

文章编号: 1001-1455(2005)04-0335-06

爆炸地震波模拟研究^{*}

国胜兵¹, 潘越峰^{1,2}, 高培正¹, 王明洋², 钱七虎²

(1. 第二炮兵工程设计研究所, 北京 100011;

2. 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 基于能够描述爆炸地震波的非平稳随机过程模型进行爆炸地震波的模拟研究。基于爆炸地震能量守恒以及经验关系, 提出了能够考虑装药量和爆距影响的爆炸地震波功率谱密度和幅值包络线模型, 并且利用实测的爆炸试验数据, 对模型参数进行标定, 给出单点、两点(微差)和多点(微差)爆炸地震波实用模拟方法。结果表明模拟得到的爆炸地震波时程能够很好地再现爆炸地震波的一些特性。

关键词: 爆炸力学; 微差爆炸地震波; 非平稳随机过程; 爆炸; 数值模拟

中图分类号: O382

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

虽然爆炸地震波与天然地震波有相似之处, 但是还存在许多差异。相对于天然地震波来说, 爆炸地震波高频分量丰富、变化范围较大, 但持时一般较短、衰减较快且幅值高, 因此不能将两种荷载完全等同视之^[1]。图 1 为实测的单点爆炸、两点(微差)爆炸和多点(微差)爆炸所产生的爆炸地震波时程。

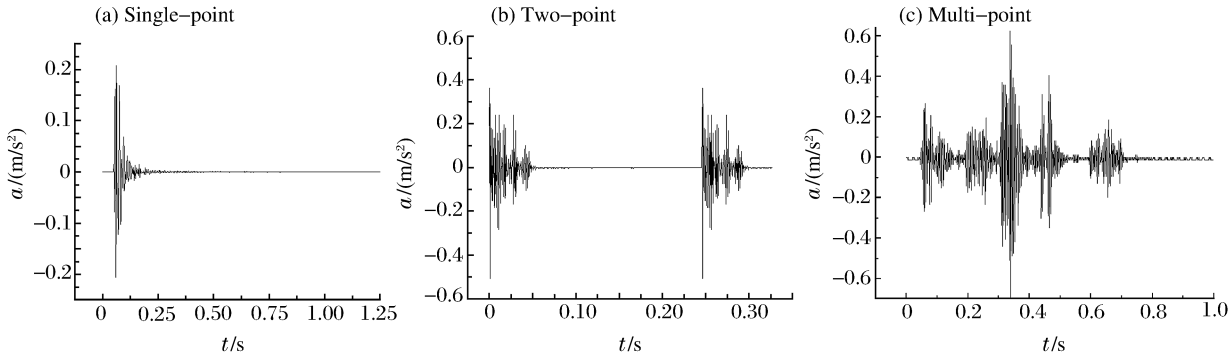


图 1 实测的爆炸地震波加速度时程

Fig. 1 History of acceleration of measured explosion seismic waves

由于建筑物拆除爆破、工业爆破事故等不断增多和对武器作用效应研究的不断深入, 人们开始重视爆炸地震波的产生、传播和作用效应的研究, 进行了不同种爆炸方式^[2]、不同荷载^[3]及不同埋深^[4]等因素对爆炸地震波传播的影响的理论和试验研究。所有这些都只是基于试验得到的地震动数据来分析和评估爆炸地震波的一些特性, 所做的研究比较初步、浅显。

研究表明, 爆炸地震动的振源具有强烈的随机性, 随机激励信号呈不规则变化, 因此在模拟爆炸波时可以采用随机分析方法。以前的研究仅基于描述天然地震引起的地震动的功率谱模型(如 Weirstrass-Mandelbrot 功率谱模型^[5]、Kanai-Tajimi 过滤白噪声模型^[6])来模拟爆炸地震波, 而天然地震动和爆炸地震动存在一定的差异, 因此上述两种模拟都存在一定的局限性。

本文中根据随机振动和爆炸力学理论, 基于非平稳随机过程模型, 提出能够考虑装药量和爆距影响的功率谱密度和幅值包络线模型, 从而给出单点、两点(微差)和多点(微差)爆炸地震波实用模拟方法和模拟结果。

^{*} 收稿日期: 2004-08-23; 修回日期: 2004-11-16

作者简介: 国胜兵(1975—), 男, 博士。

1 非平稳随机过程模型

根据随机振动的理论研究,非平稳随机过程可由下式来描述

$$A(t)=L(t)\varphi(t) \tag{1}$$

式中: $A(t)$ 为非平稳随机过程,这里代表爆炸地震波加速度时程; $L(t)$ 为调幅函数,是一确定性函数; $\varphi(t)$ 为一零均值平稳随机过程。

就自然地震动激励而言,幅值包络线函数 L 已经采用的数学模型就有指数函数、双指数函数、线性函数与指数或双指数函数的乘积、分段线性函数等^[7]。这些数学模型在自然地震模拟中已经得到了验证,但是能否直接应用到爆炸地震波的模拟中还有待进一步研究。林大超^[8]通过试验研究发现,在爆炸作用下给定点的爆炸振动加速度的幅值包络线函数满足指数形式的衰减关系,通过类比爆炸冲击波在岩石中传播规律随时间满足幂函数关系,给出了地震动峰值达到后幅值快速衰减的加速度包络函数

$$L(t)=L_0(t/t_0)^{-a}e^{-b(t-t_0)} \quad a>0,t>t_0 \tag{2}$$

式中: L_0 、 a 、 b 为待定常数, t 为时间, t_0 为延迟时间。式(2)并不能反映爆炸地震波到达峰值前的幅值增长规律。因此,曾德斌等^[9]将 M. Shinozuka 等^[10]得出的双指数包络函数通过改进应用于爆炸地震波的模拟

$$L(t)=L_0(e^{-b_1(t-t_0)}-e^{-b_2(t-t_0)}) \quad b_2>b_1>0,t>t_0 \tag{3}$$

式中: b_1 、 b_2 为给定的常数, t_0 为地震波到达时间, $t_0=r/c$, r 为观测点与爆炸中心的距离, c 为波速。对比式(2)和式(3)不难发现,对式(2)稍加改进,则其给出的幅值包络线函数也能反映峰值前的幅值增长规律。因此,将幅值包络线函数 L 定为贝拉盖冲量型近似^[11]

$$L(t)=CL_0(t-t_0)e^{-C(t-t_0)} \tag{4}$$

式中: C 、 L_0 为待定常数。

$\varphi(t)$ 为含隐周期的平稳高斯过程,且有相关函数

$$R(\tau)=2be^{-\frac{a}{\tau}}\left(\cos b\tau+\frac{a}{\omega_0}\sin b|\tau|\right) \tag{5}$$

和谱密度

$$S(\omega)=\frac{4}{\pi}\frac{ab\omega_0^2}{(\omega^2-\omega_0^2)^2+4a^2\omega^2}, \quad \omega_0^2=b^2+a^2 \tag{6}$$

式中: $\omega_0>0$,为特征频率; $a>0$,为相关参量(a^{-1} 为特征相关时间); b 为方差。

2 非平稳随机过程模型的修正

爆炸地震波不同于天然地震波,在不同距离处和不同炸药当量时,爆炸地震效应应该是不同的。因此在进行爆炸地震波的模拟时,应该考虑离爆心的距离和炸药当量的影响,也就是在构造幅值包络线函数和爆炸地震波谱密度时应考虑到距离和炸药当量的影响。地震动观测数据研究表明,影响地震动强度的主要因素是炸药当量、爆心距。因此,由经验关系可以得到下式^[12]

$$a_{\max}=m\bar{r}^{-n} \tag{7}$$

式中: $a_{\max}$ 为爆炸地震动最大加速度; $\bar{r}$ 为比距离,且 $\bar{r}=R/Q^{1/3}$, Q 为炸药当量, R 为爆心距; n 、 m 为待定常数。因此,将式(7)中的 $a_{\max}$ 替代式(4)中的 L_0 ,在幅值包络线函数中就可以考虑离爆心的距离和装药量的影响,这时,包络线函数就有如下形式

$$L(t)=m\bar{r}^{-n}te^{-C(t-t_0)} \tag{8}$$

同样,对式(3)进行替换有

$$L(t)=m\bar{r}^{-n}(e^{-b_1(t-t_0)}-e^{-b_2(t-t_0)}) \quad b_2>b_1>0,t>t_0 \tag{9}$$

林大超^[8]基于阻尼半空间爆炸点源加载模型在一定简化条件下得到了位移的频率响应函数,再结合爆炸加载函数的功率谱,推导出位移功率谱的形式解,进一步导出了加速度功率谱的理论分析公式

$$S(r,\omega)=\frac{S_0\omega^4}{r}\left(\omega e^{-k_s\omega^2r}+\frac{F_0}{(\omega^2-\omega_0^2)^2+4\xi_0^2\omega_0^2\omega^2}\right) \tag{10}$$

式中： S_0 、 k_s 和 F_0 为常数，由试验确定； r 为离爆心的距离； ξ_0 为阻尼系数。

由于上式右边括号内第二项不包括爆心距 r ，因此，类似于上式，结合式(6)有

$$S(r,\omega)=\frac{S_0\omega^5}{r}e^{-k_s\omega^2r}+\frac{4S_0F_0\omega^4}{\pi r}\frac{ab\omega_0^2}{(\omega^2-\omega_0^2)^2+4a^2\omega^2} \tag{11}$$

基于试验得到的经验关系，爆炸地震波震级和爆炸地震效应之间的关系为^[8,12]

$$\ln E=A_1+B_1M \tag{12}$$

式中： E 为地震波的总能量， A_1 和 B_1 均为常数， M 为表征地震强度的震级。

研究表明^[12]，震级 M 与装药量之间有如下关系

$$M=A_2+B_2\ln Q \tag{13}$$

式中： A_2 和 B_2 为常数， Q 为装药量。因此，综合式(12)和式(13)有

$$\ln E=A_1+B_1A_2+B_1B_2\ln Q=A+B\ln Q \tag{14}$$

式中： A 和 B 为常数。式(14)可换一种写法

$$E=e^AQ^B \tag{15}$$

基于功率谱来求能量，则有表达式

$$E=2\pi\int_{-\infty}^{+\infty}S(\omega)d\omega \tag{16}$$

由于频率 ω 不为负值，对于给定的爆心距 r ，将式(11)代入式(16)有

$$E=2\pi\int_0^{+\infty}\left(\frac{S_0\omega^5}{r}e^{-k_s\omega^2r}+\frac{4S_0F_0\omega^4}{\pi r}\frac{ab\omega_0^2}{(\omega^2-\omega_0^2)^2+4a^2\omega^2}\right)d\omega \tag{17}$$

即

$$E=S_0f_1(k_s)+bS_0F_0f_2(a,\omega_0) \tag{18}$$

式中： $f_1(k_s)$ 为 k_s 确定性函数，由于 k_s 是常数，所以有 $S_0f_1(k_s)=K$ ； $f_2(a,\omega_0)$ 为 a 和 ω_0 的确定性函数。联系式(18)和式(15)，有

$$E=e^AQ^B=S_0f_1(k_s)+bS_0F_0f_2(a,\omega_0) \tag{19}$$

因此

$$bS_0F_0f_2(a,\omega_0)=e^AQ^B-K \tag{20}$$

由于式(20)中 a 和 ω_0 分别为相关参量(且 a^{-1} 为特征相关时间)和特征频率，且有

$$\omega_0^2=b^2+a^2 \tag{21}$$

则式(20)可改写成

$$g(a,b)=e^AQ^B-K \tag{22}$$

式中： $g(a,b)$ 为 a 、 b 确定性函数。

从上面的分析可知，从能量的角度来看，装药量 Q 与谱密度中 a 、 b 参数存在确定性关系，但由于参数 a 和 b 之间不存在唯一的对应关系，所以式(22)不能导出 Q 与 a 或 Q 与 b 之间的唯一关系，通过试验确定 a 或 b 的值以后就可以基于式(22)导出装药量对谱密度的影响的关系式。

因此，基于幅值包络线函数(式(8)或(9))和谱密度函数(式(11))就可以模拟能够考虑装药量和爆距影响的爆炸地震波时程。

3 爆炸地震动时程模拟

按前面所提出的爆炸地震波修正的非平稳随机过程模型的方法，进行爆炸地震波的模拟，幅值包络线函数按式(8)选取，谱密度函数按式(22)选取。根据文献[8,13]的试验结果，就可以确定本次模拟所需的参数： $m=448.53$ ， $n=2.03$ ， $C=665.4$ ， $\omega_0=100$ ， $a=60$ ， $b=80$ ， $S_0=7.5\times10^{-8}$ ， $k_s=4.35\times10^{-5}$ ， $F_0=9.1\times10^{-6}$ 。距离 $r=10,20,30$ m；相应地 $t_0=0.01,0.02,0.03$ s。装药量 $Q=30$ kg。

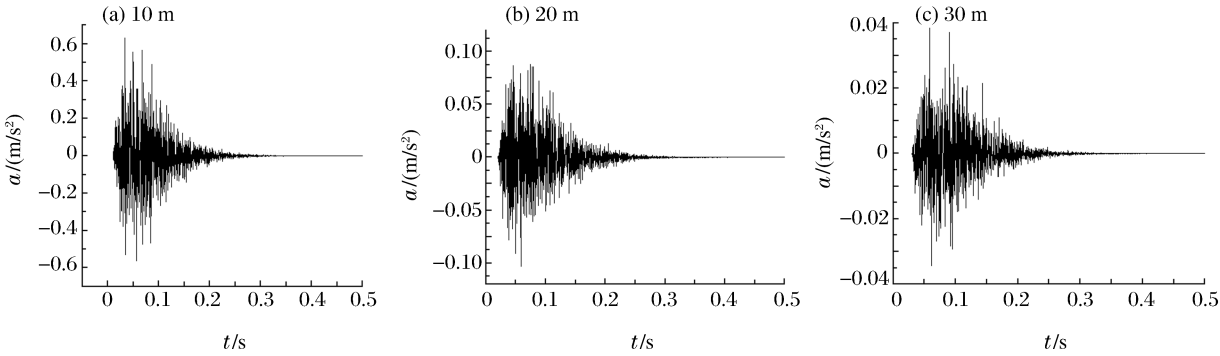


图 2 模拟得到的爆炸地震动加速度时程

Fig. 2 History of acceleration of simulated explosion seismic waves

利用 MatLab 软件编制了该模型的计算程序。图 2 为装药量为 30 kg 时不同距离(10,20,30 m)的爆炸地震动时程的数值模拟结果。从模拟结果来看,不同距离处爆炸地震动的频率和幅值都有所不同,说明爆炸地震动时程会随离爆心距离的不同而存在差异。

图 3 为基于式(22)计算得到的模拟结果与图 1(a)进行傅立叶变换得到的试验结果的比较。从图中可以看到,试验结果与数值模拟结果吻合较好。

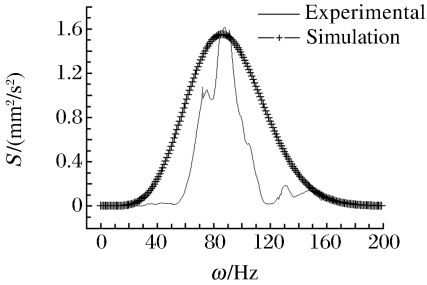


图 3 爆炸地震动功率谱

Fig. 3 Explosion seismic power spectra

4 两点(微差)爆炸地震动模拟

从前面的模拟效果来看,幅值包络线函数(式(4))能够很好地模拟爆炸地震波的峰值的上升以及随后的衰减特性。因此,在模拟微差爆炸地震动时程时,仍然采用式(4)的形式,但是有必要进行改进。从微差爆炸所产生的爆炸地震波实测时程的波形来看(见图 1(b)),微差爆炸地震波主要是由 2 段单点爆炸地震波组成,最大特点是在时间上有微差。因此,改进的幅值包络线函数中采用分段描述各个点爆炸产生的地震波,有

$$L(t)=\begin{cases}0 & t\leqslant t_0 \\ C_1L_1(t-t_0)e^{-C_1(t-t_0)} & t_0<t\leqslant t_1 \\ C_2L_2(t-t_1)e^{-C_2(t-t_1)} & t_1<t\leqslant t_2 \\ 0 & t>t_2\end{cases}$$

(23)

式中: t_0 为地震波到达该处的时间, t_1 、 t_2 分别为第 1 段、第 2 段地震波持续的时间点。 C_1 、 C_2 、 L_1 、 L_2 为待定常数。

下面进行微差爆炸地震动时程的模拟,幅值包络线函数按式(23)选取,谱密度仍然按式(6)选取。参照前两节的参数取值,本节模拟时,参数 $C_1=C_2=665.4$, $L_1=L_2=45.8$, $t_0=0.1\text{ s}$, $t_1=0.45\text{ s}$, $t_2=1.0\text{ s}$ 。模拟结果见图 4。由模拟结果,与两点微差爆炸的实测地震动时程曲线(见图 1(b))进行对比可以发现,模拟的爆炸地震波时程与实测结果在定性上吻合较好。由于缺乏必要的试验数据来精确地确定模型参数,因此模拟结果不能在定量上与实测数据吻合得更好。但模拟结果与实测数据非常相似,从而可以看出基于本节提出的模型和模拟方法可以很好地模拟两点微差爆炸产生的地震波。

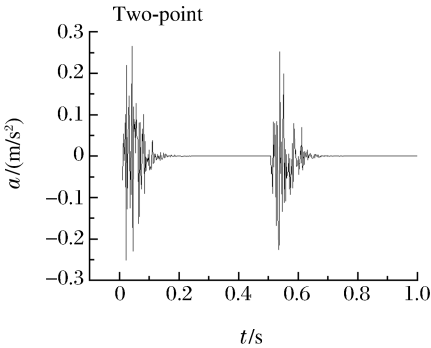


图 4 模拟得到的爆炸地震动加速度时程

Fig. 4 History of acceleration of simulated explosion seismic waves

5 多点(微差)爆炸地震动模拟

类似于前面模拟两点(微差)爆炸地震动时程的方法,进一步改进幅值包络线函数,以期能够很好应用于多点爆炸的模拟问题。同样,将多个装药爆炸产生的地震波分段描述,每段采用同一个函数模型,但是利用参数的差异来描述不同装药的影响。因此改进的幅值包络线函数有

$$L(t)=\begin{cases}0 & t\leqslant t_0 \\ C_1L_1(t-t_0)e^{-C_1(t-t_0)} & t_0< t\leqslant t_1 \\ C_2L_2(t-t_1)e^{-C_2(t-t_1)} & t_1< t\leqslant t_2 \\ \vdots & \vdots \\ C_nL_n(t-t_{n-1})e^{-C_n(t-t_{n-1})} & t_{n-1}< t\leqslant t_n \\ 0 & t> t_n\end{cases}\tag{24}$$

式中: $C_1、C_2、\cdots、C_n$ 和 $L_1、L_2、\cdots、L_n$ 依次为第 1 段、第 2 段、 $\cdots$ 、第 n 段装药产生的地震波幅值包络线函数的参数,为待定常数。 t_0 为地震波到达该处的时间, $t_1、t_2、\cdots、t_n$ 为第 1 段、第 2 段、 $\cdots$ 、第 n 段地震波持续的时间点。

下面进行多点(微差)爆炸地震动时程的模拟,幅值包络线函数按式(24)选取,谱密度仍然按式(6)选取。模拟 5 个点爆炸所产生的地震动时程。参照前三节的参数取值,本节模拟时,参数 $C_1=C_2=\cdots=C_5=665.4, L_1=27.5, L_2=45.8, L_3=68.7, L_4=36.6, L_5=50.4, t_0=0.1\text{ s}, t_1=0.2\text{ s}, t_2=0.25\text{ s}, t_3=0.31\text{ s}, t_4=0.4\text{ s}, t_5=0.6\text{ s}$ 。模拟结果见图 5。由模拟结果,并且与多点微差爆炸的实测地震动时程曲线(见图 1(c))进行对比可以发现,模拟的爆炸地震波时程与实测结果在定性上符合较好。事实上多点爆炸产生的后效应非常复杂,这就使模型中的一些参数在试验时不易得到,因此模拟结果未能与实测数据在定量上一致。

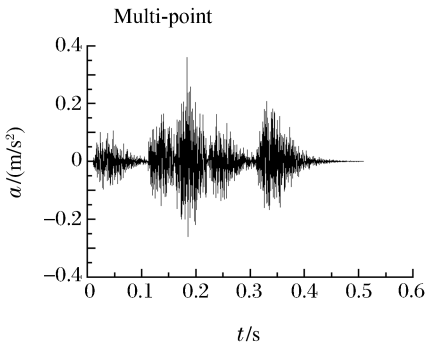


图 5 模拟得到的爆炸地震动加速度时程
Fig. 5 History of acceleration of simulated explosion seismic waves

6 结 语

基于能量法,对一般的爆炸地震波功率谱密度函数和幅值包络线函数模型进行了改进,在功率谱密度函数中考虑了与爆距的影响,在幅值包络线函数中不但考虑了爆距的影响,而且还考虑了装药量的影响,最后进行了合成模拟。模拟结果表明,上述模型和模拟方法是可行的、合理的,能在一定程度上再现爆炸地震波的一些特性。

还提出模拟两点(微差)爆炸和多点(微差)爆炸产生的地震动时程的非平稳随机过程模型,基于该模型进行了数值模拟。模拟结果表明基于本文中提出的模型能够很好地描述两点(微差)爆炸和多点(微差)爆炸产生的爆炸地震波时程特性。

参考文献：

[1] 钮强. 岩石爆破机理[M]. 沈阳: 东北工业出版社, 1990: 135—137.
[2] 林大超, 白春华, 张奇. 爆炸地震地面竖向振动的幅值特性[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(2): 173—176.
LIN Da-chao, BAI Chun-hua, ZHANG Qi. Amplitude characteristics of vertical ground surface vibration caused by explosion seism[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(2): 173—176.
[3] Kim Dong-soo, Lee Jin-sun. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(3): 115—126.
[4] Negmatullave S K H, Todorovska M I, Trifunac M D. Simulation of strong earthquake motion by explosion-exper-

- iments at the Lyaur testing range in Tajikistan[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1999,18(3):189—207.
- [5] LIN Da-chao, BAI Chun-hua, ZHANG Qi, et al. Characterization method of explosion seismic wave[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000,9(3):249—254.
- [6] 曾德斌,林大超,熊祖钊,等. 单自由度系统的爆炸地震演变响应[J]. *爆炸与冲击*, 2002,22(1):46—51.
ZENG De-bin, LIN Da-chao, XIONG Zu-zhao, et al. Nonstationary random response of SDOF system to evolutionary random explosion seismic excitation[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002,22(1):46—51.
- [7] Nigam N C, Narayanan S. *Applications of Random Vibration*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994:234—245.
- [8] 林大超. 爆炸地震波传播规律及其毁伤效应[D]. 北京:北京理工大学, 2001.
- [9] 曾德斌,林大超,白春华,等. 爆炸地震加速度幅值的包络函数模型[J]. *工程爆破*, 2001,7(3):1—4.
ZENG De-bin, LIN Da-chao, Bai Chun-hua, et al. Envelope function model of ground acceleration amplitude of explosion seism[J]. *Engineering Blasting*, 2001,7(3):1—4.
- [10] Shinozuka M, Sato Y. Simulation of non-stationary random process[J]. *Journal of Engineering Mechanics Division, Proc of ASCE*, 1967,93(EM4):11—40.
- [11] (苏)柯略列夫斯基 B A. 民防掩蔽部-结构与计算[M]. 工程兵工程学院, 译. 南京:工程兵工程学院, 1993:34—44.
- [12] 张雪亮, 黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981:105—110.
- [13] 黄忆龙. 爆炸地震波震源特性的理论研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京校区), 2000.

Numerical simulation of explosion seismic waves

GUO Sheng-bing^{1*}, PAN Yue-feng^{1,2}, GAO Pei-zheng¹,
WANG Ming-yang², QIAN Qi-hu²

(1. *Engineering Design and Research Institute of Second Artillery, Beijing 100011, China;*

2. *Engineering Institute of PLA University of Science and Technology,
Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

Abstract: Explosion seismic waves are numerically studied with a non-stationary random process model. Based on energy conservation and experiential relation, an envelope function of acceleration amplitude and power density of explosion seismic waves is proposed, in which the effects of distance and mass of explosive are considered. The model parameters are determined by using the measured data. A practical simulation method of single-point, two-point (little-difference) and multi-point (little-difference) explosion seismic waves is also presented. Numerical simulation results show that the simulated history of explosion seismic waves can well reproduce some characteristics of explosion seismic waves.

Key words: mechanics of explosion; little-difference explosion seismic waves; non-stationary random process; blast; numerical simulation

* Corresponding author: GUO Sheng-bing
E-mail address: xiangyanxia@126.com
Telephone: 010-65339527