DOI: 10.11883/bzycj-2016-0376 文章编号: 1001-1455(2018)04-0869-07

一种低附带弹药金属颗粒定向加载技术*

李俊承[1],樊壮卿[2],梁 斌[1],康建毅[2],高海鹰[1],陈 菁[2],卢永刚[1]
(1.中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999;
2.第三军医大学野战外科研究所,重庆 400042))

摘要: 为了实现低附带弹药金属颗粒定向可控加载,研制了采用爆轰方式驱动低附带弹药金属颗粒的发射装置,并进行了不同尺寸钨球颗粒与不同装药比的发射实验。运用高速摄影与高速红外摄影捕捉爆轰驱动过程中颗粒抛撒分布和速度,并采用 CT 断层扫描和三维图像重建再现了颗粒在肥皂靶中的三维空间分布。实验结果揭示了爆轰驱动下颗粒加速、减速和散落 3 个阶段的特征。钨球颗粒速度均值范围为 689.84～889.14 m/s,最大侵彻深度为 65.23～167.35 mm,颗粒加载上靶率在 30%以上。发射装置中金属颗粒/装药质量比可调,能重复使用。采用肥皂靶、高速摄影、高速红外相结合的测试方法有效可行,CT 图像重建用于终点弹道参数判读能提高结果分析精度。以上结果可为研究低附带弹药对生物目标的毁伤效应、致伤机理和生物损伤判定与救治提供有效可行的技术与方法。

关键词: 低附带;金属颗粒;定向加载;发射装置
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

现代战争格局下,局部冲突、城镇战斗、反恐维稳往往发生在地形复杂、平民和设施密集的场所,这就需要在准确击中目标的同时,还要将附带毁伤控制在一定范围内。传统杀爆弹药爆炸后会产生大量金属破片,破片的方向和距离无法控制,容易对目标周围其他人员造成较大的附带毁伤,难以达成作战目标。低附带弹药就是在这种背景下逐步发展的一种精确打击武器。低附带弹药以惰性重金属颗粒与炸药混合装填,以碳纤维等轻质复合材料作为壳体。惰性重金属粉末降低了装药的装填比,减弱了爆炸冲击波的威力;碳纤维等轻质壳体在爆轰波作用下破碎并充分燃烧,不产生致命性杀伤破片;惰性重金属颗粒在近距离范围内具有较大的动能,但颗粒细、质量小,并且其速度在空气中以指数形式衰减;这些因素使低附带弹药在小范围内有较强的杀伤作用,而不会造成大范围的附带杀伤[1-2]。另外,对低附带弹药的主要打击对象有生目标而言,大量密集分布的金属颗粒产生的毁伤效应和致伤机理有别于传统爆炸性武器,对损伤判定与救治也提出了新的要求,因此,需要建立一种能够模拟不同威力效果的低附带弹药金属颗粒加载方法进行相关研究。

文献[2-8]中低附带弹药颗粒抛撒实验主要采用柱形装药外围装填钨球颗粒。起爆后,金属颗粒向四周高速飞散。这种静爆方式装药量较大,金属粉末方向不可控、重复性欠佳,且弹药成本较高,难以满足系统地进行生物实验研究的需要。有鉴于此,本文中设计一种小药量爆炸定向抛撒金属粉末群的装置,并进行不同尺寸钨球颗粒与不同装药比条件的实验研究。通过调整装药量控制颗粒抛撒速度,定向抛撒高速的重金属粉末颗粒,以期便于快速重复实验和威力参数测试,满足低附带弹药的生物毁伤效应、致伤机理、损伤判定与救治研究的需要。

1 发射装置设计

根据霰弹枪发射金属颗粒的原理,将小圆柱型药柱放置在一端封闭的柱形管内,金属颗粒放置在开口端;装药起爆后,颗粒群在爆轰产物驱动下高速飞散出来。发射装置的结构如图 1 所示,主要包括 4

* **收稿日期**: 2016-12-13; **修回日期**: 2017-03-22
基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金项目(U1330139)
第一作者: 李俊承(1984—),男,博士研究生,工程师; **通信作者**: 卢永刚,lygcaep@263.net。

部分:底座、发射身管、端盖、内衬套。底座用于放置发射身管,两边有固定螺栓,起支撑与固定作用;发射身管开口处为 90°广角开口,内部为腔状药室,放置内衬套和装药,金属颗粒和装药质量可根据实验需要进行调整;端盖起封闭药室的作用,通过 3 个固定螺栓与发射身管连接固定,端盖中心开有导线孔,引出起爆线;内衬套可取出更换,内部放置炸药,在爆轰过程中可预防发射身管变形。

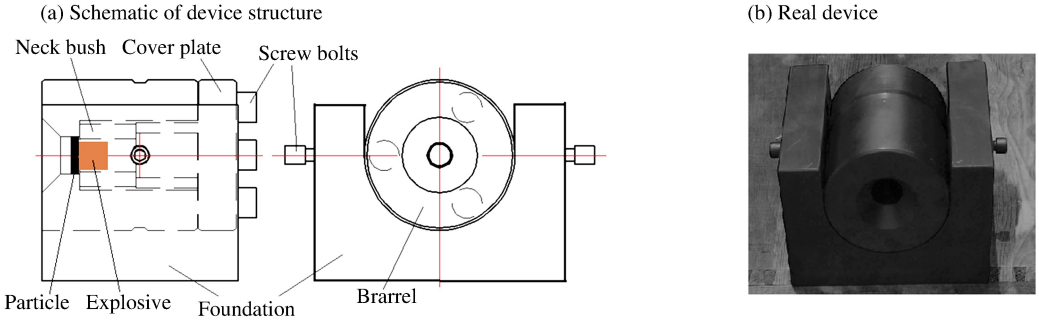


图 1 发射装置结构示意图

Fig. 1 Launching device

2 加载实验

2.1 实验设计

共进行 10 发实验,具体工况见表 1,其中 d 为粒径,m_0 为金属颗粒总质量,ρ 为药柱密度,m 为药柱质量,L 为发射端口与靶标之间的距离。实验过程中采用的金属颗粒为球形钨合金颗粒,按直径可分为 5 种(50～1 500 μm);对同一直径的颗粒,分别采用单倍(6.8 g)、双倍质量(13.6 g)的药柱加载,药柱为 95%成分的黑索金;靶标采用弹道实验专用肥皂,其迎弹面为边长 $2a=32$ cm 的正方形。

表 1 实验工况

Table 1 Tungsten particles used in experiments

编号	颗粒状材料	d/μm	m_0/g	ρ/(g·cm^{-3})	m/g	L/cm
1	球形钨合金	50	6.8	1.7	6.8	40
2	球形钨合金	200	6.8	1.7	6.8	40
3	球形钨合金	500	6.8	1.7	6.8	40
4	球形钨合金	1 000	6.8	1.7	6.8	40
5	球形钨合金	1 500	6.8	1.7	6.8	40
6	球形钨合金	50	6.8	1.7	13.6	40
7	球形钨合金	200	6.8	1.7	13.6	40
8	球形钨合金	500	6.8	1.7	13.6	40
9	球形钨合金	1 000	6.8	1.7	13.6	40
10	球形钨合金	1 500	6.8	1.7	13.6	40

2.2 现场布置

实验现场布置如图 2 所示。肥皂的密度与肌体组织相当,具有对温度钝感、瞬时毁伤形貌保留完全的特性,颗粒穿入后能够有效固定侵彻孔径、深度以及颗粒分布,便于弹道参数测量。高速摄影仪用于获取颗粒速度;高速红外摄影仪用于获取发射体抛撒颗粒瞬间的温度场以及颗粒抛撒姿态,温度设定范围为 50～1 000 ℃;背景布以及标尺作为颗粒飞散的轴向参考。

2.3 实验数据处理

实验后肥皂靶统一编号回收,利用 CT 扫描对毁伤元加载后的靶标进行连续断层扫描,获取颗粒在肥皂靶不同深度平面分布的二维图像。将二维灰度图像导入医学图像软件 Mimics 进行三维重建,获

得颗粒群在肥皂靶中空间分布的三维图像，对颗粒穿孔大小、侵彻深度、数量、颗粒分布等参数进行量化统计分析。

高速摄影采集数据采用配套 Phantom 软件进行后处理，根据实验中预设的标尺，利用图形追踪功能计算颗粒速度。高速红外数据采用仪器配套 Altair 软件进行后处理，该软件具有图形剪切、温度识别、图形追踪、距离测定、区域温度分析等功能。

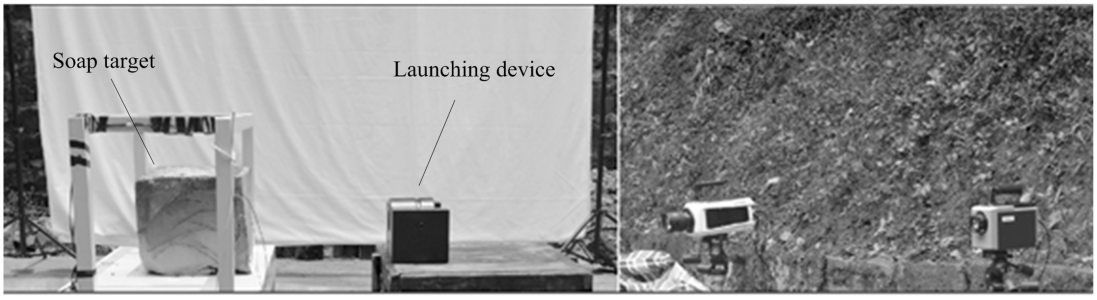


图 2　现场布置

Fig. 2　Layout of experiment

3　结果分析及讨论

3.1　爆炸驱动颗粒过程

爆炸驱动颗粒过程中的高速红外摄像和高速摄影图像分别如图 3 和图 4 所示，图像均来自第 3 发实验（见表 1）。红外摄像拍摄帧频为 115 s^{-1}，分辨率为 640×512；高速摄影拍摄帧频为 10 000 s^{-1}，分辨率为 800×600。

由图 3 可知，整个爆轰驱动过程可分为 3 个阶段：第 1 阶段（t<26 ms，），起爆后装置前端爆轰产物与部分颗粒同时喷出，颗粒在爆轰产物作用下处于加速状态；第 2 阶段（26 ms<t<70 ms），颗粒与爆轰产物一起飞散一定距离后相互分离，颗粒在空气介质中开始减速飞行；第 3 阶段（70 ms<t<200 ms），爆轰产物逐渐消失，颗粒持续减速最终散落。在爆轰驱动过程中，颗粒团在高温高压的驱动作用下温度明显增高，红外图像分析显示爆轰产物表面最高温度到达 443 ℃；爆轰产物消散后，颗粒仍有近 90 ℃。此过程与低附带模拟弹静爆时爆轰过程基本一致。

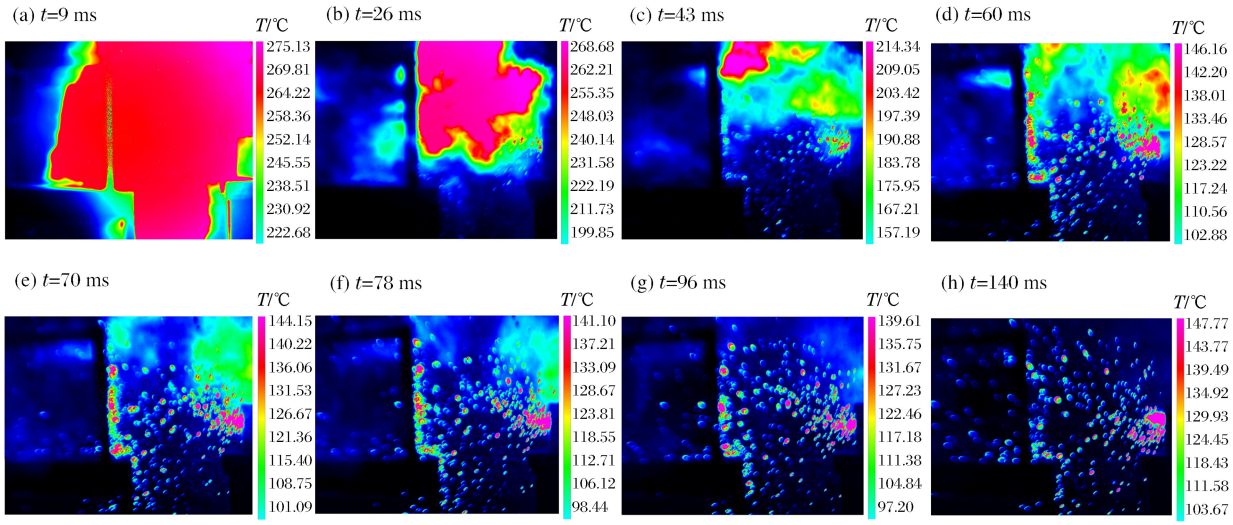


图 3　爆轰驱动的高速红外图像

Fig. 3　High speed infrared images of detonation-driven particles

图 4 为高速摄影过程。通过高速摄影视频慢放可以看出：当 $t=0.1$ ms 时，爆轰产物前端出现冲击波；$t=0.2$、0.3 ms 时，爆轰产物与颗粒混合飞散，此时颗粒与爆轰产物尚没有完全分离；$t=0.5$ ms 时，部分颗粒已经与爆轰产物分离，进入空气中开始减速阶段；此后，爆轰产物持续飞散膨胀直至消失，颗粒在空气中不断减速飞散。



图 4 爆轰驱动过程的高速摄影

Fig. 4 High speed photos of detonation-driven particles

3.2 发射定向性与颗粒速度分析

发射装置开口端呈角度为 90°的“喇叭口”形状，颗粒随爆轰产物高速从身管中飞出端口时，由于开口处身管变宽，压力突然降低，部分颗粒随爆轰产物沿“喇叭口”高速飞散，因此颗粒向上、下飞散角在 90°以内，大量颗粒集中向身管轴向方向飞散，如图 3(d)～(f)所示。通过对回收靶进行影像分析获得了钨球颗粒的散布情况，如图 5 所示。

图 5(a)为颗粒加载后肥皂靶形貌；图 5(b)为肥皂靶迎弹面 CT 扫描图像，其中绿色亮点为钨球颗粒；图 5(c)为肥皂靶加载钨球颗粒后的三维重建图像；图 5(d)为肥皂靶迎弹面方向所见的全部钨球颗粒。由图 5 可知，颗粒在靶标内迎弹面上分布均匀，在靶体内密集度高、数量大。

以第 3 发实验为例，对肥皂靶的 CT 图像进行像素识别和统计得到，颗粒实际上靶数量约为 2 000。根据表 1 中钨球颗粒参数计算可得，钨球颗粒总数约 6 300，即颗粒上靶率约为 31.7%。

作为比较，采用柱形装药周围装填钨球颗粒，并在相同距离上放置肥皂靶，如图 6 所示。爆炸后颗粒向周向均匀飞散，颗粒上靶率 P_{target} 可以表示为：

$$P_{\mathrm{target}}=\frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{a}{L}\right)\times 100\% \tag{1}$$

取 $L=40$ cm，$2a=32$ cm 代入式(1)求得 $P=12.1\%$，远小于定向装置的爆轰驱动上靶率。

通过对高速摄影数据得到了不同直径颗粒的平均速度分布曲线，如图 7 所示。可以看出，钨球颗粒的平均速度随炸药/钨球质量比增大而升高，相同装药比时，大尺寸颗粒在空气场中的平均速度更大。

对比图 3 和图 4 两组爆轰过程的时间历程图像，颗粒在飞散过程中有明显的速度梯度。通过高速摄影对颗粒追踪得出，颗粒群前端边界速度为 1 km/s 左右。随着爆轰产物消失，之后有少量高温颗粒持续飞散，通过高速红外对后段颗粒追踪分析，发现颗粒速度未超过 100 m/s。因此，前端高速颗粒对目标侵彻起主要作用。

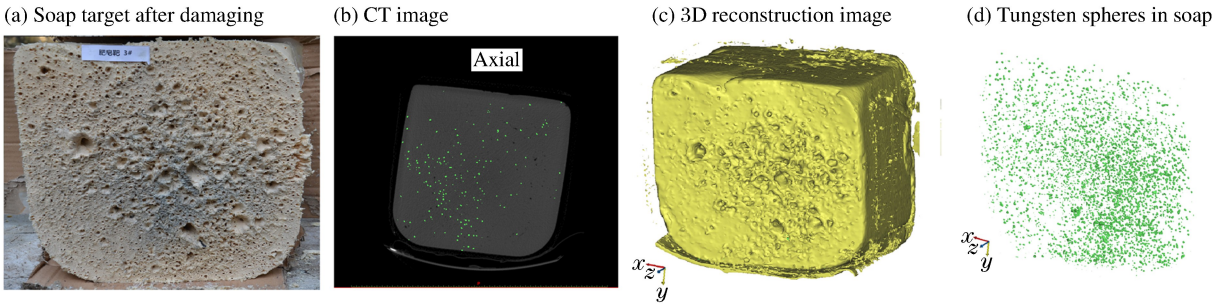


图 5　回收靶影像分析得到的钨球颗粒散布情况

Fig. 5　Distribution of tungsten particles obtained by the analyses of soap target image

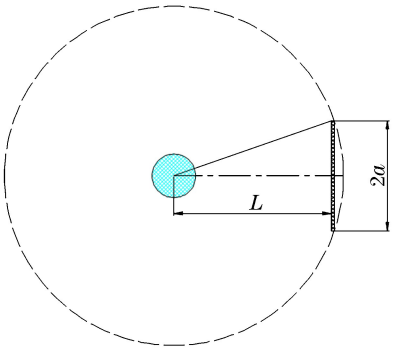


图 6　柱形装药驱动下的颗粒周向飞散

Fig. 6　Illustration of particles' circuital flying driven by cylindrical charge

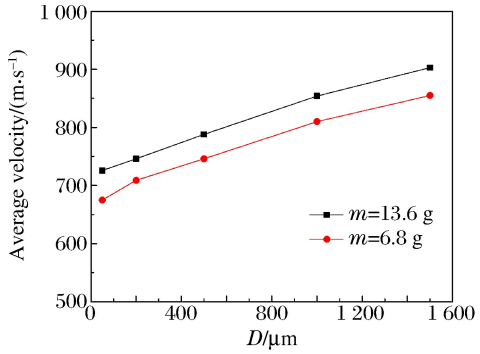


图 7　不同装药量下颗粒平均速度随直径的变化曲线

Fig. 7　Average velocities of particles versus diameter with different charge ratios

3.3　颗粒对靶标侵彻分析

图 8 给出了表 1 中所有工况下肥皂靶的 CT 扫描图像。在 Mimics 软件中对 CT 扫描图像进行剖切测量，得到不同直径与装药量条件下颗粒对肥皂靶侵彻深度的统计结果，如表 2 所示，其中 h 为侵彻深度，P 为特定侵彻深度区间内颗粒数与总颗粒数之比，$h_{\max}$ 为最大侵彻深度。

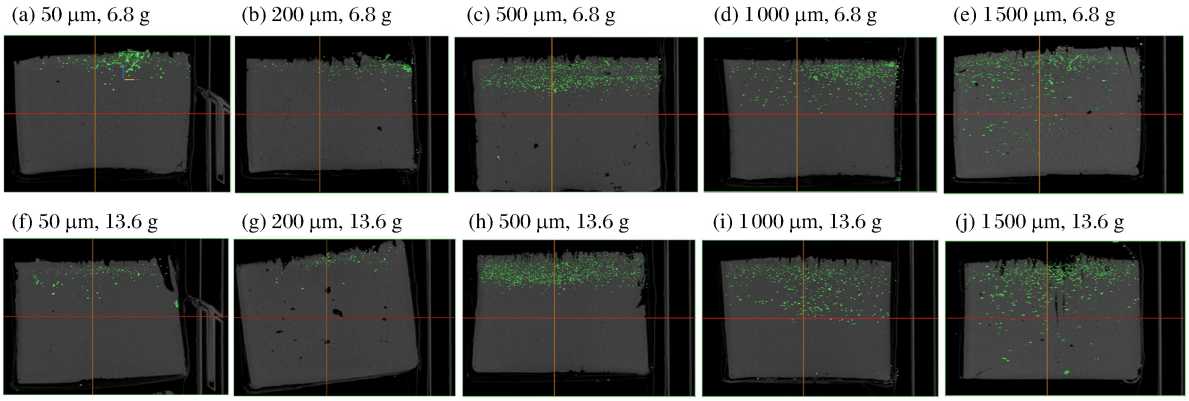


图 8　各组肥皂靶 CT 扫描图像

Fig. 8　CT images of soap targets

通过肥皂靶现场照片与三维重建模型对比，三维重建模型还原了肥皂靶的毁伤形态。对三维模型进行不同方向剖切、测量、统计，发现爆轰驱动颗粒群对肥皂靶进行毁伤具有以下特点：(1)同一靶标中钨球颗粒侵彻深度分散范围大，颗粒直径越大，颗粒侵深分布范围越广；(2)装药量相同时，较大尺寸颗粒穿透深度更大；颗粒尺寸相同时，装药量越大，颗粒穿透深度越大；(3)小颗粒烧结现象明显，随着颗粒直径增大，颗粒分布均匀性更好；(4)由于颗粒密集度高，肥皂靶出现了大面积的侵彻空腔融合。

表 2 不同直径颗粒打击肥皂靶的弹道参数统计

Table 2 Ballistic parameters of the soap target penetrated by particles with different diameters

D/μm	颗粒侵彻深度分布(m=6.8 g)		h_{max}/mm	D/μm	颗粒侵彻深度分布(m=13.6 g)		h_{max}/mm
	h/mm	P/%			h/mm	P/%	
50	≤13.82	12.98	65.23	50	≤14.56	10.93	102.72
	13.82～25.26	58.56			14.56～31.70	48.77	
	≥25.26	28.46			≥31.70	40.30	
200	≤18.24	19.37	70.26	200	≤16.85	15.96	118.46
	18.24～52.62	67.17			16.85～46.55	43.62	
	≥52.62	13.46			≥46.55	40.42	
500	≤10.00	6.36	76.52	500	≤38.67	22.92	124.63
	10.00～43.00	50.63			38.67～55.88	54.99	
	≥43.00	43.01			≥55.88	22.09	
1 000	≤21.75	21.04	110.58	1 000	≤24.00	11.42	130.98
	21.75～87.00	66.15			24.00～50.50	47.85	
	≥87.00	12.81			≥50.50	40.73	
1 500	≤26.18	18.16	115.00	1 500	≤25.72	13.17	167.35
	26.18～65.37	39.71			25.72～52.30	39.82	
	≥65.37	42.13			≥52.30	47.01	

4 结 论

(1)设计的实验装置具有装药量小、单次实验时间短、金属颗粒/装药质量配比可调、可重复使用的优点，实现了爆轰驱动金属颗粒群的定向可控抛撒，颗粒上靶率达到 30%以上，高于常规爆轰方式。

(2)采用高速摄影仪与高速红外摄影仪进行爆轰驱动颗粒抛撒姿态捕捉和颗粒群速度测试的方法可行；CT 扫描和三维图像重建不仅可直观显示颗粒在靶标中的三维分布及靶标毁伤形貌，而且有利于提高终点弹道参数实验结果的分析精度。

(3)相同装药配比条件下，大尺寸颗粒具有更高的动能和侵深，小尺寸颗粒则容易出现烧结现象；颗粒尺寸相同时，增加装药量可明显提高颗粒速度与侵深。

以上结论能够为研究低附带弹药的生物毁伤效应、致伤机理、损伤判定与救治提供可行的技术手段与方法。

参考文献：

[1] 刘俊，姚文进，郑宇，等. 低附带毁伤弹药的炸药/钨粉质量比对钨粉抛撒特性的影响[J]. 含能材料，2015，23(3)：258-264.
LIU Jun，YAO Wenjin，ZHANG Yu，et al. Effect of explosive/tugsten powder mass ratio for LCD ammunition on dispersal characteristics of tungsten powder[J]. Chinese Journal of Energetic Materials，2015，23(3)：258-264.

[2] 蒋海燕，王树山，魏继锋，等. 爆炸驱动固/液介质爆炸抛撒的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2014，34(5)：574-579.
JIANG Haiyan，WANG Shushan，WEI Jifeng，et al. Explosive dispersal of solid and liquid media：experimental

investigation[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(5):574-579.

[3] 郑波，陈力，丁雁生，等. 温压炸药爆炸抛撒的运动规律[J]. 爆炸与冲击，2008，28(5)：433-437.
ZHENG Bo, CHEN Li, DING Yansheng, et al. Dispersal process of explosion production of thermobaric explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(5):433-437.

[4] 陈亚红，白春华，李建平，等. 装药比对中心炸药抛撒钨颗粒群影响的实验研究[J]. 实验力学，2010，25(6)：661-666.
CHEN Yahong, BAI Chunhua, LI Jianping, et al. Experimenal study of tungsten particles explosion dispersal with different charge ratios[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010,25(6):661-666.

[5] 郭学永，惠君明，解立峰. 燃料爆炸抛撒过程的实验研究[J]. 高压物理学报，2005，19(2)：120-126.
GUO Xueyong, HUI Junming, XIE Lifeng. Experimental study on the process of fuel explosion dispersion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(2):120-126.

[6] 白春华，陈亚红，李建平，等. 爆炸抛撒金属颗粒群的装药方式[J]. 爆炸与冲击，2010，30(6)：652-657.
BAI Chunhua, CHEN Yahong, LI Jianping, et al. Charge forms for explosion dispersal of metal particles[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):652-657.

[7] 陈亚红，白春华，刘意，等. 爆炸抛撒颗粒群动能特性的评价[J]. 火炸药学报，2011，34(4)：45-48.
CHEN Yahong, BAI Chunhua, LIU Yi, et al. Assessment on kinetic characteristics of granular swarm dispersed by explosion[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2011,34(4):45-48.

[8] LIU G, HOU F, CAO B, et al. Experimental study of fuel-air explosive[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2008,44(2):213-217.

Experimental study on directed loading metal particles of low collateral damage ammunition

LI Juncheng[1], FAN Zhuangqing[2], LIANG Bin[1], KANG Jianyi[2],
GAO Haiying[1], CHEN Jing[2], LU Yonggang[1]

(1. *Institute of Systems of Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *Institute of Surgery, Third Military Medical University, Chongqing* 400042, *China*)

Abstract: In this work, to realize explosive directed loading metal particles of low collateral damage ammunition, we developed a launching device and used it to carry out the dispersing of tungsten particles of different sizes and charging ratios. We captured the dispersion attitude and velocity of tungsten particles using high speed photography and high speed infrared photography, and demonstrated the three dimensional spatial distribution of tungsten particles inside the soap target using computerized tomography and three dimensional reconstruction. The results revealed the three phases of detonation-driven particles, i.e. acceleration, deceleration, and scattering. For particles of different sizes, the average velocity ranged from 689.84 m/s to 889.14 m/s, and the maximum penetrating depth ranged from 65.23 mm to 167.35 mm. The launching device was observed to perform well at directed loading metal particles with a rate of over 30% in hitting the target. We adjusted the mass ratio of the charge to the particles to meet various experimental requirements and improved the analysis accuracy of terminal ballistics parameters using the CT image reconstruction technique. Our study here can serve as a useful technique for further investigation of the damage effects, wounding mechanism, injury evaluation and treatment of low collateral damage ammunition.

Keywords: low collateral damage ammunition; metal particle; directed loading; launching device

(责任编辑　王玉锋)