

文章编号: 1006-9941(2017)02-0118-07

高聚物粘结炸药蠕变行为的近场动力学模拟方法

李 潘, 郝志明, 刘永平, 甄文强

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 近场动力学是一种新的无网格方法, 发展了其对于材料粘弹性力学行为的分析能力。采用 Burgers 粘弹性模型, 结合非线性粘弹体的时间-应力等效原理, 推导出非线性粘弹体在不同应力下的蠕变柔度的表达式和近场动力学蠕变本构力函数, 建立起可应用于高聚物粘结炸药的近场动力学蠕变模拟方法。模拟了 PBX9502 的蠕变行为, 并通过实验验证。建立的方法可用于高聚物粘结炸药在温度和应力共同作用下的蠕变行为分析。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 蠕变; 温度; 应力

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.005

1 引 言

近场动力学(PD)是一种新的基于非局部思想的无网格方法。在分析破坏问题时有限元、有限差分等传统方法会产生裂纹尖端奇异性, 扩展有限元虽然已经解决了很多裂纹扩展和连接问题, 但在分析三维裂纹扩展和群裂纹等复杂破坏问题时面临挑战。无网格法消除了网格依赖性, 但在模拟断裂时遇到了张力不稳定问题。分子动力学方法也被用来模拟裂纹扩展和连接问题, 但存在计算时间长、计算效率低等问题。PD方法兼有分子动力学方法和无网格方法的优点, 避免了传统方法在面临不连续问题时的奇异性, 又突破了分子动力学方法在计算尺度上的缺陷。因此, 该方法在研究损伤、断裂、失稳等问题时具有明显优势。PD方法还有待发展, 传统的粘弹性、塑性以及弹、塑、粘性耦合的材料性质在PD本构模型中的表述尚待深入研究^[1-3]。

沥青、混凝土、高聚物、固体推进剂、高聚物粘结炸药等广泛应用于国民经济建设和国防工业中, 在温度和机械载荷的作用下呈现出明显的非线性粘弹性特

征, 这类材料力学行为的研究越来越受到重视^[4-6]。孟红磊^[7]提出了一种含累积损伤的非线性粘弹性本构方程来描述推进剂的拉伸应力-应变关系, 并将其引入有限元分析中获得了较好的计算结果。冯震宇^[8]将非线性粘弹性朱-王-唐本构模型应用于飞机风挡的数值模拟, 结果表明本构模型较好地模拟了风挡材料的力学行为。

由于传统数值模拟方法易在损伤处产生奇异, 且具有网格依赖性等缺点, PD方法已开始应用于粘弹性材料的力学行为模拟。Mitchell^[9]基于并联形式的Maxwell模型建立了PD线性粘弹性本构模型。Azizi^[10]将Burgers模型引入PD键理论, 得到PD线性蠕变本构力函数, 模拟了高分子材料在低应力水平下的线性蠕变, 数值模拟与实验结果较吻合, 但模型本构力函数中的横截面积对于点对相互作用没有明确的物理意义。由于高分子、混凝土、高聚物粘结炸药等材料在高应力作用下呈现出非线性蠕变特性, 模型不能较好地模拟这类材料在温度和应力共同作用下的非线性蠕变行为。

本研究利用Burgers粘弹性模型表征蠕变柔度主曲线, 结合非线性粘弹体的时间-应力等效原理, 得到不同应力水平下蠕变柔度的表达式。将其代入PD本构力函数, 推导出非线性粘弹体的PD蠕变本构力函数, 从而建立起一种可应用于高聚物粘结炸药的近场动力学蠕变模拟方法。利用该方法对PBX9502在不同温度和不同应力作用下的蠕变行为进行模拟, 获得与实验一致的结果。

收稿日期: 2016-05-13; 修回日期: 2016-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(11472257)和中国工程物理研究院重点学科项目(计算固体力学)

作者简介: 李潘(1988-), 女, 博士研究生, 主要从事PBX的本构和损伤破坏研究。e-mail: lipan263646@163.com

通信联系人: 郝志明(1965-), 男, 研究员, 主要从事计算固体力学研究。e-mail: haozm@caep.cn

2 PD 方法的基本理论

2.1 运动方程

PD 方法将物体所占区域离散成具有一定质量的物质点,域内任一物质点 \mathbf{x}_k 与其周围一定范围(近场范围 $H=H(\mathbf{x}_k, \delta)=\{\mathbf{x}_j \in R: \|\mathbf{x}_j-\mathbf{x}_k\| \leq \delta\}$)内的其它物质点 \mathbf{x}_j 之间存在相互作用 f ,如图 1 所示,也称为本构力函数^[11]:

$$\mathbf{f}=\mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_j, \mathbf{u}(\mathbf{x}_k, t), \mathbf{u}(\mathbf{x}_j, t), t) \quad (1)$$

根据牛顿第二定律可得物质点 \mathbf{x}_k 的运动方程为

$$\rho(\mathbf{x}_k) \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_k, t)=\int_H \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_j, \mathbf{u}(\mathbf{x}_k, t), \mathbf{u}(\mathbf{x}_j, t), t) dV_j+\mathbf{b}(\mathbf{x}_k, t) \quad (2)$$

式中, ρ 为物质点密度, \mathbf{u} 为物质点的位移, \mathbf{b} 为单位体积物质所受的外载荷。

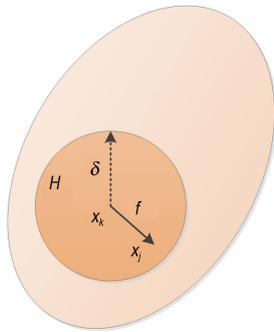


图 1 物质点与其近场范围内其它物质点的相互作用

Fig.1 Pairwise interaction of a material point with its neighboring points

2.2 本构力函数的基本形式

对于线弹性各向同性材料, Madenci^[12] 给出了本构力函数 \mathbf{f} 的基本形式

$$\mathbf{f}=c s \frac{\mathbf{y}_j-\mathbf{y}_k}{|\mathbf{y}_j-\mathbf{y}_k|} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{y}_j-\mathbf{y}_k=\mathbf{x}_j-\mathbf{x}_k+\mathbf{u}_j-\mathbf{u}_k$; $s=(|\mathbf{y}_j-\mathbf{y}_k|-|\mathbf{x}_j-\mathbf{x}_k|)/(|\mathbf{x}_j-\mathbf{x}_k|)$, 为作用键伸长率; c 为与结构尺寸、近场半径和材料柔度相关的参数。令经典理论的应变能密度与 PD 理论的应变能密度相等,可分别得到一维、二维和三维情况下 c 的表达式。

$$c=\begin{cases} \frac{2}{A\delta^2 J}, & \text{one dimension} \\ \frac{9}{\pi h\delta^3 J}, & \text{two dimensions} \\ \frac{12}{\pi\delta^4 J}, & \text{three dimensions} \end{cases} \quad (4)$$

式中, J 为材料柔度, δ 为近场半径, h 为二维板厚度, A 为一维杆的横截面积。

通过改变式(4)中材料柔度的取值,可以将线弹性材料的本构力函数扩展到非线性分析。

2.3 方程求解方法

PD 方法的运动方程式(2)可离散为

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}_k^n = \sum_j \mathbf{f}(\mathbf{u}_j^n - \mathbf{u}_k^n, \mathbf{x}_j^n - \mathbf{x}_k^n) V_j + \mathbf{b}_k^n \quad (5)$$

其中, n 为时间步数。

可见,近场动力学方法给出的运动方程是动力学形式的,用它来计算静力学问题时还需做一定的处理,如可采用引入人工阻尼的动态松弛方法来求解。Underwood^[13] 提出了一种自适应动态松弛法求解近场动力学运动方程,其中阻尼随物质点的位移变化,能较快地使结果收敛。

将式(5)引入阻尼 c^n ,并改写成矩阵形式

$$\ddot{\mathbf{U}}^n(\mathbf{x}, t^n) + c^n \dot{\mathbf{U}}^n(\mathbf{x}, t^n) = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F}^n(\mathbf{U}^n, \mathbf{U}'^n, \mathbf{x}, \mathbf{x}') \quad (6)$$

由中心差分法得到

$$\dot{\mathbf{U}}^{n+1/2} = \frac{(2-c^n \Delta t) \dot{\mathbf{U}}^{n-1/2} + 2\Delta t \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F}^n}{(2+c^n \Delta t)}$$

$$\mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{U}^n + \Delta t \dot{\mathbf{U}}^{n+1/2} \quad (7)$$

初始条件为

$$\dot{\mathbf{U}}^{1/2} = \frac{\Delta t \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F}^0}{2} \quad (8)$$

式中, \mathbf{F} 为物质点所受合力, \mathbf{D} 为密度矩阵,其对角元素满足

$$\lambda_{ii} \geq \frac{1}{4} \Delta t^2 \sum_j |K_{ij}| \quad (9)$$

$$\sum_j |K_{ij}| = \sum_{j=1}^N \frac{|\xi_{(i)(j)} \cdot \mathbf{e}|}{|\xi_{(i)(j)}|} \frac{c}{|\xi_{(i)(j)}|}$$

式中, \mathbf{e} 为 x, y, z 方向的单位矢量, c^n 为阻尼系数

$$c^n = 2 \sqrt{((\mathbf{U}^n)^T \mathbf{K}^n \mathbf{U}^n) / ((\mathbf{U}^n)^T \mathbf{U}^n)} \quad (10)$$

\mathbf{K}^n 为对角刚度系数

$${}^1 K_{ii}^n = -(F_i^n / \lambda_{ii} - F_i^{n-1} / \lambda_{ii}) / (\Delta t \dot{u}_i^{n-1/2}) \quad (11)$$

动态松弛法是通过添加人工阻尼,从而求得函数的静态解的一种方法。阻尼越大,收敛也就越快,但是人工阻尼的大小不能超过临界阻尼,否则会造成计算时间过长。

3 非线性粘弹体的 PD 蠕变本构力函数

3.1 非线性粘弹体的时间-应力等效原理

沥青、混凝土、固体推进剂、高聚物以及高聚物粘

结炸药等在温度相同的条件下, 应力水平越高, 材料的蠕变应变就越大, 材料呈现出非线性粘弹性特征。此时, 不能只考虑时间和温度, 还需要考虑应力水平对蠕变行为的影响。非线性粘弹体的时间-应力等效原理^[14]认为, 材料受载应力水平对蠕变柔度的影响与温度相似, 也具有等效性。依据自由体积理论, 推导出了时间-应力等效原理的表达式^[15]:

$$J(\sigma, t) = b_\sigma J(\sigma_0, t/a_\sigma) \quad (12)$$

式中, a_σ 和 b_σ 分别为应力水平和竖直移位因子, 具有与温度移位因子类似的形式, $J(\sigma_0, t)$ 为参考应力 σ_0 下的蠕变柔度主曲线。

3.2 蠕变柔度主曲线的表征

粘弹性材料同时具有弹性和粘性特征, 根据流变学理论采用弹性和粘性元件组合描述其粘弹性行为。粘性元件与弹性元件常见的组合模型包括 Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型以及其它复杂模型。一般而言, 材料模型的选择和确定应该遵循以下原则: (1) 模型能够很好地反映材料的力学性能; (2) 模型应尽可能简单、直观。Burgers 粘弹性模型是由 Maxwell 单元和 Kelvin 单元串联组成的四参数模型, 可以表示高聚物粘结炸药粘弹行为的主要特征^[16]。由实验测得的高聚物粘结炸药材料的蠕变曲线与 Burgers 模型一致性很好。基于以上几点, 本研究选择了 Burgers 粘弹性模型来描述高聚物粘结炸药的粘弹性行为。

参考应力 σ_0 下的蠕变柔度主曲线可以通过 Burgers 粘弹性模型来描述, 如图 2 所示。

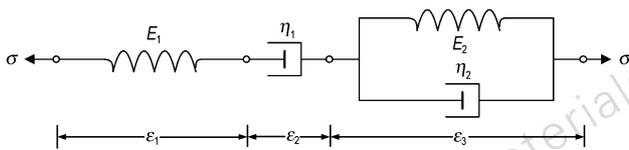


图 2 Burgers 粘弹性模型

Fig. 2 Burgers viscoelastic model

根据胡克定律和牛顿流体定律可得到, 当应力为常数时 Burgers 模型的应变表达式为

$$\varepsilon(\sigma_0, t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0 t}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) \quad (13)$$

式中, E_1, E_2 为弹簧的弹性模量, MPa; η_1, η_2 为粘壶的粘滞系数, MPa; t 为时间, s。

令蠕变柔度 $J(\sigma_0, t) = \varepsilon(\sigma_0, t) / \sigma_0$, 则:

$$J(\sigma_0, t) = \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) \quad (14)$$

由此, 画出 Burgers 模型的蠕变曲线, 如图 3 所示。

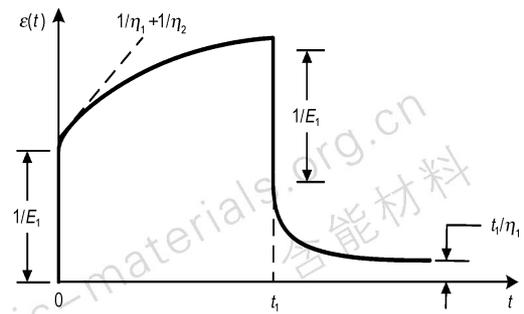


图 3 Burgers 模型的蠕变曲线

Fig. 3 Creep curve of Burgers model

3.3 PD 蠕变本构力函数

结合式 (12) 和式 (14) 可以得到不同应力水平下, 非线性粘弹体的蠕变柔度表达式

$$J(\sigma, t) = b_\sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t/a_\sigma}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t/a_\sigma}{\eta_2}}) \right] \quad (15)$$

当时间 t 为定值时, 材料的蠕变柔度保持不变。因此, 可以将式 (15) 代入式 (4), 再代入式 (3), 得到蠕变各个时刻对应的各参数均具有明确物理意义的 PD 方法本构力函数

$$f(\sigma, t) = \begin{cases} \frac{2}{A\delta^2 s} \frac{y_j - y_k}{|y_j - y_k|} / \left\{ b_\sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t/a_\sigma}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t/a_\sigma}{\eta_2}}) \right] \right\}, & \text{one dimension} \\ \frac{9}{\pi h \delta^3 s} \frac{y_j - y_k}{|y_j - y_k|} / \left\{ b_\sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t/a_\sigma}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t/a_\sigma}{\eta_2}}) \right] \right\}, & \text{two dimensions} \\ \frac{12}{\pi \delta^4 s} \frac{y_j - y_k}{|y_j - y_k|} / \left\{ b_\sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t/a_\sigma}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t/a_\sigma}{\eta_2}}) \right] \right\}, & \text{three dimensions} \end{cases} \quad (16)$$

利用 Fortran 自编程实现算法, 首先将结构离散为均匀分布的物质点, 各个时刻物质点间的相互作用力用式 (16) 表示, 采用动态松弛法求得物质点的位移。最后将该方法应用于 PBX9502 材料的蠕变行为模拟。

4 应用实例

4.1 应力移位因子的确定

Gagliardi^[17] 针对 PBX9502 开展了不同温度、不同应力下的圆柱体单轴压缩蠕变实验, 实验结果见

图 4. 通过公式 $J = \varepsilon / \sigma$, 并取对数, 得到对数蠕变柔度随时间的变化曲线, 如图5所示。可以看出, 24 °C 时,

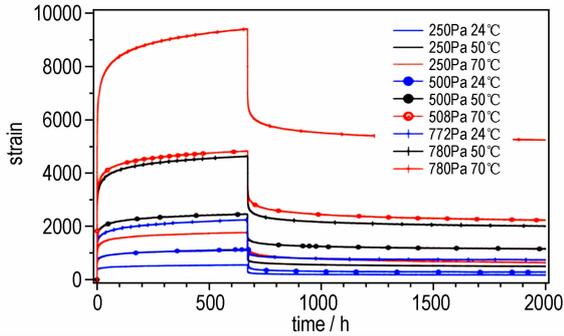


图 4 PBX9502 的蠕变实验结果

Fig. 4 Creep test results of PBX9502

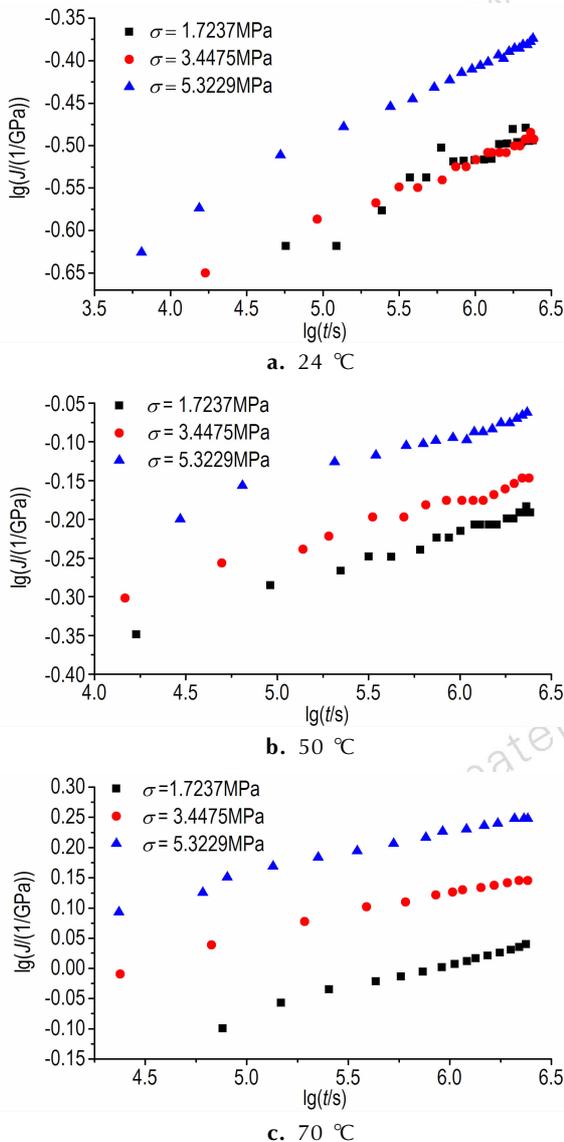


图 5 不同应力下 PBX9502 的对数蠕变柔度曲线

Fig. 5 Logarithmic creep compliance curves of PBX9502 under different stresses

1.7237, 3.4475 MPa 低应力水平下的蠕变柔度曲线几乎完全重合, PBX9502 呈现出了线性粘弹性特性。随着温度的上升, 应力水平越高, 材料的蠕变应变就越大, PBX9502 呈现出非线性粘弹性。同时, 不同应力下的蠕变柔度曲线具有相似性, 这与温度变化时的蠕变行为类似, 即时间和应力对 PBX9502 蠕变行为的影响也具有等效性。

以 σ_0 为参考应力, 将其对应的对数蠕变柔度主曲线向其他应力水平下的蠕变曲线做相应的竖直移位, 使两曲线重合, 得到的蠕变曲线如图 6 所示。图 6 中显示, 经过移位的对数蠕变主曲线与其他应力

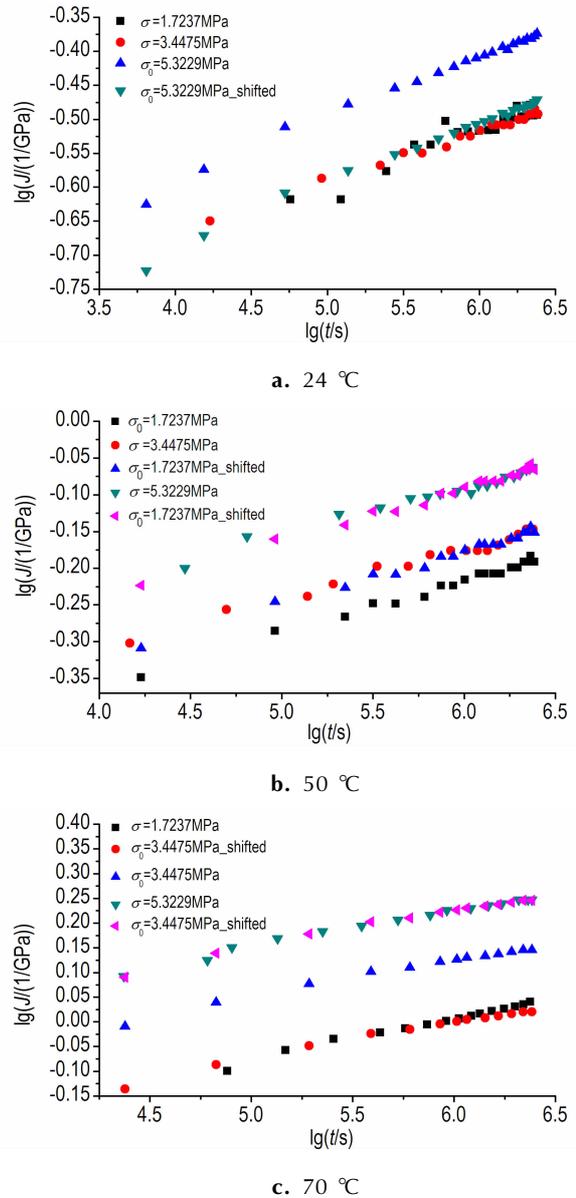


图 6 竖直移位后 PBX9502 的对数蠕变柔度曲线

Fig. 6 Logarithmic creep compliance curves of PBX9502 after vertical translation

水平下的蠕变曲线几乎完全重合,这是由于不同应力下的蠕变柔度曲线具有相似性。因此,应力水平移位因子 $a_\sigma = 1$ 。

另外,从式(12),可以看出竖直移位因子 b_σ 等于不同应力下初始柔度的比值。

根据如图 4 所示的 PBX9502 的蠕变试验数据,拟合得到 Burgers 模型参数,结果见图 7 和表 1。

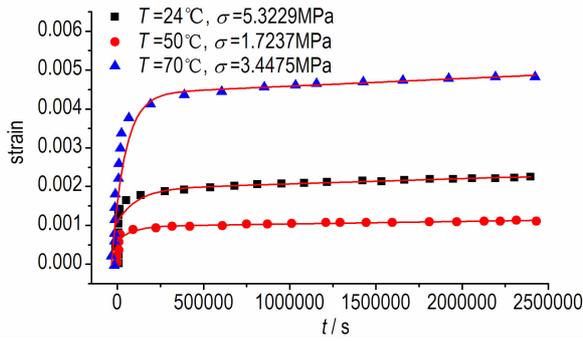


图 7 Burgers 模型参数拟合

Fig.7 Parameter fitting of Burgers model

表 1 PBX9502 的 Burgers 模型参数

Table 1 Parameters of Burgers model for PBX9502

T / °C	σ_0 /MPa	E_1 /GPa	η_1 /GPa	E_2 /GPa	η_2 /GPa
24	5.3229	4.8390	3.9394×10^7	6.4037	7.4478×10^5
50	1.7237	2.8538	2.6254×10^7	4.7164	4.1235×10^5
70	3.4475	2.1547	1.7862×10^7	1.2357	0.9212×10^5

Note: σ_0 is reference stress, E_1, E_2 are elastic modulus of the spring, η_1, η_2 are coefficients of viscosity of the dashpot.

通过蠕变柔度主曲线与其他应力水平下蠕变柔度曲线初始柔度的比值,得到的应力竖直移位因子 b_σ 的取值列于表 2。

表 2 应力竖直移位因子 b_σ 的取值

Table 2 Values of stress vertical translation factor b_σ

T / °C	σ_0	stress/MPa		
		$\sigma = 1.7237$	$\sigma = 3.4475$	$\sigma = 5.3229$
24	5.3229	0.8083	0.7697	
50	1.7237		1.0956	1.3352
70	3.4475	0.7488		1.2600

4.2 PBX 圆柱体受压蠕变行为的 PD 模拟

如图 8 所示,蠕变实验采用圆柱体试样^[17],直径 12.7 mm,高 25.4 mm,上下受均匀分布的压应力。模型被离散为均匀的物质点,计算参数如下:

$dt = 1.0$ s, 密度 $\rho = 1900$ kg/m³,泊松比 $\nu = 0.25$,物质点间距 $dx = 0.6$ mm,近场半径 $\delta = 3dx$ 。

图 9 给出初始应变和应力随载荷步的变化趋势,可以看出,PBX 炸药柱的应力和应变约在 150 载荷步达到稳定。

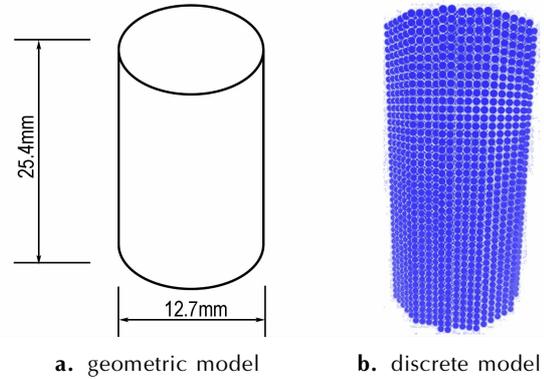
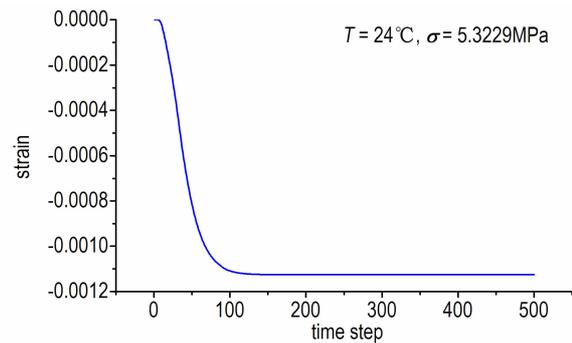
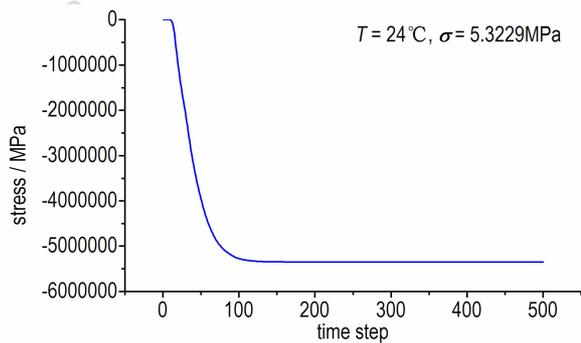


图 8 数值计算模型

Fig.8 Numerical simulation model



a. change of initial strain with time step



b. change of stress with time step

图 9 应力和应变随载荷步的变化

Fig.9 The change of stress and strain with time step

将参考应力 σ_0 对应蠕变柔度主曲线的 Burgers 模型参数以及应力竖直移位因子 b_σ 代入式(16)的 PD 蠕变本构力函数,得到的模拟蠕变曲线与实验曲线的对比情况见图 10,可以看出,模拟曲线与实验曲

线吻合很好。

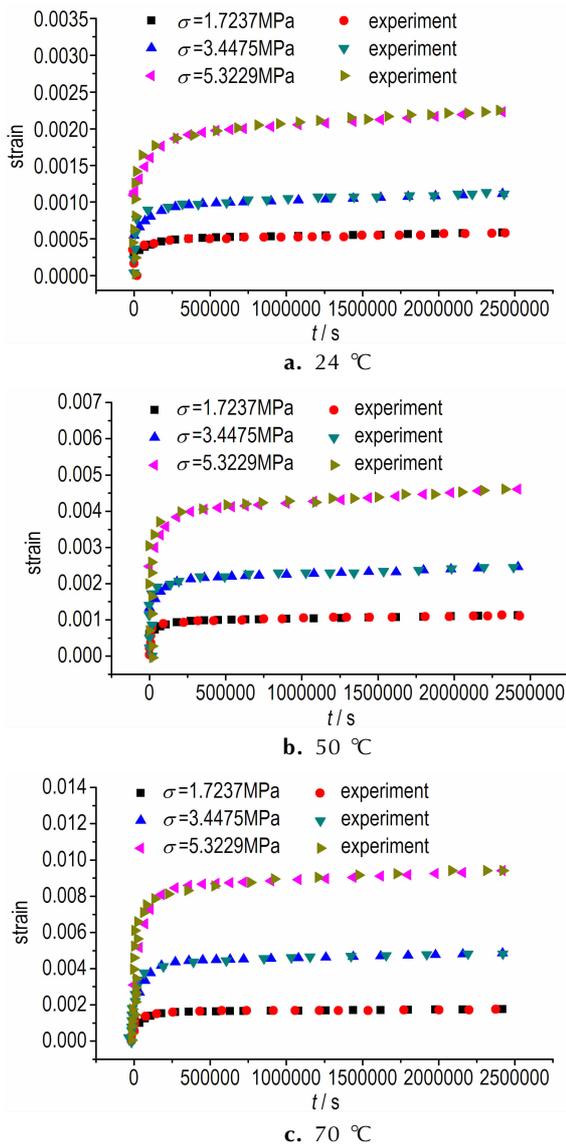


图 10 PBX9502 模拟蠕变曲线与试验曲线的对比

Fig. 10 Comparison of simulated and experimental creep curves of PBX9502

5 结 论

近场动力学方法是一种新的无网格方法,它在分析损伤、断裂和失稳等不连续问题时具有优势。但是,作为一种新的无网格方法,PD 方法还在发展中,在粘弹性、塑性、损伤断裂与破坏等问题分析上还有待发展,需要做进一步的研究。

本研究通过非线性粘弹体的时间-应力等效原理,与 Burgers 粘弹性模型得到了不同应力作用下材料蠕变柔度的表达式,推导出非线性粘弹体的 PD 蠕变本

构力函数,从而建立起可应用于高聚物粘结炸药的近场动力学蠕变模拟方法。模拟了 PBX9502 在温度和应力作用下的蠕变行为,获得与实验一致的结果。

本研究建立的近场动力学蠕变行为模拟方法可应用于同时计及温度和应力作用的高聚物粘结炸药的蠕变行为分析。

参考文献:

- [1] 黄丹, 章青, 乔丕忠, 等. 近场动力学方法以及应用[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 448-459.
HUANG Dan, ZHANG Qing, QIAO Pei-zhong, et al. A review on peridynamics method and its applications[J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(4): 448-459.
- [2] Gerstle W, Sau N, Silling S A. Peridynamic modeling of concrete structures[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237(12-13): 1250-1258.
- [3] Kilic B, Agwai A, Madenci E. Peridynamic theory for progressive damage prediction in center-cracked composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2009, 90(2): 141-151.
- [4] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992: 8-22.
YANG Ting-qing. *Viscoelastic mechanics*[M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 1992: 8-22.
- [5] 周光泉, 刘孝敏. 粘弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 8-15.
ZHOU Guang-quan, LIU Xiao-min. *Viscoelastic theory*[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1996: 8-15.
- [6] 唐明峰, 蓝林钢, 李明, 等. 以 RDX 为基的浇注 PBX 力学性能与本构模型[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 215-220.
TANG Ming-feng, LAN Lin-gang, LI Ming, et al. Mechanical properties and constitutive models of RDX based cast PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 215-220.
- [7] 孟红磊, 鞠玉涛. 含损伤非线性粘弹性本构模型及数值仿真应用[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(6): 764-768.
MENG Hong-lei, JU Yu-tao. Nonlinear viscoelastic equation with cumulative damage and its application on numerical simulation[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(6): 764-768.
- [8] 冯震宇, 王新军, 王富生, 等. 朱-王-唐非线性粘弹性本构模型在有限元分析中的实现及其应用[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(2): 269-272.
FENG Zhen-yu, WANG Xin-jun, WANG Fu-sheng, et al. Implementation and its application in finite element analysis of constitutive model for ZWT nonlinear viscoelastic material[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2007, 25(2): 269-272.
- [9] Mitchell J A. A non-local, ordinary-state-based viscoelasticity model for peridynamics. SAND2011-8064, 2011.
- [10] Azizi M A, Ariffin A K, Nik M I, et al. The peridynamic model of viscoelastic creep and recovery[J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2015, 11(4): 579-597.
- [11] Silling S A, Askari E. A meshfree method on the peridynamic model of solid mechanics[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83: 1526-1535.
- [12] Madenci E, Oterkus E. Peridynamic theory and its applications

- [M]. New York: Springer Science and Business Media, 2014.
- [13] Underwood P. Dynamic relaxation[J]. *Comput Meth Trans Anal*, 1983, 1: 245–265.
- [14] Jazouli S, Wenbo Luo, Breman F, Vu-Khanh T. Application of time-stress equivalence to nonlinear creep of polycarbonate[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24: 463–467.
- [15] 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.
- [16] 蔡峨. 粘弹性力学基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989: 54–81.
CAI E. Basis of viscoelastic mechanics[M]. Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1989: 54–81.
- [17] Gagliardi F J, Cunningham B J. Creep testing plastic-bonded explosives in uni-axial compression[D]. United States: SEM XI international congress Orlando, FL, 2008.

Application of Peridynamic Method on Prediction of Creep Behavior of Polymer Bonded Explosives

LI Pan, HAO Zhi-ming, LIU Yong-ping, ZHEN Wen-qiang

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Peridynamics is a recently developed meshfree method with many aspects needing to be further studied, such as viscoelasticity, plasticity and the coupling of elasticity, plasticity and viscosity. The analytical ability for considering viscoelastic behavior of peridynamics is developed. The theoretical basis, modeling procedure and numerical scheme of peridynamics are first reviewed. Then the expressions of creep compliance under different stresses and the peridynamic creep response functions are deduced combining time-stress equivalence principle of nonlinear viscoelastic materials and utilizing Burgers viscoelastic model. In this manner, the peridynamic creep simulation method which can be applied to polymer bonded explosives is established. The creep behavior of PBX9502 is then simulated using this method, which indicates a good conformity with experiment results. The established method can be applied to analyze creep behavior of polymer bonded explosives under different temperatures and different stresses.

Key words: polymer bonded explosives; creep; temperature; stress

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.005