

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221790

旋流竖井泄洪洞水力学特性及泥沙输移特性研究

蔡豪锋¹, 张建民¹, 陈学艳², 王乃飞^{2,3}, 颜晶冉^{2,3}, 肖发新⁴, 吴云峰⁴

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 三峡生态环境投资有限公司, 湖北 宜昌 443004; 3. 长阳日新生态治理有限公司, 湖北 宜昌 443500; 4. 长阳土家族自治县水利和湖泊局, 湖北 宜昌 443500)

摘要: 基于 RNG κ - ϵ 双方程紊流模型并结合 VOF 两相流模型, 通过模型试验和数值模拟分析了双涡室旋流竖井流态、流速、压力、消能、空化和泥沙输移特性。结果表明, 模拟结果与试验值吻合程度较好, 涡室段通过掺气坎补气, 掺气更加充分, 降低了发生空蚀破坏可能性; 实测消能率达到 75% 以上, 消能效果较好; 不同粒径泥沙在不同流量下在竖井底部存在泥沙淤积, 使得消力井深度减小, 小流量运行时淤沙最高可达到消力井深度的 72%, 但经过一次大洪水后泥沙被清空, 淤沙高度降低为井深的 1.6%, 使旋流竖井保持有足够的消能水垫, 不会影响其正常运行。在实际工程中, 控制拦污栅大小, 避免大颗粒泥沙进入泄洪洞导致拥堵, 实践中可通过改变运行方式来控制消力井淤沙高度, 使其有足够富裕的水垫深度来满足旋流竖井设计和正常运行要求。

关键词: 旋流竖井; 泥沙输移特性; 数值模拟; 模型试验; 消能

中图分类号: TV135.2⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0112-05

1 引言

与传统消能工相比, 旋流式消能工通过水流间形成的紊动、剪切和涡流进行强烈掺混消能, 消耗大部分能量, 具有结构简单、布置灵活、消能率高等特点, 常用于导流洞改建为永久泄洪洞和市政排水工程中。旋流竖井泄洪时往往会伴随水流的冲刷、空化空蚀、急流冲击波等有害现象。因此, 解决掺气减蚀的问题对旋流竖井泄洪洞尤为重要。雷刚等^[1]提出双涡室旋流竖井, 在涡室段新增掺气坎, 增加泄流时掺气量, 防止竖井壁面发生空化破坏; 何军龄等^[2]指出竖井消力井利用环状水跃和水垫消耗旋转水流中的 58.69% 的能量; 郭雷^[3]提出当井深 H_0 等于 1.69 倍竖井直径 D_0 时, 下游水流波动最小; 张宗孝等^[4]提出在消力井直径 D 等于 1.40 倍竖井直径 D_0 时, 消力井水垫达到最大值, 此时消能效果最好; 栗帅等^[5]采用 Realizable κ - ϵ 紊流模型模拟某双涡室竖井旋流泄洪洞水流流态、压力及消能率等水力特性。

消力井深度对旋流竖井的水力特性至关重要, 但对上游含沙量较高的流域旋流竖井泄洪时会有部分泥沙沉入井底导致消力井水垫深度减小, 使得原有消力井深度和衔接段尺寸不能保证水垫深度降低后水流的稳定性与正常运行要求。为此, 本文通过模型试验分析其水流流态、流速、压力等水力特性分布规律及泥沙输移特性; 通过数值模拟对模型试验中不易测得的数据进行补充, 探求其压力、流场等分布规律, 获得了一些有益的结论, 可供借鉴。

2 研究方法

2.1 模型试验

某旋流竖井泄洪洞由上平段、一级旋流竖井、中平段、二级旋流竖井、下平段组成。依据重力相似准则, 采用比尺为 1:40 试验模型, 使用有机玻璃制作。原设计方案上平段底坡坡比为 1:10, 水流切向进入上部涡室时水位雍高明显, 根据工程实际地形条件, 上平段连接段 30 m 长度偏大

收稿日期: 2022-07-30, **修回日期:** 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130904)

作者简介: 蔡豪锋(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学, E-mail: 1018055095@qq.com

通讯作者: 张建民(1972-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水力学, E-mail: 424126524@qq.com

无法满足设计要求,因此需进一步优化,优化体型布置见图 1,竖井上部连接段长度缩短至 18 m,底部坡比增至 1:3.58。试验工况 1~4 流量分别为 179、120、80、16.5 m³/s。为更好揭示旋流竖井泄洪洞消能及空化特性,在涡室、竖井段布置测压管;流速测量采用南京水利科学研究院生产的 LGY-II 型智能流速仪;时均压力采用测压管测量;水面线采用精度为 0.1 cm 的钢尺测量。

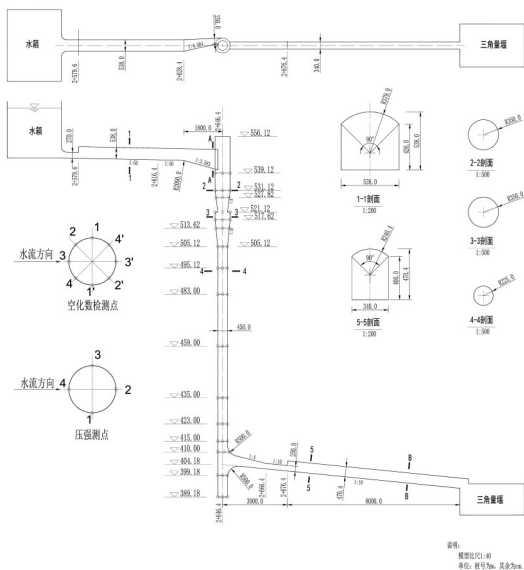


图 1 旋流竖井体型布置图

Fig. 1 The type of vortex shaft

2.2 数值模拟

为揭示旋流竖井内部的流动规律,在模型试验的基础上采用 FLUENT 软件进行数值模拟研究,使用结构与非结构网格相结合的方式对旋流竖井进行分段处理,网格数量约为 45×10^4 个,尺寸大小在 0.2~0.8 m 之间,网格质量满足要求,网格划分示意图见图 2。



图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mesh generation

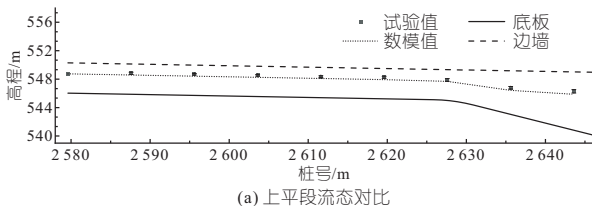
使用实际工程中常用的 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对旋流竖井的流态进行计算,采用 VOF 两相流模型对自由液面进行追踪;流体由于紊流模型中未求解压力项,采用 PISO 算法对压力和速度场

进行耦合计算,离散格式采用 Quick 格式。

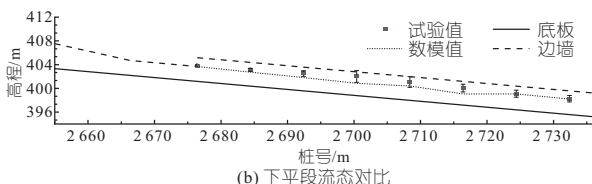
3 结果与分析

3.1 数值模拟准确性

为确保数值模拟计算结果的准确性,比较了 $Q=179 \text{ m}^3/\text{s}$ 时旋流竖井通过 FLUENT 数值模拟得到的上平段流态等水力特性,见图 3。由图 3 可知,下平段水深稍有误差,一方面是由于下平段掺气水流水面波动较大,试验测量时有误差;另一方面是由于数值模拟中掺气水流的水面线难以量化。总体而言,数值模拟计算结果与模型试验中的测量误差均在 10% 以内,模拟效果较好,可采用数值模拟的计算结果对旋流竖井水力特性进行研究。



(a) 上平段流态对比



(b) 下平段流态对比

图 3 水面线试验与数模对比

Fig. 3 Comparison of water surface profile in numerical simulation and model test

3.2 流态分析

$Q=179 \text{ m}^3/\text{s}$ 时旋流竖井上平段水流平顺,设计边墙高度满足要求。水流平顺进入涡室后顺利沿壁面旋转,在涡室内有一定壅高,最大壅高出现在涡室下游壁面高程 552.24 m 处。水流沿涡室旋转一周后经涡室折流坎后的水流衔接平顺,由于折流坎的阻挡,壁面与涡室进口水流碰撞,并增加了旋流角动量^[6]。水流始终贴着壁面以螺旋式的形式旋转,形成壁面掺气水流,保护了竖井高流速段。涡室中心空腔保持连续贯通,掺气坎仍有一定空腔,保证了竖井的掺气效果,降低了发生空化空蚀的可能性。

水流以较高流速进入竖井底部时发生环状水跃,水流进入消力井水垫时卷入大量空气,形成乳白色的高浓度掺气水流,水流在较低高程处仍存在切向速度,消力井底部有少量旋转掺气水流存在,有利于将水垫底部的泥沙、碎石等杂物卷入下平段清除。

水流在消力井处经强烈混掺消能后进入压坡段, 流线变化剧烈, 压坡段均被乳白色的掺气水流充满。出流后仍存在大量乳白色掺气水流, 仅在贴近底板处有很薄的一层清水层, 由于下平段中气体大量被释放, 水面存在较大波动现象, 会有部分水流高过边墙高度, 通过观察可发现上窜的水体为掺气水流, 不影响整体泄流效果。

3.3 流速特性

通过数值模拟计算, 水流在竖井段壁面流速分布见图 4(a)。由图 4(a)可知, 水流在进入涡室后主要以切向速度为主, 上平段水流冲击部分流速增大, 第一个收缩段面积减小, 流速逐渐增大, 其中 $Q=179 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水流经过第一个收缩段由于壁面水层较厚, 流速减小; 第二个收缩段面积突增, 水流在掺气空腔处受到阻碍作用, 流速降低, 随后面积逐渐减小, 流速逐渐增大。随着高程的降低, 势能转换为动能, 切向速度逐渐减小, 垂向速度逐渐增加; $Q=179 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水流在环状水跃发生处速度达到峰值 36.55 m/s 。直至竖井下部分由于消能水垫的原因, 流速又逐渐减小, 消力井底部流速在 5 m/s 左右, 流速呈现“两头小, 中间大”的变化趋势。

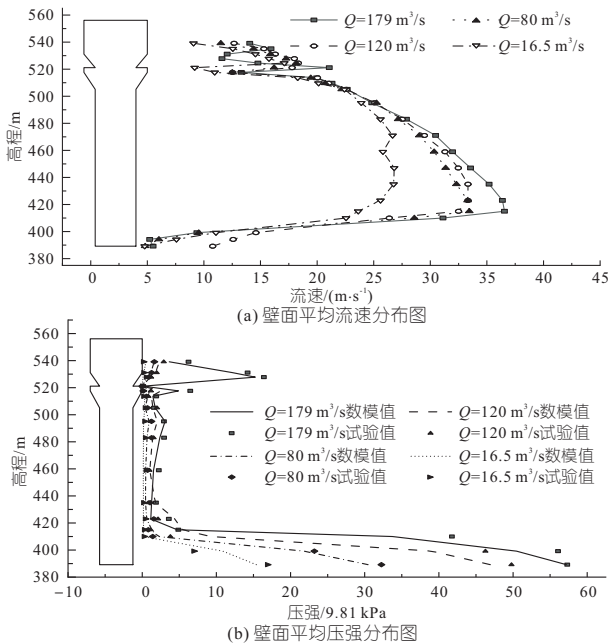


图 4 竖井段壁面平均流速、压强分布图

Fig. 4 Average velocity and pressure distribution at the wall of vortex shaft section

3.4 压强特性

各工况竖井壁面压力模拟值与实测值对比见图 4(b)。由图 4(b)可知, 由于上平段水流直冲井壁, 该处压强有局部的增大, 接着在收缩段随高程的降低, 内径减小, 壁面水层增厚, 压强逐渐增大; 随后水流由上涡室进入下涡室, 离心力瞬间释放,

下涡室受到水流直冲部分有局部的增大。随着高程的降低, 切向流速减小, 壁面压强也逐渐减小, 竖井段壁面压强变化较小。直至竖井下部分由于消能水垫的原因, 压强又逐渐增大; 竖井底座部分由于还存在环向速度的缘故, 动能受到边界的束缚转化为压能, 随着底座中心往外越扩散, 其压强越大。数值模拟计算结果与物理模型实测值比较接近, 进一步验证了数值模拟的准确性。

3.5 空化数

高水头泄水建筑物在空蚀敏感区容易发生空蚀破坏, 为判断竖井井壁抗空蚀能力, 结合数值模拟计算所得压强和流速计算井壁空化数, 水流空化数 σ_0 计算公式为:

$$\sigma_0 = (H + H_a - H_v) / [u_0^2 / (2g)] \quad (1)$$

$$H_a = 10.33 - \nabla / 900 \quad (2)$$

其中 H 为计算点的相对压强水头; H_a 为当地大气压强水头; H_v 为水的气化压强水头, 随温度的变化而变化, 计算时取 0.24 ; $u_0^2 / (2g)$ 为计算点的平均流速水头; ∇ 为当地海拔高程。

空化数检测点布置见图 1, 沿竖井圆周计算 8 组数据, 由式 (1)、(2) 计算所得 $Q=179 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水流空化数见图 5。由图 5 可看出, 在竖井下部, 压强逐渐减小, 流速在重力作用下逐渐增加, 在高程 $415 \sim 458 \text{ m}$ 时水流空化数低于空化数临界值 0.20 。由于采用双涡室旋流竖井, 涡室段布置有掺气坎, 增加了其掺气量, 在竖井下部的水流掺混了大量空气, 从而可避免发生空化空蚀的可能性。

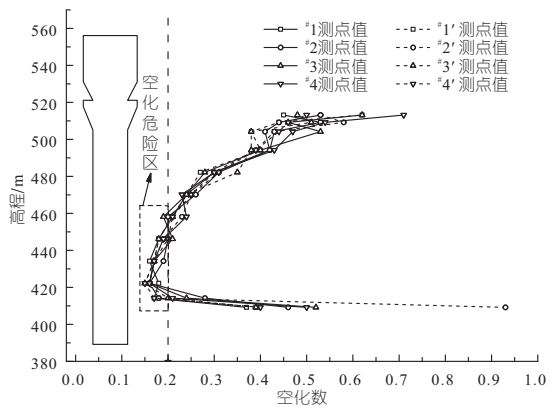


图 5 井壁水流空化数

Fig. 5 Well wall water cavitation number

3.6 消能率

旋流竖井中能量损失主要由水流与壁面摩擦造成的沿程水头损失和竖井底部水垫混掺碰撞造成的能力损失。消能率 η 计算公式为:

$$\eta = \left[1 - \frac{z_2 + h_2 + \alpha_2 v_2^2 / (2g)}{z_1 + h_1 + \alpha_1 v_1^2 / (2g)} \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中, z_1, z_2 均为计算断面的平均高程; h_1, h_2 均

为计算断面的平均水深; v_1 、 v_2 均为计算断面的平均水深; α_1 、 α_2 均为动能修正系数,取 1.0。

计算断面见图 1。计算断面 A-A 位于涡室入口处,由于水流经过下平段压坡出流后波动比较强烈,故取计算断面 B-B(桩号 0+2 732.40),此处水流趋于平稳。各工况消能率计算结果见表 1。传统消能工消能率一般在 40%~50%,由表 1 可知,各工况消能率均大于 75%,消能效果明显,试验值与模拟值吻合较好,可见本文旋流竖井体型设计合理,满足泄洪要求。

表 1 消能率计算结果

Tab. 1 Calculation results of energy dissipation ratio

工 况	项目	平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		水头/m		消能 率/%
		A-A 断面	B-B 断面	A-A 断面	B-B 断面	
1	试验值	14.21	22.34	157.20	9.08	79.39
	模拟值	13.90	24.41	156.79	9.03	76.36
2	试验值	11.33	18.55	156.36	8.83	83.81
	模拟值	11.79	17.76	156.30	8.59	84.90
3	试验值	10.47	15.10	154.70	8.32	87.56
	模拟值	11.08	16.26	154.76	7.76	86.81
4	试验值	9.20	9.89	152.67	7.01	92.36
	模拟值	11.03	11.42	152.71	6.86	91.50

3.7 泥沙输移特性

在实际工程中,对上游含沙量较高的流域,旋流竖井泄洪时会有部分泥沙进入泄洪洞并沉入井底导致消力井水垫深度减小,使得原有衔接段尺寸不再能够保证水垫深度降低后水流的消能和衔接水流稳定性,原有消力井深度和衔接段尺寸不能满足设计和正常使用要求。产生的主要危害有:①消力井深度减小,水体在竖井底部掺混强度减弱,导致消能率降低;②下平段水流波动过大,为保持下平段泄洪洞有足够净空,需加高泄洪洞边墙高度,增加了工程投资;③中平段水流波动过大,水流趋于稳定的距离加长,在进入二级竖井时不易形成较好流态,影响旋流竖井消能减蚀效果,增大了建筑物安全隐患。

涡室进口宽度和下平段压坡出口高度均为 2.5 m,当超径泥沙 >0.5 倍进出口高度时,容易造成“卡脖子”现象,拥堵泄洪洞,故通过试验测试旋流竖井在不同流量下对粒径不超过 1.2 m 的泥沙的输移能力,淤沙剩余高度与试验实测图见图 6。由图 6 可看出,水流在消力井底部仍保持较高掺混强度,消力井底部部分泥沙随水流挟带流出,但仍有部分泥沙会淤积在消力井底部,在中小流量大粒径冲淤情况下,消力井深度分别为 0.28、0.65 倍井深,会导致消力井水垫深度有所减小,消能率降低,从而影响水面波动等不利现象;在大流量时,淤沙高度仅为 0.016~0.04 倍消力井深度,所以在实际工程中旋流竖井经过一次大

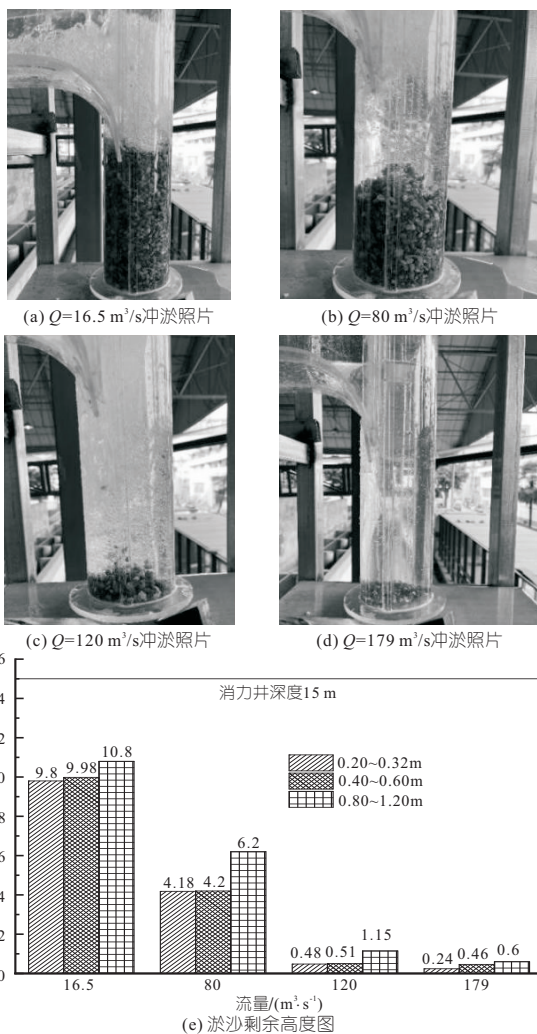


图 6 冲淤试验图

Fig. 6 Chart of sediment scour and deposition

洪水后能将消力井底部淤积泥沙排出。

因此,在含沙量较高的流域中,首先采用一定工程措施,控制拦污栅大小,避免大颗粒超径泥沙进入泄洪洞导致拥堵,其次考虑泥沙淤积高度,使其有足够富裕的水垫深度满足旋流竖井消能要求。实践中能够通过运行方式来控制消力井淤沙高度,经过一次洪水后泥沙清空,使得旋流竖井保持有足够的消能水垫,不会影响其正常运行。

4 结论

a. 采用 RNG κ - ϵ 双方程紊流模型并结合 VOF 两相流模型对双涡室旋流竖井流态、压力、空化数和消能率等水力参数进行模拟,模拟结果与试验值变化规律基本一致,吻合程度较好。

b. 本文提出的旋流竖井优化方案流态良好,有连续贯通的空腔,混掺强烈,涡室段通过掺气坎补气,掺气更加充分,降低了发生空蚀破坏可能性;消能率达到 75% 以上,消能效果较好。

c. 小流量运行时旋流竖井淤沙高度最高达

