

小打鹅尾矿库尾矿堆积坝稳定性研究

魏作安^{1,2}, 杨永浩^{1,2}, 赵怀军³, 陈宇龙⁴

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400030; 3. 凉山矿业股份有限公司, 四川 凉山 615146; 4. 东京大学 土木工程系, 日本 东京 113-8656)

摘 要: 由于小打鹅尾矿库区地形条件限制,使得该尾矿库存在“两高一快”的特殊性. 为了确保尾矿库工程安全可靠,在尾矿库初步设计完成后,采用物理模型实验、数值模拟和理论分析方法,分析和研究了尾矿堆积坝的稳定性,获得了尾矿堆积坝的结构组成、设置坝体排渗设施与不设排渗设施条件下尾矿坝渗流场的变化规律,以及不同工况下尾矿坝的稳定性等成果. 这些研究成果为该尾矿库的设计和安全生产管理提供了科学依据. 至今该尾矿库已安全运行五年多,一切正常.

关 键 词: 尾矿坝;稳定性分析;物理模型实验;数值模拟;浸润线

中图分类号: TD 926.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)04-0589-05

Stability of Tailings Dam of Xiaodae Tailings Pond

WEI Zuo-an^{1,2}, YANG Yong-hao^{1,2}, ZHAO Huai-jun³, CHEN Yu-long⁴

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. Liangshan Mining Co., Ltd., Liangshan 615146, China; 4. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan. Corresponding author: WEI Zuo-an, E-mail: weiza@cqu.edu.cn)

Abstract: Due to the limitation of the topography of Xiaodae tailings pond, the height of the starter dam is 72.5 m and increases very fast (the average rate was 18.5 m/a). To ensure its safety, the stability analysis was carried out through physical model tests, numerical simulation and theoretical analysis after primary design of the tailings pond. The structural composition of tailings dam, the variation rules of seepage field with or without drainage system in the dam, and the stability of tailings dam under different working conditions were obtained. Results could be helpful to the design and safety management of the tailings pond. So far, the dam has been stably utilized for over five years.

Key words: tailings dam; stability analysis; physical model test; numerical simulation; phreatic surface

凉山矿业为满足 6 kt/d 选厂排放尾矿的需要,2006 年计划在小打鹅沟新建一座尾矿库. 由于库区地形条件限制,使得该尾矿库存在“两高一快”的特殊性,主要表现为:设计初期坝高为 72.5 m,这个在国内不多见;堆积坝上升速度快,最快达到 22 m/a,平均速度为 18.5 m/a,这个速度在国内上游法筑坝的尾矿库中少见^[1];设计子坝高. 为了解决堆积坝的上升速度快的问

题,建议加高子坝高度至 10 m. 这个高度远高于上游法堆坝子坝高 2~4 m 的常规值.

尾矿库是一种特殊的工业构筑物^[2],也是非煤矿山最大的危险源之一^[3-4]. 国内外矿山因尾矿库溃坝等造成的重大灾害事故屡见不鲜^[5-9],为此,我国针对尾矿库工程的设计、施工及生产安全管理出台了相应的规程规范和规定等文件^[10-11].

收稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11372363).

作者简介: 魏作安(1965-),男,江西南昌人,重庆大学教授,博士生导师.

由于新建小打鹅尾矿库存在“两高一快”的特殊性,目前尚无参照的工程先例. 为了确保尾矿库工程安全可靠,在尾矿库初步设计完成后,2007 年初,作者受业主委托,采用物理模型试验、数值模拟和理论分析方法,针对该尾矿坝的稳定性进行了分析与研究. 研究成果为改善尾矿坝的后期设计及生产运行提供了有益的帮助. 通过该尾矿库几年来运行情况比对,实践表明,当年尾矿坝稳定性分析结果是可靠的.

1 小打鹅尾矿库工程概况

小打鹅尾矿库设计总坝高 187.5 m,有效库容 898.8 万 m³,能满足选厂使用 7.1 a^[12]. 该尾矿库属于山谷型尾矿库(图 1). 采用上游法筑坝,实行坝前分散放矿. 尾矿堆积坝高为 115.0 m,尾矿库最终堆积标高为 +1355.0 m,设计堆积坝外坡比为 1:4.0.

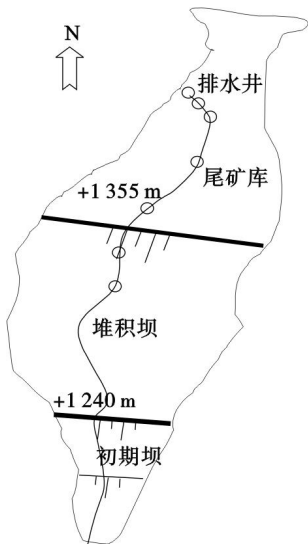


图 1 小打鹅尾矿库平面示意图
Fig. 1 Plan sketch of Xiaodae tailings pond

初期坝为碾压式透水石渣坝,设计坝高 72.5 m,坝顶宽 4.5 m,坝轴线长 188.65 m,上游坡比为 1:1.75,下游坡比 1:2.75,坡面每 15 m 高设置宽 1.5 m 的马道. 上游坡设置了由双层土工布、砾石、碎石构成的反滤层.

尾矿库排洪系统由库外排洪设施、库内排洪设施构成. 库外排洪设施包括左岸坡顺山体而下进库区公路内侧排水沟及库区右岸两支沟挡水坝及排水钢管;库内排洪设施包括库内排水井、排水管和初期坝两侧溢洪道.

由于受库区地形的制约,即库内沟谷两侧坡

陡狭窄,主沟纵坡较陡(平均坡降为 17%),以及为满足年排放 126.8 万 m³ 尾矿的生产要求,使得该尾矿库存在“两高一快”的特殊性. 该尾矿库设计库容如图 2 所示.

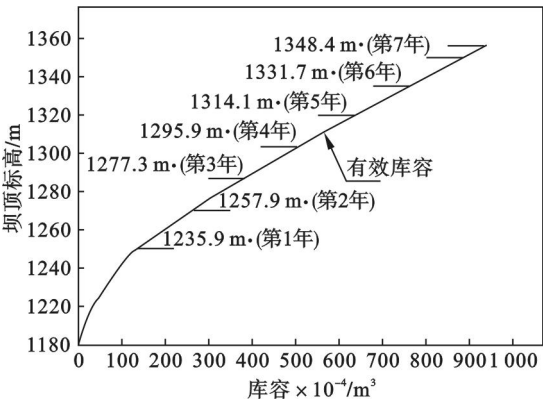


图 2 设计库容
Fig. 2 Designed storage

2 尾矿堆坝物理模型试验

由于该尾矿库为新建尾矿库,无法获得坝体结构组成等与坝体稳定性计算所需的基础资料. 因此,利用比例尺为 1:200 的堆坝物理模型试验,来演绎该尾矿库的堆坝过程,从而获得坝体干滩面的长度与坡度、不同层面尾矿颗粒的组成与分布及地下水位的变化规律等. 试验尾矿来自现场排放的尾矿,质量分数为 20% ~ 25%.

通过试验,获得了干滩面上尾矿颗粒沉积与分布规律(图 3)、堆积坝体的结构组成概化分区图(图 4),以及与坝体稳定性计算所需的基础资料. 从图 4 可以看出,尾矿堆积坝土层组成主要为尾粉砂和尾粉土.

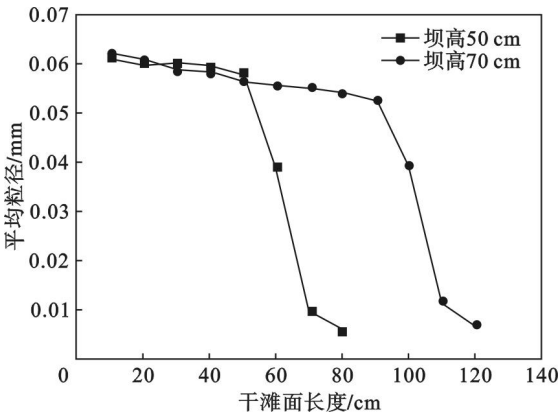


图 3 模型试验时干滩面颗粒分布情况
Fig. 3 Average diameter distribution of particles on beach during model test

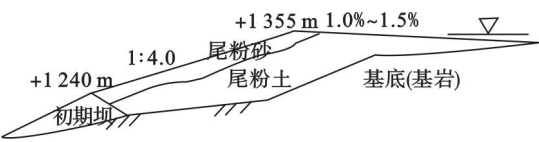


图 4 堆积坝体结构概化剖面图
Fig. 4 Cross section of tailings dam

3 尾矿坝渗流场的数值模拟

尾矿坝的浸润线是尾矿库的生命线,浸润线位置的高低对尾矿坝的稳定性影响非常大^[1],为此,采用 2D - Flow 软件对该尾矿坝地下渗流场进行模拟分析。

依据物理模型试验结果(图 4),将尾矿坝划分为 4 种不同材料区:基底(基岩)、堆石坝(初期坝)、尾粉砂和尾粉土。各区材料的物理力学参数见表 1,数值模拟网格划分见图 5。

表 1 坝体的材料参数
Table 1 Parameters of tailings dam

材料名称	ρ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	黏聚力 kPa	内摩擦角 ($^{\circ}$)	渗透系数 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
尾粉砂	1.93	10.8	30.1	3.75×10^{-4}
尾粉土	1.98	11.29	25.5	2.13×10^{-5}
初期坝	2.20	0.0	34.0	2.70×10^{-3}
基底	2.30	10.0	38.0	0.0

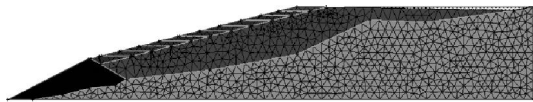


图 5 单元网格划分
Fig. 5 Meshing of model

按照规范要求,库水位按两种工况考虑:正常情况,干滩面的长度为 100 m;洪水情况,干滩面的长度为 70 m,即规范中的最小值。

为了探索坝体排渗设施的效果,在模拟计算中,按照设置排渗系统和不设排渗系统两种情况考虑。采用坝体预埋塑料花管(管径 100 mm)水平排渗措施,排渗管垂直间距为 10 m,即每级子坝堆筑前,先铺设水平排渗管,排渗管水平间距为 15 m,排渗管长 60 m,排渗管里的水靠自流排出,汇集到坝坡的截水沟内。

模拟结果如图 6、图 7 所示。由计算结果可以得出:

1) 不设坝体排渗系统,正常工况下,浸润线与坝坡面有一定距离(图 6a),未发生相交现象。但洪水工况下,浸润线的位置明显比正常工况要

高许多,且在堆积坝下游靠近初期坝处,几乎与坝坡面接近(图 7a),地下水极有可能从该处溢出,产生管涌或坡面沼泽化,甚至造成溃坝事故。

2) 设置坝体排渗系统后,则情况发生了很大变化,无论是正常工况下(图 6b)还是洪水工况下(图 7b),浸润线位置均比较深,且远离坝坡面,对坝体的稳定性非常有利。

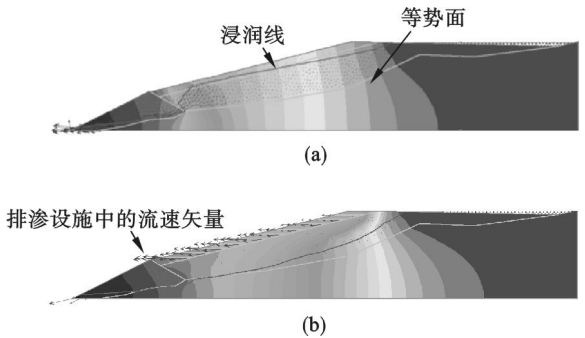


图 6 正常工况下坝体渗流计算结果
Fig. 6 Dam seepage calculation results under normal situation
(a) — 无排渗系统; (b) — 有排渗系统。

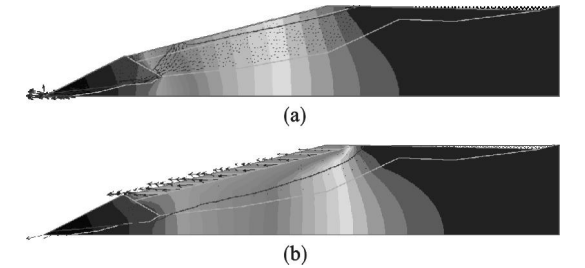


图 7 洪水工况下坝体渗流计算结果
Fig. 7 Dam seepage calculation results under flood situation
(a) — 无排渗系统; (b) — 有排渗系统。

4 尾矿坝稳定性计算

在物理模型试验和坝体地下渗流场的计算结果基础上,按照设计规范要求^[10],采用极限平衡法中的瑞典条分法和毕肖普法,对该尾矿坝的稳定性进行了计算,结果见表 2。由表 2 可以看出:

1) 如果不设置坝体排渗系统,则在洪水工况和特殊工况下,稳定系数均小于规范值;设置坝体排渗系统后,稳定系数均大于规范值。

2) 设置坝体排渗系统后,坝体稳定系数在洪水工况下提高了 6.7% (瑞典法),在特殊工况下提高了 18.4% (瑞典法)。

3) 在尾矿坝的设计中,应该设置坝体排渗系统,对提高尾矿坝的稳定性非常有利。另外,在日常的生产管理中,尽量降低水位及浸润面的位置。

表 2 尾矿坝稳定系数计算结果
Table 2 Stability calculation results of tailings dam

条件	洪水工况		特殊工况	
	瑞典法	毕肖普法	瑞典法	毕肖普法
无排渗	1.070	1.113	0.895	0.914
有排渗	1.142	1.207	1.060	1.112

5 小打鹅尾矿库的运行现状

小打鹅尾矿库工程于 2007 年开工建设,2009 年上半年竣工,并投入使用(图 8). 至今(2014 年)已运行了 5 年多. 目前,堆积了 8 级子坝,正在堆积第 9 级子坝,尾矿堆积坝高为 80 m,总坝高已达 152.5 m. 库内水位:正常工况下干滩长保持在 200 m 左右,洪水工况下干滩长保持在 120 m 左右,与原设计要求基本一致.



图 8 小打鹅尾矿库坝坡全貌
Fig. 8 Existing status of Xiaodae tailings pond

为了监测坝体地下水位情况,沿坝坡纵向设计了 3 排地下水位监测孔,2012 年的地下水位监测结果如图 9 所示.

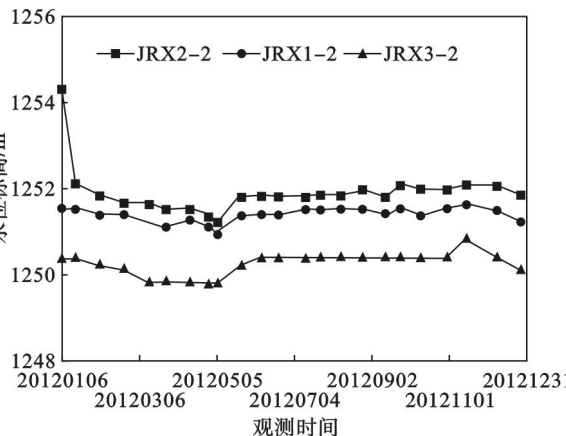


图 9 尾矿坝地下水位现场监测结果
Fig. 9 Monitoring results of underground water level for tailings dam

目前,一级子坝(+1 250 m 标高)、三级子坝(+1 270 m 标高)上的监测孔已经形成,并进行了监测. 监测结果显示,一级子坝上的 3 个监测孔(JRX1-1,JRX2-1,JRX3-1)均未见到地下水,

说明地下水位低于预期值. 三级子坝上的 3 个监测孔(JRX1-2,JRX2-2,JRX3-2)均见到地下水. 地下水位的埋深为 +1 249.90 ~ +1 251.94 m,满足原设计地下水位的要求,也满足规范要求^[10].

从尾矿库的现场情况看,该尾矿库的运行一切正常. 再过两年,该尾矿坝将达到设计坝高. 矿山企业通盘考虑后,现正着手准备在该尾矿库的基础上进行加高扩容,以保证矿山的可持续发展.

6 结 论

- 1) 该尾矿坝稳定性分析结果是可靠的,对该尾矿库的设计及安全生产管理起到了非常好的指导作用.
- 2) 利用堆坝物理模型试验能较好地演绎尾矿库的形成过程,获得与坝体稳定性分析有关的基础资料,对于新建尾矿库的相关研究很有帮助.
- 3) 按照规范要求,针对尾矿坝的稳定性开展理论分析,是尾矿库设计与安全评价所必须的,也是最有效的方法.

参考文献:

[1] 王汉强,沈楼燕,吴国高. 固体废弃物处置堆存场环境岩土技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
(Wang Han-qiang, Shen Lou-yan, Wu Guo-gao. Solid waste disposal stockpiling environmental geotechnical technology [M]. Beijing: Science Press, 2007.)

[2] 尹光志,魏作安,许江. 细粒尾矿及其堆坝稳定性分析[M]. 重庆:重庆大学出版社,2004.
(Yin Guang-zhi, Wei Zuo-an, Xu Jiang. Research on the characteristics and dam stability of fine grained tailings [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004.)

[3] Wei Z A, Yin G Z, Li G, et al. Reinforced terraced fields method for fine tailings disposal[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(12): 1053-1059.

[4] Wei Z A, Yin G Z, Wang J G, et al. Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures[J]. Waste Management & Research, 2013, 31(1): 106-112.

[5] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 69-71.
(Xu Hong-da. Statistical analyses of tailing reservoir disease accidents in China [J]. Industrial Construction, 2001, 31(1): 69-71.)

[6] Rico M, Benito G, Díez-Herrero A. Flood from tailings dam failures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1): 79-87.

[7] Dixon-Hardy D W, Engels J M. Guidelines and recommendations for the safe operation of tailings management facilities [J]. Environmental Engineering

- Science*, 2007, 24(5): 625 – 637.
- [8] Jeyapalan J K, Duncan J M, Seed H B. Analyses of flow failures of mine tailings dams [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(2): 150 – 171.
- [9] Zandarín M T, Oldecop L A, Rodríguez R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams [J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1): 108 – 118.
- [10] 中华人民共和国建设部. 选矿厂尾矿设施设计规范: ZBJ1—1990 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990. (Ministry of Construction of People's Republic of China. Design specification of concentrator tailings facilities: ZBJ1—1990 [S]. Beijing: China Standards Press, 1990).
- [11] 中华人民共和国安全生产行业标准. 尾矿库安全技术规程: AQ2006—2005 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006. (Safety Production Industry Standard of the People's Republic of China. Safety technical regulations for the tailing pond: AQ2006—2005 [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006.)
- [12] 刘明生, 蓝蓉. 小打鹅尾矿库排洪设施的优化设计 [J]. 有色金属设计, 2010, 37(3): 12 – 17. (Liu Ming-sheng, Lan Rong. Optimization design of flood control infrastructure of tailings dam at Xiaodae [J]. *Nonferrous Metals Design*, 2010, 37(3): 12 – 17.)

(上接第 571 页)

4 结 论

1) 利用结构面迹线与圆盘直径的关系和分布函数推导出定位块体、半定位块体和随机块体的生成概率。

2) 基于失效概率提出失效块体, 并建议利用失效块体体积占不稳定块体体积的比例 I_1 来表征开挖面稳定性。在块体化程度较小或不均匀的情况下, I_2 随机性太大; 在实际工程中, 应当利用关键块体信息进行个别支护之后, 再利用开挖面稳定性系数 I_1 进行稳定性评价。

3) 开挖面稳定性系数 I_1 缺乏更多的工程实例、工程工况验证, 需要后续进行深入研究。

参考文献:

- [1] Wang S H, Ni P P. Application of block theory modeling on spatial block topological identification to rock slope stability analysis [J]. *International Journal of Computational Methods*, 2014, 11(3): 903 – 914.
- [2] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 357 – 367.
- [3] Warburton P M. Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1981, 18(5): 415 – 427.
- [4] Warburton P M. Some modern developments in block theory for rock engineering [J]. *Comprehensive Rock Engineering*, 1993, 3: 293 – 315.
- [5] Lin D, Fairhurst C. Static analysis of the stability of three-dimensional blocky systems around excavations in rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1988, 25(3): 139 – 147.
- [6] Mauldon M, Goodman R E. Vector analysis of key block rotations [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(12): 976 – 987.
- [7] 于青春, 薛果夫, 陈德基. 裂隙岩体一般块体理论 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (Yu Qing-chun, Xue Guo-fu, Chen De-ji. Preliminary study on general block method of fractured rock mass [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.)
- [8] Windsor C R. Rock reinforcement systems [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(6): 919 – 951.
- [9] 张奇华, 邹爱清, 石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2609 – 2614. (Zhang Qi-hua, Wu Ai-qing, Shi Gen-hua. Application of key block theory to analysis of rock stability for underground plant in Baise hydraulic project [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2609 – 2614.)
- [10] Marek J M, Savely J P. Probabilistic analysis of the plane shear failure mode [C] // Proceedings of the 19th US Symposium on Rock Mechanics. Las Vegas, 1978: 40 – 44.