

文章编号: 1006-9941(2014)06-0798-06

## F2311 含量对 TATB 基 PBX 蠕变性能的影响

林聪妹, 刘佳辉, 刘世俊, 涂小珍, 黄忠, 李玉斌, 张建虎

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 以 TATB 基高聚物粘结炸药(PBX)为原配方,制备了含氟弹性体(F2311)含量分别为 0.05%、0.1%、0.2%、0.4%的 4 种改性配方,采用动态力学分析仪研究了 F2311 对 PBX 的三点弯曲蠕变性能影响。结果发现,加入 0.4%的 F2311 使 TATB 基 PBX 的抗蠕变性能下降,减少 F2311 含量有利于提高其抗蠕变性能。含 0.05% F2311 的改性配方 PBX 在 60 °C/6 MPa 下的蠕变应变略低于原配方。研究同时采用六元件模型对 TATB 基 PBX 及其改性配方的蠕变行为进行模拟。得到了蠕变曲线的本构方程,理论预测模型和试验数据吻合良好。根据时温等效原理,获得了 TATB 基 PBX 及其改性配方在参考温度 30 °C 下的蠕变柔量主曲线,结果表明含 0.05% F2311 的 TATB 基 PBX 改性配方的长期抗蠕变性能优于原配方 PBX。

**关键词:** 应用化学; TATB; 高聚物粘结炸药; 含氟弹性体; 蠕变性能; 时温等效

**中图分类号:** TJ55; O69

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.016

### 1 引言

TATB 基高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)是一种颗粒高度填充的聚合物基复合材料,具有能量高、感度低、力学性能好、易机械加工等优点,广泛应用于各种武器系统。在贮存和使用过程中,PBX 材料受环境温度和加载应力的影响,会发生明显的蠕变行为<sup>[1-3]</sup>。蠕变性能与所处环境条件有关,例如,环境温度的反复变化导致 TATB 基 PBX 抗蠕变性能出现一定程度下降<sup>[4]</sup>,而 75 °C 高温加速老化对 TATB 基 PBX 的稳态蠕变速率没有明显的影响<sup>[5]</sup>。

蠕变是粘弹性材料的典型力学松弛现象,也是 PBX 主要的失效形式之一<sup>[6]</sup>。丁雁生等<sup>[7]</sup>认为对于颗粒高度填充聚合物基复合材料,颗粒相坚硬时,尽管高聚物含量很少,但其基体的蠕变仍然是复合材料蠕变的主要根源。通过物理方法或化学方法对高聚物进行改性,如采用填料填充<sup>[8]</sup>、添加偶联剂<sup>[9]</sup>或者辐射交联<sup>[10]</sup>等方法,可以有效地提高聚合物及其复合材料的耐蠕变性能。但是目前关于改性 PBX 蠕变性能方面的报道较少,为此,本研究采用含氟弹性体(F2311)改性 TATB 基 PBX,测试了其三点弯曲蠕变行为,获得了 PBX 的蠕变本构方程,讨论了含氟弹性体(F2311)

含量对 TATB 基 PBX 蠕变性能的影响,为分析 PBX 在贮存和使用过程中的力学响应提供参考。

### 2 试验部分

#### 2.1 配方和样品制备

原配方 PBX-1 中 TATB 和粘结剂质量比为 95 : 5。在 PBX-1 基础上保持粘结剂总含量不变,加入质量分数为 0.05%、0.1%、0.2%、0.4%的 F2311,标记为 PBX-2、PBX-3、PBX-4、PBX-5。采用水悬浮法制备 TATB 基 PBX 的造型粉,再压制成药柱。

#### 2.2 三点弯曲蠕变试验

在德国 NETZSCH 公司 DMA 242 热机械分析仪上进行三点弯曲蠕变性能测试:采用跨距为 20 mm 的三点弯曲样品夹具,测试不同温度、不同最大弯曲正应力下 PBX 的三点弯曲蠕变性能。试验过程由仪器控温模块自动恒温,控温精度为  $\pm 1$  °C。试验时间设定为 5400 s,若在设定时间内样品没有破坏,试验停止;若在设定时间内样品被破坏,试验立即停止。

在三点弯曲蠕变试验中,样品受到拉、压载荷的共同作用,即样品的上表面受到压应力作用,下表面受拉应力作用。在中心某一特殊层面上,材料既不受压也不受拉,这一层面称为中性层。弯曲正应力沿中性层上下,呈现线性分布。在最外侧其绝对值达到最大,称为最大弯曲正应力  $\sigma_{\max}$  :

收稿日期: 2013-08-10; 修回日期: 2014-01-23

作者简介: 林聪妹(1985-),女,助理研究员,主要从事高聚物粘结炸药的配方设计和性能研究。e-mail: lincmei2009@163.com

$$\sigma_{\max} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

式中,  $F$  为施加的外力,  $N$ ;  $L$  为跨距,  $mm$ ;  $b$  和  $h$  分别为样品的宽度和厚度,  $mm$ 。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 TATB 基 PBX 高温蠕变性能

##### 3.1.1 F2311 含量对 TATB 基 PBX 高温蠕变性能的影响

TATB 基 PBX 的高温蠕变性能研究关注的温度范围为  $50 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , 应力范围为  $3 \sim 12 \text{ MPa}$ <sup>[11]</sup>, 为此本研究选取  $60 \text{ }^\circ\text{C}/6 \text{ MPa}$  为试验条件, 进行三点弯曲蠕变试验, 得到 5 种 TATB 基 PBX 的蠕变应变, 结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,  $60 \text{ }^\circ\text{C}/6 \text{ MPa}$  下, PBX-1, PBX-2, PBX-3 蠕变曲线形状基本相同, 明显分为两个阶段, 即加载时的瞬时弹性应变和稳态蠕变阶段。PBX-4 配方的蠕变分为三个阶段: 瞬时弹性应变、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段<sup>[12]</sup>。而 PBX-5 的蠕变应变随时间而迅速增大, 然后发生蠕变破坏。高温蠕变性能可以通过蠕变破坏时间、最大蠕变应变和稳态蠕变速率表示<sup>[11]</sup>。蠕变破坏时间是指试验样品出现蠕变破坏的时间, 最大蠕变应变是指蠕变试验结束时的蠕变应变。稳态蠕变阶段的蠕变速率近似为一个稳定数值, 称为稳态蠕变速率, 可以通过测量稳态阶段的斜率求得。以 PBX-1 为例, 对蠕变曲线的稳态段进行线性拟合, 其结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在稳态蠕变阶段, 蠕变应变随时间的延长而线性增大。试验数据与线性拟合结果具有良好的一致性。拟合直线的斜率即为稳态蠕变速率。PBX-1 的稳态蠕变速率为  $7.667 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 为 TATB 基 PBX 的蠕变性能参数。由表 1 可见, 随着 F2311 含量减少, TATB 基 PBX 的稳态蠕变速率降低, 蠕变破坏时间变长, 蠕变应变减小。由于添加 0.4% F2311, PBX-5 配方的蠕变应变随时间的增加而迅速增加(见图 1), 蠕变破坏时间为 25 s。当 F2311 含量降低至 0.2% 时, PBX-4 的蠕变破坏时间为 2640 s。进一步降低 F2311 含量, PBX-1~PBX-3 呈现出稳态蠕变的态势, 在试验设定时间内没有发生蠕变破坏。这主要是因为原粘结剂中含有苯乙烯共聚物, 其分子主链中含有苯基等芳杂环, 链上可以内旋转的单键比例相对较少, 分子链的刚性大。而 F2311 是单体摩尔比为 1:1 聚合的偏氟乙烯/三氟氯乙烯无规共聚物, 其分子链由饱和单键构成, 分子链可以围绕单键进行内旋转, 分子链的柔性比原粘结剂提高。苯乙

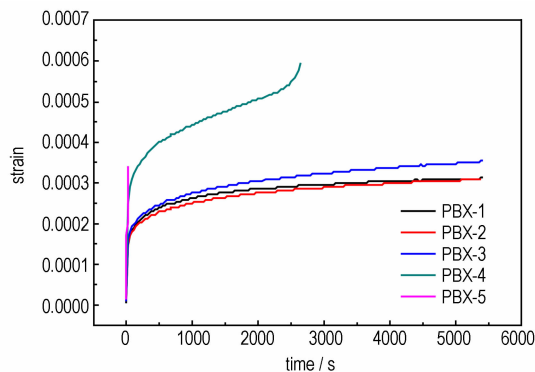


图 1  $60 \text{ }^\circ\text{C}/6 \text{ MPa}$  下 TATB 基 PBX 的蠕变应变曲线

Fig. 1 Creep strain curves of TATB-based PBXs at  $60 \text{ }^\circ\text{C}/6 \text{ MPa}$

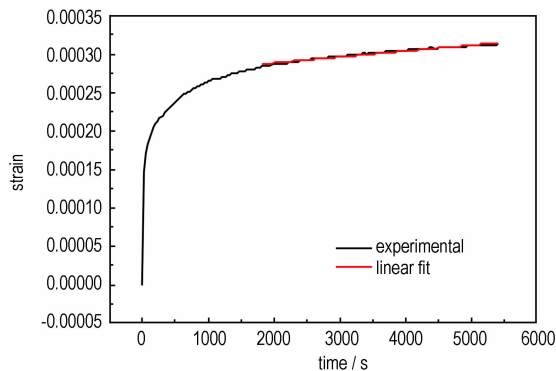


图 2  $60 \text{ }^\circ\text{C}/6 \text{ MPa}$  下 PBX-1 的蠕变曲线稳态段线性拟合示意图

Fig. 2 The linear fit of the creep strain curves during steady state of PBX-1 at  $60 \text{ }^\circ\text{C}/6 \text{ MPa}$

表 1 TATB 基 PBX 的蠕变性能参数

Table 1 The creep performance parameters of TATB-based PBXs

sample	constant creep strain rate/ $\text{s}^{-1}$	maximum creep strain	creep failure time/s
PBX-1	$7.667 \times 10^{-9}$	$3.128 \times 10^{-4}$	>5400
PBX-2	$1.011 \times 10^{-8}$	$3.100 \times 10^{-4}$	>5400
PBX-3	$1.398 \times 10^{-8}$	$3.535 \times 10^{-4}$	>5400
PBX-4	$6.194 \times 10^{-8}$	$5.941 \times 10^{-4}$	2640
PBX-5	—	$3.405 \times 10^{-4}$	25

烯共聚物的玻璃化转变温度为  $116 \text{ }^\circ\text{C}$ , 而 F2311 的玻璃化转变温度为  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在实验温度下, 苯乙烯共聚物处于玻璃态, 而 F2311 处于高弹态, 其分子链段可以自由运动, 易于流动和变形。由于热运动, F2311 的线性长链分子不断改变自己的形状, 分子通常处于卷曲状态。F2311 的弹性模量很小, 受到外力作用时, 卷曲的分子链容易被拉直, 显示出较大的形变量, 所以 F2311 的加入使 PBX 的硬度降低, 材料抵抗外力变形的能力也降低, 抗蠕变性能降低。因此, 降低 F2311 含量有利于提高 PBX 的抗蠕变性能。当 F2311 含量降至 0.05% 时, PBX-2 的蠕变应变略低于 PBX-1。这

主要是因为 F2311 含量较低时,材料韧性对蠕变性能的影响占主导作用。PBX 在制备过程中存在多种缺陷和损伤,当受到外加载荷作用时,损伤开始扩展。少量 F2311 的加入提高了粘结剂基体的韧性,从而降低了 PBX 中蠕变损伤的扩展速度,提高其抗蠕变性能。试验结果表明,改性配方 PBX-2 的抗蠕变性能优于原配方 PBX-1,其他改性配方 PBX-3 ~ PBX-5 的抗蠕变性能低于原配方 PBX-1。因此,选取抗蠕变性能较好的改性配方 PBX-2 进一步研究温度和应力对蠕变性能的影响,并将其与原配方 PBX-1 进行比较。

### 3.1.2 温度和应力对 TATB 基 PBX 高温蠕变性能的影响

选取原配方 PBX-1 以及抗蠕变性能较好的改性配方 PBX-2,考察 4 MPa 时,温度对 TATB 基 PBX 高温蠕变性能的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可知,温度对 TATB 基 PBX 的三点弯曲蠕变性能影响显著。温度由 30 °C 提高到 80 °C, PBX-1 和 PBX-2 的蠕变应变逐渐增加,表明尺寸稳定性及长期负荷能力逐渐降低。

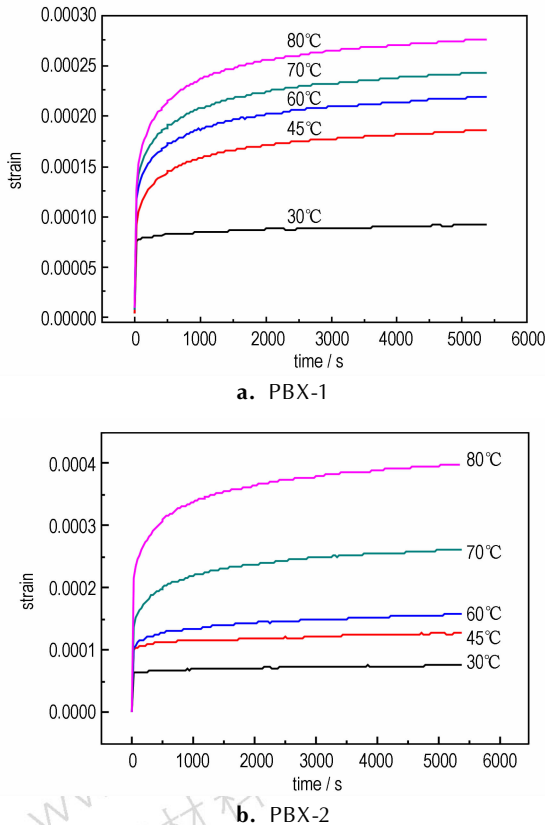


图 3 4 MPa 时不同温度下 PBX-1 和 PBX-2 的蠕变应变曲线  
Fig. 3 Creep strain curves of PBX-1 and PBX-2 at different temperatures under 4 MPa

对比图 1 和图 3 中 PBX-1 和 PBX-2 在 60 °C/6 MPa

和 60 °C/4 MPa 下的蠕变应变曲线,可以看出,应力对 TATB 基 PBX 的三点弯曲蠕变性能影响较大。60 °C 下,加载应力为 4 MPa 和 6 MPa 时, PBX-1 的最大蠕变应变为  $2.207 \times 10^{-4}$  和  $3.128 \times 10^{-4}$ , PBX-2 的最大蠕变应变为  $1.579 \times 10^{-4}$  和  $3.100 \times 10^{-4}$ 。随应力的增加, TATB 基 PBX 的最大蠕变应变增加,抗蠕变性能降低。

### 3.2 TATB 基 PBX 蠕变曲线的本构方程

许多学者提出了采用理想弹簧和理想粘壶,以各种不同方式组合起来,模拟蠕变过程,如 Maxwell 模型、Voigt(或 Kelvin)模型、Burger 四元件模型等<sup>[12]</sup>。但是这些模型只给出了具有单一松弛时间的指数形式的响应,而 PBX 是颗粒高度填充的聚合物基复合材料,由于结构单元的多重性及其运动的复杂性,其蠕变过程不只一个松弛时间,为此,必须采用多元件组合模型<sup>[12]</sup>来模拟。为了更加深刻地理解蠕变力学松弛现象,本研究采用六元件力学模型<sup>[12]</sup>来模拟 TATB 基 PBX 的蠕变行为,模型示意图如图 4 所示。

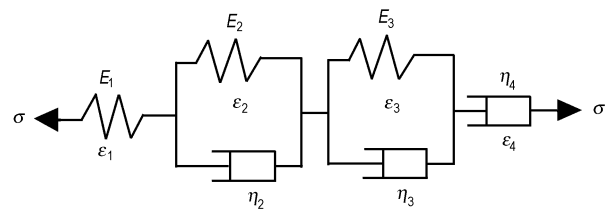


图 4 六元件力学模型示意图

Fig. 4 Schematic drawing of six-element mechanical model

六元件力学模型可视为 Maxwell 模型<sup>[12]</sup>和两个 Voigt 模型<sup>[12]</sup>串联而成的,蠕变过程中应力  $\sigma = \sigma_0$ , 因此聚合物基复合材料的总应变:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-t/\tau_2}) + \frac{\sigma_0}{E_3} (1 - e^{-t/\tau_3}) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t \quad (2)$$

式中,  $t$  为蠕变时间, s;  $\varepsilon(t)$  为蠕变应变  $\varepsilon$  随蠕变时间  $t$  的函数;  $\varepsilon_1$  为普弹形变;  $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$  为高弹形变;  $\varepsilon_4$  为粘性流动形变;  $\sigma_0$  为初始应力, MPa;  $E_1$  为普弹形变的弹性模量, MPa;  $E_2$  和  $E_3$  为高弹形变的弹性模量, MPa;  $\tau_2$  和  $\tau_3$  为松弛时间, s;  $\eta_4$  为本体黏度, MPa · s。

将方程(2)两边同除以  $\sigma_0$ , 得方程(3):

$$\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-t/\tau_2}) + \frac{1}{E_3} (1 - e^{-t/\tau_3}) + \frac{1}{\eta_4} t \quad (3)$$

在蠕变过程中,由于恒定应力加载,蠕变过程也可以用蠕变柔量  $D$  来表示:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (4)$$

方程(3)就转化为蠕变柔量方程:

$$D(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}(1 - e^{-t/\tau_2}) + \frac{1}{E_3}(1 - e^{-t/\tau_3}) + \frac{1}{\eta_4}t \quad (5)$$

式(5)即为 TATB 基 PBX 蠕变曲线的本构方程。

采用 Origin 数据分析软件<sup>[13]</sup>和式(5)对 5 种样

品在不同试验条件下的蠕变曲线进行非线性拟合,得到六元件模型中 TATB 基 PBX 的各参数(弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、松弛时间  $\tau_2$ 、 $\tau_3$  和本体黏度  $\eta_4$ )的值列于表 2 中。由表 2 可以看出, PBX-1 ~ PBX-5 的拟合相关系数平方值  $R^2$  都达到 0.994 以上,说明六元件模型可以高精度模拟 TATB 基 PBX 的蠕变行为。

表 2 不同试验条件下六元件模型的拟合参数

Table 2 The fitting parameters of six-element model under different conditions

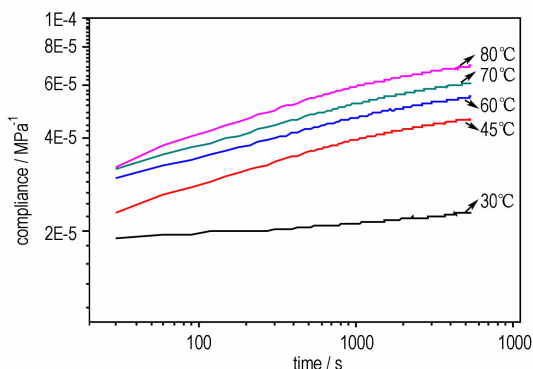
sample	test condition	$E_1$ /MPa	$E_2$ /MPa	$\tau_2$ /s	$E_3$ /MPa	$\tau_3$ /s	$\eta_4$ /MPa · s	$R^2$
PBX-1	30 °C/4 MPa	$1.022 \times 10^6$	$5.281 \times 10^5$	590.22	$5.475 \times 10^4$	8.79	$2.927 \times 10^9$	0.99854
	45 °C/4 MPa	$9.585 \times 10^5$	$6.811 \times 10^4$	549.37	$3.918 \times 10^4$	18.39	$9.820 \times 10^8$	0.99846
	60 °C/4 MPa	$6.130 \times 10^5$	$6.293 \times 10^4$	562.60	$3.221 \times 10^4$	15.43	$8.217 \times 10^8$	0.99833
	70 °C/4 MPa	$5.179 \times 10^5$	$5.440 \times 10^4$	562.27	$2.968 \times 10^4$	16.37	$7.340 \times 10^8$	0.99847
	80 °C/4 MPa	$4.181 \times 10^5$	$4.386 \times 10^4$	541.70	$2.741 \times 10^4$	21.12	$6.742 \times 10^8$	0.99829
	60 °C/6 MPa	$5.138 \times 10^5$	$4.024 \times 10^4$	590.46	$2.373 \times 10^4$	20.31	$5.640 \times 10^8$	0.99865
PBX-2	30 °C/4 MPa	$2.044 \times 10^6$	$8.428 \times 10^5$	1014.43	$8.646 \times 10^4$	6.73	$5.758 \times 10^9$	0.99814
	45 °C/4 MPa	$1.010 \times 10^6$	$3.016 \times 10^5$	221.61	$4.171 \times 10^4$	6.36	$1.458 \times 10^9$	0.99766
	60 °C/4 MPa	$6.220 \times 10^5$	$1.482 \times 10^5$	607.30	$3.876 \times 10^4$	12.25	$9.774 \times 10^8$	0.99783
	70 °C/4 MPa	$5.184 \times 10^5$	$5.210 \times 10^4$	612.80	$2.762 \times 10^4$	15.82	$6.288 \times 10^8$	0.99834
	80 °C/4 MPa	$4.342 \times 10^5$	$3.390 \times 10^4$	572.41	$1.786 \times 10^4$	13.74	$4.257 \times 10^8$	0.99865
	60 °C/6 MPa	$4.183 \times 10^5$	$4.590 \times 10^4$	664.60	$2.413 \times 10^4$	17.28	$4.369 \times 10^8$	0.99885
PBX-3	60 °C/6 MPa	$3.428 \times 10^5$	$4.037 \times 10^4$	675.00	$2.286 \times 10^4$	18.29	$3.108 \times 10^8$	0.99907
PBX-4	60 °C/6 MPa	$2.159 \times 10^5$	$3.677 \times 10^4$	198.95	$1.637 \times 10^4$	14.15	$5.734 \times 10^7$	0.99439

由表 2 拟合结果可知,应力为 4 MPa 时,随着温度的增加, PBX-1 和 PBX-2 普弹形变的弹性模量  $E_1$  逐渐降低。这是因为温度升高, TATB 基 PBX 中粘结剂分子链段和分子链热运动的能量增加。另一方面,温度升高使粘结剂发生体积膨胀,加大了分子间的自由空间。这两种作用使得粘结剂的分子热运动加剧,材料宏观表现为刚性下降,弹性模量降低。同样, TATB 基 PBX 高弹形变的弹性模量  $E_2$  和  $E_3$  也随加载温度的升高而降低,表现出明显的温度依赖性。温度升高, TATB 基 PBX 中粘结剂分子链越更容易发生延展和相对滑移,因此 TATB 基 PBX 中本体黏度  $\eta_4$  降低。试验温度为 60 °C 时,加载应力由 4 MPa 提高至 6 MPa, PBX-1 和 PBX-2 的弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和本体黏度  $\eta_4$  降低。这主要是因为粘结剂分子链在高应力作用下活动能力提高。可见,应力增大与温度升高对材料蠕变行为具有类似的影响。在 60 °C/6 MPa 下,随着 F2311 含量降低, PBX-2 ~ PBX-4 配方的弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和本体黏度  $\eta_4$  逐渐增加。这表明 TATB 基 PBX 的抗蠕变性能随 F2311 含量降低而提高。

### 3.3 蠕变行为的时间-温度等效性分析

蠕变现象既可以在较高的温度下较短的时间内观

察得到,也可以在较低的温度下较长的时间内观察到<sup>[12]</sup>。根据时间-温度等效原理<sup>[12]</sup>,通过短期的试验数据可以预估相对长期的蠕变性能,提供了一种材料长期蠕变性能的加速表征方法<sup>[13]</sup>。根据式(4),将图 3 的纵坐标蠕变应力转换为蠕变柔量,可以得到加载应力为 4 MPa 时, PBX-1 和 PBX-2 在不同温度下的三点弯曲蠕变柔量与时间对数关系曲线,结果见图 5。从图 5 中可以看出,各温度下的蠕变曲线形状相似。利用时温等效原理<sup>[13]</sup>,以 30 °C 作为参考温度,可以获得如图 6 所示的主曲线。从蠕变柔量主曲线来看,与原配方 PBX-1 相比, PBX-2 的蠕变曲线向下偏移,这表明改性配方的抗



a. PBX-1

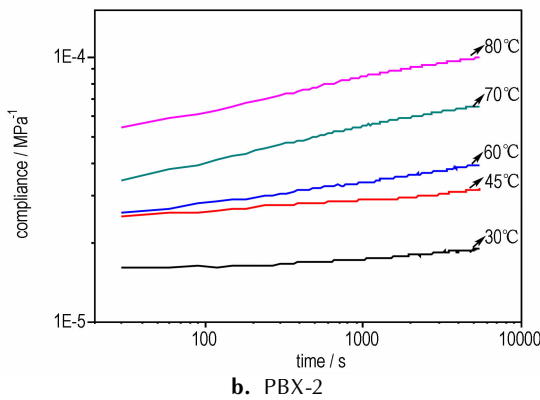


图5 4 MPa时不同温度下PBX-1和PBX-2的蠕变柔量曲线

Fig.5 Creep compliance curves of PBX-1 and PBX-2 at different temperatures under 4 MPa

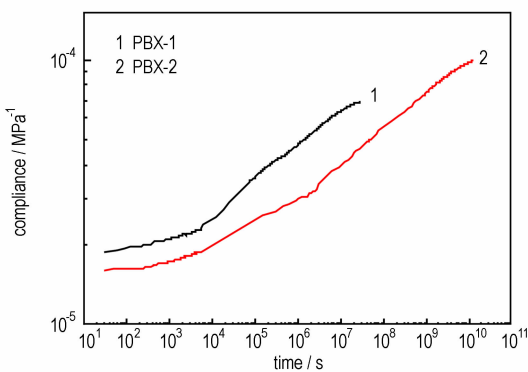


图6 PBX-1和PBX-2的蠕变柔量主曲线(30°C)

Fig.6 Creep compliance master curves of PBX-1 and PBX-2 at 30°C

蠕变性能优于原配方PBX-1。参考温度下得到的试验时间为30~5400 s,只跨越3个数量级;PBX-1主曲线的时间坐标为30~ $2.7 \times 10^7$  s,跨越7个数量级;PBX-2主曲线的时间坐标为30~ $1.5 \times 10^{10}$  s,跨越10个数量级。4 MPa的应力作用下,PBX-1的蠕变柔量主曲线的时间跨度达到 $2.7 \times 10^7$  s(约0.85年)。

## 4 结论

(1) 含氟弹性体(F2311)含量对TATB基PBX的抗蠕变性能具有显著的影响。当F2311含量较低(0.05%)时,改性配方在60°C/6 MPa下的蠕变应变低于原配方,抗蠕变性能提高。而F2311含量高于0.05%时,改性配方的抗蠕变性能有所降低。

(2) 采用六元力学模型,可以高精度地模拟TATB基PBX及其改性配方的蠕变特性,拟合相关系数较高。拟合参数中弹性模量 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 和本体黏度 $\eta_4$ 可以作为判定材料蠕变性能的特征参量。

(3) TATB基PBX及其改性配方的三点弯曲蠕变行为符合时温等效原理,将PBX在五个实验温度下的短期三点弯曲蠕变曲线水平平移获得了30°C下的主曲线,可以预测材料在30°C下约 $2.7 \times 10^7$  s(约0.85年)内的三点弯曲蠕变变形情况。与原配方PBX-1相比,TATB基PBX改性配方(含0.05%的F2311)的蠕变柔量主曲线向下偏移,抗蠕变性能提高。

## 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 Cailiao)*, 2005, 13(3): 150-154.
- [2] 潘颖, 丁雁生, 蔡瑞娇, 等. PBX高聚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.
- [3] CHEN Peng-wan, XIE Hui-min, HUANG Feng-lei, et al. Deformation and failure of polymer bonded explosives under diametric compression test[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25: 333-341.
- [4] 李敬明, 温茂萍, 黄毅民. 热循环对TATB基高聚物粘结炸药的性能影响研究[J]. 含能材料, 2005, 13(4): 208-210.  
LI Jing-ming, WEN Mao-ping, HUANG Yi-min. Effect of the thermal cycling test on the properties of TATB based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(4): 208-210.
- [5] 韦兴文, 李敬明, 涂小珍, 等. 热老化对TATB基高聚物粘结炸药力学性能的影响[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 157-161.  
WEI Xing-wen, LI Jing-ming, TU Xiao-zhen, et al. Effects of Thermal Ageing on Mechanical Properties of PBX Based on TATB[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 157-161.
- [6] Liu Z W, Xie H M, Li K X, et al. Fracture behavior of PBX simulation subject to combined thermal and mechanical loads[J]. *Polymer Testing*, 2009, 28: 627-635.
- [7] 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.
- [8] YANG Jing-lei, ZHANG Zhong, Schlarb A K, Friedrich K. On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 nanocomposites. Part I. Experimental results and general discussions[J]. *Polymer*, 2006, 47: 2791-2801.
- [9] Bengtsson M, Oksman K. Profile extrusion and mechanical properties of crosslinked wood-thermoplastic composites[J]. *Polymer Composites*, 2006, 27(2): 184-194.
- [10] YU J R, CHEN Z L, Zhu J, et al. Crosslinking modification of UHMWPE fibers by ultra-violet irradiation[J]. *International Polymer Processing*, 1999, 4(4): 331-335.
- [11] 涂小珍, 张波, 韦兴文, 等. TATB基高聚物粘结炸药高温力学性能[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 306-309.  
TU Xiao-zhen, ZHANG Bo, WEI Xing-wen, et al. Mechanical properties of TATB based PBX at high temperature[J]. *Chinese*

*Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21 (3): 306-309.

[12] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2005.

[13] 林聪妹, 刘世俊, 涂小珍, 等. TATB 基 PBX 及其改性配方的蠕变

性能[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 506-511.

LIN Cong-mei, LIU Shi-jun, TU Xiao-zhen, et al. Creep properties of TATB-based polymer bonded explosive and its modified formulation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4): 506-511.

## Influence of F2311 Content on Creep Performance of TATB-based Polymer Bonded Explosive

LIN Cong-mei, LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, TU Xiao-zhen, HUANG Zhong, LI Yu-bin, ZHANG Jian-hu

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

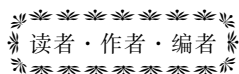
**Abstract:** In order to investigate the effects of fluoroelastomer (F2311) content on the creep performance of TATB-based polymer bonded explosive (PBX), 4 PBX formations modified by adding 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 wt% F2311 were prepared, and their three-point bending creep behavior were studied by dynamic mechanical analyzer. Results show that the addition of 0.4% F2311 make the creep resistance performance of TATB-based PBX decrease, and with the decrease of F2311, the creep resistance performance of PBX modified formulation enhances. When F2311 content decreases to 0.05 wt%, the creep strain of modified formulation is slightly smaller than original formulation at 60 °C/6 MPa. Meanwhile, six-element model was used to simulate the creep behaviors of PBX. The constitutive equations of creep curves were obtained. The predicted theoretical results coincide quite well with the experimental data. Based on time-temperature superposition principle, the master curves of TATB-based PBX and its modified formulation are obtained at 30 °C. Results show that compared with original formulation PBX, the long-term creep resistance performance of modified formulation PBX with 0.05 wt% F2311 is enhanced.

**Key words:** applied chemistry; TATB; polymer bonded explosive (PBX); fluoroelastomer; creep performance; time-temperature superposition

CLC number: TJ55; O69

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.016



### 《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简历及主要研究工作介绍。

《含能材料》编辑部