

文章编号: 0258-1825(2004)03-0249-06

## 用双流体颗粒-壁面碰撞模型模拟混合层流动

张夏<sup>1,2</sup> 周力行<sup>1</sup>

(1.清华大学工程力学系,北京 100084;

2.中国科学院力学研究所国家微重力实验室,北京 100080)

**摘要:**将考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型加入到二阶矩两相湍流模型中,模拟了平面混合层两相流动。结果表明,考虑壁面粗糙度的模型的模拟结果与不考虑的结果相比,给出的纵向平均速度更小、纵向脉动速度更大,与实验值更接近。对于大颗粒,这种影响尤其明显。这些趋势与颗粒轨道模型的模拟结果定性上一致。这表明,窄通道内大颗粒和壁面的碰撞对颗粒流动特性有更显著的影响。

**关键词:**颗粒-壁面碰撞;壁面粗糙度;混合层两相流动

**中图分类号:** O357.5 **文献标识码:** A

## 符 号

$d$	颗粒直径	'	湍流脉动
$e$	恢复系数	"	均方根值
$f$	摩擦系数	下角标	
$n$	数密度	1,2	碰撞前,后
$u, v$	纵向,横向速度	$i$	流场内节点
$x, y$	纵向,横向坐标	$in$	入口
$\alpha'$	粗糙度倾角最大值	$p$	颗粒
上角标		$w$	壁面
-	平均		

## 0 引 言

现有各种两相流动双流体模型预报的两相雷诺应力各分量与实验值之间尚存在明显的差别<sup>[1]</sup>,对于受限的颗粒流动,一个重要原因是没有正确处理颗粒-壁面碰撞规律。目前常用的十分简化的颗粒相壁面边界条件,例如,壁面处颗粒法向速度为零,浓度、切向速度和雷诺应力的法向梯度为零等,和实际不符。已有的颗粒-壁面碰撞模型各有优缺点:颗粒轨道模型的颗粒-壁面碰撞模型可以很直观地考虑壁面粗糙度对颗粒-壁面碰撞的影响,但无法直接用于双流体模型中;而双流体模型的颗粒-壁面碰撞模型虽然能给出颗粒在壁面上的概率密度函数或有关变量的平均值,但对颗粒-壁面碰撞动力学的考虑带有

很大的经验性,也没有考虑壁面粗糙度。文献[2]在吸收这两类模型优点的基础上,提出了考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型,将壁面粗糙度的影响引入双流体模型的颗粒-壁面碰撞模型中。这种模型在突扩<sup>[3]</sup>、旋流<sup>[4]</sup>和水平槽道<sup>[5]</sup>两相流动中的应用显示出初步效果,本文将其应用于平面混合层湍流两相流动的数值模拟,并与实验结果<sup>[6]</sup>以及颗粒轨道模型的模拟结果<sup>[7]</sup>进行比较,以进一步验证这种模型。

## 1 考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型

考虑壁面粗糙度的颗粒-壁面碰撞模型由如下颗粒浓度、速度和雷诺应力的壁面边界条件构成:

• 收稿日期: 2003-06-16; 修订日期: 2004-04-12.

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目子课题(G1999-0222-08),中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-SW-L05).

作者简介: 张夏(1971-),男,中国科学院博士后,研究方向:工程热物理.

$$\bar{n}_{pw} = \frac{1}{2} \bar{n}_{pi} \left(1 + \frac{1}{e}\right) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\bar{v}_{pi}}{v_{pi}^n}\right) \quad (1)$$

$$\bar{u}_{pw} = (\bar{u}_{p1} + \bar{v}_{p1}f) \left(1 - \frac{1}{3} \alpha'^2\right) \quad (2)$$

$$\bar{v}_{pw} = \frac{1}{3} \alpha'^2 (\bar{v}_{p1} - \bar{u}_{p1}f) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \overline{u'_p u'_p} \approx & \frac{1}{3} \overline{u'_p u'_{p1}} \{3 - \alpha'^2 [2 - f^2(1 + e)]\} + \\ & \frac{1}{3} \overline{v'_p v'_{p1}} (1 + e) [3f^2 + \alpha'^2(1 - 2f^2)] + \\ & \frac{2}{3} \overline{u'_p v'_{p1}} f [3 - \alpha'^2(2e + 3)] + \\ & \frac{1}{3} \overline{u_{p1}} \overline{u_{p1}} \alpha'^2 f^2 (1 + e) + \\ & \frac{1}{3} \overline{v_{p1}} \overline{v_{p1}} [3ef^2 + \alpha'^2(1 + e - 2ef^2)] - \\ & \frac{2}{3} \overline{u_{p1}} \overline{v_{p1}} \alpha'^2 f (1 + 2e) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \overline{v'_p v'_p} \approx & \frac{1}{3} \overline{v'_p v'_{p1}} [3e - \alpha'^2(2e - f^2 - f^2e)] + \\ & \frac{1}{3} \overline{u'_p u'_{p1}} \alpha'^2 (1 + e) + \frac{2}{3} \overline{u'_p v'_{p1}} f \alpha'^2 (1 + 2e) + \\ & \frac{1}{3} \overline{u_{p1}} \overline{u_{p1}} \alpha'^2 (1 + e) + \\ & \frac{1}{3} \overline{v_{p1}} \overline{v_{p1}} [3e - \alpha'^2(2e - f^2 - f^2e)] + \\ & \frac{2}{3} \overline{u_{p1}} \overline{v_{p1}} f \alpha'^2 (1 + 2e) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \overline{u'_p v'_p} \approx & \frac{2}{3} \overline{u'_p v'_{p1}} \alpha'^2 (1 + e) (1 - f^2) - \\ & \frac{1}{3} \overline{u'_p u'_{p1}} \alpha'^2 (2 + e) - \\ & \frac{1}{3} \overline{v'_p v'_{p1}} f [3e(1 - \alpha'^2) - 2\alpha'^2] - \\ & \frac{1}{3} \overline{u_{p1}} \overline{u_{p1}} \alpha'^2 f (1 + e) - \\ & \frac{1}{3} \overline{v_{p1}} \overline{v_{p1}} f [3e - \alpha'^2(1 + 3e)] + \\ & \frac{1}{3} \overline{u_{p1}} \overline{v_{p1}} \alpha'^2 (1 + 2e) (1 - f^2) \end{aligned} \quad (6)$$

式(1)为颗粒相数密度壁面边界条件,它只与壁面附近流场内颗粒数密度、颗粒相法向平均速度和脉动速度均方根之比,以及碰撞过程的恢复系数有关,因为这几个量影响运动到壁面以及与壁面碰撞后从壁面反弹的颗粒数量。式(2)和(3)分别为颗粒相轴向和法向平均速度壁面边界条件。轴向平均速度不仅与入射颗粒的轴向、法向速度有关,还与摩擦系数和壁面粗糙度倾角有关。入射颗粒轴向速度越大,法

向速度、摩擦系数、壁面粗糙度倾角越小,则轴向速度在壁面上的平均值越大。另外,除理想镜面反射条件外,颗粒相在壁面上的轴向平均速度永远小于入射平均速度。其中减小的量可以分为两部分:由摩擦引起的能量损耗和壁面粗糙度引起的能量再分配。颗粒的法向平均速度,由于壁面粗糙度的存在,其值不再为0,但是由于 $\alpha'$ 很小,可以预料法向平均速度将很低,显然其中的变化也是由壁面粗糙度存在而导致的能量再分配引起的。如果两相湍流模型中不考虑颗粒的扩散,则应将法向平均速度置为0,以免壁面上出现颗粒流。式(4)~式(6)为颗粒相雷诺应力壁面边界条件,其影响因素较多,但由于函数关系复杂,而且入射颗粒雷诺应力的各个分量没有数量关系的比较,很难直接看出其随恢复系数、摩擦系数和粗糙度倾角变化而产生的变化。但是,可以发现,壁面粗糙度的引入,使得雷诺应力各分量之间的相互转化和平均运动向脉动运动的转化增强。

模型中有三个参数即恢复系数 $e$ 、摩擦系数 $f$ 和壁面粗糙度倾角 $\alpha'$ 需要确定。在使用二阶矩两相湍流模型时,壁面上颗粒相轴向平均速度的减小除了由颗粒-壁面碰撞直接引起外,还会由颗粒相壁面雷诺应力 $\overline{v'_p v'_p}$ 引起,这是不同于颗粒-轨道模型中颗粒-壁面碰撞模型的地方。考虑到这会重复计算轴向平均速度的减小量,选择恢复系数 $e$ 和摩擦系数 $f$ 时,应该适当减小。

## 2 模拟对象、两相湍流模型和数值方法

模拟的对象是文献[6]测量的混合层两相流动,为中心气粒两相射流与两侧气体单相射流混合的垂直槽道流动。通道几何形状及尺寸如图1所示,通道长1400mm,宽250mm,高25mm。因宽度是高度的10倍,中心断面可以简化为二维问题进行模拟。槽道壁面为研磨铝合金板,对粗糙度未做分析,但估计在 $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 之间。颗粒为球形玻璃珠,材料密度为 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ ,测速粒径取样范围分别为 $10\mu\text{m} \sim 90\mu\text{m}$ 和 $70\mu\text{m} \sim 140\mu\text{m}$ ,相应地平均粒径为 $45\mu\text{m}$ 和 $108\mu\text{m}$ 。气粒两相进口条件如图2所示,其中中心槽道两种粒径的颗粒载荷分别为0.02和0.17。文献[7]对这个实验对象用颗粒轨道模型进行了模拟,采用的恢复系数 $e = 0.9$ ,摩擦系数 $f = 0.3$ ,壁面粗糙度倾角为标准差为 $4^\circ$ 的正态分布,并考虑了粒径分布。

本文用二阶矩两相湍流模型,其内容和两相的边

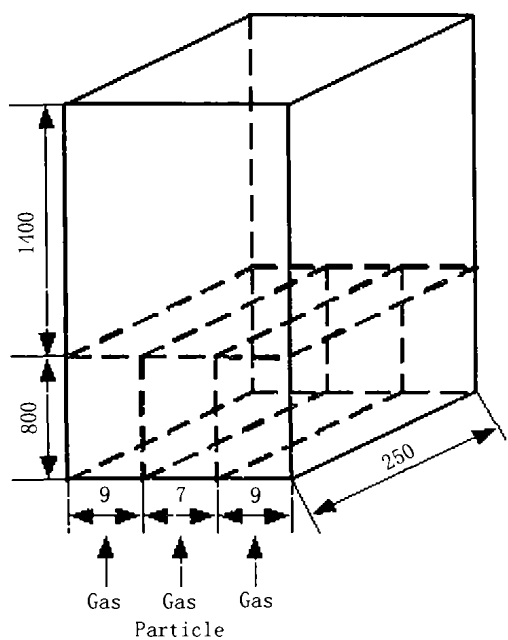


图 1 混合层流动通道几何形状与尺寸  
Fig. 1 Geometrical configuration and sizes of the mixing-layer flow channel

界条件见文献[8],两相关联封闭用文献[9]提出的双时间尺度耗散模型。其中对颗粒在壁面处的边界条件分别取考虑和不考虑壁面粗糙度的颗粒-壁面碰撞模型。根据二阶矩模型的特点,选择恢复系数  $e = 0.7$ ,摩擦系数  $f = 0.15$ ,壁面粗糙度最大倾角为  $4^\circ$ 。

模拟中采用节点数为  $27 \times 281$  的均匀交错网格。自编程序,用 SIMPLEX 算法,两相收敛标准均为最大相对余源和小于  $10^{-4}$ 。在 PENTIUM - IV PC 微机上运行一个工况需 10 分钟左右。

### 3 模拟结果与讨论

对  $45\mu\text{m}$  和  $108\mu\text{m}$  两种颗粒,用二阶矩模型的模拟结果及其与实验和颗粒轨道模型模拟结果的对照如图 3 ~ 图 6 所示。符号 PT 和 PTR 分别表示不考虑粗糙度和考虑粗糙度时颗粒轨道模型的模拟结果, bc1 和 bc2 分别表示考虑粗糙度和不考虑粗糙度时二阶矩模型的模拟结果。图中没有给出不考虑粗糙度时颗粒轨道模型的纵向平均速度,该速度略大于考虑粗糙度时的结果,但差别很小。

对于  $45\mu\text{m}$  的颗粒,由图 3 和图 4 可见,二阶矩模型和颗粒轨道模型均给出与实验结果符合较好的纵向平均速度,而且壁面粗糙度的影响不明显。对于纵向脉动速度,考虑壁面粗糙度的两种模型在流场的不同区域给出与实验符合程度不同的结果。在第二与第三个截面上模拟结果与实验结果差别不大,可能是由于小粒径颗粒的流动与气相流动较接近,颗粒相湍流模型对其影响较小;另外,壁面粗糙度使得颗粒相纵向脉动速度略微增大。二阶矩模型的模拟结果表

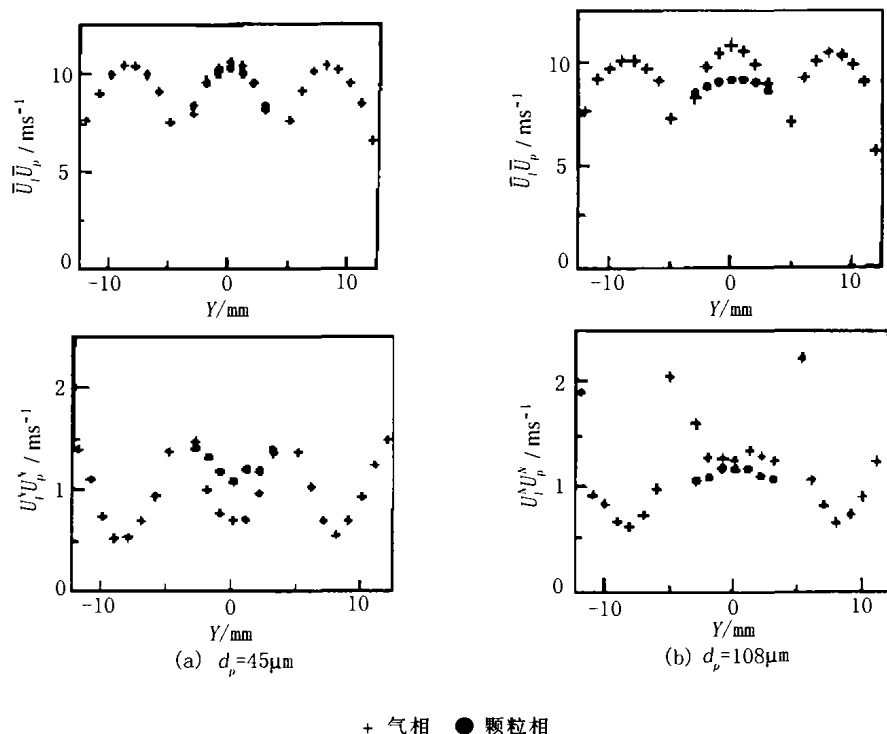


图 2 不同粒径的进口纵向平均速度和脉动速度  
Fig. 2 The particle longitudinal mean and fluctuation velocities at inlet

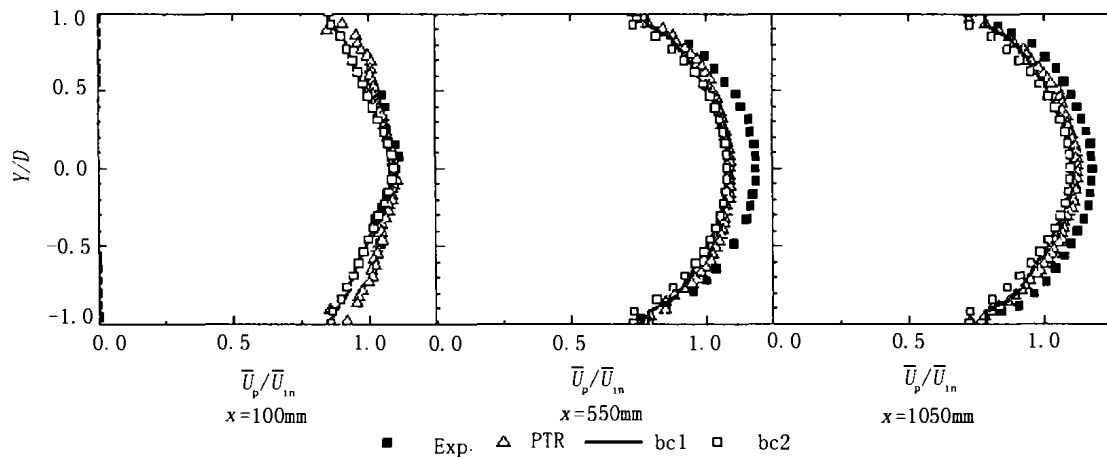


图 3 45 $\mu\text{m}$  颗粒纵向平均速度分布

Fig. 3 The longitudinal mean velocity for 45 $\mu\text{m}$  particles

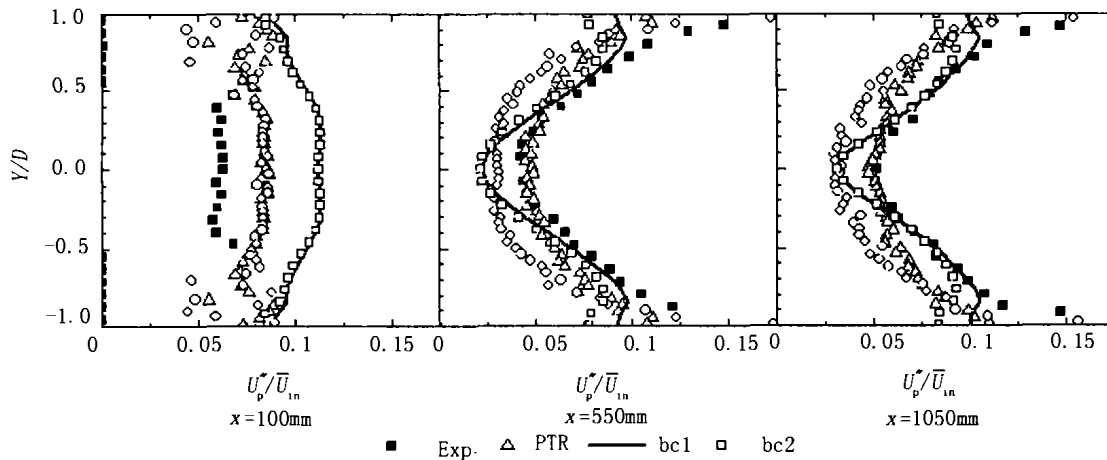


图 4 45 $\mu\text{m}$  颗粒纵向脉动速度分布

Fig. 4 The longitudinal fluctuation velocity for 45 $\mu\text{m}$  particles

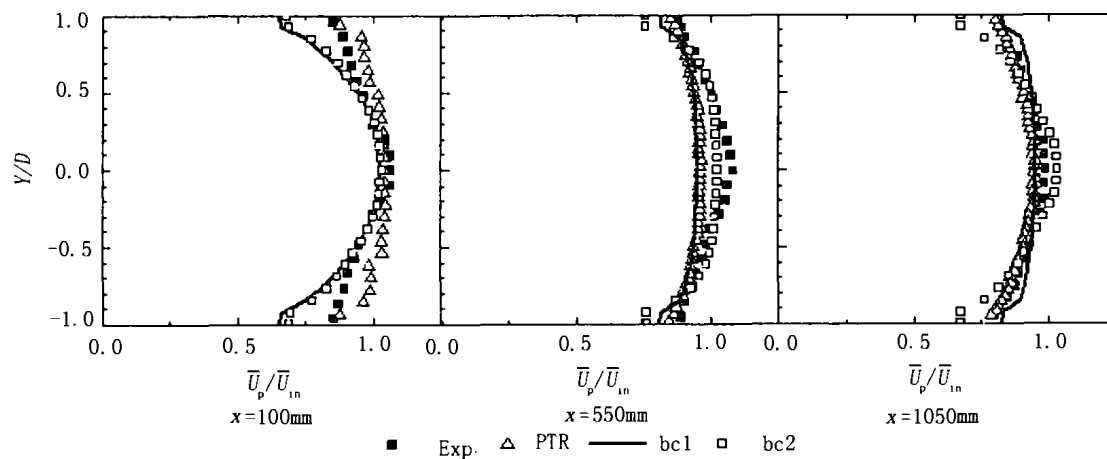
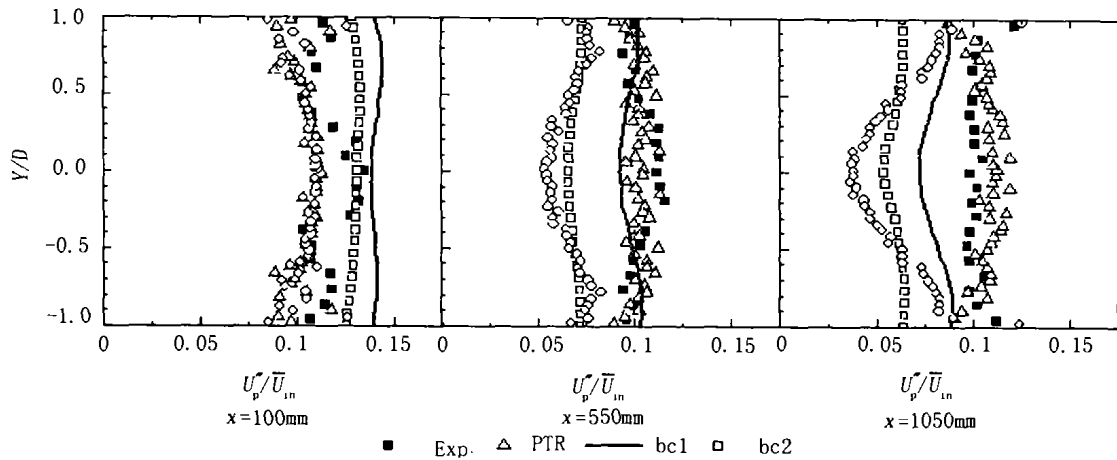


图 5 108 $\mu\text{m}$  颗粒纵向平均速度分布

Fig. 5 The longitudinal mean velocity for 108 $\mu\text{m}$  particles

图6 108 $\mu\text{m}$  颗粒纵向脉动速度分布Fig. 6 The longitudinal fluctuation velocity for 108 $\mu\text{m}$  particles

明,壁面粗糙度对这种颗粒湍流的影响还只是局限于壁面附近。

对于 108 $\mu\text{m}$  的颗粒,由图 5 可见,二阶矩模型和颗粒轨道模型给出的纵向平均速度也和实验值很接近,但与 45 $\mu\text{m}$  颗粒的结果相比,壁面粗糙度的影响开始表现出来,即考虑壁面粗糙度时给出的纵向平均速度较不考虑时的小。由图 6 可见,对于纵向脉动速度,考虑壁面粗糙度的二阶矩模型比不考虑壁面粗糙度的二阶矩模型的模拟结果更接近实验值。壁面粗糙度显著地增强了纵向脉动速度。二阶矩模型和轨道模型的模拟结果均表明,壁面粗糙度对颗粒湍流的影响遍及整个流场。二阶矩模型给出较实验值小的结果,而颗粒轨道模型给出比实验值大的结果,这种差别可能是由采用不同的粒径分布和颗粒相湍流模型等原因引起的。

总的来说,对于两种粒径的颗粒,与不考虑壁面粗糙度的模拟结果相比,考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型给出较小的纵向平均速度和较大的纵向脉动速度,这与实验结果符合更好;而且对于 108 $\mu\text{m}$  的颗粒,是否考虑壁面粗糙度,结果的差别更大,这些都与颗粒轨道模型的模拟结果一致。壁面粗糙度之所以减小颗粒相纵向平均速度,增大纵向脉动速度,是因为壁面粗糙度引起不同方向瞬时速度之间的相互转换,使得其概率密度分布变宽并进而引起平均速度的减小和脉动速度的增大。对于小颗粒,颗粒-壁面碰撞的影响会因为颗粒与气相之间的滑移较小而被局限于壁面附近;对于大颗粒,这种影响将会扩散到较远的地方甚至整个流场。这也说明,对于窄通道这种颗粒-壁面碰撞频繁的流动,大颗粒受碰撞

过程影响更大。

考虑壁面粗糙度时二阶矩模型和颗粒轨道模型对两种粒径颗粒的预报,均给出大致相似的纵向平均速度,但对于纵向脉动速度,在壁面附近前者给出与实验符合更好的结果,而在流场中心后者给出较好的结果,这可能是由两个方面的原因引起的:很显然,两种模型的差别是一个重要原因;另外,颗粒轨道模型考虑了粒径分布而二阶矩模型将颗粒处理为单一粒径,实际上,颗粒在流场的不同区域可能表现出不同的粒径偏析,而这种偏析对平均速度的影响较小,但对脉动速度的影响较大。

应该指出的是,预报结果和实验值之间的差别,是由两相湍流模型和边界条件共同引起的,而不仅仅是颗粒-壁面碰撞模型造成的。显然湍流模型的进一步改进对提高预报结果的精度也具有重要意义。

## 4 结论

(1) 考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型,与不考虑粗糙度的模型相比,给出的颗粒纵向平均速度较小、纵向脉动速度较大,与实验值更接近。

(2) 窄通道流动中上述影响对大颗粒更明显,即颗粒-壁面碰撞对颗粒流动特性的影响更大。

(3) 二阶矩模型的模拟结果与颗粒轨道模型的模拟结果定性上一致。

## 参考文献:

- [1] ZHOU L X. Recent advances in the second-order moment two-

- phase turbulence models for gas-particle and bubble-liquid flows [A]. In: Michaelides, ed. Proc. 4th Inter. Conf. On Multiphase Flow [C], keynote Lecture, CD-ROM. New Orleans, 2001.
- [2] 张夏,周力行.考虑壁面粗糙度的双流体颗粒-壁面碰撞模型[J].燃烧科学与技术,2002,8(2):140-144.
- [3] 张夏,周力行.双流体颗粒-壁面碰撞模型在突扩两相湍流模拟中的应用[J].燃烧科学与技术,2003,9(3):195-199.
- [4] ZHANG X, ZHOU L X. A two-fluid particle-wall collision model accounting for the wall roughness [A]. In: Proc. 10th Workshop on Two-Phase Flow Predictions [C]. Merseburg, 2002, 44-51.
- [5] ZHANG X, ZHOU L X. Simulation of horizontal channel gas-particle flows using a two-fluid particle-wall collision model accounting for wall roughness [A]. In: Proc. 4th ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conf., Vol. 2A [C]. 2003, 589-594.
- FEDSM2003-45750.
- [6] MILOJEVIC D, BORNER TH, DURST F. Prediction of turbulent gas-particle flows measured in a plane confined jet [A]. In: PARTEC: Reprints 1st World Congr. on Particle Technology [C], Part IV. 1986, 485-505.
- [7] SOMMERFELD M. Modeling of particle-wall collisions in confined gas-particle flows [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1992, 18: 905-926.
- [8] ZHOU L X, CHEN T. Simulation of swirling gas-particle flows using USM and  $k-\epsilon-kp$  two-phase turbulence models [J]. *Powder Technology*, 2001, 114: 1-11.
- [9] YU Y, ZHOU L X. Simulation of sudden-expansion gas-particle flows using different closure models of two-phase velocity correlation [A]. In: Sommerfeld, ed. Proc. 10th Workshop on Two-Phase Flow Predictions [C]. Merseburg, 2002, 442-449.

## Simulation of mixing-layer gas-particle flows using a two-fluid particle-wall collision model

ZHANG Xia<sup>1,2</sup>, ZHOU Li-xing<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A two-fluid particle-wall collision model is proposed. It takes into account the effects of the friction, restitution and in particular the wall roughness, and hence the redistribution of Reynolds stress in different directions, the absorption of turbulent energy from the mean motion and the attenuation of particle motion by the wall. The proposed model is incorporated into the second-order moment two-phase turbulence model to simulate mixing-layer gas-particle flows. The results show that the two-fluid particle-wall collision model accounting for wall roughness gives smaller longitudinal mean velocity and greater longitudinal fluctuation velocity than those obtained using the model not accounting for the wall roughness. This is in good agreement with the experimental results. These results are also in qualitative agreement with the simulation results given by the particle trajectory model. For large particles, such effect is more evident. The results point out that in narrow channels the particle-wall collision has more obvious effect on the particle flow behavior.

**Key words:** particle-wall collision; wall roughness; mixing-layer gas-particle flows