

粗砂浆体水平管道流动水力坡度预测研究

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: 为了研究粗砂浆体水平管道流动水力坡度预测问题,通过分析和计算颗粒运动受力平衡关系,提出添加修正系数来修正干涉力的研究方法,并采用若干专家学者的试验数据,拟合出了修正系数的表达式.在此基础上,利用等效阻力模型,给出了粗砂水平管道流动水力坡度的计算模型,并借助相关学者的试验数据对该模型进行了检验.结果表明,模型计算值与实测值的偏差均小于10%,且考虑修正系数后,水力坡度的计算值相对增大,更加接近实测值.说明粗砂颗粒浆体管道中颗粒干涉力需要修正,且由此提出的粗砂颗粒水力坡度模型对于研究粗砂浆体管道输送技术具有一定参考价值.

关键词: 浆体; 水力坡度; 粗砂; 水平管道

中图分类号: TV142

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)01-0071-05

在我国的水库、港口以及江河湖泊等疏浚工程中,泥沙的管道输送是一种重要的输送方法.而输沙管道,尤其是粗砂管道水力坡度的预测,对于浆体泵的选择以及各种输送参数的确定具有重要意义,是管道输送工程的重要研究内容.因此,众多学者对输沙管道的水力坡度进行了研究^[1-5].这些研究中,有的基于经验公式,有的基于前人研究的理论推导,但都未能阐明颗粒,尤其是粗颗粒与细颗粒在管道中的运动规律.本文通过分析粗砂颗粒受力平衡,来研究粗砂颗粒受力情况,在此基础上,研究管道中粗砂浆体水力坡度预测模型.

1 水平管道粗砂运动受力分析

固体颗粒在管道中完成加速过程以后,沉降性浆体就会达到一个稳定的流动状态,水、固体颗粒和沉降性浆体的速度将达到一定的值.此时,固体颗粒的加速度 $dv_s/dt=0$,则可以得到下式^[6]:

$$f_D - f_h - K_4 f_f = 0 \quad (1)$$

式中: f_D 为流体对颗粒的拖曳力, $f_D = C_{Dr} \frac{\pi}{4} d_e^2 \frac{(V_w - V_s)^2}{2} \rho$, C_{Dr} 为阻力系数, V_w 为清水平均流速, V_s 为粗砂颗粒平均速度; ρ 为清水密度; d_e 为颗粒直径; f_h 为其他颗粒的干涉力, $f_h = \left[1 - (1 - q)^{2(n-1)} \frac{(\sqrt{Re_p} \alpha + \sqrt{Re_p \alpha^2 + 4 \sqrt{48} \alpha \beta / (1 - q)^{n-1}})^2}{(\sqrt{Re_p} \alpha + \sqrt{Re_p \alpha^2 + 4 \sqrt{48} \alpha \beta})^2} \right] w_b$; q 为颗粒的管内浓度分布; Re_p 为颗粒雷诺数,计算方法见有关文献^[7], α 和 β 为颗粒斯万逊常数,对于球形颗粒,其值分别为0.6626和5.368; n 为指数,计算方法参照文献^[6]; f_f 为颗粒与管道底部的摩擦力, $f_f = \frac{\pi}{6} d_e^3 f(\rho_s - \rho) g$, f 为颗粒与管道底部的摩擦系数, g 为重力加速度. K_4 为处于滑跳移的颗粒占总颗粒的比例,当颗粒处于完全滑跳移运动时, $K_4 = 1$; 当颗粒处于完全悬浮运动时, $K_4 = 0$; 当颗粒处于部分悬浮,部分滑跳移运动时, $K_4 = 11 V_l / V_m$, 其中 V_l 为颗粒沉降终速度, V_m 为浆体平均速度.

收稿日期: 2012-07-10

作者简介: 赵利安(1973-),男,陕西西安人,讲师,主要从事浆体输送技术及理论、采矿工程方面的研究.

E-mail: anlizhao@163.com

对于小颗粒的情况,式(1)是成立的,而对于大颗粒的情况,有必要进行检验.本文采用朝仓国臣等^[6-9]学者的粗砂试验数据进行计算,试验条件见表1.

表1 用于验证粗颗粒受力平衡的若干流动试验条件

Tab. 1 Test conditions used in testing force balance equation for coarse sand

研究者	颗粒直径 d_c / mm	颗粒密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	面积指数 κ_i	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	1.08	2 650	1.0	粗砂	50	0.181 ~ 0.232	1.8 ~ 2.0
Newitt	1.55	2 650	1.5	粗砂	25.4	0.020 5 ~ 0.037 7	1.87 ~ 2.73
Gillies	0.29	2 650	1.5	河砂	53	0.15 ~ 0.40	1.83 ~ 4.87
Durand	2.04	2 650	1.5	粗砂	150	0.07	2.92 ~ 5.37
Scarlett	0.58	2 650	1.5	粗砂	40	0.08 ~ 0.17	1.05 ~ 2.88

计算结果如图1所示.图1表明,根据公式计算的粗砂颗粒的干涉力 f_h 的值普遍小于水流对颗粒的拖曳力和颗粒受到的摩擦力之差.因此,对于粗颗粒,式(1)存在较大的偏差,偏差存在的原因在于干涉力 f_h 的计算不准确.此处采用修正系数 L 对干涉力进行修正,则式(1)变为:

$$f_D - Lf_h - K_4 f_t = 0 \quad (2)$$

将式(2)变形为:

$$L = \frac{f_D - K_4 f_t}{f_h} \quad (3)$$

通过对若干专家试验数据的分析,发现粗砂颗粒(密度不变)的体积浓度 C ,浆体平均速度 V_m ,颗粒粒径的 d_c 均会对修正系数产生影响^[9-10].考虑到浓度因素习惯用 $1-C$ 表示,且此处颗粒为粗砂颗粒,管道直径 D 的影响也应考虑,以及 L 为无量纲常数,则系数 L 的形式为:

$$L = a(1 - C)^b \left(\frac{V_m}{\sqrt{gD}} \right)^c \left(\frac{d_c}{D} \right)^d \quad (4)$$

利用表1中专家的试验数据,采用式(3)计算了不同条件下的修正系数 L 值,并进行了数据拟合,结果见图2.最后得到修正系数 L 的表达式为:

$$L = 0.37 \log \left((1 - C) \frac{V_m d_c}{V_t D} \right) + 1.832 1 \quad (5)$$

另外,从前面的计算可知,大多数情况下,修正系数 L 的值大于1.

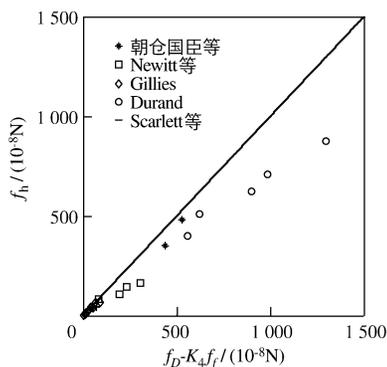


图1 力平衡方程的计算

Fig. 1 Calculation of force balance equation

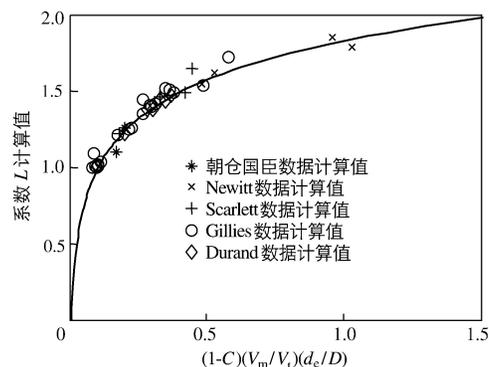


图2 系数 L 和 $(1-C)(V_m/V_t)(d_c/D)$ 的关系

Fig. 2 Relation between coefficient L and $(1-C)(V_m/V_t)(d_c/D)$

研究发现颗粒直径超过0.2 mm后,颗粒的受力情况和运动情况与粒径小于0.2 mm的差异较大^[9].由于式(5)是从粒径为0.29 ~ 2.04 mm的粗砂试验数据得出的,故式(5)只适用于粒径大于0.2 mm的粗砂.

2 粗砂管内流动水力坡度计算模型推导

当管道中的水流处于紊流状态时,水力坡度可以用下式来表示:

$$i = \frac{\lambda}{2gD} V^2 \quad (6)$$

式中: λ 为达西阻力系数; V 为清水与粗砂颗粒发生动量交换前的速度.

对于粗砂浆体而言,当粗砂颗粒处于完全悬浮、部分处于悬浮,部分处于滑、跳移以及颗粒全部滑、跳移运动时,不能用式(6)来计算阻力损失.根据许振良等^[6]的研究,以平均流速 V_m 流动的沉降性浆体可以被看作是以平均速度 V 流动的清水.更加确切地说,如果管段两边存在的压力差能够使清水以速度 V 流动,则当粗砂颗粒群介入后,就只能使浆体以速度 V_m 向前移动.因此,当沉降性浆体以速度 V_m 在管道中流动时所产生的水力坡度可以认为是以速度 V 在管道中流动的清水的水力坡度,其原理可以用图3所示的等效阻力模型来理解.

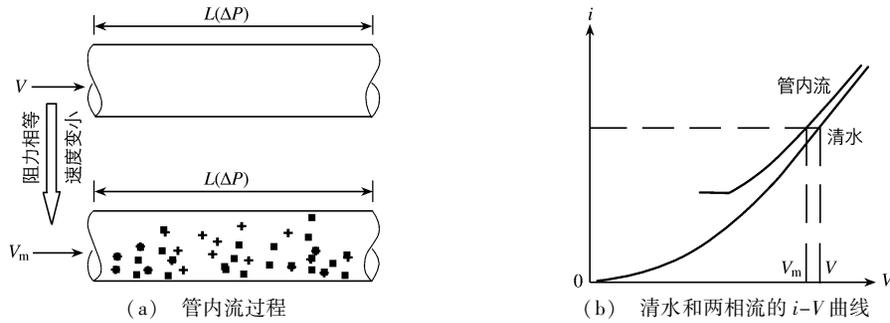


图3 等效阻力模型原理

Fig. 3 Principles of equivalent resistance model

由流体对颗粒的拖曳力 f_D 的表达式可以得到:

$$V_w - V_s = \sqrt{\frac{8(Lf_h + K_4 f_f)}{\pi d_e^2 C_{Dr} \rho}} \quad (7)$$

式中:颗粒的干涉力 f_h 和 f_f 以及滑移速度 $V_w - V_s$ 和阻力系数 C_{Dr} 均为浓度分布 q 的函数^[6].

当以单位水平管道为研究对象时,设管道内的平均管内浓度为 q ,浆体平均速度为 V_m ,粗砂颗粒平均速度为 V_s ,水流平均速度为 V_w ,根据上面式(5)~(7),滑移速度计算式(7)变为:

$$V_w - V_s = \sqrt{\frac{8(LF_h + K_4 f_f)}{\pi d_e^2 C_{Dr} \rho}} \quad (8)$$

利用式(8),可通过迭代法求解,得到平均滑移速度的值.

根据文献[9],存在以下关系:

$$V_m = V_w(1 - \bar{q}) + V_s \bar{q} \quad (9)$$

$$V = V_w + [1 - 0.56\psi(1)] \frac{\delta \bar{q}}{(1 - \bar{q}) V_w} V_s^2 \left[1 + 33\lambda K_4 \frac{K_3 \sqrt{L_a g}}{V_m} \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \right]^2 \quad (10)$$

式中: δ 为粗砂颗粒的密度与液体(水)的密度之比; K_3 为常数,取值3.742; λ 为达西阻力系数,可用阿里特苏公式计算^[5]; $\psi(1)$, L_a 的计算方法见有关文献^[6,11].

根据式(8)、(9)和(10),可以求出固体颗粒平均速度 V_s ,液体平均速度 V_w ,及动量交换前流体的平均速度 V .将求出的速度 V 代入式(6),就可以得到粗砂浆体管道流动的水力坡度.

3 粗砂管内流动水力坡度计算模型检验

在水平管道中,采用 Durand 等专家学者的粗砂试验数据,对前面提出的粗砂粒浆体水力坡度计算模型进行检验,具体参数见表 2.

表 2 用于验证水平管道水力坡度的试验参数

试验者	管道直径 D / mm	体积浓度 C	浆体平均速度 $V_m / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	颗粒 种类	颗粒密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粒径 d_c / mm
Durand	150	0.027 ~ 0.10	3.49 ~ 5.66	粗砂	2 650	2.04
Bonnington	38.1	0.053 ~ 0.20	1.50 ~ 3.35	粗砂	2 650	1.88
Shook	52.45	0.18	1.54 ~ 3.64	粗砂	2 650	0.20 ~ 0.61
Gillies	53,263	0.15 ~ 0.25	1.83 ~ 4.37	粗砂	2 650	0.55, 2.4

颗粒处于各种状态时,水力坡度计算值和试验值的比较见图 4,其中,图 4(a)为颗粒处于完全悬浮状态时的水力坡度计算值和试验测定值的对比,从图中可以看出,计算值和试验测定值的偏差均在 10% 以内;图 4(b)为颗粒处于完全滑跳移时,除个别点的误差较大外,大多数的偏差小于 10%;图 4(c)为颗粒处于部分悬浮、部分滑跳移时,大多数的偏差小于 10%.

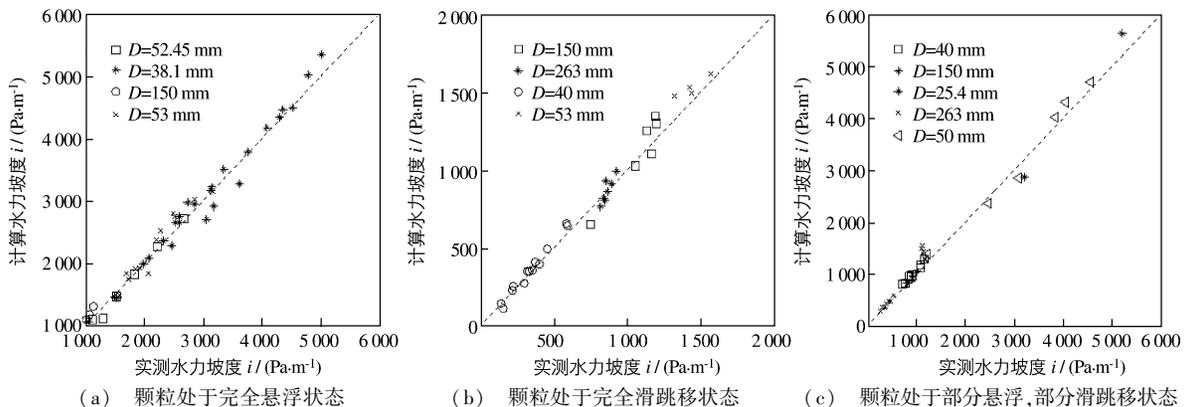


图 4 水力坡度计算值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between measured and calculated values of hydraulic gradient

图 5 为利用 Gillies 和 Bonnington 等专家的试验数据计算的不考虑修正系数 L (即 $L=1$) 和考虑系数 L 两种情况下水力坡度的比较. 可见,不考虑系数 L 时,计算值和实测值的最大偏差为 19%;考虑系数 L 时,计算值和实测值的最大偏差为 7.6%. 从图 5 可以看出,考虑修正系数 L 后,水力坡度的计算值相对增大,总体上更加接近实测值.

4 结 语

粗砂水平管道流动时,颗粒所受干涉力需要用系数修正;模型计算值与实测值的偏差基本小于 10%,且考虑修正系数 L 后,水力坡度的计算值相对增大,更接近实测值. 文中提出的粗砂颗粒水力坡度模型对于粗砂浆体管道输送技术具有一定参考价值.

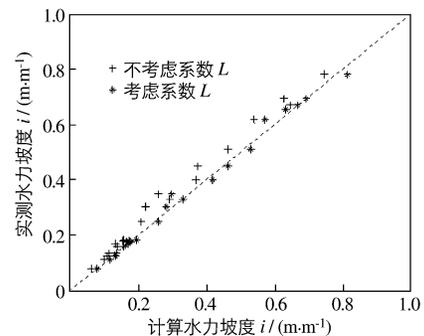


图 5 系数 L 对水力坡度的影响

Fig. 5 Influence of coefficient L on hydraulic gradient

参 考 文 献:

- [1] 倪福生, 齐帜, 赵立娟. 管道输沙两层流动模型分界位置的确定[J]. 中国港湾建设, 2008(1): 13-15. (NI Fu-sheng, QI Zhi, ZHAO Li-juan. Determination of location of interface in two level flow model for sediment transport in pipelines[J]. China Harbour Engineering, 2008(1): 13-15. (in Chinese))
- [2] 罗大鑫. 管道排沙特性试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 41. (LUO Da-xin. Experimental study on flushing characteristics the sediment with pipeline[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 41. (in Chinese))
- [3] 王英杰, 阳宁, 金星. 泥沙管道输送试验系统的研制及分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 34-38. (WANG Ying-jie, YANG Ning, JIN Xing. Research and analysis on experimental system of sediment transport in pipelines[J]. Yellow River, 2012, 34(2): 34-38. (in Chinese))
- [4] 张雪兰, 孙西欢, 李永业, 等. 浅谈浆体管道输送阻力损失研究现状[J]. 山西水利, 2011(1): 38-42. (ZHANG Xue-lan, SUN Xi-huan, LI Yong-ye, et al. Research status of pipeline resistance loss of slurry transportation[J]. Shanxi Water Resources, 2011(1): 38-42. (in Chinese))
- [5] 叶坚, 夏建新, MALCZEWSKA BEATA. 水平管道水力输送粗粒物料的阻力损失研究[J]. 金属矿山, 2011(7): 12-18. (YE Jian, XIA Jian-xin, MALCZEWSKA BEATA. Study on the resistance loss of hydraulic transport for coarse particles in horizontal pipeline[J]. Metal Mine, 2011(7): 12-18. (in Chinese))
- [6] 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. (XU Zhen-liang. Study on the velocity profile and hydraulic gradient of heterogeneous flow[D]. Shenyang: Northeastern University, 1999. (in Chinese))
- [7] 张士林. 浆体管道淤积流速数值计算方法研究[J]. 水力采煤与管输, 2011(4): 6-9. (ZHANG Shi-lin. Research on numerical calculation method of deposition critical velocity in slurry pipeline [J]. Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation, 2011(4): 6-9. (in Chinese))
- [8] GILLIES R G. Pipeline flow of coarse particle slurries[D]. Canada: Saskatchewan, 1993.
- [9] 赵利安. 大颗粒浆体内流动规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011. (ZHAO Li-an. Study on flow law of large particle slurry in pipeline[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011. (in Chinese))
- [10] 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(1): 122-125. (WANG Tie-li, ZHAO Li-an. Study on interference force to large suspended particles in slurry pipeline[J]. Clean Coal Technology, 2011(1): 122-125. (in Chinese))
- [11] 张士林, 许振良, 邵龙潭. 浮游界限速度的求解方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(2): 279-281. (ZHANG Shi-lin, XU Zhen-liang, SHAO Long-tan. Research of confirming float critical velocity in slurry[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(2): 279-281. (in Chinese))

Prediction analysis of hydraulic gradient for coarse sand slurry in horizontal pipes

ZHAO Li-an, XU Zhen-liang

(Mining Institute of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the predication of hydraulic gradient for coarse sand slurry in the horizontal pipe, based on the analysis and calculation of the coarse sand particle's balance relationship in the horizontal pipe, by adopting a research method of adding a correction factor L before interference force is put forward, and by using related experts' experimental data and through data fitting, an expression of correction coefficient L is given out. Based on this, by using an efficient resistant model, a hydraulic gradient calculation model for coarse sand slurry in the horizontal pipe is developed. The calculation model is verified by related experts' experimental data and it is found out that the deviation between the calculated values by author's model and the measured values is not more than 10%, and that after considering the correction factor L , the model-calculated values will relatively increase and move closer to the measured values. So in the coarse sand slurry pipeline, the interference force acting on coarse particles needs to be revised by correction factor, thus the hydraulic gradient calculation model put forward for coarse sand slurry can give a certain reference to the study of the transport of coarse sand slurry in pipes.

Key words: slurry; hydraulic gradient; coarse sand; horizontal pipe