

文章编号: 0253-9721(2007)10-0004-05

十字形 PTT 与 PET 长丝的力学性能模型

刘保生, 顾肇文, 王其

(东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要 对长丝之间的力学作用进行了模型建立和分析, 利用四元件模型对十字形 PTT 和 PET 长丝的蠕变行为分别进行力学阐述, 得出了长丝的力学参数: 弹性模量、黏滞系数。利用这些微观参数验证长丝的应力松弛行为, 得到与宏观表现较为合理的相似性。四元件模型从理论上对长丝的力学性能进行了表征, 不仅可描述长丝的急弹性、缓弹性变形, 还可同时验证长丝的塑性变形, 更优于三元件模型。

关键词 PTT 长丝; 应力松弛; 蠕变; 四元件模型

中图分类号: TS182.5 文献标识码: A

Models of mechanical properties of the cross section PTT filament and PET filament

LIU Baosheng, GU Zhaowen, WANG Qi

(College of Textile, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract A model was developed to analyze the inter-filament mechanical function, and the creep of the cross section PTT and PET filaments was expatiated by four element models. The mechanical parameters of the filaments such as elasticity module and viscosity coefficient were got, which were used to validate the stress slack of the filaments, showing in good accord with the macro performance of the filaments. It can be seen that the four element models can be applied to character exactly the mechanical properties of the filaments in theory. It can describe the rapid elasticity and slow elasticity of the filaments and verify their creep, and is advantageous over the three element models.

Key words PTT filament; stress slack; creep; four element models

PTT 纤维又名聚对苯二甲酸丙二醇酯 (Polytrimethylene Terephthalate)^[1-2], 具有优良的拉伸回弹性, 良好的染色性和抗污性, 良好的服用性能, 手感舒适, 耐洗可穿性, 悬垂性能好^[3], 深受消费者喜爱。PTT 纤维可用于制作缝纫线、地毯以及非织造布等领域。

基于纤维截面形态差异而产生的性能变化, 利用化学或物理方法简单地改变合成纤维的截面形态, 可改变普通合成纤维的一些基本性能。十字形 PTT 纤维与普通 PTT 纤维虽然具有相同的化学组成与结构, 但在很多方面会表现出不同的性能。PTT 与 PET 同属聚酯纤维, 二者的纤维结构具有明显的差别; PTT 纤维分子结构中存在 3 个亚甲基基团

$-CH_2$, 在大分子构型上呈“Z”字型^[4-5]。这种构型使得纤维像弹簧一样, 具有良好的弹性和弹性回复性^[6]。PTT 纤维和 PET 纤维同属高分子材料, 其拉伸变形符合高分子材料黏弹性形变的变形机制。通过对十字形 PTT 纤维和十字形 PET 纤维的拉伸、蠕变和应力松弛进行测试, 可根据高聚物的拉伸力学性能来描述 2 种长丝的拉伸行为, 同时确定他们受外力拉伸时表现出的不同力学性能。

1 实验部分

1.1 试样

十字形 PTT DTY 长丝, 11.1 tex/48 f; 十字形

PET DTY 长丝, 11.1 tex/48 f。

1.2 拉伸性能测试

用 XL-1 纱线强度仪进行拉伸性能测试。隔距 250 mm, 拉伸速度 250 mm/min, 预加张力 0.5 cN/tex, 试样根数 20 根。

1.3 蠕变实验

用 YG061 FQ 电子单纱强力仪进行测试。隔距 250 mm, 预加张力 0.5 cN/tex, 拉伸应力 100 cN, 试样根数 10 根。在预加张力作用下, 将纱线固定于两夹头之间, 根据设定的拉伸应力对纱线进行拉伸, 每隔 2 s 取纱线的伸长值, 得出时间-伸长曲线。

1.4 应力松弛实验

用 YG061 FQ 电子单纱强力仪进行测试。隔距 250 mm, 预加张力 0.5 cN/tex, 拉伸速度 50 mm/min, 试样根数 10 根。在预加张力作用下, 将纱线固定于两夹头之间, 纱线拉伸到定伸长率 10% 时进行应力松弛, 每隔 2 s 取纱线的应力值, 得出时间-应力曲线。

2 模型分析

2.1 拉伸断裂结果分析

2 种异形截面长丝的常规力学性能见表 1, 强力-伸长曲线见图 1。

表 1 2 种异形截面长丝的常规力学性能

Tab.1 Two filaments' normal mechanical properties

长丝品种	断裂强度/ (cN·dtex ⁻¹)	断裂 伸长率/%	断裂功/ J	初始模量/ (cN·tex ⁻¹)
十字形 PTT	2.264	36.584	16.238	1.670
十字形 PET	3.286	22.580	15.397	3.970

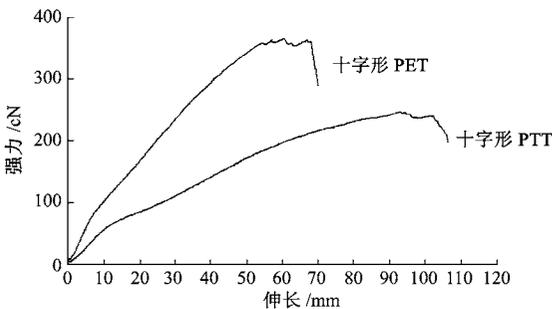


图 1 强力-伸长曲线

Fig.1 Strain-stress curve

拉伸测试表明, 十字形 PTT 长丝的初始模量和断裂强度均比十字形 PET 长丝低。在拉伸初始阶段, 十字形 PTT 长丝受到小负荷作用时发生变形, 这是由于 PTT 的大分子结构中比 PET 多一个亚甲基

基团, 使得分子与分子之间的相互作用力较低, 因而在受外加负荷作用时更易发生分子的运动, 变形更大。从表 1 和图 1 还可发现, 十字形 PTT 的断裂伸长率明显大于十字形 PET 长丝, 即 PTT 长丝比 PET 长丝的延伸性更好, 这主要归功于 PTT 长丝大分子结构中所谓的“奇碳效应”^[11], 呈现明显的“Z”字形, 具有较好的弹性和回弹性。

PTT 纤维和 PET 纤维在受到拉伸作用时除分子链主价键发生变形外, 次价键也逐步断裂和分子链逐步伸展, 纤维之间发生大分子的重排, 因此高聚物的拉伸断裂都具有对时间的依赖性, 同时也具有类似弹簧一样的拉伸性能, 所以其力学性能兼有弹性固体和黏性流体的变形特征。模型分析假设条件: 1) 纱线符合四元件模型, 由 2 个虎克弹簧和 2 个牛顿黏壶组成; 2) 纱线视为一个整体, 纱线中各单丝的拉伸或收缩具有同一性; 3) 纱线的捻度为 0。图 2 为四元件模型图^[7]。

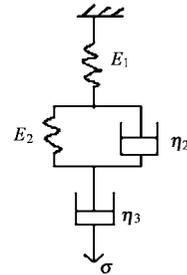


图 2 四元件模型图

Fig.2 Four element models

四元件模型的本构方程为

$$E_1 \dot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta} \epsilon = \dot{\sigma} + \frac{E_1}{\eta} \left[1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta}{\eta} \right] \sigma + \frac{E_1 E_2}{\eta} \sigma \quad (1)$$

式中: E_1 、 E_2 为虎克弹簧的弹性模量 (cN/tex); η 、 η 为牛顿黏壶的黏滞系数 (cN·s/tex); ϵ 、 σ 分别为纱线的应变和应力, 是时间 t 的函数。

2.2 蠕变作用模型分析

2.2.1 本构方程

在恒定应力拉伸作用下, 即 σ 为常数时, 式(1)简化为

$$\tau_k \dot{\epsilon} + \epsilon = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2)$$

式中 $\tau_k = \eta / E_2$, 式(2)的通解为

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{\eta} t + C_1 e^{-t/\tau_k} + C_2$$

由边界条件 $t=0$ 时, $\epsilon(0) = q E_1$; $\dot{\epsilon}(0) = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{\sigma}{\eta}$ 解得

$$C_1 = -\frac{\sigma}{E_2}; C_2 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2}$$

所以四元件模型的蠕变方程为^[2]

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2}(1 - e^{-t/\tau_k}) + \frac{\sigma}{\eta_b}t \quad (3)$$

2.2.2 蠕变模型的力学模拟

依据长丝的强力-伸长曲线,蠕变实验选择 100 cN 作为定负荷。一方面该负荷在断裂强力范围内,另一方面在拉伸时,该负荷值处于 2 种纱线的屈服区,蠕变实验对应力应变的描述较为准确。

将实验所得数据代入式(3),利用 Matlab 软件中的非线性函数最小二乘法拟合程序 lsqnonlin 分别对 2 种纱线的蠕变进行拟合,得出蠕变所对应的力学拟合方程。

十字形 PTT:

$$\epsilon(t) = 25.2446 - 3.1424e^{-24.6260t} + 0.1202t \quad (4)$$

十字形 PET:

$$\epsilon(t) = 6.9633 - 0.6729e^{-46.7939t} + 0.09380t \quad (5)$$

结合蠕变本构方程式(3)及拟合方程式(4)、(5),得出在该负荷蠕变作用下 2 种纱线所对应的各项参数,如表 2 所示。

表 2 长丝力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of two filaments

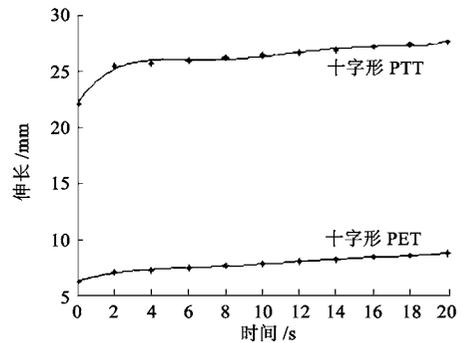
纱线品种	$E_1/$ (cN·tex ⁻¹)	$E_2/$ (cN·tex ⁻¹)	$\eta_b/$ (cN·s·tex ⁻¹)	$\tau_b/$ (cN·s·tex ⁻¹)
十字形 PET	1.4308	13.3737	0.2858	95.9588
十字形 PTT	0.4072	2.8640	0.1163	74.8512

根据拟合方程式(4)、(5)可以得出拟合曲线,如图 3(a)所示,而实际蠕变实验曲线如图 3(b)所示。

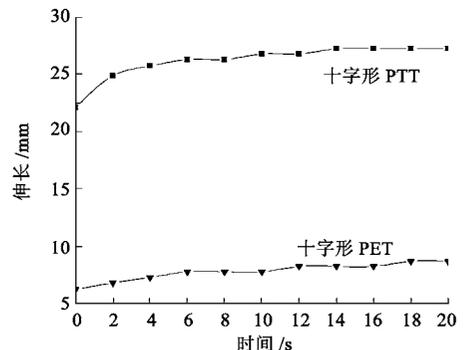
如图 3 所示,十字形 PTT 和十字形 PET 曲线都拟合得非常相似。在相同的外力作用下,十字形 PTT 长丝的伸长比十字形 PET 长丝要大得多,而初始阶段缓弹性变形的速率也比十字形 PET 长丝要快;比较表 2 的数据可看出,十字形 PTT 长丝的弹性模量 E_1 小于十字形 PET 长丝的,在拉伸的初始阶段,即当 $t = 0$ 时, $\epsilon(0) = \frac{\sigma}{E_1}$,此时只发生弹性应变,

$\epsilon_{PTT}(0) > \epsilon_{PET}(0)$,十字形 PTT 长丝更容易变形,表现在小负荷作用时发生较大的变形,亦即初始模量较十字形 PET 长丝低;随着时间 t 的增加,2 种长丝都进入缓弹性变形区域,缓弹性形变不断发生,并逐渐增大,但速率 $v = \frac{\sigma}{\eta_b}e^{-t/\tau_k} + \frac{\sigma}{\eta_b}$ 逐渐减少,并最终趋向于一条直线;十字形 PTT 长丝的弹性模量 E_2 及黏滞系数 η_b 都比十字形 PET 长丝的小,表现为缓弹

性要高于十字形 PET 长丝;对于牛顿黏壶 η_b 在初始阶段对长丝的拉伸不形成作用,其决定了长丝的不可回复的形变,并随时间的增加而增大。由表 2 还可知,十字形 PTT 长丝的不可回复形变要高于十字形 PET 长丝,这是由大分子结构的差异所致,PTT 长丝的大分子中比 PET 多了 1 个亚甲基基团 $-CH_2-$,分子间的相互作用降低,纱线的拉伸和回缩都变得较为容易,大分子链的断裂较为容易,因此不可回复的塑性变形较大,所以通过四元件模型可以充分地反映出长丝的弹性变形、缓弹性变形以及塑性变形,适合对长丝的蠕变行为进行描述。



(a) 蠕变曲线拟合图



(b) 蠕变实验图

图 3 时间-伸长蠕变曲线

Fig.3 Time-length squirmy transmutation curve.

- (a) Curve fitting of squirmy transmutation;
- (b) Experiment picture of squirmy transmutation

2.3 应力松弛模型分析

2.3.1 本构方程

分析长丝发生应力松弛作用时,即考察长丝在保持恒定伸长时其内应力随时间的变化关系,首先根据四元件模型公式求出长丝应力松弛时模型的本构方程式。

恒定伸长时,即 $\epsilon = \epsilon_c = \text{常数}$,则式(1)可简化为^[7]

$$\dot{\sigma} + \frac{E_1}{\eta_b} \left[1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_b}{E_1} \right] \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_2}{\eta_b E_1} \sigma = 0 \quad (6)$$

根据实际情况可知式(6)必有其解, 因而有

$$\left| \frac{E_1}{\eta_b} \left| 1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_a}{\eta_b} \right| \right|^2 - 4 \frac{E_1 E_2}{\eta_a \eta_b} \geq 0,$$

通解为 $\sigma = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t}$ (7)

式中: C_1 、 C_2 为待定参数; r_1 、 r_2 则可由

$$x^2 + \frac{E_1}{\eta_b} \left| 1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_a}{\eta_b} \right| x + \frac{E_1 E_2}{\eta_a \eta_b} = 0$$
 (8)

的 2 个根得出。式(7)即为纱线在定伸长松弛时的力学模型本构方程。

2.3.2 模型求证

蠕变模型得出了 2 种长丝的力学性能参数, 从数据上对 2 种纱线的力学行为进行对比分析, 通过应力松弛模型可以进一步地对蠕变所得的参数进行验证。

在定伸长率为 10% 时, 将表 2 中十字形 PTT 的数值代入式(8)可得

$$r_1 = -28.1279; r_2 = -0.0048$$

代入式(7)可得 $C_1 = 2.8867$; $C_2 = 59.1133$ 。

因此在定伸长为 10% 时, 十字形 PTT 长丝的应力松弛方程为

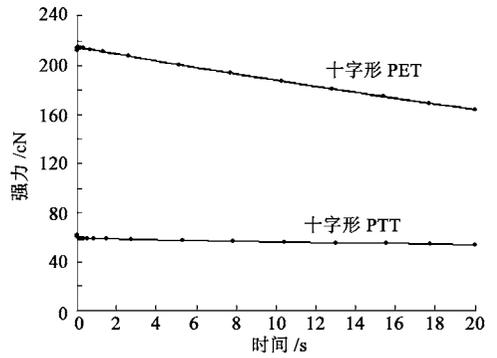
$$\sigma = 2.8867 e^{-28.1279t} + 59.1133 e^{-0.0048t}$$
 (9)

同理可得定伸长率为 10% 时十字形 PET 长丝的应力松弛方程为

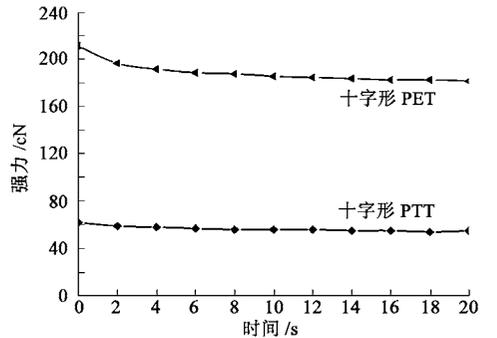
$$\sigma = -3.2580 e^{-51.8016t} + 215.2580 e^{-0.0135t}$$
 (10)

利用 Matlab 软件对式(9)、(10)进行曲线拟合, 得到图 4 应力松弛时间-强力曲线。从图可看出, 十字形 PTT 和十字形 PET 长丝定伸长拉伸时, 其内应力都随时间的增加而减少, 十字形 PET 的减少更为明显, 这主要是因为十字形 PET 长丝的大分子链不易伸长, 在一定的伸长长度时, 要克服较大的作用力, 分子链产生断裂, 断裂后的分子链不易进行重排, 因此其内应力损失较大, 而十字形 PTT 长丝“Z”字型的构型能够承受较大的伸长, 在定伸长拉伸时, 其大分子链容易产生重排, 因此内应力的减少较少。

由图 4 还可看出, 拟合曲线所表征的力学关系和实际实验曲线表征的较为相似, 拟合性较强, 通过蠕变实验所得参数不仅较好地反映了长丝蠕变实验的性能, 同时还可很好的说明发生应力松弛时长丝的力学性能, 进一步的比较出 2 种长丝的性能差异; 从松弛角度看, 在相同的伸长长度时, 十字形 PTT 长丝所需的力远小于十字形 PET 长丝, 反过来可以看出在较小的外加负荷作用时, 十字形 PTT 长丝比十字形 PET 能够产生较大的伸长, 也即其弹性延伸



(a) 应力松弛拟合图



(b) 应力松弛实验图

图 4 应力松弛时间-强力曲线

Fig. 4 Time-strength stress slack curve. (a) Curve fitting picture of stress slack; (b) Experiment picture of stress slack

性较十字形 PET 要好, 进一步验证了蠕变时 2 种纱线的力学特征。因此通过应力松弛实验可以验证四元模型关于长丝蠕变力学性能表征的准确性; 四元模型对长丝的蠕变和应力松弛描述都很合适。

3 结论

1) 十字形 PET 长丝的虎克弹簧的弹性模量 E_1 、 E_2 均高于十字形 PTT 长丝, 同时黏滞系数 η_a 、 η_b 也高于 PTT 长丝, 十字形 PET 的弹性模量高, 大分子不易发生变形和旋转, 黏滞特征明显, 反之十字形 PTT 具有较好的弹性延伸性。

2) 十字形 PET 长丝的断裂强度及初始模量都比十字形 PTT 长丝高, 但断裂伸长率低于十字形 PTT 长丝。十字形 PTT 长丝的弹性模量较十字形 PET 低, 其表现为较好的弹性特征。

3) 利用四元模型完全可以很好地表征十字形 PTT 和十字形 PET 纱线的力学性能, 虽然三元模型也可以表征, 但三元模型有其局限性, 仅能描述急弹性、缓弹性和塑性变形中的 2 种, 而四元模型则可同时反映这 3 种变形; 利用四元模型描述十

字形 PET 和十字形 PTT 长丝力学性能是很适合的。

FZXB

参考文献:

- [1] 陈克权 .PTT 纤维的结构与性能 .合成纤维工业[J], 2001 ,24(6) :37 - 40 .
- [2] Mashish S S ,Laddha S K . PTT—fiber of the future[J] . Chemical Textile International , 2005(8) ,33 - 34 .
- [3] 刘玉俐 ,杨宝武 .新型纺织用 PTT 纤维的特性及其

染色工艺探讨[J] .当代石油石化 ,2002(2) :39 - 41 .

- [4] Houston S Brown ,Paul K Casey ,Mike J . Poly(trimethylene terephthalate) polymer for fibers[J] . NF New Fibers , 2000 (7) :56 - 70 .
- [5] 陈克权 ,马嘉萍 ,杨菲 .PTT 长丝瞬时拉伸回弹性能研究[J] .合成纤维工业 ,2003(2) :6 - 9 .
- [6] 李慧 ,王府梅 .PTT 织物与棉氨包芯纱织物的弹性比较[J] .纺织学报 ,2005 ,26(6) :32 - 34 .
- [7] 于伟东 ,储才元 .纺织物理[M] .上海 :东华大学出版社 ,2002 .