

文章编号:1006-9941(2018)09-0786-05

PBX模拟材料内应力激光超声掠面纵波检测方法研究

周海强¹,裴翠祥²,刘文艺²,弋东驰²,杨占锋¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999; 2. 西安交通大学航天航空学院,机械结构强度与振动国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要: 为了验证激光超声技术检测高聚物粘结炸药(PBX)内应力的可行性,建立了基于激光超声掠面纵波的PBX模拟材料内部应力状态新型高效无损检测方法。搭建了PBX模拟材料试件应力在线激光超声无损检测实验平台。测量了不同加载状态下激光超声掠面纵波信号。结果表明,PBX模拟试件在受到1 MPa以上应力时,超声掠面纵波的传播方向与应力方向平行时声速变化明显。声速相对变化量与应力呈近似线性增加的关系,随着应力的增加,超声掠面纵波的声速随之增加。初步验证了激光超声掠面纵波对于PBX模拟材料内部应力状态检测的可行性。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX);内应力;无损检测;激光超声;表面波;声弹性

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2017367

1 引言

高聚物粘结炸药(polymer bonded explosive, PBX)由于其优良的性能在国防领域得到广泛应用。但PBX结构在压制成型、加工、运输及存储等过程中存在开裂现象,严重影响其安全性能、爆轰性能及力学性能。研究表明导致PBX材料损伤、裂纹扩展甚至发生破裂的一个重要因素是其内部应力存在,特别是残余应力会严重降低PBX材料结构强度并影响其疲劳寿命等。PBX在成型过程中其内应力来源及分布非常复杂,目前还没有十分有效的无损检测方法。研究PBX应力测试技术和方法,对PBX材料成型、控制其加工工艺、消除内应力、保障其安全性能等具有重要意义,也是PBX材料损伤、断裂力学研究的重要实验技术基础,具有重要的实用价值和学术意义^[1-4]。

PBX模拟材料是由晶体颗粒和粘结剂按照一定的比例混合制作而成,其晶体颗粒和粘结剂的比例与某PBX的比例相同,两者都属于颗粒填充聚合物复合材料,具有相似的细观结构特征,因此常用于模拟PBX的力学性能或物理化学性能^[5]。无损检测技术目前已广泛应用与材料和结构内部残余应力状态的检测和评价,常用的残余应力无损检测方法有X射线衍射法、中子射线衍射法和超声波法等。与X射线和中子射线衍射法相比,超声方法具有设备简单、适用范围广、对人体无害,已成为国内外研究的重点,广泛应用于金属内应力或残余应力的测量^[6-9]。关于PBX材料内应力超声无损检测方法国内相关研究报道极少。张伟斌等^[10]开展了基于压电超声体波的PBX材料内应力测量方法研究,验证了大应力作用下超声波法无损测定PBX构件内部应力的可行性,测量结果显示,由于PBX材料内部应力相对较小,体波对应力测量灵敏度较低,还无法满足实际测量需求。

研究表明,与纵波(L)、横波(S)等体波相比,掠面纵波(sL)对应力尤其是沿其传播方向的应力极为敏感,其能量传播深度相比于瑞丽波(R)等表面波较深,在较长的传播途径中可以保持较好的波形特性,因而成为测量一定深度下材料内部应力的一种理想波形^[11]。然而由于PBX材料的超声波波速较低,传统的压电超声探头难于在其内部激发出sL波。激光超声

收稿日期:2017-11-23;修回日期:2018-02-05

网络出版日期:2018-05-04

基金项目:中物院化工材料研究所科技创新基金(KJCX-201506),国家自然科学基金资助(11502192)

作者简介:周海强(1986-),男,助理研究员,主要从事含能材料无损检测与评价技术研究与应用工作研究。

e-mail: haiqiang0602@caep.cn

通信联系人:裴翠祥(1984-),男,副教授,主要从事机械结构无损检测与评价技术的研究与应用工作。e-mail: pei.cx@xjtu.edu.cn

引用本文:周海强,裴翠祥,刘文艺,等. PBX模拟材料内应力激光超声掠面纵波检测方法研究[J]. 含能材料, 2018, 26(9): 786-790.

ZHOU Hai-qiang, PEI Cui-xiang, LIU Wen-wen, et al. Study on Detection Method of Internal Stress in PBX Simulated Material by Laser Ultrasonic Skimming Surface Longitudinal Wave[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2018, 26(9): 786-790.

作为一种新型、非接触超声检测技术,可同时在材料内部激发不同模态超声波,被认为是一种非常有潜力的新型超声检测方法。为了探索激光超声技术检测PBX内应力的可行性,研究建立激光超声掠面纵波PBX材料内应力超声无损检测方法,在线测试了PBX不同压缩过程中的内应力状态,为PBX内应力的测试提供研究基础。

2 实验部分

2.1 实验样品

实验样品采用PBX模拟材料,由中国工程物理研究院化工材料研究所生产。其造型粉经过等静压制,然后机械加工为50 mm×20 mm×10 mm的长方体样品。为降低PBX模拟试件初始内应力的影响,实验前对其进行时效处理,其初始状态不同模态超声波声速如表1所示。

表1 PBX模拟试件声速

material	C_L	C_S	C_R
PBX	3000	1400	1300

Note: C_L is the longitudinal wave velocity, C_S is the shear wave velocity, C_R is the surface acoustic velocity.

2.2 激光超声法应力测量基本理论

当固体材料受能量低于材料熔融阈值的脉冲激光照射时,一部分光能会被材料吸收转化为热能,从而在材料表面附近形成瞬态非均匀温度场,并产生热膨胀,最终在热弹力作用下产生超声波。图1为激光超声波在PBX材料中传播的声场图^[12]。由图1可以看出激光超声在PBX材料中能同时激发出沿深度方向传播的L波和S波,以及沿表面传播的R波和sL波。

根据声弹性原理,沿应力方向传播的sL波速与应力之间的关系如下^[13]:

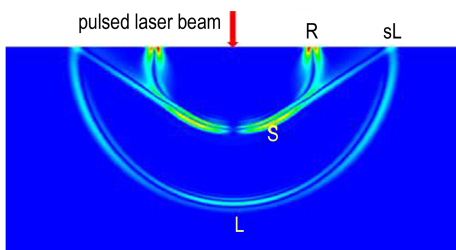


图1 激光在PBX材料中激发超声波声场图^[12]

Fig. 1 Ultrasonic field excited by laser in PBX material

$$\rho_0 v^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right] \quad (1)$$

式中, v 为有应力情况下sL波的传播速度, $m \cdot s^{-1}$; ρ_0 为被测材料密度, $kg \cdot m^{-3}$; λ 、 μ 为材料二阶弹性常数,Pa; l 、 m 为三阶弹性常数,Pa; σ 为应力值,Pa。

对式(1)两边分别求导得出声速的变化量与应力变化量之间的关系:

$$\frac{dv}{d\sigma} = \frac{v}{v^2} = K \quad (2)$$

式中, K 称为声弹性常数。

由(2)式可得,在固定传播距离内,应力与声速的关系可简化为:

$$\frac{\Delta v}{v_0} = K_0 \cdot \sigma \quad (3)$$

式中, v_0 为无应力情况下sL波波速,即波速的相对变化量与应力幅值成正比。因此根据声弹性原理,可通过测量sL波波速的相对变化量来评价材料内部应力的变化大小。

2.3 测量方法及实验系统

如图2所示,根据sL波的传播特点及声弹性原理,可以采用“一发一收”模式,脉冲激光在PBX试件表面激发超声波,压电超声波斜探头接收超声波信号。根据图1所示的PBX材料内部激光超声声场分布和不同模态超声波的传播特性,可以判断压电超声探头可以接收到沿表面传播的R波和sL波,以及底面纵波反射波(2L)和模态转化波(LS)等超声波信号。通过固定激发激光束与接收探头之间的距离,将声速测量转化成传播时间的测量。最后通过在试件两端施加不同大小的应力,获取sL波传播速度与应力大小间的关系。

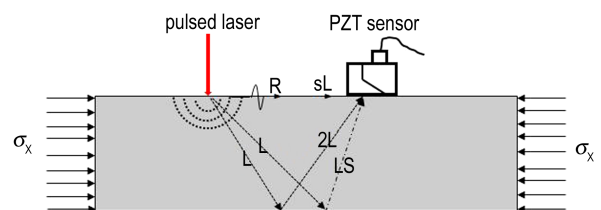


图2 基于激光超声的PBX内应力测量方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stress measurement method with laser ultrasound in PBX

图3为PBX模拟材料内应力激光超声检测实验系统示意图。由图3可知,整个系统可分为应力加载装置和激光超声检测单元两部分。为实现PBX内应力激光超声在线原位测试,将应力加载装置安装在激光超声检测实验平台上,该应力加载装置由液压千斤顶、

压力传感器和钢制框架组成,如图4所示。所采用液压千斤顶可提供0~200 kN有效载荷,S型压力传感器的量程为0~10 kN,重复测量误差 $\pm 2\%$ 。激光超声检测实验系统包含YAG脉冲激光器、聚焦透镜、压电超声探头、信号放大器、带通滤波器和示波器。实验过程中,先将PBX模拟材料试件固定在应力加载装置中,再由脉冲激光器发射波长1064 nm、脉宽10 ns、重复频率25 Hz的脉冲激光束,激光束经聚焦透镜聚焦到PBX模拟试件上。同时将压电超声探头置于试件表面上,固定压电超声探头与激光束的间距为24 mm。通过压电超声探头接收表面波和体波底面回波信号,再经信号放大器和滤波器后,由示波器进行采集和显示。为提高信号的信噪比,示波器采用16次平均模式进行信号采集和显示。

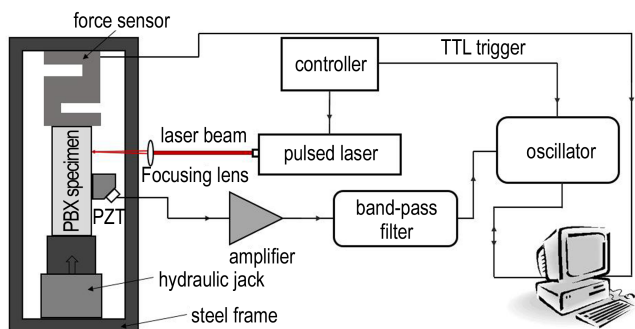


图3 PBX内应力激光超声检测实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment system for stress measurement in PBX with laser ultrasound

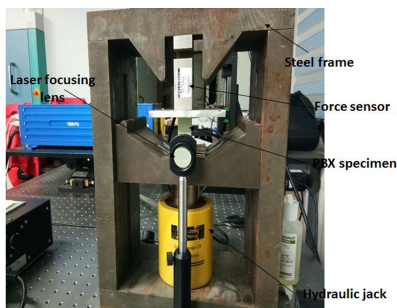


图4 内应力激光超声原位检测小型加载装置

Fig. 4 The small loading device for in situ test of internal stress with laser ultrasound

3 结果与讨论

3.1 PBX模拟材料试件内部激光超声信号

根据PBX模拟试件中不同模态激光超声传播的路径和声速可确认回波信号分别为sL波、2L波、R波

和LS波,如图5所示。由图5可以看出,各种模态激光超声回波信号可以明显地区分开,且sL波在检测信号的前端。因此可通过本研究所搭建的实验装置实现PBX模拟材料中掠面纵波的测量,初步验证了基于激光超声掠面纵波的PBX模拟材料内应力检测方法的可行性。

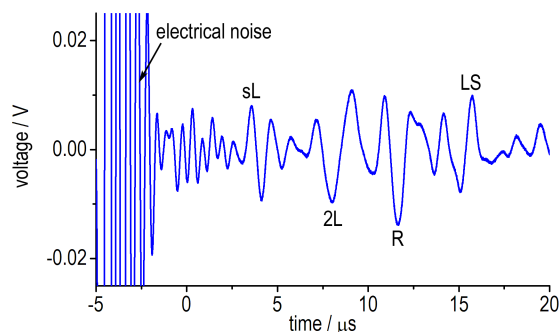


图5 PBX模拟材料试件激光超声检测信号

Fig. 5 Measured laser ultrasonic signal in PBX simulation specimen

3.2 PBX模拟材料内应力激光超声测量结果

图6为PBX模拟材料试件不同应力状态下激光超声sL波信号比较,测量过程中激光束与压电探头之间间距保持不变。从图6可以看出,随着应力的逐渐增大,sL波除其幅值有所增加外,其到达时间也逐渐提前,且应力幅值越大,其时间差别也越大,即超声波波速变化量越大。初步可以看出该实验结果与声弹性理论基本相符。

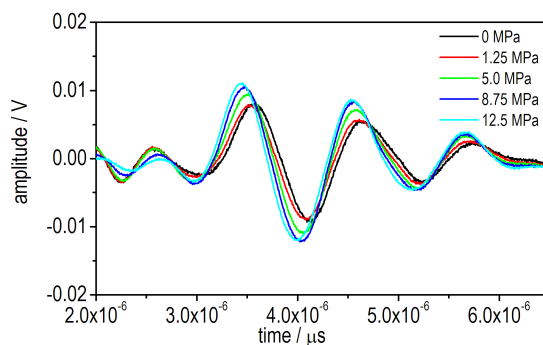


图6 PBX模拟材料试件不同应力状态下激光超声sL波信号比较

Fig. 6 Comparison of laser ultrasonic sL wave signals in PBX simulation specimen within different stress

通过测量应力引起的超声波信号延迟到达时间,可以计算出相应的波速相对变化量。图7为测得PBX模拟试件中内应力与sL波波速相对变化量间的关系

曲线。从图7可以看出,应力与sL波波速相对变化量间存在明显的线性关系。对其进行线性拟合之后可以得,其斜率约为 8.36×10^{-4} ,因此两者之间的关系式可表示为:

$$\frac{\Delta v}{v_0} \approx 8.36 \times 10^{-4} \sigma \quad (4)$$

结合式(4),通过检测材料中的超声波传播速度的变化来计算得到其内应力值,验证了基于激光超声掠面纵波的PBX模拟材料内应力检测的可行性。

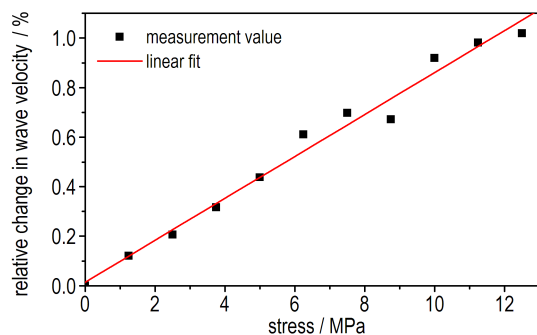


图7 PBX模拟材料试件内应力振幅与波速相对变化量关系

Fig. 7 Relationship between the relative change quantity in wave velocity and amplitude of stress in PBX specimen

4 结论

提出并研究了基于激光超声掠面纵波的PBX模拟材料内应力无损检测方法。搭建了PBX模拟材料试件应力在线激光超声无损检测平台,使用脉冲激光在PBX模拟材料中进行了超声波激发,采用压电超声探头进行信号接收,开发了小型应力加载装置,实现了在PBX试件内部不同大小的初始应力的导入。主要研究结果可以概括为以下几个方面:

(1) 脉冲激光可在PBX模拟材料内同时激发包括sL波在内的多种模态超声波。

(2) 在不同加载状态下对激光超声掠面纵波信号进行了测量,发现试件在受到1 MPa以上应力时,传播方向与应力方向平行的掠面纵波的传播速度有明显变化。

(3) 获得了激光超声掠面纵波传播速度相对变化量与应力幅值间的线性关系,初步验证了激光超声掠面纵波对于PBX模拟材料内部应力状态检测的可行性。

参考文献:

[1] 董海山,周芬芬.高能炸药及相关物性能[M].中国工程物理研

究院,1989:301-303.

- [2] 陈鹏万,丁雁生.高聚物粘接炸药的力学行为及变形破坏机理[J].含能材料,2000,8(4):61-164.
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng. Mechanical behaviour and deformation and failure mechanisms of polymer bonded explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(4):61-164.
- [3] 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 in damage in pressed polymer bonded explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 372-378.
- [4] 宗和厚,张伟斌,肖丽,等.超声端点反射法检测PBX表面裂纹深度[J].含能材料,2016,24(2):166-170.
ZONG He-hou, ZHANG Wei-bin, XIAO Li, et al. Crack depth detection of PBX section by ultrasonic edge peak echo method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(2): 166-170.
- [5] 蔡宣明,张伟,魏刚,等.PBX模拟材料动力学响应及微观损伤模式[J].含能材料,2014,22(5):136-138.
CAI Xuan-ming, ZHANG Wei, WEI Gang, et al. Dynamic mechanics response and mesoscopic damage of a PBX simulant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 136-138.
- [6] 徐春广,宋文涛,潘勤学,等.残余应力的超声检测方法[J].无损检测,2014,36(7):25-31.
XU Chun-guang, SONG Wen-tao, PAN Qin-xue, et al. Residual stress nondestructive testing method using ultrasonic [J]. *NDT*, 2014, 36(7): 25-31.
- [7] Landa M, Pleck J. Ultrasonic techniques for non-destructive evaluation of internal stress[C]//15th WCNDT, Roma, 2000.
- [8] 朱伟,彭大暑,杨立斌,等.超声波法测定残余应力的原理及其应用[J].计量与测试技术,2001,28(6):25-26.
ZHU Wei, PENG Da-shu, YANG Li-bin, et al. The principle of determining residual stress by ultrasonic wave and its use [J]. *Measurement and Testing Technique*, 2001, 28(6): 25-26.
- [9] 贺玲凤,潘桂梅,小林昭一.用激光超声测量H型钢梁的残余应力[J].华南理工大学学报(自然科学版),2001,29(7):20-23.
HE Ling-feng, PAN Gui-mei, Kobayashi Shoichi. Measurement of residual stress in H-shaped steel beam using laser ultrasonic [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2001, 29(7): 20-23.
- [10] 张伟斌,赵北君,田勇,等.高聚物粘接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.
- [11] 汪丽丽,吴伟,王茹,等.基于LCR波的20CrMnTi渗碳淬火齿轮表面残余应力检测[J].无损探伤,2017,41(1):9-20.
WANG Li-li, WU Wei, WANG Ru, et al. The testing of surface residual stress of 20CrMnTi carburizing quenching gear based on LCR wave [J]. *NDT*, 2017, 41(1): 9-20.
- [12] 裴翠祥,弋东驰,刘文文,等.PBX内部缺陷激光超声无损检测数值模拟[J].含能材料,2017,25(10):822-828.
PEI Cui-xiang, YI Dong-chi, LIU Wen-wen, et al. Numerical simulation of laser ultrasonic testing of internal defects in PBX [J].

Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao),
2017, 25(10): 822-828.

[13] Yashar J, Vagelis P, Mehdi A N. Using L_{CR} ultrasonic method

to evaluate residual stress in dissimilar welded pipes[J]. *International Journal of Innovation Management and Technology*,
2013(4):170-174.

Study on Detection Method of Internal Stress in PBX Simulated Material by Laser Ultrasonic Skimming Surface Longitudinal Wave

ZHOU Hai-qiang¹, PEI Cui-xiang², LIU Wen-wen², YI Dong-chi², YANG Zhan-feng¹

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Beijing Institute of Technology, Xi'an 710049, China)

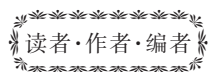
Abstract: To verify the feasibility of detecting the internal stress of polymer bonded explosive (PBX) by laser ultrasonic technology, a new and high efficiency nondestructive testing method for internal stress state of PBX simulation material based on laser ultrasonic skimming surface longitudinal wave was established. An experimental platform of on-line laser ultrasonic nondestructive testing used for PBX simulation specimen stress was built. The longitudinal wave signal of laser ultrasonic skimming surface was measured under different loading conditions. Results show that when the PBX simulation specimen is subjected to stresses above 1MPa, the velocity of sound changes obviously when the propagation direction of ultrasonic skimming surface longitudinal wave is parallel to the stress direction. The relation between the relative change quantity of sound velocity and the stress increases approximately linearly. With the increase of stress, the sound velocity of ultrasonic skimming surface longitudinal wave increases. The feasibility of detecting the internal stress state of PBX simulation material by laser ultrasonic skimming surface longitudinal wave is preliminarily verified.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); internal stress; nondestructive testing; laser ultrasonic; surface wave; acoustic elasticity

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2017367



《含能材料》实现单篇网络首发

为了以规范的网络期刊出版方式更快更好地确立作者的科研成果首发权,全面提高学术论文的传播效率和利用价值,《含能材料》与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司(简称电子杂志社)签署了《CAJ—N网络首发学术期刊合作出版协议》,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ—N)进行《含能材料》单篇网络首发。

自2018年5月起,凡经《含能材料》审定录用的稿件将在《中国学术期刊(网络版)》(CAJ—N)上网络首发,后视编排情况发布整期汇编定稿,并印刷出版。

为规范网络首发版式,请投稿作者登录本刊网站,仔细阅读本刊投稿须知,并依据投稿模板中相关要求认真撰写论文。录用定稿网络首发之后,在后续整期汇编定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名及排序、作者单位以及其主要学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

欢迎作者投稿本刊。欢迎读者通过中国知网、本刊网站阅读并使用DOI引用本刊最新录用论文。

《含能材料》编辑部