

文章编号:1006-9941(2022)09-0971-07

# 时间-温度-应力等效原理在 TATB 基 PBX 拉伸蠕变中的适用性分析

赵 龙<sup>1,2</sup>,袁洪魏<sup>1</sup>,朱晓燕<sup>1</sup>,温茂萍<sup>1</sup>,文乾乾<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院研究生院, 北京 100081)

**摘要:** 为验证时间-温度-应力原理在 TATB 基 PBX 拉伸蠕变中的适用性,实现长期拉伸蠕变变形评估计算,开展了某 TATB 基 PBX 恒应力不同温度的常规拉伸蠕变实验和恒温度梯级拉伸蠕变实验,采用陈氏法对梯级加载蠕变曲线进行分解处理,得到恒温度不同应力的拉伸蠕变曲线,基于非线性粘弹性材料的时间-温度-应力等效原理,采用二分法计算程序对各蠕变柔量曲线进行了平移汇集,获得了参考温度和应力(30 ℃、3.0 MPa)下的温度应力耦合蠕变柔量主曲线和考虑温度和应力的 Williams-Landel-Ferry 方程参数。结果表明在所分析的温度范围(30~50 ℃)和应力范围内(1.0~5.5 MPa),TATB 基 PBX 的拉伸蠕变行为较好地符合时间-温度-应力等效原理描述,可以利用该原理通过高温高应力的 PBX 短期拉伸蠕变实验预测其低温低应力的长期拉伸蠕变变形。

**关键词:** 高聚物黏结炸药(PBX);蠕变;时间-温度-应力等效;WLF 方程;二分法

**中图分类号:** TJ55; O37

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2022039

## 0 引言

高聚物黏结炸药(PBX)由高能单质炸药品粒为主体、一种或几种高聚物作为黏接剂组成。由于黏接剂的存在,PBX 在常温下便已表现出明显的粘弹性特征。PBX 在武器系统全寿命服役周期内,不仅要作为含能材料在作战时发挥其爆轰性能,而且要作为构件在武器库存环境中承受力热载荷的作用。在长贮装备长达十几年甚至几十年的长贮周期内<sup>[1]</sup>,PBX 将会根据武器系统的具体任务剖面经历长期的静态存储,而特定温度和载荷下的蠕变是 PBX 构件在这一过程的典型力学行为之一,这对于 PBX 长期蠕变性能评估覆盖的时间范围提出了较高的需求。PBX 长期蠕变可能导致 PBX 构件发生破坏,造成武器系统的结构完整性损失,进而威胁其爆轰性能的正常发挥,因此对 PBX 长期蠕变变形发展进行评估需求迫切,加之 PBX 存在拉压不对称性<sup>[2]</sup>,抗拉伸破坏能力显著弱于抗压缩破坏能力,

长期拉伸蠕变变形发展愈加成为 PBX 配方改进、构件设计和评估中的重点关注项。

对于 PBX 的长期蠕变行为研究,Bruce Cunningham<sup>[3]</sup>、Ian Darnell<sup>[4]</sup>等开展了 PBX9501、PBX9502 的单轴压缩、围压压缩、单轴拉伸等蠕变实验,根据实验结果采用对数时间与蠕变应变之间的线性关系描述蠕变变形的发展并据此分析建模。而对于具有粘弹性特征材料的长期性能演化,研究者们更多借助高聚物力学性能的时温等效原理的方法来研究这一现象,以期利用实验室条件下的某种短期试验数据来预估在实际使用温度下的长期力学行为:如李明等<sup>[5]</sup>基于短时单轴压缩蠕变实验结果研究了 TATB 基 PBX 的蠕变模型和蠕变的时温等效参数;林聪妹等<sup>[6]</sup>通过 DMA 三点弯蠕变实验研究发现改变粘结剂配方可显著改变 TATB 基 PBX 的蠕变性能,并采用时温等效原理对改变效果进行量化分析;Thompson 等<sup>[7]</sup>对 PBX9501 和 PBX9502 进行了准静态单轴拉伸/压缩数据、DMA 数据、SHPB 数据及蠕变数据进行了时温等效性分析,获得了一定温度和应变率范围内该 2 种炸药的时温转换因子;黄西成等<sup>[8]</sup>应用时温等效原理对 PBX 的失效应力进行了率温等效分析,从实测的失效应力-温度关系建立失效应力与应变率的关系,发现对于 EDC37 炸药在  $10^{-4}$ ~ $10^4$  s<sup>-1</sup> 应变率范围内应用时温等效是成功的。

收稿日期:2022-02-25;修回日期:2022-05-06

网络出版日期:2022-07-13

作者简介:赵龙(1989-),男,工程师,主要从事 PBX 力学行为研究。e-mail:zhaolong@caep.cn

通信联系人:文乾乾(1991-),男,工程师,主要从事 PBX 力学行为研究。e-mail:wengqq@caep.cn

引用本文:赵龙,袁洪魏,朱晓燕,等.时间-温度-应力等效原理在 TATB 基 PBX 拉伸蠕变中的适用性分析[J].含能材料,2022,30(9):971-977.

ZHAO Long, Yuan Hong-wei, ZHU Xiao-yan, et al. Applicability Analysis of Time-temperature-stress Equivalent Principle in Tensile Creep of TATB-Based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(9):971-977.

前述研究工作表明,时温等效原理适用于描述PBX的力学响应在一定范围内随温度的变化关系,但对于长期蠕变行为的评估工作尚不能形成充分的支撑,一方面是由于研究工作关注重点不同,更重要的原因是,已有的蠕变实验数据已表明PBX的蠕变变形关于应力呈现明显的非线性特征<sup>[9-10]</sup>,因此仅由时温等效原理得到的蠕变柔量主曲线不能够直接计算某一关注应力水平下的蠕变变形曲线,而是需要首先明确蠕变柔量与应力之间的非线性关系。为解决这个问题,一种较为合理且便捷的方式是应用时间-温度-应力等效原理<sup>[11]</sup>,该原理已在多种非线性粘弹性材料的蠕变行为研究中得到验证<sup>[12-15]</sup>。该原理认为应力水平与温度、压力、溶剂浓度、损伤以及老化等对材料特征时间的影响相似,有其等效性<sup>[16-17]</sup>,因此可将较高温度和应力下的短时蠕变变形推测较低温度和应力下的长期蠕变变形,为研究粘弹性材料长期力学性能提供重要的加速表征方法,且其仅采用3个参数就描述了蠕变柔量和温度、应力之间非线性关系,在此基础上又可极大地缩短蠕变实验测试时长,对于PBX配方设计和改进、构件设计和评估中的长期蠕变变形分析计算可能具有较好的实用性,但其对于PBX蠕变规律的适用性应该首先得到验证。

为此,本研究以某TATB基PBX为研究对象,开展了典型温度和应力范围内的蠕变实验,其中恒应力不同温度的蠕变曲线簇由常规蠕变实验获得,而恒温度不同应力的蠕变曲线簇由陈氏法<sup>[18]</sup>的梯级加载蠕变实验获得,采用二分法算法程序计算了温度应力耦合柔量主曲线的平移因子,据此分析了时间-温度-应力原理在描述TATB基PBX拉伸蠕变变形行为规律中的适用性。

## 1 时间-温度-应力等效原理

依自由体积理论<sup>[19]</sup>,材料粘度 $\eta$ 与其自由体积分数 $f$ 之间满足Doolittle方程<sup>[19]</sup>:

$$\eta = A \exp(B/f) \quad (1)$$

式中,A、B为材料常数。时温等效原理<sup>[19]</sup>认为,粘弹性材料在不同时间尺度上的力学行为可以通过改变温度来实现,实质在于材料粘弹性松弛时间 $\tau$ 的温度相关性。若材料的自由体积分数 $f$ 与温度的改变呈线性关系:

$$f = f_0 + \alpha_T(T - T_0) \quad (2)$$

式中, $\alpha_T$ 为自由体积分数的热膨胀系数,单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , $f_0$ 为材料在参考温度 $T_0$ 下的自由体积分数,记时温移位

因子 $a_T = \tau/\tau_0 = \eta/\eta_0$ 其中 $\eta_0$ 和 $\tau_0$ 分别为材料在参考温度 $T_0$ 下的粘度和松弛时间,单位分别为 $\text{MPa}\cdot\text{s}$ 和 $\text{s}$ , $\eta$ 和 $\tau$ 分别为材料在温度 $T$ 下的粘度和松弛时间,则

$$\lg a_T = \frac{B}{2.303} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{f_0} \right) \quad (3)$$

于是,由式(2)和式(3),得到

$$\lg a_T = -\frac{B}{2.303} \left( \frac{T - T_0}{f_0/\alpha_T + T - T_0} \right) = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (4)$$

其中 $C_1 = B/(2.303f_0)$ , $C_2 = f_0/\alpha_T$ 为材料常数,此即为广泛应用的Williams-Landel-Ferry(WLF)<sup>[19]</sup>方程。而时间-温度-应力等效原理<sup>[11]</sup>认为,应力水平同温度一样,也对材料自由体积产生影响,与式(2)类似,即

$$f = f_0 + \alpha_T(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0) \quad (5)$$

其中, $\sigma$ 为应力,MPa; $\sigma_0$ 为参考应力,MPa; $\alpha_\sigma$ 为自由体积分数的应力膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,设存在温度-应力耦合移位因子 $a_{T\sigma}$ 使得

$$\eta(T, \sigma) = \eta(T_0, \sigma_0) a_{T\sigma} \quad (6)$$

同时,由式(1)和式(5),有如下关系存在:

$$\begin{aligned} \lg a_{T\sigma} &= -\frac{B}{2.303f_0} \left( \frac{\alpha_T(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0)}{f_0 + \alpha_T(T - T_0) + \alpha_\sigma(\sigma - \sigma_0)} \right) \\ &= -C_1 \left( \frac{C_3(T - T_0) + C_2(\sigma - \sigma_0)}{C_2C_3 + C_3(T - T_0) + C_2(\sigma - \sigma_0)} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $C_3 = f_0/\alpha_\sigma$ 为材料常数,故若无应力变化,即 $\sigma - \sigma_0 = 0$ 时,上式退化为WLF方程,若选取实验温度为参考温度 $T_0$ ,即 $T - T_0 = 0$ ,则式(7)退化为应力移位因子的表达式:

$$\lg a_\sigma = -\frac{B}{2.303} \left( \frac{\sigma - \sigma_0}{f_0/\alpha_\sigma + \sigma - \sigma_0} \right) = \frac{-C_1(\sigma - \sigma_0)}{C_3 + (\sigma - \sigma_0)} \quad (8)$$

进一步地,不同条件下的蠕变柔量曲线存在如下转换关系:

$$J(t, T_0, \sigma_0) = J\left(\frac{t}{a_T}, T, \sigma_0\right) = J\left(\frac{t}{a_\sigma}, T_0, \sigma\right) = J\left(\frac{t}{a_{T\sigma}}, T, \sigma\right) \quad (9)$$

式中, $J$ 为蠕变柔量, $\% \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。应用时间-温度-应力等效原理<sup>[11]</sup>,可以通过较高应力水平下的短期蠕变行为来预测较低应力水平下的长期蠕变行为,进而可以预测所关注的应力和温度下的蠕变行为达到屈服或破坏应变的时间<sup>[12]</sup>。根据该原理描述,满足其适用性的材料,在适用的载荷范围内的蠕变数据应该呈现以下特征:(1)不同温度、应力下的蠕变柔量曲线 $J(t, T, \sigma)$ 在对数时间坐标中能够平移汇集成式(9)所示的某一参考温度和应力水平下的光滑的柔量主曲线 $J(t, T_0, \sigma_0)$ ;(2)各蠕变柔量曲线平因子 $a_{T\sigma}$ 与温度、应力的关系能够采用式(7)所示的温度应力耦合的WLF方程描述。本研究据此开展试验设计和适用性分析。

## 2 蠕变柔量曲线平移方法

蠕变柔量主曲线是材料长期蠕变行为的最主要表征量,在实际计算过程中,对于各蠕变柔量曲线在对数时间坐标上平移汇集成主曲线的过程,应避免人为手动尝试引入主观随意性,而宜采用算法程序进行数据处理<sup>[20]</sup>,以期获得较为客观的主曲线和平移因子,这对于原理的适用性分析至关重要。

为此,设计了二分法算法程序对数据进行处理,由算法程序计算获得平移因子。如图 1 所示,在每次对某条蠕变柔量曲线在对数时间坐标中向参考主曲线  $L_0$  平移过程中,先将其分别向左右平移一定距离  $lga_1$  和  $lga_2$ ,得到能够包含参考主曲线  $L_0$  在内的边界曲线  $L_1$  和  $L_2$ ,再在有对应柔量值的区间  $\Omega$  内计算  $L_1$  和  $L_2$  与参考主曲线之间的距离  $D_1$  和  $D_2$ ,距离  $D$  采用如式 (10) 所示计算方法:

$$D = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg t_i^c - \lg t_i^m) \right| \quad (10)$$

其中,  $n$  为边界曲线在区间  $\Omega$  内的数据点个数,  $t_i^c$  和  $t_i^m$  分别为边界曲线和参考主曲线同一柔量值对应的时间坐标点(当曲线中没有对应测试点时,可由相邻两点插值获得),再根据  $D_1$  和  $D_2$  大小产生新的平移距离为  $(lga_1+lga_2)/2$  的边界曲线  $L_3$ ,以此循环计算,直到两边边界曲线平移因子之差  $\Delta=|a_1-a_2|$  小于收敛判定值(本研究取  $\Delta=0.001$ ),算法流程如图 2 所示。

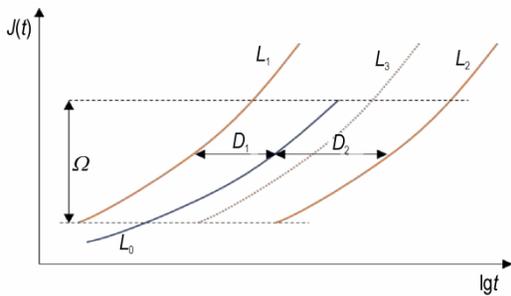


图 1 二分法示意图

Fig.1 Schematic diagram of dichotomy

## 3 实验部分

### 3.1 试验样品与仪器

样品为等静压成型的某 TATB 基 PBX 加工成的哑铃型样品,样品规格为  $\Phi 15 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ ,样品和夹具形状尺寸依据 GJB1997-772A《炸药实验方法》<sup>[21]</sup> 中单轴拉伸蠕变样品制作,形状尺寸如图 3 所示。

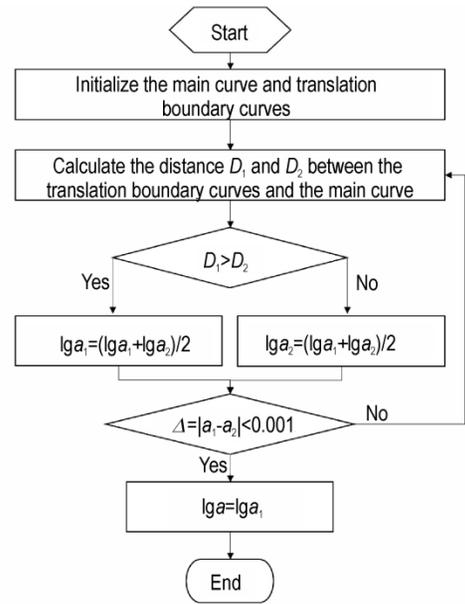


图 2 二分法计算流程

Fig.2 Dichotomy calculation process

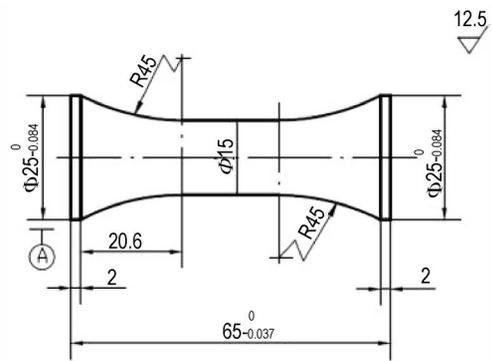


图 3 拉伸样品尺寸<sup>[21]</sup>

Fig.3 Geometry and dimensions of tensile sample<sup>[21]</sup>

实验在配备环境温度箱的 Instron5967 电子万能试验机上开展,温度箱控温精度为  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,试验机载荷控制精度为 0.5 级,采用引伸计测量轴向变形,标距段为 15 mm,量程  $\pm 1 \text{ mm}$ ,精度 0.5 级。试验机横梁加载前,样品处于装夹状态并在温度箱内恒温 4 h,并保持 0.1 MPa 的初始预紧力,恒温时间达到后,开始横梁加载至预定载荷并保持,横梁加载速率为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 3.2 实验过程

为分析 PBX 的时间-温度等效关系,选取典型温度范围  $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$  每隔  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度点和典型拉伸应力值 3.0 MPa 开展单轴拉伸蠕变实验。为尽可能分析获得较长时间范围的蠕变变形规律和时间温度应力等效性分析,在实验室实际条件下尽可能将蠕变载荷保持较长时间,其中柔量曲线平移的参考温度点  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  保持时间最长达 546 h,实际达成的各蠕变载荷保持时间在表 1 中列出。

表1 各温度下的TATB基PBX样品拉伸蠕变实验时长

Table 1 Creep test duration at each temperature

temperature/°C	30	35	40	45	50
creep test duration/h	546	42	69	88	95

为分析应力水平对蠕变变形的加速效果,也即应力-时间等效关系,采用岩土力学中广泛应用的陈氏法<sup>[18]</sup>开展梯级加载蠕变实验,该方法一方面可提高测试效率,从有限的样品中获取更多信息,另一方面可以有效减小样品质量波动对规律探索的影响。对于获得的梯级拉伸蠕变曲线,需通过陈氏法进行数据处理分解获得各应力分别加载下的蠕变曲线,该方法根据玻尔兹曼叠加原理<sup>[19]</sup>将各级曲线进行外推获得各级应力的蠕变应变增量,再将各级增量依据时间坐标进行叠加获得分别加载蠕变曲线,具体方法原理介绍可参考文献<sup>[18]</sup>,实验采用0.5 MPa做为单级应力台阶,每一级蠕变时间设为12 h,载荷控制曲线如图4所示。

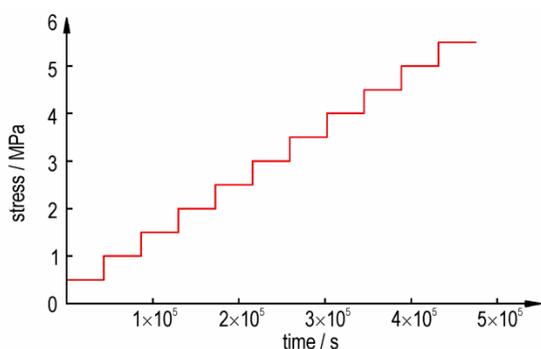


图4 梯级拉伸蠕变载荷控制示意图

Fig.4 Multistep tensile creep load control diagram

## 4 结果与讨论

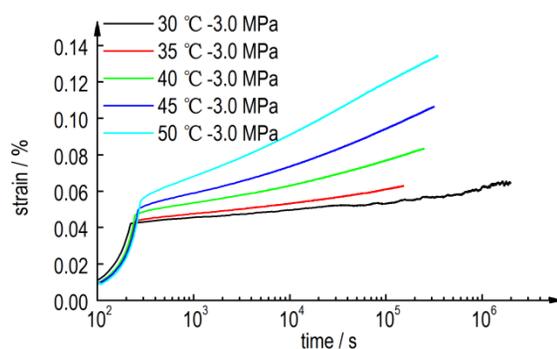
### 4.1 拉伸蠕变实验结果

实验获得的不同温度下TATB基PBX的蠕变曲线在图5a中采用对数时间坐标绘出,获得的梯级拉伸蠕变曲线在图5b中采用线性时间坐标绘出,由于应力加载段时间占比很小,因此,为方便分析蠕变变形规律,后续分析中忽略加载过程的时间,即认为蠕变载荷保持阶段开始的时间为蠕变起始时间。

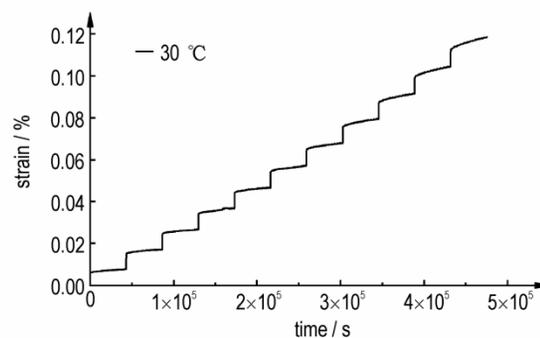
利用陈氏法对梯级拉伸蠕变曲线进行处理,各级曲线的外推方程采用形如式(11)方程的修正的时间硬化理论进行拟合<sup>[22]</sup>

$$\varepsilon_c(t_i) = A(t_i - t_{i0})^B + \varepsilon_c(t_{i0}) \quad (11)$$

式中, $t_i$ 表示第*i*级蠕变发生的时间,单位为s, $t_{i0}$ 表示第*i*级蠕变发生的起始时刻, $t_i - t_{i0}$ 表示第*i*级蠕变载荷的



a. 3.0 MPa tensile creep curves under different temperatures



b. 30 °C multistep tensile creep curve

图5 拉伸蠕变实验结果

Fig.5 Tensile creep test results

保持时间, $\varepsilon_c(t_{i0})$ 表示第*i*级蠕变应变的起始值,单位为%, $\varepsilon_c(t_i)$ 表示第*i*级的蠕变应变值, $t_{i0}$ 和 $\varepsilon_c(t_{i0})$ 由实验曲线获得, $A$ 、 $B$ 为修正时间硬化理论模型拟合参数,采用Origin Pro软件与Levenberg-Marquardt算法拟合获得,各级曲线的拟合参数见表2。数据处理结果在图6中绘出,图中左侧的一系列蠕变曲线簇为获得的各应力水平下的蠕变曲线。实验结果显示,TATB基PBX样品的蠕变速率随着应力水平的增大而增大。

### 4.2 时间-温度-应力等效原理的适用性分析

为研究时间-温度-应力等效原理能否较好地描述TATB基PBX在不同温度和应力下的拉伸蠕变行为,将获得的图5a所示的恒应力不同温度的蠕变曲线簇 $\varepsilon(t, T, \sigma_0)$ 和图6所示的陈氏法数据处理后的恒温度不同应力的蠕变曲线簇 $\varepsilon(t, T_0, \sigma)$ ,按照式(11)转化为蠕变柔量曲线 $J(t, T, \sigma_0)$ 和 $J(t, T_0, \sigma)$ ,如式(12):

$$J(t, T, \sigma) = \varepsilon(t, T, \sigma) / \sigma \quad (12)$$

以 $T_0=30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_0=3.0\text{ MPa}$ 作为参考温度和参考应力进行时间-温度-应力等效性分析。对于 $J(t, T, \sigma_0)$ 蠕变柔量曲线簇,以 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $3.0\text{ MPa}$ 、实验时长为546 h的蠕变柔量曲线作为初始参考主曲线进行时间-温度等效性分析,采用二分法算法程序将其余4条曲线按

表 2 修正时间硬化理论拟合参数

Table 2 Fitting parameters of modified time hardening theory

load/MPa	A	B	Adj.R-S/%
0.5	1.29E-05	0.471	98.8
1.0	2.79E-05	0.416	98.7
1.5	4.50E-05	0.373	98.5
2.0	1.71E-05	0.492	94.3
2.5	3.91E-05	0.406	98.2
3.0	3.85E-05	0.416	96.4
3.5	5.31E-05	0.398	97.6
4.0	2.11E-05	0.499	98.8
4.5	3.78E-05	0.458	98.8
5.0	2.59E-05	0.507	99.1

Note: A and B are fitting parameters of modified time hardening theoretical model. Adj.R-S is short for adjust R squared, the coefficient of determination.

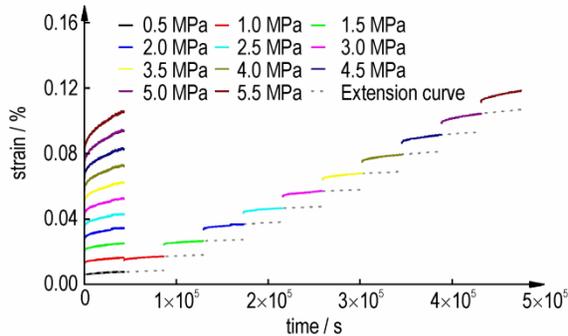


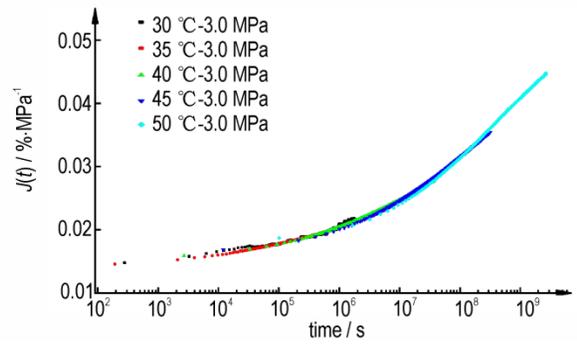
图 6 梯级拉伸蠕变曲线陈氏法处理结果

Fig.6 Processing results of multistep curve using Chen's method

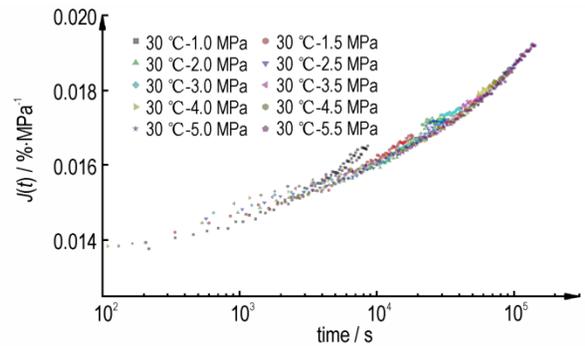
照温度由低到高的次序依次平移,每次平移后更新参考主曲线,最终获得的恒应力柔量主曲线如图 7a 所示,计算得到的温度平移因子  $lga_T$  在表 3 中列出。

为排除初始预紧力的干扰,将陈氏法数据处理获得的 1.0~5.5 MPa 的蠕变柔量曲线簇  $J(t, T_0, \sigma)$  进行应力-时间等效性分析,取该曲线簇中 3.0 MPa 蠕变柔量曲线作为初始主曲线,采用二分法将其他曲线朝该曲线平移并更新参考主曲线,平移顺序由中间到两边,依次为 3.5、2.5、4.0、2.0、4.5、1.5、5.0、1.0、5.5 MPa。最终获得的恒温柔量主曲线如图 7b 所示,计算得到的应力平移因子  $lga_\sigma$  在表 4 中列出。

图 7 结果显示,在对数时间坐标上平移后,两个柔量曲线簇均形成了较为光滑的主曲线,图 7a 中的恒应力柔量主曲线平移效果最好,各曲线重合度较高,在参考温度点  $T_0=30\text{ }^\circ\text{C}$  汇集后跨越的时间尺度达到  $10^9\text{ s}$  量级,远远超出实验时长。图 7b 中的恒温柔量主曲线总体平滑,在参考应力点  $\sigma_0=3.0\text{ MPa}$  以下的曲线存在局部重合度不好的现象,主要原因是 3.0 MPa 以下蠕



a. Compliance master curve under constant  $\sigma$



b. Compliance master curve under constant T

图 7 恒应力和恒温柔量主曲线

Fig.7 Compliance master curve under constant  $\sigma$  and constant T

表 3 3.0 MPa 各温度点的  $lga_T$

Table 3  $lga_T$  at each temperature

T/°C	30	35	40	45	50
$lga_T$	0	-0.98	-2.18	-3.00	-3.89

Note:  $lga_T$  is temperature moving factor.

表 4 30 °C 各应力点的  $lga_\sigma$

Table 4  $lga_\sigma$  at each stress

$\sigma$ /MPa	$lga_\sigma$
1.0	0.686
1.5	0.354
2.0	0.122
2.5	0.091
3.0	0
3.5	-0.152
4.0	-0.266
4.5	-0.348
5.0	-0.448
5.5	-0.545

Note:  $lga_\sigma$  is stress moving factor.  $\sigma$  is stress.

变变形较小,实验过程中的温度波动对变形测试影响较大,受限于试验时长,且参考应力点位于曲线簇中部,该主曲线达到的时间尺度未能接近恒应力柔量主

曲线,但也大幅超出每级曲线的试验时长。

将2条主曲线直接绘制在同一坐标系中,可以得到如图8所示的温度应力耦合柔量主曲线,该主曲线的跨越时间尺度与恒应力柔量主曲线相同,恒温柔量主曲线与恒应力柔量主曲线在对应的时间尺度内重合度较好,曲线整体平滑。当兼顾各个时间尺度的变形描述时,该柔量主曲线仍可用形式简单且参数较少的修正时间硬化理论模型进行拟合描述,拟合结果和参数在图8中列出,拟合相似度达到99.8%,表明由15条柔量曲线汇集而成的耦合柔量主曲线呈现统一的变化规律,符合式(9)所示的适用性特征描述。

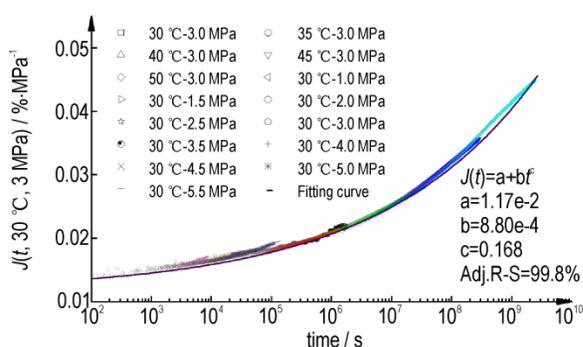


图8 耦合柔量主曲线

Fig.8 Coupled compliance master curve

为进一步考察平移因子对于式(7)所示的温度应力耦合的WLF方程的符合性,将表3和表4中获得的平移因子根据式(7)采用Origin Pro软件与Levenberg-Marquardt算法进行非线性曲面拟合,得到了考虑温度和应力的WLF方程参数,方程参数 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 拟合结果在图9中列出,结果也显示出很好的拟合相似度,达到99.6%,表明了在所分析的载荷条件范围内(30~50 °C, 1.0~5.5 MPa),各蠕变柔量曲线的平移因子符合式(7)的规律描述。

以上对于主曲线和平移因子的分析结果表明时间-温度-等效原理在所分析的典型载荷条件范围内表现出了较好的适用性。进一步地,利用所获得的耦合WLF方程参数结合耦合柔量曲线,便可评估计算该载荷条件范围内特定温度和应力条件下的长期蠕变变形,由于同时考虑了温度和应力对蠕变变形的加速作用,合理地明确了蠕变柔量于温度和应力之间地非线性关系,该耦合主曲线较单一的时温等效主曲线更为准确合理,且在低应力条件下能够获得更大的时间范围,更能充分发挥短期蠕变实验数据对于长期性能计算评估的效能,因此,时间-温度-应力等效原理可很好地应用于TATB基PBX长期蠕变性能的加速表征和评估计算。

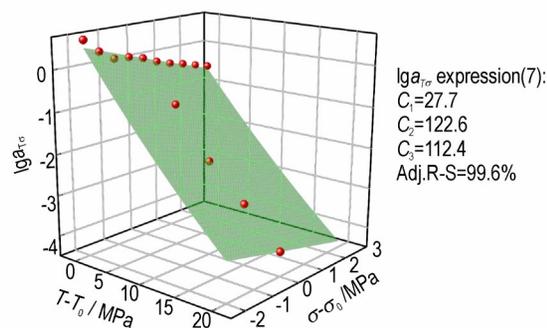


图9 耦合平移因子 $lga_{Ter}$ 拟合图

Fig.9 Coupling translation factor  $lga_{Ter}$  fitting diagram

## 5 结论

(1)开展了某TATB基PBX恒应力不同温度的常规拉伸蠕变实验和恒温度梯级拉伸蠕变实验,采用二分法算法程序对各TATB基PBX的拉伸蠕变柔量曲线进行了平移汇集,较客观地获得了30~50 °C、1.0~5.5 MPa条件范围内的光滑耦合柔量主曲线和平移因子。

(2)对不同温度和应力条件下的蠕变柔量曲线平移汇集获得的耦合柔量主曲线呈现统一的变化规律,而平移因子符合温度应力耦合的WLF方程描述,表明时间-温度-应力等效原理在所分析的典型条件范围内具有较好地适用性,可应用于TATB基PBX长期拉伸蠕变性能的加速表征和评估计算。

### 参考文献:

- [1] 魏发远, 谢朝阳, 孙昌璞, 等. 长贮装备性能退化评估当议[J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 262-272.  
WEI Fa-yuan, XIE Chao-yang, SUN Chang-pu, et al. Discussion on performance degradation assessment of long-term storage equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(16): 262-272.
- [2] GAËTANE Plassarta, DIDIER Picarta, MICHEL Grattonb, et al. Quasistatic mechanical behavior of HMX- and TATB-based plastic-bonded explosives[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 150: 103561.
- [3] CUNNINGHAM B, FRANCO G. PBX 9501 Creep tests[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2008.
- [4] DARNELL I M, OH S, HROUSIS C A, et al. A constitutive model for long time duration mechanical behavior in insensitive high explosives[C]//Proceedings - 14th International Detonation Symposium, 2010.
- [5] 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): 150-155.  
LI Ming, WEN Mao-ping, HE Qiang, et al. The compressive creep behavior of PBX based on TATB[J]. *Journal of energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 150-155.
- [6] 林聪妹, 刘佳辉, 刘世俊, 等. F2311含量对TATB基PBX蠕变性能的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 798-803.  
LIN Cong-mei, LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, et al. Influence of F2311 content on creep performance of TATB-based polymer

- ponded explosive[J]. *Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6):798-803.
- [7] THOMPSON D G, DELUCA R, BROWN G W. Time-temperature analysis, tension and compression in PBXs[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2012, 30: 299-323.
- [8] 黄西成, 陈刚, 魏强, 等. 高聚物粘结炸药宽温宽应变率下率温等效原理讨论[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集第Ⅲ册, 2013.
- [9] THOMPSON D G. Memo WX7-14-1359, Subject: PBX 9502 creep data, compression and tension [R], LAUR-14-20710. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2014.
- [10] 唐维. TATB基PBX炸药的准静态本构模型与强度准则[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
TANG Wei. Quasi-static constitutive model and strength criterion of TATB based PBX explosives[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [11] 罗文波, 杨挺青, 安群力. 非线性粘弹性体的时间-温度-应力等效原理及其应用[J]. 固体力学学报, 2001, 22(3): 219-224.  
LUO Wen-bo, YANG Ting-qing, AN Qun-li. Time-temperature-stress equivalence and its application to nonlinear viscoelastic materials[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2001, 22(3): 219-224.
- [12] 王志方, 张国忠. 胶凝原油蠕变的时间-温度-应力等效性[J]. 力学与实践, 2008, 30(1): 62-65.  
WANG Zhi-fang, ZHANG Guo-zhong. The time-temperature-stress equivalence of creep behavior of gelled crude oil[J]. *Mechanics in Engineering*, 2008, 30(1): 62-65.
- [13] 裴建中, 张久鹏, 王秉纲. 沥青混合料时间-应力-温度等效研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 639-644.  
PEI Jian-zhong, ZHANG Jiu-peng, WANG Bing-gang. Research on time-stress-temperature equivalence of asphalt mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(5): 639-644.
- [14] CHANG F C, LAM F, KADLA J F. Application of time-temperature-stress superposition on creep of wood-plastic composites [J]. *Mechanics of Time-dependent Materials*, 2013, 17(3): 427-437.
- [15] 张建伟, 熊英, 郭少云, 等. 丁腈橡胶热处理过程的时间-温度-应力等效性[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(11): 56-59.  
ZHANG Jian-wei, XIONG Ying, GUO Shao-yun, et al. Equivalence of time, temperature and stress during the heat treatment process of nitrile butadiene rubber[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(11): 56-59.
- [16] SAID Jazouli, LUO Wen-bo, FABRIC Bremand, et al. Application of time-stress equivalence to nonlinear creep of polycarbonate[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24: 463-467.
- [17] 马燕, 刘秀, 罗利, 等. 双轴拉伸下高聚物的时间-应力等效原理试验研究[J]. 材料导报, 2019, 33(12): 4188-4192.  
MA Yan, LIU Xiu, LUO Li, et al. Time-stress superposition principle of polymers under biaxial tension: Experimental study[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(12): 4188-4192.
- [18] 赵龙, 甘海啸, 唐维, 等. 陈氏法在TATB基PBX蠕变特性研究中的适用性分析. 含能材料, 2018, 26(7): 608-613.  
ZHAO Long, GAN Hai-xiao, TANG Wei, et al. Applicability analysis of Chen's method in the research of TATB-based PBX creep behavior [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(7): 608-613.
- [19] 阿克洛尼斯 JJ, 麦克奈特 W J. 聚合物粘弹性引论[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 47-58.  
AKLONIS J J, MACKNIGHT W J. Introduction to polymer viscoelasticity[M]. Beijing: Science Press, 1986: 47-58.
- [20] GERGESOVA M, ZUPANČIČ B, SAPRUNOV I, et al. The closed form t-T-P shifting (CFS) algorithm[J]. *Journal of Rheology*, 2011, 55(1): 1-16.
- [21] 国防科学技术工业委员会. GJB 772A-1997: 中华人民共和国国家军用标准炸药实验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1997.  
National Defense Science and Technology Industry Committee. GJB 772A-1997: National military standard explosives experimental method of the People's Republic of China[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Commission Military Standards Press, 1997.
- [22] 兰琼, 唐维, 贺建华, 等. 某HMX基PBX温压时效处理过程变形规律数值模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 543-547.  
LAN Qiong, TANG Wei, HE Jian-hua, et al. Simulation on deformation of HMX based PBX by thermal-pressure treatment [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(6): 543-547.

## Applicability Analysis of Time-temperature-stress Equivalent Principle in Tensile Creep of TATB-Based PBX

ZHAO Long<sup>1,2</sup>, Yuan Hong-wei<sup>1</sup>, ZHU Xiao-yan<sup>1</sup>, WEN Mao-ping<sup>1</sup>, WEN Qian-qian<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Graduate School of CAEP, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to verify the applicability of time-temperature-stress principle in tensile creep of TATB-based PBX and realize the evaluation calculation of long-term uniaxial tensile creep deformation, the conventional tensile creep experiment under constant stress but different temperatures and multistep tensile creep experiment under constant temperature of a TATB-based PBX were carried out. The tensile creep curves under constant temperature but different stresses were obtained by decomposing the multistep creep curve following Chen's method. The coupled creep compliance master curves under reference temperature and stress (30 °C and 3.0 MPa) and parameters of Williams-Landel-Ferry equation considering temperature and stress were obtained by translating and assembling the creep compliance curves using dichotomy calculation program based on the time-temperature-stress equivalence of nonlinear viscoelastic materials. The results show that the tensile creep behavior of TATB-based PBX is well described by the time-temperature-stress equivalent principle in the analyzed temperature range from 30 °C to 50 °C and stress range from 1.0 MPa to 5.5 MPa, which could be used to predict the long-term tensile creep deformation under low temperature and low stress through the short-term tensile creep tests at high temperature and stress.

**Key words:** PBX; creep; time-temperature-stress equivalence; WLF equation; dichotomy

**CLC number:** TJ55; O37

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022039

(责编: 姜梅)