文章编号:1000-5773(2013)06-0872-05

含铝炸药震源激发地震波的数值模拟*

曾一鑫,白春华,陈　健,王仲琦

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京　100081)

摘要:为了研究含铝炸药震源激发地震波能量的传播规律,对药量为0.7 kg含铝炸药在埋深1 m的砂土介质中进行爆炸实验,并基于AutoDyn商业软件引入高能炸药的Miller能量释放模型,对含铝炸药震源在土中的爆炸过程进行数值计算。模拟研究表明,地表垂向振动速度历程的模拟结果与实验结果吻合较好,说明JWL-Miller能量释放模型能较好地反映含铝炸药在土中的爆轰过程。模拟研究还表明,震源激发的下传地震波能量密度随深度的增加呈指数衰减规律,含铝炸药激发的下传地震波总能量为等药量TNT的1.34倍。

关键词:震源;Miller模型;地表垂向振动;下传地震波能量

中图分类号:O389;P315.8　　**文献标识码**:A

1　引　言

炸药震源已广泛应用于石油勘探领域,随着探勘技术的提高和不同地区岩土介质的变化,对于炸药震源的要求也越来越高。下传地震波能量是指传入深层土壤介质中的地震波能量,是评价炸药震源的重要指标。下传地震波能量越高,对于地震勘探工作越有利。研制新型高下传地震波能量的炸药震源及结构有着重要的意义。炸药中混入铝粉是提高炸药能量的有效途径,含铝炸药在水下爆炸能量输出结构[1-3]等问题已经有了大量的研究工作。辛春亮等[4]对比了含铝炸药水中爆炸Lee-Tarver模型和Miller能量释放模型的仿真结果,指出Miller模型能更好地描述大药量含铝炸药水下爆炸的尺度效应,而Lee-Tarver模型参数对于大药量的模拟误差较大。关于含铝炸药在土中爆炸激发地震波的研究还不多,尤其是数值模拟方面的工作比较少。土介质物理特性十分复杂,炸药与土介质的耦合作用过程缺乏统一的理论。爆炸地震效应的实验记录一般仅对地表质点振动进行监测[5],而炸药爆炸后传入深层土壤的地震波能量很少有实验进行监测。为了考察含铝炸药在土介质中爆炸后下传地震波能量的大小,引入Miller能量释放模型和岩土介质Linear模型[6],模拟埋深1 m、药量为0.7 kg条件下,含铝炸药在砂土介质中激发地震波的过程,对比研究含铝炸药与相同药量TNT炸药下传地震波能量的衰减规律。

2　地表振动测试

实验在空旷的砂土场地进行,实验重复多次,地表检波器为线性排列,相邻检波器间距为2.5 m,第一个检波器布置在地表,与炸药震源的水平距离为10 m,炸药埋深为1 m(炸药几何中心距离地表1 m)。爆炸点与观测点位置的关系如图1所示。炸药震源分别为0.7 kg的TNT和含铝炸药。

爆炸地震地面振动速度测试系统选用美国劳雷公司的NZXP24型高精度地震仪,检波器频率100 Hz,量程175 mV。该仪器具有自动增益功能,实测动态范围144 dB,调谐畸变0.000 5%,灵敏度为24.83 V/(m·s)。

图2分别为TNT和含铝炸药爆炸后,10、20和30 m处检波器记录的振动信号。随着距离的增

* **收稿日期**:2012-01-11;**修回日期**:2012-04-30

基金项目:国家重大专项(2011ZX05006-002)

作者简介:曾一鑫(1986—),男,博士研究生,主要从事土中爆炸数值模拟研究. E-mail:10902002@bit.edu.cn

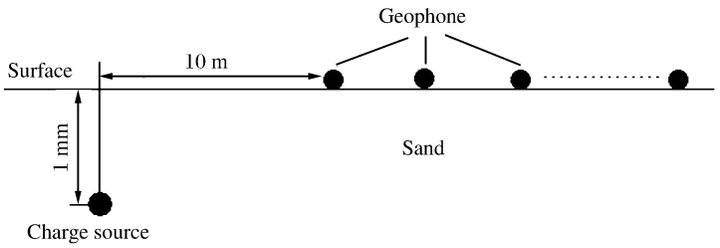


图 1　地表振动测试实验示意图

Fig. 1　Schematic of surface vertical vibration measurements

加,振动的峰值降低,持续时间增长。对比可以发现,含铝炸药激发的地表质点振动峰值明显大于 TNT,并且振动持续时间较长。

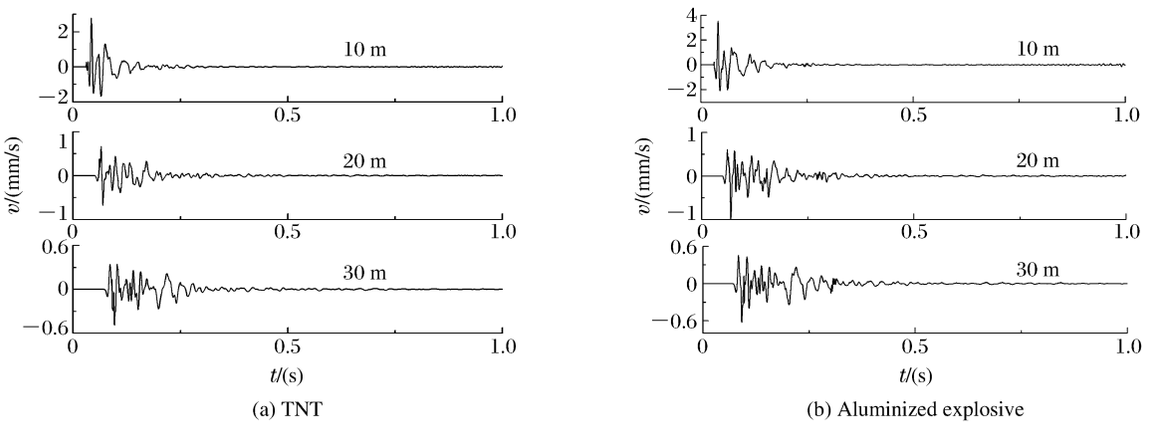


图 2　地表振动信号

Fig. 2　Signals of surface vertical vibration

3　数值模拟

土中爆炸的数值仿真技术十分重要,地表质点振动信号的测试很容易实现,但炸药爆炸后下传地震波引起的质点振动是不容易测定的。完整地描述炸药震源在土介质中激发的地震波场,需要借助数值仿真技术。选用商业软件 AutoDyn 对炸药在砂土中激发地震波的过程进行模拟。

3.1　JWL-Mill 模型

对于 TNT 类常用炸药,通常采用理想炸药爆轰产物的 JWL 状态方程[7]

$$p = C_1\left(1-\frac{\omega}{r_1 v}\right)\mathrm{e}^{-r_1 v} + C_2\left(1-\frac{\omega}{r_2 v}\right)\mathrm{e}^{-r_2 v} + \frac{\omega e}{v} \tag{1}$$

式中:e 为 C-J 爆轰能量,C_1、C_2、r_1、r_2 和 ω 是由实验测得的参数。对于含铝炸药这种高能非理想炸药,铝粉的加入使炸药的能量有显著提高,其参与反应在 CJ 面之后,释放的能量对爆轰波阵面的传播没有贡献,不能用传统的 CJ 理论来描述含铝炸药的爆炸过程。为了描述这一部分额外能量带来的效应,在炸药 JWL 状态方程的基础上加入了 Miller 模型[1]

$$\begin{cases} p = A\left(1-\dfrac{\omega}{R_1 V}\right)\mathrm{e}^{-R_1 V} + B\left(1-\dfrac{\omega}{R_2 V}\right)\mathrm{e}^{-R_2 V} + \dfrac{\omega(E+\lambda Q)}{V} \\ \dfrac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = a\ (1-\lambda)^m p^n \qquad \text{Miller 能量模型} \end{cases} \tag{2}$$

式中:Q 为铝粉加入的额外能量,λ 为反应率,a 是能量释放常数,m 是能量释放指数,n 是压力指数。该模型可以很好地表达含铝炸药爆炸时的能量释放和压力变化规律。数值计算时采用的参数来自文献[8]。通过圆筒试验标定的含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程的参数 A、B 分别为 7.52,12 GPa;$R_1=4.4$,$R_2=1.3$,$\omega=0.33$;$Q=6$ GJ/m^3,$m=0.68$,$n=0.185$,$a=0.028$。

3.2　数值仿真模型

砂土介质选择 Linear 材料模型和 von Mises 强度模型，文献[9]通过三轴试验测定了该地区砂土介质的动力学常数。砂土地层的密度为 1 940 kg/m^3，弹性模量 38.5 MPa，泊松比为 0.31。计算模型如图 3 所示。观测点设置在土介质自由表面和炸药震源垂直下方，地表观测点记录的质点振动信号用以对比实验结果，而炸药震源垂直下方的观测点用来记录下传地震波质点振动速度的历史。

整体的计算域为 200 m×100 m，土介质表面选择自由边界，而其他边界采用 Transmitting Boundary，这类边界条件不会对传播到该边界的应力波产生反射。计算时采用 Lagrange 和 Euler 网格耦合算法。炸药在爆炸过程中处于流体状态，为了不使网格变形过大导致网格消失，造成能量损耗，炸药震源以及距离震源 0.5 m 以内的土介质采用 Euler 网格，如图 4 所示。距离震源 0.5 m 以外的土介质采用 Lagrange网格，值得指出的是，图 4 中所示的 Lagrange 网格为非结构网格。考虑到节约计算时间的问题，外围的土介质采用渐变尺寸 Lagrange 网格。

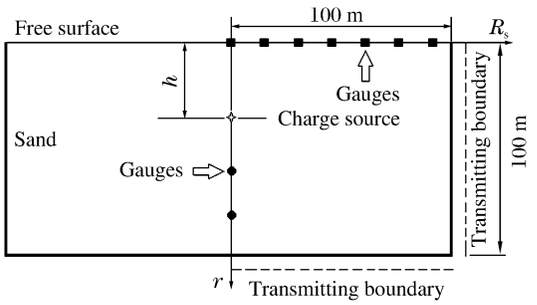


图 3 计算模型示意

Fig. 3 Simulating model

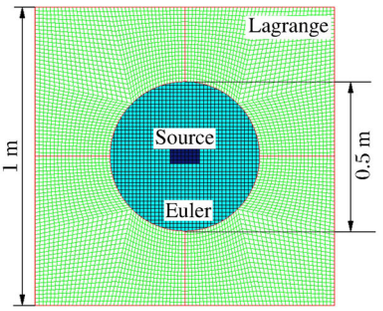


图 4 震源处网格示意图

Fig. 4 Grid near the seismic source

4 结果分析

4.1 地表振动结果对比

图 5 给出了含铝炸药爆炸后地表水平位置 10 m 处垂向振动的速度时程曲线，实验结果和数值模拟结果吻合较好。由于数值模拟的砂土介质选用 Linear 模型，计算的速度曲线振动持续时间和振动的频率都略大于实验结果。

地表质点振动速度峰值(PPV)随水平距离 R_s 成负指数衰减规律，如图 6 所示，数值计算结果与实验结果基本吻合。含铝炸药的振动速度峰值大于 TNT 炸药，且衰减速度较慢。TNT 爆炸后在地表水平距离 50 m 处的振动变得非常微弱，而含铝炸药爆炸后在地表水平。值得说明的是，实验场 40 m 处是车辆通行的地面，土介质密度大于周围土介质，造成了该点附近的检波器所测信号偏大。

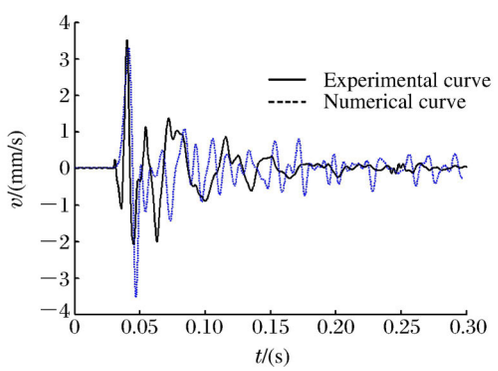


图 5 地表 10 m 处质点振动速度时程对比

Fig. 5 Comparison of numerical and experimental results of aluminized explosive at 10 m

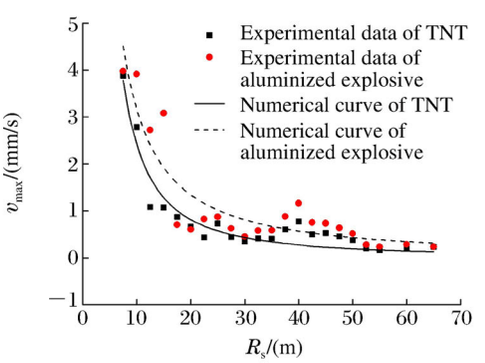


图 6 地表振动速度峰值随水平距离衰减的规律

Fig. 6 Peak value of surface vertical vibration diminished with R_s

地表所测到的地震波信号通常用均方根振幅值(RMS)[10]来评价，其计算公式为

$$A_{\mathrm{RMS}}=\frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}A_i^2} \tag{3}$$

式中：N 为采样点数，A_i 为采样点处的质点振动峰值。利用(3)式对图 6 中的数值曲线进行计算，可以得到含铝炸药在地表产生的振动信号均方根振幅值数值模拟的结果为 1.4 倍。

4.2　下传地震波能量

下传地震波是炸药震源激发的有效地震波，其携带的地震波能量越大，炸药震源的激发效果越好。但实验很难测定震源垂直向下方向上的振动，通过数值计算的方法，获得了下传地震波能量的衰减规律。地震波能量的计算公式如下[11]

$$E_{\mathrm{s}}=4\rho\pi r^2\left[c_{\mathrm{L}}\int_0^{\infty}v_1^2\,\mathrm{d}t+c_{\mathrm{T}}\int_0^{\infty}(v_2^2+v_3^2)\,\mathrm{d}t\right] \tag{4}$$

式中：c_{L} 和 c_{T} 分别为土介质纵波波速和横波波速，v_1、v_2 和 v_3 为 3 个方向的质点速度分量。对于本研究的数值计算模型，$v_2=v_3$。地震波的能量密度为

$$E_{\mathrm{SD}}=\rho c_{\mathrm{L}}\int_0^{\infty}v_1^2\,\mathrm{d}t+c_{\mathrm{T}}\int_0^{\infty}(v_2^2+v_3^2)\,\mathrm{d}t \tag{5}$$

通过监测点记录炸药震源垂直向下方向上质点的振动速度历程曲线，利用(5)式计算的下传地震波的能量密度随深度的衰减规律如图 7 所示。

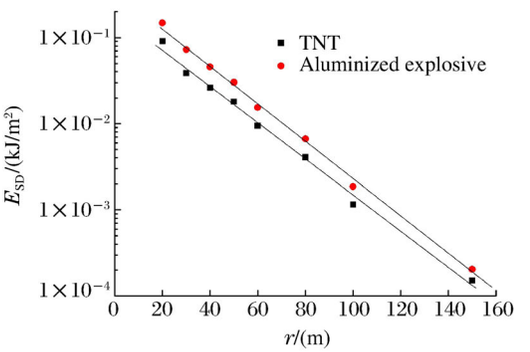


图 7　下传地震波能量密度随传播深度的衰减

Fig. 7　Seismic energy density of pass down wave diminished with r

E_{SD}随传播深度呈负指数衰减规律。由图 7 中的数据可以计算出含铝炸药下传地震波的能量密度平均为 TNT 炸药的 1.34 倍。铝粉使炸药的总能量增大，爆炸时气体产物在膨胀过程中，铝粉的二次反应使能量释放时间增长，爆腔内压力衰减速率较慢，意味着土介质受到的爆炸载荷作用时间与能量都增大，在其中传播的地震波能量也会相应增大。

5　结　论

利用 AutoDyn 商业计算软件加入 Miller 能量释放模型，模拟了含铝炸药在砂土介质中激发地震波的过程，含铝炸药地表质点振动峰值特性可以通过实验和数值模拟同时获得，且模拟结果与实验结果吻合较好，说明 JWL-Miller 模型在一定程度上能较好反映含铝炸药在土中爆炸的能量释放过程。模拟结果表明，0.7 kg 含铝炸药比等重量 TNT 炸药引起的地表振动幅度大，均方根振幅值为 TNT 炸药的 1.4 倍；下传地震波能量密度随传播深度呈指数衰减规律，且 0.7 kg 含铝炸药在砂土中激发的下传地震波能量为等药量 TNT 炸药的 1.34 倍。采用含铝炸药可以显著提高下传地震波的能量，并可作为开发高能炸药震源的一个重要手段。

References:

[1]　Miller P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion of non-ideal explosives [J]. Mater Res Soc Sym Procee, 1996, 418(1): 413-420.

[2]　Zhou L, Xu G G. Configuration of underwater energy output for aluminized explosive mixtures [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 6(1): 30-36. (in Chinese)
周　霖，徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构 [J]. 火炸药学报，2003，6(1)：30-36.

[3]　Xin C L, Xu G G, Liu K Z, et al. Numerical simulation of energy output structure for aluminized explosive and idealized explosive in underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(4): 6-8. (in Chinese)

辛春亮,徐更光,刘科种,等. 含铝炸药与理想炸药能量输出结构的数值模拟 [J]. 火炸药学报,2007,30(4):6-8.

[4] Xin C L,Xu G G,Liu K Z,et al. Application of Miller energy release model for aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2008,16(4):436-440. (in Chinese)
辛春亮,徐更光,刘科种,等. 含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用 [J]. 含能材料,2008,16(4):436-440.

[5] Lin D C,Bai C H,Zhang Q. Amplitude characteristics of vertical ground surface vibration caused by explosion seism [J]. Journal of Beijing Institute of Technology,2001,21(2):173-176. (in Chinese)
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.

[6] Century Dynamics Inc. AUTODYN User's Manual (Version 12. 1) [Z]. San Ramon,CA: Century Dynamics Inc,2009.

[7] Chen L,Feng C G,Huang Y M. The cylinder test and JWL equation of state detontion product of aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2001,3(1):13-15. (in Chinese)
陈 朗,冯长根,黄毅民. 含铝炸药圆筒试验及爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 火炸药学报,2001,3(1):13-15.

[8] Zhang B P,Zhang Q M,Huang F L. Detonation Physics [M]. Beijing: Weapon Industry Press,1997. (in Chinese)
张宝平,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学 [M]. 北京:兵器工业出版社,1997.

[9] Qiu C L. Study on the experiment of dynamic property of the soil [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2010. (in Chinese)
邱丛礼. 爆炸载荷下的岩土动态力学性能试验研究 [D]. 北京:北京理工大学,2010.

[10] Wu C Q,Hao H. Numerical study of characteristics of underground blast induced surface ground motion and their effect on above-ground structures Part Ⅰ: Ground motion characteristics [J]. Soil Dyn Earthq Eng,2005,25(1):27-38.

[11] Sanchidrián J A,Segarra P,Lòpez L M. Energy components in rock blasting [J]. Int J Rock Mech Min Sci,2007,44(1):130-147.

Simulations of Seismic Waves Stimulated by Aluminized Explosive

ZENG Yi-Xin,BAI Chun-Hua,CHEN Jian,WANG Zhong-Qi

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In order to study the propagation of seismic waves stimulated by aluminized explosives, the commercial software—AutoDyn was used, in combination with Miller energy release model, to simulate the explosion in the sand. The results of simulation agreed well with the experiment: 0. 7 kg aluminized explosive aluminized explosive was buried with a depth of 1 m in the sand, and its root mean square (RMS) amplitude of surface seismic waves was 1. 23 times more than TNT; while the seismic energy density of waves passed down diminished exponentially with the depth, and seismic energy of Aluminized explosive passed down was 1. 34 times more than TNT.

Key words: aluminized explosives; miller model; surface vertical vibration; energy of seismic wave passed down