

文章编号: 1001-1455(2008)03-0200-07

Kevlar/环氧树脂层合材料的动静态力学性能及本构关系*

王元博^{1,2}, 王肖钧¹, 余育苗¹, 胡秀章¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

2. 清华大学汽车工程系, 北京 100084)

摘要: 利用 MTS 和 SHPB 装置开展了 Kevlar / 环氧树脂层合材料动静态力学性能实验研究, 详细讨论了应变率和纤维铺设方式的不同所引起的材料力学行为的差异。根据实验结果提出了一种经验型本构模型, 该模型不仅考虑了材料的应变率硬化、损伤软化效应, 还通过增强系数的引入描述了纤维铺设方式对材料力学性能的影响。

关键词: 固体力学; 本构关系; SHPB; Kevlar/环氧树脂层合材料

中图分类号: O346.4

国标学科代码: 130 · 1540

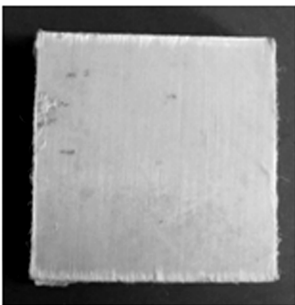
文献标志码: A

1 引言

Kevlar 纤维层合材料因质量轻、抗冲击性能强、吸能性好, 被广泛用于装甲防护和个人防护装备。作为防护材料使用时, 它往往受到弹道冲击载荷的作用, 因而研究其动态力学性能十分重要。目前针对 Kevlar 动态力学性能的实验研究还缺乏系统性, 有些甚至存在矛盾。如汪洋等^[1-2]和夏渊明等^[3]开展的 Kevlar 纤维束及单向层合板在应变率在 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之间的冲击拉伸实验表明, 动态拉伸性能是应变率相关的。而陈思颖等^[4]在碳纤维、E 玻璃纤维、Kevlar 和 Twaron 等纤维束的冲击拉伸行为研究中, 则发现: 除 E 玻璃纤维外, 其余纤维的强度对应变率并不敏感; 与碳纤维和 E 玻璃纤维相比, Kevlar 和 Twaron 纤维具有更好的抗冲击性能。此外, 当前的研究仍以中低应变率为主, 而弹道冲击涉及到的应变率通常在 1000 s^{-1} 以上^[5]。本文中以弹道防护研究为背景, 开展 Kevlar/环氧树脂层合材料在准静态和高应变率下的力学行为研究, 并试图根据实验结果提出经验型的本构模型。

2 实验概述

(a) Angle-piled laminates



(b) Interwoven laminates

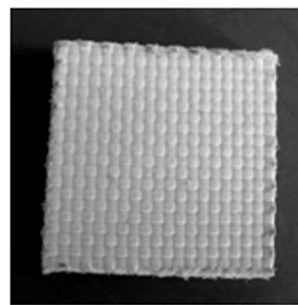


图1 Kevlar/环氧层合材料
Fig.1 Kevlar/epoxy laminates

* 收稿日期: 2006-11-23; 修回日期: 2007-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572134); 国防科技重点实验室基金项目(51453030205ZK0101)

作者简介: 王元博(1978—), 男, 博士。

实验所用 Kevlar/环氧树脂层合板采用了两种不同的纤维铺设方式:角度铺层和织物铺层。两种层合板中纤维的体积分数均为 75%,测得密度为 1.44 g/cm^3 ,单层厚度为 0.5 mm ,采用化学方法固化。外形如图 1 所示。

准静态实验包括沿纤维方向的面内拉伸实验和沿厚度方向的离面压缩实验,在 MTS810 材料试验机上进行;动态实验主要研究厚度方向上的离面压缩行为,在分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)上进行。

3 实验结果与讨论

3.1 准静态力学性能实验

3.1.1 面内拉伸实验

图 2 给出了角度铺层板和织物铺层板的面内拉伸应力应变曲线,可以看到两者有明显的不同。在角度铺层板中纤维是伸直的,拉伸载荷直接转移至纤维上,基体对承载的贡献可以忽略,因而应力应变曲线表现出良好的线性。而在织物铺层板中纤维是“皱褶”的,其抗拉刚度不如角度铺层板,在拉伸过程中容易产生基体开裂、分层等内部损伤,由此引起材料整体抗拉性能的下降,表现为加载初期切向模量的下降。当基体损伤发展至一定程度,纤维与基体的粘结完全破坏,“皱褶”的纤维逐渐伸直,载荷基本由纤维承担,由于纤维抗拉能力强,它抵消了因损伤引起的材料性能的劣化,使得抗拉模量得到恢复,甚至出现明显的增强。这种由于纤维开始发挥作用而使得受损材料的刚度得到明显恢复的现象,称之为纤维增强效应,它与纤维铺设方式有密切关系。

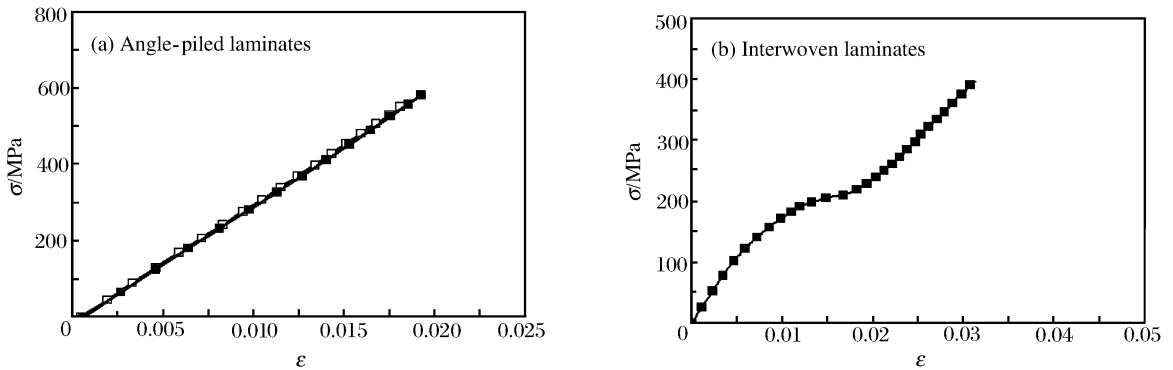


图 2 准静态面内拉伸应力应变曲线

Fig. 2 Quasi-static stress-strain curve of in-plane tension

3.1.2 离面压缩实验

图 3 为两种材料的离面压缩应力应变曲线。受到离面压缩载荷作用时,基体对载荷的承载的作用不可忽视,因而无论是角度铺层板还是织物铺层板,其曲线显示出一定的非线性。两者均可观察到纤维

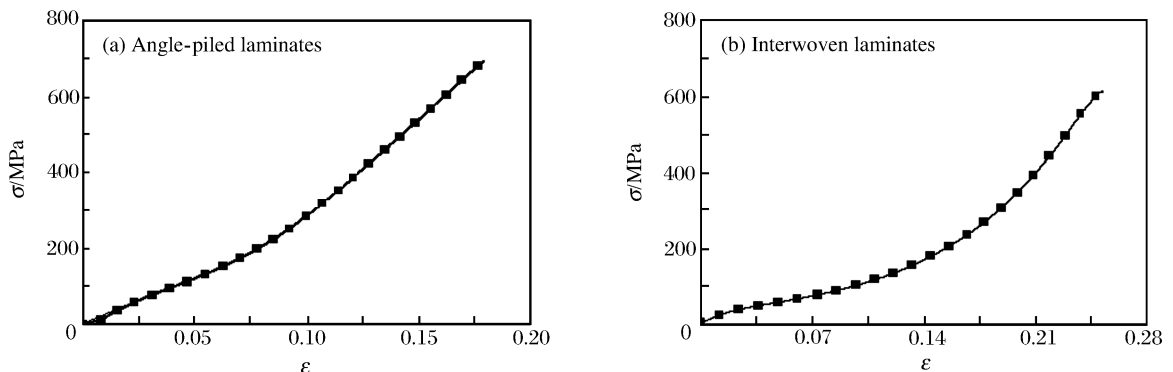


图 3 准静态离面压缩应力应变曲线

Fig. 3 Quasi-static stress-strain curve of off-plane compression

增强效应,即受损材料的切向模量在加载后期有了明显的恢复。从图中材料切向模量的变化可以看出,织物铺层板的纤维增强现象较角度铺层板更为显著。这是由于对于角度铺层板,这种增强因素主要来自纤维本身;而在织物铺层板中,除了纤维本身的作用外,其力学性能还要受到纤维铺设方式的影响。因而,二者纤维增强效应的不同实际上体现了纤维铺设方式对材料压缩性能的影响。

3.2 动态离面压缩实验

图4为两种材料在SHPB装置上测得的动态离面压缩实验结果。从图中可以看出,无论是角度铺层板还是织物铺层板,其动态力学行为均存在明显的应变率效应,强度随着应变率增加而提高,但动态实验中纤维增强现象不如准静态时显著,特别是对于角度铺层板,没有观察到明显的纤维增强现象。这是由于基体在纤维增强层合材料中起着支承和保护纤维的作用,并以剪应力的形式在纤维间传递载荷。M. V. Hosur等^[6]指出,冲击作用下基体通常会发生碎裂。这种碎裂会使耐冲击性差的环氧基体损伤严重,不利于纤维间载荷的传递,抑制了纤维增强作用的发挥,因而在动态实验中纤维增强效应不如静态时明显。

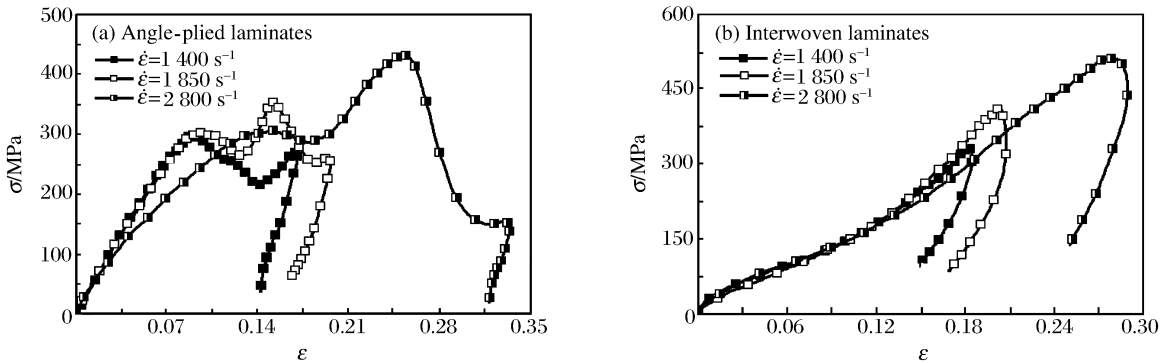


图4 动态离面压缩应力应变曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curve of off-plane compression

4 本构模型

在研究Kevlar/环氧树脂的动态离面压缩性能时,许沐华等^[7]提出了如下形式的经验型本构关系

$$\sigma = E\epsilon(1 - D)\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^\gamma \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, γ 为应变率硬化参数,损伤量 D 是将基体开裂、分层、纤维断裂等多种破坏模式综合考虑在内的变量

$$D = 1 - \exp\left(-\frac{1}{ne}\left(\frac{E\epsilon}{\sigma_0}\right)^n\right) \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量, σ_0 为材料强度, e 为自然对数底数, n 为曲线形状参数。许沐华等^[7]指出,动态加载下 n 是一个与应变率相关的参数,反映了应变率对材料损伤的作用。该模型中考虑了应变率硬化、损伤软化对材料力学行为的影响,然而其本质上是将层合材料视为横观各向同性均质材料,并不考虑纤维和基体的细观结构及其耦合作用。在动态实验中观察到的“纤维增强效应”,因与纤维的铺设方式有关,无法通过(1)式描述。细观地描述“纤维增强效应”将会遇到很大的困难,但由于它是通过宏观量即切向模量的强化表现出来的,因而可以采用与损伤相同的处理方法,即引入一个内变量即增强系数 K_f 来表征它对材料力学行为的影响。

假设增强系数 K_f 具有如下的形式

$$K_f = \begin{cases} 1 & \epsilon < \epsilon_0 \\ (\epsilon/\epsilon_0)^m & \epsilon \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ϵ_0 为阈值应变。由于通过受损材料模量的恢复来表征纤维增强效应,而这只有当应变发展至一

定程度,完全覆盖损伤引起的材料弱化后才能体现出来。因此从这个意义上说,它表明了增强效应的作用范围,其大小与应变率、纤维铺设方式有关。当 $\epsilon < \epsilon_0$ 时,材料的响应主要表现为损伤导致的整体性能的下降,此时, $K_f = 1$; 当 $\epsilon > \epsilon_0$ 时, $K_f > 1$, 纤维增强效应开始发挥作用,且完全覆盖了损伤的影响; m 为特征参数,可作为衡量增强作用大小的一个量度。

材料的动态力学行为通常与应变率范围有关,因而对于不同的应变率范围,本构方程形式不同。

准静态加载($10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)时,未观察到明显的应变率效应,本构方程可取作

$$\sigma = E\epsilon(1 - D)K_f \tag{4}$$

动态加载($1\ 400 \sim 2\ 800 \text{ s}^{-1}$)时,考虑到应变率效应,采用对数函数的形式来描述应变率效应的影响,本构方程为

$$\sigma = E\epsilon(1 - D) \left(1 + \alpha \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) K_f \tag{5}$$

式中: α 为应变率硬化系数,参考应变率 $\dot{\epsilon}_0 = 1\ 000 \text{ s}^{-1}$ 。

利用(4)~(5)式对两种材料的动静态离面压缩应力应变关系进行拟合。图 5 为角度铺层板的动静态离面压缩曲线的拟合结果,表 1 为所得拟合参数。当 $\epsilon = 0.20$ 时,(3)式给出的 $K_f = 1.99$,可见纤维增强效应非常明显,可以完全覆盖由损伤导致材料模量的弱化。动态加载中,角度铺层板没有出现像准静态那样明显的增强效应,因此在拟合动态实验结果时取 $K_f = 1$ 。

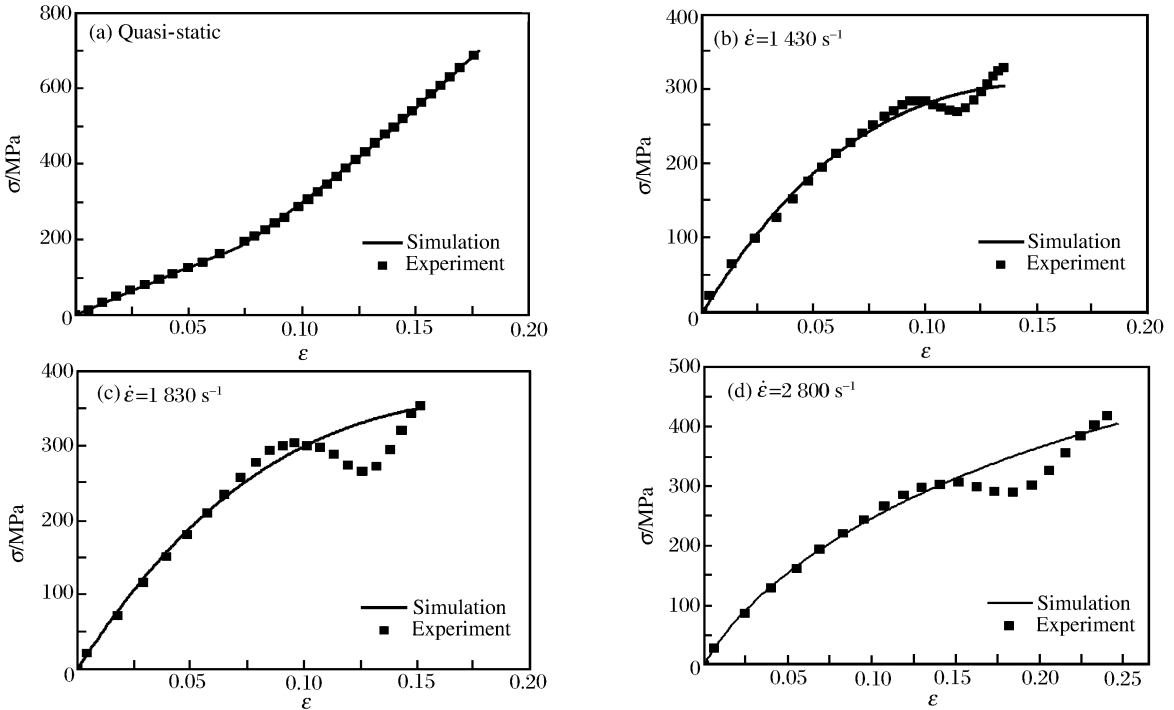


图 5 动态离面压缩应力应变关系拟合曲线与实验曲线的比较

Fig. 5 Comparison of fitted and experimental stress-strain curves of dynamic off-plane compression for angle-ply laminates

表 1 角度铺层板的本构关系拟合参数

Table 1 Fitting parameters of constitutive relationship of angle-ply laminates

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	E/GPa	ϵ_0	n	m	α
准静态	2.575	0.064	1.567	0.602	—
1 430	4.764		1.127		0.617
1 830	4.764		1.053		0.617
2 800	4.764		0.373		0.617

图6和表2分别为织物铺层板的拟合结果和拟合参数。表2中参数 n 、 m 和 ϵ_0 与应变率有关,在本文所述有限实验基础上,拟合出如下的关系式

$$\begin{cases} n = 0.22 + 0.146 \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon} - 1430}{176.2}\right) \\ m = 1.763 - 0.161 \ln \dot{\epsilon} \\ \epsilon_0 = 0.155 - 0.012 \ln \dot{\epsilon} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 的单位为 s^{-1} 。

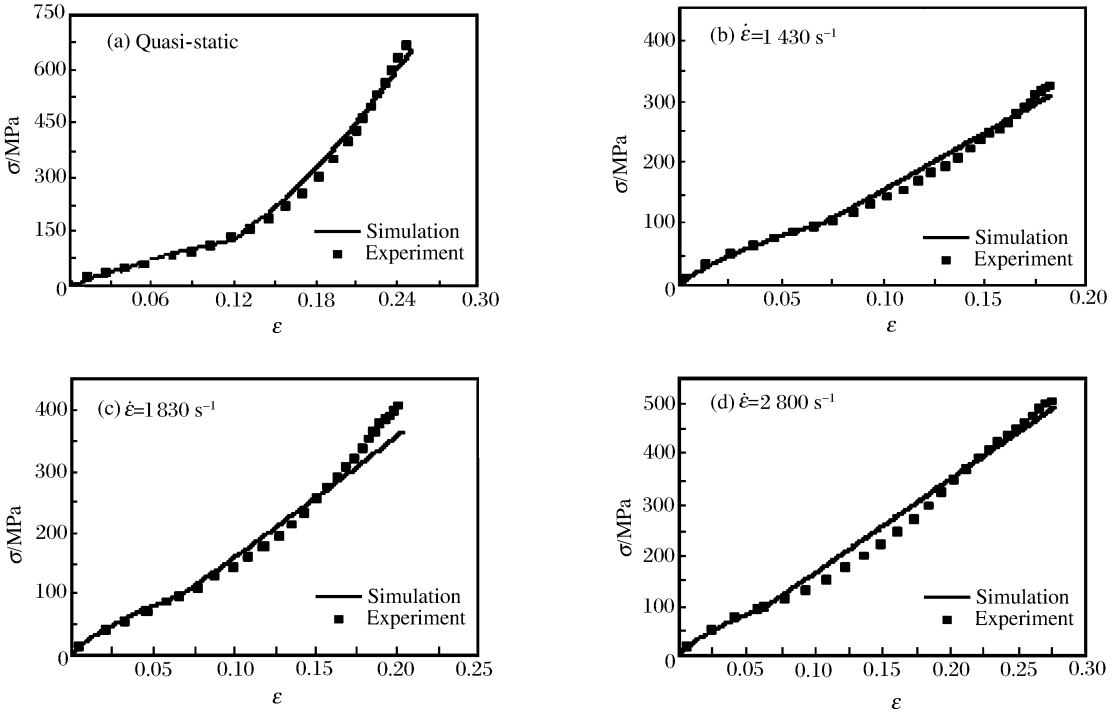


图6 离面压缩应力应变关系拟合曲线与实验曲线的比较

Fig. 6 Comparison of fitted and experimental stress-strain curves of off-plane compression for interwoven laminates

表2 织物铺层板的本构关系拟合参数

Table 2 Fitting parameters of constitutive relationship of interwoven laminates

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	E/GPa	ϵ_0	n	m	α
准静态	1.862	0.120	0.428	1.449	—
1430	3.563	0.071	0.366	0.587	0.997
1830	3.563	0.067	0.245	0.556	0.997
2800	3.563	0.063	0.220	0.480	0.997

n 、 m 和 ϵ_0 随应变率的变化关系曲线如图7所示。从中可以看出:(1)准静态时 ϵ_0 比动态时大,动态范围内 ϵ_0 还随应变率的增加而减小。(2) m 随应变率增加逐渐减小。宏观上,纤维增强效应是通过受损材料模量的恢复来描述的,这只有在应变发展至一定程度后才能体现出来。高应变率加载时基体的“碎裂”将会加快损伤的积累,削弱纤维受到的粘结作用,使得纤维在较小的伸长下发挥增强作用,致使 ϵ_0 随应变率的增加而减小。然而基体受损越严重越不利于纤维间载荷的传递,这会削弱纤维的增强作用,表现为衡量增强作用大小的参数 m 随应变率的增加而减小。注意到动态时角度铺层板没有观察到明显的增强效应,因而这时的增强系数实际上表征了纤维铺设方式对材料力学行为的影响。上述讨论同时反映出纤维铺设方式的影响随着应变率的增加呈下降趋势。

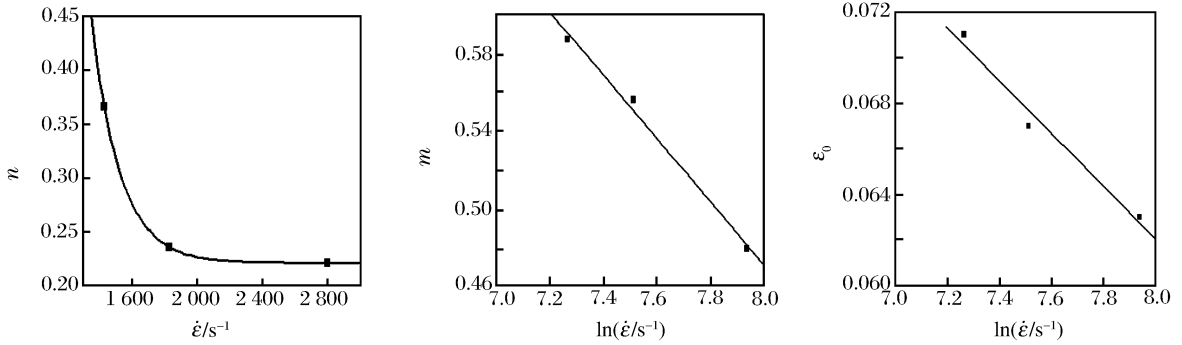


图 7 动态离面压缩拟合参数随应变率的变化关系

Fig. 7 Relationship between fitting parameters and strain rate of dynamic off-plane compression for interwoven laminates

尽管上述本构方程主要针对层合材料的离面压缩力学行为,然而将其做一定的“修正”可用以描述面内拉伸力学行为。对于织物铺层板,“皱褶”的纤维被拉直前后,基体损伤对材料性能的影响是不同的,随纤维的伸直而减弱,因而有必要采用不同的损伤参数来描述这种变化,本构方程(4)可进一步修正为如下的形式

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon(1 - D) & \varepsilon < \varepsilon_0 \\ E\varepsilon(1 - D)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m & \varepsilon \geq \varepsilon_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$D = 1 - \exp\left(-\frac{1}{ne}\left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^n\right)$$

$$D = 1 - \exp\left(-\frac{1}{n}\left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^n\right)$$

利用(7)式对织物铺层板面内拉伸实验结果进行拟合,如图 8 所示。准静态面内拉伸应力应变关系拟合参数分别为: $E=22.15 \text{ GPa}$, $\varepsilon_0=0.178$, $\sigma_0=201.2 \text{ MPa}$, $n=1.02$, $\sigma'_0=383.5 \text{ MPa}$, $n'=0.428$, $m=0.503$ 。它与离面压缩力学行为的区别体现了层合材料各向异性和拉压不对称性的特点。

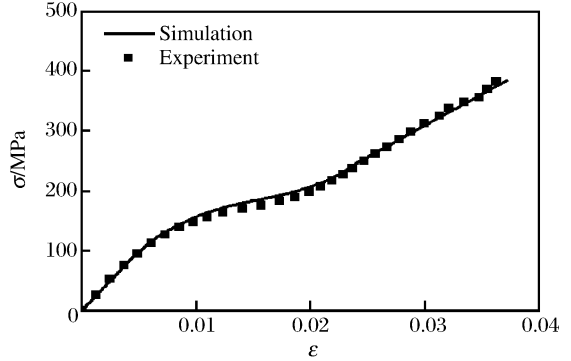


图 8 准静态面内拉伸应力应变关系拟合曲线与实验曲线的比较

Fig. 8 Comparison of fitted and experimental stress-strain curves of in-plane tension for interwoven laminates

5 结束语

开展了 Kevlar/环氧树脂层合材料的动静态力学性能研究。实验结果表明,Kevlar 纤维层合材料的力学行为具有典型的各向异性特点,不仅表现为明显的应变率效应和损伤软化效应,还与纤维铺设方式密切相关。根据实验结果,提出了一个经验型的本构模型,该模型中考虑了应变率硬化、损伤软化和纤维铺设方式对材料力学行为的影响。

参考文献:

[1] WANG Yang, XIA Yuan-ming. A modified constitutive equation for unidirectional composites under tensile impact and the dynamic tensile properties of KFRP[J]. Composites Science and Technology, 2000,60(4):591-596.

[2] WANG, Yang, XIA Yuan-ming. The effects of strain rate on the mechanical behaviour of kevlar fibre bundles; An experimental and theoretical study[J]. Composites Part A, 1998,29(11):1411-1415.

[3] XIA Yuan-ming, WANG Xing. Constitutive equation for unidirectional composites under tensile impact[J]. Composites Science and Technology, 1996,56(2):155-160.

- [4] 陈思颖,黄晨光,段祝平. 几种高性能纤维束的冲击动力学性能实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 355-359.
CHEN Si-ying, HUANG Chen-guang, DUAN Zhu-ping. Experimental study on the dynamic properties of high strength fiber clusters[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 355-359.
- [5] 彭刚. 抗冲击复合材料抗弹性能试验及表征技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [6] Hosur M V, Vaidya U K, Abraham A, et al. Static and high strain rate compression response of thick section twill weave S-2 glass/vinyl ester composites manufactured by affordable liquid molding processes[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1999, 121(4): 468-475.
- [7] 许沭华,王肖钧,张刚明,等. Kevlar 纤维增强复合材料动态压缩力学性能实验研究[J]. 实验力学, 2001, 16(1): 27-34.
XU Shu-hua, WANG Xiao-jun, ZHANG Gang-ming, et al. Experimental investigation on the dynamic compression properties of Kevlar fiber reinforced composite laminates[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(1): 27-34.

Quasi-static and dynamic mechanical properties of Kevlar/epoxy composite laminates and its constitutive equation

WANG Yuan-bo^{1,2*}, WANG Xiao-jun¹, YU Yu-miao¹, HU Xiu-zhang¹

(1. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230007, Anhui, China;*

2. *Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The MTS810 and SHPB were used to experimentally study the quasi-static and dynamic mechanical properties of Kevlar/epoxy composite laminates. Effects of the strain rate and lay-up types of fiber on the mechanical behaviors of laminated Kevlar were discussed. Based on the strain-rate curves of laminated Kevlar, an empirical constitutive equation was proposed in which the strain-rate hardening and damage softening effects of the material were taken into consideration. A stiffness-strengthened factor was introduced into the proposed constitutive equation to describe the influences of fiber lay-up types on the mechanical properties of the laminates. Results show that the introduced factor is reasonable in the fitted and experimental stress-strain curves.

Key words: solid mechanics; constitutive equation; SHPB; Kevlar/epoxy composite laminates

* Corresponding author: WANG Yuan-bo
E-mail address: wangyb@mail.ustc.edu.cn