文章编号:1000-5773(2013)03-0361-06

某含铝 PBX 压缩性能的应变率与温度效应*

陈丁丁,卢芳云,林玉亮,蒋邦海

(国防科学技术大学理学院,湖南长沙 410073)

摘要:武器弹药在生产、存储、使用等过程中难免需要经受高温、高压、冲击等恶劣环境的考验。在这些极端环境下,作为装填物的高能炸药的力学性能在很大程度上会影响弹药的安全性,因此有必要对其力学性能展开深入的研究。在分离式霍普金森压杆实验平台上,采用单独加热试样快速装配的方法,对某含铝高聚物粘结炸药(PBX)在不同温度、不同应变率下的压缩性能进行了实验研究。在 4 种温度(12、29、45 和 62 ℃)下分别得到了不同应变率(250~1 200 s^{-1})加载下的压缩力学性能。实验结果表明,该 PBX 的压缩强度具有明显的应变率强化效应和温度软化效应,并且具有较好的线性关系,但破坏应变没有明显的变化。根据所得实验结果,利用双线性函数对压缩强度与温度和应变率之间的关系进行了拟合,认为此关系式仅适用于温度高于粘结剂玻璃转化温度情况下的动态压缩性能。

关键词:高聚物粘结炸药;温度;应变率;压缩;分离式霍普金森压杆

中图分类号:O347.1 **文献标识码**:A

1 引 言

高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive,PBX)由于具有良好的力学性能,易于加工成型,在常规武器战斗部及核弹头中得到广泛应用。在生产、运输、贮存以及正常的使用过程中,武器弹药经受高温、高压、冲击等恶劣环境的考验是不可避免的。在恶劣环境下,炸药结构本身的稳定性关系着武器弹药的安全性,而炸药的力学性能是影响炸药安全性的一个重要方面。

在这样的安全需求下,人们开始从细观到宏观方面对 PBX 的各种力学性能展开大量的研究[1-5]。陈荣利用分离式霍普金森压杆装置,对含铝 PBX 在复杂加载下的动态力学性能进行了较为系统的研究[6]。然而,关于温度对 PBX 力学性能影响的研究尚不多见。从文献看,这方面的工作多见于剑桥大学的卡文迪许实验室[7-8]和美国 Los Alamos 国家实验室的研究[9-12]。国内,温茂萍等对某 PBX 平面应变断裂韧度随温度的变化规律进行了研究[13];覃金贵等对一种 PBX 代用材料进行过温度与应变率效应方面的研究[14]。多数研究表明,PBX 炸药的力学性能具有比较明显的应变率效应和温度效应。

本研究在分离式霍普金森压杆实验平台上,采用单独加热试样、快速装配的方法,对一种含铝 PBX 炸药在不同温度、不同应变率下的压缩力学性能进行了测试;利用获得的数据定量分析了 PBX 的压缩强度与温度、应变率的关系。结果表明,该 PBX 材料具有明显的应变率强化和温度软化效应。

---

* **收稿日期**:2011-08-19;**修回日期**:2011-09-23

基金项目:国家自然科学基金(10902122,10872215,11132012);国防科大优秀研究生创新基金(S100201)

作者简介:陈丁丁(1987—),男,博士研究生,主要从事材料动态力学性能研究. E-mail:dingding.mail@163.com

通讯作者:卢芳云(1963—),女,博士,教授,主要从事材料动态力学性能研究研究. E-mail:fylu@nudt.edu.cn

2 材料和实验

2.1 材料与试样

实验用含铝 PBX 炸药的组分为 76%的 RDX，20%的铝粉和 4%的粘结剂，与文献[1,6]中所研究的为同种炸药材料。该炸药形状为灰色粉末状。试样制备采用模具手工压制成型，试样尺寸为∅15 mm×8 mm(如图 1 所示)，厚度误差在 0.05 mm 以内，密度为(1.70+0.01)g/cm^3。

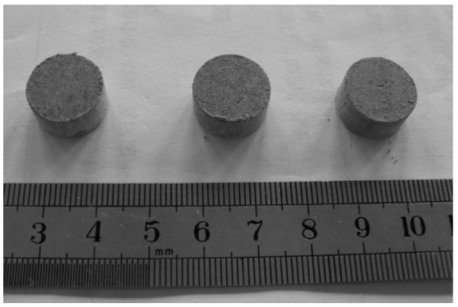


图 1 实验中使用的炸药试样

Fig. 1 Photograph of tested PBX specimen

2.2 实验方法

在分离式霍普金森压杆平台上，对 PBX 试样进行动态压缩性能测试。高温实验采用对试样单独加热，然后快速装配进行实验的方案。该炸药的导热率很低，从而大大降低了对装配速度的要求。图 2 给出了 4 组高温试样夹持到两压杆之间后的温度变化情况，图中给出了 4 组实验数据，起始温度从高到低依次为 83、75、69 和65 ℃。表 1 是将试样置于空气中的温度变化情况。冷却时的室温均为 15 ℃。从图 2 和表 1 中可以看出，试样与压杆接触以后，2 s 时间内温度下降不超过 2 ℃，而在空气中 12 s 内温度才下降了2 ℃。在装配过程中，可以保证试样从加热容器中取出到与杆相接触所用时间小于 6 s，从与压杆接触到发射子弹的时间小于 2 s。因此，试样中温度的下降幅度可以控制在3 ℃以内。

表 1 试样在空气中的温度变化情况

Table 1 Temperature change of hot specimen after being exposed in atmosphere

Time/(s)	T/(℃)	ΔT/(℃)
0	75	0
12	73	2
24	70	5
35	69	6
43	67	8

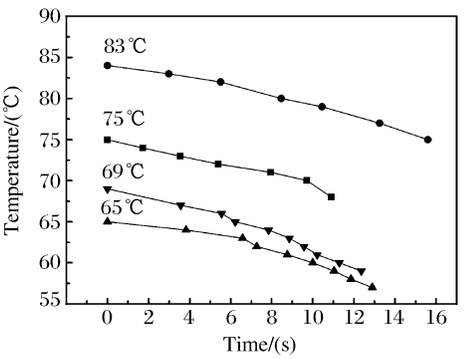


图 2 试样夹持到压杆两端后的温度变化情况

Fig. 2 Temperature-time curve of hot specimen after being fixed to bars

3 实验结果与讨论

3.1 应变率强化效应

考虑到安全性因素，本研究仅对试样在 12、29、45 和 62 ℃温度条件下的动态压缩性能进行了测试，每个温度下获得了 4 个不同应变率的力学响应。每种情况至少进行 4 次重复实验，以保证实验的有效性和数据的可靠性。图 3～图 6 分别是这 4 个温度下获得的不同应变率加载的压缩强度。从图中可以发现，虽然材料压缩性能具有一定的分散性，但压缩强度的应变率强化效应十分明显，并且呈线性关系。图 7 和图 8 分别是实验中最低温 12 ℃和最高温 62 ℃下获得的典型的应力-应变曲线。其它两种温度下的应力-应变曲线除应力峰值不同外，曲线形状没有明显区别，在此不再列出。

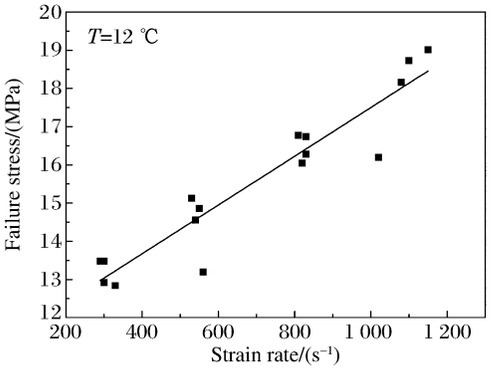


图 3 12 ℃条件下 PBX 压缩强度与应变率关系

Fig. 3 Relationship between compressive failure stress and strain rate at 12 ℃

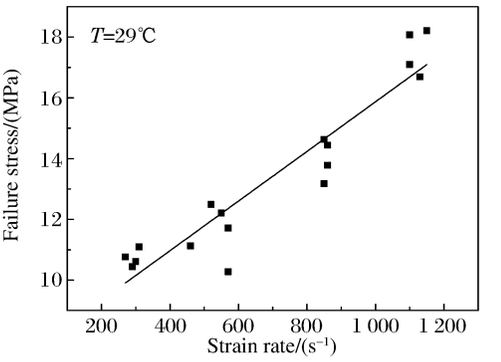


图 4 29 ℃条件下 PBX 压缩强度与应变率关系

Fig. 4 Relationship between compressive failure stress and strain rate at 29 ℃

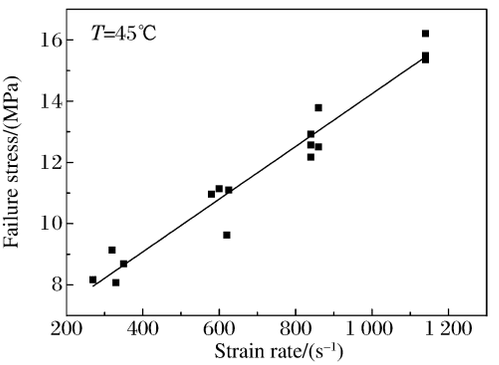


图 5 45 ℃条件下 PBX 压缩强度与应变率关系

Fig. 5 Relationship between compressive failure stress and strain rate at 45 ℃

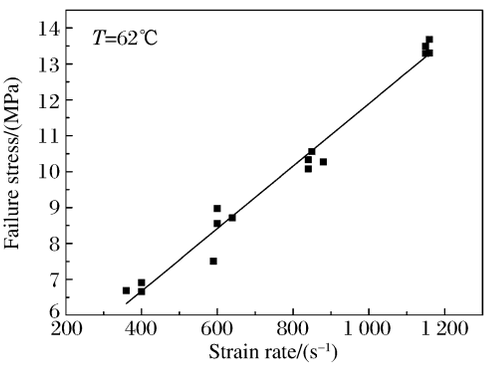


图 6 62 ℃条件下 PBX 压缩强度与应变率关系

Fig. 6 Relationship between compressive failure stress and strain rate at 62 ℃

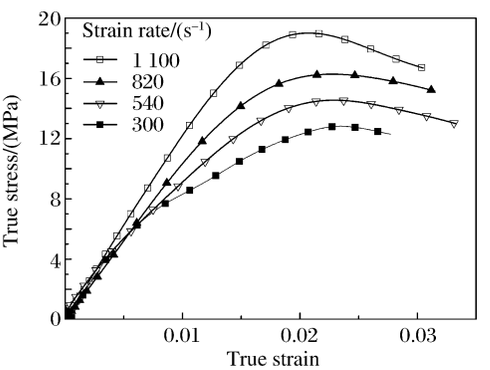


图 7 12 ℃时不同应变率加载条件下 PBX 的典型真实应力-真实应变曲线

Fig. 7 True stress-true strain curve under different strain rates loaded at 12 ℃

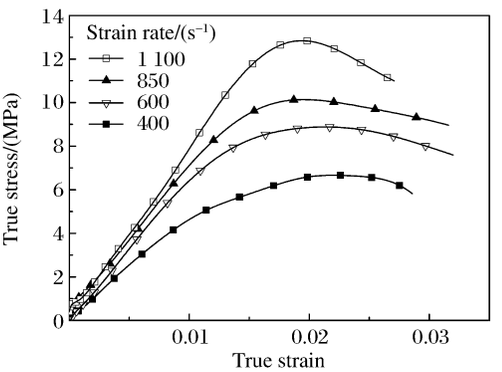


图 8 62 ℃时不同应变率加载条件下 PBX 的典型真实应力-真实应变曲线

Fig. 8 True stress-true strain curve under different strain rates loaded at 62 ℃

3.2 温度软化效应

为了研究不同应变率下 PBX 力学性能的温度效应,需要得到固定应变率下不同温度的力学响应。但是,随着试样温度的升高,相同实验条件下所获得的应变率也会随之升高。虽然可通过改变子弹的撞击速度来调整应变率,但需要花费大量的试样和时间在调试上。因此,没有苛求在不同温度下的实验中具有相同的应变率。考虑到实验所得数据已能充分反映固定温度下压缩强度与应变率之间的关系,首

先采用线性函数对其进行拟合，然后利用拟合的函数得到固定应变率(300、550、850、1 100 s^{-1})下的压缩强度。拟合函数为

$$\sigma(T,\dot{\varepsilon}) = a(T)\dot{\varepsilon} + b(T) \tag{1}$$

由于获得的数据具有一定的分散性，因此拟合时去掉一些明显偏离主要规律的数值。图 9 为拟合得到的结果，表明 PBX 的压缩强度随温度的升高呈线性减小的规律。拟合结果显示，线性程度很高，线性相关性系数均在 0.98 以上。另外，就温度与应变率的耦合关系来看，应变率的升高会削弱温度对 PBX 强度的软化效应，但不是十分显著。

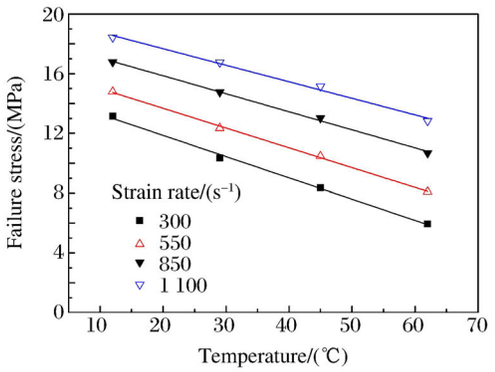


图 9 采用拟合结果得到的不同应变率下的压缩强度与温度的关系

Fig. 9 Relationship between compressive failure stress and temperature calculated from fitted failure stress-strain rate relations

3.3 本构分析

由上述分析可知，当应变率一定时 PBX 的压缩强度与温度呈线性关系，则(1)式对温度的偏导数应与温度无关，即有

$$\frac{\partial\sigma(T,\dot{\varepsilon})}{\partial T} = \frac{\partial a(T)}{\partial T}\dot{\varepsilon} + \frac{\partial b(T)}{\partial T} = f(\dot{\varepsilon}) \tag{2}$$

所以 $a(T)$和 $b(T)$均为常数或是温度 T 的线性函数。因此，对于压缩强度与温度和应变率之间的关系，可以用双线性函数进行拟合，其函数形式为

$$\sigma(T,\dot{\varepsilon}) = k(\dot{\varepsilon} - m)(T - n) + w \tag{3}$$

式中：k、m、n、w 是与应变率和温度都无关的参数。

温度采用绝对温度，拟合得到的压缩强度-温度-应变率关系为

$$\sigma(T,\dot{\varepsilon}) = 3.67 \times 10^{-5}(\dot{\varepsilon} - 4\,186.03)(T - 93.5) + 40.30 \tag{4}$$

如文献[6]所述，这种密度下材料显示出一种准脆性的性质。本实验发现，即使温度升高到 62 ℃，其破坏应变同样没有明显的变化。如图 10 所示，在本实验条件中的不同温度和不同应变率下所获得的材料的破坏应变都集中在 0.15 到 0.25 之间。根据文献[1]的思想，将每条应力-应变曲线进行归一化处理发现，在 12～62 ℃之间，温度几乎没有改变归一化后应力-应变曲线的形状，图 11 所示为在 12 ℃和 62 ℃温度条件下，应变率在 530～630 s^{-1} 范围内的归一化曲线。因此，可以利用文献[1]中所采用的方法对其本构方程进行拟合。由于本研究重点在讨论温度与应变率对该 PBX 压缩性能的影响，该本构拟合方面的工作在此不进行展开。

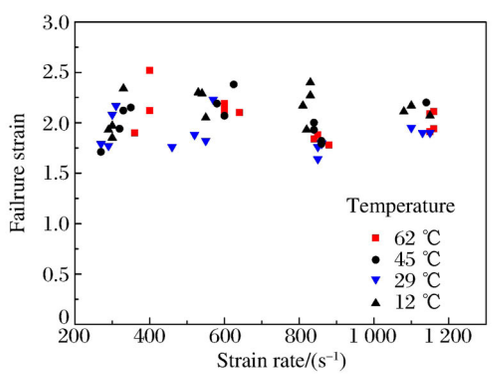


图 10 不同加载条件下的破坏应变分布

Fig. 10 Failure strains under different temperatures and strain rates

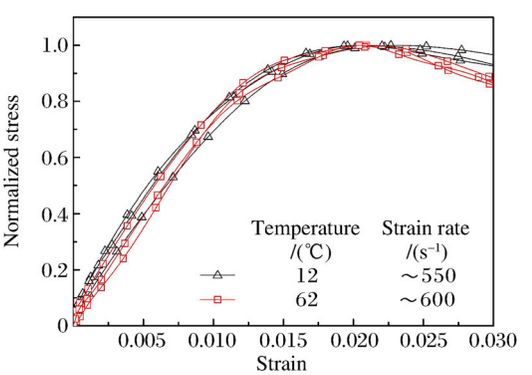


图 11 在两种不同温度下得到的应力归一化后的应力应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves after stress normalized at two temperatures

由于实验中实现的温度范围有限,有必要对(4)式的适用范围进行讨论。Govie 曾经提到,在过去大量的研究中发现,英国的一种 PBX 炸药 EDC37 的力学性能绝大部分决定于其粘结剂的性质[9]。陈荣在常温下通过对与本研究所用相同的含铝 PBX 的压缩强度、脱粘强度和颗粒破坏强度进行比较得出,压缩破坏以界面脱粘模式为主[6]。可以认为,所占比重并不多的高聚物粘结剂在压缩破坏中起到了非常关键的作用。

在高聚物力学领域,根据化学反应中的过渡态理论提出的埃林(Eyring)流动模型为

$$\sigma = \frac{2kT}{V}\arcsin h\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{2v_0}e^{E_0/kT}\right) \tag{5}$$

式中:V 称作 Eyring 体积,E_0 是位垒高度,v_0 表征分子的运动速度。在低温(但高于玻璃转化温度)高应变率下可近似为[15]

$$\sigma \propto \frac{2kT}{V}\left(\lg\frac{\dot{\varepsilon}}{v_0} + \frac{E_0}{kT}\right) \tag{6}$$

做进一步变换,有

$$\sigma \propto \frac{2kT}{V}(\lg\dot{\varepsilon} - \lg v_0) + \frac{2E_0}{V} \tag{7}$$

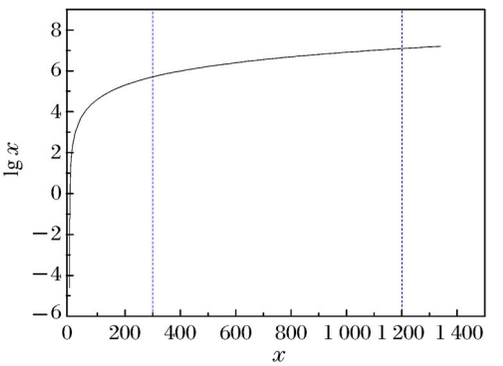


图 12　对数函数曲线

Fig. 12　Logarithm function curve

当 x 在 300～1 200 之间时,函数 $\lg x$ 本身具有相当好的线性关系(如图 12 中两虚线之间的曲线段所示),(7)式与本实验所得到的关系((3)式)是一致的,即强度与应变率(或应变率对数)和温度成线性关系,说明压缩破坏很可能主要发生在炸药颗粒间的粘结剂上。这与文献[6]中提到的破坏模式主要以脱粘为主也是一致的。需要强调的是,Eyring模型是基于高聚物链段运动得出的,当环境温度低于高聚物玻璃转化温度时,由于链段运动被冻结,该模型也就不再适用了。因此,在没有完全确定该 PBX 压缩破坏模式之前,保守地认为(4)式(或(3)式)所描述的应变率与温度效应仅限于在高于粘结剂玻璃转化温度下的动态压缩性能,文献[8-9]里的实验结果也佐证了这一观点。

4　结　论

在分离式霍普金森压杆实验平台上,采用单独加热试样、快速装配的方法,对一种含铝 PBX 炸药在不同温度(12、29、45 和 62 ℃)、不同应变率下(250～1 200 s^{-1})的压缩力学性能进行了测试。实验结果表明,该 PBX 材料具有明显的应变率强化和温度软化效应,并且有较好的线性关系;然而,破坏应变在不同温度和不同应变率下没有明显的变化。根据实验数据,采用双线性函数对压缩强度与温度和应变率之间的关系进行了拟合,并认为此关系式仅适用于温度高于粘结剂玻璃转化温度情况下的动态压缩性能。

References:

[1] Chen R, Lu F Y, Lin Y L, et al. Mechanical behavior and constitutive model of pressed aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(5): 460-463. (in Chinese)
陈　荣,卢芳云,林玉亮,等. 一种含铝炸药压缩力学性能和本构关系研究 [J]. 含能材料,2007,15(5):460-463.

[2] Zhou D, Huang F L, Yao H S. Study on the visco-elastic constitutive model of PBX [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(11): 945-948. (in Chinese)
周　栋,黄风雷,姚惠生. PBX 炸药粘弹性损伤本构关系研究 [J]. 北京理工大学学报,2007,27(11):945-948.

[3] Wu H M, Lu F Y. Research on constitutive relation of a polymer bonded explosive and pressed Comp. B [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(2): 139-144. (in Chinese)
吴会民,卢芳云. 一种高聚物粘结炸药和 B 炸药的本构关系研究 [J]. 高压物理学报,2005,19(2):139-144.

[4] Li M, Zhang J, Li J M, et al. Experimental investigation to the damage location of PBX mechanical failure at meso-cale [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(2): 79-83. (in Chinese)
李　明,张　珏,李敬明,等. 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学实验研究 [J]. 含能材料,2005,13(2):79-83.

[5] Wu H M, Lu F Y, Lu L, et al. Microstructure fractural characteristics of energetic materials under compressive loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3): 213-218. (in Chinese)

吴会民,卢芳云,卢 力,等.压缩加载下三种含能材料细观破坏特征观察 [J].高压物理学报,2005,19(3):213-218.

[6] Chen R. Experimental studies on mechanical properties of a PBX under various dynamic loading conditions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
陈 荣.一种 PBX 炸药试样在复杂应力动态加载下的力学性能实验研究 [D].长沙:国防科学技术大学,2010.

[7] Balzer J E, Siviour C R, Walley S M, et al. Behaviour of ammonium perchlorate-based propellants and a polymer-bonded explosive under impact loading [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2004, 460(2043): 781-806.

[8] Williamson D M, Siviour C R, Proud W G, et al. Temperature-time response of a polymer bonded explosive in compression (EDC37) [J]. J Phys D: Appl Phys, 2008, 41(8): 1-11.

[9] Govier R K, Gray G T, Blumenthal W R. Comparison of the influence of temperature on the high-strain-rate mechanical responses of PBX 9501 and EDC37 [J]. Metall Mater Trans A, 2008, 39(3): 535-538.

[10] Cady C M, Blumenthal W R, Gray G T, et al. Mechanical properties of plastic-bonded explosive binder materials as a function of strain-rate and temperature [J]. Polymer Engineering and Science, 2006, 46(6): 812-819.

[11] Blumenthal W R, Gray G T, Idar D J, et al. Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of PBX 9502 and Kel-F 800 (TM) [C]//Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter-1999. Snowbird, Utah: AIP, 2000: 671-674.

[12] 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 12th International Symposium on Detonation. San Diego, CA: NSWC, 2002.

[13] Wen M P, Pang H Y, Tian Y, et al. Regulations of plane strain fracture toughness of PBX changed with temperatures [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(3): 63-65. (in Chinese)
温茂萍,庞海燕,田 勇,等. PBX 平面应变断裂韧度随温度的变化规律 [J].火炸药学报,2005,28(3):63-65.

[14] Qin J, Lin Y L, Lu F Y, et al. Dynamic compressive properties of a PBX analog as a function of temperature and strain rate [C]//Proulx T. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. New York: Springer, 2011: 141-146.

[15] He P S. Structure and Properties of Polymers [M]. Beijing: Scientifical and Technical Publisher, 2008. (in Chinese)
何平笙.新编高聚物的力学性能 [M].北京:科学技术出版社,2008.

Effects of Strain Rate and Temperature on Compressive Properties of an Aluminized PBX

CHEN Ding-Ding, LU Fang-Yun, LIN Yu-Liang, JIANG Bang-Hai

(*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: Weapons have to face some extremely abominable situations, such as high temperature, high pressure, shock loadings, etc. In such situations, the mechanical properties of the high explosive filled in weapons will decide the level of security of the whole system, making it necessary to get a deep understanding on the mechanical properties of these explosives. In this work, we tested the dynamic compressive properties of an aluminized polymer bonded explosive (PBX) at four temperatures (12, 29, 45 and 62 ℃) by using split Hopkinson pressure bars. Specimens were heated individually before fixed to the bars to get the target temperature. The strain rate was ranged from 250 s^{-1} to 1 200 s^{-1}. The results show the failure compressive stress is strongly dependent on strain rates and temperatures, while the failure strain almost keeps constant. The failure stress increases obviously with the rise of strain rates and the decrease of temperatures. And a double-linear function is used to fit the compressive failure stress-strain rate-temperature relationship. However, this relationship for dynamic compression may become invalid when the temperature is lower than the glass transition temperature.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); temperature; strain rate; split Hopkinson pressure bar; compression