文章编号：1000-5773(2005)03-0213-06

压缩加载下三种含能材料细观破坏特征观察*

吴会民[1,2]，卢芳云[1,2]，卢 力[1]，王志兵[1]

(1. 国防科技大学理学院应用物理系，湖南长沙 410073；
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900)

摘要：通过扫描电镜，对三种含能材料在不同应变率压缩条件下回收的试样断面进行了细观观察，得到了三种含能材料的细观破坏特征，并对其破坏机理进行了分析。同时结合高聚物粘结炸药(PBX 炸药)和压装 B 炸药组分的比较，分析了两种炸药在高应变率条件下的不同破坏模式。

关键词：含能材料；压缩加载；应变率；细观破坏模式
中图分类号：O347.1；TQ564 **文献标识码**：A

1 引 言

近年来，武器装药结构的安全性日益受到重视，特别是在跌落、撞击等意外情况下，炸药装药的起爆性能会发生敏化的现象，促进了对炸药的损伤及其演化的研究[1]。对确定的含能材料配方而言，含能材料的细观结构特征，如炸药颗粒尺寸及分布、颗粒间的孔穴尺寸、炸药晶体的缺陷及尺寸等，对炸药的感度有很大的影响，即所谓微结构效应(Microstructural Effects)。特别是 PBX 炸药在压装成型过程中，其孔穴率、炸药颗粒的缺陷或裂纹等内部细观损伤对 PBX 炸药的感度有明显的影响[2,3]。在外界载荷作用下，炸药材料内部将产生新的损伤以及损伤演化，导致材料敏化[4]。

炸药冲击实验[5,6]结果表明，在低幅冲击载荷下，当冲击速度较低时，含能材料内部的损伤演化和发展导致试件破裂；而当冲击速度较高时，其损伤演化会导致材料敏化而发生强烈的化学反应。这些均说明，炸药的损伤和演化对炸药安全性问题的研究具有重要意义。

为了结合宏观力学特性对含能材料的损伤和破坏特征作进一步的研究，本工作对不同加载条件下的含能材料回收样品断面进行了微细观结构分析，得到了三种含能材料的损伤和破坏特征认识。分析表明，如何表征含能材料这些损伤并将损伤与其性能建立联系，是一个应该关注的课题。

2 实验概述

2.1 实验材料

实验采用的材料为 PBX 炸药、压装 B 炸药以及复合固体推进剂(CSP)，其中炸药通过压制成型，由江南机械厂提供，复合固体推进剂由国防科技大学航天与材料工程学院提供。表 1 列出了各材料的主要成份，表 2 列出三种材料试样的尺寸。

2.2 压缩实验

对三种含能材料在不同应变率条件下进行了压缩实验。高应变率 SHPB 实验在国防科技大学自行研制的分离式 Hopkinson 压杆上完成；准静态实验在青山牌 WDW-100B 微机控制万能材料实验机上进行。

* **收稿日期**：2004-05-26；**修回日期**：2004-12-09
基金项目：国家自然科学基金(10276038)；国防科技重点实验室基金(51478030201-KJ0103)
作者简介：吴会民(1974—)，男，硕士，讲师，主要研究方向为材料动态力学性能. E-mail：wuhuimin93@163.com

表 1 三种含能材料的组分

Table 1 The material compositions

Energetic material	Compositions
PBX explosive	97%HMX/3%glue
Comp. B explosive	60%RDX/40%TNT/1%Ozocerite
Composite solid propellant (CSP)	8.0%Glue/69.5%Oxidizer(AP)/18.5%Aluminium(Al)/3.3%ELasticizer/0.5%～0.7%Catalyst

表 2 三种含能材料试样尺寸

Table 2 Sample dimension

Parameter	PBX explosive		Comp. B explosive		Composite solid propellant	
	High strain rates	Quasi-static	High strain rates	Quasi-static	High strain rates	Quasi-static
d/(mm)	13.8	13.8	13.7	13.7	14.0	14.0
l/(mm)	5.4	10.8	5.2	10.3	5.0	8.0

2.3 扫描电镜实验

对压缩实验中的试样进行回收，选定试样断面进行细观观察。由于三种含能材料均为不导电材料，在进行扫描电镜实验前，首先利用溅射仪对试样断面进行了喷金处理，再利用扫描电镜进行细观观察。实验在中南大学材料分析实验室采用 KYKY2800 扫描电镜完成。

3 实验结果

3.1 PBX 炸药细观观察结果

3.1.1 高应变率(10^2 s^{-1})条件下 PBX 炸药细观观察

图 1、图 2、图 3 分别为 PBX 炸药在高应变率条件下试样断面的形貌。其中图 1 为试样断面放大 20 倍时的宏观形貌，从图中可以看出，试样的宏观破坏形式为轴向劈裂。

图 2 为高应变率范围试样断面放大 2 000 倍时的细观形貌。从图 2 中可以看出，在断面上有三种不同的区域：HMX 晶粒与粘结剂分离区域、HMX 晶粒破碎区域以及粘结剂断裂区域。图 3 是将图 2 中 HMX 晶粒破碎区域进一步放大的图像，从图中可以看出，HMX 晶粒会破碎成更小的 HMX 晶粒。对 HMX 晶粒间的裂纹进行进一步放大观察时发现，在电子束轰击下，在原来完整的晶粒上又有新的微裂纹萌生，典型图像如图 3 中 2 所指区域。初步分析认为，这是由两方面的原因造成的：一方面是由于电子束的轰击导致能量沉积，在热应力作用下，损伤进一步演化及裂纹进一步扩展；另一方面是由于HMX

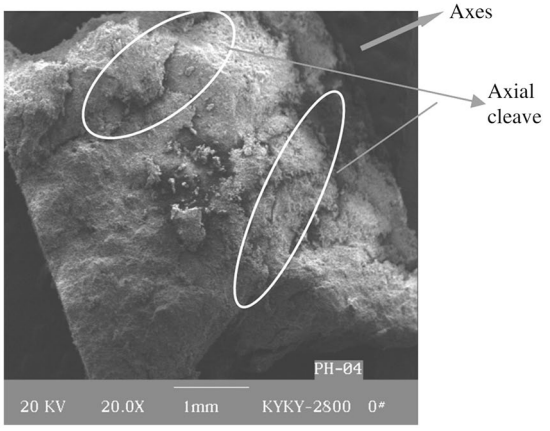


图 1 高应变率加载下试样断面宏观形貌

Fig. 1 The section of a PBX specimen from high strain rate test

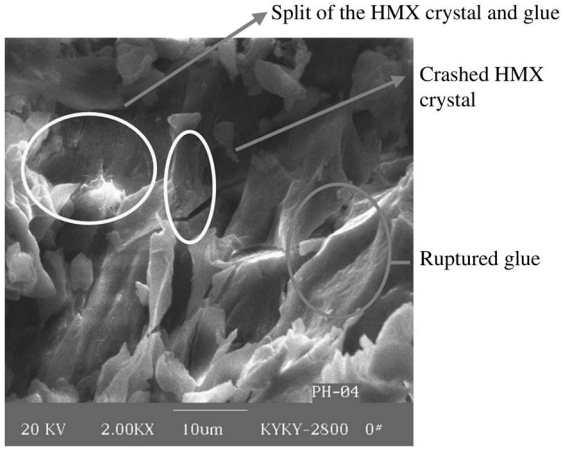


图 2 高应变率加载条件下 PBX 炸药断面形貌

Fig. 2 Typical fractograph of a PBX specimen from high strain rate test

晶粒经高应变率冲击后,残余强度很低,电子束的轰击力使 HMX 晶粒进一步破碎。

对于 PBX 炸药,粘结剂强度高、粘结力强,在高应变率压缩作用下,在试样内部会沉积一定的能量,由于应变率较高,这部分能量未能及时释放出去,而是沉积在试样内部。当这部分能量大于一定数值的时侯,会引起晶粒的破碎,同时在这一过程中伴随着试样内部微裂纹的传播,其传播路径比较复杂,但是总沿着比较薄弱的路径进行扩展。如果粘结剂与晶粒表面的粘结强度大于粘结剂的强度,则表现为粘结剂的分离,如果粘结剂与晶粒表面的粘结强度小于粘结剂的强度,则表现为粘结剂与晶粒的分离,如图 2 所示各种情况。

以上观察结果表明,在高应变率压缩条件下,试样断面细观特征主要表现为 HMX 晶粒破碎、HMX 晶粒与粘接剂的分离以及粘结剂的断裂。

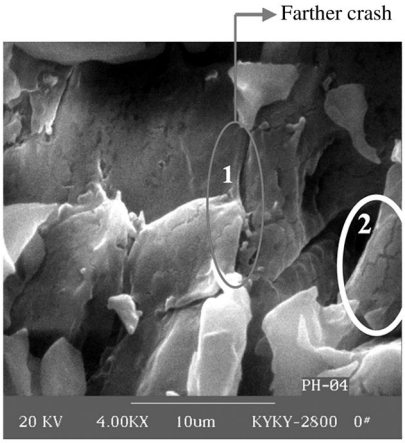


图 3　HMX 晶粒破碎区域放大图

Fig. 3　Enlarged graph of the fractural region

3.1.2　低应变率(10^{-2} s^{-1})条件下 PBX 炸药细观观察

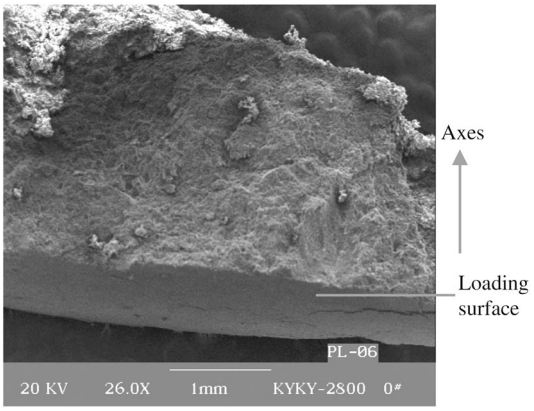


图 4　准静态压缩实验下 PBX 试样断面宏观形貌

Fig. 4　The section of an PBX specimen from low strain rate test

图 4 为准静态压缩实验回收的试样断面放大 26 倍时的宏观形貌,从图中可以看出,试样的宏观破坏形式为劈裂。图 5 给出了放大 3 000 倍时的形貌。从图 5(a)中可以看出,在断面上存在 HMX 晶粒和粘结剂分离的现象,其典型的区域如图 5(a)中的 1 区域所示;从图 5(b)中可以看出,在断面上存在粘结剂分离的现象,其典型的区域如图 5(b)中的 2 区域所示。与高应变率压缩实验回收的试样断面细观特征相比,在准静态压缩后,没有发现普遍的 HMX 晶粒破碎现象。在准静态实验条件下,PBX 炸药断面细观特征主要表现为 HMX 晶粒与粘结剂的分离以及粘结剂的断裂。

综上所述,高应变率与准静态得到的 PBX 炸药试样宏观破坏模式相同,均表现为轴向劈裂;同时,

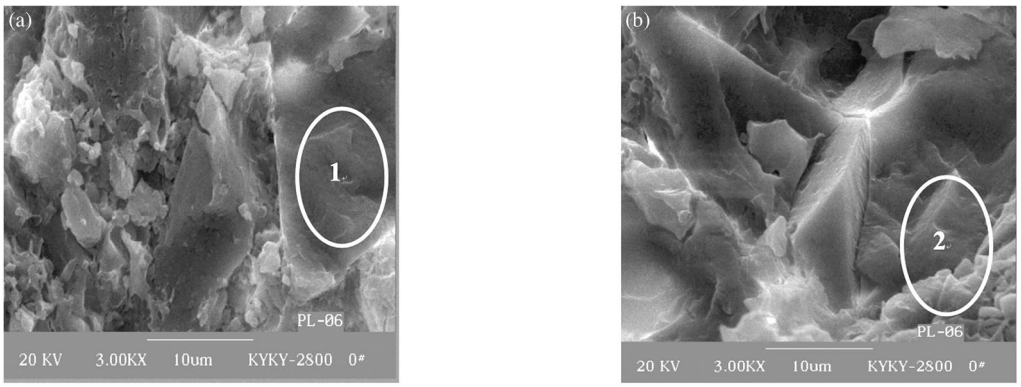


图 5　准静态压缩实验下 PBX 试样中晶粒脱粘形貌

Fig. 5　Splitted cross section of an HMX crystal from bonding in a PBX specimen under loading at low strain rate

试样断面细观特征均有 HMX 晶粒与粘结剂分离、以及粘结剂的裂开现象出现；其区别在于：在高应变率加载条件下会造成试样内部大量晶粒进一步破碎成小的晶粒，产生晶粒间的裂纹，且 HMX 晶粒残余强度很低，在 SEM 实验中，电子束的能量即可以使其进一步破碎；在低应变率压缩实验回收的试样中，则没有观察到晶粒破碎现象发生。

HMX 晶粒间的裂纹对 PBX 炸药感度的影响比 HMX 晶粒与粘结剂分离、以及粘结剂的断裂对 PBX 炸药的影响更为严重。这是因为在 PBX 炸药中，粘结剂具有一定的绝热作用，HMX 晶粒与粘结剂的分离以及粘结剂的断裂对 PBX 炸药感度的影响会远小于这些裂纹的影响。受损后炸药中的这些裂纹会成为 PBX 炸药起爆过程中可能的“热点”源，这意味着与低应变率相比，高应变率压缩会使得 PBX 炸药内部热点增加，进一步影响 PBX 炸药的感度，使 PBX 炸药的感度提高，意外起爆概率增加。

3.2 压装 B 炸药细观观察结果

图 6 给出了压装 B 炸药在高应变率加载后试样断面的观察结果，其中图 6(a)为放大 1 000 倍时的观察结果，图 6(b)为放大 2 000 倍的观察结果，图 6(b)为图 6(a)中局部区域的放大结果。从图 6 中可以看出，在高应变率条件下，试样断面细观破坏特征为晶粒之间的分离。

图 7 是 B 炸药低应变率实验回收试样断面的观察结果，其中图 7(a)为放大 500 倍时的观察结果，图 7(b)为放大 1 200 倍时的观察结果，图 7(b)为图 7(a)中局部区域的放大结果。从图 7 中可以看出，压装 B 炸药在准静态实验下，试样断面细观破坏特征为晶粒之间的分离。以上结果表明：压装 B 炸药在高应变率压缩条件下与准静态实验条件下，其试样断面细观特征相同，均为颗粒之间的分离。

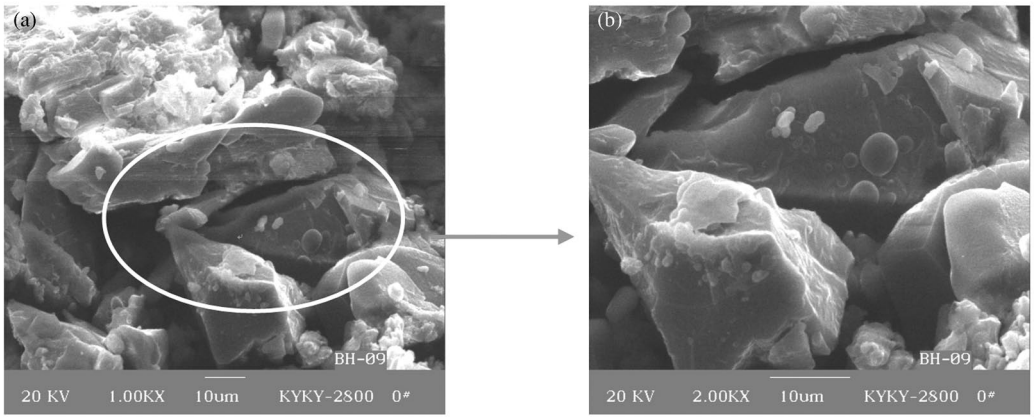


图 6 高应变率压缩下压装 B 炸药试样断面形貌放大图

Fig. 6 The section of Comp. B specimen under loading at high strain rate

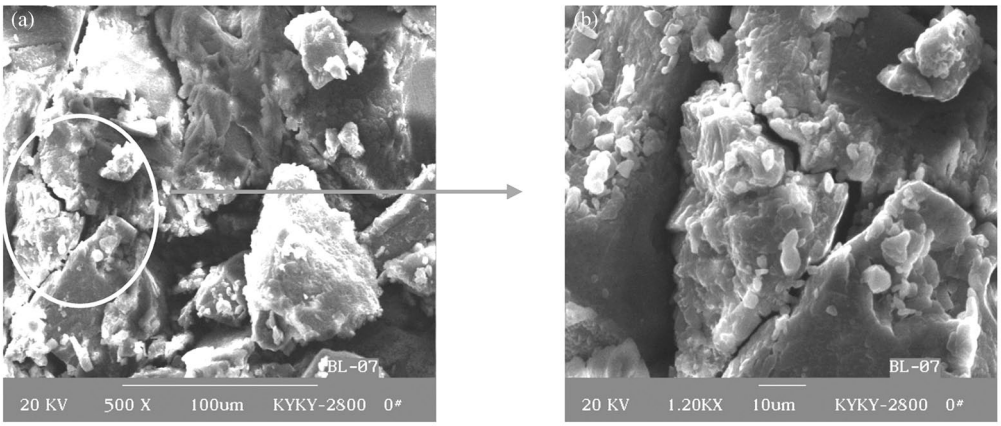


图 7 准静态压缩实验下压装 B 炸药试样断面形貌放大图

Fig. 7 The section of Comp. B specimen under loading at low strain rate

与 PBX 炸药相比,压装 B 炸药在高应变率压缩条件下没有发现晶粒破碎的现象。这是由于压装 B 炸药是由石蜡包覆晶粒压装而成。在 B 炸药中,石蜡主要起钝感作用,其强度较低,与晶粒的粘结力较弱。由于石蜡强度低、粘结力弱的特点,同时其初始损伤程度与 PBX 炸药相比较为严重,内部的微裂纹、孔隙等缺陷能迅速汇合,形成宏观裂纹,使得试样内部的能量能及时释放出去,因此一般不会出现晶粒破碎的现象。

3.3　复合固体推进剂细观观察结果分析

图 8 给出了复合固体推进剂高应变率压缩实验回收的试样内部的观察结果,其中图 8(a)为放大 150 倍时的观察结果,图 8(b)为放大 300 时倍的观察结果,图 8(b)为图 8(a)中局部区域的放大结果。从图 8 中可以看出,这时试样内部细观破坏特征为固体推进剂内部颗粒与基体之间的分离。

图 9 给出了复合固体推进剂在准静态压缩条件下试样内部的观察结果,其中图 9(a)为放大 50 倍时的观察结果,图 9(b)为放大 150 倍时的观察结果,图 9(b)为图 9(a)中局部区域的放大结果。从图 9 中可以看出,在准静态压缩条件下,试样内部细观破坏特征为固体推进剂内部颗粒与基体之间的分离。

综上所述,在高应变率和准静态实验下,复合固体推进剂细观破坏特征主要表现为,颗粒和基体之间的分离,即脱粘。这种破坏一方面削弱了材料的颗粒增强效应,使得材料的弹性模量降低,材料的力学性能劣化;另一方面,增加了复合固体推进剂的燃烧面积,可能直接影响其性能。

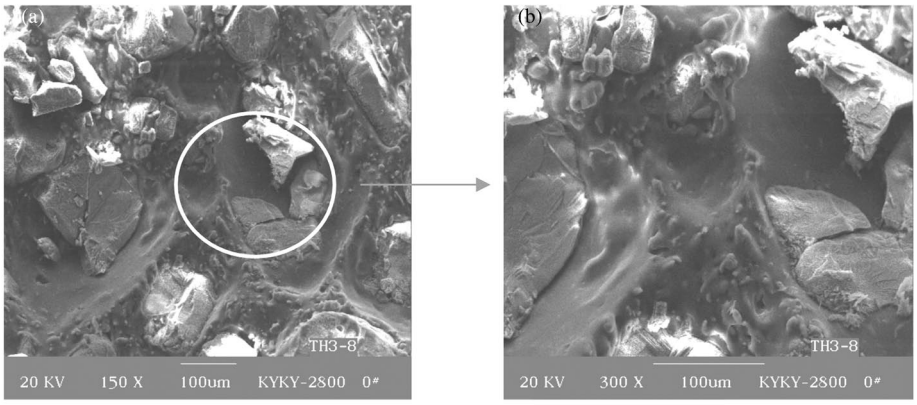


图 8　高应变率压缩下固体推进剂试样剖面形貌放大图

Fig. 8　The section of CSP specimen under loading at high strain rate

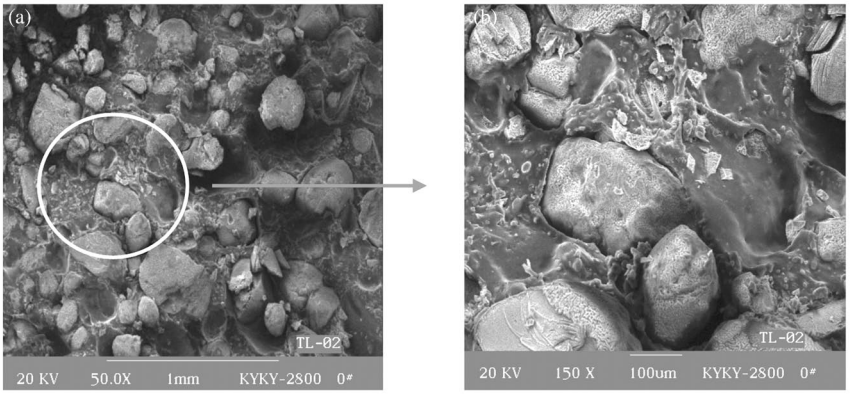


图 9　准静态压缩实验固体推进剂试样剖面形貌放大图

Fig. 9　The section of CSP specimen under loading at low strain rate

4　结　论

通过以上实验结果分析,得到了三种含能材料的细观破坏特征,归纳出以下认识。

(1) 对于 PBX 炸药和压装 B 炸药,在不同应变率压缩条件下,其宏观破坏模式均为轴向劈裂,即裂

纹扩展方向和加载方向基本平行。

(2) 对于PBX炸药,高应变率条件下与准静态实验条件下的试样断面细观特征表现有所不同,在高应变率下为HMX晶粒破碎、HMX晶粒与粘结剂分离、以及粘结剂的裂开;而在准静态实验条件下主要为HMX晶粒与粘结剂分离、以及粘结剂的裂开现象出现。

(3) 压装B炸药在高应变率压缩条件下与准静态实验条件下试样断面细观特征相同,均为颗粒之间的分离。

(4) 两种炸药在高应变率条件下,其试样的损伤程度与准静态实验下的试样相比明显严重(主要表现在颗粒添加物与基体分离的程度)。

(5) 复合固体推进剂在高应变率压缩条件下与准静态实验条件下,其试样断面细观特征相同,均为颗粒与基体之间的分离,即脱粘。

这种损伤破坏应该会直接影响所研究的三种含能材料的起爆、爆轰和燃烧性能。对于两种炸药,其细观破坏将增加内部可能的"热点"源,使得炸药的感度增加,意外起爆概率增加,影响其安全性;对于复合固体推进剂,其细观破坏增加了复合固体推进剂的燃烧面积,可能直接影响其工作性能。如何表征含能材料的这些损伤并将损伤与其性能建立联系,是一个值得关注的课题。

References:

[1] Luo J R. Study on Damage, Fracture and Constitutive Relation of PBX [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001. (in Chinese)
罗景润. PBX损伤、断裂及本构关系研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2001.

[2] Heijden V D, Bouma R H B. Shock Sensitivity of HMX/HTPB PBX's: Relation with HMX Crystal Density [A]. 29th International Annual Conference of ICT Karlsruhe [C]. FGR, 1998. 65-Ⅰ-65-Ⅱ.

[3] Howe P M, Conley P, Benson D. Microstructural Effects in Shock Ignition [A]. 11th International Symposium on Detonation [C]. Colorado, 1998. 768-780.

[4] Lefrancois A, Demol G. Increase of Sensitivity of HMX-Based Pressed Explosives Resulting of the Damage Induced by the Hydrostatic Compression [A]. 29th International Annual Conference of ICT Karlsruhe [C]. FGR, 1998. 33-1-33-12.

[5] Chidester S K. Low Amplitude Impact Testing and Analysis of Pristine and Aged Solid Explosives [A]. 11th International Symposium on Detonation [C]. Colorado, 1998. 93-100.

[6] Scammon R J. Low Amplitude Insult Project: Structural Analysis and Prediction of Low Order Reaction [A]. 11th International Symposium on Detonation [C]. Colorado, 1998. Ⅲ-118.

Microstructure Fractural Characteristics of Energetic Materials under Compressive Loading

WU Hui-Min[1,2], LU Fang-Yun[1,2], LU Li[1], WANG Zhi-Bing[1]

(1. *Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*;
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The fractural surfaces of the compression tested specimens have been observed by scanning electron microscope (SEM). Microstructure fractural characteristics of three energetic materials under compressive loading at different strain rates are obtained. Based on the material composition, the fractural mechanisms of the PBX and Comp. B under the loading are discussed, respectively, which attempts to explain differences of the fractural characteristics between the two explosives.

Key words: energetic material; compressive loading; strain rate; microstructural fracture characteristics