文章编号：1001-1455(2014)02-0235-06

含能材料药型罩的爆炸成型及毁伤作用*

万文乾，余道强，彭 飞，王维明，阳天海
（总装备部工程兵科研一所，江苏 无锡 214035）

摘要：为了研究由含能材料制备的药型罩爆炸成型过程及其对目标靶的终点效应，设计了球缺形药型罩的装药结构，放置与药型罩曲率相同的缓冲垫在药型罩和主装药之间，运用高速摄影系统拍摄含能材料药型罩的成型过程。实验结果表明，含能材料药型罩在爆炸作用下能够形成弹丸，弹丸速度 2 km/s 左右。含能弹丸穿透 20 mm 厚的装甲钢靶后反应加剧，形成大量的气体。侵彻过程含动能和化学反应的综合作用，穿孔有明显的烧蚀现象，穿孔口径 0.5D，最大穿深 1.4D。利用含能材料制备成药型罩可以实现炸药的直接驱动，这可为含能材料战斗部的工程应用提供参考。

关键词：爆炸力学；侵彻；缓冲垫；含能材料药型罩；爆炸成型
中图分类号：O381；TJ410.3 **国标学科代码**：1303510 **文献标志码**：A

高效毁伤是现代弹药的发展方向之一，为突破传统弹药的毁伤威力，现发展着新概念、新原理和新型毁伤元技术。反应破片是一种带有活性含能材料的新型毁伤元，它与目标撞击时对目标除了具有动能侵彻作用外，还同时释放化学能，产生燃烧、爆炸等，对目标的作用效果比常规破片战斗部有较大幅度的提高。反应破片中的反应材料是由具有类爆轰性的亚稳态反应材料制成，具有稳定的物理、化学性能，在制造、加工、储藏、运输等方面都具有良好的安全性。近年来，有很多这方面的研究[1-6]，研究多以铝、钛等金属颗粒与聚四氟乙烯按一定比例混合后压制烧结而成的混合式反应破片为主[7]，其特点是结构简单，较容易实现。但破片撞击目标时的动能较低，侵彻效果不够理想，目前研究对象多以复合反应破片为主。复合反应破片由内核为含能材料、外层由重金属壳体包覆而成，含能材料通常为 Al/Ti 与 PTFE 的混合物，可以是柱形、球形、椭球形等，它对目标的侵彻毁伤能力比反应破片有较大的提高[8-12]。复合反应破片多以弹道枪发射，破片速度基本在 1 km/s 以下，极大限制了含能破片的工程应用。本文中，研究由含能材料制成的药型罩在炸药直接驱动作用下的成型及毁伤作用，试图为含能材料在武器装备战斗部的应用提供技术基础。

1 战斗部结构

图 1 为含能材料药型罩爆炸成型战斗部结构示意图，主要由壳体、含能材料药型罩、主装药、缓冲垫、整形装药组成。其中，含能材料药型罩是由铝、聚四氟乙烯及添加剂等按一定比例混合后压制烧结而成的具有一定曲率半径的药型罩。

主装药采用压装钝化黑索今，密度 1.7 cm/g^3，主装药长径比 0.65；整形装药采用压装钝化黑索今，密度 1.65 cm/g^3；壳体材料为 45 钢，厚度 0.07D（主装药口径 D=70 mm）；含能材料药型罩内外曲率半径相同，为 0.6D；缓冲垫与含能材料药型罩的曲率半径相同，放置于药型罩与主装药之间，降低炸药爆轰对药型罩的冲击。

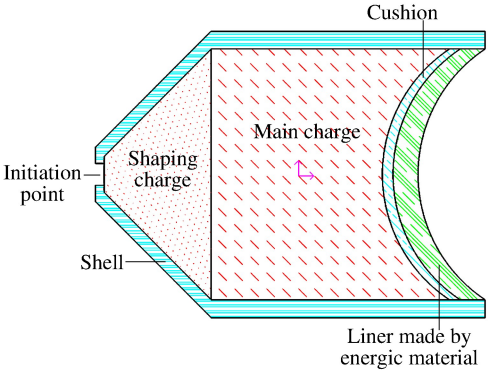


图 1 战斗部结构示意图

Fig. 1 Schematic of warhead

* **收稿日期**：2012-08-01；**修回日期**：2012-11-13
作者简介：万文乾（1980— ），男，博士，工程师。

2 实 验



图 2 实验件

Fig. 2 Experimental warhead

2.1 实验件

按照图 1 结构加工,实验件炸药总质量 385 g,含能材料药型罩质量 100 g,缓冲垫质量 30 g,实验件如图 2 所示。

2.2 靶 板

2.2.1 装甲钢

为了观测含能材料药型罩爆炸成型、侵彻效应及后效毁伤,设计了如图 3 所示的实验装置。目标靶板为装甲钢,尺寸为 500 mm×500 mm×20 mm;战斗部炸高 500 mm;支架高 350 mm,下部放置尺寸 1 000 mm×1000 mm×10 mm 的 A3 钢后效钢板。利用高速摄像拍摄整个过程。

2.2.2 钢锭

为了研究含能材料药型罩爆炸成型后的侵彻能力,选择了 45 钢锭,钢锭直径为 310 mm,厚度为 110 mm,如图 4 所示。

2.3 高速摄像

实验设置如图 5 所示,支架和战斗部放置于箱体内,装甲钢板固定在箱体的侧壁预留孔处,战斗部轴心和 20 mm 装甲钢板的中心在同一水平面上,后效钢板为 8 mm 厚 A3 钢板,放置于箱体外侧,距装甲钢板 1 200 mm。利用高速摄像拍摄装甲钢板与后效钢板间的区域,观测含能战斗部爆炸形成的含能弹丸在穿透装甲钢板后的反应扩散情况。



图 3 实验装置布置

Fig. 3 Layout of experimental device



图 4 钢锭

Fig. 4 Experimental steel ingot



图 5 高速摄像实验设置

Fig. 5 Setup for high-speed camera

3 结果与分析

3.1 爆炸成型过程

采用高速摄像方法对实验件的爆炸过程进行了拍摄,获得了爆炸后不同时刻的图片,如图 6 所示。

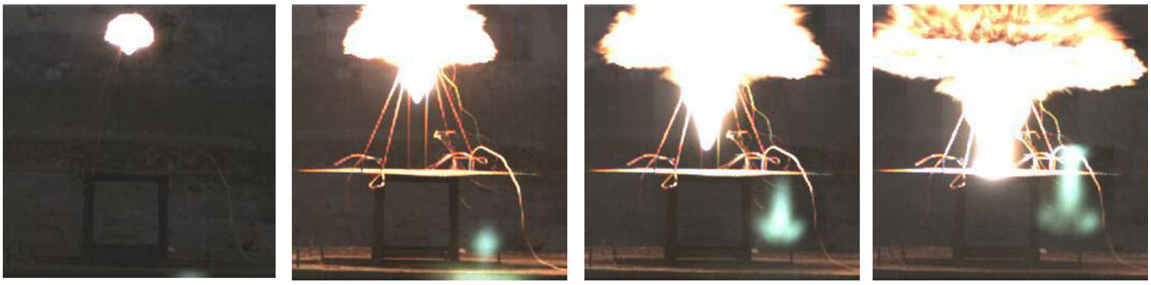


图 6 药型罩成型过程的实验结果

Fig. 6 Experimental results of liner forging process

高速摄像拍摄速度为 10 000 帧每秒。含能材料药型罩不同于金属药型罩，含能材料在爆轰波的压力下会发生反应。由图 6 中可以看出，虽然缓冲垫削弱了爆轰波对含能材料药型罩的冲击，但含能材料药型罩在成型过程中还是发生了反应。药型罩在爆炸作用下，获得 2 km/s 左右的速度。高速摄像中，由于含能药型罩反应发出的光，并不能直接看出含能材料药型罩爆炸成型的形状。但镜头中的虚光刚好把炸药爆炸及含能材料反应的光屏蔽掉，剩下弹丸的大致形状。从虚光中可以看出，含能材料制成的药型罩在爆炸作用下，能够形成弹丸。

利用 ANSYS/LSDYNA3D 软件对含能材料药型罩的爆炸成型过程进行数值模拟，图 7 为含能材料药型罩爆炸成型过程。

数值模拟结果表明，含能材料药型罩在爆炸作用下能够形成弹丸，弹丸长径比为约 3.6，速度为 2 188 m/s，这与高速摄像的结果一致。

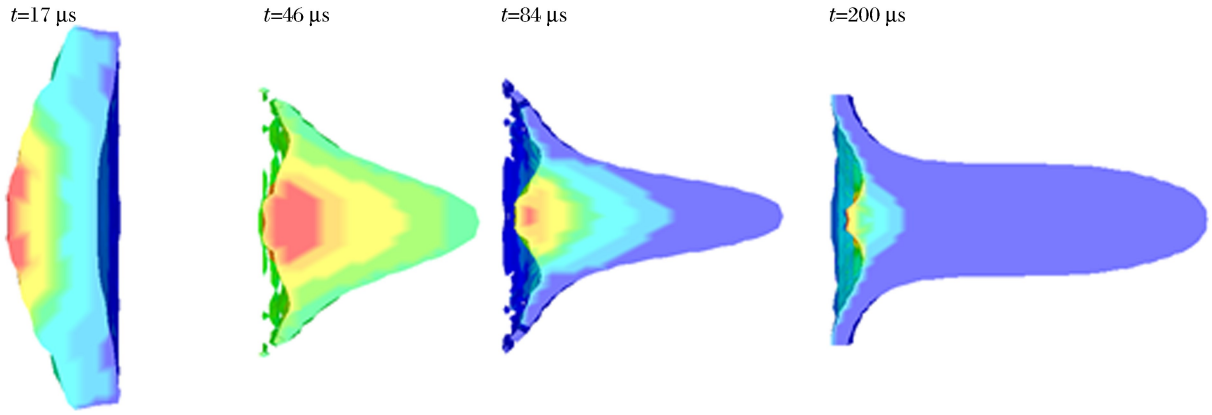


图 7　药型罩成型过程的数值模拟结果

Fig. 7　Numerical simulation results of liner forging process

图 8 为含能弹丸穿透的靶板及后效靶板的情况。穿孔直径为 0.5D，穿孔周围有烧蚀现象，表明含能材料反应时的温度较高，大于靶板的融化温度。后效靶板上没有出现冲击现象，表明含能弹丸在穿透靶板后加剧反应并生成大量的气体。后效靶只出现了积碳现象，为含能材料反应后的生成物。



图 8　靶板和后效板的破坏

Fig. 8　Damages of the target and aftereffect target

3.2　爆炸成型后的侵彻能力

图 9 为实验件对厚 110 mm 的 45 钢绽侵彻结果的正面和剖开后的截面图。结果表明，含能材料爆炸形成的弹丸具有较高的侵彻能力，穿深达到 1.1D，穿孔直径 0.5D。由截面图可以看出，钢锭上表面穿孔周围明显向上突起，表明对钢绽的侵彻穿深主要是含能弹丸动能的作用。同时，穿孔有明显的烧蚀现象，这是弹丸侵彻过程中化学反应的效果。

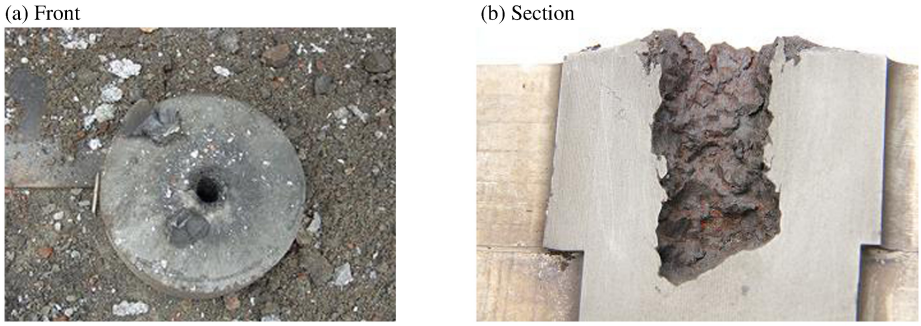


图 9 钢锭的破坏

Fig. 9 Damages of the steel ingot

比较图 8～9 可以看出，含能弹丸穿透 20 mm 装甲钢板需要消耗约 1/3 能量，约 2/3 能量能够进入目标内部。

3.3 靶后反应

高速拍摄速率为 10 000 帧每秒，典型时刻的图像如图 10 所示。

由图 10 可以看出，含能弹丸穿透装甲钢板后，发生了剧烈的化学反应，反应产物形成的光球以近似半球形扩散。取反应开始扩散照片的前 8 帧近似计算反应产物的扩散速度，如表 1 所示。表中，R 为光球半径，v 为扩散速度。



图 10 靶后反应的高速摄像照片

Fig. 10 Reaction photo after perforating target by high-speed camera

表 1 反应产物的扩散速度

Table 1 Pervading velocities of reaction products

帧序	R/mm	v/(m·s^{-1})	帧序	R/mm	v/(m·s^{-1})
1	110	—	5	677	910
2	297	1 870	6	765	880
3	454	1 570	7	828	630
4	586	1 320	8	885	570

由高速摄像图像，反应产物形成的火球最大直径 1 010 mm，产物的扩散开始最快，随着半径的不断增大，扩散的速度越来越小，扩散的平均速度为 1 100 m/s，火球持续时间为 28 ms。

4　结　论

通过对含能材料药型罩爆炸成型及毁伤作用的实验研究，得出以下结论。

(1)由含能材料制备成的药型罩，在爆炸作用下虽然发生了部分反应，主体仍旧能够形成弹丸，弹丸速度 2 km/s 左右。

(2)含能弹丸穿透 20 mm 厚的装甲钢靶后反应加剧，形成超压、高温、破片等多种杀伤元，反应后形成大量的气体，后效靶有反应后的残留物。

(3)含能弹丸侵彻是动能和化学反应的综合作用过程，穿孔有明显的烧蚀现象，穿孔口径 0.5D，最大穿深 1.1D。

(4)穿透 20 mm 装甲钢板后反应产物形成的火球最大直径 1 010 mm，产物的扩散开始最快，随着半径的不断增大，扩散的速度越来越小，扩散的平均速度为 1 100 m/s，火球持续时间为 28 ms。

参考文献：

[1] Douglas D. Reactive material enhanced warhead[C]// Peo Perspective of Manufacturing, Defense Manufacturing Conference. Las Vegas, 2001.

[2] 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 Heng-jian, Huang Hui, Yang Shi-qing, et al. Preliminary research on damage enhanced fragment[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007,15(6):566-569.

[3] Vasant S J, Waldorf M D. Process for making polytet-rafluoroethylene-aluminum composite and product made: USA 6547993B1[P]. 2003-04-15.

[4] 帅俊峰，蒋建伟，王树有. 准球形复合爆炸成型弹丸成型的数值模拟[J]. 中北大学学报：自然科学版，2008，29(1)：38-41.
Shuai Jun-feng, Jiang Jian-wei, Wang Shu-you. Numerical simulation of formation of quasi-spherical compound explosively formed projectile[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2008,29(1):38-41.

[5] Richard G A. A standardized evaluation technique for reactive warhead fragments[C]// Proceedings of the 23rd International Symposium Ballistics. Tarragona, Spain: International Ballistics Committee, 2007:16-20.

[6] Raftenberg M N, Mock W, Kirby G C. Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al compound mixture[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008(35):113-117.

[7] 门建兵，蒋建伟，帅俊锋，等. 复合反应破片爆炸成型与毁伤实验研究[J]. 北京理工大学学报，2010，30(10)：1143-1146.
Men Jian-bing, Jiang Jian-wei, Shuai Jun-feng, et al. Experimental research on formation and terminal effect of explosively formed compound reactive fragments[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010,30(10):1143-1146.

[8] 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(11)：30-34.
Sun Wen-xu, Li Shang-bin, Huang Heng-jian, et al. Impact of the protective materials on explosive driving reactive fragments[J]. Science & Technology Review, 2011,29(11):30-34.

[9] 帅俊锋，蒋建伟，王树友，等. 复合反应破片对钢靶侵彻的实验研究[J]. 含能材料，2009，17(6)：722-725.
Shuai Jun-feng, Jiang Jian-wei, Wang Shu-you, et al. Compound reactive fragment penetrating steel target[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(6):722-725.

[10] 谢长友，蒋建伟，帅俊峰，等. 复合式反应破片对柴油油箱的毁伤效应试验研究[J]. 高压物理学报，2009，23(6)：447-452.
Xie Chang-you, Jiang Jian-wei, Shuai Jun-feng, et al. Experimental study on the damage effect of compound reactive fragment penetrating diesel oil tank[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(6):447-452.

[11] 杨华楠，廖雪松，王绍慧，等. 含能破片技术与应用[J]. 四川兵工学报，2010，31(12)：4-7.

Yang Hua-nan, Liao Xue-song, Wang Shao-hui, et al. Technology and application of energetic fragments[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2010,31(12):4-7.

[12] 吴荣波,陈智刚,刘俊波,等.柱形含能破片对带壳炸药引爆能力的数值模拟[J].设计与研究,2011,38(9):8-11.
Wu Rong-bo, Chen Zhi-gang, Liu Jun-bo, et al. Numerical simulation of shelled explosive detonation ability by column energetic fragments[J]. Design and Research, 2011,38(9):8-11.

Formation and terminal effect of an explosively-formed penetrator made by energetic materials*

Wan Wen-qian, Yu Dao-qiang, Peng Fei, Wang Wei-ming, Yang Tian-hai
(*The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department, Wuxi* 214035, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: A hemispherical liner was designed and the cushion with the same curvature as the liner was placed between the liner and the explosive. And the forming process of an explosively-formed penetrator from the liner made by reactive material was recorded by using a high-speed camera. Experimental results show that the liner made by reactive materials can be forged into an energetic penetrator under explosive loading and the velocity of the energetic penetrator can be up to about 2 km/s. After perforating the armor steel target with the thickness of 20 mm, the energetic penetrator reacts acutely and produces a great deal of gas. The penetrating process of the energetic penetrator is maintained by kinetic energy and chemical reaction. Ablation can obviously be observed during perforation. The diameter of perforation is about 0.5 times as large as the diameter of charge and the penetrating depth is about 1.1 times as large as the diameter of charge.

Key words: mechanics of explosion; penetration; cushion; liner made by reactive materials; explosively forming

* Received 1 August 2012; Revised 13 November 2012
Corresponding author: Yu Dao-qiang, yudaoqiang@sina.com

(责任编辑 丁 峰)