

### 辅助药型罩材料对组合罩射流成型特性研究

吉元峰, 吴国东, 王志军, 张小静, 王琪

引用本文:

吉元峰, 吴国东, 王志军, 等. 辅助药型罩材料对组合罩射流成型特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(7): 29-32.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 锥罩材料对组合药型罩射流成型的影响

引用本文: 张小静, 吴国东, 王志军, 等. 锥罩材料对组合药型罩射流成型的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 39-42.

#### 2. 材料对截顶辅助药型罩形成聚能侵彻体的影响

引用本文: 陈莉, 王志军, 尹建平, 等. 材料对截顶辅助药型罩形成聚能侵彻体的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(7): 20-22,27.

#### 3. 一种超聚能装药结构的仿真

引用本文: 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, 37(6): 35-38.

#### 4. 复合药型罩射流侵彻钢靶的影响参数研究

引用本文: 贾子健, 王志军, 尹建平, 等. 复合药型罩射流侵彻钢靶的影响参数研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 57-59,85.

#### 5. 截顶M形顶部结构药型罩形成射流的数值模拟

引用本文: 安文同, 高永宏, 陈熙, 等. 截顶M形顶部结构药型罩形成射流的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 40-43.

# 辅助药型罩材料对组合罩射流成型特性研究

吉元峰, 吴国东, 王志军, 张小静, 王 琪

(中北大学 机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:**设计了一种带有辅助药型罩的新型圆筒-半球组合药型罩结构,为了得到不同辅助药型罩材料对组合药型罩形成的主射流的影响规律,采用非线性动力学仿真软件 Autodyn-2D 对其射流成型及侵彻过程进行数值仿真研究。结果表明:当辅助药型罩采用不同材料时,对主射流的性能影响较大,当圆筒材料为钢时,射流对目标的侵彻深度最深;当圆筒材料为尼龙时,射流侵彻孔径最大;当圆筒材料为紫铜时,主射流的速度和长度性能最优。

**关键词:**圆筒-半球组合药型罩;射流成型;侵彻

**本文引用格式:**吉元峰,吴国东,王志军,等.辅助药型罩材料对组合罩射流成型特性研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(07):29-32.

**Citation format:**JI Yuanfeng, WU Guodong, WANG Zhijun, et al. Effect of Different Additional Liner on Jet Performance of Combined Liner[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(07): 29-32.

中图分类号:TJ410.3

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)07-0029-04

## Effect of Different Additional Liner on Jet Performance of Combined Liner

JI Yuanfeng, WU Guodong, WANG Zhijun, ZHANG Xiaojing, WANG Qi

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

**Abstract:** In order to obtain the influence rule of different auxiliary liner materials on the main jet formation by the compound liner, a new cylinder-hemisphere liner structure with auxiliary liner was designed. The nonlinear dynamics simulation software Autodyn-2D was used to simulate the jet formation and penetration process. The results show that the influence of different materials on the performance of the main jet is great, and the penetration depth of the jet is the deepest when the cylinder material is steel. When the cylinder material is nylon, the hole diameter of penetration is the largest. When the cylinder is made of red copper, the velocity and length of the main jet are optimal.

**Key words:** cylinder-hemisphere combined liner; jet formation; penetration

随着复合装甲、反应装甲、主动防御装甲等新型装甲不断出现,为了提高常规弹药的毁伤能力及应对不同的装甲目标,研究者提出了许多不同的战斗部方案,对药型罩的改进就是其中一个重要的方向。许多新型药型罩结构形式也被不断设计出来,串联药型罩、复合药型罩、星型药型罩、多层药型罩和各种组合药型罩等都已经出现,并且进行进一步的优化研究<sup>[1-4]</sup>。

国内外许多研究者对带有辅助结构的药型罩做了大量

研究,V. F. Minin<sup>[5]</sup>在传统药型罩结构的基础上,通过施加辅助药型罩得到超高速射流,做了初步的仿真研究;徐文龙等<sup>[6]</sup>从理论和实验的角度研究了超聚能射流的成型过程;石军磊等<sup>[7]</sup>研究了超聚能结构中,辅助结构的材料对射流性能的影响;陈莉等<sup>[8-9]</sup>研究了截顶辅助药型罩的材料对射流成型的影响和一种叠加辅助药型罩的射流成型过程,指出钛和钽组合优于其他组合,而且叠加辅助药型罩结构能提高主药型罩材料的利用率,并可有效增加杆体的速度;何洋洋等<sup>[10]</sup>

收稿日期:2019-09-15;修回日期:2019-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(11572291);中北大学第十五届研究生科技立项项目(20181509)

作者简介:吉元峰(1995—),男,硕士研究生,主要从事机电系统设计与分析研究,E-mail: 981696299@qq.com

通讯作者:吴国东(1968—),男,教授,主要从事弹药高效毁伤和弹药飞行控制研究,E-mail:wugudong1188@163.com

对圆锥、球缺组合式战斗部空中成型技术进行数值模拟研究;周方毅等<sup>[11]</sup>对圆锥-球缺药型罩聚能战斗部结构优化设计进行研究,采用了正交优化设计方案。

带有圆筒辅助结构的半球药型罩是一种新的组合药型罩结构,为提高杆式射流的侵彻能力,在半球罩的顶端加上一个圆筒形的辅助结构,使得形成的杆式射流具有更高的头部速度和射流长度。为了进一步优化,本文将研究圆筒辅助药型罩材料不同时对药型罩射流成型的影响。

## 1 数值仿真模型的建立

本文研究的结构几何模型如图 1 所示,装药直径  $d$  为 100 mm,装药长度  $L$  为 150 mm,长径比为 1.5,半球药型罩半径  $R_2$  为 50 mm,圆筒外径  $\Phi$  为 30 mm,圆筒高度  $h$  为 30 mm,圆筒底厚  $\delta_1$  为 8 mm、圆筒侧壁厚  $\delta_2$  为 3 mm,半球罩壁  $\delta_3$  为 3 mm。

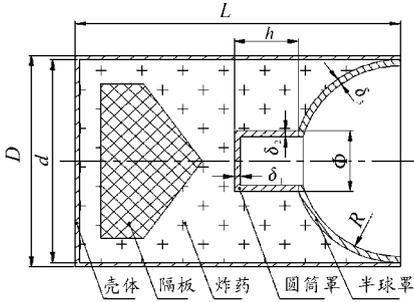


图 1 几何模型示意图

图 2 为在 Autodyn-2D 中创建的有限元模型。因为 Lagrange 算法在计算过程中,网格会随材料产生变形,变形太大会使时间步长严重变小,导致计算时间大大加长,甚至使计算出错,所以 Lagrange 算法适合小变形计算;而 Euler 算法在计算中,网格固定不动,材料在网格中流动,不会因为变形太大而出现畸变。在爆炸过程中,炸药、药型罩和壳体都会产生很大的变形,所以本文中炸药、药型罩和壳体都使用 Euler 算法,而靶板采用 Lagrange 算法。对射流侵彻靶板进行仿真运算时,采用 Autodyn 自带的 Euler-Lagrange 耦合运算。

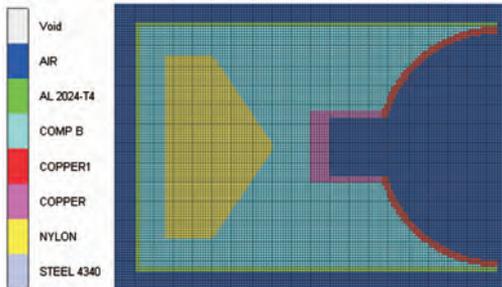


图 2 有限元模型

空气域边界类型定义为 Flow-Out,表示所有物质可以流出,来模拟无限空间,以防止材料在边界反射使得仿真结果

出现较为严重的误差,确保仿真的可靠性。在 AUTODYN 运算环境中,选择不同的单位制组合,系统会自动换算出其他参数对应的单位,本文单位制采用 mm、mg、ms,该单位制的优点是会带来较小的舍入误差,提高计算精度。

## 2 材料模型

仿真模型中所用到的材料均是从 Autodyn 自带材料库中选取<sup>[12]</sup>,壳体用铝合金 AL 2024-T4,隔板材料选取尼龙,药型罩材料用紫铜 COPPER;炸药用爆速和爆压较高的 B 炸药,密度为 1.717 g/cm<sup>3</sup>,爆速为 7980.001 m/s,爆压为 29.5 GPa;圆筒辅助结构的材料分别取尼龙、铝合金、4340 钢、紫铜、钽和钨 6 种,以上材料的状态方程、强度模型和失效模型如表 1 所示。

表 1 材料模型

材料	状态方程	强度模型	失效模型	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
NYLON	Shock	Von Mises	Hydro (Pmin)	1.14
COMP B	JWL	None	None	1.717
AL 2024-T4	Shock	Steinberg Guinan	None	2.785
STEEL 4340	Linear	Johnson Cook	Plastic Strain	7.83
COPPER	Shock	None	None	8.93
TANTALUM	Shock	None	None	16.65
TUNGSTEN	Shock	None	None	19.224

尼龙、钽、钨和铜选用 Shock 状态方程,用来描述密度、压力、能量、粒子速度和冲击速度之间的关系:

$$U_s = c_0 + s_1 u_p + s_2 u_p^2$$

其中: $u_p$  为粒子速度。

B 炸药选用 JWL 状态方程,用来描述高能炸药爆炸及爆轰产物膨胀到 1 kbar 压力时的状态:

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

其中: $\rho$  为密度; $\eta = \rho/\rho_0$  为参考密度, $\rho_0$  为参考密度。其他参数是与动态试验相关的定量值。

4340 钢选用 linear 状态方程,Johnson Cook 强度模型以及 Plastic Strain 失效模型来对其进行描述。

linear 状态方程是用来定义一个线性的,密度变化小,与能量无关的状态方程:

$$P(\rho) = K \mu$$

其中: $\mu$  为压缩比, $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$ , $\rho$  为密度; $K$  为体积模量。

Johnson Cook 强度模型尤其用来描述金属材料在大应变、高应变率和高温的材料变形:

$$Y = [A + B \epsilon_p^n] [1 + C \ln \epsilon_p^*] [1 - T_H^m]$$

其中: $\varepsilon_p$  为有效塑性应变; $\varepsilon_p^*$  为标准有效塑性应变; $T_H = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ ;其他参数为材料常数。

Plastic Strain 失效模型主要用来模拟材料的塑性破坏。

铝合金采用 Steinberg Guinan 强度模型,用来定义材料高应变率下的剪切模量与屈服应力:

剪切模量

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left( \frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G'_t}{G_0} \right) (T - 300) \right\}$$

屈服应力

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left( \frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{Y'_t}{Y_0} \right) (T - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon)^n$$

其中: $\varepsilon$  为有效应变率; $T$  为温度(K); $\eta = v_0/v$  为压缩比; $\beta$  为硬化常数; $n$  为硬化指数; $P$  为压力。

图2中 COPPER1 和 COPPER 均为紫铜,COPPER1 指的是半球形药型罩,COPPER 指的是圆筒形辅助药型罩。

### 3 仿真结果及其分析

#### 3.1 圆筒材料对半球罩射流成型的影响

为研究圆筒形辅助药型罩材料对组合药型罩射流成型的影响,取圆筒形辅助药型罩的材料为尼龙、铝合金、4340钢、紫铜、钽和钨6种情况进行研究,80  $\mu$ s 时射流成型如图3所示。为便于表述,对射流的各个部分进行了标号。将半球罩形成的杆式射流命名为射流2;圆筒罩形成的射流,有一部分由于速度快,到了射流2前面形成射流1,有一部分由于速度慢,留在射流2尾部形成射流3。

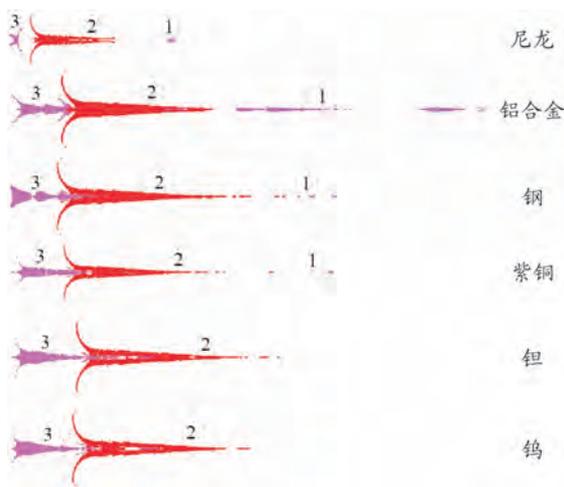


图3 圆筒材料不同时的射流成型

由图3可以看出,尼龙作为圆筒材料时,射流头部有明显的膨胀效应,射流2头部呈中空状,这是由于尼龙圆筒罩压垮速度快,半球罩还未来得及压合,炸药就从连接处泄露出来。铝合金作为圆筒罩材料时,由于铝合金密度低,相同体积的圆筒结构质量相对较小,使得压垮速度快,射流1的射流量最大,射流2完整,几乎没有断裂。钢作为圆筒材料时,射流1较少,且断裂严重,射流2头部也有部分断裂。紫

铜作为圆筒材料时,形成的射流较长,但射流1也较少,且断裂严重,射流2头部也有部分断裂。钽和钨作为圆筒材料时,圆筒罩都形成了射流3,射流2头部有轻微断裂。

根据仿真结果可以得出,圆筒罩材料不同所形成的射流2头部速度有一定差异,图4(a)为随着圆筒罩材料的变化所形成射流2头部速度的变化曲线。由图4(a)可以看出,随着圆筒材料由尼龙、铝合金、钢、紫铜、钽、钨此顺序变化,射流2头部速度先缓慢增大,在圆筒材料为钽时达到最大值,后缓慢减小。

由图4(b)可以看出,随着圆筒材料由尼龙、铝合金、钢、紫铜、钽、钨此顺序变化,射流2长度先以较快的速度增大,在圆筒材料为紫铜时达到最大值,后以较快速度减小。

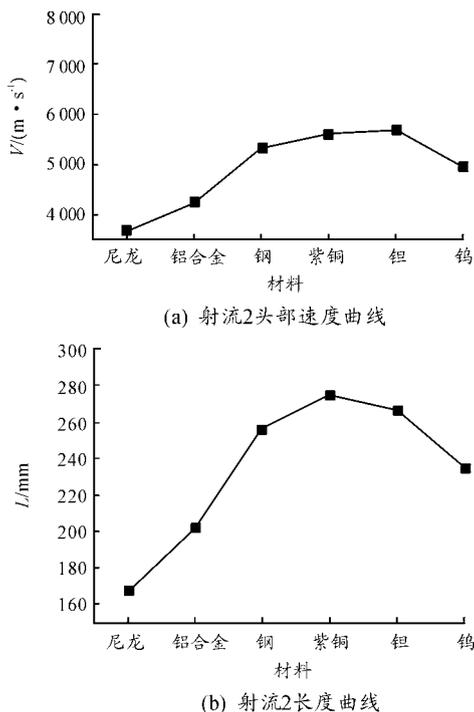


图4 圆筒材料对射流成型的影响

综上所述,当圆筒辅助药型罩的材料为钽时,射流2的头部速度最大,当圆筒辅助药型罩的材料为钢和紫铜时,射流2的头部速度次之;当圆筒辅助药型罩的材料为紫铜时,射流2的长度最大,当圆筒辅助药型罩的材料为钢和钽时,射流2的长度次之。

#### 3.2 圆筒材料对侵彻能力的影响

为了进一步研究射流的侵彻能力,用圆筒材料不同的6种组合以及单独的半球罩分别对400 mm 4340钢靶进行侵彻,侵彻情况如图5,有关数据见表2。

由图5可以看出,当圆筒材料为铝合金、钢和铜时,400 mm厚的4340钢被完全击穿;当圆筒材料为尼龙、钽和钨以及单独的半球罩时,400 mm厚的4340钢没被击穿,其中圆筒材料为尼龙时,侵彻深度最小。

表2列出了半球罩射流和不同圆筒材料时组合药型罩射流的侵彻深度、侵彻孔径以及射流剩余速度。当圆筒材料

是钢时,400 mm 4340 钢被完全击穿,射流的剩余速度最大,圆筒材料为紫铜时,射流剩余速度次之;圆筒材料为尼龙时,射流侵彻深度最小,但是侵彻孔径最大。

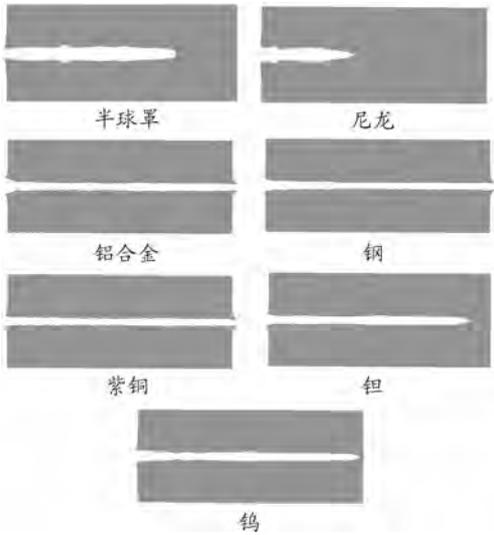


图5 圆筒材料不同时的侵彻情况

表2 圆筒材料不同时的测量数据

材料	孔深/ mm	孔径/ mm	剩余速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )
半球罩	258	25.95	0
尼龙	165	28	0
铝合金	>400	18	1175.7
钢	>400	19.59	1480.3
紫铜	>400	16.9	1324.2
钽	365	18	0
钨	398	22	0

由图5和表2可知,半球罩射流侵彻深度大于圆筒罩为尼龙的组合药型罩射流,小于其他圆筒材料的组合药型罩射流;半球罩射流侵彻孔径小于圆筒罩为尼龙的组合药型罩射流,大于其他圆筒材料的组合药型罩射流。

综上所述,圆筒材料为钢和紫铜时,对靶板的侵彻深度最大,比单纯半球罩至少提高了55.04%;圆筒材料为尼龙时,侵彻孔径最大,比单纯半球罩提高了7.90%。

## 4 结论

1) 结合考虑使射流2头部速度和射流长度尽量达到最大,在所选的6种辅助罩材料中圆筒材料为紫铜效果最优,圆筒材料为钢和钽时,效果次之。

2) 当圆筒材料为钢时,射流对靶板的侵彻深度最大,圆筒材料为紫铜时,效果次之,适用于侵彻大厚度装甲;当圆筒材料为尼龙时,射流侵彻孔径最大,适用于对侵彻深度要求不高,对侵彻孔径要求高的情况。

## 参考文献:

- [1] 尹建平,王志军. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2012.
- [2] 王志军,吴国东. 一种新型星锥状药型罩形成射流的数值模拟[J]. 兵工学报,2007,28(11):1397-1400.
- [3] 范晨阳,王志军,吴国东. 星锥状药型罩形成射流侵彻混凝土的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(3):99-102.
- [4] 张小静,吴国东,王志军,等. 锥罩材料对组合药型罩射流成型的影响[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(3):39-42.
- [5] MININ V F, MININ O V, MININ I V. Physics hypercumulation and combined shaped charges [C]. IEEE International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. Novosibirsk, Russia: IEEE, 2013:71-89.
- [6] 徐文龙,王成,徐斌. 超聚能射流形成过程机理研究[J]. 兵工学报,2018,39(2):261-268.
- [7] 石军磊,刘迎彬,胡晓艳,等. 辅助药型罩材料对超聚能射流性能影响的数值模拟[J]. 火炸药学报,2017,40(1):69-74.
- [8] 陈莉,王志军,尹建平. 材料对截顶辅助药型罩形成聚能侵彻体的影响[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(7):20-27.
- [9] 陈莉,王志军,吴国东,等. 一种叠加辅助药型罩形成射流的仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程,2016,39(3):73-75.
- [10] 何洋洋,龙源,张朋军,等. 圆锥-球缺组合式战斗部空气中成型技术数值模拟研究[J]. 火工品,2008(4):33-37.
- [11] 周方毅,詹发民,吴晓鸿,等. 圆锥-球缺药型罩聚能战斗部结构优化设计[J]. 爆破器材,2014,43(6):43-47.
- [12] ANSYS AUTODYN User Manual: Release 12.1 [M]. ANSYS In, November 2009.

科学编辑 魏继锋 博士(北京理工大学副教授、硕导)  
责任编辑 周江川