

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.017

张靓, 杨具瑞, 陈玉壮. 前置掺气坎角度对溢流坝阶梯面消能特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 118-125. (ZHANG Liang, YANG Ju-rui, CHEN Yu-zhuang. Impacts of pre-aerator angels on energy dissipation of stepped spillway[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 118-125.)

前置掺气坎角度对溢流坝阶梯面消能特性的影响

张 靓¹, 杨具瑞¹, 陈玉壮²

(1. 昆明理工大学 现代农业工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 将掺气坎布置在宽尾墩出口和阶梯溢流坝首级台阶的中间位置,能有效减小高坝泄水建筑物在高速水流作用下发生空蚀和冲刷破坏的概率。利用水气两相流模型并联合 RNG $k-\varepsilon$ 模型,模拟计算不同前置掺气坎角度对溢流坝阶梯面掺气浓度和消能特性的影响,前置掺气坎角度依次取 8° , 10° 和 11.3° 。其中模型采用 VOF 方法对自由水面进行处理,利用几何重建方式对水气面附近进行插值,采用 PISO 算法和非定常流算法进行计算。模拟计算结果表明,在不同前置掺气坎角度下,阶梯面平均掺气浓度沿程变化趋势为总体减小并在后几级台阶处保持不变;在靠近掺气空腔后的台阶处,沿阶梯水平近壁面凹角到凸角方向,掺气浓度的变化趋势为先减后增,而沿阶梯面垂直近壁面凹角到凸角方向,掺气浓度的变化趋势为先增后减,且同一断面的掺气浓度随前置掺气坎角度的增加而逐渐增加;在靠近反弧段的阶梯上,沿阶梯水平近壁面凹角到凸角方向,掺气浓度的变化趋势为逐渐增大,而沿阶梯面垂直近壁面凸角到凹角方向,掺气浓度的变化趋势为逐渐减小,随着前置掺气坎角度的增加,同一断面掺气浓度随着增大,且泄水建筑物消能率随之增大。

关键词: 前置掺气坎角度; 阶梯溢流坝; 工程水力学; 数值模拟; 掺气特性; 消能特性

中图分类号: TV135.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)04-0118-08

阶梯式溢流坝消能工在距今两千多年前已被应用于水利工程中,它主要利用水流流经阶梯坝面时形成的旋流、碰撞等作用进行沿程消能,在小单宽流量和低流速工程中使用广泛,其消能效果较好且在溢流面不容易发生空化空蚀破坏^[1]。随着材料工艺和筑坝技术的日益提高,高坝建筑物被更多地应用于实际工程中,但泄水建筑物过流阶梯表面在大单宽流量作用下易空蚀破坏,研究显示避免阶梯面发生空蚀破坏的有效方法之一是增加泄流的掺气浓度,A. J. Peterka 等^[2]通过试验研究得出当过流阶梯近壁面掺气浓度达到 5%~8%时,能有效减小阶梯面发生空蚀破坏的概率。为了增加阶梯面的掺气浓度,需要增加掺气坎、宽尾墩等掺气设施对泄流进行强迫掺气。故此在保证泄水建筑物具有较好消能率的前提下,还应确保其掺气设施的掺气效果良好^[3]。李中枢等^[4]将阶梯溢流坝和宽尾墩相结合,利用宽尾墩对泄流进行横向紧缩纵向扩散,进而增加水流与空气接触的面积,并减少了台阶过流流量,从而减轻了阶梯消能的压力。后小霞等^[5]结合阿海电站的实际工程,采用 RNG-紊流模型,对溢流坝水力特性进行模拟计算,研究表明阶梯溢流坝阶梯面掺气空腔形态与宽尾墩收缩比有关。胡耀华等^[6]在 X 型宽尾墩和阶梯溢流坝首级台阶处设置掺气坎,通过数模与试验相结合的研究方法得出了掺气腔尺度与掺气挑坎高度、阶梯坡度等之间的关系。彭勇等^[7-8]通过在阶梯溢洪道首级台阶处增设掺气坎来达到掺气目的,其掺气机理为在前置掺气坎作用下泄流被掺气坎挑起并在水舌下方的过渡台阶处形成空腔,泄流通过空腔进行强迫掺气进而达到增加掺气浓度的目的,此文献中测试了溢流坝沿程掺气浓度,并表明当掺气浓度达到 5%时阶梯面发生空蚀破坏的概率大大减小。

收稿日期: 2015-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51569010);水利部公益性行业专项经费项目(201101042)

作者简介: 张 靓(1990—),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事工程水力学研究。

E-mail: zhangl199011@163.com 通信作者: 杨具瑞(E-mail: yangjurui@163.com)

由上可知,众多学者对溢流坝消能工掺气的研究方向大致偏向阶梯面强迫掺气空腔形态以及总体掺气分布,而研究单个阶梯水平及竖直近壁面泄流掺气浓度分布情况甚少,阶梯近壁面是否发生空蚀破坏与其掺气浓度有关,故有必要对其掺气浓度分布情况进行深入研究,为类似工程提供设计依据。彭勇等^[7]提出运用理论方法研究前置掺气坎阶梯溢洪道的掺气和消能问题,但理论公式中忽略或简化了许多因素,致使计算结果差异较大。吴守荣^[9]、张陆陈^[10]等提出运用模型试验研究阶梯溢洪道的掺气问题,但模型试验往往会受到场地及经济条件的限制,现今数值模拟凭借其成熟的理论基础、获取资料完整和花费小等优势,已成为研究水气两相流运动的有效工具之一。本文基于某一水电站,讨论前置掺气坎角度分别为 8° 、 10° 和 11.3° 的阶梯溢流坝阶梯水平和垂直近壁面的掺气浓度分布,以及不同前置掺气坎角度下阶梯溢流坝的消能特性,对完善宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池一体化消能工具有十分重要意义。

1 物理模型及试验方案

本文以某电站的泄水建筑物为模拟对象,主要包括宽尾墩、前置掺气坎、阶梯溢流坝和消力池。为简化计算,取该电站5孔阶梯溢流坝中的1孔进行模拟计算。模型依据重力相似准则设计比尺为1:60,采用Y型宽尾墩,后接坝面坡脚为 53° 的阶梯斜坡段,坝面有29级阶梯,阶梯宽度和高度分别为1.25和1.70 cm。阶梯溢流坝后连接反弧段,其半径为83.3 cm,消力池紧跟在反弧段之后,长235 cm。研究显示若掺气坎角度太小,不利于水流的挑射,从而导致坎后水流掺气不充分;若掺气坎角度太大,挑射水流对坝面冲击力增大,进而导致坝面破坏。工程实践表明,溢流坝的掺气坎坡度合理取值范围为1:5~1:7(8° ~ 11.3°)。本文为探讨前置掺气坎角度对阶梯面掺气特性和消能的影响,经试验研究设计了前置掺气坎角度分别为 8° 、 10° 和 11.3° 共3种方案(掺气坎高1 m,第一级台阶高2 m)。模型主要比尺如下:几何比尺为60,流量比尺27 885,流速比尺和时间比尺均为7.75,压力比尺为60,糙率比尺为1.98。图1为前置掺气坎平面布置。

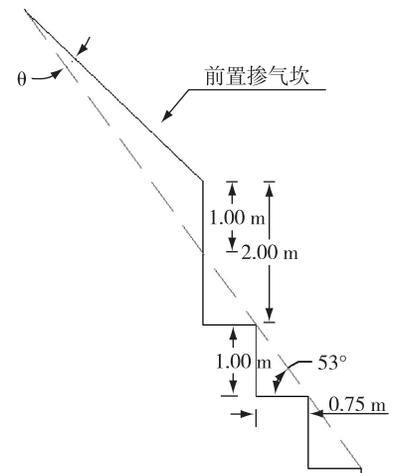


图1 前置掺气坎平面布置图
Fig. 1 Layout plan of pre-aerator

2 数学模型

2.1 基本控制方程

本文采用RNG κ - ε 双方程紊流模型对流场进行数值模拟,方程如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} C_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: t 为运动时间; p 为修正后的压力; x_i, x_j 分别为坐标分量, $i, j = 1, 2, 3$; ρ 为混合相的密度; k 为稳动能项; u_i 为 x_i 方向速度瞬时分量; ε 为稳动耗散率项; μ 为流体动力黏度项; μ_t 为湍流黏度项; $C_\mu, C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 均为经验常数项,分别取值0.09, 1.44和1.92。 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, a_k = 1.0, a_\varepsilon = 1.3$ (a_k 为 k 的紊流普朗特数, a_ε 为 ε 的普朗特数), G_k 为在平均梯度状况下产生的湍动能生成项。

2.2 自由表面追踪 VOF 模型

对第 q 相流体体积分数采用式(5)计算(本文采用 C. W. Hirt^[11] 提出适用两种互不相融流体界面跟踪计算的 VOF 方法):

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + u_j \frac{\partial a_q}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

式中:第 q 相流体的体积分数是 a_q 。

3 数值模拟域网格划分及边界条件设定

3.1 数值模拟域及其网格划分

为使模拟结果加快收敛,数值模拟域除宽尾墩、阶梯和尾坎外都利用结构化网格进行划分,利用非结构化网格对阶梯和宽尾墩处进行划分。同时网格划分的原则为密疏适当,重要部位如两相交界面的网格应画得相对密一些,在仅有水相或气相等次要部位区域的网格相对稀疏些。其中模拟区域原点取在溢流堰堰面曲线与上游水库交线中心位置,以水库进水方向为 x 轴,水库横截面方向为 y 轴,水库铅直方向为 z 轴。模拟域网格数量约为 15 万,台阶底部网格尺寸为 0.315 cm,前置掺气坎底部网格尺寸为 1.42 cm。模拟区域网格结构如图 2。

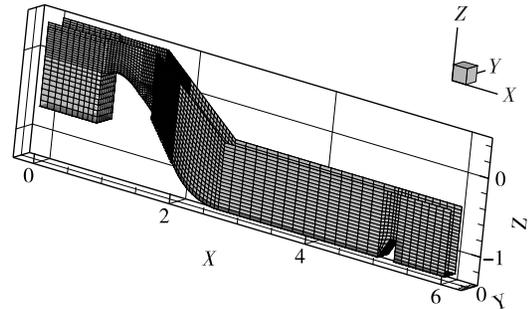


图 2 数值模拟域整体网格

Fig. 2 Whole grids of numerical simulation domain

3.2 数值模拟域边界条件

本文定义 5 种边界条件:①压力进口边界:将水库入水口上方与空气联通处以及模型上方与大气连接处的边界条件设置为压力进口。②速度进口边界:将水库入水口边界条件设置为速度进口,流速 2.17 m/s,单宽流量 123.66 m³/(m·s),模型入口平均流速 $v_{in} = 0.28$ m/s。③自由出流:将水流出水断面处的边界条件设为自由出流,下游水位 1 440 m,消力池底板高程为 1 405 m。④压力出口边界:将水流出水上方与空气相联通处的边界条件设为压力出口。⑤壁面边界:模拟区域内将固壁面上的法向速度设置为零,并定义其边界条件为相对无滑移。

模拟区域的紊动能 k 和耗散率 ε 的计算式^[12]为: $k = 0.00375v_{in}^2$, $\varepsilon = k^2/(0.4H_0)$, 其中: v_{in} 为进口流速; H_0 为进口水深。

3.3 数值模拟域求解方法

采用非定常 PISO 计算方法对压力-速度进行耦合,既可缩短计算时间又可修正网格畸变。采用非结构网格和有限体积法相结合的方式对方程进行离散。同时对整个计算区域进行初始化,对残差变量进行监控,采用一阶迎风格式对正在求解的动量方程进行离散,时间步长定为 0.001~0.003 s。

3.4 计算模型验证

利用带有前置掺气坎的阶梯溢流坝三维数学模型,模拟计算已进行过物理模型试验的工况,通过对坎后空腔长度、前置掺气坎角度为 10° 的沿程平均掺气浓度、断面水深、流速的模拟计算值和实测值比较分析来验证本文模拟的可靠性。表 1 为坎后掺气空腔长度计算值与模拟值,两者误差最大为 7.9%,图 3 为前置掺气坎角度 10° 的阶梯溢流坝坎后平均掺气浓度模拟值与实测

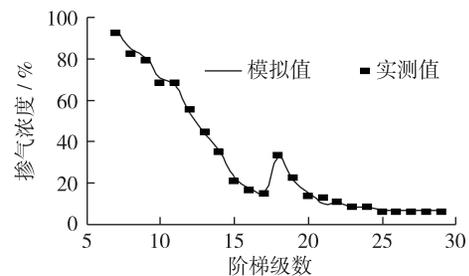


图 3 坎后平均掺气浓度对比

Fig. 3 Comparison of average air concentration values behind aerator

值对比图, 两者平均误差为 7.65%, 图 4 为阶梯溢流坝断面水深模拟值与实测值对比, 平均误差为 2.21%; 图 5 为消力池底部流速模拟值与实测值对比, 平均误差为 4.32%, 两者吻合较好。这表明本文采用的模拟求解方法可用来研究掺气和消能特性。

表 1 坎后掺气空腔长度实测值与模拟值

Tab. 1 Measured and simulated values of aerated cavity length behind aerator

方案	前置掺气坎挑角/(°)	阶梯/个		坎后空腔长度/m		
		实测值	模拟值	实测值	模拟值	误差
1	8	6.38	6.05	8.85	8.39	5.2%
2	10	7.11	6.55	9.80	9.02	7.9%
3	11.3	8.85	8.20	11.62	10.89	6.3%

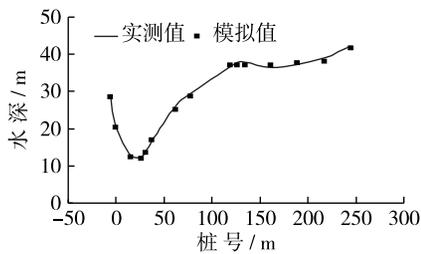


图 4 阶梯溢流坝断面水深模拟值与实测值对比
Fig. 4 Comparison between simulated and measured depths on stepped spillway

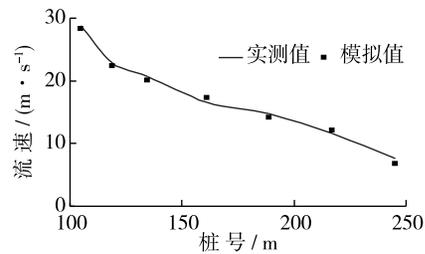


图 5 消力池底部流速模拟值与实测值对比
Fig. 5 Comparison between simulated and measured velocity at bottom of stilling basin

4 计算结果与分析

4.1 阶梯面掺气浓度分布与前置掺气坎角度的关系

4.1.1 阶梯面平均掺气浓度沿程分布 过流掺气主要包括泄流下方强迫掺气和水面自行掺气。本文重点研究在前置掺气坎作用下坎后空腔强迫掺气对过流掺气浓度的影响。在带有宽尾墩的阶梯溢流坝中增设前置掺气坎, 下泄水流经闸墩出流, 由于前置掺气坎的挑射作用, 前置掺气坎将下部水流挑射至下游较远的阶梯面上, 此时纵向挑射水舌与过流坝面发生分离, 在过渡台阶处形成坎后掺气空腔, 坎后掺气空腔掺气浓度均大于 95%, 坎后掺气空腔对下泄水流进行强迫掺气, 在有水阶梯面上形成含气量较大的水流。研究 $y=0$ 截面的掺气特性, 3 种前置掺气坎角度下掺气水流流态和阶梯面上平均掺气浓度沿程分布见图 6 和 7。

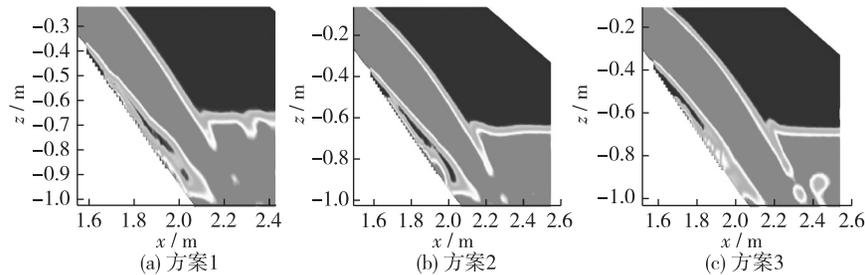


图 6 3 种前置掺气坎角度下掺气水流流态

Fig. 6 Flow patterns of aeration under three kinds of pre-aerator angles

由图 6 可见, 3 种前置掺气坎角度下掺气起始点的位置基本相同, 均在前置掺气坎末端, 且全部阶梯面均被掺气旋滚泄流覆盖。由图 7 可见, 阶梯面上平均掺气浓度沿程分布, 趋势为总体减小并在后几级台阶处

保持不变,究其原因为,过流在坎后掺气空腔强迫掺气作用下携带大量气泡且气泡沿水流方向移动并逐渐向自由水面发展,从而导致掺气量沿水流移动方向沿程减小。随着前置掺气坎角度的增大,前置掺气坎对泄流纵向挑射作用增大,坎后掺气空腔覆盖范围增大,使得同一断面处掺气浓度随其增大。

4.1.2 阶梯水平近壁面上的掺气浓度分布 图8为3种前置掺气坎角度下阶梯水平近壁面上掺气浓度分布,图中 x/X 表示测量点到水平近壁面凹角的距离/阶梯水平近壁面宽度。29级阶梯中选取4个典型阶梯进行分析,分别为第10,15,20和25级阶梯。在不同前置掺气坎角度下,在靠近掺气空腔末端的第10和15级阶梯水平近壁面上,分布形式为沿阶梯水平近壁面凹角到凸角方向掺气浓度先减后增,最小掺气浓度所对应的位置不同,且最小掺气浓度所对应的位置与水平近壁面凸角顶点之间的距离随前置掺气坎角度的增大而减小,同一截面的掺气浓度随其增大而增大。在靠近反弧段的第20和25级阶梯水平近壁面上,当前置掺气坎角度为 8° 时,其分布规律与第10和15级阶梯上的掺气分布一致,都是沿阶梯水平近壁面凹角到凸角方向先减后增,而当前置掺气坎角度为 10° 和 11.3° 时,其分布规律为沿水平近壁面凹角到凸角方向掺气浓度依次增大,且前置掺气坎角度为 11.3° 时增幅较大。由上可知,在前置掺气坎作用下,靠近掺气空腔的阶梯面泄流掺气充分,掺气浓度变化趋势均为先减后增,而在靠近反弧段阶梯面上,其变化趋势为依次增大,且同一截面的掺气浓度随前置掺气坎角度增大而增大。

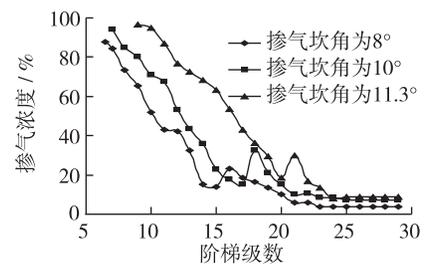


图7 平均掺气浓度沿程分布

Fig.7 Distribution of average air concentration

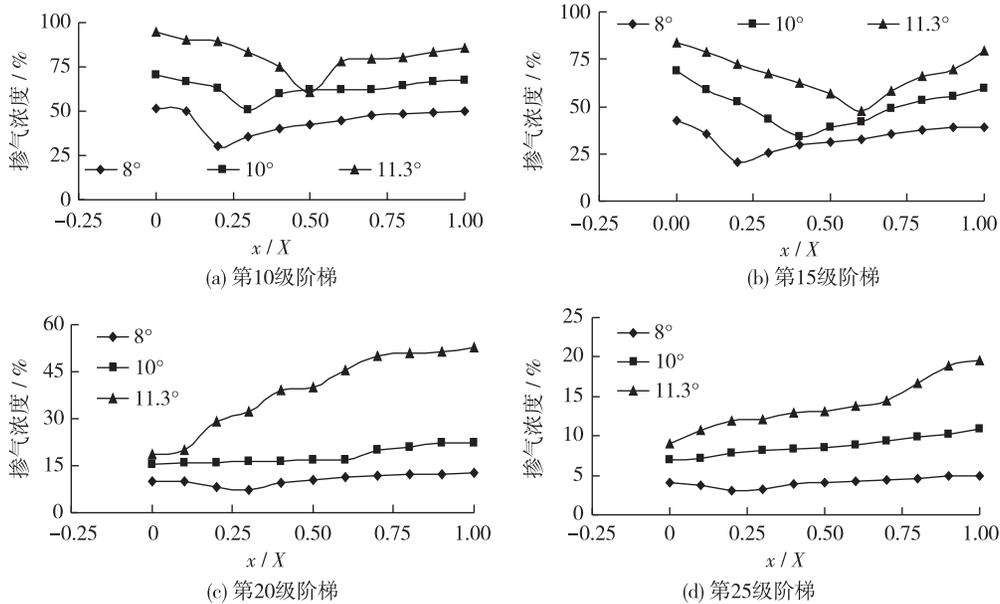


图8 3种前置掺气坎角度下阶梯水平近壁面上掺气浓度分布

Fig.8 Distribution of air concentration on level near wall under three kinds of pre-aerator angles

4.1.3 阶梯垂直近壁面上的掺气浓度分布 图9为3种前置掺气坎角度下阶梯垂直近壁面上掺气浓度分布,图中 y/Y 表示测量点到垂直近壁面凸角的距离/阶梯垂直近壁面高度。同样选取第10,15,20和25级4个典型阶梯进行分析。在不同前置掺气坎角度下,在第10和15级阶梯垂直近壁面上,分布情况为沿阶梯垂直近壁面凸角到凹角方向先增后减,其最大掺气浓度所对应的位置不同,随前置掺气坎角度的增大,最大掺气浓度所对应的位置与垂直近壁面凸角顶点之间的距离随之减小,且对于同一截面的掺气浓度随其增大。在靠近反弧段的第20和25级阶梯上,沿垂直近壁面凸角到凹角方向其掺气浓度依次减小。

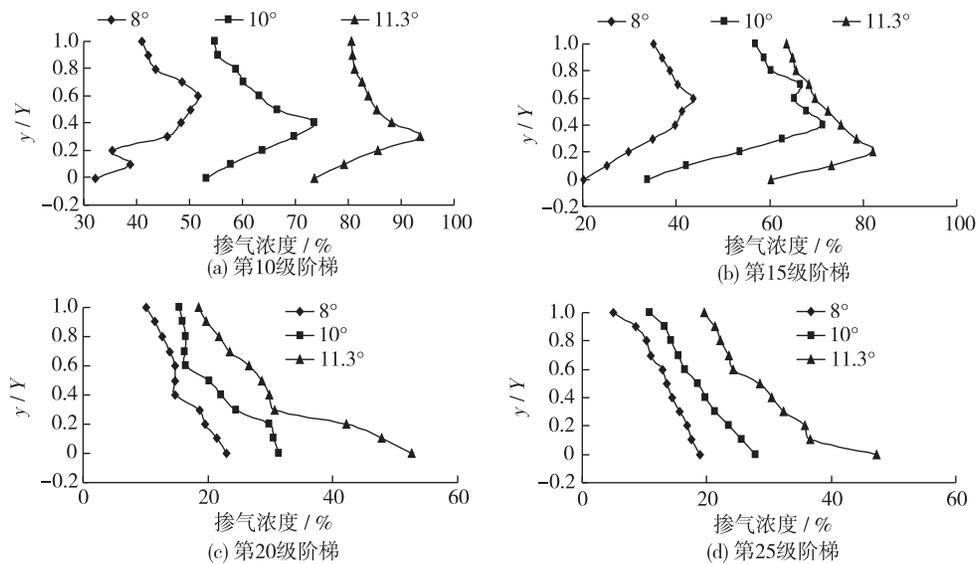


图9 3种前置掺气坎角度下阶梯垂直近壁面上掺气浓度分布
Fig. 9 Distribution of air concentration on vertical near wall under three kinds of pre-aerator angles

4.2 前置掺气坎角度对流速及消能特性的影响

4.2.1 前置掺气坎角度对流速分布的影响 泄流经Y型宽尾墩出流,由于前置掺气坎的作用,底部泄流更易被挑射,形成稳定的挑距和坎后掺气空腔。水流经阶梯溢流坝坝面下泄,在前置掺气坎和阶梯溢流坝的共同作用下,泄流能量逐渐转化,其势能大部分转化成动能,故在反弧段末端流速较大。表2为3种前置掺气坎角度下消力池底部流速沿程分布,泄流在消力池入口处流速均较大,方案1,2,3在此处的流速分别为29.75,28.31,27.09 m/s,流速沿水流移动方向逐次减小,在消力池尾坎处底分别减至8.35,6.83,5.75 m/s,可见本文研究的消能工消能效果较好。方案1的消力池入口处底部流速与方案2相比增加了5.09%,与方案3相比增加了9.82%,故前置掺气坎角度较大时对流速的影响较大。随前置掺气坎角度的增大,消力池入口流速和尾坎处流速逐次减小。其中,当前置掺气坎角度为11.3°时,消力池入口处的流速最小,由此可知方案3中的前置掺气坎体型更利于能量的耗散。

表2 3种前置掺气坎角度下消力池底部流速沿程分布

Tab. 2 Velocity distribution along bottom of stilling basin under three kinds of pre-aerator angles

桩号/m	流速/(m·s ⁻¹)		
	方案1	方案2	方案3
105	29.75	28.31	27.09
119	23.68	22.35	21.53
134.6	21.13	20.07	19.07
161	18.81	17.28	16.38
189	15.21	14.12	13.07
205	14.03	13.06	11.82
217	13.40	12.07	10.95
230	9.72	8.38	6.87
245	8.35	6.83	5.75

4.2.2 前置掺气坎角度对消能率的影响 下泄水流流经前置掺气坎后形成稳定掺气空腔,在其作用下对泄流进行强迫掺气,并经阶梯面作用加强对水流的旋滚破碎,两者共同作用加速了泄流的能量耗散。本文通过两断面能量差确定泄流的能量耗散,取水库入水口为断面1,桩号245的尾坎处为断面2,利用式(6)计算消能率:

$$\eta = \Delta E/E_1 = (E_2 - E_1)/E_1 \tag{6}$$

式中: E₁ 为断面1的总能量; E₂ 为断面2的总能量。

表3为不同前置掺气坎角度下的消能率。可见,随着前置掺气坎角度的增加,消能率随其增大,当前置掺气坎角度较大时,其角度变化对消能率的影响较大,反之则较小。产生此规律的原因为,前置掺气坎角度越大,对泄流纵向挑射作用增大,使得泄流掺气愈充分,加剧了水流之间碰撞,从而加速了泄流能量的耗散。

表3 不同前置掺气坎角度下的消能率

Tab. 3 Rates of energy dissipation under three kinds of pre-aerator angles

前置掺气角度/(°)	断面1总能量/m	断面2总能量/m	消能率/%
8	99.05	49.45	50.07
10	99.05	45.72	53.84
11.3	99.05	44.35	55.22

5 结 语

通过对前置掺气坎角度分别为 8° 、 10° 和 11.3° 的阶梯溢流坝进行模拟计算,研究不同角度下前置掺气坎对阶梯溢流坝掺气和消能特性的影响,主要结论为:

①阶梯面上平均掺气浓度沿程变化趋势为总体减小并在后几级台阶处保持不变,且全部阶梯面均被掺气旋滚泄流覆盖。随着前置掺气坎角度的增大,前置掺气坎对泄流纵向挑射作用增大,坎后掺气空腔覆盖范围逐次增大,同一断面处掺气浓度随其逐渐增大。

②在前置掺气坎作用下,靠近掺气空腔的阶梯面泄流掺气充足,水平近壁面上掺气浓度分布形式均为沿凹角到凸角方向先减后增,垂直近壁面上掺气浓度分布形式为沿凹角到凸角方向先增后减,而在靠近反弧段阶梯面上,水平近壁面上掺气浓度变化趋势为沿凹角到凸角方向逐渐增大,垂直近壁面上掺气浓度变化趋势为沿凸角到凹角方向依次减小,且同一截面的掺气浓度随前置掺气坎角度增大而增大。

③随着前置掺气坎角度的增加,前置掺气坎对泄流纵向挑射作用增大,泄流掺气愈充分,水流之间碰撞加剧,进而加速了泄流能量的耗散,消力池尾坎处的流速逐次减小且消能率随之逐渐增大,当前置掺气坎角度较大时,前置掺气坎角度变化对流速和消能效果的影响较大,反之则较小。

综上所述,前置掺气坎角度增大,阶梯溢流坝阶梯面上沿程平均掺气浓度和典型阶梯水平垂直近壁面掺气浓度均逐渐增大,有利于防止阶梯面发生空化空蚀破坏;消力池底部流速随之减小,消能率随其增大,则有利于减小消力池尺寸和减轻下游冲刷。结合以上两点考虑,方案3优于方案1和2。

参 考 文 献:

- [1] 骈迎春, 张志昌. 台阶式溢洪道掺气坎水流空腔长度和通气量的试验研究[J]. 西北水力发电, 2006, 22(4): 41-45, 49. (PIAN Ying-chun, ZHANG Zhi-chang. Experimental research on the length of the air cavity behind and jet aeration capacity of flow over aerator on stepped spillways[J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2006, 22(4): 41-45, 49. (in Chinese))
- [2] PETERKA A J. The effect of entrained air on cavitation pitting[C] // Proc 5th IAHR Congress. Minneapolis USA, 1953: 507-518.
- [3] 胡耀华, 伍超, 卢红, 等. 宽尾墩后接阶梯溢流坝面水工设施的研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(5): 37-41. (HU Yao-hua, WU Chao, LU Hong, et al. A study of hydraulic structure of flaring gate piers locating at the upstream of stepped spillway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(5): 37-41. (in Chinese))
- [4] 李中枢, 潘艳华, 韩连超, 等. 宽尾墩联合消能工体型选择及水力特性的研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 82-88. (LI Zhong-shu, PAN Yan-hua, HAN Lian-chao, et al. Hydraulics of stilling basin with flaring gate piers[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 82-88. (in Chinese))
- [5] 后小霞, 杨具瑞, 甄建树. 宽尾墩体型对宽尾墩+阶梯溢流坝+消力池消能方式中阶梯掺气空腔长度及负压影响研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 203-209, 215. (HOU Xiao-xia, YANG Ju-rui, ZHEN Jian-shu. A study of impacts on aerated cavity length and negative pressure by Y-shape flaring gate pier combined with stepped spillway in energy dissipator[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 203-209, 215. (in Chinese))
- [6] 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 Yao-hua, 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))

- [7] 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 Jian-min, XU Wei-lin, 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. (in Chinese))
- [8] 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(3): 6-11. (CHEN Jian-gang, ZHANG Jian-min, XU Wei-lin. 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(3): 6-11. (in Chinese))
- [9] 吴守荣, 张建民, 许唯临, 等. 前置掺气坎式阶梯溢洪道体型布置优化试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(3): 37-42. (WU Shou-rong, ZHANG Jian-min, XU Wei-lin, et al. Experimental investigation on hydraulic characteristics of the flow in the pre-aerator stepped spillways[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(3): 37-42. (in Chinese))
- [10] 张陆陈, 骆少泽, 王新. 陡槽高速泄流掺气减蚀试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(增1): 329-332, 337. (ZHANG Lu-chen, LUO Shao-ze, WANG Xin. Experimental study of air entrainment to alleviate cavitations for chute with high-speed discharge[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Suppl1): 329-332, 337. (in Chinese))
- [11] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. J Comput Phys, 1981 (39): 201-225.
- [12] 张洛, 后小霞, 杨具瑞. 边宽尾墩体型对边墙区域水流水力特性的影响研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1): 85-92. (ZHANG Luo, HOU Xiao-xia, YANG Ju-rui. Study on impact of flaring gate pier shape on hydraulic characteristics of flow in sidewall region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(1): 85-92. (in Chinese))

Impacts of pre-aerator angels on energy dissipation of stepped spillway

ZHANG Liang¹, YANG Ju-rui¹, CHEN Yu-zhuang²

(1. Modern Agricultural Engineering College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The aerators are normally placed at the middle of the first step and the exit of the flaring gate pier, which can effectively reduce the probability of cavitation and scouring damage caused by high-velocity flow to the release structures of high dams. In this study, a water vapor two-phase model with RNG $k-\varepsilon$ modeling is used to simulate the aeration on the surface of the stepped spillway and the energy dissipation characteristics; three pre-aerator angles of 8° , 10° and 11.3° are simulated in the energy dissipater of the stepped spillway; VOF method is adopted to deal with the free water surface; and the ways of geometry reconstruction modeling for interpolation, PISO and the unsteady flow methods, which are the numerical simulation methods, are applied. The simulation results indicate that the trend of the aeration concentration is decreasing in general, and the trend stays unchanged at the end of a few steps indifferent angles of the pre-aerators; the step is near and behind an aerated cavity whose tendency of the aeration concentration decreases first and then increases along the concave angle to the lobes on the horizontal step near the wall, while its trend is inverse on the perpendicular step near the wall. In addition, the aeration concentration increases with the enlargement of the pre-aerator angles at the same section; the step is at the ogee section whose aeration concentration increases along the concave angles to the lobes on the horizontal step near the wall; the aeration concentration reduces along the lobes angle to the concave on the perpendicular step near the wall, and the aeration concentration increase with the augment of the pre-aerator angles at the same section. The rates of energy dissipation of the release structure increase with the enlargement of the pre-aerator angles.

Key words: pre-aerator angels; stepped spillway; engineering hydraulics; numerical simulation; aeration characteristics; dissipation characteristics