

# 土壤介质中爆破数值模拟

孔祥雷<sup>1</sup>, 高志安<sup>2</sup>

1. 辽宁工程技术大学, 辽宁阜新(123000)

2. 阜新市交通局, 辽宁阜新(123000)

E-mail: [xiangleizi@163.com](mailto:xiangleizi@163.com)

**摘要:** 不同的炸药在不同介质中爆炸其作用效果是不同的。本文利用大型非线性动力分析软件 LS-DYNA, 采用 SOIL\_AND\_FOAM 模型对土壤中单孔条形装药条件下的爆破情形进行了模拟, 分析了炸药爆炸的成长过程、炮孔周围介质的损伤特点、有效应变场以及速度场, 并得到了关于土壤介质爆破的一些结论, 丰富了爆破研究。

**关键词:** 土壤介质, 爆破, 条形装药, 数值模拟

## 1. 引言

随着国民经济的快速发展, 爆破以其独特的优势在土木、水利、矿采、农、林、工业等部门中得到了越来越多的应用, 创造了一定的社会效益<sup>[1]</sup>。爆破技术在工程实践中有了很大发展, 但是爆破理论却远远落后于工程实际, 现场中仍有很多问题需要从理论上去验证与提升。在爆破工程中, 炸药在炮孔中的作用是一个比较基本的问题, 对于改善爆破质量节约成本提高效率具有重要的意义。但是, 钻孔爆破的应力应变场特别是爆破近区的应力应变场很难现场观测, 野外主要采用高速摄影或测量爆破漏斗的方法进行定性分析; 室内试验一般采用动光弹实验来实现应力场的模拟; 对于理论分析法, 由于工程爆破问题的非线性特征, 一般很难得到解析解。计算机模拟技术的发展为爆炸问题的研究是提供了一种非常有效而且经济方便的手段。本文拟利用大型非线性动力分析软件 LS-DYNA<sup>[2]</sup>, 采用土壤的 SOIL\_AND\_FOAM 模型, 针对单孔条形装药条件下的土壤爆破情形, 进行数值模拟计算。

## 2. 粘性土的爆炸冲击变形

土是由固体颗粒、水和空气组成的一种三相介质。固体颗粒之间相互粘结起着骨架的作用, 其间充斥着大量的孔隙空气及水分。在外荷载的作用下, 粘性土有两种变形机理<sup>[3]</sup>, 即土的骨架变形和土的所有相变形。土性及载荷不同两种机理的作用是不同的。在快速动力变形情况下, 土间空气及水分不能迅速的通过颗粒间溢出, 在外力的作用下其三相结构都要发生较大变化。在爆炸冲击作用瞬间, 三相将会严重离析, 生成一定厚度的水膜、气泡以及土粒致密层; 在爆炸冲击波作用的远端, 空气和水分会被挤入受力较小的区域, 土粒被压密实。

## 3. 建立计算模型

为了分析炸药对炮孔周围介质的作用规律, 模型取值为: 土壤域 1.60m×1.60m×2.20m, 考虑土壤爆破过程的隆起其上部加 0.50m 的空气域, 炮孔深 1.45m, 条形药柱尺寸为 0.04m×0.04m×1.15m, 填充长度取为 0.30m, 耦合装药, 炸药底部中心点起爆, 为简化计算炮孔填充采用与周围土壤相同的材料。由于模型具有对称性也为了节约计算成本, 只建立 1/4 个模型, 如图 1 所示。

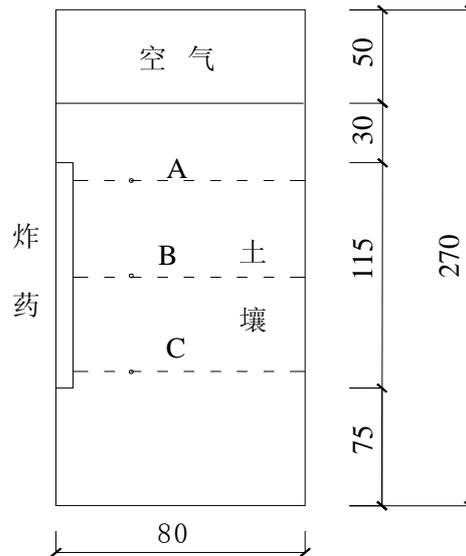


图 1 模型计算域示意图

Fig.1 Schematic diagram of model calculation domain

边界条件为:左(中轴)边界为对称边界,下以及右、后边边界为无反射边界。计算中所采用的高能炸药 PETN 其主要计算参数为:密度  $\rho_0=1.26\text{g/cm}^3$ ,爆速  $D=0.654\text{cm}/\mu\text{s}$ ,C-J 压力  $P=0.14\times 10^{11}\text{Pa}$ ,LS-DYNA 程序描述高能炸药爆轰产物  $P-V$  关系采用 JWL 状态方程:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$

式中: $V$  是比容, $E_0$  是初始内能密度,参数  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  等为试验确定的常数,取值<sup>[4]</sup>如下:

A/GPa	B/GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
537.1	20.106	6.0	1.80	0.28	3.6

土壤由固相(土粒),液相(土中孔隙水),气相(土中气体)三相组成,土粒粘结较疏松,孔隙率大,含有孔隙水气,抗压抗剪强度低,极容易压缩变形,并且将伴有气泡产生。所以采用 SOIL-AND-FOAM 模型,主要参数为:密度  $\rho_0=2.50\text{g/cm}^3$ ,剪切模量  $G=1.60\times 10^7\text{Pa}$ ,体积模量  $K=2.5\times 10^7\text{Pa}$ 。

在计算固体力学中多用 Lagrange 列式,计算流体力学则用 Euler 列式,但在解决流-固耦合问题时需要一种将两种方法的优点结合起来的算法,即 ALE 算法,这种方法可以很好的克服固体大变形数值计算的难题。本次模拟采用 ALE 多物质耦合算法,单位采用 cm-g- $\mu\text{s}$  制。

## 4. 计算与分析

### 4.1 爆炸的成长

炸药从药柱底部开始起爆,瞬间从爆点扩展到整个药柱底部,发展成为爆轰,其初始作用效果云图状如苹果,爆轰继续向上传播,由于爆轰波速远远大于介质中的冲击波速,加之爆生气体随后在土壤中的扩腔作用,使得炸药整个爆轰过程的作用效果云图就象土壤中生长的胡萝卜一样(如图 2 所示)。

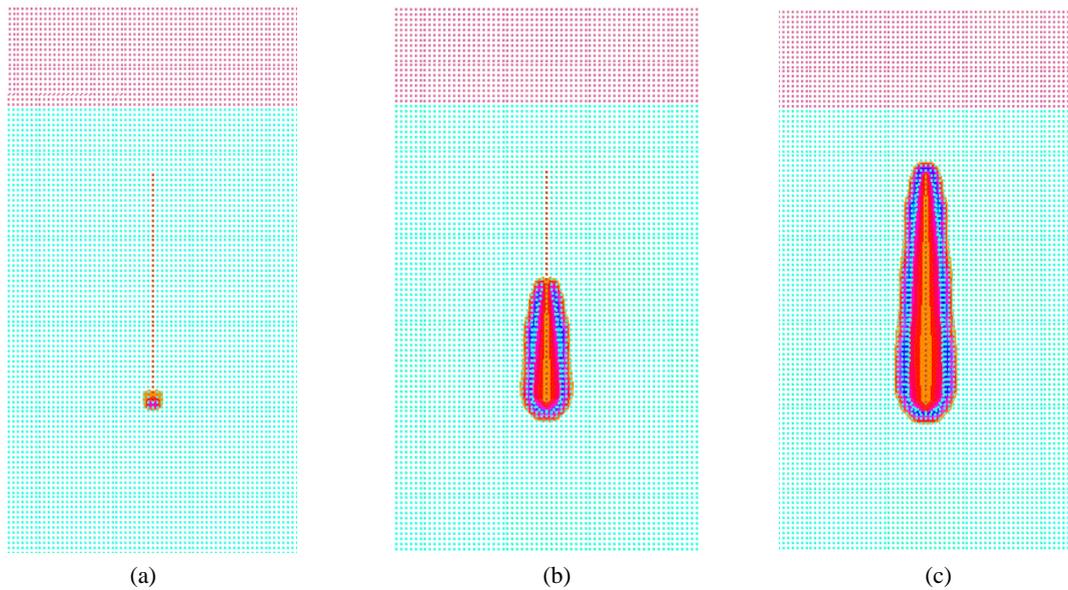


图 2 等效应力云图

Fig.2 Nephogram for equivalent effective stress

炸药对周围介质的作用主要包括两部分，一部分是爆轰波对介质的动态冲击，另一部分是爆生气体的膨胀做功。在模型中选用的炸药的爆速极高，其对孔壁的冲击作用很强，又由于土壤在冲击荷载下变形具有流塑性，所以在这种情况下爆轰波的冲击扩腔效应相对比较明显，压缩孔壁形成致密层。在爆生气体的作用下，空腔继续扩大，相比之下药柱下部的爆生气体作用时间较长，又有继爆炸药的能量与气体的不断补充，所以初始阶段下部扩腔相对较大，随着时间的增长，这种差距将会消失。

#### 4.2 爆炸损伤特点分析

从爆轰开始到爆轰结束，整个过程中介质的有效塑性应变如图 3 所示。

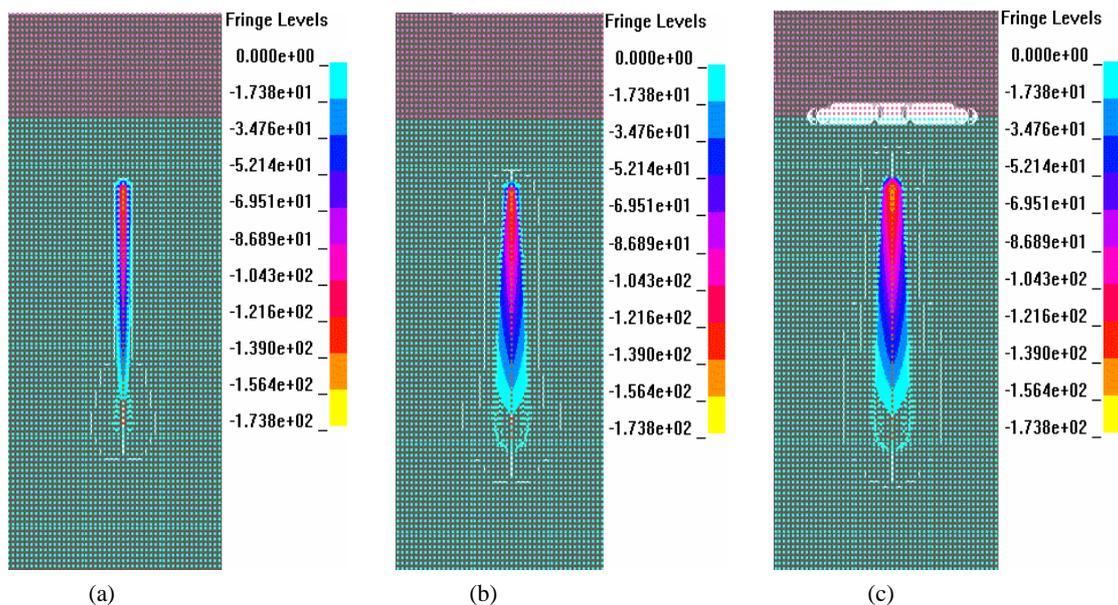


图 3 有效塑性应变云图

Fig3 Nephogram for effective plastic strain

爆轰从药柱的一端传向另一端，在传爆端冲击波始终以球面波的形式向外传播，从整个过程来看，爆炸生成的高温高压气体的作用以柱面波的形式传播。伴随着的爆生气体在土壤介质中以柱面波的形式挤压土体，使近端土体流出，土粒结构重组，压实压密，强度提高，形成硬壳。从动画上看，在整个爆轰过程中由于后继能量与气体的不断补充，使得炮孔下部犹如受气锤高频冲击，扩孔较大，在土壤类介质中这种端部效应比较明显。从图 C 中还可以看到冲击波自由面反射所造成的介质应变，最终自由面介质将会隆起抛出，但模拟显示不是很明显，这也是和土壤介质本身有关的。

### 4.3 应力场分析

将土壤介质沿药柱高度分 A、B、C 三个截面，沿药柱径向分近端（炮孔壁）和远端（约孔径的 5.5 左右）分析。首先分析近端应力场，其沿截面的时程曲线如图 4 所示。当爆轰波到达的瞬间，介质的压力、温度、密度等将会产生飞跃越，表面形成冲击波，在冲击波过后伴随着稀疏波的产生（图中未有显示）。在连续爆轰中，冲击波作用呈现脉冲的形式，爆生气体在炮孔内不断震荡。

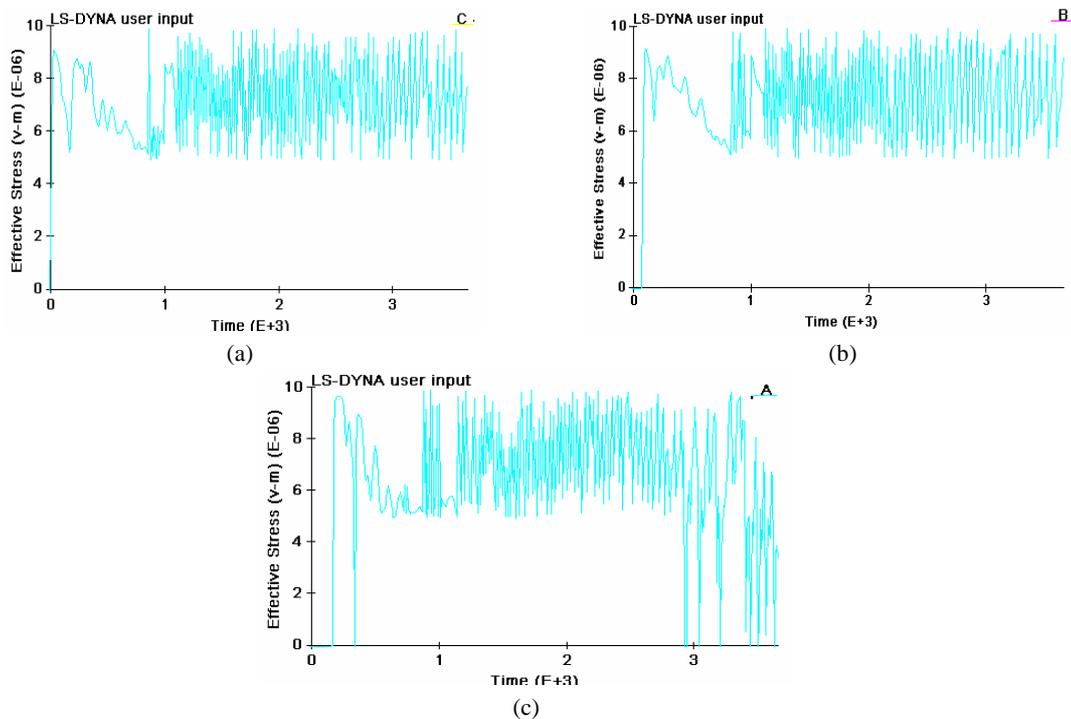


图 4 孔壁有效应力时程曲线

Fig.4 Curves of effective stress history at hole wall

远端应力时程曲线如图 5 所示。其规律和近端比较相似。从图线可以看出越往上靠近自由面曲线越稀疏，由于质密坚硬的介质有利于波的传播，换句话说其本身贮留能量较少，可以推断沿药柱轴向，土壤介质下部比上部密实硬度高，沿药柱径向近端比远端密实硬度高。

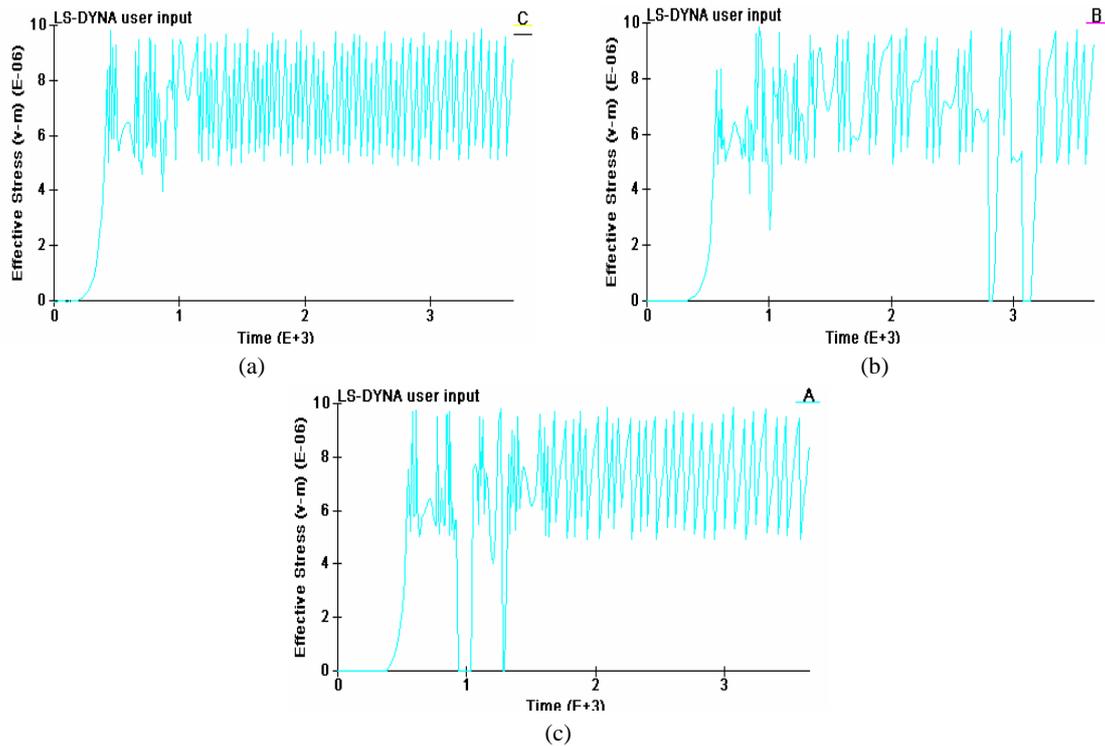


图5 远端有效应力时程曲线

Fig.5 Curves of effective stress history at a distance from hole wall

沿 B 面 X 坐标 4cm, 20cm, 60cm 依次取 A、B、C 三个单元,压力时程曲线如图 6 所示。可见三条曲线的峰值依次降低, 介质中应力沿径向迅速衰减。

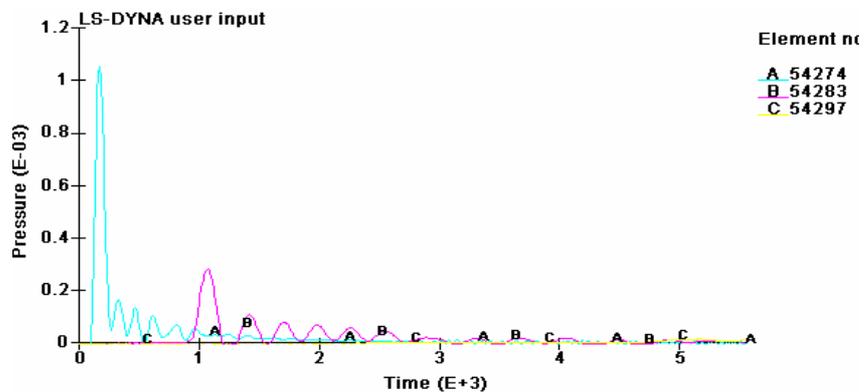


图6 B 截面 A、B、C 单元压力时程曲线

Fig.6 Curves of pressure history of element A、B and C at section B

#### 4.4 速度场分析

图 7 给出了远端三个截面单元的 X 方向的速度-时程曲线。从图中可以看出:当爆轰波向外传播时,由于 A、B、C 三个单元所受的冲击波不等,因而其质点的振动速度也是不同的,并且随着冲击波的衰减其速度峰值也迅速衰减;X 方向速度端部的小于中部的。

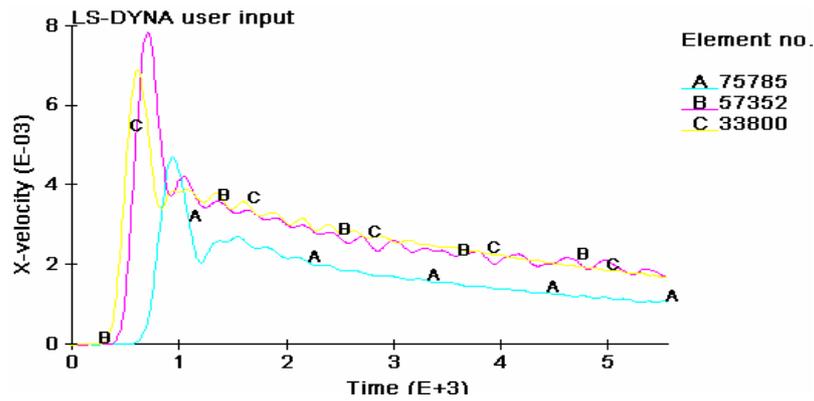


图7 X-A、B、C单元速度\_时程曲线

Fig.7 Curves of velocity history for elements A,B and C

## 5. 结论

通过对土壤介质中单自由面条形装药爆破数值模拟计算，可以得到以下结论：

(1)数值模拟技术从某种角度上能够比较形象直观地反映了条形药包在介质中爆炸后对炮孔周围介质的作用效果。

(2)炸药爆炸对介质的作用，一方面取决于炸药本身，一方面决定于介质。不同的炸药，不同的介质，其应力、应变场及介质中质点的速度等是不同的。由以上分析可知：土壤中爆破，其作用主要反映为下部土体的压密以及上部的隆起（抛掷），而在岩石、混凝土<sup>[5]</sup>等坚硬介质中主要表现为破碎、剥离、抛掷等。利用这一原理，可以有针对性的使爆破技术服务与工程实践。

## 参考文献

- [1] 张继春.工程控制爆破[M].成都:西南交通大学出版社,2001.
- [2] LSTC,LS-DYNA keyword user's manual[M]California:Livermore Software Technology Corporation,2003.
- [3] J.亨利奇.著.爆炸动力学及其应用[M].熊建国等译.北京:科学出版社,1987.
- [4] 张宝坪,等.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2001.
- [5] 钟光复,等.单自由面混凝土介质中的深孔爆破数值分析[J].工程爆破.2006,3(1):1-6.

## NUMERICAL SIMULATION OF BLASTING IN SOIL

KongXianglei<sup>1</sup>, GaoZhian<sup>2</sup>

1. LiaoNingTechnicalUniversity, LiaoNingFuXin, China (123000)
2. FuXinCity Traffic Bureau, LiaoNingFuxin, China (123000)

## Abstract

The blasting effects of different explosives are different in different mediums. This paper numerically simulates the single-hole blasting in soil medium with column charging by large-scale nonlinear dynamic analysis software LS-DYNA and SOIL\_AND\_FOAM model.; and analyses the process of explosion in soil、the damage characteristic of medium around blast-hole、Von Mises effective stress and velocity fields,gives some useful conclusions about blasting in soil medium riching blasting research.

**Keywords:** soil medium, blasting, column charging, numerical analysis

**作者简介:** 孔祥雷, 1981 年出生, 吉林长春人, 辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为工程控制爆破。