

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.04.011

轴向驱动反应破片的作用过程^{*}

张世林^① 黄德雨^② 樊雪锋^① 吴建萍^①

①中船重工第 710 研究所(湖北宜昌,443000)

②中国人民解放军 95874 部队(江苏南京,210022)

[摘 要] 为提高舰炮末端硬拦截反舰导弹的能力,提高对目标的毁伤效能,设计了一种轴向驱动反应破片战斗部。应用非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对破片战斗部进行了数值模拟分析,数值模拟结果表明:采用 PTFE (聚四氟乙烯)作为内衬可以有效提高破片的完整性和抛撒速度。通过试验对设计的战斗部进行了毁伤效能验证,试验结果表明:反应破片在侵彻靶板后,具有爆燃等二次毁伤效应,造成的损伤效果优于传统型利用动能打击目标的惰性破片,可使舰船硬拦截反导效能显著提高。

[关键词] 反应破片;数值模拟;毁伤;飞散特性

[分类号] TJ760.3+1

引言

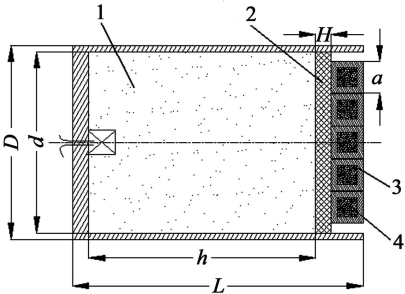
破片杀伤战斗部是对付反舰导弹的重要手段^[1]。目前,自然破片、预制破片和控制破片等惰性重金属破片^[2]杀伤战斗部起爆后,破片沿战斗部周向均匀分布并向外飞散,通过高速动能对目标进行穿甲、侵彻或毁伤,毁伤效能不足,目标的剩余破坏效应难以消除,大部分战斗部的杀伤元素不能得到有效利用,破片利用率较低,战斗部质量大,已经不能满足拦截超音速、高超音速、掠海飞行的反舰导弹的效能要求。国内学者为解决破片战斗部的毁伤效能做了大量的研究:邢恩峰等提出了一种舰用防空弹药方案,研究了炸药驱动惰性破片轴向抛掷速度的规律^[3];张辉等对轴向前置破片战斗部破片场和毁伤效能进行了研究,证明其毁伤概率远优于传统型破片战斗部^[4];黄亨建等进行了毁伤增强型破片的研究,其毁伤效能明显优于钢制惰性破片^[5];徐松林等对 PTFE(聚四氟乙烯)/Al 反应复合物的本构关系进行了研究,建立了 JC 塑性模型的压缩本构方程,验证了方程的合理性^[6];阳世清等对 PTFE/Al 复合反应材料的压制工艺及性能进行了研究,为工程应用提供了指导价值^[7]。

笔者设计的轴向驱动反应破片战斗部是一种新型高效毁伤多用途战斗部,能够形成轴向能量相对集中的定向反应破片束和径向均匀分布的自然破片群,在毁伤过程中除了自身的动能侵彻外,还伴随着强烈的燃烧、爆炸等效应,对目标进行强烈的附带损害,即 C 级毁伤或者 K 级毁伤^[8]。从而提高拦截目

标的毁伤效能,相比导弹拦截目标消耗量最低。运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对轴向驱动反应破片战斗部进行了数值模拟分析,并结合静爆试验,验证了轴向驱动反应破片战斗部的高效毁伤能力是明显的,为后续战斗部的工程设计提供了借鉴。

1 战斗部结构设计

设计的反应破片战斗部如图 1 所示。其弹体结构类似于瑞士厄利空公司的 Ahead 战斗部。反应破片主要置于战斗部内衬端面,采用中心端起爆方式,通过装药结构设计以控制破片的飞散方向,进而获得高密度破片束。图 1 中,弹体直径为 D ,高度为 L ;主装药采用 B 炸药,其中装药直径为 d ,装药高度为 h ;内衬厚度为 H ;轴向驱动反应破片壳体采用 45[#] 钢,结构是长度为 a 的立方体;破片内装有亚稳态反



1 - 主装药;2 - 内衬;3 - 破片壳体;4 - 含能材料。

图 1 轴向反应破片战斗部结构图

Fig. 1 Structure diagram of the axial response fragment warhead

^{*} 收稿日期:2015-06-25
作者简介:张世林(1986 -),男,工程师,硕士,主要从事弹药工程方面的研究。E-mail:zsl.31@163.com

应材料 PTFE/Al,反应破片沿着战斗部端面等距排列,破片总个数为 21 个,密度为 ρ ;战斗部壳体材料为硬质铝合金。

2 破片飞散特性

破片的初始抛撒速度是破片飞散特性的主要内容之一,它是评估杀伤战斗部威力的重要依据^[2]。发散角的大小直接影响到形成的破片束的侵彻能力和打击面积。

本文的战斗部模型为完全轴对称的,选择破片速度方向与对称轴 z 轴反向之间的夹角为发散角。根据破片的速度分析,可以确定每个破片的发散角 α 的值,进而近似求得破片的打击密度。本文只考虑破片发散角稳定时的状况。破片的发散角为:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{v_z}{v}\right) = \arctan\left(\frac{l}{H}\right);$$

(1)

$$H = \int_0^{t_0} v_z dt;$$

(2)

$$l = \int_0^{t_0} v_x dt。$$

(3)

式中: t_0 为破片从开始飞散至击中目标的时间; H 为 $t = t_0$ 时刻破片在 z 方向的位移; l 为破片的发散半径; v_z 为 z 轴速度,即轴向速度; v_x 为破片的径向速度; v 为破片初始抛撒速度。

定义打击面积为 S ,破片总数为 N ,打击密度为 $\omega(S)$,打击密度作为打击面积的函数,即

$$\omega(S) = \frac{N}{S}。$$

(4)

其中:打击面积 $S = \pi(H \tan \alpha + l_z)^2$, l_z 为某破片到弹轴线的距离。

3 数值模拟

3.1 计算模型、材料模型及参数

采用ANSYS/LS-DYNA进行轴向驱动反应破片战斗部的数值模拟分析,采用流固耦合算法。数值模型由战斗部壳体、主炸药、内衬和反应破片(壳体和反应材料)组成。其中,主炸药、空气和内衬采用欧拉网格建模,单元使用多物质ALE算法,战斗部壳体和反应破片均采用拉格朗日网格建模。采用TrueGrid 软件进行有限元模型的建立,模型简化如

图 2 所示。

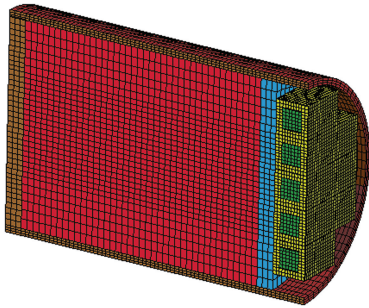


图 2 战斗部有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the warhead

网格单元采用 Solid164 八节点六面体单元;战斗部壳体材料模型选用 Plastic_Kinematic 材料模型;破片壳体和反应材料选用 Mat_Johnson_Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程;主炸药采用 High_Explosive_Burn 材料模型和 JWL 状态方程描述;内衬模型选用 Mat_Elastic_Plastic_Hydro;空气采用 Null 材料模型和 Gruneisen 状态方程描述。主要材料参数如表 1 所示,参考值见文献[6,9-11]。

3.2 数值模拟结果分析

反应破片在主装药爆轰过程中,瞬间受到爆轰压力的驱动,以防止破片在加速飞散过程中不发生破碎或者受热提前反应,确保反应破片的完整性,避免毁伤能力削弱。本文中,研究了 6 种方案:无内衬和分别以泡沫铝、尼龙、泡沫塑料、橡胶和 PTFE 低密度材料作为内衬,其方案编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#],数值模拟分析其对反应破片飞散特性和完整性的影响。

3.2.1 反应破片飞散数值模拟结果

通过数值模拟,得到了不同内衬时反应破片的初始抛撒速度和飞散角曲线,如图3和图4所示。由仿真计算可知,起爆后大约在25 μ s时,破片的抛掷速度趋于稳定,爆轰压力与空气阻力相等,爆轰产物对破片束的作用基本消失。破片的最大速度出现在端面中心处,破片的最小速度出现在靠近壳体处,反应破片的最大速度为2 400 m/s,最小速度为

表 1 主要材料参数

Tab. 1 Main parameters of materials

B 炸药	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
	1.71	7 980	29.5	5 422	76.7	4.2	1.1	0.34
PTFE/Al	A_0/MPa	A_1/MPa	A_2/MPa	B_0/MPa	B_1/MPa	B_2/MPa		
	-437.9	238.17	-30.72	1 800.65	-1 093.52	174.41		
45 [#] 钢	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G/GPa	A/GPa	B/GPa	n	C	m	
	7.83	77	79.2	51	0.26	0.014	1.03	

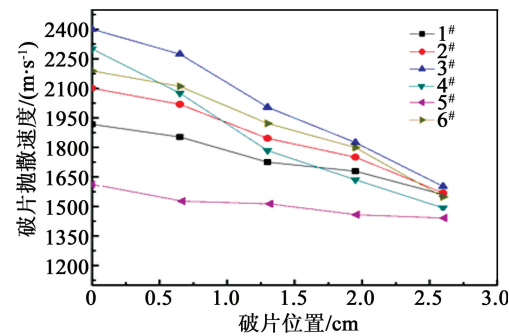


图3 破片初始抛撒速度曲线

Fig. 3 Initial dispersal velocity of fragments

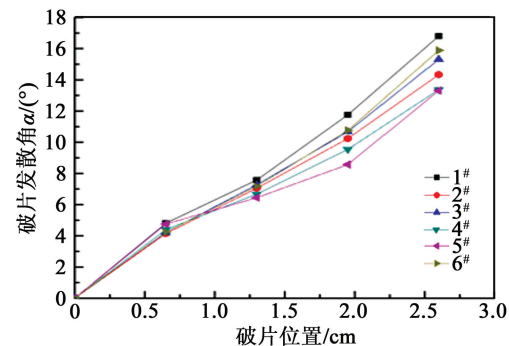


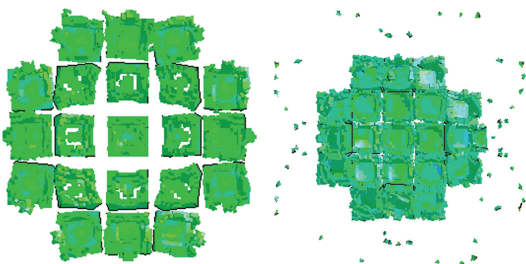
图4 破片发散角曲线

Fig. 4 Ejection angle of fragments

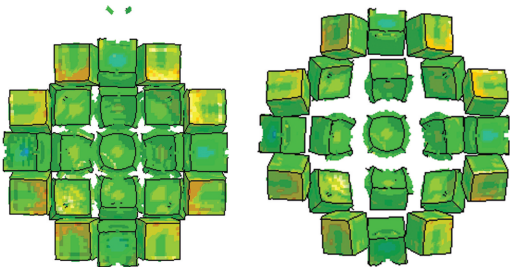
表2 不同内衬材料对反应破片飞散的影响

Tab.2 Effects of different liner materials on dispersion of response fragments

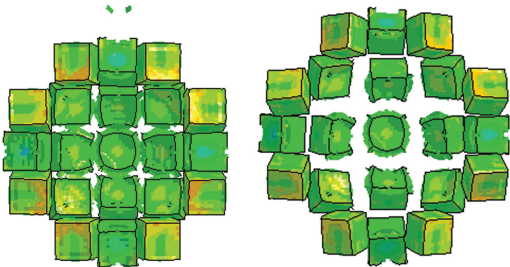
防护材料	材料密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	平均抛撒速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	平均发散角 $\alpha/^\circ$	破片状态
无内衬	0	1 500	11.8	有破碎、变形
泡沫铝	1.040	1 650	7.6	有破碎、变形
尼龙	1.140	1 780	7.3	少量破碎、变形
泡沫塑料	1.265	1 804	7.1	少量破碎、变形
橡胶	1.400	1 850	7.0	无破碎、变形
PTFE	2.160	1 917	6.4	无破碎、变形



(a) 方案1# (b) 方案2#



(c) 方案3# (d) 方案4#



(e) 方案5# (f) 方案6#

图5 80 μs 时不同方案破片的变形状态

Fig. 5 Deformation state of fragments from different programs at 80 μs

1 595 m/s。由公式知:破片发散角主要集中在 $-16^\circ \sim 16^\circ$ 范围内,表明破片基本上沿着战斗部端面法线方向飞行。破片飞散稳定后,发散角标准差值较大,说明破片发散角度呈离散化,导致破片发散角增大,同时破片束的密度有所降低。

3.2.2 内衬对反应破片飞散的影响分析

通过数值模拟得到了不同内衬时反应破片的初始抛洒状态。由表2可以看出,内衬对破片的飞散特性影响较大。随着内衬材料密度的增加,破片的平均抛撒速度增大,平均发散角减小,并且破片的破损现象也相对减小。采用泡沫铝为内衬时,破片的速度最低,而采用密度相对较大的PTFE时,破片的速度最大。采用PTFE作为内衬时,其速度比无内衬时提高了27.8%。从图5不同方案的破片变形状态也可以看出,随着内衬密度的增加,破片的完整性逐渐趋于完好。

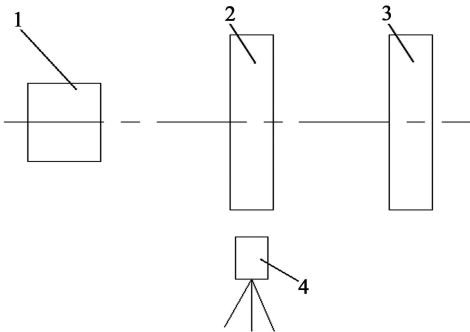
这是由于无内衬时,炸药与反应破片直接接触,当爆轰波传至端面时,爆轰产物迅速向周围运动,压缩空气形成冲击波,削弱了爆轰产物对破片的有效做功;同时,驱动反应破片沿着端面法线方向高速飞行;破片受到爆轰的直接载荷,造成外壳的变形。而采用内衬时,避免了反应破片与主装药的直接接触,一方面防止过度的动压加载,避免反应破片破碎,另一方面阻止过热的炸药爆轰产物的直接作用,削弱

了爆轰波压力,避免反应破片过早受高热而发生快速分解反应。同时,内衬有效阻止稀疏波向爆轰产物内传入,起到了约束、延缓的作用,使得对破片的加载时间延长,提高了爆轰产物对破片的做功能力。

4 试验及分析

4.1 试验装置

根据数值模拟分析,开展试验验证。如图 6 试验装置简图所示,战斗部距目标靶板距离 3.0 m,靶板为 1.2 m×1.0 m×3.0 mm 的钢板。靶心距离地面 1.0 m。图 7 为反应破片战斗部,战斗部内置反应破片 21 枚,破片密度为 ρ ,内衬层采用 PTFE,共计 4 枚试验样机(图 6 所示)。试验时,战斗部横向放置在试验架,且中心与靶板中心水平对正。



1 - 战斗部;2 - 测速靶;3 - 目标靶;4 - 高速摄像机。

图 6 试验装置布置示意图

Fig. 6 Arrangement of the test device

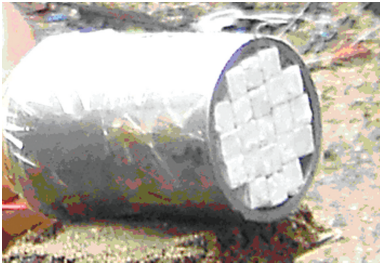


图 7 战斗部实物图

Fig. 7 The warhead

4.2 试验结果

通过图 8 摄像可以看出,燃烧式反应破片在撞击靶板瞬间,伴有强烈的火焰产生,火焰长度约半米。这是由于高速飞行的破片在撞击靶板瞬间,破片内部压力瞬间变大,温度升高,反应材料受到高温高压后,达到临界爆压值,发生燃烧效应。由试验结果(图 9)可知:靶板表面均出现穿孔痕迹,穿孔 21 个,与预制反应破片数目相同,且弹坑处均有燃烧熏蚀痕迹,表明反应破片战斗部在炸药爆轰后,预制破片比较完整。在穿过靶板后,受到靶板的挤压摩擦后,反应材料发生爆炸燃烧反应,释放大量的热,大部分反应弹丸在靶板上能够有较完整的穿孔,穿孔

孔径均大于 10 mm,破片穿透靶板后仍有较高的剩余速度,且反应性黑色痕迹较多,反应破片分布在宽 940~1 200 mm、高 870~1 000 mm 的区域内,最大飞散角为 18°~22°,其打击密度为 17.5~25.6 m⁻²。通过高速摄影图像,可近似求得 4 枚样机反应破片

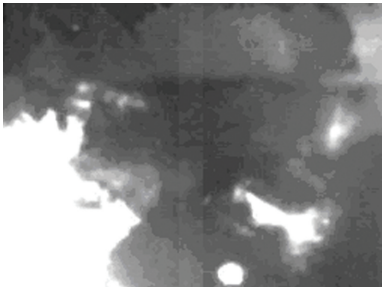
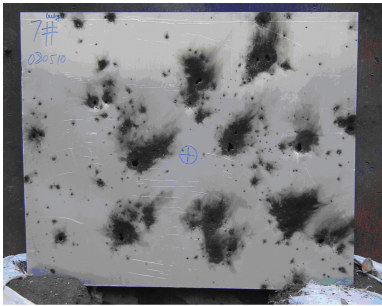
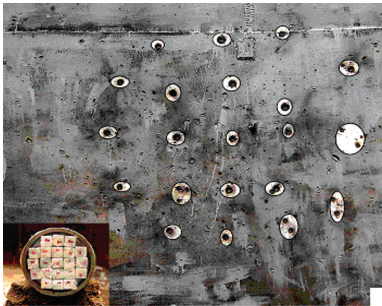


图 8 破片撞击靶板瞬间燃烧图

Fig. 8 Burning results of fragment at the moment of impacting the target plate



(a) 1#靶板



(b) 2#靶板



(b) 3#靶板

图 9 破片侵彻靶板毁伤效果图

Fig. 9 Damage results of fragments penetrating the target plate

的平均速度为 1 800 ~ 2 000 m/s。

试验表明:设计的轴向驱动反应破片战斗部发射的反应破片完整性较好,破碎情况较少,与数值模拟结果相吻合。

5 结论

1)数值模拟发现:无内衬时,轴向驱动反应破片抛撒速度最低,且在爆轰载荷下受损严重;采用密度相对较大的 PTFE 作为内衬,可以有效提高破片的完整性和抛撒速度。

2)轴向驱动反应破片在侵彻靶板后,具有燃烧等二次毁伤效应,造成的复合毁伤效果优于传统型单一利用动能打击目标的惰性破片。

3)轴向驱动反应破片战斗部具有定向功能,其速度提升和打击密度均优于传统型破片战斗部。

参考文献

- [1] 周智超,吴晓锋,冷画屏. 舰炮近炸引信预制破片弹在反导中的弹丸威力分析[J]. 军事运筹与系统工程, 2005,19(2):67-70.
- [2] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
SUI S Y, WANG S S. Terminal effects [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2000.
- [3] 邢恩峰,钱建平,赵国志. 装药结构参数对轴向预制破片抛掷速度的影响[J]. 火炸药学报, 2007,30(1):49-53.
XING E F, QIAN J P, ZHAO G Z. Effect of structural parameters of charge on the driving velocity of axial preformed fragments[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(1):49-53.
- [4] 张辉,李向豪,张选明. 轴向增强炮弹破片场优化控制及反导效能分析[J]. 计算机仿真, 2012,29(9):22-27.
ZHANG H, LI X H, ZHANG X M. Optimal control about axial enhanced artillery shells exploding and damage analysis of missiles [J]. Computer Simulation, 2012,29(9):22-27.

- [5] 黄亨建,黄辉,阳世清,等. 毁伤增强型破片探索研究[J]. 含能材料, 2007,15(6):566-569.
HUANG H J, HUANG H, YANG S Q, et al. Preliminary research on damage enhanced fragment [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007,15(6):566-569.
- [6] 徐松林,阳世清,张炜,等. PTFE/Al 含能复合物的本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2010,30(4):439-444.
XU S L, YANG S Q, ZHANG W, et al. A constitutive relation for a pressed PTFE/Al energetic composite material [J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(4):439-444.
- [7] 阳世清,徐松林,张彤. PTFE/Al 反应材料制备工艺及性能[J]. 国防科技大学学报, 2008,30(6):39-42,62.
YANG S Q, XU S L, ZHANG T. Preparation and performance of PTFE/Al reactive materials [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008,30(6):39-42,62.
- [8] 张世林. 轴向预制破片战斗部破片飞散特性影响因素分析[D]. 太原:中北大学, 2012.
ZHANG S L. Analyze on the factors of dispersion characteristic of axial prefabricated fragments [D]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [9] 孙文旭,李尚斌,黄亨建,等. 防护材料对爆炸驱动反应破片的影响[J]. 科技导报, 2011,29(16):30-34.
SUN W X, LI S B, HUANG H J, et al. Impact of the protective materials on explosion driving reactive fragments [J]. Science & Technology Review, 2011,29(16):30-34.
- [10] 才鸿年,王鲁,李树奎. 战斗部材料研究进展[J]. 中国工程科学, 2002,4(12):21-27.
CAI H N, WANG L, LI S K. Research progress in warhead materials [J]. Engineering Science, 2002,4(12):21-27.
- [11] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

Research on the Mechanism of Axial Driving Response Fragments

ZHANG Shilin^①, HUANG Deyu^②, FAN Xuefeng^①, WU Jianping^①

①710 Institute, China Shipbuilding Industry Corporation (HuBei Yichang, 443000)

② Unit 95874, PLA (Jiangsu Nanjing, 210022)

[ABSTRACT] In order to improve naval gun's ability of terminal intercepting anti-ship missile, and improve the damage efficiency to target, an axial driving response fragment warhead was designed. ANSYS/LS-DYNA, the non-linear finite element analysis software, was used to perform the numerical simulation of the reliability of the fragment warhead. Results show that using PTFE (teflon) as the inner liner can effectively improve the integrity and the dispersal speed of fragments. Damage efficiency of the designed warhead was verified by experiments. Test results show: after penetrating the target plate, the burning fragments possesses secondary damage effects due to deflagration, which is superior to traditional fragment, by mean of the kinetic energy. It could greatly improve the efficient of anti missile.

[KEYWORDS] response fragment; numerical simulation; damage; scattering characteristic