

基于水工模型试验的尾矿库复杂排洪系统泄流研究

Study on Discharge Flow of Complex Flood Drainage System of Tailings Pond Based on Hydraulic Model Test

周彩霞^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

2. 尾矿库灾害防控技术与装备国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要:为保证尾矿库排洪系统安全可靠运行,本文对某二等尾矿库的排洪系统进行了水工模型试验,通过不同方案和不同工况对排水井和隧洞的水力特性进行了试验,对其泄流量、水流流态、脉动压力和掺气浓度进行了研究,试验结果可为尾矿库排洪系统的工程设计提供参考。

关键词:尾矿库; 水工模型; 泄流量; 排洪系统

中图分类号: TD926.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0076-07

Abstract: In order to ensure the safe and reliable operation of the tailings drainage system, a hydraulic model test was carried out on the drainage system of a second-class tailings reservoir. The hydraulic characteristics of the drainage well and tunnel were tested through different schemes and different working conditions, and the discharge rate, flow pattern, pulsating pressure and aeration concentration were studied. The test results can provide references for the engineering design of the tailings drainage system.

Key words: tailings pond; hydraulic model; discharge flow; flood drainage system

1 前言

尾矿库是用以贮存金属、非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所,其中排洪系统是尾矿库的重要设施,关系到尾矿库的安全运行、环境保护及周边社区的生命财产安全。郑学鑫、岑建^[1]通过分析国内外 265 座尾矿库事故类型得出,由于洪水漫顶导致的事故占 20.4%,仅次于渗流破坏(占 22.3%)和边坡失稳(占 21.9%),而排水构筑物的泄水能力不足是引起洪水漫顶的重要原因之一。高峰、周积果^[2]采用 C5.0 决策树算法,从 61 起典型事故中提取影响因素变量对尾矿库事故影响因素进行重要性分析得出发生事故类型数量第三多的是洪水漫顶事故。尾矿库排洪系统一旦泄流能力不足,库内水位可能迅速上升,引起洪水漫顶,进而引发溃坝风险,

造成灾难性后果,故尾矿库排洪系统必须保证具有足够的泄流能力。《尾矿设施设计规范》GB 50863—2013 中规定,对特别复杂的排洪系统,宜进行水工模型试验验证^[3],《尾矿库安全规程》GB 39496—2020 中也规定,对特别复杂的排洪系统,应进行水工模型或模拟试验验证^[4]。

2 排洪系统概况

某工程尾矿库为二等库,位于我国西南山区,山势雄伟,谷深峡窄,山坡较陡,年降雨量 1 066 mm,汇水面积 16 km²。设计库内排洪系统采用框架式排水井—隧洞的型式。排洪系统的进口共设 8 座框架式排水井,1-1 和 1-2 排水井通过支洞与主洞相连,2-1 和 2-2、3-1 和 3-2、4-2 排水井通过竖井和支洞与主洞相连,4-1 排水井通过竖井直接与主洞相连。排水井采用相同的尺寸,均为内径 5.8 m,高 32 m;排洪隧洞采用圆拱直墙型,底宽 5 m,高 5 m,纵坡 3.5%,排洪主洞长 2 630 m,排洪系统平面布置如图 1 所示。尾矿库各使用期均为 2 座井同时泄水,随着库水位的上升,1-1 和 1-2、2-1 和 2-2、3-1 和 3-2、4-1 和 4-2 逐级使用,水流情况复杂。

[作者简介] 周彩霞(1986—),女,山西吕梁人,硕士,高级工程师,从事尾矿工程设计及研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2023YFC3012204)

[引用格式] 周彩霞. 基于水工模型试验的尾矿库复杂排洪系统泄流研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(3): 76-82.

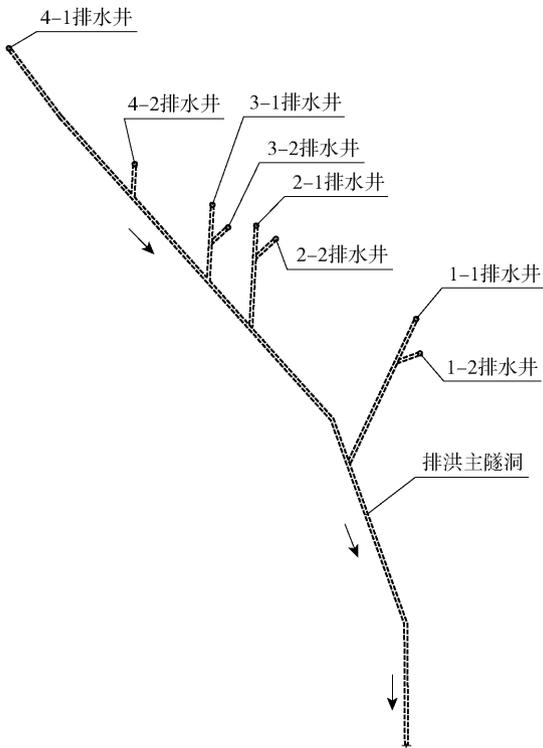


图1 排洪系统平面布置图

另外,结合回水系统是否利用排洪系统,又有两个方案。方案一为排洪系统仅承担排洪功能,具体如图2所示;方案二为利用排水井回水,并在排洪主洞内铺设回水管进行回水,具体如图3所示。

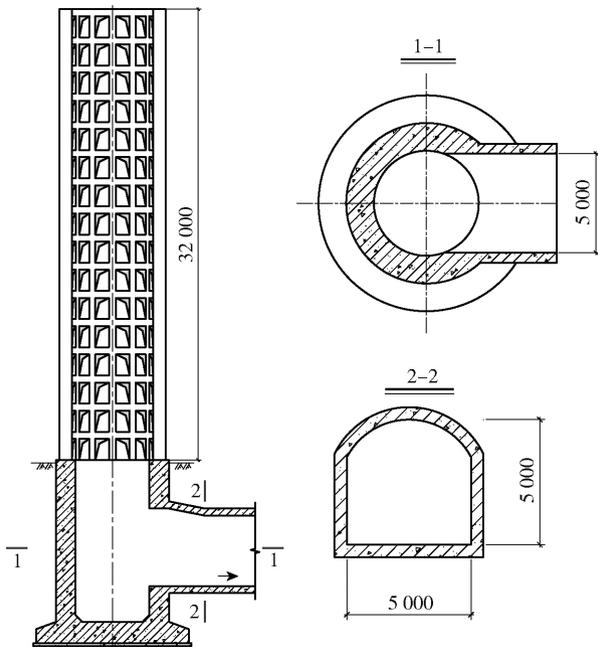


图2 方案一剖面图(单位:mm)

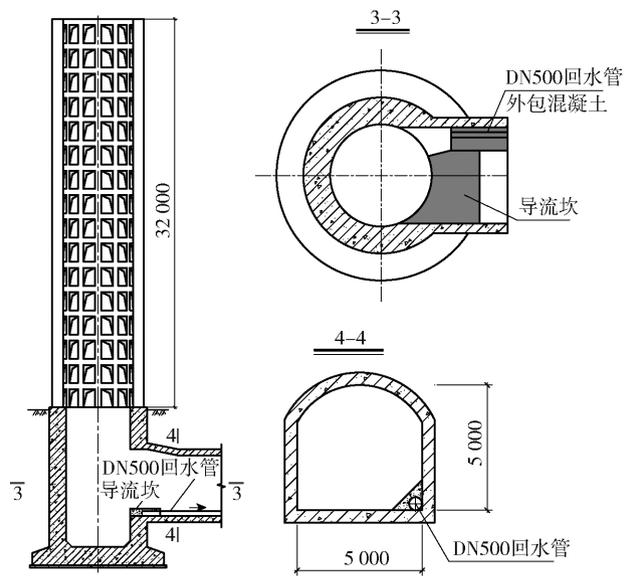


图3 方案二剖面图(单位:mm)

济和高效,需要就排洪系统开展水工模型试验研究,通过试验结果复核设计参数,优化结构型式,提升工程性能,为设计提供依据和参考。

3 水工模型设计

3.1 相似理论

实际工程中的水流现象往往是很复杂的,许多水力学问题单纯依靠理论分析来求解会遇到很大的困难,因此采用模型试验法是解决问题的有效途径。模型试验就是在与原型相似而缩小了几何尺寸的模型上进行研究,在模型中观测流态和运动要素,然后把模型中的这些实测资料引申到原型中去。

表征液体运动的量具有各种不同性质,一般可以分为三大类:第一类是描述液体几何形状的量,如长度、面积、体积等;第二类是描述液体运动状况的量,如速度、加速度、流量、时间等;第三类是描述液体运动动力特征的量,如质量、动量、密度等。因此,两个液体运动系统的相似特征,可以用几何相似、运动相似和动力相似来描述^[5]。这三种相似是模型和原型保持完全相似的重要特征,它们是互相联系、互为条件的。几何相似是运动相似、动力相似的前提条件,动力相似是决定流动相似的主导因素,运动相似是几何相似和动力相似的表现,它们是一个统一的整体,是缺一不可的。

实际工程中的水流运动是非常复杂的,若要同时保证相似是非常困难的,甚至是不可能的,对于某一实际问题,总有一种作用力起主要作用,而其它作用力是次要的。因此抓住水流现象中的主要矛盾,

为了检验设计方案的合理性,确保工程安全、经

使得主要作用力的相似准数在模型与原型中保持相等,在模型试验时可以把实际问题简化,使其主要作用的那种力满足相似准则,适当忽略其它次要的力,实践证明这在工程上是可以满足要求的。

在尾矿库排洪系统中,水流主要是在重力作用下的流动,因此模型试验必须保证重力相似(弗劳德数相似)。

3.2 模型比尺

本工程水工模型按重力相似准则进行设计,即

$\lambda_{Fr} = \frac{\lambda_v}{\sqrt{\lambda_g \lambda_L}} = 1$, 模型几何比尺 $\lambda_L = 40$, 可得各物理量相似关系见表1。

表1 各物理量模型与原型比尺

物理量	比尺关系	物理量比尺
几何比尺	λ_L	40
流速	$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}$	6.3
流量	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	10 119.3
糙率	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1.8
时间	$\lambda_t = \lambda_L^{0.5}$	6.3
压强	$\lambda_p = \lambda_L$	40

3.3 模型设计

模型采用有机玻璃制作,原型混凝土衬砌糙率 $n_p = 0.014$, 要求模型糙率 $n_m = n_p / \lambda_n = 0.0078$ 。有机玻璃糙率约为0.008, 经过试验测试,选取的有机玻璃材料糙率满足阻力相似要求。

为保持模型水流流动与原型相似,模型雷诺数应达到阻力平方区,经初步计算,模型和原型的雷诺数均远远大于临界雷诺数,水流处于紊流状态,因此模型与原型水流流动相似。

由于库区范围较大,排洪系统整体模型较大,若采用整体建模,模型的几何比尺较大,难以反映关键部位(排水井、竖井)的泄流情况,而排洪主洞较长,后续大部分区域流态趋于稳定,故将系统分为四个部分进行模型试验:

(1) 1-1 和 1-2 排水井为第一部分,模型长 4.9 m,高 1.2 m。

(2) 2-1 和 2-2 排水井为第二部分,模型长 3.7 m,高 1.7 m。

(3) 3-1 和 3-2 排水井为第三部分,模型长 3.8 m,高 2.4 m。

(4) 4-1 和 4-2 排水井为第四部分,模型长 8.0 m,高 3.0 m。

第一部分、第四部分模型实景如图4、图5所示。



图4 第一部分(1-1、1-2排水井)排洪系统模型实景图



图5 第四部分(4-1、4-2排水井)排洪系统模型实景图

4 模型试验结果分析

4.1 泄流量

1) 方案一和方案二泄流量对比

选取第一部分(没有竖井)和第四部分(竖井最深)典型模型进行方案一和方案二泄流量的对比试验,得出不同水头下第一部分模型方案一和方案二的泄流量见表2和表3,泄流量对比曲线如图6所示,第四部分模型方案一和方案二的泄流量见表4和表5,泄流量对比曲线如图7所示。

表2 第一部分模型方案一泄流量(洞内无其他设施)

水头/m	泄流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	水头/m	泄流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
0	0	2.8	169.95
0.8	44.47	3.2	202.28
1.2	58.37	3.6	236.71
1.6	79.18	4	270.44
2	113.56	4.4	300.61
2.4	147.02		

从图6和图7可以看出,方案一的泄流量整体比方案二大,尤其是当堰上水头超过2 m后,泄流量的差距较大,由此可以看出,隧洞进口设置导流坎和埋设回水管减小了排洪系统的泄流量,本系统中,由于排洪隧洞尺寸较大,所以当堰上水头小于2 m时,影响不大,但是随着堰上水头的增大,对泄流量的影响变大。所以,最终排洪系统型式选取方案一,库内

**表3 第一部分模型方案二泄流量
(洞内埋导流坎及回水管)**

水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹	水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹
0	0	2.8	146.86
0.4	22.3	3.2	160.65
0.8	38.72	3.6	190.11
1.2	61.88	4.0	215.45
1.6	87.56	4.4	233.44
2	110.02	4.8	255.44
2.4	128.12	5	272.15

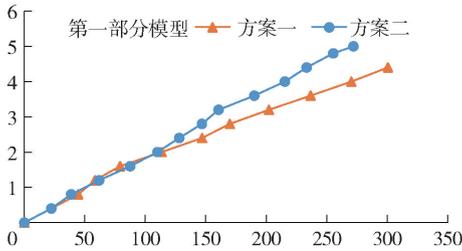


图6 第一部分模型方案一和方案二泄流曲线对比图

表4 第四部分模型方案一泄流量(洞内无其他设施)

水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹	水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹
0	0	2.8	198.58
0.8	40.78	3.2	253.24
1.2	59.99	3.6	279.64
1.6	72.25	4	310.56
2	115.25	4.4	344.55
2.4	148.57		

**表5 第四部分模型方案二泄流量
(洞内埋导流坎及回水管)**

水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹	水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹
0	0	2.8	165.69
0.4	16.68	3.2	193.66
0.8	32.74	3.6	210.58
1.2	62.77	4	240.6
1.6	77.69	4.4	280.39
2	101.38	4.8	297.18
2.4	145.8	5	307.86

回水另外单独设置浮船和地表管线。

2) 不同位置泄流量曲线

选取方案一第二部分典型模型,进行 2-1 和 2-2 排水井底部、中部、上部不同位置的泄流量试验,得

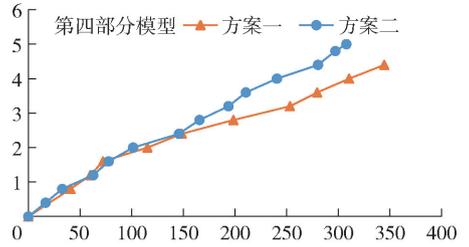


图7 第四部分模型方案一和方案二泄流曲线对比图

出排水井不同位置下不同水头的泄流量见表 6 ~ 表 8,泄流量曲线如图 8 所示。

**表6 第二部分模型排水井泄流量
(起始泄水标高位于底部)**

水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹	水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹
0	0	3.2	190.56
0.8	35.85	3.6	215.61
1.2	58.57	4	249.14
1.6	94.55	4.4	293.21
2	120.2	5.6	350.14
2.4	145.25	8.4	384.68
2.8	166.23	10	390.21

**表7 第二部分模型排水井泄流量
(起始泄水标高位于中部)**

水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹	水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹
0	0	3.2	214.25
0.8	37.78	3.6	245.85
1.2	63.25	4	288.54
1.6	100.27	4.4	320.88
2	130.48	5.6	370.85
2.4	157.56	8.4	405.25
2.8	178.21	10	410.87

**表8 第二部分模型排水井泄流量
(起始泄水标高位于上部)**

水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹	水头/m	泄流量/m ³ ·s ⁻¹
0	0	3.2	235.42
0.8	39.21	3.6	299.25
1.2	69.28	4	342.65
1.6	105.41	4.4	370.25
2	138.68	5.6	398.85
2.4	168.25	8.4	419.28
2.8	186.85	10	420.23

从图 8 可以看出,不同部位泄流曲线整体趋势是一致的,泄流流量随着堰上水头的增加而增大,增

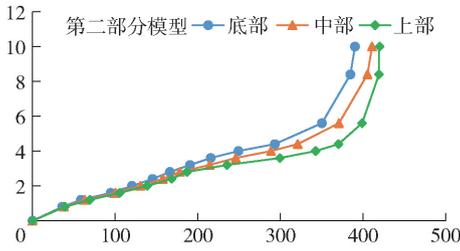


图8 方案一第二部分(2-1、2-2 排水井)不同部位泄流曲线

长趋势分为两个阶段,2座排水井联合泄洪流量曲线拐点出现在堰上水头在4.4~5.6 m,当堰上水头拐点水头时,泄流量随着堰上水头的增加而迅速增大,当堰上水头大于拐点水头时,泄流量增大幅度变小。

从底部、中部、上部不同部位的泄流曲线可以看出,起始泄水标高对泄流量有一定的影响,即存在相同水头下,起始泄水标高越高,泄流量越大的规律,在水头达到3 m 以上后,该趋势较为明显。

4.2 水流流态

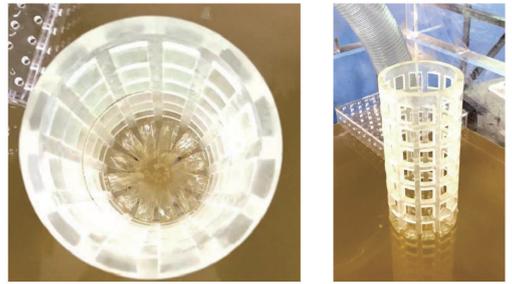
不同部分模型的水流流态大体相似,以第一部分模型的水流流态为例进行介绍。

1) 排水井的水流流态

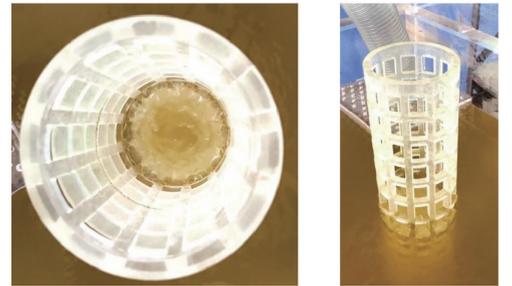
排水井的水流流态如图9所示,当堰上水头小于1.2 m时,排水井进口处的水流被立柱分为12股水舌,水舌均匀分布,在排水井内自由跌落,汇向排水井中心,在排水井和竖井中,没有出现贴壁流现象,进水孔周围的水面平稳,也没有不良的水力现象(图9(a))。当堰上水头位于1.6~4.0 m时,12股水舌均匀的流入排水井,随着堰上水头的增加,水流在排水井内逐渐壅高,水舌逐渐消失(图9(b))。当堰上水头大于4.0 m时,排水井内会出现波动的水面且略低于井外水面,随着堰上水头的增加,排水井内的水面逐渐趋于稳定并且与井外水面持平(图9(c))。

2) 消力井的水流流态

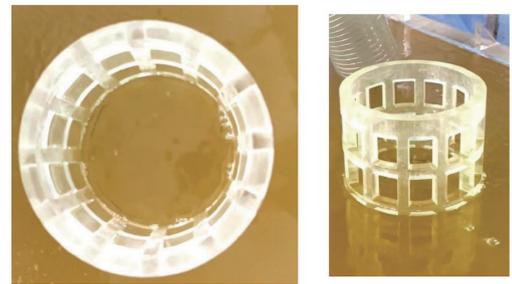
消力井的水流流态如图10所示,当堰上水头为0.8 m时,1-1、1-2消力井底部产生水垫层,由于排水井内水流的跌落,导致水垫层内部有大量气泡产生,消力井出口水面壅高,流态为无压流。由于1-2消力井水流受到下游岔管阻挡作用,在消力井出口附近产生水面壅高现象。1-1消力井出口处水面波动相对较大,消力井内部紊动也较大,1-2消力井出



(a) 堰上水头0.8 m



(b) 堰上水头2.4 m



(c) 堰上水头10.0 m

图9 排水井的水流流态图

口处水面平稳,水流现象如图10(a)、图10(b)所示。当堰上水头为2.0 m时,由于排水井内水流的跌落导致消力井内部水流产生大量气泡,水流紊动剧烈。由于1-2消力井水流受到下游岔管阻挡作用,消力井出口为明满交替水流状态,1-1消力井出口为满流状态,水流现象如图10(c)、图10(d)。当堰上水头达到4.0 m以后,水流充满消力井,仍有气泡产生但气泡含量较少,为满流状态。随着堰上水头的增加,可以观察到水中气泡逐渐减少。水流现象如图10(e)、图10(f)。当堰上水头达到10.0 m以后,水流充满消力井,为压力流状态,水流现象如图10(g)、图10(h)。

3) 排洪隧洞的水流流态

排洪隧洞的水流流态如图11所示,当堰上水头小于2.0 m时,排洪隧洞水流流态为无压流,水面相对平稳,水面高度随着堰上水头高度增加而增加,在岔管处由于隧洞边壁对支洞来水阻流导致水面壅高,如图11(a)所示。当堰上水头在2.0~2.8 m

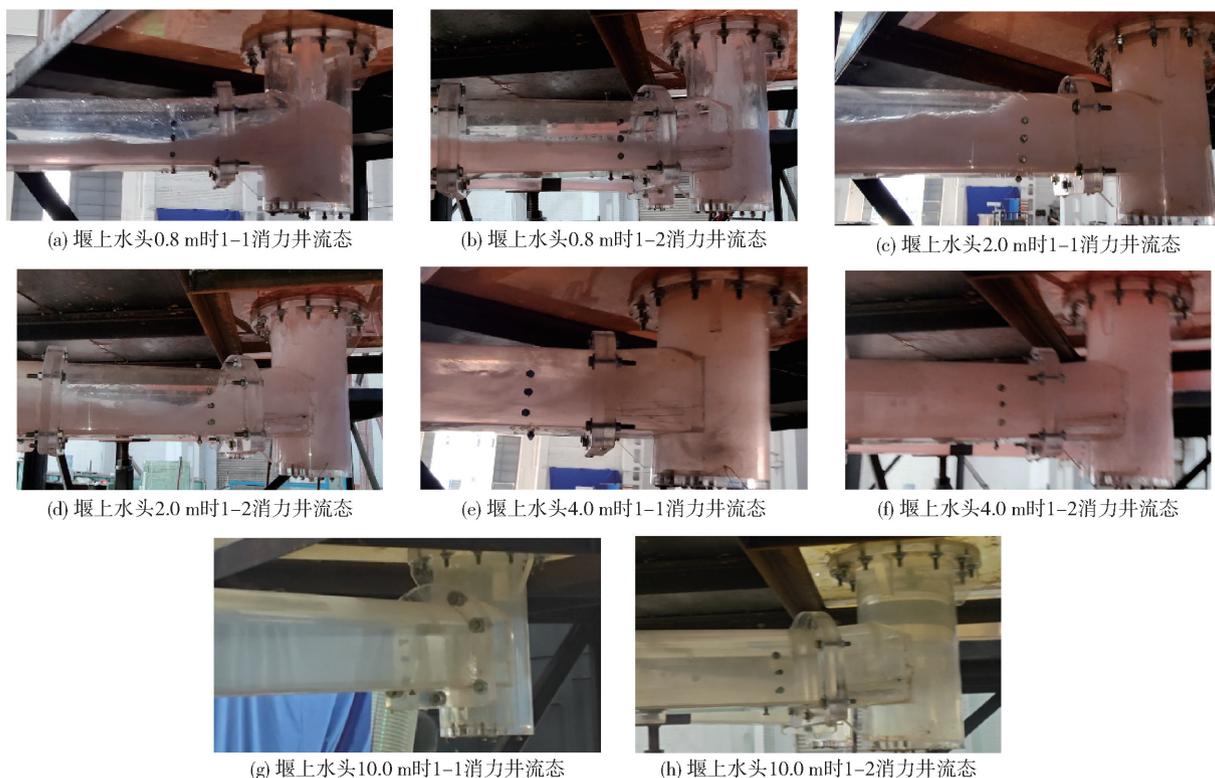


图 10 消力井水流流态图

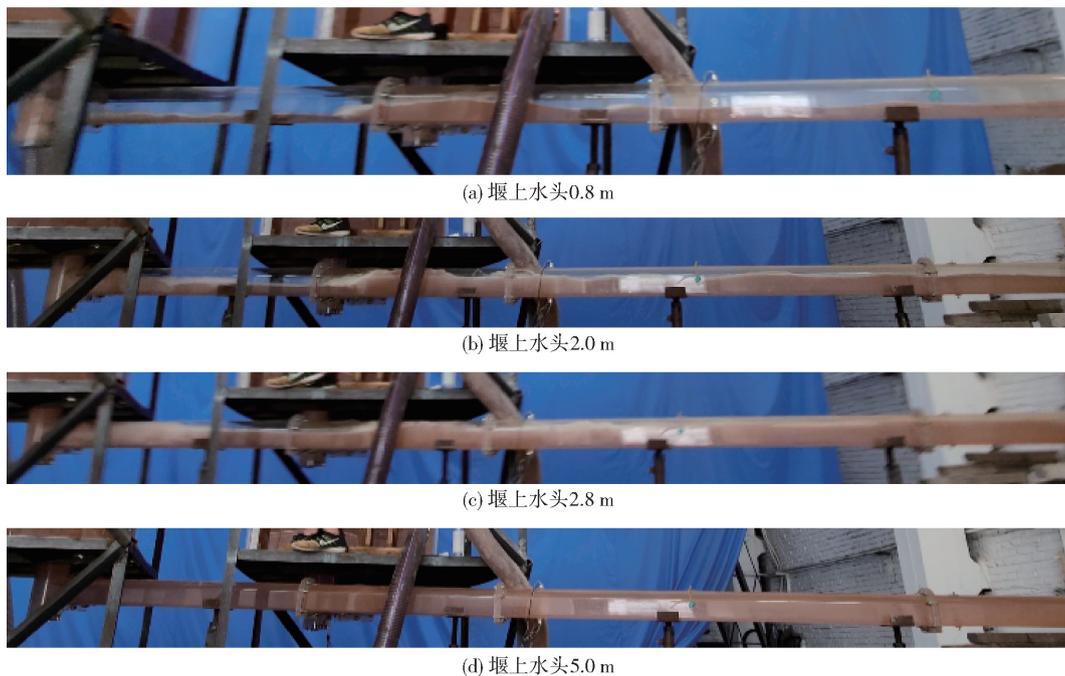


图 11 排洪隧洞水流流态图

时,支洞及岔管处水流为明满交替状态(图 11(b)、图 11(c)),其余处排洪隧洞水流流态为无压流。当堰上水头在 2.8~4.0 m 时,支洞水流随着堰上水头的增加逐渐趋于满流状态,岔管附近水流为满流。

当堰上水头大于 4.0 m 时,支洞和岔管基本处于满流状态(图 11(d))。

4.3 脉动压力

利用多功能监测系统对消力井底部脉动压力进

行测量,测得各个测点的点脉动压力,计算得出时均压强,对数据分析,检验排洪系统设计的合理性。消力井底部设置5个采集点,中心位置为测点1,消力井出口方向设置测点4、测点5,使测点4、5平均分布在测点1到边壁之间;与消力井出口相垂直方向设置测点2、测点3,使测点2、3平均分布在测点1到边壁之间,消力井测点位置如图12所示。

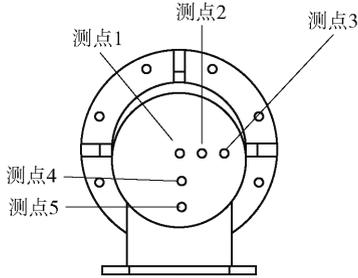


图12 消力井测点位置图

1-1和1-2消力井底部时均压强图如图13、图14所示,从图中可以看出,1-1和1-2消力井底部时均压强基本呈现出随水深增加而增加的规律,其中1-1消力井底部最大时均压强为222.34 kPa,1-2消力井底部最大时均压强为237.57 kPa。

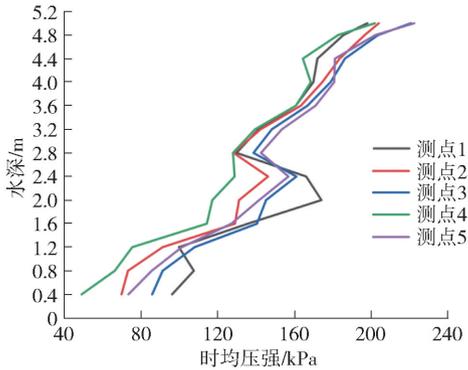


图13 1-1消力井水头与底部时均压强关系图

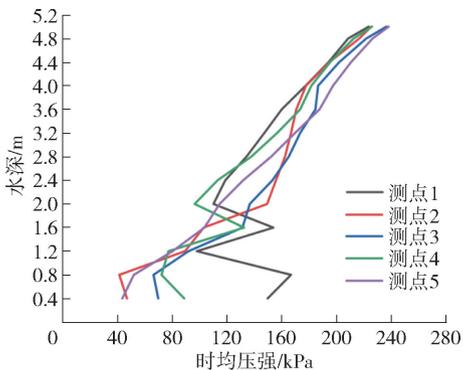


图14 1-2消力井水头与底部时均压强关系图

4.4 掺气浓度

水流通过排水井卷携大量空气跌入消力井,在消力井水垫层区,水流翻滚强烈,水面破碎,导致水流发生掺气。采用掺气浓度仪测量掺气浓度,并利用单片微型计算机进行数据采集和处理。数据采集主要来源是消力井底部,将应变片贴于消力井底部,进行模型中掺气的测量。

1-1和1-2消力井掺气浓度变化如图15所示,两个排水井起始泄水标高相同,二者掺气浓度范围及浓度变化趋势相似。1-1消力井底部掺气浓度在水深为0.8 m时达到最大值7.01%,2-2消力井底部掺气浓度在水深为0.8 m时达到最大值7.12%。

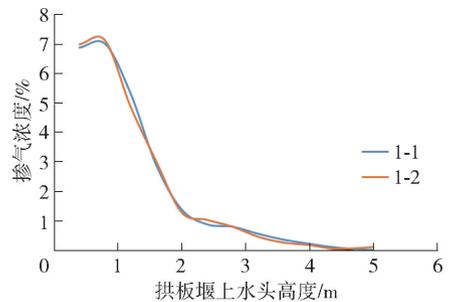


图15 1-1和1-2消力井掺气浓度变化图

5 结论

(1) 通过水工模型试验获得了各使用期2座排水井同时泄水的复杂泄水工况下的泄流关系曲线,为下一步进行尾矿库调洪演算提供了依据和参考。

(2) 隧洞内埋设回水管或者设置导流坎等均会减小排洪系统的泄流能力并对排洪系统的水流流态造成一定影响,故在设计中应尽可能避免在排洪系统内设置其他设施,使水流平顺自然,保证其泄流量和水流流态。

(3) 通过水工模型试验获得了排洪系统的水流流态、脉动压力和掺气浓度等情况,为排洪系统的优化布置和结构设计提供了参考。

[参考文献]

[1] 郑学鑫,岑建. 尾矿库安全风险分析及对策措施研究[J]. 防灾科技学院学报,2019,21(2):82-85.
 [2] 李伟,徐孝平. 水力学[M]. 武汉:武汉水利电力出版社,2000.
 [3] 牛文杰,陈峰,宁辰禹,等. 基于尾矿胶结回填技术的露天矿坑回填治理研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):7-14.
 [4] 林子扬,王卫红,杨宏珺. 尾矿库不同溃坝形式的数值模拟研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(6):12-16+21.