

高水头旋流阻塞复合内消能工水力特性研究

王立杰^{1,2}, 李奇龙³, 张鹏君⁴, 李江波³

(1. 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410014; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014; 3. 西安理工大学水利水电学院, 陕西西安 710048; 4. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州 730000)

摘要: 旋流阻塞复合内消能工是适用于高坝泄洪消能的一种新型消能工, 为了分析其在超高作用水头下的泄洪消能适用情况, 采用模型试验与数值模拟相结合的方法, 对 200 m 作用水头条件下该消能工的水力特性进行了研究。结果表明: 泄流量为 1 547 m³/s, 略大于设计值, 满足泄流要求; 洞内形成了稳定的空腔旋流, 旋流洞段空腔直径约 6~7 m, 旋流角约 60°, 壁面压强约 110×9.8 kPa, 最大点流速约 45 m/s; 起旋器与旋流洞段为 0.050~0.274 Hz 的低频脉动, 且水流空化数均大于 1.2, 运行安全; 阻塞扩散段末端最小瞬时负压为 -3.81×9.8 kPa, 且水流空化数较小, 但水流掺气率较高, 有利于减免发生空蚀; 阻塞扩散段末端脉动优势频率为 46.99 Hz; 总消能率达 82.1%, 消能率高。研究成果可为该复合消能工在高水头下的泄洪消能应用提供参考。

关键词: 旋流阻塞复合内消能工; 阻塞; 空腔旋流; 模型试验; 数值模拟; 水力特性

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0115-07

Hydraulic characteristics of swirling-blocking composite internal energy dissipator with high water head

WANG Lijie^{1,2}, LI Qilong³, ZHANG Pengjun⁴, LI Jiangbo³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology, Changsha 410014, China; 2. POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 3. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: The swirling-blocking composite internal energy dissipator is a novel energy dissipator which is applicable to the flood discharge and energy dissipation of high dams. In order to analyze its application to the flood discharge and energy dissipation of dams with ultra-high water head, its hydraulic characteristics under the condition of 200 m water head are studied by means of physical model test and numerical simulation. The results show that with the application of this novel dissipator, the discharge is 1 547 m³/s, which is slightly larger than the design value but can still meet the discharge requirements. There is a stable swirling flow in the cavity, and the diameter of the cavity in the swirling section is about 6–7 meters, with a swirling angle of about 60°. In the swirling section, the wall pressure is about 110×9.8 kPa, and the maximum point velocity is about 45 m/s. There is a low frequency pulsation between the swirling flow generator and the swirling section, which is 0.050 to 0.274 Hz, and the cavitation number is greater than 1.2, indicating that the discharge operation is safe. The minimum instantaneous negative pressure at the end of the blocking diffusion section is -3.81×9.8 kPa, and the cavitation number of the flow is small; however, the possibility of cavitation would be greatly reduced due to the high aeration rate of the flow. The dominant frequency of the flow at the end of the diffusion section is 46.99 Hz and the total energy dissipation rate is as high as 82.1%. The research results can provide some reference for the application of the composite energy dissipator to the flood discharge and energy dissipation of dams

收稿日期: 2023-01-19; 修回日期: 2023-07-09

基金项目: 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金项目(PKLHD201804); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(青年)(2019JQ-064)

作者简介: 王立杰(1980—), 男, 湖南长沙人, 博士, 正高级工程师, 研究方向为水工水力学。

通讯作者: 李奇龙(1985—), 男, 甘肃静宁人, 博士, 讲师, 研究方向为水工水力学和高坝泄洪消能。

with high water head.

Key words: swirling-blocking composite internal energy dissipator; blocking; swirling flow in cavity; physical model test; numerical simulation; hydraulic characteristics

1 研究背景

高坝泄洪中的消能问题和空化、脉动等高速水流问题历来十分突出^[1],而孔板^[2]、洞塞^[3]、消力井^[4]、竖井旋流^[5-6]和水平旋流^[7]等内消能方式具有消能率高、抗空蚀能力强和不雾化等优点,被广泛采用^[8]。其中,水平旋流利用水流旋转产生的离心力,可以增大洞内水压力,利于减免空化;同时气水混掺与水流层强剪切可以增大能量耗散,提高消能率,在高作用水头下应用时更有优势。水平旋流已在我国公伯峡水电站中得以成功应用,经2006年原型观测,运行良好,消能率可达84.5%^[7]。

水平旋流消能方式是经工程验证过的可以满足作用水头100 m、流量1 000 m³/s级泄洪消能要求的安全高效消能方式。但起旋器出口局部低压不可避免,水头较高时有空化风险,于是提出在水平旋流洞末端增设阻塞的新型旋流阻塞复合内消能工,利用阻塞增大洞内压力,减免空化,并增大消能率^[9]。牛争鸣^[10]结合两河口、猴子岩水电站导流洞改建,进行了工程应用研究,证明该消能工可以满足作用水头120~140 m、流量约1 000 m³/s情况下的泄洪消能要求。随后许多学者对该消能工水力特性进行了大量研究,分析了其泄流规律、增压特性及流速分布^[11-17]。

旋流阻塞内消能工流态复杂,呈空腔旋转气水两相流,当水头更高时,高速水流问题将会十分突出。为了探究该消能工在更高作用水头下应用的普适性,本文采用模型试验和数值模拟相结合的方法,对200 m作用水头、1 500 m³/s流量级下消能工的水力特性进行研究,为其在高水头泄洪消能中的推广应用提供参考。

2 旋流阻塞复合内消能泄洪洞体型设计

旋流阻塞复合内消能工由开敞式进口、竖井、起旋器、旋流洞段、阻塞扩散段及退水洞段组成,详见图1。开敞式进口采用WES(Waterway Experiment Station)堰面曲线过渡,竖井直径以控制平均流速不超过20 m/s设计,取13.0 m;起旋器采用外侧1/4椭圆曲线($x^2/10.6^2 + y^2/16.0^2 = 1$)与内侧直线相切方式,以尽量保证旋流洞内水流旋转稳定。旋流洞

段直径按经验公式 $D = (Q^2/g)^{0.2}$ 设计,取14.0 m;通气孔直径以满足通气量要求,且通气孔风速按不超过60 m/s规范要求设计,根据经验取4.2 m。为尽量减小阻塞后负压并缓解高速水流脉动问题,阻塞采用渐缩渐扩型式,其收缩段、均匀段与扩散段长度分别为20、10、25 m,阻塞孔口以能显著增大洞内壁面压强且不严重影响泄流量为原则进行设计,孔口面积收缩比 m 根据经验通常取0.2~0.5,本次取0.36,对应孔口直径为11.2 m。水位以旋流洞洞中心所在水平面为基准计,泄洪洞设计作用水头200 m、流量1 500 m³/s,下游为自由流出。

3 模型试验与数值模拟

3.1 模型试验

模型试验根据重力相似准则设计,几何比尺为1:40,试验对水流流态、壁面压强、空腔直径、旋流角、脉动压强等水力特性进行观测。壁面压强用测压管量测;空腔直径采用自制探针量测,误差小于1 mm;旋流角按迹线示踪法用量角仪量测。在起旋器、旋流洞段、阻塞扩散段与退水洞前段共布置10个测点测量脉动压强(图1),脉动压强采用DY2000脉动压强传感器与DJ800监测仪测量,采样间隔时间为0.01 s,采集时间为50 s,每组重复采样6次。

3.2 数值模拟

数值模拟在进行空腔形态和洞内流速研究方面更有优势,同时还能得到试验难以观测到的流场信息^[18-19]。紊流模型采用常见的更适宜于大曲率流动模拟的Realizable $k - \varepsilon$ 紊流模型,由于篇幅原因,此处不再介绍其控制方程。本文重点关注水平旋流洞段及阻塞段空腔旋流的水力特性,因此对计算域进行适当简化,进口选择自竖井底部的起旋器进口,出口至下游退水洞出口。旋流洞段与退水洞段均采用结构网格划分,起旋器段结构复杂,采用非结构网格划分。对近空腔气水界面和近壁面处网格进行局部加密。起旋器水流进口边界条件依据试验结果以速度进口给出,通气孔空气进口处采用大气压进口,排气孔出口为大气压出口,退水洞出口为明流流态,采用压力出口边界设置。壁面为无滑移壁面,边界层采用非平衡壁面函数法处理。空腔气水界面采用VOF(folome of fluid)法捕捉。计算时采用有限体积法隐格式迭代求解,采用SIMPLE(semi-implicit meth-

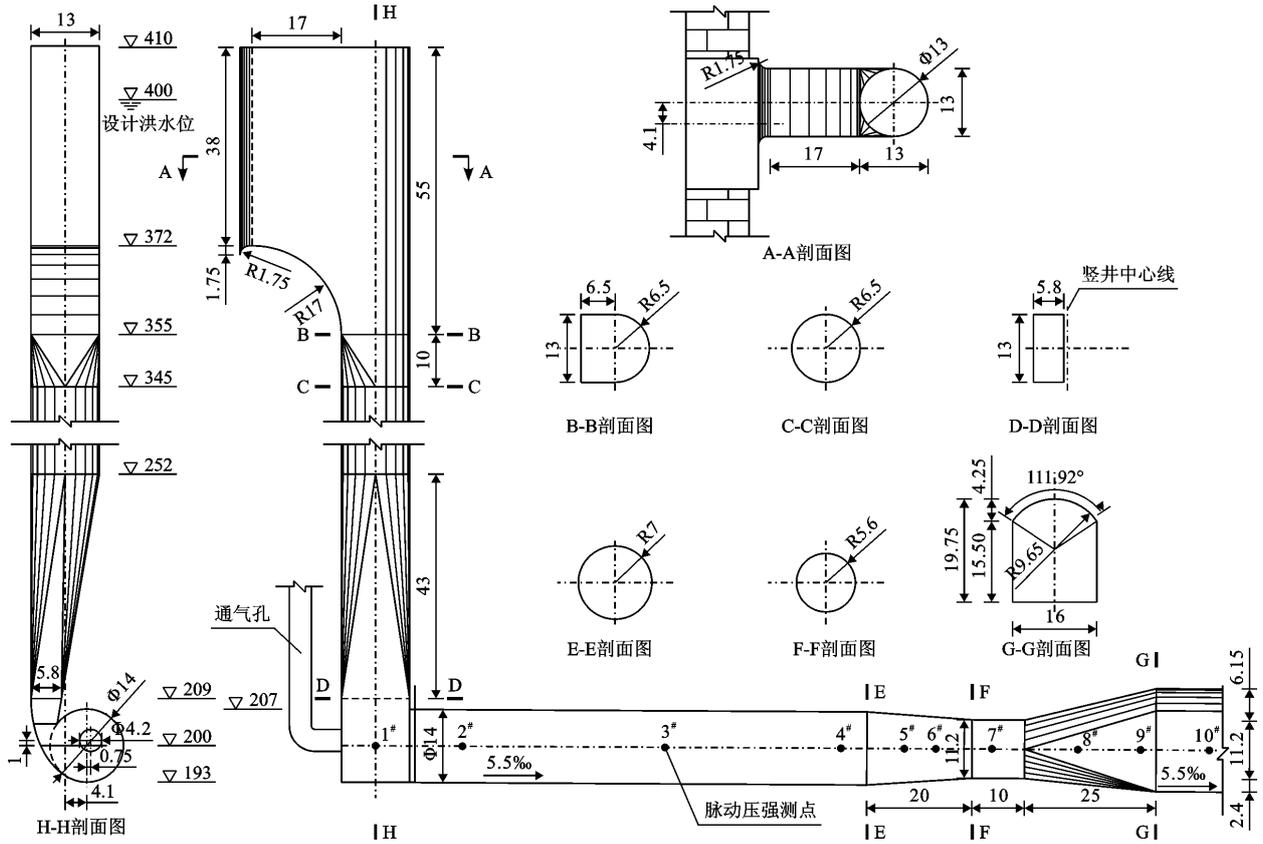


图 1 旋流阻塞复合内消能工体型图(单位:m)

od for pressure linked equations) 法进行压力速度耦合,并选取 QUICK 格式作为离散格式。

数值模拟建模时的坐标系,以沿水流流动的洞轴线水平方向为 x 方向,垂直于洞轴线且指向左侧的水平方向为 y 方向,垂直于洞轴线指向上方方向为 z 方向,坐标原点位于起旋器出口断面的水平洞轴线上。

4 结果与分析

4.1 流态

旋流阻塞泄洪洞试验水流流态见图 2,数值模拟纵剖面气水相图见图 3。

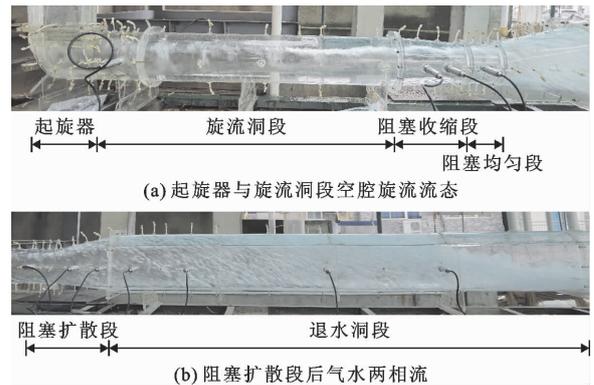


图 2 旋流阻塞消能工内水流流态

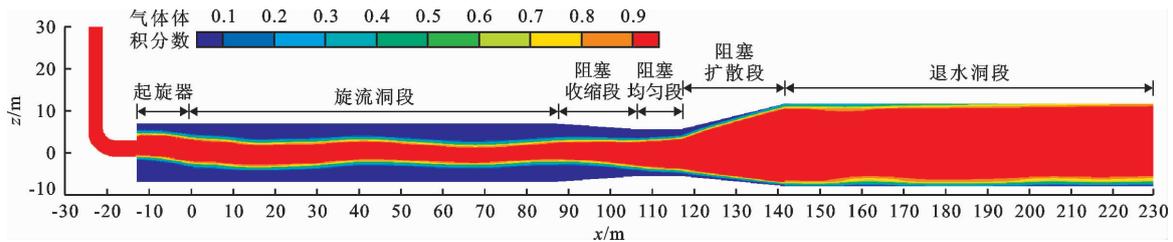


图 3 泄洪洞内水流流态数值模拟气水相图($y=0$ 纵剖面)

由图 2、3 可知,模型试验与数值模拟结果吻合。水流进入起旋器后,在通气孔通气条件下,起旋器内水流发生旋转,并在旋流洞段呈稳定的空腔旋流;空

腔旋流在阻塞扩散段扩散后,旋转迅速减弱并在扩散段末端下游约 85 m 处跌落为明流;扩散后水流受水流高速紊动和掺气影响,呈乳白色气水两相流。

洞内未出现明显不良流态。

4.2 泄流能力

试验水位与流量的关系曲线见图4,流量系数变化规律见图5。

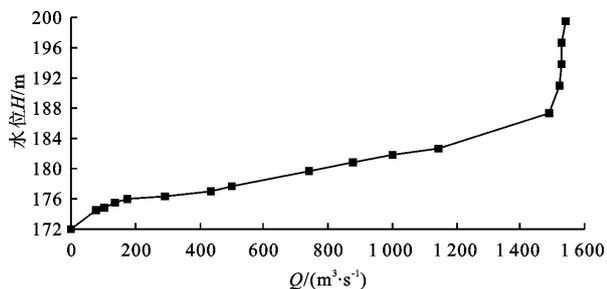


图4 模型试验水位与流量关系曲线

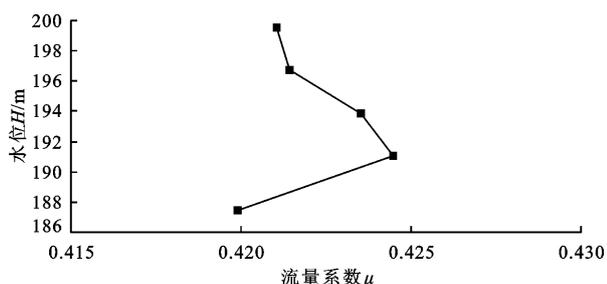


图5 模型试验水位与流量系数关系曲线

从图4、5可以看出,当作用水头 $H \leq 187.40$ m时,竖井内水位低于堰顶,开敞式进口为自由进流,泄流规律呈堰流泄流特征; $H > 187.40$ m时,竖井水位高于堰顶,为淹没进流,呈有压孔流泄流特征。正常运行时为淹没进流,经计算,流量系数在0.420~0.427之间,略小于公伯峡工程的0.58~0.59^[20],表明阻塞会影响泄流量并使泄流能力减小,这是阻塞应用的不利之处。当设计水头为200 m时泄流量为1547 m³/s,略大于设计值,流量系数为0.422,满足设计泄流能力要求。

4.3 空腔直径

旋流空腔直径沿程变化见图6, L/D 表示断面相对位置, L 为距起旋器端头的水平距离, m; D 为旋流洞洞径, m。

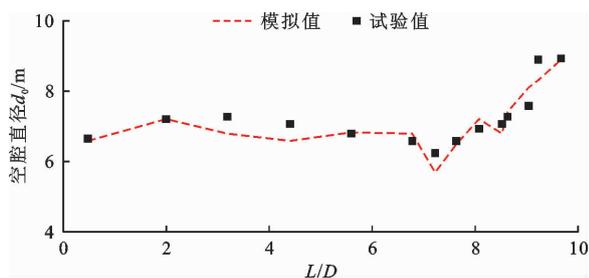


图6 空腔直径沿程变化

从图6可以看出,数值模拟与模型试验结果基本吻合。空腔直径沿旋流洞段具有较好的保持性,但沿程略缓慢减小,在旋流洞段末端 $L/D = 7.2$ 断面附近达到最小;在阻塞段,受下游水流扩散和退水洞明流通气的影响,空腔直径变大,至扩散段末端附近水流跌落。在出起旋器后的旋流洞段,空腔直径约6~7 m。

4.4 压强特性

旋流洞与阻塞段壁面压强沿程分布见图7。从图7中可以看出,模型试验与数值模拟结果吻合较好。在旋流洞段壁面压强较大,约为 110×9.8 kPa,略超过总作用水头的1/2。在阻塞位置压强迅速减小,阻塞扩散段末端出现了较小的负压,试验最小负压为 -2.6×9.8 kPa,数值模拟值为 -3.2×9.8 kPa。但经试验观测,该位置水流呈掺有大量气泡的乳白色气水两相流,水流掺气充分;同时下游为自由出流,水流迅速转变为明流,通气条件好,这均有利于减免空蚀。

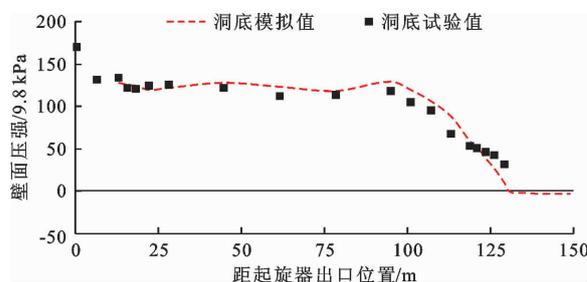


图7 旋流洞与阻塞段壁面压强沿程变化

空腔旋流典型横断面压强分布模拟结果见图8。从图8可以看出,压强沿断面近似呈同心圆中心对称分布特征,壁面处压强最大,中心空腔处压强最小,且近似为大气压。

4.5 流速特性

空腔旋流为三维流动,沿洞径方向流速很小,因此可视为沿切向和沿轴向复合而成的水流流动。切向、轴向流速沿径向分布见图9。

由图9(a)可知,切向流速沿径向近似呈中心对称分布特征,自洞壁沿径向迅速增大,在近壁区具有较大的速度梯度,然后在主流层内沿指向洞中心方向逐渐缓慢增大,在近空腔气水界面处最大,然后逐渐减小。断面最大切向点流速约为40 m/s。从图9(b)可以看出,轴向流速沿径向近似呈轴对称分布特征,自洞壁沿径向轴向流速迅速增大,然后在主流层内沿指向洞中心方向逐渐缓慢减小,水流层内断面最大流速位于近壁面处(中心约6~7 m为气体空腔区,为气体风速)。进入阻塞位置后,轴向流速显著增大,沿

断面分布更趋于均匀。断面最大轴向点流速约为 15

m/s,经分析,最大点流速约为 45 m/s。

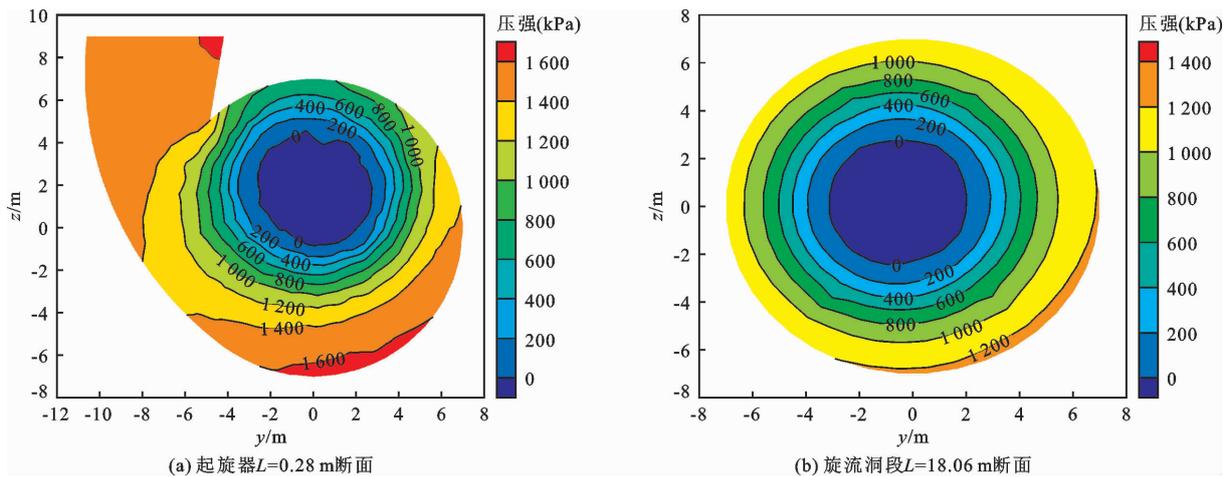


图8 空腔旋流典型横断面压强分布模拟云图

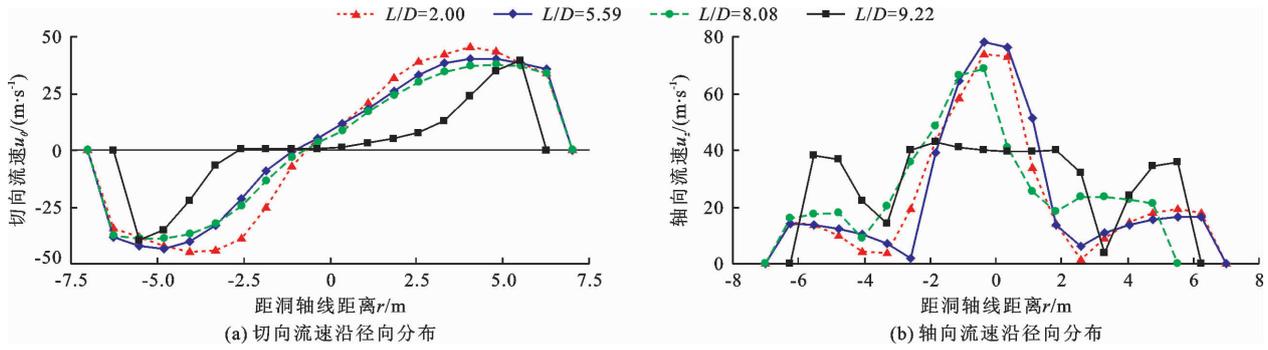


图9 切向、轴向流速沿径向分布

4.6 旋流角

旋流角为水流流速矢量方向与洞轴线的空间夹角,其沿程变化见图 10。

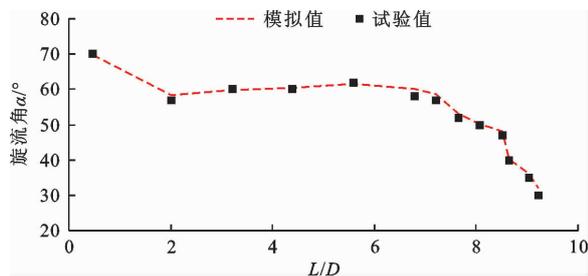


图10 旋流角沿程变化

从图 10 可以看出,模型试验与数值模拟结果吻合较好。旋流洞段旋流角沿程整体具有较好的保持性,约为 60°,表明形成的空腔旋流较为稳定;同时较大的旋流角表明,在等纵向距离条件下水流旋转流程会增加,沿程水头损失增大,这有利于水流消能。进入阻塞段后,水流轴向流动加强,旋流角迅速减小,表明旋转减弱。

4.7 脉动压强

脉动压强均值与时均压强值对比见图 11,阻塞扩散段 9 号测点脉动压强自功率谱见图 12。

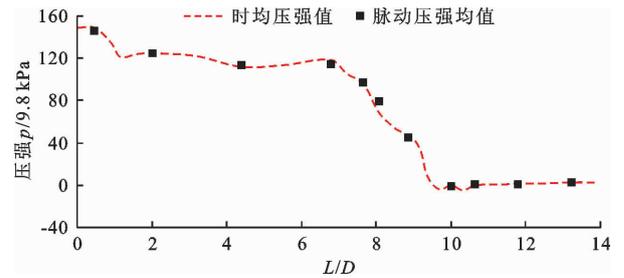


图11 脉动压强均值与时均压强对比

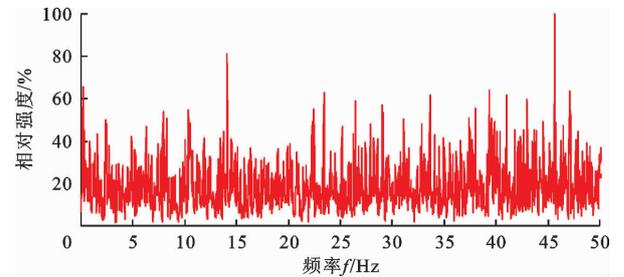


图12 阻塞扩散段 9 号测点脉动压强自功率谱图

由图 11 可以看出,脉动压强均值与时均压强测量值基本一致。起旋器脉动压强均值约为 140×9.8 kPa,旋流洞段脉动压强均值在 $110 \times 9.8 \sim 120 \times 9.8$ kPa 之间,且沿程略有衰减,阻塞扩散段末最小脉动压强均值约为 -1.40×9.8 kPa;最大瞬时

脉动压强出现在起旋器内,为 142.10×9.8 kPa,最小出现在阻塞扩散段,为 -3.81×9.8 kPa;均方差在起旋器与阻塞扩散段略大,旋流洞段略小,但均不超过 2.95×9.8 kPa;脉动压强系数在 $0.02 \sim 0.21$ 之间。除阻塞扩散段 9 号测点 ($L/D = 10.85$) 优势脉动频率为 46.99 Hz 外,其余测点脉动压强主频均在 $0.050 \sim 0.274$ Hz 之间,为低频脉动,表明起旋器与旋流洞段内空腔旋流的水流脉动不会引起旋流洞结构的共振。

扩散段末端出现了较高频率的脉动,但该位置水流呈高掺气的气水两相流,在此条件下水流脉动是否会引发结构振动,还需进一步深入研究。

4.8 水流空化数

水流是否发生空化,通常用水流空化数 σ 来判断,一般泄水建筑物初生空化数取 $0.2 \sim 0.3$,水流空化数越大越不容易空化。水流空化数可用公式(1)计算。

$$\sigma = \frac{p_w - p_v}{\rho u^2 / 2} \quad (1)$$

式中: p_w 为壁面压强,kPa; p_v 为汽化压强,kPa,标准大气压下, 15°C 水温时取值为 0.174×9.8 kPa; ρ 为水流密度, kg/m^3 ; u 为断面平均流速, m/s 。按公式(1)计算的水流空化数详见表 1。

表 1 不同断面位置的水流空化数

部位	断面位置 L/D	水流空化数 σ
起旋器	0.46	1.34
	2.00	1.32
旋流洞段	3.20	1.38
	5.59	1.21
	7.22	1.11
	7.65	0.99
	8.07	0.69
阻塞扩散段	8.65	0.37
	9.21	0.24
	9.68	-0.03

从表 1 中可以看出,起旋器与旋流洞段水流空化数较大,远大于初生空化标准,不会发生空化,阻塞对改善洞内水流空化条件作用显著。阻塞扩散段水流空化数较小,扩散段末端小于 $0.2 \sim 0.3$ 。

$L/D = 10.85$ 断面模拟水流掺气率见图 13,从图 13 中可以看出,近壁水流层内掺气较充分,流层内掺气率超过 10%。水流掺气会有效降低空蚀风险^[21-22],有研究表明,当掺气率达到 4%~6% 时空蚀可能性会显著降低^[23]。

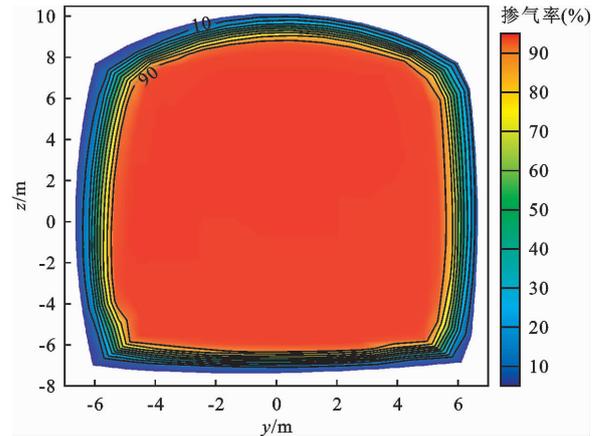


图 13 $L/D = 10.85$ 断面模拟水流掺气率

虽然该结果为采用 VOF 模型所得,其在精确模拟掺气率方面精度有限,但在模拟气水混掺趋势方面仍有一定的参考价值。由模拟结果可知,扩散段末端附近气水大量混掺已接近洞壁,高掺气可有效减免空蚀。该位置是否会发生空蚀,有待进一步深入研究。

4.9 消能率

以旋流洞洞中心所在水平面为基准面,计算自进口前断面至退水洞 150 m 断面总消能率 η 。

$$\eta = \frac{E_0 - E}{E_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_0 为旋流洞总机械能,m; E 为退水洞计算断面机械能,m。

经计算,旋流洞总消能率约为 82.1%,与公伯峡旋流洞总消能率 84.5% 接近^[7],消能率高。

5 讨论

模型试验与数值模拟是研究消能工水力特性的两种基本方法。模型试验在水力特性研究时结果更为可靠,数值模拟则能客观反馈出旋流空腔轮廓,并在获得空腔旋流三维流场内部结构方面更具优势^[18]。水平旋流阻塞复合内消能泄洪洞内为复杂的气水两相流,本文将这两种方法相结合并发挥了各自的优势,更全面地得到了该消能工在高水头条件下的基本水力特性;同时也验证了采用 Realizable $k - \varepsilon$ 紊流模型和 VOF 气水两相流模型的数值模拟方法在进行气水两相流水力特性模拟时具有较高的精度。

水平旋流消能可以满足作用水头 100 m、流量 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 级泄洪消能要求^[7],但不能满足超高水头下的安全运行要求。为提高消能工应用的适宜性,本文设计了超高水头条件下的旋流阻塞复合内消能工体型,并首次分析研究了 200 m 级超高水头作用下的水流流态、泄流规律、空腔直径、压强、流速

以及脉动压强和水流空化数等水力特性。通过分析得知,阻塞前水平旋流洞内水流呈稳定的空腔旋流,流态稳定;阻塞前均呈较大正压,这对减免水流空化有利。综合阻塞前各部位水力特性,指标均良好,运行安全。在阻塞扩散段,水流出现较小负压,且局部位置水流脉动强烈;同时水流空化数也较小,局部位置低于空化标准。但通过水流流态和掺气率的初步模拟可知,阻塞扩散段呈掺气较高的气水两相流,这有利于缓解水流空化。阻塞扩散段运行是否安全是该消能工应用研究的重点。

6 结论

(1)泄流规律呈低水位为堰流、高水位为有压孔流的分段变化特征;200 m 作用水头时试验泄流量为 $1\ 547\ \text{m}^3/\text{s}$,流量系数为 0.422,满足设计泄流能力要求。

(2)旋流洞内呈三维空腔旋流流动,空腔直径约 6~7 m,壁面压强约 $110 \times 9.8\ \text{kPa}$,旋流角约 60° ,最大点流速约 $45\ \text{m/s}$;起旋器与旋流洞段均为低频脉动,不会引起结构共振;水流空化数均大于 1.2,不会发生空化。

(3)阻塞扩散段末端最小瞬时负压为 $-3.81 \times 9.8\ \text{kPa}$,脉动优势频率为 46.99 Hz,水流空化数也较小,但水流掺气较充分,高掺气率对减免发生空蚀十分有利。

(4)总消能率约 82.1%,消能率高。

综上可知,在 200 m 级作用水头时,旋流阻塞复合消能工可以满足 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 量级下的泄洪要求,消能率高,同时起旋器与旋流洞段流态与水力特性指标良好,运行安全。阻塞扩散段末端出现了 46.99 Hz 的优势频率脉动,且水流空化数也较小,虽然高掺气水流有利于减少空蚀,但高掺气气水两相流条件下是否会发生空蚀与结构振动问题,是其在高作用水头下成功应用的下一个关键问题,有待深入研究。

参考文献:

- [1] 张建民. 高坝泄洪消能新技术研究进展和展望[J]. 水力发电学报,2021,40(3):1-18.
- [2] 张东,王志刚. 多级孔板泄洪洞水流空化特性[J]. 水力发电学报,2022,41(6):78-87.
- [3] 海琴,周磊. 猴子岩水电站多级洞塞泄洪洞水力特性试验研究[J]. 水电能源科学,2019,37(2):99-102.
- [4] 陈小威,张宗孝,刘冲,等. 基于消能井并深变化下的竖井溢洪道压强试验研究[J]. 应用力学学报,2016,33(5):826-831+936.
- [5] 张文传,王均星,董宗师,等. 竖井旋流式溢洪道消能及空化特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(12):3011-3019.
- [6] 赵建永,刘韩生,徐自立,等. 急流小流量旋流式竖井洞室流态试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):186-189.
- [7] 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.
- [8] 谢省宗,吴一红,陈文学. 我国高坝泄洪消能新技术的研究与创新[J]. 水利学报,2016,47(3):324-336.
- [9] 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.
- [10] 牛争鸣. 四川省大渡河猴子岩非常泄洪洞(水平旋流消能方案)单体水工模型试验报告[R]. 西安:西安理工大学,2009.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 葛晨,牛争鸣,李奇龙,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(2)[J]. 水力发电学报,2015,34(1):73-78+92.
- [15] CAO Shuangli, NIU Zhengming, YANG Jian, et al. Velocity and pressure distributions in discharge tunnel of rotary-obstruction composite inner energy dissipation [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(1): 111-117.
- [16] 李奇龙,牛争鸣,王捷. 设置阻塞后旋流洞内的增压特性分析[J]. 工程力学,2016,33(2):216-223.
- [17] 孙亚琴,牛争鸣,曹双利. 空腔旋流压强与影响因素[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2019,34(1):106-114.
- [18] 南军虎,马保泰,王煜博. 水平旋流消能工水力学研究方法适宜性[J]. 水科学进展,2018,29(3):390-397.
- [19] 南军虎,陶然,高欢. 泄洪竖井内水气两相流研究方法对比分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2022,37(5):684-690.
- [20] 巨江,卫勇,陈念水. 公伯峡水电站水平旋流洞试验研究[J]. 水力发电学报,2004,23(5):88-91.
- [21] XU Weilin, WANG Qingfeng, WEI Wangru, et al. Effects of air bubble quantity on the reduction of cavitation erosion[J]. Wear, 2021, 482: 203937.
- [22] LI Jianbo, XU Weilin, ZHAI Yanwei, et al. Influence of multiple air bubbles on the collapse strength of a cavitation bubble [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 123: 110328.
- [23] 郭志萍,董志勇. 掺气条件下水流空化特性的研究[J]. 水力发电学报,2013,32(1):113-117+131.