

文章编号: 1001-1455(2008)03-0265-06

地表垂直爆破震动速度的数值计算^{*}

刘红岩¹, 王新生²

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对爆破震动速度计算中存在的问题, 提出了分两步计算的方法, 即先计算爆炸近区由炸药爆炸引起的冲击压力, 再计算远端震动区的质点震动速度。并对动力学计算中的阻尼问题进行了初步讨论。利用本文提出的方法对岩粉、水和空气三种不同间隔装药结构下的不同质点处的震动速度进行了计算, 计算结果与实测结果吻合较好。岩粉间隔装药条件下的计算地表垂直震动速度最大, 水间隔装药次之, 空气间隔装药最小。

关键词: 爆炸力学; 垂直震动速度; 多物质 ALE 算法; 间隔装药; 动力阻尼

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

目前矿山开采大多采用爆破方式, 而由爆破引起的震动是矿山开采设计中需要关注的一个重要课题。因为由爆破引起的震动很可能会造成矿区高陡边坡、地下巷道或地面建筑物等设施在动力作用下的失稳与破坏^[1-3], 因而爆破震动的控制显得非常重要。而爆破震动强度的预测则是爆破震动控制的前提和基础, 只有在对由爆破引起的震动强度准确预测的基础上, 才能实施有效的控制, 并对控制效果作出客观评价。爆破垂直震动速度是爆破震动强度的重要指标, 目前在工程爆破界最常用的爆破垂直震动速度预测方法就是根据已测试出的质点震动速度, 利用萨道夫斯基公式或模糊控制理论如神经网络技术等得到震动速度的传播规律^[2-4]。但是, 当震动测试数据的获得并不是很容易时, 这两种方法就显得无能为力了。利用数值计算的方法对由爆破引起的介质内部的压力与震动强度进行的计算^[5-7], 为爆破震动速度的预测提供了一个很好的思路。但是他们所涉及到的计算模型尺寸都很小, 而当爆源距被保护物较远时, 模型尺寸将会很大, 网格数量也将急剧增加, 采用上述方法将无法计算。本文中在上述研究的基础上, 结合矿山生产中常用的特殊装药方式——间隔装药, 对岩粉、空气和水三种不同间隔物质装药爆炸条件下远距离处地表垂直震动速度进行现场测试和数值计算研究, 目的在于提高炸药能量利用率、改善爆破效果、提高矿山生产效率的同时, 能够找到有效降低爆破地震效应的装药结构, 为矿山爆破地震效应控制打下基础。

2 矿山工程地质条件及爆破震动现场测试

2.1 矿山工程地质条件

矿区隶属于河北省承德钢铁公司的黑山铁矿, 地势西北高、东南低。矿区内地形较平坦, 山体呈近南北走向, 沟谷深切, 为侵蚀、构造剥蚀地貌形态。

矿区内的主要岩性为暗色辉长岩, 根据相关试验得到暗色辉长岩的物理力学参数分别为: 密度 $\rho = 2.878 \text{ t/m}^3$, 弹性模量 $E = 48.0 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.23$, 黏聚力 $c = 20.0 \text{ MPa}$, 摩擦角 $\phi = 45^\circ$, 抗拉强度 $T = 6.4 \text{ MPa}$ 。

* 收稿日期: 2006-12-26; 修回日期: 2007-05-07

基金项目: 北京市教委科技发展和人文社科研究基金项目(1223606); 中国博士后科学基金项目(20060400498)

作者简介: 刘红岩(1975—), 男, 博士, 副教授。

2.2 监测仪器和监测系统

地震监测系统包括地震仪、检波器、衰减器及信号电缆。地震仪是美国劳雷公司生产的 Strata ViewTM 型数字地震仪,共有 24 个通道。检波器为中国石油地震勘探魁星技术公司生产的中心频率为 4.5 Hz 的垂直分量速度检波器。测试时将检波器垂直插入地表土层,使检波器与大地有良好的耦合性能。

2.3 试验条件、测点布置和测试结果

试验场地选择在相对平坦、且无大的地质构造地段。试验布孔参数及所用爆破器材与采场生产爆破完全相同。其中孔径为 200 mm、孔深 14 m、孔间距 4 m,底盘抵抗线为 6.5 m,台阶高度 12 m,单孔装药为 175 kg,炸药为二号岩石炸药。装药结构如图 1,对于每种不同的装药结构均布置 7 个监测点,他们都位于炮孔的侧后方,各监测点距爆源的距离及测试结果见表 1。表中, R 为爆心距, v 为计算震速, v_0 为实测震速, e 为相对误差, $e=(v-v_0)/v_0$ 。

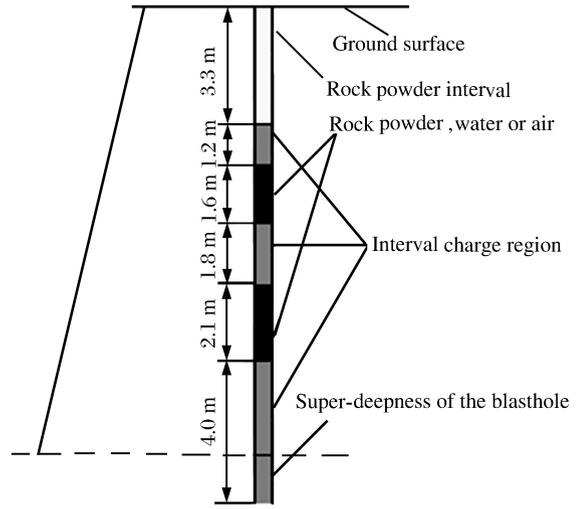


图 1 装药结构图

Fig. 1 Charge structure

表 1 三种间隔装药条件下数值模拟结果与实测结果对比

Table 1 Comparison of simulated and experimental results under three different interval charge conditions

No	岩粉				水				空气			
	R/m	$v/(cm/s)$	$v_0/(cm/s)$	$e/(%)$	R/m	$v/(cm/s)$	$v_0/(cm/s)$	$e/(%)$	R/m	$v/(cm/s)$	$v_0/(cm/s)$	$e/(%)$
1	40	2.59	2.58	0.4	36	2.86	2.87	-0.3	32	2.90	2.41	20.3
2	44	2.23	2.52	-11.5	40	2.55	2.69	-5.2	36	2.65	2.33	13.7
3	48	2.06	2.39	-13.8	44	2.09	2.50	-16.4	40	2.49	2.19	13.7
4	63	1.70	2.00	-15.0	59	2.03	2.40	-15.4	55	1.83	1.82	0.5
5	78	1.54	1.66	-7.2	74	1.71	1.80	-5.0	70	1.57	1.41	11.3
6	93	1.31	1.29	1.6	89	1.17	1.20	-2.5	85	1.44	0.92	56.5
7	108	0.99	0.96	3.1	104	1.00	0.94	6.4	100	1.07	0.70	52.9

3 爆破震动速度的数值计算及分析

当炸药在岩石中爆炸时,根据距炮孔中心的远近不同,可把整个岩石区域分为粉碎区、裂隙区和震动区,根据岩石在各个区域中的受力不同也表现出流体性、弹塑性和弹性等不同的力学特性。而通常被保护物距爆源都相对较远,大多处于岩石的弹性震动区,所以数值计算的范围就跨越了几个不同的区域,因此在数值计算中采用同一种岩石本构模型不太合适。而且如果计算区域的尺寸与炮孔的尺寸相差较大,由于在炮孔附近区域需要进行较密集的网格划分,而为了保证网格划分的协调性,单元的数量势必大大增加,导致计算时间大大加长,甚至会因为计算机内存不足等原因而无法计算。因而本文中拟采用分步方法进行计算,即首先在爆源近区,采用 ALE 算法处理爆炸近区的塑性大变形问题,并提取塑性区与弹性区分界面处的压力数据;然后利用提取出的压力作为输入数据计算爆破震动区的垂直质点震动速度。爆炸近区计算的主要目的是为了提取弹塑性分界面处的压力参数,为远场地震波的模拟提供原始数据。基于以上目的,选用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行模拟分析,该软件是功能齐全的非线性显式分析程序,其显式算法特别适合于分析各种非线性冲击动力学问题,并在爆破震动领域得到较为广泛的应用^[8]。

3.1 爆炸近区的数值计算

3.1.1 计算模型

采用二号岩石炸药对水、空气与岩粉三种不同间隔装药条件下的爆破垂直震动速度进行计算,为简化计算,设定药卷上部的堵塞材料参数和周围的岩石参数相同。因此计算域中包含三类物质:二号岩石炸药、岩石、间隔物质,根据不同的间隔装药类型,间隔物质分别为水、空气或岩粉。三类物质均用 SOLID 164 实体单元进行网格划分。由于爆炸近区的岩石在爆炸荷载的作用下会产生很大的变形,因此为了避免 Lagrange 单元网格的形状畸变可能导致的计算中断,四种物质划分均划分为 Euler 网格,采用多物质 ALE 方法进行计算。在有限元分析中,固体力学多用 Lagrange 法,流体力学则使用 Euler 法,但在解决流体-固体耦合作用时通常需要将两种方法结合起来,即 ALE 算法,主要用于求解流体与结构的相互作用问题。该算法的特点采用的网格每一步(或每隔若干步)都是根据物质区域的边界构造一个合适的网格,以避免网格的严重扭曲。而本文中的炸药爆炸生产物、空气和水均为流体,而岩石为固体,为明显的流固耦合作用,适于采用 ALE 算法,并且也有相关文献利用该算法进行岩土爆破计算^[8]。为了节省机时,根据模型的对称性,取模型的 1/4 进行研究。取模型 x 方向长 3 m, y 方向长 2 m, z 方向长 15 m。整个模型共划分 69 783 个节点,61 190 个单元。在 xOz 面和 yOz 面处施加对称约束, z 轴方向上端面设定为自由面,其余作无反射边界处理。计算模型及网格划分如图 2 所示。

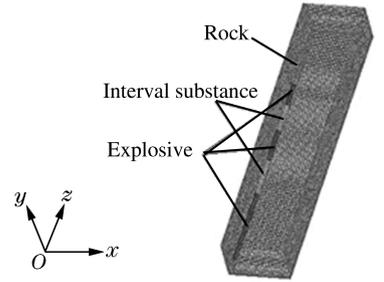


图 2 计算模型
Fig. 2 Calculation model

3.1.2 材料模型与状态方程

(1)炸药燃烧模型。炸药采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程能够精确描述爆炸过程中爆轰产物的压力、体积、能量特性

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega e_0}{v} \tag{1}$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为 JWL 状态方程参数, p 为压力; e_0 和 v 分别表示爆轰产物的初始内能密度和相对体积。二号岩石炸药的参数分别为:密度 $\rho = 1.00 \text{ t/m}^3$,爆速 $D = 3.60 \text{ km/s}$,CJ 压力 $p_{CJ} = 3.24 \text{ GPa}$, $A = 214 \text{ GPa}$, $B = 0.182 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.3$, $e_0 = 4.5 \text{ GPa}$, $v = 1.0$ 。

(2)空材料模型。该材料模型通过调用状态方程来避免复杂的偏应力计算,压力下限由截至压力确定。在模拟过程中通过联合使用该模型和具有不同参数的 Gruneisen 状态方程来模拟液态的水与气态的空气,Gruneisen 状态方程定义材料冲积压缩时的状态方程为

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu (1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu - \alpha \mu^2 / 2)}{(1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \mu^2 / (\mu + 1) - s_3 \mu^3 / (1 + \mu)^2)^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) e_0 \tag{2}$$

材料膨胀时的状态方程为

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) e_0 \tag{3}$$

式中: c 为水中声速; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, ρ_0 为材料密度; s_1 、 s_2 和 s_3 为 Gruneisen 系数; γ_0 为伽马系数; α 是对 γ_0 的一阶体积修正; e_0 为初始体积内能。所使用的空材料模型和状态方程参数见表 2。

表 2 水和空气的状态方程参数

Table 2 Equation-of-state parameters for water and air

材料	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	$c / (\text{km/s})$	s_1	s_2	s_3	γ_0	α	$e_0 / (\text{J/m}^3)$
水	1 000	1.650	0	0	0	0	0	0
空气	1.25	0.300	0	0	0	0.4	0.4	0

(3)岩石材料模型。Drucher-Prager 屈服准则在应力空间为圆锥形屈服面,在 π 平面上圆形屈服线为 Mohr-Coulomb 屈服曲线的内切圆,其屈服条件考虑了静水压力的影响,比较适合岩土介质。Drucher-Prager 屈服准则的表达式为^[2]

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = K, \quad \alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2\phi)}}, \quad K = \frac{\sqrt{3}C\cos\phi}{\sqrt{3 + \sin^2\phi}} \quad (4)$$

式中: I_1 为应力张量的第一不变量, J_2 为应力偏量的第二不变量, C 为土的粘聚力, ϕ 为岩石的内摩擦角。其材料参数见 2.1 节中。

3.1.3 计算结果

从计算结果可以看出, 空气间隔有一个比较明显的膨胀和衰减过程, 水和岩粉间隔却比较缓慢; 同时, 在三种情况下, 岩石均受到强烈的冲击压缩, 并以球对称形式向外扩展。同时随着距炮孔距离的增加, 三种不同间隔装药条件下的压力逐渐趋于相同。

考察三种不同间隔装药情况下, 距爆源不同距离处的单元应力变化情况可知, 在爆源近处岩粉间隔装药产生的压力比空气间隔稍大一点, 而水间隔产生的应力值均比二者小; 而随距离的增大, 三种情况下的压力均有不同程度的衰减, 其中岩粉间隔和空气间隔的压力衰减幅度大于水间隔时的压力衰减幅度。图 3 给出了三种间隔装药条件下在 $z=7.5$ m 剖面上沿 x 方向上不同点处的压力计算对比结果。

3.2 爆炸远区的质点垂直震动速度计算及结果分析

3.2.1 数值计算模型

模型长 120 m、宽 4 m、高 15 m, 为了节省机时, 取 1/2 模型进行研究。计算域包含一种物质: 岩石。共划分 44 826 个节点, 36 000 个单元。yOz 面加冲击载荷, 其余除 xOy 面为自由边界和 xOz 为对称边界外, 其余均为无反射边界。

3.2.2 材料模型与动力阻尼

由于地震波传播区域属于弹性范围, 因而岩石材料模型采用弹性材料模型, 取岩石参数如下: $\rho=2.878$ t/m³, $E=48$ GPa, $\mu=0.23$ 。

由于施加在弹性模型边界上的冲击应力波是典型的动态荷载, 材料在该动态荷载作用下也表现出明显的动态特性, 因此应采用动力有限元方法进行求解。动力有限元的基本方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{Q}(t) \quad (5)$$

式中: \mathbf{M} 为总体质量矩阵, \mathbf{K} 为总体刚度矩阵, $\mathbf{Q}(t)$ 为等效结点荷载向量, \mathbf{C} 为阻尼矩阵。目前在动力学的问题研究中, 虽然质量和刚度的分布可以比较精确地模拟, 但是系统阻尼的考虑方法仍然没有能够很好地解决。Rayleigh 是一个广泛应用地正交阻尼模型, 可以表示为质量阻尼和刚度阻尼的组合^[3]

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} = \frac{2(\xi_i\omega_i - \xi_j\omega_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2}\omega_i\omega_j\mathbf{M} + \frac{2(\xi_i\omega_i - \xi_j\omega_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2}\mathbf{K} \quad (6)$$

式中: ξ_i 为振型阻尼参数, ω_i 为振动圆频率。取阻尼参数: $\alpha=10.0$, $\beta=0.000\ 02$ 。

3.2.3 加载曲线

由于爆炸近区的计算只是为爆炸远区质点震动速度的计算提供初始输入压力参数, 因此质点震动速度的计算才是本文的核心部分。而关于初始输入压力参数的获取与施加需要解决两个方面的问题:

一是垂直炮孔方向上的压力提取位置。根据距炮孔远近的不同, 当炸药爆炸以后, 炮孔附近区域的岩石分为粉碎区、裂隙区和弹性震动区。由于本步中所采用的模型为弹性模型, 所以压力提取的位置应该在弹性区和裂隙区的分界面处。文献研究表明^[9], 对于密度 $\rho=2.35\sim 2.60$ t/m³、泊松比 $\nu=0.22\sim 0.31$ 、弹性模量 $E=29.4\sim 62.0$ GPa 的岩石来说, 当炸药爆炸以后, 所形成的径向裂隙区半径为装药半径的 21.60~23.44 倍。由于径向裂隙区的范围即是塑性区的范围, 因此, 在本文中取塑性区的范围为装药半径的 22.0 倍, 即弹塑性的分界面为距炮孔中心 2.2 m 处, 也就是说需要在距炮孔中心 2.2 m 处提取压力曲线, 作为本步中计算的初始输入压力。

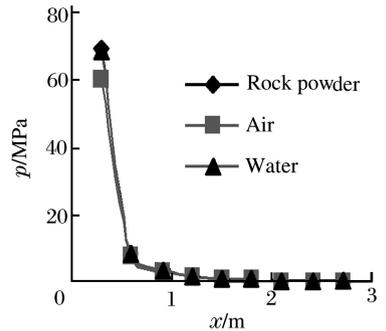


图 3 不同点处的压力计算结果
Fig. 3 Calculated pressures at different points for different interval charge structures

二是垂直于炮孔方向上压力提取的位置,由于在本文中炮孔很深,垂直于炮孔方向上的各个截面处其压力曲线肯定有所不同。因此为了更好地反映真实情况,沿垂直于炮孔方向均匀分为三段,即每段长度为5 m,然后选取每段的中点即沿炮孔方向分别在2.5、7.5和12.5 m处提取相应的压力曲线,则这三个点分别为:A(2.2,0,2.5)、B(2.2,0,7.5)、C(2.2,0,12.5),然后把相应的压力荷载施加到相应的弹性模型界面上,作为该面上的所受的冲击力。

按照上述方法提取压力参数,分别提取三种不同间隔装药条件下不同位置处的典型的压力曲线如图4所示。

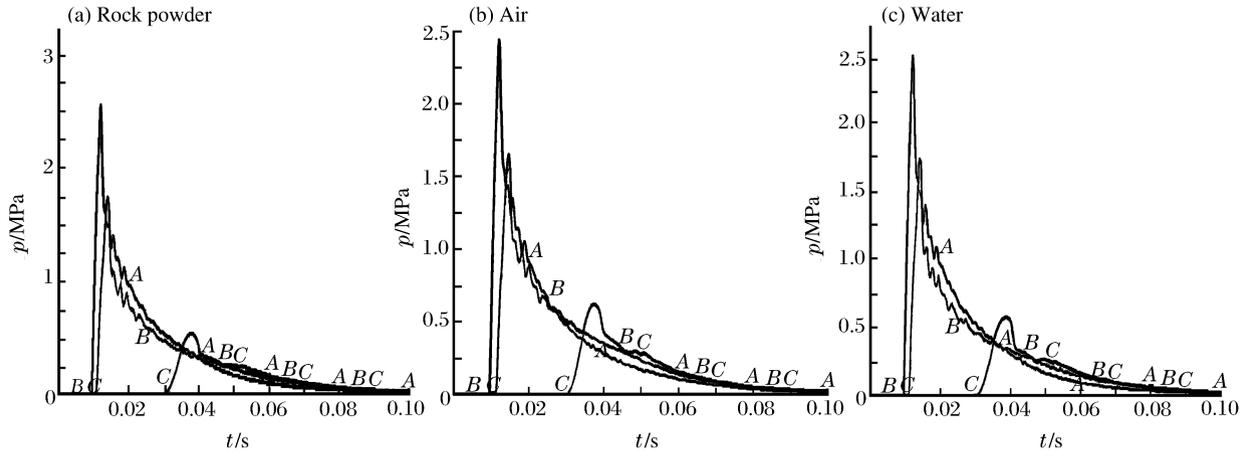


图4 计算压力曲线

Fig. 4 Calculated pressure-time curves under three different interval charge conditions

3.2.4 计算结果与现场测试结果的对比分析

根据以上的计算模型及参数,对三种工况进行了模拟计算。然后提取三种工况下不同距离处的质点垂直峰值震动速度,并与试验结果进行对比,见表1。

由表1中的计算结果与实测结果的对比分析中可以看出:

(1)对于三种不同装药结构,岩粉间隔和水间隔模拟出来的结果与实测结果吻合较好,其最小误差为-0.3%,最大误差也仅为-15.0%;而空气间隔模拟出来的结果与实测值相差较大,最大达到56.5%,几乎达到实测值的1.6倍。

(2)对于同一距离处的由不同间隔装药结构引起的爆破震动速度,测试结果和计算结果存在一点点的差异。从计算结果来看,岩粉间隔时所产生的震动速度比水间隔时大,这可由图4中的压力曲线看出,岩粉间隔爆炸时所产生的压力最大,同时由于在远区的震动速度计算中所采用的材料模型及参数都是相同的,因而爆破震动速度也应该最大。而从测试结果来看,岩粉间隔时所产生的震动速度比水间隔时小,二者存在一定的差异,这可能是由于测试误差所致。

(3)从计算结果和测试结果的对比来看,二者存在着一定的误差。出现这种误差的原因除了试验测试系统本身的误差,主要可能是数值计算中材料模型和材料参数的选取与实际情况有一定的差距,如在计算中把岩石当作均质弹性体,这与实际情况肯定都存在着一定的差异,所以导致二者结果不一致。不过从总体上来说,数值计算结果与实测结果还是比较接近的,也体现出了爆破震动速度的衰减规律,计算结果还是比较合理的,也就是说通过数值模拟可以得到一个总体的震动速度变化规律。

4 结 语

通过本文中的数值计算结果可以看出,数值计算方法在爆破震动速度计算中是可行而且非常有效的,特别是在不需要依赖以往震动测试数据的基础上就可以对爆破震动速度作出一个比较切合实际的估计结果,这一点对爆破设计和施工是非常有指导意义的,这是对现有爆破震动速度预测方法的一个有益的补充,同时也为该课题的研究提供了一条新的途径。

参考文献:

- [1] Malmgren L, Nordlund E. Behavior of shotcrete supported rock wedges subjected to blast-induced vibrations[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006,43:593-615.
- [2] WU Cheng-qing, LU Yong, HAO Hong. Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004,28:93-109.
- [3] MA Guo-wei, HAO Hong, ZHOU Ying-xin. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions [J]. *Engineering Structures*, 2000,22(10):1378-1389.
- [4] 沈蔚,徐全军,季茂荣,等. 中深孔爆破振动参数的 BP 神经网络预报[J]. *爆炸与冲击*,2002,22(4):353-357.
SHEN Wei, XU Quan-jun, JI Mao-rong, et al. Using BP artificial neural network to predict bench blast vibration parameters[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002,22(4):353-357.
- [5] WANG Zhong-qi, LU Yong. Numerical analysis on dynamic deformation mechanism of soils under blast loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003,23:705-714.
- [6] HAO Hong, MA Guo-wei, ZHOU Ying-xin. Numerical simulation of underground explosions[J]. *Fragblast: the International Journal of Blasting and Fragmentation*, 1998,2:383-395.
- [7] Dhakal R P, Pan T C. Response characteristics of structures subjected to blasting-induced ground motion[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003,28:813-828.
- [8] 尚晓江,苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [9] 陈士海,王明洋,钱七虎. 岩体中爆破破坏分区研究[J]. *爆破器材*,2004,33(3):33-36.
CHEN Shi-hai, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Study on distinction of blasting crack zones and time course of stress in rocks[J]. *Explosive Materials*, 2004,33(3):33-36.

Numerical calculation of ground vertical blasting vibration velocity

LIU Hong-yan^{1*}, WANG Xin-sheng²

(1. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China*)

Abstract: Aiming at the existing problem in blasting vibration velocity calculation, a calculation method by two steps is proposed, in which the shock pressure induced by explosion is first calculated in blasting near region, then the particle vibration velocity farther is calculated. The damping problem in dynamics calculation is discussed preliminarily. The vibration velocities of the different particles under the three different charge conditions with different intervals such as rock powder, water and air, are respectively calculated by means of the proposed method. The calculated ground vertical vibration velocity under the rock powder interval charge condition is maximum, that under the water interval charge condition is inferior and that under the air interval charge condition is minimum. Calculated results accord with the experimental results.

Key words: mechanics of explosion; vertical vibration velocity; multi-material ALE algorithm; interval charge; dynamic damping

* Corresponding author: LIU Hong-yan
E-mail address: lhyan1204@126.com
Telephone: 86-10-82322628