

文章编号: 1006-9941(2018)07-0608-06

# 陈氏法在 TATB 基 PBX 蠕变特性研究中的适用性分析

赵 龙, 甘海啸, 唐 维, 唐明峰, 周红萍

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 为提高高聚物粘结炸药(PBX)蠕变行为研究的实验效率以便进一步研究其长期服役性能, 探索分析了陈氏法在 PBX 蠕变特性研究中的适用性。采用陈氏梯级加载法和常规加载法分别对某 TATB 基 PBX 材料进行了应力水平为 5.5, 11, 16.5, 22 MPa 的单轴压缩蠕变实验。采用陈氏数据处理法处理了梯级加载蠕变实验结果, 得到了分别加载下的蠕变曲线, 并与常规加载法得到的蠕变曲线进行了对比。结果表明, 5.5 MPa 和 11 MPa 应力水平下两种方法得到的蠕变曲线是重合的, 但陈氏方法得到的蠕变曲线低于 16.5 MPa 和 22 MPa 应力水平下用常规方法得到的蠕变曲线, 这表明陈氏方法可在低应力水平下很好地应用于材料的蠕变实验研究, 可应用于长期服役性能的进一步研究, 在高应力水平下, 观察到了明显的蠕变硬化效果, 陈氏法所得蠕变曲线只有在蠕变变形阶段与真实常见蠕变一致, 而在瞬态弹性变形阶段发生折减。

**关键词:** 高聚物粘结炸药(PBX); 蠕变; 陈氏法; 梯级加载; 蠕变硬化

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.07.010

## 1 引 言

TATB 基高聚物粘结炸药(PBX)具有高能钝感、力学性能相对较好和安全可靠高等优点, 广泛应用于各种武器系统。PBX 的力学行为依赖于外部的载荷、温度和时间, 在常温下即表现出明显的粘弹性特征<sup>[1]</sup>。武器系统在长期贮存过程中, PBX 部件受到自身重力和装配预紧力等的长时作用产生非预期的蠕变变形, 有可能导致其在服役期间意外破坏, 所以亟待确定 PBX 材料的长期强度及蠕变破坏判据等长时服役特性, 为结构设计提供支撑, 确保武器系统在长期贮存环境中的完整性和可靠性。长期强度是指是指材料在长期载荷作用下抵御破坏的强度值, 长期强度和蠕变破坏判据的确定, 均需通过研究多级应力水平的长时(以月计)蠕变行为获得总体规律<sup>[2-3]</sup>, 尤其是低载荷下的长时蠕变行为, 因此需要更效率的蠕变实验方法来节约时间成本, 缩短研究周期。美国利夫莫尔实验室<sup>[4-6]</sup>和阿拉莫斯实验室<sup>[7]</sup>均通过设计建立专用的实验设备并花费较长时间(近三个月)来获取 PBX 的长时蠕变实验数据, 国内的研究则多基于开展正交短时(以小时计)蠕变实验, 探

寻 PBX 材料的蠕变机制<sup>[8-10]</sup>, 建立涵盖温度、应力、损伤等变量的短时蠕变模型<sup>[11-12]</sup>, 对短时蠕变行为进行数值模拟<sup>[13]</sup>, 而对于 PBX 长时服役性能的研究尚处于起步阶段, 其研究方法和实验方法甚为缺乏, 主要难点在于常规的分别加载蠕变实验方法在长时蠕变实验中耗时较长, 样品需求量大, 成本较高。

陈氏法是岩土力学中成熟而且典型的蠕变行为研究方法, 包括陈氏加载法和陈氏数据处理法, 由著名岩土力学家陈宗基教授提出<sup>[14-15]</sup>, 该方法在国内外岩土流变学研究中应用广泛<sup>[2-3]</sup>。通过对单一试样进行梯级加载, 以适当的程序处理实验数据, 得到分别加载情况下的恒应力蠕变曲线<sup>[16]</sup>, 不仅可大幅节约试验成本, 还可减小蠕变模型和长期强度研究中因样品分散性带来的误差。目前, 将该方法应用于 PBX 材料蠕变行为的研究工作尚未见文献报道。因此, 本工作采用陈氏法研究了 TATB 基 PBX 的蠕变行为, 采用陈氏加载法(也即梯级加载)的方式获得单一试样的蠕变曲线, 通过陈氏数据处理方法得到分别加载下的蠕变曲线, 与真实分别加载下的蠕变实验结果进行了对比, 分析了陈氏法在研究 TATB 基 PBX 蠕变特性中的适用性, 为进一步开展长时服役性能研究奠定基础。

## 2 基本原理及实验设计

### 2.1 陈氏法基本原理

陈氏法的基本原理是考虑到真实的流变介质对加

收稿日期: 2017-10-15; 修回日期: 2017-12-29

作者简介: 赵龙(1989-), 男, 研究实习员, 主要从事 PBX 力学性能研究。e-mail: zhaolong@caep.cn

通信联系人: 周红萍(1977-), 女, 高级工程师, 主要从事 PBX 力学性能研究。e-mail: zhouhongping@caep.cn

载历史具有记忆效应,与常规的分别加载蠕变实验方法不同,该方法通过采用梯级加载的蠕变实验方法,得到对应不同应力水平的梯级蠕变曲线,再根据反映材料记忆效应的叠加原理,采用作图法建立真实变形过程的叠加关系。与常规方法相比,陈氏法可以使流变试验从单一试样得到更多的试验资料,能够大幅缩短试验周期,节约试验成本<sup>[16]</sup>,而且可以减小由样品差异导致的分散性。

陈氏法旨在通过对试样进行如图 1a 所示的的级距为  $\Delta\sigma$  的梯级加载,获得如图 1b 所示的梯级蠕变实验曲线,进而推断出载荷为  $\sigma_n = n\Delta\sigma$  的一次性加载的蠕变曲线。具体分析如下:

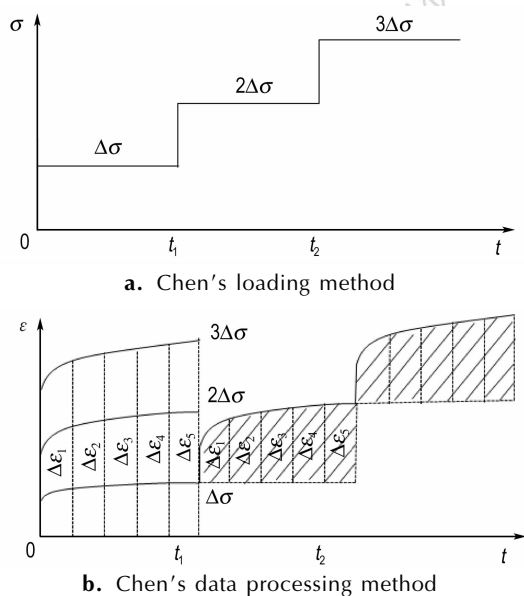


图 1 陈氏法示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Schematic diagrams of Chen's method

从时间  $t_0=0$  到  $t_1$ ,材料在恒定载荷  $\sigma_1 = \Delta\sigma$  作用下发生蠕变变形,若试验进行到时间  $t_1$  时不加下一级载荷  $\Delta\sigma$ ,则由于材料变形已进入稳态蠕变,材料变形将继续沿虚线进行,所以增加载荷  $\Delta\sigma$  的效果是使试样发生了虚线与实线之间的附加变形  $\Delta\epsilon(t)$  (如图 1b 阴影区域所示),因此,可以第一级蠕变曲线为基础,叠加第二级载荷作用持续相同时间的蠕变增量  $\Delta\epsilon(t)$ ,得到分别加载载荷为  $\sigma_2 = 2\Delta\sigma$  的蠕变曲线。继续进行梯级加载,可在前一级蠕变曲线上作同样的处理,进而得到分别加载载荷为  $\sigma_n = n\Delta\sigma$  的蠕变曲线,见图 1b 左方  $0 \sim t_1$  时刻虚线区域,这样就可以从单个试样上,得到  $n$  个不同载荷作用下的蠕变曲线。加载时应在试样进入稳态蠕变以后再进行下一级加载,而且各级加载的时间间隔应相等<sup>[16]</sup>。

## 2.2 试验设计

材料为某 TATB 基 PBX 药柱,尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。实验在电子万能试验机上开展,采用引伸计测量轴向变形(量程  $\pm 1 \text{ mm}$ ,精度 0.5 级,标距段 15 mm)。在室温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  下进行压缩蠕变试验,为对比研究梯级加载所得到的结果与常规恒应力加载(也即分别加载)的异同,实验分为两部分:梯级加载蠕变试验和分别加载蠕变实验。

根据陈氏法的基本原理和方法,梯级载荷采用压缩强度 20%(5.5 MPa),40%(11.0 MPa),60%(16.5 MPa),80%(22.0 MPa)递进加载,每级载荷加载后保持载荷不变使样品蠕变 2 h,然后以准静态加载至下一级,准静态加载速度为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,单个样品实验共进行 8 h,载荷时间曲线如图 2a 所示。与梯级加载载荷对应,分别加载蠕变实验采用载荷为压缩强度的 40%(11 MPa),60%(16.5 MPa),80%(22 MPa),试验方法为先准静态加载到预定载荷,再保持载荷不变使样品蠕变 2h,载荷时间曲线如图 2b 所示。

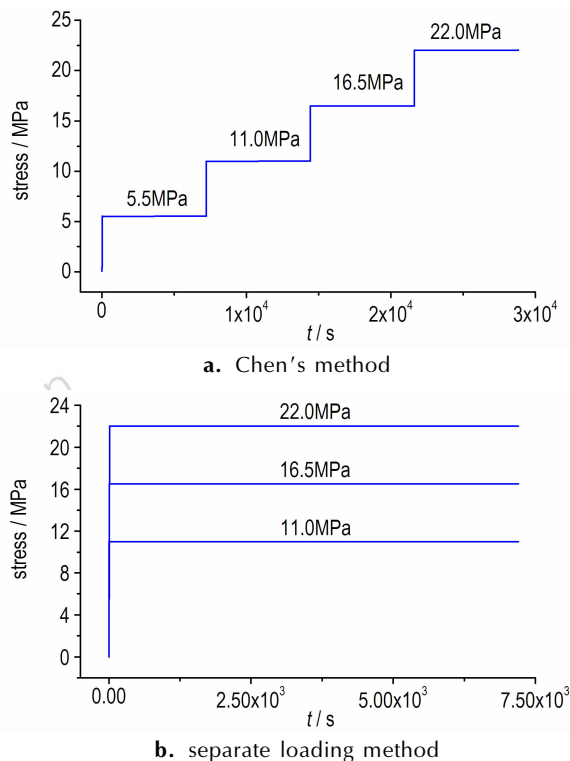


图 2 两种方法的蠕变载荷时间历程

Fig. 2 Creep loading history with two different methods

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验结果

梯级加载下的蠕变实验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,随着各级载荷叠加,在每一级载荷作用的 2 h 内,各级蠕变均经历了减速蠕变阶段并进入了稳态蠕变阶段,且稳态蠕变速率逐级增加。

分别加载下的蠕变实验结果在图 4 中用实心点划线列出,需要说明的是,由于梯级加载第一级 5.5 MPa 载荷施加之前试样并未蠕变,因此第一级蠕变曲线也可作为分别加载试验结果。

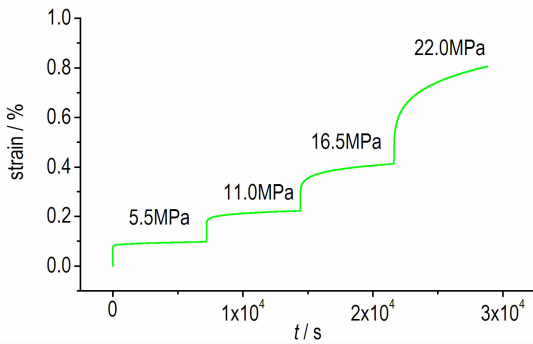


图 3 陈氏梯级加载法得到的蠕变曲线

Fig. 3 Creep curve obtained by Chen's multistep loading method

### 3.2 数据处理及对比

采用陈氏数据处理方法的具体步骤为:

(1) 第一级荷载对应的应变-时间曲线不变,与分别加载的应变-时间曲线相同。

(2) 将第一级荷载下的应变-时间曲线按稳定蠕变的规律进行延长,获得相应时间下延长线与第二级荷载下应变的差值;本研究采用曲线延长方法为,采用 Origin 软件,针对每一级蠕变应变,先采用形如(1)式的 3 级 Prony 级数对各级蠕变曲线进行拟合:

$$\varepsilon(t) = D_0 + \sum_{i=1}^3 D_i e^{-\frac{t-t_0}{\tau_i}} \quad (1)$$

式中,  $D_0$ 、 $D_i$  分别表示初始蠕变柔度和特征蠕变柔度,  $\tau_i$ 、 $t_0$  为分别表示特征延迟时间和起始时间,然后将得到的表达式在时间轴上进行外推得到。参数拟合结果在表 1 中列出,各级曲线的拟合度均大于 99.5%。

(3) 将第二级蠕变曲线与第一级外推曲线在同一时刻做差,将应变差值按照第二级荷载作用的持续时间与第一级荷载持续相等时间下的应变进行叠加,获得第二级荷载在分别加载情况下的应变-时间曲线。

(4) 依照上述方法依次求得各级荷载的分别加载应变-时间曲线,所得结果在图 4 中用空心点划线列出。

表 1 Prony 级数拟合参数

Table 1 Fitting constants of Prony series

constants	1 <sup>st</sup> step	2 <sup>nd</sup> step	3 <sup>rd</sup> step
$D_0$	0.107	0.230	0.429
$D_1$	-0.0189	-0.0319	-0.0372
$D_2$	-0.0034	-0.0151	-0.0720
$D_3$	-0.0055	-0.0507	-0.0630
$t_0/s$	6.713	7153.495	14362.815
$\tau_1/s$	10449.184	5130.847	519.997
$\tau_2/s$	1368.955	466.140	4860.521
$\tau_3/s$	137.276	42.638	62.918
Adj. R-S/%	99.90	99.97	99.99

数据处理结果显示,第二、三、四级蠕变曲线与处理前相比稳态蠕变速率均减小,而且载荷值越大,减小幅度越大。对比图 4 中陈氏法所得各级蠕变曲线与分别加载所得真实蠕变曲线,可知,在 11 MPa 载荷下,陈氏法处理得到的蠕变曲线与分别加载得到的真实蠕变曲线几乎完全重合,尤其在稳态蠕变阶段,同一时刻对应的应变值最大偏差小于 0.5%,而在 16.5 MPa 与 22 MPa 载荷下,陈氏法得到的蠕变曲线与真实蠕变曲线平行,特别是在稳态蠕变阶段,但整体小于真实应变。16.5 MPa 载荷下,两条曲线的同一时刻应变差为 0.08%,而在 22 MPa 载荷下,两者应变差为 0.4%,这种现象充分说明,在梯级加载和分别加载的稳态蠕变阶段,该材料的蠕变机制是相同的。

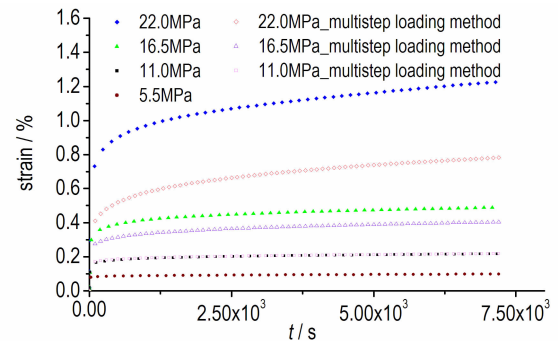


图 4 陈氏法和分别加载法得到的蠕变曲线对比

Fig. 4 Comparison of the creep curves obtained by Chen's method and separate loading method

由此,可以认为,在低应力水平(0~11 MPa)下,陈氏法得到的蠕变曲线与真实蠕变曲线一致,可满足工程需求。随着载荷的增加,陈氏法得到的蠕变曲线在蠕变阶段与真实蠕变曲线一致,而在准静态加载过程中的瞬态变形发生了折减,而且随着载荷的增大,瞬态变形折减量增大。

### 3.3 适用性及原因分析

陈氏法适用于低应力水平下的 PBX 蠕变行为研究,原因分析如下:

在低应力水平下(0 ~ 11 MPa),无论是在准静态还是在蠕变状态(减速蠕变和稳态蠕变阶段)下,PBX 材料应力和应变均表现为线性关系,因而其在非恒应力状态下的蠕变行为可以用 Boltzmann 线性叠加原理来描述,如式(2)<sup>[16]</sup>,符合陈氏数据处理法的基本假设,

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \int_{-\infty}^t \sigma(\tau) K(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

式中,  $E_0$  为材料的弹性模量,MPa;  $K(t-\tau)$  为积分核函数,  $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 该函数反映材料的流变特性。

图 1a 所示的加载过程可以表达为如下的函数形式:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \Delta\sigma \cdot \theta_i \quad (3)$$

其中,  $\theta_i$  定义如下:

$$\theta_i = \theta_i(t-t_i) = \begin{cases} 1 & (t-t_i) \geq 0 \\ 0 & (t-t_i) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $t_i$  表示第  $i$  级应力加载时刻,将(3)式代入(2)式,有

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta\sigma}{E} \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i + \int_0^t \Delta\sigma \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot K(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

若试验进行的时间已达到  $t \geq t_n$ ,则可等价地将(5)式写成<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{n \cdot \Delta\sigma}{E} + \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^t \Delta\sigma \cdot \theta_i \cdot K(t-\tau) d\tau \\ &= \frac{n \cdot \Delta\sigma}{E} + \Delta\sigma \cdot \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^t K(t-\tau) d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

上式表明,在给定加载函数式(3)的作用下,材料在时间  $t$  时的总变形为各级载荷的弹性变形和加上各级载荷单独作用时的蠕变效应的总和,假如在试验中控制加载程序使得各积分区间满足  $t_n - t_{n-1} = \Delta t$

则有

$$\varepsilon(\Delta t) = \frac{n\Delta\sigma}{E} + n\Delta\sigma \int_0^{\Delta t} K(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

记  $n\Delta\sigma = \sigma$  有

$$\varepsilon(\Delta t) = \frac{\sigma}{E} + \sigma \int_0^{\Delta t} K(t-\tau) d\tau \quad (8)$$

式(8)即为一次性加载  $\sigma = n\Delta\sigma$  的在时间区间为  $0 \sim \Delta t$  的积分型蠕变方程。因此,在低应力水平下,可

通过陈氏法由单一试样获得该材料的蠕变曲线簇<sup>[3]</sup>,如果增大单级加载时间,则可进一步获得材料的长时蠕变规律和模型,以此简化实验方案,节约实验成本。

而在高应力水平下(大于 11 MPa),陈氏法所得蠕变曲线与真实蠕变曲线相比在瞬态变形阶段有偏差,为了进一步分析原因,将梯级加载过程中的应力-应变曲线绘出,并与该材料在准静态加载情况下的应力-应变曲线<sup>[17]</sup>进行对比,如图 5。

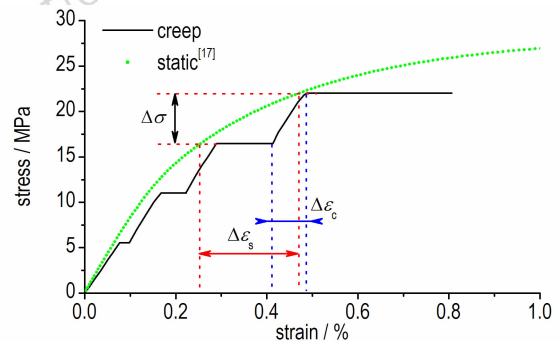


图 5 蠕变过程和准静态加载过程应力应变曲线对比  
Fig. 5 Comparison of the stress-strain curves under creep procedure and quasi-static loading procedure

图 5 中虚线为准静态应力应变曲线,实线为梯级加载蠕变过程中的应力应变曲线。后者呈阶梯状,可明显地分为两种过程,其中应力增长、应变增长的“上升”部分为梯级加载蠕变过程中的准静态加载阶段(也即瞬态变形阶段),而应力不变、应变增长的“平台”部分则为蠕变阶段。在陈氏法的准静态加载过程中,应力随应变直线上升,材料表现为线弹性,将该过程的各级应变增量和杨氏模量列于表 2。

表 2 准静态加载过程的应变增量和杨氏模量  
Table 2 Strain increment and Young's modulus in quasi-static loading procedure

stress /MPa	quasi-static strain increment $\Delta\varepsilon_c$ /%	Young's modulus /GPa
0-5.5	0.075	7.33
5.5-11.0	0.069	7.97
11.0-16.5	0.067	7.21
16.5-22.0	0.073	7.53

由表 2 可见,在准静态加载阶段,各级载荷产生的应变增量(均值为 0.071%)和杨氏模量基本相同(均值 7.51 GPa),即材料在此阶段表现为明显的线弹性,而在常规准静态加载实验中,该材料只在低应力水平

下应力应变关系表现为线弹性,而在较高载荷表现为非线性。在图5中取应力区间16.5~22.0 MPa进行分析,对于相同的应力增量 $\Delta\sigma$ ,在真实准静态加载实验中,应力应变曲线表现为非线性,应变增量 $\Delta\varepsilon_s=0.215\%$ ,而在陈氏法蠕变过程的准静态加载阶段,应力应变关系为线性,应变增量 $\Delta\varepsilon_c=0.073\%$ ,仅为 $\Delta\varepsilon_s$ 的1/3,这就说明该材料经过蠕变变形后再加载刚度变大,材料变硬,模量变大,从而在后继的准静态加载过程中表现出线弹性特征,这种现象表明该PBX材料具有蠕变硬化特征<sup>[18]</sup>,该特征在低应力水平下表现不明显,而高应力水平下导致陈氏法所得蠕变曲线与真实蠕变曲线在瞬态变形阶段产生偏差。

因此,如果只关注TATB基PBX的稳态蠕变阶段,不关注瞬态阶段的蠕变硬化现象,如采用过渡蠕变法评估材料的长期强度<sup>[2]</sup>,则陈氏法亦可以在高应力水平范围内得以应用。

## 4 结 论

(1)在低应力水平下(0~11 MPa),TATB基PBX材料的应力应变关系为线性,其蠕变行为可采用线性Boltzmann叠加原理来描述,因而采用陈氏法得到的蠕变曲线与真实蠕变曲线一致,可满足工程需要。

(2)在高应力水平下(大于11 MPa),陈氏法得到的蠕变曲线在蠕变变形阶段与真实蠕变曲线一致,由于材料表现出明显的蠕变硬化特征,使其在蠕变后继的准静态加载产生的应变增量较真实加载条件发生折减,致使总体变形偏小。

### 参考文献:

- [1] 李明,温茂萍,何强,等. TATB基高聚物粘结炸药蠕变特性研究[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] 张清照,沈荣明,丁文其. 锦屏绿片岩力学特性及长期强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8):1642-1648.  
ZHANG Qing-zhao, SHENG Rong-ming, DING Wen-qi. Study of mechanical properties and long-term strength of jinping green schist[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1642-1648.
- [3] 吴谦. 软粘土的结合水对其二次固结和长期强度的影响及机理研究[D]. 长春:吉林大学,2015.  
WU Qian. Research on influence of bond water on secondary consolidation and long term strength of soft clay. Changchun: Jilin University, 2015.
- [4] Gagliardi F J, Cunningham B J. Creep testing plastic-bonded explosives in uni-axial compression[C]//Society for Experimental Mechanics-11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics, 2008.
- [5] Darnell I M, Oh S, Hrousis C A, et al. A constitutive model for long time duration mechanical behavior in insensitive high explosives[R]. Lawrence Livermore National Laboratory Report, LLNL-CONF-425382,2010.
- [6] 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.
- [7] DeLuca R, Brown G W. PBX 9502 creep data, compression and tension[R]. Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-14-20710, 2014.
- [8] 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.
- [9] 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):798-802.  
LIN Cong-mei, LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, et al. Influence of F2311 content on creep performance of TATB-based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 798-802.
- [10] ZHOU Hong-ping, HE Qiang, LI Ming, et al. The tensile properties and creep performance of a long-term thermally aged plastic bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(9): 826-831.
- [11] 丁雁生,潘颖,蔡瑞娇. 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.
- [12] 唐维,李明,温茂萍. 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. PBX creep model based on modified time hardening theory[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(1): 34-36.
- [13] 李攀,郝志明,刘永平,等. 高聚物粘结炸药蠕变行为的近场动力学模拟方法[J]. 含能材料,2017,25(2):118-124.  
LI Pan, HAO Zhi-ming, LIU Yong-ping, et al. Application of peridynamic method on prediction of creep behavior of polymer bonded explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2): 118-124.
- [14] Tan T K. Determination of the rheological parameters and the hardening coefficients of clays. In: Kravtchenko J, Sirieys P M. (eds) *Rheology and Soil Mechanics/Rhéologie et Mécanique des Sols*[C]//International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg, 1966: 265-272.
- [15] Tan T K, Kang Wen-fa. Locked in stresses, creep and dilatancy of rocks, and constitutive equations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1980, 13(1): 5-22.
- [16] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社,1994:140-143.
- [17] 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.



[18] 陈绍杰, 刘小岩, 韩野, 等. 充填膏体蠕变硬化特征与机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 570-578.  
CHEN Shao-jie, LIU Xiao-yan, HAN Ye, et al. Experimental

study of creep hardening characteristic and mechanism of filling paste[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(3): 570-578.

## Applicability Analysis of Chen's Method in the Research of TATB-based PBX Creep Behavior

ZHAO Long, GAN Hai-xiao, TANG Wei, TANG Ming-feng, ZHOU Hong-ping

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

**Abstract:** To improve the experimental efficiency of creep behavior research of polymer bonded explosive (PBX) for the further study of the long-term service performance, the adaptability of Chen's method in the experimental study of PBX creep behavior was investigated and analyzed. The uniaxial compression creep experiments of a TATB-based PBX material under the stress levels of 5.5, 11, 16.5 MPa and 22 MPa were carried out by Chen's multistep loading method and separate loading method, respectively. Chen's data processing method is applied to deal with the creep test results of multistep loading, the creep curves under different loading were obtained, and compared with the creep curves obtained by separate loading method. Results show that creep curves obtained by both methods under the stress levels of 5.5 MPa and 11 MPa are coincident, but the ones obtained by Chen's method are lower than the ones obtained by separate loading method under the stress levels of 16.5 MPa and 22 MPa, which indicates that Chen's method can be well applied to the creep experimental study of the material under low stress level, and can be applied to the study of long-term service properties further. While under high stress level, obvious creep hardening effect is observed so that creep curves from Chen method are only in accord with the real separate ones at creep deformation stage but discount occurs in the stage of instantaneous elastic deformation.

**Key words:** polymer bonded explosive(PBX); creep; Chen's method; multistep loading method; creep hardening

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.07.010



## 《含能材料》实现单篇网络首发

为了以规范的网络期刊出版方式更快更好地确立作者的科研成果首发权,全面提高学术论文的传播效率和利用价值,《含能材料》与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司(简称电子杂志社)签署了《CAJ—N 网络首发学术期刊合作出版协议》,通过《中国学术期刊(网络版)》(CAJ—N)进行《含能材料》单篇网络首发。

自 2018 年 5 月起,凡经《含能材料》审定录用的稿件将在《中国学术期刊(网络版)》(CAJ—N)上网络首发,后视编排情况发布整期汇编定稿,并印刷出版。

为规范网络首发版式,请投稿作者登录本刊网站,仔细阅读本刊投稿须知,并依据投稿模板中相关要求认真撰写论文。录用定稿网络首发之后,在后续整期汇编定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名及排序、作者单位以及其主要学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

欢迎作者投稿本刊。欢迎读者通过中国知网、本刊网站阅读并使用 DOI 引用本刊最新录用论文。

《含能材料》编辑部