

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0398

## PBX-1 炸药的力学性能和本构关系\*

孙文旭<sup>1,2,3</sup>, 罗智恒<sup>2,3</sup>, 唐明峰<sup>2</sup>, 李 明<sup>2</sup>, 刘 彤<sup>3,4</sup>, 章定国<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 中国工程物理研究院研究生院, 四川 绵阳 621999;

4. 中国工程物理研究院成都科学技术发展中心, 四川 成都 610200)

**摘要:** PBX 的力学行为对其安全性有重要影响。为研究 PBX-1 的力学性能, 以 PBX-1 为研究对象, 进行准静态力学实验和 SHPB(分离式霍普金森压杆)实验研究。结果表明, 准静态压缩实验中, 试样的裂纹出现在与加载方向大约成 45° 的最大剪应力方向。SHPB 实验中, 在应变率 100~1 500 s<sup>-1</sup> 范围内, 随着应变率的提高, PBX-1 炸药的动态屈服强度、动态压缩强度和破坏应变不断提高。动态屈服强度逐渐从静态的 2.77 MPa 增加至 16.1 MPa; 压缩强度从 7.46 MPa 增加至 16.1 MPa, 破坏应变从 6.23% 增加到 26.4%。同时, 基于 Z-W-T 模型, 建立了一种含损伤的动态黏弹性本构模型, 在 330~1 500 s<sup>-1</sup> 应变率范围内具有较高的精度, 可以较好地描述 PBX-1 炸药在达到破坏前的动态力学行为。

**关键词:** PBX-1 炸药; 动态力学行为; 损伤; Z-W-T 模型

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

塑性粘结炸药 (polymer-bonded explosive, PBX) 是一种以高能炸药为主体, 添加了黏结剂、增塑剂和降感剂等辅助材料制成的高能钝感的混合炸药。与 TNT 相比, PBX 炸药具有能量高、感度低、强度高等优点。PBX 炸药作为一种高颗粒填充度的复合材料, 在外部载荷作用下, 会发生结构的微细观损伤变化<sup>[1-4]</sup>。这些损伤一方面使炸药力学性能劣化, 降低其物理性能; 另一方面, 在动载下或冲击载荷作用下, 产生的微细观损伤加剧了“热点”的形成, 进而影响炸药的感度、燃烧和爆炸性质。因此, 开展 PBX 炸药的动态力学性能研究, 有利于分析复杂环境中炸药材料力学性能的演化规律, 对评估和提高炸药的安全性能具有重要理论和实践意义。

PBX 炸药在高应变率动态加载下的非线性、黏弹性、大变形特征等均有重要影响。但研究者在建立 PBX 的本构模型时, 一般仅考虑材料的非线性, 少数关注到其黏弹性效应, 更少考虑材料在动态加载后的损伤。目前关于黏弹性效应及大变形力学行为已经分别在高分子材料、推进剂及橡胶类材料有了相对较为成熟的研究。Song 等<sup>[5]</sup> 在进行 EPDM 橡胶材料的单轴冲击压缩实验时, 发现材料在高应变率下具有较为明显的黏弹性效应, 仅仅选择单一的橡胶超弹模型无法精确描述 EPDM 在冲击下的力学行为, 这种差别在变形较小的时候尤为明显。为此, 他们将橡胶超弹模型和黏弹性模型结合, 并将得到的混合模型用于准静态及冲击力学行为描述。王宝珍等<sup>[6]</sup> 也采取了相似的办法, 将 Mooney 超弹模型和黏弹性模型结合, 亦能较好的描述 CR 橡胶在不同温度 (-20~50 °C) 和应变率 (5×10<sup>-3</sup>~3×10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) 下的力学性能。此类模型难以同时表示出准静态和冲击载荷下的力学特性, 并且难以描述高应变率下的力学行为<sup>[7]</sup>。朱兆祥、王礼立和唐志平等以有限黏弹性本构方程为基础, 从 Green-Rivlin 本构理论出发, 提出了一个适用于热塑性和热固性材料用的“朱-王-唐”本构模型 (简称为 Z-W-T 模型) 来描述高分子材料的非线性黏弹性行为<sup>[8-10]</sup>。以上提及的 Mooney 模型等, 不能描述高应变率下的损伤行为; ZWT 模型可较

\* 收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2018-12-03

第一作者: 孙文旭 (1986—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 664729892@qq.com;

通信作者: 刘 彤 (1964—), 男, 研究员, Tliu@swust.edu.cn。

好地表征 PBX 炸药的基本力学性能,但不能描述损伤,因此,需要进行 ZWT 模型的改进,增加损伤行为的描述。

为研究 PBX-1 的压缩力学性能和本构关系,本文以一种新型抗过载浇铸 PBX 炸药为研究对象,分别进行准静态力学实验和 SHPB(分离式霍普金森压杆)实验研究,对比不同加载条件下 PBX-1 的响应情况,利用 Z-W-T 模型,建立含损伤的非线性黏弹性本构模型,并与动态力学性能测试结果分析对比,建立高应变率下的 PBX-1 本构关系,为描述 PBX 炸药的力学行为提供参考。

## 1 PBX-1 炸药力学实验

### 1.1 准静态力学实验

PBX-1 炸药主要组成为:奥克托今(HMX)、铝粉(Al)、高氯酸铵(AP)、端羟基聚丁二烯(HTPB)等,浇铸成型。按照 GJB 772A/1997 标准相关测试要求,进行 PBX-1 炸药的准静态力学实验测试。采用  $\varnothing 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的圆柱型炸药试样,在室温  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 55% 和加载速度  $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (对应应变率为  $4.17 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ ) 情况下进行了准静态压缩实验。图 1 为准静态压缩实验中试样表面裂纹形貌图。裂纹出现在与加载方向大约成  $45^{\circ}$  的最大剪应力方向,试样的宏观破坏形式为劈裂。



图 1 PBX-1 炸药的宏观裂纹形貌

Fig. 1 Macro crack feature of PBX-1

为了研究炸药晶体与黏结剂等在外界压力作用下的响应,采用型号为 KYKY-2800B 的扫描电子显微镜,对准静态试验中 PBX-1 炸药试样断面形貌进行观测,扫描结果如图 2 所示。图 2(a) 展示了炸药内部广泛存在的微小空洞等初始缺陷。图 2(b) 和图 2(c) 展示了在断面上炸药晶体与黏结剂之间的互相分离以及黏结剂的断裂。由于局部温度分布和炸药晶体与黏结剂两者亲疏性差异,炸药晶体很难被黏结

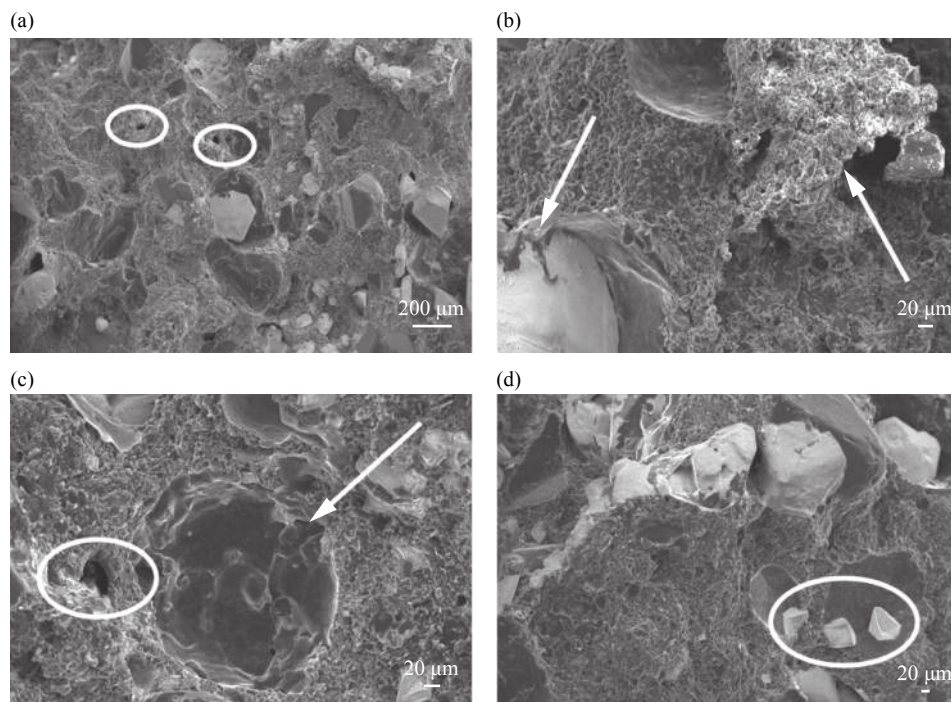


图 2 PBX-1 炸药的典型细观形貌

Fig. 2 Typical meso-scale features of PBX-1

剂均匀包覆。在挤压作用下, 晶体与黏结剂之间的粘聚力将存在一定差别, 使得断面上的晶体部分发生挤压破碎, 而粘聚力强的晶体则仍然与黏结剂保持在一起, 如图 2(d) 所示。在准静态测试加载条件下, PBX-1 炸药的细观破坏模式主要为炸药晶体与黏结剂的分离以及黏结剂的断裂。

## 1.2 SHPB 实验

采用分离式霍普金森压杆 (split-Hopkinson pressure bar, SHPB) 进行 PBX-1 炸药的动态力学性能测试。SHPB 是动态力学测试手段中应用最为广泛的技术之一。由于炸药材料的低波阻抗特性和低强度, 传统的 SHPB 将很难获得清晰的应力-应变信号。因此, 本文采用波阻抗较低的高强合金铝作为杆材料, 并采用铜、黄铜等材料作为波形整形器的材料。试验中, 通过在入射杆撞击端中心位置粘贴单个或组合的波形整形器, 使子弹在加载过程中先撞击波形整形器。通过整形器产生的塑性变形等将应力脉冲进行整形, 然后再撞击入射杆, 最终传至入射杆中是经过滤波整形的波形。为了抑制入射杆和投射杆端面与试件之间的摩擦影响, 在界面上涂覆了以二硫化钼为主要成分的降低摩擦的材料。

采用的试件尺寸是  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 密度为  $1.86 \text{ g/cm}^3$ , 加载速度范围为:  $1.7 \sim 10.4 \text{ m/s}$ 。利用高速 CCD 相机记录了试样在冲击过程中的变形状态。图 3 分别为加载速度是  $3.4$  和  $10.4 \text{ m/s}$  条件下的试样破坏情况。可以看出, 试样经过冲击加载后, 没有发生粉碎性破坏, 在  $10.4 \text{ m/s}$  弹速加载后仍然保持较好的完整性, 加载后的试样均保持了较好的圆柱状, 没有明显的鼓起, 这说明端面摩擦得到了较好的抑制。PBX 炸药内的高聚物粘结剂具有较好的吸能和缓冲效果, 且由于高聚物的粘弹性特性及其组成的高聚物基体, 炸药内部广泛存在的粘结剂将吸收和储存了撞击产生的能量, 使 PBX 炸药中炸药颗粒承受的外界作用力降低, 因而具有较好的韧性和承载能力, 出现裂纹后仍然具有一定的结构强度, 使得 PBX 炸药在冲击作用下承受冲击加载的能力提高。

图 4 为 PBX-1 炸药从  $100 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内的应力-应变曲线, 其中, 应变率为  $100 \text{ s}^{-1}$  时, 没有达到材料的破坏强度。作为对比, 图 4 还给出了 PBX-1 的准静态压缩曲线。随着应变率的提高, PBX-1 炸药的动态屈服强度不断提高, 逐渐从准静态的  $2.77 \text{ MPa}$  提高到  $1500 \text{ s}^{-1}$  冲击加载下的  $16.1 \text{ MPa}$ , 说明 PBX-1 炸药具有明显的应变率效应。但与准静态加载不同, 变形初期各应力-应变曲线基本重合在一起, 应变率效应较弱, 其斜率约为  $270 \text{ MPa}$ 。该阶段体现了粘结剂的弹性以及炸药晶粒与粘结剂界面的强度特性, 在发生界面脱粘及炸药晶粒破碎之前, PBX-1 炸药可看成一个均匀的弹性结构。继续加载后, 炸药晶粒/粘结剂界面、内部气泡与孔穴等弱结构开始破坏, 加载速度不同, 材料内部裂纹等的发展速度也不同, 因此曲线逐渐分离。从数值上看, 材料具有较高的动态压缩强度和破坏应变, 说明 PBX-1 炸药具有较强韧性和抗冲击破坏能力。

图 5 为 PBX-1 炸药的强度和失效应变随应变率变化关系曲线。随着加载速率的增加, PBX-1 的动

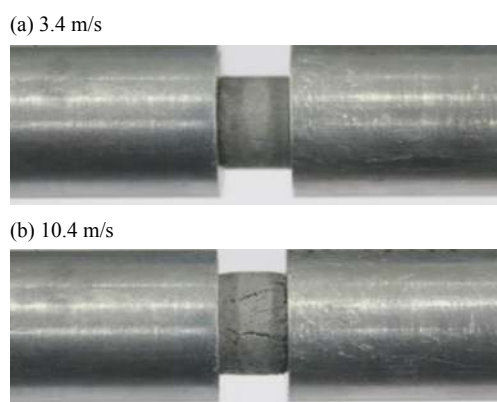


图 3 不同速度加载后的试样破坏状态

Fig. 3 Damage status under various velocity loading

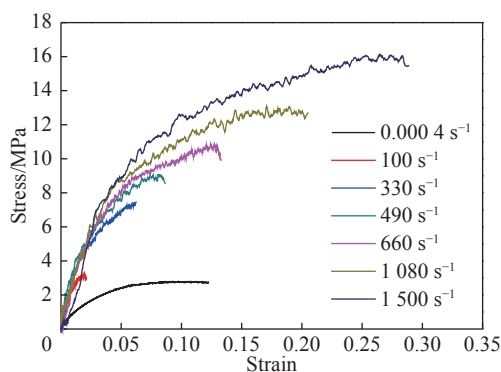


图 4 PBX-1 炸药不同应变率下的应力 ( $\sigma$ )-应变 ( $\epsilon$ ) 曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship of PBX-1 under various strain ( $\sigma$ )-rates ( $\epsilon$ )

态压缩强度和破坏应变均随之增加, 应变率从  $330 \text{ s}^{-1}$  增加到  $1\,500 \text{ s}^{-1}$  时, 压缩强度从  $7.46 \text{ MPa}$  增加至  $16.1 \text{ MPa}$  (准静态压缩强度  $2.77 \text{ MPa}$ ), 破坏应变从  $6.23\%$  增加到  $26.4\%$ 。因此, 随着加载速度的提高, PBX-1 炸药的动态屈服与失效应变均不断提高。

## 2 含损伤 Z-W-T 本构模型

Z-W-T 非线性粘弹本构模型由一个非线性弹簧、一个低频 Maxwell 体和一个高频 Maxwell 体三者并联所组成, 如图 6 所示。积分形式的 Z-W-T 方程为:

$$\sigma = f_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为应变;  $f_e(\varepsilon)$  为高分子材料的非线性弹性响应项,  $f_e(\varepsilon) = E_0\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3$ ,  $E_0$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  是对应的弹性常数; 第二项描述低应变率下的黏弹性响应,  $E_1$  和  $\theta_1$  分别是所对应的低频 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间; 第三项描述高应变率下的黏弹性响应,  $E_2$  和  $\theta_2$  分别是所对应的高频 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。

式(1)只能描述黏弹性特性, 并未描述材料屈服和损伤演化。将材料损伤演化参数引入其中, 可以建立考虑黏弹性损伤的 Z-W-T 模型<sup>[11-12]</sup>:

$$\sigma = (1 - D) \left[ f_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \right] \quad (2)$$

式中:  $D$  为损伤因子,  $0 \leq D \leq 1$ , 具体表达式如下:

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_{th} \\ D_0 \dot{\varepsilon}^{\delta-1} (\varepsilon - \varepsilon_{th})^\delta & \varepsilon > \varepsilon_{th} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_{th}$  是损伤发生演化时的应变阈值;  $D_0$  是初始损伤因子;  $b$  是损伤应变指数因子;  $\delta$  是率相关的指数因子,  $\delta > 1$  是随着应变率的增加, 破坏应变减少, 即冲击脆化;  $\delta < 1$  是随着应变率的增加, 破坏应变增加, 即所谓的冲击韧化;  $\delta = 1$  时可简化为临界应变准则。

结合 PBX-1 炸药的力学行为特征, 对 Z-W-T 模型进行了修正:

$$\sigma = \left[ 1 - \left( D_0 + D_1 \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^c \right) \varepsilon^a \right] \left[ \sigma_m (1 - \exp(-m\varepsilon)) + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \right] \quad (4)$$

式中:  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $c$ 、 $a$ 、 $\sigma_m$ 、 $m$  为材料常数。

在对参数进行拟合时, 利用了 PBX-1 在  $330 \text{ s}^{-1}$ 、 $490 \text{ s}^{-1}$ 、 $1\,080 \text{ s}^{-1}$ 、 $1\,500 \text{ s}^{-1}$  等 4 种应变率下的应力应变曲线, 如图 7 所示。首先, 通过选取两种不同应变率下的应力应变曲线相减, 并通过遗传算法拟合<sup>[13]</sup> 得到  $D_0$ 、 $D_1$ 、 $c$ 、 $a$ 、 $\sigma_m$ ; 再把参数代入式(4)中, 通过高应变率下的应力-应变曲线拟合出  $m$ 、 $E_2$ 、 $\theta_2$ , 得到 7 个参数, 如表 1 所示。

图 8 为模型计算曲线与实验测试曲线对比。本构模型在应变率为  $660 \text{ s}^{-1}$  时与实验测试曲线重合结

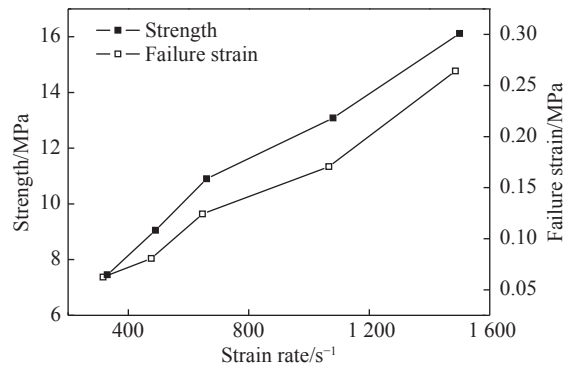


图 5 PBX-1 炸药强度和失效应变随应变率变化  
Fig. 5 Relations between strength/failure strain and strain rate

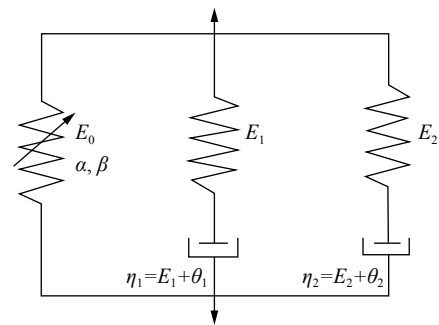


图 6 Z-W-T 非线性黏弹本构模型  
Fig. 6 Z-W-T non-linear viscoelastic constitutive model

表 1 本构模型材料参数

Table 1 Parameter values of constitutive models

$D_0$	$D_1$	$c$	$a$	$\sigma_m/\text{MPa}$	$m$	$E_2/\text{MPa}$	$\theta_2/\mu\text{s}$
8.591	-0.484	1.167	5.480	5.480	43.687	101.156	75.482

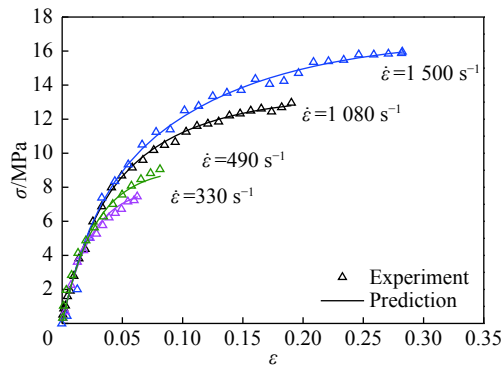
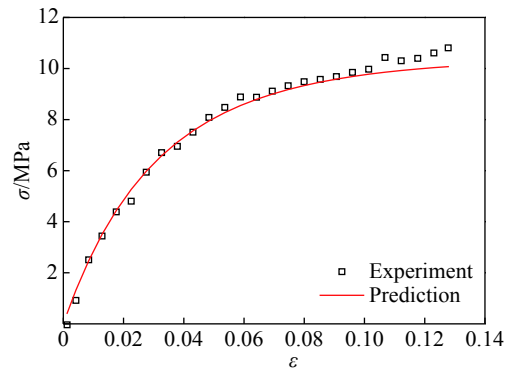


图 7 实验测试曲线与拟合曲线

Fig. 7 Comparison between experimental and fitting curves

图 8 模型计算曲线与实验测试曲线对比 ( $\dot{\epsilon}=660 \text{ s}^{-1}$ )Fig. 8 Comparison between experimental and calculated curves ( $\dot{\epsilon}=660 \text{ s}^{-1}$ )

果较高,能较好地描述 PBX-1 炸药在达到破坏前的动态力学行为。在不考虑材料分散性和实验偶然误差的情况下,按照图 8 所拟合 PBX-1 炸药的应变-压缩强度曲线,其在  $660 \text{ s}^{-1}$  时破坏强度为  $9.12 \text{ MPa}$ ,说明在达到破坏点之前,模型预测与实验测试结果误差不超过 3%,表明修正后的模型具有较高的精度,能较好地描述浇铸 PBX-1 炸药动态加载下的力学行为。当应变率大于 0.11 时,数值模拟结果略小于实验值,误差在 4%~6% 之间,这是由于遗传算法拟合修正的 ZWT 模型参数有一定的误差,体现在数值模拟结果上为随着应变的逐步增大,应力值小于实验结果。

### 3 结论

本文以一种新型抗过载浇铸 PBX 炸药为研究对象,通过准静态力学实验和 SHPB 实验对 PBX-1 炸药的压缩力学性能进行测定,并利用含损伤的 Z-W-T 非线性黏弹性本构模型,拟合得出了其在高应变率下的本构关系,对比动态力学性能测试结果,主要有以下结论:

(1) 准静态压缩实验中,试样的裂纹出现在与加载方向大约成  $45^\circ$  的最大剪应力方向,宏观破坏形式为劈裂;

(2) SHPB 实验中,随着应变率的提高, PBX-1 炸药的动态屈服强度、动态压缩强度和破坏应变不断提高。动态屈服强度逐渐从静态的  $2.77 \text{ MPa}$  增加至  $16.1 \text{ MPa}$ ; 压缩强度从  $7.46 \text{ MPa}$  增加至  $16.1 \text{ MPa}$ , 破坏应变从 6.23% 增加到 26.4%;

(3) 基于 PBX 炸药材料损伤和应变率效应,通过遗传算法拟合,建立了一种含损伤的动态黏弹性本构模型,在  $330 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内具有较高的精度,可以较好地描述 PBX-1 炸药在达到破坏前的动态力学行为。

### 参考文献:

- [1] 舒远杰, 霍冀川. 炸药学概论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 187-197.  
SHU Yuanjie, HUO Jichuan. Introduction to explosives [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 187-197.
- [2] 王礼立, 施绍裘, 陈江瑛, 等. ZWT 非线性热粘弹性本构关系的研究与应用 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2000, 139(S): 141-149. DOI: 1001-5132(2000)Sup-0141-09.

- WANG Lili, SHI Shaoqiu, CHEN Jiangying, et al. Study and application of nonlinear thermo-viscoelastic constitutive relations based on ZWT model [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2000, 139(S): 141–149. DOI: 1001-5132(2000)Sup-0141-09.
- [3] 罗景润. PBX 的损伤、断裂及本构关系研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001: 1–19.  
LUO Jingrun. Study on damage, fracture and constitutive relationship of PBX [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001: 1–19.
- [4] 陈广南, 张为华, 刘子如, 等. 固体推进剂裂纹摩擦热点形成细观模型分析 [J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(1): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2006.01.002.  
CHEN Guangnan, ZHANG Weihua, LIU Ziru, et al. Meso-scale hot-spot model of crack friction in solid propellant [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(1): 5–8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2006.01.002.
- [5] SONG B, CHEN W, MING C. Novel model for uniaxial strain-rate-dependent stress-strain behavior of ethylene-propylene-diene monomer rubber in compression or tension [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 92(3): 1553–1558. DOI: 10.1002/app.20095.
- [6] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2007.01.001.  
WANG Baozhen, HU Shisheng, ZHOU Xiangrong. Research of dynamic mechanical behavior and constitutive model of rubber under different temperatures [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(1): 1–6. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4888.2007.01.001.
- [7] 卢强, 王占江, 王礼立, 等. 基于 ZWT 方程的线黏弹性球面波分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 463–470. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0463-08.  
LU Qiang, WANG Zhanjiang, WANG Lili, et al. Analysis of linear visco-elastic spherical waves based on ZWT constitutive equation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 463–470. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0463-08.
- [8] 张延耿, 楼建锋, 周婷婷, 等. PBX 炸药含各向异性损伤的黏弹性统计微裂纹本构模型初步研究 [J]. *高压物理学报*, 2016, 30(4): 301–310. DOI: 10.11858/gywlb.2016.04.006.  
ZHANG Yangeng, LOU Jianfeng, ZHOU Tingting, et al. Initial study on constitutive model of PBXs via viscoelastic statistical crack mechanics including anisotropic damage [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(4): 301–310. DOI: 10.11858/gywlb.2016.04.006.
- [9] 敬仕明. PBX 有效力学性能及本构关系研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009: 30–65.  
JIN Shiming. Study on the effective mechanical properties and constitutive relations of PBX [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009: 30–65.
- [10] 成丽蓉, 施惠基. PBX 炸药含裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系 [J]. *含能材料*, 2015, 23(10): 999–1003. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.015.  
CHENG Lirong, SHI Huiji. Elastic-viscoplastic constitutive coupled micro-cracks propagation damage of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(10): 999–1003. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.015.
- [11] 孙朝翔, 鞠玉涛, 郑亚, 等. 双基推进剂的高应变率力学特性及其含损伤 ZWT 本构 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 507–512. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0507-06.  
SUN Chaoxiang, JU Yutao, ZHENG Ya, et al. Mechanical properties of double-base propellant at high strain rates and its damage-modified ZWT constitutive mode [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 507–512. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)05-0507-06.
- [12] 王礼立, 董新龙, 孙紫建. 高应变率下计及损伤演化的材料动态本构行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(3): 193–198. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)03-0193-06.  
WANG Lili, DONG Xinlong, SUN Zijian. Dynamic constitutive behavior of materials at high strain rate taking account of damage evolution [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(3): 193–198. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)03-0193-06.
- [13] 高军, 黄再兴. 多种群遗传算法在 PBX 本构模型参数识别中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 861–868. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0861-08.  
GAO Jun, HUANG Zaixing. Application of multiple-population genetic algorithm in parameter identification for PBX

constitutive model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 861–868. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0861-08.

## Compressive mechanical properties and constitutive relations of PBX-1

SUN Wenxu<sup>1,2,3</sup>, LUO Zhiheng<sup>2,3</sup>, TANG Mingfeng<sup>2</sup>,  
LI Ming<sup>2</sup>, LIU Tong<sup>3,4</sup>, ZHANG Dingguo<sup>1</sup>

(1. *School of Sciences, Nanjing University of Science and Technology,*  
*Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2. *Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics,*  
*Mianyang 621900, Sichuan, China;*

3. *Graduate School of China Academy of Engineering Physics,*  
*Mianyang 621999, Sichuan, China;*

4. *Chengdu Science Development Center of China Academy of Engineering Physics,*  
*Chengdu 610200, Sichuan, China)*

**Abstract:** The mechanical behavior of PBX has an important impact on its safety. In order to study the mechanical properties of PBX-1, the quasi-static mechanical experiments and SHPB (split-Hopkinson pressure bar) experiments were conducted. The results showed that the crack direction was the direction of maximum shear stress, which was about  $45^\circ$  to the loading direction in the quasi static compression tests. In the SHPB tests, the dynamic yield strength, dynamic compression strength and failure strain of PBX-1 explosive were continuously improved with the improvement of strain rate in the range of  $100\text{--}1\ 500\ \text{s}^{-1}$ . The dynamic yield strength gradually increased from the static 2.77 MPa to 16.1 MPa. The compression strength increased from 7.46 MPa to 16.1 MPa, and the failure strain increased from 6.23% to 26.4%. At the same time, based on the Z-W-T model, a dynamic viscoelastic constitutive model with damage was established. It has a high accuracy in the range of  $330\text{--}1\ 500\ \text{s}^{-1}$  strain rate, and could be used to describe the dynamic mechanical behavior of PBX-1 before failure.

**Keywords:** PBX-1 explosive; dynamic behavior; damage; Z-W-T constitutive model

(责任编辑 王小飞)