尾矿库分期建设溢洪道水力特性三维数值模拟

胡良才，郭大平，李哲辉，李玉雷，张 宁

（中核第四研究设计工程有限公司，河北 石家庄 050021）

摘要：分期建设是尾矿库溢洪道的建设特点之一，不同运行阶段溢洪道的水力特性差异较大。以某铀尾矿库分期建设溢洪道为研究对象，基于 VOF 方法、RNG k-ε 紊流模型，采用 Flow-3D 软件对溢洪道初始设计方案、优化设计方案的水流流态、流速、消能率等进行了三维数值模拟。研究表明，初始设计方案下基建期溢洪道水流流态较平顺，溢洪道体型合理；但建成期溢洪道存在台阶段底坡偏陡、水面高出边墙等问题。优化后的建成期溢洪道水流流态较好，水流最大流速约 17.31 m/s，消能率约 78.53%，溢洪道体型较合理。研究成果可用于指导分期建设溢洪道工程设计。

关键词：分期建设；溢洪道；尾矿库；水力特性；数值模拟；VOF 方法；RNG k-ε 紊流模型

中图分类号：TV135.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0075-06

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.01.04

排洪设施是尾矿库的重要组成部分[1-2]，在排泄入库暴雨洪水、保障尾矿库防洪安全方面发挥着重要的作用[3-6]。溢洪道泄流能力大、检修方便，在地形地质等条件许可时，采用溢洪道作为排洪设施可大幅提高尾矿库防洪安全性。按运行阶段不同，溢洪道可分为基建期、运行期、建成期，其中运行期及建成期溢洪道通常是在基建期溢洪道基础上通过抬高溢流堰堰顶高程而成，加高后的溢流堰与陡槽多采用台阶段连接。工程实际中，台阶段坡度较缓时，水流流态较好，溢洪道安全性较高，但陡槽利用长度短，不经济；台阶段坡度较陡时，可增加陡槽利用长度，节约工程投资，但可能造成溢洪道水流流态恶化，严重时会危及尾矿库安全。

合理的溢洪道体型是尾矿库防洪安全的重要保障，但目前对分期建设溢洪道不同阶段水力特性的研究较少。笔者以某铀尾矿库分期建设溢洪道为研究对象，采用计算流体力学软件 Flow-3D 对溢洪道不同运行阶段的水力特性进行三维数值模拟研究，对溢洪道初始设计方案进行分析，并对溢洪道体型、水流流态、流速、消能率等进行优化和计算。

1 数值模型

1.1 控制方程

流体运动控制方程[7]包括连续性方程、动量方程、紊动能方程和耗散率方程。

连续性方程为

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

动量方程为

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

紊动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\alpha_k(\mu+\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k-\rho\varepsilon,$$

紊动耗散率方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\alpha_\varepsilon(\mu+\mu_t)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}\ ,$$

式中：ρ—密度，kg/m^3；t—时间，s；u_i、u_j—速度分量，i、j 分别为 1、2、3、…、n，m/s；x_i、x_j—坐标分量，m；p—压力，Pa；μ—流体动力黏性系数，Pa·s；

收稿日期：2023-01-11

基金项目：国家国防科技工业局核能开发科研项目（科工二司〔2019〕1341 号）

第一作者简介：胡良才（1983—），男，河北邢台人，硕士，高级工程师，主要从事铀尾矿库科研、设计工作。

μ_t—紊动黏性系数，Pa·s；k—紊动能，m^2/s^2；ε—紊动耗散率，m^2/s^3；G_k—平均速度梯度引起的紊动能产生项；常数 $\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39$，$C_{1\varepsilon}=1.42$，$C_{2\varepsilon}=1.68$。

鉴于 RNG k-ε 紊流模型在模拟复杂水流流动方面的优越性[8]，采用 RNG k-ε 模型封闭方程组和流体体积分数(Volume of Fluid，VOF)法[9]追踪水流自由表面，采用 Flow-3D 对分期建设溢洪道水力特性进行三维数值模拟研究。

1.2 模型验证

采用台阶溢洪道泄流模型试验[10]验证本数值模型的准确性。试验模型由上游水池、宽顶堰、台阶段、出水渠组成，其中宽顶堰长(L)为 1.01 m，宽(W)为 0.52 m，高(H)为 1.0 m，上游进口是半径(r)为 0.08 m 的圆弧；台阶段由 10 级等高台阶组成，每级台阶长(l)为 0.2 m、高(h)为 0.1 m，试验模型见图 1。

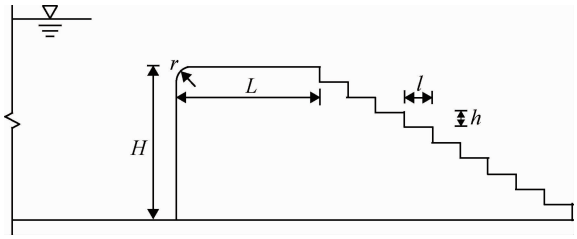


图 1 试验模型示意图

Fig. 1 Sketch of the test model

Flow-3D 数值模型严格按照试验模型尺寸建模，模型入口采用压力入口，设置水的体积分数为 1，表示入口处为水流，水深通过试验流量计算得到；出口边界条件设置为自由出流；模型顶部给定为压力入口边界条件，采用绝对压强，水的体积分数设为 0，对应溢洪道顶部大气边界；底部及两侧边壁采用镜像边界条件。采用结构化网格对溢洪道模型进行网格划分，为节约计算时间，采用二维网格进行模拟，即在宽顶堰宽度方向仅设置一层网格。对流量(Q)为 0.090、0.105、0.113 m^3/s 情况下宽顶堰上游及堰顶水深进行模拟，宽顶堰堰顶无量纲水深曲线见图 2。纵坐标中 y 为宽顶堰上游及堰顶水深，y/L 为无量纲水深；横坐标中 x 为距宽顶堰距离，x/L 为无量纲距离。

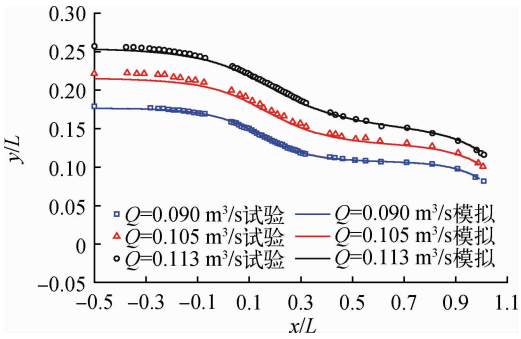


图 2 宽顶堰堰顶无量纲水深曲线

Fig. 2 Dimensionless free-surface profiles above the broad-crested weir

由图 2 可见，各流量下试验及数值模拟水深吻合较好，水深最大相对误差分别为 0.29%、3.15%、1.56%，说明数值模拟精确度较高。

2 工程应用

2.1 工程概况

某尾矿库为干式堆存尾矿库，由初期坝、堆积坝、排洪设施、副坝等组成。尾矿库为四等库，采用 50 年一遇设计洪水标准，500 年一遇校核洪水标准，设计洪峰流量为 51.76 m^3/s，校核洪峰流量为 74.48 m^3/s。考虑到排洪井管(隧洞)式排洪设施水流流态复杂，排洪井与排洪管(隧洞)连接处易发生空化与空蚀，且尾矿库运行后期排洪管(隧洞)上部覆盖有数十米厚的尾矿，一旦排洪管(隧洞)受到挤压破坏，可能导致尾矿流失库外而污染环境，因此设计采用开敞式溢洪道作为尾矿库排洪设施。

溢洪道采用分期建设方案，基建期溢洪道由溢流堰、陡槽、消力池等组成。溢流堰采用结构简单、施工方便的宽顶堰，堰长 6.0 m、宽 15.0 m、边墙高 3.0 m。陡槽根据底坡不同分为两级，一级陡槽长 50.0 m、宽 15.0 m、底坡为 0.02；二级陡槽位于一级陡槽下游，长 26.0 m、宽 15.0 m、底坡为 0.5，陡槽边墙高 2.5 m。二级陡槽末端设消力池，消力池长 20.0 m、宽 15.0 m、深 4.5 m，消力池出口处设尾坎，下游接排水渠。运行期溢流堰标高随尾矿坝加高而逐步抬高直至建成，加高后溢流堰与一级陡槽采用等高台阶连接，台阶高 1.0 m、宽 0.6 m。基建期及建成期溢洪道三维模型见图 3。

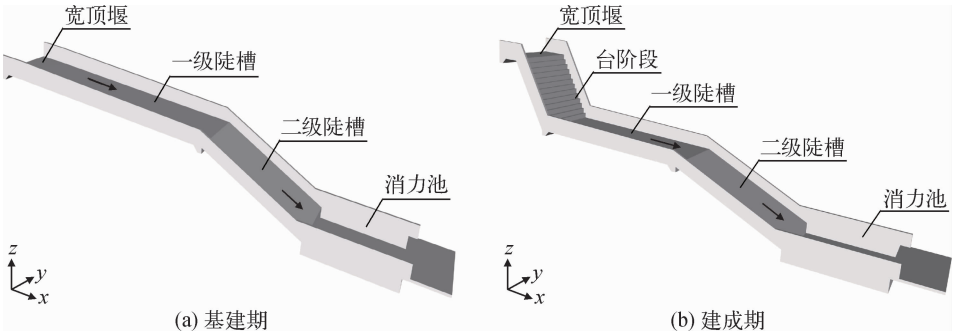


图 3　溢洪道三维模型示意图

Fig. 3　Diagram of three-dimensional model of the spillway

2.2　数值模型建立

采用 AutoCAD 软件建立溢洪道三维模型，并输出为立体制版(Stereo-lithography，STL)格式文件。根据溢洪道实际尺寸进行三维建模，模型包括溢流堰、一级陡槽、二级陡槽、消力池、排水渠，模型下游模拟至消力池后 10.0 m。

2.2.1　网格划分

采用多网格块对溢洪道数值模型进行网格划分，为避免计算过程中水流冲击网格块顶部而影响模拟精度，设置最大模拟高程高于校核洪水位。经过多次试算，确定结构化网格尺寸为 $\Delta x=\Delta y=0.20$ m、$\Delta z=0.10$ m，其中沿水流方向为 x 轴正方向，重力方向为 z 方向，网格总数为 426.6 万个。为提高数值模拟精度，在溢流堰末端、陡槽变坡处、陡槽末端设置网格面，以确保 Flow-3D 能更加精准识别溢洪道特征面。

2.2.2　边界条件

溢洪道模型入口采用压力入口，设置水的体积分数为 1，表明溢洪道入口处全部为水流，通过校核洪水位给定；出口设置在消力池尾坎下游 10.0 m 处，以确保出口水流平顺便于计算收敛，出口边界条件设置为自由出流。溢洪道顶部给定为压力入口边界条件，采用绝对压强，水的体积分数设为 0，表明溢洪道顶部为大气；底部及两侧边壁采用固体壁面边界条件，溢洪道壁面粗糙高度的计算公式[11]为

$$k_s = 3.72D_h\exp\left(\frac{-0.10D_h^{1/6}}{n}\right),$$

式中：k_s—壁面粗糙高度，m；D_h—水力直径，m；n—曼宁系数。经计算壁面粗糙高度为 2.0 mm。

3　模拟结果分析

3.1　初始设计方案

校核频率暴雨情况下，基建期溢洪道水流流态见图 4(a)，溢洪道内水流流态整体较平顺，仅在二级陡槽末端水流进入消力池后，产生较为明显的水跃，跃后水面高度基本与消力池边墙齐平，说明基建期溢洪道体型基本合理。建成期溢洪道水流流态见图 4(b)，水流经过宽顶堰后在重力作用下以抛物线形式跌落，由于台阶段坡度较陡，未能很好的顶托水流，水流出现“脱壁”现象，台阶段水面线也高出两侧边墙顶标高。由于冲击力较大，水流落入一级陡槽后，水面产生较为明显的波动，之后以较平顺的流态进入二级陡槽，水流从二级陡槽末端进入消力池时，在消力池内产生较为明显的水跃，跃后水深高度与消力池边墙基本齐平。

3.2　优化设计方案

3.2.1　体型优化方案

为解决初始设计方案溢洪道台阶段水流“脱壁”问题，对建成期溢洪道体型进行优化。将溢流堰型式由长直型的宽顶堰改为与水流贴合较好的曲线型 WES 实用堰，同时将台阶段坡度由 1.0∶0.6调整为 1.0∶2.0，台阶高度由 1.0 m 调整为 0.5 m；优化后台阶段仍采用等高台阶，台阶高 0.5 m、宽 1.0 m，优化后的建成期溢洪道三维模型见图 5。

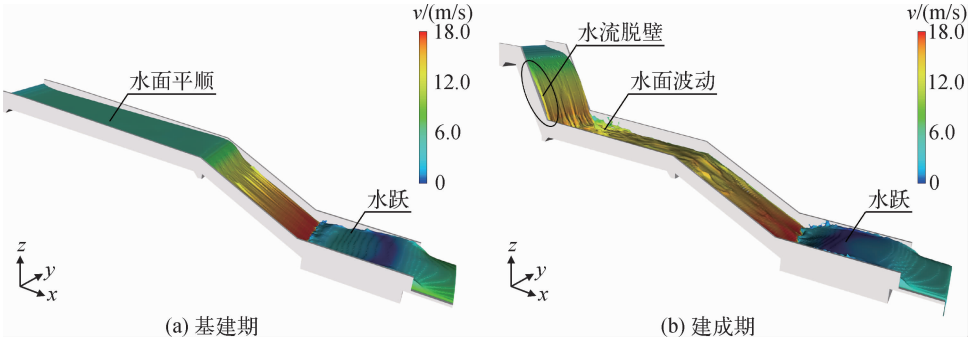


图 4 初始设计方案溢洪道水流流态

Fig. 4 Flow pattern of spillway in the initial design scheme

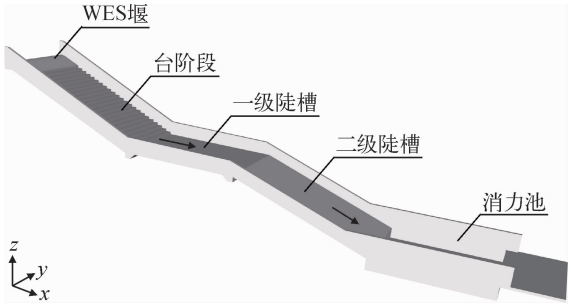


图 5 优化后建成期溢洪道三维模型示意图

Fig. 5 Diagram of three-dimensional model of the spillway after optimization

3.2.2 水流流态

校核洪水位 1 078.19 m 时，优化后建成期溢洪道水流流态见图 6。可以看出，溢流堰由宽顶堰调整为 WES 实用堰后，堰体对水流顶托作用明显，水流以较平顺的状态流过堰体。由于台阶相当于加大了溢洪道底板粗糙度，因此水流进入台阶段后在台阶上产生较强烈的旋滚，水流表面极不平整，水体大量掺气。之后水流以较平顺的状态进入一级陡槽、二级陡槽，并在进入消力池后产生水跃，水跃高度低于消力池边墙高度。

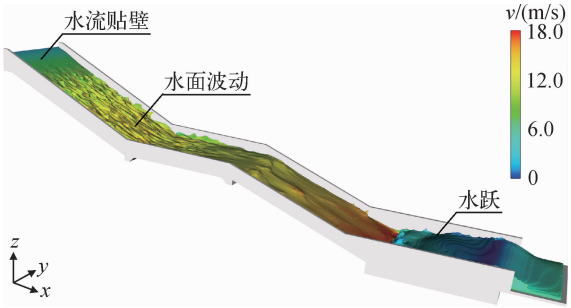


图 6 优化后建成期溢洪道水流流态

Fig. 6 Flow pattern of spillway in the built-up stage after optimization

3.2.3 水流流速

校核洪水位 1 078.19 m 时，优化后建成期溢洪道沿宽度方向中间剖面处的水流流速等值线及矢量图见图 7。可以看出，台阶段底坡放缓后，水

流贴合台阶以滑行水流流态流动，流动过程中充满台阶凸角边缘连线形成的虚拟底板下部，水流在虚拟底板与台阶之间剧烈旋滚，形成稳定的循环漩涡，同时急剧消减水流能量[12]。溢洪道水流最大流速出现在二级陡槽末端，约为 17.31 m/s。

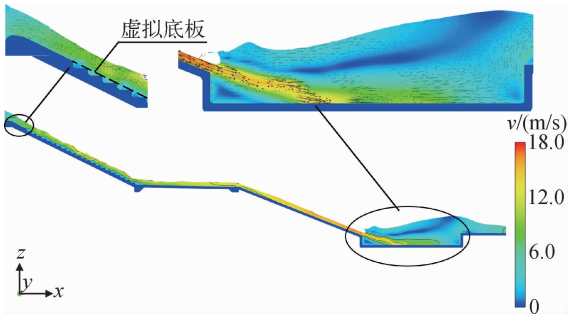


图 7　优化后建成期溢洪道水流流速图

Fig. 7　Flow velocity of spillway in the built-up stage after optimization

3.2.4　消能率

消能率（η）是反映溢洪道消能效果的指标[13]，其定义为

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\%,$$

$$E_1 = Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g},$$

$$E_2 = Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g},$$

式中：E_1、E_2—溢洪道上、下游断面总水头，m；Z_1、Z_2—溢洪道上、下游水面相对于基准面的落差，m；v_1、v_2—溢洪道上、下游断面水流平均流速，m/s；α_1、α_2—流速系数。

经计算，校核洪水位下溢洪道整体消能率为 78.53%，有效消减了下泄水流的能量。

4　结论

对于分期建设溢洪道，不仅应关注基建期体型，还应关注运行期及建成期溢洪道的水力特性，以最大限度保证尾矿库防洪安全。Flow-3D 模拟结果与模型试验结果吻合较好，宽顶堰堰顶水深最大相对误差仅为 3.15%，Flow-3D 软件可用于溢洪道等水工建筑物水力特性三维数值模拟研究，为溢洪道设计方案优化提供依据。

初始设计方案的基建期溢洪道内水流流态较好，溢洪道体型基本合理；建成期溢洪道台阶段未能有效发挥对水流的顶托作用，存在水流“脱壁”、水面高出边墙顶标高等问题。

优化设计方案采用 WES 实用堰，其对水流顶托作用明显，在台阶段水流贴合台阶以滑行流态流动，并在虚拟底板与台阶之间剧烈旋滚，大量掺气的同时快速消减了能量。校核洪水位下，溢洪道内水流最大流速约 17.31 m/s，整体消能率达 78.53%，消能效果较好，溢洪道体型较合理。

参考文献：

[1] 胡良才，郭大平，李哲辉，等. 精细地形下铀尾矿库溃坝三维数值模拟研究[J]. 铀矿冶，2020，39(1)：56-61.

[2] 李道明，王明文，吴国高，等. 新型排洪方式在尾矿库扩容工程中的应用分析[J]. 有色金属（矿山部分），2022，74(5)：86-89.

[3] 孙东坡，姚策，王二平，等. 尾矿库排水系统急流交汇区水流控导试验研究[J]. 中国农村水利水电，2013(4)：68-71.

[4] 杜振斐，武伟伟，吴永刚. 某大型尾矿库排洪系统水工模型试验研究[J]. 有色金属（矿山部分），2019，71(5)：64-71.

[5] 刘明生，王睿齐. 某金矿尾矿库排水隧洞竖井段的优化设计[J]. 金属矿山，2020(8)：195-198.

[6] 胡良才. 铀尾矿库排洪系统渗漏整治方案[J]. 现代矿业，2022，38(5)：231-233+240.

[7] 贾洪涛. 带尾坎的阶梯溢洪道数值模拟研究[J]. 人民黄河，2020，42(5)：130-134+137.

[8] YAKHOT V，ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence：I. Basic theory[J]. Journal of Scientific Computing，1986，1(1)：3-51.

[9] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.

[10] FELDER S, CHANSON H. Free-surface profiles, velocity and pressure distributions on a broad-crested weir: a physical study[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(12): 1068-1074.

[11] FLOW SCIENCE, INC. Flow 3D user manual [M]. Santa Fe: Flow Science, Inc., 2016.

[12] 张志昌,金瑾.台阶式溢洪道水力特性的研究[M].北京:科学出版社,2018.

[13] 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.

Three-dimensional Numerical Simulation on Hydraulic Characteristics of Tailings Pond Spillway Under Phased Construction

HU Liangcai, GUO Daping, LI Zhehui, LI Yulei, ZHANG Ning

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Phased construction is one of the characteristics of tailings pond spillway, and the hydraulic characteristics of the spillway vary greatly at different stages of operation. Based on the VOF method and RNG k-ε turbulence model, the flow pattern, velocity and energy dissipation rate of the initial design scheme and optimization design scheme of the spillway were simulated by Flow-3D. The results show that the flow pattern during the infrastructure period is relatively smooth, the shape of the spillway is reasonable, while the spillway in the built-up stage has problems such as steep slope in the stepped section and the water surface line extends beyond the side walls. The flow pattern of the optimized spillway is good, the maximum flow velocity in the spillway is about 17.31 m/s and the energy dissipation rate is about 78.53%, the shape of the optimized spillway is reasonable. The research results can be used to guide the design of spillway under phased construction.

Key words: phased construction; spillway; tailings pond; hydraulic characteristics; numerical simulation; VOF method; RNG k-ε turbulence model