

一种超聚能装药结构的仿真

李庆鑫,王志军,陈莉,伊建亚

(中北大学 机电工程学院,太原 030051)

摘要:为了得到一种新型的可形成较传统射流更高速度的聚能装药结构,利用非线性动力学分析软件 AUTODYN-2D 对其成型过程进行了数值仿真,并应用应力波基础、冲击力学等相关理论进行分析。研究表明:选用铜、钽、钨作为“蘑菇形”药型罩的材料可以得到速度在 8 800 ~ 13 000 m/s 且具有良好成型效果的高速射流。分析了药型罩壁厚和下辅助药形罩二的半径结构参数对射流速度的影响,结果表明,减小药型罩厚度或增大下辅助药形罩的半径可以有效提高形成射流的速度,但速度超过 13 700 m/s 后成型效果变差。根据研究成果可以得到“蘑菇形”药型罩各部分材料的搭配规律及其成型规律。

关键词:“蘑菇形”药型罩;高速射流;应力波;结构仿真

本文引用格式:李庆鑫,王志军,陈莉,等.一种超聚能装药结构的仿真[J].兵器装备工程学报,2016(6):35-38.

Citation format:LI Qing-xin, WANG Zhi-jun, CHEN Li, et al. Simulation Research of a Super Shaped Charge Structure[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(6):35-38.

中图分类号:TJ413. 2

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)06-0035-04

Simulation Research of a Super Shaped Charge Structure

LI Qing-xin, WANG Zhi-jun, CHEN Li, YI Jian-ya

(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to get a new type of shaped charge structure which can form much higher speed of jet than traditional, nonlinear dynamics analysis software AUTODYN-2D numerical simulation was proposed with applied mechanics, mechanical or related theory. Research shows that: copper, tantalum, tungsten as “mushroom” type shaped charge structure material choosed can get the speed in 8 800 ~ 13 000 m/s and has good forming effect of high speed jet. The effect of radius structure parameters of medicine type shield wall thickness and the sub-auxiliary medicine form cover on the jet speed was analyzed. The simulation analysis prove that reducing the thickness of shaped charge liner or increasing the radius of sub-auxiliary shaped charge liner can effectively improve the speed of forming jet. But if the speed of forming jet has exceeded 13 700 m/s, the shape of forming jet will be bad. Through this study, we can get the “mushroom” liner of different material collocation rules and forming rules.

Key words: “mushroom” type shaped charge; high-speed jet; stress wave; structure simulation

聚能装药作为一种传统的反装甲手段,广泛应用于各类反坦克、反装甲战斗部。相对于杆式穿甲弹具有成本低、技术成熟、工艺稳定等优点。随着防护技术的发展,一大批高性能、新理念的材料应用于国防领域,使得装甲的防护能力得到了很大提升。这对反装甲战斗部的研究与发展提出了

新的挑战。俄国科学家 V. F. Minin 等^[1]在传统聚能装药基础上开创了超聚能装药领域,首次提出并定义了超聚能射流现象。这种超聚能射流不仅有着较传统射流更高的速度而且成型后射流质量也有很大的提升,对于增大破甲深度有非常重要的意义^[2-4]。

收稿日期:2015-12-23; **修回日期:**2016-01-29

基金项目:国家自然科学基金(11572291);中北大学科技立项(20151205)

作者简介:李庆鑫(1990—),男,硕士研究生,主要从事弹药战斗部技术研究。

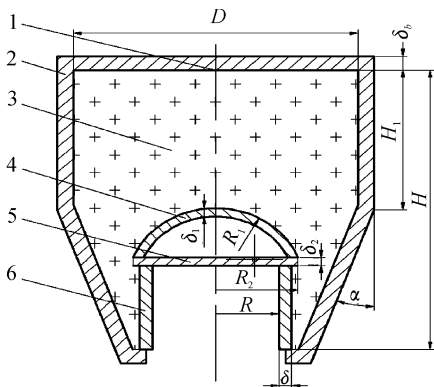
本文就超聚能装药中一种经典结构——“蘑菇形”药型罩利用 AUTODYN-2D 软件进行仿真研究。通过插入高斯点的方式观察药型罩材料的利用情况以及各点成型后的速度情况,分析了部分结构参数对超聚能射流成型的影响。

1 几何结构及计算模型

1.1 结构及几何模型

“蘑菇形”药型罩结构如图 1 所示。此结构由壳体、炸药装药、药型罩、上辅助药型罩、下辅助药型罩、起爆点等组成。主要参数有:装药口径 D 、装药高度 H 、圆柱部高度 H_1 、斜肩部角度 α 、壳体壁厚 δ_b 、药型罩内径 R 及壁厚 δ 、辅助药型罩一曲率半径 R_1 及壁厚 δ_1 、下辅助药型罩半径 R_2 及壁厚 δ_2 。

图 1 中 $D = 90 \text{ mm}$ 、 $H = 100 \text{ mm}$ 、 $H_1 = 50 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 20^\circ$ 、 $\delta_b = 5 \text{ mm}$ 、 $R = 20 \text{ mm}$ 、 $R_1 = 28 \text{ mm}$ 、 $\delta_1 = 3 \text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 3 \text{ mm}$ 。其中药型罩壁厚 δ 及下辅助药型罩半径 R_2 为变量参数。



1. 起爆点; 2. 壳体; 3. 炸药装药; 4. 上辅助药型罩;
5. 下辅助药型罩; 6. 药型罩

图 1 “蘑菇形”药型罩结构

1.2 计算模型

“蘑菇形”药型罩装药结构为轴对称结构,建立模型时可以采用 2D 模型替代 3D 模型进行研究,简化建模过程、缩短计算时间且不失其准确性。所以本研究采用非线性动力学分析软件 AUTODYN-2D。聚能装药形成射流的过程涉及多物质、运动变形大且变形剧烈,所以采用 Euler 算法,使用 AUTODYN 高进度多物质求解器 Euler-material 进行仿真计算。有限元模型如图 2 所示。



图 2 蘑菇形药型罩有限元模型

2 材料的选择

“蘑菇形”药型罩整体由两个辅助药型罩和一个药型罩

组成。较传统药型罩而言,半球形的上辅助药型罩可以提高爆轰产物与药型罩的作用面积,延长能量传递时间,两个辅助药型罩间的空气夹层延长了爆轰产物轴向上作用于药型罩的时间,提高了炸药能量的利用率,使得在轴线方向上药型罩可以获得相当大的压力,最终形成具有极高速度的超聚能射流^[3,7]。

压力值为 p_1 的平面冲击波 D_0 从 A 中右行传播入射到 B 中。设 A、B 原来都处于未扰动状态,对应于 $p-u$ 图中的 0 点,入射冲击波使材料 A 从 0 点沿 Hugoniot 冲击曲线运动到 1 点,入射冲击波到达两材料的界面时由于冲击波阻抗的不同将发生反射和透射。根据不同介质界面上满足压力 p 和质点速度 u 均连续的要求,分别得到如图 3 示冲击波传播情况^[4-6]。

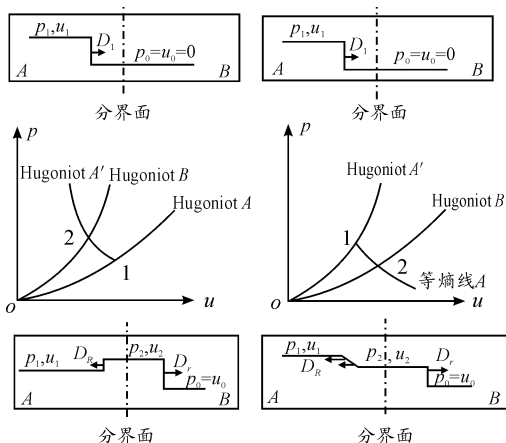


图 3 冲击波传播

- 冲击波从低阻抗入射到高阻抗材料的反射和透射
- 冲击波从高阻抗入射到低阻抗材料的反射和透射

从图 3 可以观察到,当冲击波从高阻抗入射到低阻抗材料时,B 材料可以获得更高的质点速度^[8],与本文的研究初衷即获得更加高速的射流相符。根据以上分析初步确定 3 组材料方案,如表 1 所示。

表 1 药型罩材料方案

	药型罩	上辅助药型罩	下辅助药型罩
1	铝	铁	铜
2	铜	钽	铁
3	铜	钨	钽

采用 $D = 90 \text{ mm}$ 、 $H = 100 \text{ mm}$ 、 $H_1 = 50 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 20^\circ$ 、 $\delta_b = 5 \text{ mm}$ 、 $R = 20 \text{ mm}$ 、 $R_1 = 28 \text{ mm}$ 、 $\delta_1 = 3 \text{ mm}$ 、 $\delta_2 = 3 \text{ mm}$ 、 $\delta = 0.3 \text{ mm}$ 、 $R_2 = 25 \text{ mm}$ 结构,药型罩材料参数如表 2 所示,在 4 倍装药口径处获得如图 4 所示射流。

3 组仿真数据得到射流头部速度分别为 $15\,484 \text{ m/s}$ 、 $11\,427 \text{ m/s}$ 、 $13\,707 \text{ m/s}$ 。方案 1 形成射流虽然头部速度非常高,但是头部出现多处断裂,成型效果不佳。方案 2 形成射流也发生断裂现象,且速度最小。方案 3 形成射流即保持了

较高的头部速度又有着良好的成型效果。证明铜、钽、钨3种材料搭配较为合理。如果再替换其他材料,应该遵循冲击阻抗从上辅助药型罩、下辅助药型罩到药型罩依次减小的规律,且较为合理的配比是药型罩冲击阻抗要明显小于其他两者。

表2 药型罩材料参数

	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	声速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	冲击阻抗/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}$)
铝	2.785×10^3	5 328	1.48×10^7
铜	8.930×10^3	3 940	3.52×10^7
铁	7.860×10^3	4 610	3.62×10^7
钽	16.65×10^3	3 414	5.69×10^7
钨	19.22×10^3	4 029	7.75×10^7

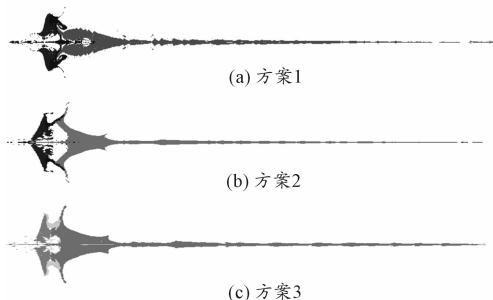


图4 不同材料方案药型罩在4倍装药口径处形成射流节

3 结构参数对射流成型的影响

对于蘑菇形聚能装药射流形成过程的成型过程如图5所示。

起爆后,爆轰波向上辅助药型罩顶部方向前进,率先压垮上辅助药形罩。由于上辅助药形罩为球缺形,在其未与下辅助药形罩贴合前,压垮过程与单独作为药型罩形成后翻形EFP过程类似。同时爆轰波继续向前,压垮筒形药型罩。之后过程施加到筒型药型罩上的压力主要分两部分,一部分为与其直接接触的爆轰波带来的;另一部分为与其接触的压合后的辅助药形罩间接传播的爆轰波压力。两种压力同时作用完成后续的压垮过程。

从理论上讲,筒形药型罩本身由于其压垮角 β 较小,按照射流成形的PER理论,其可以产生较高头部速度的射流。再加上部分位置的压力是由与其贴合的辅助药形罩加载的,通过第2节分析,这部分将获得比爆轰波直接压垮更高的速度。

3.1 药型罩厚度对形成射流的影响

为了研究药型罩厚度对形成射流的影响,本文对下辅助药型罩半径 $R_2 = 26 \text{ mm}$,药型罩厚度分别为2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0的结构进行仿真计算。

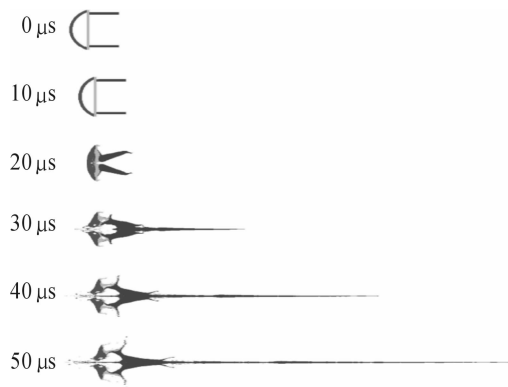
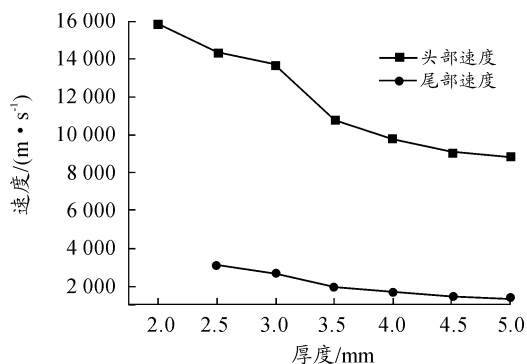


图5 蘑菇形聚能装药射流形成过程

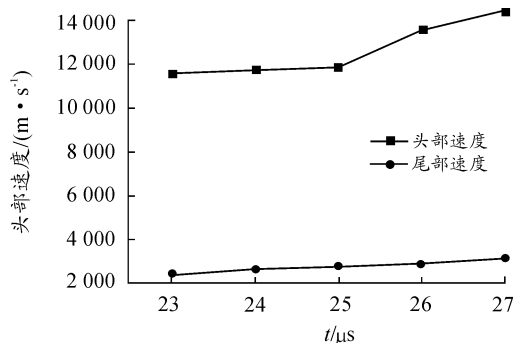
图6 不同壁厚在 $t = 50 \mu\text{s}$ 时形成射流的头尾速度

计算结果显示,在壁厚2.0 mm时射流断裂严重,随着壁厚的增加射流成型更加稳定,当 $\delta \geq 3.0 \text{ mm}$ 时射流良好未出现断裂。同时随着壁厚的增加头部速度逐渐减小,头尾速度差趋于定值。具体数据如图6所示。

3.2 下辅助药型罩的半径对形成射流的影响

为研究下辅助药型罩的半径对形成射流的影响,本文对药型罩壁厚 $\delta = 0.3 \text{ mm}$,下辅助药型罩的半径分别为2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0的结构进行仿真计算。

计算结果显示,随着半径的增加所形成的射流头部的速度逐步提高,与3.1中情况相同,在半径增加到一定程度($R_2 \geq 27 \text{ mm}$)后,射流就会出现断裂状况。具体数据如图7所示。

图7 不同半径 R_2 在 $t = 50 \mu\text{s}$ 时形成射流的头尾速度

4 结论

本研究中结构形成的射流与传统小锥角锥形药型罩相比,射流长度相差极小、射流直径为传统的50%左右,但拥有极高的头部速度,与传统射流相比最大可高出50%左右,对破甲威力的提高有极大的积极意义。

1) “蘑菇形”药型罩是一种新型的可以形成高速射流的新结构。在结构相同的情况下对于材料铜、钽、钨的组合可以形成头部速度8 800~13 000 m/s的高速射流。

2) 对于这种新型的药型罩,材料的选择需要遵循冲击阻抗从上辅助药型罩、下辅助药型罩到药型罩依次减小的规律,且较为合理的配比是药型罩冲击阻抗要明显小于其他两者。

3) 对于本研究中提到的结构,减小药型罩壁厚或增大下辅助药形罩半径是提高射流头部速度的有效手段。但应该注意的是,当速度增大到13 700 m/s后,所形成的射流将会出现颈缩或断裂现象,影响破甲能力。

参考文献:

[1] MININ V F, MININ I V, MININ O V. Physics of hypercu-

mulation: a review [C] // Proc. of 2013 Int. Forum on special equipments and eng. Mech. Science Press, USA, 2013: 10-12.

- [2] 王成, 钱俊松, 王万军. 超聚能射流形成的数值模拟 [C] // 北京力学会第20届学术年会论文集. 北京: [出版社不详], 2014.
- [3] 王淦龙. 超聚能射流数值模拟的初步研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [4] 王志军, 尹建平. 弹药学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [5] 余同希, 邱信明. 冲击动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [6] 马晓青, 韩峰. 高速碰撞动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [7] 郑宇. 双层药型罩毁伤元形成机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [8] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] 张明星, 姜波, 黄晓霞. 聚能装药杆式射流的数值仿真 [J]. 四川兵工学报, 2014(12): 20-22.

(责任编辑 周江川)