

# 弹靶参数对含能破片冲击起爆屏蔽装药的影响

贺丽萍, 陈 闯, 王佳浩

(沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳, 110159)

**摘 要:** 为了研究弹靶参数对含能破片冲击起爆屏蔽装药的影响, 以 Al/PTFE (26.5/73.5) 活性反应材料制成的含能破片为研究对象, 运用 SPH 算法分析了破片质量、几何形状, 以及盖板厚度和材料因素对屏蔽装药冲击起爆的影响。结果表明: 质量大的破片冲击起爆屏蔽装药的能力优于质量小的破片; 圆柱体破片冲击起爆屏蔽装药的能力优于球形破片; 较厚的盖板抗冲击起爆能力优于较薄的盖板; 密度大或韧性大的盖板材料抗冲击起爆能力较佳。

**关键词:** 含能破片; 弹靶参数; 冲击起爆; 屏蔽装药; 数值模拟

中图分类号: TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.02.007

## The Influence of Projectile and Target Parameters on Reactive Fragment Impact Initiating Covered Explosive

HE Li-ping, CHEN Chuang, WANG Jia-hao

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159)

**Abstract:** In order to study the influencing factors of shielded charge initiated by energetic fragment impactation, the reactive fragments made from the classical formula of Al/PTFE reactive material (26.5/73.5) were studied. The SPH algorithm was used to analyze the effects of fragment mass and geometry, cover thickness and material on the impact initiation of shielded charge. The results show that the impact initiation shielding charge of fragments with large mass is better than that of fragments with small mass; the impact initiation shielding charge of cylindrical fragments is better than that of spherical fragments. The initiation ability of thick cover with high density or toughness materials is better than that of thin cover plate.

**Key words:** Reactive fragment; Target parameters; Impact initiation; Covered explosive; Numerical simulation

含能破片较常规破片能够大幅度地提高破片威力, 有关含能毁伤元及其战斗部技术研究已取得显著进展。John Starckenberg 等<sup>[1]</sup>通过实验与数值模拟分析了不同弹靶作用条件对起爆阈值的影响。H.R.James<sup>[2-3]</sup>通过计算破片作用裸装药时的冲击波冲量, 提出了冲击起爆裸装药的能量判据。何源等<sup>[4]</sup>研究了不同靶板材料、不同头部参数的含能破片冲击侵彻过程和释能时间, 得到释能时间与侵彻过程的关系。董小瑞等<sup>[5]</sup>进行了破片冲击引爆屏蔽 B 炸药的试验研究, 得出

了屏蔽 B 炸药的临界起爆压力和临界起爆能量。任会

兰等<sup>[6]</sup>研究了 W 含量对 Al/W/PTFE 反应材料冲击反应特性的影响。王海福等<sup>[7]</sup>对含能破片冲击起爆屏蔽装药行为展开仿真模拟研究。

## 1 数值计算模型

本文采用 Autodyn 分析平台, 分析了弹靶参数对含能破片冲击起爆屏蔽装药的影响因素, 为该问题的深入研究提供一些理论依据。

根据研究对象的实际特点, 依靠等效强度方法计

收稿日期: 2021-01-20

作者简介: 贺丽萍(1977-), 女, 副教授, 主要从事含能材料的制备及表征。

基金项目: 辽宁省自然科学基金指导计划 (No. 2019-ZD-0262)。

算能够得出屏蔽装药盖板的材料以及厚度。目前飞机以及导弹目标由两部分组成,分别为蒙皮和部件的壳体,建立等效靶需要考虑蒙皮的等效强度以及部件壳体的等效强度,等效靶板的材料选用 Autodyn 材料库中的 2024 铝,内装药选用 B 炸药,含能破片材料为 PTFE/Al。

图 1 为破片冲击起爆屏蔽装药的模型示意图,经过简化后的屏蔽装药模型由盖板以及炸药组成,其中盖板材料为 2024 硬铝,材料库代号为 AI2024-T4;内装炸药为 B 炸药,代号 COMBJ1。设置非反射边界条件和对称约束,其装药的厚度为 50mm,装药直径为 150mm。为观测以及记录破片在侵彻屏蔽装药过程中的温度和压力等其他参数的变化,在屏蔽装药靶板的轴线方向上均匀地每隔 10mm 布置高斯点。

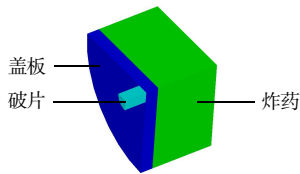


图 1 含能破片冲击屏蔽装药模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of energetic fragment impacting covered explosive

## 2 计算结果及分析

### 2.1 破片参数对屏蔽装药冲击起爆的影响

#### 2.1.1 破片几何参数

通过改变相同质量下 PTFE/Al 含能破片的几何形状以及圆柱体的长径比,分析含能破片几何参数对冲击起爆屏蔽装药的影响,选用长径比为 1.0 和 1.5 的圆柱体破片以及球形破片以 2 480m/s 的速度冲击屏蔽装药,其中破片的质量为 10g,屏蔽装药的盖板厚度为 10mm,材料为硬铝。图 2 为长径比为 1.0、1.5 的圆柱体破片和球形破片冲击屏蔽装药的炸药内部压力云图。

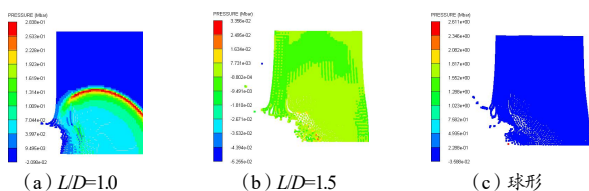


图 2 不同形状破片下炸药的内部压力云图

Fig.2 Nephograms of internal pressure of explosive under fragments with different shapes

分析图 2 可知,以 2 480m/s 的速度冲击屏蔽装药,只有长径比为 1.0 时的圆柱体含能破片冲击引爆了屏蔽装药,在炸药的内部出现了明显的爆轰波,而长径比为 1.5 的圆柱体破片和球形破片未能引爆,炸药内未出现爆轰波。

将含能破片的着靶速度逐渐升高,不同观测点压力随着着靶速度的变化如图 3 所示。由图 3 (a) 可见在观测点 1 炸药的初始压力均呈线性上升,而图 3 (c) 观测点 5 在速度较小时炸药的初始压力很小,且随速度的增加压力上升幅度很小,但当速度上升到某一值时,压力会出现一个突跃,之后速度继续增加但压力保持稳定不变。炸药的压力发生突跃时的速度即为冲击起爆炸药的速度阈值,长径比为 1.0 的圆柱体破片冲击起爆带 10mm 厚硬铝盖板的屏蔽装药的速度阈值约为 2 480m/s;长径比为 1.5 时,速度阈值约为 2 850m/s;破片形状为球形时,速度阈值约为 2 540m/s,如图 4 所示。分析其原因是因为破片的质量不变,破片外形改变会造成着靶时与屏蔽装药的接触面积发生变化。圆柱体破片长径比为 1.0 时的接触面积最大,冲击波的脉冲半径也最大,因而速度阈值最低。

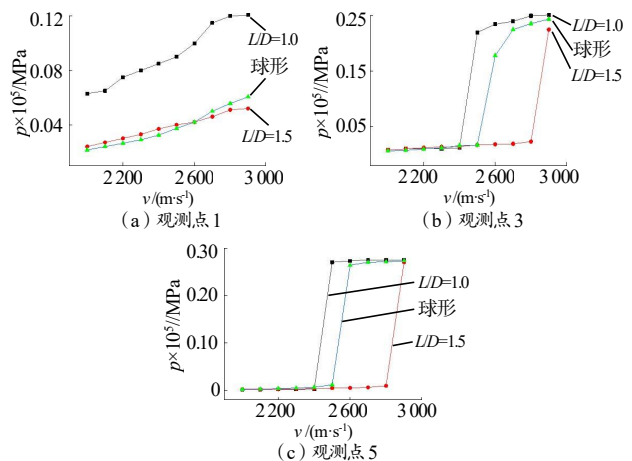


图 3 不同观测点炸药压力随破片着靶速度变化曲线

Fig.3 Curves of explosive pressure with fragment velocity at different points

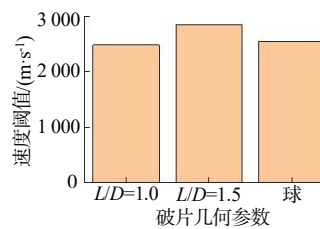


图 4 不同形状破片下的着靶速度阈值

Fig.4 Target velocity thresholds under fragments with different shapes

### 2.1.2 破片质量

通过改变 PTFE/Al 含能破片的质量,分析其对冲击起爆屏蔽装药的影响,在 2 000m/s 的速度下,分别用 10g、15g、20g 和 25g 的含能破片冲击屏蔽装药,破片的形状为长径比为 1.0 的圆柱体,盖板为 10mm 厚的铝质板。炸药内部压力云图如图 5 所示。

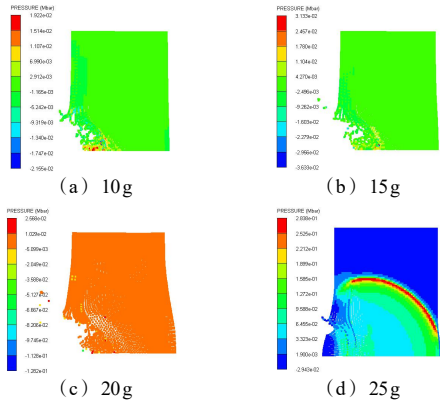


图 5 不同质量破片下的炸药内部压力云图  
Fig.5 Nephograms of internal pressure of explosive under fragments with different masses

通过“升降法”得出 PTFE/Al 含能破片在 2 000m/s 的速度下能够成功冲击起爆的质量阈值约为 25g。不同质量含能破片在不同观测点的压力变化曲线如图 6 所示。由图 5~6 可见破片质量分别为 10g、15g、20g 均未出现爆轰波且各观测点处的压力峰值呈递减趋势,压力曲线紊乱,表明炸药未爆炸。而含能破片质量超过 25g 屏蔽装药能够被成功起爆。

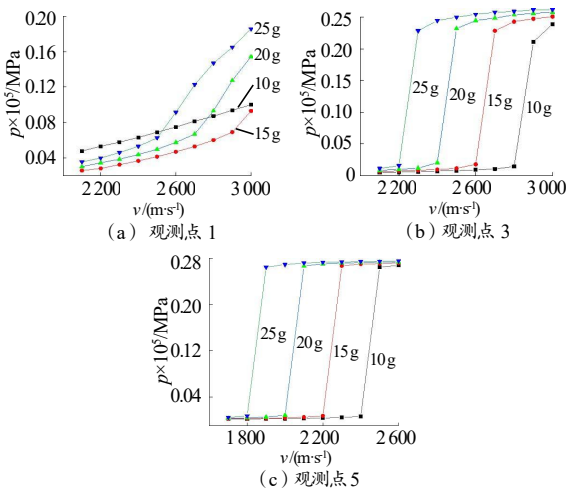


图 6 不同观测点炸药压力随破片着靶速度变化曲线  
Fig.6 Curves of explosive pressure with fragment velocity at different points

由图 6 (a) 可见,随着含能破片的着靶速度逐渐升高,不同破片质量下炸药受到的初始压力均逐渐变大,在小于 2 100m/s 时,质量为 10g 的破片施加给炸

药的的压力最大,但速度超过 2 100m/s 后 25g 的破片冲击形成的压力曲线斜率变大,同时压力也大于其他质量的破片。由图 6 (c) 可见,当速度达到某一极限曲线发生突跃,当前条件下的速度阈值分别为:质量为 10g 的破片为 2 480m/s, 15g 的破片为 2 240m/s, 20g 的破片为 2 030m/s, 25g 的破片为 1 850m/s, 如图 7 所示。

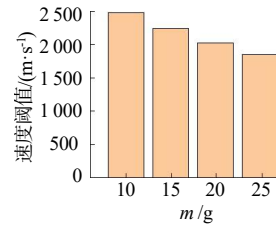


图 7 不同质量破片下的着靶速度阈值  
Fig.7 Target velocity thresholds under fragments with different masses

在相同的速度下,破片的质量越大所携带的动能也就越大,传递给炸药的冲击波也越大;另一方面,因为破片的长径比保持不变,质量的增加会造成破片与屏蔽装药接触面积的增加,增大了冲击波的作用范围,从而促进炸药的爆轰。

### 2.2 盖板参数对屏蔽装药冲击起爆的影响

#### 2.2.1 盖板厚度

采用质量为 20g、长径比为 1 的圆柱体 PTFE/Al 含能破片,以 2 000m/s 的速度分别冲击盖板厚度为 2mm、5mm 和 10mm 的屏蔽装药,盖板材料为硬铝。炸药内部压力云图如图 8 所示。

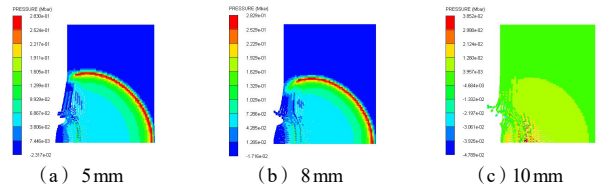


图 8 不同厚度盖板下炸药内部压力云图  
Fig.8 Nephograms of internal pressure of explosive under different thickness of cover plate

各观测点处的压力随着靶速度的变化曲线如图 9 所示。由图 9 (a) 可见,当速度在 1 900m/s 以下,炸药受到的初始压力从小到大依次为:盖板厚度为 10mm、5mm、8mm,这表明 10mm 盖板对内装炸药的保护能力最强;但当速度超过 1 900m/s,盖板为 5mm 的曲线斜率突然变大,此时盖板已无法对炸药起到保护作用。由图 9 (c) 可见观测点 5 处的速度达到某一值时炸药的压力突然上升,发生爆轰,因此得

到冲击起爆速度阈值分别为：5mm 盖板厚度时为 1 560m/s，8mm 时为 1 840m/s，10mm 时为 2 050m/s，如图 10 所示。盖板对内部装药起到保护的作用，能够屏蔽因破片撞击产生的冲击波。盖板越厚，防护能力越大。

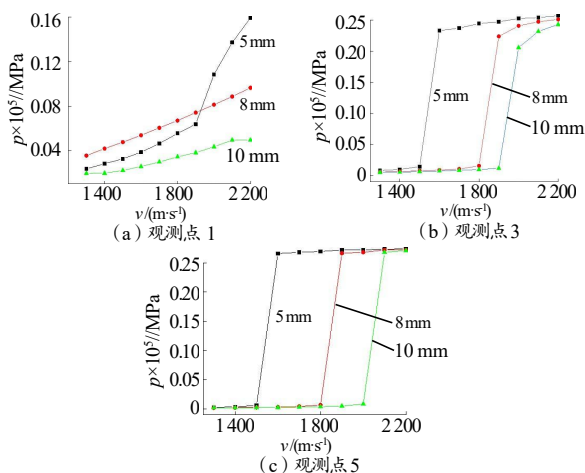


图9 不同观测点处炸药压力随破片着靶速度变化曲线  
Fig.9 Curves of explosive pressure with fragment velocity at different points

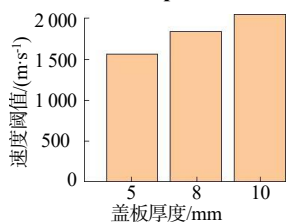


图10 不同盖板厚度下的着靶速度阈值  
Fig.10 Target velocity thresholds under cover plate with different thickness

### 2.2.2 盖板材料

为研究盖板材料对 PTFE/Al 含能破片冲击屏蔽装药的影响，选用质量为 10g、长径比为 1.0 的圆柱体 PTFE/Al 含能破片，以 2 000m/s 的速度冲击材料分别为 2024 硬铝、4340 钢以及碳酸聚酯的盖板，盖板厚度为 10mm。炸药内部压力云图如图 11 所示。各观测点处的压力随着靶速度的变化曲线如图 12 所示。

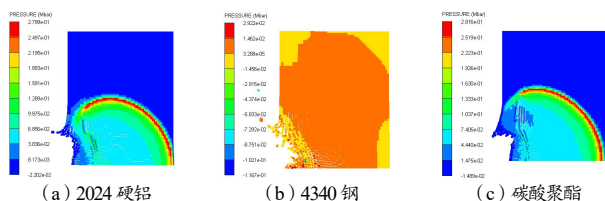


图11 不同盖板材料下炸药内部压力云图  
Fig.11 Nephograms of internal pressure of explosive under different materials of cover plate

由图 11 可见，当屏蔽装药的盖板材料为 2024 硬铝时，炸药内部出现爆轰波，各观测点处的压力峰值

不断上升，表明炸药完全爆轰；当盖板的材料为碳酸聚酯，模拟结果与铝的结果相似；当盖板的材料为 4340 钢时，炸药内部未出现爆轰波，观测点处的压力峰值呈递减趋势，表明炸药未发生爆炸。由图 12 (a) 可见，在速度 2 300m/s 以下，同样厚度盖板内部炸药的压强由小到大依次为 4340 钢，碳酸聚酯，2024 铝，表明 4340 钢对内装炸药的防护性能最好，碳酸聚酯其次，2024 铝最差。但当含能破片的着靶速度超过 2 300m/s，碳酸聚酯的压力曲线斜率突然变大，在观测点 5 处的也会出现突跃，这表明此时碳酸聚酯材料已经失效，无法对装药起到保护作用，炸药发生爆炸。2024 铝和 4340 钢的速度压力曲线总体呈线性上升，含能破片冲击起爆 3 种材料盖板屏蔽装药的速度阈值分别为：碳酸聚酯 2 360m/s，2024 铝 2 480m/s，4340 钢 3 100m/s，如图 13 所示。

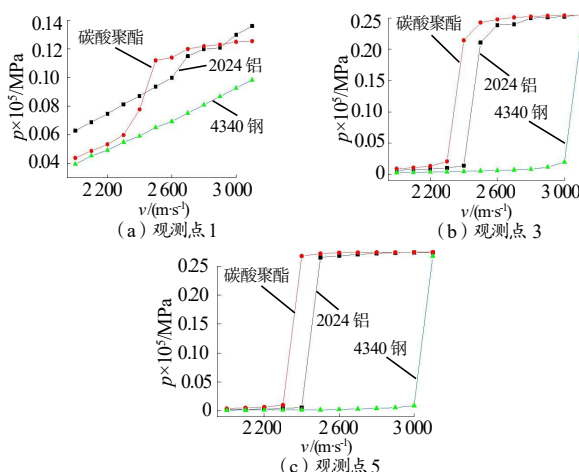


图12 不同观测点处压力随破片速度变化曲线  
Fig.12 Curves of explosive pressure with fragment velocity at different points

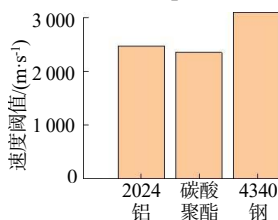


图13 不同盖板材料的着靶速度阈值  
Fig.13 Target velocity thresholds under different materials of cover plate

造成这一结果是因为材料的密度和泊松比参数会对材料内冲击波传播有很大影响，若材料的密度很大或者韧性很好，那么就可以有效地缓冲材料的冲击波。4340 钢的强度和密度较高，很好地保护到了内装炸药，而碳酸聚酯的密度不到硬铝密度的一半，但其

防护效果在一定的速度范围内要优于硬铝,这是因为碳酸聚酯材料缓冲性能较好,减缓了冲击波的传播,从而提高了对炸药的防护性能。

### 3 结论

采用 Autodyn-2D 平台对 PTFE/Al 含能破片冲击起爆屏蔽装药进行了仿真模拟,得出冲击引爆屏蔽装药的结论如下:

(1) 破片的几何参数发生改变会影响冲击引爆的结果,圆柱体长径比为 1.0 时可正常爆轰,圆柱体长径比为 1.5 和球形破片时未引爆装药,冲击波的传播受到在盖板自由端存在稀疏作用的影响,减弱了冲击波的作用。此外,含能破片质量为 10g、15g 及 20g 时未引爆装药,质量达到 25g 能够引爆炸药,破片质量的增加造成的冲击波越大,同时与盖板的接触面积也会增加,加大了冲击波的作用范围。

(2) 屏蔽装药的盖板对内部装药起到保护作用,盖板的厚度为 5mm 和 8mm 时,含能破片可引爆装药,当厚度达到 10mm 可保护装药不被引爆。盖板的材料也会对破片冲击引爆结果造成影响,盖板材料为 4340 钢时炸药未被引爆,盖板材料为 2024 硬铝和碳酸聚酯时,装药能够被引爆。盖板材料的密度以及韧性会

影响冲击波的传播,改变作用到装药的能量,使盖板的防护性能发生改变。

#### 参考文献:

- [1] John Starkenberg, Yun Huang, Alvin Arbuckle. Numerical modeling of projectile impact shock initiation of bare and covered composition-B[J]. Journal of Energetic Materials, 2006, 2(1): 1-41.
- [2] James H R, Haskins P J, Cook M D. Prompt shock initiation of cased explosives by projectile impact[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1996, 21(5): 251-257.
- [3] James H R. An extension to the critical energy criterion used to predict shock initiation thresholds[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1996, 21(1): 8-13.
- [4] 何源, 何勇, 潘绪超. 含能破片冲击薄靶的释能时间[J]. 火炸药学报, 2010, 33(002): 25-28.
- [5] 董小瑞, 隋树元. 破片对屏蔽炸药的碰撞起爆研究[J]. 华北工学院学报, 1999, 20(3): 236-238.
- [6] 任会兰, 李尉, 刘晓俊, 等. 钨颗粒增强铝/聚四氟乙烯材料的冲击反应特性[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 872-878.
- [7] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引爆屏蔽装药机理研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(08): 786-789.