文章编号：1003-1480（2026）01-0021-08

战斗部装药在破片撞击下的冲击起爆特性研究

许 伟[1]，段 继[2]

（1. 国家国防科技工业局军工项目审核中心，北京，100032；2. 中北大学，山西 太原，030051）

摘 要：研究了战斗部在破片撞击下的冲击起爆特性，进行了安全性数值仿真和试验。依据美军标 MIT-MTD-2105D，使用Φ14.3 mm×14.3 mm 钢破片撞击战斗部，评估其宏观响应。优化了 Lee-Tarver 模型，计算了壳体和装药的动力学响应。结果显示：1 885，2 158 m·s^{-1}撞击速度下，战斗部未起爆；峰值压力和最大反应度随速度增加而增大，但破片能量下降，对战斗部威胁效能比降低。不同长径比破片的起爆阈值计算表明，随着破片质量的增加，质量侵蚀比下降，起爆阈值降低 12.7%～46.2%。

关键词：战斗部安全性；破片撞击；点火增长模型；动态响应；起爆阈值

中图分类号：TJ301 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.004

Study on Shock Initiation Response of Warhead Charge under Fragment Impact

XU Wei[1]，DUAN Ji[2]

(1. State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, Beijing, 100032；2. North University of China, Taiyuan, 030051)

Abstract： The shock initiation characteristics of warheads under fragment impact were studied, and the safety numerical simulation and test were conducted. Based on the US standard MIT-MTD-2105D, the macro response was assessed using Φ14.3 mm×14.3 mm steel fragment impacting the warhead . The Lee-Tarver model was optimized to calculate the dynamic response of the shell and the charge. The results show that the warhead doesn't explode at 1 885, 2 158 m·s^{-1} impact speed; The peak pressure and maximum responsiveness are increased with the speed, but the fragment energy is decreased, and the threat effectiveness ratio to the warhead is decreased. The calculation of the initiation threshold of different aspect ratio fragments shows that the mass erosion ratio decreases and the initiation threshold decreases by 12.7%~46.2% with the mass of fragment increasing.

Key words： Warhead safety；Fragment impact；Ignition and growth model；Dynamic response；Initiation threshold

随着现代高性能弹药技术的不断发展，弹药在储存、运输及使用过程中的安全性问题受到了广泛关注。在复杂的战场环境下，弹药可能面临多种外界刺激，其中破片撞击是威胁弹药安全的重要因素之一。因此，研究弹药在破片撞击情况下的安全性，已成为弹药设计与研发过程中的一项关键指标。

国内外学者对破片撞击带壳装药进行了深入研究，研究表明，在破片撞击的作用下，炸药的主要反应机制为冲击起爆[1-2]。冲击起爆的过程极为复杂，相关研究主要涵盖冲击起爆机制、冲击起爆试验测试以及冲击起爆的数值模拟等方面。在冲击起爆机制方面，学术界普遍接受“热点”起爆理论[3-6]。在冲击起爆试验研究中，涉及爆轰性能参数测试[7-10]、爆轰产物状态方程标定[11]、拉格朗日冲击起爆特性测试[12-18]以及

收稿日期：2025-01-18

作者简介：许伟（1989-），男，工程师，主要从事弹药安全技术研究。
通讯作者：段继（1987-），男，讲师，主要从事弹药安全技术研究。

基金项目：山西省基础研究计划资助项目（No. 20210302124340）。
引用本文：许伟，段继. 战斗部装药在破片撞击下的冲击起爆特性研究[J]. 火工品, 2026(1): 21-28.

子弹/破片撞击安全性试验等多种类型[19]。试验发现，炸药的冲击起爆响应会受到壳体材料、结构、装药性质以及破片材料和尺寸等多种因素的综合影响，难以仅通过缩比机理研究来准确判断战斗部的安全性。因此，目前对于破片撞击下的冲击起爆安全性研究，主要还是依赖于全尺寸试验。

为更深入研究炸药的冲击起爆过程，研究者基于起爆机理和大量的试验测试结果，构建了多种冲击起爆仿真模型。这些模型主要分为宏观唯象模型和分子动力学细观模型。宏观模型发展较早，代表性模型包括 Forest- Fire[20]、JTF[21]、Lee-Tarver[22]和 HVRB[23]等模型，它们基于连续介质力学理论和“热点”机理，对炸药的反应过程进行现象学层面的描述。与宏观模型相比，基于分子动力学的细观模型能够更精准地描述“热点”的形成机制，被视为未来该领域的发展方向。例如，Massoni J 等[24]建立了能够反映粘塑性孔洞塌陷机制的微观模型；Yano K 等[25]建立了一种综合考虑孔洞塌缩、绝热剪切带和摩擦 3 种机制的点火模型；Kim K[26]建立了含孔隙炸药起爆的反应速率模型，能够计算炸药颗粒度和孔隙度对冲击起爆的影响；段卓平等[27]构建了多元 DZK 反应速率模型，该模型能有效反映炸药组分配比、颗粒度、孔隙度以及粘结剂强度和含量对冲击起爆的影响。然而，细观模型的计算量巨大，目前尚无法实现跨尺度仿真。在机械撞击下的冲击起爆相关研究中，应用最广泛的仍然是 Lee-Tarver 模型。但是，由于 Lee- Tarver 模型的点火项不连续、增长项和完成项的比例系数与形状因子相互影响、模型参数多（共 15 个）等不足，导致模型参数标定工作量大、效率低，模型适用范围小。

为了研究战斗部在破片撞击条件下的安全性，本研究参照美军标 MIT-MTD-2105D 开展了柱形破片撞击下的弹药安全性试验，深入分析了弹药在高速破片撞击条件下的响应特性；通过引入半周期三角函数，对 Lee-Tarver 点火增长模型进行优化。优化后的模型消除了速率方程中反应度极限的限制，使速率方程保持连续，从而改善了模型的稳定性。此外，将点火项和完成项的形状因子最大数值限制为 1，减弱了参数间的补偿效应，提高了模型参数的适用性。优化后的速率方程参数减少至 10 个，有效提高了模型参数的标定效率。通过基于炸药驱动金属板试验对模型参数进行标定，并验证了模型的准确性。应用优化后的 Lee-Tarver 点火增长模型，结合破片撞击试验，分析了战斗部装药的响应特性，得到了破片撞击战斗部装药的起爆阈值，为战斗部装药安全性评估提供理论参考。

1 破片撞击战斗部的安全性试验

1.1 试验件及试验方法

本研究所用的战斗部装药为 RDX 基含铝炸药，其装药质量配比为 w_{RDX}∶w_{Al}∶$w_{添加剂}$=80∶19∶1。战斗部壳体材料采用 30CrMnSi，圆柱部壁厚 20 mm。

破片撞击战斗部安全性试验装置由 25 mm 弹道炮、防护挡板、见证板、发射药筒、弹托以及柱形破片组成。试验中所使用的测试仪器包括测速仪、超压传感器以及高速摄影系统。在试验中，破片撞击弹丸的圆柱部，试验布置如图 1 所示。

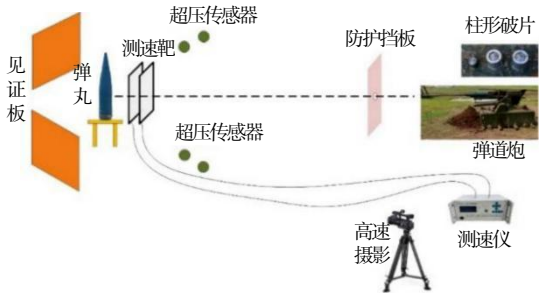


图 1 试验布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of fragment impact test

由图 1 可知，炮口与战斗部的距离设定为 12 m；在距离战斗部 3 m 的位置，以 120° 对称布置 2 块尺寸为 2.0 m × 1.5 m × 5 mm 的 Q235 见证板；地面呈 120° 布设了 2 路 4 个超压传感器，传感器与战斗部之间的水平距离分别为 5 m 和 7 m；高速摄影仪则安置在距离战斗部 25 m 的掩体内。

依据破片撞击安全性试验标准，破片参数及撞击要求如表 1 所示。

表 1 破片参数及安全性试验要求

Tab. 1 Fragment parameters and safety test requirements

破片尺寸/mm	破片材料	破片质量/g	着靶速/(m·s^{-1})
ϕ 14.3 × 14.3	30CrMnSi	18.6	> 1 800

1.2　试验结果分析

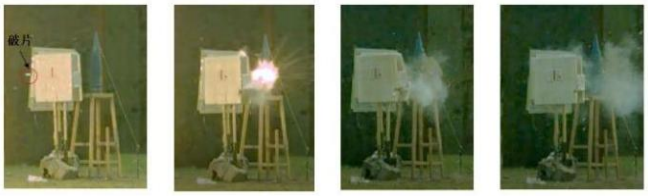
进行了 2 次破片撞击战斗部的试验，其撞击速度分别为 1 885，2 158 m·s^{-1}。在 2 次试验中，战斗部壳体均未被穿透，分别在撞击点形成了直径 35.6 mm、深度 12 mm 和直径 40.3 mm、深度 14 mm 的侵彻坑。装药未发生响应，且未检测到冲击波超压信号，具体试验结果如图 2 所示。

(a) 1 885 m·s^{-1}　　(b) 2 158 m·s^{-1}

图 2　破片撞击试验结果

Fig.2　Fragment impact test results

破片撞击战斗部过程的高速摄影记录如图 3 所示。



(a) 0 ms　(b) 0.16 ms　(c) 0.32 ms　(d) 0.48 ms

图 3　破片撞击后战斗部响应过程（破片撞击速度 2 158 m·s^{-1}）

Fig.3　The warhead response process of fragment impact test(fragment impact velocity of 2 158 m·s^{-1})

如图 3 所示，高速撞击引发的局部区域温度急剧上升，产生了显著的高温热辐射亮光。随着破片动能被弹壁吸收以及温度的散失，侵彻过程随之结束。在高速撞击条件下，冲击载荷远超过材料的动态屈服强度，导致侵彻过程中金属材料呈现类似流体状态，破片质量侵蚀明显。

2　点火增长模型优化与数值仿真分析

2.1　点火增长速率模型的优化

在当前研究中，分子动力学细观模型在执行跨尺度仿真时，计算量巨大。针对冲击起爆问题，Lee-Tarver 模型依然是被广泛采用的仿真模型。然而，该模型中的三项式点火项构型导致速率方程出现不连续性，从而影响了计算的稳定性。此外，增长项与完成项构型中的比例系数和形状因子存在明显的参数补偿效应，且受限于反应度极限，进一步影响了模型的适用范围。此外，该模型包含 15 个参数，参数的校准工作量巨大且效率低下。

针对上述问题，本研究引入了半周期三角函数概念。该函数的周期性质能够确保速率方程的连续性，同时消除了反应度极限对速率方程的不利影响。由于三角函数的最大值为 1，这有助于降低比例系数和形状因子的参数补偿需求，从而增强了模型的仿真适用性。经过优化，模型参数数量减少至 10 个，显著降低了标定过程的复杂性，并提升了仿真工作的效率。优化后的速率方程数学结构为：

$$\begin{aligned} \mathrm{d}F/\mathrm{d}t = {} & Freq\cdot 0.5\cdot(1+\cos(\pi F/figmax)) \\ & (\eta_e - 1 - Ccrit)^{Eetal} + Grow_1\cdot\sin(\pi F^{Es1})\cdot P^{em} \\ & + Grow_2\cdot\sin(\pi F^{Es2})\cdot P^{en} \end{aligned} \tag{1}$$

式（1）中：F、η_e和 P 分别代表炸药反应度以及反应物的相对密度和压力。所提出的新型三项式模型中包含若干待定参数，具体包括 *Freq*、*figmax*、*Ccrit*、*Eetal*、$Grow_1$、*Es*1、*em*、$Grow_2$、*Es*2 和 *en*。参数 *Ccrit* 指临界压缩量，它决定了炸药在达到特定压缩程度时才能被点燃的阈值条件$\eta_s \geqslant 1+Ccrit$；而 *figmax*、*Es*1 和 *Es*2 则对速率方程的形态起到调节作用，它们消除了反应度的极限值，确保速率方程在全范围保持连续性。

改进的点火增长速率模型与 Lee-Tarver 模型对比如图 4 所示。图 4（a）的研究结果显示，通过引入三角函数，显著改善了点火项的不连续性问题，从而增强了模型的稳定性；对比图 4（b）与图 4（c），新的增长完成项形状因子的最大值为 1，仅需 1 个参数即可实现形状控制，且变化过程平缓，同时消除了 Lee-Tarver 模型中增长和完成项的限制，降低了参数标定的复杂性，提高了标定效率；得益于三角函数的周期特性，更易于理解各参数变化对炸药反应速率的影响，进而得到适用范围更广的参数。

将优化后的点火增长速率方程嵌入 LS-Dyna，其

开发流程如图 5 所示。

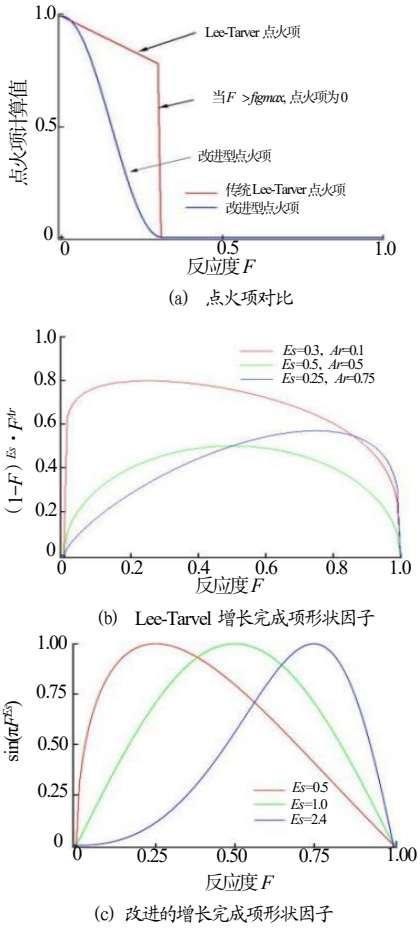


图 4 改进的点火增长速率模型与 Lee-Tarver 模型对比

Fig.4 Comparison between the improved model and the Lee-Tarver model

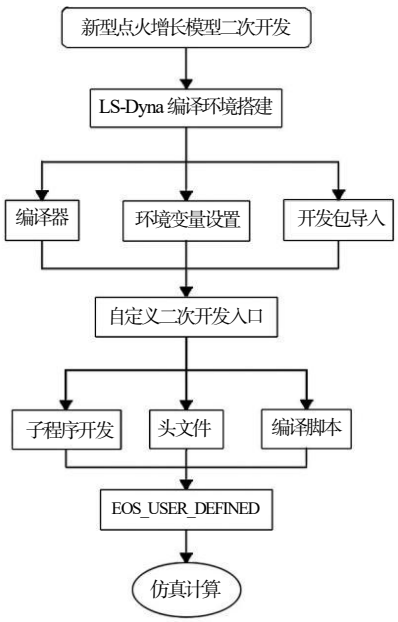


图 5 LS-Dyna 二次开发流程

Fig. 5 LS-Dyna secondary development process

2.2 参数标定与模型验证

根据与研究对象战斗部装药组分相似的含铝炸药（80%RDX/20%Al）驱动金属板试验数据[18]，对标定点火增长模型参数进行标定。本研究借鉴了含铝炸药驱动金属板的试验装置，对平面波发生器结构进行了简化处理，并构建了二维轴对称模型以模拟物理过程，具体模型结构如图 6 所示。

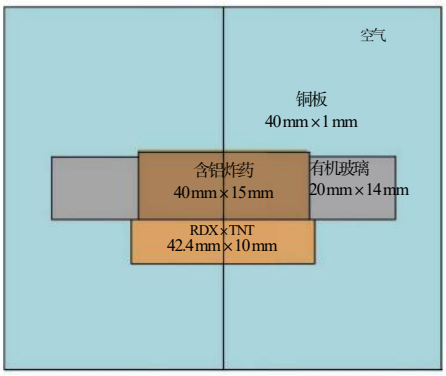


图 6 炸药驱动金属平板仿真模型

Fig.6 Simulation model of explosive driving metal flat plate

以文献[18]中测得的炸药驱动金属板速度曲线作为基准，采用 LS-OPT 软件进行参数标定，经过 201 次迭代运算，最终确定了速率方程参数，具体结果见表 2。

表 2 新型点火增长速率方程参数

Tab. 2 Improved ignition and growth rate equation parameters

figmax	*Freq*	*Ccrit*	*Eetal*	$Grow_1$
0.31	31300	0.042	8.49	570
*Es*1	*em*	$Grow_2$	*Es*2	*en*
1.34	1.76	442	1.37	0.68

含铝炸药驱动金属板的实验与仿真结果如图 7 所示。计算所得曲线与实验数据曲线在整体趋势上表现出较高的一致性，平均误差值低于 3%。

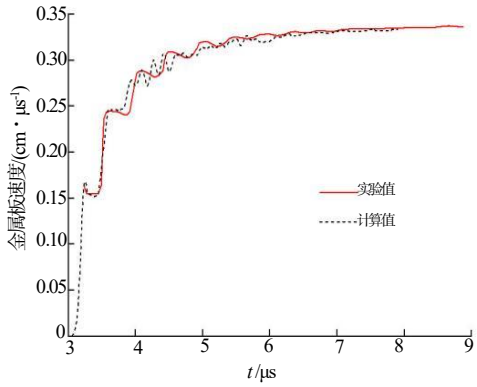
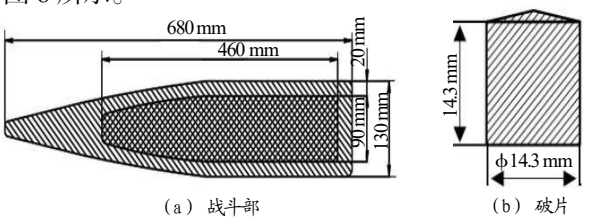


图 7 1 mm 铜板自由面速度计算值与实验值

Fig.7 Calculated and experimental values of free surface velocity for 1 mm copper plate

2.3　破片撞击战斗部过程的仿真分析

采用校准后的点火增长模型，对破片撞击战斗部的动力学过程进行计算。战斗部与破片的模型尺寸如图 8 所示。



（a） 战斗部　　（b） 破片

图 8　战斗部和破片模型尺寸

Fig.8　Warhead and fragment model size

为了分析破片撞击下装药内部的压力和反应度，设置 5 个内部监测点，如图 9 所示。

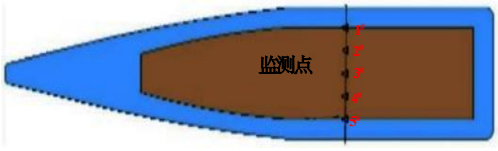


图 9　模型监测点示意图

Fig.9　Distribution of model gauge points

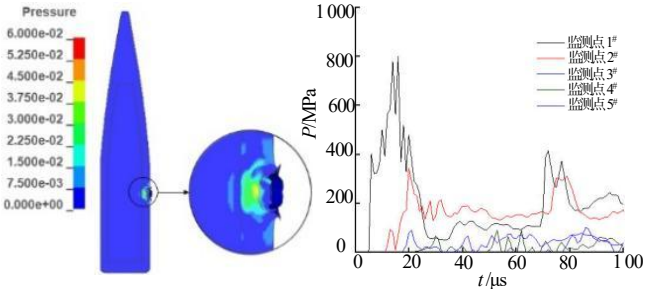
战斗部壳体和破片的材料模型和状态方程参数如表 3 所示。

表 3　战斗部壳体和破片材料模型和状态方程参数

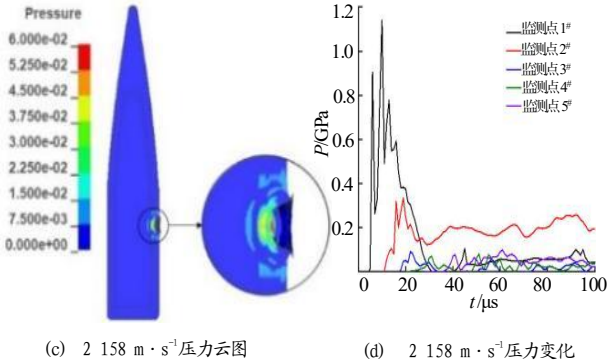
Tab. 3　Warhead shell and fragment simulation parameters

材料	ρ/(g·cm^{-3})	G/Mbar	A/Mbar	B
30CrMnSi	7.83	0.752	0.011 63	0.007 53
	C	n	m	T_t
	0.064 8	0.450 9	1.53	1 793
	C/(cm·μs^{-1})	S_1	S_2	S_3
	0.456 9	1.49	0	0
	γ_0	a	E_0	V_0
	1.93	0.50	0	1.0

不同撞击速度条件下，战斗部装药的压力分布云图以及监测点的压力变化曲线如图 10 所示。当撞击速度达到 1 885，2 158 m·s^{-1}时，破片未能穿透弹壁。由此产生的装药内部峰值压力分别为 790 MPa 和 1.14 GPa，并迅速衰减。



(a)　1 885 m·s^{-1}压力云图　　(b)　1 885 m·s^{-1}压力变化

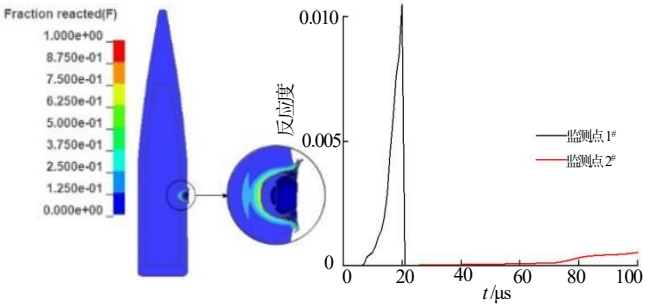


(c)　2 158 m·s^{-1}压力云图　　(d)　2 158 m·s^{-1}压力变化

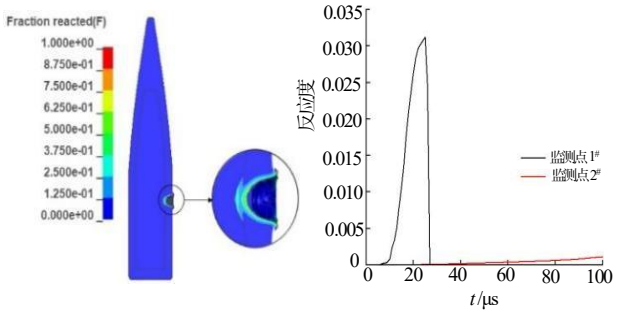
图 10　破片撞击战斗部的仿真结果

Fig. 10　Simulation results of fragment impacting warhead

在破片撞击作用下的装药反应度分布云图以及监测点的反应变化曲线如图 11 所示。



(a)　1 885 m·s^{-1}反应度云图　　(b)　1 885 m·s^{-1}反应度曲线



(c)　2 158 m·s^{-1}反应度云图　　(d)　2 158 m·s^{-1}反应度曲线

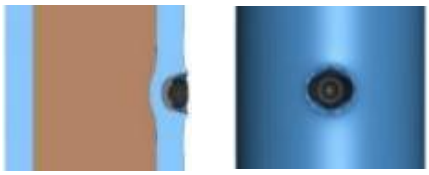
图 11　破片撞击下的炸药反应度

Fig. 11　Reaction degree of explosive under fragment impact

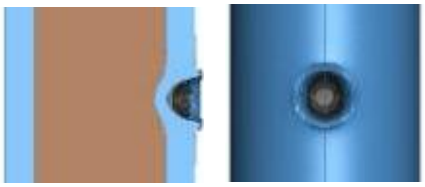
当破片以 1 885，2 158 m·s^{-1}的速度撞击时，接近撞击点区域的反应度达到峰值，其中炸药的最大反应度分别达到 0.010 和 0.031。而其他监测点的炸药反应度几乎为 0，表明在此撞击速度下，由破片撞击传递的冲击波能量不足以激发炸药反应度的显著增长。

破片撞击战斗部壳体的仿真结果如图 12 所示。在本研究中，采用 1 885，2 158 m·s^{-1}的初始速度对战斗部圆柱部分进行弹道冲击试验，在战斗部壳体侧

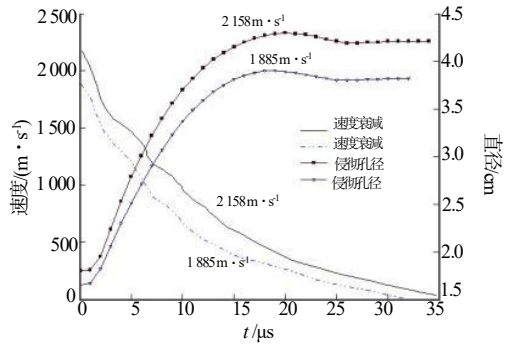
壁形成了直径分别为 ϕ38.2 mm 和 ϕ42.1 mm 的弹坑。研究发现，在不同撞击速度条件下，破片速度的衰减遵循几何相似性原则，且破片速度在大约 35 μs 的时间内衰减至 0；通过对比仿真分析与试验数据，可见最大误差控制在 8%以内。



(a) 1 885 m·s^{-1}侵彻



(b) 2 158 m·s^{-1}侵彻



(c) 破片速度与弹坑尺寸变化

图 12 破片侵彻侧壁仿真结果

Fig. 12 Simulation results of fragment impacting sidewall

针对不同速度的破片撞击，进一步分析了战斗部侧壁的损伤情况以及破片能量的转化过程，相关结果如图 13 所示。

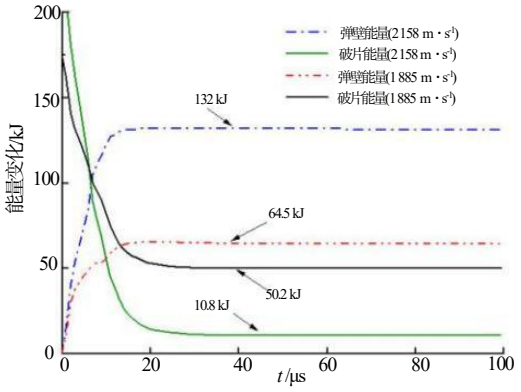


图 13 破片及侧壁的能量变化

Fig. 13 The energy change of fragment and sidewall

在 1 885 m·s^{-1}速度下，破片的初始动能为 175 kJ，与侧壁碰撞后，侧壁吸收了 64.5 kJ（占破片初始动能的 35%），而破片的动能降至 50.2 kJ（占初始动能的 28.7%）。剩余的 36.3%动能主要转化为冲击波能量传递至炸药，其余以热能和质量侵蚀的形式耗散；在 2 158 m·s^{-1}速度下，破片的初始动能为 227 kJ，碰撞后侧壁吸收了 132 kJ 的能量（占破片初始动能的 58.1%），破片的动能降至 10.8 kJ（占破片初始动能的 4.8%）。剩余的 37.1%动能同样转化为冲击波能量传递至炸药，其余以热能和质量侵蚀的形式耗散。

通过分析仿真结果，可以观察到随着撞击速度的提升，战斗部侧壁吸收的能量显著增加（由 35%增至 58.1%），而破片的动能明显下降（由 28.7%降低至 4.8%）。剩余能量相近，这表明撞击速度的增加增强了破片对壳体的破坏力，破片的质量侵蚀效应明显增强，但传递至炸药的冲击波能量并未显著增加。显然，在高速破片撞击的条件下，除了关注撞击速度外，战斗部装药的安全性还应考虑破片的质量。因此，在保持圆柱破片直径不变的前提下，通过仿真计算了 4 种不同长径比的柱形破片撞击战斗部的冲击起爆速度阈值。计算工况及结果如表 4 和图 14 所示。

表 4 不同长径比柱形破片撞击战斗部的起爆阈值

Tab. 4 Initiation threshold of different aspect ratio fragments impacting the warhead

破片形状	长径比	质量/g	起爆阈值/(m·s^{-1})
柱形破片	1.06	18.63	2 360
	1.52	26.95	2 060
	1.98	35.17	1 500
	2.44	43.43	1 270

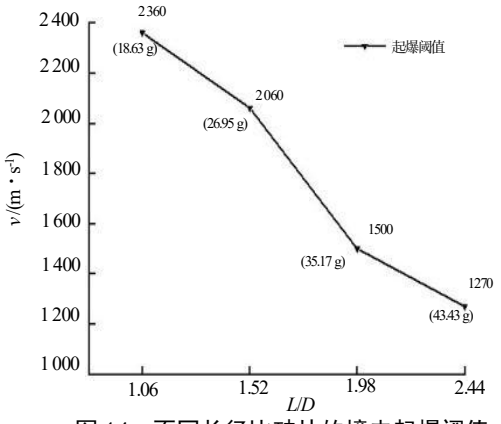


图 14 不同长径比破片的撞击起爆阈值

Fig.14 Impact initiation threshold of fragments with different aspect ratios

由图 14 可知，随着破片质量的增加，侵彻过程中破片的质量侵蚀比减小，冲击起爆阈值明显下降。

3 结论

本研究聚焦于战斗部在遭遇破片撞击时的冲击起爆响应特性，依据美国军用标准 MIT-MTD-2105D 进行了一系列安全性试验，并对 Lee-Tarver 点火增长模型进行了精细化调整。通过结合试验数据，本研究对模型的准确性进行了验证。利用优化后的模型，进行了破片撞击战斗部动力学响应的仿真计算，得出以下结论：

（1）本研究通过引入半周期三角函数，对 Lee-Tarver 点火增长模型进行了优化，消除了反应度限制，提升了模型的稳定性和适用性，并减少了参数数量，简化了标定流程。优化后的模型与实验数据对比显示平均误差低于 3%，从而验证了模型的正确性和可靠性。

（2）在 1 885，2158 m·s^{-1} 的破片撞击速度下，尽管破片未能穿透战斗部侧壁而形成侵彻坑，但战斗部并未发生起爆，这表明战斗部具有较高的安全性。

（3）随着撞击速度的提升，破片对壳体的破坏作用增强，侧壁吸收的能量增多，破片动能明显下降，然而破片剩余能量并未显著增加，这说明应考虑破片质量对战斗部安全性的影响。

（4）仿真结果表明，随着破片质量的增加，破片的质量侵蚀比例下降，冲击起爆阈值显著降低，这表明增加破片质量会提高起爆风险。

综上所述，本研究通过试验与数值仿真相结合的方法，系统地探讨了破片撞击速度和质量对战斗部安全性的影响，对 Lee-Tarver 点火增长模型进行了优化，并验证了其在战斗部安全性评估中的有效性。

参考文献：

[1] 白志玲,段卓平,景莉,等.飞片冲击起爆高能钝感高聚物粘结炸药的实验研究[J].兵工学报, 2016, 37(8):1 464-1 468.

[2] 陈兴旺.近场冲击波和高速破片对屏蔽装药的冲击引爆问题研究[D].南京:南京理工大学,2023.

[3] Tran L, Udaykumar H S. Simulation of void collapse in an energetic material, part 2: Reactive case[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(5): 959-974.

[4] Barua A , Zhou M .Computational analysis of temperature rises in microstructures of HMX-Estane PBXs[J].Computational Mechanics, 2013, 52(1):151-159.

[5] Austin R A, Barton N R, Howard W M, et al. Modeling pore collapse and chemical reactions in shock-loaded HMX crystals[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2014, 500(5): 052 002.

[6] Zhou T, Lou J, Zhang Y ,et al.Hot spot formation and chemical reaction initiation in shocked HMX crystals with nanovoids: a large-scale reactive molecular dynamics study [J].Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(26):17 627-17 645.

[7] Bouyer V, Sheffield S A, Dattelbaum D M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of detonating liquid explosives[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2009, 1 195(1): 177-180.

[8] Bouyer V, Hebert P, Doucet M, et al. Experimental measurements of the chemical reaction zone of TATB and HMX based explosives[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2012, 1 426(1): 209-212.

[9] Loboiko B G , Lubyatinsky S N .Reaction zones of detonating solid explosives[J].Combustion Explosion & Shock Waves, 2000, 36(6):716-733.

[10] Yang Y, Duan Z P, Zhang L S, et al. Measurements of reaction zone and determination of the equation of state parameters of DNAN-based melt-cast aluminized explosive[J]. Journal of Energetic Materials, 2020, 38(2): 240-251.

[11] 李淑睿,段卓平,郑保辉,等.2,4-二硝基苯甲醚基熔铸含铝炸药圆筒试验及爆轰产物状态方程[J].兵工学报, 2021, 42(7):1 424-1 430.

[12] Urtiew P A , Tarver C M .Shock initiation of energetic materials at different initial temperatures (review) [J]. Combustion Explosion & Shock Waves, 2005, 41 (6):766-776.

[13] Urtiew P A, Forbes J W, Garcia F, et al. Shock initiation of

UF-TATB at 250 ℃ [C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2002, 620(1): 1 039-1 042.

[14] Gibson L L, Dattelbaum D M, Bartram B D, et al. Shock initiation sensitivity and Hugoniot-based equation of state of Composition B obtained using in situ electromagnetic gauging[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2014, 500(19): 192 004.

[15] Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R, et al. Embedded electromagnetic gauge measurements and modeling of shock initiation in the TATB based explosives LX-17 and PBX 9502[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2002, 620(1): 1 019-1 022.

[16] Hollowell B C , Gustavsen R L , Dattelbaum D M ,et al. Shock initiation of the TATB-based explosive PBX 9502 cooled to 77 Kelvin[J].Journal of Physics Conference Series, 2014, 500(18):182 014.

[17] 李志鹏,龙新平,黄毅民,等.组合式电磁粒子速度计实验方法的研究及应用[J].含能材料, 2005, 13(6):359-361.

[18] 段继.含铝炸药爆轰驱动的非线性特征线模型[J].爆炸与冲击, 2021, 41(9):16-26.

[19] 王永亮.枪弹和破片对引信的打击及相关不敏感技术研究[D].南京:南京理工大学,2018.

[20] Mader C L, Forest C A. Two-dimensional homogeneous and heterogeneous detonation wave propagation[C]//Sixth Symposium (International) on Detonation. 1976: 405-413.

[21] Johnson J. N. , Tang P. K. , ForestC. A. Shock-wave initiation of heterogeneous reactive solids[J]. J.Appl. Phys. 1985,57 (9): 4 323-4 334.

[22] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980, 23(12): 2 362-2 372.

[23] Starkenberg J, Dorsey T M. An assessment of the performance of the history variable reactive burn explosive initiation model in the CTH code[C]//Proceedings-eleventh Symposium (International) on Detonation. Snowmass, CO, Office of Naval Research, VA ONR-33300-5. 1998: 621-631.

[24] Massoni J , Saurel R , Baudin G ,et al.A mechanistic model for shock initiation of solid explosives[J].Physics of Fluids, 1999, 11(3):710-736.

[25] Yano K, Horie Y, Greening D. Mechanistic model of hot-spot: a unifying framework[C]//AIP Conference Proceed- ings. American Institute of Physics, 2002, 620(1): 983-986.

[26] Kim K .Development of a model of reaction rates in shocked multicomponent explosives[C]// Proceedings of the 10th Symposium on Detonation. San diego: Office of Naval Research,1989: 593-603.

[27] 段卓平,刘益儒,欧卓成,等.多元混合 PBX 炸药孔隙塌缩热点模型[J].北京理工大学学报, 2013, 33(8):771-775.

[28] Bai Z , Duan Z , Wen L ,et al.Comparative analysis of detonation growth characteristics between HMX and TATB‐based PBXs[J].Propellants Explosives Pyrotechnics, 2019, 44(7):858-869.