

被动应力状态下非流态化颗粒流通过孔口的流率*

李洪钟** 柳 华 孙敦明

(中国科学院化工冶金研究所, 北京 100080)

摘 要 讨论了非流态化气固流通过孔口流率的理论模型中主动应力状态及被动应力状态模型参数符号的选取原则, 导出被动应力状态下颗粒流通过孔口流率的理论方程。将理论计算结果与大量实验数据比较, 归纳出被动应力状态下孔口流率的数值解法与简化积分解法的修正系数经验方程。

关键词 非流态化气固流 应力状态 孔口流率

1 引 言

本文作者曾在文献[1,2]应用非流态化气固两相流理论, 提出了颗粒物料通过孔口流率的两种理论计算方法: 微分方程的数值解法和简化的积分解法, 并将理论预测与各种条件下实验数据相比, 得出了孔口流率修正系数的经验方程。然而在上述理论分析中, 未充分讨论颗粒物料在管中流动时所处的应力状态对孔口流率的影响, 在计算孔口流率修正系数时, 均以主动应力状态处理。而实际上经常出现的是被动应力状态。为此, 本文讨论不同应力状态下各模型参数的符号选取, 并着重研究固体颗粒流处于被动应力状态时通过孔口的流率及相应的修正系数。

2 流动模型与应力状态

固体颗粒物料在管中的流动方向可分为顺重力流(下流)和逆重力流(上流)。颗粒流所处的应力状态可分为主动和被动应力状态。所谓主动应力状态是指应力场中最大主应力的方向靠近垂直方向而最小主应力的方向则靠近水平方向; 所谓被动应力状态是指应力场中最大主应力的方向靠近水平方向而最小主应力的方向则靠近垂直方向。根据前人的工作^[3~7], 颗粒物料上流时, 一般处于主动应力状态, 仅当壁摩擦力很大时, 才可能出现被动应力状态; 而当颗粒物料下流时, 一般处于被动应力状态, 仅当壁摩擦力很小时, 才可能出现主动应力状态。主动与被动应力状态在模型计算中的主要区别在于当用公式^[2,6,8]计算模型参数中的一系列应力比值时, 对某些参数所选取的符号不同。为便利读者, 现将文献[2]所列各应力比的计算式重复如下

$$\frac{\tau_{vw}}{(\sigma_z)_{vw}} = \frac{\sin 2\beta \sin \delta}{1 - \cos 2\beta \sin \delta} = E_v \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_{vw}}{(\sigma_z)_{vw}} = \frac{1 + \cos 2\beta \sin \delta}{1 - \cos 2\beta \sin \delta} = H_v \quad (2)$$

$$\frac{\tau_{sw}}{(\sigma_z)_{sw}} = \frac{\sin 2\beta \sin \delta}{1 - \cos (2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta} = E_s \quad (3)$$

1993-03-22收到初稿, 1993-07-03收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

** 通讯联系人。

$$\frac{\sigma_{sw}}{(\sigma_z)_{sw}} = \frac{1 + \cos 2\beta \sin \delta}{1 - \cos(2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta} = H, \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{vw}}{\sigma_{vw}} = \frac{\tau_{sw}}{\sigma_{sw}} = \frac{\sin 2\beta \sin \delta}{1 + \cos 2\beta \sin \delta} = \tan \varphi = \mu \quad (5)$$

$$\frac{(\sigma_z)_{sw}}{\bar{\sigma}_z} = \frac{\cos^2 \delta [1 - \cos(2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta]}{[1 + \cos(2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta] (1 + \sin^2 \delta \pm y_1 \sin \delta)} = D, \quad (6)$$

$$\frac{(\sigma_z)_{vw}}{\bar{\sigma}_z} = \frac{\cos^2 \delta (1 - \cos 2\beta \sin \delta)}{(1 + \cos 2\beta \sin \delta) (1 + \sin^2 \delta \pm y_2 \sin \delta)} = D_c \quad (7)$$

$$\frac{(\sigma_z)_{sw}}{\bar{\sigma}_z} = \frac{\cos^2 \delta [1 - \cos(2\beta - 2\alpha) \sin \delta]}{[1 + \cos(2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta] (1 + \sin^2 \delta \pm y_3 \sin \delta)} = D_s \quad (8)$$

$$\frac{(\sigma_z)_{vw}}{\bar{\sigma}_z} = \frac{\cos^2 \delta (1 - \cos 2\beta \sin \delta)}{(1 + \cos 2\beta \sin \delta) (1 + \sin^2 \delta \pm y_4 \sin \delta)} = D_v \quad (9)$$

上述各式中

$$2\beta = \frac{\pi}{2} + \varphi \pm \cos^{-1} \frac{\sin \varphi}{\sin \delta} \quad (10)$$

$$y_1 = \frac{4}{3c_1} [1 - (1 - c_1)^{3/2}] \quad (11)$$

$$y_2 = \frac{4}{3c_2} [1 - (1 - c_2)^{3/2}] \quad (12)$$

$$y_3 = \sqrt{1 - c_1} + \frac{1}{\sqrt{c_1}} \sin^{-1} \sqrt{c_1} \quad (13)$$

$$y_4 = \sqrt{1 - c_2} + \frac{1}{\sqrt{c_2}} \sin^{-1} \sqrt{c_2} \quad (14)$$

$$c_1 = \tan^2 \eta / \tan^2 \delta \quad (15)$$

$$c_2 = \tan^2 \varphi / \tan^2 \delta \quad (16)$$

$$\eta = \tan^{-1} \frac{\sin(2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta}{1 + \cos(2\beta \mp 2\alpha) \sin \delta} \quad (17)$$

上述各式中 $\pm$ 及 $\mp$ 符号选择的规则是:

(1) 当为移动床上流操作时, 上述各式中之 $(2\beta \pm 2\alpha)$ 应取 $(2\beta - 2\alpha)$; 反之, 当为移动床下流时, 则应取 $(2\beta + 2\alpha)$ 。

(2) 当为主动应力状态时, 上述各式的 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 以及式(10)中的 $\cos^{-1}(\sin \varphi / \sin \delta)$ 之前取十号; 反之, 当为被动应力状态时, y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 及 $\cos^{-1}(\sin \varphi / \sin \delta)$ 之前取一号。

3 孔口流率修正系数 C_o

由于被动应力状态与主动应力状态的模型参数的符号选择不同, 因此孔口流率的理论计算值不等, 孔口流率修正系数 C_o 也不相同。若设模型计算的孔口流率为 G_p , 修正后的孔口流率为 G_{pc} , 则有

$$G_{pc} = C_o G_p \quad (18)$$

为了求得计算 C_0 的经验方程, 在内径 25.5mm、长 5.26m 的玻璃管中进行了各种条件下的孔口排料实验, 测定了海砂、微球型硅胶、Cr-P 催化剂 3 种不同性质物料(物性参数见参考文献[1]), 4 种不同床倾斜度(0° , 15° , 30° , 45°), 5 个不同孔口直径(8.8mm, 13.3mm, 16.0mm, 17.6mm, 19.6mm), 以及不同负压差条件下的孔口流率 G_{pm} , 将实验测定值 G_{pm} 与对应条件下的被动应力状态模型计算值 G_p 对比, 取得各种不同条件下的修正系数 C_0 , 经因次分析及多元线性回归, 求得了如下计算被动应力状态下孔口流率的修正系数 C_0 的经验方程:

(1) 对应于微分方程的数值解法

$$C_0 = (1.23035 - 0.0003587\rho_p/\rho_f) + (0.172128 - 0.0000791\rho_p/\rho_f)\Phi \\ - (0.41059 - 0.00006955\rho_p/\rho_f)D_0/D - (0.68159 - 0.0002805\rho_p/\rho_f)\cos\theta \quad (19)$$

式(19)对 240 组实验数据的平均偏差为 $\pm 9.0\%$ 。

(2) 对应于简化的积分解法

$$C_0 = 0.434726 + 0.174031\Phi + 0.552098D_0/D - 0.41608\cos\theta \quad (20)$$

式(20)对 268 组实验数据的平均偏差为 $\pm 10.0\%$ 。

式(19)和式(20)是基于因次分析和大量实验数据回归而得的无因次数组之间的关联式, 因此它的适用范围不限于本实验的范围, 然而应指出, 本文的理论分析是基于非流态化气固流的稳定流动, 实现稳定流动的条件如 Φ 、 D/d_p 、 D_0/D 、 D_0/d_p 的临界值必须满足, 详见参考文献[9]。

4 结 论

本文讨论了非流态化气固流通过孔口流率的理论模型中主动应力状态及被动应力状态模型参数符号的选取原则; 并且着重研究被动应力状态下的孔口流率修正系数; 分别提出了对应于微分方程数值解法及简化积分解法的孔口流率修正系数的经验方程。可作为文献[1]的续篇, 供工程设计和工业操作参考。

符 号 说 明

C_0 ——孔口流率修正系数	p ——流体压力, Pa
D ——管道直径, m	$\Delta p/\Delta z$ ——床的平均压降梯度, Pa/m
D_c ——圆柱形床截面正应力分配系数	z ——至顶部的轴向距离, m
D_0 ——孔口直径, m	α ——锥形的半锥角, $(^\circ)$
D_s 、 D_t 、 D_v ——分别为方锥形、圆锥形、方柱形床截面正应力分配系数	β ——最大主应力方向与垂直于壁面方向间夹角, $(^\circ)$
d_p ——平均颗粒直径, m	δ ——颗粒物料的有效内摩擦角, $(^\circ)$
E_s 、 E_v ——分别为倾斜壁上和垂直壁上的对比剪应力	ϵ_0 ——垂直移动床无压差自由流空隙率
G_p 、 G_{pc} 、 G_{pm} ——分别为固体颗粒质量流率的理论计算值、修正值和实测值, kg/s	θ ——床轴线与垂直方向间的夹角, $(^\circ)$
g ——重力加速度($g=9.81\text{m/s}^2$)	μ ——物料与壁间的摩擦系数($\mu=\tan\varphi$)
H_s 、 H_v ——分别为倾斜壁上和垂直壁上的对比正应力	ρ_f ——流体密度, kg/m^3
	ρ_p ——颗粒密度, kg/m^3
	σ_{sw} 、 σ_{vw} ——分别为物料作用于倾斜壁和垂直壁上的正应力, Pa

- | | |
|--|--|
| σ_x ——床层横截面上轴向接触正应力, Pa | 的切应力, Pa |
| $\bar{\sigma}_x$ ——整个床层截面上 σ_x 的平均值, Pa | Φ ——无因次压降梯度 |
| $(\sigma_x)_{iw}$ ——靠近倾斜壁面的 σ_x 值, Pa | $\Phi = (\Delta p / \Delta z) / [\rho_p (1 - \epsilon_0) g \cos \theta]$ |
| $(\sigma_x)_{vw}$ ——靠近垂直壁面的 σ_x 值, Pa | φ ——物料与管壁间的摩擦角, ($^\circ$) |
| τ_{iw} 、 τ_{vw} ——分别为物料作用于倾斜壁和垂直壁上 | |

参 考 文 献

- 1 李洪钟. 化工学报, 1992, 43(6): 664~672
- 2 Li H. Powder Technology, 1992, 73(2): 147~156
- 3 Walker D M. Chem Eng Sci, 1966, 21(11): 975~997
- 4 Walters J K. Chem Eng Sci, 1973, 28(1): 13~21
- 5 Walters J K. Chem Eng Sci, 1973, 28(3): 779~789
- 6 Li H, Kwauk M. Chem Eng Sci, 1989, 44(2): 249~259
- 7 Li H, Kwauk M. Chem Eng Sci, 1989, 44(2): 261~271
- 8 李洪钟. 高校化学工程学报, 1990, 4(1): 321~334
- 9 郭天民, 宋瑜. 化工学报, 1960(2): 97~113

NONFLUIDIZED PARTICLE FLOW RATE THROUGH AN ORIFICE UNDER PASSIVE STRESS STATE

Li Hongzhong, Liu Hua And Sun Dunming

(Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

Abstract The theoretical calculation methods, i. e., the numerical method and the simplified integral method, for predicting particle flow rate through an orifice have been established by using the theory of nonfluidized gas-particle two phase flow. The active stress state and the passive stress state of the particle flow are discussed. The choice of the signs $\pm$ and $\mp$ in the theoretical equations is also proposed. The empirical equations for evaluating the correctness factor, C_o , which is used to make correction for the particle flow rate G_p calculated by the numerical method and the simplified integral method under the passive stress state, are also given on the basis of regression analysis for experimental data. The predicted value of particle flow rate is in good agreement with the experimental data.

Keywords nonfluidized gas-particle flow, stress state, flow rate through an orifice