DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0899-07

小当量地下爆炸的质点速度模型*

李学政,王敏超
(西北核技术研究所,陕西 西安 710024)

摘要:在第四纪砂砾层中进行了系列公斤至百公斤级的地下封闭爆炸,研究了小当量化学爆炸地震波传播规律。在近场,地震波持时很短,水平振幅强于垂向振幅。质点速度随当量呈现指数增加,水平向指数为 1.09,垂直向指数为 0.77,质点速度随距离呈现指数衰减,水平向和垂直向指数分别为 2.07 与 1.57。Sadauskas 模型、显函模型和双极模型都能定量描述小当量地下爆炸地震波质点速度变化,但他们之间的反演精度存在差异,双极模型的残差最小。换言之,采用双极模型反演的数据更接近实际。

关键词:双极模型;地下爆炸;第四纪砂砾层;地震波质点速度
中图分类号:O382.1 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

地下爆炸广泛应用于工业、农业和国防等领域。因此,有关地下介质的爆破破碎机理、爆炸波数值模拟、地震波传播特征和地震效应等,已经进行了大量研究[1-10]。尤其是地下爆炸发生的地震效应,虽然爆炸地震和天然地震的形成机理存在很大差别,但是他们都激发地震波,引起地震动,对地表和人类工程建筑物造成破坏,在某种程度上,破坏效果是类似的。而造成地震破坏效应的强弱主要取决于爆炸激发的地震波引起的地介质质点运动参数大小。因此,有关地下爆炸引起的地震波传播规律、介质质点运动参数计算方法,一直备受关注。

本文中,基于第四纪砂砾层中小当量(即当量在公斤级至百公斤级范围)的封闭爆炸的观测资料,针对波形中优势横波进行分析处理,分析爆炸地震波水平与垂向质点速度随当量和距离变化,并对几种模型在描述观测数据方面的残差进行分析对比,确定描述第四纪砂砾层介质的地震波质点运动速度模型。

1 数学模型

介质的质点运动参数与爆炸当量、方式、源区介质和观测距离等众多因素有关。一般地,爆炸当量越大,激发的地震波就越强,爆炸封闭越好,爆炸能量耦合到介质中能量越高。爆炸能量耦合到介质中的比例(即能量耦合系数)主要和爆炸方式及爆炸所处的介质等因素有关。学者建立数学模型时,对地下封闭爆炸和抛洒爆炸、岩石与土层分别研究,从而大大简化了模型,使数学模型更有实用性[5]。归结起来,现有模型主要有以下几种。

(1)Sadauskas 模型。Sadauskas 模型[5]的地下爆炸质点速度为:

$$v=K\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:质点速度 v 的单位为 cm/s,当量 W 的单位为 kg,距离 R 的单位为 m。对于岩石,$K=50$,对于土壤,$K=200$,$\alpha=1\sim2$。

(2)显函模型。谢毓寿等[10]基于炸药量为 0.05~2.0 kg TNT、距离在 35~404 m 范围内的数据,确定了振动质点速度为:

$$\lg v=K_0+\alpha\lg W+\beta\lg R$$

上式可改写为:

* **收稿日期**:2016-01-25;**修回日期**:2016-11-06
第一作者:李学政(1957—),男,博士,高级工程师,lixuzh@163.com。

$$v = K\frac{W^{\alpha}}{R^{\beta}} \tag{2}$$

式中：$K=10^{K_0}$，对于坚硬岩石，$K_0=2.2\sim2.6$，$\alpha=0.60$，$\beta=1.80$。

双极模型。用 Sadauskas 模型参数计算时，先计算比例距离，并且规定恒定的指数。而用显函模型计算 α、β 时，要基于较多样本参量，且需要各次爆炸空间位置不变等条件，否则将带来一定数据误差。为解决这个问题，双极模型[6]被提了出来。该模型在计算模型参数时不同于传统的上述两个模型计算方法，而是在一定当量指数变化区间内，查找最合适参数，使模型预测数据和实测数据具有更高的一致性。质点速度为：

$$v = K\left(\frac{W^{\alpha}}{R}\right)^{\beta} \tag{3}$$

式中：对于黄土层，K 为 0.40，α 为 2.0，β 为 2.3。

2 实验与检测

2.1 场地介质

野外爆炸实验场地相当开阔，地形没有明显起伏，地面十分平坦。整个场地未见坚硬基岩，出露的地层为第四纪冲积层，为砂砾石混合体，砾石大小不一，多数砾石呈现长椭球和不规则形状，具有较低的磨圆度和筛选度。在地表以下至 6 m 之间，砂砾层中含砂比例较高，6 m 以下直至 20 m 深处，砂砾层中含砂比例明显降低。实验场地构造相对简单，未发育大的断裂构造。砂砾石混合体结构十分松散，地表仅被一些植物稀疏覆盖，宏观上为一片植被不甚发育的荒漠区域。

2.2 检测仪器与布设

所用的检测地震波仪器是短周期型 LE-3Dlite，机电换能灵敏度为 400V/(m·s^{-1})，检波器噪声很低，能够检测 1～80 Hz 范围内的振动信号。该地震检波仪器为三分向组合体，可以在三维方向检测地震波质点振动幅值。

地表出露的为第四纪砂砾层，地势比较平坦。在爆炸点周围不同方向，距离在 0.5～5 km 范围内，布设了十几个地震波检测点，爆炸源与检测点分布如图 1 所示。

系列爆炸源主要为 20、100 和 300 kg 的 TNT 炸药，从地表向下开挖约 20 m 深井，将炸药放在井底部，然后用挖出来的砂砾石进行回填，增强爆炸能量耦合，提高弹性能在爆炸能量中的比例。

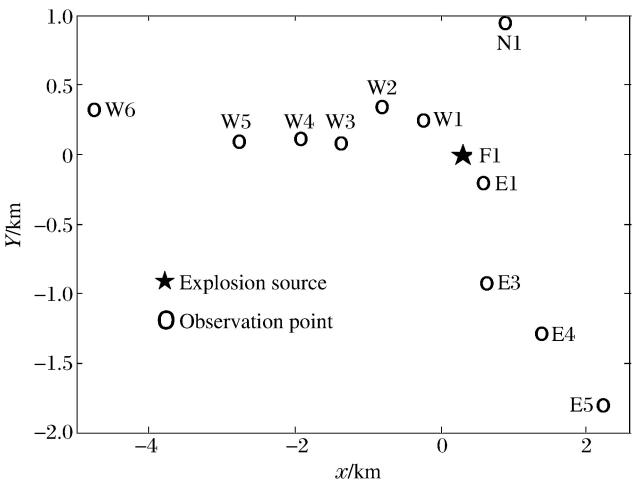

图 1 爆炸源与检测点分布

Fig. 1 Layout of explosion sources and observation points

3 测量结果

3.1 测量概况

为确定本底噪声，在 E1 台站记录信号前截取了 20s 的数据。其本底波形比较稳定，振幅大约为 0.5 μm/s，傅立叶振幅从低频到高频渐渐降低，最大傅立叶振幅为零频极限值，优势频带主要限制在 3 Hz以下。针对这次实验布设十几个观测点，均记录到了良好的数据。地震波形持时很短，仅为数秒钟，两个水平方向的地震波形，在振动幅值大小、包络线形态和波形持时方面具有较好的一致性，而垂向和水平向波形在上述几方面明显不同，波形振幅远强于水平向振幅。随着距离增大，波形复杂性明显增加，如图 2 所示。

3.2　质点运动速度

实验所用的 LE-3Dlite 地震计，能够测量东西、南北和垂向 3 个方向的地运动数据，通过灵敏度换算，可以直接得出地运动质点速度 v_e、v_n、v_v。表 1 为爆炸当量为 300 kg 爆炸实验部分观测点质点速度。根据表 1，质点水平速度 v_e 与南北速度 v_n 互有大小，v_{en} 为水平均值，均大于垂直速度。统计上 v_e 大于 v_n，垂向 v_v 小于任意水平上幅值。数据表明，爆炸激发的地震波，水平上振幅强于垂向振幅。

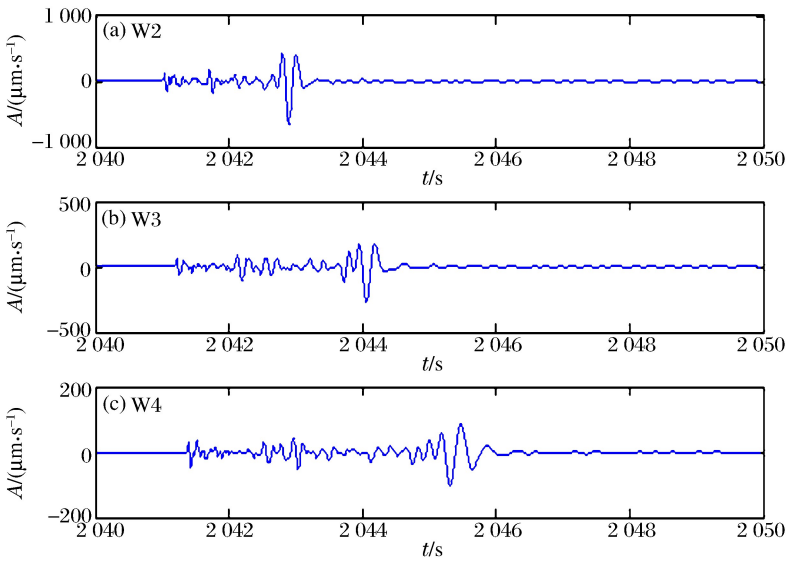

图 2　地震波形

Fig. 2　Seismic waveforms from observation points

表 1　300 kg 实验部分观测点质点速度

Table 1　Partial observation data of 300 kg explosion

台站	R/km	v_e/(μm·s^{-1})	v_n/(μm·s^{-1})	v_v/(μm·s^{-1})	v_{en}/(μm·s^{-1})
W2	1.038 0	288.00	619.29	179.55	453.65
W3	1.599 3	126.17	119.70	99.95	122.94
W4	2.144 7	170.35	92.06	51.20	131.20
W5	2.980 6	49.70	33.14	31.43	41.42
W6	4.967 7	13.10	8.73	4.77	10.92
E1	0.521 6	1 172.70	1 227.42	361.80	1 200.10
E3	1.151 8	221.67	122.48	96.97	172.08
E4	1.844 2	61.54	141.97	48.56	101.75

4　模型确定

4.1　Sadauskas 模型

根据式(1)，基于一系列小当量地下爆炸不同观测点的距离和相应地表质点速度，先计算各观测点的数据 $\sqrt[3]{W}/R$，然后，采用最小二乘法，进行回归计算。本文中对水平向质点速度 v_h 和垂直向质点速度 v_v 进行处理和回归，计算结果显示：水平向的线性相关因子 0.960，残差 0.245，模型中 α 为 2.37，K 为 3.81；垂向的线性相关因子 0.938，残差 0.297，模型中 α 为 2.26，K 为 2.28。拟合曲线如图 3 所示，于是 Sadauskas 模型为：

$$\begin{cases} v_h = 3.81\left(\dfrac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{2.37} \\ v_v = 2.28\left(\dfrac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{2.26} \end{cases} \tag{4}$$

根据上述回归参数，水平向质点速度相对于垂向质点速度，随 $\sqrt[3]{W}/R$ 增长比垂直向快，二者的线性相关性更强。

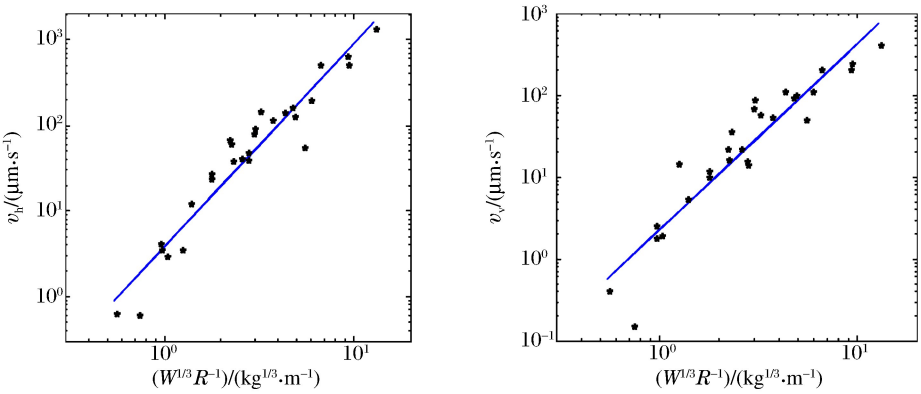

图 3 质点速度拟合曲线

Fig. 3 Relation between particle velocity and observation distances

4.2 显函模型

式(2)是距离 R、W 的二元函数，该式反映了地介质质点速度随距离增加而衰减、随当量增长而增长的关系，随距离的衰减指数可以通过一次实验不同距离的检测点速度计算确定，而随当量的指数可以通过同一观测点不同当量的实验数据得出。由于地下介质的复杂性，存在介质能量吸收和球面扩散作用，地震波在传播过程中，能量逐渐消耗，地震波幅值随着距离增加发生衰减，不同介质中衰减指数是不同的。本文中采用最小二乘法，对地震波的水平和垂直数据进行了回归计算，其计算结果如图 4 所示。

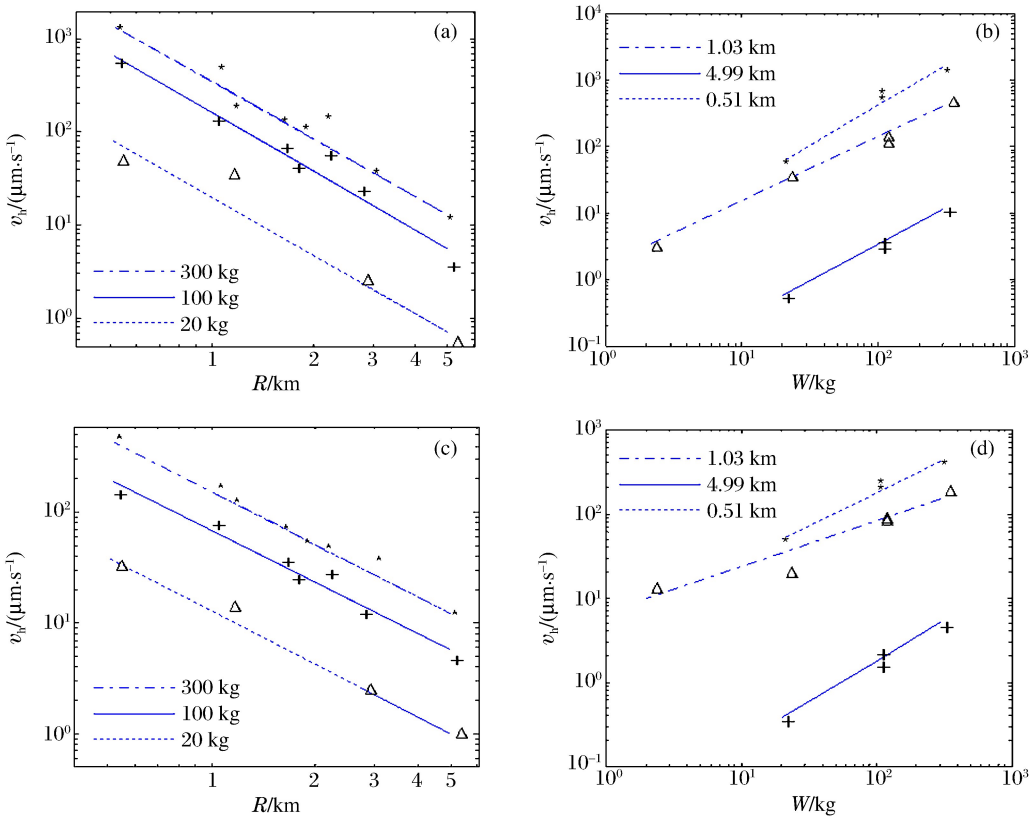

图 4 质点速度与当量、距离的拟合曲线

Fig. 4 Relation between particle velocities and yields distances

图 4(a)为质点水平速度与距离的拟合曲线。图中 3 种不同当量爆炸的拟合曲线大致是平行的，距离指数为－2.07，相关系数为 0.97。图 4(c)为质点垂直速度与距离拟合曲线，距离指数为－1.57，相关

系数为 0.99。二者相比，质点垂直速度相比于水平速度，与距离的相关性更强。图 4(b)为质点水平速度与当量拟和曲线。图为 20～300 的 4 次爆炸，在 0.51、1.03 和 4.99 km 的距离测点上的数据拟和曲线，这几条曲线大致是平行，但存在一定差别，当量指数约为 1.09，相关系数为 0.99。图 4(d)为质点垂直速度与当量拟合曲线，当量指数为 0.77，相关系数为 0.97。于是显函模型为：

$$\begin{cases} v_{\mathrm{h}} = 1.79 W^{1.09} R^{-2.07} \\ v_{\mathrm{v}} = 2.82 W^{0.77} R^{-1.57} \end{cases} \tag{5}$$

4.3　双极模型

由于爆炸激发的质点振动参数和爆炸当量正相关，随着当量增大而增大，且呈显出指数增长关系。双极模型参数测定完全不同于传统的 Sadauskas 模型和显函模型模型测定方法，采用区间寻优方法，确定最佳的当量指数[4]。具体计算时，首先，给定一个当量指数，计算与距离的比值，利用最小二乘法进行回归计算，得出模型参数，采用模型反演质点速度数据，并和实测数据进行对比，确定实测和反演数据之间的残差值。然后，用一定的步长，选择下一个当量指数，计算残差，步长越小，计算的结果越细致，但计算量也越大。将选定的区间内所有点计算完毕，从所有计算残差列表中选取最小残差所对应的参数，即为速度模型参数。本文中在 1.0 至 2.5 之间采用 0.05 步长进行计算，部分计算结果见表 2，如图 5 所示。α、β、b、γ 和 σ 分别表示当量开方次数、比例距离指数、回归截距、相关系数和残差。

根据表 2，水平向在当量指数 1.7 至 2.0 区间内，反演与实测数据之间的残差，从开始的逐渐减小，到 2.0 时达到极小值，为 0.172，从 2.0 到 2.6 之间又逐渐回升增大。整个曲线为凹向上形态，如图 5(a)所示 。而相关系数在在 2.0 达到极大值，相关性最强。垂直向在当量指数 2.4 时，同时达到残差最小和相关系数最大。残差变化如图 5(b)所示。图 5(c)～(d)为水平与垂直向质点速度拟合曲线。双极模型为：

$$\begin{cases} v_{\mathrm{h}} = 1.11 \left(\dfrac{W^{1/2.0}}{R} \right)^{2.07} \\ v_{\mathrm{v}} = 1.21 \left(\dfrac{W^{1/2.40}}{R} \right)^{2.11} \end{cases} \tag{6}$$

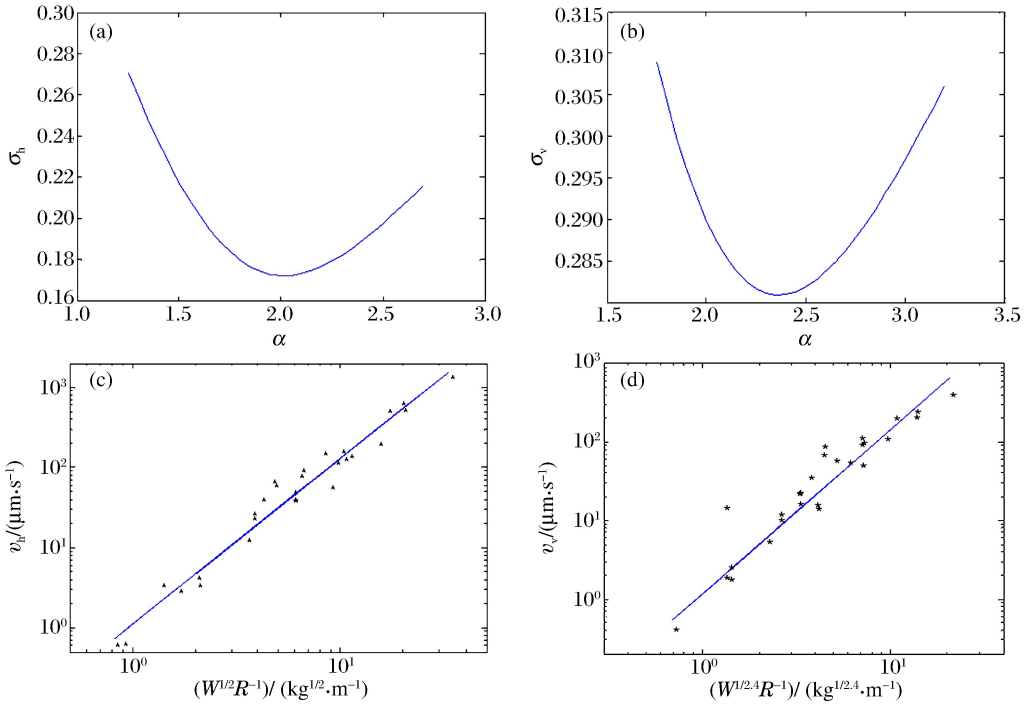

图 5　双极模型质点速度残差与距离曲线

Fig. 5　Curves on particle velocities and remains from double extreme model

表 2 双极模型部分计算数据

Table 2 Partial calculating data from double extreme model

α	β_h	b_h	γ_h	σ_h	β_v	b_v	γ_v	σ_v
1.70	1.891 4	0.141 0	0.976 4	0.188 7	1.760 8	−0.289 8	0.930 0	0.314 2
1.80	1.957 6	0.078 7	0.978 7	0.179 6	1.827 1	−0.235 7	0.934 5	0.304 1
1.90	2.017 4	−0.016 3	0.980 0	0.174 1	1.887 5	−0.181 2	0.938 1	0.296 1
2.00	2.071 2	0.045 6	0.980 5	0.172 0	1.942 4	−0.126 6	0.940 7	0.289 9
2.10	2.119 4	0.106 5	0.980 2	0.173 0	1.992 1	−0.072 6	0.942 6	0.285 4
2.20	2.162 6	0.166 2	0.979 4	0.176 5	2.036 9	−0.019 3	0.943 8	0.282 5
2.30	2.201 1	0.224 3	0.978 1	0.182 1	2.077 3	0.033 0	0.944 3	0.281 1
2.40	2.235 3	0.280 8	0.976 3	0.189 2	2.113 5	0.084 0	0.944 4	0.280 9
2.50	2.265 6	0.335 6	0.974 2	0.197 4	2.146 1	0.133 6	0.944 1	0.281 8
2.60	2.292 4	0.388 4	0.971 7	0.206 4	2.175 2	0.181 8	0.943 3	0.283 6

5 模型分析

Sadauskas 模型中，质点水平向与垂向速度随 $\sqrt[3]{W}/R$ 变化的指数分别为 2.37 和 2.28，相关系数分别为 0.960 和 0.938。数据表明，质点速度和 $\sqrt[3]{W}/R$ 相关性是比较强的。

显函模型中，采用固定系列爆炸位置，确定质点速度随当量增大指数。事实上，爆炸位置尽管变化不大，但每次的地下爆炸不能完全重复，各爆炸位置之间依然有数十米的距离。严格来讲，位置不变，工程上是难以实现。因此当量指数测定存在一定误差。水平质点速度的当量指数具有一定分散性，均值为 1.09、20～300 kg 的质点速度随距离的衰减指数，一致性比较好，均值为−2.07。垂直向质点速度的当量指数为 0.77、20～300 kg 的质点速度随距离的衰减指数在−1.55 至−1.58 之间，均值为 1.57。距离衰减指数相对于当量增长指数，精度要高得多。

双极模型中，水平与垂直向质点速度当量的指数分别是 1/2.0 和 1/2.4，其残差分别 0.172 和 0.280。而 Sadauskas 模型的水平与垂直向速度的残差分别为 0.245 和 0.297，显函模型的水平与垂直向速度的残差分别为 0.171 和 0.300。双极模型与 Sadauskas 模型和显函模型相比，在反演或预测质点速度参数方面，更加接近实际数据。

6 结 论

在第四纪砂砾介质中进行了公斤至百公斤级系列地下封闭爆炸，通过对 0.5～5.0 km 范围地震波测量和数据分析，得出如下结论。

地震波水平振幅强于垂向振幅，质点速度随当量呈现指数增加，水平指数为 1.09，垂直指数为 0.77，质点速度随距离呈现指数衰减，水平指数为 2.07，垂直指数为 1.57。Sadauskas 模型、显函模型和双极模型都能够描述小当量地下爆炸地震波质点速度。反演计算结果显示，双极模型的残差最小，显函模型次之，Sadauskas 模型最大。换言之，采用双极模型反演的数据更加接近实际。

参考文献：

[1] 刘爱文，俞言祥，付长华，等. 50 t 科学爆破振动的衰减特征及地形效应[J]. 爆炸与冲击，2010，30(1)：21-26.
Liu Aiwei, Yu Yanxiang, Fu Changhua, et al. Attenuation characteristics and topographic effect of a scientif ic explosion with 50 t explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 21-26.

[2] 赵爱华，郭永霞，孙为国，等. 华北地区矿山爆破活动的时空特征[J]. 地球物理学进展，2012，27(3)：917-923.
Zhao Aihua, Guo Yongxia, Sun Weiguo, et al. Spatio-temporal characteristics of mine blast activity in North China [J]. Progress in Geophys, 2012, 27(3): 917-923.

[3] 崔汝国，王尚旭，宁鹏鹏，等. 炸药震源在济阳坳陷粘土介质中的激发理论初探[J]. 石油物探，2009，48(6)：601-610.

Cui Ruguo, Wang Shangxu, Ning Pengpeng, et al. Preliminary discussion on shooting theory for dynamite in clay medium of Jiyang[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009,48(6):601-610.

[4] 陈亚娟，王利. 土介质中 TNT 炸药爆炸波传播特性的数值模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版)，2010，29(1)：88-91.
Chen Yajuan, Wang Li. Numerical study on the propagation and damage behavior of the blasing wave with TNT in soil medium[J]. Journal of Henan Polytechnic University (National Science), 2010,29(1):88-91.

[5] 张雪亮，黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京：地震出版社，1981.

[6] 李学政，张诚邃，刘文学. 封闭爆炸近场地震纵波及横波质点速度模型[J]. 爆炸与冲击，2011，31(2)：196-203.
Li Xuezheng, Zhang Chengliu, Liu Wenxue. Particle velocity models of longitudinal and transversal waves in the near field of sealed explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(2):196-203.

[7] 林大超，张奇，白春华. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击，2003，23(1)：32-36.
Lin Dachao, Zhang Qi, Bai Chunhua. Time frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):31-36.

[8] Bache C T. Estimating yield of underground nuclear explosion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982,72(6):131-168.

[9] Khalturin V I, Rautian T G, Richards P G. The Seismic signal strength of chemical explosions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998,88(6):1511-1524.

[10] 谢毓寿，王耀文. 工业爆破的地震效应[J]. 地球物理学报，1962，11(2)：154-161.
Xie Yushow, Wang Yaowen. Seismic effect of construction blasting[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1962,11(2):154-163.

Particle velocity models on small yields underground explosions

Li Xuezheng, Wang Minchao

(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: A series of underground explosions whose yield is confined at a limited level ranging from a few kilograms to a hundred were carried out in the Quaternary Period hardpan. The law of seismic wave propagation on small yield chemical explosion was investigated in the experiments. The results show that the duration of the seismic waves were shorter in the near field, the horizontal vibration amplitudes was stronger than the perpendicular ones, and the particle velocity increases exponentially with the increase of the yield. An index in the horizontal direction was approximately 1.09, while that in the perpendicular direction was approximately 0.77. The particle velocity exponentially decreases with the increases of the distance. The attenuating index in the horizontal direction is 2.07 and that in the vertical direction is 1.57. It is shown that the Sadauskas model, the obvious model, and the double extreme model can all quantitatively describe the seismic particle velocity on small yield underground explosions but they differ in the inverse precision of the parameters. Here, the difference in the residual of the double extreme model is the least. In other words, the parameters inversed by using the double extreme model are closest to the data actually observed.

Keywords: double extreme model; underground explosion; Quaternary Period hardpan; seismic particle velocity

(责任编辑　丁　峰)