

考虑颗粒尾涡效应的二阶矩两相湍流模型

曾卓雄, 韩守磊, 徐义华

(南昌航空大学航空与机械工程学院, 330063, 南昌)

摘要: 将作者曾提出的颗粒尾涡增强气体湍流模型加入到二阶矩-颗粒动力论两相湍流模型中, 建立了新的考虑尾涡效应的二阶矩两相湍流模型, 并对水平槽道、旋流突扩室和下行床内的两相流动进行了模拟. 对水平槽道和旋流突扩室内稀相两相流动的模拟结果表明: 与实验数据对照, 新模型比没有考虑颗粒尾涡影响的模型有一定程度的改进, 颗粒尾涡效应确实增大了气体湍流; 在下行床内的稠密两相流动中, 由于两相之间的相互作用比较明显, 颗粒尾涡不仅增大了气体脉动, 而且也增大了颗粒脉动.

关键词: 气固两相流; 湍流; 颗粒尾涡效应

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1348-03

Second-Order Moment Two-Phase Turbulence Model Considering Particle Wake Effect

Zeng Zhuoxiong, Han Shoulei, Xu Yihua

(Aeronautic and Mechanical Engineering college, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Combining the semi-empirical particle-wake enhancement turbulence model with the second-order moment two-phase turbulence model based on the particle kinetic theory, a new second-order moment two-phase turbulence model considering particle wake effect is established to simulate dilute gas-particle flows in a horizontal channel and a swirling sudden-expansion chamber. The simulation results of this new model, in comparison with the turbulence model ignoring particle wake effect, show better agreement with the experimental ones, and the particle wake effect enhances the gas turbulence. Moreover, the simulation for dense gas-particle flows in a downer indicates that for strong two-phase interaction, the particle wake effect is capable of enhancing both gas fluctuation and particle turbulent fluctuation.

Keywords: gas-particle flow; turbulence; particle wake effect

两相流中颗粒或者其他离散相(气泡、液滴等)的存在对流体湍流的影响,称之为湍流变动,一直是国内外研究的难点和热点. 文献[1]给出了一个湍流变动的半经验模型,描述了颗粒与湍流涡相互作用造成的两相流中的湍流变动. 涡中颗粒的加速运动反映为湍流削弱,颗粒后的尾涡或者涡的脱落造成的流体速度扰动反映为湍流增强,这两种机理的联合作用造成了流体总的湍流变动. 文献[2]采用了和文献[1]类似的思路,提出了一个颗粒-湍流相互作

用模型,考虑了由细颗粒造成的湍流抑制和由大颗粒造成的湍流增强. 文献[3]提出了另一个湍流变动的模型,认为湍能的产生和耗散包括4个部分:固有湍流的产生以及由于颗粒阻力做功造成的湍能产生;湍流本身的黏性耗散以及由于颗粒造成的湍能耗散. 这几项构成了湍能的平衡. 文献[4]仿照混合长度模型的思路,对气相雷诺应力方程中流体湍流的剪切产生项进行了简化. 上述颗粒尾涡增强气体湍流的模型,有的尚缺乏应用,有的虽在应用中取得

了一定效果,但是缺乏实验检验,或者改进效果不够理想,有待进一步深入研究。

文献[5-7]虽然对气体绕流单颗粒进行了数值模拟,但是没有系统地探讨各种因素对湍流变动的影响,也没有据此构造湍流变动模型。

本文作者曾用基于雷诺应力方程湍流模型的 RANS 模拟和极细的网格系,以及大涡模拟,对颗粒受湍流气体绕流进行了数值模拟,并改变颗粒直径和来流速度,获得了颗粒增强气体湍流的规律,据此构造了和现有模型不同的一种颗粒尾涡增强气体湍流的新模型^[8-9]。

本文进一步将该模型和二阶矩-颗粒动力论两相湍流模型相结合,建立了考虑尾涡效应的二阶矩两相湍流模型,并对水平槽道、旋流突扩室和下行床内的气固两相流动进行了模拟。

1 考虑颗粒尾涡效应的两相湍流模型

本文中的符号定义如下: U 为平均速度, u, v, w 分别为轴向、径向、切向脉动速度, uu 为雷诺应力, d_p 为颗粒直径, k 为湍动能, α_p 为颗粒体积浓度, β 为阻力系数, ϵ 为湍动能耗散率;下角标 p 代表颗粒, g 代表气体。

颗粒源项中考虑颗粒尾涡效应的气体雷诺应力方程为

$$\frac{\partial(\bar{\alpha}_g \rho_g \overline{u_{g,i} u_{g,j}})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\alpha}_g \rho_g U_{g,k} \overline{u_{g,i} u_{g,j}})}{\partial x_k} =$$

$$D_{g,ij} + P_{g,ij} + \Pi_{g,ij} - \epsilon_{g,ij} + G_{g,qp,ij} + G_{p,w} \delta_{ij} \quad (1)$$

式中

$$G_{p,w} = c \frac{\rho_p \bar{\alpha}_p U_{rel}^2}{\tau_{rp}}$$

相应地,在气体湍流动能耗散率方程中也会出现颗粒尾涡效应引起的源项

$$\frac{\partial(\bar{\alpha}_g \rho_g \epsilon_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\alpha}_g \rho_g U_{g,k} \epsilon_g)}{\partial x_k} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_{g\alpha} \bar{\alpha}_g \rho_g \frac{k_g}{\epsilon_g} \overline{u_{g,k} u_{g,l}} \frac{\partial \epsilon_g}{\partial x_l} \right) +$$

$$\frac{\epsilon_g}{k_g} [c_{\epsilon 1} (P_g + G_{g,qp}) - c_{\epsilon 2} \bar{\alpha}_g \rho_g \epsilon_g] + c_{\epsilon 3} \frac{\epsilon_g}{k_g} G_{p,w} \quad (2)$$

式中: $G_{g,qp} = 2\beta(k_{gp} - k_g)$; $c_{\epsilon 3} = 1.8$ 。

上述方程组中右端的各项表达式,以及两相连续方程、两相动量方程、两相速度关联方程、颗粒雷诺应力方程、颗粒湍动能耗散率方程、颗粒拟温度方程,可参考文献[10]。与不考虑颗粒尾涡效应的二阶矩两相湍流模型^[10]相比,本模型在气体雷诺应力方

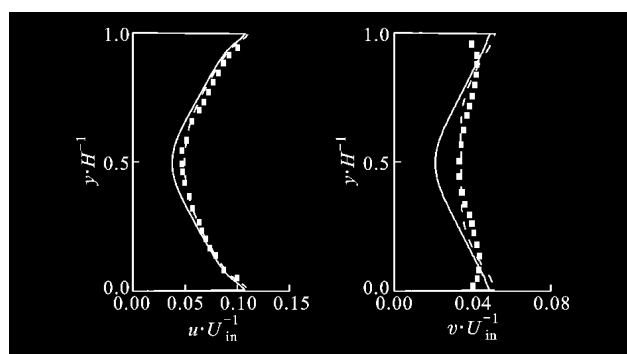
程和气体湍流动能耗散率方程中出现了颗粒尾涡效应引起的源项 $G_{p,w}$ 。

2 数值计算及结果分析

利用本模型和不考虑尾涡效应的二阶矩两相湍流模型,自行编制程序对气固两相流动进行了数值模拟。

2.1 水平槽道内气固两相流动的数值模拟

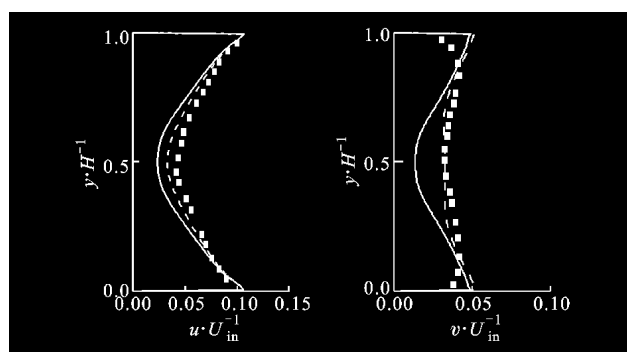
本节模拟的是文献[11]测量的水平槽道内气固两相充分发展流动。图 1、图 2 显示了不同壁面粗糙度下气体水平方向和垂直方向的脉动速度分布,可见本模型的预报结果与实验数据吻合得更好。气体垂直方向的脉动速度预报结果在壁面附近都偏大,而在槽道中心区域分布比较平坦。相对来讲,在高粗糙度下,气体水平方向脉动速度的预报结果都与实验数据相差得大些。



(a)水平方向 (b)垂直方向

—:不考虑尾涡效应; ----:考虑尾涡效应; ■:实验值

图 1 低粗糙度壁面时的气体脉动速度分布

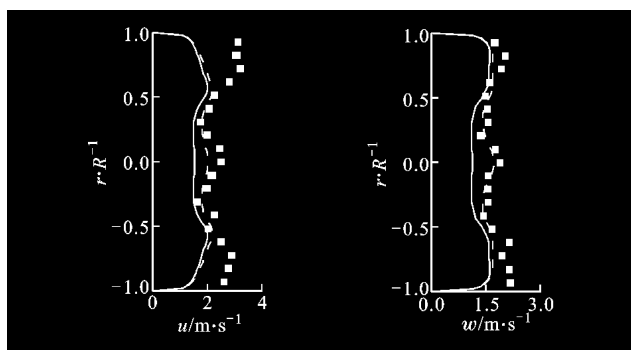


(a)水平方向 (b)垂直方向

图 2 高粗糙度壁面时的气体脉动速度分布

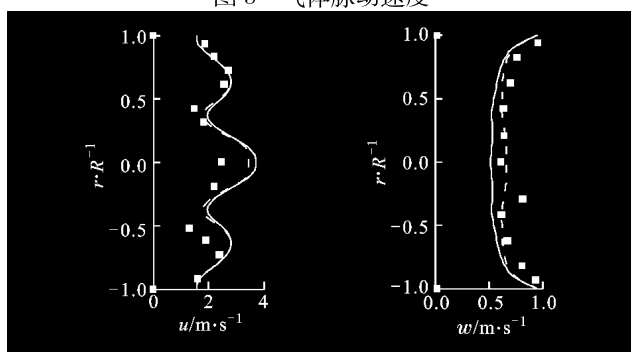
2.2 旋流突扩室内气固两相流动的数值模拟

本节模拟的是文献[12]中的轴对称旋流突扩两相流动。从图 3、图 4 可以看出,对两相轴向和切向脉动速度而言,本模型比没有考虑颗粒尾涡影响的模型有一定程度的改进,特别是在轴线附近,本模型的预报结果更接近实验值,这是由于上游区颗粒集



(a)轴向 (b)切向

图3 气体脉动速度



(a)轴向 (b)切向

图4 颗粒脉动速度

中在轴线附近,浓度较高,所以湍流变动效应较明显.

2.3 下行床内稠密气固两相流动的数值模拟

本节的模拟对象是文献[13]测量的下行床内稠密气固两相流动.图5~图11给出了颗粒浓度、两相平均速度及脉动速度分布的模拟结果.从图5和图9的两相轴向速度分布以及图8的颗粒体积浓度分布上看,考虑和不考虑颗粒尾涡效应的预报结果差不多,也就是说颗粒尾涡效应影响不大.从图6、7、10和11中的两相脉动速度分布上看,颗粒尾涡效应增大了两相的脉动速度,这是因为下行床内的两相流动属于稠密流动,使得两相之间的相互作用比较明显,造成了两相间雷诺应力的再分配,但对平均速度的影响没有对脉动速度那么明显,因为颗粒尾涡效应是通过雷诺应力的综合作用间接地影响平均应力的.

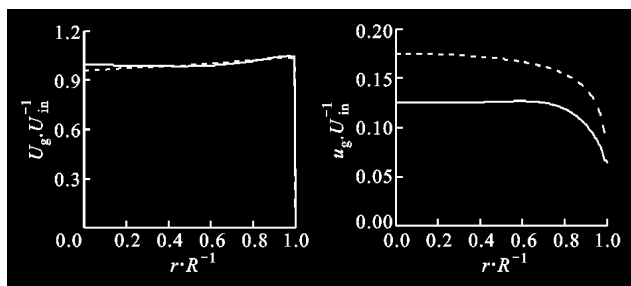


图5 气体轴向速度

图6 气体轴向脉动速度

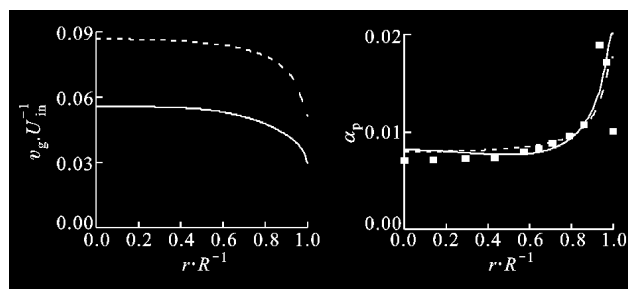


图7 气体径向脉动速度

图8 颗粒体积浓度

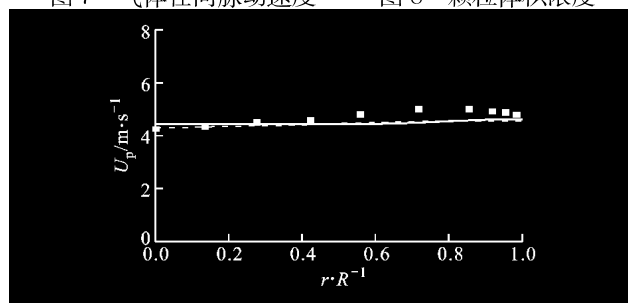


图9 颗粒轴向速度

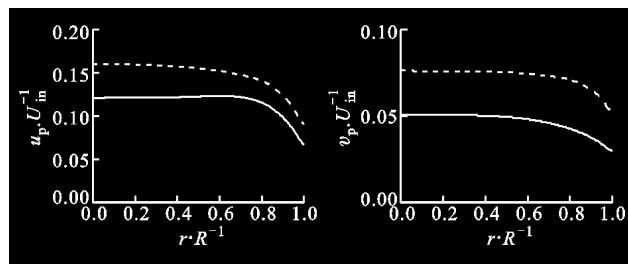


图10 颗粒轴向脉动速度

图11 颗粒径向脉动速度

3 结 论

本文建立了考虑尾涡效应的二阶矩两相湍流模型,对水平槽道、旋流突扩室和下行床内的两相流动进行了模拟.对水平槽道和旋流突扩室内的稀相两相流动的模拟结果表明,本模型所获得的结果比没有考虑颗粒尾涡影响的模型的结果与实验数据更加吻合,颗粒尾涡效应确实增大了气体湍流.对下行床内稠密气固两相流动的模拟结果显示,由于两相之间的相互作用比较明显,颗粒不仅增大了气体湍流,而且也增大了颗粒湍流.

参考文献:

- [1] Yuan Z, Michaelides E E. Turbulence modulation in particulate flows: a theoretical approach [J]. Int J Multiphase Flow, 1992, 18(5): 779-785.
- [2] Yarin L P, Hetsroni G. Turbulence intensity in dilute two-phase flows: the particles-turbulence interaction in dilute two-phase flow [J]. Int J Multiphase Flow, 1994, 20(1): 27-44.
- [3] Kenning V M, Crowe C T. On the effect of particles

- on carrier phase turbulence in gas-particle flows [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1997, 23(2): 403-408.
- [4] Yu Yong, Zhou Lixing, Wang Baoguo. Modeling of turbulence modification using two-time-scale dissipation models and accounting for the particle wake effect [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006, 14(3):314-320.
- [5] Bagchi P, Balachandar S. Response of the wake: an isolated particle to an isotropic turbulent flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 518(1): 95-123.
- [6] Constantinescu G S, Chapelet M, Squires K. Turbulence modeling applied to flow over a sphere [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(9): 1733-1742.
- [7] Constantinescu G S, Squires K D. LES and DES investigations of turbulent flow over a sphere at $Re = 10,000$ flow [J]. *Turbulence and Combustion*, 2003, 70(1/4): 267-298.
- [8] Zeng Zhuoxiong, Zhou Lixing. LES of turbulence enhancement by particle-wake effect and simulation of turbulence modulation in gas-particle flows [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007, 15(1): 12-16.
- [9] 曾卓雄. 稠密气固两相流动的颗粒湍流模型和颗粒尾涡增强气体湍流的研究, 清华大学博士后报告[R]. 北京:清华大学,2006.
- [10] Yu Y, Cai F P, Zhou L X. A second-order moment two-phase turbulence model for dense gas-particle flows [C/CD]//Proceedings of 5th International Conference on Multiphase Flow, ICMF'04. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2004: Paper 161.
- [11] Kussin J, Sommerfeld M. Experimental studies on particle behavior and turbulence modification in horizontal channel flow with different wall roughness [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(1): 143-159.
- [12] 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.
- [13] Wang Y, Bai D R, Jin Y. Hydrodynamics of cocurrent down-flow circulating fluidized bed (CDCFB) [J]. *Powder Technology*, 1992, 70(3): 271-275.

(编辑 葛赵青)