

文章编号: 1001-1455(2006)03-0193-06

高应变率下计及损伤演化的材料动态本构行为*

王礼立,董新龙,孙紫建

(宁波大学力学和材料科学研究中心,浙江 宁波 315211)

摘要:材料在高速变形过程中常常伴有不同形式的内部缺陷或微损伤的演化。大量的实验观察表明,损伤演化同时依赖于应变、应变率和温度,而且高应变率和低温之间有某种等价性。由此基于热激活机制,提出了同时依赖于应变率和应变的微损伤演化律,及相应的计及损伤弱化效应的率型本构关系。以聚丙烯/尼龙(PP/PA)共混高聚物为例,具体研究了其计及损伤演化的 ZWT 本构关系,并区分其率相关的本构响应及率相关的损伤演化响应。

关键词:固体力学;动态本构关系;损伤演化;高应变率;动态破坏

中图分类号: O346.5

国标学科代码: 130·1540

文献标志码: A

1 引言

区别爆炸/冲击动力学与静力学,通常应计及两种最基本的动力学效应,即惯性效应和应变率效应。前者导致各种形式的精确或简化的波传播的研究;而后者则导致各种类型的应变率相关的(率型)本构关系和失效准则的研究^[1]。

高应变率下材料动态力学行为的研究,如果从 1872 年著名的 Hopkinson 实验算起,已有 130 余年的历史。大多数材料具有应变率强化效应的事实已广为人知。非弹性变形,不论其具体机制如何,实际上是一个以有限速率发展的时间过程。

同样,材料的破坏/断裂,不论其具体机制如何,也是一个速率(时间)相关的流变过程,一个不同形式的微损伤以有限速率演化的时间过程。

问题的复杂性在于这两个过程实际上常常是不可分地交织在一起,并相互影响。一方面,微损伤是随流变过程而发展的,微损伤的演化依赖于材料所经受的应力、应变、应变率等本构力学变量;另一方面,损伤演化必将影响材料的力学行为,包括本构关系和失效准则。在爆炸/冲击载荷下,这一问题变得更加复杂。因此,高应变率下计及损伤演化的率型动态本构关系和动态破坏准则的研究,已成为当前物理学家、力学家和材料科学家们共同关心的前沿研究课题之一。

人们一方面已对高应变率下的材料动态本构响应开展了大量研究^[1~3],另一方面也已对高应变率下的材料动态损伤演化开展了不少研究^[4~9],但对两者相结合的研究则还有待进一步深入。本文中概述了我们历年来在这方面的一些研究结果,并介绍了最新的研究进展。

2 实验研究的重要结果

我们对不同材料(包括金属材料、高分子材料和混凝土材料等)所进行的大量实验研究^[10~19]一致地表明:材料高速变形过程常常伴随着不同形式的内部微损伤演化过程,并由此最终导致材料的破坏。所观察到的材料内部缺陷/损伤在细观尺度上主要表现为:微裂纹、微孔洞和剪切带,而在微观尺度上表现为位错和孪晶等。各种形式的动态破坏实际上并非一个简单的瞬时响应,而是一个包含不同形式的损伤演化、以一定速率发展的动态过程。

* 收稿日期: 2005-11-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10032010); 中国工程物理研究院科研合作项目

作者简介: 王礼立(1934—),男,教授。

以具有体心立方结构(β 相)的钛合金在高应变率下的绝热剪切带为例^[10~12],显微观察表明,这种钛合金在高应变率下的粘塑性流变以高度局域化的绝热剪切带的形成和演化为特征,直至裂纹沿剪切带扩展而导致材料的最后破坏。在给定的温度和高应变率下,绝热剪切带是随应变的增加而发展的;而在给定温度和应变下,绝热剪切带是随应变率的增大而发展的。这一事实表明,作为材料微损伤主要形式之一的剪切带,在给定温度下其演化是同时依赖于应变和应变率的,如图1所示。图中的曲线是由如下的绝热剪切-热粘塑性失稳准则给出的理论预示(应变率 $\dot{\epsilon}$ 的单位为 s^{-1})^[12]

$$\left(1 + 2.45 \times 10^{-2} \ln \frac{\dot{\epsilon} \times 10^3}{1.4}\right) (A - 0.919\epsilon)(0.588 + \epsilon) = 1$$

式中: A 为表征绝热剪切过程中不同状态的材料参数: $A=1.1536$ 对应于形变带开始形成, $A=1.1382$ 对应于混合带开始形成, $A=1.1143$ 对应于全相变带开始形成。

进一步在不同温度下的试验研究还表明,随着试验温度的降低,绝热剪切带的形成和演化加剧,如图2所示。这一事实表明,就绝热剪切带的演化而言,提高应变率与降低温度之间存在一定的等价性。这种“率-温等价性”与其他基于热激活机制的速率过程所显示的特征类似。

关于以微裂纹为基本形式的损伤,在我们对高聚物和混凝土材料的高应变率试验中,同样观察到^[13~18]微裂纹损伤的演化是同时依赖于应变和应变率的。甚至锆合金 Zircaloy-4 在冲击载荷下孪晶的发生和发展,我们也观察到是同时依赖于应变和应变率的^[19~20]。我们采用改进的熔断丝网络模型及 Monte-Carlo 随机方法,对损伤演化进行数值模拟的研究结果也表明^[21],损伤演化是同时依赖于应变和应变率的。

总之,大量的试验研究和观察表明,材料内部损伤的演化不仅仅取决于载荷(或变形)的大小,还依赖于载荷(或变形)的速率和温度。

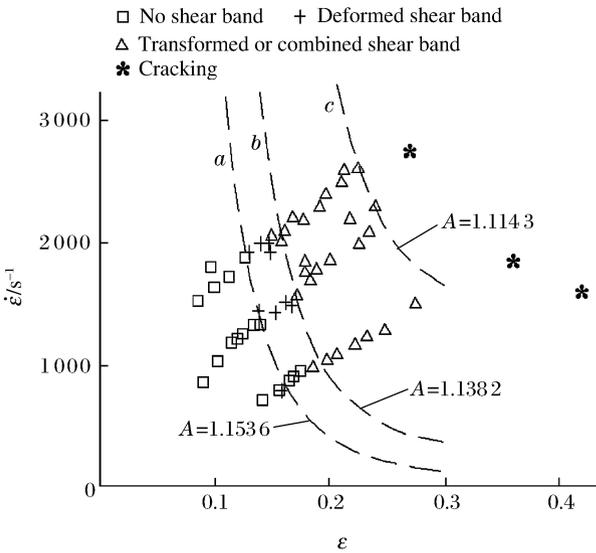


图1 室温下绝热剪切带的起始和发展同时依赖于应变和应变率

Fig. 1 Dependence of initiation and development of adiabatic shear band on both strain and strain rate

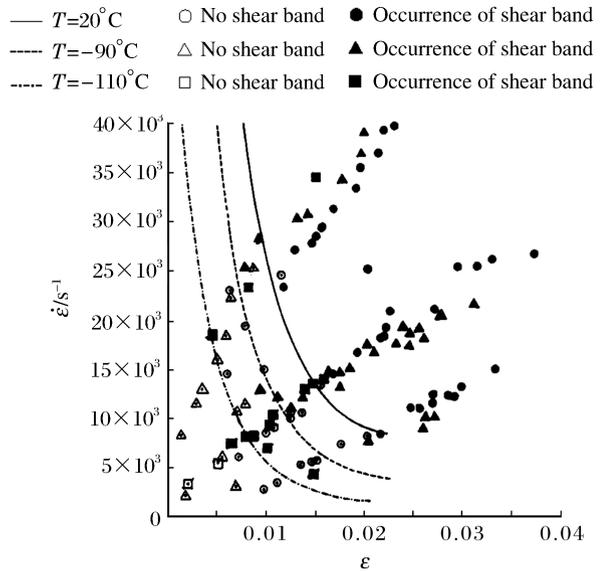


图2 绝热剪切带的发生同时依赖于应变、应变率和温度

Fig. 2 Dependence of occurrence of adiabatic shear band on strain, strain rate and temperature

3 基于热激活机制的损伤演化模型

根据材料损伤演化既依赖于应变率、又依赖于温度的实验事实,类似于位错运动的热激活机制,我们提出了一个基于热激活机制的损伤演化模型^[22]。

众所周知,关于金属材料的应变率相关的粘塑性本构关系,在微观机制上常用材料内部线缺陷-位

错的热激活运动来解释, 即有

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{U_s(\sigma)}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}^p$ 是塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 是频率因子, $U_s(\sigma)$ 是与作用应力 σ 相关的热激活能, k 是 Boltzman 常数, T 是绝对温度。式(1)的关键在于热激活能 U_s 与作用应力 σ 之间的关系。当两者之间存在线性函数关系时, 式(1)就化为大家熟知的位错运动的 Seeger 模型; 这时, σ 与 $\lg \dot{\epsilon}$ 之间有线性关系。

若以 σ 表示无损伤材料的应力, 以 σ_{app} 表示含损伤材料的应力, 则按 Kachanov(1958), 损伤的宏观内变量 D 可定义为

$$D = (\sigma - \sigma_{app})/\sigma, \quad \text{或 } \sigma_{app} = (1 - D)\sigma \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (2)$$

当 $D=0$ 时, 表示材料无损伤, 当 $D=1$ 时, 表示材料完全丧失承载能力。

当把微损伤的演化过程也看作一个应力促进的热激活过程时, 类似于式(1), 有

$$\dot{D} = \frac{\partial D}{\partial t} = \dot{D}_0 \exp\left(-\frac{U_D(\sigma)}{kT}\right) \quad (3)$$

式中: \dot{D} 是微损伤演化率, \dot{D}_0 是损伤演化的频率因子, 而 U_D 是微损伤演化过程的热激活能。问题的关键也在于确定热激活能 U_D 与作用应力 σ 之间的函数关系。

暂不具体考虑 U_D 如何依赖于作用应力 σ , 而作为一级近似, 设对于同一材料, U_D 和 U_s 间有正比关系, 即

$$U_D = aU_s \quad (4)$$

式中: a 是材料参数, 则由式(1)、(3)和(4)可得

$$\dot{D}/\dot{D}_0 = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^a, \quad \text{或 } \dot{D} = K_D \dot{\epsilon}^a \quad (5)$$

积分后得

$$D = K_D \Psi_D(\dot{\epsilon}) \quad (6)$$

式中: $K_D = \dot{D}_0/\dot{\epsilon}_0^a$, $\Psi_D(\dot{\epsilon}) = \int_0^{\dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}^a dt$ 。式(6)给出了一种简单形式的率型损伤演化律。

对于恒定应变率的过程, 且设损伤演化存在某个应变阈值 ϵ_{th} , 则对式(6)积分后可得

$$D = K_D \dot{\epsilon}^{a-1} (\epsilon - \epsilon_{th}) \quad \epsilon > \epsilon_{th} \quad (7)$$

显然, 如果引入如下的材料的率相关的动态破坏准则(D_c 是临界损伤值)

$$D \geq D_c \quad (8)$$

则由于 a 值的不同将会出现以下三种情况^[21]:

(1) 如果 $a > 1$, 则随着应变率的提高, 破坏应变减少, 即所谓的“冲击脆化”。

(2) 如果 $a < 1$, 则随着应变率的提高, 破坏应变增加, 即所谓的“冲击韧化”。

(3) 如果 $a = 1$, 则式(7)简化为临界应变准则, $\epsilon = \epsilon_{th} + D_c/K_D$ 。

在更一般的情况下, D 与 ϵ 之间可能存在非线性关系, 式(7)还可以推广到如下更一般的形式

$$D = D_k (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{a-1} (\epsilon - \epsilon_{th})^b \quad \epsilon > \epsilon_{th} \quad (9)$$

对于每一种具体材料, 关键是如何通过大量的试验结果来确定其率型损伤演化律中的材料参数 D_k 、 a 、 b 和 ϵ_{th} 。最大的困难在于: 在当前的宏观力学实验过程中, 特别在 SHPB 冲击试验和气炮平板撞击试验等的短历时过程中, 迄今尚无办法直接测量试样内部损伤的演化。因而, 只能想办法在研究材料率型本构关系的同时, 设法区分哪部分对应于材料的率型本构响应, 哪部分则对应于材料内部损伤演化所致的率相关响应。

4 计及损伤演化的率型动态本构关系

下面以高聚物为例来讨论。我们对典型工程塑料(如环氧树脂、有机玻璃 PMMA、聚碳酸酯 PC、尼龙、ABS、PBT 等)进行的一系列实验研究表明^[13], 在准静态载荷到冲击载荷的范围内, 即在应变率为

$10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 典型高聚物(包括热塑性和热固性的)的非线性粘弹性本构行为在相当大的变形范围内(例如 $\epsilon < 0.07$) 可以令人满意地由如下 ZWT 非线性粘弹性本构关系来描述

$$\sigma = f_e(\epsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (10a)$$

$$f_e(\epsilon) = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3, \quad \text{或 } f_e(\epsilon) = \sigma_m \left[1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{(m\epsilon)^i}{i}\right) \right] \quad (10b)$$

式中: $f_e(\epsilon)$ 描述非线性弹性平衡响应, E_0 、 α 和 β (或 σ_m 、 m 和 n) 是对应的弹性常数; 第一个积分项描述低应变率下的粘弹性响应, E_1 和 θ_1 分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间; 而后一个积分项描述高应变率下的粘弹性响应, E_2 和 θ_2 则分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。

在变形更大因而必须计及损伤演化时, 相应的 ZWT 非线性粘弹性本构关系则可表为

$$\sigma = (1 - D) \left[f_e(\epsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \right] \quad (11)$$

式中: 损伤 D 的演化方程由式(9)表述, 有关的材料损伤演化参数 D_k 、 a 、 b 和 ϵ_{th} 则要通过试验来确定。

例如, 对于以聚丙烯与马来酸酐的接枝共聚物 (PP-g-MAH) 为相容添加剂的聚丙烯/尼龙 (PP/PA) 共混高聚物, 根据应变率为 $4 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 和应变大到 0.24 的宽范围的试验数据, 用遗传算法确定的式(11)的材料本构参数列于表 1 中。按此, 理论预示曲线与实测曲线令人满意地相符, 如图 3 所示。

特别值得注意的是, 对于在用遗传算法确定材料本构参数时没有包含的 $\dot{\epsilon} = 1.78 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的试验数据, 理论预示也和实测曲线令人满意地相符, 如图 4 所示。

表 1 以 PP-g-MAH 为相容剂的 PP/PA 共混高聚物计及损伤演化的 ZWT 材料参数

Table 1 Material parameters for PP/PA polymer blends with compatibilizer of PP-g-MAH

σ_m/MPa	n	m	E_1/GPa	θ_1/s	E_2/GPa	$\theta_2/\mu\text{s}$	D_k	a	b	ϵ_{th}
44.1	1	39.4	0.278	7.22	2.29	10.7	0.639	1.13	0.617	0.075*

* 进一步的试验研究表明, ϵ_{th} 实际上也依赖于应变率, 即有: $\epsilon_{th} = 0.075 - 1.02 \times 10^{-5} \dot{\epsilon}$ 。

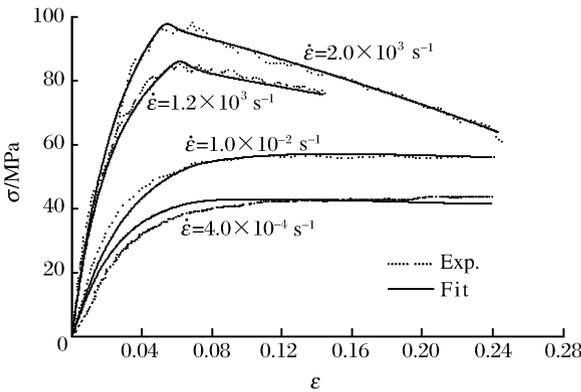


图 3 拟合曲线与试验曲线的比较

Fig. 3 The fitted and experimental curves

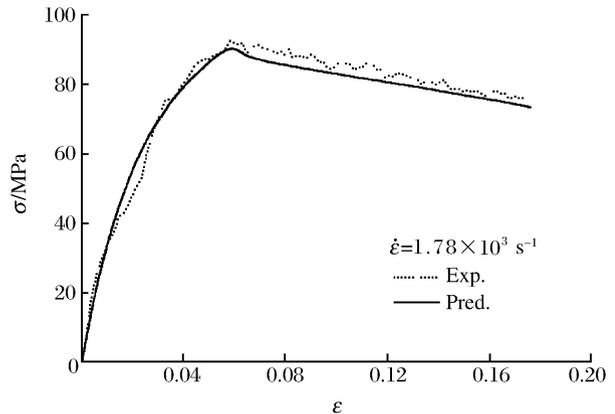


图 4 预示曲线与试验曲线的比较

Fig. 4 The predicted and experimental curve

按表 1 的材料损伤演化参数, 由式(9)可确定在不同应变率下的损伤演化曲线, 如图 5 所示, 这些曲线实际上也反映了不同应变率下按式(10)和式(11)所确定的两应力-应变曲线之差。

上述结果说明, 不论就式(9)而言, 还是就式(11)而言, 本文中提出的模型能成功地描述材料的率型损伤演化的非线性粘弹性本构行为, 并能区分材料的率相关的本构行为和率相关的损伤演化行为。

另一方面, 我们采用 SHPB 试验和反向传播 (BP) 神经网络方法相结合的新途径, 在不需对材料本构模型作任何假定的前提下, 对 PP/PA 共混高聚物计及损伤演化的本构关系进行辨识, 并区分本构响

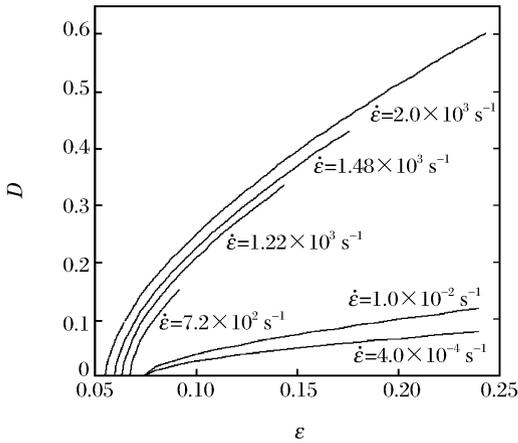


图5 PP/PA 共混高聚物不同应变率下的损伤随应变的演化曲线

Fig. 5 D - ϵ curves at different strain rates for PP/PA polymer blends

应和损伤演化响应, 同样确定损伤演化是同时依赖于应变和应变率的。令人鼓舞的是: 用上述两种不同的方法分别独立进行的研究, 得出了几乎一致的结果, 其细节已在另文详加讨论^[23]。

5 结论

(1) 大量的实验观察表明, 材料内部损伤的演化同时依赖于应变, 应变率和温度。

(2) 基于热激活机制, 提出了同时依赖于应变率和应变的微损伤演化律(式(9)), 及相应的动态破坏准则(式(8)和(9))和计及损伤弱化效应的率型本构关系(式(11)和(9))。

(3) 以聚丙烯/尼龙(PP/PA)共混高聚物为例, 具体研究了其计及损伤演化的 ZWT 本构关系, 并区分其率相关的本构响应及率相关的损伤演化响应。理论预示与试验结果令人满意地相一致。

参考文献:

- [1] 王礼立. 应力波基础[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社出版, 2005.
- [2] Zukas J A, Nicholas T, Swift H, et al. Impact Dynamics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1982.
- [3] Meyers M A. Dynamic Behavior of Materials[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994.
- [4] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational models for ductile and brittle fracture[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(11): 4814-24.
- [5] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solid[J]. Physics Reports, 1987, 147: 253-388.
- [6] Curran D R, Seaman L. Simplified models of fracture and fragmentation[A]. High-Pressure Shock Compression of Solids II[M]. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [7] Bai Y L, Bai J, Li H L, et al. Damage evolution, localization and failure of solids subjected to impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24: 685-701.
- [8] WANG Hai-ying, BAI Yi-long, XIA Meng-fen, et al. Spallation analysis with a closed trans-scale formulation of damage evolution[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(4): 400-407.
- [9] 封加波. 金属动态延性破坏的损伤度函数模型[D]. 北京: 北京理工大学, 1992.
- [10] Wang L L, Lu W X, Hu S S, et al. Study on the initiation and development of adiabatic shear bands for a titanium alloy under high strain rates, IUTAM Symposium on MMMHVDF[A]. Kawata K, Shioiri J. Macro-and Micro-Mechanics of High-Velocity Deformation and Fracture[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1987: 359-406.
- [11] Wang L L, Bao H S, Lu W X. The dependence of adiabatic shear banding on strain-rate, strain and temperature [J]. Jour de Physique, Colloque C3, 1988, 49 (9): 207-214.
- [12] 王礼立. 绝热剪切-材料在冲击载荷下的本构失稳[A]. 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992: 3-33.
- [13] 王礼立, 杨黎明. 固体高分子材料非线性粘弹性本构关系[A]. 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992: 88-116.
- [14] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4): 333-342.
- [15] ZHOU Feng-hua, WANG Li-li, HU Shi-shen. A damage-modified nonlinear visco-elastic constitutive relation and failure criterion of PMMA at high strain-rates[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(4): 333-342.
- [16] XU Ming-qiao, SHI Shao-qiu, Wang Li-li. Study on dynamic behavior and damage evolution of polymers under

- high strain rates[A]. International Symposium on Macro-, Meso-, Micro- and Nano-Mechanics of Materials[C]. Hong Kong, 2003:201–202.
- [16] WANG Li-li, LAI Hua-wei, SUN Zi-jian, et al. Dynamic deformation and fracture of polymers taking account of damage evolution[J]. 宁波大学学报(理工版), 2003,6 (6):372–380.
- [17] 陈江瑛,黄旭昇,王礼立. 混凝土动态损伤演化[A]. 教育·科技·人才研讨会论文集[C]. 宁波,2001:170–173.
- [18] 王永忠. C30 混凝土在一维应力与 PPR 管约束下动态力学性能的研究[D]. 宁波:宁波大学,2004.
- [19] Wang L L, Kobayashi A, Hu S S, et al. Dynamic compressive behavior of zircaloy at high strain rates[A]. GU Hai-cheng, HE Jia-wen. Microstructural and Mechanical Behavior of Materials[C]. London: Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1986:807–814.
- [20] Kobayashi A, Wang L L, Lu W X, et al. Macro/ Microscopic approach to dynamic mechanical behavior of zircaloy-4 subjected to tension and compression[A]. Chiem C Y, Kunze H D, Meyer L W. Impact Loading and Dynamic Behavior of Materials[C]. German: DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1988:815–822.
- [21] HUANG De-jin, Shi Shao-qiu, Wang Li-li. Studies on rate-dependent evolution of damage and its effects on dynamic constitutive response by using a random fuse network model[A]. Chiba A, Tanimura S, Hokamoto K. Impact Engineering and Application, Proc 4th Inter Symp Impact Engineering[C]. Tokyo: Elsevier Science Ltd, 2001:743–748.
- [22] Wang L L, Jiang Z B, Chen J Y. Studies on rheological relation of materials by taking account of rate-dependent evolution of internal defects at high strain rates[A]. WANG Ren. IUTAM Symposium on Rheology of Bodies with Defects[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999:167–178.
- [23] 孙紫建,王礼立. 两种 PP/PA 共混高聚物动态大变形本构关系及损伤演化研究[A]. 第七届全国冲击动力学学术会议[C]. 昆明:2005.

Dynamic constitutive behavior of materials at high strain rate taking account of damage evolution

WANG Li-li^{*}, DONG Xin-long, SUN Zi-jian

(Mechanics and Materials Science Research Center,
Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: High-velocity deformation process of material is usually accompanied with interior damage evolution in different forms. Experimental observations for different materials show that damage evolution is dependent on strain, strain rate and temperature, and a certain equivalency exists between the strain rate effect and the temperature effect. Thus, based on the thermo-activation mechanism, a strain and strain-rate dependent damage evolution law and the corresponding rate-dependent constitutive relation taking account of damage evolution are proposed. As an example, the ZWT nonlinear viscoelastic constitutive relation taking account of damage-weakening effect is further studied, particularly the constitutive response and the response due to damage evolution can be distinguished.

Key words: solid mechanics; dynamic constitutive relation; damage evolution; high strain rate; dynamic failure

* Corresponding author: WANG Li-li
E-mail address: llwangch@nbu.edu.cn
Telephone: 0574-87600451