

垂向异重流式水沙分离鳃水沙分离机理浅析

朱 超¹ 邱秀云¹ 严跃成²

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院 新疆 乌鲁木齐 830052;2.新疆大学建筑工程学院 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要:对新形净水装置——垂向异重流式水沙分离鳃的水沙分离机理进行初步研究。在已有的利用加单排鳃片分离鳃对含沙质量浓度为 60 kg/m³ 的浑水进行研究的基础上,对无鳃片普通模型、加单排鳃片模型和加双排鳃片模型在泥沙质量分数为 8% ~ 20% 的范围内进行了不同含沙浓度浑水中泥沙沉降速度的对比试验,得出 3 种不同装置中泥沙沉降速度的基本规律。分别从泥沙絮凝的角度和异重流的角度阐述了垂向异重流式水沙分离鳃这一装置可以快速进行水沙分离的机理,并简单论述了垂向异重流的概念。

关键词:垂向异重流式水沙分离鳃;对比试验;絮凝;快速分离;异重流

中图分类号:TV14 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2009)05-0020-04

Analysis of mechanism of vertical-component density flow water-sediment separation device//ZHU Chao¹, QIU Xiu-yun¹, YAN Yao-cheng²(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, 830052, China; 2. College of Architecture Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: The water-sediment separation mechanism of a new purified water device—a vertical-component density flow water-sediment separation device—was preliminarily investigated. Based on research on separation devices with single-row gill-pieces in turbid water that contains 60 kg/m³ of sediment, three kinds of device models, the single-row gill-piece, the double-row gill-piece, and the no gill-piece models, were made for comparative experiments on sediment falling velocity in turbid water whose sediment mass fraction is 8%–20%. The basic rules of sediment falling velocity in these three different devices were obtained. According to the theories of sediment flocculation and density flow, the mechanism of water-sediment separation is discussed. The vertical-component density flow phenomenon is described on the basis of the experiments.

Key words: vertical-component density flow water-sediment separation device; comparative test; flocculation; sharp separation; density flow

我国是世界上河流泥沙最多的国家,特别是北方河流,含沙量高而且泥沙颗粒细,水沙多相流的分离难度大,给城市给水、工业给水和农村给水造成了巨大的能耗和负担。据水利部提供的数据,目前全国农村尚有 3 亿多人饮用水不安全,其中绝大部分是农民。特别是我国华北、西北黄土区和新疆一带的众多河流都具有高浑浊水的特点。河水的泥沙质量浓度达数十、甚至数百千克每立方米,并且泥沙粒径极细,粒径小于 0.03 mm 的泥沙质量分数一般达到 40% 以上,处理起来十分困难。水沙混合物多相流的重力分离遵循泥沙颗粒越大沉速越快的自然规律。因此,国内外在自来水厂的水处理中都是采用加絮凝剂(采用最多的是聚丙烯酰胺)来加大泥沙的粒径使其加速沉降。但是,加絮凝剂的均化混凝过

程需要消耗大量电力,而且自来水中残留的聚丙烯酰胺一遇铁器就分解成有毒的丙烯酰胺单体,对人体非常有害;水厂淤泥可使鱼类致死,无法排入河道,导致环境污染。目前处理的方法是将其深埋在地下,这样不仅占用空间,而且会污染周边环境。因此,寻求不加絮凝剂的高效水沙分离方法和装置显得尤为重要。邱秀云等^[1]研制的垂向异重流式水沙分离鳃(以下简称“分离鳃”)不加任何化学药剂,利用垂向异重流原理将浑水中的泥沙(包括黏土)分离并取出清水,其分离速度是泥沙在静态下沉降速度的 1.9 ~ 3.7 倍,与加絮凝剂进行水沙分离的速度相近。笔者主要通过对不同含沙浓度的水流在 3 种不同结构形式装置中的不同沉降规律进行试验研究,初步分析“分离鳃”快速分离水沙的机理以及不同鳃

片形式对分离效果的影响。

1 试验设备和材料

1.1 试验装置

笔者试验研制了 2 种不同鳃片类型的垂向异重流式水沙分离鳃,分别为单排鳃片式和双排鳃片式(图 1)。试验装置为矩形管状鳃,由鳃管、鳃片构成。单排鳃片式分离鳃鳃片为一平面,以一定的角度 α 倾斜固定在矩形鳃管长方向的两侧壁上,与鳃管的宽度侧壁构成 β 倾斜角,但与宽度方向的两侧壁之间保持一定的距离,即鳃片与管壁之间构成清水上升和泥沙下降的通道。实际应用时,宽度方向的侧壁分布有网眼,鳃管上下段为开口状。双排鳃片式分离鳃与单排鳃片式分离鳃类似,也由鳃管、鳃片构成。所不同的是鳃片呈“V”字形,与鳃管的连接形式同单排鳃片分离鳃。

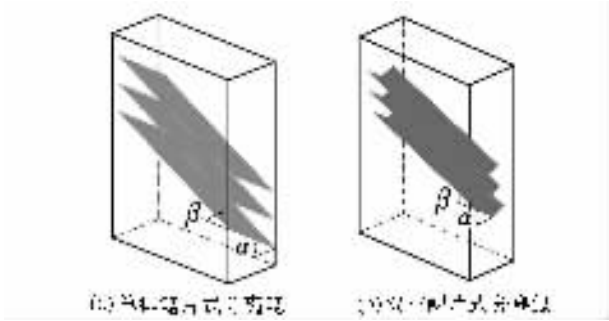


图 1 垂向异重流式混合流体分离鳃示意图

1.2 试验材料

试验选用新疆乌鲁木齐鲤鱼山的天然黄土作为模型沙。鲤鱼山黄土的颗粒级配见图 2。由图 2 可见,鲤鱼山的黄土颗粒粒径大于 0.007 mm 的沙粒质量分数为 79.61%,粒径大于 0.250 mm 的沙粒质量分数为 0.16%,中值粒径为 0.019 mm。

试验所用的仪器主要有:电子天平、电热恒温箱、玻璃烧杯、锥形瓶、量筒、秒表、刻度尺、数码照相机。

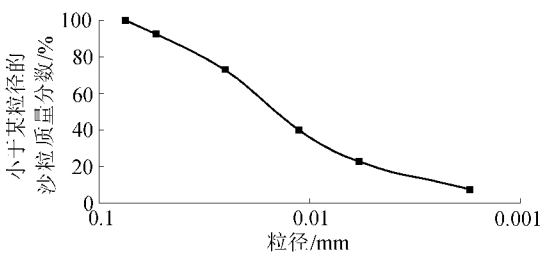


图 2 鲤鱼山黄土颗粒级配曲线

2 试验方案及试验现象

2.1 试验方案

共计选取 6 组不同含沙量的水样进行试验,各组水样中的泥沙质量分数 S_w 分别为 8%、10%、12%、15%、18%、20%。将搅拌均匀的含沙水样同时分别注入无鳃片普通管、单排鳃片分离鳃管和双排鳃片分离鳃管中置于水平桌面上。利用刻度尺和秒表记录浑液面下降的位置和时间。试验中注意观察不同管中浑液面下降时所发生的现象,并利用数码相机拍摄记录下来。

2.2 试验现象

试验中观察到 6 组试样的泥沙沉降现象基本相同,都是无鳃片普通管中泥沙从下沉伊始就产生了明显的清浑水交界面,泥沙缓慢下沉,而单排鳃片分离鳃管和双排鳃片分离鳃管没有产生明显的清浑水交界面,上层水体逐渐由浑转淡,如图 3(a)所示(从左至右依次为无鳃片普通管、单排鳃片分离鳃管、双排鳃片分离鳃管)。泥沙沉降到鳃片上后沿鳃片向下滑动,至鳃片低端呈颗粒状或者团状的泥沙聚集成类似泥浆流从鳃片低端垂直向下流动,而清水则从鳃片的下表面倾斜向上运动至高端一侧汇集成清水流上升,如图 3(b)(c)所示。泥沙沉降到分离鳃底部后,能明显地看到各鳃片间下沉的泥沙呈阶梯状分布(如图 3(d)所示),且含沙浓度越高,此现象越明显,但随着时间的推移,分离鳃中各鳃片间的浑

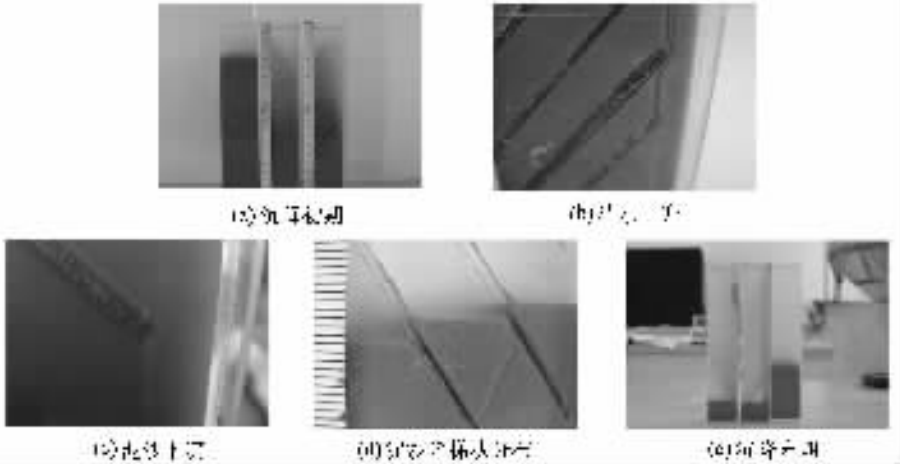


图 3 不同时段泥沙沉降现象

液面最终趋于同一水平面上,如图 3(e)所示(从左到右依次为双排鳃片分离鳃、单排鳃片分离鳃、无鳃片普通管)。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

本试验意在对比分离鳃可以快速进行水沙分离的机理进行初步探讨,所以着重观察并记录了在上述 3 种试验装置中不同含沙量试样的泥沙沉降的速度变化。此速度也就是浑水交界面在一定时间段内下沉的平均速度(对于分离鳃来说,由于没有明显的浑水交界面,只能依据其中的浑水由上而下逐渐由浑转淡来估计在一定时间段内泥沙下沉的距离),其结果绘于图 4 中。

由图 4 可以看出,普通管中泥沙沉降速度变化基本可分为 2 个阶段:①在 $t = 0 \sim 400\text{ s}$ 时段内,泥沙沉降速度随着时间的增加而增加,即为加速沉降段。②当 $t > 400\text{ s}$ 之后,随着时间的增加沉降速度变化很小,即为匀速沉降段。在这一阶段需要注意的是 $S_w = 8\%$ 和 $S_w = 10\%$ 这 2 种情况,由图 4 中可看出,泥沙沉降速度均出现了小幅下降,似乎进入减速下沉阶段,而不是匀速。产生此现象的原因主要是含沙量降低,导致泥沙沉降加快(由图 4 中也可明显看出此 2 者的泥沙沉降速度比其他 4 者的大)。当 $t > 400\text{ s}$ 后, $S_w = 8\%$ 和 $S_w = 10\%$ 2 个试样中的泥沙与其他几个试样相比已快完成沉降。沉降后期记录到的沉降过程中最后有一小部分时间对于这 2 个试样而言已经是完成沉降后的时间了,这部分大约几十秒的时间是试验本身不需要的,但是由于试验计时精度的限制,被列入了沉降时间。图 4 中表示的是沉降平均速度,由于多了这一段不必要的时间而导致计算出的沉降平均速度减小,在图中出现了

所谓的减速下沉。这一现象在其他 4 个试样相应的图中也有所体现,只是没有这么明显。这种现象主要是由于试验条件限制所造成的,不会对分析试验结果产生太大影响,仍然可以认为 400 s 之后的沉降为匀速沉降。

分离鳃中泥沙的沉降速度可以明显地分为 2 个阶段:①加速下沉阶段。由图 4 可以看出,在 $t = 0 \sim 500\text{ s}$ 时段内,泥沙沉降速度随着时间的增加而迅速增大,即为加速沉降阶段,这一阶段与普通管的加速沉降阶段在时间上基本一致,而速度增大却是普通管的 3 倍左右。②减速下沉阶段。泥沙沉降速度达到峰值后急剧回落,在 $100 \sim 300\text{ s}$ 时段内下降到与普通管相同的水平,甚至小于普通管中的沉降速度,笔者认为,此阶段主要是由于分离鳃下部浑水浓度很大,从而使泥沙沉降速度减小。

整个沉降试验呈现出泥沙含量越高则沉降速度越小、沉降时间越长的趋势,但总体上来看,无论泥沙含量如何变化,分离鳃中泥沙沉降速度的峰值都是普通管中的 3 倍左右。

沉降结束后的检验结果表明,分离鳃上层清水含沙质量浓度低于 0.1 kg/m^3 。因为本试验中所用分离鳃底部没有设置排沙孔,因此泥沙沉降到底部后形成类似泥浆的浑水的含沙量没有精确检验。但是沉降结束后,泥沙基本都聚集在分离鳃底部,约占整个分离鳃体积的 $1/5 \sim 1/10$ 。据此估计此时底部泥沙质量浓度在 1000 kg/m^3 左右。

3.2 试验结果初步分析

普通管与分离鳃管 2 种装置所产生的沉降速度的差异,从试验现象来看主要是由于分离鳃管与普通管中泥沙的絮凝结构不同造成的。

试验用普通自来水或多或少地含有一些电解质。根据现有的泥沙研究资料可知:泥沙颗粒在含

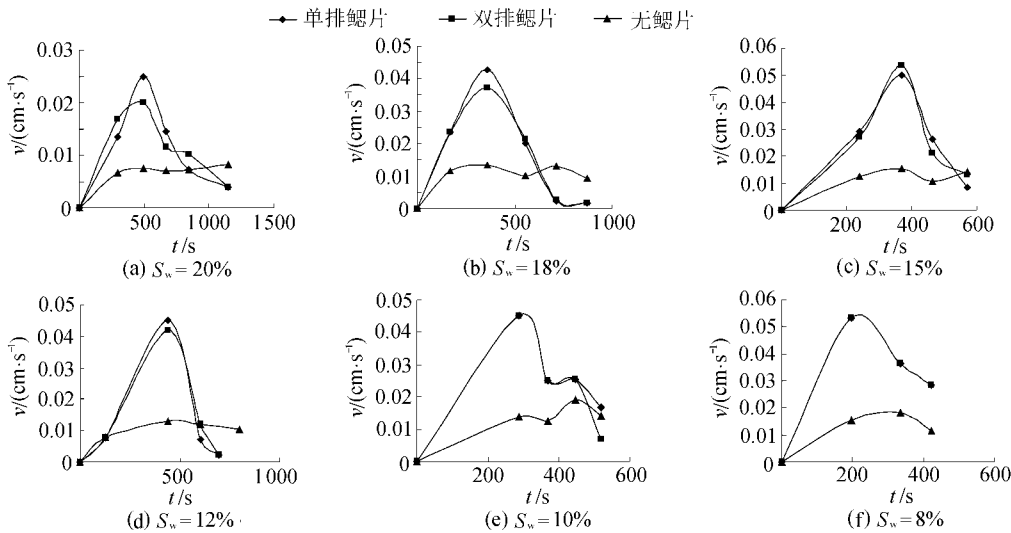


图 4 不同时间、不同浓度浑水的泥沙沉降速度

电解质的水中会形成双电层结构。颗粒表面的电荷吸引水分子在颗粒周围形成 1 层吸附水膜。当带有吸附水膜的 2 颗泥沙相互靠近时,会形成公共的吸附水膜。如果颗粒足够细,那么存在于 2 颗沙粒之间的公共吸附水膜便足以将它们连接起来。这种作用叫“聚凝作用”^[1-3]。而泥沙絮凝与受范德华引力和双电层斥力的作用有关。范德华引力与颗粒间表面电荷密度无关,但双电层斥力取决于悬液中电解质的组成及浓度,与颗粒的表面电荷密度密切相关。当范德华引力大于双电层斥力时,泥沙颗粒就发生絮凝;反之,则分散^[4]。即当水中反号离子增加时,会中和压缩泥沙表面的双电层结构从而使颗粒之间的静电斥力减小,其结果就是使泥沙的絮凝程度增强^[5-8]。泥沙颗粒絮凝后,形成较大团粒(中间有很大的孔隙,包围密封了大量水分),称为絮团。絮凝结果如果形成絮团可以使泥沙沉速成千成万倍地增大。然而当泥沙含量超过某一程度,絮团在整个容器中形成联结的蜂窝结构、搭成构架形成一个连续的空间结构网,出现一定的刚性,这时泥沙沉速大幅度降低。在一开始,空间结构网仅由极细颗粒的泥沙组成,它与清水组成均质的浆液,以极缓慢的速度下沉,可以看到 1 层极缓慢下降的清浑水交界面。粗颗粒泥沙随着絮凝结构的影响而降低沉速,但仍保持分散体系的性质自由下沉,沉降过程存在粗细沙分选。含沙量继续增大,越来越多的粗颗粒也成为絮凝结构的一部分。含沙量增大到某个临界值时,全部泥沙均参与组成均质的浆液。此时,粗细泥沙以同一极其缓慢的速度,也就是清浑水交界面的速度下降。这一速度比不均匀沙在清水中的平均沉速小数百倍乃至上千倍^[1-2,5]。

本试验中普通管泥沙沉降的规律基本与上述现象相一致。表明试验所用含沙水流的含沙量已经达到了形成空间絮网结构的程度。而利用分离鳃在进行水沙分离时均未出现空间网状结构,亦即未出现明显的清浑水交界面。产生这种现象的主要原因就是分离鳃中鳃片的作用。鳃片的存在把整个分离鳃划分为一个个独立的沉降区域,与无鳃片的普通管相比,每个独立的沉降区域的沉降距离都缩短了很多,使其只有不带鳃片装置的十几分之一,沉降距离的缩短导致泥沙经过很短时间的沉降就已经到达鳃片上了。沉降到鳃片上的泥沙和泥沙之间业已形成的小的絮团沿鳃片呈推移质状向下运动,在滚动(运动)过程中互相黏结,构成更大的团粒结构,并且这些大颗粒结构形成类似泥浆一样的连续流体沿鳃片低端一侧快速下沉,据此认为分离鳃中的泥沙发生了絮凝,形成了絮团,但是其中的细颗粒泥沙在鳃片的干扰下没有形成空间结构网。而絮凝的结果如果

仅仅形成絮团而并不发展成空间结构网则可以使泥沙的沉降速度成千成万倍地增大。这即是分离鳃可以快速进行水沙分离的原因。

试验中观察到的沿鳃片低端快速下沉的类似泥浆的液体,与水体并不发生混掺。而其密度与水相比显然有差异,因密度差异而在分离鳃中形成的泥浆类流体从鳃片低端一侧下沉,清水从低端附近沿各个鳃片下表面向上运动至高端一侧,汇集成清水流上升,即在每 2 个鳃片间形成泥浆流沿下鳃片表面向下运动、清水流沿上鳃片的下表面向上运动的分层环流现象,也就是垂向异重流现象。

4 结 语

通过对不同含沙量的水样进行的多次试验,对垂向异重流式水沙分离鳃可以快速进行水沙分离的普遍性和规律性进行了初步验证,并对其水沙分离机理进行了初步分析。研究表明,垂向异重流式水沙分离鳃快速分离水沙具有一定的普遍性,目前已有的 2 种不同结构形式的分离鳃的水沙分离效率基本相当。

然而目前的宏观试验下,通过观察记录仅能发现加鳃片装置确实改变了泥沙沉降的速度分布,使泥沙不再匀速下沉(如泥沙下沉过程中不产生明显的浑液面,下沉的泥沙呈阶梯状分布等现象)。究竟泥沙是否如分析所指的规律运动,则需要进一步试验验证。

试验表明, $S_w = 8\%$ 情况下泥沙的宏观沉降规律与另外 5 组试样($S_w \geq 10\%$)的基本一致。但相比之下, $S_w = 8\%$ 时达到最大沉降速度的时间比另 5 组试样的减少了 100 ~ 300 s。如 $S_w = 8\%$ 试样中泥沙达到最大沉降速度的时间为 200 s 左右,而 $S_w = 20\%$ 的试样中泥沙达到最大沉降速度的时间为 500 s 左右,前者总沉降时间比后者减少 300 s 左右。这一现象是否具有普遍意义尚有待于进一步试验的验证。

参考文献:

- [1] 邱秀云,龚守远,严跃成,等.一种新型水沙分离装置的研究[J].新疆农业大学学报,2007,30(1):68-70.
- [2] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983:30-35.
- [3] 张瑞瑾.河流泥沙动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [4] 陈洪松,邵明安.细颗粒泥沙的絮凝沉降特性[J].土壤通报,2002(10):356-359.
- [5] 刘林,陈立,王家生,等.不同离子浓度下泥沙浓度对絮凝沉降的影响[J].武汉大学学报(工学版),2002(2):29-32.
- [6] 王尚毅.细颗粒泥沙在静水中的沉降运动[J].水利学报,1964(5):20-29.
- [7] 王果庭.胶体的稳定性[M].北京:科学出版社,1990.
- [8] 胡纪华,杨兆禧.胶体与界面化学[M].广州:华南理工大学出版社,1997.

(收稿日期:2008-11-11 编辑:高建群)