

洞内淹没射流及水平旋流梯级内 消能的适用性研究

赵洋, 李守义, 牛争鸣, 李奇龙, 贾飞
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了适应高水头泄洪消能的需要,提出了一种新型的泄洪内消能工,即洞内淹没射流与水平旋流梯级内消能工。以流量 $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、最大总作用水头 150m 为标准进行了该消能工的体型设计,然后对设计的消能工进行了 $1:60.25$ 几何比尺下的水工模型试验。结果表明:下游出现与明渠相似的多种水跃流态,淹没射流孔口系数 $0.5 \sim 0.56$,起旋器喉口流量系数 $0.32 \sim 0.35$ 之间;旋流空腔直径先增大后迅速减小最后平稳,在旋流阻塞孔口处空腔直径又迅速增大最后稳定;下游水位 H_F 小于 $2.0D$ 时,下游旋流洞段压强相对变化幅度较小, H_F 大于 $2.0D$ 时,上下游水位对旋流洞压强影响较大;上游水位的变化不影响淹没射流速度相对变化,下游水位的变化,对水平旋流洞段影响较大;上游淹没射流消能、竖井消能、旋流洞消能与下游旋流阻塞扩散消能的消能率分别占总消能率的 15% 、 10% 、 30% 、 10% ,其中下游水平旋流洞段承担主要消能部分。

关键词: 淹没射流; 水平旋流; 梯级内消能工; 旋流式消能; 水力特性; 泄洪洞

中图分类号:TV651.3; TV135.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0168-05

Study on the applicability of submerged jet and horizontal rotating cascade

ZHAO Yang, LI Shouyi, NIU Zhengming, LI Qilong, JIA Fei

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to adapt to the need of high head flood discharge, a new type of water outlet can be put forward, which is the submerged jet and horizontal cyclone. In this paper, the body design of the energy dissipation work was carried out with flow rate of $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ and the maximum total effect of water head 150m . Then, a hydraulic model test was carried out on the designed energy dissipater under geometric scale of $1:60.25$. The results show that there are many kinds of water flow patterns similar to the open channels, and the water flow coefficient of the water jet is $0.5 \sim 0.56$, and the flow coefficient of the rotator throat is between $0.32 \sim 0.35$. The diameter of the swirl cavity firstly increases and then rapidly decreases finally stabilizes. and the cavity diameter of the cavity is rapidly increasing and finally becomes stable. When the downstream water level H is less than $2.0D$, the pressure of the downstream swirl tunnel is relatively small, and when H is greater than $2.0D$, and the upstream and downstream water level has a greater influence on the pressure of the cyclone hole. The change of upstream water level does not affect the relative change of submerged jet velocity, and the change of the downstream water level influences the horizontal rotation tunnel. Upstream submerged jet flow energy dissipation, vertical shaft energy dissipation and swirl tunnel energy dissipation, and the downstream cyclone blockage dissipation accounted for 15% , 10% , 30% , 10% of the total energy dissipation rate, of which the downstream horizontal swirling flow sections bear the main dissipating part.

Key words: submerged jets; level rotary flow; cascade inner energy dissipator within the industry; gyrating-flow energy dissipation; hydraulic characteristics; spillway tunnel

收稿日期:2017-06-28; 修回日期:2017-08-08

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。

通讯作者:李守义(1955-),男,甘肃庄浪人,教授,博士生导师,研究方向为水工结构应力仿真分析、结构优化设计、水利水电工程造价管理。

1 研究背景

旋流式消能是在旋流洞内设置起旋装置,使水流在洞内发生旋转进行消能的内消能方式。夏维洪等^[1-2]最先介绍了前苏联旋转水流阀门、切向旋转进水器和螺旋进水器 3 种基本型式的竖井旋转水流消能设施的基本构造。牛争鸣等^[3-5]研究了下游水位、通气孔直径、起旋器喉口等对水力特性的影响。表明消能率随下游水位的增大而衰减,并且依据试验观测资料对这种流动的壁面压力系数及其影响因素的变化规律进行了分析,在分析的基础上给出了泄量的基本计算公式、流量系数的变化规律和泄量计算的公式。南军虎等^[6]、朱争鸣等^[7-8]为了揭示空腔旋流内部的压强特性,以公伯峡水电站水平旋流消能工为例,采用理论分析、模型试验和数值模拟相结合的方法进行了研究。李生庆等^[9]通过模型试验,对旋流式竖井泄洪洞洞内的压力进行了测量,分析了涡室、竖井侧壁及消力井侧壁、底板的压力变化规律。

王永生等^[10]认为复合式旋流式内消能工是解决高坝水力设计中高水头泄洪消能的新途径。因此牛争鸣等^[12-13]结合雅砻江两河口水电站后期 3[#]导流洞和大渡河猴子岩 1[#]导流洞的改建,在研究旋流阻塞和旋流扩散复合消能泄洪洞的水力特性基础上,对该类型复合式旋流内消能泄洪洞的设计原理与方法进行研究探讨,研究了新型旋流阻塞和旋流扩散复合内消能泄洪洞的壁面压强特性。安丰勇^[11]研究了阻塞旋流最大泄流能力由起旋器及阻

塞体型共同控制,降低了泄洪洞的泄流量。杨健^[14]结合工程实例研究了旋流阻塞消能和旋流扩散消能相结合的基本水力特性。牛争鸣等^[15]进一步对于这种复合式消能工研究得出阻塞孔口流量系数与阻塞前水头损失以及阻塞导致的相对空腔半径、旋流角及相对壁面压强的旋流特性变化有关^[15]。

本文提出了泄洪洞内淹没射流与水平旋流梯级内消能工,该消能工是一种新型的多级内消能工,其消能主要由两部分组成,即第一部分由上游进水口接水平淹没射流洞段组成,进行淹没射流消能,第二部分由竖井接水平旋流洞段组成,然后再通过阻塞扩散段与原导流洞衔接,进行旋流阻塞扩散消能。

2 数据与方法

本次试验系统由供水系统、试验模型、测压测速装置、尾水池及量水堰 5 部分组成。

主要采用系列的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研究。试验模型按重力相似设计,几何比尺 1: 60. 25。试验中原型设计流量 1 200 m³/s,最大总作用水头 150 m,竖井与旋流洞直径初定为 $D = 10\text{ m}$ 。

2.1 重力相似基本原理

重力相似(弗劳德相似准则)是保证试验模型与实际工程中水流运动在重力与惯性力成一定比例,以此来保证动力相似,原型和模型中的弗劳德数($Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$)相等,具体比尺关系如表 1。

表 1 原、模型各物理量的比尺关系

几何比尺	流速比尺	流量比尺	压强比尺	时间比尺	糙率比尺
$\lambda_L = 60.25$	$\lambda_V = \lambda_L^{0.5} = 7.763$	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 28176.86$	$\lambda_{P/\gamma} = \lambda_L = 60.25$	$\lambda_t = \lambda_L^{0.5} = 7.763$	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.98$

2.2 流量的测量

试验模型上、下游水位采用装有标尺的水位管进行量测。由于试验模型泄流量较大,故模型流量采用矩形薄壁堰量测,流量计算公式如下:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \tag{1}$$

式中: Q 为泄流量, m³/s; b 为堰宽, m; H_0 为堰上水头, m; m_0 为包括行进流速在内的流量系数。

2.3 起旋器的设计

起旋器的设计泄流量按下式计算:

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

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. 35 ~ 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。

2.4 试验压力测点布置

试验模型压力测点布置如图 1、2,上游段布置 25 个测压孔断面,下游段布置 24 个测压孔断面。每个断面在洞壁顶部、底部、左侧、右侧各布置一个测压孔。

3 结果与讨论

3.1 流量系数

根据公式(1)、(2)计算出了 9 种典型工况下不同断面的流量系数,泄流量规律如表 2 所示。

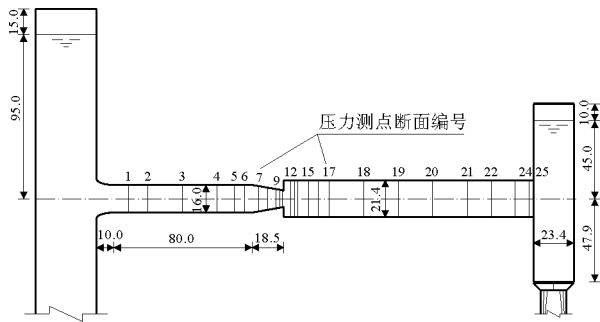


图1 试验模型上游段(单位:cm)

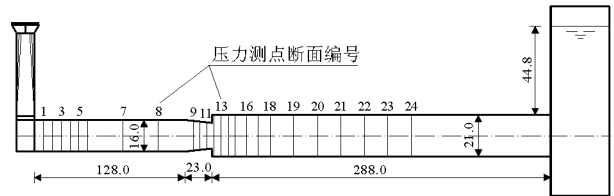


图2 试验模型下游段(单位:cm)

表2 泄流量规律

上游 水位	下游 水位	流量 $Q /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	淹没射流 孔口流量 系数 μ_1	旋流器喉 口流量 系数 μ_2	下游阻塞 口流量系 数 μ_3
	0.5 D	0.020	0.51	0.37	0.28
12D	1.5D	0.019	0.50	0.40	0.28
	2.5D	0.019	0.49	0.40	0.31
	0.5D	0.025	0.54	0.36	0.35
10.9D	1.5D	0.019	0.54	0.37	0.27
	2.5D	0.019	0.54	0.37	0.30
	0.5D	0.019	0.69	0.35	0.26
9.2D	1.5D	0.018	0.65	0.36	0.25
	2.5D	0.017	0.60	0.33	0.25

影响泄流规律的因素主要有作用水头 $H_{\text{上}}$ 、通气孔洞径 D_0 、起旋器喉口收缩比 n 、阻塞孔口收缩比

m 及下游水位 $H_{\text{下}}$, 因此, 在本次试验过程中分别对在不同作用水头 $H_{\text{上}}$ 及下游水位 $H_{\text{下}}$ 两个因素影响下, 对 150 ~ 200 m 设计高水头作用下的水平旋流阻塞与旋流扩散复合内消能工的泄流规律进行试验测量研究。上游淹没射流阻塞口的流量系数 μ_1 在 0.5 ~ 0.7 之间, 如图 3。当上游水位偏低时, 气体会通过上游管道流入, 在上游淹没阻塞口形成空腔, 影响流量系数 μ_1 下降, 因此为避免上游水位偏低带来的影响, 流量系数选为 0.5 ~ 0.56。由于流量系数为无量纲数, 运用此模型计算的流量系数范围可直接应用于实际工程。从图 4 和图 5 中得出, 旋流洞起旋口的流量系数 μ_2 较上游阻塞口流量系数较小, 其变化范围为 0.33 ~ 0.4, 下游旋流器喉口流量系数 μ_3 变化不大。

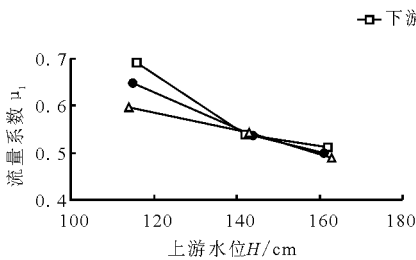


图3 上游淹没射流孔口流量系数曲线

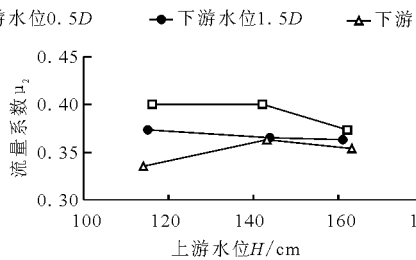


图4 旋流喉口流量系数曲线

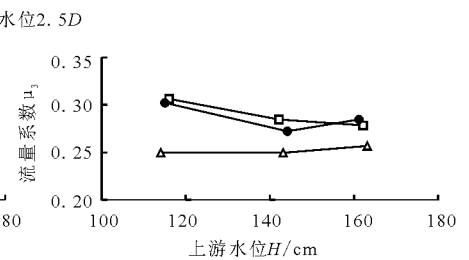


图5 下游阻塞口流量系数曲线

3.2 下游水平旋流洞段及扩散段压强特性分析

为了探究水平旋流洞段及扩散段壁面四周压强分布特性, 选择了两种工况: 工况I为上游水位 12 D (以下游水平旋流洞中心轴为 0 势能线), 下游为明流状态; 工况II为上游水位 10.9 D, 下游水位 2.5 D。两种工况水平旋流洞管壁压强分布如图 6 和图 7。

试验表明: 对于水平洞左壁面和底壁面, 其壁面压强的变化规律基本相似。当 $X/D < 8.8$ 时, 水流刚开始进入起旋器及起旋器之后一定范围内, 由于起旋器强迫水流发生旋转, 因此在水平旋流洞左侧壁面和底部壁面的壁面压强均较大, 右壁面和上壁面变化规律基本相似, 其沿程压强逐渐减小。当 8.8

$< X/D < 10.8$ 时, 压强快速减小, 此过程对应水平旋流段收缩段, 流速增大, 压强减小, 管道四周壁面压强变化规律相似。当 $X/D > 10.8$ 时, 水流进入到下游扩散段, 由于管径增大, 流速减小, 根据能量方程, 此段管壁压强较收缩段压强大, 但是在 $10.8 < X/D < 12.0$ 段, 水平旋流收缩段与尾水洞连接一定距离, 空腔中的空气快速与水流互相混合, 形成水汽两相流, 此时流态复杂, 也容易形成负压。当 $X/D > 2.0$ 时, 管壁壁面压强相对稳定, 沿程减小, 同一断面各测点压强变化不大。

3.3 上下游水位对于旋流洞压强的影响

图 8 和 9 分别为不同下游和上游水位对旋流洞压

强的影响。根据图8和9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_F 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,但是 H_F 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段时,由于流速增大,管壁压强极小,小于 $0.1 H_U$,在经过收缩段到尾水洞时,由于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

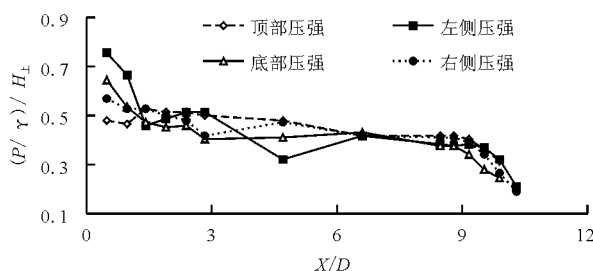


图6 工况 I 下游水平旋流洞管壁压强分布

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。当下游水位 H_F 小于 $2.0D$ 时,上游水位对于旋流洞段壁面压强和尾水洞段壁面压强的影响不大,但是在 H_F 大于 $2.0D$ 时,上游水位的变化对于壁面压强影响很大。当 H_F 大于 $2.0D$,上游中水位运行对于旋流洞段壁面压强的影响很大,在高水位运行时,壁面压强变化幅度较大。这对于泄洪洞的运行设计而言,当下游水位较低时,对上游运行水位要求不严格,但是下游水位较高时,运行水位应选择中水位,以满足安全要求。

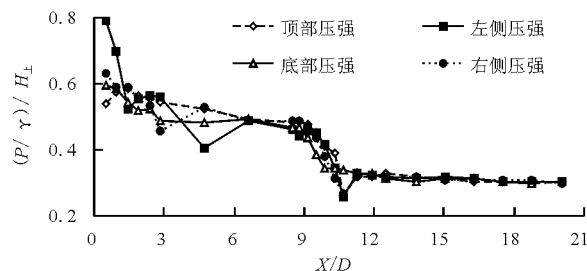


图7 工况 II 下游水平旋流洞管壁压强分布

3.4 淹没射流式水平旋流内消能泄洪洞的流速特性

图10为上游水位为 $12D$ 时不同下游水位下游水平旋流洞的流速分布。分析图10可知,当 $0 < X/D < 2$ 时,空腔直径呈逐渐增大的趋势,动能和压能之间的相互转换比较剧烈,流速有增大的趋势,水平旋流洞断面平均旋转流速约在 $42 \sim 45 \text{ m/s}$ 。

当 $2 < X/D < 7.14$ 时,即在水平旋流洞段,可以看到水平旋流洞断面平均流速沿程逐渐减小。此时,水流旋流强度较大,水流旋转路径增长,沿程水头损失增大,引起断面平均流速逐渐减小。此时,水平旋流洞断面平均旋转流速约在 $36 \sim 40 \text{ m/s}$ 。

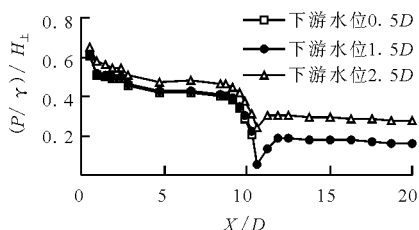
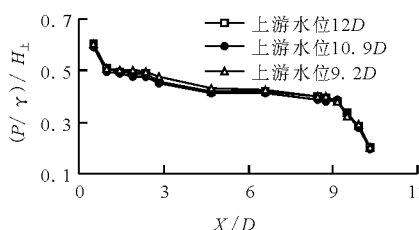
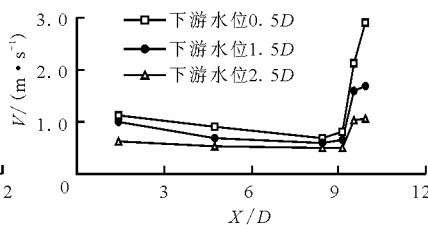
当 $7.14 < X/D < 8.64$ 时,即在阻塞收缩段和

阻塞水平段,对于不同的上游水位,流速均呈现出逐渐增大的趋势。分析其原因发现,当 $7.14 < X/D < 8.64$ 时,随着旋流洞洞径沿程逐渐收缩,加之空腔直径逐渐增大,引起旋转水流流速逐渐增大。此时,水平旋流洞断面平均旋转流速约在 $37 \sim 46 \text{ m/s}$ 。

3.5 洞内淹没射流及水平旋流梯级内消能方式的实际消能率

选择上游水位 $12D$ 时(工况 I)和 $10.9D$ 时(工况 II),根据能量守恒定律,计算不同下游水位情况下水平淹没射流洞段的消能率,如图11、12。

试验数据显示,在上游淹没射流整体消能率中,阻塞口消能率在 11% 左右。

图8 上游水位为 $12D$ 时不同下游水位对于旋流洞压强影响图9 下游水位为 $0.5D$ 时不同上游水位对于旋流洞压强的影响图10 上游水位为 $12D$ 时不同下游水位下游水平旋流洞流速分布

洞内淹没射流及水平旋流梯级内消能方式的主要消能部位有4个,即上游淹没射流阻塞口、上游淹没射流段与下游旋流洞段连接的竖井段、下游水平旋流洞段旋流消能、下游水平旋流洞与尾水洞连接阻塞口。根据试验数据图13所知,水平旋流洞段消

能在 30% 左右,但是下游阻塞口的消能率在 10% 之间,与上游阻塞口消能率相差甚大,其原因是上游淹没射流阻塞口的流态形式是一相流,而下游阻塞口的流态形式是水气两相流,导致了消能率的降低。整个试验模型的总体消能率在 70% 左右。

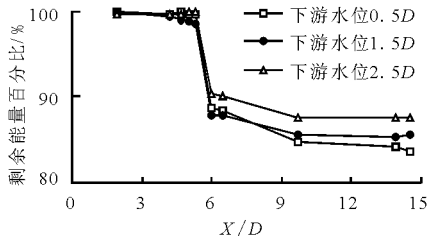


图 11 上游水位 12D 时上游淹没射流段沿程能量变化

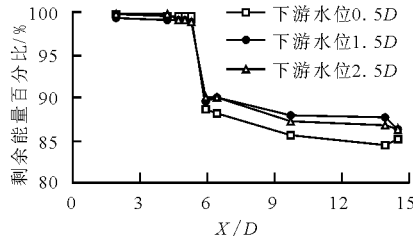


图 12 上游水位 10.9D 时上游淹没射流段沿程能量变化

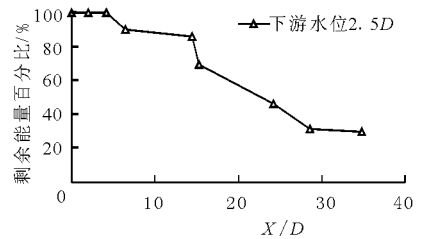


图 13 整个消能工的沿程能量变化

4 结 论

(1) 上游淹没射流阻塞口的流量系数在 0.5 ~ 0.56 之间, 下游旋流洞起旋口的流量系数较上游阻塞口流量系数小, 其变化范围在 0.35 ~ 0.4 之间, 变化幅度很小。

(2) 洞内淹没射流及水平旋流梯级内消能方式的主要消能部位有 4 个, 即上游淹没射流阻塞口、上游淹没射流段与下游旋流洞段连接的竖井段、下游水平旋流洞段旋流消能、下游水平旋流洞与尾水洞连接阻塞口。根据试验数据, 上述 4 种消能工的消能率分别为 15%, 10%, 30%, 10%, 整个消能工的消能率在 70% 左右。

(3) 当下游水位 H_f 在 0.5D 和 2.0D 之间变化时, 旋流洞段洞壁压强相对变化幅度不大, 但是当 H_f 大于 2.0D 时, 洞壁压强变化幅度较大, 下游水位对于旋流洞壁压强影响很大, 随着下游水位的升高, 旋流洞壁压强增大。

(4) 在下游水平旋流洞段, 对于不同的上游水位, 断面平均流速沿程变化的趋势基本上均呈现出先逐渐减小, 后再增大的规律。

此次试验仅对同一体型“ $n = 0.56, m_1 = 0.64, m_2 = 0.34$ ” (n 为起旋器收缩比, m_1 为上游阻塞收缩比, m_2 为下游阻塞收缩比) 的水平旋流内消能泄洪洞的流态、泄流量、壁面压强、空腔直径和流速等水力特性进行了较为全面的测量和分析研究。水平旋流洞段随着下游水位的升高, 其旋流空腔的直径变化以及气体进入量或排出量等情况并没有作出观测, 有待于在以后试验中开展。针对上游高水位、下游低水位条件下, 在下游水平旋流洞与尾水洞连接的阻塞口处, 中心空腔、空腔与管壁之间是旋转水流, 但是在进入尾水洞的很短距离内, 水流与气体很快混掺, 这在惯性作用下和水流与气体压强的相对比较下解释不通。所以, 对于这种试验现象及其形成的机理和水力特性应在后期工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [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(自然科学版), 1998, 26(3): 11-17.
- [3] 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, 22(1): 61-69.
- [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, 2002, 21(4): 71-80.
- [5] 牛争鸣, 孙静, 章晋雄. 竖井进流水平旋转内消能泄水道的泄量特性研究[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 72-77.
- [6] 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(02): 272-281.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李生庆, 黄涛. 旋流式竖井泄洪洞洞内压力特性的试验研究[J]. 四川水力发电, 2013, 32(S1): 135-139+145+182.
- [10] 王永生, 李建中, 牛争鸣. 旋流式内消能工研究综述[J]. 陕西水力发电, 1995(4): 21-26.
- [11] 安丰勇. 水平旋流内消能泄洪洞的阻塞效应研究[D]. 西安理工大学, 2005.
- [12] 牛争鸣, 杨健, 丁浩铎, 等. 旋流阻塞与旋流扩散复合式内消能泄洪洞的水力设计[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 24-30.
- [13] 牛争鸣, 曹双利, 丁浩铎, 等. 旋流阻塞与旋流扩散复合式内消能泄洪洞的壁面压强特性[J]. 应用力学学报, 2010, 27(1): 184-189+233.
- [14] 杨健. 旋流阻塞与旋流扩散复合式内消能泄洪洞的水力特性——以雅砻江两河口和大渡河猴子岩水电站导流洞改建方案论证为例[C] // 陕西省水力发电工程学会青年优秀学术论文文集, 2008.
- [15] 牛争鸣, 李奇龙, 曹双利, 等. 阻塞式旋流泄洪洞的泄量特性分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1): 139-146, 188.