



振动流变对泥浆管道输送的减阻效果研究*

陈杨柳二¹, 郝宇驰², 陶润礼², 张民曦¹, 喻国良¹

(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: 泥浆在管道输送中阻力大导致能耗高, 严重制约疏浚生产效益。本文将泥沙流变学的振动加载流化技术应用到泥浆管道输送减阻研究中, 在管道系统中开展振动流变减阻效果研究。结果表明, 减阻效果随着振动频率的增大先显著提升后趋于平缓; 随着体积浓度的增加而增强, 但其增强的速度逐渐减小; 随着输送流速的增加而不断减弱直至趋于平稳。且对于试验泥样, 存在一个最优振动频率为 40 Hz, 此时系统达到了最佳减阻效益状态; 在内径为 100 mm 管道中, 当泥浆体积浓度为 29.94%、管道输送流速为 0.9 m/s、微幅机械振动频率为 100 Hz 时, 对于中值粒径为 31 μm 的奉贤海滩泥沙能减小 20% 以上的阻力损失; 最后, 提出了泥浆管道输送振动流变减阻的计算模型。

关键词: 疏浚泥浆; 管道输送; 振动减阻; 泥沙流变; 阻力损失; 微幅机械振动

中图分类号: TV 149; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0029-06

Research on drag reduction effect of vibration rheology on mud pipeline transportation

CHEN Yang-liu-er¹, HAO Yu-chi², TAO Run-li², ZHANG Min-xi¹, YU Guo-liang¹

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

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

Abstract: The mud has high resistance in pipeline transportation, which results in high energy consumption and thus severely restricts the efficiency of dredging production. This paper applies the vibration loading fluidization technology of sediment rheology to the research on the drag reduction of mud pipeline transportation and investigates the effect of vibration rheology on drag reduction in the pipeline system. The results show that the drag reduction effect increases significantly and then tends to be stable with the increase in the vibration frequency and is enhanced with the increase in the volume concentration but at a gradually decreased rate. The increase in the conveying flow rate weakens the drag reduction effect until making it level off. For the mud sample tested in this paper, there is an optimal vibration frequency, 40 Hz, at which the system has reached the best state of drag reduction benefits. In a pipeline with an inner diameter of 100 mm, the resistance loss can be reduced by more than 20% for sediment at the Fengxian Beach with a median particle size of 31 μm when the mud volume concentration is 29.94%, the pipeline transportation velocity 0.9 m/s and the micro-amplitude mechanical vibration frequency 100 Hz. Finally, this paper proposes the calculation model for the drag reduction of the mud pipeline transportation by vibration rheology.

Keywords: dredging mud; pipeline transportation; drag reduction by vibration; sediment rheology; resistance loss; micro-amplitude mechanical vibration

收稿日期: 2021-10-21

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52001206)

作者简介: 陈杨柳二(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为港口航道与海岸工程。

通讯作者: 张民曦(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 从事海岸工程、海洋工程研究。E-mail: zmx8888@sjtu.edu.cn

管道输送是疏浚工程中高浓度泥浆的一种主要输送方式，在输送过程中尤其是长距离输送情况下，随着输送距离变长、输送时间增加，泥沙颗粒由于其重力作用逐渐向管道底沉积而不再保持悬浮状态，导致管道输送阻力增大，从而增大输送的能耗、降低排距，严重时甚至会造成堵管等问题。若发生堵管，挖泥船必须停工，需花较长时间清通管道，进一步降低疏浚效率。因此，本文的主要关注点在于长距离泥浆管道输送的减阻研究。

在多年理论研究与工程实践的基础上，泥浆管道输送减阻方法的研究取得了丰硕的成果。国内外研究发现，在泥浆输送中添加高分子聚合物^[1-2]、细颗粒泥沙^[3-4]、气体^[5-7]等介质以影响管道内的流场能够在一定范围内取得良好的减阻效果，但不论哪种介质的添加量都会受到输送距离和时间的制约^[8]，这个问题限制了添加介质减阻方法在许多大型疏浚工程中的应用。近年来，泥沙流变学^[9]为工程领域和自然现象中的一些问题

提出新的解决途径。采用高频微幅振动将水下淤泥流化后再利用泥浆泵进行输送，在实验室内实现了输送阻力减小^[10]。孙业志等^[11]通过大红山全尾砂试验发现振动减阻在浆体输送中是可行的。依据杨闻宇和喻国良^[12-13]的研究，对高浓度淤泥施加机械振动作用会降低其黏滞系数。然而，将机械振动载荷流化疏浚泥浆而减小输送阻力的程度值得进一步研究。为此，本文将通过物理试验探索机械振动荷载诱发泥沙流变在疏浚泥浆管道输送中的实际减阻效果。

1 试验方案

1.1 试验管道

泥浆管道输送的物理试验系统见图 1。试验管道内径为 100 mm，总长为 14.5 m，管道上部使用无色透明亚克力材质以便观察整个试验过程，其余部分使用普通 PVC 材质，各管段采用法兰连接。正式试验前多次使用清水运行，以检测整个管道系统是否会出现漏液。

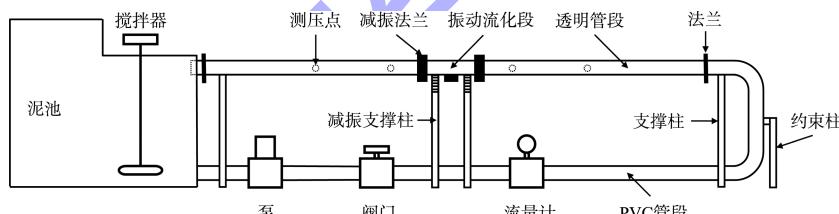


图 1 试验管道系统

试验泥浆储存在尺寸为 1 200 mm×800 mm×400 mm(长×宽×高)的铝合金箱泥池中，其上部未封顶且切割一部分，以方便试验系统搭建及试验过程中使用搅拌器等相关操作，底部开孔处使用 PVC 材质接头连接泥池与 PVC 管段。

试验采用 4 kW 立式泵、防腐蚀的 UPVC 隔膜阀和 DN100 四氟衬里电磁流量计。通过调节阀门的开闭程度来控制管道内流量大小，并通过读取电磁流量计数据，记录泥浆输送的流量与流速。

振动流化段由中间的钢制振动管段和两侧的减振法兰组成。其中钢制振动管段采用耐腐蚀且强度合适的不锈钢材质，在长为 500 mm 的不锈钢

管中心管底外侧焊接一个固定平台用以安装振动源(24 V 小型直流电动振动马达)，并在钢管两侧焊接法兰盘以便连接减振法兰。设置减振法兰的目的是防止振动源工作时产生的振动传递到两侧的亚克力管段。整个振动流化段的内径与其余管段保持一致(均为 100 mm)，以最大程度减小整个管道系统内泥浆输送时的局部阻力损失。

振动流化段前后各布置两个距离相等的测压点，外接测压管分别测量试验过程中前后两组测压点的压力差(即对应的阻力损失)，前面两测压点的压力差用作校准，通过后面两测压点间压力差的变化来反映施加振动载荷前后泥浆管道输送阻力损失的变化，从而体现减阻效果的变化。

1.2 试验泥样

选取实验室中从奉贤海滩挖掘获得的泥样^[14], 去除草根、贝壳、石块等杂质, 取清水均匀搅混制成泥浆, 将其储存在泥池中, 多次取样并使用激光粒度仪测定得到最终制备的泥浆泥沙中值粒径 $d_{50}=31\text{ }\mu\text{m}$ 。后续试验中可以通过不断添加筛过的泥样增大管道输送的泥浆浓度。

1.3 试验步骤

1) 在泥池中备好初步试验所需的泥浆并测定其浓度, 连接电源并运行泵, 调节隔膜阀开启程度, 直至电磁流量计显示的泥浆输送流量达到稳定且流速为 0.9 m/s 时, 记录此时振动流化段前后两组压差值。打开电源并启动振动马达, 将其振动频率依次调节为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 Hz 以获得不同的试验组次, 对应记录每个振动频率下的振动流化段前后两组压差值。

2) 改变隔膜阀开启程度, 将泥浆管道输送流速依次增大为 1.2、1.5、1.8、2.1、2.4、2.7 m/s, 且分别对各个输送流速重复前述试验操作。在改变输送流速前需要关闭隔膜阀与泵, 并使用搅拌器均匀搅拌泥池内的泥浆, 待泥浆静置一段时间, 以达到每次运行之前试验泥浆的性质能最大程度上相近。

3) 在完成该体积浓度下输送流速达到 2.7 m/s 的试验后, 关闭隔膜阀与泵, 再通过添加筛过的泥样增大管道输送的泥浆浓度, 并重复前述所有试验步骤。另外, 当最大试验泥浆浓度达到体积浓度 $C_v=30\%$ 时, 不再继续增加输送浓度。

1.4 试验工况

按照上述步骤开展了 7 种体积浓度、7 种输送流速、11 种振动频率(包含未施加振动荷载)下的管道减阻试验, 以探索泥浆管道输送在不同工况下的减阻效果变化规律, 见表 1。

表 1 管道试验工况

组别	体积浓度/ %	输送流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	振动频率/ Hz	组别	体积浓度/ %	输送流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	振动频率/ Hz	组别	体积浓度/ %	输送流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	振动频率/ Hz
T1	6.38	0.9	0~100	T18	12.39	1.8	0~100	T35	20.87	2.7	0~100
T2	6.38	1.2	0~100	T19	12.39	2.1	0~100	T36	25.21	0.9	0~100
T3	6.38	1.5	0~100	T20	12.39	2.4	0~100	T37	25.21	1.2	0~100
T4	6.38	1.8	0~100	T21	12.39	2.7	0~100	T38	25.21	1.5	0~100
T5	6.38	2.1	0~100	T22	16.63	0.9	0~100	T39	25.21	1.8	0~100
T6	6.38	2.4	0~100	T23	16.63	1.2	0~100	T40	25.21	2.1	0~100
T7	6.38	2.7	0~100	T24	16.63	1.5	0~100	T41	25.21	2.4	0~100
T8	9.59	0.9	0~100	T25	16.63	1.8	0~100	T42	25.21	2.7	0~100
T9	9.59	1.2	0~100	T26	16.63	2.1	0~100	T43	29.94	0.9	0~100
T10	9.59	1.5	0~100	T27	16.63	2.4	0~100	T44	29.94	1.2	0~100
T11	9.59	1.8	0~100	T28	16.63	2.7	0~100	T45	29.94	1.5	0~100
T12	9.59	2.1	0~100	T29	20.87	0.9	0~100	T46	29.94	1.8	0~100
T13	9.59	2.4	0~100	T30	20.87	1.2	0~100	T47	29.94	2.1	0~100
T14	9.59	2.7	0~100	T31	20.87	1.5	0~100	T48	29.94	2.4	0~100
T15	12.39	0.9	0~100	T32	20.87	1.8	0~100	T49	29.94	2.7	0~100
T16	12.39	1.2	0~100	T33	20.87	2.1	0~100	-	-	-	-
T17	12.39	1.5	0~100	T34	20.87	2.4	0~100	-	-	-	-

2 试验结果与分析

2.1 振动流变下减阻效果分析

保持泥浆体积浓度和管道输送流速不变, 改变振动流化段管底振动频率进行试验分析, 见图 2a); 保持振动流化段管底振动频率和管道输

送流速不变, 改变泥浆体积浓度进行试验分析, 见图 2b); 保持振动流化段管底振动频率和泥浆体积浓度不变, 改变管道输送流速进行试验分析, 见图 2c)。

由图 2a) 可以看出, 对于管道内径为 100 mm、

泥沙中值粒径 d_{50} 为 $31 \mu\text{m}$ 的泥浆, 在任一体积浓度和输送流速下, 在管道底部施加微幅机械振动都能够减小泥浆在管道输送中产生的阻力损失, 其中在体积浓度为 29.94%、输送流速为 0.9 m/s 、振动频率为 100 Hz 时能减小 20% 以上的阻力损失。

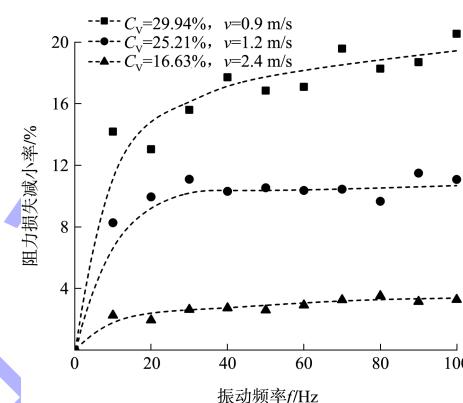
另外, 泥浆管道输送阻力损失减小率随振动频率的变化曲线有着相似的规律, 即随着振动频率的增大先明显增大后趋于平缓, 这也表明试验中振动流化段的减阻效果有着随振动加载频率增加呈现先显著提升后逐渐稳定的趋势。

在振动加载频率为 10 Hz 时, 阻力损失减小率相较于未施加振动有陡增现象, 这是由于微幅机械振动诱发流经振动单元的泥浆发生流变、降低了接触面附近泥浆黏度而明显减小了输送的阻力损失。对于图中数据, 通过计算得到, 振动频率为 40 Hz 时的阻力损失减小率大小平均达到了振动频率为 100 Hz 时的 87.53%, 这说明在振动频率为 40 Hz 的基础上振动频率增大 1.5 倍只能提升不到 $1/8$ 的减阻效果。可以认为 40 Hz 为本文管道振动减阻试验的最优振动频率(f_0), 在此时泥浆管道输送系统达到了最佳减阻效益状态, 因为加大振动频率所得到减阻效果的提升远不及所增加的功耗, 其减阻效益反而会降低。

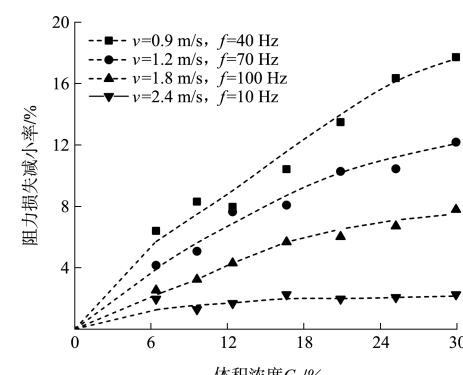
由图 2b) 可以看出, 阻力损失减小率随体积浓度的变化曲线有着相近的形态, 即阻力损失减小率随着体积浓度的增加而增大, 但其增大的速度逐渐减缓。这也表明振动流化段的减阻效果随泥浆体积浓度的增大而增强, 且逐渐达到相对平衡状态。另外, 体积浓度对减阻效果的影响受到输送流速与振动频率大小的限制, 当输送流速为 2.7 m/s 、振动频率为 100 Hz 时, 泥浆体积浓度 C_v 值为 16.63% 较 9.59% 时阻力损失减小率的数值仅提升了 19.35%; 而当输送流速为 0.9 m/s 、振动频率为 60 Hz 时该值为 58.45%, 是前者的 3.02 倍。

另外, 在不同的振动频率和体积浓度下, 每条阻力损失减小率曲线的变化趋势也有着同样的趋势, 见图 2c), 即阻力损失减小率随着输送流速的增加而不断减小, 直至曲线趋于平稳。这也表

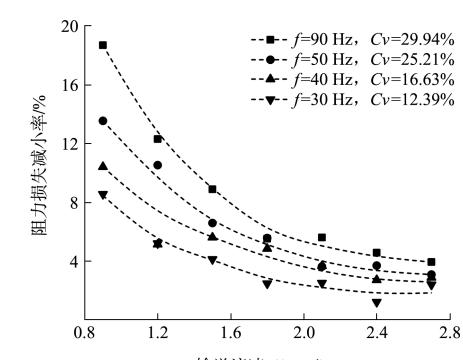
明振动流化段的减阻效果随着输送流速的增大而减弱最后达到相对平衡。在试验中输送流速为 0.9 m/s 时振动流化段的减阻效果最明显, 在图 4 中当时阻力损失减小率为流速 2.7 m/s 时相应值的 $2.10 \sim 4.44$ 倍。这是因为流速越小时泥浆中的泥沙颗粒向管道底部下沉淤积的趋势越强, 相应输送的阻力损失越大, 而在此时施加微幅机械振动来流化管底壁, 附近的泥浆能够最大程度上减小输送阻力损失。



a) 随振动频率的变化曲线



b) 随体积浓度的变化曲线



c) 随输送流速的变化曲线

图 2 阻力损失减小率变化曲线

2.2 阻力损失减小率计算公式

如上所述, 泥浆管道振动减阻效果受到振动频率、体积浓度以及输送流速的影响。因此, 相应的阻力损失减小率可以表示为:

$$\Delta h_f = \frac{h_f - h'_f}{h_f} = f(C_V, f, v) \quad (1)$$

式中: Δh_f 为阻力损失减小率; h_f 为未施加振动载荷后的阻力损失; h'_f 为施加振动载荷的阻力损失; C_V 为泥浆体积浓度; f 为振动加载频率; v 为泥浆输送流速。

由前述分析可知, 振动频率、体积浓度与输送流速 3 个参数对于阻力损失减小率均有相应的影响关系, 即:

$$\Delta h_f = \frac{h_f - h'_f}{H_f} = f_1(C_V) \cdot f_2(f) \cdot f_3(v) \quad (2)$$

选取试验中最优振动频率 f_o 并引入管道输沙临界流速 v_c , 得到方程(2)的无量纲函数形式为:

$$\Delta h_f = \frac{h_f - h'_f}{h_f} = f_1(C_V) \cdot f_2\left(\frac{f}{f_o}\right) \cdot f_3\left(\frac{v}{v_c}\right) \quad (3)$$

式中: 根据天津航道局疏浚技术工程规范^[15]中给出的管道输沙临界流速计算公式, 取 $v_c = 0.928 C_V^{0.105} d_{50}^{0.056} \sqrt{2gD(\rho_s - 1)}$, 其中 g 为重力加速度, D 为输泥管道内径, ρ_s 为颗粒密度。

将 $d_{50} = 31 \mu\text{m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $D = 0.1 \text{ m}$, $\rho_s = 2.65 \text{ t/m}^3$, $f_o = 40 \text{ Hz}$ 代入方程(3)中, 并通过对图 2a) 中共计 539 组试验数据进行拟合分析, 最终得到泥浆管道输送振动流变减阻情况下的阻力损失减小率计算公式如下:

$$\Delta h_f = 0.0377 C_V^{0.526} \left[\left(\frac{v}{v_c} \right)^{-1.547} + 0.0626 \right]. \quad \ln(3.701f + 1) \quad (4)$$

其中, 拟合方程(4)的 R^2 为 0.95, 且使用方程(4)对前述所有工况总共 539 组试验数据进行计算, 并将得到的计算值和阻力损失减小率实测值进行比较, 结果见图 3。从图中可以看到计算值点群基本集中在完全一致线两侧附近, 进一步表明拟合效果良好。

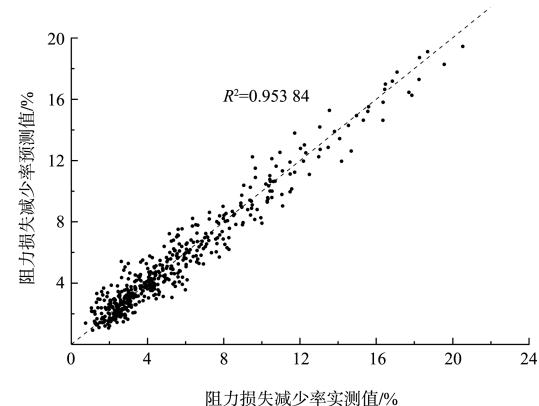


图 3 阻力损失减小率的预测值与实测值的比较

但需要注意的是, 式(4)尚未考虑泥浆的颗粒粒径、输送管径和振动加载布置方式等因素的影响。此外, 试验中搭建的振动流化段前后管道是水平且呈直线布置的, 而在疏浚工程中, 尤其在长距离疏浚淤泥输送时, 管道的布置会因山丘、河渠、建筑物等周边环境条件而发生倾斜或曲折, 可能导致出现泥浆输送阻力损失局部突变, 所布置的振动流化装置的实际效果也会相应出现波动。

3 结论

1) 施加微幅机械振动载荷诱发管内泥浆流变能够切实有效地减少泥浆管道输送的阻力损失。通过试验发现, 泥浆管道输送的减阻效果随着振动频率的增大先明显提升后逐步趋于稳定; 随着体积浓度的增加而增强, 但其增强的速度逐渐减小; 随着输送流速的增加而不断减弱直至趋于平稳。且本文试验中存在一个最优振动频率为 40 Hz, 在此时泥浆管道输送系统达到最佳减阻效益状态。

2) 通过本文试验发现, 在内径为 100 mm 管道中, 当泥浆体积浓度为 29.94%、管道输送流速为 0.9 m/s、微幅机械振动频率为 100 Hz 时, 对于中值粒径为 31 μm 的奉贤海滩泥沙能减小 20%以上的阻力损失。这也进一步验证了将微幅机械振动应用在长距离泥浆管道输送中可取得较好的减阻效果。

3) 针对本文试验条件范围, 建立了泥浆管道输送振动流变减阻下阻力损失减小率的计算方程,

为今后深入研究与工程实际应用提供参考。

参考文献：

- [1] 王文治, 陈武奎. 泥浆管路输送的添加剂减阻试验[J]. 泥沙研究, 1982(2): 27-35.
- [2] YANG S Q, DOU G. Turbulent drag reduction with polymer additive in rough pipes[J]. Journal of fluid mechanics, 2010, 642: 279-294.
- [3] KAZANSKIJ I, BRUHL H, HINSCH J. Influence of added fine particles on the flow structure and the pressure losses in sand-water-mixture[R]. Milton Keynes: British Hydrodynamics Research Association, 1974.
- [4] SCOTT S H, ABT S R. Hydraulic transport of fine and coarse sediment mixtures in pipelines[J]. Journal of transportation engineering, 2002, 128(1): 1-8.
- [5] XINLI W, HWANG J Y, GREENLUND R C, et al. Effects of flow speed, flow pattern and air bubbles on pressure loss in slurry pipelines[J]. Minerals & metallurgical processing, 2003, 20(1): 36-41.
- [6] 朱汉华, 范世东, 钟骏杰, 等. 挖泥船管道输泥的加气助送阻力特性试验研究[J]. 船海工程, 2008, 37(2): 120-122.
- [7] 汤勃, 孔建益, 侯宇, 等. 三相流管道输送技术研究[J].

(上接第 20 页)

3) 从计算结果和影响因素等方面综合考虑, 美国规范的计算结果可以较好地包络其他方法, 但其未能考虑紊动程度的影响, 在强紊动的水流条件下, 建议对照 Pilarczyk 法和 Escarameia & May 法综合评估确定块石质量。

4) 在实际应用中, 应结合工程所遵循的规范体系及工程条件, 选取对应的计算方法, 并建议采用多种方法进行对比计算; 同时, 因计算公式主要由试验数据的总结推导得来, 存在一定的局限性, 实际工程应用中, 应开展物理模型试验进行验证, 以确保工程的安全可靠。

武汉科技大学学报, 2009, 32(1): 98-101.

- [8] 赵立娟, SEUNGHEE K, YUSEUNG K. 电磁场对泥浆管道输送阻力性能影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(1): 64-67.
- [9] 喻国良, 杨闻宇, 洪国军. 泥沙流变学及其应用[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 130-135.
- [10] 潘志芳. 淤泥液化与管道输送淤泥的阻力[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [11] 孙业志, 吴爱祥, 黎剑华. 高浓度浆体管道输送的振动减阻[J]. 矿冶工程, 2001(4): 4-6, 9.
- [12] 杨闻宇, 喻国良. 机械振动作用下淤泥液化产生的细颗粒释放机理[J]. 厦门理工学院学报, 2016, 24(1): 86-91.
- [13] YANG W, YU G. Rheological response of natural soft coastal mud under oscillatory shear loadings[J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 2018, 144(4): 05018005.
- [14] ZHANG M, YU G. Critical conditions of incipient motion of cohesive sediments [J]. Water resources research, 2017, 53(9): 7798-7815.
- [15] 天津航道局. 疏浚工程技术规范: JTJ 319—1999[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

(本文编辑 王传瑜)

参考文献：

- [1] 曹玉芬, 陈汉宝, 孟祥玮. 块石在水流作用下的稳定性研究[J]. 水道港口, 2009, 30(5): 320-324.
- [2] 水利部水利水电规划设计总院. 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [3] US Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual: EM 1110-2-1100[S]. Washington: USACE, 2002.
- [4] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan [S]. Tokyo: OCDI, 2010.
- [5] CUR, CIRIA, CETMEF. The rock manual—the use of rock in hydraulic engineering: CIRIA C683[S]. 2nd ed. London: CIRIA, 2007.

(本文编辑 王璁)