

文章编号: 1006-9941 (2017)08-0683-06

# 常温和 75 °C 条件下 PBX-2 炸药射弹撞击响应特性

代晓淦<sup>1</sup>, 于劭钧<sup>1</sup>, 黄风雷<sup>2</sup>, 文玉史<sup>1</sup>, 郑雪<sup>1</sup>, 姚奎光<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究常温和 75 °C 条件下 PBX-2 炸药射弹撞击响应特性, 采用高温撞击试验装置对 PBX-2 炸药进行了射弹撞击试验。采用冲击波超压传感器测量了炸药的反应超压, 结合回收样品综合分析了常温和 75 °C 下炸药的响应特性。采用有限元程序 LS-DYNA 计算分析了不同撞击速度对应的常温和 75 °C PBX-2 炸药的受力变化。结果表明, 常温下 PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值为 263.5 ~ 269.9 m · s<sup>-1</sup>; 加热至 75 °C 时, PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值为 316 ~ 367 m · s<sup>-1</sup>。相比常温状态, 当射弹撞击速度低于 800 m · s<sup>-1</sup> 时, 75 °C 条件下 PBX-2 炸药反应程度明显下降, 但射弹撞击速度高于 800 m · s<sup>-1</sup> 时, 约 1.54 GPa 的输入压力就能使 75 °C PBX-2 炸药产生剧烈反应。

**关键词:** 撞击安全性; 高聚物粘结炸药 (PBX); 响应特性

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.08.011

## 1 引言

炸药在异常环境下的安全性一直是含能材料领域研究的重点, 异常环境包括力、热耦合刺激, 如高温撞击。在低冲击载荷下, 炸药会发生严重的机械损伤、失效、变形及流动, 导致点火, 更复杂的是损伤(热、机械损伤)导致炸药性能变化, 以致影响炸药点火及之后的反应发展过程, 使得炸药的点火阈值及反应程度发生变化。因此, 研究炸药在撞击载荷下的点火阈值及响应特性对炸药使用及运输过程中的安全性评估具有重要的意义。

目前, 国外主要针对高温下炸药的撞击/冲击安全性变化开展了大量的研究, 主要集中在受热炸药的冲击起爆方面(即输入压力大于 2 GPa)。如 Dallman 等<sup>[1]</sup>研究了 PBX-9502 和 LX-17 炸药在常温、75 °C 和 252 °C 下到爆轰距离与引爆压力关系; Urtiew 等<sup>[2-5]</sup>以及 Tarver 等<sup>[6]</sup>广泛开展了三氨基三硝基苯(TATB)基以及奥克托今(HMX)基高聚物粘结炸药(PBX)受热冲击起爆, 获得了炸药热损伤后的冲击起爆响应特

性。对于输入压力小于 2 GPa 受热炸药非冲击点火安全性问题, 国内, 代晓淦等<sup>[7-8]</sup>设计了射弹撞击试验开展了初步的研究, 发现 HMX 高温相变显著影响 PBX 炸药撞击安全性; 李金河等<sup>[9]</sup>采用火炮飞片加载以及电磁粒子测速技术研究了 HMX 基炸药常温下的反应阈值, 获得了炸药的化学反应以及点火反应阈值, 但未考虑力、热耦合作用以及炸药状态对反应阈值的影响。由于高温和撞击耦合加载作用实验比较困难, 同时受热炸药撞击作用机制更复杂, 涉及力、温度等多种因素的相互影响, 不确定性较大。因此, 不同输入压力下加热炸药的撞击安全性问题研究相对较少。

为此, 本研究在常温和 75 °C 下, 以射弹撞击加载方式, 研究不同撞击速度时 PBX-2 炸药射弹的响应特性, 分析了不同输入压力对常温和 75 °C PBX-2 炸药射弹撞击响应的影响, 为评估力、热耦合作用下炸药的安全性提供参考。

## 2 试验原理与装置

### 2.1 试验原理

采用的高温下 PBX 炸药射弹撞击试验(简称为高温撞击试验)装置如图 1 所示<sup>[7-8]</sup>。试验时, 将炸药柱放入装置壳体内, 首先利用加热装置以一定的升温速率加热装置壳体, 热量通过热传导方式从壳体传入炸药柱内, 将炸药加热。当炸药加热至预定温度时发射射弹, 撞击装有炸药的壳体, 使炸药样品受到热、撞击、

收稿日期: 2016-12-18; 修回日期: 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11472051), 中国工程物理研究院化工材料研究所科技创新基金(KJ CX-201503)

作者简介: 代晓淦(1978-), 男, 副研究员, 主要从事炸药安全性研究。e-mail: zhangy2005767@sina.com

通信联系人: 姚奎光(1987-), 男, 助理研究员, 主要从事炸药安全性研究。e-mail: yaokuiguang1987@163.com

剪切等多种刺激的综合作用,导致炸药样品发生不同程度的反应。根据高速摄像图像、空气冲击波超压、试验件残骸,进行综合分析,评价加热前后炸药的撞击安全性变化。

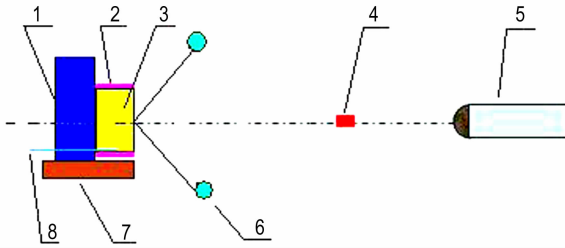


图1 高温射弹撞击试验示意图

1—金属挡板, 2—电加热带, 3—炸药, 4—射弹, 5—发射装置, 6—冲击波超压传感器, 7—支撑架, 8—热电偶

Fig. 1 Schematic diagram of projectile impact test at high temperature

1—metal baffle, 2—electric heating device, 3—explosive, 4—projectile, 5—launch device, 6—shock-wave overpressure sensor, 7—underprop, 8—thermocouple

试验过程中主要采用 MEMRECAM GX-1 高速录像机,观测射弹撞击炸药点火反应情况;在距离撞击点 3 m 位置处用冲击波超压测试系统(冲击波超压传感器、YE6600 电荷放大器以及泰克示波器组成)测量炸药反应超压;采用 K 型热电偶监测炸药边缘的温度。

## 2.2 试验装置

高温撞击试验中装药壳体结构示意图见图 2 所示,由炸药试样、壳体、压盖等组成。炸药尺寸  $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ,压盖厚度为 4 mm,材料为 Q235 钢;

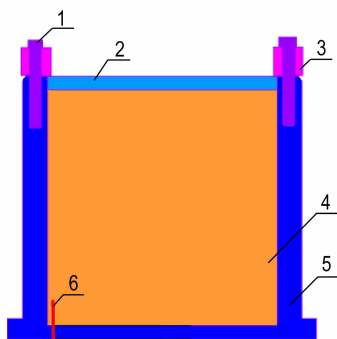


图2 高温射弹撞击试验中装药壳体结构示意图

1—螺钉, 2—压盖, 3—压环, 4—炸药试样, 5—壳体, 6—热电偶

Fig. 2 Schematic diagram of charge shell configuration of projectile impact test at high temperature

1—cover plate, 2—bolt, 3—retaining ring, 4—explosive sample, 5—shell, 6—thermocouple

压环、壳体材料均为 Q235 钢。试验时在装药壳体外套上电加热带,实现对装置加热,具体见图 3 所示。对常温和 75 °C 两种状态下的 PBX-2 炸药(主要由 HMX、TATB 和粘结剂组成)开展试验研究。射弹尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,材料为 Q235 钢,加载速度可达  $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



图3 PBX 炸药高温射弹撞击试验装置照片

Fig. 3 The photograph of projectile impact test for PBX device at high temperature

## 3 计算分析

由于试验中压力测试困难,故采用计算方法模拟分析 PBX-2 炸药受力过程,为此,建立了射弹撞击计算模型,如图 4 所示,图中标注点 A 位于压盖与炸药接触面,计算网格尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。对炸药采用 PLASTIC\_KINEMATIC 模型计算射弹撞击过程中炸药受力,钢壳体材料模型为 JOHNSON\_COOK,常温和 75 °C 两种温度下炸药力学参数见表 1<sup>[10]</sup>。

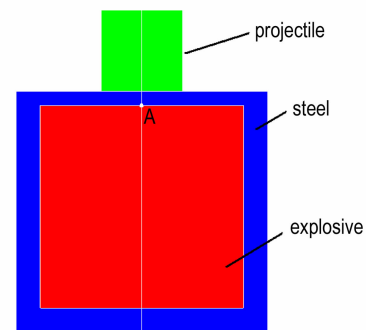


图4 射弹撞击计算模型

Fig. 4 Model of calculating the projectile impact

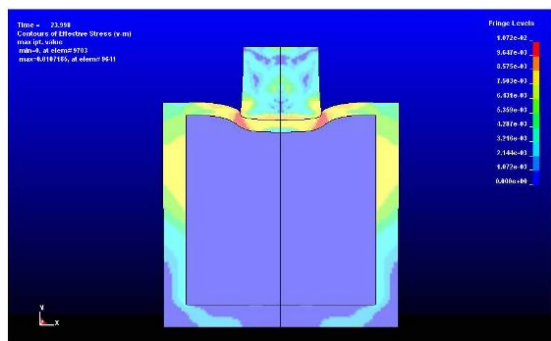
采用有限元程序 LS-DYNA 对该撞击试验进行了数值计算,给出了常温  $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  射弹撞击下计算的典型应力云图,如图 5 所示;计算了常温和 75 °C 条件

下不同速度撞击时 A 点的受力曲线,结果如图 6 所示。由图 5a 可见,在  $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  射弹速度撞击下,在撞击后  $23 \mu\text{s}$  时压盖已发生较大变形,此时射弹未击穿压盖;从图 5b 可知,在撞击后  $42 \mu\text{s}$  时射弹已击穿压盖,并剪切形成圆片,可见撞击过程中射弹边缘接触处有明显的剪切作用,该射弹撞击试验中对炸药作用的主导机制是强剪切作用。

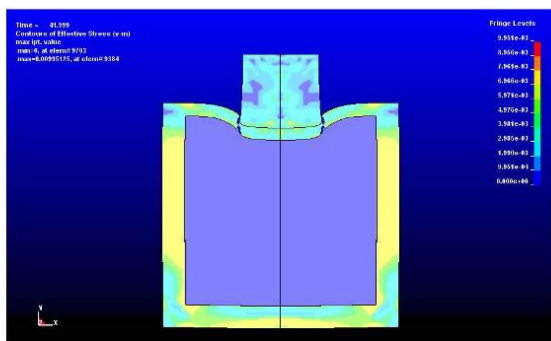
表 1 PBX-2 炸药力学参数

Table 1 Mechanical parameters of PBX-2 explosive

materials	test condition	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	compressive module /GPa	compressive strength /MPa
PBX-2	ambient temperature	1.849	10.1	44.9
	75 °C	1.835	1.9	6.3



a. 23  $\mu\text{s}$

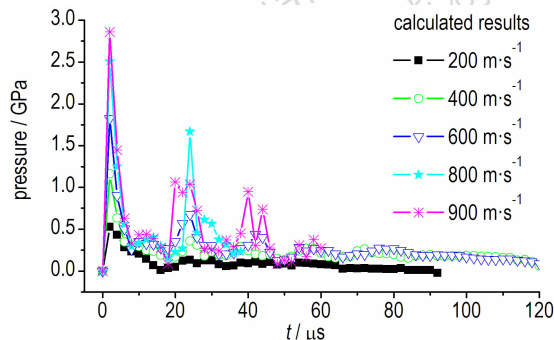


b. 42  $\mu\text{s}$

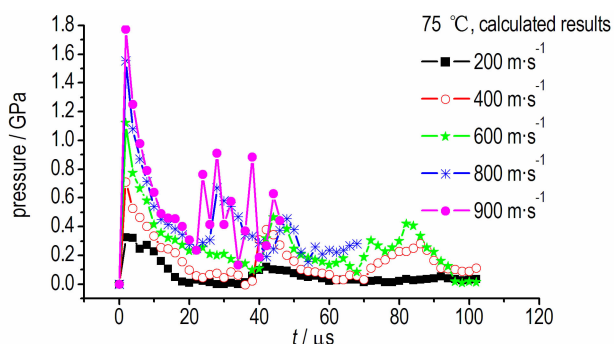
图 5 计算得到的常温  $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击下典型应力云图  
Fig.5 Typical stress distribution at ambient temperature and  $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  obtained by calculation

从图 6 可看出,对于常温 PBX-2 炸药,在  $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击速度下,撞击峰值压力约为 0.52 GPa;在  $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度下,撞击峰值压力约为 2.6 GPa。对于 75 °C PBX-2 炸药,在  $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击速度下,撞击峰值压力约 0.33 GPa,在  $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击速度下,撞击峰值压

力达到约为 1.54 GPa。由此可见,由于 75 °C 时 PBX-2 炸药的力学性能改变,导致在相同速度撞击下 PBX-2 炸药受力均远低于常温条件。因此,相比于常温,要使加热至 75 °C 时 PBX-2 炸药发生点火反应,就需要更高的撞击速度。



a. ambient temperature



b. 75 °C

图 6 计算的常温和 75 °C 时不同撞击速度下 A 点受力曲线  
Fig.6 Stress curves of the point A under various projectile velocities at ambient temperature and 75 °C

## 4 试验结果

### 4.1 试验装置残骸分析

图 7 是回收的射弹撞击常温以及 75 °C PBX-2 炸药的试验装置残骸照片。从图 7a 中可以看出<sup>[7]</sup>,对于常温炸药,当速度在  $237 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,PBX-2 炸药表面有一凹坑,装置完好,表明此时炸药没有发生反应;当速度在  $269.9, 321.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,壳内无剩余样品,表明此时炸药发生了反应;以  $786.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度撞击,压盖被击穿,约束壳体裂为两块;以  $844 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度撞击,未回收有壳体残骸,见证板上留有壳体高速撞击的凹坑,连接件上有明显反应导致的痕迹,表明此时炸药发生了高烈度反应;  $1033 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击下的结果与  $844 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度撞击结果基本一致。

炸药被加热至 75 °C 时,在射弹速度为 276,



294  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, PBX-2 炸药表面有一凹坑, 壳体完好, 高速录像测试发现未有点火出光现象, 表明炸药未反应; 当速度在 367  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右时, 壳内未有剩余样品, 撞击过程中有点火出光现象, 表明此时炸药发生了反应; 在

553  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度撞击下, 约束壳体裂为两块, 底板未被击穿; 在 786  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击下, 约束壳体裂为三块, 底板被击穿, 表明炸药未发生剧烈反应; 在 830  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  撞击下, 反应形成了小破片, 表明此时炸药发生了高烈度反应。



图7 回收的常温和 75 °C 时试验装置残骸照片

Fig.7 Photographs of recover wreckage of test device at ambient temperature and 75 °C

#### 4.2 常温和 75 °C PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值分析

图 8 为射弹撞击常温和 75 °C 下 PBX-2 炸药超压与弹速曲线, 结合图 7 结果照片综合分析, 对于常温 PBX-2 样品, 在 237, 247.2, 263.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时 PBX-2 炸药没有发生反应; 而在速度为 269.9, 305.6  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时反应超压在 15 kPa 附近, 表明炸药发

生了爆燃反应; 在 321.2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时 PBX-2 炸药反应超压达到了约 22 kPa, 仅比同等条件下雷管起爆 PBX-2 炸药 (即射弹撞击试验装置中 PBX-2 炸药完全爆轰时产生的超压) 产生的超压差 5 kPa 左右, 表明 PBX-2 炸药发生的反应接近爆轰; 在 700 ~ 800  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 反应超压在 15 kPa 附近, 表明炸药发生了爆燃反应; 在 844, 879, 1033  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 反应超压为 22 ~ 24 kPa, 接

近同等条件下雷管起爆 PBX-2 炸药产生的超压。加热至 75 °C 时,射弹以 276, 294, 316 m · s<sup>-1</sup> 的速度撞击 PBX-2, 炸药均未发生反应; 速度为 367 m · s<sup>-1</sup> 时反应超压约 4 kPa, 发生了爆燃反应; 在 553, 786 m · s<sup>-1</sup> 速度撞击下反应超压均小于 10 kPa, 显著低于常温样品, 而在速度 830, 879 m · s<sup>-1</sup> 时, 反应超压约为 25 kPa, 均高于同等条件下常温样品。

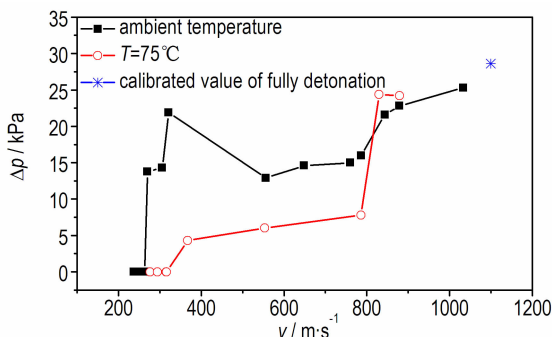


图 8 常温和 75 °C 下射弹撞击 PBX-2 炸药超压与弹速曲线  
 Fig. 8 Curves of impact velocity-overpressure of PBX-2 explosive at ambient temperature and 75 °C

试验结果表明, 常温 PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值为 263.5 ~ 269.9 m · s<sup>-1</sup>; 加热至 75 °C 时, PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值为 316 ~ 367 m · s<sup>-1</sup>。相比常温条件, 75 °C 下 PBX-2 炸药的力学性能显著降低, 其撞击点火反应速度阈值显著升高。在非冲击点火条件下<sup>[11]</sup>, 75 °C 时 PBX-2 炸药反应超压明显低于常温状态, 主要原因<sup>[12-13]</sup>是炸药被加热至 75 °C 后, 粘结剂明显发生了流动, 填补了原有孔隙, 相比常温炸药, 加热后炸药柱中缺乏孔隙而不易形成对流燃烧, 炸药燃烧面积相对较小, 气体生成速率和能量释放速率都受到很大的限制, 使得炸药反应超压低于常温状态。

由图 6 压力计算结果和图 8 超压结果可知, 相比常温状态, 射弹以大于 800 m · s<sup>-1</sup> 的速度撞击 75 °C PBX-2 炸药需要较低输入压力, 就能使其产生更为剧烈的反应。

### 5 小结

加热至 75 °C 时, PBX-2 炸药的力学性能显著降低, 导致受力明显低于常温条件。

高温撞击试验中, 当射弹速度小于 800 m · s<sup>-1</sup> 时, 常温 PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值为 263.5 ~ 269.9 m · s<sup>-1</sup> 之间; 加热至 75 °C 时, PBX-2 炸药撞击点火反应速度阈值为 316 ~ 367 m · s<sup>-1</sup>。相比于常温条件,

在射弹撞击速度高于 800 m · s<sup>-1</sup> 时, 约 1.54 GPa 的输入压力就能使 75 °C 下的 PBX-2 炸药产生更为剧烈的反应。

温度和力学性能耦合作用导致加热前后 PBX-2 炸药撞击响应特性变化, 相比温度敏化效应, 加热导致的力学性能变化是影响 75 °C 下 PBX-2 炸药的撞击响应特性(点火反应速度阈值、反应程度)的主导因素, 75 °C 时 PBX-2 炸药撞击点火速度阈值显著提升, 反应程度明显下降。

### 参考文献:

- [1] Dallman J D, Wackerle J. Temperature-dependent shock initiation of TATB-based high explosives[C] // 10th International Detonation Symposium, Boston, MA, 1993: 130-138.
- [2] Urtiew P A, Cook T M, Maienschein J L, et al. Shock sensitivity of IHE at elevated temperature[C] // 10th International Detonation Symposium, Boston, MA, 1993: 139-147.
- [3] Urtiew P A, Tarver C M, Maienschein J L, et al. Effect of confinement and thermal cycling on the shock initiation of LX-17[J]. *Combustion and Flame*, 1996: 43-53.
- [4] Urtiew P A, Tarver C M, Forbes J W, et al. Shock sensitivity of LX-04 at elevated temperature[C] // Shock Compression of Condensed Matter, AIP Conference Proc. 429, Amherst, MA, 2000: 727-730.
- [5] Urtiew P A, Vandersall K S, Tarver C M, et al. Initiation of heated PBX-9501 explosive when exposed to dynamic loading[R], Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-CONF-214667, 2005.
- [6] Tarver C M, Forbes J W, Urtiew P A, et al. Shock sensitivity of LX-04 at 150 °C[C] // Shock Compression of Condensed Matter, AIP Conference Proc. 515, Snowbird, UT, 2000: 891-894.
- [7] 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.
- [7] 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.
- [8] DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, HUANG Hui, et al. Impact response characteristics of a cyclotetramethylene tetranitramine based polymer-bonded explosives under different temperatures[J]. *J Appl Phys*, 2013, 11: 114906.
- [9] 李金河, 傅华, 曾代朋, 等. 低冲击加载下 JOB-9003 炸药的反应阈值[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 876-880.
- [9] LI Jin-he, FU Hua, ZENG Dai-peng, et al. The reaction threshold of JOB-9003 explosive under low amplitude loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 876-880.
- [10] DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, ZHANG Hao-bin, et al. Fragment impact ignition mechanism for different HMX-based PBXs at high temperature [C] // 15th International Detonation Symposium, San Francisco, CA, July 2014: 1526-1535.
- [11] Blaine W Asay. Non-shock initiation of explosives[M]. Springer, 2010: 568-575.
- [12] 代晓淦, 王娟, 文玉史, 等. 加热前后 PBX 炸药燃烧转爆轰特性变化研究[J]. *含能材料*, 2013, 21(5): 649-651.
- [12] DAI Xiao-gan, WANG Juan, WEN Yu-shi, et al. Deflagration to detonation transition characteristics for heated PBX-2[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(5): 649-651.
- [13] DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, HUANG Feng-lei, et al. Effect of temperature, density and confinement on deflagration to detonation transition of an HMX-based explosive [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39: 563-567.

## Response Characteristic of PBX-2 Explosive under Projectile Impact at Ambient Temperature and 75 °C

DAI Xiao-gan<sup>1</sup>, YU Shao-jun<sup>1</sup>, HUANG Feng-lei<sup>2</sup>, WEN Yu-shi<sup>1</sup>, ZHENG Xue<sup>1</sup>, YAO Kui-guang<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the response characteristic of PBX-2 explosive under projectile impact at ambient temperature and 75 °C, the projectile impact tests of PBX-2 explosive were conducted by a high temperature impact test device. The reaction overpressure of the explosive was measured by the shock-wave overpressure sensor and the response characteristics of the explosive at ambient temperature and 75 °C were comprehensively analyzed using recovered samples. The stress variation of PBX-2 at ambient temperature and 75 °C at different impact velocities was calculated and analyzed using finite element program LS-DYNA. The results show that the threshold velocity of ignition reaction for PBX-2 explosive at ambient temperature is from 263.5 m · s<sup>-1</sup> to 269.9 m · s<sup>-1</sup>, while the threshold velocity of ignition reaction for PBX-2 heated to 75 °C is from 316 m · s<sup>-1</sup> to 367 m · s<sup>-1</sup>. Compared with ambient temperature state, when the projectile velocity is less than 800 m · s<sup>-1</sup>, the reaction degree of PBX-2 at 75 °C obviously decreases. However, when the projectile velocity is higher than 800 m · s<sup>-1</sup>, the impact pressure of about 1.54 GPa can make the PBX-2 at 75 °C occur violent reaction.

**Key words:** impact safety; polymer bonded explosive (PBX); reaction characteristic

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j. issn.1006-9941.2017.08.011



### 《含能材料》“损伤与点火”征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部