

文章编号: 1006-9941(2008)02-0164-03

# JO-9159/ECX 复合装药的冲击波敏感度研究

韩 勇, 鲁 斌, 蒋志海, 卢校军

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用隔板试验研究了分别由厚度为 3, 5, 10, 20 mm 挤注炸药 (ECX) 和  $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm JO-9159 炸药构成的复合装药的冲击波敏感度  $G_{50}$ , 并采用有限元方法进行了数值模拟。结果表明, 试验值与计算值结果基本一致, 复合装药的冲击波敏感度在 JO-9159、ECX 两种炸药冲击波敏感度之间, 随着 ECX 炸药厚度的增加, 复合装药的冲击波敏感度呈  $G_{50} = 12.96 + 5.13e^{-h/6.41}$  一阶指数衰减形式下降。

**关键词:** 爆炸力学; 复合装药; 冲击波敏感度; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

## 1 引 言

与研制单质炸药、混合炸药相比, 利用现有炸药进行合理的结构设计从而达到武器的安全和性能要求更容易实现, 并具有较高的实用性、灵活性。法国、美国等已在多种现役战斗部中利用复合装药提高武器的抗冲击能力、破片加速能力及爆破作用等<sup>[1]</sup>。我国在复合装药方面也开展了一些研究, 胡双启等<sup>[2]</sup>为解决钝感主装药的起爆可靠性问题, 进行了传爆药与主装药复合装药的研究。肖绍清、宗琦<sup>[3-5]</sup>等提出利用复合装药实现减低爆破地震、提高光面爆破效果等。这些工作主要是针对复合装药对性能的影响进行的研究, 在复合装药对冲击波感度的影响方面鲜有文献报道。本研究针对复合装药的冲击波感度进行了实验及数值模拟研究, 为从装药结构上降低冲击波感度、提高作功能力提供参考。

## 2 冲击波感度实验

复合装药由两种炸药构成: 一种为能量及感度较高的 JO-9159 炸药, 另外一种为能量及感度相对较低的 ECX 炸药。两种炸药的具体爆轰性能参数<sup>[6]</sup>及冲击波感度见表 1。复合装药冲击波感度的表征采用隔板试验, 采用有机玻璃作为隔板, 主发药为  $\Phi 20$  mm  $\times$  40 mm 的 JO-9159 炸药。实验装置如图 1 所示。被发药 JO-9159 炸药的尺寸为  $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm, ECX 炸药的装药尺寸有四种, 分别为  $\Phi 20$  mm  $\times$  3 mm、 $\Phi 20$  mm  $\times$  5 mm、 $\Phi 20$  mm  $\times$  10 mm、 $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm。

表 1 两种炸药爆轰性能参数及冲击波感度

Table 1 Detonation parameters and shock sensitivity of two explosives

explosive	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$D/mm \cdot \mu s^{-1}$	$p/GPa$	$G_{50}/mm$
JO-9159	1.860	8.862	36.8	18.0
ECX	1.680	8.350	27.8	13.0

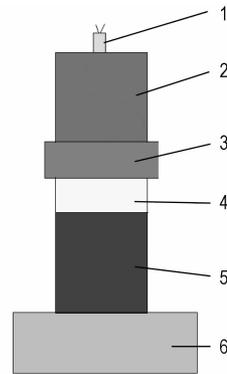


图 1 复合装药隔板试验装置图

1—8 号雷管, 2— $\Phi 20$  mm  $\times$  40 mm JO-9159 炸药, 3—有机玻璃隔板, 4—ECX 炸药, 5— $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm JO-9159 炸药, 6—见证板

Fig. 1 Gap test setting of composite charges

1—No. 8 detonator, 2— $\Phi 20$  mm  $\times$  40 mm JO-9159, 3—PMMA, 4—ECX, 5— $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm JO-9159, 6—witness plate

## 3 试验结果及分析

在四种不同厚度 (3, 5, 10, 20 mm) ECX 炸药装药条件下, 复合装药的隔板试验结果见表 2。

由表 1、表 2 可得, 这四种复合装药的冲击波感度均在 JO-9159 炸药 (18 mm) 及 ECX 炸药 (13 mm) 之间, ECX 炸药越薄, 复合装药的冲击波感度越趋近于 JO-9159 炸药的冲击波感度, ECX 炸药越厚, 复合装药的冲击波感度越趋近于 ECX 炸药的冲击波感度。随着 ECX 炸药厚度的增加, 复合装药的冲击波感度  $G_{50}$  与隔板厚度  $h$  成近似一

收稿日期: 2007-04-29; 修回日期: 2007-10-12

基金项目: 中国工程物理研究院化工材料研究所所长基金 (62601040215)

作者简介: 韩勇 (1976 -), 男, 硕士, 助理研究员, 从事爆炸物理研究。

e-mail: y\_han76@126.com

阶指数衰减形式下降(见图2),其具体关系见式(1)。

$$G_{50} = 12.96 + 5.13e^{-h/6.41} \quad (1)$$

表2 复合装药的隔板试验结果

Table 2 Gap test results of composite charges

ECX thickness/mm	$G_{50}$ /mm	$\sigma$ /mm	$G_{50}$ (composite charge) / $G_{50}$ (JO-9159)
3	16.4	0.2	0.91
5	15.3	0.4	0.85
10	13.8	0.1	0.77
20	13.3	0.1	0.74

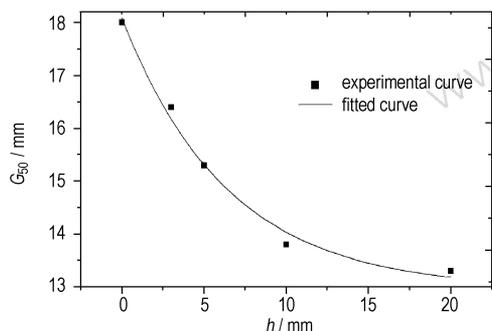


图2 复合装药的冲击波敏感度与 ECX 厚度的关系

Fig.2 Relationship between shock sensitivity of composite charges and extrusion-cast explosive (ECX) thickness

当 ECX 炸药厚度为 10 mm 时,复合装药与 JO-9159 炸药的冲击波敏感度比值约为 0.77,即复合装药的冲击波敏感度与 JO-9159 炸药相比降低近 23%。因此,对于装填

表3 JO-9159 与 ECX 炸药点火-增长模型反应速率方程参数

Table 3 Ignition and growth reactive flow parameters of JO-9159 and ECX explosive

explosive	$I$	$b$	$a$	$x$	$G_1$	$c$	$d$	$y$	$G_2$	$e$	$g$	$z$
JO-9159	7.430E+11	0.667	0.111	10	100	0.667	1	1	80	1.0	1.0	1.0
ECX	4.000E+06	0.667	0.22	7	5	0.667	0.111	1	400	0.333	1.0	3.0

表4 有机玻璃状态方程参数

Table 4 The Gruneisen EOS parameters of PMMA

$C/\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\gamma_0$	$A$	$E_0$	$V_0$
0.332	1.424	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.10E+01

## 4.2 数值模拟结果

应用有限元 LS-DYNA 程序<sup>[10]</sup>对复合装药的隔板试验进行数值模拟。图3a为 ECX 炸药厚度为 3 mm,隔板厚度为 16 mm 时,复合装药被起爆状态下 JO-9159 炸药不同位置处(0, 2, 4, 6 mm)的压力时程曲线,沿爆轰波传播的方向,峰值压力逐渐增长。图3b为 ECX 炸药厚度为 3 mm,隔板厚度为 17 mm 时,复合装药熄爆状态下 JO-9159 炸药不同位置处(0, 2, 4, 6 mm)的压力时程

曲线,峰值压力沿爆轰波传播的方向逐渐降低。调整隔板厚度,根据峰值压力变化趋势判定复合装药是否起爆,最终计算获得 3 mm 厚 ECX 炸药下,复合装药的临界隔板厚度为 16.5 mm。按同样方法,获得 5, 10, 20 mm 厚度的 ECX 炸药下,复合装药被起爆的临界隔板厚度。数值模拟结果与隔板试验所获得的冲击波敏感度  $G_{50}$  见图 4 所示,计算结果与试验结果基本一致。

## 4 隔板试验的数值模拟

### 4.1 材料模型

计算模型中,JO-9159、ECX 炸药采用三项式的点火增长模型,有机玻璃采用 Gruneisen 方程。

三项式点火增长模型<sup>[7]</sup>:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y + G_2(1-\lambda)^e \lambda^f p^z \quad (2)$$

式中, $\lambda$  是炸药反应度, $t$  是时间, $\rho$  是密度, $\rho_0$  是初始密度,单位为  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $p$  是压力,单位为 GPa;  $I, G_1, G_2, a, b, x, c, d, y, e, g$  和  $z$  是常数。

Gruneisen 方程<sup>[8-9]</sup>:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{v_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu + S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E \quad (3)$$

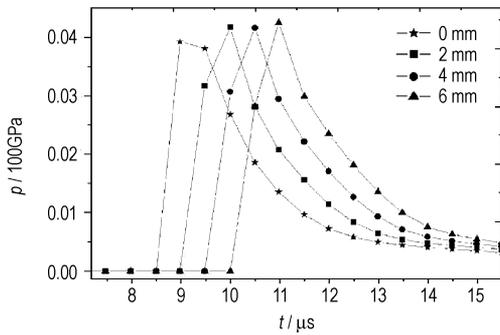
其中, $C$  为  $u_s-u_p$  曲线的截距, $S_1, S_2, S_3$  是  $u_s-u_p$  曲线斜率, $\gamma_0$  是 Gruneisen 系数, $a$  是对  $\gamma_0$  的一阶体积修正。

JO-9159、ECX 炸药化学反应速率方程的参数见表 3,有机玻璃状态方程参数见表 4,表 3、4 中参数带下标 0 的表示材料初始值。

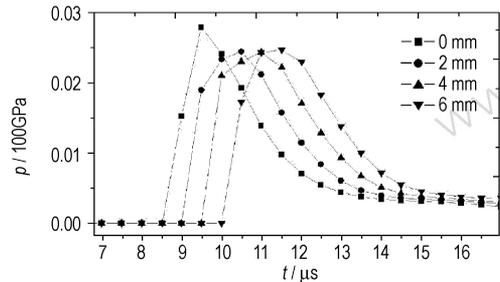
曲线,峰值压力沿爆轰波传播的方向逐渐降低。调整隔板厚度,根据峰值压力变化趋势判定复合装药是否起爆,最终计算获得 3 mm 厚 ECX 炸药下,复合装药的临界隔板厚度为 16.5 mm。按同样方法,获得 5, 10, 20 mm 厚度的 ECX 炸药下,复合装药被起爆的临界隔板厚度。数值模拟结果与隔板试验所获得的冲击波敏感度  $G_{50}$  见图 4 所示,计算结果与试验结果基本一致。

## 5 结论

(1) 采用隔板试验和有限元 LS-DYNA 程序对由 ECX 和 JO-9159 构成的复合装药冲击波敏感度进行了研究,隔板实验结果与数值模拟结果基本一致。



a. With partition thickness of 16 mm



b. With partition thickness of 17 mm

图3 JO-9159 炸药不同位置处的压力时程图

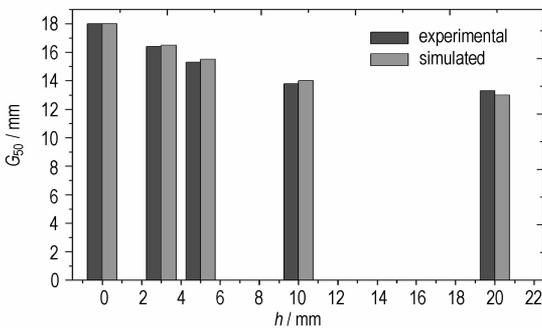
Fig.3 Histories of  $p-t$  calculated at different distance with the partition thickness of 16 mm and 17 mm

图4 复合装药冲击波感度的实验值与计算值比较

Fig.4 Comparison between simulated and experimental results of shock sensitivity of composite charges

(2) 复合装药的冲击波感度在 JO-9159、ECX 两种炸药冲击波感度之间。

## Shock Sensitivity of JO-9159/ECX Composite Charge

HAN Yong, LU Bin, JIANG Zhi-hai, LU Xiao-jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Gap test was used to study the shock sensitivity  $G_{50}$  of composite charge composed of  $\Phi 20$  mm  $\times$  20 mm JO-9159 and extrusion-cast explosive (ECX) with thickness of 3, 5, 10, 20 mm. The shock sensitivity of composite charge was simulated by LS-DYNA finite element method and compared with the experimental results. Results show that there is a good agreement between experimental and simulated results. The  $G_{50}$  of composite charge is between that of JO-9159 and ECX, and it descends with first order exponential decay form of  $G_{50} = 12.96 + 5.13e^{-h/6.41}$  with the thickness of ECX increasing.

**Key words:** explosion mechanics; composite charge; shock sensitivity; numerical simulation

(3) ECX 炸药厚度对复合装药冲击波感度有明显的影响,随着 ECX 炸药厚度的增加,复合装药的冲击波感度呈近似一阶指数衰减形式下降。

(4) 对于装填 JO-9159 炸药的战斗部,通过装填一定厚度的 ECX 炸药复合装药能够有效降低装药结构的冲击波感度,从而提高战斗部在冲击载荷下的安全性。

### 参考文献:

- [1] 王晓峰, 郝仲璋. 炸药发展中的新技术[J]. 火炸药学报, 2002, 25(4): 35-38.
- [2] WANG Xiao-feng, HAO Zhong-zhang. New development of explosives technology[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(4): 35-38.
- [3] 胡双启, 曹雄, 赵学严. 凹球型传爆药装药结构研究[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(4): 301-303.
- [4] HU Shuang-qi, CAO Xiong, ZHAO Xue-yan. Study on the concave spherical structure of the booster pellet[J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2001, 22(4): 301-303.
- [5] 肖绍清, 王文杰, 曹桂祥, 等. 炮孔复合装药结构对混凝土作用的数值模拟[J]. 工程爆破, 2003, 9(3): 19-24.
- [6] XIAO Shao-qing, WANG Wen-jie, CAO Gui-xiang, et al. Numerical simulation of blasting effect of compound charge in a concrete block[J]. *Engineering Blasting*, 2003, 9(3): 19-24.
- [7] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641-645.
- [8] ZONG Qi, MENG De-jun. Influence of different kinds of hole charging structure on explosion energy transmission[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 641-645.
- [9] 肖绍清, 朱文彬, 曹桂祥, 等. 炮孔复合装药结构的功能和设计要求[J]. 工程爆破, 2003, 9(2): 12-15.
- [10] XIAO Shao-qing, ZHU Wen-bin, CAO Gui-xiang, et al. Function and design regulations of compound charge in a blasthole[J]. *Engineering Blasting*, 2003, 9(2): 12-15.
- [11] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [12] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [13] Daniel J S. An equation of state for polymethylmethacrylate[R]. UCID-16982, 1975.
- [14] Lee E, Breithaupt D, Memillan C, et al. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products[R]. UCID-91490, 1985.
- [15] ANSYS/LS-DYNA 用户使用手册[G]. 1998.