

# 爆炸挤压粘土密度变化过程的数值模拟

## Numerical simulation on variation of density of the soil compacted by explosion

王仲琦<sup>1</sup>, 张 奇<sup>2</sup>, 白春华<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081; 2. 西安科技学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**一种新型爆破工艺, 需要采用不可压缩介质作垫层, 利用炸药的爆炸作用对粘土进行挤压, 形成地下空间。为了分析爆炸挤压后土体参数的变化规律, 建立了爆炸挤压垫层和粘土的力学模型及数值方法。通过计算, 得到爆炸作用下粘土密度变化的分布和爆炸空腔的发展过程。

**关键词:** 爆炸作用; 数值计算; 爆破工程

中图分类号: TD 235

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2001) 03- 0350- 04

**作者简介:** 王仲琦, 男, 1972 年生, 1998 年获北京理工大学硕士学位, 现在该校攻读博士学位。主要从事爆炸力学理论及数值模拟方法研究。

WANG Zhong-qi<sup>1</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, BAI Chun-hua<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** There is a new blasting technology which utilizes the explosion effect of the explosive to compact the soil to form the underground space with the non-compacted material as the cushion. To analyze the variation of the parameters of the soil, the mechanical model and numerical method of the explosion compacting the cushion and soil are established. The profile of the density variation of the soil under explosion effect and the developing process of the explosion cavity are acquired by simulation.

**Key words:** explosion effect; numerical simulation; blast engineering

## 1 问题的提出<sup>y</sup>

爆炸挤压可使粘土形成规则的空腔, 该技术已被应用于构筑地下空间。与传统施工方法相比, 省工、省时、省料, 经济和社会效益十分明显。粘土在爆炸载荷下, 密度增大, 强度提高有利于腔体稳定和维护。许多学者对爆炸空腔的膨胀过程进行过研究<sup>[1-3]</sup>, 但腔壁以外土体密度的变化规律研究不多, 特别是土体密度变化与装药的相关性及与土体物理力学性质的相关性缺乏研究。

以前研究主要考虑的物理模型是耦合装药对土体的爆炸挤压作用。由于这种新型的爆破工程工艺需要, 本文采用数值模拟, 分析不耦合装药对土体的挤压过程, 不耦合空间填充一种不易压缩介质作为垫层, 本文中采用水介质(如图 1)。

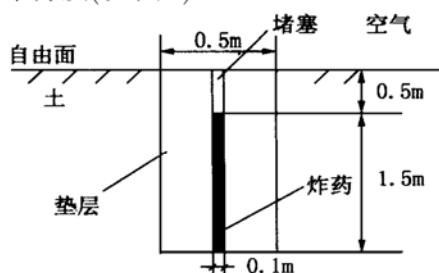


图 1 爆破孔和装药布置

Fig. 1 Blast hole and charge

## 2 力学模型和计算方法

炮孔中装药爆炸形成的爆炸场中涉及爆轰产物、空气、土和水等四种介质, 同时此问题又是一个大变形问题。笔者在多流体网格算法基础上, 提出了两种以上介质处理算法, 并自行编制了 sMMIC 程序。此程序可以模拟垂直炮孔爆炸作用。

### 2.1 算法简述

可以处理两种以上介质作用的多流体网格方法采用轴对称或平面 Euler 坐标系中的矩形离散网格, 考虑到计算域较大, 采用变步长的空间网格。对于流体弹性塑性方程组, 采用“和”分裂格式, 主要分为压力效应步和输运步。

计算域中采用体积份额  $\sigma^{(i)}$  处理物质界面, 设混合合格中爆轰产物、空气和土所占体积分别是  $V^{(1)}$ 、 $V^{(2)}$  和  $V^{(3)}$ , 则其所占体积份额分别是

$$\sigma^{(i)} = V^{(i)} / \sum_{j=1}^3 V^{(j)} \quad i = 1, 2, 3$$

所有的物理量离散后的值都取在网格中心, 人工粘性都取在格边中点。通过 Lagrange 步和输运步, 可得到问题的计算格式。其计算循环过程如下:

a) 根据变形几何关系和应力应变关系计算得到网格偏应力值。

b) 压力效应步(即 Lagrange 步), 考虑压力梯度和偏应力的作用, 得到网格的中间速度和内能。

c) 输运步(即 Euler 步), 质量、动量和能量在 Euler 网格上进行重新分配, 得到新的网格速度和网格内各介质的质量及内能。对于混合格进行输运时, 采用两项技术:

(1) 对于含有混合网格的计算, 运用 Youngs 界面处理技术, 利用贡献网格及其周围八个网格的介质体积分额来确定贡献网格中物质的界面。混合网格中的物质界面被近似地用一条直线来表示, 该直线的斜率由贡献网格周围八个网格体积分额的分布来确定, 直线斜率确定后, 再根据贡献网格本身的体积分额确定直线的位置。物质界面构造出来后, 就可以计算从贡献网格流向接受网格的体积流, 然后再分别计算通过网格边界的质量流、动量流、能量流等物理量。

(2) 当混合格中有三种物质时, 采用简单线界面技术(SLIC), 根据前后网格的物质状态近似判断本网格中物质分布状态, 用水平直线段或垂直直线段近似表达物质分界面。最后, 由物质近似分布状态确定各物质输运量。

d) 根据各介质的状态方程得到网格压力, 完成一个时间循环。

e) 用稳定性准则规定的条件计算下一个时间步的步长, 即可进行下一个时间步的计算。

## 2.2 实例模型

垂直炮孔爆炸初始场如图 1 所示。

### (1) 网格划分

由于中心装药直径很小, 而所关心的爆炸作用范围较大, 因此采用变步长矩形网格,  $r$  向 280 个网格, 随  $r$  增大网格尺寸从 5 mm 逐渐加大到 30 mm, 共计 2.8 m;  $z$  向 120 个网格, 以装药为中心, 沿  $z$  轴正负方向网格尺寸从 50 mm 加大到 80 mm, 共计 5.6 m。

### (2) 边界条件处理

在边界网格以外增加一排虚网格来处理边界条件:  $z$  轴为对称轴, 采用刚性壁条件, 其余三个边界为自由边界。

### (3) 应力应变关系

对土采用理想弹塑性模型, 应力应变关系为

$$S_{lk} = G(\epsilon_{lk} - \frac{1}{3} \mu \delta_{lk}) \quad l, k = r, z, \theta$$

其中  $\delta_{lk} = \begin{cases} 1, & l = k \\ 0, & l \neq k \end{cases}$ ;  $S_{lk}$  为应力偏量;  $\mu$  为体积应变;  $G$  为剪切模量。

采用屈服准则:

$$f = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} - (\alpha_0 + \alpha_1 p + \alpha_2 p^2)$$

式中  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  是常数;  $p$  是压力;  $S_{ij}$  为偏应力。

### (4) 状态方程

在爆炸场的数值模拟中, 爆轰产物的压力波动范围很大, 从几万个大气压到低于一个大气压, 很难找到一个适合所有范围的状态方程。JWL 状态方程能精确描述凝聚炸药圆桶实验过程, 且具有明确的物理意义, 因而在弹药设计和爆炸数值模拟中得到了广泛应用。本文对爆轰产物采用 JWL 状态方程, JWL 状态方程<sup>[2]</sup>的一般形式为

$$P_s = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + CV^{-(w+1)}$$

$$E_s = \frac{A}{R_1} \exp(-R_1 V) + \frac{B}{R_2} \exp(-R_2 V) + \frac{C}{wV^w}$$

其中  $P_s$  为压力;  $E_s$  为爆轰产物的内能;  $V$  为爆轰产物的相对体积(即爆轰产物体积与初始体积之比  $V^{(1)}/V_0$ ); 下标  $s$  表示等熵过程;  $A, B, C, R_1, R_2, w$  为待定常数, 对于乳化油, 取  $A = 214.4, B = 0.182, C = 0.649, R_1 = 4.2, R_2 = 0.9, w = 0.15$ , 本组数据由文献[2]给出。

对于空气, 近似采用理想气体状态方程。

对于垫层, 采用泰特状态方程<sup>[4]</sup>, 对于一个理想绝热过程, 得绝热线

$$(P + B)/\rho^k = (P_0 + B)/\rho_0^k$$

式中  $P$  为压力;  $P_0$  为初始压力;  $\rho$  为密度;  $\rho_0$  为初始密度;  $B = 0.3045 \text{ GPa}; k = 7.15$ 。

对于土, 其压力  $p$  和体积应变  $\epsilon^v$  的关系式为<sup>[5]</sup>

$$p = 8.626 \times 10^5 \exp(18.9 \epsilon^v)$$

## 3 计算结果与分析

### 3.1 计算参数

炮孔参数: 孔直径 0.1 m, 孔深 2 m, 堵塞长 0.5 m。

装药几何参数: 装药直径 0.1 m, 装药长 1.5 m。

爆轰参数: 密度  $\rho = 1.31 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 爆速  $D = 5600 \text{ m/s}$ , 反向起爆。

垫层介质参数: 内径 100 mm, 外径 500 mm, 密度  $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

土体物理力学参数<sup>[5]</sup>: 密度  $\rho = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 剪切模量  $G = 0.01601 \text{ GPa}$ , 屈服极限  $\sigma_0 = 7.7 \text{ MPa}$ ,  $\alpha_0 = 2.4 \times 10^6 \text{ Pa}^2$ ,  $\alpha_1 = 1.36 \times 10^4 \text{ Pa}$ ,  $\alpha_2 = 0.1232$ 。

### 3.2 计算结果

图 2 是爆炸作用不同时刻土体介质内密度等值线的分布情况。图 3 是爆炸空腔、垫层介质与土体分界面的发展过程。

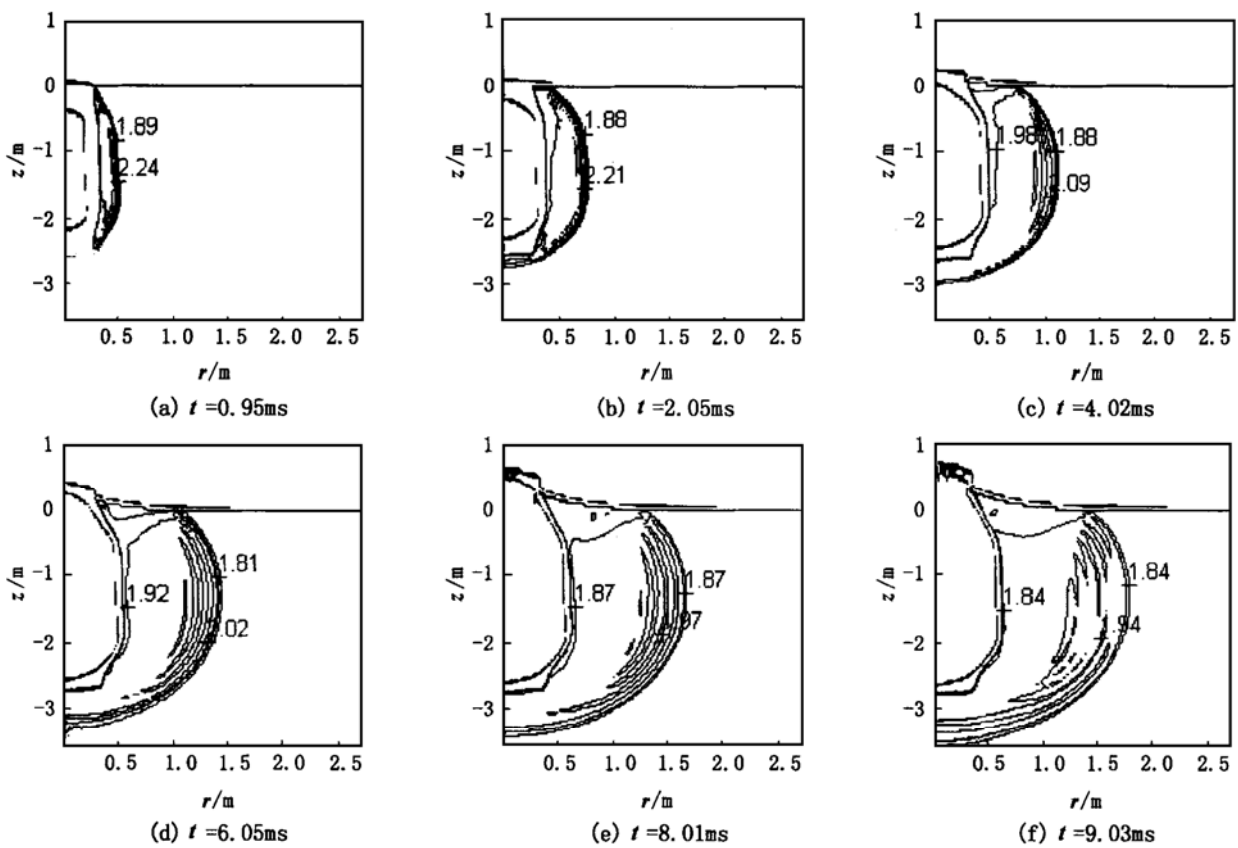


图2 密度等值线

Fig. 2 Density Contour

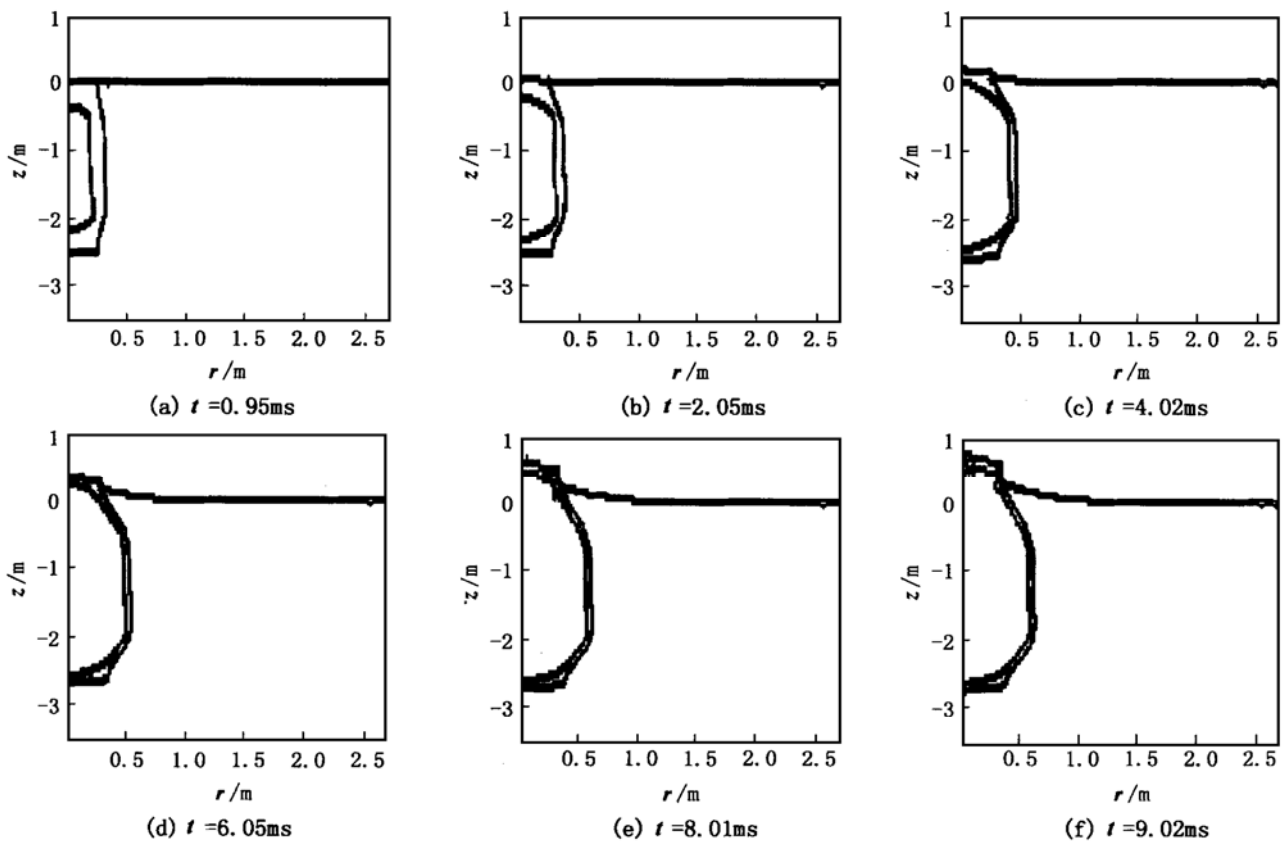


图3 爆炸空腔、垫层介质与土体分界面的发展过程

Fig. 3 Developing process of the interfaces among the explosion cavity, cushion and soil

### 3.3 结果分析

由图 2, 3 可以看出爆炸空腔大约在 9.02 ms 时已停止膨胀, 在 9.02 ms 以后, 爆炸空腔开始卸载, 因此可以认为此时土体密度变化结束。

密度变化的分布如图 4。从图 4 可以看出爆炸挤压以后, 密度最大可以提高到原来的 1.11 倍。密度变化的区域半径约为 1.73 m, 是装药半径的 34.6 倍。笔者在粘土中进行爆炸挤压实验后, 对爆炸空腔周围的土体密度进行测试, 其密度的变化规律与数值模拟结果相似, 空腔壁面由于爆炸作用出现众多密集小裂纹, 此腔壁近区密度不是最大, 随距离增加, 土体中裂缝消失, 密度逐渐达到最大, 然后密度变化减小, 直到原始状态。

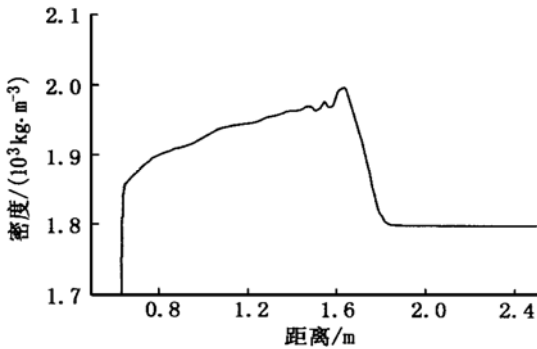


图 4 密度变化的分布  
Fig. 4 The profile of density

根据图 3, 可以得到爆炸空腔、垫层介质与土体分界面随时间的变化情况, 见图 5。

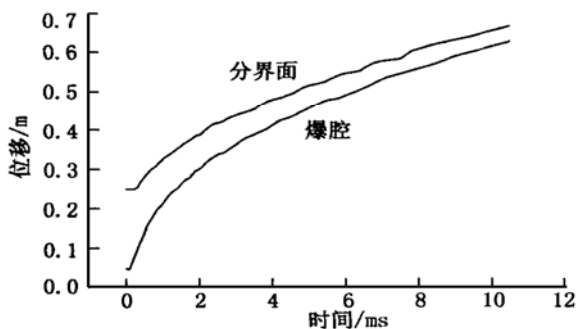


图 5 爆炸空腔、垫层介质与土体分界面的位移随时间的变化

Fig. 5 Displacement of the interface among the explosion cavity cushion and soil vs time

爆炸空腔的膨胀速度如图 6。

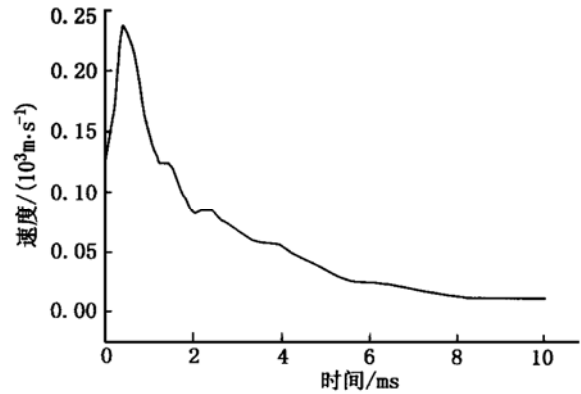


图 6 爆炸空腔的膨胀速度

Fig. 6 Expansion speed of the explosion cavity

由图 5 和图 6 可看出, 爆炸空腔的半径随时间单调增加, 而爆炸空腔膨胀速度随时间由小到大, 再逐渐变小。从图 3 中可以看出, 垫层随时间逐渐扩展, 并均匀的分布在腔体表面, 具有良好的成型效果。空腔的最大速度为 239 m/s。空腔最大半径为 0.66 m, 是装药半径的 13 倍。

## 4 结 语

通过数值计算, 分析了不耦合装药爆炸载荷下不可压缩介质作为垫层的粘土挤压过程。数值结果与实际情况相吻合。本文的意义在于可以对装药、土体及装药与土体之间的垫层介质进行数值模拟, 给出土体内密度的变化规律以及空腔发展过程, 为工程参数优化提供依据。

### 参考文献:

- [1] 龙 源. 条形装药土中爆炸冲击波及空腔的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(1): 41~ 48.
- [2] 杨秀敏, 金骥良, 刘殿中. 土壤内集中药包爆破漏斗特性的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 1984, 4(1): 48~ 55.
- [3] 张 奇. 岩石爆破的粉碎区及其空腔膨胀[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(1).
- [4] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 等译. 北京: 科学出版社, 1987. 152~ 153.
- [5] 顾文彬, 叶序双, 詹发民, 阳天海, 等. 球形装药半无限介质中爆炸动力学分析[J]. 工程爆破, 1999, 5(1): 5~ 10.

## 来函照登

贵刊 2001 年第 2 期 p. 201 刊登的“采动影响下覆岩垮落过程的数值模拟”一文(第一作者刘红元)图 4 照片系辽宁工程

技术大学于广明博士提供。因成文疏忽, 未及注明。特此更正, 并向广大读者及于广明博士本人致歉!

唐春安

2001 年 5 月 17 日