

# 铸装 TNT 爆轰性能的数值模拟

曹菊珍 周淑荣 李德谦

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要** 参照 Lee E L 等报道的有关铸装 TNT 的 JWL 形式状态方程及化学能释放率函数, 从理论估算了不同反应率的定态雨贡组关系和定常爆轰波结构; 利用二维拉氏 FCM 程序数值模拟铸装 TNT 的冲击引爆、绕爆、隔爆等爆轰性能, 对一些典型算例进行了计算, 计算结果与文献给出的结果相一致。

**关键词** 爆轰性能 数值模拟 铸装 TNT

## 1 铸装 TNT 定态爆轰波结构

### 1.1 状态方程及反应率函数

本文研究对象为铸装 TNT, 使用状态方程为 JWL 形式<sup>[1]</sup>:

$$p_i = A_i \left( 1 - \frac{\omega_i}{R_{1i}V} \right) \exp(-R_{1i}V) + B_i \left( 1 - \frac{\omega_i}{R_{2i}V} \right) \exp(-R_{2i}V) + \frac{\omega_i E_i}{V} \quad (1)$$

式中:  $p_i$  为压力;  $V$  为比容比;  $E_i$  为体积内能;  $A_i$ 、 $\omega_i$ 、 $B_i$ 、 $R_{1i}$ 、 $R_{2i}$  均为由实验标定的常数。脚标  $i$  有下面规定:  $i=1$  为原始固体炸药,  $i=2$  为爆轰产物。

反应率函数为 Lee E L 形式:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = I(1-f)^{\frac{2}{9}} \eta^4 + G(1-f)^{\frac{2}{9}} f^{\frac{2}{3}} p^{1.2} \quad (2)$$

式中:  $f$  为反应度, 即化学反应进程变量;  $\eta = \frac{V_0}{V_1} - 1$ ,  $V_0$  为初始比容;  $V_1$  为冲击压缩炸药未反应时的比容;  $I$ 、 $G$  均为由实验标定的常数;  $t$  为时间。

### 1.2 平面一维定态爆轰波结构

一维平面定态雨贡组关系式:

$$(1-f)E_1 + fE_2 - fQ - E_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)(1-V) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为化学反应所释放的能量;  $p_0$  为初始压力;  $E_0$  为内能。将(1)代入(3), 经整理得到不同反应度下的雨贡组关系式:

$$p \left\{ (1-f) \frac{V}{\omega_1} + \frac{fV}{\omega_2} - \frac{1}{2}(1-V) \right\} =$$

$$\left\{ (1-f) \left[ \frac{A_1 V}{\omega_1} \left( 1 - \frac{\omega_1}{R_{11} V} \right) \exp(-R_{11} V) + \frac{B_1 V}{\omega_1} \left( 1 - \frac{\omega_1}{R_{21} V} \right) \exp(-R_{21} V) \right] + \right. \\ \left. f \left[ \frac{A_2 V}{\omega_2} \left( 1 - \frac{\omega_2}{R_{12} V} \right) \exp(-R_{12} V) + \frac{B_2 V}{\omega_2} \left( 1 - \frac{\omega_2}{R_{22} V} \right) \exp(-R_{22} V) \right] + \right. \\ \left. fQ + \frac{1}{2} p_0 (1-V) + E_0 \right\} \quad (4)$$

必须指出的是, (4) 式假定波后达到了局部压力平衡, 故反应物与产物的压力均为  $p$ 。表 1 为由 (4) 式计算得到不同反应度  $f$  下的  $p$ 、 $V$  关系:

表 1 铸装 TNT 不同反应度下的雨贡纽关系  
Table 1 Hugoniot relation of cast TNT in partial reaction

$f$	与不同 $V$ 对应的 $p$ /(GPa)							
	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
0.0	0.00	0.62	1.62	3.19	5.66	9.48	15.41	24.69
0.1	1.86	2.71	3.95	5.74	8.35	12.15	17.74	26.05
0.2	3.19	4.20	5.60	7.52	10.21	13.98	19.31	26.94
0.3	4.19	5.32	6.82	8.84	11.58	15.30	20.43	27.57
0.4	4.96	6.18	7.77	9.86	12.62	16.31	21.28	28.05
0.5	5.59	6.87	8.52	10.66	13.44	17.10	21.94	28.41
0.6	6.10	7.44	9.14	11.31	14.11	17.74	22.47	28.70
0.7	6.53	7.91	9.65	11.86	14.66	18.26	22.90	28.94
0.8	6.89	8.31	10.08	12.31	15.13	18.70	23.26	29.14
0.9	7.20	8.65	10.45	12.70	15.52	19.07	23.57	29.30
1.0	7.47	8.94	10.77	13.04	15.86	19.39	23.83	29.45

图 1 为铸装 TNT 不同反应度下的雨贡纽曲线。图中分别给出  $f=1.0, 0.7, 0.3$  和  $0.0$  四种情况。由瑞利直线与  $f=1.0$  曲线相切, 其切点为 CJ 状态。由瑞利直线与  $f=0.0$  曲线相交的交点为 Von Neuman 尖点。表 2 给出了这些值。由瑞利直线与不同反应度下的雨贡纽曲线的交点就能得到铸装 TNT 爆轰波结构内的压力分布曲线, 见图 2。

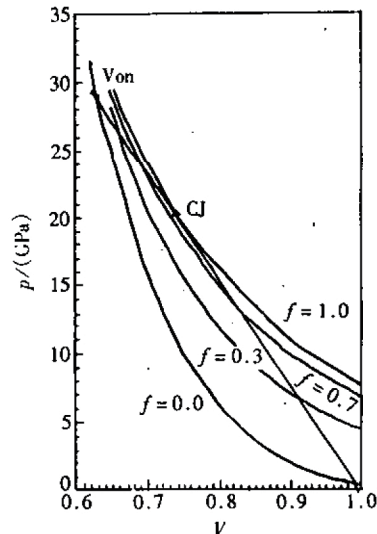


图 1 铸装 TNT 不同反应度下的雨贡纽曲线

Fig. 1 Hugoniot curves of cast TNT

表2 铸装 TNT 的 V-N 值与 CJ 值

Table 2 Von Neumann spike and Chapman-Jouguet conditions of cast TNT

	Von Neuman 值				CJ 值		
	$D$ (mm/ $\mu$ s)	$p_s$ (GPa)	$\frac{V_s}{V_0}$	$u_s$ (mm/ $\mu$ s)	$p_{CJ}$ (GPa)	$\frac{V_{CJ}}{V_0}$	$u_{CJ}$ (mm/ $\mu$ s)
文献 <sup>[1]</sup>	6.85	28.1	0.63	2.55	21.0	0.73	2.28
FCM	6.67	28.2	0.64	2.50	20.2	0.74	2.30

由图2及表2得到的计算值无需反应速率函数但是,爆轰波反应区内的物理量分布及剖面宽度则需要反应速率的具体表达式。根据(2)式积分得定态爆轰波结构内化学反应所需时间  $t$  为:

$$t = \int_0^1 \frac{df}{I(1-f)^{\frac{2}{9}}\eta^4 + G(1-f)^{\frac{2}{9}}f^2 p^{1.2}} \quad (5)$$

利用图2积分得到  $t \approx 0.035\mu$ s,从而得到反应区宽度为0.16mm左右,比钝感炸药 TATB 的反应区宽度0.93mm<sup>[2]</sup>小得多。

## 2 数值计算结果

二维数值计算均使用 FCM (Free cell method) 程序进行。该程序使用二维弹塑性流体力学方程,其计算方法采用在多边形 Lagrange 网络上回路积分的办法建立差分格式。程序中考虑(1)、(2)关系式,并满足假定爆轰产物与固态炸药混合时质量内能平衡的条件。这样一来,未反应物与产物的混合物的压力、内能可表示为:

$$\begin{cases} p = (1-f)p_1 + fp_2 \\ E = (1-f)E_1 + fE_2 + (1-f)\rho_0 Q \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} E_1 = \frac{A_1}{R_{11}} \exp(-R_{11}V) + \frac{B_1}{R_{21}} \exp(-R_{21}V) + \rho_0 e_{th} \\ E_2 = \frac{A_2}{R_{12}} \exp(-R_{12}V) + \frac{B_2}{R_{22}} \exp(-R_{22}V) + \rho_0 e_{th} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $e_{th}$  为与温度有关的质量内能。

由质量内能平衡假定,得到:

$$e_{th} = \frac{E}{\rho_0} - \frac{(1-f)}{\rho_0} \left[ \rho_0 Q + \frac{A_1}{R_{11}} \exp(-R_{11}V) + \frac{B_1}{R_{21}} \exp(-R_{21}V) \right] - \frac{f}{\rho_0} \left[ \frac{A_2}{R_{12}} \exp(-R_{12}V) + \frac{B_2}{R_{22}} \exp(-R_{22}V) \right] \quad (8)$$

当炸药受到冲击后,就开始算反应率,可根据比容比  $V$  的大小作为计算反应度  $f$  的判

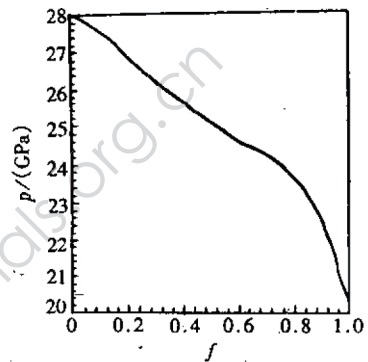


图2 铸装 TNT 爆轰波结构内的压力分布曲线

Fig.2 Pressure curve of cast TNT in the structure of detonation wave

据,将算出的  $f$  代入(8),最后可求得  $p_1$ 、 $p_2$ 。

在数值计算中,炸药区网格划分及人为粘性选取按匹配准则<sup>[4]</sup>进行,若偏离准则,则算出的冲击引爆图像将偏离实验较远。

### 2.1 一维数值计算结果

为了验证 FCM 程序计算结果可靠性,用一维模型进行了计算。该模型考察了铸装 TNT 受到 6.5GPa 持续压力脉冲的冲击时爆轰形成的时间与距离。图 3 为计算得出的结果。图 4 为文献[1]给出的计算与实验曲线,由其得到 CJ 爆轰形成时间为  $2.4\mu\text{s}$  左右,距离约为 11.5mm,与图 3 得到的爆轰形成时间、距离十分接近。从而证明了 FCM 程序计算结果的可靠性。

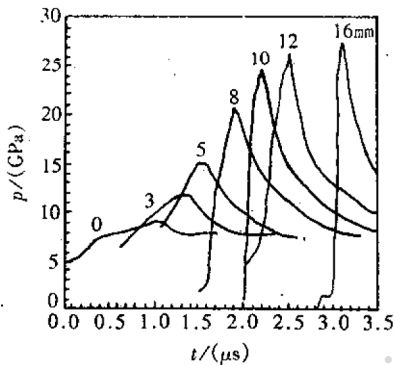


图3 用 FCM 计算出的 TNT 中的  $p-t$  曲线

Fig.3 Pressure histories calculated by FCM for a sustained shock pulse of 6.5MPa in cast TNT

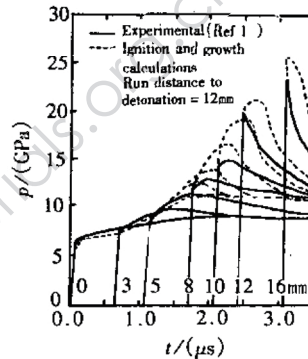


图4 文献[1]给出的 TNT 中的计算与实验  $p-t$  曲线

Fig.4 Calculated and experimental pressure histories for a sustained shock pulse of 6.5GPa in cast TNT

### 2.2 二维数值计算结果

利用 FCM 程序数值模拟了水雷中用一个起爆器引爆后的爆轰波在铸装 TNT 中的传播过程。这里存在爆轰波绕爆与隔爆等问题。计算分为两种情况进行。

#### (1) 二维轴对称模型

如图 5 所示。利用  $E_1$ 、 $E_2$  为旋转轴的二维轴对称模型来计算爆轰波绕过 B 点的情况。引爆管管壁为铝,内装钝化黑索金(RDX),引爆初始点为 A 点。图 6 为用 FCM 程序计算得到的爆轰波在 TNT 中绕过 B 点的过程。由于旋转体是轴对称的,故画出的图像是一半图像。从图上可见拐角处不存在死区。当 A 点点火后  $19\mu\text{s}$  左右,爆轰波到达 B 点,爆轰波能顺利绕过 B 点,然后向周围传播,于  $t = 33\mu\text{s}$  左右到达 C 点。图 6 中深黑色区域为爆轰波扫过区域。

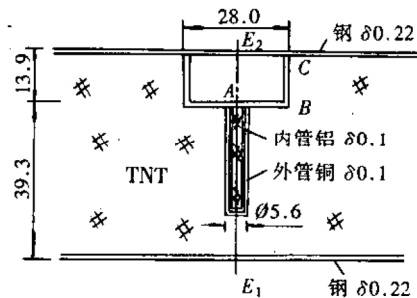


图5 轴对称模型初始示意图

Fig.5 Initial axisymmetry model

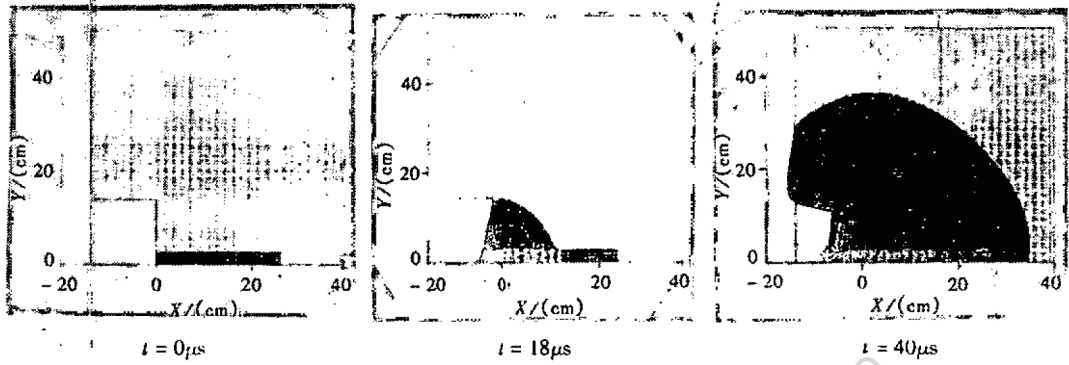


图6 轴对称模型计算结果  
 Fig.6 Computational results of axisymmetry model

(2) 平面模型

如图7所示。TNT区域中有两个管状区域。其中靠右边的管子是引爆管(铝管壁厚为1mm;中间引爆药为钝化RDX;引爆点为A点)。靠左边的管子,管壁为1mm厚的铜,里面可以是空心,也可以是实心铝。图8为由FCM程序计算得到的爆轰波通过实心的情况。图9为左管是空心的情况。由图8和图9可见爆轰波都能通过实心的管或空心管引爆左边的炸药,只是在引爆时间和波阵面形状上有差异。比如在空心管时D点约在44μs开始起爆;而实心管时D点在35μs左右就起爆了。从此以后其余区域的炸药再相继被引爆。

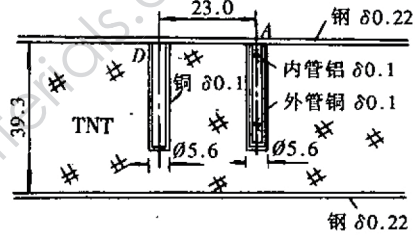


图7 平面模型初始示意图  
 Fig.7 Initial plane model

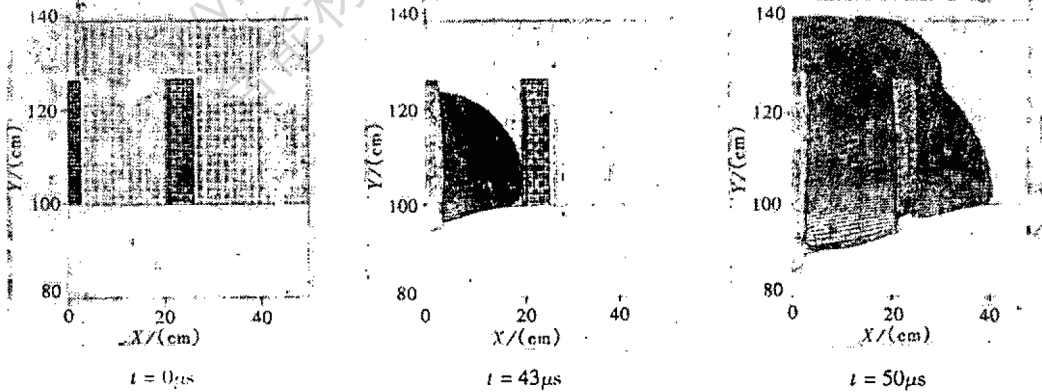


图8 平面模型计算结果(实心)  
 Fig.8 Computational results of plane model(solid)

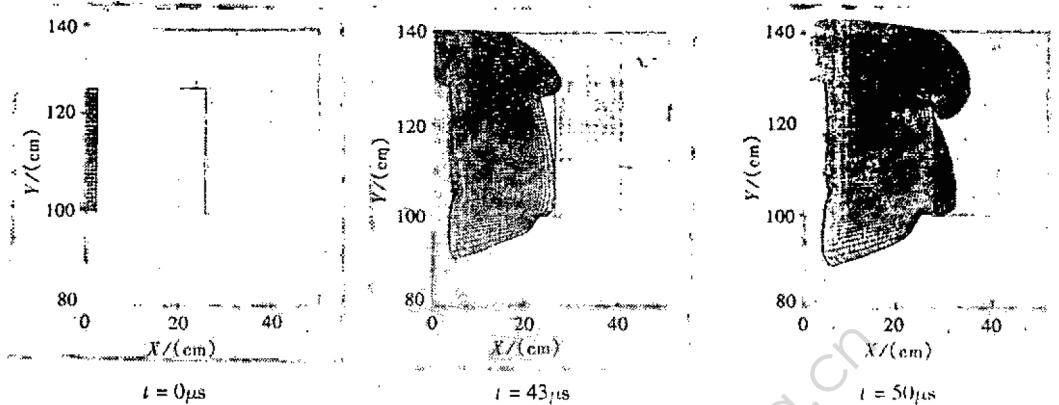


图 9 平面模型计算结果(左管为空心)

Fig.9 Computational results of plane model(hollow)

### 3 讨 论

根据文献[1]给出的铸装 TNT 的宏观、唯象化学反应率及 JWL 形式的状态方程,通过爆轰数值模拟能够对炸药的引爆、增长阶段的过程进行定性和定量研究。但是必须指出,本文给出的计算结果定性上是可靠的;定量上不能保证完全正确,因为引爆时间均与人为粘性的选取及空间步长划分关系密切<sup>[4]</sup>;其次,反应率函数与炸药状态方程是配套使用的,也可使用 Forest Fire 反应率与 HOM 状态方程进行计算。使用不同表达式得到的结果是否一致还需进一步观察,由 FCM 程序计算得到二维结果还缺乏实验证明,因此本文给出的定量结果仅供参考。

### 参 考 文 献

- 1 Lee E L, Tarver C M. Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives. Phys. Fluids, 1980, 23(12): 2362 ~ 2372
- 2 孙锦山, 曹菊珍. 钝感炸药爆轰性能的数值模拟. 爆炸与冲击, 1995, 15(1): 28 ~ 36
- 3 林忠, 雷昌镇, 张铁桥. 二维弹塑流计算的自由网格法 FCM. 北京计算流体力学讨论会文集(第 6 集), 1994.
- 4 曹菊珍. 爆轰波数值计算中人为粘性与空间步长的匹配关系. 爆炸与冲击, 1986, 6(2): 137 ~ 142

## THE NUMERICAL MODELING OF DETONATION PROPERTIES OF CAST TNT

Cao Juzhen Zhou Shurong Li Deqian

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088*)

**ABSTRACT** Referring to the data of reaction rate and JWL equation of state reported by Lee E L and Tarver C M, we computed the detonation wave structure and numerically modeled the shock initiation and detonation proceeding around the corner of cast TNT by using the 2D Lagrange FCM code. We also compared the results obtained from computation with those given by the above said authors, and found both of them well agreeable with each other.

**KEYWORDS** cast TNT, detonation property, numerical modeling.