

文章编号: 1006-9941(2003)00-0013-05

## 炸药冲击损伤的实验研究

陈鹏万<sup>1</sup>, 丁雁生<sup>2</sup>, 何松伟<sup>3</sup>, 黄风雷<sup>1</sup>, 陈力<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学爆炸灾害预防与控制国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

3. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用低速气炮对 B 炸药和 PBXN-5 高聚物粘结炸药进行冲击损伤加载。通过控制弹速对试样进行不同程度的损伤, 同时记录冲击加载过程中应力变化过程。对冲击损伤形貌进行显微观察, 同时对冲击损伤前后试样密度和声衰减进行测量。结果表明, B 炸药和 PBXN-5 炸药均表现出脆性材料的损伤特征, 但其材料组成上的不同也导致了二者损伤特征有所差异。

**关键词:** 炸药; 损伤; 低速冲击; 微观结构

**中图分类号:** O344.6; TQ560.71

**文献标识码:** A

### 1 引言

含能材料对载荷的响应不但包括力学响应, 还包括化学响应, 涉及力-热-化学反应的耦合, 具有不同于惰性材料的特征。损伤不但影响炸药的宏观力学性能, 同时还影响炸药的感度、燃烧甚至爆轰性能。大量研究表明, 起爆是由于炸药中孔洞和裂纹等各种形式的缺陷在外界刺激下首先形成“热点”, 然后进一步激发化学反应形成的。研究炸药装药在不同外界刺激下损伤产生机制及演化规律对于炸药装药的安全性评估具有重要的作用。

炸药的服役环境非常复杂, 在运输、储存、发射、穿靶等过程中会受到各种载荷的作用。用落锤试验可以模拟低速冲击时中等应变率下损伤的产生<sup>[1-2]</sup>。高应变率下损伤的产生则可以采用弹丸或高速飞片进行模拟<sup>[3-5]</sup>。由于炸药材料的强度通常较低, 同时还具有燃烧爆炸的危险, 因而给炸药材料损伤研究带来了困难, 其研究手段和分析方法与惰性材料也不同。本实验采用长脉冲低速气炮进行冲击加载, 研究了熔铸 B 炸药和热压成型 PBXN-5 高聚物粘结炸药 (PBX) 的冲击损伤, 通过显微观察及声衰减测量等对损伤状态进行了表征。

### 2 实验装置及分析方法

实验材料为 PBXN-5 高聚物粘结炸药和 Comp. B 炸药。PBXN-5 用热压成型, 而 Comp. B 炸药用熔铸成型。材料组成分别为: PBXN-5, HMX 94.5% ~ 95% 氟橡胶 F2641 5.0% ~ 5.5%; Comp. B, TNT40% RDX60%。PBXN-5 热压成型时压制压力为 200 MPa, 压制温度为 100 °C。压制时先往复升、卸压 3 次, 然后保温保压 1.5 h, 降温降压后退模, 降温采用自然冷却。

为了模拟冲击损伤的产生, 采用自行设计改造的低速气炮进行冲击加载<sup>[6]</sup>。该气炮为模拟炮弹发射对炸药惯性冲击而研制。炮管直径 56 mm, 配有一个缓冲器, 在缓冲器中充不同压力的气体来控制试样上冲击载荷的作用时间。通常金属件撞击作用时间为 100 ~ 200 μs, 而通过缓冲器则可以将作用时间增加到几个毫秒, 这样就为冲击载荷的控制提供了方便。在炮口前有测速管, 用断通探针和自动跟踪同步机测量弹丸速度。通过控制高压室的气体发射压力控制炮弹的发射速度。

实验装置如图 1 所示。在炸药柱外部用钢套筒进行约束, 在传力柱、击杆与炸药柱之间分别放置一缓冲聚乙烯垫。炮弹包括钢弹和铝弹, 炮弹的尺寸为  $\Phi 56 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ , 钢弹重 2 kg, 铝弹重 720 g。压力通过击杆上的压力传感器测量。发射出的炮弹首先作用于缓冲器, 经传力柱和缓冲垫作用于炸药柱。PBXN-5 试样尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , Comp. B 试样尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

收稿日期: 2002-10-08; 修回日期: 2002-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(10002022)及国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(10076021)

作者简介: 陈鹏万(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事含能材料损伤力学、爆炸理论及应用研究工作。

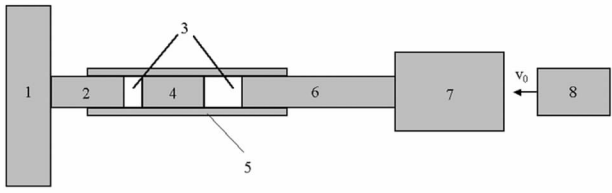


图1 低速冲击加载示意图

1—砧体, 2—击杆, 3—聚乙烯垫, 4—样品,  
5—钢套, 6—传力柱, 7—缓冲器, 8—弹丸

Fig.1 Schematic of low-velocity impact loading

1—anvil, 2—steel rod, 3—polyethylene cushion,  
4—sample, 5—steel tube, 6—dowel steel,  
7—buffer, 8—projectile

采用不同方法对冲击损伤进行评价。用排水法测量冲击损伤前后的试样密度,以分析不同损伤条件下密度变化。通过超声波测量冲击损伤前后声衰减的变化,超声波测量采用脉冲插入取代法<sup>[7]</sup>。采用偏振光显微镜和扫描电镜(SEM)对冲击损伤前后炸药细观结构的变化进行观察。炸药材料通常很软,而且本身还有爆炸的危险,这样就给显微试样的制备带来了困难。制样时首先用800#水砂纸初磨,然后用抛光机抛光,根据材料组成选择合适的腐蚀剂进行腐蚀,对于扫描电镜试样还需喷涂导电层。抛光在具有防爆措施的隔爆间内进行,通过CCD人员在安全距离之外对抛光过程进行监控。为防止抛光过程中摩擦生热引起意外事故,必须保证不间断的水流对试样进行冷却。针对试样较软的问题,抛光布选用软质丝绸布,抛光材料选用 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。为了避免在抛光过程中引入新的损伤,冲击损伤试样先用环氧树脂进行包镶,然后再进行初磨和抛光。在试样的纵向剖面上选择不同的区域进行观察(如图2),区域A靠近冲击面,区域B在试样中部,区域C靠近冲击背面。

### 3 实验结果及分析

图3为钢弹以弹速 $109\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 冲击PBXN-5试样时在击杆上测量得到的压力波形,冲击载荷作用的时间约 $3\text{ ms}$ ,载荷峰值约 $264\text{ MPa}$ 。图4为冲击损伤前PBXN-5的剖面形貌。图5为受 $109\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 钢弹冲击后PBXN-5试样靠近冲击面区域的损伤形貌,右边白色区域为包镶所用的环氧树脂材料,弹丸由右向左进行冲击(图6至图9中冲击加载方向与图5相同)。可以看出,炸药中的裂纹较之冲击前增多了。图6为中

部区域的损伤形貌,颗粒中的裂纹数量比冲击面附近更多,同时还有一条贯穿多个炸药颗粒的裂纹。图7为冲击背面附近的损伤形貌,可以看出此区域损伤更加严重,贯穿炸药颗粒的裂纹也增多。图8为同样冲击条件下Comp. B冲击损伤试样靠近冲击面区域的损伤形貌,图9为靠近冲击背面区域的损伤形貌。可以看出,虽然Comp. B试样中的RDX颗粒也产生了裂纹,但裂纹数量比PBXN-5中HMX要少。总的说来,在PBXN-5和Comp. B的炸药颗粒中产生的微裂纹大致与冲击加载方向垂直。图10为Comp. B冲击断面形貌,可见破坏方式主要为沿晶断裂。在断口上有裸露的RDX颗粒及RDX颗粒拔出后留下的凹坑。

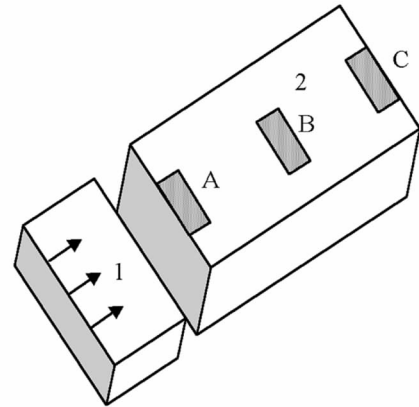


图2 显微观察位置示意图

1—弹丸, 2—炸药

Fig.2 Schematic of view fields

1—projectile, 2—explosive

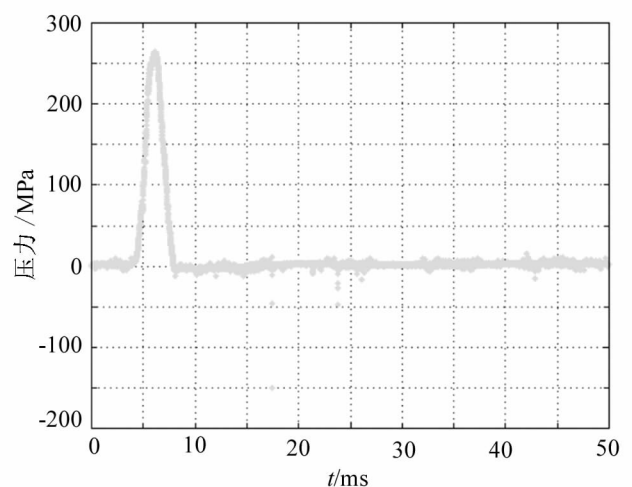


图3 PBXN-5 低速冲击击杆压力波形

Fig.3 Typical stress history of impact loading

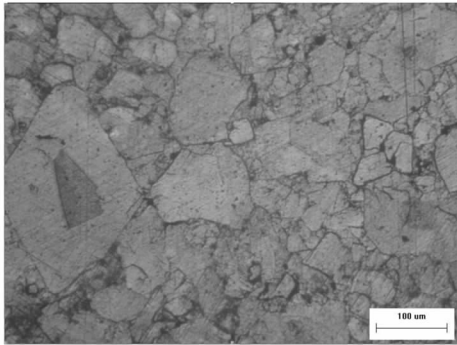


图 4 冲击损伤前 PBXN-5 剖面形貌  
Fig.4 Plan view of undamaged PBXN-5 sample

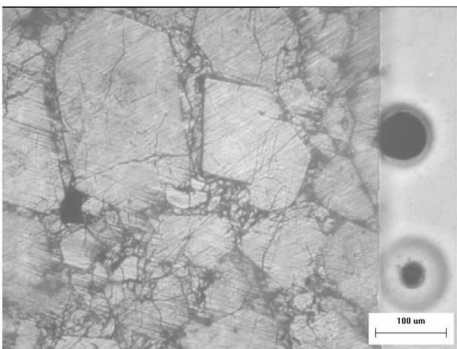


图 5 PBXN-5 低速冲击损伤形貌(冲击面)  
Fig.5 Near-field region, damaged PBXN-5

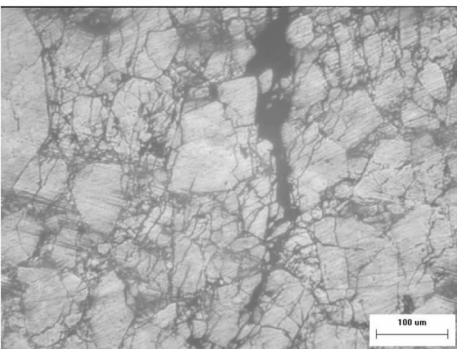


图 6 PBXN-5 低速冲击损伤形貌(中间区域)  
Fig.6 Mid-field region, damaged PBXN-5

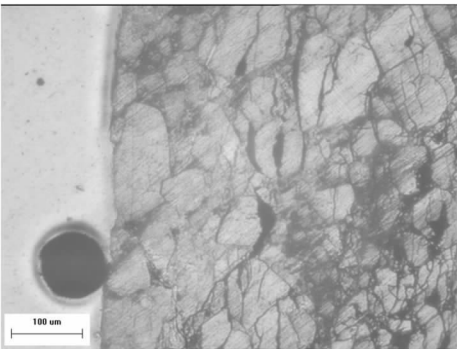


图 7 PBXN-5 低速冲击损伤形貌(冲击背面)  
Fig.7 Far-field region, damaged PBXN-5

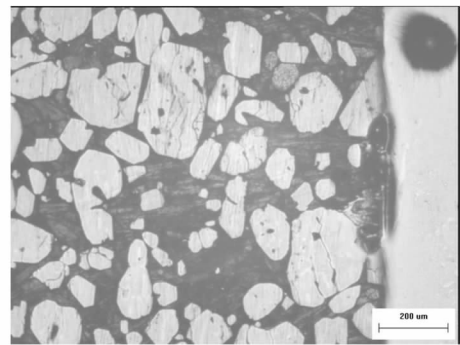


图 8 Comp. B 低速冲击损伤形貌(冲击面)  
Fig.8 Near-field region, damaged Comp. B

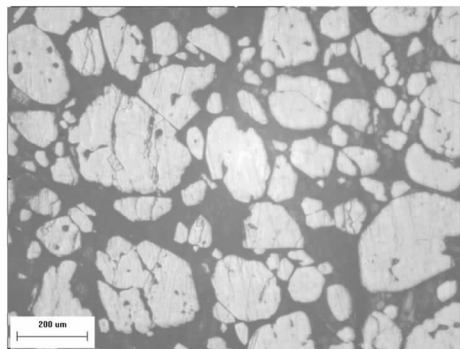


图 9 Comp. B 低速冲击损伤形貌(靠近冲击背面)  
Fig.9 Far-field region, damaged Comp. B

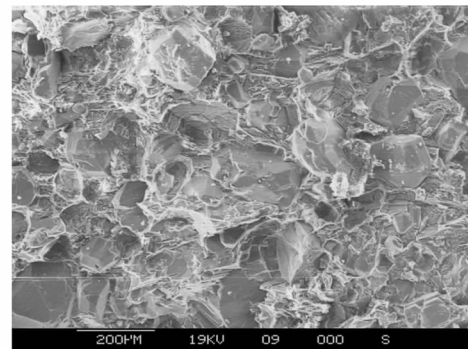


图 10 Comp. B 低速冲击断口形貌  
Fig.10 Typical fractograph of damaged and fractured Comp. B

受  $109 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  钢弹冲击后 PBXN-5 试样并没有发现肉眼可见的宏观裂纹,而此弹速作用于 Comp. B 时在试样中产生了几条垂直于加载方向的贯穿的横向裂纹,在冲击背面还产生了破碎。这说明 PBXN-5 抵抗冲击的能力比 Comp. B 更强,而 Comp. B 的脆性比 PBXN-5 更大。这是由于 Comp. B 中两种炸药 RDX 和 TNT 脆性都比较大,而 PBXN-5 中虽然粘结剂含量很少,但能极大地改善 PBX 材料整体抵抗变形的能力。各向异性材料在动载荷下的损伤破坏,既与动载荷下的应力场有关,又与材料的初始损伤场和各向异性

的性质有关。本实验提供了研究上述现象的一种方法和手段。对上述显微照片进行图像处理 and 统计分析可望得到一些有意义的结果。

表 1 所示为不同冲击条件下材料冲击损伤后的密度变化。冲击后由于产生了微裂纹和孔洞,从而使得试样的密度减小。冲击压力越大,损伤越严重,材料的密度减小越多。当用铝弹以弹速 60.4、125.4、147.8、191.4 和 194.1  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  分别冲击 PBXN-5 时,冲击后材料的密度分别减小了 0.214%、0.273%、0.525%、1.082% 和 1.114%。当用钢弹以 109  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  冲击时,

PBXN-5 密度减小了 1.82%, 而 Comp. B 减小了 0.42%。表 2 所示为不同弹速冲击损伤后试样声衰减系数。同样可以看出,弹速越高,冲击压力越大,试样中损伤越严重,声衰减系数越大。冲击损伤前 PBXN-5 声衰减系数为  $2.60 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,而在弹速 60.4、125.4、147.8、191.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  分别冲击后声衰减系数分别增加到 2.85、3.55、4.67 和 4.72  $\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,分别增大了 9.6%、36.5%、79.6% 和 81.5%。可以看出,冲击损伤后试样声衰减系数的变化比密度的变化更大。这也说明炸药声衰减对损伤更敏感。

表 1 冲击损伤前后密度变化

Table 1 Densities of undamaged and damaged explosives

材 料	弹速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )/峰值压力 (MPa)					
	60.4/56.3	125.4/113.3	147.8/-	191.4/212.5	194.1/-	109 <sup>1)</sup>
PBXN-5	-0.214%	-0.273%	-0.525%	-1.082%	-1.114%	-1.82% (264 MPa)
Comp. B	-	-	-	-	-	-0.42% (283 MPa)

注: 1) 钢弹,其余为铝弹。

表 2 PBXN-5 冲击损伤前后声衰减变化

Table 2 Attenuation coefficients of undamaged and damaged PBXN-5 explosives  $\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1}$

冲击前	弹速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )/峰值压力 (MPa)			
	60.4/56.3	125.4/113.3	147.8/-	191.4/212.5
2.60	2.85	3.55	4.67	4.72

#### 4 结束语

本实验所采用的长脉冲低速气炮及试样回收和测试系统具有良好的精确度,实验重复性较好,是研究炸药材料冲击损伤及动力学性能有效的加载手段。在低速冲击下,PBXN-5 和 Comp. B 均表现出脆性材料的损伤特征,冲击后试样中产生大量的微裂纹。这些微裂纹的存在使试样密度降低,同时声衰减增加。弹速越大,冲击压力越高,材料的损伤越严重,试样密度降低越大,声衰减增加也越大。相比之下,Comp. B 表现出比 PBXN-5 更大的脆性,在所用弹速作用下 PBXN-5 通常没有宏观裂纹形成,而 Comp. B 则会产生宏观裂纹,甚至会产生破碎。这说明虽然 PBXN-5 中粘结剂的含量很少,但却极大地改善了材料整体抗冲击性能。这也给了我们一点有益的启示:在不显著降低炸药能量的情况下,适当增加粘结剂的含量可望使材料的力学性能如抗冲击性能显著增加,还可望适

当降低炸药的感度。

在本实验所用的弹速下,脉冲压力较低,在实验中还没有观察到明显的化学反应痕迹。今后可以尝试用更高的弹速进行冲击,也可以尝试在不提高弹速的情况下在冲击面处预留空气间隙,观察冲击作用下激发局部化学反应时炸药的细观结构。这将有助于加深我们对冲击作用下热点形成机理的认识。

致谢: 本实验所用的 PBXN-5 炸药由华北工学院张景林教授提供,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Demol G, Lambert P, Trumel H. A study of the micro-structure of pressed TATB and its evolution after several kinds of solicitations[A]. Eleventh International Detonation Symposium[C], Snowmass, 1998. 85-88.
- [2] 张泰华. 推进剂的损伤状态对其对燃烧稳定的影响[D]. 中国科学院, 1999.
- [3] Green L, James E, Lee E. Energetic response of propellants to high velocity impact[A]. Proceedings of Eighth Symposium (international) on detonation[C]. Albuquerque, New Mexico, 1985. 284-293.
- [4] Sandusky H W, Bernerker R R. Influence of fresh damage on the shock reactivity and sensitivity of several energetic materials[A]. Proceedings of Tenth Symposium (International) on Detonation[C], Portland, Oregon, 1993. 490-498.

- [5] 黄风雷. 固体推进剂冲击特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1992.
- [6] 陈鹏万. 高聚物粘结炸药的细观结构及力学性能[D]. 中国科学院力学研究所, 2001.
- [7] 冯若, 陈兆平, 朱正亚. 用脉冲插入取代法研究物质的超声性质[J]. 声学进展, 1983, 2(4): 28-31.

## Experimental Study on the Impact Damage of Selected Explosives

CHEN Peng-wan<sup>1</sup>, DING Yan-sheng<sup>2</sup>, HE Song-wei<sup>3</sup>, HUANG Feng-lei<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>2</sup>

- (1. *National Key Laboratory of the Prevention and Control of Explosion Disaster, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
2. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*
3. *Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)*

**Abstract:** The study of damage mechanisms and its evolution of explosives is of great importance for the safety evaluation of explosive materials. A long-pulse low-velocity gas gun with a gas buffer was used to impact explosive samples. The explosives used include cast Comp. B and hot pressed PBXN-5. Different projectile velocities were used to achieve different damage degree in samples and the stress history of samples in the process of dynamic loading was recorded. The microstructure of samples before and after impact were studied by use of Scanning Microscopy (SEM) and Polarized Light Microscopy (PLM). In addition, the density and ultrasonic wave attenuation of samples before and after impact loading were examined. The results show that both Comp. B and PBXN-5 exhibit similar damage characteristics of brittle materials. However, due to the difference in compositions, Comp. B and PBXN-5 also exhibit different damage characteristics.

**Key words:** explosive; damage; low velocity impact; microstructure