

# 单纤维横向压缩模量的一种测试方法

施桐梧 黄机质 张 燕

(西北纺织学院)

【摘要】 本文提出了单纤维横向压缩模量的一种测试方法，用热机械检测仪测得了四种单纤维的横向压缩模量。

## 一、测试原理

矩形截面材料的横向压缩模量可从压缩应力-应变曲线中比较简便地求得。但对于横向尺寸极小、截面常呈圆型、且属各向异性非线性粘弹材料的纺织纤维来说，情况较为复杂，除需测微小力和微小位移外，还要考虑到圆形截面的影响和横向变形系数的影响。

设在压缩过程中接触区宽度  $2b$  远小于单丝半径  $R$ 、接触区宽度方向上的载荷分布为椭圆型分布，且另一侧简化为单位长度的集中载荷  $P = E/L$  (见图 1)。则根据资料<sup>[1,2]</sup>已得出总压缩位移量  $u$  和压缩区半宽  $b$  的计算方程：

$$u = (4P/\pi) [(1/E_1) - (V_{1s}^2/E_s)] \times [0.19 + Sh^{-1}(R/b)] \quad (1)$$

$$b^2 = (4PR/\pi) [(1/E_1) - (V_{1s}^2/E_s)] \quad (2)$$

式中： $E_1$  为欲测的横向模量； $E_s$  为纵向模量； $V_{1s}$  为横向变形系数。

$$\text{令 } \alpha = (4/\pi) [(1/E_1) - (V_{1s}^2/E_s)] \quad (3)$$

$$\text{则 } u = \alpha P (0.19 + Sh^{-1}\sqrt{R/\alpha P}) \quad (4)$$

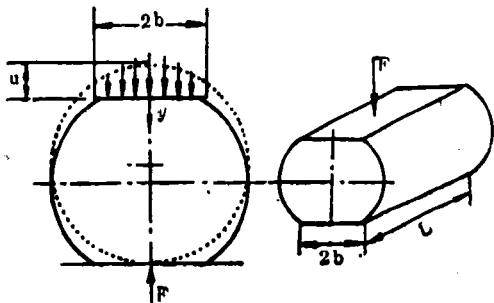


图 1 单纤维横向受压状态

$$b^2 = \alpha PR \quad (5)$$

名义应变

$$u/D = u/2R = (1/2)(b/R)^2 \times [0.19 + Sh^{-1}(R/b)] \quad (6)$$

$$\text{且 } du/dp = \alpha [0.19 + Sh^{-1}(R/b) - \sqrt{R^2/(R^2 + b^2)}] (1/2) \quad (7)$$

显然， $dp/du$  并非常数，压缩曲线为非线性，但在名义应变  $(u/D) < 0.05$  时，非线性并不显著。以普通涤纶纤维为例，名义应变由 0.008 增至 0.05，压缩应力-应变曲线上相应点的切线倾角由  $71.7^\circ$  增加到  $78^\circ$ ，仅增加  $6.3^\circ$ ，特别当材料的  $E_1$  大时，更可看作是线性的。

故在测得压缩曲线后，在屈服点前的初始压缩近似直线段中取中点得到  $u/D$ ，可据(6)式求得  $R/b$  之值，再据该点斜率由(7)式求得  $\alpha$ ，并结合拉伸试验求  $E_s$  和选用适当的  $V_{1s}$ ，即可据(3)式求得单纤维横向压缩模量  $E_1$ 。由于一般纤维材料  $E_1 < E_s$ ，且  $V_{1s} < 0.5$ ，故从(3)式知，在某些条件下，由  $V_{1s}$  对  $E_1$  造成的误差较小。

## 二、测试装置和压缩曲线

我们用热机械检测仪测单纤维的横向压缩模量，用上海天平仪器厂生产的 RJY-1 型热机械检测仪用差动变压器式位移传感器测微小位移，其最小分度值达  $0.2\mu\text{m}$ 。位移传感器上的托盘可放置的最大重量为 250g。现托盘上放一水杯，用蠕动泵以一定速率将水输送到杯中，起恒速加载作用，在位移传感器下方，

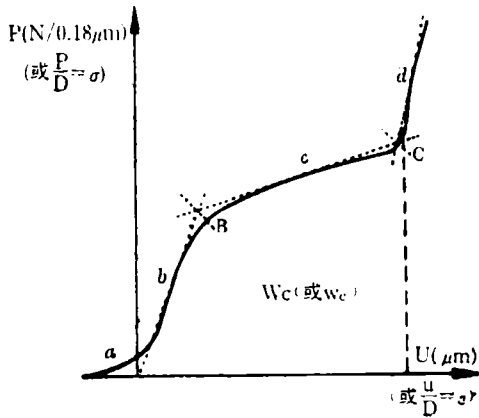


图 2 单纤维横向压缩曲线

用铜质螺杆将厚 0.18mm，端面平整的薄钢片与之联接。置于底座上的纤维试样受薄钢片端面的压缩，其压缩量  $u$  即传感器的位移量可由原记录仪绘出，而对应记录仪的某一走纸速度，在恒定注水速率下，记录纸的走纸方向上的单位间隔即代表确切的载荷量。

用这种方法测得的压缩曲线如图 2 所示。从该曲线可求得单纤维横向压缩模量，也可求得屈服应力、硬化应力、屈服功等指标<sup>[3]</sup>。

受热机械检测仪可加载荷最大值的限制，最大载荷下，纤维虽已压成矩形截面，但一般未被压断和完全劈裂，故所得曲线未出现破坏点。但已能从压缩图中看出其压直和紧密接触、弹性变形、屈服、硬化等过程。由于压缩段长度约为纤维直径的十倍左右，故压缩之初在小载荷下，首先将纤维段压直使之紧贴于底座，此时在压缩曲线上表现为较大的位移量 ( $a$  段)。此后的  $b$  段为弹性压缩变形阶段。若所压纤维为矩形截面，则该段曲线的斜率即为纤维的初始压缩模量；继续加载则纤维发生较大的变形，在曲线上表现为屈服段  $c$  段。由于在屈服段纤维内部结构重新调整，再继续加载时，纤维的压缩变形量反而变小，故出现斜率更大的硬化段  $d$  段。在这一曲线上，选  $b$  段中点为特征点计算压缩模量  $E_1$ ；作  $b$  段、 $c$  段和  $d$  段的切线，以相邻两切线交点处的角平分线交于原曲线定义屈服点  $B$  和硬化反曲点  $C$ ，

由此可得屈服应力  $\sigma_B$ 、硬化应力  $\sigma_C$  和硬化功  $W_c$  (或硬化比功  $W_c = W_c / \pi R^2 L$ )。

### 三、测试结果

对四种纤维进行横向压缩试验，见表 1。

表 1 试样规格与测试结果

品种	半毛	普通涤纶	改性涤纶	锦纶
实测直径 ( $\mu\text{m}$ )	21.7 (1.72)	21.5 (1.22)	16.8 (1.16)	20.8 (1.02)
$E_1$ (GPa)	0.520 (0.201)	0.510 (0.091)	0.498 (0.087)	0.612 (0.082)
$E_3$ (GPa)	2.16 (0.70)	3.51 (0.30)	3.76 (0.58)	2.90 (0.65)
$\sigma_B$ (GPa)	0.00225 (0.0030)	0.0212 (0.0041)	0.0208 (0.0048)	0.0219 (0.0028)
$W_c (\times 10^4 \text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$	1.02 (0.130)	1.08 (0.223)	1.20 (0.121)	1.58 (0.162)
$V_{13}$	0.48	0.45	0.45	0.48

注：测试结果均为 10 次平均，括号内数值系方差。

从上述测试结果可以看出，由于纤维大分子的取向排列，结构上各向异性也导致了纵向和横向模量的差异。取向度低的羊毛和侧向有序的锦纶，其横向模量  $E_1$  约占纵向模量数值的 24.1% 和 21.1%，而取向度较高的涤纶，纵、横向模量的差异更加显著，横向模量仅占纵向模量值的 14.5% 和 13.2%。与纵向拉伸试验所得断裂比功相一致，锦纶的硬化比功也比较大。

### 四、讨 论

1. 用热机械检测仪测单纤维横向压缩性能可基本满足测试所需的精度要求，可得到单纤维横向压缩曲线并求得屈服应力  $\sigma_B$ 、硬化比功  $W_c$  等一系列指标。

2. 非矩形截面的纤维不能单独根据压缩曲线的斜率求取横向压缩初始模量，而需同时考虑形态尺寸和横向变形系数。

3. 单纤维横向压缩一般经过压直、弹性变形、屈服、硬化等过程，直到最终劈裂性破坏，

4. 单纤维横向压缩初始模量仅为纵向拉伸初始模量的  $1/4 \sim 1/7$  左右。

本研究得到姚穆教授指导，谨致谢忱。

### 参 考 资 料

[1] S. Kawabata, «J. Text. Inst» 81, No.7

(1990) 432~481.

[2] I. M. Ward, «固体高聚物的力学性能» (第二版), 科学出版社, 1988, 2.

[3] 黄机质, «单纤维横向压缩测试的理论和实践» (学位论文), 西北纺织学院, 1993.3.