

文章编号: 1006-9941(2006)02-0136-03

## 高聚物粘结炸药试件应力状态的超声法测试技术

张伟斌<sup>1,2</sup>, 赵北君<sup>1</sup>, 田 勇<sup>2</sup>, 黄 辉<sup>2</sup>, 朱世富<sup>1</sup>, 杨占锋<sup>2</sup>

(1. 四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610064;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 在加载情况下, 采用超声法对高聚物粘结炸药 PBX-9003 应力状态进行了测试, 获得了 PBX-9003 炸药试件声弹性参数。结果表明, 炸药在受到较大应力作用时超声波在炸药件内部传播速度有明显变化, 采用超声测得的应力接近实验所施的载荷(应力), 验证了在大应力作用下超声法无损测定炸药实际构件载荷应力的可行性。

**关键词:** 超声学; PBX-9003 炸药; 应力; 声弹性常数; 超声测试

**中图分类号:** TJ55; TB559

**文献标识码:** A

### 1 引 言

高聚物粘结炸药(PBX)在生产成型、加工、运输及贮存过程中, 存在损伤断裂现象, 其内部可能存在导致材料损伤的内应力(含残余应力)。内应力的来源、分布十分复杂, 到目前为止还不能有效控制, 其对武器库存、整装或整贮的影响很复杂, 往往会带来危害。实践表明残余应力会严重地降低 PBX 的结构强度和疲劳寿命等。因此研究应力测试技术和方法, 开展有关机理研究, 对控制炸药件加工工艺、消除内应力有重要意义。

无损测定(内)应力在材料科学与工程界是极为重视的课题, 近些年来国内外学者致力于研究内应力的测试技术。超声波可以穿透工件的任意深度, 适合于构件内部的应力测试, 这一特点是其它可测量表面应力的方法(如 X 射线衍射法等)无法比拟的。目前有 M. Landa<sup>[1]</sup>、朱伟<sup>[2]</sup>、刘艳华<sup>[3]</sup>等利用超声检测技术测定了金属内应力或残余应力, 贺玲凤<sup>[4]</sup>利用激光超声技术测量了大型构件的残余应力。对于含能材料方面的应力研究, 有甄华生<sup>[5]</sup>等对固体火箭发动机药柱裂纹的产生机理及改善裂纹的方法进行了探讨, 分析了药柱应力的来源, 但至今还无有效的应力无损测试方法。为探索 PBX 内部应力的无损测试, 本工作主要利用超声方法测试 PBX-9003 炸药试件应力状态, 为 PBX 部件内应力的测试提供研究基础。

### 2 超声测试基本原理

超声检测材料的应力是建立在声弹性理论基础之上

的, 它通过超声波在材料内部的传播特性, 利用应力引起的声双折射效应对应力进行测量。设超声纵波在零应力介质中的传播速度为  $V_{L0}$ , 在  $X-Z$  平面应力(主应力为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ )时的传播速度为  $V_L$ , 声速与应力之间的关系<sup>[6]</sup>:

$$\frac{V_L - V_{L0}}{V_{L0}} = S(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

即纵波声速的相对变化与主应力之和成正比, 其比例系数  $S$  称为纵波速应力常数(声弹性常数), 且:

$$S = \frac{\mu l - \lambda(m + \lambda + 2\mu)}{\mu(3\lambda + 2\mu)(\lambda + 2\mu)} \quad (2)$$

式中,  $\mu$ 、 $\lambda$  为介质拉梅常数,  $l$ 、 $m$  为介质的三弹性常数(即在应力和应变不是无限小时, 按级数展开时所对应的高阶弹性常数), 这些常数由实验测定。因而确定出纵波弹性常数  $S$ , 只要测出  $V_{L0}$ 、 $V_L$  即可求得  $X-Z$  平面上两主应力之和。

### 3 声弹性参数的试验测定

图 1 所示为测定声弹性常数的示意图, 所用试件是将 PBX-9003 炸药柱切割成  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$  的长方体炸药。表 1 为炸药试件超声传播时间及声弹性参数的测定结果。根据式(1), 沿  $Z$  轴单向加应力  $\sigma_2$ , 则有  $(V_{L1} - V_{L10})/V_{L10} = S_{L2}\sigma_2$ 。同理, 可得  $(V_{L2} - V_{L20})/V_{L20} = S_{L1}\sigma_1$ 。因此, 只需通过试验测定出超声在加载前后炸药试件中的  $V_{L1}$ 、 $V_{L10}$ 、 $V_{L2}$ 、 $V_{L20}$ , 即可获得两个方向声弹性常数  $S_{L1}$ 、 $S_{L2}$ 。

利用普通的超声探伤仪, 用 40 MHz 及以上采样卡采集波形, 通过测定炸药试件背面反射回波的传播时间便能比较精确得到超声波声速, 因此通过试验测出施加应力时超声波在试件中传播的时间变化量, 就可以计算出声弹性参数  $S_{L1}$  和  $S_{L2}$ 。

收稿日期: 2005-04-12; 修回日期: 2005-09-13

作者简介: 中国工程物理研究院联合基金资助(10476016)

作者简介: 张伟斌(1972-), 男, 助理研究员, 硕士研究生, 从事含能材料无损检测技术研究及应用工作。

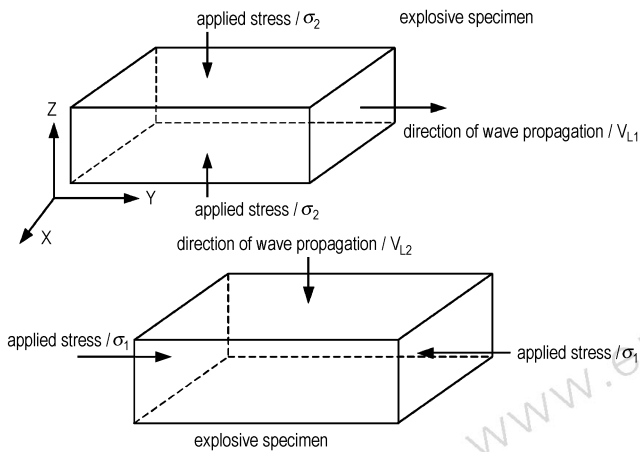


图 1 炸药试样声弹性参数测定示意图

Fig. 1 Sketch map of velocity of plane waves and stress field in explosive specimen

表 1 声弹性参数的试验测定结果

Table 1 Results of sonic elastic modulus tested by ultrasonic method

No.	load $\sigma_1/\text{MPa}$	before load $V_{L20}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	after load $V_{L2}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	sonic elastic modulus $S_{L1}/\text{MPa}^{-1}$
1	25	2851	2856	7.015E-05
2	25	2847	2852	7.025E-05
3	25	2885	2890	6.932E-05
4	25	2872	2877	6.753E-05
5	25	2857	2862	7.000E-05
6	25	2850	2855	7.018E-05
No.	load $\sigma_2/\text{MPa}$	before load $V_{L10}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	after load $V_{L1}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	sonic elastic modulus $S_{L2}/\text{MPa}^{-1}$
7	25	3029	3034	6.603E-05
8	25	3042	3047	6.575E-05
9	25	3033	3038	6.594E-05

实验测得的声弹性参数  $S_{L1}$  和  $S_{L2}$  平均值分别为  $6.992\text{E-}05 \text{ MPa}^{-1}$  和  $6.590\text{E-}05 \text{ MPa}^{-1}$ 。

#### 4 应力测试及结果分析

利用试验测得声弹性参数  $S_{L1}$  和  $S_{L2}$  进行炸药试件的应力测试,当施加不同应力于炸药试件时,测得试件所受的应力结果见表 2,所用试件为上述 PBX-9003 药柱切割成  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  的试件。

在实验过程中发现小应力引起的声速变化非常微小,这给声速的精确测量带来困难,只有当试样受到较大的应力时声速才有明显的变化,因此该方法适用于宏观大应力的超声测试。

从表 2 的结果可以看出,用超声波法测得的应力结果与试验机载荷所施加应力二者很接近,验证了超声波法能无损测定实际炸药构件的载荷作用应力,测量的应力为沿超声波传播路径的平均值。

表 2 试件所受应力的超声测试结果及与所加应力的比较

Table 2 Comparison of the stress results by ultrasonic testing with mechanical load

No.	stress $\sigma_1/\text{MPa}$ (mechanical load)	stress $\sigma_1/\text{MPa}$ (ultrasonic testing)	stress deviation /MPa
1	36	37.1	1.1
4	25	26.0	1.0
5	25	26.2	1.2
6	25	26.2	1.2
7	22	20.7	-1.3
No.	stress $\sigma_2/\text{MPa}$ (mechanical load)	stress $\sigma_2/\text{MPa}$ (ultrasonic testing)	stress deviation /MPa
8	25	23.4	-1.6

#### 5 结论

炸药在受到较大应力作用时超声波在炸药件内部的传播速度有明显变化,采用超声测得的应力接近实验所施的载荷(应力),验证了在大应力作用下超声波法无损测定炸药实际构件载荷应力的可行性。小应力情况有待进一步研究。

致谢:本文的加载试验得到了中物院化工材料研究所二部八组的大力支持,在此表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] Landa M, Pleck J. Ultrasonic techniques for non-destructive evaluation of internal stresses[A]. 15th WCNDT[C], Roma,2000.
- [2] 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, 6: 25-26. ZHU Wei, PENG Da-shu, YANG Li-bin, et al. The principle of determining residual stresses by ultrasonic wave and its use[J]. *Measure and Testing Technique*, 2001(6): 25-26.
- [3] 刘艳华,杨思乾. 超声波测定摩擦焊接头残余应力[J]. 焊接学报,2000,21(3): 55-58. LIU Yan-hua, YANG Si-qian. Ultrasonic testing residual stress in friction welded-joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2000,21(3): 55-58.
- [4] 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.
- [5] 甄华生,孙玉蓉,苑玲. 固体火箭发动机药柱内应力的产生与预防[J]. 上海航天,2002(5): 36-38. ZHEN Hua-sheng, SUN Yu-rong, YUAN Ling. The analysis and prevention of internal stress in the solid rocket motor grain flaw[J]. *Aerospace Shanghai*, 2002(5): 36-38.
- [6] 郑超祖. 超声波试验应力分析方法[J]. 无损检测,1979,1(1): 18-22. ZHENG Chao-zu. Ultrasonic Experiment Stress Analysis Method [J]. *Nondestructive Testing*, 1979,1(1): 18-22.

## Ultrasonic Testing Stress of Polymer Bonded Explosive Specimens

ZHANG Wei-bin<sup>1,2</sup>, ZHAO Bei-jun<sup>1</sup>, TIAN Yong<sup>2</sup>,  
HUANG Hui<sup>2</sup>, ZHU Shi-fu<sup>1</sup>, YANG Zhan-feng

(1. Institute of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Experiments of ultrasonic testing stress of PBX-9003 explosive were carried out under a big load. The sonic elastic modulus of PBX-9003 explosive was obtained. The results show that the ultrasonic velocity propagating through explosive has a distinctive change when it receives a big load. The stress tested by ultrasonic method is close to the stress loaded by mechanical method. The feasibility of ultrasonic nondestructive testing the large stress of PBX-9003 explosive is verified.

**Key words:** ultrasonics science; PBX-9003 explosive; stress; sonic elastic modulus; ultrasonic testing



### 会议信息 (二)

- 第 9 届全国分析化学年会暨第 9 届原子光谱学术会议**      会议主题: 分析化学学科的新成就、新进展和新挑战  
定于 2006 年 10 月 8 - 11 日在南昌市召开, 人数 700 人, 邀请外宾港澳台人数 40 人。  
会议负责人: 倪永年      电话: 0791 - 8326232      电子信箱: mstang@ zzu. edu. cn  
会议联系人: 万益群      电话: 0791 - 8304654      电子信箱: rpliang@ ncu. edu. cn; pingqiu@ ncu. edu. cn  
地址: 南昌市南昌大学化学系, 450052      传真: 0791 - 8321370
- 2006 年全国高分子材料科学与工程研讨会**  
会议主题: 高分子新材料的新展开  
定于 2006 年 10 月在四川省绵阳市召开, 人数 300 人。  
承办单位: 中国工程物理院化工材料研究所; 清华大学化工系; 四川大学高分子研究所  
会议负责人/联系人: 谢续明      电话: 010 - 62773607      传真: 010 - 62784550      电子信箱: xxm - dce@ tsinghua. edu. cn  
地址: 北京清华园清华大学化工系, 100084
- 中国化学会第 13 届化学热力学与热分析学术会议**      会议主题: 化学热力学与热分析学术研讨  
定于 2006 年 8 月 14 ~ 18 日在河南新乡召开, 人数 200 人。  
承办单位: 河南师范大学  
会议负责人: 尉志武 (清华大学)      电话: 010 - 62792492      传真: 010 - 62771149      电子信箱: yuzhw@ tsinghua. edu. cn  
会议联系人: 卓克垒      电话: 0373 - 3326336      传真: 0373 - 3326336      电子信箱: kzhuo@ henannu. edu. cn  
地址: 河南新乡河南师范大学化学与环境科学学院, 453007
- 第九届全国特种应用化学学术研讨会**  
定于 2006 年 12 月在海南召开, 人数 150 人。  
承办单位: 中国热带农业科学院分析测试中心; 防化研究院第四研究所  
会议负责人: 谢德芳      电话: 0898 - 66895005      传真: 0898 - 66895008      电子信箱: xdfang1@ 163. com  
地址: 海口市成西路华南中国热带农业大学, 571101  
会议联系人: 杜兰波      电话: 010 - 66758341      传真: 010 - 68904756      电子信箱: lb\_du@ bnchina. com  
地址: 北京市 1044 信箱 400 号防化研究院第四研究所, 100037
- 第十四届全国分子光谱学术会议**  
定于 2006 年 7 月 8 ~ 11 日在长春市召开, 人数 150 ~ 200 人。  
承办单位: 中国化学会物理化学委员会; 中国光学会光谱委员会; 吉林大学超分子结构与材料教育部重点实验室  
会议负责人/联系人: 赵冰      电话: 0431 - 5168473      传真: 0431 - 5193421      电子信箱: zhaobing@ jlu. edu. cn  
地址: 吉林省长春市前进大街 2699 号吉林大学超分子结构与材料教育部重点实验室, 130023