

# 炸高对炮射导弹破甲威力影响数值仿真

林世聪<sup>1</sup>, 杨军<sup>1</sup>, 李帆<sup>2</sup>

(1. 装甲兵工程学院 兵器工程系, 北京 100072; 2. 总装备部北京军事代表局, 北京 100042)

**摘要:**炮射导弹主要采用破甲战斗部高速金属射流侵彻毁伤目标; 当材料、结构、尺寸等参数确定后, 影响战斗部破甲威力的主要因素为炸高; 以某型炮射导弹为研究对象, 利用 Ansys-Autodyn 2D 有限元仿真软件构建炮射导弹战斗部模型, 设定五组炸高对战斗部侵彻靶板过程分别进行仿真, 得到炮射导弹的有利炸高为其战斗部直径的1.90 ~ 2.53倍。

**关键词:**炮射导弹; 破甲威力; 炸高

**本文引用格式:**林世聪, 杨军, 李帆. 炸高对炮射导弹破甲威力影响数值仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2016(4): 12-14.

**Citation format:** LIN Shi-cong, YANG Jun, LI Fan. Numerical Simulation on Effect of Gun-Launched Missile's Power on Burst Height[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(4): 12-14.

中图分类号: TJ760.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2016)04-0012-04

## Numerical Simulation on Effect of Gun-Launched Missile's Power on Burst Height

LIN Shi-cong<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, LI Fan<sup>2</sup>

(1. Department of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. Beijing Military Representative Office of General Armament Department, Beijing 100042, China)

**Abstract:** The gun-launched missile mainly uses armor-penetrating warhead and penetrates damage target by high-speed metal jet. When the material, structure, size and other parameters are determined, the main factors influencing the power of armor-penetrating warhead is burst height. Taking a certain type of gun-launched missile as the research object, using Ansys-Autodyn 2D to build the missile warhead model and setting up the process of five groups of burst heights to do the numerical simulation on the process of warhead penetrating the target, we got that the stand-off burst height of gun-launched missile is 1.90 ~ 2.53 times of the diameter of the warhead.

**Key words:** gun-launched missile; power of armor-penetrating warhead; burst height

目前分析破甲战斗部威力影响因素的文章较多, 刘建荣等在文献[1]中分析了药型罩对破甲威力的影响; 李金铭等在文献[2]中分析了靶版结构对破甲威力的影响; 炸高对破甲威力的影响分析仅停留在定性分析和最简化模型分析阶段, 朱绪强、陈威等在文献[3-4]中定性总结炸高对破甲威力的影响, 认为: 一方面炸高的增加有利于射流充分伸展, 使破甲深度增加; 另一方面随着炸高增加, 射流产生径向分散和摆动, 射流不稳定性增加, 延伸到一定程度后出现断裂, 反

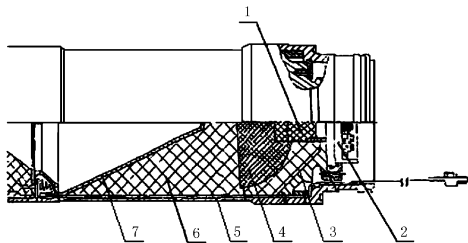
而使破甲深度降低。

炮射导弹破甲战斗部与常规非炮射破甲战斗部结构有区别, 影响其破甲威力的因素分析尚不充分。为了研究炸高对炮射导弹破甲威力的影响, 本文结合某型炮射导弹战斗部参数, 构建战斗部模型, 设置 150 mm、180 mm、210 mm、240 mm、270 mm 五组炸高, 利用 Ansys-Autodyn 2D 有限元仿真软件对侵彻过程进行仿真并监测射流速度、能量等参数变化, 结合侵彻效果, 定量分析其有利炸高, 为炮射导弹战斗部

设计及导弹结构设计提供一定理论支持。

## 1 战斗部模型构建

战斗部由外壳、药形罩、主装药、隔板、传爆药柱、底座、战斗部引信等组成,结构如图1所示。



1. 传爆药柱;2. 战斗部引信;3. 底座;4. 隔板;  
5. 外壳;6. 主装药;7. 药形罩

图1 战斗部结构

构建模型时对其结构简化,重点分析主装药、药形罩、隔板、外壳4个部分,结合具体结构尺寸,利用 Ansys-Autodyn 2D 构建战斗部 2D 模型如图2所示。



图2 战斗部 2D 模型

## 2 材料模型与参数确定

材料模型与参数的确定涉及到空气、主装药、药型罩、隔板、外壳和靶板6个部分。其中采用 Euler(欧拉)处理器对空气、主装药和药型罩建模并将其 Euler 单元定义为流体;采用 Lagrange(拉格朗日)处理器对隔板、外壳和靶板建模,并将靶板的 Lagrange 单元定义为固体。为了避免边界反射干扰试验,将边界条件设置为“Flow-out(完全流出)”,在此边界条件下所有物质均可正常流出边界,应力波也会无反射传播。

### 2.1 空气

空气选用理想气体模型,采用 Ideal-Gas(理想气体)状态方程(1)描述:

$$P = (\gamma - 1)\rho E + P_{\text{shift}} \quad (1)$$

式(1)中, $P$ 为空气压强; $\gamma$ 为气体常数; $\rho$ 为空气密度; $E$ 为内能; $P_{\text{shift}}$ 为初始压力。主要参数如表1所示。

表1 空气材料参数

$\gamma$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E/\text{kJ}$	$P_{\text{shift}}/\text{MPa}$
1.4	$1.225 \times 10^{-3}$	0.253	0

### 2.2 主装药

主装药材料模型选用 High Explosives Burn(高能炸药爆轰)模型,为精确的描述爆轰产物的膨胀驱动过程,采用 JWL(Jones-Wilkens-Lee)状态方程<sup>[6]</sup>对炸药材料进行描述:

$$p = A\left(1 - \frac{\bar{\omega}}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\bar{\omega}}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\bar{\omega}E}{V} \quad (2)$$

式(2)中, $P$ 为爆轰产物压力; $V$ 为爆轰产物相对体积,无量纲; $E$ 为初始比内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\bar{\omega}$ 为待拟合参数。 $\rho$ 为炸药初始密度、 $D$ 为爆速、 $P_{\text{Cl}}$ 为爆压。炸药选取及主要参数如表2所示。

表2 主装药材料及状态方程计算参数

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$P_{\text{Cl}}/\text{GPa}$
PBX-9404	1.85	7 980	29.5

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\bar{\omega}$	$E/(\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$
524.2	7.68	4.2	1.1	0.34	8.5

### 2.3 药型罩

药型罩为单锥变壁厚药型罩,采用 Johnson-Cook 材料本构模型和 Mie-Gruneisen 状态方程中关于压缩材料的压力计算公式描述。

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (3)$$

式(3)中, $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ 的无量纲塑性比, $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}$ ;

$A$ 为屈服应力; $B$ 为应变硬化系数; $n$ 为应变硬化指数; $C$ 为应变率相关系数; $m$ 为温度相关系数。药型罩材料选取及主要参数如表3所示。

表3 药型罩材料参数

材料	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$
紫铜	90	292	0.31	0.025	1.09

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} \quad (4)$$

式(4)中, $P$ 为压力; $C$ 为药型罩中声速; $\rho_0$ 为药型罩材料密度; $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 是  $us - up$  曲线斜率的系数; $\gamma_0$ 是 Gruneisen 常数; $a$ 是  $\gamma_0$ 的一阶体积修正; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。主要参数如表4所示。

表4 药型罩状态方程计算参数

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$C/(m \cdot s^{-1})$	$S_1$	$S_2$
8.90	4 700	90	292
$S_3$	$\gamma_0$	$a$	
0.31	2.02	0.47	

## 2.4 其他结构

隔板材料选用  $Al-84$ , 外壳材料选用 45 钢, 靶板材料选用 4340 钢, 均采用 Johnson-Cook 材料本构模型和 Mie-Gruneisen 状态方程描述。

## 3 仿真过程与结果

在主装药底部中心处设置起爆点,  $t=0$  时刻引爆战斗部形成射流。射流形成过程如图 3 所示。取药型罩底端截面为 0 截面, 图中由上至下射流长度依次为 0 mm、150 mm、180 mm、210 mm、240 mm、270 mm, 对应本文设置的 5 组炸高方案。

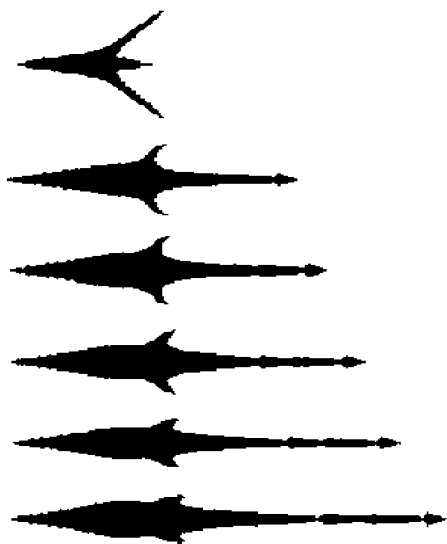


图3 射流形成过程

分别记 5 组炸高为方案 A、B、C、D、E, 进行数值仿真计算。其中方案 B 的射流侵彻过程如图 4 所示。

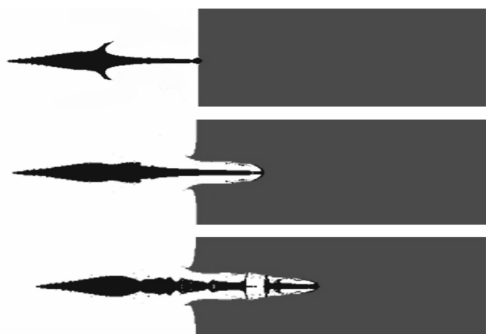


图4 射流侵彻过程

整理各方案中射流着靶时的时刻、射流速度、射流内能及最终侵彻深度如表 5 所示。

表5 不同方案射流数据及侵彻深度

方案	时刻/ $\mu s$	射流速度/ $(m \cdot s^{-1})$	射流内能/kJ	侵彻深度/mm
A	26.41	7 756.51	$5.27 \times 10^6$	484.8
B	30.26	7 804.26	$5.54 \times 10^6$	546.2
C	34.08	7 835.83	$5.88 \times 10^6$	583.4
D	37.97	7 789.49	$5.56 \times 10^6$	516.9
E	41.85	7 731.63	$5.13 \times 10^6$	439.8

从表 5 中试验数据可以看出从方案 A 至方案 E, 各项数据均先增加而后减小, 其中方案 C 中射流各项数据均大于余下四组方案, 可得出此炮射导弹战斗部炸高在 210 mm 附近时, 破甲威力达到最大。

但有利炸高为一个区间, 需结合数据具体变化规律进行探究。由此对表 5 中数据进行处理, 得到表 6 (表中“0”为初始, “+”代表增加, “-”代表减少)。

表6 方案数据对比

方案比较	着靶时间间隔/ $\mu s$	射流速度变化/ $(m \cdot s^{-1})$	射流内能变化/kJ	侵彻深度变化/mm
A-0	26.41	7 756.51	$5.27 \times 10^6$	484.8
B-A	3.85	47.74	$2.7 \times 10^5$	61.4
C-B	3.82	31.57	$3.4 \times 10^5$	37.2
D-C	3.85	-46.34	$-3.2 \times 10^5$	-66.5
E-D	3.88	-57.86	$-4.1 \times 10^5$	-77.1

结合表 6 中处理后的数据与 Autodyn 软件中的仿真过程可以得到, 炸高对炮射导弹破甲威力的影响大致满足钟形曲线, 在方案 C 中炸高 210 mm 附近达到钟顶, 即破甲威力最大; 在方案 B 中炸高 180 mm 和方案 C 中炸高 240 mm 之间, 破甲威力相对钟顶数值减小, 但减小幅度较小; 在未达到方案 B 中炸高和超过方案 D 中炸高时, 破甲威力迅速减弱。

## 4 结论

1) 结合表 5、表 6 中数据分析与 Autodyn 软件中的仿真过程可以得出, 初期随着炸高的提高, 射流接触靶板时的速度增加, 射流内能增加, 侵彻深度加深。当炸高提高到某一范围时, 侵彻深度最大, 即破甲威力最大。之后随着炸高的提高, 射流速度降低, 射流内能降低, 侵彻深度快速下降。与文献[3-4]中结论相符。

2) 此型号炮射导弹的有利炸高在 180 ~ 240 mm 之间, 使战斗部破甲威力达到最大的炸高在 210 mm 附近, 略小于 210 mm。其有利炸高为战斗部直径的 1.90 ~ 2.53 倍。

力矩  $M_p, M_f$  随发射仰角  $\phi$  的变化关系曲线如图 5 中上图所示,从图中可以看出  $M_f$  远小于  $M_p$ 。图 5 中下图为  $M_f$  随  $\phi$  的变化曲线。经计算由  $M_f$  引起的最大相对误差为

$$e_r(M) = \min\left(\frac{M_f}{M_f + M_p}\right) \approx 0.35\%$$

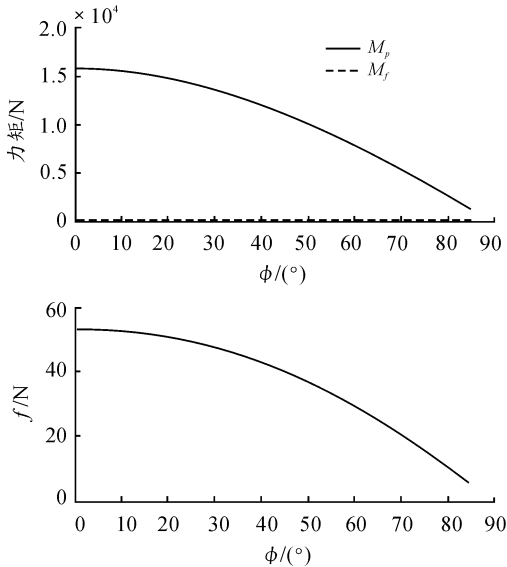


图 5 力矩随仰角的变化图像

## 4 结论

经过误差分析,滑轨与滚轮间滚动摩擦力对平衡机的影响极小,可以忽略不计,方案可行。所以该方案在理论上可以实现火炮在任意仰角射击时近似达到完全平衡。高低机

工作时只需克服起落部分对耳轴的惯性力矩,这样可以有效地减小齿轮的工作载荷。与传统的平衡机相比这种平衡机具有效率更高、效果更好、更有效地降低手轮力、延长火炮高低机寿命等优点。不过这种方案对加工工艺及加工精度要求较高。此外,模型在忽略火炮材料弹性形变的假设前提下建立的,有一定的误差。要尽量减少误差就需要在加工工艺上尽可能提高加工精度。随着工业技术的提高,新型平衡机可以达到理想的效果。

## 参考文献:

- [1] 张相炎,郑建国,杨军荣. 火炮设计理论[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005:272-280.
- [2] 何行,赵俊利. 火炮高低平衡机的设计[J]. 科技情报开发与经济,2006(24):199-200.
- [3] 王亮宽,高鑫,薛庆阳,等. 基于复合形法的某高炮平衡机优化设计[J]. 火炮发射与控制学报,2015(1):29-32.
- [4] 韩勇,王皓,程永强,等. 一种防空武器发射装置平衡机优化设计混合算法[J]. 火炮发射与控制学报,2013(4):39-43.
- [5] 王月梅,曹咏弘. 理论力学[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2010:74-86.
- [6] 刘鸿文. 材料力学 I[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2010:146-153.
- [7] 刘延柱. 高等动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2012:214-217.

(责任编辑 周江川)

(上接第 14 页)

3) 结论 2) 中战斗部有利炸高范围适用于相同或相似结构的炮射导弹破甲战斗部。

## 参考文献:

- [1] 刘建荣,张国伟,徐立新,等. 药型罩加工精度对破甲战斗部威力影响的研究[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(3):114-117.
- [2] 李金铭,张国伟,马建. 间隔靶板对破甲战斗部威力影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2013,33(5):112-114,184.
- [3] 朱绪强,成一,李德才,等. 大炸高下破甲弹的侵彻性能研究[J]. 爆破器材,2013,42(1):98-99,107.

- [4] 陈威,李吉峰,朱磊. 药型罩锥角对有利炸高影响的数值分析[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(6):44-63.
- [5] 李斌,孙建兵,许洁. 聚能射流侵彻钢板相似律数值模拟研究[J]. 机械管理开发,2013(2):9-11.
- [6] 章冠人. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
- [7] 崔军,徐峰,李向荣. 聚能射流对靶板侵彻的数值仿真[J]. 兵工自动化,2010,29(1):24-26.
- [8] 吴有龙,李伟兵,王晓鸣,等. 壳体厚度对聚能杆式侵彻体成型的影响[J]. 火工品,2010(2):29-31.
- [9] 张元军,李四川,彭小明. 破甲战斗部的炸高设计和制造工艺[J]. 四川兵工学报,2009,30(12):124-125.

(责任编辑 周江川)