

文章编号: 1006-9941(2016)11-1070-05

# 一种 HMX 基 PBX 炸药在热与落锤撞击复合作用下的响应特性

申春迎, 黄谦, 刘世俊

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了研究炸药在热与撞击复合作用下的安全性, 采用自行设计的试验装置, 对  $\Phi 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的 HMX 基 PBX 进行了 20 ~ 170 °C 范围内不同温度下 50 kg 落锤撞击试验。试验中利用压力传感器测试撞击过程中炸药受力变化。利用高速摄影系统拍摄炸药撞击点火过程。获得了 PBX 炸药在不同温度下的撞击响应特性。结果表明, 成型 PBX 炸药的撞击安全性与温度密切相关, 其中 82 °C 时撞击安全性提高, 170 °C 时撞击安全性明显变差。在 20 ~ 170 °C 范围内, 随温度升高, PBX 炸药的撞击感度先降低而后逐渐提高, 这与 PBX 炸药在高温下的力学性能发生变化、热膨胀、热分解导致的损伤以及 HMX 发生晶型转变等因素有关。

**关键词:** 炸药安全性; 热与撞击复合作用; 高聚物粘接炸药(PBX)

**中图分类号:** TJ55; TQ564

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.11.006

## 1 引言

撞击安全性和热安全性是评价炸药安全性的两个重要指标。撞击安全性可用落锤撞击感度试验、苏珊试验、滑道试验、冲塞试验、枪击试验、Steven 试验<sup>[1]</sup>等表征, 热安全性可用火烧试验、慢烤试验、一维热爆炸试验(ODTX 试验)<sup>[2]</sup>、多尺度热爆炸试验(STEX 试验)<sup>[3]</sup>等评价。这两类试验都无法预估炸药在撞击与火灾综合作用下是否会发生燃烧、爆炸等反应。近年来, 国内外相继开展了高温下炸药高速撞击安全性的研究。Kevin S. Vandersall 等<sup>[4]</sup>研究了 PBX-9501 在 150 °C 时的冲击安全性和点火增长模型。代晓淦等<sup>[5-7]</sup>研究了高温下 HMX 基 PBX-2 炸药柱在 260 ~ 320  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的小弹丸撞击剪切摩擦作用下的响应特性。研究结果表明, 温度对其撞击响应影响明显, PBX-2 炸药在 75 °C 和 105 °C 时的撞击剪切安全性比常温下好, 但在 160 °C 和 195 °C 时会明显变差。Sandusky 等人<sup>[8]</sup>研究发现, 在直径 19 mm 的钢球撞击挤压作用下, PBX-9502 炸药在 240 °C 时发生爆轰反应的临界撞击速度较常温有所降低。在实际运输和使用过程中, 武器弹药经常面临低速撞击和/或火灾事故的

威胁。其战斗部中的炸药一旦发生反应后果严重, 因此研究炸药在热与低速撞击复合作用下的安全性对于预估武器在火灾、低速撞击下的响应是非常必要的, 但目前这方面的研究还很少。

为了获得 HMX 基 PBX 炸药在热与低速撞击复合作用下的响应特性, 设计了一种炸药片热与落锤撞击复合试验装置(国家发明专利号: ZL 201310236392.7)。利用该试验装置对 PBX 炸药进行了温度为 20 ~ 170 °C、落锤质量为 50 kg、撞击速度 0 ~ 14  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的热与落锤撞击复合试验。利用薄膜式压力传感器测试炸药在撞击过程中的压力变化历程, 用高速摄影系统拍摄了炸药撞击点火过程, 并利用电子万能材料试验机对 PBX 炸药在不同温度下的压缩强度进行了测试, 从力学性能变化、晶体相变、热膨胀和热分解产生的损伤等方面分析了温度对落锤撞击安全性的影响。

## 2 试验

### 2.1 样品

PBX 炸药组成为: HMX(质量分数大于 85%)、少量 TATB、粘结剂、钝感剂。采用水悬浮法制备成 PBX 造型粉, 再用热压法压制成密度为 1.844 ~ 1.845  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、尺寸为  $\Phi 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  和  $\Phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的小药柱, 分别用于热与落锤撞击复合试验和压缩强度试验。热失重测试样品为颗粒状的 PBX 造型粉。试验中所用的炸药样品均由中国工程物理研究院化工材料研究所提供。

收稿日期: 2015-10-13; 修回日期: 2016-05-25

作者简介: 申春迎(1974-), 女, 副研究员, 主要从事含能材料安全性研究。e-mail: shency@caep.cn

通信联系人: 刘世俊(1975-), 男, 副研究员, 主要从事含能材料配方设计与性能研究。e-mail: liusj@caep.cn

## 2.2 炸药热与落锤撞击复合试验装置和试验方法

自行设计的炸药热与落锤撞击复合试验装置示意图如图 1 所示。其中,落锤质量为 50 kg,落高在 12 m 以内可调,试验温度在室温 ~300 °C 范围内可调。试验时,利用控温系统和均热块以  $5\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$  的升温速率将炸药片加热到预定温度并恒温 20 min 后,将落锤提升到预定高度,释放落锤撞击炸药。被加热的炸药在落锤的撞击作用下可能发生反应。根据试验结果调节落锤落高。

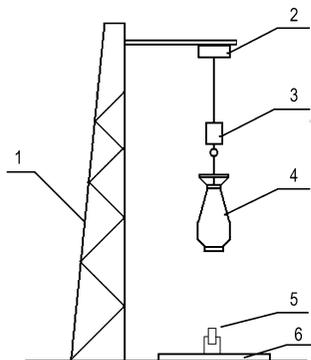


图 1 炸药热与落锤撞击复合试验示意图

1—跌落支架, 2—提升装置, 3—释放装置, 4—落锤, 5—样品装置, 6—钢靶

Fig.1 Schematic diagram of the thermal-impact coupling test device

1—drop tower, 2—lift device, 3—releasing device, 4—drop hammer, 5—sample holder, 6—steel base

试验中,采用 MEMRECAM GX-1 高速摄影机观察炸药点火情况,在距撞击点 1 m 处布置超压测试系统(由 CA-YD-202 自由场压力传感器、YE6600 电荷放大器、泰克示波器组成)测量炸药反应超压,采用  $50\ \Omega$  螺旋型薄膜式锰铜压力计测量炸药底部的受力过程。

根据高速摄影图像、冲击波超压、试验残骸来综合判断炸药是否发生反应。以炸药发生反应时落锤的最低落高来表征该温度下炸药的落锤撞击感度。

样品装置示意图见图 2。样品装置由击杆、聚四氟乙烯环、导向套、击砧、底座、均热块、加热带组成。其中 PBX 炸药样品的尺寸为  $\Phi 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ; 聚四氟乙烯环厚 8 mm; 击砧、击杆、底座和均热块材料为钢,导向套材料为铝。

## 2.3 热与落锤撞击复合试验温度选择

为确定热与落锤撞击复合试验的温度范围,选择适宜的试验温度点,对 PBX 炸药进行了热失重测试分析。其在升温速率为  $5\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$  时的热失重曲线

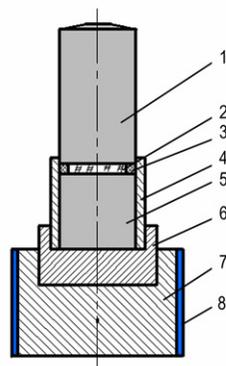


图 2 样品装置示意图

1—击杆, 2—炸药片, 3—聚四氟乙烯环, 4—导向套, 5—击砧, 6—底座, 7—均热块, 8—加热带

Fig.2 Schematic diagram of the sample holder

1—striker, 2—explosive tablet, 3—PTFE ring, 4—guide tube, 5—anvil, 6—steel base, 7—heating block, 8—ring heater

(TG 曲线)见图 3。从图中看出, PBX 在  $136 \sim 150\text{ °C}$  开始出现热失重,在  $263.7\text{ °C}$  热失重达到 4%,根据炸药的配方组成和组分的热性能特点可知此时主要为粘结剂和钝感剂的热分解;随后热失重加剧,在  $285\text{ °C}$  时,热失重达到 92%,此为 HMX、粘结剂和钝感剂受热发生分解造成的。故 PBX 炸药热与撞击复合试验的试验温度选择了常温、钝感剂熔化、粘结剂软化、炸药发生轻微分解、HMX 发生晶型转变的几个特征温度,即 20, 82, 125, 155, 170 °C。

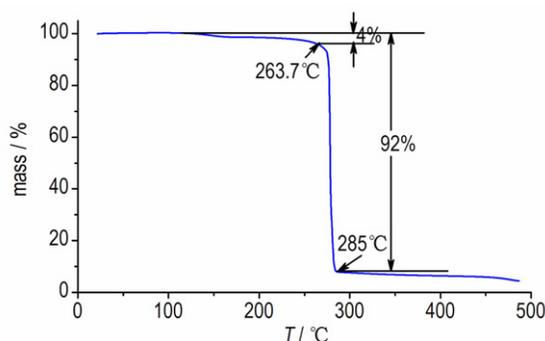


图 3 PBX 炸药的 TG 曲线 ( $5\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Fig.3 TG curve of PBX at a heating rate of  $5\text{ °C} \cdot \text{min}^{-1}$

## 2.4 炸药压缩强度试验

参照 GJB772A-1997 方法 416.1 (抗压强度压缩法),采用带有温度控制箱的 INSTRON 8862 电子万能材料试验机,对  $\Phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的小药柱进行炸药压缩强度性能测试。试验速度:  $10\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。测试温度为  $20 \sim 150\text{ °C}$  内几个不同温度点,每个温度

点五发试样为一组。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 热与落锤撞击复合试验的撞击过程

在热与落锤撞击复合试验中, PBX 炸药发生反应后回收的击砧照片见图 4。从图 4 可看出, 当炸药发生反应时, 击砧表面有炸药烧蚀发黑的痕迹, 残余炸药表面有燃烧的痕迹, 铝质导向套破裂。

高速摄影图像可用来观察判断炸药在落锤撞击压缩下是否发生点火以及点火熄灭或成长, 获得点火延滞时间等。图 5 是典型的 PBX 炸药撞击点火高速摄影图像。由图 5a 可见, 在 20 °C、落高 5 m 的落锤撞击作用下, 部分炸药发生点火、燃烧, 大部分炸药被撞

碎后飞散出去, 点火延滞时间约 1.1667 ms。由图 5b 可见, 温度为 170 °C 的炸药被跌落高度为 1.5 m 的 50 kg 落锤撞击后随即发生点火, 点火延滞时间约 200  $\mu$ s, 有明显的燃烧发光现象, 而且燃烧迅速。这说明炸药在高温环境下受到撞击时很容易发生反应, 而且反应会迅速延续下去。



图 4 热-撞击复合试验后的击砧照片

Fig. 4 Photograph of the anvil after thermal-impact coupling test

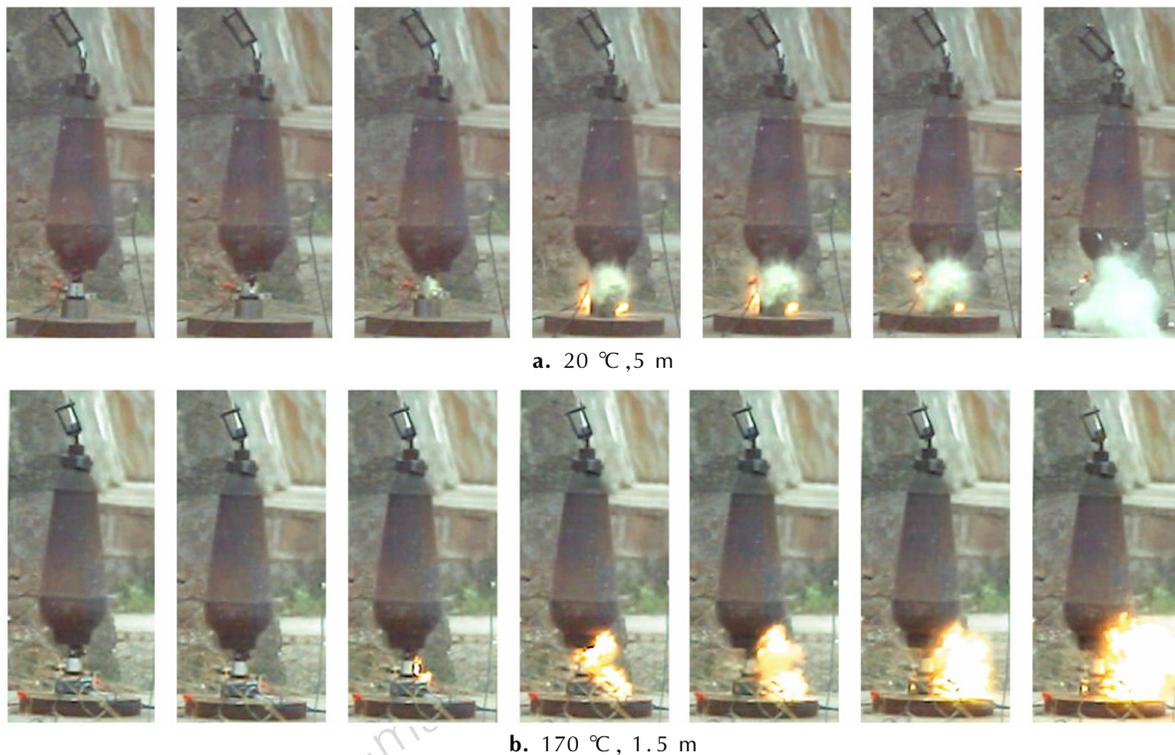


图 5 PBX 炸药撞击点火高速摄影图像

Fig. 5 High speed recording pictures of ignited PBX during the impact process

图 6 为不同温度下 PBX 炸药的落高与点火延滞时间关系图。从图 6 中可看出, 在相同温度下, 落高越高, 点火延滞时间越短。同时, 温度升高, 点火延滞时间缩短。

#### 3.2 撞击过程中炸药片的受力分析

图 7 是 20 °C、落锤落高分别为 2.5, 4, 6 m 时撞击过程中炸药底部的压力-时间历程曲线。从图 7 可

以看出, 落锤落高为 2.5 m 和 4 m 时炸药的压力曲线相似, 最大压力峰值在 2 GPa 左右, 脉宽 1 ms 左右, 随后压力逐渐降低, 表明炸药未发生反应。分析认为, 在受到落锤撞击时, 炸药底部压力立即上升, 随着炸药进一步受到压缩挤压, 炸药底部受到的压力随之增长, 在聚四氟乙烯环和导向套被破坏后, 出现泄压, 压力很快降低。在落高 6 m 时, 压力峰值在 1.5 GPa 时发生

跳变,表明炸药发生了反应。

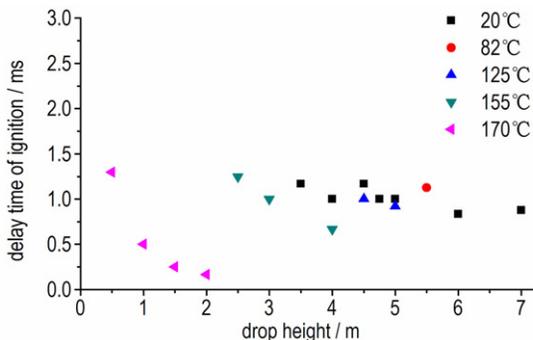


图 6 落高与点火延滞时间的关系

Fig. 6 Relationship of the drop height and delay time of ignition

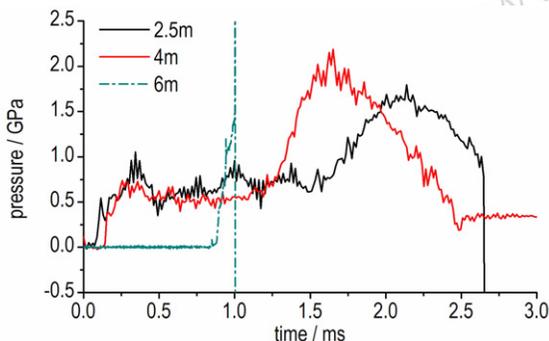


图 7 热-撞击复合试验中 PBX 炸药的底部压力-时间曲线

Fig. 7 The base pressure-time history of PBX in thermal-impact coupling test

### 3.3 温度对炸药撞击响应的影响

不同温度下 PBX 炸药的反应落高阈值结果见图 8。从图 8 可看出,温度对 PBX 炸药的撞击安全性影响明显。在 170 °C 以下,随着温度升高,PBX 炸药的反应落高阈值先升高,而后逐渐降低。反应落高阈值越高则撞击感度越低。不同温度时 PBX 的撞击感度从低到高的排列顺序依次为 82, 125, 20, 155, 170 °C,其中 20 °C 与 155 °C 时的阈值相近。当温度在 170 °C 时,反应落高阈值显著降低,在 0.5 ~ 1 m 左右,撞击感度显著提高。

药片状的(药量 50 mg)纯 HMX 炸药在室温 ~ 150 °C 范围内,反应落高阈值随着温度升高略有降低,但变化不明显<sup>[9]</sup>,因此,成型 HMX 基 PBX 炸药在 20 ~ 150 °C 范围内的撞击感度变化与 HMX 含量关系不大,而可能与 PBX 在高温下的力学性能变化及由于热膨胀、热分解等产生的热损伤有关。

从图 8 可看出,82 °C 时 PBX 的反应落高阈值高于其它温度。这与该温度下 PBX 的力学性能有关。在 20 ~ 80 °C 范围内,随温度升高,PBX 炸药的压缩强度

显著降低(见图 9),从 44.85 MPa 降低到 4.24 MPa。PBX 炸药被加热到 82 °C 时,由于里面的粘结剂软化、低熔点钝感剂熔化,PBX 炸药发生软化、延展性增加,压缩强度降低,在撞击力的作用下易发生流动,不容易产生应力集中,减少了热点的形成,因此 82 °C 时 PBX 的撞击感度低于其他温度。

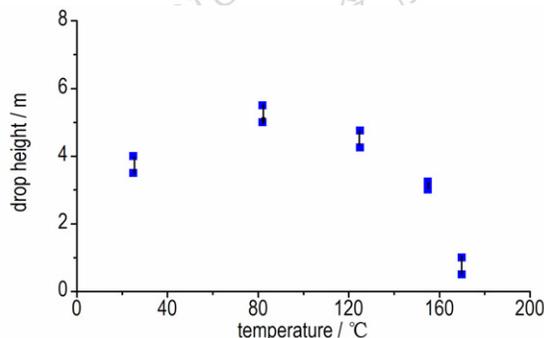


图 8 PBX 炸药片温度-反应落高阈值关系

Fig. 8 The reaction drop height threshold changing with temperatures of PBX

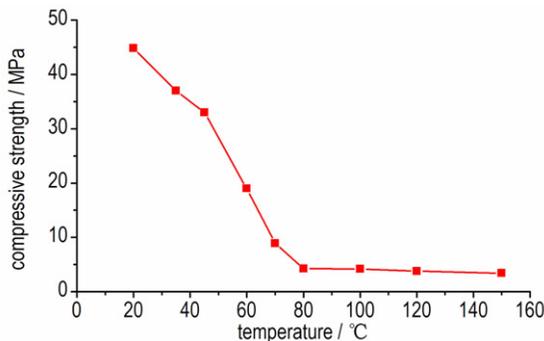


图 9 PBX 炸药压缩强度-温度关系

Fig. 9 Compressive strength vs. temperature for PBX

在 82 ~ 155 °C,随着温度升高,PBX 的反应落高阈值降低。从图 9 可看出,PBX 的压缩强度在该温度段没有明显变化,稳定在 3.4 MPa 左右。在撞击作用下,PBX 的流动性不会增加。由于 PBX 在受热膨胀时会产生一些孔洞、间隙等,同时在 136 °C 以上还会有部分炸药发生轻微的热分解也会形成一些孔洞间隙等损伤,在撞击压缩作用下这些损伤缺陷部位易产生热点,而且炸药的活化能随着温度升高会略有降低,因此,在这个温度范围内 PBX 炸药受到撞击时更容易反应,撞击感度会随着温度升高而提高。

从图 8 还可以看出,在 170 °C 时,PBX 炸药的撞击感度显著提高。这可能与 PBX 中 HMX 由稳定的  $\beta$  晶型转化为不稳定的  $\delta$  晶形有关。HMX 在 155 ~ 174 °C 范围内会发生  $\beta \rightarrow \delta$  相变,体积发生热膨胀,晶体膨胀 6.7%,导致晶格破坏,同时产生大量孔洞、裂

纹等损伤,从而形成大量的热点和剪切带,大幅提高了 HMX 的起爆感度,撞感与起爆药相当<sup>[10-13]</sup>。故 PBX 炸药在 170 °C 高温、落锤撞击下由于 HMX 晶形发生转变、PBX 炸药内部由于热膨胀和热分解产生的损伤、缺陷以及高温下炸药活化能降低等原因致使 PBX 炸药更容易发生反应,反应落高阈值显著降低,撞击感度明显提高。

## 4 结 论

(1) 采用自行设计的炸药片热与落锤撞击复合试验装置,对成型 HMX 基 PBX 炸药进行了不同温度下的热与落锤撞击试验,结果表明,设计的试验装置能有效用于成型炸药的热与撞击复合作用下的安全性研究。

(2) 在 20 ~ 170 °C 范围内,成型 PBX 炸药的撞击感度与温度密切相关。随温度升高,PBX 的撞击感度先降低后提高。其中,82 °C 时的撞击感度最低,这与该温度下 PBX 炸药的力学性能显著降低不易形成热点有关;在 82 ~ 155 °C,PBX 撞击感度随温度升高而提高,与炸药内部由于热膨胀和热分解产生的损伤缺陷易形成热点有关;170 °C 时的撞击感度显著提高,这与炸药中的 HMX 晶体发生相变、炸药内部由于热分解和热膨胀产生的缺陷密切相关。

(3) 高温环境下,炸药的点火延滞时间缩短。同一温度下,随着落锤高度增加,点火延滞时间变短。

### 参考文献:

- [1] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven test[C]//12th International Detonation Symposium. Snowmass; Office of Naval Research, 2002.
- [2] Michael Robert Williams, Mariana Violetta Matei. The decomposition of some RDX and HMX based materials in the one dimensional time to explosion apparatus. Part 2. Estimating the violence of the cook-off event [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 2007, 32(1): 7-15.
- [3] Maienschein J L, Wardell J F, Reaugh J E. Thermal explosion violence of HMX-based explosives-effect of composition, confinement and phase transition using the scaled thermal explosion experiment[R]. UCRL-IC-138876.
- [4] Kevin S, Vandersall, Craig M, et al. Shock initiation experiments on PBX9501 explosive at 150 °C for ignition and growth modeling[R], UCRL-CONF-213826.
- [5] Dai Xiaogan, Wen Yushi, Huang Hui, et al, Impact response characteristics of a cyclotetramethylene-tetranitramine based polymer-bonded explosives under different temperatures[J]. *J Appl Phys*, 2013, 114: 114906-114911.
- [6] 吴博,代晓淦,文玉史,等. 加热前后 PBX-2 炸药的撞击响应[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(4): 34-36. WU Bo, DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, et al. Impact response of unheated and heated PBX-2 explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(4): 34-36.
- [7] Dai Xiaogan, Wen Yushi, Zhang Haobin, et al. Fragment Impact Ignition Mechanism for Different HMX-based PBXs at high Temperature[C]//Proceedings of the 15th International Detonation Symposium, San Francisco, CA, July 2014: 1526-1535.
- [8] Sandusky W, Andrews A, Alexander E. Hazard tests on a heated TATB based high explosive[C]//11th International Detonation Symposium. Snowmass: [s.n.], 1998: 428-433.
- [9] Gengxin Zhang, Brandon L Weeks. A device for testing thermal impact sensitivity of high explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 35: 440-445.
- [10] Paul D Peterson, Joseph T Mang, Blaine W Asay. Quantitative analysis of damage in an octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazonic-based composite explosive subjected to a linear thermal gradient[J]. *J Appl Phys*, 2005, 97(9): 093507.
- [11] Karpowicz R J, Brill T B. The beta-delta transformation of HMX-its thermal analysis and relationship to propellants[J]. *AIAA J*, 1982, 20: 1586.
- [12] Herrmann M. Thermal expansion, transitions, sensitivities and burning rates of HMX[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992 17: 190-195.
- [13] Blaine W Asay, Bryan F Henson. On the difference in impact sensitivity of beta and delta HMX[J]. *Energetic Materials*, 2003, 21: 223-235.

## Response of a HMX Based PBX Explosive Under Thermal and Drop Hammer Impact Coupling Effect

SHEN Chun-ying, HUANG Qian, LIU Shi-jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** To investigate the safety of explosive under thermal and impact coupling effect, a 50 kg drop hammer impact test of HMX based PBX with  $\phi 20$  mm $\times$ 8 mm at 20-170 °C was performed by a self-designed experimental device. In the experiment, the pressure histories of explosive during the impact process was measured by pressure sensors. The impact ignition process of explosive was shot by the high-speed photography system. The impact response characteristics of PBX explosive at different temperatures were obtained. Results show that the impact safety of forming PBX explosive was closely related to the temperature, the impact safety at 82 °C is improved, and the impact safety at 170 °C becomes worse significantly. In the temperature range of 20 °C to 170 °C, with increasing the temperature, the impact sensitivity of PBX first decreases and then increases gradually. This is related to the mechanical property changing of PBX explosive occurred at high temperature, and the damage caused by thermal expansion, thermal decomposition, and the phase transition occurrence of HMX and other factors.

**Key words:** explosive safety; thermal and impact coupling effect; polymer bonded explosive(PBX)

**CLC number:** TJ55; TQ564

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.11.006