

# CL-20 基混合炸药的冲击起爆特征<sup>\*</sup>

皮铮迪, 陈 朗, 刘丹阳, 伍俊英

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究 CL-20 基混合炸药的冲击起爆特征, 深入分析冲击波作用下 CL-20 基混合炸药的爆轰成长规律, 采用炸药驱动飞片冲击起爆实验方法, 对 CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 三种压装混合炸药进行了冲击起爆实验, 通过嵌入在炸药内部不同位置处的锰铜压力传感器, 获得了炸药内部压力的变化历程。依据实验结果标定了混合炸药的点火增长模型参数, 其中, 利用反应速率方程中的两个增长项, 分别模拟 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 混合炸药中两种组分的反应增长过程, 得到这两种混合炸药的反应速率方程参数。并通过数值模拟的方法得到了三种炸药的临界起爆阈值和 POP 关系。研究结果表明: 三种 CL-20 基混合炸药中, CL-20/NTO 混合炸药具有更高的临界起爆阈值, 而 CL-20/FOX-7 混合炸药具有更长的爆轰成长距离; 此外, 利用此套拟合双组分混合炸药反应速率方程的方法, 可以对新型配方炸药的冲击起爆过程进行预测性计算。

**关键词:** 冲击起爆; CL-20; NTO; FOX-7; 点火增长反应速率方程

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

1987 年, A. T. Nielsen 等<sup>[1]</sup>首次合成六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20), 由于其具有较高的密度和能量<sup>[2]</sup>, 得到了广泛的关注和研究。随着现代武器系统的发展, 对炸药使用的安全性要求逐渐提高, 其中, 在冲击加载作用下炸药起爆并成长为爆轰的过程是了解炸药安全性能的核心问题, 因此, 研究 CL-20 基混合炸药的冲击起爆规律具有重要意义。实验中, 通常利用 Lagrange 量计测量冲击波后反应流场的变化, 获得冲击作用下炸药的爆轰成长过程, C. M. Tarver 等<sup>[3]</sup>对 LX-19 炸药(95.2% wt.  $\epsilon$ -CL-20, 4.8% Estane)进行了冲击起爆实验研究, 通过嵌入在炸药内部的锰铜压力传感器获得了距离待测炸药起爆面不同位置处的压力变化历程, 根据实验结果, 分析了 LX-19 炸药的冲击波感度。由于炸药冲击起爆过程的瞬时性以及炸药爆炸的破坏性, 在实验过程中得到的数据仍然比较有限, 因此, 可以借助数值模拟的方法深入了解炸药的起爆和爆轰成长过程, 其中, 炸药在受到冲击加载后的反应速率是数值模拟研究的核心问题。基于经验的反应速率方程, 已经可以较好地描述这一过程, 其中, 应用比较广泛的是 Lee 和 Tarver 设计的点火增长反应速率方程<sup>[4]</sup>, 此方程基于爆轰波的 ZND 模型和热点理论假设, 描述炸药受冲击后的点火-增长过程, 通过匹配平面一维反应冲击波阵面后反应流场的实验结果, 拟合反应速率方程中的待定参数。可是, 该反应速率方程的应用范围比较有限, 一旦炸药的配方发生变化, 就需要基于新的实验结果重新调整反应速率方程中的参数。

本文中采用炸药驱动飞片的实验方法, 对 CL-20、CL-20/FOX-7 和 CL-20/NTO 三种 CL-20 基混合炸药进行冲击起爆实验研究, 利用嵌入在炸药内部的锰铜压力传感器, 测量距离起爆面不同位置处的压力变化历程, 获得三种 CL-20 基混合炸药的爆轰成长过程。采用点火增长反应速率模型, 对炸药的冲击起爆过程进行数值模拟, 根据实验结果拟合三种炸药的点火增长反应速率方程参数, 在拟合 CL-20/FOX-7 和 CL-20/NTO 两种混合炸药的模型参数时, 利用反应速率方程中两个独立的生长项分别描述混合炸药中两种组分炸药的反应过程。建立飞片撞击炸药的计算模型, 得到三种 CL-20 基混合炸药的冲击起爆阈值和入射冲击压力与爆轰成长距离关系(Pop plot), 并对三种炸药的冲击感度进行定量分析。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-04-26; 修回日期: 2016-07-26

第一作者: 皮铮迪(1984—), 男, 博士; 通信作者: 陈 朗, chenlang@bit.edu.cn。

1 实 验

1.1 实验装置

炸药驱动飞片冲击起爆实验装置如图 1 所示,装置由雷管、平面波炸药透镜、加载炸药、有机玻璃隔板、钢飞片、有机玻璃支架、铝隔板、炸药试件和见证板组成。实验时,通过雷管起爆炸药平面波透镜和加载炸药,产生一束平面波,经有机玻璃隔板衰减后作用于钢飞片并驱动其向下运动,飞片撞击铝隔板,产生的平面冲击波经铝隔板衰减后最终起爆待测炸药。通过改变有机玻璃隔板和铝隔板的厚度来调节起爆待测炸药的冲击波强度。平面波炸药透镜和加载炸药的直径均为 50 mm,有机玻璃隔板直径为 60 mm,钢飞片的直径为 50 mm、厚 3 mm,铝隔板的直径为 150 mm。

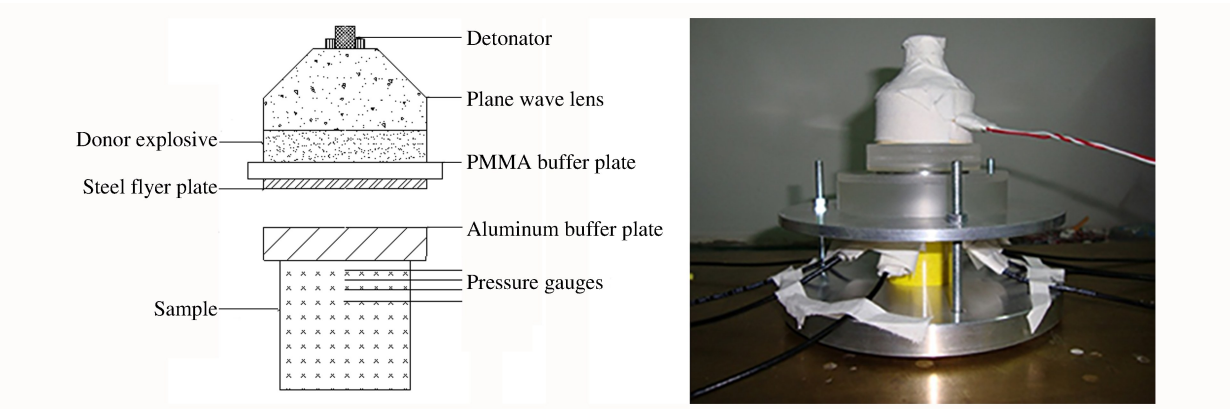


图 1 炸药驱动飞片冲击起爆实验装置示意图及照片  
Fig.1 Diagram and photo of shock initiation experimental apparatus

实验炸药为 CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 压装混合炸药,详细配方如表 1 所示,按照预定的压制工艺将其制成直径 40 mm,高度分别为 25 mm 和 1~4 mm 的药柱,药柱间密度极差不超过 0.02 g/cm<sup>3</sup>,三种炸药的平均密度列于表 1 中。在装配炸药试件时,将高 25mm 的药柱作为底座置于最底端,在其上方依次放置三个厚度 1~4 mm 的药柱,在药柱间和试件的最上方嵌入锰铜压力传感器,其中,传感器被封装在两层 0.1 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜之中,按此结构,就可获得从冲击波入射面至炸药内部 0~8 mm 之间 4 个位置处的压力变化历程。

表 1 实验炸药配方及平均密度

Table 1 Formula and average density of the samples

| 编号 | 炸药配方(质量比)                               | 平均密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|----|-----------------------------------------|----------------------------|
| 1  | CL-20 (95%CL-20, 5%Binder)              | 1.94                       |
| 2  | CL-20/NTO (47%CL-20, 47%NTO, 6%FPM)     | 1.89                       |
| 3  | CL-20/FOX-7 (47%CL-20, 47%FOX-7, 6%FPM) | 1.88                       |

利用上述实验装置,对 CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 混合炸药进行了冲击起爆实验,每次实验获得冲击波入射面及炸药内部共 4 个位置处压力随时间的变化曲线,通过改变有机玻璃和铝隔板的厚度,调节入射冲击波压力。

1.2 实验结果及分析

图 2 是 CL-20 混合炸药在  $p_0=4.18$  GPa 的入射压力下,距冲击波入射面不同距离  $x$  处的压力-时间变化曲线,从图中可以看出,当冲击波传至 2 mm 位置时,炸药反应释放的能量已能够支持到爆轰波阵面,但支持度很小,只是使波阵面压力有小幅度的提高,达到 4.29 GPa,随着时间的推移,波后炸药反应释能的压力峰逐渐追赶前导冲击波,在 4 mm 处爆轰波阵面压力已达到 25 GPa 左右。

图 3 是 3.49 GPa 的入射压力下,CL-20/NTO 混合炸药内部不同位置的压力-时间曲线,可以看到,

3.49 GPa 压力的冲击波引发了炸药的反应,但反应相对缓慢,压力成长较慢,在 5 mm 之内炸药反应释放的能量没有支持到爆轰波阵面。另外,几乎每个前导波阵面后都出现了压力的卸载,即压力到达峰值后又迅速下降。这可能是多种机制引起的,例如混合压制炸药中存在的孔穴,在压力波的作用下闭合,出现压力卸载的现象;也可能是由于 NTO 的屈服强度相对较低,在冲击波的作用下发生了较大的形变,从而导致了压力的卸载。

在入射压力为 3.40 GPa 时,CL-20/FOX-7 混合炸药内部不同位置的内部压力变化历程如图 4 所示,可以看出,在有效信号范围内,炸药释放的能量未能支持到爆轰波阵面,表明在此范围的入射压力下,波阵面只激发了少量的炸药反应,并且反应增长速率也相对缓慢。

CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 混合炸药在相同冲击加载条件下的实验结果如图 2~4 中所示,这三次实验中有有机玻璃隔板厚度均为 14 mm,铝隔板厚度均为 10 mm,由于 CL-20 混合炸药的密度高于后两者,因此,其入射压力相对较高,为 4.18 GPa,而后两种混合炸药的入射冲击波压力分别为 3.49、3.40 GPa。通过比较三种混合炸药的内部压力成长趋势,可以明显看出,向 CL-20 中分别加入 NTO 和 FOX-7,均可有效降低其冲击波敏感度。

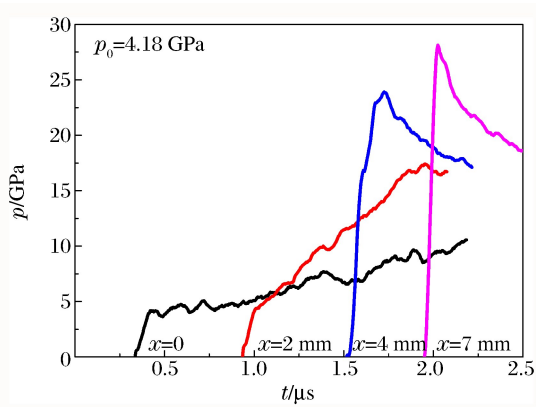


图 2 CL-20 混合炸药在距冲击波入射面不同距离处的内部压力-时间曲线

Fig. 2 Pressure curves of CL-20 explosive at different displacements from shock incidence plane

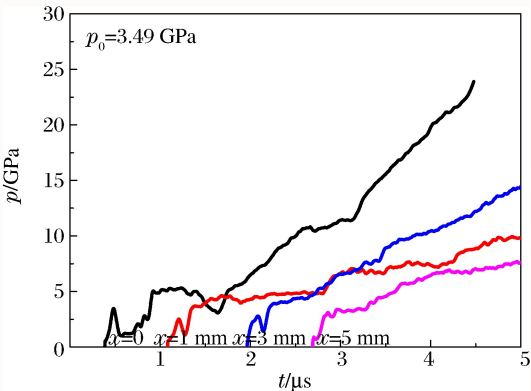


图 3 CL-20/NTO 混合炸药在距冲击波入射面不同距离处的内部压力-时间曲线

Fig. 3 Pressure curves of CL-20/NTO explosive at different displacements from shock incidence plane

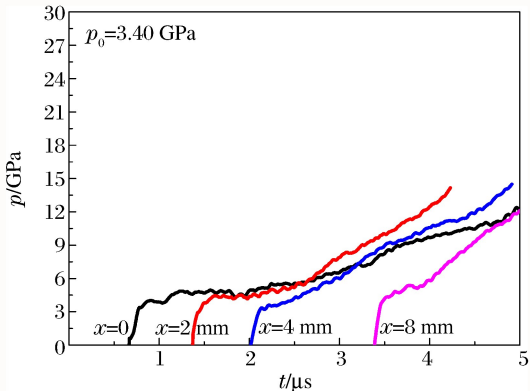


图 4 CL-20/FOX-7 混合炸药在距冲击波入射面不同距离处的内部压力-时间曲线

Fig. 4 Pressure curves of CL-20/FOX-7 explosive at different displacements from shock incidence plane

2 炸药冲击起爆数值模拟

根据炸药驱动飞片冲击起爆实验装置,建立计算模型。由于装置具有对称性,因此采用二维轴对称模型,模型中各组件的尺寸与实验装置一致。在炸药内部嵌入了锰铜压力传感器,且传感器的上下表面均贴敷聚四氟乙烯薄膜,这些结构对冲击波在炸药内部的传播会产生一定的影响,因此在计算中也建立了传感器模型。采用非线性有限元计算方法<sup>[5]</sup>对炸药的起爆过程进行模拟。

平面波炸药透镜由 TNT 和 8701 炸药组成,加载炸药为 TNT,均采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程<sup>[6]</sup>进行描述。两种炸药的材料参数如表 2 所示,表中  $\rho$  为炸药的初始密度, $D$  为爆速, $P_{CJ}$  为 C-J 点爆轰压力。

表 2 8701 和 TNT 的材料参数<sup>[7]</sup>

Table 2 Parameters of TNT and 8701 explosive

| 炸药   | $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $D/(\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$ | $P_{\text{CJ}}/\text{GPa}$ | $A/\text{GPa}$ | $B/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $E_0/\text{GPa}$ |
|------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|-------|-------|----------|------------------|
| 8701 | 1.70                                   | 0.831 5                                | 29.50                      | 854.5          | 20.49          | 4.60  | 1.35  | 0.25     | 8.5              |
| TNT  | 1.64                                   | 0.693 0                                | 27.00                      | 371.3          | 3.23           | 4.15  | 0.95  | 0.30     | 7.0              |

计算中有机玻璃隔板、支架、铝隔板、钢飞片、包裹传感器的聚四氟乙烯薄膜均为惰性材料,采用弹塑性流体力学材料模型和 Grüneisen 状态方程描述,Grüneisen 状态方程<sup>[8]</sup>的具体形式为:

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

式中: $\mu=\rho/\rho_0-1$ , $\rho$  是密度, $\rho_0$  是材料初始密度, $C$  是  $u_s-u_p$  曲线截距。 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  是  $u_s-u_p$  曲线斜率的系数, $\gamma_0$  是 Grüneisen 系数, $a$  是对  $\gamma_0$  的一阶体积修正。表 3 是几种惰性材料的 Grüneisen 状态方程参数。

表 3 几种惰性材料的 Grüneisen 状态方程参数<sup>[7]</sup>

Table 3 Grüneisen parameters for inert materials

| 惰性材料      | $\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $c/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $\gamma_0$ | $a$  |
|-----------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------|-------|------------|------|
| PMMA      | 1.851                                    | 2.240                                  | 2.090 | -1.12 | 0.0   | 0.850      | 0.00 |
| Steel     | 7.830                                    | 4.570                                  | 1.490 | 0.00  | 0.0   | 1.930      | 0.50 |
| Al        | 2.700                                    | 5.355                                  | 1.345 | 0.00  | 0.0   | 2.130      | 0.48 |
| Polyimide | 1.414                                    | 2.470                                  | 1.629 | 0.00  | 0.0   | 1.395      | 0.00 |

利用点火增长模型模拟凝聚炸药的冲击起爆过程,模型中使用 JWL(Jones-Wikins-Lee)状态方程<sup>[9]</sup>来描述未反应炸药和爆轰产物,具体形式为:

$$P_E = A e^{-R_1 v_E} + B e^{-R_2 v_E} + \frac{\omega c_v T_0}{v_E} \tag{2}$$

$$P_p = A e^{-R_1 v_p} + B e^{-R_2 v_p} + \frac{\omega c_v T_p}{v_p} \tag{3}$$

式中: $P_E$ 和 $P_p$ 为炸药初始压力和产物压力, $v_E$ 和 $v_p$ 为炸药初始相对比容和产物相对比容, $c_v$ 为比定压热容, $T_0$ 和 $T_p$ 为炸药初始温度和产物温度, $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、和 $\omega$ 为待定参数。

通过匹配冲击波传入炸药中最初几个位置的压力变化趋势,拟合出 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 两种混合炸药的未反应 JWL 状态方参数,由于 CL-20 混合炸药的压制密度与 LX-19<sup>[3]</sup>接近,利用已有的 LX-19 未反应 JWL 状态方程参数进行试算,计算结果可以较好地模拟冲击波传入炸药中最初几个位置的压力波形,因此,CL-20 混合炸药的未反应 JWL 状态方程选用已有的 LX-19 参数。三种混合炸药的未反应 JWL 状态方程参数如表 4 中所示。利用 CL-20 混合炸药圆筒实验,得到密度为 1.94g/cm<sup>3</sup> 的 CL-20 混合炸药爆轰产物 JWL 状态方程,方程参数如表 4 中所示。采用 BKW 状态方程<sup>[9]</sup>和计算程序<sup>[10]</sup>来计算 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 两种混合炸药爆轰产物的等熵膨胀,两种混合炸药的配方和生成热数据见表 5。利用 BKW 状态方程计算得到的炸药爆轰产物等熵膨胀数据,拟合出 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 两种混合炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数,详见表 4 中所示。

点火增长反应速率方程最初由两项组成<sup>[4]</sup>,点火项和燃烧项,后来,为了更好地模拟高压、短脉冲下的冲击起爆过程,在两项式的基础上又增加了快速反应项<sup>[11]</sup>,三项式点火增长反应速率方程为:

$$\frac{d\lambda}{dt} = I (1 - \lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1 (1 - \lambda)^c \lambda^d P^y + G_2 (1 - \lambda)^e \lambda^g P^z \tag{4}$$

式中: $\lambda$  是炸药反应度, $t$  是时间, $\rho$  是密度, $\rho_0$  是初始密度, $P$  是压力, $I$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $x$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $y$ 、 $e$ 、 $g$  和  $z$  是可调系数。

表 4 CL-20、CL-20/NTO、CL-20/FOX-7 混合炸药的点火增长模型参数

Table 4 Ignition and growth model parameters for CL-20, CL-20/NTO and CL-20/FOX-7

| 参数                         | 未反应 JWL 状态方程          |                       |                       |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | CL-20                 | CL-20/NTO             | CL-20/FOX-7           |
| $\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$ | 1.94                  | 1.89                  | 1.88                  |
| $A/GPa$                    | 444 400               | 24 900                | 122 300               |
| $B/GPa$                    | -5.13                 | -3.18                 | -6.91                 |
| $R_1$                      | 13.5                  | 11.3                  | 11.3                  |
| $R_2$                      | 1.35                  | 1.13                  | 1.13                  |
| $\omega$                   | 0.869 5               | 0.869 5               | 0.869 5               |
| $C_v/(GPa \cdot K^{-1})$   | $2.78 \times 10^{-3}$ | $2.78 \times 10^{-3}$ | $2.78 \times 10^{-3}$ |
| $T_0/K$                    | 298                   | 298                   | 298                   |
| 剪切模量/GPa                   | 4.54                  | 4.00                  | 4.00                  |
| 屈服强度/GPa                   | 0.2                   | 0.2                   | 0.2                   |

| 参数                       | 爆轰产物 JWL 状态方程        |                      |                      |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                          | CL-20                | CL-20/NTO            | CL-20/FOX-7          |
| $A/GPa$                  | 1 887.64             | 1 640.27             | 1 589.47             |
| $B/GPa$                  | 162.40               | 22.26                | 18.34                |
| $R_1$                    | 6.50                 | 5.93                 | 5.78                 |
| $R_2$                    | 2.75                 | 1.76                 | 1.54                 |
| $\omega$                 | 0.547                | 0.700                | 0.700                |
| $C_v/(GPa \cdot K^{-1})$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ | $1.0 \times 10^{-3}$ |
| $E_0/GPa$                | 11.50                | 8.46                 | 9.07                 |

| 参数          | 点火增长反应速率方程            |                   |                       |
|-------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
|             | CL-20                 | CL-20/NTO         | CL-20/FOX-7           |
| $I$         | $7.43 \times 10^{11}$ | $4.0 \times 10^6$ | $7.43 \times 10^{11}$ |
| $a$         | 0.0                   | 0.22              | 0.0                   |
| $b$         | 0.667                 | 0.667             | 0.667                 |
| $x$         | 20.0                  | 7.0               | 20.0                  |
| $G_1$       | 402                   | 402               | 254                   |
| $c$         | 0.667                 | 0.667             | 0.667                 |
| $d$         | 0.333                 | 0.333             | 0.333                 |
| $y$         | 2.0                   | 2.0               | 2.0                   |
| $G_2$       | 400                   | 0.6               | 140                   |
| $e$         | 0.333                 | 0.667             | 0.667                 |
| $g$         | 1.0                   | 0.111             | 0.333                 |
| $z$         | 2.0                   | 1.0               | 2.0                   |
| $F_{igmax}$ | 0.3                   | 0.3               | 0.3                   |
| $F_{G1max}$ | 0.5                   | 0.5               | 0.5                   |
| $F_{G2min}$ | 0.5                   | 0.0               | 0.0                   |

采用点火增长反应速率方程模拟 CL-20 混合炸药的起爆过程,根据冲击起爆实验结果,标定出它的反应速率方程参数,如表 5 中所示,模拟计算与实验结果的对比如图 5 所示。

使用三项式点火增长反应速率方程模拟 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 两种混合炸药的冲击起爆过程,利用方程中第二项来描述 CL-20 的反应增长过程,而第三项来模拟两种混合炸药中反应相对较慢的 NTO 和 FOX-7 的反应释能过程。由于 CL-20 的反应较快,且两种混合炸药中 CL-20 的质量分数均为 47%,因此,假设在反应度达到 0.5 时混合炸药中的 CL-20 就已经完成了全部反应,而 NTO 和

表 5 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 两种混合炸药的配方和生成热数据  
Table 5 Formula and heat of formation for the explosive of CL-20/NTO and CL-20/FOX-7

| 炸药配方(质量比)                        | 生成热/(J·g <sup>-1</sup> ) | 物质的量(分子量为 100 时)/mol |         |         |         |         |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                  |                          | C                    | H       | N       | O       | F       |
| CL-20 : NTO : FPM(47 : 47 : 6)   | -189.86                  | 1.537 5              | 1.507 4 | 2.733 9 | 2.372 3 | 0.200 7 |
| CL-20 : FOX-7 : FPM(47 : 47 : 6) | -141.53                  | 1.449 5              | 2.054 6 | 2.558 0 | 2.558 0 | 0.200 7 |

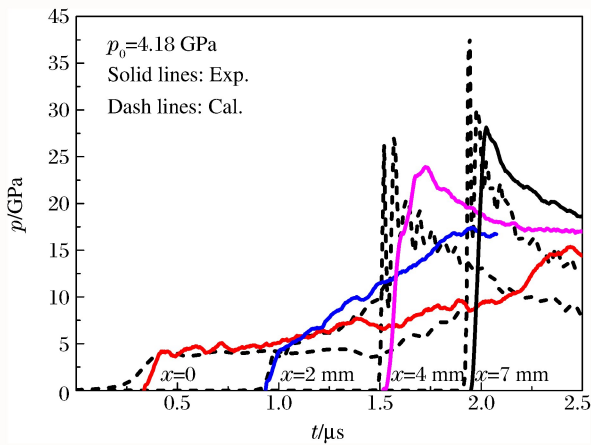


图 5 CL-20 混合炸药计算与实验结果对比  
Fig. 5 Experimental and calculated pressure histories in shock initiation of CL-20 explosive

FOX-7 的反应速率相对较慢,它们的反应进程应贯穿始终。本次实验已得到 CL-20 单组分炸药的反应速率方程参数,而 NTO 和 FOX-7 则参考与其冲击感度相近的 RDX 和 TATB 炸药的模型参数<sup>[12]</sup>,在得到每种组分炸药的两项式点火增长反应速率方程参数后,即可“拼”出双组分混合炸药的反应速率方程,其中,还需要根据实际情况对方程参数进行一定的调整。尝试采用两种不同的方法获得 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 混合炸药的反应速率方程参数,第 1 种方法选用反应较慢组分的点火项作为反应速率方程的第一项,选用两种组分的增长项作为反应速率方程的第 2~3 项,利用此方法,得到了 CL-20/NTO 混合炸药的参数,如表 5 中所示。另一方法中,在 CL-20 混合炸药反应速率方程的基础上添加第 3 项,描述 FOX-7 的反应过程,然而,添加此项后,会使初期的反应速率增大,这明显与实际情况不符,因此,尝试对 CL-20 增长项系数  $G$  进行修正来解决此问题,参数的修正公式如下:

$$G_{\text{new}} = G_{\text{CL-20}} \eta_{\text{CL-20}} + G_{\text{FOX-7}} \eta_{\text{FOX-7}} \tag{5}$$

式中: $G_{\text{CL-20}}$  和  $G_{\text{FOX-7}}$  分别为 CL-20 和 FOX-7 的增长项系数, $\eta_{\text{CL-20}}$  和  $\eta_{\text{FOX-7}}$  为两种组分的质量分数, $G_{\text{new}}$  为修正后的系数。当  $G_{\text{CL-20}}$  为 402、 $G_{\text{FOX-7}}$  为 140、 $\eta_{\text{CL-20}}$  和  $\eta_{\text{FOX-7}}$  均为 47% 时,按公式(5)计算出修正后的增长项系数为 254,CL-20/FOX-7 混合炸药的反应速率方程参数如表 5 中所示。

图 6~7 是 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 混合炸药的计算与实验结果对比,可以看出,计算结果较好地模拟出了两种混合炸药中不同位置处压力的成长趋势,表明利用上述方法得到的反应速率方程参数,可以较好地描述双组分混合炸药 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 的冲击起爆过程。因此,利用上述拟合双组分混合炸药点火增长反应速率方程的方法,可以对不同配比混合炸药的冲击起爆过程进行预测性计算,从而降低实验量及成本。

非均质炸药冲击起爆的  $p^2\tau$  判据和临界能量流判据<sup>[13]</sup>,是研究炸药冲击感度的重要参数,两种判据的具体形式为:

$$p^2\tau = \text{const} \tag{6}$$

$$E_c = p u \tau = \text{const} \tag{7}$$

式中: $p$  为入射冲击波压力, $u$  为冲击波后粒子速度, $\tau$  为入射冲击波脉冲宽度, $E_c$  为临界起爆能量。此

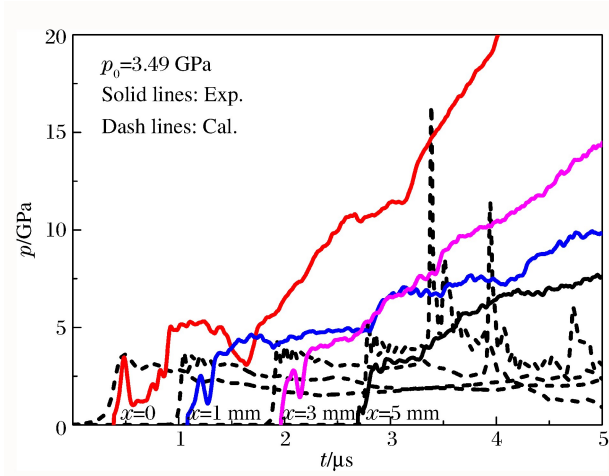


图 6 CL-20/NTO 混合炸药计算与实验结果对比  
Fig. 6 Experimental and calculated pressure histories in shock initiation of CL-20/NTO

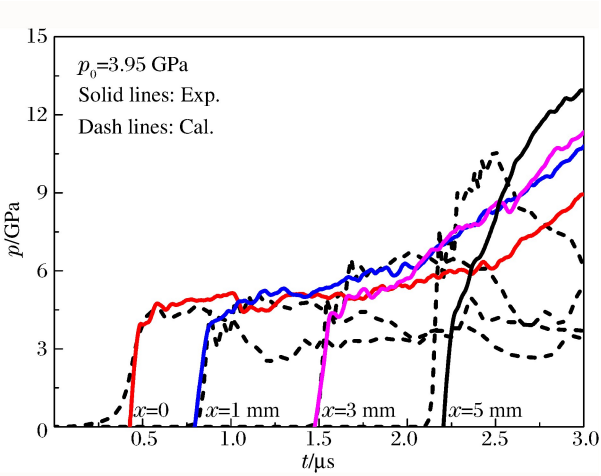


图 7 CL-20/FOX-7 混合炸药计算与实验结果对比  
Fig. 7 Experimental and calculated pressure histories in shock initiation of CL-20/FOX-7

外,炸药在不同入射压力下的爆轰成长距离,即 POP 关系<sup>[14]</sup>,也是反映炸药冲击感度的重要参数。

这几种重要判据可以利用飞片撞击有隔板炸药的实验获得,因此,建立了飞片冲击起爆计算模型,尝试采用数值模拟的方法,计算 CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 三种混合炸药的冲击感度相关参数。计算模型由飞片、隔板、待测炸药组成,赋予飞片一定的速度,使其撞击隔板产生冲击波并起爆待测炸药,通过改变飞片的速度以获得不同的入射冲击波压力,计算分析待测炸药在不同入射压力下的起爆规律。钢飞片和铝隔板采用弹塑性流体力学材料模型和 Grüneisen 状态方程描述,使用点火增长模型描述待测炸药。钢飞片的厚度为 3 mm,铝隔板厚 6 mm,待测炸药高 40 mm,三者直径均为 50 mm。

利用此计算模型对 CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 三种混合炸药进行了飞片冲击起爆数值模拟,计算得到了使炸药起爆的最低入射压力(临界压力) $p$ ,入射冲击波后粒子速度  $u$  以及飞片撞击隔板产生冲击波的脉宽 $\tau$ ,最终得到三种混合炸药冲击起爆的临界阈值,如表 6 所示。通过改变飞片撞击隔板的速度,得到待测炸药在不同入射冲击压力下的爆轰成长距离,并在对数坐标下对样本点进行线性拟合,得到炸药的冲击起爆 POP 关系,如图 8 所示。由以上结果可以看出,与 CL-20 混合炸药相比,CL-20/FOX-7 混合炸药冲击起爆的  $p^2\tau$ 判据和临界能量流判据只有少许提高,而添加了 NTO 的 CL-20/NTO 混合炸药的临界起爆阈值却有较大提升;从 POP 关系可以看出,向 CL-20 中分别添加 FOX-7 和 NTO 均可增加其爆轰成长距离,其中,在相同入射压力下,CL-20/FOX-7 混合炸药的爆轰成长距离要大于 CL-20/NTO 混合炸药。综合这两种结果,认为在相同加载条件下,CL-20/NTO 混合炸药内部形成的“热点”数量要少于 CL-20、CL-20/FOX-7 两种混合炸药,因此,其临界起爆阈值较高。然而,在“热点”的增长阶段,FOX-7 炸药的反应速率要低于 NTO 炸药,从而导致 CL-20/FOX-7 混合炸药比 CL-20/NTO 混合炸药的爆轰成长距离更大。

表 6 三种混合炸药冲击起爆的临界阈值

Table 6 Shock initiation critical thresholds for three mixed explosives

| 炸药(质量比)                  | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 临界压力/GPa | $p^2\tau$ /(Pa <sup>2</sup> ·s) | $p\tau u$ /(J·m <sup>-2</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------|----------|---------------------------------|---------------------------------|
| CL-20(95/5)              | 1.94                     | 1.39     | $253.67\times10^{10}$           | $41.97\times10^4$               |
| CL-20/NTO/FPM(47/47/6)   | 1.89                     | 1.46     | $279.86\times10^{10}$           | $66.71\times10^4$               |
| CL-20/FOX-7/FPM(47/47/6) | 1.88                     | 1.40     | $257.33\times10^{10}$           | $43.19\times10^4$               |

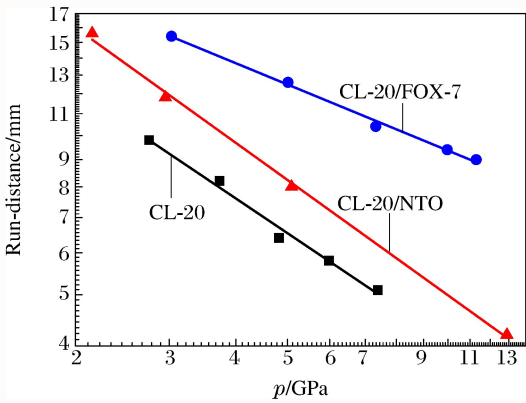


图 8 三种炸药的 POP 关系图  
Fig. 8 Pop plots for the three explosives

3 结 论

通过在炸药内部嵌入锰铜压力传感器,并采用炸药驱动飞片冲击起爆的实验方法,获得了 CL-20、CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 三种混合炸药的内部压力变化历程,利用点火增长模型,对炸药的冲击起爆过程进行数值模拟。研究发现,三种 CL-20 基混合炸药相比,CL-20/NTO 混合炸药具有更高的临界起爆阈值,而在相同冲击加载条件下 CL-20/FOX-7 混合炸药具有更长的爆轰成长距离。在拟合双组分混合炸药 CL-20/NTO 和 CL-20/FOX-7 的反应速率方程过程中,使用两个增长项对两种炸药的反应分开描述,通过对比计算与实验结果,发现此方法得到的反应速率方程可以有效地模拟混合炸药的起爆过程。因此,利用此套拟合双组分混合炸药反应速率方程的方法,可以对新型配方炸药的冲击起爆过程进行预测性计算。

参考文献:

[1] Nielsen A T, Nissan R A. Polynitropolyaza caged explosives[J]. Naval Weapon Center Technical Publication, 1986 (5):6692.

[2] Simpson R L, Urtiew P A, Ornellas D L, et al. CL-20 performance exceeds that of HMX and its sensitivity is moderate[J]. Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 1997,22(5):249-255.

[3] Tarver C M, Simpson R L, Urtiew P A. Shock initiation of an  $\epsilon$ -CL-20-estane formulation[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. AIP Publishing LLC, 1996:891-894.

[4] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[C]// Physics of Fluids. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 1980:2262-2372.

[5] Hallquist J O. LS-DYNA user's manual: nonlinear dynamic analysis of structures in three dimensions[M]. California: University of California, 2001:823-826.

[6] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives: UCLD-16189[R], 1973.

[7] 陈朗,刘群,伍俊英. 受热炸药的冲击起爆特征[J]. 爆炸与冲击,2013,33(1):21-28.  
Chen Lang, Liu Qun, Wu Junying. On shock initiation of heated explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(1):21-28.

[8] Daniel J S. An equation of state for ploy-methyl-meth acrylate: UCID-16982[R], 1975.

[9] Mader C L. Numerical modeling of detonation[M]. Berkeley: California Press, 1979.

[10] Mader C L. Detonation properties of condensed explosives computed using the BKW equation of state: LA-2900 [R]. Los Alamos Scientific Laboratory Report, 1963.

[11] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C] // Proceedings of the 8th International Symposium of Detonation. Albuquerque, USA, 1985:951-961.

- [12] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Shock initiation of composition B and C-4 explosives: experiments and modeling[J]. Russian Journal of Physical Chemistry: B, 2008,2:162-171.
- [13] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. Explosives Stoffe, 1969,17(1):9-13.
- [14] Ramsay J B, Popolato A. Analysis of shock wave and initiation data for solid explosives: LA-DC-6992; CONF-651003-3[R]. Los Alamos Scientific Lab., Univ. of California, N. Mex., 1965.

## Shock initiation of CL-20 based explosives

Pi Zhengdi, Chen Lang, Liu Danyang, Wu Junying

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In the present work, shock initiation experiments on CL-20, CL-20/NTO and CL-20/FOX-7 mixed explosives were performed to investigate the shock initiation characteristics of Hexanitro-hexaazaisowurtzitane (CL-20) based explosives. An explosive driven flyer device was utilized to initiate the charges with manganin gauges embedded into the target to measure time resolved local pressure histories. The shock initiation of CL-20 based explosives was simulated using the ignition and growth reactive flow model, and the parameters were obtained by fitting the experimental data. Furthermore, the reaction of two compositions in CL-20/NTO and CL-20/FOX-7 was simulated respectively using the two growth terms in the ignition and growth model. The parameters were then applied in the calculation of the initial shock pressure-distance to detonation relationship (Pop plot) and the shock initiation critical thresholds for the three mixed explosives. The results show that the CL-20/NTO explosive has a higher shock initiation critical threshold, while the CL-20/FOX-7 explosive has a longer distance to detonation under the same loading conditions. Besides, this model for the explosive with the two compositions can be applied to predict the shock initiation characteristics of the explosive with new formulations.

**Keywords:** shock initiation; CL-20; NTO; FOX-7; ignition and growth reactive flow model

(责任编辑 曾月蓉)