

文章编号: 1008-8857(2022)03-0176-05

DOI: 10.13259/j.cnki.eri.2022.03.008

气固两相流动中的一种颗粒相湍流模型

曾卓雄, 徐晓东, 王浩渊, 程 恒, 公 雪

(上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 201306)

摘 要: 颗粒湍流有其自身的产生与耗散。鉴于颗粒湍流模型对预测精度有很大影响, 建立了考虑各向异性和两相相互作用的颗粒相湍流模型, 采用代数雷诺应力模型封闭气固两相产生项及两相速度关联产生项。分别利用本模型和 $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ 模型对比研究了轴对称旋流两相流动的颗粒相平均速度及脉动速度, 结果显示, 本模型的模拟结果比 $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ 模型的更接近于实验数据, 表明本模型更符合颗粒湍流的内在特性。

关键词: 两相流动; 旋流; 双尺度脉动

中图分类号: TK124 文献标志码: A

A particle turbulence model in the gas-particle two-phase flow

ZENG Zhuoxiong, XU Xiaodong, WANG Haoyuan, CHENG Heng, GONG Xue

(College of Power and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China)

Abstract: Particle turbulence has its own generation and dissipation. Particle turbulence model has a great impact on the prediction accuracy. So, a particle turbulence model was established in which the anisotropy and the interaction between two phases were considered, and the generation terms of both gas-particle two phases and two-phase velocity correlations were closed by the algebraic Reynolds stress model. Numerical simulation on axisymmetric swirl gas-particle flow was performed using present model and $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ turbulence model. Results showed that the predicted results such as particle mean velocity and fluctuation velocity by present model were closer to the experimental ones, comparing with those by $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ model. It indicated that the present model was more consistent with the inherent characteristics of particle turbulence.

Keywords: gas-particle flows; swirl flow; two-scale fluctuation

气固两相流动广泛存在于燃煤电厂、化工、冶金等领域, 引起了国内外诸多关注^[1-3]。徐启等^[4]针对颗粒相采用拉格朗日模型, 针对气相采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对煤粉旋流两相流

进行了数值模拟。Wu 等^[5]针对气相采用 $k-\omega$ 湍流模型, 利用双流模型模拟了喷动床内的气固流动。众所周知, 不仅固体颗粒自身存在湍流的产生和耗散, 而且颗粒的存在对气体湍流流

收稿日期: 2020-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0604204)

第一作者: 曾卓雄 (1972—), 男, 博士, 教授。研究方向: 多相反应流体力学。E-mail: zengzhx@163.com

动也有很大的影响。在双流体两相湍流模型中, 两相速度脉动关联及产生项的封闭相对薄弱。早期简单的量纲分析方法或半经验法被广泛采用, 其模拟结果和理论分析及实验结果有较大差距, 因此, 有必要建立两相速度关联的输运方程。Zeng 等^[6]从大尺度的颗粒湍流脉动和颗粒间碰撞引起的小尺度脉动的概念出发, 建立了颗粒相双尺度模型。该模型物理意义明确, 总体预测精度比其他湍流模型要好, 但对计算要求高。综合考虑模型的合理性及经济性, 并结合文献 [6], 本文建立了将颗粒相双尺度模型及两相关联湍动能 k_{pg} 方程相结合的颗粒相湍流模型, 将其计算结果与 $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ 模型^[7]的结果进行比较, 并对比实验数据, 以检验该模型的模拟能力。

1 颗粒相双尺度两相湍流模型

颗粒大尺度脉动湍动能 k_{1p} 方程为

$$\frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p k_{1p}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p U_{pj} k_{1p}})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_p + \frac{\mu_{pt}}{\sigma_{pk}} \right) \frac{\partial k_{1p}}{\partial x_l} \right] - \rho_p \overline{\alpha_p} \overline{u_{pi} u_{pj}} \frac{\partial U_{pi}}{\partial x_j} - \overline{\alpha_p \rho_p} T_p + 2\beta[k_{pg} - k_{1p}] \quad (1)$$

式中: $\overline{\alpha_p}$ 为颗粒体积浓度; ρ_p 为颗粒密度; k_{1p} 为颗粒大尺度脉动湍动能; t 为时间; U_{pj} 、 U_{pi} 为颗粒平均速度; x_j 、 x_l 为空间坐标; μ_p 为分子动力黏性系数; μ_{pt} 为湍流动力黏性系数; σ_{pk} 为经验系数; $\overline{u_{pi} u_{pj}}$ 为颗粒雷诺应力; T_p 为大尺度脉动能量传递率; β 为阻力系数; k_{pg} 为两相关联湍动能; 下角标 i 、 j 、 l 表示坐标方向, 1 表示大尺度脉动, p 表示颗粒。

颗粒小尺度脉动湍动能 k_{2p} 方程为

$$\frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p k_{2p}})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p U_{pj} k_{2p}})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_p + \frac{\mu_{pt}}{\sigma_{pk}} \right) \frac{\partial k_{2p}}{\partial x_l} \right] + \overline{\alpha_p \rho_p} T_p - \overline{\alpha_p \rho_p} \varepsilon_p - \frac{1}{3}(1-e^2) \frac{k_{2p} \overline{\alpha_p \rho_p}}{\tau_c} - 2\beta k_{2p} \quad (2)$$

式中: k_{2p} 为颗粒小尺度脉动湍动能; ε_p 为小尺度脉动耗散率; e 为碰撞恢复系数; 下角标 2 表示

小尺度脉动; $\tau_c = \left(\frac{2\pi}{3k_{2p}} \right)^{1/2} \frac{d_p}{16\overline{\alpha_p}}$, d_p 为颗粒直径。

大尺度脉动能量传递率 T_p 方程为

$$\frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p T_p})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p U_{pj} T_p})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_p + \frac{\mu_{pt}}{\sigma_{pe}} \right) \frac{\partial T_p}{\partial x_l} \right] + \frac{T_p}{k_{1p}} (C_{p1} P_p - C_{p2} \overline{\alpha_p \rho_p} T_p + C_{p3} G_{1p,pg}) + C_{p4} \overline{\alpha_p \rho_p} \frac{P_p^2}{k_{1p}} \quad (3)$$

式中: σ_{pe} 、 C_{p1} 、 C_{p2} 、 C_{p3} 、 C_{p4} 为经验系数; $P_p = -\rho_p \overline{\alpha_p} \overline{u_{pi} u_{pj}} \frac{\partial U_{pi}}{\partial x_j}$, 为产生项; $G_{1p,pg} = 2\beta(k_{pg} - k_{1p})$ 为大尺度脉动两相湍流相互作用项。

小尺度脉动耗散率 ε_p 方程为

$$\frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p \varepsilon_p})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\alpha_p \rho_p U_{pj} \varepsilon_p})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_p + \frac{\mu_{pt}}{\sigma_{pe}} \right) \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial x_l} \right] + \frac{\varepsilon_p}{k_{2p}} (C_{ep1} \overline{\alpha_p \rho_p} T_p - C_{ep2} \overline{\alpha_p \rho_p} \varepsilon_p + C_{ep3} G_{2p,pg}) + C_{ep4} \frac{T_p^2}{k_{2p}} \overline{\alpha_p \rho_p} \quad (4)$$

式中: C_{ep1} 、 C_{ep2} 、 C_{ep3} 、 C_{ep4} 为经验系数; $G_{2p,pg} = -2\beta k_{2p}$, 为小尺度脉动两相湍流相互作用项。

颗粒相的 $\mu_{pt} = c_{\mu p} \rho_p (k_{1p} + k_{2p})^2 / T_p$, $c_{\mu p} = 0.09$,

$k_p = k_{1p} + k_{2p}$ 。

两相关联湍动能 k_{pg} 方程为

$$\frac{\partial k_{pg}}{\partial t} + (U_{gj} + U_{pj}) \frac{\partial k_{pg}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(u_{ge} + u_{pe}) \frac{\partial k_{pg}}{\partial x_l} \right] - \frac{1}{2} \left(\overline{u_{gi} u_{pj}} \frac{\partial U_{pi}}{\partial x_j} + \overline{u_{pi} u_{gj}} \frac{\partial U_{gi}}{\partial x_j} \right) + \frac{\beta}{\overline{\alpha_g \rho_g} \overline{\alpha_p \rho_p}} [\overline{\alpha_p \rho_p} k_p + \overline{\alpha_g \rho_g} k_g - (\overline{\alpha_g \rho_g} + \overline{\alpha_p \rho_p}) k_{pg}] - \frac{\varepsilon_g}{k_g} k_{pg} \quad (5)$$

式中: U_{gj} 、 U_{gi} 为气体平均速度; u_{ge} 为气体有效运动黏性系数; u_{pe} 为颗粒有效运动黏性系数; $\overline{u_{gi} u_{pj}}$ 、 $\overline{u_{pi} u_{gj}}$ 为两相脉动速度关联; $\overline{\alpha_g}$ 为气体体积浓度; ρ_g 为气体密度; k_g 为气体湍动能; ε_g 为气体湍动能耗散率; 下角标 g 表示气体。

封闭两相关联产生项的雷诺应力代数表达式为

$$\begin{aligned} \overline{u_{pi}u_{gj}} = & -\frac{\overline{\alpha_g\rho_g\overline{\alpha_p\rho_p}}}{\beta(\overline{\alpha_g\rho_g}+\overline{\alpha_p\rho_p})} \left(\overline{u_{pi}u_{gl}} \frac{\partial U_{gj}}{\partial x_l} + \overline{u_{gj}u_{pl}} \frac{\partial U_{pi}}{\partial x_l} \right) + \\ & \left(\frac{\overline{\alpha_g\rho_g}}{\overline{\alpha_g\rho_g}+\overline{\alpha_p\rho_p}} \overline{u_{gi}u_{gj}} + \frac{\overline{\alpha_p\rho_p}}{\overline{\alpha_g\rho_g}+\overline{\alpha_p\rho_p}} \overline{u_{pi}u_{pj}} \right) - \\ & \frac{2\overline{\alpha_g\rho_g\overline{\alpha_p\rho_p}}}{\beta(\overline{\alpha_g\rho_g}+\overline{\alpha_p\rho_p})} \frac{k_{pg}}{k_g} \varepsilon_g \delta_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $\overline{u_{pi}u_{gl}}$ 、 $\overline{u_{gj}u_{pl}}$ 为两相脉动速度关联； $\overline{u_{gi}u_{gj}}$ 为气相雷诺应力；当 $i=j$ ， $\delta_{ij}=1$ ；当 $i \neq j$ ， $\delta_{ij}=0$ 。

封闭两相产生项等的雷诺应力代数表达式为

$$\begin{aligned} \overline{u_{pi}u_{pj}} = & -\lambda \frac{k_p}{\varepsilon_p} \left(\overline{u_{pi}u_{pl}} \frac{\partial U_{pj}}{\partial x_l} + \overline{u_{pj}u_{pl}} \frac{\partial U_{pi}}{\partial x_l} \right) + \\ & \frac{\beta k_p}{c_1 \overline{\alpha_p\rho_p} \varepsilon_p} (\overline{u_{pi}u_{gj}} + \overline{u_{gi}u_{pj}} - 2\overline{u_{pi}u_{pj}}) + \\ & (1-\lambda) \frac{2}{3} k_p \delta_{ij} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $\overline{u_{pi}u_{pl}}$ 、 $\overline{u_{pj}u_{pl}}$ 为颗粒雷诺应力； c_1 为经验系数； $\lambda=0.8$ ^[8]。

$$\begin{aligned} \overline{u_{gi}u_{gj}} = & -\lambda \frac{k_g}{\varepsilon_g} \left(\overline{u_{gi}u_{gl}} \frac{\partial U_{gj}}{\partial x_l} + \overline{u_{gj}u_{gl}} \frac{\partial U_{gi}}{\partial x_l} \right) + \\ & \frac{\beta k_g}{c_1 \overline{\alpha_g\rho_g} \varepsilon_g} (\overline{u_{pi}u_{gj}} + \overline{u_{gi}u_{pj}} - 2\overline{u_{gi}u_{gj}}) + \\ & (1-\lambda) \frac{2}{3} k_g \delta_{ij} \end{aligned} \quad (8)$$

式中， $\overline{u_{gi}u_{gl}}$ 、 $\overline{u_{gj}u_{gl}}$ 为气相雷诺应力。

上述方程组构成了颗粒相双尺度模型及两相关联湍动能 k_{pg} 方程相结合的颗粒相湍流模型。气相的湍流模型及两相其他控制方程可参考文献[8]。在文献[6]中，对两相速度关联采用两相速度关联 $\overline{u_{pi}u_{gj}}$ 的输运方程。本文中两相速度关联采用的是湍动能 k_{pg} 方程，采用代数应力方程(6~8)来封闭。

2 旋流室内气固两相流动的数值计算

两相进口为速度进口条件，出口取充分发展条件。对气相，壁面取无滑移条件；对固相，壁面取滑移条件。对流项的离散采用二阶迎风格

式，扩散项的离散采用二阶中心差分格式，对差分方程组采用压力-速度修正的SIMPLE算法求解。图1为旋流室结构示意图^[9]，其中：1为直流进口；2为旋流进口； D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 分别为中心孔直径、环缝内径、环缝外径、旋流室直径，值分别32、38、64、194 mm。分别采用本模型以及 $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ 五方程模型^[7]对图2的两相流动进行了模拟。固体材料密度为 $2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均粒径为 $60 \mu\text{m}$ 。气体中心质量流量为 $9.9 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ，颗粒质量载荷0.034，气体环缝质量流量为 $38.5 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ，旋流数为0.47。网格类型为结构化网格。网格无关性验证如图2所示，其中： r 为径向位置； R 为旋流室半径。实验数据为文献[9]的颗粒轴向脉动速度。网格1的网格数为1387346，网格2的网格数为1126348，两者结果基本重合。取网格2的结果作为分析对象。

图3为气体、颗粒两相平均速度分布。对两相轴向平均速度 U_g 、 U_p 和切向平均速度 W_g 、 W_p 而言，本模型以及 $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ 模型的模拟结果均与实验数据较吻合，但是在截面中心区域，对于轴向速度， $k_g-\varepsilon_g-k_p-\varepsilon_p-\theta$ 模型的模拟结果和实验结果有一定的差距。

图4为气体、颗粒两相脉动速度分布。对气相轴向脉动速度 u_g 和切向脉动速度 w_g ，两种模型的模拟结果与实验数据相差都比较大，这可能是由于相位多普勒粒子分析仪(PDPA)测量结果有误差，也可能是因为湍动能耗散率等变量方程的封闭还需改进。但是对于颗粒相轴向脉动速度 u_p 及切向脉动速度 w_p ，两种模型的模拟结果

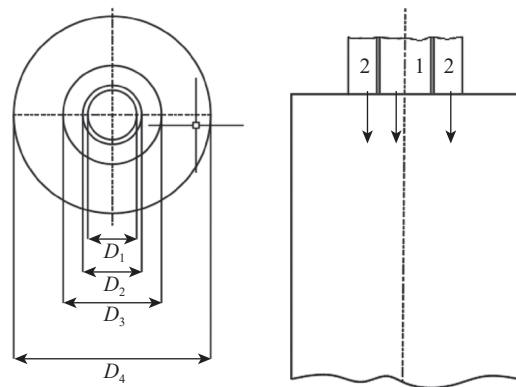


图1 旋流室示意图

Fig. 1 Geometry of the swirl chamber

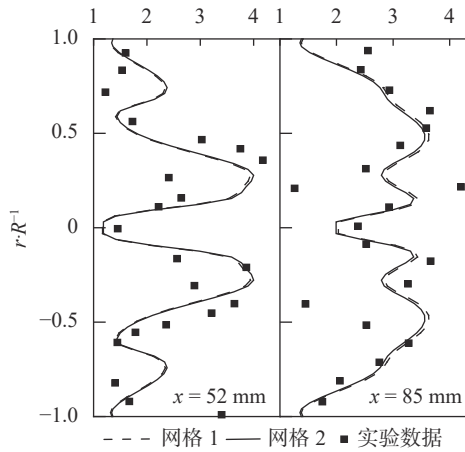


图2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

均与实验数据较吻合。颗粒湍流有其自身的对流、扩散、产生和耗散, 其平均速度及脉动速度呈现出和气相不一致的分布。总体上, 本模型的

模拟结果和实验数据吻合得更好, 造成结果差异的主要原因是本模型的封闭更合理, 既考虑了各向异性, 又考虑了两相相互作用的影响。

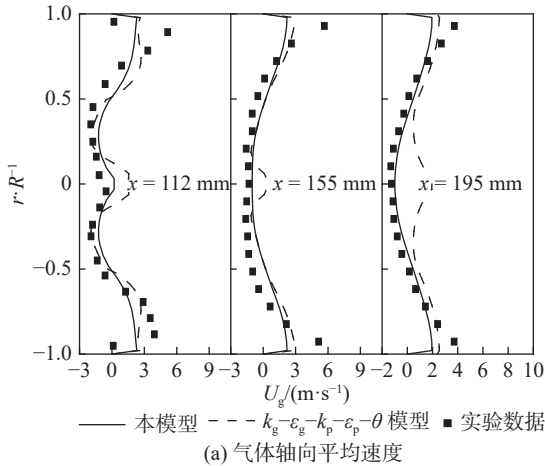
3 结论

本文研究了旋流室内的气固两相流动, 主要结论有:

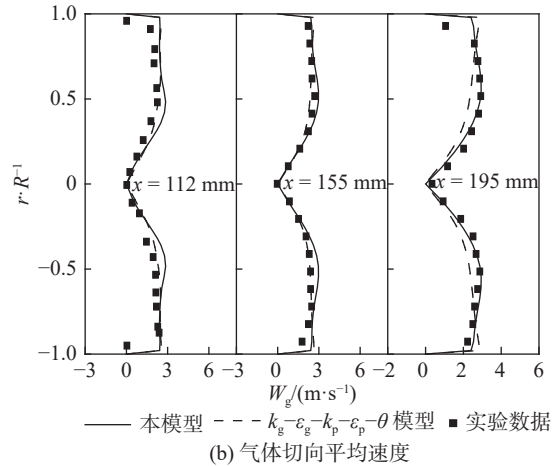
(1)建立了颗粒相双尺度模型及两相关联湍动能方程相结合的颗粒相湍流模型, 本模型同时考虑了脉动各向异性以及两相湍流间相互作用。

(2)利用本模型以及 $k_g - \epsilon_g - k_p - \epsilon_p - \theta$ 五方程模型对旋流两相流动进行了数值计算, 并对比了两种模型下两相平均速度及脉动速度的分布。

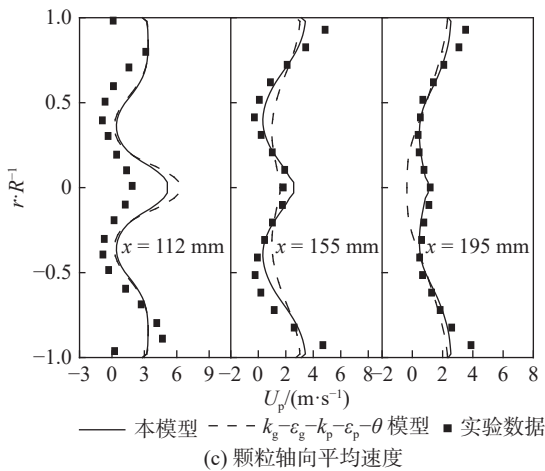
(3)总体而言, 本模型的模拟结果比 $k_g - \epsilon_g - k_p - \epsilon_p - \theta$ 五方程模型的模拟结果与实验数据更吻合。



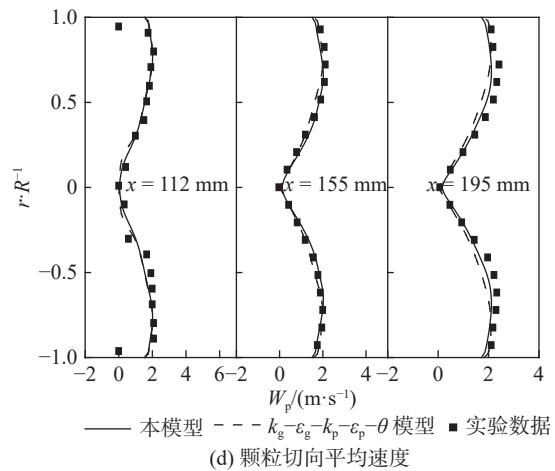
(a) 气体轴向平均速度



(b) 气体切向平均速度



(c) 颗粒轴向平均速度



(d) 颗粒切向平均速度

图3 气体、颗粒两相平均速度分布

Fig. 3 Mean velocity of the gas and particles

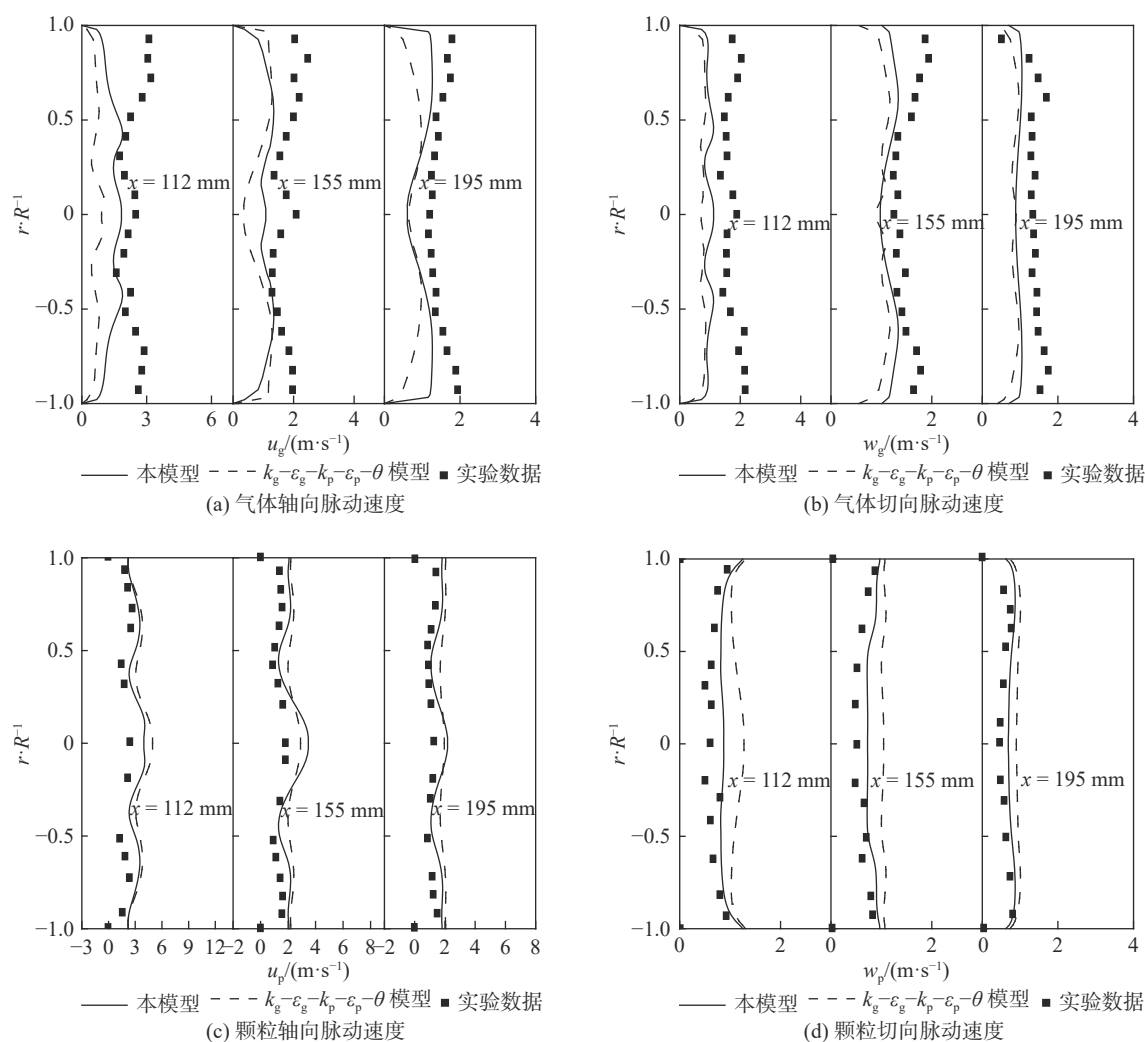


图4 气体、颗粒两相脉动速度分布

Fig. 4 Fluctuation velocity distribution of the gas and particles

参考文献:

- [1] WANG Q X, CHEN Z C, ZENG L Y, et al. An innovative combustion technology for a down-fired boiler with swirl burners: Gas/solid flow characteristics with various burner injection angles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 1296 - 1310.
- [2] 周力行. 旋流燃烧氮氧化物生成的研究进展 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(1): 1 - 10.
- [3] 于瑞红, 王涛涛, 文雷. 旋流对冲锅炉低氮燃烧特性数值模拟研究 [J]. 煤炭科技, 2019, 40(6): 17 - 22.
- [4] 徐启, 邢嘉芯, 张梦竹, 等. 低 NO_x 旋流煤粉燃烧器气固两相流模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(20): 215 - 220.
- [5] WU F, ZHANG J J, MA X X, et al. Numerical simulation of gas-solid flow in a novel spouted bed: Influence of row number of longitudinal vortex generators[J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29(8): 1848 - 1858.
- [6] ZENG Z, ZENG Z, XU Y. A nonlinear formula not shown particle two-scale turbulence model and its application[J]. *Acta Mechanica Sinica:English Edition*, 2007, 23(6): 621 - 625.
- [7] 曾卓雄, 胡春波, 姜培正, 等. 密相、湍流、可压、气固两相流理论及在管道中的应用 [J]. *空气动力学学报*, 2001, 19(1): 109 - 118.
- [8] 周力行. 多相湍流反应流体力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [9] SOMMERFELD M, QIU H H. Detailed measurements in a swirling particulate two-phase flow by a phase-doppler anemometer[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1991, 12(1): 20 - 28.