

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0083

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. WU Y F, LI L. Experimental study on influence of radial slope of suspended slab on flow field of vortex settling chamber[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 162-168, 174. (in Chinese)

排沙漏斗悬板径向坡度对流场影响的试验研究

吴洋锋, 李琳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了弄清楚溢流悬板径向坡度改变对排沙漏斗流场的影响, 通过物理模型试验方法, 利用粒子图像流场测速技术(PIV)对悬板径向坡度分别为0、0.087、0.173、0.259时的排沙漏斗模型三维速度场进行了量测, 并结合排沙漏斗工作原理对各工况下的切向速度、径向速度、垂向速度及流线进行了对比分析。结果表明: 随着悬板径向坡度增加, 漏斗室内旋流强度增大, 空气涡面积增大, 排沙耗水率降低, 泥沙颗粒向室内运动机率增大, 淤积在悬板上的可能性减小; 悬板坡度对漏斗室内的二次流强度和形成位置影响较大, 其中坡度为0.173时二次流最为稳定, 坡度为0.259时, 无二次流形成, 不利于底部泥沙输移至排沙底孔; 垂向速度分布结果表明坡度为0.259时过渡区垂直向上流速较少, 泥沙落淤悬板或者随流溢出的机会最小, 但垂直速度相比切向速度和径向速度而言较小, 且过渡区范围很小, 对悬板落淤和截沙率的影响可以忽略不计。

关键词: 溢流悬板径向坡度; PIV; 流场特性; 排沙耗水率; 二次流

中图分类号: TV 673 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0162-07

Experimental study on influence of radial slope of suspended slab on flow field of vortex settling chamber

WU Yangfeng, LI Lin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to find out the influence of the change of the radial slope of overflow suspended slab on the flow field of the vortex settling chamber, through physical model tests, we used the particle image flow velocity measurement technique (PIV) to measure the three dimensional velocities of the vortex settling chamber with the radial slope of suspended slab at 0, 0.087, 0.173, and 0.259. With consideration to the working theory of vortex settling chamber, we compared and analyzed the tangential velocity, radial velocity, vertical velocity, and streamline of each working condition. The results showed that with the increase of the radial slope of the suspended slab, the swirling intensity in the vortex settling chamber increased, the air vortex area increased, the water consumption rate decreased, the probability of sediment particles moving to the interior increased, and the possibility of deposition on the suspended slab decreased. The slope of the suspended slab had a great influence on the strength and formation position of secondary flow in the vortex settling chamber. The secondary flow was the most stable at a slope of 0.173. No secondary flow was formed when the slope was 0.259, which was not conducive to the transport of bottom sediment to the bottom hole of sediment discharge. The results of vertical velocity distribution showed that when the slope was 0.259, the vertical upward velocity of transition zone was small, and there was a minimum chance of sediment silting or overflowing. However, the vertical velocity was smaller than tangential velocity and radial velocity, and the transition zone was very small. The influence of vertical velocity on the deposition and sediment interception rate of suspended slabs was negligible.

Key words: radial slope of overflow suspended slab; PIV; flow field characteristics; water consumption rate for sediment discharge; secondary flow

收稿日期: 2017-11-12 修回日期: 2017-12-21 网络出版时间: 2018-01-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180111.1551.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(59379394); 新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAU GR12016032)

Funds: National Natural Science Foundation of China (59379394); Xinjiang Agricultural University Graduate Research Innovation Project (XJAU GR12016032)

作者简介: 吴洋锋(1994), 男, 湖北荆门人, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: 632686080@qq.com

通讯作者: 李琳(1979), 女, 山东青岛人, 教授, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: lilin_xjau@163.com

排沙漏斗是一种应用非常广泛的二级泥沙处理设施^[1]。溢流悬板是排沙漏斗的重要组成部分,悬板的设置可有效防止粗颗粒泥沙在漏斗进口淤积,同时可以迫使较细的泥沙随水流沿漏斗绕行一周,在水流稳定区沉降并通过底孔排出,更有效地排除细颗粒泥沙^[2-4]。此外,设置悬板后,漏斗室内的空气漏斗有所减小,可大大减小排沙耗水量^[5-6]。近年来工程实践表明,在处理高含沙且含极细沙水流的悬沙排沙漏斗工程中时常发生悬板塌落破坏事故,致使排沙漏斗失效。如陕西泾惠渠排沙漏斗工程设计引水流量 $40 \text{ m}^3/\text{s}$, 处理最大含沙量 $200 \text{ kg}/\text{m}^3$, 泥沙处理粒径 $0.0005 \sim 0.1 \text{ mm}$, 运行过程中悬板塌落破坏,漏斗被迫停止使用^[7]。又如新疆喀什一级电站排沙漏斗工程设计引水流量 $46.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 处理最大含沙量 $347 \text{ kg}/\text{m}^3$, 泥沙处理粒径 $0.002 \sim 2 \text{ mm}$, 运行过程中悬板塌落破坏,漏斗功能丧失^[8]。有文献^[9]分析悬板塌落破坏的原因之一是传统的排沙漏斗溢流悬板为半圆形,呈水平布置,运行过程中溢流悬板上泥沙落淤量远远超出设计荷载,使悬板及其支撑系统失稳而坍塌。优化悬板布置形式减少泥沙落淤量使悬板正常发挥其功能是保证排沙漏斗有效处理悬移质泥沙亟待解决的问题。

近二十年来,有许多学者对排沙漏斗进行研究。周著等^[10]通过模型试验和原型观测结果分析了排沙漏斗的排沙原理和排沙效果。侯杰^[11],王顺久^[12],邱秀云^[13],唐毅^[14]对排沙漏斗模型流场进行了研究,揭示流场特性对泥沙分离和输移的影响机制,认为切向流速主要起维持涡旋强度的作用,向下的轴向速度和指向中心的径向速度起促进泥沙的沉降和向排沙底孔输运的作用。显然,排沙漏斗三维流场特性对其泥沙沉降速率、截除率和排沙耗水率有着重要影响。为了解决悬沙排沙漏斗悬板上的泥沙落淤问题,文章提出将悬板由水平放置改为沿径向向漏斗中心倾斜放置,使悬板在径向形成一定坡度,以期减少泥沙落淤于悬板。但悬板径向坡度改变如何影响排沙漏斗三维流场进而如何影响排沙效果和排沙耗水率的研究尚未开展相关研究。因此,文章通过系列试验应用 PIV 对溢流悬板径向坡度不同的排沙漏斗内三维速度场进行了量测,基于量测结果分析悬板径向坡度变化对漏斗室内三维流场的影响,为优化悬板布置提供参考。

1 试验模型及方案

1.1 试验模型

喀什一级电站排沙漏斗工程是处理悬移质泥沙

的二级排沙设施,原型观测结果表明该排沙漏斗对粒径为 0.002 mm 以上的泥沙截除率可达 70% 。因此,文章以该漏斗工程为原型,依据重力相似准则设计模型。模型几何比尺为 $1:273$,原型校核流量为 $57.1 \text{ m}^3/\text{s}$,漏斗直径为 60 m 、漏斗室底坡 $1:5$,排沙底孔孔径 1.5 m 。制作全透明有机玻璃的排沙漏斗模型,其中进水矩形涵洞宽 44 mm ,高 88 mm ,漏斗直径 220 mm ,锥底坡度 $1:5$,底孔直径 5.5 mm ,溢流悬板置于进水涵洞上方距离进水涵洞顶部 14.45 mm ,悬板宽度为 44 mm ,长度为漏斗半周长。试验中将悬板自漏斗边墙向漏斗室中心倾斜,使其在径向形成一定坡度 i ,具体布置形式见图 1。模型进流量 $Q = 0.079 \text{ L}/\text{s}$,悬板径向坡度 i 分别为 $0, 0.087, 0.173, 0.259$ 。

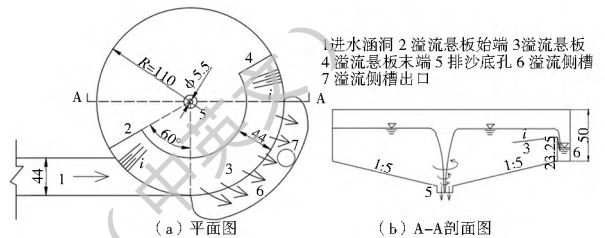


图 1 排沙漏斗模型(单位: mm)

Fig. 1 The model of vortex settling chamber (unit: mm)

1.2 试验方案

试验采用北京尚水信息技术股份有限公司自主研发的 PIV 测速系统,由 CCD 采集相机、光源组件和同步控制器组成^[15-19]。其中,CCD 采集相机的测速范围为 $0 \sim 1000 \text{ m}/\text{s}$,分辨率最大为 2320×1726 像素。光源组件包括连续激光器和棱镜,其中连续激光器工作波长 532 nm ,功率 5 W ,功率稳定性为 5% ,棱镜采用带机械件的 60° 鲍威尔棱镜,可使激光束通过后最优化地划成光密度均匀、稳定性好、直线性好的直线。使用同步控制器精确控制两个相机的采集频率和曝光时间。为满足 PIV 测量要求,在排沙漏斗模型的外侧罩上一个方形透明的有机玻璃盒子,里面装满与试验相同的工作介质^[20-22]。

试验选用的 PIV 专用示踪粒子主要成分为 SiO_2 ,粒径约为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,密度约为 $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。示踪粒子的尺度足够小且与被测流体的比重相差不大,其形状接近球形,具有足够高的散射率。示踪剂撒布浓度为 $8 \text{ mg}/\text{L}$,示踪粒子分布均匀、流动跟随性高,其运动能真实反映流体运动状态,试验系统为循环系统。进流量 Q_0 、溢流流量 Q_1 均由称重法测得。

在悬板径向坡度不同时,分别对排沙漏斗的不同水平测试面及径向测试面进行二维 PIV 拍摄。根据装置的几何结构以及 PIV 系统中 CCD 相机的

视场大小要求, 拍摄水平面时 CCD 相机轴线垂直于排沙漏斗的水平测试面, 柱体的中心轴线垂直于激光片光, 相机镜头与被拍摄的面之间的距离约为 $60\text{ cm}^{[23]}$ 。以排沙漏斗进水渠底所在水平面 $z = 0\text{ mm}$ 为基准面, 选择 $z = 24\text{ mm}$ 、 $z = 10\text{ mm}$ 、 $z = -8.5\text{ mm}$ 作为水平测试面 (见图 2(a))。拍摄垂直测试面时激光片光面通过排沙漏斗中心轴线, 选取以 x 正半轴绕中心轴逆时针旋转 90° 、 270° 后所在的垂直面为测试面 (见图 2(b)、(c))。在每个试验工况下, CCD 相机拍摄 200 张示踪粒子图像, 然后在 PIV 后处理计算系统里对其进行互相关计算, 对 200 张测试结果取平均, 并通过 Tecplot 进行数据的显示和提取。

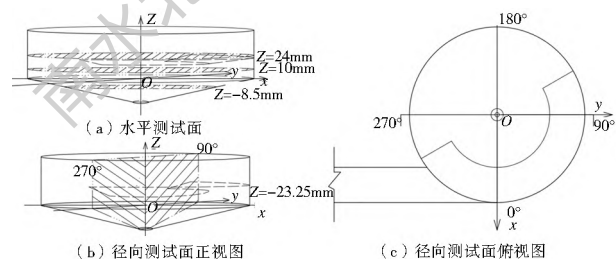


图 2 测试面位置

Fig. 2 Location of the measurement planes

2 试验结果及分析

2.1 水平测试面流速

悬板径向坡度 i 不同时水平测试面 $z = 24\text{ mm}$ 、 -8.5 mm 的 x, y 方向速度 u, v 的合速度 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ 的速度及流线如图 3、图 4 所示。图中 r/R

为测点所在径向位置与漏斗室半径的比值。因受壁面圆弧边界的限制, 测点不能刚好布置于边界上, 导致了图 3、图 4 中流场边界上及其附近处流场速度缺失, 流场边界呈折线型, 但由于壁面边界附近处流场同时受壁面激光反射光的影响较大, 因此本文不考虑边界附近处流场速度的缺失影响。从图 3、图 4 可以看出, 漏斗室内平面旋流速度随 i 增大而增大。受漏斗中心空气涡旋转影响的旋流环状区域面积和流速均随 i 的增大而增大。如平面 $z = 24\text{ mm}$ 、 -8.5 mm 上, 空气涡边缘处的速度值由 0.22 m/s 、 0.28 m/s ($i = 0$) 增至 0.36 m/s 、 0.36 m/s ($i = 0.259$), 增加了 64% 和 29% ; 位于平面 $z = 24\text{ mm}$ 的漏斗近边墙区的合速度值由 0.17 m/s 增至 0.25 m/s 增加了 47% 。不同坡度 i 下, 悬板末端出口处的低速区 (图 3(a) 中 A) 面积随着 i 的增大而减小。 $i = 0$ 时, 空气涡外围为环形低速带 (见图 3(a) $0.3 < r/R < 0.5$) 合速度约为 0.084 m/s , 随着 i 增大该区域速度增大, 如 $i = 0.259$ 时合速度约为 0.143 m/s , 与 $i = 0$ 相比增加了 70% 。

悬板径向坡度增加, 漏斗室内旋流强度随旋流速度增加而增强, 离心惯性力增加, 有利于水沙离心分离。与 $i = 0$ 时相比较, $i > 0$ 后悬板及其上方水体作用于悬板下方水体的垂向和径向约束增强, 减少了水流沿径向向中心和沿垂向向上的扩散, 离心力作用增强, 使水流经有压涵洞进入漏斗室后继续保持较大旋转速度有压运行, 有利于维持水流旋流强度。如试验中进水涵洞内的速度为 0.2 m/s , $i = 0$ 和 0.259 时,

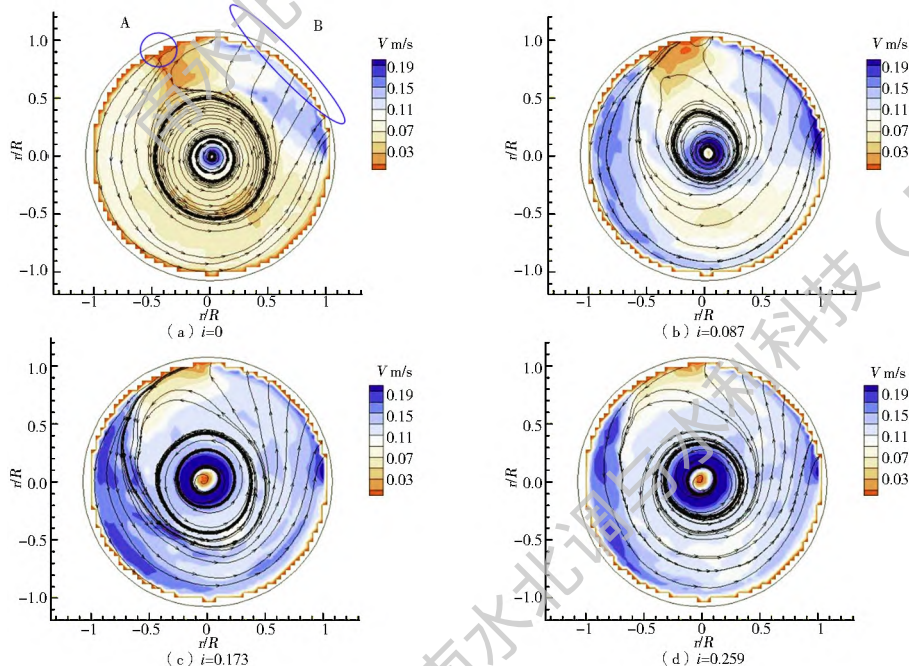


图 3 不同工况时平面 $z = 24\text{ mm}$ 流速云图及流线图

Fig. 3 The velocity contours and stream lines of plane $z = 24\text{ mm}$ under different working conditions

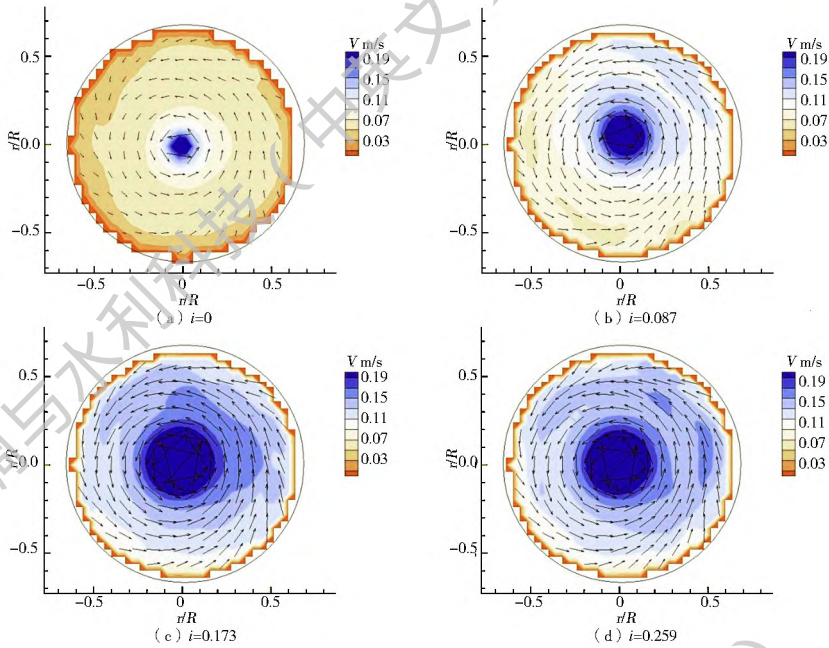


图4 不同工况时平面 $z = -8.5 \text{ mm}$ 流速矢量及云图

Fig. 4 The velocity vectors and contours of plane $z = -8.5 \text{ mm}$ under different working conditions

悬板下方水流平面旋转合速度为 0.16 m/s 和 0.18 m/s 。 $i > 0$ 悬板上方水体受到了悬板的支持力, 支持力的水平分力与离心力方向相反, 与径向的压力差方向一致, i 越大悬板上方的压力体越重, 指向中心的水平分力和沿斜面向下的垂直分力越大, 与 $i = 0$ 相比, $i > 0$ 时泥沙颗粒在水平分力和垂直分力作用下向室内运动机率增大, 淤积在悬板上的可能性减小。

试验量测中发现排沙底孔孔径和进流量保持不变, 空气涡位置基本位于漏斗中心, 悬板坡度的改变对其影响较小, 但是空气涡的面积随悬板径向坡度的增大而增大, 排沙耗水率随其增大而减小。如空气涡面积(xoy 平面)由 $i = 0$ 时的 113 mm^2 增加至 $i = 0.259$ 时的 380 mm^2 , 增加了 236% (见表 1)。

表 1 排沙耗水率

Tab. 1 The water consumption rate for sediment discharge

| 溢流悬板 径向坡度 i | 溢出水百分数 $Q_1/Q_0(\%)$ | 空气涡 面积/ mm^2 | 排沙耗水率 $1 - Q_1/Q_0(\%)$ |
|------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0 | 84.8 | 113.21 | 15.2 |
| 0.087 | 86.1 | 200.96 | 13.9 |
| 0.173 | 87.4 | 346.38 | 12.6 |
| 0.259 | 88.6 | 380.65 | 11.4 |

从图 3 所示的流线可以看出, 排沙漏斗溢出水流(图 3(a)中 B 区)主要由 I、II 两部分组成, I 部分是指经悬板末端发出并沿近边墙区($0.95 < r/R < 1$)逆时针旋转运动约 270° 后至溢流口后溢出的水流, II 部分是指进入漏斗室中心区域($0.3 < r/R <$

0.5)做旋转运动后经溢流口溢出的水流。当 $i = 0.087, 0.173$ (如图 3(b)、3(c))时, 经溢流口流出的水流 $64\%、100\%$ 是由 I 部分组成。当 $i = 0$ 和 0.259 (如图 3(a)、3(d))时经溢流口流出的水流 90% 由 II 部分组成, 水流在漏斗室内逆时针旋转数圈后经溢流口流出, 水流在漏斗内旋转路径长, 有利于延长泥沙在排沙漏斗内的停留时间, 使其被分离机会增加。

2.2 径向测试面流速

选取典型工况下 90° 断面和 270° 径向断面垂向速度 w 和径向速度 v 的合速度 $\sqrt{w^2 + v^2}$ 矢量如图 5、图 6 所示。图中 Z/H 表示测点所在 z 轴位置与漏斗室高度(自底孔至漏斗顶部的距离)的比值。从图中可以看出, 与前人研究结果^[24]一致, 当 $i = 0$ 时, 90° 断面上受悬板溢出水流的影响, 水流在大部分区域有向上的垂向速度和指向边壁的径向速度, 悬板上方径向流速达到最大。悬板下方受二次流的影响表现出靠近底板区域速度较大, 且受底坡影响愈靠近锥体排沙底孔速度越大(如图 5(a)), 二次流是排沙漏斗将通过离心分离至边墙附近和重力沉降到底板处的泥沙排出的关键^[25]。当 i 从 0 增大至 0.259 , 垂直面上合速度随之增大, 二次流位置和强度随之变化。当 $i = 0.259$ 时, 90° 和 270° 断面上均无二次流现象, 受悬板向漏斗中心倾斜的影响, 悬板近区径向流速均指向边壁, 不利于泥沙排出; 270° 断面上底板附近速度矢量较大且指向排沙底孔, 但是其余区域的速度矢量水平指向圆心, 不利于泥沙沉降和离心分离。 $i = 0.173$ 的 90° 和 270° 断面上二次流强度和范围较 $i = 0$ 明显

增加,断面上靠近空气涡附近的大部分径向速度在离心力作用下背离圆心,在 90° 断面上受悬板下方指向圆心的速度的影响在近悬板区域出现回流漩涡,

延长了泥沙停留时间。在 270° 断面上形成稳定的二次流,且二次流强度明显大于 $i=0$ 工况,有利于延长泥沙停留时间和加速底部泥沙排出。

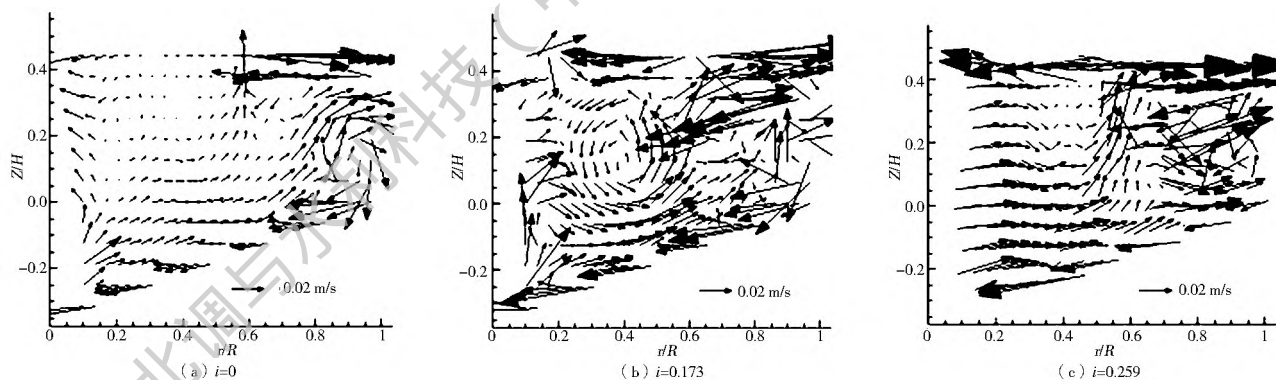


图 5 悬板径向坡度不同时 90° 断面流速矢量图

Fig. 5 The velocity vectors of section 90° under different radial slopes of suspended slab

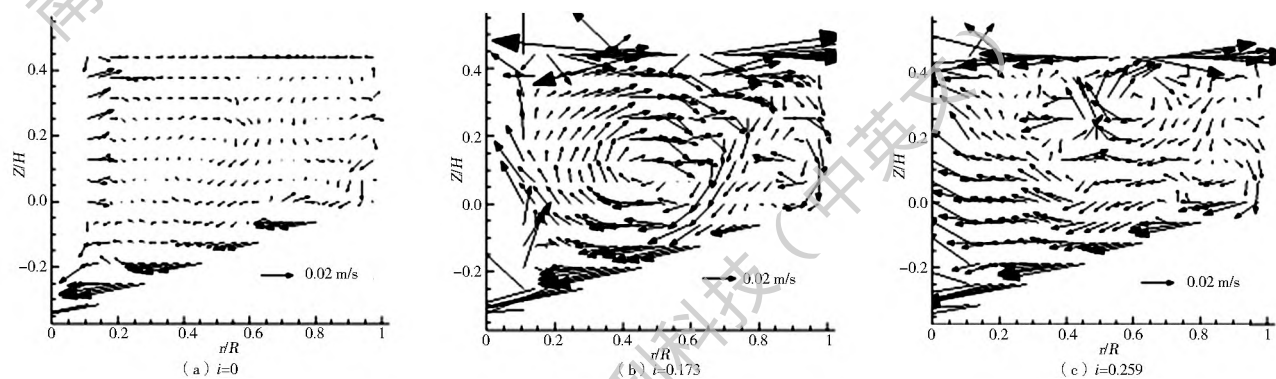


图 6 悬板径向坡度不同时 270° 断面流速矢量图

Fig. 6 The velocity vectors of section 270° under different radial slopes of suspended slab

2.3 典型测线速度分布

不同悬板径向坡度时排沙漏斗典型测线的切向和垂向速度如图 7、图 8 所示。图 7 为不同水平测试面上 $x=0$ 测线上的切向速度,规定切向速度逆时针旋转为正。由图中可以看出,悬板径向坡度改变对漏斗室内的涡流特征无影响,不同 i 时,同一水平面上的涡流特征相同。但是在相同 i 时,漏斗柱体区 ($z=10\text{ mm}$) 和锥体区 ($z=-8.5\text{ mm}$) 表现出的涡流特征不相同。柱体区内, $0 < r/R < 1$, 涡流呈现出明显的自由涡 ($0.15 < r/R < 0.5$) 和强迫涡 ($0.5 < r/R < 0.85$) 组合; $-1 < r/R < 0$, 在自由涡 ($0.1 < r/R < 0.3$) 和强迫涡 ($0.55 < r/R < 0.85$) 之间有一中间区域 ($0.3 < r/R < 0.55$) 的切向速度随着 r 的增加保持不变,且速度较小,离心力也较小,该区内水体类似于刚体做旋转运动。而在锥体区内,切向速度随半径增大而单调减小,呈现自由涡特征。因此,含沙水流在柱体区内受空气涡和切向进流的共同作用下做旋转运动,泥沙因密度大向边墙处运动,以离心分离为主。在锥体区切向进流对其影响很小,越靠近边壁切向流速越小,离心力越小,

压差力起主要作用,在二次流作用下下沉至底部的泥沙被输运至排沙底孔。

图 8 为 90° 和 270° 径向测试面在 $z=22.4\text{ mm}$ 测线上的垂向速度,其中 $r/R > 0$ 和 $r/R < 0$ 分别为 90° 和 270° 一侧的垂向速度,速度大于 0 表明水流沿 z 轴正方向运动,否则,沿负方向运动。从图中可以看出,在 $0.2 < r/R < 0.4$ 区域内,不同工况下垂直速度几乎为 0,表明受漏斗中心快速旋转的空气涡影响该区域内水流做平面剪切运动。同样在 $0.6 < r/R < 1.0$ 区域内,受悬板的垂直约束近壁区水流出出现较小的向上的垂向流速,除 $i=0.259$ 工况外,其余工况最大垂向速度不超过 $\pm 5\text{ mm/s}$,也可视为二维剪切流区域,因此进入剪切流区域内的泥沙颗粒悬浮溢出的可能性很小,这一现象和结论与文献 [26] 一致。但是在以上两区域之间有一过渡区 ($0.4 < r/R < 0.6$),切向进流和空气涡旋转惯性力对其影响均较小,除 $i=0.259$ 工况外,其他工况垂向流速由约为 0 陡增至峰值 30 mm/s ($i=0.173$),且方向向上,进入该区域的泥沙随水流溢出的可能性很大。受漏斗进流和出流不对称性影响, 270° 测面垂

向速度与 90° 不完全相同,但是沿径向也可分为剪切流区域($-0.5 < r/R < -0.1$ 和 $-1 < r/R < -0.8$)和过渡区($-0.5 < r/R < 0.8$)。从图中可以明显看出, $i=0$ 时,在无悬板一侧过渡区不存在,但在有悬板一侧过渡区垂向流速较大,与 $i=0.087$, 0.173 一致。而 $i=0.259$ 时,在有悬板一侧和无悬

板均无过渡区,与其他工况相比,在有悬板一侧过渡区域内垂直向上流速较少。所以区别于其他工况而言, $i=0.259$ 经过渡区泥沙随水流溢出或落淤悬板的机会最小。但由于过渡区范围较小,加之垂直速度相对于切向速度而言较小,对排沙漏斗截除率的影响较小。

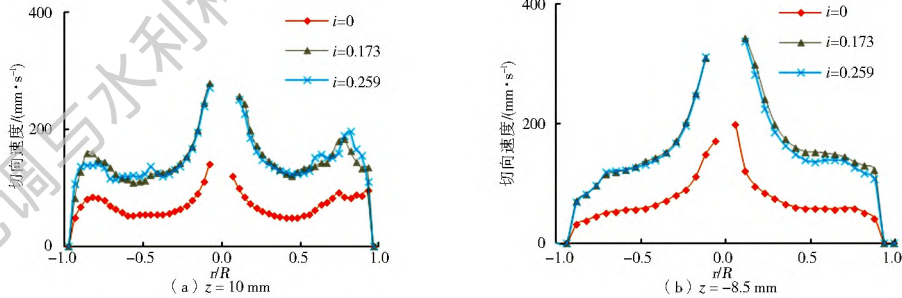


图7 不同水平测试面上 $x=0$ 测线上的切向速度

Fig. 7 The tangential velocity distribution of $x=0$ survey line in different horizontal test planes

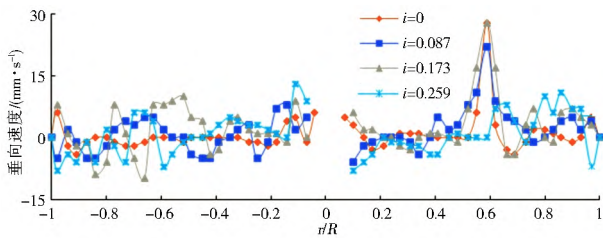


图8 $z=22.4$ mm 测线的垂向速度分布

Fig. 8 The vertical velocity distribution of $z=22.4$ mm survey line

3 结论与展望

文章研究了悬板径向坡度对排沙漏斗内流场的影响,通过PIV测量不同悬板径向坡度下排沙漏斗内水平测试面、径向测试面、典型测线的速度分布,对比分析悬板径向坡度改变对排沙漏斗的截沙率、排沙耗水率和水沙分离的影响,主要得出以下结论。

(1)悬板径向坡度改变对漏斗室内的涡流特征无影响,不同 i 时,同一水平面上的涡流特征相同。柱体区流场是强迫涡和自由涡的耦合,锥体区内为自由涡。悬板径向坡度改变对空气涡的位置基本无影响,但空气涡面积随悬板坡度增大而增大,排沙耗水率减小。

(2)随着 i 的增大,漏斗室内旋流强度随切向速度增大而增强,离心惯性力增加,有利于水沙分离。悬板坡度增大,作用于悬板上方的水体指向漏斗中心的水平分力和沿悬板向下的垂直分力越大,泥沙颗粒在水平分力和垂直分力作用下向室内运动机率增大,淤积在悬板上的可能性减小。

(3)悬板径向坡度改变影响了水流在漏斗内的运动路径,水流溢出前在漏斗室内的运动路径随 i 从0增大至0.259而随之增长,有利于延长泥沙在

排沙漏斗内的停留时间,使其被分离机会增加。

(4)悬板径向坡度改变对径向测试面中二次流的强度和位置影响较大, $i=0.173$ 时,二次流强度较其它 i 下的大,可加速底部泥沙的输出,提高截沙率。 $i=0.259$ 时, 90° 和 270° 断面上均无二次流形成不利于泥沙排出。

(5)垂向速度分布结果表明坡度为0.259时过渡区垂直向上流速较少,泥沙落淤悬板或者随流溢出的机会最小,但垂直速度相比切向速度和径向速度而言较小,且过渡区范围很小,对悬板落淤和截沙率的影响可以忽略不计。

文章仅从清水流场的角度从理论上分析了悬板径向坡度改变后排沙漏斗内三维流场特性的变化对水沙分离效果的影响,文章的结论尚需要通过浑水模型试验进行验证。

参考文献(References):

[1] 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.(ZHOU Z, QIU X Y, HOU J, et al. The total sand flushing funnel and application[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(1): 95-98. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2001.01.016.

[2] 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,(04):56-60.(TANG Y, WU C G, ZHOU Z. 3-D flow field in funnel sluice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, (04): 56-60. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.1999.04.011.

[3] 谭冬初.排沙漏斗的水力分析计算[J].水动力学研究与进展(A辑),1999,(2):176-183.(TAN D C. Hydraulic analysis and calculation of sand funnel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1999, (2): 176-183. (in Chinese)) DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.1999.02.007.

- [4] 刘善均, 张建民, 曲景学, 等. 排沙漏斗优化及输沙特性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003(4): 6-9. (LIU S J, ZHANG J M, QU J X, et al. Experimental investigation on sediment transport of sand funnel[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003(4): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2003.04.002.
- [5] 李琳, 牧振伟, 周著. 排沙漏斗截沙率计算[J]. 水利水电科技进展, 2007(4): 50-54. (LI L, MU Z W, ZHOU Z. Calculation of sediment rate of sand funnel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007(4): 50-54. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.jssn.10067647.2007.04.014.
- [6] 李琳. 排沙漏斗结构优化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005. (LI L. Study on structure optimization of vortex sediment funnel[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2005. (in Chinese))
- [7] 屈百平, 刘进步. 泾惠渠排沙漏斗工程设计特点[J]. 陕西水利水电技术, 2004(2): 55-57, 64. (QU B P, LIU J B. The design features of Jinghuiqu funnel engineering[J]. Shaanxi water conservancy and hydropower technology, 2004(2): 55-57, 64. (in Chinese))
- [8] 邓宏荣. 喀什一级电站排沙漏斗工程悬移质泥沙水文测验与分析[J]. 四川水利, 2015(4): 5F-54. (DENG H R. Hydrologic measurement and analysis of suspended sediment in the funnel project of Kashi first stage power station[J]. Sichuan water resources, 2015(4): 5F-54. (in Chinese))
- [9] 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. (HAN X R. Cause analysis and design change of suspended plate of sand funnel in Jing Hui River[J]. Shaanxi water conservancy and hydropower technology, 2008(1): 37-39. (in Chinese))
- [10] 周著, 王长新, 侯杰. 强螺旋排沙漏斗的模型试验和原型观测[J]. 水利水电技术, 1991(11): 44-48. (ZHOU Z, WANG C X, HOU J. model test and prototype observation[J]. water conservancy and hydropower technology, 1991(11): 44-48. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.1991.11.013.
- [11] 侯杰, 王顺久, 周著, 等. 全沙排沙漏斗浑水流域特性及输沙规律[J]. 泥沙研究, 2000(6): 63-68. (HOU J, WANG S J, ZHOU Z, et al. The characteristics and sediment transport of sand drainage funnel in all sand. [J]. Sediment research, 2000(6): 63-68. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2000.06.010.
- [12] 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. (WANG S J, ZHOU Z, HOU J, et al. Experimental study on flow characteristics of the sand funnel and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7): 104-109. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2002.07.019.
- [13] 邱秀云, 侯杰, 周著. 排沙漏斗的流场特性及输沙机理[J]. 中国农村水利水电, 1999(4): 3-5. (QIU X Y, HOU J, ZHOU Z. Characteristics and sediment transport mechanism of sand funnel[J]. China Rural Water and Hydropower, 1999(4): 3-5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.jssn.10072284.1999.04.002.
- [14] 唐毅, 吴持恭, 周著. 设导流墩排沙漏斗清水流场的测试研究[J]. 实验力学, 1997(4): 72-79. (TANG Y, WU C G, ZHOU Z. A test study on flow field with diversion pier sand funnel [J]. Journal of Experiments Mechanics, 1997(4): 72-79. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.1997.01.003.
- [15] 孙姣, 张宾, 唐湛棋, 等. 旋转圆柱绕流的PIV实验研究[J]. 实验流体力学, 2016, 30(1): 81-90. (SUN J, ZHANG B, TANG Z Q, et al. Experimental study on the flow past a rotating cylinder with PIV[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(1): 81-90. (in Chinese)) DOI: 10.11729/sytlx20150037
- [16] 施卫东, 季磊磊, 李伟, 等. 不同流量工况下斜流泵内部流场PIV试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 27-33. (SHI W D, JI L L, LI W, et al. PIV experiment on internal flow field of mixed flow pump under different flow conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 27-33. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.10001298.2016.06.004.
- [17] 张桂夫, 王鲁海, 朱雨建, 等. 基于PIV测量的涡轮流量计响应分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2381-2387. (ZHANG G F, WANG L H, ZHU Y J, et al. Turbine flowmeter response analysis based on PIV measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2381-2387. (in Chinese))
- [18] 胡建军, 张锋, 李志显, 等. 带有自发射流的涡轮叶顶间隙流场PIV测量[J]. 动力工程学报, 2016, 36(11): 870-876. (HU J J, ZHANG D, LI Z X, et al. Measurement of tip clearance flow with spontaneous tip injection using PIV technology[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2016, 36(11): 870-876. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.16747607.2016.11.003.
- [19] 周梦君, 毛辉辉, 封亚, 等. 2×2棒束通道格架混翼横向往流场PIV实验研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(4): 133-137. (ZHOU M J, MAO H H, FENG Y, et al. PIV experiment research of lateral flow field in 2×2 rod bundles channel with mixing vane grids[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(4): 133-137. (in Chinese)) DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.04.0133.
- [20] 邹帅, 徐加辉, 周杰, 等. 中雷诺数圆柱、方柱绕流PIV试验对比研究[J]. 机械设计与制造, 2016(6): 81-84. (ZOU S, XU J H, ZHOU J, et al. Experimental and comparative study on the flow past a circle and square cylinder at moderate reynolds numbers[J]. Mechanical Design & Manufacture, 2016(6): 81-84. (in Chinese)) DOI: 10.19356/j.cnki.10073997.2016.06.023.
- [21] 冯俊杰, 毛玉红, 叶强, 等. Taylor Couette 流场特性的 PIV 测量及数值模拟[J]. 实验流体力学, 2016, 30(2): 67-74. (FENG J J, MAO Y H, YE Q, et al. PIV measurement and numerical simulation of Taylor Couette flow[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(2): 67-74. (in Chinese)) DOI: 10.11729/sytlx20150091.
- [22] 肖俊, 邱秀云, 周著, 等. 应用 PIV 技术测试浑水水力分离清水装置的清水流场流动特性[J]. 水利水运工程学报, 2006(1): 54-58. (XIAO J, QIU X Y, ZHOU Z, et al. Application of PIV test of muddy water, hydraulic separation device water flow characteristics of water flow[J]. Hydro Science and Engineering, 2006(1): 54-58. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2006.01.011.

(下转第174页)

- [15] 张靖, 拾兵, 薛旖云. 糙率变化对明渠水深影响的探讨[J]. 人民黄河, 2012, 34(9): 121-122. (ZHANG J, SHI B, XU E Y. Discussion on the influence of roughness variation to the open channel flows[J]. Yellow River, 2012, 34(9): 121-122. (in Chinese))
- [16] 拜亚茹. 人工渠道糙率系数影响因素的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(4): 230-232. (BAI Y R. Experiment on influence factors on roughness coefficient of artificial channel[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(4): 230-232. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.04.047.
- [17] BECKER L, YEH W W G. Identification of parameters in unsteady open channel flows[J]. Water Resources Research, 1972, 8(4): 956-965.
- [18] BECKER L, YEH W W G. Identification of multiple reach channel parameters[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 326-335.
- [19] 金忠青, 韩龙喜, 张健. 复杂河网的水力计算及参数反问题[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1998, 13(3): 280-285. (JIN Z Q, HAN L X, ZHANG J. Hydraulic calculation and inverse problem of complex river network[J]. Journal of Hydrodynamics, 1998, 13(3): 280-285. (in Chinese))
- [20] 董文军, 姜亨余, 喻文焕. 一维水流方程中曼宁糙率的参数辨识[J]. 天津大学学报, 2001, (2): 201-204. (DONG W J, JIANG H Y, YU W H. Parameter identification of manning roughness in one-dimensional flow equation[J]. Journal of Tianjin University, 2001, (2): 201-204. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0493-2137.2001.02.017.
- [21] 程伟平, 毛根海. 基于带参数的卡尔曼滤波的河道糙率动态反演研究[J]. 水力发电学报, 2005(2): 123-127. (CHENG W P, MAO G H. Study on channel friction parameter inversion based on Kalman filter with unknown parameter vector[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005(2): 123-127. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2005.02.027.
- [22] 张潮, 毛根海, 张士乔, 等. 基于数据挖掘的河网糙率直接反演方法[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 108-112. (ZHANG C, MAO G H, ZHANG T Q, et al. Direct inversion method of river network roughness based on data mining[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 108-112. (in Chinese))
- [23] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer Verlag, 1995.
- [24] 王磊. 基于主成分分析的支持向量机回归预测模型[J]. 信息技术, 2008(12): 58-59. (WANG L. Regression forecast model of support vector machine based on principal component analysis[J]. Information Technology, 2008(12): 58-59. (in Chinese)) DOI: 10.13274/j.cnki.hdzt.2008.12.050.
- [25] 吴思. 人工渠道糙率与明渠流态关系的试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. (WU S. Experimental study on the relationship between roughness of artificial channel and flow regime of open channel[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. (in Chinese))
- [26] CORTES C, VAPNIK V. Support vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.

(上接第 168 页)

- [23] 王小兵, 刘扬, 崔海清, 等. 水力旋流器内部流体流动特性 PIV 实验[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 143-149. (WANG X B, LIU Y, CUI H Q, et al. A PIV experimental study on fluid flow characteristics in hydrocyclone[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 143-149. (in Chinese))
- [24] 肖柏青, 罗麟, 周著, 等. 排沙漏斗流场的大涡模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(3): 30-35. (XIAO B Q, LUO L, ZHOU Z, et al. Large eddy simulation of flow in a vortex settling chamber[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 30-35. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.03.019.
- [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. (XIAO B Q, RONG G W. Study on flow field characteristics of vortex settling chamber and its sediment removal mechanism[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(2): 232-238. (in Chinese)) DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.02.013.
- [26] MASHAURI, DAMAS. A review of the tea cup effect and removal of suspended solids from water[J]. Progress Multidisciplinary Research Journal, 2011, 1(1): 72-85.