

体型参数对旋流排沙渠道水沙特性的影响

南军虎,代江龙,李伟,汪超群,马康宁

(兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃兰州 730050)

摘要:为明确关键体型参数对渠道和排沙洞内水沙特性的影响,在模型试验研究的基础上开展了旋流排沙渠道的水沙两相流数值模拟。结果表明:起旋室高度对截沙率影响较为显著,最大相差5.41%;排沙洞直径、倾角和起旋室出口宽度对分流比影响显著,最大相差8.13%,增大倾角后改善了原排沙洞封闭端因壁面条件影响而产生的泥沙淤积;起旋室出口宽度对渠道内水沙特性基本无影响;不同体型下旋流排沙渠道均可高效、持续排沙,截沙率均大于90%,经过起旋室后,高含沙水流从排沙洞流出,下游渠道含沙量急剧减小。

关键词:旋流排沙渠道;体型参数;水沙特性;截沙率;数值模拟

中图分类号:TV91

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)03-0064-09

Influence of shape parameters on characteristics of water and sediment in desilting channel with swirling flow//
NAN Junhu, DAI Jianglong, LI Wei, WANG Chaoqun, MA Kangning(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To clarify the influence of key shape parameters on the characteristics of water and sediment in the channel and sediment transport pipe, numerical simulations of the water and sediment two-phase flow in the desilting channel with swirling flow were conducted based on the model experimental test. The results show that the height of the swirling flow generator significantly affects the sediment trapping efficiency, with a maximum difference of 5.41%. The diameter and inclination angle of the sediment transport pipe, and the outlet width of the swirling flow generator have significant influences on the split ratio, with a maximum difference of 8.13%. Increasing the inclination angle improves the sediment accumulation caused by wall conditions at the closed end of the sediment transport pipe. The outlet width of the swirling flow generator has no evident effect on the characteristics of water and sediment in the channel. The desilting channel with swirling flow can discharge sediment efficiently and continuously in all types of desilting channels, with sediment trapping efficiency greater than 90%. After passing through the swirling flow generator, the water with high sediment content flows out of the sediment transport pipe, and the sediment content in the downstream channel decreases sharply.

Key words: desilting channel with swirling flow; shape parameter; water-sediment characteristics; sediment trapping efficiency; numerical simulation

我国水资源总量丰富,但空间分布不均。渠道引水用于工农业生产是水资源调度 and 利用的一种普遍方式。然而,黄河等河流具有“水少、沙多、水流挟沙量大”等突出特征^[1]。引水时水流中的泥沙带来的渠道淤堵、过流能力减小、水泵叶片磨蚀等问题不可避免,而清淤引起的大量耕地占压、周边土地沙化、生态环境恶化等问题^[2]也非常突出。在黄河流域生态保护和高质量发展的大背景下,水沙分离问题成为引水工程中的研究热点。

在渠道内布设排沙涡管是解决渠系泥沙问题的

方法之一^[3],即在渠道底部埋设一根顶部敞开的涡管,涡管轴线与渠道水流流向成一定角度,渠道底部高含沙水流经涡管顶部开口流入涡管,在涡管内形成螺旋流,利用螺旋流排除渠道底部推移质泥沙和部分粗粒径的悬移质泥沙^[4-5]。排沙涡管因具有排沙效率高、耗水量少、结构简单、施工方便等优点而得到广泛研究和应用^[6],如张开泉等^[7]通过对排沙涡管推移质泥沙机理进行分析及试验研究,提出了悬移质涡管排沙的计算方法,并成功应用于沙湾县金沟河渠首水电站沉沙池的设计上^[8]。但不同技

基金项目:国家自然科学基金项目(52069011);甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2023CXZX-444);兰州市青年科技人才创新项目(2023-QN-33)

作者简介:南军虎(1985—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:nanjh08@126.com

术有各自的特点,研究表明排沙涡管需要布置在带有坡度的渠道上,且在渠道相对水深大于0.4时才能产生较高强度的螺旋流^[9-10];当水流的弗劳德数 Fr 介于0.7~1.2之间时,截沙率高于75%,分流比低于15%,但 Fr 超出此范围后排沙涡管排沙效果较差,开口较大时也易造成泥沙淤积^[11-13]。

旋流排沙渠道是基于旋转水流强挟沙力的特点提出的一种渠道排沙新技术^[14],其在排沙涡管的基础上设置断面逐渐缩小的起旋室将渠道与排沙洞相连接,渠底高含沙水流在重力作用下进入起旋室,利用起旋室落差在排沙洞内形成流速较渠道内更高的旋转水流,旋转水流的强挟沙力将渠底推移质泥沙转化为悬移质并排出排沙洞,从而实现水沙分离的目的。南军虎等^[15]基于反向神经传播网络、径向基函数神经网络和响应面法对旋流排沙渠道水力特性进行了预测,采用正交数值试验方法对旋流排沙渠道体型进行了优化^[16],并通过试验研究的方法探究了不同来流条件下旋流排沙渠道的排沙、余沙及淤沙特性,分析了截沙率的变化规律^[17];上述研究同时也表明该技术的地域适应性强,结构简单,能实现持续排沙,可用于渠道内推移质泥沙和较粗颗粒的悬移质泥沙的分选。

然而,作为一种水沙分离新技术,体型参数对旋流排沙渠道水沙特性的影响尚不明确。基于此,本文在模型试验研究的基础上开展不同体型下旋流排沙渠道的水沙两相流数值模拟,分析体型参数对旋流排沙渠道水沙特性的影响,以期对旋流排沙渠道在引水渠道等工程中的应用提供参考。

1 研究方法

1.1 模型试验

旋流排沙渠道由引水渠道、起旋室和排沙洞3个部分组成,起旋室和排沙洞位于渠道中间位置。搭建如图1所示的试验模型,主要由有机玻璃模型、供水系统、回水系统、量测系统等部分组成,其中供水和回水系统由蓄水水箱、水泵、稳水池、尾水池及供水管道组成。在渠道上游设置加沙装置,在排沙洞出口及尾水池内设置泥沙回收装置。

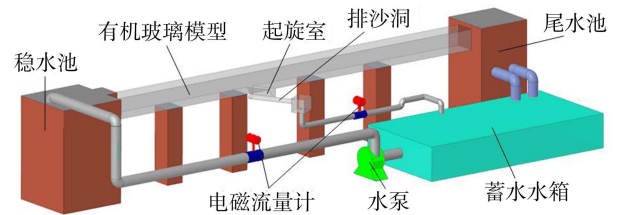


图1 试验布置

引水渠道坡度为0,长6200 mm、宽300 mm、高400 mm,渠道轴线与排沙洞轴线呈60°夹角;起旋室进口宽度、出口宽度、高度分别为120、20、168 mm;排沙洞直径为66 mm,长度为568 mm。模型沙粒径介于0.075~3.000 mm之间,筛分为6个粒径区间。分别取各粒径区间的泥沙50 g配置成总质量300 g的模型沙加入渠道内,试验后收集排沙洞出口和渠道出口的泥沙进行烘干称重。试验中通过阀门控制上游渠道来流量,流量调节范围为0~90 m³/h,渠道内可形成不同工况的来流条件。对同一工况下的水力参数多次测量后取平均值,测量精度满足试验要求。

1.2 数值模拟

以上游来流量为13.89 L/s、渠道入口泥沙质量流量为60 g/s的工况为例,分析不同体型旋流排沙渠道的水沙特性。上游含沙水流经过起旋室时需要消耗部分流量将泥沙从排沙洞内排出,定义分流比 W 和截沙率 C 分别为

$$W = (Q'/Q) \times 100\% \tag{1}$$

$$C = (m'/m) \times 100\% \tag{2}$$

式中: Q' 为排沙洞流出的排沙耗水量; Q 为上游河道来流流量; m' 为排沙洞排出泥沙质量; m 为渠道上游来沙质量。

渠道内水流经起旋室进入排沙洞,在起旋室的导向作用下排沙洞内形成与洞轴线呈一定夹角的旋转水流,该角度称为旋流角 ω ,可用下式计算:

$$\omega = \arctan(v_z/v_x) \tag{3}$$

式中: v_z 为旋转水流的切向流速; v_x 为旋转水流的轴向流速。

1.2.1 几何模型与方案设计

旋流排沙渠道体型如图2所示,使用Pro-E软件建立几何模型,其中 H 为上游渠道水深, B 为渠道宽度, h 为排沙洞中心与渠底的高差,倾角 α 为排沙洞封闭端与竖直方向的夹角, D 为排沙洞直径, b_{in} 为起旋室进口宽度, b_{out} 为起旋室出口宽度。

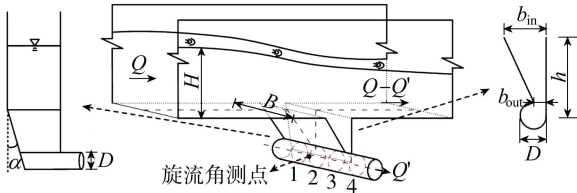


图2 旋流排沙渠道

在前期研究的基础上确定了影响旋流排沙渠道水沙特性的5个关键体型参数,各参数取值见表1。采用单一变量法设计了12种不同体型的旋流排沙渠道,以探讨不同体型旋流排沙渠道的排沙耗水量、

分流比、截沙率、旋流角及含沙量分布等水沙特性,了解不同体型时旋流排沙渠道的排沙效果。

表 1 体型参数取值

体型编号	h/mm	D/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	b_{out}/mm	b_{in}/mm
1	160	66	0	20	120
2	168	66	0	20	120
3	176	66	0	20	120
4	176	60	0	20	120
5	176	72	0	20	120
6	176	72	15	20	120
7	176	72	20	20	120
8	176	72	25	20	120
9	176	72	20	18	120
10	176	72	20	22	120
11	176	72	20	18	110
12	176	72	20	18	130

依据表 1 确定 5 组不同方案:选取体型 1、2、3 分析起旋室高度 h 对旋流排沙渠道水沙特性的影响;选取体型 3、4、5 分析排沙洞直径 D 对旋流排沙渠道水沙特性的影响;选取体型 6、7、8 分析倾角 α 对旋流排沙渠道水沙特性的影响;选取体型 7、9、10 分析起旋室出口宽度 b_{out} 对旋流排沙渠道水沙特性的影响;选取体型 9、11、12 分析起旋室进口宽度 b_{in} 对旋流排沙渠道水沙特性的影响。

1.2.2 计算设置与边界条件

数值模拟采用可实现的 $k-\varepsilon$ 模型模拟渠道内部流场,体积分数法 (volume of fluid, VOF) 捕捉自由水面,速度压力耦合采用压力隐式分裂算法 (pressure-implicit with splitting of operators algorithm, PISO), 梯度插值采用格林-高斯求解方法,水气两相体积分数的离散选取 Compressive 格式,其他离散格式采用 QUICK 格式,选用离散相模型 (discrete phase model, DPM) 模拟渠道流场内泥沙颗粒运动,该模型假定离散相颗粒在运移过程中无破损及变形等现象,固体颗粒的各项物理参数不发生改变^[18],通过以下原则确定 DPM 模型中不同粒径组泥沙颗粒的球度,当某一粒径泥沙的多组数值模拟截沙率均高于或低于试验截沙率时,选用排沙洞封闭端的泥沙淤积量来确定球度,其他情况通过截沙率来确定泥沙颗粒的球度。表 2 为确定的 6 组不同粒径泥沙的球度,设置渠道入口持续来沙,每秒加沙 60 g,对渠道入口及两个出口的流量及泥沙质量流量进行监测。

表 2 泥沙粒径区间及球度

序号	粒径区间/mm	球度	序号	粒径区间/mm	球度
1	0.075 ~ 0.160	1.0	4	0.600 ~ 1.250	0.5
2	0.160 ~ 0.315	0.7	5	1.250 ~ 2.360	0.3
3	0.315 ~ 0.600	0.5	6	2.360 ~ 3.000	0.3

渠道入口水深、流速等信息通过试验测算得到;

设置上游渠道内水流进口边界条件为速度进口,方向沿渠道内水流方向;渠道内水流与大气接触,边界条件采用压力进口,压强设定为大气压,气体体积分数为 100%;渠道下游出口和排沙洞出口与大气相连接,边界条件采用压力出口。

1.2.3 数值模拟方法验证

旋流排沙渠道网格划分采用非结构化网格,对比了网格总数分别为 97 万、310 万、447 万时旋流排沙渠道水沙特性的数值模拟与模型试验结果,综合考虑计算效率与精度,选取数量为 310 万的网格划分方案,以分析不同体型下旋流排沙渠道的水沙特性。表 3 为上游来流量 13.89 L/s、渠道内一次性加沙 300 g 工况下,旋流排沙渠道内水沙特性的数值模拟和试验结果对比,可见所采用的数值模拟方法可以实现对渠道内水沙运动的精确模拟。

表 3 模型试验与数值模拟结果对比

研究方法	排沙耗水量/(L/s)	加沙质量/g	排沙质量/g	余沙质量/g	截沙率/%
模型试验	4.96	300	276.3	23.7	92.1
数值模拟	5.02	300	276.0	24.0	92.0

2 结果与分析

2.1 起旋室高度对水沙特性的影响

表 4 为不同起旋室高度下旋流排沙渠道内的水沙特性,其余参数取值见表 1 中体型 1、2、3。当起旋室高度为 160、168、176 mm 时,渠道的分流比分别为 35.21%、36.14%、36.65%,最大相差 1.44%;测点处的旋流角分别为 71.54°、75.93°、77.91°,最大相差 6.37°;对应的截沙率分别为 90.57%、95.98%、93.88%,最大相差 5.41%;排沙洞出口泥沙质量流量分别为 54.34、57.59、56.33 g/s,最大相差 3.25 g/s。起旋室高度增大,测点处的旋流角增大,这是由于起旋室高度增大后渠道与排沙洞之间的落差变大,水流流经起旋室后势能减小,排沙洞内旋转水流的动能增加,旋流强度增强,离心力使得旋流区域水流流层变薄,排沙洞内旋流角测点处旋转水流的切向流速增大,然后沿排沙洞轴线方向逐渐转换为以轴向运动为主的旋转水流。起旋室高度取值不同时截沙率大小不同,起旋室高度为 168 mm 时截沙率最大,而在其他两种体型下截沙率均较小,由此表明起旋室高度的变化对截沙率影响存在阈值,取值偏大或偏小都会降低旋流排沙渠道的截沙率,起旋室高度降低时对渠道的截沙率影响更大。此外从表 4 可以看出,在持续来沙条件下排沙洞出口及渠道下游出口泥沙质量流量之和小于渠道入口泥沙质量流量,这是因为受边界条件的影响,排沙洞封

表 4 不同起旋室高度下旋流排沙渠道水沙特性

起旋室高度/mm	排沙耗水量/(L/s)	分流比/%	断面 2 旋流角/(°)	渠道入口泥沙质量流量/(g/s)	排沙洞出口泥沙质量流量/(g/s)	渠道下游出口泥沙质量流量/(g/s)	淤沙质量流量/(g/s)	截沙率/%
160	4.89	35.21	71.54	60	54.34	2.65	3.01	90.57
168	5.02	36.14	75.93	60	57.59	1.26	1.15	95.98
176	5.09	36.65	77.91	60	56.33	2.22	1.45	93.88

闭端水流运动紊乱,会形成涡旋区,使得该位置处的泥沙难以随主流排出排沙洞而产生淤积,但淤积的泥沙很少且靠近排沙洞封闭端,不会影响排沙洞内旋流的产生和发展。

图 3 为不同起旋室高度下排沙洞内含沙量径向分布(取排沙洞中心位置为 0,沿右侧方向为正值,左侧方向为负值)。从图 3 可以看出,排沙洞内含沙量随半径的增大呈增大趋势,在靠近排沙洞边壁 3 mm 范围内存在较大的含沙量梯度,在此范围内含沙量突然增大并达到最高,其中断面 1 最高含沙量约为 99 kg/m³,断面 4 含沙量最高值约为 151 kg/m³,排沙洞中心 30 mm 范围内含沙量较小,表明在旋流强挟沙力作用下泥沙紧靠排沙洞壁面运动。

2.2 排沙洞直径对水沙特性的影响

表 5 为不同排沙洞直径下旋流排沙渠道内的水沙特性,其余参数取值见表 1 中体型 3、4、5。当排沙洞直径为 60、66、72 mm 时,渠道的分流比分别为

31.68%、36.65%、39.81%,最大相差 8.13%;测点处的旋流角分别为 72.62°、77.91°、77.69°,最大相差 5.29°;对应的截沙率分别为 95.53%、93.88%、95.77%,最大相差 1.89%;排沙洞出口泥沙质量流量分别为 57.32、56.33、57.46 g/s,最大相差 1.13 g/s。从表 5 可以看出,渠道分流比随着排沙洞直径的增大而增大,且增幅较大,而截沙率较为稳定,各排沙洞直径下渠道的截沙率均保持在 93% 以上。由于排沙洞直径增大使得排沙洞内流动空间增大,通过起旋室进入排沙洞内的水流流量增加,断面 2 的旋流角也呈增大趋势,当排沙洞直径为 72 mm 时断面 2 的旋流角接近 78°。各排沙洞直径下排沙洞内淤沙质量流量仅介于 0.56 ~ 1.45 g/s 之间。

图 4 为不同直径下排沙洞典型断面的含沙量径向分布。从图 4 可以看出,当排沙洞直径较小时($D=60$ mm),靠近排沙洞封闭端水流旋转不充分,断面 1 位置旋流的挟沙力较小,排沙洞中心位置含

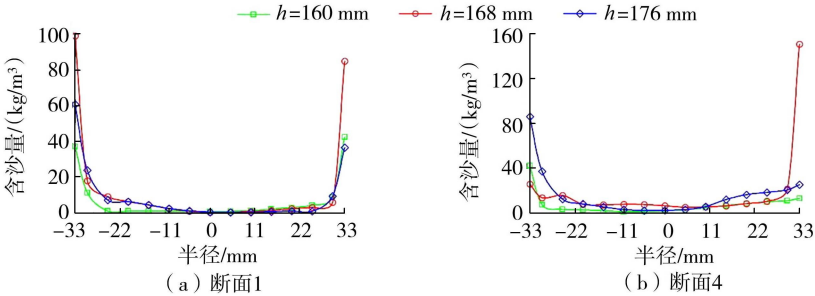


图 3 不同起旋室高度下排沙洞内含沙量径向分布

排沙洞直径/mm	排沙耗水量/(L/s)	分流比/%	断面 2 旋流角/(°)	渠道入口泥沙质量流量/(g/s)	排沙洞出口泥沙质量流量/(g/s)	渠道下游出口泥沙质量流量/(g/s)	淤沙质量流量/(g/s)	截沙率/%
60	4.40	31.68	72.62	60	57.32	2.12	0.56	95.53
66	5.09	36.65	77.91	60	56.33	2.22	1.45	93.88
72	5.53	39.81	77.69	60	57.46	1.93	0.61	95.77

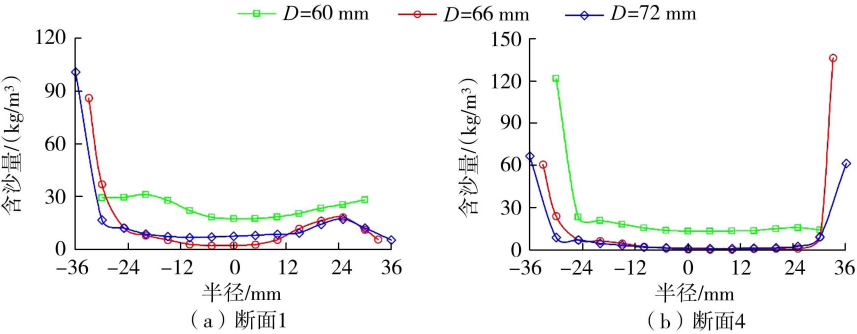


图 4 不同排沙洞直径下排沙洞内含沙量径向分布

沙量较高,到断面 4 位置旋流的挟沙力依然较弱。增大直径后排沙洞内有更充足的空间保证旋流的产生发展,同时排沙耗水量增加,旋流强度增加,水流挟沙力增强,与直径 60 mm 相比,直径为 66、72 mm 时排沙洞内含沙量的径向分布规律基本一致,且泥沙分布更靠近排沙洞壁面,表明排沙洞直径大于 66 mm 时排沙洞内可以形成足够强度的旋流来排除泥沙,但直径的增大会对渠道分流比产生较大影响。

2.3 倾角对水沙特性的影响

表 6 为不同倾角下旋流排沙渠道内水沙特性,其余参数取值见表 1 中体型 6、7、8。文献[16-17]的数值模拟和试验研究中均存在排沙洞封闭端区域泥沙淤积的情况,基于此,增大排沙洞封闭端倾角取值,以达到减少或去除排沙洞封闭端泥沙淤积的目的。当倾角为 15°、20°、25°时,渠道的分流比分别为 36.07%、32.25%、31.10%,最大相差 4.97%;测点处的旋流角分别为 73.72°、74.88°、72.78°,最大相差 2.10°;对应的截沙率分别为 94.07%、93.67%、92.18%,最大相差 1.89%;排沙洞出口泥沙质量流量分别为 56.44、56.20、55.31 g/s,最大相差 1.13 g/s。从表 6 可以看出,当倾角为 15°时,旋流排沙渠道的分流比最大,截沙率最高,渠道下游出口泥沙质量流量约为 2.3 g/s;倾角越大,起旋室过流断面面积越小,分流比越小,使得进入排沙洞的含沙水流减少,相应地截沙率也越小,但不同倾角下旋流排沙渠道的截沙率均大于 92%,处于较高水平。与

文献[16-17]的结果相比较,增大排沙洞封闭端倾角取值能够有效去除原排沙洞封闭端受壁面条件的影响而产生的泥沙淤积,各倾角下渠道的淤沙量仅占来沙总量的 1.3%~2.1%。

图 5 为不同倾角下排沙洞典型断面含沙量径向分布。从图 5 可以看出增大倾角之后断面 1 排沙洞右侧 20 mm 左右含沙量增大处逐渐向排沙洞中心靠近,这是因为倾角的增大改变了排沙洞封闭端的水力条件,从倾角倾斜壁面上进入排沙洞内的水流增大了旋流的轴向流速,旋流尚未成形时便沿轴线方向流动,切向流动作用减弱,泥沙与排沙洞壁面的距离增加,排沙洞中心含沙量有所增大;轴向流速的增大有利于更加快速地排除泥沙。旋流在排沙洞内经过发展,到断面 4 位置,泥沙在旋流强挟沙力作用下靠近排沙洞壁面运动,表现为中间小、两端大的分布规律。

2.4 起旋室出口宽度对水沙特性的影响

表 7 为不同起旋室出口宽度下旋流排沙渠道内水沙特性,其余参数取值见表 1 中体型 7、9、10。当起旋室出口宽度为 18、20、22 mm 时,对应的分流比分别为 32.11%、32.25%、38.16%,最大相差 6.05%;测点处的旋流角分别为 74.00°、74.88°、70.51°,最大相差 4.37°;对应的截沙率分别为 92.30%、93.67%、93.28%,最大相差 1.37%;排沙洞出口泥沙质量流量分别为 55.38、56.20、55.97 g/s,最大相差 0.82 g/s。由表 7 可知,起旋室

表 6 不同倾角下旋流排沙渠道水沙特性

倾角/(°)	排沙耗水量/(L/s)	分流比/%	断面 2 旋流角/(°)	渠道入口泥沙质量流量/(g/s)	排沙洞出口泥沙质量流量/(g/s)	渠道下游出口泥沙质量流量/(g/s)	淤沙质量流量/(g/s)	截沙率/%
15	5.01	36.07	73.72	60	56.44	2.30	1.26	94.07
20	4.48	32.25	74.88	60	56.20	2.80	1.00	93.67
25	4.32	31.10	72.78	60	55.31	3.90	0.79	92.18

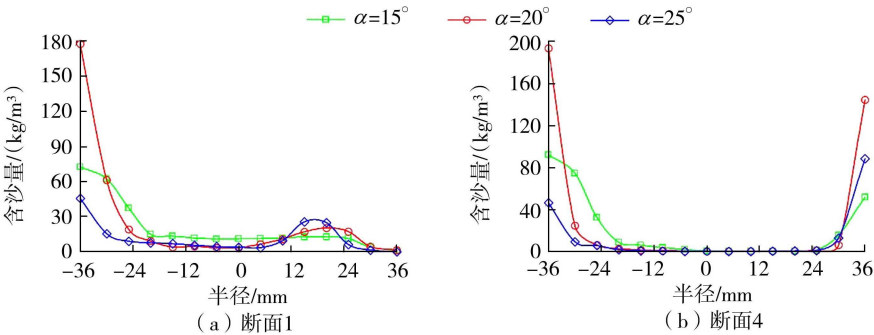


图 5 不同倾角下排沙洞内含沙量径向分布

表 7 不同起旋室出口宽度下旋流排沙渠道水沙特性

起旋室出口宽度/mm	排沙耗水量/(L/s)	分流比/%	断面 2 旋流角/(°)	渠道入口泥沙质量流量/(g/s)	排沙洞出口泥沙质量流量/(g/s)	渠道下游出口泥沙质量流量/(g/s)	淤沙质量流量/(g/s)	截沙率/%
18	4.46	32.11	74.00	60	55.38	2.50	2.12	92.30
20	4.48	32.25	74.88	60	56.20	2.80	1.00	93.67
22	5.30	38.16	70.51	60	55.97	2.60	1.43	93.28

出口宽度越大,分流比越大,使得渠道水位降低,排沙洞内水流旋转力度有所减弱,断面2的旋流角减小;不同起旋室出口宽度下旋流排沙渠道的截沙率均大于92%,基本稳定且处于较高水平,而淤沙量仅占来沙总量的1.6%~3.5%。

图6为不同起旋室出口宽度时排沙洞典型断面的含沙量径向分布。从图6可以看出,与起旋室出口宽度为20、22 mm相比,出口宽度为18 mm时断面1排沙洞右侧20 mm左右处的含沙量较高,断面4上排沙洞边壁与中心的含沙量差值较大,表明在相同距离内,排沙洞内旋流发展速度更快。在3种起旋室进口宽度下,旋流在到达断面4时均已稳定,在排沙洞近壁面含沙量最高可达192 kg/m³,排沙洞中心30 mm半径范围内含沙量基本为0 kg/m³。

2.5 起旋室进口宽度对水沙特性的影响

表8为不同起旋室进口宽度下旋流排沙渠道内水沙特性,其余参数取值见表1中体型9、11、12。当起旋室进口宽度为110、120、130 mm时,渠道的分流比分别为30.89%、32.11%、30.24%,最大相差1.87%;测点处的旋流角分别为73.62°、74.88°、73.33°,最大相差1.55°;对应的截沙率分别为

93.53%、92.30%、93.52%,最大相差1.23%;排沙洞出口泥沙质量流量分别为56.12、55.38、56.11 g/s,最大相差0.09 g/s。由表8可知,起旋室进口宽度的增大对旋流排沙渠道的排沙耗水量、分流比、旋流角及截沙率等水沙特性的影响较小,各项数值大小基本保持一致,淤沙量仅占来沙总量的1.4%~3.5%。

图7为不同起旋室进口宽度下排沙洞内典型断面含沙量径向分布。从图7可以看出,起旋室进口宽度增大时,排沙洞内含沙量分布规律基本一致,仅在排沙洞断面1右侧12~24 mm范围内数值大小有所不同。当起旋室进口宽度为120 mm时,断面4壁面上含沙量最高,表明排沙洞内旋流强度较高,能更好地挟带泥沙。但整体来说3种进口宽度下渠道的排沙耗水量、分流比、旋流角、截沙率等水沙特性基本一致。

3 讨论

3.1 参数影响

起旋室高度的变化对旋流排沙渠道截沙率的影响较为显著,当起旋室高度为168 mm时截沙率最

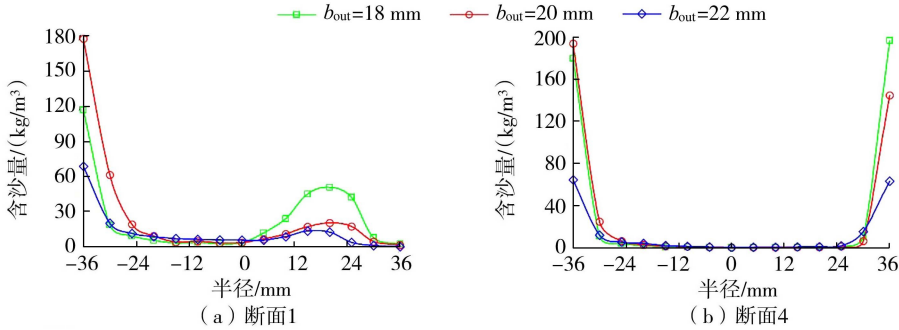


图6 不同起旋室出口宽度下排沙洞内含沙量径向分布

表8 不同起旋室进口宽度下旋流排沙渠道水沙特性

起旋室进口 宽度/mm	排沙耗 水量/(L/s)	分流 比/%	断面2旋 流角/(°)	渠道入口泥沙 质量流量/(g/s)	排沙洞出口泥沙 质量流量/(g/s)	渠道下游出口泥沙 质量流量/(g/s)	淤沙质量 流量/(g/s)	截沙 率/%
110	4.29	30.89	73.62	60	56.12	3.00	0.88	93.53
120	4.46	32.11	74.00	60	55.38	2.50	2.12	92.30
130	4.20	30.24	73.33	60	56.11	2.50	1.39	93.52

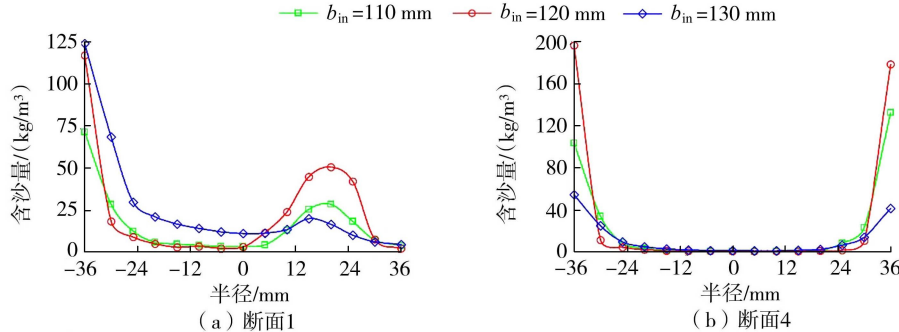


图7 不同起旋室进口宽度下排沙洞内含沙量径向分布

大,而在其他两种体型下载沙率均较小,表明起旋室高度取值对截沙率的大小影响存在阈值,取值偏大或偏小都会降低渠道的截沙率。排沙洞直径和起旋室出口宽度对渠道的排沙耗水量影响较大,最大可达8.13%,而对截沙率影响较小。倾角对旋流排沙渠道水沙特性的影响单一,其值越大,渠道的排沙耗水量及截沙率越小,但对减轻排沙洞封闭端的泥沙淤积能够起到关键作用。起旋室进口宽度的增大对渠道内水沙特性无显著影响。

受边界条件的影响,不同体型时排沙洞断面1处的含沙量有所不同,增大倾角之后在排沙洞内靠近起旋室近垂直壁面20 mm左右位置处的泥沙含量明显增大,该位置旋流的产生发展受边界条件影响较大,未能形成稳定旋流;沿轴线方向旋流经过发展达到稳定,泥沙运动逐渐靠近排沙洞壁面,断面4位置处排沙洞径向含沙量在近壁面处最大,而在排沙洞中心基本为零,表明排沙洞内形成了足够强度的旋转水流,泥沙在旋流切向流动的作用下紧靠排沙洞壁面运动,在轴向流动的作用下从排沙洞排出,截沙率大小表明所产生的旋流可以满足持续排沙的需求。

3.2 上下游渠道内含沙量变化

图8为起旋室上游和下游的渠道中心含沙量分布(图中L为渠道断面与渠道水流入口间的距离),数值模拟中各体型渠道边界条件一致,上游水沙分布特征基本一致,因此仅选用试验体型上游渠道内含沙量沿程变化进行分析。从图8(a)可以看出,在渠道入口进沙以后,泥沙逐渐在渠道底部沉降,在L=3.00 m处大部分泥沙已经沉降,形成渠底高含沙

水流,含沙量接近50 kg/m³;经过起旋室后,渠底推移质泥沙和大部分悬移质泥沙从排沙洞排出,下游渠道内泥沙含量急剧下降,且不同体型下相同位置处的含沙量差距极小。进入下游渠道内的极细粒径泥沙分布在水流中,呈现表层含沙量小、底部含沙量大的趋势,但最大含沙量均小于0.6 kg/m³,表明起旋室及排沙洞的位置合理。文献[17]的试验结果显示该泥沙以0.075~0.315 mm粒径的泥沙为主,该粒径范围泥沙进入渠道下游后,不会造成渠道内泥沙淤积或机械磨损等问题。

3.3 分流比

南军虎等^[14]探讨了不同来流量时排沙耗水量与相对水深之间的关系,随着上游渠道来流量的增加,渠道内依次呈现自由流、临界流和淹没流3种流态,在临界流条件下排沙耗水量与相对水深关系曲线上出现明显的拐点,分流比随相对水深的增加呈现先急剧减小而后缓慢减小的分段式变化规律,在相对水深为0.97时,旋流排沙渠道的分流比仅为6.07%。南军虎等^[16]对旋流排沙渠道体型进行了优化,优化前后旋流排沙渠道的截沙率分别为90%和88%,优化后泥沙淤积质量为4.31 g,增大倾角后排沙洞内的泥沙淤积问题得到了改善,排沙洞和渠道内无明显泥沙淤积,能够满足实际工程中水沙分离的要求。

经分析,旋流排沙渠道是一种高排沙、低耗水渠道排沙技术,实际工程应用中在渠道泥沙易淤积处布设起旋室和排沙洞,对下游渠道内水流影响很小,在持续来沙条件下不同体型截沙率均高于90%,能够高效且持续排沙,进入渠道下游泥沙量极小,主要

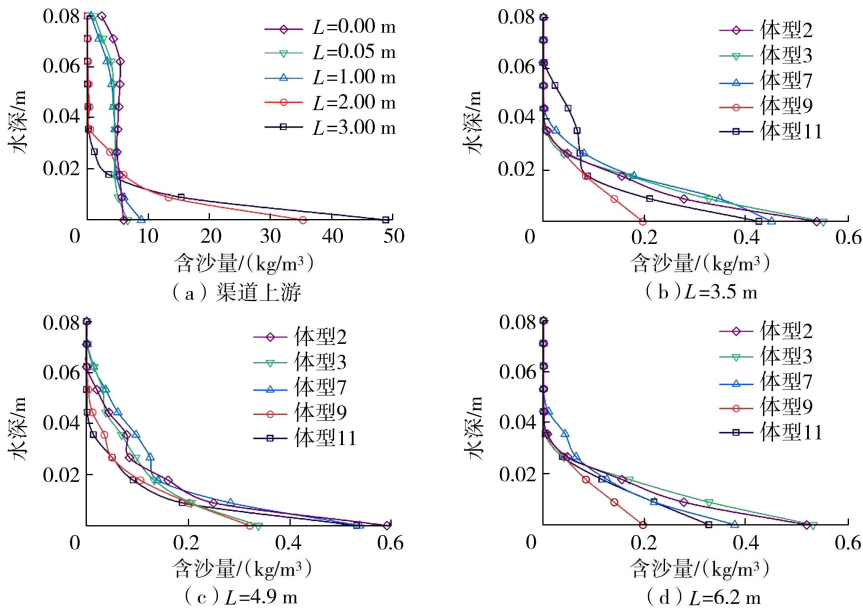


图8 渠道中心含沙量

以 0.075 ~0.315 mm 粒径泥沙为主,以悬移质形式分布于水体中。

4 结 论

a. 起旋室高度的变化对旋流排沙渠道截沙率影响存在阈值,取值偏大或偏小都会降低截沙率,高度降低时对截沙率影响更大,最大降幅为 5.41%,但其截沙率仍超过了 90%,处于较高水平,而在其他体型下排沙渠道的截沙率较为稳定,相差在 3% 以内。

b. 排沙洞直径不足会使得排沙洞内旋转水流无法产生足够的强度,阻碍旋流的发展,不能充分带动泥沙运动,直径扩大对排沙洞内部旋流强度影响较小,但会增加渠道所需的排沙耗水量,不利于水资源的高效利用。

c. 增大倾角后原排沙洞内封闭端的泥沙淤积问题得到了改善,在原体型下封闭端局部区域由于壁面条件产生的涡旋区导致了泥沙淤积,当倾角为 20°时能够在保证截沙率的基础上去除原排沙洞封闭端的泥沙淤积。

d. 起旋室出口宽度对分流比和旋流角影响较大,在设计取值时应当偏小,对截沙率影响较小。

e. 起旋室进口宽度对旋流排沙渠道的水沙特性基本无影响。

参考文献:

[1] 张金良,仝亮,王卿,等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2): 41-49. (ZHANG Jinliang,TONG Liang,WANG Qin,et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(2):41-49. (in Chinese))

[2] 卢红伟,王延贵,史红玲. 引黄灌区水沙资源配置技术的研究[J]. 水利学报,2012,43(12):1405-1412. (LU Hongwei,WANG Yangui,SHI Hongling. Study on main techniques of water and sediment resources allocation in irrigation system of the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (12): 1405-1412. (in Chinese))

[3] 何训江. 新疆金沟河排沙工程涡管排沙技术的应用[J]. 人民黄河,2012,34(4):131-132. (HE Xunjiang. Application of sediment release by vortex tube to the sediment release project of Jingou River in Xinjiang[J]. Yellow River,2012,34(4):131-132. (in Chinese))

[4] FEYS D,VERHOEVEN R,DE SCHUTTER G. Fresh self compacting concrete, a shear thickening material [J].

Cement and Concrete Research,2008,38(7):920-929.

[5] DE LARRARD F,FERRARIS C F,SEDRAN T. Fresh concrete;a Herschel-Bulkley material[J]. Materials and Structures,1998,31(7):494-498.

[6] 王庆祥,李养志,程永华,等. 螺旋流排沙的试验研究和应用[J]. 泥沙研究,1990(2):63-70. (WANG Qingxiang, LI Yangzhi, CHENG Yonghua, et al. Experimental study on sediment escaping technique by vortex tube spiral flow and its application[J]. Journal of Sediment Research,1990(2):63-70. (in Chinese))

[7] 张开泉,刘焕芳. 涡管排沙技术研究的发展与前瞻[J]. 水利水电科技进展,2000,20(2):16-18. (ZHANG Kaiquan, LIU Huanfang. Progress in research of the technique of sediment trapping by vortex tube [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000,20(2):16-18. (in Chinese))

[8] 刘焕芳,张开泉. 涡管排沙式沉沙池的工程应用:以新疆金沟河渠首电站为例[J]. 水利水电科技进展,2000,20(4):42-44. (LIU Huanfang, ZHANG Kaiquan. Engineering application of sand trapping by vortex tube in settling basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2000,20(4):42-44. (in Chinese))

[9] 刘焕芳,张开泉. 悬移质涡管排沙分析[J]. 人民黄河,1995,17(1):1-4. (LIU Huanfang, ZHANG Kaiquan. Analysis of suspended load discharge through scroll[J]. Yellow River,1995,17(1):1-4. (in Chinese))

[10] 田艳,张根广,秦子鹏. 螺旋流排沙管三维数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2014(9):131-134. (TIAN Yan, ZHANG Genguang, QIN Zipeng. 3D numerical modeling on sand trapping tubes with spiral flows[J]. China Rural Water and Hydropower,2014(9):131-134. (in Chinese))

[11] 刘焕芳,张开泉. 水电站引水渠上涡管排沙式沉沙池试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),1997,13(4):51-56. (LIU Huanfang, ZHANG Kaiquan. Experimental study of sand trapping by vortex tube in settling basin on water power channel [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1997, 13 (4): 51-56. (in Chinese))

[12] 张开泉,刘焕芳. 涡管分水排沙规律的研究及其工程应用[J]. 泥沙研究,1991(4):1-12. (ZHANG Kaiquan, LIU Huanfang. A study on water-diverting and sand trapping by vortex tube and its application[J]. Journal of Sediment Research,1991(4):1-12. (in Chinese))

[13] 刘焕芳,张开泉. 涡管排沙工程设计中的几个控制条件[J]. 水利水电技术,1999,30(增刊1):5-7. (LIU Huanfang, ZHANG Kaiquan. About several control conditions in scroll desilt project design [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1999,30(Sup1):

5-7. (in Chinese))

[14] 南军虎,高欢,汪超群,等. 一种新型旋流排沙渠道的试验研究和数值模拟[J]. 工程科学与技术,2022,54(6):116-123. (NAN Junhu, GAO Huan, WANG Chaoqun, et al. Experimental study and numerical simulation of a newly developed desilting channel with swirling flow[J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(6):116-123. (in Chinese))

[15] 南军虎,高欢,汪超群,等. 旋流排沙渠道水力特性预测模型适宜性研究[J]. 水电能源科学,2022,40(9):142-145. (NAN Junhu, GAO Huan, WANG Chaoqun, et al. Study on the suitability of hydraulic characteristics prediction model of desilting channel with swirling flow[J]. Water Resources and Power,2022,40(9):142-145. (in Chinese))

[16] 南军虎,罗涵,马康宁,等. 旋流排沙渠道体型优化的正交数值试验方法和应用[J]. 水力发电学报,2022,41(10):160-169. (NAN Junhu, LUO Han, MA Kangning, et al. Orthogonal numerical experiment method and application for shape optimization of desilting channel with swirling flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(10):160-169. (in Chinese))

[17] 南军虎,汪超群,李伟,等. 旋流排沙渠道排沙特性试验[J]. 农业工程学报,2022,38(14):127-135. (NAN Junhu, WANG Chaoqun, LI Wei, et al. Experiments on sediment characteristics in a desilting channel with a swirling flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(14):127-135. (in Chinese))

[18] 周芳龄,唐勇,周晓泉. 基于 DPM 模型的旋流式沉沙池悬沙数值模拟[J]. 水电能源科学,2020,38(10):91-94. (ZHOU Fangling, TANG Yong, ZHOU Xiaoquan. Numerical simulation of suspended sediment in vortex-type sedimentation basin based on DPM model[J]. Water Resources and Power,2020,38(10):91-94. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-08 编辑:俞云利)

+++++

(上接第 50 页)

[12] 胡维忠. 长江中下游干流河道崩岸状况及其防治[J]. 长江技术经济,2020,4(1):17-20. (HU Weizhong. Bank collapse and its prevention in the main stream of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Technology and Economy of Changjiang,2020,4(1):17-20. (in Chinese))

[13] 陈敏,沈华中,冯源,等. 长江中下游河道近年崩岸应急整治[J]. 水利水电快报,2017,38(11):15-18. (CHEN Min, SHEN Huazhong, FENG Yuan, et al. Emergency regulation of bank collapse in the middle and lower reaches of the Yangtze River in recent years[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2017,38(11):15-18. (in Chinese))

[14] 刘祥玉,刘晓辉,高清洋,等. 长江中下游顺直河道水流冲刷引发崩岸的模拟试验[J]. 水运工程,2019(4):90-97. (LIU Xiangyu, LIU Xiaohui, GAO Qingyang, et al. Simulation experiment of bank collapse caused by scouring in straight river section in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering,2019(4):90-97. (in Chinese))

[15] 王延贵,陈吟,陈康. 冲积河流岸滩崩退模式与崩退速率[J]. 水利水电科技进展,2018,38(4):14-20. (WANG Yangui, CHEN Yin, CHEN Kang. Study on collapse-retreat patterns and bank erosion rates of alluvial riverbanks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(4):14-20. (in Chinese))

[16] 贺俊锋. 浅谈袋装砂施工工艺在深水筑堤中的应用[J]. 珠江水运,2007,11(2):21-23. (HE Junfeng. Discussion on the application of sand bag construction technology in deep water embankment construction[J]. Pearl River Water Transport,2007,11(2):21-23. (in Chinese))

[17] 刘欣欣. 深水滑抛土工包沉落机理与棱体成型研究[D]. 南京:河海大学,2017.

[18] 焦子峰,于学付,蒲敏艳,等. Padma 河道整治工程土工沙袋抛填施工方法对比[J]. 水运工程,2019(2):200-203. (JIAO Zifeng, YU Xuefu, PU Minyan, et al. Comparison of construction methods for geotextile sandbag dumping applied to Padma river regulation engineering[J]. Port & Waterway Engineering,2019(2):200-203. (in Chinese))

[19] 刘欣欣,束一鸣,顾克,等. 翻板抛投土工包沉落轨迹与落域[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):50-54. (LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke, et al. Settling trajectories and placement for geocontainers dumped from a bevel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(1):50-54. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-04 编辑:俞云利)