

文章编号: 1003-1480 (2003) 04-0024-04

# 线型聚能射流形成过程的 数值模拟

夏卫国, 李裕春, 顾文彬, 欧阳春

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京, 210007)

**摘 要:** 本文利用三维有限元程序对线型聚能射流的形成过程进行数值模拟, 分析了线型聚能装药的射流及其杵体的速度、密度等参数的分布特性, 并对射流和杵体在飞行过程中的断裂现象进行了分析讨论。这对进一步展开对线型聚能装药的理论研究具有一定的指导作用。

**关键词:** 线型聚能装药; 射流; 断裂; 数值模拟

**中图分类号:** TD235.3      **文献标识码:** A

## Numerical Simulation of Linear Shaped Charge Jet Formation Process

XIA Wei-guo, LI Yu-chun, GU Wen-bin, OU Yang-chun

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLAUST, Nanjing 210007)

**Abstract:** This paper takes advantage of 3D explicit finite element method to simulate the process of linear shaped charge jet formation. The distributing characteristics of varied parameters, such as velocity and density, in the shaped charge jet and slug are analyzed. The break-up phenomena in the jet and slug during their flight process are also discussed. It is helpful to theory investigation of linear shaped charge.

**Key words:** Linear shaped charge; Jet; Break-up; Numerical simulation

线型聚能装药(又称切割装药)是聚能装药的一种, 利用它可制成各种爆炸切割器, 用于切割金属和其它材料。从20世纪60年代开始被广泛应用于宇航和军事领域, 如导弹和航天飞机中的自毁系统和分离装置, 以及条形反坦克履带式地雷等。这种装药结构应用在结构物的爆破拆除工程中, 能准确控制解体方式和倒塌方向。

对线型聚能装药的研究以试验为主, 随着计算机和数值技术的发展, 出现了诸多程序代码, 这为聚能装药的广泛研究奠定了基础。Vigil采用线型聚能装药分析代码LESCA对线型聚能装药的设计进行了模拟和优化, Gazonas和Segletes等人采用

EPIC92代码模拟了线型聚能装药射流的形成以及对2in(5cm)厚轧制均质装甲板的侵彻, Gazonas等人使用CTM代码对柔性线型聚能装药的侵彻和起爆特性进行了模拟。李裕春等人采用DYNA2D程序对面对称形式的线型聚能装药结构进行过分析和模拟, 结果与试验结果相符。

## 1 计算模型

### 1.1 基本假设

本文将采用三维有限元程序对线型聚能射流形成的过程进行模拟, 以期更为真实的反应金属药

收稿日期: 2002-10-14

作者简介: 夏卫国(1966-), 男, 讲师, 从事爆破器材的应用研究工作。

型罩的压垮、射流形成、拉伸以及断裂的全过程。在对模型进行分析的基础上,给出如下的基本假设:炸药、药型罩和外壳壳体材料为均匀连续介质,整个爆炸过程为绝热过程;装药结构为严格的面对称结构,采用顶部中心点起爆模式。

## 1.2 模型及参数

本文采用的线型聚能装药的基本结构参数为:药型罩厚度为 1.5mm,母线长为 15mm,药型罩顶角为  $90^\circ$ ,装药高度为 5.9mm,聚能装药纵向长度 30mm(主要是考虑到模型的大小)。装药结构外形如图 1 所示,线型聚能装药结构以  $xoy$  平面为药型罩材料的碰撞对称面(以下称为对称平面)。药型罩和外壳连接在一起,均为铅合金,材料采用 Steinberg 模型,装药为 RDX 炸药,采用高能炸药燃烧模型。

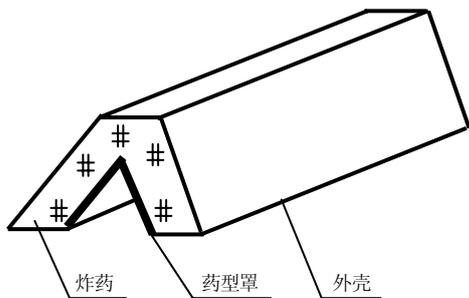


图1 线型聚能装药的基本结构外形

计算模型采用八节点六面体单元。根据初边界条件,建立二分之一模型,以  $xoz$  为对称面,模型的起爆点正好位于原点。为了保证计算过程的稳定性,药型罩(包括外壳)、炸药及空气材料均采用欧拉单元,整个模型采用均分网格,图 2 是数值模拟所采用的有限元网格示意图(断面视图,截取了模型的部分图示),计算所采用的单元总数为 403 000 个。

## 2 聚能射流形成过程的数值模拟

由于线型聚能装药结构具有面对称特点,在中心点起爆条件下,爆轰波同时沿棱向和  $x$  轴向传播。药型罩在爆轰波的作用下压垮,向对称平面产生加速运动,在对称平面上发生碰撞,形成高速的金属射流。药型罩的压垮由起爆中心点向两端依次发生,所以射流的形成也有先后次序。在  $xoz$  面内首先形成射流,然后向两端发展逐渐形成射流。射流

头部形成后,由于药型罩连续被压垮,致使流入射流部分的质量和能量在初始阶段不断增加,射流头部处于加速过程。随着射流质量和能量流入量的减少,射流头部速度逐渐降低,并沿射流长度方向递减,射流内部存在着速度梯度,所以射流在运动过程中不断拉伸。

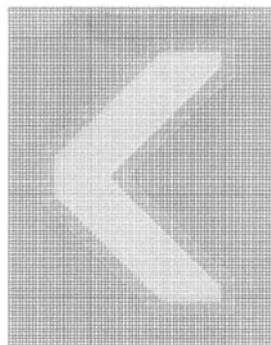


图2 线型聚能装药有限元网格

图 3 为线型聚能射流形成过程中的几个典型瞬态(以物质密度表示)。从图 3 可以看出,射流及杆体部分的长度是随时间逐渐增长的,直至射流断裂。图 3 (a) 表示药型罩及外壳的初始状态;图 3 (b) 表示起爆后  $6.0\mu\text{s}$  时刻药型罩及外壳的变形图,此时药型罩已向对称平面闭合,在对称平面内发生碰撞后,射流头部开始形成;图 3 (c) 表示起爆  $18.0\mu\text{s}$  时药型罩及外壳(部分)的变形情况,此时药型罩已完成整个闭合过程,射流的形成量不断增加,由于射流中存在着一定的逆向速度梯度,射流头部产生一定量的质量累积,也正是由于速度梯度的存在,射流部分此时已有明显的“颈缩”产生;图 3 (d) 表示起爆  $28.0\mu\text{s}$  时金属射流形成的情况,可以看出,此时的射流和杆体都有不同程度的断裂,由于射流部分的速度比杆体部分的速度变化大,所以,射流部分的断裂先于杆体,并且射流部分的断裂数目也比杆体部分的多。另外,从图 3 中还可以看出,杆体部分(位于碰撞点后的杆体前端部分)也产生了和射流部分相似的“缩颈”现象,这种现象称为“体缩”现象,以区别于射流部分的“颈缩”。在杆体中发生这种现象的原因是由于碰撞点后存在着较大的速度梯度。随着时间的增长,杆体中的“体缩”现象越发明显。药型罩的翼端及外壳将形成无效的碎片,并对外飞散,对目标的切割贡献不大。

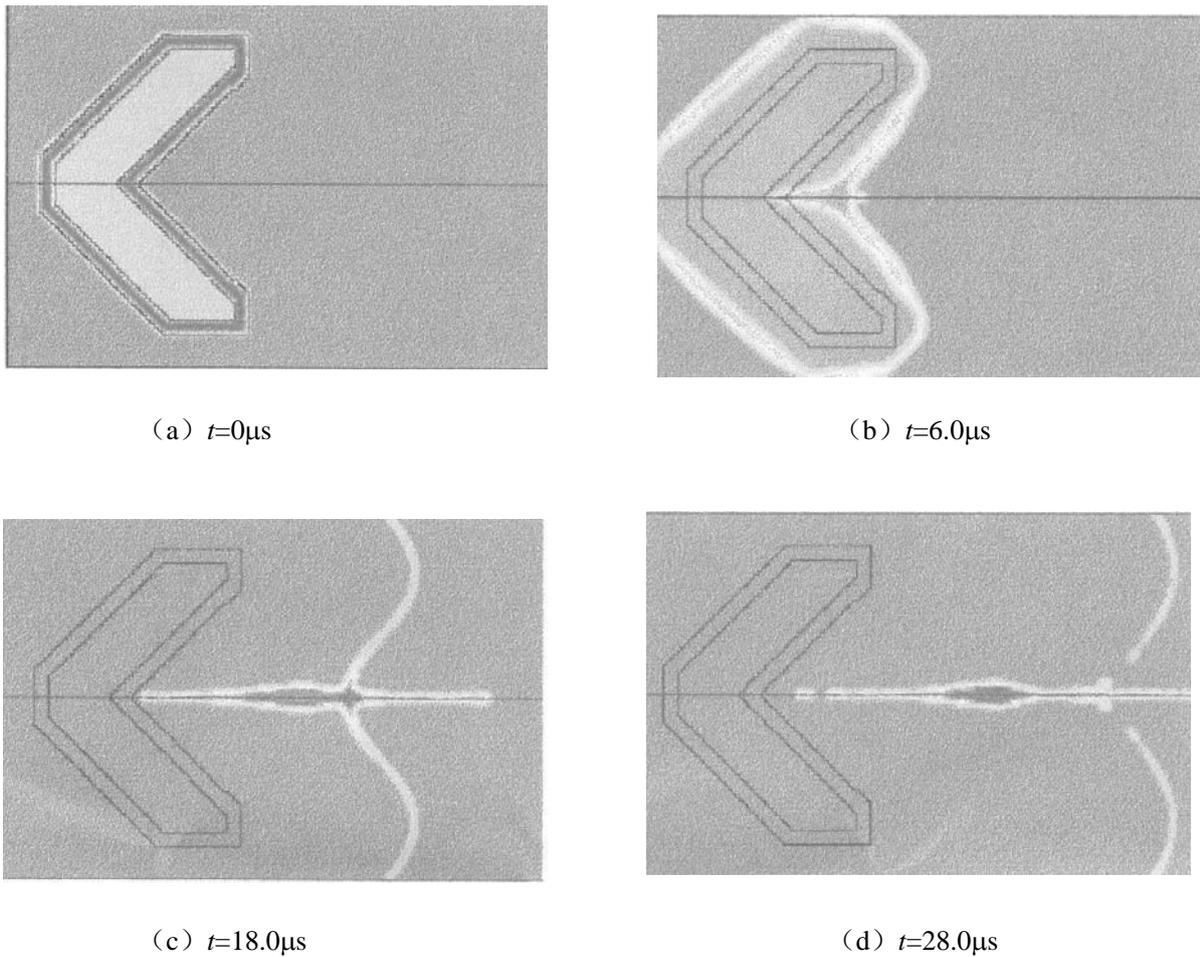


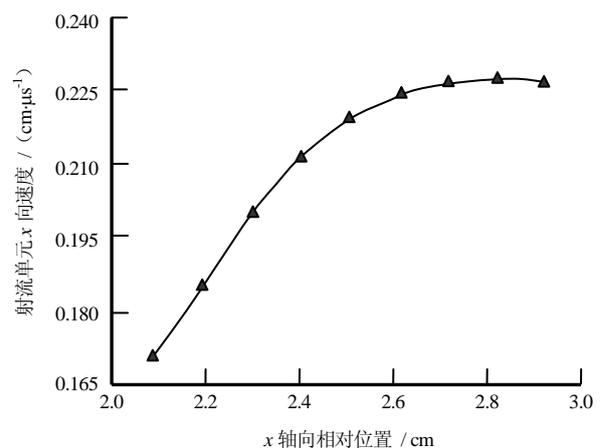
图3 线型聚能射流形成过程

### 3 射流参数分布特性

图4显示了 $16.0\mu\text{s}$ 时刻射流部分单元(所有单元均位于轴线上)的速度与其相对位置关系曲线( $x$ 轴向相对位置是指各单元至药型罩顶点的绝对距离)。从图4可以看出射流部分的速度分布规律,总体上沿射流头部向后速度逐渐降低,射流后部的速度降比射流头部的速度变化大,所以,射流部分的断裂首先应发生在中后部位。数值模拟结果显示,射流开始断裂的时间点大约在 $18.0\sim 20.0\mu\text{s}$ 之间,射流断裂时,断裂部位离射流最前端约 $0.523\text{cm}$ ,而离射流尾部约 $0.975\text{cm}$ ,即射流开始断裂时的断裂部位大约在射流长度的 $1/3$ 处。

图5是 $16.0\mu\text{s}$ 时刻杆体部分单元(所有单元均位于轴线上)的速度与其相对位置关系曲线。从图5曲线可以很容易地看出,杆体中的速度分布规律是先增后减,即杆体前部的物质速度小于杆体中部

的物质速度,随后沿杆体长度方向向后

图4  $16.0\mu\text{s}$ 时射流部分的速度规律

速度逐渐减小。由于杆体的中后部速度降比较大,即杆体的中后部速度梯度大,所以杆体中的断裂首先发生在杆体的中后部。模拟结果显示,杆体断裂

开始时, 断裂处离碰撞点(位于药型罩的中心对称面上)约 2.06cm, 而离杵体尾部仅为 0.24cm, 断裂出现在杵体的尾部。位于碰撞点前后的射流和杵体在速度上存在着较大的区别, 射流在侵彻目标上起主导作用, 而杵体部分所起作用不大。因此, 对于线型聚能装药(或切割装药)结构的设计, 应考虑到将药型罩材料尽可能地转化为金属射流, 以提高对目标的侵彻深度和贯穿能力。

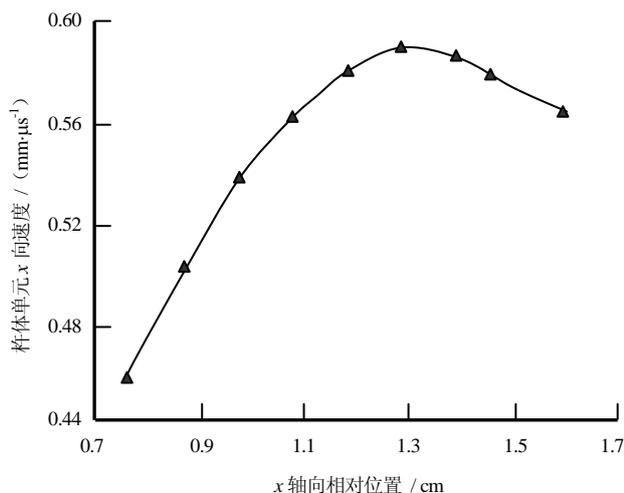


图 5 16.0 $\mu$ s 时杵体部分的速度规律

图 6 是 18.0 $\mu$ s 时刻沿  $x$  轴向(由射流头部至杵体中后部)药型罩内部密度分布。从密度分布曲线可以看出, 射流部分的密度值变化比较大, 这说明射流部分的材料拉伸程度也较大, 曲线上的最低点可能是首先发生断裂的部位, 数值模拟结果表明这一位置正好是射流部分最先发生断裂的部位。杵体部分的密度变化较小, 密度分布相对较均匀。数值模拟结果表明, 杵体部分首先发生断裂的部位位于杵体的尾部, 这是因为杵体尾部速度梯度较大的缘故。随后由杵体尾部向其中部逐次发生断裂, 与此同时, 在杵体的“体缩”处也将发生断裂。

由以上的讨论可以看出, 对于特定模型, 可以确定出射流的断裂时间, 可以根据这一时间来选取线型聚能装药的最佳炸高(至少可以确定炸高的取值范围)。

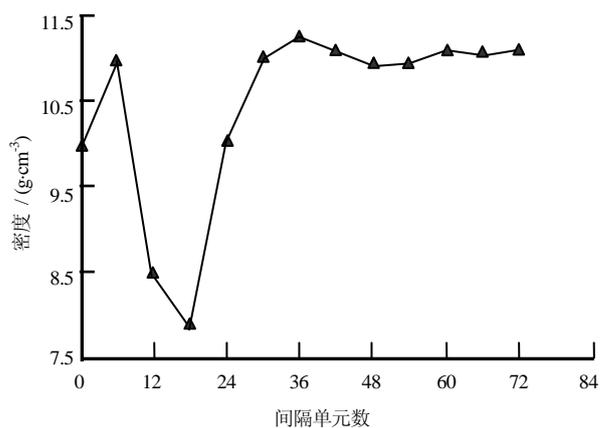


图 6 18.0 $\mu$ s 时密度变化曲线规律

## 4 结 语

本文采用了三维有限元法对线型聚能装药射流的形成及其参数分布特性进行了讨论, 可以得出以下一些结果:

(1) 线型聚能射流和杵体中都存在着逆向的速度梯度, 它导致了射流头部的质量累积和杵体中的“体缩”现象;

(2) 断裂首先发生在射流部分, 断裂部位位于射流的前端, 杵体部分也将发生断裂, 但其断裂次序是从杵体尾部开始的, 随后向中部发展, 杵体的“体缩”部位也随之开始断裂;

(3) 压垮后的药型罩内部密度分布规律是: 射流部分密度变化大, 杵体部分密度变化相对较小, 这是由于射流部分的速度梯度大, 而杵体部分速度梯度较小的缘故。

## 参考文献:

- [1] Gazonas G A, Segletes S B. Hydrocode simulation of the formation and penetration of a linear shaped demolition charge into an RHA plate [R]. AD-A299777, 1995.
- [2] 恽寿裕, 涂侯杰. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 142~148.
- [3] Walters W P, Zukas J A. Fundamentals of shaped charges [M]. New York: John Wiley and Sons, 1989: 203~209.
- [4] 李裕春. 线型聚能装药射流形成数值模拟及装药结构参数优化研究 [D]. 南京: 工程兵工程学院, 2001.6.