

文章编号: 1001-1455(2010)02-0152-07

壳装炸药殉爆实验和数值模拟*

王晨¹, 伍俊英¹, 陈朗¹, 鲁建英^{1,3}, 郭昕², 王晓峰²

(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. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;

3. 防化指挥学院, 北京 102205)

摘要: 进行了壳装固黑铝炸药殉爆实验, 通过观察残留炸药、壳体及见证板变形, 判断被发炸药的爆炸情况, 得到了炸药临界殉爆距离。建立了壳装炸药殉爆实验计算模型, 采用非线性有限元计算方法, 对壳装固黑铝炸药殉爆实验进行了数值模拟。计算中采用预设壳体单元破片方法描述主发炸药壳体破片的形成和破片对被发炸药的撞击起爆, 炸药临界殉爆距离的计算结果与实验结果基本一致。主要是主发炸药中部的壳体破片撞击到被发炸药, 被发炸药起爆位置也在装药中部。炸药壳体厚度主要影响破片速度和质量、被发炸药的防护性能, 从而影响炸药临界殉爆距离。

关键词: 爆炸力学; 殉爆; 非线性有限元; 壳装炸药

中图分类号: O385

国标学科代码: 130.35

文献标志码: A

1 引言

研究炸药殉爆特性对炸药安全性有重要意义。炸药殉爆实验主要有裸装炸药殉爆实验和壳装炸药殉爆实验 2 类, 其中壳装炸药殉爆实验更接近炸药实际使用状态。对炸药殉爆实验的数值模拟可以描述炸药在殉爆中的反应规律, 同时能够获得殉爆过程中的细节规律, 在很大程度上减少实验数量。但由于爆炸冲击波和壳体破片的共同作用, 壳装炸药殉爆实验的作用机制比裸装炸药殉爆实验的更复杂。P. W. Howe 等^[1]采用欧拉程序 2DE 对壳装炸药殉爆实验进行了 2 维数值模拟, 主要计算了较小殉爆距离下爆炸冲击波对被发炸药的作用情况, 分析了殉爆距离、壳体宽厚以及主发炸药和被发炸药的间隔板对殉爆结果的影响。J. P. Lu 等^[2]对裸装 PBXN-109 炸药殉爆实验进行了数值模拟, 主要分析了爆炸冲击波对炸药的殉爆作用。S. Fisher 等^[3]对壳装 PBXN-9 炸药殉爆实验进行了数值模拟, 分析了包装容器中弹药间的冲击波殉爆情况。陈朗等^[4]计算了不同距离下裸装炸药的殉爆距离, 分析了炸药殉爆过程中被发炸药中爆轰的成长历程。目前炸药殉爆实验的数值模拟中主要考虑爆炸冲击波作用, 只适合对裸装炸药和较近殉爆距离下壳装炸药殉爆实验进行计算分析。而在大距离下壳装炸药殉爆实验中, 主发炸药壳体破片是起爆被发炸药的主要因素。其殉爆过程数值模拟中主要考虑主发炸药壳体破片对被发炸药的作用。

本文中进行了壳装固黑铝(GHL)炸药殉爆实验, 通过观察被发炸药的反应、壳体以及见证板的变形, 判断被发炸药的爆炸情况。建立壳装炸药殉爆实验模型, 考虑主发炸药壳体破片的形成和破片对被发炸药的撞击起爆, 对炸药殉爆过程进行计算分析。

2 殉爆实验

图 1(a) 是殉爆实验装置示意图。实验装置由雷管、传爆药、主发炸药、被发炸药、炸药壳体以及见证板组成。主发炸药与被发炸药相隔一定距离竖立在地面上, 观测主发炸药爆炸后, 被发炸药的反应情况。实验的主发炸药与被发炸药都为直径为 60 mm、长为 240 mm 的柱形药柱。药柱壳体和见证板都

* 收稿日期: 2009-01-15; 修回日期: 2009-05-31

作者简介: 王晨(1985—), 女, 硕士。

为钢材料,壳体厚度为 3 mm,见证板厚度为 15 mm。

图 1(b) 为殉爆实验装置的实物照片。实验中,首先由雷管起爆传爆药柱,进而起爆主发炸药,主发炸药爆炸后产生壳体破片作用于被发炸药。通过观察被发炸药的残余情况、壳体和见证板的变形,来判断被发炸药的反应情况。在不同装药距离下对固黑铝炸药进行殉爆实验。殉爆距离为主发药柱和被发药柱壳体边界的最短距离,根据不同殉爆距离下被发炸药的反应情况,得到炸药的临界殉爆距离。

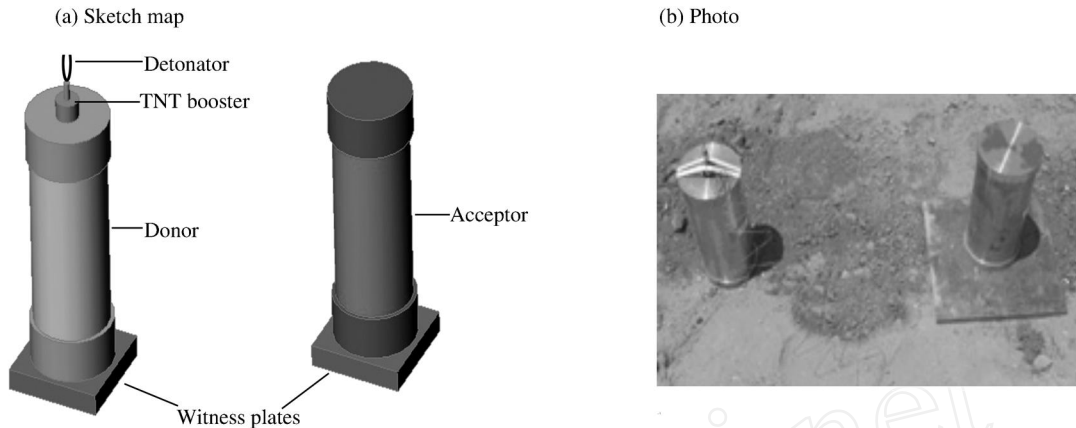


图 1 殉爆实验装置示意图和实物照片

Fig. 1 Experimental setup for sympathetic detonation experiments

3 数值模拟

采用非线性有限元方法对壳装炸药殉爆实验进行数值模拟^[5]。根据图 1 所示的实验装置,建立 3 维计算模型。已有的研究表明^[4],裸装固黑铝炸药的临界殉爆距离远小于壳装固黑铝炸药的临界殉爆距离。在临界殉爆距离附近,空气中的爆炸冲击波对被发炸药的作用远小于壳体破片对被发炸药的作用,因此,在建立模型时忽略空气中的爆炸冲击波作用,重点描述壳体破片对被发炸药的作用。为有效描述主发炸药爆炸产生的壳体破片,将主发炸药壳体设为等体积单元组成的结构,设置壳体材料失效应变,当壳体在爆炸作用下达到失效应变后,相邻单元节点分离,每一个或几个单元形成一个破片。图 2 为壳装炸药殉爆实验计算几何模型。为简化计算,模型中不考虑雷管,把传爆药柱上端面的中心点设为起爆点。采用拉格朗日算法,模型为六面体网格。图 3 为模型的网格图。

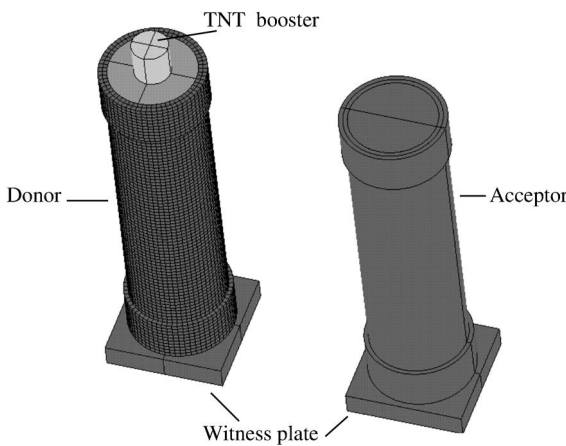


图 2 殉爆实验计算几何模型

Fig. 2 A geometry model for calculation of the sympathetic detonation experiment

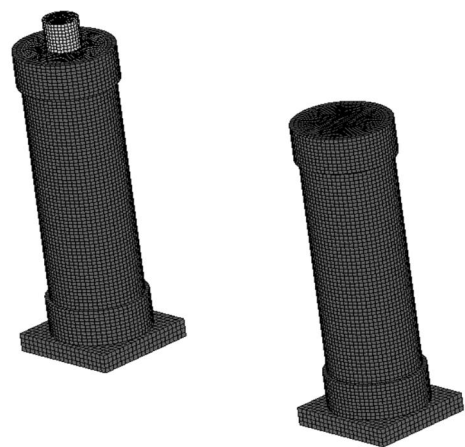


图 3 计算模型网格图

Fig. 3 Mesh of the calculation model for the sympathetic detonation experiment

对炸药壳体和见证板采用弹塑性模型。钢的密度为 7.8 g/cm^3 , 弹性模量为 206 GPa , 屈服应力为 100 MPa , 泊松比为 0.3 。计算中壳体失效应变设为 0.085 。

对固黑铝炸药, 采用点火增长反应模型和 JWL 状态方程^[6-7], 对传爆药, 采用高能炸药反应模型和 JWL 状态方程。点火增长模型表示为

$$\frac{d}{dt} = I(1 - \frac{d}{d_0})^b \left[\frac{p}{p_0} - 1 - a \right]^x + G_1 (1 - \frac{d}{d_0})^c d^y p^z + G_2 (1 - \frac{d}{d_0})^e p^z \quad (1)$$

式中: d 代表炸药反应度, t 代表时间, ρ 代表密度, ρ_0 代表初始密度, p 代表压力; $I, G_1, G_2, a, b, x, c, d, y, e, g$ 和 z 为常数, 且 $I = 0.25 \text{ s}$, $b = 0.6667$, $a = 0.02$, $x = 8$, $G_1 = 0.0287 \text{ MPa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $c = 0.2222$, $d = 0.6667$, $c = 2$, $G_2 = 0.4 \text{ MPa}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, $e = 0.333$, $g = 1$, $z = 3$ 。以上模型参数均来自文献[4]。

4 结果及讨论

图4是殉爆距离为 227 mm 的殉爆实验后被发炸药的见证板照片。见证板被炸出一个坑洞, 表明在这个距离下炸药被完全起爆。图5是殉爆距离为 300 mm 的殉爆实验后被发炸药照片。照片显示, 被发炸药下部壳体一部分被炸开, 上部壳体基本完好, 壳体还有一部分未反应的炸药。表明殉爆实验中, 主发炸药爆炸对被发炸药的作用主要集中在被发炸药下部, 只有少部分被发炸药发生了反应。根据多发不同殉爆距离实验的结果, 得到壳厚为 3 mm 的固黑铝炸药临界殉爆距离约为 227 mm 。

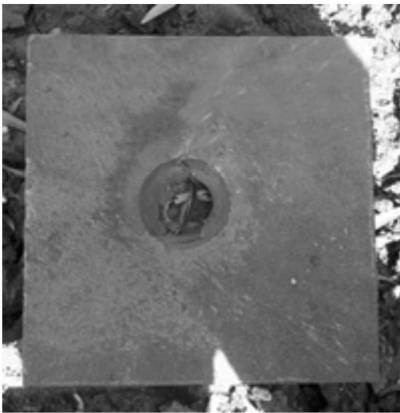


图4 殉爆距离为 227 mm 的殉爆实验后被发炸药的见证板照片

Fig. 4 Deformation of the witness under the acceptor with the separation of 227 mm



图5 殉爆距离为 300 mm 的殉爆实验后被发炸药照片

Fig. 5 Remains of the acceptor charge with the separation of 300 mm

表1是不同殉爆距离下固黑铝炸药殉爆实验的数值模拟结果。计算结果显示, 殉爆距离小于 220 mm 时, 被发炸药完全爆轰; 殉爆距离大于 230 mm 时, 被发炸药的壳体变形, 被发炸药只是部分反应。临界殉爆距离在 $220 \sim 230 \text{ mm}$ 之间, 与实验得到的约 227 mm 临界殉爆距离基本一致。

表1 不同殉爆距离下殉爆实验数值模拟计算结果

Table 1 Simulation results of sympathetic detonation experiments

序号	距离/mm	被发炸药反应情况
1	200	完全爆轰
2	220	完全爆轰
3	230	部分反应
4	250	部分反应
5	300	部分反应

图6是计算得到的 220 mm 殉爆距离下主发炸药壳体破片和被发炸药不同时刻的变形图。起爆传爆柱后, 主发炸药壳体破片向周围飞散。图7是破片对被发炸药作用瞬间的细节图像, 部分破片撞击在被发炸药壳体上。图8是计算的被发炸药内部纵截面不同时刻压力分布。起爆区位于被发炸药中部,

140 μs 时,距药柱下端约 96 mm 处,压力达到 7.96 GPa。148 μs 时,曲面形爆轰波在被发炸药中传播。165 μs 时,大部分被发炸药爆炸。180 μs 时,被发炸药已完全爆炸。图 9 是 180 μs 时被发炸药壳体的变形图。此时被发炸药壳体已被炸开。

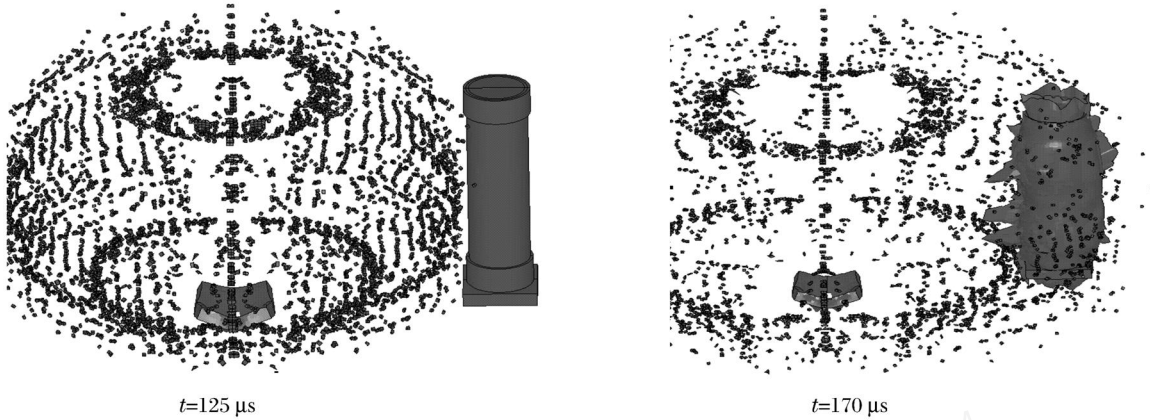


图 6 220 mm 殉爆距离下主发炸药壳体破片和被发炸药不同时刻的变形图

Fig. 6 Calculated distortion at different times for the configuration with the separation of 220 mm

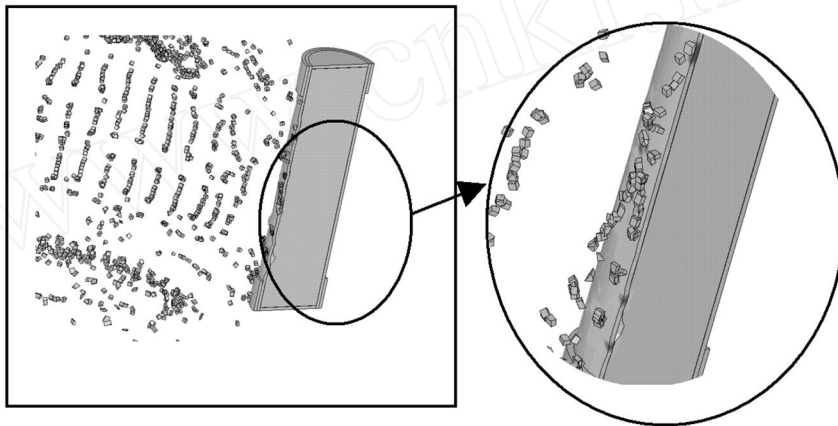


图 7 破片对被发炸药作用的瞬间的细节图像

Fig. 7 Moment for the fragments acting on the acceptor charge

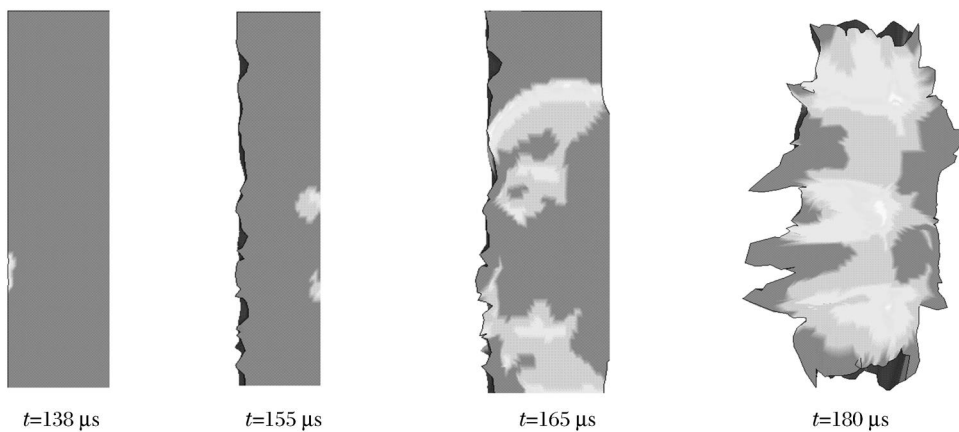


图 8 被发炸药内部纵截面不同时刻压力分布

Fig. 8 Pressure distribution at different times for the vertical section of the acceptor charge

图 10 是 230 mm 殉爆距离下主发炸药壳体破片和被发炸药不同时刻的变形图。135 μs 时,主发炸药破片开始作用于被发炸药的壳体。190 μs 时,被发炸药没有大的变形,没有发生爆炸。计算的被发炸药内部压力显示,145 μs 时,被发炸药正对主发炸药一侧,距药柱下端约 90 mm 处压力增长到 3.66 GPa。表明炸药已有反应,之后在后续破片和炸药反应的共同作用下,被发炸药内部局部区域压力进一步增大,但很快压力衰减,反应没有成长为爆轰。图 11 是 230 mm 殉爆距离下 190 μs 时被发炸药壳体变形图。这时被发炸药的壳体面对主发炸药一侧出现凹痕和小坑洞,壳体有一定形变,但形状基本完整。

由于主发炸药壳体破片在起爆被发炸药过程中起着主导作用,因此,壳体厚度对殉爆结果的影响是需要关心的问题。在装药条件相同的情况下,对不同壳厚固黑铝炸药殉

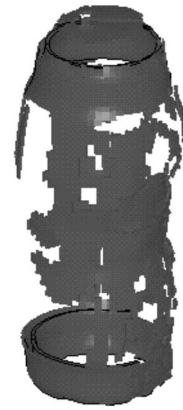


图 9 180 μs 时被发炸药壳体的变形图
Fig. 9 Distortion of the acceptor steel shell at 180 μs

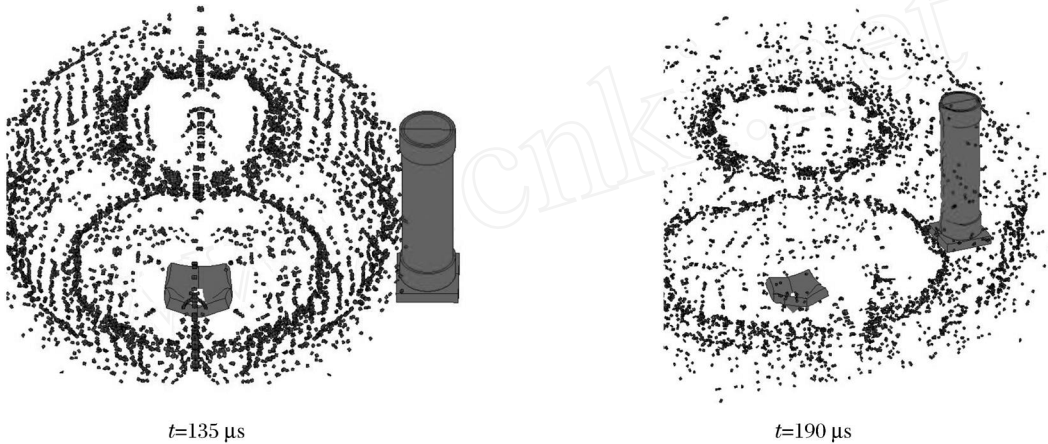


图 10 230 mm 殉爆距离下主发炸药壳体破片和被发炸药不同时刻变形

Fig. 10 Calculated distortion at different times for the configuration with the separation of 230 mm 爆实验进行了数值模拟,研究炸药壳体厚度对殉爆结果的影响。计算结果显示,当壳厚为 2 mm 时,被发炸药临界殉爆距离为 175 mm;当壳厚为 3 mm 时,临界殉爆距离为 225 mm;当壳厚为 4 mm 时,临界殉爆距离为 185 mm。

被发炸药被破片撞击起爆,破片速度起关键作用。在主发炸药壳体上靠近被发炸药一侧沿轴向不同位置取 5 个单元,代表不同位置的 5 个破片如图 12 所示。图 13~15 是计算得到的不同壳厚下 5 个破片的速度时间曲线。从图中可以看出,主发炸药爆炸后,在爆轰产物驱动下壳体破片加速运动,当破片撞击被发炸药后,速度迅速下降。不同位置破片的速度有很大差别,装药上下两端的破片速度较低,中间部分速度较高。2、3、4 号破片速度有迅速下降段,表明都撞击到了被发炸药壳体,其中 4 号破片撞击被发炸药时的速度最大。

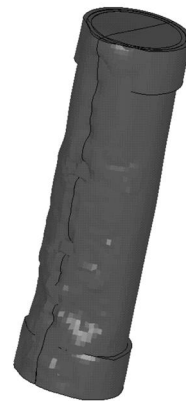


图 11 190 μs 时被发炸药壳体的变形图
Fig. 11 Distortion of the acceptor steel shell after detonation at 190 μs

壳体厚度为 2、3 和 4 mm 的 4 号破片撞击速度分别为 2 591、2 095 和 1 925 m/s。随着壳体厚度的增加破片速度减小。主发炸药的壳体厚度主要影响破片的速度和质量,而被发炸药的起爆与主发炸药

破片速度和质量、被发炸药壳体防护性能等因素都有关系。壳体厚度为 2 mm 的破片速度大、质量小，虽然被发炸药也是壳体厚度为 2 mm 有利于起爆，但临界殉爆距离相对较小。壳体厚度为 4 mm 的破片虽然速度小，但质量大，另外厚度为 4 mm 的被发炸药壳体对被发炸药的防护作用较强，因此殉爆距离也较小。壳体厚度为 3 mm 的破片既有一定速度又有一定质量，防护作用不强，临界殉爆距离较大。

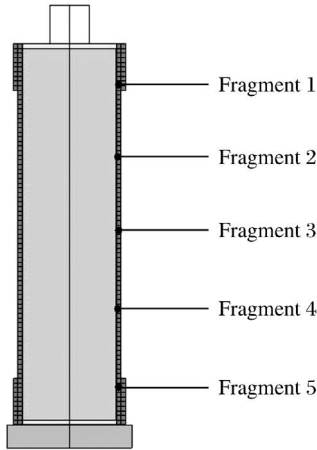


图 12 轴向位置所取单元点

Fig. 12 Element points at axes

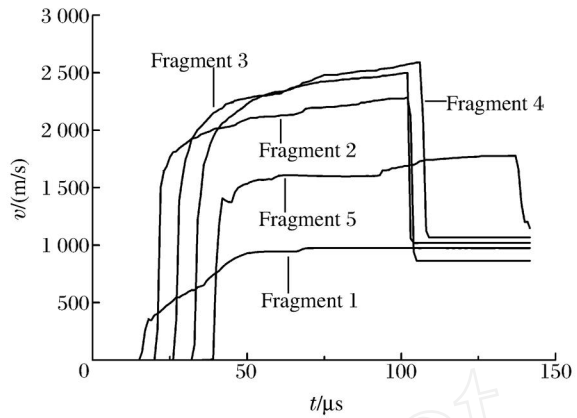


图 13 2 mm 壳破片速度时间曲线

Fig. 13 Velocity histories of fragments at the steel shell of 2 mm thickness

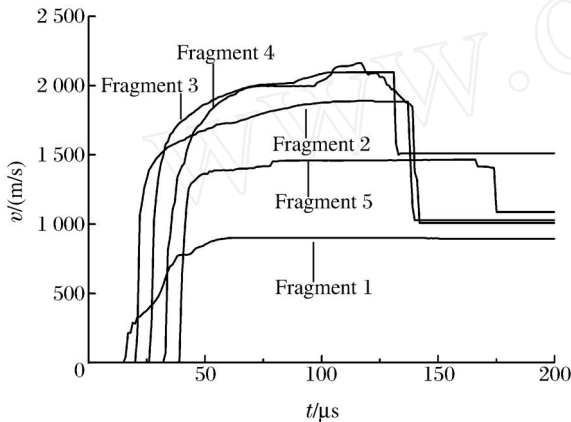


图 14 3 mm 壳破片速度时间曲线

Fig. 14 Velocity histories of fragments at the steel shell of 3 mm thickness

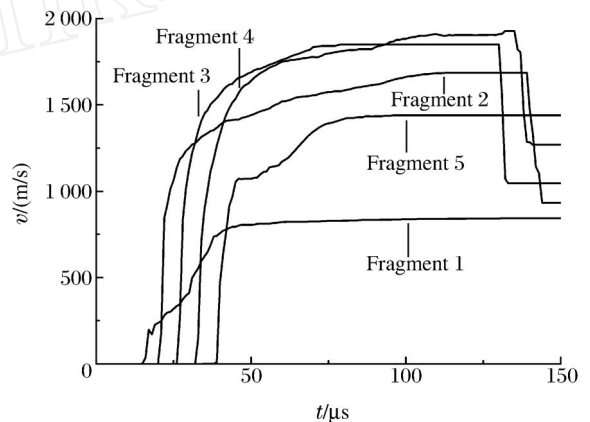


图 15 4 mm 壳破片速度时间曲线

Fig. 15 Velocity histories of fragments at the steel shell of 4 mm thickness

5 结 论

实验结果显示装药质量为 1 kg、装药尺寸为 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 、壳厚为 3 mm 的固黑铝炸药临界殉爆距离约为 227 mm。殉爆实验数值计算的炸药临界殉爆距离为 220 ~ 230 mm，与实验结果基本一致，表明采用预设壳体单元破片的计算模型，能够有效描述壳装炸药殉爆实验情况。

在装药条件相同的情况下，对不同壳厚固黑铝炸药殉爆实验进行了数值模拟，研究炸药壳体厚度对殉爆结果的影响。计算结果显示，壳厚为 2 mm 时，被发炸药临界殉爆距离为 175 mm；壳厚为 3 mm 时，临界殉爆距离为 220 mm；壳厚为 4 mm 时，临界殉爆距离为 185 mm。

计算结果显示，主要是主发炸药中部的壳体破片撞击到被发炸药，而被发炸药起爆位置也在装药中部。主发炸药壳体厚度主要影响破片的速度和质量，而被发炸药的起爆与主发炸药破片速度和质量、被发炸药壳体防护性能等因素都有关系。

参考文献：

- [1] Howe P M, Huang Y K, Arbuckle A L. A numerical study of detonation propagation between munitions[C] Proceedings of the 7th Symposium (International) on Detonation, 1982:1055-1061.
- [2] Lu J P, Lochert I J, Kennedy D L, et al. Simulation of sympathetic reaction rests for PBXN-109[C] Proceedings of 13th Symposium (International) on Detonation, 2006.
- [3] Fisher S, Baker E L, Wells L, et al. XM982 excalibur sympathetic detonation modeling and experimentation[C] Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, 2006.
- [4] 陈朗,王晨,鲁建英,等.炸药殉爆实验和数值模拟[C] 第四届爆炸计算力学会会议论文集,西宁,2008:341-346.
- [5] Hallquist J O, Benson D J. LS-DYNA Users' Manual: Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions[M]. Version 960. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.
- [6] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling of short pulse duration shock initiation of solid explosive[C] Proceedings of 8th Symposium (International) on Detonation, 1985:951-961.
- [7] Lee E, Breithaupt D, Mcmillan C, et al. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products[R]. UCID-91490, 1985.

Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of explosives in shell *

WANG Chen¹, WU Jun-ying¹, CHEN Lang¹, LU Jian-ying^{1,3},
GUO Xin², WANG Xiao-feng²

- (1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
2. *Xian Modern Chemistry Research Institution, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*
3. *Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)*

Abstract : Sympathetic detonation experiments of the GHL explosives in steel shell were carried out. By observing the remainder of the explosive, the deformation of the witness and steel shell, the explosive reaction state was judged and the critical distance of the sympathetic detonation was gained. A calculation model of sympathetic detonation was established. By using the non-linear finite element method, sympathetic detonation experiments of the GHL explosives in steel shell were numerically simulated by the established calculation model. In this calculation model, the method of foreordained fragments was used to describe the form of the donor's fragments and the impact of these fragments acting on the acceptor. Numerically simulated results of the critical distances are in agreement with the experimental results. The fragments mostly in the middle part of the donor impact the acceptor, and the initiation point is in the middle part of acceptor. The steel-shell thickness affects mainly the velocity and quality of the fragments as well as the defense capability of the acceptor. Consequently the steel-shell thickness affects the critical distance of the sympathetic detonation.

Key words : mechanics of explosion; sympathetic detonation; non-linear finite element; explosives in shell

* Received 15 January 2009; Revised 31 May 2009

Corresponding author: WU Jun-ying, wjy1312@bit.edu.cn

(责任编辑 张凌云)