DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0339-08

RDX/HMX 颗粒炸药落锤撞击点火-燃烧机理*

吴艳青[1],鲍小伟[1],王明扬[1],黄风雷[1],张 柱[2]
(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.太原科技大学应用科学学院,山西 太原 030024)

摘要:对单质炸药受低速撞击的力学和化学响应研究,是进行炸药敏感性评价的基础。利用配备了光学观测的落锤撞击装置,实现了频率为 1.5×10^5 s^{-1} 的实时观测,不但可以区分样品的"爆"或"不爆",而且可以获取 RDX 和 HMX 颗粒炸药受落锤低速撞击变形、破碎、溅射、点火和燃烧随时间演化的特征。结果表明:RDX 颗粒是在液相中点火,而 HMX 颗粒在固相中点火;燃烧反应前常常发生剧烈的溅射现象,溅射是由气相反应产物释放能量推动破碎的颗粒所致。对比了单个和单层颗粒炸药响应的特点,多个颗粒由于热点密集和破碎后相互作用,其燃烧反应比单个颗粒燃烧反应更剧烈。根据图像处理估算燃烧波传播速度,很好地表征了样品宏观燃烧反应的剧烈程度。

关键词:燃烧;落锤撞击;RDX/HMX;颗粒炸药;点火;高速摄影
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

黑索今(RDX)和奥克托今(HMX)是性能良好的高能单质猛炸药,随着这两种单质炸药为主体的 PBX 复合炸药的广泛应用,对 RDX 和 HMX 使用的安全可靠性也提出了更高的要求。撞击感度是炸药非常重要的安全性能指标之一,工程上常用落锤实验中样品发生爆炸概率为 50%的下落高度(H50)来评价炸药撞击感度的高低[1-2]。然而,由于设备之间的差异以及实验者用来判定样品"爆"与"不爆"的人为误差,即使落锤实验中感度相同的两种炸药,在低速撞击作用下的变形、破碎、点火和燃烧反应的剧烈程度也不相同[3-4]。为了定量准确地评定炸药在低速撞击下的敏感性,需要对炸药在低速撞击下的热点形成、点火、燃烧的力化学响应过程进行观测研究。

目前已有许多学者通过改造落锤实验装置来研究炸药在低速撞击下的点火-燃烧机理,其中最著名的是 G. M. Swallowe 等对落锤仪进行的改进[5-6]。S. N. Heaven 等[7]、J. E. Field 等[8-9]利用改进后的落锤仪对几种炸药在低速撞击下的变形-点火-燃烧特性进行了对比;L. E. Balzer 等[10]用高速摄影仪记录了 PETN 和超细 PETN 的落锤撞击响应过程,认为气泡的压缩是引起 PETN 点火的因素;S. Hamdan 等[11]利用改造的落锤仪获得了炸药受撞击过程中力的时间历程曲线等。但以上研究均没有在评价敏感性方面给出定量化指标,也没有在炸药燃烧反应剧烈程度上进行区分。

本文中,将立式落锤仪的下落部分和基底部分进行机械改造,加入完整的光路,利用高速摄影仪拍摄 HMX 和 RDX 颗粒炸药受低速撞击的整个响应过程。通过处理实时拍摄的图像,对两种颗粒炸药撞击起爆过程中的点火和燃烧进行对比,分别研究单个和单层 RDX、HMX 颗粒炸药的响应特点,利用图像处理估算燃烧波的传播速度,获取表征颗粒炸药燃烧反应剧烈程度的特征量。

1 实验研究

1.1 RDX 和 HMX 颗粒的显微观测

利用聚焦离子束扫描电子显微镜对实验所用的 RDX 和 HMX 炸药颗粒进行观测。图 1 为扫描电

* **收稿日期**:2015-09-10;**修回日期**:2016-01-21
基金项目:国家自然科学基金项目(11572045);国防基础科研计划项目(B1520132004);
山西省青年科学研究基金项目(2015021021)
第一作者:吴艳青(1974—),女,博士,教授,博士生导师,wuyqing@bit.edu.cn。

子显微镜下两种样品的低倍和高倍形貌图，RDX 颗粒和 HMX 颗粒的外观形貌特征有很大差别。其中 RDX 颗粒样品粒径为 600～1 200 μm，呈椭球形，表面相对平整、光滑，无尖角；HMX 颗粒样品粒径为 300～500 μm，呈不规则多面体形，表面棱角分明、相对粗糙，有“凸台”结构存在。

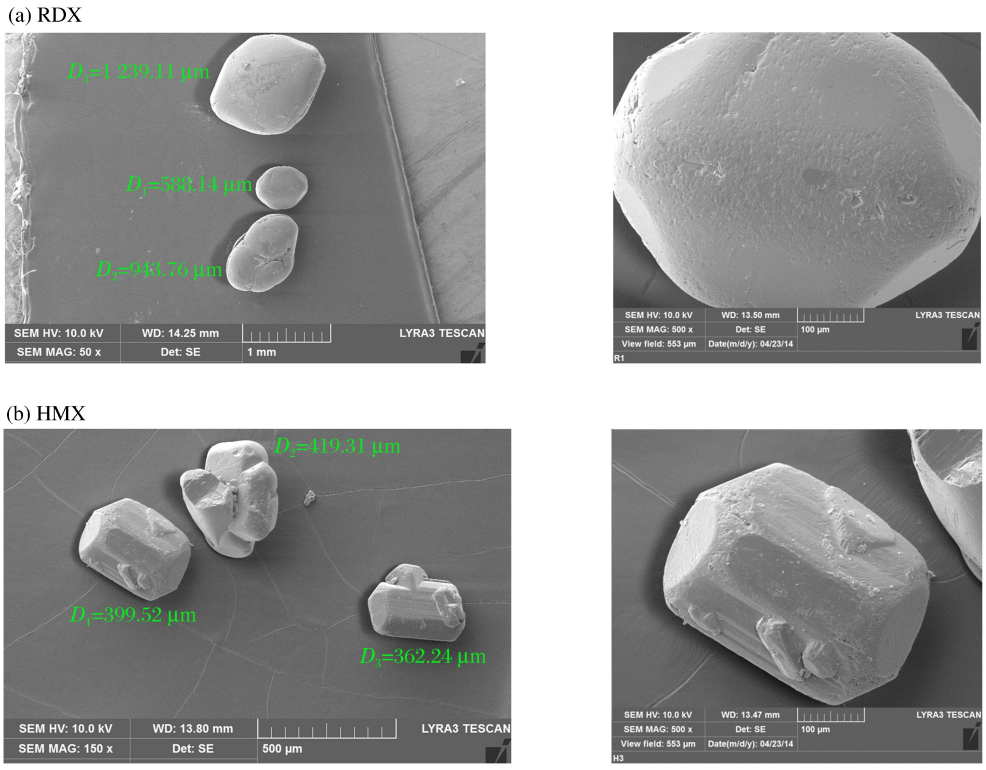


图 1 扫描电镜观测的不同放大倍数下的 RDX 和 HMX 颗粒样品

Fig. 1 Microscopic morphologies of RDX and HMX particles observed by scanning electron microscopy

1.2 落锤撞击加载装置

基于落锤仪整体尺寸和落锤撞击部分的功能，重新设计并改造了撞击装置，可以通过光路对撞击过程进行实时观测，落锤加载装置及光路观测部分示意图如图 2 所示。

在落锤侧面加工 40 mm×40 mm 的方孔，方孔中用金属支架以 45°角固定平面镜。转而向内开∅25 mm的圆孔至锤体中部，形成一个 L 型孔，与落锤端口的∅50 mm 的圆柱槽连通，圆柱槽用于嵌入∅50 mm×20 mm 的钢化玻璃。钢化玻璃的质量约 102.4 g，对其上、下两表面进行抛光处理，以保证透光性。钢化玻璃牌号为 Al-Si88412/ No. 0018/ BMA. T. BBK. G。

钢化玻璃与落锤之间放置起缓冲作用的铜垫圈，使钢化玻璃能够承受较大冲

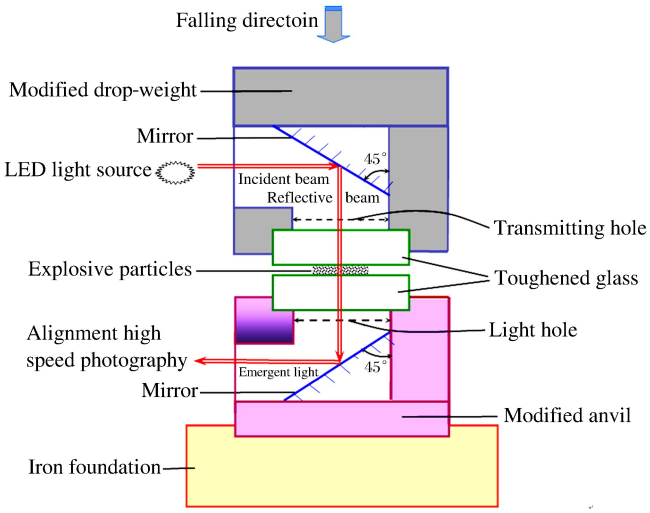


图 2 落锤加载装置及光路观测示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing the drop-weight loading and optical measurement system

击力而不易损坏。落锤背面有防二次撞击装置，落锤第一次撞击试样弹起后装置触发，将落锤挂在与导轨连接的刻槽上，防止落锤再次下落对试样二次加载。改造后的落锤总质量为 5.62 kg。

圆柱型下击柱尺寸为∅70 mm×100 mm，内部开孔方式和上落锤相同，击柱下方的底座上开了圆槽，将击柱固定在钢基座上。落锤加载过程中，为保证钢化玻璃击柱间的平面碰撞，在撞击装置外添加侧向开口的导向套筒，尺寸为∅93 mm×340 mm，厚度为 9.3 mm。碰撞瞬间光线经过平面镜反射，依次透过钢化玻璃上击柱、试样、钢化玻璃下击柱，反射后进入微焦距高速数字成像系统，记录试样受落锤撞击过程中的响应过程。

2　点火-燃烧现象

2.1　图像处理标定

为获得统一的长度标尺基准，未加载时先将半透明的刻度尺放置在钢化玻璃击柱上，以 1.5×10^5 s^{-1} 的拍摄频率为例，将标尺图像以一定比例尺插入 AUTOCAD，在软件中图像尺寸为 30 mm×16.88 mm，如图 3 所示。在刻度尺的照片上选取 10 mm 的 3 条平行线段，测量它们在软件中的长度，即 20.28、20.35、20.35 mm，取平均值为 20.33 mm，代表实际中的 10 mm。则实际与图像尺寸比例尺为：

$$\alpha=\frac{10\ \text{mm}}{20.33\ \text{mm}}=0.492 \tag{1}$$

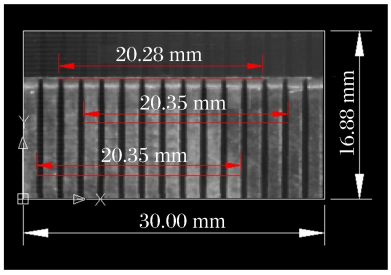


图 3　比例尺基准标定

Fig. 3　Scale calibration for calculating real size

2.2　RDX 颗粒的点火-燃烧实验

图 4 为粒径 620 μm 的单个 RDX 颗粒在 15 cm 落高下撞击响应的图像，高速摄影仪拍摄频率为 1.5×10^5 s^{-1}。整个响应持续 886.67 μs，可清晰观测到 RDX 颗粒经历了破碎、塑性扩展、中心熔化、局部喷射、点火并快速燃烧等现象。在 286.67 μs 时，颗粒塑性变形结束，并在中心区域出现熔化现象，透光性增强。随后，在 306.67 和 400.00 μs 时，破碎后的样品分别出现了向右上方和左下方的局部喷射现象。在 553.33 μs 时，试样大范围向四周喷射；在 560.00 μs 时，出现局部点火（红线标记）；到 566.67 μs时，该热点引发了局部燃烧。

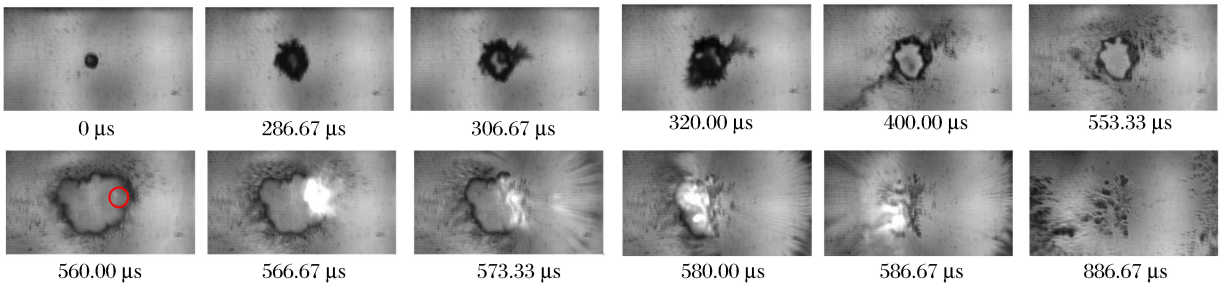


图 4　单个 RDX 颗粒受撞击的响应过程，落锤下落高度为 15 cm

Fig. 4　Selected photographic frames for an individual RDX particle in response to a drop-weight impact with 15 cm height

燃烧面积的测量通过统计像素点的方法来实现。实验中以 1.5×10^5 s^{-1} 的拍摄速度所得的图像分辨率为 256×144，即整幅图片中共含有 256×144＝36 864 个像素点。将 560.00 和 566.67 μs 时的图像在 Photoshop 中打开，如图 5 所示，统计出燃烧区域中所包含的像素点为 1 273。计算出燃烧区域的面积和等效圆半径分别为：

$$S_1=S_0\times\frac{1\ 273}{36\ 864}=(0.492\times30.00\ \text{mm})\times(0.492\times16.88\ \text{mm})\times\frac{3\ 714}{36\ 864}=4.23\ \text{mm}^2$$

$$R_1 = \sqrt{S_1/\pi} = 1.16 \text{ mm} \tag{2}$$

则得 560.00 μs 到 566.67 μs 时间段内试样的平均燃烧速度为：

$$\overline{V} = \frac{R_1}{\Delta t} = \frac{1.16 \text{ mm}}{6.67 \text{ μs}} = 173.9 \text{ m/s} \tag{3}$$

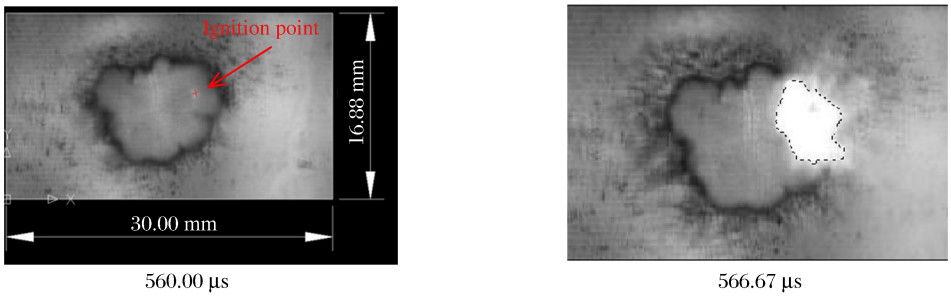


图 5 两个时刻燃烧区面积的变化

Fig. 5 Burning area change from 560.00 μs to 566.67 μs

将紧密排列的 10 个 RDX 颗粒进行落锤撞击实验，落锤下落高度为 15 cm，如图 6 所示。加载过程持续 1 060.00 μs，试样经历了破碎扩展、中心熔化、溅射、点火、快速燃烧、冷却。280.00 μs 时试样破碎变形阶段结束，随后出现向四周剧烈喷射的现象。993.33 μs 时两处发生局部点火，并迅速发展成剧烈燃烧，1 000.00 μs 时各点火处的燃烧迅速连通。燃烧在 20 μs 的时间内迅速扩展至整个试样，只有少量残余试样冷却堆积。与图 4 相似，图 6 中 453.33 μs 到 993.33 μs 均出现样品中心区由于液相导致发亮的现象。

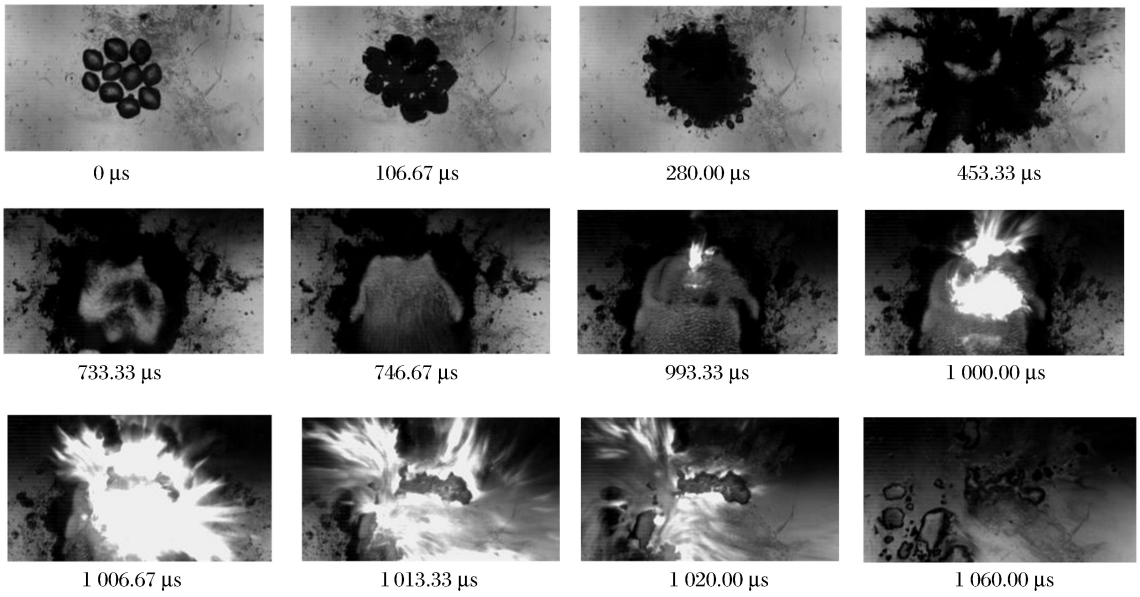


图 6 单层(10 颗)RDX 颗粒受撞击后的点火燃烧图像，落锤下落高度为 15 cm

Fig. 6 Selected photographic frames for ten RDX particles in response to a drop-weight impact of 15 cm height

图 7 的比例因子为 0.459，计算出两个时刻的燃烧区域的面积和等效圆半径分别为：

$$S_2 = S_0 \times \frac{3\ 714}{36\ 864} = (0.459 \times 30.00 \text{ mm}) \times (0.459 \times 16.88 \text{ mm}) \times \frac{3\ 714}{36\ 864} = 10.749 \text{ mm}^2$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{S_2}{\pi}} = 1.85 \text{ mm} \tag{4}$$

$$S_3 = S_0 \times \frac{12\ 712}{36\ 864} = (0.459 \times 30.00\ \text{mm}) \times (0.459 \times 16.88\ \text{mm}) \times \frac{12\ 712}{36\ 864} = 36.79\ \text{mm}^2$$

$$R_3 = \sqrt{\frac{S_3}{\pi}} = 3.42\ \text{mm} \tag{5}$$

则 1 000.00 μs 到 1 006.67 μs 时间段内的平均燃烧速度为：

$$\overline{V} = \frac{R_3 - R_2}{\Delta t} = \frac{3.42\ \text{mm} - 1.85\ \text{mm}}{6.67\ \mu\text{s}} = 235.4\ \text{m/s} \tag{6}$$

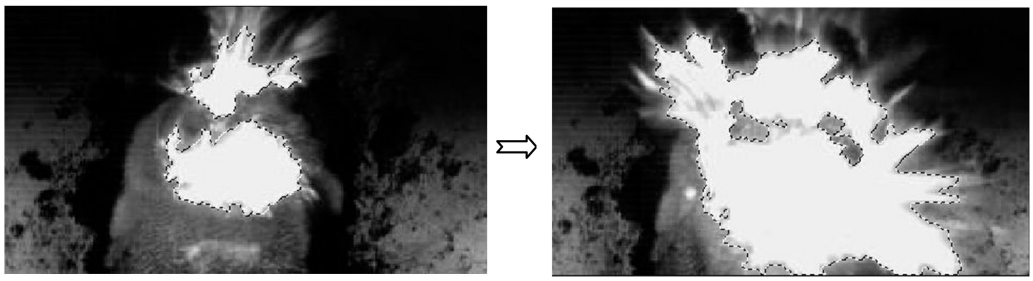


图 7　两个时刻燃烧区面积的变化

Fig. 7　Burning area change from 1 000.00 μs to 1 006.67 μs

2.3　HMX 点火燃烧实验

图 8 中试样为粒径 480 μm 的 HMX 颗粒，落锤下落高度为 15 cm，高速摄影仪拍摄频率为 $1.5\times10^5\ \text{s}^{-1}$。与 RDX 试样不同的是，HMX 试样在受撞击后并没有出现中心区域很明显的熔化现象。样品经历变形破碎后，在 293.33μs 时发生向左下方的飞溅现象，360.00 μs 时向多个方向的喷射产生，并在平铺试样的上边缘处发生点火，试样点火引发快速燃烧，在约 20 μs 内样品反应结束，但仍有残留反应物。

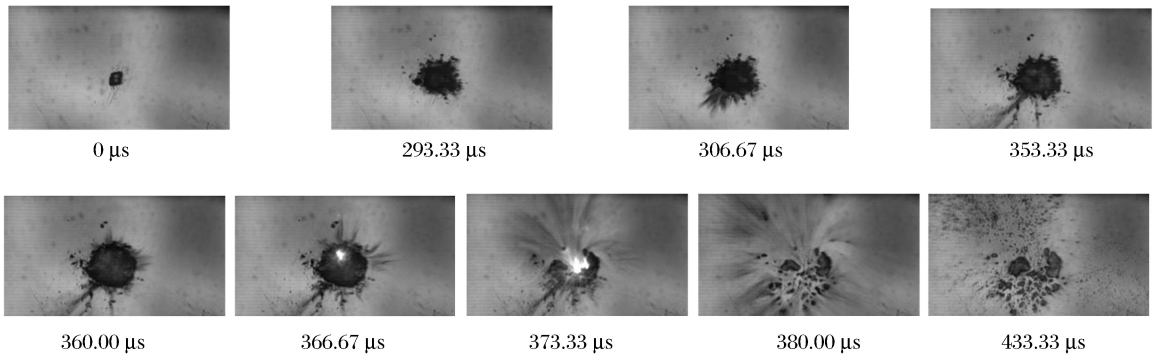


图 8　单个 HMX 颗粒受撞击的响应过程，落锤下落高度为 15 cm

Fig. 8　Selected photographic frames for an individual HMX particle in response to a drop-weight impact with 15 cm

此实验中实际长度与图像长度的比例系数为 0.492，由 366.67 μs 和 373.33 μs 两个时刻图像确定燃烧波的传播速度。根据燃烧区域的像素数目，分别计算这两个时刻的燃烧区面积和等效半径：

$$S_1 = S_0 \times \frac{47}{36864} = (0.492 \times 30.00\ \text{mm}) \times (0.492 \times 16.88\ \text{mm}) \times \frac{47}{36\ 864} = 0.156\ \text{mm}^2$$

$$R_1 = \sqrt{\frac{S_1}{\pi}} = 0.22\ \text{mm} \tag{7}$$

$$S_2 = S_0 \times \frac{673}{36\ 864} = (0.492 \times 30.00\ \text{mm}) \times (0.492 \times 16.88\ \text{mm}) \times \frac{673}{36\ 864} = 2.238\ \text{mm}^2$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{S_2}{\pi}} = 0.84\ \text{mm} \tag{8}$$

则平均燃烧速度为：

$$\overline{V}=\frac{R_2-R_1}{\Delta t}=\frac{0.84\ \text{mm}-0.22\ \text{mm}}{6.67\ \mu\text{s}}=92.95\ \text{m/s} \tag{9}$$

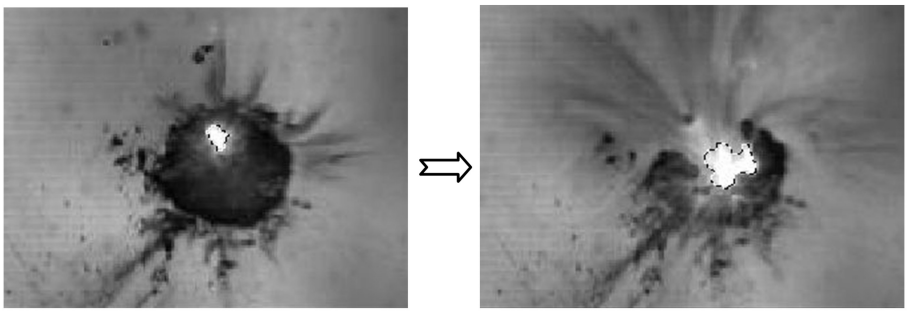


图 9 两个时刻燃烧区面积变化

Fig. 9 Burning area change from 366.67 μs to 373.33 μs

图 10 所示为 10 个紧密排列的 HMX 颗粒受落锤撞击后的响应过程，落锤下落高度为 15 cm，高速摄影仪拍摄频率为 $1.5\times10^5\ \text{s}^{-1}$。试样受落锤撞击后点火燃烧的响应过程持续 926.67 μs。试样颗粒的破碎、变形扩展持续 526.67 μs。由于破碎物的相互作用产生了 3 处明显点火区，多个热点区引发整体燃烧且相互连通，并迅速发展为剧烈燃烧反应，传播至几乎整个破碎试样。

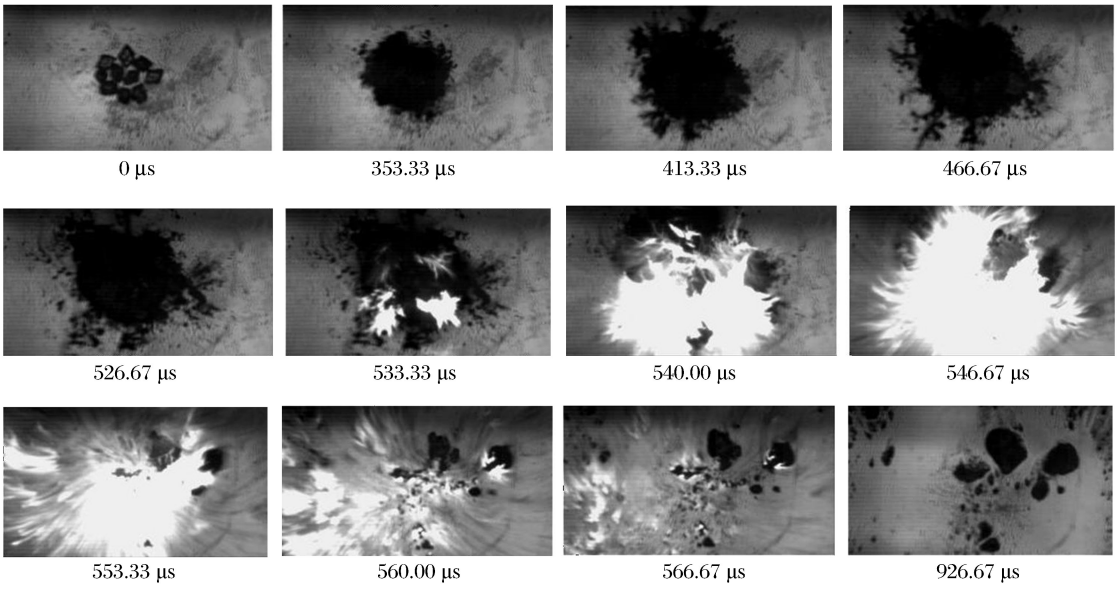


图 10 单层(10 颗)HMX 颗粒受撞击后的点火燃烧图像，落锤下落高度为 15 cm

Fig. 10 Selected photographic frames for ten HMX particles in response to a drop-weight impact with 15 cm

图 11 中实际长度与图像中长度的比例系数为 0.459，533.33 μs 和 540.00 μs 两个时刻的燃烧图像面积和等效圆半径分别为：

$$S_1=S_0\times\frac{1\ 581}{36\ 864}=(0.459\times30.00\ \text{mm}\times0.459\times16.88\ \text{mm})\times\frac{1\ 581}{36\ 864}=4.58\ \text{mm}^2$$

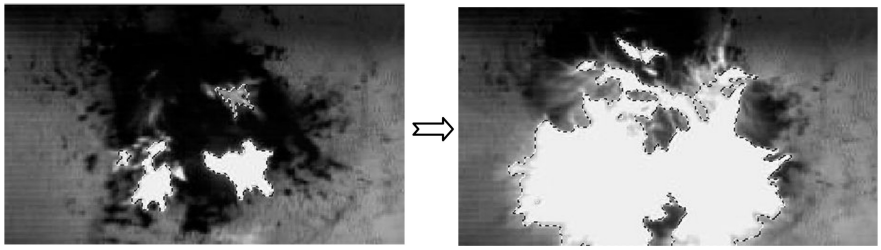
$$R_1=\sqrt{\frac{S_1}{\pi}}=1.21\ \text{mm} \tag{10}$$

$$S_2=S_0\times\frac{11\ 604}{36\ 864}=(0.459\times30.00\ \text{mm}\times0.459\times16.88\ \text{mm})\times\frac{11\ 604}{36\ 864}=33.59\ \text{mm}^2$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{S_2}{\pi}} = 3.27\ \text{mm} \tag{11}$$

利用燃烧面积等效圆半径的变化量，计算得到平均燃烧速度为：

$$\overline{V} = \frac{R_2 - R_1}{\Delta t} = \frac{3.27\ \text{mm} - 1.21\ \text{mm}}{6.67\ \mu\text{s}} = 308.9\ \text{m/s} \tag{12}$$



533.33 μs　　540.00 μs

图 11 两个时刻燃烧区面积变化

Fig. 11 Burning area change from 533.33 μs to 540 μs

2.4 两种材料的对比

从高速摄影图像可以看到，RDX 样品中点火发生在样品部分熔化后，液相的出现使得图像中亮度增加，样品回收后也有流动的痕迹。点火后由于气相产物生成而使得液相溅射。相比而言，HMX 颗粒在点火前则没有发生明显的熔化现象，点火后由于局部气相产物的压力，使得破碎固相材料发生飞溅。RDX 和 HMX 颗粒受低速撞击中点火机制并不相同，RDX 颗粒是在液相中点火，而 HMX 则在固相中点火，因此，RDX 和 HMX 点火后的燃烧传播介质有所不同。火焰传播速度可作为燃烧阶段反应剧烈程度的度量，见表 1。

表 1 火焰传播速度

Table 1 Propagation velocity of combustion flame

实验方案	落锤高度/cm	火焰速度/(m·s^{-1})
单个 RDX 颗粒	15	173.9
单层多个 RDX 颗粒	15	235.4
单个 HMX 颗粒	15	93.0
单层多个 HMX 颗粒	15	308.9

3 结　论

研究炸药在机械刺激下点火燃烧的条件及机理，评价炸药的安全性能具有重要的理论意义及应用价值。本文中设计改造了落锤仪的下落部分和基底击柱部分，在落锤和击柱内增加光路，高速摄影选取 1.5×10^5 s^{-1}的拍摄频率，实现了单个及多个炸药颗粒在落锤撞击下整个响应过程的观测记录。实验观测发现，在点火前 RDX 大部分熔化为液相，而 HMX 则是在固相内部发生点火。以 15 cm 的落高撞击单个/多个 RDX、HMX 颗粒，图像处理获得 173.9、235.4、93.0、308.9 m/s 的燃烧波传播速度，颗粒破碎后相互作用及热点区聚合，均会促进随后的燃烧反应。实验结果给予我们更重要的启发是：炸药材料的撞击敏感性不能仅用“爆”和“不爆”来评价，而应该提取力化学响应过程中的特征量，才能对炸药的敏感性有全面的认识。后面将发展更合理的定量表征参数。

参考文献：

[1] Balzer J E, Proud W G, Walley S M. et al. High-speed photographic study of the drop-weight impact response of RDX-DOS mixtures[J]. Combustion and Flame, 2003,135(4):547-555.

[2] Buntain G A, Mckinney T, Rivera T, et al. Decomposition of energetic materials on the drop-weight-impact machine[C]// Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation. Portland, Oregon, United States, 1989:1037-1043.

[3] Rice B M, Hare J J. A quantum mechanical investigation of the relation between impact sensitivity and the charge distribution in energetic molecules[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2002,106(9):1770-1783.

[4] Keshavarz M, Jaafari M. Investigation of the various structure parameters for predicting impact sensitivity of ener-

getic molecules via artificial neural network[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006,31(3):216-225.

[5] Swallowe G M, Field J E. The ignition of a thin layer of explosive by impact: The effect of polymer particles[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences, 1982,379(1777):389-408.

[6] Swallowe G M, Field J E, Hutchinson C D. Impact experiments on thin layers of polymers and intermediate explosives[C]// Gupta Y M. Proceedings of the Fourth American Physical Society Topical Conference on Shock Waves in Condensed Matter. New York: Plenum Press, 1985:891-898.

[7] Heavens S N, Field J E. The ignition of a thin layer of explosive by impact[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences, 1982,379(1612):77-93.

[8] Field J E, Swallowe G M, Heavens S N. Ignition mechanisms of explosives during mechanical deformation[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences, 1982,382(1782):231-244.

[9] Field J E, Palmer S J P, Pope P H, et al. Mechanical properties of PBXs and their behaviour during drop-weight impact[C]// Short J M. 8th Symposium (International) on Detonation. White Oak, Maryland, USA: Naval Surface Weapons Center, 1985:635-644.

[10] Balzer J E, Field J E, Gifford M J, et al. High-speed photographic study of the drop-weight impact response of ultrafine and conventional PETN and RDX[J]. Combustion and Flame, 2002,130(4):298-306.

[11] Hamdan S, Swallowe G M. The strain-rate and temperature dependence of the mechanical properties of polyetherketone and polyetheretherketone[J]. Journal of Materials Science, 1996,31(6):1415-1423.

Ignition and burning mechanisms of RDX/HMX particles subjected to drop-weight impact

Wu Yanqing [1], Bao Xiaowei[1], Wang Mingyang [1], Huang Fenglei[1], Zhang Zhu[2]

(1. *Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Applied Science College, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *ShanXi, China*)

Abstract: The mechanical and chemical response of explosives under low velocity impact is the basis for the evaluation of their sensitivity. The drop-weight impact apparatus equipped with the optical photography was used to achieve a frequency of 150 thousand seconds of real time observation. It was capable of distinguishing the samples of "Go" or "no Go" and observing such characteristics of deformation, crushing and breakage, jetting, ignition and combustion evolution, of RDX and HMX particles under low velocity impact. The selected photographic frames show that ignition occurred in the partially melted RDX phase. But for the HMX particles, ignition mainly occurred in the solid phase. A violent jetting phenomenon often occurs before the reaction of combustion. The occurrence of jetting primarily results from the energy released by gaseous products, which push the pulverized or melted explosives splash. The response characteristics of single and multiple granular explosives were compared. Because of the interaction of the hot spots broken, the combustion reaction of the particles is more intense than that of the single particles. The size ratio of the image to the actual length can be used to estimate combustion wave propagation velocity in each case, which is very suitable for characterizing the intensity of the macro-combustion reaction.

Keywords: combustion; drop-weight impact; RDX/HMX; granular explosives; ignition; high-speed photography

(责任编辑 张凌云)