

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221096

基于 VOF 模型溢洪道掺气槽位置数值模拟

周 凯^{1,2}, 牧振伟^{1,2}, 张红红^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为解决高水头溢洪道空蚀破坏问题, 设计了3种方案, 分别在桩号0+130.73、0+161.78、0+186.39处加设掺气槽, 其对应的弗劳德数 Fr 分别为6.65、7.91、8.53, 并采用 RNG κ - ϵ 紊流模型和物理模型试验的方法, 分析易发生空蚀破坏断面的掺气浓度及沿程水流空化数指标。结果表明, 在桩号0+186.39处加设掺气槽, 在易发生空蚀破坏截面临底掺气浓度大于15%, 沿程水流空化数均大于0.3, 效果优于其他2种方案, 可有效解决溢洪道空蚀破坏问题。

关键词: 溢洪道; 掺气槽位置; VOF 模型; 弗劳德数 Fr ; 掺气浓度分布

中图分类号: TV131.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0108-04

1 引言

高水头泄水建筑物在较大流速部位易产生空蚀破坏, 造成建筑物表层脱落, 甚至形成河道内部的深坑。对此, 主要采用在溢洪道上设置掺气槽的方法, 来避免溢洪道发生空蚀破坏^[1]。由于设置掺气槽, 溢洪道内部流场紊动及水气混掺剧烈, 现有量测方法很难实现对溢洪道内部水流特性的监测, 且部分试验数据量测易产生误差, 而数值模拟方法对溢洪道内部水力特性具有良好的观测能力。如赵莹等^[2]采用 Realizable κ - ϵ 紊流模型, 分别对 U、V、矩形掺气槽进行数值模拟分析, 得到加设掺气坎可有效避免高速水流对过流表面的破坏; 高学平等^[3]采用 κ - ϵ 混合湍流模型, 对溢洪道沿程断面掺气浓度、水面线及掺气空腔进行研究, 证明了双流体欧拉法在溢洪道掺气水流中的可行性。目前, 关于掺气槽位置的模拟研究较少, 尚缺少掺气槽位置对工程掺气影响的相关理论研究。鉴此, 本文采用 RNG κ - ϵ 模型与物理模型试验相结合的方法, 对溢洪道泄槽段进行加设掺气槽方案优化比选, 探究了掺气槽位置对实际工程的影响, 旨在为类似工程设计提供借鉴。

2 模型试验与计算体型

2.1 溢洪道概况

新疆某溢洪道全长 316.4 m, 引渠段为渐缩弧形, 底板高程 690 m; WES 堰堰高 3.5 m, 宽 8 m; 闸室段长 25 m; 后接泄槽段, 长 185 m, 采用缓坡接陡坡的连接方式, 缓坡段纵坡坡比 1:20.0, 陡坡段纵坡坡比 1:2.5, 缓坡与陡坡间采用抛物线的连接方式; 后接挑流鼻坎段, 长 22 m。设计流量 278.00 m³/s, 校核流量 422.00 m³/s, 在设计 and 校核流量下泄槽段流速均高达 30 m/s 以上。其体型见图 1。

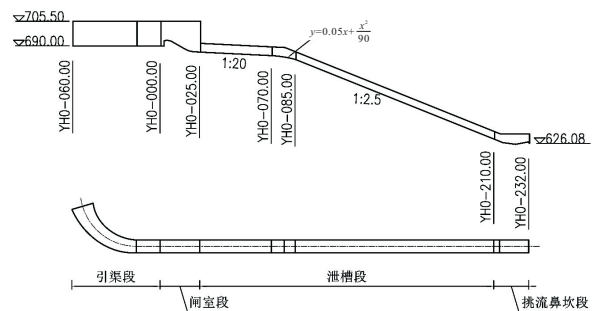


图 1 溢洪道结构布置示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of spillway structure layout

2.2 模型比尺

溢洪道掺气减蚀物理模型按重力相似准则设计^[4], 满足几何相似、水流运动相似与动力相似, 确定模型比尺 $\lambda_l = 30$, 其水力要素见表 1。

收稿日期: 2022-05-23, 修回日期: 2022-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769037); 新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目(XJEDU2017T004)

作者简介: 周凯(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 2283357810@qq.com

通讯作者: 牧振伟(1973-), 男, 教授、博导, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: xjmzw@163.com

表 1 重力相似条件下的各水力参数

Tab.1 Hydraulic parameters under similar gravity conditions

水力参数	换算关系	相似比尺	水力参数	换算关系	相似比尺
长度 l	λ_l	30	流量 Q	$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2}$	4 930
压强 p	$\lambda_{p/\gamma} = \lambda_l$	30	时间 t	$\lambda_t = \lambda_l^{1/2}$	5.477 23
流速 v	$\lambda_v = \lambda_l^{1/2}$	5.477 23	糙率 n	$\lambda_n = \lambda_l^{1/6}$	1.762 73

2.3 试验方案

由于泄槽段流速过大,且易发生空蚀,故设计了 3 种方案,分别在桩号 0+130.73、0+161.78、0+186.39 处加设掺气槽进行对比试验,试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Tab.2 Test plan

方案	工况	试验/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	掺气槽位置/m	Fr
原方案	1	设计流量	278.00		
	2	校核流量	422.00		
1	1	设计流量	278.00	0+130.73	6.65
	2	校核流量	422.00	0+130.73	6.65
2	3	设计流量	278.00	0+161.78	7.91
	4	校核流量	422.00	0+161.78	7.91
3	5	设计流量	278.00	0+186.39	8.53
	6	校核流量	422.00	0+186.39	8.53

掺气槽坎高应保证其坎后水流与底板夹角尽可能小,且掺气槽坎后应有稳定的掺气空腔^[5]。本文选取掺气挑坎,坎长 3 m,坎高 0.2 m,挑坎角度为 3.81°,掺气槽尺寸为 1 m×0.7 m,通气孔尺寸为 0.8 m×1 m,陡峭部分长 1.88 m,与泄槽段底部相连接。掺气槽细部构造见图 2。

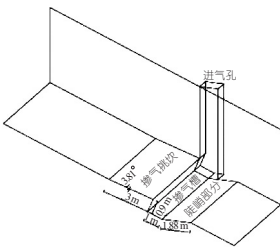


图 2 掺气槽细部构造图

Fig. 2 Aerator detail structure drawing

3 数值模拟

3.1 控制方程

VOF 适用于分层流和需要追踪自由表面的问题,在不同流体域中共用一套方程,计算各流体域占整个计算域体积的百分比,在水气两相流中,规定水体积分数为 α_n ,当 $\alpha_n = 0$ 时,表示单元内没有水相;当 $\alpha_n = 1$ 时,表示单元内完全充满水相;当 α_n 为 0~1 时,则表示单元内存在水相;对于单元内水气两相流,水和气的体积之和为 1。计算选用 RNG κ - ϵ 湍流模型,其考虑泄槽段高速水流中的旋流流动情况,能更好地表示强剪切力

的流动,其连续性方程、动量方程、湍动能 κ 方程和耗散率 ϵ 方程中连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

κ 方程为:

$$\frac{\partial (\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\kappa (\mu + \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \epsilon \tag{3}$$

ϵ 方程为:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1}^* \frac{\epsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \tag{4}$$

$$\text{其中 } C_{\epsilon 1}^* = C_{\epsilon 1} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \tag{5}$$

式中, ρ 为密度,kg/m³; p 为压强,pa; t 时间,s; u_i 、 u_j 均为时均速度分量,m/s; x_i 、 x_j 均为坐标分量; μ 为流体粘滞系数,N·s/m²; μ_t 为紊动粘滞系数,N·s/m²; G_κ 为湍动能产生项; σ_κ 、 σ_ϵ 分别为紊动能 κ 及紊动耗散率 ϵ 对应的普朗克数,均取 1.39; C_{μ} 、 $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 η_0 、 β 均为控制方程常数变量,值分别为 0.085、1.420、1.680、4.380、0.012。

3.2 网格划分

模拟区域划分为弧线型引渠段、WES 堰、泄槽段及挑流鼻坎段,为获取较高网格质量,对溢洪道采用分块划分网格,最后组合的方式,网格划分采用六面体结构网格。为了获取较为精确的数据,对掺气槽部位及水气交界面处的网格进行局部加密,最终确定网格总量在 72×10^4 个左右。选取方案 3 泄槽段及挑流鼻坎段进行加设掺气槽试验,泄槽段网格及掺气槽细部网格划分见图 3。

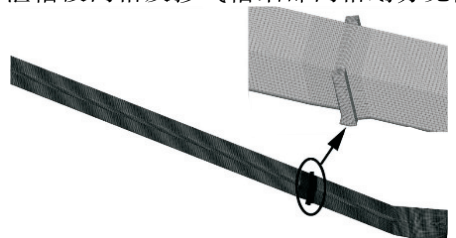


图 3 泄槽段及挑流鼻坎段计算网格划分

Fig. 3 The calculation grid division of the drainage trough and the suction nose section

3.3 边界条件

溢洪道进口分为空气进口和水流进口,其中空气进口采用标准大气压进口,水流进口采用速度进口,不同工况模型进口流速分别为 $v_{设计} = 1.98 \text{ m/s}$; $v_{校核} = 2.57 \text{ m/s}$,通气孔的进口为标准大气压进口,溢洪道出口为标准大气压出口,两侧边墙及底板设为无滑移边界,采用 SIMPLEC 算法对压力速度耦合迭代求解,考虑到最小网格尺寸及流速的大小,选取计算时间步长为 0.001 s 。当迭代残差曲线低于设置条件且进出口流量误差小于 5% 时,可判定计算完成。

4 结果与分析

4.1 结果验证

4.1.1 泄槽段水面线及流速分布

为确保数值模拟结果的可靠性,利用模型试验对方案3设计、校核流量工况下数值模拟计算结果进行验证。结果见图4。由图4可知:①设计流量下,溢洪道泄槽段流速计算值与试验值最大误差在桩号 $0+140$ 处,为 6% ;②校核流量下,溢洪道泄槽段流速计算值与试验值最大误差在桩号 $0+93$ 处,为 6.6% ,计算结果与试验值误差均小于 10.0% ,说明该方法在消力池内部水流特性模拟中具有较高的可靠性。

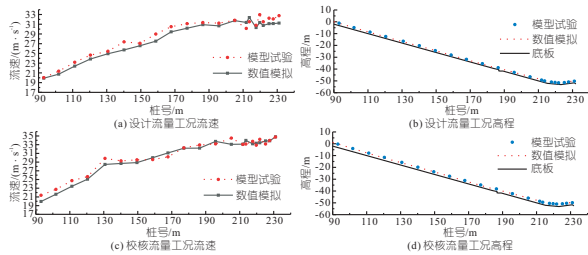


图4 数值模拟与模型试验对比

Fig. 4 Comparison between numerical simulation and model test

4.1.2 掺气槽局部水面线及流速分布

方案3掺气槽局部剖面水气二相分布见图5,水流在掺气槽上游形成明显的水气分界面,在设计、校核流量工况下,水流流态均在掺气挑坎位置有所上升,且在掺气槽下游形成一段稳定的掺气空腔,其长度 L 可近似为掺气浓度 60% 的等值

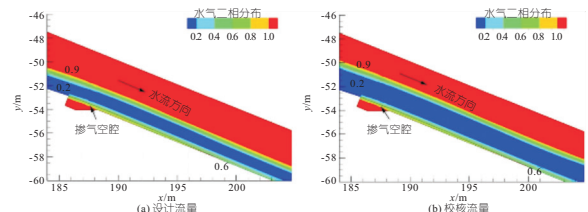


图5 方案3掺气槽部位水气二相分布

Fig. 5 Scheme 3 water-gas two-phase aerator

线与底板交点距挑坎的距离,其中设计流量下空腔长度为 12.11 m ,校核流量下空腔长度为 13.61 m 。

方案3掺气槽断面水深、流速分布见图6。由图6可得:①设计流量下掺气挑坎上水深为 1.357 m ,断面平均流速为 30.909 m/s ;模型试验实测坎上水深为 1.325 m ,流速为 31.352 m/s ,其水深误差为 2.4% ,流速误差为 1.4% ;②校核流量下掺气挑坎上水深为 2.026 m ,断面平均流速为 32.209 m/s ;模型试验实测坎上水深为 1.875 m ,流速为 32.939 m/s ,其水深误差为 8% ,流速误差为 2.2% 。在设计、校核工况下,掺气槽临底部掺气明显,流速集中在截面中心,水深、流速误差均在 10% 以下,计算值与试验值吻合较好。

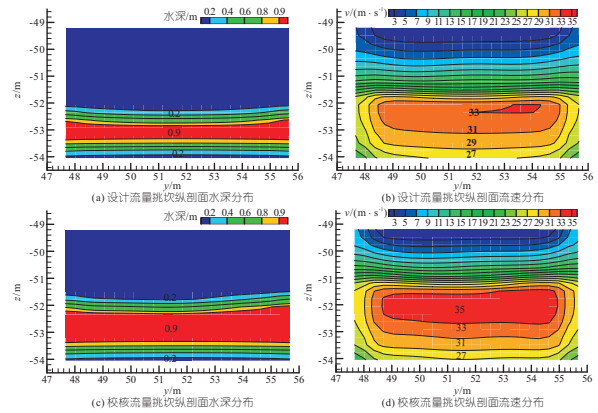


图6 挑坎处断面水深、流速分布

Fig. 6 The distribution of water depth and velocity at the cross section

4.2 断面掺气浓度分布

由于桩号 $0+193 \sim 0+232$ 段易发生空蚀破坏且流速过大,故选取桩号 $0+205.10, 0+211.87, 0+217.62, 0+221.834$ 四个断面进行掺气浓度观测,结果见图7。由图7可知,各断面掺气浓度分布规律基本相同,坎后掺气浓度沿程先增大后减小^[6];由于掺气槽下游靠近底板处形成了掺气空腔,掺气水流在靠近底板处掺气浓度较高,在水体主流区,掺气浓度相对较低。水流空化数与掺气浓度呈正比,且在低流速下受掺气浓度影响较大,在高流速下受掺气浓度影响较小^[7]。当近壁水流掺气浓度大于 1.5% 时,能有效降低空蚀破坏,当掺气浓度大于 7% 时,空蚀破坏基本消失。在实际工程中,当临界掺气浓度值大于 5% ,即可避免泄水建筑物过流面空蚀破坏问题^[8]。在所选截面中,方案1(工况1、2)加设掺气槽距离所选截面最远,在易发生空蚀段,临底掺气浓度小于 5% ,掺气浓度自底面至表面逐渐增大。方案2(工况3、4)临底掺气浓度达到 $6\% \sim 20\%$ 之间,方

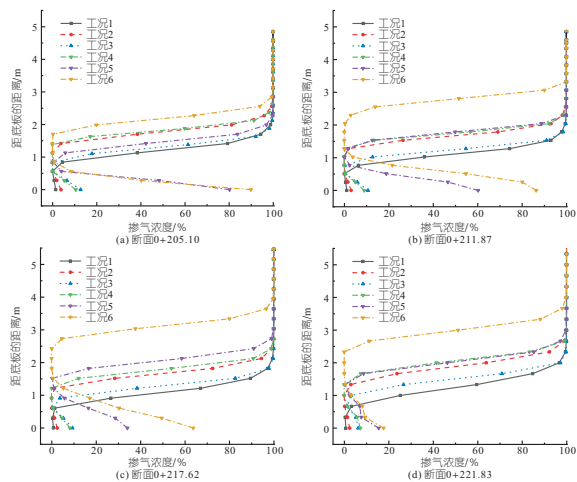


图 7 断面掺气浓度分布

Fig. 7 Aeration concentration distribution at section

案 3(工况 5、6)临底掺气浓度在 15% 以上,掺气浓度均呈现底部和表面大、中间小的分布规律。这与马关博等^[9]研究结论吻合,相较于方案 1、2,方案 3 在易发生空蚀段掺气更为充分,能有效避免空蚀破坏的产生。

4.3 水流空化数

由于泄槽段流速过高,故对泄槽段桩号 0+93.06~0+213.65 处进行水流空化数计算,根据水流空化数及流速判断溢洪道是否发生空化现象。文献[10]中美国垦务局水力学专家布格提出空蚀控制的建议, $\sigma > 1.7$ 时,可不考虑保护措施; $1.7 > \sigma > 0.3$ 时,严格控制不平整度; $0.3 > \sigma > 0.12$ 时,要加设掺气设施; $\sigma < 0.12$ 时,要修改设计。

水流空化数越小,流速越大越易产生空化现象,空化数 σ 计算公式为:

$$\sigma = (h_0 + h_a - h_v) / [v_0^2 / (2g)] \quad (5)$$

$$h_a = 10.33 - \nabla / 900 \quad (6)$$

式中, h_0 为来流参考断面时均压力水头, m; v_0 为来流参考断面平均流速, m/s; h_a 为大气压力水柱, m; ∇ 为当地海拔高度, m; h_v 为水汽化压力水柱, 与水温有关, 本试验水温取 15 °C, 则取 h_v 为 0.17。

水流空化数计算结果见图 8。原方案设计、校核工况下,在桩号 0+193~0+213.65 范围出现不同程度水流空化数 $\sigma < 0.3$ 的情况,且流速大于 30 m/s,综合考虑应加设掺气槽,以增大水流空化数,防止高速泄水建筑物中的某些部位出现空蚀破坏。方案 1 在设计、校核工况下,沿程水流空化数 σ 较原方案均有所提升,在设计流量工况下,沿程水流空化数 $\sigma > 0.3$,但在校核工况下,桩号 0+193~0+213.65 段仍出现水流空化数 $\sigma < 0.3$ 的情况,由于流量的增大,其水流空化数随流速增大而增大。方案 2 在设计、校核流量工况下,

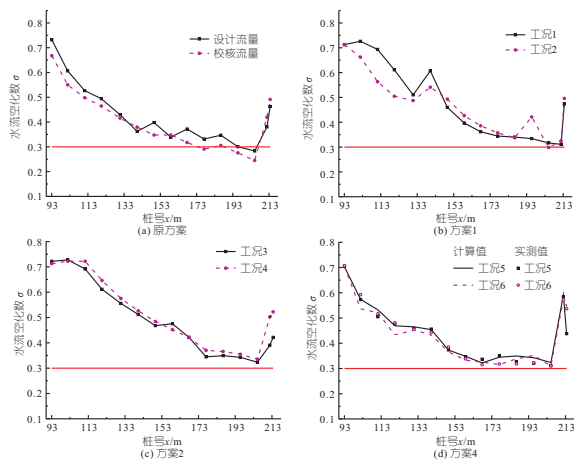


图 8 水流空化数

Fig. 8 Flow cavitation number

沿程水流空化数 $\sigma > 0.3$,在易发生空蚀断面临底掺气浓度在 6%~20% 之间,可有效降低空蚀破坏的产生。方案 4 在设计、校核流量工况下,沿程水流空化数 σ 均大于 0.3,且在易发生空化空蚀段临底掺气浓度高达 15% 以上,计算值与试验值吻合较好,最终确定在溢洪道泄槽段桩号 0+186.39 处设置 1 道掺气槽,可有效避免空蚀破坏的产生。

5 结论

a. 方案 3 在易发生空蚀截面,其临底掺气浓度范围为 15%~90%,且沿程水流空化数大于 0.3,可有效避免空蚀破坏。

b. 掺气槽应优先考虑布置在易发生空蚀断面上游且弗劳德数 Fr 较大的位置,同体型掺气槽,布置于弗劳德数 Fr 较大的位置,其效果较好。

参考文献:

- [1] 赵业彬,徐艺绯,骆少泽,等.某水电站溢流坝陡槽高速泄流掺气减蚀试验研究[J].水电能源科学,2012,30(9):82-84.
- [2] 赵莹,王贞化.组合掺气体型水力特性三维数值模拟[J].水电能源科学,2011,29(3):89-91.
- [3] 高学平,贾来飞,宋慧芳,等.溢洪道掺气坎槽后掺气水流三维数值模拟研究[J].水力发电学报,2014,33(2):90-96.
- [4] HELLER V. Scale effects in physical hydraulic engineering models[J]. Journal of hydraulic research, 2011,49(3):293-306.
- [5] 时启燧,潘水波,邵嫫嫫,等.通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J].水利学报,1983(3):1-13.
- [6] 南海龙,徐一民,颜敏,等.掺气坎后水流掺气浓度分布及掺气保护长度试验研究[J].水电能源科学,2015,33(1):173-176.
- [7] 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.

