

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.007

聚能射流对靶板侵彻的数值仿真

崔军, 徐峰, 李向荣

(装甲兵工程学院 兵器工程系, 北京 100072)

摘要: 利用 AUTODYN 非线性动力学分析软件, 采用 Johnson Cook 动态本构模型和多物质 Euler 算法, 对某子母弹的子弹聚能射流形成、侵彻钢板过程进行了数值仿真, 得到与试验结果相近的聚能射流形成和侵彻的物理现象和规律, 验证了该模型和数值模拟的合理性, 为该弹的测试和鉴定提供一些理论依据, 对聚能破甲战斗部的工程设计具有重要的应用价值。

关键词: 聚能装药; 数值仿真; Euler-Lagrange 算法

中图分类号: TP602 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Shaped Charge Jet Penetrating into Target

CUI Jun, XU Feng, LI Xiang-rong

(Dept. of Weaponry Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Using AUTODYN nonlinear dynamics analysis software, Johnson Cook constitutive model of dynamic and multi-material Euler algorithm, the bullet of a dispenser shaped jet formation process of penetrating steel plate numerical simulation and experimental results are similar to shaped Jet Formation and Penetration of the physical phenomena and laws. It verifies the model and numerical simulation is reasonableness, and provides some theoretical basis for the bullet testing and appraisal. The engineering design has important application value.

Keywords: Shaped charge; Numerical simulation; Euler-Lagrange algorithm

0 引言

聚能射流是弹药爆炸后形成的高速流体, 其对靶板侵彻能力是各种舰弹对目标毁伤能力的重要指标。目前, 聚能射流侵彻的方法已广泛应用于各种箭弹战斗部的设计上, 故研究聚能射流对靶板的侵彻具有重要的现实意义。

1 理论基础

聚能射流的形成: 炸药爆轰后, 将炸药的能量传给金属药型罩, 药型罩以很大的速度向轴线运动汇聚(压垮), 药型罩内壁在压垮中产生速度更高的塑性金属流。当爆轰波在压垮过程中产生的压力远超过药型罩材料的屈服强度时, 药型罩性能大致相当于一种非粘性、不可压缩的流体, 因此, 用定常理想不可压缩流体力学模型来解释射流的形成过程。但在实际聚能装药中, 药型罩各处壁厚不同, 对应的装药厚度也有变化, 故药型罩上各处的压垮速度不相同。为了使仿真模拟更接近实际, 可把药型罩及对应的装药划分成若干微元, 只要求在微元内满足定常条件, 即“准定常方法”。按理想不可压缩流体来计算处理射流形成的过程, 即 PER 理论^[1]。

AUTODYN 非线性动力学仿真软件提供了多种

材料模型和状态方程, 功能齐全的输出输入处理模块适用于爆炸、冲击和侵彻等问题的数值模拟计算。

2 建立有限元分析模型

2.1 假设

通常情况下, 对某一问题的仿真分析必须先做一些假设, 将复杂的目标简化成能建立数值仿真模型并保证目标真实特性的简单目标, 这就要求对一些特定的环境参数、几何条件进行简化, 然后再运用数学计算的方法来对目标进行量化计算模拟。采用 Backman 和 Goldsmith 对于侵彻的假设如下:

- 1) 靶板的响应集中在几倍于弹体直径的区域中, 可忽略远离冲击点的复杂边界条件;
- 2) 忽略包括摩擦在内的热效应;
- 3) 假定撞击面局部为平面。

2.2 模型材料选取

表 1 材料参数

部件	材料	状态方程	强度模型	失效模型	密度/g·cm ⁻²
空气	Air	Ideal Gas			0.001 225
炸药	CompB	JWL			1.717
药型罩	Copper	Shock			8.93
壳体	Steel 4340	Linear	Johnson Cook	Johnson Cook	7.83
靶板	Steel S-7	Shock	Johnson Cook		7.75

收稿日期: 2009-07-02; 修回日期: 2009-09-08

作者简介: 崔军 (1966-), 男, 吉林人, 副教授, 从事武器维修、弹药毁伤方向研究。

数值仿真的动力学模型由壳体、药型罩、炸药、空气和靶板 4 个部分组成。所用的材料均直接从软件的材料数据库中获得, 材料参数如表 1。

2.3 网格及边界条件

由于破甲弹的聚能装药结构由图示模型沿 X 轴旋转一周获得, 故模型具有轴对称特性且聚能装药是线性的, 为了节约计算资源, 只需要采用平面 1/2 模型, 用 $\text{cm}\cdot\text{g}\cdot\mu\text{s}$ 单位制。其中炸药、药型罩和空气 3 种材料采用 Euler 处理器建模。建模方法为:

先用 Euler 多物质的方法建立平面网格, 划分网格后输入填充物质理想气体, 并输入网格中理想气体的内能; 用 Lagrange 的方法建立壳体、药型罩和炸药的几何模型, 划分网格并依次填入理想气体到平面网格中; 后将壳体、药型罩和炸药选中, 并替换成 Euler 方法, 在材料网格上重新分配质量、动量和能量, 得到新的网格速度和网格内各介质的质量及内能。Euler 法的好处是网格不动且不变形, 克服了单元网格畸变引起的数值计算困难。

靶板采用 Lagrange 处理器建模, 将靶板的 Lagrange 单元定义为固体, 将炸药、空气和药型罩的多物质 Euler 单元定义为流体。因模型是二维使用 2 种处理器, 故射流与靶板的相互作用为 Euler-Lagrange, 聚能装药产生的射流通过耦合把能量和压力传递给靶板, 实现对靶板的侵彻, 靶板对射流起几何约束作用。数值模拟时模型几何参数如表 2。

表 2 模型几何参数 mm

壳体长	壳体直径	药型罩厚	壳体厚	靶板长	靶板厚
102	60	2	2	100	40

壳体、药型罩、炸药和靶板的初始速度以及初始能量都设为 0, 起爆方式为中心起爆, 冲击波能量耗散为 15%。最后, 设定边界条件为 Flow out (Euler), 设置循环周期、时间步长、以及观察点等输入输出的自定义参数。

3 计算结果分析

在给定外壳尺寸和了解设计参数要求的条件下, 进行数值模拟前必须先通过改变药型罩的锥角大小和炸高距离的大小, 通过大量的数值模拟得到较好的射流和有利炸高, 进而获得较好的破甲效果。



图 3 各个周期射流侵彻靶板的状态图

图 3 中的(a)、(b)、(c)、(d)分别表示射流在 700、1 000、1 500、2 000 个周期时侵彻靶板的状态图,

3.1 锥角选取

通过改变锥角的大小进行数值模拟, 以获取较好的射流形成过程。由于射流的形成与 EFP 有区别, 射流的锥角取值为 $30^\circ \sim 70^\circ$ ^[2]之间, 为保证射流速度和质量, 只选取了在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 范围内的小角度变化, 每次增加 5° 做一次模拟。关于射流较好锥角的选择, 不仅需要通过大量的仿真分析和统计试验, 而且需要考虑到设计的总体要求、目标特性、边界条件及各种其它因素的影响, 最终才能确定。仅粗略地根据设计对射流的速度、形状、破甲深度和扩孔的孔径等参数的要求, 选取了锥角为 50° 时模型作为研究对象。图 1 为 50° 锥角时模型图, 图 2 是在没有设立靶板时经历 1 000 个周期后所形成的射流状态图, 射流的头部发生了堆积现象, 通过模拟发现图 2 再经过约 500 周期后射流就会产生断裂。



图 1 50° 锥角模型图

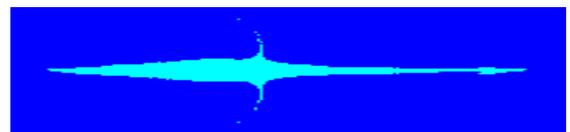


图 2 无靶板 1 000 周期时射流状态图

3.2 炸高选取

炸高的选取与破甲效果是必然联系的, 同一锥角下不同炸高时, 破甲效果是不一样的, 不同锥角下同一炸高时, 破甲的效果也不相同; 炸高距离越大, 侵彻孔径愈小, 侵彻深度越深, 炸高距离越小, 侵彻孔径愈大, 侵彻深度越浅^[2]; 根据设计提出的具体要求, 在考虑形成较好射流的同时, 结合不同的炸高进行模拟实验, 最后进行综合比较, 才能获得较好的破甲效果。根据破甲深度及扩孔的孔径等参数要求, 选择了炸高为 45 mm 时的模型来模拟。

3.3 结果分析

通过上述分析和试验, 最终选取了锥角为 50° , 炸高为 45 mm 时的模型进行数值模拟。图 3 是各个周期时射流侵彻靶板的的状态图。

从各图中可以看出：射流侵彻的孔径要大于射流的直径，随着周期的不断增加，由于射流挤压靶板时，自身头部速度降低和能量传递导致后继的射流不断堆积，射流的直径将会逐渐增大，慢慢堆积满前端部分的侵彻孔，当然前提是在射流的最大穿深小于靶板的厚度；当射流的穿深大于靶板厚度时，射流就会穿透，而由于杆体直径较大，可能与射流发生断裂。从图 3(b)、(c)可以看出：靶板材料在射流的猛烈挤压下，不仅密度有所增加，而且向边界挤出；图 3(c)、(d)中靶板的左表面比较粗糙，是由于炸药冲击波造成有部分射流或壳体破片飞散所造成的。

图 4 是在不同观察点得到射流速度随时间变化图，横轴为时间轴 (ms)，纵轴为速度轴 (m/s)。图 4(a)、(b)是在没有放置靶板的情况和观察点网格坐标为 (107,3)、(201,2) 的速度变化图，图 4(c)、(d)是在侵彻靶板时观察点网格坐标为(115,7)、(312,2)的速度变化图，其中图 4(a)、(b)和(c) 3 个观察点在杆体中；从 4 个图中都可以看出射流的速度都达到了 6 000 m/s，在约 5 μs 时，由于在爆轰波的直接作用下，对药型罩顶部的强烈冲击使射流微元速度激增，射流头部压力和加速度达到最大值，从射流开始产生到爆轰波的能量耗尽持续了约 40 μs。

由于图 4(a)、(b)的观察点不同，图 4 (a)网格在前，所以变化时间早于图 4 (b)，而射流形成的过程非常复杂，射流微元相互挤压传递速度与内能，在固定了的网格中流动，在约 24 μs 产生了图 4(a)观察点中射流速度下降，可能是射流发生了断裂，受其影响，图 4(b)也出现了相同的情况，在约 50 μs 时观察点网格中射流微元基本不再流动。

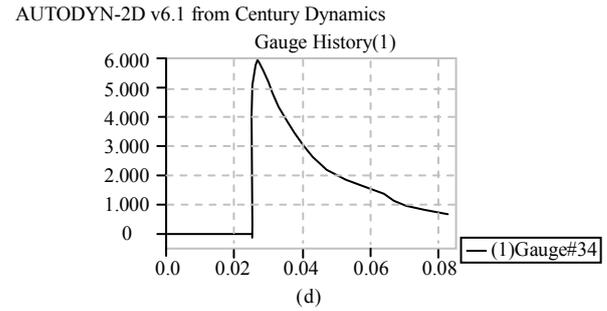
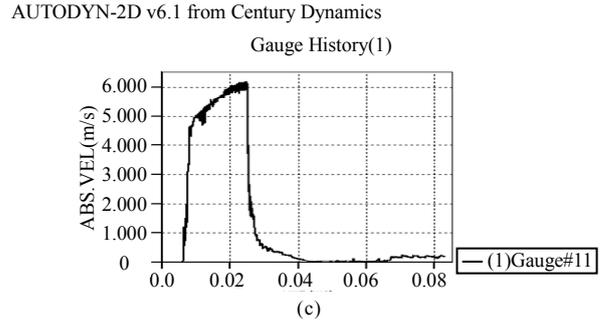


图 4 不同观察点射流速度变化图

图 4(c)、(d)仍然是由于网格坐标的不同导致了速度产生的先后；图 4(c)中在约 25 μs 时发了速度骤降，这是由于射流在侵彻靶板的过程中，其头部射流受到靶板的阻挡速度下降，通过相互挤压将自身的动能转化为靶板的内能，这样在头部产生更多的堆积并向后延伸，后继的射流微元也受其影响速度下降，到图 4(a)观察点时速度就会大减；另一个原因是沿射流纵轴线方向存在速度梯度^[3]，沿轴线方向的内能和速度较大，而靠近外围的则比较小；图 4(d)观察点网格坐标位于靶板上，且靠近射流轴线，从开始侵彻到完成侵彻，速度下降比其它 3 图平缓，经过了约 50 μs 射流速度降为 1 000 m/s 以下。

4 结论

该仿真结果与实验结果^[4]基本吻合，由上述模拟分析可知：1)在弹药的设计和试验等方面，运用计算机仿真技术可以形象逼真地模拟聚能装药对靶板的侵彻，意义重大；2) 在建立正确模型的同时，考虑的因素越全面，仿真质量越高。

参考文献：

[1] 王树魁, 贝静芬, 等译. 成型装药原理及其应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 55-66.
 [2] 王儒策. 弹药工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 104-105.
 [3] 谭多望, 孙承伟, 等. 大锥角聚能射流实验研究[J]. 高压物理学报, 2003, 17(3): 204-208.
 [4] 赵捍东, 陈国光, 董永香. 聚能装药射流的数值仿真研究[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(3): 211-214.

