

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.06.003

预制破片对复合毁伤元战斗部发散角的影响*

董晓亮^① 李文彬^① 沈晓军^②

^①南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室(江苏南京,210094)

^②中国人民解放军63961部队(北京,100012)

[摘 要] 为了对复合战斗部预制破片发散角进行有效控制,应用 ANSYS/LS-DYNA 3D 非线性有限元仿真软件,研究预制破片类型、直径、材料、间距等对复合毁伤元破片场的影响,并对确定的结构进行试验验证。结果表明,采用球形破片能够得到内、外分布均匀的破片场。研究破片材料、直径、间距对复合战斗部预制破片发散角的影响,得到了复合战斗部基本结构:球形破片材料选择钨合金,破片直径为 10 mm,内、外圈破片间距为 1 mm。对设计的复合战斗部进行静爆试验,试验结果与仿真结果基本一致。

[关键词] 爆炸力学;复合毁伤元战斗部;预制破片;发散角

[分类号] TJ410.3+3;O38

Influence of Pre-fragment on Divergence Angle of Warhead with Combined Damage Elements

DONG Xiaoliang^①, LI Wenbin^①, SHEN Xiaojun^②

^① National Defense Key Laboratory of intelligent ammunition technology,
Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

^② Unit 63961, PLA (Beijing, 100012)

[ABSTRACT] In order to effectively control the divergence angle created by the prefabricated fragments of a warhead composite, ANSYS/LS-DYNA 3D nonlinear finite simulation was used to study the broken fragment field of the combined damage elements in view of the type, diameter, material and spacing of the pre-fragments. The determined structure was tested and verified. The results show that spherical fragments can be used to obtain uniform distribution of fragments inside and outside. The influence of fragment material, diameter and spacing on the divergence angle of combined warhead pre-fragment was also studied, and the basic structure of combined warhead was obtained. Tungsten alloy was selected as the spherical fragment with a diameter of 10 mm and a spacing of 1 mm between its inner and outer ring. The static detonation test was carried out for the designed combined warhead, and the test results were basically consistent with the simulations.

[KEYWORDS] explosion mechanics; combined damage element warhead; pre-fragment; divergence angle

引言

目前,各类武器装备的分工日益明确,虽然提高了针对性,但单一的用途和效应已不能完全适应现代战争的需求。国外针对这种情况,开发了将聚能装药、破片相结合的复合毁伤元战斗部,既可以利用聚能装药破坏重装甲目标^[1-5],还可以利用破片攻击人员、雷达、卡车、直升机、步兵战车等多种目标。由

此可见,采用复合毁伤元战斗部,可以满足对多种目标的毁伤要求^[6-10]。

虽然复合战斗部具有良好的战术性能,但是由于不同毁伤元的设计参数各不相同,其相互影响作用非常复杂。为保证毁伤元的打击效力,必须对结构设计参数进行详细的分析和优化。龚柏林等^[11]提出了一种将预制破片群与药型罩破片群相结合的复合破片场技术,并通过数值仿真和试验验证说明了该战斗部的可行性。常江等^[12]通过数值仿真及

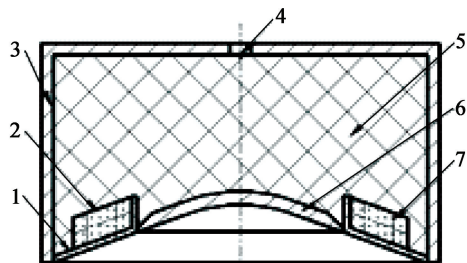
* 收稿日期:2018-04-20
基金项目:青年科学基金项目(11602111)
作者简介:董晓亮(1988 -),男,博士,主要从事弹丸高效毁伤与终点效应研究。E-mail:dxl880807@163.com
通信作者:李文彬(1964 -),男,博导,主要从事弹丸终点效应及目标毁伤技术研究。E-mail:lw2000cn@njjust.edu.cn

试验验证,对药型罩设计参数进行了针对性的优化改进;但是,并未对所提出的复合毁伤元战斗部球形预制破片发散角控制方法进行研究。

为了克服上述问题,设计了将预制破片群与药型罩相结合的复合毁伤元战斗部结构,研究了预制破片类型、预制球形破片直径、预制球形破片材料、球形破片间距等对复合毁伤元战斗部发散角的影响,并通过静爆试验对方案的可行性进行验证。

1 仿真模型

本研究的复合毁伤元战斗部主要包括主装药、药型罩、预制破片组件、挡环、壳体。其中,预制破片组件由预制破片和填充材料组成。壳体采用钢质材料,挡环为铝合金材料,结构如图 1 所示。



1 - 挡环;2 - 填充物;3 - 壳体;4 - 起爆点;
5 - 主装药;6 - 药型罩;7 - 预制破片组件。

图 1 战斗部结构

Fig. 1 Structure of the warhead

战斗部口径为 127 mm,装药高度为 70 mm。方案中,药型罩采用弧锥结合结构,由 CATIA 进行参数化建模,以保证模型的几何精度。药型罩口径为 70 mm,壁厚为 4.25 mm,夹角为 140° ,弧度半径为 55 mm,为了改善爆炸成型弹丸 (EFP) 成型形态,对药型罩结构边沿切边,切边厚度为 1.25 mm,切边方向与水平方向夹角为 45° 。挡环内部直径 70 mm,夹角为 140° ,壁厚为 2 mm。壳体壁厚为 2 mm。

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对复合毁伤元战斗部成型过程进行数值模拟。采用 ALE 算法,计算中,主装药、空气、填充材料、挡环被剖分为 Euler 网格;预制破片、壳体、药型罩被剖分为 Lagrange 网格,置于 Euler 网格中。为了消除边界效应,空气介质的外边界设置为压力输出边界以模拟无限空气域。Euler 网格与 Lagrange 网格之间使用流体/结构耦合方式^[12]。

预制破片、壳体、药型罩被分为 Lagrange 网格, Lagrange 单元之间必须定义接触方式。预制破片与

药型罩、壳体之间采用自动面-面接触,钨球本身也需要定义接触,接触方式为自动单面接触^[13]。

计算中的炸药材料采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程能够精确地描述在爆轰驱动过程中爆轰产物的压力、体积、能量特性。本文中,选取的炸药为 8701,具体输入参数:密度 $\rho = 1.69 \text{ g/cm}^3$,爆速 $D = 8\,425 \text{ m/s}$, C-J 压力 $p_{CJ} = 39 \text{ GPa}$;采用的 JWL 状态方程参数为: $A = 8.54$, $B = 0.205$, $R_1 = 4.6$, $R_2 = 0.25$, $\omega = 0.095$ 。药型罩、壳体、挡环采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程描述。填充材料、空气采用 Null 材料模型和 Gruneisen 状态方程描述,具体参数见文献[14]。计算过程中不考虑预制破片变形,预制破片采用刚性材料模型进行描述。

采用装药顶端中心单点起爆方式。计算过程中由于单点积分容易产生沙漏,出现计算的数值震荡,故使用沙漏控制^[14]。

由于炸药对钨球及 EFP 成型的作用时间有限,为了更准确、更快速地进行计算,当计算至 $100 \mu\text{s}$ 时,删除炸药、空气、挡环、填充物等 ALE 单元。利用完全重启动继续计算至 $400 \mu\text{s}$,对 $400 \mu\text{s}$ 时刻的毁伤元成型参数进行统计。由于复合战斗部的几何形状具有对称性,因此可取 1/2 结构部分建立三维模型进行计算,有限元模型见图 2。

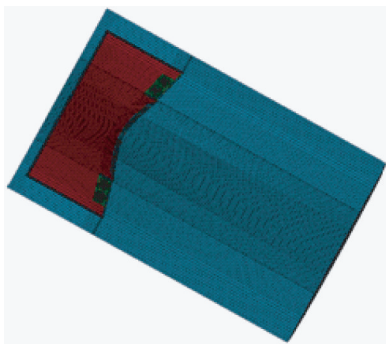


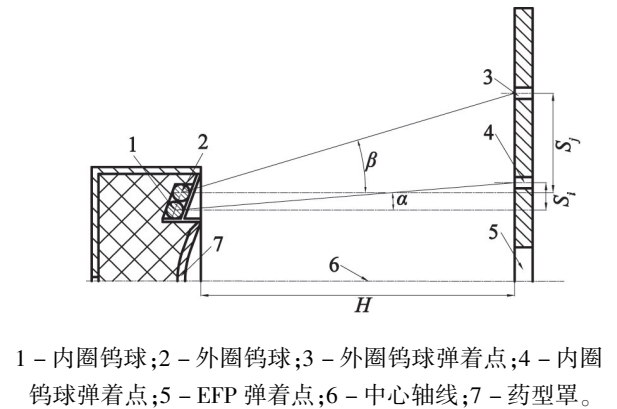
图 2 有限元计算模型

Fig. 2 The finite element model

2 仿真结果分析

复合毁伤元在成型过程中,由于受到爆轰波形和有效装药量的影响,破片在获得轴向速度的同时获得了一定的径向速度。在此径向速度的作用下,破片不断地向外运动,形成了具有一定发散角的破片场。

由图 3 可知,内圈破片的发散角 α 为



1 - 内圈钨球;2 - 外圈钨球;3 - 外圈钨球弹着点;4 - 内圈钨球弹着点;5 - EFP 弹着点;6 - 中心轴线;7 - 药型罩。

图 3 钨球发散角定义

Fig.3 Definition of divergence angle of tungsten ball

$$\alpha = \frac{S_i}{H} \quad (1)$$

式中: H 为装药与靶板之间的距离; S_i 为内圈破片的发散半径。

同理,外圈破片发散角 β 通过外圈破片发散半径 S_i' 计算得到。本次计算时间 $t = 400 \mu\text{s}$ 。

2.1 成型过程

图 4 为采用球形破片复合战斗部成型过程的数值模拟结果。由图 4 可知,当装药从顶部中心起爆后,球形爆轰波向药型罩方向运动。药型罩中心加速在前,边缘加速在后,开始向外翻转形成 EFP 头部;同时,爆轰波推动钨球向前并向外运动。随着爆

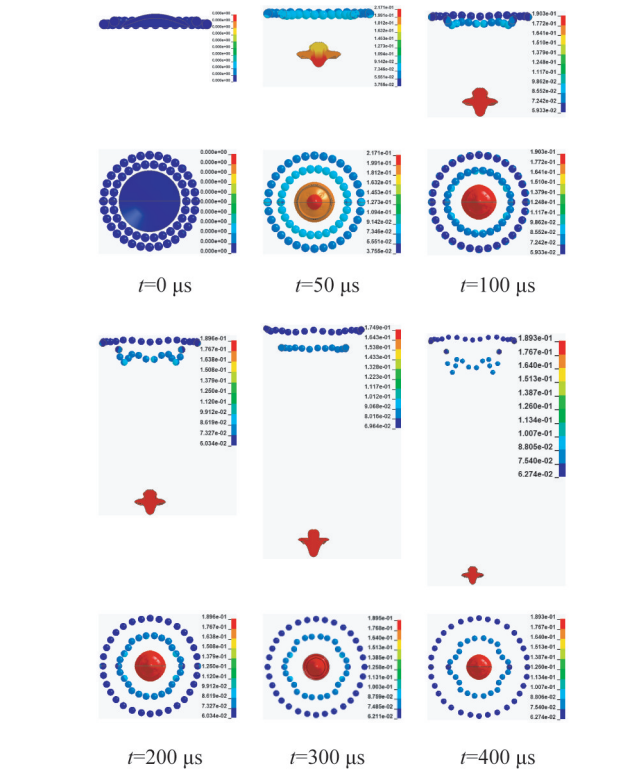


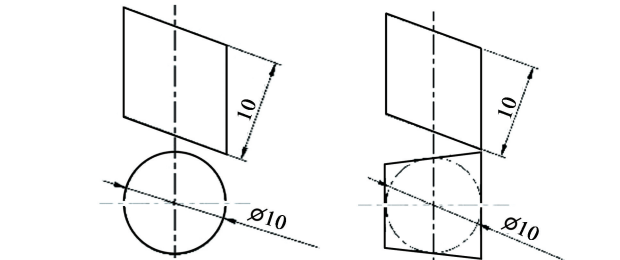
图 4 复合毁伤元的成型过程

Fig.4 Molding process of combined damage element

轰波的连续作用,药型罩不断发生轴向压垮和变形,被驱动向对称轴运动,最终形成完整的 EFP 弹丸;钨球不断向轴向运动且获得径向速度,在不断向径向方向运动的过程中,内圈钨球与外圈钨球发生碰撞。在 $t = 100 \mu\text{s}$ 后,EFP 弹丸完全成型;内、外圈钨球均获得稳定的径向和轴向速度。

2.2 破片类型对复合战斗部的影响

在药型罩的周围放置两圈预制破片,预制破片采用球形、圆柱形、方块形 3 种形状,其中球形预制破片直径为 10 mm ,圆柱形和方块形预制破片形状见图 5。



(a) 圆柱形预制破片 (b) 方块形预制破片

图 5 预制破片形状(单位:mm)

Fig.5 Prefabricated fragment shapes

图 6 为预制破片排布方式,破片分为内、外两层,内层有 26 枚破片,外层有 32 枚破片。圆柱形、球形破片截面圆半径为 R_1 ,外圈破片截面圆半径为 R_2 ;方块形破片与球形破片相切。球形破片质量为 9.42 g ,圆柱形破片质量为 14.14 g ,内圈方块形破片质量为 17.90 g ,外圈方块形破片质量为 17.46 g 。

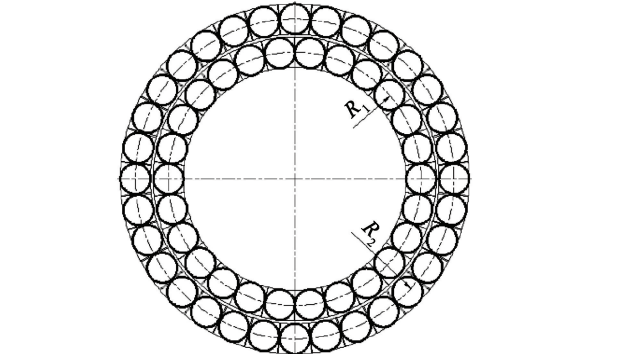
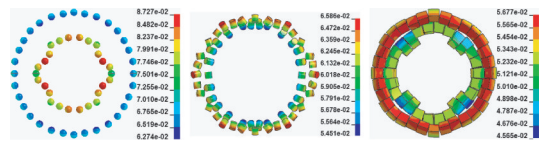


图 6 球形破片排布方式

Fig.6 Arrangement of spherical fragments

根据计算结果可以看出:采用球形破片方案时,内圈破片最大发散角 3.66° ,最小发散角 2.76° ,外圈破片最大发散角 7.06° ,最小发散角 6.11° ,在破片场覆盖范围内,破片分布均匀;采用圆柱形破片方案,内圈破片最大发散角 8.94° ,内圈破片最小发散角 7.58° ,外圈破片最大发散角 9.56° ,外圈破片最

小发散角 8.41°, 预制破片处于打击范围的边缘区域; 采用方块形破片方案, 内圈破片最大发散角 1.84°, 内圈破片最小发散角 1.37°, 外圈破片最大发散角 2.17°, 外圈破片最小发散角 1.55°, 预制破片打击面积很小。不同形状预制破片 $t = 400\ \mu\text{s}$ 时刻形成的破片场见图 7 所示。



(a) 球形 (b) 圆柱形 (c) 方块形
图 7 不同形状预置破片分布

Fig. 7 Preliminary distribution of fragments in different shapes

2.3 破片直径对复合战斗部的影响

以球形预制破片方案为基础, 研究球形预制破片直径对复合战斗部发散角影响。钨球直径选取 6、8、10、12、13 mm 5 种方案进行仿真, 结果见图 8。

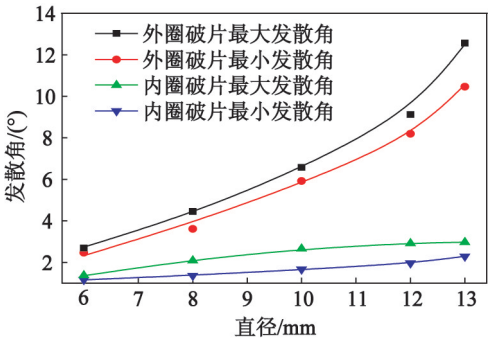


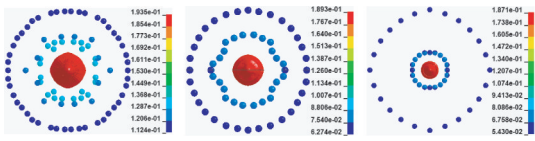
图 8 破片直径与破片发散角的关系

Fig. 8 Relationship between diameter of tungsten ball and divergence angle of tungsten fragment

由图 8 可以看出: 内圈球形破片发散角随着破片直径的增加缓慢增加, 球形破片直径由 6 mm 增加到 13 mm, 内圈破片最大发散角由 1.37° 增加到 2.97°, 增长了 116%; 内圈破片最小发散角由 1.16° 增加到 2.29°, 增长了 97.4%。外圈破片发散角随球形破片直径的增加快速增加, 球形破片直径由 6 mm 增加到 13 mm, 外圈破片最大发散角由 2.69° 增加到 12.56°, 增加了 367%; 外圈破片最小发散角由 2.46° 增加到 10.46°, 增加了 325%。

图 9 为不同直径的钨球破片场。由图 9 可见: 通过改变钨球的直径, 可获得不同组合发散角的破片场。

图 8、图 9 均可看出, 钨球直径对外圈破片发散角的影响大于对内圈破片发散角的影响。



(a) $d = 6\ \text{mm}$ (b) $d = 10\ \text{mm}$ (c) $d = 13\ \text{mm}$

图 9 不同直径的钨球破片场分布

Fig. 9 Fragment distribution of tungsten balls with different diameters

2.4 破片材料对复合战斗部的影响

以 $\varnothing 10\ \text{mm}$ 球形破片为研究对象, 进一步研究球形破片材料对复合毁伤元战斗部发散角的影响。在密度 $6.6 \sim 21.4\ \text{g/cm}^3$ 之间选择 10 种金属破片进行仿真研究。

图 10 为球形破片密度与破片发散角的关系曲线; 图 11 为不同材料球形破片形成的破片场。

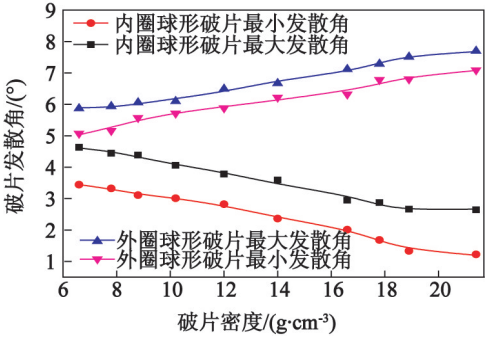
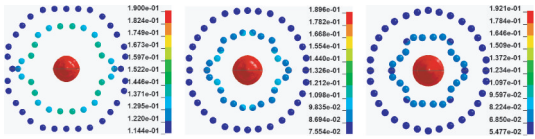


图 10 球形破片密度与破片发散角的关系

Fig. 10 Relationship between density of spherical fragments and divergence angles of fragments



(a) $\rho = 7.8\ \text{g/cm}^3$ (b) $\rho = 16.6\ \text{g/cm}^3$ (c) $\rho = 21.4\ \text{g/cm}^3$

图 11 不同材料的破片场分布

Fig. 11 Fragment distribution for different materials

由图 10、图 11 可以看出: 内圈球形破片最大、最小发散角随破片密度的增加而减小; 球形破片密度由 $6.6\ \text{g/cm}^3$ 增加到 $21.4\ \text{g/cm}^3$, 内圈破片最大发散角由 4.63° 减小到 2.64° , 减小了 75.4%, 内圈破片最小发散角由 3.44° 减小到 1.22° , 减小了 64.5%。外圈球形破片最大、最小发散角随破片密度的增加而增加。球形破片密度由 $6.6\ \text{g/cm}^3$ 增加到 $21.4\ \text{g/cm}^3$, 外圈球形破片最大发散角由 5.87° 增加到 7.70° , 增加了 31.2%; 外圈球形破片最小发散角由 5.07° 增加到 7.09° , 增加了 39.8%。由上述仿真结果可以看出: 可以通过使用不同材料的球形破

片,获得不同分布的破片场。

2.5 破片间距对复合战斗部的影响

球形破片场在形成的过程中,内圈、外圈钨球发生碰撞,也是外圈钨球获得较大径向速度的原因,同时由于钨球直径的碰撞为非对称碰撞,故对破片场最终分布有较大影响。以 $\varnothing 10\text{ mm}$ 钨合金球形破片材料为研究对象,研究破片间距对复合毁伤元战斗部发散角的影响。

图 12 为钨球间距对破片发散角的影响曲线;图 13 为不同钨球间距形成的破片场分布图。

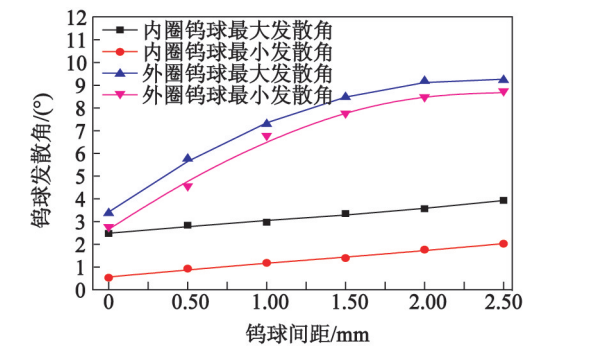


图 12 破片间距对钨球破片发散角的影响

Fig. 12 Influence of fragment spacing on divergence angle of tungsten spheres

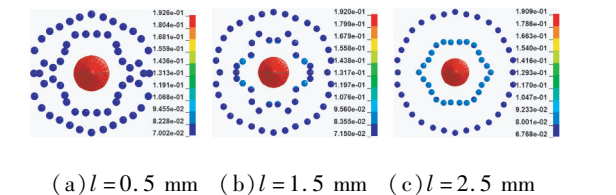


图 13 不同钨球间距的破片场分布

Fig. 13 Fragment distribution with different tungsten sphere spacing

由图 12 可以看出:内圈钨球最大、最小发散角随钨球间距的增加呈线性增加;钨球间距由 0.5 mm 增加到 2.5 mm ,内圈钨球最大发散角由 2.84° 增加到 3.93° ,增加了 38% 。内圈钨球最小发散角由 0.93° 增加到 2.02° ,增加了 117% 。外圈钨球发散角随着钨球间距的增加而增加。钨球间距由 0.5 mm 增加到 2.5 mm ,外圈钨球最大发散角由 5.77° 增加到 9.23° ,增长了 59.9% ;外圈钨球最小发散角由 4.56° 增加到 8.74° ,增长了 91.7% 。

由图 13 可以看出,随着钨球间距的增加,外圈钨球形成的破片场更趋近于圆形,内圈钨球呈规律的多边形。因此,通过调节钨球间距,可以改善钨球破片场的分布。

综上所述,通过对破片类型、直径、材料和间距

对复合战斗部破片发散角的影响研究,可以得到复合战斗部的基本结构:破片类型选用球形,破片材料选用钨合金,破片直径为 10 mm ,内、外圈破片间距为 1 mm 。

3 试验验证

为了进一步验证该成型技术方案的可行性,在数值模拟的基础上,开展了战斗部静爆试验。起爆方式为主装药上端面中心单点起爆。

试验时战斗部与靶板之间的距离为 5 m 。参考数值仿真结果中破片场的径向分布范围,采用尺寸为 $1\text{ 000 mm} \times 1\text{ 000 mm} \times 10\text{ mm}$ 的 45° 钢板作为效应靶板。靶板垂直于底面,战斗部轴线与底面平行,距离底面 1.5 m ;弹体中心与靶板中心对正;在战斗部右后方设置高速摄影,记录并观察 EFP 和内、外钨球接触靶板的时刻。

试验现场弹靶布置如图 14 所示。

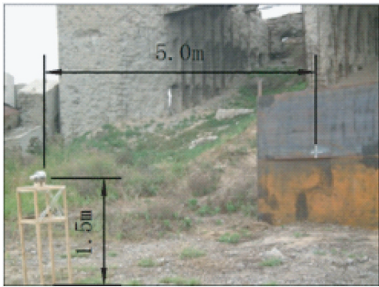


图 14 试验现场布置

Fig. 14 Test site layout

试验回收的靶板如图 15 所示。在复合破片场的作用下,靶板严重毁伤。整个破面落点呈规则圆形分布,密度均匀,无明显的覆盖盲区。观察发现,药型罩侵彻孔处于毁伤元中心区域,而预制钨球分布于外围。这些现象均与数值仿真结果比较一致。

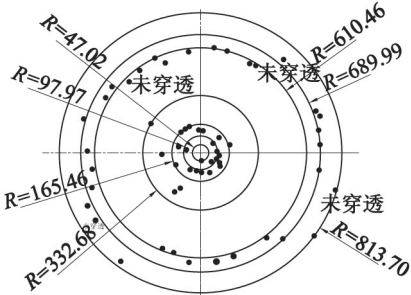


图 15 试验后的钨球落点半径(单位:mm)

Fig. 15 Drop point radius of tungsten balls after test

落区中心为 EFP 落点,穿孔基本为圆形,侵彻孔直径为 32.4 mm 。

在 EFP 侵彻孔外围为预制钨球落点,内圈钨球落点较为混乱,外圈钨球落点基本为规则圆形。内圈钨球均可穿透 5 m 距离上的 10 mm 钢板,外圈钨球有 28 枚钨球破片可穿透 10 mm 钢板。

表 1 中,通过仿真与试验发散角的对比可以看出:仿真与试验基本一致。

表 1 试验与仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of test and simulation results

(°)

发散角	α_{\max}	α_{\min}	β_{\max}	β_{\min}
仿真结果	3.66	2.76	6.17	5.62
试验 1 [#]	2.53	1.54	7.48	6.15
试验 2 [#]	3.79	1.57	8.41	6.10

4 结论

以复合毁伤元战斗部为研究目标,在同一挡环夹角下,研究破片类型、破片材料、破片直径、破片间距等对复合毁伤元破片场发散角的影响。

1)相比于方块形、圆柱形破片,球形破片形成的破片散布更均匀,破片场更容易控制。

2)球形破片直径是影响破片发散角的重要因素,破片发散角随着球形破片直径的增加而增加。通过使用不同直径的钨球破片可以获得不同发散角组合的破片场,当钨球直径为 10 mm 时,内圈钨球最大发散角 2.66°,最小发散角 1.68°,外圈钨球最大发散角 6.57°,最小发散角 5.92°,得到的破片场内部分布均匀。

3)随着球形破片密度的增加,内圈破片发散角逐渐减小,外圈破片发散角逐渐增加。破片材料选用钨合金,可得到比较均匀的破片场。

4)破片间距是影响钨球发散角的主要因素之一。随着破片间距的增加,内、外圈钨球发散角逐渐增加。内外圈钨球间距为 1.0 mm 时,内圈钨球最大发散角为 2.97°,最小发散角为 1.18°,外圈钨球最大发散角为 7.29°,最小发散角为 6.79°,内外圈发散角分布均匀。

5)对设计的复合战斗部进行试验研究,从试验与仿真结果对比可知,仿真与试验结果基本一致。可以为此后的进一步研究提供依据。

参 考 文 献

[1] 李传增,荣竹,谢中元,等. 10 号钢和紫铜 EFP 侵彻性能的数值模拟及实验研究[J]. 火炸药学报,2010,33

(1):79-82.
LI C Z, RONG Z, XIE Z Y, et al. Simulation and test on the penetration performance of 10[#] steel and copper EFP[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010,33(1):79-82.
[2] 贾伟,吴国东,王志军,等. 药型罩结构对环形爆炸成型弹丸形成的影响[J]. 爆破器材,2011,40(6):8-11.
JIA W, WU G D, WANG Z J, et al. Influence of liner structure on forming process of annular EFP[J]. Explosive Materials,2011,40(6):8-11.
[3] 陈奎,夏平,李伟兵. 大炸高下爆炸成型弹丸的试验研究[J]. 火工品,2014(6):5-8.
CHEN K, XIA P, LI W B. Experimental research on performance of EFP at large stand-off distance[J]. Initiators & Pyrotechnics,2014(6):5-8.
[4] 李刚,刘荣忠,郭锐. 爆炸成抛物面型弹丸战斗部的仿真研究[J]. 计算机仿真,2011,28(11):14,18.
LI G, LIU R Z, GUO R. Simulation on parabolic liner forming process [J]. Computer Simulation, 2011, 28(11):14,18.
[5] 曹兵. EFP 对有限厚 45[#] 碳钢板侵彻实验研究[J]. 火炸药学报,2007,30(3):19-21.
CAO B. Experimental study on EFP penetrating 45[#] steel plate[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(3):19-21.
[6] 孙加肖,尹建平,王志军,等. 起爆方式对变壁厚药型罩形成毁伤元影响的数值仿真[J]. 爆破器材,2017,46(2):16-20.
SUN J X, YIN J P, WANG Z J, et al. Numerical simulation on the damage element formed by variable thickness liner under different ways of initiation[J]. Explosive Materials, 2017,46(2):16-20.
[7] 龙源,毛振兴,刘健峰,等. 曲率半径对双层药型罩 EFP 战斗部成形及侵彻的影响[J]. 爆破器材,2016,45(3):5-10.
LONG Y, MAO Z X, LIU J F, et al. Influence of curvature radius on the formation and penetration of explosively formed penetrator warhead of the double layer liner[J]. Explosive Materials,2016,45(3):5-10.
[8] 臧立伟,尹建平,王志军. 轴向预制破片战斗部的设计研究[J]. 爆破器材,2013,42(2):5-9.
ZANG L W, YIN J P, WANG Z J. Optimizing design of axial prefabricated fragments [J]. Explosive Materials, 2013,42(2):5-9.
[9] 彭军,袁宝慧,孙兴昀,等. 立方形钨破片穿甲效应的数值模拟与试验[J]. 爆破器材,2017,46(5):23-28.
PENG J, YUAN B H, SUN X Y, et al. Numerical simulation and experiment for penetrating performance of cubic

