

土壤内集中药包爆破漏斗特性的数值分析

杨秀敏 金骥良 刘殿中

(1983年8月1日收到)

本文得出了土壤内集中药包爆炸问题的二维弹塑性数值计算解,描述了土中爆炸漏斗形成的过程和不同埋深位置时漏斗大小的变化情况以及药包下方土壤中应力波衰减的规律。

这些结果有助于分析研究爆炸试验中观测到的现象和数据。

一、前言

当集中炸药药包在一定深度的土壤中爆炸时,由于爆炸产物的高压冲击作用,药室周围的土壤被向外挤压而形成空腔,同时,药包上部土壤隆起破裂,后被爆炸气体冲击地表,从而出现爆破漏斗。试验表明,爆破漏斗的形状和体积随着药包埋深的不同而变化,对一定药量的炸药药包来说,在某一埋深处,其爆破漏斗体积具有极大值。

本文试用数值计算方法,对土壤中集中药包爆破漏斗的形成及其主要特性予以初步分析研究。假定土壤为均匀各向同性介质,采用弹塑性力学模型,不考虑重力影响。爆源为长径比 $\phi = l/d = 1$ 的短柱形TNT集中药包,药量 $Q = 1$ 吨。用欧拉形式的二维轴对称动力学方程组来描述介质的运动状态⁽¹⁾。利用现有的触地爆炸二维差分计算程序⁽²⁾并作适当的修改,求得本问题的数值解。

数值计算结果初步描述出了土中爆破漏斗的形成过程、不同埋深条件下漏斗尺寸的变化趋势以及漏斗下方土中应力波的衰减规律。应该指出,由于文中选取的土壤本构关系及其性能参数是相应于一定的土壤介质,因而并不具有普遍意义。此外,在物理力学模型和计算程序上也还有待于进一步完善,故本文提供的结果尚不能在定量计算中使用,但可用于土壤中爆炸现象的定性分析。

二、基本方程组

力学参量的定义及其单位

t —— 从爆炸零时算起的时间(ms);

r, θ, z —— 欧拉空间坐标(cm);

- ρ —— 土壤介质的密度 ($kg \cdot ms^2/cm^3$);
 u, v —— 分别为 z 和 r 方向的土壤运动速度分量 (cm/ms);
 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ —— 分别为 r, θ, z 方向上的正应力分量 (kg/cm^2);
 τ_{rz} —— rz 平面内的剪应力分量 (kg/cm^2);
 P —— 平均静水压力 (kg/cm^2);
 S_r, S_θ, S_z —— 分别为 r, θ, z 方向的弹性应力偏量分量 (kg/cm^2);
 S_r^*, S_θ^*, S_z^* —— 分别为 r, θ, z 方向的塑性应力偏量分量 (kg/cm^2);
 τ_{rz}^* —— rz 平面内塑性剪应力分量 (kg/cm^2);
 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ —— 分别为 r, θ, z 方向线应变分量;
 γ_{rz} —— rz 平面内的角应变分量;
 ε_v —— 体应变;
 e_r, e_θ, e_z —— 分别为 r, θ, z 方向的应变偏量分量;
 $J_2(D)$ —— 应力偏量第二不变量 (kg/cm^2);
 $Y(P)$ —— 土壤剪切强度函数 (kg/cm^2);

1. 欧拉形式的动力学方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial r} + u \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

2. 应变率与速度的关系:

$$\frac{de_r}{dt} = \frac{\partial v}{\partial r} \quad (4)$$

$$\frac{de_\theta}{dt} = \frac{v}{r} \quad (5)$$

$$\frac{de_z}{dt} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6)$$

$$\frac{d\gamma_{rz}}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (7)$$

3. 应变率张量分解为体应变率和应变率偏量之和:

$$\frac{de_r}{dt} = \frac{de_v}{dt} - \frac{1}{3} \frac{de_v}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{de_\theta}{dt} = \frac{de_v}{dt} - \frac{1}{3} \frac{de_v}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{de_z}{dt} = \frac{de_v}{dt} - \frac{1}{3} \frac{de_v}{dt} \quad (10)$$

$$de_v/dt = -(1/\rho)(d\rho/dt) \quad (11)$$

4. 应力张量分解为平均静水压力与应力偏量之和:

$$\sigma_r = S_r - P \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = S_\theta - P \quad (13)$$

$$\sigma_z = S_z - P \quad (14)$$

$$P = -(1/3) (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) \quad (15)$$

5. 静水压力与体应变之间的关系。

在加载过程中, 平均静水压力与体积压缩变形量之间关系采用 Рахматулин 提出过的土壤动力压缩曲线^[3]; 在卸载过程中, 考虑土壤的压实效应, 在一定的压力范围内将沿着与加载曲线不同的路径进行。

$$P = P_H (1 - \Psi) + P_{uL} \Psi \quad (16)$$

其中

$$\Psi = \begin{cases} 0 & (\rho > \rho_{ma}) \\ 1 & (\rho < \rho_{ma}) \end{cases}$$

$$P_H = 20000 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^4 + 250 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$P_{uL} = \begin{cases} P_H & (\rho > 1.47 \rho_0) \\ P_{Hma} - k_{uL} (\rho_{ma} - \rho) & (\rho_0 < \rho < 1.47 \rho_0) \\ 0 & (\rho < \rho_0) \end{cases}$$

以上式中, ρ_{ma} 为土壤加载过程中的最大密度; P_{Hma} 为与 ρ_{ma} 相对应的压力; P_H 、 P_{uL} 分别为加载和卸载时的压力, 在压力为 1000 kg/cm^2 (对应密度为 $\rho = 1.47 \rho_0$) 以上时两者相等; 卸载的斜率 k_{uL} 是假定土壤经大于 1000 kg/cm^2 的压力作用后密度增大 3% 而得出的常数。

6. 应力偏量和应变率偏量之间的关系。

在弹性加载和卸载阶段, 偏量之间服从剪切胡克定律:

$$\frac{dS_r}{dt} = 2G \frac{de_r}{dt} \quad (17)$$

$$\frac{dS_\theta}{dt} = 2G \frac{de_\theta}{dt} \quad (18)$$

$$\frac{dS_z}{dt} = 2G \frac{de_z}{dt} \quad (19)$$

$$\frac{d\tau_{rz}}{dt} = 2G \frac{dy_{rz}}{dt} \quad (20)$$

在塑性加载阶段, 偏量之间应用理想塑性屈服条件, 采用简化办法, 仍按上述弹性关系求得应力偏量各分量, 然后缩小一定的比例 (使应力状态拉回到屈服面上来), 再代入方程 (12-14), 以求出塑性阶段的应力张量。

塑性应力偏量各分量按以下关系式求出:

$$S_i^* = K S_i \quad (21)$$

$$S_o^* = K S_o \quad (22)$$

$$S_i^* = K S_i \quad (23)$$

$$\tau_{i2}^* = K \tau_{i2} \quad (24)$$

式中 $K = [J_2(P)/J_2(D)]^{1/2}$

$$J_2(D) = (1/2)(S_i^2 + S_o^2 + S_i^2 + 2\tau_{i2}^2) \quad (25)$$

$$J_2(P) = (1/3)Y^2(P)$$

$$Y(P) = \begin{cases} 0.5 + 0.268P & (P < 80 \text{ kg/cm}^2) \\ 22 & (P \geq 80 \text{ kg/cm}^2) \end{cases} \quad (26)$$

上面共列出了25个未知参量和26个方程,但因方程(1)和方程(11)是等价的,所以整个方程组是封闭的,可以求解。

三、数值计算方法

在现有的岩石触地爆炸二维流体弹塑性模型计算程序基础上,去掉能量方程,将初始网格移入地下,并加上相应的边界条件,修改后得到土壤浅埋爆炸二维弹塑性模型的计算程序。数值差分计算的方法和步骤可参见有关文章^{(1)、(2)},这里仅将与触地爆炸计算主要不同之处的处理方法加以说明。

1. 初始网格参数

由于炸药药包埋入地下,就必须把药包和其周围土壤作为两种介质来处理,其初始密度分别为 ρ_o^* 和 ρ_o 。这样就出现了两种计算网格,药室网格和土壤网格(此外还有空气网格)。由药包体积,不难定出初始药室网格的大小和数目,再根据爆炸能量按动能、内能分配各半的原则,可以算出药室网格内爆炸产物的初始压力 P_o 和初始速度 u_o 、 v_o 。

2. 空腔边界处理

药室的边壁,即炸药和土壤两种介质的界面就是爆炸空腔的边界。假定在空腔破裂之前,两种介质不允许穿越此边界进行质量、动量交换,而只能有力的传递。但在计算过程的后期,当药室空腔网格与空气网格(地表上面)或处于剥离状态的土壤网格直接相邻时,则允许它们之间发生质量交换。

在空腔内部,爆炸产物的气体压力用等熵膨胀来近似,空腔中气体压力可用以下表达式:

$$P^* = P_o \left(\frac{\rho^*}{\rho_o} \right)^k \quad (27)$$

式中 P_o 和 ρ_o^* 分别为爆轰初始压力和初始密度; ρ^* 为爆炸气体密度; k 为爆炸气体的绝热指数。

3. 地表土壤剥离假定

在临近地表处,我们假定:如果土壤密度小于初始密度 ρ_o ,其质点合成速度指向地上且超过1.5米/秒,则认为此网格的土壤已处于剥离状态,它们将与周围介质分离开来并飞出地表面。

四、计算结果简介

运用以上的数学计算模型，我们对药量为1吨的TNT集中药包，在土壤为均匀介质的条件下，做了一组触地爆炸和三组浅埋爆炸（小抵抗线）的数值计算。药包中心到地表面的距离分别为 $H = 0, 1.25, 2.50, 3.75$ 米。计算结果简介于下。

1. 爆破漏斗的形成过程

由示踪质点显示出的土壤变形情况，形象地描绘出了土中爆破漏斗的形成过程。以 $H = 2.5$ 米为例，不同时刻的漏斗形状如图1所示。在爆炸的早期阶段，由于爆炸产物气体的高压冲击作用，爆心周围出现一个近似球形的空腔向外扩张，此时，邻近药包的土壤发生了极大的位移，形成密实的压缩圈。稍后，爆心投影点附近地表向上隆起而出现鼓包。当空腔临近而

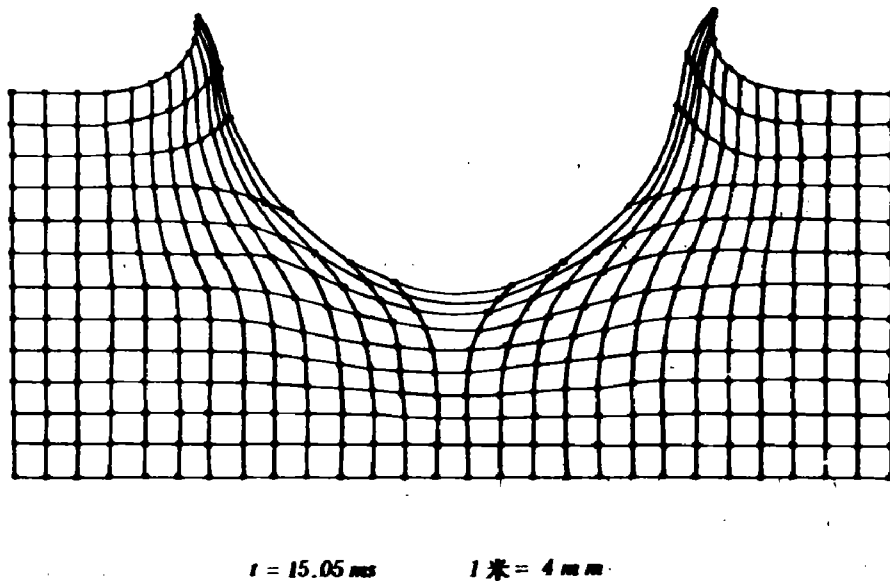
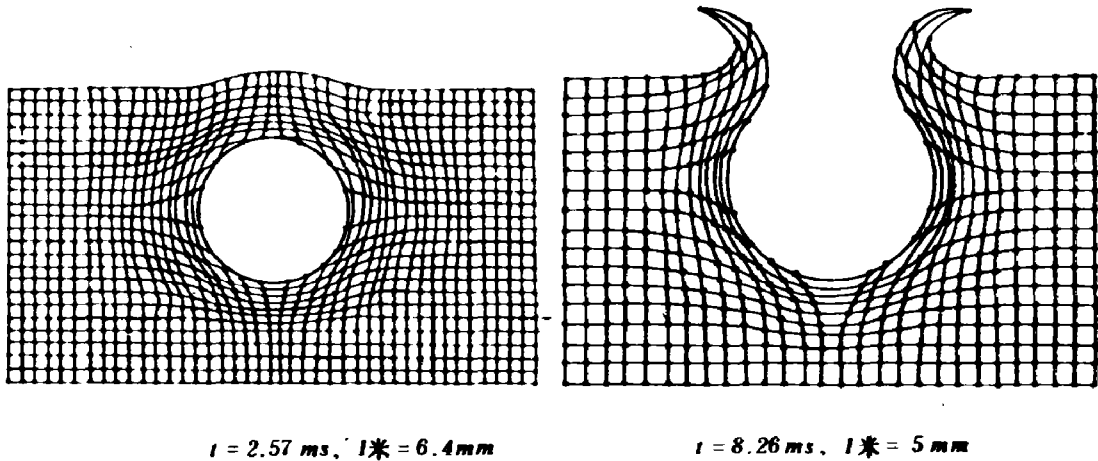


图1 不同时刻爆破漏斗的发展过程

尚未到达地表面时，由于应力波的反射稀疏作用，部分表面土壤发生剥离现象。空腔与剥离

层相联接后，爆炸产物气体携带破碎土块一齐向上方冲出，于是出现了爆破漏斗的锥形。在此以后的阶段，漏斗主要向两侧延伸，沿 z 轴的深度方向发展缓慢并逐渐停止下来。由此结果可知，在爆破漏斗的形成机制中，爆炸产物对周围土壤的冲击、挤压及抛掷作用是主要的因素，而剥离效应只起到一定的辅助作用。

图2给出了空腔半径和漏斗体积随时间变化的规律。其中，所谓空腔半径是指从初始药包中心算起向下至漏斗底部的距离，该值加上药包中心埋深就是通常所说的爆破漏斗深度。对于 $H = 2.5$ 米的爆炸而言，计算所得的爆破漏斗形成时间为20毫秒。

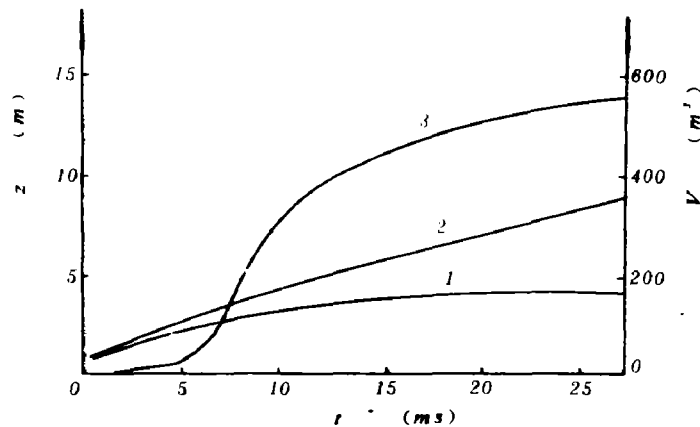


图2 空腔半径、漏斗体积及应力波阵面随时间变化的关系曲线
1—空腔半径 (z 向)， 2—应力波阵面， 3—漏斗体积。

2. 不同埋深条件下的爆破漏斗

三种埋深的浅埋爆炸及对应的触地爆炸条件下，计算所得的漏斗尺寸如图3所示。其中， R 为爆破漏斗的最大半径， h 为爆破漏斗的中心深度（均相对初始地表面言）。

可以看出，在浅埋爆炸条件下，随着药包埋深的增加，爆破漏斗的半径和深度均相应增大。如所周知，若把药包埋得极深，则将成为不出现漏斗的封闭爆炸 ($R = 0, h = 0$)。可见，图3中的两条曲线应该各有其极大值而后降至与横轴相交。另一方面，如果把药包抬高地表而作表面爆炸或低空爆炸，则漏斗也将逐渐减小以至消失。但限于时机和经费，我们没有对图中两端的虚线部分作相应的计算。

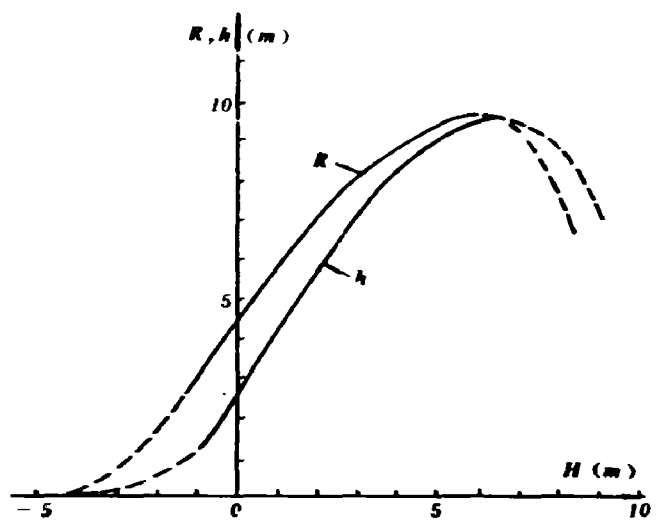


图3 爆破漏斗尺寸与药包埋深的关系

3. 土中浅埋爆炸应力波的衰减规律

图4给出了三种浅埋爆炸条件下爆心下方土中应力波 σ_z 峰值的计算衰减曲线,其中波的传播距离是以药包中心为起点算起的。对浅埋爆炸而言,不同埋深爆炸的应力衰减曲线在初始阶段相交于一点,即对应着空腔壁上的应力值。在较高应力部分,衰减指数 α 大于2;在较低应力部分,由于压实效应起了作用,衰减指数一般大于3。

从计算得出的应力波波阵面的形状来看,在爆心所处水平面以下的部分,较好地呈现出球面波的特征,只有邻近地表的浅层地区才出现较复杂的变化。这就意味着,沿铅垂方向不同深度的 $\sigma_z \sim z$ 衰减曲线,基本上也反映了沿通过爆心的水平方向不同距离的 $\sigma_r \sim r$ 衰减规律。在野外爆破试验中,可以用测量 $\sigma_r \sim r$ 曲线来代替测量 $\sigma_z \sim z$ 关系。因为前者较后者容易实现。

图4中的三条虚线分别代表相对应的空腔内部(或漏斗底部)的

压力。在空腔尚未破裂以前,腔内压力按等熵膨胀规律变化,破裂之后,随着爆炸产物冲出地表,漏斗底部压力迅速下降,以致会小于同一时刻土中应力波的峰值应力。

计算结果还表明,由于我们选取的土壤的可压缩性较大,从而使土中应力波的传播速度缓慢而爆炸空腔的发展速度很快。在爆后的早期阶段,土中应力波阵面总是紧贴在空腔壁附近;只有当空腔发展减缓或停止下来以后,土中应力波才脱离空腔向外传播(见图2中的空腔和应力波走时曲线),而此时的应力峰值已衰减到几百个大气压的量级,这意味着高应力区只局限在压缩圈附近。当然,这种特定条件下得出的计算结果,并不一定与现场土中爆炸试验的实测数据完全相符合。

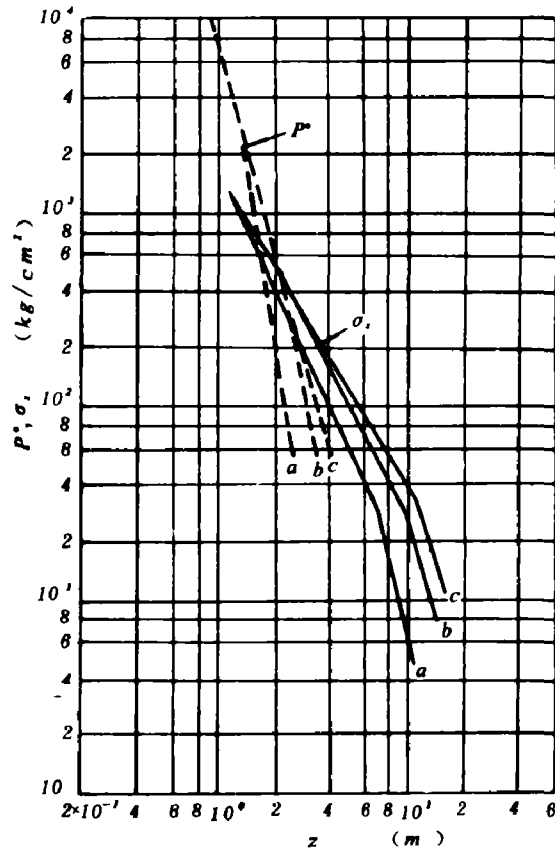


图4 不同埋深条件下 σ_z 应力峰值衰减曲线

$a-H = 1.25\text{ m}$, $b-H = 2.50\text{ m}$, $c-H = 3.75\text{ m}$.

参 考 文 献

- (1) L. J. Hageman, J. M. Walsh, AD-726459, AD-726460, Vol. I, Vol. II, (1971).
- (2) 曾惠泉、杨秀敏、焦云鹏、王太厚, 爆炸与冲击, (2)(1982), 45.
- (3) X. A. Рахматлин, А. Я. Сагомонян. Вопросы Динамики Грунтов, МГУ. (1964).

THEORETICAL ANALYSIS OF CRATER CHARACTERISTICS OF CONCENTRATED CHARGE EXPLOSION IN SOIL

Yang Xiumin Jin Jiliang Liu Dianzhong

Abstract

In this paper, the numerical solution of two-dimensional elasto-plastic problem of charge burst in shallow lay of soil is derived, the development of the crater in soil is described, the variation of crater size with different buried positions and the attenuation law of stress waves underneath in soil is also related. These results are helpful to the investigation of phenomena and data observed in explosion experiments.