DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0728-06

冲击起爆弹丸内装药延迟起爆数值模拟*

章猛华[1],王鹏新[2],余永刚[1],阮文俊[1],王 健[1],宁惠君[3]
(1.南京理工大学能源与动力工程学院,江苏 南京 210094;
2.中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001;
3.河南科技大学土木工程学院,河南 洛阳 471023)

摘要:对穿爆燃弹的穿靶及释能过程进行数值模拟,解释了 SPH-FEM 耦合方法在模拟冲击起爆过程的优越性。通过对不同弹芯头部形状、直径及材料的对比分析,得到了不同工况下装药热点成长的压力-时间曲线,计算结果表明:在弹芯直径不变的情况下,弹芯头部直角尖刺越短,装药的热点成长时间越短;在头部尖刺长度不变的情况下,减小弹芯直径,热点生成时间也缩短;选用钢弹芯比钨合金弹芯有一定靶后释能优势。模拟穿靶效果与真实穿靶效果符合较好,这种方法可以为穿爆类弹丸设计提供依据。

关键词:爆炸力学;冲击起爆;耦合算法;穿爆燃弹;光滑粒子
中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

穿甲爆破燃烧弹,由于其集穿甲、破片杀伤、纵火燃烧等作用于一身,能够应对复杂多变的作战环境,在武器运用中范围较广,消耗量也相对较大。随着高科技新型复合材料、轻型高强度防护材料和重型装甲的广泛运用,对弹药的性能提出了更高的要求,为了满足多环境及多任务的需求,迫切需要对传统弹药进行性能改进以及毁伤增强。

穿爆类枪弹,由于弹内空间有限,安装引信元件势必会减小装药空间,减小毁伤效果,而且也增加弹药的生产成本。所以弹内装药依靠弹芯的惯性力起爆,弹芯即是杀伤侵彻元件又是点火元件。此类枪弹的毁伤有效性体现在穿靶后适时爆炸形成破片杀伤,为实现靶后释能,必须对此类弹药的点火起爆时间进行精确把控,这就要求对装药的点火机理及过程进行深入分析。由于弹丸高速撞靶的过程只能持续几十微秒,而且对于弹丸内部各部件的作用过程难于进行观测,基本无法实现对内部装药的起爆过程进行详细描述[1]。

基于弹药撞靶过程的动态测量与解析计算相对困难,因此数值模拟方法以其经济性与高效性逐渐成为此类问题重要的研究手段[2]。本文中运用 AUTODYN 软件,对穿爆燃弹进行数值计算,详细分析穿靶过程弹芯对装药的惯性起爆作用过程,以及不同弹芯对延迟起爆时间的影响,为此类弹药设计及改进提供相应的手段和依据。

1 模型及算法

1.1 计算模型

穿爆燃弹典型装药结构如图 1 所示。数值计算时不考虑由于零件制造、装配等造成的不对称性,由于文中模拟只研究装药的起爆特性,所以不考虑燃烧剂的成分,燃烧剂用密度相近的金属材料铝替代,考虑到模型为

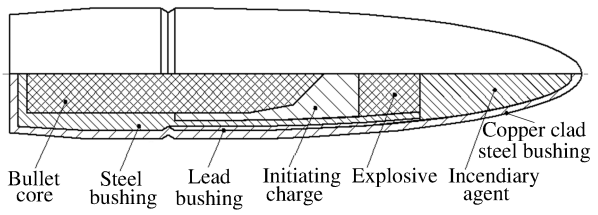

图 1 穿爆燃弹结构

Fig. 1 Bored armour-piercing explosive incendiary cartridge structure

* **收稿日期**:2015-01-20;**修回日期**:2015-05-11
基金项目:国防预研究基金项目
第一作者:章猛华(1990—),男,博士研究生,zmhalt@163.com。

轴对称结构，为了减少计算时间，建立整体的 1/4 模型，并对模型进行简化，简化后模型包括钢壳、弹芯、延时起爆药、炸药、燃烧剂和靶板，子弹数值模拟模型如图 2 所示。

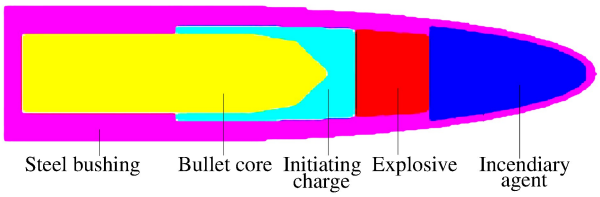

图 2　子弹数值模拟模型

Fig. 2　Bullet simulation model

钢壳材料为 steel 4340、延时起爆药选择感度较高的太安 PETNJJ1、炸药材料为高能钝感炸药 COMPBJJ1、燃烧剂为铝合金 Al 2024T351、靶板材料为 steel 1006，这些材料在高能炸药爆轰和高速撞击的高压作用下，表现出高应变、快速流动等特性，计算采用 shock 和 linear 本构关系和 Grüneisen 状态方程，材料参数取自 AUTODYN 标准数据库[3]。装药采用 Lee-Tarver 状态方程，此方程能够很好的模拟非均质炸药的冲击起爆特性：

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t}=I\,(1-F)^{b}\,(\mu-a)^{x}+G_1\,(1-F)^{c}F^{d}p^{y}+G_2\,(1-F)^{e}F^{g}p^{z}$$

式中：F 是破碎反应系数，它在模拟冲击起爆过程中控制着炸药化学能的释放；I、G_1、G_2、a、b、c、d、e、g、x、y、z 都是常数。该 3 项反应速率方程代表了压装炸药在冲击点火和爆轰时反应的 3 个阶段。炸药未反应物和反应物均采用 JWL 状态方程。PETN 和 Comp B 炸药参数如表 1。

表 1　PETN 和 Comp B 材料参数

Table 1　Material parameters of PETN and Comp B

炸药	材料参数											
	$I/\mu s^{-1}$	b	a	x	G_1	c	d	y	G_2	e	g	z
PETN	20	0.222	0	4	0	0	0	0	400	0.222	0.667	1.4
Comp B	44	0.222	0.01	4.0	414	0.222	0.667	2.0	0	0	0	0

炸药	产物参数					未反应物参数				
	ω	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2
PETN	0.25	589.2	16.92	4.4	1.2	1.173	3 746	−131.3	7.2	3.6
Comp B	0.34	524.2	7.67	4.2	1.1	0.893	77 810	−5.031	11.3	1.13

1.2　计算方法

由于爆炸或高速冲击下，材料会发生大变形，出现网格畸形，所以在使用有限元 Lagrange 算法解决这类问题时，不可避免地会出现计算精度和效率下降，甚至会出现网格变形太大而导致计算无法继续进行。在处理这种问题时，必须采用侵蚀算法删除畸变网格，使计算继续进行，在爆炸或者高速冲击过程中，畸变网格相对较多，删除较多的材料，会影响结构加载的准确性，与实际情况有一定差距[4]。Euler 算法采用空间网格固定的方法，能解决材料大变形和流动引起的网格变形，但对界面的处理不够清晰。任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法，仍须采用 Lagrange 技术进行界面处理，无法避免算法在处理材料界面的局限性。

为了克服网格算法的不足，研究工作者开始探索和发展无网格算法。光滑粒子方法(smoothed particle hydrodynamics，SPH)是 20 世纪 70 年代发展起来的一种典型 Lagrange 无网格数值方法，它通过带质量、动量、能量等的离散节点来构成计算域，不同材料的节点自然地构成界面，材料间的相互作用可以由节点间的相互作用来自然地模拟；同时由于这种方法不需要网格，特别适宜于模拟大变形问题。因此在理论上，SPH 方法能够自然地模拟高速碰撞、侵彻贯穿等物理现象。由于 SPH 算法的粒子尺寸的选择没有有限元网格划分灵活，有限元法可以根据实际需要，对感兴趣的地方进行网格加密。所以对于相同的模型，采用 SPH 算法所需时间要比有限元法长，特别是在计算模型较大的情况下，对于一般计算机来说内存和计算时长都是工程项目所难以接受的，因而把两种方法结合起来就同时具备了两

种计算方法的优点[5-9]。本文中采用 SPH 和 FEM 法相耦合的方法来模拟侵彻的整个过程，对侵彻范围内的靶板采用 SPH 粒子填充，其余部分采用有限元网格，耦合结构如图 3 所示。

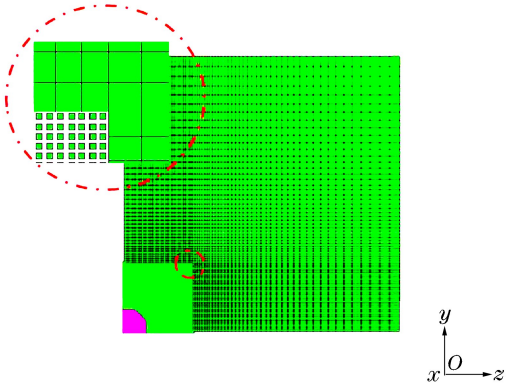

图 3 SPH-FEM 耦合靶板模型

Fig. 3 SPH-FEM coupling target model

2 数值模拟结果分析

2.1 粒子尺寸的影响

对于数值模拟来说，不管是有限元算法还是 SPH 算法，粒子(网格)的尺寸非常重要，从图 4 中可以看到，随着粒子尺寸的不断减小，曲线逐渐趋于平缓，计算结果收敛。当粒子直径小于 0.05 cm 时，随着粒子的加密，炸药的热点形成时间没有太大的变化，但是由于粒子增多，计算时间大大增加，所以选择理想计算粒子直径为 0.05 cm。

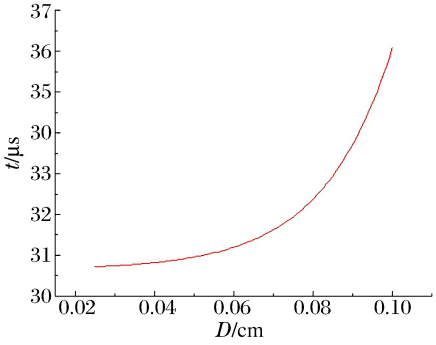

图 4 热点成长时间与粒子直径的关系

Fig. 4 Relationship of hot point growth time with particle diameters

2.2 冲击起爆分析

冲击起爆弹丸的毁伤有效性体现在弹内装药的释能时间，只有当弹丸穿过目标防护后爆炸才能造成最大毁伤。控制弹内装药释能时间是研究及改进穿爆类弹药的重点，影响延时起爆药的起爆因素有很多，在装药种类不变的情况下，弹芯的材料及结构、钢壳的强度及装药结构均对延迟时间有一定影响。但是作为点火元件，弹芯的作用是延时起爆药起爆时机最重要的影响因素，所以下面分别从弹芯的头部形状、直径及材料出发进行数值模拟，分析各种工况下延时起爆药的起爆时间。

2.2.1 弹芯结构的影响

不同结构的弹芯如图 5 所示。由于此类穿爆燃弹要求在 300 m 内穿透 1.8 mm 钢板并实现靶后释能，根据实验数据，弹丸飞行 300 m 后的速度减小到 700 m/s 左右，给定弹丸 700 m/s 的初速，靶板厚度为 1.8 mm。3 种工况下初始热点压力-时间曲线如图 6 所示。

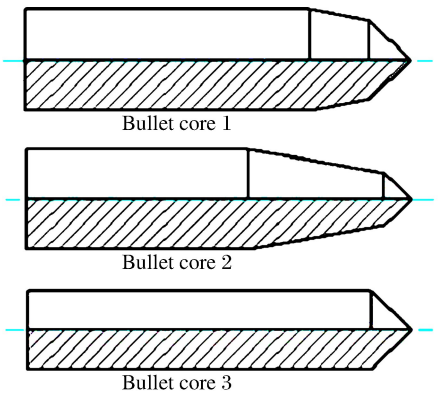

图 5 不同结构弹芯

Fig. 5 Bullet cores with different structures

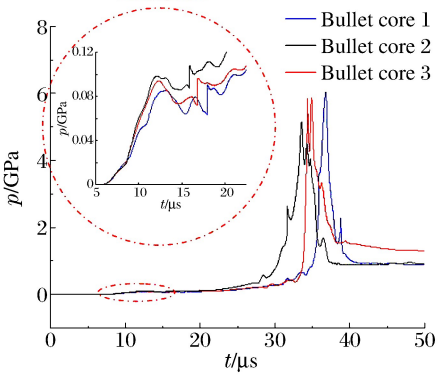

图 6 热点压力成长曲线

Fig. 6 Curves for hot point pressure growth

以弹芯 1 为参照，对弹芯 2 进行分析，计算结果显示，弹丸撞靶后，热点压力均在 12 μs 时达到第 1 个峰值，但选用弹芯 1 结构时热点初始压力更小，说明弹芯对起爆药的惯性冲击力更小，热点压力在 37 μs时迅速上升，显然炸药已被起爆，热点由此向外扩散，弹芯 2 结构热点则在 32 μs 时向外扩散，比弹芯 1 提前了 5 μs，表明弹芯头部直角尖刺越短，延迟起爆药点火时间越早，这是由于弹芯头部直角尖刺越短，弹芯受到的阻力越小，弹芯对延迟药的挤压越充分，起爆药的压缩度越大，热点温度成长越快，爆轰开始时间越早，对实现靶后释能不利。两种弹芯的撞靶开坑效果和开坑尺寸如图 7 所示，从图 7 可以看出，选用弹芯 2 使装药更早爆炸，弹丸头部未完全穿过靶板炸药已经被起爆，装药早炸明显增加了开坑直径，增强了侧向毁伤效应，相应就减小了对目标内部的杀伤威力，与预期毁伤效果有一定偏差。

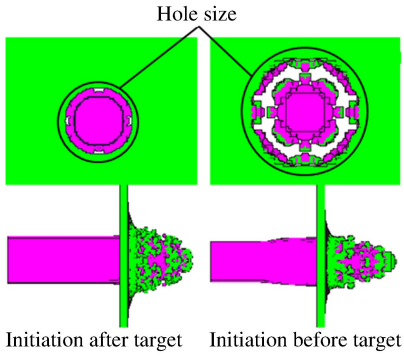

图 7　不同释能时机的穿靶效果图

Fig. 7　Effect of energy release time on target penetration

当减小弹芯直径(弹芯 3)，热点压力在 34 μs 时迅速上升，起爆药在此被点火起爆，相比于弹芯 1，弹芯 3 与装药的接触面减小，弹芯所受阻力变小，但由于弹芯尺寸的改变，质量也随之减小，从热点压力-时间曲线(见图 6)可以看出，减小弹芯直径，起爆药所受冲击压力增大，热点温度上升较快，爆轰形成的时间缩短，起爆时间提前了大约 3 μs，同样不利于实现弹丸的靶后释能。

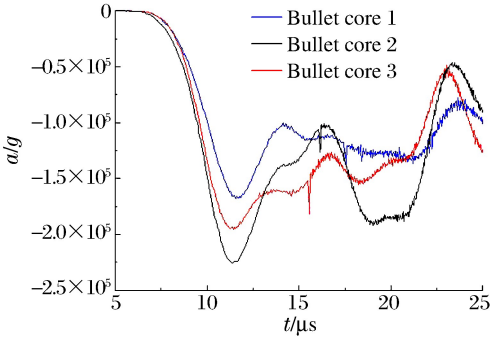

图 8　弹芯过载曲线

Fig. 8　Curves for bullet core overload

对比 3 种不同弹芯的过载加速度，如图 8 所示，3 种弹芯的加速度为弹芯 2 最大，弹芯 3 次之，弹芯 1 最小，说明弹芯 2 在侵彻相同厚度的靶板时对装药的冲量最大，炸药内部的空穴的压缩度增加以及炸药晶体间的摩擦更为剧烈，使热点温度上升越快，延迟起爆药爆轰形成时间最短，最不利于实现穿而后爆的毁伤效果。

2.2.2　弹芯材料的影响

对不同材料的弹芯进行数值分析，选用第 1 种结构的弹芯，分别对其填充钨合金和钢两种不同材料，计算得到的压力-时间曲线如图 9 所示，从图中可以看出，钨合金弹芯装药在 37 μs 时被引爆，而钢弹芯则在 45 μs 时才起爆延迟药，延迟时间比钨合金弹芯长，钢弹芯使装药起爆时间滞后了 8 μs。这是由于同样结构的钨合金弹芯的质量大，撞靶过程中的惯性力也大，起爆药在相同时间内受到的冲量大，热点温度上升较快，导致起爆时间缩短，结果表明钢弹芯比钨合金弹芯更有利于穿爆弹丸实现靶后释能。图 10 给出了两种不同材料弹芯的热点生成位置时刻图，反应度 $0 \leqslant \alpha \leqslant 1$，从 0 到 1 分别表示未反应和完全反应。从图中可以看出，热点生成位置均在装药靠近弹芯头部一侧，且出现的位置也相同，材料的改变只影响热点的成长时间。

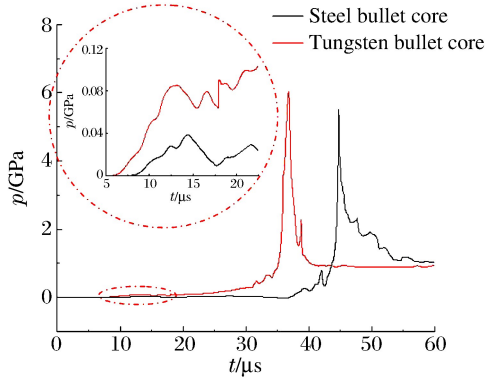

图 9　热点压力成长曲线

Fig. 9　Curves for hot-point pressure growth

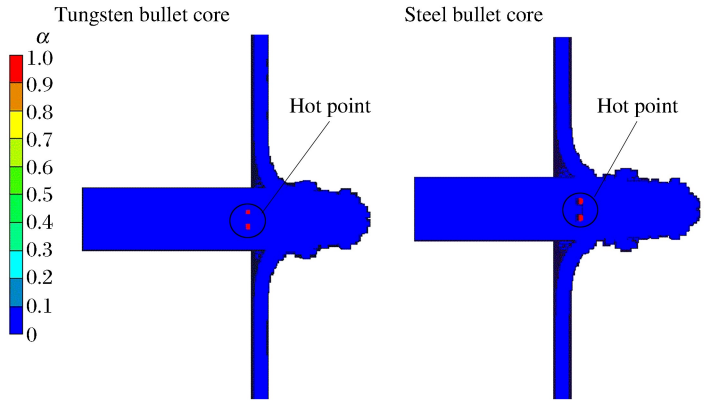

图 10 热点生成位置时刻图

Fig. 10 Hot-point generated positions and moments

2.2.3 穿爆效果对比

弹丸撞击并穿透靶板 100 μs 后，整个弹丸已经穿透靶板，并且弹丸内部装药已经膨胀扩散(在 50～100 μs 内完成)，钢外壳破碎成许多高速的小飞片向四周飞散，弹丸头部因为没有填充炸药而形成一个较大的破片向前运动，弹丸尾部壳体也同样因为没有填充炸药而与弹芯一起向前飞行，实现对目标内部人员及设备的二次破片杀伤，如图 11 所示；弹丸起爆后破片飞散效果图与 X 光照片符合较好[10]，如图 12 所示。

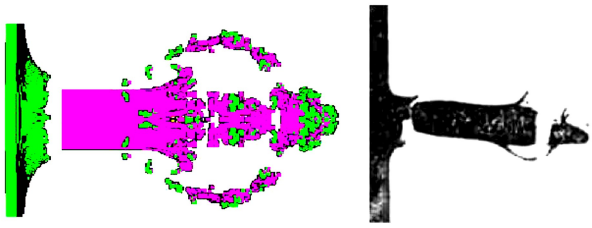

图 11 子弹穿靶效果

Fig. 11 Bullet's target penetration effect

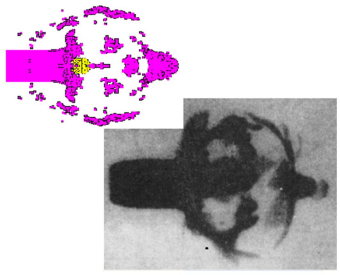

图 12 破片飞散效果

Fig. 12 Fragments' flying effect

3 结 论

(1)穿爆燃弹撞靶毁伤属于大应变和高应变率的过程，利用 SPH 与 FEM 耦合算法，能够较好地模拟穿爆燃弹在穿甲过程中弹芯对延时起爆药的作用过程及穿爆后破片的飞散过程。

(2)弹芯的弹头形状和直径均对装药的延迟起爆时间有影响，通过模拟对比 3 种不同结构的弹芯，可以得出，在弹芯长度和直径不变的情况下，弹芯头部直角尖刺越短，装药的延迟起爆时间越短。对于相同的弹芯和尖刺长度，减小弹芯直径，装药起爆延期时间也变短。减小弹芯头部尖刺长度和弹芯直径均不利于穿爆弹丸的靶后释能。

(3)弹芯材料的选择对弹丸的穿爆效果有一定影响，比较钢弹芯和钨合金弹芯的延迟起爆时间，在弹芯结构不变的条件下，弹芯的质量越小，撞靶过程中对延迟起爆药的惯性冲击力越小，热点成长较慢，延迟起爆时间较长，有更好的靶后释能优势。

参考文献：

[1] 张德良，罗忠文，俞善炳，等. 穿爆弹撞靶效应数值分析[J]. 兵工学报，1997，18(2)：102-106.
Zhang Deliang, Luo Zhongwen, Yu Shanbin, et al. Numerical analyses of the effects of impact of a penetrating projectile on the target[J]. Acta Armamentarii, 1997, 18(2): 102-106.

[2] 纪冲，龙源，方向. 基于 FEM-SPH 耦合法的弹丸侵彻钢纤维混凝土数值模拟[J]. 振动与冲击，2010，29(7)：69-74.
Ji Chong, Long Yuan, Fang Xiang. Numerical simulation for projectile penetrating steel fiber reinforced concrete with FEM-SPH coupling algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 69-74.

[3] Century Dynamics Inc. Interactive non-linear dynamic analysis software AUTODYNTM user manual. Revision 3.0 [CP]. USA: Century Dynamics Inc, 1997.

[4] 乐莉，闫军，钟秋海. 超高速撞击仿真算法分析[J]. 系统仿真学报，2004，16(9)：1941-1943.
Yue Li, Yan Jun, Zhong Qiuhai. Simulations of debris impacts using three different algorithms[J]. Journal of Sys-

tem Simulation, 2004,16(9):1941-1943.

[5] 王吉，王肖钧，卞梁. 光滑粒子法与有限元的耦合算法及其在冲击动力学中的应用[J]. 爆炸与冲击，2007，27(6)：522-528.
Wang Ji, Wang Xiaojun, Bian Liang. Linking of smoothed particle hydrodynamics method to standard finite element method and its application in impact dynamics[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(6):522-528.

[6] Attaway S W, Heinstein M W, Swegle J W. Coupling of Smooth particle hydrodynamic with finite element method [J]. Nuclear Engineering and Design, 1994,150(2/3):199-205.

[7] De Vuyst T, Vignjevic R, Campbell J C. Coupling between meshless and finite element methods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(8):1054-1064.

[8] Xiao Y H, Han X, Hu D A. A coupling algorithm of finite element method and smoothed particle hydrodynamics for impact computations[J]. Computers, Materials & Continua, 2011,23(1):9-34.

[9] 肖毅华，胡德安，韩旭，等. 一种自适应轴对称 FEM-SPH 耦合算法及其在高速冲击模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击，2012，32(4)：384-392.
Xiao Yihua, Hu Dean, Han Xu, et al. An adaptive axisymmetric FEM-SPH coupling algorithm and its application to high velocity impact simulation[J]. Explosive and Shock Waves, 2012,32(4):384-392.

[10] 宋太阳. 冲击起爆弹丸对薄板侵彻过程研究[J]. 弹道学报，1999，11(4)：54-69.
Song Taiyang. Theinvestigation on penetration process of projectile initiated by impact onto thin-sheet[J]. Journal of Ballistics, 1999,11(4):54-69.

Numerical simulation of the delay time of impact initiated projectile

Zhang Menghua[1], Wang Pengxin[2], Yu Yonggang[1],
Ruan Wenjun[1], Wang Jian[1], Ning Huijun[3]

(1. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng* 137001, *Jilin, China*;
3. *School of civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471023, *Henan, China*)

Abstract: In this work, we investigated the process of penetration and energy release of the impact initiated projectile was investigated using numerical simulation, verified the superiority of the coupling of smooth particle hydrodynamics (SPH) with finite element method (FEM) in impact initiation, and obtained pressure-time curves for the projectile's hot-point pressure growth in different operating conditions by analyzing its bullet core's different head shapes, diameters and materials. Our simulation results show that, for a given bullet core's diameter, the shorter the bullet head's spike length, the more reduced the initiation time for the explosives' hot-point growth; for a given bullet core's length, a reduced bullet core's diameter will lead to a reduced hot-point growth time; and bullet cores made from steel show greater advantage at delay initiation time over those made from tungsten alloy. The simulated effects of target penetration are fairly consistent with those from experimental results.

Key words: mechanics of explosion; impact initiation; SPH; impact initiated projectile; coupling algorithm

(责任编辑　曾月蓉)