DOI: 10.11883/bzycj-2017-0154
文章编号: 1001-1455(2018)06-1241-06

垫层对破片冲击起爆带壳炸药影响的数值模拟*

张 涛,刘雨生,高志鹏,杨 佳,刘 艺,谷 岩
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 将战斗部简化为带钢壳和垫层的炸药组件,用 3 种不同厚度的材料作垫层,利用非线性有限元软件 AUTODYN 对高速破片侵彻、引爆带壳炸药的作用过程进行了数值模拟,得到了高速破片冲击起爆带壳带垫层炸药的波后压力剖面。对不同厚度多种材料作为垫层时带壳炸药的冲击到爆轰距离进行了对比分析,结果表明,通过控制垫层的材料和厚度,可以对破片冲击起爆带壳炸药进行有效抑制。研究结果对战斗部破片起爆的防护设计具有指导意义。

关键词: 垫层;带壳炸药;高速飞片;冲击起爆;非线性有限元
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

在现有的反导技术中,利用破片撞击引爆战斗部是主要方式之一。破片对带壳炸药的冲击起爆研究对反导战斗部破片设计、炸药安全性设计及战斗部防护设计具有重要的指导意义。国内外众多学者通过数值模拟、理论分析及实验研究对破片撞击引爆战斗部开展了大量的研究[1-4]。M. D. Cook 等[5]系统综述了 1985~2010 年 25 年间破片冲击起爆炸药的研究成果,总结了破片冲击起爆炸药的三种机理。M. D. Cook 等[5]、P. J. Haskins 等[6]、H. J. Melosh 等[7]、M. D. Cook 等[8]对不同速度破片撞击炸药的起爆行为进行了系统研究,发现了低速破片撞击炸药时炸药的延时冲击起爆行为。李小笠等[9]、李旭峰等[10]采用数值模拟方法分析研究了破片形状、速度、材料等对带壳炸药冲击起爆行为的影响。宋浦等[11]、王树山等[12]就破片对带壳装药的撞击毁伤行为开展了实验研究。已有破片冲击起爆带壳装药的数值模拟和实验研究均局限于壳体直接与炸药接触,而忽略了战斗部中用于隔热作用的垫层对破片冲击起爆带壳炸药的影响。

本研究以战斗部对高速破片的防护设计为研究背景,用 3 种不同厚度的材料作垫层,采用非线性有限元软件 AUTODYN 对高速破片侵彻、引爆带壳炸药的过程进行数值模拟,分析不同厚度和不同材料的垫层对破片冲击起爆带壳炸药的影响。

1 数值模拟模型

战斗部在高速飞行过程中外部钢壳会与空气摩擦,致使外部钢壳温度较高,垫层通常采用热传导系数比较低的有机材料,通过降低热传导,保证战斗部内部装药的温度不致过高。图 1 为战斗部结构示意图。战斗部壳体采用厚 10 mm 的钢壳,装药采用密

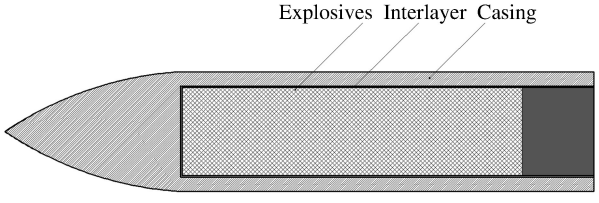


图 1 战斗部结构示意图
Fig. 1 Structure sketch of warhead

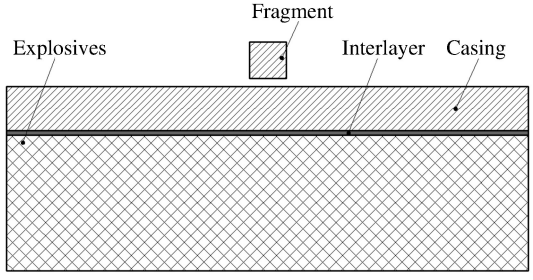


图 2 破片撞击战斗部简化模型
Fig. 2 Simple model of warhead impacted by a fragment

* 收稿日期: 2017-05-04; 修回日期: 2017-09-14
第一作者: 张 涛(1988—),男,硕士,助理研究员,zhangtao102@caep.cn。

简化模型左右对称，为了减小计算量，取简化模型的一半进行建模和计算，如图 3 所示，计算中采用 Lagrange 计算方法。为了获得破片冲击起爆带壳炸药时垫层对炸药起爆性能的影响，在炸药中距离与垫层的界面处 0～18 mm 范围内以 2 mm 为间隔设置压力取样点，编号分别为 1# ～10#，用以监测进入炸药不同距离处冲击波的发展状态。

破片采用 1006 钢，战斗部壳体材料采用 4340 钢，战斗部主装药采用 Comp. B 炸药，垫层材料分别采用环氧树脂、聚乙烯或硅橡胶。材料的状态方程、强度模型、侵蚀模型如表 1 所示。参数取自 AUTODYN 软件材料标准库。

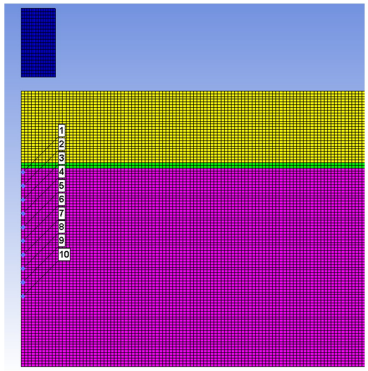


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculational model

表 1 材料模型

Table 1 Material models

部件	材料	状态方程	强度模型	侵蚀模型
破片	steel 1006	Grüneisen	Johnson-Cook	plastic strain
壳体	steel 4340	Grüneisen	Johnson-Cook	plastic strain
	epoxy	shock	viscoelastic	
垫层	polyethyl	shock	viscoelastic	
	rubber	shock	viscoelastic	
炸药	Comp. B	ignition and growth	Von mises	

其中破片和壳体采用的 Grüneisen 状态方程为：

$$p=\frac{\rho_0 c^2\mu\left(1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right)}{1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}}+(\gamma_0+a\mu)E \tag{1}$$

式中：μ 为压缩度，c 为物质中的声速，S_1、S_2、S_3 是 u_s-u_p 曲线的三次拟合系数，u_s 为冲击波速度，u_p 为波后粒子速度；γ_0 是 Grüneisen 系数，a 是对 γ_0 的一阶修正，ρ_0 为初始密度，E 为产物内能。S_1、S_2、S_3、γ_0 和 a 均为输入常数。

垫层材料采用的冲击状态方程：

$$u_s=c+su_p \tag{2}$$

式中：u_s 为进入材料的冲击波速度，u_p 为冲击波进入材料后引起的粒子速度变化值，c、s 为材料常数。

主装药 Comp. B 的化学反应率方程采用的点火增长模型：

$$\mathrm{d}\lambda/\mathrm{d}t=I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0-1-a)^x+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y+G_2(1-\lambda)^e\lambda^f p^z \tag{3}$$

式中：λ 代表化学反应率，a 为临界压缩度，用于限制点火界限，当炸药达到一定的压缩度 a 时才会发生点火。y 为燃烧项指数，代表爆燃过程，b、c 分别代表点火和燃烧项的燃烧阶数，参数 I 和 x 控制点火热点的数量，G_1 和 d 控制了点火后热点的早期反应增长，G_2 和 z 确定了高压下的反应速率。

2 数值模拟结果及分析

为了研究垫层材料及其厚度对破片冲击起爆带壳炸药特性的影响，建立了不同密度（密度为 1.16 g/cm³ 的环氧树脂、密度 0.95 g/cm³ 的聚乙烯、密度 1.23 g/cm³ 的硅橡胶）不同厚度（0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 mm）垫层材料的破片冲击起爆炸药模型。前期实验结果显示，破片冲击速度一般在 1 000～2 000 m/s之间，本研究计算中选取 1 550 m/s 的典型破片速度，破片形状为 10 mm×10 mm 的方形，破片初始位置距离壳体表面 2 mm 处。

2.1　破片冲击起爆带壳炸药过程描述

图 4 所示是采用 0.8 mm 环氧树脂作为垫层时，破片撞击带壳炸药后不同时刻主装药中的压力云图。以此为例，对破片撞击带壳炸药时主装药的冲击起爆过程进行详细描述。

从图 4 可以看出，破片高速撞击炸药壳体的瞬间，在两者界面产生两个强度为 34.4 GPa 的冲击波(1.4 μs)，两个冲击波将沿相反方向分别向破片和钢壳中传播。由于破片尺寸较小，在钢壳中传播的冲击波波阵面逐渐变形，发展成为类似点起爆的冲击波波阵面形状(3 μs)。当冲击波传播至钢壳和垫层界面时，由于垫层材料环氧树脂的冲击阻抗低于钢壳，垫层中透射进入一个 9.3 GPa 强度的冲击波的同时，钢壳中反射进入一个稀疏波(3.5 μs)。当冲击波继续传播至垫层和炸药的界面时，由于未反应炸药的冲击阻抗略高于垫层材料，传播进入炸药的冲击波强度为 10.4 GPa(3.7 μs)。冲击波在炸药中传播时，由于炸药发生局部反应导致冲击波压力不断增加，直至在 4.6 μs 时冲击波压力和速度发生明显的阶跃，说明冲击波已发展成为爆轰波。此后炸药发生完全爆轰(6 μs)。

为了准确表征垫层材料及其厚度对破片冲击起爆带壳炸药的影响，本研究选用冲击到爆轰的距离(冲击波进入炸药到炸药发生完全爆轰的距离)作为表征参量。通过在炸药中距离与垫层的界面处 0～18 mm 范围内以 2 mm 为间隔设置的压力取样点，监测得到进入炸药不同距离处冲击波后的压力状态，根据 von Neumann 峰峰值压力判断炸药是否发生完全爆轰从而得到炸药的冲击到爆轰距离。

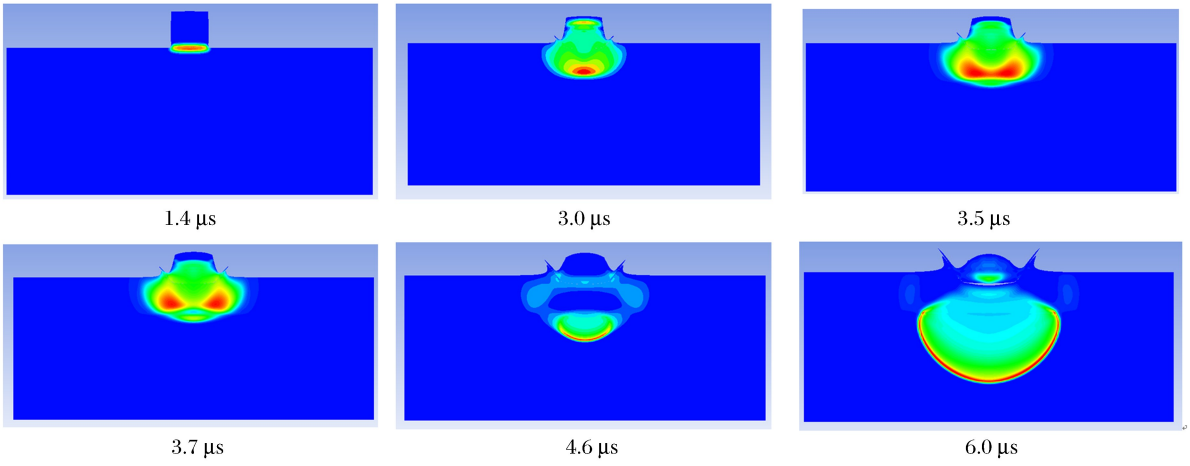


图 4　破片起爆过程中典型时刻炸药中的压力云图

Fig. 4　Detonation pressure fields of fragment initiation at different time

图 5(a)、(b)、(c)为分别采用厚 0.8、1.6、2.4 mm 的环氧树脂作为垫层条件下，破片冲击起爆带壳炸药时，不同冲击波运动位置处的波后压力剖面。从图 5(a)中可以看出，当冲击波进入炸药后，1# 压力取样点所处的物质压力出现突跃，表明冲击波进入炸药，该冲击波的强度大约为 9.44 GPa，此后随着冲击波进入炸药距离的增加，波后压力剖面的 von Neumann 峰峰值不断增加。从不同位置压力取样点之间的起跳时间差可以看出，冲击波速度在不断加速，冲击波进入炸药 5.71 mm 时，波后压力剖面 CJ 点的压力达到 29.5 GPa，表明炸药发生完全爆轰。炸药发生完全爆轰后波后压力剖面的 von Neumann 峰峰值基本保持不变，同时，由于化学反应的进行，波后压力剖面在 von Neumann 峰后呈现快速下降，随着化学反应的结束，波后压力剖面会由于产物飞散造成的稀疏波进一步缓慢降低。

从图 5 中可以看出，随着环氧树脂垫层厚度的不断增加，环氧树脂自身的黏性及边侧稀疏对冲击波的衰减作用逐渐加剧，导致进入炸药的冲击波压力逐渐减小。结果显示，当垫层采用厚 0.8、1.6、2.4 mm的环氧树脂时，进入炸药的冲击波压力分别为 9.44、7.80、7.09 GPa，而对应的炸药冲击转爆轰距离分别为 5.71、7.47 和 8.46 mm。

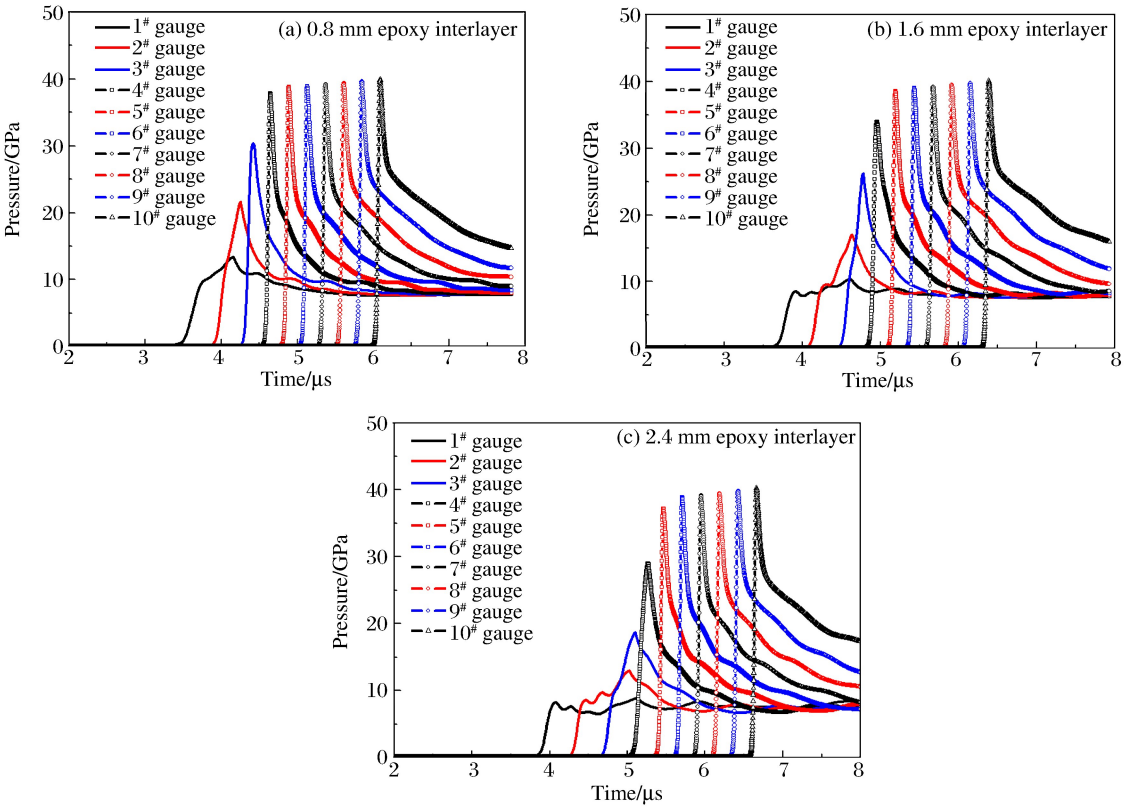


图 5 不同厚度环氧树脂作为垫层时炸药中的波后压力剖面

Fig. 5 Pressure history of explosives with different thicknesses epoxy interlayer

2.2 不同厚度垫层对破片冲击起爆带壳炸药的影响

为了研究不同厚度垫层对破片冲击起爆带壳炸药的影响，分别计算了采用厚 0、0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 mm 的硅橡胶作为垫层时的破片冲击起爆带壳炸药模型，获得了不同冲击波运动位置处的波后压力剖面。

图 6 所示为炸药的冲击到爆轰距离随硅橡胶垫层厚度变化的计算结果。从图中可以看出，当垫层采用厚 0、0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 mm 的硅橡胶时，炸药的冲击转爆轰距离分别为 5.53、6.05、9.88、17.34、30.26、51.94 mm。说明由于垫层对冲击波的衰减，导致随着垫层厚度的不断增加，进入炸药的冲击波强度不断降低，从而使得炸药发展成为完全爆轰的距离不断增加。炸药的冲击到爆轰距离与垫层厚度近似成指数关系。

2.3 不同材料垫层对破片冲击起爆带壳炸药的影响

为了研究不同材料垫层对破片冲击起爆带壳炸药的影响，分别计算了采用厚 0.8、1.6、2.4 mm 的环氧树脂、聚乙烯和硅橡胶作为垫层时的破片冲击起爆带壳炸药模型，获得了不同冲击波运动位置处的波后压力剖面。

图 7 所示为炸药的冲击到爆轰距离随垫层材料变化的计算结果。从图中可以看出，当垫层分别采用相同厚度的环氧树脂、聚乙烯和硅橡胶时，炸药的冲击转爆轰距离依次增大，且随着垫层厚度的增加，硅橡胶垫层的冲击转爆轰距离急剧增加，而聚乙烯和环氧树脂作为垫层时，随着厚度的增加，冲击转爆轰距离增长较为缓慢。说明硅橡胶垫层对冲击波的衰减最严重，导致相同垫层厚度条件下，经过硅橡胶垫层进入炸药的冲击波强度最低，从而使得炸药发展成为完全爆轰的距离最长。经过聚乙烯和环氧树脂垫层进入炸药的冲击波强度相近。

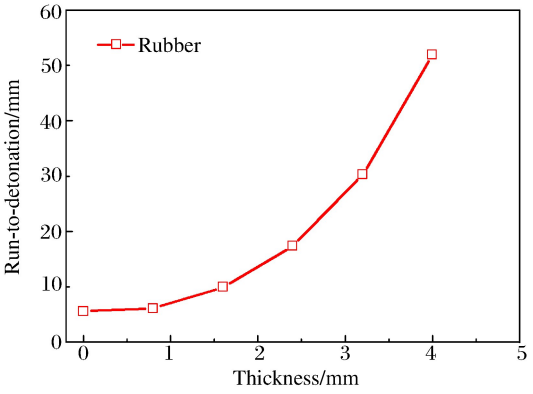


图 6　炸药的冲击到爆轰距离随
硅橡胶垫层厚度的变化曲线

Fig. 6　Run-to-detonation varied with the thickness of interlayer rubber

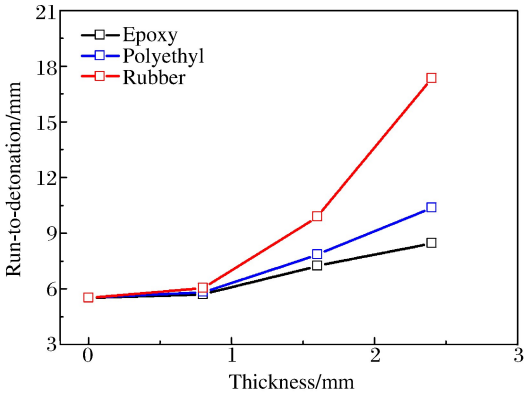


图 7　炸药的冲击到爆轰距离随
不同材料垫层的变化曲线

Fig. 7　Difference of run-to-detonation for the three interlayer materials

3　结　论

利用非线性有限元软件 AUTODYN 对不同厚度的不同材料作为垫层时，高速破片侵彻、引爆带壳炸药的作用过程进行了数值模拟。得到了 3 种不同厚度的材料作为垫层时，高速破片冲击起爆炸药的波后压力剖面。探索了垫层的材料及厚度对破片冲击起爆带壳炸药的影响。主要结论如下：

(1)主要用于降低热传导的薄层有机物垫层材料(＜3 mm)可以对破片冲击起爆带壳炸药起到有效的防护作用，对于典型破片(速度为 1 550 m/s，形状为 10 mm×10 mm 的方形破片)，冲击起爆距离对垫层的厚度较为敏感，2 mm 左右的硅橡胶即可将冲击到爆轰距离增加到 15 mm，表明可以通过增加垫层厚度加强战斗部破片起爆的防护能力；

(2)对于不同材料的垫层，炸药在相同冲击作用下发展成为完全爆轰的距离不同，厚度越大差异越明显，如对于厚度为 2.4 mm 的环氧树脂和硅橡胶，典型冲击条件下，冲击到爆轰距离可相差数倍，表明可以通过采用对冲击波衰减层能力较强的垫层材料加强战斗部破片起爆的防护能力；

(3)硅橡胶是一种较为理想的垫层材料，其热导率相对较低，同时，这种材料对冲击波的衰减能力较强。采用硅橡胶作为垫层可以对破片冲击起爆带壳炸药进行的有效抑制，对战斗部破片起爆的防护起到积极作用。

参考文献：

[1]　ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials[J]. Journal of Applied Physics, 2013,113(8):2129-1156.

[2]　WANG H, ZHENG Y, YU Q, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials [J]. Journal of Applied Physics, 2011,110(7):239-H03.

[3]　LUO P, WANG Z, JIANG C, et al. Experimental study on impact-initiated characters of W/Zr energetic fragments[J]. Materials & Design, 2015,84:72-78.

[4]　洪建华，陶江源. 杀伤破片击穿和引爆靶弹的分析与研究[J]. 弹道学报，2002,14(4):60-66.
HONG Jianhua, TAO Jiangyuan. Study of fragment penetrating and detonate target missile[J]. Journal of Ballistics, 2002,14(4):60-66.

[5]　COOK M D, HASKINS P J. Projectile impact initiation of a homogeneous explosive[J]. AIP Conference Proceedings, 1996,370(1):823-826.

[6]　HASKINS P J, COOK M D. On delayed detonation(xdt)under fragment impact—An analysis of experimental data and a simple phenomenological model[C]// American Institute of Physics, 2009:205-208.

[7] MELOSH H J. High-velocity solid ejecta fragments from hypervelocity impacts[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987,5(1/2/3/4):483-492.

[8] COOK M D, HASKINS P J, JAMES H R. An investigation of the response of secondary explosives to conical-tipped projectiles and oblique impacts[C]// American Institute of Physics, 1994:1421-1424.

[9] 李小笠,屈明,路中华. 三种破片对带壳炸药冲击起爆能力的数值分析[J]. 弹道学报,2009,21(4):72-75.
LI Xiaoli, QU Ming, LU Zhonghua. Numerical simulation on the impact effect of three type fragments impacting steel-covered charge[J]. Journal of Ballistics, 2009,21(4):72-75.

[10] 李旭锋,李向东,顾文彬,等. 含能破片引爆带壳炸药过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2014,34(2):202-208.
LI Xufeng, LI Xiangdong, GU Wenbin, et al. Numerical simulation on detonating shelled explosives by energetic fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(2):202-208.

[11] 宋浦,梁安定. 破片对柱壳装药的撞击毁伤试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(1):87-88.
SONG Pu, LIANG Anding. Experimental investigation on charges covered shell damaged fragments impact[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006,26(1):87-88.

[12] 王树山,李朝君,马晓飞,等. 钨合金破片对屏蔽装药撞击起爆的实验研究[J]. 兵工学报,2001,22(2):189-191.
WANG Shushan, LI Chaojun, MA Xiaofei, et al. An experimental study on the initiation of covered charge impacted by tungsten alloy fragments[J]. Acta Armamentarii, 2001,22(2):189-191.

[13] 张涛,谷岩,赵继波,等. 新型高能钝感炸药 JBO-9X 在较高冲击压力下冲击起爆过程的实验研究[J]. 火炸药学报,2016,39(1):28-33.
ZHANG Tao, GU Yan, ZHAO Jibo, et al. Experimental study on shock initiation process of a new insensitive high explosive JBO-9X under high impact pressure[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016,39(1):28-33.

[14] 张涛. 激光干涉测速技术用于楔形炸药冲击起爆性能研究[D]. 四川绵阳:中国工程物理研究院,2016:57-59.

Numerical simulation of the interlayer effects for fragments impacting steel-covered charge

ZHANG Tao, LIU Yusheng, GAO Zhipeng, YANG Jia, LIU Yi, GU Yan

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: Non-linear dynamical finite element software AUTODYN was used to simulate the shock initiation of steel-covered charge impacted by high-velocity fragments. The interlayer effect was studied based on the pressure history of initiation when different materials and thickness interlayers were used. The results show that the interlayer material is an important factor affecting pressure history and run-to-detonation of explosives, the thickness of interlayer has the same effects. The initiation of explosives can be effectively prevented with changing the thickness and material of the interlayer.

Keywords: interlayer; steel-covered charge; high-velocity flyer; shock initiation; non-linear dynamic

(责任编辑 曾月蓉)