

基于三维激光扫描的尾矿库变化监测及稳定性分析

Monitoring and Stability Analysis of Tailings Pond Changes Based on 3D Laser Scanning

穆泉寒¹, 吴彩燕^{1,2,3}, 易柏成¹, 廖军⁴

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 国家遥感中心绵阳科技城分部, 四川 绵阳 621010;
3. 西南科大四川天府新区创新研究院, 四川 成都 610299; 4. 四川安信科技有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:本文以金属非金属矿山可视化安全监测专项为依托,利用三维激光扫描技术对米易万年沟尾矿库进行安全监测,对2021年1月到2022年12月的库区进行了扫描监测。结果表明:现状干滩长度524.555 m,万年沟尾矿库万年沟库区面积增加14.5万m²,堆积坝高由1579.249 m增加至1589.09 m共增加9.841 m,筑坝速率为4.9205 m/a;新增堆排尾砂约1265.7万m³,堆排速率为660.365万m³/a;尾矿库总库容较大,筑坝速率、堆排速率较快,为防止溃坝带来的严重后果,运用了三种极限平衡法,其计算结果表明尾矿库目前处于稳定状态。

关键词:尾矿库; 三维激光扫描; 变化监测; 稳定性分析; 极限平衡法

中图分类号: TD176

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)04-0067-09

Abstract:This article is based on the special project of visual safety monitoring for metal and non-metallic mines. 3D laser scanning technology is used to monitor the safety of the Mi Yi Wanniangou tailings pond. The reservoir area from January 2021 to December 2022 was scanned and monitored. The results show that the current length of the dry beach is 524.555 meters, the area of the Wanniangou tailings pond has increased by 145 000 square meters, and the height of the accumulation dam has increased from 1 579.249 meters to 1 589.09 meters, with a total increase of 9.841 meters, The dam construction speed is 5.134 m/a; Approximately 12.657 million cubic meters of newly added tailings, The stacking rate is 66 036 500 m³/a; The total capacity of the tailings pond is relatively large, and the dam construction and discharge rates are fast. In order to prevent serious consequences caused by dam failure, three limit equilibrium methods were used. The calculation results show that the tailings pond is currently in a stable state.

Key words:dailings pond; 3D laser scanning; change monitoring; stability analysis; limit equilibrium method

1 前言

矿产资源是中国重要的国家战略性资源,在我国经济社会建设高速发展的过程中发挥着很大作用,比如钒钛磁铁矿、稀有金属矿等。尾矿库是整个矿产资源开发的过程中的组成部分,也是重要的一环^[1]。尾矿库通常是在利用筑坝法拦截谷口以及周围地产生的,用来对堆贮金和非金属矿山进行矿物选别,并清除尾矿和其他工业废弃物的主要场所。尾矿库具有较强的能量释放能力,

但也是一个潜在的泥石流威胁源,如果施工管理不当,就有可能导致溃坝灾害的发生,而一旦发生溃坝事故,将会带来极其严重的后果^[2]。三维激光扫描技术是GPS发展之后测量行业的一场科技变革,因为它的无接触式、快捷性、测量的高密度性、穿透力等优势,三维激光扫描技术有着实景复制技术的美称。三维激光扫描技术在使用过程中无需实体接触,适应了各种各样复杂的环境^[3]。因此利用该技术的优点,应用于尾矿库的安全监测和稳定性分析,对矿山的安全、可持续生产有着重要的现实意义^[4]。

随着国家的快速经济增长,必须满足日益增长的对自然资源的需求。但是,在这个过程中,必须承担巨额的工作、生活成本,这与现在强调的矿业的可持续性相悖。因此不少的尾矿库面临着堆排速率和筑坝速率增加,库容量大的现状^[5]。研究表明,滩

[作者简介] 穆泉寒(1998—),男,硕士,主要从事矿山安全、地质灾害等方面的研究工作。

[引用格式] 穆泉寒,吴彩燕,易柏成,等.基于三维激光扫描的尾矿库变化监测及稳定性分析[J].中国矿山工程,2023,52(4):67-75.

面表层的砾石类型以及它们的凝胶化作用对河床的稳定性有重大的影响。当滩面中的砾石的流动速度提升时,它们的凝胶化作用也会提升,这会对坝体的稳定性产生负面的影响。此外,滩面中砾石的凝胶化作用会对坝体的稳定性产生负面的影响,例如,当滩面中砾石的流动速度提升时,它们的凝胶化作用会减弱,这会对坝体的稳定性产生负面的影响,这样会导致尾矿坝的不稳定^[8-14]。尾矿库坝体的稳定性分析可以理解为一个斜坡的稳定性分析,目前定性、定量和非确定性分析法是斜坡稳定性分析的主要方法^[15]。其中定性分析方法无法顾及考虑变形和变形能力之间的关系,也没有考虑应力和强度之间的关系,因此很少被使用^[16];而非确定性分析方法在工程实例的问题中难以运用,因为在使用此方法的过程中需要统计大量因子,并要求各因子的赋值比较精确^[17];定量分析方法中被广泛使用的是以数学和力学为基础的极限平衡法,包括了简化毕肖普法、瑞典圆弧法和 Morgenstern-Price 法等^[18-19]。瑞典条分法不考虑土条之间的相互作用力,不满足每一土条的力及力矩平衡条件,仅满足整体力矩平衡条件,计算中运用了土条的法向静力平衡条件、库仑强度理论、整体对滑弧圆心的力矩平衡。简化的毕肖普法在公式推导过程中使用了竖向力平衡的原理和力矩平衡原理,但公式推导后,又忽略竖向力,这是毕肖普法与瑞典条分法最本质的区别。Morgenstern-price 法给出了条间合力的作用位置,但改变条间合力的作用方向以求得最佳解^[20-22]。

据收集的设计等资料,万年沟尾矿库最终堆积标高 1 720 m,总坝高 325 m,总库容 3.26 亿 m^3 ,属坝体高、总库容大的尾矿库。目前尾矿库堆积坝高 1 589.09 m,总坝高 185.09 m,目前属二等库。

2 工程概况

1) 地形地貌

库区属中高山切割构造剥蚀地貌单元,整个呈“V”字形西高东低态势,沟底纵坡坡度 $10^\circ \sim 30^\circ$,两侧斜坡坡度 $25^\circ \sim 45^\circ$ 。位于库区的地貌呈现出一种类似蒲扇的状态,东部的坝基处的沟壑较浅,但长度超过 1 km,而从北到南,5 条自然沟道构筑了一个巨大的扇状结构,这里就是一个巨型的尾矿库。

2) 地质构造

据收集的相关资料,区内断裂构造以北东向、南北向两组为主,地质构造比较简单,断裂较少,节理裂隙不发育,且较均匀,属剥蚀稳定区;区内无不良地质现象,绝大部分地层属弱透水-微透水性。

3) 地层岩性

根据收集的信息,该区域的地层从上到下依次是第四纪残坡积粉质黏土、第四纪冲洪积漂卵石夹砂和震旦系宝山组千枚岩。这些岩石属于中度变质岩和软质岩。

4) 水文地质

库区属裂隙充水水文地质条件简单类型,主要为大气降水、次为溪沟水及构造裂隙、风化裂隙水。上层滞水:雨季时有短暂的上层滞水,孔隙潜水:主要赋存于第四系冲、洪积层中,其中含漂砾卵石、漂石、细砂层中水量较大,地下水还包含熔岩水、基岩裂隙水等。地形对于排出地表水和地下水都非常有利。

5) 气象水文

根据气象站的数据,该地区属于亚热带气候区。根据 1956—2001 年的统计数据,该地区的年平均降水量为 1 104.0 mm,其中 5~10 月份是雨季,这段时间内会出现大暴雨,占全年降水量的 94.4%。此外,该地区的日平均降水量为 8.24 mm。本月的降水量最多可达 514.99 mm,而月平均降水量则达到 91.5 mm。日最大降雨量为 136.1 mm,日平均降雨量为 3.0 mm。

3 尾矿库安全监测

3.1 无人机数据获取与处理

万年沟尾矿库是四川省最大的尾矿库,由于万年沟尾矿库的库区面积较大,采用 V100 飞马无人机进行数据采集。V100 飞马无人机续航能力强,传感器模块均采用多路冗余设计,凭借着其简单易用和高效可靠的优点适用于多种场景。本次采用的 V100 飞马无人机相关参数见表 1。

经过 2022 年 12 月的实地考察,完成了 2 架次的飞行,飞行面积达到了 23.758 km^2 。为了确保飞行的准确性,在尾矿库库区设置了像控点(GCP),并结合 Pix4Dmapper 对其进行了坐标校正。并结合 2021 年 1 月的飞行数据,最终得到了尾矿库的数字正射影像,具体如图 1 所示。

表1 机件参数

起飞重量	续航时间	巡航速度	机身长度	翼展	差分模式	GPS 更新频率	爬升/下降速度
8.5 kg	90 min	20 m/s	1 660 mm	2 356 mm	PPK/RTK 及其融合作业模式	20 Hz	3 m/s

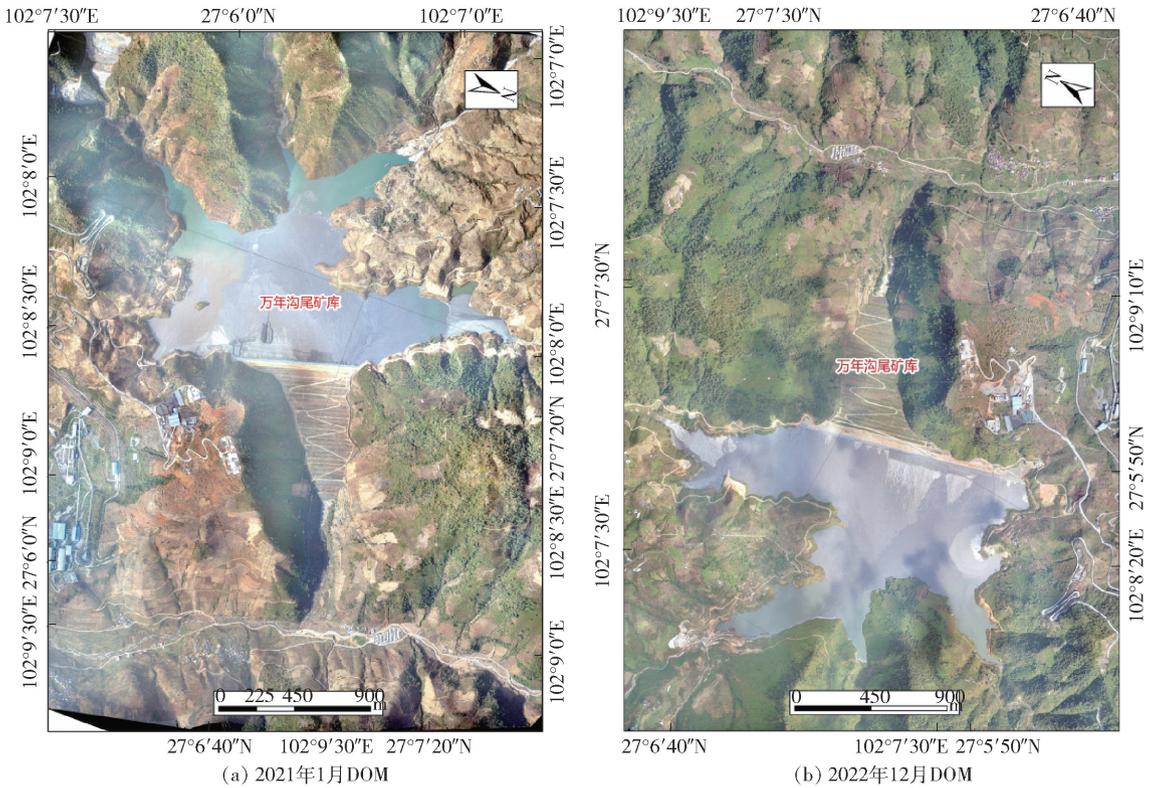


图1 万年沟尾矿库 DOM 与 DEM

3.2 参数提取及数据对比

基于三维激光点云数据,由于尾矿库库区面积大,堆积坝高,本次参数提取共布置了三条平行的提取坝体关键参数信息的剖面,并获取现状最小干滩长度测量数据,得到尾矿库坝体各项关键参数,剖面布置如图2所示。



图2 坝体关键参数提取剖面布置图

初期坝和堆积坝的总外坡比(1:3.3、1:4.8)均小设计中初期坝和堆积坝的总外坡比(1:1.8、1:5.0)。除正在堆筑的1590 m平台和堆积坝设计标

高1450 m、1455 m、1465 m、1475 m、1510 m、1545~1560 m、1575~1585 m平台外,其他台阶外坡比均大于对应的设计值。目前,万年沟尾矿库的干滩长度已经达到了524.555 m,这个数字大大超过了二等库的最低要求100 m,具体如图3、图4所示。

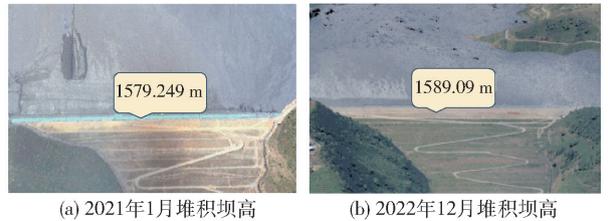


图3 堆积坝高变化

通过对2021年1月和2022年12月两期无人机收集的DEM数据进行精心的预处理,并使用MapTek I-Site Studio进行综合的地质建模,以及对其中的变化进行实时的监控。

通过数据对比分析得到尾矿库坝体及周边范围

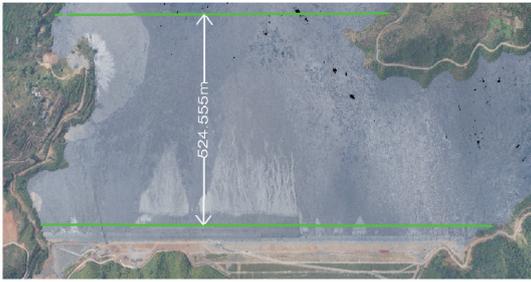


图4 最小干滩长度

内一些特定要素的变化情况和尾矿库的安全运营状况。主要对比方法是在两期无人机正射影像图上进行筛查与辨识,得到尾矿库排洪设施、堆积坝高、坝体缺陷、库区上下游建筑物等要素的变化情况。经过对比具体变化结果如下:万年沟库区面积增加14.5万 m²,堆积坝高由1 579.249 m增加至1 589.09 m共增加9.841 m,筑坝速率为4.920 5 m/a;新增堆排尾砂约1 265.7万 m³,堆排速率为660.365万 m³/a,具体如图5所示。

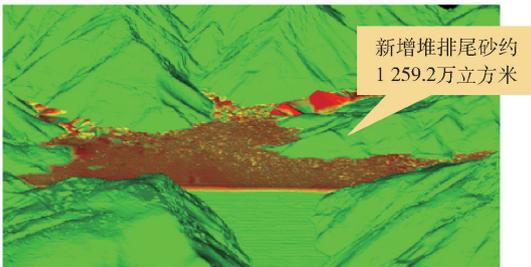


图5 万年沟尾矿库新增堆排尾砂

3.3 逃生路线图设计

出于节省工程资金的角度考虑,一般情况下尾矿库都建立在距离厂区较近的范围内,在这种情况下,尾矿库的位置有的靠近公路或铁路,有的靠近河流,还有的尾矿库库区下游存在居民点。对于万年沟这样的大型尾矿库而言,坝体一旦失事发生溃坝,会给下游人民的生命和财产造成灾难性的损失。因此,据万年沟尾矿库周边三维数据反馈信息,结合尾矿库周边居民和道路分布情况,绘制尾矿库逃生路线图,万年沟尾矿库上游人员沿公路朝库区左右两边进行撤离,库区下游民众沿公路朝左右两边撤离,具体撤离路线和方向如图6所示。

3.4 地质灾害分布情况

2023年2月22日13时许,内蒙古阿拉善盟阿拉善左旗新井煤业有限公司一露天煤矿发生大面积坍塌,有工作人员和车辆被埋。事故发生后造成2人死亡6人受伤,并有51人失联。在库区内,地质

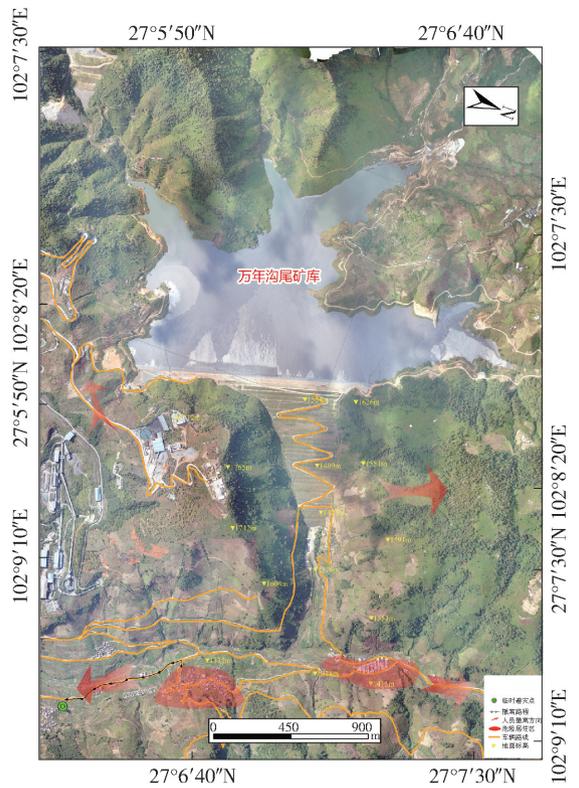
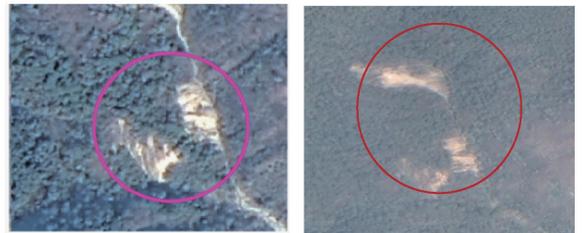


图6 逃生路线图

灾害的突发通常造成严重的后果,对库区的周边环境进行调查,监测可能存在的隐患是有必要的。因此,本文对比了2021年2月至2022年11月的高分影像图,具体如图7所示。在新一期的影像图中发现该处植被明显减少,在强工况降雨条件下可能发生滑坡和泥石流物源。



(a) 2021年1月影像

(b) 2022年12月影像

图7 库区上游隐患点

库区在夏季易出现强暴雨,容易造成山地滑坡,引发溃坝,应该对植被明显减少区域进行复垦,预防灾害发生。

4 稳定性分析

万年沟尾矿库筑坝速率较快(4.920 5 m/a),堆排速率快(660.365万 m³/a),库容量大。目前尾矿库堆积坝高1 589.09 m,总坝高185.09 m,是二等

库,在尾矿库处于稳定状态下继续堆排作业,尾矿库最终堆积标高预计将达到 1 720 m,总库容 3.26 亿 m^3 ,坝体总高度 325 m。大型尾矿库的稳定性分析将有利于矿山企业的稳定生产。库区下居民点多处,其中集中的居民点两处,若发生溃坝事故将产生严重后果,因此对万年沟尾矿库进行稳定性分析是有必要的。

4.1 DEM 叠加分析、剖面的选择与概化

将万年沟尾矿库 2021 年 1 月与 2022 年 12 月两期 DEM 数据进行叠加分析,具体如图 8 所示。从图中可以看出,除了尾矿库新增加的尾矿堆排部分,尾矿库坝体颜色统一,表明在这段时间之内尾矿库没有发生明显的变形^[22]。

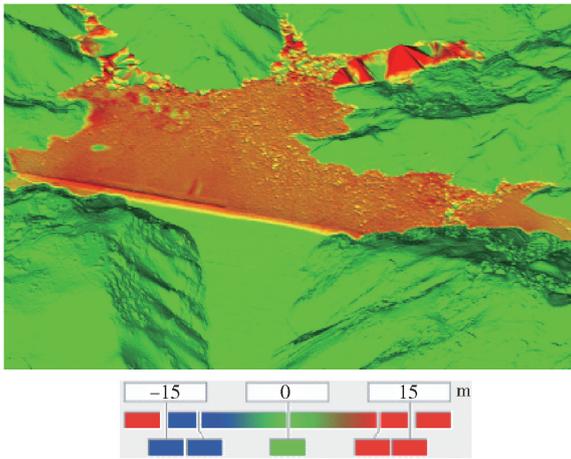


图 8 尾矿库 DEM 叠加分析结果

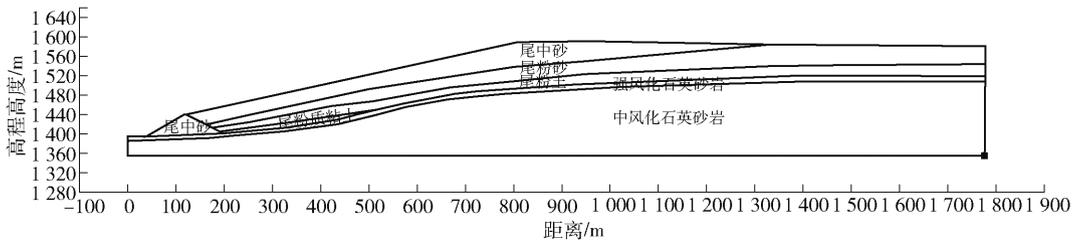


图 10 计算剖面概化

(AQ 2006—2005)中附录 B 坝体尾矿的平均物理力学指标、《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)中附录 C 坝体尾矿平均物理力学性质指标和《工程地质手册(第四版)》中土的经验数据,以及其他类似项目岩土体参数选取经验,综合确定了尾矿坝饱和渗流和稳定性计算的参数,具体数据见表 2。

2) 边界条件选取

根据本项目研究目标及工程实际情况,建立渗流有限元计算模型,计算得到坝体浸润线。计算中

根据尾矿库地下水渗流场和最不稳定剖面特征,并结合本次尾矿坝稳定性分析的目的,选取通过堆积坝、初期坝坝底、并顺冲沟延展的剖面作为本次的计算剖面,具体如图 9 所示。



图 9 计算剖面选择

2022 年 12 月,四川省安全科学技术研究所完成的三维激光扫描和无人机航测数据,以及《岩土工程勘察报告》(2015 年 2 月),为尾矿库初期坝、堆积坝的坡度、高程、干滩等提供了重要的参考依据,同时,根据周边尾矿库资料及区域地质资料,对原始地形、地层划分进行了相应的调整。图 10 所示为选取计算剖面的地层概化图。

4.2 参数及边界条件

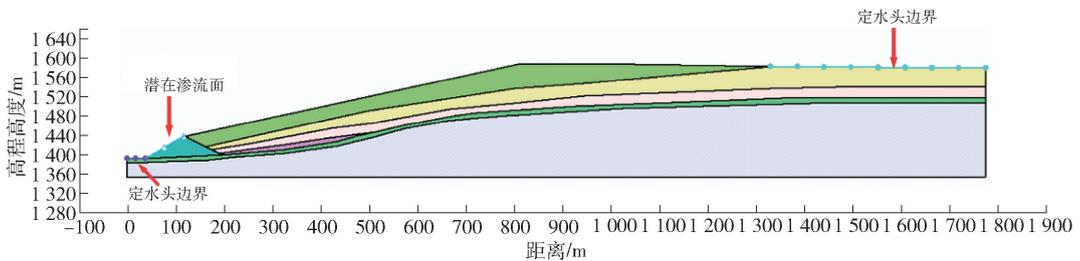
1) 参数选取

根据《攀钢集团万年沟尾矿库坝体稳定性试验研究堆积坝工程地质勘察报告》《攀钢集团攀枝花新白马矿业有限责任公司白马选矿万年沟尾矿库坝体稳定性分析研究报告》《尾矿库安全技术规程》

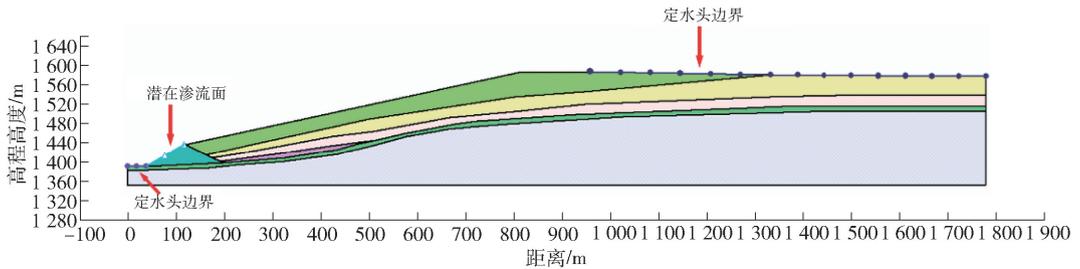
取尾矿坝上下游水位以下的坡面为第一类边界(定水头边界)。上游边界设置分两种情况,分别为 ①正常运行:现状干滩长度为 524.555 m,故设置正常运行水位为现状最小干滩长度时水位,即 1 584.421 8 m;②洪水运行:尾矿库现状尾矿坝堆积高度为 149 m,根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)中二等尾矿库等别和最小干滩长度的规定,设置洪水运行水位最小干滩长度为 100 m 时水位,即 1 591.049 m。具体如图 11 所示。

表 2 尾矿坝计算参数选取

序号	岩土类别单位	容重/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	渗透系数/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	饱和含水率/ $\%$	持水度/ $\%$
1	尾中砂	21.6	8	34	3.5×10^{-3}	33	7
2	尾粉砂	21.9	12	33	1.8×10^{-3}	32	8
3	尾粉土	22.2	20	31	1.1×10^{-4}	24	10
4	尾粉质黏土	21.3	20	26	1.7×10^{-5}	41	34
5	尾黏土	19.6	15	30	1.0×10^{-7}	17	15
6	堆石体	23	0	40	0.015	15	4
7	强风化石英砂岩	23	60	35	3.5×10^{-5}	15	8
8	中风化石英砂岩	27	500	45	5.0×10^{-6}	8	3



(a) 正常运行渗流边界条件



(b) 洪水运行渗流边界条件

图 11 边界条件选取

3) 滑面形状

本次稳定性分析中采用剪入剪出口方法定义滑面,计算获得合理的滑面和安全系数。在指定出入口之后,SLOPE/W 将出入口线上的各一点连成一条

直线,在通过这条直线中点的垂线建立一个半径点,这就形通过这个圆的圆心和半径,就可试算出最不稳定滑面、稳定性系数等。本次分析剪入剪出口设置如图 12 所示。

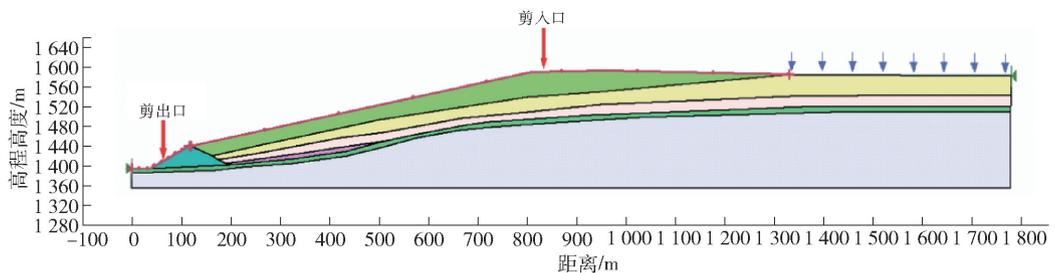


图 12 剪入剪出口设置示意

4) 地震影响

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)表 C.23 和《白马铁矿尾矿场地震地质调查

及场地地震基本烈度复核鉴定报告》,万年沟尾矿库所属区域地震基本烈度为Ⅷ度,基本地震动峰值加速度 $a = 0.15 g$ 。根据根据《尾矿设施设计规范》

(GB50863—2013)第4.4.1条条文说明和《水工建筑物抗震设计规范》(SL203—1997)第4.3.2条,竖向设计地震加速度取为水平向设计地震加速度的2/3,即 $av = 0.10g$ 。

4.3 浸润线计算

1) 模型的验证

渗流分析必须获得收敛解,计算浸润线才可

靠可信。检查方式为完成渗流计算后,绘制参数设置中输入的渗透函数曲线和软件计算渗透函数曲线,当这两条曲线重合时,说明计算结果为收敛解。

图13所示为计算收敛性,输入和计算渗透函数曲线重叠度较高,说明模型参数选择适当、边界条件设置正确,计算浸润线结果可信可靠。

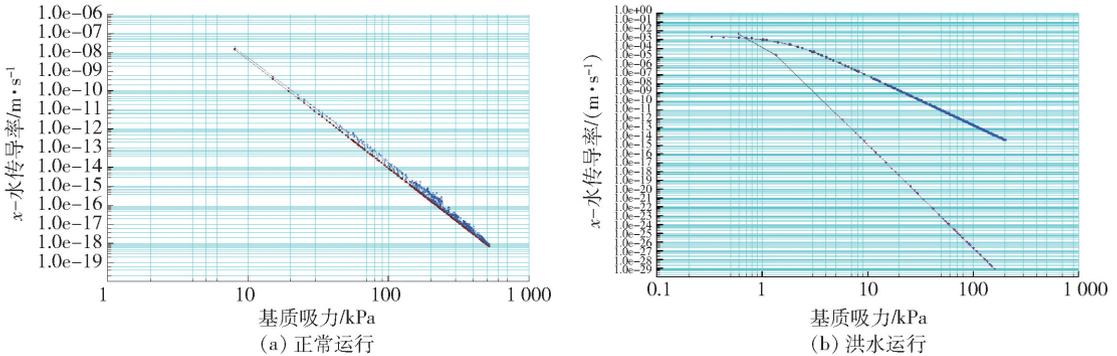


图13 计算收敛性

2) 计算结果

通过建立尾矿坝二维模型,可以计算出在①正常运行和②洪水运行条件下尾矿浸润线的分布

情况,并将其结果展示在图14和图15中。统计各级子坝距浸润线距离(即浸润线埋深),结果见表3。

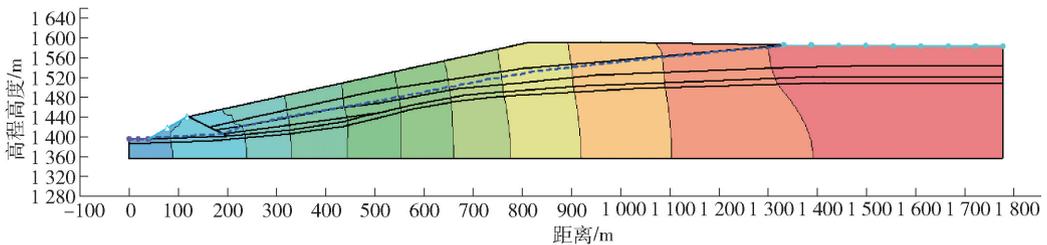


图14 正常运行浸润线计算结果

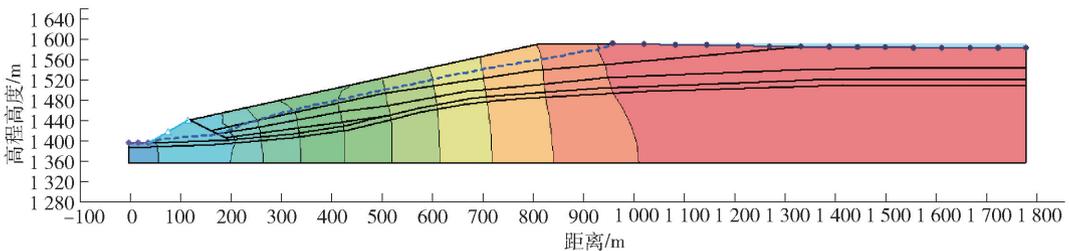


图15 洪水运行浸润线计算结果

表3 计算浸润线埋深结果

工况	埋深/m								初期坝 坝顶	规范 要求/m
	1 455	1 475	1 495	1 515	1 535	1 555	1 575	1 590		
正常运行	49	41	45	51	55	56	56	62	38	8~6
洪水运行	40	26	25	22	27	22	25	32	33	

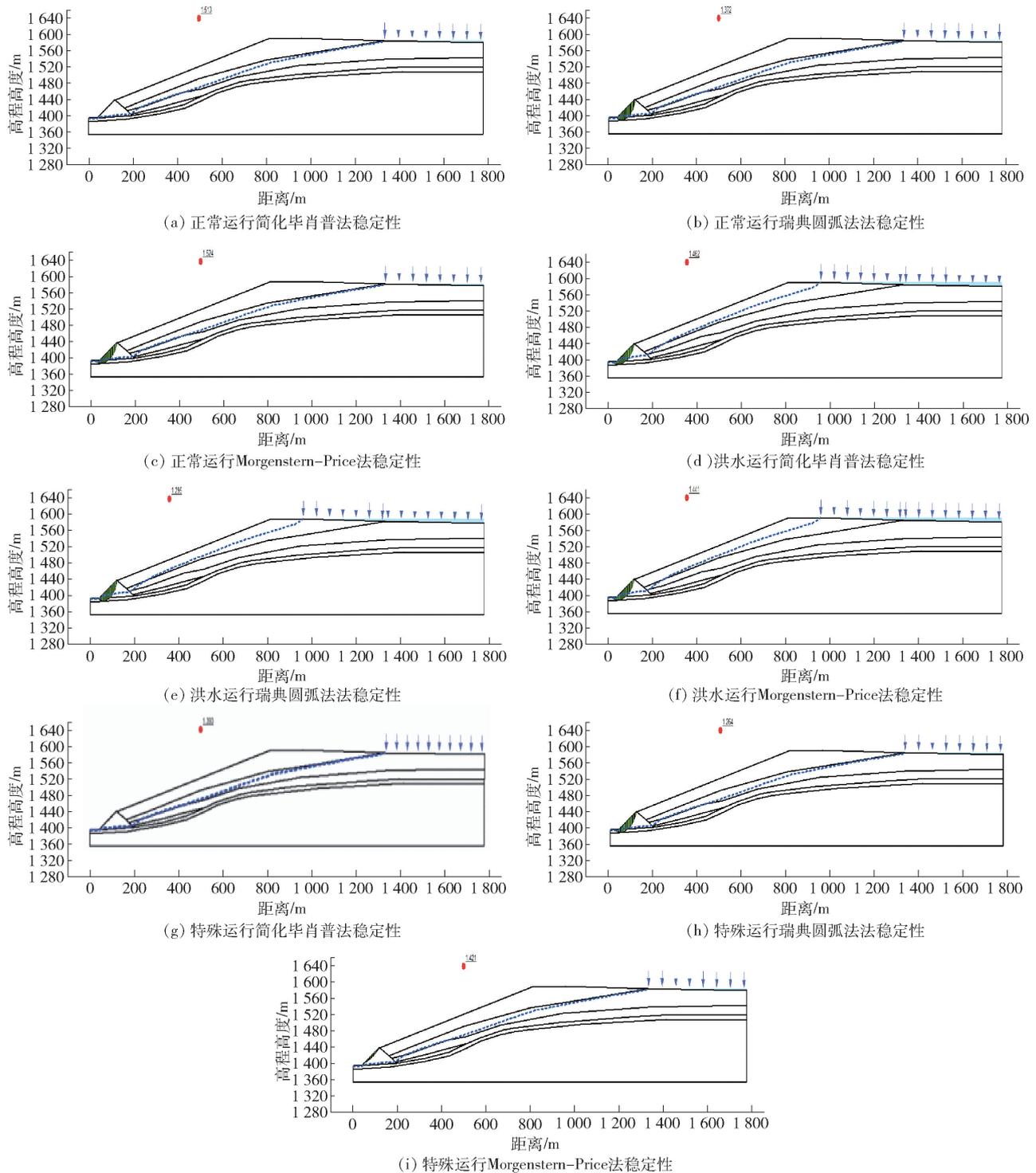


图 16 稳定性计算结果

经过重新测量,目前的尾矿库堆积坝的顶部海拔 1589 m,初期海拔 1440 m,因此可以得到坝高 149 m。按照《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)的要求,堆积坝的坝高为 $100\text{ m} < H = 149\text{ m} < 150\text{ m}$,其最低的渗透深度为 6~8 m。根据这个模拟结果,万年沟尾矿库的浸润线埋深既能够符合日常

使用的标准,也能够应对洪水的挑战,而且还具备相当的剩余空间。

4.4 稳定性计算

通过综合考虑初期坝与堆积子坝的 3 种不同情形,即①正常运行;②洪水运行;③特殊运行,可以使用简化毕肖普法、瑞典圆弧法以及 Morgenstern-Price

法来评估尾矿库的稳定性。

目前尾矿库现状总坝高为 149 m,根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)中表 3.3.1,参照坝高将目前尾矿库等级定为二等尾矿库。

通过研究各种不同的工作条件下的稳定性,将其结果与《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)的 4.4.1-2 的最低要求进行了比较,具体情况可参见表 4。

表 4 稳定性计算结果统计表

工况	简化毕肖普法		瑞典圆弧法		Morgenstern-Price 法
	计算值	规范值	计算值	规范值	
①正常运行	1.513	>1.25	1.372	>1.15	1.524
②洪水运行	1.462	>1.15	1.295	>1.05	1.441
③特殊运行	1.393	>1.10	1.264	>1.00	1.421

注:规范值来自《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)表 4.4.1-2。

采用简化毕肖普法计算出①正常运行;②洪水运行;③特殊运行工况条件下,安全系数大于规范要求,且有一定的安全余量。采用瑞典圆弧法计算出①正常运行;②洪水运行;③特殊运行工况条件下,安全系数大于规范要求,但安全余量较小。Morgenstern-Price 法计算安全系数,没有相关标准规定稳定性判定依据,结果供相关单位参考。综上所述,判定在此模型设置条件下万年沟尾矿库在①正常运行;②洪水运行;③特殊运行工况属于稳定状态。

5 结论

此次对万年沟尾矿库进行了三维激光扫描分析,得出结论:万年沟库区面积增加 14.5 万 m^2 ,堆积坝高由 1 579.249 m 增加至 1 589.09 m 共增加 9.841 m,筑坝速率为 4.920 5 m/a;新增堆排尾砂约 1 265.7 万 m^3 ,堆排速率为 660.365 万 m^3/a 。相比之下,万年沟尾矿库筑坝速率较快,堆排速率快,库容量大。库区上游识别出一处滑坡隐患点,建议企业加强此处的监测与管控;坝体外观变形较小,利用渗流场模拟万年沟尾矿库浸润线分布情况,模拟结果表明其埋深大于规范要求。最后利用了毕肖普法、瑞典圆弧法和 Morgenstern-Price 法计算了坝体的稳定性系数,结果表明万年沟尾矿库在正常运行、洪水运行、特殊运行条件下的安全系数均满足规范要求。

[参考文献]

[1] 黄万抚,邹志强,钟祥熙,等.不同风化程度离子型稀土矿赋存特征及浸出规律研究[J].中国稀土学报,2017,35(2):253-261.
[2] 李童斐,夏庆霖,汪新庆,等.中国稀土矿资源成矿地

质特征与资源潜力分析[J].地学前缘,2018,25(3):95-106.

- [3] 张甫仁,景国勋,顾志凡,等.论矿山重大危险源辨识、评价及控制[J].中国煤炭,2001,27(10):41-43.
[4] 陈祯,陈俊智,马毓婷,等.云南某矿山磷石膏尾矿库溃坝灾害影响分析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(1):50-55.
[5] 王志军.三维激光扫描技术在矿山尾矿库安全监测中的应用[J].中国金属通报,2022(4):66-68.
[6] 娄仲凯.多源测控技术在尾矿库安全监管中的应用研究[J].中国矿山工程,2022,51(1):51-55.
[7] 殷宪太,欧孝孝,侯福昌,等.尾矿库溃坝危险性评价方法探讨——以武宣县三里振祈锰尾矿库为例[J].山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(2):25-29.
[8] 贾倩,刘彬彬,於方,等.我国尾矿库突发环境事件统计分析对策建议[J].安全与环境工程,2015,22(2):92-96.
[9] 周科平,刘福萍,胡建华,等.尾矿库溃坝灾害链及断链减灾控制技术[J].灾害学,2013,28(3):24-29.
[10] 吕淑然,赵学龙.尾矿库坝外排土压坡对其稳定性影响的数值分析[J].中国矿业,2014,23(5):113-115.
[11] 辛保泉,万露,耿龙龙,等.尾矿库溃坝室外模型试验及灾害预测分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(5):102-108.
[12] 张力霆.尾矿库溃坝研究综述[J].水利学报,2013,44(5):594-600.
[13] 刘磊,张红武,钟德钰,等.尾矿库漫顶溃坝模型研究[J].水利学报,2014,45(6):675-681.
[14] 张登,简文彬,叶琪,等.尾矿库边坡时变分析模型及其应用[J].岩土力学,2014,35(3):835-840.
[15] 毛益佳.汝阳寺沟尾矿坝快速堆积可行性研究[D].西安:长安大学,2009.
[16] 白东尧,鞠金峰,许家林,等.李家壕煤矿地下水人工坝体稳定性研究[J].煤炭学报,2017,42(7):1839-1845.
[17] 李伯根,夏良,梁亦邱,等.大后沟尾矿库稳定性分析[J].矿业研究与开发,2018,38(12):61-65.
[18] 邬长福,姚贵佳,陈亮,等.基于 Geo-Studio 的离子型稀土矿边坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):72-77.
[19] 王自力,王立娟,尹恒.基于空天地三维数据的尾矿库安全监管技术研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(2):124-130.
[20] 黄雷.尾矿库坝体的稳定性影响因素和整治措施[J].中国金属通报,2021(10):169-170.
[21] 李洪梁,王丽娟,尹恒,等.金属矿山高速率筑坝尾矿库稳定性分析[J].矿业研究与开发,2020,40(1):95-102.
[22] 杨晓松,高涛.瑞典条分法与简化毕肖普法在海堤抗滑稳定分析中的比较[J].水运工程,2017,(2):95-102.