

弹丸壳体性能对聚能射流影响的数值模拟^{*}

刘晓蕾¹, 曹红松¹, 张会锁¹, 柴 豫²

(1 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2 66080 部队, 山西忻州 034010)

摘要:利用 LS-DYNA3D 有限元分析软件, 对某弹丸在不同壳体性能情况下形成射流的过程进行数值模拟及对比分析, 以寻求壳体性能对聚能装药射流的影响。通过对计算结果的分析, 总结了壳体厚度及壳体材料对射流头部速度、射流总能量等相关特性的影响, 找出了弹丸的最佳壳体厚度和壳体材料。结论可为弹丸设计及提高战斗部威力提供有益参考。

关键词:壳体; 聚能装药; 射流; 数值模拟

中图分类号: TJ410.333 **文献标志码:** A

Numerical Simulation on the Effect of Shaped Charge Jet with Different Performance of Projectile Shell

LIU Xiaolei¹, CAO Hongsong¹, ZHANG Huisuo¹, CHAI Yu²

(1 School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2 No. 66080 Unit, Shanxi Xinzhou 034010, China)

Abstract: By using the LS-DYNA3D finite element analysis software, the numerical simulation and comparison analysis are made to some projectile on the formation process of shaped charge jet under the different performance of shell situations, in order to seek the effect of shaped charge jet with different of projectile shell. Through analysis the calculation results, summarized the effect of shell thicknesses and material performances to the head-speed and total energy etc correlation character of the jet; and the most superior adapting between the charge amount and the thickness of shell is discovered. This article provides the beneficial reference for the projectile design and improving the might of warhead.

Keywords: shell; shaped charge; jet; numerical simulation

0 引言

带壳聚能装药是一种传统结构, 因其在炮弹、火箭弹及导弹中的广泛应用而倍受关注。前人针对药型罩的结构、起爆方式对聚能射流性能的影响, 做了大量的研究工作^[1-2]。壳体作为聚能装药结构的重要组成部分, 其性能对聚能射流的影响不容忽视。高尔新等人曾先后以理论分析和实验研究为依托, 研究了带壳聚能装药的相关特性^[3]。然而, 实验和理论研究并不能直观地描述各项参数在射流形成过程中的变化情况。因此, 通过建立合理的数学模型, 对壳体在射流过程中的作用进行模拟分析就显得尤为重要。

文中以结构简单的某型破甲弹为例, 针对不

同的壳体厚度和壳体材料进行实体建模和数值仿真分析, 从而确定壳体性能对聚能射流性能的影响规律。

1 数值仿真模型的建立

文中针对 85mm 口径的弹丸, 建立 1/4 的有限元仿真模型。模型由炸药、药型罩、空气和壳体四部分组成。在保证体积及外径不变的情况下, 壳体的厚度分别为 1mm、2mm、3mm、4mm。壳体材料分别选用铝、45# 钢和钨合金。药型罩为开口外径为 38.5mm, 锥角为 61.6°, 3mm 等壁厚的圆锥形药型罩。仿真过程中, 炸药、药型罩、空气、壳体均采用单点多物质 ALE 单元描述, 所有单元均为规则六面体单元, 单元之间光

^{*} 收稿日期: 2008-04-18

作者简介: 刘晓蕾(1982-), 女, 内蒙通辽人, 硕士研究生, 研究方向: 弹药工程。

滑过渡排列整齐规则,以便于物质在网格内运输,减少单元畸变。炸药、药型罩、壳体的 1/4 有限元模型见图 1。

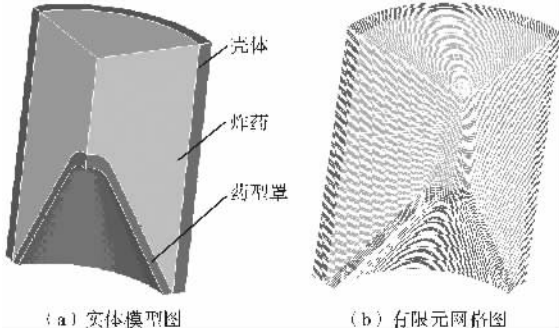


图 1 1/4 有限元模型图

2 计算参数的选取

2.1 材料本构模型及参数

2.1.1 炸药材料模型与状态方程

LS-DYNA 中有专门描述高能炸药的材料模型 (MAT_HIGH-EXPLOSIVE-BURN) 和 JWL 状态方程。该方程能精确地描述炸药在爆炸过程中产生的爆轰气体的压力、体积、能量特性,其形式为^[4]:

$$p_e = A_e(1 - \frac{\omega_e}{R_{1e}V})\exp(-R_{1e}V) + B_e(1 - \frac{\omega_e}{R_{2e}V})\exp(-R_{2e}V) + \frac{\omega_e E_e}{V} \quad (1)$$

式中: $V = V_e/V_0$ 是相对体积, V_e 是未反应炸药的比容, V_0 是炸药初始比容; P_e 、 E_e 分别是未反应炸药的体积、能量密度; A_e 、 B_e 、 R_{1e} 、 R_{2e} 、 ω_e 为常数。数值模拟中所用炸药的参数如表 1 所示。

表 1 炸药材料模型参数

| 炸药爆轰参数 | 密度 $\rho_0/$ (g/cm ³) | | 爆速 $D/$ (cm/ μ s) | | C-J 压力 $P_j/$ GPa | |
|--------|--------------------------------------|----------|--------------------------|-------|----------------------|------------|
| | | 1.63 | | 0.693 | | 27.0 |
| 状态方程系数 | $A/$ GPa | $B/$ GPa | R_1 | R_2 | OMEGA | $E_0/$ GPa |
| | 371.2 | 7.43 | 4.15 | 0.95 | 0.3 | 7.0 |

2.1.2 药型罩材料模型与状态方程

采用 (MAT_ELASTIC_PLASTIC-HYDRO) 本构模型和 (EOS_GRUNEISEN) 状态方程, 描述药型罩应力和应变之间的关系。Gruneisen 状态方程将压缩材料的压力为^[4]:

$$P =$$

$$\frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (2)$$

其中: C 是 $u_s - u_p$ 曲线的截距; S_1 、 S_2 、 S_3 是 $u_s - u_p$ 曲线斜率的系数; γ_0 是 Gruneisen 的系数; a 是对 γ_0 的一阶体积修正; μ 为压缩程度; ρ_0 为初始密度。药型罩的材料为紫铜, 其密度为 8.93g/cm³, 剪切模量 47.7GPa, 屈服应力 120MPa。所用状态方程参数较常见这里不再给出。

2.1.3 壳体材料模型与状态方程

文中选用 3 种不同的壳体材料作为研究对象, 3 种材料均采用 (MAT_Johnson-Cook) 本构模型和 (EOS_GRUNEISEN) 状态方程, 其压力形式同式 (2)。数值模拟所用壳体材料参数如表 2 所示。

表 2 壳体材料模型参数

| | 密度 $\rho_0/$ (g/cm ³) | | | 剪切模量 $G/$ GPa | | | |
|--------|-----------------------------------|-------|-------|---------------|--------|-----|-------|
| 铝 | 2.77 | | | 35.00 | | | |
| 45# 钢 | 7.83 | | | 80.15 | | | |
| 钨合金 | 17.7 | | | 137.0 | | | |
| 状态方程系数 | $C/$ (km/s) | S_1 | S_2 | S_3 | GAMMAO | A | E_0 |
| | 0.01 | 1.339 | 0 | 0 | 2.17 | 0 | 0 |

2.1.4 空气材料模型与状态方程

空气采用 (EOS_LINEAR_POLYNOMIAL) 线性多项式状态方程和 (MAT_NULL) 模型描述, 该方程定义膨胀材料的压力为^[4]:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

其中: $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$, $\frac{\rho}{\rho_0}$ 是当前流体密度与初始流体密度的比值。 $C_4 = C_5 = \gamma - 1$, γ 为比热容; E 为内能。数值模拟所用空气材料的相关参数如表 3 所示。

表 3 空气材料模型参数

| 空气密度 $\rho_0/$ (g/cm ³) | 0.125E-3 | | | | | | | |
|--|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 状态方程系数 | C_0 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | E_0 |
| | -1E-6 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0 | 2.5E-6 |

2.2 初始及边界条件

模型采用点起爆方式, 通过关键字 “INITIAL_DETONATION” 进行参数控制。由

于文中采用 1/4 模型,故需在模型的对称面上施加对称面约束。因模型中空气为有限区域,故需在空气边界上添加透射边界。

3 数值仿真结果和分析

3.1 数值仿真结果

针对文中所选模型,其数值计算结果如下:在有壳体的情况下,射流头部速度的最大值为 4399.9m/s、最小值为 3775.87m/s;射流总能量的最大值为 75.28kJ、最小值为 44.47kJ;射流拉伸距离最长为 131.6mm、最短为 110.3mm。数值模拟所得相关结果见表 4。

表 4 不同壳体性能和装药量情况下射流性能对比表

| 聚能射流性能 | 壳体材料 | 壳体厚度/mm | | | |
|--------------|------|---------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 炸药质量/g | | 181.5 | 171.2 | 161.1 | 151.2 |
| 壳体质量/g | 铝 | 18 | 35.61 | 52.8 | 69.6 |
| | 45#钢 | 50.9 | 100.66 | 148.9 | 196.24 |
| | 钨合金 | 115.1 | 227.54 | 337.4 | 444.74 |
| 射流头部速度/(m/s) | 铝 | 3775.9 | 3790.0 | 3806.8 | 3817.2 |
| | 45#钢 | 3879.2 | 3989.6 | 4084.3 | 4159.8 |
| | 钨合金 | 4032.0 | 4169.8 | 4296.8 | 4399.9 |
| 射流总能量/kJ | 铝 | 44.47 | 47.59 | 49.35 | 51.86 |
| | 45#钢 | 51.55 | 63.69 | 62.54 | 60.73 |
| | 钨合金 | 65.92 | 75.28 | 74.73 | 73.72 |

在无壳体情况下,聚能射流的头部速度为 3680m/s;射流总能量为 60.64kJ;拉伸距离为 109.5mm。 $t=0.034ms$,无外壳时形成聚能射流的头部速度和总能量曲线(见图 2、图 3)。

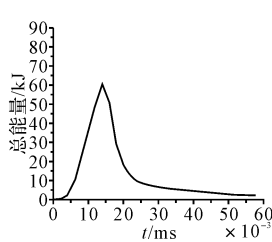
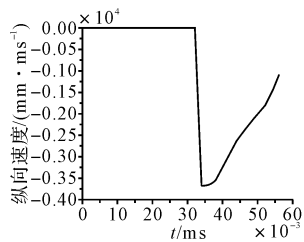


图 2 无壳体时射流头部速度曲线图

图 3 无壳体时射流总能量曲线图

3.2 结果分析

3.2.1 壳体材料对聚能射流形成的影响

壳体的材料直接影响着聚能射流的形成和破甲威力,相同结构的壳体由于材料性能不同将导致所形成的射流性能也各不相同。 $t =$

0.055ms 时,不同壳体材料所形成的射流形状如图 4 所示。(由于计算量较大限于篇幅,仅列举了无壳体和壳体厚度为 3mm 时三种材料的射流图像,其余情况下的射流图像不再列举)。

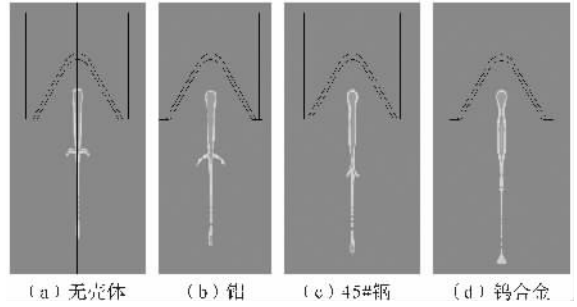


图 4 不同壳体材料形成射流过程的仿真图像

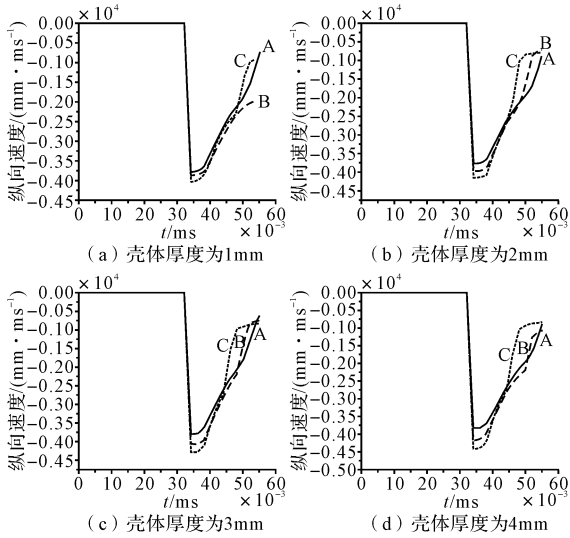
从图 4 及表 4 可以看出,在壳体厚度相同的情况下,壳体材料密度、剪切模量越大,射流的拉伸距离越长、头部直径越大、总能量越大,所形成的聚能射流头部速度也越高。这主要是由于密度大的壳体材料对炸药的约束能力比密度小的材料强,从而延长了炸药对药型罩的作用时间,使得更多的爆轰能量能转化为药型罩的动能。但是,过大的壳体密度将增大弹丸的整体质量,进而影响弹丸的弹道特性。且在相同情况下,密度越大的壳体所形成的射流越易发生断裂。因此为能有效地提高弹丸的毁伤能力,必须结合具体情况合理的选择弹丸壳体材料。

由仿真结果可知,虽然以铝为壳体时所形成的射流头部速度较低,但弹丸的整体质量较低,所形成的射流也要比以其它两种材料为壳体时所形成的射流稳定。对比各种因素,实际中破甲战斗部外壳多采用铝和塑料材料,炮射的弹药只有在满足强度要求的条件下才采用钢质壳体。

3.2.2 壳体厚度对聚能射流形成的影响

壳体厚度相同材料不同时,在 $t=0.034ms$ 时刻,弹丸所形成的射流头部速度曲线如图 5 所示。由该图可知,壳体厚度直接影响着聚能射流的成形和头部速度。比较图 5 中的 4 组曲线可发现,在壳体材料相同的情况下,壳体的厚度越大,射流头部速度越高。但如果壳体厚度过大,会引起质心后移,这将不利于稳定飞行;且由仿真结果可知,壳体厚度过大,将使罩口部微元与罩顶部微元的轴向速度差变小,使射流易发生断裂。然而如果壳体厚度过小,又将导致射流头部

速度变小,射流拉伸距离变小。因此,对于某一特定的装药结构都应存在一个壳体临界厚度,使弹丸具有最大的毁伤威力。因此,必须综合其它特性来寻求壳体的最佳壁厚。



注:曲线中 A 为铝;B 为 45# 钢;C 为钨合金。

图 5 不同壳体材料形成的射流头部的速度曲线

文献[5]认为,聚能装药所以具有很大的破甲威力,其根本原因在于能量的高度集中。因此,金属射流的总能量也是评价聚能装药毁伤威力的一个重要因素。在保证射流头部速度较大的同时,应保证所形成的射流具有较大的能量。文中所模拟的射流总能量曲线图如图 6 所示。

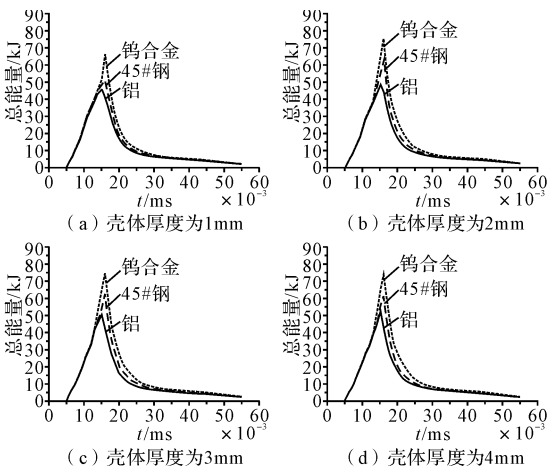


图 6 壳体厚度相同、材料不同时射流总能量曲线图

由该图可知,射流总能量与头部速度的变化趋势并不相同,射流的总能量并不随壳体厚度的增加而增大。由图 3 可知,在弹丸无壳体时,由于装药量较大,射流所具有的总能量仍可以达到

60.64kJ;当壳体材料为铝时,随壳体厚度的增大射流总能量逐渐增大,其最大值为 51.86kJ;当壳体材料为 45# 钢和钨合金时,在厚度为 2mm 时,射流总能量分别取得最大值,其最大值分别为 63.69kJ 和 75.28kJ。

针对文中所选模型,综合各种影响因素认为:当壳体材料为钨合金时,弹丸虽具有较高的射流头部速度和总能量,但其所形成的射流质量和稳定性较差,弹丸质量较大其实际应用价值并不高,相比而言 45# 钢和铝更适合作为壳体材料;当壳体材料为铝时,壳体的临界壁厚应在 4mm 左右;当壳体材料为 45# 钢时,壳体的临界壁厚在 1~2mm 之间。

4 结论

文中采用数值仿真的方法对弹丸壳体性能对聚能射流的影响进行了仿真分析,得到以下结论:

- 1)带壳的射流速度大于不带壳的射流速度,壳体厚度越大其头部速度越高,射流越易发生断裂。在相同厚度情况下,壳体密度越大,射流头部速度增加幅度也越大。
- 2)壳体材料的密度和厚度影响着聚能射流的总能量,在壳体厚度相同时,材料密度越大,射流的总能量越大;而当壳体材料相同厚度不同时,射流的总能量并不随壳体厚度的增加而增大。
- 3)对于某一特定结构的弹丸,应存在一个最佳的壳体厚度,使形成的射流具有最大的毁伤威力。由仿真结果可知,该厚度临界值与壳体的密度有关,壳体材料不同其临界值也各不相同。

参考文献:

[1] 张会锁,赵捍东,王芳,等.药型罩壁厚对聚能射流影响的数值模拟[J].测井技术,2006,30(1):47-49.
 [2] 易建坤,姜新权,彭浩,等.起爆方式对线性聚能装药射流形成的影响[J].火炸药学报,2006,29(3):57-61.
 [3] 高尔新,李建平,李景云.带壳聚能装药的实验研究[J].实验力学,1996,11(2):205-210.
 [4] 赵海鸥.LS-DYNA 动力学分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003.
 [5] 付代轩.深穿透油气井射孔弹优化设计[J].测井技术,1998,22(5):362-365.