

大颗粒浆体管道流动速度分布与滑移速度研究

赵利安,许振良

(辽宁工程技术大学 矿业学院,辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了研究大颗粒浆体在管道中的运动规律,通过对大颗粒的受力情况进行计算和分析,发现大颗粒运动过程中存在额外作用力,提出了采用修正系数 K 来描述该作用力的研究方法。通过数据拟合,给出了水平管道修正系数 K 的表达式。在此基础上,结合固体颗粒受力平衡方程和清水、固体颗粒动量方程、清水管内流速度分布公式,给出了水平管道大颗粒悬浮时浆体速度分布和滑移速度计算模型。模型计算结果与实测结果的对比表明,速度分布实测值和模型计算值的偏差均小于 3%,且考虑修正系数 K 后,清水速度相对增大,固体颗粒速度相对变小;液固滑移速度计算值相对增大,其与实测值的偏差均小于 10%,且更加接近实测值。

关键词: 浆体; 速度分布; 大颗粒; 水平管道; 滑移速度

中图分类号: TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)03-0116-04

Velocity distribution and slip velocity of large particle slurry flow in pipe

ZHAO li'an, XU Zhenliang

(College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Through analysing the forces acted on large particle in pipe, investigate the flow law for large particle slurry in pipe. The results show that there are additional force acted on particle, which can be described by modified coefficient K . Through data fitting calculation method, provide the expression of modified coefficient K in horizontal pipe. Through equilibrium equation of force on particle, moment equations for water and solid particle, water velocity distribution formula in pipe, design velocity distribution model and slip velocity model for large particle slurry when solid particle is in suspension. Comparison of model calculating result and experiment result show that the maximum deviation between calculated values by model for velocity distribution and experimental values is less than 3 percent. Considering the coefficient K , calculation values of water velocity increase, calculation values of solid velocity reduce. The model calculating result of slipping velocity increase, and maximum deviation between model calculated values and experimental values is less than 10 percent, and the calculation values is much closer to the experimental values.

Key words: slurry; velocity distribution; coarse particle; horizontal pipe; slip velocity

0 引 言

矿山尾矿处理、海洋采矿及水力采煤等均涉及大粒度物料的管道输送问题。众多实验和理论

研究发现,大颗粒和水流之间存在着较明显的滑移速度。众多学者对液固两相速度分布进行了研究^[1-4]。有的提出经验公式,有的采用数值解法,但大都对固体颗粒运动阻力考虑不完全,适合流

收稿日期: 2013-01-29 责任编辑: 孙淑君

作者简介: 赵利安(1973—),男,陕西西安人,讲师,博士,主要从事采矿工程和浆体管道输送理论研究。E-mail: anlizhao2@163.com。

引用格式: 赵利安,许振良.大颗粒浆体管道流动速度分布与滑移速度研究[J].洁净煤技术,2013,19(3):116-119.

动条件单一,适用范围窄,更重要的是尚未完全揭示粗颗粒的颗粒大小对速度分布、滑移速度的影响。

1 粗颗粒垂直管道受力分析

固体颗粒密度为 ρ_s , 球等价直径为 d_e , 流经固体颗粒间的液体的速度为 v_i , 液流的平均上升速度 v_m , 水的密度和黏度分别为 ρ 和 u 。一般认为, 流态化实验中只有颗粒受到的作用力有: 固体颗粒的重力 f_G , 流体对颗粒的浮力 f_B , 来自液体的抵抗阻力 f_{Di} , 颗粒体积浓度为 C , 管道直径为 D , 此外, 颗粒还受到其他颗粒的干涉作用力 f_{hi} 。则根据颗粒受力平衡关系, 存在

$$f_G = f_{Di} + f_{hi} + f_B \quad (1)$$

上式变形为

$$w_b = f_{Di} + f_{hi} \quad (2)$$

其中

$$w_b = \frac{\pi}{6} d_e^3 (\rho_s - \rho) g \quad (3)$$

$$f_{Di} = C_{Di} \frac{\pi d_e^2}{4} \times \frac{v_i^2}{2} \rho \quad (4)$$

$$\frac{f_{hi}}{w_b} = 1 - (1 - C)^{2(n-1)} \frac{\left\{ \sqrt{Re\mu\alpha} + \sqrt{Re\mu\alpha^2 + \frac{4\sqrt{48\alpha\beta}}{(1-C)^{(n-1)}}} \right\}^2}{(\sqrt{Re\mu\alpha} + \sqrt{Re\mu\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta}})^2} \quad (5)$$

式(3)中, w_b 为有效重力。式(4)中, C_{Di} 是基于 v_i 的阻力系数。

采用夏建新^[5]的粗颗粒流态化实验数据, 对公式(2)的平衡关系进行验证。计算结果表明: 大多数情况下, 有效重力 w_b 都大于拖曳力 f_{Di} 和颗粒间干涉力 f_{hi} 之和, 即对于直径为 5, 15, 25 mm 的颗粒, 式(2)不成立^[6]。

计算和分析表明, 额外修正系数与固体颗粒的浓度 C 、平均速度 v_m 和颗粒直径 d 及管道直径 D 有关, 考虑到额外修正系数 K 作为无量纲量, 因而其形式可以暂定为

$$K = f(1 - C) \frac{v_m d}{v_i D} \quad (6)$$

2 额外阻力系数推导

根据作者前期的研究结果^[6], 考虑到修正系数 K 的情况, 水平管道颗粒处于悬浮时, 存在如下平衡

关系

$$f_D - Kf_h = 0 \quad (7)$$

其中 f_D, f_h 计算时, 仍可采用式(4)和式(5), 此时, 式(4)中 v_i 理解为水平管道滑移速度 $v_w - v_s$, 式(5)中的 C_{Di} 为基于滑移速度 $v_w - v_s$ 的阻力系数, 而 C 应为管内浓度 q 。

式(7)可以变形为

$$K = \frac{f_D}{f_h} \quad (8)$$

利用式(8)计算各种情况下的 K 值, 进行非线性拟合, 可求出式(6)的具体形式。此处采用朝仓国臣^[7], Newitt^[8], Scarlett^[9], Gillies^[10], 许振良^[11], 黄钊林^[12]等的实验数据, 计算出不同物料、悬浮条件下的额外修正系数 K 的值, 拟合曲线为

$$K = 0.37 \log \left((1 - C) \frac{v_m d}{v_i D} \right) + 1.8321 \quad (9)$$

3 速度分布计算模型推导

根据式(4)、式(5)和式(7), 并考虑到粗颗粒固体的额外修正系数 K , 可以得到颗粒悬浮时, 存在以下关系

$$v_w - v_s = \sqrt{\frac{8Kf_h(Z)}{\pi d_e^2 C_{Di} \rho}} \quad (10)$$

式中 Z 为过管道中心垂线上任意点到管道底部距离, mm。

在微小时间 Δt 内, 从断面积为 dA 的管道中排出的质量为 M_s 的固体颗粒与质量为 M_w 的清水动量平衡方程和连续性方程分别为^[13]

$$v = v_w + [1 - 0.56\psi(1)] \frac{\delta q}{(1 - q) v_w} v_s^2$$

$$\left[1 + 33k_4 \lambda \frac{k_3 \sqrt{L_a g}}{v_m} \left(1 - \frac{1}{\delta} \right)^2 \right]^2 \quad (11)$$

$$v_m = v_w (1 - q) + v_s q \quad (12)$$

管道内水流指数分布公式为^[14]:

$$v = v_0 \left(\frac{R - r}{R} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (13)$$

式中, R 为管道半径, r 为距离管道中心的距离, v_0 与平均速度 v 的关系为

$$v_0 = \frac{v}{0.817} \quad (14)$$

在式(10)、(11)、(12)和(13)中, 变量 q, v_w, v_s, v 均可以看作是到管道底部距离 Z 的函数, 因此, 通过式(10)、(11)、(12)和(13)联合求解, 可以求出

粗颗粒管道固体颗粒和清水互相作用后清水、固体颗粒和浆体速度分布以及清水与固体颗粒作用前的速度分布,进一步可以得到液固滑移速度 $v_w - v_s$ 。

显然,式(10)、(11)、(12)中,若将各个速度 v_w 、 ρ_s 、 ρ 理解为平均意义上的速度 v_w 、 ρ_s 和 ρ ,各公式仍成立,从而可以得到液固平均滑移速度 $v_w - v_s$ 。

表1 用于检验速度分布和平均滑移速度模型的流动实验条件及参数

研究者	颗粒直径 D/mm	颗粒密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	面积指数 κ_1	物料 种类	内径 D/mm	体积浓度 C	平均速度 $v_m/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
朝仓国臣等	1.08	2480	1.0	玻璃	50	0.181 ~ 0.232	2.0 ~ 1.8
Newitt 等	1.55	2670	1.5	砾石	25.4	0.0205 ~ 0.2000	1.875 ~ 2.730
Gillies	0.29	2650	1.5	河砂	53	0.15 ~ 0.40	3.05
Durand	2.04	2620	1.5	砾石	150	0.07	3.92 ~ 5.37
Scarlett	0.58	2650	1.5	河砂	40	0.08 ~ 0.17	1.05 ~ 2.88

图1为根据朝仓国臣、川村毅等流动实验数据的浆体速度分布计算结果。由朝仓国臣、川村毅的实验结果可知,浆体流动状态为颗粒完全悬浮流动状态。计算结果表明,浆体平均速度为1.80 m/s和2.00 m/s时,计算值和实测值相差较小,最大偏差均不超过2.7%。

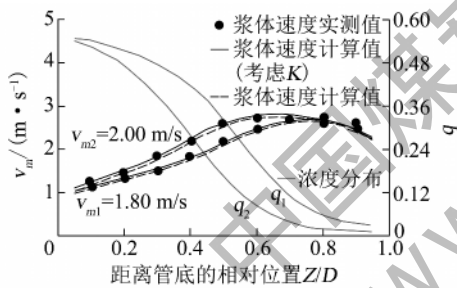


图1 浆体速度分布计算值和实测值比较

图2为根据Newitt数据的计算值与实验值的对比。根据Newitt实验可知,浆体的流动条件均为颗粒完全悬浮运动状态。Newitt实验只测定了清水的速度分布,故图2中只显示了清水速度分布计算值与实测值的对比,结果表明清水速度分布实测值和计算值的偏差均小于3%,而且考虑K后,清水速度相对增大。

图3为根据Gillies实验数据的固体颗粒速度计算值和实测值的对比。模型计算值与Gillies实测值很接近,最大误差均小于3%,且考虑修正系数K后,颗粒速度相对减小。

图4是采用Durand数据绘制的平均速度为3.92 m/s和5.37 m/s时,各点滑移速度 $v_w - v_s$ 计算结果。由图4可以看出,考虑干涉力修正系数K

4 模型计算结果与实测结果对比

为了检验作者提出的模型,此处采用朝仓国臣^[7], Newitt^[8], Gillies^[10], Durand^[15]和赵利安^[16]等的实验数据,对所提出的模型进行验证。表1列出了各位学者的流动实验条件和若干参数。

后,液固滑移速度相对增大。

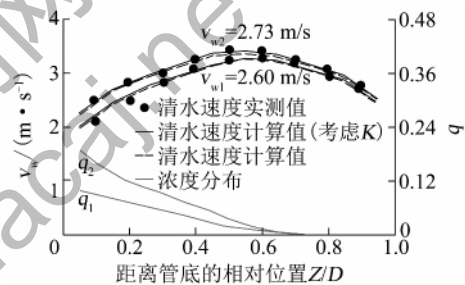


图2 清水速度分布计算值和实测值比较

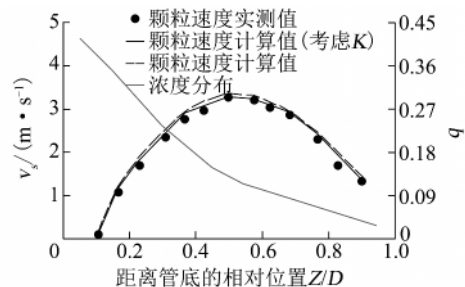


图3 颗粒速度分布计算值和实测值比较

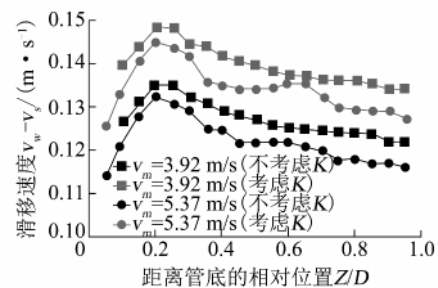


图4 系数K对滑移速度的影响

表2和表3分别为Scarlett和Gillies的液固滑移速度 $v_w - v_s$ 的实测值与模型计算值的对比。

表2 Scarlett 实测平均滑移速度与计算值的对比

颗粒浓度 C	滑移速度 实测值 $(v_w - v_s) /$ $(m \cdot s^{-1})$	计算滑移速度 (不考虑 K) $(v_w - v_s) /$ $(m \cdot s^{-1})$	计算滑移速度 (考虑 K) $(v_w - v_s) /$ $(m \cdot s^{-1})$
0.17	0.23	0.1445	0.213
0.16	0.24	0.1537	0.236
0.12	0.26	0.1676	0.245
0.08	0.33	0.2930	0.316

表3 Gillies 的平均滑移速度实测值与计算值比较

颗粒浓度 C	滑移速度 实测值 $(v_w - v_s) /$ $(m \cdot s^{-1})$	计算滑移速 (不考虑 K) $(v_w - v_s) /$ $(m \cdot s^{-1})$	计算滑移速度 (考虑 K) $(v_w - v_s) /$ $(m \cdot s^{-1})$
0.132	0.259	0.1819	0.2480
0.282	0.108	0.0891	0.1107
0.294	0.157	0.1085	0.1592
0.356	0.087	0.0680	0.0893
0.388	0.335	0.2958	0.3152

从表2可以看出,考虑修正系数 K 后,滑移速度的计算偏差最大为 7.4%,相对于不考虑 K 滑移速度有所增大,更加接近实测值。从表3可以看出,计算值和实测值的偏差均较小,均在 10% 以内,同样,考虑修正系数 K 后,滑移速度相对增大,更加接近实测值。

5 结 论

1) 粗颗粒在清水中流动时,受到额外阻力的作用,该阻力与参数 $(1 - C)$, v_m 和 d/D 有关,提出了采用修正系数 K 来描述额外阻力的方法。通过数据拟合,给出修正系数 K 的具体形式;

2) 通过固体颗粒受力平衡方程和清水、固体颗粒动量方程、清水速度分布公式等,给出了粗颗粒速度分布和滑移速度的计算模型;

3) 速度分布模型的验证结果表明,实测值和计算值的偏差均小于 3%。且考虑系数 K 后,清水速度相对增大,液固滑移速度相对增大,接近实测值,而固体颗粒速度相对变小。滑移速度的验证结果表明,考虑系数 K 后,液固滑移速度相对增大,更加接近实测值。

参考文献:

[1] N. Sad Chemloul, K. Chaib, K. Mostefa. Simultaneous measurements of the solid particles velocity and concentration profiles in two phase flow by pulsed

ultrasonic doppler velocimetry [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2009, 31 (4): 11 - 17.

[2] J Syrjanen, S Haavisto, A Koponen et. al. Particle velocity and concentration profiles of sand-water slurry in stirred tank-measurements and modelling [C]//Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne: CSIRO 2009: 1 - 6.

[3] Mario R, Rojas, A Eduardo Saez. Analysis of Horizontal pipeline flow of settling dense slurries [C]//Proceedings of the 7th international conference on multiphase flow IC-MF 2010, Tampa, FL, USA: Science press 2010: 1 - 8.

[4] Thomas Walski, Joseph Falco. Transport of large solids in unsteady flow in sewers [J]. Urban Water Journal 2011, 8 (3): 179 - 187.

[5] 夏建新. 大洋多金属结核水力提升两相流体动力学及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000: 20 - 22.

[6] 王铁力, 赵利安. 浆体管道中大颗粒干涉力研究 [J]. 洁净煤技术 2011, 17(1): 122 - 125.

[7] 朝仓国臣, 川村 毅, 中岛 岩. 水平管内 の 粒子速度 および 浓度分布 の シミュレーション [C]//日本矿业会春季大会讲论要旨集. Tokyo: 集英社 2008: 99 - 100.

[8] Newitt, D. M. Richardson J. F., Gliddon, B. J.. Hydraulic Conveying of Solids in Horizontal Pipes [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1955, 33(3): 93 - 113.

[9] B. Scarlett, A. Grimley. Particle velocity and concentration profiles during hydraulic transport in a circular pipes [C]//Hydrotransport 3 - Third International conference on the hydraulic Transport of Solids in Pipes. Colorado: Colorado School of Mines, 1974: D3 - 23 - D3 - 37.

[10] Gillies. Pipeline Flow of Coarse Particle Slurries [D]. Saskatchewan, Canada, 1993.

[11] 许振良. 非均质流速度分布与水力坡度的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 1999.

[12] 黄钊林. 倾斜管道中浆体流动特性的实验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 1988.

[13] 许振良. 管道内非均质流速度分布与水力坡的研究 [J]. 煤炭学报, 1998, 23(1): 91 - 96.

[14] 林建忠. 流体力学 [M], 北京: 清华大学出版社, 2009: 234 - 235.

[15] Durand R. Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes Experimental Research [C]//5th Congress of the International Association of Hydraulic Research. Minneapolis: Minnesota, 1953: 89 - 103.

[16] 赵利安. 大颗粒浆体管内流动规律研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.