

doi: 10.7690/bgzd.2021.03.003

平顶尺寸与起爆环半径对复合药型罩形成射流的影响

冯志威, 王志军, 尹建平, 张小静
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为研究复合药型罩平顶尺寸与起爆环半径对射流头部速度及成形的影响, 对不同平顶尺寸和起爆环半径的铜-铝复合药型罩进行数值模拟。利用 AUTODYN-2D 模拟药型罩的变形和射流的形成及断裂的过程, 仿真平顶尺寸对射流的影响、起爆环大小对双层药型罩形成射流的影响、平顶尺寸与起爆环半径对射流成形的影响, 并分析外罩挤破内罩状况。结果表明: 小起爆环半径时, 药型罩平顶尺寸越小, 射流头部速度越高; 大起爆环半径时, 较大的平顶尺寸可获得较高的射流头部速度, 平顶尺寸增加到装药口径 20% 左右时, 成形中会出现内罩挤破外罩的现象。

关键词: 平顶尺寸; 环形起爆; 复合药型罩; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3 **文献标志码:** A

Study on Influence of Flat Top Size and Annular Detonation on Forming of Composite Liner Jet

Feng Zhiwei, Wang Zhijun, Yin Jianping, Zhang Xiaojing

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

Abstract: To study the influence of flat top size and initiation ring radius of composite liner on jet head velocity and forming, numerical simulation of copper-aluminum composite liner with different flat top size and initiation ring radius was carried out. Use AUTODYN-2D to simulate the deformation of composite liner and the formation and fracture process of the jet, simulate the effect of the flat top size on the jet, the influence of initiation ring size on jet formation, the influence of flat top size and initiation ring radius on jet forming were simulated, and the situation of liner crushing inner liner was analyzed. The results show that when the detonating ring radius is small, the top size of composite liner is smaller, and the jet head velocity is higher; when the detonating ring radius is large, the larger top size can obtain a higher jet head velocity. When the charge diameter is increased to about 20%, the inner cover may break the outer liner during forming.

Keywords: flat top size; annular initiation; composite liner; numerical simulation

0 引言

为应对各种军事目标越来越强的防护和抗打击能力, 有效对付各种现代装甲目标, 并满足现代矿山、石油钻井和地质深层开坑等方面的需要, 人们对装药、爆轰波形、药型罩材料与结构等方面进行了大量研究, 提出了双层复合药型罩^[1]。

刘润滋等^[2]通过仿真发现: 外母线为直线、上锥罩为等壁厚和下锥罩为变壁厚相结合的复合药型罩, 且当上下罩高相同时, 射流头部速度达到最大; 王德宝等^[3]发现: 在顶点起爆条件下, 平顶药型罩的平顶中心首先下凹并拉动药型罩壁向内汇聚构成环形线性聚能罩, 聚能罩在炸药爆轰作用下产生一级射流, 一级射流彼此作用继而产生更高速度的二级射流; 李鹏等^[4]通过试验和数值模拟研究发现: 半预制药型罩斜置角度为 1.5° 时, 爆炸成型杆式侵彻体着靶姿态最好, 对 45 钢靶板侵彻深度最大; 王

瑶等^[5]对复合双层药型罩不同罩顶过渡弧半径形成射流的过程进行数值模拟后发现: 随着过渡弧的增大, 射流速度明显下降, 射流对靶板的侵彻深度减小; 吴义锋等^[6]通过调整不同的起爆环尺寸, 获得聚能侵彻体速度及伸长量的变化规律; 陆志毅等^[7]利用数值计算研究双层药型罩时发现: 外罩为铝罩的双层药型罩形成的射流具有良好的拉伸成型性能、较高的头部速度且不易断裂; 龚超安等^[8]和曹杰等^[9]分别研究了铜铝双层药型罩厚度比对射流侵彻能力的影响: 龚超安等^[8]发现在铜铝厚度比在 2 附近时药型罩侵彻能力最好, 为最佳厚度比; 曹杰等^[9]发现铜铝厚度比为 1:1.5 时, 铜铝双层复合药型罩射流性能最优。

已有研究多从复合药型罩不同双层材料和材料厚度匹配等方面研究, 或者研究过渡弧半径或起爆环半径等单一因素对药型罩形成射流的影响。为了

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(11572291); 山西省研究生联合培养基地人才培养项目(20160033, 20170028)

作者简介: 冯志威(1997—), 男, 山东人, 硕士, 从事弹药高效毁伤研究。E-mail: fzw12@hotmail.com。

弥补研究的不足，从平顶尺寸与起爆环半径匹配性方面考虑，分析 2 因素对平顶复合药型罩形成射流共同影响。笔者运用 AUTODYN-2D 软件，选择合适材料参数，建立合理的数值计算模型，通过射流头部速度和头部材料、射流伸长情况来研究平顶尺寸和起爆环半径对平顶复合药型罩形成射流的影响，为复合药型罩射流及侵彻的研究提供相关参考。

1 模型建立

药型罩的模型如图 1 所示，战斗部直径 $D=98$ mm，高度 $H=144$ mm。药型罩口径 $d=90$ mm，药型罩锥角 $2\alpha=60^\circ$ 。药型罩内罩(与炸药相邻一侧)为铝，药型罩外罩为铜，内外罩厚度之比为 1:2。锥角部分药型罩内罩厚度为 1.2 mm，外罩厚度为 0.6 mm。顶部截顶尺寸内罩厚度为 1.27 mm，外罩厚度为 0.63 mm。炸药选用 PBX-9010，壳体材料选取 4330 钢。

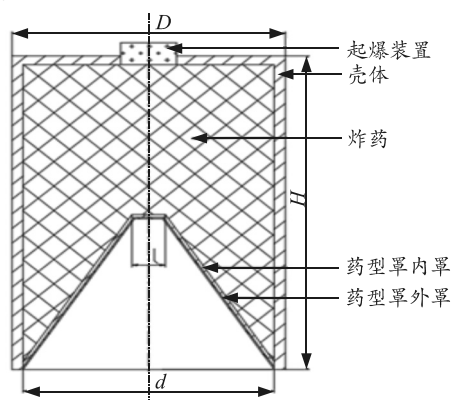


图 1 战斗部结构

聚能装药中的物质流动，尤其是炸药和药型罩，具有大变形的特点，一般用 Euler 算法进行数值模拟。采用 AUTODYN-2D 轴对称来模拟药型罩的变形及射流的形成及断裂的过程。在空气域的边界施加边界条件避免压力的反射。有限元模型如图 2。

Material Location

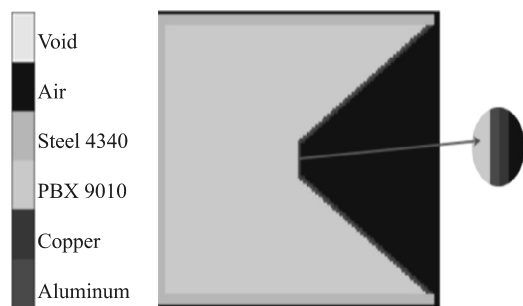


图 2 战斗部有限元模型

材料状态方程与强度模型如表 1 所示，炸药选用 PBX-9010，模型选取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。壳体选取 Liner 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型。铜选取 Liner 状态方程。铝选取 Shock 状态方程和 von Mises 强度模型。材料参数均取自 AUTODYN 数据库。

表 1 材料状态方程与强度模型

材料	状态方程	强度模型
Air	Ideal Gas	None
Copper(铜)	Liner	Johnson Cook
Aluminum(铝)	Shock	von Mises
Steel 4340	Liner	Johnson Cook
PBX-9010	JWL	None

2 形成射流的仿真结果

2.1 平顶尺寸对射流的影响

为研究不同的平顶尺寸对射流的影响，选取平顶的半径从 0~18 mm，每组间隔 6 mm，共 4 组。当平顶尺寸为 0 时，即为尖顶锥形药型罩。炸药的起爆方式均为中心起爆。

炸药中心起爆后，爆轰波在炸药中传播直到传播至药型罩处，爆轰波驱动复合药型罩内外罩闭合形成射流。由于射流头部速度高，杆体部分速度低，射流逐渐拉长。如图 3 所示，当不同平顶尺寸 $60 \mu\text{s}$ 时，射流头部由外罩铜闭合形成，射流杆体的形态为铝包裹铜，复合药型罩形成的射流杆体较小，射流的最尾端为铝。随着平顶尺寸的增加，射流的头部膨大，由于射流的杆体伸长量减小造成射流拉伸长度变短，有效射流长度变化不大。射流的最尾端由药型罩平顶部分闭合形成，平顶尺寸增加时，射流最尾端逐渐变大，形成“剪刀”形状，射流一致性变好。

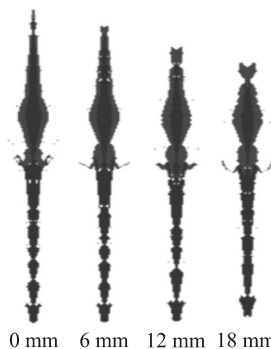


图 3 不同平顶尺寸 $60 \mu\text{s}$ 时射流的形态

如图 4 所示，随着平顶尺寸的增加， $60 \mu\text{s}$ 时射流的头部位置变化较小，射流尾部坐标逐渐增大，射流长度逐渐减小。射流头部速度逐渐减小，尾部速度增加，射流速度梯度逐渐变小。由于采取顶点

起爆的方式，平顶尺寸从小增大时，爆轰波加大了与药型罩顶部的接触面积，爆轰波在压垮药型罩、内外罩闭合过程中，药型罩母线变短为影响射流头部速度的主要因素，导致射流速度降低。

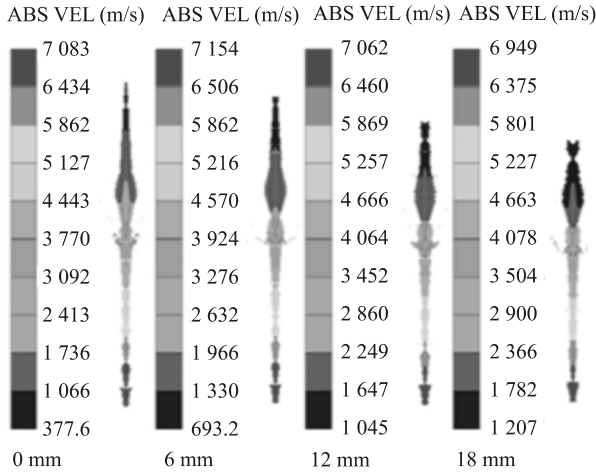


图 4 不同平顶尺寸 60 μs 时射流速度云图

如图 5 所示，射流速度随着药型罩平顶尺寸的变化呈现逐渐变化的趋势：当平顶尺寸较小时，射流头部速度受到平顶尺寸的影响较小；随着平顶尺寸的逐渐增大，射流头部速度迅速减小。平顶尺寸与射流速度基于最小二乘法的拟合表达式为

$$v = 7166.100 + 0.767l - 0.722l^2 \quad (0 \leq l \leq 18)$$

利用拟合表达式可以通过平顶尺寸预测和估计射流的速度。

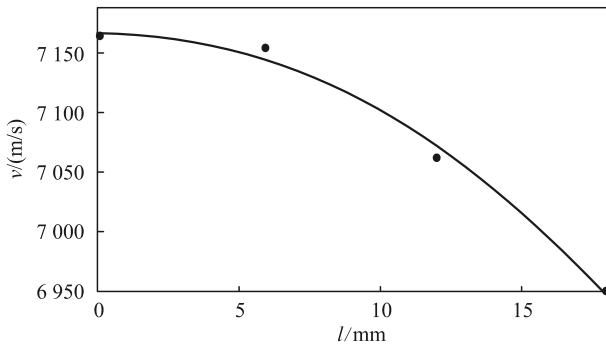


图 5 射流速度与平顶尺寸拟合曲线

2.2 起爆环大小对双层药型罩形成射流的影响

为研究不同起爆环半径对形成射流的影响，选取起爆环半径从 0~45 mm，每组间隔 15 mm，一共 4 组。当起爆环半径为 0 时，即为中心起爆。药型罩平顶尺寸均为 0，即尖顶锥形药型罩。

如图 6、图 7 所示，随着起爆环半径的增加，60 μs 时射流的伸长变长，射流的头部变细，射流伸长更充分。在 60 μs 时射流的头部位置逐渐变大，射流尾部坐标几乎不变，射流长度、射流头部速度

和射流速度梯度逐渐增加。爆轰波在压垮药型罩、内外罩的闭合过程中，起爆环半径越大，爆轰波与药型罩瞬时接触面积越大，射流的头部速度增大。

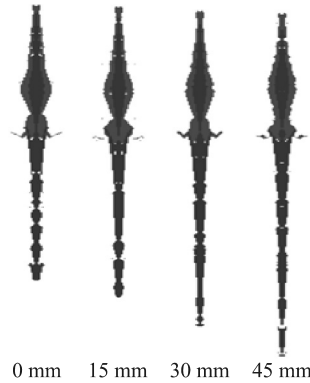


图 6 不同的起爆环半径 60 μs 时射流的形态

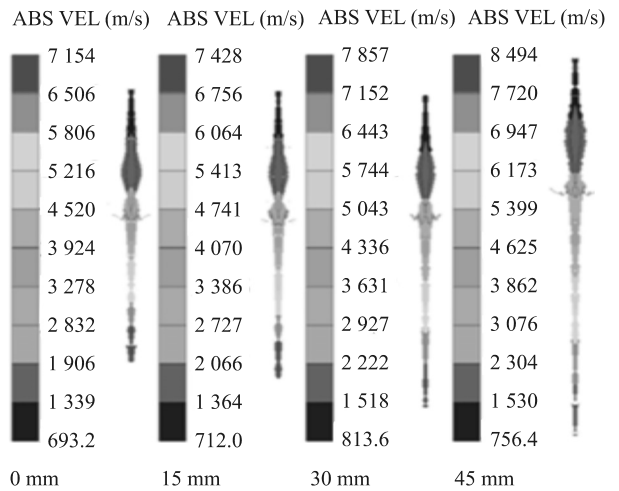


图 7 不同起爆环半径 60 μs 时射流速度云图

图 8 是射流头部速度与聚能装药起爆环直径的关系，射流速度随着起爆环半径增加呈现逐渐增加的趋势，起爆环半径与射流头部速度基于最小二乘法的拟合表达式为

$$v = 7156.650 + 11.510r + 0.403r^2 \quad (0 \leq r \leq 45)$$

利用拟合表达式可以通过起爆环半径预测和估计射流的速度。

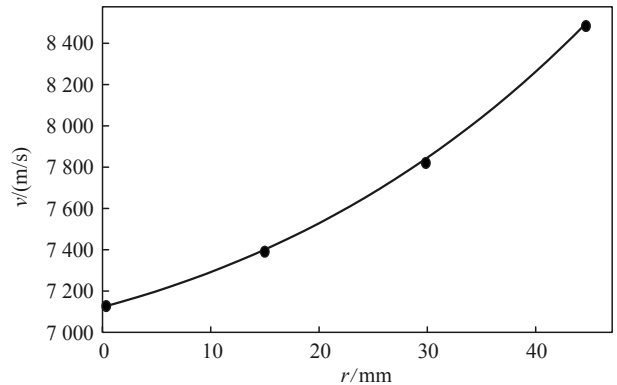


图 8 射流头部速度与起爆环半径拟合曲线

2.3 平顶尺寸与起爆环半径对射流成形的影响

为找出最高射流速度对应的药型罩平顶尺寸和起爆环半径，提高射流的侵彻能力，对药型罩的平顶尺寸和起爆环半径进行多组仿真。平顶的直径从0~18 mm，每组间隔6 mm，起爆环半径从0~45 mm，每组间隔15 mm，一共16组进行仿真，得到60 μs时射流头部速度如表2所示。

表2 射流头部速度 m/s

起爆环半径/ mm	平顶尺寸/mm			
	0	6	12	18
0	7 163	7 154	7 062	6 949
15	7 385	7 428	7 248	7 248
30	7 828	7 857	7 777	7 740
45	8 617	8 494	8 644	8 673

由图9可以看出：射流总体呈现药型罩平顶尺寸越小，起爆环半径越大，射流速度越大的趋势。起爆环半径增大对射流头部速度的影响大于平顶尺寸对射流头部速度的影响。数值模拟中，射流的最高速度出现在平顶直径18 mm、起爆环半径45 mm处，射流最高速度为8 673 m/s，射流头部速度最低时出现在平顶直径18 mm，起爆环半径为0 mm时，射流头部速度为6 948 m/s，最高速度比最低速度增加了24.8%。

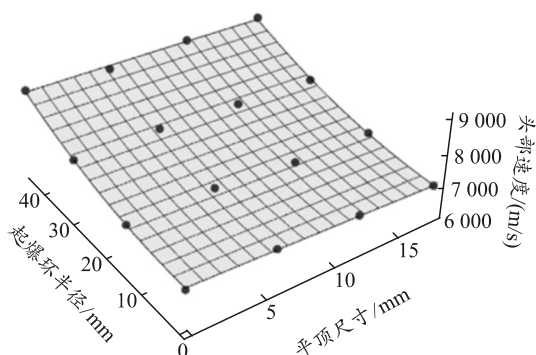


图9 起爆半径、平顶尺寸与头部速度拟合曲面

基于各个节点，拟合起爆环半径、平顶尺寸，射流头部速度的曲面为

$$v = 7110.68 - 12.230l - 0.106l^2 + 2.190r + 0.378lr + 0.624r^2 \quad (0 \leq l \leq 18, 0 \leq r \leq 45)$$

利用拟合方程可以通过平顶尺寸、起爆环半径预测射流的速度。

在拟合平面中，对拟合曲面进行有约束条件下 ($0 \leq l \leq 18, 0 \leq r \leq 45$) 寻优，在 $l=6$ mm, $r=45$ mm 时有最大速度为 8 623.83 m/s，拟合最大速度与仿真最大速度相比误差为 0.57%。在 $l=18$ mm, $r=0$ mm 时有最小速度为 6 956.22 m/s，拟合最低速度与仿真最

低头部速度相比误差为 1.18%，拟合曲面与仿真结果基本一致。

3 外罩挤破内罩状况分析

仅从射流头部最高速度来评价射流侵彻能力，平顶的半径从0~18 mm、起爆环半径从0~45 mm进行仿真，起爆环半径为45 mm、头部半径为18 mm时，射流头部速度最高。平顶尺寸较大时，爆轰波压垮药型罩，内外罩闭合的过程中会出现外罩挤破内罩形成射流的头部，由于外罩的材料为铝，密度较小，侵彻能力比铜差。

如图10、图11所示，在13 μs时内罩铝已经挤破外罩铜，在16 μs时已经成为射流的头部，并且速度较高。从射流的头部速度和射流头部材料综合评价射流侵彻能力的好坏。由仿真结果可知：起爆环半径为45 mm、头部半径为6~12 mm时射流成形最好。



图10 13 μs时内外罩闭合形态

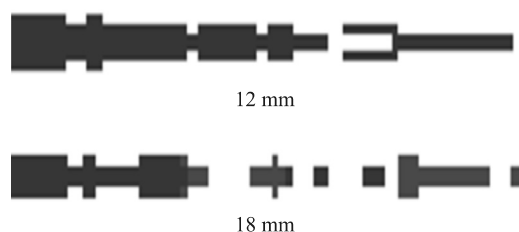


图11 60 μs时射流头部形态

4 结论

通过对复合药型罩不同平顶尺寸和起爆环半径进行数值模拟，得出以下结论：

1) 射流成形过程中，头部速度总体呈现出平顶直径越小，起爆环半径越大，射流速度越高的规律。对于90 mm装药口径，当平顶直径为18 mm、起爆环半径为45 mm时，数值模拟时的射流速度最高为8 673 m/s。

2) 在拟合曲面的寻优及通过射流头部速度和材料的综合评价形成射流情况，为避免出现内罩挤破外罩的情况，平顶直径为6~12 mm、起爆环半径为45 mm时，射流成形情况较好。