

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.001

# 聚能射流作用于带壳 B 炸药非爆轰解体的研究\*

胡中伟<sup>①</sup> 毛益明<sup>②</sup> 丁文<sup>②</sup> 郭涛<sup>②</sup> 姜林<sup>①</sup> 张丹<sup>①</sup> 解立峰<sup>①</sup>

<sup>①</sup>南京理工大学安全科学与工程学院(江苏南京,210094)

<sup>②</sup>陆军工程大学野战工程学院(江苏南京,210007)

**[摘要]** 为了优选锥形聚能装药结构参数并探究带壳 B 炸药实现非爆轰解体销毁的条件,基于正交试验法,利用 AUTODYN 软件对射流形成过程进行模拟,探究了药型罩锥角、材料、壁厚、装药口径等不同装药结构参数对射流引爆能力  $v^2d$  的影响,并优选出了用于侵彻带壳 B 炸药的结构参数。利用选定的装药结构,开展侵彻带炮弹钢壳体 B 炸药仿真模拟,探究炸高与壳体厚度对炸药响应状态的影响,分析在不同炸高下射流侵彻引爆带壳装药的机理;并开展试验研究,验证炸药响应状态仿真结果。结果发现,对所选炮弹钢壳体和 20 mm 口径的聚能装药而言,当炸高小于  $3.50d$ (壳体厚度为  $0.2d$ )或  $d$ (壳体厚度为  $0.3d$ )时,被发装药在射流侵彻直接产生的冲击波或冲击波经背板反射得到的反射波的作用下发生爆轰。当炸高大于  $5.00d$ (壳体厚度为  $0.2d$ )或  $2.05d$ (壳体厚度为  $0.3d$ )时,因射流剩余能量激发产生的冲击波及反射波无法引起被发装药的爆轰,可以实现弹药的非爆轰解体。

**[关键词]** 废弃弹药;聚能装药;非爆轰解体;带壳 B 炸药;数值模拟;试验验证

**[分类号]** TJ410

## Study on Disintegration without Detonation of Shelled Composition B Penetrated by Shaped Charge Jet

HU Zhongwei<sup>①</sup>, MAO Yiming<sup>②</sup>, DING Wen<sup>②</sup>, GUO Tao<sup>②</sup>, JIANG Lin<sup>①</sup>, ZHANG Dan<sup>①</sup>, XIE Lifeng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

<sup>②</sup>College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

**[ABSTRACT]** In order to optimize the structural parameters of conical shaped charge and explore the conditions for achieving disintegration without detonation of shelled Composition B, the jet formation process was simulated using AUTODYN software based on orthogonal experimental method. The influences of different charge structural parameters such as cone angle, material, wall thickness, and charge diameter on the jet detonation capability  $v^2d$  were studied. And the structural parameters for penetrating shelled Composition B were optimized. Simulation of penetration of steel shelled Composition B with projectiles was conducted using the selected charge structure. The effects of explosion height and shell thickness on the response state of explosives were investigated. The mechanism of jet penetration and detonation of shell charges at different explosion heights was also analyzed. Finally, experimental research was conducted to verify the simulation results of the response state of explosives. It was found that, for the selected shell steel shell and 20 mm caliber energy gathering charge, when the explosion height is less than  $3.50d$  (shell thickness of  $0.2d$ ) or  $d$  (shell thickness of  $0.3d$ ), Composition B detonates under the action of the shock waves directly generated by jet penetration or the reflected waves obtained from shock wave contact with the back plate. When the explosion height is greater than  $5.00d$  (shell thickness of  $0.2d$ ) or  $2.05d$  (shell thickness of  $0.3d$ ), the shock wave and reflected wave generated by the residual energy of the jet could not cause the detonation of Composition B, and disintegration without detonation of the ammunition could be achieved.

**[KEYWORDS]** abandoned ammunition; shaped charge; disintegration without detonation; shelled Composition B; numerical simulation; experimental verification

\* 收稿日期:2024-06-05

基金项目:十四五共用技术预研项目(50904060102)

第一作者:胡中伟(2000—),男,硕士研究生,主要从事聚能射流的相关研究。E-mail: 2274484669@qq.com

通信作者:郭涛(1978—),男,博士,副教授,主要从事地雷与爆破器材爆炸作用研究。E-mail: gnotao13915966@sina.com

## 0 引言

废旧弹药是指因超过弹药储存期、未完全引爆、弹体受损等原因而性能下降、失去军事利用价值的弹药,或因技术及装备更新而淘汰的弹药<sup>[1]</sup>。虽然这类弹药的安定性、弹体状态发生了改变,但大多依旧具备爆炸效能<sup>[2]</sup>。出于安全性考虑,废旧弹药亟待销毁。比较传统的弹药销毁方法包括燃烧法、爆炸法、拆分法、溶解法等<sup>[3-4]</sup>。但这些方法都对场地或操作条件有较高要求,并且影响范围大。因此,寻找一种有效且安全的弹药销毁方法至关重要。

聚能战斗部因能量密度高、方向性好及射流高温、高速等特点常被应用于靶板的侵彻或弹药的爆炸销毁。在射流侵彻炸药方面,Held<sup>[5]</sup>开展了 4 种不同口径的聚能装药起爆裸露炸药的试验,并与射弹撞击引爆试验结果相比较,首次从试验角度提出了 Held 起爆判据,即  $K = v^2 d$ 。其中: $v$  为射流尖端速度; $d$  为射流尖端直径。该判据形式简单且准确性较高,因此被广泛应用于工程实践中。之后,研究人员基于 Held 判据,通过各种方法研究了锥角、壁厚、射流形状、靶板厚度、炸高等因素对射流形成及侵彻过程的影响<sup>[6-9]</sup>。詹发民等<sup>[10]</sup>以金属杆代替聚能装药金属射流,开展了侵彻引爆带屏蔽板炸药的仿真研究,分析了不同直径金属杆侵彻不同板厚炸药的极限速度,并与 Held 判据进行比较。宋乙丹等<sup>[11]</sup>通过试验对不同厚度盖板屏蔽下 2 种 PBX 炸药的射流冲击反应状态进行了探究,并得到了 2 种炸药的起爆临界盖板厚度。

除此之外,研究人员发现,通过控制射流侵彻引爆能力能够在不引爆炸药的情况下使带壳装药发生解体。朱瑞等<sup>[12]</sup>通过数值模拟方法获得了射流穿透不同厚度壳体后的引爆能力,并开展了射流侵彻带壳装药试验进行验证,获得了实现非爆炸式解体的射流引爆能力阈值。

然而,已有的仿真研究大多仅针对纯靶板、屏蔽炸药或夹层炸药展开,并未考虑被发带壳装药的全约束结构对炸药响应状态的影响;并且,靶板或屏蔽板材质主要为 Q235 钢或 45# 钢等普通钢材,与实际弹药所用钢材有所区别。因此,针对壳体材质为炮弹用 21MnNiMoA 钢的带壳装药开展了一系列研究。首先,基于正交试验法,对射流形成过程进行模拟,获得药型罩参数和装药口径的最优化设计结果;在此基础上,开展聚能射流侵彻全约束带壳 B 炸药的仿真研究,探索炸高和壳体厚度对炸药响应状态的

影响以及不同炸高下侵彻引爆炸药的机理,并得到射流作用于所选钢壳体带壳 B 炸药实现非爆轰解体的条件;最后,开展侵彻试验,验证被发装药响应状态的模拟结果。为聚能射流在未爆弹销毁方面的进一步应用提供参考。

## 1 聚能装药结构的正交优化设计

### 1.1 试验方案

采用正交试验的方法,探索聚能装药结构参数的最优化设计,选择药型罩的壁厚  $A$ 、锥角  $B$ 、装药口径  $C$ 、药型罩材料  $D$  作为试验因素。

射流速度  $v_j$  随着锥角  $\alpha$  的增大而减小,而射流质量相应增大,射流质量的大小直接影响直径和稳定性,选取  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  为锥角的 3 个水平。对于装药结构,口径增大,射流的侵彻能力也随之增强,但也会导致装药量增加,同时增大危险性,选择装药口径的水平为 15、20、25 mm。药型罩最佳壁厚由药型罩材料、锥角、直径等决定,一般约为装药口径的 1%~6%<sup>[13]</sup>。根据最佳壁厚理论计算公式,确定壁厚的范围为 0.3~0.8 mm,水平确定为 0.3、0.5、0.8 mm。对药型罩材料而言,铜、镍等高密度金属材料具有良好的比动能,侵彻性能优异;而低密度的材料,侵彻性能较低,但开孔尺寸较大<sup>[13]</sup>。因此,在药型罩材料的选取过程中,以聚四氟乙烯 (PTFE) 为代表,考虑了低密度非金属材料对射流形成过程的影响。另外,方案中所有工况的内部装药均选择 RDX 炸药。为了控制装药量,将装药结构的长径比控制为 1.5。

最终,各因素水平的选取如表 1 所示。

表 1 正交试验各因素水平

Tab. 1 Levels of each factor in orthogonal test

水平	药型罩壁厚 $A/\text{mm}$	药型罩锥角 $B/(\circ)$	装药口径 $C/\text{mm}$	药型罩材料 $D$
1	0.3 ( $A_1$ )	45 ( $B_1$ )	15 ( $C_1$ )	PTFE ( $D_1$ )
2	0.5 ( $A_2$ )	60 ( $B_2$ )	20 ( $C_2$ )	镍 ( $D_2$ )
3	0.8 ( $A_3$ )	90 ( $B_3$ )	25 ( $C_3$ )	紫铜 ( $D_3$ )

### 1.2 装药结构模型及参数

射流形成模型主要由聚能装药、药型罩、装药结构壳体、空气 4 部分组成。利用 AUTODYN 软件建立聚能装药模型,射流形成全过程均在空气域内进行,装药模型如图 1 所示。其中,计算模型采用轴对称结构,采用 mm-mg-ms 单位制。共用到空气、RDX、PTFE、紫铜、镍、铝、Teflon 等材料,所用材料选

取的模型及状态方程见表2。材料选取AUTODYN数据库的内置参数。为了更好地分析模拟结果,在装药结构右侧每隔10 mm设置一个测点,以便获取该处的参数值。

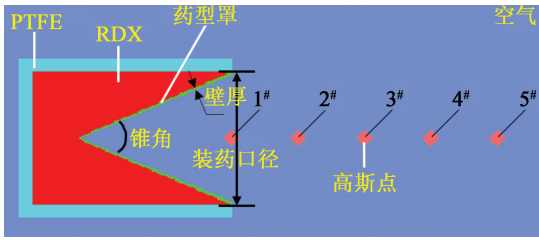


图1 聚能装置模型

Fig.1 Model of shaped charge

表2 各材料采用的状态方程及模型

Tab.2 State equations and models of various materials

材料	状态方程	强度模型	失效模型
空气	Ideal Gas		
RDX	JWL		
PTFE	Shock	Johnson Cook	
紫铜	Shock	Johnson Cook	
镍	Shock	Johnson Cook	
铝	Shock	Johnson Cook	
Teflon	Shock	von Mises	Hydro (Pmin)

1.3 模拟结果

以射流在60 mm炸高下的引爆能力 $v^2d$ 为评价指标,9组工况的模拟结果如表3所示。

1.4 极差分析

为了分析各因素对聚能射流侵彻引爆能力的影响度,并获得各因素的最佳水平,对上述结果进行极差分析,结果如表4所示。

表4中: $K_i(K_1、K_2、K_3)$ 为每个因素各个水平下的指标总和; $k_i(k_1、k_2、k_3)$ 为每个因素各个水平下的指标总和的平均值; $R$ 为极差, $R = \max\{k_1, k_2, k_3\} - \min\{k_1, k_2, k_3\}$ 。

极差越大,表示该因素对试验指标的影响程度越大。 $R_D > R_C > R_B > R_A$ ,表明对锥形聚能装药结构

表3 聚能装药成型过程模拟结果

Tab.3 Simulation results of the forming process of shaped charge

序号	药型罩壁厚 A	药型罩锥角 B	装药口径 C	药型罩材质 D	$v^2d / (\text{mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2})$
1#	A1	B1	C1	D1	136.09
2#	A1	B2	C2	D2	32.50
3#	A1	B3	C3	D3	59.09
4#	A2	B1	C2	D3	52.86
5#	A2	B2	C3	D1	159.41
6#	A2	B3	C1	D2	15.88
7#	A3	B1	C3	D2	65.74
8#	A3	B2	C1	D3	9.88
9#	A3	B3	C2	D1	120.64

来说,对引爆能力的影响程度由大到小为药型罩材料、装药口径、药型罩锥角、药型罩壁厚。

各因素水平对射流引爆能力的影响见图2。对于药型罩壁厚因素,壁厚为0.5 mm(A2)时,射流的引爆能力略大于0.3 mm(A1)时;而壁厚为0.8 mm时,由于射流速度的下降而导致引爆能力下降。因此,同时考虑试验结果与后续加工难度,选取壁厚0.5 mm(A2)为最终的优选方案。对于药型罩锥角,选择45°(B1)为该因素的最终方案。对装药口径因素而言,随着口径的增大,引爆能力总体呈上升趋势,这也符合基本规律。为了达到使炸药非爆轰解

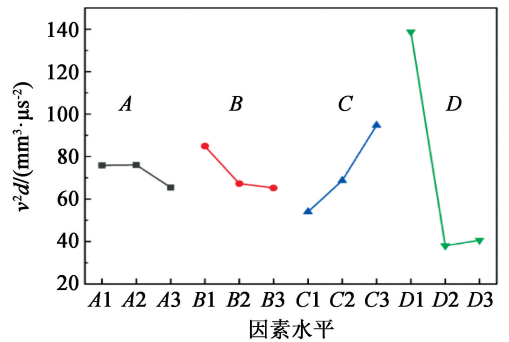


图2 不同因素水平对射流引爆能力的影响  
Fig.2 Influence of different levels of factors on the ability of jet detonation

表4 极差分析

Tab.4 Range analysis

因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R$
A	227.68	228.15	196.26	75.89	76.05	65.42	10.63
B	254.69	201.80	195.61	84.90	67.27	65.20	19.70
C	161.85	206.00	284.24	53.95	68.67	94.75	40.80
D	416.15	114.12	121.83	138.72	38.04	40.61	100.68

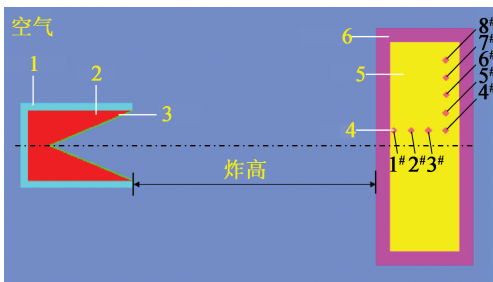
体的效果,并以尽量减小装药量为原则,选择 20 mm (C2)为该因素的最终方案。药型罩材料对引爆能力的影响最大,药型罩材料为 PTEF 时,主要由于射流头部直径很大,导致射流引爆能力远大于其他 2 种材料;但引爆能力过强,可能会导致在较大炸高下依旧使模拟弹药发生爆轰。因此,为了达到使被发弹药实现非爆轰解体的效果,选择紫铜(D3)为最终方案。

通过极差分析可以得到,所选锥形装药结构的最佳参数组合为 A2B1C2D3。即最终选定装药结构的各参数分别是:药型罩壁厚为 0.5 mm、锥角为 45°、装药口径为 20 mm、药型罩材料为紫铜。

## 2 射流侵彻带壳装药仿真

### 2.1 仿真设置

将最终的药型罩结构参数确定后,开展聚能射流侵彻带壳 B 炸药的模拟研究,探究炸高、壳体厚度对侵彻过程的影响。为了更加准确地得到射流侵彻模拟弹药过程中被发装药的响应过程,被发弹药采取长径比为 1:3 的地雷状全封闭模型。被发弹药内高为 20 mm( $d$ ),壳体厚度为 4 mm( $0.2d$ )和 6 mm( $0.3d$ )。聚能装药结构的口径为 20 mm,长径比为 1.5。聚能射流侵彻被发弹药的仿真模型如图 3 所示。为了便于分析被发装药的响应状态,将测点分别设置于距轴线 5 mm、高度每隔 5 mm 的位置,以及距炸药右侧 4 mm、每隔 5 mm 的位置。



1 - PTFE; 2 - RDX; 3 - 药型罩; 4 - 高斯点; 5 - B 炸药;  
6 - 高强度钢。

图 3 聚能装药侵彻带壳弹药仿真模型

Fig. 3 Simulation model of shaped charge penetrating shelled ammunition

其中,被发高能炸药选取 B 炸药,弹药壳体材料为 GJB 397A—1998《炮弹用合金钢棒规范》中规定的 21MnNiMoA 钢。B 炸药用 Lee-Tarver 点火增长模型进行描述,选取软件数据库中的材料;壳体材料的状态方程采用 Shock 方程,强度模型和失效模

型均采用 Johnson-Cook 模型,仿真模型参数见表 5<sup>[14]</sup>。需注意的是,为了适应被发装药 Lee-Tarver 模型,需利用 cm-g- $\mu$ s 单位制建模。壳体材料选择拉格朗日网格,两种网格之间的接触采用拉格朗日-欧拉自由耦合算法。

表 5 21MnNiMoA 材料的状态参数

Tab. 5 State parameters of 21MnNiMoA

$\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$G/$ GPa	$A/$ MPa	$B/$ MPa	$n$	$C$	$m$
7.85	76	980	770	0.26	0.04	1.03

### 2.2 结果分析

以各测点处压力及被发装药的反应度为指标,判定炸药是否发生爆轰;并且利用测点得到的压力分析炸高、壳体厚度对侵彻过程的影响。

为探寻冲击起爆阈值与侵彻体密度及裸露炸药密度的关系,Held<sup>[15]</sup>通过总结侵彻体冲击炸药的实验结果,得到:

$$u_{cr} = \frac{v_{cr}}{(1 + \sqrt{\rho_{HE}/\rho_p})}; \quad (1)$$

$$K = u_{cr}^2 d_{cr} = \frac{v_{cr}^2}{(1 + \sqrt{\rho_{HE}/\rho_p})^2} d_{cr}。 \quad (2)$$

式中: $u_{cr}$ 为相同工况下侵彻带壳装药过程中穿透盖板时射流的出口速度; $v_{cr}$ 为射流侵彻裸露炸药的尖端速度; $K$ 为射流对带壳装药的侵彻引爆能力; $d_{cr}$ 为射流穿透壳体时的尖端直径; $\rho_{HE}$ 为被发装药的密度; $\rho_p$ 为侵彻体的密度。

依据式(2)计算各工况下聚能射流穿透壳体后对炸药的侵彻引爆能力。仿真结果见表 6。仿真结果满足 B 炸药的冲击起爆阈值  $16 \text{ mm}^3/\mu\text{s}^2$ <sup>[16]</sup>。

#### 2.2.1 射流引爆被发装药工况分析

在低炸高情况下,射流穿透壳体后,剩余能量能够引爆被发装药。以壳体厚度为 4 mm( $0.2d$ ),且炸高为 20 mm( $d$ )和 70 mm( $3.50d$ )时射流侵彻引爆 B 装药过程为代表进行分析。这 2 个工况下,部分时刻的炸药压力分布和反应度分布如图 4~图 7 所示。竖直方向上 5 个测点 4#~8#观测到的压力变化曲线如图 8 所示。

在仿真结果中,射流穿透壳体后,被发装药在射流剩余能量的作用下发生反应,产生冲击波,冲击波随着射流的拉伸前进也向前传播。当壳体厚度为  $0.2d$ 、炸高为  $d$  时,射流穿透壳体后的剩余能量能够直接使附近区域的炸药完全反应,产生爆轰波。随着爆轰波的稳定传播,被发装药在射流未达到装药下底面时已经反应完全,发生强烈爆轰。该过程可

表6 聚能射流侵彻带壳B炸药的仿真与试验结果对比

Tab.6 Comparison of simulation results and experimental results of penetration of shelled Compositon B by shaped charge jet

工况	壳体厚度/ mm	炸高/ mm	$K/$ ( $\text{mm}^3 \cdot \mu\text{s}^{-2}$ )	炸药响应 状态	壳体及坑体状态
1 <sup>#</sup>	4(0.2d)	20(d)	20.45	爆炸	坑体破坏严重
2 <sup>#</sup>	4(0.2d)	45(2.05d)	19.00	爆炸	坑体破坏严重,产生尖锐破片
3 <sup>#</sup>	4(0.2d)	70(3.50d)	17.90	爆炸	坑体破坏严重
4 <sup>#</sup>	4(0.2d)	100(5.00d)	10.96	未爆	壳体上端盖脱离柱面,内部有炸药 烧蚀穿孔现象
5 <sup>#</sup>	4(0.2d)	150(7.50d)	7.17	未爆	壳体上端盖脱离柱面,壳体底部穿孔 区域附近有明显烧蚀痕迹
6 <sup>#</sup>	6(0.3d)	20(d)	18.55	爆炸	坑体破坏严重
7 <sup>#</sup>	6(0.3d)	45(2.05d)	15.12	未爆	壳体上端盖脱离柱面,壳内有少量小药块
8 <sup>#</sup>	6(0.3d)	70(3.50d)	14.17	未爆	壳体上端盖脱离柱面,壳体周围 有部分小药块

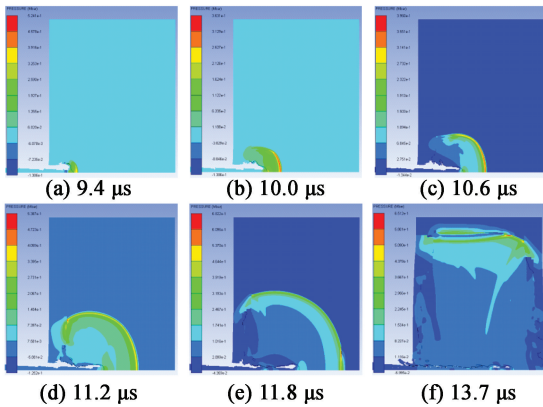


图4 壳体厚度0.2d、炸高为d时射流侵彻引爆带壳B炸药过程部分时刻的压力分布

Fig.4 Pressure distribution at some moments during the process of jet penetration of shelled Composition B with a shell thickness of 0.2d and an explosion height of d

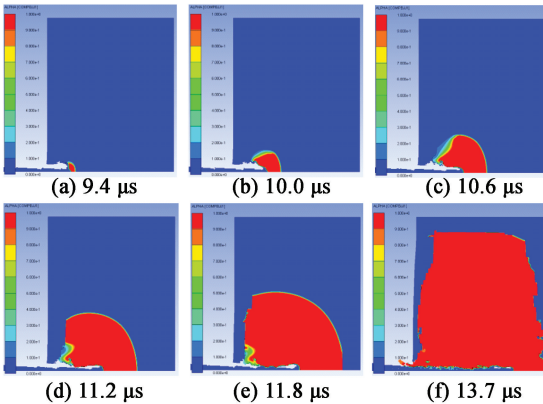


图5 壳体厚度0.2d、炸高d时射流侵彻引爆带壳B炸药过程部分时刻的反应度分布

Fig.5 Reactivity distribution at some moments during the process of jet penetration of shelled Composition B with a shell thickness of 0.2d and an explosion height of d

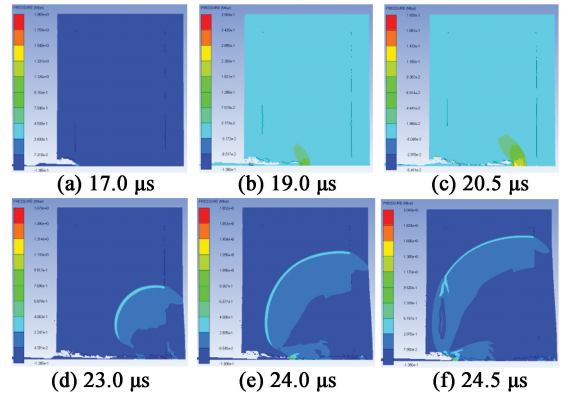


图6 壳体厚度0.2d、炸高为3.50d时射流侵彻引爆带壳B炸药过程部分时刻的压力分布

Fig.6 Pressure distribution at some moments during the process of jet penetration of shelled Composition B with a shell thickness of 0.2d and an explosion height of 3.50d

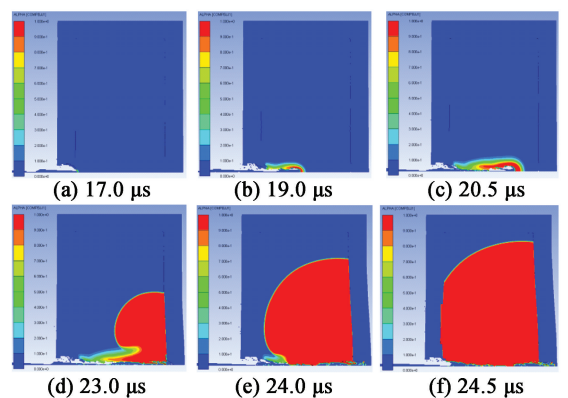
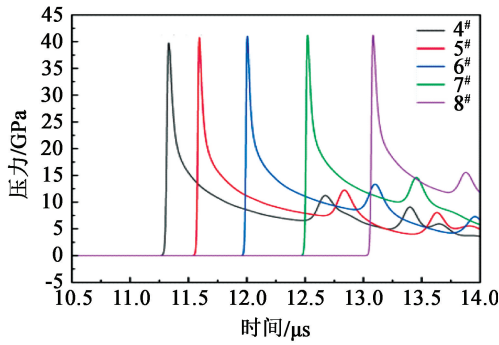
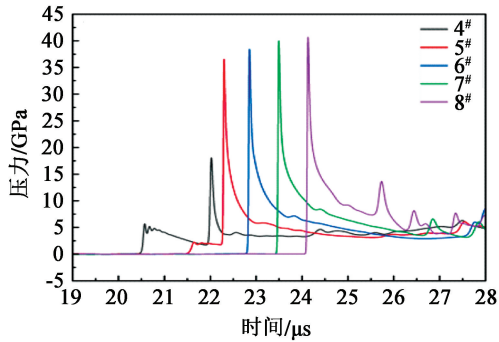


图7 壳体厚度0.2d、炸高3.50d时射流侵彻引爆带壳B炸药过程部分时刻的反应度分布

Fig.7 Reactivity distribution at some moments during the process of jet penetration of shelled Composition B with a shell thickness of 0.2d and an explosion height of 3.50d



(a) 炸高为  $d$



(b) 炸高为  $3.50d$

图 8 壳体厚度  $0.2d$  下不同炸高时高斯点 4# ~ 8# 的压力变化曲线

Fig. 8 Pressure variation curves of Gaussian points 4# ~ 8# with a shell thickness of  $0.2d$  at different explosion heights

用图 8(a) 的压力变化曲线印证,在爆轰波的传播下,测点的压力直接超过 B 炸药的爆轰压力。

当炸高增加至  $3.50d$  时,射流侵彻被发装药产生的冲击波较弱,4# 和 5# 测到的第一个峰值压力较小,且因为 5# 离炸药反应区域较远,故峰值压力更低一些。随着侵彻的继续进行,冲击波接触到下盖板后发生反射,形成压力更高的反射冲击波并向炸药内部传播;经过一定时间的作用之后,炸药形成点火增长的趋势,并最终发展成完全爆轰。由于 6# ~ 8# 离轴线较远,射流侵彻直接导致的炸药反应并未使这 3 个点的压力发生变化,而在反射波的传播下,该点处的第一个峰值压力直接超过炸药爆轰压力,即发生爆轰。从图 7 的反应度分布中也可以看出,炸药是受反射冲击波的作用,在炸药内部形成的点火增长趋势,而不是射流直接侵彻引起的爆轰。

### 2.2.2 射流未引爆被发装药工况分析

在大炸高下,射流侵彻炸药产生的冲击波以及冲击波在下盖板处产生的反射波均不能引爆被发装药。以壳体厚度为  $0.2d$ 、炸高为  $5.00d$  时射流侵彻 B 装药过程为代表进行分析。该过程中,部分

时刻的炸药压力分布和反应度分布如图 9 和图 10 所示。

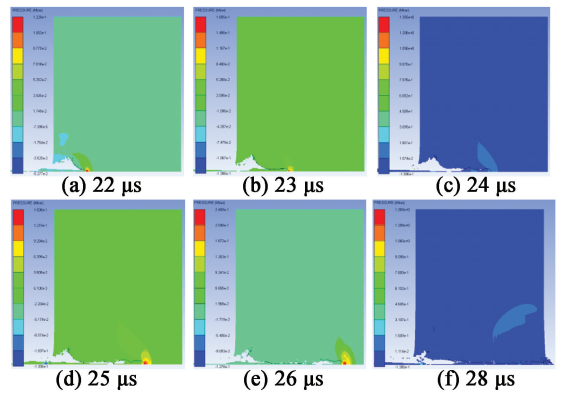


图 9 射流侵彻带壳 B 炸药过程部分时刻的压力分布  
Fig. 9 Pressure distribution at some moments during the process of jet penetration of shelled Composition B

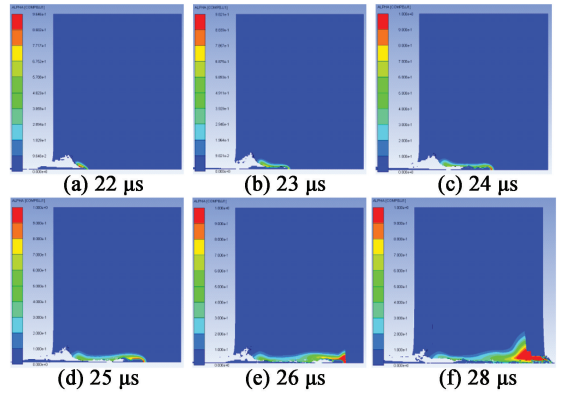


图 10 射流侵彻带壳 B 炸药过程部分时刻的反应度分布  
Fig. 10 Reactivity distribution at some moments during the process of jet penetration of shelled Composition B

壳体厚度为  $0.2d$ 、炸高为  $5.00d$  时,射流在侵彻带壳 B 炸药的过程中也产生了冲击波。但是该冲击波较弱,未能引起被发装药的点火增长趋势。而且随着射流的侵彻,炸药内部的压力逐渐变小,在壳体下盖面形成的反射冲击波也未能稳定传播,并且逐渐衰减,依然未能将炸药引爆,直至射流穿透炸药和金属壳体。由反应度变化可知,B 炸药受到侵彻作用之后,仅在射流穿孔区域及附近发生反应,产生了热点,使炸药发生分解,局部区域反应度达到了 1。但是热点数量较少,并且随着射流的进一步侵彻,热点并未大面积增多,所以 B 炸药未被引爆。与炸药发展成为完全爆轰相比,释放的能量也就小很多。该工况下的各测点的压力变化曲线如图 11 所示。

### 2.3 试验验证

为验证仿真结果的准确性,开展聚能射流侵彻

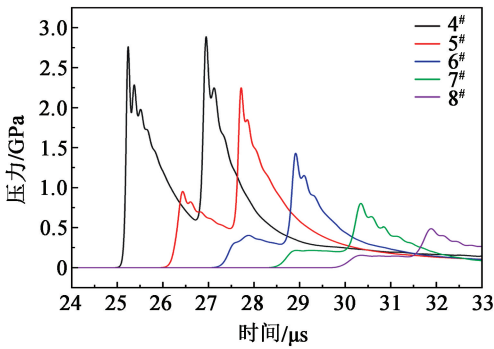


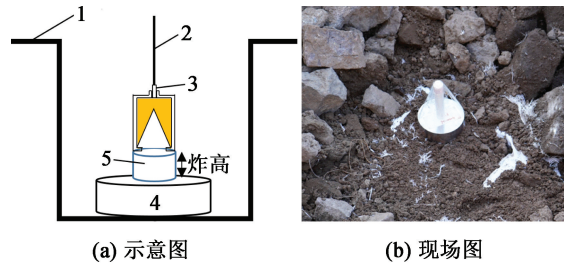
图 11 高斯点 4# ~ 8# 的压力-时间曲线

Fig. 11 Pressure-time curves of Gaussian points 4#-8#

带壳 B 炸药试验,得到不同炸高下模拟弹药的响应状态。试验中所选材料均与仿真模型一致。将内装熔铸 B 炸药的模拟弹药作为侵彻对象。壳体采用螺纹连接以保证良好的密闭性。弹体结构依然选择长径比为 1 : 3,内径为 11.6 cm,内高为 3.9 cm。具体布置如图 12 所示。

通过炸高管调节炸高,同时避免聚能装药在外力作用下摇晃导致的射偏情况。试验结束后,结合爆坑状态以及壳体状态判定被发装药是否发生爆炸。试验结果如图 13、图 14 所示;仿真和试验结果如表 6 所示。试验结果与仿真结果一致,说明所选取的仿真条件合适。

由试验结果可知,模拟弹药响应状态分为爆炸或者非爆轰解体,并且解体方式为在壳体薄弱环节发生断裂,表现为上端盖在内部炸药燃烧压力下脱离柱面,并且内部炸药由于燃烧或在冲击波作用下



(a) 示意图

(b) 现场图

1 - 地面;2 - 起爆线;3 - 雷管;4 - 被发弹药;5 - 炸高管。

图 12 聚能射流侵彻带壳 B 炸药试验布置

Fig. 12 Experimental arrangement for penetration of shelled Composition B by shaped charge jet

碎成小块。需要注意的是,工况 4# 中,炸药熔铸完成后直接开展试验,并未避免熔铸炸药与壁面的黏附作用,因此,仅发生内部中心区域烧蚀。

聚能射流在相同炸高下能引爆 0.2d 壳体厚度模拟弹药,但无法引爆 0.3d 壳体厚度的模拟弹药,说明更厚的壳体对射流能量的削弱作用更强。在低炸高下,聚能射流能引爆被发装药;而在较大炸高下,聚能射流仅引起少量炸药的反应,并导致壳体内壁变黑。

### 3 结论

1) 正交试验发现,对锥形聚能装药结构来说,装药结构各因素对引爆能力的影响程度由大到小为药型罩材料、装药口径、药型罩锥角、药型罩壁厚。

2) 结合正交试验结果以及实际应用,选定后续

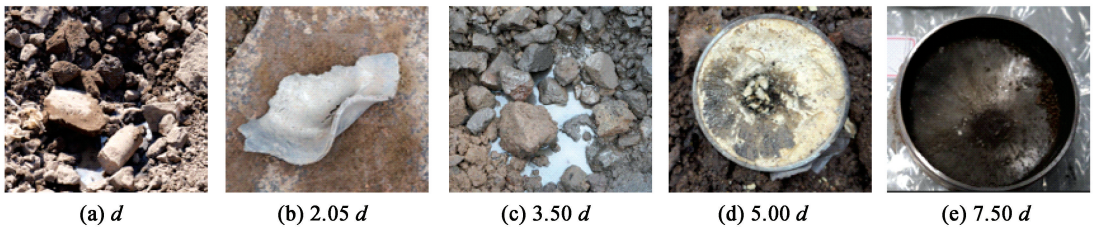


图 13 不同炸高下 4 mm(0.2d) 厚度带壳 B 炸药试验结果

Fig. 13 Experiment results of shelled Composition B with a thickness of 4 mm (0.2d) under different height of burst

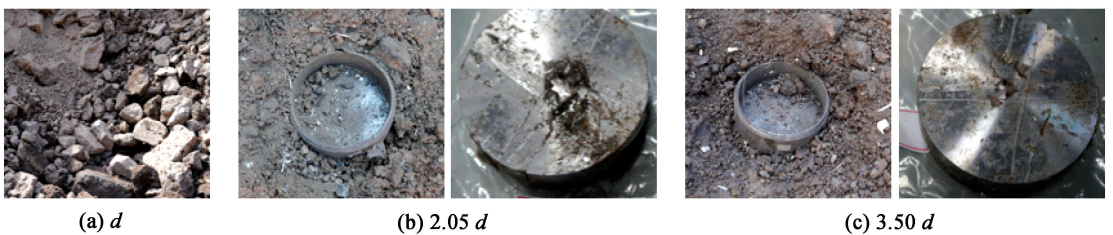


图 14 不同炸高下 6 mm(0.3d) 厚度带壳 B 炸药试验结果

Fig. 14 Experiment results of shelled Composition B with a thickness of 6 mm (0.3d) under different height of burst

侵彻仿真的结构参数为:药型罩壁厚为 0.5 mm、锥角为 45°、装药口径为 20 mm、药型罩材料为紫铜。

3) 仿真和试验结果表明,对所选炮弹钢壳体带壳装药而言,当炸高小于 3.50d(壳体厚度为 0.2d)或 d(壳体厚度为 0.3d)时,被发装药在射流侵彻直接产生的冲击波或冲击波经背板反射得到的反射波的作用下发生爆轰;当炸高大于 5.00d(壳体厚度为 0.2d)或 2.05d(壳体厚度为 0.3d)时,因射流剩余能量激发产生的冲击波及反射波无法引起被发装药的爆轰,可以实现弹药非爆轰解体。

4) 实现弹药非爆轰解体,需要满足的条件为:射流侵彻过程中产生的冲击波不足以引发弹药稳定爆轰;射流穿透上壳体后的剩余能量仅能使被发装药发生燃烧或产生逐渐衰减的非爆轰反应。

### 参 考 文 献

- [1] 李金明,雷彬,丁玉奎. 通用弹药销毁处理技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012.  
LI J M, LEI B, DING Y K. Technology of conventional ammunition disposal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] 朱可可,黄飞,张小宇,等. 废旧弹药销毁研究现状[J]. 安徽化工,2021,47(3): 11-12, 16.  
ZHU K K, HUANG F, ZHANG X Y, et al. Study status of destroying used ammunition [J]. Anhui Chemical Industry, 2021, 47(3): 11-12, 16.
- [3] 田轩,王晓峰,黄亚峰,等. 国外废旧火炸药非军事化处理技术进展[J]. 飞航导弹,2015(2): 79-83.  
TIAN X, WANG X F, HUANG Y F, et al. Progress in demilitarized treatment technology for waste explosives abroad [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(2): 79-83.
- [4] 李全俊,王国辉,雷林,等. 废旧弹药拆分技术现状与发展[J]. 兵工自动化,2018,37(5): 93-96.  
LI Q J, WANG G H, LEI L, et al. Present situation and development of waste ammunition decomposition technology [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(5): 93-96.
- [5] HELD M. Initiating of explosives, a multiple problem of physics of detonation [J]. Explosivestoffe, 1968(5): 98.
- [6] 张铁军,唐潮,宋鹏伟,等. C型聚能管锥角的优化研究[J]. 爆破器材,2023,52(5): 30-37.  
ZHANG T J, TANG C, SONG P W, et al. Optimization of the cone angle of the C-type shaped charge tube [J]. Explosive Materials, 2023, 52(5): 30-37.
- [7] 方一舟,张先锋,熊玮,等. 考虑形状分布特性的聚能射流侵彻作用规律研究[J]. 北京理工大学学报,2023,43(10): 1047-1058.  
FANG Y Z, ZHANG X F, XIONG W, et al. Study on penetration law of shaped charge jet considering shape distribution characteristics [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(10): 1047-1058.
- [8] ELSHENAWY T, LI Q M. Breakup time of zirconium shaped charge jet [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38(5): 703-708.
- [9] YARIN A L, ROISMAN I V, WEBER K, et al. Model for ballistic fragmentation and behind-armor debris [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(2): 171-201.
- [10] 詹发民,姜涛,周方毅,等. 聚能射流引爆带壳装药数值计算分析[J]. 工程爆破,2018,24(5): 23-27.  
ZHAN F M, JIANG T, ZHOU F Y, et al. Numerical simulation of shaped charge jet initiating shelled explosive [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(5): 23-27.
- [11] 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 Y D, CHEN K Q, LU Z H, et al. Experimental research of the impact initiation of shelled pressed PBX explosives by shaped charge jet [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(1): 69-72, 78.
- [12] 朱瑞,郭涛,毛益明,等. 聚能射流解体带壳 B 炸药的数值模拟与实验研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(11): 32-39.  
ZHU R, GUO T, MAO Y M, et al. Numerical simulation and experimental study of shaped charge jet on disintegrating composition Bina shell [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(11): 32-39.
- [13] 郭誉,向理,罗怀. 药型罩发展现状与趋势研究[J]. 湖南有色金属,2023,39(3): 74-77.  
GUO Y, XIANG L, LUO H. Research on the development status and trend of shaped charge liners [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39(3): 74-77.
- [14] 甄建伟,曹凌宇,孙福. 弹药毁伤效应数值仿真技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2018.  
ZHEN J W, CAO L Y, SUN F. Numerical simulation of ammunition damage effect [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.
- [15] HELD M. Analytical initiation criteria of high explosives at different projectile or jet densities [J]. AIP Conference Proceedings, 1996, 370(1): 867-870.
- [16] HELD M. Critical conditions for shock initiation of detonation by small projectile impact [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Detonation. Annapolis, MD, US, 1981.