

文章编号: 1006-4710(2012)04-0398-06

# 由风速和压强过程线 解读水平旋流泄洪洞流态

南军虎<sup>1,2</sup>, 牛争鸣<sup>1</sup>, 洪镒<sup>1,3</sup>, 朱静<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;  
3. 黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810209)

**摘要:** 以公伯峡水电站为例, 结合原型风速和压强随闸门开度的变化过程线, 研究了水平旋流泄洪洞的水流流态。试验系统描述了堰闸段、竖井段、起旋室、旋流洞、水垫塘及退水洞内水流流态的变化过程, 对比分析了原型和模型流态的差异。结果表明受收缩环的影响, 在闸门开启过程中堰闸段水流由堰流向淹没流过渡, 竖井段水流由自由跌落向淹没射流过渡; 旋流洞内流态的变化大致可分为五个阶段, 经历由自由流向吸吮流转变的过程; 水垫塘调整流态的作用显著, 退水洞内水流呈稳定的明流流态。

**关键词:** 水平旋流; 流态; 原型; 开度; 过程线

**中图分类号:** TV131.6      **文献标志码:** A

## Interpretation of Flow Pattern of Horizontal Gyrating Discharge Tunnel by Wind Velocity and Pressure Graph

NAN Junhu<sup>1,2</sup>, NIU Zhengming<sup>1</sup>, HONG Di<sup>1,3</sup>, ZHU Jing<sup>1</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;  
3. Yellow River Upstream Hydropower Limited Liability Company, Xining 810209, China)

**Abstract:** The flow patterns of horizontal gyrating discharge tunnel are studied with Gongboxia hydropower station as an example and in combining with wind velocity and pressure graph during the gate opening. The tests systematically describe the flow pattern difference between prototype and models and the variation of flow pattern in weir section, vertical shaft section, starting rotation device, gyrating discharge tunnel, water plunge pool and recession tunnel. The results show that the flow pattern transforms gradually from weir flow to submerged flow in the weir section, and from free drop to submerged jet flow in the vertical shaft section because of the annular aerator and in the process of gate opening. The flow pattern of the gyrating discharge tunnel may be classified into five steps, experiencing the changes from free flow to absorbing flow. The function of the water plunge pool adjusting flow is significant. And the flow in the recession tunnel appears to be the steady open flow pattern.

**Key words:** horizontal gyrating flow; flow pattern; prototype; opening; graph

为了解决水利水电工程高坝建设中的高速水流问题, 探讨如何将导流洞改建为永久式泄洪洞, 从 20 世纪 60 年代起, 国内外就开始了旋流式消能工的研究。董兴林等<sup>[1]</sup>结合沙牌水电站等工程研究

了竖井旋流式泄洪洞, 提出了此类消能工的设计准则; 夏维洪等<sup>[2]</sup>对泄洪洞内旋转水流的消能和空化特性进行了研究, 描述了水流在隧洞内的流态; 杨开林等<sup>[3]</sup>研究了水平旋流洞含气水流的模型相似律

收稿日期: 2012-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51166008); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(00X901)。

作者简介: 南军虎(1985-)男, 甘肃会宁人, 博士生, 研究方向为水工水力学和流体力学。E-mail: nanjh@yahoo.cn。  
牛争鸣(1957-)男, 陕西佳县人, 教授, 博导, 研究方向为水工水力学。E-mail: niuzm@xaut.edu.cn。

等问题;牛争鸣等<sup>[4]</sup>结合原型和模型试验资料对比分析了旋流泄洪洞的压力特性;刘之平等<sup>[5]</sup>数值模拟了竖井旋流泄洪洞复杂的水流运动,得到自由水面、流速及压力等水力要素的分布规律。工程中将竖井与水平洞切向连接后的消能设施称水平旋流内消能泄洪洞,因能在洞内形成旋转水流,其具有结构简单、布置灵活、消能率高的特点,在公伯峡水电站导流洞改建中首次得到了应用,并通过了原型过水试验的检验<sup>[6]</sup>。

流态是研究泄水建筑物水力特性和进行工程设计的基本前提与依据,虽然上述文献对旋流泄洪洞的流态作了一定的研究,且文献[7]、[8]定义了水平旋转内消能泄洪洞的基本流态,但这些成果均基于模型试验的研究,受缩尺效应影响,原型和模型流态总存在一些差异;由于泄洪洞通常布置于山体中,原型试验时也无法直接观测流态的变化过程,故对水平旋流泄洪洞的流态缺乏系统研究。

基于上述问题,本文以公伯峡水电站为例,通过

分析原型通气孔风速和关键部位的壁面压强随闸门开度的变化过程线,系统地概述了水平旋流泄洪洞水流流态的变化规律,并结合1:40和1:60模型试验成果,分析了原、模型流态的差异。

### 1 试验概述

公伯峡水平旋流泄洪洞布置图如图1所示,在堰闸段、竖井段、起旋室、旋流洞和通气孔内布置了压强和风速测点,三次原型过水试验时上游平均水位分别是2 003.25 m、2 003.79 m和2 003.87 m,下游河道平均水位分别是1 903.48 m、1 903.46 m和1 903.57 m,试验时闸门启、闭速度分别约为1.4 m/s和1.5 m/s。

模型按重力相似准则设计,采用40和60两种不同的比尺,用有机玻璃制作,测点按常规模型试验在需要的位置上布置,并保持与原型观测测点的对应,工作闸门的启、闭规律与原型试验时相似,采用线性方式启闭。

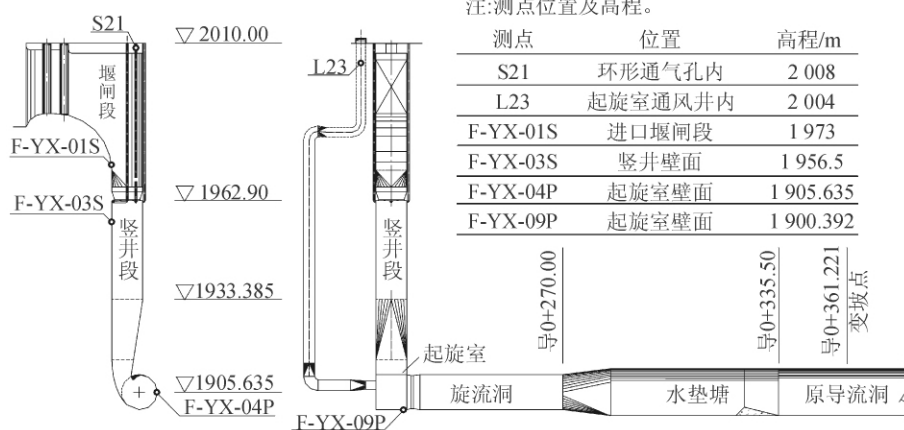


图1 公伯峡水平旋流泄洪洞  
Fig. 1 Gongboxia horizontal gyrating discharge tunnel

### 2 进口堰闸段流态

本节结合模型流态和堰面末端测点 F-YX-01S 的压强时间过程线(图2),分析了进口堰闸段的水流流态在闸门开启过程中的变化规律。

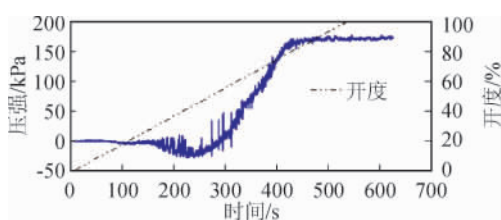


图2 F-YX-01S 压强时间过程线  
Fig. 2 Pressure graph of F-YX-01S

闸门开启初期,水流对称地沿溢流面向下跌落,测点 F-YX-01S 的压强值近似为零,此时堰面水层很薄,离心力较小;随闸门开度的增大堰面水层逐渐变厚,当开度介于30%~50%之间时堰闸段水流呈自由跌落状态,环形掺气坎孔口尚未被淹没,但离心力的增大导致堰面出现负压。

闸门开度大于50%后,堰面压强值由负变正并迅速增加,表明环形掺气坎孔口渐趋满流,堰闸段水位上升,进口流态从堰流转变为淹没流,水流流速和离心力均减小。由于堰闸段水流与表面来流之间存在着较大的速度梯度,水流相互剪切并产生旋涡,旋涡挟带气泡向下部流去(图3),剪切区的前锋随开度的增加而上移。

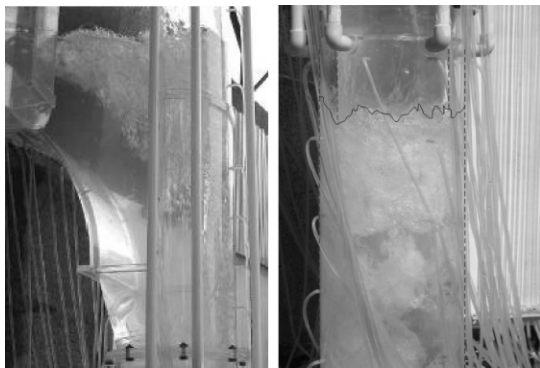


图3 堰闸段及竖井内水流流态

Fig. 3 Flow patterns in the weir section and vertical shaft

当开度大于80%以后闸门底缘脱离水面,水流剪切区范围逐渐变小,压强值趋向稳定,堰闸段形成稳定的淹没流,相应开度时进口段的流态与水力参数见表1。

表1 进口段流态与水力参数

Tab. 1 Flow pattern and hydraulic parameters in the weir section

开度 /%	20	40	60	80
上游水位 /m	1 992.36	1 995.72	1 999.08	2 002.44
压强 / (kPa)	0	-20	50	170
流态描述	堰面水层很薄,流态为堰流。	堰面水层厚度增加,水流离心力使堰面出现最大负压值。	环形掺气坎孔口被淹没,堰闸段水位上升,水流相互剪切产生旋涡。	堰闸段形成稳定的淹没流,流态水库及进口流态平稳。

原型和模型进口段流态的演变基本一致,但堰闸段平均水位之间存在明显差异。原型试验水位条件下,闸门全开后原型堰闸段平均水位介于2 002.0~2 002.2 m,较上游水位低1.8 m;1:40和1:60模型堰闸段平均水位分别约为2 001.4~2 002.2 m和2 000~2 001 m,较上游水位分别约低1.8 m和2.8 m;堰上水头越小,模型比尺越小,水流受粘滞力及表面张力的影响越显著,则堰闸段水位越低。

### 3 竖井段流态

竖井段水流流态可通过环形通气孔中测点S21的风速时间过程线(图4)和竖井内壁面测点F-YX-03S的压强时间过程线(图5)得到直观反映。

由图4和图5可以看出,闸门开启初期竖井段水流表现为自由跌落和冲撞边壁后的折射流动,竖井内壁面压强近似大气压,受水流挤压影响通气孔处于排气状态。当闸门开度介于10%~30%时,环形掺气坎孔口虽未完全封闭,但水流挟带空气使竖井内出现负压,通气孔状态由排气转变为吸气,风速

值由负变正。

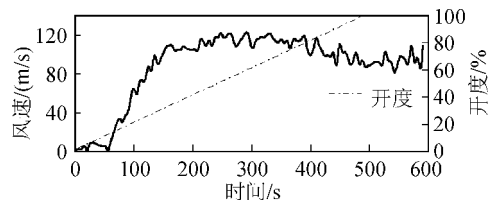


图4 S21 风速时间过程线

Fig. 4 Wind velocity graph of S21

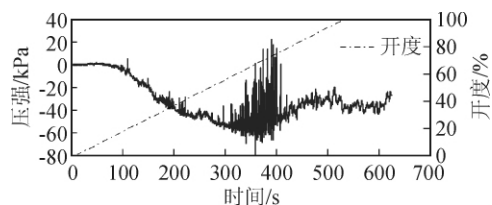


图5 F-YX-03S 压强时间过程线

Fig. 5 Pressure graph of F-YX-03S

闸门开度大于30%后,起旋室收缩断面出现壅水,竖井内水位逐渐上升,至开度约为50%时,环形掺气坎孔口被完全淹没,断面水流呈淹没射流状态,因环形掺气坎孔口断面小于竖井断面,故在射流周围形成一封闭的环状空腔,随开度的增加,竖井水位上升,环状空腔长度逐渐减小。高速运动的射流冲击竖井水流,形成水面波动和向下的剪切运动,水流强烈紊动并掺混了大量空气,因此竖井下部为乳白色的水气两相流(图3);环状空腔内依旧为负压,但负压增大趋势减缓是因为竖井内水位上升产生的顶托作用抵消了空腔负压的增大,通气孔风速的增大趋势亦有所减缓。当闸门开度大于80%后,环形掺气坎孔口为稳定的淹没射流,射流的挟气量与通气孔的通风量保持相对平衡,负压和风速基本稳定,环状空腔也在较为稳定的范围内波动,各特征开度对应的竖井流态与壁面压强见表2。

表2 竖井流态与壁面压强

Tab. 2 Flow pattern and pressure in the vertical shaft

开度 /%	20	40	60	80
压强 /kPa	-5	-20	-55	-30
流态描述	水流为自由跌落和冲撞竖井边壁后的折射流动状态。	环形掺气坎孔口局部封闭,竖井段出现负压,起旋室收缩断面出现壅水,竖井内水位逐渐上升。	水流呈淹没射流,射流周围形成封闭的环状空腔,射流与竖井水流强烈紊动。	环状空腔在稳定范围内变化,竖井内为乳白色的水气两相流,含气率沿高程减小。

原、模型流态随闸门开度的变化过程较为相似,但原型试验水位条件下,原型、1:40和1:60模型

环状空腔长度变化范围分别为 12.0 ~ 17.0 m、1.6 ~ 6.0 m 和 2.4 ~ 4.2 m。模型值较原型的偏小 70% ~ 80%，且比尺越小，差异越大。对产生环状空腔长度差异的原因分析如下：影响起旋室壁面压强的主要因素有竖井水位所产生的静压、起旋室旋转水流引起的离心力压强和旋流洞空腔内压强<sup>[6]</sup>，由起旋室和旋流洞内各测点的壁面压强可知，同一位置的压强值原型的最小，1:40 模型的次之，1:60 模型的最大，例如起旋室内测点 F-YX-09P 的压强原型值为 619.38 kPa，与之对应的 1:40 和 1:60 模型引申值分别为 650.8 kPa 和 665.4 kPa，而同一断面两种比尺模型的水层厚度差异不大，水流流速又大致相当，因此旋流洞环流空腔内气体负压值原型的最大，1:40 模型的次之，1:60 模型的最小，该结论也可通过原、模型通风井通风量数值的大小得到印证（详见第 4 节）。旋流洞环流空腔内负压对竖井水流表现为抽吸作用，其值越大，抽吸作用越明显，则竖井内水位越低，环状空腔长度就越长。

#### 4 起旋室和旋流洞流态

旋流洞内水流流态的变化主要与起旋室出口断面的水流弗劳德数  $Fr$  和  $h/D$  ( $h$  为下游水位， $D$  为旋流洞洞径) 有关<sup>[14]</sup>， $Fr$  对流态的影响随闸门开度的增加得到体现；虽然公伯峡水平旋流泄洪洞出口为自由出流，但水垫塘收缩断面对水流的“壅阻”，其效果与下游水位升高一致。典型的竖井进流水平旋流内消能泄洪洞的基本流态可以分为：自由流、吸吮流、过渡流和淹没流<sup>[8-9]</sup>，不同的流态分区内各水力参数的变化规律是不同的（表 3）。

表 3 基本流态

Tab.3 The basic flow patterns

流态	描述	参数
自由流	环流空腔直径 $d_0$ 数值较大，环流空腔内的气体压强 $p_0$ 近似等于零	$p_0 \approx 0$ $d_0 \approx C$
吸吮流	环流空腔内的气体压强 $p_0$ 为负压， $p_0 < 0$ ， $d_0 \neq C$ ，通风量 $\Phi$ 主要与真空度 $h_v$ 有关	$\Phi = f(h_v)$
过渡流	环流空腔直径 $d_0$ 沿程减小后消失成羽状气泡，通风量 $\Phi$ 明显减小	$p_0 \leq 0$
淹没流	空腔环流消失，通风量 $\Phi$ 为零，轴心水流开始逆向流动	$p_0 \geq 0$ $d_0 = C$ ， $\Phi = 0$

由模型流态观测，结合起旋室通风井风速（图 6）和起旋室壁面压强（图 7）的变化可知，随闸门开度的增加，旋流洞内流态性质发生明显变化。闸门开启初期旋流洞内水层很薄，洞内仅形成小范围空腔直径较大的旋流，但旋转力度较弱，受水流挤压通

气孔处于排气状态，流态具有自由流的特征。当闸门开度大于 30% 后，起旋室收缩断面已被淹没，旋流洞起始段的水流只有沿径向分布的切向流速，轴向动能和动量为零，在旋流洞封闭端头的约束下，水流被迫转向形成轴向流动，切向与轴向流动合成总的环向流动，并与洞轴线成一定夹角（旋流角），此时旋流洞内围绕通气孔已形成稳定的空腔环流，造成局部水流紊动的加强，环流挟带空气致使空腔内出现负压。

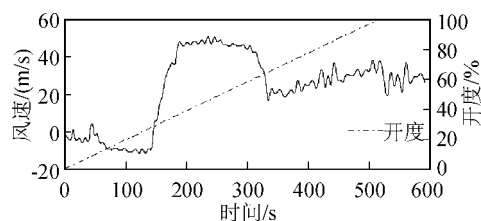


图 6 L23 风速时间过程线

Fig.6 Wind velocity graph of L23

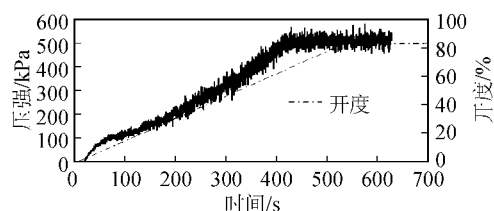


图 7 F-YX-04P 压强时间过程线

Fig.7 Pressure graph of F-YX-04P

若选用轴向断面平均流速  $V_z$  作为轴向流速的特征量，依据连续性方程得：

$$V_z = \frac{4Q}{\pi(D^2 - d_0^2)} \quad (1)$$

式中  $Q$  为泄流量 ( $m^3/s$ )； $D$  为旋流洞洞径 ( $m$ )。现以  $D$  为旋流洞横向特征长度，用环流空腔周长  $\pi d_0$  与  $D$  的乘积作为环流空腔内表面的特征面积  $A_z$  ( $m^2$ )，按量纲分析法，环流挟气量  $\Phi_\epsilon$  ( $m^3/s$ ) 可表示为：

$$\Phi_\epsilon \propto A_z V_z = \pi d_0 D V_z = \frac{4d_0/D}{1 - (d_0/D)^2} Q \quad (2)$$

当  $Q$  增大时旋流洞内水层增厚，对应的环流空腔直径  $d_0$  减小，由式 (1) 和式 (2) 可知，轴向断面平均流速  $V_z$  增大，环流挟气量  $\Phi_\epsilon$  增多，则环流空腔内的气体压强  $p_0$  减小，因此起旋室通风井风速迅速增大，该阶段旋流洞内水流具有吸吮流的特征。当闸门开度介于 40% ~ 60% 时通风井的通气能力与环流的挟气能力保持相对平衡。开度约为 60% 时，水垫塘收缩断面出现水流“壅阻”，水垫塘内水体对旋流洞环流的顶托作用显现出来，因此通风井风速

由最大值急速降低至 20 m/s 左右,但随开度的增大通气孔风速依旧波动增大,故旋流洞内流态仍具有吸吮流的特征。当开度大于 80% 后,旋流洞内形成稳定的空腔环流,通风井的通气能力与空腔环流的挟气能力形成新的平衡状态并保持稳定。旋流洞内水流轴向流速沿程从零迅速增大至 30 m/s 左右,并具有一定的保持性,切向流速沿程减弱,因此旋流角沿程减小,在整个旋流洞中其值在 20°~90° 范围内变化,旋流形成后有效地加长了水流的流程,增大了沿程水头损失。

综上所述,旋流洞内流态的变化大致可分为五个阶段:未形成旋流的自由流挤压排气阶段→旋流形成、负压和通风量迅速增大的吸吮流变化阶段→通风量与挟气量相对平衡的吸吮流保持阶段→水垫塘收缩断面处水流壅阻、通风量迅速降低阶段→通风量与挟气量形成新的相对平衡的吸吮流阶段。表 4 为各特征开度对应的起旋室与旋流洞内的流态与压强,闸门全开后旋流洞内水流流态如图 8 所示。

表 4 起旋室与旋流洞内流态与压强

Tab. 4 Flow pattern and pressure in the starting rotation device and gyrating discharge tunnel

开度/%	20	40	60	80
压强/kPa	120	220	350	510
流态描述	旋流洞中仅有小范围空腔直径较大的旋流,且旋转力度较弱,通气孔排气。	起旋室收缩断面被淹没,旋流洞中形成大范围的旋转水流,非线性增大的水流离心力压 <strong>强起主导。</strong>	旋流洞中水层厚度增加,旋流强度增强,受水垫塘的壅阻影响,通风量迅速减小。	水平洞中围绕通气孔形成稳定的空腔环流,旋流角沿程减小。

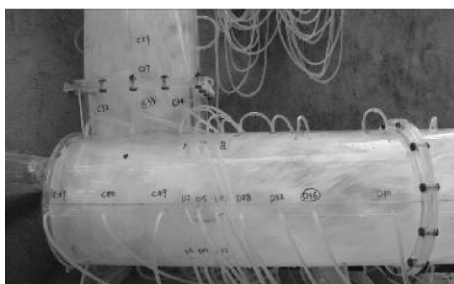


图 8 旋流洞内水流流态

Fig. 8 Flow pattern in the gyrating discharge tunnel

模型旋流洞内流态的变化可由起旋室通风井通风量  $\Phi$  随上游水位  $H$  的变化特性(图 9) 得到反映,可以看出 1:40 和 1:60 模型的通风量随上游水位的增加呈相反的变化趋势,体现出在两种不同比尺模型中旋流洞内水流流态发生了不同的变化。综合

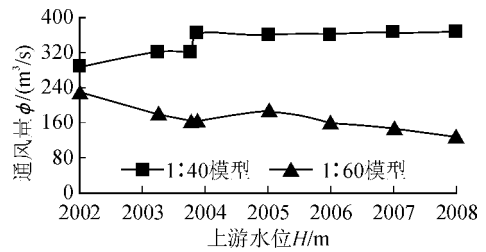


图 9 通风量  $\Phi$  随上游水位  $H$  的变化

Fig. 9 Variation of ventilation  $\Phi$  with upstream water level  $H$

表 3、图 6 及图 9 可知,随上游水位的升高,1:40 模型的环流速度和水流挟气量增大,通风量也逐渐增大,旋流洞内水流具有吸吮流的特征;1:60 模型旋流洞内同一断面的环流空腔直径和通风量随上游水位的增加逐渐减小,水流流态逐渐由吸吮流向淹没流过渡。

### 5 水垫塘与退水洞流态

在扩散段由于过水断面渐扩,旋流角急剧减小,受水垫塘收缩断面的影响,上游一定范围内水位壅高,水流的流态发生调整,旋转力度得到弱化,环流空腔内气体与水流充分掺混,形成乳白色的水气两相流(图 10)。



图 10 水垫塘段水流流态

Fig. 10 Flow pattern in the water plunge pool

在水垫塘收缩断面后,由于建筑物体形的突扩,水流旋转力度再次得到弱化,洞顶水流近乎对称地沿导流洞轴向两侧散开,受重力作用在导 0+361.221 m 断面前后脱离顶壁,水面线急剧降低;采用 50.0 m 长的水垫塘段,可以起到很好地调整流态的作用。在改建边界线(导 0+370.00 m) 以后的导流洞内,水流大致分为两层,下部为清水层,上部为水气混合层,随水流流速的减小,掺混在水中的气体沿程析出,约至导 0+611.00 m 断面气泡完全析出,整个退水洞中水流无明显的横向超高和水气团撞击洞顶现象,闸门全开后洞顶余幅大于 65%,满足退水洞呈明流流态的运行条件;泄洪洞出口归槽水流流速低(14.6 m/s 左右),波浪小,对岸边冲刷较轻;原、模型退水洞内水流流态基本一致(图 11)。



图 11 退水洞水流流态

Fig. 11 Flow pattern in the recession tunnel

## 6 结 论

受收缩环的影响,在闸门开启过程中堰闸段水流由堰流向淹没流过渡,竖井段水流由自由跌落向淹没射流过渡;受粘滞力及表面张力的影响,原、模型堰闸段水位之间存在差异。

旋流洞内流态的变化在闸门开启过程中大致可分为五个阶段,即未形成旋流的自由流挤压排气阶段→旋流形成、负压和通风量迅速增大的吸吮流变化阶段→通风量与挟气量相对平衡的吸吮流保持阶段→水垫塘收缩断面处水流壅阻、通风量迅速降低阶段→通风量与挟气量形成新的相对平衡的吸吮流阶段;通风量随上游水位的不同变化趋势体现了 1:40 和 1:60 模型旋流洞内流态的差异。

水垫塘调整流态的作用明显,退水洞内水流呈稳定的明流流态,泄洪洞出口水流归槽条件良好,原、模型出口段流态基本一致。

### 参考文献:

- [1] 董兴林,郭军,肖白云,等.高水头大泄量旋涡竖井式泄洪洞的设计研究[J].水利学报,2000,(11):27-33.  
Dong Xinglin, Guo Jun, Xiao Baiyun, et al. Design principle of high head and large discharge vortex drop spillway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 27-33.
- [2] 夏维洪,王河生.旋转水流消能及其空化特性[J].河海大学学报,1998,26(3):11-17.  
Xia Weihong, Wang Hesheng. Energy dissipation of rotational flow and its cavitation characteristics [J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(3): 11-17.
- [3] 杨开林,韩昆,王涛.竖井式水平旋流洞含气水流模型相似律[J].水利学报,2009,40(12):1416-1424.  
Yang Kailin, Han Kun, Wang Tao. Model similarity laws of gas-liquid mixed flow in horizontal swirling flow tunnels with vertical shaft [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1416-1424.
- [4] 洪镛,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.  
Hong Di, Niu Zhengming, Nan Junhu, et al. Comparison and analysis to characteristics of fluctuating pressure for horizontal swirl discharge tunnel between prototype and model [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2010, 25(6): 727-736.
- [5] 张晓东,刘之平,高季章,等.竖井旋流式泄洪洞数值模拟[J].水利学报,2003,(8):58-63.  
Zhang Xiaodong, Liu Zhiping, Gao Jizhang, et al. 3-D numerical simulation of flow in shaft spillway with whirling current [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (8): 58-63.
- [6] 高季章,董兴林,刘继广.生态环境友好的消能技术-内消能的研究与应用[J].水利学报,2008,39(10):1176-1183.  
Gao Jizhang, Dong Xinglin, Liu Jiguang. Research and application of eco-friendly energy dissipation technology-internal energy dissipation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1176-1183.
- [7] 牛争鸣,张宗孝,孙静,等.通气对水平旋流内消能泄洪洞水力特性的影响[J].长江科学院院报,2006,23(5):1-5.  
Niu Zhengming, Zhang Zongxiao, Sun Jing, et al. Influence of ventilation on hydraulic characteristics of level rotary flow in internal energy dissipation tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(5): 1-5.
- [8] 牛争鸣,张明远.基本水动力学特性的大尺寸水平旋流内消能泄洪洞[J].水动力学研究与进展: B 辑,2005,17(4):503-513.  
Niu Zhengming, Zhang Mingyuan. Basic hydrodynamics characteristics of cavity spiral flow in a large size level pipe [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser B), 2005, 17(4): 503-513.

(责任编辑 王卫勋)