

沉降性浆体在水平管道内输送时的水力坡度^①

许振良

(辽宁工程技术大学资源与环境工程学院, 阜新 123000)

摘要 从固体颗粒加速期间清水与固体颗粒的速度变化、动量传递、相关质量等基本问题分析入手,研究了沉降性浆体在水平管道内流动时其固体颗粒在3种流动状态下的水力坡度,提出了沉降性浆体在水平管道内流动的机理模型,进而用该模型对一些输送条件下的沉降性浆体的水力坡度进行了计算。对实际问题的理论计算结果与实测结果的对比分析表明,该模型能比较精确地预计上述几种流动状态下水平管道内沉降性浆体的水力坡度。

关键词 沉降性浆体 附加压力 干涉力 水力坡度

中图法分类号 TD569

沉降性浆体在水平管道内流动时,浆体内固体颗粒的输移状态决定着浆体管道输送水力坡度的大小,弄清浆体内固体颗粒的输移状态与浆体管道输送水力坡度之间的关系,是实现浆体既安全又经济地进行长距离管道输送的先决条件。本文从固体颗粒加速期间清水与固体颗粒的速度变化等分析入手,研究了沉降性浆体中固体颗粒的移动状态与浆体管道输送水力坡度之间的关系,提出了预计沉降性浆体管道输送水力坡度的新模型和方法。

1 固体颗粒的加速过程分析

沉降性浆体在水平管道内流动时,固体颗粒在管内的运动速度要能从0加速至 u_s ,必然要得到来自于清水间的动量转让。固体颗粒由静止开始加速,经过时间 t 达到一个稳定的速度,并继续以该速度在管内向前运动来实现物料输送。根据Rose的试验研究可知,固体颗粒加速时,在固体颗粒加速管段上存在一个附加压力 ΔP_s ,其计算公式为^[1]

$$\Delta P_s = 0.56 \phi(1) M^* v_m^2 \rho \quad (1)$$

这里

$$M^* = \frac{\delta \bar{q} v_s}{(1 - \bar{q}) v_w} \quad (2)$$

式中 $\phi(1)$ 是系数; $\delta = \rho_s / \rho$; ρ_s, ρ 是固体颗粒和清水的密度; \bar{q} 为定常流管段上固体颗粒平均体积浓度; v_w, v_s, v_m 分别为定常流管段上清水、固体颗粒、沉降性浆体的平均速度。

2 固体颗粒加速期间的清水速度变化分析

在管口断面A上微小时间 Δt 内排出的固体颗粒质量 M_s 和清水质量 M_w 之间建立动量平衡方程式则^[2]

$$v - v_w^* = \frac{\bar{q} \rho_s v_s^2}{(1 - \bar{q}) \rho_w} \quad (3)$$

式中 v 和 v_w^* 为考察的这部分质量为 M_w 的清水和固体颗粒发生动量交换前、后的流速。

质量为 M_w 的清水由于与固体颗粒进行动量交换而减速。然而,固体颗粒加速管段存在的附加压力 ΔP_s 又使它的速度增加,其增加量为^[2]

① 收稿日期: 1998-05-08; 修回日期: 1998-12-09 许振良, 男, 42岁, 工学博士, 教授

$$\Delta v_w = \frac{A(1-\bar{q})\Delta P_s \Delta t}{A(1-\bar{q})v_w \rho \Delta t} = \frac{\Delta P_s}{\rho v_w} \quad (4)$$

质量为 M_w 的清水在固体颗粒加速期间的实际速度改变量为

$$v - v_w = v - v_w^* - \Delta v_w \quad (5)$$

由式(5)可进一步得到

$$v - v_w^* = k_1(v - v_w) \quad (6)$$

且

$$k_1 = 1 + \Delta v_w / (v - v_w) \quad (7)$$

将式(6)代入式(3), 便可得到计算清水实际速度变化量的计算公式为

$$v - v_w = \frac{\bar{q}\rho_s v_s^2}{k_1(1-\bar{q})\rho_w} \quad (8)$$

式中 k_1 的计算公式为^[2]

$$k_1 = 1/[1 - 0.5\phi(1)] \quad (9)$$

$\phi(1)$ 的取值由图1的 $\phi(1)$ 与 $\lg(v_m^2/gd\delta^2)$ 关系曲线给出, 其中 d 为固体颗粒粒径, g 为重力加速度。

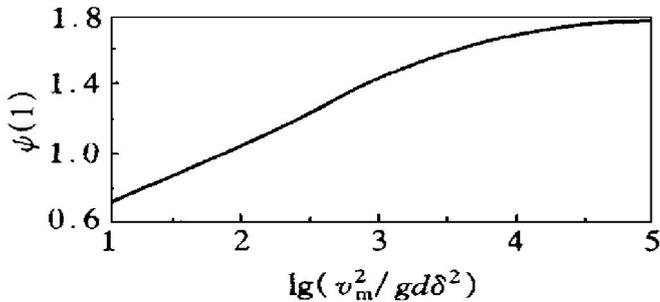


图1 $\phi(1)$ 与 $\lg(v_m^2/gd\delta^2)$ 关系图

Fig. 1 Relationship between $\phi(1)$ and $\lg(v_m^2/gd\delta^2)$ for two-phase liquid flow

3 定常流状态下固体颗粒的受力及运动分析

固体颗粒在管内结束加速过程后, 沉降性浆体就进入了稳定的流动状态, 此时单个固体颗粒的运动方程可由下式给出^[3]

$$\frac{\pi}{6} d_e^3 (\rho_s + \frac{\rho}{2}) \frac{dv_s}{dt} = F_D - F_h = 0 \quad (10)$$

式中 F_D , F_h 是固体颗粒所受来自于清水间的水流拖曳力和其他固体颗粒的干涉力, 各自的计算公式如下^[3]

$$F_D = \frac{\pi}{4} d_e^2 C_{Dr} \frac{(v_w - v_s)^2}{2} \rho \quad (11)$$

$$F_h = \left[1 - (1 - \bar{q})^{2(n-1)} \frac{(\sqrt{Re\alpha} + \sqrt{Re\alpha})}{(\sqrt{Re\alpha} + \sqrt{Re\alpha^2 + 4\sqrt{48\alpha\beta}/(1-\bar{q})^{n-1}})^2} \right] W_b \quad (12)$$

式中 d_e 是固体颗粒的球体等价直径, C_{Dr} 是以 $v_w - v_s$ 为基准的阻力系数, Re 是固体颗粒雷诺数, α 和 β 是固体颗粒 Swanson 形状系数, n 是质数(用佐藤公式计算), W_b 是固体颗粒在水中的有效重力 $W_b = \pi d_e^3 (\rho_s - \rho) g / 6$ 。

将式(11)代入式(10), 则

$$v_s = v_w - \sqrt{\frac{8F_h}{\pi d_e^2 C_{Dr} \rho}} \quad (13)$$

考察管口断面 A 上排出的浆体流量可知, 清水、固体颗粒及浆体平均速度 v_w , v_s 及 v_m 三者之间还存在下面的关系:

$$v_m = v_w(1 - \bar{q}) + v_s \bar{q} \quad (14)$$

式(8), (13) 和(14) 给出了 v , v_w , v_s 和 v_m 之间的关系。

4 加速期间固体颗粒处于滑、跳移时的速度变化分析

加速期间固体颗粒在管内处于滑、跳移状态时, 必需考虑固体颗粒与管壁之间由摩擦而引起的固体颗粒速度改变量。清水传递给固体颗粒动量的一部分被摩擦力引起的动量所消耗, 固体颗粒的最终平均速度 v_s 实际上是固体颗粒与清水之间发生动量交换所引起的速度改变量 v_s^* (增加) 及与管壁摩擦引起的速度改变量 Δv_s (减小) 的和所形成的。式(8) 已经不能反映清水实际速度改变量 $v - v_w$ 与固体颗粒最终平均速度变化量 v_s 之间的关系。在这种状态下, 固体颗粒的最终平均速度 v_s 可由下式给出

$$v_s = v_s^* - \Delta v_s \quad (15)$$

进而有

$$v_s^* = k_2 v_s \quad (16)$$

这里

$$k_2 = 1 + \Delta v_s / v_s \quad (17)$$

将式(16)代入式(8), 则能得到清水实际平均速度变化量的计算公式如下

$$v - v_w = \frac{k_2 \bar{q} \rho_s v_s^2}{k_1 (1 - \bar{q}) \rho_w} \quad (18)$$

固体颗粒在加速段管段单位长度上所受的摩擦力 F_F 可由下式给出^[2]

$$F_F = f A \bar{q} (\rho_s - \rho) g \quad (19)$$

式中 f 是摩擦系数。由加速管段上摩擦力 F_F 所造成的固体颗粒速度的改变量 Δv_s 则可由下式给出

$$\begin{aligned} \Delta v_s &= \frac{F_F t}{M_s} = f \frac{A \bar{q} (\rho_s - \rho) g t}{A \bar{q} \rho_s} \\ &= f g (1 - \frac{1}{\delta}) t \end{aligned} \quad (20)$$

根据 ROSE 的研究可知, 固体颗粒的加速距离 L_a 的计算公式为^[1]

$$L_a = 6D \left| \frac{M_s}{\rho \sqrt{g}} \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{D^5}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho}} \right|^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

式中

$$M_s = A \bar{q} v_s \rho_s \quad (22)$$

式(21)中的 D 为管道的内径。由于固体颗粒的加速时间 t 随加速距离 L_a 增大而增大, 因而这里可以假设

$$t = k' \sqrt{L_a / g} \quad (23)$$

式中 k' 是常数。将式(23)代入式(20)有

$$\Delta v_s = f g (1 - \frac{1}{\delta}) k' \sqrt{\frac{L_a}{g}} \quad (24)$$

将式(24)代入式(17), 并令 $v_m / v_s = k_3'$; $k_3 = k' k_3'$, 则得到 k_2 的计算公式如下

$$k_2 = 1 + f \frac{k_3 \sqrt{L_a g}}{v_m} (1 - \frac{1}{\delta}) \quad (25)$$

根据 Newitt^[2] 的研究结果可知, 当固体颗粒在管内处于滑、跳移状态时, 固体颗粒与管底间的摩擦系数 f 与输送清水时的管摩擦阻力系数 λ 之间的关系是

$$f = 33 \lambda \quad (26)$$

由于管摩擦的存在, 固体颗粒处于滑、跳移状

态时, 固体颗粒运动方程已变成下面的形式

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{6} d_e^3 (\rho_s + \frac{\rho}{2}) \frac{dv_s}{dt} = \\ F_D - F_h - F_f = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

式中 F_f 是作用在单个固体颗粒上的摩擦力,

$$F_f = F_F / n_p \quad (28)$$

式中 n_p 是单位长度管段上的固体颗粒数, 其计算公式为

$$n_p = 6A \bar{q} / (\pi d_e^3) \quad (29)$$

将式(19), (29)代入式(28), 可解出 F_f 。

将式(11)代入式(27)有

$$v_s = v_w - \sqrt{\frac{8(F_h + F_f)}{\pi d_e^2 C_{Dr} \rho}} \quad (30)$$

式(14), (18)和式(30)给出了固体颗粒在管内处于滑、跳移动状态时的 v , v_w , v_s 和 v_m 之间的关系。

5 加速期间固体颗粒部分处于悬移, 部分处于滑、跳移时的速度变化分析

介于临界速度 v_c 与均质流界限速度 v_H 之间流动的沉降性浆体内的固体颗粒多数处于部分悬移, 部分滑、跳移运动状态。该种沉降性浆体固体颗粒加速期间作用在固体颗粒上的管壁摩擦力 F_F 可由下式给出

$$F_F = k_4 f A \bar{q} (\rho_s - \rho) g \quad (31)$$

式中 k_4 为处于滑、跳移运动状态的固体颗粒占全部固体颗粒质量之比。此时计算清水实际速度变化量的计算公式的形式虽然与式(18)相同, 但 k_2 的计算公式已变成

$$k_2 = 1 + 33 k_4 \lambda \frac{k_3 \sqrt{L_a g}}{v_m} (1 - \frac{1}{\delta}) \quad (32)$$

根据费祥俊的研究可知, 当沉降性浆体的平均流速大于临界速度时, k_4 可由下面的公式计算^[4]

$$k_4 = 11 v_t / v_m \quad (33)$$

式中 v_t 为单个固体颗粒的沉降速度。

这样, 将式(31)代入式(28)便可解出 F_f ,

进而将解出的 F_f 和式(11) 代入式(27) 有

$$v_s = v_w - \sqrt{\frac{8(F_h + k_4 F_f)}{\pi d_c^2 C_{Dr} \rho}} \quad (34)$$

将式(32) 代入式(18) 有

$$v = v_w + [1 - 0.56 \phi(1)] \frac{\bar{\delta} v_s^2}{(1 - q) v_w} \cdot \left[1 + 33k_4 \lambda \frac{k_3 \sqrt{L_a g}}{v_m} \left(1 - \frac{1}{\delta}\right) \right]^2 \quad (35)$$

式(14), (34) 和(35) 则给出了固体颗粒部分处于悬移、部分处于滑、跳移状态时 v , v_w , v_s 和 v_m 之间的关系。

6 沉降性浆体的水力坡度

清水在管道内处于紊流状态流动时, 其管道摩阻损失可用下面的 Darcy-Weisbach 公式给出:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \rho \quad (36)$$

式中 λ 是阻力系数; L 是管段长度; v 是清水的平均速度。

对于在水平管道内流动的沉降性浆体来说, 公式(36) 已不能用来计算其管道的摩阻损失。但通过前面的分析可知, 沉降性浆体以平均速度 v_m 在管道内的流动, 实际上可以看成是清水以平均速度 v 在管内流动; 进一步说, 当存在于管段上的压差能使清水以平均流速 v 向前流动时, 那么, 清水中介入了平均体积浓度为 \bar{q} 的固体颗粒群后, 这个压差则只能使其混合物(沉降性浆体) 以速度 v_m 向前流动。由此, 以平均速度 v_m 流动的沉降性浆体在管道内产生的管道摩阻损失也因而能被看成是清水以平均速度 v 在管道内流动时产生的摩阻损失。这样, 只要利用给定的输送条件求解出这个 v , 那么就可以以此来计算管道的摩阻损失和水力坡度。显然, 前面的分析已经给出了固体颗粒处于几种流动状态下求解 v 的公式, 这样, 只要把利用上面这些公式求得的 v 代入式(36) 便能得到求解沉降性浆体水平管道输送水力坡度的计算公式:

$$i = \frac{\lambda}{2gD} \{ v_w + [1 - 0.56 \phi(1)] \cdot \frac{\bar{\delta} v_s^2}{(1 - q) v_w} [v_w - \sqrt{\frac{8(F_h + k_4 F_f)}{\pi d_c^2 C_{Dr} \rho}}]^2 \cdot [1 + 33k_4 \lambda \frac{k_3 \sqrt{L_a g}}{v_m} (1 - \frac{1}{\delta})]^2 \}^2 \quad (37)$$

这里, 固体颗粒处于悬移状态时, $k_4 = 0$; 固体颗粒处于滑、跳移状态时, $k_4 = 1$; 固体颗粒部分处于悬移、部分处于滑、跳移状态时, $k_4 = 11v_t/v_m$ 。

为了能准确预计水平管道内沉降性浆体的管道水力坡度, 判定固体颗粒在管道内的移动状态是至关重要的。平均速度处于均质流界限速度 v_H 以上的沉降性浆体可认为其固体颗粒是处于悬移状态; 平均速度介于堆积限界 v_{cd} 与浮游限界速度 v_B 之间的沉降性浆体可认为其固体颗粒是处于滑、跳移状态; 平均速度介于浮游限界速度 v_B 与均质流界限速度 v_H 之间的沉降性浆体可认为其固体颗粒是部分处于悬移, 部分处于滑、跳移状态。由于工业浆体中细粒子的比例很大, 浆体的浓度也很高, 这不但减缓了颗粒的下沉趋势, 同时也对紊动产生一定的抑制作用, 并使得浆体的阻力系数低于相同雷诺数下的清水阻力系数。预计水平管道内工业浆体的管道水力坡度时, 浆体中的固体颗粒可按悬移状态来处理, 其阻力系数 λ^* 则由下式给出^[4]

$$\lambda^* = \lambda [1 - 0.4 \lg \mu_r + 0.2 (\lg \mu_r)^2] \quad (38)$$

式中 μ_r 为工业浆体的相对粘性系数。

对于粒径较为单一的沉降性浆体, 浮游限界速度 v_B 及均质流界限速度 v_H 可用下面的 Newitt 及 Lazarus 公式计算^[5]:

$$v_B = 17v_t \quad (39)$$

$$v_H = 4.4 \sqrt{gDC_D}^{1/4} (\delta - 1)^{1/6} \quad (40)$$

7 理论计算结果与试验实测结果的对比

表 1 给出了本文用于检验水力坡度理论计

表1 用于检验水力坡度理论计算结果的流动试验条件及试料参数

Table 1 Experimental ranges of published data that were used in verifying the calculated hydraulic gradient results

No.	Reference	D/mm	$\rho_s/(g \cdot cm^{-3})$	$c/\%$	$v_m/(cm \cdot s^{-1})$	Particle	d_{50} or d/mm
1	[6]	51. 5, 263, 495, 50. 7	2. 65	8. 4~ 34. 1	166~ 417	Fine sand	0. 165, 0. 52
2	[7]	263	2. 65	9	260~ 400	Gravel	13
3	[8]	150	2. 62	8. 7~ 13. 1	394~ 509	Fine sand	0. 44
4	[8]	150	2. 62	2. 7~ 10	292~ 559	Gravel	2. 04
5	[9]	52. 45	2. 62	18	191~ 364	Fine sand	0. 20~ 0. 61
6	[10]	38. 1	2. 65	8~ 28	143~ 418. 2	Fine sand	0. 152
7	[10]	38. 1	2. 65	5. 2~ 18. 2	282~ 356	Gravel	1. 88
8	[11]	40	1. 16	3~ 14	50~ 242	Poly carbonate pellets	3. 06
10	[4]	139	2. 75	26. 7	150~ 380	Iron tailings	0. 19

算结果的流动条件及试料参数。根据表1列出的流动试验条件及试验结果计算出的管道水力坡度与实测值或与用其它公式计算的水力坡度的计算值作了比较,如图2~4所示。图中的纵坐标表示水力坡度的计算值,横坐标表示水力坡度的实测值。

图2为固体颗粒处于悬移状态下理论求得的水力坡度值与实测值之间的比较。图3为固体颗粒处于滑、跳移状态下理论求得的水力坡度值与实测值之间的比较。图4为固体颗粒部分处于悬移,部分滑、跳移状态下理论求得的水力坡度值与实测值之间的比较。

从图2~4可以看出,理论计算结果与实

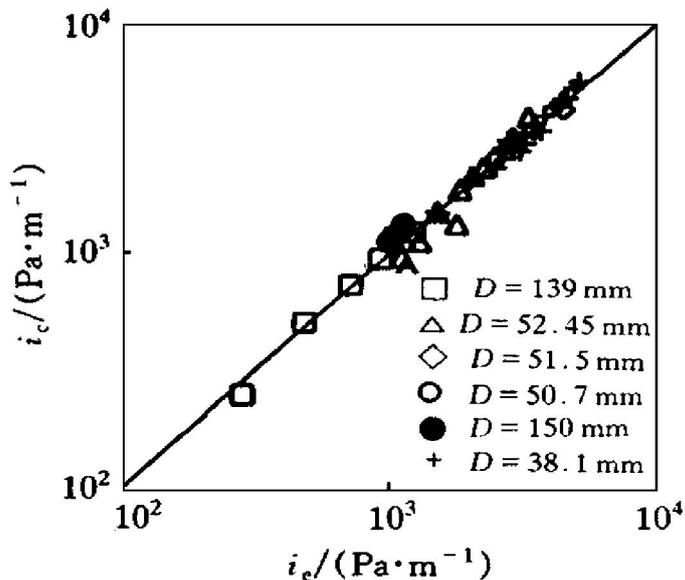


图2 水力坡度实测值 (i_e) 与计算值 (i_c) 的比较
Fig. 2 Measured and calculated values of hydraulic gradient
($c = 15.2\% \sim 28.6\%$, $d = 0.152 \sim 1.88$ mm)

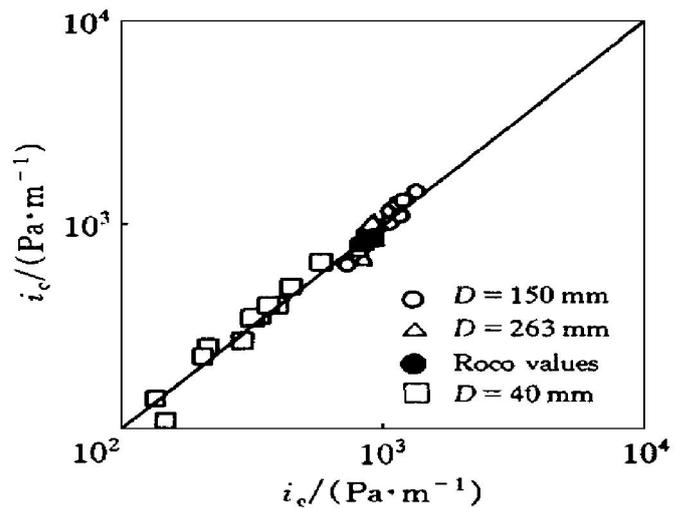


图3 水力坡度实测值与计算值的比较
Fig. 3 Measured and calculated values of hydraulic gradient
($c = 2.7\% \sim 14\%$, $d = 2.04, 3.06, 13$ mm)

测值的绝大部分偏差不大于10%。

利用本文及国内各研究机构提供的浆体水力坡度公式^[4] (金川公式 (a式), 长沙矿冶研究院公式 (b式), 鞍山矿山设计院公式 (c式), 煤炭科学研究院唐山分院公式1 (d式), 煤炭科学研究院唐山分院公式2 (e式), 北京有色冶金设计研究总院公式 (f式)), 对某铁尾矿浆体的摩阻试验进行了计算, 所获得的浆体水力坡度的计算值与实测值之间的比较结果如图5所示, 图中的纵坐标表示水力坡度, 横坐标表示浆体的平均流速。

从图5中可以看出, 利用本文公式计算的水力坡度值与实测值之间的一致程度要好于其

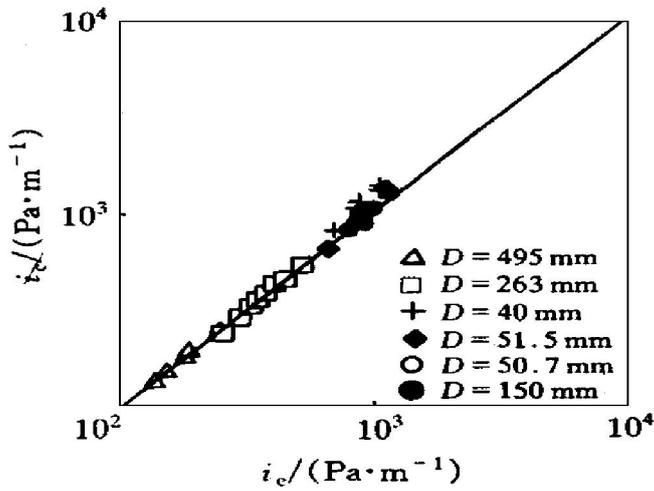


图4 水力坡度实测值与计算值的比较

Fig. 4 Measured and calculated values of hydraulic gradient

($c = 3\% \sim 34\%$, $d = 0.165 \sim 3.06 \text{ mm}$)

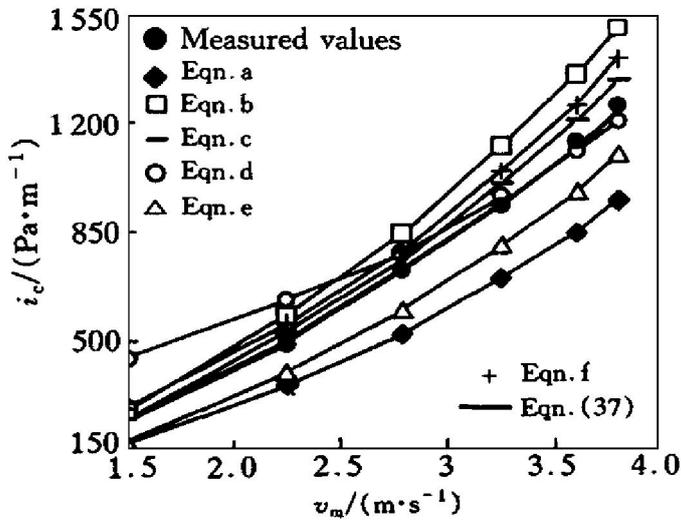


图5 尾矿水力坡度实测值与各家公式计算结果

Fig. 5 Measured and calculated values of hydraulic gradient of tailing sand

($d = 0.19 \text{ mm}$, $c = 26.7\%$, $D = 139 \text{ mm}$, $\delta = 2.75$)
他大多数公式的计算结果。

8 结论

(1) 在已知平均流速、输送浓度、管径和

管壁粗度的前提下，可利用本文提出的水力坡度公式比较精确地预计水平管道沉降性浆体或工业浆体的水力坡度；

(2) 用本文提出的水力坡度公式预计水平管道沉降性浆体水力坡度时，必须正确估计浆体中固体颗粒在管道内的移动状态。否则预计结果的精度将受到影响；

(3) 系数 k_3 的取值为 3.742。

REFERENCES

- Rose H E and Duckworth R A. The Engineer, 1969, 226 (12): 430- 434.
- Xu Zhenliang (许振良). J Liaoning Technology University (辽宁工程技术大学学报), 1998, 17 (5): 449- 454.
- Sato Hiroshi (佐藤博), Xu Zhenliang (许振良) and Cui Yushun (崔玉顺). Shigen to Sozai, 1993, 109 (10): 759- 767.
- Fei Xiangjun (费祥俊). Slurry and Grainy Solid Materials Transporting Hydraulics (浆体与粒状物料输送水力学). Beijing: Tsinghua University Press, 1994, 249- 406.
- Sato Hiroshi (佐藤博). Slurry Transporting Hydraulics. Japan Akita, 1988: 147.
- Roco M C and Shook C A. J Pipelines, 1984, 4 (1): 3- 13.
- Roco M C and Shook C A. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1983, 61 (8): 494- 503.
- Durand R. In: Proc Intern Assoc Hydr Res 5th Congr. Minneapolis, 1953, 89- 103.
- Xu Zhenliang (许振良). J of China Coal Society (煤炭学报), 1998, 23 (1): 91- 96.
- Bonnington S T. British Hydromechanics Research Association, R. R. 637, Cranfield, Bedford, 1959.
- Ayukawa K. Hydraulic Trans Japan Soc Mech Engrs, 1972, 38 (315): 2863- 2872.

HYDRAULIC GRADIENT FOR SETTLING SLURRY FLOW IN HORIZONTAL PIPE

Xu Zhenliang

*Institute of Resources and Surrounding Engineering,
Liaoning Technology University, Fuxin 123000, P. R. China*

ABSTRACT The hydraulic gradients of settling slurry flow transported in three kinds of moving states, i. e. suspension, saltation, or partially suspension were investigated, based on analyzing the changes of solid particles and water in momentum, velocity and their mass related to momentum exchanging over the acceleration period of the solid particles. Then a new mechanism model was proposed about the hydraulic gradient of settling slurry flow in horizontal pipe and a number of hydraulic gradients of settling slurry flow were calculated, the results of the hydraulic gradient and the analyses about the comparison between the calculated and the experimental results enunciated that the hydraulic gradient of settling slurry flow flowing in these states mentioned above can be accurately expected in the new model.

Key words slurry additional pressure interference force hydraulic gradient

(编辑 何学锋)