

HTPB 推进剂高应变率粘弹性本构模型研究^{*}

常新龙¹, 赖建伟¹, 张晓军¹, 胡 宽¹, 齐 伟²

(1. 第二炮兵工程大学 动力工程系, 陕西 西安 710025; 2. 西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为分析 HTPB 推进剂在高应变率条件下的力学响应, 开展了推进剂分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 实验, 得到了不同温度 ($-40 \sim 25^{\circ}\text{C}$) 和应变率 ($700 \sim 2050\text{s}^{-1}$) 下的应力-应变曲线。结果表明, HTPB 推进剂在高应变率条件下具有显著的温度和应变率敏感性, 且随着应变率的增加和温度的降低, 推进剂的应力逐渐增加。在 Burke 模型基础上, 结合超弹性和粘弹性理论, 建立了一种考虑温度和高应变率效应的本构模型。通过不同温度和应变率条件下实验结果与本构理论预测对比, 验证了本构模型的有效性, 可为固体推进剂药柱点火瞬态结构完整性分析提供理论依据。

关键词: HTPB 推进剂; 高应变率; 本构模型; 分离式 Hopkinson 压杆; 温度效应

中图分类号: V512.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2014) 01-0123-05

High Strain-Rate Viscoelastic Constitutive Model for HTPB Propellant

CHANG Xin-long¹, LAI Jian-wei¹, ZHANG Xiao-jun¹, HU Kuan¹, QI Wei²

(1. Power Engineering Department, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Aeronautics College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to research mechanical behaviors of HTPB propellant at high strain-rate, split Hopkinson pressure bar (SHPB) tests at different temperature ($-40 \sim 25^{\circ}\text{C}$) and strain rate ($700 \sim 2050\text{s}^{-1}$) were conducted and stress-strain curves were obtained. The results show that the mechanical properties of HTPB propellant are sensitive to temperature and strain rate, and stress increases gradually with decreasing temperature and increasing strain rate. Based on Burke model, a constitutive model that incorporates non-linear hyperelastic and viscoelastic material response for HTPB propellant was developed for high strain-rate impact loading conditions. Predictions of the stress-strain response were made using the constitutive model. The good agreement between the predicted and the experimental results indicates the validity of constitutive model for different temperature and high strain-rate. The constitutive model can provide the theoretical basis for structural integrity of solid propellant grain under ignition transient pressure loading.

Key words: HTPB (hydroxy-terminated polybutadiene binder) propellant; High strain-rate; Constitutive model; Split Hopkinson pressure bar; Temperature effect

1 引 言

固体推进剂药柱在点火瞬态、高过载等过程中会受到冲击载荷的作用, 表现出动态高应变率力学特

性。由于推进剂材料在动态和准静态条件下的力学性能差别较大, 采用准静态条件下的线粘弹性本构模型对推进剂进行动态性能预测将会导致较大误差。为此, 国内外针对推进剂材料高应变率本构模型开展

^{*} 收稿日期: 2013-02-01; 修订日期: 2013-06-06。

作者简介: 常新龙 (1965—), 男, 博士, 教授, 研究领域为固体火箭发动机失效物理与可靠性。

E-mail: xinlongch@sina.com.cn

了大量的研究工作。Ho 建立了一种考虑力学损伤、温度和应变率依赖性的高应变率本构模型,该模型能够预测固体推进剂高应变率非线性粘弹性力学响应,但是对于低温条件下的预测效果不是很好^[1]。Johnson-Cook 模型主要用于金属热粘塑性材料的高应变率条件计算,对于推进剂材料是否适合还需要验证^[2]。朱-王-唐模型较好地考虑准静态和动态条件,已被大量应用于高聚物、炸药等脆性材料中,但是由于预测应变较小(小于 10%),对于推进剂类高延伸率材料需要进一步修正和完善^[3,4]。因此,准确获取 HTPB 推进剂材料的高应变率力学性能,构建一种适合 HTPB 推进剂的高应变率本构模型是十分必要的。

目前,利用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)技术来测试 PBX 炸药等脆性含能材料动态力学性能应用已经较为广泛^[5,6],对于脆性含能材料的动态力学性能、本构关系具有较为全面的了解^[7],但是针对 HTPB 推进剂等软材料的高应变率力学性能测试相对较少,数据较为缺乏^[8,9]。本文利用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验技术,针对 HTPB 推进剂进行了温度范围为 $-40 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 的高应变率压缩性能实验研究。并在 Burke 模型的基础上,建立了一种考虑温度和应变率效应的粘弹性本构模型。该模型由超弹性的稳态部分和粘弹性的瞬态部分组成,能够较好地预测 SHPB 实验结果,可为固体火箭发动机点火瞬态条件下结构完整性分析提供依据。

2 不同温度和应变率下的 SHPB 实验

2.1 HTPB 推进剂 SHPB 压缩实验

实验材料为 HTPB 复合固体推进剂,固体填充颗粒(AP/AL)质量分数为 84%,其他组分质量分数为 16%。采用机械加工方法,将试样制作成 $\Phi 10 \times 5\text{mm}$ 圆柱型试样。试样直径误差小于 0.05mm ,端面平行度小于 0.05mm ,满足实验精度要求。实验温度为

$-40 \sim 25^{\circ}\text{C}$,应变率为 $700 \sim 2050\text{s}^{-1}$ 。

实验在西北工业大学冲击动力学实验室的自带保温箱的 SHPB 系统上进行,保温箱采用液氮作为冷凝介质,SHPB 系统及保温装置示意图如图 1 所示。该系统子弹长度为 45cm ,入射杆长度为 120cm ,透射杆长度为 120cm ,直径为 18.5mm 。

由于 HTPB 固体推进剂材料的低波阻抗、低波速的特点,会影响数据准确、可靠的获得,因此,采取以下几项改进措施:(1)入射波整形技术。利用圆形橡胶薄片,增加入射波上升时间沿,使试样内部应力达到平衡。(2)采用铝合金杆,降低输出杆波阻抗,解决信号较弱问题。(3)采用半导体应变片,提高透射信号测量值。(4)在试样端部涂润滑剂,使试样和杆端面之间保持良好的润滑。

2.2 实验结果分析

通过数据采集系统得到的信号,整理分析得到 $-40, -30, -10$ 和 25°C 条件下试样真应力-应变曲线如图 2 所示,图中纵坐标 σ_{true}/C_0 为归一化处理后数据。由图 2 可以看出,随着应变的增加,应力逐渐增加。而且随着应变率增大和温度降低,推进剂应力越大,具有明显的应变率和温度相关性。

3 高应变率非线性本构模型

考虑到 HTPB 推进剂在高应变率条件下表现出粘弹特性,且具有较大的变形,因此,本文对 Burke 模型进行适当改进^[10],采用 Mooney-Rivlin 应变能函数,并考虑温度效应,建立了一种高应变率非线性本构模型,模型表达形式如下

$$\sigma = g(T)(\sigma^e + \sigma^v) \quad (1)$$

式中,模型由稳态部分 σ^e 和瞬态粘弹性部分 σ^v 组成,稳态部分为不可压缩的包含应变能函数的超弹性响应,瞬态部分为包含遗传积分的动态粘弹性响应, $g(T)$ 为温度效应关系式。

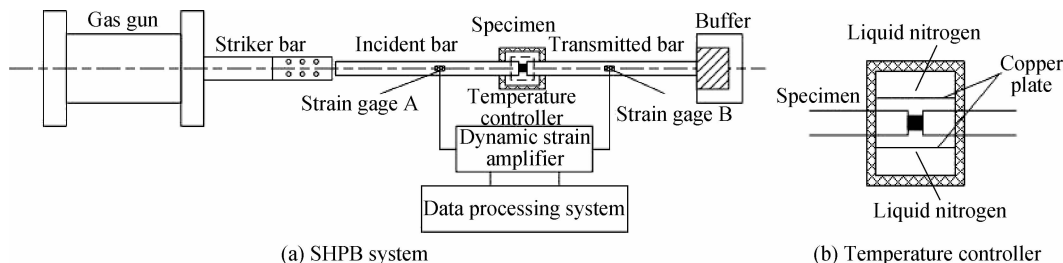


Fig. 1 Scheme of the SHPB system with temperature controller

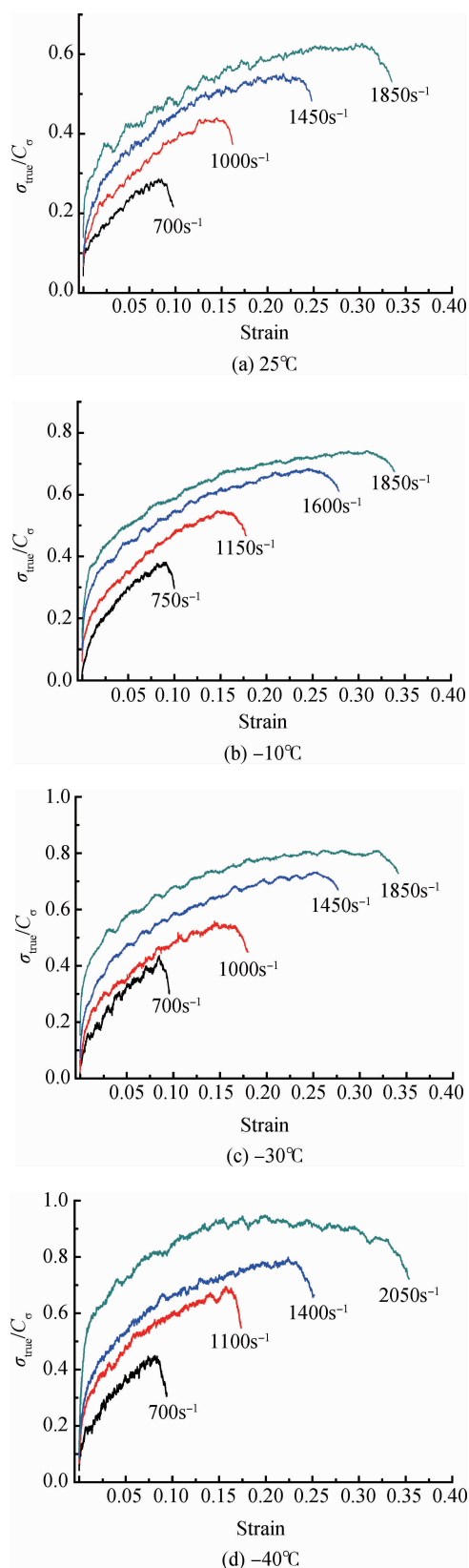


Fig. 2 Stress-strain curves at different temperature and strain rate

3.1 超弹性响应

HTPB 粘合剂基体具有复杂的分子结构,易于产生大变形,其非线性特性可以用超弹性模型来描述^[11],同样固体推进剂也表现出类似粘合剂基体的非线性超弹性特性。稳态部分的非线性本构模型形式如下

$$\begin{cases} \sigma^e = -p^e \mathbf{I} + a_1 \mathbf{B} + a_2 \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \\ a_1 = 2(\partial U / \partial I_1^B + I_1^B \partial U / \partial I_2^B) \\ a_2 = -2 \partial U / \partial I_2^B \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ^e 为柯西应力张量(或称真应力张量); p^e 为静水压力,反映材料的不可压缩性; $\mathbf{I}$ 为单位张量; $\mathbf{B}$ 为左 Cauchy-Green 变形张量; I_1^B, I_2^B 分别为张量 $\mathbf{B}$ 的第一、第二不变量; $U = U(I_1^B, I_2^B)$ 为单位体积应变能函数。

假定推进剂为各向同性近似不可压材料,应变能函数采用 Mooney-Rivlin 方程描述如下

$$U = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (3)$$

式中 C_1 和 C_2 分别为材料常数,由材料实验确定。

将式(3)带入到式(2)中,得到单轴载荷下的轴向应力

$$\sigma_{11}^e = -p^e + a_1 B_{11} + a_2 B_{11} \cdot B_{11} \quad (4)$$

式中 $a_1 = 2(\partial U / \partial I_1^B + I_1^B \partial U / \partial I_2^B) = 2(C_1 + I_1 C_2)$; $a_2 = -2 \partial U / \partial I_2^B = -2C_2$; $U = U(I_1^B, I_2^B)$; 由于单轴载荷条件下,横向应力为 0,则

$$\sigma_{22}^e = \sigma_{33}^e = -p^e + a_1 \lambda^{-1} + a_2 \lambda^{-2} = 0 \quad (5)$$

$$p^e = a_1 \lambda^{-1} + a_2 \lambda^{-2} (\lambda \text{ 为伸长比}) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),整理得到

$$\sigma_{11}^e = 2C_1 (\lambda^2 - \lambda^{-1}) + 2C_2 (\lambda - \lambda^{-2}) \quad (7)$$

上式即为本构模型的稳态超弹性响应部分。

3.2 动态粘弹性响应

固体推进剂具有显著的应变率效应,不论在准静态还是在动态条件下均表现出粘弹特性。根据 Burke 模型中粘弹性响应项表达式^[10],结合匀质、各向同性、不可压缩材料的本构关系^[12,13],将固体推进剂高应变率响应描述为

$$\sigma^v = F(t) \left(\int_0^t \phi(I_1, I_2) m(t - \tau) \dot{E}(\tau) d\tau \right) F^T(t) \quad (8)$$

式中 F 为变形梯度;应变率 $\dot{E}$ 被定义为 $\dot{E} = (\dot{F}^T \cdot F + F^T \cdot \dot{F})/2$; $\phi(I_1, I_2)$ 为 I_1, I_2 的函数,考虑推进剂材料的各向同性性质,假设空间弹性模量为常量^[14],令 $\phi(I_1, I_2) = E_i$, E_i 是与松弛时间 θ_i 相对应的弹性

模量。

将 $m(t)$ 表达为时间 t 的单调递减函数,指数级数的表达形式如下

$$m(t - \tau) = \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{t - \tau}{\theta_i}\right) \quad (9)$$

ZWT 模型采用一个应力平衡项和两个 Maxwell 单元并联,可以较好地描述高聚物材料的粘弹性力学行为,其中两个 Maxwell 单元分别用来描述准静态和动态响应。Burke 模型中瞬态粘弹性部分采用 Maxwell 单元,可以很好的描述推进剂材料的粘弹特性。为减少模型参数数量,取 $N = 1$,即用一个 Maxwell 单元来描述推进剂高应变率下的粘弹性响应,则得到非线性线粘弹性本构方程如下

$$\sigma^v = \int_0^t E_0 \exp\left(-\frac{t - \tau}{\theta_0}\right) \dot{\lambda} d\tau \quad (10)$$

式中 E_0 为动态粘弹性模量; θ_0 为动态响应松弛时间; $\dot{\lambda}$ 为拉伸速率。

3.3 热粘弹性模型建立

推进剂在高应变率条件下随着温度的变化,其力学性能表现出显著差异,因此在构建本构模型时需要考虑温度效应。采用下式作为温度效应关系式

$$g(T) = 1 + a\left(\frac{T}{T_R}\right) + b\left(\frac{T}{T_R}\right)^2 \quad (11)$$

式中 T 为实验温度; T_R 为参考温度; a, b 分别为温度效应参数。

将稳态超弹性模型、动态粘弹性模型和温度效应表达式相结合,得到考虑温度和高应变率效应的非线性本构模型如下

$$\sigma_{true} = g(T) [2C_1(\lambda^2 - \lambda^{-1}) + 2C_2(\lambda - \lambda^{-2}) + \int_0^t E_0 \exp\left(-\frac{t - \tau}{\theta_0}\right) \dot{\lambda} d\tau] \quad (12)$$

3.4 模型参数计算

将实验数据代入理论模型中进行最小二乘法拟合,可以得到上述本构模型中的 6 个待定参数,具体参数计算步骤如下:

(1) 定义参考温度为 25°C ,将应变率为 1450s^{-1} 和 1000s^{-1} 对应的应力-应变曲线相减,并采用最小二乘法进行非线性拟合得到 E_0 和 θ_0 。

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \int_0^t E_0 \exp\left(-\frac{t - \tau}{\theta_0}\right) \dot{\lambda}_2 d\tau - \int_0^t E_0 \exp\left(-\frac{t - \tau}{\theta_0}\right) \dot{\lambda}_1 d\tau \quad (13)$$

(2) 将 E_0 和 θ_0 代入式(12)中,选取 1450s^{-1} 应变率曲线,进行非线性拟合,得到 C_1 和 C_2 。

(3) 将参数 E_0, θ_0, C_1 和 C_2 代入式中,分别与不同温度($-40 \sim 25^\circ\text{C}$)和不同应变率条件下曲线进行对比,并采取全局优化方法,求得各个温度下对应的 $g(T)$ 值。

(4) 利用式 $g(T) = 1 + a\left(\frac{T}{T_s}\right) + b\left(\frac{T}{T_s}\right)^2$ 进行拟合,得到参数 a 和 b ,至此本构模型中需要所有参数全部求得,如表 1 所示。

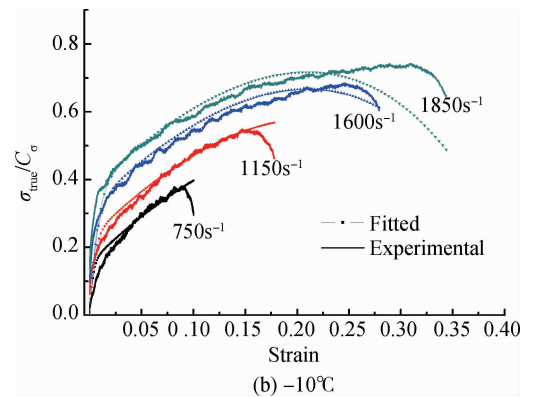
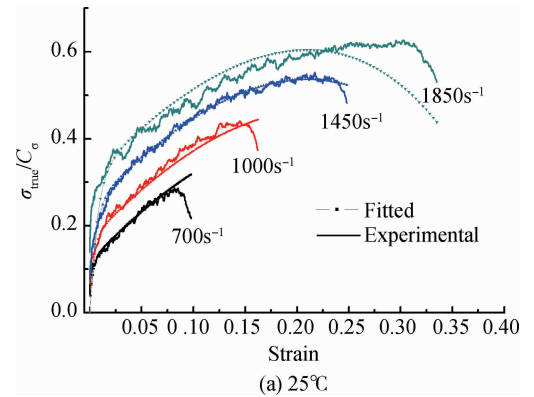
Table 1 Fitting parameters of constitutive model

$C_1 /$ MPa	$C_2 /$ MPa	$E_0 /$ MPa	θ_0 / s	a	b
-29.298	18.436	1152.271	3.780×10^{-6}	2.572	-2.608

4 模型有效性验证

将计算得到的 6 个参数代入本构模型式(12)中,与实验数据对比如图 3 所示。

由图 3 可以看出,在应变率低于 1450s^{-1} 时理论模型与实验结果具有较好的一致性,说明该模型能够较好的描述推进剂材料温度和高应变率相关的力学行为。但是当应变率较高时(1850s^{-1}),随着应变的增加(大于 25%),拟合曲线与实验结果误差较大,其原因还需进一步分析。模型中的温度效应仅仅考虑了环境温度的影响,不能反映高应变率下的升温对材



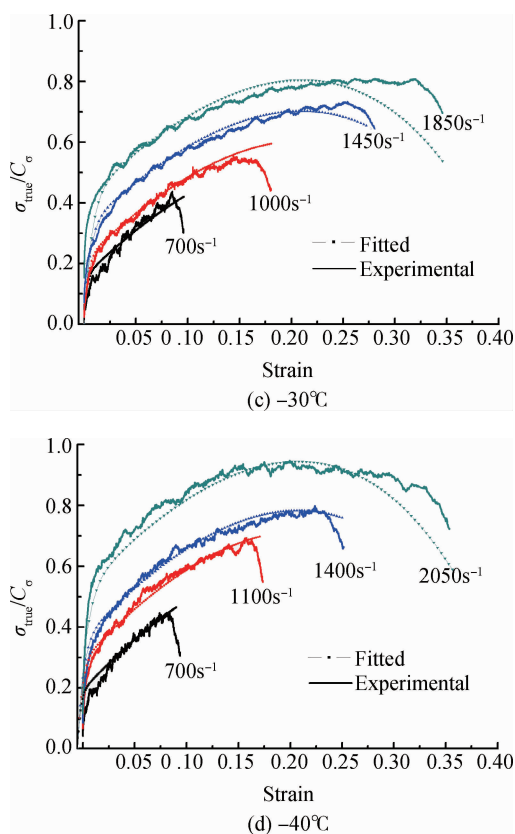


Fig.3 Comparison of experimental data and model predictions

料性能的影响^[15],因此一定程度上也造成理论与实验结果误差增大。该本构模型物理意义明确,并具有较好地预测能力,下一步将对其进行完善后进行数值化开发,可用于固体火箭发动机的结构完整性分析。

5 结 论

通过本文研究,得出以下结论:

(1) HTPB 推进剂在高应变率条件下,呈现出温度和应变率相关性。随着应变率的增加和温度的降低,材料的应力逐渐增加。

(2) 本文建立的本构模型由超弹性稳态响应和动态粘弹性响应组成,考虑了温度和应变率效应,可较好地描述推进剂材料的高应变率力学行为。

(3) 理论模型与实验结果对比具有较好的一致性,验证了本构模型的有效性。但在应变率超过 1450s^{-1} 时,随着应变增加,误差增大。

参考文献:

[1] Ho S Y. High Strain-Rate Constitutive Models for Solid Rocket Propellants [J]. *Journal of Propulsion and Power*,

2002,18(5):1106-1111.

- [2] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures [C]. *Netherlands: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague*, 1983: 541-547.
- [3] 王蓬勃,王政时,鞠玉涛,等. 双基推进剂高应变率型本构模型的实验研究 [J]. *固体火箭技术*, 2012, 35(1): 69-72.
- [4] 卢芳云,林玉亮,王晓燕,等. 含能材料的高应变率响应实验 [J]. *火炸药学报*, 2006, 29(1): 1-4.
- [5] Ho S Y, Fong C W. Temperature Dependence of High Strain-Rate Impact Fracture Behaviour in Highly Filled Polymeric Composite and Plasticized Thermoplastic Propellants [J]. *Journal of Materials Science*, 1987, 22: 3023-3031.
- [6] Gray III G T, Idar D J, Blumenthal W R, et al. High- and Low-Strain Rate Compression Properties of Several Energetic Material Composites as a Function of Strain Rate and Temperature [C]. *Colorado: Proceedings of the 11th Detonation Symposium, Snowmass Village*, 1998: 76-84.
- [7] 罗景润. PBX 的损伤、断裂及本构关系研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2001.
- [8] 王立闻,庞宝君,朱 耀. 固体火箭发动机推进剂动态力学性能研究 [C]. 烟台: 中国宇航学会固体火箭推进第 24 届年会论文集, 2007: 256-257.
- [9] 卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(1): 410-414.
- [10] Burke M, Woytowicz P. A Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model for Solid Propellant [R]. *AIAA 90-2213*.
- [11] 常武军,鞠玉涛,胡少青. HTPB 固化胶片的超弹性本构模型 [J]. *推进技术*, 2012, 33(5): 795-798. (CHANG Wu-jun, JU Yu-tao, HU Shao-qing. Research on Hyperelastic Constitutive Model for HTPB Crosslinked Specimen [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(5): 795-798.)
- [12] 王 锐. 橡胶隔振器动力学性能及设计方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [13] Lockett F J. Non-Linear Viscoelastic Solids [M]. *New York: Academic Press*, 1972.
- [14] 庄 茁. 连续体和结构的非线性有限元 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] Kapoor R, Nemat-Nasser S. Determination of Temperature Rise During High Strain Rate Deformation [J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 27(1): 1-12.

(编辑:张荣莉)