

浆体管道中大颗粒干涉力研究

王铁力¹, 赵利安²

(1. 中国煤炭科工集团 武汉设计研究院管道输煤所 湖北 武汉 430064;

2. 辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了研究输送大颗粒的垂直浆体管道中固体颗粒所受的干涉力,采用相关专家的实验数据,发现大颗粒垂直浆体管道中大颗粒受到的干涉力要大于小颗粒所受的干涉力。在此基础上,采用数据拟合方式给出了干涉力修正系数的表达式。将得到的干涉力应用于管道中颗粒受力分析中,并运用在大颗粒垂直管道阻力损失的计算模型中,通过实验数据验证了干涉力对阻力的影响。

关键词: 浆体管道; 大颗粒; 干涉力; 数据拟合

中图分类号: TD825.6

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2011)01-0122-04

浆体管道输送已有 100 多年的历史,它属于两相流的流体力学问题,近几十年的发展很快。固体物料的管道输送作为一种新的物料运输方式已被广泛应用于很多部门和领域。被输送的物料包括煤炭、原材料(金属或非金属矿物、建材等)、废料(电厂粉煤灰、冶金或化学矿山的各种尾矿、工业废渣等)等。近几年来,中国浆体管道输送领域发展势头良好,已建成了若干条长距离管道工程,如尖山铁精矿输送工程、翁福磷精矿管道输送工程、大红山铁精矿管道输送工程等。浆体管道输送的应用范围不断扩大,在理论上也取得了较多的研究成果。笔者通过实验及理论分析给出了管道输送中大颗粒的干涉力模型,对实际工程应用起到了重要的指导意义。

1 垂直管道中大颗粒干涉力研究

直径为 d 的固体颗粒,在体积分数为 C_v 管道直径为 D 的垂直管道中进行沉降时,由于液、固相互作用,颗粒群的沉降速度要小于单个颗粒的沉降速度。设颗粒的干涉沉降速度为 V_{hi} 。在以干涉沉降速度沉降时,相应就会有一部分液体上升,设其速度为 V_u 。

图 1 为垂直管道固体颗粒群的沉降示意。

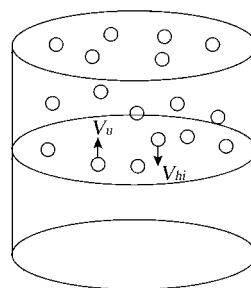


图 1 垂直管道固体颗粒群的沉降

固体颗粒相对于上升的液体的速度 V_r 与干涉沉降速度 V_{hi} 以及液体上升速度 V_u 的关系为:

$$V_r = V_{hi} + V_u \quad (1)$$

根据固体颗粒下沉排出的液体体积与固体颗粒的体积相等,可以得到公式:

$$V_{hi} C_v = V_u (1 - C_v) \quad (2)$$

根据式(1)、式(2)可推导出:

$$V_r = V_{hi} + V_{hi} C_v / (1 - C_v) \quad (3)$$

由式(3)进一步变换,可得到:

$$V_r = V_{hi} / (1 - C_v) \quad (4)$$

在垂直管道的浆体沉降过程中,固体颗粒的粒径越大,则颗粒的干涉终速度 V_{hi} 也随之增大,导致

很难正确测定颗粒群的沉降速度。为了准确测试固体颗粒群的干涉沉降速度 V_{hi} , 常用的方法是在垂直管道底部铺设金属网, 在金属网上放一定厚度的颗粒床层, 逐渐增大上升液流的平均速度 V_m 。当液体平均速度足够大时, 颗粒就会悬浮, 利用 V_m 和 V_{hi} 的关系, 就能够确定颗粒群的沉降速度。图 2 为垂直管道颗粒群的流化试验示意。

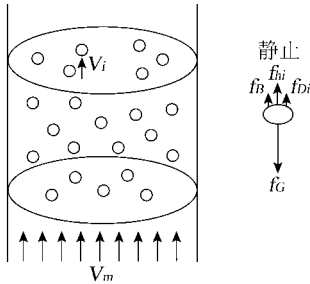


图 2 垂直管道颗粒群的流化试验示意

V_i 为流经固体颗粒间的液体的速度, 其与液流的平均上升速度 V_m 的关系为:

$$AV_m = A(1 - C_v) V_i \quad (5)$$

式中 A 为管道断面积。

式(5)可变换为:

$$V_i = V_m / (1 - C_v) = V_r \quad (6)$$

根据式(4)、(5)和式(6)可得:

$$V_{hi} = V_m \quad (7)$$

从图 2 中可以看出, 当固体颗粒处于平衡状态时, 单个固体颗粒受到的作用力有: 固体颗粒的重力 f_g , 固体颗粒受到的浮力 f_b , 固体颗粒的拖曳力 f_{Di} 。此外, 根据许振良^[1]的研究, 颗粒还受到其他颗粒的干涉作用力 f_{hi} , 因此, 存在力的平衡关系:

$$\pi d_e^3 (\rho_s - \rho) g = \pi C_{Di} d_e^2 V_i^2 / 8\rho + f_{hi} \quad (8)$$

根据佐藤博^[2]的研究, 颗粒干涉作用力的表

达形式 f_{hi} 如下:

$$\frac{f_{hi}}{w_b} = (1 - C_v)^{2(n-1)}$$

$$\left\{ \frac{\sqrt{Re_p \alpha} + \sqrt{Re_p \alpha^2 + 4 \sqrt{48 \alpha \beta} / (1 - C_v)^{(n-1)}}}{(\sqrt{Re_p \alpha} + \sqrt{Re_p \alpha^2 + 4 \sqrt{48 \alpha \beta}})^2} \right\}^2 \quad (9)$$

公式(8)对于小颗粒是适用的, 而对于大颗粒间干涉力国内有很多专家学者做过大量实验。笔者采用夏建新^[3]和金文斌^[4]的流态化实验数据, 通过实验数据同模型计算比较, 对式(8)进行大颗粒情况的验证。夏建新试验采用的固体颗粒为密度为 2 t/m^3 的天然结核, 颗粒直径为 18 mm 和 28 mm 。金文斌试验采用的固体颗粒粒径分别为 $11.20, 21.20, 30.53 \text{ mm}$, 密度为 2 t/m^3 。利用夏建新和金文斌垂直管道流态化实验数据, 对颗粒有效重力、流体对颗粒的拖曳力和颗粒间的干涉力分别进行了计算, 结果见表 1。

从表 1 可以看出, 大颗粒垂直管道处于受力平衡状态时, 公式(9)干涉力偏小, 几乎可以忽略。造成这种现象的原因是: 首先由于固体颗粒较大, 造成颗粒同管道直径比值 d/D 不容忽视。其次, 颗粒较大时, 颗粒尾部的尾流可能形成附加作用力, 从而使干涉力发生变化, 导致误差。因此, 若使模型的计算更加准确、符合实际, 就需要对该模型进行修正。设修正系数为 K , 则(9)式可变为:

$$\frac{\pi}{6} d_e^3 (\rho_s - \rho) g = C_{Di} \frac{\pi}{4} d_e^2 \frac{V_i^2}{2} \rho + K f_{hi} \quad (10)$$

根据夏建新^[3]和金文斌^[4]的大颗粒实际实验数据, 对大颗粒的阻力模型进行修正, 得到干涉力修正系数 K 的值。

表 1 大颗粒垂直管道受力计算表

试验序号	颗粒管道直径比 d/D	质量分数 $\omega/\%$	有效重力 W_b/N	拖曳力 F_d/N	干涉力 F_h/N	干涉力修正系数 K
1	0.0737	0.1016	0.0072	0.0036	0.0018	2.0151
2	0.0801	0.1450	0.0072	0.0030	0.0024	1.7481
3	0.1370	0.0575	0.0489	0.0279	0.0074	2.8378
4	0.128	0.0697	0.0489	0.0253	0.0089	2.6525
5	0.1325	0.0724	0.0489	0.0241	0.0095	2.609
6	0.1416	0.0875	0.0489	0.0234	0.0106	2.4046
7	0.1435	0.1182	0.0489	0.0201	0.0139	2.0627
8	0.1614	0.1214	0.0489	0.0234	0.0117	2.1814

试验序号	颗粒管道直径比 d/D	质量分数 $\omega/\%$	有效重力 W_b/N	拖曳力 F_d/N	干涉力 F_h/N	干涉力修正系数 K
9	0.1732	0.1237	0.0489	0.0240	0.0124	2.0164
10	0.1915	0.1267	0.1460	0.0732	0.0339	2.1442
11	0.2032	0.1335	0.1460	0.0677	0.0358	2.1885
12	0.2178	0.1479	0.1460	0.0652	0.0405	1.9946
13	0.28	0.196	0.1126	0.0187	0.0497	1.8887
14	0.28	0.122	0.1126	0.0229	0.0357	2.5138
15	0.18	0.264	0.0299	0.0058	0.0094	2.5497
16	0.18	0.236	0.0299	0.0062	0.0074	3.210

根据表 1、式(10) 及大颗粒在管道中的受力分析可以看出,大颗粒的干涉力修正系数 K 与颗粒管道直径比 d/D 、密度比 ρ_s/ρ 、固体颗粒体积分数 C_v 、密度比 $(\rho_s - \rho)/\rho$ 以及 V_m 密切相关。因此,干涉力修正系数 K 的函数形式可以表示为:

$$K = f_1(C_v, V_m, \frac{d}{D}, \rho_s/\rho) \quad (11)$$

V_m 的影响可以用 d/D 和 ρ_s/ρ 来表示。而对于特定的固体颗粒 ρ_s/ρ 一般可以认为是常数,因此,干涉力修正系数 K 的函数关系可以修正为:

$$K = f(C_v, d/D) \quad (12)$$

K 与 d/D 关系可以采用指数函数形式。当 d/D 一定时 K 与 C_v 大致成指数函数关系。因此, K 的形式可表示为

$$K = \alpha e^{\beta C} (\frac{d}{D})^\gamma \quad (13)$$

其中 α, β, γ 为待定的常数。经过数据拟合,可以得到以下关系:

$$K = 500812e^{-3.79C} (\frac{d}{D})^{0.2022} \quad (14)$$

2 干涉力系数对垂直管道浆体阻力损失影响

固体颗粒在管内加速过程的运动方程为:

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_s + \frac{\rho}{2}) \frac{dV_s}{dt} = F_D - W_b - KF_h \quad (15)$$

式中 F_D 为水对固体颗粒的平均拖曳力, W_b 为有效重力, F_h 为颗粒之间的平均干涉力, K 值可由式(14) 计算得出。

进入稳定状态时:

$$V_s = V_w - \sqrt{\frac{8(F_h + w_b)}{\pi d_p^2 C_{D\gamma} \rho}} \quad (16)$$

式中 $C_{D\gamma}$ 为基于 $V_w - V_s$ 的阻力系数。设 V_0 是管道中心的流速,管道半径为 R ,距管壁距离为 y 处的流体速度为 $V(y)$,则无论管道是水平、垂直或者倾斜, y 与 $V(y)$ 的关系可以用下式来表示^[2]:

$$\frac{V(y)}{V_0} = (\frac{y}{R})^{\frac{2}{7}} \quad (17)$$

在垂直浆体管道中,根据质量守恒,有:

$$V_m = V_w(1 - q) + V_s q \quad (18)$$

式中 V_m 为浆体的平均速度,因此,可以得到 4 个关于 V, V_s, V_w 和 V_m 的方程,其实都是管道内任意点到管壁距离 y 的函数。公式(15)、(16)、(18) 中的 V, V_s, V_w 和 V_m 可以分别改写成 $V(y), V_s(y), V_w(y)$ 和 $V_m(y)$,分别是距离管底距离的函数。(15)、(16)、(18) 与式(17) 构成含有 4 个未知量的方程组,可以通过求解方程组,求出清水的原速度分布 $V(y)$ 。

根据许振良^[1] 的等效阻力模型可知,将求解出的 V 带入下式,就可以求解出沉降性浆体在垂直管道内的阻力

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \rho \quad (19)$$

式中 λ 为达西阻力系数。已知浆体的平均输送体积分数 C_v ,则可以求出 V, V_s, V_w 和 V_m 的平均值,最后得出垂直上升浆体管道的摩阻损失。

3 粗颗粒浆体摩阻损失模型的验证

笔者采用夏建新试验数据,来检验干涉力修正系数对摩阻损失的影响。试验中采用透明玻璃管,直径为 0.1 m,相对粗糙度为 0.0011,物料用直径为 15 mm 的锰结核,密度为 2 t/m³。图 3、图 4 分别为不考虑干涉力和考虑干涉力系数的管道阻力损失。

从图3和图4可以看出不考虑干涉力,阻力损失的计算值同实测值最大误差为17.28%,考虑干涉力后最大误差为8.4%,更符合实际情况。

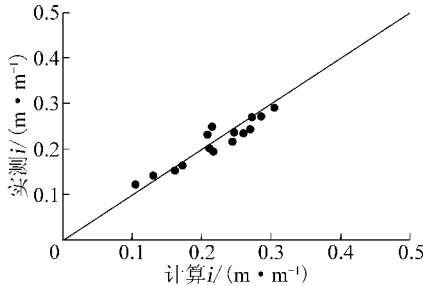


图3 不考虑干涉力系数管道阻力损失

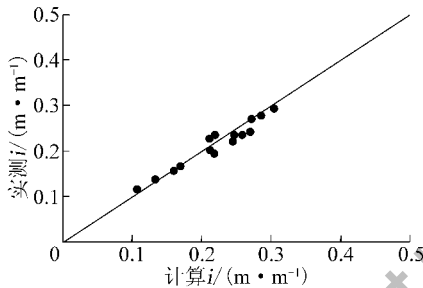


图4 考虑干涉力系数管道阻力损失

4 结 论

(1) 对于颗粒管道直径比 d/D 在 0.0737 ~ 0.28 范围内,固体质量分数在 25% 以内的粗颗粒垂直浆体管道,计算干涉力时要考虑干涉力修正系数;

(2) 利用数学拟合的方法,对现有实验数据进行分析计算,给出了粗颗粒垂直管道的干涉力修正模型即: $K = 500812e^{-3.79C} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.2022}$

(3) 将大颗粒干涉力修正系数利用在管道阻力损失的计算中,减少了垂直管摩阻损失计算数值与实际数值的误差。

参考文献:

- [1] 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, 1998: 14 - 15.
- [2] 佐藤博, 崔玉顺. 管内浓度およびすべり速度の算定式[J]. 资源·素材学会志, 1989, 105(6): 457 - 463.
- [3] 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]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2000: 21 - 23.
- [4] 金文斌, 黄小平. 大颗粒物料在垂直管道内最小输送速度的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 1997, 17(2): 17 - 20.

Study on interference force to large suspended particles in slurry pipeline

WANG Tie-li¹, ZHAO Li-an²

(1. Department of Pipeline Coal Transporting, Wuhan Design

and Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Wuhan 430064, China;

2. School of Resource and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the interference force to large suspended particles in slurry pipelines, make many references to specialistic experimental datas, find that the interference force to large suspended particles stronger than small ones, get interference force correction factors expression using data fitting methods, computational model of pipe resistance also use this expression. The experimental datas also prove the interference force influence.

Key words: slurry pipeline; large suspended particles; interference force; data fitting

洁净煤技术(双月刊) 每本订价 20 元 全年 120 元 欢迎订阅!