

文章编号: 1001-1455(2010)01-0045-06

# 环形多点起爆精度对聚能杆式侵彻体成型的影响\*

李伟兵, 王晓鸣, 李文彬, 郑宇

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对环形多点起爆网络在多模成型装药上的应用问题, 利用 LS-DYNA 程序, 通过改变延迟时间和延迟点数, 研究了6点起爆网络起爆同步精度对形成侵彻体的速度、长径比等参数的影响规律, 并找出了引起侵彻体弯曲变形的主要原因——横向速度梯度的变化规律, 得到了延迟时间在 200 ns 以内可使形成的侵彻体不发生弯曲变形, 成型参数基本不变。进行了实验验证, 实验结果与数值模拟结果吻合较好。

**关键词:** 爆炸力学; 多点起爆网络; 起爆精度; 聚能杆式侵彻体

**中图分类号:** O385; TJ456

**国标学科代码:** 130·3530

**文献标志码:** A

## 1 引言

影响聚能侵彻体成型的关键因素主要是起爆方式、装药性质、装药结构、药型罩材料性能和结构参数等。就起爆方式而言, 主要包括单点起爆、多点起爆、环形起爆等形式, 其中多点起爆的各点装药是否同时起爆是影响聚能侵彻体成型的重要因素之一。对多点起爆网络及起爆精度有大量的研究, 如温玉全等<sup>[1]</sup>对设计的刚性面同步起爆网络进行同步时间分析、胡双启等<sup>[2]</sup>研究了环形传爆药多点同步起爆网络、许碧英等<sup>[3]</sup>设计了平面多点同时起爆网络, 等等, 罗健等<sup>[4]</sup>在研究多点起爆起爆点数对 EFP 尾翼的影响时, 提出多点起爆的同步性对 EFP 的飞行稳定性有较大的影响, 必须严格加以控制, 但未对多点起爆的同步性对 EFP 成型参数的影响规律进行研究。要使 EFP 在大炸高情况下仍能发挥很好的侵彻威力, 弹丸需有较好的飞行稳定性, 通常要求起爆的同步性偏差小于 100 ns<sup>[5-6]</sup>。如果在相对较小炸高情况下研究侵彻体的侵彻威力, 则主要考虑起爆同步性对侵彻体的成型形态和参数的影响。

本文中, 采用 6 点环形起爆网络, 应用 LS-DYNA 软件研究多点起爆网络起爆精度对聚能杆式侵彻体成型的影响, 并进行实验验证, 找出起爆偏差对形成的聚能杆式侵彻体速度和长径比的影响规律。

## 2 数值模拟方案及有限元模型

### 2.1 多点起爆网络的布置

为了方便数值模拟, 将 6 点环形起爆网络在成型装药结构的圆周面上布置成如图 1 所示的 2 种形式, 均为轴对称分布, 装药直径为 60 mm, 起爆半径为 21 mm。

在实际中多点起爆网络的起爆偏差是参差不齐的, 有一定的随机性, 但是为了找出起爆偏差的影响规律, 主要研究各点起爆偏差相同的情况下对聚能杆式侵彻体成型的影响, 根据图 1 起爆点的布置情况确定 4 种延迟起爆方案: 方案 1、2、3 均采用单侧起爆偏差方式, 方案 1 延迟起爆位置为图 1(a) 中点 1, 方案 2 为图 1(b) 中点 1、2, 方案 3 为图 1(a) 点中 1、2、6, 方案 4 采用对称起爆偏差方式, 延迟起爆位置为图 1(b) 中点 3、6。

### 2.2 有限元模型

采用 LS-DYNA 程序, 用 ALE 算法来计算涉及网格大变形、材料流动问题的聚能侵彻体形成过程,

\* 收稿日期: 2008-10-13; 修回日期: 2009-07-18

基金项目: 国防基础科研项目(A2620060253)

作者简介: 李伟兵(1982—), 男, 博士研究生。

炸药、药型罩、空气选用多物质流欧拉算法,炸药、药型罩、空气与壳体的相互作用采用流固耦合算法<sup>[7]</sup>。为了减少计算量,建立如图2所示的1/2模型图。

装药 JH-2 炸药采用 JWL 状态方程;药型罩材料为紫铜,壳体材料为 45 钢,本构方程采用 Johnson-Cook 模型,状态方程为 Gruneisen 方程。对于多介质 ALE 方法,还需建立覆盖整个弹丸飞行范围的空气网格,并在边界节点上施加压力流出边界条件,避免压力在边界上的反射。空气采用流体模型,状态方程为线性多项式。计算中所使用的材料参数见文献<sup>[8]</sup>。

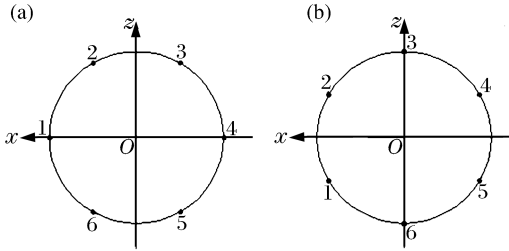


图1 起爆点的布置

Fig.1 Layout of initiation points

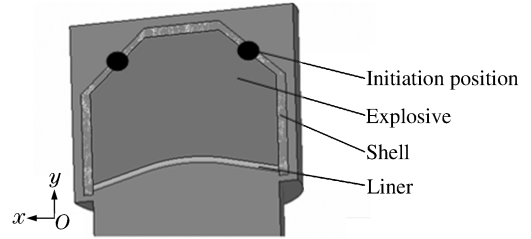


图2 三维有限元 1/2 模型图

Fig.2 Half of the three-dimensional finite element model

### 3 数值模拟结果及分析

#### 3.1 起爆偏差的影响

为了研究不同起爆偏差对形成的侵彻体速度  $v$  和长径比  $L/D$  的影响规律,将 4 种研究方案的延迟起爆时间  $\tau$  分别设定为 50、100、150、200、300 和 500 ns。图 3 为起爆偏差为 0 即同步起爆时聚能杆式侵彻体成型过程的计算结果。

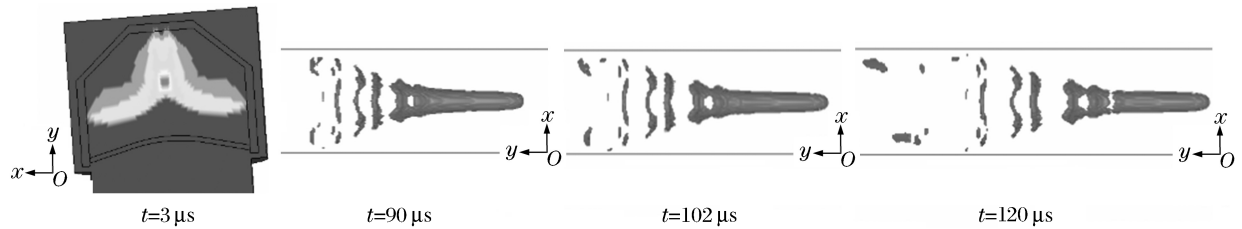


图3 同步起爆时聚能杆式侵彻体成型过程

Fig.3 The formation process of a jetting projectile charge when initiation windage is 0 ns

由于多点起爆对聚能侵彻体的影响主要体现在对主装药爆轰波形的控制上,图 4 为起爆偏差引起主装药爆轰波形的变化,随着延迟时间的增加,主装药传递的爆轰波对称性越来越差,造成爆轰波对药型罩的压垮时间和空间不对称,从而影响聚能侵彻体的形态和成型性能。

计算的聚能侵彻体形态结果见图 5,成型参数(速度、长径比)随延迟时间的变化曲线如图 6 所示。如果延迟时间在 200 ns 以内,对形成的侵彻体尾翼有影响,大于 200 ns 以后侵彻体开始发生弯曲,特别是到了 500 ns,侵彻体发生严重的弯曲变形,飞行稳定性和侵彻能力都将大大降低。比较图 5 中单侧起爆偏差各方案侵彻体形态,随着延迟点数的增加,聚能侵彻体的尾翼破坏越来越严重,弯曲变形越来越明显。而对称起爆偏差所形成的侵彻体无弯曲变形,起爆偏差到 300 ns 后才对侵彻体尾翼有所影响。

从图 6 可以看出,随着延迟时间的增加,聚能侵彻体的头部速度和长径比都先稍微有所增加,然后又逐渐减小。当延迟时间在 200 ns 以内时,侵彻体的头部速度和长径比基本不变。综合分析起爆偏差对侵彻体的形态和成型参数的影响,除了爆轰波不对称对尾翼的影响外,主要还是引起了侵彻体的弯曲变形,这势必影响侵彻体最后的侵彻威力。

因此,侵彻体存在横向速度梯度是引起侵彻体最终弯曲变形的的主要原因。图 7 给出了单侧起爆偏差情况下侵彻体头尾横向速度和由横向速度引起的横向位移,此横向位移值指尾部中心相对于头部中心的横向偏移量,可以得出随着延迟时间和延迟点数的增加,侵彻体横向速度梯度逐渐增大,在 100 ns

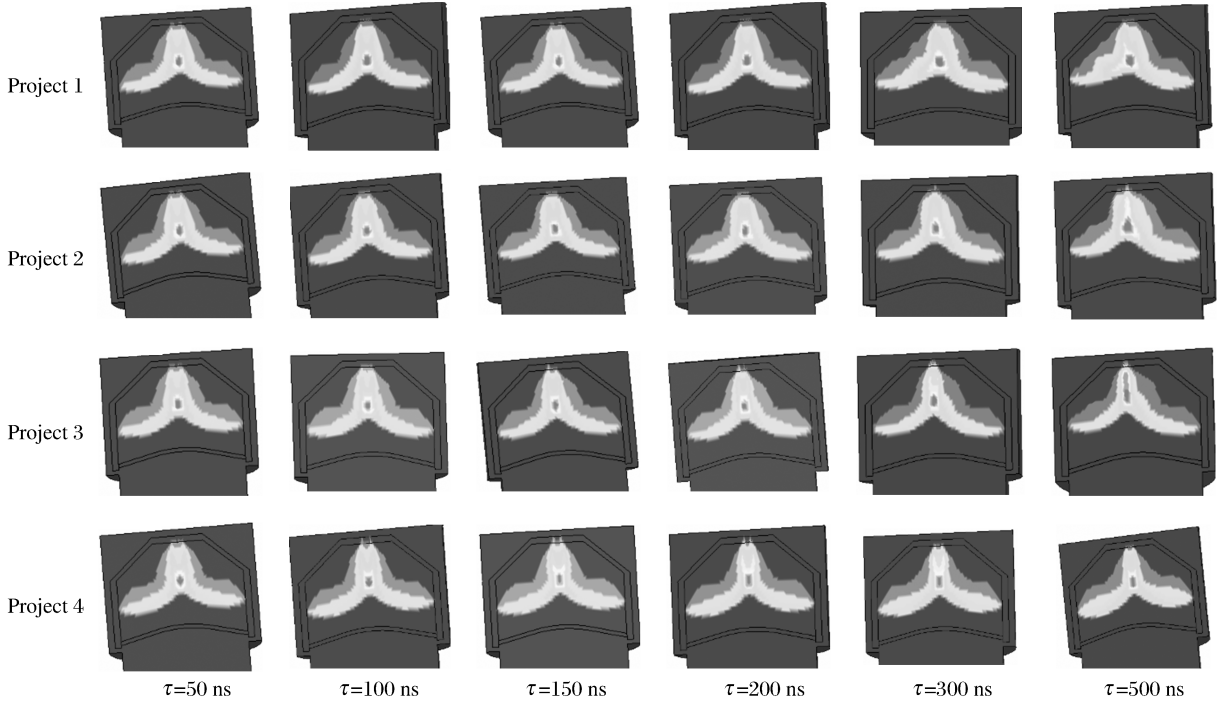


图 4  $t = 3 \mu\text{s}$  时的爆轰波形状

Fig. 4 The detonation wave figure at  $3\mu\text{s}$



图 5  $t = 102 \mu\text{s}$  时的聚能侵彻体成型形态

Fig. 5 The penetrator shape at  $102 \mu\text{s}$

时相对横向位移在 1 mm 以内,200 ns 时相对横向位移增加到 2 mm 左右,到 300 ns 时相对横向位移最大达到 4.4 mm,将使侵彻体发生明显弯曲变形。

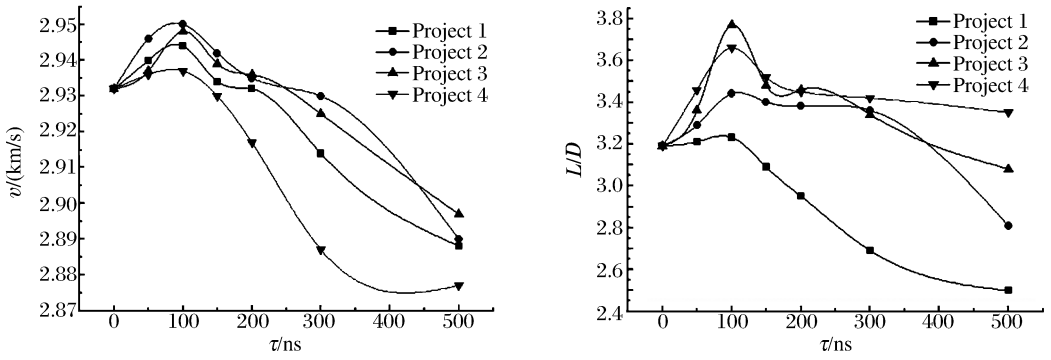


图 6  $t=102 \mu s$  时的聚能侵彻体成型参数

Fig. 6 The formation parameters of penetrator at  $102 \mu s$

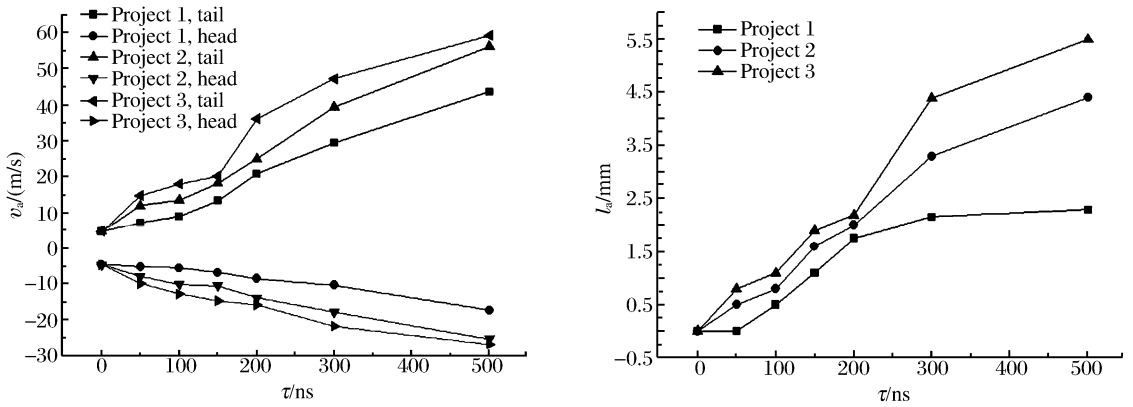


图 7  $t=102 \mu s$  时单侧起爆偏差的聚能侵彻体横向速度和位移

Fig. 7 The across velocities and displacements of penetrator of side initiation windage at  $102 \mu s$

由于侵彻体横向速度和位移随着飞行时间不同是变化的,以方案 2 为例分析各延迟时间下侵彻体横向速度和位移随飞行时间的变化规律,如图 8 所示。发现横向速度随着时间的增大逐渐变小,而头尾相对横向位移随着时间的增大逐渐增大,到了某一时间点基本上趋向平缓变化。

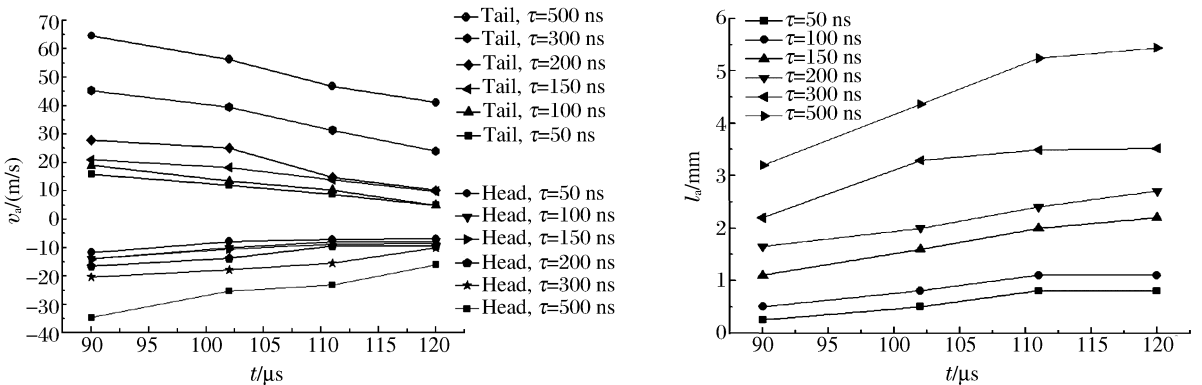


图 8 方案 2 聚能侵彻体横向速度和位移

Fig. 8 The across velocities and displacements of penetrator of project 2

### 3.2 实验验证

采用与数值模拟同样的成型装药结构,图 1(a)中起爆点 1~6 延迟起爆时间分别为 500、300、200、

0、200 和 300 ns。采用 HP 公司产的 2 台 450 kV 脉冲 X 光机组合进行拍摄, 以获得侵彻体的长度、直径、头部速度和尾部速度等参数。

6 点环形起爆网络如图 9 所示, 通过控制输入端到扩爆头之间的导爆索距离设定延迟时间。测定导爆索爆速为 6 896.5 m/s, 导爆索基准长度为 10 mm, 则起爆点 1~6 导爆索长度分别为 13.45、12.07、11.38、10.00、11.38 和 12.07 mm。每一根导爆索的长度由精度为 0.01 mm 的游标卡尺保证。6 点环形起爆网络在成型装药结构上的布置如图 10 所示。

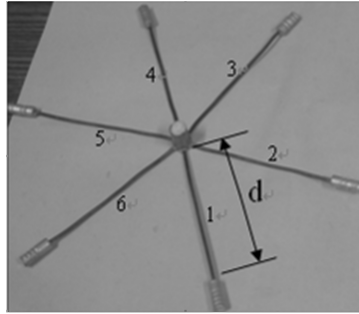


图 9 6 点起爆网络

Fig. 9 Six points initiation circuit

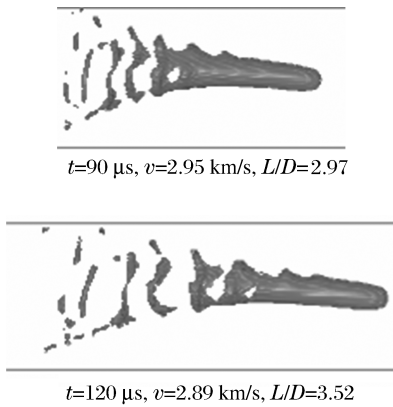


图 10 实验装置

Fig. 10 Experiment setup

从所形成的侵彻体的外部形状及侵彻体弯曲变形和侵彻体参数的比较<sup>[9]</sup>(见图 11)来看, 数值模拟结果与实验结果较吻合。由于底片问题, X 光照片在 90  $\mu\text{s}$  时未能得到侵彻体尾翼部分, 但是长径比是取未断裂部分侵彻体长度与最大直径之比, 所以不受影响。其中  $\bar{v}$  为 90~120  $\mu\text{s}$  之间的平均速度。

(a) Numerical



(b) X-ray

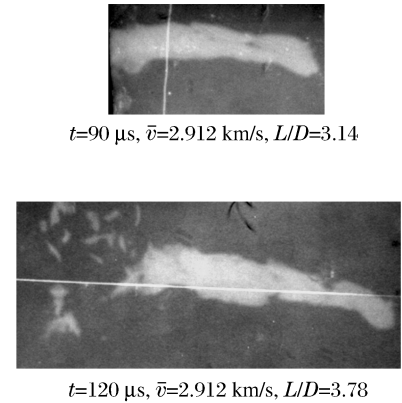


图 11 模拟和实验结果的比较

Fig. 11 Comparison between experimental and numerical results

## 4 结论

(1) 6 点环形起爆网络起爆同步性偏差使得侵彻体横向速度梯度递增, 而横向速度梯度的存在引起了侵彻体的横向位移, 在 60 mm 口径装药情况下, 100 ns 时尾部相对于头部的横向偏移量在 1 mm 以内, 200 ns 时相对横向位移增加到 2 mm 左右, 到 300 ns 时相对横向位移最大达到 4.4 mm, 将使侵彻体发生明显弯曲变形。从侵彻体形态来分析, 在 200 ns 以内对侵彻体尾翼有影响, 从 200 ns 到 300 ns 侵彻体开始发生弯曲变形, 到 500 ns 时侵彻体已经发生严重的弯曲, 将严重影响侵彻体的飞行稳定性和侵彻能力。

(2) 针对 60 mm 口径的成型装药结构, 最好能保证 6 点环形起爆网络的起爆偏差, 即各起爆点的延迟时间在 200 ns 内, 此时所形成的侵彻体不发生弯曲变形, 侵彻体速度、长径比等参数基本保持不变。

(3) 对于单侧起爆偏差, 随着延迟点数的增加, 聚能侵彻体的尾翼破坏越来越严重, 弯曲变形越来越明显; 侵彻体的头部速度和长径比都随着延迟时间的增加先稍微增大, 后又逐渐减小。而对称起爆偏差对形成的侵彻体形态和侵彻体参数影响比单侧起爆偏差小。因此, 在实验中如果有些误差避免不了, 则尽量使这些误差分布在 2 个对称位置上。



## 参考文献:

- [1] 温玉全,焦清介,李国新,等.刚性面同步起爆网络设计及同步时间分析[J].兵工学报,2001,22(1):45-47.  
WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie, LI Guo-xin, et al. Structural design and time analysis of synchronous explosive circuit in a rigid surface[J]. Acta Armamentarii, 2001,22(1):45-47.
- [2] 胡双启,邵玲,曹雄.环形传爆药多点同步起爆网络的应用研究[J].火炸药学报,2004,27(3):62-65.  
HU Shuang-qi, TAI Ling, CAO Xiong. Application of multi-point synchronous explosive logic circuit of the ring propagating charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004,27(3):62-65.
- [3] 许碧英,李公法,高桂萍.平面多点同时起爆网络的设计[J].火工品,2004,(3):1-4.  
XU Bi-ying, LI Gong-fa, GAO Gui-ping. Design of multi-point simultaneous initiating circuit on a plane[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2004,(3):1-4.
- [4] 罗健,蒋建伟,朱宝祥.多点起爆对 EFP 形成的影响研究[J].弹箭与制导学报,2004,24(2):27-29.  
LUO Jian, JIANG Jian-wei, ZHU Bao-xiang. The effect of multi-point initiation on the explosively formed penetrator formation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004,24(2):27-29.
- [5] Bouet H, Tarayre P, Guillon J P. Study of a multi-point ignition EFP[C]//15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel, 1995:159-166.
- [6] BAI Ying-wei, YANG Zhen-ying, CHU En-yi, et al. Study of an annular multipoint simultaneous initiation system [C]//26th International Pyrotechnics Seminar. Nanjing, China, 1999:23-28.
- [7] 何涛,杨竞,金鑫,等. ANSYS 10.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [8] 吴义锋.点环起爆多模成型装药机理研究[D].南京:南京理工大学,2007:42-45.
- [9] LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator[J]. International Journal Impact Engineering, 2010,37(4):414-424.

## Effects of annulus multi-point initiation precision on formation of jetting projectile charge<sup>\*</sup>

LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, ZHENG Yu

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aim at the problem of annulus multi-point initiation circuits applied in multimode shaped charges, the LS-DYNA code was used to explore the initiation synchronization precision of six points initiation circuit how to affect the parameters for the penetrators formation, such as velocity and length-diameter ratio, by changing the delay points and time. The change law of across velocity grads was obtained, which was the main reason that caused the penetrator bend. When the delay time is within 200 ns, the penetrator cannot bend and its formation parameters are not changed. Experimental results show the experimental data are in agreement with the simulations.

**Key words:** mechanics of explosion; multi-point initiation circuit; initiation precision; jetting projectile charge

<sup>\*</sup> Received 13 October 2008; Revised 18 July 2009

Corresponding author: LI Wei-bing, njustlwb@163.com