

辽宁省地方标准

尾矿库溃坝模拟技术规程

征求意见稿

DB/T 2021058



# 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	2
3 术语和定义 .....	3
4 前期准备工作 .....	5
5 尾矿库溃坝安全风险分析 .....	6
6 尾矿库溃坝试验模拟 .....	9
7 尾矿库溃坝数值模拟 .....	12
8 尾矿库溃坝概率分析 .....	16
9 尾矿库溃坝模拟分析报告编写 .....	18
附录 A 尾矿库防洪能力评价基本控制方程 .....	19
附录 B 尾矿库溃坝模型试验相似比例尺 .....	21
附录 C 尾矿库溃坝数值模拟基本控制方程 .....	22
附录 D 尾矿库溃坝数值模拟分析 成果要求 .....	25
附录 E 尾矿库溃坝模拟分析报告 内容提纲 .....	26
参考文献 .....	29

# 前 言

本标准按照 给出的规则起草

本标准由××提出并归口

本标准的起草单位：辽宁有色勘察研究院有限责任公司 辽宁大学 辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司

本标准的主要起草人：侯永莉 郝喆 姚文生 张亮 肖圣博 滕达 田亚光 李国栋 鲍立新 范鹏 孙鸿昌 张文 朱淳 彭铭 张敬良（名次无先后）

# 尾矿库溃坝模拟技术规程

## 1 范围

本标准适用于山谷型、傍山型、截河型和平地型等尾矿库坝体溃决、泥石流演进的溃坝模型试验和数值模拟，并可供围堰、堤防等类似工程参考。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50123 土工试验方法标准

SL 42 河流泥砂颗粒分析规程

SL 155 水工（常规）模型试验规程

SL 99 河工模型试验规程

SL/T 164 溃坝洪水模拟技术规程

GB 51108-2015 尾矿库在线安全监测系统工程技术规范

GB 39496-2020 尾矿库安全规程

GB 50863-2013 尾矿设施设计规范

DZ/T 0221—2006《崩塌、滑坡、泥石流监测规范》

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**尾矿库溃坝模型** dam break model for tailing pond

以重力为主要动力因素,研究尾矿坝体由于各种因素发生溃决和形成泥石流运动的实体模型。

#### 3.2

**尾矿库及下游地形** tailing pond and downstream topography

尾矿库库区及周边自然环境,包括尾矿库、周围山体、下游地形等。

#### 3.3

**尾矿库溃坝试验模拟** simulation of dam break test of tailings pond

建立尾矿库及下游地形的物理模型,模拟研究溃坝泥石流在尾矿库区及下游地形上的流动状态。

#### 3.4

**尾矿库溃坝数值模拟** numerical simulation of tailings dam break

在重力、渗流等条件影响下,尾矿坝破损发生溃决,模拟研究泥石流在尾矿库区及下游地形上的流动状态。

#### 3.5

**淹没范围** inundated area

尾矿库溃坝泥石流在库区下游的覆盖范围。

#### 3.6

**淹没深度** submergence depth

尾矿库溃坝泥石流在库区下游的堆积深度。

#### 3.7

**演进流速** evolution velocity

尾矿库溃坝泥流向下游演进的速度。

#### 3.8

**泥石流冲击力** impact force of debris flow

尾矿库溃坝泥石流在下游演进过程中对下游构筑物的作用力。

### 3.9

拦挡坝 retaining dam

尾矿库下游用于降低泥石流流速或改变泥石流方向的坝体。

#### 4 前期准备工作

4.1 应收集尾矿库所在区域自然条件。主要包括：地理位置、气象水文、地形地貌、土壤植被、地质、地震等基本数据和信息。

4.2 宜收集尾矿库所在区域社会经济资料。主要包括：土地类别、人口、经济状况等。

4.3 应收集尾矿库所在区域地形资料。主要包括：库区及周边地形图、相关设施布置图等，比例不小于 1:1000，地形图范围应包含库区汇水区及坝下游影响区。

4.4 应收集尾矿库所在区域工程与水文地质资料。主要包括地层岩性、地质构造、岩土参数、地下水等。

4.5 应收集尾矿库设计、施工相关资料。主要包括：

1) 尾矿库类型、库容、等别、布置型式；

2) 坝型、坝体结构、排渗及防渗形式；

3) 防排洪系统布置与设计：应收集库容曲线、入库洪水、设计防洪标准、排水构筑物、泄水构筑物及泄流能力等资料；

4) 其他：坝基处理相关资料。

4.6 应收集尾矿库运行期相关资料。主要包括：

1) 监测：尾矿排放、堆筑、堆压时间、坝体变形、浸润线、渗流、泄流、排水、入库洪水等资料；

2) 改扩建：改扩建内容、设计及施工相关资料；

3) 病害治理：病害部位、性质、治理措施及相应监测等资料；

4) 其他：检测、鉴定、评定、验收等资料。

4.7 应收集尾矿坝下游相关资料。主要包括居民区、建（构）筑物、交通设施、河流及防洪设施、土地类别、植被状况等。

4.8 现有资料不满足溃坝模拟分析要求时，可适当布置相应工作（如勘察、检测及测量工作等），补齐所需资料和相关数据。

4.9 退役尾矿库溃坝模拟所收集相关资料，宜参照以上条款执行。

## 5 尾矿库溃坝安全风险分析

### 5.1 溃坝类型和安全风险因素识别

5.1.1 尾矿库溃坝事故可分为4种溃坝类型：失稳溃决、漫顶溃决、渗透破坏、结构破坏。

5.1.2 与尾矿坝失稳溃决有关的安全风险因素有：尾矿坝外坡比、浸润线高度、尾矿平均粒度、现状坝高等。

5.1.3 与尾矿坝漫顶溃决有关的安全风险因素有：防洪标准、排洪设施能力、干滩长度与安全超高等。

5.1.4 与尾矿坝渗透破坏有关的安全风险因素有：浸润线逸出、坝体渗漏、渗透坡度、管涌、流砂等。

5.1.5 与尾矿坝结构破坏有关的安全风险因素有：坝体裂缝、坝面拉沟、排洪构筑物堵塞或损坏、库区地质灾害等。

5.1.6 应结合尾矿库现状和安全风险复核结果，识别出尾矿库的可能溃坝事故类型和现状安全风险因素。

### 5.2 尾矿库溃坝安全风险复核

#### 5.2.1 尾矿库坝体失稳溃决风险因素复核

1 应验算复核坝体抗滑稳定最小安全系数，应满足表 5.2.1-1 规定值。

表 5.2.1-1 坝坡抗滑稳定的最小安全系数

计算方法	运行条件	尾矿坝级别			
		1	2	3	4
简化毕肖普法	正常运行	1.5	1.35	1.30	1.25
	洪水运行	1.30	1.25	1.20	1.15
	特殊运行	1.20	1.15	1.15	1.10
瑞典圆弧法	正常运行	1.30	1.25	1.20	1.15
	洪水运行	1.20	1.15	1.10	1.05
	特殊运行	1.10	1.05	1.05	1.05

2 应现场检测尾矿坝现状坝高和外坡坡比。检测坝的外坡坡比时，应选择最大坝高断面和坝坡较陡断面，且每 100m 坝长应不少于 2 处。

3、应根据监测数据，复核浸润线高度。给出详细复核标准。

## 5.2.2 洪水漫顶溃决风险因素复核

### 1 尾矿库防洪标准应符合下列规定：

1) 尾矿库各使用期的防洪标准应根据使用期库的等别、库容、坝高、使用年限及对下游可能造成的危害程度等因素，按表 5.2.3-1 确定。

表 5.2.3-1 尾矿库防洪标准

单位：年

尾矿库各使用期等别	一	二	三	四	五
洪水重现期	1000~5000 或 PMF	500~1000	200~500	100~200	100
PMF 为可能的最大洪水					

2) 当确定的尾矿库等别的库容或坝高偏于该等上限，尾矿库使用年限较长或失事后对下游会造成严重危害者，防洪标准应取上限或提高等别。

3) 中线式或下游式尾矿筑坝的尾矿库，堆坝区的防洪标准应不小于 50 年一遇洪水。

4) 尾矿库排洪系统外的尾矿坝坝肩截水沟、坝面排水沟的防洪标准应不小于年最大 24h 雨量均值。

2 应根据尾矿库实际的地形、水位和尾矿沉积滩面，对尾矿库防洪能力进行复核，尾矿库安全超高、干滩长度和干滩坡度应满足设计要求。

建议此条与 5.2.4 中第 2 条对换。3 应检查尾矿库排洪构筑物的质量检测报告，并进行现场表观质量复核。复核的主要内容包括构筑物有无变形、位移、损毁、淤堵、排水能力是否满足设计要求。

## 5.2.3 渗透破坏风险因素复核

1 应现场核验尾矿库浸润线埋深，查明浸润线的位置与形态，浸润线埋深应不小于 1.1 控制浸润线埋深。

2 应现场检查坝体渗漏、管涌情况，应查明坝体外坡及下游有无渗漏出逸点，出逸点的位置、形态、流量及含砂量等。

## 5.2.4 结构破坏风险因素复核

1 应现场检查坝体有无纵、横向裂缝迹象。发现坝体出现裂缝时，应查明裂缝的长度、宽度、深度、走向、形态和成因，判断危害程度。

2 应对尾矿库排洪构筑物进行结构质量复核，主要内容包括混凝土强度、混凝土中钢筋配置、构件的几何尺寸、伸缩缝、沉降缝等是否满足设计与规范要求。

3 应详细观察周边山体有无异常和急变，并根据岩土工程勘察报告，分析周边山体发

生滑坡的可能性。

### 5.3 尾矿库溃坝安全风险评价

5.3.1 应根据尾矿库失稳风险因素复核结果判断尾矿库存在失稳溃坝可能性。

5.3.2 应根据尾矿库洪水漫顶风险因素复核结果判断尾矿库存在全溃可能性。

5.3.3 应根据尾矿库渗透破坏风险因素复核结果判断尾矿库存在渗透溃坝可能性。

5.3.4 应根据尾矿库结构破坏风险因素复核结果判断尾矿库存在结构溃坝可能性。

5.3.5 宜根据尾矿库溃坝安全风险因素与复核结果，判定尾矿库溃坝类型和安全风险等别。安全风险等别应包括：无风险、一般风险、较大风险和重大风险。四类安全风险等别划分标准：（建议列表并结合上述四类复核结果和安全风险因素来划分，如无溃坝可能性，不存在安全风险因素为无风险；等等）

5.3.6 无风险是指尾矿库可继续安全运行。

5.3.7 一般风险是指尾矿库带有缺陷运行。

5.3.8 较大风险是指尾矿库存在严重缺陷，应进行治理。

5.3.9 重大风险是指尾矿库无法继续运行，应停止使用。

### 5.4 尾矿库防洪能力评价

5.4.1 应验证尾矿库防洪能力，评价方法可采用理论分析计算。

5.4.2 应验算尾矿库的洪峰流量、洪水总量和洪水过程线。

5.4.3 应根据不同形式的排水系统，选取相应的泄流公式计算泄流能力。

5.4.4 应建立任一时段内水库蓄水量变化方程（ $V_2-V_1$ ）。

5.4.5 应建立下泄流量  $q$  与蓄水量  $V$  的关系方程。

5.4.6 应根据 5.4.4 和 5.4.5 建立的方程组成求解方程组，确定入库洪水过程、下泄流量过程和尾矿库蓄水量变化过程三者之间的定量关系，进行尾矿库调洪计算。

5.4.7 应给出调洪控制高程，保证尾矿库尾矿库排洪构筑物正常运行。

## 6 尾矿库溃坝试验模拟

### 6.1 模型的设计准则（公式应有编号）

6.1.1 模型应满足水流流态相似，模型雷诺数和水深应满足以下要求

$$\text{Re}_m > 2000$$

$$h_m > 1.5\text{cm}$$

6.1.2 模型应满足水流重力相似要求

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_H}$$

6.1.3 模型应满足水流阻力相似要求

$$\lambda_n = \frac{1}{\lambda_v} \lambda_H^{2/3} \lambda_J^{1/2} = \lambda_H^{1/6}$$

6.1.4 模型应满足河床变形相似要求

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_S} \lambda_{t_1}$$

6.1.5 模型应满足尾砂物理力学相似，主要在颗粒几何形态、密度及干密度、粒径、休止角、抗剪强度、固结等方面满足相似要求

6.1.6 模型应满足尾砂启动相似要求

$$\lambda_{v_c} = \lambda_v$$

6.1.7 模型应满足尾砂沉降相似

$$\lambda_\omega = \lambda_u$$

6.1.8 模型应满足尾砂悬移相似要求

$$\lambda_\omega = \lambda_v$$

6.1.9 模型应满足水流挟砂相似要求

$$\lambda_S = \lambda_{S^*}$$

- 6.1.10 尾矿库溃坝模型试验应采用正态模型，应满足坝体溃决过程的相似。
- 6.1.11 应根据工程规模、试验场地和试验任务等条件，合理选择模型比尺及模拟范围，各物理量相似比尺应满足下表条件。
- 6.1.12 应绘制模型总体布置图、建筑物模型详图和测点布置图。

## 6.2 模型的建立准则

- 6.2.1 应塑造尾矿库最大坝高相应等高线范围内上游天然地形
- 6.2.2 搭建模型要突出下游重要建筑物、房屋、交通设施等地理位置和空间分布。
- 6.2.3 模型制作安装时，应保证材料的结构稳定性。
- 6.2.4 模型安装应满足《水工（常规）模型试验规程》（SL 155）精度要求。
- 6.2.5 模型制作安装完成后，应进行质量和精度检查，并记录检查结果。

## 6.3 试验仪器

- 6.3.1 水位测量：超声水位仪、自动跟踪式水位计、波高仪等。
- 6.3.2 流速测量：能连续测量和记录的测速仪器，如旋桨流速仪、声学多普勒流速仪和 PIV 测速系统等。
- 6.3.3 流量测量：电磁流量计、超声波流量计和量水堰等。
- 6.3.4 流态测量：摄像机、照相机等。
- 6.3.5 溃口测量 三维地形扫描仪

## 6.4 试验目的

- 6.4.1 坝体溃决和泥石流演进过程的观测，应能定性、定量描述坝体溃决和泥石流演进过程，说明坝体浸润变化规律、坝体溃决破坏模式、泥石流演进规律及覆盖范围等特征。
- 6.4.2 泥石流厚度的测量。
- 6.4.3 泥石流表层流场的测量。

## 6.5 成果分析

- 6.5.1 应对各种工况的数值模拟进行成果分析。
- 6.5.2 应对计算成果进行可靠性和合理性分析，必要时与模型试验进行对比验证。
- 6.5.3 计算结果应包括下列内容：
  - a) 泥石流的演进过程；

- b) 特征断面的泥石流变化过程；
- c) 特征点的泥石流变化过程；
- d) 防控措施对泥石流的防控效果。

## 6.6 试验报告编写

试验报告应包含但不限于以下内容：

- a) 工程概况；
- b) 试验目的、研究内容及思路；
- c) 技术路线和方法；
- d) 模型设计；
- e) 试验过程；
- f) 试验数据；
- g) 成果分析；
- h) 结论和建议；

## 7 尾矿库溃坝数值模拟

溃坝模拟计算应与尾矿库稳定性分析一体化模拟

### 7.1 一般规定

7.1.1 尾矿库溃坝数值模拟，应包括尾矿坝失稳模拟和溃坝泥石流演进模拟两部分。

7.1.2 尾矿库溃坝数值模拟之前，应据 5.4 节的要求，进行尾矿库防洪能力评价。

7.1.3 尾矿库溃坝数值模拟，应建立尾矿坝稳定性与溃坝模拟计算一体化分析模型。

7.1.4 尾矿库溃坝安全风险分析成果或最不利运行条件下尾矿坝失稳模拟的计算滑移面，来综合判定尾矿库溃坝模拟溃口部位。

7.1.5 模拟逐渐溃溃口泥石流过程时，可采用动网格模拟技术，反应溃口形状变化过程。

7.1.6 尾矿坝失稳模拟和溃坝泥石流演进模拟，应采用三维数值模拟法计算。

### 7.2 尾矿坝失稳模拟分析

7.2.1 尾矿坝稳定性计算模型，应符合以下要求：

- 1 尾矿坝本构模型，宜采用 Mohr-Coulomb 或 Drucker-Prager 准则；
- 2 尾矿坝坝体材料及坝基土的物理力学参数，应与岩土工程勘察结果一致；
- 3 尾矿坝坝体材料及坝基土的抗剪强度指标，应根据强度计算方法与土的类别，按《尾矿设施设计规范》GB50863 中的有关规定进行选取；

4 尾矿坝稳定性计算荷载，应按《尾矿设施设计规范》GB50863 有关规定，考虑正常运行、洪水运行和特殊运行三种运行条件的荷载组合。

7.2.2 尾矿坝稳定性边界条件，应符合以下要求：

- 1 尾矿坝坡面及坝顶等临空面不设置边界条件；
- 2 其余位置均设置位移边界条件加以控制。

7.2.3 尾矿坝稳定性计算方法，应符合以下要求：

- 1 模型求解方法宜采用有限差分法、有限元法等数值计算方法。
- 2 对于尾矿堆积坝，模拟时可用拟合法确定各使用期及各运行条件下的临界浸润线。
- 3 对于尾矿堆积坝，可采用流固耦合分析，明确坝体内部地下水渗流模式及其对稳定性的影响。

### 7.3 溃坝模型及求解方法

7.3.1 溃坝模型应符合以下要求：

1 应采用三维尾矿坝模型，并充分考虑库区和下游复杂性，模拟真实地形对溃坝泥石流演进的影响。

2 尾矿库溃坝模拟范围宜包括全库区；下游模拟范围应大于溃坝可能波及范围，并充分考虑沟谷、农田、村庄、河流和公路等复杂地形地物条件。

3 宜采用实测或模型试验资料对模型糙率进行率定，宜进行模型水位、流量验证。

4 当无资料时，宜进行模型参数敏感性分析，应对模型计算结果进行合理性分析。

#### 7.3.2 溃坝泥石流应符合以下要求：

1 溃坝泥石流本构关系模型宜采用 VOF 多相流模型与  $k-\varepsilon$  湍流模型理论，也可采用粘性宾汉流体进行模拟。

2 VOF 多相流模型相数为 2，即溃坝泥石流和空气两种，其中空气为主相，溃坝泥石流为次相，计算在自重作用下溃坝流动情况。

3 应考虑最危险滑动面以上堆积尾矿溃坝对下游的影响，根据现场勘测确定溃坝下泄泥石流体积。

4 由溃坝泥石流下泄体积和溃坝下泄流量过程线确定尾矿库溃坝持续时间，数值模拟时间宜大于实际溃坝持续时间，待模拟结果基本无变化结束计算。

5 对库区及下游地形，可设置地表植被、构筑物等对泥石流的摩擦系数，以接近真实的溃坝结果。

#### 7.3.3 溃坝求解应采用以下方法：

1 溃坝数值模拟宜利用精细建模软件和流体动力学软件相耦合，实现尾矿库溃坝泥石流流动的高精度模拟。

2 溃坝数值模型求解方法宜采用有限差分法、有限元法、有限体积法等，并适应溃坝泥石流在尾矿库下游演进过程模拟要求。

### 7.4 网格划分及定解条件

#### 7.4.1 尾矿库溃坝模拟的计算网格，应符合以下要求：

1 计算网格可采用结构网格和非结构网格，并覆盖全部模拟区域。

2 计算网格应反映尾矿库特征和地形变化，网格的布设应疏密得当。

3 对重点区域、地形地物变化较大区域、体积较小构筑物等，网格应适当加密；对于地势较为平坦，地形地物变化不大的区域，网格尺寸可以适当放大。

4 应统筹网格质量、网格精度和计算效率，应在保证网格质量和精度的前提下，适当

提高计算效率。

5 宜进行计算网格无关性分析。

7.4.2 尾矿库溃坝模拟的定解条件，应符合以下要求：

1 初始条件，应根据溃坝模拟的设计要求，确定溃坝前的坝高和库水位参数。

2 尾矿坝坝顶，可考虑临时堆载的影响。

3 边界条件，应根据模拟软件要求加以详细设置，可按下列方法选取：

1) 初期坝及堆积坝表层应依据孔隙水压力设为透水边界。

2) 尾矿坝顶面、平台及坡面为自由面，下游边界条件应给定自由出流。

3) 其余边界通过位移边界条件控制。

4 尾矿坝溃口设置为溃坝泥石流流量入口，溃坝残余坝体、下游地形及重要构筑物设置为壁面。

## 7.5 计算方案

7.5.1 应根据 5.1 节溃坝类型识别结果，结合尾矿坝稳定性计算结果，分析可能出现的溃坝模式，并确定尾矿坝的溃口部位。

7.5.2 尾矿坝溃决模式宜采用坝顶瞬时全溃或坝顶逐步溃决模式。

7.5.3 逐渐溃决的溃口流量过程，可按以下步骤分析：

1 先根据稳定性计算确定初始溃口的形状和尺寸，同时假定该形状在溃口发展过程中一直保持不变，然后根据泥沙冲刷率公式计算下一时段溃口处的泥沙冲刷量。

2 根据泥沙冲刷量计算下一时刻溃口的下切深度。

3 根据新的溃口底部高程和溃口的溃口宽度，计算下一时刻的溃口出流量。

7.5.4 应提出溃坝泥石流防控措施，并进行方案合理性验证。

## 7.6 结果分析

7.6.1 应针对各种工况下尾矿坝稳定性，进行数值模拟结果分析。

7.6.2 应对溃坝模拟成果进行可靠性和合理性分析，必要时与模型试验进行对比验证。

7.6.3 溃坝结果分析应包括下列内容：

1 泥石流的演进过程；

2 特征断面的泥石流变化过程；

3 特征点的泥石流变化过程；

4 防控措施对泥石流的防控效果。

## 8 尾矿库溃坝概率分析

### 8.1 分析方法

8.1.1 尾矿库溃坝概率分析之前，应据 5.1 节的要求，进行尾矿库溃坝类型和溃坝安全风险因素识别。

8.1.2 应建立尾矿库溃坝事件定性描述和概率值的对应关系。可将事件描述为五类，并符合表 8.1.1-1 的规定。

表 8.1.1-1 尾矿库溃坝事件定性描述和概率量级的转换关系

事件定性描述	概率量级	判 据
事件不会发生	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$	概率量级宜针对不同溃坝事件类型，根据历史资料和尾矿坝安全鉴定结果，并结合尾矿坝危险因素和长期运用情况给出。  本表数据可供参考。
事件基本不会发生	$1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$	
事件可能发生	0.01~0.1	
事件很可能发生	0.1~0.5	
事件非常可能发生	0.5~1.0	

8.1.3 应根据 5.1 节识别出的溃坝类型和相应溃坝风险因素，建立相应的溃坝概率的二级指标估算表。

8.1.4 应根据 8.1.3 确定的溃坝概率估算表，采用专家打分法，进行各溃坝风险因素的发生概率打分。

8.1.5 权重的确定应符合下列规定：

1 可通过尾矿库病害风险事件的统计结果，计算事件发生几率，作为各风险因素在溃坝类型中的权重。尾矿库病害事件统计数据，可参照相关参考文献<sup>[1-3]</sup>。

2 可通过专家打分法，明确溃坝各风险因素在溃坝类型中的权重。

3 应基于 5.1.7 对溃坝类型的识别结果，并结合专家打分法，明确溃坝类型在溃坝事件中的权重。

8.1.6 可建立尾矿库溃坝灾害评价事故树，明确溃坝风险因素、溃坝类型与溃坝事件的逻辑关系。

8.1.7 可根据尾矿库溃坝灾害事故树，采用线性加权法构造溃坝后果综合评价函数，尾矿库溃坝概率表达式应为计算溃坝概率与溃坝导致后果调整系数的乘积。

## 8.2 分析结果

8.2.1 根据所列溃坝因子概率估算表和权重，检查尾矿库运行中各风险因素（一级指标）现状情况，先按式（8.2.1-1）计算溃坝类型（二级指标）概率分值，再按式（8.2.1-2）计算出尾矿库溃坝的概率数值。

$$S_i = \sum_{j=1}^n (N_j \times W_j) \quad (8.2.1-1)$$

$$FP = \sum_{i=1}^n (S_i \times W_i) \quad (8.2.1-2)$$

式中：S<sub>i</sub>—一级指标的分值；

N<sub>j</sub>—二级指标分值；

W<sub>j</sub>—二级指标权重值；

W<sub>i</sub>—一级指标权重值；

FP—溃坝概率值。

8.2.2 为综合考虑尾矿库规模、经济和社会环境等后果因素所占权重及其影响，应对溃坝概率进行调整，获得最终的尾矿库溃坝概率综合分析结果。尾矿库溃坝后果调整系数可按表 8.2.2-1 确定。

表 8.2.2-1 尾矿库溃坝后果调整系数

尾矿坝级别	尾矿库下游（距坝脚 1km）状况		
	基本农田、自然保护区、生态保护红线	头顶库（有居民或重要设施等）	非头顶库（无居民或重要设施等）
1	1.30	1.20	1.00
2	1.25	1.10	1.00
3	1.25	1.10	1.00
4	1.20	1.00	1.00
5	1.20	1.00	1.00

8.2.3 应根据尾矿库溃坝概率综合分析结果，与尾矿库溃坝事件定性描述和发生概率的转换关系表 8.1.1-1 相比较，确定溃坝概率等级。

## 9 尾矿库溃坝模拟分析报告编写

- 9.1 尾矿库溃坝模拟应提交《尾矿库溃坝模拟分析报告》。
- 9.2 《尾矿库溃坝模拟分析报告》应提交纸版报告和相关电子文档等成果。
- 9.3 尾矿库溃坝数值模拟分析，应符合附录 D 的成果要求。
- 9.4 尾矿库溃坝模拟分析报告，内容应包括：项目概述，尾矿库设计方案，尾矿库溃坝安全风险分析，尾矿坝失稳模拟分析，尾矿库溃坝模拟分析，尾矿库溃坝概率分析，结论与建议等。内容提纲参见附录 E。
- 9.5 报告应按规定履行审查审批程序。

## 附录 A 尾矿库防洪能力评价基本控制方程

### A.0.1 洪水计算

#### 1 洪峰流量计算

$$Q_p = 0.278\phi_p i_p F = 0.278 \frac{\phi_p S_p}{\tau_p^{n_p}} F \quad (\text{A.0.1-1})$$

其中:  $\tau_p \leq 1$ ,  $n_p = n_{1p}$ ;  $\tau_p > 1$ ,  $n_p = n$ ;  $i_p = \frac{P_{\tau_p \text{面}}}{\tau_p}$ ;  $\tau_p = x \left( \frac{L}{\sqrt{J}} \right)^y$

式中:  $Q_p$ —设计洪峰流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\phi_p$ —设计洪峰径流系数;

$i_p$ —相对于汇流时间  $\tau_p$  的设计面暴雨强度,  $\text{mm}/\text{h}$ ;

$S_p$ —设计最大时雨量,  $\text{mm}$ ; 各种频率的雨量  $S_p = K_p \bar{P}_1 = P_{1p}$ ;

$P_{\tau_p \text{面}}$ —一定频率下  $\tau_p$  历时的设计面暴雨量,  $\text{mm}$ ;

$\tau_p$ —一定频率下的汇流历时, 小时;

$\alpha_p$ —设计洪量径流系数;

$x$ 、 $y$  为地区汇流参数;

$J$ —主沟平均坡比;

$L$ —控制地点以上的河流长度;

$F$ —汇水面积,  $\text{km}^2$ 。

#### 2 洪水总量计算

$$W_{\text{三}p} = 0.1 \times K_F \times K_p \times \bar{P}_{\text{三}} \times \alpha_{\text{三}p} \times F = 0.1 \times \alpha_{\text{三}p} \times P_{\text{三}p \text{面}} \times F \quad (\text{A.0.1-2})$$

$$W_{(\text{三}-24)p} = 0.1 \times \alpha_{(\text{三}-24)p} \times (P_{\text{三}p \text{面}} - P_{24p \text{面}}) \times F \quad (\text{A.0.1-3})$$

$$W_{24p} = W_{\text{三}p} - W_{(\text{三}-24)p} \quad (\text{A.0.1-4})$$

式中:  $W_{\text{三}p}$ 、 $W_{(\text{三}-24)p}$  和  $W_{24p}$ —不同频率的设计三日洪量、前锋洪量和主峰洪量 (即 24 小时洪量), 万  $\text{m}^3$ ;

$\alpha_{\text{三}p}$  和  $\alpha_{(\text{三}-24)p}$ —不同频率的三日洪量径流系数和前锋洪量径流系数;

$P_{\text{三}p \text{面}}$  和  $P_{24p \text{面}}$ —不同频率三日、24 小时设计面暴雨量,  $\text{mm}$ ;

$F$ —汇水面积,  $\text{km}^2$ 。

#### 3 洪水过程线计算

洪水过程线形状系数:

$$\gamma_p = \frac{W}{Q_p \times T \times 0.36} \quad (\text{A.0.1-5})$$

式中： $Q_p$ —洪峰流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$W$ —洪水总量，万  $\text{m}^3$ ；

$T$ —主峰洪水历时。

## A.0.2 调洪计算

### 1 调洪计算基本原理

任一时段内入库水量减去出库水量等于该时段内水库蓄水量的变化量。

$$(Q_1 + Q_2) / 2 \cdot \Delta t - (q_1 + q_2) / 2 \cdot \Delta t = V_2 - V_1 = \Delta V \quad (\text{A.0.2-1})$$

式中： $Q_1$ —时段初的入库流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$Q_2$ —时段末的入库流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$q_1$ —时段初的出库流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$q_2$ —时段末的出库流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$V_1$ —时段初的库蓄水量， $\text{m}^3$ ；

$V_2$ —时段末的库蓄水量， $\text{m}^3$ ；

$\Delta t$ —时段长，其大小一般可视入库流量的变化幅度而定。陡涨陡落的小河取 1~6h，变化平缓的大河取 12~24h。

在以上方程中， $Q_1$ 、 $Q_2$ 可由设计洪水过程线上查得， $\Delta t$ 可根据具体情况选定， $q_1$ 及  $V_1$ 根据起调条件确定。 $q_2$ 和  $V_2$ 是未知数。

### 2 下泄流量 $q$ 与蓄水量 $V$ 的关系

应建立水库下泄流量  $q$  与蓄水量  $V$  的关系。

$$q = f(V) \quad (\text{A.0.2-2})$$

应将式 (A.0.2-1) 和 (A.0.2-2) 组成求解方程组。

## 附录 B 尾矿库溃坝模型试验相似比例尺

B.0.1 溃坝试验的相似准则及比例尺，见表 B.0.1。

表 B.0.1 模型相似比例尺

相似准则	相似比尺	符号	比尺关系	备注
几何相似	模型几何比尺	$\lambda_L$	$\lambda_L$	正态定床模型
水流运动相似	流速比尺	$\lambda_v$	$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}$	—
	流量比尺	$\lambda_Q$	$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$	
	糙率比尺	$\lambda_n$	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	
	时间比尺	$\lambda_t$	$\lambda_t = \lambda_L^{1/2}$	
泥沙运动相似	沉降速度比尺	$\lambda_{\omega}$	$\lambda_{\omega} = \lambda_v$	冲淤时间比尺与时间比尺相差不宜过大
	起动流速比尺	$\lambda_{v_c}$	$\lambda_{v_c} = \lambda_v$	
	挟沙能力比尺	$\lambda_{S^*}$	$\lambda_{S^*} = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}}$	
	冲淤时间比尺	$\lambda_{t_2}$	$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_{S^*}} \lambda_t$	
稳定状态相似	堆积密度比尺	$\lambda_{\rho}$	$\lambda_{\rho} = \frac{\lambda_c}{\lambda_L}$	—

## 附录 C 尾矿库溃坝数值模拟基本控制方程

### B.0.1 数学模型及基本假设

1 由连续性方程和动量方程所组成的流动模型（圣维南方程组），见式（C.0.1-1）~式（C.0.1-2）。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{C.0.1-1})$$

动量方程：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \mu_t)] \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho B_i \quad (\text{C.0.1-2})$$

式中： $\rho$ —密度系数， $\text{kg/m}^3$ ；

$\mu$ —分子黏性系数， $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ，分子黏性系数由宾汉模型给出；

$p$ —修正压力， $\text{Pa}$ ；

$B_i$ —单位体积的体积力， $\text{N/m}^3$ ；

$\mu_t$ —紊流黏性系数， $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ 。

2 溃坝理论分析及模拟中，采用以下几点假设：

- 1) 采用拉格朗日方法描述固体骨架，并假设其为连续介质；
- 2) 固体颗粒不可压缩；
- 3) 采用太沙基有效应力原理，固体骨架采用有效应力模型模拟；
- 4) 考虑孔隙率和颗粒骨架体积随时间的变化；
- 5) 等温条件。

### B.0.2 数值计算原理

进一步应用 VOF 法和  $k-\varepsilon$  双方程紊流模型耦合的数值模拟方法，对溃坝泥石流场进行模拟。

#### 1 VOF 模型

VOF 法在计算域内，对模型中的每一相引入一个变量——相体积分数  $F$ ， $F$  是空间和时间的函数，即  $F=F(x, y, z, t)$ 。在离散网格内， $F$  取值是网格内各相流体的体积与能够被流体通过的空间体积的比。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad F \in [0, 1] \quad (\text{C.0.2-1})$$

## 2 湍流模式

标准的  $k-\varepsilon$  模型是基于能量方程和扩散速率方程而得出的模型，湍流动能  $k$  和耗散率

$\varepsilon$  :

$k$  方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (\text{C.0.2-2})$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{C.0.2-3})$$

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}$$

式中:  $u_i$ 、 $u_j$ —速度分量, m/s;

$x_i$ 、 $x_j$ —坐标分量, m;

$\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$ —分子动力黏性系数, N·m/s;

$k$ —紊动动能, m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;

$\varepsilon$ —紊动耗散率, m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;

$P$ —修正压力, Pa;

$\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ — $k$ 、 $\varepsilon$  的紊流普朗特数, 无因次;

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ —经验常数, 无因次;

$c_\mu$ —经验常数取 0.09。

## 3 求解方法

将模型的控制方程  $k-\varepsilon$  紊流方程和 VOF 法的体积函数输运方程用以下通用方程表示, 包含时间导数项、对流项、扩散项、源项。

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varphi) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) = S_\varphi \quad (\text{C.0.2-4})$$

式中:  $u_j$ —流体速度矢量, m/s;

$\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\varphi$ —通用因变量 (如  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $k$ 、 $\varepsilon$  等);

$\Gamma_\phi$ —对应于  $\phi$  的扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$S_\phi$ —方程的源项。

采用有限体积法离散方程, 控制体积单元如图 B.0.2-1。

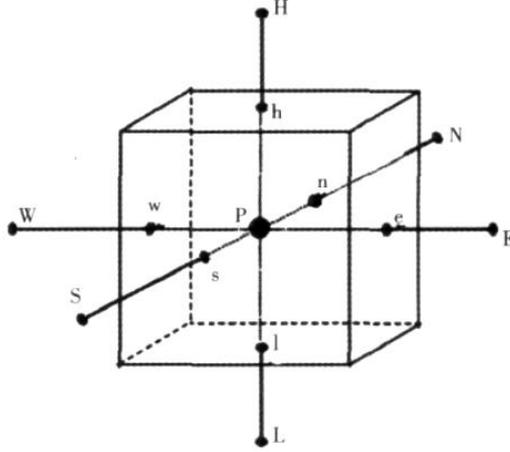


图 B.0.2-1 三维控制体积单元

在由表面  $S_j$  ( $j=1, N$ ) 所围成的控制体积  $V_p$  内, 对上式进行积分得到下式:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_{V_p} \rho \phi dV}_{T_1} + \underbrace{\sum_j \int_{S_j} (\rho u_r \phi - \Gamma_\phi \text{grad} \phi) dS}_{T_2} = \underbrace{\int_{V_p} S_\phi dV}_{T_3} \quad (\text{C.0.2-5})$$

式中:  $u_r$ —流体相对于表面  $S$  的速度,  $\text{m/s}$ ;

$T_1$ —时间导数项;

$T_2$ —总通量项, 包括对流项和扩散项;

$T_3$ —源项。

## 附录 D 尾矿库溃坝数值模拟分析 成果要求

**C.0.1** 尾矿库溃坝数值模拟分析的主要内容及要求，见表 C.0.1。

表 C.0.1 尾矿库溃坝数值模拟分析成果表

成果名称	主要内容及要求
模型建立	利用精细建模软件，建立尾矿坝稳定性和溃坝分析三维计算模型。模型模拟范围宜包括全库区和尾矿坝，下游范围应大于溃坝可能波及范围。
溃坝泥石流演进状态	根据分析结果，提取尾矿库发生溃坝过程以及溃决泥石流中不同时刻流动演进情况的体积分数云图，时间间隔以 100~300s 为宜。
溃坝泥石流淹没高度	根据分析结果，提取尾矿库溃决泥石流下泄泥石流对地面压力，获得泥石流淹没高度的演进分布。时间间隔以 100~300s 为宜。
溃坝泥石流速度演进	根据分析结果，提取尾矿库溃决泥石流下泄泥石流流动速度的演进分布。时间间隔以 100~300s 为宜。
特征断面和特征点变化过程	根据分析结果，提取特征断面的泥石流变化过程和特征点的泥石流变化过程。
溃坝泥石流影响范围	根据分析结果，提取尾矿库自溃口起的泥石流演进影响范围，获取最大影响距离，分析对下游既有建（构）筑物、交通道路、农田等设施的影响。
防控建议	根据溃坝模拟计算结果，提出溃坝防控措施，并分析对泥石流的防控效果。
附图要求	1、项目区遥感影像图； 2、1:1000 数字地形图； 3、溃坝泥石流演进最终影响范围图。

## 附录 E 尾矿库溃坝模拟分析报告 内容提纲

### 前言

简要说明模拟分析过程和结果。

### 1 项目概述

#### 1.1 项目背景

项目来源，矿山企业概况，尾矿库地理位置，周边环境状况，水文气象条件，地形地貌条件，地层岩性及地质构造，水文地质工程地质，库区不良地质作用，地震效应。

#### 1.2 编制原则和依据

报告编制的原则、技术标准和相关技术资料。

#### 1.3 评价内容和组织

尾矿库溃坝模拟分析目的和内容，评价工作组织，评价实施过程等。

### 2 尾矿库设计方案

#### 2.1 尾矿坝设计

初期坝和尾矿堆积坝的几何模型及构造形式等。

#### 2.2 放矿、排洪及排渗设计

尾矿库的放矿方式及排渗方法，排洪系统布置，尾矿库排洪及澄清水回收。

#### 2.3 库容设计

尾矿库设计等别、防洪标准，尾矿库库容设计。

#### 2.4 基本控制指标

尾矿浆澄清距离，最小安全超高，最小干滩长度，浸润线埋深等。

#### 2.5 辅助设施

尾矿库的监测、通讯、照明措施，上坝道路设计等。

### 3 尾矿库溃坝安全风险分析

#### 3.1 尾矿库溃坝类型识别

结合尾矿库质量检查和安全风险复核结果，分析可能出现的溃坝类型。

#### 3.2 尾矿库溃坝安全风险因素分析

尾矿库失稳溃决风险因素分析，尾矿库渗透破坏风险因素分析，尾矿库漫顶溃决风险因素分析，尾矿库结构破坏风险因素分析。

#### 3.3 尾矿库防洪能力评价

尾矿库入库洪水计算，尾矿库排水系统（排水管、排水斜槽等）排水能力计算、溢洪道泄流能力计算，尾矿库调洪计算。

#### 4 尾矿坝失稳模拟分析

##### 4.1 分析方法

尾矿坝建模方法和失稳模拟方法，采用的分析软件及主要功能。

##### 4.2 模型建立

尾矿库失稳模拟的计算模型、计算参数、边界条件、荷载组合及安全系数要求。

##### 4.3 稳定性分析

尾矿库在正常工况、洪水工况和特殊工况的稳定性分析，滑面部位及安全系数计算，溃坝模拟的溃口位置确定。

#### 5 尾矿库溃坝模拟分析

##### 5.1 理论基础

尾矿库溃坝模拟计算原理，溃坝模拟软件介绍。

##### 5.2 模型建立

建立溃坝模拟的数学模型及基本假设，设置初始条件、设置计算参数和边界条件，根据溃坝类型识别和三维稳定性分析结果，明确溃决模式和溃口位置。

##### 5.3 数值模拟分析

进行尾矿库溃坝的数值模拟分析。

根据溃坝模拟结果，分析溃坝泥石流演进情况、泥石流压力（淹没高度）演进情况、特征断面和特征点的泥石流变化过程、泥石流速度演进情况和溃坝泥石流最终影响范围。

分析溃坝泥石流沿下游流动的最大扩散距离、扩散范围，与选厂、居民区、农田、河道、公路设施等的最小距离，分析尾矿库溃坝对下游的损害程度。

提出溃坝防控措施，并分析对泥石流的防控效果。

#### 6 尾矿库溃坝概率分析

##### 6.1 溃坝类型和危险因素识别

尾矿库溃坝事件案例分析，尾矿库溃坝事故类型分析，尾矿库溃坝影响因素识别。

##### 6.2 溃坝灾害事故树

建立尾矿库溃坝灾害评价事故树，明确溃坝事件、溃坝类型与溃坝危险因素的逻辑关系。

##### 6.3 溃坝概率及权重分析

通过尾矿库病害事件统计或专家打分法，获取尾矿库溃坝类型和各危险因素的概率。

通过专家打分法，确定尾矿库溃坝类型的二级权重和各危险因素的一级权重。

#### 6.4 溃坝概率计算及后果综合评价

依据溃坝危险因素概率与一级权重的乘积，获得溃坝类型的概率。

依据溃坝类型的概率和相应二级权重的乘积，获得溃坝概率。

确定尾矿库溃坝概率分析调整系数，获得尾矿库溃坝概率。

根据溃坝风险概率计算结果，进行尾矿库溃坝后果综合评价。

### 7 结论与建议

#### 7.1 主要结论

#### 7.2 存在问题与建议

#### 附图

项目区遥感影像图、尾矿库周边地形图、溃坝泥石流对周边环境影响范围图等。

## 参考文献

- [1] 吴宗之,梅国栋. 尾矿库事故统计分析及溃坝成因研究[J]. 中国安全科学学报,2014,24(9):70-76.
- [2] 张家荣,刘建林. 中国尾矿库溃坝与泄露事故统计及成因分析[J]. 中国铝业,2019,43(4):10-14.
- [3] 张锦峰,宋志飞,耿闻泽. 我国尾矿库数量事故统计分析和防范[J]. 现代矿业,2023,39(3):6-9.
- [4] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑,2001,(01):69-71.
- [5] 沃廷枢. 尾矿库手册[M]. 冶金工业出版社,2013,8.
- [6] 马舒琪,陈玉明. 尾矿库防护能力可靠性分析[J]. 工况自动化,2010,11.