

文章编号: 1006-9941(2000)01-0042-04

简单拉伸下高聚物粘结炸药的非线性本构关系

罗景润^{1,4}, 张寿齐², 赵方芳^{1,4}, 李大红³, 赵玉华²

(1. 中国工程物理研究院结构力学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900;

3. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;

4. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)

摘要: 根据两种高聚物粘结炸药在不同温度(−10~45℃)和应变率($10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)下的准静态拉伸实验结果, 建立了考虑温度和应变率效应的非线性本构关系。理论预测与实验结果吻合, 为这类材料的力学性能分析提供了依据。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 力学性能; 非线性本构关系

中图分类号: O344.1; TQ560.71

文献标识码: A

1 引言

在武器工业中高聚物粘结炸药(PBX)的力学性能特别重要, 近年来很多学者对 PBX 在不同温度和应变率下的力学性能或响应进行了研究^[1~6]。结果表明, PBX 的强度随应变率的增加和温度的降低而增加, 但迄今为止, 还没有比较合理的本构模型对其力学行为进行描述。

在静态载荷下, 一般采用修正的 Ramberg-Osgood 关系来描述低应变率下 PBX 的力学行为^[7], 但是, 该模型不能体现温度和应变率的效应。在较高的应变率下, 一些研究者也采用 Johnson-Cook 模型来描述其力学行为^[5], 但该模型是针对金属材料在高应变率下的力学行为建立的^[8], 当应用于 PBX 材料时, 理论与实验结果差异较大, 这或许与高应变率下 PBX 材料内部损伤的发展有关。

本文基于实验结果, 建立了 PBX 在准静态拉伸载荷下同时考虑温度和应变率效应的非线性本构关系。

2 修正的 Ramberg-Osgood 关系

对两种 PBX 材料的标准拉伸试件(dog-bone 形状)在不同温度(−10~45℃)和应变率($10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)下进行准静态拉伸实验。材料 I 主要由 HMX、粘结剂

及钝感剂组成; 材料 II 由 HMX、TATB、粘结剂和钝感剂组成。

可以用修正的 Ramberg-Osgood 关系描述这两种材料的力学行为:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + 0.0436 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \quad (1)$$

式中, σ_0 和 ε_0 分别为应力-应变关系中初始线性段某处的应力和应变, 其弹性模量 $E = \sigma_0 / \varepsilon_0$, m 是与应变率及温度有关的参数。

从图 1 和图 2 可看出, ε_0 、 σ_0 和 m 都与温度和应变率有关, 但无规律性。仅 E 随温度的增加和应变率的降低而降低, 如表 1 所示。

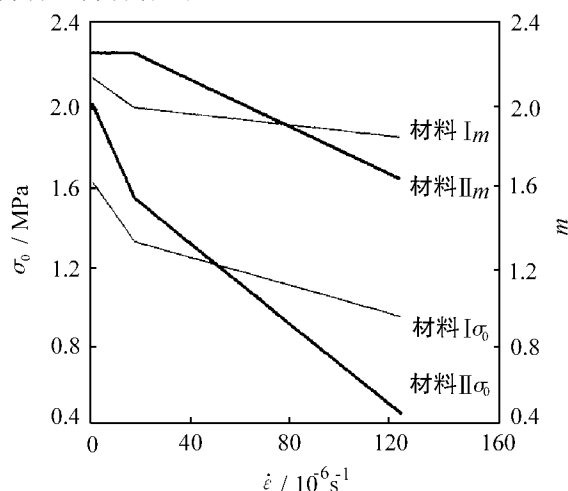


图1 σ_0 及指数 m 与应变率的相关性

Fig. 1 Relations of σ_0 and m with strain rate

收稿日期: 1999-08-24 修回日期: 1999-11-05

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金资助项目(980113)

作者简介: 罗景润(1966-), 男, 博士生, 副研, 发表论文数篇。

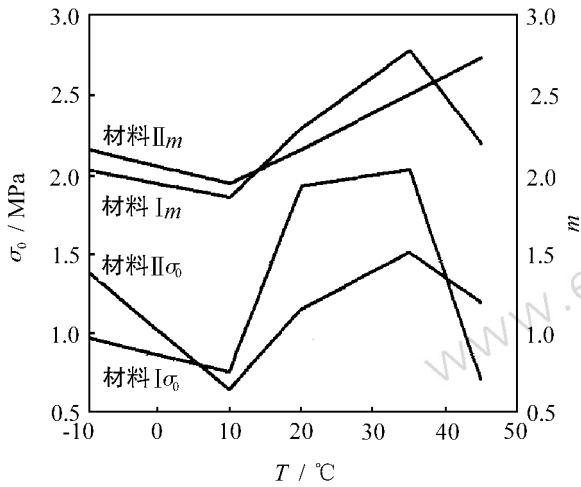
图 2 σ_0 及指数 m 与温度的相关性Fig. 2 Relations of σ_0 and m with temperature

表 1 不同温度及应变率下材料 I 和材料 II 的弹性模量

Table 1 Elastic moduli of two materials at

different temperature and strain rate

GPa

PBX	温度/°C					应变率/ 10^{-6} s^{-1}		
	-10	10	20	35	45	1	18	125
材料 I	17.99	14.40	12.73	11.22	10.69	12.43	13.61	14.24
材料 II	16.46	14.58	12.83	11.23	10.00	12.20	13.00	13.65

3 非线性本构关系

实验结果表明,两种 PBX 材料的力学性能对温度和应变率都比较敏感。在准静态加载条件下,应变率从 10^{-6} s^{-1} 增加到 10^{-4} s^{-1} 时,材料 I 的弹性模量提高 15%,材料 II 的弹性模量提高 12%。用修正的 Ramberg-Osgood 关系可以描述拉伸载荷下 PBX 的应力-应变行为时,其中的参数 ε_0 、 σ_0 和 m 并不为材料常数,而是与温度和应变率都有关,且没有确定的关系。因此,必须建立考虑温度和应变率效应的本构关系。

为了研究应变率和温度对金属材料力学性能的影响,Johnson & Cook^[8] 提出了一个热粘塑性模型来描述不同温度和高应变率下金属材料的力学行为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)(1 - \bar{T}^k) \quad (2)$$

其中, A 、 B 、 C 、 n 和 k 为材料常数, A 为参考温度和参考应变率下材料的屈服应力, $\dot{\varepsilon}_0$ 为准静态下参考应变率, $\bar{T}$ 为无量纲温度:

在该模型中,第一部分(包含常数 A 、 B 和 n)反映

了材料的应变硬化特征,第二部分描述应变率对材料性能的影响,而第三部分反映温度软化效应。

对于受拉伸载荷作用的 PBX,由实验结果可看出,不能直接应用 Johnson-Cook 模型描述不同温度和应变率下材料的力学行为。在室温和参考应变率下该模型简化为一个简单的指数关系,显然与实验结果有很大偏差。不过,可以借鉴这种方法将修正的 Ramberg-Osgood 关系转化为:

$$\sigma = A(\varepsilon - B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)g(\bar{T}) \quad (3)$$

从而得到 PBX 在简单拉伸载荷下的非线性本构关系,于是在室温下由 A 、 B 、 n 和 C 这四个常数就可以确定不同应变率的拉伸载荷下 PBX 材料的应力-应变关系。

温度对 PBX 材料的力学行为影响很大。所谓热软化效应即 PBX 的强度随着温度的增加而下降。从工程应用和力学分析角度来讲,一般所关心的温度在 $-50 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围。根据不同温度下的拉伸实验结果,可以采用如下的函数关系来反映温度影响:

$$g(\bar{T}) = (1 - \alpha\bar{T} - \beta\bar{T}^2 - \gamma\bar{T}^3) \quad (4)$$

式中,无量纲温度 $\bar{T}$ 可定义为:

$$\bar{T} = \frac{T - T_r}{T_r} \quad (5)$$

其中, T_r 为室温。

于是, PBX 在单向拉伸下的非线性本构关系为:

$$\sigma = A(\varepsilon - B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)(1 - \alpha\bar{T} - \beta\bar{T}^2 - \gamma\bar{T}^3) \quad (6)$$

该模型中的系数 A 、 B 、 n 、 C 、 α 、 β 和 γ 为材料常数(对确定的 PBX),与温度和应变率无关,其中常数 A 具有应力的量纲,其余皆为无量纲常数。

该本构模型的物理意义也很清楚,第一部分表明参考温度和应变率下 PBX 材料的应力-应变关系及其与简单线性关系的偏离程度(或者非线性程度),第二部分表征应变率(或试验机加载头的运动速度)对 PBX 材料力学性能的影响,第三部分表征热软化效应。

所研究的两种 PBX 材料常数如表 2 所示。

表 2 两种 PBX 的材料常数

Table 2 Material constants in the nonlinear constitutive model

PBX	A/GPa	B	n	C	α	β	γ
材料 I	12.73	399.50	2.04	0.013	0.136	0.022	0.036
材料 II	12.83	120.33	1.84	0.017	0.127	0.030	0.043

由非线性本构关系(6)所预测的不同温度和不同应变率下两种 PBX 材料的应力 - 应变关系与实验结

果比较分别如图 3 ~ 6 所示。可以看出理论模型与实验结果一致。

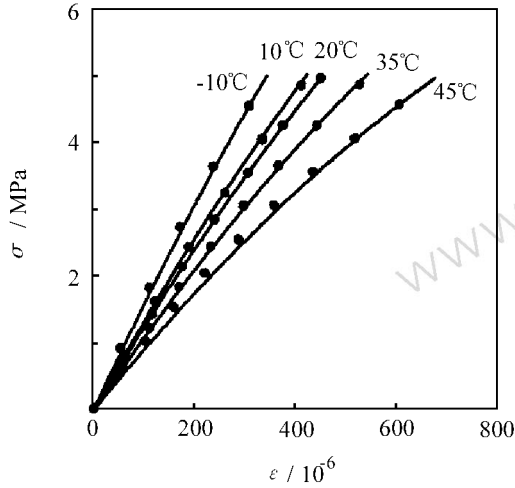


图 3 不同温度下材料 I 的应力 - 应变关系 ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 3 Stress-strain curves of I at different temperature

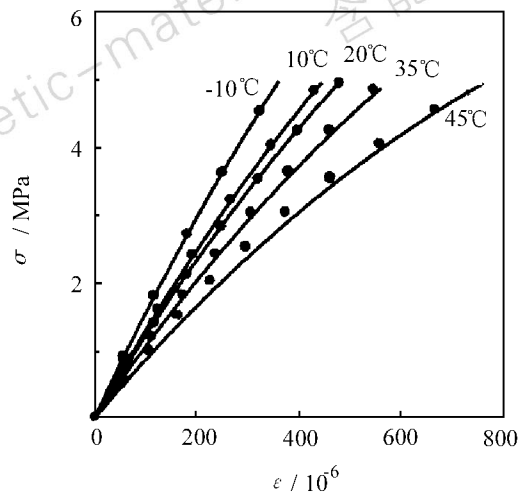


图 4 不同温度下材料 II 的应力 - 应变关系 ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 4 Stress-strain curves of II at different temperature

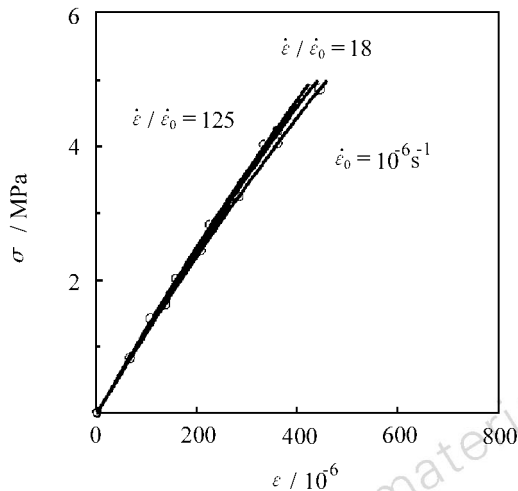


图 5 不同应变率下材料 I 的应力 - 应变关系 (20 °C)

Fig. 5 Stress-strain curves of I at different strain rate

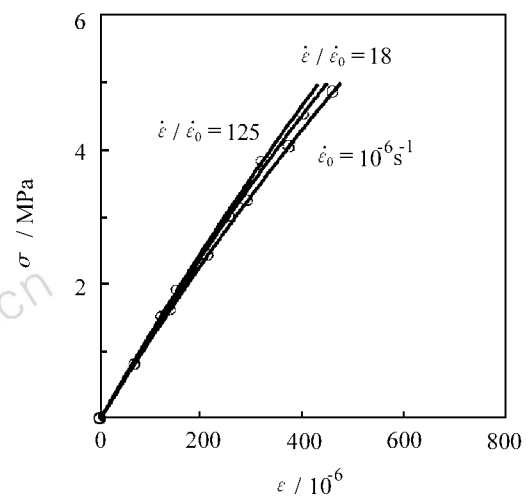


图 6 不同应变率下材料 II 的应力 - 应变关系 (20 °C)

Fig. 6 Stress-strain curves of II at different strain rate

4 结果讨论

Johnson-Cook 本构模型能较好地描述金属材料在不同温度和应变率载荷下的塑性行为^[9]。由于 PBX 材料的拉伸和压缩力学性能差别很大,同时在拉伸和压缩(静态和动态)时所表现的力学行为与金属材料完全不同,因此,不能直接应用 Johnson-Cook 模型来描述 PBX 的力学行为。

PBX 在拉伸载荷下没有明显的屈服行为(如图 3 ~ 6 所示)。虽然修正的 Ramberg-Osgood 关系可以表征 PBX 材料在拉伸载荷下的这种力学行为,但是该关系中的参数与温度及应变率都有关,不是材料常数。本文所建立的非线性本构关系(式(6))可以描述这类材料在拉伸载荷下的力学行为,由该式所预测的在不同温度和应变率下 PBX 材料的应力 - 应变关系与实验结果相吻合。

需要指出的是,该本构模型是在准静态条件下同时考虑温度和应变率对 PBX 材料力学性能的影响,该模型可以推广应用于较高应变率拉伸载荷下 PBX 的力学性能研究,但是,显然不适合用于描述受到压缩载荷(静态及动态)下 PBX 的力学行为,这方面还需要进一步探讨。

参考文献:

- [1] Weigand D A, Pinto J, Nicolais S. The mechanical response of TNT and a composite, composition B, of TNT and RDX to compressive stress, I: uniaxial stress and fracture[J]. J. Energetic Materials, 1991, 9: 19-80.
- [2] Pinto J, Weigand D A. The mechanical response of TNT and a composite, composition B, of TNT and RDX to compressive stress, II: triaxial stress and yield[J]. J. Energetic Materials, 1991, 9: 205-263.
- [3] Weigand D A. Constant critical strain for mechanical failure of several particulate polymer composite explosives and propellant and other explosives[R]. AD-A327298, 1997.
- [4] Gray C I. High and low strain rate compressive properties of several energetic material composites as a function of temperature and strain rate[C]. Paper summaries—The 11th Int. Detonation Symp., 1998: 229.
- [5] 韩小平, 张元冲. 含能材料动态力学性能实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, (1): 20-27.
- [6] Goldrein H T. Optical techniques for strength studies of polymer bonded explosives[C]. 10th Symp. (Int.) Detonation, Boston, 1993: 525-535.
- [7] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [8] Johnson C R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates, and high temperature[C]. 15th Int. Symp. on Ballistics, 1983: 1-7.
- [9] Meyers M A. Dynamic Behavior of Materials[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

Nonlinear Constitutive Relation of PBX under Simple Tension

LUO Jing-run^{1,4}, ZHANG Shou-qi², ZHAO Fang-fang^{1,4}, LI Da-hong³, ZHAO Yu-hua²

(1. Southwest Institute of Structural Mechanics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. Southwest Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

4. Graduate Institute, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the experimental data from quasi-static tension of two polymer-bonded explosives (PBX) under temperature from $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ and strain rate from 10^{-6} s^{-1} to 10^{-4} s^{-1} , a nonlinear constitutive relation is proposed to describe the mechanical behaviors of the said PBX under the simple tension at different temperature and strain rate. The theoretical prediction from the constitutive relation is well agreeable to the experimental results, which provides a basis for analyzing the mechanical response of this kind of material construction.

Key words: polymer-bonded explosive (PBX); mechanical properties; nonlinear constitutive relation