

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0025-04

破片撞击钢靶产生的碎片群特性分析

张广华, 沈飞, 王辉

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为了研究钢靶在破片高速撞击下产生的碎片群特征, 开展了破片撞击钢壳试验。通过碎片群作用于后效靶上产生的凹坑, 分析了破片形状、材质、靶板厚度等因素对碎片群的影响规律。结果表明: 破片质量相同时, 钢破片撞击时的穿孔直径高于钨破片, 球形破片穿孔直径的稳定性普遍高于立方形破片; 随着靶板厚度增加, 破片撞击后更容易产生小质量碎片群, 且运动速度逐渐降低; 相对于钢破片, 钨破片撞击钢靶后具有更强的后效作用。研究结果可为杀伤战斗部毁伤元设计及不敏感战斗部结构设计提供参考依据。

关键词: 破片撞击; 钢靶; 碎片群; 穿孔直径

中图分类号: TJ410.3⁺3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.006

Analysis on Characteristics of Debris Group Produced by Fragment Impacting Steel Target

ZHANG Guang-hua, SHEN Fei, WANG Hui

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to study characteristics of the debris group produced by high-speed impact of the fragments on the steel shell, the test of the fragments impacting on the steel shell was carried out. Through the crater produced by the debris group acting on the aftereffect target, the influence of shape, material and thickness of the target plate on the debris group was analyzed. The results show that the perforation diameter of steel fragment is generally higher than that of tungsten fragment, and the stability of perforation diameter of spherical fragment is higher than that of square fragment. With the increase of thickness of the target plate, it is easier to produce small mass debris group after fragments hitting the target, and the motion speed also gradually decreases. Compared with steel fragments, the tungsten fragments have stronger aftereffect after impacting the steel plate. The research results can provide reference for designing of damage element and structure of insensitive warhead.

Key words: Fragment impact; Steel target; Debris group; Perforation diameter

破片高速撞击是弹药在全寿命周期内受到的典型外界刺激之一, 其响应过程是一个高温、高压、高应变率的非正常反应过程, 相关研究中通常将其等效为破片撞击带壳装药问题。对此, 国内外开展过较多研究, 分析了破片^[1]、壳体^[2-3]等因素对装药响应特性的影响规律, 建立了装药的起爆判据^[4-5]。张涛等^[6]研究表明通过控制垫层的材料和厚度, 可以对破片冲

击起爆带壳炸药进行有效抑制; 周双等^[7]利用 AUTO DYN 软件模拟碎片冲击起爆带铝壳 PBX 装药的过程, 得到了碎片尺寸、冲击速度、铝壳厚度对炸药起爆特征的影响规律; 王昕等^[8]开展了钨球撞击不同曲率半径柱面钢壳 B 炸药的数值模拟; 屈可朋等^[9]对带有不同厚度防护板的装药开展了撞击试验, 结果表明, 随着防护板厚度的增加, 破片撞击后更容易形成

收稿日期: 2021-08-20

作者简介: 张广华 (1987-), 男, 副研究员, 从事爆炸作用与毁伤技术研究。

通讯作者: 王辉 (1977-), 男, 研究员, 从事炸药爆轰性能试验与理论研究。

基金项目: 国防基础科研专项 (20190502)

密集分布的碎片群，进而在装药内部形成多个热点，使装药发生更为剧烈的反应。

已有的研究表明，壳体较薄时，冲击效应是导致装药反应的主控因素；当壳体较厚或破片速度较低时，由于冲击波的急剧衰减，难以将装药冲击引爆，破片撞击壳体后会产生具有一定速度的碎片，由于碎片具有不规则边缘，通过对装药的摩擦、剪切等机械刺激，极易在碎片与装药接触部位产生热点，形成局部高温，进而导致装药发生反应。因此，这种情况下通常认为机械刺激是导致装药发生反应的主控机制^[10]。由此可见，破片撞击壳体后形成的碎片群形态对装药响应特性影响较大，而目前关于该方面研究相对较少。因此，本文开展了不同条件下破片撞击钢靶板试验，分析了破片形状、材质、靶板厚度等因素对碎片群的影响。

1 破片撞击钢靶试验

1.1 试验设计

通过 $\Phi 14.5\text{mm}$ 弹道枪驱动破片撞击钢靶，破片拟定加载速度 1600m/s ；钢靶后 0.25m 处放置后效靶，通过碎片残骸撞击后效靶产生的凹坑，判断碎片群形态；靶板距离枪口 7.15m ；距枪口 4m 、 6m 处布设测速网靶，用于测量距枪口 5m 处的破片速度。试验布局如图 1 所示。

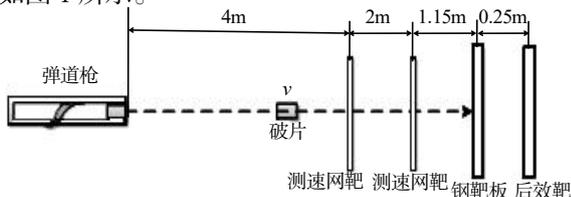


图1 试验现场布局
Fig.1 Layout of the test site

1.2 样品参数

1.2.1 破片

破片材质分别为 45 钢和 93W，形状分别为球形和立方形，具体参数如表 1 所示。

表 1 破片参数

Tab.1 Fragment parameters

破片类型	材质	尺寸/mm	质量/g
钢块	45 钢	$8 \times 8 \times 8$	4.01
钨块	93W	$7.95 \times 5.47 \times 5.47$	4.16
钢球	45 钢	$\Phi 10$	4.10
钨球	93W	$\Phi 7.6$	4.02

1.2.2 钢靶及后效靶

钢靶材质为 Q235A，尺寸为 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ ，厚度分别为 8mm 、 10mm 、 12mm 。后效靶采用 $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的 LY12 硬铝。

2 试验结果及分析

2.1 钢靶

钢破片以 1615.8m/s 速度撞靶（ 12mm 厚度）后的钢靶状态如图 2 所示。



图 2 试验后的钢靶

Fig.2 Steel target after test

由图 2 可以看出，靶板正面向前弯曲，呈花瓣型破坏；背面可见明显层裂现象，为破片撞击靶板时产生的应力波传播至靶板背面形成拉伸破坏所致。

不同条件下的钢靶穿孔直径如表 2 所示。

表 2 不同条件下的钢靶穿孔直径

Tab.2 Perforation diameter of steel target under different conditions

序号	破片类型	靶板厚度/mm	撞靶速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	穿孔直径/mm
1	钢块	8	1633	17
2	钨块	8	1630	17
3	钢球	8	1644	18
4	钨球	8	1590	15
5	钢块	10	1615	17
6	钨块	10	1592	15
7	钢球	10	1624	18
8	钨球	10	1606	15
9	钢块	12	1616	20
10	钨块	12	1615	17
11	钢球	12	1623	18
12	钨球	12	1606	16

由表 2 可以看出：钢质破片穿孔直径普遍高于钨合金破片，这是由于二者质量相等，钢质破片体积高于钨合金破片，因此撞靶时的撞靶面积也高于钨合金破片所致。通过计算得出不同破片的穿孔直径标准差：钢块为 1.414mm ，钢球为 0 ，钨块为 0.94mm ，钨球为 0.47mm ，由此可知，球形破片穿孔直径的稳定性高于立方形破片。这是由于球形破片的着靶姿态更稳定，而立方形破片运动时会不断翻转，进而导致着靶姿态会有一定的随机性；此外，靶板厚度对穿孔直径并无明显影响规律。

2.2 后效靶

2.2.1 后效靶形态

不同条件下的后效靶形态分别如图3~5所示。

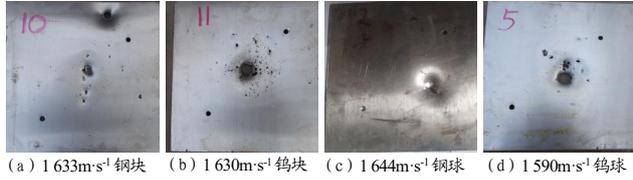


图3 8mm靶板下的后效靶

Fig.3 Aftereffect target under 8mm target plate

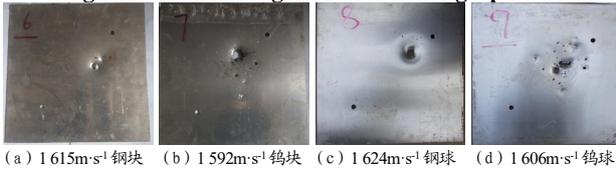


图4 10mm靶板下的后效靶

Fig.4 Aftereffect target under 10mm target plate

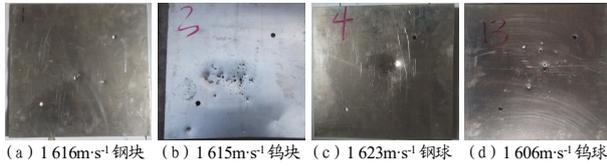


图5 12mm靶板下的后效靶

Fig.5 Aftereffect target under 12mm target plate

2.2.2 靶板厚度对碎片群的影响

由图3~5可以看出：破片为钢块时，后效靶上的凹坑数量及深度均随靶板厚度的增加而逐渐降低；破片为钨块/钨球时，当靶板较薄（8mm），后效靶上均出现了较大直径穿孔（约10mm），判断为大质量破片或靶板残骸撞击所致；该孔周围分布有大量小凹坑，应为破片撞靶产生的密集小碎片群撞击所致；当靶板厚度增加至10mm时，后效靶上虽然也有较大穿孔，但是孔径明显小于靶板厚度8mm时，仅有4mm左右，穿孔周围仍然密集分布有小碎片群撞击产生的小凹坑；当靶板厚度增加至12mm时，后效靶上仅有一些小凹坑。由此可见，靶板厚度对碎片群形貌具有显著影响，随着靶板厚度增加，破片残骸在靶板内的运动行程加长，导致其磨损更严重，进而不容易产生大块残骸，而是会产生小质量碎片群；加之碎片速度会随着靶板厚度的增加逐渐衰减，因此出靶板后的碎片剩余速度也会逐渐降低。

2.2.3 破片材质对碎片群的影响

由图3~5可知，钨破片穿靶后在后效靶上形

成的凹坑数量及深度均高于钢破片，表明钨破片撞靶后更容易形成密集碎片群，且碎片侵彻后效相对钢破片更高。这是由于进入靶板的冲击波压力及不同材质破片的自身损伤模式差异共同导致的。

破片撞击靶板时会产生两列波：向破片传播的左行波和向靶板传播的右行波，根据撞击时的动量守恒定律及界面上的连续性条件，有^[11]：

$$p_b = a_b \rho_b u_b + b_b \rho_b u_b^2 \quad (1)$$

$$p_f = a_f \rho_f u_f + b_f \rho_f u_f^2 \quad (2)$$

$$u_b + u_f = v \quad (3)$$

$$p_b = p_f \quad (4)$$

式(1)~(4)中： p_b 、 u_b 分别为作用在靶板上的冲击波压力、质点速度； ρ_b 为靶板材料的密度； a_b 、 b_b 为靶板材料的冲击雨贡纽参数； p_f 、 u_f 分别为作用于破片上的冲击波压力、质点速度； ρ_f 为破片材料的密度； a_f 、 b_f 为破片材料的冲击雨贡纽参数； v 为破片撞击速度。

联立式(1)~(4)得到靶板上的质点速度 u_b ：

$$u_b = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

式(5)中：

$$A = \rho_f b_f - \rho_b b_b \quad (6)$$

$$B = -\rho_f a_f - 2\rho_f b_f v - \rho_b a_b \quad (7)$$

$$C = \rho_f v(v b_f + a_f) \quad (8)$$

将 u_b 代入式(1)，可得作用在靶板上的冲击波压力 p_b 。冲击波在靶板内传播时会发生衰减，其衰减规律如下：

$$p_h = p_b \cdot e^{-\alpha h} \quad (9)$$

式(9)中： p_h 为冲击波传播至 h 距离处的压力值； α 为靶板材料的冲击波压力衰减系数。计算得到不同材质破片撞靶时，靶板内的冲击波压力随靶板厚度 h 的变化规律，如图6所示。

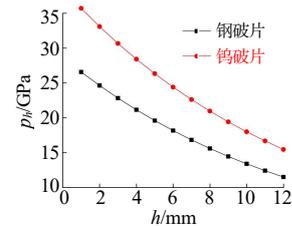


图6 冲击波压力—靶板厚度变化曲线

Fig.6 Shockwave pressure vs target thickness curve

由图6可以看出，钨破片撞靶时的靶内冲击波压

力高于钢破片,因此,更容易导致靶板发生塑性变形及结构破坏。此外,钢破片的自身损伤模式为变形和侵蚀,而钨破片采用粉末烧结工艺制备而成,脆性较强,在高速撞击作用下容易破碎,自身损伤模式为变形、侵蚀和破碎3种情况共同作用^[12],因此,撞靶过程中更容易产生碎片。试验中部分钢破片撞靶后回收到了大块破片残骸,如图7所示。而钨破片撞靶后均未回收到大块残骸,也证明了钨破片撞靶时更容易碎裂,进而产生密集分布的碎片群。

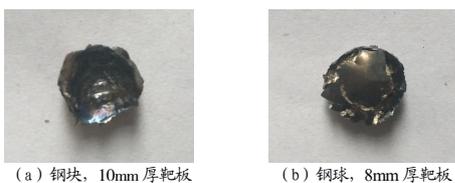


图7 钢破片撞靶后回收到的大块残骸

Fig.7 Large debris received after steel fragment hit the target

综上所述,相对于钢破片,钨破片撞击钢靶后更容易产生密集分布的碎片群,且具有更强的后效作用,作用于装药时,碎片残骸对装药的剪切、摩擦等机械刺激更加剧烈;加之碎片形成过程中会有大量塑性功转变成热能,使其具有很高温度,导致装药在冲击波、机械刺激、热等多因素耦合作用下产生多个热点,因而更容易引起装药发生剧烈反应。

2.2.4 破片形状对碎片群的影响

通过图3~5可以看出,无论钢质还是钨合金破片,不同形状破片穿靶后的碎片群形态并无明显规律。本文研究对象为破片垂直撞击平面壳体,实际情况下破片撞击位置也有可能为曲面,因此,壳体曲率半径、破片撞击位置、撞击角度等因素也会影响穿孔直径和碎片群特性,关于该问题还有待于进一步开展相关研究。

3 结论

(1) 相同质量条件下,钢破片撞靶时的穿孔直径普遍高于钨破片;球形破片穿孔直径的稳定性高于立方破片。

(2) 随着靶板厚度增加,破片撞靶后更容易产生小质量碎片群,且碎片剩余速度逐渐降低,对于带壳装药,则表现为装药响应烈度随壳体厚度的增加而逐渐降低;相对于钢破片,钨破片撞靶后更容易产生碎片群,且具有更强的后效作用,作用于装药时更容易导致其发生剧烈反应。

参考文献:

- [1] 贺丽萍,陈闯,王佳浩.弹靶参数对含能破片冲击起爆屏蔽装药的影响[J].火工品,2021(2):23-27.
- [2] 张琨,隋元松,纪冲,等.两种MEFP战斗部对屏幕带壳装药起爆能力的数值分析[J].火工品,2021(1):23-26.
- [3] 陈闯,郝永平,杨丽,等.双层介质隔板试验及被发炸药冲击起爆特性分析[J].兵工学报,2017,38(10):1957-1964.
- [4] 孙宝平,段卓平,张海英,等.破片撞击装药点火实验和数值模拟[J].爆炸与冲击,2013,33(5):456-462.
- [5] Gushanov A R, Volodina N A, Belov G V, et al. Numerical simulation of experiments on the low-velocity impact on HMX-based HE using explosive transformation initiation kinetics[J]. Journal of Energetic Materials, 2010, 28(Suppl 1): 50-65.
- [6] 张涛,刘雨生,高志鹏,等.垫层对破片冲击起爆带壳装药影响的数值模拟[J].爆炸与冲击,2018,38(6):1241-1246.
- [7] 周双,陈利,张庆明.破片冲击起爆带壳装药的数值模拟[J].兵工学报,2015,36(S1):317-321.
- [8] 王昕,蒋建伟,王树有,等.钨球对柱面带壳装药的冲击起爆数值模拟研究[J].兵工学报,2017,38(8):1498-1505.
- [9] 屈可朋,赵志江,沈飞,等.高速破片撞击下带壳装药响应及防护的试验研究[J].火炸药学报,2019,42(2):185-190.
- [10] 辛建国,徐豫新,李超,等.破片冲击柱面薄壳装药实验[J].兵工学报,2014,35(S2):222-227.
- [11] 张广华,沈飞,屈可朋,等.壳体厚度对装药响应特性的影响[J].兵器装备工程学报,2019,40(8):14-17.
- [12] 彭军,袁宝慧,程淑杰,等.立方破片对钢靶的穿甲威力研究[J].科学技术与工程,2011,11(29):7092-7096.