

# PBX 材料亚临界开裂实验研究

李德聪<sup>1</sup>, 邢冬梅<sup>1</sup>, 丁雁生<sup>1</sup>, 董星<sup>2</sup>, 陈鹏万<sup>2</sup>, 张伟斌<sup>3</sup>, 郝莹<sup>3</sup>, 程思亮<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学所, 北京 100080; 2. 北京理工大学, 北京 100081;

3. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**通过比较 PBX 材料和岩石类材料的力学性质, 借助岩石断裂力学的研究方法, 设计了 PBX 材料在三点弯曲载荷下的白光散斑实验, 观察了 PBX 材料中裂纹扩张的规律。通过计算应力强度因子和分析裂纹尖端扩张速度, 证实 PBX 材料中也存在亚临界开裂, 为 PBX 材料结构件的储存开裂研究提供了新的思路和方法。

**关键词:**PBX 材料; 亚临界开裂; 应力强度因子; 储存开裂

## 1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)是一种颗粒高度填充的聚合物复合材料, 一般以高能单质炸药为主体炸药, 以一种或几种高聚物做粘结剂, 并加入有关添加剂(如增塑剂、钝感剂、抗老化剂等), 经不同的工艺制备而成。高聚物粘结炸药具有很高的能量密度和良好的物理力学性能, 易于加工成型, 故其应用较为广泛。然而由于 PBX 中的炸药颗粒含量很高, 两种材料模量相差很大、热膨胀系数不同等原因, 使炸药在成型的过程中形成许多的初始损伤。对压制成型的药柱, 虽然在外表面无肉眼可见的裂纹, 但经探伤查明内部常有疏松、微裂纹和其它缺陷。这些损伤使药柱力学性能劣化, 使得有些炸药药柱在后续的加工或储存过程中产生裂纹甚至开裂, 严重影响了使用。

本文通过比较 PBX 材料与岩石材料的性质, 借助岩石断裂力学的研究方法, 设计了 PBX 材料在三点弯曲载荷下的白光散斑实验并观察了 PBX 材料中裂纹扩张的规律, 证实了 PBX 材料中也存在亚临界开裂, 为 PBX 材料结构件的储存开裂的进一步研究提供了新的思路和方法。

## 2 PBX 材料与岩石类材料性质的比较

从材料的结构方面看, PBX 是一种异相非均质材料, 其主体成分是几十到上百微米的炸药晶粒, 在晶粒间隙间填充着粘结剂等添加剂。因添加剂含量少, 不能完全包覆炸药晶粒和填充晶粒间隙, 使 PBX 材料出现裂隙和空隙; 压制成型时炸药晶粒发生破碎, 更增加了裂隙数量和空隙容积, 这些空隙和裂隙正是 PBX 材料的初始缺陷。岩石中的沉积岩是水底沉积物在一定地质环境经历一定地质年代挤压形成的, 其成分也是颗粒(细碎岩屑)和粘结物, 也存在空隙和裂隙等细观缺陷; 岩石中的火成岩, 虽然不是由颗粒和粘结物组成, 但在长期的地质构造运动中也支离破碎, 产生了大量空隙和裂隙。虽然两者的颗粒相和粘结相材料不同、成型机制不同, 因此材料的特征参数的数值差异很大, 但定性特征却有许多相同之处。

通过材料的拉伸实验和巴西实验, 我们发现, PBX 材料同岩石类材料相类似, 也是抗压性能明显优于其抗拉性能; 同时还发现当应力应变偏离弹性时, 发生应变软化现象。另外, 从低速气炮撞击实验中, 我们还发现 PBX 材料也存在剪胀现象, 而剪胀是岩石类材料的一个基本性质。

岩石类材料另外一个基本性质是存在亚临界开裂现象。也就是说, 在低于断裂韧性  $K_{Ic}$  的应力强度因子  $K_I$  长时间作用下岩石也会开裂, 且开裂速度随应力强度因子升高而增加。  $K_I$  可以低到  $K_{Ic}$  的十分之一、二, 高到十分之八、九; 开裂速度由  $10^{-9}$  m/s 升到  $10^{-3}$  m/s。这就是所谓“亚临界开裂”, 其实质是微裂纹行为的一种宏观表现。既然 PBX 材料和岩石类材料有这么多的相似的性质, 那么我们自然会想到这样一个问题——“PBX 材料中

• 基金项目: 中国工程物理研究院和国家自然科学基金委提供了部分经费支持(联合基金 10076021)

作者简介: 李德聪(1979-), 男, 博士研究生, 爆炸力学。

是否也存在亚临界开裂?”。

PBX 材料的声发射实验证实损伤在较低应力水平已开始演化;同时蠕变实验表明,在较低应力长时间作用下 PBX 会开裂。这些现象都提示 PBX 材料中也应当存在亚临界开裂。

本文应用实验研究的方法,证实了在 PBX 材料中存在亚临界开裂。

### 3 实验装置及实验方法

#### 3.1 实验方法选择

在研究岩石类材料亚临界开裂现象的时候,人们设计了双扭实验。最初的想法是直接利用双扭实验,并通过激光散斑的方法来记录 PBX 材料开裂的过程,但由于试样表面质点的位移是沿其法向的,所以用干涉的方法很难记录质点的真实位移,故选用了三点弯曲加载的白光散斑实验来验证 PBX 材料的亚临界开裂。

#### 3.2 实验原理及方法

散斑法是通过光的干涉进行测量的一种方法。当漫反射表面被光照明时,在空间出现随机分布的亮斑和暗斑,称为散斑。试样在三点弯曲载荷的作用下发生变形,此时物体表面的散斑图也随之变化,对比变形前后的散斑图的变化,采用适当的算法就可以高度精确地计算出物体表面各点的位移及应变。三点弯曲载荷白光散斑实验示意图如图 1 所示。

当试样表面有裂纹出现时,与之相对应的散斑图上便产生了不相干的区域,比较不相干区域的变化,就可以

确定裂纹尖端的扩张速度。另外,由于试样及其初始裂纹的形状,尺寸和加载方式都是确定的,故其应力场强度因子的表达式也是确定的。这样,很容易通过实验或数值模拟的方法求出该应力强度因子。

通过判断裂纹扩张的速度和应力强度因子,就可以验证是否在 PBX 材料中存在亚临界开裂。

#### 3.3 实验所用试样

图 2 所示为实验中所用的 PBX 材料试样。试样长 32mm,宽和高均为 10mm,预制的 V 形裂纹面间的宽度为 1mm,裂尖的长度为 4mm。实验中将该试样水平放置在 Instran 材料试验机上,两边支撑的宽度均为 1mm。压头作用在试样上表面正对着裂尖的线上。

实验中采用了恒定位移加载的方式,即压头向下运动的速度是恒定的,其值为  $1.0\mu\text{m/s}$ 。

### 4 实验结果及分析

#### 4.1 实验现象描述及裂纹扩张速度的计算

实验中通过压头作用于 PBX 材料的加载曲线可由力传感器测得,如图 3 所示。通过计算机记录 PBX 材料的散斑图像,我们便可以计算不同时刻材料表面的变形场。典型的 PBX 材料散斑图像及所取的计算区域如图 4 所示。

分析中所取的计算区域大小为  $400 \times 300$  像素(分辨率为  $15.7/\text{像素}$ ),即计算区域实际大小为  $6.28\text{mm} \times 4.71\text{mm}$ 。计算区域距裂纹尖端的距离为 600。计算中变形前的图像采用的是 10s 时的散斑图像;而变形后的图像分别采用的是 120,150,160,170,180 以及 190s 时的散斑图像。计算结果如下图 5 所示,y 方向取为平行于裂尖的方向,图中发白的部分为不相关区域,即裂缝。

从载荷曲线上看,65s 的时候载荷达到最大值 52.1N,然后就开始下降,说明裂缝尖端已经出现开裂。从计算结果可以看出:到 150s 的时候计算区域中已经出现不相关的区域,即裂缝。由于计算区域离的底部到裂缝尖端

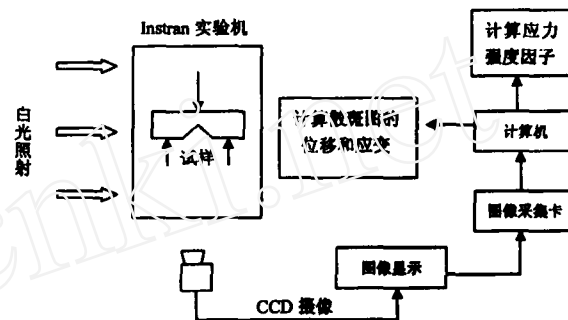


图 1 三点弯曲载荷白光散斑实验示意图

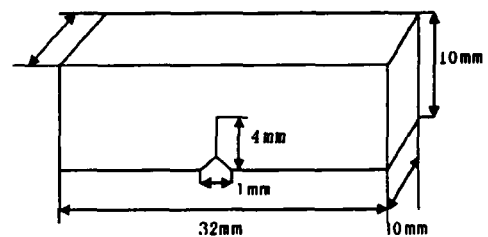


图 2 PBX 材料试样

的距离为  $600\mu\text{m}$ , 估计在这段时间内裂缝的平均扩张速度约为  $7.06\mu\text{s}$ 。

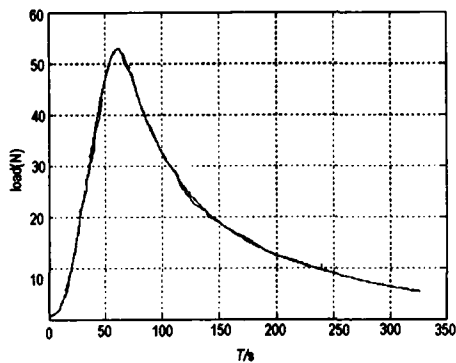


图3 实验加载曲线

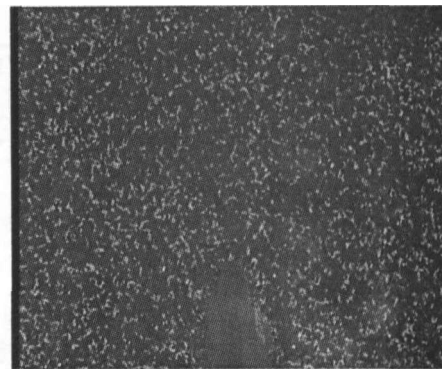
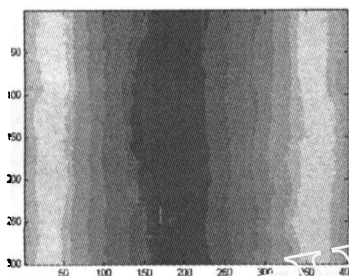


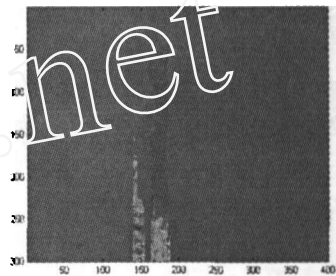
图4 PBX 材料的散斑图像(框内为计算区域)



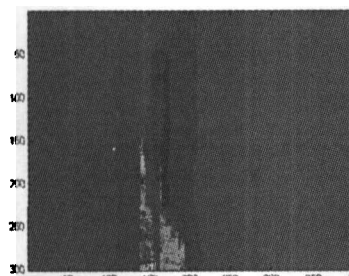
120s 时 Y 方向位移场分布图



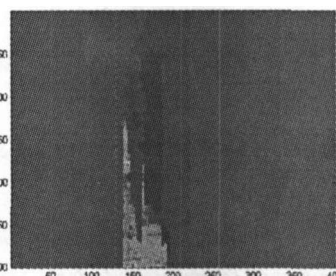
150s 时 Y 方向位移场分布图



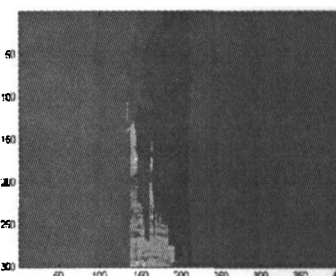
160s 时 Y 方向位移场分布图



170s 时 Y 方向位移场分布图



180s 时 Y 方向位移场分布图



190s 时 Y 方向位移场分布图

图5 不同时刻计算区域内 Y 方向位移场分布图

从图5中,我们可以得到不同时刻裂缝的长度,从而计算出不同时间段内裂缝扩张的平均速度,结果如表1所示。

从表1中可看出,裂缝扩张的速度的量级为  $10^{-5}\text{m/s}$ ,远小于在该材料中的声速,符合亚临界开裂的条件。

#### 4.2 应力强度因子的计算

通过三点弯曲产生的裂缝属于张开型裂,即型裂纹。由于在实验中没有能够测量裂纹尖

端附近点的张开位移,只能通过数值模拟的方法来求其应力强度因子。计算中将 PBX 材料假设为弹性材料,其杨氏模量为  $E = 7 \times 10^9 \text{Pa}$ ,泊松比  $\nu = 0.3$ 。根据不同时刻裂缝的长度建立计算模型,然后通过 ANSYS 软件来计算不同时刻裂尖处的应力强度因子  $K_I$ ,结果如表2所示。另外,材料的断裂韧性  $K_{Ic}$ 可由开始起裂时裂尖处的应力强度因子近似表示,同样可以利用 ANSYS 软件计算得到,其值为  $5.92 \times 10^6 \text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

表1 不同时刻裂纹长度及裂纹扩张速度

| 时间/s | 长裂纹长度 /mm | 短裂纹长度 /mm | 平均裂纹长度 /mm | 裂纹扩张速度 / (mm/s) |
|------|-----------|-----------|------------|-----------------|
| 120  | 0.00      | 0.00      | 0.00       |                 |
| 150  | 1.10      | 0.78      | 0.94       |                 |
| 160  | 1.88      | 0.78      | 1.33       | 0.039           |
| 170  | 2.36      | 1.10      | 1.73       | 0.040           |
| 180  | 2.70      | 1.88      | 2.39       | 0.056           |
| 190  | 3.06      | 2.20      | 2.63       | 0.034           |

从表2中,可以看出上述五个时刻应力强度因子为 $(1.79 \pm 0.03) \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,误差不大于2%。其值小于材料断裂韧性的1/3,应力强度因子的无量纲值约为0.3,符合亚临界开裂的条件。

由此可断定:PBX材料也存在亚临界开裂。

## 5 结论

本文通过三点弯曲的白光散斑实验,证实了PBX材料中也存在亚临界开裂现象。在本文的三点弯曲实验中,裂纹扩张速度的量级为 $10^{-5} \text{m/s}$ ,而应力强度因子的无量纲值不到1/3。

亚临界开裂是导致PBX材料结构件的储存开裂的内因。充分认识和理解PBX材料的亚临界开裂,可能从根本上找到解决PBX材料储存开裂的正确途径。

致谢:参加本实验的还有杨业敏研究员、张泰华高级工程师、陈力副研究员、许向红、刘东旭、向长美、王彦军等。实验工作得到中国科学院力学研究所的非线性力学开放实验室支持。作者对此深为感谢。

### 参考文献:

- [1] 陈鹏万,丁雁生,陈力. 含能材料装药的损伤及力学性能研究进展[J]. 力学进展,2002,32(2):212-222.
- [2] 陈鹏万,丁雁生. 高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理[J]. 含能材料,2000,8(4):161-164.
- [3] Atkinson B A. 岩石断裂力学[M]. 1987,尹祥础、修济刚等译. 地震出版社,1992.

## Experimental Study on Subcritical Fracture of PBX Material

LI De-cong<sup>1</sup>, XING Dong-mei<sup>1</sup>, DING Yan-sheng<sup>1</sup>, DONG Xing<sup>2</sup>,  
CHEN Peng-wan<sup>2</sup>; ZHANG Wei-bin<sup>3</sup>, HAO Ying<sup>3</sup>, CHENG Si-liang<sup>3</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 629100, China)

**Abstract:** Through comparing mechanical behaviors of PBX material with that of rock material, and by using the method applying to study rock fracture mechanics, the experiment of white light speckle of PBX material under three-point bending loads is designed. The process of cracks opening is also observed. Through calculating the stress intensity factors and analyzing the velocity of cracks opening, it is proved that subcritical fracture exists in PBX material, which will put a light on studying the storing fracture phenomena of PBX material.

**Key words:** PBX material; subcritical fracture; stress intensity factors; storing fracture