

文章编号: 1006-9941(2015)06-0543-05

# 某 HMX 基 PBX 温压时效处理过程变形规律数值模拟

兰琼, 唐维, 贺建华, 雍炼, 韩超, 杨宝刚

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为掌握高聚物粘结炸药(PBX)内部弹性应变向塑性应变转化规律,应用时温等效原理推导 80 °C 的 HMX 基 PBX 蠕变曲线,并由 ANSYS 有限元软件拟合得到基于修正时间硬化理论的蠕变模型,用此模型对温压时效处理过程的 HMX 基 PBX 加热加压阶段变形情况进行模拟,结果显示:温压时效处理(80 °C、10 MPa)使 HMX 基 PBX 产生应力加载方向的压缩变形,炸药柱直径和高度分别减小 0.476 mm 和 1.306 mm,密度增大 0.047 g·cm<sup>-3</sup>,表明温压时效处理方法能够对 PBX 起到加速蠕变的作用。

**关键词:** 温压时效处理;高聚物粘结炸药(PBX);时温等效原理;蠕变;变形

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.007

## 1 引言

温压时效处理方法是利用热塑性高聚物粘结炸药(PBX)可以反复加热加压的特点,在高聚物粘结剂软化温度范围内,对 PBX 施加一定压力,使材料在弹性应变能释放的同时发生加速蠕变<sup>[1]</sup>,使颗粒间接触区发生塑性变形,粘结相热软化,进一步填充材料内部空隙,抑制炸药件的不可逆长大,提高其密度,减少分层、疏松等缺陷<sup>[2]</sup>。

目前,国内外主要采用试验结合宏观、微观测试的方法判断温压时效处理效果,取得了系列研究成果<sup>[2-4]</sup>,印证了其对于成型炸药件宏观性能强化,内部孔隙减小的影响。但是,试验测试方法周期长,效率低,且无法获得试验过程中炸药件受热、力影响的尺寸变化规律。温压时效处理可以通过蠕变促进 PBX 材料弹性应变向塑性应变的转化,通过数值模拟确定炸药件在温压时效处理过程中的蠕变量,进而初步估计试验效果。通过建立合适的蠕变模型,可以模拟炸药在处理过程中的变形规律,判断处理工艺是否合理,通过修改载荷参数能初步确定处理条件,以减少试验次数,缩短试验周期。但目前还未见利用数值模拟方法分析

炸药温压时效处理过程的相关报道。

本研究应用时温等效原理<sup>[5-7]</sup>推导 80 °C 的 PBX 蠕变曲线,并由 ANSYS 有限元软件<sup>[8]</sup>拟合得到修正的时间硬化蠕变理论参数模型,用此模型对温压时效处理过程的加热加压阶段进行模拟,得到处理过程中炸药件尺寸变化规律,并推导出炸药件密度变化量,由此预测温压时效处理对 PBX 的作用效果。

## 2 80 °C 下蠕变曲线的确定

### 2.1 基于修正时间硬化理论的蠕变模型

文献[9]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(modified time hardening theory, MTHT)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、时间和与温度等相关的常数并采用易于确定参数的乘积形式。修正时间硬化理论认为在给定的应力和温度下,蠕变应变仅取决于时间,其数学表达式为时间硬化<sup>[10-11]</sup>的积分修正,其一般表达式为:

$$\varepsilon_{cr} = \int \varepsilon'_{cr} dt = g(\sigma, t, T) \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ ,应变; $t$ ,时间,s; $\sigma$ ,应力,N·mm<sup>-2</sup>;  $T$ ,温度,K。

为综合考虑蠕变的影响因素,假定 PBX 材料蠕变为各向同性,引入修正因子  $C_1$ ,考虑应力、时间和温度影响因素的系数  $C_2$ 、 $C_3$  和  $C_4$ ,并采用乘积的形式,具体表达式分别如式(2)和式(3)所示。

收稿日期: 2014-04-15; 修回日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(11102189)

作者简介: 兰琼(1979-),女,副研究员,主要从事含能材料成型及后处理技术研究。e-mail: lanqiong111@sohu.com

通信联系人: 贺建华(1986-),男,助理研究员,主要从事含能材料成型及力学性能研究。e-mail: hejianhua 20041138@126.com

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

即基于修正时间硬化理论的蠕变应变公式为:

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

## 2.2 80 °C 下蠕变曲线的确定

温压时效处理试验是在 80 °C 下对材料施加压力载荷, 导致炸药件受压, 体积减小, 产生压缩应力应变, 应用时温等效理论<sup>[5-7]</sup>, 在已知温度的蠕变曲线基础上推导出 80 °C 下的 PBX 压缩蠕变曲线。

炸药材料的力学性能与温度相关, 可以通过数小时内的压缩蠕变试验来获得蠕变应变曲线。图 1 为恒定压缩应力 4 MPa, 20, 35, 45, 55 °C 和 65 °C 温度下获得的一系列 HMX 基 PBX 蠕变试验曲线。初始加载时, 试验横梁速度为恒定值 (0.5 mm · min<sup>-1</sup>), 试样标距为 15 mm。试验在 Instron5582 材料试验机上进行。从图 1 可知, 在各个温度下获得的压缩蠕变曲线形状极为相似, 符合时温等效原理关于高聚物力学性能高度依赖于时间和温度的描述。因此, 将不同温度下 HMX 基 PBX 压缩蠕变曲线 (图 1) 转化为图 2 所示的蠕变柔量曲线, 再转化为压缩蠕变柔量双对数曲线 (以下简称双对数曲线) (图 3)。由图 3 可知, 45, 55 °C 和 65 °C 下的双对数曲线的形状基本一致, 因此可以通过平移双对数曲线到某一参考温度下获得主曲线, 在平移中同时获得变换因子  $\alpha_T$ 。依据以上原则, 以 55 °C 为参考温度, 将高于此参考温度的双对数曲线向右移动而低于此温度的双对数曲线向左移动, 可以得到 55 °C 下的双对数坐标下的主曲线。因此, 利用时温等效原理, 以 55 °C 为参考温度, 分别选择 45 °C 曲线向左移动, 65 °C 曲线向右移动, 获得图 4 所示的双对数坐标下的蠕变柔量曲线的叠合主曲线, 并由此由 Williams-Landel-Ferry 方程 (WLF 方程)<sup>[7]</sup> 推导出 80 °C 下的压缩蠕变曲线。

对大多数材料而言, 变换因子的对数值  $\log \alpha_T$  与  $(T-T_g)$  的关系可以用 WLF 方程<sup>[7]</sup> 来表示:

$$\log \alpha_T = -\frac{C_1(T-T_g)}{C_2+(T-T_g)} \quad (4)$$

式中,  $T_g$  为玻璃化转变温度, K, 将  $T_g$  用  $T_r$  (参考温度, K) 代替,  $T_r$  取 55 °C, 方程 (4) 变为:

$$\log \alpha_T = -\frac{C_1(T-T_r)}{C_2+(T-T_r)} \quad (5)$$

对比一定温度下已知曲线的蠕变柔量对数值, 利用经过曲线平移获得的变换因子可以确定出参数  $C_1=11.9$ ,  $C_2=55.62$ , 因此可以得到适合 HMX 基 PBX

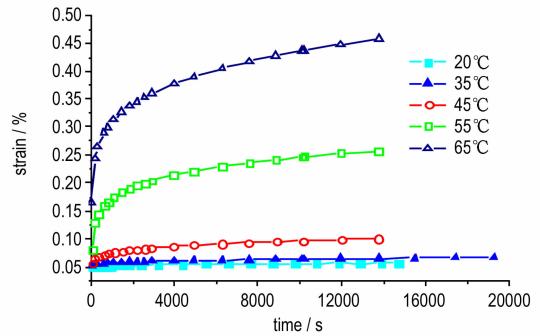


图 1 不同温度下 HMX 基 PBX 压缩蠕变曲线

Fig. 1 Compressive creep curves for HMX based PBX at different temperatures

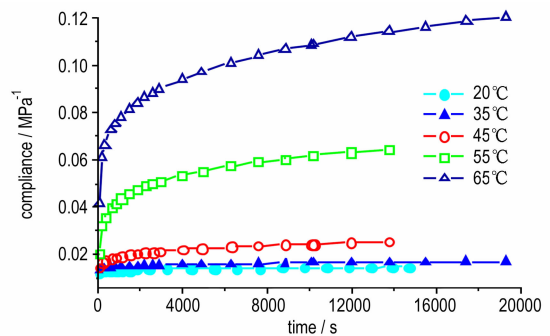


图 2 不同温度下 HMX 基 PBX 压缩蠕变柔量曲线

Fig. 2 Compressive creep compliance curves for HMX based PBX at different temperatures

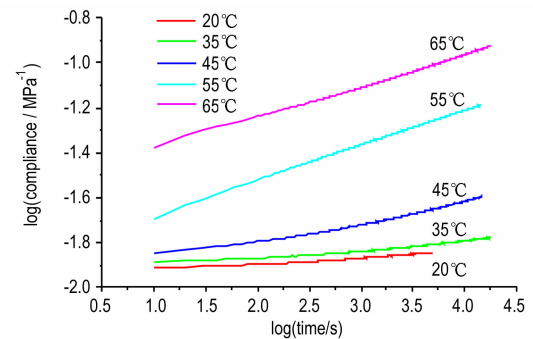


图 3 不同温度下 HMX 基 PBX 压缩蠕变柔量双对数曲线

Fig. 3 Double logarithm curves of compressive creep compliance for HMX based PBX at different temperatures

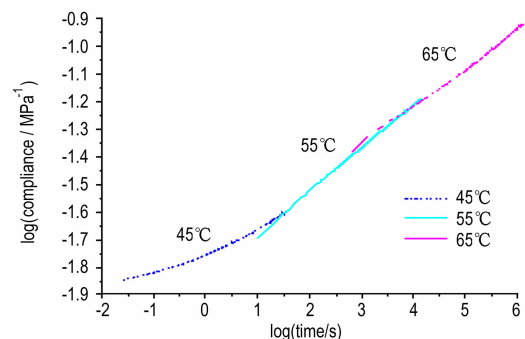


图 4 双对数坐标下的主曲线

Fig. 4 Master curve at double logarithm coordinates

的 WLF 方程:

$$\log \alpha_T = -\frac{11.9(T-328)}{55.62+(T-328)} \quad (6)$$

方程(6)为双对数曲线的移动提供了定量参考依据。图5为图4转换后获得的55℃下蠕变柔量理论与试验主曲线对比图,由图5可知,通过时温等效原理得到的55℃下的蠕变柔量理论主曲线与通过试验获得的叠合主曲线非常吻合。说明时温等效原理适用于HMX基PBX,可由此来推导80℃下的压缩蠕变曲线。

将温度  $T=80\text{℃}$  带入公式(6),得  $\log \alpha_T = -3.69$ , 因此将主曲线向左移动 3.69,经变化即可获得 80℃ 下的压缩蠕变曲线,如图6所示。

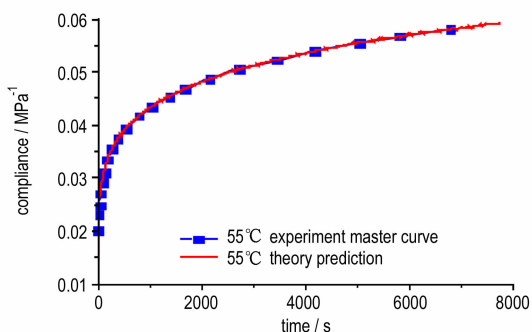


图5 55℃下蠕变柔量理论与试验主曲线对比图  
Fig.5 Theoretical vs experimental curves at 55℃

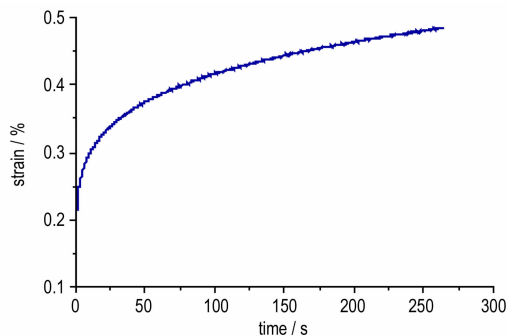


图6 80℃压缩蠕变曲线  
Fig.6 Compressive creep curve at 80℃

### 2.3 基于修正时间硬化理论的蠕变模型参数确定

利用 ANSYS 软件对 80℃蠕变曲线进行非线性拟合,可以得到 HMX 基 PBX 成型件在 80℃时的基于修正时间硬化理论的蠕变应变公式常数。

由于假设试验是在恒定温度下进行,因此式(3)中  $C_4$ 取零,用 ANSYS 软件对推导的蠕变曲线进行拟合,来确定参数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 。拟合所用的蠕变应变值由公式(7)确定:

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon - \varepsilon_e = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (7)$$

式中,  $\varepsilon_{cr}$ 为蠕变应变分量,  $\varepsilon$ 为总应变,  $\varepsilon_e$ 为弹性应变分量,已知加载应力  $\sigma=4\text{ MPa}$ ,弹性模量  $E=3.32\text{ GPa}$ 。图7为理论与拟合曲线图,由图7可见二者相互吻合,得到参数值  $C_1 = 3.3316 \times 10^{-7}$ ,  $C_2 = 0.45$ ,  $C_3 = -0.8557$ 。将参数值带入式(3)得到蠕变应变修正的时间硬化理论模型:

$$\varepsilon_{cr} = \int \varepsilon'_{cr} dt = 2.3088 \times 10^{-6} \sigma^{0.45} t^{0.1443} \quad (8)$$

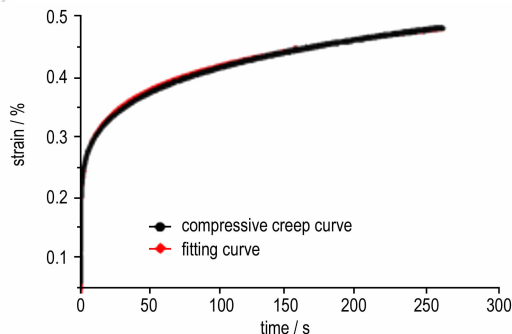


图7 80℃压缩蠕变理论与拟合曲线  
Fig.7 Comparison of theory and fitting curve

## 3 温压时效处理过程蠕变变形模拟

### 3.1 问题的描述

选用 PLANE182 四节点结构单元,采用修正的时间硬化蠕变模型来模拟尺寸为  $\Phi 56\text{ mm} \times 154\text{ mm}$  的圆柱体 HMX 基 PBX 在恒定温度及压力载荷作用条件下的尺寸变化情况。由于炸药件构型呈中心轴对称,且在高温下承受均匀施加于外表面单元面上的轴对称压力载荷作用,其尺寸变化情况与时间  $t$  有关。因此,采用热弹塑性—蠕变有限单元法<sup>[12]</sup>来模拟。

### 3.2 问题的假设

- (1) 试验过程发生蠕变变形,不考虑蠕变松弛;
- (2) 处理过程中温度和压力恒定;
- (3) 材料为均质各向同性;
- (4) 弹性应变、蠕变应变可分。

### 3.3 有限元模型的建立

#### (1) 几何模型

对于受轴对称载荷作用的圆柱体炸药件,可以根据其旋转对称性将其简化,取圆柱截面中心点为坐标原点,取  $Z_1=0\text{ mm}$  和  $Z_2=77\text{ mm}$  及  $r_1=0\text{ mm}$  和  $r_2=28\text{ mm}$  的截面进行计算,如图8所示,  $a$  点为边界位移采集点。

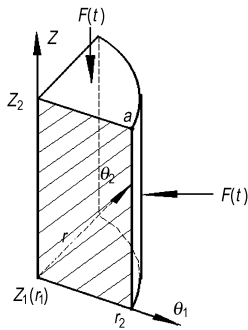


图8 圆柱体炸药件简化模型

Fig.8 Simplified model of cylinder

### (2) 材料模型

模拟用材料压缩强度及压缩模量参数如表1所示,材料泊松比为0.3。

表1 HMX基PBX在不同温度下的力学性能

Table 1 Mechanical properties of PBX at different temperatures

temperature / °C	compression strength / MPa	compression modulus / GPa
20	40.55	12.17
35	35.03	11.75
45	34.02	11.75
55	25.71	8.09
60	18.58	5.10

### (3) 初始条件

假定炸药件初始温度是均匀分布的,即  $T_0 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ , 其内部初始应力应变为  $\sigma_0 = 0, \varepsilon_0 = 0$ 。

### (4) 载荷及约束条件

恒定压力载荷  $F(t)$  均匀施加于  $r_2 = 28\text{ mm}$ 、 $Z_2 = 77\text{ mm}$  的两条边界线上,  $F(t) = 10\text{ MPa}$ , 作用时间  $t = 4\text{ h}$ , 同时对  $r_1 = 0\text{ mm}$ 、 $Z_1 = 0\text{ mm}$  的两条边界线分别施加径向和轴向位移约束。

## 3.4 结果及讨论

图9为加载结束时炸药件形变图,由图9可见炸药件加载后尺寸减小,整体收缩。

图10为模拟得到的炸药件加载过程中a点径向位移及轴向位移图。由图10可见,炸药件在受恒定载荷作用下其变化符合蠕变规律,边界点a在加载初期迅速收缩,炸药件尺寸减小幅度较为明显,随着时间的推移,尺寸变化逐渐减小,最终将进入稳定蠕变阶段。

a点径向最大位移为0.238 mm,轴向最大位移为0.653 mm,对整个炸药件来说其直径减小0.476 mm,

高度减小1.306 mm。由此可估算出初始密度为  $1.809\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的HMX基PBX经温压时效处理后密度增大量为  $0.047\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 密度提高到  $1.856\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 比文献[3]的试验值  $1.858\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  略低,这可能与计算的简化及密度计算过程中忽略了蠕变松弛量和冷却过程密度变化量等因素有关,另外,计算模型假设材料内部是均匀的,模拟值与试验值有一定的差异。同时,模拟参数可能也存在一定误差。

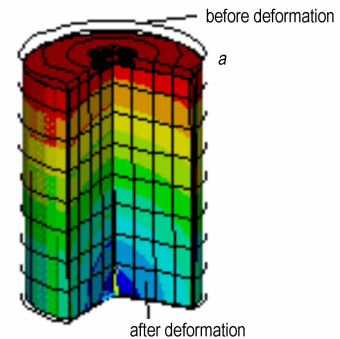
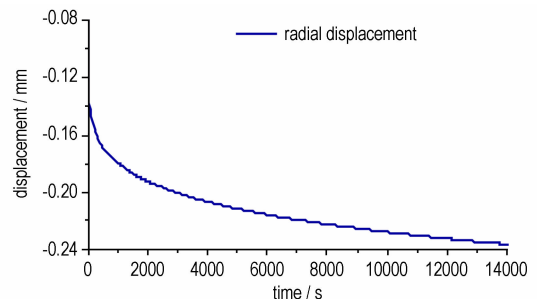
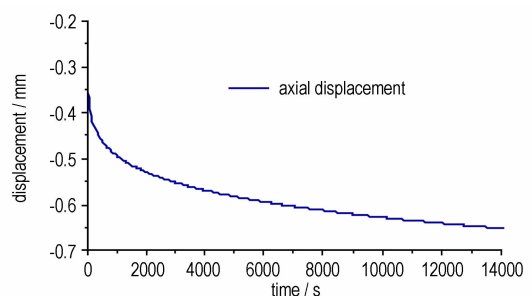


图9 加载结束时炸药件形变图

Fig.9 Explosive deformation diagram at the end of loading



a. radial displacement



b. axial displacement

图10 a点径向和轴向位移图

Fig.10 Radial and axial displacement curves of point a

## 4 小结

(1) 采用时温等效原理推导  $80\text{ }^\circ\text{C}$  下的HMX基PBX压缩蠕变曲线,并利用ANSYS软件拟合得到修正的时间硬化蠕变理论参数模型  $\varepsilon_{cr} = 2.3088 \times 10^{-6} \sigma^{0.45} t^{0.1443}$ 。

用此模型模拟温压时效处理过程 HMX 基 PBX 尺寸变化规律,结果发现,HMX 基 PBX 边界点在加载初期迅速收缩,且随时间延长逐渐减缓,印证了温压时效处理方法对成型 HMX 基 PBX 的加速蠕变作用。

(2)初始密度  $1.809 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的 HMX 基 PBX 经温压处理后的模拟密度为  $1.856 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,与文献中的  $1.858 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  接近,说明可以应用该蠕变模型模拟温压时效处理过程变形规律,从而预估温压处理对 HMX 基 PBX 密度的影响,为试验开展提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 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 Cailliao)*, 2005, 13(3): 150-154.
- [2] 兰琼,戴斌,杨白凤,等. 温压时效处理 PBX 内部裂纹愈合现象研究[J]. 含能材料,2013,21(2): 205-208.  
LAN Qiong, DAI Bing, YANG Bai-feng, et al. Healing of cracks in PBX by the thermal pressure aging treatment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2013, 21(2): 205-208.
- [3] 兰琼,韩超,雍炼,等. 低压热处理对 PBX 炸药件密度及内部质量的影响[J]. 含能材料,2008,16(2): 185-187.  
LAN Qiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Effect of low-pressure heat treatment on PBX. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2008, 16(2): 185-187.
- [4] Harrell J D. Bartherm processing of small LX-14 pressings[R]. MHSMP-75-20F, 1975.
- [5] Ferry J D. Viscoelastic properties of polymers[M]. 3rd Revised edition. New York: Wiley, John & Sons, Incorporated, 1980: 280-290.
- [6] 阿克洛尼斯,麦克奈特. 聚合物粘弹性引论[M]. 吴立衡,译. 北京: 科学出版社,1986: 39-59.  
Aklonis J J, MacKnight W J. Introduction of polymer viscoelasticity [M]. translate WU Li-heng, Beijing: Science Press, 1986: 39-59.
- [7] Williams M L, Landel R F, Ferry J D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids[J]. *J Am Chem Soc*, 1955, 77: 3701-3707.
- [8] Saeed Moaveni. Finite element analysis theory and application with ANSYS[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [9] 唐维,李明,温茂萍,等. 基于修正时间硬化理论的 PBX 蠕变模型[J]. 含能材料,2008,16(1): 34-36.  
TANG Wei, LI Ming, WEN Mao-ping, et al. PBX creep model based on modified time hardening theory[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2008, 16(1): 34-36.
- [10] Penny R K, Marriott D L. Design for creep[M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [11] Ogbonna N, Fleck N A, Cocks A C F. Transient creep analysis of ball indentation[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 1995, 37(11): 1179-1202.
- [12] 穆霞英. 蠕变力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社. 1990: 164-200.

## Simulation on Deformation of HMX based PBX by Thermal-pressure Treatment

LAN Qiong, TANG Wei, HE Jian-hua, YONG Lian, HAN Chao, YANG Bao-gang

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** To analyze regular of the shift from internal elastic strain to plastic stain for polymer-bonded explosive (PBX), creep curves for HMX based PBX under  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  were obtained by time temperature equivalence principle, and the creep model based on modified time hardening theory was obtained by ANSYS software. The deformation of HMX based PBX during the thermal-pressure process was simulated. Results shows that compression deformation occurs along the loading stress under thermal-pressure aging treatment ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ MPa}$ ) for HMX based PBX with diameter and height reducing  $0.476 \text{ mm}$ ,  $1.306 \text{ mm}$ , respectively, and the density increasing  $0.047 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , which confirms that the creep behavior of PBX can be accelerated by the thermal-pressure aging treatment.

**Key words:** thermal-pressure aging treatment; polymer-bonded explosive (PBX); time-temperature equivalence principle; creep; deformation

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.007