

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222649

曲面溢流悬板倾角对排沙漏斗流场特性的影响

顾怀猛^{1,2}, 王延文³, 李琳^{1,2}, 王平圆^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与
水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆塔城地区水利水电勘察设计院, 新疆 塔城 834700)

摘要: 排沙漏斗的流场特性对其水沙分离性能具有决定性作用, 为了探究曲面悬板的倾角对排沙漏斗流场特性的影响, 利用大涡模拟和 VOF 相结合的方法, 对曲面悬板倾角分别为 5° 、 10° 、 15° 时的排沙漏斗三维流场特性开展研究, 并与相同进流量下排沙漏斗设置平面悬板时的流场特性进行对比。结果表明, 采用曲面悬板可增大漏斗室内的涡流强度, 减小低流速带的范围, 倾角增加能提高空气涡的稳定性、增加空气涡的强度和尺寸, 有利于水沙旋流分离; 锥体区径向流速随倾角增加而增大, 且基本指向漏斗中心, 有利于泥沙快速输移至排沙底孔; 曲面悬板表面溢出水流的流速大于平面悬板表面的流速, 且倾角 θ 为 15° 时, 悬板上流速最大。

关键词: 排沙漏斗; 流场特性; 曲面悬板; 数值模拟; 大涡模拟

中图分类号: TV673

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0145-04

1 引言

我国西北内陆地区河流中悬移质泥沙含量较高, 在水利工程及农业生产中, 为减少泥沙带来的危害, 需要修建一级、二级泥沙处理设施, 其中二级泥沙处理设施主要包括各种形式的沉沙池、排沙漏斗等。排沙漏斗主要由进水涵洞、漏斗室、排沙廊道、排沙底孔、溢流出口、溢流侧槽、边墙、溢流悬板等组成。针对排沙漏斗结构尺寸与水力要素之间的关系已开展了大量研究^[1-4]。溢流悬板作为排沙漏斗的重要构件, 其作用是使从有压进水涵洞切入漏斗的水流维持半有压状态, 同时约束水流, 延长水流在漏斗中的停留时间。近年来部分漏斗工程出现了悬板坍塌事故^[5], 原因是水平悬板上方的泥沙淤积厚度大大超出了设计淤积厚度, 增加了作用于悬板的荷载。因此, 在保证截除率和排沙耗水率的情况下优化排沙漏斗悬板使其上方泥沙淤积量减少成为该领域研究中关注的焦点问题。吴洋锋等^[6]提出将悬板近心端向下倾斜, 并分析了倾斜角度对排沙漏斗流场特性的影响; 李琳等^[7]探讨了悬板溢流段和非溢流均匀布孔对排沙漏斗三维流场的影响; 王平圆等^[8]通

过浑水试验, 发现一定倾角的曲面悬板可有效减少悬板、漏斗底板的泥沙淤积量和排沙耗水率。然而, 溢流悬板由平面改为曲面并倾斜一定角度时排沙漏斗内部流场特性的变化对水沙分离性能的影响尚不明确。因此, 本文通过试验和数值模拟对排沙漏斗内设置不同倾角时曲面溢流悬板的流场特性进行研究, 探讨了倾角对切向流速、涡流强度及径向流速的影响, 揭示了曲面悬板倾角变化对排沙漏斗流场和水沙分离性能的影响机理, 旨在提高泥沙处理设施水沙分离的性能。

2 模型设计及验证

排沙漏斗模型由全透明的亚克力板制成, 具体尺寸见图 1。考虑到采用曲面悬板的排沙漏斗进行 PIV 拍摄时, 曲面悬板的壁面折射率较大, 会影响悬板下方及其附近水流的拍摄精度, 因此

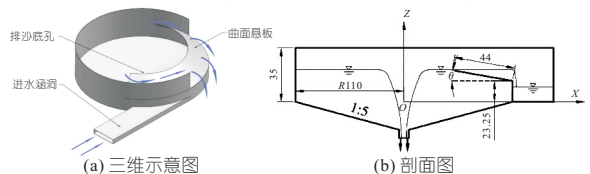


图 1 漏斗模型尺寸示意图(单位: mm)

Fig. 1 Vortex setting chamber model size diagram

收稿日期: 2022-12-27, **修回日期:** 2023-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069028)

作者简介: 顾怀猛(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 2795481375@qq.com

通讯作者: 李琳(1979-), 女, 博士、教授、博导, 研究方向为水力学及和流动力学, E-mail: lilin_xjau@163.com

为了避免出现较大误差,采用悬板倾角 $\theta=0^\circ$ 的排沙漏斗模型在进流量 $Q_0=0.079\text{ L/s}$ 时应用 PIV 粒子测速系统进行流速测量,测量结果用于数学模型及经验参数验证。

由悬板与边墙的位置关系可知当曲面悬板倾角大于 15° 时,悬板内缘高度会高于漏斗边墙,使漏斗室内水位抬高,不利于上下游衔接。因此,选取曲面悬板倾角 θ 为 $0^\circ、5^\circ、10^\circ、15^\circ$,在进流量 $Q_0=0.079\text{ L/s}$ 的条件下进行数值模拟。选用 Ansys Fluent 软件中的大涡模型(LES)^[9] 和 VOF^[10] 方法模拟排沙漏斗内水气两相三维流场。网格无关性分析表明网格数量大于 90×10^4 个后,网格数量对计算结果的影响可忽略,故本文数值模拟采用的网格数量约为 90×10^4 个。悬板水平布置时空气涡面积、溢流百分数及排沙耗水率的数值模拟结果分别为 $115.5\text{ mm}^2、85.2\%、14.8\%$,实测值分别为 $132.2\text{ mm}^2、84.8\%、15.2\%$ 。由此可看出,各指标的相对误差均较小,分别为 $2.03\text{ mm}^2、0.4\%、2.6\%$ 。图 2 为切向流速的 PIV 实测值与数值模拟计算值对比。由图 2 可发现,切向流速的实测结果与模拟结果在测线上的分布规律基本吻合。表明所采用的数学模型能较好地模拟排沙漏斗内的流场情况。

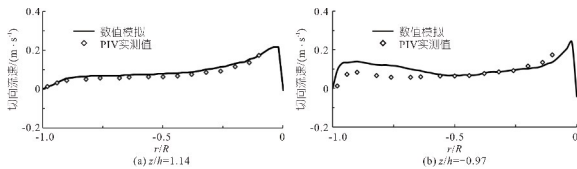


图 2 切向流速 PIV 实测值与计算值对比

Fig. 2 Comparison of measured and calculated values of tangential velocity PIV

3 结果与分析

3.1 切向流速及空气涡形态

图 3 为不同悬板倾角下排沙漏斗在不同水平

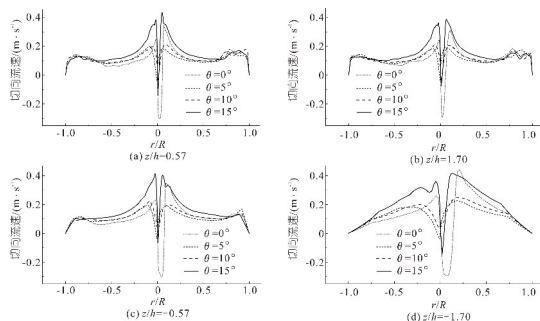


图 3 不同水平面 $x=0$ 测线上切向流速分布

Fig. 3 Tangential velocity distribution in different horizontal $x=0$ lines

面内 $x=0$ 测线上的切向流速分布,其中 z/h 为 $0.57、1.70$ 位于柱体区, z/h 为 $-0.57、-1.70$ 位于锥体区。 z 为测线所处水平高度; h 为漏斗进水涵洞的高度,其值为 8.8 mm 。由图 3 可看出,不同倾角下,切向流速沿径向的分布规律基本相同,表明悬板由平面变为曲面对排沙漏斗切向流速分布规律无影响,但倾角不同时同一点的切向流速明显不同。在柱体区 $0.1 < r/R < 0.5、-0.5 < r/R < -0.1$ 区域,水流受空气涡旋转影响,切向流速随半径的增大而减小,呈自由涡特征;在 $0.6 < r/R < 0.8、-0.8 < r/R < -0.6$ 区域内,水流受圆柱形边墙的约束作用和进水涵洞切向进流的影响,切向流速随半径的增大而增大,呈强迫涡特征。在锥体区内,边墙及切向进流的影响减弱,切向流速的分布主要呈自由涡特征。当 θ 为 $5^\circ、10^\circ$ 时,空气涡附近的切向流速小于悬板水平布置时,其他区域略有增加;当倾角增大到 15° 时,切向流速明显增加, z/h 为 $0.57、1.70$ 的平均切向流速分别约为 $\theta=0^\circ$ 时的 $1.68、1.73$ 倍。 z/h 为 $-0.57、-1.70$ 的平均切向流速分别约为 $\theta=0^\circ$ 的 $2.12、1.75$ 倍。因此,采用一定倾角的曲面悬板能增大排沙漏斗内的涡流强度,减少锥底泥沙的淤积量,其中倾角 $\theta=15^\circ$ 时涡流强度最大。

由图 3 还可看出,悬板由平面改为曲面后漏斗室内的环形低速带的范围缩小,且倾角越大,低速带范围越小,低速带内的流速越大,使得沉降的泥沙不易淤积在底板上。以 $z/h=0.57$ 为例,悬板水平布置(即 $\theta=0^\circ$)时,低速带范围为 $-0.7 < r/R < -0.4、0.35 < r/R < 0.7$,最小流速为 0.061 m/s ,而当 $\theta=15^\circ$ 时,低速带范围为 $-0.6 < r/R < -0.5、0.5 < r/R < 0.7$,最小流速为 0.11 m/s ,相较于 $\theta=0^\circ$,低速带范围缩小了 46% ,最小流速增加了 80% 。产生该现象的原因因为采用水平悬板时,悬板对其下方的水流仅有垂向约束作用,而当悬板变为曲面后,曲面悬板对其下方的水流同时兼具垂向、水平方向的约束作用。在铅垂方向,悬板对水流的垂向约束与切向进流的共同作用使进口处的水流具有较大动能,阻止粒径较大的泥沙在进口处淤积的同时,迫使粒径较小的泥沙随水流沿漏斗绕行作螺旋运动,延长其在漏斗内的停留时间。在水平方向上,曲面悬板对水流产生水平指向漏斗中心的约束作用,使切向进流和圆柱形边墙引起的强迫涡向漏斗中心移动,从而减小了漏斗中环形低速区的范围。

空气涡形态与排沙漏斗内的涡流强度关系密切,研究表明^[8]排沙漏斗内涡流强度越大,空气涡

形状越粗长且垂直贯穿漏斗底孔中心,旋流分离作用越明显,排沙耗水率越低。图 4 为各悬板倾角下漏斗内的空气涡形态。由图 4 可看出,在进流量相同的情况下,将悬板由平面变为曲面时,空气涡形态发生了变化,当 $\theta = 0^\circ$ 时,空气涡直径较小,且未贯穿底孔,这样的空气涡易摆动,极不稳定,沉降在底板上的泥沙不易排出或沉降后的泥沙在涡流扰动下再次悬浮;当悬板变为曲面悬板时,排沙漏斗内的空气涡直径增大,且垂直贯穿漏斗底孔中心,空气涡的直径及长度随倾角的增大而增大,当 $\theta = 15^\circ$ 时空气涡直径最大,呈粗长型,该形态的空气涡最稳定,空气涡周围乃至整个漏斗室内的旋流强度相对稳定,利于泥沙的沉降及沉降泥沙向排沙底孔输移。

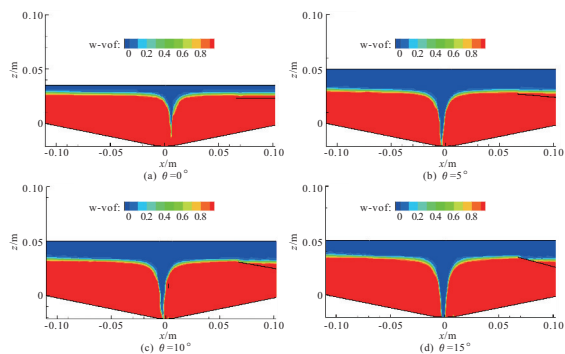


图 4 不同倾角下空气涡形态

Fig. 4 Air vortex morphology under different tapers

3.2 径向流速

图 5 为 $x=0$ 断面上不同测线的径向流速分布,径向流速指向漏斗中心为正,反之为负。由图 5 可看出,将悬板由平面改成曲面后,径向流速明显增大,且大部分区域内流速为正(即指向漏斗中心),有利于泥沙向底孔输移。锥体区径向流速明显大于柱体区,相较于悬板水平布置,锥体区的径向流速多指向漏斗中心,更有利于沉降到漏斗底

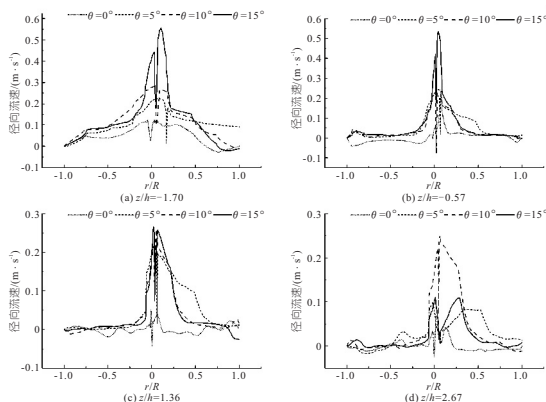


图 5 不同水平面 $x=0$ 测线中的径向流速分布

Fig. 5 Radial velocity distribution in different horizontal $x=0$ lines

板上的泥沙通过底孔排出。因此,在倾角 $\theta = 15^\circ$ 时,漏斗底板上的泥沙淤积量最小,该结果与王平圆等^[8]的试验结果一致。悬板由平面变为曲面后,在柱体区 $z/h = 1.36$ 高度上的 $0.3 < r/R < 0.7$ 及 $z/h = 2.67$ 高度上的 $0.3 < r/R < 0.8$ 区域内,径向流速的增幅较为显著。原因是倾角越大,悬板近心端越高,水流从悬板始端及末端溢流的流量比例越大,悬板表面溢流方向与漏斗室内径向流速方向相反的水流对径向流速的影响较小,故悬板下方的径向流速增大,更有利于悬板下淤积泥沙的起动和泥沙向底孔方向输移。

3.3 悬板表面流速

图 6 为不同倾角曲面悬板表面的流速矢量图。由图 6 可看出,悬板由平面改为曲面后,悬板上水流流态发生了变化。由图 6(a)可看出,平面悬板表面的流速分布较均匀,且有部分做圆周运动。而采用曲面悬板时(图 6(b)~(d))悬板表面流速增幅明显,并且曲面使水流从悬板首端和末端溢流的比例较大,悬板表面的水流方向基本指向溢流口的方向,这样会使悬浮在悬板上的细颗粒泥沙不易发生淤积,随溢出水流运动到下游,其中 $\theta = 15^\circ$ 时悬板上水流流速最大,因此在设置的倾角范围内, $\theta = 15^\circ$ 时泥沙在悬板上泥沙淤积的可能性最低。

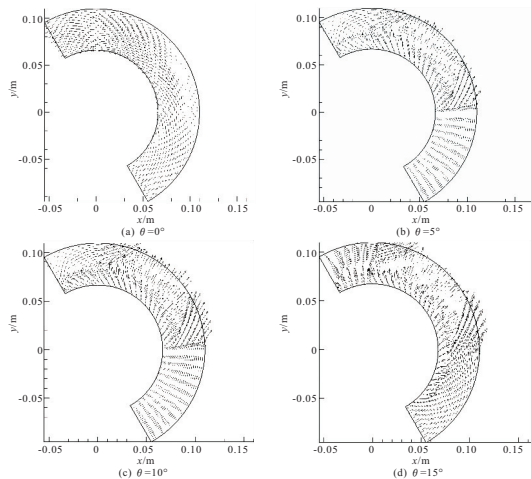


图 6 不同倾角悬板上流速矢量图

Fig. 6 Velocity vector diagram of deflector plate with different taper

排沙漏斗设置曲面悬板且倾角较大时更有利于水沙分离和提高泥沙排出率,但在实际应用时当曲面悬板倾角过大时,会抬高漏斗室内水位,使上游引水渠水位壅高,漏斗室边墙亦需加高,增加造价,上游引水渠道渠堤需加高;此外,倾角过大时,悬板所维持的半有压作用减弱。因此,实际应用时曲面悬板可适度倾斜一定角度,但不宜过大。

4 结 论

a. 曲面悬板排沙漏斗的倾角不同时漏斗内均呈现强迫涡和自由涡组合的涡流性质。漏斗内的旋流强度随着悬板倾角 θ 的增大而增强,在强迫涡和自由涡交界处形成的低流速带范围减小,在倾角 $\theta = 15^\circ$ 时,漏斗内的旋流强度最强。

b. 与水平排沙漏斗相比,曲面悬板的排沙漏斗空气涡的长度增加,且贯穿底孔,变得更为稳定;其大小和强度随曲面悬板倾角的增大而增大,在 $\theta = 15^\circ$ 时,空气涡呈粗长型贯穿底孔,直径最大。

c. 曲面悬板的漏斗内,锥体区径向流速方向基本指向排沙底孔,且相较于悬板水平放置时流速增加,有利于沉降到底板上的泥沙从底孔排出。

d. 曲面悬板有利于增大悬板上的水流流速,且悬板上的流速矢量基本指向溢流出口,不利于泥沙在悬板上淤积, $\theta = 15^\circ$ 时,悬板上流速最大,最不易淤积泥沙。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] AMIN H, MOJTABA S, MEHDI A M. Effects of

curvature submerge vane in efficiency of vortex setting basin[J]. Journal of applied research in water and waste water, 2014, 6(2): 80-85.

- [3] 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(7): 104-109.
- [4] HUANG T H, JAN C D, HSU Y C. Numerical simulation of water surface profiles and vortex structure in a vortex setting basin by using flow-3D [J]. Journal of marine science and technology, 2017, 25(5): 531-542.
- [5] 韩晓荣. 泾惠渠排沙漏斗悬板事故原因分析及设计更改[J]. 陕西水利水电技术, 2008(1): 37-39.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] DELGADILLO J A, RAJAMANI R K. Large-eddy simulation (LES) of large hydrocyclones[J]. Particulate science & technology, 2007, 25(3): 227-245.
- [10] HIET C W, NICHOLSB D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.

Influence of Inclination Angle of Curved Overflow Deflector Taper on Flow Field Characteristics of Vortex Setting Chamber

GU Huai-meng^{1,2}, WANG Yan-wen³, LI Lin^{1,2}, WANG Ping-yuan^{1,2}

- (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China;
3. Xinjiang Tacheng District Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Tacheng 834700, China)

Abstract: The flow field characteristics of vortex setting chamber(VSC) play a decisive role in its water and sediment separation performance. In order to clarify the influence of the inclination angle of the curved deflector on the flow field characteristics of VSC, the large eddy simulation and VOF method are used to study the three-dimensional flow field characteristics of the VSC when the inclination angles of the curved deflector are 5° , 10° and 15° respectively, and the flow field characteristics of the VSC with the plane deflector under the same inlet flow rate are compared. The results show that the use of curved cantilever deflector will increase the eddy current intensity in the VSC chamber and reduce the range of low velocity zone. The increase of the inclination angle can improve the stability of the air vortex, increase the strength and size of the air vortex, which is beneficial to the separation of water and sediment. The radial velocity in the cone area increases with the increase of the inclination angle, and basically points to the center of the VSC, which is conducive to the rapid transport of sediment to the bottom hole of the sediment discharge. The velocity of the overflow flow on the surface of the curved deflector is greater than that on the surface of the plane deflector, and the flow velocity on the deflector is the largest when the inclination angle is 15° .

Key words: vortex setting chamber; flow field characteristics; curved deflector; numerical simulation; large eddy simulation