第21卷 第2期
2007年6月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 21, No. 2
June, 2007

文章编号:1000-5773(2007)02-0165-08

高速杆式弹丸三维数值模拟*

李成兵[1],裴明敬[2],沈兆武[1]

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系,安徽合肥 230026;
2. 西北核技术研究所,陕西西安 710024)

摘要:应用LS-DYNA动力学分析软件对变球缺型罩装药结构下高速杆式弹丸的形成过程进行数值模拟研究,揭示了其成型机理,并研究了中心点起爆、四点同时起爆和环形起爆等三种起爆方式对高速杆式侵彻体的成型和性能参数的影响,得到了弹体的速度分布。数值计算结果显示:变球缺型罩装药结构能形成速度高、长径比大、质量分布合理的高速杆式侵彻体,其成型机理兼有聚能射流和翻转型爆炸成型弹丸的特点,即上半部罩微元直接向轴线压合,下半部罩微元向轴线压合时逐渐向后翻转变形。不同起爆方式下所形成的高速杆式弹丸的形状和性能参数有所不同,其中环形起爆所形成的弹体性能参数最优。实验结果所反映的起爆方式的影响规律与数值计算结果是一致的。

关键词:爆炸力学;高速杆式弹丸;变球缺型药型罩;起爆方式;数值模拟
中图分类号:O358 **文献标识码**:A

1 引 言

高速杆式弹丸属于聚能侵彻体范畴[1],与EFP一样没有明显的杵体和射流之分,其侵彻性能介于EFP和聚能射流之间。它和普通小锥角罩形成的射流相比,具有对炸高不敏感、药型罩利用率高和后效大的特点;与EFP和常规动能穿甲弹相比,高速杆式弹丸比它们的飞行速度更大、弹体长度更长、断面比动能更大、侵彻能力更强,尤其对砖墙、钢筋混凝土等坚固工事的侵彻更显示出高速杆式侵彻体的优势。另外在对付某些特殊的装甲防护,如多层间隔装甲、含水间隙装甲和机场跑道等具有较好的应用前景[2]。早在20世纪80年代国外便开始研究聚能杆式侵彻体,20世纪90年代中期广泛应用到精确打击的灵巧弹药武器系统中,实现了在较大炸高下获得较大的侵彻深度,提高了武器装备的作战效能。如CBU-97/CBU-105、STAFF非制导炮弹、SADRAM末敏弹、STRIX末制导炮弹、XM93型广域反装甲雷等精确打击武器中都配有爆炸成形杆式侵彻体战斗部[3]。

能形成聚能杆式侵彻体的装药方式很多。国外对大锥角装药进行了较多研究,最早的是所谓X Charge[4]。国内也对大锥角装药进行了一定的研究,如谭多望等[5]利用脉冲X光照相技术研究了大锥角罩所形成的侵彻体的特点,证实了杆式侵彻体在15倍炸高条件下对钢靶具有较好的侵彻性能 。王海福、段卓平等[6-7]也对大锥角装药进行了研究。除大锥角装药外,国内外对能形成杆式侵彻体的JPC装药结构[3,8]也进行了较多的研究。变球缺型罩装药结构也能形成性能优良的聚能杆式侵彻体,但却很少有学者对其进行研究。本工作利用数值模拟技术对变球缺型罩装药结构及爆炸形成高速杆式侵彻体的过程和机理进行研究,并研究了起爆方式对高速杆式侵彻体的成型及性能参数的影响。

* **收稿日期**:2006-06-07;**修回日期**:2006-09-30
基金项目:国防科技预研项目(413260401)
作者简介:李成兵(1977—),男,博士研究生,主要从事爆炸力学研究. E-mail:lichbing@mail.ustc.edu.cn
通讯作者:沈兆武,男,教授,博士生导师,主要从事爆炸力学研究. E-mail:zwshen@ustc.edu.cn

2 变球缺型罩装药结构设计

高速杆式弹丸本质上是一种杵体小、延伸率低的射流，因此设计高速杆式弹丸应从降低杵体质量、降低头部射流速度和提高侵彻体平均速度三方面进行。依据这个设计原则，通过计算分析后，将药型罩设计为变球缺型结构。它介于小锥角聚能射流罩和球缺型 EFP 罩之间，具有大的压合角，这对形成高速杆式侵彻体是有利的。为了减小形成杵体的质量，降低整个侵彻体的速度梯度，还采用变壁厚的药型罩设计，顶部厚，周围薄。以药型罩直径 D 为基本参数，其他结构参数为：内径 $R_1=(0.55\sim0.60)D$，外径 $R_2=(0.58\sim0.62)D$，药型罩高度为 $H=(0.30\sim0.35)D$，半锥角 $\alpha=82°\sim86°$。

3 计算模型

3.1 建模及网格的划分

采用 LS-DYNA 三维动力学分析软件对变球缺罩装药形成高速杆式弹丸进行数值模拟。计算模型中装药直径 $D_k=52$ mm，壳体厚度 1 mm，装药长径比 1.2。由于计算中采用中心点起爆、四点同时起爆和环形起爆三种起爆方式，因此，只需建立 1/4 的轴对称有限元模型。计算中采用的单位系统为：长度 cm，质量 g，时间 μs；导出单位：密度 g/cm³，应力 100 GPa，压力 100 GPa，速度 10 km/s，能量 0.1 MJ。整个计算模型可简化为炸药、药型罩和壳体 3 部分，均采取 Lagrange 方法计算，网格划分如图 1 所示。

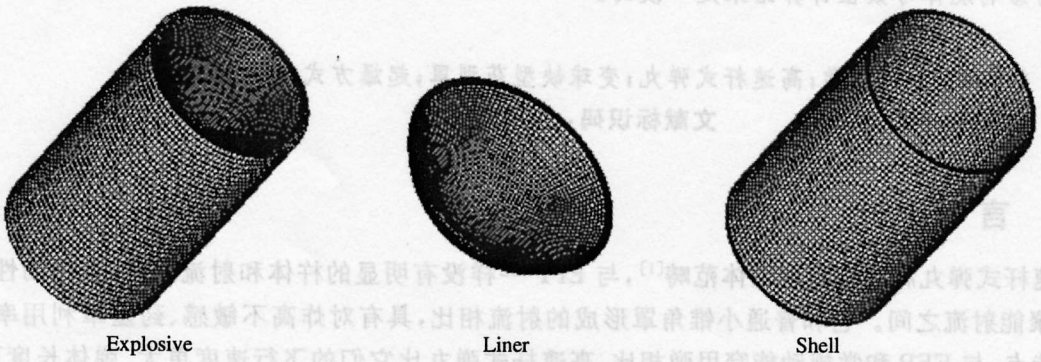


图 1 计算模型网格划分

Fig. 1 Mesh of the numerical model

高速杆式弹丸的形成过程是一个大变形的弹塑性流体动力学过程，采用 Lagrange 方法进行计算时，网格会发生较大的扭曲变形，使得网格的尺寸变化很大。但该方法可以对介质运动的整体或局部的变化都描述得比较清晰，能真实地呈现侵彻体的形成过程，从而探讨它的成型机理，也能清楚地显示节点的速度、整体的动能等物理量。

3.2 材料模型

3.2.1 炸药

对 B 炸药(RDX/TNT=60/40)采用高能炸药材料模型，爆轰产物的膨胀采用 JWL 状态方程，并假定爆轰前沿以常速率传播。以炸药爆轰产物的压力 p 表示的 JWL 状态方程为[9]

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1v}\right)\mathrm{e}^{-R_1v}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2v}\right)\mathrm{e}^{-R_2v}+\omega\rho e \tag{1}$$

式中：ρ_0 是炸药初始密度，ρ 是爆轰产物密度，e 是比内能，A、B、R_1、R_2 和 ω 为输入参数。计算所使用的参数[9]见表 1。

3.2.2 药型罩

对于紫铜药型罩材料，用本构模型描述偏应力和偏应变之间的关系，并用状态方程表达应力张量的球张量部分、能量和密度之间的关系。在计算中，选取适宜解决冲击问题的 Mie-Grüneisen 状态方程。在高速杆式弹丸成型过程中，在第一阶段，即爆轰波传到药型罩顶时，药型罩材料中的应力是由状态方

程控制的;在第二阶段,即在准零压下发生塑性应变期间,其持续时间较长,药型罩材料中的应力是由本构模型控制的。在计算过程中,对药型罩材料选用 Steinberg 本构模型来计算。Steinberg 本构模型[10]中结合了压力效应、温度和塑性延展率,适合塑性应变率高于 $10^5\,s^{-1}$ 的情况[11]。

表 1　B 炸药爆轰产物的 C-J 参数和 JWL 状态方程参数

Table 1　C-J parameters and JWL EOS parameters of the B explosive

C-J parameters				Parameters of JWL EOS				
ρ/(g/cm³)	D/(km/s)	p_{CJ}/(GPa)	e_0/(kJ/cm³)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω
1.710	7.79	28.3	8.31	524.3	7.67	4.2	1.1	0.34

(a) Grüneisen 状态方程

$$p=\frac{\rho_0 c_0^2\mu(1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2}+\gamma\left\{\rho e-\frac{1}{2}\frac{\rho_0 c_0^2\mu(1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2}\frac{\mu}{1+\mu}\right\} \tag{2}$$

式中:$\mu=\rho/\rho_0-1$;c_0、s 分别是 Rankine-Hugoniot u_s-u_p 直线截距和斜率,其值分别为 3.94 km/s 和 1.49;Grüneisen 系数 $\gamma=2.02$。

(b) Steinberg 本构模型

在 Steinberg 本构模型中,剪切模量 G 和屈服应力 σ_y 都随压力增加而增加,同时随温度增加而减少。当达到材料的熔化温度时,二者均接近于零。材料在熔化前的剪切模量

$$G=G_0\left[1+bpv^{1/3}-h\left(\frac{e-e_c}{3R'}-300\right)\right]\exp\left(-\frac{fe}{e_m-e}\right) \tag{3}$$

式中:G_0、b、h、f 为实验上确定的材料常数;p 为压力;v 为比容;e_c 为冷压缩能量,e_m 为熔化能量,e 为比内能;$R'=R\rho/A$,R 为普适气体常数,ρ 为密度,A 为摩尔质量。

屈服强度

$$\sigma_y=\sigma'_0\left[1+b'pv^{1/3}-h\left(\frac{e-e_c}{3R'}-300\right)\right]\exp\left(-\frac{fe}{e_m-e}\right) \tag{4}$$

式中:σ_0'、b'为材料常数。Steinberg 本构模型计算参数[10]见表 2。

表 2　Steinberg 本构方程计算参数

Table 2　Computational parameters of Steinberg constitutive equation

G_0/(GPa)	b/(s²/kg$^{2/3}$)	b'/(s²/kg$^{2/3}$)	h	f	A/(g/mol)	T_{m0}/(K)	γ_0	σ'_0/(GPa)
47.7	2.83	2.83	3.77×10^{-4}	0.001	63.55	1356	2.02	0.12

3.2.3　壳体

对壳体材料碳钢采用应变率相关和失效相结合的各项同性塑性随动硬化模型。屈服应力 σ_y 由计及应变率的 Cowper-Symonds 模型[12-13]计算得到

$$\sigma_y=[1+(\dot{\varepsilon}/C)^{1/P}](\sigma_0+\beta E_p\varepsilon_p^e) \tag{5}$$

式中:σ_0 表示初始屈服应力;$\dot{\varepsilon}$ 为应变率;C、P 为 Cowper-Symonds 应变率参数;ε_p^e 为有效塑性应变;E_p 为塑性硬化模量,且

$$E_p=E_{tan}E/(E-E_{tan}) \tag{6}$$

式中:E 为杨氏模量;E_{tan}为切线模量。壳体的计算参数[14]在表 3 中列出。

表 3　壳体材料计算参数

Table 3　Computational parameters of the shell material

ρ/(g/cm³)	E/(GPa)	ν	σ_y/(GPa)	E_{tan}/(GPa)	β	C/(s^{-1})	P
7.85	207	0.3	2.07	22	1.0	4.0	0.6

4 数值模拟结果

4.1 高速杆式弹丸的形成过程

为了研究高速杆式弹丸的形成过程和机理，截取了药型罩压垮变形过程中的九个时刻点，如图2所示。计算结果表明：主装药经环形起爆网络(起爆半径为 $D_k/3$，D_k 为装药直径)起爆后大约 7 μs，药型罩受到炸药爆轰压力和爆轰产物的冲击和推动作用，开始被压垮、变形，向前高速运动。罩顶微元被压垮变形，上半部分药型罩微元“流向”对称中心，在对称中心堆积并发生相互碰撞、挤压，罩壁厚增加，内表面速度增大，外表面速度减小。在轴线压合的结果是：速度高的罩内表面形成“头部射流”，速度低的罩外表面形成“杵体”。当 $t=13$ μs 时，“头部射流”和“杵体”开始形成。随着爆轰压力的继续作用，以及罩微元间的相互作用，药型罩继续向前高速运动、变形，下半部分药型罩在向轴线收拢过程中逐渐向后翻转变形。当 $t=50$ μs 时，高速杆式弹丸初步形成。此时的弹体具有比较均匀的质量分布和较大的长径比，并且在弹体尾部形成一个回转尾裙。此时形成的“杵体”细长，质量小。

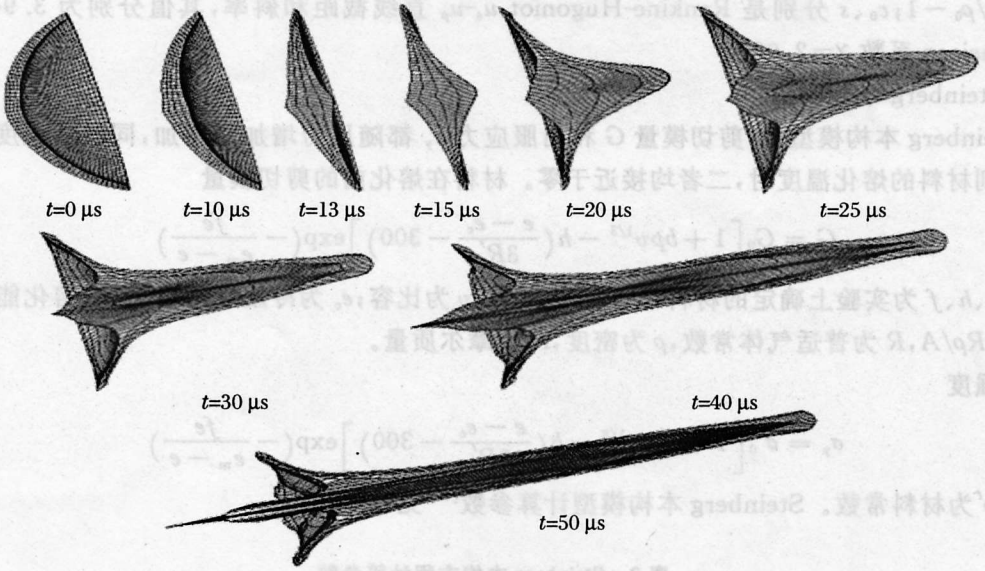


图2 聚能杆式弹丸成型过程

Fig. 2 Formation process of rod-shaped projectile

在变球缺罩装药结构下，高速杆式弹丸的成型机理与典型射流、爆炸成型弹丸都有所区别。众所周知，聚能射流是由于药型罩在炸药的高压爆轰作用下加速运动，并向装药轴线压合，发生碰撞、挤压，被挤压出的材料就形成射流，速度在 8 000 m/s 以上，其余部分则形成速度较低的杵体；而爆炸成型弹丸在形成过程中，一般药型罩都发生翻转变形，罩微元在轴线处基本不发生碰撞(即使发生碰撞现象，压合角也很大，接近 180°)，不再分裂成高速和低速两部分，弹体的速度梯度很小，成型后的弹丸飞行速度和药型罩被爆轰产物的驱动速度接近，一般低于 2 000 m/s。高速杆式侵彻体的形成过程兼有聚能射流和爆炸成形弹丸两者的特点，即既有压垮、压合，也有翻转变形。

4.2 起爆方式对高速杆式弹丸成型的影响

对于聚能装药战斗部，起爆方式是影响战斗部性能的重要因素之一。为了研究起爆方式对高速杆式弹丸的影响，对比计算了中心点起爆、四点同时起爆和环形起爆方式下所形成的侵彻体性能参数，见表4所列。计算结果表明，三种起爆方式都能形成具有较高的头部和尾部速度、较大长径比的杆式侵彻体。环形起爆和四点同时起爆所形成的高速杆式弹丸的头部速度、头尾速度差、长径比和动能要大于中心点起爆下的，但所有弹丸的尾部速度却基本相同，都在 1 200m/s 左右。对于四点同时起爆和环形起爆，起爆半径对弹丸头部速度影响较大，而对弹丸尾部速度影响微弱。弹体头部速度、头尾速度差、长径比和弹体动能随起爆半径的增大而增大。但是，当起爆半径处于 $D_k/3\sim5D_k/12$ 之间时，起爆半径对弹

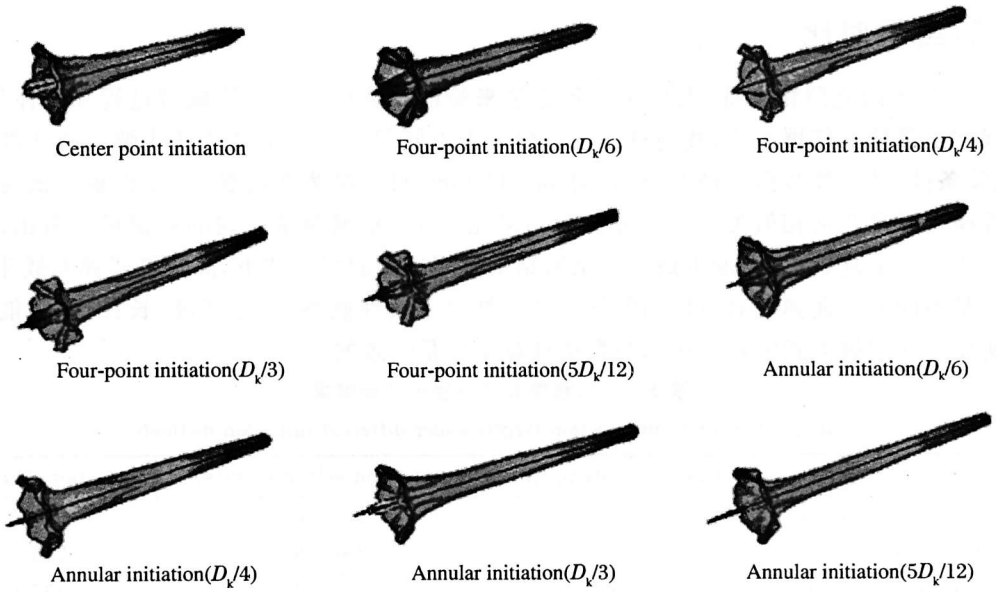
丸性能参数的影响越来越小。即在该范围内增大起爆半径已经不能明显地改善弹丸的性能。相反由于起爆半径的增大,炸药柱的侧向稀疏波的影响增强,会削减炸药对药型罩的爆轰作用。因此,对于多点同时起爆和环形起爆,起爆半径都有一个上限值。

表 4　不同起爆方式下的侵彻体性能参数

Table 4　Performance parameters of projectile with different initiation methods

Initiation methods	Slenderness ratio of charge	Initiation radius /(mm)	Velocity of tip /(m/s)	Velocity of tail /(m/s)	Velocity difference /(m/s)	Slenderness ratio of projectile	Kinetic energy /(kJ)
Center initiation	1.5	0	2725	1128	1597	8.1	59.6
Four-point initiation	1.5	$D_k/6$	2870	1201	1669	9.1	65.6
	1.5	$D_k/4$	2980	1244	1736	9.3	68.4
	1.5	$D_k/3$	3075	1254	1821	10.4	70.4
	1.5	$5D_k/12$	3135	1268	1868	12.5	71.2
Annular initiation	1.5	$D_k/6$	2921	1198	1723	10.4	66.8
	1.5	$D_k/4$	2980	1232	1748	11.1	68.4
	1.5	$D_k/3$	3207	1235	1972	11.5	76.4
	1.5	$5D_k/12$	3265	1247	2018	11.6	77.6

在 $t=50$ μs 时,不同起爆方式下的弹体形状如图 3 所示,弹体速度分布如图 4 所示,位移测量的起始位置是初始药型罩底部平面。中心点起爆以及小起爆半径下的四点起爆和环形起爆所形成的弹丸头部都呈尖锐状,整个弹体质心靠后,所形成的"杵体"质量较大。这样的弹丸既无法长距离稳定飞行,并且弹体头部速度也较低,对目标的侵彻能力自然就较差。随着起爆半径的增大,四点同时起爆和环形起爆所形成的弹体质心前移,"杵体"减小,整个弹体的质量分布更加合理,弹丸头部速度都在 3 000 m/s 以上,大部分质量单元的速度也都在 2 000 m/s 以上,此时的弹丸具有良好的飞行弹道稳定性和攻击能力。环形起爆下的弹丸杵体质量明显小于中心点起爆和四点同时起爆下的。



Compuation time $t=50$ μs

图 3　不同起爆方式下的弹体形状

Fig. 3　Shape of projectiles with different initiation methods

综上所述，三种起爆方式中，环形起爆最优，四点同时起爆次之，中心点起爆最差；相同起爆半径下，环形起爆要明显优于四点同时起爆。造成这些差别的根本原因在于不同起爆方式在炸药中形成的爆轰波形结构不同，使得爆轰波阵面法线和罩法线间的夹角不同。点起爆后形成散心的球面爆轰波，波阵面法线与药型罩法线夹角大；而环形起爆后形成会聚的“喇叭形”爆轰波，降低了爆轰波阵面法线与药型罩法线之间的夹角，提高药型罩微元的压合速度 v_0，同时降低罩微元的偏转角 δ，从而降低罩微元的压合角 β，这两方面的作用均能提高弹丸速度和高速段的质量。四点同时起爆后，从各起爆点产生的球形爆轰波向外传播，当传播到两起爆点的对称平面位置时，两两爆轰波将发生相互作用，根据碰撞点位置不同可发生正碰撞、正规斜碰撞和马赫碰撞。爆轰波相互作用后在爆轰波内部区域形成超压区，最后在药型罩附近也形成“喇叭状”的波形结构，同样具有聚心爆轰作用。由于起爆点数量少，爆轰波向中心会聚的程度较弱，到达罩表面的爆轰波阵面法线与罩法线夹角相对于环形起爆下的要大，因此，对药型罩的作用也相对较弱，进而最终影响弹丸的成型和性能参数。

环形起在爆理论上可以看作多点起爆的集合，在实验中有时也用多点起爆（组成一个起爆环）来实现所谓的环形起爆。起爆点越多越密集，则起爆越接近理论上的环形起爆。研究多点同时起爆的目的在于：在满足规定的技术指标条件下，多点起爆是否能替代环形起爆，以简化起爆网络。

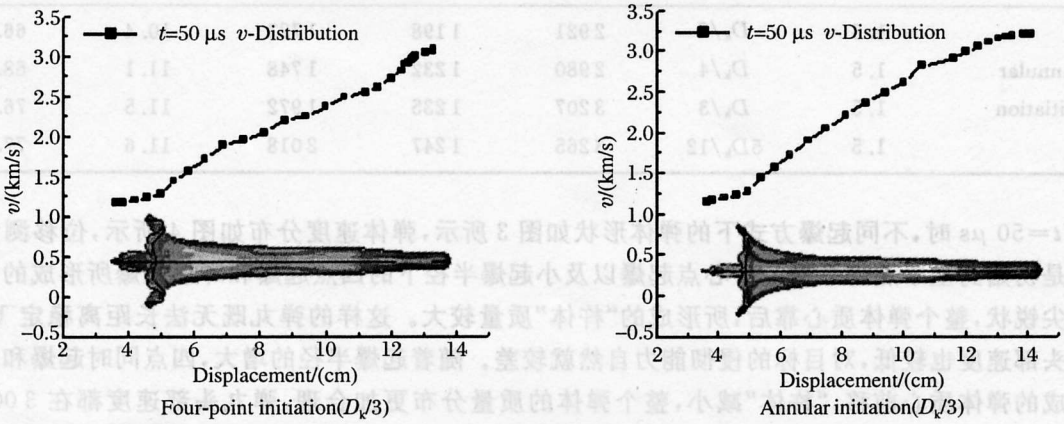


图 4 四点起爆和环起爆下的弹体速度分布

Fig. 4 Velocity distributions of projectiles

5 与试验结果对比

由于缺乏 X 光闪光照相设备，无法用实验方法来验证高速杆式弹丸的成型过程和弹体形貌，但为了优选并确定出最佳的起爆方式，我们进行一系列关于不同起爆方式下高速杆式弹丸战斗部侵彻目标的试验，试验条件：试验弹装药直径 86 mm，炸高 344 mm，目标靶为多层叠加 45 钢板。试验弹体结构与数值计算模型满足几何相似关系。部分试验结果见表 1。根据测量得到的数据可以看出，环形起爆下弹丸的侵靶速度最高，侵彻深度也最大。试验结果说明不同起爆方式下，高速杆式弹丸战斗部对目标的侵彻效果是不同的。而弹丸对目标的毁伤效果好坏源于其性能参数，如速度、长径比、动能等，因此。试验结果所反应的起爆方式的影响规律与数值计算结果是一致的。

表 5 不同起爆方式下侵彻试验结果

Table 5 Results of penetration targets under different initiation methods

Number	Initiation method	Radius of initiation/(mm)	Penetration velocity/(m/s)	Penetration depth/(mm)
1	Center initiation	0	2789.0	214.5
2	Four-point initiation	28.67	2968.5	238.0
3	Four-point initiation	28.67	3045.0	232.0
4	Annular initiation	28.67	3275.0	252.0
5	Annular initiation	28.67	3224.8	256.0

6 结 论

(1) 设计的变球缺型罩装药结构可以形成具有较高头部速度、大长径比和质量分布合理的高速杆式侵彻体。变球缺罩装药结构下的高速杆式侵彻体的形成过程和机理兼有聚能射流和翻转型爆炸成型弹丸两者的特点，即在炸药的爆轰作用下，药型罩顶部首先被压垮变形，上半部药型罩微元向对称中心聚集并发生碰撞、挤压，下半部罩微元在向中心压合过程中逐渐翻转变形，最终形成具有一定速度梯度的高速杆式侵彻体。

(2) 起爆方式对高速杆式侵彻体的性能参数和弹体形状有重要影响。三种起爆方式中，环形起爆所形成的弹体性能参数最优。起爆半径大小对弹丸的成型也有影响，一般取 $D_k/3 \sim 5D_k/12$ 之间，可以获得比较理想的杆式侵彻体。实验结果所反应的起爆方式的影响规律与计算结果基本一致。

References:

[1] Whelan A J, Furnisss D R, Townsley R G. Experimental and Simulated (Analytical & Numerical) Elliptical-Form Shaped Charges [A]//20th International Symposium on Ballistics [C]. Florida: National Defense Industrial Association, 2002: 446-454.

[2] Baker E L. A Sdaniels. Selectable Initiation Shaped Charges [A]//20th International Symposium on Ballistics [C]. Florida: National Defense Industrial Association, 2002: 436-449.

[3] Blache A, Weimann K. Shaped Charge with Jetting Projectile for Extended Targets [A]//van Niekerk C. 17th International Symposium on Ballistics [C]. Midrand, South Africa: The South African Ballistic Organization, 1998: 207-216.

[4] Mattsson K, Sorensen N, Ouve R, et al. Development of the K-Charge, a Short L/D Shaped Charge [A]//Reinecke W G. 18th International Symposium on Ballistics [C]. San Antonio, Texas: Terminal Ballistics Vulnerability Wound Ballistics, 1999: 528-534.

[5] Tan D W, Sun C W. Zhao J B, et al. Experimental Investigation of Shaped Charge with Large Cone Angle [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(3): 204-208. (in Chinese)
谭多望，孙承纬，赵继波，等. 大锥角聚能装药实验研究 [J]. 高压物理学报，2003，17(3)：204-208.

[6] Wang H F, Jiang Z R, Yu W M, et al. Behavior of Jetting Penetrator Charge Operating Underwater [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(3): 189-192. (in Chinese)
王海福，江增荣，俞为民，等. 杆式射流装药水下作用行为研究 [J]. 北京理工大学学报，2006，26(3)：189-192.

[7] Duan Z P, Wu H L, Wang Y Q. Numerical Simulation of Rod-Liked Jet Formation [A]//CCTAM-2005 [C]. Beijing, 2005: 562-569 (in Chinese)
段卓平，吴晗玲，汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究 [A]//中国力学学会学术大会-2005 [C]. 北京，2005：562-569.

[8] Huerta M, Vigil M G. Design, Analyses, and Field Test of a 0.7 m Conical Shaped Charge [J]. Int J Impact Eng, 2006, 32: 1201-1213.

[9] Dobratza B M. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants [R]. UCRL-51319, 1974.

[10] Steinberg D J. Equation of State and Strength Properties of Selected Material [M]. LLNL, 1991.

[11] Jones N. Structural Aspects of ship Collisions [A]//Jones N, Wierzbicki T. Structural Crashworthiness [C]. London: Butterworths, 1983: 308-337.

[12] Johnson G R, Cook W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures, and Pressures [J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[13] Livermore. LS-DYNA Keyword User's Manual [DB]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001: 610-1026.

[14] Gui Y L, Yu C, Liu C L. 3D Simulation of Over-Turned Explosively Formed Projectile (EFP) with Star- Shaped Fins [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 313-318. (in Chinese)
桂毓林，于　川，刘仓理. 带尾翼的翻转型爆炸成型弹丸的三维数值模拟 [J]. 爆炸与冲击，2005，25(4)：313-318.

Three-Dimensional Numerical Simulation of the High Velocity Rod-Shaped Projectile

LI Cheng-Bing[1], PEI Ming-Jing[2], SHEN Zhao-Wu[1]

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*;
2. *Northwest Institute of Nuclear and Technology, Xi'an* 710024, *China*)

Abstract: The software of LS-DYNA was applied to simulate the formation process of a high velocity rod-shaped projectile from the modified hemispherical liner. Its formation mechanism was analyzed. It was demonstrated that the initiation methods such as center point initiation, four-point initiation and peripheral initiation had an effect on the formation and the performance parameters of the high velocity rod-shaped projectile. The results of numerical computation indicate that the shaped charge with the modified hemispherical liner can form the rod-shaped penetrator with high velocity, large slenderness and rational mass distribution. Its formation mechanism combines that of the shaped jet and the overturned explosively formed projectile, i. e. the upper half of liner directly collapses along the axial line and the lower half of liner is gradually overturned when closing the axial line. There are some differences of the shape and performance parameters of the rod-shaped penetrators formed under the different initiation methods. The peripheral initiation is the best excellent initiation method. The experimental result shows a good agreement with results of numerical simulations.

Key words: mechanics of explosion; high velocity rod-shaped projectile; modified hemispherical liner; initiation method; numerical simulation