文章编号：1000-5773(2005)02-0139-06

一种高聚物粘结炸药和 B 炸药的本构关系研究*

吴会民[1,2]，卢芳云[1,2]

(1. 国防科技大学理学院，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：利用万能材料试验机对一种高聚物粘结炸药(简称 PBX 炸药)和压装 B 炸药进行了准静态压缩实验，得到了两种炸药在不同应变率下的应力应变曲线。通过两种炸药在不同应变率下力学性能的研究，建立了两种炸药含应变率效应的本构方程。结果表明，建立的本构方程能较好地描述两种炸药在弹性阶段和强化阶段的力学性能。

关键词：PBX 炸药；压装 B 炸药；准静态实验；本构关系
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

材料的本构关系反映了材料在外界因素作用下的力学行为，外界因素包括温度、加载速率等。本质上讲，材料的本构关系应体现材料的微、细观结构的变形规律，但是，由于还没有搞清楚材料微、细观结构的变形机制，目前只能建立各种近似的本构模型来描述材料的变形规律，如基于实验结果的经验型的本构模型，或考虑典型微结构变形的本构模型[1,2]等。

对于炸药，由于材料的特殊性以及其应用的局限性，对其本构关系的研究还很不深入，如何建立合理的本构模型描述炸药在外界因素作用下的变形规律，尚需做很多基础性的研究工作。目前，由于缺乏对炸药在不同应变率下力学性能的实验研究，如何建立近似的或经验型的本构模型来反映应变率对材料力学行为的影响，成为工程应用中迫切需要研究的问题[3]。

准静态载荷下，对于 PBX 炸药，一般采用修正的 Ramberg-osgood 关系来描述其在准静态拉伸及压缩载荷下的应力应变响应[4]。该本构模型唯象地表征了准静态拉伸或压缩载荷下 PBX 炸药应力-应变关系的特征。但是，该模型并没有反映温度和应变率的影响，随着应变率的增加和温度的变化，该模型与实验结果偏差越来越大[5]。为了考虑应变率和温度的影响，一些研究者采用 Johnson-Cook 模型[6]描述炸药的力学行为。韩小平等采用该模型来拟合复合炸药 Comp. B 在 $10^{-4}\sim10^{0}$/s 应变率范围内的实验结果，模型结果与实验结果偏差较大[7]。显然这种模型还不能恰当地描述炸药的力学行为特征。

本研究基于一种 PBX 炸药和压装 Comp. B 炸药在不同应变率压缩下的应力应变曲线实验测试结果，唯象地建立了描述两种炸药在低应变率下力学行为的本构关系。

2 PBX 炸药和压装 B 炸药的力学性能

本研究对 PBX 和压装 Comp. B 两种炸药进行了准静态条件下材料力学性能测试。实验在国防科技大学航天与材料工程学院工程力学实验室完成，材料试验机为青山牌 WDW-100B 微机控制万能材

* **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：材料动态力学性能. E-mail：wuhuimin93@163.com

料试验机。实验所用炸药由江南机器厂提供。PBX 炸药试样的直径为 13.8 mm,长度为 10.7 mm,成份为 97%HMX/3%粘结剂;B 炸药试样的直径为 13.7 mm,长度为 10.3 mm,成份为 60%RDX/40%TNT/1%石蜡。

对两种炸药试样进行了 3 种应变率加载下的压缩实验,得到了两种炸药不同应变率下的应力应变曲线,并进行了重复试验,结果表明实验具有良好的重复性。实验结果如图 1 和图 2 所示。

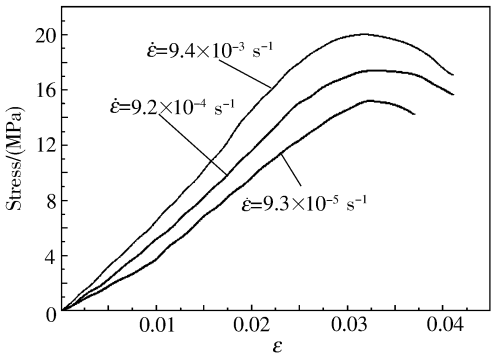


图 1 PBX 炸药应力应变曲线

Fig. 1 Stress strain curves of the PBX explosive

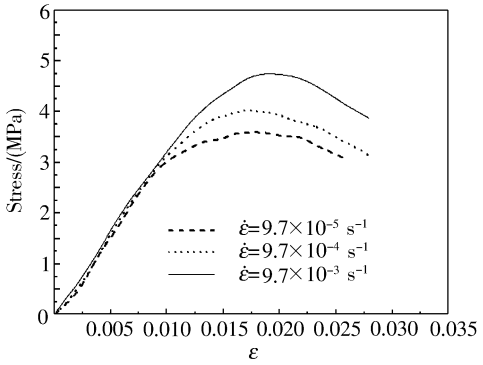


图 2 B 炸药应力应变曲线

Fig. 2 Stress strain curves of Comp. B explosive

从图 1 和图 2 中可以看出两种炸药的应力应变曲线可以分为 3 个阶段:线弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段。可以采用弹性模量、屈服极限、压缩强度、压缩强度所对应的应变(或称为临界应变,破坏应变等)等来描述两种炸药在准静态压缩条件下的力学性能。应力应变曲线上各阶段定义及相应的特征点参见图 3。

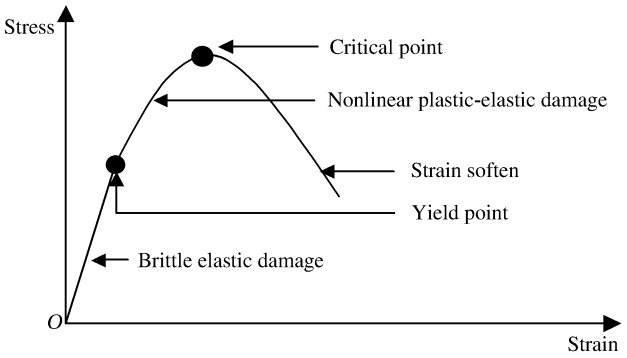


图 3 PBX 炸药和 B 炸药的典型应力应变曲线

Fig. 3 Typical stress strain curve of the PBX and Comp. B

PBX 炸药在低应变率范围内其弹性模量和压缩强度具有应变率效应,其值随应变率的增加而增加;屈服应变和临界应变的应变率效应不明显,其值基本为一常数。屈服应变值约为 0.024,临界应变值约为 0.033。对于压装 B 炸药,在弹性阶段,不同应变率下的应力应变关系基本为一直线且基本重合,表明弹性模量和屈服极限应变率效应不明显。即在准静态压缩条件下弹性模量和屈服应变基本不随应变率的变化而变化,为一常数,弹性模量数值约为 321 MPa,屈服极限应变数值约为 0.011。

表 1 和表 2 给出了不同应变率下 PBX 炸药和压装 B 炸药的力学性能参数。通过这些力学性能参数可以研究两种炸药力学行为的应变率效应。图 4、图 5、图 6 和图 7 分别给出两种炸药力学性能与相对应变率对数的关系,图中 $G=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$。图 4 和图 5 中拟合出的直线方程分别为

弹性模量(单位为 MPa)

$$E=512+50\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$$

压缩强度(单位为 MPa)

$$\sigma=15.1+1.04\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$$

式中 $\dot{\varepsilon}_0=9.3\times10^{-5}\,\mathrm{s}^{-1}$,为参考应变率。

图 6 和图 7 中拟合出的直线方程为

压缩强度(单位为 MPa)

$$\sigma = 3.53 + 0.26\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$$

临界应变

$$\varepsilon = 0.017 + 4.35 \times 10^{-4}\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$$

式中:$\dot{\varepsilon}_0 = 9.7\times10^{-5}\,s^{-1}$,为参考应变率。

表 1　不同应变率下 PBX 炸药的力学性能参数

Table 1　Mechanical properties of the PBX explosive at different strain-rates

$\dot{\varepsilon}$ /(s^{-1})	E /(MPa)	Yield limits /(MPa)	σ /(MPa)
9.3×10^{-5}	496.1±15.9	12.9±0.3	15.2±0.6
9.2×10^{-4}	657.7±14.3	15.1±0.1	17.4±0.8
9.4×10^{-3}	727.2±16.5	16.7±0.5	20.0±0.5

表 2　不同应变率下 B 炸药的力学性能参数

Table 2　Mechanical properties of Comp. B explosive at different strain-rates

$\dot{\varepsilon}$ /(s^{-1})	σ /(MPa)	ε
9.7×10^{-5}	3.57±0.15	0.017±0.000 5
9.7×10^{-4}	4.03±0.12	0.018±0.000 3
9.7×10^{-3}	4.76±0.11	0.019±0.000 2

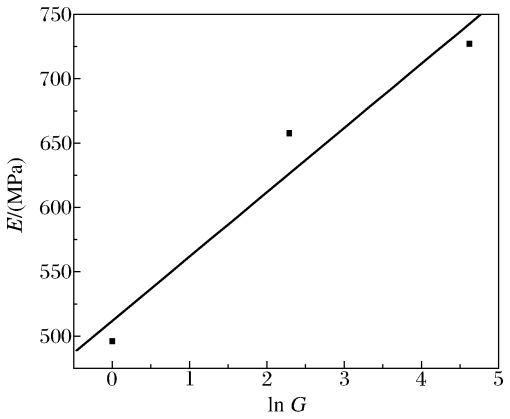


图 4　PBX 炸药弹性模量与相对应变率对数的关系

Fig. 4　Relation between elastic modules and logarithm strain rates for the PBX

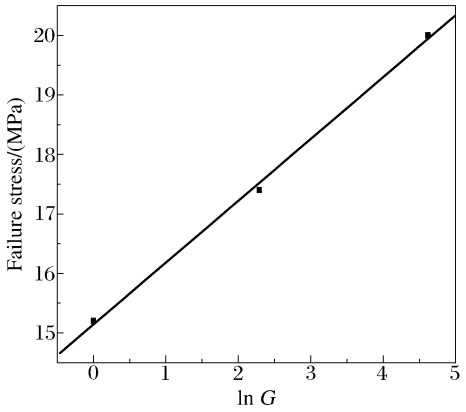


图 5　PBX 炸药压缩强度和相对应变率对数的关系

Fig. 5　Relation between failure stresses and logarithm strain rates for the PBX

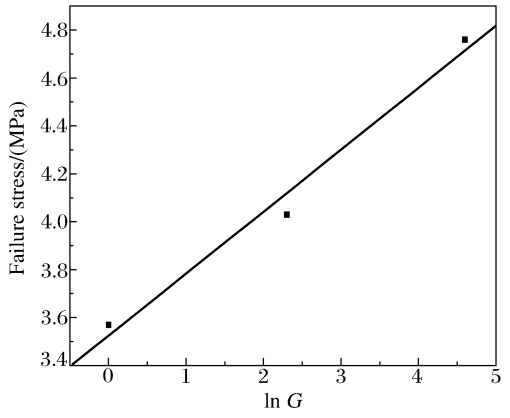


图 6　B 炸药压缩强度与相对应变率对数的关系

Fig. 6　Relation between failure stresses and logarithm strain rates for Comp. B

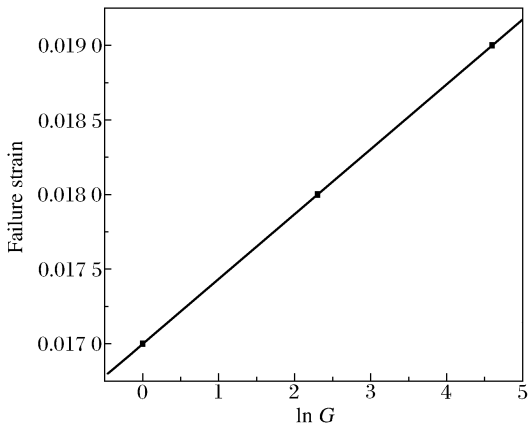


图 7　B 炸药临界应变与相对应变率对数的关系

Fig. 7　Relation between failure strains and logarithm strain rates for Comp. B

根据以上结果,在低应变率范围,两种炸药的力学性能与应变率的相关性具有如下简单关系

$$E = E_0[1 + A\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{1}$$

$$\sigma=\sigma_0[1+B\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{2}$$

$$\varepsilon=\varepsilon_0[1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \tag{3}$$

式中:E、σ 和 ε 分别表示应变率为 $\dot{\varepsilon}$ 时的弹性模量、压缩强度和临界应变;E_0、σ_0 和 ε_0 分别表示参考应变率($\dot{\varepsilon}_0$)下炸药的弹性模量、压缩强度和临界应变;A、B 和 C 为无量纲参数,分别表示炸药的压缩强度、弹性模量和临界应变对应变率的敏感程度,其值如表 3 所示。

表 3 PBX 炸药和 Comp. B 炸药力学性能应变率效应系数

Table 3 Strain-rate effective coefficients on mechanical properties of PBX explosive and Comp. B explosive

Explosives	A	B	C
PBX explosive	0.098	0.069	
Pressed Comp. B explosive		0.074	0.026

3 PBX 炸药和压装 B 炸药的损伤破坏过程分析

PBX 炸药和 B 炸药在加工过程中不可避免地存在空隙以及微裂纹等缺陷,在外界因素下这些缺陷部位将产生高度的应力集中,并逐渐扩展,形成微裂纹。另一方面,PBX 炸药中颗粒和粘结剂的结合界面是薄弱的环节,将脱开形成界面裂隙,并发展成微裂纹。若外界因素继续作用,PBX 炸药和 B 炸药体中的微裂纹将经过汇集、贯通等过程而形成宏观裂缝。同时宏观裂缝的端部又因应力集中而出现新的微裂纹,甚至出现微裂纹区,这又将发展成新的宏观裂缝或体现为原有宏观裂缝的延伸。如此反复交替,宏观裂缝必将沿着最薄弱的路径逐渐扩展,最后使材料完全碎裂。

从图 3 中可以看出,PBX 炸药和 B 炸药应力应变关系初始阶段为线弹性阶段,然后进入非线性强化阶段,到达压缩强度后,材料进入应变软化阶段。PBX 炸药和 B 炸药原始试样中存在初始损伤 D_0,在弹性阶段,这些初始损伤会进一步演化,但是该阶段的损伤演化是可逆的,即卸载后可以恢复,所以在弹性阶段的损伤演化为弹性损伤。从细观机制来看,在该阶段所对应的主要是微裂纹的闭合以及自相似扩张。在强化阶段,损伤的演化发展进入不可逆阶段,主要有微裂纹的摩擦滑移、弯折扩展。

根据以上分析,建立材料的损伤演化方程

$$D=f(D_0,\varepsilon,\dot{\varepsilon}) \tag{4}$$

对于 PBX 炸药,从得到的应力应变曲线图中可以看出,在强化阶段,各应变率条件下的应力应变曲线基本平行,即强化阶段不同应变率下的应力应变曲线形状相同,由对其力学性能应变率效应的分析可知,其损伤的演化基本与应变率无关。基于应力应变关系的非线性考虑,建立其损伤演化方程如下

$$D=D_0\alpha(\varepsilon-\varepsilon_p)^n \tag{5}$$

对于 B 炸药,从得到的应力应变曲线图中可以看出,其损伤与应变率和应变都有关系,建立损伤演化方程如下

$$D=D_0\frac{\alpha(\varepsilon-\varepsilon_p)^n}{1+\beta\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)} \tag{6}$$

(4)式~(6)式中:$D_0=1-\rho_0/\rho$,为试样中的初始损伤,ρ_0 为炸药的初始密度,ρ 为炸药的理论密度,ε_p 为材料的屈服应变。α、β 和 n 为本构方程的参数。

4 PBX 炸药和压装 B 炸药的本构模型建立

4.1 PBX 炸药的本构模型建立

通过对 PBX 炸药低应变率范围的弹性模量的应变率效应的研究,得出结论:PBX 炸药低应变率范围的弹性模量的应变率效应具有半对数关系,即

$$E=[1+A\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)]E_0$$

所以 PBX 炸药弹性范围的本构关系可以采用

$$\sigma=[1+A\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)]E_0\varepsilon$$

进行描述,$\dot{\varepsilon}_0=9.26\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$。

在强化阶段和应变软化阶段范围内,由于材料内部初始损伤演化使得材料的承载能力降低,材料应力应变关系呈现非线性。考虑损伤演化,强化阶段和应变软化阶段的应力应变关系采用

$$\sigma=[1+A\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)](1-D)E_0\varepsilon$$

式中 D 如公式(5)所示。

综上所述,低应变率范围含能材料的本构关系可以采用

$$\begin{aligned}&\sigma=[1+A\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)]E_0\varepsilon && 0<\varepsilon<\varepsilon_{\mathrm{p}}\\&\sigma=[1+A\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)](1-D)E_0\varepsilon && \varepsilon\geqslant\varepsilon_{\mathrm{p}}\end{aligned}\tag{7}$$

进行描述。由 PBX 准静态压缩条件下的力学性能研究得到的结果为:$A=0.098$、$\varepsilon_{\mathrm{p}}=0.024$、$E_0=512$ MPa。

由对 PBX 炸药材料密度测量数据的平均值以及参考手册得到的理论密度数据进行计算,得到 $D_0=0.0503$。采用遗传算法拟合本构关系中的参数得到 $\alpha=1.09\times10^8$、$n=5.16$。

图 8 给出了 PBX 炸药准静态实验的拟合曲线。从图 8 曲线的拟合情况可以看出,所建立的本构模型能较好地描述 PBX 炸药在低应变率条件下的应力应变曲线。随着应变率的增加,在应变软化阶段的误差越来越严重,表明应变软化阶段的损伤演化规律需进一步研究。

4.2　压装 B 炸药的本构模型建立

通过对 B 炸药力学性能的应变率效应进行研究,得到结论:压装 B 炸药的弹性模量不具有应变率效应。当材料进入强化阶段后,材料的应力应变曲线随应变率的变化而不同,说明压装 B 炸药的损伤演化具有应变率效应。

在弹性范围内,采用

$$\sigma=E_0\varepsilon\tag{8}$$

描述材料的力学行为。

在强化阶段和应变软化阶段采用

$$\sigma=\left[1-\frac{D_0\alpha(\varepsilon-\varepsilon_{\mathrm{p}})^n}{1+\beta\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)}\right]\cdot E_0\varepsilon\tag{9}$$

式中:$\dot{\varepsilon}_0=9.7\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$,由 B 炸药在准静态压缩条件下的力学性能研究得到的结论知 $E=321$ MPa、$\varepsilon_{\mathrm{p}}=0.010$,由对 B 炸药材料密度测量数据的平均值以及参考手册得到的理论密度数据进行计算,$D_0=0.0127$。采用遗传算法拟合本构关系中的参数,得到 $\alpha=2.55\times10^7$、$n=3.55$、$\beta=0.026$。

图 9 给出了 B 炸药本构曲线的拟合情况。从图 9 中可以看出给出的 B 炸药本构模型能够较好地描述 B 炸药的弹性阶段和强化阶段。在应变软化阶段还存在一定的误差。这可能是由于在应变软化阶段材料内部损伤的演化规律与强化阶段不同所导致。

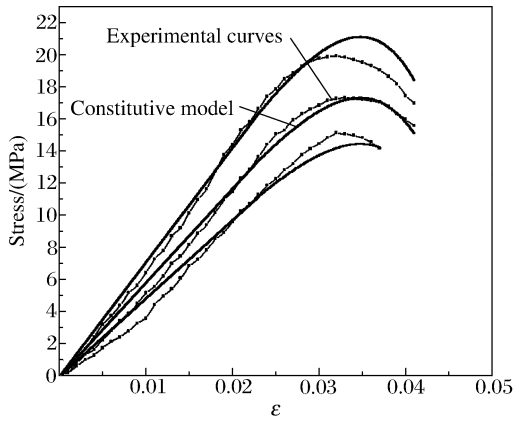


图 8　PBX 炸药准静态实验本构关系的曲线拟合

Fig. 8　Constitutive curves fitted for the PBX's data

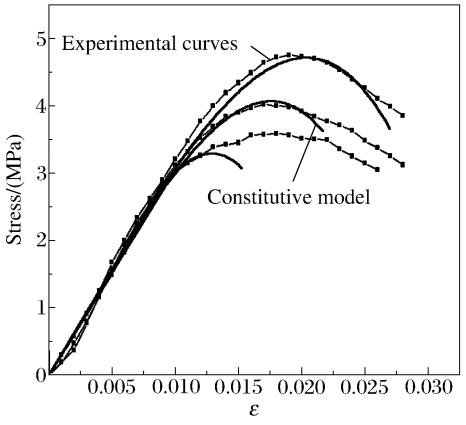


图 9　B 炸药准静态实验本构关系的曲线拟合

Fig. 9　Constitutive curves fitted for Comp. B's data

5 结束语

本研究唯象地建立了两种炸药材料在低应变率范围内的本构模型。所建立的本构模型能较好地描述两种炸药在低应变率条件下弹性阶段和强化阶段的应力应变行为,在应变软化阶段与实验结果相差较大,所以建立的两种炸药的本构模型可以描述两种含能材料在材料破坏前的应力应变行为。

对于含能材料来说,材料内部的应力在达到屈服极限或断裂强度时,材料内部已经累积了不可逆的损伤,这些损伤将可能进一步影响材料的起爆性能或燃烧性能。要建立包含微裂纹尺寸、形状、数量的本构模型,通过这些微裂纹的动态演化研究对炸药起爆的影响,还需要进一步深入细致的工作。从这方面来看,我们所建立的3种含能材料的本构模型还需要进一步深化。

References:

[1] Shi D K, Jin Z H. Mechanical Properties of Material [M]. Xi′an: Xi′an Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese)
石德珂,金志浩. 材料力学性能 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.

[2] Bischoff P H, Perry S H. Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rate [J]. Material and Structure, 1991, 41: 425-450.

[3] 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.

[4] Dong H S, Zhou F F. Performance of High Explosive and Correlates [M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
董海山,周芬芬. 高能炸药及其相关物性 [M]. 北京:科学出版社,1989.

[5] Renganathan K, Rao B N, Jana M K. Failure Assessment on a Strip Biaxial Tension Specimen for a HTPB-Based Propellant Material [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999, 24: 349-352.

[6] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rate and High Temperature [A]. 15th International Symposium on Ballistics [C]. Hague, Netherlands, 1983. 1-7.

[7] Han X P, Zhang Y C, Shen Y P, et al. Study on Dynamic Compressive Behavior and Constitutive Model of Comp. B Explosive [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 3: 303-309. (in Chinese)
韩小平,张元冲,沈亚鹏,等. Comp. B 复合炸药动态压缩力学性能和本构关系的研究 [J]. 实验力学,19963:303-309.

Research on Constitutive Relation of a Polymer Bonded Explosive and Pressed Comp. B

WU Hui-Min[1,2], LU Fang-Yun[1,2]

(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: Compressive behaviors of a polymer bonded explosive (PBX) and pressed Comp. B have been tested by means of a hydraulic material test machine at different strain-rates. Stress-strain curves of the materials at different strain rates have been obtained in this paper. According to the study on the mechanical behaviors of the two kinds of explosives at different strain-rates, the constitutive relations have been derived, which agree well with the experimental data from quasi-static tests during the linear elastic and strain-hardening stages of the stress-strain curves.

Key words: PBX explosive; pressed Comp. B; quasi-static compression experiment; constitutive relation