



# 长直管道输砂的沿程临界流速<sup>\*</sup>

弓新洁<sup>1</sup>, 陶润礼<sup>2</sup>, 郝宇驰<sup>2</sup>, 张民曦<sup>1</sup>, 喻国良<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201208)

**摘要:**近年来,河湖水库的环保疏浚、港口航道建设与维护性疏浚工程越来越多,管道输送是疏浚泥沙搬运的主要方式,输送距离也越来越长。管道输送中流速沿程的再分布情况和临界流速尚待进一步研究。基于古雷镇填沙工程清水工况及输沙工况分层取样浓度实测数据对模型进行率定。在此基础上对长直管道输送砂类泥沙颗粒进行三维水动力及砂的运动模拟,分析了直管道沿程的剖面流速再分布特征和泥沙淤积临界流速规律,提出长管中不同断面位置发生泥沙淤积的临界流速公式,为疏浚工程设计提供参考依据。

**关键词:**疏浚淤泥;管道输送;临界流速;数值模拟

中图分类号: TV 149; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0013-05

## Critical velocity of sand transportation along long straight pipeline

GONG Xin-jie<sup>1</sup>, TAO Run-li<sup>2</sup>, HAO Yu-chi<sup>2</sup>, ZHANG Min-xi<sup>1</sup>, YU Guo-liang<sup>1</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean&Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. CCCC National Engineering Research Center Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

**Abstract:** In recent years, there have been more and more environmental protection dredging projects in rivers and reservoirs and port and waterway construction and maintenance dredging projects. Pipeline transportation is the main method of dredging sediment transportation, and the transportation distance is also getting longer and longer. The redistribution of the flow velocity and the critical flow velocity along the pipeline needs to be further studied. The model is calibrated based on the measured data of the clean water conditions and the stratified sampling concentration of the sand transport conditions of the Gulei sand filling project. On this basis, three-dimensional hydrodynamic and sand motion analysis are performed on the long straight pipeline transportation of sand particles. The redistribution characteristics of the section velocity along the straight pipeline and the law of the critical velocity of sediment deposition are analyzed. The formula of the critical velocity of sediment deposition at different sections in the long pipe is put forward, which provides a reference for the design of dredging projects.

**Keywords:** dredged sludge; pipeline transportation; critical velocity; numerical simulation

我国江河湖泊众多、水网交错复杂,人口聚集,排放负荷大,大量泥沙淤积加剧江河湖泊及海岸水质恶化,使水资源保护任务更艰巨,河湖水库的环保疏浚工程项目越来越多。这些疏浚工

程90%以上的施工量采用泥沙管道输送方式完成<sup>[1]</sup>。因此,研究泥沙管道输送具有现实意义。

目前,对于输沙管道中的流速沿程分布规律和发生淤积的临界流速变化规律尚待进一步探讨。

收稿日期: 2020-11-25

\*基金项目: 航道疏浚技术交通行业重点实验室开放基金项目(DTKB-18-03)

作者简介: 弓新洁(1996—),女,硕士研究生,研究方向为港口与近海岸工程及泥沙研究。

通讯作者: 陶润礼(1970—),男,硕士,高级工程师,从事港口、航道及近海工程研究。E-mail: taorunli@cccc-drc.com。

管道中的泥浆从泥泵出来进入管道后随着输送长度的增加, 因过流断面边界上阻力的变化会导致流速剖面不断改变, 并非通常认为的均匀流。而这种流速剖面的沿程改变会导致泥沙淤积可能首先出现在管道中的某一位置, 因此, 需要探讨淤积临界流速沿程的变化规律。Durand 提出要以管道底部刚刚出现固体颗粒淤积时的流速作为淤积临界流速<sup>[2]</sup>, 但王绍周等<sup>[3]</sup>认为临界状态下的临界流速应该包括不淤临界流速、淤积临界流速、阻力最低点临界流速和不冲临界流速等 4 种。此外, Wasp<sup>[4]</sup>、Wilson<sup>[5]</sup>、费祥俊<sup>[6-7]</sup>、喻国良<sup>[8]</sup>和李明<sup>[9]</sup>等针对不同粒径及管径提出了半经验性临界流速公式, 但均未考虑输沙管道中的流速沿程分布变化对临界流速的影响, 也没有考虑输送长度的影响, 这些公式对工程实践的指导意义相对较弱。因此, 需要对输沙管道中流速分布及淤积临界流速的沿程分布规律开展进一步研究。

本文将对顺直管道泥沙输送建立一个三维水动力及泥沙运动数值模型, 利用实测数据对模型进行率定, 在此基础上, 分析管道内剖面流速沿程的再分布及泥沙淤积临界流速沿程的变化情况, 针对管道中不同断面位置发生泥沙淤积的条件提出一个临界流速计算公式。

## 1 长直管道泥沙输送数值模型

### 1.1 控制方程

本文采用标准湍流模型以及多相流混合模型。在笛卡尔坐标系下, 水流控制方程的连续方程和动量方程分别为:

连续性方程:

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(uA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(uA_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - Ku \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - Kv \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - Kw \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$  是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的流速分量 (m/s);  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上可流动的面积分数;  $V_F$  是可流动的体积分数;  $\rho$  是液体的密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $p$  是作用在流体微元上的压强 (Pa);  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的重力加速度 (m/s<sup>2</sup>);  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的黏滞力加速度 (m/s<sup>2</sup>);  $K$  是泥沙输移模型当中的阻力增加项。

泥沙控制方程为基于 Nielsen 公式的推移质输沙率方程和悬移质扩散方程<sup>[10]</sup>。在推移质计算中, 床面单宽体积推移质输沙率  $\Phi$  的计算公式为:

$$\Phi = \beta_{\text{Nie}} \theta^{0.5} (\theta - \theta'_{\text{cr}}) c_b \quad (3)$$

推移质层厚度为:

$$\frac{\delta}{d} = 0.3 d_*^{0.7} \left( \frac{\theta}{\theta'_{\text{cr}}} - 1 \right)^{0.5} \quad (4)$$

式中:  $\theta'_{\text{cr}}$  是临界 Shields 数;  $\theta = \frac{\tau}{gd(\rho - \rho_f)}$  是局部 Shields 数, 当根据床面剪切应力  $\tau$  计算得到的局部 Shields 数大于临界 Shields 数时, 表面泥沙起动,  $d$  是颗粒直径,  $\rho_f$  是流体密度;  $d_*$  是砂的无量纲颗粒直径;  $\beta_{\text{Nie}}$  是 Nielsen 经验系数;  $c_b$  是床面上的局部体积分数;  $\delta$  是推移质层厚度。

局部泥沙颗粒随水流携带的上升速度  $u_{\text{lift}}$  为:

$$u_{\text{lift}} = \alpha n_s d_*^{0.3} (\theta - \theta'_{\text{cr}})^{1.5} \sqrt{\frac{gd(\rho - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (5)$$

悬移质扩散方程为:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \nabla \cdot (u_s C_s) = \nabla \cdot \nabla (E C_s) \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  是携沙系数;  $n_s$  指向管道底部沉积泥沙的外法线方向;  $C_s$  是悬沙的质量浓度;  $u_s$  是悬沙的运动速度 (m/s);  $E$  为扩散系数。

### 1.2 计算软件与网格划分

Flow-3D 软件近年来被广泛应用<sup>[11-12]</sup>, 许多研究者在对管道泥沙输运模拟中都采用了该软件中的泥沙冲刷模型, Flow-3D 中的 FAVOR 技术可以利用每个网格内的固体体积分数确定固体的表面位置, 进而在结构化的网格内部把复杂的几何体独立化定义, 达到利用简单矩形网格表示复杂几何形状的效果<sup>[13]</sup>。

按模拟管道的长度和管径 1:1 建立实体模型并导入 Flow-3D 软件中, 激活泥沙冲刷模型并限定泥沙区域, 整体采用结构化正交网格, 为精确研究泥沙在垂直方向上的淤积起动过程, 在垂直方向上对网格进行额外加密。

### 1.3 计算条件的设置

#### 1.3.1 初始条件设置

给定超半管的初始水位, 使水流可以迅速充满整个管道, 压力为大气压强。设定计算步长为 0.01 s。

#### 1.3.2 边界条件设置

管道入流断面设置固定流量和泥沙入流浓度, 管道出流断面设置大气压强, 其余边壁设置为对称边界。

#### 1.3.3 泥沙板块设置

模拟中采用古雷镇填沙工程野外实测的 0.7 mm 中粗砂, 以便将模拟结果与实测数据进行对比。另

外, 还采用细砂进行模拟, 其泥沙粒径取 0.15 mm。两者的密度均为  $2.650 \text{ t/m}^3$ , 泥沙的水下休止角分别取  $35^\circ$  和  $32^\circ$ , 临界希尔兹数分别取 0.032 和 0.070。

### 1.4 模型的率定

#### 1.4.1 管壁当量粗糙度的率定

先根据古雷镇填沙工程清水工况确定计算的边界条件和网格尺度, 对管道清水工况进行模拟计算, 利用野外实测数据与模拟结果进行对比来验证模型的准确性。按照野外实测的清水工况, 对应 192 m 的聚氨酯管道和 178 m 长的钢管, 分别进行入流速度为 4.98、5.46 m/s 的 4 组模拟计算, 模拟中材料的当量粗糙度最终分别确定为 0.045 mm 和 0.120 mm。当进出口断面的计算流场稳定后导出时均压强值计算压差, 并对模拟的压强值和试验值进行对比, 见表 1, 两者偏差小于 10%。

表 1 清水工况模拟与野外实测的压差对比

入流速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	钢管材质	管道当量粗糙度/mm	管道长度/m	模拟压差/Pa	野外实测压差/Pa	数据偏差/%
4.98	聚氨酯	0.045	192	163.23	149.94	8.86
4.98	钢管	0.120	178	186.43	176.40	5.60
5.46	聚氨酯	0.045	192	195.43	183.26	6.64
5.46	钢管	0.120	178	222.79	214.62	3.81

#### 1.4.2 泥沙参数的率定

在清水工况的基础上, 加入泥沙板块建立长管泥沙输送模型, 与古雷镇填沙工程野外泥沙输送(粒径 0.7 mm)的分层取样浓度数据进行对比率定。由于实际工程中, 模拟泥沙输送的入口流速和泥沙浓度一般不是恒定值, 模拟时需要将实际工况的入口流速和泥沙浓度随时间的变化数据导出, 作为动态入流边界条件进行数值模拟。将数值模拟计算得到的悬沙浓度换算成泥浆混合密度, 与野外实测结果进行对比, 模拟中不断调整泥沙参数直到模拟误差整体在 10% 以内, 见表 2。

表 2 泥沙工况模拟与野外实测的浓度对比

断面点号	测量密度/( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	模拟浓度/%	模拟值折算密度/( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )	数据偏差/%
1	1.330	13.0	1.215	8.68
2	1.440	30.3	1.500	4.15
3	1.350	19.8	1.327	1.69
4	1.010	6.2	1.103	9.20
5	1.020	4.5	1.075	5.35

## 2 结果分析

### 2.1 沿程剖面流速的再分布

泥沙颗粒能否在管道各断面底部发生运动, 主要取决于沿程断面流速分布。利用上述验证的数值模型对不同浓度泥沙工况进行模拟计算, 结

果见图 1,  $z$  为观测点的纵坐标高程,  $h$  为观测断面的实际过流水深。相比清水工况下, 沿程断面流速发生了再分布; 随着管道入流长度的增大, 流速分布不均匀程度加大, 主流区越来越偏向管道上部;

且在同样的入流流速下, 泥沙浓度越大, 断面流速分布的非均匀程度越大。断面流速的这种重新调整必将导致泥沙运动情况在每个断面发生再适用。因此, 需要考虑管道长度对临界流速的影响。

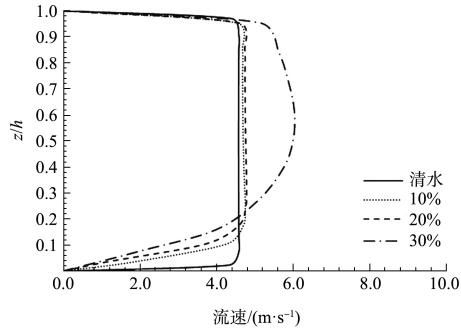
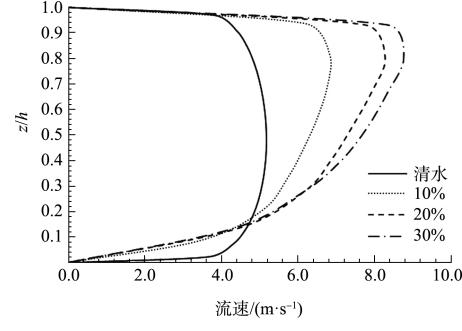
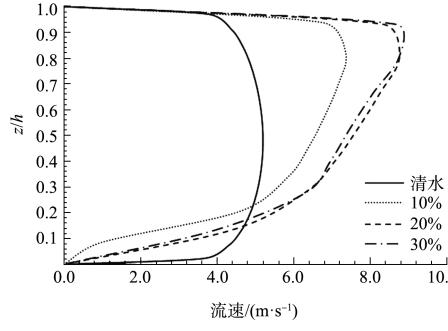
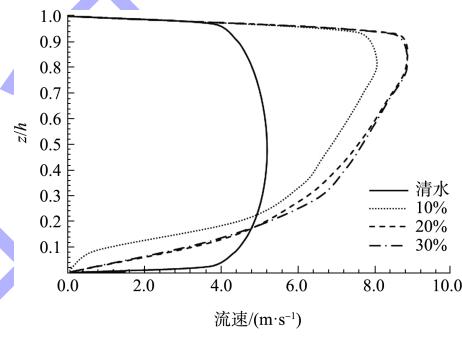
a)  $x=10$  m断面b)  $x=50$  m断面c)  $x=100$  m断面d)  $x=150$  m断面

图 1 不同浓度泥沙工况的断面流速分布

## 2.2 沿程临界流速的分布特性

对不同浓度的粗砂和细砂输送工况进行模拟计算, 输出不同典型断面的淤积与断面流速的关系, 以此得到各自工况下的淤积临界流速(表 3)。淤积临界流速的确定方法见图 2, 随着管道内断面平均流速的不断增大, 存在一个显著的拐点流速, 当断面流速比此拐点流速略小时此处淤积骤增, 当大于此拐点流速时断面流速对管内淤积没有明显影响, 此拐点流速则为淤积临界流速。

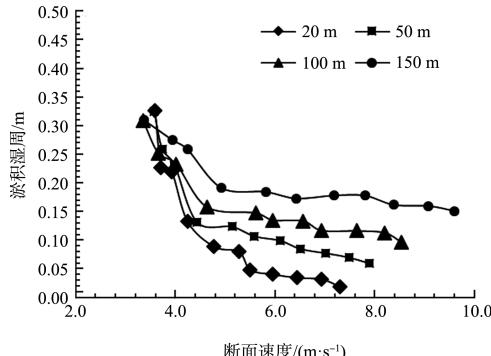


图 2 中粗砂 10% 浓度不同工况下各断面淤积变化

表 3 不同工况下淤积临界流速模拟结果

泥沙中值粒径 $d/\text{mm}$	泥沙入流浓度/%	断面位置/m	模拟流速范围/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	淤积临界流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0.70	20	10	20, 50, 100, 150	1.5~6.5, 4.245, 4.432, 4.630, 4.924
		20	20, 50, 100, 150	1.5~7.0, 4.883, 5.072, 5.430, 5.609
		30	20, 50, 100, 150	2.0~7.5, 5.823, 6.146, 6.725, 7.194
		10	20, 50, 100, 150	1.5~6.0, 2.484, 3.014, 3.161, 3.173
0.15	20	20	20, 50, 100, 150	1.5~6.0, 3.009, 3.520, 3.684, 4.229
		30	20, 50, 100, 150	2.0~6.5, 3.511, 4.020, 4.224, 4.913

### 2.3 沿程临界流速的计算公式

基于李鹏程等<sup>[14]</sup>提出的临界流速公式的结构形式, 鉴于顺直管道泥沙输送中流速沿程出现再分布现象, 本文进一步引入输送长度参数  $x$  和管道当量粗糙度  $\Delta$ 。利用表 3 中的数据进行回归, 得到临界流速公式如下:

$$v_{cr} = 5.4247 \sqrt{gD(S-1)} C_v^{0.3068} \left( \frac{d_{95}}{D} \right)^{0.25} \left( \frac{x}{\Delta} \right)^{0.0738} \quad (7)$$

式中:  $D$  为管道直径 (m);  $S$  为固液比,  $S = \rho_s / \rho$ , 其中  $\rho_s$  为固体颗粒密度,  $\rho$  为水的密度;  $C_v$  为输送泥沙体积浓度;  $d_{95}$  为颗粒累积分布为 95% 的粒径 (m), 即小于此粒径的颗粒体积含量占全部颗粒的 95%。拟合的可决系数  $R^2 = 0.98$ , 淤积临界流速模拟值和修正公式计算值的大部分点都落在 45° 线上或是分布在 45° 线两侧(图 3), 公式拟合性较好。

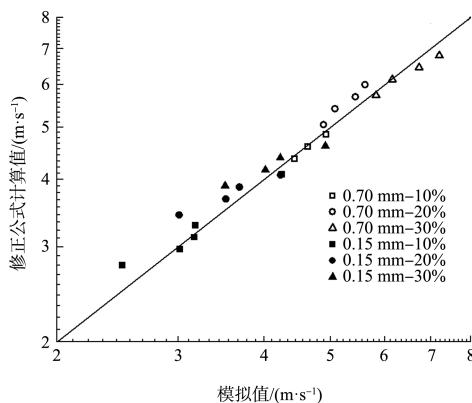


图 3 淤积临界流速模拟值与修正公式计算值比较

为进一步验证公式的有效性, 利用曹斌等<sup>[15]</sup>通过粗颗粒水力管道输送的试验数据, 与公式计算值进行对比, 见图 4, 除了个别试验数据有差别外, 大部分点都落在 45° 线上或是分布在 45° 线两侧, 说明公式计算值和试验值吻合性较好。

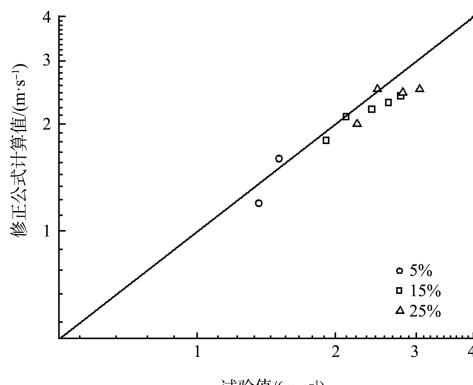


图 4 试验值与修正公式计算值比较

### 2.4 临界流速的沿程变化

考虑到工程中的疏浚管道长度会到几千米甚至上万米, 针对不同长度的输送管道, 利用本公式进行计算, 图 5 的结果表明: 淤积临界流速随着计算长度的增加而增大, 但在长度到达一定范围后增速趋于相对稳定, 不会无限制地增大。此规律符合工程实际经验。

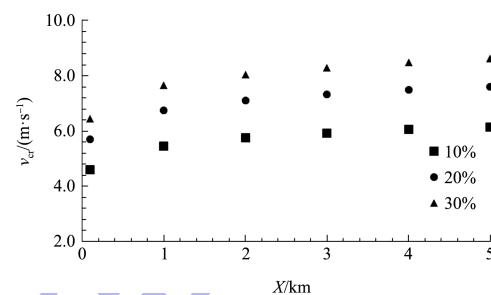


图 5 中粗砂淤积临界流速随管道长度的变化

### 3 结论

- 1) 顺直管道输送中的断面流速会随着沿程输送出现再分布, 需要考虑管道长度对临界流速的影响。
- 2) 临界流速随着输送长度的增加而增大, 但在长度到达一定范围后增速趋于相对稳定, 不会无限制增加。
- 3) 在考虑输送长度参数  $x$  和管道当量粗糙度  $\Delta$  的基础上提出了淤积临界流速计算公式, 该公式得到了文献 [15] 的粗颗粒水力管道输送试验数据的初步验证。

### 参考文献:

- [1] 陶伟.简析当前中国疏浚行业发展的形势与对策[J].经贸实践, 2018(11): 210.
- [2] Durand R. The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes [M]. London: Collage of National Coal Board, 1952.
- [3] 王绍周.粒状物料的浆体管道输送[M].北京: 海洋出版社, 1998.
- [4] WASP E J, KENNY J P, GANDHI R L. Solid-liquid flow slurry pipeline transportation [M]. Clausthal: Trans. Tech. Publications., 1977.