

文章编号: 1671-8097(2003)04-0347-05

颗粒扩散的三个效应分析及其数值模拟

赵海波, 柳朝晖, 郑楚光

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 在对均匀各向同性湍流中的颗粒进行研究时,目前通常采用拉氏方法描述两相湍流中的颗粒相运动,用的较多的就是基于颗粒所见气体速度的 Langevin 方程。此方程的封闭必须考虑颗粒扩散的轨道穿越效应、连续性效应和惯性效应。在仔细分析几个效应的基础上,提出了1种改进的漂移系数模型,综合考虑颗粒在均匀各向同性湍流内扩散所遇到的三种效应的影响,并进行数值模拟分析了几个效应对数值模拟结果的影响。

关键词: 湍流; 颗粒扩散; 惯性效应; 轨道穿越效应; 连续性效应

中图分类号: O357.5 **文献标识码:** A

0 引言

如何确定在颗粒轨道上所见流体微团瞬时速度是拉氏研究的关键和难点,也是了解两相间的湍流相互作用,特别是湍流对颗粒作用的关键。颗粒所见的气体微团速度的 Langevin 方程中漂移系数的封闭必须体现颗粒扩散的影响。理论和实验都已经证明,颗粒的扩散存在三个效应,即轨道穿越效应、惯性效应和连续性效应。一方面在外界体积力的作用下,另一方面由于颗粒与流体的惯性的不同,造成颗粒的轨道穿越周围重力很小的流体微团,则导致颗粒的速度相关随时间的下降较相应的流体微团要快一些,这就是轨道穿越效应^[3]。垂直于重力方向的颗粒扩散相比较于平行于重力方向的颗粒扩散要小,也就是垂直于重力方向的颗粒的速度相关相比较于平行于重力方向的颗粒的速度相关要小一些,这就是连续性效应的体现^[4]。随着颗粒惯性(Stokes 数)的增加,颗粒所见流体微团的积分时间尺度由拉氏时间尺度向更大的欧拉时间尺度转变,这就是惯性效应^[5]。目前大量的计算颗粒扩散的模型均是在拉氏坐标系下进行的。它们可以归为两大类:(1) 涡相互作用模型(EIM)^[1], (2) 时间相关模型(TCM)^[2]。在 EIM 模型中,颗粒被假设与一系列的涡团相互作用,相互作用时间取涡生存时间和颗粒穿越涡团

时间的最小值;在 TCM 模型中,颗粒与相对应的流体颗粒从同一位置出发,跟踪颗粒和该颗粒相对应的流体颗粒,通过采用拉氏时间关联(沿着流体-颗粒轨道)和欧拉空间关联(填补流体和颗粒空间位置上的差距)获得颗粒所见的流体速度。这些模型从不同方面考虑了这些效应的影响,但是一般都只考虑了某两种效应的整合,未能综合考虑三种效应的影响。Simonin 提出的考虑颗粒扩散的轨道穿越效应和连续性效应的模型^[6]被广泛应用,但是有研究表明全面考虑三个效应的影响对准确预测湍流流动中颗粒的扩散十分重要。本文从 Simonin 模型出发,通过对此模型分别进行简化和改进,系统研究了颗粒扩散的几个效应对突扩无旋湍流两相流的影响,最后提出了一种全面考虑颗粒扩散的三个效应的漂移系数的模型。

1 模型描述

颗粒所见的流体微团瞬时速度的 Langevin 方程形式如下^[6]:

$$\frac{du_{gi,p}}{dt} = S_{u,ip} = \underbrace{g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial u_{gi}}{\partial x_j} \right)}_I + \underbrace{(u_{pj} - u_{gj}) \frac{\partial u_{gi}}{\partial x_j}}_{II}$$

收稿日期: 2003-04-29; 修回日期: 2003-09-23.

基金项目: 国家重点基础研究专项经费(2000CB211602).

作者简介: 赵海波(1977-),男,湖南宁乡人,博士生,主要研究方向为多相湍流反应流体力学和电厂自动化与控制技术.

$$\underbrace{G_{gp,ij}(u_{gj} - \tilde{u}_{gj}) + B_{gp}^{1/2}\omega}_{III} \quad (1)$$

其中: $u_{gi,p}$ 为颗粒所遇到的流体微团的瞬时速度, 式(1)中, 右边第一项反映流体平均速度场对流体微团的加速度, 第二项反映颗粒和流体微团轨道差异和流体平均速度梯度的附加作用项, 第三项则用于考虑黏性脉动、压力脉动和颗粒相对流体运动等的影响, 其中二阶张量 $G_{gp,ij}$ 为相空间漂移系数, B_{gp} 为相空间扩散系数, ω 为一高斯白噪声。

Langevin 方程中的漂移系数 $G_{gp,ij} = f(\tau_p)$ 。其中 τ_p 为颗粒所见流体微团的拉氏积分时间尺度, 它反映沿着颗粒轨道的流体微团速度脉动相关性的衰减速度。漂移系数的封闭是 Langevin 方程封闭的核心任务。

1.1 Simonin 模型

Simonin 考虑颗粒的轨道穿越效应和连续性效应对颗粒所见气体微团的拉氏时间尺度的影响, 发展了如下模型^[6]:

$$G_{gp,ij} = -\frac{1}{\tau_p} \delta_{ij} - \left[\frac{1}{\tau_p} - \frac{1}{\tau_p} \right] p_i p_j; \quad p_i = \frac{V_{r,i}}{|V_r|} \quad (2)$$

其中: $V_{r,i}$ 为当地颗粒与流体微团的相对速度的平均值, τ_p 和 τ_p , 分别为颗粒所见气体微团的脉动速度在和颗粒轨道平行和垂直方向上的拉氏时间尺度。根据均匀湍流内颗粒扩散的实验结果, Csanady^[7] 建议的形式如下 ($C_\beta = 0.45$):

$$\tau_{p,\parallel} = \tau_p(1 + C_\beta \xi_r^2)^{-1/2}; \quad \tau_{p,\perp} = \tau_p(1 + 4C_\beta \xi_r^2)^{-1/2}; \quad \xi_r^2 = 1.5 |V_r|^2 / k_f \quad (3)$$

τ_p 为流体自身的拉氏时间尺度(沿流体轨道), 一般来说, 采用如下模型($\beta_1 = 2.075$):

$$\tau_p = k / (\beta_1 \epsilon) \quad (4)$$

在此漂移系数的模型中, 因为 $\tau_{p,\parallel}$ 和 $\tau_{p,\perp}$ 两个时间尺度不相等, 且 $\tau_{p,\parallel} < \tau_{p,\perp}$, 所以体现了轨道穿越效应和连续性效应。

1.2 Simonin 模型的简化

为了分析各个效应具体对于湍流两相流的影响, 本文简化以上模型使其只考虑轨道穿越效应。如果不考虑颗粒所见气体微团的脉动速度在和颗粒轨道平行和垂直方向上的拉氏时间尺度的差异, 那么就没有考虑到颗粒扩散的连续性效应了, 所以简化模型如下描述:

$$G_{gp,ij} = -1/\tau_p; \quad \tau_p = \tau_p(1 + 2C_\beta \xi_r^2)^{-1/2}$$

显而易见, 因为不考虑 τ_p 在两个方向上的差异,

并且颗粒所见气体微团的拉氏积分时间尺度 τ_p 小于流体微团沿流体自身轨道的拉氏积分时间尺度 τ , 考虑到了流体-颗粒轨道差异, 所以此简化模型考虑到且仅考虑到了颗粒扩散的轨道穿越效应。

1.3 Simonin 模型的改进

由于 Simonin 模型没有考虑到颗粒扩散的惯性效应, 所以本文对 Simonin 的模型作进一步的改进, 使其完全考虑颗粒扩散的三个效应。按照惯性效应, 随着颗粒惯性(Stokes 数)的增加, 颗粒所见流体微团的积分时间尺度 τ_p 由拉氏时间尺度 τ 向更大的欧拉时间尺度 τ_E 转变, 所以首先改写了 τ 的表达式(4), 反应颗粒惯性(Stokes 数)对其的影响:

$$\tau = \tau_E f(St_i) = \frac{k}{\epsilon} f(St_i)$$

采用 Wang 和 Stock^[5] 所给出的均匀各向同性湍流中的经验关系式来考虑颗粒扩散的惯性效应, 即

$$f(St_i) = 1 - \frac{1 - T_{Li}/T_{mEi}}{(1 + St_i)^{0.4(1 + 0.01St_i)}}$$

于是

$$\tau = \frac{k}{\epsilon} \left[1 - \frac{1 - T_{Li}/T_{mEi}}{(1 + St_i)^{0.4(1 + 0.01St_i)}} \right] \quad (5)$$

在此认为, 当 $St_i \rightarrow 0$ 时, 也就是不考虑存在颗粒惯性时, $\tau = k / (\beta_1 \epsilon) = 0.4819k / \epsilon$, 所以, 取 $T_{Li}/T_{mEi} = 0.4819$ 。

仍然采用 Simonin 模型中考虑轨道穿越效应和连续性效应的方法, 联立方程(2)、(3)、(5), 即得到了考虑了颗粒扩散三个效应的漂移系数模型。

以上封闭了颗粒所见的流体瞬时速度 Langevin 方程, 它是构建拉氏 PDF 方程模型的基础。相关工作可以参考文献[8]。若对气体湍流用雷诺应力方程模型, 对颗粒用拉氏 PDF 方程模型, 并用 Monte-Carlo 法求解 PDF 方程, 得到颗粒雷诺应力, 两相速度脉动关联, 漂移速度等, 并把它们返回到气相的雷诺应力方程中去, 用有限差分方法求解气相, 则可求解两相流场。

2 数值模拟结果

本文用上述模型对文献[9]用 PDPA 测量的, 旋流数为 0 的突扩无旋气粒两相流动进行了模拟。所模拟的突扩室的几何形状和尺寸见图 1。

旋流室长度 L 为 950 mm, 颗粒相为 $30\ \mu\text{m}$ 的玻璃微珠, 材料密度为 $2.5\ \text{t/m}^3$ 。进口参数为: 中心质量流率 $9.9\ \text{g/s}$, 环管质量流率 $38.5\ \text{g/s}$, 颗粒载荷比 0.034。

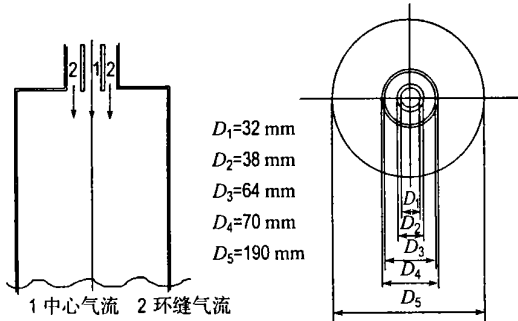


图 1 气室几何形状

Fig. 1 Geometrical shape of cylinder room

模拟中, 对气相采用雷诺应力输运方程模型封闭, 并用有限差分法求解, 对颗粒相则通过在网格内生成随机颗粒, 统计网格内各随机颗粒即可得到颗粒的平均速度、应力和两相脉动速度相关量等。模拟中所用气相边界条件为: 入口处的速度

和雷诺正应力均采用实验值, 对雷诺剪应力用涡粘性假设给定; 出口处采用充分发展管流条件; 壁面处取无滑移条件, 速度及雷诺应力在近壁点用壁面函数修正; 轴线处采用对称条件。颗粒相边界条件为: 入口处的颗粒速度按实验值, 入口处的雷诺正应力取联合正态分布, 壁面处取为弹性碰撞, 轴线处按对称边界处理。气相流场按 SIMPLEC 算法求解^[10], 对颗粒相的计算采用二阶龙格-库塔法。计算中所取的网格数为 32×20 , 并在入口附近将网格局部加密, 颗粒样本上限取 1 000 000 (每个网格平均 1 000 个), 时间步长取为 0.2 ms, 每迭代五次气相场计算颗粒相五个步长, 重复迭代直到气相最大余源和小于 1.0×10^{-3} 。

数值模拟的结果参照图 2 ~ 5。图中的 RSM-PDF(1) 表示考虑颗粒扩散的轨道穿越效应时的模拟结果, RSM-PDF(2) 表示考虑颗粒扩散的轨道穿越效应和连续性效应时的模拟结果, RSM-PDF(3) 表示考虑颗粒扩散的三个效应时的模拟结果。

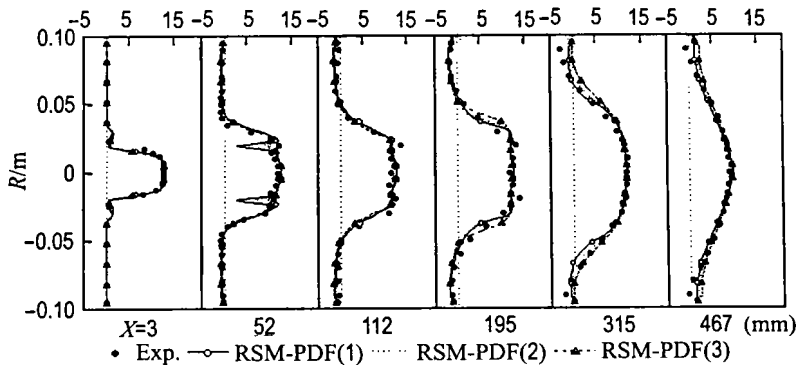


图 2 颗粒相轴向平均速度

Fig. 2 Axes-direction average velocity of particle phase

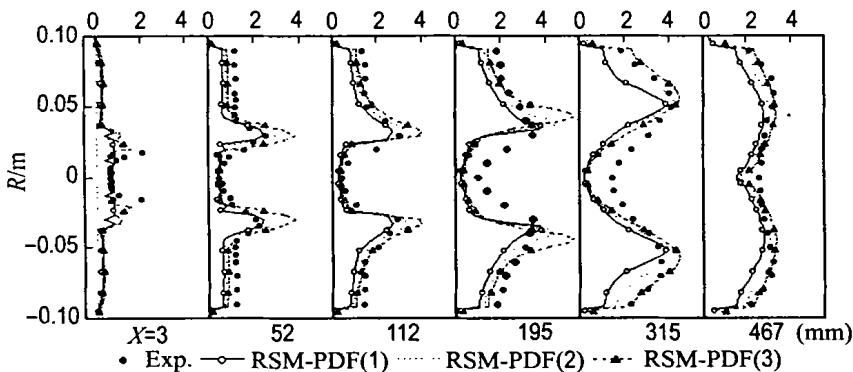


图 3 颗粒相轴向脉动速度

Fig. 3 Axes-direction frequent velocity of particle phase

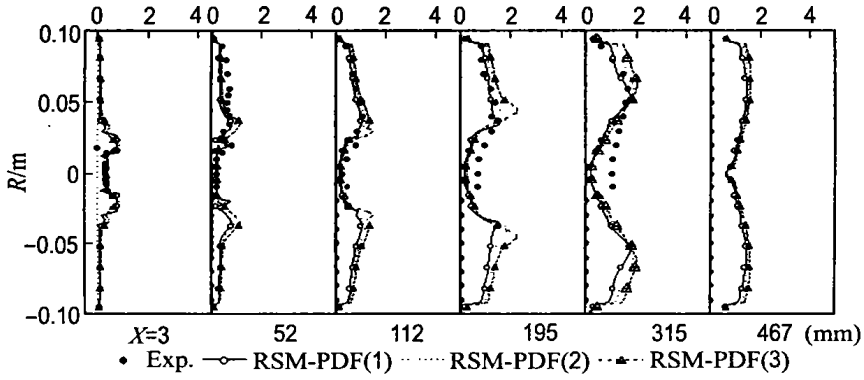


图4 颗粒相切向脉动速度

Fig. 4 Radius-direction frequent velocity of particle phase

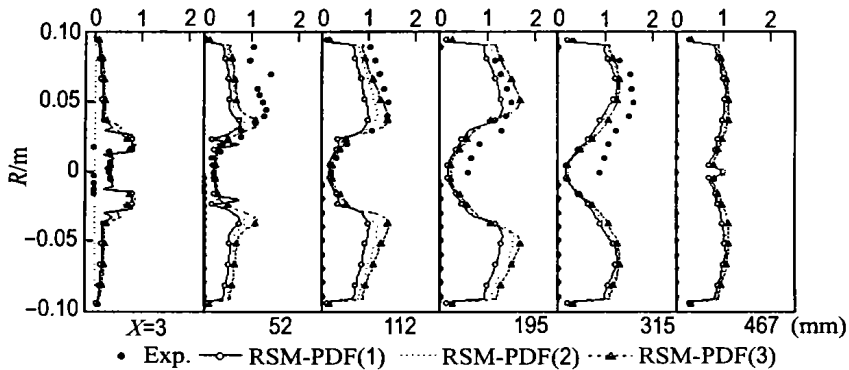


图5 颗粒相周向脉动速度

Fig. 5 Circumference-direction frequent velocity of particle phase

对于流体相的轴向平均速度、流体相的轴向速度脉动、流体相的切向脉动速度、流体相的周向脉动速度的模拟,各种情形下的模拟结果基本上是一致的。实际上,因为三种情形下对于流体相的模拟都是采用同一个模型,也就是RSM模型来进行模拟,所采用的处理方法也是一致的。加上模拟对象为稀释气粒两相流,平均颗粒体积分数为 3.4×10^{-6} ,所以对于流体相的模拟结果基本上没有什么差异。

对于颗粒相的模拟,结果则有一些差异。由图2可见,对于颗粒相的轴向平均速度的模拟,在 $x = 52$ 的中心轴线附近,当只考虑轨道穿越效应时,预报出了一个很明显的不合理的回流形状,而实际实验值没有这个回流形状;当考虑两个效应时,这个回流形状变得不那么明显,但是仍然存在;当全面考虑颗粒扩散的三个效应时,基本上没有预报出这个不合理的回流形状,与实验值符合相当好。RSM-PDF(3)的模拟结果普遍要比其他两种情况的模拟结果要大一些,也更符合实验结果,这是由于惯性效应的影响,使颗粒所见流体微

团的积分时间尺度变大,从而反映出来这种模拟结果,这在发展阶段 $x = 195$ 处更为明显。

对于颗粒相的轴向脉动速度的模拟,从图3可以看出,数值模拟结果之间存在较大差别,主要体现在脉动速度的双峰的高度、坡度以及峰顶位置的偏移上面。对于RSM-PDF(1),因为没有考虑到连续性效应,它认为垂直于重力方向的速度相关与重力方向(本模拟中,即为轴向)的速度相关一致,垂直于重力方向的颗粒扩散与重力方向的颗粒扩散一样;而RSM-PDF(2)考虑到连续性效应,认为垂直于重力方向的速度相关较重力方向的速度相关要小,垂直于重力方向的颗粒扩散较重力方向的颗粒扩散小,所以总的模拟结果显示RSM-PDF(1)的模拟结果普遍比RSM-PDF(2)的模拟结果要小一些,这正好反映了连续性效应。而RSM-PDF(3)的模拟结果要比前面两种情况的都要大一些,这是因为惯性效应的存在使颗粒所见流体微团的积分时间尺度由拉氏时间尺度向更大的欧拉时间尺度转变,于是颗粒的扩散在重力方向以及垂直于重力方向都要比前面

两种模型的数值模拟结果要大一些,也更接近实验结果。切向颗粒相脉动速度的模拟(图4)和周向颗粒相脉动速度的模拟(图5)也基本体现了以上三个效应不同的影响和差异。

3 结 语

(1) 在雷诺应力-拉氏概率密度函数两相湍流模型中考虑颗粒扩散的几个效应,能够清晰的反映出各种不同效应对颗粒相的影响。对于颗粒相轴向平均速度的模拟,考虑颗粒扩散的效应越全面,越符合试验值;对于颗粒各个方向的脉动速度的模拟,在颗粒由入口中心轴线往壁面逐渐扩散的过程中,考虑颗粒扩散的效应越全面,越符合实验值。

(2) 本数值模拟很直观的验证了颗粒扩散的三个效应,这对于丰富和完善两相湍流模型将是一个较好的基础研究。但是要进一步解决两相湍流模型,还需要在其他方面做很多工作。实际上,封闭扩散系数只是封闭联合PDF输运方程的一部分,封闭它能使联合PDF输运方程更加合理反映真实物理演变过程。但并不是唯一因素,还有其他一些因素;比如说颗粒间碰撞、颗粒壁面相互作用、颗粒破碎等都会给模拟结果带来误差,而作者的模型还暂时没有考虑到这些因素。

参考文献:

[1] CHEN P P, CROWE C T. On the Monte-Carlo modeling particle dispersion in turbulence [C] //

Proc Int Symp on Gas-Solid Flows, ASME FED 1984, **10**: 37-41.

[2] BERLEMONT A, LESJONQUERES P, GOUESBET G. Particle Lagrangian simulation in turbulent flows [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1990, **16**: 19-34.

[3] YUDINE M I. Physical considerations on heavy-particle diffusion [J]. *Adv Geophys*. 1959, **6**: 185-191.

[4] LU Q Q, FONTAINE J R, AUBERTIN G. A Lagrangian model for solid particles in turbulent flows [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1993: 347-367.

[5] WANG L P, STOCK D E. Dispersion of heavy particles by turbulent motion [J]. *J Atmospheric Sciences*, 1993, **50**: 1897-1913.

[6] SIMONIN O. Eulerian prediction of the fluid/particle correlated motion in turbulent two-phase flows [J]. *Appl Sci Res*, 1993, **51**: 275-283.

[7] CSANADY G T. Turbulent diffusion of heavy particles in the atmosphere [J]. *J Atmospheric Science*, 1963, **20**: 201-208.

[8] 柳朝晖, 郑楚光, 周力行. DSM-LPDF 两相湍流模型及旋流两相流动的模拟[J]. 工程热物理论, 2001, **22**(5): 641-644.

[9] SOMMERFELD M, QIU H H. Detailed measurements in a swirling particulate two-phase flow by a phase-doppler anemometer [J]. *Int J Heat and Fluid Flow*, 1991, **12**: 15-32.

[10] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. Hemisphere: [s n], 1980.

Analysis of three effects of particle dispersion in isotropic turbulent flow and its numerical simulation

ZHAO Hai-bo, LIU Zhao-hui, ZHENG Chu-guang

(Huazhong Univ. of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the course of research of particle phase in the isotropic uniform flow, the Lagrangian method is widely used to describe the particle phase movement of two phase flow. The common model is a Langevin-type equation of the fluid velocity relative to the particles. To enclose the equation, the inertia effect, the crossing trajectories effect and the continuity effect of particle dispersion must be taken into account in the model. On the base of detailed analysis of some effects, a modified model for the drift coefficient was proposed puts, considering synthetically the three effects of particle dispersion in isotropic turbulent flow. Finally the diversification of result of numerical simulations were carried out to analysis the different effect of particle dispersion.

Key words: turbulent; particle dispersion; inertia effect; crossing trajectories effect; continuity effect