

# HMX 基 PBX 的温度环境适应性

韦兴文, 周筱雨, 涂小珍, 王 培

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:**对 HMX 基 PBX 进行了  $-40\sim+75^{\circ}\text{C}$  温度循环试验和温度冲击试验,采用超声波参量检测方法对炸药的内部损伤进行了分析和表征。并对环境试验前后炸药的力学性能和破坏方式进行了实验研究。结果表明,温度循环试验和温度冲击试验将导致 HMX 基 PBX 产生热损伤,使 HMX 基 PBX 压缩强度轻微下降,而对拉伸强度影响不大。

**关键词:**物理化学;高聚物黏结炸药;PBX;环境适应性;热损伤;力学性能;超声波检测

**中图分类号:**TJ55; O642.3<sup>+1</sup>

**文献标志码:**A

**文章编号:**1007-7812(2012)01-0015-04

## Thermal Environment Adaptability of HMX based PBX

WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, TU Xiao-zhen, WANG Pei

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The thermal cycling and thermal shock tests between  $-40^{\circ}\text{C}$  and  $75^{\circ}\text{C}$  were carried out. The thermal damages of PBX were studied by ultrasonic characterization. The mechanical properties and failure modes of the PBX were experimentally investigated before and after environment tests. The results show that the thermal cycling and thermal shock can induce the thermal damages of PBX, which make the compressive intension decrease slightly, but the tensile intension doesn't change significantly.

**Key words:** physical chemistry; polymer bonded explosive; PBX; environment adaptability; thermal damage; mechanical properties; damage ultrasonic testing

## 引 言

PBX 在贮存、运输和使用时会经历各种各样的温度环境。短时间的高温作用会加剧界面分子的运动,使剪切强度降低,但是,如果长期暴露于较高的温度下,则会导致一些反应的发生,引起界面的物理和化学方面的变化,产生热老化<sup>[1-5]</sup>。因此,炸药件在贮存的过程中,将会发生界面“损伤”,导致材料的微观界面结构发生变化,产生微小缺陷。随着外界载荷的变化,缺陷会演化发展,并进一步汇集、扩展,最终可能导致材料的宏观破坏。另一方面,由于炸药件是粉末压制脆性材料,温度突变引起的热应力可能会使炸药件产生热激损伤、微裂纹、开裂或塌陷,这将直接影响到武器的安全性能和使用性能<sup>[6-10]</sup>。田勇等<sup>[11-12]</sup>用淬水法和超声波特

性参量检测技术对 HMX 基 PBX 试样的热冲击损伤破坏进行了试验研究,获得了热冲击温度差与试样损伤破坏率、超声波声速、增益之间正相关的对应关系。

本实验从炸药装药的实际使用环境条件出发,对压制成型的 HMX 基 PBX 进行温度循环试验和温度冲击试验,考察不同温度载荷作用对其损伤及力学性能的影响,综合评估 HMX 基 PBX 的温度适应能力,为其工程应用提供依据。

## 1 实 验

炸药为 HMX 基 PBX,黏结剂为三元乙丙共聚物。样品尺寸分别为  $\Phi 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$  药柱和  $\Phi 15\text{ mm}\times 65\text{ mm}$  长哑铃,粉末压制成型,密度约为  $1.850\text{ g/cm}^3$ 。

收稿日期:2011-10-20; 修回日期:2011-12-13

基金项目:国家自然科学基金(10832003)

作者简介:韦兴文(1977-),硕士研究生,助理研究员,从事含能材料老化研究工作。

温度循环试验使用 ESL-04AGP 调温调湿箱, 在  $-40\sim+75^\circ\text{C}$  开展热循环试验, 升降温速率为  $12^\circ\text{C}/\text{h}$ , 并在  $-40^\circ\text{C}$  和  $75^\circ\text{C}$  恒温 2 h 使样品温度均匀稳定, 试验周期数分别为 5 个周期和 10 个周期。在  $-55\sim+75^\circ\text{C}$  高温试验箱和低温试验箱进行热冲击损伤试验, 并在  $-55^\circ\text{C}$  和  $75^\circ\text{C}$  恒温 2 h 使样品温度均匀稳定, 高低温转换时间小于 5 min, 试验周期数分别为 1 个周期、3 个周期和 5 个周期。

利用 CTS-36 型数字化超声波探伤仪检测哑铃状和柱状样品的热损伤。使用单换能器纵波脉冲反射法, 探头频率 2.5 MHz, 晶片尺寸  $\Phi 10\text{ mm}$ , 仪器增益值的上限为 84 dB, 耦合剂为水, 耦合面为试样端面。检测的超声波参量包括声速和增益值。

采用英国 INSTRON 公司 5582 型电子万能试验机进行拉伸性能和压缩性能的测试, 参照 GJB772A-97 方法 418.1 和 413.1 标准执行。横梁速度为  $0.5\text{ mm}/\text{min}$ , 测试温度为  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 。采用中科科仪公司 KYKY-2800B 扫描电子显微镜对热疲劳前后 HMX 基 PBX 拉伸断口形貌进行观察和分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HMX 基 PBX 温度循环损伤对力学性能的影响

温度循环试验前后 HMX 基 PBX 的密度及超声波参数值见表 1。

由表 1 可见, 经热循环试验后, HMX 基 PBX 柱状和哑铃状的密度均有所下降, 这主要是由于温

度循环导致药柱发生不可逆长大所致。由于 PBX 中黏结剂的含量很低, 而且黏结剂与 HMX 颗粒的热膨胀系数有很大不同。在交变热应力作用下, 会发生黏结剂从炸药表面“脱粘”, 导致炸药产生塑性形变即“不可逆长大”, 可以通过尺寸和密度两个物理量进行观测。超声波参数值均具有相同的变化规律: 声速值随温度循环周期数的增加而减小, 但增益值随周期数的变化不明显。从超声波检测理论定性分析, 材料的增益值侧重于关联材料局部的宏观性能, 如缺陷的存在等; 声速与材料的密度密切相关, 其侧重于关联材料整体的微细观性能, 如损伤等。这表明, 温度循环试验将使 HMX 基 PBX 产生热疲劳损伤, 损伤程度随周期数增加而增大。用式(1)可以计算 PBX 的损伤量<sup>[13]</sup>。

$$D_p = 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_1}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中:  $D_p$  为 PBX 的损伤量;  $\rho_0$  为初始 PBX 的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_1$  为受损 PBX 的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。计算得到 PBX 热疲劳损伤量如表 1 所示。

表 1 结果表明, 柱状和哑铃状不同尺寸规格的 PBX 样品, 热疲劳损伤量很接近, 也就是说用式(1)表征热损伤度是合理的。随着温度循环周期数的增加, PBX 热疲劳损伤度增大, 但增长幅度随周期数增大有所减小, 这与热应力作用导致 PBX 产生塑性形变的特性有关, 一定的温度范围和温变速率下热应力是有限的一个量值, 产生的最大形变量(弹性应变和塑性应变)也是一个有限量值。

温度循环试验前后 HMX 基 PBX 力学性能的测试结果见表 2。

表 1 温度循环试验前后 HMX 基 PBX 的密度及超声波参数值

Table 1 Densities and ultrasonic character of HMX based PBX before and after thermal cycling

| 热循环<br>周期数/个 | 密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ |       | 声速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |             | 增益/dB        |               | $D_p/10^{-4}$ |       |
|--------------|-------------------------------------|-------|------------------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|-------|
|              | 药柱                                  | 哑铃    | 药柱                                 | 哑铃          | 药柱           | 哑铃            | 药柱            | 哑铃    |
| 0            | 1.851                               | 1.848 | $2856\pm 4$                        | $3055\pm 1$ | $7.2\pm 0.8$ | $39.1\pm 2.1$ |               |       |
| 5            | 1.844                               | 1.841 | $2852\pm 1$                        | $3036\pm 2$ | $7.3\pm 0.5$ | $40.0\pm 2.0$ | 25.23         | 25.27 |
| 10           | 1.842                               | 1.839 | $2842\pm 3$                        | $3021\pm 1$ | $7.6\pm 0.6$ | $39.2\pm 2.3$ | 32.44         | 32.49 |

表 2 温度循环试验前后 HMX 基 PBX 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of HMX based PBX before and after thermal cycling

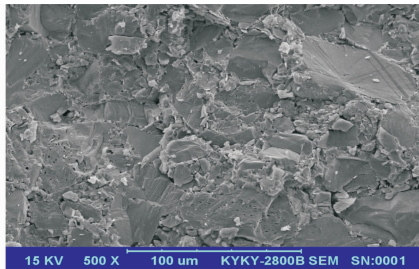
| 热循环周期数/个 | 压缩强度/MPa        | 压缩模量/GPa        | 拉伸强度/MPa       | 拉伸模量/GPa        |
|----------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 0        | $50.64\pm 0.79$ | $13.86\pm 0.92$ | $6.88\pm 0.48$ | $11.53\pm 0.07$ |
| 5        | $44.50\pm 0.24$ | $12.93\pm 0.34$ | $7.80\pm 0.61$ | $10.51\pm 0.13$ |
| 10       | $42.70\pm 0.20$ | $12.50\pm 0.35$ | $7.59\pm 0.70$ | $10.21\pm 0.15$ |

由表 2 可见, 随着循环周期数的增加, HMX 基 PBX 的压缩强度和压缩模量均有所减小, 但拉伸强

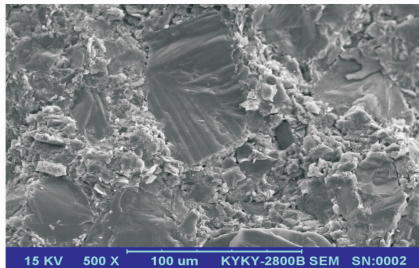
度和拉伸模量的变化趋势不明显。这表明, 热疲劳损伤导致 HMX 基 PBX 的压缩性能下降, 而对拉伸

性能无显著影响。

PBX 是一种黏弹性材料, 在压缩载荷作用下炸药晶体将起主要作用, 而在拉伸载荷作用下, 黏结剂与炸药的界面将起决定作用<sup>[14]</sup>。用 KYKY-2800B 扫描电子显微镜对 HMX 基 PBX 拉伸断口形貌进行观察, 结果如图 1 所示。



(a) 初始样品



(b) 循环后样品

图 1 HMX 基 PBX 拉伸断口 SEM 照片

Fig. 1 SEM photographs of fractured surface of HMX based PBX

由图 1 可见, 热疲劳试验前后 HMX 基 PBX 拉伸断裂断口形貌差别不大, 拉伸应力作用下断裂的

主要模式为炸药晶体颗粒和黏结剂界面的脱粘, 其主要特征有两个: 一是炸药颗粒脱落后留下的黏结剂; 二是断面上的炸药晶体还比较完整。经过温度循环试验后, HMX 炸药晶体与黏结剂仍保持极强的黏合作用。

## 2.2 HMX 基 PBX 热冲击损伤对力学性能的影响

热冲击试验前后 HMX 基 PBX 的密度和超声波参数值见表 3。

由表 3 可见, 经热冲击试验后, HMX 基 PBX 柱状和哑铃状样品的密度均没有出现明显下降, 但超声检测得到的声速值随冲击次数增加而下降, 增益值变化无明显规律。表明热冲击没有引起试样的“不可逆长大”, 但也导致试样内部微损伤, 其微损伤量可用式(2)进行计算<sup>[15]</sup>。

$$D_c = 1 - \left(\frac{c_0}{c_1}\right)^2 \quad (2)$$

式中:  $D_c$  为 PBX 的损伤量;  $c_0$  为初始 PBX 的超声波速度, m/s;  $c_1$  为受损 PBX 的超声波速度, m/s。计算得到 PBX 热冲击损伤量如表 3 所示。

表 3 结果表明, 柱状和哑铃状样品的热冲击损伤量随着热冲击周期数的增加而增大, 药柱经一轮温度冲击后即出现了较大的损伤量, 而哑铃状样品的损伤量相对较小。因此, 热冲击损伤量与样品的形状尺寸密切相关, 相同的温度冲击条件下, 尺寸较大的样品内部产生的热应力更大, 相应的损伤也更大。

表 3 热冲击试验前后 HMX 基 PBX 的密度和超声波参数值

Table 3 Densities and ultrasonic character of HMX based PBX before and after thermal shock

| 热冲击<br>周期数/个 | 密度/(g · cm <sup>-3</sup> ) |       | 声速/(m · s <sup>-1</sup> ) |        | 增益/dB    |          | D <sub>c</sub> /10 <sup>-4</sup> |       |
|--------------|----------------------------|-------|---------------------------|--------|----------|----------|----------------------------------|-------|
|              | 药柱                         | 哑铃    | 药柱                        | 哑铃     | 药柱       | 哑铃       | 药柱                               | 哑铃    |
| 0            | 1.849                      | 1.848 | 2884±4                    | 2937±3 | 10.6±1.8 | 34.6±0.5 |                                  |       |
| 1            | 1.849                      | 1.848 | 2820±5                    | 2933±4 | 7.0±1.0  | 31.6±0.5 | 43.89                            | 2.72  |
| 3            | 1.847                      | 1.847 | 2808±8                    | 2912±5 | 8.5±1.0  | 32.4±0.5 | 52.01                            | 16.95 |
| 5            | 1.847                      | 1.846 | 2772±4                    | 2849±7 | 9.0±0.8  | 36.0±1.8 | 76.16                            | 59.03 |

热冲击试验前后 HMX 基 PBX 药柱的力学性能测试结果见表 4。

表 4 热冲击试验前后 HMX 基 PBX 的力学性能

Table 4 Mechanical properties of HMX based PBX before and after thermal shock

| 热冲击周期数/个 | 压缩强度/MPa    | 压缩模量/GPa    | 拉伸强度/MPa   | 拉伸模量/GPa   |
|----------|-------------|-------------|------------|------------|
| 0        | 45.67±1.282 | 12.60±0.490 | 6.30±0.370 | 10.1±0.707 |
| 1        | 38.61±0.461 | 13.85±0.451 | 5.96±0.360 | 9.84±0.170 |
| 3        | 38.78±0.574 | 13.12±1.522 | 5.69±0.902 | 9.96±0.256 |
| 5        | 36.89±0.358 | 12.52±0.678 | 5.21±0.335 | 9.66±0.352 |

由表 4 可见, 随着热冲击周期数的增加, HMX 基 PBX 的压缩强度和拉伸强度出现明显的下降, 但

拉伸强度下降幅度不大。对比分析试验结果表明, 热冲击损伤和温度循环损伤对力学性能影响具有

相似的规律,即热损伤导致 HMX 基 PBX 压缩力学性能下降,而对炸药的拉伸性能影响不明显。

### 3 结 论

(1)温度循环试验和温度冲击试验均容易导致 HMX 基 PBX 产生热损伤,随温度循环和热冲击次数的增加而加剧。

(2)HMX 基 PBX 的热疲劳损伤机理为塑性形变导致尺寸“不可逆长大”和密度下降。热损伤导致 HMX 基 PBX 压缩力学性能下降,对炸药的拉伸性能影响不明显。

(3)热损伤后炸药晶体与黏结剂仍保持极强的黏合作用,HMX 基 PBX 仍然具有较高的抗拉强度。

#### 参考文献:

- [1] SUN Xiang-yu, LI Yan-li, ZHAO Hai-quan. The effect on aging properties of main components of NEPE propellant [C]// 37th Int Conf of ICT. Karlsruhe: ICT, 2006.
- [2] Sridhar B, T, N, Ravichandran K, Nagappa R. Study of ageing behaviour of a composite solid propellant using mechanical and ballistic tests [C]// 37th Int Conf of ICT. Karlsruhe: ICT, 2006.
- [3] Thompson D G, Idar D J, George T, Gray III. quasi-static and dynamic mechanical properties of new and virtually-aged PBX 9501 composites as a function of temperature and strain rate [C]// 37th Int Conf of ICT. Karlsruhe: ICT, 2006.
- [4] 冯国富, 杨朝卿, 于荫林. 高温暴露试验对 PBX 药柱的影响 [J]. 火炸药学报, 1997, 20(3): 17-19.  
FENG Guo-fu, YANG Chao-qing, YU Yin-lin. Influence of high temperature cycling test on PBX columns [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 1997, 20(3): 17-19.
- [5] Willey T M, Lauderbach L, Gagliardi F. Comprehensive characterization of voids and microstructure in TATB-based explosives from 10 nm to 1 cm; effects of temperature cycling and compressive creep [C]// 14th International Detonation Symposium. Coeur d'Alene: Office of Naval Research, 2010.
- [6] Sandusky H W, Bernerker R R. Influence of fresh damage on the shock reactivity and sensitivity of several energetic materials [C]// Proceedings of 10th Symposium on Detonation. Massachusetts: Office of Naval Research, 1993: 490-498.
- [7] 吴承云, 于荫林, 许光. 炸药模拟环境湿湿度试验技术研究 [J]. 兵工学报, 1996, 18(2): 27-31.
- [8] Meuken D, Scholtes G. Quantification of thermal and mechanical damage in PBX's [C]// Insensitive Munition and Energetic Materials Technology Symposium. Brisolol: NDIA, 2006.
- [9] 姚惠生, 黄风雷, 张宝平. 炸药冲击损伤及损伤炸药冲击起爆实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(6): 487-490.  
YAO Hui-sheng, HUANG Feng-lei, ZHANG Bao-ping. Experimental study on the impact damage and shock initiation of damaged explosives [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(6): 487-490.
- [10] 尹俊婷, 袁宝慧, 牛鹏俊. 炸药损伤及损伤炸药环境适应性的实验研究 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(2): 78-80.  
YIN Jun-ting, YUAN Bao-hui, NIU Peng-jun. Experimental study on the explosive damage and environment adaptability of damaged explosive [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(2): 78-80.
- [11] 田勇, 张伟斌, 郝莹. 炸药热冲击损伤破坏及超声波特性参量检测 [J]. 火炸药学报, 2000, 23(4): 13-15.  
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, HAO Ying. Thermal shock damage of explosives and its ultrasonic characterization [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2000, 23(4): 13-15.
- [12] 田勇, 罗顺火, 张伟斌. JOB-9003 炸药“激热”冲击损伤破坏及超声特征 [J]. 火炸药学报, 2002, 25(3): 17-19.  
TIAN Yong, LUO Shun-huo, ZHANG Wei-bin. Water-bathed thermal shock damage of PBX JOB-9003 and its ultrasonic characteristics [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2002, 25(3): 17-19.
- [13] 倪全刚, 陶春虎. 损伤力学教程 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [14] 陈鹏万, 丁雁生. 高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理 [J]. 含能材料, 2000, 8(4): 161-164.  
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng. Mechanical behaviour and deformation and failure mechanisms of polymer bonded explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2000, 8(4): 161-164.
- [15] CHEN Peng-wan, DAI Kai-da, HUANG Fei-lei. Ultrasonic evaluation of the impact damage of polymer bonded explosives [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 13(3): 342-347.