

水平旋流泄洪洞的基本流态与影响因素

牛争鸣¹ 张宗孝¹ 张壮志²

(1. 西安理工大学水利水电学院 陕西 西安 710048; 2. 中国长江电力股份有限公司 湖北 宜昌 443002)

摘要 通过模型试验,对上下游水位、通气孔直径、水平洞洞长和起旋器收缩断面面积比对水平旋流泄洪洞的流态的影响进行了研究。结果表明,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,流态的分类与转变受各种因素的影响。通气时,水平旋流洞内旋流的空腔直径大而均匀,水流旋转的强度增大;不同的洞长,流态从吸吮流向淹没流转变时过渡区的相对上下游水位差相同,但洞长越大,吸吮流的范围越大,转变为自由流流态时所需要的起旋器出口的水流弗劳德数也越大,起旋器出口面积比不同时,流态分区的临界水力条件是不同的。

关键词 泄洪洞 水平旋流 模型试验 基本流态 影响因素

中图分类号:TV651 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)04-0001-05

Basic flow pattern in horizontal rotary flow spillway tunnels and its influencing factors/NIU Zheng-ming¹, ZHANG Zong-xiao¹, ZHANG Zhuang-zhi²(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. China Yangtze Electric Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: Based on model tests, a study was performed on the influences of the upstream and downstream water levels, the diameter of vent hole, the length of spillway tunnels, and the area contraction ratio of rotary flow generator on the flow pattern in the horizontal rotary flow spillway tunnel. The result shows that, under the condition of pressure flow, the flow in the spillway tunnel can be divided into three patterns, i.e. the free flow pattern, the absorbing flow pattern, and the submerged flow pattern, and that classification and conversion of different flow patterns are influenced by many factors. Moreover, some conclusions are drawn as follows: in ventilation state, the cavity of rotary flow in the spillway tunnel is uniform with large diameter, and the intensity of flow rotation increases; for different lengths of the spillway tunnel, the relative difference between upstream and downstream water levels ($H-h$)/ h in transitional zone where the absorbing flow pattern is converted to the submerged flow pattern is invariable; the longer the spillway tunnel, the wider the range of absorbing flow, and the greater the Froude number at the outlet of rotary flow generator needed for the conversion of the absorbing flow pattern into the free flow pattern; for different area contraction ratios at the outlet of rotary flow generator, the critical hydraulic conditions for flow pattern regionalization are different.

Key words: spillway tunnel; horizontal rotary flow; model test; basic flow pattern; influencing factor

为了解决水利水电工程高坝建设中的高速水流问题,探讨将大尺度导流洞改建为永久式泄洪洞,以缩短工期和降低工程造价,从 20 世纪 90 年代起,国内就开始了旋流式内消能泄洪洞的研究工作^[1]。由公伯峡水电站右岸导流洞改建的国内第一个较高水头、较大流量的水平旋流式内消能泄洪洞的运行成功,将为这一类型的内消能泄洪洞提供研究、设计和工程示范的实例,将极大地促进该类型旋流内消能泄洪洞的推广与应用。中国水利水电科学研究院和西北水利水电勘测设计研究院针对这一工程进行过许多工程方案的试验研究,笔者对这一类型的水平旋流内消能泄洪洞的基本水力特性进行了较深入系统的研究^[2-11]。

流态的变化与临界水力条件是进行泄水建筑物水力特性分析的基本前提与依据,也是泄水建筑物设计与工程应用的基本条件。通过对流态变化的观测和对引起流态变化因素的分析,对建立各物理量之间的相互关系和对试验资料的整理分析有非常重要的作用。本文在国家自然科学基金的资助下,通过模型试验,研究了通风孔的直径、水平洞的长度和起旋器出口面积比变化对水平旋流内消能泄洪洞流态的影响。

1 试验模型体型及尺寸

本文所采用的试验模型体型及尺寸如图 1 所示。模型试验按重力相似准则设计,在本文模型试验的工况范围内,模型试验的水流流态均处于阻力

平方区。为了保证模型试验结果的推广应用,模型各部分尺寸均以模型洞径为相对参数设计,模型洞径 $D = 16\text{ cm}$ 。试验模型由 3 个部分组成,即竖井、旋流发生器和水平洞。通气孔位于水平洞左端头的中间右上位置,紧邻起旋器的出口。相对通气孔直径 $D_0/D = 0, 0.0625, 0.125, 0.187, 0.313, 0.413$, 水平洞的相对洞长 $L/D = 31.5, 67.4$, 起旋器出口面积与竖井断面面积的比值 $A/A_d = 0.25, 0.35, 0.45, 0.55$ (以下简称“面积比”)。起旋器出口收缩断面面积大小的改变是通过起旋器内侧直线收缩段与竖直方向夹角的改变来实现的,对起旋器外侧的圆弧曲线不加改动(参见图 1 中的起旋器段)。模型试验工况为相对上游水位 $H/D = 9.6 \sim 18.44$, 相对下游水位 $h/D = 0.5 \sim 4.5$ 。

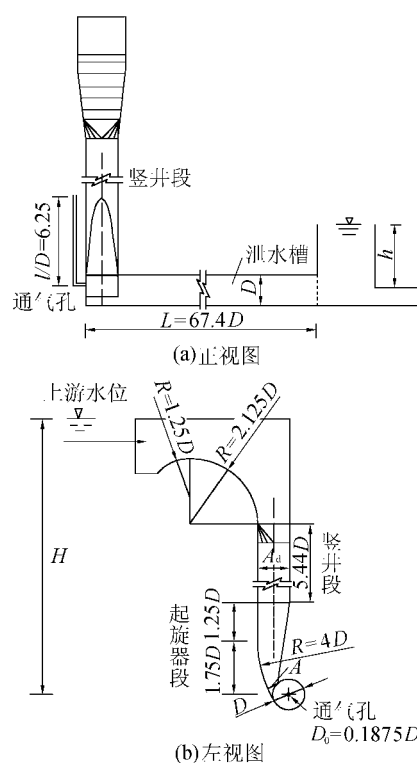


图 1 模型尺寸布置

在上述相对上下游水位的变化范围内,观测了流态、通气量、泄流量、空腔内的气体压强、壁面压强、空腔直径和旋流夹角等。通气孔的风速采用 QDF-3 型热球式风速仪量测,通气量按通气孔的平均风速与面积的乘积确定。空腔内的压强值采用 U 形测压管量测,壁面压力采用测压管量测,环流空腔直径采用自制探针由水平洞上下左右 4 个方向的量测值平均确定,泄流量由矩形量水堰量测。各种物理量量测的相对误差均在 3% ~ 5% 之内,量测方法详见文献 [2-11]。

2 水平旋流泄洪洞的基本流态

对水平旋流泄洪洞,在文献 [12] 中提到以水平

旋流泄洪洞的相对洞长来划分类型, $L/D < 30$ 为“短洞”, $L/D > 30$ 为“长洞”。这种旋流泄洪洞类型划分的方法仅考虑了旋流沿相对洞长的自由衰减,没有考虑上、下游水位变化及通气条件和其他水力条件变化对旋流流动的影响,也没有揭示水平旋流洞可能出现的流态类型。

经观测,在图 1 所示的水平旋流泄洪洞内,水流在重力作用下,经竖井末端起旋器的出口收缩断面 A 后,沿水平洞的切向方向,围绕通气孔形成一个近乎圆形气腔的切向环流,空腔直径为 d_0 。因受水平洞封闭端头的约束,切向环流沿水平洞迅速转变为与水平洞的轴线成一定的夹角 α 、由轴向与切向两种流动合成的空腔环流。空腔直径不断扩大至相对洞长(z/D)的 1.5 ~ 2.5 倍,然后稳定、沿程不变或沿程减小,与基本流态有关。空腔沿整个水平洞有一定的摆动。

上、下游水位的变化对流态有明显的影响,在竖井为压力流的条件下,水平旋流泄洪洞的基本流态可分为自由流流态、吸吮流流态与淹没流流态^[2]。水平洞内流态的基本特征为:自由流流态时,空腔内的气体压强近似等于大气压,空腔直径沿程近似不变,通气量与轴向的断面平均流速成正比;吸吮流流态时,空腔内的气体压强为负压,通气量与空腔内气体压强的绝对值的 1/2 次方成正比,空腔直径沿程减小;淹没流流态时,通气孔被淹没,通气量为零,轴心水流开始逆向流动,空腔直径为零。在 3 种基本流态的相互转变过程中会出现 2 种过渡状态的流态,逆序与顺序的临界水力条件有所不同。过渡状态的流态沿程可分成空腔环流的起始变化段、稳定变化段、明显缩小变化段和气泡流段^[10]。

空腔环流形成的水力条件可由相对上下游水位差 $(H - h)/h$ 和起旋器出口的水流弗劳德数 Fr 决定 $\left(Fr = \frac{Q/A}{\sqrt{gH}} \right)$ 。在旋流洞的 $L/D = 31.5$ 和 $D_0/D = 0.125$ 时,空腔环流形成的水力条件为 $(H - h)/h > 2.5$ 或 $Fr > 0.46$, 水平旋流洞的流态分区及判断条件为^[10] ①当 $(H - h)/h < 2.5, Fr < 0.46$ 时,为淹没流流态区;②当 $2.5 \leq (H - h)/h < 6, 0.46 \leq Fr < 0.54$ 时,为吸吮流流态区;③当 $(H - h)/h \geq 6, Fr \geq 0.54$ 时,为自由流流态区。

这种流态的划分、基本特征的描述和分区的特性,考虑了上、下游水位的影响,显示出旋流洞内流态沿洞长变化的基本特征,概括了在竖井为压力流的条件下,水平旋流泄洪洞有可能出现的流态类型,因此将其称为水平旋流洞的基本流态。

对水平旋流泄洪洞流态的影响因素很多,除与

上、下游水位有关以外,还与通气孔的直径、水平旋流洞的洞长和起旋器出口断面的面积比直接相关,当这些因素改变时,流态的基本类型不变,但流态分区的水力条件会发生相应的改变,这正是本文要论述的主要观点。

3 通风孔直径对流态的影响

通气孔直径对流态的变化有明显的影响。在竖井进口为自由堰流时,由于堰上水流跌入竖井时自身挟挟大量空气,通气状态的改变对水平旋流洞内流态的影响很小。在竖井进口淹没,竖井内为压力流时,水流进入竖井时自身挟挟的空气已很少,通气状态对水平旋流洞内流态有显著的影响,但在 $D_0/D > 0.1875$ 后,这种影响明显减小,此时空腔内的气体压强近似等于大气压^[11]。在相同的上下游水位、不通气时,水平旋流洞内旋流的空腔直径明显变小,在较小的 z/D 值(距水平洞起始端的相对距离)时就开始变窄、扭曲和消失为气泡流,在通气和通气孔直径增大后,空腔直径大而较均匀,经过一段稳定的区域后沿程逐渐减小,并贯穿水平洞,通气孔的直径越小,在流态的转变过程中,过渡状态流态对应的相对上下游水位的变化范围就越大,通气时水流旋转的强度比不通气时剧烈,通气状态改变时,下游水位对流态的影响更为显著。例如不通气时随下游水位的增大,空腔迅速减小,在 $h/D = 4.6$ 和在 $z/D = 20$ 附近,空腔呈线状,出现回流,到 $z/D = 26.25$ 附近,空腔就已消失;当 D_0/D 增大到 0.3125 时,在同一上下游水位和 $z/D = 35.25$ 附近,空腔才呈线状和出现回流,到 $z/D = 41$ 左右空腔才消失。

4 洞长变化对流态的影响

图2为起旋器出口收缩断面面积比相同($A/A_d = 0.45$)相对通气孔直径相同($D_0/D = 0.125$)水平旋流洞的相对洞长 L/D 为 31.5 和 67.4 时,空腔消失成气泡流时的断面位置与相对上下游水位差 $(H-h)/h$ 的变化。从图2中可以看出,2种相对洞长,水平旋流洞内流态从吸吮流向淹没流转变时 $(H-h)/h$ 的界线值(过渡区范围)均为 $1.5 \leq (H-h)/h \leq 2.5$ 。这表明洞长不同时流态从吸吮流向淹没流转变中,过渡区对应的相对上下游水位差的变化范围是相同的。

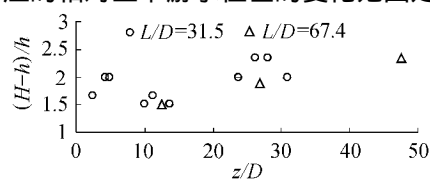


图2 空腔消失成气泡流的位置与 $(H-h)/h$ 的变化

图3为 $A/A_d = 0.45$, $D_0/D = 0.125$,但 L/D 不同时,起旋器出口断面 Fr 与 $(H-h)/h$ 的变化。起旋器出口断面的 Fr 仅考虑了上游的水流条件,而 $(H-h)/h$ 还考虑了下游水位变化的影响。从图3可见,水平旋流洞的相对洞长 L/D 为 31.5 和 67.4 时, Fr 随 $(H-h)/h$ 的变化趋势虽相同,但分区的界限值明显不同。当 $L/D = 31.5$ 时,在 $2.5 \leq (H-h)/h < 6$ 内, Fr 随 $(H-h)/h$ 的增大而增大,下游水位对流态和水力特性的影响显著,空腔内的气体压强为负压,因此属于吸吮流流态的范围;在 $(H-h)/h \geq 6$ 以后, Fr 趋于常数 0.71 ,下游水位对流态和水力特性的影响较小,空腔内的气体压强为大气压,因此属于自由流流态的范围。而在 $L/D = 67.4$ 时,吸吮流的范围在 $2.5 \leq (H-h)/h < 11$,明显增大,自由流流态所需要的上游水流条件 Fr 也明显增大, Fr 趋于常数 0.85 。这表明洞长不同时,流态分区的临界水力条件是不同的,洞长越大,吸吮流的范围越大,自由流流态要求的 $(H-h)/h$ 值或 Fr 值更大。因此文献[10]中将 $(H-h)/h$ 作为流态的判别标准或将起旋器出口断面 Fr 作为流态的判别标准而不考虑洞长的影响也是不全面的。但因为还无法建立水平旋流泄洪洞水力特性的一般函数关系表达式,也缺乏更系统的洞长变化的试验研究,因此洞长对流态的影响还只能作为影响因素反映在水力参数的关系之中。

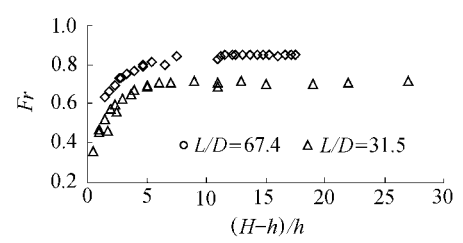


图3 不同洞长时 Fr 与 $(H-h)/h$ 的关系

另外从2种洞长的流态观测结果的对比可知,当 $L/D = 31.5$ 时,在 $(H-h)/h \geq 6$ 以后,空腔内气体压强就近似为大气压,空腔直径沿程的变化就已很小,但在 $L/D = 67.4$ 时,即使在 $(H-h)/h \geq 11$ 后,空腔内气体压强也已近似为大气压,但还会出现空腔直径沿程的明显减小(在 $z/D > 30$ 后)。因此文献[2,10]中,将空腔直径是否沿程变化作为流态变化的基本特征也是不全面的,自由流和吸吮流流态变化的基本特征还是在于空腔内的气体压强是否为负压。

5 起旋器收缩断面面积比不同时流态的变化

起旋器安装在竖井的末端,是一个逐渐收缩的与水平洞切向相贯的旋流发生装置。它既是竖井与

水平旋流洞的衔接装置,又是旋流的发生装置。起旋器出口的收缩断面是这种旋流内消能工水力特性和旋流特性的控制断面,因此其对流态、泄流量和过渡段的水力特性有重要的影响,但目前尚没有人做过专门的研究。本节在 $D_0/D = 0.1875$, $L/D = 63.4$ 时,研究了起旋器出口收缩断面面积比对旋流泄洪洞水流流态的影响,面积比的变化共 4 种,即 $A/A_d = 0.25$ 0.35 0.45 0.55 。

5.1 流态的变化过程

在上游水位较低, $H/D < 10.3$ 时,水流在竖井内呈自由跌落流,此时水平洞内水流无旋转,呈明流状态;在 $H/D = 10.3$ 附近时,水平洞内水流处于临界起旋状态。

在 $10.3 < H/D < 10.6$, 水平洞内 $z/D = 0 \sim 29$ 范围内,水流旋转充分,空腔沿程减小,在 $z/D = 29 \sim 35.25$ 范围内空腔消失,变成气泡流,再随后气泡逸出,水流呈明流状平稳流出水平洞。

在 $10.6 \leq H/D \leq 10.8$ 、面积比为最小($A/A_d = 0.25$)时,竖井进口的堰上水流处于自由堰流与淹没堰流的过渡状态,此水位状况下,水流的自由掺气已经不充分了,竖井内的水流呈半透明状态。水平洞内的旋转水流在一定的洞长后,空腔直径开始明显变小,变窄,出现扭曲,在泄水道 $z/D = 38.38$ 附近已变成带状,到 $z/D = 60.25 \sim 63.38$ 附近,空腔变成气泡流。当上游水位再增加,竖井进口为淹没堰流。水平洞内旋流空腔处于稳定状态,空腔直径沿程减小,但一直延伸到水平洞出口。

通过试验可知,起旋器收缩断面的面积比对自由堰流时的流态影响不大,只是面积比越大,竖井进口处自由堰流向淹没堰流转变时的库水位越高。4 种面积比从自由堰流向淹没堰流转变时,相对库水位的变化范围为 $H/D = 10.8 \sim 11.2$ 。

5.2 面积比对淹没堰流时水平洞内流态的影响

当竖井的进口处于淹没堰流状态,竖井内为有压流,水平洞内为空腔环流。对于同一面积比来说,上、下游水位变化对流态有显著的影响。对同一下游水位,上游水位越高,空腔直径也越大,旋转角 α 也越小;对于同一上游水位,下游水位越高,由于回水压力的作用,空腔直径也越小,旋转角越大。水平洞内形成的环流空腔的长度随上游水位的升高而增长,随下游水位升高而减小。空腔环流沿程的变化可分为起始段、稳定段和消失段,在空腔消失部位会出现水气掺混状态。在 $h/D \leq 1$ 时,水平洞内稳定空腔在洞末端消失;随着下游水位的升高,当 $h/D = 2$ 时,旋流夹角变大,稳定空腔直径逐渐减小,出现了吸吮流流态。洞内流态如图 4 所示。

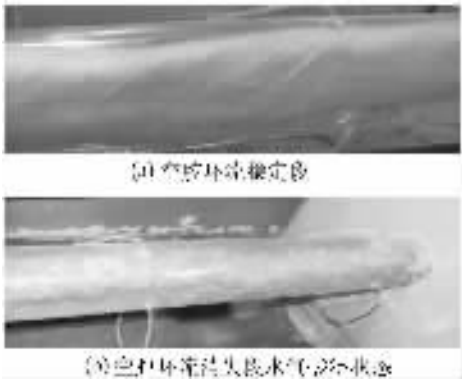


图 4 泄水道内形成的稳定空腔及空腔消失后形成的水气掺混状况

图 5 是在吸吮流与淹没流之间的过渡流流态下,不同起旋器出口收缩断面面积比时,空腔消失的位置与上下游水位差之间的关系。从图 5 中可以看出面积比较大时(0.45 0.55),旋流空腔消失时所需要的上下游水位差较小,为 $1.5 < (H - h)/h < 2.5$;而当面积比较小时(0.25 0.35),旋流空腔消失时所需要的上下游水位差变化较大,为 $2.0 < (H - h)/h < 6.5$ 。这说明面积比较小时,上、下游水位变化对流态的影响较大,对通气孔通风量等其他因素的变化也更为敏感。

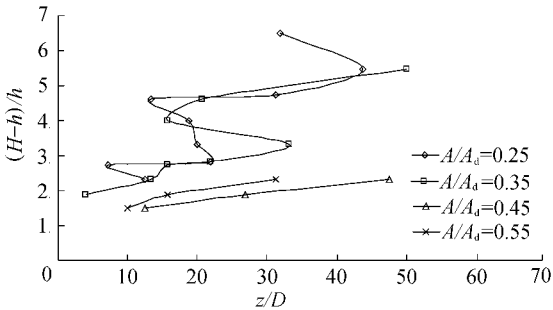


图 5 不同面积比时旋流空腔消失时的 $(H - h)/h$ 与 z/D 关系

当面积比为 0.55 时,上游水位升高至 $H/D = 17.19$ 时,水平洞内的空腔环流状态发生改变,在水平洞中部 $Z/D = 16$ 附近形成扭状空腔环流,如图 6 所示。主要是因为面积比为 0.55 的状况下,起旋器出口断面增大,泄流量变大,通气孔通气量不足,水平洞的壁面压力较其他面积比时达到最小所致。



图 6 环流空腔突变形成扭带状

图 7 是不同面积比时,起旋器出口断面 Fr 与 $(H - h)/h$ 之间的关系。由图 7 可见, Fr 随 $(H - h)/h$ 的变化趋势虽也相同,但不同面积比分区

界限值不相同,即自由流流态区(Ⅰ区)与吸吮流流态区(Ⅱ区)对应的 Fr 及 $(H-h)/h$ 的变化范围均不同。因为起旋器出口面积比的变化实质上就是 Fr 的变化,就是泄流量的变化, $(H-h)/h$ 的变化实质上就是下游水位的变化,所以图7还表明泄流量随下游水位的变化存在最大值,这已被相关的研究所证实^[2,11]。

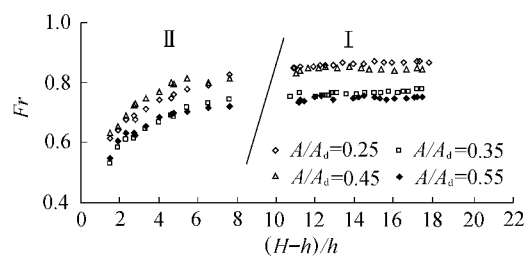


图7 不同面积比时 Fr 与 $(H-h)/h$ 关系

6 影响流态变化因素的分析

通过几个系列的模型试验研究和观测,可以肯定,在流体的物理性质(黏滞性 μ 、密度 ρ 、万有引力特性 g 等)不变的条件下,影响流态变化的主要因素为上游水位 H 、通气量 Φ 、空腔环流内的气体压强 p_0 、洞长 z 、洞径 D 、下游水位 h 和起旋器的几何尺寸及通气孔的几何尺寸。通过量纲分析,上游水位、竖井进口、竖井段和起旋器的几何尺寸(也包括面积比 A/A_d)等影响因素均可由起旋器收缩断面的水流弗劳德数 Fr 所概括,通气孔的几何尺寸、通气量的影响和空腔内气体压强等影响因素均可由通气孔断面的通气量弗劳德数 fr 所概括,因此图1所示的竖井进流水平旋转内消能泄洪洞的无因次水力特性变量(例如相对空腔直径 d_0/D 、相对壁面压强 $p_w/(\gamma H)$ 和环流空腔内的相对真空度 h_v/H 、流态等)的无因次函数关系式均应为

$$f(Fr, fr, h/D, z/D) = 0 \quad (1)$$

其中 $Fr = \frac{Q/A}{\sqrt{gH}}$, $fr = \frac{\phi/A_\phi}{\sqrt{gh_v}}$
 式中: $A_\phi = \pi D_0^2/4$ 为通气孔的面积; p_a 为大气压强; $h_v = (p_a - p_0)/\gamma$ 为环流空腔内的真空度; Q, A 分别为泄流量与起旋器出口的面积。将式(1)写成 $Fr = f(fr, z/D)h/D$ 的形式后不难看出,流态的变化主要与 Fr 和下游水位有关,但也与 fr 和 z/D 有关。

7 结 论

a. 对水平旋流泄洪洞流态的影响因素很多,除上、下游水位以外,流态的变化还与通气孔的直径、水平洞的洞长和起旋器出口断面的面积比直接有关,在竖井为压力流的条件下,水平旋流泄洪洞的流

态可以分为自由流、吸吮流与淹没流这3种基本流态,在流态的转变过程中会出现过渡状态的流态。

b. 空腔环流形成的水力条件和流态的分区条件在洞长和通气孔直径不变时可由 $(H-h)/h$ 和起旋器出口断面 Fr 决定,在通气孔的直径和洞长改变时,流态分区所对应的 $(H-h)/h$ 和 Fr 均有所不同,但基本流态的类型不变。

c. 通气时,水平旋流洞内的旋流空腔直径增大,水流旋转的强度增大;不同的洞长,流态从吸吮流向淹没流转变时,过渡区相对上下游水位差的变化范围相同,但洞长越大,吸吮流的范围越大,转变为自由流流态时所需要的起旋器出口断面 Fr 也越大,起旋器出口面积比对流态有明显的影 响,但最终可归结为 Fr 对流态的影响。

d. 流态的变化主要与起旋器出口断面 Fr 和 h/D 有关,但也与综合反映通气孔通气量影响的无因次变量 fr 和 z/D 有关。

参考文献:

- [1]牛争鸣,洪锦,谢小平,等.旋流内消能泄洪洞的国内外研究进展与发展趋势[C]//全国基础水力学学术研讨会论文集.武汉:武汉大学出版社,2004:72-77.
- [2]牛争鸣,孙静,章晋雄.竖井进流水平旋转内消能泄水道泄量特性[J].水利学报,2003(1):72-77.
- [3]牛争鸣,孙静,张鸣远.竖井进流水平旋转内消能泄水道环流空腔直径的变化规律[J].水利学报,2003(2):31-37.
- [4]牛争鸣,孙静,张鸣远.竖井进流水平旋转内消能泄水道的壁面压力分布规律[J].水力发电学报,2003(4):71-80.
- [5]牛争鸣,孙静,程庆迎.竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布与消能率的试验研究[J].水力发电学报,2003(1):61-69.
- [6]孙静,牛争鸣,章晋雄.竖井进流水平旋转内消能泄水道流速分布的试验研究[J].水动力学研究与进展,2003(2):240-247.
- [7]牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道空腔环流的能动力特性[J].西安交通大学学报,2004(7):741-745.
- [8]牛争鸣,张鸣远.水平旋转空腔环流的壁面应力[J].应用力学学报,2004(4):110-114.
- [9]牛争鸣,张鸣远,程庆迎.水平旋转内消能泄水道空腔环流的旋流特性[J].水力发电学报,2004(3):102-106.
- [10]牛争鸣,张鸣远.水平旋转内消能泄水道的流态序列、分区特性及临界条件[J].水动力学研究与进展:A辑,2005,20(1):14-18.
- [11]牛争鸣,孙静,张宗孝,等.水平旋转内消能泄洪洞空腔环流内气体压强的变化规律[J].水动力学研究与进展:A辑,2006,21(4):526-532.
- [12]夏维洪.苏联的旋转水流消能[J].水利水电科技进展(河海科技进展),1991,11(3):29-40.

(收稿日期:2006-10-16 编辑:熊水斌)