

文章编号: 1001-1455(2006)04-0328-05

杆式射流形成的数值模拟研究

吴晗玲^{1,2}, 段卓平¹, 汪永庆¹

(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. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 利用数值仿真软件 LS-DYNA3D, 通过数值模拟方法研究了药型罩压跨、射流的形成、延伸和失稳断裂的全过程, 数值模拟结果与实验结果吻合较好, 得到了一套实用的数值模拟方法及材料模型参数, 定性分析了大锥角的药型罩压跨过程, 对形成杆式射流的药型罩结构设计具有一定借鉴意义。

关键词: 爆炸力学; 杆式射流; 数值模拟; 药型罩

中图分类号: Q358

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

杆式射流^[1]又称喷射弹丸^[2], 属于聚能侵彻体的范畴。其主要特点就是像爆炸成形弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 一样没有明显的杆体和射流之分, 但是在高炸高条件下会像聚能射流一样失稳断裂。作为一种侵彻性能介于 EFP 和聚能射流之间的聚能侵彻体, 杆式射流在对付某些特殊的装甲防护如含水间隙装甲面前具有较好的应用前景^[3]。

形成杆式射流的装药结构主要是大锥角聚能装药。对大锥角装药有较多的研究, 最早的是所谓的 X 型装药, 药形罩材料为铝, 锥角为 90°, 使用奥克托尔炸药, 用隔板产生环形爆轰波。射流头部速度超过 12 km/s, 对多层间隔装甲有良好的侵彻效果。M. J. Murphy^[4]用 Dyna2D 和闪光 X 射线实验, 研究了 110° 铝锥罩聚能射流的特性, 并比较了各种大锥角铝罩和铜罩对混凝土的侵彻。李发伯^[5]用闪光 X 射线实验研究了大锥角、小长径比的聚能装药产生的射流, 发现正向中心起爆条件下得到的射流短粗低速, 而逆向环起爆条件下的射流细长高速, 并分析指出其原因。

本文中在前人工作基础上, 对两类 (平面截顶型和球缺型) 共四种装药结构形成的杆式射流进行数值模拟研究, 并将数值模拟结果与实验结果相比较。通过实验来校正用于杆式射流数值模拟研究的计算方法、材料模型及参数的选定等一系列问题。

2 有限元数值计算方案

聚能装药的作用是一种多物质相互作用的大变形运动, 在金属射流形成的过程中, 随着炸药材料和药型罩材料会发生愈来愈剧烈的变形。用 Lagrange 方法难以准确模拟。采用 LS-DYNA970 的多物质 ALE 方法和运动网格法来进行模拟在杆式射流形成、延展及断裂的过程。除了聚能装置外, 对于多物质 ALE 方法而言, 还需建立足以覆盖整个射流范围的空气网格。并且在模型的边界节点上施加压力流出边界条件, 避免压力在边界上的反射。

有限元网格划分的几何模型用 ANSYS 前处理软件建立。因聚能装置为轴对称结构, 所以模型采用 1/4 结构, 在模型的对称面上施加对称约束条件, 即约束这些对称面上节点的位移和旋转自由度。如图 1 所示, 受篇幅所限, 这里只给出药型罩 1 装药结构的有限元数值计算模型图 (1/2 的剖面图)。药型罩底部内口径为 5 cm, 外口径为 5.6 cm, 装药高度为 6 cm, 无壳体。

• 收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2005-06-08

作者简介: 吴晗玲 (1979—), 男, 硕士。

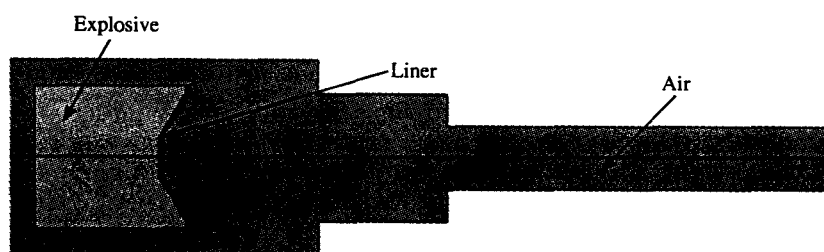


图 1 药型罩 1 装药结构的有限元数值计算模型图

Fig. 1 Finite element model of shaped charge No. 1

作为数值计算的基础,网格尺寸的划分对计算的结果有着直接的影响,过密的网格会导致计算时间的急剧增加,而如果网格过少,则使得计算结果不可接受。为此,必须在网格密度和计算时间之间找到一个平衡点,以使计算结果和计算所需时间都可以接受。根据数值预研的结果,本文算例所建立的有限元模型,在射流经过的区域(中心轴线附近)的网格稍密,尺寸在 0.039 cm 左右,网格再加密对计算结果影响非常小,而在其他区域稍疏,节省了计算时间。这样的处理使得计算结果和计算所需时间都在可以接受的范围内。

由于受计算机性能的限制,数值模拟仅模拟了四种药型罩的前 80 μs 射流的形成和拉伸过程,以 40 μs 时刻计算结果与实验结果相比较。

3 材料模型及参数的选取

计算中使用 8701 炸药,选用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程。JWL 状态方程精确描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积、能量特性,表达式为^[6]

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为输入参数, E_0 为初始比内能。

8701 炸药的参数分别为^[7]: $\rho = 1.70 \text{ g/cm}^3$, $D = 8.40 \text{ km/s}$, $p_{\text{Cl}} = 30 \text{ GPa}$, $A = 56.4 \text{ GPa}$, $B = 6.801 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.1$, $R_2 = 1.3$, $\omega = 0.36$, $E_0 = 10.0 \text{ GPa}$ 。

药型罩的材料为紫铜,使用流体弹塑性模型和 Gruneisen 状态方程^[6]来描述药型罩在爆轰波作用下的动力响应行为,可用来模拟高应变($>10^5$)条件下的材料变形问题。Gruneisen 状态方程表达式在压缩状态时为

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left(1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right)}{1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

在膨胀状态时为

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E$$

式中: c 是声速, s_1 、 s_2 和 s_3 是 $D-u$ 曲线斜率的系数, γ_0 是 Gruneisen 系数, a 是对 γ_0 的一阶修正。

紫铜的流体弹塑性材料模型参数分别为^[8]: $\rho = 8.93 \text{ g/cm}^3$, $G = 47.7 \text{ GPa}$, $Y = 450 \text{ MPa}$, $c = 3.94 \text{ km/s}$, $s_1 = 1.49$, $s_2 = 0.6$, $s_3 = 0$, $\gamma_0 = 1.99$, $a = 0.47$ 。

4 数值模拟结果与实验结果的比较及分析

大锥角药型罩在爆轰波作用下的流动过程可以分为三种不同表现:第一种是压跨型,类似于小锥角药型罩压跨形成射流;第二种是翻转型,与大锥角药型罩翻转形成翻转弹丸相似;第三种是混合型,罩壁向轴线聚合的过程中,一部分压跨一部分翻转。此次数值模拟研究发现这几种药型罩的压跨过程都是混合型的。这种形成类型有利于提高射流的整体速度,同时也使射流具有一个合适的速度梯度。使它在较大的炸高下仍能保持稳定状态,不易发生失稳断裂。

4.1 四种装药结构的实验 X 光相片和计算结果的对比

图 2~3 给出了四种装药结构的实验 X 光相片($t=40.5 \mu\text{s}$)和计算结果($t=40 \mu\text{s}$),可以进行对比。

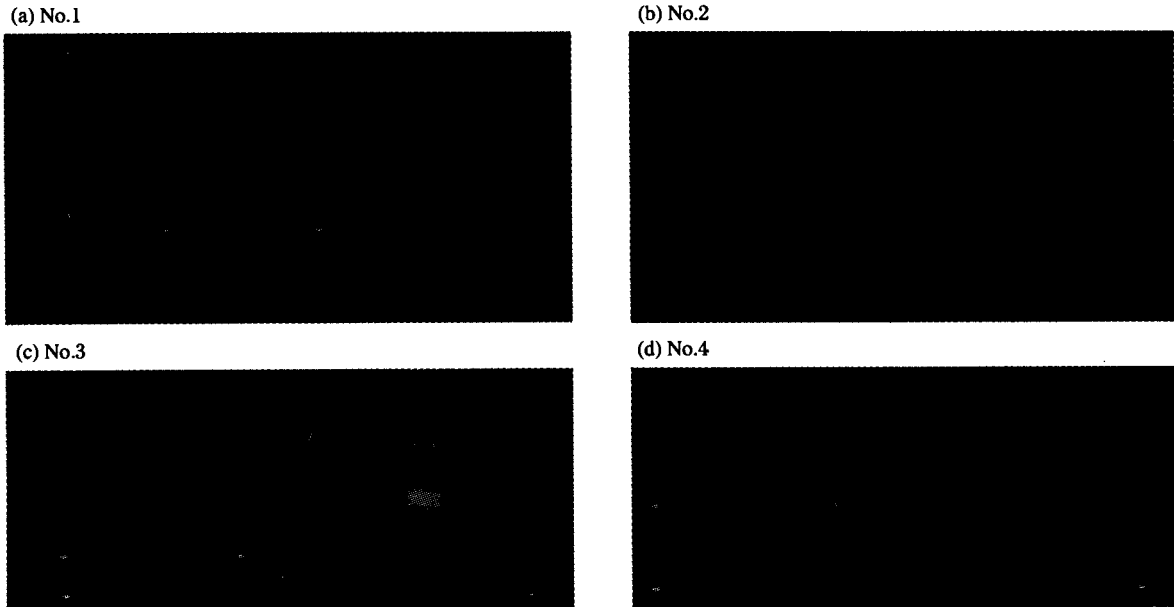


图 2 四种装药结构的实验 X 光相片($t=40.5 \mu\text{s}$)

Fig. 2 Experimental photos

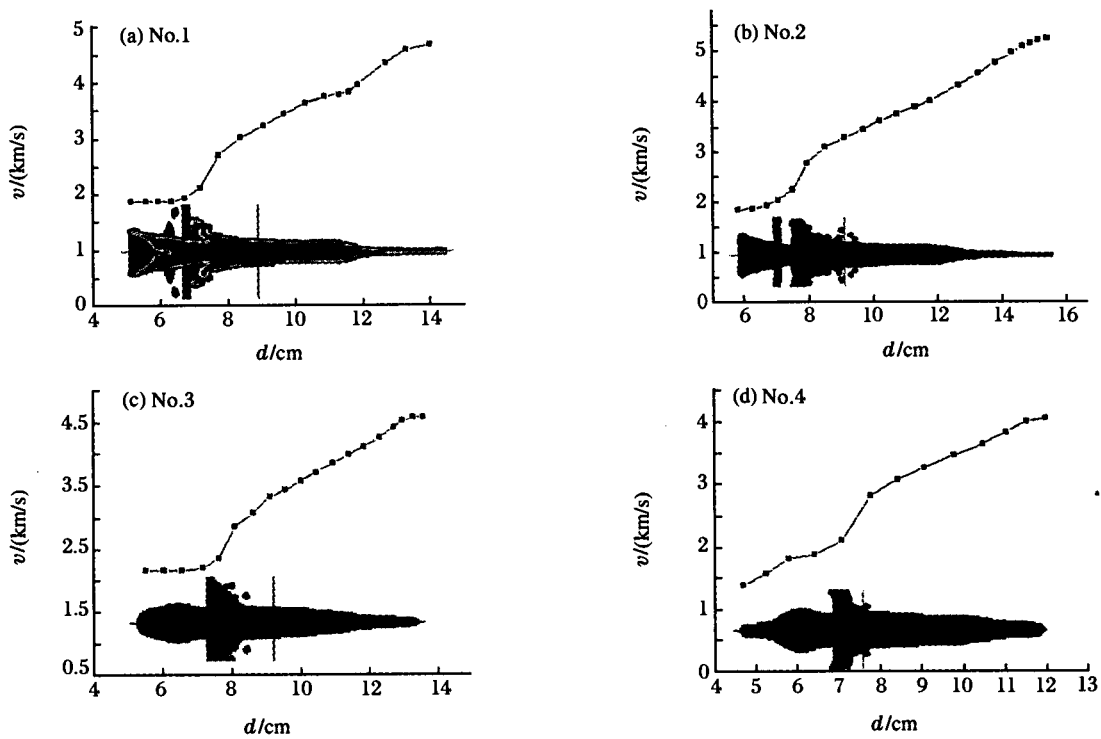


图 3 四种装药结构的计算结果($t=40 \mu\text{s}$)

Fig. 3 Calculation results

4.2 四种药型罩形成的杆式射流实验结果与数值模拟所得射流的参数比较

表 1 给出了射流实验与数值模拟所得射流的参数比较, d_1 为头部位置, d_2 为尾部位置。其中对于药型罩 1 的装药结构共进行了两发实验,得到了两个时刻实验数据。

表 1 实验与数值模拟所得射流的参数比较

Table 1 Comparison between experimental data and calculation results

药型罩	$t/\mu\text{s}$		d_1/cm		d_2/cm	
	实验	计算	实验	计算	实验	计算
1	40.5	40	12.42	12.50	5.43	5.30
1	58.5	60	19.70	20.40	8.74	8.80
2	40.5	40	12.81	13.00	5.49	5.60
3	40.6	40	12.98	13.30	5.32	5.34
4	40.5	40	12.07	12.01	5.12	5.00

计算结果显示：药型罩 1 和 2 形成的射流头部都比较细长，而后类似柱状，杆体和射流没有明显的界限，满足杆式射流的设计要求；而药型罩 3 和 4 形成射流的直径从头至尾是逐渐增大的，呈圆锥型。从四种装药结构形成的射流的外部形状和射流的头尾位置相对于起始原点的位置上来看，数值模拟结果与实验结果较吻合。从各次计算所得图像来看，所得侵彻体在两倍口径位置处非常完整，没有断裂，也没有明显的杆体和射流之分，与实验结果非常相似。而在 8 倍炸高处射流已经都断裂成 9~11 段（由于篇幅所限，这里没有给出这张图片），与实验所得的射流断裂后图像较相似，各段长度、体积和直径都比小锥角聚能射流大得多，个数少得多，可以说这四种侵彻体都是杆式射流。

从图 2~3 中可以看出，与球缺型药型罩相比，平面截顶药型罩形成的射流主体部分速度梯度较小，直径较大且均匀，对目标的侵彻效果较好，这在实验中也得到了类似的结果。

由于 X 射线不能将密度较低的物质清晰地底片上拍摄出来，故计算和实验都是选取杆式射流头尾部关键位置作为比较对象，如对实验所拍摄的照片，把射流直径变化最大并能够清晰辨认的那个位置作为射流的头部位置，并以此作为校正数值模拟结果的依据。

4.3 药型罩 1 所形成的杆式射流的形状历史

由于篇幅所限，图 4 只给出药型罩 1 结构在各时刻形成的杆式射流的形状，从中可以很清楚地看出药型罩压跨、射流形成和断裂的过程。

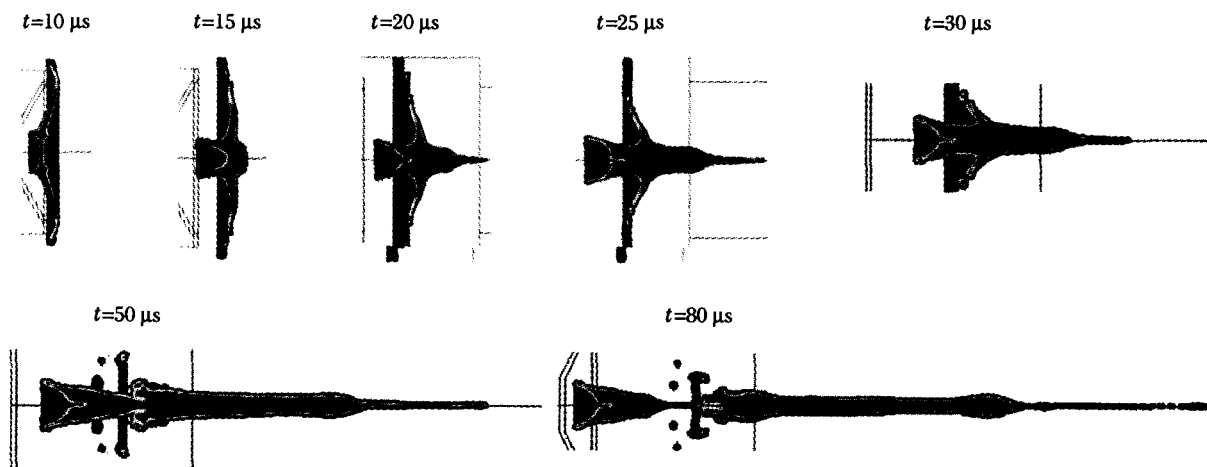


图 4 药型罩 1 装药在不同时刻的杆式射流形状

Fig. 4 Rod-like jet shapes of projectile with Charge 1 at different times

从计算和实验结果可见，当爆轰产物沿着罩的外表面同时作用在罩上时，中心罩附近开始增厚，这是材料向中心汇聚引起的。罩的边缘直径在变形过程中开始扩大，这可能是由于侧向稀疏波及罩变形过程中产生的径向压应力引起的，值得指出的是，这个增大部分越来越薄，到后来已变成一薄片，与罩的本身脱离。计算显示，药型罩 1 和 2 结构形成的杆式射流的头部有质量堆积的现象，在实验中也有此现象，从而进一步说明了计算中所采用的方法及其结果都是可以接受的。

5 结 论

(1)通过实验来标定数值模拟方法及计算所用到的参数,得到了一组较精确的材料模型参数,数值模拟结果与实验结果吻合较好,杆式射流的长度、形状和头尾部位置与实验结果基本一致,说明本文所用的数值模拟方法和材料模型参数是可靠的,这为后续的工作打下了坚实的基础。

(2)通过数值模拟研究揭示了杆式射流形成的全过程,并发现所形成的杆式射流性能还不是最优的,在大炸高下,杆式射流断裂比较严重,下步的工作主要是通过改进药型罩的几何结构进而使之形成的杆式射流在较大的炸高下仍保持完整,断裂的段数更少。

(3)在聚能装药的数值计算研究中,发展合理的材料模型来分析药型罩压跨及变形的过程是目前亟需解决的问题,要求这些模型不能局限于宏观连续介质力学范围中,还应包含材料的微观物理机制,比如说药型罩材料的显微组织、温度效应等,并将之应用于有限元分析软件,使它能够用于分析计算药型罩压跨、射流形成、延伸和失稳断裂的全过程以及射流在一定炸高下对目标的侵彻效应。

参 考 文 献:

- [1] Whelan A J, Furniss D R, Townsley R G. Experimental and simulated (analytical & numerical) elliptical-form shaped charges[A]. Carlenone J. 20th International Symposium on Ballistics[C]. 2002:446—454.
- [2] Blache A, Weimann K. Shaped charge with jetting projectile for extended targets[A]. 17th International Symposium on Ballistics[C]. Midrand, South Africa, 1998:207—215.
- [3] Baker E L, Sdaniels A. Selectable initiation shaped charges[A]. Carlenone J. 20th International Symposium on Ballistics[C]. 2002:10.
- [4] Murphy M J. Shaped charge penetration in concrete: A unified approach[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-53393,1983.
- [5] 李发伯. 小长径比聚能装药试验研究[R]. 四川绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,1997.
- [6] LS-DYNA Keywords User's Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- [7] 胡湘渝. 凝聚炸药二维冲击波起爆研究[D]. 北京:北京理工大学,1999.
- [8] 皮爱国. 超高速射弹成型机理及其数值模拟研究[D]. 湖南长沙:国防科学技术大学,2003.

Simulation investigation of rod-like jets

WU Han-ling^{1,2*}, DUAN Zhuo-ping¹, WANG Yong-qing¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: By three-dimensional finite element dynamic code LS-DYNA3D, the process of collapse, formation, elongation, instability and break-up of rod-like jet is simulated. The predictions of the simulation are in agreement with experimental data. A acceptable method of numerical simulation and parameters of material are obtained. The process of collapse about rod-like jet is discussed. It may be helpful for designing the configuration of shaped charge of rod-like jet.

Key words: mechanics of explosion; rod-like jet; numerical simulation; liner

* Corresponding author; WU Han-ling
E-mail address: wuhanling@imech. ac. cn
Telephone: 010-62545533-2138