

水平旋流内消能泄洪洞段与尾水洞 段流态适用性研究

赵洋, 牛争鸣, 李奇龙, 王天时, 贾飞
(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了探究水平旋流内消能泄洪洞段与尾水洞段流态适用性条件,建立了一种新型的泄洪内消能水力模型,即洞内淹没射流与水平旋流梯级内消能工。试验以原型流量 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 、最大总作用水头 150 m 为标准进行了模型试验的体型设计,然后对设计的该消能工进行了 $1:60.25$ 几何比尺下的水力模型试验。结果表明:当 $1.5 < X/D < 9.1$ 时,旋流洞内空腔直径沿程先增大后迅速减小最后平稳,当 $9.1 < X/D < 10.3$ 时,空腔直径呈现出逐渐增大并最终稳定至 $r/D = 0.45$ 左右的趋势;上游水位对于下游尾水洞段的流态影响条件不大,当下游水位 $0.5D < h < 0.85D$ 时,旋流洞与尾水洞内会形成旋流远驱水跃流态,当下游水位 $0.85D < h < 0.95D$ 时,旋流洞与尾水洞会出现旋流临界水跃流态,当下游水位 $0.95D < h < 3.2D$ 时旋流洞与尾水洞会出现旋流淹没出流流态。

关键词: 梯级内消能工; 水力模型试验; 旋流远驱水跃; 旋流临界水跃; 旋流淹没出流

中图分类号:TV651.3; TV135.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)01-0187-05

Study on the applicability of the flow state of the spillway and the tail-hole section of horizontal cyclone

ZHAO Yang, NIU Zhengming, LI Qilong, WANG Tianshi, JIA Fei

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the applicability of horizontal swirling flow inner energy dissipation section of spillway section and tailrace tunnel, a new model of flood discharge and energy dissipation is established, namely submerged jet and horizontal swirling cascade internal energy dissipater. The model design of the model test was carried out with the flow rate $1200\text{ m}^3/\text{s}$ and the maximum total acting head 150 m as the standard. Then the hydraulic model test under the $1:60.25$ geometric scale of the designed energy dissipater was carried out. The results show that when the $1.5 < X/D < 9.1$, swirl hole along the cavity diameter increases first and then decreases rapidly finally becomes steady. When $9.1 < X/D < 10.3$, the cavity diameter increased and finally stabilized to about $r/D = 0.45$. The water level of upstream flow has little influence on the downstream segment of the tailrace tunnel, when the downstream water level is $0.5D < h < 0.85D$, the swirl flow and tailwater cave will form a swirling far-flow hydrodynamic regime, and when downstream water level is $0.85D < h < 0.95D$, swirl hole of tailrace tunnel will appear and swirl flow and critical hydraulic jump, when the water level downstream of $0.95D < h < 3.2D$ and swirl hole of tailrace tunnel will appear submerged cyclone flow pattern.

Key words: cascade internal energy dissipation; hydraulic model test; swirling flow hydraulic jump; swirling critical hydraulic jump; swirling flow and submerged outflow

1 研究背景

旋流式消能是在旋流洞内设置起旋装置^[1],使

水流在洞内发生旋转进行消能的内消能方式,具有消能率高、施工简单和布置灵活等优点^[2-3]。曹双利^[4]通过模型试验,在旋流条件下对水平旋流内消

收稿日期:2017-08-03; 修回日期:2017-10-05

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51709226)

作者简介:赵洋(1993-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为洪水演进数值模拟、结构应力数值模拟。

通讯作者:牛争鸣(1957-),男,陕西西安人,博士,教授,博士生导师,研究方向为旋转内消能泄洪洞水力特性。

能泄洪洞环流空腔内气体压强的变化规律及与各水力特性的关系进行了研究。南军虎等^[5]采用原型与不同比尺模型试验对比和理论分析的方法,研究了公伯峡水平旋流泄洪洞的水力特性,初步探讨了模型的缩尺效应,并且发现水流挟气使空腔内形成负压,通风由通气孔进出口的压差产生,空腔内真空度是原、模型通风量相似的主要影响因素^[6]。李奇龙等^[7-8]通过数值模拟计算发现旋流洞段发生空化空蚀可能性较小,而扩散段末端有出现空化空蚀的可能性,然后对泄洪洞在不同阻塞体型下的流态进行研究。洪锺等^[9]研究表明环形掺气坎上游竖井段、起旋室内及水平旋流洞内压力随时间变化趋势原型和模型的基本一致,符合重力相似准则。

牛争鸣等^[10]通过模型试验发现在竖井为有压流的条件下,水平旋流泄洪洞的流态可分为自由流、吸吮流和淹没流 3 种基本流态。南军虎等^[11-12]发现数值模拟能够客观地反映出空腔旋流内部的流场特性。栗帅等^[13]通过数值模拟获得了各个流段不同的水流流态、流速、压强以及消能率的沿程分布和特性,计算结果与试验结果符合良好。丁浩铎^[14]通过试验发现当上游水位一定时,起旋器喉口和阻塞孔口收缩比决定了大坡降水平旋流洞段的流态及各项水力特性。南军虎等^[15]、牛争鸣等^[16-17]为了揭示空腔旋流内部的压强特性,以公伯峡水平旋流消能工为例,采用理论分析、试验研究和数值模拟相结合的方法进行了分析。南海龙^[18]研究水流的流态与工作水头的关系,通过分析实测数据对水流流态进行分类,并得到临界工作水头的变化范围。

本文通过一种新型的泄洪内消能工模型试验,探究水平旋流洞段空腔直径变化规律,根据明渠水跃流态的发展变化,将下游水平旋流洞段与尾水洞段的水流流态分为 3 种:旋流远驱水跃、旋流临界水跃、旋流淹没出流,并且探究不同水流流态满足的下游水位条件,为水平旋流洞洞身设计和运行管理提供科学依据。

2 数据与方法

本研究主要采用系列水工模型试验与影响因素的量纲分析方法,并结合必要的理论分析进行。试验模型按重力相似设计,几何比尺 1: 60.25,各物理量原型与模型的比尺关系见表 1。试验按原型流量 1 200 m³/s,最大总作用水头 150 m 进行设计。

2.1 上游进口段直径的选择

按照原型流量 $Q = 1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$,选择原型管径

为 10 m,由理论计算公式 $V = \frac{Q}{0.25\pi d^2}$,得出 $V = 15.28\ \text{m/s}$,因而上游进口段管径满足设计规范对于流速的要求。

表 1 原、模型各物理量的比尺关系

物理量	比尺关系	比尺数值
几何	λ_L	60.25
流速	$\lambda_V = \lambda_L^{0.5}$	7.763
流量	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	28176.86
压强	$\lambda_{P/\gamma} = \lambda_L$	60.25
糙率	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1.98

2.2 起旋器的设计

起旋器孔口的泄流能力按公式(1)计算:

$$Q_2 = \mu_2 A \sqrt{2g(H_2 - P_v/\gamma)} \quad (1)$$

式中: Q_2 为起旋器孔口泄流量,m³/s; μ_2 为起旋器孔口流量系数,取 0.3 ~ 0.4; A 为起旋器孔口过流面积,m²; H_2 为起旋器孔口处总的作用水头,m; P_v 为水平旋流洞段壁面压强值,m。

2.3 模型试验工况

本文提出的梯级内消能工模型主要由两部分组成,第 1 部分为水平洞内的收缩淹没射流消能,第 2 部分为竖井接水平旋流洞再接阻塞扩散段的旋流消能与阻塞扩散消能。设计模型试验工况如表 2 所示(H 为上游水位, h 为下游水位, D 为管道直径)。

表 2 模型试验设计工况

上游水位 H/D	下游水位 h/D
12	0.5
	1.5
	2.5
10.9	0.5
	1.5
	2.5
	1.0
	1.2
	0.8
9.2	0.5
	1.5
	2.5
8.1	0.5

2.4 试验模型设计

整个模型部分主要由上游水平淹没射流洞段和

下游水平旋流洞段组成。模型示意图如图1所示,现场安装模型如图2所示。选取上游进口段管径 $d_1 = 16$ cm,管长 L_1 可选择 $(5 \sim 10)d_1$,因此取 $L_1 = 5d_1 = 5 \times 16 = 80$ cm。上游扩散段管长 L_2 ,可选择 $(5 \sim 10)d_1$,选择 $L_2 = 9d_1 = 144$ cm,管径选择21 cm。通过公式(1)的计算,竖井段和起旋器连接部分设计为圆变方,上边圆的直径为15 cm,与起旋器连接处为 15 cm $\times$ 9.33 cm的长方形接口。旋流洞直径选择与上游淹没射流洞段射流前的管道直径相同,即 $d_3 = 16$ cm,旋流洞长度选择 $L_3 = 8D = 128$ cm。尾水管直径选择现有的 $d_4 = 21$ cm管径,长度 $L_4 = 18D = 288$ cm。下游阻塞采用圆台体,长度为23

cm,直径从16 cm逐渐过渡到13 cm。

3 结果与讨论

3.1 水平旋流洞段空腔直径变化特性

本文结合相关研究成果,在不同上游水位下对水平旋流内消能泄洪洞的空腔直径及空腔位置进行测量,测量结果如图3、4所示。其中 X 为以起旋器最前端为基点沿水平旋流洞方向的距离, D 为水平旋流洞洞径, r 为空腔半径。无量纲因次量 X/D 表示相对洞径大小水平旋流洞方向的距离, $X/D = 0$ 为起旋器最前端, $X/D = 9.1$ 为水平旋流洞末端, $X/D = 10.3$ 为阻塞收缩段末端。

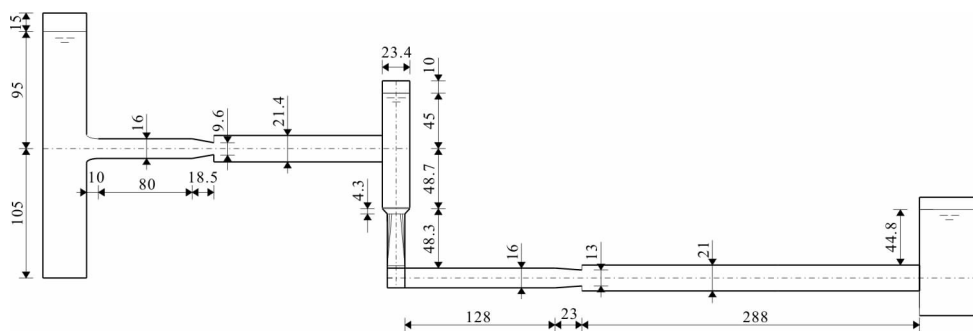


图1 模型设计示意图



图2 模型安装现场图

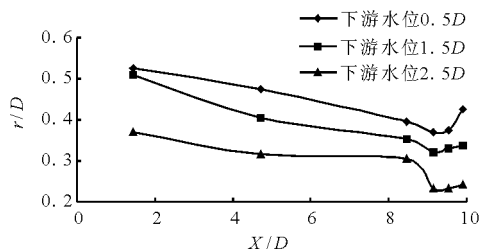


图3 上游水位12D时空腔直径沿程变化规律

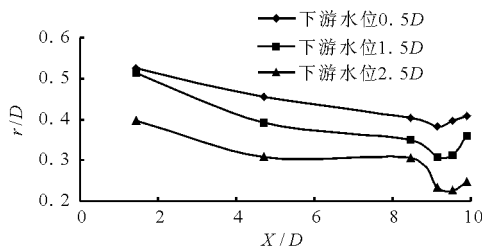


图4 上游水位10.9D时空腔直径沿程变化规律

根据图3和图4分析可知,对于不同的上游水位,空腔直径沿程变化的趋势基本上均呈现出先增大、再减小、再增大的规律。当相对洞径大小水平旋流洞方向的距离即 $0 < X/D < 1.5$ 时,空腔直径呈逐渐增大的趋势,究其原因发现,在此位置,动能和压能之间的相互转换比较剧烈,而且先期进入水平旋流洞段水流旋流经过洞顶后与后期进入水流相遇,此处水层厚度较大,相对的空腔直径减小, X/D 越接近1.5,水层厚度越小,相对的空腔直径增大。

当 $1.5 < X/D < 9.1$ 时,即在水平旋流洞段,空腔直径呈现出先迅速减小后逐渐趋于稳定的趋势。究其原因发现,在 $X/D = 2$ 位置附近,动能和压能之间的相互转换比较剧烈,导致壁面压力、流速以及空腔直径逐渐减小;之后,随着壁面压力逐渐趋于稳

定,流速和空腔直径也渐趋于稳定。

当 $9.1 < X/D < 10.3$ 时,即在阻塞收缩段对于不同的上游水位,空腔直径均呈现出逐渐增大并最终稳定至 $r/D = 0.45$ 左右的趋势。分析其原因发现,当 $X/D > 9.1$ 时,随着旋流洞洞径逐渐收缩,旋转水流流速逐渐增大,空腔直径逐渐增大。

3.2 下游水平旋流洞段与尾水洞段流态特性

为了观测下游水平旋流洞段和尾水洞段的流态,选择上游水位10.9D时,下游水位分别为0.5D、0.85D、1.0D、1.25D、1.6D、3.2D 6种工况进行观测。试验中同时观测下游水平旋流洞内空腔直径的变化和尾水流态变化,观测结果归纳为以下几点:

(1) 下游尾水洞明流状态。当下游水位 $h < 0.5D$ 时,旋流洞段的旋流空腔直径基本稳定,水流

进入尾水洞段在很短的距离内与气体完成了混掺,由于水流惯性的作用旋转还会前进一段距离,一定距离后才会形成明流状态,该流态一直保持至尾水池中,对于尾水管中水流无影响。

(2) 下游尾水洞远驱水跃状态。当下游水位 $0.5D < h < 0.85D$, 下游水跃进入尾水管道中, 还未与扩散段相连接, 扩散段后内部仍是旋流空腔, 如图 5 和 6 所示, 在扩散后大约 $5D$ 距离后形成明流, 再经过一段明流距离与下游水流相接, 形成水跃, 随着下游水位的不断增高, 尾水洞段的明流区域不断减小, 直至消失。

(3) 下游尾水洞段临界水跃状态。当下游水位 $0.85D < h < 0.95D$ 时, 此时尾水洞段明流区域已经消失, 阻塞扩散段后的旋转水流与下游水位影响尾水管的水流进行连接, 如图 7 所示。此时水流流态不稳定, 会因为下游水位或者上游水位的微小变化而改变, 在淹没流与明流之间转化。

(4) 下游尾水洞段淹没状态(有空腔)。当下游水位 $0.95D < h < 1.25D$ 时, 下游的气体不断进入到尾水管中, 直至淹没。下游水位对于扩散段旋转流影响很大, 阻塞扩散后的水流距离不断减小, 直至消失, 在尾水洞段形成了淹没流, 在管道中逐渐形成稳定的气腔, 沿着水流的方向, 空腔直径逐渐减小, 直至消失, 如图 8 所示。水平旋流洞段的空腔直径变化不大。

(5) 下游尾水洞段淹没状态(无空腔)。当下游水位 $1.25D < h < 3.2D$ 时, 下游水位对于尾水洞段和旋流洞段影响极大, 如图 9 所示, 尾水洞段的空腔逐渐向阻塞口推进, 尾水洞段为无气泡的淹没射流。

旋流洞段的空腔直径不断减小, 阻塞口与尾水洞段的接口处, 水气两相流也慢慢消失, 淹没流逐渐向旋流洞内靠近。在起旋器处的通气管道中, 可以明显看出有水流逐渐淹没通气孔, 最高可达 $0.3D$ 。

(6) 下游尾水洞段与旋流洞段全淹没状态。随着上述 5 种流态变化趋势, 可以得出: 当下游水位 h 大于 $3.2D$ 时, 下游水位的不断增加, 会逐渐淹没水平旋流洞, 洞中的旋流空腔直径会慢慢变小, 直至消失, 如图 10 所示。此种状态为下游全淹没状态, 在整个下游均为淹没流流态, 通气孔中也会出现水流, 不会再有气体的吸入与排出, 但是水流的流速及压强还是旋转流的水力特性。

3.3 下游水平旋流洞段与尾水洞段洞壁压强特性

上游水位分别为 $12D$ 、 $10.9D$ 的情况下, 不同下游水位条件下水平旋流段及尾水洞段壁面压强观测结果如图 11、12 所示。

根据图 11 和图 12 的数据分析, 在同一上游水位情况下, 随着下游水位的变化, 水平旋流洞壁面压强和尾水洞段壁面压强变化趋势相同; 当下游水位 h 在 $0.5D$ 和 $2.0D$ 之间变化时, 旋流洞段管壁压强相对变化幅度不大, 当 h 大于 $2.0D$ 时, 管壁压强变化幅度较大, 下游水位对于旋流洞管壁压强影响很大, 随着下游水位的升高, 旋流洞管壁压强增大; 当水流经过下游阻塞收缩断时, 由于流速增大, 管壁压强极小, 小于 $0.1H$, 在经过收缩段到尾水洞时, 由于是空腔中的空气与水在极短的距离混合, 流态复杂, 会出现负压。尾水洞段管壁压强沿程减小, 沿程变化幅度较小, 但是受到下游水位的影响较大。



图 5 旋流远驱水跃出口段



图 6 旋流远驱水跃中间段



图 7 旋流临界水跃

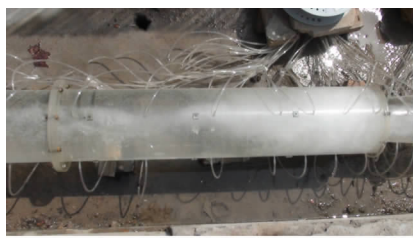


图 8 旋流淹没水跃(有空腔)



图 9 旋流淹没水跃(无空腔)



图 10 下游水平旋流洞段全淹没水跃

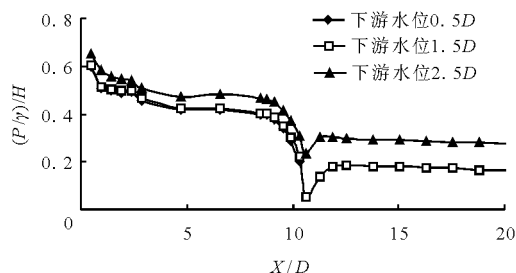


图11 上游水位12D时不同下游水位旋流洞压强

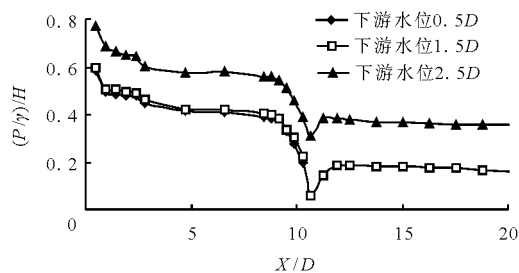


图12 上游水位10.9D时不同下游水位旋流洞压强

4 结 论

(1) 水平旋流内消能工下游尾水洞段和水平旋流洞段流态可细分为以下6种:下游尾水洞明流状态;下游尾水洞远驱水跃状态;下游尾水洞段临界状态;下游尾水洞段淹没状态(有空腔);下游尾水洞段淹没状态(无空腔);下游尾水洞段与旋流洞段全淹没状态。

(2) 当水平旋流洞方向的距离即 $0 < X/D < 1.5$ 时,空腔直径呈逐渐增大的趋势,随着 X/D 越接近1.5,水层厚度越小,相对的空腔直径增大;当 $1.5 < X/D < 9.1$ 时,即在水平旋流洞段,空腔直径呈现出先迅速减小后逐渐趋于稳定的趋势;当 $9.1 < X/D < 10.3$ 时,即在阻塞收缩段,对于不同的上游水位,空腔直径均呈现出逐渐增大并最终稳定至 $r/D = 0.45$ 左右的趋势。

(3) 上游水位 $H = 8.0D$ 、下游水位为明流状态时,淹没射流段为明流状态,竖井为下跌流态,并形成淹没流态,此时由于水流对于竖井管壁的撞击,竖井管震动较大。上游水位 $H = 8.26D$ 、下游水位为明流状态时,竖井段的水位在上游管道中心,上游可看到射流状态,竖井段中掺气明显,为水气两相流直致起旋器形成旋流,并且竖井有水跃向射流段推进。

参考文献:

- [1] 安丰勇. 水平旋流内消能泄洪洞的阻塞效应研究[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [2] 贺立强. 公伯峡水平旋流式泄洪洞试验研究及运行方式的优化[D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [3] 吴小丽. 水平旋流泄洪洞空化特性及相似律问题的初步探讨[D]. 西安:西安理工大学,2010.
- [4] 曹双利. 旋流条件下通气孔通风量和环流空腔内气体压强
- [5] 南军虎,牛争鸣,洪 镒,等. 公伯峡水平旋流泄洪洞水力特性研究[J]. 水力发电学报,2013,32(3):101-107.
- [6] 牛争鸣,南军虎,洪 镒,等. 水平旋流泄洪洞通风量相似性研究[J]. 水力发电学报,2013,32(4):77-81+142.
- [7] 李奇龙,牛争鸣,王 捷. 基于准自由涡分布的阻塞旋流泄洪洞流场分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(5):49-57.
- [8] 李奇龙,牛争鸣,葛 晨,等. 泄洪洞内具有阻塞与扩散段的水平旋流消能方式水力特性的试验与数值模拟(1)[J]. 水力发电学报,2014,33(5):145-151.
- [9] 洪 镒,牛争鸣,南军虎,等. 水平旋流泄洪洞原型和模型的脉动压力特性对比与分析[J]. 水动力学研究与进展A辑,2010,25(6):727-736.
- [10] 牛争鸣,张宗孝,张壮志. 水平旋流泄洪洞的基本流态与影响因素[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):1-5.
- [11] 南军虎,牛争鸣,张 东. 旋流消能工内空腔旋流的数值模型[J]. 四川大学学报(工程科学版),2015,47(1):76-83.
- [12] 南军虎,牛争鸣,张 东. 旋流消能工内空腔旋流的流速特性[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):41-47.
- [13] 栗 帅,张建民,胡小禹,等. 淹没型旋流竖井泄洪洞流态过渡的数值模拟研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(4):13-19.
- [14] 丁浩铎. 大坡降复合式旋流阻塞内消能泄洪洞的水力特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
- [15] 南军虎,牛争鸣,张 东,等. 旋流消能工内空腔旋流的压强特性[J]. 应用基础与工程科学学报,2016,24(2):272-281.
- [16] 牛争鸣,洪 镒,张浩博,等. 公伯峡旋流泄洪洞的水力特性与原型观测[J]. 水力发电学报,2008,27(4):30-35.
- [17] 牛争鸣,洪 镒,谢小平,等. 导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的研究和实践——以公伯峡水电站为例[J]. 水利水电科技进展,2007,27(1):36-41.
- [18] 南海龙. 泄洪洞突扩、突跌水流流态及其掺气水力特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.