DOI：10.11883/1001-1455(2015)05-0723-06

爆轰驱动变截面异形杆静态抛撒实验研究*

宁惠君[1]，王　浩[2]，王政伟[2]，张　成[2]，阮文俊[2]
(1. 河南科技大学土木工程学院，河南　洛阳　471023；
2. 南京理工大学能源与动力工程学院，江苏　南京　210094)

摘要：为提高防空战斗部的毁伤后效，设计一种新型离散杆战斗部—中心起爆式变截面异形杆战斗部，并首次开展了爆轰驱动异形杆静态抛撒实验研究，获得了杆条的初速度，分析了杆条的抛撒特性、飞行姿态及其对目标钢板的侵彻效应。实验结果表明，异形杆在爆轰驱动过程中飞行姿态发生改变，达到了预期设计效果，提高了对目标的侵彻能力。

关键词：爆炸力学；异形杆战斗部；爆轰驱动；静态抛撒
中图分类号：O381　　**国标学科代码**：13035　　**文献标志码**：A

提高毁伤后效是防空战斗部研究的主要内容，而离散杆式战斗部作为防空战斗部的研究热点之一，关于它的研究不断创新。随着战术的需求，对于飞机、巡航导弹上某些防护厚度较大的要害部位往往需要更高的毁伤深度，这就对离散杆式战斗部的结构设计提出了更高的要求。传统离散杆战斗部的杆条形状多为圆柱形、方形，R. M. Lloyd 等通过对杆条形状的设计，基于传统的柱形、方形离散杆，将杆条形状设计为十字形、星形等，使得同等质量战斗部空间内能够装填更多杆条杀伤元，提高战斗部的杀伤效果[1-5]。基于已有研究工作，本文中提出一种中心起爆式变截面异形杆战斗部，将杆条设计为非等截面直杆，形状为长细比较大的圆台形。它们紧密地排列在炸药装药的周围，当战斗部装药爆炸后，驱动金属杆条向外高速飞行，由于杆条结构的不对称性，杆的两端会产生较大的翻转角速度，使得杆条在高速飞行中形成不同的角度毁伤目标，对目标形成切口。而爆轰作用结束后，异形杆在飞行过程中受到空气阻力的影响，杆条在飞行一定距离范围内，仍能在保持较高存速的同时以较好的侵彻角度，近似于正侵彻[6-7]（当入射角小于 15°，斜侵彻与正入射的性能基本相同）毁伤目标，保持对目标的侵彻能力，见图 1。

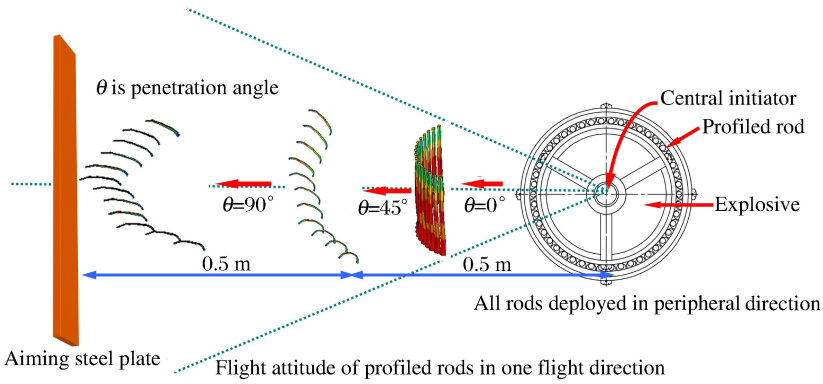


图 1　中心起爆式变截面异形杆战斗部杀伤原理

Fig. 1　Profiled rod warhead lethality enhancer

1　中心起爆式变截面异形杆战斗部结构设计

中心起爆式变截面异形杆战斗部结构如图 2 所示，呈圆柱形，由炸药、波形控制器、异形杆、尼龙环、壳体、中心管、蒙皮等组成。炸药选用 Octol，密度为 1.78 g/cm^3。装药形状为腰鼓形，其作用在于当炸

* **收稿日期**：2014-04-11；**修回日期**：2014-07-20
基金项目：航天一院高校联合基金项目(CALT201105)
第一作者：宁惠君(1985—　)，女，博士，讲师，ninghui85@163.com。

药爆轰时,爆炸作用力不使杆严重弯曲和变形,而给予沿杆长各部分一个较均匀的速度。装药半径为 35 mm,长度为 140 mm。外置波形控制器,其作用是将爆炸的球面波转换为柱面波,合理的波形控制器设计使沿杆长的爆炸等强作用场减小爆轰压力差,避免杆条在爆炸作用下断裂。波形控制器为铝质(2024 铝),密度为 2.78 g/cm^3,最大厚度为 5 mm,长度为 140 mm。蒙皮为 2024 铝,厚度为 2 mm,长度均为 140 mm。异形杆选用 10 号钢,密度为 7.83 g/cm^3,单根杆质量为 9.76 g,其结构如图 3 所示,两端面直径分别为 3、5 mm,长度为 98 mm,长细比为 24.5。如图 2 所示,50 根异形杆均匀排布在战斗部圆周方向。由于异形杆为变截面杆,故在波形控制器外侧设置尼龙环,并将尼龙环沿圆周方向开设 50 个半圆形缺口,固定杆的位置。主装药的起爆位置与装药形状配合,以达到控制爆轰波形状的目的,对于本文装药结构,起爆点应在战斗部主装药的中间位置。实验战斗部具体装配如图 4 所示,实验战斗部数据如表 1 所示,表中 m_e 为炸药质量,m_t 为炸药和铝内衬的总质量,m_r 为 50 根杆条的总质量,m_w 为战斗部的总质量。

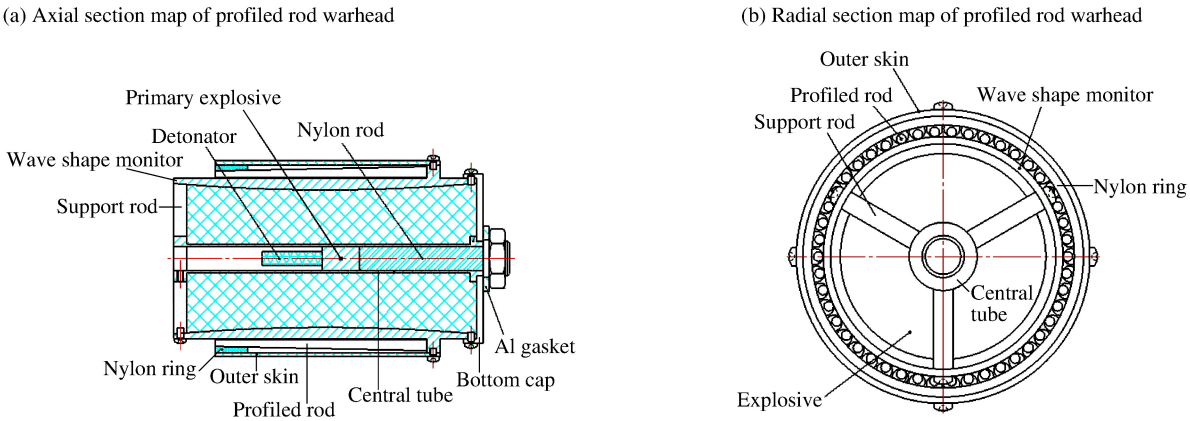


图 2 异形杆战斗部结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of profiled rod warhead

表 1 实验战斗部数据

Table 1 Information for experimental rod warhead

序号	m_e/g	m_t/kg	m_r/g	m_w/kg
1	803.66	1.098	489.44(9.766×50)	1.91
2	800.17	1.095	489.44(9.766×50)	1.78(不含蒙皮)

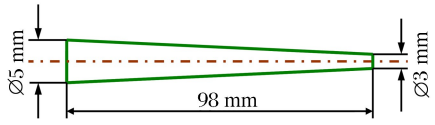
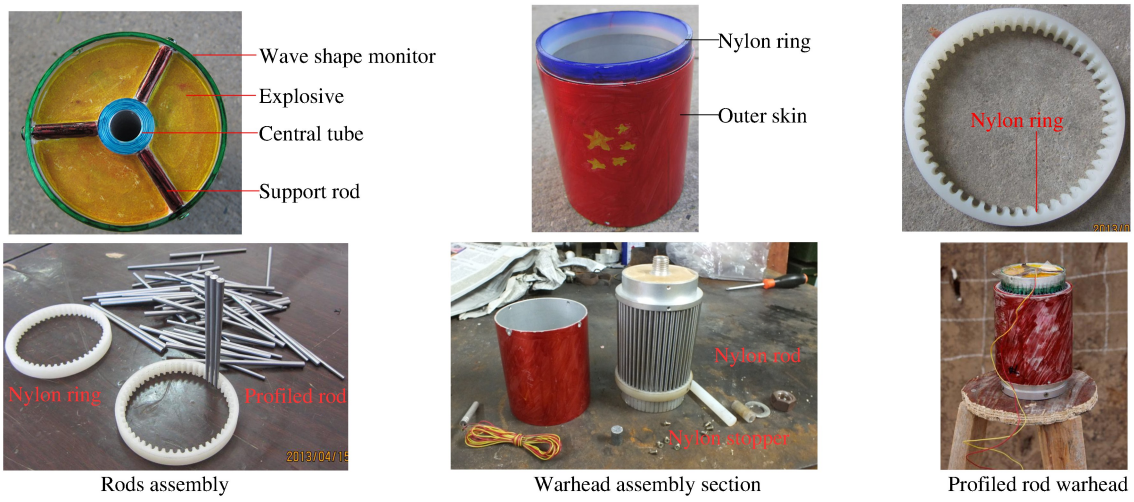


图 3 变截面异形杆结构示意图

Fig. 3 Structural representation of profiled rod with variable cross-section



Rods assembly　　Warhead assembly section　　Profiled rod warhead

图 4 实验件的装配

Fig. 4 Rod warhead assembly with section installation

2　爆轰驱动异形杆运动静态抛撒实验研究

2.1　实验目的

爆轰驱动异形杆运动静态抛撒实验共进行了 2 发，目的在于验证杆条飞行姿态与理论设计的飞行姿态是否一致，以及对钢板的毁伤效应是否达到预期效果，为进一步优化战斗部结构及实验提供依据。

2.2　实验描述及场地布置

中心起爆后，炸药驱动异形杆沿圆周方向飞散，参考文献[8-10]，实验场地布置可按图 5 所示。首先，在预先安排好的位置放置长 5.56 m、宽 2 m、厚 10 mm 的钢板。根据理论估算杆条飞行姿态，如图 1 所示，杆条飞行 0.5 m 左右翻转 45°，飞行 1 m 左右翻转 90°，故在距离钢板 1 m 处放置高度为 1 m 的静爆实验平台，并在实验平台上放置实验战斗部，确保战斗部的中心位于实验平台中心位置且战斗部爆心到钢板的距离 $d=1$ m，具体布置如图 5 所示。第 1 发实验场地布置如图 6(a)所示，对准静爆实验平台，分别在距离爆心 2、3、4、5 m 处布置 2 组测速靶 A、B，并在 A、B 处距离爆心 2～7 m 处每隔 0.5 m 布置 2 组姿态靶，在距离爆心 2～7 m 处每隔 1 m 布置姿态靶 C。第 2 发实验场地布置如图 6(b)所示。将测速靶及姿态靶均向后移动 1 m，即分别在距离爆心 3、4、5、6 m 处布置 2 组测速靶 A、B，并在 A、B 处距离爆心 3～8 m 处每隔 0.5 m 布置 2 组姿态靶，在距离爆心 3～8 m 处布置姿态靶 C。另外，为了进一步了解杆条对钢板的毁伤效果，在第 2 发实验中，在钢板后面设置了带有棉被的木板用来收集杆条。在场地布置时，务必保证战斗部中心与测速网靶中心在一条水平线上，并保证测速网靶及姿态靶垂直于战斗部中轴线，核定好靶距。高速摄像观察口距离爆心 20 m。

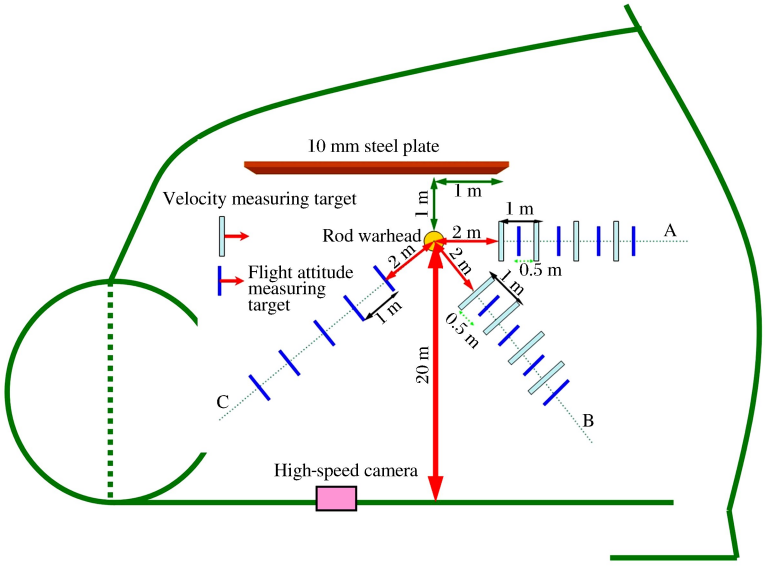


图 5　静爆场地平面布置图

Fig. 5　General arrangement drawing of trinity site prior to warhead test

(a) Test 1　　(b) Test 2

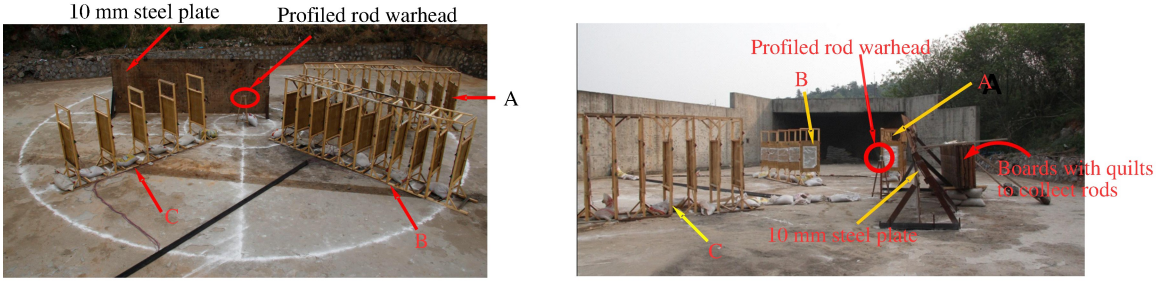


图 6　实验场地布置照片

Fig. 6　General arrangement photos of trinity site

雷管中心起爆后，炸药爆炸驱动异形杆沿圆周方向飞散，部分异形杆高速穿过 3 组锡箔测速靶、姿态靶，部分异形杆直接侵彻 10 mm 厚钢板。采用锡箔纸靶测试杆条飞散速度，结果如表 2 所示。利用高速摄像机来观测战斗部爆炸驱动异形杆飞散形态。

战斗部爆炸后，异形杆沿圆周方向飞散，爆轰产物的影响及杆条之间的相互碰撞等都可能导致测速

出现误差。例如测得的速度可能是爆轰产物碎片的速度,或者并不是同一根杆条的速度,又或者一组测速靶出现不同根杆的速度,这些往往会导致测试数据失真。所以确保测试数据有效对确定杆条飞散速度至关重要。对比第 1 发实验的测速数据,发现得到 A、C 2 组速度变化情况趋于一致,为有效数据。杆的最大速度约 1 400 m/s,在爆轰产物的推动下杆加速之后随着杆的飞行距离增加,杆的速度有衰减趋势,到 5 m 处杆的速度衰减到 1 100～1 200 m/s。考虑到第 1 发实验 2 m 处姿态靶完全被炸烂,第 2 发实验时将测速靶及姿态靶均向后移动 1 m。对比第 2 发测试数据可以看出,A、B 2 组速度变化趋于一致,为有效数据。与第 1 发实验杆条速度相比,第 2 发实验杆条的最大速度有所下降,约 1 184 m/s,这是由于第 2 发实验中没有安装蒙皮,爆轰压力有所下降。随着飞行距离的增加,杆的速度有所衰减,到 6 m 处,杆的速度衰减到 900 m/s 左右。

表 2 实验测试异形杆飞行速度

Table 2 Measured flight velocities of profiled rods

序号	v_A/(m·s^{-1})				v_B/(m·s^{-1})				v_C/(m·s^{-1})			
	2 m	3 m	4 m	5 m	2 m	3 m	4 m	5 m	2 m	3 m	4 m	5 m
1	1 058	1 408	1 389	1 351	2 198	913	1 351	1 190	1 167	1 333	1 224	1 234
序号	v_A/(m·s^{-1})				v_B/(m·s^{-1})				v_C/(m·s^{-1})			
	3 m	4 m	5 m	6 m	3 m	4 m	5 m	6 m	3 m	4 m	5 m	6 m
2	1 125	1 067	1 045	982	1 184	1 050	865	850	1 549	1 286		1 001

2.3 实验现象及结果分析

2.3.1 异形杆对实验钢板的毁伤效应分析

图 7(a)、(b)为 2 发实验后杆条对钢板的毁伤效果图,从图中可以看出,杆条均匀地打在钢板上,钢板上整齐地出现圆形穿孔及长度约 10 mm 的条形杆状痕迹。观察距离爆心 1 m 处钢板的毁伤效果,从图 7(b)、(c)、(d)又可清晰地看出从钢板中间位置开始:钢板右边为圆形穿孔,其下方对应条形杆状痕迹;左边为圆形穿孔,其上方对应条形杆状痕迹。这是因为杆条沿圆周方向飞散。杆条穿过钢板的痕迹说明杆条在爆轰过程中按照预期设计高速翻转运动,在飞至钢板 1 m 处近似正侵彻钢板,在侵彻钢板中杆条发生断裂,一部分穿透钢板形成圆形穿孔,另一部分则拍在钢板上形成条形痕迹。为进一步验证杆条飞行姿态的变化,需要对杆条穿过姿态靶的飞行姿态进行分析。

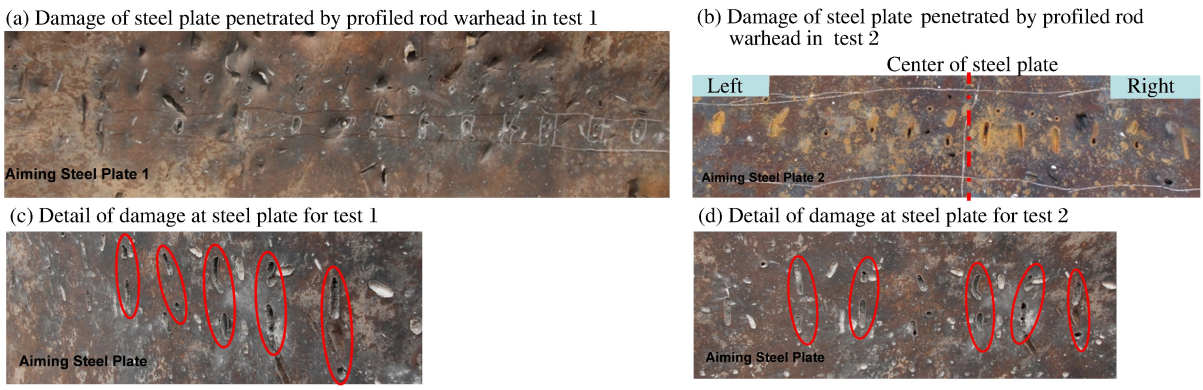


图 7 杆条对实验钢板的毁伤效果

Fig. 7 Damage effect of aiming steel plates by profiled rods

2.3.2 异形杆对姿态靶的穿透姿态分析

图 8 为爆轰作用结束后的实验现场图。从图 8 可以看出,爆轰作用结束后,多数纸靶被打烂。找出有效姿态靶,即保存较完整的纸靶,并对照找出纸靶上杆条痕迹是否为同一根杆条穿透痕迹,如果为同一根杆条,则为有效姿态靶。2 次实验中纸靶上的杆条痕迹最长为 65～70 mm,这是由于杆条在爆轰作用下发生弯曲。另外,从图 9 中 2 发实验姿态靶的痕迹也可以看出,异形杆在飞行过程中高速翻转的同时还带有侧向旋转。这可能是由于装配过程中,杆并没有完全平行于战斗部中心轴线,造成一定的初始

安装角，导致杆发生了侧向旋转。图 10 所示为实验回收杆条。图 10(a)所示为第 1 发实验结束后在目标钢板附近收集的杆条，与实验前杆条相比，变形后的杆条最大长度约为 65 mm。图 10(b)为第 2 发实验结束后在姿态靶附近收集到的杆条，图中杆条明显发生弯曲。这是由于杆条穿过姿态靶后，最终撞到静爆场外围混凝土墙壁上造成的。这部分杆条最大长度接近 70 mm。



图 8 爆轰作用后实验现场纸靶照片

Fig. 8 Photo of paper targets in trinity site after detontation

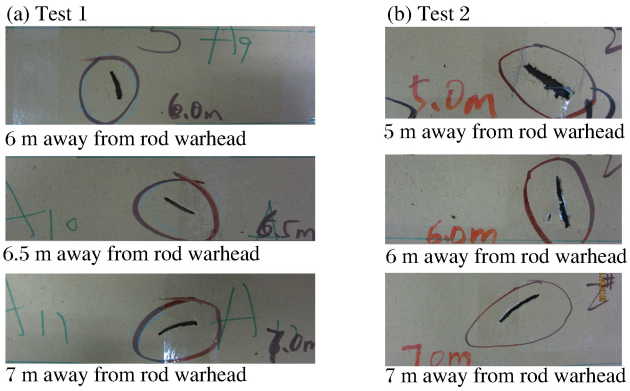


图 9 有效纸靶展示的异形杆飞行姿态

Fig. 9 Valid paper targets showing rod flight attitude in tests

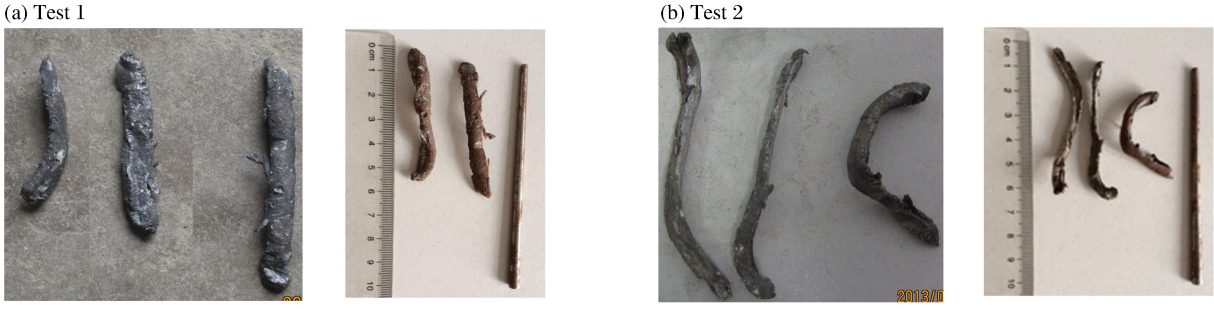


图 10 实验回收杆条

Fig. 10 Deformed rods recoved after detonation

2.3.3 实验结果分析

(1)异形杆在爆炸作用中杆条结构基本保持完整，战斗部装药结构设计合理。(2)由于异形杆形状的改变，杆条在爆炸过程中飞行姿态发生了改变，通过钢板的毁伤效应可以看出，杆条在 1 m 左右近似正侵彻目标钢板，提高了战斗部的侵彻能力，达到了预期设计目标。(3)由钢板毁伤效应分析可知，杆条在侵彻钢板过程中发生断裂，为此，下一步需要在此基础上对杆条形状进行优化设计，以保证杆条在侵彻过程中不发生断裂，提高战斗部的杀伤效果。

3 结　论

(1)提出了一种新型离散杆战斗部—中心起爆式变截面异形杆战斗部，将杆条设计为变截面圆台形直杆，使得杆条的飞行姿态发生变化。在爆轰作用初期，由于杆条结构的不对称性，杆的两端会产生较大的翻转角速度，使杆条在高速飞行中形成不同的角度毁伤目标，对目标形成切口。而爆轰作用结束后，异形杆在飞行过程中受到空气阻力的影响，在飞行一定距离范围内仍能够在保持较高存速的同时以较好的侵彻角度(近似于正侵彻)毁伤目标，保持对目标的侵彻能力。(2)首次将异形杆战斗部设计应用于工程实验，开展了爆轰驱动异形杆静态抛撒实验。分析实验现象，得到了杆条的初速度、抛撒特性、飞行姿态及其对钢板的侵彻效应。实验结果表明，战斗部装药结构设计合理，异形杆在爆轰驱动下飞行姿态发生了改变，近似正侵彻目标钢板，提高了战斗部的侵彻能力，达到了预期设计目标。(3)本文的实验成果可为异形杆的进一步理论及实验研究提供参考以及对离散杆战斗部的研究具有重要参考价值。

参考文献:

[1] Lloyd R M, Sebeny J L. Physics of kinetic energy rod warheads against TBM submunition payloads: AIAA-ADA364868[R]. 1999:1-17.

[2] Lloyd R M, Sebeny J L. Novel penetrator study for defeat of ballistic missile payloads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,33(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12):380-389.

[3] Lloyd R W. Kinetic energy rod warhead with optimal penetrators: US, 6779462B2[P]. 2004-08-24.

[4] Lloyd R M. Warhead with aligned projectiles: WO, 03/042624A2[P]. 2003-05-22.

[5] Lloyd R M. Kinetic energy rod warhead with lower deployment angles: WO, 2005/022074A2[P]. 2005-03-10.

[6] 李大红,吴强,张汉钊,等.钨杆弹斜侵彻特性研究[J].爆炸与冲击,1996,16(2):158-165.
Li Da-hong, Wu Qiang, Zhang Han-zhao, et al. Research of oblique penetration by rod projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(2):159-165.

[7] 王峰,王肖钧,胡秀章,等.卵形杆弹对铝靶的斜侵彻[J].爆炸与冲击,2005,25(3):265-270.
Wang Feng, Wang Xiao-jun, Hu Xiu-zhang, et al. Oblique penetration of an ogive-nosed rod into the aluminum target[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):265-270.

[8] 李向东,钱建平,曹兵,等.弹药概论[M].北京:国防工业出版社,2004:263-273.

[9] 孙传杰,路中华,卢永刚,等.可控旋转离散杆空间运动分析[J].爆炸与冲击,2008,28(4):378-383.
Sun Chuan-jie, Lu Zhong-hua, Lu Yong-gang, et al. Montion analysis of controllable rotation discrete rod[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(4):378-383.

[10] 何勇,陈祺.离散杆战斗部杆条飞行性能模拟试验研究[J].南京理工大学学报:自然科学版,2006,30(5):547-549.
He Yong, Chen Qi. Simulated experiment on flight performance of rod about discrete rod warhead[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006,30(5):547-549.

Experimental research on static dispersing of profiled rods driven by detonation

Ning Hui-jun[1], Wang Hao[2], Wang Zheng-wei[2], Zhang Cheng[2], Ruan Wen-jun[2]

(1. *School of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471023, *Henan, China*;
2. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: A new discrete rod warhead named profiled rod warhead was proposed to improve the damage aftereffect, and the experimental research on detonation-driven profiled rod dispersing was employed. The initial velocity of the rods were obtained. The dispersion characteristics and flight attitude of the rods and their damage effect to the aming steel plates were analyzed. The flight attitudes of the rods changed in the detonation-driven process. Experimental results show that the expected design effects were achieved.

Key words: mechanics of explosion; profiled rod warhead; detonation-driven; static dispersing

(责任编辑 张凌云)