

泥沙浓缩旋管清液排放口布置形式

陈 铂^{1,2}, 赵利平^{1,2}, 陈绍文³, 黄良材³, 程永舟^{1,2}, 喻黎明^{1,2}, 陈 宏^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 广东金东海集团有限公司, 广东 汕头 515041)

摘要:为确定一种新型水力吹填用水沙分离装置——泥沙浓缩旋管关键部件清液排放口的布置形式,使用数值模拟与物理模型试验相结合的方法对初步拟定的几种清液排放口形式进行了研究,并综合考虑工程适用性与浓缩效率,选取垂直主管布置排放管的外排放口作为该装置清液排放口。结果表明,该排放口形式的泥沙浓缩旋管不但可以提高吹填造陆入场泥沙浓度,同时还会降低入场泥沙细颗粒含量,从而改善吹填泥沙的工程性质。

关键词:泥沙浓缩旋管;水沙分离;水力吹填;清液排放口;布置形式;数值模拟;模型试验

中图分类号:TV142 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)03-0080-05

Study of layout form of clear liquid discharge port on sediment concentrated spiral tube//CHEN Bo^{1,2}, ZHAO Liping^{1,2}, CHEN Shaowen³, HUANG Liangcai³, CHENG Yongzhou^{1,2}, YU Liming^{1,2}, CHEN Hong^{1,2} (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China; 3. Guangdong Gold East Sea Engineering Company, Shantou 515041, China)

Abstract: In this paper, it is proposed a new type of water-sediment separation device named sediment concentrated spiral tube (SCST), which is used in hydraulic fill. To confirm layout form of clear liquid discharge port—key components of the device, several tentative of clear liquid discharge port of SCST were investigated by numerical simulation and physical experiment. Considering the engineering applicability and efficiency of concentration, this paper selected the outside discharge port, whose discharge pipe was perpendicular to the main pipe, as the recommended clear liquid discharge port for SCST. Overall, the results showed: SCST, with the selected layout form, not only could improve sediment concentration for hydraulic fill, but also reduced the content of fine particles, as well as improved the engineering properties of fill sediment.

Key words: sediment concentrated spiral tube; water-sediment separation; hydraulic fill; clear liquid discharge port; layout form; numerical simulation; model test

我国沿海地区土地资源紧张,将疏浚淤泥用来吹填造陆,是一举两得、变废为宝的好方法。水力吹填淤泥由于黏粒含量高、含水率高,其工程特性一般很差,主要表现为压缩性大、强度低、渗透性能差、排水固结缓慢。吹填形成的土地需要经过长期固结,因此水力吹填工程迫切需要能提高吹填淤泥工程性质的技术。为降低含水率、提高入场泥沙含固率,通常的做法是使用固液分离装置进行固液分离处理,并将低含沙清液排出以提高泥沙工程性质。已有很多固液分离装置的研究成果^[1-6],固液分离设备的分

离效果都比较好,固体颗粒浓缩率较高。但由于结构大多较为复杂,局部水头损失大,部分分离设备还需要外部动力输入,所以处理能力有限,不适合作为大规模吹填造陆工程的水沙分离设备。此外,吹填造陆工程要求水力吹填的泥沙要有一定的流动性,经处理的泥沙含水率不宜过低。广东金东海集团有限公司和长沙理工大学工程技术研发中心研制出一种新型水沙分离装置——泥沙浓缩旋管(下文简称旋管),该装置利用水力吹填的动能在旋管中形成环流,离心力使比水密度大的泥沙颗粒向旋管外侧

基金项目:湖南省高等学校科学研究项目(12C0029);水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2012SS06);广东金东海集团有限公司资助项目(12061901)

作者简介:陈铂(1978—),男,浙江瑞安人,讲师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:colby_cn@hotmail.com

边壁处(即旋管弯曲段远离曲率中心一侧)汇集,出流时泥沙会形成有序分布,靠近旋管外侧边壁泥沙浓度高,靠近旋管内侧边壁泥沙浓度低。在工程中可以将旋管内侧低含沙浓度的清液排出,以增加入场泥沙浓度,进一步提高工程效率。

为使旋管结构定型,并运用于实际工程中,需要考虑如何有效地将清液排出,这涉及排放口位置、形式及布置方式。笔者采用数值模拟与物理模型试验相结合的方法,对旋管分沙机理和内部水沙运动规律进行研究,以数值模拟进行定性比较,指导设计排放口形式;以物理试验做定量研究,并通过试验确定适用的排放口形式。

1 数值模拟试验和排放口选型

研究泥沙问题通常采用物理模型试验方法,物理模型试验理论基础较为成熟,对于复杂的综合性泥沙问题,可以得到较为可信的试验现象与结果^[7],但由于灵活性和成本等方面的不足,使其应用受到了很多限制。近年来随着计算机技术的快速发展,计算流体力学已成为与物理模型试验同等重要的研究方法,其中的泥沙数值模拟也正成为研究泥沙问题的重要手段^[8]。

水力吹填时管道内水流速度很高,为紊流流动。目前紊流数值模拟中主要使用混合长模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型等。混合长模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型对于各向异性紊流流场模拟误差较大,并不适于计算存在强烈二次流的旋管。RNG $k-\varepsilon$ 模型是 Yokhoth 等^[9]于 1986 年使用重整化群理论在标准 $k-\varepsilon$ 模型基础上进行改进后的模型,该模型通过修正紊动黏滞系数考虑了流动中的旋转等情况,所以本文数值模拟使用 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行流场计算。为了解泥沙颗粒在旋管中的运动规律,使用基于 Lagrange 方法的离散相模型计算单颗粒泥沙运动。颗粒运动控制方程^[10]为

$$\frac{du_s}{dt} = -\frac{1}{\rho_s} \nabla F_p + \frac{\rho - \rho_s}{\rho_s} G + C_D \frac{3\rho}{4D\rho_s} (u - u') |u - u'| \quad (1)$$

其中

$$u' = u_s + u_{\text{diff}}$$

式中: u 为水流速度; u_s 为颗粒速度; u_{diff} 为颗粒扩散(随机运动)速度; F_p 为压力; G 为质量力(包括重力和其他质量力); ρ 为水体密度; ρ_s 为颗粒密度; C_D 为拖曳系数; D 为颗粒直径。

水和沙是通过拖曳力互相作用。对于球形颗粒,其拖曳系数有经验公式^[11]

$$C_D = \frac{24}{Re_d} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re_d}} + 0.4 \quad (2)$$

其中

$$Re_d = \frac{\rho D |u - u'|}{\mu}$$

式中 Re_d 为颗粒雷诺数。计算时不考虑颗粒之间的碰撞影响。

为了解旋管实现泥沙有序分布的原理,使用数值模拟方法研究旋管中挟沙水流的运动规律。旋管结构形式如图 1 所示,管道内径为 d ,螺旋管道轴线半径为 R ,本文取 $d=90 \text{ mm}$ 、 $R=350 \text{ mm}$ 。旋管入口压力为 1.4 MPa ,旋管出口压力为 1.0 MPa ;投放颗粒为 5 组直径 $0.054 \sim 0.9 \text{ mm}$ 的球形颗粒,在进口段每秒投放 5 000 颗,投放位置随机分布,初始速度为零;颗粒密度为 2.65 g/cm^3 ,颗粒与管壁碰撞为非弹性碰撞,碰撞后回弹系数取为 0.658 ,颗粒拖曳系数取为 0.43 。

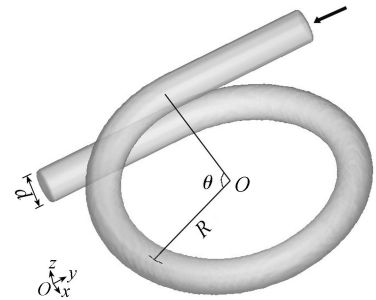


图 1 旋管结构示意图

经计算得到旋管内部流动结构如图 2(a) 所示。水流刚进入弯曲段时,由于管道曲率影响使靠近旋管外侧的水体压强变大,内侧水体压强变小,如图 2(b) 所示。进入弯曲段后水体同时还受到离心力作用,在离心力与压力梯度共同作用下旋管内水流会形成很强的二次流。水流在沿管道轴线运动的同时还会绕轴线做圆周运动,形成靠近边壁处的高速环

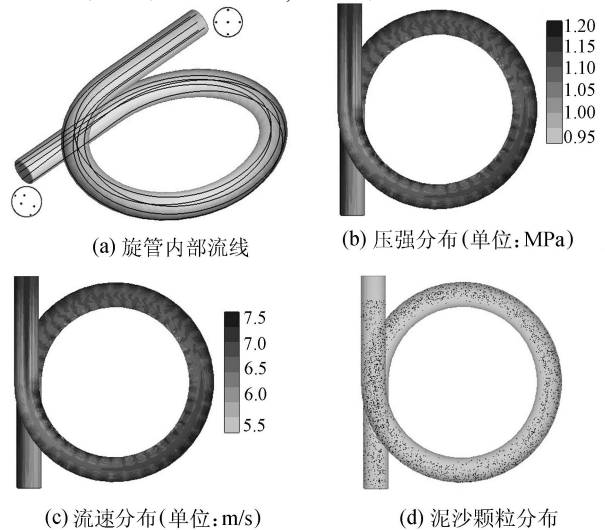


图 2 旋管内部压力、流场和泥沙颗粒分布

流带,如图2(c)所示,根据流线在管道截面位置变化情况,主流方向逐渐偏离管道轴线向旋管外侧靠近。图2(d)给出了泥沙颗粒分布情况,泥沙颗粒随水流运动,受离心力作用逐渐向旋管外侧集中。进入旋管内的泥沙颗粒数随时间变化曲线如图3所示,泥沙颗粒总数在6s后基本稳定在3000颗左右。进入螺旋管道后,从 $\theta=90^\circ$ 开始顺水流方向取4个截面(图4(a))分析泥沙颗粒分布,将管道截面划分为8个区域(图4(b))。在泥沙颗粒总数稳定后持续观测收集各截面不同位置出现的泥沙颗粒,各截面泥沙颗粒分布情况见表1,可以看出随水流运动泥沙在旋管中逐渐向外侧下方聚集。

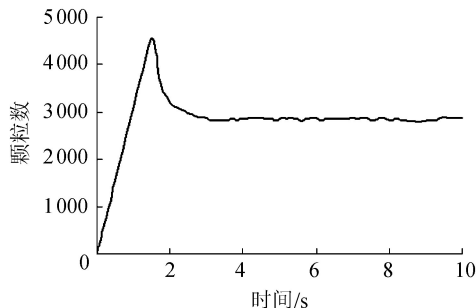


图3 旋管内泥沙颗粒数历时曲线

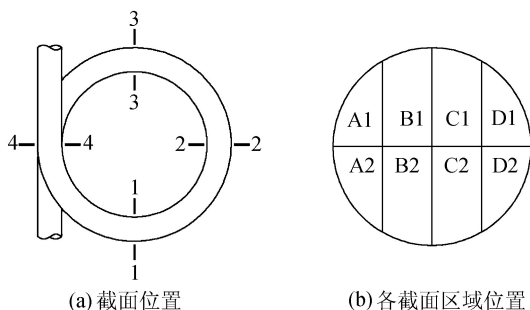


图4 旋管截面区域位置示意图

表1 各截面泥沙颗粒分布情况 %

区域	截面 1-1	截面 2-2	截面 3-3	截面 4-4
A1	0.50	0.00	0.00	0.00
A2	0.50	0.45	0.00	0.55
B1	5.00	4.93	5.00	0.00
B2	17.00	15.25	20.00	19.89
C1	12.00	8.52	10.91	3.87
C2	19.50	23.77	29.09	30.94
D1	25.50	21.08	16.36	20.44
D2	20.00	26.01	18.64	24.31

在实现泥沙有序分布后,需有效排除低含沙清液,提高入场泥沙浓度。先采用数值模拟进行定性研究,对不同排放方案排放效率、流动条件做比较。排除清液使用直径为45mm的直管进行外排放,排放管与主管分别布置不同角度,如图5(a)(b)(c)(d)所示;或是在主管内部添加一块挡板将主流与清液分开进行内排放,如图5(e)所示。各方案边界

条件相同,旋管入口压力为1.4MPa,主管出口压力为1.3MPa,排放管出口压力为1.0MPa,比较旋管整体工作效果。

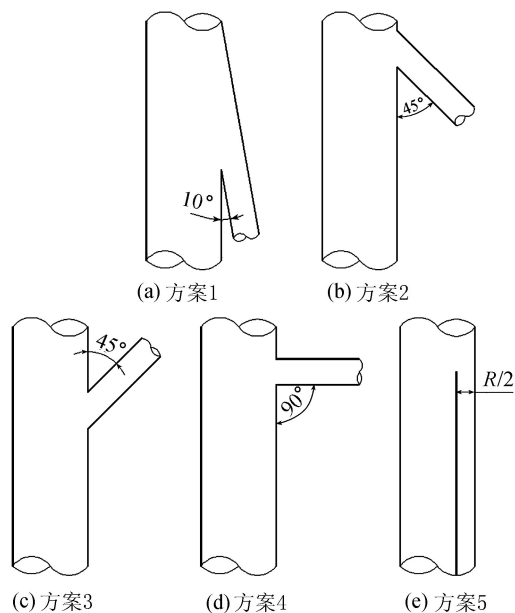


图5 排放口结构示意图

经计算后得到各排放口流场如图6所示。流动状态稳定后(6~20s)在排放管捕捉被排出的颗粒,被排出颗粒随时间变化曲线如图7所示,均为粒径为0.054mm的细颗粒。各方案捕捉颗粒数量如表2所示,进行方差分析结果如表3所示,可见5种方案有显著差异(P 值远小于5%)。方案1、4排水管排出泥沙颗粒相对较少,而且泥沙颗粒数随时间变化较小(图8),对旋管泥沙浓缩较为有利;方案1由于排放管与主管夹角较小,两部分连接段(实际

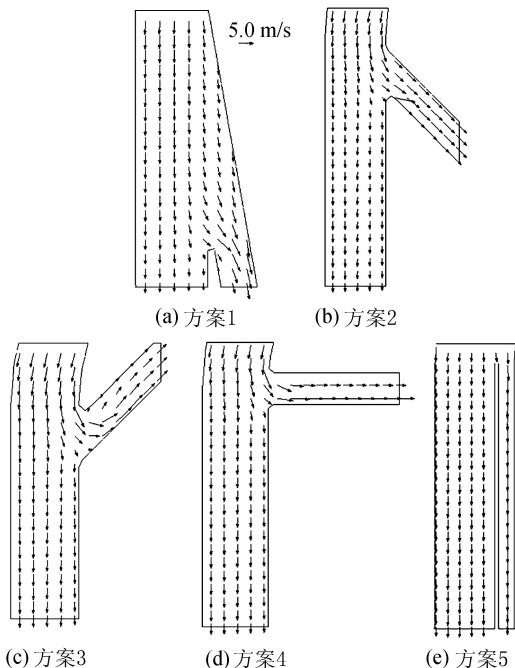


图6 排放口管轴平面流速矢量

工程中的焊缝)很长,加工难度较大,故不作为推荐方案。方案2,3排出的泥沙颗粒较多,同时泥沙排放很不稳定,泥沙浓缩效率较低。从流动结构来看,方案2,5水流较为平顺,挟沙水流引起的管道磨损与振动也相对要小,对工程运行较为有利。综合比较,选取外排放方案4和内排放方案5作为进一步的研究对象,制作物理模型进行试验分析。

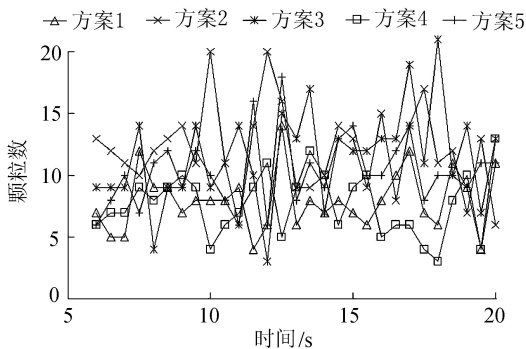


图7 排放管捕捉颗粒数历时曲线

表2 排放管排出颗粒数

排放口形式	取样次数	颗粒总数	颗粒数平均值	方差
方案1	29	231	7.97	5.89
方案2	29	350	12.07	12.50
方案3	29	334	11.52	15.62
方案4	29	222	7.66	6.52
方案5	29	299	10.31	8.22

表3 排放管排出颗粒方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方和	F比	P值	F的临界值
组间	4	471.820	117.955	12.099	1.79×10^{-8}	2.436
组内	140	1364.828	9.749			
总计	144	1836.648				

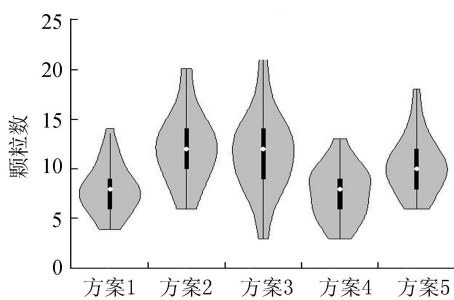


图8 排放管捕捉颗粒数小提琴图^[12]

2 物理模型试验

2.1 试验装置及工况

物理模型使用有机玻璃制作,旋管内径 $d = 90 \text{ mm}$,旋管轴线曲率半径 $R = 350 \text{ mm}$,排放口根据数值模拟分析结果制作了内排放口和外排放口两种(图9),清液排放管内径均为 20 mm ,内排放口中的挡板距管壁 25 mm 。试验装置如图10所示,蓄水池中事先配置好质量分数为 3.57% 的含沙浑水,使用搅拌

泵均匀混合。试验用水(包括排放出的清液)最终流回蓄水池,保持蓄水池中水体含沙浓度的稳定。

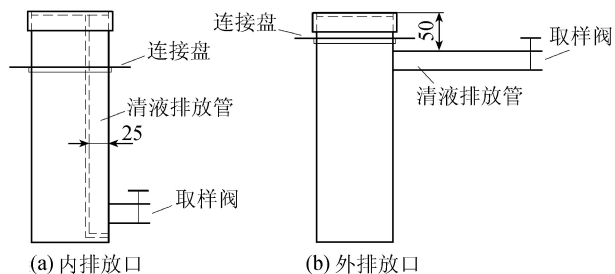


图9 排放口结构示意图(单位:mm)

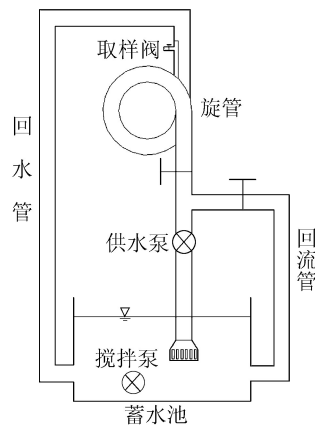


图10 试验装置示意图

试验流速根据天津某吹填工程选取,该工程单管设计最大流量为 $8000 \text{ m}^3/\text{h}$,输送管道内径为 0.8 m ,管内平均流速为 4.42 m/s ;模型采用重力相似准则,即

$$Fr = \left(\frac{u}{\sqrt{gL}} \right)_p = \left(\frac{u}{\sqrt{gL}} \right)_m \quad (3)$$

计算得到试验最大流量为 9.4 L/s ,对应旋管内平均流速为 1.48 m/s 。

2.2 试验结果与分析

对内排放和外排放两种排放口分别使用不同流量进行试验,试验时取样阀全开,两种排放形式的主管流量和排放出的清液流量比较见图11,可以看出两种排放口清液排放效率相近。在主管和排放管同时取3组水样测量泥沙浓度,当浓度值组间差异大

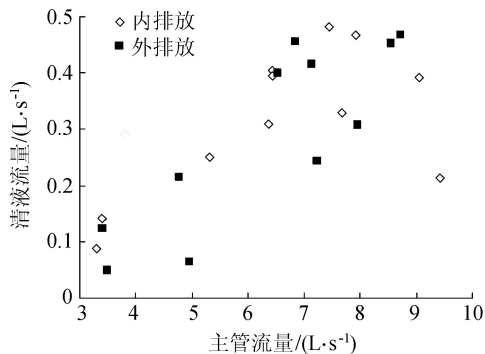


图11 流量分配

于 20% 时重新取样,将 3 组水样泥沙浓度取平均得到该工况主管和排放管泥沙浓度值;浓度测量后将泥沙烘干分析粒径分布。以主管水样的泥沙浓度与排放管水样泥沙浓度的比值作为衡量泥沙浓缩效果的参考值,泥沙浓度比与雷诺数之间的关系如图 12 所示,可以看出主管水体和排放管清液泥沙浓度比绝大部分情况都大于 1,即主管水体含沙量大于排放管,最多时主管水样泥沙浓度可以达到清液的近 20 倍。泥沙浓度比随着流速的增加而增加。泥沙浓度比与排放口形式和雷诺数之间的影响关系使用协方差分析法进行分析,结果见表 4,分析表明泥沙浓度比受雷诺数影响显著(雷诺数 P 值小于 5%)。若假定两种排放口泥沙浓度比随雷诺数变化关系一致,可对两种排放口泥沙浓度比和雷诺数进行线性回归,并绘制出回归线(图 12),可以看出外排放试验组浓缩效果要略好于内排放试验组(回归斜率相同时,外排放试验组截距略大),但根据表 4 结果两者差异并不显著。

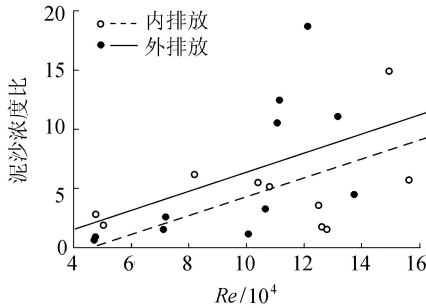


图 12 泥沙浓度比和雷诺数的关系

表 4 泥沙浓度比协方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方和	F 比	P 值/%
雷诺数	1	131.91	131.908	6.534	1.984*
排放口形式	1	23.02	23.024	1.140	29.967
残 差	18	363.40	20.189		

试验还发现排出的清液不但泥沙颗粒较少,而且其中所含细颗粒的比例高于主管水体,这与数值模拟试验中排放口被捕捉到的颗粒均为最小粒径颗粒的情况相符。使用主管水体和排出清液泥沙中值粒径 d_{50} 的比值来反映这种颗粒粗细的差异,两种排放口泥沙中值粒径比与雷诺数关系如图 13 所示,可以看出流速越高主管水体与排出清液中泥沙粒径差异越大,对细颗粒去除效果越好。使用协方差分析方法研究泥沙中值粒径比受排放口形式与雷诺数的

表 5 泥沙中值粒径比协方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方和	F 比	P 值/%
雷诺数	1	0.845	0.845	8.061	1.313*
排放口形式	1	0.004	0.004	0.041	84.224
残 差	14	1.468	0.105		

影响,分析结果见表 5,表明泥沙中值粒径比受雷诺数影响显著(雷诺数 P 值小于 5%),而与排放口形式无关。依照相同变化规律进行线性回归的泥沙中值粒径比与雷诺数关系图(图 13),也显示两种排放口的差异很小。

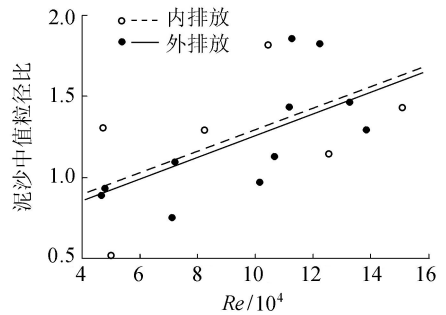


图 13 泥沙中值粒径比和雷诺数的关系

3 结 语

使用数值计算方法模拟了旋管内的流动情况,比较了几种不同清液排放口的排放效果,选取了在管内侧 $R/2$ 处设挡板的内排放口和垂直主管布置排放管的外排放口的两种排放口形式进行物理模型试验比较。试验结果表明,旋管浓缩效果主要受管内流速影响,流速越高浓缩效果越好,配有外排放口的旋管浓缩效果略好于内排放旋管。试验同时发现,排放管排出的清液中所含细颗粒比例明显高于主管水体,这对于吹填入场泥沙的工程特性会产生有利影响。试验表明管内流速越大,排出的清液中细颗粒比例越高;排放口形式对细颗粒比例并无影响。内排放口由于管内存在挡板,产生的水头损失大于外排放口,且加工维护不便,故工程中推荐使用垂直主管排放的外排放口布置形式。

参考文献:

- [1] 庞学诗. 水力旋流器理论与应用[M]. 长沙:中南大学出版社,2005.
- [2] 谭义海,李琳,邱秀云,等. 梭锥管内锥圈对水沙分离的影响[J]. 水利水电科技进展,2011,31(1):79-82. (TAN Yihai, LI Lin, QIU Xiuyun, et al, Influences of conical circles in shuttle-conical tube on separation of water and sediment [J], Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1):79-82. (in Chinese))
- [3] 李琳,谭义海,杨海华,等. 梭锥管内锥圈水沙分离机理及锥圈设计参数[J]. 水利水电科技进展,2013,33(3):5-9. (LI Lin, TAN Yihai, YANG Haihua, et al, Water sediment separation mechanism and design parameters of conical circles in shuttle-conical tubes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3):5-9. (in Chinese))

(下转第 98 页)

- [58] 胡小卫. 山区河道型水库滑坡涌浪特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2011.
- [59] 黄锦林. 库岸滑坡涌浪对坝体影响研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [60] 黄智敏,付波,钟勇明,等. 乐昌峡库区松山子滑坡体滑坡涌浪研究[C]//吴有生. 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源诞辰110周年纪念大会论文集(下册). 北京:海洋出版社,2012:578-584.
- [61] 殷坤龙,刘艺梁,汪洋,等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2012,37(5):1067-1074. (YIN Kunlong, LIU Yiliang, WANG Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences,2012,37(5):1067-1074. (in Chinese))
- [62] HUANG B, YIN Y, WANG S, et al. A physical similarity model of an impulsive wave generated by Gongjiafang landslide in Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides,2014,11(3):513-525.
- [63] KAMPHUIS J W, BOWERING R J. Impulse waves generated by landslide [C]//Proceeding of 12th Coastal Engineering Conference. New York, ASCE, 1970: 575-588.
- [64] 黄种为,董兴林. 水库库岸滑坡激起涌浪的试验研究[C]//水利水电科学研究院科学研究论文集(第13集);水力学. 北京:水利出版社,1983:157-169.
- [65] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [J]. Environmental Fluid Mechanics,2008,8(3):263-280.
- [66] PANIZZO A, de GIROLAMO P, RISIO M D, et al. Great landslide events in Italian artificial reservoirs [J]. Natural Hazards and Earth System Science,2005,5(5):733-740.
- [67] 刘建秀. 流体力学滑坡涌浪区的样条边界元法[J]. 黄淮学刊:自然科学版,1994,10(3):35-38. (LIU Jianxiu. Spline boundary element method of the landslide surge in fluid mechanics [J]. Huang Huai Journal,1994,10(3):35-38. (in Chinese))
- [68] 郭洪巍,吴葱葱. 水库滑坡涌浪的数学模型及其应用[J]. 华北水利水电学院学报,2000,21(1):24-27. (GUO Hongwei, WU Congcong. The mathematical model for landslide and its application [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2000,21(1):24-27. (in Chinese))
- [69] 王延平. 滑坡涌浪预测理论研究及计算模型开发[D]. 成都:成都理工大学,2005.
- [70] HUANG B, YIN Y, LIU G, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, Three Gorges Reservoir, on November 23, 2008 [J]. Landslides, 2012,9(3):395-405.
- [71] SEO S N, LIU P L F. Edge waves generated by the landslide on a sloping beach [J]. Coastal Engineering, 2013,73:133-150. (收稿日期:2014-02-20 编辑:骆超)

(上接第84页)

- [4] 严跃成,邱秀云,张翔,等. 两相流分离器泥沙运动轨迹及加速滑移的力学分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5):27-29. (YAN Yuecheng, QIU Xiuyun, ZHANG Xiang, et al. Mechanical analysis of sediment motion path and accelerated slip on two-phase flow separation device [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(5):27-29. (in Chinese))
- [5] 赵江涛,侍克斌,李玉建,等. 圆中环沉沙排沙过滤池滤水槽过滤性能试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):57-60. (ZHAO Jiangtao, SHI Kebin, LI Yujian, et al. Experimental study on filtration performance of filter tank in circular central sand filter for sand discharging and desilting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(5):57-60. (in Chinese))
- [6] 董玉萍,牟献友,文恒. 多级斜板式水沙分离装置试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):52-56. (DONG Yuping, MOU Xianyou, WEN Hen. Experimental study on the water-sediment separator with multilevel inclined plates [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(5):52-56. (in Chinese))
- [7] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [8] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics [M]. New York:McGraw-Hill,1995.
- [9] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence; I. Basic theory [J]. Journal of scientific computing,1986,1(1):3-51.
- [10] BARKHUDAROV M, DITTER J L. Particle transport and diffusion [R]. Santa Fe:Flow Science, Inc,1994.
- [11] BATCHELOR G K. An introduction to fluid mechanics [M]. Cambridge:Cambridge University Press,1983.
- [12] HINTZE J L, NELSON R D. Violin plots: a box plot-density trace synergism [J]. The American Statistician, 1998,52(2):181-184. (收稿日期:2014-02-15 编辑:熊水斌)