

文章编号: 1006-9941(2017)12-0970-06

非线性超声技术检测 TATB 基 PBX 微损伤

杨占锋^{1,2}, 田勇¹, 周海强¹, 张伟斌¹, 李敬明¹, 李卫彬³

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院北京研究生院, 北京 100088; 3. 中国厦门大学航空航天学院航空系, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对高聚物粘结炸药(PBX)初始损伤及疲劳损伤问题,利用自行建立的非线性超声测试装置,对模压成型的两种密度三氨基三硝基苯(TATB)基 PBX 圆柱形试样及其在压缩疲劳过程中的非线性超声参量进行了测试,用断貌分析和计算机断层扫描(CT)验证了非线性超声检测结果。结果表明,与内部初始损伤程度较低的 TATB 基 PBX 试样相比,内部存在明显界面损伤的 TATB 基 PBX 试样的非线性超声系数明显偏高,非线性超声系数与 TATB 基 PBX 初始损伤程度之间有一定的相关性;在 TATB 基 PBX 试样疲劳加载至即将产生微裂纹时,非线性超声系数急剧增加并在产生宏观裂纹时达到极值,显示非线性超声参量可监测 TATB 基 PBX 疲劳损伤发展过程;TATB 基 PBX 初始损伤程度不同其疲劳损伤速度和发展过程也不尽相同。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 微损伤; 疲劳; 超声检测; 非线性参量

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.001

1 引言

高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)从晶体制备、颗粒包覆到压制成型、时效处理等整个制造过程中,有可能产生微裂纹、微孔隙、颗粒破碎等初始微损伤^[1-3],在运输、贮存及服役中受到热、机械疲劳等作用,PBX 中的初始微损伤会不断汇聚、扩展使力学性能退化、承载能力下降、热点源增加,进而影响其使用有效性、安全性和可靠性^[4]。因此对 PBX 初始微损伤及其疲劳损伤发展程度的评估具有重要意义,对深入研究其有效性、安全性及可靠性具有重要的价值。

利用超声方法检测与评估 PBX 结构件内部缺陷和损伤是常见的手段^[5]。田勇等^[6]测试了 PBX 热冲击前后的超声特性参量来表征其损伤和破坏情况,表明超声特性参量对 PBX 的损伤及破坏表现出一些可识别的特征。然而,常规超声检测方法主要针对对毫米

级宏观缺陷的评估与检测,对微纳米级微观缺陷或损伤及其扩展演变尚没有合适的检测方法。

近年来,人们开始尝试将声波传播过程中的非线性现象应用在无损伤检测领域,这种利用超声传播过程中的非线性响应来表征材料微观结构变化的方法被称为非线性超声检测技术。利用非线性超声检测与评估金属材料的疲劳损伤、蠕变损伤,以及评估微观结构变化已有一些报道^[7]。研究表明非线性超声方法可以表征金属疲劳损伤早期阶段的位错密度变化^[8-9]。利用非线性超声检测方法针对金属材料 and 复合材料的热损伤检测也有一些报道^[7,10]。这些研究表明非线性超声检测技术是可以对微观损伤和微缺陷进行早期检测的有效方法。

为此,本研究尝试利用非线性超声参数对微观损伤的高敏感性,对初始损伤程度不同的 TATB 基 PBX 试样及其在疲劳加载过程中的非线性超声参量测试及响应行为研究,探索一种可以对颗粒高度填充的 TATB 基 PBX 内部损伤进行早期检测与无损评估的新方法。

2 实验部分

2.1 样品制备

将 TATB 基造型颗粒经钢模热压成型为 $\Phi 20$ mm \times 20 mm 的圆柱形试样。采取两种不同压力压制两种

收稿日期: 2017-06-06; 修回日期: 2017-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(11204279)、国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金重点支持项目(U1330202),中央高校基础研究基金(20720140511)。

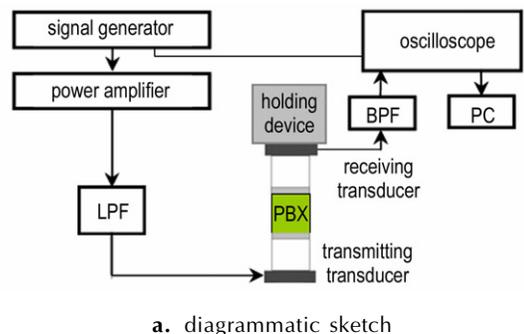
作者简介: 杨占锋(1977-),男,副研究员,主要从事无损表征与评价研究。e-mail: yangzif@caep.cn

通信联系人: 田勇(1967-),男,研究员,主要从事无损表征与评价研究。e-mail: tianyong@caep.cn

密度相差较大的试样,使试样初始微损伤程度不同,以开展相关研究。通过工艺条件控制这两种试样的密度分别为 $(1.885 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $(1.908 \pm 0.002) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 完成压制后测试其密度,挑选出实测密度在上述控制范围内的试样作为研究对象,分别称之为低密度试样(或初始微损伤程度较高试样, L1、L2)、高密度试样(初始微损伤程度较低试样, H1、H2)。

2.2 非线性超声测试方法

自行建立的高功率非线性超声测试装置如图 1 所示。任意波形发生器产生频率为 1.25 MHz 的脉冲串,经低通滤波(LPF)和放大后激励中心频率为 1.25 MHz 的压电换能器(发射探头)产生有限幅度的超声波,通过耦合剂在 PBX 试样中传播,被中心频率为 2.5 MHz 的压电换能器(接收探头)接收和带通滤波(BPF)后输入示波器中。基频发射换能器、倍频接收换能器分别放置在试样两相对面,通过专门设计的支架与试样连接,以保证每次检测后换能器和试样接触压力保持一致,以及保证发射换能器和接收换能器在同一轴线上,并采用性能稳定且有一定粘性的硅脂作为耦合剂。



a. diagrammatic sketch

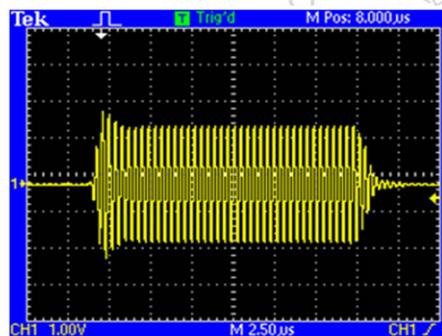


b. physical picture

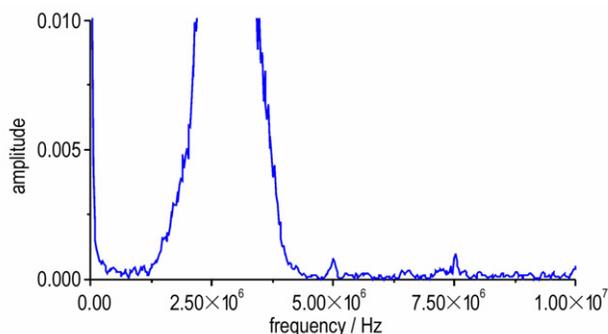
图 1 检测装置
Fig.1 Inspection device

信号发生器与示波器连接,观察信号的稳定性,保证采集信号的可比较性。信号的稳定部分经过汉宁窗函数处理后获得频域下的基频谐波振幅 A_1 和二次谐

波振幅 A_2 。实验中获得的典型的含有基频谐波和二倍频谐波的超声信号如图 2 所示。其中,图 2a 为示波器所采集的时域信号,图 2b 为对该时域信号的频谱分析结果(即频域信号)。



a. time-domain signal



b. frequency-domain signal

图 2 实验信号案例

Fig.2 Experimental signal cases

PBX 的二阶非线性超声系数 β 可由式(1)计算^[11]:

$$\beta = \frac{8A_2}{k^2 x A_1^2} = \frac{2c^2 A_2}{\pi^2 f^2 x A_1^2} \quad (1)$$

式中, β 为二阶非线性超声系数; A_1 为基频谐波幅值, V; A_2 为二倍频谐波幅值, V; x 为试样厚度, m; k 为波数, m^{-1} ; f 为超声频率, Hz; c 为超声波速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 机械加载及参量测试

采用 Instron8862J4873 型疲劳蠕变试验机对两种试样分别进行机械加载试验,机械加载又分为单轴压缩破坏加载和压缩疲劳循环加载。

单轴压缩破坏试验及参量测试:对两种试样分别进行单轴压缩破坏加载试验以测试其破坏强度,加载速率均为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,在加载前分别测试试样的纵波声速 C_L 、增益 G 以及二阶非线性超声系数 β ;在加载后进行断貌分析以获取试样在加载前内部的初始微损伤情况。通过试样非线性超声参量与破坏强度、

初始损伤之间对应关系的对比分析,研究非线性超声参量与初始微损伤之间是否具有相关性。

压缩疲劳循环加载及参量测试:以 0~70% 破坏强度对试样进行压缩疲劳循环加载;每 50 个压缩疲劳循环为一轮加载实验,进行多轮加载,通过疲劳循环次数的增加使试样内部损伤逐渐积累,直至试件产生宏观裂纹。在每轮疲劳加载试验前后,均测试试样的纵波声速 C_L 、增益 G 以及非线性超声系数 β 等参量,研究这些参量对疲劳损伤的敏感性。

3 实验结果与分析

3.1 两种试样的非线性超声判别

选取低密度、高密度 TATB 基 PBX 试样(L1、H1)分别进行单轴机械压缩破坏试验,其中一组典型试样的参量测试结果见如表 1 所示,超声时域波形及畸变如图 3 所示。

表 1 两种 TATB 基 PBX 试样参量测试结果

Table 1 The measurement results of parameters for two kinds of TATB-based PBX specimens

specimen	ρ /g · cm ⁻³	C_L /m · s ⁻¹	β /(×10 ⁻⁹)	F_M /N	σ_M /MPa
H1	1.910	2669	18	8500	27.0
L1	1.887	2106	457	5625	17.9

Note: ρ is the mass density, C_L is the wave velocity, β is the nonlinear coefficient, F_M is the breaking load, σ_M is the breaking strength.

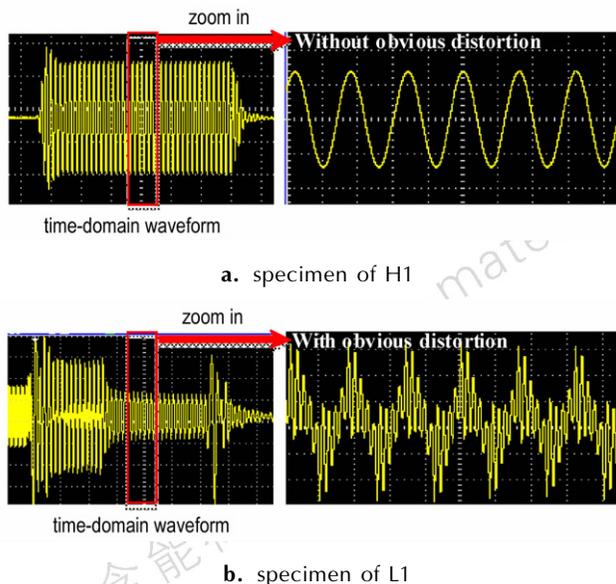


图 3 TATB 基 PBX 试样的超声时域波形及畸变

Fig. 3 Ultrasonic time-domain waveform and distortion of TATB-based PBX specimens

由表 1、图 3 可知, TATB 基 PBX 试样 L1 的二阶非线性超声系数明显偏高(约为试样 H1 的 25 倍)、超声波形有较为明显的畸变(如图 3b 所示),而试样 H1 的二阶非线性超声系数明显偏低、超声波形也无明显畸变(如图 3a 所示);由于非线性超声系数、波形畸变可反映出材料微细观损伤程度,由此可初步推断试样 L1 内部初始微损伤程度要高于试样 H1。从单轴压缩破坏试验结果来看,试样 L1 在压缩载荷达到 5625 N 时即发生了断裂破坏,试样 H1 在载荷达到 8500 N 时才发生断裂破坏,即试样 L1 的压缩破坏强度(约 17.9 MPa),远低于试样 H1 的破坏强度(27.0 MPa),分析是由于试样 L1 的初始损伤程度较高才导致了其破坏强度较低,破坏加载试验结果与非线性超声测试结果及得到的结论是一致的。

为了进一步验证非线性超声测试结果的可靠性,还对这两种试样在断裂后的形貌进行了分析,结果如图 4 所示。

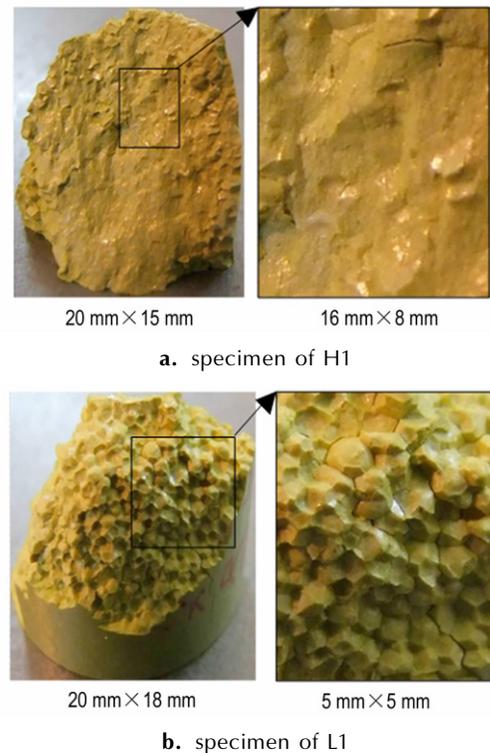


图 4 PBX 试样 H1 和 L1 的断裂形貌

Fig. 4 The fracture surface pictures of PBX specimens H1 and L1

由图 4 可见,试样 L1 断口基本是粘接剂界面开裂,断面上的炸药颗粒团形状清晰可见,颗粒团之间有大量的界面开裂、裂隙、裂纹等,反映出炸药颗粒团之间界面的粘接强度较低,致使其在 17.9 MPa 较小的破坏载荷下即发生了界面脱开形式的断裂,说明试样

在压制成型后、压缩破坏实验之前其内部即可能存在大量的粘接剂界面开裂或弱粘等程度较高的损伤；而试样 H1 的断面呈现出比较平滑的断裂形貌，仅在靠近圆柱面的局部区域可见少量的炸药颗粒团，反映出其造型颗粒包覆质量较好，压制成型后颗粒界面之间粘接强度较高，所以在 27.0 MPa 的较大载荷作用下才发生断裂，进一步说明试样 H1 在压缩破坏实验之前其内部损伤程度较低。

以上的破坏加载试验及断痕分析结果均验证了根据非线性超声系数评估判断的 TATB 基 PBX 试样 L1 初始损伤程度高于试样 H1 的结论的正确性，证实了非线性超声检测结果的可靠性。说明非线性超声系数及波形畸变与 PBX 初始损伤之间有一定的相关性，利用非线性超声系数及波形畸变可以定性表征 TATB 基 PBX 的初始损伤程度。

3.2 PBX 疲劳损伤发展过程的非线性超声评估

3.2.1 初始微损伤程度较高 TATB 基 PBX 试样疲劳过程中的(非)线性超声参量响应

为了对比线性超声参量、非线性超声参量对疲劳损伤的敏感性，对疲劳过程中的线性超声参量、非线性超声参量进行了测试和对比。其中初始微损伤程度较高(即低密度)试样 L2 在疲劳加载过程中的声速 C_L 、增益 G 等线性声学参量及非线性超声系数 β 等参量的测试结果如表 2，这些参量随疲劳次数的变化曲线如图 5 所示，其在循环疲劳至 350 周时圆柱面及内部出现裂纹的实物照片和 CT 检测结果如图 6 所示。

由图 5 可见，随着循环疲劳周期数的增加，初始微损伤程度较高的 L2 试样的超声非线性响应总体呈逐渐增加的趋势，特别是在压缩疲劳加载至 250 周时，非线性超声系数开始急剧递增，并在疲劳至 350 周时增至极大值，为初始非线性超声系数的 10 倍以上，从非线性超声的角度可以推断试样此时的疲劳累计损伤已发展至较高水平，而此时试样表面及内部确已产生宏观裂纹的实际情况(见图6)也印证了这一点，说明

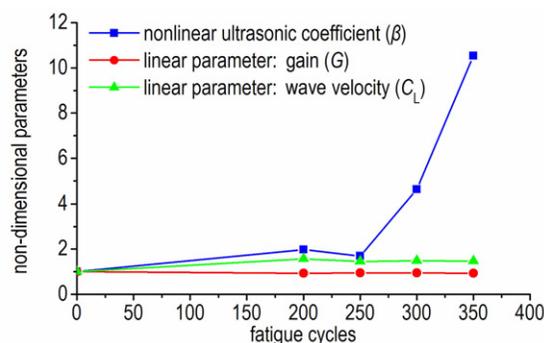
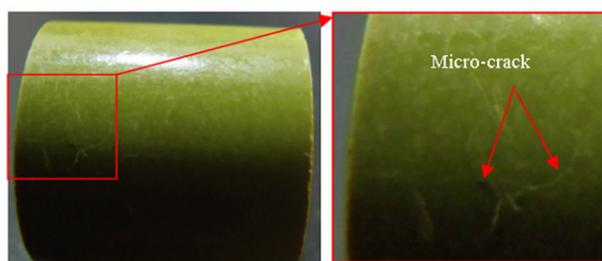
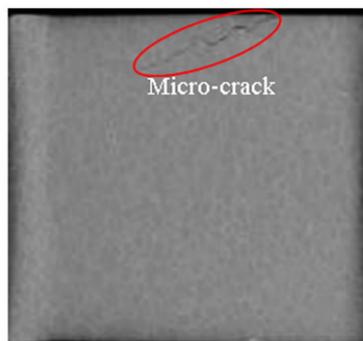


图 5 初始微损伤程度较高试样(L2)压缩疲劳过程中的线性和非线性声学参数变化

Fig.5 The change in linear and nonlinear acoustic parameters in the process of compressive fatigue for specimen (L2) with higher initial micro-damage degree



a. picture of fatigue crack



b. specimen of L2

图 6 初始微损伤程度较高试样(L2)循环疲劳加载 350 周期时出现微疲劳裂纹

Fig.6 Micro fatigue crack occurring under 350 cycle fatigued loading for specimen (L2) with higher initial micro-damage degree

表 2 初始微损伤程度较高 TATB 基 PBX 试样 L2 的参量测试结果

Table 2 The measurement results of parameters for TATB-based PBX specimen L2 with higher initial micro damage degree

round	fatigue cycles	amplitude		nonlinear coefficient $\beta / (\times 10^{-9})$	gain G / dB	wave velocity $V / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
		fundamental A_1 / V	second harmonic A_2 / V			
0	0	0.204174	0.000676	131.11	38.0	2232
1	200	0.074131	0.000204	258.60	59.4	2071
2	250	0.056885	0.000099	221.55	55.2	2114
3	300	0.051286	0.000224	609.11	56.2	2100
4	350	0.025704	0.000129	1380.82	56.0	2089

非线性系数可以灵敏反映出 TATB 基 PBX 试样的疲劳损伤发展过程及累计疲劳损伤程度。而在整个循环疲劳加载中超声增益、声速等线性参量均未发生明显变化,特别是在循环疲劳累计加载至 350 周时现场已听到裂纹开裂声,试件表面也已出现肉眼可见的裂纹,试件已出现严重损伤即将断裂(见图 6),而线性超声参量依然未发生明显的变化。这表明相对于传统的线性超声检测技术,非线性超声技术对疲劳损伤及其发展更加敏感,是一种可以对 PBX 内部微观损伤早期检测的有效手段。

3.2.2 两种试样在疲劳加载过程中的非线性超声参量

两种试样(L2、H2)在疲劳过程中的非线性超声系数变化如图 7 所示。由图 7 可见,由于加载前的初始损伤程度不同,所以它们在之后的压缩疲劳加载中的损伤发展过程也不尽相同,L2 试样在疲劳加载过程中的非线性系数处于相对较高水平(一直高于高密度的),并且在累计循环疲劳至 350 周时,非线性系数已高达 1380×10^{-9} ,已接近断裂,此时在现场也观察到了其表面已出现肉眼可见的微裂纹,该微裂纹界面随着循环疲劳加载而同步地开合。而 H2 试样,在整个 450 周的疲劳加载过程中,非线性超声系数呈现出逐渐累计及缓慢发展的趋势,说明初始微损伤程度较低的 TATB 基 PBX 试样在疲劳加载过程中的疲劳损伤总体上处于相对较低的水平并且发展缓慢,而初始微损伤程度较高的 TATB 基 PBX 试样的疲劳损伤发展速度更快。

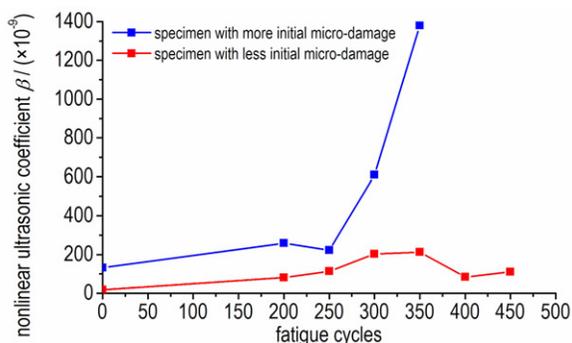


图 7 两种试样初始损伤程度对其疲劳损伤发展过程的影响

Fig. 7 Effects of initial damage degree on the developing process of fatigue damage for two specimens

5 结论

(1) 与初始微损伤程度较低的 TATB 基 PBX 试样相比,初始微损伤程度较高试样的压缩破坏强度较低,

相应的二阶非线性超声系数相对较高、波形畸变也相对较为明显,表明非线性超声参量与初始微损伤之间有一定的相关性,利用二阶非线性超声系数可以定性表征 TATB 基 PBX 的初始微损伤程度。

(2) 在 TATB 基 PBX 试样压缩疲劳循环加载中,非线性超声系数随着疲劳循环次数的增加逐渐递增,特别是在试样产生宏观裂纹之前的 100 个疲劳循环中,非线性超声系数急剧增大并在产生宏观裂纹时达到极大值,而在这整个循环加载过程中,声速、增益等线性超声参量则无明显变化。说明与线性超声参量相比,非线性超声参量对 TATB 基 PBX 试样的疲劳损伤发展过程及累计疲劳损伤程度更为敏感,是一种可以对 PBX 内部损伤进行早期检测的有效手段。

(3) TATB 基 PBX 试样初始微损伤程度不同,其在疲劳循环加载过程中的损伤水平及发展速度也不尽相同,与初始微损伤程度较低的试样相比,初始微损伤程度较高的试样疲劳损伤发展速度更快。

参考文献:

- [1] 张伟斌, 戴斌, 田勇, 等. 微米级炸药晶体缺陷的 μ VCT 试验研究[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 767.
ZHANG Wei-bin, DAI Bin, TIAN Yong, et al. Experiment study on micron crystal defect of explosive based on μ VCT [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(6): 767.
- [2] 刘佳辉, 刘世俊, 黄明, 等. 压制 PBX 中炸药晶体损伤的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 372-378.
LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, HUANG Ming, et al. Progress on crystal damage in pressed polymer bonded explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 372-378.
- [3] 张伟斌, 李敬明, 杨雪海, 等. TATB 颗粒温压成形 PBX 的初始损伤[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 202-204.
ZHANG Wei-bin, LI Jing-ming, YANG Xue-hai, et al. Initial mesoscopic damage of TATB based PBX pressed by warm compaction [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2): 202-204.
- [4] Zhou Z, Chen P, Duan Z, et al. Comparative study of the fracture toughness determination of polymer-bonded explosive simulant [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(17): 2991-2997.
- [5] 温茂萍, 田勇, 游开兴. 炸药部件无损检测综述[J]. 含能材料, 1994, 2(1): 31-38.
WEN Mao-ping, TIAN Yong, YOU Kai-xing. A review for non-destructive testing of explosive parts [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1994, 2(1): 31-38.
- [6] 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(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(4): 13-15.

- [7] Hermann J, Kim J Y, Jacobs L, et al. Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(12): 124913.
- [8] W Li, Y Cho, Achenbach J D. Detection of thermal fatigue damage in composites by second harmonic Lamb waves [J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(8): 085019. 1 – 085019. 8.
- [9] 颜丙生, 张士雄. LY12 铝合金疲劳损伤的非线性超声检测[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(2): 93–98.
- YAN Bing-sheng, ZHANG Shi-xiong. Using nonlinear ultrasonic test for fatigue damage of LY12 aluminum alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(2): 93–98.
- [10] 张萌, 轩福贞. 汽轮机转子钢蠕变损伤的非线性超声评价[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(2): 76–81.
- ZHANG Meng, XUAN Fu-zhen. Creep damage evaluation of steam turbine rotor steel by using the nonlinear ultrasonic technique[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(2): 76–81.
- [11] Zarembo L K, Krasil'nikov V A. Nonlinear phenomena in the propagation of elastic waves[J]. *Sov Phys Usp*, 1971, 13(6): 778–797.

Detection of Micro-damages in TATB-based Polymer Bonded Explosive by Nonlinear Ultrasonic Technique

YANG Zhan-feng^{1,2}, TIAN Yong¹, ZHOU Hai-qiang¹, ZHANG Wei-bin¹, LI Jing-ming¹, LI Wei-bin³

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Department of Graduate Students, CAEP, Beijing 100088, China; 3. Department of Aeronautics, School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Aiming at the problem of initial damage and fatigue damage for polymer bonded explosive (PBX), the nonlinear ultrasonic parameters of two kinds of triamino trinitrobenzene (TATB)-based PBX cylindrical specimens with different density formed by compression molding and these specimens in the process of compressive fatigue were tested by self-established nonlinear ultrasonic testing device. The nonlinear ultrasonic testing results were verified by fracture surface analysis and computer tomography (CT) testing. Compared with TATB-based PBX specimens with less initial interfacial micro-damage degree, the nonlinear ultrasonic coefficients of the TATB-based PBX specimens with obvious interfacial damage are obviously higher. There is a certain relevance between the nonlinear ultrasonic coefficient and the initial damage degree of TATB-based PBX. When the microscopic crack is nearly generated in the TATB-based PBX, the nonlinear ultrasonic coefficient increases sharply and reaches maximum, revealing that the nonlinear ultrasonic parameters can monitor the fatigue damage developing process. There is a certain difference in fatigue damage rate and developing process for TATB-based PBX specimens with different initial micro-damage degree.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); micro-damage; fatigue; ultrasonic testing; nonlinear parameters

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.001