

非均质炸药殉爆试验数值模拟^{*}

周保顺^{1,2}, 王少龙¹, 徐明利¹, 胡 健¹, 袁 伟¹

(1 第二炮兵装备研究院, 北京 100085; 2 第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘 要: 为了确定影响非均质炸药在冲击波作用下殉爆的主要因素, 对冲击波作用下炸药殉爆过程进行了数值模拟研究; 运用 LS-DYNA3D 软件对模型中不同情况的主发药和被发药进行了数值模拟, 结合冲击起爆临界判据对模拟结果进行了验证。结果表明: 殉爆距离与主发药的爆轰压力和被发药的爆轰感度以及主被发药的形状关系密切, 与被发药是否施加约束无显著关系。

关键词: 殉爆; 冲击起爆; 临界起爆判据; 数值模拟

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Sympathetic Detonation of Heterogeneous Condensed Explosives

ZHOU Baoshun^{1,2}, WANG Shaolong¹, XU Mingli¹, HU Jian¹, YUAN Wei¹

(1 The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China;

2 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to determine the primary factors which influence sympathetic detonation of heterogeneous condensed explosives, the numerical simulation of the sympathetic detonation under shock initiation was studied. The LS-DYNA3D was used to simulate the detonation process of different models of donor charge and acceptor charge, and the simulation result was validated by critical initiation criterion. The simulation result shows that the properties of the acceptor charge and the shock wave pressure of the donor charge are primary factors which cause sympathetic detonation of the acceptor charge, as well as the shape of both donor charge and acceptor charge, but it is rarely influenced no matter whether fasten the acceptor charge or not.

Keywords: sympathetic detonation; shock initiation; critical initiation criterion; numerical simulation

0 引言

炸药是一种含能物质, 在受到足够强的外界刺激如力、热、光、电等作用时会发生爆炸, 并可能造成临近炸药的殉爆。所谓殉爆^[1] 就是当炸药 A 爆炸后, 能够引起与其相距一定距离的炸药 B 爆炸。先发生爆炸的炸药 A 称为主发药, 引起殉爆的炸药 B 称为被发药。被发药殉爆概率为 100% 时, 主发药与被发药之间的距离 L 称为殉爆距离, 而被发药 100% 不能殉爆时两炸药之间的距离 R 叫做最小不殉爆距离, 或叫殉爆安全距离。显然, 殉爆安全距离大于殉爆距离。

影响殉爆的主要因素有主发药产生的冲击波超压、作用时间和温度、火球半径、爆轰产物的

冲击能量、被发药的感度、几何尺寸、被发药对不同激发形式的响应等。

文中主要考虑主发药产生的冲击波超压及其作用时间对被发药的作用效果, 通过对同种被发药与两种不同主发药爆轰冲击波作用下发生殉爆的数值模拟, 得到了不同情况下的殉爆距离, 并用冲击起爆临界判据对其进行了验证。通过比较不同情形下的殉爆距离, 得到了引起被发药殉爆的主要因素。

1 计算模型

1.1 物理模型及算法

建立的殉爆模型主要包括三部分: 主发药、

^{*} 收稿日期: 2008-12-25

作者简介: 周保顺(1985-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向: 战斗部技术。

被发药和空气,其物理模型如图 1 所示。主发药和被发药为相同的立方体和圆柱形两种物理模型。考虑到模型的对称性,实际建模为 1/2 圆柱和 1/2 立方体,将其关于 xoy 面映射后可以得到全模型。图 1 的左面,主发药和被发药均取为圆柱形状,高 8cm,半径 4.51cm;空气也为圆柱形状,高 100cm,半径 20cm。图 1 的右面,主发药和被发药均取为立方体形状,边长 8cm;空气取为长方体形状高度 100cm,其余两边均为 40cm。

采用的算法为单点多物质流固耦合算法,即主发药和空气被剖分为欧拉网格,被发炸药被剖分为拉格朗日网格,拉格朗

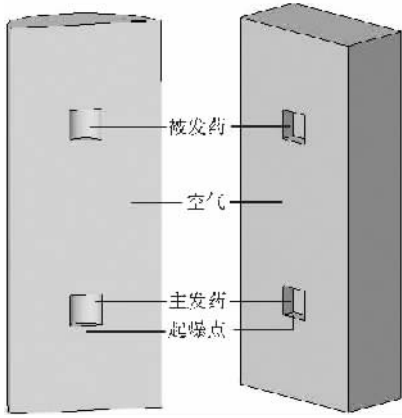


图 1 两种物理模型

日网格置入欧拉网格中,程序采用耦合方式求解拉格朗日网格和欧拉网格之间的相互作用。主发药的起爆方式为底部中心位置单点起爆,以滑移爆轰形式沿轴线上传播^[2]。

1.2 材料参数和物态方程

主发药为 TNT 炸药和 PETN 炸药,采用高能炸药材料模型和 JWL 物态方程描述主发药的爆轰过程。JWL 物态方程的表达式为:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为输入参数; E_0 为初始比内能。表 1 和表 2 给出了两种主发药的爆轰性能参数和 JWL 状态方程参数^[3]。

表 1 主发药爆轰性能参数和 JWL 状态方程参数 (I)

主发药	$\rho /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$D /$ ($cm \cdot \mu s^{-1}$)	$p_{CJ} /$ ($10^{11} Pa$)	$E_0 /$ ($10^{11} Pa$)
TNT	1.630	0.693	0.210	0.070
PETN	1.770	0.830	0.335	0.101

表 2 主发药爆轰性能参数和 JWL 状态方程参数 (II)

主发药	$A / (10^{11} Pa)$	$B / (10^{11} Pa)$	R_1	R_2	ω
TNT	3.738	0.02747	4.15	0.90	0.35
PETN	6.170	0.16926	4.40	1.20	0.25

被发药为 PBX9404 炸药,采用流体弹塑性材料模型和点火及成长状态方程描述,材料参数及状态方程参数见文献[1]。点火及成长反应三项目的的反应速率方程表达式为:

$$d\lambda/dt = I(1 - \lambda)^b (\rho_1/\rho_0 - 1 - a)^x + G_1 (1 - \lambda)^c \lambda^d p^y + G_2 (1 - \lambda)^e \lambda^g p^z \quad (2)$$

式中: I 、 G_1 、 G_2 、 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 g 、 x 、 y 、 z 为 12 个可调系数, a 为临界压缩度, y 为压力指数, $b = c = 2/3$ 表示内向的球形颗粒燃烧; I 、 x 控制点火热点的数量; G_1 、 d 控制点火后热点早期的反应增长; G_2 、 e 、 g 、 z 决定高压下的反应速率; λ 为化学反应度, p 为反应压力。

空气采用空白材料模型和线性多项式状态方程^[4],材料状态方程参数见文献[5]。

2 模拟结果的分析及验证

2.1 模拟结果分析

就上述主、被发炸药殉爆距离的数值模拟结果如表 3 所示。对于一定大小的主发药及被发药来说,显然存在两个处于临界状态的距离,一个是使被发药起爆的最大距离,另一个是使被发药不起爆的最小距离。定义临界分离距离 d 为这两个距离的中点。试验表明, d 代表了从高级爆轰到低级爆轰的过渡^[1]。不难看出,临界分离距离 d 是殉爆距离 L 和殉爆安全距离 R 的平均值。但是在数值模拟中临界分离距离 d 不能模拟出来,表 3 中给出的殉爆距离 L' 为主发药上端与被发药下端之间的长度,其意义是当两炸药间的距离大于 L' 时,被发药不发生殉爆;当两炸药间的距离小于等于 L' 时,被发药发生殉爆。

表 3 殉爆距离数值模拟结果

	L' 圆柱 /cm	L' 立方体 /cm
TNT 炸药	21	17
PETN 炸药	25	24

由上表可以明显看出:相同的主发药和被发

药,对应不同的形状时殉爆距离不同;不同的主发药相同的被发药,发生殉爆的距离也不相同。并且当主发药的威力越大时,殉爆距离也越大。

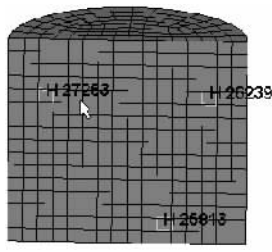


图 2 单元选取示意图

上述数据是在被发药不加约束的情况下模拟得到的,对于被发药在冲击波传播方向上加上约束的情况文中也进行了模拟。选取主发药为 TNT 炸药,主、被发药为圆柱形状,主、被发药之间的距离为 21.5cm 时,被发药中某些单元(单元选取如图 2 所示,其中 E1 代表 H25813 单元,E2 代表 H27253 单元,E3 代表 H26239 单元),在不加冲击波方向的约束和施加冲击波方向的约束两种情况下,单元沿冲击波方向的位移和单元受冲击波压力进行对比。

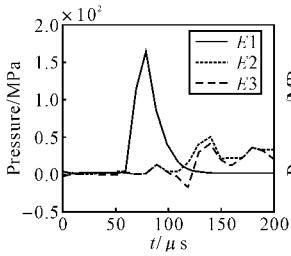


图 3 施加约束时单元压力

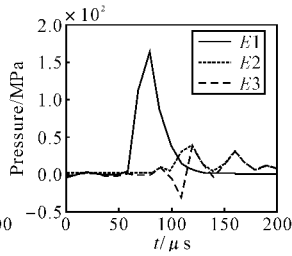


图 4 无约束时单元压力

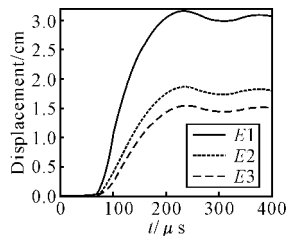


图 5 施加约束时单元位移

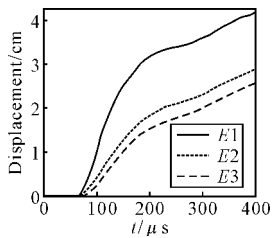


图 6 无约束时单元位移

由图 3 和图 4 可以看出,在有无约束的情况下被发药所受到的冲击压力没有变化;由图 5 和图 6 可以看出,在有无约束的情况下被发药中各单元的绝对位移虽然不同,但是单元间的相对位移基本上没有变化。由此可以得出,有无约束对殉爆距离没有显著影响。

此外,通过改变被发药点火及成长状态方程中的参数 I ,殉爆距离也会发生变化。当增大 I 时,殉爆距离将增大。从而说明,殉爆距离与被

发药的爆轰感度有关。

2.2 模拟结果的验证

为了检验数值模拟殉爆结果,引入非均质炸药冲击起爆临界判据进行验证。冲击起爆是炸药对压力脉冲的一种动态响应形式,目前应用的冲击起爆临界判据主要有临界起爆压力判据和临界起爆能量判据。文中主要采用临界起爆能量判据,包括使用 G. C. M. Foan^[6]的积分能量判据:

$$E = \int_0^t p^2(t) dt \quad (3)$$

以及从守恒方程和雨贡纽曲线关系中导出的临界能量方程^[2]:

$$E_c = p^2 t / \rho u_s \quad (4)$$

式中: E_c 为临界起爆能量; p 为冲击压力; t 为入射冲击波的脉冲宽度; ρ 为炸药密度; u_s 为压力 p 时炸药的冲击波速度。文中所选取的 PBX9404 被发药的临界起爆参数^[1]: $\rho = 1.84 \text{g/cm}^3$, 起爆乘积 $p^2 t = 4.7 (\text{GPa})^2 \cdot \mu\text{s}$, 临界起爆能量 $E_c = p^2 t / \rho u_s = 5.88 \times 10^2 \text{kJ/m}^2$, 冲击波速度 $u_s = 8000 \text{m/s}$ 。

由表 3 可知,当主发药为 TNT 炸药,主、被发药都为圆柱形状时,殉爆距离为 21cm。在主、被发药的距离为 21cm 和 21.5cm 两种情况下,选取被发药上相同单元,对其使用临界冲击起爆能量判据进行判断。如果模拟准确,在 21cm 时被发药上所选单元的能量应该超过其临界能量,而相应的 21.5cm 时就应该低于其临界能量。通过将 LS-DYNA3D 后处理数据导入 MATLAB 软件进行积分计算,作被发药所选单元的能量-时间图见图 7~图 10。

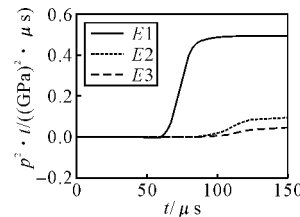


图 7 距离 21.5cm 时单元起爆乘积

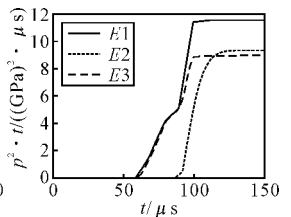


图 8 距离 21cm 时单元起爆乘积

由图 7~图 10 可以看出,模拟情况与理论数值符合得比较好。在距离为 21.5cm 时,被发药没有起爆,在其被发药上所选取的单元无论是起

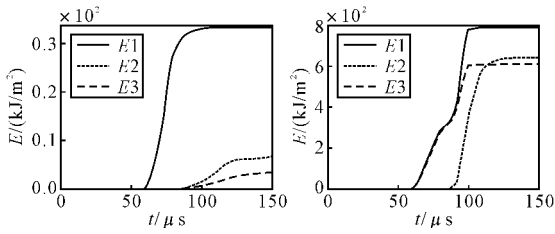


图 9 距离 21.5cm 时 起爆能量
图 10 距离 21cm 时 起爆能量

爆乘积还是起爆能量均未达到临界起爆阈值；在距离 21cm 时，被发药起爆，在其被发药上所选取的单元起爆乘积和起爆能量均超过了临界起爆阈值。需要指出的是，在数值模拟中会出现起初没有殉爆，而在计算足够长的时间后发生殉爆的现象。这与被发药的反应速率方程有关，实际情况不应该发生这种现象。因为炸药的爆轰过程是在极短的时间内完成的，而衰减冲击波脉冲持续的时间相对来说是一段很长的时间，因此炸药发生稳定爆轰只可能在压力由峰值衰减到炸药的临界起爆压力 p 这一段时间内发生，即只有这一段时间内的能量对炸药的爆轰来说是有效的。超过这段时间，稳定爆轰已经发生，后面的能量就不起作用了^[7]。

在文献[8]的表 1 中，给出了当主发药和被发药均为柱状 TNT 散装单质炸药（密度 $\rho = 0.85 \sim 1.0 \text{g/cm}^3$ ）时的殉爆试验数据。从中可以看出，当药量为 1000g 时，距离为 29cm 发生殉爆，而距离为 40cm 则不发生殉爆；当药量为 1600g 时，距离为 40cm 发生殉爆，距离为 52cm 不发生殉爆。装药量越大殉爆距离越大。并且密度 $\rho = 1.84 \text{g/cm}^3$ 的 PBX9404 的临界起爆压力为 6.45GPa，密度为 $\rho = 1.65 \text{g/cm}^3$ 的 TNT 的临界起爆压力为 10.4GPa^[1]，也就是说此种情况下的 PBX9404 的冲击波敏感度要较 TNT 炸药大一些，而殉爆距离相应要大一些。文中数值模拟中主发药为柱状 TNT 炸药（密度 $\rho = 1.63 \text{g/cm}^3$ ）的质量为 835g，被发药为柱状 PBX9404

炸药（密度 $\rho = 1.84 \text{g/cm}^3$ ）的质量为 942g，殉爆距离为 21cm。通过对比数值模拟和试验中的主被发炸药的类型、密度、形状和质量等因素，数值模拟结果与试验结果是相符的。

3 结论

文中运用数值模拟的方法计算了冲击波作用下非均质炸药的殉爆距离，模拟结果能够与理论数值和试验数据^[8]相符合。通过对不同种类、不同形状主被发炸药殉爆过程的模拟，得出殉爆距离与主发药的爆轰压力、被发药的爆轰感度，以及主被发药的形状关系密切，与被发药是否有约束无显著关系。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 李翔宇, 卢芳云. 可变形战斗部主辅装药殉爆研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(5): 23-31.
- [3] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
- [4] 尚晓江, 苏建宇. ANSYS LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] Foan G C M, Goloy G D. Shock initiation in gap test configurations[C]// 7th Symposium on Detonation, Annapolis: Naval Surface Weapons Center, 1981.
- [7] 周培毅, 胡双启. 非均质炸药冲击起爆的临界判据研究[J]. 华北工学院学报, 1996, 17(4): 308-312.
- [8] 李铮, 项续章, 郭梓熙. 各种炸药的殉爆距离[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 231-241.