

文章编号: 1006-9941(2008)01-0034-03

## 基于修正时间硬化理论的 PBX 蠕变模型

唐 维<sup>1,2</sup>, 李 明<sup>1</sup>, 温茂萍<sup>1</sup>, 张 丘<sup>1</sup>, 赵小东<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 对比分析了现有的 PBX 蠕变模型, 提出运用基于修正时间硬化理论来模拟机械加工过程中的蠕变行为, 该模型有紧凑的数学表达式和较少的待定参数。为验证模型的有效性, 选取以奥克托今(HMX)为基的 PBX 进行常温条件下的压缩蠕变试验并进行了模型研究, 确定了全部模型参数。采用有限元软件对圆柱体压缩试样的压缩蠕变实验进行仿真。理论分析以及有限元数值仿真表明该模型用于仿真计算时, 其结果与试验获得蠕变数据相当吻合, 可以运用于 PBX 部件加工的形位变化仿真。

**关键词:** 材料力学; PBX; 蠕变模型; 修正时间硬化理论; 有限元仿真

**中图分类号:** TJ55; O341; TB301

**文献标识码:** A

### 1 引 言

高聚物粘结炸药(PBX)是一种高颗粒填充的复合材料, 少量的粘结剂存在会带来明显的蠕变行为<sup>[1-2]</sup>。在 PBX 部件的机械加工中, 由于较长时间的机械力作用, 局部位置会有明显的形位变化, 这是 PBX 粘弹性蠕变特性的体现。通过有限元仿真技术可以模拟 PBX 部件在夹持和加工过程中的变形行为, 不过现有的仿真研究在运用材料模型时都未考虑其粘弹性蠕变行为<sup>[3]</sup>, 而是直接选用线弹性模型, 不能真实地反映其材料力学行为特征。研究 PBX 的蠕变特性, 并建立合适的蠕变材料本构模型, 对于提高 PBX 部件的有限元仿真精度, 实现炸药部件的精密加工和形位尺寸的有效控制具有重要意义。

丁雁生等<sup>[4-5]</sup>在粘弹性力学理论的基础上, 提到由两弹簧和两粘壶组成的四元件流体模型能较好地解释 PBX 中聚合物的蠕变特性, 并推出了如公式(1)所示的高聚物整体应变与时间的关系。李明等<sup>[6]</sup>研究了 TATB 为基的 PBX 的蠕变, 认为 7 级 Prony 级数模拟的蠕变柔量函数与试验叠合曲线能很好的吻合。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) + \frac{\sigma_0}{F_1}t \quad (1)$$

上述模型对于完善 PBX 蠕变的理论模型有重要作用, 但公式结构复杂, 待定参数多; 同时, 文献

[5]也指出要很好地反映 PBX 的蠕变特性, 应该采用更多元件的模型, 这样势必引入更多的待定模型参数, 为工程应用带来不便。本文引入基于修正时间硬化理论来描述 PBX 的压缩蠕变行为, 根据实验数据确定模型参数, 得到可以方便运用于炸药部件机械加工仿真的蠕变模型。

### 2 基于修正时间硬化理论的 PBX 蠕变模型

#### 2.1 模型的提出

基于时间硬化理论的 Norton-Bailey 蠕变规律<sup>[7-9]</sup>认为: 在给定的应力和温度条件下, 从应力一开始其蠕变应变率仅决定于时间, 一般表达式为  $\dot{\varepsilon}_{cr} = f(\sigma, t, T)$ 。通常蠕变试验获得的数据是应力  $\sigma$ 、环境温度  $T$  以及总应变  $\varepsilon$  与时间的关系, 于是演化出了修正时间硬化理论(modified time hardening theory, MTHT), 认为在给定的应力和温度条件下, 从应力一开始其蠕变应变率仅决定于时间, 根据定义, 其数学表达式即为时间硬化理论表达式的积分修正, 一般表达式为  $\varepsilon'_{cr} = \int \dot{\varepsilon}'_{cr} dt = g(\sigma, t, T)$ 。从(修正)时间硬化理论中的假设来看, 这与我们对 PBX 蠕变的认识是相符的, 也是合理的。综合考虑蠕变的影响因素, 假定 PBX 材料蠕变特性的各向同性, 引入修正因子  $C_1$ , 蠕变应变(率)对应力、时间和与温度相关的常数系数  $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$ , 为便于参数的确定, 公式采用乘积的形式, 具体表达式分别如式(2)和式(3)所示, 而式(4)表示总应变与蠕变应变  $\varepsilon_{ce}$ 、弹性应变  $\varepsilon_e$  的关系。

$$\dot{\varepsilon}'_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-\frac{C_4}{T}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cr} = \int \dot{\varepsilon}'_{cr} dt = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} e^{-\frac{C_4}{T}} / (C_3 + 1) \quad (3)$$

收稿日期: 2007-06-14; 修回日期: 2007-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10602054), 中国工程物理研究院化工材料研究所所长基金资助项目(No. 62601080314)

作者简介: 唐维(1981-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事 PBX 部件机械加工计算机仿真研究。

通讯联系人: 李明, 副研究员, e-mail: li\_ming@caep.ac.cn

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon - \varepsilon_e = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

考虑材料的粘性随时间硬化,应有  $C_3 < 0$ ; 如还随应力硬化,应有  $C_2 < 1$ 。

### 2.2 模型的建立

本文以奥克托今为基的 PBX 恒应力下的三次压缩蠕变试验数据为例,阐述模型参数确定的具体步骤,再通过比较分析试验和仿真所得的蠕变应变数据以确定基于修正时间硬化理论的蠕变模型的有效性和可靠性。

#### 2.2.1 压缩蠕变试验

实验在 Instron 5582 材料实验机上进行。压缩蠕变试样是标准圆柱体试样 ( $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ), 直接由小型压机压制而成。试验温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 试样标距为  $15 \text{ mm}$ , 初始加载速度为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试验开始时, 加载直至试样内真实应力达到预先设定的应力值 (进行了三次压缩蠕变试验, 试验压缩应力分别为  $27, 30, 39 \text{ MPa}$ , 后两个试样实验应力已接近于该型材料的准静态压缩破坏应力, 模拟了 PBX 部件加工中可能出现的机械破坏的极限情况), 然后由实验系统自动补偿因蠕变减少的应力, 采集总应变与时间的相关数据 (折算初始加载时的应变率为  $0.00042/\text{s}$ , 属于准静态范围), 试验结果如图 1 所示。

#### 2.2.2 模型参数的确定

试验测得该型 PBX 的弹性模量为  $10.1 \text{ GPa}$ , 因公式(3)所需要的是蠕变应变  $\varepsilon_{cr}$ , 故先用公式(4), 从试验测定的总应变中减去弹性应变部分得到蠕变应变  $\varepsilon_{cr}$ , 再采用公式(3)表征的基于修正时间硬化理论的蠕变模型拟合确定模型参数。试验初期, 试验应力尚未稳定, 在保证需要的前提下, 为提高精度, 模型建立选取  $150 \sim 3600 \text{ s}$  的数据进行处理。因试验温度恒定,  $C_4$  取零<sup>[7-9]</sup>; 考虑到仿真计算的收敛性, 经多次计算,  $C_1$  取  $10^{-5}$  能很好的满足要求。拟合结果如图 1 所示, 模型参数见表 1。

表 1 奥克托今为基的 PBX 蠕变模型参数

specimen number	experimental stress /MPa	$C_2$	$C_3$	residual (Sn)
1	27.1	0.401	-0.703	4.245E-05
2	30.6	0.502	-0.708	6.133E-05
3	39.5	0.392	-0.649	1.607E-05

### 2.3 模型的应用

在 ANSYS 中建立对应表 1 中参数值的蠕变模型, 并建立压缩蠕变试验有限元模型, 施加试验边界条件

(在圆柱试样模型下表面施加零位移约束, 上表面施加试验压缩应力), 计算得到的试样蠕变应变如图 1 所示的仿真曲线。

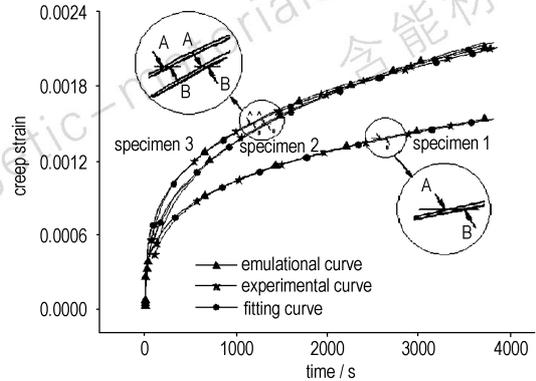


图 1 蠕变应变比较图

Fig. 1 The comparison of creep strain

### 3 分析与讨论

比较和分析实验数据和仿真数据, 可以发现:

(1) 采用公式(3)所表征的基于修正时间硬化理论的蠕变模型, 对蠕变实验的有效数据进行拟合, 精度很高, 残差标准差都在  $10^{-5}$  量级, 拟合曲线基本与实验曲线完全重合。

(2) 对比每次仿真曲线和对应实验曲线可以发现, 前者总是略大于后者, 笔者认为, 最主要的原因是实验初期的  $150 \text{ s}$  左右的实验应力值尚处于逐步增加的不稳定阶段, PBX 蠕变相对较弱; 而仿真实验则从时间为  $0 \text{ s}$  时已经加载了稳定时的实验应力值, 显然最后的仿真曲线会超前实验曲线几十秒, 读取图示各点坐标值如表 2 所示, 表中数据与这一解释吻合。

表 2 实验和仿真曲线的时间差

Table 2 Time difference of experimental and emulational curves

specimen number	creep strain	$t_A/\text{s}$	$t_B/\text{s}$	$\Delta t/\text{s}$
1	1.357E-03	2491.8	2551.4	59.6
2	1.488E-03	1264.1	1293.9	29.8
3	1.488E-03	1112.2	1135.9	23.7

Note:  $t_A, t_B$  is time on emulational and experimental curve, respectively.

(3) 确定可靠的模型参数将使得仿真预测不同结构和受力状况下 PBX 炸药部件的蠕变变形, 进而有效地控制和提高 PBX 炸药部件加工精度成为可能。从图 1 可以看出, 试样 3 的试验应力最大, 但其蠕变应变在  $2000 \text{ s}$  左右却逐渐小于试样 2, 可见, 尽管试样的蠕变随应力增加而增加, 但 PBX 这种颗粒复合材料的蠕变也表现出一定程度的随机性, 分析其原因, 主要是试

样成型过程中造成的试样非均质特点所致,而且本文试验所施加应力都接近于材料准静态压缩条件下的破坏应力,材料在此应力水平下的蠕变可能伴随有微细观的裂纹产生,这也可能造成一定程度的蠕变变形随机性特点,即在相对弱的应力水平作用下也可能产生引起相对较高的蠕变变形,加速 PBX 的蠕变失效。这也表明需要更多的试验数据来精确对定模型的参数,以提高仿真的可靠性。

#### 4 结 论

在压缩蠕变试验的基础上提出采用基于修正时间硬化理论的蠕变模型用于描述 PBX 的蠕变特性,该模型在假定 PBX 蠕变各向同性的基础上综合考虑蠕变应变的影响因素,引入应力、时间和与温度等的相关常数并采用易于确定参数的乘积形式。采用该模型对试验数据进行处理时,拟合精度很高,残差标准差都在  $10^{-5}$  量级,表明模型能够很好的表征该 PBX 的蠕变特性,可以运用于炸药部件机械加工形位变化的计算机仿真。另一方面,鉴于接近破坏应力下的蠕变变形带有一定程度的随机性,该模型参数可以通过更多的蠕变失效试验来精确确定。

#### 参考文献:

- [1] 张双寅. 聚合物基复合材料蠕变及其与疲劳断裂的关系[J]. 复合材料学报,1987,4(2): 1-9.  
ZHANG Shuang-yin. Creep properties and their relationships to fracture and fatigue of composite materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*,1987,4(2): 1-9.
- [2] 潘颖,丁雁生,蔡瑞娇,等. 刚性粒子填充高聚物粘弹性细观损伤

显微观察[J]. 北京理工大学学报,2000,1: 125-128.

PAN Ying, DING Yan-sheng, CAI Rui-jiao, et al. Microscopic observations on the mesoscopic damage in the polymer bonded solid particulate [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*,2000,1: 125-128.

- [3] ZHAO Xiao-dong, BAI Ping, LI Ming, et al. Experimental and numerical investigation into machining parameters for cutting forciers and temperatures of PBX [C] // *Theory and Practice of Energetic Materials*, Beijing, Science Press,2005. 338-342.
- [4] 潘颖,丁雁生,蔡瑞娇,等. PBX 聚合物基复合材料蠕变损伤一维模型[J]. 兵工学报,2000(2): 123-127.  
PAN Ying, DING Yan-sheng, CAI Rui-jiao, et al. One-dimensional creep-damage model of plastic bonded explosives [J]. *Journal of China Ordnance*,2000(2): 123-127.
- [5] 丁雁生,潘颖,蔡瑞娇,等. PBX 材料的蠕变损伤本构关系[J]. 含能材料,2000,8(2): 86-90.  
DING Yan-sheng, PAN Ying, CAI Rui-jiao, et al. The creep-damage constitutive relation of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2000,8(2): 86-90.
- [6] 李明,温茂萍,何强,等. TATB 基高聚物粘结炸药的蠕变特性研究[J]. 含能材料,2005,13(3): 150-154.  
LI Ming, WEN Mao-ping, HE Qiang, et al. The compressive creep behavior of PBX based on TATB [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2005,13(3): 150-154.
- [7] Chandenduang C, Becker A A. Boundary element formulation for two-dimensional creep problems using isoparametric quadratic elements [J]. *Computers and Structures*,2003,81(16): 1611-1618.
- [8] Jahed Hamid, Bidabadi Jalal. An axisymmetric method of creep analysis for primary and secondary creep [J]. *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*,2003,80(9): 597-606.
- [9] Ogbonna N, Fleck N A, Cocks A C F. Transient creep analysis of ball indentation [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*,1995,37(11): 1179-1202.

## PBX Creep Model Based on Modified Time Hardening Theory

TANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1</sup>, WEN Mao-ping<sup>1</sup>, ZHANG Qiu<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of CAEP, Mianyang 621900, China )

**Abstract:** A reasonable model of plastic bonded explosive (PBX) substantiated by creep property is useful for finite element simulation of machining PBX components. Modified time hardening theoretical (MTHTT) model, which has compact form and less undetermined parameters, is promoted in this paper to describe creep behavior of PBX. A HMX based PBX is employed to conduct compressive creep tests. The model parameters are determined and the corresponding fitting details are discussed for validating the model. Meanwhile, finite element software is used to simulate the creep deformation of cylinder specimens subjected to the experimental stresses. Theoretical analysis and the simulation show that the model agrees well with the results of creep test and it could be used in simulating the deformation of PBX components during the machining process.

**Key words:** materials mechanics; polymer bonded explosive (PBX); creep model; modified time hardening theory (MTHT); finite element simulation