

文章编号: 1006 - 7051(2005)03 - 0057 - 05

# 爆破近区地质结构特性对震动 信号传播的影响研究

尚晓江, 丁 桦

(中国科学院力学研究所工程科学研究部, 北京 100080)

**摘 要:** 基于文献<sup>[1]</sup>提出的“爆破震动弹性区的信号是经过震源邻近区域等效地质结构滤波后传出的”观点,利用 LS-DYNA 程序对岩土介质中存在软弱夹层时的爆破震动过程进行了一系列数值计算,讨论了存在软弱地质结构面时自由表面震动信号频率特征的变化规律。比如:爆破点和软弱结构面的相对位置以及软弱结构面分布范围和刚度改变时,爆破地震信号频率特征的演化规律。这些规律说明了爆破邻近区域的结构特征对震动信号频率特征有着显著的影响,同时为各种工程地质结构(如地下裂隙、软弱夹层等)的识别提供了一种新的思路。现场爆破实验的结果也定性地验证了这些规律。

**关键词:** 爆破近区; 地质结构; 爆破震动; 频率特征

**中图分类号:** TD235.1<sup>+4</sup> **文献标识码:** A

## EFFECT OF GEOLOGICAL STRUCTURE NEAR BLASTING AREA ON VIBRATING SIGNAL

SHANG Xiaojiang, DING Hua

(Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**ABSTRACT:** Based on the point of view that the vibration signal is filtered by the geological structure near the blasting vibration source proposed by literature<sup>[1]</sup>, we calculated a series of blasting vibrations generated by explosives placed at different locations with underground weak layers by means of LS-DYNA. From the numerical results, we studied the evolvement laws of frequency characteristics of the ground vibration signals, including the evolvement law of frequency characteristic of the blasting earthquake signals in the case when the location of the weak layers at blasting point and its distribution range and rigidness change. These laws indicate that geological structure near the blasting vibration source has dramatic effect on the vibration signal. The laws offer a new idea of identifying the varied engineering geological structures like underground cracks and weak interlayer, and have been confirmed by qualitative tests conducted in-situ.

**KEY WORDS:** Area near blasting source; Geo-structure; Blasting vibration; Frequency characteristic

### 1 引 言

在爆破过程中,炸药对周围介质的作用可近似看作一作用时间很短的脉冲载荷。爆炸作用通过这个脉冲载荷传递给周围介质,使介质产生变形、破坏和运动。近期研究表明<sup>[1]</sup>,爆破震动弹性区的信号

是经过震源邻近区域的地质结构滤波后传出的。由于激发的短时作用特征,使得以辐射形式传出的震动信号的主要成分,为由这一区域地质结构特征所决定的自振信号。利用这一特性,结合爆破震动传播特性的分析,将有助于我们对近震源区的地质结构进行识别,以及进一步探求爆破防震和减震技术。

收稿日期: 2005 - 03 - 14

作者简介: 尚晓江, 硕士研究生。

## 2 近区地质结构特性对爆破震动信号特征的影响

在无限介质中球对称爆破的情况下,爆破震动源的作用可以看作是一个半径为  $r_0$  的等效球形空腔内壁上作用一随时间变化的均布压力引起的径向位移响应,其解可以表示为<sup>[2]</sup>

$$u(r, t) = \frac{1}{r^2} f\left(t - \frac{r}{c_p}\right) + \frac{1}{c_p r} f\left(t - \frac{r}{c_p}\right) \quad (1)$$

其中:  $u(r, t)$  为  $t$  时刻距爆破中心距离为  $r$  处的径向位移;  $c_p$  为介质的纵波波速;  $f$  为波函数,其具体形式为:

$$f(t) = e^{-at}(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) + C \quad (2)$$

式中的前一项是线弹性方程的无限介质中含有球形空腔的齐次解;  $C$  为与载荷相关的特解;  $A$ 、 $B$  为与载荷特性、介质材料参数、介质初始状态和空腔尺寸相关的参数;  $a$ 、 $\omega$  为与介质材料参数和空腔尺寸相关的常数。给出爆破震动信号的视频率,计算式如下:

$$= \frac{2c_s}{r_0} \sqrt{1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}} \quad (3)$$

爆破使完整的介质中形成一个弱化区(爆破区)类似于空穴,这样就使爆破近区有了明显的结构特征。由于爆破过程作用时间很短,邻近介质的运动可近似地看作被给予了一个初始速度的后续惯性运动,其运动特征取决于这时近区的结构形态,其形式为一个典型的阻尼振动。这一阻尼振动特征,可以从全空间均匀弹性介质中一球形空腔的解析解式(1)和式(2)明确看出。

对于载荷作用时间明显短于震动信号主高频周期的情形,载荷时间函数的分布对震动传播影响不大,即震动响应此时只取决于震源作用冲量  $I_f$  的大小和地质结构的等效滤波特征。

设  $s$  为距震源一定距离的爆破震动响应、 $G$  为脉冲响应函数、 $H$  为地质结构的等效滤波函数、 $f(t)$  为震源时间函数,则

$$s = G * H * f \quad (4)$$

当  $f(t)$  的持续时间远小于  $s$  的主高频的周期时,近似地有

$$H * f = \int f(t) dt \cdot H = I_f \cdot H \quad (5)$$

利用卷积的结合率就有

$$s = I_f \cdot G * H \quad (6)$$

即:震动信号由震源作用冲量  $I_f$  的大小和地质结构的等效滤波特征所决定。

另外,近震源区域介质力学参数或者炸药量的不同,震源邻近区域在爆破荷载作用后的结构形态就不同,这些因素的变化将引起爆破近区尺度的变化,进而影响到震动信号的频率特征。

## 3 数值模拟结果

根据文献[1]提出的等效载荷模型,我们对爆破震动源的作用进行了等效简化:

设  $V$  为等效载荷作用区域,利用加权残数法可以给出弹性动力学基本方程的等效积分形式:

$$\int_V (\ddot{u}_i - \sigma_{ij,j} + e_i) v_i dx = 0 \quad (7)$$

式中:  $\ddot{u}_i$  为质点的运动加速度;  $\sigma_{ij,j}$  为应力张量的散度;  $e_i$  为震动源作用力;  $v_i$  为权函数。

设  $E_k$  为与  $V$  相交的单元,  $k = 1, \dots, K$ , 则对应于震动源产生的节点力  $e_i$  的项为

$$\int_{E_k} e_i v_i dx = f(t) \int_{E_k} v_{i,j} M_{ij} dx = f(t) V_k^T P_k \quad (8)$$

其中  $f(t)$  为载荷作用时间函数;  $V_k$  为单元节点处的函数值向量;  $P_k$  由下式给出:

$$P_k = \int_{E_k} DN^T M dx \quad (9)$$

$DN$  为有限元形函数微分矩阵,  $M$  为震源矩阵,其具体形式:

$$M = (1 - \nu) M_1 + M_2 \quad (10)$$

其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$M_2 = \begin{bmatrix} \nu / (1 - \nu) & 0 & 0 \\ 0 & \nu / (1 - \nu) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:  $\nu$  为周边介质的泊松比;  $\nu$  为表征空腔与开裂的比例因子(考虑岩石中药室壁的破坏特征,本文计算中取  $\nu = 0$ )。

利用上面给出的简化关系,我们进行了一些数值模拟计算。图1所示为存在地下软弱结构面(如水平软弱夹层)情况下的爆破模型。最初曾针对地下裂隙中的爆破进行过相关研究<sup>[3,4]</sup>。

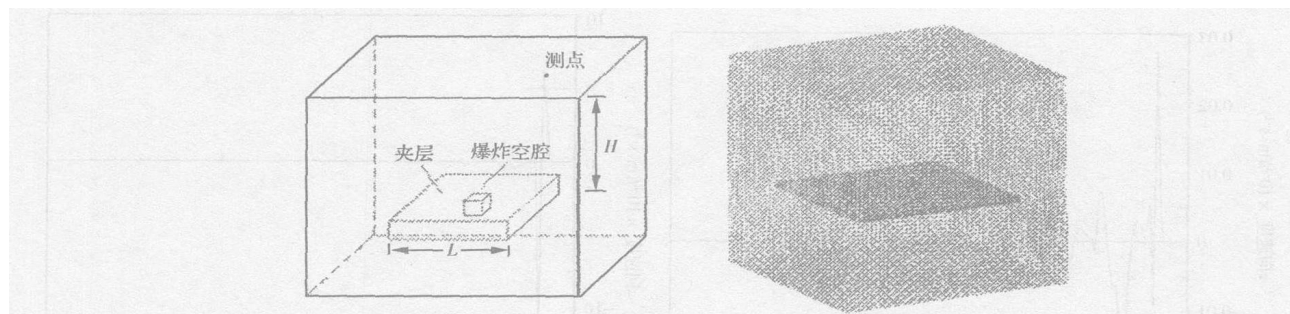


图1 水平软弱夹层爆破模拟的有限元模型

Fig. 1 FE Model for blasting in horizontal weak layer

我们采用六面体有限单元模型,载荷的作用区域正好由一个或几个单元组成,药包埋设的深度  $H$  和软弱夹层的分布尺度  $L$  及其弹性模量  $E$  在模型中作为可变化的参数。

模型采用边长 51m 的弹性立方体,侧面、底面均施加无反射边界条件来模拟地下半空间,上表面为自由表面。软弱夹层位于自由表面以下 25m 深处,爆源位于模型的垂直中轴线上、地表以下  $H$  深处。

介质和软弱夹层均近似地被看作各向同性弹性体,其物理参数取为:

岩石介质:  $E_1 = 2.4 \times 10^4 \text{MPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\rho =$

$2.4 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ;

软弱夹层和爆破破坏区单元:  $E = 0.01 E_1$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\rho = 2.4 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

通过数值计算的结果可以发现:当震源布置在地面附近的浅层,深层软弱夹层的存在并不影响地表面的观察信号(见图 2),这说明浅层爆破信号在分辨地下深层地质构造方面,存在着一定盲区。相反,当震源布置在软弱夹层附近,有无软弱夹层的信号则完全不一样,这一点可以从信号的持续时间、频率成分看出,震动信号的这些特征反映了爆破近区的某些地质结构的信息(见图 3)。

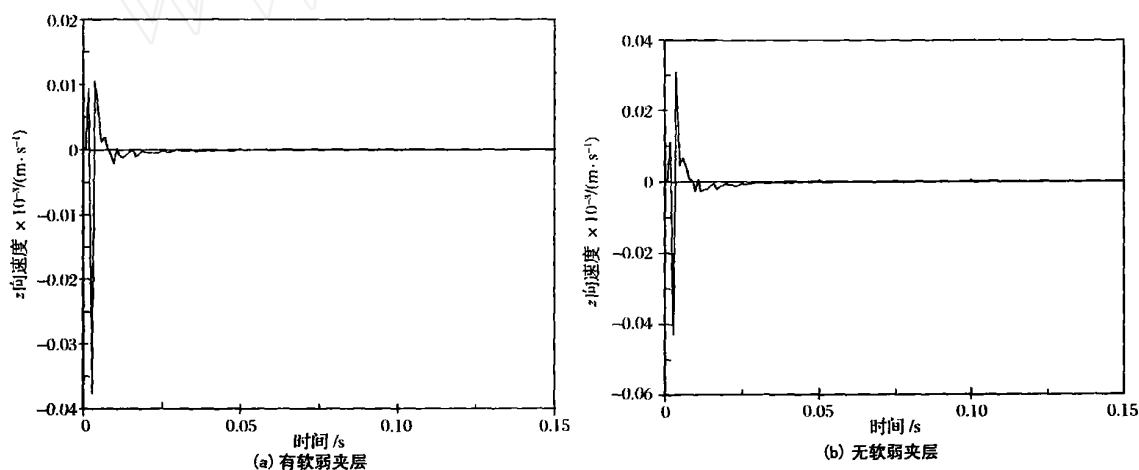


图2 震源同处于浅层,深层有(a)、无(b)软弱夹层时地表同一点的震动信号

Fig. 2 Comparison of the wave forms with (a) and without (b) weak layer when the explosive is placed in the same position near the ground surface

为说明爆破位置邻近区域地质结构特性对震动信号特征的影响,我们利用一系列数值计算的结果,进一步讨论了下面几种情况的地面震动信号特征的变化规律。

### 3.1 爆破点与软弱夹层面相对位置改变时地面信号的变化

改变爆破位置(沿深度变化)进行一组计算。图 4 给出了地表同一测点当爆源分别位于夹层中、夹层上和夹层以下时的震动信号频域图像的对比,从图中看出:在软弱夹层中爆破时,地表测点震动信号的主频最低,且低频成分显著。

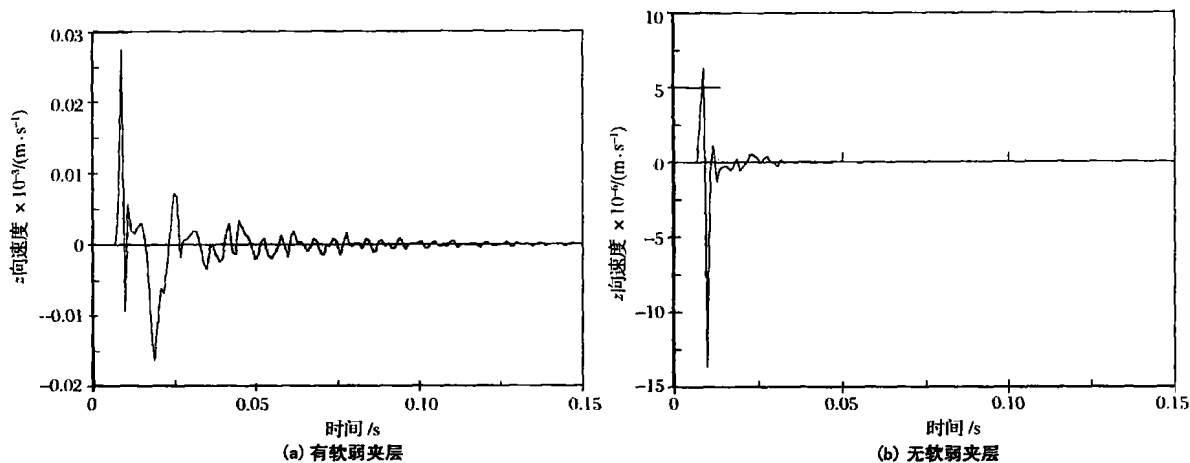


图 3 震源的位置相同且都处于深层,其附近有无软弱夹层时地表同一点的震动信号

Fig. 3 Comparison of the wave forms with(a) and without (b) weak layer when the explosive is placed in the same position which is near the layer when the layer exists

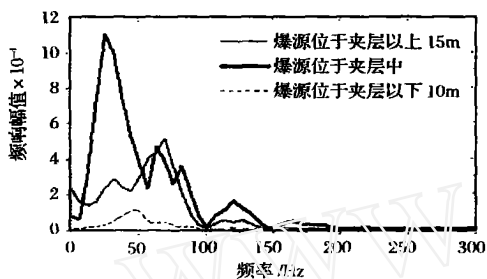


图 4 爆源深度改变时震动信号的频域图像

Fig. 4 Signal in frequency domain for different depth of blasting source

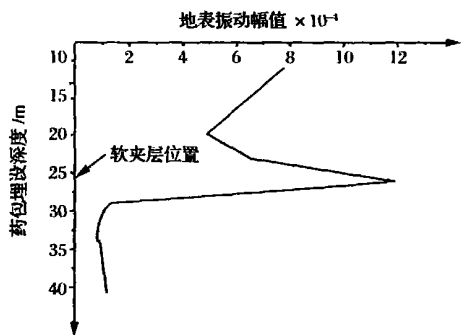


图 5 地表信号振动幅值随爆源深度的变化曲线

Fig. 5 Maximum amplitude of the ground vibration signal for different depth of blasting source

图 5 为自由表面同一点震动信号频域响应的幅值随爆源深度的变化曲线。这一曲线直观地展示了爆源相对于软弱夹层位置不同时地表震动信号幅值的变化规律。当爆源位于夹层以上时,地表震动幅值随药包埋深的增加而减小;当爆源逐渐靠近地下软夹层时,地表震动信号的幅值显著增大;药包埋深继续增加到夹层以下时,由于受到夹层的反射和吸

收作用,地表震动幅值显著降低到很小的值。

### 3.2 夹层分布范围对地表震动信号特征的影响

(1) 夹层尺度变化对其中爆破的影响。图 6 给出了爆破震源位于软弱夹层中间时,自由表面上同一点震动波形频谱的主峰值频率(频谱中对应于最大响应幅值的频率)在夹层尺度增加过程中的变化情况。

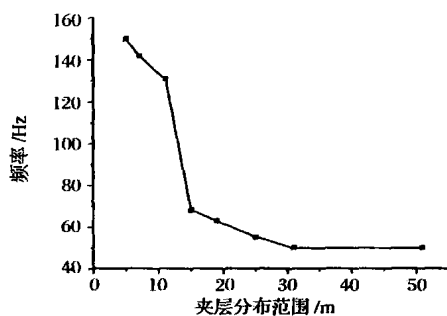


图 6 震动信号峰值频率随夹层展布尺度变化

Fig. 6 Peak frequency for different areas of weak layer

从图中看出,当夹层的分布尺度较小时,主峰值的频率较高。随着夹层展布范围的增大,峰值频率逐渐降低,低频成分显著增加,整个频谱向低频方向移动。

(2) 夹层分布范围对其下方爆破的影响。图 7 给出了位于软弱夹层以下的爆破震源(计算中爆破药包埋设的深度位置始终不变)引起地表震动信号的频谱。三条曲线分别对应于无软弱夹层、有限大的夹层(尺度 31m ×31m)以及无限大夹层的三种情形。

可以从图 7 很直观地看出,存在软弱夹层的条件下,软夹层对其下方爆破源引起的震动信号的传

播有一种明显的吸收和减震作用,而且随着夹层尺度的增大,这一作用也就越显著。

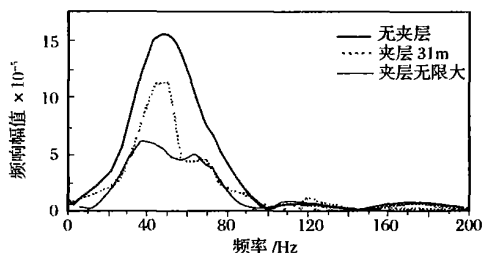


图7 夹层以下爆破时夹层尺度变化与地面震动信号频谱的关系

Fig.7 Spectrum of blasting vibration signals with different areas of weak layer beneath which charge is placed

### 3.3 夹层刚度改变时对其下方爆破震动的影响

在模型中改变软夹层的弹性模量,其他参数不变。通过一组计算来分析软夹层刚度改变时对其下方爆破震动信号屏蔽作用的影响。计算中以岩石材料与软弱夹层杨氏弹性模量的比值来定义相对刚度。图8给出计算的结果。

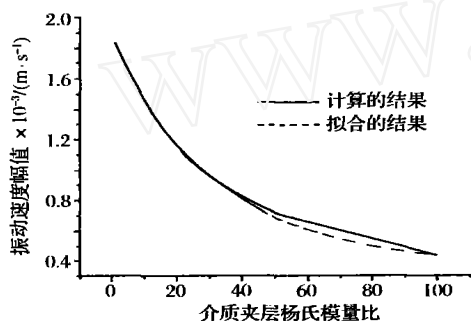


图8 屏蔽效应随介质夹层相对刚度变化曲线

Fig.8 Shading effect corresponding to different Young's modulus of the weak layer

图8中,数值计算中得到的结果被一个指数衰减函数很好地拟合。这说明当夹层的刚度降低时对其下方爆破震动信号的吸收作用类同于软夹层厚度增大时下方震动信号透射系数降低的情形。

## 4 现场实验的结果

我们通过实施现场爆破实验来验证在数值模拟中发现的一些规律。

图9为实验现场岩石剖面照片,可以清楚地看到岩石断面中有着一个厚约0.4m的软弱泥化夹层。这一实验地点位于重庆奉节县白衣庵古滑坡的中部。

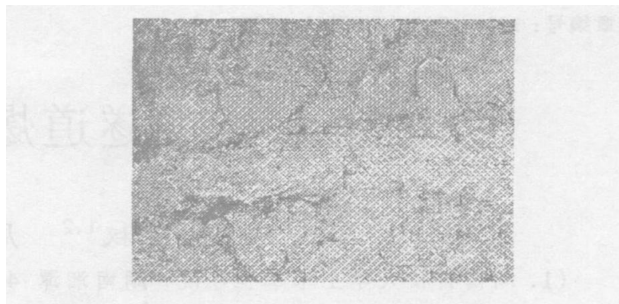


图9 软弱夹层现场照片

Fig.9 Picture of a weak layer

实验是在夹层中以及夹层上下位置进行爆破,采集地表测点的震动信号。图10为现场爆破采集到同一测点震动信号的频谱曲线,实线、虚线表示爆破位置分别处于夹层以上和夹层中。从图中可以看出,现场爆破采集的震动信号特征证实了数值模拟中得到的一些基本规律,比如:当爆破震源越靠近地下软弱夹层时,地表震动信号的低频成分增加,信号主频降低;而当爆源远离夹层时地表震动信号主频提高。这一点和实验现场情况是相符合的,即实验现场夹层以上的岩石材料,其刚度是高于夹层的。

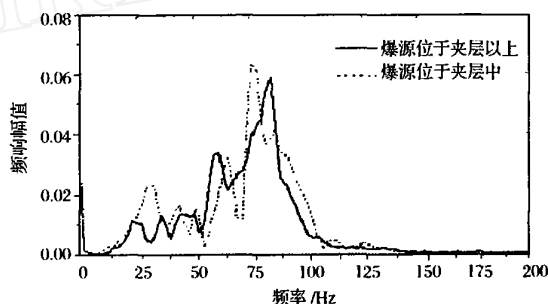


图10 测点1震动信号频谱

Fig.10 Spectrum of signals at the test point 1

## 5 结语

综上所述,爆破震动信号反映了爆破邻近区域的结构特征,爆破领域内的各种特殊地质结构对爆破震动信号的频率特征有着显著影响,这些影响规律可用于对地下软弱夹层等特殊结构的特征进行识别和反演<sup>[5]</sup>,这将有助于我们如何利用爆破的震动作用,或采取必要的减震措施。

在目前的地质勘探中,软弱结构面的识别主要靠探井和探槽,探井通过一些点上的信息,靠工程经验判断将它们连成地质剖面,在不能确定的情况下通过挖探槽来寻找滑带面。利用爆破震动的识别方法通过地表震动信号的特征,来识别以探井为中心

(下转第48页)

### 3 起爆网路, 堵塞及飞石距离

(1) 起爆网路: 本次起爆以导爆管为主起爆网路, 复式敷设。每个药室放置 3 发导爆管雷管, 并用塑料套管保护。每个药室段位安排见表 1。上层平硐外毫秒 1 段, 下层平硐外毫秒 3 段。

(2) 堵塞: 堵塞材料全部用井巷掘进时排弃的碎石, 堵塞长度从药室至横巷与平巷的交叉处, 平巷不堵塞。

(3) 爆破个别飞石距离:  $R_f = 20 n^2 W K_f = 397.44\text{m}$ , 式中:  $n$  为爆破作用指数, 取值 0.8;  $W$  为最小抵抗线, 为 20.7m (下层 1# 药室距近工棚、混凝土搅拌站方向 400m);  $K_f$  为安全系数, 一般取 1.0 ~ 1.5, 本工程取 1.5。

### 4 爆破效果与体会

起爆时随着一声闷响, 爆破山体迅速隆起, 紧接着高 100.8m 山体在 45m 拦腰处发生巨大规模的崩塌, 岩石扑地的轰鸣声持续约 10s。被爆岩石 70% 崩塌在山体的东、西两侧, 山体从 45m 高度形成平台, 平台上无爆堆, 公路边坡一侧 (山体北侧) 留有平台边缘。飞石控制在安全距离内, 最远的个别飞石未超过 300m, 爆破效果完全达到设计要求, 爆破非

常成功。

通过这次双层多硐室拦腰大爆破形成山体平台, 有以下几点体会:

(1) 药室布置在试算过程中, 严格将密集系数控制在 1 左右。由于本次山体爆破是药室的组合作用, 每个药室都有临空面, 因此在首先拟定下层药室后, 再对各药室间的密集系数进行调整。

(2) 对平台边缘的形成, 主要是通过平台边缘方向各药室最小抵抗线与该药室中心至平台边缘的最短水平距的比值进行控制。根据工程实践经验, 如为 60°~70° 的自然坡面时, 比值一般为 0.8 为宜。

(3) 多集团药包不均衡作用设计时, 合理确定药室的  $n$  值、标准单耗, 并安排下层硐室靠近公路一侧的药室后爆, 不仅有利于减弱下破裂线形成下铲状, 而且有利于山体崩塌和减少平台台面上的爆堆。

#### 参考文献:

- [1] 中国工程力学学会工程爆破专业委员会. 工程爆破 (下册) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [2] 交通部第一公路工程总公司. 公路路基施工技术规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [3] 露天大爆破编写组. 露天大爆破 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.

(上接第 61 页)

的一定范围内软弱结构面的存在性及其空间展布特征。这样将有可能减少探井、探槽的数量, 提高地质结构识别的可靠性、精度和效率。

#### 参考文献:

- [1] 丁 桦, 郑哲敏. 爆破震动等效载荷模型 [J]. 中国科学 (E 辑, 技术科学) 2003, 33(1): 82 - 90.
- [2] Sharpe J A. The production of elastic waves by explosion pressure: - Theory and empirical field observations [J]. Geophysics, 1942, 7: 144 - 154; - Results of observation near an exploding charge [J]. Geophysics, 1942, 7: 311 - 321.

- [3] Ding H, Zheng Z M. Source Model for Blasting Vibration and Tentative Application to Engineering Geophysics [A]. Proceeding of The 9th International Congress on Sound and Vibration [C]. Orlando, Florida, USA, 8 - 11 July 2002.
- [4] Ding Hua, Long Lipin, Wu Yanfeng, Zheng Zhemin. Detection of Cracks Using Blasting Vibration Part1: Numerical results [A]. International Conference on Slope Engineering [C]. 8 - 10 December 2003, Hong Kong.
- [5] Ding Hua, Shang Xiaojiang, Bai Jinze. Characteristics of Blasting Vibration in Presence of Weak Interlayers [A]. Proceedings of The 6th World Congress on Computational Mechanics [C]. Sept. 5 - 10, 2004, Beijing China.