

矿浆管道输送临界流速试验研究

许振良¹, 蔡荣宦¹, 武日权¹, 王铁力²

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 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 430070)

摘要:为了精确计算矿浆管道输送的临界流速,根据前人试验数据,分析了浆体浓度、管道直径、浆体粒径组成及浆体密度等对临界流速的影响,并进行机理分析。在研究前人计算临界流速公式的基础上,提出计算临界流速公式新模型及临界流速的新定义,通过量纲分析拟合出临界流速计算新公式,并对新公式进行验证。结果表明,临界流速随着浆体浓度和管径的增加而增大,随颗粒粒径和管径比值的增大而减小。本文的试验临界流速实测值与计算值最大误差为2.69%,平均误差为1.29%;文献中试验的临界流速实测值与计算值平均误差分别为4.18%、10.25%、11.45%;临界流速计算新公式平均误差均在12%以内,满足稀悬液浆体管道输送临界流速的预测要求。

关键词:矿浆管道;水力输送;临界流速;量纲分析

中图分类号:TV142

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)03-0139-05

Experimental study on critical velocity of slurry pipeline transportation

XU Zhenliang¹, CAI Ronghuan¹, WU Riquan¹, WANG Tieli²

(1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Department of Pipeline Coal Transporting, Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to accurately calculate the critical velocity of slurry pipeline transportation, the influence of slurry concentration, pipeline diameter, slurry size distribution and slurry density on the critical flow velocity was analyzed according to previous experimental data, and the mechanism was elucidated. The results show that with the increase of slurry concentration and pipeline diameter, the critical velocity increases, while the critical velocity decreases gradually with the increasing of particle size and diameter ratio. On the basis of previous studies, a new model for calculating critical velocity and a new definition on critical velocity are proposed. It is fitted by dimensional analysis and verified by experiment. The maximum error between calculated value and measured value is 2.69%, and the average error is 1.29%. The average error of measured critical velocity and tested value from three famous scholars are 4.18%, 10.25%, 11.45%, respectively. The average error of the new formula to verify the calculation of critical velocity is less than 12%, which meets the prediction of critical velocity.

Key words: slurry pipeline; hydraulic transportation; critical velocity; dimensional analysis

0 引 言

近年来,矿浆管道输送发展迅速,多条运量大、距离长的浆体管道已在设计和施工阶段,其中包括我国正在建造的神渭输煤管道,全长727 km,设计年输煤能力10 Mt^[1]。管道输送物料已达10余种,

如煤浆、铁矿浆、磷矿浆、石灰石矿浆、尾矿等,只要固液混合物的化学成分稳定,均可通过管道水力输送。矿浆管道输送具有运营和维修成本低、人力少、环境影响小、自动化程度高等优点,已发展成为继铁路、公路、水运、空运之后的第五大运输方式。临界流速是矿浆管道输送设计的重要参数,是管道输送

收稿日期:2017-09-26;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.03.026

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874059);中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2014QN040)

作者简介:许振良(1956—),男,吉林永吉人,教授,博士,主要从事采矿工程和浆体管道输送理论研究。E-mail:lgdxzl@aaliyun.com。通讯作者:蔡荣宦,硕士研究生。E-mail:925816163@qq.com

引用格式:许振良,蔡荣宦,武日权,等.矿浆管道输送临界流速试验研究[J].洁净煤技术,2018,24(3):139-143.

XU Zhenliang, CAI Ronghuan, WU Riquan, et al. Experimental study on critical velocity of slurry pipeline transportation[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(3): 139-143.

速度的下限,准确计算临界流速对矿浆管道输送能否成功运行起决定性作用。Durand^[2]提出了颗粒从悬浮状态进入管道底部有床面滑动或滚动的临界速度计算公式;瓦斯普^[3]通过分析已有临界流速资料,对Durand模型进行修正,得到临界速度计算公式;Shook^[4]认为临界流速就是水力坡度-平均流速曲线最低点处的流速。但是由于固-液两相流输送理论的复杂性和特殊性,有些理论还没有统一的定论,学者们对临界流速定义还存在差异,现有大多计算公式都是经验公式或半经验公式,公式的适用范围比较局限,不具有普遍性。本文给出了临界流速的定义,结合已有试验数据,分析了浆体浓度、管道直径、浆体粒径组成及浆体密度等对临界流速的影响,通过量纲分析,拟合出临界流速计算公式,并对公式进行验证,以期精确计算矿浆管道输送的临界流速。

1 矿浆管道输送临界流速定义及计算公式

目前,国内外学者对临界流速还没有统一的定义。Durand定义管道底部将要出现颗粒淤积状况时的流速为临界流速,也称“极限淤积流速”^[2,5]。Thomas^[6]认为应当采用管道底部颗粒出现不动或滑动时的流速作为临界流速,并定义为“最小输送流速”。Graf等^[7]认为临界流速是固体颗粒由悬浮状态沉淀下来形成固定底床时所对应的流速,命名为“临界淤积流速”。费祥俊^[8]、王邵周^[9]主张使用“临界不淤流速”,即固体颗粒由悬浮状态转为在床面滚动或滑动时的流速为临界流速。笔者主张将固体颗粒由悬浮状态转为沿水平管道底部移动时的流速定义为矿浆管道输送临界不淤流速,其中固体颗粒沿水平管道底部移动状态包括滑动、滚动和跳动状态等。

国内外学者为准确确定临界流速进行了大量试验,得到了不同形式的临界流速经验或半经验公式。由于学者对临界流速的定义存在差异,加之试验条件、试验材料、试验范围以及水力参数不同,也未综合考虑管道水力输送时的各因素,导致临界流速计算公式有所区别,经验或半经验公式具有一定的局限性,实测值与计算值也存在较大偏差。

2 试验条件

本文试验数据借鉴文献[10],采用砂样进行浆体管道输送临界流速试验,采用3种不同管径的钢

管进行水力输送试验,管径分别为76、100、133 mm,分别在每个管径中对固体颗粒质量分数为15%~40%(体积分 C_V 为5%~15%)的海砂进行水力输送试验,测定对应的临界流速 v_c 。试验砂样取自海南,砂样的平均密度为2764 kg/m³,粒度分布如图1所示,加权平均粒径为0.391 mm,试验数据见表1。

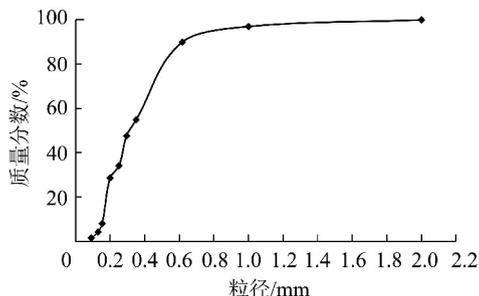


图1 物料粒度分布

Fig. 1 Size distribution of material

表1 3种管径钢管的试验数据

Table 1 Experimental data of three pipeline diameters

133 mm		100 mm		76 mm	
体积分 数/%	实测临界流 速/(m·s ⁻¹)	体积分 数/%	实测临界流 速/(m·s ⁻¹)	体积分 数/%	实测临界流 速/(m·s ⁻¹)
6.12	2.07	5.80	1.82	6.93	1.56
7.58	2.18	8.08	1.92	9.54	1.68
9.36	2.23	9.65	1.97	10.93	1.72
11.43	2.33	12.59	2.09	13.14	1.78
13.45	2.51	15.26	2.19	15.38	1.89

3 矿浆管道输送临界流速影响因素

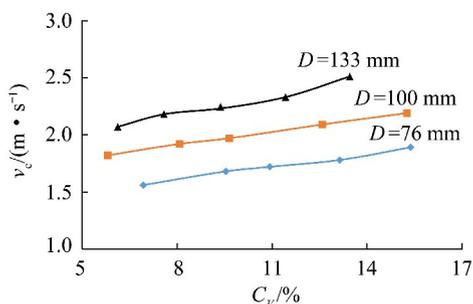
3.1 浆体浓度对临界流速的影响

浆体浓度对临界流速的影响具有多样性,可分为3类^[11]。①随着固体颗粒浓度的增加,细粒级颗粒的临界流速不断增大;②随着固体颗粒浓度的增加,粗粒级颗粒的临界流速可能减小也可能增大,在颗粒粒径较粗的浆体中,一般黏度由清水黏度决定,这时提高固体颗粒的浓度,临界流速也会增大;③随着固体颗粒浓度的增加,中等粒级颗粒的临界流速不断减小。

固体颗粒浓度提高,导致固液混合浆体的有效黏度增加,使固体颗粒在固液混合的浆体中有效重力减小,沉降速度和临界流速减小;但固体颗粒浓度提高,也会抑制水流的紊动强度,使固体颗粒在固液混合浆体中的支持力减小,使固体颗粒悬浮能力下

降,临界流速也因此增大^[9]。固体颗粒浓度较低时,提高固体颗粒浓度会抑制水流的紊动强度,使水流紊动提供的支持力较增加浆体黏度减小的有效重力更占优势,会使临界流速增大;固体颗粒浓度较高时,提高固体颗粒浓度会使固体颗粒在固液混合浆体中沉降速度减小起主导作用,临界流速减小,但进一步提高固体颗粒浓度,使固体颗粒浓度达到一定程度,浆体将会转入层流状态,流动不稳定,且阻力也会急剧增大^[8]。

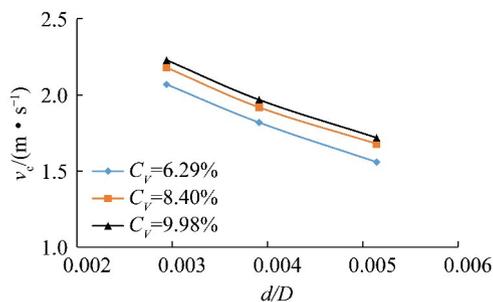
固体颗粒粒径 d 为 0.391 mm,不同管道直径 D 下, v_c 与 C_V 的关系如图 2 所示。由图 2 可知,3 种管径的临界流速均随着体积分数的增大而增大,说明物料体积分数增大时,抑制了水流的紊动强度,水流紊动强度减弱较增加浆体有效黏度的作用更占优势,即由水流紊动提供的支持力变小,需要更高的流速使固体颗粒悬浮,因此临界流速增加。

图 2 v_c 与 C_V 的关系Fig. 2 Relationship between v_c and C_V

3.2 管道直径对临界流速的影响

国内外学者就管道直径对临界流速影响的看法存在差异,但大多认为临界流速与管道直径的 $1/2 \sim 1/4$ 次方成正比。Durand^[2]认为临界流速与管道直径的 $1/3$ 次方成正比。管道直径越大,管道绝对粗糙度越小、与颗粒粒径等厚度的流体层的层间速度梯度变小,导致由速度差引起的托举压强减小,固体颗粒难以充分悬浮和维持原来的浓度梯度,因此临界流速会增大^[12]。

由图 2 可知,随管道直径的增加,临界流速变大,数据拟合后发现其临界流速与管道直径的 $1/2$ 次方成正比,与上述结果吻合。 d/D 与 v_c 的关系如图 3 所示。可知,随 d/D 增大,临界流速逐渐减小。由于固体颗粒粒径不变, d/D 由管径决定。管径加大,固体颗粒从管底悬浮难度更大,难以维持原有的垂线浓度梯度,需要更大的输送速度,临界流速逐渐增大,即随着 d/D 增大,临界流速逐渐减小。

图 3 v_c 与 d/D 的关系Fig. 3 Relationship between v_c and d/D

3.3 固体颗粒粒径对临界流速的影响

固体颗粒越粗,在相同体积分数的浆体中,其有效重力增加,沉降速度增大,更容易沉降,因此如果使颗粒悬移,就需要提高流速^[8]。若固体颗粒较细,容易形成均质浆体,固体颗粒不易沉降,流速降低。工业固体颗粒管道运输需要合理的粒级分布,细颗粒会形成絮网结构,降低粗颗粒的沉降速度,继而减小输送速度。为了系统安全稳定运行,工业固体颗粒管道运输对上限粒径有严格限定^[13]。

3.4 固体颗粒密度对临界流速的影响

固体颗粒密度是影响临界流速的重要因素。固体颗粒密度越小,固体颗粒在浆体中越易悬浮,临界流速降低。固体颗粒密度越大,在其他条件相同的情况下,重力变大,颗粒更易沉降,临界流速变大。因此,临界流速随着固体颗粒密度的增大而增大。

4 矿浆管道输送临界流速的计算

丁宏达^[14]提出大多数非均质浆体管道输送临界流速计算模型如下^[3,8-9,15-17]:

$$v_c = K_0 (C_V)^m \left(\frac{d}{D}\right)^n C_{d0}^p [2gD(s-1)]^q \quad (1)$$

式中, K_0 为系数; C_{d0} 为颗粒沉降阻力系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; s 为固体物料质量与 4 °C 时同体积纯水质量的比值; m, n, p 和 q 为指数。

丁宏达^[14]认为上述各模型中 C_{d0} 一般按照颗粒大小分区取值,但通常浆体管道输送颗粒雷诺数 Re 多在过渡区 $1 < Re < 20$ 内, C_{d0} 和 Re 可用丁氏^[14]经验公式(2)和(3)计算。

$$C_{d0} = 24Re^{-0.764} \quad (2)$$

$$Re = [\rho_0 g (\rho_s - \rho_0) d^3 / 18\mu^2]^{0.812} \quad (3)$$

式中, ρ_0 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_s 为固体颗粒的密度, kg/m^3 ; μ 为水的动力黏度。

联立式(2)和式(3)得 C_{d0} 的计算公式为

$$C_d = K_1 d^{-1.861} \quad (4)$$

式中, K_1 为系数。

由式(4)可知, C_d 对临界流速的影响可通过 d 对临界流速影响来体现。因此通过量纲分析并借鉴已有研究成果^[10,14-16]得到临界流速计算模型如下:

$$\frac{v_c}{\sqrt{2gD(s-1)}} = K_2 C_v^h \left(\frac{d}{D}\right)^j \quad (5)$$

式中, K_2 为系数; h 和 j 为指数。

采用表1试验数据,对式(5)进行回归分析,通过 Excel 多元线性回归拟合出临界流速计算公式为

$$\frac{v_c}{\sqrt{2gD(s-1)}} = 1.424 (C_v)^{0.21} \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.04} \quad (6)$$

为检验式(6)准确性和适用性,将本文试验数据与文献[2]、[18-19]试验数据代入式(6)进行验证,具体见表2。本文试验临界流速计算值与实测值比较如图4所示,文献试验临界流速的计算值与实测值比较如图5所示。

表2 著名学者试验数据

Table 2 Experimental data of three famous scholars

文献	D/m	d/mm	s	C_v	$v_c/(m \cdot s^{-1})$
	0.108	0.585	2.60	0.050	1.99
[2]	0.108	0.585	2.60	0.100	2.12
	0.108	0.585	2.60	0.150	2.44
	0.052	3.200	1.41	0.050	0.60
[19]	0.052	3.200	1.41	0.100	0.65
	0.052	3.200	1.41	0.150	0.68
	0.150	0.440	2.60	0.050	2.47
	0.150	0.440	2.60	0.100	2.65
[18]	0.150	0.440	2.60	0.150	2.71
	0.150	2.040	2.60	0.075	2.53
	0.150	2.040	2.60	0.079	2.41
	0.150	2.040	2.60	0.100	2.62

由图4、5可知,本文试验的临界流速实测值与计算值最大误差为2.69%,平均误差为1.29%;文献[19]试验的临界流速实测值与计算值最大误差为8.57%,平均误差为4.18%;文献[2]试验的临界流速实测值与计算值最大误差为13.50%,平均误差为10.25%;文献[18]试验的临界流速实测值与计算值比较个别点偏差达到15%,但大部分点的偏差均小于15%,平均误差为11.45%;文献中试验的临界流速实测值与计算值平均误差为9.33%;经检验,临界流速计算新公式验证的平均误差在12%以内。因此,式(6)对临界流速的计算值与实测值基

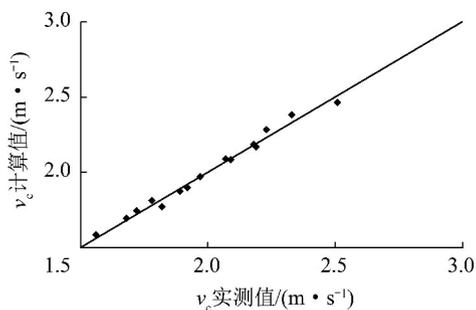


图4 本文 v_c 计算值与实测值的对比

Fig. 4 Comparison between measured values and computed values of v_c in paper

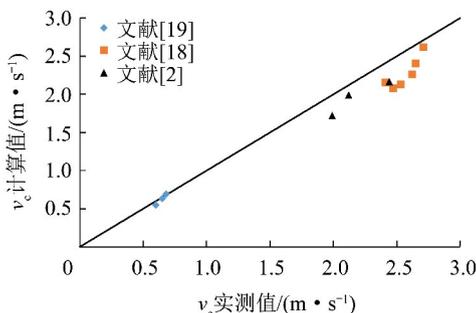


图5 文献 v_c 计算值与实测值的对比

Fig. 5 Comparison between measured values and computed values of v_c of famous scholars

本吻合。由于本文是对体积分数5%~15%的海砂进行水力输送试验,对公式适用性检验时,所采用的文献中试验数据体积分数也在5%~15%,因此,式(6)适用稀悬液浆体管道输送临界流速的预测。

5 结 论

1) 矿浆管道输送的临界流速定义为固体颗粒由悬浮状态转为沿水平管道底部移动状态时的流速,其中固体颗粒沿水平管道底部移动状态包括滑动、滚动和跳动状态等。

2) 随着浆体浓度的增加,临界流速不断增大;管径增加,临界流速随之增大;颗粒粒径和管径比值增大,临界流速逐渐减小。

3) 通过对前人成果的分析,并利用文献中的试验数据,给出了矿浆管道水力输送的临界流速计算新方法,并对新计算方法进行验证。本文试验临界流速实测值与计算值最大误差为2.69%,平均误差为1.29%;文献中试验的临界流速实测值与计算值平均误差为9.33%;经检验,临界流速计算新公式平均误差在12%以内,满足稀悬液浆体管道输送临界流速的预测要求。

参考文献(References):

- [1] 陈光国,夏建新.我国矿浆管道输送技术水平与挑战[J].矿冶工程,2015,35(2):29-32.
CHEN Guangguo, XIA Jianxin. Existing technology and technical challenges in slurry pipeline transportation development in China[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015, 35(2):29-32.
- [2] DURAND R. The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes[D]. London:College National Board,1952.
- [3] 瓦斯普. 固体物料的浆体管道输送[M]. 北京:中国水利水电出版社,1980.
- [4] SHOOK C A. Pipelining solids:The design of short-distance pipelines[M]. Toronto:Chemical Engineering,1969.
- [5] 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.
- [6] THOMAS D G. Transport characteristics of suspensions: Part VI. minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes[J]. AICHE Journal, 1962, 8(3):373-378.
- [7] GRAF W H, ROBINSON M P, YUCEL O. Critical velocity for solid-liquid mixtures[C]//Transport of solids in conduits Part 1. Bethlehem:Lehigh University,1970.
- [8] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [9] 王绍周. 粒状物料的浆体管道输送[M]. 北京:海洋出版社,1998.
- [10] 刘晓东. 水力输砂试验研究[J]. 水力采煤与管道运输,2004(1):3-7.
- [11] 卢勇. 管道固-液两相浆体输送理论研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [12] 邱灏,曹斌,夏建新. 粗颗粒物料管道水力输送不淤临界流速计算[J]. 水利水运工程学报,2016(6):103-108.
QIU Hao, CAO Bin, XIA Jianxin. Non-silting critical velocity calculation of coarse-grained materials in hydraulic pipeline[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6):103-108.
- [13] 汪东,许振良,孟庆华. 浆体管道输送临界流速的影响因素及计算分析[J]. 管道技术与设备,2004(6):1-2.
WANG Dong, XU Zhenliang, MENG Qinghua. Effect factors and calculating analysis of critical flow velocity in slurry pipeline transportation[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2004(6):1-2.
- [14] 丁宏达. 物料粒径对浆体管道输送临界流速的影响[J]. 水力采煤与管道运输,2011(4):1-6.
- [15] 秦德庆,曹斌,夏建新,等. 不同颗粒物料管道水力输送不淤临界流速的确定[J]. 矿冶工程,2014,34(1):9-11.
QIN Deqing, CAO Bin, XIA Jianxin, et al. Study on non-depositing velocity of different particle materials in pipeline by hydraulic transportation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(1):9-11.
- [16] 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 Zhenliang, WANG Tieli. Experimental studies on critical velocities of sand-water heterogeneous flow in horizontal pipelines[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4):63-69.
- [17] 曹斌,李婧贤,徐心一,等. 粗颗粒管道水力输送试验研究[J]. 泥沙研究,2016(3):61-66.
CAO Bin, LI Jingxian, XU Xinyi, et al. Experimental study on pipeline hydraulic transport of coarse particles[J]. Journal of Sediment Research, 2016(3):61-66.
- [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] MEHMET A K, MUSTAFA G. Critical flow velocity in slurry transporting horizontal pipelines[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2001, 127(9):763-771.