

文章编号:1006-9941(2009)02-0147-05

炸药水中爆炸能量输出结构的数值模拟

史 锐, 徐更光, 徐军培, 刘科种

(北京理工大学爆炸科学技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:介绍了理想炸药和含铝炸药水中爆炸的能量输出模型,并采用 AUTODYN 软件,对 TNT 和 PBXW-115 水中爆炸远场的冲击波形进行了求解。计算出了冲击波峰值压力、衰减时间常数、冲量、能流密度和冲击波能等参数,并将计算结果与实验数据进行了对比。在不可压缩流体理论的假设下,推导出了水中爆炸一维气泡脉动方程。把脉动方程同爆轰产物的状态方程相结合,计算出 1 kg TNT 和 PBXW-115 水中爆炸气泡脉动周期分别为 0.213 s 和 0.283 s,二者的气泡能分别为 $1.88 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.41 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,与实验结果吻合较好。

关键词:爆炸力学;水中爆炸;能量输出;冲击波;气泡脉动

中图分类号:TJ55; O389

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.005

1 引 言

水中爆炸过程本质上是爆炸能量在水介质中传播、转换的过程。由于冲击波辐射和气泡脉动是水中爆炸的基本动力学过程,冲击波能和气泡能便成为爆炸能量转换的基本形式,也是对目标产生破坏效应的基本能源,爆炸能量在冲击波和气泡中的分配形式称为能量输出结构。随着计算机硬件及计算方法的逐步完善,数值计算取得了长足的进步,已成为爆炸力学的三个基本手段之一^[1]。在数值模拟中通常通过圆筒实验拟合 JWL 状态方程来描述炸药的爆轰^[2],这对于理想炸药可以得到比较满意的结果,但对于含铝非理想炸药却不太适合^[3]。含铝炸药爆轰时,铝与爆轰产物继续反应,这与 C-J 爆轰理论的基本假设有较大差别。对于单独的主炸药,是爆轰波阵面内的快速反应提供支持爆轰波的能量。铝粉基本不在爆轰波阵面内反应,由于铝的吸热作用,反而会降低支持爆轰波的能量。随着爆轰过程的继续,爆轰产物大量产生,在爆轰波阵面内未反应的铝在高温高压下被加热,并与爆轰产物相互混合,与爆轰气体产物中的 O_2 和 CO 等发生反应,产生凝聚态的 Al_2O_3 ,在爆轰产物中释放大热量,增加了气体爆轰产物的作功能力。铝和爆轰产物的氧化反应与主炸药的爆轰反应相比,反应速度相对缓慢,并受到铝与爆轰产物间扩散混合程度及周围温度、压力环境控制。所以在含铝炸药的数值模拟中必

须考虑铝粉的燃烧反应,并且应适当调整模型参数和水的状态方程参数,选用合适的人工粘性和网格密度,以得到与试验相近的远场的冲击波压力时程曲线。调整之后的参数又可用来模拟爆炸近场压力的传播。对于气泡脉动的模拟,要考虑水压,热传导等诸多方面,计算量相当大,目前多数软件模拟气泡脉动的技术还很成熟,计算出的气泡半径和气泡脉动周期与实测值差别较大^[4]。本文通过求取气泡脉动方程的数值解,来计算气泡能,并与实验值进行比较。

2 炸药水中爆炸实验

实验场所水深 10 m,淡水,传感器和药柱都放置于离水面下的 5 m 处,传感器放置于距离药柱中心水平方向 2 m,布置示意图见图 1。实验内容主要为记录水

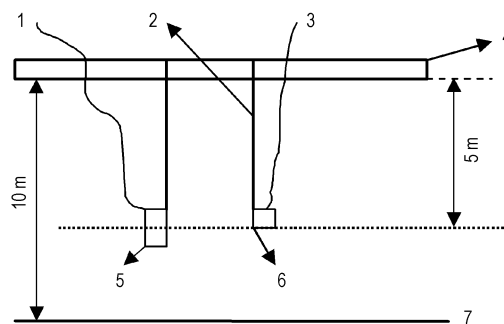


图 1 实验布置示意图

1—起爆电缆, 2—承重绳索, 3—传输电缆,
4—实验支架, 5—实验药柱, 6—传感器, 7—水底

Fig. 1 Sketch map of experimental disposal

1—initiating cable, 2—bearing cord, 3—transmitting cable,
4—experimental bracket, 5—explosive charge,
6—sensor, 7—bottom

收稿日期:2008-07-07;修回日期:2008-10-09

基金项目:国家 973 研究项目(51335030101)

作者简介:史锐(1982-),男,在读博士,研究方向为炸药水中爆炸的数值模拟。e-mail: shirui2003@163.com

下固定位置上压力扰动的时程曲线,通过压力时程曲线求得其它参量。采用的压力传感器为 ICP138A25,示波器为 SIGMA60 型。由 8 号雷管和 Pentolite 作为起爆主装药, Pentolite 传爆药柱密度为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

PBXW-115 是一种高能量的含铝炸药,其质量百分组成^[5]为 AP(200 μm) 43%; Al(20 μm) 25%; RDX(200 μm) 12%; RDX(20 μm) 8%; HTPB 粘结剂 12%。

测试得到 TNT 和 PBXW-115 的压力时程曲线如图 2 所示。实验测得的两种炸药的冲击波参数见表 1。

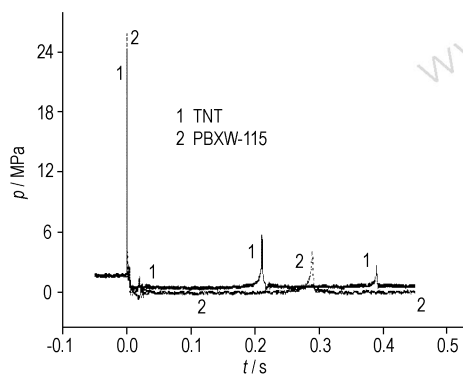


图 2 2 m 处两种炸药的实测压力时程曲线
Fig.2 Shock wave pressure-time curves from the two explosive charges at distance of 2 m

表 1 实验测得的两种炸药 2 m 处的冲击波参数

Table 1 Shock wave parameters of the two explosive charges

	TNT	PBXW-115
p/MPa	24.4	25.8
$\theta/\mu\text{s}$	96.0	141.5
$I/\text{kPa} \cdot \text{s}$	2.7	4.3
$e_s/\text{kPa} \cdot \text{m}$	20.0	26.4
E_s/MJ	1.005	1.327
T/s	0.217	0.289
$E_b/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.99	4.70

Note: p , peak pressure; θ , time constant; I , impulse; e_s , energy flux density; E_s , shock wave energy; T , bubble periods; E_b , bubble energy.

3 炸药水中爆炸冲击波的数值模拟

3.1 TNT 和 PBXW-115 的能量输出模型

(1) TNT 是理想炸药,在 CJ 面处已完全反应,能量的释放可看作瞬时的,因此只需用标准 JWL 状态方程^[6]描述爆轰产物压力:

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

采用的 TNT 的状态方程参数见表 2。

(2) PBXW-115 是非理想炸药,爆轰时,首先是高能炸药成分爆轰,随后是铝粉较缓慢的二次反应。炸药在 CJ 面处并没有释放全部能量,在膨胀过程中随着铝粉的燃烧反应不断释放出能量,不能用传统的 CJ 理论来描述含铝炸药的能量释放过程。本文采用 Lee-Tarver 点火增长模型^[8],此模型考虑了铝粉的燃烧反应,使用反应度 F 和压力 p 来控制燃烧的速率,更全面地反应了含铝炸药的爆炸过程。未反应炸药和爆轰产物均采用 JWL 状态方程,反应过程采用 Lee-Tarver 点火增长模型^[8]。

未反应炸药采用等熵条件的 JWL 状态方程描述:

$$p = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + R_3 \frac{T}{V} \quad (2)$$

爆轰产物压力也采用等熵条件 JWL 状态方程描述:

$$p = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + R_4 \frac{T}{V} \quad (3)$$

反应速率方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = I(1 - F) \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1 - F)^e F^d p^y + G_2(1 - F)^e F^f p^z \quad (4)$$

式中, F 为反应度, t 为时间, ρ_0 为初始密度, ρ 为反应到目前的密度, p 为压力, $I, G_1, G_2, b, x, a, b, c, d, y, e, f, z$ 为常数。公式(4)的第一项代表部分炸药的冲击压缩下被点火,第二项代表炸药快速反应产生 $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ 和 N_2 等气体产物;第三项代表在主要反应后相对缓慢的扩散控制反应,对于含铝炸药则代表铝粉与爆轰产物间的氧化反应。

采用的 PBXW-115 的模型参数见表 3。

3.2 水中爆炸冲击波的计算

TNT 和 PBXW-115 的装药质量都为 1 kg,采用相同的计算模型。计算采用有限差分程序 AUTODYN,炸药、水采用多物质 Euler 算法。采用楔形网格计算模型,该模型可以使网格在波传播方向上排列一致,不会导致冲击波传播失真,并且可以减少计算模型的尺度。模型尺寸为 3000 mm, X 方向单元划分数为 500,炸药及其附近加密网格,水采用多项式状态方程。经过适当调整,最终人工粘性二次项系数取 0.7,一次项系数取 0.14,水的状态方程参数见表 4。

利用 AUTODYN 软件求得了离装药中心 2 m 处的冲击波形,并计算出衰减时间常数、冲量、能流密度和冲击波能等参数。TNT 和 PBXW-115 水中爆炸 2 m 处的冲击波压力时程曲线计算值和实验结果的比较如图 3 所示。冲击波各参数计算值和实验值比较见表 5。

表 2 TNT 炸药 JWL 状态方程参数^[7]

Table 2 JWL EOS parameters for TNT

A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	ρ/g · cm ⁻³	D/m · s ⁻¹	E/J · m ⁻³	p _{CJ} /GPa
373	3.74	4.15	0.9	0.35	1.63	6930	7.35E9	21

表 3 PBXW-115 炸药点火增长模型参数^[9]

Table 3 Parameters of ignition and growth model for PBXW-115

non-reaction explosive	ρ ₀ /g · cm ⁻³	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	R ₃ /(GPa/k)	σ _y /GPa	G/GPa
	1.792	4066	-133.9	7.2	3.6	2.091E-3	4.54	0.2
detonation products	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	R ₄ /(GPa/k)	E ₀ /(kJ/cc)	D _{CJ} /m · s ⁻¹	p _{CJ} /GPa
	372.9	5.412	4.453	1.102	4.884 E-4	0.1295	6476	20.84
reaction rate equation parameters	I	b	a	x	G ₁	c	d	y
	15	0.6667	0	4	1.95	0.6667	0.1111	1
	G ₂	e	f	z	F _{mxig}	F _{migr}	F _{mng}	
	8	1	0.1111	2	0.015	0.25	0	

表 4 水的多项式状态方程参数^[7]

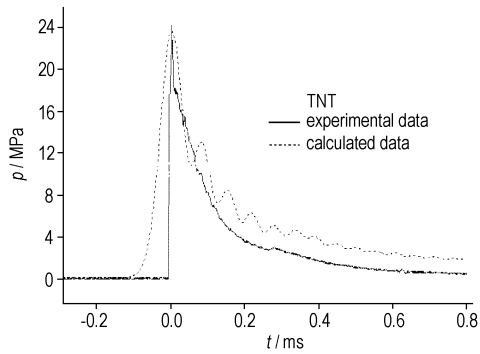
Table 4 Polynomial EOS parameters for water

ρ ₀ /g · cm ⁻³	A ₁ /GPa	A ₂ /GPa	A ₃ /GPa	B ₀	B ₁	T ₁ /GPa	T ₂ /GPa
1.0	2.2	9.54	14.57	0.28	0.28	2.2	0

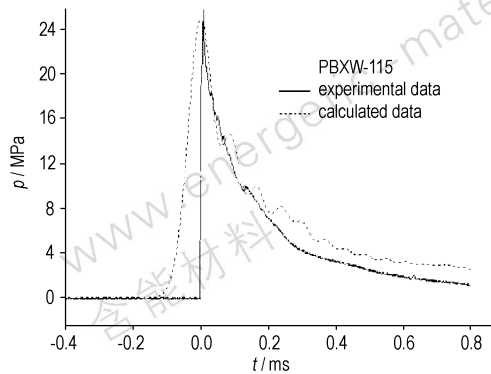
表 5 1 kg 装药爆炸 2 m 处的冲击波参数计算值和实验值比较

Table 5 Shock wave parameters of 1 kg explosive charge at distance of 2 m

parameters	TNT			PBXW-115		
	calc.	exp.	error	calc.	exp.	error
p/MPa	23.9	24.4	2.0%	25.1	25.8	2.7%
θ/μs	101.1	96.0	5.3%	150.2	141.5	5.8%
I/kPa · s	2.9218	2.7	8.2%	4.5	4.3	4.4%
e _s /kPa · m	18.564	20.0	7.2%	25.8	26.4	2.3%
E _s /MJ	0.933	1.005	7.2%	1.297	1.327	2.3%



a. TNT



b. PBXW-115

图 3 1 kg TNT 爆炸 2 m 处的冲击波压力时程计算结果和实验结果比较

Fig. 3 Shock wave pressure-time curves from 1 kg TNT at distance of 2 m

表 5 中数据表明,两种炸药的冲击波各参数计算值与实验值符合较好,误差都在 10% 以内。这一结果说明所采用的爆轰模型、产物状态方程、计算方法、人工粘性系数和网格密度等合适,可用来计算炸药水中爆炸冲击波的传播衰减规律。

3.3 TNT 和 PBXW-115 水中爆炸近场的压力时程比较

采用 3.1 和 3.2 中的爆轰模型和状态方程参数、人工粘性和相似的网格密度计算了两种炸药近场(距装药中心 10 cm)的冲击波压力时程,见图 4。

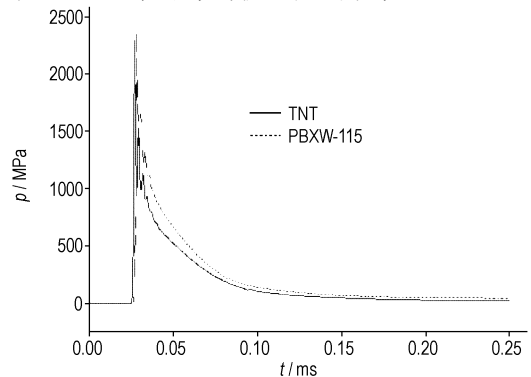


图 4 距装药中心 10 cm 处 TNT 和 PBXW-115 的压力时程比较

Fig. 4 The shock wave pressure-time curves from TNT and PBXW-115 at distance of 10 cm

从图4可以看出,TNT和PBXW-115在近场水域中的峰值压力大致相等,但PBXW-115压力脉冲较宽,衰减较慢(PBXW-115的压力曲线在TNT上方)。这使冲击波传播到远场之后,PBXW-115的峰值压力和衰减时间常数都高于TNT,显示出了含铝炸药的优势。

4 气泡脉动的数值计算

气泡脉动是炸药水中爆炸能量输出另一主要形式。数值模拟求气泡脉动周期需要计算二次压力波出现的时间,这通常在几百毫秒的量级,远大于冲击波阶段的求解时间。目前多数软件模拟气泡脉动的技术还很不成熟,且计算量相当大。研究表明,在气泡脉动一个周期的80%时间内,气泡内的压力小于流体静压力,因此可用不可压缩流体理论来描述气泡脉动过程^[10]。

在求解水下爆炸情况下我们假设如下:①炸药为等容爆轰,②水是不可压缩的理想流体,③无穷远处流场的压力等于炸药入水深度的流体静压,④周围水域以球型装药中心对称。

在以上假设条件下可以推导出二维气泡脉动方程。设气泡以 $R_b = R_b(t)$ 的规律膨胀收缩,无穷远处水的压力等于装药入水深度处的压力^[11]。对于球对称流动问题,距气泡中心 R 处的流体速度 v 可由连续方程求出:

$$v = \frac{R_b^2 R_b'}{R^2} \quad (5)$$

式中, $R_b' = dR_b/dt$ 为气泡壁面膨胀速度。 R 处的流体加速度为:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R^2} (R_b^2 R_b'' + 2R_b R_b'^2) \quad (6)$$

式中, $R_b'' = d^2R_b/d^2t$ 为气泡壁面运动的加速度。

由不可压缩理想流体一维流动的运动方程知:

$$\int_{R_b}^R \frac{\partial v}{\partial t} dR + \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} \right)_R - \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} \right)_{R_b} = 0 \quad (7)$$

将式(5)式(6)代入式(7),积分得:

$$-\frac{1}{R} (R_b^2 R_b'' + 2R_b R_b'^2) + \frac{1}{R_b} (R_b^2 R_b'' + 2R_b R_b'^2) + \frac{1}{2} \frac{R_b^4}{R^4} R_b'^2 + \frac{p}{\rho} - \frac{1}{2} R_b'^2 - \frac{p_b}{\rho} = 0 \quad (8)$$

式中, p_b 为气泡壁面压力, ρ 为水的密度,当 R 为无穷大时, $p_\infty = p_0$, p_0 为药柱放置处的静水压力。式(8)变为:

$$R_b'' = \frac{p_b}{\rho R_b} - \frac{p_\infty}{\rho R_b} - \frac{3}{2R_b} R_b'^2 \quad (9)$$

将TNT和PBXW-115的爆轰产物状态方程公式

(1)和(3)代入式(9)消去 p_b (详细过程略)后,可使用四阶龙格库塔方法对其编程求解。1 kg TNT水下5 m起爆, $\rho = 1.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, R_b 初始值为0.0527 m, R_b' 初始值为0,计算时间为300 ms;1 kg PBXW-115水下5 m起爆, $\rho = 1.792 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, R_b 初始值为0.05107 m, R_b' 初始值为0,计算时间为300 ms。模拟结果如图5所示,气泡参数计算值与实验值的比较见表6。由表6可看出,计算结果与实验数据差别很小,说明本文所推导的气泡脉动计算方法具有较高精度。

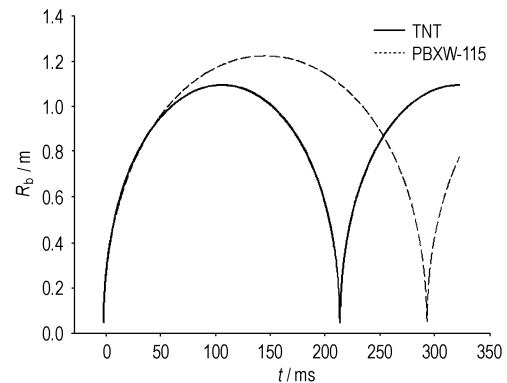


图5 1 kg装药5 m深水中爆炸气泡周期计算结果

Fig. 5 Bubble periods of 1 kg explosive charge exploded in water at a depth of 5 m

表6 气泡参数计算值与实验值的比较

Table 6 Comparison of calculated bubble parameters and experimental data

parameters	TNT		PBXW-115	
	calc.	exp. (this work)	calc.	exp. (this work)
t/s	0.213	0.217	0.283	0.289
$E_b/\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.88	1.99	4.41	4.70

5 结论

计算出的冲击波参数与实验结果符合较好,说明本文中所采用的模型参数、人工粘性系数、网格密度等合理,为求解炸药水中爆炸近场的冲击波参数提供了依据。为得到较准确的冲击波波型,要适当降低人工粘性系数,网格尺寸要划分至毫米量级。脉动方程求出的气泡的周期和气泡能与实验结果也十分接近,说明所做的假设适合于本实验方案,为炸药水中爆炸性能的评估提供了一种方法。

参考文献:

- [1] 王伟力,曾亮,朱建方. 水下爆炸的数值模拟研究现状[J]. 海军航空工程学院学报,2006,21(2): 209-216.
WANG Wei-li, ZENG Liang, ZHU Jiang-fang. Summary of present research situation of numerical simulation on underwater explosion

- [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