

立柱排布方式对悬沙排沙漏斗水沙分离性能的影响

王元, 李琳, 穆卓昀

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了获取立柱的排布方式对排沙漏斗水沙分离性能的影响规律, 通过室内试验对进流量、含沙浓度不同时双排立柱并排布置和交错布置的排沙漏斗的水沙分离性能进行研究。结果表明: 无立柱时漏斗悬板淤沙波浪峰值、底板淤沙冲沟的曲率和冲深均最大, 立柱并排布置时次之, 交错布置时各值均最小; 与未加设立柱相比, 并排布置排沙耗水率最大增加4.01%, 交错布置排沙耗水率最大增加4.25%, 加设立柱后漏斗室内的切向流速、螺旋流强度和二次流强度及范围均减小, 交错布置相对于并排布置削弱更为明显。并排布置的室内淤沙质量比交错布置减少3.10%~4.76%, 底孔排沙率增大0.90%~1.23%。工程设计时, 考虑到立柱并排布置时的底板淤积量、底孔排沙率、泥沙总截除率和排沙耗水率与不加立柱时较为接近, 故可按照并排方式布置立柱。研究成果可为排沙漏斗悬板支撑系统的优化设计提供参考。

关键词: 排沙漏斗; 溢流悬板; 双排立柱; 排布方式; 水沙分离性能; 物理模型试验

中图分类号: TV149.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)06-0152-07

Influence of column arrangement on water – sediment separation performance of the vortex settling basin

WANG Yuan, LI Lin, MU Zhuoyun

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to investigate the influence of supporting column arrangement on the water – sediment separation performance of the vortex settling basin (VSB), laboratory tests were carried out on the VSBs with two rows of supporting columns which were arranged differently including side-by-side arrangement and staggered arrangement under different inlet flows and sediment concentrations. The results showed that the peak of silt and sand ripple on the VSB suspension deflector, the curvature and depth of bottom silt gully were the largest when there were no columns, followed by the side-by-side column arrangement, and the staggered arrangement produced the smallest values. Compared with no columns, the water consumption rate of side-by-side arrangement increased by 4.01% to the maximum, and that of the staggered arrangement increased by 4.25%. The installment of the columns reduced the tangential flow rate, spiral strength and secondary flow intensity and range of the VSB, with a stronger reducing effect seen in staggered arrangement. However, the indoor sediment mass of side-by-side arrangement was 3.10% – 4.76% less than that of staggered arrangement, and the sediment discharge rate of its bottom hole was 0.90% – 1.23% higher. Therefore, side-by-side arrangement is recommended in engineering design because the floor silting amount, bottom hole discharge rate, total sediment removal rate and sand discharge water consumption rate of this arrangement are close to those of no columns. The research results are expected to provide a reference for the optimal design of the suspension deflector support system of VSBs.

Key words: vortex settling basin; suspension deflector; double row column; column arrangement; water

收稿日期: 2021-06-16; 修回日期: 2021-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069028); 自治区高校科研计划项目(XJEDU2018I010); 2018年天山青年计划项目(2018Q017)

作者简介: 王元(1998-), 男, 新疆石河子人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 李琳(1979-), 女, 山东青岛人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水力学及河流动力学。

sediment separation performance; physical model experiment

1 研究背景

灌渠泥沙淤积会造成严重的运行和维护问题,工程面临的主要问题之一是如何控制进入灌溉和动力渠道的泥沙^[1-4]。为了清除进入渠道的泥沙,通常使用涡流管、隧道式泥沙提取器或沉降池除沙^[5]。与传统类型的沉降池相比,当泥沙的截除效果相近时,排沙漏斗具有占地面积更小且排沙耗水率更低的优点,其排沙耗水率一般在5%~10%之间^[6-8]。排沙漏斗通过水流旋涡从水流中提取推移质和悬移质泥沙,其工作原理是在具有底孔的圆柱形腔室中引入切向水流,由此产生强烈的涡流,在重力和离心力的作用下,较重的泥沙颗粒被迫向底部孔口移动,较清澈的水从溢流出口流出^[9]。溢流悬板是排沙漏斗高效除沙的关键构件,溢流悬板呈圆环形,覆盖排沙漏斗周长的一半,水平布置,面积与漏斗直径成正比。漏斗的排沙机制主要依靠二次流,而溢流悬板的存在确保了水流在漏斗内部的最大停留时间,有利于二次流的形成^[10]。

自20世纪50年代起,国内外学者以提高排沙漏斗截除率、降低排沙耗水率、减少悬板和锥底的泥沙淤积量为目标对排沙漏斗几何结构与水力要素之间的相关关系开展了系统试验研究。Paul等^[10]为排沙漏斗模型尺寸的确定提供了指导性意见,规定了截取不同直径泥沙应该采用的底孔直径和冲洗流量,并提出了更加简单可靠的泥沙截除率的预测公式;Li等^[11]、李琳等^[12]和王学鑫等^[13]在保证排沙漏斗具有一定泥沙截除效率的前提下,通过在溢流悬板上开孔来降低悬板上的泥沙淤积,大大降低了悬板失事的风险;Keshavarzi等^[14]表示,布置悬板一方面可以增强进口射流和近床涡流,有利于颗粒从底孔排除,另一方面可以削弱上部入口射流,避免颗粒过早的从溢流出口流出;Niknia等^[15]对比了在顺时针水流或逆时针水流条件下,涡流沉降安装悬板和未安装悬板时的泥沙截除效率,发现在逆时针水流下且装有溢流悬板时,对于其研究中使用的0.35 mm 中值粒径的泥沙,涡流沉降室的捕集效率约为88%;王平圆等^[16-17]和吴洋锋等^[18]研究了悬板倾斜对排沙漏斗水沙分离性能的影响,结果表明悬板上倾斜可有效解决悬板的淤积问题,还可减少排沙耗水率和漏斗室内的淤积量。目前关于排沙漏斗的研究成果主要是基于室内排沙漏斗模型悬板下方无立柱支撑时开展的试验研究。

近些年,排沙漏斗逐步应用于悬移质泥沙的处理,且要求处理的泥沙粒径越来越小,漏斗直径随之增大,而悬板宽度与漏斗直径成正比,故其自重也随直径的增大而增大,为了防止悬板塌落,需要在直径较大的排沙漏斗悬板下方布设双排甚至3排立柱以支撑悬板。由排沙漏斗的工作原理可知,设置悬板是为了增强排沙漏斗的入口射流,从而保证螺旋流和二次流强度。当悬板下方布置多排立柱时,漏斗中心空气涡的贯穿性和二次流的强度及影响范围是否会受到影响,继而又如何影响排沙漏斗的水沙分离性能,布置双排或者多排立柱时其交错布置和并排布置对水沙分离性能的影响规律如何等问题尚未开展系统研究,无法为工程设计提供依据和指导。因此,本文针对目前工程中常采用的悬板双排立柱支撑在交错布置和并排布置时开展了不同进流量和进流含沙浓度下的试验研究,获得立柱排布方式对排沙漏斗的总截除率、排沙耗水率、淤积量及底孔排沙率等重要指标的影响规律,为实际排沙漏斗工程中的立柱系统布置方案提供设计依据。

2 试验模型与研究方法

2.1 试验装置与试验方案

试验采用的物理模型是以运行多年且效果良好的新疆喀什一级电站排沙漏斗工程为原型并按几何比尺1:60进行设计。排沙漏斗模型采用6 mm厚度的不锈钢制作,其糙率为0.007~0.008,漏斗直径为1 000 mm,锥底坡度1:5,漏斗模型进水涵洞为高50 mm、宽200 mm的矩形进口,进水涵洞长800 mm,排沙底孔直径为20 mm,溢流悬板水平布置在进水涵洞底以上105.8 mm的位置,相对于进水涵洞顶部抬高了55.8 mm,溢流悬板宽200 mm,圆心角180°,溢流口圆心角为90°,模型示意图图1。

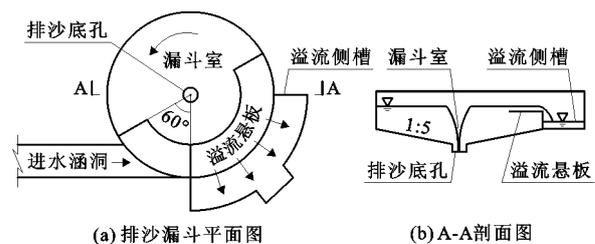


图1 排沙漏斗物理模型试验装置示意图

试验装置为自循环系统,经搅拌池搅拌均匀的携沙水流被泵入与漏斗进口相接的稳流水箱内,水流稳定后流入漏斗,进水流量的大小可通过进水阀

门进行调节。经排沙漏斗处理后的“清水”由溢流侧槽流进堰后直接进入搅拌池,浑水从底孔排出后直接进入搅拌池。当进、出口输沙率之差处于 $\pm 1\%$ 之间时认为达到输沙平衡,可进行试验。在每次试验的2 h期间,每间隔30 min依次用体积 $V = 200 \text{ mL}$ 、质量为 M 的锥形瓶在进口、溢流口和排沙底孔处取样(锥形瓶体积和质量已经过率定),然后将装满水沙混合物的锥形瓶用精度为 0.001 g 的梅特勒-托利多(Mettler Toledo)电子秤称取水沙混合物的质量 M_i ,再通过置换法^[19]公式计算进水口、溢流出口、排沙底孔3处对应的含沙浓度 S_w 、 S_o 、 S_d 含沙。为避免量测结果的偶然性,每组样品需要采集和测量3次取平均值。

试验的模型沙以新疆喀什一级电站排沙漏斗原型工程处理的泥沙为原型进行设计,按原型沙与模型沙沉降相似准则设计模型沙,模型沙粒径比尺为1:2.167。试验采用密度 $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ 、中值粒径 $D_{50} = 0.02 \text{ mm}$ 、最大粒径 $D_{\max} = 0.075 \text{ mm}$ 的天然沙作为试验用沙,泥沙颗粒级配曲线如图2所示。

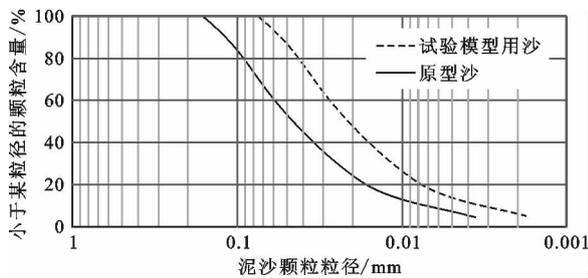


图2 泥沙颗粒级配曲线图

模型的设计流量为 $Q_w = 1.70 \text{ L/s}$,考虑到漏斗在实际运行过程中其进流量、来流含沙浓度随河道流量发生变化,故试验选取了0.85、1.05、1.40、1.70 L/s在含沙浓度 S_w 分别为3、5、8 kg/m^3 下开展试验,一些重要参数通过以下公式计算:

$$\lambda = \frac{Q_d}{Q_w} \times 100\% \quad (1)$$

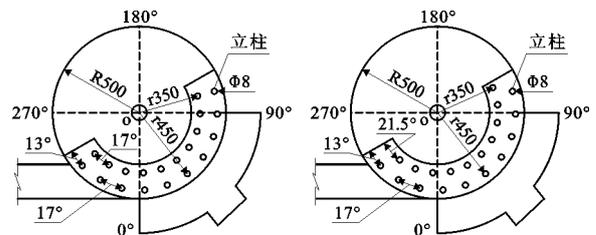
$$\eta = \left(1 - \frac{Q_o S_o}{Q_w S_w}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$\mu = \frac{Q_d S_d}{Q_w S_w} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Q_w 、 Q_o 和 Q_d 分别为进口、溢流出口和排沙底孔的模型流量,L/s,均通过量水堰测得; λ 为排沙耗水率,%; η 为泥沙总截除率,%; μ 为底孔排沙率,%; S_w 、 S_o 、 S_d 分别为进水口、溢流出口、排沙底孔水流相应的含沙浓度, kg/m^3 。

2.2 立柱布置方案

图3为溢流悬板支撑立柱排布方式的试验方案示意图。定义 r 为立柱顶部中心点到漏斗室中心的径向距离, R 为排沙漏斗半径,以 r/R 来表示立柱的径向位置;将溢流悬板靠近进水涵洞一侧作为悬板始端, h 为立柱高, H 为进水涵洞高。为寻求能提高溢流悬板稳定性且保证漏斗内部具有良好水流条件的双排立柱排布方式,试验设定了两种方案:(1)并排布置。在 $r/R = 0.7$ 和 $r/R = 0.9$ 处自悬板始端先沿圆周方向 13° 布置第1根,后按照每 17° 布置1根立柱,每排共布置10根,将此排布方式记为方案 C_1 ;(2)交错布置。在 $r/R = 0.9$ 处立柱布置方式不改变;在 $r/R = 0.7$ 处,自悬板始端先沿圆周方向 21.5° 布置第1根立柱,后沿圆周方向每 17° 布置一根,每排共布置10根,内外两排立柱错开布置,将此排布方式记为方案 C_2 。将未加设立柱的初始漏斗记为方案 C_0 。立柱直径均为8 mm(立柱直径与漏斗直径之比按照实际工程常采用的比值确定),立柱高度会因径向位置的不同而有所差异, $r/R = 0.7$ 处立柱的相对高度为 $h/H = 2.68$, $r/R = 0.9$ 处立柱的相对高度为 $h/H = 2.16$ 。



(a) C_1 方案平面图

(b) C_2 方案平面图

图3 溢流悬板支撑立柱排布方式的试验方案(单位:mm)

2.3 评价参数

在漏斗室内布置立柱支撑悬板后势必会对排沙漏斗的流场特性和水沙分离性能产生影响,为了探究方案 C_1 、 C_2 的水沙分离性能与方案 C_0 的差异,此处引入 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 4个指标对其进行评价,该4个评价指标的定义及计算方法如下:

$$D_1 = \eta_i - \eta_0 \quad (4)$$

$$D_2 = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (5)$$

$$D_3 = \mu_i - \mu_0 \quad (6)$$

$$D_4 = \lambda_i - \lambda_0 \quad (7)$$

式中: D_1 为泥沙总截除率的对比指标,%; D_2 为室内淤积质量的对比指标,kg; D_3 为底孔排沙率的对比指标,%; D_4 为底孔排沙耗水率的对比指标,%; η_i 、 m_i 、 λ_i 、 μ_i 分别为双排立柱并排或交错布排时排

沙漏斗的泥沙总截除率, %、漏斗室淤积质量, kg、排沙耗水率, %、底孔排沙率, %; η_0 、 m_0 、 λ_0 、 μ_0 分别为未加设立柱时排沙漏斗的泥沙总截除率, %、漏斗室淤积质量, kg、排沙耗水率, %、底孔排沙率, %。各指标的绝对值越小, 表示方案 C_1 或 C_2 的水沙分离性能与方案 C_0 越接近。

3 结果与分析

3.1 漏斗室内淤沙现象分析

排沙漏斗室内的冲、淤形态与其内部的流场特性密切相关^[20-23]。为了探讨立柱排布方式对流场特性的影响, 试验观测了相同来流量和进流含沙浓度下方案 C_0 、 C_1 、 C_2 的漏斗室内的冲淤形态, 为避免赘述, 现以进流量 $Q_w = 1.70 \text{ L/s}$ 、含沙浓度 $S_w = 5 \text{ kg/m}^3$ 条件下不同方案的试验现象进行对比分析, 图4为该条件下方案 C_0 、 C_1 、 C_2 运行 2 h 停水后漏斗室内的冲、淤形态。

由图4可以看出:(1)停水后方案 C_0 、 C_1 、 C_2 的悬板溢流区基本没有淤沙, 而悬板非溢流区存在淤沙。因为进流中上层挟沙水流在横向涡流^[8]的作用下经悬板溢流出口溢出, 溢流出口流量大, 悬板溢流区水深小, 流速大, 所以泥沙不易淤积在悬板溢流区; 在悬板非溢流区, 受边墙阻挡, 水流流速小, 挟沙能力弱, 泥沙易淤积。(2)3个方案中悬板上淤沙波痕的峰值大小不同, 方案 C_0 最大, 方案 C_1 次之, 方案 C_2 最小。波痕波峰处水流冲刷力大, 水流流速相对较大; 波峰两侧水流冲刷力小, 水流流速相对较

小。波峰越大, 表明水流冲刷力越强, 水流流速相对越大, 这一现象与悬板表面的流速分布^[5]一致。无立柱支撑的排沙漏斗在 $r = (0.6 \sim 0.8)R$ 范围(悬板宽度范围)内为强迫涡^[5-6], 即切向流速随着半径的增加而增大, 当 $r > 0.8R$ 后受边墙影响切向流速随之减小, 故其切向流速在 $r = 0.8R$ 处达到峰值, 与悬板上泥沙的波痕峰值相对应。方案 C_1 的波痕峰值相较于方案 C_0 明显减小, 表明其切向流速相对方案 C_0 减小; 而方案 C_2 的波痕已没有明显的波峰, 表明方案 C_2 的切向流速和旋流强度相比于方案 C_0 和 C_1 削弱明显。方案 C_1 切向流速的分布和大小与方案 C_0 较为接近。(3)3个方案漏斗底板的床面淤沙形态不同。在方案 C_0 、 C_1 中, 当 $0 < r/R < 0.6$ 时, 淤沙中形成直线型冲沟, 当 $0.6 < r/R < 1$ 时, 冲沟形状为“C”型, 凸起方向为顺水流方向, 而方案 C_2 中 $0 < r/R < 0.7$ 的冲沟为直线型, $0.7 < r/R < 1$ 的冲沟为“C”型, 且各方案冲沟深度大小关系为 $C_0 > C_1 > C_2$, “C”型冲沟的曲率大小关系为 $C_0 > C_1 > C_2$ 。泥沙冲淤形态与水流特性有关, 直线型冲沟是排沙底孔点汇的作用结果, “C”型冲沟是由于螺旋流和二次流耦合作用的结果, 其范围大小与二次流和螺旋流影响范围有关。冲沟形态、曲率和深度表明方案 C_0 、 C_1 和 C_2 中螺旋流和二次流强度及范围依次减小, 二次流挟沙力减弱, 这是由于布置立柱后局部水头损失增大而造成的, 其中方案 C_2 交错布置立柱的绕柱涡流在环向上分布更加密集, 故其水头损失大于方案 C_1 。

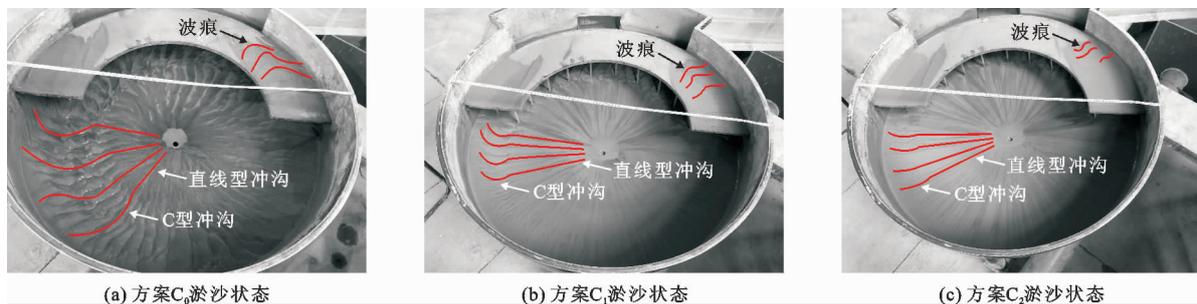


图4 $Q_w = 1.70 \text{ L/s}$ 、 $S_w = 5 \text{ kg/m}^3$ 条件下运行 2 h 后不同方案悬板与漏斗室的淤积情况

3.2 泥沙总截除率对比

图5为不同进流流量和含沙浓度下方案 C_1 、 C_2 相较于方案 C_0 的泥沙总截除率变化, 以指标 D_1 表示, 反映了立柱排布方式对泥沙总截除率的影响。由图5可以看出, 各工况下方案 C_1 、 C_2 的 D_1 值均小于 0, 表明立柱并排和交错布置时泥沙总截除率相比于无立柱方案均有所减小, 但最大减幅小于 4%。方案 C_1 各工况的总截除率减幅均小于 C_2 , 其泥沙总截除

率与方案 C_0 更为接近, 这是由于交错布置立柱时水流的水头损失大于并排布置, 使旋流强度减弱, 从而降低了泥沙总截除率。另外, 方案 C_1 、 C_2 的 D_1 绝对值随进流量的增大而逐渐减小, 表明立柱的布置方式对泥沙总截除率的影响在进流量小于设计流量时较大, 随着进口流量不断接近于设计流量, 对泥沙总截除率的影响逐渐减小。以上结果表明, 排沙漏斗引入流量等于或小于设计流量时, 相比于交错布置方案,

立柱并排布置对泥沙总截除率影响更小。

3.3 室内淤积质量及底孔排沙率对比

图6、7分别为方案 C_1 、 C_2 相较于方案 C_0 的室

内淤积质量和底孔排沙率变化,分别以 D_2 和 D_3 表示,反映了立柱排布方式对室内淤积质量和底孔排沙率的影响。

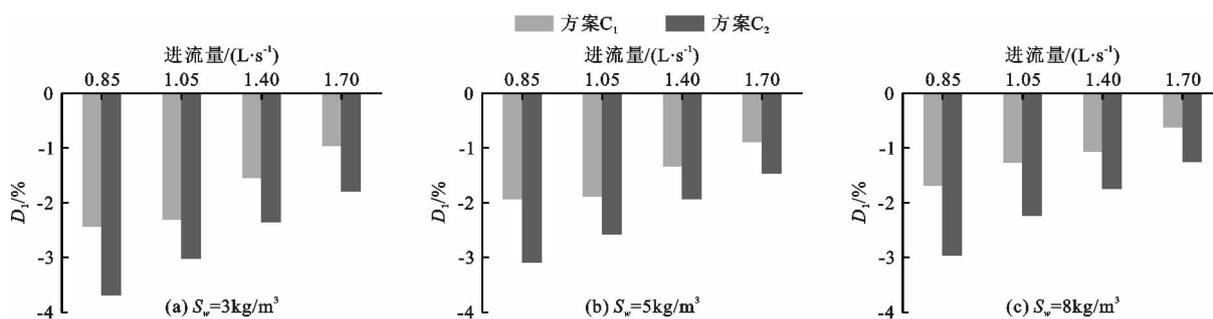


图5 不同进流流量和含沙浓度下立柱布排方式对泥沙总截除率的影响

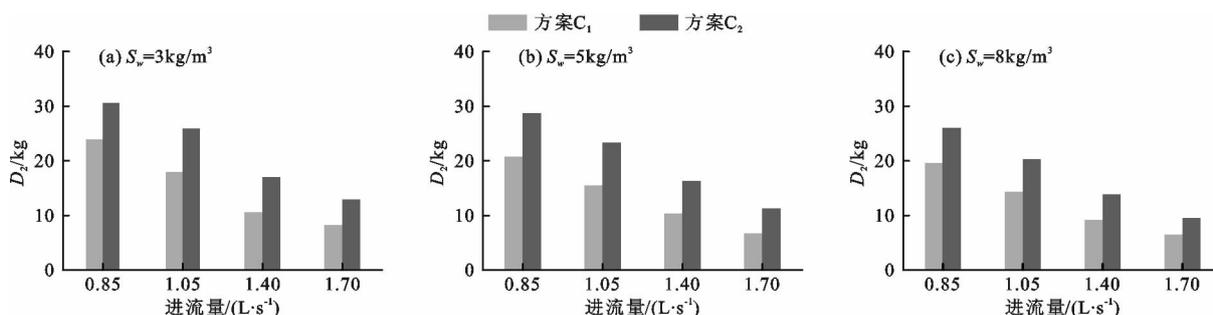


图6 不同进流流量和含沙浓度下立柱布排方式对室内淤积质量的影响

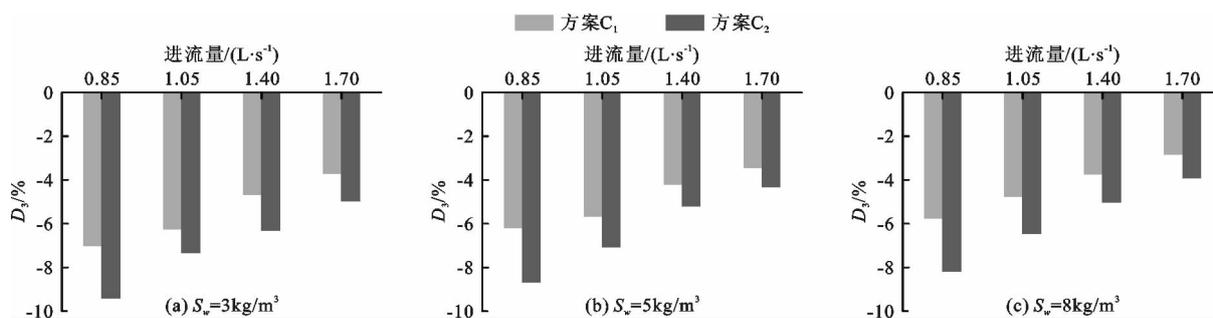


图7 不同进流流量和含沙浓度下立柱布排方式对底孔排沙率的影响

由图6、7可以看出:(1)方案 C_1 、 C_2 的 D_2 均大于0, D_3 均小于0,表明并排和交错布置立柱的漏斗室内淤积质量相比不加立柱时均有所增大,底孔排沙率相比于不加立柱时均减小,这是因为双排立柱的布置使漏斗内部切向流速降低,二次流强度减弱,沉降在底板上的泥沙不易被再次起动送往底孔,从而导致淤积量增大和排沙能力减弱。(2)方案 C_1 的淤积质量在各工况下均小于 C_2 ,底孔排沙率在各工况下均大于 C_2 。当进流量小于设计流量时,相较于方案 C_0 ,各工况下方案 C_1 和 C_2 的室内淤积质量的增幅分别为9.15%~23.9%和13.85%~30.55%,底孔排沙率减幅分别为3.73%~7.01%和5.02%~9.41%;当进流量等于设计流量时,各工况下 C_1 和 C_2 的淤积质量增幅

分别为6.38%~8.13%和9.48%~12.89%,底孔排沙率减幅分别为2.82%~3.72%和3.9%~4.95%。方案 C_1 的室内淤沙质量小于 C_2 主要是因为立柱交错布置时水头损失更大,螺旋流流速更小,同时立柱交错布置使立柱沿圆周方向的间距减小,易阻挡径向转移的泥沙,不利于底孔出沙。此外,当进流量一定时,随着含沙浓度的改变, D_2 和 D_3 的变化幅度不大,故认为含沙浓度的变化对室内淤沙质量及底孔排沙率影响不大。

在排沙漏斗实际运行的过程中,排沙漏斗进流量低于设计流量运行时,一般为河道或者渠道处于枯水期,来流含沙浓度远小于引入设计流量时的含沙浓度,因此,在排沙漏斗实际运行的过程中不会在

漏斗室内产生大量淤积。所以,以设计流量运行工况来看,方案 C_1 的淤积量相对较小且底孔排沙率较高,与方案 C_0 较接近;以小于设计流量的工况来看,两种方案均可考虑。

3.4 排沙耗水率对比

图8为不同进流流量和含沙浓度下方方案 C_1 、 C_2 相较于 C_0 的排沙耗水率变化,以 D_4 表示,反映了立柱排布方式对排沙耗水率的影响。由图8可以看出,方案 C_1 、 C_2 的 D_4 值均大于0,表明方案 C_1 、 C_2 的排沙耗水率相比于 C_0 均有所增加,且方案 C_1 与 C_2 在各工况下排沙耗水率的增幅接近。当进流量小于1.4 L/s时,相较于方案 C_0 ,各工况下方方案 C_1 和 C_2 的排沙耗水率增幅分别为2.10%~4.01%和

2.17%~4.25%,试验发现进流量过小会导致螺旋流的强度降低,引起空气涡的抖动,空气涡相对底孔的贯穿性变差,导致底孔过水面积增大,因而排沙耗水率变大;当进流量大于和等于1.4 L/s时,相较于方案 C_0 ,各工况下方方案 C_1 和 C_2 的排沙耗水率增幅分别为0.85%~1.77%和0.97%~1.87%,进流量的增加使螺旋流的强度加强,空气涡涡径变大、且稳定贯穿排沙底孔,使底孔过水面积减小,排沙耗水率减小。以上结果表明,进流量小于或等于设计流量时交错布置和并排布置对排沙漏斗耗水率影响基本一致。工程设计中,当来流量小于设计流量时,可调换排沙底孔孔径(通常在工程设计时会设计2~3个不同底孔孔径)来减少排沙耗水率。

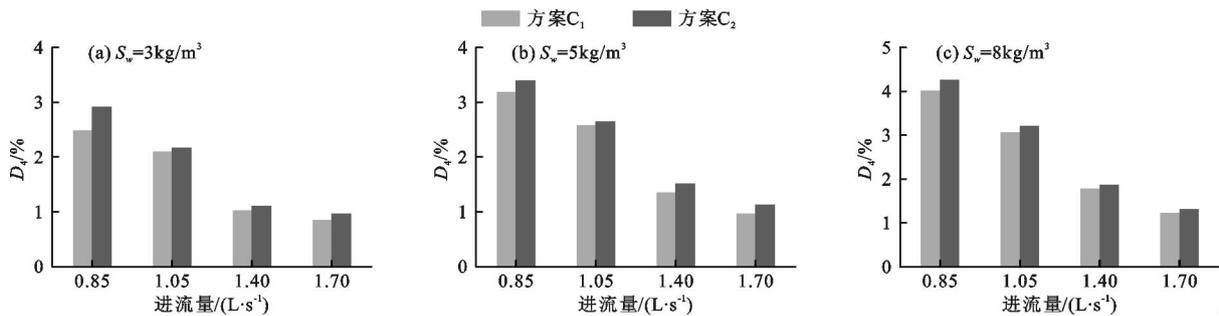


图8 不同进流流量和含沙浓度下立柱排布方式对底孔排沙率的影响

4 讨论

在排沙漏斗溢流悬板下方布置立柱支撑系统可有效预防溢流悬板塌落失事,探索一种立柱系统合理的布置形式,对排沙漏斗工程安全高效运行具有重要的意义。李琳等^[24]研究了在悬板下布置II型(即双排立柱)或H型(即双排立柱间加横梁)两种体型的立柱对排沙漏斗水沙分离性能的影响规律,结果表明,与悬板下方无支撑系统相比,加设II型、H型立柱后排沙漏斗总截除率最大减幅分别为2.43%和4.20%,室内淤积最大增幅分别为4.58%和6.58%,泥沙排出率最大减幅分别为7.01%和11.00%,排沙耗水率最大增幅分别为4.01%和4.32%。立柱的存在势必会影响排沙漏斗的流场特性,进而影响排沙漏斗的水沙分离性能。相较于加设H型立柱,II型立柱下排沙漏斗的总截除率、泥沙排出率,漏斗室内的淤积量、排沙耗水率与悬板下方不加设立柱时较接近,因此,为了保证溢流悬板稳定和排沙漏斗安全运行,工程中可采用II型立柱作为支撑体型,立柱的布置方式有并排布置和交错布置两种方案,但不同的布置方案对水沙分离性能的影响规律如何未开展系统研究,本文对溢

流悬板下方加设双排立柱的两种排布方式开展的不同进流量和进流含沙浓度工况下水沙分离性能的研究,结果表明,交错布置和并排布置对排沙漏斗底板淤积质量和底孔出沙率影响较大,对截除率和排沙耗水率影响较小。漏斗室锥底的冲沟形态、曲率和深度表明,交错布置时立柱所产生的局部绕流水头损失大于并排布置工况,导致立柱交错布置时的螺旋流、二次流的强度比并排布置低,螺旋流和二次流耦合作用是排沙漏斗有效排沙的关键^[23,25],因此,并排布置的水沙分离性能和无立柱时的工况更为接近。

本研究通过观测计算排沙漏斗室内的泥沙冲淤形态、泥沙截除率、排沙耗水率、淤积质量变化率等,定性分析了不同立柱排布方式对螺旋流场特性及其水沙分离性能的影响,后续研究可通过速度场测试试验或者数值模拟的方法量化立柱布置方式对速度场的影响,为进一步优化立柱支撑系统布置方案提供依据。

5 结论

本文通过系列物理模型试验研究了排沙漏斗溢流悬板下方的双排立柱支撑并排布置和交错布置时的水沙分离性能,主要得出以下结论:

(1)排沙漏斗溢流悬板下方不加立柱时悬板淤沙波痕的峰值最大,底板淤沙冲沟曲率和深度也最大,加设双排立柱并排布置时次之,交错布置时最小。加设立柱会使漏斗螺旋流强度和二次流强度及范围变小,立柱并排布置时螺旋流强度和二次流强度及范围介于无立柱和立柱交错布置之间。

(2)排布方式不同对泥沙总截除率、排沙耗水率影响较小,但是对底板的淤积量、底孔的泥沙排出率影响较大。相同进流含沙浓度下,当进流量小于设计流量时,与无立柱相比,交错布置立柱的漏斗底板淤积量比并排布置多了4.70%~8.01%,底孔的泥沙排出率比并排布置少了1.00%~2.40%;当进流量等于设计流量时,交错布置立柱底板的淤积量比并排布置多了3.10%~4.76%,底孔的泥沙排出率比并排布置少了0.90%~1.23%。

综上所述,在工程实际应用中,当排沙漏斗在小于设计流量下运行时,因水流含沙量低,不会造成底板大量淤积,所以两种立柱布排方式均可考虑采纳;当排沙漏斗在设计流量下运行时,并排布置的底板淤积量、底孔排沙率与不加立柱时较为接近,故立柱可采用并排布置。研究成果可为排沙漏斗悬板支撑系统的优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 杨红梅. 浅谈东雷抽黄工程泥沙问题[J]. 西北水资源与水工程, 1996, 7(3): 86-90.
- [2] 洪振国. 水电站沉沙池泥沙最小危害粒径选择分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 177-181.
- [3] SARWAR M K, ANJUM M N, MAHMOOD S. Impact of silt excluder on sediment management of an irrigation canal: A case study of D. G. Khan Canal, Pakistan[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2013, 38(12): 3301-3307.
- [4] ASHRAF M, BHATTI M T, SHAKIR A S, et al. Sediment control interventions and river flow dynamics: Impact on sediment entry into the large canals[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5465-5474.
- [5] TIWARI N K, SIHAG P, KUMAR S, et al. Prediction of trapping efficiency of vortex tube ejector[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 26(1): 59-67.
- [6] ATHAR M, KOTHYARI U C, GARDE R J. Sediment removal efficiency of vortex chamber type sediment extractor[J]. Journal of hydraulic engineering, 2002, 128(12): 1051-1059.
- [7] 周著, 邱秀云, 侯杰, 等. 漏斗式全沙排沙技术及其应用[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 95-98.
- [8] 王顺久, 周著, 侯杰, 等. 排沙漏斗的水流特性试验研究及其工程应用[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 104-109.
- [9] HUANG T H, JAN C D, HSU Y C. Numerical simulations of water surface profiles and vortex structure in a vortex settling basin by using FLOW-3D[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 25(5): 531-542.
- [10] PAUL T C, SAYAL S K, SAKHUJA V S, et al. Vortex-settling basin design considerations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(2): 172-189.
- [11] LI Lin, WANG Pingyuan, MA Yiyi, et al. Reducing sediment deposition on deflector in vortex settling basins[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2020, 146(10): 06020009.
- [12] 李琳, 王平圆, 吴洋锋, 等. 悬板开孔对排沙漏斗流场特性的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 927-935.
- [13] 王学鑫, 赵涛, 李占辉. 不同悬板孔口面积占比条件下的排沙漏斗数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 125-128+45.
- [14] KESHAVARZI A R, GHEISI A R. Trap efficiency of vortex settling chamber for exclusion of fine suspended sediment particles in irrigation canals[J]. Irrigation & Drainage, 2006, 55(4): 419-434.
- [15] NIKNIA N, KESHAVARZI A R, HOSSEINIPOUR E Z. Improvement the trap efficiency of vortex chamber for exclusion of suspended sediment in diverted water [C]// World Environmental and Water Resources Congress, Palm Springs, California, United States, 2011.
- [16] 王平圆, 李琳, 谭义海, 等. 排沙漏斗悬板倾角优化试验研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(7): 109-120.
- [17] 王平圆, 吴洋锋, 李琳. 基于大涡模拟的悬板径向坡度对排沙漏斗流场特性影响数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 156-163.
- [18] 吴洋锋, 李琳. 排沙漏斗悬板径向坡度对流场影响的试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 162-168+174.
- [19] 李占辉, 赵涛, 王学鑫. 基于流固耦合的排沙漏斗悬板应力及流场特性分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 108-111+116.
- [20] 肖柏青, 周著, 邱秀云等. 排沙漏斗中的二次流及其影响[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(1): 71-74.
- [21] 肖柏青, 戎贵文. 排沙漏斗悬移质泥沙运动数值模拟[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 986-992.
- [22] 唐毅, 吴持恭, 周著. 排沙漏斗三维涡流水流结构[J]. 水利学报, 1999, 30(4): 55-59.
- [23] 唐毅, 周著, 吴持恭. 排沙漏斗三维涡流流场脉动特性研究[J]. 水利学报, 2002, 33(2): 17-21.
- [24] 李琳, 穆卓昀, 谭义海. II型和H型立柱对排沙漏斗水沙分离性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 8-14+61.
- [25] 肖柏青, 戎贵文. 排沙漏斗流场特性与排沙机理研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2016, 31(2): 232-238.