

宾汉流体稠密两相湍流流动中的二阶矩模型

曾卓雄^{1,2}, 周力行¹, 刘志和²

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084;

2. 南昌航空工业学院 机械系, 南昌 330034)

(李家春推荐)

摘要: 建立的 Bingham 流体稠密两相流动的二阶矩_颗粒动力论湍流模型(USM_theta 模型)既体现了两相的作用,又体现了屈服应力所引起的附加项,并提出了 USM_theta 模型下考虑浓度修正值影响的两相湍流流动的算法. 利用该模型对圆管内 Bingham 流体的单相湍流流动、稠密液固两相的湍流流动进行了计算,并和五方程湍流模型进行了比较,结果表明该模型的预测效果更好. 利用 USM_theta 模型对含颗粒的 Bingham 流体的两相湍流流动进行了模拟,随着屈服应力的增加, Bingham 流体相与颗粒相在管道中心附近的主流速度减小. 液固两相湍流和 Bingham 流体两相湍流的计算结果表明屈服应力引起的附加项对流动有很重要的影响.

关键词: Bingham 流体; 两相流; 屈服应力; 二阶矩模型

中图分类号: O359 **文献标识码:** A

引 言

地下开采的原油,不可避免地带有一定的沙粒,这些沙粒必然会对原油的流动产生一定的影响,像这样含有颗粒的 Bingham 流体的流动在许多工业部门都存在,因此研究带有颗粒的 Bingham 流体的流动具有重要的意义.

由于颗粒的存在,在流体相和颗粒相的输送方程中出现了两相脉动速度关联,最早探讨颗粒脉动规律的 Tchen^[1] 基于颗粒追随流体脉动的概念得到了颗粒湍流扩散系数和气体湍流扩散系数的关系, Hinze^[2] 据此进一步推导出了流体_颗粒脉动速度关联的表达式. 然而实验表明在不少情况下,颗粒脉动比流体脉动强,大颗粒比小颗粒的强. 因此周力行等人^[3] 提出了颗粒湍流能输送方程的理论,认为颗粒湍动能有它自身的对流、扩散、产生和耗散,形成了 k_{f-f}, k_p 两相湍流模型,然而没有考虑高浓度下颗粒间的碰撞. Gidaspo^[4] 类比于稠密气体分子运动论,建立了颗粒动力学理论,该理论考虑了颗粒的随机脉动和颗粒间的碰撞. 颗粒的随机脉动和碰撞导致颗粒动量的输送,因而产生颗粒相的压力和黏度等参数,这些参数和反映单颗粒脉动的颗粒拟温度关系密切. Cheng 等人^[5] 将 k_{f-f}, k_p 模型和颗粒动力学理论结合起来考虑颗粒相湍流和颗粒间的碰撞作用,提出了 k_{f-f}, k_p 四方程模型. 但是,该模型中的

收稿日期: 2004-06-17; 修订日期: 2006-07-02

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目(G1999-0222-08)

作者简介: 曾卓雄(1972),男,江西南昌人,教授,博士(E-mail: zengzhx@163.com).

k_p 方程对颗粒相的湍动描述作了较大的简化处理,特别是忽略了颗粒相湍动能耗散率方程,而只简单地考虑了颗粒相湍动与流体相湍动相互作用引起的耗散。Zheng 等人^[6]在此基础上,考虑了颗粒湍动自身的耗散,引入了颗粒湍动能耗散率 ρ_p 方程,建立了描述稠密气固湍动的 $k_{f-f} k_{p-p}$ (简称 k_{k-k}) 双流体五方程模型。然而,四方程 $k_{f-f} k_{p-p}$ 模型^[5] 和五方程 k_{k-k} ^[6] 模型描述的两相湍流都是基于各向同性假设,实际的两相湍流脉动是各向异性的。另一方面,上述模型中对两相脉动速度关联的封闭采用了早期简单的追随理论或量纲分析方法,可能会得到两相脉动速度关联大于气相湍动能或颗粒相湍动能的结果,和理论(直接模拟结果)及实验结果不符合。因此文献[7,8]将双流体模型的颗粒碰撞的动力学理论引入各向异性的统一二阶矩两相湍流模型,提出了稠密两相流动的二阶矩两相湍流模型。

但是,上述的湍流模型都是针对 Newton 流体的两相流动,对非 Newton 流体的两相流动的研究还比较缺乏。胡春波等人^[9-11]从 Bingham 流体的本构方程特点出发,建立了 Bingham 流体的 k 模型,并模拟了管道和叶轮内的 Bingham 流体的单相流动。Salvi^[12]在理论上分析了自由界面上 Bingham 流体的两相问题。Dziubinski^[13]的实验表明,非 Newton 流体的气液两相流动和 Newton 流体的气液两相流动有很相似的流动结构,而且发现在非 Newton 流体的两相流动中,非 Newton 流体力学的特性参数对流动结构有很大的影响,这和 Fidos^[14]的实验结果一致。充力强等人^[15,16]应用 k_{k-k} 模型对管道内的非 Newton 两相流动进行了初步的计算研究,不过两相脉动关联项采用的是基于颗粒追随流体而脉动的理论。Zeng 等人^[17]也采用 k_{k-k} 模型对叶轮内的非 Newton 两相流动进行了数值模拟,对两相脉动速度关联的封闭采用了早期简单的量纲分析方法。这些基于各向同性假设的湍流模型的封闭在理论上都存在缺陷。因此本文从 Bingham 流体的本构方程特点出发,在比较成熟的两相湍流理论的基础上,考虑到两相湍流脉动的各向异性和颗粒间的碰撞作用,将 Newton 流体两相流动的二阶矩两相湍流模型^[7,8]扩展到 Bingham 流体两相流动中,建立了含颗粒的 Bingham 流体的 USM 两相湍流方程组,提出了 USM 模型下考虑浓度修正值影响的两相湍流流动的算法,并且对圆管内的含颗粒的 Bingham 流体的两相湍流流动进行了计算。

1 湍流模型

对无化学反应的、仅考虑重力、压力和阻力作用的含颗粒的 Bingham 流体的两相控制方程组进行了推导和模化,鉴于篇幅,仅将最终结果列出来。Bingham 流体相连续方程、动量方程、Reynolds 应力输运方程、湍动能耗散率输运方程和两相速度关联输运方程的表达式如下:

连续性方程

$$\frac{(\overline{f - f_m})}{t} + \frac{(\overline{f - f_m \overline{u_{fk}}})}{x_k} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{(\overline{f - f_m \overline{u_{fi}}})}{t} + \frac{(\overline{f - f_m \overline{u_{fk} \overline{u_{fi}}})}{x_k} = & \frac{1}{x_k} \left[\overline{f - f} \frac{\overline{u_{fi}}}{x_k} \right] + \frac{1}{x_k} \left[\overline{f - f} \left[\frac{\overline{u_{fk}}}{x_i} - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{2}{3} \overline{ik} \frac{\overline{u_{ij}}}{x_j} \right] \right] - \overline{f} \frac{\overline{p}}{x_i} + \overline{f - f_m} g_i - \frac{1}{x_k} (\overline{f - f_m \overline{u_{fi} \overline{u_{fk}}}) + \\ & (\overline{u_{pi}} - \overline{u_{fi}}) + \frac{1}{x_k} \left[\overline{f} \left[\frac{\overline{u_{fi}}}{x_k} + \frac{\overline{u_{fk}}}{x_i} \right] \right], \end{aligned} \quad (2)$$

方程右端第 5 项到第 7 项依次为 Reynolds 应力项、两相相互作用项和考虑 Bingham 流体屈服应

力 σ_0 引起的附加项

Reynolds 应力输运方程

$$\begin{aligned} \frac{(\overline{f_{fm} u_{fi} u_{fj}})}{t} + \frac{(\overline{f_{fm} \overline{u_{fk}} u_{fi} u_{fj}})}{x_k} = & \frac{1}{x_k} \left[\left(\overline{f_{f+}} \frac{f_t}{f_k} \right) \frac{\overline{u_{fi} u_{fj}}}{x_l} \right] - \\ & \overline{f_{fm}} \left[\frac{\overline{u_{fk} u_{fj}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fi}}}{x_k} + \frac{\overline{u_{fk} u_{fi}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fj}}}{x_k} \right] - \frac{2}{3} \overline{f_{ij}} \overline{f_{fm}} \overline{f_{f+}} + \\ & (\overline{u_{pi} u_{fj}} + \overline{u_{fi} u_{pj}} - 2 \overline{u_{fi} u_{fj}}) + \overline{f_{ij}} + \frac{1}{x_k} \left(\overline{f_{f+}} \frac{\overline{u_{fi} u_{fj}}}{x_l} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

方程右端各项依次为扩散项、产生项、耗散项、两相湍流相互作用项、压力应变项和考虑 Bingham 流体屈服应力引起的附加项 压力应变项为

$$\begin{aligned} \overline{f_{ij}} = & \overline{f_{ij,1}} + \overline{f_{ij,2}} = -c_{f1} \frac{f}{k_f} \overline{f_{fm}} \left[\frac{\overline{u_{fi} u_{fj}}}{x_k} - \frac{2}{3} k_{fij} \right] + \\ & c_{f2} \left[\overline{f_{fm}} \left(\frac{\overline{u_{fk} u_{fj}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fi}}}{x_k} + \frac{\overline{u_{fk} u_{fi}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fj}}}{x_k} \right) - \frac{2}{3} \overline{f_{fm}} \overline{u_{fk} u_{fi}} \frac{\overline{u_{fi}}}{x_k} \overline{f_{ij}} \right] \end{aligned}$$

湍动能耗散率输运方程

$$\begin{aligned} \frac{(\overline{f_{fm} f})}{t} + \frac{(\overline{f_{fm} \overline{u_{fk}} f})}{x_k} = & \frac{1}{x_k} \left[\left(\overline{f_{f+}} \frac{f}{f} \right) \frac{f}{x_l} \right] + \\ & \frac{f}{k_f} c_1 \left[-\overline{f_{fm}} \frac{\overline{u_{fk} u_{fi}}}{x_k} - 2 (k_{f1} - k_{fp}) \right] - \frac{f}{k_f} c_2 \overline{f_{fm}} \overline{f_{f+}} \frac{1}{x_k} \left(\overline{f_{f+}} \frac{f}{x_l} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

方程右端最后一项为考虑 Bingham 流体屈服应力引起的附加项

两相速度关联输运方程

$$\begin{aligned} \frac{\overline{u_{pi} u_{fj}}}{t} + (\overline{u_{fk}} + \overline{u_{pk}}) \frac{\overline{u_{pi} u_{fj}}}{x_k} = & \frac{1}{x_k} \left[(f_e + p_e) \frac{\overline{u_{pi} u_{fj}}}{x_l} \right] - \\ & \frac{\overline{u_{pi} u_{fk}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fj}}}{x_k} - \frac{\overline{u_{pk} u_{fj}}}{x_k} \frac{\overline{u_{pi}}}{x_k} + \frac{\overline{f_{fm}} \overline{p_{pm}}}{\overline{p_{pm}}} \overline{p_{pm}} \overline{u_{pi} u_{fj}} + \\ & \overline{f_{fm}} \overline{u_{fi} u_{fj}} - (\overline{f_{fm}} + \overline{p_{pm}}) \frac{\overline{u_{fj} u_{pi}}}{x_k} - \\ & c_{fp} \frac{f}{k_f} \overline{u_{fi} u_{pi}} + \overline{f_{fp,ij}} + \frac{1}{x_k} \left[\frac{\overline{u_{pi} u_{fj}}}{f_m} \frac{f}{x_l} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

方程右端各项依次为扩散项、产生项、两相相互作用项、耗散项、压力应变项和考虑 Bingham 流体屈服应力引起的附加项 压力应变项为

$$\begin{aligned} \overline{f_{p,ij}} = & \overline{f_{p,ij,1}} + \overline{f_{p,ij,2}} = -\frac{c_{fp,1}}{r_p} \left[\frac{\overline{u_{pi} u_{fj}}}{x_k} - \frac{2}{3} k_{fp,ij} \right] + \\ & c_{fp,2} \left[\left(\frac{\overline{u_{pi} u_{fk}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fj}}}{x_k} + \frac{\overline{u_{pk} u_{fj}}}{x_k} \frac{\overline{u_{pi}}}{x_k} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\overline{u_{pi} u_{fk}}}{x_k} \frac{\overline{u_{fi}}}{x_k} + \frac{\overline{u_{pk} u_{fi}}}{x_k} \frac{\overline{u_{pj}}}{x_k} \right) \overline{f_{ij}} \right], \end{aligned}$$

以上各式中: $\frac{0}{(\overline{u_{fi}}/x_j)(\overline{u_{fi}}/x_j + \overline{u_{fj}}/x_i)}$, $c_{fp,1} = 0.9$, $c_{fp,2} = 0.3$, $c_{fp} = 3.0$, $c_{f1} = 1.8$, $c_{f2} = 0.6$, $c_1 = 1.45$, $c_2 = 1.92$, $f_k = 1.0$, $f = 1.22$, $c_f = c_p = 0.09$ 这些系数的取法类似于两相流动研究和 Bingham 流体研究^{[8~11], [15~19]}

颗粒相的湍流方程组(连续方程、动量方程、Reynolds 应力输运方程、湍动能耗散率输运方程和颗粒拟温度方程)国内外进行了较多的推导,其具体形式可参考文献[8, 18] 可见,在含颗粒的 Bingham 流体相的两相湍流方程组中,与 Bingham 流体的单相流动相比,体现了两相

的相互作用;而与 Newton 流体的两相流动相比,则体现了屈服应力所引起的附加作用。当屈服应力为 0 时,本文建立的 Bingham 流体两相流动的 USM_ 湍流模型就成了 Newton 流体两相流动中的二阶矩湍流模型。当流体体积浓度 $\alpha_f (\alpha_f + \alpha_p = 1)$ 等于 1 时, Bingham 流体两相流动的 USM_ 模型就成了非 Newton 流体单相流动的 USM 模型。两相相互作用是由于另外一相存在而产生的, Newton 流体两相流动中两相的相互作用对流动的影响在文献[18]中作了较详细的叙述,而 Bingham 流体两相流动中的两相相互作用对流动的影响与此有相似的规律,本文对此不再赘述,下文将分析屈服应力所引起的附加项带来的影响。

2 数值方法

文献[7, 8, 19]应用二阶矩湍流模型对稠密两相流动进行计算时,采用的是压力_速度修正的 SIMPLEC 方法,类似于单相流动仅仅建立了流体相的压力修正方程,并没有考虑浓度修正值的影响。然而在稠密两相流动中,由于颗粒相体积浓度和颗粒相压力关系密切,故应考虑颗粒相体积浓度对颗粒相压力的影响。文献[20]采用 $k_{k-}k_{k-}$ 模型研究了考虑浓度修正值影响的 DIPSAR 算法和没有考虑浓度修正值影响的 IPSAR 算法对计算结果的影响,发现考虑浓度修正值影响的算法更能有效预测稠密两相流动。本文借鉴二阶矩湍流模型下的 SIMPLEC 方法^[7, 8, 19]和文献[20]考虑浓度修正值影响的思想,扩展并提出了 USM_ 湍流模型下考虑浓度修正值影响的两相湍流流动的 SIMPLEC 算法。该算法具体表示如下:

- 1) 给定两相速度、两相 Reynolds 应力、两相脉动关联应力、两相湍动能耗散率、颗粒拟温度、颗粒体积浓度及流体相压力分布的初始值,颗粒相压力的初始值可由颗粒拟温度和颗粒体积浓度的初始值得出
 - 2) 由颗粒相连续方程计算颗粒相体积浓度,然后由体积浓度总守恒方程计算流体相体积浓度
 - 3) 根据两相压力场,计算两相动量方程,得出两相速度场
 - 4) 计算两相压力修正方程,得出两相压力修正值
 - 5) 由两相压力修正值修正两相的速度场,由颗粒相压力修正值修正体积浓度场
 - 6) 计算两相 Reynolds 应力方程、两相脉动速度关联方程、两相湍动能耗散率方程及颗粒相拟温度方程,求出流体湍流扩散系数、颗粒相湍流扩散系数和动力粘性系数,再次由颗粒相压力和颗粒体积浓度的关系式计算颗粒相体积浓度
 - 7) 返回步骤 2),重复以上过程直至达到收敛指标
- 边界条件可参考文献[8, 16]

3 计算结果与分析

首先对单相 Bingham 流体的湍流流动和稠密液固两相湍流流动进行了计算,和实验数据进行了对照,并比较了 USM_ 模型和五方程模型 $k_{k-}k_{k-}$ ^[16]的预测效果

3.1 圆管内单相 Bingham 流体的湍流流动

陈立^[21]对直径为 0.204 m 的圆管内的 Bingham 流体的速度和湍动强度进行了测量。采用单相流的 SIMPLEC 方法^[22],计算时取管道的轴对称的一半,长 2 m,网格数为 211 × 81,网格在壁面附近加密。Bingham 流体屈服应力为 5.5 N/m²,塑性粘度为 1.64 × 10⁻³ kg/(m·s),密度为 1.140 kg/m³,进口流量为 0.036 8 m³/s。图 1、图 2 给出了 Bingham 流体的速度分布图和湍动强

度分布图, 图中 $\sigma = \sqrt{2k_b}$ 。由图 1 可见, 在湍流充分发展区域, 速度计算值与实验值吻合较好。由图 2 可看出, 在大部分区域, 湍流强度的计算值比测量值偏大, 原因可能有实验方面的和计算方面的。并且比较了二阶矩模型 USM 和 $k-\epsilon$ 模型 (USM 模型, $k-k-\epsilon$ 模型应用于单相 Bingham 流体流动时的等价形式) 对单相 Bingham 流体湍流流动的影响, USM 模型的计算结果比各向同性的 $k-\epsilon$ 模型更接近实验数据, 这是因为 USM 模型考虑了各向异性湍流流动的影响。

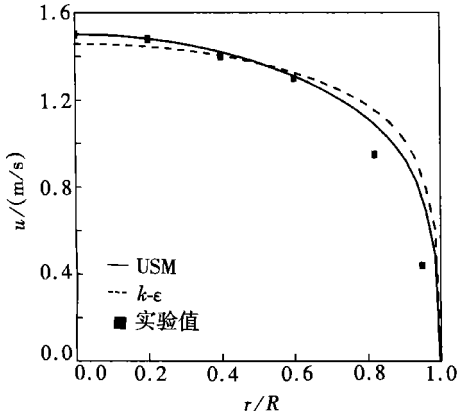


图 1 Bingham 流体速度分布

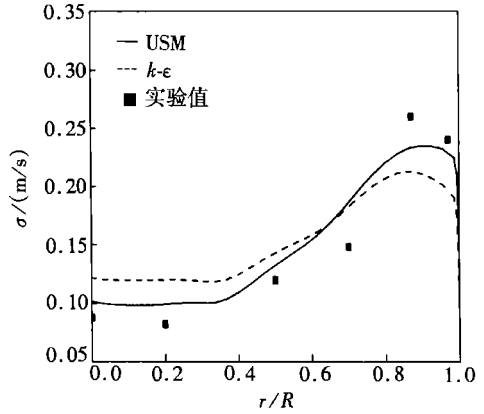


图 2 Bingham 流体湍动强度分布

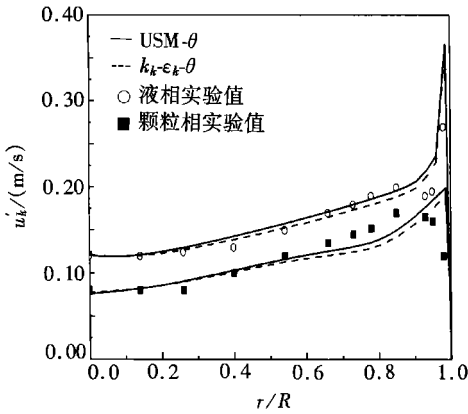


图 3 两相的轴向脉动速度分布
($w = 1.469 \text{ kg/s}$, $\rho_{\text{pin}} = 2.02\%$)

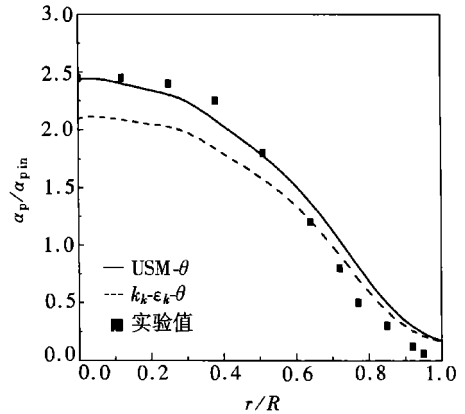


图 4 颗粒体积浓度分布
($w = 1.469 \text{ kg/s}$, $\rho_{\text{pin}} = 2.02\%$)

3.2 圆管内稠密液固两相的湍流流动

Alajbegovic^[23] 对竖直上升管道内稠密液固两相湍流流动的流体相和颗粒相同时进行了测量。实验圆管内径为 $3.6 \times 10^{-2} \text{ m}$, 流体介质是水, 进口流量为 1.469 kg/s (进口平均速度为 2.02 m/s), 颗粒平均直径为 2.32 mm , 颗粒密度为 2450 kg/m^3 , 进口体积浓度为 2.02% 。采用本文提出的考虑浓度修正影响的算法, 计算时取管道的轴对称的一半, 长度为 2 m , 划分网格为 61×81 , 网格在壁面附近加密。

图 3、图 4 分别示出了两相轴向脉动速度分布和颗粒相的浓度分布, 在湍流充分发展区域, 计算结果与实验数据吻合很好。流体的脉动速度大于颗粒的脉动速度, 脉动速度呈管道中心区域低, 壁面附近高的趋势; 而颗粒浓度分布刚好相反, 颗粒浓度呈管道中心区域高, 壁面附

近低的分布趋势,很不均匀。这是由于颗粒间、颗粒与壁面碰撞作用以及剪切粘性形成的颗粒速度梯度综合作用的结果。同样,在两相流动下,USM_模型的计算结果比五方程模型 $k_{k_k_}$ 更接近实验数据,这是因为USM_模型考虑了湍流流动的各向异性,而且两相脉动速度关联的封闭采用的是比量纲分析和追随理论更为合理的输送方程,可以更全面地反映湍流两相流动的的各向异性和两相间的湍流相互作用。

以上算例表明,各向异性的USM_模型比各向同性的五方程模型 $k_{k_k_}$ 有更合理的预测效果。

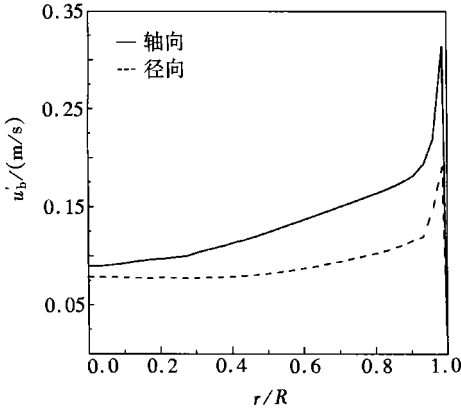


图5 Bingham流体相脉动速度分布

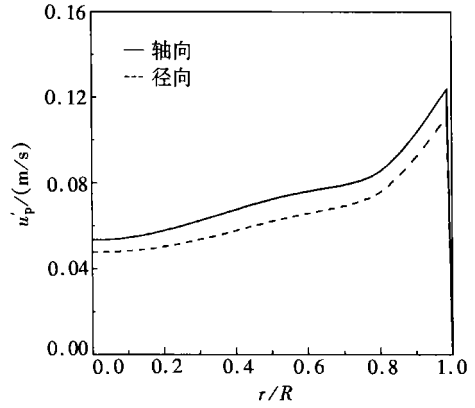


图6 颗粒相脉动速度分布

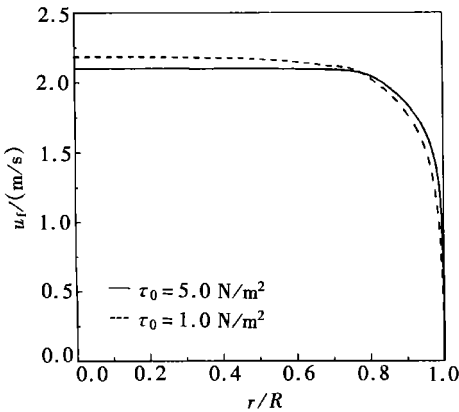


图7 Bingham流体相速度比较

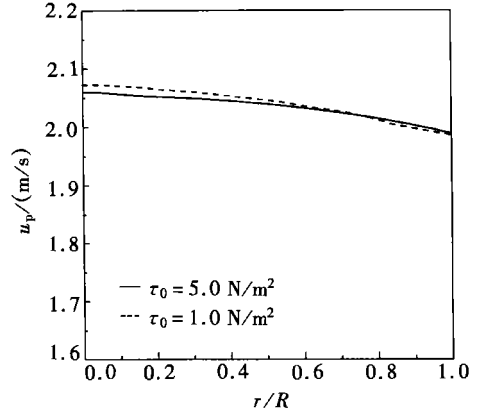


图8 颗粒相速度比较

3.3 圆管内 Bingham 流体的稠密两相的湍流流动

在上述两个算例的基础上,利用本文建立的考虑各向异性的USM_H模型和考虑浓度修正影响的算法对 Bingham 流体的稠密两相的湍流流动进行了数值模拟。Bingham 流体密度 $Q_f = 998 \text{ kg/m}^3$, 颗粒材料密度 $Q_p = 2450 \text{ kg/m}^3$, 两相进口平均速度 $u_{in} = 2.02 \text{ m/s}$, 颗粒平均直径为 $d_p = 2.32 \times 10^{-3} \text{ m}$, 进口平均体积浓度 $A_{pin} = 2.02\%$, 圆管内直径 $D = 3.6 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。Bingham 流体屈服应力为 $S_0 = 5.0 \text{ N/m}^2$, 塑性粘度 $L_f = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。计算时取管道的轴对称的一半,长度为 2 m,全场网格数为 61×81 。

图5和图6分别表示 Bingham 流体相和颗粒相的轴向及径向脉动速度分布。从图中可以看出,在湍流充分发展区域,Bingham 流体相和颗粒相都呈现出较明显的各向异性,两相的轴向

脉动速度皆大于各自的径向脉动速度, 因此很有必要采用各向异性的湍流模型, 而本文建立的 Bingham 流体两相流动的 USM- H 模型已经体现了这个特点#

图 7 和图 8 分别表示不同屈服应力下 Bingham 流体相、颗粒相的速度分布# 从图中可以看出, 随着屈服应力的增加, Bingham 流体相的主流速度在管道中心附近的大部分区域减小, 颗粒相速度也呈现了相似的分布规律, 这是由于 Bingham 流体相主流速度的减小使得该相对颗粒相的作用力减小, 从而降低了拖动颗粒向前的作用# 颗粒相在壁面的速度不为零是因为它满足滑移的边界条件#

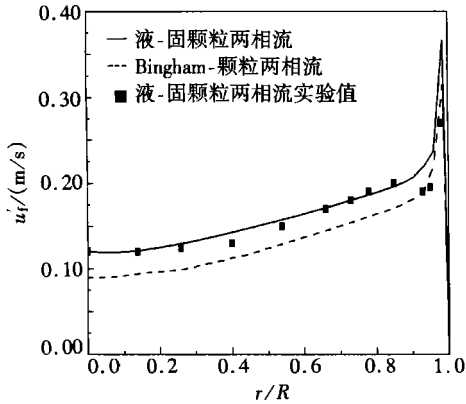


图 9 流体相轴向脉动速度比较

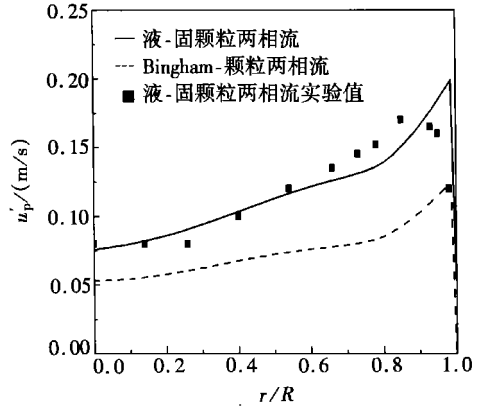


图 10 颗粒相轴向脉动速度比较

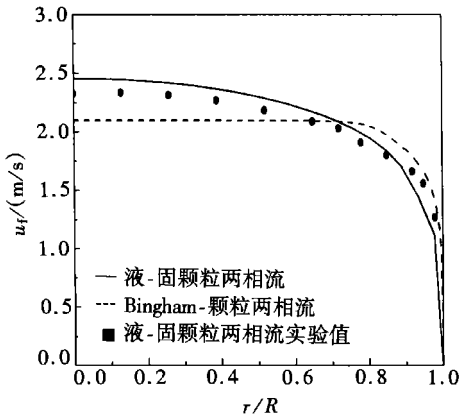


图 11 流体相速度比较

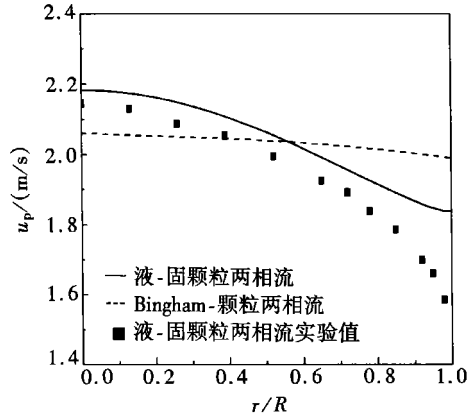


图 12 颗粒相速度比较

在所有计算条件基本一样的情况下, 将含颗粒的 Bingham 流体的两相流动的计算结果、算例 3.2 的液固两相流动的计算结果和文献[23]的实验结果进行了比较# 由图 9~ 图 12 可见, 屈服应力所带来的附加项对流动有较大的影响, 由于该项的存在, 影响了两相的速度梯度, 从而进一步影响到两相的湍脉动分布# 该项也体现了 Newton 流体两相流动和 Bingham 流体两相流动的区别# 从本文建立的 Bingham 流体两相流动控制方程组和文献[7, 8]所建立的 Newton 流体两相控制方程组可以看出, Bingham 流体两相流动的湍流控制方程组与 Newton 流体两相流动的相比, 多了一项屈服应力所带来的附加项# 当该项为 0 时, Bingham 流体两相流动的湍流控制方程组就变成了 Newton 流体两相流动的湍流控制方程组#

4 结 论

建立了稠密两相流动下 Bingham 流体相的 USM_H 湍流方程组, 与 Bingham 流体的单相流动相比, 体现了两相的相互作用; 与 Newton 流体的两相流动相比, 则体现了屈服应力所引起的附加作用# 正是该附加项的存在, 体现了 Bingham 流体两相湍流流动和 Newton 流体两相流动的区别# 提出了 USM_H 湍流模型下考虑浓度修正值影响的两相湍流流动的 SIMPLEC 算法# 利用该模型对圆管内单相的 Bingham 流体的湍流流动、稠密液固两相的湍流流动进行了计算, 并和五方程模型 k_k-E_k-H 进行了比较, 结果表明该模型的预测效果更好# 对 Bingham 流体的两相湍流流动进行了研究, 随着屈服应力的增加, Bingham 流体相与颗粒相的主流速度减小# 液固两相湍流和含颗粒的 Bingham 流体的两相湍流的计算结果表明屈服应力引起的附加项对流动有较大的影响#

[参 考 文 献]

- [1] Tchen C M. Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles in a turbulent field[D]. Hague, Martinus Nijhoff: Delft University, 1947.
- [2] Hinze J O. Turbulence[M]. New York: McGraw Hill, 1975.
- [3] Zhou L X, Huang X Q. Prediction of confined gas_particle jets by an energy equation model of particle turbulence[J]. Science in China, 1990, 33(53): 59.
- [4] Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [5] Cheng Y, Guo Y C, Wei F, et al. Modeling the hydrodynamics of downer reactors based on kinetic theory[J]. Chem Eng Sci, 1999, 54(13/14): 2019-2027.
- [6] Zheng Y, Wan X T, Qian Z, et al. Numerical simulation of the gas_particle turbulent flow in riser reactor based on $k_t-E_t-k_p-E_p-H$ two fluid model[J]. Chem Eng Sci, 2001, 56(24): 6813-6822.
- [7] Yu Y, Zhou L X, Zheng C G, et al. Simulation of swirling gas_particle flows using different time scales for the closure of two_phase velocity correlation in the second_order moment two_phase turbulence model[J]. Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(2): 247-250.
- [8] 于勇. 两相流动气体湍流变动模型和稠密两相湍流模型的研究[D]. 北京: 清华大学工程力学系, 2004.
- [9] 胡春波, 尚莲英, 蔡体敏. 宾汉流体湍流流动的理论研究[J]. 西北工业大学学报, 1998, 16(4): 589-592.
- [10] 胡春波, 魏进家, 姜培正, 等. 直圆管突扩通道内宾汉流体湍流流场的数值研究[J]. 应用数学和力学, 1998, 19(11): 1015-1020.
- [11] 胡春波, 姜培正, 魏进家. 离心泵叶轮内宾汉流体湍流流场的数值模拟[J]. 应用力学学报, 1999, 16(2): 104-107.
- [12] Salvi R. On the existence of two phase problem for Bingham fluids[J]. Nonlinear Analysis, 2001, 47(6): 4205-4216.
- [13] Dziubinski M, Fidos H, Sosno M. The flow pattern map of a two_phase non-Newtonian liquid_gas flow in the vertical pipe[J]. Internat J Multiphase Flow, 2004, 30(6): 551-563.
- [14] Fidos H. Flow hydrodynamics of multiphase mixtures of non-Newtonian liquid_gas_solid particles in vertical pipes[D]. Poland: Lodz Technical University, 2001.
- [15] 亢力强, 曾卓雄, 姜培正. 宾汉流体与颗粒间的密相两相湍流研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36

7): 693) 696.

- [16] 亢力强. 非牛顿流体与颗粒间的密相两相湍流的理论分析和数值计算[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
- [17] Zeng Z X, Xie Y B, Jiang Sh T. Numerical simulation on dense two_phase turbulent flow of Bingham fluid with partide[A]. In: Zhou L X, Ed. The Second International Symposium on Multiphase, Non Newtonian and Reacting Flows. 04[C]. China: International Academic Publishers/ Beijing World Publishing Corporation, 2004, 427) 429.
- [18] 周力行. 多相湍流反应流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [19] Zhou L X, Xu Y, Fan L S, et al. Simulation of swirling gas_particle flows using an improved second_order moment two_phase turbulence model[J]. Powder Tech, 2001, 116(3): 178) 189.
- [20] 姜培正, 魏进家, 王长安. 浓密液固两相流动的数值研究与理论分析[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(4): 84) 88.
- [21] 陈立. 高含沙圆管流的紊动强度分布[J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(12): 526) 534.
- [22] Van Doormaal J P, Raithby G D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numerical Heat Transfer, 1984, 7: 147) 163.
- [23] Alajbegovic A, Assad A, Benetto F. Phase distribution and turbulence structure for solid/ fluid upflow in a pipe[J]. Internat J Multiphase Flow, 1994, 20(3): 453) 479.

S e c o n d _ O r d e r M o m e n t M o d e l f o r D e n s e T w o _ P h a s e
T u r b u l e n t F l o w o f B i n g h a m F l u i d W i t h P a r t i c l e s

ZENG Zhuo_xiong^{1,2}, ZHOU Li_xing¹, LIU Zhi_h e²

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

2. Department of Mechanical Engineering, Nanchang Institute of Aeronautical Technology,
Nanchang 330034, P. R. China)

Abstract: The USM_theta model of Bingham fluid for dense two_phase turbulent flow is developed, which combines the unified second_order moment model for two_phase turbulence with the particle kinetic theory for the inter_particle collision. In this model, phases interaction and the extra term of Bingham fluid yield stress were taken into account. An algorithm for second_order moment model in dense two_phase flow was proposed, in which the influence of particle volume fraction was accounted for. This model was used to simulate turbulent flow of single_phase and dense two_phase in pipe, it is shown the USM_theta model has better prediction result than five_equation model, in which the particle_particle collision is modeled by the particle kinetic theory, while turbulence of both phases is simulated by the two_equation turbulence model. The USM_theta model was also used to simulate the dense two_phase turbulent flow of Bingham fluid with particles. With the increasing of the yield stress, the velocities of Bingham and particle decrease near the pipe centre, comparing the two_phase flow of Bingham_particle with that of liquid_particle, it is found the source term of yield stress has significant effect on flow.

Key words: Bingham fluid; two_phase flow; yield stress; second_order moment model