

前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算

李贵吉¹, 张建民²

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 四川 成都 610074;
2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:采用 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型和水气两相流 Mixture 模型对不同流量下前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯连接段水流进行了数值模拟,得到了连接段边墙、底板及水流内部掺气量分布规律。结果表明:突扩突跌掺气设施形成的掺气空腔长度和形态与试验结果吻合,测点处掺气量的计算值大于试验值,但计算值与试验值随流量增大而增大的变化规律基本一致;在单宽流量大于 $28\text{ m}^2/\text{s}$ 时,水流通过突扩突跌掺气设施后均能形成稳定的侧空腔和底空腔;在流经阶梯段过程中,掺气作用逐渐从四周向内部发展,最后形成均匀的掺气水流;连接段突扩突跌掺气设施和阶梯的联合作用能够有效地提高水流在底板和边墙处的掺气量;在单宽流量为 $54\text{ m}^2/\text{s}$ 时,连接段末端掺气均匀水流的掺气量高达 20%。通过设置前置突扩突跌掺气设施,能有效提高大单宽流量阶梯水流掺气量,降低泄洪建筑物产生空蚀破坏的风险。

关键词:突扩突跌掺气设施;曲线阶梯水流;掺气量;Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型;Mixture 模型

中图分类号:TV653⁺.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)04-0046-07

Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator//LI Guiji¹, ZHANG Jianming² (1. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610074, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chendu 610065, China)

Abstract: Using the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and the water-gas two-phase flow mixing model, the flow in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator under different flow rates was numerically simulated, and the distribution rule of aeration concentration in the side wall, bottom plate and flow of the curve-floor stepped tunnel was obtained. The results show that the cavity created by the pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator is consistent with the test results. The calculated value of the aeration concentration at the measurement point is greater than the test value, but however, the calculated and measured values both increase with the discharge. When the discharge per unit width is greater than $28\text{ m}^2/\text{s}$, stable side and bottom cavities through sudden lateral enlargement and bottom drop aerator can be formed. During the flow passing through the step, the aeration effect gradually develops from the surroundings to the inside, and finally a uniform aeration water flow is formed. The joint effect of the sudden lateral enlargement and bottom drop aerator and stairs in the connection section can effectively increase the aeration concentration of the water flow at the bottom and side walls. When the discharge per unit width is $54\text{ m}^2/\text{s}$, the aeration concentration of the aeration uniform water flow at the end of the connection section can reach 20%. The provision of pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator can effectively increase the aeration concentration of the ladder energy dissipator under large discharge per unit width, and can reduce the risk of cavitation damage in flood discharge structures.

Key words: sudden lateral enlargement and bottom drop aerator; flow in curve-floor stepped tunnel; aeration concentration; realizable $k-\varepsilon$ turbulence model; mixture model

阶梯溢流坝早在 3500 年前已有了应用,在 19 世纪已广泛流行于欧洲、北美、澳洲等国^[1]。CHAMANI 等^[2-5]对阶梯溢流坝的自由表面掺气进行了试验研究。程香菊等^[6]引入水气两相流混合模型,采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对 CHANSON^[3]的模型进行了数值计算。高速水流容易对溢洪道产生空蚀破坏,掺气减蚀是减少空蚀破坏的一个有效途径,

所以许多学者对掺气减蚀机理和运用进行了大量的研究^[7-9]。张法星等^[10]认为固壁周围出现的空化泡与掺入水中的空气泡的耦合作用,增加水中空泡溃灭所用时间,气泡作用的增强影响了空化原有形态,能够更为合理地解释掺气减蚀的原因。彭勇等^[11]运用动量矩方程推导出阶梯溢洪道形成均匀流时的掺气水深和消能率计算公式,认为前置掺气坎式阶梯溢洪

道适宜于大单宽流量溢洪道。Zhang 等^[12]采用水气两相流 Mixture 湍流模型对隧洞突扩突跌掺气结构侧壁附近的空气量进行了模拟,发现 Mixture 湍流模型优于 VOF 湍流模型。有学者还针对阶梯溢流坝,在第一个阶梯设置掺气挑坎或在多个阶梯上设置掺气设施,为下游阶梯提供预掺气水流,减免大单宽流量下阶梯消能工因流动掺气不足而发生空蚀破坏。

放空洞龙抬头连接段一般采用渥奇曲线连接,李贵吉等^[13-15]提出在放空洞连接段采用阶梯消能措施,通过模型试验和数值计算得到了连接段的流场特性和压力特性。曲线阶梯连接段的特点是:进口流速大,同时有压出口设置了突扩突跌掺气设施,掺气设施能与曲线阶梯联合掺气作用,从而提高水流掺气量。本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型和水气两相流 Mixture 模型,对洞内阶梯连接段的掺气特性进行了数值模拟,得到了阶梯底板和边墙掺气量分布规律,对于了解前置突扩突跌掺气设施和阶梯联合作用的掺气特性有一定的参考意义。

1 数学计算模型与方法

1.1 Mixture 模型

水气两相流 Mixture 模型是一种简化的双流体模型,它用于模拟各项具有不同速度的多相流动。通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体。它考虑了界面传递特性以及两相间的扩散作用和脉动作用;使用了滑移速度的概念,允许相以不同的速度运行。对于离散相混合物体积率超过 10% 的气泡、液滴和粒子负载流动,可采用混合模型。它用来求解混合相的动量、连续性和能量方程,以及第二相的体积分率、相间滑移速度和漂移速度^[14]。对于阶梯掺气水流的模拟,Mixture 模型优于 VOF 模型^[16]。

1.2 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型

Shih 等^[17]提出的 Relizable $k-\varepsilon$ 模型,即带旋流修正的 $k-\varepsilon$ 模型,是对标准 $k-\varepsilon$ 模型的改进。其紊动能和耗散率控制方程的 k 和 ε 方程见文献[14]方程(6)~(8)。对于阶梯消能工的计算,Realizable $k-\varepsilon$ 模型优于标准 $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[18]。

1.3 离散方法及边界条件

本文采用非结构网格与控制体积相结合来离散计算区域,压力采用体积力格式、动量和紊动能等方程中的对流扩散项采用二阶迎风格式。采用 PISO 算法来解决离散方程中速度与压力的耦合问题,可减少计算高度扭曲网格所遇到的收敛性困难。

图 1 为计算区域网格与计算边界。入口边界采用速度入口边界条件;出口采用压力出口边界;壁面

采用无滑移边界条件,对黏性底层采用标准壁函数处理。阶梯段网格采用非结构化网格,阶梯以上网格为结构化网格,对水面线附近进行了加密。

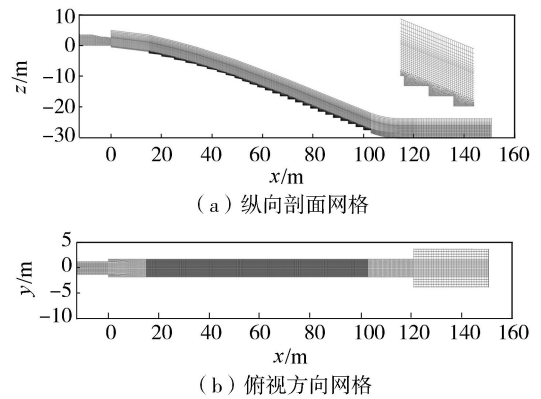


图 1 计算区域及网格

2 物理模型

物理模型采用某水电站放空洞龙抬头连接段的体型^[13],模型比尺 1 : 30。突扩突跌掺气设施设置如下:中闸室出口为 0.5 m 跌坎,宽度由 2.5 m 突扩到 3.5 m。闸室后接 1 : 10 的斜坡和包括 26 个不同长度和坡度阶梯的连接段。阶梯后接一个半径为 40 m 的反弧,反弧后再延长 6 m 的等宽水平段后突扩与下平段相接。数值计算采用原型尺寸,计算流量分别为 100 m³/s、150 m³/s、170 m³/s 和 190 m³/s,对应单宽流量为 28.57 m²/s、42.86 m²/s、48.57 m²/s 和 54.29 m²/s。

3 计算结果与分析

3.1 突扩突跌掺气空腔分析

为了掌握数值计算的吻合性,对突扩突跌掺气设施形成的掺气空腔进行对比分析。选取流量为 100 m³/s 和 190 m³/s 工况计算结果对斜坡段掺气底空腔和掺气侧空腔进行分析。图 2 为斜坡段纵剖面图,由图可知斜坡段进口的跌坎处形成了明显的底空腔。在流量为 100 m³/s 时,底空腔长约 5.0 m;在流量为 190 m³/s 时,底空腔长度已经超过斜坡,到达第 1 个阶梯末端。图 3 是斜坡段水平剖面图,由图可知,由于进入斜坡段时形成了稳定的侧空腔,侧空腔在流量为 100 m³/s 时长约 5.0 m,流量增大到 190 m³/s 时空腔长度增大到 8.0 m。相比底空腔,侧空腔随流量变幅较小,侧空腔较稳定。试验中对斜坡段掺气空腔长度进行了测量,结果与计算值相符,斜坡段只有在小流量情况下有少量回水。由此可见,通过设置突扩突跌掺气设施,使高速水流从有压进入无压后形成一个四个面与空气接触的水舌,能够为水流进入阶梯段时提供良好的掺气源。

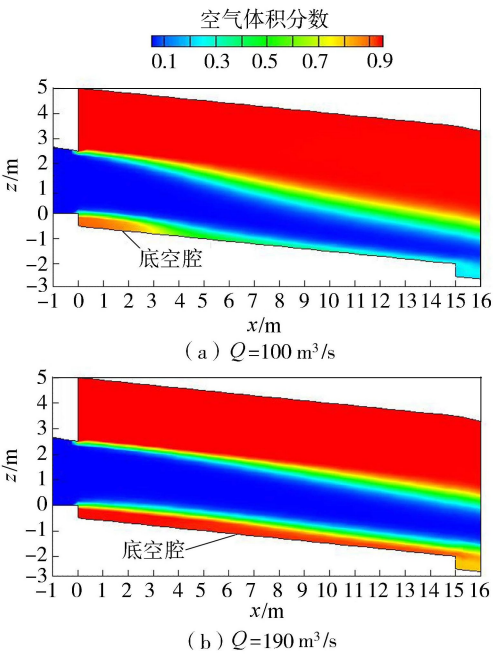


图2 不同流量时的掺气底空腔

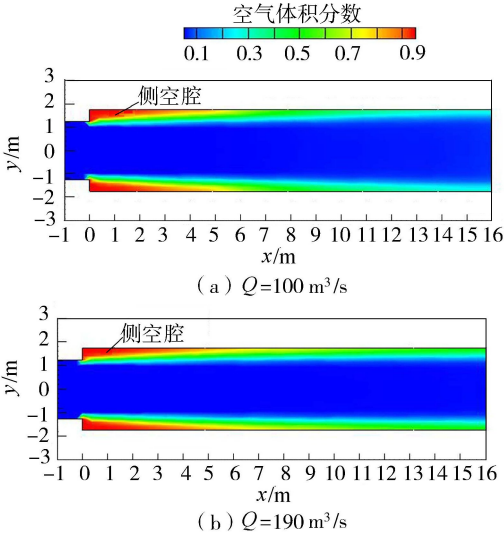


图3 不同流量时的掺气侧空腔

3.2 计算与试验掺气量比较

采用电阻式掺气量传感器对连接段的掺气量进行了测试,在10、18、和26号阶梯的底部和边墙布置一个测点,其中底板测点位于对应阶梯底板的中心位置,边墙测点离阶梯凸角垂直上方1 m处。表1为底板和边墙水流掺气量 C 的试验值与计算值比较。

由表1可知,试验掺气量总体上小于计算值,但

表1 不同流量时底板和边墙掺气量

位置	试验值				计算值			
	$Q=100\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=150\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=170\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=190\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=100\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=150\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=170\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=190\text{ m}^3/\text{s}$
10号阶梯底板	5.5	9.0	11.5	16.1	9.72	27.01	34.33	43.15
18号阶梯底板	4.6	8.1	9.9	14.1	11.58	21.05	19.71	21.33
26号阶梯底板	3.8	6.8	9.6	14.3	11.74	18.34	19.50	21.76
10号阶梯边墙	6.2	8.1	9.2	10.3	17.50	24.25	29.93	48.98
18号阶梯边墙	7.4	8.5	10.5	11.1	15.45	20.80	22.55	25.82
26号阶梯边墙	12.0	13.4	14.7	16.3	13.17	17.73	19.20	20.37

随着流量的增大,无论是在底板或者边墙处,试验与计算得到的掺气量均呈增大趋势。底板处掺气量沿程有逐渐减小趋势,且当流量增大至 $170\text{ m}^3/\text{s}$ 时,掺气量在18号阶梯时已经趋于稳定。边墙处的试验掺气量呈沿程逐渐增大趋势,而计算值则沿程有所减小,规律略有不同,但在26号阶梯处试验值与计算值非常接近。

根据掺气减蚀模型试验规程^[19],模型掺气设施处水流速度宜大于 6 m/s 。模型掺气设施处水流流速不大于 6 m/s 时,应考虑比尺影响。谢省宗等^[20]提出由于气泡上浮速度不相似,引起掺气量巨大的缩尺影响,辜晋德等^[21]通过试验得到不同比尺模型下挑流水垫塘掺气量存在差异。根据文献[13],在试验工况下连接段出口原型流速为 $20.56\sim 28.40\text{ m/s}$,对应的模型流速为 $3.75\sim 5.18\text{ m/s}$,均小于 6 m/s 。分析可得出以下结论:①由于比尺效应,模型试验测量掺气量小于原型尺寸的计算值,但试验和计算数据均随流量增大而增大;②在阶梯底板处,由于原型和模型水流流速值接近,掺气量沿程逐渐降低的规律一致,并趋于稳定;③在边墙处,由于比尺效应,沿程掺气量规律不一致,试验掺气量沿程有所增加,而计算掺气量沿程逐渐降低。

3.3 边墙掺气量分布

图4为计算区域在边墙处的水流掺气量分布。由图4可知,两个工况下阶梯段的边墙掺气量都较

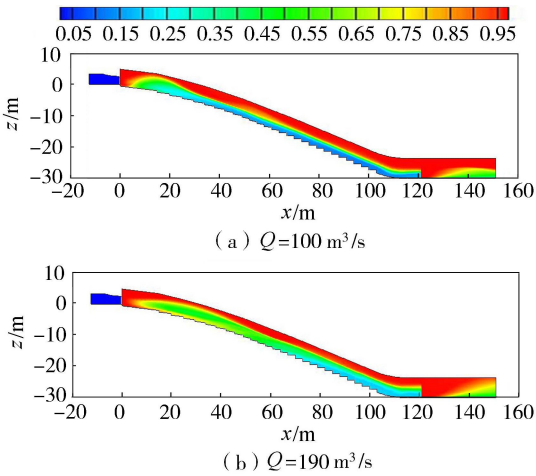
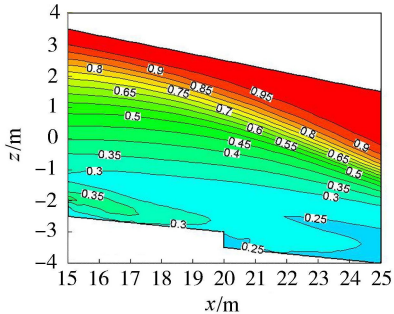


图4 不同流量边墙掺气量分布

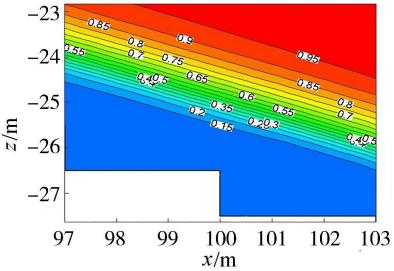
大,其中流量 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,在斜面阶梯段 1~15 号阶梯附近掺气量为 $16\% \sim 26\%$,水平阶梯段 16~26 号阶梯附近掺气量为 $12\% \sim 16\%$;流量 $190\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,在斜面阶梯段 1~15 号阶梯附近掺气量为 $40\% \sim 70\%$,水平阶梯段 16~26 号阶梯附近掺气量约 $20\% \sim 40\%$ 。

图 5 为不同阶梯段边墙的掺气量等值线。由图 5 可知,在流量为 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 时,1、2 号阶梯边墙处,计算得到的掺气量已经超过 25% ,到达最后两个阶梯边墙处水流掺气已经比较均匀,在约 0.3 倍水深以下水流掺气量达到了 15% ,且比较均匀,0.5

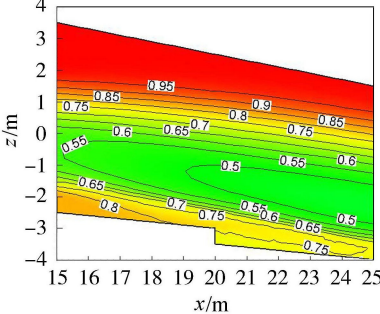
倍水深以上掺气量沿水深方向逐渐增大至 100% 。在流量为 $190\text{ m}^3/\text{s}$ 时,1、2 号阶梯边墙处,由于底空腔和侧空腔长度增大,边墙处掺气量已经超过 50% ,到达最后两个阶梯边墙处水流掺气已经很均匀,在约 0.6 倍水深以下水流平均掺气量达到了 25% ,0.6 倍水深以上掺气量沿水深方向逐渐增大至 100% 。图 6 为不同流量时阶梯连接段试验照片,可见随着流量的增大,水流掺气更明显,形成均匀乳白色掺气水流,与计算结果吻合。



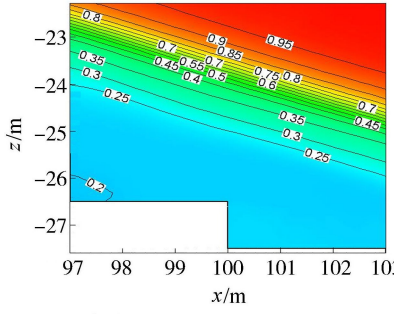
(a) $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$, 1、2号阶梯



(b) $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$, 25、26号阶梯



(c) $Q=190\text{ m}^3/\text{s}$, 1、2号阶梯



(d) $Q=190\text{ m}^3/\text{s}$, 25、26号阶梯

图 5 不同流量时不同位置边墙掺气量等值线



(a) $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$

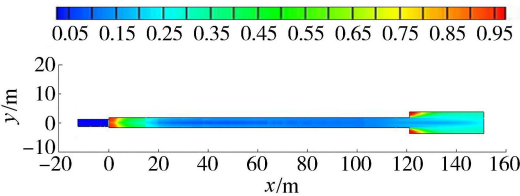


(b) $Q=190\text{ m}^3/\text{s}$

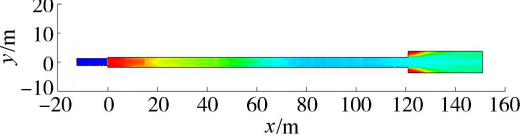
图 6 不同流量时阶梯连接段试验照片

3.4 阶梯底板掺气量分布

对于大单宽流量阶梯消能工,底板掺气量对于减免空蚀作用至关重要,文献[22]中提到当过流阶梯近壁面掺气量范围为 $5\% \sim 8\%$ 时,阶梯面发生空蚀破坏的可能性将大大降低,下面对连接段壁面沿程掺气量进行分析,董志勇等[23]提出减免空蚀的最低掺气量 $C_{\min}$ 与水流速度 u 呈幂函数形式,即 $C_{\min} = 0.026v^{1.41}$ 。根据此经验公式,数值计算的两个工况的最低掺气量分别是 2.9% 和 7.3% 。图 7 为阶梯连接段底板掺气量分布。由图 7 可知,在流量为 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下,阶梯段底板掺气量分布较均



(a) $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$



(b) $Q=190\text{ m}^3/\text{s}$

图 7 底板掺气量分布

匀,掺气量 9% ~ 15%;在流量为 190 m³/s 工况下,阶梯段沿程掺气量逐渐降低并趋于稳定,在流程 15 ~ 60 m,掺气量在 30% ~ 80% 范围变化,在流程 60 ~ 120 m,掺气量在 24% ~ 30% 范围变化。由此可见,数值计算得到的掺气量均大于经验公式计算得到的最低掺气量。

3.5 阶梯横断面掺气量分布

为了分析不同阶梯段水流掺气量分布,选取 $x=20\text{ m}$ 、 61 m 、 103 m 共 3 个截面绘制阶梯横截面上的掺气量等值线如图 8 所示。由图 8 可知,在 $x=20\text{ m}$ 断面处,内部水流还是清水,而四周则是掺气量较大的掺气水流,掺气层厚度约 0.3 ~ 0.5 m;在 $x=61\text{ m}$ 断面,由于阶梯的大粗糙度作用,水流通过剪切破碎,将空气从水流表面不断卷入内部,但尚未形成完全均匀的掺气水流。到达 $x=103\text{ m}$ 断面即最后一个阶梯处时,0.3 ~ 0.6 倍水深以下水流的掺气量已经基本相同,形成均匀掺气水流。对比可知,由于

进口处突扩的作用,水流从 $x=20\sim 61\text{ m}$ 过程中,水面线水翅从边墙到中部过渡,最后趋于稳定。

图 9 为阶梯在凸角离底板 1.0 m 高处的横向掺气量分布。由图 9 可知,在流量为 100 m³/s 时,由于侧空腔和底空腔都较短,在离底部 1.0 m 处水流在横向上的掺气量分布比较均匀,在 10 号阶梯后,掺气量在横向上基本为一条直线;在流量为 190 m³/s 时,由于侧空腔和底空腔增大,近边墙的掺气量大大高于内部的掺气量,中部掺气量则有逐渐增大趋势,最后与边墙掺气量接近。

根据断面等值线图可知,由于在进口形成了底空腔和侧空腔,连接段高速水流的掺气作用从水舌出口就已经发生;进入阶梯段,由于底板的大粗糙度,使得水流的紊动剧烈,水流在四周发生掺气作用并逐渐向内部发展,最后形成比较均匀的掺气水流。阶梯段水流的掺气量并不是随着流量的增大而减小,相反是随着流量的增大而增大。

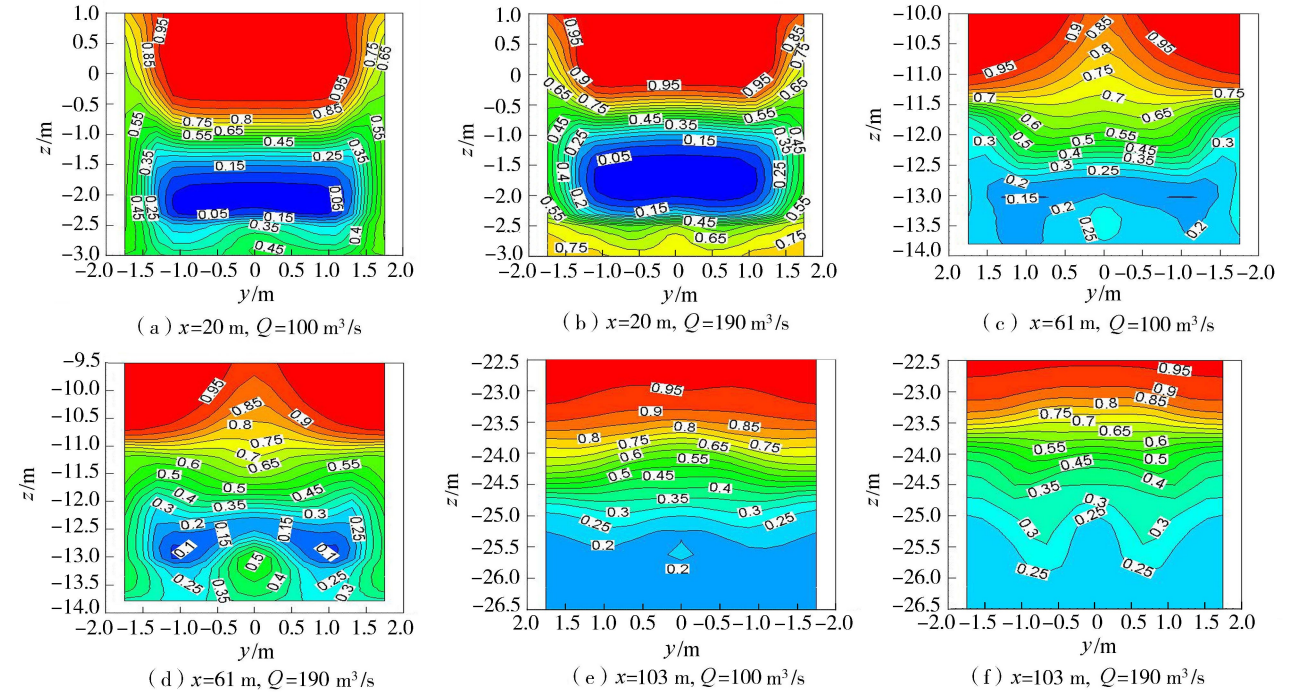


图 8 横断面掺气量等值线

—●— 0号阶梯 —■— 3号阶梯 —▲— 6号阶梯 —●— 10号阶梯 —◇— 14号阶梯 —□— 18号阶梯 —△— 22号阶梯 —○— 26号阶梯

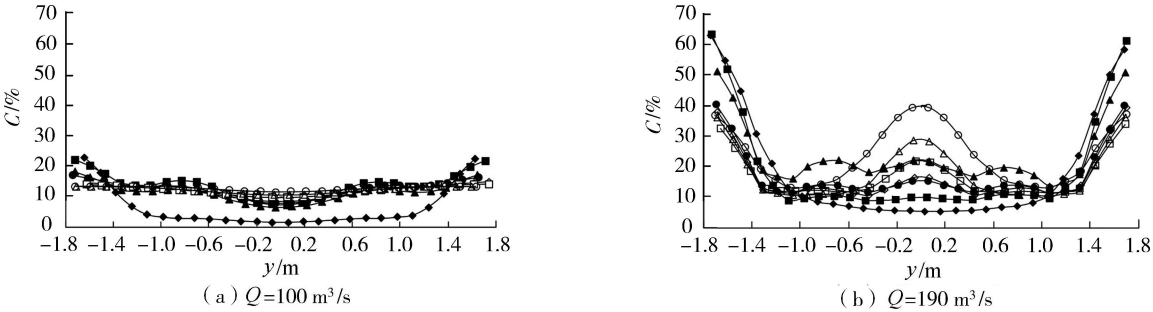


图 9 横向掺气量分布

图 10 为掺气水流在水深方向掺气量分布,选择了在斜坡末端、26 号阶梯处两个不同横向桩号进行分析。由图 8 可知,当流量为 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 时,由于底空腔和侧空腔相对较短,水流在 0.3 倍水深以下的掺气量较上部的掺气量低,且边墙处的掺气量沿程逐渐减小,最终与内部水流量趋于一致,掺气量约 13%;当流量为 $190\text{ m}^3/\text{s}$ 时,内部水流在 0.3 ~ 0.6 倍水深范围内的掺气量从 0 逐渐增大值 22% 左右,而边墙处水流的掺气量则沿程逐渐降低,但边墙处掺气水流的掺气量均在 30% 以上,略大于内部水流,0.6 倍水深以上的水流掺气量趋势一致。

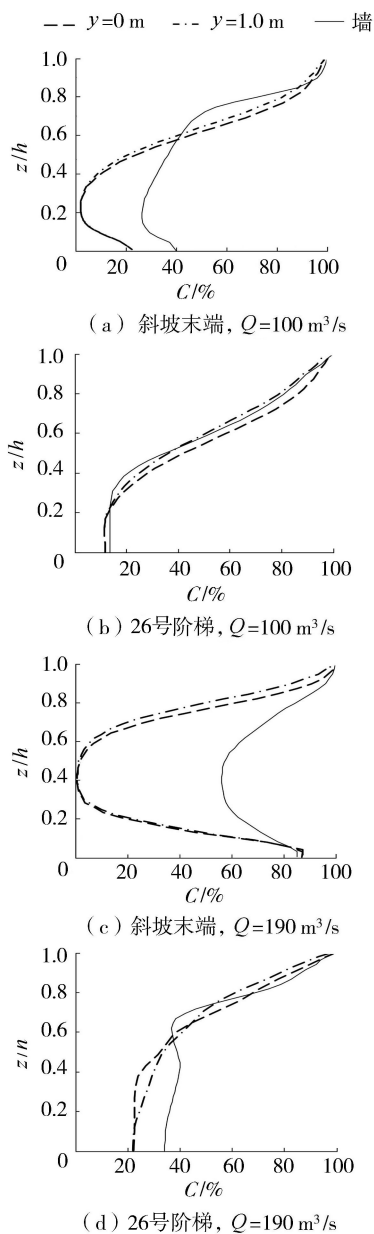


图 10 水深方向掺气量分布

4 结 论

a. 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型和水气两相流 Mixture 模型对不同流量下前置突扩突跌掺气设施

曲线阶梯连接段水流进行了数值计算,得到了连接段边墙、底板以及内部的掺气量分布规律。经对比,突扩突跌掺气设施产生的空腔与试验结果吻合,测点处掺气量的计算值大于试验值,计算值与试验值随着流量增大而增大的变化规律基本一致,比尺效应是导致计算值与试验值差异的一个原因。

b. 计算结果表明,在单宽流量大于 $28\text{ m}^2/\text{s}$ 时,连接段水舌自有压段出流后,通过突扩和突跌掺气设施均能形成稳定的侧空腔和底空腔;水流在流经阶梯段过程中,掺气作用逐渐从四周向内部发展,最后形成均匀的掺气水流;连接段突扩突跌掺气设施和阶梯的联合作用能够有效提高水流在底板和边墙处的掺气量;在单宽流量为 $54\text{ m}^2/\text{s}$ 时,连接段末端掺气均匀水流的掺气量高达 20%。通过设置前置突扩突跌掺气设施,能有效提高大单宽流量下阶梯消能工水流掺气量,降低泄洪建筑物产生空蚀破坏的风险。

参考文献:

- [1] CHANSON H. Forum article: hydraulics of stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(9): 636-637.
- [2] CHAMANI M R, RAJARATNAM N. Characteristics of skimming flow over stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(4): 361-368.
- [3] CHANSON H. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29: 145-156.
- [4] 张志昌,曾东洋,刘亚菲. 台阶式溢洪道掺气特性的试验研究[J]. 应用力学学报, 2003, 20(4): 97-100. (ZHANG Zhichang, ZENG Dongyang, LIU Yafei. Experimental investigation on the characteristic of air entrainment on the stepped spillways [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(4): 97-100. (in Chinese))
- [5] 邱毅,吴欧侯,杨具瑞,等. 阶梯溢流坝面坡度对一体化消能工水力特性的影响[J]. 水利水电科技进步, 2020, 40(3): 28-35. (QIU Yi, WU Ouyu, YANG Jurui, et al. Impact of stepped overflow dam surface slope on hydraulic characteristics of an integrated energy dissipator[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 28-35. (in Chinese))
- [6] 程香菊,罗麟,赵文谦,等. 阶梯溢流坝自由表面掺气特性数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004, 19(2): 152-156. (CHENG Xiangju, LUO Lin, ZHAO Wenqian, et al. Numerical simulation of characteristics of free-surface aeration on stepped spillway [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(2): 152-156. (in Chinese))

- Chinese))
- [7] 杨永森,杨永全. 掺气减蚀设施体型优化研究[J]. 水科学进展,2000,11(2):144-147. (YANG Yongsen, YANG Yongquan. Optimum shape of the prototype spillway chute aerator[J]. Advances in Water Science, 2000,11(2): 144-147. (in Chinese))
- [8] 刘超,杨永全,邓军,等. 泄洪洞反弧段下游侧墙掺气减蚀试验研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2006,21(4):465-472. (LIU Chao, YANG Yongquan, DENG Jun, et al. Experimental study on air entrainment to alleviate cavitations for downstream sidewalls of ogee-section in spillway tunnel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2006,21(4):465-472. (in Chinese))
- [9] 高昂,吴时强,王芳芳,等. 掺气减蚀技术及掺气设施研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 86-94. (GAO Ang, WU Shiqiang, WANG Fangfang, et al. Research progress of aeration cavitation reduction technology and aeration devices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 86-94. (in Chinese))
- [10] 张法星,徐建强,徐建军,等. 掺气减蚀机理的研究进展及讨论[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 7-10. (ZHANG Faxing, XU Jianqiang, XU Jianjun, et al. Overview and discussions on the advances in the mechanism studies of air entrainment against cavitation erosion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2):7-10. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] ZHANG Jianmin, CHEN Jiangang, XU Weilin, et al. Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics,2011,23(1):71-80.
- [13] 李贵吉,张建民,许唯临,等. 高水头水电站“三洞合一”布置的体型优化试验[J]. 水利水电科技进展, 2009,29(5): 54-60. (LI Guiji, ZHANG Jianmin, XU Weilin, et al. Experimental study on shape optimization of three-in-one diversion tunnel in high-head hydropower station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009, 29(5):54-60. (in Chinese))
- [14] 李贵吉,张建民. 洞内曲线阶梯连接段水流流场特性数值模拟[J]. 水电能源科学,2014, 32(6):81-85. (LI Guiji, ZHANG Jianmin. Numerical simulation of flow field characteristics of flow in curve-floor stepped tunnel [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(6):81-85. (in Chinese))
- [15] 李贵吉,张建民. 洞内曲线阶梯连接段水流压强特性数值计算[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2014,29(3): 300-308. (LI Guiji, ZHANG Jianmin. Numerical simulation on the pressure characteristics of the flow over curve-floor stepped tunnel [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 2014, 29(3): 300-308. (in Chinese))
- [16] 程香菊,陈永灿,罗麟. 阶梯溢流坝水气两相流数值模拟[J]. 中国科学(E辑), 2006,36(11):1355-1364. (CHENG Xiangju, CHEN Yongcan, LUO Ling. Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways [J]. Science in China (Series E), 2006,36(11):1355-1364. (in Chinese))
- [17] SHIH T, LIOU W, SHABBAR A, et al. A new eddy-viscosity model for high reynolds number turbulent flows: model development and validation[J]. Computers Fluids, 1995, 24(3):227-238.
- [18] 胡晓清,钱忠东,槐文信,等. 阶梯溢流坝水流特性数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(4):20-23. (HU Xiaqing, QIAN Zhongdong, HUAI Wenxin, et al. Numerical simulation of turbulent flow over stepped spillways[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008,41(4):20-23. (in Chinese))
- [19] 电力行业水电施工标准化技术委员会. 水电水利工程掺气减蚀模型试验规程:DL/T 5245—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [20] 谢省宗,陈文学. 掺气水流掺气量缩尺影响的估计[J]. 水利学报, 2005,36(12):1420-1425. (XIE Shengzhong, CHEN Wenxue. Estimation of scale effect of air entrainment in model test of aerated flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1420-1425. (in Chinese))
- [21] 辜晋德,赵建钧,安建峰. 挑流水垫塘掺气比尺效应试验[J]. 水利水电科技进展,2019,39(2):61-65. (GU Jinde, ZHAO Jianjun, AN Jianfeng. Experimental study on scale effect of a aerated jet in a plunge pool [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(2):61-65. (in Chinese))
- [22] PETERKA A J. The effect of entrained air on cavitation pitting [C]//Minnesota International Hydraulic Convention. Processing of 5th IAHR Congress. Minneapolis: ASCE,1953:507-518.
- [23] 董志勇,居文杰,吕阳泉,等. 减免空蚀掺气量的试验研究[J]. 水力发电学报,2006,25(3):106-115. (DONG Zhiyong, JU Wenjie, LU Yangquan, et al. Experimental study on air concentration to prevent cavitation erosion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006,25(3): 106-115. (in Chinese))

(收稿日期:2020-07-11 编辑:郑孝宇)