文章编号:1000-5773(2010)06-0401-08

炸药枪击试验和数值模拟研究*

伍俊英[1],汪德武[2],陈 朗[1],王树山[1],韩秀凤[2]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.第二炮兵装备研究院,北京 100085)

摘要:HL-10 炸药是一种以 RDX 为基的含铝炸药,为了研究该炸药在子弹或金属破片撞击作用下的安全性,利用 12.7 mm 机枪法对钢壳包覆的柱形 HL-10 装药进行了枪击试验,试验结果表明,炸药没有发生燃烧或爆轰现象,由此可定义该炸药的枪击感度试验反应等级为 1 级。建立了炸药枪击试验的计算模型和数值计算方法,对子弹撞击和穿透炸药过程进行了三维数值模拟计算,计算结果与试验结果相符,分析了子弹速度对 HL-10 炸药枪击感度的影响,其结果可为炸药安全性评价分析提供理论根据。为了进一步验证计算模型和方法,对美国的 PBX-9404 炸药的枪击作用过程进行了计算分析,结果表明,PBX-9404 炸药在枪击作用下发生了完全爆轰反应,与 Neff 等人的试验结果相吻合。

关键词:枪击试验;炸药;爆轰;数值模拟
中图分类号:TJ55;O389 **文献标识码**:A

1 引 言

随着各种现代武器战术性能的不断提高,未来高科技战争对武器系统的使用环境日益苛刻,不仅要求弹药具有高性能,而且具有高安全性,因此,开展炸药的安全性评价研究十分重要。枪击试验是用来评价弹药在子弹或金属破片撞击下安全性能的重要方法[1]。在枪击试验中,子弹高速撞击炸药时,会在炸药中产生冲击波,同时在穿透炸药过程中,子弹与炸药之间产生摩擦热,炸药在冲击波和摩擦热的共同作用下可能发生燃烧或爆轰反应[1]。从 20 世纪七八十年代开始,国内外研究者对火炸药、推进剂等就开展了大量的枪击试验研究[2-6],并先后制定了关于非核弹药安全性评价试验标准,其中以美国的 MIL-STD-2105 军标[7]最有代表性,普遍被其它国家采用。但在数值模拟计算方面研究较少,1999 年,澳大利亚的 Jones 等人[8]对复合 B 炸药的枪击试验进行了二维数值模拟计算研究。计算模型中,子弹和炸药都为圆柱形结构,炸药采用 HOM 状态方程方程和森林之火反应速率方程,计算获得了不同装药直径下,炸药发生爆炸的临界子弹速度,计算结果与试验结果吻合较好。2008 年,代晓淦等人[9]对不同尺寸下 PBX-2 炸药的枪击试验进行了二维数值模拟计算。但计算过程中没有考虑炸药的爆轰反应,只分析了炸药在子弹撞击作用下的应力应变响应特征。

由于火炸药种类较多,装药条件差异较大,使用环境复杂,枪击试验研究的试验量大,且试验得到的结果只是一种宏观的结果,因此,开展枪击试验数值模拟研究工作,能够为炸药枪击试验安全性能评价研究提供理论指导。

本研究对 HL-10 炸药进行了枪击试验,通过观察炸药反应、壳体的变形情况,判断炸药的枪击感度。建立了炸药枪击试验的数值计算模型,考虑了炸药在子弹撞击作用下的反应情况,对子弹撞击和穿透炸药过程进行了三维数值模拟计算,计算结果能够为炸药安全性评价分析提供理论根据。

* **收稿日期**:2010-03-16;**修回日期**:2010-08-30
作者简介:伍俊英(1977—),女,博士,讲师,主要从事燃烧、爆轰、爆炸与冲击等方面的研究. E-mail:wjy1312@bit.edu.cn

2 试验研究

2.1 枪击试验

图 1 给出了炸药枪击试验装置的布置图。枪击试验装置主要由 12.7 mm 机枪、子弹、测速靶网、试验炸药、见证板和超压传感器等几部分组成。试验中,将试验炸药放置在底见证板上,在距离试验炸药一定距离处,用 12.7 mm 机枪进行射击,子弹速度由测速靶网进行测量。在试验炸药后方放置侧见证板,用来判断炸药在子弹撞击作用下是否发生爆炸。在试验炸药前方,与子弹射击方向成一定方位角的位置处布置超压传感器,用来测定炸药在子弹撞击作用下,可能形成的爆炸冲击波超压。

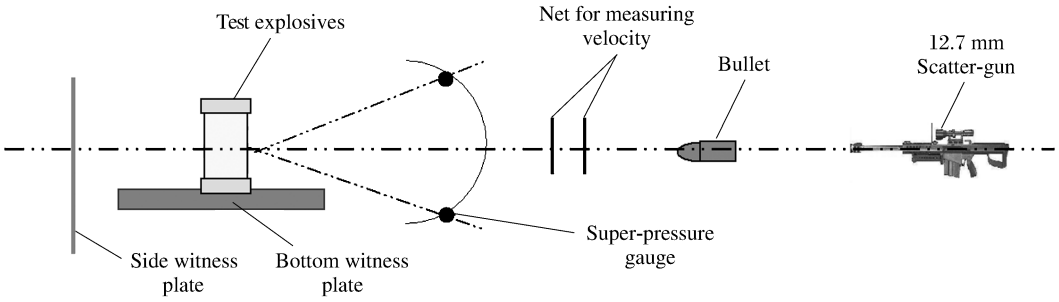


图 1 炸药枪击试验装置布置图

Fig. 1 Schematic of bullet impact test setup

试验中,试验炸药柱在底见证板上有两种摆放方式,一种是试验炸药柱横放于底见证板上,试验炸药柱轴线与枪管轴线重合,机枪瞄准试验炸药柱端盖中心进行射击,称为子弹射击炸药柱端面;另一种是试验炸药柱直立于底见证板上,轴线与枪管轴线垂直,机枪瞄准试验炸药柱中间一点进行射击,称为子弹射击炸药柱侧面。

试验炸药柱是一个壳装柱形装药,药柱两端带端盖。药柱直径为 120 mm,高为 300 mm;外壳和端盖采用厚 3 mm 的钢。试验装药为 HL-10 炸药,主要组成为:RDX/Al/粘接剂/钝感剂,装药密度为 1.73 g/cm^3,爆轰速度为 7 331 m/s,装药量约为 5 kg。子弹为穿甲燃烧弹,主要由被甲、铅套、燃烧剂和钢芯组成[11],子弹在穿透过程中起主要作用的是钢芯,子弹的速度为(850±50)m/s。

2.2 试验结果分析

两种射击方式的枪击试验研究结果表明,在子弹速度为(850±50)m/s 的条件下,每一发试验都没有发生燃烧或爆轰现象。图 2 是子弹从炸药柱端面射击后的试验照片。照片正面是子弹穿出的底端。从枪击后的试验照片可以看出,子弹穿出试验炸药柱后,底端盖被冲开了,且有一部分炸药碎裂了,但整个炸药柱的外壳保存完好,没有发生变形,也没有出现因炸药燃烧外壳变黑的现象。图 3 是子弹从炸药柱侧面撞击后的试验照片。



图 2 子弹射击炸药柱端面后的试验照片

Fig. 2 Photograph of the experimental setup for the bullet impacting the end of the explosive charge



图 3 子弹射击炸药柱侧面后的试验照片

Fig. 3 Photograph of the experimental setup for the bullet impacting the side of explosive charge

图 3 中还给出了散落的炸药碎块。从图 3 可以清楚地看到子弹击穿试验炸药柱后留下的孔洞,炸药柱外壳没有较大的变形,两端盖还保存完好。总之,根据子弹穿透试验炸药柱后壳体变形和散落的炸药形状,可以断定炸药没有发生燃烧和爆轰现象。由此可定义 HL-10 炸药的枪击感度试验反应等级为 1 级。

3　数值模拟研究

应用非线性有限元流体动力学方法(ANSYS/LS-DYNA)[10]对炸药的枪击试验进行了三维数值模拟计算。为了观察子弹穿透试验炸药柱的穿透过程,炸药柱及壳体的变形,子弹、炸药及壳体都采用拉格朗日方法。

3.1　计算模型

在计算中,不考虑机枪和超压传感器、测速靶网及见证板等测试系统,另外对穿甲燃烧弹也进行简化处理,整个穿甲燃烧弹可用一个钢芯来替代。枪击试验的物理模型呈轴对称分布,因此为了减少计算量和便于观察在子弹穿透过程中炸药内部的物理特征变化,建立了 1/4 计算模型。图 4 和图 5 分别是子弹射击药柱端面和侧面的计算模型。计算模型由子弹、试验炸药及壳体 3 部分组成。其中子弹和炸药柱的计算网格都采用 3 mm×3 mm×3 mm 的六面体网格,壳体的计算网格采用 2 mm×2 mm×2 mm的六面体网格。

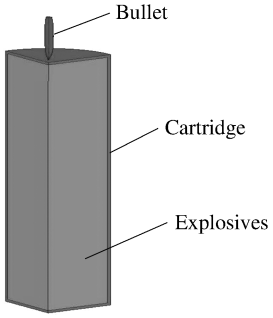


图 4　子弹射击炸药柱端面的 1/4 计算模型

Fig. 4　1/4 calculated mode for the bullet impacting the end of the explosive charge

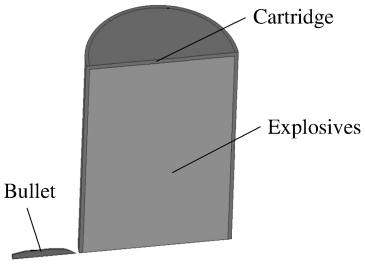


图 5　子弹射击炸药柱侧面的 1/4 计算模型

Fig. 5　1/4 calculated mode for the bullet impacting the side of the explosive charge

3.2　材料模型

子弹和弹壳材料都为钢。计算时,子弹采用刚体材料模型,弹壳采用弹塑性材料模型。钢的密度为 7.8 g/cm^3,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服应力为 100 MPa。

试验炸药采用弹塑性流体力学材料模型,同时采用点火增长反应速率方程来描述炸药在枪击试验过程中可能发生的爆轰反应。

点火增长反应速率方程为[1]

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

式中:右边多项式第一项表示部分炸药在冲击压缩下被点火,第二项表示炸药快速反应产生的爆轰气体产物的过程,第三项表示在主要反应后相对缓慢的扩散控制;λ 是炸药反应度,t 是时间,ρ 是密度,ρ_0 是初始密度,p 是压力,I、G_1、G_2、a、b、x、c、d、y、e、g 和 z 是常数。计算中,HL-10 炸药和美国的 PBX-9404 炸药的点火增长模型反应速率参数见表 1。HL-10 炸药的参数来自文献[12],PBX-9404 炸药的参数来自文献[1]。

表 1　炸药的点火增长模型反应速率方程参数

Table 1　The parameters of reaction rate of ignition growth model for explosives

Explosives	I	B	a	x	G_1	c	d	y	G_2	e	g	z
HL-10	3.1×10^4	0.667	0.02	8.0	2.87	0.222	0.667	2.0	400	0.333	1.0	3.0
PBX-9404	7.43×10^4	0.667	0.00	20.0	3.10	0.667	0.111	1.0	400	0.333	1.0	2.0

3.3 计算结果与讨论

3.3.1 子弹射击 HL-10 炸药柱端面

图 6 给出了计算模型在不同时刻的变形。由图 6 可知，子弹穿透药柱后没有发生变形，但外壳及炸药柱中心明显出现一个孔洞。随着穿透的加深，在炸药柱中形成穿孔大小有减小的趋势，这是由于炸药采用的是弹塑性流体动力学材料模型，随着侵彻的加深，炸药的网格变化较大，但受到外壳的约束，炸药柱不能向周围扩张，所以网格在拉伸的过程中，形成的孔洞又被挤压缩小了。

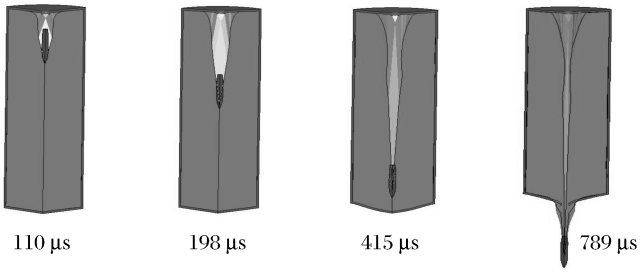


图 6 1/4 计算模型在不同时刻的变形

Fig. 6 Distortion at different times for the 1/4 calculated model

由图 7 可知，在 789 μs 时刻子弹已经完全穿出炸药柱了，在穿出的过程中，有一部分炸药随子弹一起出来了，这是由于炸药采用的是弹塑性流体动力学材料模型，尽管网格已经变形很大，但它是流体，在计算的过程中网格不会被自动删除，因此子弹与炸药间的摩擦使子弹周围的炸药随同子弹一起穿出。而外壳采用的是弹塑性材料模型，计算时定义了材料的失效应变，当网格单元的应变达到定义的失效应变值时，网格单元就会被自动删除，形成一个明显的孔洞。图 7 给出了子弹穿透炸药柱后 1/2 外壳的变形。外壳只在子弹穿过的地方形成孔洞，其它部位没有发生变形，这表明 HL-10 炸药在子弹穿透过程中没有发生燃烧和爆轰等剧烈化学反应。

为了获得子弹穿透炸药柱后的速度变化和能量损失，需要对子弹的速度变化进行分析。图 8 给出了子弹穿透过程中的子弹速度随时间变化曲线。约在 3 μs 时刻子弹初始速度由 850 m/s 开始下降，表明这个时刻子弹撞击到了炸药柱壳体的上顶盖上，这之后子弹的速度迅速下降，约在 29 μs 时刻后子弹速度又开始较平缓地下降，这时子弹已经穿过上顶盖进入炸药柱内部了。大约在 511 μs 时刻子弹速度又快速下降，这时子弹穿透到下底盖处，大约在 695 μs 时刻子弹速度下降到 321 m/s，这之后不再发生变化，子弹完全穿出炸药柱了。子弹穿透炸药柱的总时间约为 692 μs，能量损失大约为 14.2 kJ。



图 7 子弹穿透后 1/2 外壳的变形

Fig. 7 Distortion of 1/2 cartridge case

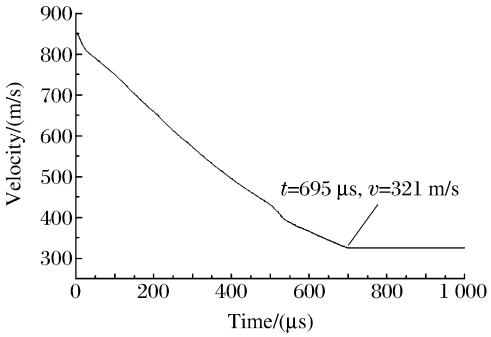


图 8 子弹速度随时间的变化曲线

Fig. 8 Bullet velocity history

图 9 给出了炸药柱内部在不同时刻的压力分布。由图 9 可知,炸药柱内部高压区主要集中在子弹头部穿孔的地方,整个侵彻过程中冲击波压力较低,最大压力不到 1 GPa,炸药柱除子弹穿孔留下的孔洞外,没有发生大的变形。通过对炸药柱内的压力以及形变综合分析,可以认为炸药没有发生燃烧或爆轰现象。

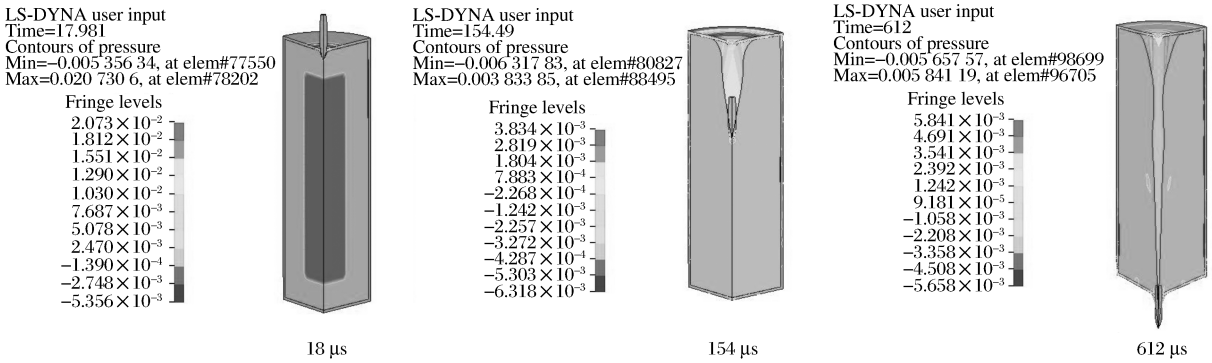


图 9　不同时刻炸药柱内部的压力分布

Fig. 9　Pressure distribution at different times

3.3.2　子弹射击 HL-10 炸药柱侧面

图 10 给出了 1/2 计算模型在不同时刻的变形。为了便于观察穿孔情况,图中显示的是将 1/4 计算模型映射成 1/2 计算模型的结果。由图 10 可知,当子弹穿透炸药柱后,装药和外壳只形成一个孔洞,并没有发生大的变形,这说明炸药并没有发生剧烈反应。在子弹穿透的过程中,药柱内产生的最大压约为 0.38 GPa,子弹穿出药柱所需的总时间约为 326.5 μs,子弹速度降为 465 m/s,损失的能量约为 11.7 kJ。

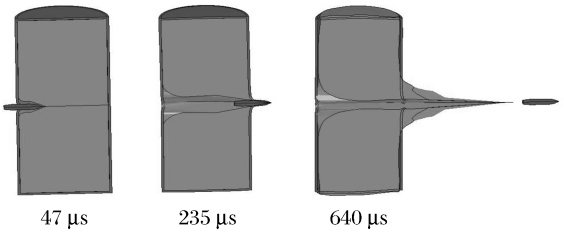


图 10　1/2 计算模型在不同时刻的变形

Fig. 10　Distortion at different times for the 1/2 calculated model

3.3.3　子弹速度对 HL-10 炸药枪击感度的影响

由于子弹速度越高,撞击炸药柱的冲击动能越大,在炸药柱中产生的冲击波也越高,但子弹速度受到机枪的限制,很难进行更高速度下的枪击试验,而数值模拟则很容易实现。因此,本研究通过数值模拟计算,分析了在提高子弹速度后炸药的响应情况。

对子弹以不同速度射击炸药柱端面的情况进行了计算。计算结果表明:子弹速度低于或等于 2 500 m/s时,HL-10 炸药不能被起爆,当子弹速度大于或等于 2 600 m/s 时,炸药才能被起爆。

图 11 给出了子弹速度为 2 600 m/s 的情况下,计算模型在不同时刻的压力分布。由图 11 可知,在 7.0 μs时刻,子弹撞击在炸药柱中产生的最大压力约为 9.3 GPa,之后压力有所下降,当到达 27 μs 时刻,压力又成长起来了,这时炸药柱内部的最大压力达到 19.7 GPa,这表明炸药已经发生了爆轰反应。在 42 μs 时刻,炸药已经发展成为稳定爆轰。从炸药柱内部的压力分布图可以看出,起爆点发生在子弹头部撞击的地方,爆轰波沿子弹侵彻的方向传播。

在炸药柱的轴心线上不同深度处选取了 5 个单元进行分析,所选的位置见图 12。图 13 给出了5 个单元的压力-时间曲线。由压力-时间曲线可知,沿子弹射击的方向,压力不断增加,最后形成了稳定爆轰。

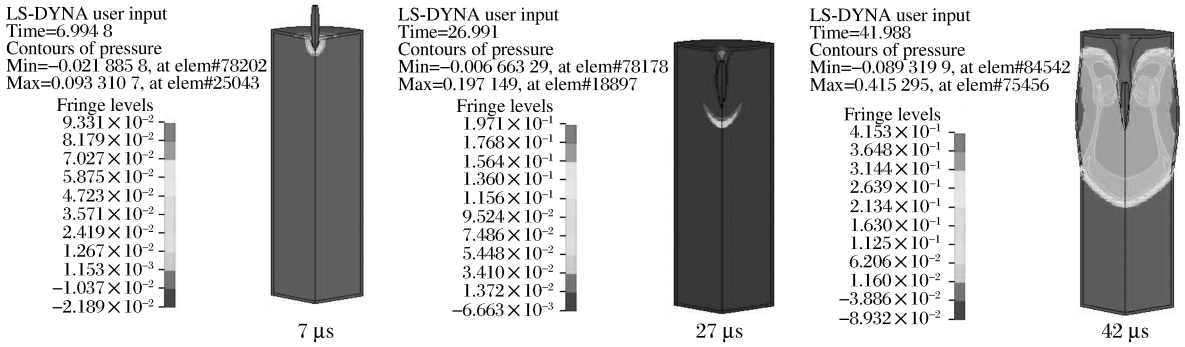


图 11 2 600 m/s 子弹速度下计算模型在不同时刻的压力分布

Fig. 11 Pressure distribution of the model at different times with the 2 600 m/s bullet velocity

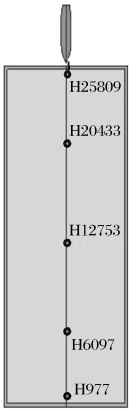


图 12 选取单元的位置

Fig. 12 Elements at the axis of the explosive charge

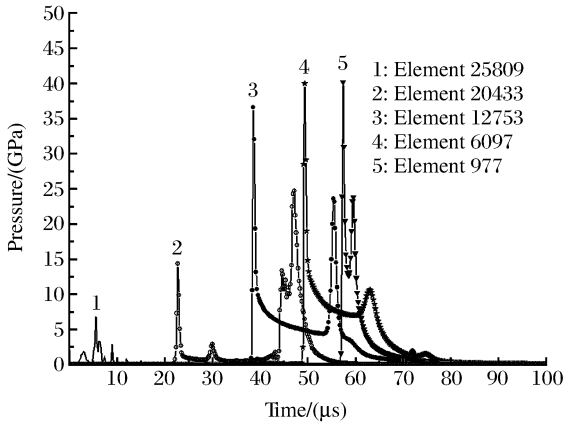


图 13 2 600 m/s 时所选取单元的压力时间曲线

Fig. 13 Pressure history curves of the selected elements with 2 600 m/s bullet velocity

3.3.4 美国的 PBX-9404 炸药

考虑到 HL-10 炸药较钝感，在枪击试验中没有发生爆轰反应，为了进一步验证计算模型，本研究中针对美国的 PBX-9404 炸药，子弹以 850 m/s 速度从炸药柱端面射击的情况进行了数值模拟计算。这种炸药是以奥克托今为基的塑料粘结炸药，感度较高。Neff [13-14] 对 PBX-9404 炸药进行了枪击试验，结果表明，PBX-9404 炸药发生了明显的爆轰反应。

计算结果表明，PBX-9404 炸药在这种情况下发生了完全爆轰反应，与 Neff 等人的试验结果相吻合。图 14 给出了不同时刻炸药柱内部的压力分布。由图 14 可知，子弹刚开始撞击炸药柱时，在炸药柱内部产生的冲击波压力较低，不到 1 GPa，随着子弹的深入，压力不断增加，在 89.5 μs 时刻，压力就增加到了 26 GPa，这之后炸药迅速发展为稳定爆轰。由此可知，由于 PBX-9404 炸药的冲击感度比 HL-10 的炸药高，在同样的子弹速度射击下，PBX-9404 炸药发生了稳定爆轰反应，而 HL-10 炸药没有发生爆轰反应。

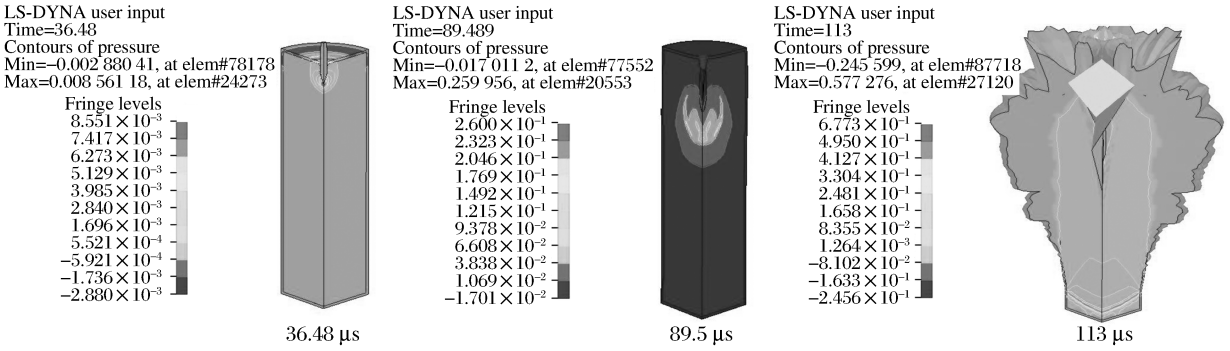


图 14　PBX-9404 炸药柱在不同时刻的压力分布

Fig. 14　Pressure distribution at different times for PBX-9404 explosives

4　结　论

为了评价 HL-10 炸药的安全性能,进行了钢壳包覆的 HL-10 炸药的枪击试验。试验结果表明,无论是子弹射击炸药柱端面还是侧面,两种情况下炸药都没有发生燃烧或爆轰反应,因此,可定义该炸药的枪击感度反应等级为 1 级。

采用爆轰数值模拟方法对 HL-10 炸药枪击试验进行了三维数值模拟计算,获得了与试验结果相符的计算结果。分析了子弹速度对 HL-10 炸药枪击感度的影响规律,结果表明,当子弹速度为 2 600 m/s 时,炸药发生完全爆轰反应,当速度不大于 2 500 m/s 时,炸药不能被起爆。对美国的 PBX-9404 炸药枪击试验的计算结果表明,PBX-9404 炸药的枪击感度较高,当子弹速度为 850 m/s 时发生了完全爆轰反应。

本研究在计算子弹撞击和穿透炸药过程中,由于炸药采用的是目前最常用的点火增长反应速率模型,该模型有一定的局限性,它只能考虑撞击过程中产生冲击波对炸药起爆的作用,而不能考虑穿透过程中产生摩擦热对炸药起爆的作用,因此,下一步工作应对计算模型和计算程序进行修改,增加温度对起爆的影响。

References:

[1] Zhang G R, Chen D N. Agglomerate Explosive Initiation Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 258-259. (in Chinese)
章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学 [M]. 北京:国防工业出版社,1991,258-259.

[2] Corley J D, Stewart A. Fuzed Insensitive General Purpose Bomb Containing AFX-645-Final Report [R]. WL-TR-95-7019, 1995: 9-14.

[3] Kimura E, Oyumi Y. Sensitivities of Azide Polymer Propellants in Fast Cook-off, Card Gap and Bullet Impact Tests [J]. J Energetic Mater, 1997, 15(2-3): 162-178.

[4] Dagley I J, Sook-Ying H, Viector N. Effects of the Polymer Matrix Density on the Shock, Bullet Impact and High Strain-Rate Ignition Sensitivity of Polymer Bonded Explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1997, 22: 296-300.

[5] Li X Z, Pei Y W. Low Volnerability Experimental Study of Solid Rocket Engine under Popping Condition [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2000, 2: 39-42. (in Chinese)
李小柱,裴养卫. 固体火箭发动机枪击低易损性试验研究 [J]. 弹箭与制导学报,2000,2:39-42.

[6] Cliff M D, Smith M W. Insensitive Munitions Assessment of the 5"/54 Naval Artillery Shell Filled With ARX 4024 [R]. DSTO-TR-1514, 2003: 9-11.

[7] Department of Defense. Test Method Standard, Hazard Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions [S]. MIL-STD-2105C, 2003.

[8] Jones D A, Kemister G, Borg R A J. Numerical Simulation of Detonation in Condensed Phase Explosives [R]. AR-010-605, DSTO-TR-0705, 1999.

[9] Dai X G, Shen C Y, Lü Z J, et al. Reaction Properties for Different Size PBX-2 Explosives in Bullet Impact Test [J]. Energetic Materials, 2008, 16(4): 432-435. (in Chinese)
代晓淦, 申春迎, 吕子剑, 等. 枪击试验中不同尺寸 PBX-2 炸药响应规律研究 [J]. 含能材料, 2008, 16(4): 432-435.

[10] LS-DYNA Users' Manual. Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions [Z]. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Version 971, 2007.

[11] Bullet Manual Writing Group. Bullet Manual [Z]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 12. (in Chinese)
枪弹手册编写组. 枪弹手册 [Z]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 12.

[12] Wu J Y, Wang C, Chen L, et al. Numerical Simulations of Sympathetic Detonation for Confined Explosive Charges [A]// Li S C, Wang Y J, Cao F X, et al. Theory and Practice of Energetic Material [C]. Beijing: Science Press, 2009, (Ⅷ): 542-547.

[13] Neff G W. Rifle Bullet Test (MHSMP-72-28S)[R]. Amarillo, Texas: Mason and Hanger-Silas Mason Co, 1971: 4.

[14] Neff G W. Rifle Bullet Test (MHSMP755Q)[R]. Amarillo, Texas: Mason and Hanger-Silas Mason Co, 1974: 16.

Experiments and Numerical Simulations of Bullet Impact Tests for Explosives with Shell

WU Jun-Ying[1], WANG De-Wu[2], CHEN Lang[1], WANG Shu-Shan[1], HAN Xiu-Feng[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *The Second Artillery Equipment Academy, Beijing* 100085, *China*)

Abstract: HL-10 explosive is an aluminized explosive based on RDX. In order to investigate the safety characteristics of HL-10 for bullet impact test, 12.7 mm bullet was used to impact HL-10 charge. Experimental results show that there is no significant reaction or burning resulted from these bullet impact tests, so the impact sensitive of HL-10 for bullet impact test is defined as the first grade. The calculation modes and methods of bullet impact tests were established. The three-dimensional numerical simulations of the bullet impact tests were conducted. Good agreement was found between the calculated results and the experimental results. In addition, the responses of HL-10 to different bullet impact velocities were analyzed. The calculated results can provide a theoretical basis for the analysis of explosives safety evaluation. To further verify the calculation model and method, the bullet impact test calculation for America PBX-9404 explosive was conducted. The results show that, PBX-9404 explosives would be detonated at 850 m/s impact velocity for the same calculation mode, which are consistent with Neff and others experimental results.

Key words: bullet impact test; explosives; detonation; numerical simulation