

直圆管突扩通道内宾汉流体 湍流流场的数值研究

胡春波^① 魏进家^② 姜培正^② 苗永淼^②

(刘宇陆推荐, 1997 年 4 月 28 日收到)

摘 要

本文依据牛顿流体中建立的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型这一基本思想, 考虑宾汉流体的本构方程, 建立了适用于求解宾汉流体湍流流动的控制方程。采用压力修正算法, 实现了宾汉流体速度场与压力场的关联。在理论研究基础上, 对直圆管突扩通道内宾汉流体湍流流动进行了数值研究, 并探讨了直圆管突扩通道内宾汉流体湍流流动机理。

关键词 宾汉流体 湍流 数值研究 流动机理

中图分类号 O373

§ 1. 引 言

宾汉流体是非牛顿流体的一个分支流体, 如石蜡基原油、高含沙水流、高浓度泥浆等都属于宾汉流体, 研究宾汉流体具有重要的意义。关于宾汉流体, 文献[1]对宾汉流体与塞流的衔接问题进行了研究, 文献[2]对宾汉体泥浆的湍流结构进行了研究, 文献[3]对宾汉流体在圆管内流动动能修正系数的确定方法进行了研究。从所查到的文献可知, 目前人们对宾汉流体的研究不论是理论上还是实验上都很不成熟, 关于直圆管突扩通道内宾汉流体湍流流动的数值研究, 还未见报导。本文考虑宾汉流体本构关系的特点, 参照文献[4], 建立了适用于宾汉流体湍流流动的控制方程, 采用压力修正算法, 对直圆管突扩通道内宾汉流体湍流流动进行了数值研究, 同时探讨了直圆管突扩通道内宾流流体湍流流动机理。

§ 2. 基本方程和湍流模型

考虑宾汉流体本构关系特点, 本文建立了圆柱对称坐标系下宾汉流体湍流流动的控制方程。

$$\text{连续方程: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho v)}{r\partial r} = 0 \quad (2.1)$$

动量方程:

$$x \text{ 方向: } \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) + \frac{\partial}{r\partial r}(r\rho uv) = 2\frac{\partial}{\partial x}\left[(\mu + \mu_t)\frac{\partial u}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{r\partial r}\left[r(\mu + \mu_t)\frac{\partial u}{\partial r}\right]$$

① 西北工业大学 802 教研室, 西安 710072

② 西安交通大学, 西安 710049

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{r \partial r} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{2\partial}{\partial x} \left[\frac{\tau_0}{G^{1/2}} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{r \partial r} \left[r \frac{\tau_0}{G^{1/2}} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \rho \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \tag{2.2}
 \end{aligned}$$

r 方向: $\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{r \partial r}(r \rho v^2) = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + 2 \frac{\partial}{r \partial r} \left[r (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial r} \right]$ 流流

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial r} \right] + \frac{2\partial}{r \partial r} \left[r \frac{\tau_0}{G^{1/2}} \frac{\partial v}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\tau_0}{G^{1/2}} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \tag{2.3} \\
 & - 2 \left(\mu + \mu_t + \frac{\tau_0}{G^{1/2}} \frac{v}{r^2} - \frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r \right)
 \end{aligned}$$

湍动能方程: $\frac{\partial}{\partial x}(\rho u K_\tau) + \frac{\partial}{r \partial r}(r \rho K_\tau) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right)$

为了使方程(3.1)最终化为相邻节点上未知值间的代数方程,首先对控制容积积分方程(3.1),然后采用混合差分格式,对控制界面的 ϕ 值及其一阶导数规定取值后,则可得:

$$A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S \quad (3.2)$$

其中:

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S$$

$$A_N = \frac{1}{2} \left[D_n \left(\frac{r}{2} \left| \frac{F_n}{2} \right| + \left| D_n - \left| \frac{F_n}{2} \right| \right| \right) - \frac{F_n}{2} \right]$$

$$A_S = \frac{1}{2} \left[D_s \left(\left| \frac{F_s}{2} \right| + \left| D_s - \left| \frac{F_s}{2} \right| \right| \right) + \frac{F_s}{2} \right]$$

$$A_E = \frac{1}{2} \left[D_e \left(\left| \frac{F_e}{2} \right| + \left| D_e - \left| \frac{F_e}{2} \right| \right| \right) - \frac{F_e}{2} \right]$$

$$A_W = \frac{1}{2} \left[D_w \left(\left| \frac{F_w}{2} \right| + \left| D_w - \left| \frac{F_w}{2} \right| \right| \right) + \frac{F_w}{2} \right]$$

其中, D, F 分别为界面上的扩导和流量。

2 压力校对方程

为了求得满足连续方程和动量方程的压力场和速度场,需要采用压力修正算法,压力修正方程可由连续方程和动量方程联立求得:

$$A_P P_P = A_E P_E + A_W P_W + A_N P_N + A_S P_S + b \quad (3.3)$$

其中:

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S$$

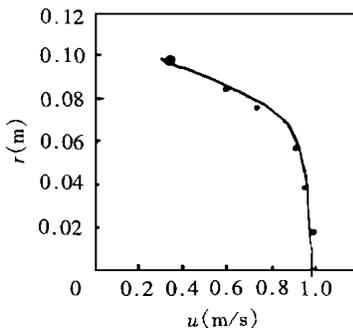
$$A_E = (r \rho \Delta r) e d e, \quad A_W = (r \rho \Delta r) w d w$$

$$A_N = (r \rho \Delta x) n d n, \quad A_S = (r \rho \Delta x) s d s$$

$$b = [(r \rho u^*)_w - (r \rho u^*)_e] \Delta r + [(r \rho v^*)_s - (r \rho v^*)_n] \Delta x$$

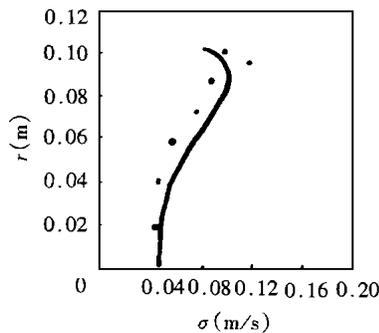
§ 4. 结果与分析

为了验证本文提出的宾汉流体湍流模型及数值算法的可行性,本文对文献[5]中的直圆管内宾汉流体湍流流动进行了数值计算,得到了宾汉流体速度分布和湍流强度分布,并与实验结果进行了比较,见图1、2,从图中可以看出,计算值与实验结果吻合较好。



$Re = 57300$

图1 流速分布



$Re = 57300$

图2 湍流强度分布

本文所计算的直圆管突扩通道示意图如图 3 所示, $r_1 = 25\text{mm}$, $r_2 = 47.6\text{mm}$, $L = 900\text{mm}$, $L_A = 750\text{mm}$, 网格划分如图 4 所示, 计算采用了 60×60 个节点, 节点的布置为径向渐密, 轴向渐稀。

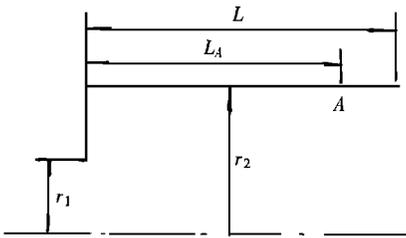


图 3

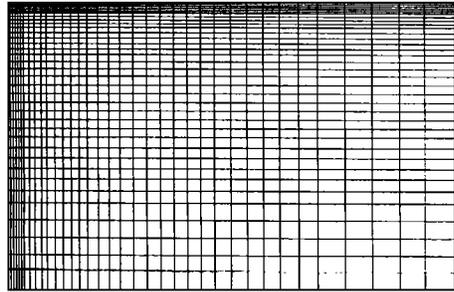
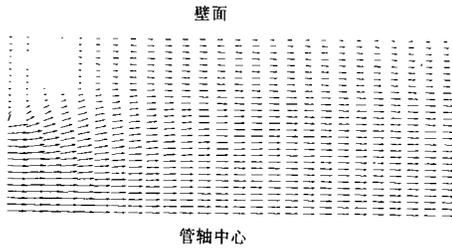
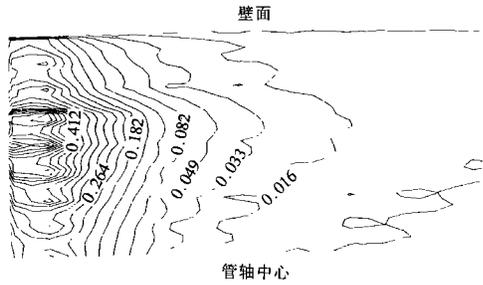


图 4 计算网格



$Re = 51000$

图 5 速度矢量图



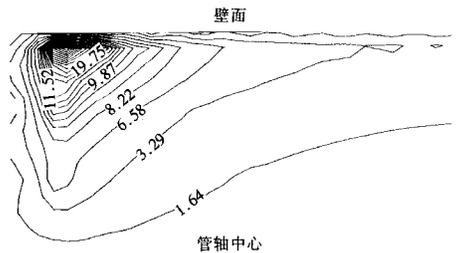
$Re = 51000$

图 6 紊动能等值线图

计算所用的宾汉流体屈服应力为 $\tau_0 = 11.2\text{N/m}^2$, 塑性粘度为 $\mu = 375 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{S/m}^2$, 流量为 $Q = 15 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ 。

假定计算区域进口紊动能 $K_{\tau_{in}} = 0.01 u_{in}^2$, 进口紊动能耗散率 $\epsilon_{in} = 0.01 K_{\tau_{in}}^2$ 。边壁处 $u = v = 0$, $K_{\tau} = \epsilon_{\tau} = 0$ 。计算区域出口采用局部单向化方式处理。轴对称处: $\partial u / \partial y = 0, \partial K_{\tau} / \partial y = 0, \partial \epsilon_{\tau} / \partial y = 0, v = 0$ 。

图 5 给出了计算区域内的速度矢量图, 从图中可以看出: (1) 在突台的后面有旋涡存在; (2) 在管轴处流速梯度为零, 该区域有流核存在; (3) 在计算域出口处, 湍流流动充分发展, 流速分布几乎不变。



$Re = 51000$

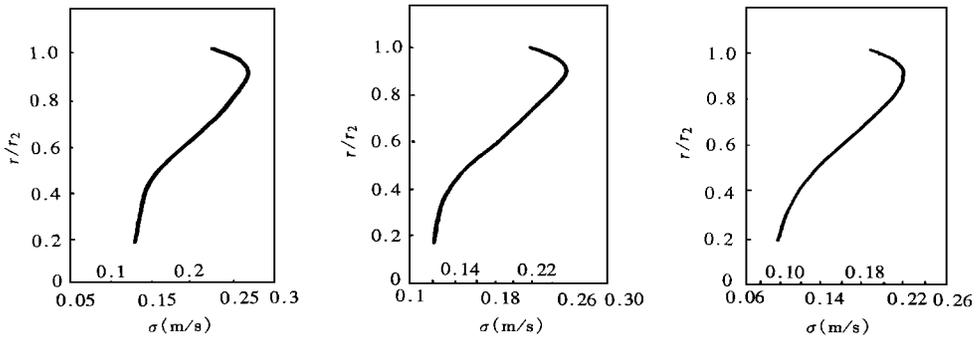
图 7 紊动能耗散率的等值线图

图 6 给出了紊动能等值线图, 从图中可以看出, 在进口处紊动能最强, 随着轴向距离的渐增, 紊动能等值线值逐渐减小, 从进口的 0.412 减小到 0.016。

图 7 给出了紊动能耗散率的等值线图,从图可以看出,突台后面回流区内,紊动能耗散率最大值为 19.76,随着离回流区距离的增加,紊动能耗散率逐渐减小。

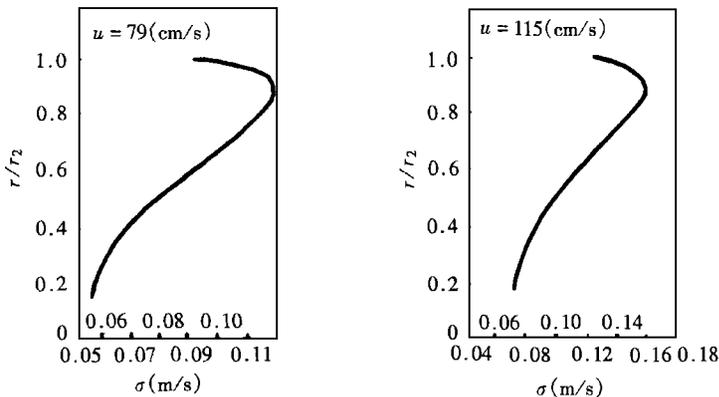
图 8 给出了图 3 中断面 A 处紊动强度 σ ($\sigma = \sqrt{2K\tau}$) 的分布图线,从图中可以看出, (a): 当屈服应力和塑性粘度分别从 $5.5\text{N}/\text{m}^2$, $16.5 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$ 增加到 $9.2\text{N}/\text{m}^2$, $27.0 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$ 时,断面最大紊动强度 σ_{max} 从 $0.264\text{m}/\text{s}$ 减小到 $0.216\text{m}/\text{s}$ 。(b): 随着屈服应力和塑性粘度的增加,断面紊动强度的分布趋于非均匀化。

图 9 给出了屈服应力为 $11.2\text{N}/\text{m}^2$, 塑性粘度为 $34.2 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 的宾汉流体在不同流速下紊动强度 σ 的分布曲线,从图中可以看出, (a): 随着流速的增大,断面紊动强度最大值由 0.118 增加到 0.156 ; (b): 随着流速的增大,紊动强度的分布趋于均匀化。



(a) $\tau_0 = 5.5\text{N}/\text{m}^2$, $Re = 115000$, $\mu = 16.5 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$, (b) $\tau_0 = 6.86\text{N}/\text{m}^2$, $Re = 94700$, $\mu = 20.1 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$, (c) $\tau_0 = 9.2\text{N}/\text{m}^2$, $Re = 70500$, $\mu = 27.0 \times 10^{-4}\text{N} \cdot \text{S}/\text{m}^2$,

图 8 紊动强度分布曲线



(a) $Re = 22000$

(b) $Re = 32000$

图 9 紊动强度的分布曲线

§ 5. 结 论

(1) 本文所建立的宾汉流体湍流流动控制方程能够反映出直圆管突扩通道内宾汉流体的湍流流动特征。

(2) 随着屈服应力和塑性粘度的增加, 紊动强度逐渐减小, 紊动强度的分布趋于非均匀化。

(3) 随着流速的增大, 宾汉流体紊动强度分布趋于均匀化。

参 考 文 献

- 1 蔡树棠、蒋贻安, 宾汉流体与塞流的衔接问题, 应用数学和力学, **8**(3) (1987), 193—198.
- 2 王兆印、任裕民、王兴奎, 宾汉流体泥浆湍流的结构特征, 水利学报, (12) (1992), 9—16.
- 3 孟令杰、孔珑, 水煤浆在圆管内流动动能修正系数的确定方法, 工程热物理学报, **14**(2) (1993), 219.
- 4 T. Toshihiro, D. Kouzou and T. Yukio, Flow of non-Newtonian fluids in curved pipe, JSME International Journal, Series, **33**(3) (1990), 476—485.
- 5 陈立, 高含沙圆管流的紊动强度分布, 水动力学研究与进展, 增刊 **8**(12) (1993), 526—533.

A Numerical Study of Bingham Turbulent Flow in Sudden Expansion Straight Circular Pipe

Hu Chunbo

(North Western Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

Wei Jinjia Jiang Peizheng Miao Yongmiao

(Chemical Engineering School, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

Abstract

The control equations for the turbulent flow of Bingham fluid are established according to Bingham fluid constitution equation. Pressure field and velocity field are correlated by pressure correction equation. The numerical computations are performed on Bingham fluid turbulent flow in sudden expansion straight circular pipe, and the flow mechanisms are discussed.

Key words Bingham fluid, turbulence, numerical study, flow mechanisms