

文章编号: 1000-3851(2009)06-0143-07

# 碳纤维/环氧树脂复合材料动态拉伸 试验研究与损伤分析

黄桥平<sup>1</sup>, 赵桂平<sup>2</sup>, 李杰<sup>\*1</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 西安交通大学 航天航空学院, 强度与振动教育部重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 利用 MTS 试验机和分离式 Hopkinson 拉杆对 2 种碳纤维/环氧树脂(T300/epoxy)层合板试件 $[(45/-45)_4]_S$  和 $[(0/45/90/-45)_2]_S$  进行了准静态(应变率 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )、中速(应变率 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ )和高速(应变率 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ )冲击拉伸试验。在热力学框架内建立了基于损伤能释放率的弹塑性动力损伤本构模型, 用该损伤模型来分析试件的动态拉伸失效过程。模型中提出了 3 种基本损伤机制(纤维断裂、基体开裂及面内剪切)的演化规律, 通过对损伤阈值黏性归一化的方法考虑了应变率对损伤演化的影响。编写了该模型有限元用户材料子程序, 并模拟了拉伸试验过程, 计算结果表明该模型能够较好地模拟碳纤维/环氧树脂层合板动态拉伸失效过程。

**关键词:** 碳纤维复合材料; 应变率效应; 损伤; 损伤能释放率; 归一化

中图分类号: TB332; O346.5 文献标志码: A

## Experimental study on carbon fiber/epoxy laminates under dynamic tensile and their damage analysis

HUANG Qiaoping<sup>1</sup>, ZHAO Guiping<sup>2</sup>, LI Jie<sup>\*1</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Tensile tests were carried out on two kinds of carbon fiber/epoxy laminates specimen ( $[(45/-45)_4]_S$  and $[(0/45/90/-45)_2]_S$ ) at quasi-static (strain rate  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), intermediate (strain rate  $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ ) and high strain rate (strain rate  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ) using the MTS material machine and tensile split Hopkinson bar. A damage constitutive model based on the damage energy release rate was derived within a thermodynamic framework to analyze the dynamic failure of carbon fiber/epoxy. Three damage evolution laws associated with three damage mechanisms (fiber breakage, matrix cracking and shear in plane) were proposed. A procedure resembling the regularization used in viscoplasticity was adopted to take the strain rate into account on damage evolution. The model was coded and implemented into finite element software. The tests were simulated using the model, and the results verify that the model can simulate the dynamic tensile failure well for carbon fiber/epoxy laminates.

**Keywords:** carbon fiber reinforced composites; strain rate effect; damage; damage energy release rate; regularization

碳纤维增强复合材料由于其特有的轻质、高强、高模而被广泛应用于工程领域。尤其在航空航天领域, 碳纤维增强复合材料已成为一种不可缺少的特种工程材料。常规复合材料结构分析大多基于经验强度准则, 如 Hill 准则、Tsai-Wu 准则等。但是从失效过程来考察, 这些强度准则忽略了复合材料达到破坏前的劣化过程。事实上复合材料失效是

一个材料性质逐渐劣化的过程, 此劣化过程必须从损伤力学角度来考虑。

20 世纪 80 年代以来, 损伤力学引起了各国学者的广泛兴趣, 在实际工程中得到越来越广泛的应用。由于损伤的不可逆性, 建立严格的损伤本构方程必须满足热力学基本定律, 如 Ju 和 Simo<sup>[1-3]</sup> 等人的工作。在复合材料损伤方面, Ladeveze<sup>[4]</sup> 研究

了复合材料的损伤问题，考虑了基体开裂和面内剪切 2 种损伤机制。但是在这一研究中，损伤演化是基于弹性损伤能释放率，且损伤演化法则是线性的。Matzenmiller 等<sup>[5]</sup>建立了复合材料弹脆性各向异性损伤本构模型。所有这些工作都没有考虑应变率效应对复合材料损伤演化的影响。

关于复合材料应变率效应的试验研究很多，如 Sun<sup>[6-7]</sup>及其合作者建立了考虑应变率效应的黏塑性本构模型。然而迄今为止，很少有人考虑应变率效应对复合材料损伤演化的影响，建立复合材料的动态损伤本构模型。本文中结合碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸试验，在热力学的基本框架内，建立了复合材料基于弹塑性损伤能释放率的损伤本构方程；引入 Perzyna 黏塑性规则化方法<sup>[8-10]</sup>，考虑了应变率效应对损伤演化的影响；借助有限元分析软件 ABAQUS 编制了相应的用户子程序 UMAT 及 VUMAT，计算发现模拟结果与试验值吻合较好。

## 1 实验方法

### 1.1 试验材料及设备

试验所用材料为单向碳纤维/环氧树脂预浸 (T300/epoxy)(125℃固化体系)层合而成，树脂质量分数为 40% ± 2.5%。选用 2 种铺层方式  $[(45/-45)_4]_S$  和  $[(0/45/90/-45)_2]_S$ ，厚度均为 2.4 mm，平面尺寸如图 1 所示。

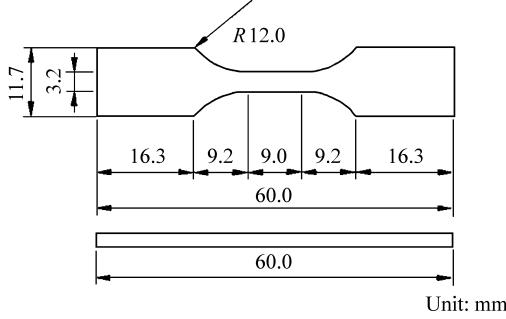


图 1 T300/环氧树脂试件形状及尺寸

Fig. 1 T300/epoxy specimen shape and dimension

利用 MTS 试验机进行了准静态拉伸试验(应变率  $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )和中应变率拉伸试验(应变率  $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ )，利用分离式 Hopkinson 拉杆进行了高速冲击拉伸试验(应变率  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ )。

### 1.2 试件破坏断口分析

图 2(a)和 2(b)分别是铺层为  $[(45/-45)_4]_S$  和  $[(0/45/90/-45)_2]_S$  的试件在准静态和高应变率拉伸加载时断口破坏照片。对各组试验断口破坏分析

发现：(1) 所有试件破坏处均位于中部工作区，表明平面受力的预期得到保证；(2)  $[(45/-45)_4]_S$  试件剪切破坏明显，断口平滑交错；铺层为  $[(0/45/90/-45)_2]_S$  的试件主要以剪切破坏和纤维断裂、拔出破坏为主，同时分层破坏也较明显；(3) 2 种试件破坏断口比较规整，脆性拉断迹象明显，特别是高应变率下表现出明显的脆性破坏形态。

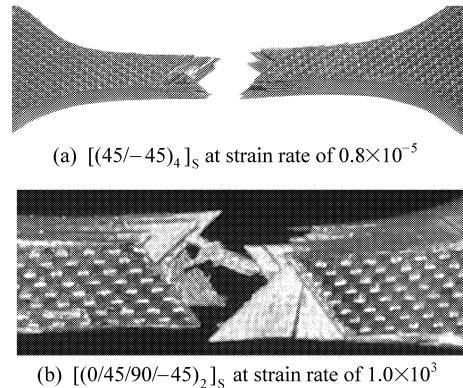


图 2 2 种试件的破坏特征

Fig. 2 Typical failure characteristics of two specimens

### 1.3 应变率效应分析

图 3(a)和 3(b)分别是铺层为  $[(45/-45)_4]_S$  和  $[(0/45/90/-45)_2]_S$  的试件在准静态、中应变率和高速拉伸时的应力-应变曲线。由图 3(a)可知，试件  $[(45/-45)_4]_S$  具有明显的应变率敏感性。当应变较小时，试件在所有应变率下均表现出线弹性应力-应变关系。随着应变增加，在准静态和中应变率下出现了平缓的较长的屈服平台，破坏应变较大；而在高应变率下，在破坏前试件应力-应变关系几乎保持线弹性，破坏应变相对较小。试验数据分析结果表明：中应变率下的屈服应力和初始模量平均值分别是准静态的 1.08 倍和 1.52 倍，高应变率下的最大应力和初始模量分别是中应变率的 1.27 倍和 1.57 倍；而中应变率下的破坏应变平均值只相当于准静态的 90%，高应变率下的破坏应变平均值只相当于中应变率下破坏应变平均值的 32%。

由图 3(b)可知，试件  $[(0/45/90/-45)_2]_S$  在准静态和中应变率下应力-应变曲线十分相似，在破坏前应力-应变基本呈线弹性关系，初始模量基本相等。在高应变率下初始模量和最大应力均有较大提高。试验数据分析结果表明：高应变率下的最大应力、初始模量和破坏应变平均值分别是准静态和

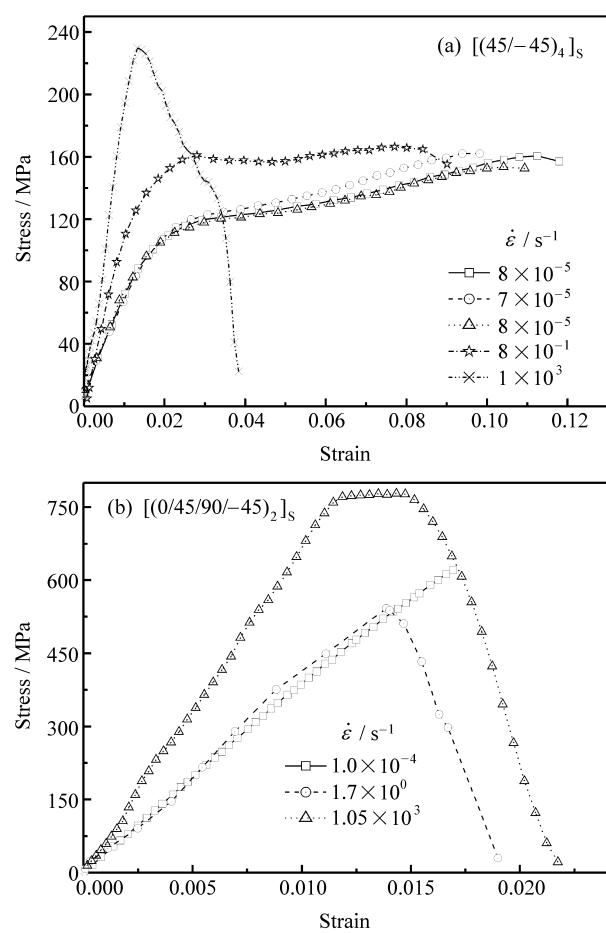


图 3 2 种试件不同应变速率时应力-应变曲线

Fig. 3 Stress - strain curves for two specimens  
at different strain rates

中应变速率下的 1.23 倍、1.54 倍和 1.39 倍。

由于铺层结构不同, 2 种试件的受力破坏机制不同, 从而导致 2 种试件的应变速率敏感性不同。试件  $[(45/-45)_4]_s$  失效主要由基体剪切破坏控制, 而环氧树脂基体是典型的应变速率敏感材料, 因而其应变速率效应比较明显。对于基体控制破坏, 由于基体开裂和纤维与基体脱粘后, 会表现出明显伪塑性行为, 即出现图 3(a)中的平缓较长的屈服平台, 当应变速率增大时这种行为会迅速减弱。而试件  $[(0/45/90/-45)_2]_s$  主要是纤维控制破坏, 纤维断裂后试件承载力迅速下降。由于碳纤维束是应变速率无关的, 因而试件  $[(0/45/90/-45)_2]_s$  的初始模量在准静态和中应变速率下变化不大, 应力-应变关系几乎保持直线。

材料初始模量随应变速率增加不断提高, 特别是在高应变速率下初始模量提高较快, 初始模量增量通过下式计算:

$$K_d = 1 + C \ln(\bar{\dot{\epsilon}} / \bar{\dot{\epsilon}}^*) \quad (1)$$

式中:  $\bar{\dot{\epsilon}}$ 、 $\bar{\dot{\epsilon}}^*$  分别是当前及参考应变速率(一般取为准静态时应变速率); 参数  $C$  为材料参数。通过试验在自然对数坐标下分两段拟合, 即低、中应变速率段(应变速率  $< 154 \text{ s}^{-1}$ ) 和高应变速率段(应变速率  $> 154 \text{ s}^{-1}$ )。根据试验结果取准静态等效参考应变速率为  $7 \times 10^{-5}$ , 当应变速率  $< 154 \text{ s}^{-1}$  时,  $C=0.05$ , 当应变速率  $> 154 \text{ s}^{-1}$  时,  $C=0.43$ 。图 4 给出了 2 种试件初始模量随应变速率变化情况。

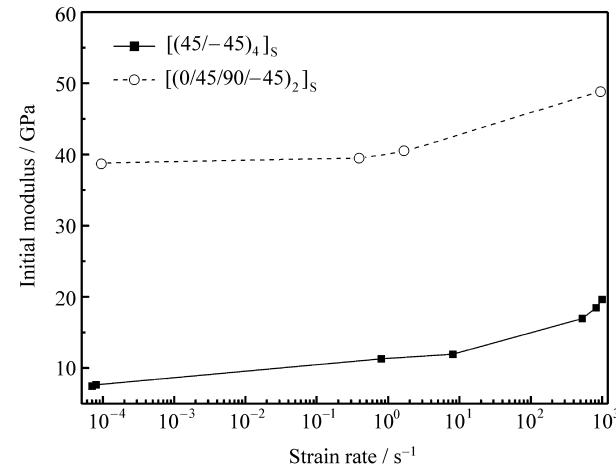


图 4 2 种试件初始模量随应变速率变化关系

Fig. 4 Change of initial modulus with strain rate

## 2 动态拉伸损伤分析

### 2.1 损伤变量与有效应力

连续介质损伤力学通过引进一个表征材料劣化的内变量——损伤变量, 来刻画材料内部的微缺陷分布及其渐进演化过程。显见, 损伤变量具有某种“损伤场”的含义, 因此在一般情况下损伤变量往往定义为张量  $\mathbf{D}$ 。为了物理概念的明确性, 将损伤后由材料实际承力面积承受的应力称为有效应力  $\bar{\sigma}$ , 而将包含微缺陷的总面积承受的平均应力称为 Cauchy 应力  $\sigma$ 。通过引进四阶损伤特征张量  $\mathbf{M}$ , 可以将有效应力空间投影到 Cauchy 应力空间:

$$\sigma = \mathbf{M} : \bar{\sigma} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{D})$ , 为损伤状态的函数, 无损伤时  $\mathbf{M}$  恒等于四阶一致性张量  $\mathbf{I}$ 。

### 2.2 热力学框架内的损伤本构方程

损伤是不可恢复的耗散过程, 必须满足热力学的基本规律。对于弹塑性损伤, 本文中认为除了复合材料的弹性自由能对损伤演化有贡献外, 塑性变

形对损伤演化也有影响。因此，除了损伤变量  $\mathbf{D}$ ，还需引入另一个表征塑性耗散的内变量  $q$ ，这 2 种耗散机制共同决定复合材料的不可逆弹塑性损伤行为。为此可引入如下弹塑性解耦的 Helmholtz 自由能势：

$$\Psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e, \mathbf{D}, q) = \Psi^e(\boldsymbol{\varepsilon}^e, \mathbf{D}) + \Psi^p(q, \mathbf{D}) \quad (3)$$

式中： $\boldsymbol{\varepsilon}^e$  为弹性应变张量； $\mathbf{D}$  为损伤张量； $q$  为塑性内变量。

对于纯力学过程，根据热力学第一和第二定律可得下述 Clasius-Duhem 不等式：

$$\bar{\sigma} \dot{\varepsilon} - \dot{\Psi} \geqslant 0 \quad (4)$$

将式(3)代入上述微分不等式，并利用 Coleman 条件可得损伤本构方程

$$\bar{\sigma} = \frac{\partial \Psi^e}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^e} \quad (5)$$

以及耗散不等式

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}^d &= -\frac{\partial \Psi^p}{\partial \mathbf{D}} \geqslant 0, \\ \dot{\gamma}^p &= \bar{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \frac{\partial \Psi^p}{\partial q} \geqslant 0. \end{aligned} \quad (6)$$

损伤能释放率张量

$$\mathbf{Y} = -\frac{\partial \Psi^p}{\partial \mathbf{D}} \quad (7)$$

它是损伤张量  $\mathbf{D}$  的对偶力张量。

### 2.3 复合材料损伤本构方程

大量试验研究表明：复合材料的损伤主要有纤维断裂(Fiber breakage)、基体开裂(Matrix cracking)和分层(Delamination)。对于复合材料单层，可以引入 3 个损伤变量  $\{d_1, d_2, d_{12}\}$  来描述沿纤维方向的受拉损伤、横向基体开裂和面内剪切损伤。

假定碳纤维和基体只有受拉才发生损伤；同时试验表明碳纤维直到破坏前一直保持弹性，因此，可定义碳纤维复合材料的弹塑性 Helmholtz 自由能势为

$$\begin{aligned} \Psi(\bar{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^e, \boldsymbol{\varepsilon}^p) &= \Psi^e(\bar{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^e) + \Psi^p(\bar{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^p) \\ &= \frac{1}{2} [\langle \bar{\sigma}_{11} \rangle \varepsilon_{11}^e + \langle \bar{\sigma}_{22} \rangle \varepsilon_{22}^e + \bar{\sigma}_{12} \gamma_{12}^e + \langle -\sigma_{11} \rangle \varepsilon_{11}^e \\ &\quad + \langle -\sigma_{22} \rangle \varepsilon_{22}^e] + \int_0^{\varepsilon_{22}^p} \langle \bar{\sigma}_{22} \rangle d\varepsilon_{22}^p + \int_0^{\varepsilon_{12}^p} \langle -\sigma_{22} \rangle d\varepsilon_{22}^p \\ &\quad + \int_0^{\gamma_{12}^p} \bar{\sigma}_{12} d\gamma_{12}^p \end{aligned} \quad (8)$$

在有效应力空间中，弹塑性损伤能释放率为

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{1}{2} H(\bar{\sigma}_{11}) \bar{\sigma}_{11} \varepsilon_{11}^e, \\ Y_2 &= \frac{1}{2} H(\bar{\sigma}_{22}) \bar{\sigma}_{22} \varepsilon_{22}^e + \int_0^{\varepsilon_{22}^p} H(\bar{\sigma}_{22}) \bar{\sigma}_{22} d\varepsilon_{22}^p, \\ Y_{12} &= \frac{1}{2} \bar{\sigma}_{12} \gamma_{12}^e + \int_0^{\gamma_{12}^p} \bar{\sigma}_{12} d\gamma_{12}^p. \end{aligned} \quad (9)$$

式中： $H(x)$  为 Heaviside 函数； $\langle x \rangle$  是 Macaulay 函数。

### 2.4 应变速率效应及黏塑性

由图 3 可见，动态加载时瞬时应力将会大于相同应变时的准静态应力，Malvern 称大于部分为过应力。为了描述这种应力提高，在过应力概念的基础上发展了一类过应力模型，例如 Perzyna 提出的黏塑性模型、Bodner-Partom 模型<sup>[8]</sup>及拟线性化本构模型等，但这些模型并不能反映初始弹性模量的提高。文献[11]给出了一个基于广义 Maxwell 模型的黏弹性模型来反映这种初始模量的应变速率效应。为了进一步考虑塑性影响，本文中将利用下述黏塑性模型来考虑基体的应变速率效应：

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^* [1 + C \ln(\bar{\dot{\varepsilon}}/\bar{\dot{\varepsilon}}^*)] \quad (10)$$

式中： $\bar{\sigma}$  是考虑应变速率效应的等效有效应力； $\bar{\sigma}^*$  是参考等效有效应力； $C$  是公式(1)中待确定的材料参数，这实际上是 John-Cook 模型的简化<sup>[7]</sup>。

各向异性复合材料常用 Hill 各向异性屈服条件作为屈服准则。对于平面应力问题，在假定碳纤维线弹性时，本文中采用 Sun<sup>[7]</sup>建议的下列各向异性屈服函数：

$$F = \frac{1}{2} (\bar{\sigma}_{22}^2 + 2a_{66}\bar{\sigma}_{12}^2) - \bar{\sigma}_y = 0 \quad (11)$$

式中， $a_{66}$  是反映剪切各向异性的参数，当  $a_{66}=1.5$  时刚好为 Von Mises 各向同性屈服函数。参数  $a_{66}$  可以通过 2 组不同偏角的单向板偏轴试验确定。对于碳纤维/环氧树脂复合材料，Sun<sup>[7]</sup>建议  $a_{66}$  取值为 2.0。塑性强化函数取为幂函数形式：

$$\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}_{y0} + A(\bar{\varepsilon}^p)^m \quad (12)$$

式中： $\bar{\sigma}_{y0}$  是初始屈服强度； $A$  和  $m$  是塑性强化参数。定义等效有效应力为

$$\bar{\sigma}^{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} (\bar{\sigma}_{22}^2 + 2a_{66}\bar{\sigma}_{12}^2)} \quad (13)$$

通过塑性功增量可以定义与之对应的等效塑性应变增量为

$$\Delta\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \left[ (\Delta\bar{\varepsilon}_{22}^p)^2 + \frac{1}{2a_{66}} (\Delta\bar{\varepsilon}_{12}^p)^2 \right]}^{1/2} \quad (14)$$

根据关联流动法则, 塑性应变增量分别为

$$\Delta\epsilon_{22}^p = \dot{\lambda} \frac{\sigma_{22}}{\bar{\sigma}_{eq}}, \quad \Delta\epsilon_{12}^p = \dot{\lambda} \frac{2a_{66}\sigma_{12}}{\bar{\sigma}_{eq}}. \quad (15)$$

式中, 塑性流动因子  $\dot{\lambda} = \frac{3}{2}(\Delta\epsilon^p / \bar{\sigma}_{eq})$ 。

## 2.5 考虑应变速率效应的损伤演化法则

在 2.3 节得到的损伤能释放率的基础上, 引进 3 个损伤函数:

$$\begin{aligned} g_1(Y_1, r_1) &= g_1(Y_1) - g_1(r_1) \leqslant 0, \\ g_2(Y_2, r_2) &= g_2(Y_2) - g_2(r_2) \leqslant 0, \\ g_{12}(Y_{12}, r_{12}) &= g_{12}(Y_{12}) - g_{12}(r_{12}) \leqslant 0. \end{aligned} \quad (16)$$

分别描述纤维拉伸损伤, 基体开裂损伤和面内剪切损伤。 $r_n$  是损伤阈值( $n=1, 2, 12$ ), 损伤变量演化由正交流动法则得到:

$$\dot{d}_n = \dot{\lambda}_n^d \frac{\partial g_n(Y_n, r_n)}{\partial Y_n}, \quad \dot{\lambda}_n^d = \dot{r}_n. \quad (17)$$

式中,  $\dot{\lambda}_n^d$  类似于塑性流动因子, 称为损伤流动因子。借助 Kuhn-Tucker 条件, 损伤加卸载条件表示为

$$\dot{\lambda}_n^d \geqslant 0, \quad g_n(Y_n, r_n) \leqslant 0, \quad \dot{\lambda}_n^d g_n(Y_n, r_n) = 0. \quad (18)$$

当  $g_n(Y_n, r_n) < 0$  时,  $\dot{\lambda}_n^d = 0$ , 从而  $\dot{d}_n = 0$ , 表示没有新的损伤产生; 当  $\dot{\lambda}_n^d > 0$  时处于损伤加载状态, 此时由损伤一致性条件可得如下关系:

$$\dot{g}_n(Y_n, r_n) = 0 \Leftrightarrow \dot{\lambda}_n^d = \dot{r}_n = \dot{Y}_n \quad (19)$$

由于损伤的不可逆性, 当前状态( $t$  时刻)的损伤阈值为

$$r_n^t = \max\{r_n^0, \max(Y_n^\tau)\}, \quad \tau \in (0, t) \quad (20)$$

式中,  $r_n^0$  为初始损伤阈值。

将式(18)代入式(16)并两边积分(初始条件:

$Y_n = r_n^0, d_n = 0$ )可得损伤变量演化方程

$$d_n = g_n(Y_n) = g_n(r_n^t) \quad (21)$$

为了刻画这 3 种损伤机制的演化规律, 本文中

分别提出了 3 种与之对应的经验演化方程:

$$\begin{aligned} d_1 &= g_1 = 1 - \sqrt{r_1^0/r_1^t} \exp[A_1(1 - \sqrt{r_1^t/r_1^0})], \\ d_2 &= g_2 = 1 - \sqrt{r_2^0/r_2^t} \exp[A_2(1 - \sqrt{r_2^t/r_2^0})], \\ d_{12} &= g_{12} = 1 - \exp[A_{12}(1 - \sqrt{r_{12}^t/r_{12}^0})]. \end{aligned} \quad (22)$$

式中,  $A_1, A_2, A_{12}$  为损伤材料参数。

为了考虑应变速率效应对损伤演化的影响, 对基体损伤和剪切损伤的损伤阈值采用类似于对塑性流动因子 Perzyna<sup>[1, 8]</sup> 黏塑性规则化的办法进行规则化:

$$\dot{r}_n = \frac{\langle Y_n/r_n - 1 \rangle^{a_n}}{\eta_n} \quad (23)$$

式中:  $\eta_n, a_n$  为黏性规则化参数;  $\langle x \rangle$  为 Macaulay 函数。可见, 上述损伤模型是建立在严格的热力学基础上的, 满足热力学的基本要求, 具有坚实的物理基础, 从而保证了本文中提出的损伤模型的普遍性和通用性。对损伤阈值规则化考虑了应变速率对损伤演化的延滞作用, 即从损伤演化的角度解释了应变速率效应对复合材料强度的影响。

## 3 数值计算结果

将上述考虑应变速率效应的弹塑性动力损伤本构模型编写成用户材料子程序 UMAT 及 VUMAT, 接入到非线性有限元分析软件 ABAQUS 中模拟试验过程。模型尺寸采用试件实际尺寸(见图 1), 模型参数如表 1 和表 2, 动力冲击荷载通过选取合适的脉冲波施加给模型。主要计算了高应变率下 2 种试件的弹塑性动力损伤行为。

图 5 是试件[(45/-45)<sub>4</sub>]<sub>s</sub> 分别在 2 种应变率(830 s<sup>-1</sup> 和 530 s<sup>-1</sup>)下应力-应变曲线计算值与试验结果比较及相应的损伤变量随应变演化曲线。图 6(a)是试件[(0/45/90/-45)<sub>2</sub>]<sub>s</sub> 在应变率为

表 1 碳纤维/环氧树脂复合材料弹塑性材料参数

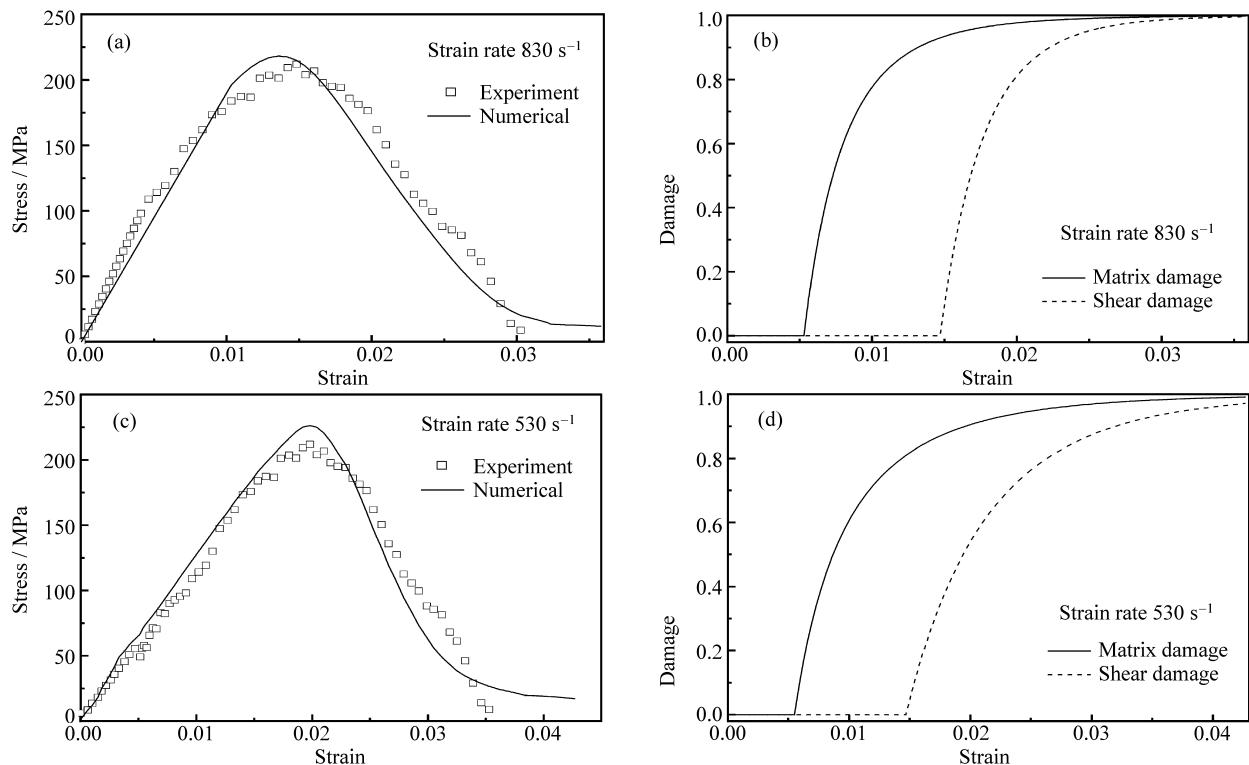
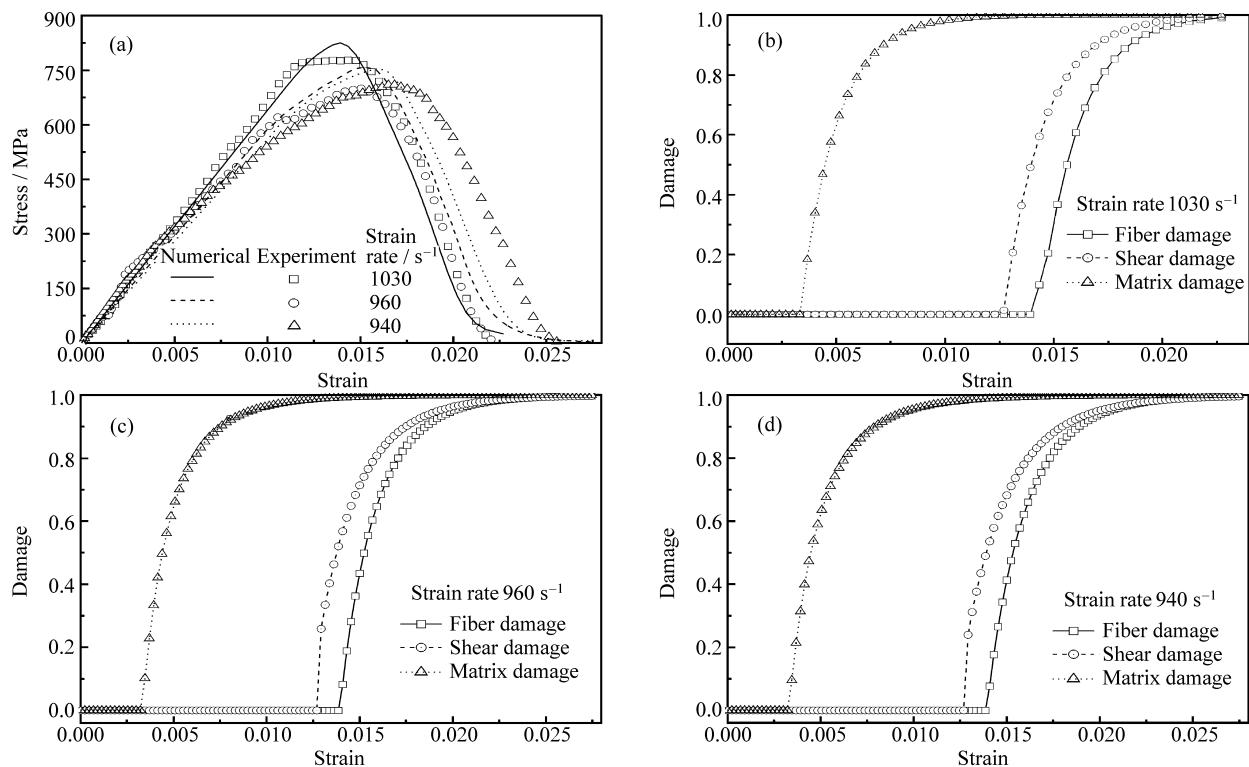
Table 1 Elastic/plastic material parameters for T300/epoxy lamina

$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$\nu_{12}$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C$	$\bar{\sigma}_{y0}/\text{MPa}$	$A/\text{MPa}$	$m$
125.00	8.90	5.50	0.36	1.56	0.05/0.43	68.60	336.80	0.13

表 2 碳纤维/环氧树脂复合材料动力损伤材料参数

Table 2 Dynamic damage material parameters for T300/epoxy lamina

$A_1$	$A_2$	$A_{12}$	$r_1^0$	$r_2^0$	$r_{12}^0$	$a_2 \cdot a_{12}$	$\eta_2$	$\eta_{12}$
0.84	0.37	0.08	13.52	0.07	0.51	1.00	10.00	10.00

图 5 试件 $[(45/-45)_4]$ s 应力-应变试验与计算值比较及损伤演化曲线Fig. 5 Stress - strain comparison between experimental and numerical results for specimen  $[(45/-45)_4]$ s and damage evolution图 6 试件 $[(0/45/90/-45)_2]$ s 应力-应变试验与计算值比较及损伤演化曲线Fig. 6 Stress - strain comparison between experimental and numerical results for specimen  $[(0/45/90/-45)_2]$ s and damage evolution

1030 s<sup>-1</sup>、960 s<sup>-1</sup>及940 s<sup>-1</sup>时应力-应变曲线计算值与试验结果比较;图6(b)~6(d)是该试件分别对应上述3种应变率时的损伤变量随应变演化曲线。从数值计算可以得到试验所不能观测到的变量——损伤随应变演化的曲线,它可以明确地显示碳纤维复合材料在不同损伤机制下的渐进劣化过程。由图5(a)、5(c)和6(a)数值计算和试验比较可见,本模型能够较好地模拟碳纤维复合材料冲击拉伸破坏过程,特别是在高应变率下的破坏过程。对于由基体控制破坏而出现的伪塑性变形现象,还有待进一步研究其变形和损伤的细观机制。

## 4 结 论

(1) 由试验可知碳纤维增强环氧树脂复合材料是典型应变率敏感材料,试件[(45/-45)<sub>4</sub>]<sub>s</sub>比试件[(0/45/90/-45)<sub>2</sub>]<sub>s</sub>表现出更明显的应变率敏感性。

(2) 在热力学框架内建立了基于弹塑性损伤能释放率的损伤本构模型,并给出了3种损伤机制的经验演化法则。

(3) 通过对损伤阈值的归一化,得到考虑应变率效应的动力损伤模型,计算结果与试验比较表明,该模型可以有效地分析碳纤维增强环氧树脂复合材料的动态拉伸破坏。

## 参考文献:

- [1] Ju J W. On energy - based coupled elastoplastic damage theories: Constitutive modeling and computational aspects [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(7): 803-833.
- [2] Simo J C, Ju J W. Strain- and stress-based continuum damage models I : Formulation [J]. International Journal of Solids and

and Structures, 1987, 23(7): 821-840.

- [3] Simo J C, Ju J W. Strain- and stress-based continuum damage models II : Computational aspects [J]. International Journal of Solids and Structures, 1987, 23(7): 841-869.
- [4] Ladeveze P, LeDantec E. Damage modeling of the elementary ply for laminated composites [J]. Composite Science and Technology, 1992, 43(3): 257-267.
- [5] Matzenmiller A, Lubliner J, Taylor R L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber composites [J]. Mechanics of Materials, 1995, 20(2): 125-152.
- [6] Thiruppukuzhi S V, Sun C T. Testing and modeling high strain rate behavior of polymeric composites [J]. Composites Part B, 1998, 29(5): 535-546.
- [7] Weeks C A, Sun C T. Modeling non - liner rate dependent behavior in fiber-reinforced composites [J]. Composite Science and Technology, 1998, 58(3/4): 603-611.
- [8] Perzyna P. Fundamental problems in viscoplasticity [M] // Yih C S. Advances in applied mechanics. New York: Academic Press, 1966: 243-377.
- [9] Faria R, Oliver J, Cervera M. A strain based plastic viscous damage model for massive concrete structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(14): 1533-1558.
- [10] 吴建营, 李杰. 考虑应变率效应的混凝土动力弹塑性损伤本构模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 1426-1430.  
Wu Jianying, Li Jie. Elastoplastic damage constitutive model for concrete considering strain rate effect under dynamic loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(11): 1426-1430.
- [11] 黄桥平, 赵桂平, 卢健. 考虑应变率效应的复合材料层合板冲击动态响应 [J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2009, 43(1): 72-76.  
Huang Qiaoping, Zhao Guiping, Lu Tianjian. Dynamic response with strain rate dependent of composite laminates [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University: Natural Science, 2009, 43(1): 72-76.