

· 施 工 ·



疏浚管道粗砂输送特性及最佳流态研究*

蒋爽^{1,2}, 刘梦龙^{1,2}, 熊林亮^{1,2}, 倪福生^{1,2}, 李雷^{1,2}

(1. 河海大学机电工程学院, 江苏常州 213022; 2. 河海大学疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏常州 213022)

摘要: 在疏浚管道输送粗砂砾石等粗大颗粒时, 由于粒径构成复杂、浓度和局部阻力波动较大等因素, 容易造成输送效率低、淤积堵塞和施工操作困难等问题。为实现粗大颗粒物料的安全高效输送, 以中值粒径0.82 mm的粗砂为研究对象, 在不同浓度和流速下进行管道输送试验, 对粗砂的流态、沿程阻力损失、临界流速和滑移比(输送效率)等特性进行研究, 根据疏浚施工要求确定输送时的最佳流态及对应的流速区间, 该流态具有不易堵塞、输送稳定性高、输送效率高和磨损较小等优点。泥沙输送特性研究成果及最佳流态确定方法对粗大颗粒的安全、稳定、高效输送具有一定的理论参考和实际应用价值。

关键词: 疏浚工程; 管道输送; 流态; 沿程阻力; 临界流速; 滑移比

中图分类号: U61; TV851

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0245-07

Transportation characteristics and optimal flow pattern of coarse sand in dredging pipelines

JIANG Shuang^{1,2}, LIU Menglong^{1,2}, XIONG Linliang^{1,2}, NI Fusheng^{1,2}, LI Lei^{1,2}

(1. School of Mechatronics Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: When coarse particles such as coarse sand and gravel are transported by dredged pipelines, due to factors such as complex composition of particle size, large fluctuations in concentration and local resistance, it is easy to cause problems such as transportation efficiency, siltation blockage and difficult operation. To realize the safe and efficient transportation of coarse particle materials, the coarse sand with a median particle size of 0.82 mm is taken as the research object. To study the flow pattern, loss of frictional drag, critical velocity and slip ratio (transportation efficiency) of coarse sand, pipeline transportation experiments are carried out under different concentrations and flow rates. According to the requirements of dredging construction, the optimal flow pattern and velocity range are determined. The flow state has the advantages of not being easy block, low wear, high transportation stability and high transportation efficiency. The research results on the characteristics of mud and sand transportation and the method for determining the optimal flow pattern have theoretical reference and application value for the safe, stable and efficient transportation of coarse particles.

Keywords: dredging works; pipeline transportation; flow pattern; frictional drag; critical velocity; slip ratio

泥浆管道输送是绞吸挖泥船施工的重要环节之一, 不同粒径泥沙颗粒的输送特性差异显著, 粒径较小的泥沙颗粒容易与水形成均质浆体进行输送, 而粒径大的泥沙颗粒在长距离输送时流态

变化复杂、惯性大, 且管道阻力和流速波动较大, 在输送过程中经常出现流速与浓度不匹配的现象, 很容易引起电机超载或管道堵塞的现象。泥浆流速过低将导致管道堵塞, 而流速过高会加剧疏浚

收稿日期: 2024-03-02

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52371275)

作者简介: 蒋爽(1981—), 男, 硕士, 高级实验师, 从事疏浚装备自动化与疏浚工艺研究。

设备的磨损。因此,对疏浚管道泥沙输送特性进行研究,可以提高施工的安全性、稳定性和输送效率,减小疏浚管线和设备的磨损,对挖泥船施工具有重要的参考价值。

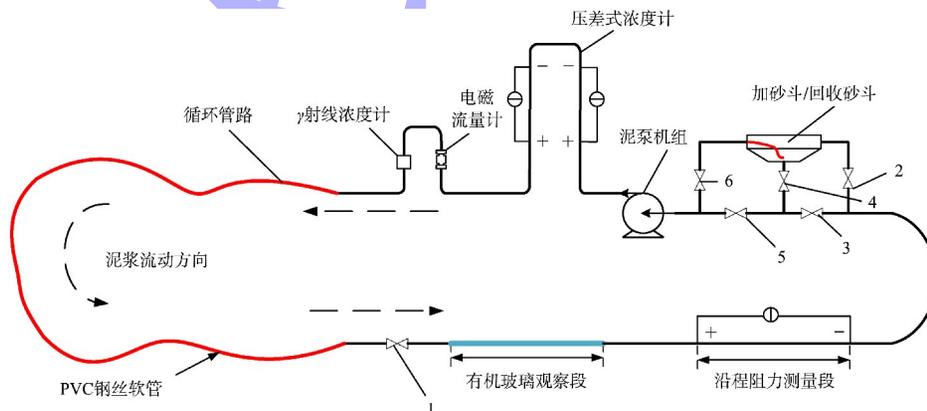
目前,许多学者从不同角度对粗颗粒泥沙的管道输送特性进行研究。曹斌等^[1]通过高速摄影技术和粒子图像测速法记录粗颗粒的运动状态及其速度变化,分析不同工况下粗颗粒在管道中的水力学特性;王海荣等^[2]以疏浚工程中泥沙的输送为研究对象,对管内两相流动的阻力特性及临界流速问题进行初步研究,并通过试验研究泥沙在不同的浓度和速度下的阻力特性;弓新洁等^[3]针对疏浚管道输送进行三维水动力及泥沙的运动模拟,分析直管道沿程的剖面流速再分布特征和淤积临界流速规律;许振良^[4]提出水平管道内非均质流中固体粒子处于悬浮流动状态下的速度分布与水力坡度求解的理论分析新方法和模型;Miedema^[5-6]通过将各主要参数进行无量纲化分析,提出 DHLLDV(Delft head loss & limit deposit velocity 代尔夫特水头损失和极限沉积流速)水头损失和临界流速框架,综合考虑两相流的流态与能量损失之间的关系;Vlasák 等^[7]对粗颗粒在管道内的

推移运动特性进行大量试验,表明管道内泥浆流速较大时,粗颗粒泥沙主要以跃移质进行推移运动,且水平管道沿程水头损失大于垂直管道。目前,将这些因素和疏浚施工结合进行系统分析的研究较少,还不能有效指导疏浚泥沙的输送作业。

本文以粗砂为研究对象,在封闭模式下进行水力输送试验,对粗砂的管道输送特性进行研究,并从设备安全、输送稳定性和输送效率等方面综合考虑,提出粗砂输送时最佳流态及对应流速区间的确定方法。

1 泥沙管道输送试验

参考挖泥船的管道输送系统在疏浚施工中的实际情况,研制出泥沙管道输送实验台,可模拟挖泥船输送过程中的多种工况。实验台的整体结构见图1,主要由22 kW 泥泵机组、DN50 循环管路和信号采集控制系统等组成,不同浓度和粒径的泥沙可通过12个加砂斗进行添加、回收。当1、3、4、5号闸阀开启且2、6号闸阀关闭时,实验台在泥泵的作用下以封闭模式进行输送,此时管道内部的泥沙浓度保持恒定,可进行管道输送特性试验。



注:1~6为手动闸阀。

图1 实验平台的整体结构

试验的输送对象为粗砂($d_{50} = 0.82 \text{ mm}$),研究不同浓度下的粗砂试验工况,浓度取5%、10%、15%、20%、25%。由于管道泥沙在不同流态转换时,测量点的当地浓度也随之变化,因此文中的浓度特指一段时间内输送泥沙体积与总混

合物体积之比,即以输送浓度作为试验工况的划分依据。

管道输送特性试验的操作流程为:1)管道内注满清水,根据管道体积计算对应工况所需要的

泥沙质量。2) 将 1、3、4、5 号闸阀开启, 2、6 号闸阀关闭, 启动电机并将泥浆流速调节至 2.00 m/s 左右, 通过加砂斗内部的堵料钢管将泥沙加入管道内部。3) 加砂完毕后, 调节电机转速改变泥浆流速, 速度从最小变为最大。临界流速附近速度取点间隔略小, 当速度较大时, 速度取点间隔略大。4) 试验完成后, 将泥沙回收至砂斗内, 并保存试验数据。

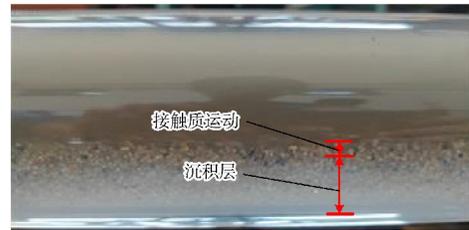
2 粗砂输送流态特征

通过试验观察不同工况下的流态, 发现各浓度下粗砂的流态变化过程基本相同, 随着流速的增大先后经历静止底床、推移质和悬移质 3 种流态。以 20% 浓度工况为例, 对不同流速下水平有机玻璃管内粗砂的流态特征进行分析。

当流速约为 0.75 m/s 时, 由于水流的挟带能力过小, 大部分粗砂沉积在管道底部, 只有沉积层表面的粗砂在水流的冲刷作用下以接触质进行间歇运动, 见图 2a)。随着流速的增大, 管道底部静止的沉积层表面不断被侵蚀, 表面被侵蚀的粗砂在水流的作用下以滚动、滑动和跳跃的形式运动。当流速增至 0.93 m/s 时, 大部分粗砂以接触质和跃移质进行推移运动, 管道底部沉积的粗砂处于不稳定状态, 沉积的粗砂形成一系列砂纹, 一段时间后被水流冲走, 管道底部的粗砂不断在运动与沉积两种状态间循环, 见图 2b)。当流速进一步增至 1.13 m/s 时, 管道底部的粗砂以稳定的形式进行推移运动。

管道底部的沉积层消失后, 砂床表面的粗砂随着流速的增大逐渐处于滚动、跳跃和悬浮的运动状态, 管道底部的粗砂也逐渐成层的滚动和移动。此时大部分粗砂以推移质进行运动, 小部分粗砂以悬移质进行运动, 该流态的特征变化见图 3。

当流速增加至一定程度时, 管道底部以推移质运动的粗砂逐渐转换为悬移质运动, 当流速大于 2.14 m/s 后, 管道内所有粗砂均处于悬浮状态, 见图 4。



a) 管道流速 0.75 m/s 时的粗砂流态



b) 管道流速 0.93 m/s 时的粗砂流态

图 2 沉积层随流速增大的实景变化

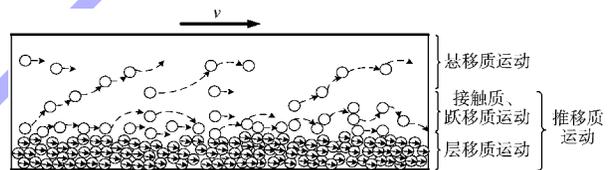


图 3 大部分粗砂推移质运动

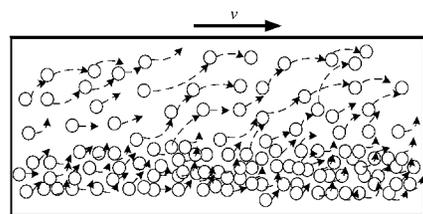


图 4 粗砂悬移质运动及浓度分布

3 沿程阻力损失

3.1 沿程阻力大小与流态的关系

泥沙沿程阻力主要来源于两部分, 分别为清水输送过程中的能量损失和泥沙引起的附加能量损失。各浓度粗砂的沿程阻力变化趋势基本相同, 见图 5。随着流速的增大呈先下降后上升的趋势, 当粗砂以悬移质进行输送后, 粗砂与清水的阻力特性曲线趋于平行。

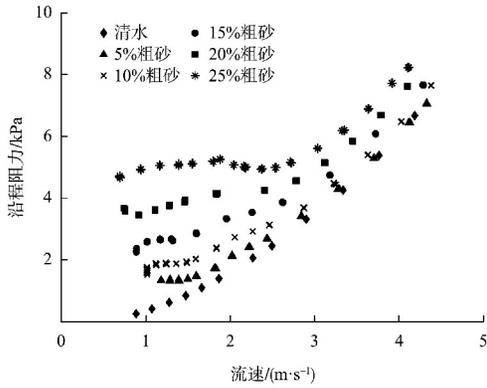
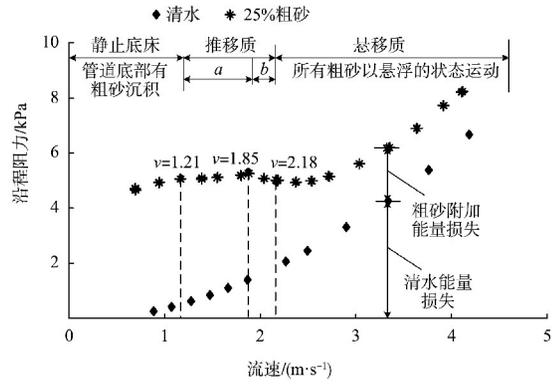


图5 粗砂的沿程阻力曲线

粗砂在 25%浓度工况下的沿程阻力见图 6，根据观察流态对沿程阻力的变化进行分析。

当流速小于 1.21 m/s 时，管道底部沉积大量的粗砂，水流从静止砂床上方的受限空间通过，此时阻力损失主要来源于液相与管壁表面之间的摩擦，以及砂床表面粗砂颗粒滚动和跃移所需要的能量。当流速为 1.21 ~ 1.85 m/s 时，大部分粗砂以接触质和跃移质的形式进行推移运动，在该过程中水流与管壁的摩擦损失将随着流速的增加而增加，且粗砂颗粒运动也需要通过水流的能量得以维持，因此过程中管道的总阻力随流速的增大而增加。当流速为 1.85 ~ 2.18 m/s 时，管道内越来越多粗砂以悬浮的状态进行运动，但仍有粗砂在管道底部以接触质和跃移质的形式运动。在此过程中，清水与管道之间摩擦产生的损失随流速的增加而增加，而粗砂与管道底部的摩擦以及维持粗砂运动所消耗的能量有所降低。由于粗砂所损耗的能量减少量大于水流摩擦的增加量，因此整体管道阻力损失随流速的增加而减小。当流速大于 2.18 m/s 时，随流速的增大粗砂的阻力特性曲线继续上升，且与清水的沿程阻力曲线趋于平行，此时粗砂颗粒引起的附加损失接近常数。

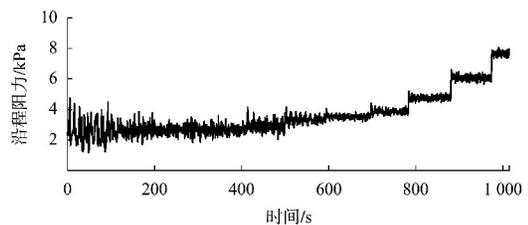


注：a 主要以接触质和跃移质运动；b 主要以悬浮状态运动，仍有接触质和跃移质。

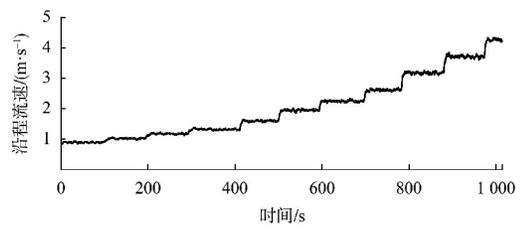
图6 浓度 C_v = 25%粗砂的沿程阻力变化

3.2 沿程阻力波动与流态的关系

沿程阻力波动的大小关乎疏浚施工过程的稳定性，波动越小人员操作难度越低。试验表明不同浓度下沿程阻力波动变化基本相同，因此以 15%浓度的工况为例进行分析，见图 7。在低流速时存在较大的波动，但随着流速的增加波动逐渐减小，直至稳定在较小值附近。为了更好地分析沿程阻力的波动程度，采用方差对流速变化时的沿程阻力波动进行定量分析。



a) 沿程阻力变化



b) 沿程流速变化

图7 粗砂输送过程中调速稳定后参数变化

在0~200 s内,流速处于1.00 m/s左右,此时沿程阻力的波动方差为0.315 2,波动幅值较大,这是因为在该流速附近管道底部沉积大量粗砂,沉积层表面的粗砂以接触质和跃移质等形式进行推移运动,且粗砂沿管线分布不均匀,因此引起较大沿程阻力波动;在200~400 s内,流速处于1.30 m/s左右,此时管道底部不再沉积粗砂颗粒,管道中的粗砂主要以接触质和跃移质进行输送,且少部分粗砂处于悬移状态,此时阻力波动方差为0.062 8,波动大幅减小,但由于不同流态之间存在转换,因此沿程阻力波动仍不稳定;在400~500 s时,由于越来越多的粗砂以悬移质进行输送,因此沿程阻力波动的幅值逐渐降低;在500 s后,流速大于2.11 m/s,管道内的粗砂从推移质逐渐全部转换为悬移质进行输送,此时粗砂颗粒沿管线分布较均匀,且不存在不同流态之间的相互转换,阻力的波动方差为0.01~0.03,基本趋于稳定状态。

4 临界流速和滑移比

4.1 临界流速

在管道水力输送系统设计中,临界流速作为静止底床和推移质的转换条件,是确保管道泥沙安全输送的一个重要参数。目前临界流速的判定标准尚未统一,且影响临界流速的因素较多^[8],通常采用经验公式和试验相结合的方式确定。由于泥沙从沉积到起动的临界不淤流速大于从启动到沉积的临界淤积流速。因此疏浚工程中通常采用临界不淤流速,对于指导施工的安全性更好。

试验对粗砂临界不淤流速的测量方法为:在泥沙输送过程中,通过透明有机玻璃管观察浆体中泥沙的运动状态。调节电机转速改变泥浆的流速,并观察管道内部的泥沙运动状态,由于流速过低时会导致管道堵塞,因此将管道底部沉积有大量泥沙的作为初始状态,然后小范围提升电机转速,待流速稳定后观察管道底部泥沙沉积情况。随着流速的增大,沉积层逐渐减薄直至消失,此过程中所有固体颗粒全部起动时的最低流速定义

为临界不淤流速。通过试验测量得到的粗砂的临界不淤流速见表1,随着浓度的增大临界不淤流速逐渐减小,这是因为运动的泥沙层对沉积层产生干涉作用,管道内泥沙浓度较高时干涉作用也越大。

表1 粗砂的临界不淤流速

浓度/%	5	10	15	20	25
临界不淤流速/(m·s ⁻¹)	1.28	1.25	1.25	1.15	1.05

4.2 滑移比

滑移比是疏浚施工过程中的重要参数之一,反映了泥沙颗粒在管道输送过程中的输送效率^[9]。在泥沙输送过程中,泥沙颗粒在水流提供能量的作用下运动,因此在输送过程中泥沙颗粒的速度 v_s 小于泥浆整体的速度 v_m 。在输送过程中泥沙的当地浓度为:

$$C_{v,i} = \frac{A_s}{A_m} \quad (1)$$

式中: $C_{v,i}$ 为输送过程中的当地浓度,%; A_s 为管道截面泥沙的总面积,即 $A_s = A_{s,1} + A_{s,2} + A_{s,3} + \dots$,m²; A_m 为泥浆在管道内所占的面积,即管道截面面积,m²。

在输送过程中,泥浆的输送浓度为:

$$C_{v,d} = \frac{v_s}{v_m} \cdot \frac{A_s}{A_m} = C_{v,i} \frac{v_s}{v_m} \quad (2)$$

式中: $C_{v,d}$ 为输送过程中的输送浓度,%; v_s 为泥沙颗粒在管道内的运动速度,m/s; v_m 为泥浆在管道内的运动速度,m/s。

在泥沙输送过程中,固体颗粒跟随水流的能力(水流挟带固体颗粒的能力)用滑移比表示,滑移比的计算公式为:

$$S = \frac{v_s}{v_m} = \frac{C_{v,d}}{C_{v,i}} \quad (3)$$

式中: S 为滑移比,%。

不同工况下粗砂的滑移比见图8,不同浓度粗砂的滑移比随流速的增加而增大,增加到一定程度后保持在稳定值附近,将该稳定值取平均可得到在该浓度下的最大滑移比。达到最大滑移比之前,在相同的流速下浓度越高的泥沙滑移比越大。

达到最大滑移比之后，不同浓度下的最大滑移比接近相同。

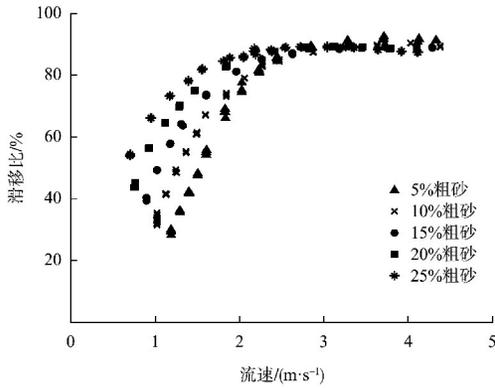


图8 不同浓度粗砂的滑移比

为便于分析最佳流态，引入相对滑移比(相对输送效率)进行研究，计算公式为：

$$S_r = \frac{S}{S_{max}} \quad (4)$$

式中： S_r 为相对滑移比，%； S 为滑移比，%； S_{max} 为最大滑移比，%。

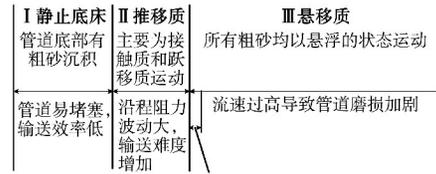
5 疏浚管道粗砂输送最佳流态的确定

在泥沙管道输送过程中，不同的流态对应的输送特性各不相同，因此应当根据施工需求对不同流态的输送特性进行系统分析，确定输送过程中的最佳流态。最佳流态应当具备输送过程中设备不易堵塞、输送稳定性高、输送效率高和管线磨损程度低等特点^[10-12]。

粗砂在不同工况下的流态分析见图9，相对滑移比随流速的增大而增大，当相对滑移比增大至100%后不再随流速增大而改变，此时增大流速(相对)输送效率不再提升，但会加剧管道的磨损。

以25%浓度的粗砂为例， $v_{c,1}$ 为粗砂的临界不淤流速，当流速小于 $v_{c,1}$ 时管道底部有粗砂沉积，容易导致管道堵塞且输送的效率很低，因此不适合在该流态进行输送。 $v_{c,2}$ 为沿程阻力波动较小的临界点，当流速小于 $v_{c,2}$ 时，粗砂主要以接触质和跃移质的形式进行推移运动，此时沿程阻力波动较大导致施工操作难度较大，因此不适合在该流态进行输送。当流速大于 $v_{c,2}$ 后，管道内的粗

砂以悬移质进行输送，当流速达到 $v_{c,3}$ 时，相对滑移比首次达到100%，此时沿程阻力波动小，输送效率高，管道磨损不严重，因此适合作为最佳的输送流态。流速大于 $v_{c,3}$ 后，随着流速的增大导致管道磨损的加剧，也不适合在该流态进行输送。



粗砂的最佳流态：大于临界不淤流速，不易堵塞；以悬移质输送，沿程阻力波动小；相对滑移比接近100%，输送效率高；管道磨损不严重

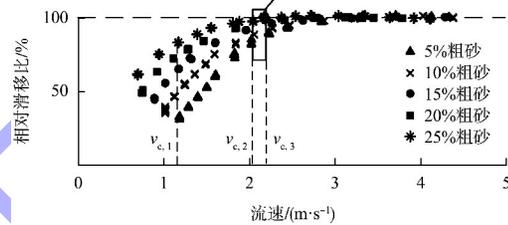


图9 粗砂的最佳流态

综上所述，粗砂最佳流态对应的流速区间为 $v_{c,2} \sim v_{c,3}$ ，此时不易堵塞，沿程阻力波动较小，输送效率高。各浓度粗砂对应的流速区间见表2。

表2 粗砂的最佳流态及流速区间

粗砂浓度/%	最佳流态的流速区间/(m·s ⁻¹)	对应流态	相对滑移比/%
5	2.05~2.35	悬移质	86.3~100
10	2.04~2.32	悬移质	88.7~100
15	2.11~2.28	悬移质	93.9~100
20	2.09~2.29	悬移质	93.7~100
25	2.08~2.26	悬移质	95.3~100

6 结论

1) 随着流速的增大，粗砂先后经历静止底床、推移质和悬移质3种流态。沿程阻力先降低后增大，沿程阻力波动逐渐降低。临界不淤流速随浓度的增大逐渐减小。

2) 粗砂的滑移比(输送效率)随流速的增大逐渐增大，最后稳定在最大滑移比。当滑移比逐渐增大并接近最大值时，粗砂以悬移质流态进行输送。

3) 从设备安全、输送稳定性、输送效率和管

道磨损等方面综合考虑, 粗砂的最佳流态应满足大于临界不淤流速, 沿程阻力波动小, 滑移比高和管道磨损不严重等要求, 因此粗砂以悬移质输送且滑移比接近最大值时处于最佳流态, 此时相对滑移比为 86.3%~100.0%, 对应流速区间为 2.04~2.35 m/s。该流速区间是基于 DN50 循环管路的试验环境得出, 针对更大的工程管道应用环境, 还需要考虑管道直径影响因素的换算过程。

4) 在疏浚施工过程中, 参照此方法并根据实际施工环境和现场施工数据分析泥沙的输送特性, 确定最佳流态对应的流速区间, 可保障输送过程中的安全性、稳定性和输送效率。

参考文献:

- [1] 曹斌, 夏建新, 黑鹏飞, 等. 管道水力输送的粗颗粒运动状态变化及其临界条件[J]. 泥沙研究, 2012(4): 38-45.
- [2] 王海荣, 何炎平. 疏浚管路阻力损失计算方法的分析[J]. 中国港湾建设, 2008(5): 17-20.
- [3] 弓新洁, 陶润礼, 郝宇驰, 等. 长直管道输砂的沿程临界流速[J]. 水运工程, 2021(8): 13-17, 23.
- [4] 许振良. 管道内非均质流速度分布与水力坡度的研究[J]. 煤炭学报, 1998(1): 93-98.

- [5] MIEDEMA S A. The heterogeneous to homogeneous transition for slurry flow in pipes[J]. Ocean engineering, 2016, 123: 422-431.
- [6] MIEDEMA S A. Slurry transport fundamentals, a historical overview & the Delft head loss & limit deposit velocity framework[M]. Delft: Delft University of Technology, 2017.
- [7] VLASÁK P, CHÁRA Z, KRUPÍČKA J, et al. Experimental investigation of coarse particles-water mixture flow in horizontal and inclined pipes[J]. Journal of hydrology and hydromechanics, 2014, 62(3), 241-247.
- [8] 汪明先. 非均质浆体管道临界淤积流速研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [9] 周志强. 绞吸挖泥船施工圆砾卵石混粗砂工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [10] 朱汉华, 范世东, 钟俊杰, 等. 疏浚船舶输泥管道的管堵与阻力影响因素研究[J]. 交通与计算机, 2008(1): 59-61.
- [11] 杨文, 邓勇, 刘建伟, 等. 绞吸挖泥船施工效率主要影响因素分析[J]. 交通企业管理, 2015, 30(6): 48-50.
- [12] 张继军, 桂晓莉. 浆体管道磨损机理研究[J]. 甘肃科技, 2011, 27(1): 60-62, 86.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 237 页)

参考文献:

- [1] 章祝君, 高加云, 李小军. 大型并列船坞岸壁结构变形特性分析及控制[J]. 水运工程, 2017(5): 98-102, 124.
- [2] 江杰, 陈俊羽, 马少坤, 等. 船坞基坑开挖对邻近桩基影响的三维数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 246-253, 274.
- [3] 曹邱林, 陈蕾. 大型船坞坞室墙施工期有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 71-77.
- [4] 戴江山, 吴辉. 钢管板桩结构位移分析[J]. 水运工程, 2018(6): 257-263, 267.
- [5] 田利勇, 于文华, 卢育芳. Plaxis 在板桩结构分析中的

应用[J]. 水运工程, 2015(4): 194-200.

- [6] 汤子扬, 牛志国, 陈春燕. Plaxis 在板桩码头分析中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2013(1): 81-85.
- [7] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [8] 尹骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 166-172.
- [9] 钱宏伟. PLAXIS 在基坑开挖对周边环境评估中的应用[J]. 山西建筑, 2017, 43(14): 69-70.

(本文编辑 王璁)