

# 平面装药模拟高超压 长持续时间爆炸作用

陈叶青 周丰峻 苏绍曾

(洛阳水利工程技术研究所 洛阳 471023)

**摘要** 平面装药长持续时间爆炸作用是一种有效的试验手段,对土中平面波传播和土介质与结构相互作用的研究具有十分重要的意义。从理论计算和大型野外试验两个方面对平面装药爆炸作用过程进行了深入研究。在理论计算上,建立了 TNT 装药和真实空气双介质物理模型,利用一维不定常平面流动拉格朗日型偏微分方程组求解,给出了爆腔压力空间分布和地面压力随时间的变化结果。在野外试验中,克服了平面装药模拟高超压作用的许多技术困难,实现了高达45MPa的压力加载。文中将理论计算和野外试验结果进行了综合比较,结果表明压力波形的振荡衰减特征完全一致,从而证明了平面装药模拟高超压长持续时间爆炸作用是完全可以实现的有效而可靠的手段。

**关键词** 平面装药 爆炸波模拟 高超压长持续 土中爆腔

## 1 前言

在城市建设高速发展的今天,地下空间利用已经引起人们极大兴趣。许多国家相继在城市地下构筑了商业街、娱乐厅、停车场等设施。地下建筑和地面建筑设计很不相同,在荷载选取上有独特的要求,它必须考虑地面传入的强动载荷的作用。特别是高超压长持续时间的爆炸作用可能对地下建筑物的安全性造成重大影响。

1964年,美国空军武器实验室为了评估地下结构物的安全性,研究了爆炸模拟加载技术,进行了氢氧混合气体爆炸试验<sup>[1]</sup>。1968年以后,美国工程兵水道试验站也参加了这项工作,率先采用了导爆索在爆腔中引爆的方法进行强动载荷模拟,即 HEST 技术。1975年以后,美国核防护局和水道试验站改进了爆腔结构,填充泡沫塑料,发展成为 FOAM HEST 技术<sup>[2]</sup>。已公布的加载超压达27MPa。70年代,前苏联也开展了加载技术研究,采用地面铺设导爆索直接复土的方法进行试验。

我国平面装药模拟加载技术起步较晚,从1981年开始进行系统研究。至1991年,已完成5次大型野外化爆加载试验,最大加载面积达25m×25m,实验模拟峰值超压为0.06~45MPa,超压持续时间为10~230ms。

在系统的模拟加载试验研究基础上,从1988年开始进行理论计算。计算解决了平面装药爆炸后爆腔扩展和地面强动载荷的形成过程,提供了不同条件下地面压力随时间变化的大量结果。

## 2 物理模型

平面装药模拟试验的爆腔置于地面上,一般是保持爆腔底部或顶部与地面平齐。爆腔可以采取变高角钢框架支撑或者泡沫塑料与导爆索装药层互相叠加的方法构成。爆腔顶部及四周复土,如图 1 所示。

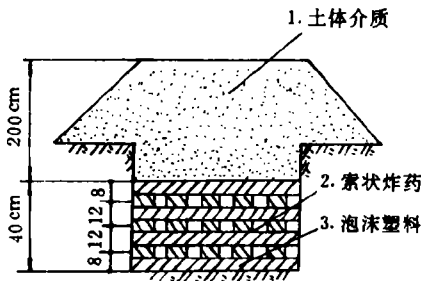


图 1 装药结构示意图

Fig. 1 Scheme of the charge structure

1. Soil; 2. Strip explosive; 3. Foam plastic

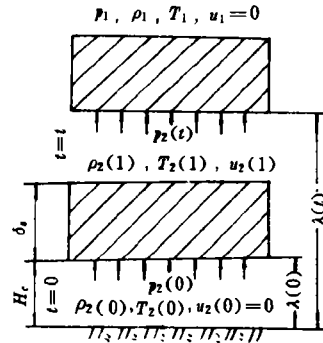


图 2 简化物理模型图

Fig. 2 Sketch of physical model

为了正确反映装药模拟试验特点,在爆腔流动区,我们建立了真实空气、TNT 装药双介质模型。假定装药瞬时爆轰,爆轰产物和空气运动满足平面一维流动条件。泡沫塑料层,在爆炸高温作用下部分燃烧形成 CO、CO<sub>2</sub>、烃、烷等气体,其余形成颗粒状或碎块状物质,对爆炸波运动造成阻碍,其作用相当于栅板滤波。

爆腔内介质的相互作用以及冲击波与土壤介质的相互作用是非常复杂的。爆炸产生的高温高压气体先压缩土体介质,使爆腔开始扩大,当应力波传播到土体介质的上表面时,产生反射拉伸波传向爆腔,加速爆腔的膨胀,从而使爆腔中的压力降低。同时土体介质在向上飞散过程中破裂形成“孔隙”,最初孔隙也是随上界体升高而扩大,造成空腔气体的泄流,使压力降低更快。整个物理过程是相当复杂的,要想用一个物理模型把整个复杂过程都准确地包括进去是很困难的,为此必须抓住问题的关键进行适当的简化处理。由于假定是一维,平面装药看成是无限大平面,因此不考虑侧向,由于土壤介质阻抗远大于空气介质阻抗,因此下边界作为固壁考虑。上界体运动破裂形成孔隙是泄压的主要原因,因而把上界体作为动边界来考虑,同时建立孔口泄流模型<sup>[3]</sup>,如图 2 所示。爆腔内压力变化满足下式<sup>[3]</sup>

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{4}{L} \left(1 - \frac{H_c}{\lambda}\right) \gamma p_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(1-\gamma)/\gamma} \times \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_2}{\rho_1} \left[ \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\gamma} - \frac{p_1}{p_2} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $p_1$  为外界压力;  $p_2$  为爆腔内压力;  $H_c$  为爆腔高度;  $\lambda$  为爆腔在上盖体运动过程中的高度;  $\rho_1$  为空气密度;  $L$  为调节系数;  $\gamma$  为绝热指数。

### 3 数值计算

取一维不定常拉格朗日型基本方程组<sup>[4]</sup>

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial R}{\partial r} \quad (\text{连续方程}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (\text{动量方程}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{p}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{能量方程}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = u \quad (\text{质点速度}) \quad (5)$$

$$E = E(p, \rho) \quad (\text{热质方程}) \quad (6)$$

$$T = T(p, \rho) \quad (\text{热能方程}) \quad (7)$$

式中:  $R$  为欧拉坐标;  $r$  为拉格朗日坐标;  $E$  为内能;  $p$  为压强;  $\rho$  为密度;  $T$  为温度;  $\rho_0$  为初始密度, 对应于空气和爆炸气体产物分别为  $\rho_{0a}, \rho_{0e}$ 。

对上述方程组进行无量纲化, 选取基本量纲量:  $p_{0a}$  (大气压力),  $\rho_{0a}$  (大气密度),  $H_c$  (爆腔高度),  $T_0$  (大气温度)。

$$\text{导出量: } u_0 = \sqrt{\frac{p_{0a}}{\rho_{0a}}}, \quad E_0 = \frac{p_{0a}}{\rho_{0a}}, \quad t_0 = \frac{H_c}{u_0}$$

设无量纲化参数为:

压强  $\pi = p/p_{0a}$ , 密度  $\eta = \rho/\rho_{0a}$ , 质点速度  $\beta = u/u_0$ , 内能  $\varepsilon = E/E_0$ , 温度  $\theta = T/T_0$ , 欧拉坐标  $\lambda = R/H_c$ , 拉格朗日坐标  $x = r/H_c$ , 时间  $\tau = t/t_0$ 。

无量纲化方程组为

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_a} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = - \frac{1}{\eta_a} \cdot \frac{\partial (\pi + \zeta)}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} = \frac{\pi + \zeta}{\eta^2} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial \tau} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \tau} = \beta \quad (11)$$

其中: 初始密度

$$\eta_a = \begin{cases} 1, & \text{对于空气} \\ \rho_{0e}/\rho_{0a}, & \text{对于爆炸气体} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{人工粘性 } \zeta = \sigma \eta, \quad \sigma = \begin{cases} \frac{\gamma + 1}{2} \left(\frac{m}{\pi}\right)^2 \Delta x^2 \left(\frac{\partial \beta}{\partial x}\right)^2, & \frac{\partial u}{\partial r} < 0 \text{ 时} \\ 0, & \frac{\partial u}{\partial r} \geq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $m$  为激波层网格数;  $\Delta x$  为网格宽度。

炸药和真实空气状态方程具有同一形式<sup>[5,6]</sup>

$$\varepsilon = \frac{1}{2} z (\mu - 1) \tag{14}$$

$$\theta = z \cdot s \tag{15}$$

$$z = \pi/\eta \tag{16}$$

对于空气:

$$\mu = \mu_0 + \mu_1 \xi \tag{17}$$

$$\xi = \ln \eta \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \mu_0 = 1 + & \frac{18.49425 + 3z}{3.29885 + z} + \frac{900(z-1)}{2810 + z^2} + \frac{1400(z^2-1)}{5 \times 10^6 + z^3} + \frac{35 \times 10^3(z-1)}{10^7 + z^2} \\ & + \frac{1900(z^2-1)}{256 \times 10^6 + z^3} + \frac{3 \times 10^5(z^2-1)}{108 \times 10^{12} + z^2} - \frac{100(z^5-1)}{6 \times 10^{11} + z^6} \end{aligned} \tag{19}$$

$$\mu_1 = \frac{2zs'}{s + zs'} \tag{20}$$

$$s = \frac{486.8}{1000 + z^2} + \frac{3860 + z}{7500 + 16.5z} \tag{21}$$

对于爆炸气体<sup>[7]</sup>:  $\mu = 1 + 1.76 + 52.4892z/(7.300 + z^2) \tag{22}$

$$s = 12/(9.65 + z) \tag{23}$$

数值计算采用显示交叉格式,在一般区域其精度是二阶的,如图 3 所示。解域是三条直线围成的半无限带形区域,差分网格取为矩形网格,令  $\Delta x$  为定值,  $\Delta \tau$  步长可变,对网格中心点取差分,则差分方程为

$$\beta_e^{n+1/2} = \beta_e^{n-1/2} - \frac{1}{\eta_n} \cdot \frac{\Delta \tau^n}{\Delta x_e} (\pi_e^{n+1/2} - \pi_e^{n-1/2} + \zeta_e^{n+1/2} - \zeta_e^{n-1/2}) \tag{24}$$

$$\lambda_e^{n+1} = \lambda_e^n + \beta_e^{n+1/2} \Delta \tau^{n+1/2} \tag{25}$$

$$\sigma_e^{n+1/2} = \begin{cases} \frac{\gamma+1}{2} (\frac{m}{\pi})^2 (\beta_e^{n+1/2} - \beta_e^{n+1/2})^2, & \beta_e^{n+1/2} > \beta_e^{n+1/2} \\ 0, & \beta_e^{n+1/2} \leq \beta_e^{n+1/2} \end{cases} \tag{26}$$

$$\eta_e^{n+1/2} = \frac{1}{\eta_n} \cdot \frac{\Delta x_{e-1/2}}{\lambda_e^{n+1} - \lambda_e^{n+1}} \tag{27}$$

$$\zeta_e^{n+1/2} = \frac{1}{2} (\eta_e^{n+1/2} + \eta_e^{n-1/2}) \sigma_e^{n+1/2} \tag{28}$$

$$\xi_e^{n+1/2} = \ln_n (\eta_e^{n+1/2}) \tag{29}$$

在一般区域及激波层区域的稳定性条件分别为

$$\frac{\gamma z}{(\Delta \lambda)^2} \Big|_{\max} (\Delta \tau)^2 \leq 1 \tag{30}$$

$$\Delta \tau \leq \frac{2/3}{k \left| \frac{\Delta \beta}{\Delta \lambda} \right|_{\max}} \tag{31}$$

式中:  $k = 2(\gamma+1)(\frac{m}{\pi})^2$ 。

初始条件,对于空气介质,  $\beta_e^{-1/2} = 0, \pi_e^0 = 1, \eta_e^0 = 1, \lambda_e^0$  为空气介质层中各网格点初始无量纲化欧拉坐标;对于炸药介质,  $\beta_e^{-1/2} = 0, \pi_e^0 = 168000, \eta_e^0 = 1.598, \lambda_e^0$  为炸药介质中各网格点的初始无量纲化欧拉坐标。

对于空气介质和爆炸气体介质的分界面,两侧的压强、密度相差很大,要进行特殊的处理才能计算下去,典型的计算结果如图4所示。

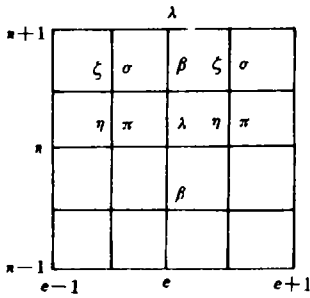


图3 交叉格式简图

Fig. 3 Sketch of intersecting scheme

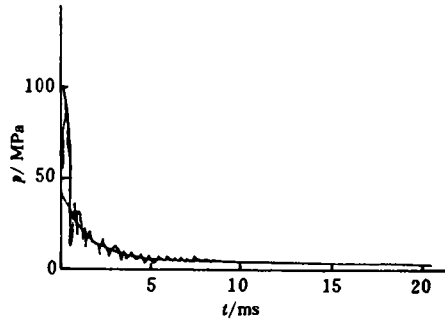


图4 理论计算超压波形

Fig. 4 Overpressure waveform of the theoretical calculation

### 4 试验研究

平面装药爆炸加载技术,其原理是在爆腔中分层布置装药作为驱动能源,层间用泡沫塑料充填作为阻尼介质,利用密排导爆索保证瞬时平面起爆条件。由于爆腔上下及四周复土形成初始密闭空间,延缓了高压气体泄漏,从而获得所需要的模拟超压波形<sup>[2,9]</sup>。

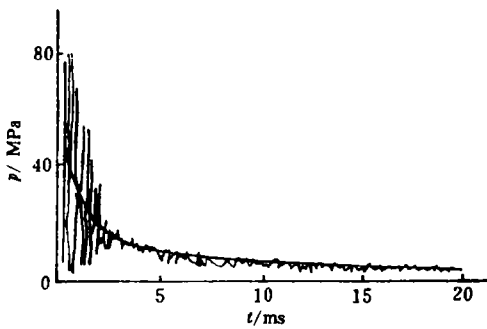


图5 试验实测超压波形

Fig. 5 Overpressure waveform of the test

在本文的系列试验中,采用了混合装药技术和偏置分层技术,参见图1。混合装药是采用导爆索-TNT片状装药按条形布设,条形装药排列紧密,构成一个混合装药层。偏置分层是在爆腔内布设多个装药层,其装药间距和装药量可以调节变化,这样可以保证模拟加载获得满意的结果。

测量系统包括四个部份,YT2-1000型压力传感器,电荷放大器,BC-32多路瞬态记录仪和GW-0520微机。为了保证测量系统的正常工作,采用了刚柔结合的防护措施,对爆腔区附近的测试电缆进行了严密的保护。

系列试验中,通过改变装药层数、装药高度和装药密度,给出了大量实测超压结果。典型实测压力波形及其拟合曲线示于图5。

### 5 爆腔平面尺寸应用设计

实际试验装药为有限平面,由于边侧稀疏的影响,地面加载的岩土介质中一维有效区类似一锥形体(如图6)。根据文献[9]的分析,平面应力场受稀疏影响的宽度可用如下函数形式表示

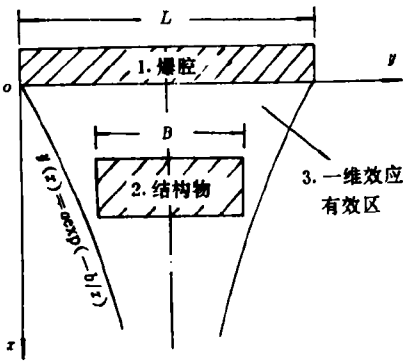


图 6 爆腔与结构物关系设计简图

Fig. 6 Design sketch of the shot cavity and structure

1. Shot cavity; 2. Structure;

3. Effective region of one dimensional action

$$y = a e^{-b/x} \quad (32)$$

式中:  $y$  为稀疏波影响宽度;  $a$  为系数;  $b$  为指数;  $x$  为自爆腔底面算起的深度。

用非线性最小二乘法进行曲线拟合, 分别得到岩、土中稀疏波影响宽度表达式如下

$$\text{岩体中: } y(x) = 2.121e^{-0.567/x} \quad (x \leq 4.0\text{m}) \quad (33)$$

$$\text{土体中: } y(x) = 2.285e^{-0.733/x} \quad (x \leq 4.5\text{m}) \quad (34)$$

当结构的线性几何尺寸和埋深确定后, 爆腔平面几何尺寸的设计就很容易地得到, 如图 6。

$$\text{岩体中: } L = B + 2 \times 2.121e^{-0.567/x} \quad (35)$$

$$\text{土体中: } L = B + 2 \times 2.285e^{-0.733/x} \quad (36)$$

上两式中:  $L$  为爆腔宽度(或长度), (m);  $B$  为结构物宽度(或长度), (m);  $x$  为自爆腔底面算起的结构物深度, (m)。

## 6 结论与展望

试验实测结果与数值计算比较表明, 压力波形拟合值相差 20%, 冲量拟合值相差 30%, 由此, 可以得出以下几个结论:

(1) 计算压力波形的振荡衰减特征和实测波形吻合, 振荡是不同介质分界面折、反射的结果, 衰减是由于爆腔扩张气体泄漏所形成的。从而证明平面装药模拟高超压长持续时间爆炸作用是有效而可靠的手段。

(2) 多层装药比单层装药效果好。多层装药由于减小了反射距离, 提高了波形振荡频率, 在阻尼作用下可以有效地抑制波形脉动。

(3) 偏置装药比均匀布设装药效果好。向下偏置装药, 可以减小上部爆腔压力, 延缓高压气体泄漏, 遏止压力波衰减过程。

由于平面装药爆炸时爆腔地面是向下运动的, 今后应建立空气、炸药和土壤三介质模型, 考虑土界面耦合运动, 将土中应力波一起计算以便获得更符合实际的结果。

## 参 考 文 献

- 1 Gerold P D. Simulation of Air-Blast Induced Ground Motions. AD 614990, 1965.
- 2 Kiger S A. Use of FOAM HEST to Simulate Low-Yield Nuclear Environment. AD-A103315, 1981.
- 3 陈叶青. 平面装药模拟核爆炸的数值计算与试验研究.[硕士学位论文]. 南京: 南京工程兵工程学院, 1991.
- 4 周丰峻. 真实空气爆炸波计算(内部资料). 洛阳: 89002 部队, 1977.
- 5 周丰峻, 等. 空气中爆炸辐射流体动力学计算(内部资料). 洛阳: 89002 部队, 1979.

- 6 Brode H L. Point Source Explosion in Air, RM-1824-AEC, 1965.
- 7 Brode H L. Blast Wave from a Spherical Charge. *Physics Fluids*, 1959, 2(2): 217~229
- 8 苏绍曾, 等. 平面装药加载技术试验研究. 洛阳: 89002 部队, 1991.
- 9 牛小玲, 等. 爆腔平面尺寸设计(私人通讯). 洛阳: 89002 部队, 1993.

## SIMULATION OF LONG-DURATION AND HIGH-OVERPRESSURE BLAST WAVE ACTION USING A PLANE CHARGE

Chen Yeqing, Zhou Fengjun, Su Shaozeng

(*Luoyang Institute of Hydraulic Engineering and Technology, Luoyang, 471023*)

**ABSTRACT** The long-duration blast wave action using a plane charge is an effective test method to study the propagation of plane waves in soil and the mutual action of soil medium on structure. In this paper, the process of blast wave action using a plane charge is investigated by numerical calculation and large scale outdoor tests. For the numerical calculation, a two-phase physical model of TNT charge and real air is established. Using the Lagrangian partial differential equations of one dimensional unsteady plane flow, the spatial distribution of the pressure on the shot cavity and the change of the pressure on the ground surface with time are given. After solving many technical difficulties on the simulation of high-overpressure by a plane charge in the outdoor tests, the pressure loading of 45Mpa is obtained. By comparing the results of numerical calculation with the measured values of the tests, the conclusion indicates that the oscillating characteristics of the waveform and attenuation profile of the pressure versus time is in good accord with the test results. So, it shows that using a plane charge to simulate the high-overpressure and long-duration blast wave action is a practical, effective and reliable method in engineering application.

**KEY WORDS** plane charge, blast wave simulation, high-overpressure, long-duration, shot cavity in soil