

文章编号: 1006-9941(2009)02-0143-04

## 不同起爆方式对聚焦战斗部性能影响的数值模拟

严翰新, 姜春兰, 李明, 王在成

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**利用 LS/DYNA 软件, 采用中心和偏心两种起爆方式引爆聚焦战斗部进行全模型三维数值模拟, 得到该战斗部两种状态下的破片初速及其分布规律; 在仿真模型中加入靶板, 得到距战斗部中心 6 m 处的破片分布, 结果显示破片在两种起爆方式下都能在靶板上形成聚焦带。通过统计得出, 偏心起爆能使破片速度增益为 20.3%, 破片在 6 m 处带宽为 1 m 的密度增益为 9.6%, 飞散角和方向角基本一致。

**关键词:**爆炸力学; 定向战斗部; 偏心起爆; 聚焦战斗部; 飞散特性; 数值模拟

**中图分类号:** TJ410.3; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.004

### 1 引言

目前的轴对称破片战斗部, 起爆后破片沿径向呈均匀分布向外飞散, 破片利用率较低。提高破片利用率, 增大毁伤效果, 成为人们广泛关注的问题。为此, 各军事大国纷纷开展定向战斗部的研究<sup>[1-3]</sup>, 偏心起爆是实现定向战斗部的方式之一。文献[4]和[5]通过实验和数值模拟指出, 在圆柱形战斗部侧面引爆战斗部时, 破片初速和密度增益均为 10% 左右。文献[6]指出, 偏心两点夹角 60° 时定向方向上杆条密度增益最大。偏心起爆能有效提高破片速度和密度。偏心起爆圆形战斗部后, 破片呈非均匀分布, 以前的数值仿真研究是通过后处理来获得破片密度, 没有形成直观分布图。

本文针对聚焦战斗部<sup>[7-8]</sup>, 采用偏心和中心两种起爆方式进行爆轰驱动过程的三维数值模拟, 得到破片速度和密度沿战斗部径向、轴向的分布和随时间的变化规律; 得到定向起爆聚焦战斗部在定向区域内的破片速度、能量的增益; 为便于破片密度的统计, 在计算模型定向区域内加入靶板, 用数值模拟方法实现了破片打靶, 得到破片在靶板上的分布图, 得出定向偏心起爆在密度上的增益。

### 2 聚焦战斗部物理模型

聚焦战斗部由主装药、壳体、破片、端盖组成, 模型如图 1 所示。炸药采用 OCTOL(HMX78/TNT22); 壳体和端盖的材料为 LY/12 铝; 破片采用全预制立方体破片, 材料为钨合金, 轴向共布置 30 环破片, 破片总数 2573 枚。

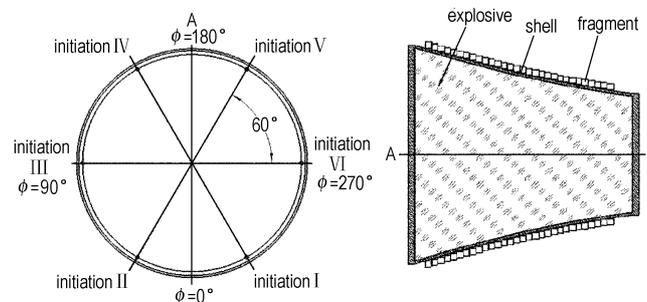


图 1 偏心起爆战斗部结构图

Fig. 1 Configuration of focus fragment warhead

### 3 算法基础和有限元模型的建立

#### 3.1 算法和建模

与 Lagrange 算法<sup>[10]</sup>相比, ALE 算法<sup>[10]</sup>可以更好地模拟炸药与壳体、破片的相互作用。建立战斗部 ALE 模型, 炸药周围充填空气介质, 炸药和空气剖分成 Euler 网格, 破片、内衬和端盖剖分成 Lagrange 网格, 置于 Euler 网格中<sup>[9-10]</sup>。

为了能清楚地观察聚焦战斗部整个破片飞散分布场, 本模拟中, 非定向起爆和定向起爆都建立全模型进行计算。模型图如图 2 所示。

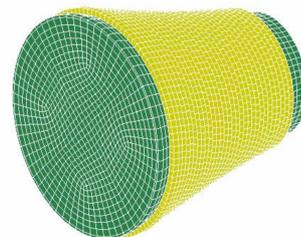


图 2 战斗部计算模型图

Fig. 2 The simulation model of warhead

收稿日期: 2008-07-23; 修回日期: 2008-10-24

作者简介: 严翰新(1979-), 男, 在读博士研究生, 研究方向为爆炸力学、弹药技术及仿真。e-mail: newagan@163.com

### 3.2 材料模型

战斗部装药采用高能炸药燃烧材料模型,计算炸药爆轰产物压力使用JWL状态方程<sup>[7,10]</sup>:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中,  $A, B, R_1, R_2$  和  $\omega$  为输入参数;  $E$  为初始比内能。表 1 为装药爆轰性能参数和JWL状态方程参数<sup>[11]</sup>。

表 1 炸药的爆炸性能参数及JWL状态方程参数

Table 1 Parameters of explosive and JWL state equation

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$p_{CJ}/GPa$	$D_{CJ}/m \cdot s^{-1}$	$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.821	34.2	8480	748.6	13.38	4.5	1.2	0.33

壳体 and 端盖采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 模型; PLASTIC\_KINEMATIC 为各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型,与应变率相关,可考虑失效。通过在 0(仅随动硬化)和 1(仅各向同性硬化)间调整硬化参数  $\beta$  来选择各向同性或随动硬化。应变率用 Cowper-Symonds 模型<sup>[10]</sup>来考虑,用与应变率有关的因数表示屈服应力,如式(2)表示:

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_0$  为初始屈服应力,  $\dot{\epsilon}$  为应变率,  $C$  和  $P$ -Cowper Symonds 为应变率参数,  $E_p$  为塑性硬化模量。

破片采用 MAT\_ELASTIC 模型。材料参数见表 2。

表 2 模型材料参数

Table 2 Parameters of model materials

materials	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$E/GPa$	$\sigma_y/GPa$	$\nu$
shell	2.8	70	0.274	0.33
cover	2.8	70	0.274	0.33
fragment	17.6	360		0.2

### 3.3 战斗部起爆方式

聚焦战斗部非定向起爆采用底面中心起爆方式,定向起爆采用底面六分位两点偏心起爆,两种起爆方式如图 1 所示。定向起爆时在这六个起爆点里取相邻的两个起爆点,如起爆点 1 和起爆点 2。

定义相邻两个起爆点与圆心连线的夹角中线的反方向定义为定向方向,相邻两个起爆点与圆心的连线的夹角的 中线,设为径向角  $\Phi = 0^\circ$ ,角度则按顺时针方向,定向方向即为径向角  $\Phi = 180^\circ$ ,定向区域为两起爆点对应方向  $60^\circ$ 角范围( $150^\circ \sim 210^\circ$ )。将轴向位置的破片从战斗部底端到顶端开始编号为 1, 2, 3, ..., 28, 29。不同起爆方式下,对破片进行初速和密度分析。

## 4 计算结果及分析

### 4.1 数值计算结果

用上述模型和算法进行数值模拟,得到战斗部 84  $\mu s$ 破片飞散图,结果如图 3、4 所示。

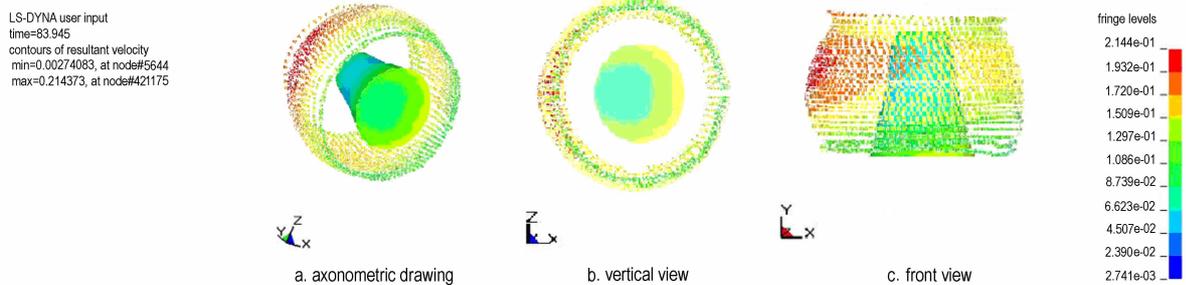


图 3 定向起爆 84  $\mu s$  时不同角度破片速度图

Fig. 3 Fragment velocity of the eccentric warhead at 84  $\mu s$

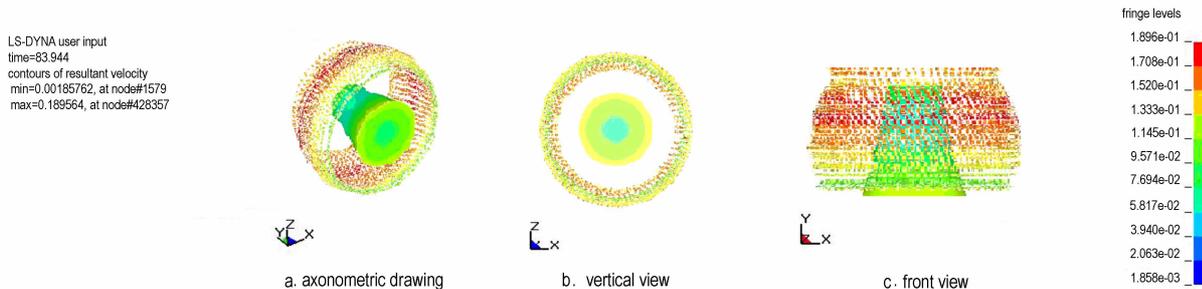


图 4 非定向起爆 84  $\mu s$  时不同角度破片速度图

Fig. 4 Fragment velocity of the the uniform warhead at 84  $\mu s$

从图 3 可以看出,偏心起爆战斗部在定向方向的速度增益比较明显;由于端部稀疏波的影响,端部预制破片速度低于中心赤道面处的破片速度,破片最大速度为  $2144 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位于战斗部中心赤道面距起爆点的偏心距最远处。

从图 4 可看出,中心起爆条件下破片沿环向均匀飞散,战斗部横截面上的破片速度相同。破片最大速度为  $1896 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位于距战斗部底端约三分之二处。

#### 4.2 不同起爆方式下破片在定向方向的增益分析

聚焦战斗部中,取目标方向  $60^\circ$  范围内两种不同起爆方式的破片平均速度进行对比。两种起爆方式的破片速度对比如图 5 所示。由图 5 可以看出,定向起爆使得破片在定向方向的破片速度要明显高于非定向起爆的破片速度。经过计算得到定向区域内破片平均速度为  $1837 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;同样得到非定向起爆的破片平均速度为  $1526 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;定向方向上的破片平均速度比非定向起爆增加 20.38%。定向方向上破片动能相应增加,比非定向起爆增加 32.55% (见图 6)。

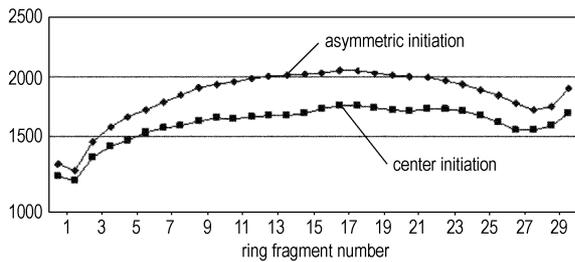


图 5 定向区域内轴向破片平均速度对比图

Fig. 5 Velocity curves of fragment by different detonation modes

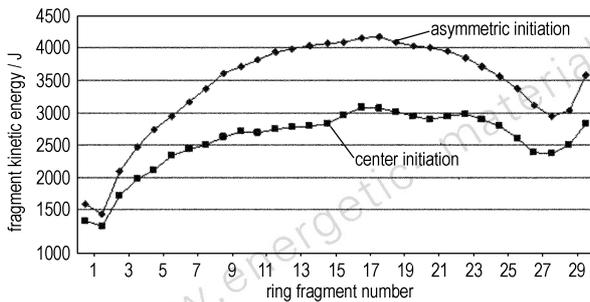


图 6 轴向破片能量对比图

Fig. 6 Energy curves of fragment by different detonation modes

### 5 破片仿真打靶

破片密度是考察破片战斗部的主要指标。在进行破片战斗部仿真研究时,都是通过后处理软件计算得到破片密度,不能直观地看到破片在靶板上的分布。在聚焦战斗部破片飞散试验过程中,由于采用偏心定向起爆方式,破片呈不均匀分布,用 LS/DYNA 后处理

软件 LS-POST 直接统计破片密度和观察聚焦战斗部聚焦带比较困难。为了得到不同起爆方式下破片密度和聚焦带的分布状态,在上述仿真计算模型中添加靶板模型进行仿真打靶。

#### 5.1 计算模型

在前述计算模型中加入靶板。不考虑破片存速对靶板的毁伤作用,只考虑破片的分布密度和聚焦带位置。靶板为 5 mm 厚的铝靶板,在 6 m 处取靶板周向角度  $60^\circ$  作为靶板宽度,靶板下端与战斗部底端面齐平,模型尺寸位置如下图 7、图 8 所示。

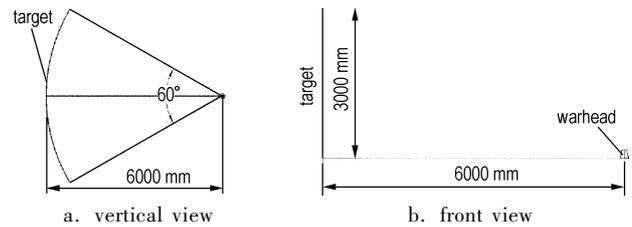


图 7 靶板位置图 (mm)

Fig. 7 Size and displacement of target

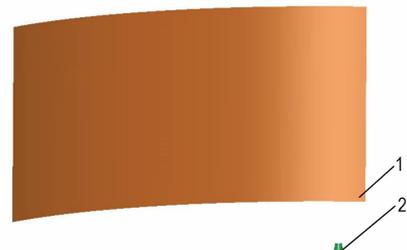


图 8 破片聚焦战斗部静爆打靶仿真计算模型图

1—靶板, 2—战斗部

Fig. 8 Simulation of fragment distribution on an annular target

1—target, 2—warhead

靶板设在离战斗部中心 6 m 处,与偏心起爆的起爆点位置相对应,范围为  $60^\circ$ ,高 3 m,靶板材料采用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 模型,材料常数与表 2 中的 cover 的材料常数相同。加入靶板以后仿真算模型共生成 580269 个单元,790159 个节点。破片靶板采用面面侵蚀接触算法,在爆轰充分作用完毕后删除炸药、空气和壳体 PART;修改计算时间为  $4000 \mu\text{s}$ 。

#### 5.2 计算结果及结论

计算采用 HP 工作站,计算时间 38 h,由于在整个破片场中破片相对体积较小,给出的破片飞散图中看不到破片,因此本文不给出破片打靶过程图。最后形成的破片打靶的密度分布图如图 9 所示。

由图 9 可以看出,破片在靶板上各形成一条较密集的聚焦带,从聚焦带中心到靶板两端破片数递减;通过对比可以看出偏心起爆的破片在靶板上聚焦带形

成的破片孔数多于中心起爆的破片孔数。对破片在靶板上的着靶位置统计分析,破片主要集中在靶板高度为0.67 m至2.83 m的范围内,破片飞散角为 $18.9^\circ$ ,取破片较密集的一段作为聚焦带,带宽1 m,聚焦带位置如图9所示,从靶板底端往上1.2 m至2.2 m处,统计得到中心起爆的破片密度为 $38.2 \text{ pieces/m}^2$ ,方向角为 $75^\circ$ ;偏心起爆的破片主要集中在靶板高度为0.75 m至2.83 m的范围内,破片飞散角为 $18.1^\circ$ ,聚焦带位置同样为靶板底端往上1.2 m至2.2 m处,破片密度为 $41.9 \text{ pieces/m}^2$ ,方向角为 $75^\circ$ ;因此可得,偏心起爆由于爆轰波的作用能使圆周向的破片在破片飞散过程中向定向方向(起爆点的反方向)汇聚,破片密度增益为9.6%。在飞散角基本一致的情况下,偏心两点起爆后由于爆轰波作用使周向破片向定向方向汇聚,偏心起爆的破片密度要大于中心非定向起爆的破片密度,在本模型中使用偏心起爆破片汇聚效果明显。

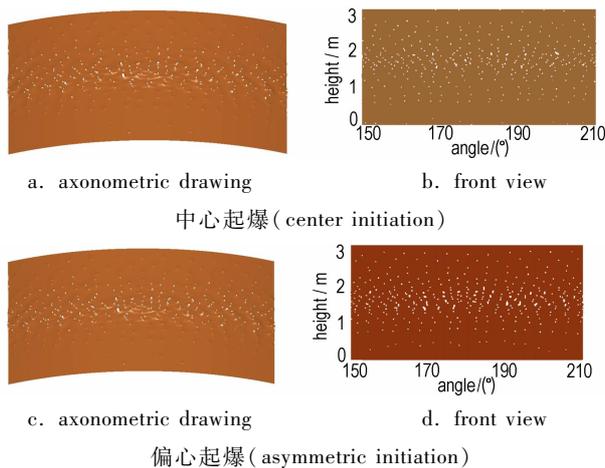


图9 破片聚焦战斗部静爆穿靶试验靶板仿真结果图

Fig. 9 Simulation of fragment distribution on an annular target in static explosion for the focused fragmentation warhead

## 6 结论

(1) 定向起爆和非定向起爆都能使破片形成聚焦带,在定向方向上定向战斗部能使破片速度、动能得到较大增益,速度增益为20.38%,动能增益为32.55%,破片飞散角分别为 $18.1^\circ$ 、 $18.9^\circ$ ,飞散角基本一致。

(2) 聚焦带内,定向起爆得到的破片密度大于非定向起爆,破片密度增益为9.6%。

(3) 两种起爆方式破片前倾的方向角基本一致,在距战斗部中心6 m处的聚焦带都为1 m。

在破片战斗部仿真计算模型中,加入靶板进行仿真打靶试验能比较直观的观察破片密度分布情况,为破片战斗部工程设计考察破片密度提供了有效方法。

## 参考文献:

- [1] Kennedy D R. A historical review of aimable air defense warhead technology [C] // 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, TX, 1999: 618 - 625.
- [2] 李记刚,余文力,王涛. 定向战斗部的研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹,2005(5): 25 - 29.  
LI Ji-gang, YU Weng-li, WANG Tao. Study on status and development of directional warhead [J]. *Chinese Winged Missiles Journal*, 2005 (5): 25 - 29.
- [3] 王晓英,张庆明,李金柱. 偏心多点起爆战斗部破片飞散三维数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报,2003,23(4): 201 - 206.  
WANG Xiao-ying, ZHANG Qing-ming, LI Jin-zhu. 3D simulation of the fragments dispersion under asymmetrical multiple point initiation [J]. *Chinese Journal of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23 (4): 201 - 206.
- [4] 王树山,马晓飞,隋树元,等. 偏心多点起爆战斗部破片飞散实验研究[J]. 北京理工大学学报,2001(2): 177 - 179.  
WANG Shu-shan, MA Xiao-fei, SUI Shu-yuan, et al. Experimental research on fragments dispersion of the warhead under asymmetrical multi-spots initiation [J]. *Chinese Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001 (2): 177 - 179.
- [5] 张新伟,陈放,王鹏,等. 多点偏心起爆战斗部x光实验研究[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(4): 537 - 539.  
ZHANG Xin-wei, CHEN Fang, WANG Peng, et al. X-ray experimental research on off-axis multi-spots initiation warhead [J]. *Chinese Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25 (4): 537 - 539.
- [6] Richard M Lloyd. Conventional Warhead System Physics Engineering Design [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1998.
- [7] 马天宝,孙远翔,宁建国,等. 双束聚焦式破片杀伤战斗部的数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报,2003, S5: 146 - 149.  
MA Tian-bao, SUN Yuan-xiang, NING Jian-guo, et al. Numerical simulation of double-beam fragment focusing warhead [J]. *Chinese Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003, S5: 146 - 149.
- [8] 李晋庆,胡焕性. 不同起爆方式对聚焦型战斗部聚焦型战斗部聚焦性能影响的试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2003,24(1): 43 - 45.  
LI Jing-qing, HU Huan-xing. Experimental investigation on focus warhead by different ignition methods [J]. *Chinese Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2003, 24 (1): 43 - 45.
- [9] LSTC. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL [DK]. 2003.
- [10] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.  
ZHAO Hai-ou. Guidelines of LS-DYNA Dynamic Analysis [M]. Beijing: Chinese Weapon Industrial Press, 2003.
- [11] 北京工业大学八系. 爆炸及其作用(下) [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1979.

(下转 151 页)

- [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2006, 21 (2): 209 - 216.
- [2] 丁宁,余文力,王涛,等. LS-DYNA 模拟无限水介质爆炸中参数设置对计算结果的影响[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28 (2): 127 - 130.  
DING Ning, YU Wen-li, WANG Tao. Influence of parameter setting on simulation result for underwater explosion by LS-DYNA [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28 (2): 127 - 130.
- [3] 陈朗,冯长根,赵玉华,等. 含铝炸药爆轰数值模拟研究[J]. *北京理工大学学报*, 2001, 21 (4): 415 - 419.  
CHEN Lang, FENG Chang-gen, ZHAO Yu-hua. Numerical simulations of the detonation of aluminized explosives [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21 (4): 415 - 419.
- [4] 辛春亮,秦健,刘科种,等. 基于 LS-DYNA 软件的水下爆炸数值模拟研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28 (3): 156 - 158.  
XIN Chun-liang, QIN Jian, LIU Ke-zhong. Research on UNDEX numerical simulation based on LS-DYNA [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28 (3): 156 - 158.
- [5] Boeksteiner G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115 [R]. ADA315885, 1996.
- [6] 恽寿榕,赵衡阳. *爆炸力学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [7] ANSYS AUTODYN Manuals Version 11.0. ANSYS, 2007.
- [8] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *Phys Fluids*, 1980, 11 (23): 23 - 62.
- [9] Lu J P, Kennedy D L. Modeling of non-ideal explosive PBXW-115 [C] // *Proceedings of 5th Australian Explosive Ordnance Symposium*. Canberra Australia, 2001.
- [10] Wilkerson S A. Boundary integral technique for explosion bubble collapse analysis [R]. ADA267369, 1993.
- [11] 李澎. 非理想炸药水下爆炸能量输出结构研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2006.  
LI Peng. Study on energy output characteristic of non-ideal explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.

## Numerical Simulation of Energy Output Structure for the Underwater Explosion

SHI Rui, XU Geng-guang, XU Jun-pei, LIU Ke-zhong

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Energy output models for the ideal explosives and aluminized explosives were introduced. These models were used to calculate far-field UNDEX of TNT and PBXW-115 with AUTODYN software. Performance parameters such as peak pressure, time constant, impulse, energy flux density and shock wave energy were calculated. These parameters were compared with experimental data. The dynamic model of high pressure gas bubble in incompressible liquid was achieved. The dynamic equations and JWL EOS (Equations of State) of the detonation products were both used to calculate bubble parameters. Bubble periods of 1 kg TNT and PBXW-115 are 0.213 s and 0.283 s. Bubble energy are  $1.88 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $4.41 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Bubble parameters calculated are consistent with experimental data.

**Key words:** explosion mechanics; underwater explosion; energy output; shock wave; bubble oscillation

(上接 146 页)

## Numerical Simulation of Effect of Different Initiation Positions on a Certain Focusing Fragment Warhead

YAN Han-xin, JIANG Chun-lan, LI Ming, WANG Zai-cheng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To increase fragment warhead performance, aimable fragment warheads were widely designed and developed to obtain high lethality against air target. A certain focusing fragment warhead driven by two different places of detonation respectively, were numerically simulated by using DYNA3D. To obtain the fragment distribution density, target was modeled numerically at 6 m far away from the fragment warhead. The simulation results show that the fragments can focus on the target, and the fragment ejection angle and azimuth angle agree with each other. The velocity of directional fragment under two asymmetric points initiation is 20.3% faster than that under the center initiation, and the fragment distribution density under two asymmetric points initiation is 9.6% greater than that under the center initiation. Simulation results could be used for the initiation system of focusing fragment warhead in engineering practice.

**Key words:** explosion mechanics; directional warhead; asymmetric initiation; focusing fragment warhead; scattering characteristics; numerical simulation