

文章编号:1006-9941(2006)02-0105-03

## 基于 ALE 算法的爆破战斗部爆炸效应数值模拟研究

李卫平<sup>1</sup>, 王少龙<sup>2</sup>, 汪德武<sup>2</sup>, 韩秀凤<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

**摘要:** 采用 Arbitrary Lagrange-Euler(ALE)算法对爆破战斗部在空气中的爆炸效应进行了数值模拟研究。在建模过程中,炸药采用 ALE 单元,壳体采用 Lagrange 单元,空气采用 Euler 单元,同时建立炸药产物在其中流动的 ALE 初始空间网格,炸药和初始空间网格之间采用共用节点连接,炸药、壳体与空气网格之间定义耦合。计算得到了爆炸产物的飞散特性、压力场的分布规律和距爆心不同距离处的爆炸超压值。进行了地面试验验证,通过对比分析表明,模拟结果与试验结果之间的相对误差小于 10%。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破战斗部; 爆炸效应; 数值模拟; ALE 算法

**中图分类号:** O385; TJ55

**文献标识码:** A

### 1 引言

爆破战斗部在爆炸过程中伴随着巨大的能量释放,产生强烈的冲击波和高温、高压爆轰产物,冲击波超压是爆破战斗部的主要毁伤元素。作为战斗部毁伤效应研究的重要内容之一,对其爆炸效应进行研究是非常重要的。由于战斗部爆炸过程是非线性的瞬态动力过程,涉及冲击动力学、流体力学、流固耦合等多方面的问题,通过纯理论方法得出问题的完整解析解非常困难,而试验的耗费又很大,因此采用数值模拟方法对其进行研究具有很大的优越性。

ALE(Arbitrary Lagrange-Euler<sup>[1]</sup>)最早是为了解决流体问题而引入的。Donea, Belytshko<sup>[2]</sup>等人分别将 ALE 法引入有限元法中,用于求解流体与结构相互作用问题。Hughes<sup>[3]</sup>等人则建立了 ALE 描述的运动学理论,解决了粘性不可压缩流体和自由表面流动问题。ALE 算法的特点是它采用的既不是固定的 Euler 网格,也不是随物体运动的 Lagrange 网格,而是每一步(或每隔若干步)根据物质区域的边界构造一个合适的网格,以避免在严重扭曲的网格上进行计算。因为在结构变形巨大时,有可能使网格造成严重畸变,产生负体积,引起数值计算困难,导致程序终止运行。而 ALE 算法可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难,并实现流-固耦合的动态分析<sup>[4]</sup>。

随着 ALE 算法的不断完善,许多专业计算软件开始引入 ALE 算法,LS-DYNA 就是其中之一。目前 LS-

DYNA 中 ALE 算法主要有单点 ALE、单点多物质 ALE、单点单物质带空洞积分算法,输运算法主要有一阶精度的 Donor Cell 算法和二阶的 Van Leer 算法<sup>[5]</sup>等。本文采用 ALE 算法对爆破战斗部爆炸效应进行了数值模拟。

### 2 战斗部爆炸模型的建立

#### 2.1 计算模型

假设空气、炸药为均匀连续介质,空气为理想气体,整个爆炸过程为绝热过程,不考虑重力作用。

计算中战斗部长 60 cm,直径 25 cm,壳体厚度 0.5 cm,装药 40 kg 的梯黑铝炸药(THL),模型示意图如图 1 所示,由于模型结构是关于 *xoy* 和 *yoZ* 平面对称,因此为减少计算量,建立四分之一模型进行计算。在对称边界上施加对称约束,在空气外边界处施加非反射边界。

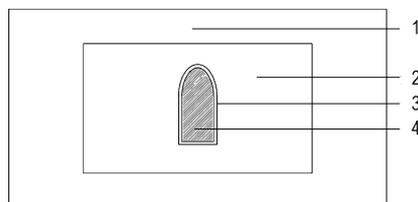


图 1 战斗部在空气中爆炸的计算模型

1—空气, 2—炸药流动区, 3—壳体, 4—炸药

Fig. 1 Calculation model of warhead exploding in air

1—air, 2—flowing field of explosion product, 3—shell, 4—explosive

模型采用点起爆方式,起爆点设置在装药中心。炸药和炸药流动区域均采用 ALE 单元,壳体为 Lagrange 单元,空气采用 Euler 单元,炸药和炸药流动

收稿日期:2005-11-07;修回日期:2005-12-29

作者简介:李卫平(1978-),男,从事火炮、自动武器与弹药工程研究。  
e-mail: lwlpw1234@163.com

网格之间通过共用节点相互连接,炸药、壳体与空气网格之间通过命令定义耦合,通过采用 ALE 算法实现爆炸过程的数值模拟。

炸药与炸药流动区域单元设置(单元类型、材料类型、状态方程)完全相同,同时,要通过关键字 INITIAL\_VOID\_PART 将炸药流动区域的网格定义成初始空间网格。

### 2.2 材料模型

空气采用无偏应力流体动力模型(Null)和 Linear Polynomial 状态方程<sup>[6]</sup>,状态方程形式如下:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

式中,  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ ,  $\frac{\rho}{\rho_0}$  为当前密度与初始密度之比;  $C_0, \dots, C_6$  为多项式方程系数,  $E$  为空气的初始内能。当应用于理想气体时,  $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ , 且  $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ , 通常取  $\gamma = 1.4$ 。

炸药采用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 本构模型和

JWL 状态方程<sup>[6]</sup>, JWL 状态方程如下:

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V'}\right) e^{-R_1 V'} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V'}\right) e^{-R_2 V'} + \frac{\omega E}{V'} \quad (2)$$

式中,  $V'$  是相对体积;  $E$  是单位体积炸药内能;  $A_1, B_1, R_1, R_2, \omega$  均为自定义输入参数,为无量纲量。

壳体采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 本构模型。壳体与炸药的具体材料参数如表 1 所示。空气密度为  $1.29 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。采用 cm-g- $\mu\text{s}$  单位制建模。

### 3 结果分析

#### 3.1 数值模拟结果

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对爆破战斗部在空气中爆炸进行了模拟,得出了炸药爆炸后不同时刻爆轰产物在空气中飞散的图像(见图 2)。

图 3 为不同时刻压力场的分布情况。图 4 为距爆心 1 m 处的模拟超压变化曲线,从图 4 可知,模拟结果为 36 MPa。

表 1 炸药的材料模型参数

Table 1 Parameters for explosive model

explosive	materials	$\rho_0/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D/\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$	$p_{CJ}/10^2 \text{ GPa}$	$A_1/10^2 \text{ GPa}$	$B_1/10^2 \text{ GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E$
	THL	1.7	0.7564	0.278	3.712	0.0323	4.15	0.95	0.3	0.07
shell	materials	$\rho_0/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$E/10^2 \text{ GPa}$	$G/10^2 \text{ GPa}$	$\nu$	ETAN	$\beta$			
	30CrMnSiNi2A	7.83	2.07	0.54	0.03	6.8E-03	0			

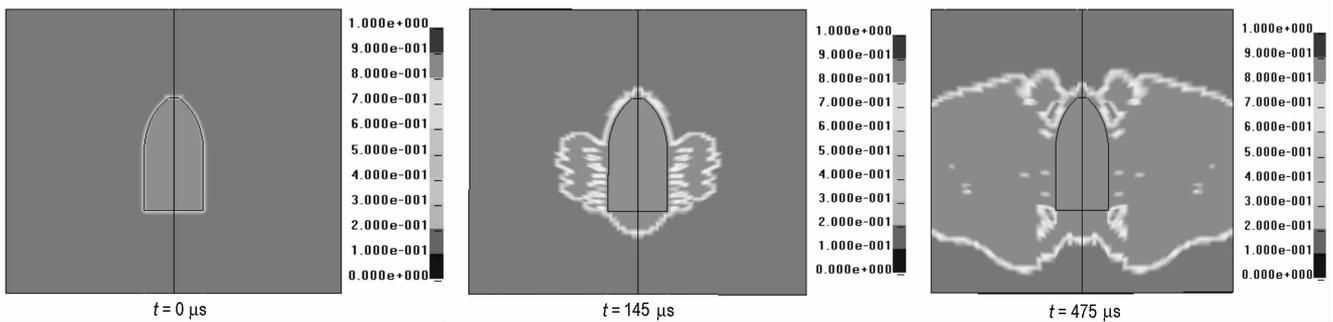


图 2 爆轰产物飞散

Fig. 2 Diffuseness of the explosion production

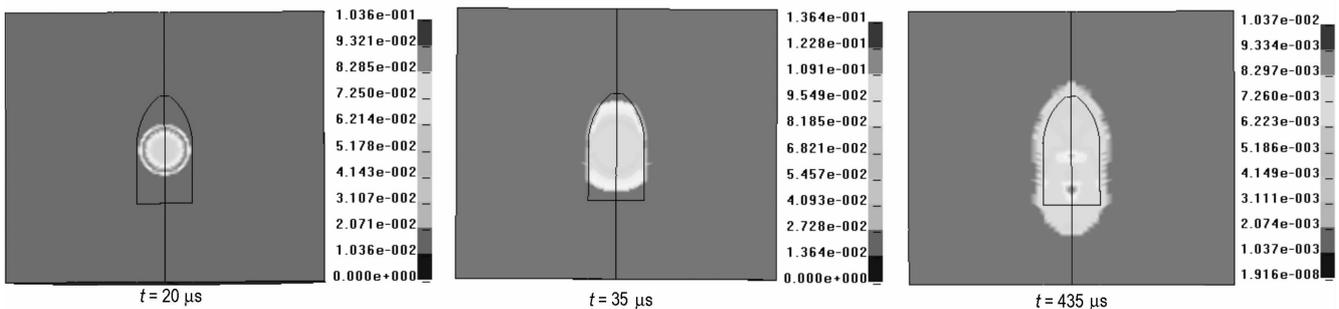


图 3 压力场分布

Fig. 3 Distribution of pressure field

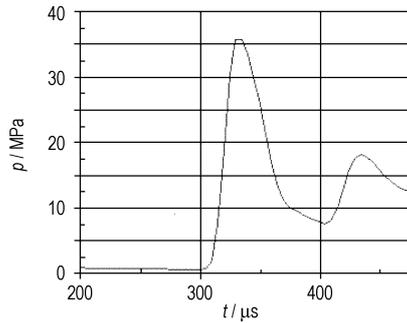


图 4 距爆心 1 m 处爆炸超压曲线

Fig. 4 Overpressure curve at the distance of 1 m

近似无限空气中 TNT 装药爆炸的常用空气冲击波超压计算公式<sup>[7]</sup>为

$$\Delta p = \frac{0.082}{\bar{r}} + \frac{0.265}{\bar{r}^2} + \frac{0.686}{\bar{r}^3} \quad (3)$$

其中对比距离,  $\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}}$ ,  $1 \leq \bar{r} \leq 15$ 。

THL 炸药的爆热为  $5447 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 根据能量相似原理换算成 TNT 当量后, 代入(3)式, 得到的距爆心 1 m 处超压值为 39.7 MPa, 这与模拟值的 36 MPa 比较接近。

### 3.2 与试验结果对比

为了验证模拟结果, 进行了地面静爆试验。战斗部为全备状态, 弹重 330 kg, 直径 250 mm, 弹长 600 mm。距实际爆心 6, 7.5, 9, 20, 30 m 处分别布置 5, 3, 2, 2, 2 个测压传感器, 用于爆炸场超压的测量。图 5 所示为距爆心不同位置处爆炸超压的模拟结果、试验结果和经验公式计算结果的变化曲线。同时计算了不同距离处爆炸超压的模拟值的相对误差(见表 2)。从图 5 可以看出, 模拟结果与试验及经验公式计算结果一致性很好。同时从表 2 数据可以看出, 模拟结果与试验结果之间的相对误差小于 10%, 满足工程应用的要求。

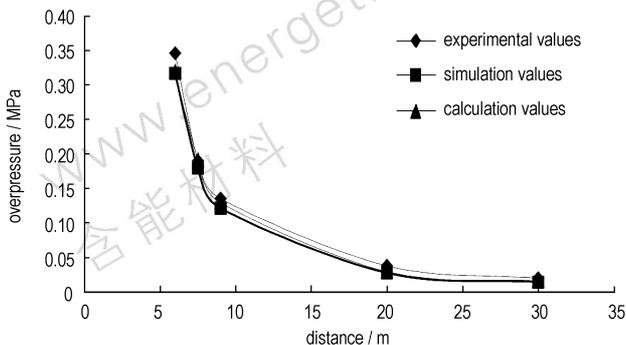


图 5 三种情况下的超压曲线

Fig. 5 Overpressure curves under different conditions

表 2 距爆心不同距离的测点超压试验值  
Table 2 Experimental overpressure values at different distance to explosion center

distance/m	6	7.5	9	20	30
average values of No. 1/MPa	0.354	0.197	0.138	0.038	0.021
average values of No. 2/MPa	0.337	0.182	0.132	0.037	0.018
average values of experiment/MPa	0.3455	0.1895	0.1350	0.0375	0.0195
simulation values /MPa	0.326	0.179	0.128	0.035	0.018
relative error/%	5.6	5.5	5.2	6.7	7.7

## 4 结 论

采用 ALE 算法, 建立炸药在其中流动的初始空间网格及定义流固耦合, 实现了对爆破战斗部爆炸过程的数值模拟, 得出的模拟结果与试验及经验公式计算结果基本相符, 且与试验结果之间的相对误差小于 10%。说明对爆破战斗部爆炸过程的数值模拟方法是正确的, 可以用于爆破战斗部的毁伤效应研究。

### 参考文献:

- [1] Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An arbitrary Lagrangian Eulerian computing method for all flow speeds. [J]. *J Computational Physics*, 1974, 14(3).
- [2] Belytschko T, Kennedy J M. Computer models for subassembly simulation [J]. *Nuclear Engineering Design*, 1978, 49(3).
- [3] Hughes T J, Liu W K, Zinnerman T K. Lagrangian-Eulerian finite element method for incompressible viscous flows [J]. *Comput Meths Appl Mech Engrg*, 1981, 29(2).
- [4] 张雄, 陆明万, 王建军. 任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展 [J]. *计算力学学报*, 1997(2).  
ZHANG Xiong, LU Ming-wan, WANG Jian-jun. Research progress in arbitrary Lagrangian Eulerian method [J]. *Journal of Computational Mechanics*, 1997(2).
- [5] 曹德青, 恽寿榕, 丁刚毅, 等. 用 ALE 方法实现射流侵彻靶板的三维数值模拟 [J]. *北京理工大学学报*, 2004, 20(2).  
CAO De-qing, YUN Shou-rong, DING Gang-yi, et al. 3-D numerical simulation of jet penetrate target using ALE method [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2004, 20(2).
- [6] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual (970v) [CP]. Livermore, 2003.
- [7] 隋树元, 王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
SUI Shu-yuan, WANG Shu-shan. Terminal Effects [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.

(下转 122 页)

## The Technology of the Strong Light Blindness Ammunition

BA Shu-hong<sup>1,2</sup>, JIAO Qing-jie<sup>1</sup>, DU Zhi-ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The radiation mechanism, formulation composition, properties test and the disturbance on night vision equipment with strong flash blindness ammunition are studied. The results show that the trinary formulation containing  $\text{KClO}_4$ , Al and epoxy resin (mass ratio is 50: 50: 3) has higher radiation and lower sensitivities. The ammunition security is greatly improved when 1% micro-powder graphite is added into the trinary formulation. When 80 g charge amount of trinary formulation (the mass ratio of  $\text{KClO}_4$ , Al and epoxy resin is 50: 50: 3) is loaded into the simulation bomb, the luminesced intensity at visible region is more than  $5.0 \times 10^7$  cd and the radiation intensity at near-infrared band exceeds  $2.1 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Moreover, 40 g charge amount of the trinary formulation has obvious disturbance on night vision equipment at 37 m.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; strong light blindness ammunition; radiation intensity; micro-powder graphite; sensitivity; pattern bomb

(上接 107 页)

## Numerical Simulation of Blasting Warheads Exploding Based on ALE Method

LI Wei-ping<sup>1</sup>, WANG Shao-long<sup>2</sup>, WANG De-wu<sup>2</sup>, HAN Xiu-feng<sup>2</sup>

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2. The Second Artillery Arming Institute, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) algorithm, the numerical simulation of the blasting warheads exploding in the air is realized. During the modeling process, the explosive was plotted with ALE elements, the shell with Lagrange elements and the air with Euler elements, the ALE meshes of the initial void were created in which the explosive products could flow, the meshes of explosive and the initial void were joined with common nodes, and the fluid-structure interaction was defined between the meshes of the explosive, shell and air. The diffusion of explosive products and the pressure distribution were obtained. The overpressure values at different distance to the explosion center were presented. The results show that the relative errors between the simulation results of overpressure and the experimental results at different distance to explosion center is less than 10%.

**Key words:** explosion mechanics; blasting warhead; explosion effect; numerical simulation; ALE algorithm

(上接 117 页)

## Synthesis and Characterization of 3,6-Dihydrazine-1,2,4,5-tetrazine and its Energetic Salts

PAN Jie, HE Jin-xuan, TAO Yong-jie

(The 42nd Institute of the Fourth Academy of CASC, Xiangfan 441003, China)

**Abstract:** 3,6-Dihydrazine-1,2,4,5-tetrazine and its energetic salts were synthesized from the easily available starting materials like triaminoguanidine and 2,4-pentanedione. The synthesis route in literature was magnified properly. Moreover, the synthesized compounds were characterized by spectra analysis (IR, NMR, EA and MS) and the explosive properties (impact and friction sensitivity) and thermal properties (TGA/DTG) were studied.

**Key words:** organic chemistry; 3,6-dihydrazine-1,2,4,5-tetrazine; synthesis; tetrazine; high-nitrogen energetic material