

# 爆破地震条件下露天煤矿防洪坝动力响应分析

杨汉宏<sup>1</sup>, 周永利<sup>1</sup>, 李胜林<sup>2</sup>

(1. 神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:**为防止黑岱沟露天煤矿的抛掷爆破对矿坑防洪坝安全的损害, 基于 FLAC<sup>3D</sup> 模拟软件, 分别建立了在无水条件和有水条件 2 种情况下西圪奔防洪坝安全稳定性的计算方案, 确定了安全参数, 通过现场监测和数值模拟, 建立了露天煤矿防洪坝爆破震动条件下动力响应模型, 研究了防洪坝动力响应的机理, 得出了爆破震动波危险主频和横向临界破坏阈值速度。研究表明: 使防洪坝体发生最大结构响应的最不利主频为 2 Hz; 坝体抛掷爆破, 对应坝底来波方向坝体横向阈值速度为 24 cm/s, 竖向阈值速度为 13 cm/s; 有水条件下, 抛掷爆破时, 坝体横向临界破坏阈值速度为 9.6 cm/s。

**关键词:** 露天煤矿; 防洪坝; 爆破地震; 动力响应

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)12-0030-06

## Analysis on dynamic responses of flood control dam for surface mine under blasting earthquake

YANG Hanhong<sup>1</sup>, ZHOU Yongli<sup>1</sup>, LI Shenglin<sup>2</sup>

(1. Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 010300, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to prevent castblasting Heidaigou surface mine safety mine flood control dam damage, finite element numerical simulation technology based on FLAC<sup>3D</sup>, it was established in anhydrous conditions and calculation scheme of water conditions under the two conditions of Xigeben safety and stability of flood control dam, safety parameters were determined by field monitoring and numerical simulation, the establishment of the dynamic response model under the condition of surface mine flood control dam blasting vibration, studies the mechanism of flood control dam dynamic response, the blasting vibration wave frequency and the risk of lateral critical damage threshold velocity. The results showed that the most unfavorable to the maximum flood control dam frequency response of the structure 2 Hz; the dam in the cast blasting, corresponding to the dam transverse wave direction threshold velocity was 24 cm/s, vertical threshold speed was 13 cm/s; under the condition of water, throwing blasting, the damage threshold of lateral critical speed was 9.6 cm/s.

**Key words:** surface mine; flood control dam; blasting earthquake; dynamic responses

## 0 引 言

防洪坝的数值模拟总体上分成 2 类, 第 1 类为无水条件下防洪坝的爆破地震响应问题, 第 2 类为洪水作用下防洪坝的爆破地震响应问题<sup>[1-4]</sup>。杨洁等<sup>[5]</sup>运用 ANSYS 时程分析方法研究爆破震动波对土石坝的影响, 计算结果表明坝顶受震动波的影响最大, 坝基次之。王亮亮<sup>[6]</sup>基于 FLAC<sup>3D</sup> 对尾矿坝加

高后爆破施工的振动响应进行了数值模拟, 分析显示以现阶段使用的生产药量及爆破方式所产生的震动不影响尾矿坝的稳定性。文献[7-10]为了判断爆破震动对相邻大坝安全的影响, 建立有限元模型进行定量分析比较, 确定了合理的爆破安全质点震动速度控制值以及坝体振动频率, 并分析了坝体在动荷载作用下的应力状态。卢云香<sup>[11]</sup>使用 ANSYS 瞬态分析方法计算分析在爆破冲击波作用下新老坝

收稿日期: 2017-08-31; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.12.006

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574247, 10272109)

作者简介: 杨汉宏(1960—), 男, 陕西绥德人, 教授级高级工程师, 现任神华准格尔能源有限责任公司董事长、党委书记。

引用格式: 杨汉宏, 周永利, 李胜林. 爆破地震条件下露天煤矿防洪坝动力响应分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 30-35.

YANG Hanhong, ZHOU Yongli, LI Shenglin. Analysis on dynamic responses of flood control dam for surface mine under blasting earthquake[J].

Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 30-35.

的动力响应,模拟得到新坝基坑开挖爆破时老坝坝体有较明显的动力放大效应,老坝拆除爆破时新坝各位置的振速幅值均低于控制标准建议值。文献[12-14]通过 Geo-Studio 建立大坝有限元分析模型,对坝体在震动作用下动力响应进行数值模拟,分析得到坝体最大水平位移在其中下部,另外从坝坡稳定、坝基液化两方面分析了爆破振动对大坝的影响效应,结果显示爆破荷载下坝基将产生超孔隙水压力和可能液化区,且水位越高可能液化区越大。文献[15-16]采用 ABAQUS 建立尾矿坝计算模型进行动力分析,得到了地震波作用下坝顶水平方向加速度反应时程曲线且坝体的最大动剪应力呈层状分布。FLAC<sup>3D</sup>是基于有限差分法的数值分析软件,在岩土、水利等非线性大变形分析中有着广泛的运用,笔者选择 FLAC<sup>3D</sup> 软件对防洪坝进行数值模拟<sup>[17-19]</sup>。

## 1 无洪水作用下的防洪坝的计算方案

1) 在进行爆破振动分析前,先进行重力下的平衡分析,并且无论何种状态下,重力始终作用在其中。

2) 分别选取一组抛掷爆破波形和一组松动爆破波形对模型进行时程分析,通过对比坝顶点的振动信号来验证模型的正确性。

3) 通过调整爆破地震波频率确定坝基底来波方向上的危险主频,将主频为危险主频的振动信号作为最不利波形。对最不利波形的振速等比例放大,根据放大后的波形对坝进行动力分析。逐步放大振幅倍数直至坝体破坏,此时对应的波形为临界破坏的输入波形。

4) 根据临界破坏的输入波的速度阈值,利用信号分析中得到的规律推算比例距离,确定安全爆破作业范围。

考虑洪水作用时,在第3)步前增加渗流分析。洪水短期作用工况,左侧洪水迅速至最高水位,而右侧坝坡未开始渗流,如图1所示,左侧坝坡孔隙压力固定,孔隙压力随水深呈线性变化,右侧孔隙水压固定为0。在进行洪水的渗流分析及力学分析后,再进行爆破地震波下的坝体动力的相关分析。



图1 洪水作用工况示意

Fig.1 Schematic diagram of flood action

## 2 数值计算模型的建立

通过现场的监测数据可知,坝顶测点横向振动速度一般均大于顺轴向振动速度,从坝的变形特征可知,坝横向更易发生破坏,出现滑坡或其他不稳定问题,为减少计算规模,坝的计算模型采用准平面模型,沿坝轴向取1 m,平面位置取为坝的中线即速度传感器布置的平面。

以西圪奔坝作为防洪坝的典型对象,由于其马道尺寸相对较小,在坝的整体稳定性分析中、刚度贡献及马道产生的荷载可以忽略。防洪坝体系中所有的坝均为均质土坝,有的上覆砌筑的岩石,有的裸露。砌筑岩石的主要作用为防止风浪、雨水冲刷以及冻胀开裂等有害作用,而本研究中主要考虑洪水下的爆破地震作用,因此暂不考虑土坝上的砌石。

简化后坝的几何形状如图2所示,模型的X轴取为坝的横向,Z轴为竖直向上方向,Y轴为坝的轴向,坐标原点为坝底起坡处,左侧坝坡比为1:3,右侧为1.0:2.5。

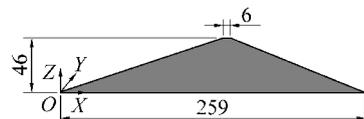


图2 坝平面几何尺寸及坐标定位

Fig.2 Plane geometric dimension and coordinate location of dam

西圪奔坝坐落在经过处理的岩基上,进行地震分析时必须考虑岩基的影响,以抛掷爆破下的西圪奔坝为研究对象。其中来波方向的测点位于原点左侧4 m处,坝右侧岩基取为2倍的坝底宽,坝高根据一倍的波长选取,取为500 m。抛掷爆破地震波下岩基范围取为X范围为 $[-4, 777]$ ,Z向范围仍为 $[0, -500]$ 。

通过土体的弹性特性可知土体的剪切波速为148 m/s,坝体的95%以上单元最大尺寸为3 m,那么较准确的考虑的频率 $f$ 约为6.2 Hz。

岩基剪切波速为2 020 m/s,仅考虑最高频率为20 Hz的爆破地震波,可知网格的尺寸为10.100~12.625 m,实际取10 m。

FLAC<sup>3D</sup>采用有限差分方法,六面体网格计算精度较高,而FLAC<sup>3D</sup>程序对于坝坡类结构,网格划分质量较差。因此本模型采用ANSYS作为前处理器,通过控制边的网格尺寸、网格形状等多种手段以保证单元的质量。模型网格划分情况如图3所示。

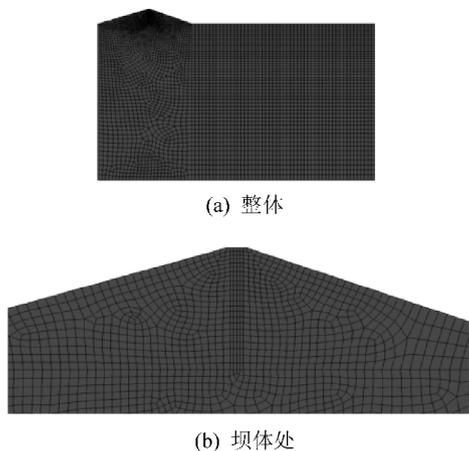


图3 模型网格划分

Fig. 3 Model mesh generation

动力分析时,坝体采用弹性本构,体积模量 100 MPa,剪切模量 3.75 MPa,密度 1 703 kg/m<sup>3</sup>。强度准则为 MC 准则,根据现场施工的报告,一般条件下选取  $C = 20$  kPa,  $\varphi = 25^\circ$ 。岩基采用弹性本构,体积模量 16 700 MPa,剪切模量 10 000 MPa,密度 2 450 kg/m<sup>3</sup>。在一般的小变形弹性分析中,为提高计算速度,土体的强度准则可不施加。

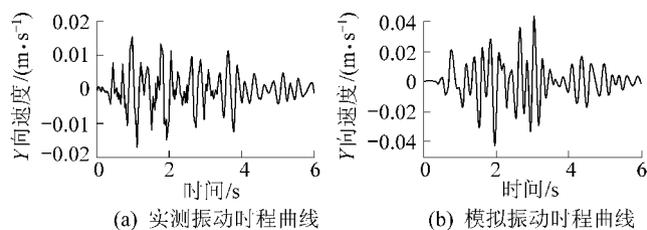
渗流分析时水模量在取 2 000 MPa,动力分析中考虑土体中所含空气的影响,水模量取为 200 MPa。坝体取为各向同性渗流模型,孔隙率为 0.44,渗透系数  $8.11 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/Pa 与实测对比,坝基采用不透水材料模型。

### 3 坝体的初始应力状态与实测对比分析

#### 3.1 初始状态

为了在土坝动力分析之前获得准确的初始应力场,应进行重力作用下的坝体平衡计算。

以抛掷爆破的模型为例,利用弹性模型计算得到的坝顶竖向位移曲线如图 4 所示,坝顶最大竖向位移为 22.3 cm,为坝高的 0.48%。可以直接将变形后的坝体模型用于地震动分析的初始模型。模型的竖向变形云图和竖向应力云图分别如图 5 和图 6 所示。



(a) 实测振动时程曲线

(b) 模拟振动时程曲线

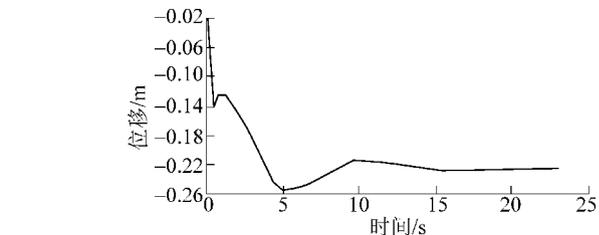


图4 坝顶的竖向位移曲线

Fig. 4 Vertical displacement curve of the dam crest

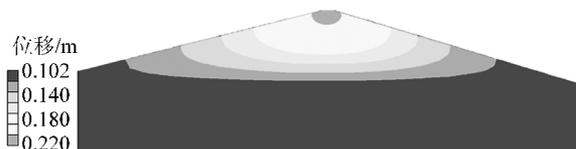


图5 模型的竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacement nephogram of model



图6 模型的竖向应力云图

Fig. 6 Vertical stress nephogram of model

#### 3.2 现场实测

选取 2012 年 6 月 18 日的抛掷爆破下的地震波,通过滤波、处理后输入到模型中。爆破振动过程中最大的塑性单元分布如图 7 所示。

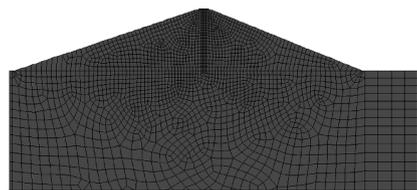
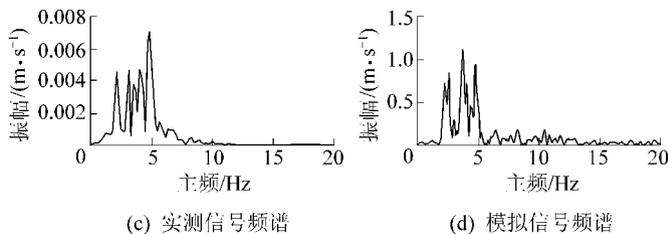


图7 塑性单元分布

Fig. 7 Distribution diagram of plastic elements

从图 7 可知,实测的爆破地震波下,坝体未出现塑性单元,整个结构处于弹性状态。坝顶中心位置的实测振动信号与监测计算模型得到的波形(模拟信号)对比如图 8 所示。

通过对比发现,模拟得到的结果与实测数据能较好的吻合,证明所建立模型符合实际情况。



(c) 实测信号频谱

(d) 模拟信号频谱

图8 Y方向实测和模拟信号时程曲线及频谱

Fig. 8 Time history curve and spectrogram of measured and simulated signals in Y direction

## 4 防洪坝动力模拟结果分析

### 4.1 无水条件下防洪坝动力模型

#### 4.1.1 代表波形的选取

为满足真实的爆破地震波时频特性,代表波形从实测来波方向的坝底数据中截取。截取波形应为原始波形的主要振动部分,应该能够反映出原始波形的主要时频部分。

抛掷爆破下的代表波形选取2012年6月18日的坝底输入波的0.5~3.5 s部分;松动爆破下的代表波形选取2011年9月10日的坝底输入波的1~4 s部分。

#### 4.1.2 危险主频的确定

为满足最不利输入波的主频条件,拉伸和缩放特征曲线的时间轴以获取不同的主频。由于实测数据全部都是在爆破远区且测点都位于抛掷方向后方,缺少爆破中近区和爆破抛掷方向两侧的测试,所得到的坝底主频都在1~20 Hz内结合实测数据主频范围和其他监测给出的主频范围,笔者进行分析选取主频范围为2.0~5.5 Hz。2 Hz主频的输入波很接近坝体结构主频,坝体反应趋近于共振,结构响应最大。综上危险主频应选为2 Hz,在进一步分析中应用主频为2 Hz的波形进行分析,并且将此波形称为最不利波形。

#### 4.1.3 坝体临界破坏条件

1) 抛掷爆破最不利波形下的坝体至临界破坏,若坝体出现大范围的塑性区,其位置邻近坝坡,节点速度矢量与塑性区发展方向相一致,则可判断坝体破坏。坝体塑性区及节点速度矢量图如图9所示。

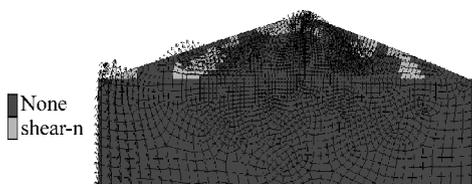


图9 坝体塑性区及节点速度矢量图

Fig. 9 Plastic zone and nodal velocity vector of dam body

10倍速度作用下,坝体出现了多处剪切塑性区,并且部分塑性区有贯通的现象,从速度矢量上看,部分大的塑性区有相互发展相互贯通的趋势。由此判断,10倍速度作用下,坝体已经产生了较大的破坏。

2) 松动爆破最不利波形下的坝体至临界破坏。松动爆破下对两区域典型地震波进行逐步放大,分析结果表明不同爆破振动波放大后对坝体的影响不

同。波形等比放大的倍数按照每次10倍递增后进行模拟计算,直至坝体发生破坏,为节约篇幅笔者只对坝体破坏时的计算结果进行分析。坝体在不同典型地震波下放大不同的倍数发生临界破坏,而由于地形及地质的复杂性,虽然调整后的主频趋于一致,但坝体承受的爆破地震波形的时频特性仍不尽相同,为保守估计使坝体发生破坏地震波幅值,研究中取较小的峰值振动速度为坝体发生临界破坏的地震波阈值速度,见表1,其中区域一Y向阈值速度 $V_y$ 取18.0 cm/s,Z向阈值速度 $V_z$ 取20.2 cm/s;区域二 $V_y$ 取16.0 cm/s, $V_z$ 取16.2 cm/s。

表1 坝体发生临界破坏的松动爆破典型地震波的阈值速度  
Table 1 Threshold velocity of typical seismic wave of loose blasting for critical damage of dam body

区域	编号	速度 $V_y$ / ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	速度 $V_z$ / ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
区域一	1	37.5	43.2
	2	18.0	20.2
区域二	3	16.0	16.2
	4	22.0	16.8

### 4.2 洪水作用下防洪坝动力模型

1) 坝体的渗流分析。渗流及水压力下的坝的孔隙水压力如图10所示,孔隙水压力成层分布,浸润线呈斜线分布。

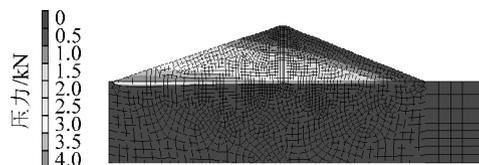


图10 孔隙水压力云图

Fig. 10 Pore water pressure nephogram

2) 抛掷爆破最不利波形下的坝体至临界破坏。仍以无水条件下的最不利波形作为本次研究中的最不利波形,每次增加1倍的最不利波形的幅值,直至坝体发生临界破坏。

通过试算,确定4倍的最不利波形为临界破坏波形,此时坝体的响应如图11a和图11b所示。从图11可以看出,在坝体上游有水时,在4倍最不利波形作用下,坝体出现了多处剪切塑性区,其中拉伸塑性区主要出现在坝体的上游,并且塑性区有贯通的现象,坝体已经产生了较大的破坏。

3) 区域一松动爆破最不利波形下的坝体至临界破坏。选取编号1作为代表波形,75倍的松动爆

破最不利波形下,坝体的响应如图 11c、11d 所示。

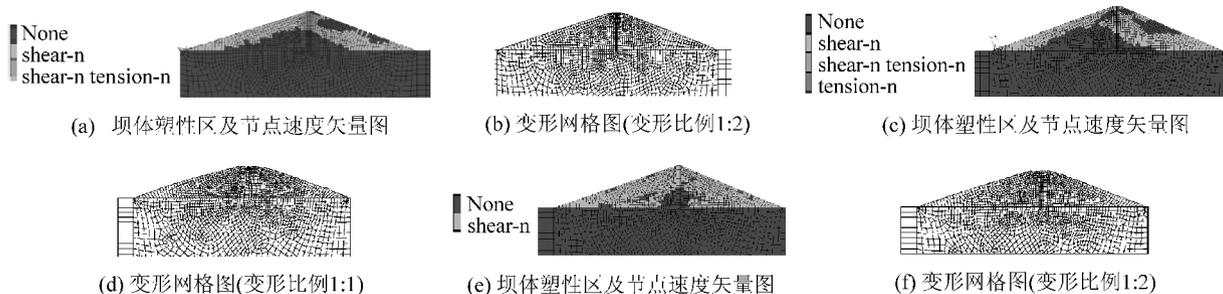


图 11 坝体响应

Fig. 11 Dam response

从图 11 可以看出,在坝体上游有水时,在 75 倍速度作用下,坝体出现了多处剪切塑性区,其中拉伸塑性区主要出现在坝体的上游表面,剪切塑性区分布在下游方向,并且部分塑性区有贯通的现象。由此判断,75 倍速度作用下,坝体已经产生了较大的破坏。

4) 区域二松动爆破最不利波形下的坝体至临界破坏。选取编号 3 作为代表波形,110 倍的松动爆破最不利波形下,坝体的响应如图 11e、图 11f 所示。

从图 11 可以看出,在坝体上游有水时,在 110

倍速度作用下,坝体出现了多处剪切塑性区,拉伸塑性区占主要部分。塑性区主要发生在坝体表面,并且塑性区有贯通的现象。由此判断,110 倍速度作用下,坝体已经产生了较大的破坏。

#### 4.3 数值模拟分析安全爆破作业范围

从数值模拟分析结果可以得到危险波形的阈值速度,则由萨道夫斯基公式可以推出阈值速度对应的危险比例距离,见表 2,通过对危险比例距离的控制就可以达到防止坝体大范围破坏的目的,起到安全作业指导的目的。

表 2 阈值速度对应的比例距离以及安全距离

Table 2 Proportional distance and safe distance corresponding to threshold velocity

条件	爆破方式	日期	$V_1 / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_2 / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	最大单响药量/kg	比例距离/m	安全距离/m
无水	抛掷爆破	2012-06-12	24	13.0	11 000	2.7	60.6
	松动爆破	2011-09-10	18	20.2	3 000	3.8	55.3
	松动爆破	2011-09-15	16	16.2	3 000	3.1	44.7
有水	抛掷爆破	2012-06-12	9.6	4.2	11 000	15.3	340.7
	松动爆破	2011-09-10	9.0	11.0	3 000	2.8	40.0
	松动爆破	2011-09-15	7.6	7.7	3 000	6.8	97.6

## 5 结 论

1) 通过对典型波形的对比分析得出使坝体发生最大结构响应的危险主频为 2 Hz,将主频为 2 Hz 的爆破地震波定义为最不利波形。

2) 无水状况下,坝体在抛掷爆破,对应坝底来波方向坝体横向阈值速度为 24 cm/s,竖向阈值速度为 13 cm/s;松动爆破,坝体横向阈值速度为 16 cm/s,竖向阈值速度为 16.2 cm/s。

3) 有水状况下,使坝体发生临界破坏的阈值速度约为有水条件下阈值的 40%~50%。具体为抛掷

爆破时,坝体横向临界破坏阈值速度为 9.6 cm/s;松动爆破爆源位于区域一时,坝体横向临界破坏阈值速度为 9 cm/s;有水环境下,松动爆破爆源位于区域二时,坝体横向临界破坏阈值速度为 7.6 cm/s。

#### 参考文献 (References):

- [1] 许红涛,卢文波,周小恒.爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J].武汉大学学报:工学版,2008,41(1): 67-71,103.  
XU Hongtao, LU Wenbo, ZHOU Xiaoheng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration [J]. Engineering Journal of Wuhan University,

- 2008, 41(1): 67-71, 103.
- [2] 张玉成, 杨光华, 刘鹏, 等. 爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 56-64.  
ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, LIU Peng, *et al.* An equivalent approach for Acting Blasting Load in Dynamic Numerical Simulation of Blasting Vibration[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 56-64.
- [3] 卢云香. 大坝治理工程爆破振动对坝体安全的影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [4] 贾铮. 尾矿坝爆破振动试验与仿真研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2013.
- [5] 杨洁, 帅培建, 杨上清. 爆破振动对高土石坝影响的数值分析[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2017, 35(3): 424-426.  
YANG Jie, SHUAI Peijian, YANG Shangqing. Numerical simulation of blasting vibration on the earth-rock dam[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2017, 35(3): 424-426.
- [6] 王亮亮. 东乡刘家排采石场爆破震动对临近尾矿坝坝体稳定性影响研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2016.
- [7] 金志玉. 坝下公路开挖爆破对相邻大坝安全的影响分析初探[J]. 大坝与安全, 2008(2): 18-20.  
JIN Zhiyu. Preliminary study on the influence of rock mass blasting to dam safety[J]. Dam & Safety, 2008(2): 18-20.
- [8] 杨伟俊. 近区爆破对土石坝安全影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3): 178-181.  
YANG Weijun. Impact analysis of blasting nearby on safety of earth-rock dam[J]. Journal of Water Resources And Architectural Engineering, 2012, 10(3): 178-181.
- [9] 邓成发, 许昌, 葛国昌. 大坝爆破振动响应评估分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 26-29.  
DENG Chengfa, XU Chang, GE Guochang. Modal analysis and wavelet transform in evaluating dam vibration response caused by blasting[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 26-29.
- [10] 何森, 刘恩龙, 刘友能. 地震动荷载作用下尾矿坝动力分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2016, 48(s1): 33-38.  
HE Miao, LIU Enlong, LIU Youneng. Dynamic analysis of one tailing dam under seismic dynamic loading[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2016, 48(S1): 33-38.
- [11] 许昌, 邓成发. 基于S变换的坝体爆破振动信号时频特征分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2014, 26(3): 59-62.  
XU Chang, DENG Chengfa. Time-frequency characteristic analysis of dam vibration response caused by blasting using s transform [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2014, 26(3): 59-62.
- [12] 王东, 王珍, 曹兰柱, 等. 近水平煤层露天矿边坡三维稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 86-90.  
WANG Dong, WANG Zhen, CAO Lanzhu, *et al.* Study on 3D stability of slope in surface mine with subhorizontal seams[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 86-90.
- [13] 罗涛, 石文芳, 何文. 某矿露天残采爆破振动对临近尾矿坝稳定性的影响分析[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(5): 102-107.  
LUO Tao, SHI Wenfang, HE Wen. Effect of open-pit blasting vibration on the stability of a vicinal tailings dam[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(5): 102-107.
- [14] 苏海洋, 杨溢, 刘磊. 云南某尾矿坝地震动力响应分析[J]. 矿冶, 2014, 23(4): 39-43.  
SU Haiyang, YANG Yi, LIU Lei. Analysis on seismic dynamic response of a tailing dam in Yunnan[J]. Mining & Metallurgy, 2014, 23(4): 39-43.
- [15] 郭雪川. 地震作用下某尾矿库动力反应分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- [16] 张力霆, 路志南, 李强. 地震作用下某尾矿坝三维动力稳定性分析[J]. 金属矿山, 2013, 42(6): 121-125.  
ZHANG Liting, LU Zhinan, LI Qiang. 3D dynamic stability analysis of the tailing dam under earthquake action[J]. Metal Mine, 2013, 42(6): 121-125.
- [17] 赵奎, 王明, 何文, 等. 露天爆破振动对拟建水库坝体影响研究[J]. 金属矿山, 2013, 42(10): 130-133, 139.  
ZHAO Kui, WANG Ming, HE Wen, *et al.* Study on the effect of the open-pit blasting vibration on reservoir dam planned to be constructed[J]. Metal Mine, 2013, 42(10): 130-133, 139.
- [18] 陈占军, 朱传云, 周小恒. 爆破荷载作用下岩石边坡动态响应的FLAC<sup>3D</sup>模拟研究[J]. 爆破, 2005, 22(4): 8-13.  
CHEN Zhanjun, ZHU Chuanyun, ZHOU Xiaoheng. FLAC<sup>3D</sup> simulation for dynamic response of rock slope under explosion[J]. Blasting, 2005, 22(4): 8-13.
- [19] 苏国韶, 张小飞, 符兴义, 等. 爆炸荷载作用下岩体振动特性的DE-FLAC<sup>3D</sup>数值模拟方法[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(6): 471-474.  
SU Guoshao, ZHANG Xiaofei, FU Xingyi, *et al.* Modeling the vibration characteristics of rock mass under explosion load using DE-FLAC<sup>3D</sup> numerical method[J]. Transactions of Beijing Institute of Technolog, 2009, 29(6): 471-474.