

# 斜墙土石坝和抛石挤淤结合强夯置换法在某尾矿库加高工程中的应用

Application of inclined wall earth dam and riprap compaction combined with dynamic compaction replacement method in the heightening project of a tailings pond

胡祥群<sup>1</sup>, 岑建<sup>1</sup>, 杨国栋<sup>2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 中条山有色金属集团有限公司, 山西 垣曲 043700)

**摘要:**以某尾矿库加高工程中的上游拦水坝加高为例, 针对其坝顶有一条道路需要保留的要求、项目现场有大量废石可供使用的条件、坝基沉积了较厚细粒尾矿土的问题, 推荐了斜墙土石坝加高方案和抛石挤淤结合强夯置换法的坝基处理方法, 并通过坝体渗流和坝坡稳定性计算分析、坝体填筑孔隙度检测、坝体实测沉降数据, 验证了加高方案和坝基处理方法的安全性。

**关键词:**尾矿库加高; 上游拦水坝加高; 斜墙土石坝; 抛石挤淤; 强夯置换法

**Abstract:** Based on an example of the upstream water retaining dam heightening project for the tailings pond heightening, aiming at the requirements that there is a road on the dam crest to reserve and there is a large number of waste rock near the site to use, against the problem that the dam foundation has deposited thick fine tailings soil, the heightening scheme of using inclined wall earth dam and the dam foundation treatment method of riprap compaction combined with dynamic compaction replacement are recommended, the safety of the heightening scheme and the dam foundation treatment method is verified through the seepage and stability of dam, porosity measurement of dam fill and measured settlement data of the dam.

**Key words:** the tailings pond heightening; the upstream water retaining dam heightening; inclined wall earth dam; riprap compaction; dynamic compaction replacement method

## 1 前言

近年来,随着国民经济的发展,人们生活和文化水平的提高,国家大力倡导绿色矿山,人们环保意识日渐加强,矿山行业各种政策越来越严谨规范,新建尾矿库周期越来越长,因此对老库实施加高扩容的案例越来越多,这样能大量地节约用地,减少环境污染源,投资和运行成本也大大减少。

尾矿库作为矿山配套的安全和环保设施,其安全性与人民生命财产和当地环境息息相关,其中排洪系统的安全问题是尾矿库的重要关注点。一般,汇水面积较大的尾矿库常常在上游设拦排洪系统,该系统能起到减少尾矿库入库水量,降低尾矿库防洪压力的作用。上游拦排洪系统常常包括上游拦水坝和溢洪道。对此类尾矿库实施加高扩容,需要将上游拦水坝同步加高,出于其在尾矿库分洪任务中发挥了很大的作用,因此如何对其进行既安全又经济合理的加高显得尤为重要。

## 2 工程概况

山西铜矿某尾矿库为典型的截河型尾矿库,由尾矿

文章编号:

1672-609X(2021)01-0068-04

中图分类号: TD926.4

文献标志码: A

作者简介: 胡祥群(1982—),女,硕士,高级工程师,主要从事尾矿工程咨询设计与研究工作。

坝、拦洪坝和两侧山体围成,于 1972 年投入使用。为了降低尾矿库防洪压力,设有上游拦排洪系统,由拦水坝和溢洪道组成,将上游 54.60km<sup>2</sup>汇水面积的雨水拦截后经溢洪道排走,尾矿库汇水面积只剩下约 6.65km<sup>2</sup>,由此可见,上游拦排洪设施发挥了很大的分洪作用,从本质上提升了尾矿库的安全度。该库原设计使用至 570m 标高,总坝高 84m,总库容 1.25 亿 m<sup>3</sup>,属二等库。为解决矿山持续生产的排尾问题,2014 年对该库进行了加高扩容设计,增加库容约 5 040 万 m<sup>3</sup>,总库容达 1.754 亿 m<sup>3</sup>,总坝高达 99m,仍属二等库。加高扩容工程中包括对上游拦水坝进行相应的加高。

原设计上游拦洪坝为均质土坝,坝顶标高为 575m,坝高约 24m。由于上游拦水坝位于尾矿库库尾,距离放矿点距离较远,因此,坝体附近沉积的尾矿细颗粒较多,截至 2014 年,坝附近尾砂淤积标高约 555m,部分区域淤积厚度至 10m,库内正常水位约 560m,水深约 5m。加高前坝顶有一条县级公路,尾矿库加高工程不宜影响该路通行,且希望能予以

保留。项目现场有大量的废石可供使用,希望能予以利用。根据前述需求,上游拦水坝加高采用下游法,坝型为斜墙土石坝。由于加高坝体位于尾矿库库内,坝基坐落在尾矿细粒层上,针对这一典型的软弱地基上的土石坝加高工程,设计结合工程勘察,推荐了采用抛石挤淤加强夯置换法对坝基进行处理。通过坝体渗流和坝坡稳定性计算分析、坝体填筑孔隙度检测、坝体实测沉降数据,验证了加高方案和坝基处理方法的安全性。

### 3 上游拦水坝加高方案

对已建拦水坝采用下游法进行加高,坝型为斜墙土石坝。加高后坝顶标高为 585m,总坝高约 35m。坝顶宽 4m,上游坝坡 564.5m 处设置宽约 15m 平台,平台以上边坡 1:3,平台以下边坡为抛土的自然安息角。下游坝坡 1:1.8。坝体分区:底部为挤淤堆石区、上游为黏土斜墙区、中部和下游为堆石区,除此之外,各种材料结合面设过渡区。剖面图如图 1 所示。

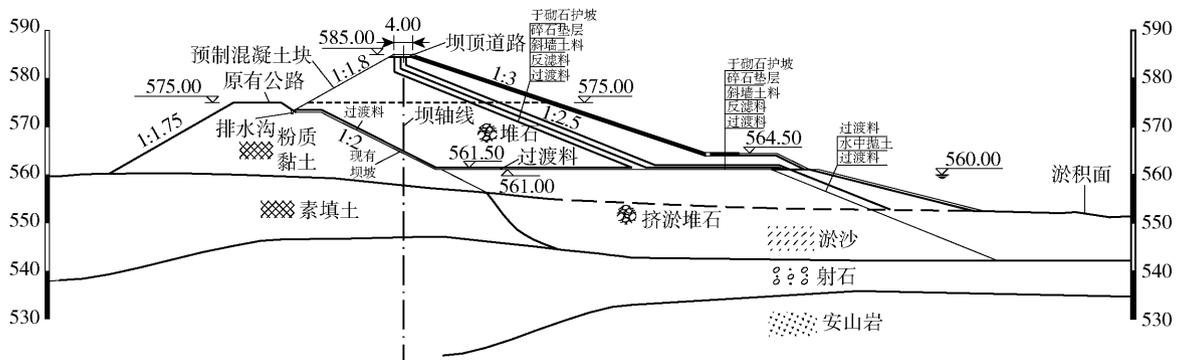


图 1 拦水坝加高典型剖面图

### 4 抛石挤淤结合强夯置换法坝基处理

根据软土的性质和空间分布,一般可通过塑料排水板堆载预压、砂桩振冲挤密、强夯置换、抛石挤淤等方法进行加固处理<sup>[1]</sup>。与其他加固方法比较,抛石挤淤法施工方便快捷、工艺简单、不用抽水、不用挖淤、施工迅速,特别适用于软弱地基表面存在大量积水无法排除的区域。对施工区域附近石料丰富的情况,采用抛石挤淤进行软基处理,可以有效节约施工成本和工期。

对于抛石挤压法的有效挤淤深度和适用范围,有学者认为,一般适用于厚度不大于 4m,且表层硬壳被挖除的具有触变性流塑状的饱和淤泥或淤泥质土处理,对于 5m 以上的深厚淤泥或者淤泥质土则

还需辅以爆破或者强夯措施<sup>[2]</sup>。

借鉴填海工程和淤泥地基处理工程经验<sup>[3-4]</sup>,上游拦水坝加高坝基处理工艺选用抛石挤淤加强夯置换法。水面以下采用水中抛石,水面以上采用重锤分层夯实,将石料压入水下尾矿细粒层,部分细粒尾矿挤向库内,部分细粒尾矿挤入石缝中,以实现坝基置换,加大坝基承载力,减小坝体运行过程中的不均匀沉降。

石料要求:水面以下石料岩性为硬质岩石,粒径 50~250mm,以避免其遇水后软化造成坝基过大沉降而危及大坝的安全。

填筑要求:堆石压实后孔隙率不大于 20%,夯击能量、夯击遍数、铺设厚度等应在试夯基础上,根据堆石料压实后检测的孔隙率进行调整。

### 5 坝体渗流和边坡稳定性计算验证

#### 5.1 计算模型

根据前述加高方案和坝基处理方法,确定坝体

与坝基材料分区,建立简化计算模型如图2所示。

#### 5.2 边界条件

根据尾矿库加高扩容工程调洪演算成果、工程勘察地下水资料,确定上游拦水坝上、下游边界水

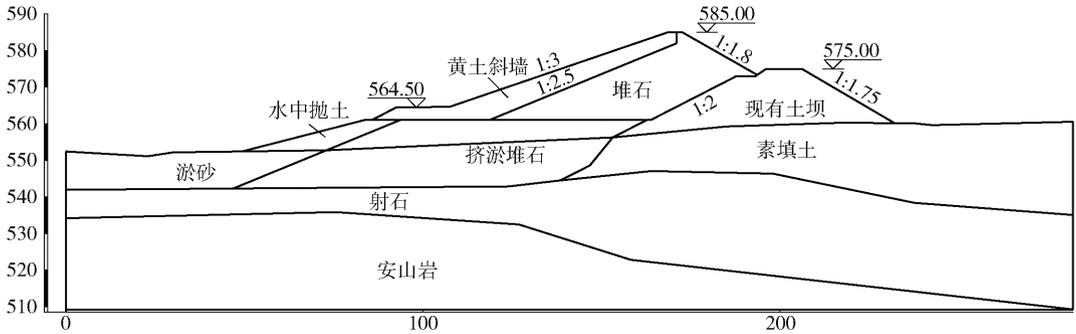


图2 简化计算模型

位。正常工况:上游边界水位为 580.00m,下游边界水位为 558.00m;洪水工程:上游边界水位为 582.50m,下游边界水位为 564.40m。

#### 5.3 计算参数

根据工程勘察和类似工程经验数据,确定各土层渗透系数、物理力学指标分别见表1和表2。

表1 各地层材料渗透系数

土层名称	渗透系数/cm·s <sup>-1</sup>
素填土	4.77 × 10 <sup>-6</sup>
现有土坝	5.43 × 10 <sup>-4</sup>
堆石	1.0 × 10 <sup>-3</sup>
黄土斜墙	1.0 × 10 <sup>-5</sup>
水中抛土	1.0 × 10 <sup>-5</sup>
挤淤堆石	1.0 × 10 <sup>-4</sup>
淤砂	4.63 × 10 <sup>-5</sup>
卵石	6.78 × 10 <sup>-3</sup>

表2 各土层物理力学指标

土层名称	天然		饱和		抗剪强度 (水上)		抗剪强度 (水下)	
	密度/ g·cm <sup>-3</sup>	密度/ g·cm <sup>-3</sup>	C/kPa	φ/(°)	C/kPa	φ/(°)	C/kPa	φ/(°)
素填土	1.92	1.96	17.0	29.0	15.9	27.6		
现有土坝	1.92	1.95	21	20.0	19	18		
堆石	1.95	2.05	0	35	0	35		
黄土斜墙	1.78	1.85	27.0	18.3	24.5	15.0		
水中抛土	1.68	1.75	17.0	15.0	15.9	13.0		
挤淤堆石	1.90	2.00	0	30	0	30		
淤砂	1.90	1.94	5.4	24.0	4.0	21.0		
卵石	2.10	2.10	0	30.0	0	30.0		

#### 5.4 计算结果

采用理正岩土计算软件中渗流问题有限元分析

计算程序和边坡稳定分析程序分别进行坝体渗流和坝坡稳定计算。渗流计算包括正常和洪水两个工况,由于尾矿库地震设计烈度为7度地区,稳定计算包括正常、洪水和地震三个工况。计算结果详见表3,图3、图4和图5。经计算分析验证,采用斜墙土石坝加高方案对上游拦水坝实施加高,浸润线出溢标高较低,需做好不同材料结合面的过渡和反滤设计以防渗透破坏,坝坡稳定能满足相关规范要求。

表3 拦水坝坝坡稳定计算结果表

运行工况	滑弧圆心坐标及半径/m			抗滑稳定		
	X坐标	Y坐标	半径	最小安全系数 K <sub>min</sub> 计算值	规范值	
坝顶标高 585m	正常运行	54.80	28.00	28.33	1.28	1.25
	洪水运行	53.60	39.00	39.34	1.34	1.15
特殊运行	54.00	29.40	29.74	1.22	1.05	

### 6 工程实施效果

2014年5月,坝体填筑至564.50m时,为了进一步检测堆石区填筑质量,进行了孔隙度检测试验,具体情况见表4。根据检测结果,当时已强夯结束的三层坝体所有检测点孔隙度均小于20%,满足设计要求。

上游拦水坝加高工程一次性设计,分两期施工,第一期加高至575m标高,在坝顶预留了后续加高所需平台,于2014年7月完工,第二期加高至585m标高,于2020年6月完工。2014年12月15日—2015年3月5日的位移观测数据显示,沉降量3~6mm,坝体加高时预留了0.5m的沉降余量,如沉降按该速度发展,预留高度能够满足实际沉降需求。

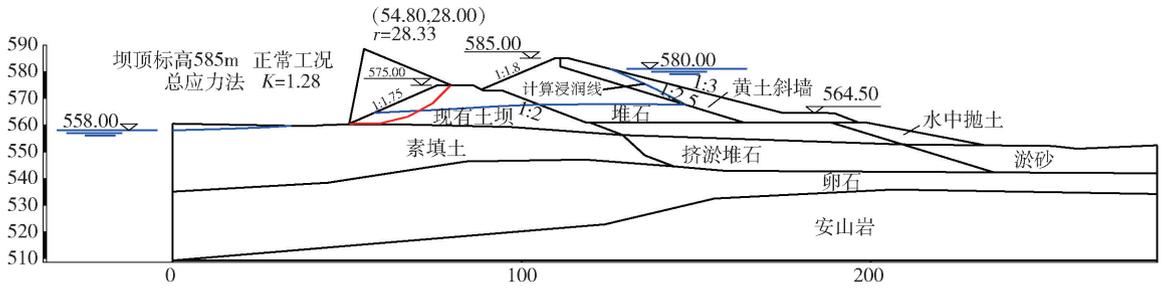


图 3 拦水坝正常工况浸润线和坝坡稳定计算结果

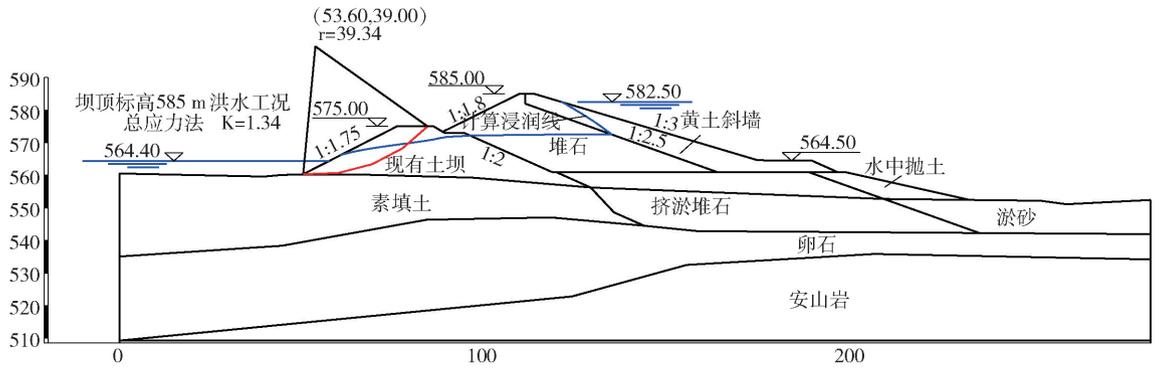


图 4 拦水坝洪水工况浸润线和坝坡稳定计算结果

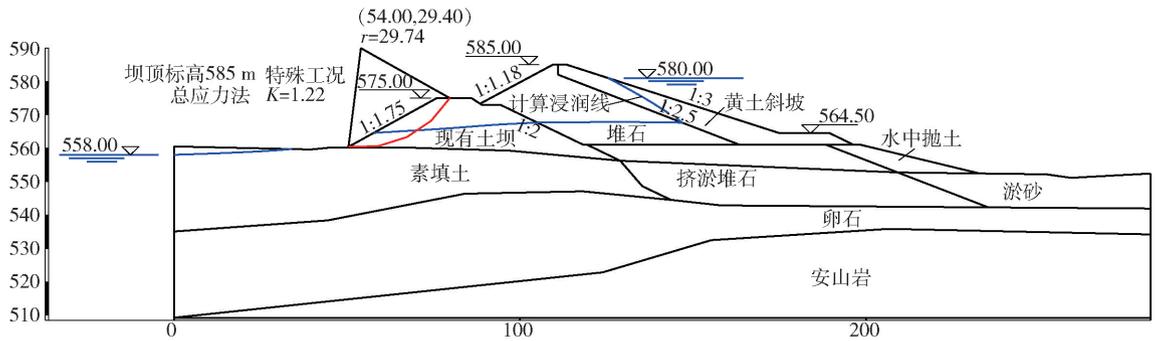


图 5 拦水坝特殊工况坝坡稳定计算结果

表 4 孔隙度检测成果表

层数	标高/m	检测 点数/个	孔隙度范围 值/%	孔隙度平均 值/%
1	水下 ~ 559.5	45	8.9 ~ 18.9	13.6
2	559.5 ~ 561.0	50	9.0 ~ 19.4	14.8
3	561.5 ~ 564.5	45	10.0 ~ 19.8	15.2

## 7 结论

(1) 针对尾矿库加高工程中遇到的拦水坝加高问题,结合建设条件和当地材料,选用了斜墙土石坝的下游法加高方案,并通过坝体渗流和坝坡稳定性计算分析验证了坝体渗流和坝坡稳定性满足相关规范要求。

(2) 借鉴填海工程和淤泥地基处理工程经验,将抛石挤淤结合强夯置换法的软弱地基处理方法成

功的运用到了尾矿库加高工程中,具有很好的实际意义。

(3) 为了检测抛石挤淤结合强夯置换法的实施效果,提出了孔隙度检测和沉降量观测的手段,能够较好地控制工程质量。

## [参考文献]

- [1] 张永涛,唐炫,杨钊. 抛石挤淤法的有效挤淤深度[J]. 土木工程与管理学报,2012,29(3):77-80.
- [2] 蒋亚,张文渊. 抛石挤淤综合法在加固地基中的应用[J]. 土工基础,2005,19(6):8-9.
- [3] 黄瑞章,潘瑞春,周新年. 抛石挤淤结合强夯置换法在道路路基处理中的应用[J]. 路基工程,2013,167(2):73-77.
- [4] 高起伏,刘晓立. 沿海路基抛石挤淤强夯置换处理技术研究[J]. 中外公路,2010,30(4):48-52.