

预制破片初速和飞散角的数值模拟^{*}

杨云川, 厉相宝, 万仁毅

(沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 为了获得预制破片战斗部破片的飞散规律, 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对某底凹预制破片弹壳体的膨胀和预制破片的飞散过程进行了数值模拟, 得到了预制破片初速和飞散方向角沿弹轴分布曲线, 其结果与经验公式计算结果具有较好的一致性。

关键词: 预制破片; 破片初速; LS-DYNA; 数值模拟

中图分类号: TJ410.33 文献标志码: A

Numerical Simulation of the Initial Velocity and Scattering Angle of Performed Fragments

YANG Yunchuan, LI Xiangbao, WAN Renyi

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to grasp dispersion law of performed warhead fragments, the numerical simulation of expansion of shell with hollow base and dispersion process of performed fragments was conducted based on ANSYS/LS-DYNA finite element program, and initial velocity and distribution curve of fragments were analyzed in coordinate. The numerical simulation result is consistent with that obtained by empirical formula.

Keywords: performed fragments; initial velocity of fragment; LS-DYNA; numerical simulation

0 引言

破片初速、破片飞散方向角是衡量战斗部性能的重要参数。目前国内研究战斗部毁伤作用机理和影响因素主要有解析方法、试验方法和仿真方法^[1-2]。随着计算机的飞速发展, 著名的通用显示动力分析程序 LS-DYNA 被引入中国, 在相关的工程领域中迅速得到广泛应用。国内外学者对预制破片的数值模拟进行了相关研究, 取得了一些实验和仿真计算结果^[3-5], 但起爆点对预制破片的影响没做具体分析, 文中分别模拟了弹头部起爆、中心起爆和弹尾部起爆三种起爆方式预制破片的飞散情况, 并得到了预制破片的飞散规律。

1 计算模型

1.1 实体结构与有限元计算模型

图1为该预制破片战斗部结构, 它由 50SiMnVB

钢壳、钝黑铝炸药、钨块预制破片和 30CrMnSi 钢套筒组成。

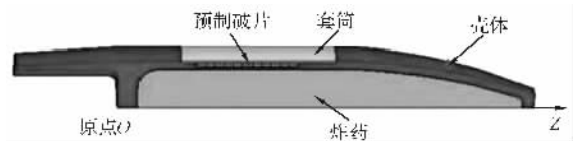


图1 预制破片战斗部结构图

战斗部的实体结构往往比较复杂, 在进行有限元数值模拟时进行了简化。由于弹丸是轴对称结构, 为了节省计算时间采用了弹丸的 1/4 模型。建模时单位采用 $\text{cm} - \text{g} - \mu\text{s}$, 拉格朗日算法。

1.2 单元类型与材料模型

该战斗部主要有四部分: 壳体、炸药、预制破片和套筒, 壳体、套筒和预制破片均采用 SHELL163 薄壳单元类型, 材料模型选择 Johnson-Cook 塑性模型和 Gruneisen 状态方程, Gruneisen 状态方程具体参数见表 1, 壳体、套筒和预制破片材料的主要参数见表 2。

^{*} 收稿日期: 2008-09-03

作者简介: 杨云川(1961-), 男, 云南昆明人, 教授, 硕士, 研究方向: 现代远程弹药应用技术研究。

表 1 Gruneisen 状态方程参数

C	S_1	S_2	S_3	α	γ_0
0.394	1.49	0	0	0.47	2.02

表 2 壳体、套筒和预制破片参数

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	μ	σ_s/MPa	G/GPa
壳体	7.83	210	0.3	1000	79
套筒	7.80	205	0.3	882	75
预制破片	17.8	356	0.25	1592	142

炸药采用 SOLID164 实体单元,材料模型选择高能炸药材料和 JWL 状态方程。该方程的 $p-V$ 关系如下:

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

其中: V 为相对体积, E_0 为初始内能密度,具体参数见表 3^[6]。

表 3 炸药参数

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(km \cdot s^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.74	8.09	34	639.2	8.32	4.4	1.3	0.33

炸药-壳体之间采用滑移接触算法,其余均是通用面面接触。分别采用弹头部起爆、中心起爆和弹尾部起爆三种方式做比较,计算过程中 $50\mu s$ 时删除炸药 PART 和接触,计算总时间为 $150\mu s$ 。

2 数值模拟结果及分析

把修改好的关键字文件递交到 LS-DYNA 求解器里进行数值计算,计算结束后运用 LS-PREPOST 进行后处理。

从仿真结果可以看出:这三种起爆方式的总体趋势类似,在 $30\mu s$ 时弹壳开始破裂,到 $85\mu s$ 时已全部破裂,圆柱部破片小、密集而且速度大,弹头部和弹尾部破片较大而且速度相对较小,弹壳主要是沿纵向撕裂,破片形成的数值仿真过程与实际情况基本一致。

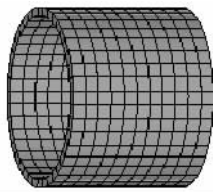


图 2 预制破片

下面重点分析预制破片(如图 2)在三种起爆方式下的飞散情况及其规律。

1)首先是弹头部起爆,选取部分典型的预制

破片节点速度随时间变化的曲线如图 3 所示,破片速度稳定时沿弹轴方向的分布曲线如图 4,其中轴向坐标从 81mm 到 180mm 为预制破片的速度,其它为壳体自然破片的速度。

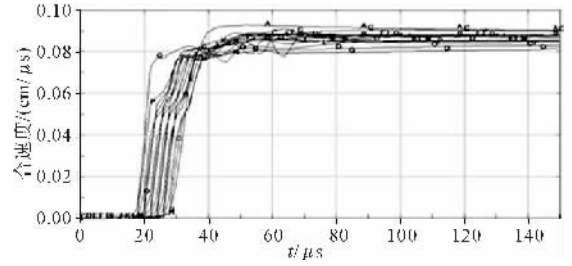


图 3 弹头部起爆时预制破片速度-时间曲线

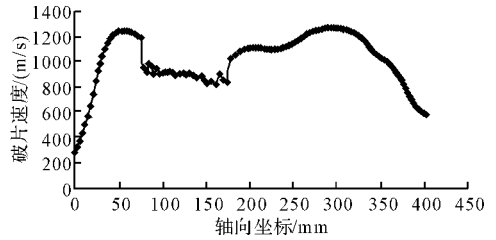


图 4 弹头部起爆时破片速度沿弹轴分布曲线

2)中心起爆时破片速度及其沿弹轴分布情况。中心起爆时部分预制破片节点的速度-时间曲线如图 5 所示,破片速度稳定时沿弹轴方向的分布曲线如图 6。

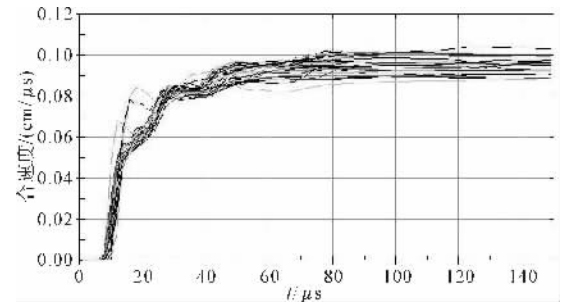


图 5 中心起爆时预制破片速度-时间曲线

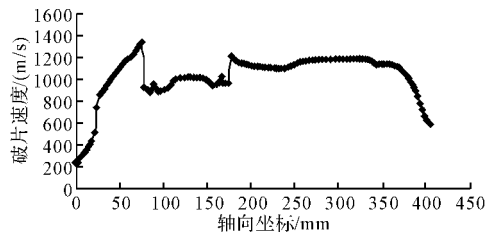


图 6 中心起爆时破片速度沿弹轴分布曲线

3)弹尾部起爆时破片速度及其沿弹轴分布情况。弹尾部起爆时部分预制破片节点的速度-时间曲线如图 7 所示,破片速度稳定时沿弹轴方向的分布曲线如图 8。

从图 3 至图 8 可以看出:都是在爆炸 $70\mu s$ 左右后,破片速度趋于稳定。弹头部起爆时,平

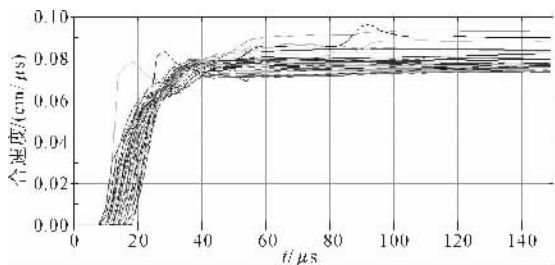


图 7 弹尾部起爆时预制破片速度-时间曲线

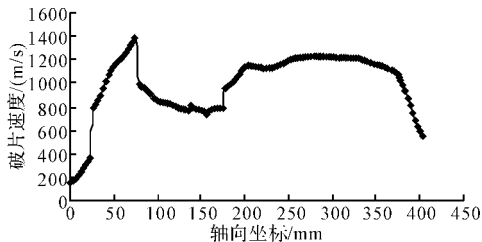


图 8 弹尾部起爆时破片速度沿弹轴分布曲线

均速度稳定在 850m/s 左右,而中心起爆时预制破片的速度是最大的,平均速度在 968m/s,而预制破片的最大速度已达到 1034 m/s,弹尾部起爆时平均速度还不到 800m/s,预制破片速度沿弹轴的分布情况见表 4,对比图 4、图 6 和图 8 可以发现,在轴向坐标为 23mm 处(即根部)中心起爆时节点速度出现了比较大的速度差,弹尾部起爆时节点速度差更加明显。

表 4 三种起爆方式预制破片速度对比 m/s

起爆点	最大速度	最小速度	平均速度	现象简单描述
弹头部起爆	982	819	850	靠近尾端预制破片速度略大于前端
中心起爆	1034	888	968	预制破片中部速度最大
弹尾部起爆	973	736	798	靠近尾端预制破片速度大于前端

还有一个现象值得关注,这三种起爆方式都有这种现象,从图 9 预制破片主视图和图 10 俯视图中



图 9 40μs 时预制破片主视图

均可以看出:预制破片在飞散过程中,出现了“凹槽”现象,也就是说,预制破片的整体飞散速度小于壳体自然破片的速度,这是因为:1)弹丸壳体是一个整体,需要聚集大量的能量才能爆炸形成自然破片,而预制破片的每个钨块通过胶连接,和壳体相比较,钨块属于独立的个体,所以预制破片的破裂不能聚集大量的能量就破坏;2)钨块的密度远比壳体破片

的密度大。

图 11 为三种起爆方式下预制破片初速飞散方向沿弹轴分布曲线,它们的分布趋势是一致的,从以上几个图中可以看出,由于弹头部起爆及凹槽现象的影响,靠近弹头部的预制破片方向角为 100° 左

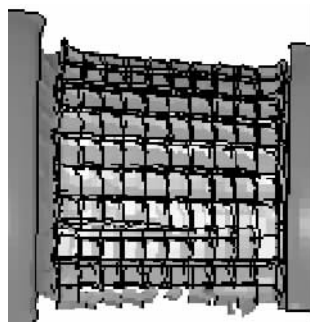


图 10 40μs 时预制破片俯视图

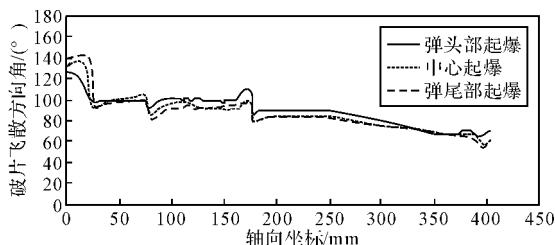


图 11 三种起爆方式下预制破片初速方向沿弹轴分布曲线

右,而靠近弹尾部的方向角为 91°左右,所以与普通弹丸相比,该弹的预制破片部分毁伤作用面积小,对目标的毁伤作用更为集中。

3 理论计算与验证

对于圆柱形壳体,破片的平均初速可根据格尼(Gurney)公式计算,这是一种最简单的计算方法^[7]。

$$v_p = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (2)$$

其中: $\sqrt{2E} = 0.52 + 0.28D_e$, D_e 为炸药的爆速;

$\beta = \frac{C}{M}$, 是炸药和壳体的质量比。

将爆速 $D_e = 8090\text{m/s}$, $\beta = 0.21$ 代入式(2)中,计算得到 $v_p = 987.7\text{m/s}$ 。比弹头部起爆数值模拟值高 16.2%,比中心起爆的模拟值高 2%,而中心起爆比弹头部起爆高 13.9%。由于格尼公式是采用了一些假定推导出来的,比如:炸药爆炸后,产物气体均匀膨胀,且密度处处相等。实际上,炸药的化学能不仅转换成了动能,而且还转换成热能、光能等;产物气体密度的均匀假设也不是真实的,因为炸药反应区附近的气体密度显然较高。基于以上这些假设,采用格尼公式计算的

(下转第 102 页)

铝,装药为 Octol 炸药。文献[5]采用圣地亚实验室开发的 SCAP 程序计算的 $350\mu\text{s}$ 时的射流形状和文中模型计算的射流形状如图 7 所示,通过图像对比

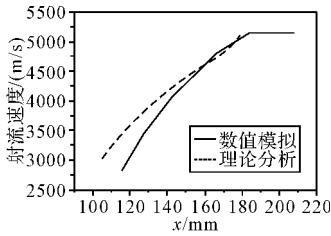


图 6 $45\mu\text{s}$ 时射流速度随射流坐标的变化图

可知,两者计算获得的射流长度、射流直径等参数偏差很小。并且文献[5]根据 SCAP 程序设计的聚能装药结构通过试验进行了验证。

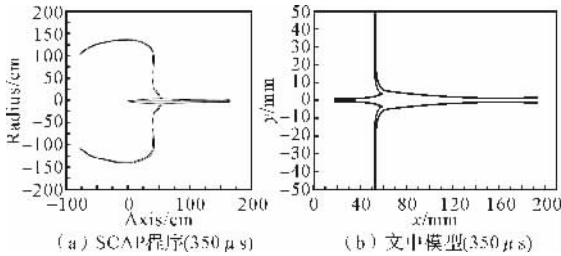


图 7 采用 SCAP 程序和文中模型计算获得的射流形状对比图

3 结束语

文中结合改进的 PER 射流理论建立了综合考虑炸药、壳体因素的药型罩压垮速度计算方法,修正了药型罩微元压跨过程、射流头部参数。通过与数值模拟的对比分析表明,文中所建立的

(上接第 98 页)

结果将偏高。而数值模拟考虑了爆轰产物泄出的影响等,所以结果比经验公式偏低。

4 结论

通过模拟计算及结果分析表明,中心起爆时获得的破片速度最大,杀伤效果更好,如果不存在工艺技术的话,应尽量选择中心起爆。在合理选择简化模型材料参数的情况下,数值仿真结果和经验公式计算结果具有较好的一致性,而且还会获得一些用试验的方法难以得到的数据结果,比如通过仿真可以得到壳体各点的应力应变值,给弹丸结构设计及优化提供了依据,让弹丸战斗部能够发挥更大的毁伤威力。

参考文献:

[1] 李向东,钱建平,曹兵,等. 弹药概论[M]. 北京:国

射流理论计算方法具有较好的工程计算精度,可为聚能装药结构设计提供参考。

参考文献:

[1] 谭多望,孙承纬. 大锥角聚能装药射流理论计算方法[J]. 高压物理学报, 2006,20(3):270-276.
 [2] 郑平泰,杨涛,秦子增. 聚能射流形成过程的理论建模与分析[J]. 国防科技大学学报, 2006,28(3):28-32.
 [3] Chou P C, Flis W J, Forsyth C M. A simplified model of jet formation in hemispherical shaped charges[C]//9th ISB, Shrivenham, 1986; 2-263-2-272.
 [4] Murpgy M J. Shaped charge penetration in concrete; A unified approach [R]. UCRL - 53393, 1983.
 [5] M Huertaa, M G Vigil. Design, analyses, and field test of a 0.7m conical shaped charge[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(8): 1201-1213.
 [6] W P Walter, J A Zukas. Fundamentals of shaped charges[M]. New York Wiley Interscience, 1989.
 [7] Trebinski R. Some improvement into analytical models of shaped charge jet formation[C]// 19th ISB, Switzerland, 2001; 725-732.
 [8] Carlenoe J, Chou P C. A one-dimensional theory to predict the strain and radius of shaped charged jets [C]// 1th ISB, Orsindo 1974; 13-15.
 防工业出版社, 2004.
 [2] 孟会林,孙新利,王少龙. LS-DYNA 程序在战斗部仿真计算中的应用[J]. 上海航天, 2003, 20(2): 33-37.
 [3] 魏继锋,焦情介,吴成. 预制破片战斗部试验与数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(3): 39-41.
 [4] 李翔宇,卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 44-48.
 [5] 杨云斌,屈明,钱立新. 破片战斗部威力仿真方法与仿真软件研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 14-18.
 [6] 于川,李良忠,黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JW1 状态方程研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 19(3): 274-279.
 [7] 魏惠之,朱鹤松. 弹丸设计理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.