

芳纶纤维束力学性能的统计本构方程

熊杰 唐菊 顾伯洪 王善元
(浙江工程学院,杭州,310033) (东华大学)

摘要:用 MTS 和旋转盘式杆-杆型冲击拉伸试验装置,获得 0.01 ~ 1 000 s⁻¹ 应变率范围内芳纶纤维束的应力应变曲线。并根据纤维束统计本构模型,获得不同变率下芳纶纤维束力学性能的统计本构方程。

关键词:芳香族聚酰胺纤维 应变率 力学性能 统计本构方程
中图法分类号:TS 101.921.4 文献标识码:A

在文献[1]中进行了芳纶纤维束冲击拉伸的实验测试,并对结果进行了定性分析,获得了高应变率下纤维束力学性能的认识,为设计复合材料靶板提供了依据。因为复合材料的冲击侵彻过程是一类非常复杂的物理过程,单凭试验研究很难全面检测冲击侵彻过程中的许多物理现象,因此利用数值分析,即通过冲击过程的参数研究寻求提高复合材料抗冲击侵彻能力的方法已成为材料设计的一个重要手段,而建立纤维材料的本构模型则是进行数值分析的重要前提^[2-4]。因此对纤维动态力学性能不仅需要定性的认识,而且更需要定量的描述。

1 实验

1.1 实验材料

芳纶标准型纤维:3 360dtex/1 000f。

1.2 冲击拉伸试验装置与测试原理

冲击拉伸试验是在旋转盘式杆-杆型冲击拉伸试验装置上进行,根据一维应力波理论可以得到试件中试验段的应力、应变和应变率分别为:

$$\sigma_s(t) = (EA/A_s) \cdot \dot{\epsilon}(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_s(t) = (2Cl_0) \int_{-\infty}^t [\dot{\epsilon}(\tau) - \dot{\epsilon}(\tau)] \cdot d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = (2Cl_0) [\dot{\epsilon}(t) - \dot{\epsilon}(t)] \quad (3)$$

式中, $\dot{\epsilon}_i(t)$ 、 $\dot{\epsilon}_t(t)$ 分别为入射波和透射波; E 、 A 和 C 分别为输入杆和输出杆的杨氏模量、横截面积和弹性波速度; l_0 和 A_s 分别为试样测试段的长度和横截面积。因此,按式(1)、(2)和(3)就可以由实测的入射波形和透射波形经数据处理后求得试件中的应力、应变和应变率。

1.3 冲击拉伸和准静态试验

将芳纶纤维束进行了四种应变率的拉伸试验,准静态拉伸应变率为 0.01 s⁻¹,冲击拉伸应变率分别为 180 s⁻¹、480 s⁻¹ 和 1 000 s⁻¹,每个应变率的试验次数以取得 3 个重复性较好的试验结果为准。表 1

为芳纶纤维束在各个应变率下的试验结果, E 、 α_b 、 ϵ_b 分别为纤维束的初始弹性模量、破坏应力、失稳应变。破坏应力 α_b 即为最大应力,失稳应变 ϵ_b 即与最大应力相对应的应变。图 1 为芳纶纤维束在各个应变率下的冲击拉伸应力应变曲线。

表 1 不同应变率下芳纶纤维束的测试结果

应变率/s ⁻¹	E/GPa	α_b /GPa	ϵ_b /%
0.01	60	2.372	5.195
180	72	2.554	5.246
480	69	2.74	5.568
1000	70	2.712	5.964

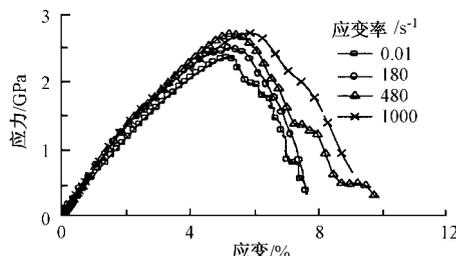


图 1 芳纶纤维束的拉伸应力应变曲线

2 纤维束统计本构模型

准静态加载下纤维束的力学模型^[5]如图 2 所示。

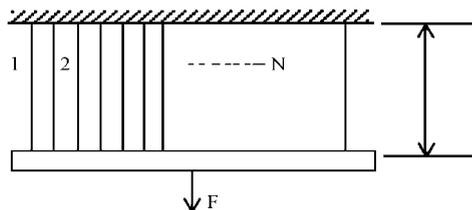


图 2 准静态加载下纤维束的力学模型

假设:1) 纤维两端固定,纤维束由 N 根长度为 L 横截面积为 A 和模量为 E_f 的平行纤维所组成。

2) 每根纤维断裂前是线弹性的,所有纤维之间无相互作用,当 n 根纤维断裂时,载荷立即在剩下的 $N - n$ 根纤维中均匀分布。若将纤维束模型看成一连续体,当纤维根数比较多时,可以用连续损伤力学方法得到该模型的损伤应力应变方程^[6](上标“s”表示准静态):

$$\sigma^s = E^s \varepsilon^s (1 - \omega) \quad (4)$$

式中, E^s 为准静态下纤维束无初始损伤的弹性模量, σ^s 为准静态下纤维束的应力, ε^s 为准静态下纤维束的应变, ω 为损伤变量。且由该模型的假设可得:

$$\begin{cases} E^s = E_f^s \\ \varepsilon^s = \varepsilon_f^s \end{cases} \quad (5)$$

式中, E_f^s 为准静态下纤维的弹性模量, ε_f^s 为准静态下纤维的断裂应变。根据连续损伤力学中损伤变量的定义:

$$\omega = n/N = G(\sigma_f) = 1 - \exp[-L a^s (\sigma_f)^{\beta^s}] \quad (6)$$

式中, σ_f 为纤维强度, $G(\sigma_f)$ 是长度为 L 的纤维在应力不超过 σ_f 时的破坏概率,呈 Weibull 分布。 a^s 为 Weibull 分布的尺度参数, β^s 为 Weibull 分布的形状参数。将(5)、(6)代入(4)得到纤维束在准静态加载时的统计本构方程为:

$$\sigma^s = E^s \cdot \varepsilon^s \exp[-L a^s (E^s \varepsilon^s)^{\beta^s}] \quad (7)$$

根据文献[7],将准静态加载的结果推广到瞬态加载情形,得到动态力学性能的统计本构方程(上标“D”表示动态):

$$\sigma^D = E^D \cdot \varepsilon^D \exp[-L a^D (E^D \varepsilon^D)^{\beta^D}] \quad (8)$$

3 统计分析

为了确定 Weibull 分布参数,对(8)式两边取对数,得:

$$\ln \left| - \ln \left| \frac{\sigma^D}{E^D \cdot \varepsilon^D} \right| \right| = \beta^D \cdot \ln(E^D \cdot \varepsilon^D) + \ln(L a^D) \quad (9)$$

应用此式,由纤维束完整的应力应变曲线如图 3 所示,即可得到 Weibull 参数 β 和 La 。因此由图 1 所示的应力应变曲线可得芳纶纤维束在不同应变率下的 Weibull 分布曲线,如图 4 所示。

从图 4 可见,这些曲线均可用直接来拟合,说明纤维强度是符合 Weibull 分布的,且 Weibull 分布参数 β 、 La 由表 2 给出, r 为线性拟合的相关系数。

将上述参数代入(8)、(9)式,便可得到芳纶纤维束在不同应变率下的统计本构方程:

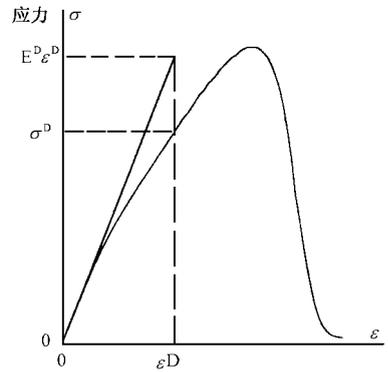


图 3 纤维束应力应变曲线

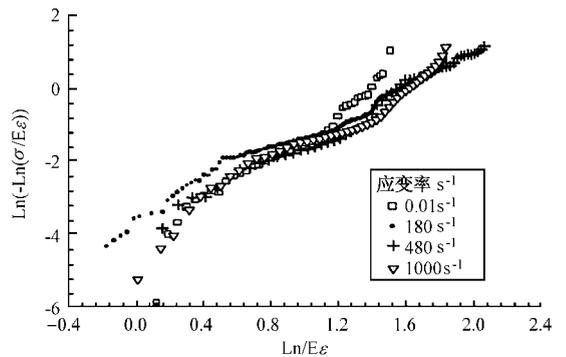


图 4 芳纶纤维束在不同应变率下的 Weibull 分布曲线

表 2 芳纶纤维束 Weibull 分布参数

应变率/s ⁻¹	β	La	r
0.01	3.3068	0.0090	0.9732
180	2.2078	0.0296	0.9873
480	2.5048	0.017	0.9906
1000	2.5936	0.0149	0.9756

$$\begin{cases} \sigma = 60 \varepsilon \exp[-0.009 \times (60 \varepsilon)^{3.3068}] (\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}) \\ \sigma = 72 \varepsilon \exp[-0.0296 \times (72 \varepsilon)^{2.2087}] (\dot{\varepsilon} = 180 \text{ s}^{-1}) \\ \sigma = 69 \varepsilon \exp[-0.017 \times (69 \varepsilon)^{2.5048}] (\dot{\varepsilon} = 480 \text{ s}^{-1}) \\ \sigma = 70 \varepsilon \exp[-0.0149 \times (70 \varepsilon)^{2.5936}] (\dot{\varepsilon} = 1000 \text{ s}^{-1}) \end{cases} \quad (10)$$

4 理论的应力应变曲线与试验结果的比较

图 5 显示芳纶纤维束 Weibull 分布理论曲线和试验结果的比较。

从图 5 可见,理论曲线与试验结果基本吻合,说明芳纶纤维束力学性能的统计本构方程是有效的。然而芳纶纤维是高分子有机纤维,具有高速韧性特征,纤维束中的每一根纤维在断裂之前并非完全线性弹性,因此实际的结果与模型的假设并不完全一致。从图 5 可以看出,理论值与试验结果的差异,在更高应变率下趋于增大。

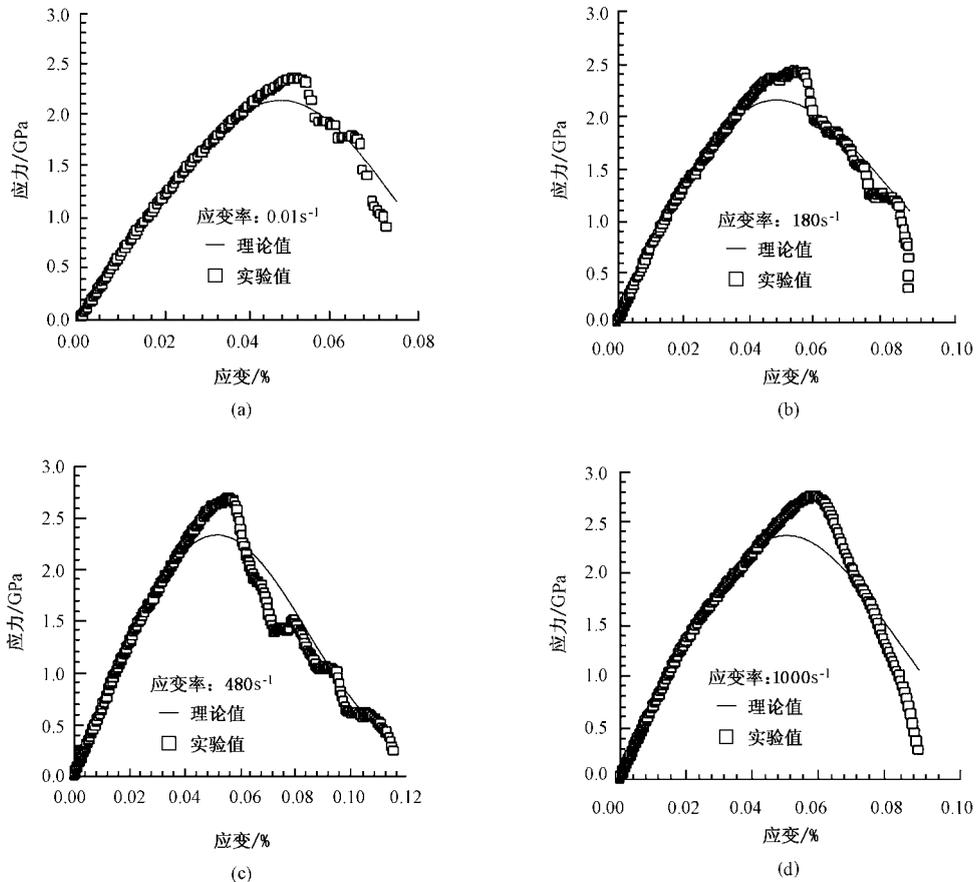


图 5 芳纶纤维束 Weibull 分布应力应变曲线和试验结果的比较

5 结 语

本文利用 MTS 和旋转盘式杆—杆型冲击拉伸试验装置,获得了 $0.01 \sim 1\,000\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内芳纶纤维束的应力应变曲线。并根据纤维束统计本构模型,获得了不同应变率下芳纶纤维束力学性能的统计本构方程,理论曲线与试验结果基本吻合。但尚未得到芳纶纤维束应变率相关的统计本构方程,还需要测试更多的不同应变率下纤维束的力学性能,以获得准确反映力学量随应变率变化的规律,因此芳纶纤维束力学性能的统计本构关系需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 熊 杰. 高应变率下芳纶纤维力学性能的研究. 纺织学报, 2000 (6): 7~10.
- 2 熊 杰. 防弹成层复合材料及其动态冲击和侵彻性能研究. 中国纺织大学博士论文, 1998.
- 3 夏源明等. 复合材料及其结构的力学进展(第三册). 武汉: 武汉工业大学出版社, 1992: 78~99.
- 4 Zhu G et al. Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles. Int. J. Solids Structure, 1992(4): 399~420.
- 5 Krajcinovic. D. Silva. M. A. G. Int. J. Solids Structures, 1982(7): 551.
- 6 Coleman. B. D. J. Mech. Phys. Solid, 1958(7): 60.
- 7 Xia, Y. M. et al. Comp. Sci. and Tech., 1994(52): 499.

中国纺织工程学会/染整专业委员会将于今年 11 月组织举办

“2003‘中大洁润丝杯’全国中青年染整工作者论文发布会”

独家冠名: 上海市高新技术企业——上海中大科技发展有限公司

资助单位: 山东华纺股份有限公司、厦门华纶印染有限公司、美国杰能科公司等

详情请垂询: 010-65016537 65016539 或发 E-mail 至: consult@ml.ctei.gov.cn