

文章编号: 1003-1480 (2022) 03-0049-05

RDX粉末炸药在极低温环境下的落锤撞击 敏感性研究

郭洪福¹, 韩旭东², 豆永鹏³, 彭军¹, 李鹏飞¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065; 2. 陆军装备部驻西安军事代表局驻西安地区第一军事代表室, 陕西 西安, 710065; 3. 陆军装备部驻西安军事代表局驻西安地区第七军事代表室, 陕西 西安, 710065)

摘要: 为研究环三亚甲基三硝胺 (RDX) 在低温环境下的撞击敏感性, 设计了低温环境下的可视化落锤试验装置, 研究了 RDX 粉末炸药在低温环境、不同落锤高度下的力-化学响应特征及相应的点火概率, 并进行点火机理分析。研究表明: RDX 粉末炸药的点火概率随环境温度的降低而降低, 在-50°C和-100°C时, RDX 粉末炸药很难发生点火; RDX 粉末在落锤撞击过程中经历缓慢的径向扩散、融化、快速流动以及溅射或者点火燃烧, 其点火机理主要是粘性热。

关键词: RDX; 落锤撞击; 高速摄影; 低温控制装置

中图分类号: TQ564.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.03.011

Research on Drop Hammer Impact Sensitivity of RDX Powder Explosive in Extreme Low Temperature Environment

GUO Hong-fu¹, HAN Xu-dong², DOU Yong-peng³, PENG Jun¹, LI Peng-fei¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065; 2. The First Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Army Equipment Department in Xi'an, Xi'an, 710065; 3. The Seventh Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Army Equipment Department in Xi'an, Xi'an, 710065)

Abstract: In order to study the impact sensitivity of RDX in low temperature environment, the visual drop hammer test device was designed. The research on the mechanics-chemical response characteristics and corresponding ignition probability of RDX powder explosive under low temperature environment and different drop heights were carried out, as well as the ignition mechanism was analyzed. The study shows that the ignition probability of RDX powder explosive decreases with the decrease of ambient temperature, it is difficult to ignite RDX powder explosive at -50°C and -100°C. RDX powder experiences slow radial diffusion, melting, rapid flow, sputtering or ignition combustion in the process of falling weight impact, the ignition mechanism of RDX powder explosive under drop weight impact is mainly viscous heat.

Key words: RDX; Drop hammer impact; High speed photography; Low temperature control device

落锤撞击是研究炸药敏感性的常用方法之一。Heavens and Field^[1]在常规的落锤撞击实验仪上安装了高速摄像机, 首次实现了对炸药在动态撞击过程中的可视化观测。BALZER 等^[2]研究了 RDX 和 PETN

常规尺寸颗粒和超细颗粒的落锤撞击感度, 试验证明粒度越小感度越低。王明扬等^[3]利用高速摄影获取了颗粒炸药在落锤撞击下的响应图像, 结果显示颗粒所经历的塑性扩展时间越长, 越容易发生点火。Wu 等^[4]

收稿日期: 2021-11-22

作者简介: 郭洪福 (1984), 男, 副研究员, 从事高效毁伤理论与技术研究。

通讯作者: 豆永鹏 (1982), 男, 高级工程师, 从事智能弹药研究。

采用高速摄影仪获取了单层 HMX 炸药颗粒在落锤撞击下的力-化学响应过程图像, 分析了其点火机理, 并建立了微观的撞击点火机理模型。Czersk 等^[5]通过落锤试验研究了炸药在落锤撞击下的热点形成机理, 试验证明落锤冲击对 HMX 试样的加热足以导致试样局部产生相变。Bao 等^[6]对单个和多个环四亚甲基四硝胺 (HMX) 高能粒子进行了低速落锤撞击试验, 发现多个颗粒经历的燃烧反应比单个颗粒更剧烈。Zhang 等^[7]在落锤试验装置上增加了一套加热设备, 对 PETN、TATP、HMX 和 AgN₃ 4 种炸药进行了落锤撞击研究, 结果表明炸药感度随着温度的升高而降低。You 等^[8]采用超声波对 2 种形态的 HMX 颗粒进行力学加载, 并通过红外摄像仪研究了超声波加载过程中试样表面温度的变化特征, 试验发现经过包覆的 HMX 单晶比未包覆 HMX 单晶更加敏感。

随着炸药的应用越来越广泛, 在高海拔、高纬度等极端条件下的使用也成为了常态, 因此, 研究低温度域的炸药敏感性非常有必要, 但目前没有落锤仪能够对其进行有效测试。本文以常规的落锤仪为基础, 在不改变其撞击原理的基础上, 通过可视化和低温环境控制设计, 建立了国内首套低温环境炸药敏感性可视化试验装置, 研究 RDX 粉末炸药在低温环境下的力-化学响应特征及相应的点火概率和点火机理。

1 落锤撞击试验

1.1 加载装置

本研究所采用的试验装置与 Heavens and Field^[1]设计的试验装置相似, 其核心是对传统的落锤试验装置进行可视化改造, 如图 1 所示。

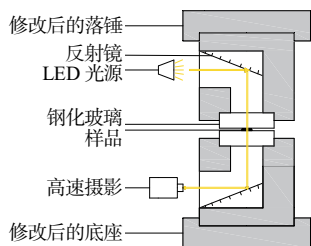


图 1 落锤加载部分的光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of light path of drop weight loading part

落锤和底座中间均设计了 L 形通道, 在二者的接触面上镶嵌了钢化玻璃, 形成了完整的光路。试验开

始时, 将样品放置在钢化玻璃上, 落锤自由落体并撞击样品时, 光源发出的入射光通过落锤和底座中心的 L 形通道进入高速摄影仪, 由高速摄影仪记录样品在落锤撞击过程中的力-化学过程。试验中使用的高速摄影拍摄速度为 150 000 帧/s, 分辨率为 256 × 144 像素。落锤的总重量约为 5.71kg。

1.2 低温环境控制系统

低温环境控制系统主要用于控制试验样品的环境温度, 该系统可将样品温度控制在常温至-150℃范围内。低温环境下的落锤撞击试验整体设计如图 2 所示。试验开始前, 通过电热丝加热液氮罐里的液氮, 液氮气体通过通气管进入低温箱, 进而对箱体內的粉末炸药进行降温。温控仪通过热电阻传感器 PT100 实时测量低温箱内的温度。当低温箱内的温度达到所需温度之后, 保温 10min。然后打开低温箱顶盖, 开始落锤撞击试验。

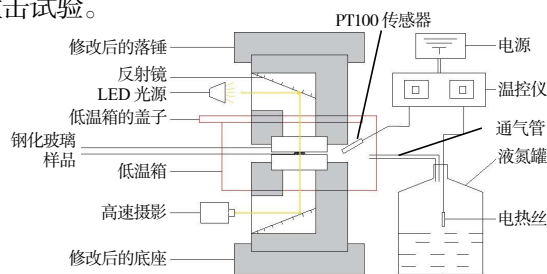


图 2 低温环境下的落锤撞击试验整体设计图
Fig.2 Design diagram of drop hammer impact test in low temperature environment

2 试验结果与分析

2.1 点火-燃烧概率

试验样品为 RDX 粉末炸药, 粒径约为 600 ~ 1 200 μm, 呈椭圆形, 表面相对平整、光滑、无尖角, 重量约为 20mg, 放置在撞击装置的中心。选取 20cm 和 25cm 2 种落锤高度及 15℃、-50℃和-100℃ 3 种温度进行落锤撞击试验, 每种落锤高度和温度条件下进行 10 次试验, 试验过程中高速摄影仪保持姿态和位置不变。表 1 为 RDX 粉末炸药的点火-燃烧概率。由表 1 可以看出, 只有温度为 15℃时发生了点火-燃烧现象, 其中 20cm 和 25cm 落锤高度下分别发生了 2 次和 3 次点火-燃烧现象, 而低温条件下的试验均未发生点火-燃烧。

表 1 RDX 粉末炸药点火-燃烧的概率
Tab.1 Ignition probability of RDX powder explosive

落锤高度/cm	温度/°C	点火概率
20	15	2/10
20	-50	0
20	-100	0
25	15	3/10
25	-50	0
25	-100	0

2.2 力-化学响应图像研究

温度为 15°C、落锤高度为 20cm 时，RDX 粉末炸药在落锤撞击下的力-化学响应图如图 3 所示。

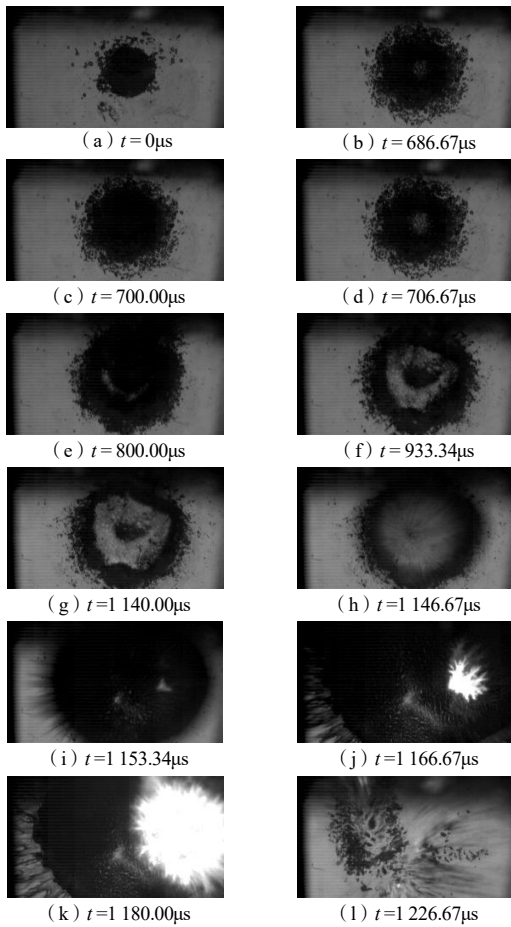


图 3 15°C、20cm 落锤高度下 RDX 粉末炸药的力-化学响应图

Fig.3 Mechanics-chemical response image of RDX powder explosive at 20cm drop weight height under 15°C temperature environment

由图 3 可知：落锤与试样接触后，在初始阶段表现为缓慢的径向移动。当 $t=686.67\mu\text{s}$ 时，试样中心出现了微弱的透光现象。当 $t=800.00\mu\text{s}$ 时，试样左侧出现了月牙形透光局域，随着加载持续，透光区域不断扩大。在 $t=1140.00\mu\text{s}$ 时，透光区域面积达到最大。当 $t=1146.67\mu\text{s}$ 时，试样又一次发生快速流动， $6.67\mu\text{s}$ 后在快速流动中形成了一个热点。整个过程可以清晰

地观察到 RDX 粉末炸药经历了径向扩散、融化、快速流动及点火燃烧。

温度为-100°C、落锤高度为 20cm 时，RDX 粉末炸药在落锤撞击下的力-化学响应图如图 4 所示。由图 4 可知：当 $t=633.34\mu\text{s}$ 时，试样中心出现了微弱的透光区，透光区发展了 $50\mu\text{s}$ ，随后样品出现了一次快速流动，快速流动后伴随有溅射的痕迹。当 $t=800.00\mu\text{s}$ 时，样品出现了圆环形的透光区。随着加载持续，透光区形成了一个环带，之后样品发生了快速流动及大面积溅射。

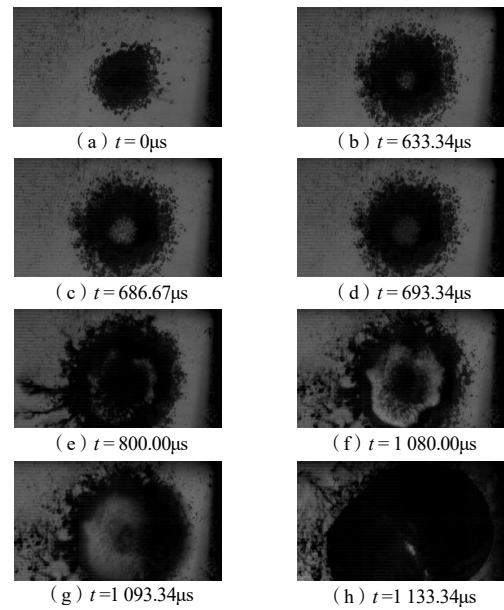


图 4 -100°C、20cm 落锤高度下 RDX 粉末炸药的力-化学响应图

Fig.4 Mechanics-chemical response image of RDX powder explosive at 20cm drop weight height under -100°C temperature environment

温度为-50°C、落锤高度为 25cm 时，RDX 粉末炸药在落锤撞击下拍摄到的力-化学响应图如图 5 所示。由图 5 可知：当 $t=566.67\mu\text{s}$ 时，试样出现第 1 次透光，持续时间为 $26.67\mu\text{s}$ ；当 $t=693.34\mu\text{s}$ ，试样出现第 2 次透光，持续时间为 $13.34\mu\text{s}$ ；当 $t=766.67\mu\text{s}$ 时，试样出现第 3 次透光；当 $t=1100.00\mu\text{s}$ 时，透光区域达到最大。整个加载过程发生了一次剧烈溅射，未发生点火燃烧。

温度为-100°C、落锤高度为 25cm 时，RDX 粉末炸药在落锤撞击下拍摄到的力-化学响应图如图 6 所示。由图 6 可知：当 $t=660.00\mu\text{s}$ 时，试样的中心出现了明显的透光区域，持续时间为 $20\mu\text{s}$ ，之后发生了快

速流动。当 $t=753.33\mu\text{s}$ 时, 样品发生了类似现象。

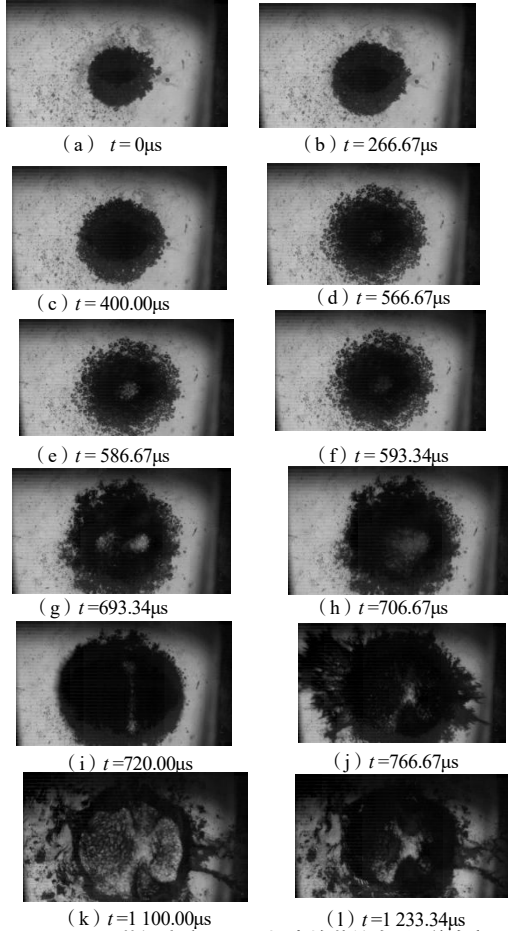


图5 -50°C 、25cm 落锤高度下 RDX 粉末炸药的力-化学响应图像
Fig.5 Mechanics-chemical response image of RDX powder explosive at 25cm drop weight height under -50°C temperature environment

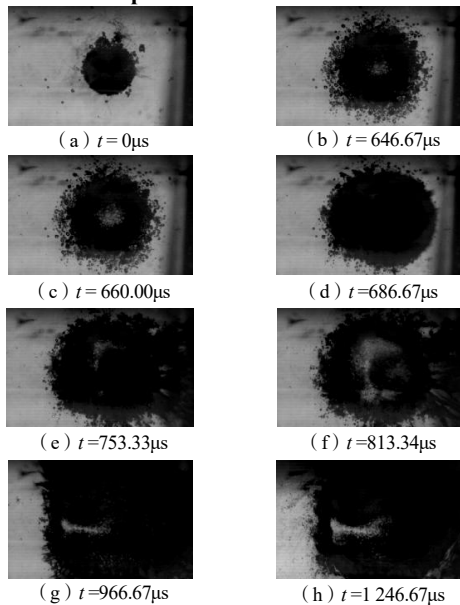


图6 -100°C 、25cm 落锤高度下 RDX 粉末炸药的力-化学响应图像
Fig.6 Mechanics-chemical response image of RDX powder explosive at 25cm drop weight height under -100°C temperature environment

从图 3~6 可以看出,RDX 粉末炸药在不同落高、不同环境温度条件下所经历的过程相似, 均经历了缓慢的径向扩散、透光、快速流动以及快速流动后伴随的溅射或者点火燃烧。

2.3 融化现象分析

鲍小伟等^[9]通过显微镜观测落锤撞击后的 RDX 样品, 分析认为透光的主要原因是样品融化导致的。为了研究极低温环境下试验过程中透光现象的本质, 将一张薄蜡纸放在样品下方, 落锤撞击后, 将带蜡纸的样品放在电子显微镜下观察, 在蜡纸的沟壑处观察到融化冷却后粘结在一起的样品痕迹, 而 RDX 在物理断裂后的碎片极其不规则, 棱角较为分明, 融化和物理断裂 2 种状态下的图像如图 7 所示。根据图 7 可以判断 RDX 粉末炸药在落锤撞击下发生了融化现象。

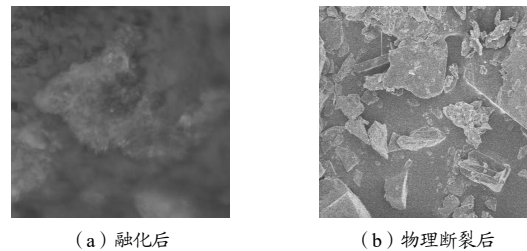


图7 融化后和物理断裂后的图像

Fig.7 Images after melting and physical fracture

样品融化的时长可能与样品的热点形成有关。为了进一步分析热点形成与融化时长的关系, 将图 3~6 中的融化时间进行了统计, 统计结果见表 2。由表 2 可知: 大多数的融化持续时间较短, 此类融化伴随的主要现象是溅射, 并不会导致热点产生。而持续时间较长的融化会导致快速流动和剧烈的溅射现象, 甚至是热点的产生。

表 2 4 种加载过程中样品融化的次数和持续的时间
Tab.2 Statistics of times and duration of sample melting in 4 loading processes

初始条件		融化持续时间/ μs		
落高/cm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	第 1 次	第 2 次	第 3 次
20	15	6.67	340.00	-
20	-100	50.00	280.00	-
25	-50	26.67	13.34	333.34
25	-100	20.00	60.00	-

3 点火机理分析

RDX 粉末炸药在落锤撞击过程中均会出现融化现象, 样品在融化状态下加载的时间越长, 发生的快

速流动越剧烈。分析认为 RDX 粉末炸药在落锤撞击下的点火原因主要是液相中的粘性流动产生的热量。融化过程是一个能量积累的过程,融化持续的时间越长,积累的能量越多,在快速流动过程中更容易形成热点。这也从侧面证明了粘性热是导致 RDX 粉末炸药在落锤撞击下点火的机理,由于液相的面积较大、持续时间较长,导致其在低温环境下的热量耗散很大,温度越低,散热越大。因此,低温环境使 RDX 粉末更难形成热点,在试验上表现为:随着温度降低,点火-燃烧概率降低。

4 结论

(1) 对常规的落锤试验装置进行了可视化改造,并设计了一套低温环境温度控制系统来改变样品的初始环境温度。获取了落锤重量为 5.71kg,落锤高度分别为 20cm 和 25cm,样品初始温度分别为 15°C、-50°C 和 -100°C 情况下 RDX 粉末炸药的力-化学响应过程图像。

(2) 试验结果显示 RDX 粉末在落锤撞击下不易发生点火-燃烧,低温环境下的点火-燃烧概率为 0。

(3) 液相中的粘性热是导致 RDX 在落锤撞击下发生点火-燃烧的主要原因。在低温环境下,由于样品的融化面积较大、持续时间较长,因此热耗散很大,难以发生点火-燃烧。

参考文献:

- [1] 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, 1974, 338(1 612): 77-93.
- [2] 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): 298-306.
- [3] 王明扬. 颗粒炸药落锤撞击的点火-燃烧试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [4] Wu Y Q, Huang F L. A microscopic model for predicting hot-spot ignition of granular energetic crystals in response to drop-weight impacts[J]. Mechanics of Materials, 2011, 43(12): 835-852.
- [5] Czerski H, Greenaway MW, Proud W G, et al. β - δ phase transition during drop weight impact on cyclotetramethylene tetranitroamine[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(8): 4 131-4 134.
- [6] Bao X W, Wu Y Q, Wang M Y, et al. Experimental investigations of mechanical and reaction responses for drop-weight impacted energetic particles[J]. Chinese Journal of Mechanics, 2017(1): 65-70.
- [7] Zhang G, Weeks B L. A device for testing thermal impact sensitivity of high explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010, 35(5): 440-445.
- [8] You S, Chen M W, Dlott D D, et al. Ultrasonic hammer produces hot spots in solids[J]. Nature Communications, 2015, (6): 6 581-1-6 581-7.
- [9] 鲍小伟. 单质粉末炸药低速撞击力化学响应的实验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.