

文章编号:1006-9941(2020)11-1095-07

超声检测方法研究 HMX 及 TATB 基 PBX 的热循环性能

程 堃^{1,2}, 徐 尧¹, 李 丽¹, 肖 盼¹, 庞海燕¹, 张伟斌¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

摘要: 为了获得奥克托今(HMX)及三氨基三硝基苯(TATB)基高聚物黏结炸药(PBX)热循环性能,在-40~75℃条件下对HMX及TATB基PBX进行热循环试验,采用超声回波法对分别经历3*N*个(*N*=0,1,2,⋯,9)热循环周期的炸药试件的纵、横波声速进行了测试,通过弹性模量和泊松比的超声测量方法计算得到动弹性模量(杨氏模量、剪切模量)和动泊松比,通过拉伸力学性能试验对静弹性模量进行了测试,计算得到动静弹性模量比。结果在热循环试验过程中,随着周期增加,HMX基PBX密度降低且降低速率逐步平缓,TATB基PBX密度呈先降低并速率放缓后略微回升的趋势,HMX及TATB基PBX纵波声速、横波声速、动杨氏模量、动剪切模量的变化趋势与其密度变化趋势一致,动泊松比基本不变,纵、横波声速与密度具有正相关的线性关系,静弹性模量先降低再升高,动静弹性模量比先升高再降低,静弹性模量和动静弹性模量比的变化拐点HMX基PBX在第15个热循环周期,TATB基PBX在第21个热循环周期。说明PBX热循环损伤量与密度变化和内部微损伤密切相关,超声纵、横波声速可定量评价PBX热循环试验中的热疲劳损伤;PBX动、静态弹性模量的差别是由PBX的结构特征所决定的;PBX动、静态弹性模量的变化趋势由微观机制控制,内在因素包括PBX内部的微裂隙、孔隙黏结剂流动。

关键词: 高聚物黏结炸药(PBX);热循环试验;超声检测;热疲劳损伤;微裂/孔隙

中图分类号: TJ55; TB551

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019292

1 引言

高聚物黏结炸药(PBX)是由炸药晶体和高聚物黏结剂等组成的一种复合材料,反复变化的温度载荷作为热时效过程的工艺因素,以及贮存、运输和使用等过程的环境因素,将导致材料性能发生改变,直接影响到武器的使用性能和安全性能。

超声无损检测方法,具有非破坏、操作简单、效率高的优点,在国内外被广泛用于金属、复合材料、陶瓷等材料的性能表征,从不同角度看来,材料微观结构、形态以及相应的力学性能等很多方面能与超声时频参量、非线性参量等建立关系,使其成为材料性能表征的

有效手段。在含能材料领域,田勇^[1-4]、张伟斌^[5-6]、韦兴文^[7]、兰琼^[8]、徐尧^[9]等采用超声无损检测方法研究了压制成型、热处理、热循环、热冲击、机械载荷等过程对PBX性能的影响,主要集中在利用分层、裂纹和疏松等内部缺陷的超声波信号进行内部质量的表征,利用超声波声速、增益和衰减量进行损伤破坏的表征,以及利用超声波声速进行应力状态的表征。在合金^[10-11]、岩石^[12-13]、混凝土^[14-15]等材料领域,许多研究人员采用超声脉冲法测定了材料的声学参量、动弹性模量及泊松比,并开展其与力学性能、结构特征、微观机制的关系研究,但含能材料在环境温度反复变化下的性能及超声无损检测方法研究仍然有待开展探索性和适用性试验。

为了进一步探索超声无损检测方法在含能材料热循环性能研究中的适用性,对HMX及TATB基PBX热循环试验过程中的超声纵、横波声速和动、静弹性模量等超声波特征参量变化规律进行了实验观察,并对这些超声波特性参量变化规律与热疲劳损伤和微裂隙、孔隙黏结剂流动等性能关系进行了分析讨论,为HMX

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2019-12-29

网络出版日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助(11702262)

作者简介: 程堃(1994-),男,硕士研究生,主要从事超声无损检测研究。e-mail: chenglongwxx@163.com

通信联系人: 徐尧(1988-),女,助理研究员,主要从事含能材料无损检测与性能表征研究。e-mail: xuyao@caep.cn

引用本文: 程堃,徐尧,李丽,等. 超声检测方法研究 HMX 及 TATB 基 PBX 的热循环性能[J]. 含能材料,2020,28(11):1095-1101.

CHENG Long, XU Yao, LI Li, et al. Thermal Cycling Properties of HMX- and TATB- Based PBX on Ultrasonic Testing Method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(11):1095-1101.

及TATB基PBX热循环性能研究提供了新型超声无损检测方法支撑。

2 实验部分

2.1 试样

HMX基PBX,中国工程物理研究院化工材料研究所;HMX单质炸药晶体、F₂₃₁₁(氟树脂)黏结剂和部分钝感炸药TATB组成的炸药造型粉经等静压压制大坯料,切取15 mm×102 mm方哑铃平行试样(1#~10#),密度均为1.847 g·cm⁻³。

TATB基PBX,中国工程物理研究院化工材料研究所;TATB单质炸药晶体和F2314(氟树脂)黏结剂组成的炸药造型粉经等静压压制大坯料,切取15 mm×102 mm方哑铃平行试样(11#~20#),密度均为1.893 g·cm⁻³。

2.2 仪器及试验条件

动弹性模量测量系统,中国工程物理研究院化工材料研究所自研;测量的超声参量包括纵波声速、横波声速、动弹性模量(杨氏模量、剪切模量)和动泊松比;硬件由计算机、双通道超声激励接收装置和超声波传感器组成,带宽0.5~25 MHz、采样频率100 MHz、采样精度12位;软件设置不同的超声波参数,控制激励超声波传感器并接收(横波、纵波)回波信号,进行声速测试并完成动弹性模量(杨氏模量、剪切模量)和动泊松比,如图1所示。

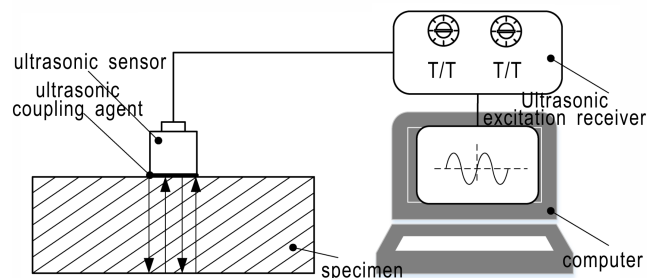


图1 动弹性模量测量系统

Fig.1 Measurement system of dynamic elastic modulus

超声波传感器为2.25 MHz横纵波一体化探头,中国工程物理研究院化工材料研究所自研;集合常规纵波直探头和常规横波直探头为一体,包括吸声材料、纵波压电晶片、横波压电晶片、阻尼块、电缆线以及外壳等,实现纵波和横波同时检测,保证纵波和横波垂直入射,耦合剂为Olympus公司的SWC-2横波耦合剂,如图2所示。

利用ESPEC公司生产的SETH-Z041U调温调湿箱对HMX及TATB基PBX试样进行热循环试验,

在-40~75℃开展热循环试验。其中,室温—40℃—75℃—室温为一个热循环试验周期,升降温速率为1℃·min⁻¹,并在-40℃和75℃恒温2h使试样温度均匀稳定。HMX基PBX试样(1#~10#)和TATB基PBX的10个平行试样(11#~20#)分别经历3N个(N=0,1,2,⋯,9)热循环试验周期。静弹性模量采用英国Instron 5582万能材料试验机进行拉伸性能的测试,根据拉伸应力-应变曲线计算得到,测试参照GJB772A-1997方法417.1标准执行,横梁速度为0.5 mm·min⁻¹,测试温度为(20±2)℃。

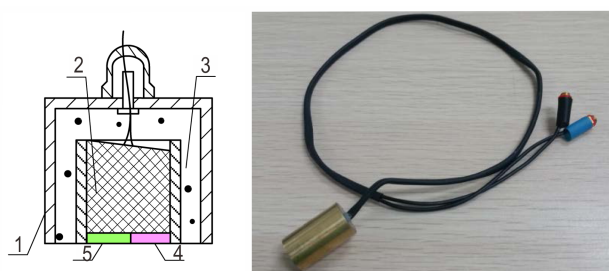


图2 横纵波一体化探头原理示意及实物图

1—外壳,2—阻尼块,3—吸声材料,4—横波压电晶片,5—纵波压电晶片

Fig.2 Schematic and physical diagram of integrated ultrasonic longitudinal and transverse wave sensor

1—shell, 2—damping block, 3—sound absorbing material, 4—transverse wave piezoelectric wafer, 5—longitudinal wave piezoelectric wafer

3 弹性模量和泊松比超声测量方法

动弹性模量(杨氏模量、剪切模量)和动泊松比采用超声声速法测量^[17-18]。超声波在固体介质中的传播速度与介质的弹性模量和密度有关,通过测量介质中的纵、横波声速可计算得到其杨氏模量、剪切模量和泊松比。

$$\sigma = \frac{V_L^2 - 2V_S^2}{2(V_L^2 - V_S^2)} \quad (1)$$

$$E = \rho V_S^2 \frac{3V_L^2 - 4V_S^2}{V_L^2 - V_S^2} \quad (2)$$

$$G = \rho V_S^2 \quad (3)$$

式中, E 为杨氏模量,GPa; G 为剪切模量,GPa; σ 为泊松比; ρ 为介质的密度,g·cm⁻³; V_L 为纵波的声速,m·s⁻¹; V_S 为横波的声速,m·s⁻¹。

超声波纵波声速和横波声速通过厚度除以介质中传播声时的方法得到,计算公式为:

$$V = \frac{2h}{\Delta t} \quad (4)$$

式中, h 为厚度, m ; Δt 为声时, s ; V 为声速, $m \cdot s^{-1}$ 。

4 试验结果与分析

4.1 超声声速-热疲劳损伤

HMX 及 TATB 基 PBX 经历不同热循环试验周期后的热循环试验周期-密度及超声参量关系见图 3。

由图 3a 可见, 在试验过程中, 随着热循环周期增加, HMX 基 PBX 的密度降低且速率逐步平缓, TATB 基 PBX 的密度呈先降低并速率放缓后略微回升的趋势。分析认为, 热循环导致 PBX 产生不可逆长大, 密度降低,

主要原因包括热膨胀系数不同导致黏结剂/炸药晶界面脱粘引起塑性变形, 内部微孔隙或微缺陷的扩张、炸药晶体的不可逆长大等。但随周期增加, 密度降低速率放缓, 甚至密度略微回升, 这与热应力作用导致 PBX 产生塑性形变的特性有关^[7,19-20]。由图 3b~图 3f 可见, 在试验过程中, 随着热循环周期增加, HMX 及 TATB 基 PBX 的纵波声速、横波声速、动杨氏模量、动剪切模量的变化趋势与其密度变化趋势一致, 泊松比基本不变。

HMX 及 TATB 基 PBX 经历不同热循环试验周期后的纵波声速、横波声速-密度关系、线性拟合直线及拟合后线性关系表达式见图 4。由图 4 可见, 在热循环试验过程中, HMX 和 TATB 基 PBX 的纵、横波声速与密度具有正相关的线性关系。

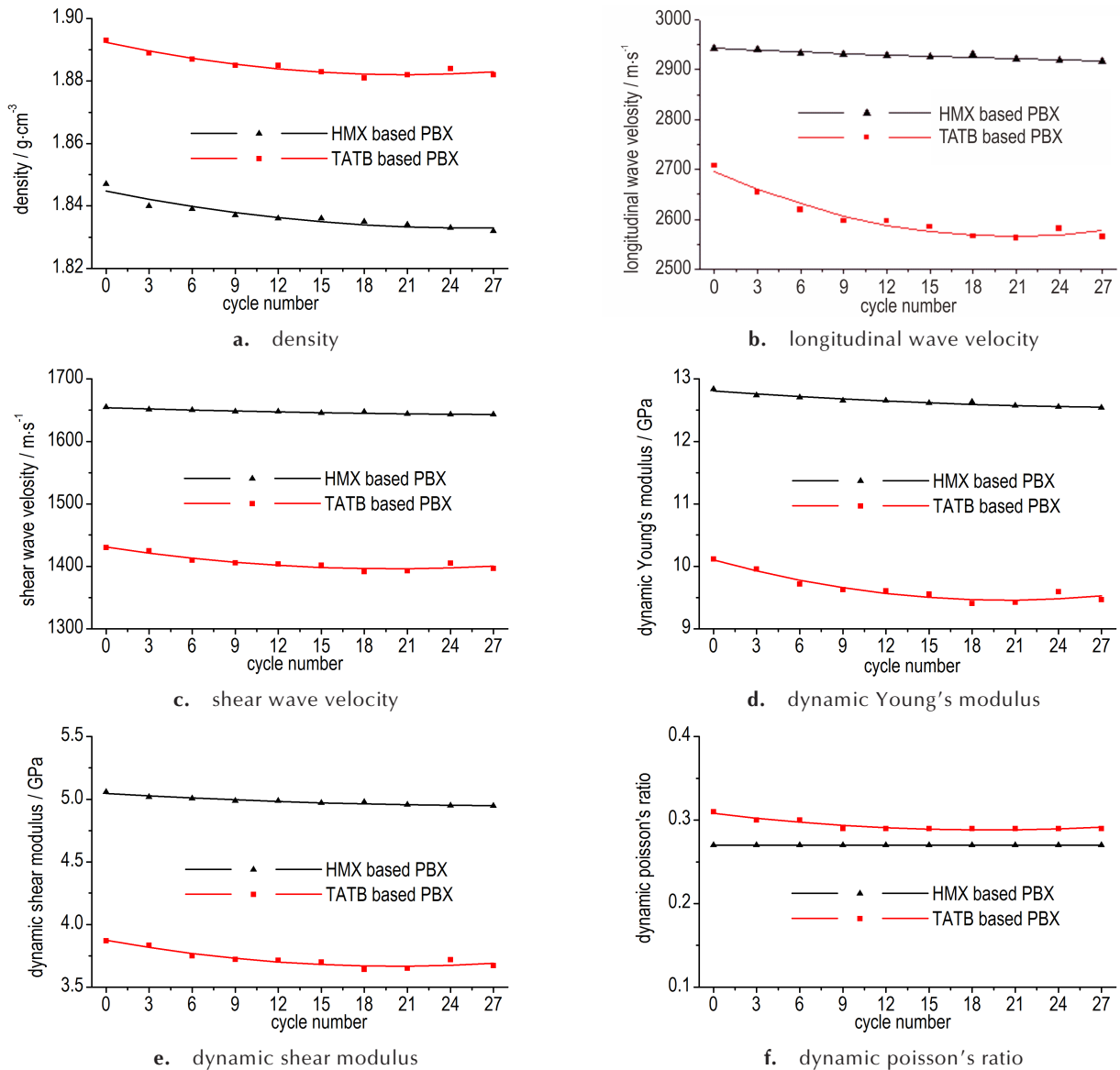


图 3 HMX 及 TATB 基 PBX 的热循环试验周期-密度及超声参量关系

Fig.3 The relationship between thermal cycle number and density and ultrasonic parameters of HMX- and TATB- based PBX

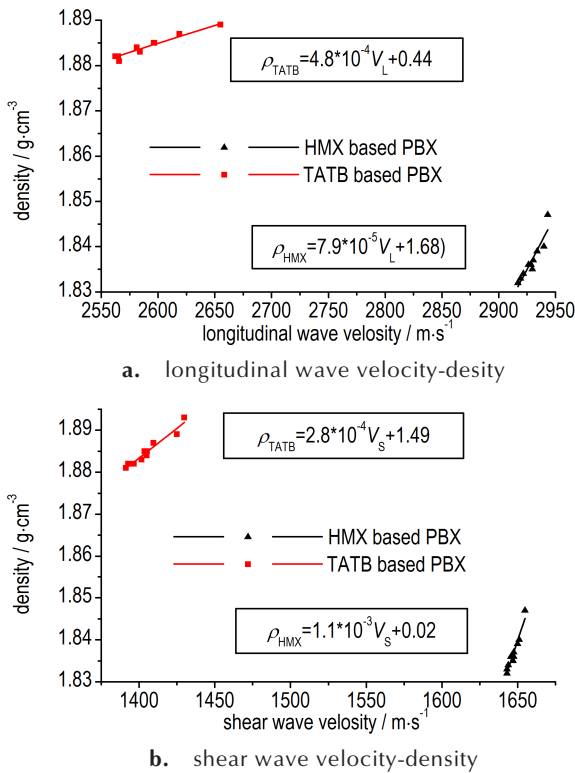


图4 热循环试验过程中HMX及TATB基PBX纵波声速、横波声速-密度的线性关系

Fig. 4 The linear relationship between longitudinal/shear wave velocity and density of HMX- and TATB- based PBX during thermal cycling

关联材料的整体微细观性能,热循环试验将使PBX产生热疲劳损伤,基于Lemaitre^[21]等效应变假设的损伤本构方程,损伤可通过损伤前后材料弹性模量的变化来定义或度量。

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \tag{5}$$

由式(1),(2)和(3)可得, $V_L^2 = \frac{E}{\rho} \times \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}$,

$V_s^2 = \frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1 + \sigma)}$,因为在热循环试验过程中,动泊松比基本不变,得到:

$$D = 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\rho} \times \frac{\tilde{V}_L^2}{V_L^2} \tag{6}$$

$$D = 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\rho} \times \frac{\tilde{V}_s^2}{V_s^2} \tag{7}$$

式中, D 为PBX的损伤变量; E 为无损PBX弹性模量,GPa; \tilde{E} 为受损PBX弹性模量,GPa; ρ 为无损PBX的密度, $g \cdot cm^{-3}$; $\tilde{\rho}$ 为受损PBX的密度, $g \cdot cm^{-3}$; V_L 和 V_s 分别为无损PBX纵波声速, $m \cdot s^{-1}$; \tilde{V}_L 和 \tilde{V}_s 分别为受损PBX

纵波声速, $m \cdot s^{-1}$ 。

由式(2),(5),(6)和(7)可见,热循环试验过程中,PBX热循环损伤量与密度变化和内部微损伤密切相关,可用密度和超声声速的表达式进行计算。如果PBX密度已知,可利用式(2)和(5),通过超声纵、横波声速计算弹性模量,定量评价PBX热循环试验中的热疲劳损伤;如果PBX密度未知,可利用纵波声速或横波声速和密度的线性关系,将纵波声速或横波声速代入式(6)或式(7),直接通过纵波声速或横波声速定量评价PBX热循环试验中的热疲劳损伤。

4.2 动静态模量-微裂隙、孔隙

HMX及TATB基PBX经历不同热循环试验周期后的热循环试验周期-动弹性模量、静弹性模量和动静弹性模量比关系分别见图5和图6。由图5和图6可见:(1)PBX动弹性模量高于静弹性模量,动静弹性模量比大于1;(2)热循环试验过程中,HMX及TATB基PBX都经历了静弹性模量先降低再升高,动静弹性模量比先升高再降低的两个阶段,前者拐点在第15个热循环周期,后者拐点在第21个热循环周期。

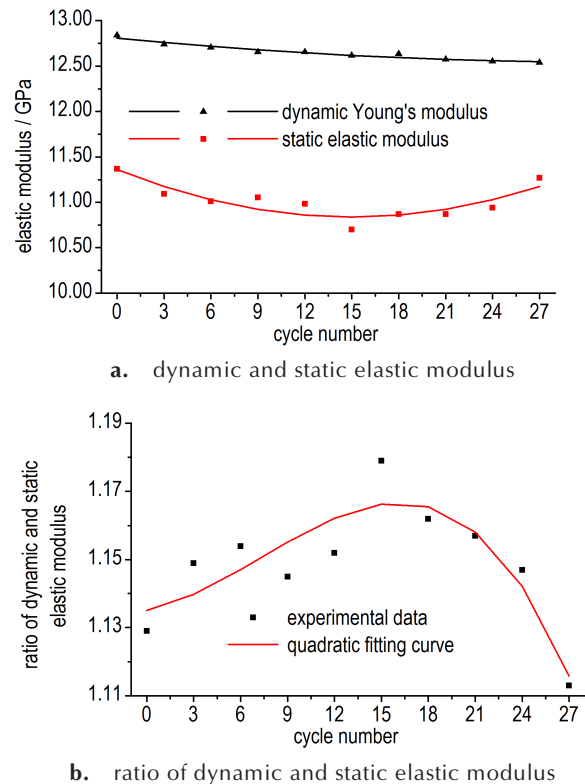


图5 HMX基PBX的热循环试验周期-动弹性模量、静弹性模量和动静弹性模量比关系

Fig. 5 The relationship between thermal cycle number and elastic modulus of HMX-based PBX

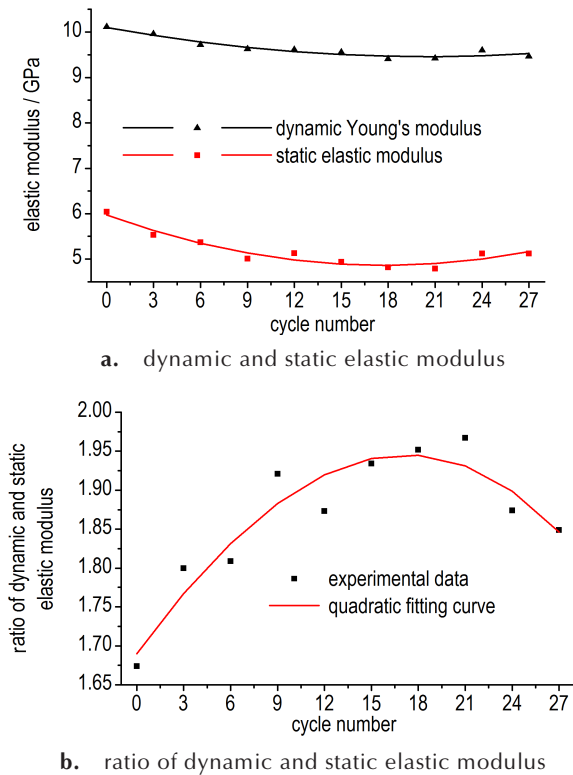


图6 TATB基PBX的热循环试验周期-动弹性模量、静弹性模量和动静弹性模量比关系

Fig.6 The relationship between thermal cycle number and elastic modulus of TATB-based PBX

对其中微观作用机制进行分析讨论:

(1) 动、静态载荷的应变幅值和载荷频率不同,静态属于无限低频率的大应变载荷,声波为小应变载荷。PBX的动、静弹性模量之所以存在差异,是因为PBX为多相不均匀介质,其内部和界面上通常存在较多的微孔隙、裂隙、裂纹等缺陷。在静态大应变条件下,PBX将发生沿裂隙面或颗粒接触面的摩擦滑动,使PBX静弹性模量降低。而声波引起的应变很小,不足以引起这种滑动,因而PBX动弹性模量高于静弹性模量。

(2) PBX是由炸药晶体和高分子黏结剂所组成的复合体系,热循环试验过程中有类似岩石弹性物理研究中的岩石骨架和孔隙流体的结构特性。参考Gassmann方程理论^[22]及其在岩石孔隙弹性特性^[23]和动态与静态弹性参数差别中的应用研究^[24],从材料内部因素出发,可知静弹性模量受微裂隙(裂隙面或颗粒接触面)影响,微裂隙增加,静态大应变条件下更容易摩擦滑动,则静弹性模量降低;反之,则相反。而小应变声波加载对微裂隙不敏感,动弹性模量受微孔隙流

体粘度,主要是高聚物黏结剂的粘弹态甚至流态变化的影响。

(3) 对热循环试验中PBX动、静弹性模量和动静弹性模量比变化的物理机理初步解释为:热循环试验第一个阶段是PBX尺寸不可逆长大,加上黏结剂和炸药晶体热膨胀系数不一致,造成的颗粒边界微裂隙增加,微裂隙率增加,使PBX静弹性模量降低;第二个阶段由于热循环试验,特别是高温段的反复作用下,PBX中玻璃化温度较低(30℃左右)的黏结剂以及少量低熔点助剂变成粘弹态甚至流态^[4],一方面,使得PBX各组分之间特别是黏结剂与炸药晶体之间原本不太好的界面状态得到改善,静弹性模量升高;另一方面,微孔隙中粘弹态甚至流态黏结剂的存在为动态测试下的炸药提供了附加刚度使动弹性模量降低速率减缓。

5 结论

(1) 在热循环试验过程中,随着热循环周期增加,HMX基PBX的密度降低且速率逐步平缓,TATB基PBX的密度呈先降低并速率放缓后略微回升的趋势。纵波声速、横波声速、动杨氏模量、动剪切模量的变化趋势与其密度变化趋势一致,动泊松比基本不变。

(2) 热循环损伤量与密度变化和内部微损伤密切相关,可用密度和超声声速的表达式进行计算,且热循环试验过程中纵、横波声速与密度具有正相关的线性关系,因此超声纵波声速或横波声速可直接定量评价PBX热循环试验中的热疲劳损伤。

(3) PBX动弹性模量高于静弹性模量,动静弹性模量比大于1,差别是因为PBX为多相不均匀介质,且其内部和界面上通常存在较多的微孔隙、裂隙、裂纹等缺陷的结构特征,导致动、静态载荷加载效果不同。

(4) 在热循环试验过程中,随着周期增加,HMX及TATB基PBX的静弹性模量先降低再升高,动静弹性模量比先升高再降低,前者拐点在第15个热循环周期,后者拐点在第21个热循环周期,内在因素包括第一阶段的微裂隙率增加和第二阶段的微孔隙中粘弹态甚至流态黏结剂。

参考文献:

- [1] 田勇,张伟斌,郝莹,等. 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, et al. Thermal shock damage of explosive and its ultrasonic characterization [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000, 23(4): 13-15.

- [2] 田勇, 罗顺火, 张伟斌, 等. 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, et al. Water-bathed thermal shock damage of PBX JOB-9003 and its ultrasonic characteristics[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(3): 17-19.
- [3] 田勇, 张伟斌, 温茂萍, 等. JOB-9003 高聚物粘结炸药热冲击损伤破坏相关性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 174-177.
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 174-177.
- [4] 田勇, 张伟斌, 李敬明, 等. 采用超声波特性参量研究 PBX 炸药的热处理[J]. 含能材料, 2006, 14(1): 53-55.
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, LI Jing-ming, et al. Heat treatment of polymer bonded explosive by using ultrasonic characterization[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(1): 53-55.
- [5] 张伟斌. 高聚物粘结炸药超声检测与评价技术及应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
ZHANG Wei-bin. Application research on ultrasonic detection and evaluation technology polymer bonded explosives [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [6] 张伟斌, 赵北君, 田勇, 等. 高聚物粘结炸药试件应力状态的超声法测试技术[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 136-138.
ZHANG Wei-bin, ZHAO Bei-jun, TIAN Yong, et al. Ultrasonic testing stress of polymer bonded explosive specimens [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 136-138.
- [7] 韦兴文, 周筱雨, 涂小珍, 等. HMX 基 PBX 的温度环境适应性[J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 15-18.
WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, TU Xiao-zhen, et al. Thermal environment adaptability of HMX based PBX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(1): 15-18.
- [8] 兰琼, 戴斌, 杨白凤, 等. 温压时效处理 PBX 内部裂纹愈合现象研究[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 205-208.
LAN Qiong, DAI Bin, YANG Bai-feng, et al. Healing of cracks in PBX by thermal pressure aging treatment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 205-208.
- [9] Xu Yao, Yang Zhan-Feng, Zhou Hai-Qiang, et al. Application of acoustoelasticity in studying compressive stress state in polymer bonded explosive [C]//Proceedings of 2015 IEEE Far East NDT New Technology and Application Forum (FENDT). 2015: 95-99.
- [10] Majumdar P, Singh S B, Chakraborty M, et al. Elastic modulus of biomedical titanium alloys by nano-indentation and ultrasonic techniques—A comparative study [J]. *Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2008, 489(1/2): 419-425.
- [11] 付千发. 金属薄片及低碳钢球化组织弹性模量的超声无损表征与评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
FU Qian-fa. Ultrasonic non-destructive characterization and evaluation of the elastic modulus of thin metal sheet and spheroidized structure in low carbon [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [12] Yong-Kyun Woo, Mancheol Suh, Insun Song, et al. Determination of the elastic modulus set of foliated rocks from ultrasonic velocity measurements [J]. *Engineering Geology*, 2004, 72(3/4): 293-308.
- [13] Martínez-Martínez J, Benavente D, García-del-Cura M. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(2): 263-268.
- [14] Petr. Cikrle, Dalibor. Kocáb, Barbara. Kucharczyková, et al. In situ determination of the elastic modulus of concrete by means of ultrasonic pulse method [J]. *Solid State Phenomena*, 2018, 4634(544): 70-75.
- [15] Ivana Barišić, Sanja Dimter, Tatjana Rukavina. Elastic properties of cement-stabilised mixes with steel slag [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, 17(9): 753-762.
- [17] 阿肯巴赫. 弹性固体中波的传播[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992: 232-248.
Achenbach. Wave propagation in elastic solids [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992: 232-248.
- [18] 李昕, 蒋瑞兴, 陈洪荪. 弹性与非弹性的测量与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 1-125.
LI Xin, JIANG Rui-xing, CHEN Hong-sun. Measurement and application of elasticity and inelasticity [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 1-125.
- [19] 李敬明, 温茂萍, 黄毅民. 热循环对 TATB 基高聚物粘结炸药性能的影响研究[J]. 含能材料, 2005, 13(4): 208-210.
LI Jing-ming, WEN Mao-ping, HUANG Yi-min. Effect of thermal cycling test on the properties of TATB based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(4): 208-210.
- [20] 李玉斌, 沈明, 李敬明. TATB 颗粒填充高聚物材料的热膨胀特性[J]. 含能材料, 2003, 11(1): 24-27.
LI Yu-bin, SHEN Ming, LI Jing-ming. Thermal expansion of TATB filled polymeric material [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(1): 24-27.
- [21] Lemaître J, Chaboche J L. Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement [J]. *Journal de Mécanique Appliquée*, 1978(2): 317-365.
- [22] 陈信平, 刘素红. 浅谈 Gassmann 方程[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 11(2): 122-127.
CHEN Xin-ping, LIU Su-hong. An preliminary introduction to gassmann equation [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1996, 10(2): 122-127.
- [23] 葛洪魁, 韩德华, 陈颀. 砂岩空隙弹性特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 332-337.
GE Hong-kui, HAN De-hua, CHEN Yong. Experimental investigation on poroelasticity of sandstones [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(3): 332-337.
- [24] 葛洪魁, 陈颀, 林英松. 岩石动态与静态弹性参数差别的微观机理[J]. 石油大学学报, 2001, 25(4): 34-36.
GE Hong-kui, CHEN Yong, LIN Ying-song. Microscopic mechanism of difference between static and dynamic elastic parameters of rock [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 2001, 25(4): 34-36.

Thermal Cycling Properties of HMX- and TATB- Based PBX on Ultrasonic Testing Method

CHENG Long^{1,2}, XU Yao¹, LI Li¹, XIAO Pan¹, PANG Hai-yan¹, ZHANG Wei-bin¹

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to obtain the thermal cycling properties of octogen(HMX) and triaminotrinitrobenzene(TATB) based polymer bonded explosive (PBX), the thermal cycling tests of HMX- and TATB-based PBX were carried out under the condition of $-40\text{--}75\text{ }^{\circ}\text{C}$. P-wave and S-wave velocity of explosive specimens with $3N$ ($N=0, 1, 2, \dots, 9$) cycles were measured by ultrasonic echo method. The dynamic elastic modulus (Young's modulus, shear modulus) and dynamic Poisson's ratio were calculated by ultrasonic measurement method. The static elastic modulus was measured directly through the tensile property test, while the ratio of dynamic and static elastic modulus was calculated. Results show that the density of HMX-based PBX decreases and later the decrease rate slows down with the increase of the cycle number during the thermal cycling test. The density of TATB-based PBX decreases first, then the decrease rate slows down, and finally has a slight upward trend. The change trend of P-wave velocity, S-wave velocity and dynamic elastic modulus of HMX- and TATB-based PBX are consistent with the change trend of their density respectively. Their corresponding dynamic Poisson's ratio is basically unchanged. There is a positive linear relationship between P-wave, S-wave velocity and its density. The static elastic modulus first decreases and then increases, where the inflexion point of HMX-based PBX is in its 15th thermal cycle, and that of TATB-based PBX is in its 21st thermal cycle. The results show that the damage quantity of PBX during thermal cycling is closely related to its density change and internal micro damage. All these phenomenon demonstrate that the ultrasonic longitudinal and shear wave velocities can be used to quantitatively evaluate the thermal fatigue damage of PBX in thermal cycling test. The change trend of the dynamic and static elastic modulus of PBX is related to its micro structure evolution including internal micro-cracks and binder flow in micro-pores.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); thermal cycling test; ultrasonic testing; thermal fatigue damage; micro-cracks/ micro-pores

CLC number: TJ55; TB551

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019292

(责编:王艳秀)