

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2020.04.004

# 爆破荷载下露天矿高边坡振动速度阈值的确定及控制

朱帅帅<sup>1</sup>, 唐海<sup>1,2\*</sup>, 万文<sup>1</sup>, 马谕杰<sup>1</sup>, 王建龙<sup>1</sup>, 丁安松<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为分析爆破作用下露天矿高边坡的稳定性,以贵州穿岩洞矿爆破开挖为工程背景,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,建立力学模型,探讨爆破荷载作用下露天矿高边坡稳定性的动态变化情况.研究表明,高边坡稳定状态下位移收敛,破坏状态下位移不收敛;以介于收敛至不收敛之间的临界状态确定边坡振动速度阈值,并得到边坡振动速度控制标准为 10 cm/s,据此求得符合允许振动要求的最大段药量为 230 kg.同时运用本文确定的边坡振动速度控制标准进行现场实测,确保了爆破施工后露天矿边坡岩体没有出现损伤现象.

**关键词:**露天矿边坡;数值模拟;临界状态;振动速度阈值;最大段药量

中图分类号:O389;TU457 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)04-0020-07

## Determination and Control of Vibration Velocity Threshold of High Slope of Open-pit Mine Under Blasting Load

Zhu Shuaishuai<sup>1</sup>, Tang Hai<sup>1,2</sup>, Wan Wen<sup>1</sup>, Ma Yujie<sup>1</sup>, Wang Jianlong<sup>1</sup>, Ding Ansong<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Technology of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To analyze the stability of the high slope of the open-pit mine under the action of blasting, taking Guizhou Provincial Chuanyandong Mine blasting excavation as the engineering background, this paper uses the ANSYS/LS-DYNA finite element software, builds a mechanical model, and discusses the dynamic change of the stability of the open-pit high slope under blasting load. Results show that the displacement value converges under the stable state of the high slope, and the displacement value does not converge under the failure state, the slope vibration velocity threshold is determined based on the critical state between convergence and non-convergence. Based on this, 10 cm/s of the slope vibration velocity control standard is proposed as threshold, the maximum charge amount per delay determined by the allowable vibration requirements is 230 kg, and the original blasting design plan is improved. Combined with on-site measurement, the slope safety control standards are determined in this paper. After the blasting construction, there is no damage to the slope rock mass of the open-pit mine.

**Keywords:** open pit slope; numerical simulation; critical state; vibration speed threshold; maximum charge amount per delay

随着爆破在开挖方面的广泛应用,由爆破振动诱发的边坡扰动问题已经成为边坡类工程施工中的一大安全难题.对于此领域,已有很多学者通过理论分析、现场试验及理论与实验相结合的方法进行了研究,

收稿日期:2020-09-22

基金项目:湖南省教育厅科研资助项目(20A196)

\*通信作者, E-mail: tanghai707298@163.com

并取得了一系列的成果.胡英国等<sup>[1]</sup>通过对现场保留岩体中损伤区进行跨孔声波测试,对基于损伤度确定临界损伤质点峰值振动速度进行了研究和分析;朱传云等<sup>[2]</sup>通过对爆破前后岩体声波波速的变化率,得到了三峡工程中爆破开挖扰动下中隔墩爆破振速控制的安全标准;李俊如等<sup>[3]</sup>通过对边坡岩体的声波测试,结合现场爆破振动监测以及工程经验,初步确定边坡振动速度安全阈值.以上对爆破振动控制的研究主要是进行现场实测,根据实测数据结合爆破安全规程确定振动速度安全阈值.但这种爆破后的实测方法不利于前期爆破开挖中对于保留岩体振动的控制,可能造成损伤.

伴随计算机技术的发展,数值模拟成为研究爆破振动对边坡扰动的重要方法.对于数值模拟在这方面的可行性,已有诸多学者对此进行了验证.刘亚群等<sup>[4]</sup>通过数值模拟分析了岩石边坡坡脚点的振动速度峰值,得出的数值模拟计算结果与工程实测结果基本一致,两者误差在要求范围以内,用数值模拟分析是可行的;马冲等<sup>[5]</sup>通过数值计算得出在不同岩层倾角下含软弱夹层的边坡所对应的爆破振动速度安全阈值;许名标等<sup>[6]</sup>将现场爆破振动测试与 ANSYS 数值模拟时程分析相结合,对爆破作用下的岩质高陡边坡分析,得到模拟速度值与速度实测值较吻合.

综上所述,采用数值模拟对爆破振动作用下露天矿边坡的稳定性研究,这种方法可行且可避免试验爆破对边坡的损伤.现以贵州穿岩洞露天采矿爆破为例,应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立爆破荷载作用下穿岩洞矿边坡的模拟,结合边坡临界状态的定义,确定边坡振动速度安全阈值的方法,并提出边坡振动速度控制标准,控制最大段药量,保证爆后边坡的安全稳定.

## 1 工程背景

### 1.1 地貌概况

贵州穿岩洞露天矿位于黔南布依族苗族自治州,矿山生产规模 350 万 t/a,东侧前期进行部分施工形成的边坡高度达到 120 m,如图 1 所示.目前,矿山开采场地为露天开采,爆区上部有 5 级台阶,每级台阶高度为 24 m,坡面角度约 53°,台阶平台宽度 10 m,如图 2 所示.根据前期勘探结果,矿区主要有磷块岩、白云岩等岩石.



图1 矿区现场照片

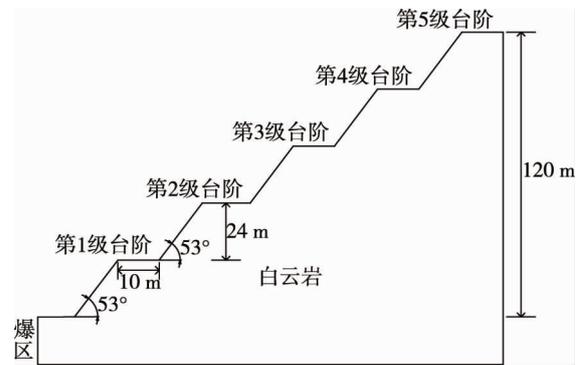


图2 边坡局部

### 1.2 爆破方案

根据爆破区域实际情况,爆区岩石主要为白云岩,属坚硬岩石,考虑钻孔能力以及钻孔设备选型,决定采用 1250 型号深孔凿岩台车,爆破采用 2<sup>#</sup>岩石乳化炸药,一次爆破 1 排孔,具体爆破参数见表 1.

表 1 爆破参数

孔径/mm	孔深/m	最小抵抗线/m	孔底距/m	孔间距/m	孔口填塞长度/m	最大段药量/kg
89	10~30	1.5	1.2~1.6	3.0	1.0~1.5	500

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

根据爆破现场工程地质条件,建立简化的边坡数值计算模型,台阶边坡高度 24 m,台阶平台宽度

10 m,边坡角拟定  $53^\circ$ .选取 LS-DYNA 软件中的塑性材料以及 Cowper-Symonds<sup>[7]</sup> 模型来模拟岩石介质,其参数见表 2.为了消除在动力分析中边界处可能造成波的反射,本文采用 Lysmer 和 Kuhlemeyer<sup>[8]</sup> 提出的黏性(无反射)边界,模型底面和右侧面是无反射边界,模型上边界是自由边界,如图 3 所示.

表 2 岩石动态力学参数

密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	切线模量 $E_{\text{tan}}/\text{GPa}$	屈服强度 $\sigma_0/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	杨氏模量 $E_0/\text{GPa}$	Cowper-Symonds 参数	
					$C/(\text{s}^{-1})$	$P$
2 680	40.92	75	0.211	68.56	2.4	4.0

## 2.2 荷载的确定

根据相关文献[9,10],本文采用在粉碎区边界上施加三角形脉冲荷载的爆破加载方法进行数值模拟研究,计算时炸药密度取  $1\,300\text{ kg}/\text{m}^3$ ,炸药爆速取  $4\,500\text{ m}/\text{s}$ ,三角形脉冲荷载曲线如图 4 所示.

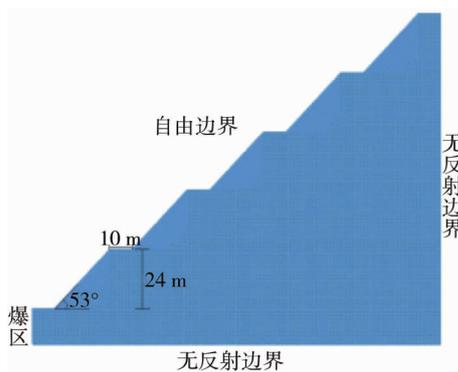


图 3 边坡数值模型

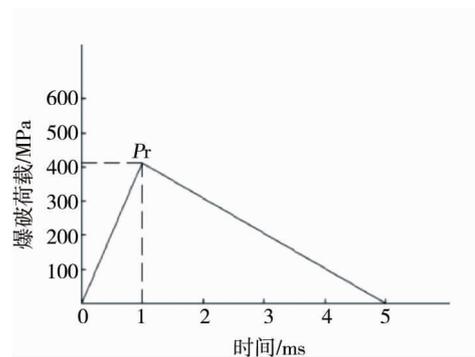


图 4 三角形爆破荷载曲线

依据炸药爆轰波的查普曼-朱格特理论为基础<sup>[11-13]</sup>,得到爆破冲击波作用在粉碎区边界岩体的峰值压力计算公式为

$$P_b = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)}; \quad (1)$$

$$P_r = \frac{P_b}{d^3}. \quad (2)$$

式中: $P_b, P_r$  分别为冲击波作用在炮孔壁和粉碎区边界岩石上的峰值压力; $\rho_e$  为炸药密度; $D$  为爆轰波速; $\gamma$  为炸药等熵指数,取 3; $d$  为粉碎区半径与炸药半径之比,取 2.

根据式(1)和式(2)计算得  $P_r = 411.33\text{ MPa}$ .

## 3 边坡振动速度控制标准

爆破振动安全控制标准的确定一直是各个岩石高边坡开挖工程的重点与难题.目前广泛通过实测数据结合爆破安全规程确定边坡振速控制标准,该方法虽然准确但资金成本与时间成本较高<sup>[14]</sup>.本次研究是根据上述计算的荷载值进行多次数值模拟,发现边坡的应力主要集中在靠近爆区的 2 个台阶,如图 5 所示.为简化计算,本文选择受爆破扰动影响较大的台阶边坡建立模型进行分析.基于目前广泛采用上层台阶的爆破振动速度阈值作为边坡爆破振动安全标准的现状,分别在爆区上部第一台阶平台和第二台阶平台处设置监测点<sup>[15]</sup>,数值模型如图 6 所示.

根据同课题组的共同研究<sup>[16]</sup>,运用数值模拟分析多次爆破荷载作用下边坡的位移变化,发现这样的规律:在稳定状态,边坡位移收敛,即边坡关键点位移趋向稳定在某一定值,依据爆破振动速度和位移之间存在对应的关系  $v = dx/dt$ ,此时关键点速度为 0,即在该荷载作用下,关键点振动速度处于峰值状态时边坡也不会破坏;在破坏状态下,边坡出现滑动面滑动破坏,边坡位移不收敛,边坡关键点位移随时间逐渐增大,振动速度也逐渐增大,直到边坡失稳破坏.由此得出当边坡位移介于收敛与不收敛之间时,边坡处于临

界状态.因此,取临界状态时关键点峰值速度作为安全阈值,可监控边坡稳定.

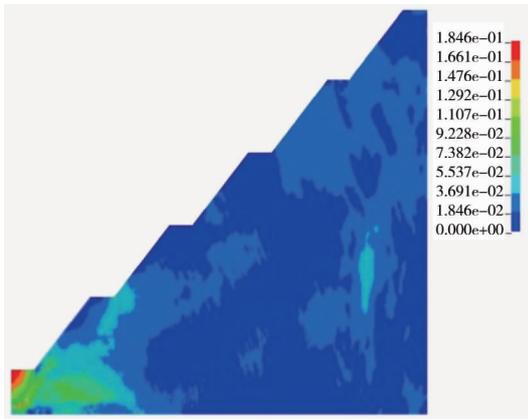


图 5 边坡应力云图

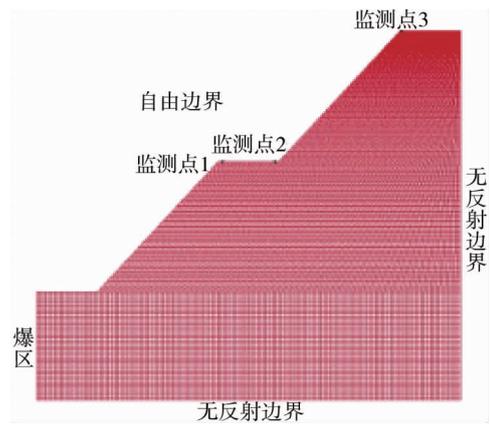


图 6 数值模型

为确定关键点的位置,保持横坐标时间不变,将纵坐标值以荷载值 411.33 MPa 为标准,依次按 1.1 倍、1.2 倍、1.3 倍……逐渐放大,直至边坡破坏.模拟后得到的边坡稳定和破坏时的位移云图分别见图 7 和图 8.从图 8 中可以看出,当荷载增加到边坡破坏时,第一台阶坡顶出现了滑动面滑动破坏,此时该坡顶距离基坑边 1 m 位置处位移变化最大,最易破坏,该位置即为关键点.

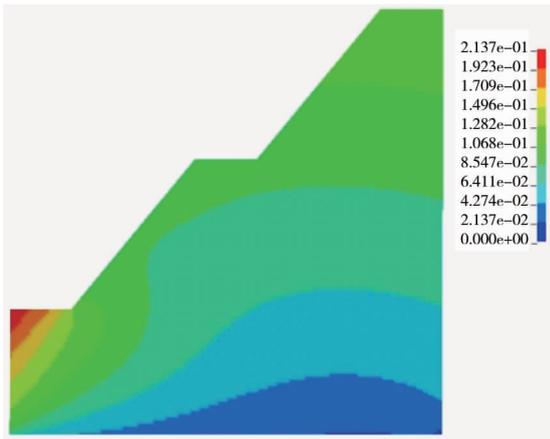


图 7 稳定时边坡整体位移云图

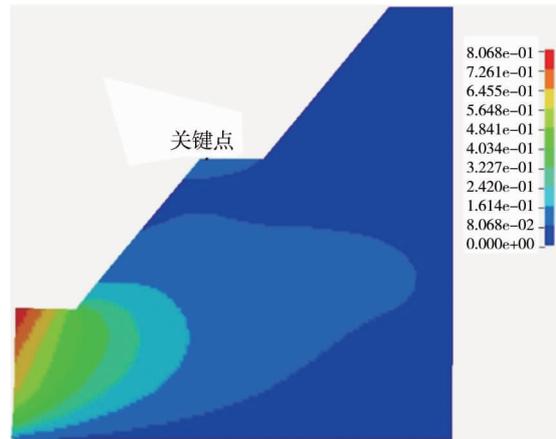


图 8 破坏时边坡整体位移云图

逐渐增大输入荷载,当输入荷载为标准荷载的 1.8 倍时,得到多次爆破作用下边坡关键点的位移曲线图,如图 9 所示,此时边坡处于稳定状态;当输入荷载为标准荷载的 1.9 倍时,得到边坡破坏时的边坡关键点的位移曲线图,如图 10 所示.

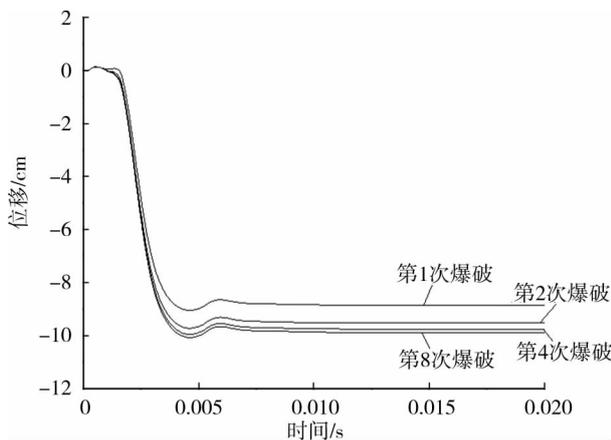


图 9 稳定时关键点位移曲线

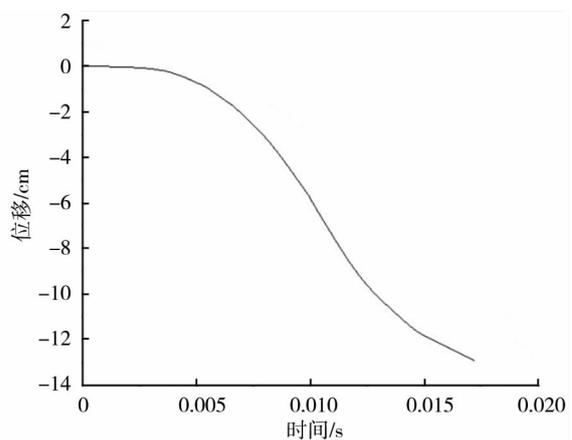


图 10 破坏时关键点位移曲线

由此可以看出,当输入荷载介于标准荷载的 1.8 ~ 1.9 倍时,边坡在该荷载作用下会达到临界状态.为保证工程安全及应用便捷,取前一级荷载(标准荷载的 1.8 倍)作用下的边坡为临界状态,此时关键点的最大峰值振动速度 15.6 cm/s 为安全阈值,取安全系数为 1.5<sup>[17]</sup>,得多次爆破荷载下边坡振动速度控制标准为 10 cm/s.

目前确定边坡振动速度的控制标准,都需要结合大量的工程经验.长沙矿冶研究院在对国内大量矿山爆破振动速度进行监测的基础上<sup>[18]</sup>,提出我国硬质岩石边坡振动控制标准范围为 22 ~ 35 cm/s;清江隔河岩工程<sup>[19]</sup>,I 类边坡控制标准为 22 cm/s;II 类边坡控制标准为 28 cm/s;III 类边坡控制标准为 35 cm/s.综上所述可以看出,若以前人成果为标准运用到本工程多次爆破施工中,可能对边坡的稳定性造成破坏,因此该工程选用本文数值模拟确定的边坡振动速度为控制标准,可避免多次爆破对边坡的损伤.

## 4 控制标准可行性分析

### 4.1 理论分析

结合大量工程试验可知,爆破振动主要与最大段药量有关,一般是采用萨道夫斯基公式来确定最大段药量:

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

式中: $Q$  为一次起爆最大段药量,kg; $R$  为爆源中心到监测对象的距离,即爆源距,m; $V$  为被保护对象允许的振动速度,cm/s; $K, \alpha$  分别为与爆破条件、岩石特性有关的系数,其取值范围见表 3.

表 3 爆区不同岩性的  $K, \alpha$  值

岩性	$K$	$\alpha$
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

由于台阶边坡与爆区位置存在高差,用该公式预测最大段药量会存在较大误差.因此,根据文献[20],当高差为正时,在公式中加入高差因子,得到了更精确的计算公式:

$$Q = \left[ R \left( \frac{V}{KH^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right]^3 \quad (4)$$

式中: $H$  为测点到爆源中心的高程差,m; $\beta$  为与高程有关的系数,其取值范围为 0.25~0.28.

本工程岩层主要为白云岩,属坚硬岩石,计算时  $K$  取 100,  $\alpha$  取 1.4,  $\beta$  取 0.26. 依据边坡振动速度的控制标准为 10 cm/s, 由式(4)计算符合允许振动要求的最大段药量为 239.39 kg, 远小于爆破设计方案中的最大段药量 500 kg, 因此原设计方案施工可能对边坡稳定性造成扰动. 为保证安全施工, 需控制最大段药量低于 239.39 kg(为便于装药,取 230 kg).

为验证该控制标准的准确性,按最大段药量 230 kg 建立数值分析模型,得到边坡在稳定时整体的位移云图(图 11a)和多次爆破荷载作用下边坡关键点的位移曲线图(图 11b).由图 11 可以看出,在多次的爆破荷载作用下,边坡坡面整体位移收敛,关键点位移趋向稳定在某一定值,说明边坡处于稳定状态.

### 4.2 实测验证

通过工程实测来验证理论确定的控制标准的合理性,现场爆破施工时,现场监测点的布置尽量与模型(图 6)中位置接近(其中监测点 1 布置在关键点处).现场爆破振动监测仪器选用成都中科测控 TC-4850 智能爆破测振仪,监测各监测点的爆破振动速度.现场仪器的布置如图 12a 所示,选取其中典型的振动信号波形图如图 12b 所示.

对现场实测各监测点数据进行处理,现场爆破数据结果见表 4.

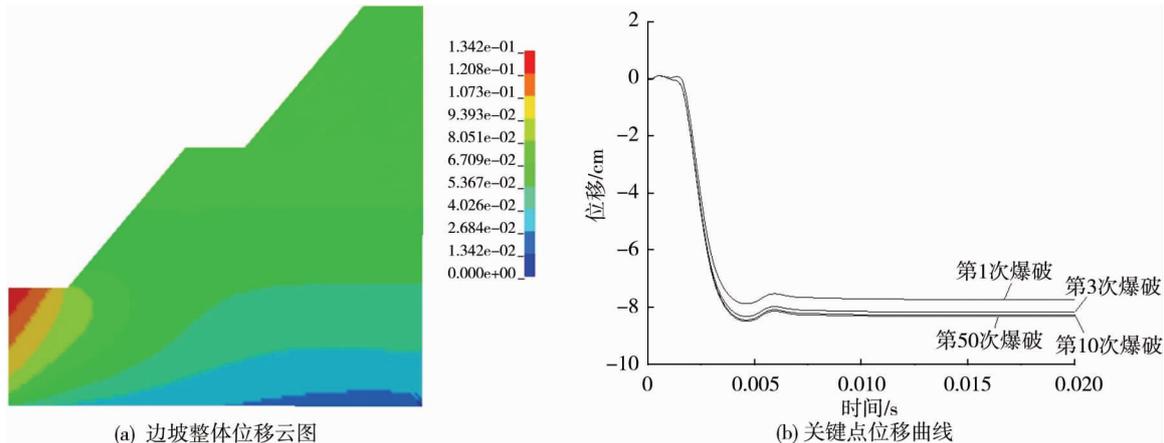


图 11 位移云图及位移曲线

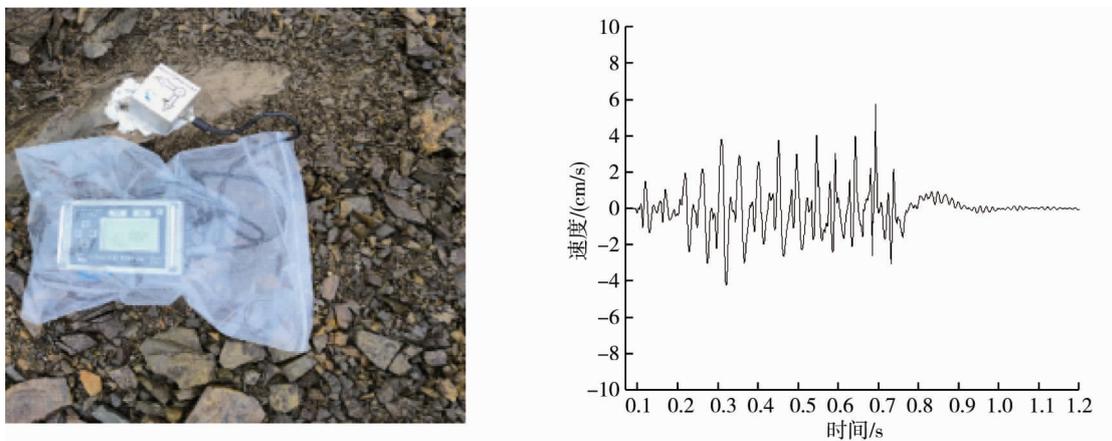


图 12 现场仪器布置及振动波形

表 4 现场监测点数据

监测点	最大段药量/kg	高差/m	爆源距/m	现场监测振动速度/(cm/s)		
				水平径向	水平切向	垂直向
1	230	24	46	8.42	5.76	6.60
2		24	55	5.50	4.92	5.62
3		48	83	3.12	2.94	2.78

从表 4 看出,爆破施工时在现场监测到的振动速度最大值为关键点处峰值振动速度(说明选取的关键点位置是合适的),小于边坡振动速度控制标准 10 cm/s,同时露天矿边坡岩体没有出现损伤现象.说明目前改进的爆破方案是可行的,确定的边坡振动速度的控制标准也是合适的.

### 5 结论

- 1)通过简化模型进行分析,确定了边坡关键点位置,依据临界状态定义,得到多次爆破荷载下边坡振动速度控制标准为 10 cm/s.
- 2)对爆破设计方案中最大段药量进行了改进,并通过数值模拟和现场实测验证了其可行性.

### 参考文献:

[1] 胡英国,卢文波,陈明,等.岩体爆破近区临界损伤质点峰值震动速度的确定[J].爆炸与冲击,2015,35(4):547-554.  
 [2] 朱传云,卢文波.三峡工程临时船闸与升船机中隔墩爆破安全判据的研究[J].爆炸与冲击,1998(4):3-5.  
 [3] 李俊如,李海波,高建光,等.黄麦岭采场边坡爆破振动响应研究[J].岩石力学与工程学报,2004(17):2954-2958.

- [4] 刘亚群,李海波,李俊如.爆破荷载作用下黄麦岭磷矿岩质边坡动态响应的 UDEC 模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3659-3663.
- [5] 马冲,詹红兵,姚文敏,等.爆破振动作用下含软弱夹层边坡稳定性及安全判据[J].爆炸与冲击,2018,38(3):563-571.
- [6] 许名标,彭德红.边坡爆破振动测试及响应规律 ANSYS 时程分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(s1):2629-2635.
- [7] 徐玖云.大煤山山坡露天矿爆破振动数值模拟[J].现代矿业,2015(12):126-129.
- [8] Lysmer J, Kuhlemeyer R. Finite dynamic model for infinite media [J]. Journal of Engineering Mechanics-Asce (Journal of the Engineering Mechanics Division), 1969, 95: 859-877.
- [9] 胡英国,吴新霞,赵根,等.水工岩石高边坡爆破振动安全控制标准的确定研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2208-2216.
- [10] Chen S G, Zhao J, Zhou Y X. UDEC modeling of a field explosion test [J]. International Journal of Blasting and Fragmentation, 2000(4):149-163.
- [11] 张建华,李世禄,王玉杰,等.爆炸扩腔数值模拟及分析[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2001,24(2):174-177.
- [12] 杨建华.炮孔爆炸荷载变化历程的确定[C]//第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(下册).2010:423-427.
- [13] 戴俊.柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001(2):144-147.
- [14] 杨建华,卢文波,陈明,等.基于爆炸荷载等效施加方法的爆破振动全历程数值模拟研究[R].广州:中国力学学会,2012.
- [15] 管志强,张中雷,叶继红,等.复杂环境钻孔爆破振动的安全阈值及预估控制[J].工程爆破,2014,20(5):13-17.
- [16] 唐海,刘亚群,吴仕鹏,等.爆破荷载作用下核电站基坑边坡稳定的安全阈值研究[C]//第233场中国工程科技论坛爆破新理论、新技术与创新成果暨第十届中国爆破行业学术会议.2016:89-95.
- [17] 李海波,高建光,李俊茹,等.黄麦岭磷矿采场爆破振动监测、声波检测及爆破设计优化报告[R].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2000.
- [18] 黎剑华,张龙,颜荣贵.爆破地震波作用下的边坡失稳机理与临界振速[J].矿冶,2001(1):11-15.
- [19] 朱传云,卢文波,董振华.岩质边坡爆破振动安全判据综述[J].爆破,1997(4):13-17.
- [20] 姚远,简文星,黄冠,等.石灰石矿山台阶边坡爆破振速安全阈值研究[J].矿冶,2018,27(4):30-35.