文章编号：1000-5773(2013)05-0751-06

基于 VESF 起爆系统 MEFP 装药的数值与实验研究*

杨伟苓[1,2]，姜春兰[1]，王在成[1]，许俊峰[1]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2.冲击环境材料技术重点实验室，山东烟台 264003)

摘要：为提高爆炸成型弹丸对目标的定向毁伤效果，设计了一种基于 VESF 起爆系统的多爆炸成型弹丸装药结构，采用 LS-DYNA 软件对 VESF 起爆系统产生的平面波和起爆方式对多爆炸成型弹丸装药威力的影响进行了仿真计算，并通过靶场实验进行了验证。结果表明：采用 VESF 起爆系统的多爆炸成型弹丸装药产生的爆炸成型弹丸速度较高，可实现多个爆炸成型弹丸的高定向度飞散，并可引爆长径比很大的炸药装药。

关键词：VESF 起爆系统；多爆炸成型弹丸；平面波；定向性
中图分类号：O383.3；TJ012.4　　**文献标识码**：A

1 引　言

为了提高对目标的定向毁伤效果，国内外学者开始研究多爆炸成型弹丸(Multiple Explosive Forming Projectile，MEFP)装药的成型机理和相关技术[1-2]。MEFP 装药可形成一束紧凑的侵彻体，侵彻体的有效射程可达 100 m，可用于攻击直升机或跑道上起降的固定翼飞机。与杀伤战斗部相比，多个爆炸成型弹丸(Explosive Forming Projectile，EFP)具有更高的动能和毁伤能力。MEFP 装药有很多优势：不用在离目标很近的位置起爆，多个 EFP 可以降低对瞄准精度的需要，增加命中概率[3]。目前在解决多个药型罩同步成型且沿着战斗部轴向定向飞散的问题时，大都采用多点起爆，但多点起爆的同步性较差。本研究基于 VESF 起爆系统设计一种 MEFP 装药结构，采用 LS-DYNA 软件对 VESF 起爆系统产生的平面波和起爆方式对 MEFP 装药威力的影响进行模拟，并通过靶场实验进行验证。

2 VESF 起爆系统数值模拟

2.1 MEFP 装药结构物理模型及 VESF 起爆系统仿真模型

MEFP 装药结构主要由副装药、飞片、主装药、壳体和药型罩等部分构成，如图 1 所示。为了减少网格数量和计算时间，建立 1/4 实体三维模型。由于算法和网格会导致计算终止，数值模拟时略去药型罩。VESF 起爆系统的有限元计算模型主要包括：空气域、壳体、主装药、飞片、副装药和端盖，如图 2 所示。算法采用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrange-Euler，ALE)多材料流体/结构耦合算法。

2.2 材料模型及参数

炸药选用 B 炸药。主装药用Lee-Tarver点火与增长模型描述，副装药用高能炸药燃烧模型描述。

* **收稿日期**：2011-05-28；**修回日期**：2011-09-08
基金项目：国防十一五预研项目
作者简介：杨伟苓(1981—)，男，博士研究生，主要从事弹药总体技术研究. E-mail：sharewishhappy@126.com
通讯作者：姜春兰(1962—)，女，博士，教授，主要从事弹药总体技术研究. E-mail：jiangchunwh@bit.edu.cn

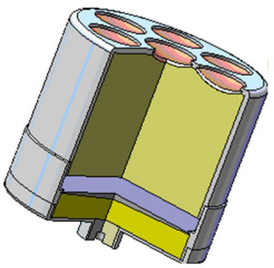


图 1 MEFP 装药结构

Fig. 1 Structure of MEFP charge

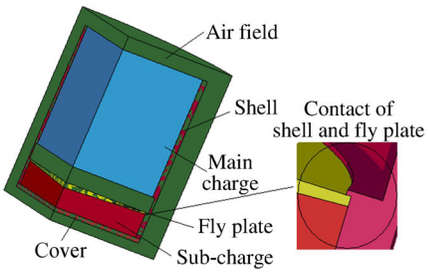


图 2 VESF 起爆系统有限元仿真模型图

Fig. 2 Simulation model of VESF initiation system

在高能炸药燃烧模型中，采用 JWL 状态方程计算炸药爆轰产物压力，即

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

式中：p 为压力；E 为初始内能；v 为初始比体积；A、B、R_1、R_2、ω 为输入参数。具体参数见表 1 和表 2，其中 e_0 为爆轰产物的相对初始内能，D_{CJ} 为爆速，p_{CJ} 为 CJ 面的爆轰压力。

Lee-Tarver 点火与增长模型反应速率方程为[4]

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} = I\ (1-\lambda)^b\ (\eta_{\mathrm{s}}-1-a)^x + G_1\ (1-\lambda)^c\lambda^d p_0^y + G_2\ (1-\lambda)^e\lambda^g p_0^z \tag{2}$$

式中：等号右边的 3 项分别为点火项、增长项和反应完成项；λ 是反应度；p_0 是当地大气压；η_{s} 是未反应炸药在冲击波作用下的相对密度；I、a、b、x、G_1、c、d、y、G_2、e、z 为常数。参数 a 是临界压缩度，用于限定点火界限，当压缩度小于 a 时炸药不点火，因而也不会发生爆炸；大多数情况下，燃烧项压力指数 $y=1$；参数 b 和 c 分别为点火和燃烧项的燃耗指数，$b=c=2/3$；参数 I 和 x 控制点火热点的数量，点火项是冲击波强度和压力持续时间的函数；参数 G_1 和 d 控制点火后热点早期的反应生长；G_2 和 z 确定高压下的反应速率。具体参数见表 3，其中 F_{mxig}、F_{mxgy} 和 F_{mngy} 为描述反应速率的参数，对于特定炸药，F_{mxig}、F_{mxgy} 和 F_{mngy} 为常数。

表 1 未反应 B 炸药的参数[5]

Table 1 Parameters of non-reaction Comp B

ρ/(g/cm^3)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω
1.717	524.5	13.38	4.2	1.1	0.3

表 2 B 炸药反应产物参数[5]

Table 2 Parameters of reaction production of Comp B

A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	e_0	D_{CJ}/(m/s)	p_{CJ}/(GPa)
524.2	7.678	4.4	−3.7	0.1	7 835	34

表 3 反应速率方程参数[5]

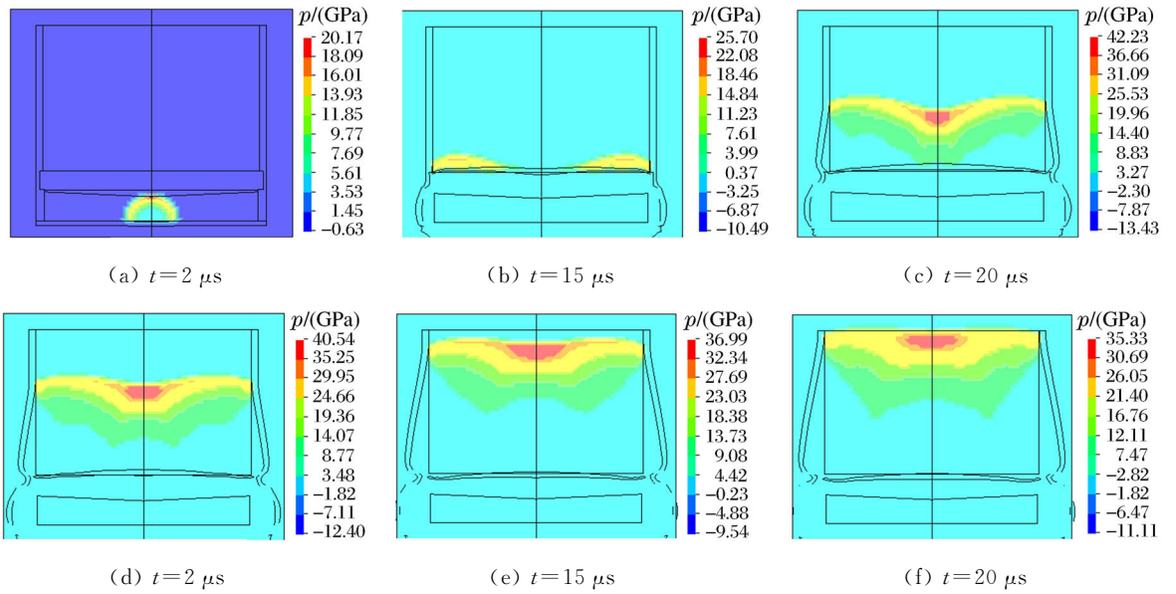
Table 3 Parameters of reaction rate equation

I	b	a	x	G_1	c	d	y
4.4	0.667	0.256 37	7	1.63	0.667	0.667	−0.037 53
G_2	e	f	z	F_{mxig}	F_{mxgy}	F_{mngy}	
4	0.333	1	3	0.071	0.5	0.5	

飞片材料采用 MAT-ELASTIC 模型描述。飞片材料选用 20 钢，密度为 7.85 g/cm^3、弹性模量为 207 GPa、泊松比为 0.3。由于飞片在副装药的驱动下作用距离短，变形量小，因此假设飞片的形变符合胡克定律，即应力只取决于应变。

2.3　数值计算结果及分析

图 3 给出了飞片冲击主装药产生的压力波形。从图 3 可以看出 VESF 起爆的特点,即在主装药的底部形成了环形起爆区域。从副装药起爆到主装药中的应力波到达另一端面的时间为 26 μs。在飞片与主装药分界面作用的过程中,虽然飞片近似保持平整,但是飞片的速度沿径向存在梯度,从中心向边缘逐渐增大,使得主装药边缘区域的界面压力大于中心区域界面的压力,导致边缘区域率先起爆,且起爆区域面积的大小也很理想。起爆区域越大,调整波形需要主装药的高度越低。适当设计飞片的质量分布对于增大起爆区域面积、降低主装药高度非常有利。



(a) $t=2$ μs　(b) $t=15$ μs　(c) $t=20$ μs

(d) $t=2$ μs　(e) $t=15$ μs　(f) $t=20$ μs

图 3　飞片冲击主装药的波形图

Fig. 3　Wave of flyer plate impacting on main charge

根据 BKW 程序理论计算得到:密度为 1.717 g/cm^3 的 B 炸药的爆速为7 780 m/s;在单点中心起爆的条件下,其 CJ 面的爆轰压力为 25.7 GPa;冲击起爆波阵面中心区域的压力比较高,约为35 GPa,其余区域波阵面压力近似为爆轰波阵面压力。可见冲击起爆既能很好地调整波形又能保持波阵面的压力不变,且可提高中心区域的压力,对提高 EFP 的动能和 EFP 飞行的定向性非常有利。

3　起爆方式对 MEFP 装药威力的影响

在模拟 3 种不同起爆方式起爆带有 7 个药型罩的一体化装药时,采用相同高度的整体装药:(1) 对于简单的点起爆,在主装药底部中心设置起爆点;(2) 对于多点起爆系统,在主装药的底部设置 7 个起爆药柱,每个起爆药柱的中心在同方位药型罩的中心线上;(3) 对于 VESF 起爆系统,由于算法和网格的复杂性会导致计算终止,根据冲击起爆会在主装药端部产生环形起爆区域的特点,进行有限元计算时在主装药端面靠近边缘的冲击起爆区域(冲击起爆区域的大小可根据图 3 确定)设置多个起爆点,使其起爆方式接近面起爆,以模拟冲击起爆产生的环形起爆区域。

3.1　有限元计算模型

有限元模型包括:炸药、壳体和药型罩。由于该模型是轴对称模型,为了提高计算效率,建立 1/2 模型,如图 4 所示。炸药材料采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型描述;壳体材料采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型描述;药型罩材料采用 MAT_STEINBERG 模型描述。

3.2　数值模拟结果及分析

图 5 给出了 3 种起爆方式中药型罩的成型情况。由图 5 可以看出:3 种起爆方式都形成了爆炸成

型弹丸;VESF 起爆方式所形成的 EFP 的速度高于另外两种方式,且成型弹丸的飞离偏角较小,定向性较好。另外,VESF 起爆方式很容易起爆长径比较大的炸药装药,且所需总药量比点起爆和多点起爆的药量少,使这种起爆系统得到广泛研究[6]。

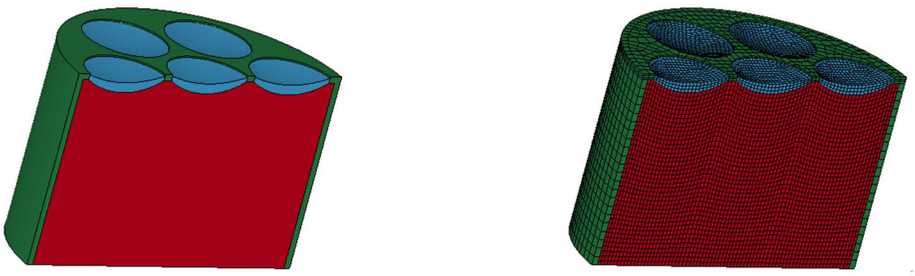
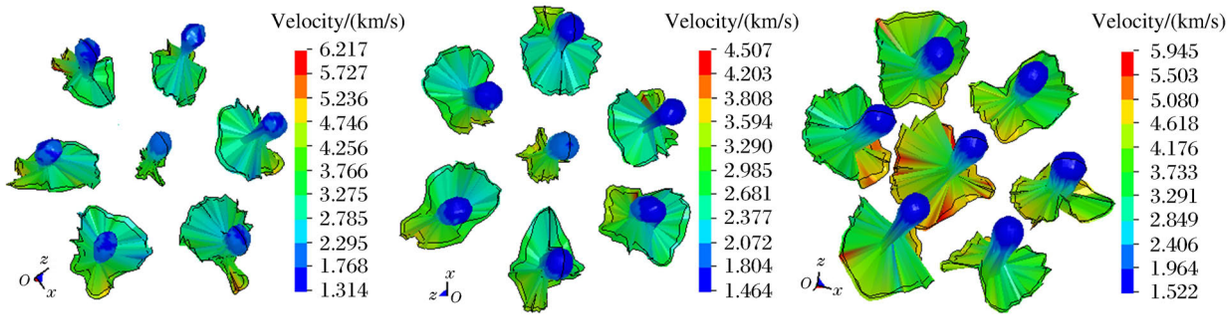


图 4 MEFP 装药的有限元仿真物理模型和网络模型

Fig. 4 Simulation physical model and gridding model of MEFP charge



(a) Point initiation (b) Mult-point initiation (c) VESF initiation

图 5 MEFP 装药的有限元仿真物理模型和网络模型

Fig. 5 Simulation physical model and gridding model of MEFP charge

表 4 给出了 3 种起爆方式下主装药百分比、成型弹丸的速度和飞行方向相对于装药中心轴线的偏角。VESF 起爆系统作用时,药型罩被压垮,形成 EFP 的速度比较高。其主要原因为,VESF 起爆系统可调整爆轰波形,在压垮药型罩时减小了药型罩的径向压垮速度,增加了药型罩的轴向压垮速度。药型罩的高度比直径小得多,缩短了爆轰波作用时药型罩沿径向压垮的时间,在稀疏波尚未进入之前,爆轰波已充分压垮药型罩,有利于提高 EFP 的速度。

表 4 3 种起爆方式仿真结果

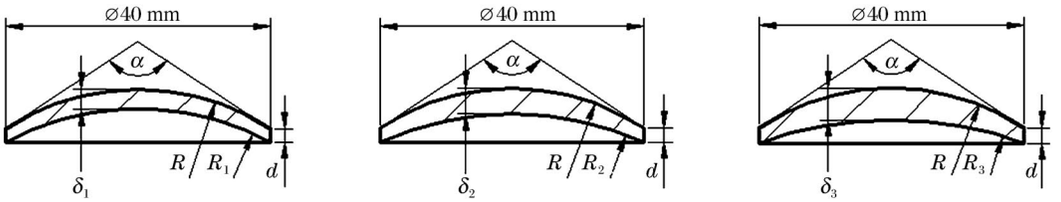
Table 4 Simulation Results of Three Initiation Styles

Initiation type	Main charge proportion/(%)	Velocity/(m/s)	Angle/(°)	EFP (Yes/No)
Point initiation	100.0	1 704	3.70	Yes
Multi-point initiation	100.0	1 812	2.85	Yes
VESF initiation	74.5	2 023	1.75	Yes

4 药型罩对 VESF 起爆系统的适应性

4.1 实验方案

通过靶场实验测试 EFP 的速度、飞散特性、着靶分布及药型罩的成型情况。VESF 起爆方式下 MEFP 装药药型罩采用 3 种方案,如图 6 所示。3 种方案均采用双曲率药型罩,药型罩口径和外曲率均相同,内曲率和罩顶厚度不同。图 6 中,α 为药型罩锥角;R 为药型罩外曲面的曲率半径;R_1、R_2、R_3 分别为 3 种药型罩内曲面的曲率半径,$R_1<R_2<R_3$;δ_1、δ_2、δ_3 分别为 3 种药型罩的罩顶厚度,$\delta_1<\delta_2<\delta_3$;



(a) Project 1　　(b) Project 2　　(c) Project 3

图 6　3 种方案药型罩示意图

Fig. 6　3 projects of liner

d 为药型罩边缘的厚度。样弹及靶场布置见图 7。

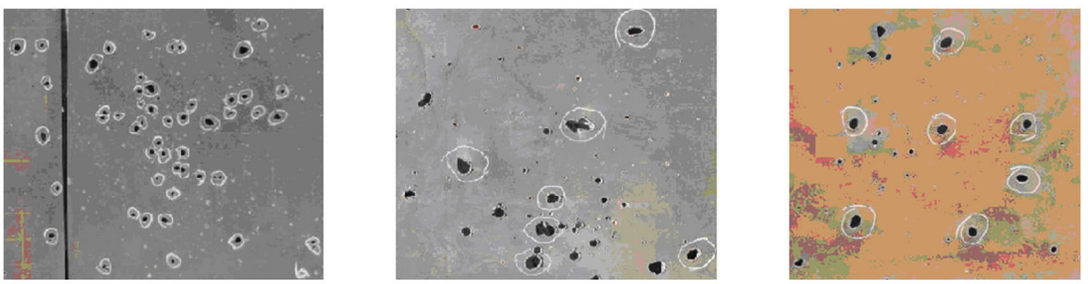


图 7　MEFP 装药及实验布置

Fig. 7　MEFP charge and experimental layout

4.2　实验结果及分析

图 8 给出了 3 种药型罩靶场实验的散布结果。从图 8 可以看出方案 1 和方案 2 中药型罩未能成型而形成了破片;方案 3 形成了 EFP,并在靶板上打出 7 个孔。可见随着药型罩底部曲率的减小,药型罩的破碎程度降低,当底部曲率减小到一定程度时,药型罩能很好地适应 VESF 起爆系统。表 5 为 3 种方案的实验结果。从表 5 可以看出,方案 3 药型罩形成了 EFP 且其速度大于方案 1 和方案 2 中药型罩破裂形成破片的速度,而且破片在靶板的散布区域比 EFP 在靶板的散布区域大,说明药型罩破裂所形成的破片飞行稳定性比 EFP 的飞行稳定差;在同一装药下,药型罩形成 EFP 所吸收炸药的能量比形成破片所吸收的炸药能量多,而且自然破片的速度保持能力比 EFP 差。



(a) Project 1　　(b) Project 2　　(c) Project 3

图 8　3 种方案散布图

Fig. 8　Distribution of three projects

表 5　测试结果

Table 5　Experimental results

Project	Shell with ring (Yes/No)	Velocity/(m/s)		Destroy area /(mm)	Disperse Angle/(°)		EFP (Yes/No)
		Simulation	Experiment		Simulation	Experiment	
1	Yes	—	2 540	⌀860	—	2.50	No
2	Yes	—	2 620	⌀800	—	2.30	No
3	Yes	2 023	2 800	⌀720	1.75	2.04	Yes

5 结 论

(1) 采用 VESF 起爆系统的多个 EFP 装药炸药时所需装药量少,且较传统的起爆方式产生的 EFP 速度高,提高了炸药能量的利用率。

(2) VESF 起爆系统最容易引爆长径比很大的装药,并且在装药内部产生较理想的平面波。

(3) 采用 VESF 起爆系统的多个 EFP 装药形成的爆炸成型弹丸定向性好。

通过进一步研究,可将 VESF 起爆系统应用于末敏子弹药战斗部或者具有精确定位能力智能区域封锁子弹药战斗部,以提高战斗部的定向打击能力。

References:

[1] Fong R, Ng W, Tang W, et al. Multiple explosively formed penetrator (MEFP) warhead technology development [C]// 19th International Symposium of Ballistics. Interlaken, Switzerland: International Ballistics Committee, 2001: 563-567.

[2] Blache A, Weimann K. Multi EFP charge for lightweight armor defend [C]//18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, USA, 1999.

[3] Fong R, Ng W, Tang S. Multiple explosively formed penetrator warhead technologies for mine and improvised explosive device neutrlization [C]//22nd International Symposium on Ballistics. Vancouver, Canada, 2005: 669-672.

[4] Whitworth N. Mathematical and numerical modelling of shock initiation in heterogeneous solid explosives [D]. UK: Cranfield University, 2008: 31.

[5] Shi R, Xu G G, Xu J P, et al. Numerical simulation of energy output structure for the underwater explosive [J]. Cinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2): 149. (in Chinese)
史 锐, 徐更光, 徐军培, 等. 炸药水中爆炸能量输出结构的数值模拟 [J]. 含能材料, 2009, 17(2): 149.

[6] Blache A, Weimann K. Generation of different detonation wave contours [C]//16th Symposium on Ballistics, San Francisco, USA, 1996.

Experimental Study and Numerical Simulation on MEFP Based on VESF Initiation

YANG Wei-Ling[1,2], JIANG Chun-Lan[1], WANG Zai-Cheng[1], XU Jun-Feng[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *National Key Laboratory of Science & Technology on Materials under Shock & Impact, Yantai* 264003, *China*)

Abstract: A kind of charge structure for multiple explosive forming projectile is put forward to improve the directional destruction effect on targets. The plane wave produced by shock initiation and initiation styles effecting on damage ability are simulated by LS-DYNA and tested. Results show that MEFP charge with VESF initiation has many advantages, such as higher velocity EFP, higher directionality and being easy to initiate charges of large ratio of height to diameter.

Key words: VESF initiation system; multiple explosive forming projectile; plane wave; directionality