

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.005

# PBX 炸药体膨胀特性研究<sup>\*</sup>

孙培培 陈春燕 南 海  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 研制了适用于 PBX 炸药体膨胀的测试装置。采用此装置分别对热固型与热塑型 PBX 炸药的体膨胀力进行了测试,获得了两种炸药由常温升至 75 ℃时的体膨胀力和体膨胀力随温度的变化曲线。试验结果表明,两种炸药的体膨胀力均是随着温度的升高而增加,在 60 ~ 70 ℃范围内体膨胀力增加最大。炸药类型对炸药的体膨胀特性有较大的影响,热塑型 PBX 的体膨胀力远远大于热固型 PBX 的体膨胀力,是热固型炸药体膨胀力的 8 ~ 9 倍。对比不同质量的 PBX-A 炸药试验结果发现,随着炸药质量的增加,炸药体膨胀力随之增加;对体膨胀力-质量曲线进行线性拟合发现,体膨胀力随着质量的增加基本呈线性增长趋势。

[关键词] 热固型 PBX 炸药; 热塑型 PBX 炸药; 体膨胀力; 体膨胀特性

[分类号] TQ560

## Volume Thermal Expansion Performance of PBX Explosives

SUN Peipei, CHEN Chunyan, NAN Hai  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Testing device used to investigate volume thermal expansion of PBX explosive was designed. Thermal-curing PBX explosives and thermal plastic PBX explosives in the same size, and thermal-curing PBX explosives in different weights were tested. Volume thermal expansion strength and volume thermal expansion strength curves of these PBX explosives changing from room temperature to 75 ℃ were obtained. Comparing volume thermal expansion performance of thermal-curing PBX explosives with the thermal plastic PBX explosives in the same size, it was found that volume thermal expansion of both of these two PBX explosives increases with temperature, reaching the maximum at 60-70 ℃. The type of PBX explosive has great influence on volume thermal expansion performance. It has been concluded that volume thermal expansion of thermal plastic PBX explosives are far larger, which are 8-9 times, than that of thermal-curing PBX explosives. From test result comparison of PBX-A explosive with different weights, it was found that volume thermal expansion increases with weight of PBX explosive. In volume thermal expansion-weight fitting curve, volume thermal expansion increases linearly with the weight of PBX explosive.

[KEYWORDS] thermal-curing PBX explosives; thermal plastic PBX explosives; volume thermal expansion strength; volume thermal expansion performance

### 引言

为了保证武器弹药的使用功能,作为关键部件,炸药装药必须满足武器环境条件下的性能要求。特别是在长储及勤务过程中,由于环境温度的变化,炸药装药发生体积变化,从而对武器的结构产生应力作用甚至造成破坏,严重影响了武器正常的作用;与此同时,体积变化会造成炸药装药产生内部缺陷,使武器的安定性显著降低。

目前,复合炸药的膨胀性能基本是采用 GJB772A<sup>[1]</sup>中线膨胀仪法进行研究。线膨胀仪法是对药柱在高温下的尺寸进行测试,给出炸药轴向尺寸的变化。有研究<sup>[2]</sup>发现,TATB 基 PBX 炸药经热循环作用后会发生 1.5% ~ 2.0% 的永久性体积膨胀。李玉斌等<sup>[3-6]</sup>发现,TATB/HMX-PBX 炸药经热循环后也具有同样的现象。韦兴文等<sup>[7]</sup>研究表明,HMX 基 PBX 炸药的热膨胀系数随温度的变化较为复杂,在低于 330 K 时,线膨胀系数约为  $5.34 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;在 330 ~ 350 K 玻璃化转变区,线膨胀系数迅速

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-03-29  
第一作者:孙培培(1984 - ),本科,高工,研究方向为军用混合炸药。E-mail:269619821@qq.com

增大到  $13.47 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。在材料膨胀性能研究测试技术方面,目前陶瓷制备、金属等行业关注较多<sup>[8-10]</sup>,但主要还是材料的线膨胀测试。实际应用过程中,炸药在弹体内受热发生的单维度体膨胀具有更为重要的意义,对于此方面未见相关研究。

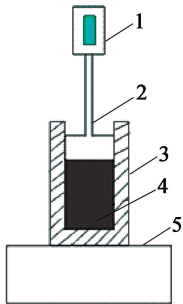
但是炸药在使用、储存等过程中,处于壳体内部限制条件下,膨胀时是整个炸药的体膨胀,体膨胀力的大小更能反映炸药膨胀的真实状态。

针对上述存在问题,首先设计了 PBX 炸药体膨胀力测试方法,采用此测试方法分别对热固型 PBX 炸药与热塑型 PBX 炸药的体膨胀力进行了测试,并对测试结果进行了分析。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原理

试验装置的原理如图 1 所示。首先,将试验样品装入测试模具中,测试样品上方放置测试压头,力学传感器放置在测试压头上。整个测试装置置于高温箱中,通过压力传感器获得炸药体膨胀力,电脑记录测试数据,形成体膨胀力-温度曲线。



1 - 力学传感器;2 - 压头;3 - 套筒;  
4 - 样品;5 - 底座。

图 1 体膨胀力测试装置示意图

### 1.2 试验样品

测试模具:内径为 60 mm,高度为 120 mm。  
热固型炸药:PBX-A,尺寸为  $\varnothing 60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 73 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。用真空捏合、真空浇注的方式将炸药浇注入模具内,固化成型后退模,修整至要求尺寸,直接装填进测试模具内部,保证端面平整。  
热塑型炸药:PBX-B,尺寸为  $\varnothing 60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,用真空捏合、真空浇注的方式将炸药浇注入测试模具内,冷凝成型后修整至要求尺寸,保证端面平整。  
分别测试两种炸药样品由常温升至 75 ℃ 过程

中的体膨胀力,测试结果中给出炸药体膨胀力-时间曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同类型炸药体膨胀力特性

图 2 与图 3 分别为 PBX-A 与 PBX-B 的膨胀力-时间曲线。

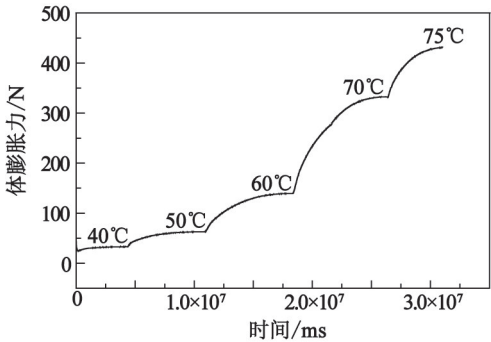


图 2 PBX-A 体膨胀力-时间曲线

Fig. 2 Volume thermal expansion-time curve of PBX-A

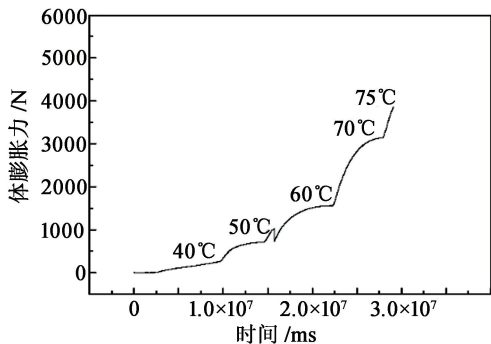


图 3 PBX-B 体膨胀力-时间曲线

Fig. 3 Volume thermal expansion-time curve of PBX-B

由图 2 和图 3 可见,炸药体膨胀力随着温度升高而增加,每个温度范围内的体膨胀力变化量不同,两种 PBX 炸药的体膨胀力均是在 60 ~ 70 ℃ 之间变化量最大。随着温度升高,炸药膨胀效应明显增加。其中,当温度由 50 ℃ 升高至 60 ℃ 时,炸药膨胀增加开始明显;当温度由 60 ℃ 升高至 70 ℃ 时,炸药体膨胀力增加最为显著,几乎为低温度时炸药体膨胀力的数倍;随着温度的继续增加,炸药继续发生膨胀,但小于 60 ℃ 至 70 ℃ 炸药体膨胀力的增长。

PBX-A 与 PBX-B 体膨胀力-温度曲线如图 4 所示,具体每个温度点的体膨胀力如表 1 所示。

从图 4 及表 1 可见,两种炸药体膨胀力都随温度升高而增加,但 PBX-B 的体膨胀力远远大于 PBX-A 的,其受热膨胀的性能远远高于 PBX-A。PBX-A 与 PBX-B 炸药均为 PBX 类型炸药,采用黏结剂均为 HTPB 基黏结剂,两种炸药成型方式存在

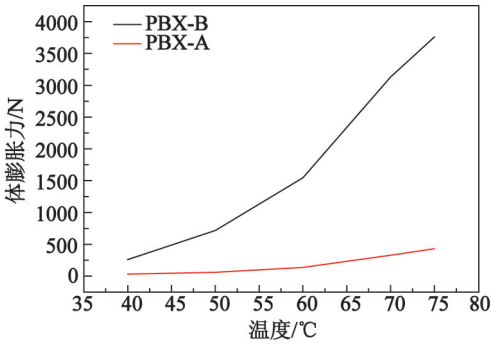


图 4 两种 PBX 炸药体膨胀力-温度曲线  
Fig. 4 Volume thermal expansion-temperature curve of two types of PBX explosives

表 1 两种 PBX 炸药不同温度下  
体膨胀力测试结果

Tab. 1 Test results of volume thermal expansion at different temperatures of two types of PBX

温度/℃	膨胀力增加量/N	
	PBX-A	PBX-B
40	31	261
50	61	716
60	137	1 544
70	329	3 131
75	430	3 758

差异,PBX-A 采用固化成型方式,PBX-B 采用冷凝成型方式。

2.2 不同质量炸药体膨胀特性

通过改变长径比的方式改变 PBX-A 炸药的体积,即改变炸药的质量,测试了 4 组不同质量 PBX-A 炸药由常温升至 75 ℃ 的体膨胀力,具体体膨胀力测试结果见表 2。由表 2 可见,随着炸药质量的增加,体膨胀力随之增加,通过计算得到了不同质量下的炸药体膨胀力,体膨胀力随着炸药质量增加在增大。

表 2 不同质量 PBX-A 体膨胀力测试结果

Tab. 2 Test results of volume thermal expansion of PBX-A with different weights

样品	直径/mm	长度/mm	质量/g	长径比	体膨胀力/N
1 <sup>#</sup>	60	50	233.1	0.83	43
2 <sup>#</sup>	60	73	341.3	1.22	141
3 <sup>#</sup>	60	100	466.3	1.67	310
4 <sup>#</sup>	60	200	932.6	3.33	718

炸药质量与体膨胀力的关系如图 5 所示,由图 5 可看出,炸药质量与体膨胀力之间基本呈线性增长的关系。对体膨胀力-质量曲线进行线性拟合,可得到质量与体膨胀力之间关系为

$y = -172.76 + 0.964x。$

式中: $y$  为体膨胀力,N; $x$  为炸药质量,g。  
拟合的相关系数为 0.991,线性相关性较好;可见,体膨胀力与炸药质量基本呈线性增长关系。

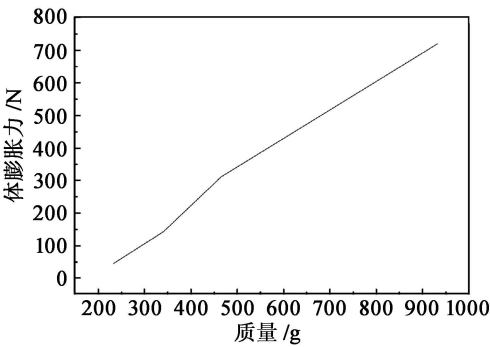


图 5 PBX-A 体膨胀力-质量曲线

Fig. 5 Volume thermal expansion-weight curve of PBX-A

2.3 讨论与分析

高分子材料的热膨胀现象,从微观的观点来分析,它是由高分子材料中链段的平均距离、键角的距离等随温度的升高而增大引起的,其热膨胀的本质是由原子的非简谐运动引起的。材料中相邻点间的作用力实际上是非线性的,0 K 时,原子处于平衡位置;温度升高,原子运动加剧,原子向右移动幅度更大一些,导致振动中偏移,宏观上即显示为材料的热膨胀现象。

PBX-A 中的 HTPB 通过固化反应与氰酸酯类固化剂形成三维网状立体结构。如图 6 所示。

HTPB 在从液态到固态的转变过程中,分子间距离从范德华作用距离(0.3 ~ 0.5 nm)到化学键(约 0.154 nm)发生了交联收缩<sup>[11]</sup>,随后在加热膨胀时,三维交联网络的分子间相互作用限制了其膨胀性,使固化网络的体膨胀力小于液态 HTPB 的体膨胀力。

PBX-B 仅采用 HTPB 为黏结剂,未加入固化剂,未形成网络结构,内部主要作用力为分子间范德华力,其内部黏结剂受热膨胀的状态如图 7 所示。

通常破坏分子间范德华力所需能量为几千焦每摩尔至几十千焦每摩尔,而破坏化学固化形成的化学键所需要的能量可达几百千焦每摩尔。高分子材料升温所提供的能量可使分子克服分子间范德华力,但无法克服化学键的牵制而运动。因此,高分子材料热膨胀通常由内部主链、链段或基团等伸展或运动构成。热固型炸药由于内部固化形成的三维网络结构的限制,仅仅其链段、侧基团可能发生运动,膨胀相对较小;而热塑型炸药膨胀过程中主链的伸

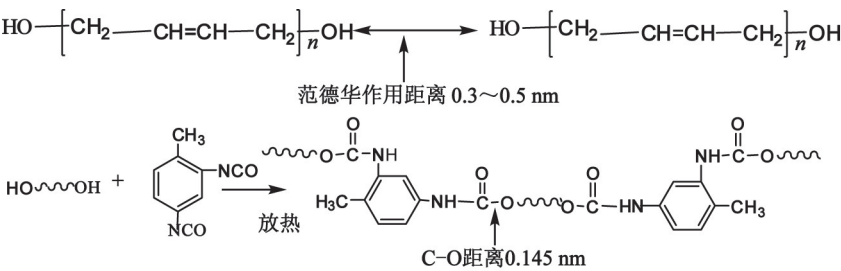


图 6 黏结剂的固化反应  
Fig. 6 Curing reaction of the adhesive



图 7 热塑型炸药内部黏结剂膨胀状态  
Fig. 7 Expansion state of internal binder of the thermal plastic PBX explosives

长、链段的运动和侧基团的运动均存在,其中主链的伸长产生的膨胀效应最明显,宏观上表现为膨胀性能较大。

3 结论

- 1) 设计了 PBX 炸药体膨胀力测试装置,成功测试到两种不同类型 PBX 的体膨胀力,为模拟计算 PBX 在弹体内的膨胀特性提供了数据支持;
- 2) 两种 PBX 炸药的体膨胀力随着温度的升高而增加,且不同温度段范围内增加程度不一,两种炸药均在 60 ~ 70 ℃ 范围内增加最大;
- 3) 热固性 PBX 的体膨胀力远远小于热塑性 PBX 的体膨胀力。

参 考 文 献

[1] 中国兵器工业总公司. 炸药试验方法: GJB 772A—97 [S]. 1997.

[2] MYERS L C. PBX 9502 coupon test: MHSMP-79-7[Z]. 1979.

[3] 李玉斌,郑雪,沈明,等. TATB 基 PBX 的热膨胀系数研究[J]. 火炸药学报,2003,26(1):23-25,55.

LI Y B, ZHENG X, SHEN M, et al. Study on thermal expansion coefficient of TATB-based PBX [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(1): 23-25, 55.

[4] 李玉斌,聂福德,孙杰,等. PBX 药柱的不可逆长大对 TATB/粘结剂界面粘结性能的影响[J]. 火炸药学报, 2001,24(4):15-16,19.

LI Y B, NIE F D, SUN J, et al. Influence of irrerer-sible growth of PBX on interface of TATB/binder [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001, 24 (4):15-16,19.

[5] OSBOM A G. Evaluation of LX-17 made form water-aminated TATB; MHSMP-82-38[Z]. 1982.

[6] 涂小珍,沈明,郑春,等. 热老化及辐照对 TATB 基 PBX 热膨胀性能的影响[J]. 含能材料, 2016, 24 (6):614-617.

TU X Z, SHEN M, ZHENG C, et al. Effect of thermal aging and irradiation on thermal expansion property of TATB based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016,24(6):614-617.

[7] 韦兴文,周筱雨,王培,等. 温度对 HMX 基 PBX 炸药热膨胀系数和热导率的影响[J]. 火炸药学报,2012,35 (3):33-37,41.

WEI X W, ZHOU X Y, WANG P, et al. Influence of temperature on thermal expansion coefficient and thermal conductivity of HMX based polymer bonded explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(3):33-37,41.

[8] 代伟. 金属线膨胀系数测定仪研究[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(1):36-38.

DAI W. Linear expansion coefficient metal eector study [J]. Metrology and Measurement Technique, 2009, 36 (1):36-38.

[9] 葛山,李楠,尹玉成,等. 大试样热膨胀仪的研制与应用[J]. 耐火材料, 2008, 42(5):397-398.

[10] 付志新,郭占成,袁章福,等. 图像在线测量法研究煤热解过程中的膨胀与收缩特性[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(5):525-529.

FU Z X, GUO Z C, YUAN Z F, et al. Shrinkage characteristics of briquette during pyrolysis using online image collection [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2005,33(5):525-529.

[11] BOARO L C C, GONCALVES F, GUIMARÃES T C, et al. Polymerization stress, shrinkage and elastic modulus of current low-shrinkage restorative composites [J]. Dental Materials,2010,26(12):1114-1150.