

炸药土中爆炸弹性区应力波的测试与分析

严峰^{1,2}, 张庆明¹, 白春华¹, 陈健¹, 王仲琦¹, 李建平¹

1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081
2. 中国兵器工业规划研究院, 北京 100053

摘要 为研究炸药在土中爆炸产生的地震波效应,设计了一套适用于测量土中弹性区应力变化的测试方法及实验系统。该实验系统对埋深 1m 的 1kg TNT 爆炸后引起的土壤应力变化进行了记录。实验结果表明,该测试系统能完整地记录爆炸过程中土中应力的变化过程。从时域和频域分析所测得的应力波,得到同一埋深时沿水平方向上应力波峰值、主频和频宽随传播距离的变化关系。

关键词 爆炸力学; 土中爆炸; 近场应力波; 频谱分析; 作用机制

中图分类号 O381

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.002

Testing and Analysis of Stress Wave in Elastic Zone Generated by Explosion in Soil

YAN Feng^{1,2}, ZHANG Qingming¹, BAI Chunhua¹, CHEN Jian¹, WANG Zhongqi¹, LI Jianping¹

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Ordnance Industry Planning Project Institute of China, Beijing 100053, China

Abstract To study the action of high-energy explosives in the underground explosion a measurement system for soil pressure is designed, including stress-testing methods and experimental systems. The experimental results show that the pressure measurement system can well record the explosions, as has been done in China and Turkey, as well as the pressure changes and the development processes. Through the analysis of the pressure waveform and the spectrum, we obtain, for the same explosive and the soil media, the stress wave peak value, the principal frequency and the frequency bandwidth against the distance.

Keywords explosion mechanics; earth explosion; near-field pressure; spectrum analysis; mechanism

0 引言

爆炸地震波是土中爆炸作用过程中十分重要的动力学现象之一。炸药在岩土介质中爆炸时,其能量主要消耗在两个方面,一是在爆轰产物的作用下,临近炸药的岩土介质受到强烈压缩,最终形成一定形状的爆炸空腔;二是在岩土介质中激发爆炸地震波,这种爆炸地震波被广泛运用于各种岩土工程领域,如交通、采矿、石油勘探及地下结构防护工程等。

岩土中的爆炸过程是一个极其复杂的过程。长期以来,很多研究人员都致力于研究不同土壤中爆炸波的传播规律。在理论研究方面,通过在长圆柱空穴中施加一个合理的压力研究应力波的传播规律^[1],S. Kobilak 等^[2]在筒仓不同深度上的正面、侧面以及背面处布置不同的传感器测量爆炸过程中筒仓上正应力和切应力的变化,结果表明,装药质量、埋深以

及炸药与筒仓间的距离均对测试压力有影响。赵跃堂等^[3]采用 $\Phi 900$ 带软硬环的土平面波加载器对 4.74m 高度的饱和土爆炸波传播进行了试验,得到了气体含量变化不大时饱和土中爆炸波沿深度方向上传播规律,而 Lu 等^[4]通过研究平面冲击波在砂质土和黏质土中传播过程中的差别,分析得到了爆炸载荷下土壤力学特性的变化,但后两个实验关注的重点是土壤塑性区中的应力变化规律。

为研究炸药土中爆炸后产生的地震波效应,本研究参照空中(或水中)爆炸压力测试技术,设计了一套适用于测量土中爆炸波的测试方法和实验系统。运用该实验系统对 1kg TNT 在埋深 1m 的条件下同一水平深度弹性区的土壤应力变化进行测量,并进行时域和频域分析,得到了一些有益结论,为研究爆炸地震波的产生机制和控制方法提供实验基础。

收稿日期:2010-11-10;修回日期:2011-06-24

作者简介:严峰,博士后,研究方向为土中爆炸力学,电子信箱:yanfeng1980912@sina.com

1 实验测试方法与系统

1.1 实验测试方法

随着科学技术的飞速发展,空中和水中的爆炸测试技术已经很成熟。本文将空气冲击波测试技术运用于土中爆炸波的测量中。其实验原理如图 1 所示。其测试原理如下:首先起爆器控制炸药爆炸;在炸药爆炸的瞬间,高温高压的电离气体将预先贴在弹体上的金属触发片(铝片)短路,这一瞬间同步触发器开始控制数据采集器采集数据;当传感器感受到炸药爆炸产生的压力波时,其输出相应的变化电压信号,这一电压信号通过信号放大器放大输入到数据采集器滤波、转化,得到压力-时间曲线,并最终存储在便携式计算机中。

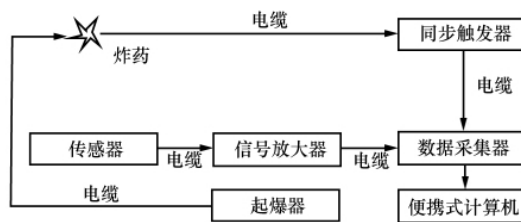


图 1 土中爆炸波测试原理
Fig. 1 Diagram of testing blast wave in soil

整个系统从硬件组成上可分为压力传感器、存储式冲击波测量装置和便携式计算机系统;从功能上划分主要有 4 项功能:测压功能,测速功能,同步计时、同步触发功能,试前检测、参数设置和试后的数据处理功能。

1.2 实验测试现场布置

土中爆炸应力波测试系统有压电式传感器(Kistler)、前置信号放大器以及数字信号记录仪组成。其实验现场布置如图 2(a)所示。炸药埋深为 1m,同一埋深水平处预埋 Kistler 压电式传感器,各个传感器的参数及与炸药的距离如表 1 所示。图 2(b)为未进行土壤回填状态压力传感器现场布置,在回填土壤时采用回填一层(厚 1cm),夯实一层的方法,确保传感器表面与土壤接触紧密。

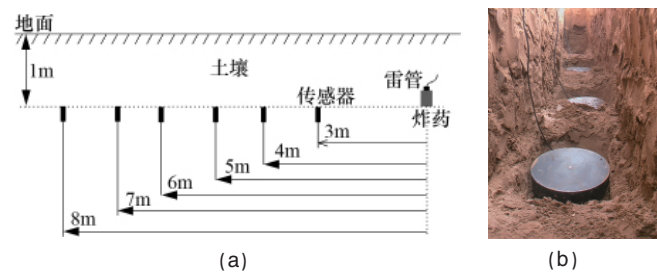


图 2 土中爆炸试验现场布置
Fig. 2 Arrangement in experimental site

2 土中爆炸波信号分析与讨论

2.1 土中爆炸波信号与地面速度信号比较

为了确定激发点与接收点之间的最小距离 ΔL ,使接收点完全位于爆炸的塑性区以外(即位于弹性区内),从而达到较好地接收初始弹性波的目的,这里采用下式^[9]计算炸药爆

表 1 传感器参数

Table 1 Parameter of pressure sensors

爆距/m	传感器编号	传感器灵敏度/(mV·kPa ⁻¹)
3	2025645	4.15
4	2025650	4.07
5	2019166	14.39
6	2025694	7.51
7	2019267	14.74
8	2019264	14.17

炸形成的塑性区半径 r_p :

$$r_p = 0.75 \cdot \left[\frac{U \cdot H \cdot Q}{E \cdot (1 - 2\sigma)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

其中, U 为单位药量爆炸时分解出的能量 (J/kg); E 为形变模数 (kg/cm²); H 为激发点深度 (m); Q 为药量 (kg); σ 为介质的泊松比。当 TNT 在土中激发时, $U=4 \times 10^6$ J/kg; $E=10^6$ kg/cm²; $\sigma=0.4$ 。本实验选取 $H=1$ m, $Q=0.7$ kg, 则塑性区半径 $r_p \approx 1.81$ m, 其他震源产生的塑性区半径均小于 2m。考虑到实际情况及计算时参数取值误差的原因,这里取 $\Delta L=3$ m 作为传感器与爆源的最小距离。

在实验过程中,运用压力测试系统成功捕捉到 1kg 柱形 TNT 炸药在埋深 1m 的条件下发生爆炸后土中应力的变化过程。为了验证测试结果的正确性,将其与地面振动速度的时间历程曲线进行了比较,如图 3 所示。图 3(a)是在埋深 1m, 距离爆心 3m 处的应力波随时间的变化过程,图 3(b)为距离爆心 10m 处地表面近的垂直速度随时间的变化过程(由于 10m 以内的地面垂直速度测量结果均溢出,选取 10m 处的结果进行比较)。

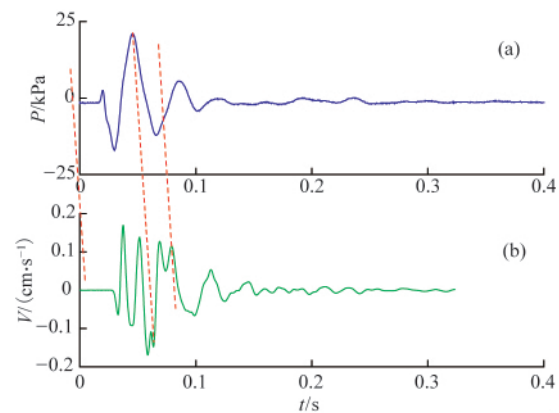


图 3 埋深 1m 处的应力波(距爆心 3m 处, (a))与地面垂直振动速度(距爆心 10m 处, (b))的比较

Fig. 3 Comparison between the elastic wave underground signal and the vertical velocity on the ground

由图 3 分析可知,实验测得应力波的作用时间与地震仪测得地表的振动时间是在同一量级和范围内的,且两者之间具有某种对应关系:应力的最大值对应垂直振动速度的最小值。据此,可以分析判断所测得的应力波信号是真实可靠的,

说明该实验测试系统能够满足实验要求。

2.2 土中爆炸波信号特征量的选取

图4为典型的土中爆炸波信号,其波形与炸药在空气(或水中)冲击波的波形有明显的区别。土中爆炸波的压力上升速度较空气(或水)中慢得多,不具有明显的“冲击”性质,而是一个脉动过程。将其划分为3个典型的脉冲过程:第一个脉冲的作用时间为18.85ms,第二个为40.98ms,第三个为35.20ms。另外,对此应力波历程曲线进行快速傅里叶变化(FFT),可以得到土中爆炸波的频谱图,如图5所示。

在这里首先给出主频和频宽的定義^[6]。主频: $PF = \frac{F_1 + F_2}{2}$, 频宽: $\Delta F = F_2 - F_1$ 。其中, F_1, F_2 分别为 $P = P_{max}/2$ 时对应的应力波频率, P_{max} 为最大应力波。

由图5可知, $F_1 = 16.34\text{Hz}, F_2 = 32.66\text{Hz}$,则应力波的频宽 $\Delta F = F_2 - F_1 = 16.32\text{Hz}$;而应力波的主频 $PF = 24.5\text{Hz}$,其周期时间 $T = 40.82\text{ms}$,这一时间几乎与图4中应力波第二脉冲的作用时间相等。由此可以推论,土中爆炸应力波激起机制是由炸药爆炸结束后产生的高压高温气体在爆腔内的第二次脉动过程决定的。

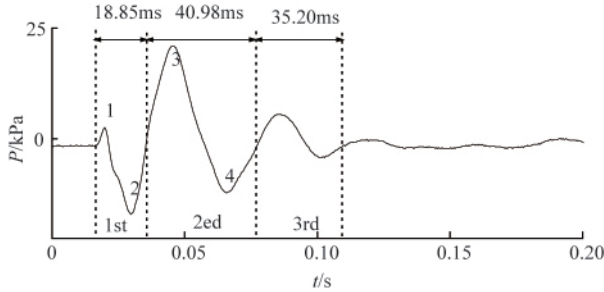


图4 典型的土中应力波信号

Fig. 4 Typical pressure signal in soil

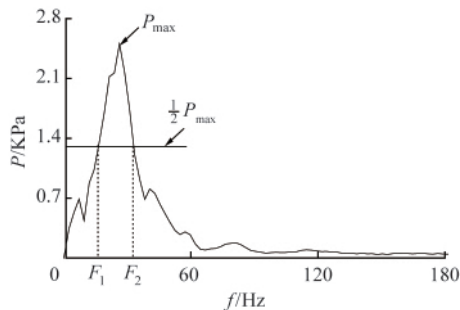


图5 土中应力波的频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of pressure in soil

2.3 土中爆炸波的传播发展情况

图6为1kg柱形TNT土中爆炸后,距爆心不同距离处所测得的土壤中压力波随时间的变化关系。土壤的声速变化情况如图7所示。

由图7可知,爆炸应力波作用前,土壤的声速为518m/s,在爆炸应力波作用下,土壤的瞬间声速降低。究其原因,可能是当冲击波在土中传播时土壤受到了挤压(或拉伸)作用,导致土壤的力学性能发生瞬间改变。

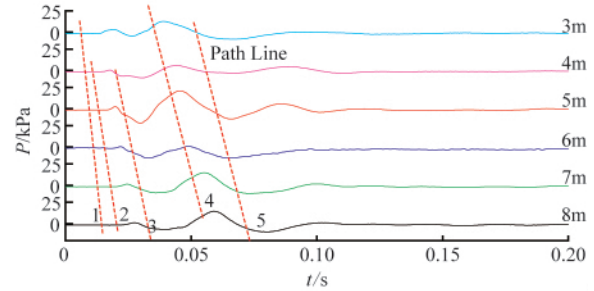


图6 1kg柱形TNT爆炸后,各点处的爆炸波变化及发展过程
Fig. 6 Development of stress waves in different distances after the TNT explosion in the soil

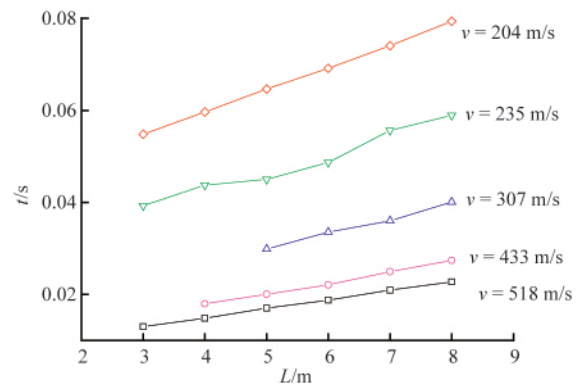


图7 不同时刻同一土壤的传播速度

Fig. 7 Transmittal velocity of soil during the shock wave passage

2.4 结果与讨论

2.4.1 频域最大压力

图8为两次相同实验条件下,不同测点处应力波在频域上峰值压力随距离的变化关系,其中, $R/w^{1/3}$ 为对比距离。两次实验中,近场($<6\text{m}$)的压力数据差别较大,究其原因可能有两点:一是与第二次炸药周围土的埋填状态有关,这是主要原因;二是近场的土壤受到爆炸后其力学性能发生了改变。因此,第二次实验中炸药能量输出较大。

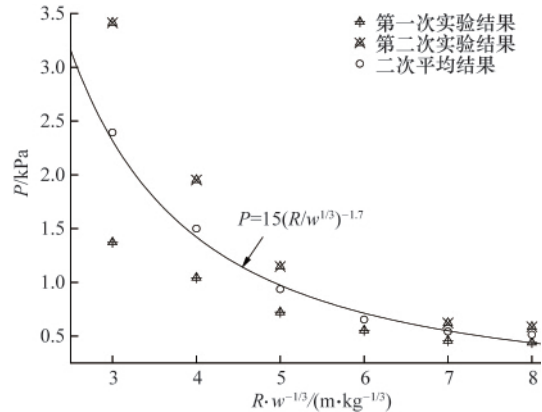


图8 应力波频域峰值随距离的衰减趋势

Fig. 8 Attenuation of the peak stress wave in frequency-domain against distance

另外,由图8进一步分析可知,随着传播距离的增加,各点处的峰值压力下降。将两次实验结果平均后进行拟合,得到峰值压力随距离的衰减关系: $P=15(R/\sqrt[3]{w})^{-1.7}$,kPa。因此,可以大约确定该土壤的衰减系数为-1.7,与文献[1]总结硬岩中自由场径向应力峰值衰减规律很相似,仅耦合系数因传播介质不同而不一样。

2.4.2 主频和频宽

图9和图10分别为两次相同实验条件下应力波的主频和频宽随着距离的变化关系。

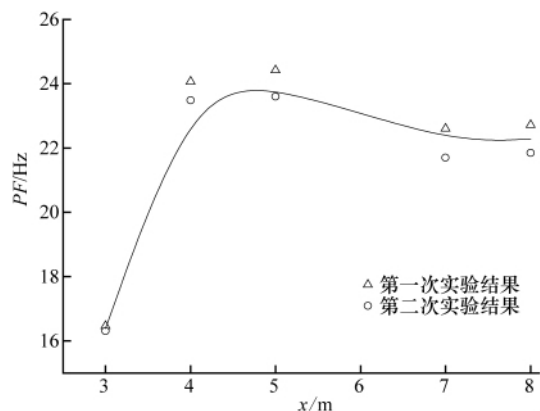


图9 土壤中应力波主频随距离的变化示意

Fig. 9 Principal frequency of stress wave changing against distance

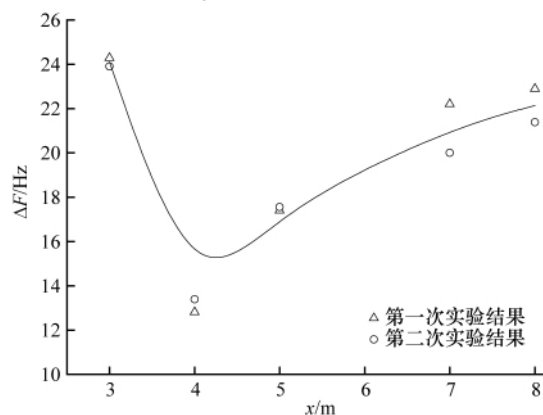


图10 土壤中应力波频宽随距离的变化示意

Fig. 10 Frequency bandwidths of stress wave changing against distance

由图9可知,土中爆炸产生应力波的主频随着传播的距离先增加后减小,3m处测得应力波的主频最小,约为16Hz,而其他测点上的应力波主频大致在22—25Hz。在图9中,3m与其他点处的应力波主频相差较大,可能是近场处的土壤在爆炸波的作用下呈现出流体的性质引起的。根据固体力学,土壤硬度越大,其响应频率越高。这恰好能解释3m处应力波比其他点处低的原因。由图10可知,土中爆炸产生应力波的频宽随着传播的距离先减小后呈近线性增加。在近场(3m处),土壤在爆炸波的作用下呈现流体性质导致该点处的应

力波频宽较高。在远场(≥ 4 m),土壤可以看作是非黏弹性体,造成应力波在传递过程中发生弛豫现象,这样,随着传播距离的增加,应力波的频宽呈近线性增加。

3 结论

通过自行设计的爆炸测试系统对TNT炸药的土中爆炸波进行了测量、分析,得到以下结论。

(1) 炸药在土中爆炸是一个脉动过程,同一深度应力波的特征强度和主频由气体膨胀过程决定。

(2) 炸药在土中爆炸时,沿同一深度的水平方向,应力波频域上的峰值压力随着传播距离的增加呈指数衰减,衰减指数为-1.7。

(3) 炸药在土中爆炸时,沿同一深度的水平方向,应力波主频随着传播的距离先增加后减小,但其频宽随着传播的距离先减小后呈近线性增加。

参考文献 (References)

- [1] Blair D P. Rise times of attenuated seismic pulses detected in both empty and fluid-filled cylindrical boreholes [J]. *Geophysics*, 1984, 49 (4): 398-410.
- [2] Kobiela S, Krauthammer T. Dynamic response of buried silo caused by underground explosion [J]. *Shock and Vibration*, 2004, 11 (5-6): 665-684.
- [3] 赵跃堂, 郑守军, 郑大亮, 等. 爆炸波在饱和土介质中传播时压力变化规律的试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2004, 24(1): 60-65.
Zhao Yuetang, Zheng Shoujun, Zheng Daliang, et al. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2004, 24(1): 60-65.
- [4] Lu Z X, Wang Y H, Pan J Z. Mechanical properties of soils under explosive loading[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 80(2): 217-222.
- [5] 汪恩华. 提高深层地震勘探分辨率方法理论及应用研究 [D]. 成都: 成都理工学院, 2001.
Wang Enhua. Seismic prospecting method of enhancing the deep zone resolution and its application research [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2001.
- [6] Hao H, Wu C Q. Scaled distance relationships for chamber blast accidents in underground storage of explosives[J]. *Fragblast*, 2001, 5(1-2): 57-90.

(责任编辑 代丽)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。