

# 掺气坎 $\sigma$ 值对阶梯式溢洪道的性能影响研究

李晓超<sup>1</sup>, 乔超亚<sup>2</sup>, 谢敏萍<sup>3</sup>, 肖广磊<sup>3</sup>, 秦蓉<sup>3</sup>, 张浩<sup>4</sup>

(1.中国华水水电开发有限公司, 成都 610000; 2.中国长江电力股份有限公司, 武汉 430000; 3.华北水利水电大学, 郑州 450045; 4.河南天池抽水蓄能有限公司, 河南 南阳 474664)

**摘要:**【目的】进一步探索掺气坎对阶梯溢洪道的水力性能影响研究。【方法】提出了高距比  $\sigma$  值, 并通过数值模拟, 针对  $\sigma$  值取 1/3、1/2、2/3 下,  $l$  分别取 0.6、0.9、1.2 m 的 9 种阶梯溢洪道方案进行了模拟, 对各方案下阶梯溢洪道的水面线、速度矢量、掺气浓度、消能率进行了分析。【结果】发现掺气坎  $\sigma$  值对阶梯溢洪道性能有显著影响, 掺气坎位置越靠近下游, 阶梯溢洪道消能率越高且越稳定, 受  $\sigma$  值的影响越小;  $\sigma$  值越小, 掺气坎前空腔越多;  $\sigma$  值越大, 掺气坎后空腔越多; 掺气坎后空腔有利于提升台阶竖直面水流掺气浓度; 掺气坎位置越靠近下游, 掺气浓度越高; 掺气坎越高, 掺气浓度越高。【结论】通过对掺气坎不同  $\sigma$  值方案下的阶梯溢洪道性能分析, 结合数值模拟结果, 发现掺气坎在同一  $\sigma$  值下, 位置越靠近下游, 水流流态越平顺、掺气效果越稳定、消能率越高; 掺气坎在同一位置下,  $\sigma$  值越大, 阶梯溢洪道的水流流态越平顺、掺气效果越好, 但消能率却并非在最大  $\sigma$  值下最优, 而是存在一个  $\sigma$  极值, 且随着掺气坎向下游移动有减小趋势。

**关键词:** 阶梯溢洪道; 掺气坎; 消能率; 数值模拟

中图分类号: TV651.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022471

OSID:



李晓超, 乔超亚, 谢敏萍, 等. 掺气坎  $\sigma$  值对阶梯式溢洪道的性能影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 131-137.

LI Xiaochao, QIAO Chaoya, XIE Mingping, et al. Influence of Aeration Threshold on Performance of Stepped Spillway[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 131-137.

## 0 引言

【研究意义】泄洪抗汛是水电站、泵站等水利枢纽的一项重要任务。在水利水电工程中, 影响其效益发挥的关键因素之一就是泄洪消能技术, 且由于我国的水电资源主要集中在西部地区, 高水头、大流量、窄河谷是很多西部水电工程的典型特征, 为安全泄洪, 保障广大人民群众生命财产安全, 工程建设的关键性控制因素便是如何确保顺利的泄洪消能。因此, 对水电工程泄洪消能关键技术进行深入研究具有十分重要的意义。

【研究进展】阶梯溢洪道作为泄洪建筑物的一种, 以其消能率高、可有效缩减下游消力池等设施尺寸的特点<sup>[1]</sup>, 得到了迅速发展和广泛应用, 但阶梯式溢洪道的消能率会随单宽流量的增加而减小, 在较大的单宽流量下, 阶梯溢洪道易受到空化空蚀的损害。为此, 国内外专家针对阶梯式溢洪道开展了诸多研究。Ohtsu 等<sup>[2]</sup>引入“过渡流”机制, 将阶梯上的流态分为“跌落流”“过渡流”“滑行流”3种。Peyras 等<sup>[3]</sup>

通过试验发现坝坡越缓, 溢洪道消能率越高。Boes 等<sup>[4]</sup>试验分析发现消能率只与阶梯临界水深有关。有研究<sup>[5-6]</sup>通过阶梯式溢洪道数值模拟发现: 台阶级数越多, 溢洪道滑行水流对台阶的冲击较小, 水流流态越好。赵相航等<sup>[7]</sup>通过在 VOF 模型下对阶梯溢洪道的数值模拟发现, 水流漩涡为顺时针漩涡, 位于台阶凹角内, 漩涡中心位置在 0.22 步高和 0.22 步长交汇处, 通过压强分析发现, 该凹角处为负压, 易发生空化。吴春水<sup>[8]</sup>通过对阶梯溢洪道的数值模拟发现水流越靠近下游, 流速越快。在压力分布图的竖直面, 拐角上部的压力值为最小负压; 阶梯式溢洪道的水平面均为正压, 而光滑式溢洪道水平面则为负压。部分研究<sup>[9-11]</sup>对传统矩形台阶进行了改进, 把传统的矩形台阶改为了“V”形台阶、倒“V”形台阶和“M”型台阶, 通过模拟结果的对比分析发现, 改进后的溢洪道水流由原二元流动为三元流动, 消能率显著增加。另外一些研究<sup>[12-14]</sup>通过对阶梯溢洪道的模拟分析发现: 坝坡越缓, 水流流速越小, 消能率越大。伍平等<sup>[15]</sup>发现坝比宜控制在 1:3~1:2 间。还有研究<sup>[16-17]</sup>通过对实际案例的模拟分析发现, 前置掺气坎的掺气效果明显。Zare 等<sup>[18]</sup>对不同掺气坎形状、不同掺气坎位置对水流掺气点及掺气水深的影响做了试验研究。贾

收稿日期: 2022-08-25 修回日期: 2023-03-18 网络出版日期: 2023-05-10

作者简介: 李晓超(1997-), 男, 河南长垣人。工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程方向研究工作。

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

洪涛<sup>[19-20]</sup>对不同台阶形式和掺气坎位置进行了数值模拟,发现掺气坎式台阶溢洪道的消能率明显优于其他3种形式,且掺气坎越靠近下游,消能率越高。

综合前人经验可知,【切入点】目前所应用的阶梯溢洪道多为组合型阶梯方式<sup>[21]</sup>,而在众多的组合型阶梯溢洪道中,坎式阶梯溢洪道以其性能优越、施工便利的特点脱颖而出,可有效解决阶梯面的空蚀破坏,正成为新兴溢洪道。而目前关于掺气坎的高度和位置方向的研究很少,【拟解决的关键问题】本文提出了掺气坎的 $\sigma$ 值这一概念,用以描述掺气坎在台阶不同位置和不同掺气坎高度的关系,并对不同 $\sigma$ 值下的方案进行了研究分析,以求进一步探索其内部规律,提高阶梯式溢洪道水力性能。

### 1 计算方案

本文所用阶梯溢洪道源于 Felder 试验中的模型,该溢洪道共6个台阶,高6 m,长20 m。第一级阶梯前宽顶堰长8 m,坡度 $\alpha=26.6^\circ$ ,台阶长 $W=5$  m,宽 $B=2$  m,高 $H=1$  m,如图1(a)所示。 $b$ 为掺气坎宽度取0.2 m, $h$ 为掺气坎高度, $l$ 为掺气坎到下一台阶的水平距离, $\sigma=h/l$ 为高距比,其中 $l$ 分别取0.6、0.9、1.2 m,对应为台阶上的位置 $l_1$ 、位置 $l_2$ 、位置 $l_3$ 的3个位置, $\sigma$ 则取1/3、1/2、2/3的3个数值,对应掺气坎参数如表1所示,共计9种台阶体型,依次记为1~9号,如图1(b)、图1(c)、图1(d)所示。

表1 掺气坎方案参数

Table 1 Parameter table of aerator scheme

位置	$h/m$		
$l_1=1.2$ m	0.4	0.6	0.8
$l_2=0.9$ m	0.3	0.45	0.6
$l_3=0.6$ m	0.2	0.3	0.4
$\sigma$ 取值	1/3	1/2	2/3

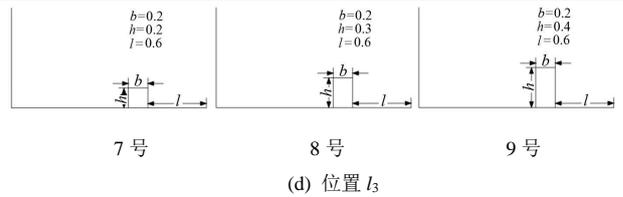
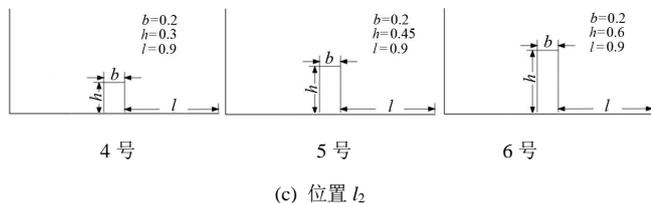
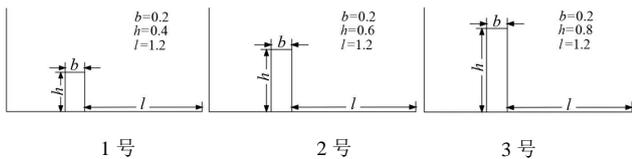
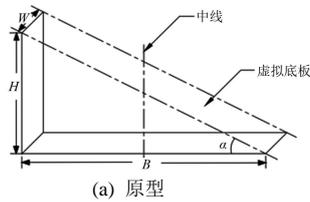


图1 台阶模型图

Fig.1 Step model diagram

## 2 数值模拟

### 2.1 建模及网格划分

根据模型参数,建立阶梯溢洪道模型,比例为1:1,网格划分采用结构化网格,示意图如图2。

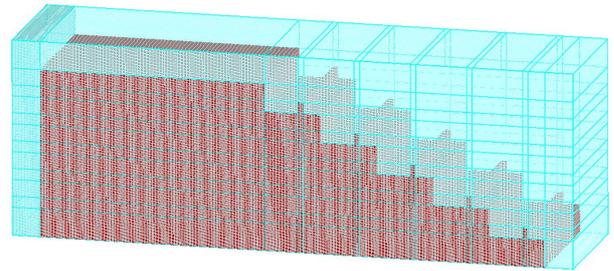


图2 网格划分示意图

Fig.2 Grid division diagram

为验证该模型计算的准确性,根据网格单元长度的不同,设置不同网格数量的方案,选取掺气坎顶点位置的速度值为评价参数,进行网格无关性分析。由图3可知,网格数量15万与12万时的模拟结果曲线已几乎重合,此时网格数量已无较大影响,确定最终网格数量为12万。网格无关性分析如图3。

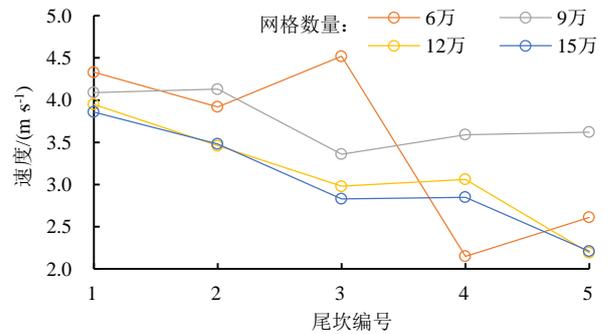


图3 网格无关性分析

Fig.3 Grid independence analysis

### 2.2 边界条件

数值模拟计算进口断面为第一级台阶前宽顶堰上的收缩断面,采用压力进口,出口断面为最后一级台阶之后0.5 m处,此处认为流速分布较为均匀,为自由出流,台阶两边均采用壁面边界,底部为壁面边界,水面采用对称边界。

### 2.3 控制方程

本文基于 Flow-3D 软件,采用模拟精度较高的 RNG  $k-\epsilon$  模型,该溢洪道水流模拟中忽略能量转换,其流动主要涉及连续方程和动量方程。

连续方程：
$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + R \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}, \quad (1)$$

式中： $V_F$  为可流动体积分数； $\rho$  为密度； $R_{DIF}$  为湍流耗散项； $R_{SOR}$  为源项； $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度分量； $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的可流动面积分数。

动量方程：
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s), \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s), \quad (4)$$

式中： $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的重力加速度； $b_x$ 、 $b_y$ 、 $b_z$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的流体损失； $p$  为作用在流体微元上的压力； $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的黏性加速度；

$k$  方程：
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon, \quad (5)$$

$\epsilon$  方程：
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^*}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (6)$$

式中： $\rho$  为流体密度； $k$  为紊动能； $\epsilon$  为紊动能耗散率。

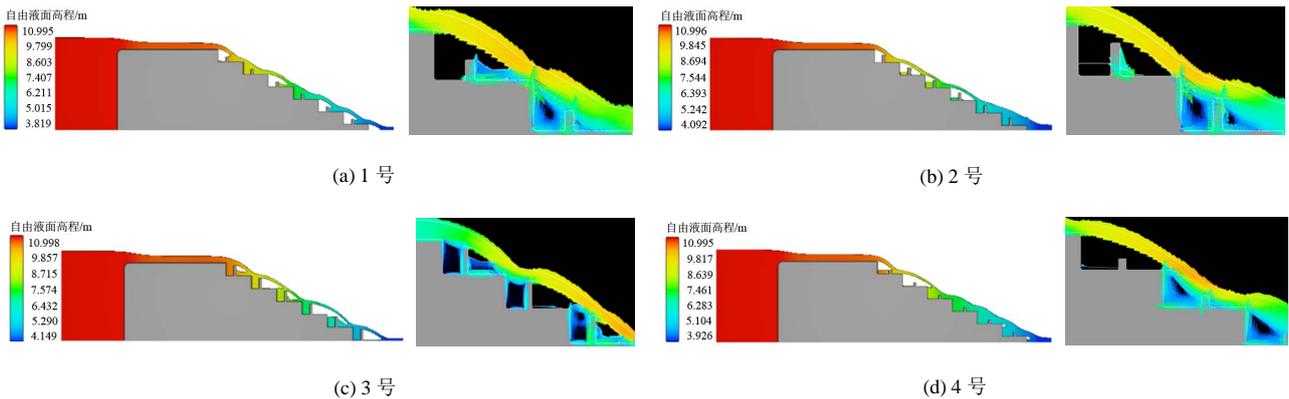
### 3 结果与分析

#### 3.1 水流流态

为分析不同台阶模型下的溢洪道水流流态，根据数据模拟结果绘制出了每种模型水流稳定之后的水面线图及具有代表性的台阶面上的流速矢量图，如图 4 所示。

由图 4 可知，位置  $l_1$  的 3 种台阶模型下的流态均为跌落流，掺气坎靠近上游位置，水流直接冲击在下一级台阶上，受台阶的反作用力形成水跃继续流至下一级台阶，直到溢洪道底部。随着掺气坎高度的增加，该状况略有好转，但水流直接冲击台阶，极易引起台阶表面损伤，且台阶与水流间存在大量的空腔，流态紊乱；位置  $l_2$  中跌落流和过渡流共存，相比位置 1 而言，水流直接冲刷台阶的情况明显改善，空腔明显减少，在台阶竖直面与掺气坎间形成较小的顺时针漩涡。随着掺气坎高度的不断增加，掺气坎与台阶前形成的漩

涡不断增大，水流不断进行消能，当掺气坎高度增至 0.6 m 即 6 号台阶模型时，掺气坎后均形成空腔；位置  $l_3$  水流充满台阶，空腔很少，水流流态为滑行流。水流在掺气坎与台阶间形成的漩涡中充分消能，流向下游。随着掺气坎高度的不断增加，空腔从台阶后转移至了掺气坎后，且此时溢洪道存在与普通阶梯溢洪道相似的虚拟底板，此底板以掺气坎顶部和台阶凸角连线为界，下方是以  $y$  方向为轴的漩涡，上方是与虚拟底板近似平行的水流层。对于同一位置而言， $\sigma$  越大，台阶与掺气坎之间的空间越大，越容易捕捉到从上一个台阶流下来的水流，形成漩涡对来流进行消能，但  $\sigma$  越大，水跃过掺气坎后的抛物线越长，又容易跃过下游台阶。综合图 2 可知： $\sigma$  越小，掺气坎前的空腔越多， $\sigma$  越大，掺气坎后的空腔越多；同一  $\sigma$  下， $l$  越小即掺气坎越靠近下游，空腔越少；掺气坎越靠近下游，水流为滑行流，对台阶的冲刷和冲击越小，水流流态越好。



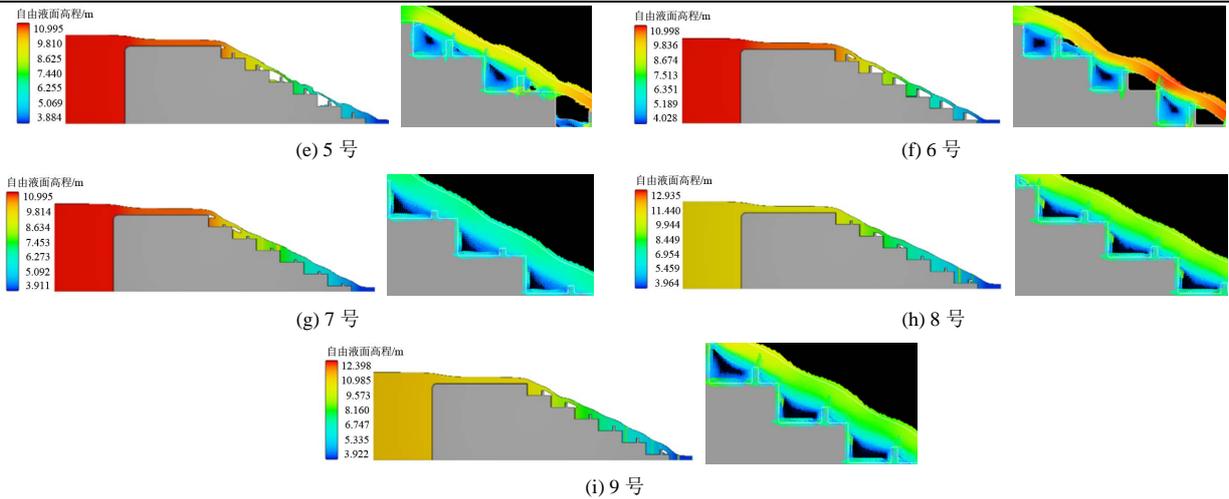


图4 水面线及速度矢量图

Fig.4 Water surface line and velocity vector diagram

### 3.2 掺气效果

掺气减蚀是保护水工建筑物尤其是泄洪建筑物的一种重要措施,为使过流面不遭受空蚀破坏,需要保证掺气浓度大于有效防止发生空化空蚀的最低浓度值<sup>[22-24]</sup>。本溢洪道的掺气效果如图5所示。

由图5可知:3号、6号、9号为同类型掺气浓度更好的方案,即在同一位置中,掺气坎高度越高,

则该溢洪道的掺气浓度越好;同一 $\sigma$ 下,掺气坎越靠近下游,其掺气浓度越高。综合整体台阶方案掺气图可发现:随着掺气坎不断向下游移动以及掺气坎高度不断增加,掺气坎的掺气效果越好,但增幅有所减小。为进一步分析其掺气浓度变化,取各台阶竖直面和水平面测点的掺气浓度如图6所示。

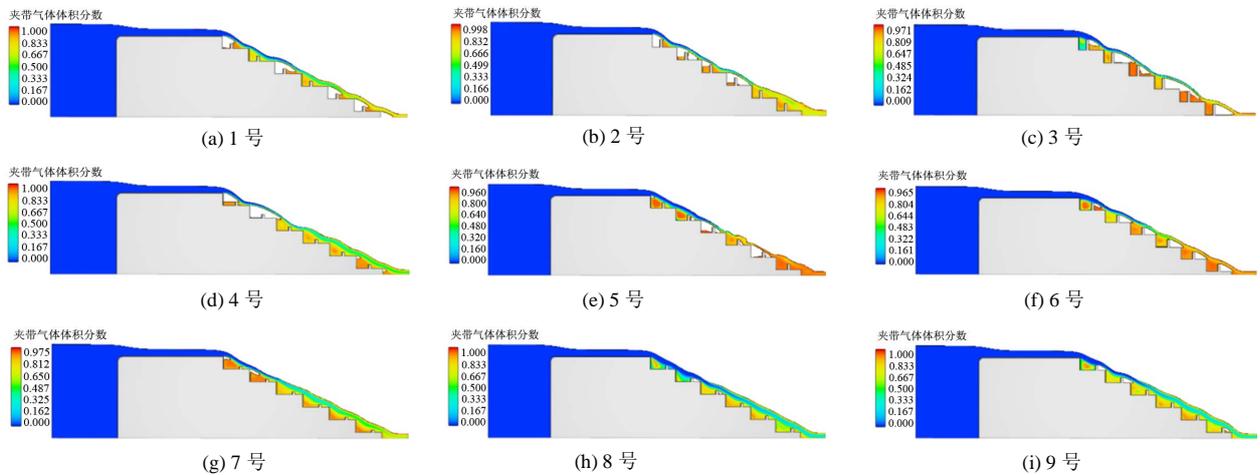


图5 掺气效果图

Fig.5 Aeration rendering

由图6可知:在各台阶竖直面同一位置下,掺气坎越高,掺气效果越好,掺气浓度越高,达到了80%左右;在各台阶水平面同一位置下,掺气坎适中时,掺气效果更好,掺气浓度值更高,达到了70%左右;位置 $I_1$ 、 $I_2$ 内各台阶的空腔较多,其掺气浓度波动较大,均不如位置 $I_3$ 各台阶的掺气浓度值稳定,即掺气坎越靠近下游位置,掺气效果越稳定。

由于台阶空化空蚀常发生在台阶竖直面,对竖直面进一步重点分析发现:由于水流流入第一阶梯前未设掺气坎,且水流流速较大,前两级台阶的竖直面掺气浓度值偏低,但随着掺气坎位置的下移,可明显观

察到位置 $I_3$ 前两级台阶比位置 $I_1$ 、位置 $I_2$ 的掺气浓度高许多,位置 $I_3$ 第1级台阶的掺气浓度最低,但仍在40%,故下游增设掺气坎可明显提高溢洪道水流掺气浓度,有效减轻水流对过流表面的空化空蚀作用,特别是对台阶竖直面。在竖直面掺气浓度图中可知3号和6号的各台阶掺气效果优良,6号为最好,对照各方案的水面线图可知,3号和6号均存在大量的掺气坎后空腔,而1号存在大量的掺气坎前空腔,其多数台阶掺气浓度值为0%,故掺气坎后形成的空腔,有利于提高水流掺气浓度值,而掺气坎前空腔则不利于提高水流掺气浓度值。

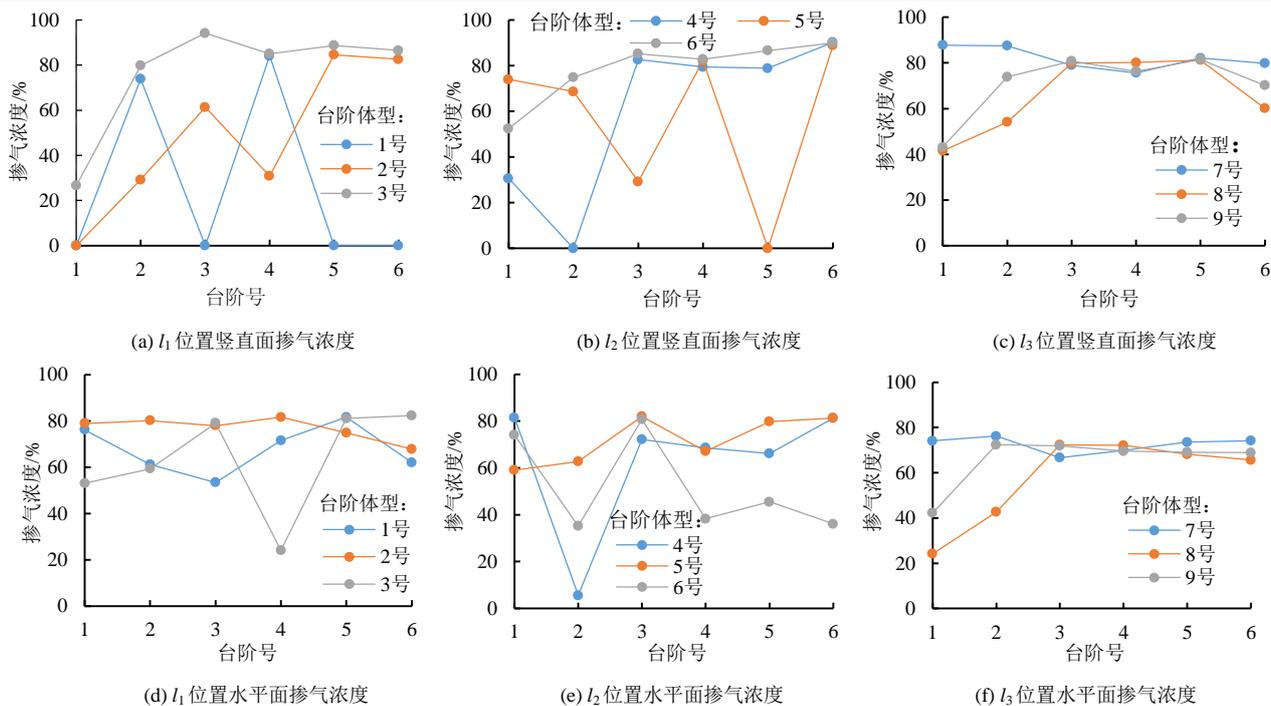


图6 掺气浓度折线图

Fig.6 Aeration concentration line chart

### 3.3 消能率

消能率是评价溢洪道的重要指标,通常采用进出口断面的能量差来计算消能率,计算式为:

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

式中:  $E_1$ 、 $E_2$  分别是进、口断面的总能量。

图7为各方案消能率折线图,由图7(a)可知,相同 $\sigma$ 值下,掺气坎位置越靠近下游,其系统消能率越高,增幅略有降低,这是因为掺气坎越靠近下游,掺气坎与台阶形成的水流漩涡越大,对水流进行不断消能。另外,位置 $l_1$ 处消能率最大的 $\sigma$ 极值为1/2、位置 $l_2$ 处消能率最大的 $\sigma$ 极值为1/2、位置 $l_3$ 处消能率最大的 $\sigma$ 极值为1/3,即在掺气坎位置的后移中,消能率最大的 $\sigma$ 极值由1/2降至1/3;由图7(b)可

知,位置 $l_1$ 曲线、位置 $l_2$ 曲线中的消能率变化随 $\sigma$ 值的增加均为先增加后减小,位置 $l_3$ 曲线中的消能率变化是随 $\sigma$ 值的增加而不断减小,位置 $l_3$ 曲线的消能率变化波动幅度比位置 $l_1$ 曲线、位置 $l_2$ 曲线的波动幅度小,且位置 $l_3$ 曲线的消能率最高,即掺气坎越靠近下游,消能率越大,且受 $\sigma$ 值的影响越小;由图7(c)可知,掺气坎位于下游位置的7、8、9号方案的消能率显著高于其他方案,进一步验证了图7(a)的结论。另外,观察1、2、3(位置 $l_1$ )和观察4、5、6(位置 $l_2$ )及观察7、8、9(位置 $l_3$ )的消能率折线图,可知位置 $l_1$ 、 $l_2$ 的消能率先增后减,位置 $l_3$ 的消能率不断减小。由图7可知,在台阶的不同位置,存在一个消能率最大的 $\sigma$ 极值,且该极值随掺气坎的向下游移动而不断降低。

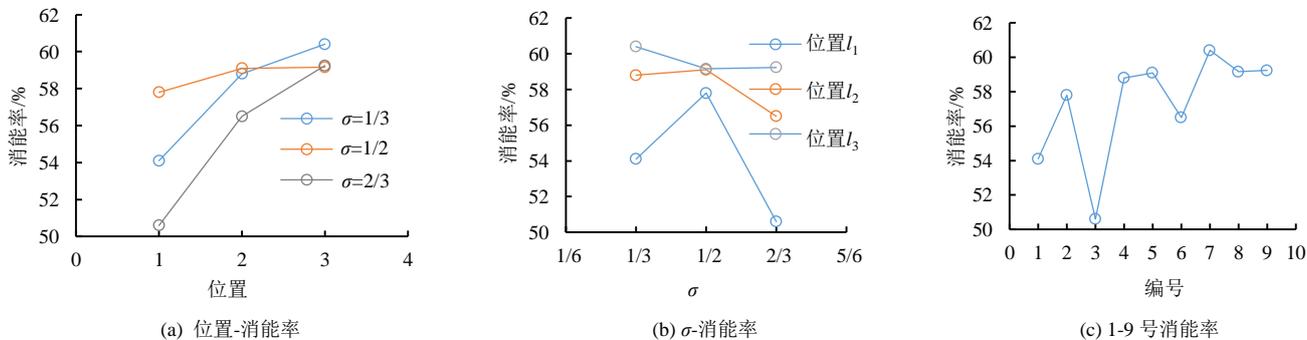


图7 消能率折线图

Fig.7 Line chart of energy dissipation rate

## 4 讨论

通过对掺气坎不同 $\sigma$ 值方案下的阶梯溢洪道性

能分析,结合各方案的水面线、速度矢量、掺气效果、消能率等数值模拟结果,发现掺气坎在同一 $\sigma$ 值下,位置越靠近下游,水流流态越平顺、掺气效果越稳定、

消能率越高,这与前人<sup>[19-20]</sup>的研究是吻合的;但通过查阅前人研究资料可知,阶梯溢洪道的水力性能不仅与台阶形式有关,还与台阶坡比、掺气水深等因素有关,因此,作者结合前人对阶梯溢洪道坡比的研究结论,对掺气坎高度值进行设置,创新性的提出了高距比 $\sigma$ 值这一概念,并发现阶梯溢洪道的水力性能与 $\sigma$ 值确实是有关的,而且也不是简单的正比关系。这是因为,掺气坎不断地增高时,与前一台阶形成的坡比在变缓,但与后一台阶形成的坡比却在变陡,因此,在不同位置使得消能率最大的 $\sigma$ 值的具体变化规律,还需要设计更为详细的 $\sigma$ 值方案,有待后续研究工作的开展,以做进一步深入分析。

需要指出的是,本文仅在同一单宽流量下,针对不同 $\sigma$ 值下的阶梯溢洪道性能做了研究和探讨,得出了一些结论,但关于其他单宽流量下及阶梯坡比下的 $\sigma$ 值对阶梯溢洪道的性能影响有待进一步研究,分析并完善其变化规律。

## 5 结论

1) 掺气坎在同一位置下, $\sigma$ 值越大,掺气坎后空腔越多、掺气浓度越高。

2) 掺气坎在同一 $\sigma$ 值下,其位置越靠近下游,即 $l$ 值越小,水流空腔越少、流态越好、掺气浓度越高、消能率越大,但使得消能率最大的 $\sigma$ 值却不断减小。

3) 掺气坎后空腔有利于提高溢洪道水流掺气浓度,掺气坎前空腔不利于提升其掺气浓度值。

4) 掺气坎位置越靠近下游,水流掺气效果越稳定,且掺气浓度明显提高;水流消能率越高,且更稳定。

5) 掺气坎在不同位置下,存在使得溢洪道消能率最大的 $\sigma$ 值,且该 $\sigma$ 值随着掺气坎向下游移动而减小。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 王承恩,张建民,李贵吉. 阶梯溢洪道的研究现状及展望[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(6): 89-94.  
WANG Cheng'en, ZHANG Jianmin, LI Guiji. Trends of current research on the stepped spillway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 89-94.
- [2] OHTSU I, YASUDA Y. Characteristics of flow conditions on stepped channels[R]. In: Proceedings of 27th IAHR Congress, San Francisco. 1997: USA, pp. 583-588.
- [3] PEYRAS L, ROYET P, DEGOUTTE G. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118(5): 707-717.
- [4] BOES R M, MATOS J, OHTSU I, et al. Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(12): 947-954.
- [5] 郭馨,解宏伟,赵相航. 基于VOF模型的台阶式溢洪道的数值模拟[J]. 青海大学学报, 2016, 34(6): 62-66.

- GUO Xin, XIE Hongwei, ZHAO Xianghang. Numerical simulation for stepped spillway based on VOF model[J]. Journal of Qinghai University, 2016, 34(6): 62-66.
- [6] 杨锐国,邱勇,陈玉斌,等. 阶梯布置对溢洪道尾水二次消能及流态影响研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(3): 100-104, 119.  
YANG Ruiguo, QIU Yong, CHEN Yubin, et al. Study on the impact of step layout on secondary energy dissipation and flow pattern of spillway tailwater[J]. Pearl River, 2021, 42(3): 100-104, 119.
- [7] 赵相航,解宏伟,郭馨,等. 基于VOF模型的台阶式溢洪道数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 143-148.  
ZHAO Xianghang, XIE Hongwei, GUO Xin, et al. Numerical simulation of stepped spillway based on VOF model[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(3): 143-148.
- [8] 吴春水. 阶梯式溢洪道泄洪能力随几何形状变化的数值模拟计算[J]. 陕西水利, 2020(5): 16-18.  
WU Chunshui. Numerical simulation calculation of flood discharge capacity of stepped spillway changing with geometric shape[J]. Shaanxi Water Resources, 2020(5): 16-18.
- [9] 田忠,许唯临,余挺,等. "V"形台阶溢洪道的消能特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(2): 21-25.  
TIAN Zhong, XU Weilin, YU Ting, et al. Characteristics of energy dissipation for "V"-type stepped spillway[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 21-25.
- [10] 徐鹏,赵信峰,白兆亮. 倒V形阶梯与传统阶梯流场特性对比研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 180-185.  
XU Peng, ZHAO Xinfeng, BAI Zhaoliang. Comparison of the flow field in inverted V-shaped and traditional stepped spillway[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(5): 180-185.
- [11] 王磊,刁明军,朱润野,等. "M"形台阶溢洪道的消能特性[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 95-102.  
WANG Lei, DIAO Mingjun, ZHU Runye, et al. Characteristics of energy dissipation of M-shape stepped spillways[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(5): 95-102.
- [12] 陈群,戴光清,朱分清,等. 影响阶梯溢流坝消能率的因素[J]. 水力发电学报, 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.
- [13] 张峰,刘韩生. 台阶式溢洪道纯台阶消能率的研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 47-50, 58.  
ZHANG Feng, LIU Hansheng. Experimental study on energy dissipation ratio of pure steps on stepped spillway[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(4): 47-50, 58.
- [14] FELDER S, CHANSON H. Aeration, flow instabilities, and residual energy on pooled stepped spillways of embankment dams[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(10): 880-887.
- [15] 伍平,王波,陈云良,等. 阶梯溢洪道不同坡比消能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(5): 24-29.  
WU Ping, WANG Bo, CHEN Yunliang, et al. Energy dissipation of skimming flow over stepped chutes with different slopes[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(5): 24-29.
- [16] 彭勇,张建民,许唯临,等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道掺气水深及消能率的计算[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 63-68.  
PENG Yong, ZHANG Jianmin, XU Weilin, et al. Calculation of aerated water depth and energy dissipation rate of a pre-aerator stepped spillway[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(1): 63-68.
- [17] 陈剑刚,张建民,许唯临. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型特点及工程应用试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(6): 6-11.  
CHEN Jiangan, ZHANG Jianmin, XU Weilin. Practical engineering application and hydraulic characteristics of the flow in stepped spillway with pre-aerator slot[J]. Journal of Sichuan University (Engineering

- Science Edition), 2010, 42(6): 6-11.
- [18] ZARE H K, DOERING J C. Inception point of air entrainment and training wall characteristics of baffles and sills on stepped spillways[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(12): 1119-1124.
- [19] 贾洪涛. 尾坎位置对坎式阶梯溢洪道水力特性影响研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(7): 189-194.
- JIA Hongtao. Effects of different tail bucket positions on hydraulic performances of stepped spillway[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(7): 189-194.
- [20] 贾洪涛. 台阶形式对阶梯溢洪道水力学特性的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(10): 148-152, 157.
- JIA Hongtao. The effects of step configurations on the hydraulic properties of stepped spillways[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(10): 148-152, 157.
- [21] 张志刚. 阶梯消能水力特性概述[J]. *中国水运(下半月)*, 2021, 21(2): 105-106.
- ZHANG Zhigang. Summary of hydraulic characteristics of stepped energy dissipation[J]. *China Water Transport*, 2021, 21(2): 105-106.
- [22] 李晓超, 谢威威, 张浩, 等. 水力机械磨蚀研究综述[J]. *人民珠江*, 2021, 42(11): 99-105, 111.
- LI Xiaochao, XIE Weiwei, ZHANG Hao, et al. Review of research on hydraulic mechanical abrasion[J]. *Pearl River*, 2021, 42(11): 99-105, 111.
- [23] 陈朝. 阶梯溢洪道水力特性试验研究：以大河边库模型试验为例[D]. 昆明：昆明理工大学, 2011.
- CHEN Zhao. Experimental study on hydraulic characteristics of stepped spillway: Taking okawabe reservoir model test as an example[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [24] 赵安妮. 前置掺气坎阶梯溢洪道体型优化数值模拟研究[D]. 西安：西安理工大学, 2020.
- ZHAO Anni. The numerical simulation study on the shape optimization of pre-aerator stepped spillways[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

## Influence of Aeration Threshold on Performance of Stepped Spillway

LI Xiaochao<sup>1</sup>, QIAO Chaoya<sup>2</sup>, XIE Mingping<sup>3</sup>, XIAO Guanglei<sup>3</sup>, QIN Rong<sup>3</sup>, ZHANG Hao<sup>4</sup>

(1. China Water Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 4. Henan Tianchi Pumped Storage Power Co., Ltd., Nanyang 474664, China)

**Abstract: 【Background and Objective】** Flood control is a primary task in water conservancy hubs, especially hydropower stations. Many hydropower projects in western China are characterized by high water head, large discharge, and narrow river valleys. Ensuring smooth energy dissipation during discharge is crucial to their safe operation. Stepped spillways have become a popular flood discharge structure due to its high energy dissipation rate and ability to effectively reduce the size of downstream damping. One challenge to the stepped spillways operated in large single-width flow conditions is the cavitation erosion it could create. Extensive efforts have been made to understand the flow pattern and enhance the performance of stepped spillways by improving their design. Among the various stepped spillways proposed, the aerated candy-type stepped spillway appears to be superior in mitigating cavitation erosion. However, there is limited research on the optimal height and position of the aerator. This paper aims to bridge this technology gap. **【Method】** Nine different stepped spillway configurations with varying aerator positions were numerically simulated to calculate the velocity vectors, spillway surface characteristics, and aeration consistency. These results were used to evaluate the hydraulic performance of each configuration. **【Result】** It was found that the sigma ( $\sigma$ ) value of the aerated candy-type stepped spillway significantly influenced the performance of the spillway. The closer the aerator was positioned to the downstream end, the higher and more stable the energy dissipation rate of the stepped spillway would be, and less impact of the  $\sigma$  is. A smaller  $\sigma$  resulted in more cavities in front of the aerator, while a larger  $\sigma$  generated more cavities behind the aerator. The vertical plane of the lifting step resulted in a concentrated aeration flow and demonstrated the advantage of cavities after the aeration barrier. Aerator proximity to the downstream end led to higher aeration concentration; higher aeration thresholds resulted in increased aeration concentration. **【Conclusion】** Numerical simulations revealed that location of the aerator and sigma value of the candy-type stepped spillway have significant impacts on performance of the spillway.

**Key words:** stepped spillway; the aerated candy; energy dissipation rate; numerical simulation

责任编辑：赵宇龙