

文章编号: 1674-9669(2015)05-0102-06
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2015.05.019

某矿露天残采爆破振动对临近尾矿坝稳定性的影响分析

罗涛^{a,b}, 石文芳^{a,b}, 何文^{a,b}, 许杨东^{a,b}, 陈承^{a,b}

(江西理工大学,a.资源与环境工程学院;b.矿业工程重点实验室,江西 赣州 341000)

摘要:某矿尾矿坝正准备二期扩容工程,附近有露天残采爆破作业,为分析该爆破振动对现阶段及二期扩容后尾矿坝稳定性的影响,根据现场爆破测振结果,拟合库区间爆破振动最大振速公式,计算分析库区距震源最近处的最大振速是否满足《爆破安全规程》要求,并采用Geo-Studio岩土软件中Quake/W和Slope/W模块,分别对现阶段及二期扩容后尾矿坝动力稳定性进行数值模拟计算。计算结果表明:该尾矿库库区距爆源最近处的最大振速2.344 cm/s,小于《爆破安全规程》中允许的标准值,满足安全规程要求;现阶段尾矿库剖面1、2在爆破振动下的最小安全系数分别为1.273和1.471,二期分别为1.267和1.473,均大于《尾矿库安全技术规程》中规定的最小安全系数,符合安全规程,尾矿库二期扩容工程是可行的。

关键词:尾矿坝;二期扩容;爆破振动;Geo-Studio;最小安全系数

中图分类号:TD325.4 **文献标志码:**A

Effect of open-pit blasting vibration on the stability of a vicinal tailings dam

LUO Tao^{a,b}, SHI Wenfang^{a,b}, HE Wen^{a,b}, XU Yangdong^{a,b}, CHEN Cheng^{a,b}

(a.School of Resources and Environment Engineering;b.Key Laboratory of Mining Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract:This paper studies the effect of the open-pit blasting vibration on the stability of a vicinal tailings dam, whose capacity is to be expanded by calculating the largest range of blasting vibration velocity vibration library formula according to the site blasting vibration measurement results. We calculated and analyzed the largest velocity in the closest point to the explosive source to determine whether it satisfied the blasting safety regulations. The Quake/W and Slope/W module of geotechnical software Geo-Studio were applied to simulate the dynamic stability of the tailings dam at the present stage and the second phase expansion stage. Calculation results show that the maximum velocity at the closest point to the explosive source is 2.344 cm/s, which is lower than the allowed values in blasting safety regulations. The minimum safety factors of tailings dam at the present stage under blasting vibration are 1.273 and 1.471. The minimum safety factors of the

收稿日期:2015-03-31

基金项目:江西省科技支撑计划重点项目(2014BBG70097);江西省工业安全工程技术研究中心开放基金项目(2013GGY001)

作者简介:罗涛(1990-),男,硕士研究生,主要从事岩石力学与工程方面的研究,E-mail: 1064430029@qq.com.

通信作者:何文(1981-),男,博士,副教授,主要从事矿山岩土工程测试技术及岩体稳定性分析方面的研究,E-mail: herman3@163.com.

second stage are 1.267 and 1.473. They are greater than the specified minimum safety factor in the tailings safety technical regulations. This paper illustrates that the open-pit blasting vibration has no effect on the stability of near tailings dam, and the second phase expansion project is feasible.

Key words: tailings dam; the second phase expansion; blasting vibration; Geo-Studio; minimum safety factors

我国是一个矿业大国, 目前每年的尾矿排放量至少在 6 亿 t 以上, 除小部分作为矿山充填或综合利用外, 绝大部分要堆存于尾矿库。尾矿库的正常运行, 不仅关系到一个矿山企业的经济效益, 而且与库区下游居民的生命财产及周边环境息息相关, 坝体一旦溃堤, 对下游居民的生命财产造成严重威胁, 也将给企业带来不可估量的损失^[1]。因此, 对于尾矿坝的稳定性分析有着十分重要的现实意义。

露天残矿开采在尾矿坝附近的情况较少, 其爆破作业对尾矿坝稳定性产生影响的可能性较大^[2-3]。在爆破作业的同时, 尾矿库扩容加高的二期工程, 也必须开展尾矿坝的稳定性分析。一旦坝体破坏滑裂, 将会造成严重的损失, 影响尾矿库二期扩容工程的顺利进行^[4]。因此, 进行露天残采爆破振动对临近尾矿坝稳定性的影响研究, 对尾矿库的安全运行和二期扩容工程有着重要的指导意义。

目前, 尾矿坝稳定性分析计算中常用的方法是有限元极限平衡法^[5]。此方法能较好地结合有限元应力分析方法和极限平衡法的特点, 由弹塑性有限元分析手段, 结合整体的应力场的影响, 随后以优化搜索方法确定最危险滑动面的位置及其安全系数。有限元极限平衡法理论体系严密, 计算效率高, 是尾矿坝坝体稳定性评价的重要手段^[6-8]。

本文以某尾矿库为例, 在现场爆破振动测试的基础上, 对现阶段和二期扩容后尾矿坝进行了动力稳定性计算和分析, 以验证其是否符合相关规程。

1 某矿尾矿库概况

该尾矿库初期坝为透水堆石坝, 是在水库大坝基础上改建而成, 外坡及顶面则采用石英片岩铺面, 坝高 29.4 m, 坝顶标高 160 m, 坝顶宽度 4.0 m, 上游坡比 1:1.5, 下游坡比 1:1.65。后期堆积坝采用尾矿上游式堆筑而成。现阶段堆积坝外坡平均坡比为 1:4.63, 每 3 m 设一级马道, 坝面上铺设了约 0.40 m 厚的黏性土层, 并种植了植被。库内尾砂滩顶标高为 205 m, 尾矿堆积坝高 45 m。尾矿库由左右两条狭长的 V 字形山谷组成, 走向由东向西, 地势从南往北由高变低, 沟口高程为 152 m 左右, 左沟位于库区南部, 沟长约 900 m, 周围均是原始林地; 右沟位于库区北部, 沟长

约 850 m, 其北侧为该矿露天残采矿点。

根据该矿尾矿库二期扩容工程设计, 二期工程的筑坝方式依然采用上游式尾矿堆坝, 从堆积标高 210 m 开始, 坝轴线往库内平移 10 m, 每 3 m 设置一条马道, 马道宽 2.5 m, 平均外坡坡比约 1:4.67, 堆积坝外坡覆人工填土 0.3~0.5 m 厚。右沟最终堆积标高 225 m, 左沟最终堆积标高 240 m。

2 爆破测振试验

爆破振动测试采用 BlastMate III 型测振仪, 可以采集 P、SV 及 SH 3 种振动体波, 爆破测振布置见图 1, 其中剖面 1、剖面 2 分别代表尾矿库的右沟和左沟剖面。测振仪布置基本与爆源呈直线, 且库区测点布置在 2 个计算剖面上, 以便将相应剖面上的爆破振动信号用于后期尾矿坝稳定性数值计算。

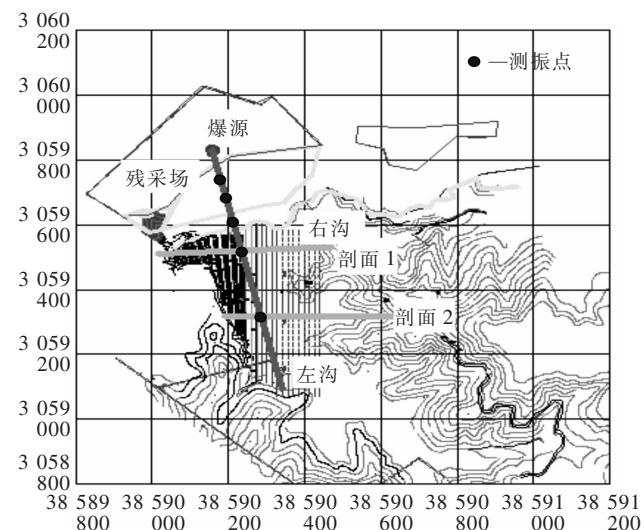


图 1 爆源及测振仪布置平面图

Fig.1 Plan of explosion source and vibrometer layout

本次爆破方式为中深孔爆破, 孔深约 10 m, 每次爆破测试布置 5 个测点, 共进行 3 次测试。测振仪与爆源及测振仪与测振仪之间间隔一定距离, 各个测点的坐标由手持式 GPS 仪卫星定位获取, 并以皮尺测距加以校核。其中 4、5 测点分别布置在剖面 1、剖面 2 上。

爆破振动测试试验完成后, 导出测振数据, 得到测点振动最大合成速度, 结果见表 1。

表1 爆破测振结果
Table 1 Blasting vibration results

序号	测点	单段最大药量/kg	测点距爆源距离/m	振动主频/Hz	振动最大合成速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
第1次爆破	1	332	91.5	28	1.65
	2	332	137.5	20	1.80
	3	332	188.5	22	1.53
	4	332	317.6	18	0.42
	5	332	527.4	18	0.33
第2次爆破	1	256	91.5	32	1.18
	2	256	137.5	20	1.59
	3	256	188.5	20	1.65
	4	256	317.6	19	0.49
	5	256	527.4	16	0.24
第3次爆破	1	224	91.5	34	1.91
	2	224	137.5	32	1.29
	3	224	188.5	23	0.80
	4	224	317.6	21	0.45
	5	224	527.4	18	0.24

根据《爆破安全规程》(GB6722-2011),爆破振动最大振速(萨道夫斯基公式)公式为:

$$V=K\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

式(1)中: Q 为炸药量(kg), R 为爆源至测点间距离(m), K 和 α 为与爆破点地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

利用最小二乘法,采用表1中的测振数据拟合式(1)中的待定参数 K 和 α ,结果为 $K=107.32,\alpha=1.376$.所以露天残采爆源至尾矿库区间的爆破振动最大振速公式为:

$$V=105.32\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{1.376} \quad (2)$$

现场调查可知,露天残采采矿点距离现阶段及二期扩容后尾矿坝最近处约110 m,根据式(2),计算得到单段药量最大为332 kg时的爆破,最近处质点振速为2.344 cm/s.尾矿坝作为工业建筑物,查询《爆破安全规程》(GB6722-2011),振动主频在10~50 Hz时爆破振动安全允许标准为3.5~4.5 cm/s.因此计算

得到的质点振速小于标准值范围,露天残采爆破满足安全规程要求.

3 爆破振动对尾矿坝稳定性的影响

根据现场爆破测振试验,进一步结合数值模拟方法开展爆破振动对尾矿坝坝体稳定性的影响模拟与分析.

3.1 计算模型

3.1.1 物理力学参数

根据该矿尾矿库勘察报告,选取的物理力学参数见表2.

表2 物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters

材料	天然重度 $\gamma /(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	剪切模量 G / MPa	内聚力 C / kPa	内摩擦角 $(^{\circ})$
人工填土	18.5	0.25	12.00	12	15
初期坝	25.0	0.30	55.00	2	40
尾粉砂	19.9	0.30	3.14	6	24
尾粉土	19.8	0.35	2.08	10	22
尾粉质黏土	19.2	0.35	1.39	18	20
尾黏土	18.7	0.40	0.83	10	10
粉质黏土	19.3	0.40	1.00	28	21
含碎石粉质黏土	19.4	0.35	1.69	28	22
强风化石英片岩	22.3	0.30	34.62	120	25

3.1.2 边界条件

该尾矿库模型的边界条件包括位移边界条件和水位边界条件.其中位移边界条件为模型两侧的水平位移约束和底部的黏滞约束;水位边界条件为坝体浸润线^[9-11]位置.为了解坝体内浸润线的位置和变化情况,设置了浸润线人工观测孔进行定期观测,根据长期观测数据资料以及人工观测孔与剖面的相对位置,从而确定剖面的浸润线埋深,见表3.

表3 不同标高处的浸润线埋深
Table 3 Depth of phreatic line

地点	项目名称	标高 /m							
		163.0	172.0	181.0	190.0	199.0	210.0	219.0	225.0
右沟	人工观测浸润线埋深/m	11.2	21.4	18.2	18.2	22.0	21.4	/	/
	二期设计浸润线埋深/m	10.5	29.5	17.5	17.5	20.5	20.5	22.5	23.0
地点	项目名称	标高 /m							
		178.0	184.0	190.0	196.0	202.0	210.0	225.0	240.0
左沟	人工观测浸润线埋深/m	4.2	12.2	15.8	22.8	22.0	23.0	/	/
	二期设计浸润线埋深/m	3.0	9.5	13.0	20.0	20.0	21.0	23.0	24.0

注:“/”指未布设观测孔.

3.1.3 模型建立

根据计算剖面、边界条件与材料物理力学参数, 应用岩土软件 Geo-Studio 建立的现阶段尾矿坝稳定性计算模型见图 2、图 3。

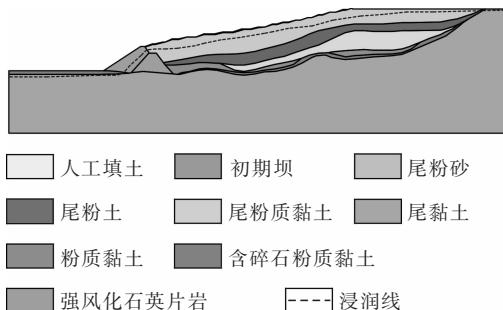


图 2 剖面 1 计算模型

Fig.2 Computational model of section 1

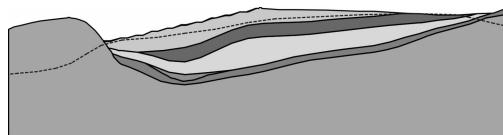


图 3 剖面 2 计算模型

Fig.3 Computational model of section 2

根据该矿尾矿库二期扩容工程设计资料, 建立的二期扩容后尾矿坝稳定性计算模型见图 4、图 5。

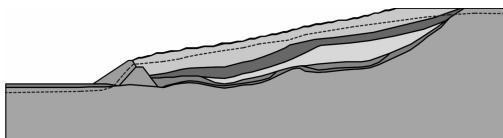


图 4 二期剖面 1 计算模型

Fig.4 Computational model of section 1 in stage II

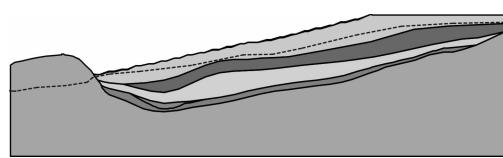


图 5 二期剖面 2 计算模型

Fig.5 Computational model of section 2 in stage II

3.2 爆破振动信号

数值计算采用 Geo-studio 有限元软件的动力学 Quake/W 模块。计算时由于爆源在剖面线的正北方, 第 1 次爆破的单段炸药量最大, 因此, 主要考虑第 1 次爆破测得的 SH 波(方向垂直于坝体)和 SV 波(方向平行于坝体)对坝体的影响^[12-15]。

其中两剖面测振点处的爆破振动信号用于现阶段和二期扩容后尾矿坝稳定性计算。其露天爆破在 2 个剖面测振点处的振动波形见图 6、图 7。

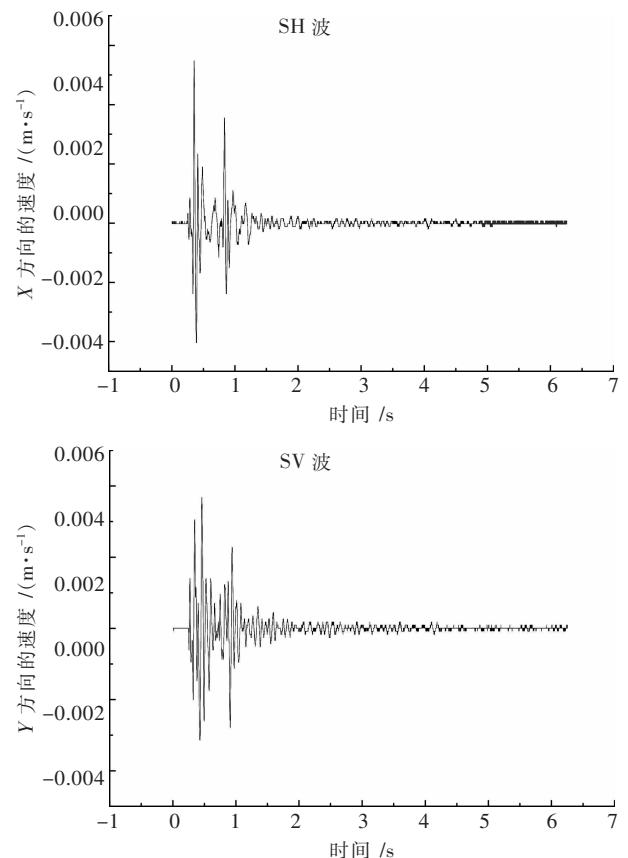


图 6 剖面 1 处 SH、SV 波振动波形

Fig.6 Vibration waveform of SH and SV wave in section 1

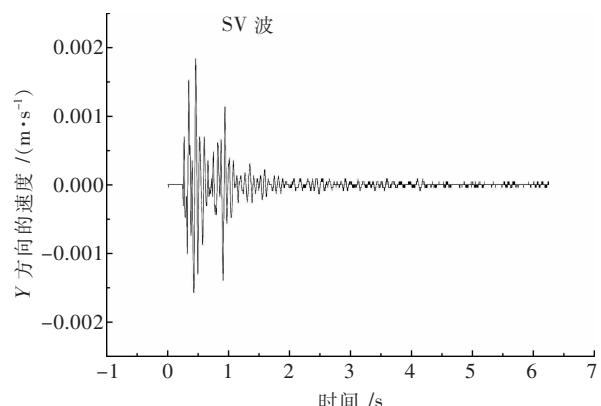
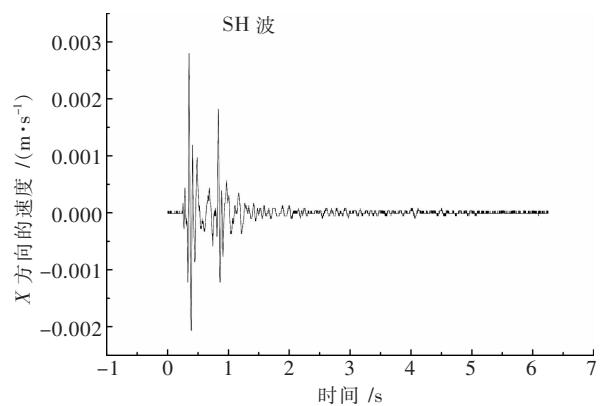


图 7 剖面 2 处 SH、SV 波振动波形

Fig.7 Vibration waveform of SH and SV wave in section 2

3.3 爆破振动对现阶段尾矿坝稳定性的影响分析

图6、图7中的爆破振动波形以不同速度的形式加载至现阶段尾矿库剖面1、剖面2处。当Quake/W动力学模块完成尾矿坝振动计算后,将计算结果导入Geo-studio软件的Slope/W模块,采用Newmark Deformation方法计算分析尾矿坝的稳定性,得到现阶段尾矿坝振动安全系数随时间的变化见图8、图9。

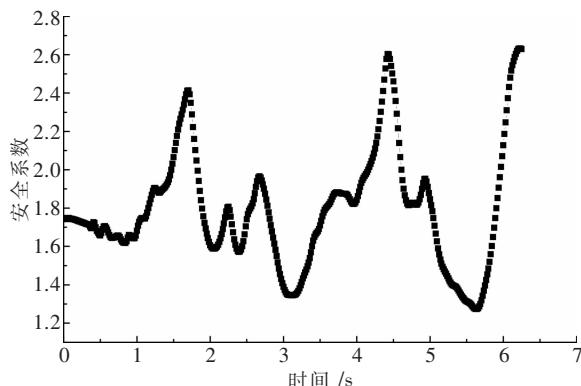


图8 剖面1安全系数随时间的变化

Fig.8 Changes of safety factor of section 1 vs time

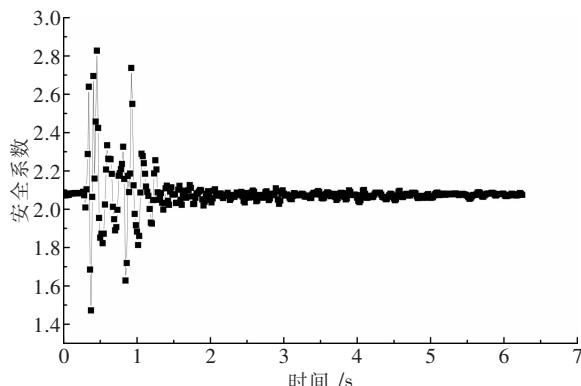


图9 剖面2振动安全系数随时间的变化

Fig.9 Changes of safety factor of section 2 vs time

由图8、图9可知,在爆破振动情况下,现阶段尾矿库剖面1的最小安全系数为1.273,剖面2的最小安全系数为1.471。

3.4 爆破振动对二期扩容后尾矿坝稳定性的影响分析

同样以图6~图7中的爆破振动波形以不同速度的形式加载至二期扩容后尾矿库剖面1、剖面2处。模拟计算方法与现阶段尾矿坝稳定性分析一致,得到二期扩容后尾矿坝振动安全系数随时间的变化见图10、图11。

由图10、图11可知,在爆破振动情况下,二期扩容后尾矿坝剖面1的最小安全系数为1.267,剖面2的最小安全系数为1.473。

由上述剖面安全系数随时间变化图可知,尾矿库

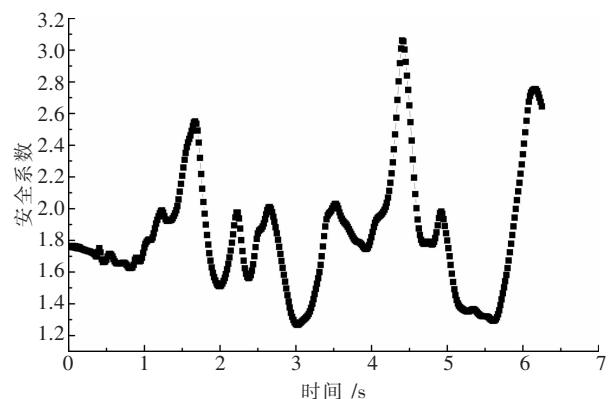


图10 二期剖面1振动安全系数随时间的变化

Fig.10 Changes of safety factor of section 1 vs time in stage II

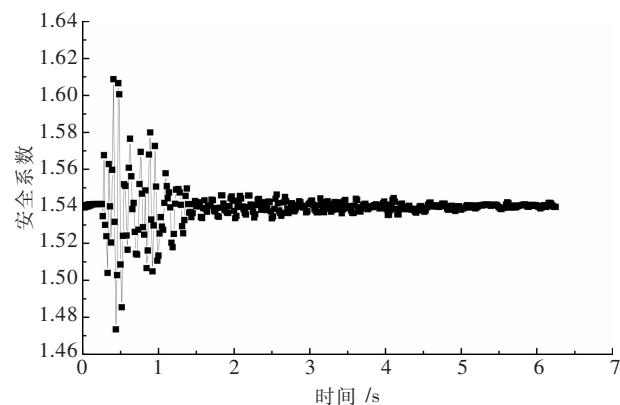


图11 二期剖面2振动安全系数随时间的变化

Fig.11 Changes of safety factor of section 2 vs time in stage II

的安全系数随爆破振动时间发生明显变化;剖面2比剖面1距爆源较远,其安全系数随爆破振动时间的变化趋势逐渐趋于稳定。因此,爆破振动对尾矿库的稳定性有着显著的影响;爆破振动对尾矿库的影响时间与距爆源的距离有关,距离越远,影响时间越短。

3.5 计算结果分析

通过该矿尾矿库相关资料可知,现阶段尾矿坝属于三级坝,二期扩容尾矿坝属于二级坝。参考《尾矿库安全技术规程》^[16](AQ2006-2005),按瑞典圆弧法计算尾矿坝抗滑稳定的最小安全系数不应小于表4规定的数值。

表4 坝坡抗滑稳定最小安全系数
Table 4 Minimum safety factor of stable dam against sliding

运用情况	库矿坝级别				
	1	2	3	4	5
正常运行	1.30	1.25	1.20	1.15	1.15
洪水运行	1.20	1.15	1.10	1.05	1.05
特殊运行	1.10	1.05	1.05	1.00	1.00

计算结果可知,在爆破振动情况下,现阶段尾矿

库右沟 1 剖面和左沟 2 剖面的最小安全系数分别为 1.273 和 1.471, 二期扩容后尾矿库右沟 1 剖面和左沟 2 剖面的最小安全系数为 1.267 和 1.473, 均大于《尾矿库安全技术规程》中规定的最小安全系数, 符合安全规程。

4 结 论

1) 根据现场爆破测试结果, 利用萨道夫斯基公式回归得到相应的 K 和 α , 计算得到爆源距尾矿坝最近处质点最大振速为 2.344 cm/s, 小于《爆破安全规程》(GB6722-2011) 中相应该尾矿库的爆破振动安全允许标准范围 3.5~4.5 cm/s, 露天残采爆破满足规程要求。

2) 爆破振动对尾矿库的稳定性有着显著的影响; 爆破振动对尾矿库的影响时间与距爆源的距离有关, 距离越远, 影响时间越短。

3) 露天残采爆破振动对现阶段尾矿坝稳定性的影响分析表明, 尾矿坝稳定性最小安全系数大于《尾矿库安全技术规程》中规定的最小安全系数, 符合安全规程, 尾矿库可以安全运行。

4) 露天残采爆破振动对二期扩容后尾矿坝稳定性的影响分析表明, 尾矿坝稳定性最小安全系数大于《尾矿库安全技术规程》中规定的最小安全系数, 符合安全规程。说明该尾矿库二期的扩容工程是可行的。

参考文献:

- [1] 胡明鉴, 陈守义, 郭爱国, 等. 某上游法尾矿坝抗滑稳定性浅析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 2): 254-258.
- [2] 李祥龙, 庙延钢, 杨溢. 爆破震动对边坡稳定性影响分析[J]. 爆破, 2006, 23(4): 15-19.
- [3] 赵宝云, 刘保县, 万贻平. 爆破震动对某边坡稳定性影响的数值模拟[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 59-62.
- [4] 林国洪. 某铜矿尾矿库运行和深部开采条件下的稳定性分析[J]. 有色金属工程, 2014, 4 (4): 65-67.
- [5] 于斯滢. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝体稳定分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [6] 程灿宇, 罗富荣, 戚承志. 有限元强度折减法计算边坡稳定的对比分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3472-3478.
- [7] 于斯滢, 邵龙潭, 刘士乙. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝体稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1185-1190.
- [8] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577-596.
- [9] 何文, 赵奎, 刘洪兴. 浸润线地质雷达探测技术在某尾矿坝稳定性分析中的应用[J]. 有色金属工程, 2014, 4(1): 68-70.
- [10] 梁冰, 白云鹏, 金佳旭. 库水位升高对尾矿坝稳定性的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 11-14.
- [11] 宋传旺, 于广明, 王越红, 等. 基于流固耦合模型分析库水位对尾矿坝的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 2): 1784-1787.
- [12] 吴贤振, 尹丽冰, 胡维, 等. 某矿井下浅孔毫秒延时爆破地表震动的数值模拟研究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(6): 100-104.
- [13] 董陇军, 李夕兵, 赵国彦, 等. 露天采矿爆破振动对砌体结构破坏效应预测的 Fisher 判别模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 750-756.
- [14] 邵良杉, 赵琳琳. 露天采矿爆破振动对民房破坏的旋转森林预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2): 58-63.
- [15] 蔡嗣经, 张栋, 何理. 地震中尾矿库液化失稳机理及数值模拟研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(2): 1-6.
- [16] 罗忆, 卢文波, 陈明, 等. 爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破, 2010, 27(1): 14-22.
- [17] 言志信, 彭宁波, 江平, 等. 爆破振动安全标准探讨[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1281-1284.