

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.08

尾矿坝-排土场联合堆排稳定性与 边坡参数优化研究

朱远乐^{1,2}, 唐绍辉^{1,2}, 苏 伟^{1,2}

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;

2. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 尾矿坝和排土场作为矿山采选固废的堆存场所是矿山事故发生高频区域,其安全与否直接关系到矿山工程的正常生产。在分析国内尾矿坝-排土场联合堆坝所取得成果的基础上,结合湖南省某钨矿所属尾矿坝-排土场联合堆坝存在的问题,分析了尾矿坝-排土场联合堆排体三个剖面整体的稳定性,同时研究了各剖面边坡参数是否能有效拦截上方滚石,提出了各剖面外坡边坡角的优化参数,采用数值模拟方法对各剖面坡形优化后的外坡边坡角的稳定性进行了分析,根据计算结果对排土场外坡进行卸荷开采设计,卸荷后形成六级外坡平台,平台宽度为 5.0 m,研究成果能够很好的指导尾矿坝-排土场联合堆排工程的治理设计。

关键词: 尾矿坝;排土场;联合堆坝;边坡;稳定性

中图分类号: TD926

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)01-0070-06

Stacking slope stability analysis and optimization of slope shape's parameters for united tailing pond-waste dump heaping

ZHU Yuanle^{1,2}, TANG Shaohui^{1,2}, SU Wei^{1,2}

(1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd, Changsha, Hunan 410012, China;

2. State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: As the storage sites for mining solid wastes, tailing ponds and waste dumps are at high frequency in mine accidents. Their safeties are directly related to the normal production of mine projects. On the basis of analysis of the results achieved by domestic tailing pond-waste dumping and combining with the existing problems of the united tailing pond-waste dump heaping site of a tungsten mine in Hunan Province, the overall stability of the three sections of tailing pond-waste dump heaping was analyzed. Study on whether the slope parameter can effectively block the rolling stones from the top was also conducted. And then the optimization parameters for the slope angle of each section are presented. The stability of the outer slope angle after optimizing of each section was calculated and analyzed using the numerical simulation method. According to the calculation results, the unloading design of the dump slope is carried out. After the unloading, a six-level 5.0 meter slope platform is formed. The results can guide the management design of the united tailing pond-waste dump heaping project.

Keywords: tailing pond; waste dump; united heaping; expansion; stability

收稿日期: 2018-04-18; 修订日期: 2018-05-08

基金项目: 湖南省重大科技专项(2011FJ1003); 国家安全生产监督管理总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(hunan-0010-2014AQ)

第一作者: 朱远乐(1987-), 男, 湖北荆州人, 硕士, 工程师, 现主要从事尾矿库安全技术的设计、评价、论证等研究工作。E-mail: 717732515@qq.com

0 引言

尾矿坝作为矿山工程采、选、尾三大控制性工程之一,是矿山事故发生高频区域^[1-2]。排土场为矿山采矿固废的堆存场所,其容纳了矿山基建期剥离的表土层、风化岩土以及露天矿山或地下矿山采矿废石及部分贫矿等^[3],排土场与尾矿坝的安全与否将直接导致矿山工程重大安全事故的发生,影响矿山企业的正常生产,同时造成重大人员伤亡与财产损失等^[4-5]。目前国内、国外的学者分别对尾矿坝、排土场工程领域进行了广泛研究,获得了可喜的成果。

目前新建尾矿坝以及排土场的审批程序和要求越来越严格,且由于地形条件、下游情况、征地、环保等问题无法同时新建尾矿坝和排土场,且单独新建尾矿坝和排土场的费用较高,若地形条件不好,这两项的费用将会大大的占用矿山投资的费用。基于上述原因,近年来国内外学者,对尾矿坝-排土场联合堆排技术进行了研究^[6-7],唐飞^[8]通过分析工程实践中排土废石和尾矿的联合堆排经验,提出了一种将尾矿坝和排土场联合在一起共同堆排的技术;王晓民等^[9]分析了将停用的尾矿坝经过技术设计后改建为排土场堆排矿山废石技术,并将此项技术运用到实际工程中;李全明^[10]通过总结尾矿坝、排土场工程的特点,提出了尾矿坝上覆排土场条件下的危险源辨识方法,同时研究了类似工程的安全评估技术。为保证尾矿坝-排土场联合堆排的安全性,通过分析现状条件下尾矿坝-排土场联合堆排整体的稳定性,提出了排土场卸荷堆排,同时优化其外坡的边坡角以达到尾矿坝-排土场联合堆排场所的整体安全。

1 排土场-尾矿坝设计及现状情况

排土场设计:湖南某锡矿所属排土场位于其选矿厂以西的冲沟内、露天采场西南部,其北部即上游为尾矿坝,排土场和尾矿库是互相连在一起的,利用基建废石筑尾矿库的初期坝。设计排土堆置高度为120 m(+520~+640 m),阶段高度6 m,台阶宽度2 m,每隔4个平台留设一个7 m宽平台,整体边坡角为16°。在废石场边坡外30 m处设置拦石坝,拦石坝长30 m,高6 m。废石场四周设截水沟,拦石坝下方设沉泥池,沉泥池定期清理。

尾矿坝设计:排土场上游为矿山所属尾矿库,排土场从尾矿坝下游坝坡往外堆排,尾矿坝为一次性筑坝,坝型为碾压土石混合料坝,尾矿坝坝顶标高+

638.0 m,坝顶宽5.0 m,上游坝坡坡比1:2.0,下游坝坡坡比1:2.5,总坝高63.0 m,总库容约为 $3.475 0 \times 10^6 \text{ m}^3$,尾矿库为三等库。尾矿坝-排土场相互位置关系图如图1所示。



图1 尾矿坝-排土场相互位置关系示意图

Fig.1 Position diagram of tailing pond-waste dump heaping

排土场现状:排土场现状与设计不符,排土场坡底往东偏移,由+520 m提升至+533 m,顶部标高超高8 m,部分台阶高度有所不同排土堆置高度约115 m(+533~+648 m),排土场实际占地面积约 $8.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,总堆置量约 $3.750 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。共形成有11个平台,台阶宽度不一,为3~14 m,台阶高度为5~10 m;排土场整体边坡角为25°~26°,其中南侧局部边坡角达到33°;排土场东西长327 m、南北宽410 m,平均堆厚42.6 m。

尾矿坝现状:尾矿坝坝体均按设计施工。坝顶表层40~50 cm进行了水泥硬化,作为汽车及其他施工设备的道路。道路内侧设有栏杆,栏杆距内坡约1.2 m,内坡表面硬化处理。

2 计算方法、参数及剖面选择

对比国内外矿山排土场安全系数,分别计算尾矿坝-排土场在三种不同工况下的稳定性,工况一为自然状态条件,工况二为暴雨状态条件,工况三为地震力条件,要求三种工况条件下,安全系数均不小于1.2^[11]。

在边坡稳定性分析中,使用瑞典圆弧法、修正的简布法、Spencer法、Morgenstern-Price法和Bishop法等极限平衡条分法得到的稳定性系数较合理和可靠^[12]。

综合分析现有地质资料,部分不明确的参数,本着安全的原则,参照类似矿山类比选取。推荐排土场稳定性分析和地基稳定性计算参数如表1所示。

表 1 岩土体强度参数表

Table 1 Strength parameters of rocks and soils

岩土体名称	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗剪强度	
		凝聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
堆排物料(正常状态)	15.4	15.0	33.1
尾矿坝体	20.0	20.0	30.0
尾矿(饱和)	19.0	8.0	12.0
全风化花岗岩	17.6	30.7	21.6
微风化花岗岩	25.9	3 356	20.09
中风化花岗岩	25.4	1 883	19.06
灰岩	26.9	1 062	11.79
洪坡积土	21.6	43	29.1
破碎带	19.0	49.3	21.9

为系统模拟分析排土场边坡稳定性状况,根据边坡岩体工程地质特征、边坡布置情况,在不同位置选取 3 个具有代表性的剖面建立计算模型,其中 2 号剖面的断面图如图 2 所示。

3 联合堆存稳定性分析

参照《有色金属矿山排土场设计规范》,将该排土场定为二级排土场。排土场现状存在如下问题:

- (1) 排土场未按设计建造拦石坝;
- (2) 排土场未做专项安全现状评价报告;
- (3) 按设计方案排土场已超高;

(4) 排土场边坡角控制不到位,局部边坡过陡。

计算尾矿坝-排土场在三种不同工况下的稳定性,稳定性计算简图见图 3、图 4,采用多种稳定性计算方法计算的稳定性结果见表 2、表 3。

尾矿坝-排土场 3 个剖面、3 种不同工况的稳定性计算结果表明,工况一条件下,尾矿坝-排土场整体稳定性较好;工况二条件下,尾矿坝-排土场整体稳定性符合要求,安全储备较小;工况三条件下,1 剖面整体稳定性安全储备不足,其余符合要求。3 种工况条件下,尾矿坝-排土场局部均会发生破坏,失稳部位主要集中在 +575 ~ +592 m 标高处。

参照国内外工程经验及铁道部运输局推荐的法向和切向回弹系数^[13],综合选取尾矿坝-排土场边坡滚石的模型参数,取切向回弹系数 R_t 取 0.82,法向回弹系数 R_n 取 0.32,坡面摩擦角取 30° 。滚石初始平动速度为 $0 \sim 1.5 \text{ m/s}$,转动速度 $0 \sim 2 \text{ rad/s}$ 。为保证边坡下方平台及作业面安全,按最不利的原则,取初始平动速度 1.5 m/s ,转动速度 2 rad/s ,来进行分析,随机模拟的滚石数为 50 个。

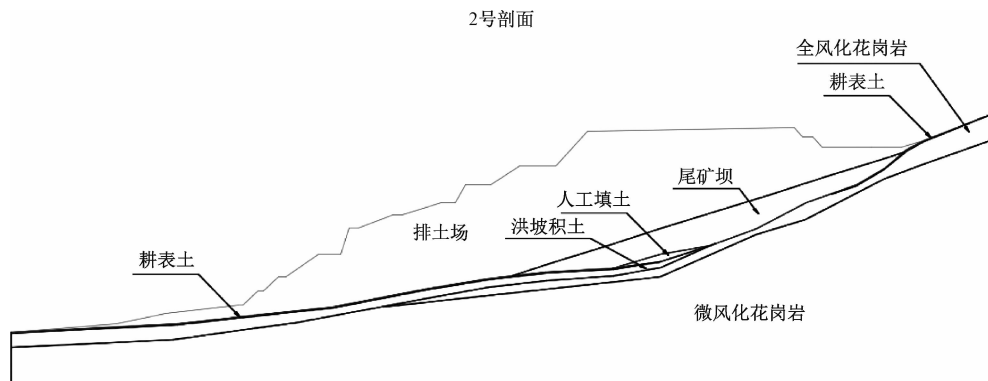


图 2 2#典型剖面断面图

Fi. 2 No. 2 section

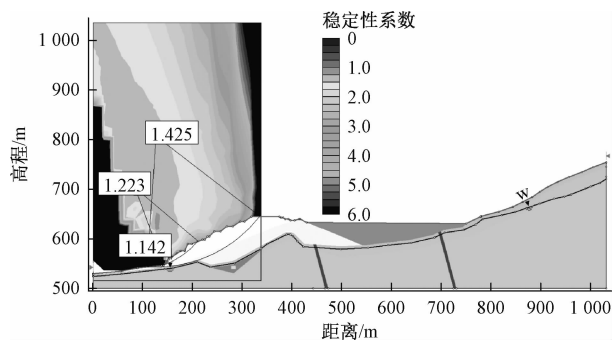


图 3 瑞典圆弧法计算结果图(工况 1、剖面 3)

Fig. 3 The results of calculation using the Swedish arc method (Condition1, No. 3 section)

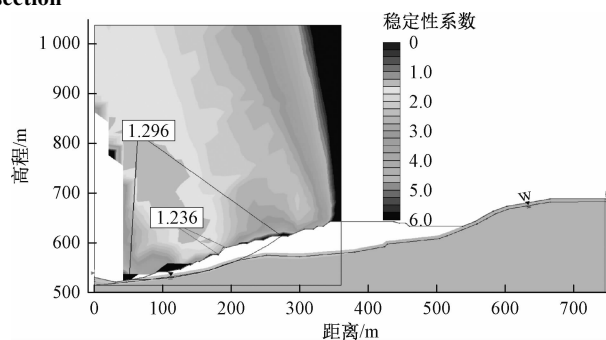


图 4 瑞典圆弧法计算结果图(工况 1、剖面 1)

Fig. 4 The results of calculation using the Swedish arc method (Condition1, No. 1 section)

表 2 边坡整体安全系数计算结果表(工况 1)
Table 2 Calculation results of overall safety factor of slope (Condition 1)

剖面编号		边坡安全系数					
		瑞典圆弧法	毕肖普法	简布法	Spencer 法	M-P 法	平均值
1	整体	1.296	1.340	1.358	1.337	1.335	1.333
	最小值	1.236	1.243	1.247	1.239	1.237	1.240
	最小值位置	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	
2	整体	1.627	1.602	1.622	1.601	1.601	1.611
	最小值	1.006	1.002	1.013	1.006	1.006	1.007
	最小值位置	575 ~ 592 m	575 ~ 592 m	575 ~ 592 m	575 ~ 592 m	575 ~ 592 m	
3	整体	1.425	1.497	1.499	1.493	1.491	1.481
	最小值	1.142	1.162	1.175	1.159	1.156	1.159
	最小值位置	546 ~ 563 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	

表 3 边坡整体安全系数计算结果表(工况 2)
Table 3 Calculation results of the overall safety factor of the slope (Condition 2)

剖面编号		边坡安全系数					
		瑞典圆弧法	毕肖普法	简布法	Spencer 法	M-P 法	平均值
1	整体	1. 216	1. 239	1. 256	1. 236	1. 236	1. 237
	最小值	0. 784	0. 789	0. 790	0. 784	0. 784	0. 786
	最小值位置	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	
2	整体	1. 194	1. 278	1. 256	1. 278	1. 276	1. 256
	最小值	0. 662	0. 661	0. 669	0. 662	0. 662	0. 663
	最小值位置	575 ~ 591 m	575 ~ 591 m	575 ~ 591 m	575 ~ 591 m	575 ~ 591 m	
3	整体	1. 196	1. 220	1. 232	1. 215	1. 218	1. 216
	最小值	0. 794	0. 797	0. 978	0. 794	0. 794	0. 831
	最小值位置	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	575 ~ 590 m	

采用 Rocfall 软件对尾矿坝 - 排土场边坡滚石进行了分析研究。计算结果表明,尾矿坝 - 排土场现状台阶的各剖面边坡参数基本能有效拦截上方滚石。

4 堆存边坡坡形参数优化

通过计算:尾矿坝 - 排土场整体上基本稳定,但剖面 1 在暴雨状态下和地震应力作用下平均安全系数最低,剖面 3 边坡分别在暴雨状态下平均安全系数最低,存在安全隐患,对其进行处理。

根据最不利原则,调整尾矿坝 - 排土场边坡坡形参数,对其进行优化使其安全系数在各工况条件均能达到 1.2。

剖面 1 不稳定坡段边坡角为 26°,该剖面边坡岩体条件分别对应边坡角为 25°、24°进行优化;剖面 2 不稳定坡段边坡角为 27°,该剖面边坡岩体条件分别对应边坡角为 26°进行优化;剖面 3 不满足规范边坡段边坡角为 33°,该剖面边坡岩体条件分别对应边坡角为 29°、28.5°进行优化。分别对各剖

面各优化的边坡角在暴雨(工况 2)、地震状态下(工况 3)稳定性进行计算分析,部分计算结果如图 5、图 6、表 4、表 5 所示。

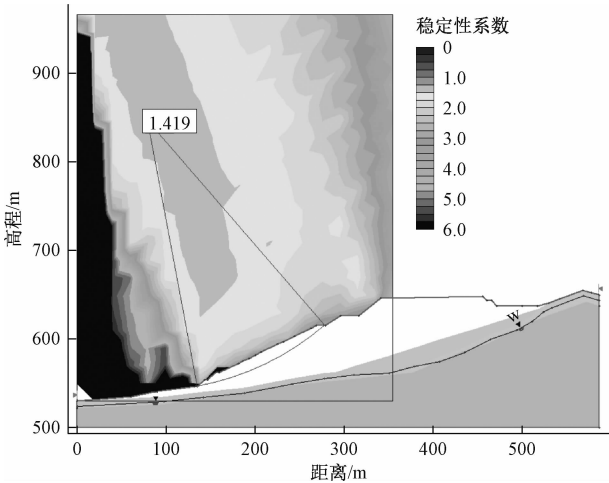


图 5 瑞典圆弧法计算结果图(26°、剖面 2、工况 3)
Fig.5 The results of the calculation using the Swedish arc method (26°, No. 2 section, Condition 3)

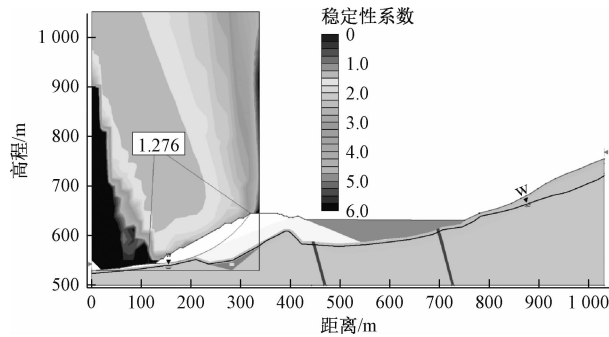


图6 瑞典圆弧法计算结果图(29°、剖面3、工况3)

Fig. 6 The results of the calculation using the Swedish arc method (29°, No. 3 section Condition 3)

表4 边坡整体安全系数计算结果表(工况2)

Table 4 Calculation results of the overall safety factor of the slope (Condition 2)

剖面	边坡角 /(°)	边坡安全系数					
		瑞典圆 弧法	毕肖 普法	简布法	Spencer 法	M-P 法	平均 值
剖面1	25.5	1.270	1.347	1.340	1.348	1.345	1.330
	25	1.286	1.359	1.357	1.357	1.357	1.343
	24	1.326	1.378	1.393	1.376	1.377	1.370
剖面2	26	1.278	1.301	1.318	1.298	1.298	1.299
剖面3	29	1.175	1.199	1.211	1.194	1.197	1.195
	28.5	1.181	1.205	1.216	1.200	1.203	1.201

表5 边坡整体安全系数计算结果表(工况3)

Table 5 Calculation results of the overall safety factor of the slope (Condition 3)

剖面	边坡角 /(°)	边坡安全系数					
		瑞典圆 弧法	毕肖 普法	简布法	Spencer 法	M-P 法	平均 值
剖面1	25.5	1.195	1.260	1.272	1.263	1.257	1.249
	25	1.208	1.267	1.281	1.269	1.266	1.258
	24	1.263	1.302	1.318	1.307	1.301	1.298
剖面2	26	1.419	1.444	1.459	1.444	1.442	1.442
剖面3	29	1.276	1.339	1.335	1.336	1.335	1.324
	28.5	1.276	1.343	1.337	1.341	1.339	1.327

计算结果表明:

(1)当1剖面滑坡段边坡角为25.5°时,在三种工况状态下安全系数均能达到规范要求,即边坡安全大于1.2;通过计算可知,需要调整的边坡区段为+575~+615 m;

(2)当剖面2滑坡段边坡角为26°时,在三种工况状态下安全系数均能达到规范要求,即边坡安全大于1.2。通过计算对比可以发现,治理部位为+575~+598 m,治理方式采用尾矿坝-排土场联合体中边坡卸

荷的方法,降低局部边坡角;

(3)当剖面3滑坡段边坡角为28.5°时,该段边坡在三种工况状态下安全系数均能达到规范要求,即边坡安全系数大于1.2。

经计算分析可知:尾矿坝-排土场边坡需要卸载区域为+575~+625 m。涉及+575~+590 m、+590~+598 m、+598~+605 m、+605~+615 m、+615~+625 m、+625~+635 m等台阶。通过对边坡规范化和卸荷,排土场新增+586 m平台,去除+590 m平台;相应的去除+575~+590 m和+590~+598 m台阶,新形成+575~+586 m和+586~+598 m台阶。

边坡规范化和卸荷后+575 m、+586 m、+598 m、+605 m、+615 m和+625 m平台新修区域的平台宽基本达到5 m;各平台形成反坡,利于平台水排入平台水沟内。+575~+590 m、+590~+598 m、+598~+605 m、+605~+615 m、+615~+625 m、+625~+635 m台阶的卸荷区域坡面角约为37°或小于37°。

排土场卸载土石方共计 $2.95 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。为利于排水,排土场各平台设置2%逆坡。经卸荷后,排土场边坡角均满足稳定性要求。

5 结论

(1)现状条件尾矿坝-排土场联合堆排体排土场部分堆高已超设计标高,排土场边坡角控制达不到设计要求,局部边坡过陡,现状条件尾矿坝-排土场的整体稳定性分析中地震工况条件下稳定性安全储备不足。

(2)尾矿坝-排土场滚石边坡分析中,联合堆排体外坡台阶的各剖面边坡参数基本能有效拦截上方滚石,对联合堆排体各剖面的外坡边坡参数进行了优化,剖面1优化后的外坡边坡角为25.5°,剖面2优化后的外坡边坡角为26°,剖面3优化后的外坡边坡角为28.5°。

(3)对尾矿坝-排土场联合堆排体外坡坡角优化后进行了卸荷设计,卸荷后形成6个平台,平台宽度为5.0 m,排土场卸载土石方共计 $2.95 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

参考文献:

- [1] 于广明,宋传旺,潘永战,等.尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J].岩石力学与工程学报,2014,7(S1):3238-3248.

YU Guangming, SONG Chuanwang, PAN Yongzhan, et

- al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3238 - 3248.
- [2] 田文旗, 薛剑光. 尾矿库安全技术与管理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 4 - 5.
TIAN Wenqi, XUE Jianguang. Tailings deposit safety technology and management [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2006: 4 - 5.
- [3] 王运敏, 项宏海. 排土场稳定性及灾害防治[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
WANG Yunmin, XIANG Honghai. Dumping site stability and disaster prevention [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [4] 段蔚平, 郭金峰, 汪斌. 我国金属矿山尾矿堆存技术及发展方向[J]. 金属矿山, 2013(12): 118 - 122.
DUAN Weiping, GUO Jinfeng, WANG Bin. Stacking process of metal mine tailings in China and its development trend[J]. Metal Mines, 2013 (12) : 118 - 122.
- [5] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 905 - 913.
WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Research on particle size grading and slope stability analysis of super-high dumping site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 905 - 913.
- [6] 武伟伟, 龚宇同, 秦秀山. 小型尾矿库存在的问题及安全对策分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2011, 63(5): 49 - 51.
WU Weiwei, GONG Yutong, QIN Xiushan. Analysis on existing problems of small tailings pond and safety precautions[J]. Nonferrous Metals: Mine Section, 2011, 63(5): 49 - 51.
- [7] 张培安. 栗西尾矿库挖潜改造延长服务期探讨研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2003, 32(5): 43 - 45.
ZHANG Peian. Study on the serve period is prolonged in Lixi tailings dam by tap the potentialities and remakes [J]. Nonferrous Metals: Mineral Processing Section, 2003, 32(5): 43 - 45.
- [8] 唐飞. 矿山排土场和尾矿库联合共建技术及其工程应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(5): 78 - 81.
TANG Fei. United constuction technology of the waste dumpand tailings pond in a mine and its engineering application. [J]. Nonferrous Metals: Mine Section, 2016, 68(5): 78 - 81.
- [9] 王晓民, 冯有志, 李全明. 停用尾矿库改建排土场的工程实践[J]. 矿业工程, 2015, 13(3): 50 - 52. .
WANG Xiaomin, FENG Youzhi, LI Quanming. Engineering practice of rebuilding tailings pond out of service into dump[J]. Mining Engineering, 2015, 13(3): 50 - 52.
- [10] 李全明. 尾矿库上覆排土场工程危险源辨识及安全评估技术研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(7): 38 - 43.
LI Quanming. Research on hazard source identification and safety assessment technology for engineering of dump on a tailings pond[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(7): 38 - 43.
- [11] 杨学堂, 王飞. 边坡稳定性评价方法及发展趋势[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(2): 103 - 106.
YANG Xuetao, WANG Fei. Slope stability evaluation method and development trend [J]. Geotechnical Engineering Technology, 2004, 18(2): 103 - 106.
- [12] 金属非金属矿山排土场安全作业规则: AQ2005—2005[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
Rules for safe operation of dumping sites in nonmetallic metal mines: AQ2005—2005 [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2005.
- [13] 邓骥宁. 高寒地区露天边坡稳定性分析及结构参数优化研究[D]. 长沙矿山研究院有限责任公司, 2016.
DENG Qining. Alpine region open pit slope stability analysis and structure parameter optimization research [D]. Changsha Institute of Mining Research Co. , Ltd, 2016.