

大豆蛋白质纱拉伸性质建模的研究

崔世忠 石风俊

(中原工学院, 郑州, 450007)

摘要: 提出由 Maxwell 元件、线性弹簧和非线性弹簧组成的四元件非线性粘弹模型, 对大豆蛋白质纱线的拉伸性质进行了测试和分析, 理论预期与实验结果能相符。

关键词: 大豆蛋白质纱 非线性粘弹模型 断裂强力 断裂伸长 断裂功 研究

中图法分类号: TS 102.512 文献标识码: A

力学模型能直观、形象地描述纺织材料的宏观力学行为, 并可对其力学性质进行定量分析。早在 20 世纪三四十年代, 模型理论就已应用于纺织材料的分析与研究, 特别是力学模型的应用尤为广泛。包括马克思威尔模型和伏克脱双元件模型。或以这些基本元件为基础, 将其串联、并联或串并联组合成多元件模型。模型中所包含的元件越多, 分析时的数学运算就越复杂。对于纱线的静态力学性质来说, 一般三元件或四元件模型就能给出精确的描述^[1,2]。

纱线受到较小的应力作用时所表现出的粘弹行为一般认为是线性的, 可以用线性粘弹模型来描述。在实际应用中, 纺织材料的变形一般是较大的, 其粘弹行为往往会表现出明显的非线性^[3-5]。为此, 提出了一个非线性粘弹模型, 对大豆蛋白质纤维^[6] 纱线的拉伸性能进行了研究。

1 大豆蛋白纤维纱线的力学模型

对不同细度的大豆蛋白质纱拉伸曲线进行分

析, 可以发现其拉伸曲线的变化规律基本一致, 均呈反 S 形, 如图 1 所示。由于预加张力的存在, 在伸长等于零时, 曲线与强力轴相交, 交点的纵坐标等于预加张力, 说明曲线的方程中存在常数项; 曲线的初始部分斜率较大, 说明方程中含有线性成分; 然后, 随着纱线伸长的增大, 强力缓慢增加, 说明曲线的方程中存在负的指数关系; 在接近断裂时, 强力随伸长的增大而快速增加, 这说明曲线的方程中还含有高次成分。因此, 模型中应该包括反映线性力学性质的线性弹簧、反映粘弹性质的粘弹元件和反映非线性力学性质的非线性元件。

为此, 提出了一个由线性弹簧、马克思威尔 (Maxwell) 元件和非线性弹簧并联组成的模型, 如图 2 所示。线性弹簧用来描述拉伸初始阶段纱线成虎克体状态的情况。马克思威尔元件是由一个线性弹簧和一个牛顿粘滞杯串联组成, 用来描述高分子材料的粘弹性质。非线性弹簧则用来描述纱线的非线性力学性质。

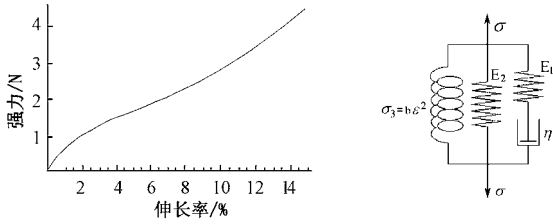


图 1 大豆蛋白质纱的拉伸曲线 图 2 四元件非线性粘弹模型

假定在马克斯威尔元件中,弹簧的弹性常数为 E_1 , 牛顿阻尼杯的阻尼系数为 η , 模型中线性弹簧的弹性常数为 E_2 , 非线性弹簧的应力和应变成二次方关系, 系数为 b 。当模型受到外力作用时, 所产生的应变为 ε 。假定马克斯威尔元件、线性弹簧和非线性弹簧受到的应力分别为 q_1 、 q_2 和 q_3 , 产生的应变分别为 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 。对于模型中的马克斯威尔元件有

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{dq_1}{dt} + \frac{q_1}{\eta} \quad (1)$$

对于线性弹簧, 其应力 q_2 与应变 ε_2 之间的关系符合虎克定律, 即

$$q_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad (2)$$

对于非线性弹簧, 其应力 q_3 与应变 ε_3 的关系为

$$q_3 = b\varepsilon_3^2 \quad (3)$$

于是, 可得

$$\sigma = q_1 + q_2 + q_3 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad (5)$$

假定纱线的拉伸为等速伸长, $\varepsilon = Kt$, K 为一常数, 初始条件为 $q(0) = 0$ 。则, 由方程(1)、(2)、(3)、(4)和(5)可得

$$\sigma = E_2 \varepsilon + b\varepsilon^2 + \eta K(1 - e^{-E_1 \varepsilon / \eta K}) \quad (6)$$

为使纱线伸直而不伸长, 在拉伸实验时需对纱线施加一定的预加张力(ISO 2062 规定 $q_0 = 0.5 \text{ cN/tex}$)。考虑预加张力的影响, 方程(6)修正为

$$\sigma = q_0 + E_2 \varepsilon + b\varepsilon^2 + \eta K(1 - e^{-E_1 \varepsilon / \eta K}) \quad (7)$$

为实用起见, 把方程(7)改写为

$$\sigma = q_0 + A\varepsilon + B\varepsilon^2 + C(1 - e^{-D\varepsilon}) \quad (8)$$

式中, $A = E_2$, $B = b$, $C = \eta K$ 和 $D = E_1 / \eta K$ 。

2 实验条件

试样分别为 18.72 tex (32°)、15.34 tex (38°)、14.58 tex (40°)、12.98 tex (45°)、12.15 tex (48°)、9.72 tex (60°)、7.29 tex (80°)、5.83 tex (100°) 的 8 种大豆蛋白质纱。拉伸实验在 USTER TENSOPRID III 全自动电子强力仪上进行, 采用的试样长度为 $L = 500 \text{ mm}$, 拉伸速度为 $V = 500 \text{ mm/min}$, 预加张力为 0.5 cN/tex ,

仪器的测试精确度为 $\pm 1 \text{ cN}$ 。每种试样测试 60 次, 仪器自动给出 60 次的平均断裂时间、平均断裂伸长、平均断裂功和平均拉伸曲线等。大气条件温度为 20°C , 相对湿度为 46%。

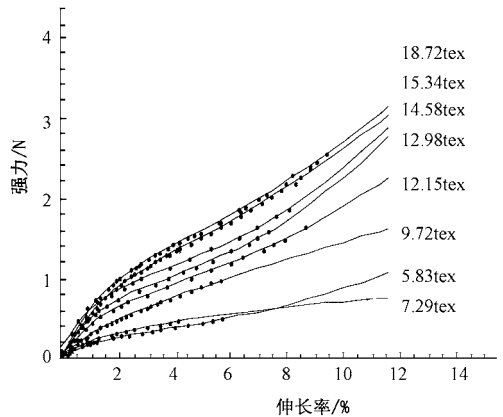
3 实验结果及讨论

把实验得到的平均拉伸曲线数字化, 用数学软件 Mathematica^[7] 根据式(8) 拟合得出大豆蛋白质纱拉伸曲线的方程并计算出理论曲线。各种不同细度的大豆蛋白质纱理论拉伸曲线所对应的 A、B、C 和 D 的数值列于表 1。计算得到的各种大豆蛋白质纱的理论曲线和实测数据如图 3 所示。从中可以看出, 理论曲线与实测结果符合得很好。

表 1 大豆蛋白质纱拉伸曲线的系数

| 细度 /tex | 18.72 | 15.34 | 14.58 | 12.98 | 12.15 | 9.72 | 7.29 | 5.83 |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| A | 0.0286 | 0.1243 | 0.0039 | 0.0303 | 0.0568 | 0.0986 | 0.0299 | 0.0286 |
| B | 0.0201 | 0.0058 | 0.0133 | 0.0111 | 0.00696 | 0.0119 | 0.0012 | 0.0027 |
| C | 1.1963 | 0.7971 | 0.859 | 0.7398 | 0.6061 | 0.373 | 0.3293 | 0.2325 |
| D | 0.650 | 0.764 | 0.812 | 0.836 | 0.782 | 0.568 | 0.580 | 0.874 |

把表 1 中 A、B、C 和 D 的数值和实测的平均断裂伸长率代入式(8), 可以计算出各种大豆蛋白质纱线的平均断裂强力。计算得到的平均断裂强力的数值列于表 2。从表 2 中可以看出, 理论预期与实测结果符合得很好。这说明在纱线的伸长率接近断裂伸长时, 配出的方程也还是适用的。



注: 曲线为理论曲线; “·” 为实测数据

图 3 大豆蛋白质纱理论拉伸曲线和实测数据的比较
同理, 对式(8) 求积分即可得到纱线的断裂功

$$W = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma d\varepsilon =$$

$$L \left[q_0 \varepsilon_b + \frac{1}{2} A \varepsilon_b^2 + \frac{1}{3} B \varepsilon_b^3 + C \varepsilon_b + \frac{C}{D} (e^{-D\varepsilon_b} - 1) \right] \quad (9)$$

把平均断裂伸长率以及表 1 中 A、B、C 和 D 的数值代入式(9), 就可以计算出各种大豆蛋白质纱线的断裂功。计算的断裂功和实测结果也列于表 2。从表

2 中可以看出,理论计算的断裂功与实测结果也是非常吻合的。

表 2 大豆蛋白质纱的断裂强力和断裂功

| 细度 /tex | 平均断裂 伸长/ % | 强力/cN | | | 断裂功/cN·cm | | |
|------------|---------------|-------|-------|-------------|-----------|--------|-------------|
| | | 实测 | 计算 | 相对 误差/ % | 实测 | 计算 | 相对 误差/ % |
| 18.72 | 13.06 | 349.2 | 352.4 | 1.0 | 1309.2 | 1319.2 | 0.8 |
| 15.34 | 11.38 | 298.8 | 305.6 | 2.3 | 1013.6 | 1072.3 | 4.0 |
| 14.58 | 12.52 | 311.2 | 304.4 | 2.2 | 979.0 | 1034.4 | 5.6 |
| 12.98 | 11.88 | 274.0 | 267.1 | 2.6 | 839.1 | 861.0 | 2.5 |
| 12.15 | 10.72 | 205.9 | 202.7 | 1.6 | 619.5 | 637.5 | 2.8 |
| 9.72 | 9.59 | 151.4 | 144.7 | 4.4 | 421.7 | 432.5 | 2.6 |
| 7.29 | 9.87 | 74.3 | 75.9 | 2.3 | 274.0 | 265.2 | 3.2 |
| 5.83 | 9.52 | 72.8 | 75.3 | 3.4 | 214.4 | 215.8 | 0.6 |

4 结 论

通过对大豆蛋白质纱线的拉伸性质的测试和分析,提出了由 Maxwell 元件、线性弹簧和非线性弹簧

并联组成的四元件非线性粘弹模型,并对其强力—伸长关系进行了分析和计算,理论预期与实测结果非常吻合。这说明该模型可以很好地用来模拟大豆蛋白质纱的拉伸性质。因此,这个四元件非线性粘弹模型的建立为大豆蛋白质纱的研究提供了一种新的途径。

参 考 文 献

- 1 宋湛华等编. 纱线强力与伸长率测试及应用. 北京: 纺织工业出版社, 1992.
- 2 严灏景编著. 纺织材料学导论. 北京: 纺织工业出版社, 1990.
- 3 Vangheluwe L. Influence of Strain Rate and Yarn Number on Tensile Test Results. Textile Res. J., 1992(10): 586 ~ 589.
- 4 Manich A M. Viscoelastic Behavior of Polypropylene Fibers. Textile Res. J., 1999(5): 325 ~ 330.
- 5 Zhong Cai. A Nonlinear Viscoelastic Model for Describing the Deformation Behavior of Braided Fiber Seals. Textile Res. J., 1995(8): 461 ~ 470.
- 6 李官奇. 植物蛋白质合成丝. 中国专利: CN 1286325 A, 2001.
- 7 杨 玉等编. Mathe matica. 北京: 人民邮电出版社, 1999.