DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0120-06

单轴压缩下 2 种 PBX 炸药的动态变形损伤及其温升效应*

李 涛,傅 华,李克武,谷 岩,刘仓理
(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重点实验室,四川 绵阳 621999)

摘要: 通过炸药单轴压缩实验,利用高速摄影和高速红外热像仪,对 2 种典型 PBX 炸药变形损伤过程和温升效应进行了实时观测。实验结果表明,2 种典型 PBX 炸药的损伤以及温升效应表现出明显差别:低粘结剂含量的炸药表现出明显的脆性特征,材料应力应变曲线中的应变软化阶段是伴随着材料损伤的演化过程,最终的失稳破坏导致样品中贯穿裂纹的形成,非均匀的裂纹分布对应于局部高温带的出现;高粘结剂含量的炸药表现出明显的韧性特征,材料应力应变曲线未出现应变软化现象,变形损伤分布较均匀,但剪切方向出现网络状的温升分布。

关键词: 固体力学;损伤;温升效应;单轴压缩;塑料粘结炸药
中图分类号: O346 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

PBX 炸药的撞击起爆是武器战斗部安全性评估的核心内容之一。撞击条件下 PBX 炸药的意外起爆相当复杂,其安全性评估需要搞清楚起爆的诱发原因和后续演变过程,这涉及材料、力学、物理和化学交叉学科等多个问题的研究。PBX 炸药作为一种复合材料,包括炸药颗粒、粘结剂/塑化剂等多种组分,在撞击过程中表现出复杂力学行为。炸药动态力学性能是研究炸药撞击安全性的基础,目前国内外研究人员开展了广泛的研究,主要致力于炸药应力应变关系、应变率和温度效应[1-4]等。除了组分因素外,研究 PBX 炸药这种复杂的力学响应特性,必须考虑材料的损伤演化过程。其次,PBX 炸药力学响应可能导致的意外起爆,诱发原因是炸药中机械能耗散引起的温度变化,当满足特定的高温条件时则会诱发含能炸药晶粒的热分解反应。炸药变形损伤及其温升效应在安全性研究中很重要,但受限于复杂的物理化学过程以及相关实验诊断技术,使得在这方面上的认识依然较薄弱。因此,开展 PBX 炸药变形损伤演化和温升过程研究,将有助于进一步理解炸药安全性问题。

随着应用的不同,PBX 炸药的组成会存在差异,特别是含能颗粒的含量,根据所占的比例大致可划分为 2 个大类。一类炸药主要在一些高性能武器装备中使用,为产生极高的爆速和爆压以及便于成型加工,在制备过程中增加了含能颗粒的体积分数(一般大于 90%);另一类炸药是在经历极大的振动或高过载环境的武器装备中使用,含能晶粒体积分数填充 80%左右,并采用软的聚合物作为粘结剂,防止受到振动载荷作用时材料内部形成裂纹,影响材料的起爆与反应特性。由于含能颗粒体积分数的不同,2 种 PBX 炸药在外载荷下呈现的力学变形和损伤演化特征明显不同:前者表现出明显的脆性特征,在较低的应变下会出现损伤破坏,失效应变约为 1%[4];后者是非常软的材料,失效应变可超过 10%[5]。2 种 PBX 炸药不同的力学性能和损伤机理,会对炸药材料的温度响应、后续的起爆机制以及反应发展产生不一样的影响。因此,为了更好地理解炸药的响应特性,有必要对 2 类典型炸药变形损伤及其温升效应分别进行研究。

* **收稿日期**: 2015-05-22; **修回日期**: 2015-11-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(11272294,11272296);
中国工程物理研究院科学技术发展重点基金项目(2012A0201007);
冲击波物理与爆轰物理重点实验室专项基金项目(2012-专-05)
第一作者: 李 涛(1978—),男,硕士,副研究员,tedleeus@163.com。

考虑在异常起爆中炸药压缩特性的重要性，大部分炸药力学性能的实验研究是利用了分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar，SHPB)实验技术。该技术最重要的基本条件为保证杆中一维(单轴)弹性应力波传播，被测的样品处于应力平衡的单轴压缩状态。不同于金属材料，炸药在受载过程中一直伴随损伤演化，当应变超过一定幅值时，损伤分布可能不再均匀，某些区域甚至出现断裂破坏的现象。因此，对于炸药应力应变关系曲线中可能出现损伤断裂的大应变区域，已经不再满足单轴压缩实验的基本条件，不能被看作是炸药材料的本质属性。但是，这部分曲线包含的损伤断裂信息，可能与炸药材料非均匀的温度变化密切相关，更应该得到关注。

本文中，针对 2 类具有不同力学性质的 PBX 炸药，采用 SHPB 实验技术实现对样品单轴压缩，利用高速相机拍摄炸药损伤断裂演化过程，以及高速红外成像系统观测样品在受载过程中温度分布和变化，探讨 2 类 PBX 炸药的变形损伤及其温度演化过程。

1　单轴动态压缩实验

单轴压缩实验是在分离式 Hopkinson 压杆装置上完成的，如图 1 所示，实验装置由打击杆、入射杆、透射杆和吸收杆组成，杆的材料为铝，直径均为 20 mm。其中，入射杆长 2 000 mm，透射杆长 1 000 mm，子弹长 300 mm。实验时，试样置于入射杆和透射杆之间，由打击杆撞击入射杆产生的应力脉冲进行冲击加载。打击杆由充入气室的压缩空气驱动，由不同的发射气压来控制打击杆的撞击速度。根据 SHPB 一维应力和应力均匀性假定，确定了动态单轴压缩下炸药材料的应变率、应变和应力。实验采用的是以 HMX 炸药为基的 PBX 炸药，尺寸为 12 mm×6 mm，包括 2 种炸药。一种炸药的粘结剂的质量分数约为 5%，密度为 1.86 g/cm^3；另一种炸药粘结剂的质量分数 12%，密度约为1.80 g/cm^3。

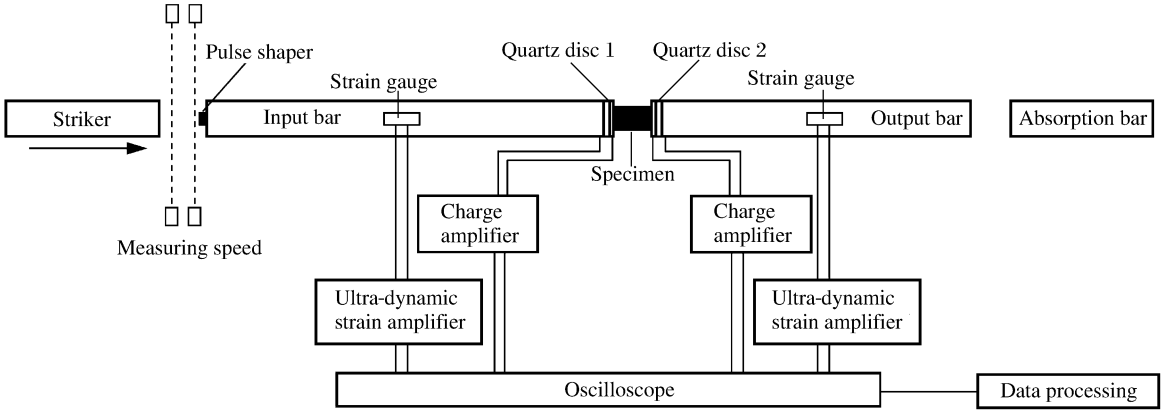

图 1　典型 SHPB 实验示意图

Fig. 1　Typical SHPB schematic setup

实验中采用数字化高速相机，如图 2 所示，对单轴压缩下炸药表面的形态变化过程进行拍摄并记录时间，该设备摄影频率和曝光时间等方面具有较好的技术指标，可较好地应用于爆炸、撞击等各类实验中。为更好的捕捉炸药的变形破坏细节，实验中减小分辨率设定幅频为 70 000 s^{-1}，对应的空间分辨率为 128×128。



图 2　数字化高速相机

Fig. 2　High speed digital camera



图 3　高速红外热像仪

Fig. 3　High speed infrared radio camera

采用高速红外热像仪，如图 3

所示,对单轴压缩下炸药表面的温度变化过程进行拍摄。热像仪采用热成像技术,将不可见的红外辐射转化为可见图像,是一种二维平面成像系统。该系统测量的是投射到热像仪探测器上的红外辐射能,并利用辐射能与温度之间的函数关系来确定温度。与可见光的成像不同,热像仪是利用测量对象温度差异所产生的热对比度不同,把温度分布图用伪彩色显示出来,成为"热图像"。高速红外热像仪的温度测量范围为$-40\sim1\,500$ ℃,可分辨最小温度差为 0.1 ℃,满帧分辨率为 640×512,满帧条件下幅频最高可达 350 s^{-1},在较低的分辨率下幅频可以更高,实验中根据设备的能力和单轴压缩变形情况,减小分辨率将幅频设置为 1 100 s^{-1}。

2 实验结果

2.1 应力应变曲线

对于低粘结剂含量的炸药,在应变率为 300 s^{-1}的单轴动态压缩下,获得的应力与应变的关系曲线如图 4 所示。曲线可划分为 3 个变形阶段:首先是上升阶段,此时材料可近似为线弹性;其次是非线性转变阶段,此时炸药出现类似于弹塑性材料屈服转变和随后短暂的上升现象,在达到峰值后加载应力急剧下降;最后是下降阶段,随着应变的增加应力逐渐下降。单轴压缩下应力应变曲线结果表明,这类炸药呈明显的脆性材料特征,破坏应变较小,仅为 1%,对应的峰值应力约为70 MPa。

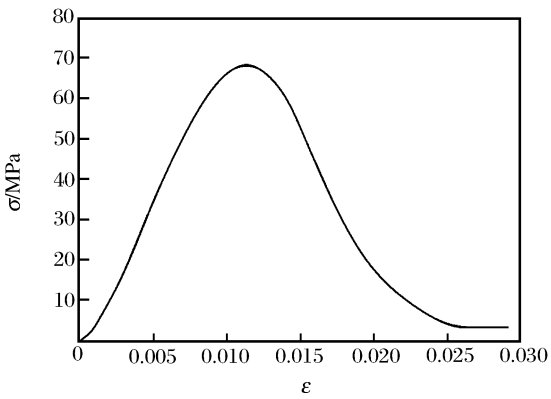

图 4 脆性 PBX 单轴压缩应力应变曲线

Fig. 4 Typical stress-strain curve of brittle PBX

对于高粘结剂含量的炸药,在应变率为 2 000 s^{-1}的单轴动态压缩下,获得的典型应力应变关系曲线如图 5 所示。曲线也可划分为 3 个变形阶段:首先是上升阶段,此时材料可近似为线弹性,这与低粘结剂含量的炸药性质完全相同;其次是非线性转变阶段,此时炸药同样出现类似于弹塑性材料屈服转变,随后在应变有较大增幅的情况下材料继续保持承载能力;最后的下降阶段,与低粘结剂含量的炸药明显不同,此时材料应变不再增加,而且随着应力急剧下降,应变还有减小的趋势,这是典型的卸载过程。单轴压缩下应力应变曲线结果表明,这类炸药韧性特征较明显,破坏应变较大,可达 20%,但对应的峰值应力略低,约为 20 MPa。

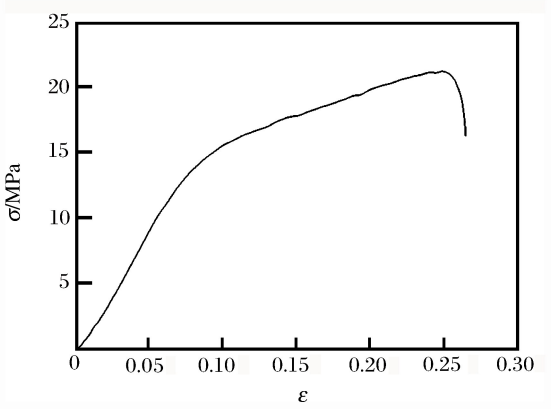

图 5 韧性 PBX 单轴压缩应力应变曲线

Fig. 5 Typical stress-strain curve of tough PBX

2.2 高速可见光图像和红外温度图像

对于 PBX 炸药这种多组分复合材料,材料的力学响应特性不仅与含能颗粒和粘结剂等组分的力学性能有关,还受材料组成结构的直接影响,结构的变化与材料损伤/断裂密切相关,材料结构的变化同时还会改变材料温度演化过程。通过高速摄影和红外热像仪,对单轴压缩下不同 PBX 炸药材料变形损伤及其温升演化过程进行了观测。由于目前红外热像仪拍摄幅频的限制,获得的动态温度图像不能完全再现炸药加载变形时温度变化的细节,但考虑到材料温度的下降主要受较慢热传导过程影响,因此在动态变形过程中测得的材料温度图像,可较好地反映炸药动态变形/损伤引发温升变化的效果。

图 6 给出了在单轴压缩下低粘结剂含量 PBX 炸药变形和后续损伤断裂过程的高速摄影图像。根

据状态的不同,大致可划分为 4 个阶段:第 1 阶段,炸药轴向变形较小,表面保持完好,炸药与两端的加载杆接触良好;第 2 阶段,炸药轴向变形逐渐增大,表面基本保持完好,炸药端面与两端的加载杆接触依然良好,炸药半径增大,但出现了 1 条轴向裂纹;第 3 阶段,炸药轴向变形继续增加,炸药半径也继续增大,出现了多条贯穿性裂纹,表面开始破坏;第 4 阶段,炸药轴向变形进一步增加,炸药半径增大到视场边缘,表面出现较多的贯穿性裂纹,同时还伴随表面崩裂的现象。

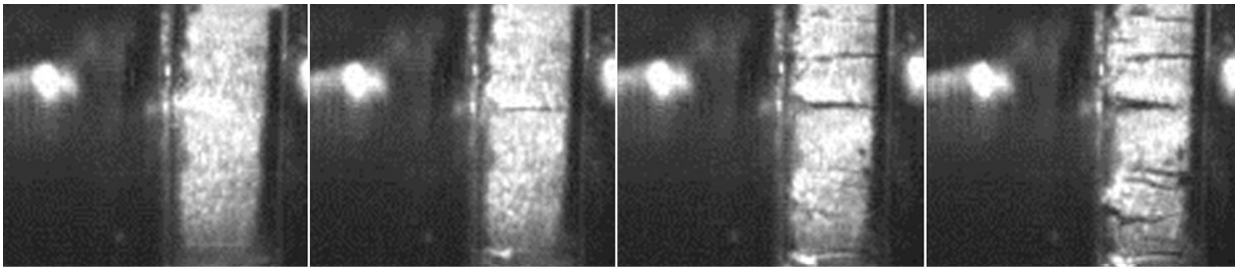

图 6　不同时刻脆性 PBX 损伤演化图像

Fig. 6　Images of damage evolution of brittle PBX at different time

图 7 给出了在单轴压缩下低粘结剂含量 PBX 炸药表面温度变化的高速红外温度图像,红外温度图像中局部高温区与高速摄影的损伤/裂纹分布具有较好的一致性。由图可知,在较小轴向变形下,炸药表面温度变化不明显,但当轴向变形进一步增加,出现损伤和微裂纹时,温度呈现局域化分布。由于炸药在较大轴向变形下由于损伤断裂造成应力分布较复杂,由此可形成剪切裂纹和轴向拉伸裂纹,损伤聚集区和裂纹中颗粒作用较强,由此造成的温升效应明显,最大温升约为 5 ℃。由于剪切方向是材料最易出现相对滑动的方向,因此剪切方向裂纹中颗粒的相对摩擦滑移造成的温升又较轴向裂纹更明显。此外,在红外图像中还可看到破碎炸药颗粒向外飞溅的过程,颗粒温度较高使得这些特征在红外图像上显示得非常清楚。

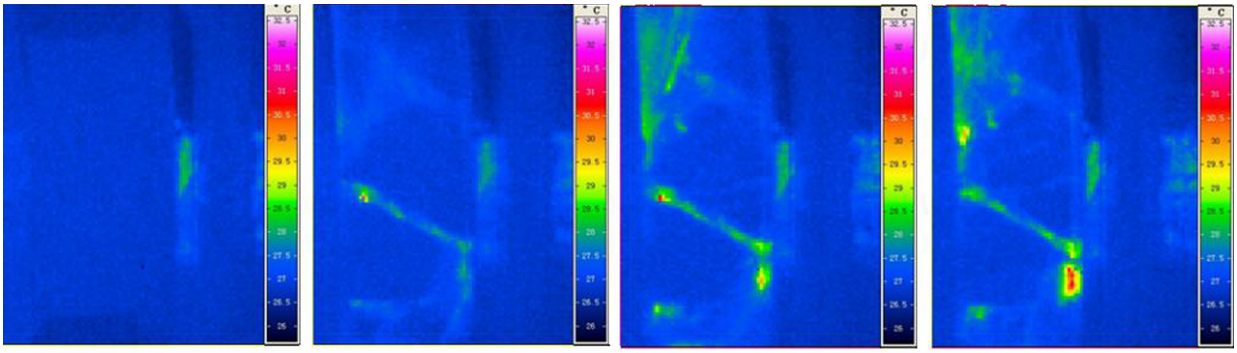

图 7　脆性 PBX 炸药的红外温度图像

Fig. 7　Infrared thermal images of brittle PBX at different times

图 8 给出了单轴压缩下高粘结剂含量 PBX 炸药变形和后续损伤断裂过程的高速摄影图像。由于粘结剂的交联作用,此类炸药轴向变形一直保持均匀,即便是在较高加载条件下也不会出现宏观裂纹导致材料断裂破坏。根据状态的不同,大致可划分为 3 个阶段:第 1 阶段,炸药轴向变形较小,表面保持完好;第 2 阶段,炸药轴向变形逐渐增大,表面虽然保持完整,但出现了由于损伤演化导致的随机褶皱分布;第 3 阶段是加载结束

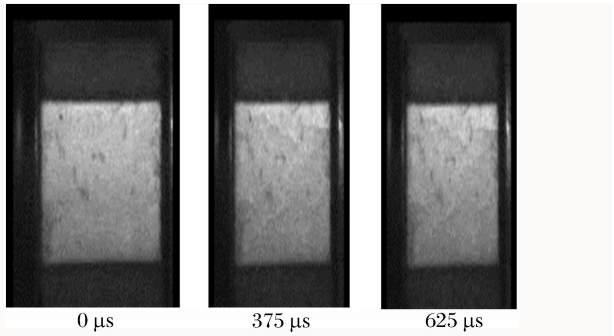

图 8　韧性 PBX 炸药损伤演化图像

Fig. 8　Images of damage evolution of tough PBX at different times

的卸载过程,此时炸药轴向变形减小,但无法完全恢复到初始未变形状态,炸药有较大的轴向残余应变,而且表面的损伤也是不可逆的,仍然处于较为均匀的随机分布状态。

图 9 给出了在单轴压缩下高粘结剂含量 PBX 炸药表面温度变化的高速红外温度图像。由图可知,整体而言,相较前一种炸药,这种炸药没有出现局部高温带,红外温度分布较为均匀,温升幅度较小,测得最大温升约为 2 ℃。同样,在较小轴向变形下,炸药表面温度变化不明显,但当轴向变形进一步增加时,内部损伤的演化,使得颗粒作用有所增强,在更大的轴向变形下,同样由于剪切方向是材料最易出现相对滑动的方向,剪切温升趋势明显,且呈网络状分布,这与 C. R. Siviour 等[6]通过高速摄影得到的剪切带分布图像是类似的。

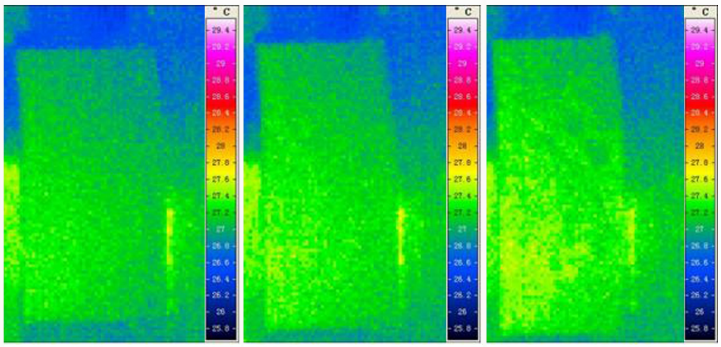

图 9 韧性 PBX 炸药的红外温度图像

Fig. 9 Infrared thermal images of tough PBX at different times

3 讨 论

PBX 炸药是一种颗粒包覆粘结剂的复合材料,包含初始损伤,如微裂纹、微空洞等,其中的粘结剂含量会对损伤演化发展以及后续温度响应过程产生影响。为此,综合前文中的实验结果,通过变形量和时间的对应关系,建立应力应变曲线、动态变形损伤以及温升分布的关联,对在单轴压缩下 2 种典型炸药力热响应特性进行讨论。

首先是低粘结剂含量的 PBX 炸药,这类炸药由于粘结剂含量低,表现出明显的脆性特征。

(1)在应力应变曲线上的线弹性阶段,样品材料变形较小且受力均匀,相应的温升幅度也很小。

(2)对于应力应变曲线上的非线性阶段起始转变点,即前面提及的名义屈服点,不等同于真正物理意义上的屈服,如 HMX 单晶的屈服极限(约 200 MPa[7])远高于该类炸药的名义屈服应力。在非线性转变阶段初期,材料内部微裂纹开始扩展,使得在应变增大承力继续增加,直至峰值应力(硬化阶段)。

(3)在应力应变曲线上的非线性转变阶段后期,应变进一步增大,微裂纹扩展形成宏观裂纹,材料出现软化。宏观裂纹的出现,使得颗粒相对滑动更容易,造成裂纹中的温度开始升高。

(4)在更大应变时,高速摄影中可观察到材料出现失稳破坏,材料受力状态和损伤分布极不均匀,材料破坏过程是逐步进行的,整个样品的承载能力不会完全消失(在应力应变曲线中体现为逐步下降段)。材料大变形时,将使裂纹中的温升变得更明显。

其次是高粘结剂含量的 PBX 炸药。这类炸药包含高含量粘结剂,材料的韧性特征较明显。

(1)这类炸药在应力应变曲线上的线弹性的物理本质与前一类炸药基本相同,但温升幅度很小。

(2)在应力应变曲线上的硬化阶段,在屈服转变时表现出更明显的黏弹特性,内部粘结剂和颗粒微结构变化后达到新的硬化阶段。同时粘结剂对剪切力的作用很敏感,使得材料在外载荷下易产生剪切变形并形成网状分布的剪切带,相应位置的温度也有所升高。

4 结 论

PBX 炸药作为一种颗粒填充聚合物的复合材料,其内部系统组成决定了此类材料的动态力学性能,以及在动态变形过程中的温度响应特性。通过炸药单轴压缩实验,并利用高速摄影和高速红外热像仪,对 2 种典型 PBX 炸药变形损伤过程和温升效应进行了实时观测。实验结果表明,2 种典型 PBX 炸药的变形损伤以及温升效应差别明显:低粘结剂含量的炸药表现出明显的脆性特征,单轴压缩下的应力应变曲线的应变软化阶段是伴随着材料内部微损伤的演化过程,最终的失稳破坏导致样品中贯穿裂纹

的形成,非均匀的裂纹分布对应于局部高温带的出现;高粘结剂含量的炸药表现出明显的韧性特征,由于大量粘结剂的保护作用,单轴压缩下的应力应变曲线未出现应变软化现象,但剪切方向的粘结剂变形和颗粒相互作用造成网络状的剪切温升现象。

参考文献:

[1] Blumenthal W R, Thompson D G, Cady C D, et al. Compressive properties of PBXN-110 and its HTPB-based binder as a function of temperature and strain rate[C]// Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. 2002:11-16.

[2] 李英雷,李大红,胡时胜,等. TATB 钝感炸药本构的实验研究[J]. 爆炸与冲击,1999,19(4):355-359.
Li Yinglei, Li Dahong, Hu Shisheng, et al. An experimental study on constitutive relationof TATB explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(4):355-359.

[3] 吴会民,卢芳云,卢力. 三种含能材料力学行为应变率效应的实验研究[J]. 含能材料,2004,12(4):227-230.
Wu Huimin, Lu Fangyun, Lu Li. Experimental studies on strain-rate effects of mechanical behaviors of energetic materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004,12(4):227-230.

[4] 傅华,李俊玲,谭多望. PBX 炸药本构关系的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2012,32(3):231-235.
Fu Hua, Li Junling, Tan Duowang. Experimental study on constitutive relation for plastic-bonded explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(3):231-235.

[5] 李克武,赵锋,傅华. 浇铸类炸药应力应变曲线的 SHPB 测量[J]. 爆炸与冲击,2015,35(6):846-849.
Li Kewu, Zhao Feng, Fu Hua. SHPB technique for the dynamic stress-strain curve measurements of casting explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(6):846-849.

[6] Siviour C R, Williamson D M, Grantham S G, et al. Split Hopkinson bar measurements of PBXs[C]// Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. 2004,706:804-807.

[7] Menikoff R, Dick J J, Hooks D E. Analysis of wave profiles for single crystal HMX: LA-UR-04-3928[R]. Los Alamos National Laboratory Report, 2004.

Deformation with damage and temperature-rise of two types of plastic-bonded explosives under uniaxial compression

Li Tao, Fu Hua, Li Kewu, Gu Yan, Liu Cangli

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In the uniaxial compression, deformation with damage and temperature-rise of two types of plastic-bonded explosives were recorded by means of a high-speed camera and a high-speed infrared radio camera. The results show that the damage evolution and the temperature-rise of the two PBXs are obviously different. As for the PBX with a low content of the binder, the brittleness of the material is characteristically obvious, the strain softening of the stress-strain curve is accompanied with a damage evolution, and the crack formation is due to the failure of the sample, where there existed a local temperature band. As for the PBX with a high content of the binder, the toughness of the material is observed, the strain softening in the stress-strain curve is absent, and the damage is distributed evenly, with a network temperature-rise in the direction of shear.

Keywords: solid mechanics; damage; temperature-rise effect; uniaxial compression; plastic-bonded explosives

(责任编辑　王易难)