

水力旋流器原位处理疏浚泥水研究

聂小保^{1,2}, 徐超^{1,2}, 易青明^{1,2}, 底佳豪^{1,2}, 隆院男^{1,2}, 何盼盼^{1,2},
李志宏^{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)

摘要: 环保疏浚的关键在于疏浚泥水的妥善处理与处置。为解决异位处理存在的能耗高、占地面积大、容易引发二次污染以及工程投资效益低等问题,采用水力旋流器对疏浚泥水进行原位处理,探讨了疏浚泥水性质、操作条件和结构形式等对疏浚泥水固液分离效率的影响。结果表明,水力旋流器处理疏浚泥水具备运行负荷高、结构紧凑、占地面积小的显著特点,是疏浚泥水原位处理的适宜装备。试验条件下,当处理负荷为 $1.3\text{ m}^3/\text{h}$ 时,分离效率可达75%以上,相应的水力停留时间仅为4~5 s;疏浚泥水中固体颗粒粒径越大、含固率越高,水力旋流器的分离效率也越高;水力旋流器的最佳处理负荷为 $1.3\text{ m}^3/\text{h}$,最佳分流比为0.13~0.15;水力旋流器的最佳锥体锥角与处理负荷有关,当负荷为 $1.3\text{ m}^3/\text{h}$ 时,最佳锥角为 5° ;适当增大溢流/底流管管径,有助于分离效率的提升。

关键词: 疏浚泥水; 原位处理; 水力旋流器; 分离效率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0066-07

In-situ Treatment for Dredged Sediment with Hydrocyclone

NIE Xiao-bao^{1,2}, XU Chao^{1,2}, YI Qing-ming^{1,2}, DI Jia-hao^{1,2}, LONG Yuan-nan^{1,2},
HE Pan-pan^{1,2}, LI Zhi-hong^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Water, Sediment Sciences & Flood Hazard Prevention, Changsha 410004, China)

Abstract: Proper treatment and disposal of dredged sediment is critical to environment-friendly dredging. Ex-situ treatment technologies for dredged sediment were reported to have a series of problems, such as high energy consumption, large land occupation, high secondary pollution risk and low investment benefit. Therefore, an in-situ technology was proposed to treat dredged sediment with hydrocyclone. The effects of dredged sediment properties, operating conditions, and structures of hydrocyclone on the separation efficiency of hydrocyclone were investigated. The results showed that hydrocyclone was suitable for the in-situ treatment of dredged sediment, and exhibited significant advantages such as high processing load, compact structure, and space efficiency. A separation efficiency of 75% was achieved with the processing load of $1.3\text{ m}^3/\text{h}$, which suggesting that the hydraulic retention time of the dredged sediment

in the hydrocyclone was only 4–5 s. Larger particle sizes and higher solid content of dredged sediment could increase the separation efficiency of hydrocyclone. The optimal operating conditions of the hydrocyclone included a processing load of 1.3 m³/h and a split ratio of 0.13–0.15. The optimal cone angle for hydrocyclone was related to the processing load, and 5° was the optimal cone angle when the processing load was 1.3 m³/h. Moreover, appropriate increase of pipe diameters of overflow and underflow would enhance the separation efficiency.

Key words: dredged sediment; in-situ treatment; hydrocyclone; separation efficiency

环保疏浚是城市污染水体,特别是黑臭水体治理的常用技术手段之一,具有周期短、见效快和内源污染根治彻底等突出优势。环保疏浚过程产生的疏浚泥水,由于含水率高、颗粒细碎和污染物含量高特性,沉降性能差,难于固液分离和脱水干化^[1,2]。如何对疏浚泥水进行妥善处理及处置,已经成为制约环保疏浚推广应用的瓶颈所在。目前国内外主要采用异位处理模式对疏浚泥水进行固液分离和尾水净化。尽管异位处理技术已经非常成熟,但是其中一些共性问题仍未得到有效解决:首先,泥水需要长距离吹送或驳运,能耗较高;其次,堆场占地面积大,容易引发二次污染;最后是各种处理构、建筑物和机械设备在疏浚结束后即被闲置,工程投资效益低。因此,当前亟需研制开发疏浚泥水的原位处理技术,即采用船载式处理装备,在挖泥船上对疏浚泥水进行即时固液分离和尾水净化,解决异位处理前述共性问题。

目前环保疏浚采用的挖泥船可以方便应对环保疏浚任务,并在较短时间内完成疏浚工作。如天津航道局“天鲸”号绞吸式挖泥船挖泥量高达 4 500 m³/h,即便是以结构紧凑、小水域适应能力强著称的美国 Mudcat 公司的 MC-2000 型环保挖泥船,挖泥量也达 600 m³/h。环保疏浚挖泥船的高产率对原位处理技术的研发提出了挑战,船载式处理装备必须与挖泥船相匹配的高处理负荷,以沉淀、浓缩为核心的常规固液分离技术显然难以满足。

水力旋流器是一种通用分离设备,具有占地面积小、处理能力强、分离效率高和无运动部件等优点,已被广泛应用于矿冶^[3]、石化^[4]、食品^[5]和环境^[6,7]等领域的固液分离单元操作。龚俊等人^[8]还将水力旋流器应用于黄河水泥沙分离,获得了 90% 左右的分离效率。目前,关于水力旋流器在疏浚泥水处理与处置中的应用研究鲜有报道,但水力旋流器对疏浚泥水的高效快速固液分离效果已得到证

实。Park 等^[9]的研究表明,水力旋流器可将疏浚泥水减容 90% 左右,同时实现 60% 左右的 COD 去除。Kim 等^[10]则发现水力旋流器对疏浚泥水的分离效果受入口流速、溢流管长度、旋流腔直径等因素的影响显著。

考虑到疏浚泥水性质、水力旋流器结构形式和操作条件等均会影响到疏浚泥水的固液分离效果,笔者以长沙市某黑臭水体待疏浚底泥为研究对象,拟开展疏浚泥水特性对水力旋流器固液分离效果的研究,寻求优化的水力旋流器结构形式和操作条件,以期实现疏浚泥水原位处理。

1 材料与方法

1.1 疏浚泥水的准备

疏浚泥水采用长沙市某黑臭水体原状底泥与上覆水配制而成,原状底泥呈明显黑臭,主要理化特性如下:pH 值为 7.59、含水率为 91.5%、有机质含量为 9.93%、TN 为 7.36 g/kg、TP 为 4.91 g/kg。粒径分布情况如图 1 所示。

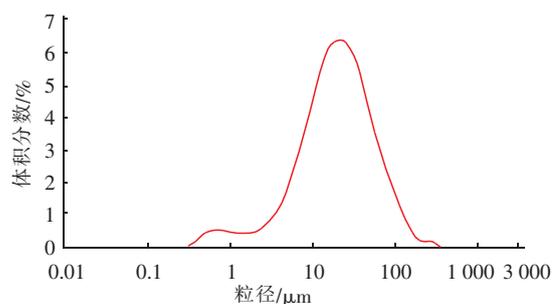


图 1 底泥颗粒粒径分布

Fig. 1 Particles size distribution of sediment

经上覆水稀释后,疏浚泥水的含水量分别为 98.8%、97.9%、97.3%、97.0%、96.8% 和 96.3%。考虑到对污染底泥直接进行颗粒筛分存在一定难度,采用受污染程度较低的原状土模拟不同粒径分布的疏浚泥水,具体操作为:取同一水体深层(约泥水界面以下 50 cm 深)原状土,烘干后进行筛分,依

次得到中值粒径为 10.5、20.4、25.7、33.0 和 47.7 μm 共 5 个类型样品,再与上覆水混合,从而得到不同粒径分布的底泥样品。

1.2 原位固液分离工艺及水力旋流器结构

原位固液分离流程及水力旋流器结构示意图见图 2。全部工艺均在挖泥船上展开。疏浚泥水首先进入水力旋流器进行快速固液分离和浓缩,产生的溢流液直接排入疏浚水体,产生的浓缩底泥由底流管进入离心脱水机。离心脱水机产生的泥饼由驳船运送至陆地,脱水滤液经活性炭柱吸附后,与水力旋流器的溢流液合并排入水体。可以看出,原位固液分离系统的占地面积和规模主要由水力旋流器的固液分离效果决定。水力旋流器固液分离效果好,则后续离心脱水机和活性炭柱规模较小,并且溢流液水质较好。

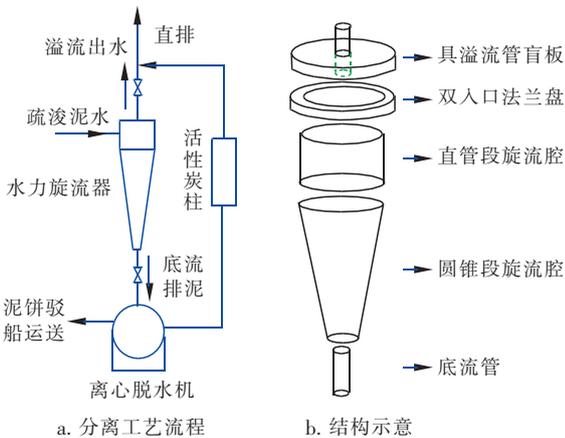


图 2 原位固液分离及水力旋流器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of in-situ solid and liquid separation system and structure of hydrocyclone

水力旋流器主体自上向下依次为具溢流管盲板、双入口法兰、直管段旋流腔、圆锥段旋流腔和底流管 5 个部分,各部分之间采用法兰连接。其中,溢流管伸入直管段旋流腔长度 l 为 30 mm,管径 ϕ_1 取 20 和 30 mm 两个规格;直管段旋流腔高度 h 为 70 mm,内径 D_1 为 70 mm;圆锥段旋流腔上圆内径 D_2 为 70 mm、下圆内径 D_3 为 30 mm,锥角 θ 取 5° 、 8° 和 10° 三个规格;底流管管径 ϕ_2 有 15 和 20 mm 两个规格。

为确保水力旋流器内流体运动的轴向对称性,并一定程度上减少局部阻力损失,降低水力旋流器运行所需的入口压力,双入口法兰盘采用渐缩截面直线型入口方式,见图 3。

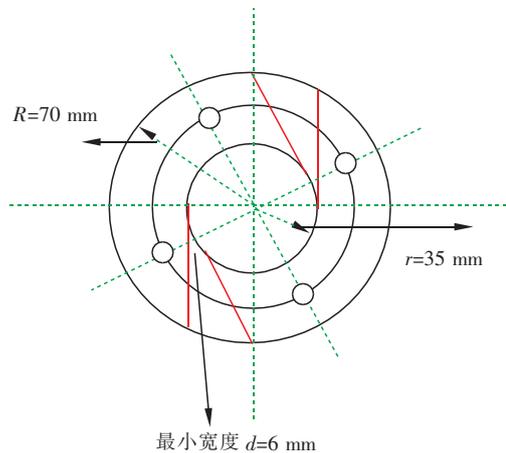


图 3 双入口法兰盘结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flange plate with double inlets

1.3 试验系统及方案

1.3.1 试验系统

中试系统见图 4。疏浚泥水在塑料吨桶中配制。配制完成后,疏浚泥水采用潜污泵提升,潜污泵扬程为 30 m(1 m 水柱产生的压力约为 9.8 kPa),流量 Q 为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。经提升后,一部分回流用于混合搅拌,以最大程度减小系统运行过程中疏浚泥水的浓度变化,另一部分依次经过阀门、流量计后进入水力旋流器。经水力旋流器固液分离后,疏浚泥水一部分形成含固率较高的底流由底流管排出,另一部分则成为含水率较高的溢流液由溢流管排出。

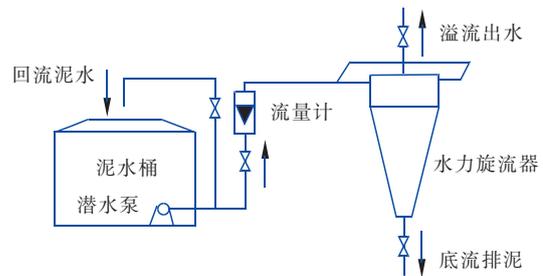


图 4 中试系统示意

Fig. 4 Schematic diagram of pilot-scale system

1.3.2 试验方案

疏浚泥水性质对固液分离效果的影响主要考察颗粒粒径和污泥浓度两个因素。其中,不同粒径的疏浚泥水由污染较轻的原状土配制,并控制含水率均为 98.8%;不同浓度的疏浚泥水由黑臭底泥和上覆水配制,中值粒径均为 $21.8 \mu\text{m}$ 。其余试验条件包括:处理负荷为 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、分流比(底流流量/进口流量)为 0.15、底流管管径为 20 mm、溢流管管径

为20 mm、锥体锥角为5°。

水力旋流器操作条件优化主要针对处理负荷和分流比进行。其中处理负荷取0.9、1.0、1.3、1.5和1.6 m³/h共5种情况,并通过调节溢流管出水阀门,固定分流比为0.15;分流比取0.05、0.08、0.10、0.12和0.15共5种情况,并固定处理负荷为1.3 m³/h。其余试验条件:疏浚泥水含水率为97.9%;中值粒径为21.8 μm;底流管管径为20 mm;溢流管管径为20 mm;锥体锥角为5°。

水力旋流器结构形式的优化主要针对锥体锥角和溢流/底流管管径进行。锥体锥角取5°、8°和10°三个规格,溢流/底流管管径有20/15、30/15、20/20、30/20 mm共4个组合模式。每个锥角均进行不同处理负荷下的分离效果试验,试验条件包括:疏浚泥水含水率为97.9%、中值粒径为21.8 μm、溢流/底流管管径为20/20 mm、分流比为0.15。溢流/底流管管径组合模式的试验在处理负荷为1.3 m³/h、锥体锥角为5°条件下进行,其余同锥角试验。

上述试验,每组均重复三次。

1.4 分析测试方法

水力旋流器的固液分离效果主要采用分离效率和浓缩倍数描述,分离效率 η 定义为:

$$\eta = \frac{c_1 V_1}{c_0 V_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中, c_0 、 c_1 分别为入口和底流固体浓度,g/L; V_0 、 V_1 分别为入口和底流体积流量,m³/h。

浓缩倍数 n 定义为:

$$n = c_1 / c_0 \quad (2)$$

疏浚泥水固体浓度采用称重法测定,颗粒粒径采用MS-2000马尔文激光粒度仪测定。

2 结果与分析

2.1 疏浚泥水性质对分离效果的影响

2.1.1 颗粒粒径的影响

试验结果表明,疏浚泥水的分离效率随着颗粒粒径的增大而增大,数据拟合结果表明两者间关系为: $y = 23.18 \ln(x - 4.43)$ 。浓缩倍数的变化趋势与分离效率基本一致,当中值粒径为33 μm时浓缩倍数最高,为5.88。大量研究表明,进口物料的粒径分布将对水力旋流器的分离效率产生显著影响。林亚玲等^[5]通过分析原料和成品中马铃薯淀粉颗粒粒径分布,发现中值粒径越大,水力旋流器的分离效果越好。Kim等^[10]的研究表明,当旋流腔直径为

100 mm、疏浚泥水颗粒中值粒径为100 μm左右时,分离效率可达70%,而当中值粒径为10 μm左右时,分离效率仅为20%左右。本研究进一步证实了提高疏浚泥水的颗粒粒径,有助于改善水力旋流器的分离效率。这可能是因为粒径越大,颗粒在旋流过程中受到的离心力越大,也就更容易达到边壁,进而沿边壁下滑最终随底流排出。因此,当疏浚泥水中污泥颗粒过于细碎时,可以考虑通过混凝等方式提高颗粒粒径,以提升固液分离效率。

2.1.2 疏浚泥水浓度的影响

不同疏浚泥水浓度下,分离效率与疏浚泥水浓度大致呈正线性相关关系,数据拟合结果为: $y = 1.11x + 32.12$ 。浓缩倍数的变化趋势与分离效率基本一致,最高可达5.00,对应污泥浓度为37 g/L。

关于进口物料浓度对水力旋流器分离效率的影响,相关研究者得到的结论不尽相同,甚至存在矛盾之处。如Lee发现^[11],当进口物料浓度由25 mg/L提高至125 mg/L时,水力旋流器对鱼饲料粉末的分离效率由45%左右降至37%;Chu等^[12]的研究得到类似的结论,并且他们认为浓度的增加会加剧物料在旋流器内的碰撞,这会对物料分离过程起到阻碍作用;而Mognon等发现^[13],水力旋流器对石油中固体颗粒的分离效果几乎不受物料浓度的影响。本研究中,疏浚泥水的含固率较高,比Lee采用的固体浓度高出数百倍,在此高固体含量情形下,水力旋流器中固体颗粒间的相互作用可能有别于低浓度条件,从而导致分离效率随着物料浓度的增大而增大。

环保疏浚根据疏浚方式分为机械式和水力式两类,其中机械疏浚产生的疏浚泥水含固率较高,水力疏浚方式产生的疏浚泥水含固率较低。由试验结果可知,水力旋流器应用于机械挖泥船,固液分离效果更好,但水力挖泥船由于疏浚泥水含固率较低,同条件下疏浚泥水体积更大,对高效固液分离的需求也就越明显。因此,如何提高水力旋流器对低浓度疏浚泥水的适应性是后续研究的重点。

2.2 操作条件对分离效果的影响

2.2.1 处理负荷的影响

疏浚泥水原位处理技术的关键在于高处理负荷,原位处理装备只有具备高处理负荷能力,才能实现结构紧凑、占地面积小和易于实施的技术特性。

图5给出了试验条件下,水力旋流器固液分离效率随处理负荷的变化情况。数据拟合得到两者间

关系为： $y = -39.48x^3 + 10.31x^2 + 179.37x - 92.57$ 。当处理负荷 $< 1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，分离效率随处理负荷的增加而增大，此后进一步增大处理负荷将导致分离效率降低。经计算，当处理负荷为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，疏浚泥水在水力旋流器内的停留时间仅为 $4 \sim 5 \text{ s}$ 左右，与常规沉淀、浓缩工艺相比，优势非常明显。浓缩倍数也是随着处理负荷的增大呈现先增大后降低的趋势，最大浓缩倍数发生在 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，为 4.75 。

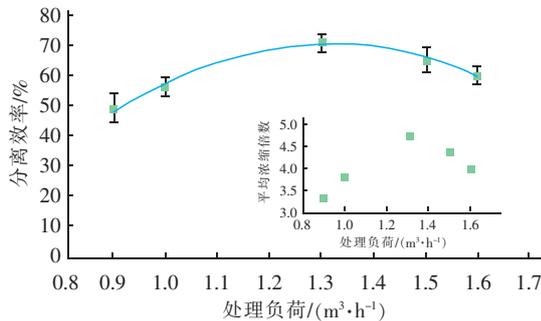


图5 处理负荷对水力旋流器分离效率的影响

Fig. 5 Effect of treatment loading on separation efficiency of hydrocyclone

当水力旋流器的结构形式固定后，其固液分离效率存在最佳处理负荷。在曾永英^[14]的研究中，当处理负荷为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，水力旋流器对油田废水中悬浮物的分离效果最佳，可达 90.5% 以上。Fan等^[15]在研究水力旋流器入流角度对分离效率的影响时，发现在各入射角条件下，当处理负荷为 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，均获得最佳的固液分离效果。蒋明虎等^[16]观察到水力旋流器处理负荷超过一定范围后，旋流器内部的压力将显著增大，据此认为压力增大是导致分离效率降低的主要原因。当旋流器底流管部位的压力下降时，底流管的固体通量将减小，分离的固体颗粒无法及时从底流管排出，累积在旋流腔内部，最终导致固液分离效果降低。

考虑到 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 的处理负荷，对于疏浚泥水而言已属高处理负荷，为确保固液分离效率，没有必要进一步增大处理负荷。经计算， $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 处理负荷条件下，水力旋流器入口流速约为 3.8 m/s ，相应底流含水率为 90.1% ，浓缩倍数为 4.75 。

2.2.2 分流比的影响

分流比是水力旋流器的另外一个重要操作参数。在相同分离效率下，分流比越小，底流含固率越大，浓缩倍数也越高，同时也意味着更显著的减量化效果。试验结果表明，不同分流比条件下，分离效率

将随着分流比的增大而持续增大。数据拟合结果表明两者间关系为： $y = 840x^{1.289}$ 。最大浓缩倍数发生在分流比为 0.12 时，为 5.61 。

研究表明^[17]，当分流比较小，颗粒物质将会在底流口出现明显的堵塞现象，这会严重削弱水力旋流器的固液分离效果，适当提高分流比，堵塞现象将明显缓解甚至消失。但分流比增大会引起压降比 ($\Delta P_{\text{溢流}}/\Delta P_{\text{底流}}$) 减小，进而导致底流颗粒物浓度的降低。本研究中，当分流比由 0.12 提高至 0.15 ，底流浓度反而由 119.8 g/L 降至 95.5 g/L ，相应的疏浚泥水浓缩倍数由 5.7 降至 4.5 ，但此时水力旋流器的分离效率仍有小幅增加，由 67.4% 增加至 71.3% ，这主要是由于底流流量增加所致。

对疏浚泥水而言，较小的分流比有助于降低污泥吹送或驳运成本，减小陆上污泥处理处置的规模；但分离效率受到制约，溢流水含固率较高，增加了后续溢流水的处理难度。从研究结果来看，分流比宜控制在 $0.13 \sim 0.15$ 左右。

2.3 水力旋流器结构形式对分离效率的影响

2.3.1 圆锥段锥角的影响

锥角对水力旋流器分离效率的影响见表1。总体而言，处理负荷为 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，圆锥段锥角为 8° 和 10° 时的分离效率明显优于 5° 时的；处理负荷为 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，三者之间的分离效率比较接近；继续增大处理负荷至 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ， 5° 锥角下的分离效率优势明显；当处理负荷为 $1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，则 8° 锥角下的分离效率优势明显。

表1 圆锥段锥角对水力旋流器分离效率的影响

Tab. 1 Effect of cone angle on separation efficiency of hydrocyclone

处理负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	分离效率/% (平均浓缩倍数)		
	5°	8°	10°
0.9	49.5 ± 4.8 (3.3)	56.1 ± 3.3 (3.74)	55.2 ± 2.2 (3.68)
1.0	56.5 ± 3.5 (3.77)	57.5 ± 2.8 (3.83)	57.2 ± 4.3 (3.81)
1.3	71.3 ± 3.0 (4.75)	67.2 ± 3.7 (4.48)	57.9 ± 4.8 (3.86)
1.5	65.6 ± 4.1 (4.37)	65.4 ± 1.6 (4.36)	57.4 ± 3.6 (3.83)
1.6	60.5 ± 3.4 (4.03)	64.2 ± 2.5 (4.28)	57.7 ± 2.4 (3.85)

研究表明^[18,19]，圆锥段锥角的变化会显著影响

水力旋流器内速度场和压力场分布,固体颗粒径向、切向运动速度发生变化,进而使得固液分离效率发生变化。国内张丹等^[20]研究发现小锥角对小颗粒分离有促进作用,但锥角会使锥段内涡流强度增加,降低分离效率,针对不同的柱段结构参数应具有最佳锥角。此外,物料的性质及分离目标也会影响到最佳锥角的选择。本研究表明,水力旋流器对疏浚泥水的分离效率受到锥角影响,且不同流量下对应的最佳锥角并不一致。目前,尚未见关于处理负荷对水力旋流器最佳锥角的影响研究,推测应与处理负荷变化导致的水力旋流器内部速度场和压力场变化有关。

2.3.2 溢流/底流管管径的影响

由于试验条件限制,本次试验未能开展溢流管和底流管管径的系列研究,只进行了20/15、30/15、20/20和30/20 mm共4种溢流/底流管管径组合模式的试验,得到分离效率分别为 $(49.9 \pm 3.5)\%$ 、 $(52.7 \pm 2.6)\%$ 、 $(71.3 \pm 3.0)\%$ 、 $(73.6 \pm 3.8)\%$,平均浓缩倍数分别为3.30、3.51、4.75、4.90。可知,试验条件下,溢流管管径对水力旋流器分离效率的影响较小,而底流管管径的增加明显促进了分离效率的提升,增幅大致为25个百分点。

尽管溢流管和底流管本身都不具备固液分离效果,但可以起到稳定旋流腔内流场的作用,同时也会影响到分流比和分离颗粒粒径分布,进而影响分离效率^[21]。曾永英^[14]采用FLUENT软件模拟了不同溢流管和底流管条件下水力旋流器的内部流场分布和固液分离过程,发现适当增大底流管管径,有助于提高旋流器的切向速度,同时轴向和径向速度分布也趋于合理,这有利于分离效率的提高;溢流管管径越大,旋流腔内压力损失就越小,分离效率也就越高。试验条件下,溢流/底流管管径为30/20 mm时,分离效率最高,这与曾永英的结论较为一致。

3 结论

① 采用水力旋流器对疏浚泥水进行原位固液分离,试验条件下,分离效率可达75%以上,相应底流含水率为90.1%、浓缩倍数为4.75、负荷为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右、水力旋流器中疏浚泥水的停留时间仅为4~5 s左右。水力旋流器应用于疏浚泥水处理,具备运行负荷高、结构紧凑、占地面积小的显著特点,是疏浚泥水原位处理的适宜装备。

② 疏浚泥水中固体颗粒粒径分布、含固率会

对水力旋流器的分离效率产生影响,提高疏浚泥水的颗粒粒径,有助于改善水力旋流器的分离效率;疏浚泥水含固率越高,分离效果也越好。

③ 操作条件也会影响到水力旋流器对疏浚泥水的分离效率,试验条件下,最佳处理负荷为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$;分离效率随着分流比的增大而增大,但分流比过高会减小底流浓缩倍数,分流比宜控制在0.13~0.15。

④ 水力旋流器对疏浚泥水的分离效率还受锥体锥角和溢流/底流管管径的影响。最佳锥角与水力旋流器的处理负荷有关,当负荷为 $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,最佳锥角为 5° ;适当增大溢流/底流管管径,有助于分离效率的提升。

参考文献:

- [1] Wasserman J C, Barros S R, Alves L G B. Planning dredging services in contaminated sediments for balanced environmental and investment costs[J]. *J Environ Manage*, 2013, 121(7): 48-56.
- [2] Rodríguez-Romero A, Khosrovyan A, DelValls T A, et al. Dredged material characterization and management frameworks: A case study at the port Vilagarcia (NW, Spain) [J]. *J Hazard Mater*, 2016, 302(8): 129-136.
- [3] Neesse T, Dueck J. Dynamic modelling of the hydrocyclone [J]. *Miner Eng*, 2007, 20(4): 380-386.
- [4] Marins L P M, Duarte D G, Loureiro J B R, et al. LDA and PIV characterization of the flow in a hydrocyclone without an air-core [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2010, 70(3): 168-176.
- [5] 林亚玲, 李树君, 李里特, 等. 水力旋流器分离马铃薯淀粉的试验研究[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(4): 55-58.
Lin Yaling, Li Shujun, Li Lite, et al. Experimental investigation on hydrocyclone for potato starch separation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2002, 33(4): 55-58 (in Chinese).
- [6] Bayo J, López-Castellanos J, Martínez-García R, et al. Hydrocyclone as a cleaning device for anaerobic sludge digesters in a wastewater treatment plant [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87(1): 550-557.
- [7] 吉芳英, 颜达超, 范剑平. 淤砂分离器对污泥特细无机砂的分离效能 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(1): 54-57.
Ji Fangying, Yan Dachao, Fan Jianping. Study on performance of silt-sludge separator for ultrafine inorganic

- silt separation[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(1): 54 – 57 (in Chinese).
- [8] 龚俊,刘晶,辛舟,等. 基于黄河水泥沙分离的水力旋流器的溢流性能研究[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(4): 55 – 58.
- Gong Jun, Liu Jing, Xin Zhou, *et al.* Investigation of overflow performance of hydrocyclone for separation of sediments from Yellow River's water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2002, 33(4): 55 – 58 (in Chinese).
- [9] Park K H, Lee J H, Bae B H, *et al.* Use of hydrocyclone and flotation column for reducing the volume of contaminated dredged materials[J]. *Water Sci Technol*, 2006, 53(7): 151 – 157.
- [10] Kim J O, Choi J, Lee S, *et al.* Evaluation of hydrocyclone and post-treatment technologies for remediation of contaminated dredged sediments[J]. *J Environ Manage*, 2016, 166: 94 – 102.
- [11] Lee J. Separation of fine organic particles by a low-pressure hydrocyclone (LPH)[J]. *Aquacul Eng*, 2014, 63: 32 – 38.
- [12] Chu L Y, Chen W M, Lee X Z. Enhancement of hydrocyclone performance by controlling the inside turbulence structure[J]. *Chem Eng Sci*, 2002, 57(1): 207 – 212.
- [13] Mognon J L, da Silva J M, Bicalho I C, *et al.* Mini-hydrocyclones applied to the removal of solids from non-Newtonian fluids and analysis of the scale-up effect[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 146: 255 – 263.
- [14] 曾永英. 细颗粒分离用固液旋流器结构设计及实验研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2012.
- Zeng Yongying. Study on Structure Design and Separation Characteristics of Solid – Liquid Hydrocyclone for Fine Particle Separation[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012 (in Chinese).
- [15] Fan Y, Wang J G, Bai Z Y, *et al.* Experimental investigation of various inlet section angles in mini-hydrocyclones using particle imaging velocimetry[J]. *Sep Purif Technol*, 2015, 149(S1): 156 – 164.
- [16] 蒋明虎,蒋巍,张国云,等. 细颗粒分离水力旋流器的结构设计及试验[J]. *大庆石油学院学报*, 2005, 29(1): 58 – 60.
- Jiang Minghu, Jiang Wei, Zhang Guoyun, *et al.* Structural design and experiment study of the hydrocyclone for fine particle[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2005, 29(1): 58 – 60 (in Chinese).
- [17] 赵立新,蒋明虎,温青,等. 水力旋流器分离细颗粒的试验研究[J]. *化学工程*, 2004, 32(2): 42 – 46.
- Zhao Lixin, Jiang Minghu, Wen Qing, *et al.* Experimental research of hydrocyclone used for fine particle separation[J]. *Chemical Engineering*, 2004, 32(2): 42 – 46 (in Chinese).
- [18] Hwang K J, Hwang Y W, Yoshida H, *et al.* Improvement of particle separation efficiency by installing conical topplate in hydrocyclone[J]. *Powder Technol*, 2012, 232(2): 41 – 48.
- [19] Yang Q, Wang H L, Liu Y, *et al.* Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations[J]. *Sep Purif Technol*, 2010, 74(3): 271 – 279.
- [20] 张丹,陈晔. 锥角对固 – 液水力旋流器流场及其分离性能的影响[J]. *流体机械*, 2009, 37(8): 11 – 16.
- Zhang Dan, Chen Ye. Effect of the cone angle on flow field and separation performance of solid-liquid hydrocyclones[J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(8): 11 – 16 (in Chinese).
- [21] 刘晓敏,檀润华,蒋明虎,等. 水力旋流器结构形式及参数关系研究[J]. *机械设计*, 2005, 22(2): 26 – 29.
- Liu Xiaomin, Tan Runhua, Jiang Minghu, *et al.* Research on structural form and parametric relations of hydrocyclones[J]. *Journal of Machine Design*, 2005, 22(2): 26 – 29 (in Chinese).



作者简介: 聂小保(1979 –), 男, 江西新干人, 博士, 副教授, 主要从事饮用水深度处理和水环境修复研究。

E – mail: 554143101@qq.com

收稿日期: 2017 – 11 – 12