

文章编号:1006-9941(2021)02-0114-10

## 射流冲击盖板覆盖下有限厚炸药的仿真和试验研究

陈思敏<sup>1</sup>,黄正祥<sup>1</sup>,贾鑫<sup>1</sup>,夏明<sup>2</sup>,汪剑辉<sup>2</sup>,肖强强<sup>1</sup>,唐德荣<sup>1</sup>

(1.南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094; 2.军事科学院国防工程研究所,河南洛阳 471023)

**摘要:** 为了研究有限厚炸药在射流冲击下的起爆过程,并得到有限厚炸药的临界起爆阈值。试验采用 $\Phi 40$  mm聚能装药作为射流源,通过高速录像进行拍摄,对不同厚度的50SiMnVB盖板覆盖下的43 mm厚TNT炸药进行了射流冲击起爆试验,得到炸药的临界起爆阈值和不同刺激强度下的响应情况以及反应产物的膨胀速度。采用数值仿真软件进行了有限厚炸药在射流冲击下的数值模拟计算,得到了射流冲击下炸药内弯曲冲击波发展过程以及有限厚炸药的临界起爆阈值和炸药厚度关系,并通过试验结果进行了验证。最后建立了有限厚炸药临界起爆阈值和临界盖板厚度的计算模型。结果表明:厚度43 mm的TNT临界起爆阈值为 $37 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ ,并且在不同响应之间反应产物的膨胀速度相差至少一个数量级。射流冲击有限厚炸药时,弯曲波发展为爆轰波需要一定距离,剩余射流头部速度越高,弯曲波发展为爆轰波所需的距离越短。炸药厚度的减少将导致有限厚炸药的临界起爆阈值和临界盖板厚度的增加,并且有限厚炸药的临界起爆阈值的对数与炸药厚度的对数近似呈线性关系。

**关键词:** 射流冲击;有限厚炸药;弯曲冲击波;临界起爆阈值

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020260

### 1 引言

野战弹药库是战时储存武器装备的基地,可以快速、不间断地提供弹药保障,是部队战斗力生成的基础,这决定了野战弹药库的突出地位和重要作用,同时也导致了它在战争中必然是敌方重点攻击目标<sup>[1-2]</sup>。聚能战斗部所形成的聚能射流由于具有能量密度高、穿透能力强、局部毁伤大的特点被广泛应用于各种弹药中。采用聚能战斗部的来袭弹药,可瞬间穿透弹药库中弹药的防护层及壳体,继而引爆内部炸药,并且随着精确制导等技术的发展,使得野战弹药战场生存环境更加恶劣,生存能力受到严峻挑战<sup>[3-5]</sup>。因此研究聚能射流对炸药的冲击起爆尤其是有限厚炸药的起爆问题具有重要的军事意义。

关于射流冲击起爆已有众多学者进行了大量研

究。M.Held等<sup>[6-7]</sup>在射流冲击起爆试验的基础上提出了炸药临界起爆准则,该准则已被广泛应用,随后Held又针对不同盖板材料,不同气隙位置进行了炸药冲击起爆研究,分析了不同条件下炸药的起爆过程以及爆轰波的发展和传播过程<sup>[8-10]</sup>。C.L. Mader等<sup>[11]</sup>采用Forest Fire爆轰模型,对铜、铝、水射流冲击PBX 9502和PBX9504高能炸药进行数值仿真,认为只有当冲击波强度足够高且持续时间足够长时才会形成爆轰波。F.Peugeot<sup>[12]</sup>将射流近似为圆头杆,在临界能量准则的基础上建立射流冲击裸炸药的理论和临界起爆准则,该准则适用于中低速和较大直径的情况。W. Arnold<sup>[13]</sup>通过仿真和试验研究了射流冲击不同条件下炸药的起爆机制。宋乙丹等<sup>[14]</sup>采用 $\Phi 80$  mm聚能装药对两种不同的PBX炸药进行了冲击起爆试验,得到临界盖板厚度以及临界起爆阈值。王利侠等<sup>[15]</sup>采用高速射流和杆状射流对带壳PBX炸药进行了冲击起爆试验,得到了临界起爆阈值并认为高速射流起爆能力大于低速的杆状射流。刘华宁等<sup>[16]</sup>利用理论计算与数值仿真的方法,实现了射流冲击起爆带壳炸药的研究,获得了不同盖板覆盖下炸药的起爆规律。现有的研究大多都是以炸药半无限厚为前提,缺乏针

收稿日期:2020-09-22;修回日期:2020-10-29

网络出版日期:2020-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助(11702144)

作者简介:陈思敏(1993-),男,博士研究生,主要从事高效毁伤和防护技术研究。e-mail:chensimin@njjust.edu.cn

通信联系人:黄正祥(1967-),男,教授,主要从事高效毁伤和防护技术研究。e-mail:huangyu@mail.njust.edu.cn.

引用本文:陈思敏,黄正祥,贾鑫,等.射流冲击盖板覆盖下有限厚炸药的仿真和试验研究[J].含能材料,2021,29(2):114-123.

CHEN Si-min, HUANG Zheng-xiang, JIA Xin, et al. Simulation and Experimental Study of Jet Impact on Covered Finite-thickness Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(2):114-123.

对有限厚炸药的冲击起爆研究以及炸药厚度对临界起爆阈值的影响规律。

目前陆军弹药中TNT炸药仍占多数,因此本试验中炸药采用TNT炸药,由高速录像对炸药起爆过程进行记录,通过调节盖板厚度得到炸药在射流冲击下的不同响应以及炸药的临界起爆阈值。由于通过试验难以得到炸药内部的反应情况,因此采用仿真对射流冲击起爆有限厚炸药的过程进行了计算,分析了有限厚炸药的起爆过程和起爆阈值随炸药厚度的变化关系,并提出了有限厚炸药临界起爆阈值和临界盖板厚度的计算方法,为射流冲击起爆带壳装药提供一定依据和参考。

## 2 试验

### 2.1 试验设置

试验中用于形成射流的聚能装药外径为40 mm,装药直径为34 mm,聚能装药主装药为JH-2,密度 $1.71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,药型罩锥角为 $60^\circ$ ,壁厚为0.9 mm,试验中聚能装药的炸高为25 mm。由前期试验得到该聚能装药所形成的射流头部速度为 $5887 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,射流直径约为2 mm。

被发炸药为压装TNT,密度 $1.54 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,直径为100 mm,厚度为43 mm。用于调节射流头部速度的盖板与TNT炸药端面接触,盖板材料为50SiMnVB,直径为130 mm,试验中盖板厚度分别为30,20,17.4 mm和15 mm,通过调节盖板和重复试验寻找炸药爆轰的临界盖板厚度。为减小炸药受到来自底部反射波的影响,炸药放置在木质试验台上,现场试验布置如图1所示。炸药受射流冲击的反应过程通过高速录像进行记录,为了拍摄不同响应下的反应现象以及反应产物的膨胀速度,高速录像拍摄帧数选为100000/s。

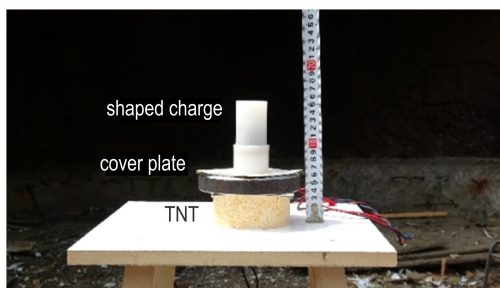


图1 射流冲击起爆试验布置

Fig.1 Arrangement of jet impact initiation test

### 2.2 试验结果

通过高速录像拍摄结果、反应产物膨胀速度、木制试验台以及试验现场并参考美军标 MIL-STD-2105D<sup>[17]</sup>,

将炸药的响应等级从高到低分为:爆轰、爆燃、燃烧和未反应。图2为30 mm厚度盖板试验照片,高速录像中未记录到明显的炸药反应现象,现场有大量粉末残留,通过高速录像得到炸药粉末的飞散速度为 $36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

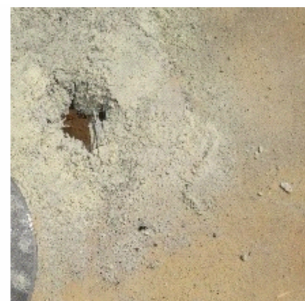


图2 盖板厚度为30 mm试验结果

Fig.2 Test results of 30 mm cover plate

20 mm 盖板下TNT炸药在不同时刻的高速录像如图3所示。由图3可见,此时TNT炸药受射流冲击后产生大量黑烟并向四周扩散,伴随着较小的火焰,但火焰不会进一步增长,经过一段时间后逐渐减小直至熄灭,此时炸药的响应等级为燃烧。通过高速录像计算得到反应产物直径为1 m时,反应产物的膨胀速度为 $76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

17.4 mm 盖板下TNT炸药在不同时刻的高速录像如图4所示。由图4可见,TNT受射流冲击后产生

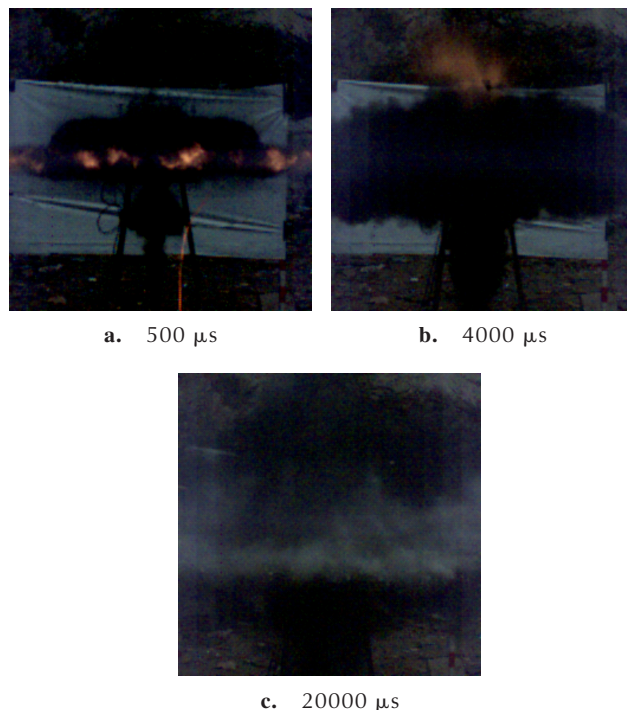


图3 盖板20 mm时炸药的燃烧过程

Fig.3 Burn process of of explosive with 20 mm cover plate

大量黑烟,在2.5 ms左右火焰开始快速增长,火焰范围不断扩大,在短暂的稳定后爆炸火球开始变暗、收缩直至熄灭,此时炸药的反应等级为燃爆。通过高速录像计算得到反应产物直径为1 m时,反应产物的膨胀速度为 $610 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

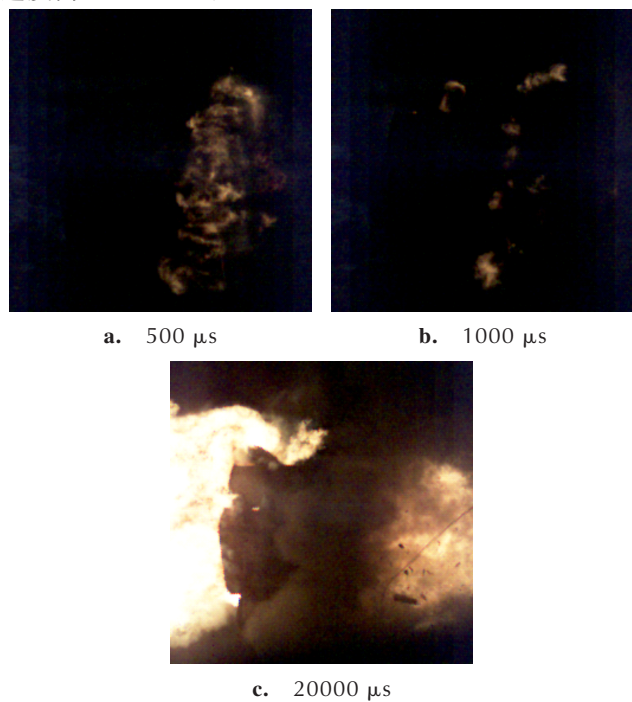


图4 盖板17.4 mm时炸药的爆燃过程

**Fig.4** Deflagration process of explosive with 17.4 mm cover plate

15 mm 盖板下 TNT 炸药在不同时刻的高速录像如图5所示。由图5可见,40  $\mu\text{s}$ 时 TNT 火光亮度明显增强,此时 TNT 发生剧烈反应,从高速录像中可明显地观察到空气中的冲击波,此时炸药的反应等级为爆轰。通过高速录像计算得到反应产物直径为1 m时的膨胀速度为 $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

不同盖板厚度下,穿透盖板后的剩余射流头部速度以及炸药的反应情况如表1所示。射流穿透盖板后的剩余头部速度通过虚拟源点理论计算<sup>[18]</sup>,虚拟源点高度为43 mm。

试验中得到的射流冲击下 TNT 炸药不同响应对应的刺激强度  $v^2d$  和反应产物或炸药粉末的膨胀速度如图6所示。从图6中可以看出,随着刺激强度的下降,炸药反应的剧烈程度减小,反应产物的膨胀速度也不断减小。刺激强度较小的变化会导致产物膨胀速度明显的不同,但当响应程度降至燃烧时,随着刺激强度的减小,产物膨胀速度几乎不再变化,在燃烧情况下反应产物的膨胀速度和未反应情况下的十分接近,这是因

为燃烧时炸药内只有极小的压力产生<sup>[19]</sup>,反应产物和炸药粉末的飞散主要是依靠射流侵入时传递的动能。

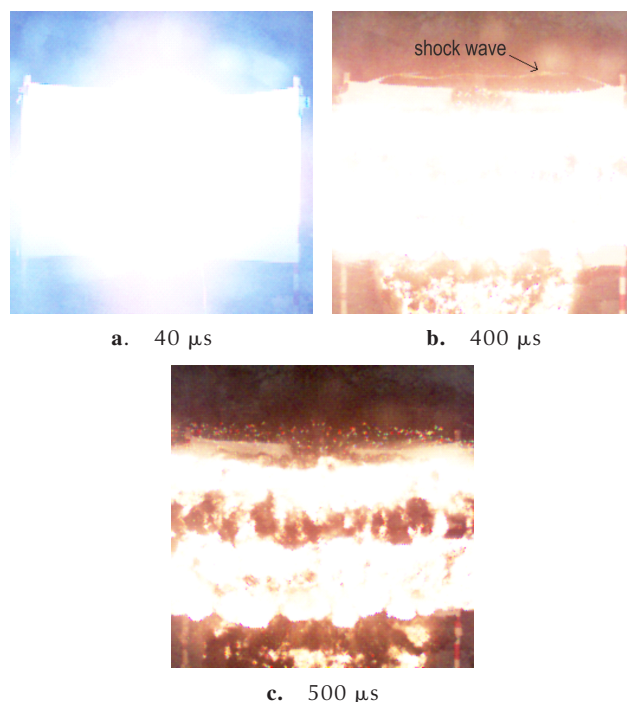


图5 盖板15 mm时炸药的爆轰过程

**Fig.5** Detonation process of explosives with 15 mm cover plate

表1 不同盖板厚度下的射流剩余头部速度和响应情况

**Table 1** Tip velocity of residual jet and explosive response under different cover plate thickness

$\delta / \text{mm}$	$v_j / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	response
30	3350	no reaction
20	3940	burn
17.4	4140	deflagration
15	4320	detonation

Note:  $\delta$  is thickness of cover plate,  $v_j$  is tip velocity of residual jet.

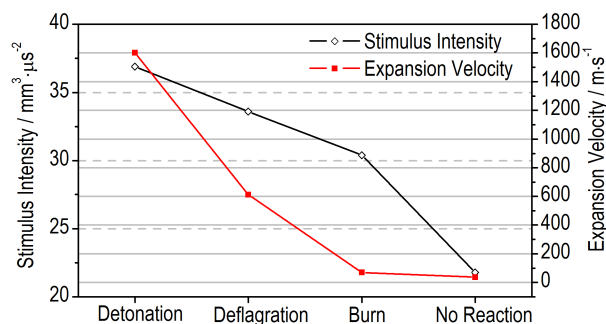


图6 试验中不同响应对应的刺激强度和反应产物或炸药粉末膨胀速度

**Fig.6** The stimulus intensity and the expansion velocity of reaction products corresponding to different responses in the test

### 3 数值计算

#### 3.1 模型建立和材料参数

采用AUTODYN有限元程序建立模型,忽略雷管的能量,采用轴对称模型,单位为 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 。聚能装药的结构和布置与试验中一致,主装药中心点起爆,仿真建模如图7所示。

仿真中炸药、空气、药型罩和外壳采用欧拉算法,盖板采用拉格朗日算法,利用流固耦合算法进行数值模拟。药型罩材料为紫铜,聚能装药中的炸药为JH-2炸药,外壳为尼龙,盖板材料为50SiMnVB,被发炸药为TNT。药型罩和盖板材料模型采用JOHNSON-COOK模型和EOS-GRUNEISEN状态方程进行

描述,如表2所示<sup>[20-21]</sup>。JH-2炸药为采用高能炸药爆轰模型和JWL状态方程描述,如表3所示<sup>[22]</sup>。

TNT采用三项式点火增长模型LEE-TARVER和JWL状态方程描述<sup>[23-24]</sup>,如表4所示。

空气和尼龙的参数来自AUTODYN软件中材料库内置参数。

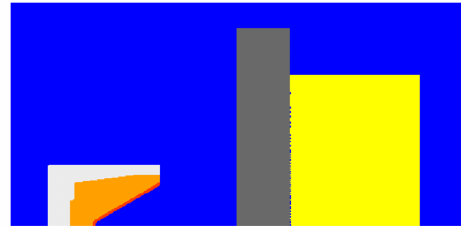


图7 射流冲击起爆仿真计算模型

Fig.7 Simulation calculation model of jet impact initiation

表2 药型罩和盖板材料参数

Table 2 Material parameters of liner and cover plate

material	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$E / \text{GPa}$	$\nu$	$A / \text{MPa}$	$B / \text{MPa}$	$n$	$C$	$m$	$T_M / \text{K}$	$T_r / \text{K}$
copper	8.93	138	0.35	120	200	0.15	0.04	0.55	1360	293
50SiMnVB	7.86	209	0.22	1047	262	0.028	0.018	0.63	1450	294

Note:  $\rho$  is density,  $E$  is elastic modulus,  $\nu$  is Poisson's ratio,  $A$  is yield stress,  $B$  is hardening constant,  $n$  is hardening exponent,  $C$  is strain rate constant,  $m$  is thermal softening exponent,  $T_M$  is melting temperature,  $T_r$  is room temperature.

表3 JH-2炸药的C-J参数及JWL状态方程参数

Table 3 C-J parameters and JWL equation of state parameters of JH-2 explosive

$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$D / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$p_{CJ} / \text{GPa}$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.71	8325	30.4	524.23	7.68	4.20	1.1	0.34

Note:  $\rho$  is density,  $D$  is detonation wave velocity,  $p_{CJ}$  is detonation pressure,  $A, B, R_1, R_2$  and  $\omega$  are parameters in JWL equation.

表4 TNT炸药参数

Table 4 parameters of TNT

$l$	$b$	$x$	$a$	$G_1$	$c$
50	0.667	4	0	360	1.0
$d$	$y$	$G_2$	$e$	$g$	$z$
0.667	1.2	100	1.0	0.111	1.0
unreacted JWL	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
	17101	-3.745	9.8	0.98	0.5675
product JWL	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
	3394.889	63.7085	8.3	2.8	0.6

Note:  $l, b, x, a, G_1, c, d, y, G_2, e, g$  and  $z$  are parameters in Lee-Tarver model,  $A, B, R_1, R_2$  and  $\omega$  are parameters in JWL equation.

#### 3.2 数值仿真结果

仿真中得到的射流头部速度为 $5795 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,尾部速度为 $1497 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,如图8所示。

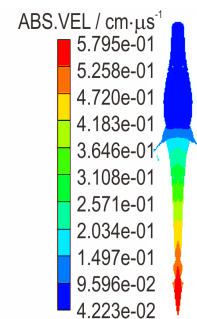


图8 仿真得到的射流速度分布

Fig.8 Distribution of jet velocity

图9~图11为TNT炸药厚度43 mm,盖板厚度为15,17.4 mm和20 mm时在不同时刻炸药内部压力云图。从图9a可以看到,在 $28 \mu\text{s}$ ,弯曲冲击波到达炸药底面,此时波阵面上压力为12.8 GPa,低于TNT的CJ压力。当弯曲冲击波到达炸药底面时,由于稀疏波的作用,弯曲冲击波衰减,同时向径向传播,如图9b所示。随后又从炸药底面向炸药内部回传,逐渐发展并在 $32.5 \mu\text{s}$ 时达到19 GPa,最终转变为爆轰波,见图9c。

从图10可以看到,盖板为17.4 mm时,在 $29.5 \mu\text{s}$ 到达底面的弯曲冲击波压力为8.5 GPa,与15 mm盖

板的情况类似, 弯曲冲击波在底面开始向回传播, 但由于此时压力较低并且由于波后和边界上稀疏波的作用, 导致压力无法进一步增长, 最终未形成爆轰波。

如图 11 所示, 在盖板厚度为 20 mm 时, 弯曲冲击

波在 31  $\mu\text{s}$  到达背面, 此时弯曲冲击波上的压力为 3.9 GPa。随后由于稀疏波的作用, 弯曲冲击波上的压力持续衰减直至消失。因此仿真得到 TNT 炸药厚度为 43 mm 时, 临界起爆的盖板厚度为 15 mm。

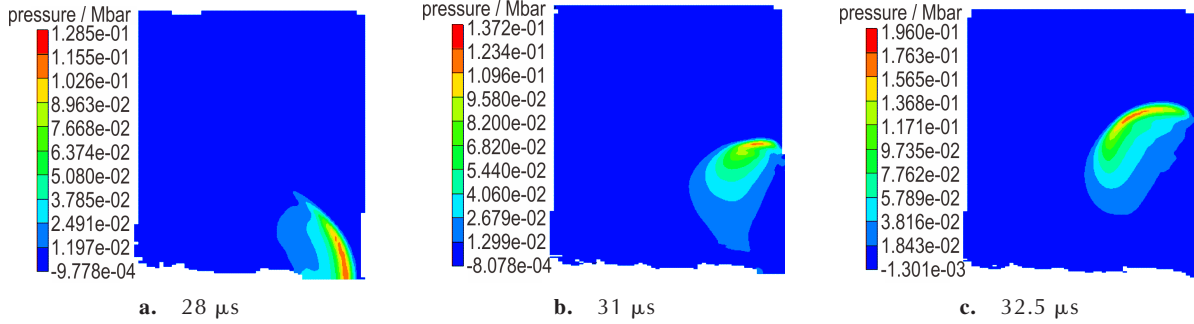


图 9 15 mm 厚盖板时不同时刻炸药内压力云图

Fig.9 Pressure distribution in explosive at different times with 15 mm thick cover plate

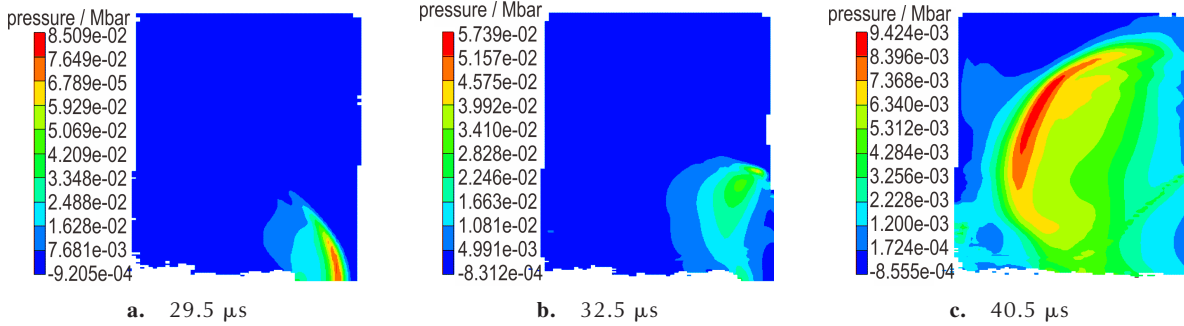


图 10 17.4 mm 厚盖板时不同时刻炸药内压力云图

Fig.10 Pressure distribution in explosive at different times with 17.4 mm thick cover plate

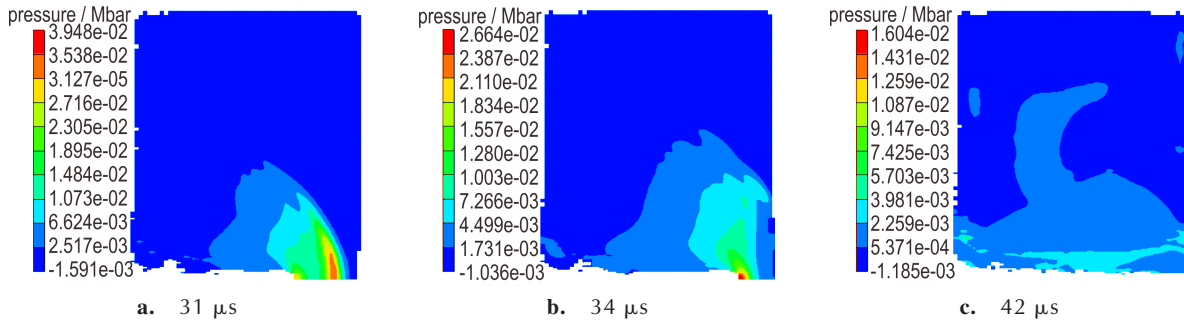


图 11 20 mm 厚盖板时不同时刻炸药内压力云图

Fig.11 Pressure distribution in explosive at different times with 20 mm thick cover plate

从仿真结果可以看出有限厚炸药在临界盖板厚度条件下, 弯曲冲击波并未在轴线位置处发展为爆轰波, 而是先在炸药底面附近发生衰减, 同时向径向传播, 随后弯曲冲击波从炸药底面开始向炸药内部传播, 最终逐渐发展为爆轰波。随着盖板厚度的增加, 射流前方的弯曲冲击波达到炸药背面时的压力不断下降, 最终会出现弯曲冲击波从炸药底面回传时, 由于稀疏波的

作用, 波阵面上的压力未继续增长不能发展为爆轰波的情况。

### 3.3 仿真试验结果的对比和讨论

仿真得到的射流头部速度为  $5795 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 试验得到的射流头部速度为  $5887 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相差 1.6%。仿真得到的临界盖板厚度为 15 mm, 与试验结果一致。

考虑盖板强度, 根据虚拟源点理论盖板厚度与射

流的剩余射流头部速度关系为:<sup>[25]</sup>

$$\delta = v_j t_0 \frac{T_0}{T} \left[ \frac{T_0 + \sqrt{T_0^2 - (1 - \gamma^2)^2 v_{jc}^2}}{T + \sqrt{T^2 - (1 - \gamma^2)^2 v_{jc}^2}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} - Z_0 \quad (1)$$

式中,  $v_{jc} = \sqrt{2R_t/\rho_j}$ ,  $T = -\gamma v_j + \sqrt{\gamma^2 v_j^2 + (1 - \gamma^2) v_{jc}^2}$ ,  $T_0 = -\gamma v_{j0} + \sqrt{\gamma^2 v_{j0}^2 + (1 - \gamma^2) v_{jc}^2}$  和  $\gamma = \sqrt{\rho_t/\rho_j}$ , 其中  $v_{j0}$  为初始射流头部速度,  $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ;  $v_j$  为剩余射流头部速度,  $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ;  $Z_0$  为虚拟源点高度,  $\text{mm}$ ;  $t_0$  为射流头部从虚拟源点到靶板所需时间,  $\mu\text{s}$ 。仿真计算得到的射流穿透不同盖板后的剩余头部速度如图 12 所示。表 5 为式 (1) 理论计算结果和仿真结果对比, 其中理论

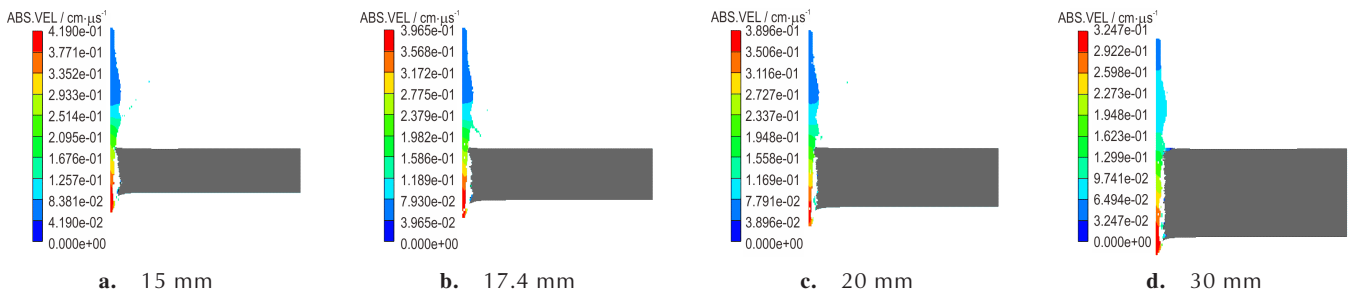


图 12 射流穿透不同盖板后的仿真结果

Fig.12 Simulation results of jet penetrating different cover plates

仿真和试验得到反应产物膨胀到直径 1 m 时的膨胀速度对比如表 6 所示, 仿真中产物膨胀速度取炸药所在高度范围内的径向平均速度, 相应的反应产物速度云图如图 13 所示, 图 13a、图 13b 和图 13c 分别为仿真得到炸药爆轰、爆燃和燃烧。结果表明, 不同响应下反应产物在直径 1 m 时的膨胀速度相差一个数量级, 因此可以通过反应产物的膨胀速度判断炸药的响应等级。仿真结果和试验结果基本一致。

由仿真得到的不同盖板厚度下弯曲冲击波波速和侵彻速度随位置的变化曲线如图 14 所示。由图 14 可以看出, 射流开始侵彻炸药的一段距离内, 弯曲冲击波和侵彻界面以相同的速度运动, 随后弯曲冲击波波速超过射流侵彻速度。随着盖板厚度的增加, 弯曲冲击波和侵彻界面以相同速度运动的距离逐渐增加。分析认为, 射流开始侵彻炸药的一段距离内, 炸药反应产生的能量还不足以维持弯曲冲击波的传播, 因此弯曲冲击波和侵彻界面以相同的速度运动。随着侵彻的进行, 炸药的反应导致波阵面上的压力和波速不断增加, 从而又加快了炸药的反应速率, 最终弯曲冲击波波速超过射流的侵彻速

计算中的射流头部速度采用试验得到的结果, 虚拟源点高度为 43 mm。

表 5 剩余射流头部速度的理论计算结果和仿真结果对比

Table 5 Comparison of tip velocity of residual jet between theory and simulation

$\delta / \text{mm}$	theory	simulation	error/%
	$v_j / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_j / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
0	5887	5795	1.6
15	4320	4190	3
17.4	4140	3965	4.2
20	3940	3896	1.1
30	3350	3247	3.1

Note:  $\delta$  is thickness of cover plate,  $v_j$  is tip velocity of residual jet.

度。15 mm, 17.4 mm 和 20 mm 盖板下都有类似的现象, 但由于受到炸药厚度的限制, 只有 15 mm 的情况炸药中才转变为爆轰波。

表 6 反应产物膨胀直径 1 m 时膨胀速度的仿真和试验结果对比

Fig.6 Comparison of simulation and experimental results on the expansion velocity of reaction products at 1 m

$\delta / \text{mm}$	response	test	simulation	error/%
		$v_e / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_e / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
15	detonation	1600	1552	3
17.4	deflagration	610	567	7
20	burn	76	84	10.5

Note:  $\delta$  is thickness of cover plate,  $v_e$  is expansion velocity of product.

Chick<sup>[26]</sup>采用直径 38 mm 的聚能装药形成射流冲击起爆密度  $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的 TNT, 试验中炸高为 2 倍装药口径, TNT 炸药与盖板接触, 试验得到临界射流头部速度为  $4100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Chick 所采用的聚能装药所形成的射流在 2~4 倍装药口径下直径为 1.5 mm, 可以计算得到 TNT 的临界起爆阈值为  $25 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ 。与 Chick 得到临界起爆阈值相比, 本试验中得到的临界起爆阈值为  $37 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ , 较 Chick 的阈值高了 48%,

而Chick试验中采用的被发炸药厚度为100 mm, 而本试验中被发炸药厚度为43 mm, 因此造成起爆阈值差异较大的原因主要是由于在有限厚TNT炸药中, 射流

侵入产生的弯曲冲击波发展为爆轰波所需的起爆深度受到限制, 导致了起爆阈值的增加, 这与仿真中得到的分析结果相同。

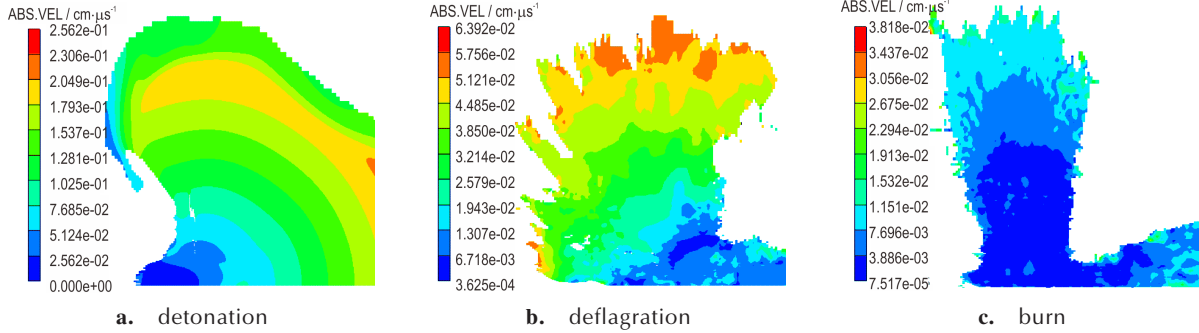


图13 仿真计算的反应产物的膨胀速度云图  
Fig.13 Expansion velocity distribution of reaction products by simulation

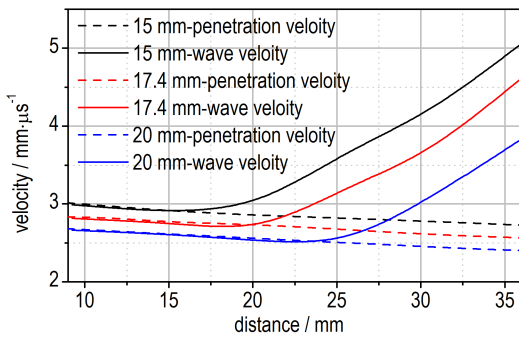


图14 仿真得到的弯曲冲击波波速和侵入速度随位置的变化曲线  
Fig.14 Curves of velocity of bow shock and penetration velocity with position by simulation

3.4 有限厚炸药的起爆阈值规律分析

为了分析炸药厚度对有限厚炸药起爆阈值的影响规律, 对不同厚度TNT炸药进行仿真计算, 仿真计算结果见表7。从仿真结果可以看出, 随着炸药厚度的减小, 射流冲击引爆炸药的临界阈值在增加。

表7 不同厚度TNT的起爆阈值仿真结果

Table7 Simulation results of TNT initiation threshold with different thickness

L / mm	δ / mm	v <sub>cr</sub> / mm·μs <sup>-1</sup>	K / mm <sup>3</sup> ·μs <sup>-2</sup>
29	10	4.7	44.2
35	12.5	4.5	40.5
39	15	4.4	38.7
46	17.4	4.2	35.3
54	20	4.0	32
58	21	3.9	30.4

Note: L is thickness of explosive, δ is thickness of cover plate, v<sub>cr</sub> is expansion velocity of product, K is initiation threshold.

射流穿透盖板后在炸药中以定常状态持续侵入, 并且侵入过程中侵入速度变化很小, 参照炸药的Pop曲线<sup>[27-28]</sup>, 假设射流开始侵入炸药的初始压力的对数与起爆深度的对数近似呈线性关系:

$$\lg X = a + b \lg p \tag{2}$$

式中, X为起爆深度, p为初始压力。忽略射流和炸药强度, 根据Bernoulli方程<sup>[29]</sup>, 可以得到在射流侵入界面上的压力:

$$p = \frac{1}{2} \rho_j (v_j - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_e u^2 \tag{3}$$

式中, ρ<sub>j</sub>和ρ<sub>e</sub>分别为射流密度和炸药密度, v<sub>j</sub>和u分别为射流头部速度和侵入速度。根据炸药的临界起爆阈值K=v<sub>j</sub><sup>2</sup>d, 有限厚炸药起爆深度近似为炸药厚度L, 可以得到有限厚炸药厚度L和临界起爆阈值K关系为:

$$\lg L = a_1 + b \lg \frac{\rho_j \rho_e K}{d(\sqrt{\rho_j} + \sqrt{\rho_e})^2} \tag{4}$$

式中, a<sub>1</sub>为常数且 a<sub>1</sub>=a+b lg 1/2。

由式(4)可以得到临界剩余射流头部速度与炸药厚度的关系为:

$$v_{cr} = \left( \frac{1}{\sqrt{\rho_e}} + \frac{1}{\sqrt{\rho_j}} \right) \left( \frac{L}{e^{a_1}} \right)^{\frac{1}{2b}} \tag{5}$$

将式(4)代入式(1)中可以得到临界盖板厚度和炸药厚度之间的关系为:

$$\delta_{cr} = \left( \frac{1}{\sqrt{\rho_e}} + \frac{1}{\sqrt{\rho_j}} \right) \left( \frac{L}{e^{a_1}} \right)^{\frac{1}{2b}} t_0 \frac{T_0}{T_{cr}} \left[ \frac{T_0 + \sqrt{T_0^2 - (1-\gamma^2)^2 v_{jc}^2}}{T_{cr} + \sqrt{T_{cr}^2 - (1-\gamma^2)^2 v_{jc}^2}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} - Z_0 \tag{6}$$

式中,  $T_{cr} = -\gamma v_{cr} + \sqrt{\gamma^2 v_{cr}^2 + (1 - \gamma^2) v_{jc}^2}$

有限厚炸药临界起爆阈值随厚度的拟合曲线如图 15 所示, 拟合得到的  $a_1=3.74$ ,  $b=-1.85$ 。由图 15 可以看出, 由式(4)得到的拟合曲线与仿真和试验的结果吻合很好, 这表明炸药厚度  $L$  的对数和临界起爆阈值  $K$  的对数近似呈线性关系, 并且随着炸药厚度的增加, 有限厚炸药的起爆阈值减小, 由于本试验中炸药厚度小于 Chick 试验中的炸药厚度, 因此本试验得到的 TNT 临界起爆阈值较 Chick 阈值高。理论计算得到炸药厚度 43 mm 和 100 mm 时, 临界起爆阈值分别为  $36 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$  和  $23 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ , 试验得到的临界起爆阈值为  $37 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$  和  $25 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ , 分别相差 3% 和 8%。

采用拟合得到的  $a_1$  和  $b$  值通过式(6)对不同炸药厚度下的临界盖板厚度进行计算, 得到临界盖板厚度随炸药厚度变化的理论计算结果和仿真试验结果, 如图 16 所示。结果表明, 随着炸药厚度的增大, 临界盖

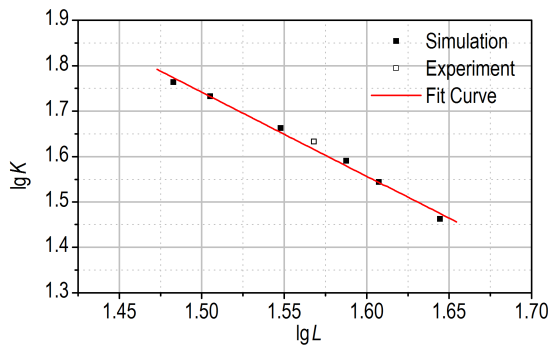


图 15 临界起爆阈值在不同炸药厚度下的拟合曲线和仿真试验结果

Fig.15 Fitting curve, simulation and experimental results of critical initiation threshold with different explosive thickness

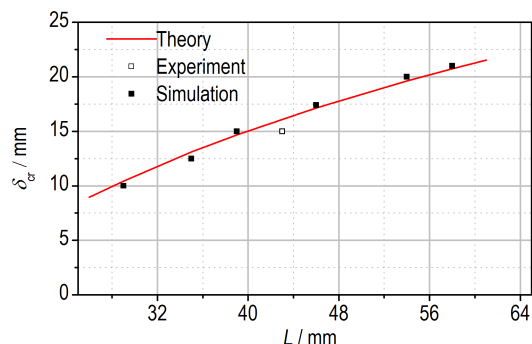


图 16 临界盖板厚度在不同炸药厚度下的理论计算和仿真试验结果

Fig.16 Theoretical calculation, simulation and experimental results of critical cover plate thickness with different explosive thickness

板厚度呈现增加的趋势。分析认为, 该现象主要因为炸药厚度增大, 将使炸药的临界起爆阈值减小, 因此使炸药起爆的最小剩余射流头部速度减小, 在相同的初始射流头部速度下, 射流引爆炸药的临界盖板厚度增加。

## 4 结论

(1) 采用  $\Phi 40$  mm 聚能装药形成的射流对不同厚度盖板覆盖下的 TNT 炸药进行了冲击试验, 得到 43 mm 厚度 TNT 的临界起爆阈值为  $37 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ , 以及不同响应下炸药反应过程以及相应响应下反应产物的膨胀速度。不同响应下反应产物的膨胀速度相差至少一个数量级, 可以根据反应产物的膨胀速度判断炸药的响应程度。

(2) 射流侵彻有限厚炸药时, 弯曲冲击波先与侵彻界面以相同速度运动, 经过一定距离后弯曲冲击波波速超过射流在炸药中的侵彻速度并稳定传播, 波阵面压力不断增加最终发展为爆轰波或者受到稀疏波作用发生衰减直至消失, 并且射流速度越高, 弯曲冲击波的压力增长越快。

(3) 对于有限厚炸药, 炸药厚度对炸药的临界起爆阈值具有较大的影响。有限厚炸药的临界起爆阈值和临界盖板厚度随炸药厚度的减小而增加, 并且炸药厚度的对数与炸药临界起爆阈值对数近似呈线性关系。

## 参考文献:

- [1] 汪金军, 易建政, 段志强, 等. 野战弹药库战场生存能力对策研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 96-98.  
WANG Jin-jun, YI Jian-zheng, DUAN Zhi-qiang, et al. Research on countermeasures of the field magazine battlefield viability[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(3): 96-98.
- [2] 张俊坤, 高欣宝, 熊冉, 邢娜. 射流对间隙靶板屏蔽炸药的冲击起爆[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 607-611.  
ZHANG Jun-kun, GAO Xin-bao, XIONG ran, et al. Jet impact initiation of the charge covered with spaced target[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2014, 22(5): 607-611.
- [3] Baker E L, Daniels A, DeFisher S, et al. Development of a small shaped charge insensitive munitions threat test[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 103: 27-34.
- [4] 王庆, 赵捍东, 赵鹏铎, 等. 聚能战斗部在防空反导中的毁伤效能研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5): 60-63, 72.  
WANG Qing, ZHAO Han-dong, ZHAO Peng-duo, et al. Study on damage effectiveness of shaped warhead in air defense and anti-missile [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, 37(5): 60-63, 72.



- [5] ZENG L, WANG W, ZHU J, et al. The numerical simulation on co-damage effectiveness of penetration and explosion made by BLU-113[C] //2010 Second International Conference on Computer Modeling and Simulation. IEEE, 2010, 2: 76-80.
- [6] Held M. Critical area for the initiation of high explosive charges [M]//Shock Waves in Condensed Matter 1983. Elsevier, 1984: 555-557.
- [7] Held M. Experiments of initiation of covered, but unconfined high explosive charges by means of shaped charge jets[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1987, 12(2): 35-40.
- [8] Held M. Shaped charge jet initiation on explosive charges equipped with barriers made up of various materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1994, 19(6): 290-294.
- [9] Held M. Shaped charge jet initiation tests with covered high explosive charges with air gaps [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2001, 26(1): 38-42.
- [10] Held M. Time distance diagram of the jet initiation of covered high explosive charges[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(4): 702-707.
- [11] Mader C L, Pimbley G H. Jet initiation and penetration of explosives[J]. *Journal of Energetic Materials*, 1983, 1(1): 3-44.
- [12] Peugeot F, Quidot M, Presles H N. An analytical extension of the critical energy criterion used to predict bare explosive response to jet attack[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1998, 23(3): 117-122.
- [13] Arnold W, Rottenkolber E. High explosive initiation behavior by shaped charge jet impacts[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 184-193.
- [14] 宋乙丹, 陈科全, 路中华, 等. 聚能射流冲击起爆屏蔽压装PBX炸药的试验研究[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(1): 69-72, 78. SONG Yi-dan, CHEN Ke-quan, LU Zhong-hua, et al. Experimental research of the impact initiation of shelled pressed PBX explosives by shaped charge jet [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2019, 42(01): 69-72+78.
- [15] 王利侠, 谷鸿平, 丁刚, 等. 聚能射流对带壳浇注PBX装药的撞击响应[J]. *含能材料*, 2015, 23(11): 1067-1072. WANG Li-xia, GU Hong-ping, DING Gang, et al. Reaction characteristics for shelled cast-cured PBX explosive impacted by shaped charge jet [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(11): 1067-1072.
- [16] 刘华宁, 郑宇, 程波. 射流引爆带不同壳体炸药的规律研究[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(2): 39-43, 47. LIU Hua-ning, ZHENG Yu, CHENG Bo, et al. Research on jet initiation different material shells covered explosive [J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(2): 39-43, 47.
- [17] Department of Defense. MIL-STD-2105D: Non-nuclear munitions risk assessment Test[S]. United States of America, 2011.
- [18] Elshenawy T, Elbeih A, Li Q M. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 136: 234-242.
- [19] 梁晓璐, 梁争峰, 程淑杰, 等. 不敏感弹药试验方法及评估标准研究进展[J]. *飞航导弹*, 2016(6): 84-87. LIANG Xiao-lu, LIANG Zheng-feng, CHENG Shu-jie, et al. Research progress on test method and evaluation standard of insensitive ammunition[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2016(6): 84-87.
- [20] Jia X, Huang Z X, Xu M W, et al. Study on interaction mechanism between the shaped charge jet and thick moving target [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(8): 1033-1048.
- [21] 朱建军, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 回火温度对50SiMnVB钢壳体形成破片性能的影响[J]. *兵工学报*, 2015, 36(11): 2080-2086. ZHU Jian-jun, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming. Effect of tempering temperature on the forming properties of fragments of 50SiMnVB steel shell [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(11): 2080-2086.
- [22] Liu J, Long Y, Ji C, et al. Influence of layer number and air gap on the ballistic performance of multi-layered targets subjected to high velocity impact by copper EFP [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112: 52-65.
- [23] White B W, Sullivan K T, Gash A E, et al. Modeling the detonation wave dynamics in reactive materials [R]. Lawrence Livermore National Lab. LLNL, Livermore, CA (United States), 2016.
- [24] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives [R]. Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), 1985.
- [25] Keefe M, Houlton J. Penetration by stretching projectiles [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1988, 36(5): 537-549.
- [26] Chick M C, Wolfson M G, Learmonth L A. A calibrated test for the assessment of the sensitivity of explosives to shaped charge jets [R]. Materials Research Labs Ascot Vale (Australia), 1986.
- [27] Sutherland G. Effect of test method on pop plot results[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2012, 1426(1): 295-298.
- [28] 胡栋, 冯民贤, 桂质葵. 炸药“Pop”关系和反应Hugoniot曲线的确定、对单一曲线增长讨论[J]. *爆炸与冲击*, 1986(2): 170-176. HU Dong, FENG Min-xian, GUI Zhi-zhen. Determination of the reactive hugoniot curve, "Pop" relation of an explosive and some discussions on the hypothesis of single curve build up [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1986(2): 170-176.
- [29] Tate A. Further results in the theory of long rod penetration [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, 17(3): 141-150.

## Simulation and Experimental Study of Jet Impact on Covered Finite-thickness Explosive

CHEN Si-min<sup>1</sup>, HUANG Zheng-xiang<sup>1</sup>, JIA Xin<sup>1</sup>, XIA Ming<sup>2</sup>, WANG Jian-hui<sup>2</sup>, XIAO Qiang-qiang<sup>1</sup>, TANG De-rong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Research Institute for National Defense Engineering of Academy of Military Sciences, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** To study the initiation process under jet impact and obtain the critical initiation threshold of explosives with different thicknesses, experiments of jet formation with  $\Phi 40$  mm shaped charge were performed and captured by the high-speed video. The 43-mm thick TNT explosives were covered by 50SiMnVB cover plates with different thicknesses in experiments. The critical initiation threshold, the response under different stimulus intensities and the expansion velocity of reaction products were obtained. The numerical simulation of finite-thickness explosive under jet impact was carried out by using numerical simulation software. The propagation process of bow wave in explosive under jet impact and the relationship between critical initiation threshold and the thickness of finite-thickness explosive were analysed. The simulation results were compared and verified by the experimental data. The results show that the critical initiation threshold of TNT with a thickness of 43 mm is  $37 \text{ mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ , and the expansion rate of reaction products varies by at least one order of magnitude between different responses. When the jet impacts on a finite-thickness explosive, a certain distance is required for a bow shock wave evolving into a detonation wave. The higher the tip velocity of the residual jet is, the shorter the distance is required for the evolution of bow shock wave to detonation wave. Therefore, the decrease of explosive thickness will lead to the increase of critical initiation threshold of finite-thickness explosive, and the logarithm of critical initiation threshold is approximately linear with the logarithm of explosive thickness.

**Key words:** jet impact; finite-thickness explosive; bow shock; critical initiation threshold

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020260

(责编:王艳秀)