

PBX 炸药细观损伤的实验研究

周 栋, 黄风雷, 姚惠生

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:为研究PBX炸药在冲击作用下的物理损伤、化学损伤及成熟的物理机制,采用炸药爆炸驱动隔板实验技术对PBX炸药进行了冲击压缩实验,回收炸药试样并对其不同位置处的断面形貌进行SEM分析。结果表明,随着冲击能量的增加,其温度效应的影响越来越显著,损伤模式从物理损伤向化学损伤过渡。这为XDT问题中的“热点”形成机制等研究提供了实验基础。

关键词:爆炸力学;PBX;损伤模式;冲击压缩;起爆机制

中图分类号:TJ55;TQ560.71

文献标志码:A

文章编号:1007-7812(2007)03-0016-03

Meso-Damage Experimental Studies on the PBX

ZHOU Dong, HUANG Feng-lei, YAO Hui-sheng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the physical mechanisms of the physical and chemical damages of PBX, and the mechanisms of heat formation, the shock compression experiments on PBX have been done using explosive driving gap experiment. The meso-structure of damaged samples in the different position was observed using SEM. The result shows that the effect of temperature significantly increases with the increase of impact energy, and the damage mode transits from the physical damage to the chemical damage. This provides experimental basis for studying the formation mechanism of hot-spot in XDT.

Key words: explosion mechanics; PBX; damage mode; shock compression; initiation mechanism

炸药的起爆机制等问题提供理论依据。

引 言

随着新型动能武器弹药快速发展,武器弹药在勤务处理及使用过程中的安全性问题成为制约武器性能提高的主要技术难题。实验研究发现,武器弹药的安全性能与其内部的损伤密切相关。由于武器弹药在勤务处理及使用过程中要受到多种类型冲击载荷的作用^[1-2],其冲击能量会在装药内部密度不连续处沉积从而产生损伤,这些损伤不但会使装药的力学性能劣化,感度升高,而且会使其燃烧性能异常,给武器弹药的勤务处理和正常使用带来许多安全隐患,影响武器系统作战效能的正常发挥,有时甚至会带来灾难性后果。因此,研究冲击载荷作用下装药的损伤情况及“热点”形成机制,不仅对解决许多军工难题,如大口径火炮发射安全性、钻地弹侵彻过程中意外起爆等问题具有应用价值,而且为研究

1 损伤实验设置

冲击压缩实验的原理^[3]是采用炸药爆炸方式驱动一定厚度的隔板冲击压缩PBX炸药试件从而产生压缩损伤,图1为冲击压缩实验装置示意图。实验装置主要由起爆雷管、传爆药柱、主发药柱、隔板、PBX炸药试件及约束套筒等组成,其中传爆药为8701炸药;主发药为TNT炸药,尺寸为 $\Phi 25\text{mm} \times 20\text{mm}$,药量16g;隔板由铝和铜隔板组成,其尺寸均为 $\Phi 40\text{mm} \times 15\text{mm}$;PBX炸药试件尺寸为 $\Phi 40\text{mm} \times 5\text{mm}$,药量10g;约束套筒为45#钢,壁厚15mm,高50mm,为避免回收过程中引入新的损伤,约束套筒采用对分开壳设计。

用H型锰铜传感器测试压力脉冲信号,图2为H型锰铜传感器的标定曲线;用MH4D高速同步脉冲

恒流源^[4]为传感器提供电源,用TDS5054B型示波器记录传感器产生的压力脉冲信号,图3为实验得到的典型压力曲线,最大的冲击压力约为1.7 GPa。

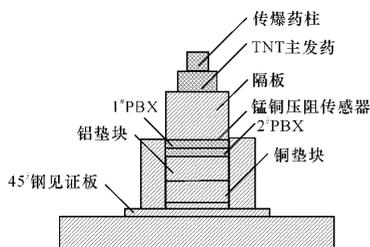


图1 冲击压缩实验装置示意图

Fig.1 Diagram of shock compression experiment device

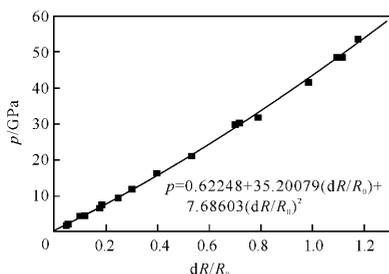


图2 传感器的标定曲线

Fig.2 The calibration curve of the sensor

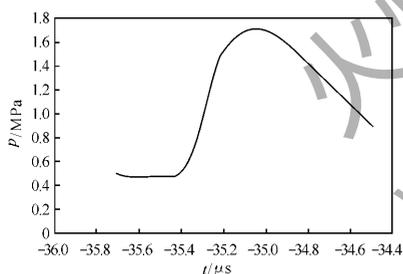


图3 实验测得典型的压力曲线

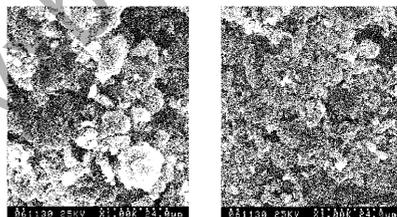
Fig.3 The typical pressure curve obtained from experiment

2 细观损伤模式研究

以HMX为主体的PBX炸药在冲击起爆过程中,当冲击波传入炸药后冲击能量在损伤缺陷处沉积从而形成“热点”^[5],当“热点”温度低于其融化温度时,HMX发生稳定分解,当“热点”温度超过其融化温度(约278℃),HMX融化并发生剧烈的分解反应,释放出高温、高压的气体产物,在气体产物的作用下,HMX的化学分解产物(包括少量挥发分子)

吸附在表面,并与熔融的HMX发生作用,如果生成的热量来不及向环境传导,系统温度会不断升高,热分解反应就会加速,在一定条件下会发展为自加速和自加热,表现出显著的自催化现象^[6]。如果自加热使系统达到发生燃烧或者爆炸反应的温度时,就会发生燃烧和爆炸,这类现象称为热自燃或热爆炸^[7]。本研究通过调整隔板厚度对PBX炸药进行冲击压缩实验,观测其中的冲击损伤及化学反应的情况。

在回收的PBX炸药试样的断面上取A、B、C三个位置进行SEM观测,结果见图4~图6。其中A为靠近试样对称轴线区,C为试样的边沿区,B介于A和C之间。通过SEM照片分析发现,3个区域的细观损伤模式有较大的差别。由图4可知,C区冲击压力最小,其损伤模式主要是冲击作用下炸药晶粒挤压开裂(如图4(a)及炸药晶粒和黏结剂之间变形不协调引起的黏结剂撕裂等(图4(b)),整个断面没有明显的温度效应的影响,且炸药晶粒也几乎没有发生化学反应,由此表明在较低的冲击作用下,沉积在缺陷处的冲击能量较低未能形成高温区域,因而只能转化为微裂纹的表面能等,产生一些物理损伤。



(a) 炸药晶粒碎裂

(b) 黏结剂撕裂

图4 C区的SEM照片

Fig.4 SEM photo of the C area

B区的冲击压力较高,从图5可以看出,整个断面形貌较为光滑,这是由于炸药晶粒发生熔融后重结晶所致,因而断面形貌表现出温度效应的影响,这在图5(b)中尤为明显。从图5(a)中还看出,炸药晶粒局部发生了分解反应,消耗并烧蚀了部分临近的黏结剂。由此表明,在较强的冲击载荷作用下,冲击能量会转化生成热量,从而激励炸药晶粒发生熔融和分解等形式的化学反应,因而其断面形貌较为光滑。

A区的冲击压力最高,从图6可以看出,在损伤试样的断面形貌上存在大量具有空间立体分布特征的网络状结构,这是因为在强冲击作用下,沉积的冲击能量转化生成了大量的热量,在热能的强烈激励下,炸药晶粒发生剧烈的化学反应,产生高温高压的反应产物,并使黏结剂发生烧蚀,剩余未被烧蚀的黏结剂以其故有的网络状结构保存下来,从而形成如

图 6(b)所示的网络状结构。

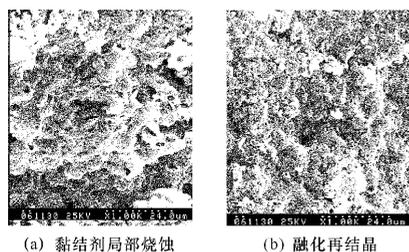


图 5 B 区的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photo of the B area

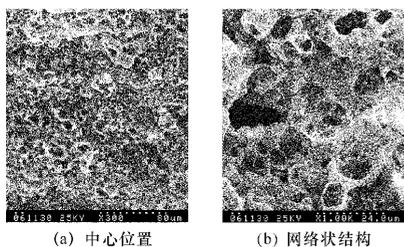


图 6 A 区的 SEM 照片

Fig. 6 SEM photo of the A area

通过对损伤试样的断面细观形貌研究发现,在不同冲击作用下,炸药表现出物理和化学损伤模式,虽然损伤模式不同,但其根源都是冲击波能量沉积在材料中的缺陷处所致,且随着冲击载荷的增强,冲击波能量也不断增强,在材料密度间断处转化生成的热能也越多,在热能的刺激下,含能炸药晶粒逐渐开始发生热分解等形式的化学反应,从而使 PBX 炸药的损伤模式从物理损伤向化学损伤转变,即在冲击作用下化学损伤与其材料的含能特性相关,是在冲击作用下的冲击波能量转化成的热能积聚到一定程度的必然结果。因此,研究 PBX 炸药的物理损伤及其演化扩展机制是研究 PBX 炸药热点形成等问题的前提和基础。本工作为延迟起爆问题中的成熟机制等问题的研究提供了一定的实验基础和依据。

3 结 论

(1) 当冲击压力较小时,回收试样的损伤模式主要是炸药晶粒碎裂及黏结剂撕裂等形式的物理损伤,其断面没有表现出温度效应的影响。

(2) 当冲击压力较高时,炸药晶粒熔融,黏结剂

发生少量烧蚀,因而其断面细观形貌较为光滑,损伤模式主要是炸药晶粒融化后再结晶以及黏结剂少量烧蚀等形式的化学损伤。

(3) 当冲击压力很高时,炸药晶粒发生剧烈的化学反应而消耗,黏结剂发生很大程度的烧蚀,剩余未发生燃烧反应的黏结剂以故有的网络状空间立体结构保存下来。

致谢:感谢北京理工大学陈鹏万及中科院力学所李端义老师在 SEM 分析中给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 陈鹏万,丁雁生.含能材料的细观损伤[J].火炸药学报,2001,24(2):58-61.
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng. Damage in energetic materials[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2001, 24(2): 58-61.
- [2] 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.
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng, CHEN Li. Progress in the study of damage and mechanical properties of energetic materials [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(2): 212-222.
- [3] 张泰华,白以龙,王世英,等.冲击破碎高能推进剂的燃烧异常[J].实验力学,2000,15(3):317-323.
ZHANG Tai-hua, BAI Yi-long, WANG Shi-ying, et al. Shock-induced damage in high-energy propellants and its effect on combustion [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(3): 317-323.
- [4] 黄正平.爆炸与冲击电测技术[M].北京:国防工业出版社,2006.
HUANG Zheng-ping. Explosion and Shock Measuring Technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [5] 章冠人,陈大年.凝聚炸药起爆动力学[M].北京:国防工业出版社,1991.
ZHANG Guan-ren, CHEN Da-nian. Condensed Explosives Initiation Kinetics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [6] 曹欣茂,李福平.奥克托今高能炸药及其应用[M].北京:兵器工业出版社,1993.
CAO Xin-mao, LI Fu-ping. HMX High Explosives and Application [M]. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 1993.
- [7] 楚士晋.炸药热分析[M].北京:科学出版社,1994.
CHU Shi-jin. Thermal Analysis of Explosives [M]. Beijing: Science Press, 1994.