文章编号：1001-1455(2014)02-0202-07

含能破片引爆带壳炸药过程的数值模拟*

李旭锋[1]，李向东[2]，顾文彬[1]，李裕春[1]，秦入平[1]
(1. 解放军理工大学野战工程学院，江苏 南京 210007；
2. 南京理工大学机械工程学院，江苏 南京 210094)

摘要：将引爆模拟战斗部等效为带铝壳炸药，设计了一种新型含能破片作为毁伤元，利用非线性有限元 LS-DYNA 软件对该含能破片侵彻、引爆带壳炸药的作用过程进行了数值模拟。用“升降法”得到了该“含能破片”对不同盖板厚度带壳炸药的引爆速度，同时与普通破片引爆同规格带壳炸药进行了对比，并进行了实验验证。结果表明，通过控制含能破片的撞击速度和含能物质的延迟起爆时间，可有效引爆盖板厚度为 8～16 mm的带铝壳炸药。

关键词：爆炸力学；临界速度；非线性有限元；带壳炸药；能破片；引爆
中图分类号：O381；TJ414.1　　**国标学科代码**：1303510　　**文献标志码**：A

在现有的反导技术中，利用高速预制破片，侵彻、引爆来袭战斗部，是常用的方式之一。为此，有很多实验、理论分析和数值模拟方法的研究[1-8]，该问题的实质是高速破片对带壳炸药的冲击起爆，是非均相炸药的非定常爆炸动力学问题[9-12]。常用的预制破片多为高密度的金属或合金实心破片体，只有当破片具有一定的质量和速度时才有足够的毁伤能力，这对破片型战斗部提出了较高要求。本文中，根据文献[13]，提出一种特殊的预制破片(含能破片)的设计思路，具体构想是：在破片内预先装入特定的起爆装置和含能物质(一般为高能可燃或可爆材料)，当破片穿透壳体、进入目标体内部后，在延迟起爆装置作用下含能物质被引爆，释放较高的热量或由冲击波引爆目标体装药，形成高效毁伤。含能破片针对易燃易爆类目标，如燃料舱、战斗部舱等，具有高效毁伤效果[14-15]。

由于带壳炸药的引爆与壳体材料和厚度、破片材料和形状、破片的着靶速度及姿态等紧密相关，很有必要开展此类破片对带壳炸药的引爆的研究。本文中，以防空战斗部毁伤来袭精确制导武器为研究背景，采用 LS-DYNA 非线性有限元软件，对钢质外壳的含能破片撞击引爆不同厚度铝盖板带壳 B 炸药的作用过程进行数值模拟，分析其引爆机理，给出临界起爆条件。

1　算法与模型

1.1　物理模型与建模

含能破片的结构如图 1 所示，圆柱形长 17.6 mm、外径 14 mm，内腔长度 10 mm、内腔直径 8 mm。腔内装有延迟起爆机构和含能物质，破片壳体和内部装填物的总质量为 15.70 g。战斗部等效为带壳炸药，为铝质圆桶形，外径 100 mm，内径 90 mm，高度 70 mm；圆盖板直径 130 mm，厚度分别为 8、10、12、14 和 16 mm；壳体、端盖材料均采用 LY12；壳内预先铸装 B 炸药。

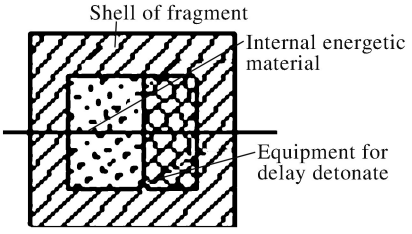


图 1 含能破片结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of energetic fragment

建模时，为保证“含能破片”与质量、直径相同的普通破片具有可比性，两者采用相同的模型和材料参数。当把它当作为普通破片计算时，对破片内含能物质作“惰性化”处理；把它作为含能破片计算时，令破片内的含能物质恢复“引爆能力”。整个模型为轴对称结构，因此建立 1/4 模型。

* **收稿日期**：2012-09-24；**修回日期**：2012-12-17
基金项目：国家自然科学基金项目(10902053)
作者简介：李旭锋(1975—　)，男，博士研究生，助理工程师。

1.2　材料模型及参数

采用 ALE 算法，破片壳体、带壳炸药壳体材料分别为 45 钢和 LY12 硬铝，均采用 Johnson-Cook 材料模型。破片壳体与破片内含能物质、带铝壳炸药壳体与壳内 B 炸药之间，均采用侵蚀面-面接触条件，破片壳体和炸药壳体之间，定义侵蚀接触算法，忽略热能损失。采用 Solid 164 单元对破片、带壳炸药壳体、B 炸药进行网格划分，破片内装填的含能物质的材料模型和状态方程分别选用高能炸药燃烧方程和 JWL 状态方程，另加延迟起爆控制关键字初始爆轰[16]。破片壳体、炸药壳体与含能物质的计算参数分别为[16]：45 钢 $\rho=7.83\ \mathrm{g/cm^3}$，$G=77.0\ \mathrm{GPa}$，$m=0.22$，$A=800\ \mathrm{MPa}$，$B=510\ \mathrm{MPa}$；LY12 硬铝 $\rho=2.78\ \mathrm{g/cm^3}$，$G=25.9\ \mathrm{GPa}$，$m=0.33$，$A=280\ \mathrm{MPa}$，$B=426\ \mathrm{MPa}$；含能物质 $\rho=1.687\ \mathrm{g/cm^3}$，$D=8.30\ \mathrm{km/s}$，$p_{\mathrm{CJ}}=33.5\ \mathrm{GPa}$，$A=581.4\ \mathrm{GPa}$，$B=6.801\ \mathrm{GPa}$；$R_1=5.25$，$R_2=1.60$，$\omega=0.28$，$E_0=8.56\ \mathrm{GPa}$，$V_0=1.00$。

2　含能破片引爆带壳炸药过程

2.1　含能破片对带铝壳炸药的引爆速度

为了能够清晰地分析含能破片与普通破片对带壳炸药的引爆过程，在计算模型上选取了对称轴线上的点 A、B、C 作为参照点，以靶板轴线与壳体外缘交界处的点 J 作为基准参照点，点 A、B、C 与点 J 的距离分别为 6.5、7.0、7.5 cm，具体相对位置如图 2 所示。普通破片和含能破片冲击带壳炸药时的压力曲线，如图 3～4 所示。为了分析破片在 0～48 μs 时间段的压力，这些参照点中的最高点需在普通破片侵彻 48 μs 时破片动态位置的前方，最低点需距壳体内壁一定距离，尽量避免冲击波到达后反射波的影响。为了使选取的参照点具有代表性，3 个参照点需相互隔开一定距离。因此，选定了如上 3 点。

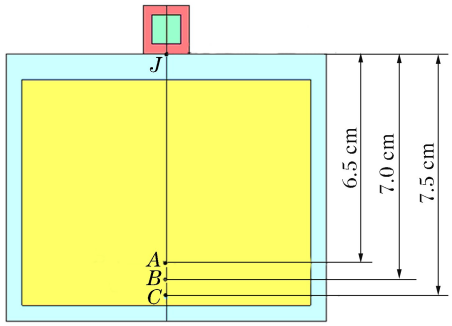


图 2　典型参照点位置

Fig. 2　Typical selection points

当含能破片以 1.3 km/s 速度撞击带壳炸药、同时使内部含能物质不起作用时，不能引爆炸药；使用与含能破片质量、结构完全相同的普通破片以相同速度撞击时，同样不能引爆壳内炸药。数值模拟结果表明，破片在穿透炸药壳体和在炸药内继续运动的过程中，炸药内部各参照点在这两种情况下的压力相同，壳内炸药在对应参照点处的压力曲线如图 3 所示。而含能破片（含能物质起作用）以 1.3 km/s 速度撞击带壳炸药时，带壳炸药被引爆，相同参照点处的压力曲线如图 4 所示。显然两者对应参照点处的压力不在一个数量级，可判断带壳炸药的引爆是含能破片内的含能物质起爆作用引起的。借鉴“升降法”原理，通过大量计算得到：普通破片引爆带壳炸药的速度为 1.695 km/s，而引爆相同规格的带壳炸药，使用含能破片时的速度仅为 1.250 km/s。

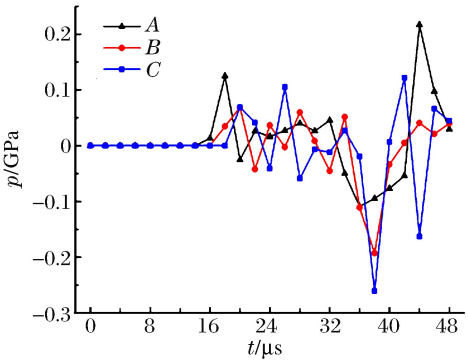


图 3　普通破片撞击带壳炸药时的压力曲线

Fig. 3　Pressure curves of detonating shelled explosives with ordinary fragment

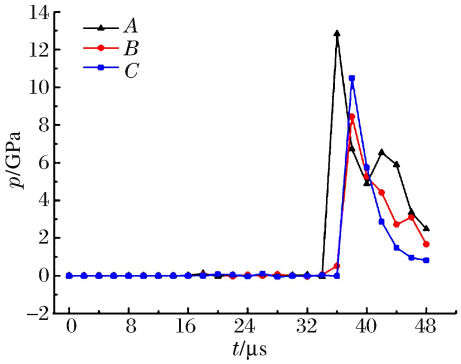


图 4　含能破片引爆带壳炸药时的压力曲线

Fig. 4　Pressure curves of detonating shelled explosives with energetic fragment

由图 3 可知,普通破片以 1.3 km/s 速度撞击(或使用含能破片但其内部含能物质不作用)时,壳内参照点 C 处压力最高,为 0.11 GPa;而由图 4 可知,含能破片以相同的速度撞击炸药壳体、进入带壳炸药内部并在里面起爆时,壳内同一参照点 C 处的压力最高达到了 11.2 GPa,显然带壳炸药被引爆是破片起爆引起的(此时破片内含能物质的延迟起爆时间为 26 μs)。

当使用含能破片以相同速度(1.3 km/s)撞击带壳炸药时,带壳炸药在不同时刻的压力状态如图 5 所示。

由图 3~5 可知,含能破片在穿透壳体过程中产生一个冲击波,破片完全穿透带壳炸药的端部壳体后,冲击波压力明显衰减,24 μs 时已衰减到较低的程度(靠近炸药壳体内壁的点 C 压力为 0.11 GPa,见图 3)。在计算中,设定含能破片在 26 μs 开始起爆,32 μs 时破片起爆产生的这个冲击波传播到壳内炸药中,并且在 34~36 μs 该冲击波继续成长为球面波,38 μs 时该冲击波的波阵面到达带壳炸药的壳体(此时参照点 C 压力为 11.2 GPa,见图 4),于是壳内炸药被引爆。

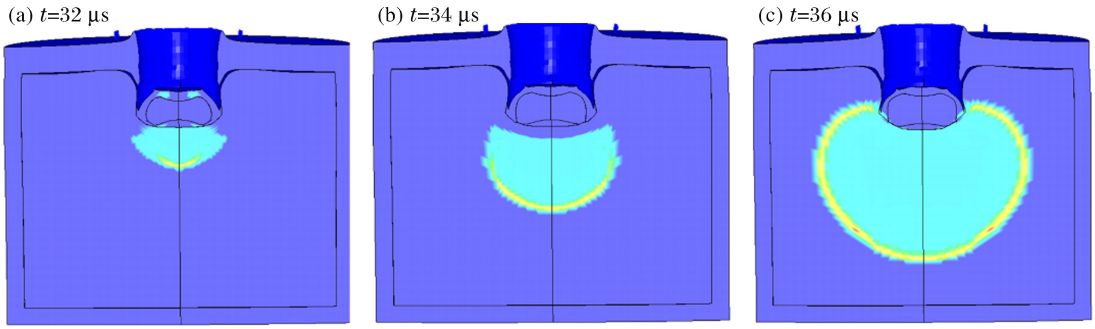


图 5 含能破片引爆时装药的应力状态

Fig. 5 Stress state of explosive with energetic fragment

2.2 同一厚度带壳炸药的引爆过程

为了更深入地分析破片对带壳炸药的引爆能力,对不同着靶速度和延迟起爆时间的作用情况进行了数值模拟。以 50 m/s 为一个间隔,针对某一速度,分别对应不同的延迟起爆时间;计算的破片规格同上,带壳炸药端部盖板厚度为 8 mm。计算结果表明:在速度 1.25~1.65 km/s 内,选择合适的含能破片着靶速度和含能物质延迟起爆时间,都能引爆带壳炸药,如图 6 所示。

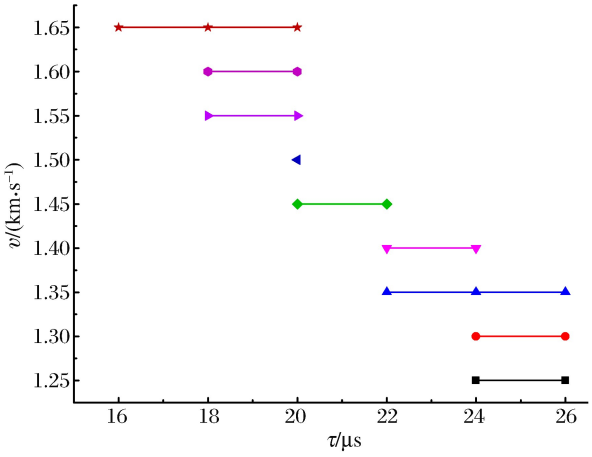


图 6 带壳炸药的引爆情况

Fig. 6 Detonation cases of shelled explosives

含能破片的着靶速度为 1.65 km/s、延迟时间为 16、18、20 μs 时,可以引爆带壳炸药,延迟起爆时间设置在 16~20 μs,当然也可引爆;含能破片的着靶速度为 1.50 km/s、延迟起爆时间为 20 μs 时,可以引爆带壳炸药。当破片的速度为 1.25 km/s 时,无论含能物质的延迟起爆时间如何调整,带壳炸药都不能被引爆。显然,含能破片冲击带壳炸药时,破片的着靶速度和延迟起爆时间影响炸药引爆与否。而当破片以 1.70 km/s 速度着靶时,即使把含能破片的延迟时间设置为无限大,等效于含能物质不爆轰,带壳炸药也能被引爆,显然此时带壳炸药被引爆的机制又与用普通破片引爆时的情况相同。

2.3 含能破片引爆带壳炸药过程

由图 6 可见,当含能破片以 1.30 km/s 的速度着靶,含能物质的延迟起爆时间设置为 22、23、27、28 μs时,带壳炸药未被引爆;而含能物质的延迟起爆时间设置为 24、25、26 μs 时,带壳炸药就可以被引爆。为了和其他壳体厚度时的数据一致,图 6 中未给出延迟起爆时间为 23、25、27 μs 时的情况。

为了说明出现这种现象的原因，在使用 LS-PrePost 后处理软件进行分析时，同样需要在带壳炸药内部选取几个参照点，参照点的位置如图 7 所示。

由图 7 可见，点 G 为基准参照点，带壳炸药内部参照点 A 与点 G 距离 3.8 cm，点 B、C、D、E、F 沿对称轴依次选定、相邻两点间距离为 0.5 cm。分别取含能破片在延迟 23、24、27 μs 起爆情况下炸药内各参照点处的压力曲线，如图 8～10 所示。由图 9 可以看出，当参照点 A 的压力超过 2.8 GPa 时，带壳炸药即被引爆，这也和文献[6]的实验结果吻合。由于含能破片内的含能物质起爆后经过 2～4 μs 冲击波才能到达点 A，为了便于直观地对照比较，对延迟 23、24、27 μs 起爆情况的分析，均在 28～48 μs 范围，每间隔 4 μs 对点 A 至 F 取一次压力值。

由图 8 可见，破片延迟 23 μs 起爆，含能破片未能将带壳炸药引爆。参照点中，点 A 距含能破片起爆时刻的位置最近，所以压力最高，点 A 处的压力在 32 μs 时达到 2.76 GPa，之后就迅速降低；其余各点的压力均未超过 0.6 GPa。

由图 9 可见，破片延迟 24 μs 起爆时，带壳炸药被含能破片引爆。参照点中，48 μs 时点 C 处的压力最高，达到 16.7 GPa，而点 A 的压力为 8.21 GPa；36 μs 时，点 A、B、C、D、E、F 的压力分别为 3.67、4.33、4.90、6.14、7.51、9.35 GPa。

由图 10 可见，破片延迟 27 μs 起爆时，含能破片也未能将带壳炸药引爆。参照点中，点 B 距起爆点较近，较延迟 23 μs 起爆时的相对位置破片向前继续运动了一段，所以此点处的压力值最高，即 36 μs 时压力达到了 1.67 GPa，此时点 A 的压力为 1.38 GPa，36 μs 之后冲击波传播过去，点 A、B 的压力就迅速降低。

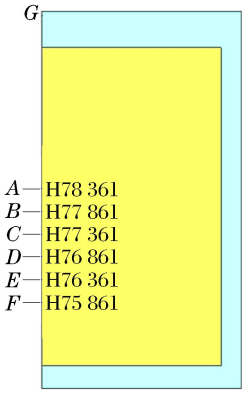


图 7　参照点位置

Fig. 7　Typical reference points

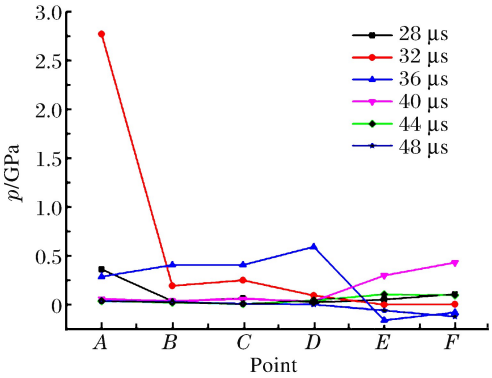


图 8　破片延迟 23 μs 起爆时参照点的压力

Fig. 8　Pressure curves of reference points under 23 μs delay time

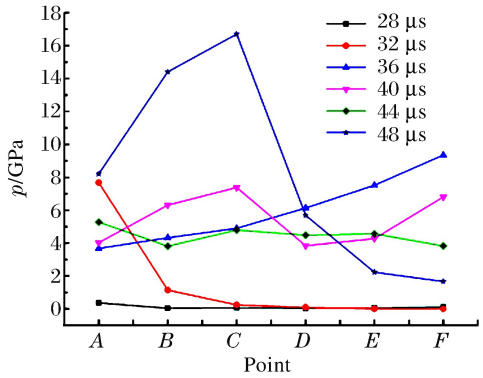


图 9　破片延迟 24 μs 起爆时参照点的压力

Fig. 9　Pressure curves of reference points under 24 μs delay time

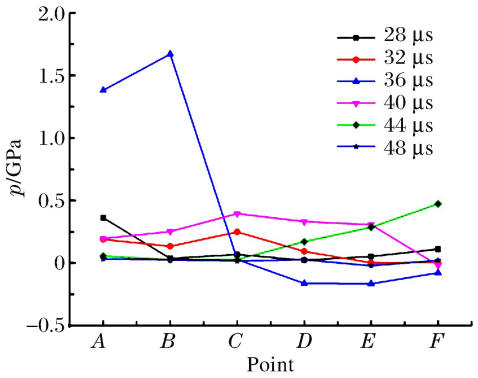


图 10　破片延迟 27 μs 起爆时参照点的压力

Fig. 10　Pressure curves of reference points under 27 μs delay time

2.4 不同厚度带壳炸药的引爆过程

当带壳炸药前端壳体的厚度分别为 10、12、14、16 mm 时，运用“升降法”原理对不同壳体厚度时的模型进行数值模拟，发现含能破片的着靶速度和其延迟起爆时间之间同样具有上述规律，相关数据如图 11 所示。

由图 11 可以看出，对于壳体厚度在上述范围的带壳炸药，含能破片以不同的着靶速度和对应的延迟起爆时间都可以引爆。含能破片着靶速度为 1.75 km/s、延迟时间为 24、26 μs 时可以引爆带壳炸药。着靶速度为 1.726 km/s、延迟时间为 30、32 μs 时可以引爆带壳炸药；延迟起爆时间在 30 与 32 μs 之间时也可以引爆带壳炸药，延迟起爆时间在此范围之外则不能引爆。含能破片着靶速度为 1.65 km/s、延迟起爆时间仅为 24 μs 时可以引爆带壳炸药。上述含能破片引爆带壳炸药时的着靶速度，都低于以同质量、同直径的普通破片冲击引爆相同规格带壳炸药时的临界速度。经计算，壳体厚度为 10、12、14、16 mm时，普通破片冲击起爆带壳炸药的临界速度分别为 1.790、1.960、2.270、2.703 km/s。于是，含能破片的引爆作用再次得到验证。

为了进一步说明含能破片对带壳炸药的引爆特性，在壳体厚度为 16 mm 的带壳炸药中，选取了类似图 8 中所示的相对位置的 4 个参照点 A、B、C、D，与基准参照点 G 的距离分别为 3.3、3.8、4.3、4.8 cm，参考点不同时刻的压力曲线，如图 12 所示。

此时，破片内物质的延迟起爆时间设置为 30 μs，可以看出，带壳炸药内的参照点 B 在 38 μs 时达到最高压力 14.8 GPa。与点 A 相比，点 B 更靠近炸药壳体内部，由于在 38 μs 时点 B 压力产生阶跃，所以判断此情况下参照点 B 处炸药首先起爆，即该带壳炸药的引爆是在含能破片的作用下起爆的。由于此情况与炸药壳体厚度 8 mm 时破片不同的着靶速度与延迟起爆时间的关系一致，在此不再阐述原因。

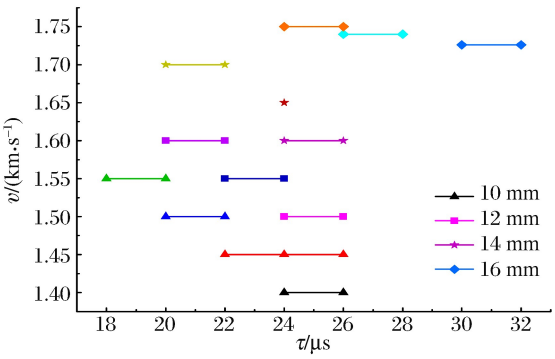


图 11 带壳炸药的引爆情况

Fig. 11 Detonation cases of shelled explosives

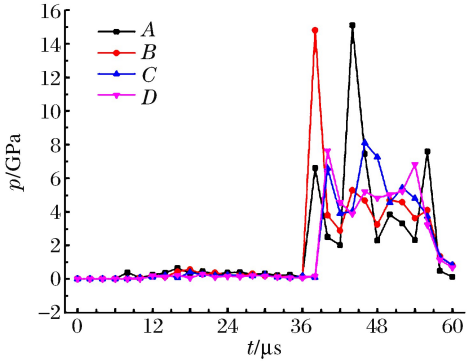


图 12 参照点的压力

Fig. 12 Pressure curves of reference points

3 含能破片引爆带壳炸药实验

对数值模拟研究的典型工况，进行了野外验证实验。带壳炸药的端部壳体厚度均为 8 mm，破片结构如图 13 所示。用滑膛式弹道试验枪发射，通过调整发射药量实现对破片出膛速度的控制，设置延迟



图 13 破片、带壳炸药和装药引爆、半爆后壳体碎片

Fig. 13 Energetic fragment, shelled explosives and detritus after detonation and incomplete detonation

起爆时间为 25 μs。实验共 7 发，其中 5 发带壳炸药被引爆（含 1 发半爆），通过靶前设置的测速靶测得破片着靶速度在 1.30～1.35 km/s。破片、带壳炸药和爆炸后的壳体碎片如图 13 所示。

与使用同规格普通实心破片撞击带壳炸药的现象对比，带壳炸药在此撞击速度下能够被含能破片引爆，说明了与破片内装填物质的适时起爆相关。

4　结　论

(1)引爆带壳炸药时，含能破片撞击壳体的速度与破片内装填物的延迟起爆时间密切相关，这从另外角度说明，含能破片对带壳炸药的引爆机制与普通破片的冲击起爆机制不同。数值模拟结果表明：只要含能破片以一定速度穿透壳体进入炸药内部，且使破片内的含能物质适时起爆，都能引爆带壳炸药。因此含能破片引爆带壳炸药的宏观机制可解释为：含能破片侵彻进入带壳炸药内部后，爆炸产生的冲击波追赶上了破片穿透该壳体时产生的冲击波，二者叠加后的冲击波压力达到了带壳炸药起爆所需要的临界压力，并且有一定的持续作用时间，于是壳内炸药被引爆。

(2)用数值模拟方法开展含能破片对带壳炸药的引爆过程研究是可行的。含能破片能够引爆端部壳体厚度 8 mm 的带壳炸药，其临界速度为 1.25 km/s，与使用质量、直径均相同的普通实心破片引爆带铝壳炸药时的临界速度 1.695 km/s 相比，可使带铝壳炸药起爆的临界速度降低 26.25%。实验中含能破片引爆带铝壳炸药的平均速度为 1.33 km/s，与计算值吻合。

(3)同样，含能破片引爆端部壳体厚度为 10、12、14、16 mm 的带铝壳炸药时，与使用同规格的普通实心破片相比，可使带铝壳炸药起爆的临界速度分别降低 21.95%、23.27%、29.60%、36.19%。含能破片技术可提高破片发射时的安定性，由此可见其引爆带壳炸药的优越性。随着带壳炸药壳体厚度的增加，使用含能破片引爆带壳炸药时所需的临界速度也随之增大。虽然带壳炸药的端部壳体厚度不同，但是使用含能破片引爆时其临界速度与含能物质延迟起爆时间相互匹配关系的规律是一致的。

参考文献：

[1] 王树山，李朝军，马晓飞，等. 钨合金破片对屏蔽装药撞击起爆的实验研究[J]. 兵工学报，2001，22(2)：189-191.
Wang Shu-shan, Li Chao-jun, Ma Xiao-fei, et al. An experimental study on the initiation of covered charge impacted by tungsten alloy fragments[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(2): 189-191.

[2] 洪建华，陶江源. 杀伤破片击穿和引爆靶弹的分析与研究[J]. 弹道学报，2002，14(4)：60-66.
Hong Jian-hua, Tao Jiang-yuan. Study of fragment penetrating and detonate target missile[J]. Journal of Ballistics, 2002, 14(4): 60-66.

[3] David D. Prediction the initiation of high explosive in warheads subjected to fragment impact[C]// Second Ballistics Symposium on Classified Topics ADPA. 1992: 10.

[4] 陈海利，蒋建伟，门建兵. 破片对带铝壳炸药的冲击起爆数值模拟研究[J]. 高压物理学报，2006，20(1)：109-112.
Chen Hai-li, Jiang Jian-wei, Men Jian-bing. Numerical simulation of fragment impacting on charge with aluminum shell[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1): 109-112.

[5] 宋浦，梁安定. 破片对柱壳装药的撞击毁伤试验研究[J]. 弹箭制导学报，2006，26(1)：87-92.
Song Pu, Liang An-ding. Experimental investigation on charges covered shell damaged fragments impact[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 87-92.

[6] 梁争峰，袁宝慧. 破片撞击起爆屏蔽 B 炸药的数值模拟和实验[J]. 火炸药学报，2006，29(1)：5-9.
Liang Zheng-feng, Yuan Bao-hui. Numerical simulation and experiment study of the initiation of shielded composition B impacted by fragment[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(1): 5-9.

[7] 董小瑞，隋树元，马晓青. 破片对屏蔽炸药的撞击起爆研究[J]. 弹箭与制导学报，1997(2)：1-4.

[8] 李晋庆，胡焕性. 不同破片对模拟战斗部的毁伤实验研究[J]. 火炸药学报，2004，27(1)：26-29.
Li Jin-qing, Hu Huan-xing. Experimental investigation on damage to simulative by different fragments[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(1): 26-29.

[9] 张泰华，赵壮华，范时俊. 冲击作用下凝聚态含能材料热点形成热-机械分析[J]. 爆炸与冲击，1996，16(4)：333-340.

Zhang Tai-hua, Zhao Zhuang-hua, Fan Shi-jun. A thermomechanical analysis of shock-induced hot spot formation in condensed energetic materials[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(4):333-340.

[10] 韩小平,张元冲,沈亚鹏,等. Comp B 复合炸药动态压缩力学性能和本构关系研究[J]. 实验力学,1996,11(3):303-310.
Han Xiao-ping, Zhang Yuan-chong, Shen Ya-peng, et al. Dynamic behavior and constitutive model of Comp B explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996,11(3):303-310.

[11] 胡湘渝. 凝聚炸药二维冲击波起爆研究[D]. 北京:北京理工大学,1999.

[12] 王树山,隋树元. 铸装 B 炸药冲击起爆特性试验[J]. 火工品,2001(2):18-20.
Wang Shu-shan, Sui Shu-yuan. Tests on shock initiation characteristics of composition B charge[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001(2):18-20.

[13] 赵国志,张运法. 常规战斗部系统工程设计[M]. 南京:南京理工大学,2000:288-299.

[14] 李旭锋. 含能破片对模拟战斗部的引爆机理研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.

[15] 赵国志,张运法. 战术导弹战斗部毁伤作用机理[M]. 南京:南京理工大学,2000:117-124.

[16] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社,2003:74-112.

Numerical simulation on detonating shelled explosives by energetic fragments*

Li Xu-feng[1], Li Xiang-dong[2], Gu Wen-bin[1], Li Yu-chun[1], Qin Ru-ping[1]

(1. *College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: Simulated ammunitions were equivalent to aluminum-shelled explosives and a new energetic fragment was designed. The nonlinear dynamics software, LS-DYNA, was used to numerically simulate the complete processes of the energetic fragments penetrating the cover plates and detonating the shelled explosives. With the help of the up-and-down method, the impact velocities of the energetic fragments were calculated for detonating the shelled explosives with the cover plates of different thicknesses and compared with those of the solid fragments. The corresponding experiments were carried out to verify the typical data selected from the numerical simulations. The investigated results show that the explosives shelled by 8—16-mm thick aluminum covers can be effectively detonated by controlling the impact velocities of the energetic fragments and the detonation delay times of the energetic material in the fragments.

Key words: mechanics of explosion; critical velocity; nonlinear dynamics software; shelled explosives; energetic fragment; detonating

---

* Received 24 September 2012; Revised 17 December 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10902053)
Corresponding author: Li Xiang-dong, lixiangd@aliyun.com

(责任编辑 丁 峰)