迄今为止, 对颗粒相平均速度、脉动速度以及脉动速度关联研究文献尚未见报道, 本文基于此, 在考虑颗粒各向异性基础上建立 USM 湍流模型, 分析颗粒相速度和脉动速度分布特性, 以及两相脉动速度的关联, 以此深入研究流动的本质。

## 2 数学模型

数学模型采取的是统一二阶矩两相湍流模型。表 1 具体列出了模型的基本方程组。更详细的推导可参看文献[4,5]。

收稿日期: 2008-04-21; 修回日期: 2008-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50606026)和重点项目(50736006)

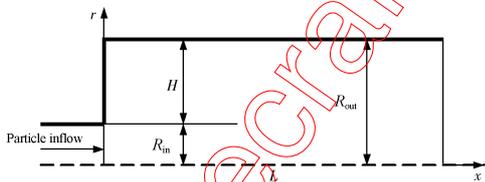
作者简介: 刘阳(1972-), 男, 中国空间技术研究院航空宇航科学与技术和清华大学力学系博士后, 大连海事大学轮机工程学院副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向: 航天器空间环境模拟技术、湍流流动和湍流燃烧。联系方式: E-mail: liuya@mail.tsinghua.edu.cn.

表 1 气固流动控制方程组  
Table 1 Governing equations of gas-particle flows

控制方程	气 相	颗粒相
连续方程	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{v}_j) = 0$	$\frac{\partial \bar{n}_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{n}_p \cdot \bar{v}_{pj}) = 0$
动量方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{v}_i \bar{v}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$ $-\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{v}'_i \bar{v}'_j) + \Delta \rho g_i + \sum_p \frac{\bar{n}_p m_p}{\tau_{rp}}(\bar{v}_{pi} - \bar{v}_i)$	$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{n}_p \cdot \bar{v}_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{n}_p \cdot \bar{v}_{pj} \bar{v}_{pi}) = \bar{n}_p g_i$ $-\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{n}_p \cdot \bar{v}'_{pi} \bar{v}'_{pj}) + \frac{\bar{n}_p}{\tau_{rp}}(\bar{v}_i - \bar{v}_{pi})$
雷诺应力方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}'_i \bar{v}'_j) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \bar{v}'_k \bar{v}'_i \bar{v}'_j) =$ $D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij} + G_{p,ij}$	$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{n}_p \cdot \bar{v}'_{pi} \bar{v}'_{pj}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\bar{n}_p \cdot \bar{v}_{pk} \bar{v}'_{pi} \bar{v}'_{pj}) =$ $D_{p,ij} + P_{p,ij} + \bar{n}_p P_{g,ij}$
湍动能耗散率方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho \bar{v}_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k}(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}) + \frac{\varepsilon}{k}[c_{\varepsilon 1}(P + G_p) - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon]$	
两相脉动速度关联方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{v}'_{pi} \bar{v}'_j) + (\bar{v}_k + \bar{v}_{pk}) \frac{\partial}{\partial x_k}(\bar{v}'_{pi} \bar{v}'_j) = D_{pgij} + P_{pgij} + \Pi_{pgij} - \varepsilon_{pgij} + C_{pgij}$	

### 3 几何模型和边界条件

几何对象为文献[6]中测量的轴对称后台阶气-固流动。外径  $R_{out}=0.06\text{ m}$ , 内直径  $R_{in}=0.025\text{ m}$ , 突扩比 0.583, 台阶位置坐标为  $(2.5\sim 6.0)\text{ cm}$ , 长度  $L=1.0\text{ m}$ , 如图 1 所示。气相体积流量为  $212.4\text{ kg/m}^3$ , 质量载荷  $M=0.005$ , 颗粒直径  $d_s=50\text{ }\mu\text{m}$ , 密度  $\rho_s=2500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。采用均匀交错网格, 在二维空间中的网格数量为  $60\times 1000$  个, 壁面气相和颗粒相采用无滑移边界条件, 速度初始条件为充分发展流场, 入口湍动能取值为 0.02, 入口和出口压力边界为 Von Neuman 边界条件。



( $R_{in}=0.025\text{ m}$ ,  $H=0.035\text{ m}$ ,  $R_{out}=0.06\text{ m}$ ,  $L=1\text{ m}$ )

图 1 轴对称突扩流动的几何形状图

Fig. 1 Geometric configuration of the axisymmetric sudden expansion flow

## 4 计算结果与分析

### 4.1 颗粒轴向平均速度

图 2 中可以看出模型可以预报出突扩条件下颗粒的回流区域、剪切流区域和主流区, 在流经

$L/H=11$  截面后, 轴向速度截面有剪切层区域有一个较大的速度梯度, 然后向下游逐渐降低。回流区长度是台阶高度的 6~8 倍, 在  $L/H=7$  截面处在回流区的再附点位置。第一和第二截面处于回流涡的前方, 轴向速度梯度较大, 在壁面附近有逆流存在。在第三个截面轴向速度趋于平缓, 第四截面接近充分发展区, 模拟结果与实验结果一致。

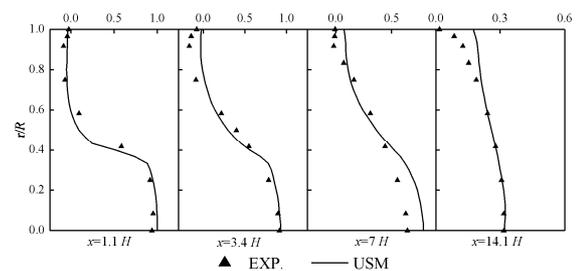


图2 颗粒轴向平均速度 (m/s)

Fig. 2 Axial average velocity of particle (m/s)

### 4.2 颗粒相轴向和径向脉动速度分布

图 3 给出气粒两相脉动速度均方根值和两相脉动速度相关均方根值的分布, 可看出脉动的各向异性。第一和第二截面内壁面和轴线间速度梯度最大处轴向和径向脉动有峰值, 体现了平均速度梯度对脉动的产生作用。径向脉动在第三和第四截面内近壁区有峰值, 估计是颗粒和壁面碰撞的结果, 两相脉动均随流动的发展而减弱。

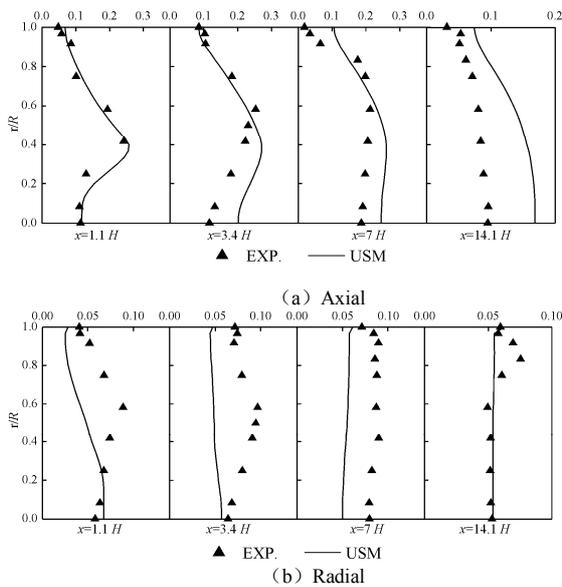
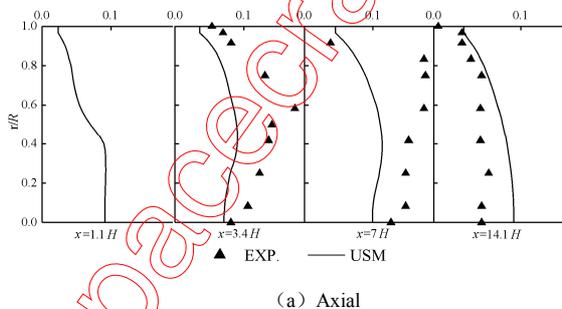


图3 颗粒和轴向径向脉动速度 (m/s)

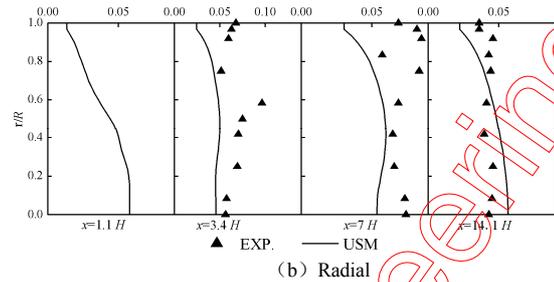
Fig. 3 Fluctuating values of axial and radial velocities (m/s)

#### 4.3 颗粒-气体轴向和径向脉动速度的关联

图4给出了雷诺应力模型模拟两相脉动关联的各向异性。原因解释为:颗粒脉动除了受到对流和扩散控制外,主要受到平均速度梯度产生项和两相脉动速度相关控制。梯度产生项不需要模拟,而关键在于两相脉动速度相关的模拟。颗粒脉动主要取决于流体的脉动,平均速度梯度可能增加或者降低两相脉动速度的相关。可以认为两相脉动速度的相关就是有流体脉动带来的颗粒的脉动。颗粒脉动是通过两相脉动的相关来接受流体的脉动的影响。这种影响对轴向和径向是不同的,在流场的不同位置处所起的作用也是不同的,所以呈现出明显的各向异性,轴向大于径向,约为2倍左右。



(a) Axial



(b) Radial

图4 颗粒和轴向径向脉动速度的关联 (m/s)

Fig. 4 Correlation of gas-particle axial and radial fluctuation velocities (m/s)

## 5 结论

- (1) 统一二阶矩气固两相湍流模型精确地模拟了突扩气固流动的流动特性,揭示了颗粒弥散的各向异性;
- (2) 颗粒轴向速度脉动大于径向速度脉动,呈现明显的各向异性;
- (3) 两相脉动速度的关联轴向大于径向,约为2倍左右,并呈现明显的各向异性。

#### 参考文献 (References)

- [1] Shahnam M, Morris G J. Gas-solid flow in an axisymmetric sudden expansion[C]// Proceeding of International Symposium on Gas-Solid Flows. La Jolla, CA, 1989: 93-99
- [2] 于勇,周力行. 突扩两相流动中颗粒相对气体湍流的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(2): 271-274
- [3] Liao C M, Lin W Y, Zhou L X. Simulation of particle-fluid turbulence interaction in sudden-expansion flows[J]. Powder Technology, 1997, 90 (1): 29-38
- [4] Yu Y, Zhou L X. Simulation of sudden expansion gas-particle flows using a two timescale dissipation closure for two phase velocity correlation[C]// Proceedings of 10<sup>th</sup> Workshop on Two Phase Flow Prediction. Merseburg, 2002: 442-449
- [5] Zhou L X. Theory and numerical modeling of turbulent gas-particles flows and combustion[M]. Beijing: Science Press, 1994
- [6] Xu Y, Zhou L X. Experimental studies on two-phase fluctuation velocity correlation in sudden expansion flows, ASME FEDSM1999-7909[R]. San Francisco, 1999