

新型异向流沉沙池泥沙沉降特性试验与机理分析

李琳^{1,2}, 付海林^{1,2}, 谭义海^{1,2}, 裴建生³, 张军^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利水电规划设计管理局, 乌鲁木齐 830099)

摘要: 为了探明二级泥沙处理设施——新型异向流沉沙池的泥沙沉降特性及其沉沙机理, 该研究开展了不同流量和不同含沙浓度的系列试验, 并对泥沙运动过程进行了力学分析, 建立并求解了新型异向流沉沙池双向倾斜薄板上泥沙运动的一阶非线性微分方程。研究结果表明, 对于中值粒径为 0.021 mm 的细颗粒泥沙的含沙水流, 长 96 cm、宽 10 cm、高 110 cm 的新型异向流沉沙池对流量为 45~360 L/h 的泥沙截除率为 40%~88.53%, 约为相同体积的底板倾斜和底板水平的条形沉沙池的 1.2~2 倍; 单位时间沉降至集沙箱的泥沙量是底板倾斜条形沉沙池的 1.3~2.3 倍; 不同时刻双向倾斜薄板上的泥沙运动速度和加速度均大于单向倾斜斜板, 倾角为锐角时, 角度越大, 速度越大。工程设计时, 若地形高差满足要求, 双向倾斜薄板的倾角 ($<90^\circ$) 越大越有利于提高沉降效率, 若高差不满足, 倾角应不小于泥沙休止角。研究结果可为新型异向流沉沙池结构优化及应用提供参考。

关键词: 沉降作用; 试验; 沉沙池; 水沙两相流; 异向流动

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.012

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0090-09

李琳, 付海林, 谭义海, 等. 新型异向流沉沙池泥沙沉降特性试验与机理分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 90-98.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.012 <http://www.tcsae.org>

Li Lin, Fu Hailin, Tan Yihai, et al. Hydraulic sediment characteristics test and mechanism analysis of a new type of anisotropic flow sedimentation basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 90-98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

在西北内陆地区的多沙河流域, 常常需要在灌区引水干渠、农田灌溉系统首部设置沉沙池^[1-2], 对进入滴灌带前的灌溉水源进行沉沙处理。传统沉沙池按形式可分为直线形沉沙池和曲线形沉沙池, 其结构简单, 施工方便, 而且造价低廉, 排沙效果良好。但受汛期河道来水量大、含沙浓度高、泥沙颗粒粒径小的影响, 传统沉沙池对悬移质泥沙的处理效果不明显, 仍会造成微灌^[3-4]和过滤系统的堵塞^[5-7], 加重后续灌溉过滤设备^[8-10] (如过滤器、灌水器流道等) 的运行负担, 阻碍微灌技术的推广应用^[11-12]。另外, 由传统沉沙池的设计理论^[13-15]可知, 沉沙效果往往受其长宽比影响较大, 泥沙颗粒粒径越小, 沉沙池的长度就越长, 占地面积就越大, 但在实际农田灌溉首部, 很少有充足的场地去建设大比尺的沉沙池, 因此, 寻求一种占地面积小且对悬移质泥沙沉沙效率高的新型沉沙池尤为迫切。

国内外许多研究人员以提高高浓度含细沙水流中细颗粒泥沙的沉降效率、减小占地面积为目标, 陆续提出了复合形沉沙池、翼片式沉沙池、分离鳃、梭锥管和多级斜板式水沙分离装置等新泥沙处理设施。为

了使这些处理设施应用于实际工程中, 前人通过试验研究和理论分析对其泥沙沉降特性开展了相应研究。He 等^[16-17]通过试验证明了由于涡流区、环流区的存在使翼片式沉沙池沉降效率高于条形沉沙池。Wang 等^[18]利用光学仪器对斜管重力沉淀池沉降过程进行了深入研究。董玉萍等^[19-20]研究了多级斜板式水沙分离装置中泥沙在浑水中的沉速以及斜板间的截留速度。严跃成等^[21-23]对分离鳃、梭锥管内泥沙的滑移运动进行了力学和轨迹分析。但目前关于斜板类除沙装置的研究, 比较缺乏对斜板上泥沙运动情况的探讨, 且均未建立泥沙运动方程, 无法求出泥沙滑移运动速度和固壁边界几何参数对运动速度的影响, 阻碍了该类沉沙池的应用及推广。

新型异向流沉沙池^[24] (专利号: ZL 202011376457.4, 简称新型沉沙池) 是本课题组发明的一种二级泥沙处理设施, 前期研究表明, 其区别于传统沉沙池, 具有细颗粒泥沙沉降效率高、排沙耗水率低、占地面积相对小的特点, 但其泥沙沉降特性及高效沉降机理尚未进行深入研究。为此, 本文拟通过系统试验对新型异向流沉沙池的泥沙沉降特性进行研究, 并与条形沉沙池沉降特性进行对比, 同时从泥沙颗粒运动过程中的受力特性出发, 建立并求解泥沙的一阶非线性运动微分方程, 讨论新型沉沙池高效沉降泥沙的机理及固壁边界几何参数对其运动的影响, 以期为沉沙池的结构优化及推广应用提供理论参考。

收稿日期: 2021-05-31 修订日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52069028); 新疆水专项 (2020.C006); 新疆自治区研究生科研创新项目 (XJ2021G162)

作者简介: 李琳, 博士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学。

Email: lilin_xjau@163.com

1 材料与方法

1.1 新型异向流沉沙池结构与工作原理

新型异向流沉沙池由有压进水管、进水箱、沉沙箱、集沙箱、排沙管和出水池组成(图1), 水平方向长 96 cm, 宽 10 cm, 竖直高 110 cm(图1b)。进水箱内设有隔水挡板将进水箱和集沙箱分隔开, 使泥沙沉降过程不受进流干扰。沉沙箱底板沿长度方向倾斜一定角度($\beta=45^\circ$), 使沉降至底板的泥沙以一定速度滑移而不淤积。沉沙箱内布置了 9 层沿长度和宽度方向倾斜的薄板, 薄板延伸至下游出水池内, 但与出水池下游边墙间留有 1 cm 的间距, 该间距为各层斜板区域分离后的“清水”出流通道; 自下而上第 2 层薄板始端与隔水挡板相交, 防止集沙箱内泥沙二次悬浮。

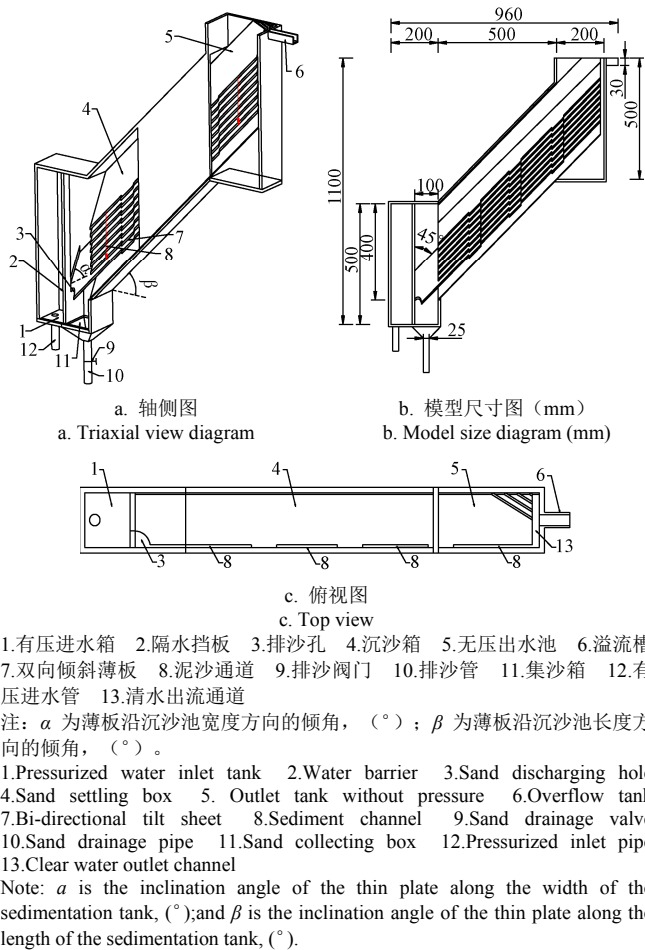


图 1 新型异向流沉沙池结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of new anisotropic flow sedimentation tank

水沙混合物从有压进水管进入有压进水箱后进入沉沙箱, 在沉沙箱内实现泥沙沉降和水沙分离, 分离后的泥沙一部分沿薄板的长度方向下滑至排沙孔排出, 一部分沿薄板的宽度方向下滑至泥沙通道排出, 并继续沿沉沙池底板下滑, 这两部分泥沙最终汇集于集沙箱中; 分离后的“清水”沿薄板的高端与沉沙箱左边墙形成的沟槽流入出水池, 再经“清水”出流通道流出。新型异向流沉沙池采用间歇式排沙, 当集沙箱泥沙淤满后(即箱内淤积高度达到排沙孔高度时), 打开排沙管的阀门, 利用进水箱的水头冲沙, 冲沙过程中进水管阀门保持开

启, 沉沙池持续运行。为防止排沙管堵塞, 排沙管选用直径较粗(2.5 cm)的 PVC 管道, 并在管道上设置球阀控制管道开关。由于集沙箱与进水箱水头相同, 排沙管在高水头作用下可实现快速排沙, 不易淤堵。

1.2 试验装置

为探明新型异向流沉沙池的沉降特性, 并和常规的条形沉沙池泥沙沉降效率进行对比, 试验首先依据《水利水电工程沉沙池设计规范》(SL/T 269—2019), 针对泥沙中值粒径 $d_{50}=0.021$ mm、流量为 45 L/h 的含沙水流设计了底板水平的条形沉沙池, 其沉沙段的尺寸为: 长 100 cm, 宽为 8.2 cm(为方便加工制作, 模型宽度取值为 10 cm)、工作高度为 28 cm, 将其命名为 III 号池。为了对比相同流量和相同待处理泥沙级配时新型异向流沉沙池(I号池)、底板倾斜的条形沉沙池(II号池)和底板水平的条形沉沙池(III号池)的沉降效率, 各个沉沙池的沉沙箱外轮廓尺寸均相同, 即长、宽、高分别为 100、10 和 28 cm; 有压进水箱和无压出水池型式和尺寸也均相同, 其中, 有压进水箱长 20 cm, 宽 10 cm, 高 50 cm, 集沙箱棱台高 10 cm, 上底和下底边长分别为 10 和 2.5 cm 的正方形; 无压出水池长 20 cm, 宽 10 cm, 高 50 cm; 矩形溢流槽布置在出水池顶部, 长 6 cm, 下底宽 2 cm, 槽深 2 cm。

各个沉沙池池箱内的构造有所不同。I号池内布置了双向倾斜的薄板, 采用厚为 0.4 cm 的 PVC 板制作, 形状为平行四边形, 短边长 20 cm, 长边长为 100 cm(第 2 层薄板长边 112 cm), 各板与沉沙箱宽度和长度方向的倾角分别为 $\alpha=60^\circ$ 和 $\beta=45^\circ$ 。薄板与出水池挡板(衔接溢流槽的板)之间构成了清水通道, 宽 1 cm, 薄板与沉沙池右边墙(顺水流方向为右边)之间构成了泥沙下沉通道, 宽 1 mm。II号、III号池沉沙箱段均无双向倾斜薄板, 但 II号池底板沿沉沙池长度和宽度方向均倾斜一定角度, III号池底板水平布置。各沉沙池采用透明度良好、厚度为 1 cm 的有机玻璃制成。

为了保证试验过程中沉沙池进口含沙浓度基本不变, 试验中每 5 min 测 1 次搅拌池及进水管处的含沙浓度, 计算出所需泥沙质量, 通过人工均匀投撒入搅拌池中。水沙混合物于搅拌池中搅拌均匀, 通过浑水泵输入沉沙池中, 在沉沙箱内实现水沙分离, 分离后的泥沙经集沙箱和排沙管排入搅拌池, 分离后的“清水”则流入无压出水池经溢流槽排入搅拌池内。

1.3 试验仪器与测量方法

试验在新疆农业大学水力学及水工实验室内(室温条件下)进行, 所用仪器有锥形瓶、精密电子秤、台秤、秒表。用蒸馏水严格率定锥形瓶体积, 应用率定后的锥形瓶分别在进水口和溢流口采集水样, 用精度为 0.001 g 的精密电子秤称出水样质量, 应用置换法原理^[25]计算出进水口和溢流口的含沙浓度 S_i 、 S_o (kg/m^3), 根据文献^[25]计算沉沙池泥沙截除率 η_s (%)。将米尺贴于集沙箱右侧, 并保持其 0 刻度线与集沙箱底板处于同一高度, 试验运行 1 h 后通过水准仪读出泥沙淤积高度, 待集沙箱中泥沙淤至排沙孔时, 记下此时的试验运行时长(即

排沙周期)。为避免试验偶然误差, 每组试验数据采集 3 次, 取平均值。

$$S = \frac{(m_{\text{瓶+浑水}} - m_{\text{瓶+水}}) \rho_s}{(\rho_s - \rho_w) V_{\text{瓶}}} \quad (1)$$

$$\eta_s = \frac{S_i - S_o}{S_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 S 为浑水含沙浓度, kg/m^3 ; $V_{\text{瓶}}$ 为锥形瓶的体积, m^3 ; $m_{\text{瓶+浑水}}$ 为锥形瓶和浑水的质量, kg ; $m_{\text{瓶+水}}$ 为锥形瓶和蒸馏水的质量, kg ; ρ_s 为泥沙密度, kg/m^3 ; ρ_w 为蒸馏水密度, kg/m^3 。

1.4 试验工况

为比较 I 号沉沙池区别于传统沉沙池的沉降特性, 运用控制变量法, 对 I、II 和 III 号沉沙池在相同浓度、相同流量工况下开展系列浑水试验, 考虑到南疆地区河流发洪水时含沙浓度可达 $5 \sim 30 \text{ kg/m}^3$, 因此, 结合工程实际, 试验浑水含沙浓度分别取 5 、 11 kg/m^3 ; 通过初步试验, I 号池的可处理流量范围为 $45 \sim 360 \text{ L/h}$, 故按照设计进流量 (45 L/h) 的 2、4、6、8 倍选择了试验工况流量, 分别为 45 、 90 、 180 、 270 、 360 L/h 。试验工况组合数为 30 组。

1.5 泥沙颗粒级配

工程实践^[26-27]表明, 对于高浓度含细颗粒泥沙 (粒径小于 0.05 mm) 较多的河流而言, 其流域内的灌区即使在修建了沉沙池的情况下, 引水灌溉渠道内仍然会产生比较严重的淤积, 无法保证后续节水灌溉设备安全运行。因此, 为探明新型异向流沉沙池处理实际工程中粒径小于 0.075 mm 的细颗粒泥沙的效果, 试验采用黄土作为模型沙进行试验, 其中粒径小于 0.051 mm 的颗粒占 87.7% , 小于 0.025 mm 的颗粒占 56% , 小于 0.011 mm 的颗粒占 28.7% , 小于 0.0056 mm 的颗粒占 15.1% , 小于 0.0016 mm 的颗粒占 4.6% , 颗粒中值粒径 $d_{50}=0.021 \text{ mm}$, 泥沙颗粒累计分布为 90% 的粒径 $d_{90}=0.054 \text{ mm}$ 。

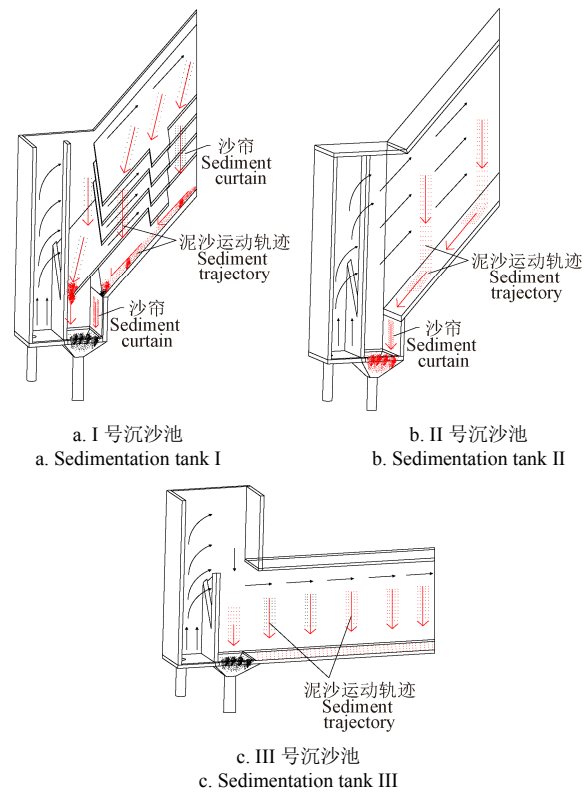
2 结果与分析

2.1 试验现象及泥沙运动特性

图 2 是根据试验现象绘制的各沉沙池的水沙流动现象的概化图。图 3 是浓度为 5 kg/m^3 、流量为 45 L/h 工况下 I 号沉沙池的水沙分离试验现象。

在试验过程中观察到, I 号沉沙池中, 含沙水流由有压进水箱进入沉沙箱后, 沉沙箱内的双向倾斜薄板将沉降区分成了多个浅层沉降区间, 水沙混合物随流体向上运动过程中, 部分泥沙自由沉降, 降落至斜板后与落在斜板上的其他颗粒聚集成团, 该泥沙团沿着薄板长度和宽度方向均有向薄板始端 (上游端) 和薄板低端滑动的速度分量, 泥沙沿其合速度方向滑向薄板低端, 一部分泥沙经薄板低端与右边墙 (顺水流方向, 右边为右边墙) 形成的泥沙通道 (定义其为 1 号泥沙通道) 以贴壁流的方式流入沉沙箱底部 (图 2a), 后沿薄板滑落至集沙箱中, 该沉降过程可观察到大部分泥沙在 1 号泥沙通道处形成了明显的“沙帘” (图 3a); 少量泥沙经排沙孔跌落集沙箱中; “清水”则沿着斜板高端与左边墙形成的锐

角沟槽流入无压出水池中排出 (图 3b)。从图 3 可明显看出左边墙一侧比右边墙一侧的水流含沙浓度低。



注: 实心箭头表示水流流向, 直角箭头表示泥沙沉降路径, 黑点代表泥沙颗粒。

Note: Solid arrows indicate the direction of water flow, right-angle arrows indicate sediment deposition paths, and black dots represent sediment particles.

图 2 沉沙池泥沙流动概化图

Fig.2 Sedimentation tank sediment flow generalization diagram



图 3 I 号沉沙池试验图片 (流量 45 L/h)

Fig.3 Test picture of sedimentation tank I (flow rate 45 L/h)

II 号和 III 号沉沙池内的水沙运动过程概化如图 2b 和 2c 所示。在 II 号沉沙池内, 含沙水流进入进水箱后流入无薄板布置的沉沙箱区, 部分泥沙未来得及沉降就随水流经溢流槽流出, 部分泥沙自由沉降至沉沙箱底板, 并沿底板下滑至集沙箱, 在集沙箱的下游壁面上也可以看到与图 3b 类似的“沙帘”现象。但在试验运行 1 h 后, 沉沙箱左、右边墙处观察到的水流浑浊程度一致, 整个沉沙池会出现模糊的清浑交界面。III 号池内水沙运动现象与 II 号基本一致, 但由于其底板水平, 泥沙自由沉降

至底板后几乎保持静止不动, 故无“沙帘”现象。

通过观察和分析试验现象可知, 泥沙在 I 号沉沙池中的运动过程主要分为泥沙落到倾斜薄板之前的自由沉降运动和泥沙沉降至薄板后沿薄板表面的滑移运动。由于多层倾斜薄板将沉降空间划分为若干沉降距离(薄板竖向间距)较短的沉降区域, 泥沙经过短时间自由沉降后便开始沿薄板的滑移运动, 故重点分析泥沙沉降至薄板后的滑移运动, 通过建立泥沙滑移运动方程, 来探讨其高效沉降泥沙的机理。

由于本试验采用的泥沙粒径较细并含有一定量的黏土颗粒, 在动水沉降过程中细颗粒之间相互碰撞容易产生絮凝而形成微小的絮凝团^[28-29], 故此处泥沙的力学分析研究对象为直径为 D 的泥沙絮团。泥沙絮团沿斜面滑移运动时主要受到水流拖曳力 F_D 、有效重力 G 和摩擦力 F_f ^[30], 各力的单位均为 N, 其计算方法见式(3)~式(5)。根据牛顿第二定律, 泥沙絮团沿薄板上任意轨迹 A_1B_1 下滑的运动方程见式(6)。

$$G = \frac{\pi}{6} D^3 (\gamma_s - \gamma) \quad (3)$$

$$F_f = G \cos \theta \tan \varphi \quad (4)$$

$$F_D = C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho V^2}{2} = C_D \frac{\rho \pi D^2}{8} |V_p \cos \delta - V_q|^2 \quad (5)$$

$$a = \frac{G \sin \theta - [F_D + G \cos \theta \tan \varphi]}{m} \quad (6)$$

式中 θ 为泥沙下滑迹线与平面 xoy 的夹角, ($^\circ$); C_D 为阻力系数; D 为泥沙絮团粒径, mm; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; V 为水流与泥沙的相对运动速度^[31], mm/s; V_p 和 V_q 分别为 I 号沉沙池中水流的运动速度和泥沙絮团在双向倾斜薄板上的滑移速度, mm/s; γ_s 和 γ 分别为泥沙絮团的干容重和水的容重, N/m^3 ; δ 为流体流速与直线 A_1B_1 的夹角, ($^\circ$); φ 为泥沙在动水条件下的休止角^[31], ($^\circ$); m 为泥沙絮团的质量, kg。

式(6)中, θ 取最大值时, 加速度 a 最大, 泥沙絮团所受惯性力最大, 故泥沙絮团在斜板上的运动迹线必为与水平面夹角最大的直线。根据图 4a 可将 θ 表示为

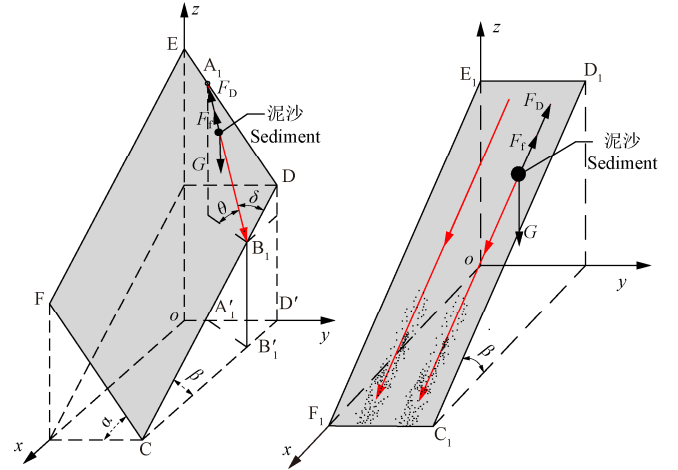
$$\theta = \arctan\left(\frac{L_{B_1D'} \tan \beta + L_{A_1D'} \tan \alpha}{\sqrt{L_{A_1D'}^2 + L_{B_1D'}^2}}\right) \quad (7)$$

式中 $L_{B_1D'}$ 和 $L_{A_1D'}$ 分别为 B_1D' 和 A_1D' 边的长度。由于 $L_{B_1D'} = k L_{A_1D'}$ (k 为与倾角 α 和 β 有关的常数), 将 $L_{B_1D'}$ 用 $L_{A_1D'}$ 代替, 则式(7)可表示为 k 的函数。当 α 和 β 为定值时, θ 仅为 k 的函数, 且 $\theta''(k) < 0$, 存在 $\theta'(k) = 0$, 故 $\theta(k)$ 有最大值 θ_{\max} 。当 $k = \tan \beta / \tan \alpha$ 时, $\theta'(k) = 0$, 则 θ_{\max} 为

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\tan \beta \sqrt{1 + \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \beta}\right)^2}\right) \quad (8)$$

因此, 泥沙絮团沿双向倾斜薄板下滑时的迹线与水平面夹角为 θ_{\max} 。

为了求出泥沙絮团在双向倾斜薄板上的运动速度 V , 将式(3)~式(5)代入式(6), 将其改写成式(9)。



a. 双向倾斜薄板

a. The bi-directional tilt sheet

b. 单向倾斜薄板

b. The unidirectional tilt sheet

注: CDEF 为双向倾斜薄板; A_1B_1 为泥沙运动轨迹; A_1B_1D' 为 A_1B_1D 在 xoy 平面的投影; $C_1D_1E_1F_1$ 为单向倾斜薄板。 F_D 为水流拖曳力, N; G 为有效重力, N; F_f 为摩擦力, N; θ 为泥沙下滑迹线与 xoy 平面的夹角, ($^\circ$); δ 为流体流速与 A_1B_1 的夹角, ($^\circ$)。

Note: CDEF is the bi-directional tilt sheet; A_1B_1 is sediment trajectory; A_1B_1D' is the projection of A_1B_1D in the xoy plane; $C_1D_1E_1F_1$ is the unidirectional tilt sheet. F_D is the water dragging force, N; G is the effective gravity, N; F_f is the sassafras force, N; θ is the angle between the sediment slide path and xoy plane, ($^\circ$); δ is the angle between the fluid flow rate and the straight line A_1B_1 , ($^\circ$).

图 4 泥沙的运动轨迹及受力分析

Fig.4 Trajectory and force analysis of sediment

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\pi \rho C_D D^2}{8m} V^2 + \frac{\pi D^3 (\gamma_s - \gamma) (\sin \theta_{\max} - \cos \theta_{\max} \tan \varphi)}{6m} \quad (9)$$

$$\text{令 } A = \frac{\pi \rho C_D D^2}{8m} \quad (10)$$

$$B = \frac{\pi D^3 (\gamma_s - \gamma) (\sin \theta_{\max} - \cos \theta_{\max} \tan \varphi)}{6m} \quad (11)$$

式(9)可写为

$$\frac{dV}{dt} = -AV^2 + B \quad (12)$$

方程(12)为一阶非线性微分方程(黎卡提方程), 不能直接求解, 需进行适当变量替换求解。对运动方程进行等式变换, 求得方程的一特解 $V = (A^{-1}B)^{0.5}$, 再利用其特解构造新方程(13)。

$$V = u + (A^{-1}B)^{0.5} \quad (13)$$

式中 u 为包含自变量 t 的函数。将式(13)代入(12)中, 可得:

$$u^{-2} \frac{du}{dt} = -2(AB)^{0.5} \frac{1}{u} - A \quad (14)$$

令 $z = \frac{1}{u}$, 通过积分变换和常数变易法可求得:

$$z = \frac{1}{V - (A^{-1}B)^{0.5}} = Ce^{-\int p dt} + e^{-\int p dt} \int Ae^{\int p dt} dt \quad (15)$$

已知 $t=0$, $V=0$ 代入上式, 可求得 $C = -(AB^{-1})^{0.5}$ 。

因此, 泥沙絮团沿 A_1B_1 的运动速度为

$$V = \frac{1}{-(AB^{-1})^{0.5} e^{2(AB)^{0.5}t} - 0.5(AB^{-1})^{0.5}(1 - e^{2(AB)^{0.5}t})} + (A^{-1}B)^{0.5} \quad (16)$$

当 $\alpha \neq 0$ 、 $\beta \neq 0$ 时, 联立式 (8)、式 (10)、式 (11)、式 (16) 可求出新型异向流沉沙池不同时刻双向倾斜薄板上的泥沙运动速度; 当 $\alpha=0$ 、 $\beta \neq 0$ 或 $\alpha \neq 0$ 、 $\beta=0$ 时, 联立各式可求解普通斜板沉沙池内单向倾斜薄板上的泥沙运动速度。由于本文的新型沉沙池模型的泥沙通道宽度为 1 mm, 为保证其正常工作, 不被堵塞, 其能处理的泥沙或絮团最大直径不超过 1 mm (本试验沙形成的絮凝体有效粒径约为 $0.026 \text{ mm}^{[32]}$)。故以粒径 $D=1 \text{ mm}$ 为例运用公式 (16) 计算倾角不同时的运动速度随时间的变化。同时, 为说明公式 (16) 对不同粒径泥沙的适用性, 又选择了试验沙的 $d_{90}=0.054 \text{ mm}$ (小于此粒径的颗粒体积含量占全部颗粒的 90%) 进行了计算, 泥沙湿密度 $\rho_s=1990 \text{ kg/m}^3$ 、 $D=1 \text{ mm}$ 和 0.054 mm 的动水休止角分别为 $\varphi=30^\circ$ 和 29° [33], 结果如图 5。从图中可以看出, 泥沙粒径不同时, 双向倾斜薄板上泥沙的运动速度均大于单向倾斜斜板。如 $t \geq 0.1 \text{ s}$ 时, $\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=45^\circ$ 时 $D=1$ 和 0.054 mm 的泥沙运动速度均为单向倾斜斜板 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=45^\circ$ 的 1.6 倍; $t=0.01 \text{ s}$ 时, 前者加速度是后者的 2 和 1.6 倍。对于双向倾斜薄板而言, α 或 β 一定时, α 或 β 越大运动速度越大 ($0 < \alpha < 90^\circ$, $0 < \beta < 90^\circ$), 沉降效率越高, 如 $\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=85^\circ$ 时 $D=1 \text{ mm}$ 的泥沙运动速度和加速度分别是 $\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=35^\circ$ 的 1.4、1.5 倍; $D=0.054 \text{ mm}$ 的泥沙运动速度和加速度均分别是 $\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=35^\circ$ 的 1.4 倍。因此, 在工程设计时若地形落差满足要求时, α 和 β 越大越有利于提高沉降效率 ($0 < \alpha < 90^\circ$, $0 < \beta < 90^\circ$); 若地形不满足要求, α 和 β 至少应大于泥沙休止角。

通过分析泥沙沉降机理可知, 泥沙能否高效沉降取决于进流量、倾角 α 和 β 的大小。将新型异向流沉沙池应用于工程实际时, 实际工程沉沙池的沉沙条件应和试验模型保持一致, 即模型与实际工程中双向倾斜薄板间的流速相同、 α 和 β 角也应分别相同。实际工程沉沙池的规模可依据需处理的泥沙粒径, 根据模型相似理论计算泥沙所需要的沉沙池尺寸和处理流量。试验室与实际工程之间, 以流速相同为基本准则。例如: 实际工程流量为试验室流量的 100 倍, 则实际工程的沉沙池过水面积亦为试验室沉沙池过水面积的 100 倍。沉沙池的长度受到泥沙级配的影响, 不同的泥沙级配, 沉沙池长度不尽相同, 需要进行相关模型试验确定出合理的沉沙池长度。

2.2 各沉沙池泥沙沉降特性对比

图 6 为不同进流量、不同进流含沙浓度时 I、II 和 III 号沉沙池泥沙截除率对比结果。由图可知, 相同进流量和含沙浓度下各池的截除率由大到小的顺序为: I、II、III。随进流量和含沙浓度的增大, 三者的截除率均随之降低。各池的截除率曲线纵向间距有随着处理流量的增大而增大的趋势, 即处理流量越大, I 号池的沉沙效果优势越明显。当处理流量为 45 L/h 、进流含沙浓度为 5 kg/m^3 时, I、II、III 号池的泥沙截除率分别为 88.53%、76.94% 和 74.38%; 而当进流含沙浓度保持不变, 处理流量增大 8 倍至 360 L/h 时, I 号池泥沙截除率仍可超过 40%, 而 II 号 III 号池的泥沙截除率仅约为 I 号池的 58% 和 50%。在 5 种流量工况下, I 号池的泥沙截除率约为 II 号 III 号池的 1.2~2 倍。

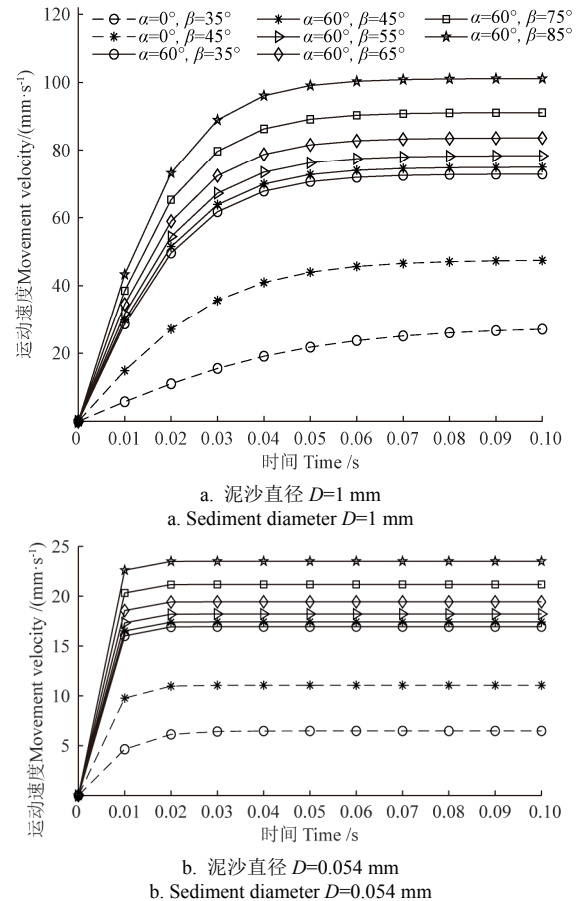


图 5 泥沙絮团沿不同薄板倾角时的运动速度

Fig.5 Movement velocities of sediment flocs along different inclination angles of the thin plate

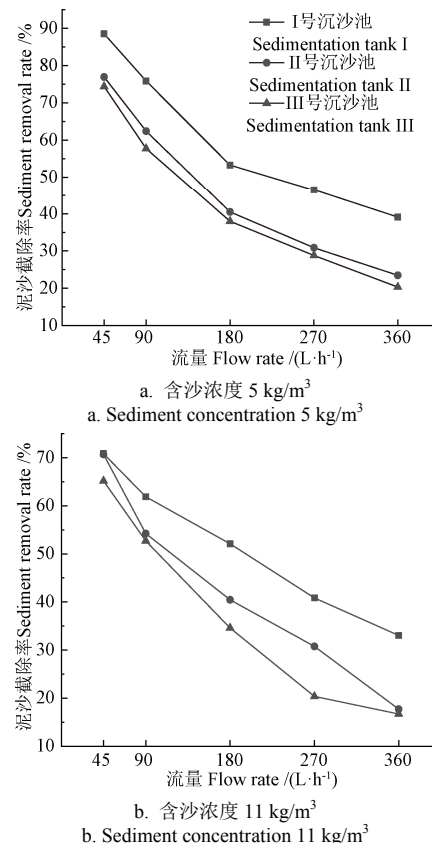


图 6 各级流量和浓度下泥沙截除率

Fig.6 Sediment removal rates at different levels of flow rate and concentration

图 7 为不同进流量、不同进流含沙浓度下 I、II 和 III 号沉沙池试验运行 1 h 后集沙箱内泥沙淤积厚度对比结果。由图 7 可知, 相同含沙浓度和进流量下各池运行 1 h 后集沙箱内泥沙的淤积厚度从大到小顺序为: I、II、III。进流量越大, I 与 II 和 III 号池泥沙淤积厚度的差值越大, 单位时间内 I 号池的泥沙淤积厚度越高, 其沉降效率优于 II、III 号沉沙池, 如流量为 45~360 L/h 时, I 号池的泥沙淤积厚度分别是 II 和 III 号池的 1.3~2.3 倍和 5~16 倍。进流量较小, 如处理流量为 45、90 L/h 时, 含沙浓度为 5 kg/m³ 时, I 与 II 相差不大, 这是因为此时池中流速较小, II 号池中的泥沙絮团接近自由沉降。而在不同进流量和含沙浓度下, III 始终较小, 与 I 和 II 不同, III 号池集沙箱内的泥沙主要来自集沙箱上方的含沙水流中的泥沙自由沉降。由图 7b 可知, 进流含沙浓度为 11 kg/m³ 时, 相同流量下, 随单位体积内的泥沙含量增大, 相同时间泥沙淤积厚度增大, I、II、III 号池内泥沙的淤积厚度比含沙浓度 5 kg/m³ 时分别增加了 2.3~3.3、2.1~3.5 和 1.4~2.0 倍。

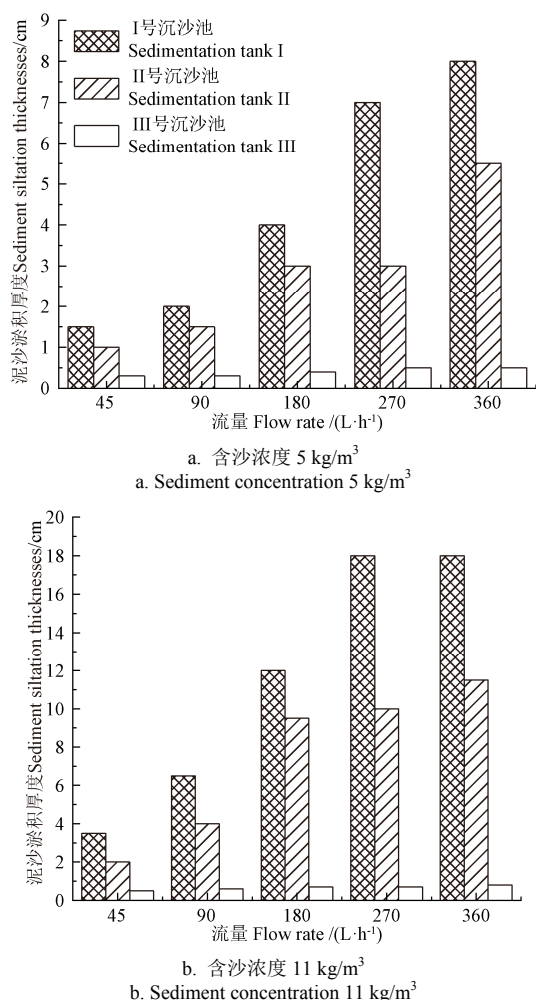


图 7 各级流量和浓度下集沙箱内泥沙淤积厚度 (运行 1 h)
Fig.7 Sediment siltation thicknesses in sand collection boxes at different levels of flow rate and concentration (operation for 1 h)

图 8 分别为不同进流量、不同进流含沙浓度下 I 和 II 号沉沙池排沙周期 (集沙箱淤满所用时间) 对比结果。由于 III 号沉沙池底板水平, 泥沙沉降至沉沙箱底板后不会向上游运动至集沙箱, 故图中未列出 III 号沉沙池的排

沙周期。由图可知, 相同含沙浓度和进流量下排沙周期从大到小顺序为: II、I。排沙周期越长, 表明此时集沙箱淤满所需要的时间越长, 沉沙池沉降效率越低。当处理流量为 270 L/h、进流含沙浓度为 5 kg/m³ 时, I 号池的排沙周期仅仅是 II 号池的 50%, 表明 I 号池的泥沙沉降效率是 II 号池的 2 倍。由图 8 还可以看出, 进流量越大, 排沙周期越短, 当进流含沙浓度增大到 11 kg/m³ 时, 相同流量下排沙周期是含沙浓度 5 kg/m³ 时的 30%~50%, 时间缩减了 50%~70%。

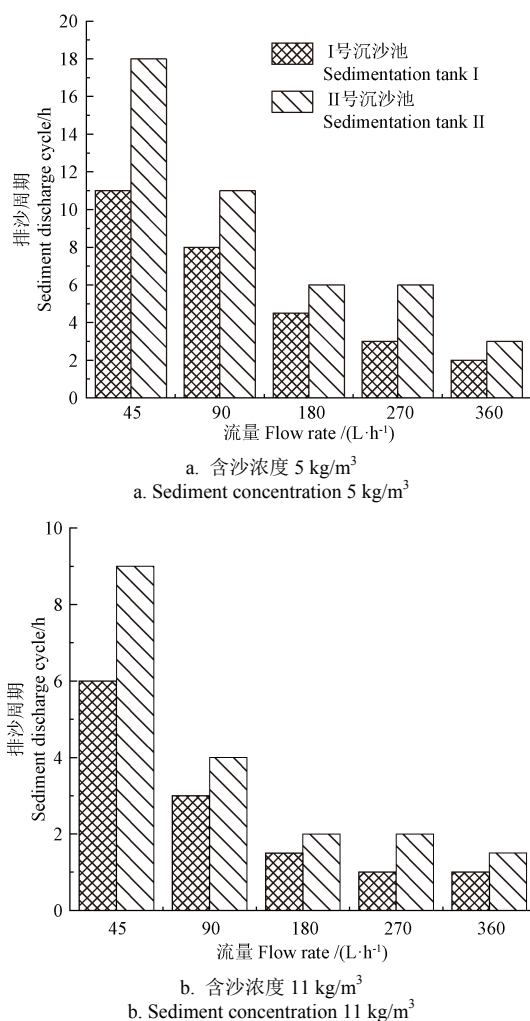


图 8 各级进流量和浓度下沉沙池的排沙周期
Fig.8 Sediment discharge cycles of sedimentation tank under different levels of inlet flow rate and concentration

3 结 论

本文通过系列物理模型试验研究了新型异向流沉沙池的泥沙沉降特性, 并将其与底板倾斜和底板水平的条形沉沙池沉降特性进行了对比。通过理论分析和数值方法建立并求解了新型异向流沉沙池双向倾斜薄板上泥沙运动的一阶非线性微分方程。主要得到以下结论:

1) 在处理含最大粒径小于 0.075 mm, 中值粒径为 0.021 mm 的细颗粒泥沙的含沙水流时, 长度 96 cm、宽度 10 cm、高 110 cm 的新型异向流沉沙池处理流量为 45~360 L/h 时泥沙截除率为 40%~88.53%, 约为相同体积的底板倾斜和底板水平条形沉沙池的 1.2~2 倍。

2) 相同运行时间时新型异向流泥沙池集沙箱内泥沙淤积厚度是底板倾斜和底板水平条形泥沙池的 1.8 和 26 倍, 排沙周期为底板倾斜条形泥沙池的 50%, 表明其相比底板倾斜和底板水平的条形泥沙池具有更高的泥沙沉降效率。

3) 不同时刻泥沙的运动速度结果显示泥沙在双向倾斜薄板上的运动速度是单向倾斜薄板上的 1.6 倍。在双向倾斜薄板中, 大倾角(薄板沿泥沙池宽度方向的倾角 $\alpha=60^\circ$, 薄板沿泥沙池长度方向的倾角 $\beta=85^\circ$)斜板上的泥沙运动速度和加速度是小倾角($\alpha=60^\circ$ 、 $\beta=35^\circ$)斜板上的 1.4、1.5 倍。证明了双向倾斜薄板上的泥沙运动速度和加速度均大于单向倾斜薄板, 倾角越大, 运动速度越大。在工程设计时若地形落差满足要求时, 薄板沿泥沙池宽度方向的倾角 α 和薄板沿泥沙池长度方向的倾角 β 越大越有利于提高沉降效率($0<\alpha<90^\circ$, $0<\beta<90^\circ$), 若地形不满足要求时, α 和 β 至少应大于泥沙休止角。

参考文献

- [1] 张军, 侍克斌, 高亚平, 等. “圆中环”沉沙排沙池浑水沉沙特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 86-93.
Zhang Jun, Shi Kebin, Gao Yaping, et al. Turbid water desilting characteristics of circular-ring desilting and sediment ejection basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(13): 86-93. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陶洪飞, 杨海华, 马英杰, 等. 流量对河水滴灌重力沉沙过滤池内流速分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 131-137.
Tao Hongfei, Yang Haihua, Ma Yingjie, et al. Influence of flow rate on flow velocity distribution in gravity sinking and filter tank for drip irrigation with river water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 131-137. (in Chinese with English abstract)
- [3] Li Y K, Pan J C, Chen X Z, et al. Dynamic effects of chemical precipitates on drip irrigation system clogging using water with high sediment and salt loads[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 833-842.
- [4] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国: 历史、现状和未来[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 372-381.
Li Jiusheng, Li Yanfeng, Wang Jun, et al. Microirrigation in China: History, current situation and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 372-381. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周理强, 韩栋, 喻黎明, 等. 导流片对 Y 型网式过滤器性能的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 40-46.
Zhou Liqiang, Han Dong, Yu Liming, et al. Effect of guide vanes on performance of Y-screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [6] 宗全利, 杨洪飞, 刘贞姬, 等. 网式过滤器滤网堵塞成因分析与压降计算[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 215-222.
Zong Quanli, Yang Hongfei, Liu Zhenjie, et al. Clogging reason analysis and pressure drop calculation of screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 215-222. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wang J, Kim S C, David Y H. Carbon nanotube penetration through a screen filter: Numerical modeling and comparison with experiments[J]. Aerosol Science and Technology, 2011, 45: 443-452.
- [8] 张文倩, 牛文全, 李学凯, 等. 减缓滴头堵塞风险的毛管首次冲洗时间及周期的确定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 70-77.
Zhang Wenqian, Niu Wenquan, Li Xuekai, et al. Determination of first flushing time and period to mitigate risk of emitter clogging in drop irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 70-77. (in Chinese with English abstract)
- [9] 阿力甫江·阿不里米提, 虎胆·吐马尔白, 木拉提·玉赛音, 等. 鱼雷网式过滤器排污时间优化试验研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊 1): 192-199.
Alipujiang·Abulimiti, Hudan·Tumaerbai, Mulati·Yusaiyin, et al. Experimental on optimization on discharge time of torpedo screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(Suppl.1): 192-199. (in Chinese with English abstract)
- [10] 吴泽广, 张子卓, 张珂萌, 等. 泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 99-108.
Wu Zeguang, Zhang Zizhuo, Zhang Kemeng, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channel emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 99-108. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wang J X, Zhu Y Y, Sun T H, et al. Forty years of irrigation development and reform in China[J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2019, 64(1): 126-149.
- [12] 袁寿其, 李红, 王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学学报, 2015, 33(1): 78-92.
Yuan Shouqi, Li Hong, Wang Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2015, 33(1): 78-92. (in Chinese with English abstract)
- [13] 于婷婷, 李腾腾, 王潇. 高含沙洪水期间吉利白坡水厂正常供水方案探究[J]. 人民黄河, 2021, 43(S1): 232-234.
Yu Tingting, Li Tengting, Wang Xiao. Exploring the normal

- water supply scheme of Jili Baekpo water plant during high sediment content flood[J]. Yellow River, 2021, 43(S1): 232-234. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡松可, 李文昊, 杨广, 等. 滴灌应用的改进直线型泥沙池结构优化研究[J]. 节水灌溉, 2020(11): 68-72, 77.
- Hu Songke, Li Wenhao, Yang Guang, et al. Research on the structure optimization of improved linear sedimentation basin for drip irrigation application[J]. Water Saving Irrigation, 2020(11): 68-72, 77. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡松可, 李文昊, 杨广, 等. 改进直线型泥沙池在农业微灌中的运行效果[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(6): 626-631.
- Hu Songke, Li Wenhao, Yang Guang, et al. Operation effect of improved straight-line desilting basin in agricultural micro-irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(6): 626-631. (in Chinese with English abstract)
- [16] He C, Marsalek J. Vortex plate for enhancing particle settling[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(8): 627-635.
- [17] Hartloper C, Kinzel M, Rival D E. On the competition between leading-edge and tip-vortex growth for a pitching plate[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(1): 1447.
- [18] Wang K, Li Y, Ren S, et al. A case study on settling process in inclined-tube gravity sedimentation tank for drip Irrigation with the yellow river water[J]. Water, 2020, 12(6): 1685.
- [19] 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 Heng. 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 with English abstract)
- [20] 董玉萍, 牟献友, 文恒, 等. 斜板式水沙分离装置中泥沙水力沉速特性研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(8): 28-30.
- Dong Yuping, Mou Xianyou, Wen Heng, et al. Research on the sediment hydraulic settling velocity feature of the water-sediment separator of inclined plates[J]. Yellow River, 2013, 35(8): 28-30. (in Chinese with English abstract)
- [21] 严跃成, 邱秀云, 张翔, 等. 两相流分离鳃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, 42.
- 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, 42. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨海华, 李琳, 靳晟, 等. 梭锥管内泥沙沉降特性及运动轨迹研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 184-189.
- Yang Haihua, Li Lin, Jin Sheng, et al. Study on sediment settling characteristics and movement path in shuttle-conical tube[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 184-189. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李琳, 杨海华, 王苗, 等. 梭锥管混浊流体分离装置流场 PIV 测试及分析[J]. 水利学报, 2013, 44(9): 1064-1070.
- Li Lin, Yang Haihua, Wang Miao, et al. Test and analysis on flow field in the shuttle-conical tube turbid flow hydraulic separation Device by PIV techniques[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9): 1064-1070. (in Chinese with English abstract)
- [24] 新疆农业大学. 一种泥沙池. 中国专利: 202011376457.4[P], 2020-11-30.
- [25] 涂启华, 杨赉斐. 泥沙设计手册[M]. 北京: 水利水电出版社, 2006.
- [26] 侯鹏, 肖洋, 吴乃阳, 等. 黄河水滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系研究[J]. 水利学报, 2020, 51(11): 1372-1382.
- Hou Peng, Xiao Yang, Wu Naiyang, et al. Cascade relationship between the emitter structure-sedimentation-clogging behavior in drip irrigation systems with Yellow River water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1372-1382. (in Chinese with English abstract)
- [27] 金镠. 细颗粒泥沙运动及滩槽交换对航道回淤的影响[J]. 水运工程, 2019(8): 111-116.
- Jin Liu. Influences of fine sediment transport and transversal sediment transport between shoal and channel on channel siltation[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(8): 111-116. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [29] 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.
- Chen Hongsong, Shao Ming'an. Flocculation and settling properties of fine sediment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002(10): 356-359. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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 with English abstract)
- [31] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [32] 海希, 邵宇阳, 张健玮. 动水条件下泥沙絮凝体粒径变化分析实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 262-266.
- Hai Xi, Shao Yuyang, Zhang Jianwei. Experimental study on change of sediment floc particle size under shear flow[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 262-266. (in Chinese with English abstract)

- [33] 陈立, 宋涛, 李东锋, 等. 侧向水流作用下均匀沙休止角变化的试验研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(3): 1-6.
Chen Li, Song Tao, Li Dongfeng, et al. Experiment study on

repose angle of uniform sand under influence of lateral flow[J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)

Hydraulic sediment characteristics test and mechanism analysis of a new type of anisotropic flow sedimentation basin

Li Lin^{1,2}, Fu Hailin^{1,2}, Tan Yihai^{1,2}, Pei Jiansheng³, Zhang Jun^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830099, China)

Abstract: River sediment concentration is often high in the inland area of Northwest China. It is necessary to set up a sediment basin in the main diversion channel of irrigation areas, in order to settle the sediment before the turbid water enters the drip irrigation belts. A new anisotropic flow sedimentation tank can be used as a promising treatment facility for the secondary sediment, due mainly to high sediment settling efficiency, and low ratio of water consumption, particularly on the removal of fine and ultrafine particles. However, a systematic investigation is still lacking on the settling characteristics and mechanism of new type sedimentation tank. In this study, a series of experiments were performed on the new anisotropic flow and bar-shaped sedimentation tank under different treatments of flow rates and sediment concentrations. A new tank was also set with the size of 96 cm length, 10 cm width, and 110 cm height. The results indicated that the settling efficiency of sediment was 40%-88.53% when the flow rate was 45-360 L/h, and the median size of sediment particle was 0.021mm. The settlement efficiency of the new tank was about 1.2-2 times that of a bar-shaped one in the same volume with a slanted or a horizontal floor. The amount of sediment settling to the collection tank per unit time was 1.3-2.3 times that of the bar-shaped one with a slanted floor. The sediment deposit was 1.8 in the new tank, 26 times that of the bar-shaped tank over the same running time. The desilting period of the new tank was only 50% that of the bar-shaped tank, indicating that the new sedimentation tank presented a relatively higher settling efficiency of sediment. An analysis was made on the stress of sediment movement on the plates that inclined in the length and width direction. Among them, the dip angles with the width and length were defined as α and β , respectively. The first-order nonlinear differential equation was established for the sediment movement on the plates. The velocity and acceleration of particles in different sizes were then calculated along the plates inclined in two-direction and only one direction at different moments. It was found that the velocity of sediment movement on the bidirectionally inclined plate was 1.6 times that on the unidirectional one. Specifically, the velocity and acceleration of particles along with the inclined plate with the great dip ($\alpha=60^\circ$, $\beta=85^\circ$) were 1.4 and 1.5 times than that with the small dip ($\alpha=60^\circ$, $\beta=35^\circ$) in the new tank. Additionally, the velocity and acceleration at any moment on the two-direction inclined plate were greater than that of the one-direction one, where both increased with the dips. In mechanism, the settlement efficiency depended mainly on the flow rate, α and β . It increased with α and β but decreased with the increment of flow rate. Furthermore, the greater α and β contributed to better settlement efficiency, particularly when α and β were acute angles if the difference of topographic height was great enough during the engineering design of the new tank. If the height difference was small, α and β should not be less than the angle of sediment repose. The findings can provide a sound reference to optimize the structure and design application for a new type of sediment settling basin with the anisotropic flow.

Keywords: sedimentation; experiments; sedimentation tank; water-sediment two-phase flow; anisotropic flow