

挤压清淤抓斗泥浆输送能耗计算

欧阳义平 杨启

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室,上海 200240)

摘要: 挤压清淤抓斗是一种为了提高疏浚效率和能量利用率、减少环境污染而研发的新型抓斗。该类抓斗结构的特殊性决定了它输送泥浆时的能耗不同于一般的疏浚设备。本文基于现有的有关浆体输送的理论和试验成果,进行分析,推导出适用于挤压清淤抓斗泥浆输送的能耗计算公式,然后利用得到的计算公式对浆体输送过程中的能耗进行计算。通过调整相关的参数,如浆体体积流量、挖掘浓度和输泥管直径等,分析了不同参数对输送能耗的影响,并确定了在各不同参数下比能耗增加不剧烈的最小管径,定义为临界管径。进而为挤压清淤抓斗设计中输泥管直径和流量的确定提供科学有效的指导。

关键词: 挤压抓斗; 泥浆输送; 管道阻力; 临界管径; 比能耗

中图分类号: U615.351.4 文献标识码: A 文章编号: 0468-155X(2013)01-0027-07

引言

挤压清淤抓斗是专门用于清理河流、湖泊和水库等底部的淤泥质淤积物的设备,郁杨天^[1]首先对其进行了研究。它在结构上与常规抓斗的不同之处在于它有一对能够绕颚板转动的挤压板和一根连接到水面的输泥管,见图1(b)。挤压清淤抓斗在清淤过程中,将被清除物(如淤泥)以浆体的形式利用管道进行输送,不必像常规抓斗那样通过反复提升抓斗来移动被清除物,减小了提升抓斗的能耗和被清除物的泄漏带来的水体污染,并且,不必提升抓斗可以缩短抓斗的工作周期,提高工作效率,因此,它比常规抓斗更高效、节能和环保。图1(b)为挤压清淤抓斗的一半,只绘制了有关输送泥浆的部分。挤压板在驱动力的作用下将挖掘入抓斗内的淤泥浆挤压输送到水面。该抓斗的工作是周期性的,如图1(a)所示,所以输泥管中的泥浆流动也是间歇性的,这也意味着管道内的浆体每个周期都要从静止开始流动,然后稳定流动,最后归于静止。这些是挤压抓斗区别于其它管道泥浆输送设备的重要特征。考虑到清淤水深比较大时,如50m以上,稳定输送泥浆过程中的时间和能耗均占输送泥浆总时间和总能耗的绝大部分,本文暂且先讨论稳定流速下的阻力和功率消耗。

挤压清淤抓斗在挤压输送泥浆时需要的功率和能量利用率是我们非常关心的参数。这两参数与抓斗的斗容、输泥管的内径、泥浆输送浓度、工作水深、淤泥性质以及泥浆输送速度等参数有着密切的关系。确定输泥管管径和输送速度以使挤压清淤抓斗在特定的工况下比能耗较低是一件非常有意义的工作,这不仅对抓斗设计阶段输泥管管径的选取有着直接的影响,而且对作业过程中清淤速度的选择也起着指导作用。

关于属于细颗粒均质流体的淤泥浆在管道中流动的阻力计算,国内外有许多的学者做过研究。如Vlasak等^[2]、Markgraf等^[3]、Wilson等^[4]、费祥俊^[5-7]、华景生等^[8],等等。他们或从理论或从试验对细颗粒浆体管道输送中的阻力和流态变化进行了深入研究,限于篇幅,此处不再赘述。本文通过分析这些

收稿日期: 2011-11-06

作者简介: 欧阳义平(1987-),男,硕士在读,专业方向: 船舶疏浚设备。E-mail: ouyouai@139.com

通讯作者: 杨启。E-mail: yangqi110@sjtu.edu.cn

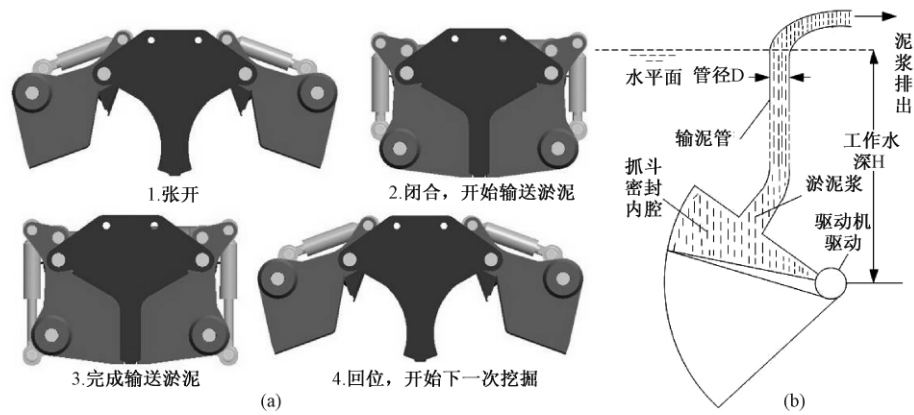


图1 挤压清淤抓斗示意图

Fig. 1 General view of squeezing dredging grab

学者的研究成果,从中提炼出适合于计算挤压抓斗泥浆输送过程中能量消耗的公式和方法。

1 理论基础和计算模型

1.1 淤泥浆体的主要性质

挤压清淤抓斗只适用于清理淤泥质沉积物和细颗粒泥沙,而且清淤时管道中输送泥浆的浓度比较高,浆体基本可以视为宾汉流体。其屈服应力和粘滞系数可以通过经验公式求得^[5,6]

$$\tau_B = e^{7.73-8.53\varepsilon} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - (C_V - C_{V0}) / C_{Vm}$$

$$\eta_r = \frac{\eta}{\mu_0} = \left(1 - \frac{1}{C_{Vm}} C_V\right)^{-2.5} \quad (2)$$

式中 τ_B 屈服应力; C_V 是输送体积浓度; C_{Vm} 是极限体积浓度; C_{V0} 是浆体从牛顿流体过渡到宾汉流体的临界体积浓度; μ_0 是水的粘度; η 是浆体的粘滞系数; η_r 是浆体的相对粘滞系数。

极限体积浓度可以通过颗粒的级配关系利用回归公式求得^[9]

$$C_{Vm} = 0.92 - 0.21 \lg \sum \frac{\Delta p_i}{d_i} \quad (3)$$

式中 Δp_i 是第 i 级颗粒对应的重量百分比, d_i 是第 i 级颗粒的平均直径。

利用回归公式可以通过极限体积浓度求得临界体积浓度^[5]

$$C_{V0} = 1.26 \times C_{Vm}^{3.2} \quad (4)$$

需要注意,根据回归公式的得出,(1)、(2)和(4)式可适用于 $C_{Vm} = 0.20 \sim 0.61$ 的范围。根据一些学者的实际测量和研究,淤泥的密度在 $1250 \sim 1600 \text{kg/m}^3$ ^[10,11] 之间,对应的极限体积浓度约为 $0.17 \sim 0.50$,基本在回归公式的适用范围内。

1.2 淤泥浆体在管道中流动的阻力

前面已经指出,本文考虑的浆体可视为宾汉体,在层流状态下,管道阻力系数可以严格推导得^[12,13]

$$\frac{1}{R_e} = \frac{f}{64} - \frac{1}{6} \frac{H_e}{R_e^2} + \frac{64}{3f^3} \frac{H_e^4}{R_e^8} \quad (5)$$

式中 $R_e = \frac{\rho_m U D}{\eta}$ 是雷诺数; $H_e = \frac{\tau_B \rho_m D^2}{\eta^2}$ 是赫氏数; f 为达西-维斯巴赫阻力系数, $f = \frac{D \Delta p / L}{\rho_m U^2 / 2}$, D 是管道内径, U 是管道中平均流速, Δp 是浆体流过长度为 L 的管道时由摩擦引起的压力降, ρ_m 浆体的密度。

湍流状态下,由于紊流发展比较充分,浆体结构被破坏,浆体屈服应力变小,直至消失^[14,15]。因此,管道阻力系数可以利用阿里特苏里公式计算

$$f = 0.11\alpha \left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (6)$$

式中 α 为浆体阻力修正系数 根据费祥俊^[7]的研究 对于淤泥质浆体 可取 $\alpha = 0.8 \sim 0.9$; $\frac{\Delta}{D}$ 为管道相对糙率 对于工业钢管 $\Delta = 0.046\text{mm}$ 。

对于层流到湍流的过渡阶段 国内外也有不少学者研究过^[13,16-19] 但是考虑到过渡阶段的复杂性 实际应用中不适合做详细计算 因此将层流和湍流的阻力系数曲线同时延伸 认为交点就是过渡点^[13]。

1.3 泥浆输送比能耗

鉴于挤压清淤抓斗的特殊性 输送泥浆的需要的功率全部由液压泵或电动机驱动挤压板提供 管道中的浆体从静止开始流动 经过启动、层流、过渡再到湍流的过程。抓斗输泥需要配备的驱动功率取决于这几个阶段中最大的功率。

在启动阶段 由于管道中的初始流速为零 因此 只要有一定的驱动功率就可以提供足够大的驱动力使得浆体流动起来 所以此阶段无需考虑功率问题。

启动之后 浆体流动属于层流 如果提供的驱动功率超过层流达到临界流速时需要消耗的功率 那么浆体流动将会过渡到湍流。因此 笔者认为可以只考虑层流和湍流两种状态下的功率消耗即可。

抓斗挤压输送泥浆时 可以认为输泥管是垂直的 功率消耗可以用下面的公式计算

$$P = \frac{\pi}{4} D^2 \left[\frac{1}{2} \rho_m U^2 \frac{H}{D} f + (\rho_m - \rho) g H \right] U \quad (7)$$

式中 $\rho_m = C_V \rho_s + (1 - C_V) \rho$ ρ_s 为淤泥颗粒的密度 一般取 $\rho_s = 2650\text{kg/m}^3$; ρ 为水的密度 取 5°C 下的密度 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$; H 是提升高度; g 是重力加速度。公式(7)是在一些假定下得出的: 抓斗外部的水压力能够完全有效的做功 忽略机械摩擦等能量损失和局部阻力损失 管道内流态只有层流和湍流两种 阻力系数 f 根据浆体所处的流态分别用公式(5)和公式(6)确定。为了确定在层流到湍流的过渡区的某一流速下的阻力系数该用公式(5)还是公式(6)计算 可以分别用(5)、(6)两式进行计算 取较大的一个阻力系数值即可。结合浆体体积流量计算公式

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 U \quad (8)$$

可以得知功率消耗与提升高度成正比 与流量基本呈现正比关系。因此 我们将度量指标确定为将单位体积的土粒提升单位高度消耗的能量 即比能耗更为合适

$$SEC = P / (\rho_s C_V Q H) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\rho(1 - C_V)}{\rho_s C_V} \right) \frac{U^2}{D} f + \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho_s} g \quad (9)$$

2 计算结果与分析

2.1 比能耗与相关参数的关系

抓斗输送淤泥时的比能耗除了与淤泥的性质有关外 还取决于挖掘浓度(抓斗完成一次挖掘 刚闭合时 挖入斗内的淤泥体积与斗容的百分比)、输送速度、管道内径和浆体体积流量。浆体输送浓度由挖掘浓度 C_{VW} 和淤泥颗粒体积浓度 C_{VI} (沉积状态下 淤泥中粒子体积占淤泥总体积的百分比) 确定 即 $C_V = C_{VW} C_{VI}$ 可以视淤泥沉积稳定体积浓度(后面简称稳定体积浓度)为淤泥颗粒体积浓度 通过回归公式求得^[5]

$$C_{VI} = 1.97 \times C_{Vm}^{3.2} + 0.145 \quad (10)$$

式中 C_{Vm} 是某一种颗粒分布淤泥能够达到的极限体积浓度 简称其为淤泥极限体积浓度。该公式是从极限体积浓度为 $0.33 \sim 0.61$ 的泥沙试验所得数据拟合得到。鉴于缺少有关淤泥该方面的试验数据 文献[5]中的泥沙和淤泥比较相似 故而本文采用(10)计算淤泥颗粒体积浓度。淤泥的性质主要取决于疏浚点的具体情况 可以通过现场采样进行试验得到淤泥颗粒体积浓度、形成特定浓度浆体的屈服应力和粘滞系数。为了便于研究 我们假定淤泥极限体积浓度 利用(1)、(2)、(4)、(10)公式估算淤泥浆体

的相关性质。然后计算不同的挖掘浓度、管径和浆体体积流量下的比能耗。

图 2 是淤泥稳定体积浓度为 0.3 时计算得到的比能耗与各参数之间的关系。从图 2(a) 和图 2(b) 可以得知 对于同一流量而不同挖掘浓度和同一挖掘浓度而不同流量的情况 ,当管径由 0.1m 增大到 1m 时 ,比能耗先迅速减小 ,然后基本保持不变。我们定义图 2(a) 和图 2(b) 中比能耗降低到稳定值的 110% 时的管径为临界管径。从图 2(a) 可以得知 ,同一流量 ,不同挖掘浓度下的临界管径不同 ,挖掘浓度小 ,临界管径大。从图 2(b) 可知 ,同一挖掘浓度 ,不同流量下 ,临界管径也不同 ,流量大 ,临界管径大。

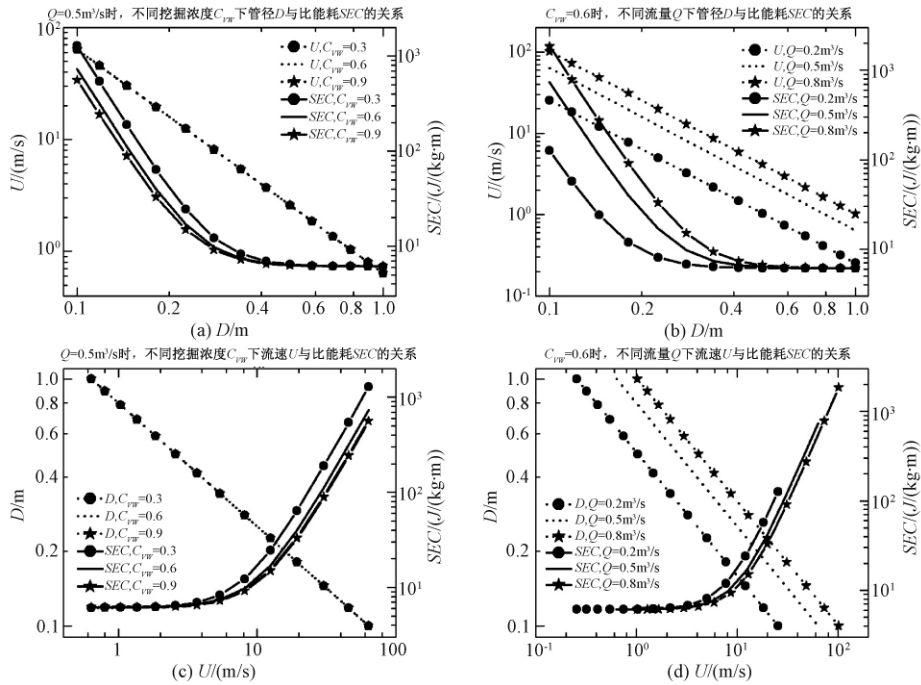


图 2 比能耗与管径、流速、挖掘浓度以及流量之间的关系(稳定体积浓度为 0.3)

Fig. 2 Relationship between specific energy consumption and pipe diameter ,flow velocity ,dredging concentration and flowrate

同临界管径的定义 ,我们定义图 2(c) 和图 2(d) 中比能耗降低到稳定值的 110% 时的流速为临界流速。从图 2(c) 和 2(d) 可知 ,对于同一流量而不同挖掘浓度和同一挖掘浓度而不同流量的情况 ,随着流速的增大 ,比能耗起初基本保持不变 ,当流速大于临界流速后 ,比能耗突然剧增。从图 2(c) 知 ,同一流量 ,不同挖掘浓度下的临界流速不同 ,挖掘浓度大 ,临界流速大。从图 2(d) 知 ,同一挖掘浓度 ,不同流量下 ,流量大 ,临界流速大。

为了更清晰的说明问题 ,我们取不同的稳定体积浓度 ,将其在不同挖掘浓度和体积流量下的比能耗与管径的关系给出 ,如图 3 所示。

从图 3 可以看出 ,不同的稳定体积浓度下 ,曲线变化趋势完全相同 ,分析同图 2。另外 ,从图 3 可以看出 ,不管其它参数如何变化 ,当管径大于临界管径后 ,比能耗基本相同 ,均在 6.6 ~ 6.8 J/(kg ·m) 之间。为了清楚的认识临界管径与各参数的关系 ,提取图 3 中的临界管径绘制图 4。

从图 4 可以得知 ,在我们研究的参数范围内 ,临界管径的范围在 0.25 ~ 0.60m 之间 ,临界管径受体积流量 Q 的影响最大 ,随着体积流量的增大而增大 ,增幅略有减小。只改变挖掘浓度 C_{vw} 或者稳定体积浓度 C_{v1} (随清淤地点改变而变化) ,临界管径的变化不大。稳定体积浓度较小时 ,单独增加挖掘浓度 ,临界管径减小;稳定体积浓度比较大时 ,一味的增加挖掘浓度并不能达到减小临界管径的目的。单独增加稳定体积浓度 ,临界管径也略有减小。

稳定体积浓度由疏浚的环境决定 ,管径是在挤压抓斗设计之初进行确定的。由于管径的增大不仅会增加制造成本 ,而且给操作带来诸多的不便 ,如移动困难 ,所以我们在比能耗增加不大的情况下 ,管径越小越好。前面求得的临界管径就是在比能耗比稳定比能耗大 10% 时对应的管径。因此 ,对于初步设计而言 ,我们可以取临界管径作为设计管径。管径最后的确定必须综合考虑制造成本和营运成本的影响。

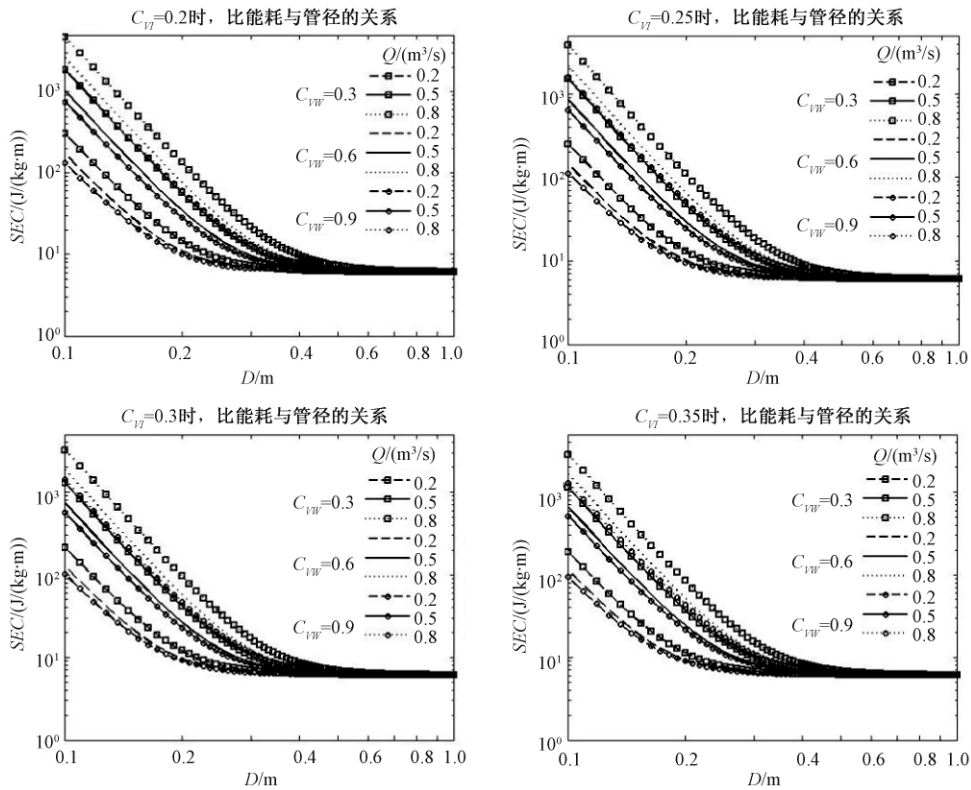


图3 不同稳定体积浓度、挖掘浓度和体积流量下比能耗与管径的关系

Fig.3 Relationship between specific energy consumption and pipe diameter under different parameters

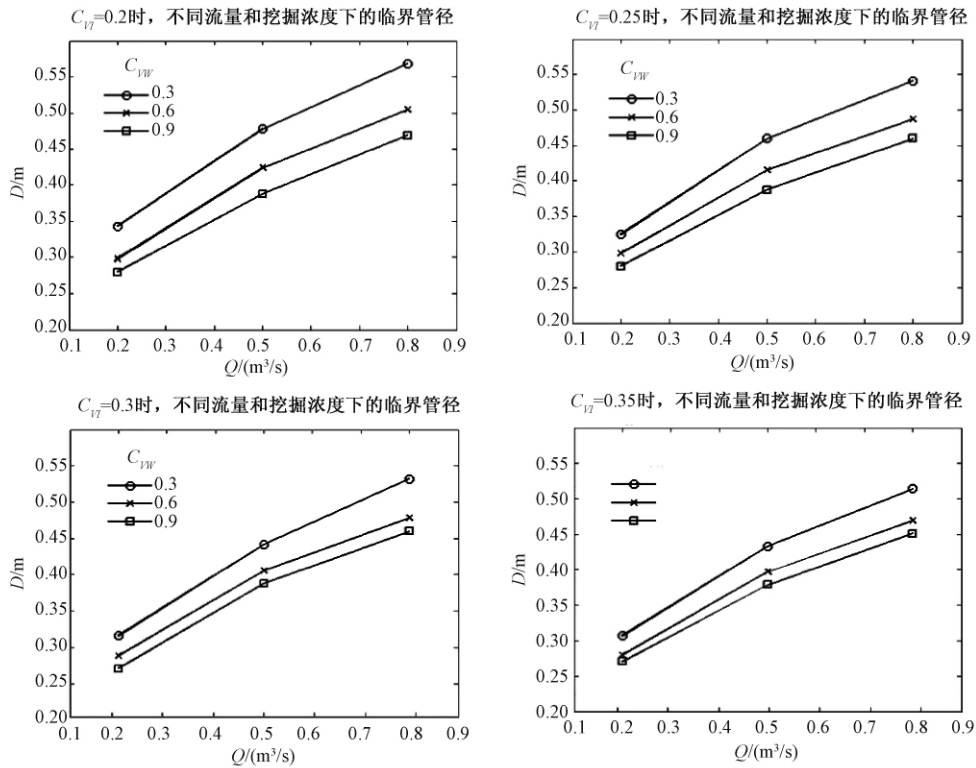


图4 不同稳定体积浓度、挖掘浓度和体积流量下的临界管径

Fig.4 Critical pipe diameters at different stable volume concentrations , dredging concentrations and flowrates

在疏浚过程中,对于不同性质的淤泥,比能耗与管径的关系会发生变化,为了降低比能耗,可以适当

的调整清淤速度,使得在设计的管径下比能耗降低到较低水平。

2.2 限制额定功率下相关参数的关系

挤压清淤抓斗在泥浆输送过程中不能配备多级提升装置而只能是一次性的能量补给,因此受驱动装置额定功率的影响很大。由比能耗的定义公式(9)可知

$$C_vQH = \frac{P}{SEC\rho_s} \quad (11)$$

从图3可知,临界管径下的比能耗基本上可以认为是一个定值。因此,对于给定额定功率 P_0 ,输送体积浓度、体积流量和工作水深三者的乘积不能超过 $\frac{P_0}{SEC\rho_s}$ 。这意味着给定功率下,工作水深大,则清淤速度要降低。这可以是体积流量降低,也可以是挖掘浓度减小。如果是通过降低体积流量的方法来降低功率消耗,那么在较大的工作水深下,可以适当配备较小的输泥管,因为图4中显示,小的体积流量,对应的临界管径也小。而通过减小挖掘浓度来降低功率消耗则无此效果。

3 结论

(1) 本文给出了一种新型清淤设备,挤压清淤抓斗泥浆输送时功率消耗的计算公式,并分析了不同的参数变化对比能耗的影响。将其它者给出的估算泥浆性质的回归公式与笔者所讨论的清淤设备相结合,探讨了不同稳定体积浓度的淤泥、不同挖掘浓度和不同清淤速度(体积流量)下比能耗的变化情况,给出了不同情况下比较合适的输泥管直径。

(2) 在稳定体积浓度为0.2~0.35,挖掘浓度为0.3~0.9,体积流量为0.2~0.8m³/s的范围内,临界管径分布范围为0.25~0.60m。临界管径受体积流量的影响最大,同时也略微受其余两参数的影响。

(3) 对于额定功率受限而工作水深较大的情况,可以采取降低泥浆体积流量来匹配功率,从而可以配备比较小的输泥管,达到降低制造成本和使清淤运作便捷的目的。

参考文献:

- [1] 郁杨天. 用于深水清淤的挤压抓斗装置研发 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [2] Vlasak, P., Chara, Z. Conveying of solid particles in Newtonian and Non-Newtonian carriers [J]. Particul. Sci. Technol., 2009, 27: 428 - 443.
- [3] Markgraf, W., Horn, R., Peth, S.. An approach to rheometry in soil mechanics-structural changes in bentonite, clayey and silty soils [J]. Soil & Tillage Research 2006, 91: 1 - 14.
- [4] Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., Clift, R. Slurry transport using centrifugal pumps [M]. 3 edn, 2006.
- [5] 费祥俊. 高浓度浑水的宾汉极限剪应力 [J]. 泥沙研究, 1981(3): 19 - 28.
- [6] 费祥俊. 高浓度浑水的粘滞系数(刚度系数) [J]. 水利学报, 1982(3): 57 - 63.
- [7] 费祥俊. 浆体的物理特性与管道输送流速 [J]. 管道技术与设备, 2000(1): 1 - 4.
- [8] 华景生, 万兆惠. 宾汉浆液在管路中输送时的阻力 [J]. 泥沙研究, 1990(2): 31 - 37.
- [9] 费祥俊. 黄河中下游含沙水流粘度的计算模型 [J]. 泥沙研究, 1991(2): 1 - 13.
- [10] 杨美卿, 王桂玲. 粘性细泥沙的临界起动公式 [J]. 应用基础与工程科学学报, 1995(1): 99 - 109.
- [11] 蒋昌波, 白玉川, 姜乃申, 等. 海河口粘性淤泥起动规律研究 [J]. 水利学报, 2001(6): 51 - 56.
- [12] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [13] Wilson, K. C., Thomas, A. D.. Analytic model of laminar-turbulent transition for Bingham plastics [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering 2006, 84: 520 - 526.
- [14] 费祥俊, 朱程清. 高含沙水流运动中的宾汉切应力 [J]. 泥沙研究, 1991(4): 13 - 23.
- [15] 王虹, 费祥俊. 流动浆液中宾汉剪切力变化规律 [J]. 泥沙研究, 1989(1): 88 - 96.
- [16] Turian, R. M.. Flow of concentrated non-Newtonian slurries: 1. Friction losses in laminar, turbulent and transition flow through straight pipe [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1998, 24: 225 - 242.
- [17] Vlasak, P., Chara, Z.. Laminar and turbulent transition of fine-grained slurries [J]. Particul. Sci. Technol. 2004, 22: 189 - 200.

- [18] Peixinho, J., Nouar, C., Desaubry, C., et al.. Laminar transitional and turbulent flow of yield stress fluid in a pipe [J]. *Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics* 2005, 128: 172 – 184.
- [19] Güzel, B., Frigaard, I., Martinez, D. M.. Predicting laminar-turbulent transition in Poiseuille pipe flow for non-Newtonian fluids [J]. *Chem. Eng. Sci.* 2009, 64: 254 – 264.

Calculation of energy consumption in slurry transportation of squeezing dredging grab

OUYANG Yi-ping, YANG Qi

(*State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: The squeezing dredging grab is a novel grab which can enhance the dredging efficiency and energy efficiency, and has less negative effect on the environment during the dredging process. The special characteristics of this new type grab result in the difference of energy consumption from other dredging equipments. In this paper the formulas which are suitable for estimating the energy consumption in the slurry transportation of the grab are derived based on the theoretical and experimental results from the literatures. And they are used to calculate the energy consumption during the slurry transport. By using different relevant parameters, as the volume flowrate, dredging concentration, pipe diameter, etc., in the calculation, the effects of each parameter on the energy consumption can be revealed. The minimum pipe diameter in each set of the parameters defined as the critical pipe diameter can be obtained. If the diameter is less than the critical pipe diameter, the energy consumption will increase abruptly. Those results can provide helpful and trustful guidance for the determination of the pipe diameter and flowrate in the design and operation of the grab.

Key words: squeezing grab; slurry transport; pipe resistance; critical pipe diameter; specific energy consumption

声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《泥沙研究》编辑室