

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.004

# 药型罩锥角对破片飞散的影响<sup>\*</sup>

韩文斌 张国伟 邵 彬 曹 鹏  
中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

[摘 要] 为了研究药型罩锥角对某小长径比多功能战斗部破片飞散的影响,利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了不同的药型罩锥角条件下破片飞散速度和破片飞散角的变化。仿真结果表明:破片的整体飞散速度随着药型罩锥角的增大而增加,锥角每增大 10°,破片整体飞散速度增加 2%,因此破片杀伤威力得到提高;破片飞散角度随着药型罩锥角的增加会略微增大,提升破片对目标的杀伤面积,且破片飞散角度会整体向上偏移。后续通过静爆试验验证了数值模拟结果的准确性。可为小长径比多功能战斗部在调整破片杀伤威力方面的研究提供参考。

[关键词] 小长径比;药型罩锥角;破片飞散;数值模拟

[分类号] TJ410

## Effect of Cone Angle of Shaped Liner on Fragment Dispersion

HAN Wenbin, ZHANG Guowei, SHAO Bin, CAO Peng  
College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In order to study the influence of the cone angle of shaped liner on the fragment dispersion of a small aspect ratio multi-functional warhead, ANSYS/LS-DYNA was used to simulate the variation of the fragment dispersion velocity and the fragment dispersion angle under different cone angles of the liner. The results show that the overall dispersion velocity of fragments increases with the increase of the cone angle of the liner. When the cone angle increases by 10° the overall dispersal velocity of fragments increases by 2%, and the lethality of fragments increases. The fragment dispersion angle increases slightly with the increase of the cone angle of the liner, which enlarges the damage area of the fragment to the target, and the fragment dispersion angle will shift upward as a whole. The accuracy of numerical simulation results was verified by static explosion test. The research results can provide a reference for adjusting the fragment killing power of the multi-functional warhead with small aspect ratio.

[KEYWORDS] small aspect ratio; cone angle of liner; fragment dispersion; numerical simulation

## 引言

现代战场上,面对防护能力日益增加的装甲目标,兼具破甲、杀伤等功能于一体的多功能战斗部的破甲威力和破片杀伤威力亟待提高。战斗部爆炸后,破片在空间的飞散分布是确定破片杀伤作用场必须研究的一个重要问题<sup>[1]</sup>。破片初速、飞散角是衡量战斗部性能的重要参数<sup>[2]</sup>。国内,随着仿真软件的日益成熟,在破片飞散领域展开了较为广泛的数值模拟研究,并取得了一定的研究成果。李松楠等<sup>[3]</sup>对不同起爆点位置对破片飞散方向的影响进

行了数值模拟研究;刘琛等<sup>[4]</sup>研究了偏心起爆方式对棱柱型定向战斗部破片飞散影响的数值模拟仿真。国外对于破片飞散速度和角度也有广泛的研究。David 等<sup>[5]</sup>对布列赫的二维格尼(Gurney)方程进行改进,提高了数值模拟过程中初始破片速度的精度;Pankaj 等<sup>[6]</sup>对单约束的破片发射装置进行参数化研究,得出装药量以及装药长径比对破片飞散速度和角度的影响。

对于小长径比多功能战斗部而言,锥角对破片飞散情况的影响并没有人做过具体的分析。本文中,在小长径比多功能战斗部的其他参量都不变的情况下,改变药型罩锥角的大小,进行数值模拟分析,找出药型罩锥角的变化对破片飞散的影响规律。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-07-04  
第一作者:韩文斌(1995 - ),男,硕士,主要从事弹药毁伤评估的研究。E-mail:1115083842@qq.com  
通信作者:张国伟(1968 - ),男,硕导,教授,主要从事弹药毁伤评估的研究。E-mail:zhangguowei1728@nuc.edu.cn

1 破片飞散初速和飞散角的理论计算

多功能战斗部兼具破甲、杀伤等功能于一体,因此战斗部威力包含破甲威力和破片杀伤威力两部分。其中,破片杀伤威力从破片飞散速度、破片飞散角两方面来衡量。

1.1 破片飞散初速

破片的飞散初速  $v_0$  是破片的主要性能指标之一,是衡量杀伤战斗部毁伤威力的重要参数。理论分析计算时,假设:破片与爆轰产物只在径向飞散,忽略轴向运动;装药的能量全部消耗在爆轰产物与破片上,忽略弹体破裂吸收的能量;破片初速相等,忽略周围空气等介质吸收的能量。根据能量平衡方程,推导得出 Gurney 公式:

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\frac{m}{M}}{1 + \frac{m}{2M}}}.$$
 (1)

式中: $m$  为炸药质量; $M$  为壳体质量; $\sqrt{2E}$  为 Gurney 常数或 Gurney 比能。该方法由于使用简便且准确度较高而得到了广泛应用。

每种炸药都有一定的 Gurney 比能,通过炸药理论与实验得出其与爆速  $D$  的关系为

$$\sqrt{2E} = \frac{D}{\sqrt{8}}.$$
 (2)

因此,已知炸药的爆速就可以求出 Gurney 比能。公式的前提条件是瞬时爆轰且不考虑轴向稀疏波的影响。式(1)适用于圆柱形弹,且只能给出最大速度的近似值,不能给出速度的分布。对于预制破片的弹体,式(1)修正后为

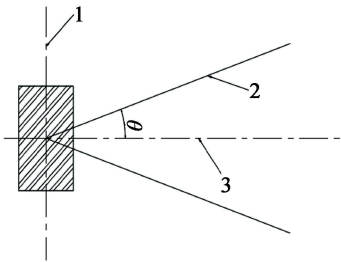
$$v_0 = \frac{D}{2\sqrt{5M}} \sqrt{\frac{2m}{5M}}.$$
 (3)

1.2 破片飞散角

破片飞散角是指战斗部爆炸后,在战斗部轴线平面内,以质心为顶点所做的包含有效破片 90% 的锥角,记为  $\theta$ ,也就是破片飞散图中(图 1)包含有效破片 90% 的两线之间的夹角。

$$\theta = \frac{40\sqrt{Q_v}}{D\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} (\cos\theta_2 - \cos\theta_1).$$
 (4)

式中: $Q_v$  为炸药爆热; $D$  为炸药爆速; $\alpha$  为弹丸装填系数; $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为爆轰波到达弹丸前、后端时爆轰波的法向与壳体表面的夹角。



1 - 战斗部中心轴线;2 - 破片飞散方向;3 - 水平线。

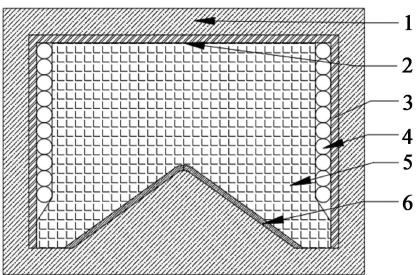
图 1 破片飞散角度简图

Fig. 1 Scattering angle sketch of fragment

2 战斗部的仿真建模

2.1 模型的建立

通常而言,小长径比战斗部是指长径比小于 0.8 的战斗部结构。本文中所研究的小口径多功能战斗部的长径比为 0.7,具有破片杀伤和破甲侵彻功能,轴对称,采用单层轴向预制钨球破片交错排列摆放。整个模型由主装药、药型罩(采用球锥结合药型罩)、壳体、预制钨球破片和空气组成。如图 2 所示。其中,装药直径为 40.7 mm,装药高度为 42.0 mm,炸高为 85.0 mm,壳体厚度为 1.5 mm;预制破片为直径为 3.0 mm 的钨球,共 11 层,每层 14 个。如图 3 所示。起爆方式为装药顶端面中心起爆。



1 - 空气;2 - 起爆点;3 - 壳体;  
4 - 破片;5 - 炸药;6 - 药型罩。

图 2 战斗部仿真结构模型

Fig. 2 Simulation structure model of warhead

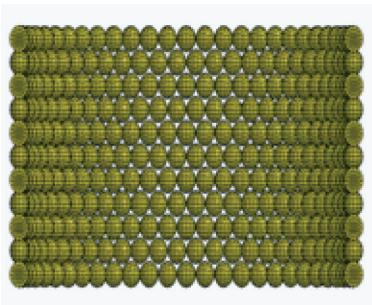


图 3 破片摆放示意图

Fig. 3 Fragment display sketch

由于该战斗部为轴对称结构,故建立 1/4 模型,单位制为 cm-g- $\mu$ s。炸药、药型罩和空气采用多物质 ALE 算法;壳体、破片采用 Lagrange 算法,二者采用 Constrained\_Lagrange\_In\_Solid 进行流固耦合,这样不容易出现网格畸变。所有单元均采用 8 节点实体单元 Solid164<sup>[7-8]</sup>。

2.2 材料模型与参数

聚能装药采用 8701 炸药,密度  $\rho = 1.7\text{ g/cm}^3$ ,爆速  $D_e = 8\ 100\text{ m/s}$ ,爆压  $p_{CJ} = 30\text{ GPa}$ ,采用 High\_Explosive\_Burn 材料模型和 EOS\_JWL 状态方程进行描述。此方程是 Jones-Wilkins-Lee 研究得到的,并假定爆轰前沿以常速率传播。JWL 状态方程定义压力为相对体积  $V$  和单位体积的初始能量  $E$  的函数:

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

(5)

式中:参数  $\omega$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$  和  $R_2$  为表征炸药特性的常数,该状态方程能很好地描述高能炸药,因为它在涉及结构金属加速度的应用中可以确定炸药的爆轰压力<sup>[9-12]</sup>。材料具体参数如表 1 所示。

表 1 8701 炸药的参数

Tab. 1 Material parameters of 8701 explosive

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$\omega$	$V$	$R_1$	$R_2$
56.40	6.80	0.36	10.00	4.00	1.30

药型罩的材料为紫铜,选用 Johnson\_Cook 模型和 EOS\_JWL 状态方程进行描述;壳体采用钢材质,用 Plastic\_Kinematic 模型描述;空气采用空物质材料 Null 描述,对应的状态方程为多线性状态方程;预制破片采用钨材质,用 Plastic\_Kinematic 模型描述。各个材料的主要参数如表 2 所示<sup>[13-16]</sup>。

表 2 各个材料参数

Tab. 2 Material parameters

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量	泊松比
紫铜	8.968	46	
空气	$1.293 \times 10^{-3}$		
钢	7.830	210	0.28
钨	18.0	3.45	0.3

3 数值模拟分析

3.1 初始模型仿真结果

初始战斗部中,药型罩采用球锥结合结构,锥角

为  $100^\circ$ ,为便于统计破片飞散速度和破片飞散角,破片层远离药型罩的层定义为第 1 层破片,靠近药型罩的最下层破片定义为第  $n$  层破片。选取战斗部起爆点所在方向与战斗部中心水平线夹角为正,战斗部药型罩所在方向与战斗部水平线夹角为负。

经过仿真计算后,得到初始仿真结果,见表 3。

表 3 初始仿真结果杀伤威力统计

Tab. 3 Statistics of killing power of initial simulation results

破片层数	破片飞散速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	破片飞散角/ $(^\circ)$
1	526	34.9
2	639	16.6
3	736	10.4
4	828	6.7
5	884	3.1
6	922	0.6
7	944	-1.7
8	948	-3.0
9	930	-5.2
10	881	-9.7
11	782	-23.1

3.2 杀伤威力仿真结果

由于本次仿真实验主要研究该多功能战斗部在金属射流成型较好的情况下药型罩锥角对破片飞散的影响规律,因此,根据参考文献选取了药型罩锥角为  $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $110^\circ$ 、 $120^\circ$  6 个药型罩锥角进行建模,数值模拟计算后,不同药型罩锥角杀伤威力统计结果如图 4、图 5 所示。

预制破片战斗部在炸药起爆后,金属预制破片在爆轰波和爆轰产物的作用下发生膨胀变形,并开始逐渐加速,直到爆轰产物膨胀速度相对于预制破片的速度可以忽略为止。由于破片速度衰减程度远

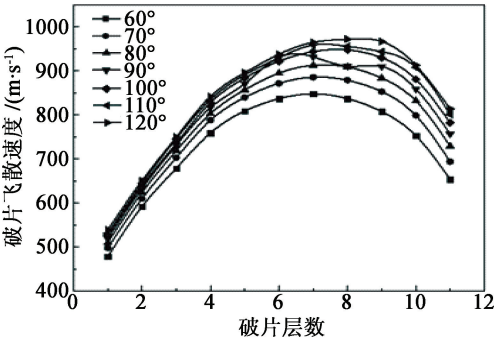


图 4 破片飞散速度与破片层数的关系

Fig. 4 Relationship between fragment dispersion velocity and fragment layer number



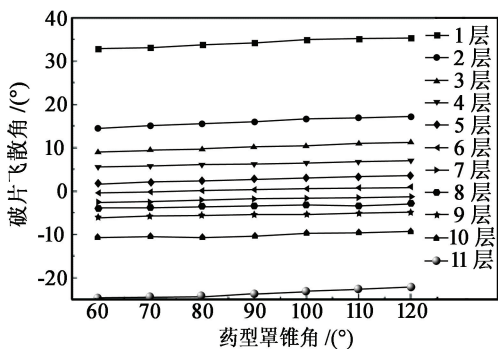


图5 破片飞散角度与药型罩锥角的关系  
Fig. 5 Relationship between fragment dispersion angle and cone angle of liner

低于爆轰产物和冲击波的衰减速度,因此,破片是远距离目标的主要杀伤元素。

炸药的比冲量是指炸药质量与弹体质量的比值。一般来说,炸药质量增加,炸药威力大,炸药的爆速和比冲量也大。

图4为不同药型罩锥角对破片飞散速度和破片层数的分布曲线。从图4可以看出,随着药型罩锥角的增加,破片整体飞散速度增加。前7层破片的飞散速度逐渐增加,第8层到最后一层破片飞散速度逐渐减小;锥角每增加10°,破片整体飞散速度增加2%。其原因是当药型罩锥角增大且战斗部口径不变时,药型罩的罩高降低,战斗部装药高度提高,从而增加了炸药的总体质量 $m$ 。从理论计算所得到破片初速公式可以看出,在壳体质量 $M$ 保持不变时,药型罩锥角增大,炸药质量 $m$ 和炸药爆速 $D$ 得到提高,破片整体初速增加。从炸药的作用机理来看,随着炸药质量和爆速的提高,产生的爆轰产物增加,爆轰波爆速提高,作用在单个破片上的球形爆轰波爆速和压强增加,促使破片的整体速度提高。

图5为不同药型罩锥角对破片飞散角影响的情况。从图5可以看出,随着药型罩锥角增大,破片飞

散角中线整体向上偏移,破片飞散角度增大,破片散布更加分散。其原因是药型罩锥角增大,需要增加炸药质量;一般来说,炸药质量增加,炸药威力大,炸药的爆速和比冲量也大。由上述的破片飞散角度公式可以得出,随着炸药爆速 $D$ 的增加,破片整体飞散角度增加。

由于受到边界效应的影响,第1层和最后一层破片的飞散速度和飞散方向角变化过大,分布相对比较离散。因此,破片在飞散边缘的分布密度偏低。

## 4 试验验证

### 4.1 试验方法

图6所示为试验布置现场。此次试验为静态打靶,试验状态为:在战斗部下方放置100 mm装甲钢,用以测试破甲威力是否满足战绩指标,其中,炸高为85 mm;在距离战斗部轴线3 m处有一个面积为1 m×2 m、厚度为3 mm的Q235钢靶,用以测试破片飞散的杀伤威力和飞散分布,3 m处的Q235钢靶主要是模拟该小长径比多功能战斗部产生的破片对轻型装甲车辆顶装甲的杀伤威力。

### 4.2 试验结果

本次试验为锥角为100°的小长径比多功能战斗部打靶试验。前面的试验显示,当锥角选取100°时满足破甲威力的战绩指标。试验结果为:破片上靶数量:每层2~3枚,共9层;上靶23枚破片,其中卡4枚,透19枚。破片飞散角上线为16.9°;破片飞散角中线为0.8°;破片飞散角下线为-9.5°;其中,第1层和最后一层破片由于破片飞散角度过大,均未着靶。剩余层数,破片飞散角度的计算与仿真结果基本吻合,见表4。因为战斗部中线高度在1.5 m左右,钢靶高度上线为2.0 m,破片飞散时战斗部中线上半部分的破片只有0.5 m高度可以上靶,所以



(a) 战斗部实物图 (b) 试验现场 (c) 破片的着靶情况

图6 试验布置现场及破片着靶

Fig. 6 Testing layout and fragments in target

表 4 试验数据与仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of test and simulation results

破片层数	试验破片飞散角/(°)	仿真破片飞散角/(°)
1		34.9
2	16.9	16.6
3	10.7	10.4
4	7.1	6.7
5	3.4	3.1
6	0.8	0.6
7	-1.6	-1.7
8	-3.2	-3.0
9	-5.1	-5.2
10	-9.5	-9.7
11		-23.1

为能更好地统计破片飞散,上靶数量只统计钢靶上方 1.0 m 处(即以 1.5 m 为对称中线,上下 0.5 m,共 1.0 m 高度)破片。

经对比发现,该初始仿真结果与上述试验结果基本吻合,证明此仿真具有参考价值。

5 结论

1)对于小长径比多功能战斗部来说,在其他结构不变、只改变药型罩锥角的前提下,药型罩锥角的增大会提高破片的整体飞散速度。

2)对于小长径比多功能战斗部来说,在满足破甲威力战绩指标的前提下,可通过适当增加药型罩的锥角来增加破片的飞散方向角,增大破片杀伤范围,进一步提高战斗部杀伤威力。

参 考 文 献

[1] 黄广炎,刘沛清,冯顺山. 基于战斗部微圆柱分析的破片飞散特性研究[J]. 兵工学报,2010,31(增1):215-218.

HUANG G Y, LIU P Q, FENG S S. Research on dispersion characteristic of fragment based on micro-column analyses for warhead[J]. Acta Armamentarii, 2010,31(Suppl.1):215-218.

[2] 孙韬,张国伟,齐蕾. 预制破片飞散规律的数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(12):45-47.

SUN T,ZHANG G W, QI L. Numerical simulation study on the rule of prefabricated fragments flying[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12):45-47.

[3] 李松楠,张国伟,崔小杰,等. 起爆点位置对破片飞散

方向的影响研究[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(11):49-53.

LI S N, ZHANG G W, CUI X J, et al. Influence of the location of the detonating point on the dispersion direction of fragments[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2018,39(11):49-53.

[4] 刘琛,李元,李燕华,等. 偏心起爆方式对棱柱形定向战斗部破片飞散规律的影响[J]. 含能材料,2017,25(1):63-68.

LIU C, LI Y, LI Y H, et al. Influence of eccentric initiation ways on fragment dispersion rule of prismatic aimable warhead[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017,25(1):63-68.

[5] FELIX D, COLWILL I, STIPIDIS E. Real-time calculation of fragment velocity for cylindrical warheads[J]. Defence Technology,2019,15(3):264-271.

[6] CHOUDHA P K, KUMARASWAMY A, DHOTE K D. Parametric study of single confined fragment launch explosive device[J]. Defence Technology,2019,15(2):179-185.

[7] 张世林,黄德雨,樊雪锋,等. 轴向驱动反应破片的作用过程[J]. 爆破器材,2016,45(4):49-53.

ZHANG S L, HUANG D Y, FAN X F, et al. Research on the mechanism of axial driving response fragments[J]. Explosive Materials, 2016,45(4):49-53.

[8] 赵飞扬,王志军,尹建平,等. 预制破片/MEFP 组合式战斗部数值仿真[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(12):52-56.

ZHAO F Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Numerical simulation of prefabricated fragment/MEFP combat warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017,38(12):52-56.

[9] 印立魁,候秀成,赵太勇,等. 对破片飞散参量计算模型的分析 and 评价[J]. 弹箭与制导学报,2017,37(4):55-59.

YIN L K, HOU X C, ZHAO T Y, et al. Analysis and assessment on computational model of fragment emission parameters[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2017,37(4):55-59.

[10] 周亚萍,王凤英,刘天生,等. 基于 LS-DYNA 对高速运动战斗部中预制破片飞散规律的数值模拟[J]. 科技通报,2017,33(5):94-97,101.

ZHOU Y P, WANG F Y, LIU T S, et al. Numerical simulation of preformed fragment distributing regularity with the warheads in high-speed movement based on LS-DYNA[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(5):94-97,101.

[11] 凌琦,何勇,何源. 定向战斗部破片飞散的数值模拟与试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(3):234-241.

- [illegible]