

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.009

赵利安, 许振良, 王铁力. 水沙非均质流水平管道流动临界速度研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 63-69. (ZHAO Li-an, XU Zhen-liang, WANG Tie-li. Experimental studies on critical velocities of sand-water heterogeneous flow in horizontal pipelines [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 63-69.)

水沙非均质流水平管道流动临界速度研究

赵利安¹, 许振良¹, 王铁力²

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院 采矿工程系, 辽宁 阜新 123000; 2. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司 管道输煤所, 湖北 武汉 430064)

摘要: 为研究水沙非均质流管道流动的临界速度, 在分析前人非均质流管道输沙试验研究成果的基础上, 利用数据回归方法建立水沙非均质流管道流动的堆积界限速度计算模型, 同时通过分析费祥俊阻力公式, 采用求导方式, 给出了水沙浆体阻力最小临界速度计算式。然后利用相关学者的若干组数据, 对所提出堆积界限速度和阻力最小临界速度的计算值和试验值进行对比。结果表明, 作者提出的堆积界限速度和阻力最小临界速度的预测值与实测值的偏差大都不超过 15%。最后分析了堆积界限速度和阻力最小临界速度随颗粒粒径、管道直径和浆体输送浓度变化的规律, 得出随着颗粒粒径减小, 两者差距逐渐变小; 随着管道直径变大, 两者差距逐渐变大; 随着输送浓度变大, 堆积界限速度呈略微变小的趋势, 而阻力最小临界速度则呈显著增大的趋势。

关键词: 水平管道; 非均质流; 堆积界限速度; 临界速度

中图分类号: TV142

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)04-0063-07

目前, 水库及河流疏浚工程、填海造地工程、尾矿输送工程等都不同程度地涉及到管道输沙技术。利用管道输送泥沙, 当输送流速降低到一定程度时, 泥沙颗粒就会在管道底部淤积, 形成滑动或固定的床层。管道底部有泥沙淤积时, 不仅会造成管道磨损、泄露, 而且会造成管道堵塞, 管路报废。因此, 实际工程中应采取技术措施, 防治泥沙等输送物质在管道底部淤积。另一方面, 水沙非均质流输送速度过大, 会造成能量浪费, 不经济。从这两个方面来讲, 管道输沙需考虑临界速度, 显然, 研究临界速度很有意义。

管道输沙时, 当输送速度降低到一定程度, 颗粒就会在管道底部淤积, 形成固定的床层, 此时的非均质流平均速度称为堆积界限速度(用 V_{cd} 表示)。浆体管道输送能量消耗最小时对应的浆体平均速度称为阻力最小临界速度(用 V_c 表示)。由于测量观察上的困难, 许多研究者认为这两个临界速度差别不大, 对其不加区分地加以研究。但严格说来, V_c 和 V_{cd} 不同, 不能将其混为一谈。本文基于多位学者的试验结果, 对 V_c 和 V_{cd} 的计算模型和相关关系进行了研究。

1 水平管道中浆体临界速度研究概况

非均质流管道流动的临界速度和流动状态关系见图 1。当非均质流的平均流速从悬浮状态下由大变小, 直至颗粒在管底开始滚动、滑动和沉积形成固定床时的最高流速就是堆积界限速度 $V_{cd}^{[1]}$ 。众多学者的研究已经证实, 若非均质流输送存在阻力最小点, 则在阻力最小点, 管内仍有沉积, 一般呈现滑动床形式^[2-4]。如图 1 所示, 当非均质流输送速度大于堆积速度 V_d 时, 管道底部的颗粒就会连续运动起来, 形成滑动床运动。通常情况下, 由于堆积界限速度 V_{cd} 易于观察, 因此研究较多。研究堆积临界速度 V_{cd} 和阻力最小临界速

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2014QN040)

作者简介: 赵利安(1973—), 男, 陕西长安人, 讲师, 博士, 主要从事浆体输送技术与理论研究。E-mail: anlizhao@163.com

度 V_c 对于管道输送工程有着重要意义,前者与管道安全运行息息相关,后者涉及到管道运输的经济性问题。

Newitt^[5]研究了堆积界限速度 V_{cd} ,其计算公式如下:

$$\frac{V_d}{\sqrt{2gD(s-1)}} = 13.9 \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{2}} C_D^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; s 为颗粒密度; d 为颗粒平均粒径; D 为管道直径; C_D 为阻力系数。式(1)表达式中缺少浓度因子,这与事实不符。因为临界速度 V_{cd} 随着颗粒大小、颗粒密度和固体含量的增加而增大^[13]。

K. C. Wilson 提出了列线图,该图用公式可近似表示为^[6]:

$$V_{cd} = \frac{8.8 \left[\frac{\mu_s(s-1)}{0.66} \right]^{0.55} D^{0.7} d_{50}^{1.75}}{d_{50}^2 + 0.11D^{0.7}} \quad (2)$$

式中: μ_s 为固体颗粒与管道底部的摩擦系数; d_{50} 为中值粒径。随后 Wilson 又对式(2)进行了改进^[7],得到:

$$\frac{V_d}{\sqrt{2gD(s-1)}} = \left(\frac{0.018}{f} \right)^{0.13} \quad (3)$$

式中: f 为流体的达西阻力系数。式(2)缺陷在于缺少浓度因素,式(3)相对式(2)而言,形式大大简化,但依旧缺少浓度因素。

张士林^[8]从清水、颗粒之间互相作用角度和颗粒启动力平衡条件角度研究了临界速度 V_{cd} 。浆体流速从小到大递增,依次得到流体速度分布、颗粒速度分布和浆体速度分布,判断颗粒启动力平衡条件是否满足,最终通过迭代法得到临界速度 V_{cd} 。该法虽具有较高的理论基础,但是涉及到大量参数的取值,易导致误差的增大,同时不利于直观地分析研究影响临界速度 V_{cd} 的各种因素。华景生等^[9]认为滑动底床滑移速度趋于零时的状态即为临界淤积状态,此时滑动底床的速度趋于零,在已知滑动床厚度的前提下,通过滑动床受力的平衡方程联立得到悬浮层平均速度后,进而求得堆积界限流速。但是在实践中,无法通过简单量测确定处于堆积界限流速下的滑动床厚度。高泉^[10]给出了宾汉流体固液两相流临界流速计算公式,而水沙非均质流一般为牛顿流体。

C. A. Shook^[11]从 Durand 阻力公式出发,提出了阻力最小临界速度 V_c 计算式为:

$$V_c / \sqrt{2gD(s-1)} = 2.43 (C_{\frac{1}{3}} / C_D^{\frac{1}{3}}) \quad (4)$$

式中: $C_{\frac{1}{3}}$ 为浆体输送浓度。

Durand 阻力公式是一个经验公式,缺乏理论基础。试验条件往往各种各样,导致把不属于非均质流的试验资料也放在一起进行统计,误认为试验资料范围越大,归纳出的经验公式就越具有代表性^[5]。Shook 公式建立在 Durand 阻力公式基础上,必然导致计算得到临界速度 V_{cd} 具有较大的误差。

汪东^[12]通过计算不同流动状态下的浆体阻力损失数据,然后通过最小二乘法得到水力坡度和浆体平均速度的拟合函数关系,再通过求导,得到阻力最小临界速度算法。该算法在计算阻力时,涉及到众多参数,计算较为复杂,容易导致较大误差。

以上各家公式,都提出了一定范围内各自适用的临界速度 V_{cd} 和 V_c 计算模型。但这些研究有的考虑因素不足,有的过于复杂和繁琐,无法进行理论分析,最重要的是没有研究水沙非均质流堆积界限流速 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 之间的内在联系。本文通过研究现有管道输沙的试验研究结果,对临界速度 V_{cd} 和 V_c 的计算方法进行研究,并进一步讨论两者之间的关系。

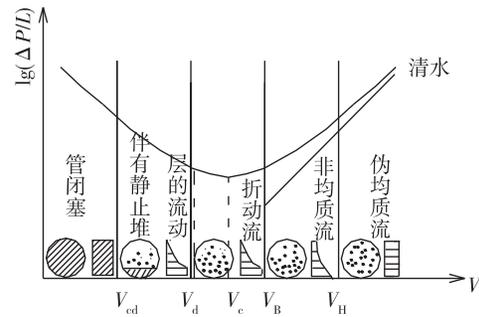


图1 非均质流临界速度和流动状态关系

Fig. 1 Relationships between critical speeds and flow states of heterogeneous fluid

2 临界速度理论研究

2.1 堆积界限速度 V_{cd}

众多研究发现,对于小颗粒浆体,其阻力损失曲线与输送清水类似,而对于粗颗粒非均质流管道输送,阻力曲线会出现如图1所示的最小点。其原因在于细颗粒浆体流动时,阻力特性类似单相流,阻力曲线类似清水阻力曲线(见图1)。而粗颗粒浆体流动时,一般采用两层模型计算阻力,因而阻力曲线不同于清水阻力曲线。从细颗粒曲线过渡到粗颗粒曲线界限并不明显,存在一个粒径范围。

R. G. Gillies^[14]从试验中发现,温度升高时,堆积界限速度有缓慢增大的趋势。温度对堆积界限速度 V_{cd} 的影响其实是通过改变输送流体的黏度实现的,可以用无量纲颗粒雷诺数 Re_p 表示。

考虑到量纲平衡,设:

$$V'_{cd} = \frac{V_{cd}}{\sqrt{gD(s-1)}} \quad (5)$$

根据众多研究成果,堆积界限速度的无量纲数 V'_{cd} 与输送浓度 C_v 和 d/D 的关系如图2和3所示。从图中可见,无量纲数 V'_{cd} 随输送浓度 C_v 的增大而降低,随 d/D 的增大而增大。

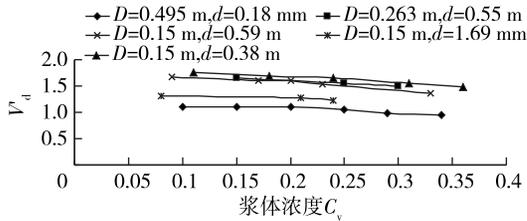


图2 V'_d 与 C_v 的关系

Fig. 2 Relationships between V'_d and C_v

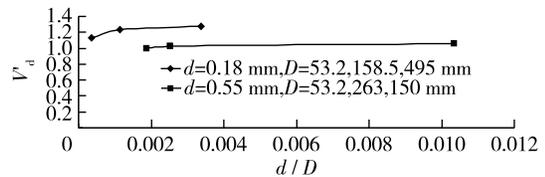


图3 V'_d 与 d/D 的关系

Fig. 3 Relationships between V'_d and d/D

因此,综上所述,堆积界限流速 V_{cd} 可用下式表示:

$$\frac{V_{cd}}{\sqrt{gD(s-1)}} = f \left[C_v, \frac{d}{D}, Re_p \right] \quad (6)$$

$$Re_p = \rho V_t d / \mu \quad (7)$$

式中: ρ 为清水密度; V_t 为固体颗粒沉降终速度; μ 为清水动力黏度。

采用 R. G. Gillies^[14] 和 V. Matousek^[15-16] 管道输沙试验中实测的堆积界限速度数据进行回归分析。Gillies 试验中粗砂粒径为 0.18~0.55 mm,密度为 2.65 g/cm³,体积浓度 C_v 范围为 0.15~0.4,颗粒尺寸分布为窄级配。Matousek 试验中粗砂粒径为 0.38~1.69 mm,密度为 2.65 g/cm³,体积浓度 C_v 范围为 0.13~43,颗粒尺寸分布为窄级配。回归后得到的堆积界限速度表达式为:

$$\frac{V_{cd}}{\sqrt{gD(s-1)}} = 1.257 C_v^{-0.05} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.0135} Re_p^{0.0135} \quad (8)$$

2.2 阻力最小临界速度 V_c

用求导法求解阻力最小临界速度是可行的,但前提是有合理的阻力公式。非均质流速度介于 $V_d \sim V_H$ 之间流动的特点是悬移质和推移质同时存在,此时必须采用适当的方法评价不同流速下悬移质和推移质颗粒各自密度,及其对阻力的影响,才能比较可靠地预测一定条件下非均质流管道输沙的水力坡度。费祥俊基于 Shook 及 Daniel 等管道中颗粒全部以推移质形式运动的水力坡度研究成果,分析了推移运动颗粒占全部颗粒的比例,进行适当近似和假定,给出了推移质颗粒的比例计算公式,在此基础上,提出了非均质流管道水力坡度的计算模型^[5],如下式所示。

$$i_m = \frac{f V_m^2}{2gD} \alpha + 11\mu_s C_v (S - 1) \frac{V_1}{V_m} \quad (9)$$

式中： V_m 为浆体平均输送速度； α 为考虑悬移质存在而抑制水流紊动对阻力的影响系数，可取常数0.9； μ_s 为颗粒与管道底部滑动的摩擦系数； S 为固体颗粒密度；摩擦系数 μ_s 和达西阻力系数 f 与试验条件有关。

式(9)虽然在推导过程中存在近似和简化，但物理概念清楚严谨，大量计算结果表明，其预测值与实测值比较相符^[5]。

对于粗颗粒窄级配情况，可以认为阻力最小临界速度就是 $i_m \sim V_m$ 曲线的极值点。对式(9)求导，用 $di_m/dV_m = 0$ 的条件，可以得到阻力临界速度 V_c 的公式为：

$$V_c = \sqrt[3]{\frac{11\mu_s C_v (s - 1) V_1 g D}{\alpha f}} \quad (10)$$

由上式可知，随着输送浓度增大，阻力最小临界速度 V_c 也增大。式(10)中沉降速度 V_1 的计算为了避免迭代和插图法的误差，采用斯万逊法计算^[1]。对M. Gogus等^[17-19]粗砂颗粒试验数据，采用斯万逊法计算的沉降速度和颗粒粒径的关系见图4。由图4可以看出粗砂颗粒沉降速度 V_1 和颗粒粒径 d 成正相关关系。故可认为在式(10)随着颗粒粒径 d 的增大，沉降终速度也增大，最终导致临界速度 V_c 增大。

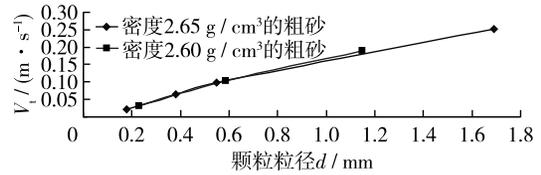


图4 粗砂颗粒沉降速度 V_1 和颗粒粒径 d 的关系

Fig. 4 Relationships between coarse particle settling velocity V_1 and particle size d

3 模型验证与讨论

3.1 堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 的验证

采用M. Gogus^[17-20]等的试验结果，对作者提出的堆积界限速度 V_{cd} 计算式进行验证。各学者的试验条件如下表1所示，其计算值和实测值的对比见图5。

表1 验证堆积界限速度的试验条件

Tab. 1 Related testing conditions for verifying deposition critical speeds

| 数据来源 | 颗粒种类 | 管道直径 D/mm | 颗粒粒径 d/mm | 浆体输送浓度 C_v | 颗粒密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ |
|--------------------------|------|--------------------|--------------------|--------------|---|
| Gogus 试验 ^[17] | 粗砂 | 150 | 1.090 | 0.011~0.037 | 2.60 |
| | 粗煤 | | 3.700 | 0.021~0.055 | 1.74 |
| Yotsukura 试验 | 粗砂 | 108 | 0.230 | 0.050~0.200 | 2.60 |
| | | | 0.585 | | |
| AVci 试验 | 粗砂 | 52 | 1.150 | 0.050~0.100 | 2.60 |
| | | | 0.596 | | |
| Durand 试验 | 粗砂 | 150 | 0.440 | 0.050~0.150 | 2.60 |

图5中堆积界限速度 V_{cd} 的计算值与实测值对比可以看出，计算值和实测值的偏差都小于15%，说明拟合公式能在一定程度上对堆积界限速度 V_{cd} 进行预测。

本文采用V. Matousek^[15-16]和R. G. Gillies^[14]的阻力试验数据(见表2)，根据阻力曲线特点，分析得到最小水力坡度时对应的浆体速度 V_m 即阻力最小速度 V_c 。用作者推导出的阻力最小临界速度 V_c 计算临界速度，与实测值进行比较，结果如图6所示。从图6可见，个别偏差达到了20%，但大部分数据的误差均小于15%。

表2 验证最小阻力损失临界速度的试验条件

Tab. 2 Related testing conditions for verifying minimum head-loss critical speeds

| 数据来源 | 颗粒种类 | 管道直径 D/mm | 颗粒粒径 d/mm | 浆体输送浓度 C_v | 颗粒密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ |
|-------------|------|--------------------|--------------------|--------------|---|
| Matousek 试验 | 粗砂 | 150 | 0.38 | 0.13~0.43 | 2.65 |
| | | | 1.69 | 0.15 | |
| Gillies 试验 | 粗砂 | 53.2 | 0.18 | 0.15~0.45 | 2.65 |
| | | 263 | 0.55 | 0.15~0.43 | |

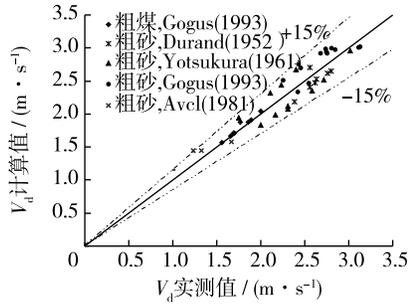


图5 V_{cd} 的计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between measured and computed values of V_{cd}

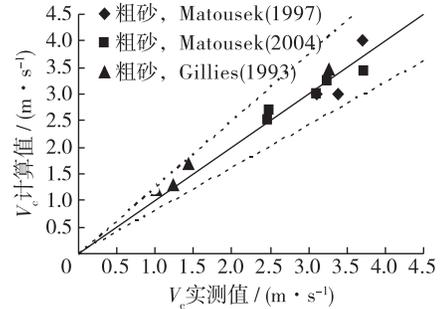


图6 V_c 的计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between measured and computed values of V_c

本文模型与 Shook 模型(8)计算的临界速度 V_c 的对比结果表明,作者模型的最大偏差为 14.28%, Shook 计算模型最大偏差为 25%。显然,本文模型的计算精度优于 Shook 计算模型。

从上面计算结果来看,本文提出的最小阻力临界速度 V_c 和堆积界限速度 V_{cd} 的计算模型,对于颗粒粒径为 0.18~1.69 mm 的粗砂浆体以及颗粒粒径为 3.7 mm 的粗煤窄级配浆体,体积浓度在 0.01~0.45,公式预测值和各家输沙试验实测值偏差大部分偏差值均小于 15%。

3.2 堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 的关系

从图 1 可知,堆积界限速度 V_{cd} 通常比阻力最小临界速度 V_c 稍微小一些,这种现象在文献^[14-16,21]的管道输沙试验中得到了证实。采用 Gillies 数据,对于颗粒粒径 0.18 mm,管道内径 53.2 mm,颗粒浓度范围 0.10~0.45,颗粒密度为 2.65 g/cm³ 的水沙非均质流,用上面提到的公式分别计算了堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c ,计算结果如图 7 所示。从图 7 可见,浆体浓度越小,堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 差值就越小。从图中还可以看出,其他条件相同时,随着浓度变大,堆积界限速度 V_{cd} 有略微变小的趋势,而临界速度 V_c 则呈显著增大的趋势。在低浓度时,两者有可能合二为一。因此,低浓度时可以认为两者相差不大。

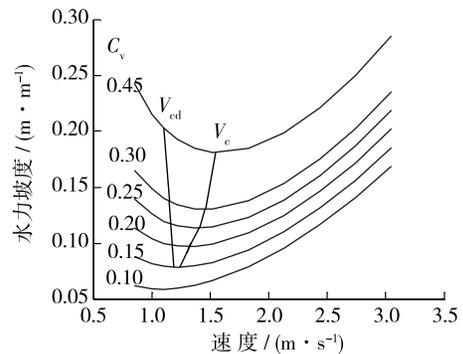
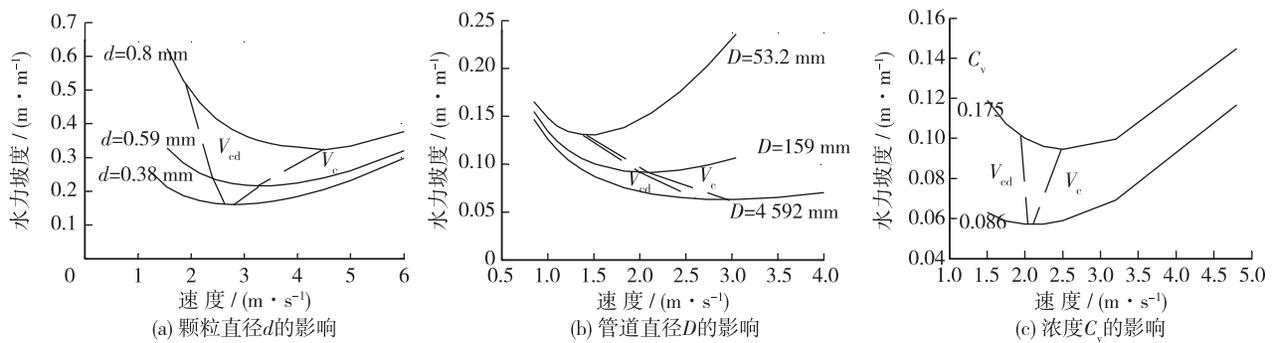


图7 浓度 C_v 对 V_{cd} 和 V_c 的影响

Fig. 7 Influences of C_v on V_{cd} and V_c

用 Matousek 试验数据计算的颗粒粒径对 V_{cd} 和 V_c 的影响见图 8(a),其中,管道直径 D 为 150 mm, C_v 为 0.23~0.24。从图中可见,随着颗粒粒径的减小, V_{cd} 和 V_c 的差距逐渐变小。管道直径对 V_{cd} 和 V_c 的影响如图 8(b)所示。图中的计算采用 Gillies 数据,颗粒直径为 0.18 mm,浓度 C_v 在 0.30 左右。可见,随着管道直径变大, V_{cd} 和 V_c 的差距逐渐变大。利用 G. R. Addie 等的试验数据^[21],计算结果如图 8(c)所示。试验中采用的粗砂颗粒平均粒径为 0.3 mm,管道直径为 200 mm,颗粒密度为 2.65 g/cm³。计算结果与图 7 类似,即浆体浓度越小,堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 差值就越小。

图8 颗粒直径 d 、管道直径 D 和浓度 C_v 对 V_{cd} 和 V_c 的影响Fig. 8 Influences of d , D and C_v on V_{cd} and V_c

4 结 语

(1) 通过对前人试验数据的分析,分别给出了堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 的计算方法。

(2) 通过有关学者的试验结果,对作者的计算公式进行了验证,结果表明,对于体积浓度在 0.01~0.45, 颗粒粒径 0.18~1.69 mm 的粗砂窄级配非均质流,本文研究结果在一定程度上可较为准确地预测堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 的值。

(3) 研究了堆积界限速度 V_{cd} 和阻力最小临界速度 V_c 之间的关系,发现管道中浆体浓度越小,颗粒越小,管道直径越小, V_{cd} 和 V_c 的差别就越小。

参 考 文 献:

- [1] 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: 15-16. (ZHAO Li-an. Study on flow law of large particle slurry in pipeline[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011: 15-16. (in Chinese))
- [2] 王绍周. 管道输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 134-136. (WANG Shao-zhou. Pipeline transportation engineering [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003: 134-136. (in Chinese))
- [3] 高明. 城市排水管道内污水两相流临界流速研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006. (GAO Ming. The research of the critical velocity of sewage flowing as two-phase fluid in city drainpipe[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese))
- [4] 白晓宁, 胡寿根. 浆体管道输送的阻力特性及其影响因素分析[J]. 水力采煤与管道运输, 2000(3): 3-8. (BAI Xiao-ning, HU Shou-gen. Resistance characteristics of slurry pipeline transportation and its influence factors analysis[J]. Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation, 2000(3): 3-8. (in Chinese))
- [5] 费祥俊. 浆体与颗粒物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 259-276. (FEI Xiang-jun. Transportation of slurry and granular materials in hydraulic[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 259-276. (in Chinese))
- [6] WILSON K C. Deposition-limit nomograms for particles of various densities in pipeline flow[J]. Proceedings Hydrotransport 6, BHRA, Cranfield, UK, 1979: 1-12.
- [7] WILSON K C. Influence of particle properties on solids effect[C]//Proc 10 Int Kol. Massenguttransport durch Rohrleitungen, Univ. GH Paderborn, Germany, 1992.
- [8] 张士林. 浆体管道淤积流速数值计算方法研究[J]. 水力采煤与管道运输, 2011(4): 6-9. (ZHANG Shi-lin. Research on numerical calculation method of the flow velocity of the slurry pipeline[J]. Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation, 2011(4): 6-9. (in Chinese))
- [9] 华景生, 万兆惠. 管道输沙中滑动底床的试验研究[J]. 水利学报, 1989(12): 21-30. (HUA Jing-sheng, WAN Zhao-hui. Experimental study on the sliding bed in pipe hydrotransport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(12): 21-30. (in Chinese))
- [10] 高泉. 粗颗粒物料管道输送临界流速的计算[J]. 长沙矿山研究院季刊, 1983, 3(4): 1-12. (GAO Quan. Calculation of critical flow velocity of coarse granular materials[J]. Quarterly of CIMR, 1983, 3(4): 1-12. (in Chinese))

- [11] SHOOK C A. Pipeline solid;the design of short distance pipelines[C]//Proc Symp on Pipeline Transport of Solid, Canadian Soc Chem Engin, 1969.
- [12] 汪东. 沉降性浆体水平管道临界流速的研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2004. (WANG Dong. Study on the critical flow velocity of settling slurry flow in the horizontal pipe[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2004. (in Chinese))
- [13] 瓦斯普 E J. 固体物料的浆体管道输送[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1980. (WASP E J. Slurry pipeline transportation of solid materials[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1980. (in Chinese))
- [14] GILLIES R G. Pipeline flow of coarse particle slurries[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1993.
- [15] MATOUSEK V. Flow mechanism of sand-water mixtures in pipelines[D]. Netherlands: Delft University, 1997.
- [16] MATOUSEK V. Dredge pumps and slurry transport[EB/OL]. Opening Course of Offshore Engineering, Delft University of Technology, 2004. <http://ocw.tudelft.nl/courses/offshore-engineering/dredge-pumps-and-slurry-transport/readings/3-flow-of-mixture-in-a-pipeline/>
- [17] GOGUS M, KOKPINAR M A. Determination of critical flow velocity in slurry transporting pipeline systems, 12th International Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport, 28-30, September Brugge, Belgium, 1993:743-757.
- [18] YOTSUKURA N. Some effects of bentonite suspensions on sand transport in a smooth 4-inch pipe[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1961.
- [19] AVCI I. Experimentally determination of critical flow velocity in sediment carrying pipeline systems[R]. Istanbul, 1981.
- [20] DURAND R. The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes[D]. London: College National Board, 1952.
- [21] ADDIE G R, HAMMAR J R. Head loss pipeline tests of settling slurries at low velocities[C]//International Mechanical Engineering Congress Perth, Western Australia, May: 15-19, 1994.

Experimental studies on critical velocities of sand-water heterogeneous flow in horizontal pipelines

ZHAO Li-an¹, XU Zhen-liang¹, WANG Tie-li²

(1. *Department of Mining Engineering, Mining Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;*
2. *Department of Pipeline Coal Transporting, Wuhan Design and Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Wuhan 430064, China*)

Abstract: In order to study the critical speeds of the sand-water heterogeneous flow in the pipelines, through analysis of a large number of previous research results, at first with the aid of the data regression, a calculation model for deposition critical speeds of the sand-water heterogeneous flow in pipelines is developed; at the same time by the Durand resistance formula derivation, the calculation formula for the minimum head-loss critical speeds is put forward. Then several groups of related data from related scholars are used to verify and analyze the calculated values and experimental values of deposition critical speeds and the minimum head-loss critical speeds, and the calculated results indicate that the maximum deviation between the calculated results of the critical speeds and the minimum critical speeds and the related test results are not more than 15%. In the end, the relationships between the deposition critical speeds and the minimum head-loss critical speeds are given, and the change law of the deposition critical speeds and the minimum head-loss critical speeds with the particle size, the diameter of the pipelines and the slurry transport concentration are also analyzed, and it is found that with the decrease of the particle size, the gap between the deposition critical speeds and the minimum head-loss critical speeds becomes smaller gradually. As the diameter of the pipelines becomes larger, the gap between the two becomes larger gradually. With the increasing of the conveying concentration, the accumulation of the boundary speeds has a slight decrease trend, while the minimum head-loss critical speeds have a significant increase.

Key words: horizontal pipeline; heterogeneous flow; deposition critical speed; critical speed