

# 阶梯溢流坝面坡度对一体化消能工水力特性的影响

邱毅, 吴欧侯, 杨具瑞, 任中成, 陈卫星

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**为探求高水头、大单宽流量下坝面坡度对一体化消能工水力特性的影响,以阿海水电站为原型,采用三维  $k-\varepsilon$  双方程紊流模型,引入水气两相流 VOF 计算方法,利用几何重建格式来迭代生成自由水面,对 1:0.80、1:0.75、1:0.65 三种阶梯面坡比进行数值模拟研究。结果表明:①最大负压值均位于首级阶梯立面凸角下 1/4 附近,并随坡度增加而增大。坡度为 56.98° 时,最大负压值为 61.02 kPa,超过了 6×9.81 kPa。②水流空化数在宽尾墩水舌出口位置出现最小值,空化数随坡度变陡而减小。坡度为 56.98° 时,空化数最小为 0.358。坡度为 51.34° 时,空化数最大,为 0.381。③随着阶梯溢流坝坝面坡度变缓,消力池最大临底流速增大。当坡度为 51.34° 时,消力池最大临底流速最大,达到 26.84 m/s,超过了 25 m/s,易发生冲磨破坏。当坡度为 56.98° 时,消力池最大临底流速最小,为 24.00 m/s。消力池尾坎前最大临底流速随坡度增加而减小,坡度为 56.98° 时最小,为 9.63 m/s;坡度为 51.34° 时,消力池尾坎前最大临底流速最大,为 9.96 m/s。④坡度的变化对一体化消能工消能率的影响不大,坡度从 51.34° 增加到 56.98°,消能率只提升 0.15%。

**关键词:**坝面坡度;阶梯溢流坝;水气两相流;空化数;负压;消能率

中图分类号:TV135.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)03-0028-08

**Impact of stepped overflow dam surface slope on hydraulic characteristics of an integrated energy dissipator//** QIU Yi, WU Ouyu, YANG Jurui, REN Zhongcheng, CHENG Weixing (Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the slope of the dam surface with high working heads and large discharge per unit width on the hydraulic characteristics of an integrated energy dissipator, Ahai Hydropower Station was chosen as a prototype based on numerical study, in which a three-dimensional  $k-\varepsilon$  two-equation turbulence model was used and a gas-liquid two-phase flow VOF computing method was introduced with a geometric reconstruction format to iteratively generate free water surface. Three gradient slope ratios were simulated, including 1:0.80, 1:0.75 and 1:0.65. The results show that, firstly the maximum negative pressure value is located near the lower 1/4 of the first step elevation lobes and increases with the slope. The maximum negative pressure is 61.02 kPa for the slope of 56.98°, exceeding 6×9.81 kPa. Secondly, the minimum cavitation number occurs at the exit point of the wide tail pier water tongue and decreases with the steepness of the slope. The minimum is 0.358 for the slope of 56.98°, and the maximum is 0.381 for the slope of 51.34°. Thirdly, as the slope of the dam surface becomes gentle, the maximum flow velocity at the bottom of the stilling pool increases, with the highest value for the slope of 51.34°, which reaches 26.84 m/s, exceeding 25 m/s and is prone to erosion. The maximum velocity at the bottom of the stilling pool is the smallest, being 24.00 m/s for the slope of 56.98°. The maximum flow velocity before the tail of the stilling pool decreases with the increase of the slope. The minimum is 9.63 m/s for the slope of 56.98°, and the maximum is 9.96 m/s for the slope of 51.34°. Finally, the slope has little effect on the energy dissipation rate of the integrated energy dissipator. The slope increases from 51.34° to 56.98°, but the energy dissipation rate only increases by 0.15%.

**Key words:** dam slope; stepped overflow dam; gas-liquid two-phase flow; cavitation number; negative pressure; energy dissipation rate

在大型水利工程中泄水建筑物有举足轻重的地位。根据有关工程资料统计,其造价占到土建工程

总量的 30% ~ 40%<sup>[1]</sup>。其中阶梯溢流坝因其低水头、小单宽流量下具有消能率高的特点,从 20 世纪

基金项目:国家自然科学基金(51569010)

作者简介:邱毅(1995—),男,硕士研究生,主要从事水工结构与高速水流研究。E-mail:qiuyi186@126.com

通信作者:杨具瑞(1964—)男,教授,博士,主要从事水工结构与高速水流研究。E-mail:yangjurui@163.com

起就被广泛应用<sup>[2]</sup>。阶梯溢流坝的一个显著特点是沿坝坡逐级掺气,并在台阶上形成翻滚,其消能效果与溢流坝坡度密切相关<sup>[3-4]</sup>。陈群等<sup>[5]</sup>通过紊流数值模拟方法对 1:0.7、1:0.75、1:0.8、1:1.4 4 种坡度在坝高 50 m 和单宽流量  $q=50 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  进行模拟,得出阶梯溢流坝的消能率随坝坡的变缓而近似线性增大。张峰等<sup>[6]</sup>通过引入纯台阶消能率的概念研究得出:在 3 种坡度(32°、38.7°、55°)下,单宽流量  $q=35.7 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  时,坡度对纯台阶消能率影响较大,坡度由 55°减小至 32°,消能率最大增加了 10.4%。这些研究<sup>[7-12]</sup>表明,小单宽流量条件下的消能率随着阶梯坝面坡度变缓而增大。但对于大单宽流量条件下,只有杨吉健等<sup>[13]</sup>在 26.57°、32.01°、33.69°、38.66°和 51.3° 5 种坡度,单宽流量为 0.129~0.378  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  时,得到不同结论,认为同一单宽流量下,坡度增加,消能率反而增大。

随着水利工程高坝建设尤其是我国西南地区一批世界级的高坝的建设<sup>[14]</sup>,单纯的靠阶梯溢流坝消能泄洪已不再适用,在宣泄大流量时,溢流水舌覆盖,使阶梯坝面难以通气,产生坝面空化空蚀及水舌不稳定<sup>[15]</sup>。如水布垭阶梯式溢洪道,其最大单宽流量 181  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ,通过实验测得阶梯立面最大负压达到 7.65  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ <sup>[16]</sup>。为了解决高水头、大单宽流量的泄洪问题,我国提出宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池一体化消能设施,该设施同时兼有阶梯式溢流面消能和宽尾墩消能的优点,利用了阶梯面进一步提高宽尾墩的消能率,又利用了宽尾墩后的无水区从水舌底部向阶梯坝面通气来避免空蚀空化破坏,从而使阶梯溢流坝向高水头大单宽流量方向发展<sup>[17]</sup>,如云南大朝山水电站、福建水东水电站、广西百色水电站、贵州索风营水电站等<sup>[18-19]</sup>。但是在高水头、大单宽流量条件下,阶梯面上水深加大,底部依然缺乏掺气条件,坝面依然出现轻微的空蚀破坏<sup>[20]</sup>,如福建水东水电站通过单宽流量为 90  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  时,尽管阶梯溢流坝与宽尾墩联合应用,但溢洪道也遭到了轻微破坏<sup>[21]</sup>,又如阿海水电站运行不到半年,阶梯部分也遭到了空化空蚀破坏<sup>[22]</sup>。而对于高水头、大单宽流量下阶梯溢流坝面坡度对一体化消能方式的水力特性的影响并未见相关文献报道。

为了解决宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池一体化消能工在高水头、大单宽流量运行时阶梯面空蚀破坏问题,保证阶梯溢流坝应力和稳定要求,进一步提高下泄流量,需寻求合理的坝面坡度,能使水流平稳过渡和衔接,减小负压,避免发生空化空蚀破坏的可能,本文结合阿海水电站,对不同坡度的阶梯溢流坝一体化消能工水力特性进行数值模拟和机理分析。

## 1 物理模型

### 1.1 模型设计

模拟的流场是以阿海水电站为原型,主要由上游水池、三段弧、WES 曲面、宽尾墩、1:0.75 阶梯坡比、反弧段和消力池组成。模型材料由有机玻璃制成,依据重力相似原理设计,模型制作和安装精度均满足 SL155—2012《水工(常规)模拟实验规程》要求。为节约计算时间,取五孔中的一孔进行模拟计算。模型主要比尺:几何比尺  $\lambda_L=60$ ,流量比尺  $\lambda_{12.5}=27\ 885.48$ ,流速比尺  $\lambda_{10.5}=7.75$ ,糙率比尺  $\lambda_{11/6}=1.98$ ,时间比尺  $\lambda_{10.5}=7.75$ 。

### 1.2 坡度的确定

根据《水工设计手册》第二版第五卷《混凝土坝》规定下游边坡一般采用 1:0.65~1:0.80。模型坡度根据我国已建重力坝的实例(表 1)初步选定 1:0.80、1:0.75、1:0.65 三种坡比。

表 1 我国部分已建实体重力坝采用的坝坡值

坝名	最大坝高/m	非溢流坝段坡比	溢流坝段坡比
龙滩	216.50	1:0.73	1:0.68
向家坝	162.00	1:0.75	1:0.75
三峡	181.00	1:0.72	1:0.74
刘家峡	147.00	1:0.65、1:0.55	
安康	128.00	1:0.65	1:0.65
三门峡	106.00	1:0.75	1:0.75
龚嘴	85.5	1:0.75	1:0.80

### 1.3 溢流堰面下游切点的确定

根据《水工设计手册》第二版第七卷《泄水与过坝建筑物》,溢流堰面下游直线段与 WES 曲面和反弧段相切连接。溢流堰面下游切点按照 WES 幂曲线切点斜率与直线段和反弧段切点斜率相等的原则计算。WES 幂曲线切点斜率  $k'$  满足  $y = \frac{n}{k'H_d^{n-1}}x^{n-1}$ , 因直线段和反弧段切点斜率为  $1/a$ ,进而求得切点坐标为

$$x = \left(\frac{k'}{an}\right)^{\frac{1}{(n-1)}} H_d \quad y = \frac{1}{n} \left(\frac{k'}{n}\right)^{\frac{1}{(n-1)}} H_d \quad (1)$$

式中: $n$  为与上游堰坡有关的指数; $H_d$  为堰面曲线定型设计水头; $a$  为大坝坝坡系数。

### 1.4 台阶尺寸和台阶数确定

台阶尺寸根据《水工设计手册》第二版第五卷《混凝土坝》确定,台阶高度为碾压混凝土每层厚度的倍数,通常为 0.6~1.2 m,台阶宽度按坝下游面的坡比依台阶高度确定。宽尾墩末端第一台阶的高度,适当高于坝面上的台阶高度,以使出宽尾墩水舌下缘形成掺气空腔,为使水流在坝面上平稳过渡,第一台阶高度不超过 2 m。台阶数根据切点的位置及

直线段的长短确定。

## 1.5 模拟方案

为研究阶梯溢流坝坡度对一体化消能工水力特性的影响,在 1 : 0.75 原型的坡比及上述设计原则基础上确定 3 种坡比。模型试验基本资料见表 2,台阶几何参数见图 1。

表 2 模型试验基本资料

方案	阶梯体型参数				试验单宽流量/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
	坡比	高度 $H/\text{m}$	长度 $L/\text{m}$	级数 $n$	
1	1 : 0.80	0.0167	0.0133	29	0.125
2	1 : 0.75	0.0167	0.0125	29	0.125
3	1 : 0.65	0.0167	0.0108	29	0.125

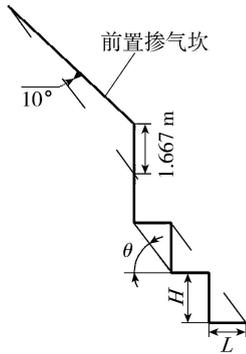


图 1 台阶几何参数

## 2 数学模型

### 2.1 基本控制方程

本文结合某二级水电站采用 RNG  $k-\varepsilon$  双方程紊流模型对流场进行数值模拟,方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

$k$  方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (4)$$

$\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* G_k}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: $\rho$  为水气混合相密度; $x_i, x_j$  为坐标分量 ( $i, j = 1, 2, 3$ );  $u_i$  为  $x_i$  方向速度分量; $t$  为时间; $p$  为修正后的压力; $\varepsilon$  为紊动耗散; $k$  为紊动能; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ,

$\mu$  和  $\mu_t$  分别为流体运动黏度系数和湍动黏度系数; $G_k$  为平均速度梯度产生的紊动能; $\alpha_k, \alpha_\varepsilon, C_{1\varepsilon}^*, C_{2\varepsilon}$  为系数项。

### 2.2 自由表面追踪 VOF 模型

为了精确地求解阶梯溢流坝面上复杂的自由水面,采用 Hirt 等<sup>[23]</sup> 提出的 VOF (volume of fluid) 方法。在  $k-\varepsilon$  紊流模型中引入用于分层流求解自由面的流体体积,可研究几种互不相溶的流体交界面位置<sup>[24]</sup>。采用 PISO 算法对压力和速度场进行耦合计算。

## 3 计算区域的离散

### 3.1 数值模拟的几何区域及网格划分

数值模拟以物理模型试验方案为依据,为使模型结果加快收敛,整体模型网格均采用结构化网格,在宽尾墩、阶梯和尾坎水流复杂区域采取网格适当加密,以便于更好地捕捉自由水面和水流流动情况,从而使阶梯内的漩涡水流和水舌形态能够真实地体现出来。整体结构如图 2 所示,模拟区域水流进口方向为  $x$  轴,竖直方向为  $y$  轴,水平方向为  $z$  轴,坐标原点位于上游水库进水面与消力池底板面交线端点处。将模型分为上游水库、宽尾墩区域、阶梯溢流坝区域、反弧段区域和消力池区域。划分的网格单元数约 10 万,宽尾墩区域最小网格尺寸为 11.75 mm,阶梯溢流坝区域最小网格尺寸为 0.87 mm。

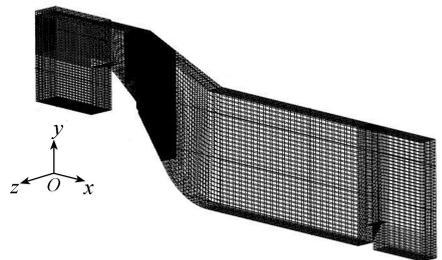


图 2 模型整体网格

### 3.2 边界条件

进口边界条件分为水流进口和空气进口两部分。水流进口采用 5000 年一遇的洪峰流量  $17500 \text{ m}^3/\text{s}$ ,取该水电站五孔溢洪道中的一孔,流量为  $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上游水位为 1507.23 m,下游溢洪道高程为 1450 m,取上游水位与下游溢洪道高程差 57.23 m 为原型进口水深,并取两宽尾墩中轴线垂直距离 18 m 为原型进口宽度,根据上述流量和断面水深及模型比尺关系可求得模型入口平均速度  $v_{\text{in}} = 0.44 \text{ m/s}$ 。因模型上部与大气连通,空气进口采用压力边界条件,坝顶高程为 1510 m,取空气进口深度为 2.77 m,根据模型比尺关系得模型空气进口深度为 46.2 mm。进口边界的  $k$  与  $\varepsilon$  可由如下计算公式得到:

$$\begin{cases} k = 0.00375v_m^2 \\ \varepsilon = k^{2/3}/(0.4H_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $H_0$  为模型进口水深。

出口边界条件也分为水流出口和空气出口两部分。水流出口采用自由出流边界条件，消力池底板高程为 1405 m，下游水位为 1445.23 m，可求得原型水流出口深度为 40.23 m，由模型比尺关系得模型水流出口水深为 670.5 mm。空气出口采用压力边界条件，由上述条件可得原型空气出口深度为 4.77 m，由模型比尺关系得模型空气出口深度为 79.5 mm。

### 3.3 计算模型验证

根据方案 3 的水工模型试验结果，将计算模型得到的掺气空腔长度、消力池段（桩号 0+105.76 m ~ 0+256.97 m）的流速和水深与试验结果对比，来验证计算模型的可靠性。水工模型试验和计算模型结果的水流流态如图 3 和图 4 所示。通过图 3 与图 4 对比可以看出，试验流态和计算模型结果流态基本一致。



图 3 整体流态照片

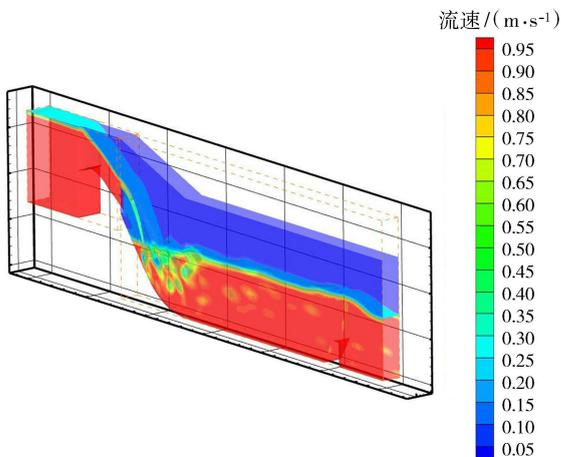


图 4 整体流态模拟

水工模型试验结果掺气空腔长度为 34.72 cm，模拟值为 32.98 cm，误差为 4.99%。消力池内流速模拟值与试验值如图 5 所示，两者平均误差为 7.5%。取  $z=0.15$  m 剖面水深模拟值与试验值作比较，如图 6 所示，两者基本接近，平均误差为 1.5%。

通过阶梯面掺气空腔长度、消力池段流速及水深的试验值与模拟值的对比分析可以得出本次数值

模拟具有较高的准确性，说明本文采用的数值模拟的计算方法对水力特性分析是可行的。

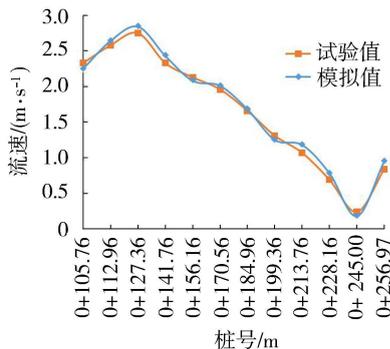


图 5 消力池内流速分布

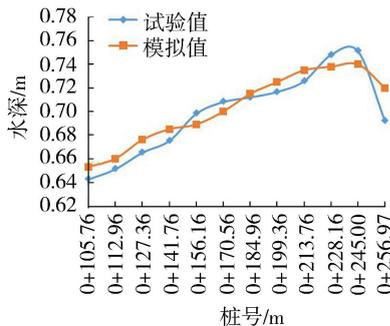
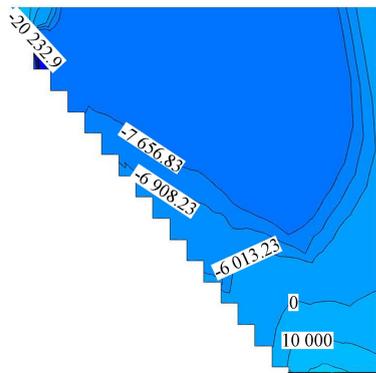


图 6 消力池内水深分布

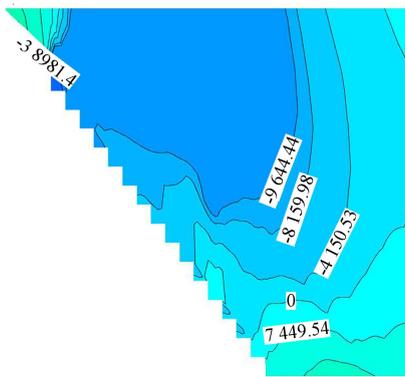
## 4 计算结果与分析

### 4.1 阶梯负压分布

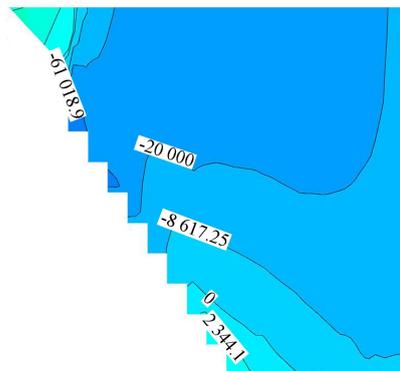
图 7 为 3 种方案下单孔中心线 ( $z=0.15$  m) 剖面压强等值线图，可见坡度为  $51.34^\circ$  时，坡度最缓，沿程阶梯面上产生局部负压分布长度为 18.79 m，最大负压为 20.23 kPa；坡度为  $53.34^\circ$  时，沿程阶梯面负压分布长度 18.39 m，相较于方案 1 小 2.13%，阶梯面最大负压为 38.98 kPa，与方案 1 相比增大 92.68%；坡度为  $56.98^\circ$  时，坡度最陡，沿程阶梯面负压分布长度 8.05 m，较之方案 2 小 56.23%，阶梯面最大负压为 61.02 kPa，相较于方案 2 大了 56.54%。从而可看出，随着阶梯溢流坝面坡度的增加，阶梯负压分布范围逐渐减小，阶梯面最大负压增大，最大负压均位于首级阶梯立面 1/4 处附近。主要是因为挑坎角度一定，台阶高度不变时，坡度变陡，挑射水舌下边缘水气交界面与阶梯面相对距离增大，因此阶梯面负压分布长度随着坡度增大而变短。同时，挑射水流与首级台阶立面的夹角一定，坡度增大，阶梯步长减小，首级台阶内部面积随之减少，导致首级台阶通气量减少，故首级台阶处最大负压随着坡度变陡而增大。方案 3 中最大负压超过了负压规范允许值，根据 SL 319—2005《混凝土重力坝设计规范》，当宣泄校核洪水位闸门全开时，负压值不得超过  $6 \times 9.81$  kPa，在工程上应注意空蚀破坏。



(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3

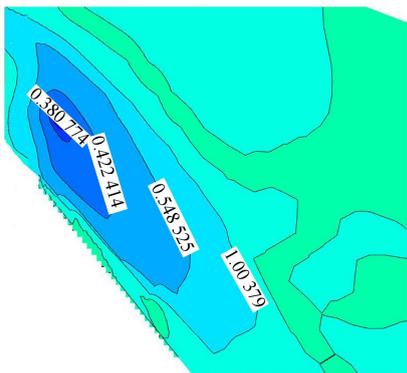
图7 阶梯面压强等值线(单位:Pa)

## 4.2 阶梯面空化数分布

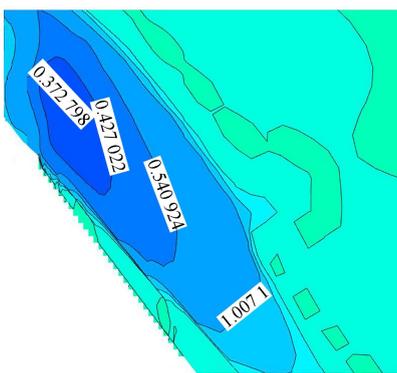
图8为在阶梯面上水流空化数分布图,首级阶梯内空化数见图9。

由图8可看出,水流空化数在宽尾墩水舌出口位置出现最小值,最小值随坡度增加而减小,方案1为0.381,方案2为0.373,方案3为0.358,随后沿着水流方向缓慢增大。由于水历经宽尾墩收缩及拉伸后形成的挑射水舌流速与负压较大,而导致此位置空化数较低,随后水舌上部扩散成水面向两侧内翻卷吸大量空气于水中使水流压强急剧增大,促使空化数显著提高。

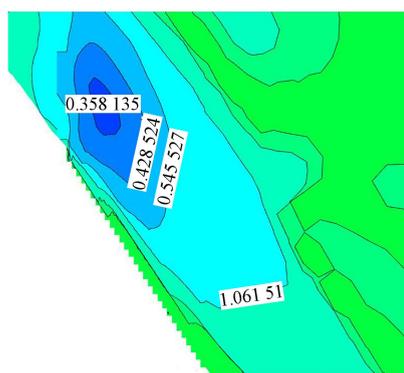
根据《水工设计手册》第二版第7卷《泄水与过坝建筑物》规定,表面上均匀的自然粗糙高度的初生空化数为1.0。由图9可以看出,从台阶内部到水舌下水气交界面空化数明显急剧减小。阶梯面坡度从 $51.34^\circ$ 增大到 $56.98^\circ$ ,小于1的空化数向阶梯内部靠近,如方案1中空化数为1的等值线距首级台阶立面约0.54 m;方案2约0.42 m,方案3约0.36 m。越靠近台阶内部,越不利于台阶安全。水历经挑坎挑射形成空腔后,虽部分空气被水流带走,出现负压,但空腔内空气流速不大,因此空化数较大,而空腔上边缘交界面处,在高速水舌和水流负压



(a) 方案1

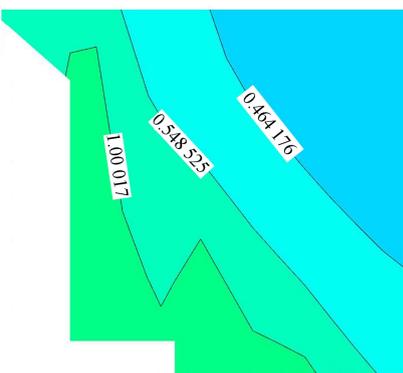


(b) 方案2

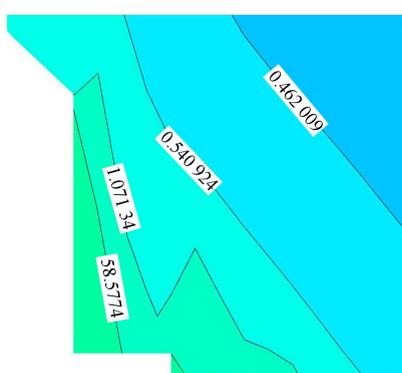


(c) 方案3

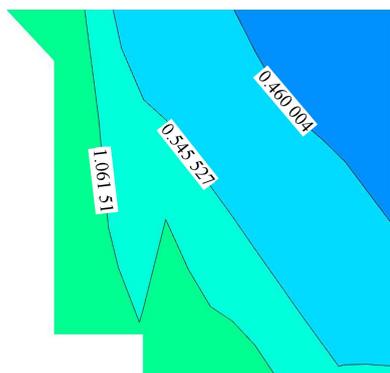
图8 阶梯面水流空化数分布



(a) 方案1



(b) 方案2



(c) 方案3

图9 首级台阶空化数分布

作用下使空化数急剧降低。从方案1到方案3,首级台阶内负压增大,迫使两相流交界面往首级台阶面移动,从而使空化数急剧降低。若首级台阶内负压过大,会致大气中的空气补充不及时,迫使挑射水舌被大气压进台阶内部,造成台阶破坏。

### 4.3 消力池水面线

各方案消力池段水面线数值模拟结果绘于图10中。由图10可见,各方案水面线变化基本一致,由于挑射水流跌入反弧段后产生水跃及消力池尾坎壅水作用,而致水面线沿程均呈上升趋势,各方案在桩号0+241.00m尾坎前端处均达到最大值,此阶段水位上升较明显,水深从39m左右到44m左右,并随坡度增加而增大,其中方案3最大,为44.69m,方案1最低,为44.45m。随后水流经过尾坎后,水位迅速下降。

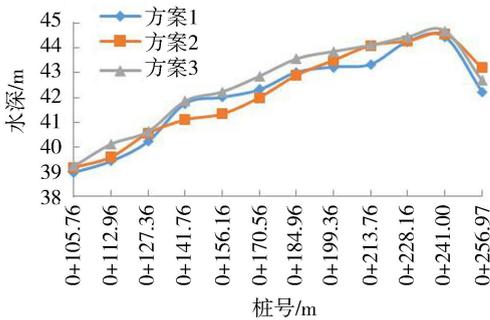


图10 各方案消力池水面线对比

### 4.4 消力池流速

图11为各坡度消力池位置的流速分布。计算结果表明,宽尾墩显著增大了入池水流横向扩散宽度,迫使入射水流形成三元水跃,并在消力池中上部区域形成立轴旋滚,而使消力池流速从底部到水面依次减小至负值。同时可见挑射水流以一定速度射向反弧段,流速逐渐增大,在入射水流跌入点前端最大临底流速出现最大值,并且消力池最大临底流速最大值随着坡度增加而减小。方案1流速最大,约26.84 m/s,超过了25 m/s,易发生冲磨破坏;方案2次之,约24.77 m/s;方案3最小,约24.00 m/s,随后流速迅速减小。取尾坎前端( $x=5.0$  m)截面最大临底流速对比,方案3最小,约9.63 m/s;方案2次之,约9.79 m/s;方案1最大,约9.96 m/s。坡度增大后,水流入射消力池角度增大,使下泄水流相互交汇、碰撞更加剧烈,加快了消力池内能量耗散。

### 4.5 阶梯坝面坡度对消能率的影响

阶梯坝面通过对空腔内气流和回溯水流的扰动来卷入大量空气达到消散水流动能的作用,消耗下泄水流部分能量,起到防冲的效果,使水流稳定安全地流动。消能率的高低是评价消能效果的重要指标<sup>[25-26]</sup>。为计量阶梯坝面坡度对下泄水流能量耗散

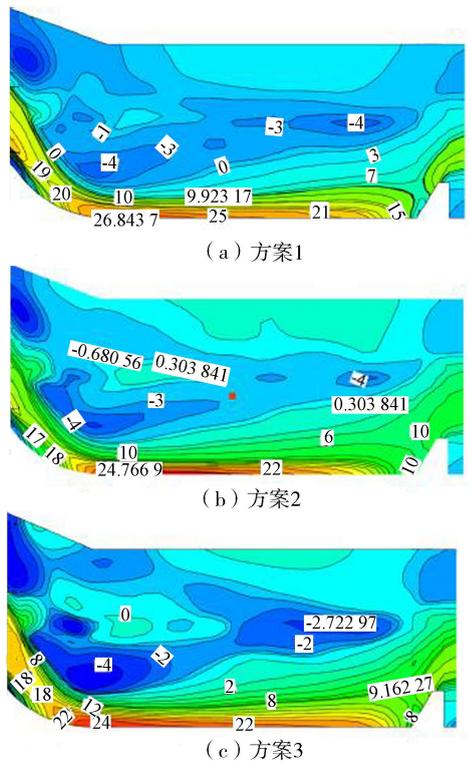


图11 消力池  $x$ - $y$  平面流速分布(单位:m/s)

的影响情况,根据上游水流进口断面和下游消力池尾坎断面建立能量方程来计算3种方案下的消能率:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (7)$$

其中

$$E_1 = Z_1 + H_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g}$$

$$E_2 = Z_2 + H_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g}$$

式中: $Z_1$ 和 $Z_2$ 分别为上下游断面相对于消力池底板的高度; $H_1$ 和 $H_2$ 分别为上下游断面水深; $v_1$ 和 $v_2$ 分别为上下游断面水流的平均速度; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 为流速系数,因为计算断面为湍流,流速呈比较均匀的对数分布,故 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 均取1。

各方案计算结果如表3所示。由表3可看出,方案1到方案3,坡度增加 $5.64^\circ$ ,消能率却只增大0.15%,说明阶梯面坡度对消能率的影响不大,但随着坡度的变陡,消能率有上升的趋势。由于挑坎挑射作用,使水舌在阶梯上缘掠过,射入反射弧,在阶梯前段形成掺气空腔,阶梯后段形成回溯水流,弱化了阶梯部分消能,但阶梯增强了空腔内气流和回溯水流内扰动程度,有利于挑射水舌底部掺气。随着阶梯面坡度增大,步长减小,为保证水流平稳下泄,反弧段与消力池整体前移,且反弧段前段向上延伸与阶梯面相切,故反弧段面积增大,消能增大。该结果与杨吉健等<sup>[13]</sup>的实验结论相一致,这说明在高水头、大单宽流量条件下,坡度增加,消能率增大。而

在低水头、小流量情况下,陈群等<sup>[5]</sup>提出阶梯溢流坝的消能率随坝坡变缓而近线性增大,这一结论有待深入研究。

表3 消能率计算结果

方案	$E_1$	$E_2$	$\eta/\%$
1	102.54	49.51	51.72
2	102.54	49.45	51.77
3	102.54	49.42	51.80

综上所述,随着阶梯溢流坝面坡度增大,阶梯面最大负压增加,当坡度为 $56.98^\circ$ 时,最大负压为 $61.02\text{ kPa}$ ,超过规范值,阶梯易发生空化空蚀破坏。随着阶梯溢流坝面坡度增加,消力池最大水深增大,消力池尾坎前最大临底流速减小,消能率增加,综合消能效果较好。但在阶梯溢流坝面坡度为 $51.34^\circ$ 时,消力池最大临底流速最大值达到 $26.84\text{ m/s}$ ,超过 $25\text{ m/s}$ ,易产生冲磨破坏。因此,在阶梯溢流坝面坡度为 $51.34^\circ$ 、 $53.13^\circ$ 和 $56.98^\circ$ 3个方案中, $51.34^\circ$ 坝面坡度的消力池最大临底流速太大, $56.98^\circ$ 坝面坡度的阶梯面最大负压超过规范值,只有坝面坡度为 $53.13^\circ$ 时,宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池一体化消能水力特性满足实际工程的需要,所以推荐坡度为 $53.13^\circ$ 。

## 5 结论

a. 阶梯溢流坝面坡度增加,阶梯面负压分布范围减小。阶梯面负压最大值均位于首级阶梯立面凸角 $1/4$ 处附近,最大负压值随坡度增加而增大,当坡度增加至 $56.98^\circ$ 时,最大负压超过 $6\times 9.81\text{ kPa}$ ,在工程上应注意空蚀破坏。

b. 模拟发现各方案水流空化数分布基本一致,并在宽尾墩水舌出口位置最小,当坡度 $51.34^\circ$ 时最小,为 $0.358$ 。从台阶内部到水舌下水气交界面空化数急剧减小,小于1的水流空化数向阶梯内部靠近,不利于台阶安全。

c. 消力池流速与水深的变化均随坡度呈一定规律性:消力池中最大临底流速随着坡度变缓而增大,坡度 $51.34^\circ$ 时最大,为 $26.84\text{ m/s}$ ,超过 $25\text{ m/s}$ ,易发生冲磨破坏。随着坡度增加,消力池尾坎前( $x=5.0\text{ m}$ )截面最大临底流速随之减小,坡度 $56.98^\circ$ 时最小,为 $9.63\text{ m/s}$ 。消力池最大水深随坡度增加而增大,坡度 $56.98^\circ$ 时最大,为 $44.69\text{ m}$ 。

d. 在高水头、大单宽流量下,阶梯溢流坝面坡度对一体化消能工的消能率影响不大,坡度 $51.34^\circ$ 时消能率最低,为 $51.72\%$ ,坡度 $56.98^\circ$ 时消能率最高,为 $51.80\%$ ,坡度从 $51.34^\circ$ 增至 $56.98^\circ$ ,消能率只增加 $0.15\%$ 。

## 参考文献:

- [1] 李志高,霍静静,向光红. 跌坎型底流消能试验研究[J]. 人民长江, 2009, 23(40): 28-29. (LI Zhigao, HUO Jingjing, XIANG Guanghong. Experimental research on energy dissipation of drop-sill bottom flow [J]. Yangtze River, 2009, 23(40): 28-29. (in Chinese))
- [2] 刘善均,朱利,张法星,等. 前置掺气坎阶梯溢洪道近壁掺气特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 401-406. (LIU Shanjun, ZHU Li, ZHANG Faxing, et al. Characteristics of near-wall aeration of pre-doped aerated canal spillway [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 401-406. (in Chinese))
- [3] 胡耀华,伍超,张亭,等. X型宽尾墩阶梯掺气空腔影响因素分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(3): 24-28. (HU Yaohua, WU Chao, ZHANG Ting, et al. Affect factors analysis of aerated cavity of X-shaped flaring gate pier [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(3): 24-28. (in Chinese))
- [4] 汝树勋,潘瑞文,唐朝阳,等. 曲线形阶梯式溢流坝的消能特性[C]//泄水工程与高速水流论文集. 成都:成都科技大学出版社, 1994.
- [5] 陈群,戴光清,朱分清,等. 影响阶梯溢流坝消能率的因素[J]. 水利发电学报, 2003, 22(4): 95-104. (CHEN Qun, DAI Guangqing, ZHU Fenqing, et al. Factors of influence on the energy dissipation ratio of stepped spillways [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 22(4): 95-104. (in Chinese))
- [6] 张峰,刘韩生. 台阶式溢洪道纯台阶消能率的研究[J]. 水利发电学报, 2015, 34(4): 47-51. (ZHANG Feng, LIU Hansheng. Experimental study on energy dissipation ratio of pure steps on stepped spillway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 47-51. (in Chinese))
- [7] DEGOUTTE G, PEYRAS L, ROYET P. Discussion of "skimming flow in stepped spillways" [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(1): 111-113.
- [8] RAJARATNAM N. Skimming flow in stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(4): 587-591.
- [9] 田嘉宁,李建中. 几种坡度的台阶式溢洪道消能特性试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 119-122. (TIAN Jianing, LI Jianzhong. The dissipation characteristics on stepped spillways of different slopes [J]. Journal of Northwest A & F University (Nature Science Edition), 2004, 32(10): 119-122. (in Chinese))
- [10] PEYRAS L, ROYET P, DEGOUTTE G. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs [J]. Journal of

- Hydraulic Engineering, 1992, 118(5): 707-717.
- [11] YILDIZ D, KAS I. Hydraulic performance of stepped chute spillway [J]. *Hydropower and Dams*, 1998(4): 64-70.
- [12] YASUDA Y, TAKAHASHI M, OHTSU I. Energy dissipation of skimming flows on stepped chute [C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. 29th IAHR Congress Proceedings. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 531-536.
- [13] 杨吉健, 刘韩生, 张峰, 等. 台阶式溢洪道消能规律 [J]. *排灌机械* 工程学报, 2015, 33(2): 123-127. (YANG Jijian, LIU Hansheng, ZHANG Feng, et al. Energy dissipation pattern of stepped spillways [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 37(2): 123-127. (in Chinese))
- [14] CHEN Shoukai, HE Qidong, CAO Jigang. Seepage simulation of high concrete-faced rockfill dams based on generalized equivalent continuum model [J]. *Water Science and Engineering*, 2018, 11(3): 250-257.
- [15] 艾克明, 丁辉. 台阶式泄槽溢洪道的应用状况浅析 [J]. *湖南水利水电*, 2000(5): 7-9. (AI Keming, DING Hui. Hydraulic characteristics and design applications of stepped spillways [J]. *Hunan Hydro & Power*, 2000(5): 7-9. (in Chinese))
- [16] 龚振赢, 刘树坤, 高季章. 宽尾墩和窄缝挑坎-收缩式消能工的应用 [J]. *水力发电学报*, 1983(3): 15-20. (GONG Zhenying, LIU Shukun, GAO Jizhang. Convergent structures to enhance energy dissipation flaring gate piers and slit-type flip buckets [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 1983(3): 15-20. (in Chinese))
- [17] 魏文礼, 吕彬, 刘玉玲. 阶梯溢流坝和宽尾墩及消力池组合消能的水流数值模拟研究 [J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2012, 27(4): 442-448. (WEI Wenli, LYU Bin, LIU Yuling. Numerical simulation of flow on stepped spillway combined with flaring gate piers and stilling basin [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(4): 442-448. (in Chinese))
- [18] 郭军, 刘之平, 刘继广, 等. 大朝山水电站宽尾墩阶梯式坝面泄洪水力学原型观测 [J]. *云南水力发电*, 2002, 18(4): 16-20. (GUO Jun, LIU Zhiping, LIU Jiguang, et al. Prototype observation of the flaring pier stepped dam face flood discharging hydraulics for the Dachaoshan Hydropower Plant [J]. *Yunnan Water Power*, 2002, 18(4): 16-20. (in Chinese))
- [19] 张挺, 许唯临, 伍超. 带掺气曹岸边溢洪道挑流消能工水力特性 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 31(2): 28-33. (ZHANG Ting, XU Weilin, WU Chao. Numerical simulation on hydraulics of lateral spillways with aeration slots and hybrid type flip buckets. [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 31(2): 28-33. (in Chinese))
- [20] 胡耀华, 伍超, 张挺, 等. X型宽尾墩阶梯掺气空腔影响因素分析 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2007, 39(3): 24-28. (HU Yaohua, WU Chao, ZHANG Ting, et al. Affect factors analysis of aerated cavity of X-shaped flaring gate pier [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(3): 24-28. (in Chinese))
- [21] 骈迎春. 台阶式溢洪道强迫掺气水流水力特性的试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [22] 朱利, 张法星, 刘善均. 前置掺气坎高度对阶梯溢流坝水力特性的影响 [J]. *人民黄河*, 2014, 36(6): 110-112. (ZHU Li, ZHANG Faxing, LIU Shanjun. Experimental investigation on the influence of height variations of the pre-aerator to the hydraulic characteristics of the flow in the stepped spillways [J]. *Yellow River*, 2014, 36(6): (in Chinese))
- [23] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Physics*, 1981, 39: 201-225.
- [24] 顾莉, 赵欣欣, 戴波, 等. 汇流比对 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2018, 46(3): 189-195. (GU Li, ZHAO Xinxin, DAI Bo, et al. The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in the U-shaped confluent curved river [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(3): 189-195. (in Chinese))
- [25] 张泽, 田淳, 张婷. 齿墩数量对齿墩式内消能工消能率影响试验 [J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1): 40-43. (ZHANG Ze, TIAN Chun, ZHANG Ting. Experimental study on influence of number of tooth blocks on energy dissipation efficiency of tooth block energy dissipater [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 40-43. (in Chinese))
- [26] 陆杨, 刘焕芳, 金瑾, 等. T形墩消力池消能率的计算及优化设计试验 [J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(6): 42-45. (LU Yang, LIU Huanfang, JIN jin, et al. Study on calculation of energy dissipation ratio and optimal design test of stilling basin with T-shape baffle. [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(6): 42-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-05-05 编辑: 郑孝宇)