

塑料粘结炸药装药的蠕变损伤一维模型*

潘颖 蔡瑞娇

(北京理工大学, 北京, 100081)

丁雁生

(中国科学院力学研究所)

郁向东 杨玉明

(中国工程物理研究院四所)

摘要 本文提出了关于塑料粘结炸药装药的粘弹性蠕变损伤一维模型, 按此模型拟合的曲线与 Johnson H D 的实验结果一致。由此指出, 决定于粘结剂的热软化和决定于炸药颗粒特征的初始损伤度是影响塑料粘结炸药蠕变损伤特性的重要因素; 对蠕变柔量的分析表明, 适当选择塑料粘结炸药的粘性系数, 有可能抑制材料发生蠕变损伤破坏。

关键词 塑料粘结炸药; 粘弹性; 蠕变; 损伤; 巴西试验

Johnson H D 围绕塑料粘结炸药(PBX)的力学性质, 特别是蠕变性质做了一系列实验^[1,2], 其中部分实验提供了应变—时间数据。可以据此讨论蠕变柔量, 研究温度和粒度的影响。然而, Johnson H D 未利用这些实验数据作进一步的理论分析。

本文拟对 Johnson H D 的实验数据进行分析, 建立蠕变—损伤耦合的一维模型, 为研究内应力导致的炸药装药蠕变损伤和破裂提供本构模型。

1 描写 PBX 蠕变第一、二阶段现象的粘弹性模型

Johnson H D 整理实验数据得蠕变柔量 $J(t) = J_0 + A t^m + B(t - t_2)$ 。这是描写蠕变第一、二阶段现象的经验公式, t_2 为第二阶段的时间起点, 有 J_0 、 A 、 B 、 m 等四个待定参数。文献[3]也采用同样的经验公式。

外载作用下 PBX 拉伸变形破坏过程的显微观察表明, PBX 可以看作一种与初始损伤相关的有粘性的固体。由此, 设想用一维粘弹性模型(如图 1.1)描写 PBX 蠕变第一、二阶段的现象。受 Johnson H D 的启发, 取四个粘弹性参数。

图 1.1 中 E 为弹簧的弹性模量, $E = \sigma/\epsilon$ F 为粘壶的粘性系数, $F = \sigma/\dot{\epsilon}$ 式中 σ 表示应力, ϵ 表示应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率。 E_1-F_1 是 Maxwell 粘弹性流体, E_2-F_2 是 Kelvin 粘弹性固体, 两者串联构成四参数粘弹性流体。材料两端受应力 $\sigma(t)$ 作用, 产生应变 ϵ

(t)。Maxwell 体的弹簧的应变为 $\epsilon_1(t)$, 粘壶应变为 $\epsilon_2(t)$; Kelvin 体的应变为 $\epsilon_3(t)$ 。

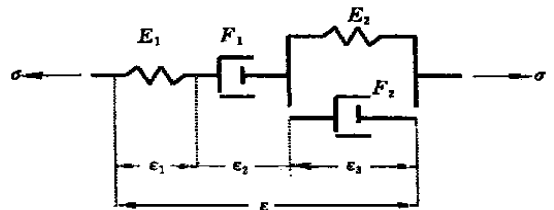


图 1.1 一维粘弹性模型

Fig. 1.1 One-dimensional viscoelasticity model

描写该材料的方程为

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (1.1)$$

$$E_1 \epsilon_1 = \sigma \quad (1.2)$$

$$F_1 \dot{\epsilon}_1 = \sigma \quad (1.3)$$

$$E_2 \epsilon_3 + F_2 \dot{\epsilon}_3 = \sigma \quad (1.4)$$

这四个方程有四个变量, 四个参数, 可确定材料的应力-应变关系 $\sigma(\epsilon)$ 。由此导出

$$\sigma + \frac{E_1}{E_2} \left(1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{E_2}{F_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_1 F_2}{E_1 E_2} \sigma = F_1 \dot{\epsilon} + \frac{E_1 F_2}{E_2} \epsilon \quad (1.5)$$

若令

$$p_1 = \frac{E_1}{E_2} \left(1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{E_2}{F_1} \right)$$

$$p_2 = \frac{E_1 F_2}{E_1 E_2}$$

$$q_1 = F_1$$

$$q_2 = \frac{E_1 F_2}{E_2}$$

1999年6月收稿, 2000年1月定稿。

* 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目(960310)

可得四参数粘弹性流体的标准化的本构关系^[4]

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} = q_1 \dot{\epsilon} + q_2 \ddot{\epsilon} \quad (1.6)$$

考虑做蠕变实验。当 $t < 0$ 时, $\sigma = \epsilon = 0$; 当 $t = 0$ 时, $\sigma = \sigma_0, \dot{\sigma} = \dot{\sigma}_0$ 。积分(1.1)~(1.4)式,得

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \\ &= \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{F_2} t} \right) + \frac{\sigma_0}{F_1} t \end{aligned}$$

改写此式,得到积分形式的本构关系——蠕变柔量 $J = \epsilon/\sigma_0$, 表为

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{F_2} t} \right) + \frac{t}{F_1} \quad (1.7)$$

蠕变柔量 $J(t)$ 对时间的导数为

$$\dot{J}(t) = \frac{1}{F_2} e^{-\frac{E_2}{F_2} t} + \frac{1}{F_1} \quad (1.8)$$

当 $t = 0$ 时, 有 $J(0) = 1/E_1, \dot{J}(0) = 1/F_2 + 1/F_1$ 。

(1.7)式所示的蠕变柔量能够很好地反映蠕变过程。当 $t = 0$, 对材料突然施加恒定应力 σ_0 时, 应变突然跳到 $\epsilon(0) = \sigma_0/E_1, J(0) = 1/E_1$ 。然后, 应变继续增加, 但增幅渐小, 属于蠕变的第一阶段, 主要是(1.7)式第二项的指数函数起作用。当时间逐渐增长到足够大, 指数函数项趋于 1, (1.7)式第二项趋于 0, 则应变趋于稳定增长, 即(1.7)式第三项起主要作用, 蠕变进入第二阶段。

Johnson H D 的蠕变柔量表达式 $J(t) = J_0 + A t^m + B(t - t_2)$, 虽然也能反映上述的两个阶段, 但它的四个参数不如粘弹性流体模型那样有明确的物理意义。粘弹性流体模型有瞬态反应, 它取决于 Maxwell 体的弹簧 E_1 。蠕变第一阶段的性质, 取决于 Kelvin 体的特征 E_2 和 F_2 。蠕变第二阶段的性质, 取决于 Maxwell 体的粘壶 F_1 。

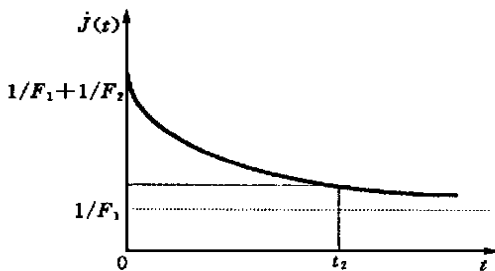


图 1.2 蠕变柔量导数曲线

Fig. 1.2 Creep compliance derivative curve

Johnson H D 的表达式中的 t_2 表示蠕变第二阶段的起点。(1.7)式不显含 t_2 , 是更准确地反映了实验事实。实际上, 很难从实验数据明确指出 t_2 值。由(1.8)式知, $\dot{J} = 1/F_1$ 是蠕变柔量导数的渐近线(如图 1.2)。若定义 $t = t_2$ 时

$$\frac{1}{F_2} e^{-\frac{E_2}{F_2} t_2} = 0.05 \frac{1}{F_1}$$

则 t_2 可表为

$$t_2 = - \frac{F_2}{E_2} \ln \frac{F_2}{20F_1}$$

2 描写 PBX 蠕变第三阶段的粘弹性—损伤耦合模型

在蠕变的第三阶段, 应变 ϵ 急剧增长直到发生断裂。一般认为, 蠕变的第三阶段与材料的内部损伤相关。若材料断面积为 A , 损伤区面积为 \tilde{A} 。定义损伤度 $D = \tilde{A}/A$ 。若无损伤, $\tilde{A} = 0$, 则 $D = 0$ 。若损伤面积 $\tilde{A} = A$, 即全断面损伤, 则 $D = 1$ 。

设材料初始损伤度 $D = D_0$, t 时刻的损伤度记作 $D(t)$ 。前节提出的蠕变应力 σ 实际是表观应力, t 时刻的真实应力记作 $\sigma(t)$ 。于是, 真应力为

$$\sigma(t) = \frac{1 - D_0}{1 - D(t)} \sigma_0$$

记 $\epsilon(t_c) = \epsilon_0$ 。从 Johnson H D 的数据看, 假设时间 $t < t_c$, 应变 $\epsilon(t) < \epsilon_0$ 时, 损伤无变化; 时间 $t = t_c$, 应变 $\epsilon(t) = \epsilon_0$ 时, 损伤有发展。于是可以假设材料服从以下的损伤演化方程

$$\dot{D} = H(\epsilon) \frac{\eta}{t_c} \frac{\epsilon - \epsilon_0}{1 - D} \quad (2.1)$$

式中阶跃函数

$$H(\epsilon) = \begin{cases} 0 & (\epsilon < \epsilon_0) \\ 1 & (\epsilon \geq \epsilon_0) \end{cases}$$

假设真应力服从前节指出的粘弹性本构关系, 则有如下基本方程

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (2.2)$$

$$E_1 \epsilon_1 = \frac{1 - D_0}{1 - D} \sigma \quad (2.3)$$

$$F_1 \dot{\epsilon}_2 = \frac{1 - D_0}{1 - D} \sigma \quad (2.4)$$

$$E_2 \epsilon_3 + F_2 \dot{\epsilon}_3 = \frac{1 - D_0}{1 - D} \sigma \quad (2.5)$$

$$\dot{D} = H(\epsilon) \frac{\eta}{t_c} \frac{\epsilon - \epsilon_0}{1 - D} \quad (2.6)$$

方程组(2.2)~(2.6)有五个因变量, 七个材料参数, 构成了一组描写材料蠕变—损伤的一阶常微分方程。在 $t < t_c, \epsilon(t) < \epsilon_0$ 时, $\dot{D} = 0, D(t) = D_0$, 方程组(2.2)~(2.6)退化为方程组(1.1)~(1.4)。因此, 方程组(2.2)~(2.6)可以统一描写蠕变—损伤的三个阶段。

3 用蠕变—损伤方程处理 Johnson H D 的实验数据

Johnson H D 于 1975 年发表的 LX - 14 (HM X/estane) 炸药(批号 713- 1)在温度 21、应力 0.48M Pa 条件下的间接拉伸蠕变实验^[1](巴西实验), 1979 年发表的同种同批炸药在 49、0.48M Pa 下的同类实验, 还有批号为 733- 131 的三种粒度的同种炸药的同类实验^[2], 共九种, 其中每一种有 3~6 个实验, 都提供了应变—时间数据。

分两步拟合实验数据:

第一步 采用最小二乘原理拟合蠕变的第一、第二阶段, 即损伤发展前的蠕变, 得到 E_1 、 E_2 和 F_1 、 F_2 四个材料参数。

做第一步时, 首先采用四参数模型进行拟合(如图 3.1), 后来发现有的试样 F_1 很大, 近似趋近于无穷大。从(1.3)式可见,

$$F_1 \dot{\epsilon} = \sigma$$

F_1 意即 $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$, $\epsilon = 0$, 无粘壶 F_1 , 模型退化为三参数固体(如图 3.2)。从(1.7)式来看, 当 F_1 蠕变柔量的第三项为零, 没有直线段部分。

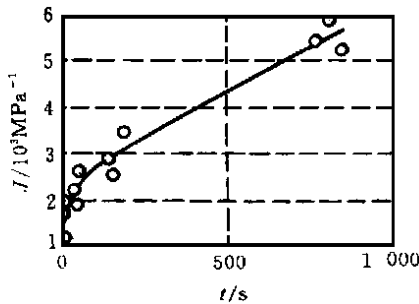


图 3 1 四参数模型的回归曲线 (损伤发展前的蠕变)

Fig 3 1 Regression curve of four parameter model

表 4 1 试样在 0.48M Pa 不同温度下的蠕变损伤参数

Tab 4 1 Creep damage parameters of specimens at different temperatures with a load of 0.48M Pa

试样	温度/	$F_1 / \text{MPa} \cdot \text{s}$	$F_2 / \text{MPa} \cdot \text{s}$	E_1 / MPa	E_2 / MPa
LX14- 75- 8(批号 713- 1)	21	3.0×10^9	1.0×10^5	460	170
LX144(批号 713- 1)	49	2.5×10^5	3.7×10^4	860	810

由表 4 1 可知, 当温度从 21 升到 49 时, F_1 下降四个量级, F_2 下降一个量级, E_1 、 E_2 同量级。温度主要影响 F_1 。从物理上来说, F_1 是粘性系数。粘性随温升急剧减小。内在原因是粘结剂(高分子聚合物)热软化, 易于流动, 易于变形。这时, PBX 的蠕变曲线有直线段, 即蠕变存在第二阶段, 或说蠕变有一

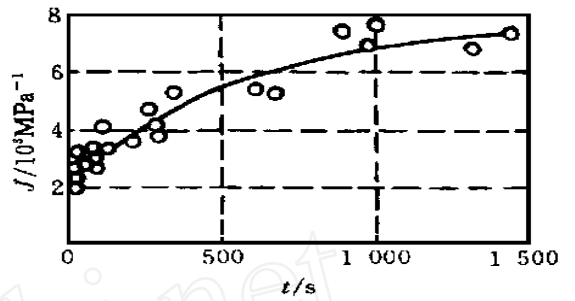


图 3 2 三参数模型的回归曲线 (损伤发展前的蠕变)

Fig 3 2 Regression curve of three parameter model

第二步 拟合蠕变的第三阶段, 即损伤发展阶段。

该阶段的实验数据非常分散(前两阶段的实验点相当集中), 所以拟合的参数 η 、 ϵ_0 、 D_0 等都有一定取值范围。如若固定 D_0 、 t_c , 拟合的 η 发散, 对应 t_{11} 、 t_{12} 、 t_{13} 分别为 η_1 、 η_2 、 η_3 (如图 3.3)。

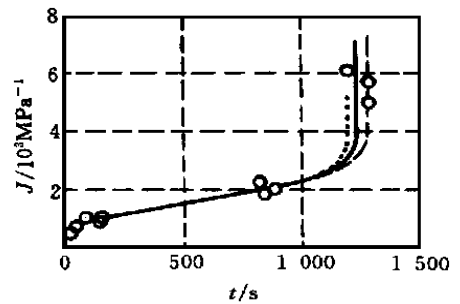


图 3 3 蠕变三个阶段的回归曲线

Fig 3 3 Regression curve of three stages creep

将两步拟合的结果画在一起, 得到蠕变三个阶段的拟合曲线(如图 3.3)。由图可见, 按粘弹性蠕变损伤理论拟合的曲线与实验结果一致。

4 讨论

4 1 温度影响

个线性阶段。

批号 713- 1 的造型粉平均粒径为 1.76mm, 即所谓标准炸药。温度变化 30 左右, 这种药柱的 F_1 变化了四个量级。如果定量描述温度对粘性的影响, 它很可能是指数关系。

4 2 粒度影响

(1) 粒度对 F_1 的影响

由表 4 2 可知, 49 °C 下, 细颗粒的造型粉 F_1 小, 中、粗颗粒 F_1 大。与常温 21 °C 下的样品 LX14-758 相比 ($F_1 = 3.0 \times 10^9$), 细颗粒 F_1 变小, 中、粗颗粒 F_1 没变。这里品种相同, 批号不同, 不十分严格, 但可以看到温度对 F_1 的影响趋势——主要是细颗粒

的 F_1 变化大。从细观上看, 颗粒尺度小, 材料易于流动变形, 导致温升时材料的宏观参数 F_1 较易改变。

(2) 粒度对损伤演化时间 $\Delta t = t_f - t_c$ 的影响

如图 4.1 (—○— Δt_1 ; —×— Δt_2 ; —+— Δt_3) 所示, 颗粒度小, 演化时间长; 颗粒度大, 演化时间短, 损伤发展快。

表 4 2 不同粒径试样在 0.48MPa、49 °C 下的蠕变损伤参数

Tab 4 2 Creep damage parameters of specimens of different granule size at 49 °C with a load of 0.48MPa

样品	成型方式	$F_1/\text{MPa} \cdot \text{s}$	E_1/MPa	$F_2/\text{MPa} \cdot \text{s}$	E_2/MPa	η_1	η_2	η_3
粗 LX145	机械加工	1.3×10^9	999	4.7×10^4	234	2 852	1 874	984
LX146	压制	4.8×10^9	711	6.1×10^4	250	3 306	2 245	1 413
中 LX147	机械加工	8.9×10^9	1170	7.6×10^4	220	2 702	1 000	808
LX148	压制	1.1×10^9	740	3.6×10^4	230	3 510	1 970	1 224
细 LX149	机械加工	3.3×10^5	1720	2.5×10^4	920	2 170	1 842	1 522
LX1410	压制	5.0×10^5	790	6.1×10^4	920	2 210	1 367	1 127

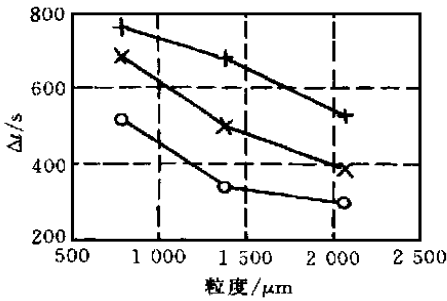


图 4 1 粒度对损伤演化时间的影响

Fig 4 1 Effect of granule size on the time of damage development

4.3 关于 ϵ_c 的讨论

由电镜观察判断^[4], PBX 的破坏准则应为拉伸应变。 ϵ_c 为描写临界损伤的拉应变的阈值, 又是蠕变第三阶段的起点。

由积分形式的本构关系知

$$\frac{1}{E_2} e^{-\frac{E_2}{F_2} t_c} = y(t_c),$$

$$\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{\epsilon_c}{\sigma_0} + \frac{t_c}{F_1} = y\left(t_c, \frac{\epsilon_c}{\sigma_0}\right)$$

在 $y \sim t_c$ 平面上 (见图 4 2), 这是两条曲线。第一条随 t_c 呈指数衰减, 第二条是一族以 ϵ_c/σ_0 为参数的斜直线。指数曲线与斜直线的交点, 对应着 t_c 的解。当给定 ϵ_c 时, 不论 σ_0 多么小, t_c 总有解。 σ_0 的最大值为 $E_1 \epsilon_c = \sigma_c$ (称 σ_c 为临界损伤应力), 此时 $t_c = 0$ 。

当 $F_1 \rightarrow \infty$ 时, 第二条线与 t_c 无关, 退化为一族以 ϵ_c/σ_0 为参数的水平线。当给定 ϵ_c 时, 如果 σ_0 足够小, 使

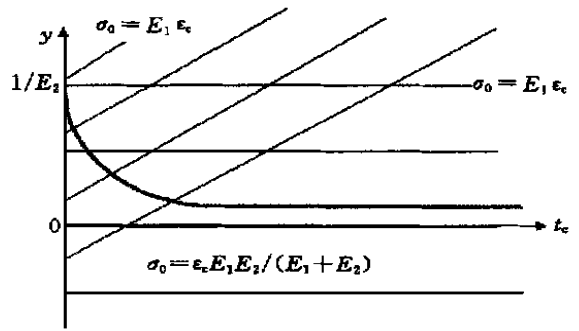


图 4 2 本构关系曲线

Fig 4 2 Curve of constitutive relation

$$\frac{\epsilon_c}{\sigma_0} < \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \quad (4.1)$$

则 $y(t_c, \epsilon_c/\sigma_0) < 0$, t_c 无解。若

$$\frac{\epsilon_c}{\sigma_0} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \quad (4.2)$$

则 $y(t_c, \epsilon_c/\sigma_0) = 0$, $t_c \rightarrow \infty$, 即三参数粘弹性体的本构关系存在极限情况。满足 (4.2) 式时, 材料需很长时间才发生蠕变损伤, 也就是材料此时不发生蠕变损伤。称 $\epsilon_c [E_1 E_2 / (E_1 + E_2)]$ 或 $[E_2 / (E_1 + E_2)] \sigma_c$ 为三参数粘弹性体的长时拉伸强度 σ_0 。当 $F_1 < \sigma_c$, 材料为四参数粘弹性体, 其本构关系不存在极限情况, 其长时拉伸强度趋于零。因此, 改善 PBX 材料的粘性, 使其 $F_1 \rightarrow \infty$, 且满足 $\epsilon_c/\sigma_0 = 1/E_1 + 1/E_2$ 时, 材料不会发生损伤破坏。这对防止 PBX 材料发生蠕变损伤破坏十分有意义。

4.4 粘性的作用

前面分别讨论过温度对粘性的影响 ($T \rightarrow \infty$, $F_1 \rightarrow \infty$)、颗粒度对粘性的影响 (细颗粒 F_1 小, 中, 粗

颗粒 F_1 大)。炸药性质变化, 主要表现为 F_1 变化大。三参数模型和四参数模型的主要差别是粘性不同。PBX 有无长时拉伸强度, 取决于 F_1 的大小。描写炸药力学性质时, 粘性是一个不应忽视的重要参数。仅用弹性参数, 没抓住主要特征, 不能描写炸药的蠕变性质, 无法正确描述 PBX 炸药的力学行为。

4.5 一维假设

本文处理数据用的是简单的一维模型, 这对巴西实验是很粗略的近似。真实的行为是三维的, 所以需要进一步研究二维或三维粘弹性蠕变损伤模型。

5 结论

(1) 用粘弹性蠕变损伤模型可以很好地反映塑料粘结炸药 (PBX) 的蠕变损伤破坏性质, 根据理论拟合的曲线与实测结果一致。

(2) 粘性是 PBX 的重要力学特征。它受到温度、粒度等参数的影响。其中温度影响特别大, 它反映了 PBX 粘结剂的热软化性能。

(3) 当粘性系数 F_1 时, $\sigma_1/\alpha = E_2/(E_1 +$

$E_2)$; 当 F_1 取有限值时, $\sigma_1/\alpha \rightarrow 0$ 。若能控制 PBX 的粘弹性参数, 提高其长时拉伸强度 α , 可以抑制蠕变损伤破坏。

(4) 颗粒度大, 损伤演化时间短。颗粒度小, 损伤演化时间长, 且发散小, 即减小造型粉的颗粒度, 利于改进 PBX 的蠕变损伤能力。但在一定条件下, 中、粗颗粒度材料在 49 时仍然保持三参数粘弹性固体的性质, 当应力足够小时不会发生蠕变损伤, 即增大造型粉的颗粒度又利于增强 PBX 的抗蠕变损伤能力。颗粒度究竟怎样作用, 有待于深入研究。

(5) 非一维的粘弹性蠕变损伤模型、粘性系数 F_1 随温度变化的定量规律等, 都有待深入研究。

参考文献

- 1 Johnson H D. MHSMP- 75- 40D, 1975
- 2 Johnson H D. MHSMP- 79- 26, 1979
- 3 董海山, 周芬芬主编. 高能炸药及相关物性能. 北京: 科学出版社, 1989.
- 4 周光泉, 刘孝敏编著. 粘弹性理论. 中国科学技术大学出版社, 1996

ONE-DIMENSIONAL CREEP-DAMAGE MODEL OF PLASTIC BONDED EXPLOSIVE

Pan Ying Cai Ruijiao

(Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Ding Yansheng

(Institute of Mechanics, CAS)

Yu Xiangdong Yang Yuming

(Fourth Institute, Chinese Engineering Physics Academy)

Abstract A one-dimensional viscoelasticity-damage model about creep of plastic bonded explosives (PBX) is suggested in this paper. The numerical solution of the model shows good agreement with the experimental results of H. D. Johnson. It follows that thermal-softening, settled upon by selection of binders and initial damage, settled upon by the granule characterization of explosives, are important factors influencing the creep damage properties of PBX materials. Analyses for the creep compliance show that the creep damage of PBX materials could be put under control, if reasonable viscosity coefficients are chosen.

Key words plastic bonded explosive, viscoelasticity, creep, damage, Brazilian test