

落锤撞击下非均匀炸药点火特性实验研究^{*}

杨 洁, 尚海林, 李克武, 黄学义, 何 真

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川绵阳 621999)

摘要: 对落锤实验装置进行改进, 由落锤直接撞击炸药样品改为使落锤先撞击上击柱, 再由上击柱对颗粒炸药样品进行加载。采用改进的落锤实验装置, 结合高速数字相机和 PVDF 压力计测量, 实时记录了以 HMX 为基的黏结炸药在低速撞击条件下的响应过程图像及其压力变化过程。结果表明: 非均匀炸药在低压长脉冲加载下基本都要经历压实→塑性扩展→颗粒破碎→形成局部高温区域→点火→燃烧→熄灭的典型非冲击点火过程, 但由于炸药在细观尺度上存在不均匀性, 导致相同实验条件下不同样品中局部高温区域点火出现的位置、持续时间以及反应强度都存在差异。

关键词: 点火; 落锤撞击; 非均匀炸药

中图分类号: O381

文献标志码: A

doi: 10.11858/gywlxb.2017.06.018

1 引 言

非均匀炸药在低速撞击条件下的点火反应机理是炸药安全性研究重点关注的问题之一。不同于均匀炸药的冲击起爆过程, 非均匀炸药低速撞击点火适用于非冲击点火。在低速撞击作用下非均匀炸药产生局部高温区域, 当该局部区域的温度和尺寸等因素达到点火阈值之后引发点火和燃烧, 最终可能引起整装炸药发生爆炸^[1-2]。

落锤实验在研究炸药低速撞击响应的工程和科学领域得到了广泛应用^[3-4]。剑桥大学卡文迪许实验室的 Balzer 等^[4-5]采用落锤实验装置研究了 PETN 和 RDX 的低速撞击响应, 结果显示, 4 种颗粒的炸药 (PETN 和 RDX 分别选用大尺寸颗粒和超细颗粒) 在落锤撞击下都出现了绝热剪切带, 但发生点火的主要原因是压实过程中颗粒间密闭空隙内气体的形成。中国工程物理研究院化工材料研究所的代晓淦等^[6]通过改造落锤仪得到了大药片 ($\varnothing 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$) Teteryl 和 JOB-9003 炸药的落锤撞击爆炸阈值, 其落高分别为 3.5 和 6.5 m。北京理工大学的吴艳青等^[7-11]利用改进后的落锤装置对 HMX 和 RDX 颗粒炸药的低速撞击点火进行了较系统的实验和数值模拟研究, 分析了多种因素对 HMX 颗粒炸药低速撞击响应的影响, 并通过图像处理估算得到颗粒炸药在落锤撞击下燃烧波阵面的传播速度。

本工作采用进一步改进的落锤实验装置对 HMX 基高聚物黏结炸药在低速撞击条件下的点火燃烧反应特性进行研究, 获得落锤加载下非均匀炸药点火反应过程的图像并测量其压力变化。

2 落锤实验装置

对传统的落锤实验装置进行改进, 由落锤直接撞击炸药样品改为由落锤先撞击上击柱, 再由上击柱

^{*} 收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-10-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11702273); 冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(9140C670402150C67291); 中国工程物理研究院流体物理研究所领域规划项目(LYGH201402)

作者简介: 杨 洁(1987—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事炸药点火及反应机理研究。E-mail: yjyang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 尚海林(1983—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事炸药化爆安全性研究。E-mail: hailinshang@caep.cn

对黏结炸药样品进行加载,改进后能够保证撞击过程保持为平面撞击状态。为了对黏结炸药的响应过程进行实时观测,分别在上、下击柱中开孔,并安装与撞击方向呈 45° 角的反光镜,从上击柱的开孔处采用 LED 光源照明,入射光经过上部反光镜反射后进入样品,之后再由下部反光镜反射后进入高速相机,光路如图 1 所示,通过放置在两块钢化玻璃击柱之间的 PVDF 压力计间接测量样品受压过程中的压力变化。

落锤材料为 Q235A 钢,质量为 10 kg,下落高度为 0~1 m,对应的撞击速度为 0~4.43 m/s。钢化玻璃击柱的材料为 K9 钢化玻璃,实测密度为 2.512 g/cm^3 ,里氏硬度值为 875。钢化玻璃上击柱的尺寸为 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,钢化玻璃下击柱的尺寸为 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

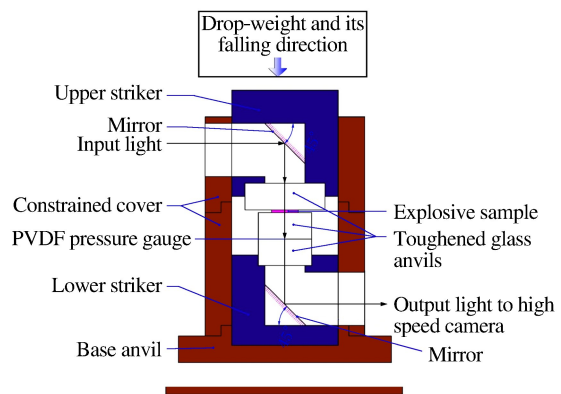


图 1 改进的落锤加载实验装置

Fig. 1 Improved drop-weight loading system

3 实验结果和讨论

实验中所用样品为以 HMX 为基的高聚物黏结炸药, HMX 质量分数为 96%, 黏结剂 Hype 的质量分数为 4%, 密度为 1.743 g/cm^3 ; 实验样品尺寸为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 质量约 140 mg。数字高速相机拍摄幅频为 180 000 帧/秒, 每幅图像之间的时间间隔为 $5.56 \mu\text{s}$ 。在落锤高度 100 cm 条件下开展了两发实验, 分别记为实验 1 和实验 2, 以下对两发实验的结果进行分析(由于采用 PVDF 触发, 触发时刻样品已经受到上击柱的撞击, 设触发时刻为零, 则初始撞击时刻 t 为负数)。

3.1 实验 1 结果

实验 1 中, 炸药样品质量为 139.8 mg, 受到落锤 100 cm 自由下落撞击后的响应过程如图 2 所示, 通过放置在两块钢化玻璃压砧之间的 PVDF 压力计测量得到撞击过程中平均压力变化的曲线如图 3 所

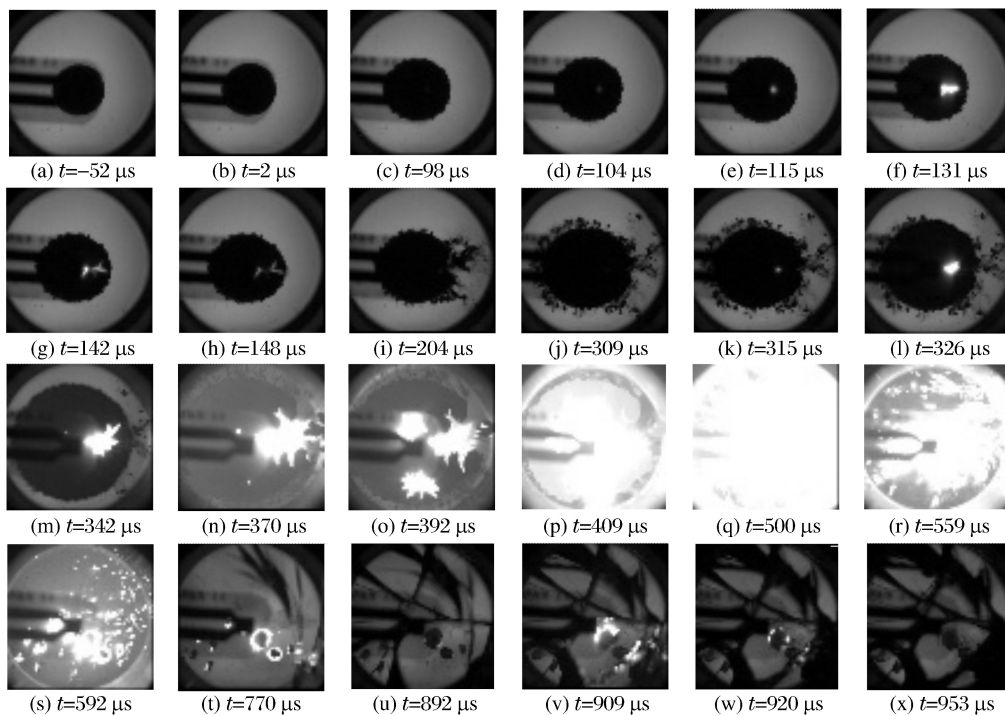


图 2 实验 1 中 HMX 黏结炸药的撞击响应过程

Fig. 2 Drop-weight impact responses of HMX based plastic bonded explosive in experiment 1

示。从图 2 的结果可以看到: $t=98\ \mu\text{s}$ 之前,炸药样品主要经历压实和塑性变形过程; $t=104\ \mu\text{s}$ 在样品中部偏右的位置出现局部高温区域,随后发生点火反应, $t=131\ \mu\text{s}$ 反应达到最强(对应图 3 中 A 点,压力为 72.2 MPa), $t=142\ \mu\text{s}$ 反应开始减弱, $t=148\ \mu\text{s}$ 反应熄灭,同时炸药从首次点火位置开始出现破碎颗粒并向周围扩散; $t=315\ \mu\text{s}$ 同样在样品中部偏右的位置出现第 2 次点火, $t=326\ \mu\text{s}$ 反应已达到与首次点火相当的强度(对应图 3 中 B 点,压力为 187.1 MPa);此后反应剧烈增长,在 $t=392\ \mu\text{s}$ 时发展为 3 个较大的反应区域, $t=409\ \mu\text{s}$ 反应区连通, $t=500\ \mu\text{s}$ 视场完全被反应发光照亮(对应图 3 中 C 点,压力为 234.2 MPa),此后反应开始减弱,直到 $t=892\ \mu\text{s}$ 反应熄灭,持续时间约 577 μs ; $t=909\ \mu\text{s}$,在右下部出现第 3 次明显的点火过程,持续时间较短。

3.2 实验 2 结果

实验 2 中炸药样品质量为 138.7 mg,受到落锤 100 cm 自由下落撞击后的响应过程如图 4 所示;通过放置在两块钢化玻璃压砧之间的 PVDF 压力计测得的撞击过程中平均压力变化曲线如图 5 所示。从图 4 的结果可以看到: $t=293\ \mu\text{s}$ 之前炸药样品主要经历压实、塑性变形和颗粒破碎过程; $t=299\ \mu\text{s}$ 在样品中部偏右的位置出现局部高温区域,随后发生点火反应, $t=338\ \mu\text{s}$ 反应达到最强(对应图 5 中 A 点,压力为 226.7 MPa), $t=349\ \mu\text{s}$ 反应开始减弱, $t=360\ \mu\text{s}$ 反应熄灭; $t=427\ \mu\text{s}$ 样品左上部出现第 2 次点火,反应迅速增长, $t=554\ \mu\text{s}$ 视场完全被反应发光照亮(对应图 5 中 B 点,压力为 296.6 MPa),此后反应开始减弱,直到 $t=715\ \mu\text{s}$ 反应又开始增强, $t=760\ \mu\text{s}$ 视场第 2 次被反应发光照亮, $t=1199\ \mu\text{s}$ 反应基本熄灭,持续时间约 772 μs 。

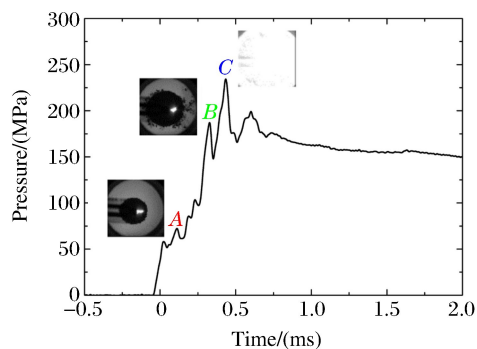


图 3 实验 1 中样品下方两块钢化玻璃压砧之间测得的平均压力

Fig. 3 Mean pressure measured between two toughened glass anvils under the sample in experiment 1

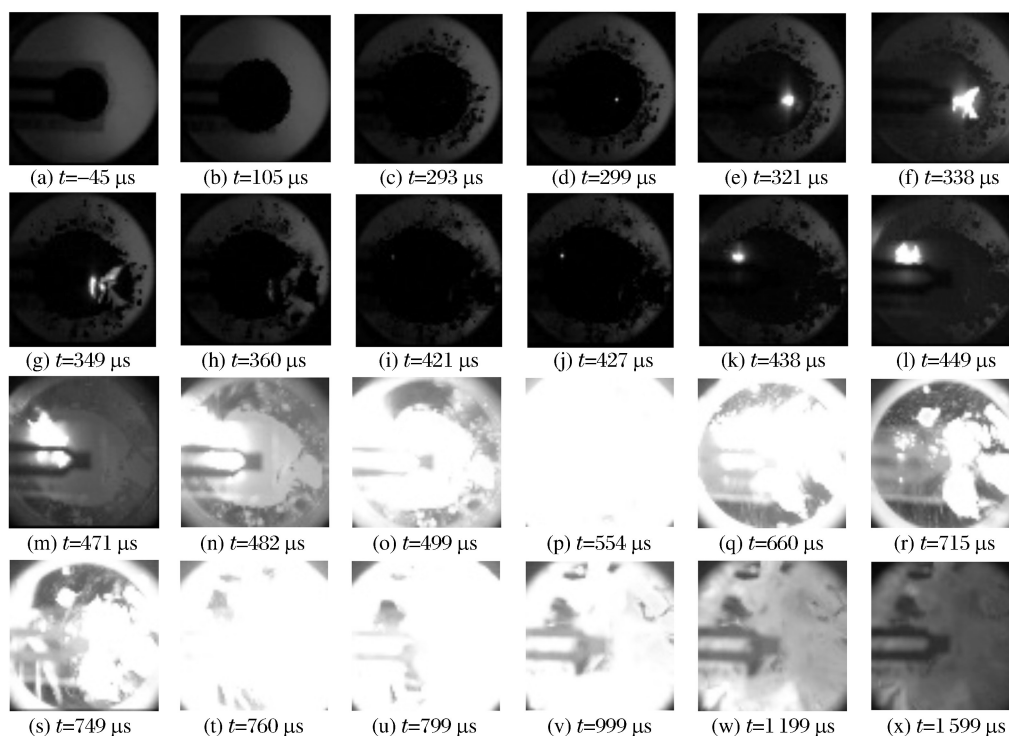


图 4 实验 2 中 HMX 黏结炸药的撞击响应过程

Fig. 4 Drop-weight impact responses of HMX based plastic bonded explosive in experiment 2

3.3 对比分析

对比实验1和实验2的结果可以看到,两发实验中黏结炸药样品在落锤100 cm撞击下的响应过程不尽相同:

(1) 实验1中,炸药在发生颗粒破碎之前($t=104\ \mu\text{s}$)有一次较为明显的点火过程,点火持续时间约 $44\ \mu\text{s}$,点火区域面积约 $10\ \text{mm}^2$,造成点火区域发生断裂,炸药开始出现颗粒破碎并向周围扩散。

(2) 发生颗粒破碎之后,实验1中炸药样品在 $315\ \mu\text{s}$ 出现第2次点火,此后在约 $577\ \mu\text{s}$ 时间内炸药样品几乎烧完,只有极少残留,并在 $909\ \mu\text{s}$ 出现第3次点火,持续时间约为 $44\ \mu\text{s}$;而实验2中炸药样品在 $299\ \mu\text{s}$ 出现第1次点火后仅持续约 $61\ \mu\text{s}$ 就熄灭,并在 $427\ \mu\text{s}$ 出现第2次点火,反应最终持续约 $772\ \mu\text{s}$ 后熄灭,仅有极少数炸药残留。

(3) 实验1中测到的峰值压力为 $234.2\ \text{MPa}$,实验2中峰值压力为 $296.6\ \text{MPa}$ 。

通过实验1和实验2的结果可以看到,黏结炸药药片在落锤低速撞击下基本都要经历压实→塑性扩展→颗粒破碎→形成局部高温区域→点火→燃烧→熄灭的过程,而且在剧烈点火反应发生之前都经历过一次点火熄灭的过程,不同的是实验1发生在破碎之前,而实验2发生在破碎之后。

4 结 论

采用改进的落锤实验装置,结合高速数字相机和PVDF压力计,实时记录并获得了以HMX为基的黏结炸药在低速撞击条件下的响应过程图像和压力变化曲线。结果表明,非均匀炸药在低压长脉冲加载下的响应过程是典型的局部高温区域点火过程,基本都要经历压实→塑性扩展→颗粒破碎→形成局部高温区域→点火→燃烧→熄灭的过程,但是由于炸药在细观尺度上存在不均匀性,导致相同实验条件下不同实验样品中局部高温区域点火出现的位置、持续时间以及反应强度都存在差异。

References:

- [1] 章冠人,陈大年.凝聚炸药起爆动力学[M].北京:国防工业出版社,1991:89-128.
ZHANG G R, CHEN D N. Ignition dynamics of condensed explosives [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 89-128.
- [2] BLAINE W A. Non-shock initiation of explosives; volume 5 [M]//Shock Wave Science and Technology Reference Library. Springer, 2010: 45-128.
- [3] BUNTAIN G A. Decomposition of energetic materials on the drop-weight-impact machine [C]//Proceedings of the 9th Symposium (International) on Detonation. NM, USA: Los Alamos National Lab, 1989: 1037-1043.
- [4] 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]. Combust Flame, 2003, 135(4): 547-555.
- [5] 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]. Combust Flame, 2002, 130(4): 298-306.
- [6] 代晓淦,向永,申春迎,等.大药片落锤撞击感度研究[J].爆炸与冲击,2006,26(4):381-384.
DAI X G, XIANG Y, SHEN C Y, et al. Study of drop hammer impact sensitivity for big-bill explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4): 381-384.
- [7] 吴艳青,黄风雷,艾德友. HMX颗粒炸药低速撞击点火实验研究[J].爆炸与冲击,2011,31(6):592-599.

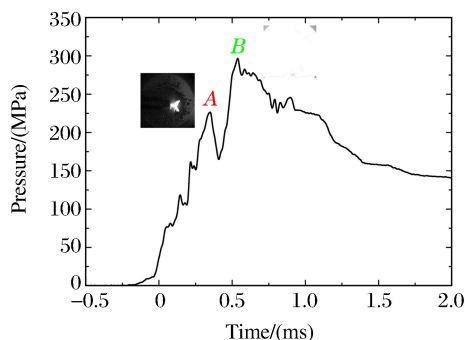


图5 实验2中样品下方两块钢化玻璃压砧之间测到的平均压力

Fig. 5 Mean pressure measured between two toughened glass anvils under the sample in experiment 2

- WU Y Q, HUANG F L, AI D Y. Experimental study on low-velocity impact ignition for HMX granular explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(6): 592-599.
- [8] WU Y Q, HUANG F L. Experimental investigations on a layer of HMX explosive crystals in response to drop-weight impact [J]. *Combust Sci Technol*, 2013, 185: 269-292.
- [9] WU Y Q, HUANG F L, ZHANG Z Y. Experiments and modeling of HMX granular explosives subjected to drop-weight impact [J]. *RSC Adv*, 2012, 2: 4152-4163.
- [10] WU Y Q, HUANG F L, HUANG M. Modeling of ignition in a single layer of impacted energetic crystals [J]. *Propell Explos Pyrot*, 2013, 38: 214-223.
- [11] 吴艳青, 鲍小伟, 王明扬, 等. RDX/HMX 颗粒炸药落锤撞击点火-燃烧机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 339-346.
- WU Y Q, BAO X W, WANG M Y, et al. Ignition and burning mechanisms of RDX/HMX particles subjected to drop-weight impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 339-346.

Experimental Research on Ignition and Burning of Heterogeneous Explosives under Drop-Weight Impact

YANG Jie, SHANG Hai-Lin, LI Ke-Wu, HUANG Xue-Yi, HE Zhen

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China*)

Abstract: In this work we presented an improved form of the drop-weight system in which, instead of being impacted directly by the drop weight, the sample was impacted by the upper anvil which was beforehand impacted by the drop weight. Based on this improved drop-weight system, the ignition and burning processes of HMX based plastic bonded explosives were recorded by a high-speed camera at the microsecond time scale. The experiment results indicate that, under low pressure and long pulse loading, heterogeneous explosives mainly undergo the process of compression→plastic flow→particle breaking→formation of local high temperature region→initiation→burning→quenching, which is a typical non-shock initiation process. But, because the explosive is heterogeneous at the mesoscale, the location of the high temperature region, the reaction duration and the reaction violence of heterogeneous explosive samples are different from each other under the same experimental conditions.

Key words: ignition; drop-weight impact; heterogeneous explosive