

文章编号:1006-9941(2009)04-0470-05

柱锥结合罩射流成型过程试验研究

顾文彬¹, 瞿洪荣^{1,2}, 唐 勇¹

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 61792 部队, 重庆 410004)

摘要:为了更好地研究柱锥结合罩射流成型过程,采用 300 kV 脉冲 X 光机试验研究了柱锥结合罩弹射流形成过程,并进行了数值模拟对比分析。共进行九发子弹爆炸试验,得到 18 幅不同时刻的射流照片。研究了射流头部速度、射流长度时程曲线等变化规律。研究表明:柱锥结合罩圆柱部分仅仅形成低速杆体,对破甲子弹射流质量和速度的贡献很小;受“激波效应”影响,射流头部速度($6738 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)小于数值模拟值($6824 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

关键词:弹药工程;柱锥结合药型罩;破甲子弹;聚能射流;X 光试验研究

中图分类号:TJ55; O358

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.023

1 引言

聚能装药已成功应用于破甲弹、反坦克导弹以及特种爆破器材。影响射流性能的因素有:药型罩及壳体材料、装药种类、药型罩结构参数等。受子弹外形尺寸、炸高等设计条件限制,要在小炸高条件下,满足破甲威力指标的要求,因此,提出了一种可大大增加母线长度的柱锥结合罩破甲战斗部,这种破甲战斗部的工程应用较少,其压垮、形成射流过程与传统锥形罩^[1-8]不同,有关射流形成的研究几乎为空白。本文以某型装备破甲子弹为对象,对柱锥结合罩压垮过程及射流成型性能进行了试验和数值模拟研究。对发展新型破甲战斗部具有理论意义和应用价值。

2 试验装置与原理

试验装置如图 1a 所示, L_1 、 L_2 分别为子弹与镜头和底片盒之间的距离,试验中 $L_1 = 1.0 \text{ m}$ 、 $L_2 = 0.5 \text{ m}$,两镜头 A、B 与子弹中心连线的夹角为 45° 。根据几何投影关系,底片盒上射流成像与实际射流尺寸成一定的放大比例关系。放大系数 K 由式(1)确定,本次试验 $K = 1.5$ 。

$$K = \frac{L_1 + L_2}{L_1} \quad (1)$$

为了满足 X 光试验要求、避免破片对试验装置危害,战斗部无金属外壳体。通过专用定位体轴向固定导爆管、雷管、传爆药柱与主装药,来保证爆炸系列同轴度和中心点起爆。本次试验 X 光机采取炸通触发

方式。由于触发线捆绑于药柱上部,而不是主装药中心部位,即爆轰波必须从起爆点传播距离 D 后才能到达 X 光机触发点,如图 1b 所示。

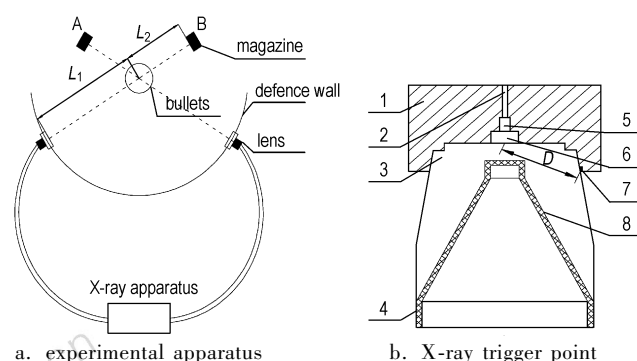


图 1 X 光试验装置和子弹结构示意图

1—抗高温固定罩, 2—导爆管插槽, 3—主装药, 4—定位环, 5—雷管, 6—扩爆药柱, 7—触发点, 8—药型罩

Fig. 1 Schematic map of X-ray experimental apparatus and bullet structure

1—fixed cover resisting high temperature, 2—slot for detonating cord, 3—main charge, 4—orientation ring, 5—detonator, 6—booster, 7—trigger point, 8—liner

起爆点到触发点距离 $D = 1.477 \text{ cm}$,对于密度为 $1700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 8701 炸药,爆速约为 $8400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,相对于装药起爆时刻, X 光机触发需要延迟 $1.76 \mu\text{s}$ 。故 X 光机获得的药型罩压垮及射流照片相对装药起爆时刻存在时间差,试验结果分析时应加以考虑。

3 X 光试验结果分析

3.1 药型罩压垮过程试验结果分析

图 2 是柱锥结合罩压垮过程不同延迟时间的药形

收稿日期:2008-11-17; 修回日期:2009-03-11

作者简介:顾文彬(1962-),男,博士后,教授,博士生导师,研究方向为弹药工程,引信工程。e-mail: guwenbin1@yahoo.com.cn

罩变形和射流成型的 X 光照片。由图 2 可知：由于圆柱部分的存在，药型罩压垮过程中上部基本保持圆柱形，这会导致较锥形罩形成更长、更粗的杵体；由于定位环不受炸药的直接爆轰作用，药型罩成型过程中定位环形状和尺寸基本不变，因此定位环直径可以作为 X 光照片数据处理时的参考依据；当 $t = 12.2 \mu\text{s}$ 时（图 2e），药形罩压垮变形过程基本结束。由图 2e 可以看出，射流头有偏离轴心的现象，产生的主要原因是：子弹主装药与药型罩装配同轴度不好；中心起爆点存在偏差。

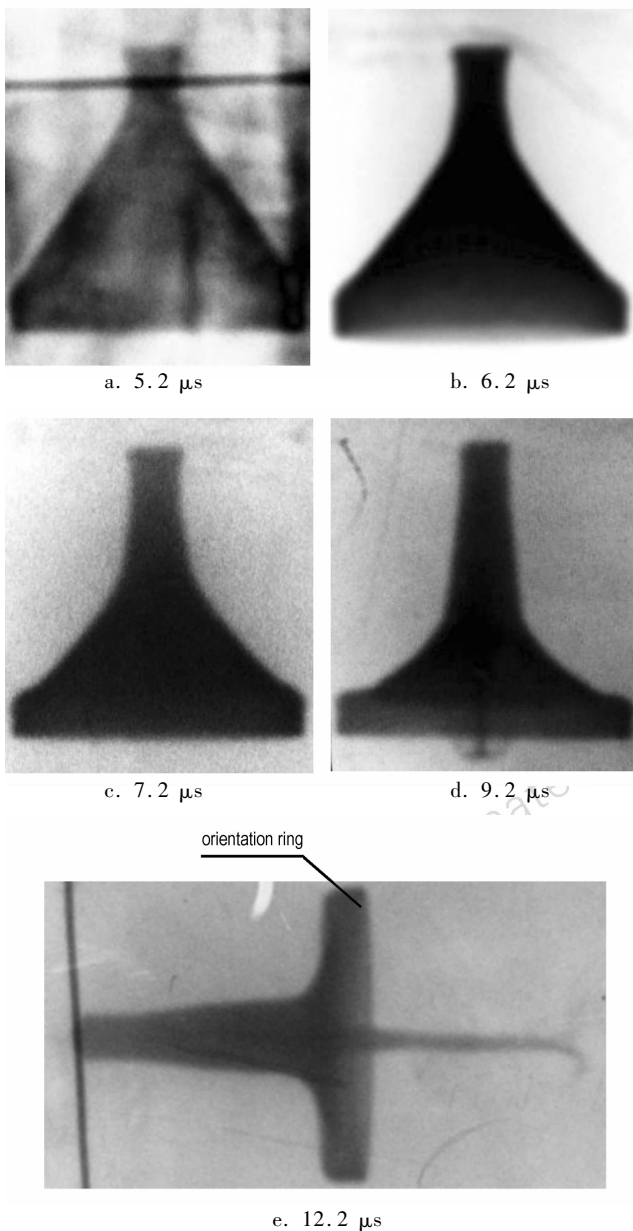


图 2 药型罩压垮过程的 X 光试验结果

Fig. 2 X-ray experimental results of the process of liner collapse

表 1 为药型罩压垮过程中，不同时刻圆柱部分宽度 M_1 、药型罩压垮后的高度 H 及其已压垮部分高度的试验结果，表中时间以 X 光机触发时刻为基准。

表 1 药型罩压垮变形过程试验结果

Table 1 Experimental results of deformation process of liner collapse

time / μs	diameter of upper cylinder M_1/mm	liner height H/mm	collapse liner height/ mm
5.2	7.3	30.8	7.3
6.2	7.7	30.7	12.6
7.2	7.0	29.7	16.8
9.2	6.5	30.7	23.6
12.2	5.8	30.0	27.8
original size	10.6	31.3	-

由表 1 可以看出：受爆轰产物作用，药型罩的圆柱部分产生径向压缩，直径逐步减小，直至形成实心圆柱，但圆柱部分罩材在轴线上碰撞并不形成射流，表明药型罩圆柱部分对射流成型没有贡献；药型罩压垮过程中高度 H 基本不变；药型罩压垮部分高度呈增大趋势。其中 $6.2 \mu\text{s}$ 时圆柱部分宽度中 (M_1) 为 7.7 mm ，大于 $5.2 \mu\text{s}$ 时的值，这是由于圆柱部分罩材受到爆轰波两个方向的作用。一方面，爆轰波对圆柱顶部挤压作用使得圆柱壁部分罩材沿径向向外运动；另一方面，爆轰波对圆柱壁部分挤压作用使得圆柱部分罩材沿径向向内运动。 $6.2 \mu\text{s}$ 时，前一种作用占主导作用，使得圆柱顶部罩材沿径向向外运动，因此此时圆柱部分宽度大于前一时刻的值。

3.2 射流成型过程试验结果分析

图 3 为 X 光机触发后延迟 $15.2, 17.3, 18.3, 20.4 \mu\text{s}$ 时拍得的照片。图中射流中部的圆环是试验子弹的定位环在爆炸成型过程中的影像。它的外形和尺寸变化不大；图 3a、图 3c 以及图 2d 中，射流头部出现“激波效应”，即高速运动射流头部冲击压缩空气形成激波，激波产生的阻力使射流头部减速及“锻平”。图 3b 中射流头主体部分有偏离轴线的现象，原因如前文所述。

依据前面提到的射流尺寸的测量方法，对 X 光机拍摄到的射流图片进行了处理，得出的试验射流长度、杵体长度见表 2。由表 2 可知，由于试验产品加工和装配质量的不一致性、试验设置和 X 光机触发时机的不可重复性、以及试验结果的读数误差等因素，导致了 $t = 12.2 \mu\text{s}$ 和 $t = 20.4 \mu\text{s}$ 时刻的两次试验结果测量值存在一定误差。分析表明，在本试验条件下，X 光底片高度误差 1 mm 所产生的射流长度影像绝对误差可达 0.67 mm 。因此，试验设置条件应严格控制。

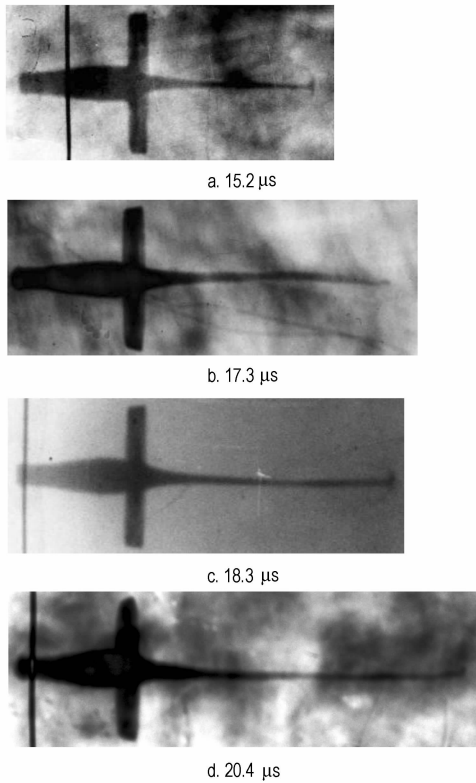


图3 射流形成过程的典型X光照片
Fig.3 Radiographs of process of jet formation

表2 不同时刻试验射流长度分布表

Table 2 Experimental jet length at different times

No.	experiment No.	time / μ s	jet length /mm	slug length /mm	ratio of slug to jet length/%
1	5-A	12.2	71.7	35.1	49.0
2	8-A	12.2	72.4	35.5	49.0
3	6-B	15.2	82.5	37.7	45.7
4	5-B	17.3	105.6	39.5	37.4
5	1-B	18.3	108.3	40.6	37.5
6	3-B	20.4	113.7	40.2	35.4
7	7-B	20.4	114.0	41.4	36.3
8	8-B	24.3	152.3	43.2	28.4
9	9-B	27.6	176.2	45.1	25.6

表2中栓体长度定义为图3中射流尾部至定位环右侧的长度,因为这部分射流速度较低,且速度分布比较均匀。依据表2中的数据绘制了射流长度随时间变化、栓体长度随时间变化以及栓体长度与射流长度之比随时间的规律,如图4~图6所示。图4是试验得到的射流长度随时间变化的拟合曲线。由图4可知:射流长度随时间非线性单调递增,当 $t = 20.4 \mu\text{s}$ 之后,射流长度增长的速度加快。

图5是试验得到的栓体长度随时间变化的分布规律。由图5可以看出,射流栓体长度呈增长趋势,但增

幅较小在35~45 mm之间。

图6为试验得到的栓体长度与射流长度之比随时间变化的拟合曲线,该曲线是非线性单调递减曲线。

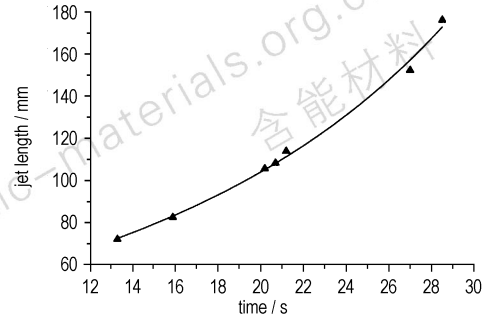


图4 射流长度时程变化曲线

Fig.4 Curve of jet length vs time

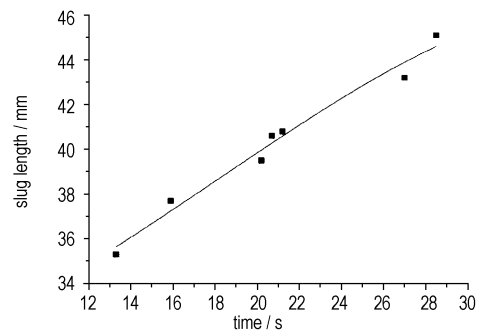


图5 栓体长度时程变化曲线

Fig.5 Curve of slug length vs time

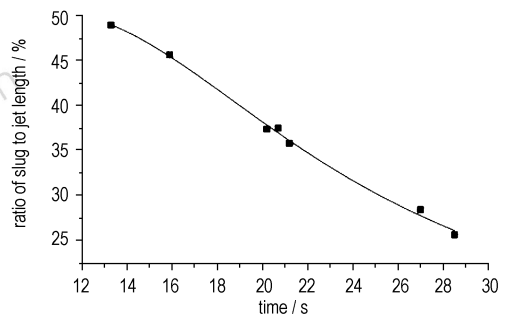


图6 栓体与射流长度比时程变化曲线

Fig.6 Curve of ratio of slug to jet length vs time

3.3 射流头部速度试验结果分析

射流头部速度是衡量破甲子弹装药结构设计优劣和侵彻威力的重要指标之一。X光机研究射流头部速度的方法是:利用两个或多个X光摄像镜头,同时触发、延时不同时间间隔,分别拍摄射流的空间分布影像,测量射流头部不同时刻的空间位置改变,计算出射流头部速度。由于产品加工和装配的不一致性,不同试样子弹的射流速度与变化规律并不完全相同。因此,射流头部速度计算应基于同一次试验照片的处理。

试验中,镜 A、B 对应的胶片盒之间存在高度差 H_1 。设置于底片盒内、用于标定的细铁丝距底片盒上边缘是等距。所以,在同一次试验中,B 照片中的细铁丝相对于 A 照片中的细铁丝低了 H_1 长度。

图 7 是第四发试验拍摄得到的两张照片,两幅照片的时间间隔 Δt 为 $5.1 \mu\text{s}$ 。图中 H_2 为不同时刻射流头部距细铁丝标定线的高度差,则射流头部在 Δt 时间内的实际运动距离为 $\Delta H = H_1 + H_2$ 。本次试验中两底片盒之间的高度差为 0.01 m 不变, H_2 、 Δt 对于不同的试验而不同。

根据 Δt 时间内射流头部位移 ΔH ,用式(2)计算射流头部速度,将计算值作为 $t_1 + \Delta t/2$ 时刻射流头部速度。

$$V_T = \frac{\Delta H}{K\Delta t} \quad (2)$$

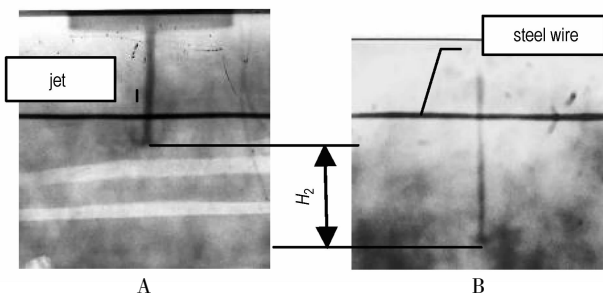


图 7 射流头部速度测定方法示意图

Fig. 7 Schematic map of testing method for jet tip velocity

表 3 不同时刻试验射流速度分布表

Table 3 Experimental jet velocity at different times

No.	experiment No.		time/ μs			$\Delta H/\text{m}$	$V_{t_1+\Delta t/2}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
	t_1	t_2	t_1	t_2	Δt		
1	3rd A	3rd B	9.2	20.4	11.2	0.1132	6738
2	4th A	4th B	12.2	19.3	7.1	0.0512	6693
3	5th A	5th B	12.2	19.3	7.1	0.0514	6719
4	8th A	8th B	12.2	24.3	12.1	0.1209	6661

4 数值模拟

图 8 为子弹结构简化示意图,图 9 为药型罩结构示意图。其中 d_1 、 l 、 h 、 α 、 d_2 、 δ 分别为药型罩圆柱部分外径和高度、药型罩圆锥部分高度和锥角、药型罩口部直径和壁厚。设计尺寸分别为 $d_1 = 5.8 \text{ mm}$ 、 $l = 2.95 \text{ mm}$ 、 $h = 32.8 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 52^\circ$ 、 $d_2 = 37.8 \text{ mm}$ 、 $\delta = 1.15 \text{ mm}$ 。子弹壳体材料为 35 铬锰硅,材料模型采用运动塑性模型;装药为 JH-2 炸药,材料模型采用燃烧模型,状态方程为 JWL 方程;药型罩为紫铜,材料模型采用流体弹塑性模型,状态方程用格留乃逊方程。根据刘建青、顾文彬等^[8]对相同装药材料和密度、相同药型罩材料的爆炸成型战斗部

试验和数值模拟研究结果,JH-2 炸药材料模型及状态方程参数、紫铜材料模型及状态方程参数列于表 4 和表 5。

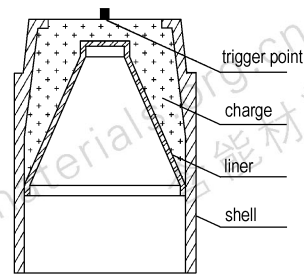


图 8 子弹简化结构示意图

Fig. 8 Schematic map of bullet structure

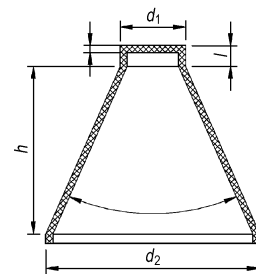


图 9 柱锥结合药型罩结构示意图

Fig. 9 Schematic map of cylinder-cone liner structure

表 4 装药的状态方程计算参数

Table 4 Computational parameters of equation of state of charge

parameters	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p_{cJ}/GPa	JWL(A)/GPa
quantity	1.65	8325	29	7.955
parameters	JWL(B)	JWL(R ₁)	JWL(R ₂)	JWL(ω)
quantity	205	3.7	2.45	2.5

表 5 药型罩的状态方程计算参数

Table 5 Computational parameters of equation of state of liner

parameters	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Gruneisen(S_1)	Gruneisen(S_2)
quantity	8.96	4750	3.8	2.74
parameters	Gruneisen(S_3)	Gruneisen(γ_0)	a	E_0
quantity	0.125	1.346	0.34	0.0

除空气采用 Eurlian 网格外,由于装药爆炸及药型罩压垮过程中材料变形较大,因此炸药和药型罩也采用 Eurlian 网格离散法;子弹壳体采用 Larglian 网格。在流固耦合之间的接触面采用任意拉格朗日欧拉混合算法(ALE 算法)^[9]。图 10a 为破甲子弹数值模拟计算模型的网格划分示意图;图 10b 为子弹装药和药型罩的网格划分示意图。

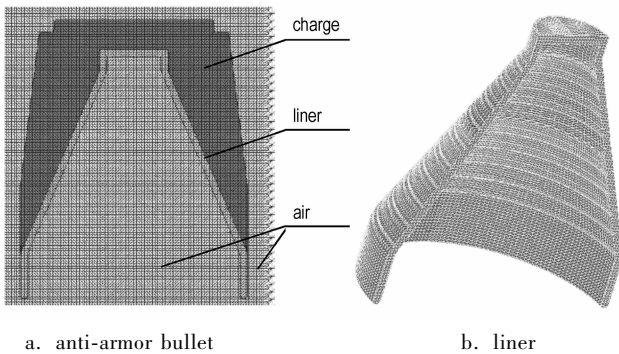


图10 子弹模型网格划分图

Fig. 10 Calculation model of bullet charge

由第三发和第八发试验图片的测量值,计算得到射流头部速度分别为 $6738 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6661 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,列在表3中。而对应的数值模拟结果分别为 $6824 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6682 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明射流头部速度较数值模拟值小。表3还给出了第四、第五发的试验结果。由表3可知:试验条件完全相同,而测速结果的绝对相差仅为 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明本次试验的试样一致性及试验条件控制较严格,测速结果可信度较高。

5 结论

(1) 柱锥结合药型罩圆柱部分在爆轰产物作用下,主要产生轴向压缩,形成低速柱体,对破甲子弹射流质量和速度贡献较小。

(2) 受“激波效应”影响,射流头部速度小于理论计算值,并呈现较快衰减规律。

(3) 采用X光试验方法研究聚能装药成型规律,若要满足试验结果精度要求,应严格控制试验样品质量和试验设置条件一致性,并选取相等的、合适的拍摄时间间隔。

参考文献:

- [1] 王儒策,赵国志. 弹道终点效应[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993:200-212.
- [2] 威廉·普·沃尔特斯,乔纳斯·埃·朱卡斯. 成型装药原理及其应用[M]. 北京:兵器工业出版社,1992:51-65.
- [3] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000:196-221.
- [4] 冯其京,郝鹏程,杭义洪,等. 聚能装药的欧拉数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2008,28(2):138-143.
FENG Qi-jing, HAO Peng-cheng, HANG Yi-hong, et al. Eulerian numerical simulation of a shaped charge[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008,28(2):138-143.
- [5] 王志军,吴国东. 一种新型星状药型罩形成射流的数字模拟[J]. 兵工学报,2007,28(11):1397-1400.
WANG Zhi-jun, WU Guo-dong. Numerical simulation on jet formation of a new star shaped liner[J]. *Acta Armamentarii*, 2007,28(11):1397-1400.
- [6] 吴成,曾艳春,张向容,等. 环型聚能要型罩的设计新方法 with 试验[J]. 北京理工大学学报,2007,27(4):291-294.
WU Cheng, ZENG Yan-chun, ZHANG Xiang-rong, et al. Investigation and design on the penetration effect of annular-linear shaped charge[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007,27(4):291-294.
- [7] Weimann K. Research and development in the area of explosively formed projectiles charge technology[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993,18:294-298.
- [8] 刘建青,顾文彬,唐勇,等. 变壁厚药型罩爆炸成型弹丸成型性能数值模拟[J]. 解放军理工大学学报,2008,9(2):172-176.
LIU Jian-qing, GU Wen-bin, TANG Yong, et al. Numerical investigation on EFP forming performance with variational-wall-thickness hemispherical liner[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008,9(2):172-176.
- [9] LS-DYAN Keywords User's Manual[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 1997:2.1-2.1

Experimental Investigation of Jet Formation of Cylinder-Cone Shaped Charge

GU Wen-bin¹, QU Hong-rong^{1,2}, TANG Yong¹

(1. Engineering Institute of Corps. of Engineers, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China;

2. No. 61792 Troops of PLA, Chongqing 410004, China)

Abstract: In order to study jet formation of the cylinder-cone liner, the formation of cylinder-cone shaped charge was studied by using 300 kV pulse X-ray apparatus. The jet formation of shaped charge was analyzed by numerical simulation. Eighteen X-ray photographs were obtained from 9 experiments. The radiographs of the liner collapse were analyzed at different times. Curves of the jet tip velocity and the jet length vs time were obtained. The results show that the cylinder part of the liner can only produce low speed slug, which has no contribution to increasing the mass and velocity of the jet. Because of the "effects of shock wave", the jet tip velocity is smaller than that by numerical simulation.

Key words: ammunition engineering; cylinder-cone liner; anti-armor bullet; shaped charge; jet; experimental investigation of X-ray