

文章编号: 1006-9941(2015)10-0999-05

PBX 炸药含裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系

成丽蓉^{1,2}, 施惠基¹

(1. 清华大学航天航空学院工程力学系应用力学教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

摘要: 为描述高聚物粘结炸药(PBX)的动态力学性能,将炸药内由微裂纹扩展引起的细观损伤,耦合到宏观粘塑性本构方程中,建立了含微裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系。针对某 PBX 炸药,开展了单轴压缩及断裂性能实验,研究了材料本构参数及本构关系计算算法,嵌入到 ABAQUS 软件中,数值模拟了该 PBX 炸药不同应变率条件下的力学行为。与实验结果对比表明,含裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系能够表征 PBX 炸药动态条件下力学性能变化过程,可用于冲击环境下炸药损伤演化分析研究。

关键词: 微裂纹扩展; 高聚物粘结炸药(PBX); 损伤; 本构关系

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.015

1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)在武器中的应用越来越广泛,其非冲击条件下安全性的研究也越来越迫切,掌握其含损伤的动态力学响应机制^[1-2]是安全性研究的基础。受现有试验条件所限,人们尚不能全面了解炸药材料微观结构的变形机制,因此主要通过建立各种近似的本构模型来描述其响应规律。

唐明峰等^[3]针对一种以 RDX 为基的 PBX 炸药,获得了不同应变率范围内的单轴压缩曲线,分别针对准静态和动态情况,建立了两种唯象损伤的粘弹性本构关系。张子敏^[4]等采用“朱-王-唐”^[5]粘弹性模型,拟合了 PBXN110 炸药的应力-应变弹性段曲线。龚建良^[6]等建立了考虑内部界面脱湿对宏观力学行为影响的复合固体推进剂本构模型。在国外,基于 Dienes^[7]统计裂纹力学模型(SCRAM),发展了多个本构模型^[8-10],不仅可模拟炸药断裂破坏,还可方便地耦合生热-反应过程,已在炸药安全性研究方面展示了较好的应用前景。Iso-SCRAM^[8]和 DCA^[9]等模型在材料弹性性能基础上耦合微裂纹的脆性损伤,并根据材料受力状态采用不同的损伤模式。Visco-SCRAM^[10]模型采用 5 个 MAXWELL 单元的粘弹性模型串联微裂纹体,其中包含了材料的粘弹性响应、统计

断裂损伤以及热点起爆机理。总之,国内外针对易产生损伤的 PBX 材料,基于不同的力学理论建立了不同本构关系,但考虑到 PBX 炸药多样性及动态力学响应复杂性,后续在如何建立耦合细观损伤、热点起爆机制的动态本构关系方面仍有大量的工作需开展。

国外发展的微裂纹统计损伤模型,其本构理论一般简化为在弹性或粘弹性基础上耦合脆性损伤,研究重点在于复杂的损伤模型,而对于材料的塑性或粘塑性行为未充分考虑。炸药材料力学性能试验^[11]表明,PBX 炸药在外力作用下具有明显塑性性能,不考虑塑性容易导致模拟的材料最高强度偏大、损伤加剧。同时考虑到冲击条件下多种热点生成机制,如孔洞坍塌、剪切带、裂纹摩擦等,主要是在炸药快速粘塑性变形或损伤断裂过程中积聚热量。因此,建立 PBX 类炸药动态损伤本构模型时,需充分考虑材料粘塑性变形和脆性损伤过程。

本研究以宏观粘塑性本构理论为基础,引入了材料内部微裂纹扩展对于炸药损伤的影响,建立了含裂纹扩展损伤的粘塑性本构方程,用于描述 PBX 材料在不同应变率条件下的应力-应变关系。同时,针对某 PBX 材料,开展了单轴压缩应力-应变实验及数值模拟研究,对比验证了模型的正确性。

2 含裂纹扩展损伤的粘塑性本构理论

含裂纹扩展损伤本构模型建立在以下假设前提下:

(1) 假定初始状态微裂纹是各向同性分布的,即炸药材料呈各向同性;

收稿日期: 2014-05-30; 修回日期: 2014-12-04

基金项目: 北京理工大学开放实验室基金(KFJJ11-9Y)

作者简介: 成丽蓉(1976-),女,副研究员,主要从事炸药冲击损伤及起爆机制研究。e-mail: 2223049089@qq.com

(2) 炸药材料损伤过程中, 忽略微裂纹成核效应, 主要考虑初始微裂纹在外力作用下的损伤演化及扩展;

(3) 忽略微裂纹之间的相互作用。

材料应力率和应变率以球张量和偏张量的形式表示, 总的应力率可以表示为偏应力率和平均应力率之和:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \dot{S}_{ij} + \dot{\sigma}_m \delta_{ij} \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}_m = k \dot{\varepsilon}_{ii} \quad (2)$$

总的应变率可以表示为偏应变率和平均应变率之和:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{e}_{ij} + \dot{\varepsilon}_m \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{ii} \quad (4)$$

式中, $\dot{\sigma}_{ij}$ 为总应力率, $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$; \dot{S}_{ij} 为偏应力率, $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{\sigma}_m$ 为平均应力率, $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为体积模量, MPa ; δ_{ij} 为 Kronecker 符号, $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 为总应变率, s^{-1} ; \dot{e}_{ij} 为偏应变率, s^{-1} ; $\dot{\varepsilon}_m$ 为平均应变率, s^{-1} 。

材料总的偏应变率 \dot{e}_{ij} 为弹粘塑性应变率 \dot{e}_{ij}^{vep} 和表征微裂纹损伤的开裂应变率 \dot{e}_{ij}^c 之和:

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^{vep} + \dot{e}_{ij}^c \quad (5)$$

开裂偏应变与偏应力之间的关系可表示为

$$e_{ij}^c = \beta^e c^3 S_{ij} \quad (6)$$

式中, c 为平均裂纹半径, β^e 为与剪切模量 G 和初始裂纹分布 N_0 相关的一个参数, 其关系为:

$$2G\beta^e = AN_0 = \left(\frac{1}{a^3}\right) \quad (7)$$

式中, A 为常数, a 为初始缺陷尺寸, 开裂偏应变和裂纹半径之间的关系为:

$$2Ge_{ij}^c = \left(\frac{c}{a}\right)^3 S_{ij} \quad (8)$$

根据 Visco-scram^[10] 模型成果, 裂纹增长速率与应力强度因子相关, 当应力强度因子大于极限值时, 裂纹就会失稳扩展, 其扩展机制是动态失稳扩展机制; 当应力强度因子小于失稳的极限值时, 裂纹仍然会低速增长, 发生演化扩展, 这个过程由热激活耗散机制主导, 微裂纹尺寸演化扩展速度 \dot{c} 具体表示为:

$$\dot{c} = v_{\max} \left(\frac{K}{K_0}\right)^m \quad K < K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}} \quad (9)$$

$$\dot{c} = v_{\max} \left(1 - \left(\frac{K_0}{K}\right)^2\right) \quad K \geq K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}} \quad (10)$$

$$K_1 = K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}} \left(1 + \frac{2}{m}\right) \frac{1}{m} \quad (11)$$

式中, K_0 微裂纹体元中基体材料的断裂韧性, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$; v_{\max} 微裂纹扩展最大速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; m 微裂纹扩展的速度系数, 取为 10, K 为含微裂纹的等效应力强度因子, $K^2 = \frac{3}{2} \pi \cdot c \cdot S_{ij} S_{ij}$, $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。材料损伤度 D 定义为:

$$D = \frac{(c/a)^3}{1 + (c/a)^3} \quad (12)$$

材料弹粘塑性应变 e_{ij}^{vep} 服从如图 1 所示的模型, 该模型由一个阻尼常数为 η 的阻尼器与一个屈服强度为 Y 的塑性单元并联以后, 与一个剪切模量为 G 的弹性体串联, 其偏应力张量可表示为:

$$\dot{S}_{ij} = 2G \dot{e}_{ij}^{vep}, \quad \|S\| \leq \sqrt{\frac{2}{3}} Y \quad (13)$$

$$\dot{S}_{ij} + \frac{G}{\eta} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{Y}{\|S\|}\right) S_{ij} = 2G \dot{e}_{ij}^{vep}, \quad \|S\| > \sqrt{\frac{2}{3}} Y \quad (14)$$

$$G = G_0(1 - D) \quad (15)$$

式中, G_0 为未损伤时的剪切模量, $\|S\|$ 为等效应力, 材料的屈服服从 von Mises 屈服法则^[12]:

$$S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} Y^2 = 0 \quad (16)$$

材料在变形过程中总的塑性功表示为:

$$\frac{dW}{dt} = S_{ij} \dot{e}_{ij}^{vp} = S_{ij} (\dot{e}_{ij}^{vep} - \dot{e}_{ij}^e) \quad (17)$$

式中, e_{ij}^e 为弹性应变。

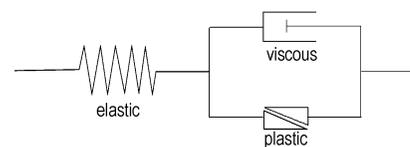


图 1 弹粘塑性模型图

Fig. 1 Elastic-viscoplastic constitutive relation model

3 PBX 炸药力学性能实验

3.1 PBX 炸药的单轴压缩实验

为验证建立的本构模型, 选取了典型浇注 PBX 炸药试件 (简称 PBX) 开展了静态单轴压缩实验及断裂性能实验。炸药试件由中物院化工材料研究所提供, 主要成份为 64% RDX、20% Al 粉、16% HTPB, 密度为 $1640 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, PBX 属于高能晶体颗粒填充的混

合炸药。

参考文献[13]的方法,在分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 装置上进行动态单轴压缩力学实验,在材料试验机上开展了静态单轴压缩力学实验。图 2 为实验获得准静态 0.01 s^{-1} 以及动态 $60, 320, 500 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的 PBX 应力-应变曲线,可看出在外力作用下, PBX 炸药达到应力最高点以前,具有粘塑性性能,应力随应变的增大而非线性增大;应力达到压缩强度(曲线上应力的最大值)后,应力随应变的增大而降低,表现出明显的脆性响应。同时, PBX 炸药具有明显的应变率效应,材料压缩强度随着加载应变率的增大而增大。

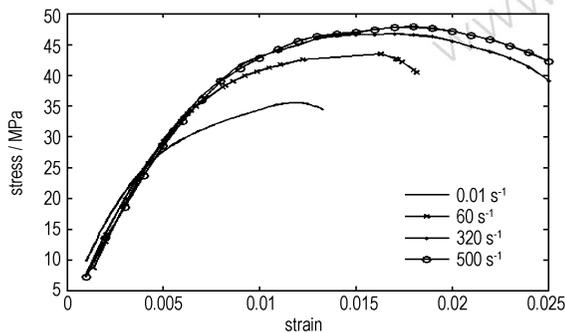


图 2 PBX 炸药在不同应变率下单轴压缩应力-应变曲线
Fig. 2 Dynamic compressive stress-strain curves under different strain rate loading

根据粘塑性本构理论^[12],在公式(14)中,假设恒定单轴压缩加载应变率,可得到粘塑性应力 σ 解析解(18),采用不同应变率 $\dot{\varepsilon}$ 下单轴压缩强度试验数据 (σ, ε) ,采用公式(18)先求得变量 τ ,依据公式(19)求得阻尼系数 η :

$$\sigma = 2G\tau(1+\nu) \dot{\varepsilon} (1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\tau\dot{\varepsilon}}}) \quad (18)$$

$$\eta = \tau G \left(1 - \frac{Y}{\sigma}\right) \quad (19)$$

因为 320 s^{-1} 应变率下的实验数据较全面地代表高应变率下炸药动态力学行为,因此选取应变率 320 s^{-1} 下压缩强度数据进行计算,求得 $\eta = 0.00143 \text{ MPa} \cdot \text{s}$,其中所用到的泊松比 $\nu = 0.32$ 、剪切模量 $G = 200 \text{ MPa}$ 、炸药屈服强度 $Y = 40 \text{ MPa}$ 取自准静态实验数据^[12-13]。

3.2 PBX 的断裂实验

参考文献[13],采用 Hopkinson 杆单次加载实验技术完成了 PBX 的断裂实验,实验测量系统示意图见图 3。实验杆材料为 LC4 铝,直径为 20 mm ,入射杆长为 2000 mm ,透射杆长为 1000 mm 。实验中应用入射波整形技术,以保证试样两端的力平衡, $p_1 = p_2 = p$ 。在

动态力平衡条件下可以由加载历史 $p(t)$ 通过公式(20)计算得到应力强度因子历史,加载峰值对应的即为应力强度因子 K_0 。

$$K_0(t) = \frac{p(t)S}{BR^{3/2}} \cdot Y\left(\frac{a}{R}\right) \quad (20)$$

式中, $p(t)$ 为随时间变化的加载力, $Y(a/R)$ 为无量纲应力强度因子, R 和 B 分别为试样半径和厚度,裂纹深度为 a , S 为支撑柱间的跨距,具体见图 3。实验获得 PBX 炸药的断裂韧性 $K_0 = 8.5 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。同时试验中采用高速摄影观测裂纹张开过程,估算得到试样中的裂纹扩展速度 $V_{\max} = 360 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

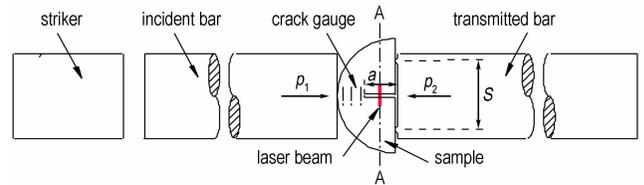


图 3 PBX 炸药断裂韧性 SHPB 测量系统示意图
Fig. 3 SHPB and data acquisition systems for fracture of the PBX

PBX 炸药这种粘塑性及脆性损伤响应的力学性能,不仅与其组分的 RDX 等单质炸药以及粘结剂性能有关,还受各组分含量及制备过程影响。RDX 高能晶体颗粒属脆性材料,粘接剂基体为粘塑性材料, PBX 的力学性能受两种材料综合影响。

根据微裂纹脆性损伤统计理论^[7],炸药试件制作过程中,内部不可避免存在微裂纹等初始缺陷,外载荷作用下初始微裂纹被激活并发生稳定扩展,炸药宏观力学性能表现为非线性增加。随着裂纹进一步扩展,裂纹扩展造成的损伤对炸药材料的性能影响越来越大,最终使得炸药材料发生破坏。因此 PBX 炸药粘塑性及脆性损伤力学响应过程,可采用在粘塑性本构模型上耦合裂纹扩展损伤来描述。

4 PBX 炸药含微裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系建立

利用上述含微裂纹扩展损伤的粘塑性本构方程编制了 UVMAT (user-defined material mechanical behavior) 加入到有限元软件 ABAQUS/Explicit 求解器^[14]中, ABAQUS/Explicit 应用中心差分方法对运动方程进行显式时间积分,应用一个增量步的动力学条件计算下一个增量步的动力学条件。显示动力学方法主要包括以下步骤:

(1) 节点计算

动力学平衡方程:

$$\ddot{u}_{(t)} = (M)^{-1}(P_{(t)} - I_{(t)}) \quad (21)$$

对时间显式积分:

$$\dot{u}_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{(\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)})}{2} \ddot{u}_t \quad (22)$$

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \dot{u}_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (23)$$

式中, u 为位移, m ; \dot{u} 为速度, $m \cdot s^{-1}$; \ddot{u} 为加速度, $m \cdot s^{-2}$; M 为质量矩阵, kg ; P 为力矩阵, N 。

(2) 单元计算

首先根据应变速率 $\dot{\epsilon}$, 计算单元应变增量 $d\epsilon$, 接着根据材料本构关系计算应力增量, 并更新材料单元应力, 最后集成节点内力 $I_{(t+\Delta t)}$:

$$\sigma_{(t+\Delta t)} = f(\sigma_{(t)}, d\epsilon) \quad (24)$$

(3) 设置时间 t 为 $t+\Delta t$, 返回步骤 1。

在上述显示动力学计算步骤中, 将建立的含裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系加入到式(24)中, 通过材料的应力状态判断材料属于弹性或粘塑性状态, 根据材料状态判断采用公式(13)或(14)进行单元偏应力更新, 同时根据偏应力大小计算单元开裂应变(公式(8)), 利用裂纹扩展方程(9)或(10)进行单元统计等效裂纹长度计算, 依据裂纹长度以及裂纹变化率计算损伤度 D (公式(12)), 并更新材料力学性能参数。

将计算得到的单轴压缩应力应变关系, 与实验曲线进行对比, 结果如图 4 所示。在应变率 $60 \sim 500 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 计算所得曲线与试验曲线变化趋势较吻合, 说明粘塑性本构关系中引入微裂纹扩展损伤, 能够模拟炸药材料发生弹性、粘塑性、脆性破坏的变化过程, 模拟得到的 PBX 最大压缩强度随应变率增大而增大, 呈应变率增强效应。图 5 为计算得到应变率 500 s^{-1} 下, PBX 炸药内部微裂纹扩展尺寸 c 、损伤度 D (见图 5a) 以及单轴压缩应力(见图 5b)随应变的变化关系, 可看出在加载的初始阶段, 材料处于弹性变形阶段; 当单轴应力超过 35 MPa 即等效应力超过 40 MPa 时(对应图 5b 中 A 点), 材料进入塑性阶段, 应力随应变非线性增加, 此过程裂纹扩展较小, 对材料性能影响不大; 当所受应力超过材料应力强度因子极限值后(对应图 5b 中 B 点), 内部微裂纹扩展加速, 裂纹尺寸 c 和损伤度 D 快速增大, 当裂纹尺寸扩展到初始裂纹约 30 倍时(对应图 5b 中 C 点), 材料进入损伤软化阶段, 应力随应变增加逐渐下降。

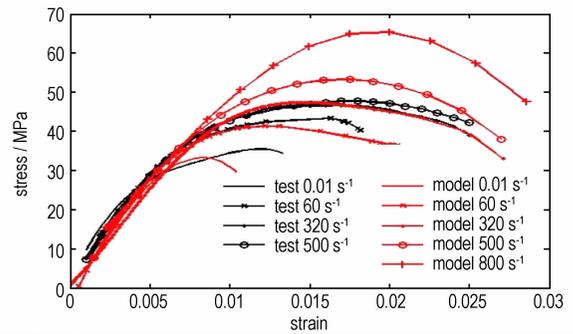
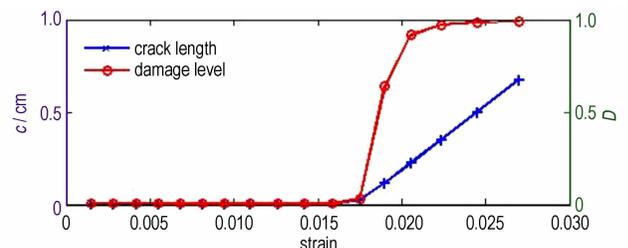
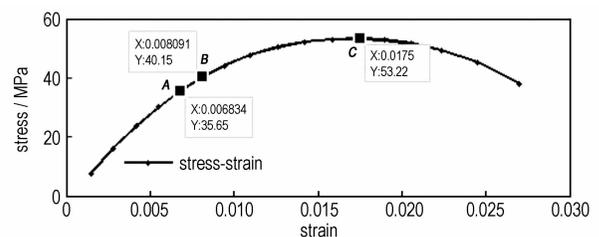


图 4 PBX 炸药应力应变实验曲线与数值模拟曲线比较

Fig. 4 Comparison of the stress-strain curves between the simulated and experimental



a. the curve of crack length c and damage D with strain



b. the stress-strain curve

图 5 应变率 500 s^{-1} 下炸药应力、裂纹、损伤度与应变对应关系

Fig. 5 The simulation results about stress, crack length and damage under 500 s^{-1} strain rate

从图 4 还可看出, 模拟曲线与实验数据未能完全吻合, 压缩强度以及压缩强度对应的应变与实验存在差距, 分析认为模型中采用一些简化处理, 与实际理论还有一定差别, 主要体现在: (1) 由于 PBX 类非均质炸药组份多样, 微裂纹扩展损伤过程受多种因素影响, 呈复杂的各向异性, 具体细观损伤模式还属于本领域研究热点及难点, 模型中采用简化的裂纹扩展速度经验公式, 损伤度由裂纹尺寸 c 确定, 导致模拟的曲线应力强度超过最大值后裂纹扩展迅速增大、材料损伤剧烈; (2) 研究表明剪切模量 G 、屈服强度 Y 、断裂强度因子 K_0 随应变率增大而增大明显, 模型中取为定值未考虑与应变率相关性。

5 结 论

(1) PBX 单轴压缩试验表明,受高能晶体颗粒及粘接剂性能的综合影响,PBX 表现出粘塑性及脆性损伤耦合的力学响应。PBX 炸药具有明显的应变率效应,材料压缩强度随着加载应变率的增大而增大。

(2) 采用微裂纹扩展表征炸药动态损伤演化,并引入到宏观的粘塑性本构关系中,建立了含细观损伤的炸药动态本构关系,经将数值模拟结果与实验数据相比较,可看出建立的模型可用来描述 PBX 炸药动态条件下力学性能变化过程。

(3) 非均质 PBX 类炸药动态损伤是一复杂的过程,目前关于损伤度的定义主要考虑裂纹尺寸的变化,后续还需进一步优化改进。

参考文献:

- [1] 张旭,曹仁义,谭多望,等. 高超音速侵彻混凝土过程中侵彻弹体装药塑性安定性分析[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 709-714.
ZHANG Xu, CAO Ren-yi, TAN Duo-wang, et al. Plastic charge stability analysis projectile during penetration of concrete targets [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 709-714.
- [2] 李俊玲, 卢芳云, 赵鹏铎, 等. 含能材料的损伤本构模型研究进展[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 229-235.
LI Jun-ling, LU Fan-yun, ZHAO Peng-duo, et al. Progress in the constitutive models including damage of energetic material [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 229-235.
- [3] 唐明峰, 蓝林钢, 李明, 等. 以 RDX 为基的浇注 PBX 力学性能与本构关系[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 215-220.
TANG Ming-feng, LAN Lin-gang, LI Ming, et al. Mechanical properties and constitutive models of RDX Based cast PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 215-220.
- [4] 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.

- [5] 唐志平. 高应变率下环氧树脂的力学性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1981.
TANG Zhi-ping. Research on the high strain rate mechanical properties of epoxy [D]. Hefei, University of Science and Technology, 1981.
- [6] 龚建良, 刘佩进, 李强. 基于能量守恒的 HTPB 推进剂非线性本构关系[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 325-329.
GONG Jian-liang, LIU Pei-jin, LI Qiang. Nonlinear constitutive relation of HTPB propellant based on the first law of thermodynamic [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 325-329.
- [7] Dienes J K, Middleditch J, Kershner J D, et al. Progress in statistical crack mechanics: an approach to initiation [C] // Proceeding of 12th International Symposium on Detonation. Coeur d'Alene, Idaho, San Diego, USA, 2002.
- [8] Addessio F L, Johnson J N. A Constitutive Model for the Dynamic Response of Brittle Materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67(7): 3275-3286.
- [9] Zuo Q H, Addessio F L, Dienes J K, et al. A rate-dependent damage model for brittle materials based on the dominant crack [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43: 3350-3380.
- [10] Haberman K S, Bennett J G, Asay B W, et al. Modeling, Simulation and Experimental Verification of Constitutive Models for Energetic Materials [R]. LA-UR-97-2304, 1997.
- [11] Rangaswamy P, Thomason D G, Liu C, Lewis M W. Modeling the mechanical response of PBX-9501 [C] // Proceeding of 14th International Symposium on Detonation. Coeur d'Alene, Idaho, 2010.
- [12] Perzyna P. The Constitutive Equations for Rate Sensitive Plastic Materials [J]. *Quart Appl Math*, 1963, 20: 321-332.
- [13] 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.
CHEN Rong. Experimental studies on mechanical properties of a PBX under various dynamic loading conditions [D]. Changsha: National University of Defense Technology Science. 2010.
- [14] Hibbitt. ABAUQS version 6.7 [CP]. Karlsson and Sorensen, Providence, RI, 2008.

Elastic-viscoplastic Constitutive Coupled Micro-cracks Propagation Damage of PBX

CHENG Li-rong^{1,2}, SHI Hui-ji¹

(1. School of Aerospace, AML, Department of Engineering Mechanics Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to characterize the dynamic mechanical behavior of polymer bonded explosives (PBX), a macroscopic elastic-viscoplastic constitutive relation has been developed, coupled by the micromechanical damage mechanism based on the macro crack statistical method. Dynamic compressive and fracture test of the PBX (64% RDX and 20% Al and 16% HTPB) have been carried out, and the material constants and algorithm for the model have been presented. By comparing with the dynamic compressive test data and simulation results of PBX, this model can predict the mechanical deformation process under different loading conditions, so that it can be spread for the deformation analysis of heterogeneous explosives.

Key words: micro-cracks propagation; polymer bonded explosives (PBX); meso-damage; constitutive relation

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.015