

文章编号:1006-9941(2020)05-0449-07

基于光纤光栅的PBX声发射监测方法

邱芷葳^{1,2},温茂萍¹,周红萍¹,付涛¹

(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研究生部,四川 绵阳 621999)

摘要: 为解决传统压电传感器(piezoelectric, PZT)不能植入弹药内部监测高聚物粘结炸药(polymer bonded explosives, PBX)损伤问题,利用可调谐窄带光源搭建了基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)微细传感器的PBX声发射监测系统(FBG-AE),开展了PBX单轴拉伸、压缩及断铅实验,对比了FBG与PZT两种传感器的信号特征;同时还开展了FBG方法的环境适应性、信号方向敏感性等研究,以验证该监测系统的基本性能。研究表明:虽然试验中FBG信号幅值略低于PZT,但也能产生毫伏级以上输出信号,可以应用于PBX损伤在线监测;在环境温度与变形场分别小于 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 25\text{ }\mu\text{e}$ 范围内时,该FBG-AE系统能够有效监测到PBX上产生的断铅信号;FBG对AE信号方向具有敏感性,在 90° 和 270° 方向(即垂直于FBG轴向方向)信号幅值最低,提出并验证了采用弯曲粘贴FBG方法可以减小声发射监测方向敏感性差异,有利于提高PBX损伤定位精度。

关键词: 光纤布拉格光栅(FBG);声发射(AE);高聚物粘结炸药(PBX);可调谐窄带激光光源

中图分类号:TJ55; TP216

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019095

1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)材料或构件在贮存、运输中由于长期外载荷的作用,将萌生裂纹并持续发展为破坏性断裂,裂纹在发展过程中积聚的能量突然释放产生瞬态应力波的现象,即为声发射(AE)。利用AE技术对PBX材料因损伤产生的声信号实施在线监测,不仅能掌握PBX损伤趋势规律、揭示PBX损伤破坏机理,而且对提高武器系统安全性和可靠性具有重要意义^[1-2]。相比其他无损检测技术,AE技术是一种被动监测技术,能对损伤进行连续、实时的原位监测。早期的AE监测工作使用传统的压电传感器(PZT)主要针对金属的变形和断裂过程,后来逐步应用于复合材料、岩石、混凝土等材料的结构健康监测^[3]。在含能材料领域,中国工程物理研究院^[4-6]、北京理工大学^[7]两机构基于压电传感器开展了PBX材料AE监测工作。但是PZT体积大,不能植入PBX构件内部狭小空间,而且

还存在电路放电等安全风险^[8],因此,亟待发展尺寸小、便于植入而且安全的传感器监测方法,光纤布拉格光栅传感器(FBG)具有微细、无源、抗电磁干扰、抗辐射等特点,而且在AE波的作用下,FBG产生拉伸或压缩,势必改变光栅周期和折射率这两个参量,引起FBG中心波长的漂移。因此,一种新型的、基于波长漂移的光纤光栅传感声发射监测技术(FBG-AE)成为应用于PBX损伤监测最为有效的技术途径。

目前,FBG-AE技术主要应用于航空航天和航海业、采矿业、电力工业等领域,针对铝板、碳纤维增强材料、岩石、变压器局部放电等损伤或异常情况实施在线实时监测^[9]。Vidakovic M^[10]等针对应用于航海领域的金属材料开展了FBG-AE监测工作,替代不能应用于海水环境的PZT传感器。日本东京大学的Wu Q, Yu F^[11-12]等利用相移FBG传感器对碳纤维增强板(CFRP)的损伤行为进行AE监测,通过S模式波和A模式波的频散特性解释CFRP中两种损伤形式:横向裂缝、分层现象。Rajan G^[13]等基于FBG-AE监测系统对岩体完整性进行了评价。马宾^[14]等基于搭建的FBG-AE系统对变压器局部放电实施在线监测,验证了内置于变压箱体的FBG相比布置于箱体外部的PZT有更好的灵敏度和更宽的频率响应范围。目前,关于FBG-AE监测技术应用于PBX领域报道极少,付涛^[8]等

收稿日期:2019-04-10;修回日期:2019-09-30

网络出版日期:2019-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助(11604309)

作者简介:邱芷葳(1995-),女,硕士生,主要从事光纤传感器及其在声发射监测中的应用。e-mail: qiuzhiew@foxmail.com

通信联系人:付涛(1982-),男,助理研究员,主要从事传感器及其在含能材料中的应用研究。e-mail: futao@caep.cn

引用本文:邱芷葳,温茂萍,周红萍,等.基于光纤光栅的PBX声发射监测方法[J].含能材料,2020,28(5):449-455.

QIU Zhi-wei, WEN Mao-ping, ZHOU Hong-ping, et al. Acoustic Emission Monitoring Method of Fiber Bragg Grating in PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(5):449-455.

采用断铅实验方法开展了FBG-AE监测PBX的损伤定位方法,提出了一种时间系数定位法修正AE波到达时间,实现高精度的损伤定位,但并未开展可应用于PBX实际损伤破坏在线监测的FBG-AE方法研究。

PBX的声阻抗较高,FBG-AE监测PBX的损伤破坏具有一定难度。因此,为了研究FBG-AE监测系统对PBX损伤监测的可行性和适用性,建立了基于FBG的AE监测方法,测试了机械载荷作用下PBX的损伤情况,在此基础上,为了使系统能适应PBX宽温域监测条件,研究了PBX损伤监测系统的环境适应性。进而,提出FBG弯曲粘贴方法,提供了一种提高PBX损伤定位精度的实施方法。

2 FBG对AE应力波的响应理论

AE源产生的弹性振动会以应力波的形式释放,随即传播到材料表面引起表面位移,用传感器感知材料表面位移的机械振动,并通过高频采集系统以电信号的形式采集到该机械振动,便可对被测材料的AE信号进行分析和处理^[15]。FBG传感器能敏感于AE应力波引起的材料表面机械振动,不同于传统PZT传感器的压电效应,FBG主要表现为中心波长 λ 发生漂移,其中漂移量 $\Delta\lambda_b$ 可表示为^[16]:

$$\Delta\lambda_b = 2n_{\text{eff}0}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda_0 \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda_b$ 为FBG中心波长漂移量,pm; $n_{\text{eff}0}$ 为初始纤芯折射率; $\Delta\Lambda$ 为几何效应引起的光栅周期弹性变形量,pm; Δn_{eff} 为弹光效应引起的纤芯折射率变化量; Λ_0 为初始光栅周期, μm 。

作用于FBG的AE应力波,描述为时间的余弦函数^[17]:

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_m \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_s} z - 2\pi f_s t\right) \quad z \in (0, l) \quad (2)$$

式中, ε_m 为AE波振幅,V; λ_s 为应力波在介质中的波长,mm; z 为FBG轴上的一点; f_s 为应力波频率,Hz。当FBG在AE应力波的作用下,由几何效应和弹光效应引起的纤芯折射率和光栅周期变化量为(满足条件:超声波波长远远大于栅区长度):

$$\Delta n_{\text{eff}}(t) = -\frac{n_{\text{eff}0}^3}{2} \times [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \times \varepsilon_m \cos(2\pi f_s t) \quad (3)$$

$$\Delta\Lambda_0(t) = \Lambda_0 \varepsilon_m \cos(2\pi f_s t) \quad (4)$$

式中, P_{11} 、 P_{12} 为弹光系数, ν 为泊松比。式(3)、式(4)代入式(1),得到由AE应力波引起的FBG中心波长漂移量^[18]:

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b \varepsilon_m \cos(2\pi f_s t) \times \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}0}^2}{2} \times [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \quad (5)$$

3 实验部分

3.1 样品制备

本研究中采用HMX基PBX,由质量分数95%的HMX晶体颗粒和质量分数5%的氟橡胶压制而成的毛坯件,参考GJB772A-1997炸药试验方法417.1、418.1机加成哑铃型拉伸试件和圆柱形压缩试件,方向敏感性测试所用的HMX基PBX试件尺寸为 $\Phi 220 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。

3.2 FBG-AE监测系统及其环境适应性

实验利用可调谐窄带激光光源搭建了FBG-AE高速解调的监测系统。监测系统的工作原理如图1所示

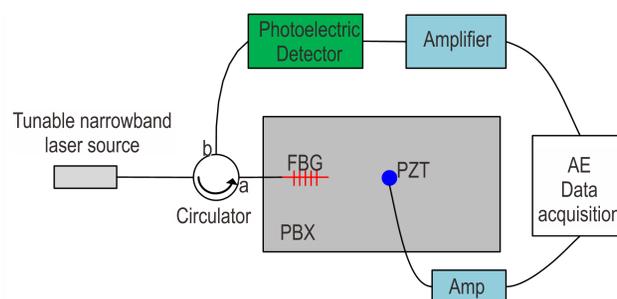


图1 FBG-AE监测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of FBG-AE monitoring system

示,实验选用中心波长约1550 nm,栅区长度10 mm,反射率大于80%的FBG贴于PBX试件表面,以PZT激励信号、断铅信号和机械载荷损伤信号作为PBX的AE源。可调谐窄带激光(Santec TSL-510)通过环形器a端照射于FBG反射谱的工作测量点。随后反射光强通过环形器b端返回,并被光电探测器(New Focus 2117)接收,此时光信号转换为电信号;前置放大器(Physical Acoustics 2/4/6)把电信号放大,最终录入数据采集系统(Express8 @ Physical Acoustics Corporation)。基于窄带激光的AE解调原理如图2所示,在外界条件作用下,FBG的中心波长从图2a位置漂移到图2b位置产生 $\Delta\lambda$ 的微小漂移量。当窄带光源的输出保持稳定,窄带光谱和FBG反射谱重叠区的面积随着FBG反射谱的左右漂移而增大或减小,即FBG反射光强在外界作用下会增大或减小,利用波长调制转换为光强调制解调出AE信号^[19]。

FBG-AE监测系统的环境适应性将决定PBX损伤监测的环境要求,根据窄带激光的AE解调原理,在温度场和应变场变化的环境下,FBG反射谱发生左右漂移,可能会导致初始设定的窄带光源波长照射到FBG透射光谱区,使得FBG反射的光强变化量极小,FBG-AE监测系统就监测不到AE信号引起的光强变化现象^[20]。

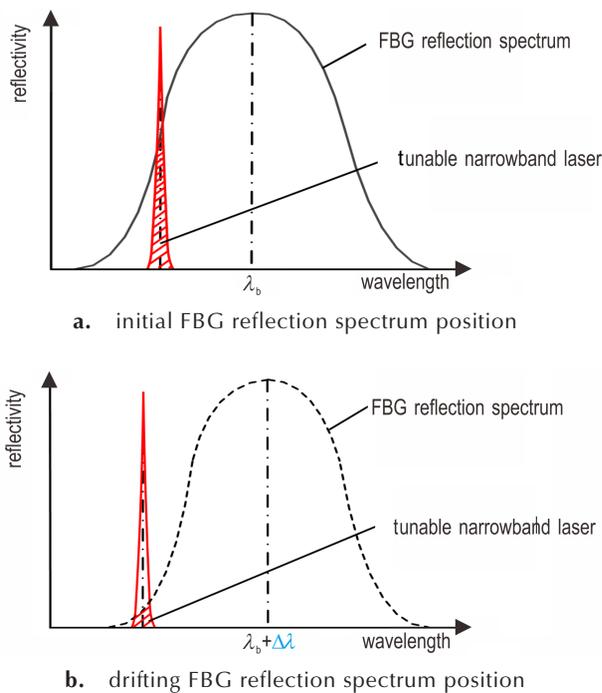


图2 基于窄带激光的AE解调原理图
Fig.2 Schematic diagram of AE demodulation based on narrowband laser source

因此,在PBX上进行了FBG-AE系统的环境适应性实验,搭建FBG-AE监测系统如图1所示,其中PZT距FBG中心50 mm。之后,可调谐窄带激光光源调于FBG的3 dB点对应的波长处,以此波长作为开始,激光光源每调节5 pm进行一次监测,直到监测不到AE信号为止,并记录激光光源对应于FBG反射谱的波长位置。

3.3 基于FBG-AE的PBX试件拉伸、压缩损伤监测

研究PBX的力学性能,能优化PBX配方设计、提高武器性能^[21]。PBX作为一种颗粒型复合材料,材料内部存在许多不均匀的声阻抗界面,对AE波的传播具有一定阻碍作用。因此,利用AE事件记录PBX损伤破坏过程,探究运用FBG监测到PBX试件损伤破坏产生的AE信号的可行性。将FBG和PZT通过耦合剂贴于PBX试件表面中心位置,如图3a、图3b所示,同时将传感器连接于AE系统,参考GJB772A-1997炸药拉伸、压缩试验方法417.1、418.1对PBX试件施加准静态轴向拉力、压力,直至PBX试件断裂。拉伸压缩实验采用万能实验机进行,拉伸试件采用标准哑铃型试件,压缩试件采用圆柱型试件(Φ20 mm×20 mm),如图3所示。

3.4 PBX的FBG方向敏感性测试

解决FBG方向敏感性问题是开展高精度的PBX损伤定位AE监测工作的重要目标之一。FBG方向敏感性取决于声波传播方向和FBG轴向的相对取向,当超

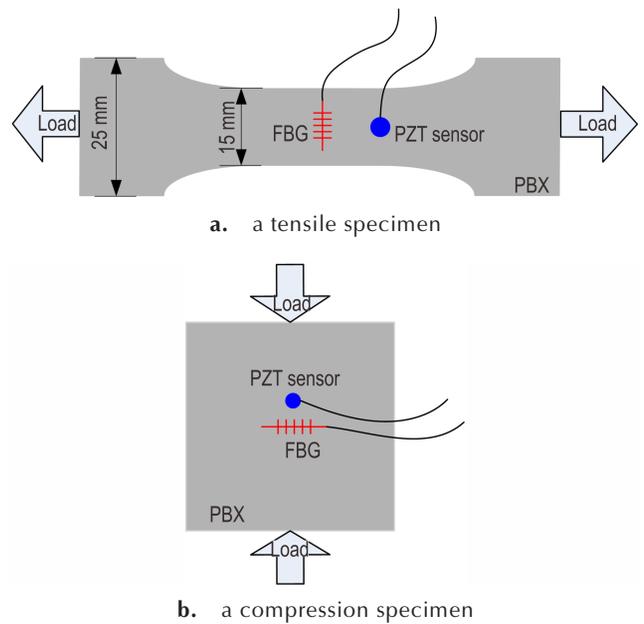


图3 PBX试件拉伸、压缩实验示意图
Fig.3 Schematic diagram of tensile and compression experiments of PBX specimens

声波的传播方向平行于FBG轴向时,FBG受到最大应变影响,具有最好的方向敏感性^[22]。为此,需要考察FBG-AE监测方法在PBX试件上的方向敏感特性。测试过程如图4所示,FBG粘贴于PBX试件(Φ220 mm×70 mm)圆心处,在图中12个方向进行断铅实验,每个位置使用自动铅笔连续断铅3次,每次铅芯伸出长度2.5 mm,与PBX表面夹角30°,用于模拟PBX损伤破坏AE信号。每个方向标记4个断铅实验位置,分别距离FBG中心30 mm、50 mm、70 mm、90 mm。

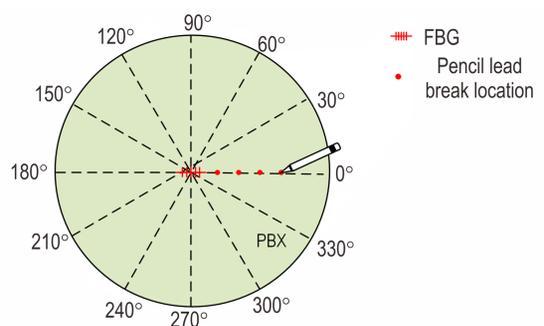


图4 FBG方向敏感性测试图
Fig.4 Test diagram of FBG direction sensitivity

4 结果与讨论

4.1 FBG-AE监测系统的温度适应性分析

图5所示,测试的两个FBG有效监测波长范围位于3 dB点处,约60 pm。根据FBG温度、应变敏感性,

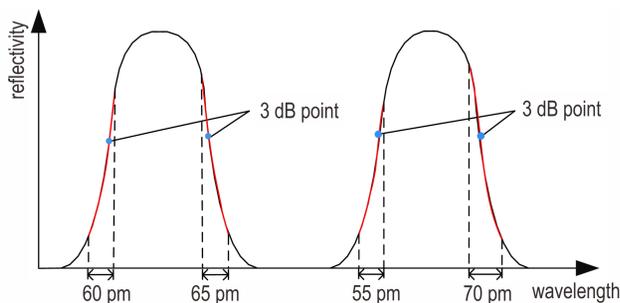


图5 FBG反射谱的传感波长范围图

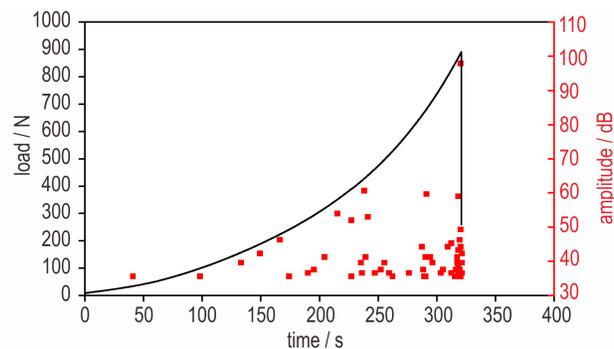
Fig.5 Sensing wavelength range of FBG reflection spectrum

在 1550 nm 波段的 FBG 对应的温度灵敏度系数为 $10 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$; 应变灵敏度系数为 $1.2 \text{ pm} \cdot \mu\text{e}^{-1}$ ^[23], 因此 FBG-AE 监测系统能在温度范围为 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变范围为 $\pm 25 \mu\text{e}$ 下监测到 AE 信号。结果表明该系统仅能在有限的温度范围或应变范围内具有 AE 监测功能。针对 PBX 实际使用的宽温域为 $-50 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$, 该 FBG-AE 监测系统还不能完全适应, 后续研究工作将对宽温域的 PBX 损伤监测工程应用问题开展研究。

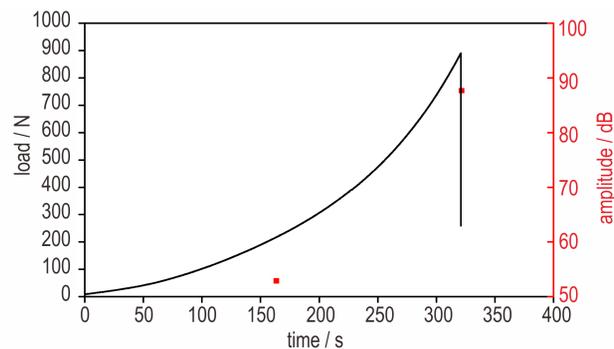
4.2 FBG 和 PZT 传感器对拉伸、压缩实验的 AE 信号监测的对比分析

图 6 表示 AE 信号幅值与时间的关系, 为了直观反映实验过程, 图中叠加了载荷对时间的曲线。PBX 拉伸、压缩实验中, FBG 传感器能监测到 PBX 断裂破坏释放的能量。与传统 PZT-AE 监测系统相比, FBG-AE 监测系统的阈值值较高导致图 6 显示的拉伸、压缩过程中的 AE 信号较少。图 6c、图 6d 压缩实验结果图与图 6a、图 6b 拉伸实验结果图比较发现, 压缩过程中产生的 AE 信号明显多于拉伸过程。这是由于 PBX 是脆性材料, 其压缩断裂能量大于拉伸断裂能量。且压缩时 PBX 有屈服、强化、软化特性, 表现出延性变形, 产生较多 AE 信号。而在拉伸时, PBX 在屈服时发生破坏, 没有强化段, 所以 AE 信号较少^[24]。

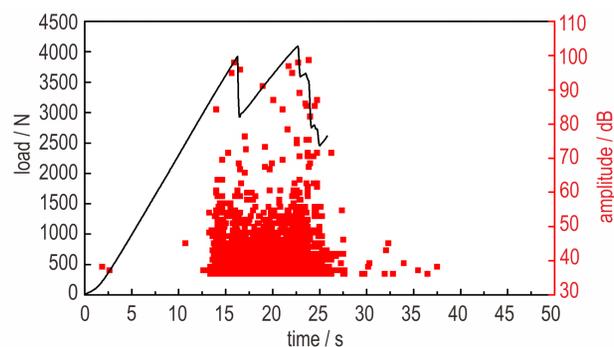
图 7 以 PBX 拉伸断裂瞬间监测到最高幅值的 AE 信号为例, 两传感器监测的信号均为典型的振荡衰减 AE 信号。PZT 监测到断裂瞬间的最大信号幅值为 99 dB, 信号到达 PZT 时间为 351.7825663 s; FBG 监测到断裂时的最大信号幅值为 88 dB, 信号到达 FBG 时间为 351.7833247 s。与 PZT 相比, FBG 监测到的幅值略小, 在时间上延迟 0.7584 ms。考察 PBX 试件断裂位置后发现, 断裂处距离 FBG 粘贴位置较远, 所以 FBG 监测到的信号幅值较低、时间较晚。可见, AE-FBG 监测系统不仅能够准确监测到 PBX 损伤断裂产生的毫伏级信号, 灵敏度较高; 而且信号的累积程度可间接反映 PBX 的加载特性。



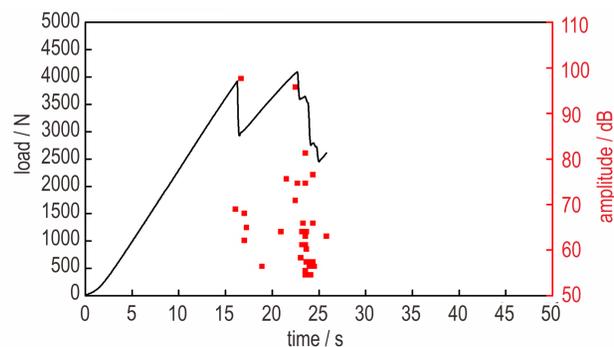
a. PZT sensor-tensile test



b. FBG sensor-tensile test



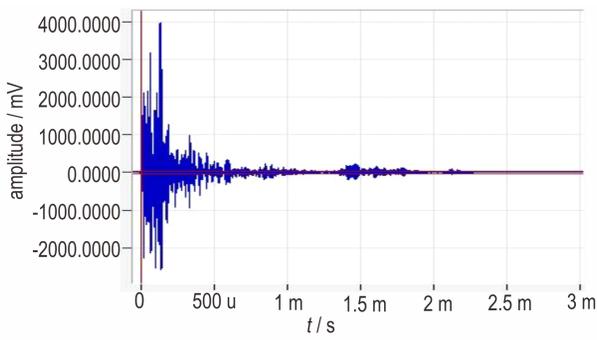
c. PZT sensor-compression test



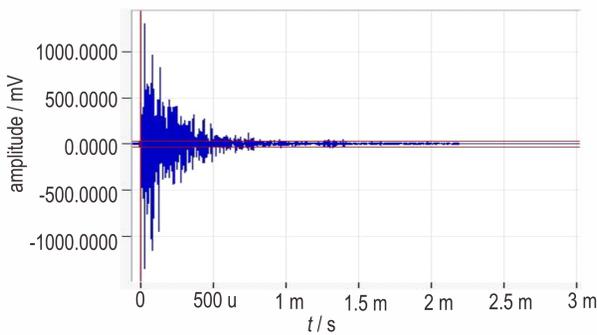
d. FBG sensor-compression test

图6 加入力学曲线的PBX试件AE信号幅值对时间结果图

Fig.6 Result diagram of the AE signal amplitude versus time in PBX specimen and embedded into mechanical loading curve



a. AE signal monitored by PZT sensor



b. AE signal monitored by FBG sensor

图7 PBX试件幅值最大的AE信号波形

Fig.7 The waveform of the AE signal with the maximum amplitude in PBX specimen

4.3 PBX的FBG方向敏感性分析

图8为PBX试件上常规粘贴FBG的方向敏感性图,在90°和270°方向(垂直于FBG轴向),断铅信号幅值偏低,甚至可能低于阈值,导致监测不到信号。在0°和180°方向(FBG的轴向),断铅信号幅值最高;从轴向过渡到垂直方向时,断铅信号幅值逐渐减小。同时,随着断铅位置与FBG之间的直线距离增加,监测的信号幅值将会减小,表明AE信号在PBX中的衰减与传播的几何距离有关^[25],信号传播至传感器距离越远,传播

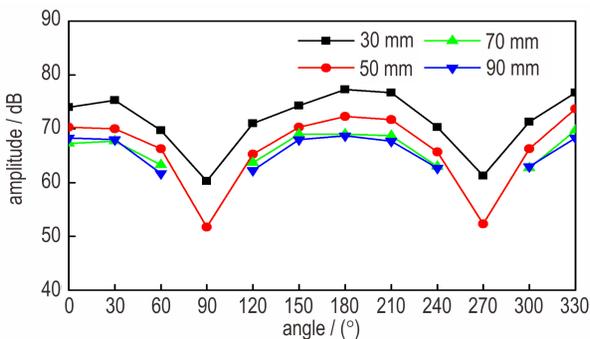


图8 不同测试距离下PBX试件AE信号幅值与FBG方向的变化关系

Fig.8 Relationship between amplitude of AE signal and direction of FBG in PBX specimen under different test distances

过程中信号衰减越明显,使得监测到的信号幅值越低。

通过以上实验分析发现FBG的方向敏感性与AE波作用的角度和距离相关。引入图9 FBG-AE的传感模型,当AE波作用于常规粘贴的直型FBG时,可由式(6)计算FBG中心波长漂移情况^[8],反映FBG的方向敏感性与角度之间的关系:

$$\Delta\lambda_b = (C_y \cos\theta + C_x \sin\theta) \lambda_b \varepsilon = C_y \lambda_b \varepsilon_y + C_x \lambda_b \varepsilon_x \quad (6)$$

式中, C_x, C_y 为AE波作用于FBG的方向系数($0 < -C_x < C_y$), θ 为AE波传播方向与FBG轴向的夹角, ε 为AE波作用于FBG中心产生的变形。

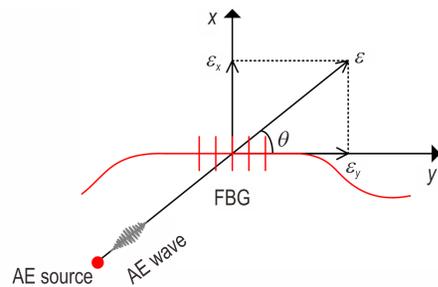


图9 FBG-AE的传感模型图

Fig.9 The sensing model of FBG-AE

由上述模型可知,当 $\theta=0^\circ$ 时, $\Delta\lambda_b$ 达到最大值,则FBG轴向是AE信号最为敏感的方向,当 $\theta=90^\circ$ 时, $\Delta\lambda_b$ 达到最小值,则FBG径向是AE信号最不敏感的方向,因此,使用常规粘贴FBG方法进行PBX损伤定位,存在以下问题:(1) PBX为高声阻抗材料,使得AE波在传播过程中衰减较大,FBG监测的声信号幅值较小。(2) 损伤定位一般采用多个传感器,当AE波传播方向作用于FBG轴向的夹角不同,会导致FBG对AE信号响应的方向敏感性差异较大。当某一FBG距AE源较远且夹角为90°或270°时,可能会监测不到AE信号,影响损伤定位精度。(3) 夹角差异会增加AE源到达FBG的时间,消除夹角引起的时间差异,将提高损伤定位精度^[8]。所以本实验采用FBG弯曲粘贴方法,如图10所示。当各个方向的AE波作用于FBG最为敏感的轴向时,由式(6)计算可知,弯曲粘贴FBG的中心波长漂移量为 $C_y \lambda_{B0} \varepsilon_y$, 仅与声源发射的波强有关,与夹

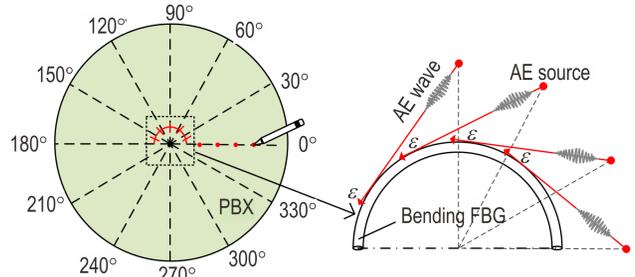


图10 FBG弯曲粘贴示意图

Fig.10 Diagram of the bending FBG

角 θ 无关。实验中各方向通过人为断铅发射等强的AE波,理论上弯曲粘贴FBG在各方向响应幅值相等。理论分析表明弯曲粘贴FBG不仅能消除夹角差异,减小FBG方向敏感性问题;而且各个方向的AE波均能作用于FBG最敏感方向。

弯曲粘贴FBG的实验验证结果如图11所示,在断铅位置相同的情况下,弯曲粘贴的FBG对AE信号的响应幅值没有常规粘贴FBG的大,但是能明显看出弯曲粘贴的FBG对各方向上AE信号响应幅值差别不大。而且当断铅位置在70 mm时,弯曲光栅在每个角度上都能响应,但是常规粘贴光栅在此距离上已不能完全响应。所以,验证了FBG的弯曲粘贴方法相比常规粘贴能减小FBG的方向敏感性存在差异的问题,并且能在轴向敏感AE信号,使得达到一定距离后其灵敏度高于常规粘贴法。

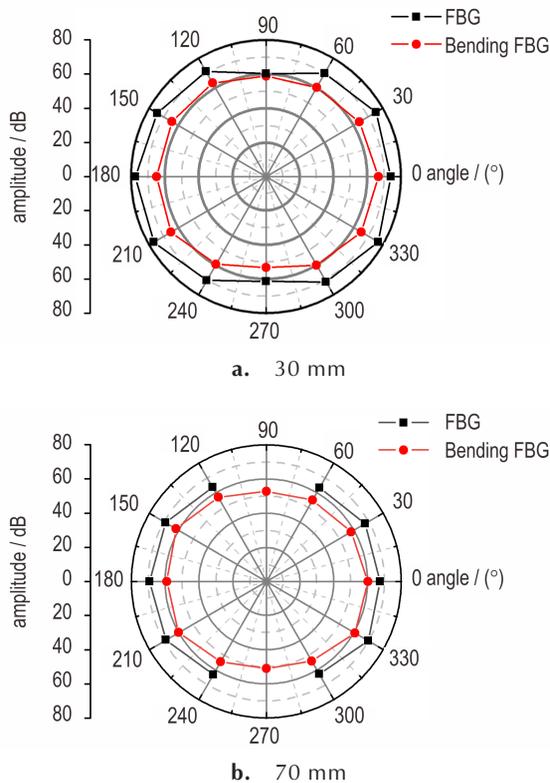


图11 FBG和弯曲粘贴FBG在距AE源不同距离下的方向敏感性测试结果图

Fig.11 Directional sensitivity test results of FBG and bending FBG at different distances from AE source

5 结论

(1)通过FBG-AE监测系统对PZT激励信号、断铅信号和PBX机械载荷损伤信号的响应分析,结果证明

该系统灵敏度虽然低于商用技术,但可以监测、判定PBX的损伤与断裂。

(2)基于可调谐窄带光源解调方法搭建的FBG-AE监测系统还不够完善,仅具有 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 25\text{ }\mu\text{e}$ 的动态监测范围能力。因此,为了适用于PBX使用环境的AE损伤监测,还需要开展研究以拓宽其温度与应变变化的适用范围。

(3)通过FBG的弯曲粘贴方法改善了常规粘贴FBG对AE信号方向敏感性不同的问题,分析了采用该方法有利于提高PBX损伤定位精度。

参考文献:

- [1] 温茂萍,田勇,游开兴.炸药部件无损检测综述[J].含能材料,1994(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.
- [2] 高登攀,郑家贵,田勇,等.浅谈声发射技术在含能材料研究中的应用[J].含能材料,2004,12(4):252-255.
GAO Deng-pan, ZHENG Jia-gui, TIAN Yong, et al. Application of acoustic emission technique in energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(4): 252-255.
- [3] 沈功田,戴光,刘时风.中国声发射检测技术进展——学会成立25周年纪念[J].无损检测,2003,25(6):302-307.
SHEN Gong-tian, DAI Guang, LIU Shi-feng. Acoustic emission testing progress in china: celebration for the 25(th) anniversary of chinese society for NDT[J]. *NDT*, 2003, 25(6): 302-307.
- [4] 付涛.PBX热强度评估相关技术研究[C]//中国工程物理研究院科技年报.2018.
FU Tao. Research on related technology of PBX thermal strength assessment[C]//China Academy of Engineering Physics Annual Report. 2018.
- [5] 赵方芳,罗景润,田常津,等.利用声发射技术监测颗粒填充聚合物材料的裂纹扩展过程[J].高压物理学报,2000,14(3):235-240.
ZHAO Fang-fang, LUO Jing-run, TIAN Chang-jin, et al. The crack growth process of particulate filled polymer monitored by acoustic emission [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 14(3): 235-240.
- [6] 高登攀,田勇,王丽玲,等.高聚物粘结炸药热冲击过程中的声发射现象研究[J].无损检测,2006,28(4):173-176.
GAO Deng-pan, TIAN Yong, WANG Li-ling, et al. Study on acoustic emission phenomena of plastic bonded explosive during thermal shock[J]. *NDT*, 2006, 28(4): 173-176.
- [7] Wang X, Ma S P, Zhao Y T, et al. Observation of damage evolution in polymer bonded explosives using acoustic emission and digital image correlation [J]. *Polymer Testing*, 2011, 30(8): 861-866.
- [8] Fu T, Wei P, Han X L, et al. Application of fiber Bragg grating acoustic emission sensors in thin polymer-bonded explosives [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 377-392.
- [9] 刘娟,丁克勤.光纤声发射传感器的研究现状与展望[J].传感器与微系统,2010,29(9):5-7.
LIU Juan, DING Ke-qin. Survey on development and prospect of fiber-optic acoustic emission sensor [J]. *Transducer and Mi-*

- crossystem Technologies*, 2010, 29(9): 5-7.
- [10] Vidakovic M, Mccague C, Armakolas I, et al. Fiber Bragg grating-based cascaded acoustic sensors for potential marine structural condition monitoring[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 1-2.
- [11] Wu Q, Yu F M, Okabe Y, et al. Application of a novel optical fiber sensor to detection of acoustic emissions by various damages in CFRP laminates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 24(1): 11-15.
- [12] Yu F M, Wu Q, Okabe Y, et al. The identification of damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates using a novel fiber-optic acoustic emission sensor[J]. *Structural Health Monitoring*, 2016, 15(1): 93-103.
- [13] Rajan G, Karekal S. High frequency fiber Bragg grating interrogator for monitoring rock cracking events for mining applications[C]// *Fiber-optic & Photonic Sensors for Industrial & Safety Applications*. IEEE, 2017.
- [14] 马宾, 徐健. 一种用于变压器局部放电在线监测的光纤声发射传感器试验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(7): 2273-2277. MA Bin, XU Jian. Study of fiber-optic acoustic emission sensor for partial discharges detection in power transformer[J]. *spectroscopy and spectral analysis*, 2017, 37(7): 2273-2277.
- [15] 阳能军, 姚春江, 袁晓静, 等. 基于声发射的材料损伤检测技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 5-13. YANG Neng-jun, YAO Chun-jiang, YUAN Xiao-jing, et al. Material damage detection technology based on acoustic emission [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016: 5-13.
- [16] Kersey A D, Davis M, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [17] Minardo A, Cusano A, Bernini R, et al. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferro-electrics & Frequency Control*, 2005, 52(2): 12-20.
- [18] 张法业, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 202-210. ZHANG Fa-ye, JIANG Ming-shun, SUI Qing-mei, et al. Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 202-210.
- [19] Kanakambaran S, Sarathi R, Srinivasan B. Robust classification of partial discharges in transformer insulation based on acoustic emissions detected using fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(24): 18-27.
- [20] Lee J R, Tsuda H. A novel fiber Bragg grating acoustic emission sensor head for mechanical tests[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(10): 1181-1186.
- [21] 温茂萍, 唐维, 董平, 等. 粘结剂含量对热压TATB基PBX残余应力的影响[J]. *含能材料*, 2017, 25(8): 661-666. WEN Mao-ping, TANG Wei, DONG Ping, et al. Effect of binder content on residual stress of thermally compacted TATB based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(8): 661-666.
- [22] Betz D C, Thursby G, Culshaw B, et al. Structural damage location with fiber Bragg grating rosettes and Lamb waves[J]. *Structural health monitoring*, 2007, 6(4): 299-308.
- [23] 廖延彪, 黎敏, 张敏, 等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 20-25. LIAO Yan-biao, LI Min, ZHANG Min, et al. Optical fiber sensing techniques and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 20-25.
- [24] 温茂萍, 庞海燕, 唐明峰, 等. 基于应力应变曲线的断裂能参数表征炸药韧性[J]. *含能材料*, 2015, 23(4): 351-355. WEN Mao-ping, PANG Hai-yan, TANG Ming-feng, et al. Toughness measurement of explosive based on fracture energy of the stress-strain curve[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(4): 351-355.
- [25] Ono K. Review on structural health evaluation with acoustic emission[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(6): 958-980.

Acoustic Emission Monitoring Method of Fiber Bragg Grating in PBX

QIU Zhi-wei^{1,2}, WEN Mao-ping¹, ZHOU Hong-ping¹, FU Tao¹

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Department of Graduate Students, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional piezoelectric (PZT) sensor can not be implanted into the ammunition to monitor the polymer bonded explosives (PBX) damage, a PBX acoustic emission monitoring system based on the micro-sensor of the fiber Bragg grating (FBG) was constructed by using a tunable narrowband laser source. The uniaxial tension, compression and pencil lead break experiments of the PBX materials were carried out, and the signal characteristics monitored by the FBG and PZT sensors were compared. At the same time, the environmental adaptability and signal direction sensitivity of the FBG method were also studied to verify the basic performance of the monitoring system. The results show that: although the amplitude of the signal monitored by FBG in the test is slightly lower than the PZT, it can also generate output signal above the millivolt level, which can be applied to online monitoring of PBX damage; When the ambient temperature and strain field are less than $\pm 3^\circ\text{C}$ or $\pm 25\ \mu\text{e}$, respectively, the FBG-AE system can effectively monitor the AE signal generated by PBX damage; FBG is sensitive to the direction of AE signal, and the signal amplitude is the lowest in the 90° and 270° directions (the direction of perpendicular to the FBG axial). It is proposed and verified that the gluing method of bending FBG can reduce the difference in the sensitivity of the FBG in response to AE signal, which is beneficial to improve the positioning accuracy of the acoustic emission source.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); acoustic emission (AE); polymer bonded explosives (PBX); tunable narrowband laser source

CLC number: TJ55; TP216

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019095

(责编:高毅)