

doi: 10.7690/bgzd.2019.07.019

## 不同炸高下的 EFP 对盖板炸药的撞击起爆研究

林建清<sup>1</sup>, 郑宇<sup>1</sup>, 郝云峰<sup>2</sup>, 李文彬<sup>1</sup>, 王晓鸣<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学智能弹药实验室, 南京 210094; 2. 晋西工业集团有限责任公司, 太原 030027)

**摘要:** 为了研究不同状态下的爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 对盖板炸药的冲击起爆影响, 采用 Ls-Dyna 仿真软件, 建立 EFP 撞击起爆带壳炸药的数值仿真模型。利用 EFP 成型过程的不同阶段其头部速度不同, 对不同厚度盖板的 CompB 炸药进行撞击起爆数值仿真, 分析了各个阶段的比动能、头部速度与盖板厚度的关系, 以及盖板厚度与起爆时刻、位置的变化规律。仿真结果表明: 在 0.5~1 倍装药直径之间, 可以得出临界盖板厚度与头部速度、EFP 沿飞行方向的投影面积成正比, 并且 EFP 在侵彻大于 2.5 倍装药直径的盖板过程时, 不会形成剪切块; 笔者设计的口径 40 mm EFP 完全成型后, 其比动能为 61.81 MJ/m<sup>2</sup>, 可以起爆最大盖板厚度为 10 mm 的 CompB 炸药; 在一定盖板厚度范围内, 冲击起爆时间和冲击起爆位置都随着盖板厚度增加而增加; EFP 飞行至 0.5 倍装药直径处, 所能撞击起爆的临界盖板厚度是 EFP 成型后的 2 倍。该研究对于防空防导的战斗部 EFP 设计具有一定的参考价值。

**关键词:** EFP; 冲击起爆; 临界盖板厚度; 数值模拟; 比动能**中图分类号:** TJ410.2 **文献标志码:** A

## Study on Impact Detonation of Cover Explosion by EFP with Different Explosive Heights

Lin Jianqing<sup>1</sup>, Zheng Yu<sup>1</sup>, Hao Yunfeng<sup>2</sup>, Li Wenbin<sup>1</sup>, Wang Xiaoming<sup>1</sup>

(1. Ministerial Key Laboratory of Smart Ammunition, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China; 2. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

**Abstract:** In order to study the impact of explosively formed projectile (EFP) on the impact of the cover explosives under different conditions, the numerical simulation model of EFP impact detonation shell explosive was established by Ls-Dyna simulation software. Using different head speeds in different stages of the EFP forming process, the impact initiation simulation of CompB explosives with different thickness covers was carried out, and the relationship between specific kinetic energy, head speed and thickness of the cover, the thickness of the cover, the change law of the detonation time and position were analyzed. The simulation results show that between 0.5 and 1 times the diameter of the charge, it can be concluded that the critical cover thickness is proportional to the head speed and the projected area of the EFP along the flight direction, and the EFP is penetrating more than 2.5 times the diameter of the charge. During the plate process, no shearing block is formed; The caliber 40 mm EFP designed in this paper is fully formed, its specific kinetic energy is 61.81 MJ/m<sup>2</sup>, and the maximum CompB explosive with a thickness of 10mm can be detonated; within a certain thickness of the cover plate, the impact both the detonation time and the impact detonation position increase with the increase of the thickness of the cover plate; when the EFP flies to the 0.5 times the diameter of the charge, the thickness of the critical cover plate capable of impacting and detonating is twice that of the EFP after molding. It has some reference value for EFP design of air defense antimissile warhead.

**Keywords:** EFP; shock initiation; critical cover thickness; numerical simulation; specific kinetic energy

## 0 引言

EFP 作为拦截来袭战斗部的毁伤元具有大炸高、高效毁伤等特点, 与传统的刚性破片毁伤元相比, 在撞击速度、存速和起爆输入能量方面都具有一定优势。唐勇等<sup>[1]</sup>进行了 EFP 冲击起爆带盖板装药的可行性分析研究; 张先峰等<sup>[2]</sup>进行了 EFP 冲击引爆带壳炸药数值模拟研究; 顾文彬等<sup>[3]</sup>对 EFP 引爆厚盖板炸药盒进行了数值模拟并验证了带尾翼的

EFP 能有效倾侵爆 40 mm 厚盖板炸药盒。总体来说, 相对于破片毁伤元而言, EFP 作为毁伤元冲击起爆炸药的相关研究相对较少。

在研究过程中, 由于成型装药形成的 EFP 速度大小不易控制, 因此笔者利用 EFP 在成型过程中的不同阶段 EFP 头部速度不相同, 整体动能不变的情况下, 研究对带壳炸药的冲击起爆规律, 并分析了各个阶段的比动能、头部速度与盖板厚度之间的关系, 以及盖板厚度与起爆时刻、位置的关系。

收稿日期: 2019-02-23; 修回日期: 2019-03-25

作者简介: 林建清(1991—), 男, 福建人, 硕士, 从事终点效应与目标毁伤技术研究。E-mail: 598512214@qq.com。

### 1 非均质炸药的起爆判据

非均质炸药的起爆阈值，既与冲击波压力  $p$  有关，又与冲击波脉冲的持续时间  $\tau$  有关。F.E.Walker 和 R.J.Wasley 于 1969 年首先提出了非均质炸药起爆的  $p^2\tau$  判据<sup>[4]</sup>； $p^2\tau$  的物理含义：将  $p^2\tau$  除以冲击波阻抗  $\rho_0 D_s$ ，可以得到

$$E_c = \frac{p^2\tau}{\rho_0 D_s} = \frac{\rho_0 D_s u \cdot p\tau}{\rho_0 D_s} = pu\tau$$

式中： $D_s$  为冲击波速； $u$  为波阵面上的质点速度；则  $pu$  实际上是冲击波传入炸药的功率，因此  $pu\tau$  代表冲击波传输的功。该式可作为适用范围更广泛的冲击起爆判据，称之为临界能量流判据。

### 2 算法及有限元模型

EFP 撞击盖板炸药问题涉及 EFP 药柱炸药的爆炸、药型罩的爆炸成型以及 EFP 侵入盖板和炸药等大变形、高应变率动力学过程，为了满足此过程大变形及材料流动等非线性效应数值模拟的研究需要，计算时采用了应变率效应的非线性材料模型和 ALE 算法。

#### 2.1 数值计算模型

利用 LS\_Dyna 软件进行 3 维数值模拟计算，计算模型由炸药、药型罩、空气、盖板和被发炸药 5 部分组成，其中炸药、药型罩和空气采用欧拉网格建模，使用多物质 ALE 算法，盖板和 CompB 炸药采用拉格朗日网格建模，并且盖板、CompB 炸药与空气和药型罩材料之间采用耦合算法。

EFP 计算模型采用弧锥结合型结构，装药直径为 40 mm，装药高度为 32 mm。为了减小计算量，建立 1/4 3 维数值计算模型。选用 Solid164 实体单元，起爆方式采用中心点起爆，EFP 成型装药计算模型如图 1 所示，被发炸药尺寸设置为  $\Phi 120$  mm $\times$ 112 mm。将 CompB 炸药置于不同炸高处，研究 EFP 成型过程的不同阶段对 CompB 冲击起爆的影响。

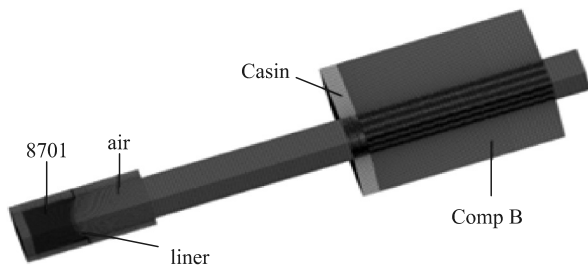


图 1 EFP 冲击起爆带壳炸药的数值模拟仿真模型

### 2.2 材料模型及参数

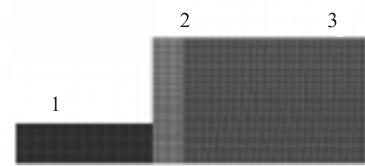
聚能装药炸药采用 8701，材料模型为 High\_Explosive\_Burn，状态方程为 JWL，药型罩及盖板材料分别为紫铜和 45 号钢，材料模型为 Johnson-Cook 模型，状态方程为 Gruneisen，被发炸药为 CompB 炸药<sup>[5]</sup>，材料模型为弹塑性模型；状态方程为点火与增长方程，上述材料参数如表 1 所示。

表 1 仿真涉及的材料部分参数

盖板	$\rho/(g/cm^3)$	$G/GPa$	$E/GPa$	$\mu$
45 号钢	7.83	77		
$A/GPa$	$B/GPa$	$n$	$C$	$M$
0.090	0.292	0.31	0.025	1.09
名称	炸药	$\rho/(g/cm^3)$	$D/(m/s)$ <th><math>P_{CJ}/GPa</math></th>	$P_{CJ}/GPa$
EFP 药柱	8701	1.695	8425	29.66
$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
854.50	20.49	4.6	1.35	0.25
药型罩	$\rho/(g/cm^3)$	$G/GPa$	$E/GPa$	$\mu$
铜	8.96	47.7		
$A/GPa$	$B/GPa$	$n$	$C$	$M$
0.792	0.510	0.26	0.014	1.03
名称	炸药	$\rho/(g/cm^3)$	$G/GPa$	$\sigma_y/GPa$
被发炸药	CompB	1.712	3.54	0.2
$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega_1$
524.2	7.678	4.2	1.1	0.5

#### 2.3 算法及材料参数验证

为了验证算法和材料参数的正确性，建立了计算仿真模型，如图 2：射弹尺寸为直径 12.7 mm $\times$ 长 22.4 mm，盖板选用 1 mm 45 号钢以及 3 mm 和 5 mm 的 Al。将计算结果与文献[6]试验数据、文献[7]计算数据以及文献[8]仿真数值进行比较，文中仿真结果数据与文献[6-8]数据都有较好的一致性，结果如表 2 所示。



1. projectile; 2. coverplate; 3. CompB.

图 2 射弹撞击盖板 CompB 模型

表 2 平头铜射弹冲击起爆临界速度 mm/ $\mu$ s

盖板材料	临界起爆速度			
	实验 <sup>[6]</sup>	计算 <sup>[7]</sup>	仿真 <sup>[8]</sup>	文中仿真
裸炸药	0.969	0.99~1.00	0.93~0.94	0.97~0.98
1 mm 钢	1.086	1.11~1.12	1.03~1.04	1.03~1.04
3 mm AL	1.203	1.21~1.22	1.20~1.21	1.12~1.13
5 mm AL	1.348	1.42~1.44	1.44~1.45	1.30~1.31

EFP 侵入威力验证，钢锭采用 45 号钢，尺寸为  $\Phi 120$  mm $\times$ 50 mm，仿真计算结果局部图(如图 3)。其中： $D_1$  为弹坑口部直径； $D_2$  为弹坑底部直径； $H$

为侵彻深度。试验布置(如图 4), 侵彻靶板效果(如图 5), 将仿真结果与试验侵彻结果进行比较。如表 3 所示, 侵彻威力的仿真数据与试验 1、2 数据最大误差为 5.36%, 说明该仿真结果可信。

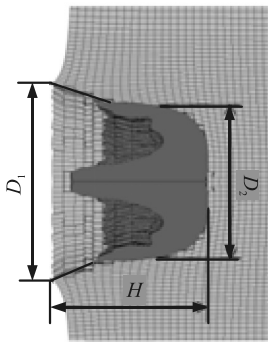


图 3 侵彻结果局部



图 4 试验布置



(a) 侵彻试验靶 1



(b) 侵彻试验靶 2

图 5 EFP 侵彻钢锭

表 3 EFP 侵彻威力试验结果数据 mm

侵彻参数	$D_1$	$D_2$	侵深 $H$
试验 1	26.21	18.34	19.50
试验 2	25.53	19.28	19.50
仿真数据	25.72	19.38	20.27

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 EFP 成型过程及对炸药的撞击起爆过程

药型罩药柱采用中心点起爆, 在起爆  $100 \mu\text{s}$  后基本趋于稳定飞行, EFP 整体速度大约为  $1460 \text{ m/s}$ , 其中  $v_h$  为头部速度,  $v_t$  为尾部速度, 其成型过程头尾速度如图 6。

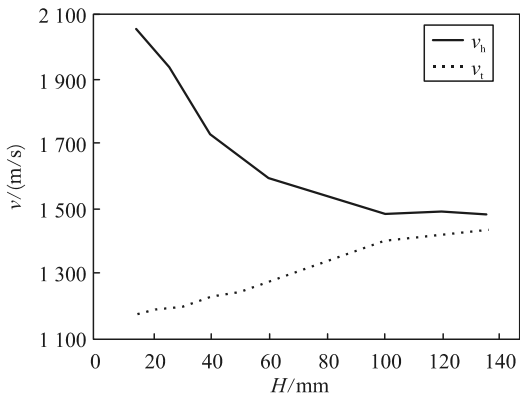


图 6 EFP 成型过程中的头尾速度

EFP 药柱起爆  $15 \mu\text{s}$  后的动能基本不变(如图 7), 其总动能大约为  $23925.6 \text{ J}$ , 而 EFP 沿飞行方向的投影面积逐渐减小(如图 8), 到  $80 \mu\text{s}$  后基本不变, 此时 EFP 沿飞行方向的投影面积为  $3.871 \text{ cm}^2$ 。

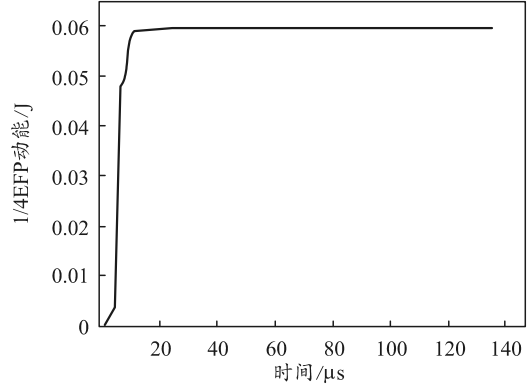


图 7 起爆后 1/4EFP 动能变化

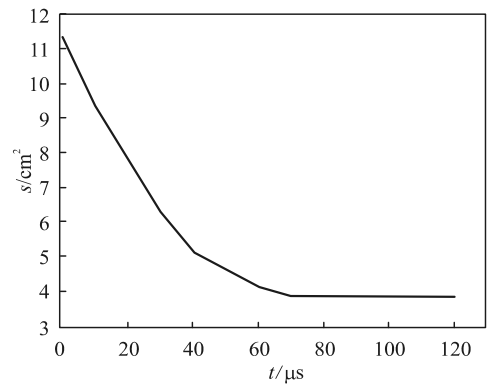


图 8 EFP 沿飞行方向的投影面积

为了使爆轰产物不对被发炸药造成影响, 在 EFP 药柱炸药与盖板、被发炸药之间不设置流固耦合作用。从仿真计算结果图 9、图 10 来看, 临界盖板厚度随着 EFP 头部速度的增大而增加。在炸高为  $0.5 \sim 1.0$  倍装药直径之间时, 虽然 EFP 比动能在逐渐增加, 但是 EFP 延飞行方向的投影面积、临界盖板厚度和头部速度都在逐渐减小, 说明在此炸高内进行盖板炸药的 EFP 冲击起爆, 临界盖板厚度与头部速度、EFP 沿飞行方向的投影面积成正比。

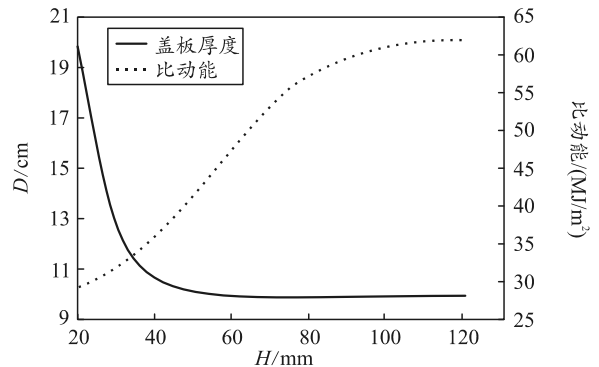


图 9 比动能、临界盖板厚度与炸高之间的关系

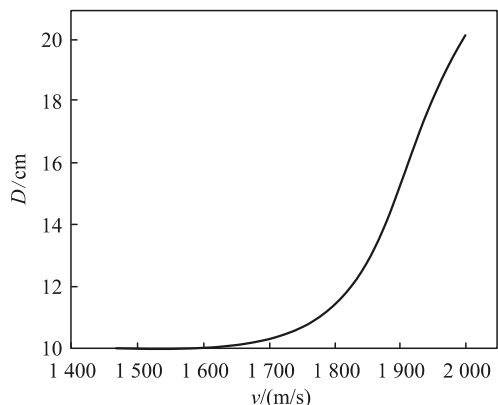


图 10 EFP 头部速度与临界盖板厚度的关系

选取盖板厚度为 10 和 15 mm 在炸高为 0.5 倍装药直径进行仿真，图 11 为仿真过程压力云图。从压力云图中可以看出：成型初期 EFP 处于扁平状，虽然头尾速度差大，其侵彻能力较弱，但是头部速度较高，其在 17  $\mu$ s 时开始侵彻盖板，分别在 30.5、33  $\mu$ s 达到起爆压力，在 33、35.5  $\mu$ s 达到 CJ 压力。并且可以看出：EFP 先在盖板正面形成一定区域的压缩剪切；随着压缩剪切的进行，当到达背面附近时，主要以拉伸为主，未在背面形成剪切块，同时可以看出在 EFP 未击穿盖板前就已起爆。在炸高为 0.5 倍装药直径，盖板厚度大于 10 mm 时，起爆机制可以解释为：EFP 头部速度高，在其脱体冲击波作用下发生冲击起爆。

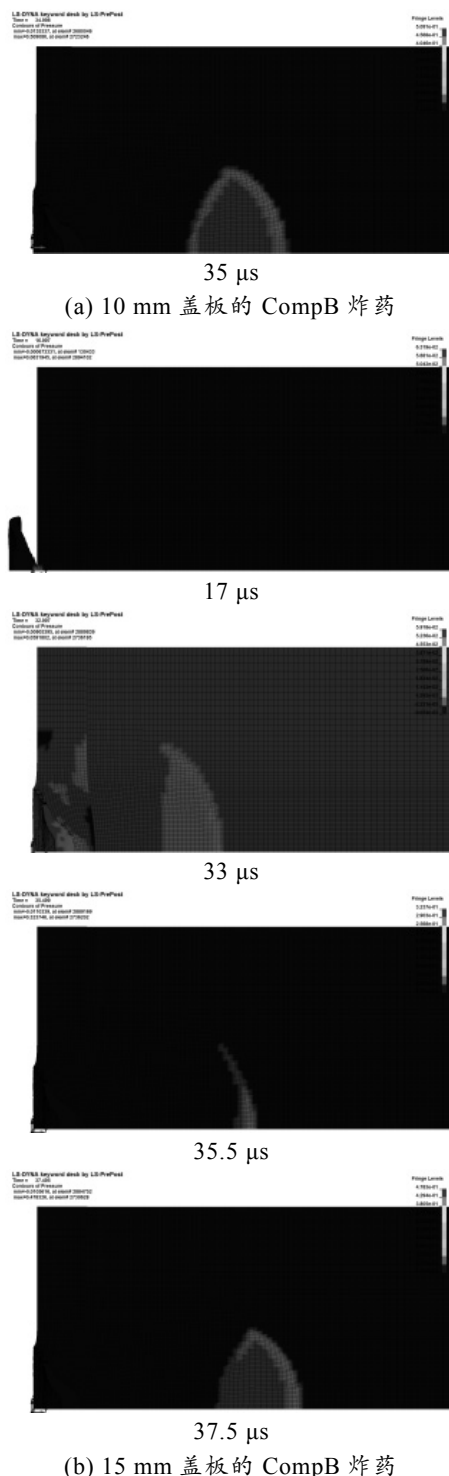
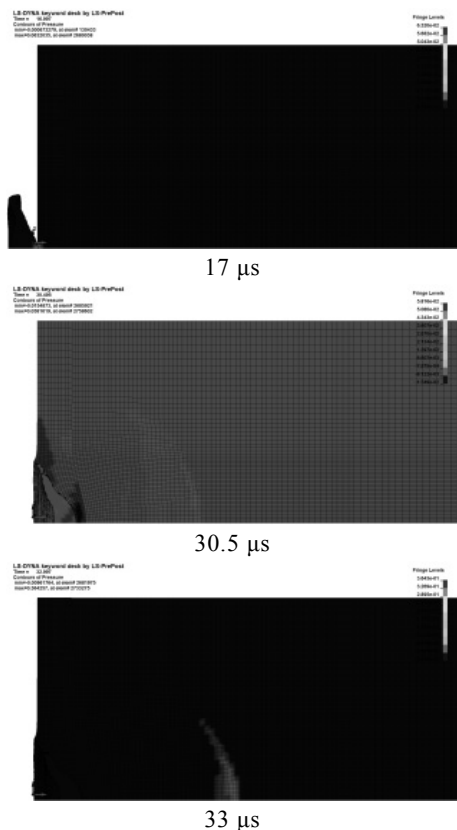


图 11 各工况下冲击起爆压力云图

炸高为 1.0~2.5 倍装药直径，虽然 EFP 头部速度逐渐减小，但其比动能在逐渐增加，并最终使盖板炸药达到 CJ 压力。由于临界盖板厚度不变，根据临界能量流判据  $put$  可知，在此炸高范围内，盖板炸从 EFP 获得的输入总能量一样。

在炸高大于 2.5 倍装药直径时，EFP 基本完全成型，比动能和临界盖板厚度都不变，EFP 侵彻能

力也不变，可以得到 EFP 的比动能为  $61.81 \text{ MJ/m}^2$  时，可以起爆的最大盖板厚度为  $10 \text{ mm}$  的 CompB 炸药。

取炸高为 2.5 倍直径处如图 12 所示。从图中可以看出：此时的 EFP 可以穿透盖板，并继续侵彻炸药，在  $100 \mu\text{s}$  时， $10 \text{ mm}$  盖板的 CompB 炸药内压力出现阶跃点，并逐渐增长，在侵彻炸药  $12 \mu\text{s}$  后达到 CJ 压力，CompB 炸药的 CJ 压力为  $29.4 \text{ GPa}^{[4]}$ ，说明此时已经形成稳定的爆轰。

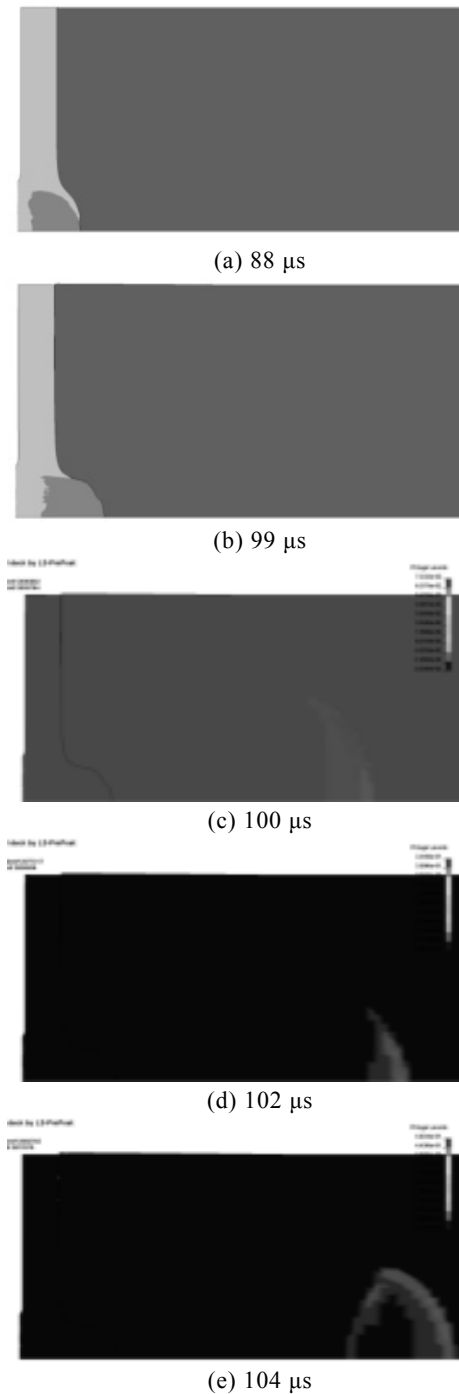


图 12 2.5 倍炸高下撞击侵彻盖板和起爆压力云图

### 3.2 盖板厚度与起爆位置、时刻的关系

取 2 倍装药直径的炸高下，在临界盖板厚度内，冲击不同盖板厚度的炸药，盖板厚度分别为  $5$ 、 $6$ 、 $7$  和  $8 \text{ mm}$ ，得出曲线如图 13。

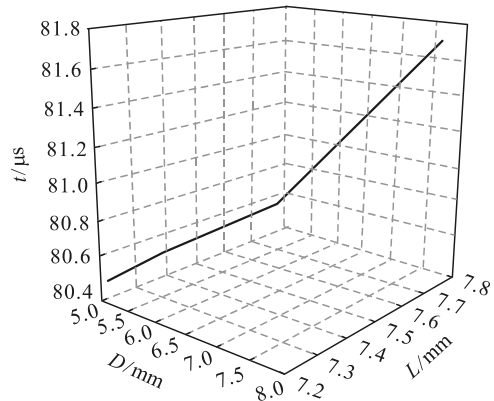


图 13 盖板厚度与冲击起爆位置、时刻的关系

从图可以看出：在一定盖板厚度范围内，冲击起爆时间和冲击起爆位置都随着盖板厚度的增加而增加，且越接近临界盖板厚度增加幅度也逐渐增加。这是因为随着盖板厚度的增加，冲击波压力衰减的越多，作用在炸药上的脉冲压力越小，根据临界起爆能量判据，其所需的起爆时间就越长，起爆位置与盖板的距离越大。

### 4 结论

1) 在  $0.5 \sim 1$  倍装药直径之间，可以得出临界盖板厚度与头部速度、EFP 沿飞行方向的投影面积成正比，并且 EFP 在侵彻大于 2.5 倍装药直径的盖板过程时，先在前面板形成一定区域的压缩剪切，在背面主要以拉伸破坏为主，不会形成剪切块。

2) 文中设计的口径在  $40 \text{ mm}$  EFP 完全成型后，比动能为  $61.81 \text{ MJ/m}^2$  时，可以起爆最大盖板厚度为  $10 \text{ mm}$  的 CompB 炸药。

3) 在一定盖板厚度范围内，冲击起爆时间和冲击起爆位置都随着盖板厚度增加而增加，且越接近临界盖板厚度增加幅度也越大。

4) EFP 飞行至  $0.5$  倍装药直径处，虽然其长径比较小，但其头部速度较高，所能撞击起爆的临界盖板厚度是 EFP 成型后撞击起爆的临界盖板厚度的 2 倍。

### 参考文献：

[1] 唐勇, 吴腾芳, 顾文彬, 等. EFP 冲击起爆带盖板装药的可行性分析[J]. 解放军理工大学学报, 2004, 5(1): 73-75.  
 [2] 张先峰, 陈惠武, 赵有守. EFP 冲击引爆带壳炸药数值

模拟研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 90-92.

[3] 顾文彬, 李旭峰, 李裕春, 等. EFP 引爆盖板炸药盒数值模拟[J]. 弹道学报, 2013, 25(3): 59-63.

[4] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.

[5] 崔凯华, 洪滔, 曹结东. 射弹冲击带盖板 CompB 装药起爆过程数值模拟[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 286-289.

[6] ALMOND R J, MURRAY S G. Projectile attack of surface scattered munition: Prompt shock finite element models and live trial[J]. Propellants, Explosives,

Pyrotechnics, 2006, 31: 83.

[7] URTIEW P A, VANDERSALL K S, TARVER C M, et al. Shock initiation Experiments and modeling of Composition B and C4[C]//Proceeding of the 13th International Detonation Symposium, Norfolk Virginia USA, 2006: 929-939.

[8] TARVER C M, HALLQUIST J Q, ERICKSON L M. Modeling short pulse duration Shock initiation of solid explosives[C]//Proceeding of the 8th International Detonation Symposium, Naval Surface Weapons enter, Albuquerque, NSWCMP86-194, 1985: 951-961.

\*\*\*\*\*

(上接第 81 页)

### 4.3 系统效率

为了测试系统的整体性能, 笔者在 VC6.0 环境下在 PC 机(CPU I7 3770K, 内存 8 g, 显卡 Nvidia Geforce GTX 680, 操作系统 Windows7 sp2)上进行了如下实验: 1) 使用文中系统进行 5 次碰撞(开炮 5 次), 记录每次碰撞检测消耗的时间; 2) 将系统中的布料模拟与碰撞检测部分换成 SOLID2.0 包, 重复以上过程, 记录碰撞检测消耗时间。结果如表 1 所示。

表 1 文中系统与典型系统效率比较 ms

次 数	文中 系统	基于特征 值的算法	空间 分解法	基于物体 空间方法	基于 SOLID2.0 的系统
1	152	165	160	172	180
2	153	166	158	170	182
3	155	168	165	171	179
4	159	164	160	172	180
5	155	166	162	169	178

## 5 结束语

从以上结果可以看出, 文中系统在模拟布料时比一些经典碰撞检测算法效率高。系统效率的提高主要是来自 2 个方面:

- 1) 以 Verlet 积分方法为核心的数种有效方法的改进与整合;
- 2) 采用随时可以停止的有限迭代方法, 用精度

换时间的策略。

### 参考文献:

[1] 蓝磊. 基于位置约束的布料动态模拟研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.

[2] 铁铮. 面向服装变形的三维布料仿真技术研究及实现[D]. 上海: 东华大学, 2017.

[3] 周玲莉. 基于物理模型的布料实时动画关键技术研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2015.

[4] 卢路加, 张君会, 赵志稳. 欧拉积分性质及应用[J]. 亚太教育, 2015, 11(20): 123-125.

[5] VERLET L. Computer experiments on classical fluids. I. Thermo dynamical properties of Lennard-Jones molecules[J]. Physical Reviews, 1967, 159: 98-103.

[6] 于晓霞. 碰撞检测技术在游戏中的应用与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2007: 25-28.

[7] 刘浩. 基于质点—弹簧模型的实时三维布料模拟系统[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 132-135.

[8] GUIDO B, DENNIS A, FRANZE W. Virtual Reality Systems Modelling Haptic Two-Finger Contact with Deformable Physical Surfaces[C]//2007 International Conference on Cyberworlds. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 2007: 114-123.

[9] METCALF M, PRESS W H, TEUKOLSKY S A, et al. Numerical recipes in Fortran 90, Vol 2[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993: 38-44.

[10] 柯莹, 梁惠娥, 王宏付. 基于 OpenGL 的虚拟服装二维样板设计与修改[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 35-39.