

# 爆炸作用数值模拟

贝新源 周连胜 张志杰

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

**摘要** 采用简单的炸药化学反应率方程,利用二维流体弹塑性流动程序,对一个变直径铜壳中装药的爆炸作用做了数值模拟。

**关键词** 爆炸作用 数值模拟 化学反应率

## 1 引言

爆炸作用是指炸药爆炸产生高压产物气体对周围介质做功,使介质内部承受短时间的强载荷,并引起介质急剧变形和内部各部位各力学量的变化。用流体弹塑性流动程序模拟爆炸作用需要考虑炸药爆轰的产生与爆轰波的传播,就要引入炸药化学反应率方程和炸药状态方程。理论与实验研究表明<sup>[1]</sup>,高级炸药的化学反应是个复杂过程,且反应区的空间宽度不到1mm。要用数值模拟方法比较详细地研究炸药的爆轰性能,需要采用复杂的化学反应率方程、未反应炸药和产物的状态方程,并且要将空间步长分得很小。例如 Mader<sup>[2]</sup>做的爆轰波数值模拟,网格线度为几千个~几个埃(1埃=10<sup>-8</sup>厘米),这样小的网格对于爆炸作用的工程计算是不可想象的。Lee<sup>[3]</sup>采用比较复杂的反应率方程,以模拟热点的产生和发展,其方程形式如下

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1-F)^x \eta^y + G(1-F)^z F^r \eta^s \quad (1)$$

其中: $\eta = (V_0/V_1) - 1$ ;  $F$  是炸药的反应分数;  $p$  是压强;  $V_0$  是炸药初始比容;  $V_1$  是受冲击压缩后未反应炸药的比容;  $I, G, x, y, z, r$  是炸药常数。

状态方程用 JWL 方程,其中有许多材料常数。要确定这么多常数也并非易事。Wilkins 在其著名的 HEMP 程序中做爆炸作用模拟时,在反应率方程(或称燃烧函数)中引入参数  $t_0$ <sup>[4]</sup>( $t_0$  是网格参量,是爆轰波到达该网格的时刻)。在二维计算中显然只能用于简单的起爆形式和简单的结构形式。文中介绍一种简化的反应率方程,可用于爆炸作用工程设计中的数值模拟,而对于起爆形式及结构形式都没有限制。

## 2 化学反应率方程与状态方程

爆炸作用的数值模拟,重点在于研究周围介质在炸药爆炸作用下的运动及内部力学量变化情况,对于炸药爆轰的反应区情况以及 C-J 参量等不必精确描述。这样我们将(1)

• 本文曾在1991年7月中国兵工学会应用力学研究会举办的计算力学研讨会上发表。此次略有增删。  
1992年10月3日收到原稿,1993年7月3日收到修改稿。

式简化成

$$\partial F / \partial t = a p^b (1 - F) \quad (2)$$

作为化学反应率方程,式中只含  $a, b$  两个参数。

状态方程取气体型方程与  $F$  的乘积形式

$$p = (k - 1) \rho e F \quad (3)$$

式中:  $\rho$  是密度,  $e$  是比内能。它同时描述未反应完全网络中的混合物状态以及已完全反应的产物的状态。而对于未反应炸药,  $p = 0$ , 这意味本简化形式不描述 von Neumann 峰细节。

由于没有引入未反应炸药的状态方程,所以只用(2)式炸药爆轰不能传播,需要再引入一个辅助的反应率方程。这里取熟知的体积型方程

$$F = (V_0 - V) / (V_0 - V_{CJ}) \quad (4)$$

式中,  $V_{CJ}$  是 C-J 比容。在程序中,分别用(2)、(4)两式计算  $F$ ,再比较后取其中大者用之。

(2)式和(4)式一起,综合描述炸药中热点的产生与生长。(4)式主要描述炸药开始受冲击压缩,产生热点,并且这些热点随即生长,炸药的化学反应分数  $F$  增大。由于化学反应的进行,炸药与产物的混合物中压强上升,从而进一步产生更多的热点,并迅速生长,造成炸药的化学反应迅速发展。这主要由(2)式描述。因子  $(1 - F)$  则描述当  $F$  趋于 1 时,即炸药的化学反应接近完成时,  $F$  不再增加。

### 3 算例模型与参数

所取炸药的初始参数:  $\rho_0 = 1.62 \text{ g/cm}^3$ ;  $D = 8150 \text{ m/s}$ ;  $k = 2.87$ 。

根据已知爆速  $D$ ,先用一维程序模拟,确定(2)式中的  $a, b$  值为  $a = 550, b = 1.8$ 。对应于(2)式  $t$  的单位是  $\mu\text{s}$ ,  $p$  的单位是  $\text{GPa}$ 。

算例模型设计为一个铜质阶梯状变直径圆柱壳体,内装炸药。壳体外径 12cm,高 10cm。内径分别为 4cm、6cm 和 8cm,见图 1。起爆方式为点起爆,即在口部中心点起爆。对于这种构形和起爆方式,要事先确定爆轰波到达阶梯尖角附近处一些网格的时刻  $t_0$  值是困难的,而用(2)式结合(4)式,可以自然地得到解决。网格划分采用边长为 0.25cm 的正方形。节点数为  $41 \times 25 = 1025$ 。

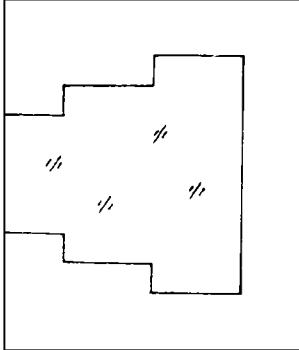


图 1 结构图

Fig. 1 Structure

铜的材料参数:初密度  $\rho_0 = 8.93 \text{ g/cm}^3$ ; Hugoniot 参数  $c_0 = 3.94 \times 10^5 \text{ cm/s}$ ;  $s = 1.489$ ; Grüneisen 系数  $\Gamma_0 = 1.97$ ; 剪切模量  $G = 38.5 \text{ GPa}$ ; 屈服强度  $Y_0 = 0.22 \text{ GPa}$ ; 铜的状态方程采用 Grüneisen 方程

$$p = p_H + \Gamma_0 \rho_0 (e - e_H) \quad (5)$$

其中,

$$p_H = p_H(c_0, s, V) \quad (6)$$

$$e_H = p_H (V_0 - V) / 2 \quad (7)$$

本构关系采用弹性理想塑性, Mises 屈服判据。

#### 4 数值模拟结果

将上节模型与参数分别编入我们研制的拉格朗日流体弹塑性流动程序<sup>[6]</sup>及初值文件中,在“银河”I型机上运行,输出 $5\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 及 $15\mu\text{s}$ 三个时刻的变形图和等压线图,见图2~图7。等压线间隔为5GPa。共运行510个时间循环,只花CPU时间94秒。这是由于我们的程序是用向量FORTRAN编写的,它比较充分地发挥“银河”I型机的向量部件的潜力,绝大部分计算达到并行化,所以能高速运行。

在计算编码中加了(人为)旋转粘性,以抑制拉氏网格畸变造成的计算困难及精度损失。虽然作为算例,网格划分很粗,但在计算的整个 $15\mu\text{s}$ 过程中,总能量守恒的误差保持在2%以内,时间步长稳定在 $0.03\sim 0.04\mu\text{s}$ ,这都表明计算是稳定的。从输出的各时刻变形图与等压线图分析波的传播、产物飞散与壳体变形等在物理上是合理的。所以本算例的计算结果是可靠的。

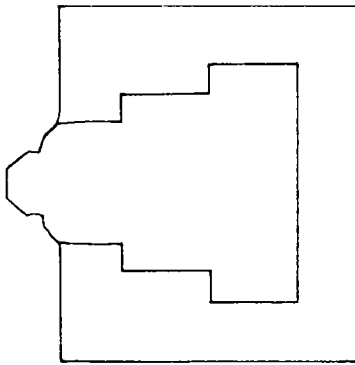


图 2  $5\mu\text{s}$  变形图

Fig. 2 Deformation at  $5\mu\text{s}$

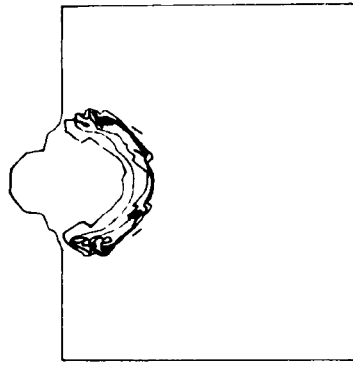


图 3  $5\mu\text{s}$  等压线图

Fig. 3 Isobar at  $5\mu\text{s}$

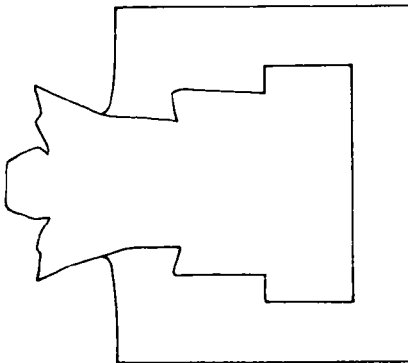


图 4  $10\mu\text{s}$  变形图

Fig. 4 Deformation at  $10\mu\text{s}$

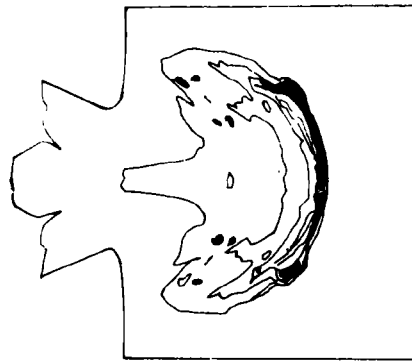


图 5  $10\mu\text{s}$  等压线图

Fig. 5 Isobar at  $10\mu\text{s}$

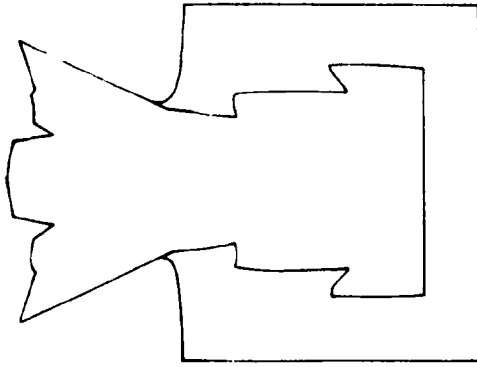


图6 15μs 变形图  
Fig. 6 Deformation at 15μs

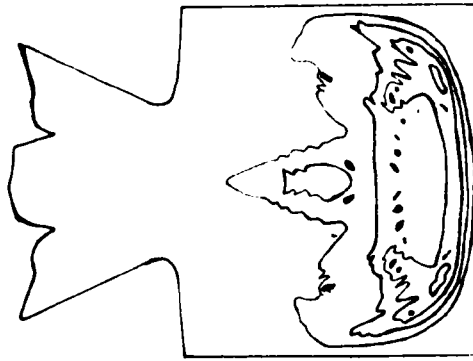


图7 15μs 等压线图  
Fig. 7 Isobar at 15μs

## 5 结 语

我们提出的简化化学反应率方程,结合气体状态方程,可以用于模拟任何起爆形式(点起爆、多点起爆、线起爆、面起爆、飞板冲击起爆等)、任何结构形状的爆炸作用,我们已用于武器设计及其性能研究工作。由于我们用过的炸药种类有限,对于某些炸药可能(2)式不够理想,可以进一步采用下式

$$\partial F / \partial t = \alpha p^b (1 - F)^\lambda \quad (8)$$

即增加一个可调因子  $\lambda$ , 其范围估计在 1~2 之间。

## 参 考 文 献

- 1 Дремин А Н, 等著; 沈金华, 等译. 凝聚介质中的爆轰波. 北京: 原子能出版社, 1986. 109~110
- 2 Mader C L. Numerical Modeling of Detonations, [s.l.]; Uni of CA press, 1979, 20~27
- 3 Lee E L, et al. Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives. Phys Fluids, 1980, 23: 2362~2373
- 4 Giroux E D. UCRL-51079 Rev, 1, 1973.
- 5 张志杰, 贝新源, 周连胜. 飞板碰撞的弹塑性流动的计算. 国防科技大学报, 1984, 48: 13~14

## NUMERICAL SIMULATION OF EXPLOSION EFFECT

Bei Xinyuan, Zhou Liansheng, Zhang Zhijie

(National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

**ABSTRACT** A simple equation of chemical reactive rate for explosion is adopted. Using the two dimensional fluid-elastic-plastic flow code, the numerical simulation has been completed on explosion effect for the charge within a copper cell with variable diameter.

**KEY WORDS** explosive effect, numerical simulation, chemical reactive rate