

条形装药土中爆炸冲击波及 空腔的数值模拟

龙 源

(工程兵工程学院)

摘要 本文用拉格朗日坐标有限差分法对条形装药土中爆炸的冲击波和空腔参数进行了一维轴对称数值模拟。计算中取爆破介质为弹-理想塑性体。计算得到的冲击波、爆炸空腔的参数与X光摄影数据的比较,结果表明计算与实测结果基本一致。

关键词 冲击波 空腔 土介质 条形装药 有限差分法。

条形装药在工程爆破和军事爆破上得到大量应用的装药形式之一。从研究装药在土中爆炸的初期开始,如何对某种确定的爆破介质选择一个比较适合的计算模型,以模拟条形装药土中爆炸时产生的空腔及土中冲击波参数,是人们关注的问题。本文采用了П.Чемник等人提出的弹-理想塑性模型^[1],在处理冲击波时加入了人工粘性。计算只考虑了爆炸空腔发展的初期和中期阶段。此外,也计算了爆炸的最终空腔。

一、假设与已知条件

假设无限介质中有一无限长条形装药,它在土中爆炸时按瞬时爆轰处理,即 $t = 0$ 时,在装药位置有一团与其同形状的高温高压气体均匀地作用于柱腔壁,绝热等熵地向外膨胀,形成了爆炸产物与土介质界面的运动。同时在介质中推出冲击波。计算和实验中所用炸药和土介质的初始条件见文献[2],并取土的动态弹性模量为29 MPa。

此外,假定介质的密度只随波阵面运动而变化,它仅仅是拉格朗日坐标的函数,与时间无关。

在考虑土介质应力状态时,对于一维轴对称问题,由于轴向应变 $\epsilon_z = 0$,则轴向应力

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (\mu \text{ 为介质泊松比})$$

又可以证明

$$|\sigma_r| > |\sigma_z| > |\sigma_\theta|$$

因此,只要计算径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 就可以了。

我们用弹-理想塑性模型来描述高温高压爆炸产物作用下对土介质的性状。如图1所示,这种模型考虑了应力波的强度。当介质处于较高压力情况下,应力值远远超过介质的弹性限,而处于塑性流动状态。因此,选择一合理的塑性流动函数描述塑性流动。同时,该模型也考虑到了弹性前驱波,即也计及了弹性范围的变形量。

对于爆炸气体的流动,假如它满足LZK状态方程。

1988年10月3日收到原稿,1989年1月20日收到修改稿。

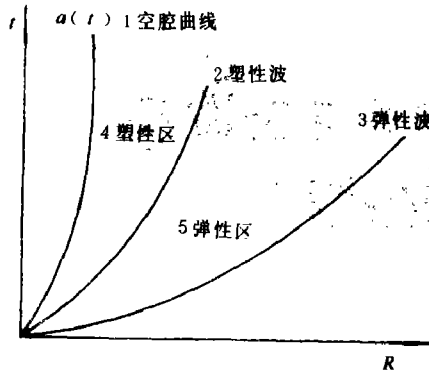


图1 弹-理想塑性模型

Fig. 1 Elastic-ideal plastic model

1. Cavity curve. 2. Plastic wave.

3. Elastic wave. 4. Plastic area.

5. Elastic area.

二、基本方程

对于爆炸气体中的微团和土介质中的微团 Δm , 分别有如下基本方程。

(一) 在爆炸气体中

运动方程

$$\frac{du}{dt} = -R \frac{d}{dm} (p_c + Q_c) \quad (1)$$

连续性方程

$$\frac{1}{\rho_c} = v_c = \frac{1}{2} \frac{dR^2}{dm} \quad (2)$$

状态方程 (LZK)

$$p_c = \frac{B}{v_c^2} \left[1 - \frac{1}{a(\gamma-1)} \right] + \frac{E_c}{av_c} \quad (3)$$

人工粘性

$$Q_c = \begin{cases} \frac{a \Delta m}{2v_c R} \left| \frac{dv_c}{dt} \right| + \frac{4(\Delta m)^2}{v_c R^2} \left| \frac{dv_c}{dt} \right|^2 & \text{当 } \frac{dv_c}{dt} < 0 \\ 0 & \text{当 } \frac{dv_c}{dt} \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

质量微团

$$\Delta m = \frac{1}{2v_c} \Delta R^2$$

以上各式中, R 为拉格朗日坐标, u 、 Q_c 和 p_c 分别为质点速度, 人工粘性和气体压力, ρ_c 为气体密度, $v_c = 1/\rho_c$ 为比容。在状态方程中, 对于确定的炸药介质, B 、 γ 、 a 均为常数, E_c 为炸药爆炸能。 $a = \sqrt{\gamma p_c v_c}$ 。

(二) 在土介质中

运动方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -R \frac{\partial}{\partial m} (-\sigma_r + Q) - \frac{\nu}{R} (\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (5)$$

连续性方程

$$\frac{1}{\rho} = \nu = \frac{1}{2} \frac{\partial R^2}{\partial m} \quad (6)$$

人工粘性

$$Q = \begin{cases} \frac{a \Delta m}{2\nu R} \left| \frac{\partial \nu}{\partial t} \right| + \frac{4(\Delta m)^2}{\nu R^2} \left| \frac{\partial \nu}{\partial t} \right| & \text{当 } \frac{\partial \nu}{\partial t} < 0 \\ 0 & \text{当 } \frac{\partial \nu}{\partial t} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

质量微团

$$\Delta m = \frac{1}{2\nu} \Delta R^2$$

以上各式中, σ_r 和 σ_θ 分别为径向和切向应力, ρ 和 ν 为土介质密度和比容。人工粘性中的 $a = \sqrt{E\nu}$, 其中 E 为介质的动弹模量。

三、本构方程

对于土介质的屈服采用库伦干摩擦条件

$$|\tau| = C - \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

式中 τ 和 σ 分别为最大剪应力和切面上的正应力, φ 和 C 分别为介质的内摩擦角和内聚力。假设

$$f = |\tau| - (C - \sigma \operatorname{tg} \varphi) = |\tau| - C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

为屈服函数, 则由 τ 、 σ 和 σ_r 、 σ_θ 的关系, 可得到

$$f = \sigma_\theta - \frac{(1 - \sin \varphi) \sigma_r + 2C \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (9)$$

又有关系式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial R} &= \dot{\varepsilon}_r = \dot{\varepsilon}_r^e + \dot{\varepsilon}_r^p \\ \frac{u}{R} &= \dot{\varepsilon}_\theta = \dot{\varepsilon}_\theta^e + \dot{\varepsilon}_\theta^p \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $\dot{\varepsilon}_r$ 和 $\dot{\varepsilon}_\theta$ 分别为径向和切向应变率, 角标 e 和 p 分别表示弹性和塑性。

对于弹性应变, 由广义虎克定律可推得

$$\varepsilon_\theta^e = \frac{\mu \sigma_r - (1 - \mu) \sigma_\theta}{E (1 + \mu)(1 - 2\mu) [\mu^2 - (1 - \mu)^2]}$$

因此有

$$\frac{u}{R} = \dot{\varepsilon}_\theta^e = \frac{(1 + \mu)[(1 - \mu)\dot{\sigma}_\theta - \mu\dot{\sigma}_r]}{E} \quad (11)$$

同理得到

$$\frac{\partial u}{\partial R} = \dot{\varepsilon}_r = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\dot{\sigma}_r - \mu\dot{\sigma}_\theta] \quad (12)$$

联解(11)、(12)式可以得到

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_r &= \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \left\{ (1-\mu) \frac{\partial u}{\partial R} + \mu \frac{u}{R} \right\} \\ \dot{\sigma}_\theta &= \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \left\{ \mu \frac{\partial u}{\partial R} + (1-\mu) \frac{u}{R} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

而

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_k &= \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_k} \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由上式可以得到塑性加载条件下的应力计算式

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_r &= \frac{E}{1+\mu} \frac{(1+\sin\varphi)^2 \partial u / \partial R + 2\cos^2\varphi (u/R)}{(1+2\mu)(3-\sin\varphi) - \sin\varphi(1-3\sin\varphi)} \\ \dot{\sigma}_\theta &= \frac{E}{1+\mu} \frac{\cos^2\varphi (\partial u / \partial R) + 2(1-\sin\varphi)^2 u/R}{(1+2\mu)(3-\sin\varphi) - \sin\varphi(1-3\sin\varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

以上各式中的 μ 为土介质的泊松比， λ 为待定参数，在推导应力表达式时可以消去。对其导数的取值，有

$$\lambda \rightarrow \begin{cases} = 0 & \text{当 } \begin{cases} f < 0 \text{ (弹性)} \\ f = 0, \dot{f} < 0 \text{ (从屈服面卸载)} \end{cases} \\ < 0 & \text{当 } f = 0, \dot{f} = 0 \text{ (理想塑性, 无硬化, 应力在屈服面上流动)} \end{cases}$$

四、计算中的稳定条件和边界与初始条件

1. 稳定条件

差分计算中的稳定条件是对时间步长 Δt 给予如下限制

$$\Delta t^{n+1} = \min \left(\frac{R_{j+1}^{n+1} - R_j^{n+1}}{3\sqrt{a^2 + b^2}} \right) \quad (16)$$

式中 a 的意义同前， b 按下式取

$$b = \begin{cases} 4\Delta R^{n+1} \left(\frac{\dot{v}}{v} \right)^{n+1} & \text{当 } v_{j+(1/2)}^{n+1} < v_{j+1/2}^n \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } v_{j+(1/2)}^{n+1} \geq v_{j+(1/2)}^n \text{ 时} \end{cases}$$

2. 边界条件

由于假设爆炸是在无限介质中发生的，并且只计算爆炸空腔和冲击波参数，故外边界的影响可以不考虑。

爆炸空腔与爆炸气体的分界面上的参数按接触间断而进行搭接处理，即认为对于紧挨分

界面的左右两个质量微元体, 其质点速度 u 和应力 σ_R, σ_θ 等参量随空间坐标的变化是连续的, 进一步可确定分界面的位置, 然后根据前面公式再计算分界面两侧介质的各个物理量。

3. 初始条件

不考虑爆轰过程, 对于起始时刻 $t = 0$, 分别取爆炸气体的初密度为炸药的初始密度, 土介质的初密度按实验所给条件取定。质点初速度 $u(0) = 0$, 初始爆炸空腔半径 $R(0) = r_0$ (装药半径)。

五、计算结果及其与实验结果的比较

1. 波阵面上质点速度沿空间的分布

从计算结果(图2)得到, 质点的最大速度是随距离增加而呈负指数规律衰减的, 这个结果与文献[3]给出的实验结果基本一致。从任一时刻的质点速度沿空间分布情况来看, 在爆炸近区, u 增加较快, 这与波的强度有关。随着时间增加, 波的强度削弱, 质点速度的增长也较缓慢。

2. 冲击波的定点波形和在不同时刻的空间波形

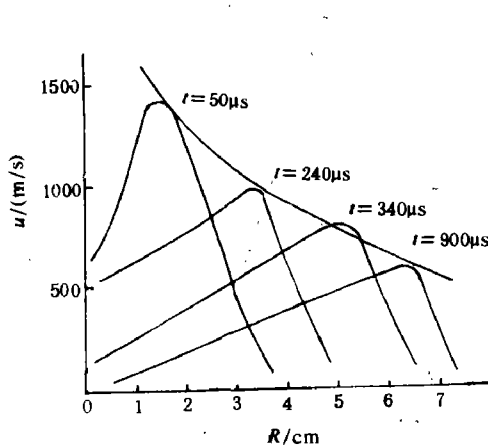


图2 波阵面质点速度的空间分布

Fig. 2 Spacial distribution of the mass velocity in a shock wave

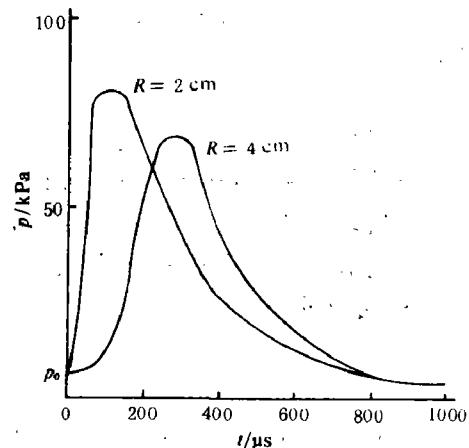


图3 冲击波的定点波形

Fig. 3 Shape of the shock wave at some distance from the charge

图3给出了距爆心两个不同距离的定点波形。从图中看出, 压力上升基本上是突跃的, 这符合冲击波的性质。冲击波在不同时刻的空间波形也较好地反映了爆炸初期冲击波的传播特点。从图4可以看出, 在土介质中最大峰值压力的衰减趋势也与文献[4]提供的实验结果大致相同。

此外, 计算指出, 在距爆心相对距离 $\bar{r} = R/r_0$ 约为27时, 爆炸近区介质中传出的冲击波就消失了。

3. 爆炸空腔

爆炸空腔的形状取决于装药的形状。计算和实验均采用直径 5.6×10^{-1} m。长径比21.8的

条形装药, 图5给出了计算的空腔曲线。计算的最终爆炸空腔半径为 $6.5 \times 10^{-2} \text{ m}$, 这个值与我们的X光摄影实验结果 $6.9 \times 10^{-2} \text{ m}$ 是比较接近的。

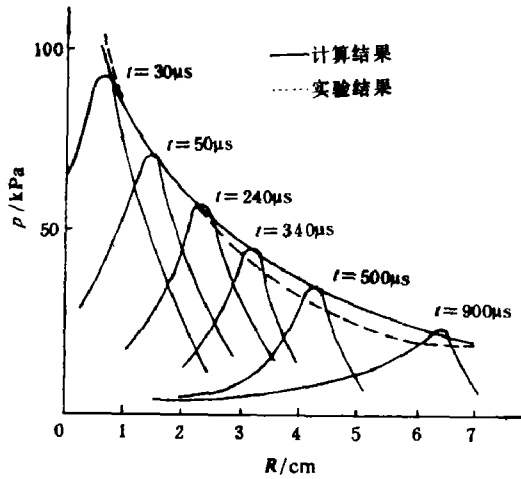


图4 冲击波在不同时刻的空间波形

Fig. 4 Spatial shape of the shock wave at different time

— Calculated results Experimental results

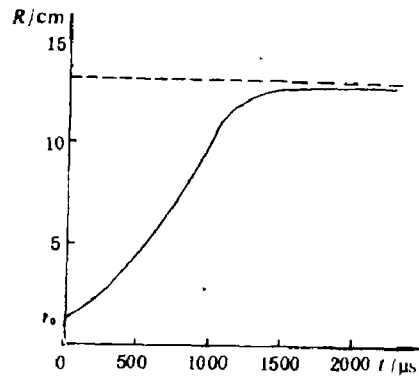


图5 爆炸空腔的运动曲线

Fig. 5 Radius of the explosion cavity R as a function of the time t

计算表明, 爆腔的最终尺寸由土介质的强度决定。当腔内压力不大于介质的强度时, 腔体膨胀立即停止。此时, 按照爆炸理论, 由于土介质内势能的积累而出现的反弹作用, 使空腔运动最终出现几次微小的脉动。该现象在计算中没有明显反映出来, 这可能是所选计算模型的一个不足之处。

六、结 语

从计算结果的分析与与实验结果比较来看, 采用理想弹塑性模型, 对于一些土介质, 可以比较实际地计算条形装药爆炸初期的冲击波参数和空腔参数, 这对定量分析土中爆炸的初期状态是有益的。当然, 实际的土中爆炸, 问题要复杂得多。临空面、装药形状、炸药种类以及介质本身的力学参数、天然节理裂隙等等, 都可能对爆炸产物产生重要影响。因此, 如何选取介质较真实的本构关系, 以确定较精确或简化的计算模型, 是定量研究爆炸参数和解决实际爆炸问题的重要途径。

弹-理想塑性模型虽发展较早, 但对于计算条形装药在土中的爆炸参数, 仍有一定实际意义。

完成本文曾受到林学圣教授、沈贤玕教授的赐教, 作者表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Чевник, П., Кокс, А. . Механика Глубенных Подземных Взрывов , Издательство "МИР" Москва (1966).
- [2] 龙 源等, 爆炸与冲击, 8 (3) (1988), 227.
- [3] J. 亨利奇著, (熊建国等译), 爆炸动力学及其应用, 科学出版社, 1987年.

NUMERICAL SIMULATION OF THE SHOCK WAVE AND CAVITY OF A STRIP-SHAPED EXPLOSIVE CHARGE EXPLODING IN SOIL

Long Yuan

(Engineering Institute, Engineering Corps, PLA)

ABSTRACT Recently, cylindrical charges have been widely used as a kind of special charge structures in engineering and military blasting and attention has been paid to its further theoretical studies. This paper studies the parameters of the explosion cavity in soil and its generated shock waves by using the finite difference method and the elastic-perfect-plastic model proposed by P.Chetuvik¹⁾ et al; An artificial viscosity is used to smooth discontinuities in calculation. Comparing the results of calculation with those obtained by the X ray photographic experiment, good agreement is obtained.

A. Hypothesis and preliminary conditions:

1. Cylindrical charge explosion in soil is considered as a transient detonation.
2. The powdered RDX explosive is used with a diameter of $5.6 \cdot 10^{-3}$ m, length/diameter 21.8, and charge density 1.0×10^3 kg/m³. The ordinary black and yellow top-surface clay are used as the media, its cohesive coefficient is 2.45×10^4 Pa, angle of internal friction $23^{\circ}28'$, density 1.8×10^3 kg/m³ and water content 15~16 %
3. The media densities are regarded as functions of the Lagrangian coordinates, independent upon the time.

B. Explosion model and constitutional relations:

1. Effects of detonation products under high temperature and pressure in the media are described with the elastic-perfect-plastic model as in Fig.1. When the medium is under high pressure, the loading stress is far beyond its elastic limit into a plastic state. So a reasonable function is selected to describe the plastic flow. In addition, the elastic precursor is considered simultaneously.

2. Constitutional relations

The Mohr-coulomb friction failure relation:

$$|\tau| = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

where τ = maximum shear stress, σ = normal stress at tangential plane, φ = angle of internal friction, C = cohesion.

is used to describe the yielding properties of the soil. Therefore, the yielding relation is

$$f = |\tau| - C + \sigma \tan \phi$$

C. Results and conclusions:

1. The particle velocity decreases exponentially with the increase of distance.
2. The shock wave form passing fixed-point and the spatial distributions of the shock wave at various times all reflect the propagation characteristics of the shock wave. Besides, the decay behavior of the peak pressure is in accord with that of the experiment.
3. The final dimension of the explosion cavity depends on the soil strength. When the cavity pressure is less than the soil strength, the expansion of the cavity stops immediately.
4. The shock wave parameters and explosion cavity generated by the cylindrical charge explosion can be calculated rather correctly for some soils using the elastic-perfect-plastic model, but some factors, for example, free surface, charge shape, and the distribution of the charge weight and so on, are not considered. There are some differences among the results of calculation and those obtained by the experiments.

KEY WORDS shock wave, cavity, soil medium, strip-shaped explosive charge, finite difference method.