文章编号：1000-5773(2013)04-0625-08

PBX 炸药率型损伤本构关系的实验研究*

李 丹[1,2]，赵 锋[2]，傅 华[2]，李克武[2]

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院，四川绵阳 621010；
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，对高聚物粘结炸药(PBX 炸药)进行循环加、卸载实验和不同应变率下的压缩实验，测得 PBX 炸药在不同工况下的应力-应变曲线。采用唯象分析和细观统计相结合的方法，得到含损伤内变量的损伤演化方程，提出 PBX 炸药的率型损伤本构模型。通过拟合实验数据，获得了率型损伤本构模型的相关参数。结果表明，建立的本构方程能较好地描述 PBX 炸药在线弹性阶段、强化阶段、应变软化阶段的力学性能，待定参数少，形式简单，其中以微裂纹密度定义的损伤变量可方便地由力学实验确定。

关键词：PBX 炸药；微裂纹密度；率型；损伤；本构关系
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

固体高能炸药主要包括高聚物粘结炸药(Plastic-Bonded Explosives，PBX)和浇铸类(浇注类)炸药，机械强度极低。在合成、成型及机械加工过程中，固体高能炸药极易形成微孔洞、微裂纹等初始损伤。这些初始损伤会在外界冲击和热刺激作用下演化发展，最终可能出现基体破碎，此外产生的颗粒间摩擦、孔洞坍塌、局部剪切，在外界刺激能量达到一定程度时，还会形成反应热点。当固体高能炸药内部的应力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，从而很可能影响炸药后续的反应特性和起爆机制，对炸药的安全性影响重大。由于涉及颗粒的多尺度结构以及装药体系的非均匀性、机械作用与化学反应的耦合，关于战斗部装药在极端条件下的生存能力研究充满挑战性。探讨在外界因素影响下炸药受损的物理机制，研究考虑损伤内变量演化的炸药本构关系，对于更好地评估炸药的生存能力，具有重要意义。

自 20 世纪 80 年代以来，国内外学者对炸药的静动态本构关系进行了多方面研究，例如：Goudreau 等人[1]采用 SHPB(Split-Hopkinson Pressure Bar)，对 PBXW-113 炸药的动态力学性能进行了研究，给出了不同应变率(10^3～10^4 s^{-1})条件下的拉压应力-应变曲线；Blumenthal 等人[2]对 PBX-110 炸药在不同温度(－55～20 ℃)、不同应变率(10^{-3}～2×10^3 s^{-1})条件下的压缩性能进行了研究；韩小平[3]、李英雷[4]、罗景润[5-6]、吴会民[7]等人使用 MTS 机和 Hopkinson 杆，对 TNT 炸药、Comp. B 炸药和 PBX 炸药进行了实验研究，采用 Johnson-Cook 模型[8]和改进的 Johnson-Cook 模型进行拟合，同时考虑温度效应的影响；傅华等人[9]在 SHPB 装置上开展了某典型 PBX 炸药的单轴压缩实验，得到了不同应变率下某 PBX 炸药的压缩应力-应变曲线，初步建立了该炸药具有粘性修正项的 Sargin 唯象模型。但是，以上本构模型都是从唯象学角度出发建立的，未考虑材料内部的细观损伤变化。

Browning 等人[10]针对 PBX9502 和 PBX9501 炸药，提出了一维粘塑性损伤本构模型，并认为塑性

* **收稿日期**：2013-05-16；**修回日期**：2013-07-12
基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金重大项目(2009A0201008)
作者简介：李 丹(1975－)，男，博士，讲师，主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail：danli@swust.edu.cn

由材料内部的损伤引起，方程参数由蠕变实验及循环加、卸载实验得到，但是该本构方程不能很好地模拟长时间条件下的应力松弛。Dienes 等人[11-12]对炸药进行了大量的动态损伤力学性能实验及损伤炸药的延迟起爆实验，其主要研究结论是：在低幅长脉冲压缩载荷下，炸药晶体内闭合的微裂纹界面的摩擦生热效应是热点形成的最主要物理机制。基于热点形成机制，Dienes 建立并逐步完善了统计细观损伤力学模型——SCRAM 模型。该模型是研究含能材料损伤的、具有代表性的细观损伤本构模型。然而，SCRAM 模型参数众多，需要 96 个模型参数描述材料特性，且其中一些模型参数很难通过实验确定，极大限制了 SCRAM 模型的应用。Bennett 等人[13]在 PBX 炸药的冲击力学响应及非冲击起爆的数值模拟中，采用包含黏弹性响应、统计断裂力学和热点起爆机理的黏弹性统计断裂本构模型（Visco-SCRAM），数值模拟结果与位移场实验测量值吻合较好。

目前，对于具有初始损伤且易产生损伤的 PBX 材料，如何选择损伤变量，度量或表征损伤，建立损伤演化方程（温升率及应变率相关），建立考虑温度效应、应变率效应及损伤内变量的炸药综合性本构模型，仍需进一步细致研究。本研究根据 PBX 炸药的压缩实验结果，考虑包含微裂纹尺寸、形状、密度等参数的损伤内变量演化，通过改进 Johnson-Cook 模型，建立压缩载荷下某典型 PBX 炸药计及应变率、损伤演化的非线性本构关系。

2 循环加载下 PBX 炸药的力学性能

采用万能试验机，对 PBX 炸药进行循环加、卸载实验和低应变率（$10^{-4}\sim10^{-2}$ s^{-1}）下的压缩力学性能测试。实验在中国工程物理研究院流体物理所完成。PBX 炸药试样的直径为 5 mm，高度为8 mm，主要成分（质量分数）为：HMX 炸药（88%）、HTPB 炸药（7%）、石蜡（3%）、其它（2%）。

为了获得压缩载荷下 PBX 炸药的损伤演化规律，对 PBX 试件进行应变率为 10^{-3} s^{-1} 的递增循环加、卸载实验。在进行循环加载实验前，首先测定 PBX 材料的单轴抗压强度，以便确定其载荷水平。图 1 给出了当最大加载应变 $\varepsilon_{max}=24\%$ 时递增循环加载下的应力-应变（σ-ε）曲线，其中 ε_p 为每次循环加载对应的最大应变（ε_p 的最大值即为 ε_{max}）。在递增循环加载过程中：加、卸载过程的应力-应变曲线均为内凹型，并且内凹现象随着 ε_p 的增大越来越明显，致使新的微裂纹在试件局部应力集中处开始出现，随后微裂纹之间产生相对滑移，微裂纹区不断扩展，微裂纹密度随之增大，这是一个连续损伤演化积累过程。裂纹扩展过程中的能量转化使相应部位原有的集中应力得以消弛，结构调整促使裂纹止裂，而在卸载过程中，原先被压实的微裂纹重新释放，导致 PBX 炸药的有效弹性模量逐渐减小。随着循环加载最大应变 ε_p 的提高，屈服应力和残余应变逐渐提高，例如：当最大应变 ε_p 为 12% 时，屈服应力为 0.88 MPa，残余应变为 0.10%；当最大应变 ε_p 为 24% 时，屈服应力为 1.76 MPa，残余应变为 3.59%。

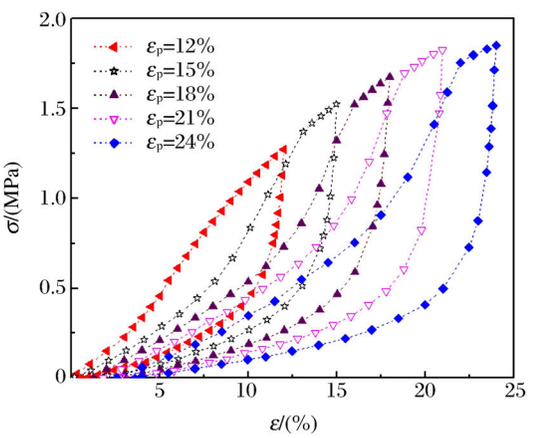


图 1 循环加载下 PBX 炸药的应力-应变曲线（$\varepsilon_{max}=24\%$）

Fig. 1 Stress-strain curves for the PBX explosive under repeated compressive loading ($\varepsilon_{max}=24\%$)

3 PBX 炸药损伤演化方程的建立

为了获得压缩载荷下 PBX 炸药的损伤内变量，借鉴文献[14]，引入裂纹形状参数 ρ，用于综合表征 PBX 炸药的裂纹尺寸、裂纹形状、裂纹密度等。

$$\rho=\Omega\eta n_v\overline{c^3} \tag{1}$$

式中：Ω 为无量纲常数，η 为无量纲裂纹几何常数，n_v 为细观单元单位体积的裂纹数，c 为给定裂纹面积

$A(A=\Omega c^2)$的特征裂纹尺寸，$\overline{c^3}$ 表示 c^3 的平均值。

考虑微裂纹的滑移面滑动，当试样受到二次加载时，包含加、卸载过程的应力-应变曲线中，一部分曲线没有微裂纹滑移的弹性响应，另一部分是由微裂纹滑移控制的响应，如文献[14]中的图 13 所示。设 E_0 为加载过程中弹性段的割线模量，E_{eff} 为加载过程中强化阶段的有效模量，则比值 E_0/E_{eff} 与裂纹形状参数 ρ 的关系可表示为[14]

$$\frac{E_0}{E_{\mathrm{eff}}}=1+\frac{2\rho}{15}\left[\frac{2+3\mu^2+2\mu^4}{(1+\mu^2)^{3/2}}-2\mu\right] \tag{2}$$

式中：μ 为细观单元断裂面的动摩擦系数。

将含能材料中的细观损伤裂纹全部简化为币形裂纹，(1)式中的 Ω 取为 π，$\eta=8(1-\nu)/3\pi$，则(1)式中的细观损伤裂纹密度 $n_v\overline{c^3}$ 可以表示为比值 E_0/E_{eff} 的函数，即

$$n_v\overline{c^3}=\frac{45}{16(1-\nu)}\frac{(1+\mu^2)^{3/2}}{2+3\mu^2+2\mu^4-2\mu(1+\mu^2)^{3/2}}\left(\frac{E_0}{E_{\mathrm{eff}}}-1\right) \tag{3}$$

式中：ν 为泊松比。

为了获得微裂纹密度 $n_v\overline{c^3}$ 与循环加载最大应变 ε_{p} 的关系式，先根据实验曲线，获得不同加载应变水平下比值 E_0/E_{eff} 与 ε_{p} 的关系。当最大加载应变水平 $\varepsilon_{\max}$ 分别为 12%、15%、18%、21%、24%、26%时，进行类似于图 1 中的循环加、卸载实验，得到 E_0/E_{eff} 数据点，拟合 E_0/E_{eff} 与 ε_{p} 的关系，如图 2 所示。拟合公式为

$$\frac{E_0}{E_{\mathrm{eff}}}=0.740\,24+0.032\,47\varepsilon_{\mathrm{p}} \tag{4}$$

从图 2 可以看出，拟合公式与实验数据具有较好的拟合度。

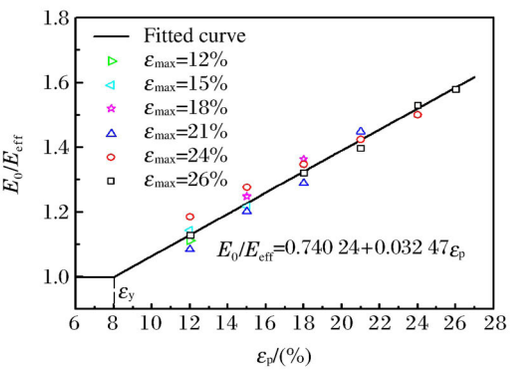


图 2　循环加载下 E_0/E_{eff} 与最大应变 ε_{p} 的关系（当 $0<\varepsilon_{\mathrm{p}}<\varepsilon_{\mathrm{y}}\approx8\%$，$E_0=E_{\mathrm{eff}}$）

Fig. 2　E_0/E_{eff} versus ε_{p} attained during each loading cycle (When $0<\varepsilon_{\mathrm{p}}<\varepsilon_{\mathrm{y}}\approx8\%$, $E_0=E_{\mathrm{eff}}$)

由于 PBX 炸药主要由 HMX 晶体构成，因此采用 SHPB 结合低速冲击实验测定的 PBX 动摩擦系数，可认为近似等于 HMX 晶体内微裂纹滑移的动摩擦系数。PBX 动摩擦系数的具体测量方法为：将压剪杆斜面上的入射波分解为压缩载荷和剪切载荷，分别施加在试样上，对试样进行平面压剪加载，利用入射杆和透射杆上的测试信号，反推试样的应力-应变情况，结合库仑定律，求得 PBX 炸药界面的平均动摩擦系数 μ。最终得到的 μ 为 0.15。将 μ 值和(4)式代入(3)式，得到

$$n_v\overline{c^3}=\frac{1.65}{1-\nu}(0.032\,47\varepsilon_{\mathrm{p}}-0.259\,76) \tag{5}$$

考虑到 PBX 炸药具有孔洞效应，无法利用声波探测法测量其波速，因此本研究采用间接法测定 PBX 炸药的泊松比 ν。利用图像处理软件，对记录炸药压缩过程的高清摄像进行图像处理，获取 PBX 炸药比例变形内横向应变与纵向应变之比的绝对值，进而得到循环加载下不同最大加载应变下 PBX 炸药的泊松比。如图 3 所示，当最大应变 ε_{p} 为 12% 时，ν 为 0.406；随着循环加载下最大应变 ε_{p} 增大，泊松比 ν 逐渐减小。拟合 ν 与 ε_{p} 的关系，可得线性

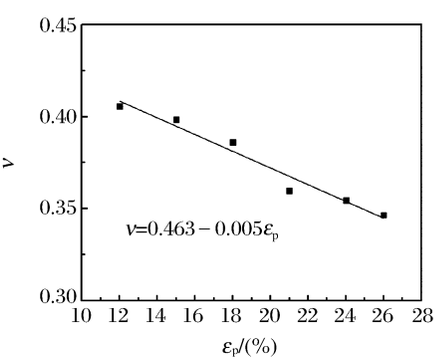


图 3　泊松比随最大应变 $\varepsilon_{\max}$ 的变化规律

Fig. 3　Variations of Poisson's ratio with the maximum applied strain

拟合式：$\nu=0.463-0.005\varepsilon_p$。

PBX 炸药的破坏主要以 HMX 晶体内的微裂纹、微空洞等损伤的产生和演化为前导，HMX 晶体自由表面不断增加，从而降低了 PBX 炸药传递荷载的能力，对宏观强度起到弱化作用，微裂纹密度的逐渐增大，导致 PBX 炸药力学性能的非线性特征趋于明显。结合含分布裂纹固体的统计研究结果，定义损伤变量[15-16]

$$D=\frac{2-\nu}{1-\nu}\beta n_v\overline{c^3} \tag{6}$$

式中：β 为材料系数，量纲为 1。若忽略重复加载（尚未超过曾达到的最大应变）引起的新裂纹，做以下两个基本假设：(1) 弹性模量的下降是由众多微裂纹滑移面造成的；(2) 当 PBX 炸药超过屈服应变后，材料中的微裂纹会引起宏观不可恢复变形。结合(6)式，建立考虑 PBX 炸药初始损伤的损伤演化方程，即

$$D=\begin{cases}D_0 & \varepsilon<\varepsilon_y\\ D_0+\dfrac{2-\nu}{1-\nu}\beta n_v\overline{c^3} & \varepsilon\geqslant\varepsilon_y\end{cases} \tag{7}$$

式中：$D_0=1-\rho_0/\rho_s$ 为试样中的初始损伤，ρ_0 为炸药的初始密度，ρ_s 为炸药的理论密度，ε_y 为炸药的屈服应变。

利用(5)式、(6)式和(7)式，可以建立包含微裂纹尺寸、形状、密度等参数的损伤演化方程，其中与细观微裂纹密度有关的参数可方便地由力学实验确定。

4 模型有效性验证

本研究采用 PBX 炸药循环加载应力-应变曲线的特征参数表征损伤演化的宏观响应特性，将微裂纹的相对滑移认定为 PBX 炸药能量耗散的主要物理机制，阐述 PBX 炸药细观损伤演化特性。为了验证循环加载下应力-应变曲线中获得的微裂纹密度 $n_v\overline{c^3}$ 的有效性及准确性，结合扫描电子显微镜(SEM)获取的 PBX 炸药样品的微观损伤形貌，将细观统计方法获得的微裂纹密度与唯象分析获取的(5)式进行对比，验证(5)式的准确性。

不同最大加载应变 ε_{max} 下典型的 PBX 炸药微裂纹分布如图 4 所示。对确定的 PBX 配方而言，PBX 炸药具有不同的初始缺陷（见图 4(a)）；在外界载荷作用下，PBX 材料内部将产生新的损伤，损伤不断演化，导致材料敏化（见图 4(b)～图 4(g)）。从图 4 可以看出，随着最大加载应变的提高，伴随着损伤演化的不断发展，HMX 晶体内的微裂纹条数和长度不断增加，微裂纹密度随之增大。

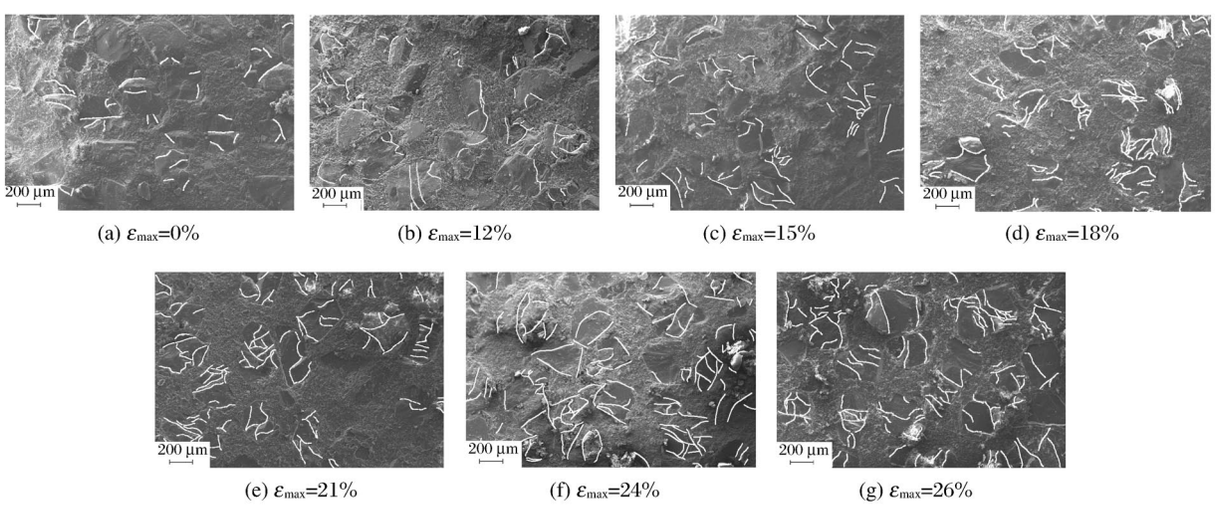


图 4 不同最大加载应变下 PBX 炸药的微观裂纹图

Fig. 4 SEM images of the microstructure of the PBX explosive at different strain levels

图 5 为 $\varepsilon_{max}=24\%$时 PBX 炸药微裂纹 Voronoi 拼图。拼图的目的是为了准确统计单位面积的微裂纹长度和条数。计算的依据是不统计靠近边缘的不完整晶体的面积及其产生的裂纹数目,只统计拼图内完整晶体的裂纹条数。在压缩载荷下,PBX 的破坏模式既有炸药晶体的脆性断裂,也有粘结剂与炸药颗粒的脱粘以及粘结剂的断裂,但以炸药的脆性断裂为主,即穿晶断裂。因此统计裂纹条数时,忽略粘结剂的断裂、粘结剂与炸药颗粒的脱粘,只统计炸药晶体脆性断裂产生的裂纹。将图 4 中的其它微裂纹分布图做类似图 5 的 Voronoi 拼图处理,由此得到图 5 中 2 580 μm×1 750 μm 区域内有效面积所包含的 HMX 晶体裂纹条数,以及所有微裂纹的总长度和平均裂纹长度,求得相应的微裂纹密度数据,如表 1 所示。

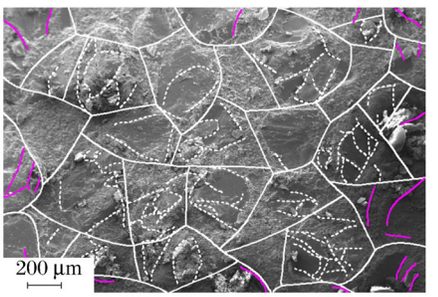


图 5　PBX 炸药裂纹的 Voronoi 拼图

Fig. 5　Voronoi diagram of the cracks of the PBX explosive

表 1　不同应变水平下的微裂纹密度统计表

Table 1　Statistical table of micro-crack density at different strain levels

ε_{max}/(%)	n_s/(10^{-5}/μm^2)	$\overline{c_s}$/(μm)	$n_v\overline{c^3}$	$\Delta n_v\overline{c^3}$
0	0.47	113.67	0.08	0
12	1.66	137.99	0.43	0.35
15	2.29	143.97	0.64	0.56
18	2.98	147.95	0.89	0.81
21	3.30	152.82	1.10	1.02
24	3.39	169.84	1.33	1.25
26	3.41	177.58	1.43	1.35

表 1 中:n_s 为单位面积裂纹条数;$\overline{c_s}$ 为平均裂纹长度;$n_v\overline{c^3}$ 为裂纹密度;$\Delta n_v\overline{c^3}$ 为裂纹密度增量,表示在初始缺陷形成的微裂纹密度基础上,在外力作用下微裂纹密度的增加。从表 1 可以看出:随着最大加载应变 ε_{max} 的提高,微裂纹的条数和长度不断增加;当样品未受到外加载荷作用时,2 580 μm×1 750 μm 的有效区域内晶体微裂纹条数为 15 条,平均裂纹长度为113.67 μm;当最大加载应变为 26%时,2 580 μm×1 750 μm 有效区域内微裂纹条数为 112 条,平均裂纹长度为 177.58 μm。

体视学关系式为

$$n_v\overline{c^3}\approx 1.36 n_s\overline{c_s^2} \tag{8}$$

式中:$n_v\overline{c^3}$ 为三维微裂纹密度,$n_s\overline{c_s^2}$ 为二维状态下由 SEM 图像统计出的微裂纹密度。根据(8)式,可将图 4 中的平面微裂纹密度数据转换为三维状态下的微裂纹密度。将(8)式计算结果与循环加载应力-应变曲线获取的 PBX 微裂纹密度 $n_v\overline{c^3}$ 进行比较,如图 6 所示。可见,两者符合较好。

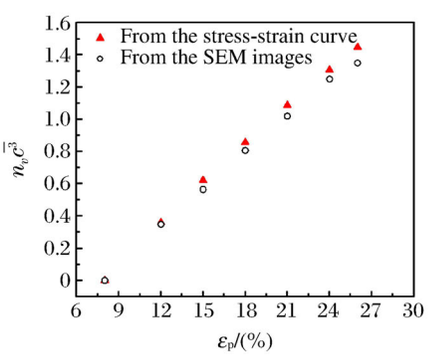
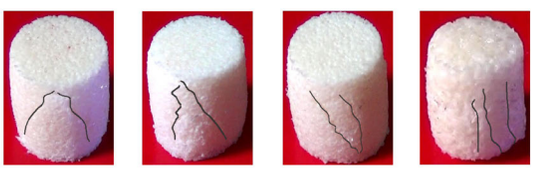


图 6　裂纹密度 $n_v\overline{c^3}$ 与最大加载应变的关系

Fig. 6　Variation of the damage parameter $n_v\overline{c^3}$ with the maximum applied strain

5 PBX 炸药率型损伤本构模型及实验验证

对 PBX 炸药试样进行 4 种应变率($10^{-2}\sim10^{-4}$ s^{-1})加载下的压缩实验,得到 PBX 炸药在不同应变率下的应力-应变曲线。重复进行压缩实验,结果表明,实验具有良好的重复性。PBX 炸药的应力-应变曲线可以分为 3 个阶段:线弹性阶段、非线性强化阶段和达到极限强度后的应变软化阶段。PBX 炸药是一种含初始损伤、颗粒高度填充的复合材料,其原始试样中存在的初始损伤,以微裂纹、微空洞等形式表现。在弹性阶段加载初期,PBX 炸药的微裂纹、微空洞逐渐被压密,初始损伤会进一步演化,该阶段的损伤演化是可逆的,可视为可恢复的弹性损伤。从细观机制来看,线弹性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,在峰值应力附近出现宏观剪切带,判定方法借鉴文献[17]。在应变软化阶段,PBX 炸药中的微裂纹经过汇集、贯通等过程,形成宏观裂隙。在加载应变达到 40%左右宏观剪切带完全形成后,PBX 强度逐步趋近于 PBX 的残余强度。虽然不同应变率下($10^{-2}\sim10^{-4}$ s^{-1})PBX 炸药试样剪切带的破坏形态各异,但均为多重剪切面破坏,表现出明显的韧性特性,如图 7 所示。



(a) $10^{-2}s^{-1}$ (b) $10^{-3}s^{-1}$ (c) $5\times10^{-4}s^{-1}$ (d) $10^{-4}s^{-1}$

图 7 剪切带完全形成后 PBX 炸药的剪切带破坏形态

Fig. 7 Shear band failure of PBX explosive after complete development of shear band

在低应变率范围内,PBX 炸药的特征强度具有应变率效应,其值随应变率的增加而增加,而屈服应变、极限应变的应变率效应不明显。在弹性阶段,PBX 炸药未发生损伤,可仅考虑应变率效应对力学行为的影响;在强化阶段和应变软化阶段,由于材料内部初始损伤演化使材料的承载能力降低,材料的应力-应变关系呈现非线性,这时需考虑由微裂纹密度变化而引起的损伤演化。结合修正的 Johnson-Cook 模型[8],由(5)式、(6)式和(7)式,得到计及微裂纹尺寸、形状、密度等细观参数的损伤率型本构方程,即

$$\begin{cases}\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},D)=[1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)]A\varepsilon & \varepsilon<\varepsilon_y\\ \sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},D)=[A\varepsilon+B(\varepsilon-\varepsilon_y)^n][1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)](1-D) & \varepsilon\geqslant\varepsilon_y\end{cases} \tag{9}$$

式中:A、B、C、n 均为材料参数,A、B 具有应力量纲,n、C 的量纲为 1,参考应变率 ε_y 为 10^{-4} s^{-1}。(9)式等号右边含有 A、B 的项用来描述炸药弹性和应变硬化特征,含有 C 的项用来描述应变率对炸药力学性能的影响,含有损伤度 D 的项则是考虑损伤效应对炸药力学性能的影响。

利用率型损伤本构模型,得到 PBX 炸药在低应变率下的压缩本构关系,如图 8 所示,其中材料参数 $A=6.15$ MPa,$B=1.61$ MPa,$n=0.64$,$C=0.33$,$\beta=0.18$。从图 8 可以看出,修正的率型损伤本构模型与不同应变率下的实验数据符合较好,可以较好地表征 PBX 炸药在线弹性阶段、强化阶段、应变软化阶段的力学性能。

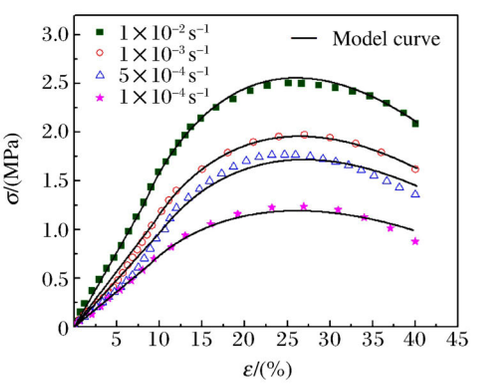


图 8 PBX 炸药本构模型曲线与实验数据的对比

Fig. 8 Comparison between dynamic compression models and experimental data for the PBX explosive

6 结 论

(1) 采用循环加载实验,建立了包含微裂纹尺寸、形状、密度等参数的 PBX 炸药损伤演化方程;

(2) 将 SEM 图像获取的平面微裂纹密度数据转换为三维状态下的微裂纹密度,并与循环加载应力-应变曲线获取的 PBX 微裂纹密度进行比较,两者符合较好;

(3)采用唯象分析和细观统计相结合的方法,建立了 PBX 炸药率型损伤本构方程,该方程能较好地描述 PBX 炸药在线弹性阶段、非线性强化阶段、应变软化阶段的力学性能,待定参数少、形式简单,其中以微裂纹密度定义的损伤变量可方便地由力学实验确定。

References:

[1] Goudreau G, Moen W, Breithaupt D. Evaluation of mechanical properties of PBXW-113 explosive, UCID-20358 [R]. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.

[2] Blumenthal W R, Thompson D G, Cady C M, et al. Compressive properties of PBXN-110 and its HTPB binder as a function of temperature and strain rate [C]//The 12th International Detonation Symposium. San Diego, California, USA, 2002: 530-549.

[3] Han X P, Zhang Y C, Shen Y P, et al. Dynamic behavior and constitutive model of Comp. B explosive [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(3): 303-310. (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, 1996, 11(3): 303-310.

[4] Li Y L, Li D H, Hu S S, et al. An experimental study on constitutive relation of TATB explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 353-359. (in Chinese)
李英雷,李大红,胡时胜,等. TATB 钝感炸药本构关系的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 353-359.

[5] Luo J R, Zhang S Q, Zhao F F, et al. Nonlinear constitutive relation of PBX under simple tension [J]. Energetic Materials, 2000, 8(1): 42-45. (in Chinese)
罗景润,张寿齐,赵方芳,等. 简单拉伸下高聚物粘结炸药的非线性本构关系 [J]. 含能材料, 2000, 8(1): 42-45.

[6] Luo J R. Study on damage, fracture and constitutive relation of PBX [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001: 112-126. (in Chinese)
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: 112-126.

[7] 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.

[8] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Eng Fract Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[9] Fu H, Li J L, Tan D W. Experimental study on constitutive relations for plastic-bonded explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(3): 231-236. (in Chinese)
傅　华,李俊玲,谭多望. PBX 炸药本构关系的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 231-236.

[10] Browning R V, Gurtin M E, Williams W O. A one dimensional viscoplastic constitutive theory for filled polymers [J]. Int J Solids Struct, 1984, 20(11/12): 921-934.

[11] Dienes J K. A unified theory of flow, hot spots, and fragmentation with an application to explosive sensitivity [M]//Davison L, Grady D E, Shahinpoor M. High-Pressure Shock Compression of Solids Ⅱ: Dynamic Fracture and Fragmentation. New York, USA: Springer, 1996: 366-398.

[12] Dienes J K, Kershner J D. Multiple-shock initiation via statistical crack mechanics, LA-UR-98-3046 [R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1998.

[13] Bennett J G, Haberman K S, Johnson J N. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives [J]. J Mech Phys Solids, 1998, 46(12): 2303-2322.

[14] Poon B, Ponson L, Zhao J, et al. Damage accumulation and hysteretic behavior of MAX phase materials [J]. J Mech Phys Solids, 2011, 59(10): 2238-2257.

[15] Ling J M, Sun J. On mesocrack damage of brittle rocks and its time-dependent characteristics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 304-312. (in Chinese)
凌建明,孙　钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304-312.

[16] Ling J M. Study on the mesoscopical characteristics of rock damage under compressive loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1993, 21(2): 219-226. (in Chinese)
凌建明. 压缩荷载条件下岩石细观损伤特征的研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 1993, 21(2): 219-226.

[17] Wang Z P. Studies on the digital photograph measuring method and application of soil deformation with triaxial test [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001: 114-123. (in Chinese)
王助贫. 三轴试验土样变形的数字图像测量方法及其应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2001: 114-123.

Experimental Study on Rate-Dependent Constitutive Relations with Damage for Plastic-Bonded Explosives

LI Dan[1,2], ZHAO Feng[2], FU Hua[2], LI Ke-Wu[2]

(1. *College of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *China*;
2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Cyclic loading and unloading experiments and the uniaxial compressive experiment of plastic-bonded explosives (PBX) under different strain rate were performed by a universal material testing machine. The stress-strain curves of plastic-bonded explosives were obtained in different operating conditions. Based on the idea of combining phenomenological analysis and micro-statistical analysis, a damage evolution equation with damage internal variable and rate-dependent constitutive relations with damage for plastic-bonded explosives were given. The model was checked with the experimental data, and the relevant parameters of rate-dependent constitutive relations with damage were obtained. Experimental results indicate that the constitutive equation can describe mechanical properties of the PBX explosives at the linear elastic stage, strengthen stage, and strain softening stage. The constitutive relation is simple and requires less parameters to be determined. The damage variable defined by micro-crack density can be easily determined by mechanical testing.

Key words: PBX explosive; micro-crack density; rate type; damage; constitutive relation