

# 某露天采场填方松散体边坡爆破振动动力响应分析

Dynamic Response Analysis of Blasting Vibration on Loose Slope of an open-pit mine

郎旭<sup>1</sup>, 张智宇<sup>2</sup>

(1. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:**某露天采场上部最终形成的台阶边坡为填方松散体,存在一定的安全隐患。为了控制后续爆破作业对边坡稳定的影响,爆破作业时在边坡进行了振动测试。采用 ANSYS 数值模拟软件模拟爆破振动作用下边坡的动力响应规律,研究有效应力及塑性应变的变化特征,并通过对比坡底的加速度与速度证明了模拟的可靠性,进而对爆破作业动态振动荷载下的边坡安全与稳定性进行判定分析,研究爆破作业条件下地震波对松散堆积体边坡稳定性的影响。研究结果表明,在当前爆破载荷作用下边坡稳定性较好,爆破后边坡整体处于稳定状态,可为后续矿山爆破参数的修正提供依据。

**关键词:**松散体边坡; 爆破振动; 数值模拟; 动力响应

**中图分类号:** TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)03-0007-06

**Abstract:**The step slope formed in the upper part of an open pit is filled with loose loose body, which has some hidden danger. In order to control the influence of subsequent blasting operation on slope stability, vibration test was carried out in the slope during blasting operation. ANSYS numerical simulation software is used to simulate the dynamic response law of the slope under blasting vibration, study the change characteristics of effective stress and plastic strain, and prove the reliability of the simulation by comparing the acceleration and velocity of the slope bottom, and then determine and analyze the safety and stability of the slope under the dynamic vibration load of blasting operation. The influence of seismic wave on the stability of loose accumulation slope under blasting operation is studied. The results show that the slope stability is good under the current blasting load, and the slope is in a stable state after blasting, which can provide a basis for the subsequent correction of mine blasting parameters.

**Key words:**loose slope; blasting vibration; numerical simulation; dynamic response

## 1 前言

在露天矿山爆破施工中,边坡的稳定性对确保施工安全至关重要。边坡在爆破振动或降水、地震、开挖作业等外界因素的影响下,会造成其内部应力重分布,进而有可能形成应力集中而发生滑坡、泥石流、坍塌等自然灾害,严重危害日常生产及人民生命安全,因此需要针对边坡所受外界影响因素类型,对其稳定性进行计算分析,确保边坡安全稳定符合设计需求。孙鹏昌等<sup>[1-5]</sup>针对爆破施工振动作用下露天矿山的边坡稳定及振动响应问题,通过现场实测数据分析及数值模拟计算手段,针对边坡的受力状态及主要破坏原因进行了分析,确定了不同工

况下的边坡稳定系数。朱大鹏等<sup>[6-8]</sup>等针对爆破振动作用下松散岩体动力响应规律进行研究,得出爆破振动作用下边坡有关安全系数的主要影响因素如位移、振动速度、振动加速度等均随着距爆破作业区域距离的增加而减弱。周后友等<sup>[9]</sup>等通过数值模拟软件对边坡在爆破作业下的安全系数进行分析,研究了位移、速度、应力分布等关键因素的变化规律,计算出了特定工况下的边坡安全系数及安全临界振动速度等重要特征。

为了研究日常生产爆破作业对某露天采场松散体边坡稳定性的影响,分别采用不同药量进行爆破振动测试,并在边坡坡顶及坡脚位置设置监测点,对爆破振动数据进行采集与分析。

## 2 现场爆破振动监测

### 2.1 爆破振动测试系统

为了确保露天边坡在日常生产中的安全及稳定性,需要将爆破作业时的边坡振动强度控制在安全允许标准内,若边坡振动强度超过安全允许值,则很

[作者简介] 郎旭(1986—),工程师,从事露天采矿和爆破工作。

[基金项目] 国家自然科学基金项目“频繁爆破作用下节理岩体损伤本构模型及破裂机理研究”(52064025)。

[引用格式] 郎旭,张智宇.某露天采场填方松散体边坡爆破振动动力响应分析[J].中国矿山工程,2023,52(3):7-12.

可能会影响边坡稳定性,导致发生落石滑坡等灾害。而在评估爆破作业条件下边坡的安全情况时,除了采用常用的边坡位移、振动速度及加速度作为评定标准外,还应考虑爆破作业条件下边坡的持续振动时间,因为持续振动下的累积破坏作用对边坡或建(构)筑物安全性的影响也不容忽视,同时还需要进一步计算爆破振动主频率和边坡的固有频率之间的耦合程度,因为两者相近的话边坡容易发生共振进而导致边坡更易产生破坏。测量边坡上爆破振动波的基本原理是通过在边坡上距离作业区域不同距离安放专用传感器,采集数据并进而分析爆破振动波的强度、衰减规律、持续时间及频率等重要参数,其标准参考 GB 6722—2014《爆破安全规程》所规定的爆破振动安全允许标准,确定边坡的爆破振动安全阈值。

为了获得好的测试效果,测试选择成都中科测控有限公司生产的 TC-4850 爆破测振仪和速度传感器,现场爆破振动测试传感器采用低频三向振动速度传感器,它与爆破测振仪配套使用。数据处理采用爆破测振仪自带程序,爆破测振仪记录的爆破振动波形在计算机上经程序导出,再在其基础上进行数据分析。爆破振动测试系统采集和处理数据流程如图 1 所示。



图 1 爆破振动测试系统示意图

## 2.2 测点布置及监测数据

监测工作共进行了三次,每次爆破均采用斜线逐孔起爆网路,一次爆破总药量分别为 1 950 kg、5 280 kg(分 2 次起爆:4 080 kg + 1 200 kg)和 16 272 kg(分 2 次起爆:9 792 kg + 6 480 kg),最大单响药量不超过 90 kg。在 2450、2460 和 2470 平台的坡顶和坡脚用混凝土各布置了 2 个测点,共 6 个测点,每次爆破各测点的距离、最大单响药量、最大振动速度和主振频率等数据见表 1。

## 3 动力响应分析模型设计

为了计算方便,将边坡整体视为单一均质的岩石材质,根据矿山前期研究数据及参考相关论文所选用材料的力学模型及参数,最终确定数值模拟中

所用基本力学参数,具体参数见表 2。图 2 所示为所建边坡模型中轴切面形成的剖面图,将 2430 水平作为所建模型水平基准面,并确定模型最终尺寸为 X 方向长 93 m, Y 方向高 50 m, Z 方向宽度为 5 m,选择三维边坡数值模拟中常用的实体单元 SOLID45 作为本次数值模拟所用单元类型。

网格划分是求解处理之前的关键一步,网格划分的合适与否直接影响着计算时间与计算结果精准程度,本研究采用的划分方法为映射网格划分。模型划分的单元数为 9862,划分网格后的模型如图 2 所示。

本次数值模拟计算方法选用时程分析法,首先对实测爆破振动数据进行分析处理,将其转化为加速度曲线;并在模型底部选择水平面加载经过计算处理后的地震波加速度曲线,计算过程中从模型的初始状态开始,对地震波影响下的边坡进行计算;通过积分计算方法,计算出直至地震波加载结束后的边坡状态,并提取计算过程中相关的关键数据,包括边坡的应力应变、位移变形等参数的时程变化曲线,进而对数据进行整理分析,进行相关安全性判定及抗震能力、变形情况计算计算,最终确定边坡的稳定性及安全性系数。

时程分析法优点在于能够准确真实的反应边坡在爆破振动作用下受力的全部过程,得到边坡由于爆破振动作用而形成的永久变形情况,同时能够提取边坡内部岩体的应力应变数据,获取其应力应变分布云图,进而对边坡的安全稳定性进行针对性的定量研究计算,例如边坡在整个振动过程中不同节点的位移速度曲线、应力变化过程,并对爆破振动的反应过程进行评价,最终准确判定边坡稳定性问题。

瑞利阻尼的作用是在有关动力学问题的计算过程中有效降低模型处于自然振动状态下的振动幅度。本次数值模拟计算中,最终计算结果是为了获取边坡在外界地震波影响下的变形及位移等特征值,选用瑞利阻尼能够实现边坡在外部荷载作用下的起振到逐渐停止并稳定的过程,因此本次计算选用瑞利阻尼。在模拟计算过程中,假定刚度矩阵  $K$  和质量矩阵  $M$  是影响阻尼矩阵  $C$  的主要因素。

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

式中, $\alpha$  是与质量成比例的阻尼常数; $\beta$  为与刚度成比例的阻尼常数。

在模拟计算中,计算对象为岩石类材料时,通常临界阻尼比设定范围为 0.02 ~ 0.05。模型本构选

表1 现场监测数据汇总表

爆破地点	测点 编号	测点 位置	距离/ m	总药 量/kg	最大单响 药量/kg	最大振动速度/ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	主振 频率/Hz	备注
某坑南扩 112 线 2351 水平	1	2450 平台坡顶	394	1950	90	-0.132	9.938	水平径向
						0.151	11.065	水平切向
						0.081	6.768	垂直
	2	2450 平台坡脚	400	400	400	0.152	7.921	水平径向
						0.232	6.780	水平切向
						0.085	4.914	垂直
	3	2460 平台坡顶	421	421	421	-0.219	9.132	水平径向
						0.175	6.838	水平切向
						0.093	8.273	垂直
	4	2460 平台坡脚	429	429	429	-0.147	7.835	水平径向
						0.123	6.639	水平切向
						-0.076	7.812	垂直
	5	2470 平台坡顶	444	444	444	-0.138	5.035	水平径向
						-0.182	4.272	水平切向
						-0.096	4.272	垂直
	6	2470 平台坡脚	453	453	453	-0.186	4.883	水平径向
						-0.113	4.425	水平切向
						-0.090	4.425	垂直
某坑南扩 112 线 2350 水平	1	2450 平台坡顶	469	469	469	-0.190	9.685	水平径向
						0.163	10.363	水平切向
						-0.101	7.882	垂直
	2	2450 平台坡脚	472	472	472	-0.237	10.554	水平径向
						0.308	10.782	水平切向
						-0.128	12.066	垂直
	3	2460 平台坡顶	493	493	5280(4080+1200)	-0.298	6.866	水平径向
						-0.245	6.866	水平切向
						-0.146	4.578	垂直
	4	2460 平台坡脚	499	499	499	-0.200	6.866	水平径向
						-0.225	6.714	水平切向
						-0.125	4.578	垂直
	5	2470 平台坡顶	512	512	512	-0.191	7.805	水平径向
						-0.173	12.618	水平切向
						0.103	4.905	垂直
	6	2470 平台坡脚	520	520	520	-0.162	11.869	水平径向
						0.114	11.096	水平切向
						0.075	4.932	垂直
某坑南扩 112 线 2255、2265 水平	1	2450 平台坡顶	579	579	579	0.385	7.10	水平径向
						0.260	6.52	水平切向
						0.138	6.77	垂直
	2	2460 平台坡顶	601	601	601	0.371	5.59	水平径向
						0.247	5.36	水平切向
						0.140	7.80	垂直
	3	2460 平台坡脚	609	609	16272(9792+6480)	0.301	5.43	水平径向
						0.269	5.45	水平切向
						0.113	5.83	垂直
	4	2470 平台坡顶	622	622	622	0.216	6.81	水平径向
						0.218	4.54	水平切向
						0.135	5.62	垂直
	5	2470 平台坡脚	630	630	630	0.214	6.24	水平径向
						0.160	5.47	水平切向
						0.109	5.07	垂直

表2 计算所用土岩力学参数

岩性	密度/ g·cm <sup>-3</sup>	弹性 模量/ GPa	内摩 擦角/ (°)	内聚力/ MPa	泊松比
排土场堆土	2.14	0.779	25	0.012	0.229

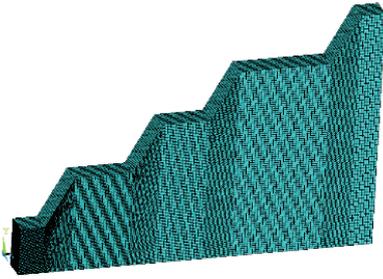
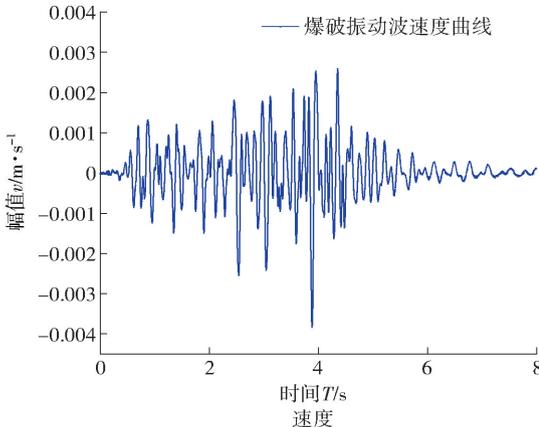


图2 边坡模型划分网格

用弹塑性本构时,在计算过程中,大部分能量损耗发生在材料的塑性流动阶段。所以在进行动力学相关的大变形问题计算时,阻尼比取较小值即可满足计算需求,查阅并参考相关论文,最终确定阻尼比取值为0.05。

在现场实际中,边坡会受到爆破地震波作用,而地震波按照传播方式不同,可将其分为纵波、横波和面波。纵波具有明显的压缩特征,它可以有效地挤压岩石,但其破坏力不大;而横波则具有明显的剪切特征,它可以有效地剪切岩石,但其破坏力也不容小觑;最终,面波是由纵波与横波碰撞而形成的混合波,与纵波、横波传可在岩体内部传播不同,面波仅能沿着地表传播。由于在工程实际中当中,对岩体起破坏作用的主要是横波,纵波由于其波形特点,无法有效对岩体构成破坏,同时面波受到其传播路径的限制,对岩石结构体所起到的破坏作用也十分有限。所以在数值模拟计算过



程中,为了简化计算过程,同时能够有效反映工程实际问题,在加载地震波时只加载起主要破坏作用的横波。施加方式为在模型底部的水平径向方向施加由爆破地震波处理而来的加速度曲线,同时考虑重力作用,在竖直方向上施加重力荷载,即地震波与重力荷载同时作用于岩体,爆破地震波加载方式为在边坡底部施加荷载,将加速度荷载施加在底部平面节点上,具体如图3所示。

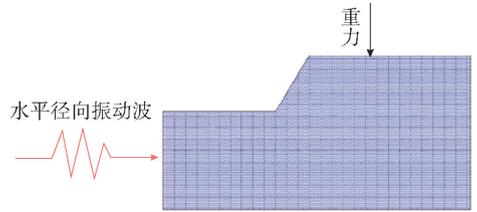


图3 爆破动荷载施加方式

处理后的水平径向速度时程曲线以及加速度时程曲线如图4所示。爆破振动数据来自2450平台测点1的水平径向振动曲线,振动持续时间为8s,主频为7.10 Hz,峰值速度为0.385 cm/s,对应的峰值加速度为0.174 m/s<sup>2</sup>。处理后的爆破振动加速度总时长为8s,时间间隔为0.002s,共4000个数据点。

ANSYS处理边坡对爆破振动的动力响应时,最有效的处理方式是将加速度视为动力荷载,并且从ANSYS利用宏文件将爆破加速度荷载导入软件,而加速度荷载作用于边坡有限元模型的节点上。本研究在做动载下边坡稳定性分析时,考虑重力在竖直方向作用的同时,在水平径向导入爆破振动波加速度时间历程曲线,即同时考虑爆破振动及自重荷载的作用。

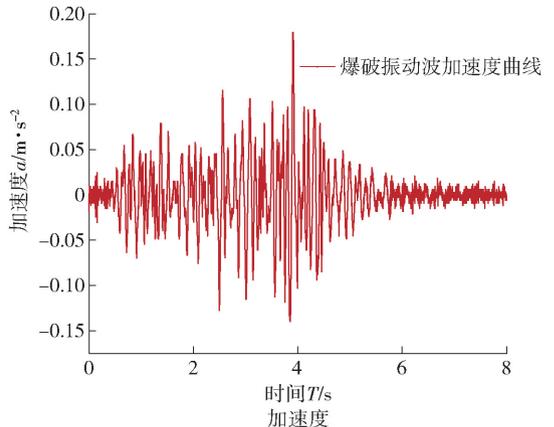


图4 水平径向振动速度及加速度时间历程曲线

## 4 模拟结果分析

在动力学数值模拟计算过程中通常采用 Von Mises 有效应力表示模型的应力分布趋势与特点,并且 Von Mises 有效应力的有效性经过了大量验证并得到了广泛的认可与应用。Von Mises 有效应力基于形状改变比能理论进行计算。形状改变比能理论也称为材料力学第四强度理论,基本原理在于表述模型内部的应力分布情况时,通过采用等值线方法对其进行描述,等值线方法可以有效描述计算过程中模型内部应力的分布与变化情况,从而快速准确确定模型中的应力集中即边坡危险区域。Mises 屈服条件可以简单概述为当计算过程中的有效应力达到并超过了选用材料在简单拉伸状态下的屈服极限式,即表明模型进入塑

性变形阶段并发生破坏,所以在计算过程中将所用材料的动态抗拉强度作为破坏判定依据,当有效应力超过岩石材料所设定的动态抗拉强度,即判定此处岩石已破坏。

计算结果中的边坡滑动面发生塑性破坏并形成贯通只能作为判定边坡是否发生失稳破坏的必要条件,而不能将其作为充分条件。边坡发生破坏失稳的标志性破坏情况应为滑移部分出现突变移动,即计算过程中所产生的贯通滑移面上的应力应变出现突变时可判定边坡发生失稳破坏。所以在计算结果中通过分析数值模拟结果能否收敛或者在塑性滑移面上是否出现应力应变突变作为边坡模型是否发生破坏依据。爆破振动作用下边坡的 Von Mises 应力图和塑性应变云图如图 5 所示。

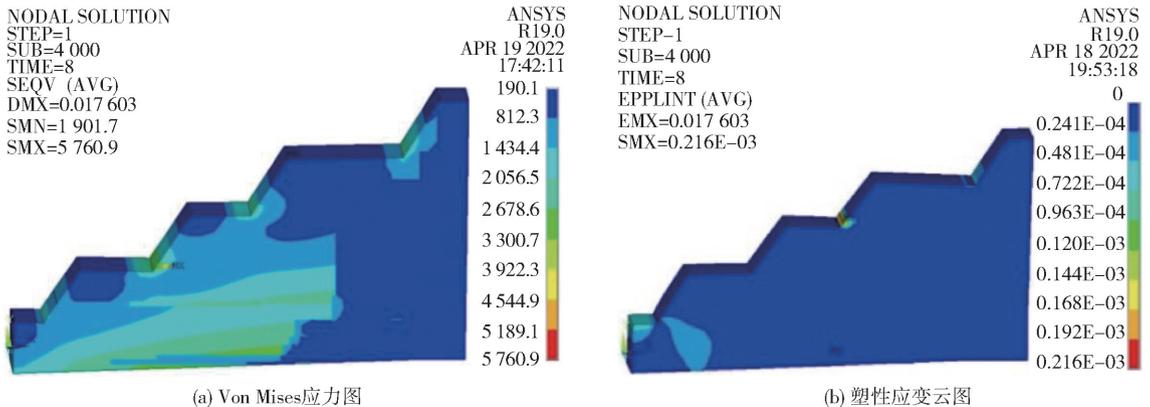


图 5 Von Mises 应力图与塑性应变云图

由图 5 可以看出,在施加经过实测数据处理后的加速度荷载下,模型中的应力集中区域位于边坡模型的 2460 平台阶段边坡的底部,该区域所受到的最大应力为 57.6 kPa,一般土岩颗粒的强度范围在 100 kPa 至 10 MPa。数值计算结果表明边坡未发生塑性破坏,同时结合现场观测结果,边坡未发生变化,两者结合分析即可认为在当前爆破作业条件下,边坡所受荷载未对边坡安全性造成影响。正常生产爆破荷载作用下边坡 2460 坡脚位置出现了一定的塑性应变,最大塑性应变值为 0.000 216,其原因是边坡(2440~2480 平台)主要是由松散土岩堆积形成,故边坡整体力学性能较差。同时图中塑性破坏区主要出现在边坡坡面处,表明边坡在爆破动载作用下破坏容易从坡面出现。在本次计算过程中,整个求解过程无不收敛情况,再结合本次计算出的边坡整体应力应变分布情况均较小,边坡整体模型未发现贯通整体模型的塑性破坏区域,认为当前边坡

在现有爆破作业中处于安全状态。

针对现场监测数据,对数值模拟计算所得结果中的位移进行分析,分别提取其水平、竖直方向位移云图,分析其不同方向最大位移点,具体如图 6 所示。并对坡脚位置单元节点的速度、加速度时程曲线进行分析,对其计算值与监测值进行分析比较,具体如图 7 所示。

由图 6 可以得出,正常生产爆破作业条件下所产生的爆破振动对于边坡安全影响十分有限,通过分析数值模拟中的最大位移量及最大位移位置对稳定性进行判定,在边坡坡底位置出现了水平最大位移点,其变形值为 0.98 cm,而边坡最高处出现竖直方向的最大位移为 1.76 cm,其水平与竖直方向最大位移值均在安全允许范围内,即判定当前边坡处于稳定状态。同时对比竖向与水平方向上最大位移值,可说明本次爆破振动带来的影响小于自重影响。

为保证本次模拟计算结果的准确性,提取边坡

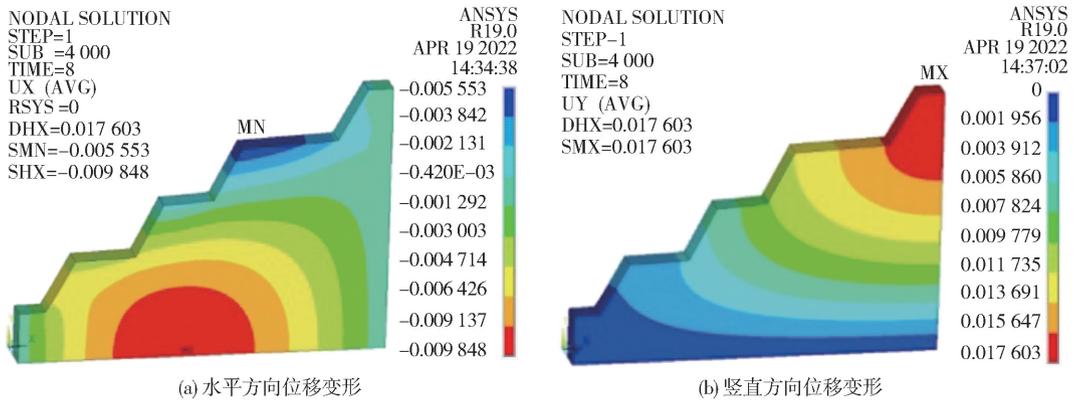


图6 水平及竖直方向位移变形

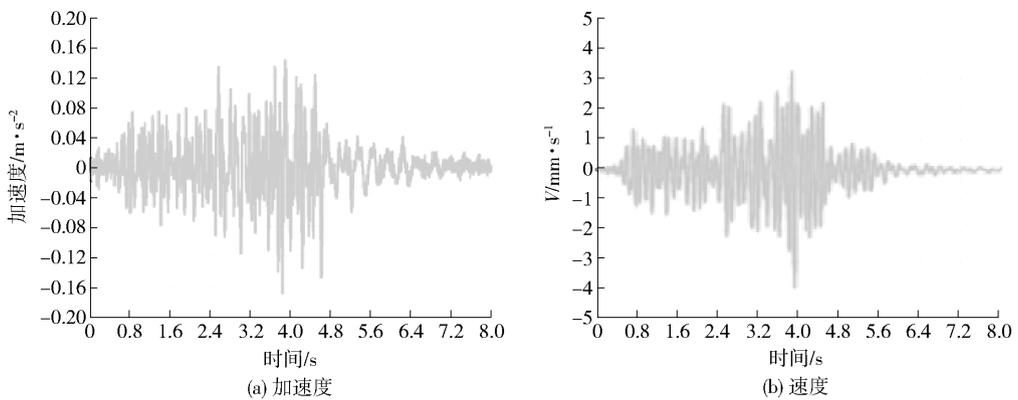


图7 边坡底部节点加速度及速度时间历程曲线

底部节点的加速度与速度响应时程曲线,节点水平径向振动峰值加速度与速度分别为  $0.163 \text{ m/s}^2$  及  $0.39 \text{ cm/s}$ 。通过与现场实测数据进行对比分析,相关特征值基本相符,二者误差在 7% 以内,表明本次数值模拟结果准确,可用于边坡稳定性判定与分析。

## 5 结论

(1)随着边坡高程及水平距离的增加,三个不同方向上的振动峰值速度呈现出先增大后减小的趋势,但随着边坡高程及水平距离增加,爆破振动波速度峰值总体呈下降规律。

(2)通过分析有效应力云图及塑性应变云图,二者峰值均在材料允许强度范围内,数值模拟结果表明在当前爆破作业条件下边坡稳定性良好,类似规模的正常爆破施工不会对边坡安全造成影响,计算结果与现场监测结果相符。

(3)对比坡底的加速度与速度响应时程曲线,本次模拟结果与实测数据基本符合,误差在 7% 以内,说明本次模拟结果可靠。

### [参考文献]

[1] 孙鹏昌,卢文波,雷振,等.单薄山体岩质高边坡爆破

振动响应分析及安全控制[J].岩土工程学报,2021,43(5):877-885.

[2] 刘礼福,黄今,雷国荣,等.爆破振动作用下某露天矿高陡边坡稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2021,73(4):27-32.

[3] 林海松.高边坡爆破振动传播规律及其控制技术[J].工程爆破,2020,26(2):69-74+86.

[4] 宫长亮,杨继海,孙哲申,等.大孤山露天矿边坡爆破动力响应与稳定性研究[J].露天采矿技术,2022,37(6):1-5+10.

[5] 厉美杰,杜军,王洪强,等.爆破振动对露天矿山永久边坡稳定性的影响分析[J].爆破,2023,40(1):170-176.

[6] 朱大鹏,谢昌建,许红波.隧道进口岩堆斜坡爆破振动动力响应研究[J].安全与环境学报,2022,22(3):1275-1283

[7] 贾党育.隧道爆破开挖对洞中段边坡稳定性影响的数值分析[J].矿冶工程,2017,37(1):25-28.

[8] 李薇.临近隧道爆破施工对矿山村堆积体边坡稳定性影响评价[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(9):225-229.

[9] 周后友,池恩安,欧阳天云,等.爆破荷载作用下露天边坡稳定性分析[J].爆破,2021,38(2):80-87.