

文章编号: 1006-9941(2014)02-0215-06

## 以 RDX 为基的浇注 PBX 力学性能与本构模型

唐明峰<sup>1,2</sup>, 蓝林钢<sup>2</sup>, 李明<sup>2</sup>, 温茂萍<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为研究一种黑索今(RDX)基浇注高聚物粘结炸药(PBX)的力学性能与本构模型,利用 INSTRON 材料试验机及改进分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)进行了准静态和动态单轴压缩实验,获得了材料在  $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  及  $843 \sim 1490 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内的应力-应变曲线。结果表明:该浇注 PBX 的变形过程分为线性段、强化段和软化段。准静态加载下该浇注 PBX 具有明显的应变率效应,其弹性模量、压缩强度、临界应变与相对对数应变率之间近似呈线性关系;而在实验应变率范围内,动态加载下特别是加载初期应变率效应不明显,同时发现其破坏准则由应力控制,材料在 12MPa 附近发生破坏。借鉴推进剂及橡胶材料本构关系的研究结果,分别提出了能描述浇注 PBX 一维动、静态压缩力学行为的率相关本构模型,该模型与实验结果误差小于 10% 吻合较好。

**关键词:** 固体力学; 浇注 PBX; 力学性能; 本构关系

**中图分类号:** TJ55; O34

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.018

### 1 引言

浇注高聚物粘结炸药(PBX)具有威力大、安全性和安定性好、抗过载能力强的特点,从 20 世纪 80 年代起,一些西方国家基本上都采用浇注 PBX 作为侵彻战斗部的主装药。在高速冲击下,浇注 PBX 将承受复杂的力学环境,其力学响应会影响战斗部的侵彻安定性和起爆可靠性,基于材料力学性能及响应的研究已成为近年来含能材料的热点。

文献[1]利用 INSTRON 材料试验机对一种以奥克托今(HMX)为基的浇注 PBX 进行了准静态拉伸试验,得到了弹性模量、压缩强度、临界应变、断裂应变与温度及组分含量之间的定量关系。Blumenthal 等<sup>[2]</sup>对一种浇注 PBX 压缩性能与温度及应变率的关系进行了研究,发现该 PBX 呈现低强度、低模量等软材料特征,同时应变率对压缩强度的影响非常明显,而高应变率下只有温度低于 0 °C 时才对温度敏感。Ozgen<sup>[3]</sup>在实验中则观察到了浇注 PBX 的非线性粘弹性行为。本构模型研究方面,Michel 等<sup>[4]</sup>在 -50 ~ 60 °C 下对以端羟基聚丁二烯(HTPB)为粘结剂

的浇注 PBX 进行了准静态拉伸( $5, 50, 500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )和动态压缩实验,以此为基础建立了一种包含 5 个 Maxwell 单元的粘弹性模型,并成功用于 LS-DYNA 数值计算。张子敏等<sup>[5]</sup>对国产浇注传爆药 PBXN-110 进行了冲击加载,发现材料损伤主要表现为炸药颗粒破碎及颗粒与粘结剂的脱粘;该文以“朱-王-唐”模型作为材料本构,能对应力-应变曲线的弹性段进行较好地拟合。然而遗憾的是,这些本构模型并不完全适用于高应变率的情况,弹性段之后,其精度会随应变的增加而降低;或者只适合于准静态的情况。

总之,由于浇注 PBX 材料多样性及含能敏感等特性的影响,目前对浇注 PBX 力学性能的实验与理论研究还比较零散,尤其是材料动态力学性能及实验技术的研究还远不够深入,缺乏对不同系列浇注 PBX 宏观力学性能系统的了解。因为难以直接从理论上预测 PBX 的力学行为,加上实验的不足,致使目前的本构模型缺乏足够的精度,特别是动态加载下模型误差往往随加载的进行而增大。为此,本课题组利用材料试验机及分离式 Hopkinson 压杆分别进行了准静态和动态压缩实验,研究了以黑索今(RDX)为基的浇注 PBX 在不同应变率下的力学性能,同时建立了两种压缩本构模型,结果表明,直至材料破坏模型仍有较高的精度。

### 2 实验

样品制备采用“捏合-真空浇注-固化”的工艺制备

收稿日期: 2013-06-23; 修回日期: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(11372292); 中国工程物理研究院发展基金(2013A0203006); 国防基础科研(B1520132004)

作者简介: 唐明峰(1988-),男,硕士研究生,主要从事炸药等高分子材料的力学性能研究。e-mail: myfengtong@sina.com

通信联系人: 李明(1971-),研究员,博士,主要从事固体力学,晶体力学研究。e-mail: li\_ming@caep.cn

而成<sup>[6]</sup>。PBX的主体为RDX和铝粉, 粘结剂以HTPB为主, 试样密度 $1.71\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。整个实验分为准静态实验和动态实验两部分。

准静态实验在INSTRON 5582型材料试验机上进行。试样加工尺寸 $\Phi 20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ , 实验设计了 $0.12, 0.5, 12\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 三个加载速度, 对应应变率分别为 $1.0\times 10^{-4}, 4.17\times 10^{-4}, 1.0\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。对浇注PBX进行了准静态单轴压缩重复性实验, 结果显示实验具有良好的重复性。

动态实验在分离式Hopkinson压杆(SHPB)上进行(图1)。压杆采用直径20 mm的7075铝杆, 子弹长300 mm, 入射杆长1500 mm, 透射杆长1200 mm。压杆弹性模量71 GPa, 密度 $2.78\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。应变信号用国防科大研制的KD205-1A动态应变仪采集, 存储于Tektronix DPO3014数字示波器。由于浇注PBX属于软材料, 其波阻抗低, 导致透射信号微弱, 为了获得准确有效的实验信号, 采用高精度半导体应变片(放大倍数162倍)提高透射波信号的信噪比。采用波形整形技术, 利用合金铜及橡胶组成的波形整形器对入射波整形, 延长应力加载时间, 使试件在破坏前达到应力平衡, 同时利用该技术实现常应变率加载<sup>[7]</sup>。图2是SHPB实测应变波形图, 可知试件在加载过程中基本处于应力平衡的状态, 而反射波为一平台, 即实现了常应变率加载。样品设计尺寸 $\Phi 12\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ , 置于防爆箱(图1虚线框), 实验应变率分别为 $840, 1160, 1330, 1490\text{ s}^{-1}$ , 同一子弹速度加载下具有较好的重复性。应力、应变由下列公式求出:

$$\sigma(t) = \frac{S_B}{S_S} E \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -(2c_0/L_S) \int_0^t \varepsilon_r(t) d\tau \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon_i(t)$ 、 $\varepsilon_r(t)$ 表示压杆上测得的透射和反射应变脉冲,  $E$ 、 $S_B$ 、 $c_0$ 分别为压杆的杨氏模量(MPa)、截面积( $\text{m}^2$ )及弹性压缩波波速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $L_S$ 、 $S_S$ 分别是试样的长度(m)和截面积( $\text{m}^2$ )。材料的应力-应变曲线由式(1)和式(2)联合给出。

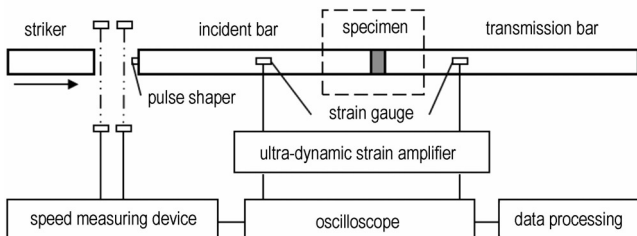


图1 分离式Hopkinson压杆示意图

Fig.1 Schematic illustration of a SHPB setup

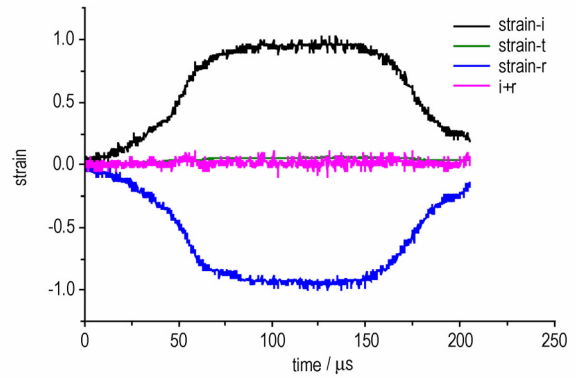


图2 实测应变波形

Fig.2 Strain-time signals from SHPB experiments

### 3 浇注PBX的力学性能

#### 3.1 准静态加载下的力学性能

3种低应变率下的实验结果如图3所示。由图3可看出, 在准静态压缩下, 浇注PBX的应力-应变曲线由3个阶段组成: 一个很小的线性段、强化阶段及应变软化阶段。曲线整体上表现出强烈的非线性, 这是由高聚物粘结剂的非线性造成的。采用弹性模量 $E$ 、压缩强度 $\sigma_m$ 、临界应变 $\varepsilon_m$ 来描述浇注PBX在准静态压缩下的力学性能。弹性模量 $E$ 由最大载荷5%~20%对应的应力-应变曲线段确定<sup>[8]</sup>,  $\sigma_m$ 、 $\varepsilon_m$ 由应力-应变曲线上应力最大值对应的应力和应变确定。表1给出了3个不同应变率下浇注PBX力学性能参数的值。结果表明, 浇注PBX对加载速率很敏感, 当应变率从 $10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 增加到 $10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 时,  $E$ 、 $\sigma_m$ 、 $\varepsilon_m$ 值分别提高了60%、62%及26%, 表明3个力学性能参数均具有应变率效应, 其值随应变率的增加而增大。进一步分析显示, 这些参数与对数相对应变率之间具有线性关系, 可借此对应变率效应进行量化描述。取参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ , 并令 $\eta = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ , 则拟合得到弹性模量 $E = 106.59(1 + 0.13067\ln\eta)$ , 压缩强度 $\sigma_m = 3.1582(1 + 0.13846\ln\eta)$ , 临界应变 $\varepsilon_m = 1.0408(1 + 0.057203\ln\eta)$ 。根据表1拟合出曲线如图4所示。

表1 不同应变率下浇注PBX的力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of cast PBX at different strain rates

strain rate/ $\text{s}^{-1}$	$E/\text{MPa}$	$\sigma_m/\text{MPa}$	$\varepsilon_m$
$1.00\times 10^{-4}$	106.3	3.207	0.1050
$4.17\times 10^{-4}$	126.9	3.712	0.1113
$1.00\times 10^{-2}$	170.6	5.194	0.1319

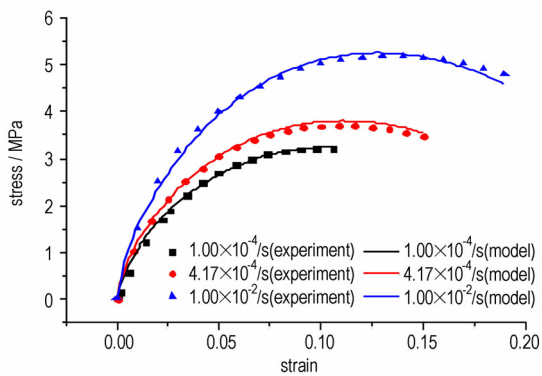


图3  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  低应变率下的应力-应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curves at strain rates of  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

### 3.2 动态加载下的力学性能

图5是高应变率下的实验结果,冲击压缩下浇注PBX的变形仍由3个阶段组成:弹性段、强化段及应变软化段。弹性段主要反映了粘结剂的弹性以及炸药晶粒与粘结剂界面的强度特性,强化段主要反映了炸药内部微结构被压实的过程,软化段主要反映了晶粒破碎、宏观裂纹发展的过程。在实验所取应变率范围内,弹性段各应力应变曲线重合在一起,应变率效应微

弱,直到进入强化段,且变形进入强化段时的应变(可称为转折应变)基本保持不变,也与应变率无关。这是由于炸药颗粒被粘结剂完全包覆,与内部气泡、孔穴等可视为细小的弹性单元,是冲击开始时的主要承力结构,而炸药晶粒基本没有破坏,直至脱粘。值得说明的是,实验所取4个应变率基本处于同一数量级,也在一定程度上导致了曲线初始段差别不大。可见在此应变率范围内,浇注PBX的临界应变随应变率的增加而增大,但没有明显的规律(如图6所示);而压缩强度随应变率变化不大,其值为一常数,这可能说明动态加载下浇注PBX的破坏准则由最大应力控制,由图5可知该阈值约为12 MPa。

与压装PBX相比,浇注PBX含有大量的惰性粘结剂,这赋予了浇注PBX优异的弹性体力学性能,受力后能发生较大的变形。回收试样显示,样品在冲击下变软,没有发生明显的破碎,外形仍然近似为圆柱状,在  $1490 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时才能观察到较明显的宏观裂纹(图7)。这是由于炸药内部广泛存在的粘结剂吸收和储存了撞击产生的能量,使PBX中炸药颗粒承受的外界作用力大幅降低,从而形成浇注PBX较强的抗过载能力。

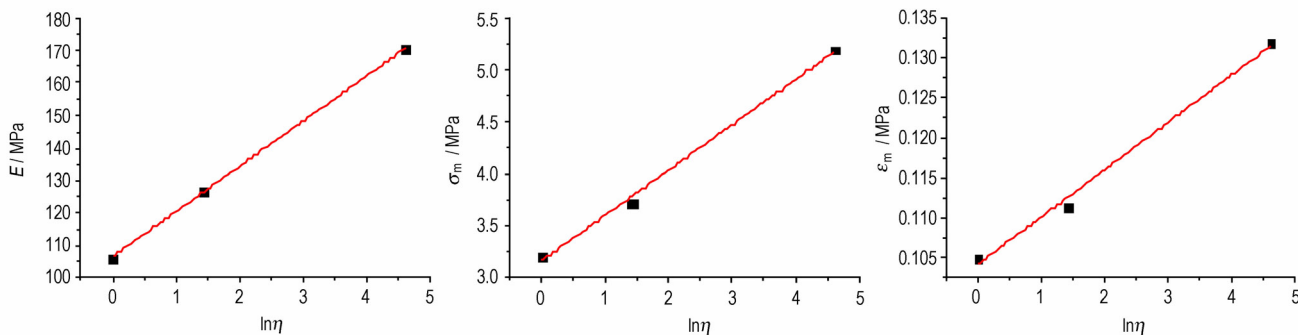


图4 低应变率下 ( $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) 的压缩力学性能  
Fig.4 Mechanical properties of the PBX at strain rates of  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

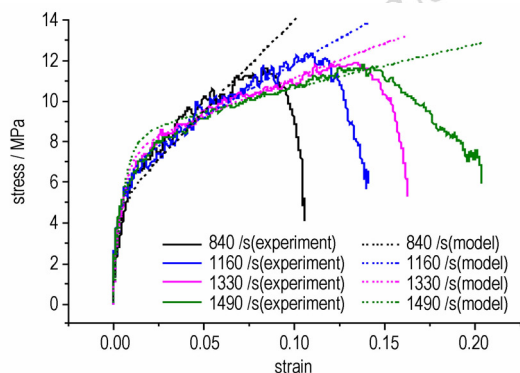


图5 动态加载下的应力-应变曲线  
Fig.5 Stress-strain curves from SHPB experiments

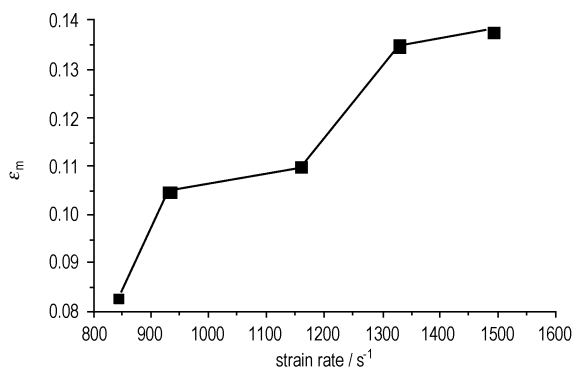


图6 动态加载下临界应变与应变率的关系  
Fig.6 Relationship of failure strain and strain rate for the PBX

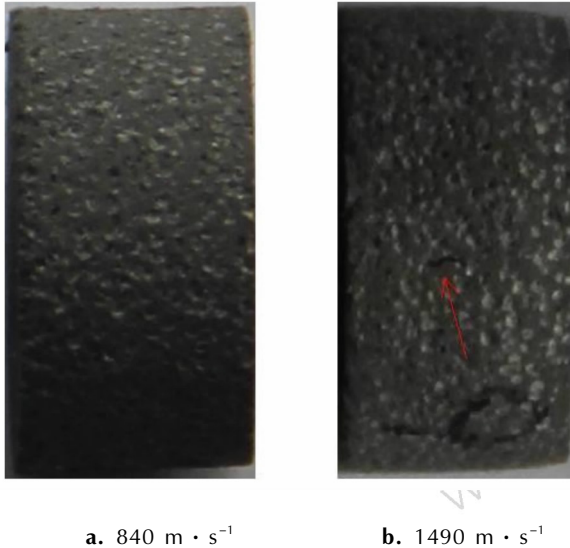


图7 不同撞击速度下回收的浇注 PBX 样品

Fig.7 Cast PBX samples recovered at different impact velocities

以上分析表明,浇注 PBX 不仅具有与普通 PBX 不同的力学性能,其在准静态和动态加载下的力学响应也具有较大差异。全面评价浇注 PBX 力学行为离不开对材料微观破坏模式更详细的探讨,这项工作本课题组将结合其抗过载能力另文详述。

## 4 本构模型

### 4.1 准静态本构模型

该浇注 PBX 中含有大量的粘结剂,材料结构复杂,应力-应变曲线有较强的非线性特征,从图 2 可见,加载开始后很快表现出非线性,亦没有明显的屈服行

表 2 准静态模型结果与实验结果对比

Table 2 Comparison of quasi-static experiment and model

strain rate/s <sup>-1</sup>	compressive strength/MPa			failure strain		
	experimental	model	error/%	experimental	model	error/%
1.00×10 <sup>-4</sup>	3.207	3.241	1.067	0.1050	0.1048	-0.1950
4.17×10 <sup>-4</sup>	3.712	3.809	2.610	0.1113	0.1109	-0.3061
1.00×10 <sup>-2</sup>	5.194	5.265	1.375	0.1319	0.1276	-3.255

### 4.2 动态本构模型

高速冲击下,观察到浇注 PBX 具有与准静态条件下完全不同的变形行为。目前,很难在高应变率下兼顾大变形、粘弹性等诸多因数的影响,多数针对浇注 PBX 本构模型的研究仅从粘弹性出发,从而难以准确描述大应变时的力学行为。提高浇注 PBX 在大变形条件下的模型精度是目前面临的一个重要问题。可以

为。目前,力学工作者和材料学工作者并没有很好地从物理本质上建立浇注 PBX 的本构模型。因此,我们转而考虑具有相似力学性能且研究较为成熟的材料,如固体推进剂。吴会民等<sup>[9]</sup>研究复合固体推进剂(CSP)时,提出了一种改进的幂指数硬化模型,较好地描述了该材料力学行为的非线性及应变率效应。借鉴这种思想,建立如下唯象型本构模型:

$$\sigma = (1 - D \cdot k \varepsilon) (1 + C \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)) E_0 \varepsilon^n \quad (3)$$

$$D = D_0 (1 + \gamma \ln(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)) \quad (4)$$

式(3)中第一项表示材料损伤演化引起的抗压能力的弱化效应,第二项表示应变率增强效应,第三项是对材料非线性应力-应变关系的幂指数描述。变量  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分别为应力、应变,  $D$  表示损伤,  $k$  为损伤与应变之间的相关因子,材料常数  $E_0$ 、 $n$  表征材料的非线性力学行为,  $C$  为非线性行为的应变率效应系数,  $D_0$  表示初始损伤,  $\gamma$  为损伤的应变率效应系数。其中  $\sigma$ 、 $E_0$  的单位为 MPa, 其余为无量纲参数,取参考应变率  $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。采用 origin 软件拟合模型中的参数,首先利用参考应变率下的数据拟合得到  $k$ 、 $E_0$ 、 $n$ ,再利用另一曲线可拟合得到  $C$ 、 $\gamma$ ,初始损伤通过理论密度与实际密度之比计算。最后得到  $D_0 = 0.024441$ ,  $k = 158.2314$ ,  $\gamma = -0.038852$ ,  $C = 0.091324$ ,  $E_0 = 25.336 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.68126$ 。

图 3 给出了准静态压缩下本构模型的拟合情况。经拟合曲线计算得到的压缩强度、临界应变与实际测量值的对比如表 2,可见该模型能较好的描述浇注 PBX 在低应变率下的变形行为。

参考橡胶类材料在这方面的研究成果。Bo Song 等<sup>[10]</sup>提出了一个橡胶材料受单轴冲击压缩的本构模型,该模型由两个部分组成,分别表征橡胶材料的非线性大变形和粘弹性的影响;王宝珍等<sup>[11]</sup>对这种模型作了进一步改进,成功引入了温度项。这里我们采用类似的处理办法,将 Neo-Hookean 超弹模型<sup>[12]</sup>和粘弹性模型加和,在常应变率加载的条件下,得到如下的

混合型本构模型:

$$\sigma = C_{10}(\lambda - 1/\lambda^2) + E_1 \theta_1 \dot{\varepsilon} (1 - \exp(-\frac{\varepsilon}{\theta_1 \dot{\varepsilon}})) \quad (5)$$

$$C_{10} = \alpha + \beta \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) \quad (6)$$

(5)式第一项表示浇注 PBX 在冲击压缩下的非线性大变形行为,伸长率  $\lambda = 1 + \varepsilon$ ; 第二项表示粘弹性行为。变量  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分别为应力、应变,  $E_1$  为弹性常数,  $\theta_1$  为松弛时间,  $\alpha$ 、 $\beta$  表示材料超弹行为的应变率效应。其中  $\sigma$ 、 $E_1$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  单位 MPa,  $\theta_1$  单位 us, 取参考应变率  $\dot{\varepsilon}_0 = 843 \text{ s}^{-1}$ 。用 Origin 软件拟合模型中的参数,首先利用参考应变率下的数据拟合得到  $\alpha$ 、 $E_1$ 、 $\theta_1$ , 然后用另一组应变率数据拟合得到  $\beta$ , 其值分别为  $\alpha = 34.242 \text{ MPa}$ ,  $\beta = -43.795 \text{ MPa}$ ,  $E_1 = 1518.6 \text{ MPa}$ ,  $\theta_1 = 3.5866 \text{ us}$ 。

图 5 给出了单轴冲击压缩下本构模型的拟合情况。在不考虑材料分散性和实验偶然误差的情况下,我们取该浇注 PBX 的压缩强度为 12 MPa, 由此经由模型计算得到的临界应变与实际测量值之间的对比如表 3, 可见模型直到试件破坏时仍能较好地描述材料的本构行为,并不存在现有模型的拟合精度随加载的进行而降低的情况<sup>[5]</sup>, 即本研究提出的模型适用于该材料动态加载下的整个变形过程,说明(5)式用于浇注 PBX 在高应变率下的力学响应时具有较高的精度。

表 3 动态模型结果与实验对比

Table 3 Comparison of failure strain on experiment and dynamic model

strain rate/s <sup>-1</sup>	failure strain		
	experimental	model	error/%
840	0.0777	0.08445	8.028
1160	0.1026	0.1097	6.436
1330	0.1243	0.1343	7.444
1490	0.1577	0.1435	-9.933

## 5 结论

(1) 浇注 PBX 的力学响应具有明显的应变率效应,准静态压缩下其弹性模量、压缩强度、临界应变与相对对数应变率之间有线形关系。

(2) 动态加载初期材料应变率效应微弱,随后变得明显;临界应变随应变率增大而增大,而压缩强度基本保持不变,这表明其破坏准则可能由应力控制。

(3) 针对准静态和动态实验数据分别建立了两种

唯象本构模型,与实验结果吻合较好,能在较高精度下描述浇注 PBX 在准静态及动态压缩下直至破坏的整个变形过程。

## 参考文献:

- [1] Gordana A, Vesna R, Zoran B. Influence of content and dispersion of octogene and oxidizer on the mechanical properties of cast aluminized PBX [J]. *Scientific Technical Review*, 2008, 7 (2): 51-59.
- [2] Blumenthal W R, Thompson D G, Cady C M, 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. Washington, DC: Office of Naval Research, 2002: 530-549.
- [3] Ozgen U C. Mechanical behavior PBXW-128 and PBXN-110 under uniaxial and multiaxial compression at different strain rates and temperatures [J]. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2004; 28, 55-65.
- [4] Michel Q, Patrick R, Philippe C. Constitutive models for PBX at high strain rate [C] // AIP Conference Proceedings. Snowbird, Utah: American Institute of Physics, 2000: 687-689.
- [5] 张子敏, 仲凯, 许碧英, 等. 浇注型 PBX 炸药的动态力学性能研究 [J]. *火工品*, 2010 (6): 30-33. ZHANG Zi-min, ZHONG Kai, XU Bi-ying, et al. Study on dynamic mechanic performance of cast PBX explosive [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010, 6: 30-33.
- [6] 黄辉, 董海山. 一种对撞击不敏感的新型炸药 [J]. *含能材料*, 2002, 10(2): 74-77. HUANG Hui, DONG Hai-shan. Studies on new explosives insensitive to impact [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(2): 74-77.
- [7] Nie X, Song B, Ge Y, et al. Dynamic tensile testing of soft materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49: 451-458.
- [8] 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.
- [9] 吴会民. 几种含能材料本构关系研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2003. WU Hui-min. Researches on the constitutive behavior of three kinds of energetic materials [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2003.
- [10] Song B, Chen W N, Ming C. Novel model of uniaxial strain rate dependent stress-strain behavior of ethylene-propylene-diene monomer rubber in compression or tension [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 92(3): 1553-1558.
- [11] 王宝珍, 胡时胜, 周相荣. 不同温度下橡胶的动态力学性能及本构模型研究 [J]. *实验力学*, 2007, 22(1): 1-6. WANG Bao-zhen, HU Shi-sheng, ZHOU Xiang-rong. Research of dynamic mechanical behavior and constitutive model of rubber under different temperatures [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(1): 1-6.
- [12] Jung S P, Park T W, Chung W S. Dynamic analysis of rubber-like material using absolute nodal coordinate formulation based on the non-linear constitutive law [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2011, 63: 149-157.

## Mechanical Properties and Constitutive Models of RDX Based Cast PBX

TANG Ming-feng<sup>1,2</sup>, LAN Lin-gang<sup>2</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, WEN Mao-ping<sup>2</sup>

(1. Graduate School, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Stress-strain curves of a RDX Based cast PBX were obtained using an INSTRON testing machine and an optimized Split Hopkinson pressure bar (SHPB) at different strain rates ( $10^{-4} \sim 10^{-2}$  /s and  $843^2 \sim 1490^2$  /s). Results show that mechanical properties of the material including elastic modulus, compressive strength, and strain at maximum stress, increase linearly with strain rate in quasi-static tests. With in small dynamic strain rate range, weak rate dependence is observed in SHPB tests, especially at the initial loading stage. The dynamic failure criterion were controlled by stress, and materials failure occurs at 12MPa. Based on rate-dependent phenomenological material models of solid propellants and rubber materials, one-dimension constitutive equations for quasi-static and dynamic compression are presented, showing a good agreement with experimental data with error less than 10%.

**Key words:** solid mechanics; cast PBX; mechanical properties; constitutive models

**CLC number:** TJ55; O34

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.018



## 火工烟火技术及相关技术创新学术研讨会征文通知

为促进我国火工烟火行业的创新发展,紧跟国内外火工烟火前沿技术和相关技术的技术创新,加强科技人员间的学术交流与信息沟通,提高研究水平,经研究决定,暂定于2014年三季度召开中国兵工学会火工烟火专业火工烟火技术及相关技术创新学术研讨会。现将会议征文的有关事项通知如下:

### 一、征文内容

(1) 国内外火工品及相关药剂、烟火剂的基础理论创新,关键技术创新;(2) 国内外爆破器材、烟火器材的发展趋势和技术创新;(3) 国内外火工品及相关药剂工艺、材料、测试的技术创新;(4) 火工品安全性、可靠性评估方法和理论的技术创新;(5) 火工品及相关药剂测试分析、仪器设备的技术创新;(6) 国内外热电池、锂电池等化学电源设计、工艺、材料、测试的技术创新;(7) 国内外汽车安全气囊设计、工艺、材料、测试的技术创新;(8) 国内外火工品标准化、爆破器材标准化的现状和发展趋势;(9) 火工品的数字化设计与仿真、工艺与制造、试验与测试、协同与管理;(10) 火工烟火技术、爆破器材技术、化学电源技术、汽车安全气囊技术十三·五发展趋势。

### 二、稿件要求

(1) 论文内容反映的研究成果具有较高的理论水平或应用价值;(2) 论文未在国内外正式出版物上发表过;(3) 作者提交的论文必须通过所在单位的保密审查,文责自负,论文内容不得涉密;(4) 论文请按如下顺序排列:题目,作者名,单位名,所在地,邮编,中文摘要,中文关键词,正文,参考文献,作者简介;(5) 论文格式按照科技论文标准规范,要求用 Word 2003 以上版本软件排版。

### 三、征文截至时间 2014年6月20日

学术研讨会召开的具体时间、地点另行通知。优秀论文可推荐到《火工品》期刊。

### 四、投稿采用电子邮件方式 hgxx2005@163.com

### 五、联系方式 联系地址:西安市99号信箱兵工学会,710061

联系人:王建华

电话:029-85333477