

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.018

不同胺类扩链剂配比的氨纶拉伸力学模型及参数分析

汪家琪,游革新

(华南理工大学机械与汽车工程学院,广州 510640)

摘要:根据 Hooke 弹簧和 Newton 粘壶,提出一种由 Maxwell 元件和粘滞系数随应变增大的粘壶并联组成的模型,对氨纶的拉伸过程进行模拟。首先,将乙二胺和 1,2-丙二胺按物质的量之比 3.4:1,4.5:1,6.3:1,10:1 和 21:1 配制扩链剂,制备 5 种扩链剂配比的氨纶;然后对不同扩链剂配比的氨纶进行拉伸测试并对其拉伸曲线进行拟合,分析模型参数;最后对 5 种扩链剂配比的氨纶进行傅里叶变换红外光谱测试,结合氨纶的氢键化程度分析模型参数随扩链剂配比的变化规律。结果表明,该模型能较好地拟合氨纶的拉伸曲线,5 种扩链剂配比的氨纶拉伸曲线拟合度均大于 0.999;模型的弹性模量与粘滞系数随扩链剂配比的增大而增大,与氨纶氢键化程度的变化规律一致,扩链剂配比增大使氨纶抵抗变形的能力增强,在模型上则体现为弹性模量与粘滞系数的增大。

关键词:氨纶;扩链剂配比;弹性模量;粘滞系数

中图分类号: TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0100-05

Tensile Mechanical Model and Parameter Analysis of Spandex with Different Diamine Chain Extender Ratio

Wang Jiaqi, You Gexin

(School of Mechanical and Automotive engineering, South China University of technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract : Based on the Hooke spring and the Newton stick pot, a model consisting of a Maxwell element and a sticking pot with a viscosity coefficient increasing with strain was proposed to simulate the tensile process of the spandex. First, EDA was respectively mixed with 1,2-PDA at molar ratios of 3.4:1,4.5:1,6.3:1,10:1 and 21:1 as chain extender to prepare spandex with 5 kinds of chain extender ratio. Then the tensile tests of the spandex with different chain extender ratio were carried out, and the tensile curve was fitted to analyze the model parameters. Finally, the infrared spectroscopy test of spandex with different chain extender ratio was carried out, and the variation of the model parameters with the chain extender ratio was analyzed in combination with the degree of hydrogen-bond of spandex. The results show that the model can fit the tensile curve of spandex accurately and the fitting degree of spandex with five kinds of chain extender ratio is higher than 0.999. The elastic modulus and viscosity coefficient of the model increase with the increase of the chain extender ratio, which is consistent with the change of the degree of hydrogen-bond of spandex. The increase of the chain extender ratio enhances the ability of the spandex to resist deformation, which shows in the model is that the elastic modulus and the viscosity coefficient increase.

Keywords : spandex ; chain extender ratio ; elastic modulus ; viscosity coefficient

氨纶是一种合成纤维,学名聚氨酯纤维,具有高弹性、耐腐蚀、耐热等优异性能^[1-3],因此被广泛应用于纺织、医疗、消防、Z-pinch 装置等领域^[4-7]。由于氨纶在使用过程中会受到各种拉伸作用,需要引入合适的模型来定性定量地分析其拉伸性能。高分子材料的基本物理模型为 Hooke 弹簧和 Newton 粘

壶^[8],对应于氨纶的结构,弹簧相当于软链段,而硬链段有物理交联点的作用^[9],会对软段的运动产生约束,相当于粘壶^[10]。

目前关于氨纶的拉伸模型研究相对较少。A. A. Almetwally 等^[11]用多元线性回归模型预测棉/氨纶包芯纱的拉伸性能,刘鑫森等^[12]用一个非线性

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目 (U1430107)

通讯作者: 游革新,博士,教授级高工,主要研究高分子材料加工与功能化 E-mail : gxyou@scut.edu.cn

收稿日期: 2019-04-25

引用格式: 汪家琪,游革新. 不同胺类扩链剂配比的氨纶拉伸力学模型及参数分析 [J]. 工程塑料应用,2019,47(7): 100-104,113.

Wang Jiaqi, You Gexin. Tensile mechanical model and parameter analysis of spandex with different diamine chain extender ratio[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7): 100-104, 113.

弹簧和一个牛顿粘壶串联组成的二元件模型拟合氨纶的拉伸曲线,有很好的拟合效果。然而,目前关于氨纶拉伸模型的研究,注重于在模型中引入非线性弹簧,尚未涉及粘壶的粘滞系数会随应变增大的情况。当氨纶未受拉力,或是在拉伸初始阶段应变较小时,软段处于蜷曲状态,如图 1a 所示;当应变增大,软段被拉开,其状态如图 1b 所示。由于硬段起交联作用,会对软段的形变产生约束,随着应变增大,其约束作用应该会逐渐增强,对应于模型中粘壶的粘滞系数逐渐增大。通过引入模型分析氨纶的拉伸,可为纺织领域氨纶原料配比的选择,以及用氨纶制备安全绳等安全设备时的原料配比提供理论指导。

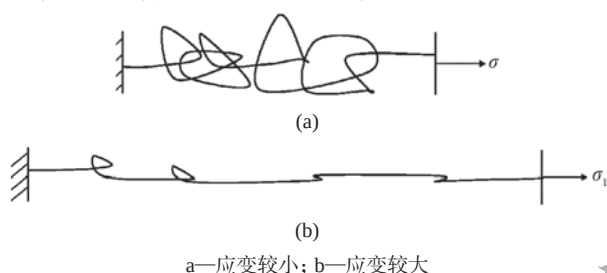


图 1 氨纶受拉力应变较小与应变较大时软段的状态

笔者制备氨纶用到的扩链剂是乙二醇(EDA)和 1,2-丙二醇(1,2-PDA),改变这两种扩链剂的配比会改变氨纶结构中的侧甲基水平,进而影响氨纶性能。因此,采用 Maxwell 元件和变系数粘壶并联组成的模型来模拟氨纶的拉伸过程,研究 5 种不同扩链剂配比(即 EDA 与 1,2-PDA 物质的量之比)的氨纶拉伸拟合曲线,并结合氨纶微观结构分析模

型参数随扩链剂配比的变化规律,从而为氨纶在纺织及安全领域的使用提供借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

聚四氢呋喃二醇 (PTMG): 工业级,四川天华富邦化工有限责任公司;

4,4'-二苯基甲烷二异氰酸酯 (MDI): 工业级,烟台万华化学有限公司;

EDA 与 1,2-PDA: 工业级,日本东曹株式会社;

N,N-二甲基乙酰胺 (DMAc): 工业级,浙江江山化工股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

反应罐及原液储罐: 浙江开普特氨纶有限公司;

导丝卷筒及卷绕机: 浙江开普特氨纶有限公司;

电子式万能试验机: CMT6101 型,美特斯工业系统有限公司;

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析仪: Vertex-70 型,德国 Bruker 公司。

1.3 氨纶的制备

首先,将 MDI 与 PTMG 按物质的量之比 1.75:1 混合,制备预聚体并加入 DMAc 溶解,得到预聚体溶液,然后将 EDA 和 1,2-PDA 分别按物质的量之比 3.4:1,4.5:1,6.3:1,10:1 和 21:1 配置扩链剂,加入到预聚体溶液中制备纺丝原液,最后通过溶液干法得到一系列不同扩链剂配比的氨纶。制备过程涉及的反应如图 2、图 3 所示。

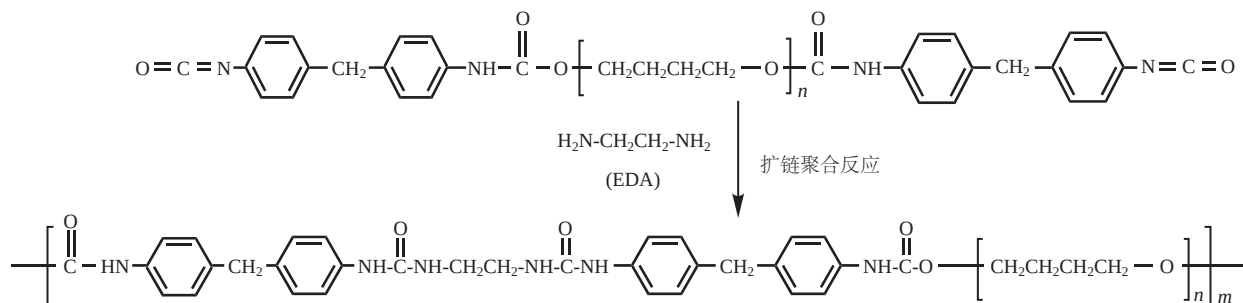


图 2 EDA 扩链聚合反应式

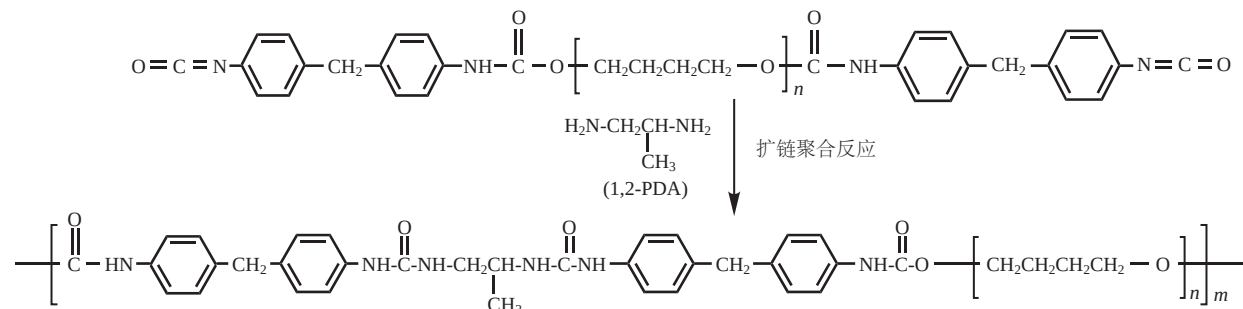


图 3 PDA 扩链聚合反应式

1.4 测试方法

(1) 拉伸性能测试。

采用电子式万能试验机对氨纶进行拉伸测试,调整夹具距离 50 mm,拉伸速率 500 mm/min,实验温度为室温,将氨纶拉伸直至断裂,得到拉伸过程中应力应变的关系曲线。

(2) FTIR 测试。

将 5 种氨纶样品均匀排列在玻璃片上,采用 FTIR 衰减全反射法进行测试,波数范围 500 ~ 4000 cm^{-1} ,入射角度 45°,扫描次数 32 次,分辨率 0.16 cm^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 氨纶拉伸力学模型的构建

Hooke 弹簧模型如图 4 所示,代表着理想弹性体,其本构关系符合胡克定律,应力与应变之间的本构方程为:

$$\sigma_{\text{弹}} = E \varepsilon_{\text{弹}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\text{弹}}$ ——弹簧的应力;

$\varepsilon_{\text{弹}}$ ——弹簧的应变;

E ——弹簧的拉伸弹性模量。

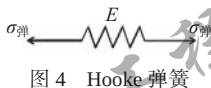


图4 Hooke 弹簧

Newton 粘壶模型如图 5 所示,代表着理想粘性体,其本构关系符合牛顿定律,应力与应变之间的本构方程为^[8]:

$$\sigma_{\text{粘}} = \eta (d\varepsilon_{\text{粘}} / dt) \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{粘}}$ ——粘壶的应力;

$\varepsilon_{\text{粘}}$ ——粘壶的应变;

$d\varepsilon_{\text{粘}} / dt$ ——应变的变化率;

η ——粘壶的粘性系数。

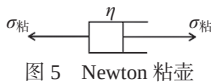


图5 Newton 粘壶

由于硬段在氨纶大分子中起物理交联点的作用,考虑到拉伸过程中随着应变增大,软段被拉开,硬段对软段的约束可能会增强,因此提出一个如图 6 所示的力学模型,该模型由 Maxwell 元件和粘滞系数随应变增大的粘壶并联组成。

设图 6 中左侧 Maxwell 元件的弹簧、粘壶应变分别为 ε_1 , ε_1' ,弹性模量与粘滞系数分别为 E_1 和 η_1 ,右侧非线性粘壶的初始粘滞系数也为 η_1 ,其粘滞系数 $\eta(\varepsilon)$ 随应变的增大而增大,设两者关系满足:

$$\eta(\varepsilon) = \eta_1 + k\varepsilon^n \quad (3)$$

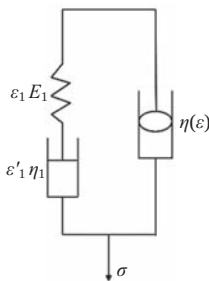


图6 Maxwell 与变系数粘壶的并联模型

式 (3) 中 k , n 为常数, ε 为模型的总应变。Maxwell 元件中弹簧、粘壶的应力相等,即:

$$E_1 \varepsilon_1 = \eta_1 (d\varepsilon_1' / dt) \quad (4)$$

总应力 σ 与总应变满足如下关系:

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1 + \eta (d\varepsilon / dt) \quad (5)$$

其中,总应变 ε 可表示为:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_1' \quad (6)$$

氨纶的拉伸速率恒定,因此应变速率满足下

式:

$$S = d\varepsilon / dt = v / 60l \quad (7)$$

式中: S ——应变速率, s^{-1} ;

v ——拉伸速率, mm / min ;

l ——氨纶的原长, mm 。

氨纶原长 50 mm,拉伸速率 500 mm / min ,应变速率 0.166 67 s^{-1} 。

对式 (6) 两边求导,再将式 (3)、式 (4)、式 (5)、式 (7) 代入,得:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} + \frac{\sigma}{\tau_1 S} = \frac{k\varepsilon^n}{\tau_1} + 4kS\varepsilon^{n-1} + \frac{\eta_1}{\tau_1} + E_1 \quad (8)$$

式 (8) 中 τ_1 为 Maxwell 模型的松弛时间,满足:

$$\tau_1 = \eta_1 / E_1 \quad (9)$$

对式 (8) 求解,可得应力应变的关系为:

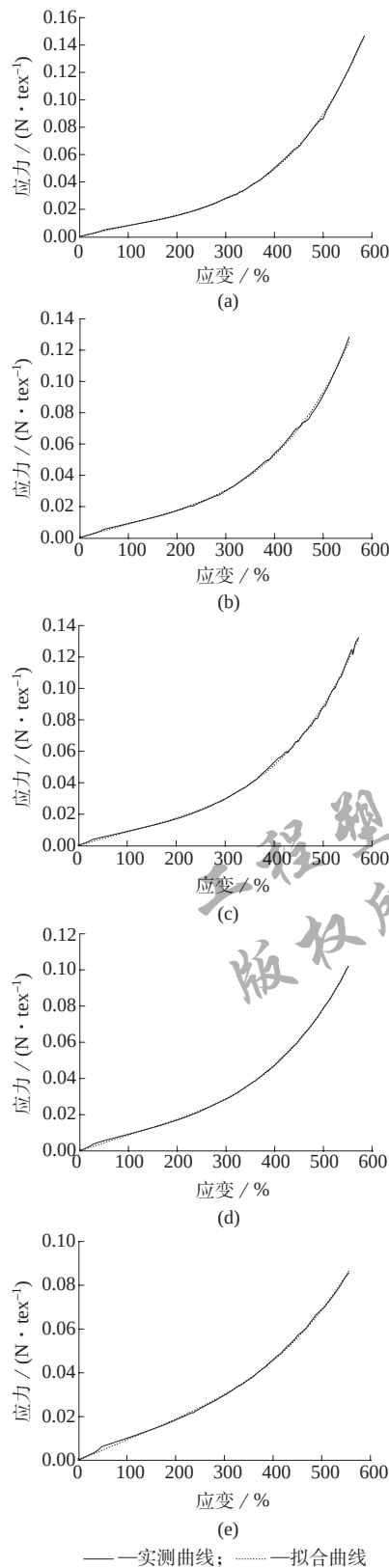
$$\sigma = -2\eta_1 S e^{-\frac{\varepsilon}{\tau_1}} + kS\varepsilon^n + 2\eta_1 S \quad (10)$$

2.2 不同扩链剂配比的氨纶拉伸曲线的拟合

式 (10) 中,当 $n=4$ 时,该模型对氨纶拉伸曲线的拟合度较高,可达到 0.999 以上,则式 (10) 可写为:

$$\sigma = -2\eta_1 S e^{-\frac{\varepsilon}{\tau_1}} + kS\varepsilon^4 + 2\eta_1 S \quad (11)$$

图 7 为氨纶的拉伸实测曲线及拟合曲线。由图 7 可见,氨纶的实测拉伸曲线与拟合曲线的重合度较高,拟合效果较好,具体拟合参数列于表 1 中。由表 1 可知,随着扩链剂配比增大,松弛时间与初始粘滞系数都增大。粘滞系数可表示粘性流动单元的变形,代表氨纶大分子中链段间的摩擦作用,粘滞系数随扩链剂配比的增大而增大,说明扩链剂配比增大使氨纶链段排列更加紧密,拉伸过程中链段间的摩



扩链剂配比: a—3.4:1; b—4.5:1; c—6.3:1; d—10:1; e—21:1

图7 氨纶的拉伸实测曲线及拟合曲线

擦阻力更大。松弛时间表示形变固定时应力减小到初值的 $1/e$ 倍所需的时间^[8], 松弛时间越长则表示

粘性越强。由式(9)可计算出不同扩链剂配比的氨纶对应的拉伸模型中的弹性模量, 列于表2中。由表2可知, 弹性模量随扩链剂配比的增大而增大, 说明随着扩链剂配比增大, 氨纶抵抗变形的能力增强。

表1 氨纶的拉伸曲线拟合参数

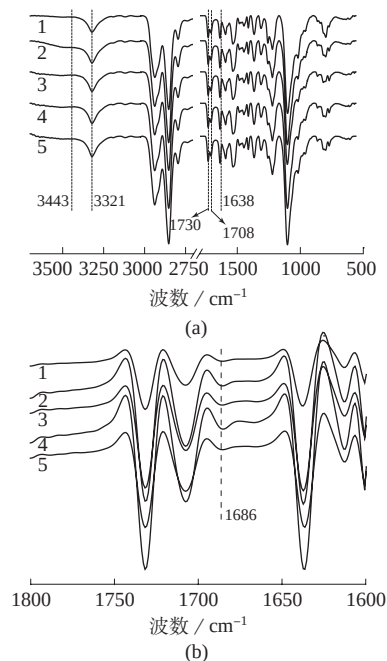
项 目	扩链剂配比				
	3.4:1	4.5:1	6.3:1	10:1	21:1
τ_1/s	28.75	41.87	45.38	47.53	124.53
$\eta_1/(N \cdot s \cdot tex^{-1})$	0.125 28	0.195 64	0.213 57	0.225 32	0.596 58
$k/(\times 10^{-4})$	6.02	5.74	5.31	4.25	2.51
R^2	0.999 73	0.999 16	0.999 43	0.999 68	0.999 30

表2 氨纶的弹性模量

项 目	扩链剂配比				
	3.4:1	4.5:1	6.3:1	10:1	21:1
弹性模量	0.004 36	0.004 67	0.004 71	0.004 74	0.004 79

2.3 模型参数与氨纶氢键化的关系

对5种不同扩链剂配比的氨纶进行FTIR测试, 结果如图8所示。图8中 1638 cm^{-1} 与 1686 cm^{-1} 处的伸缩振动峰分别对应脬基上氢键化 $C=O$ 与脬基上游离 $C=O$, 1708 cm^{-1} 与 1730 cm^{-1} 处分别对应氨酯基上氢键化 $C=O$ 与氨酯基上游离 $C=O$, 3321 cm^{-1} 处对应氨酯基上氢键化的 $N-H$, 3443 cm^{-1} 处对应脬基和氨酯基上游离的 $N-H$ ^[13-15]。



扩链剂配比: 1—3.4:1; 2—4.5:1; 3—6.3:1; 4—10:1; 5—21:1

a—波数 $500\sim 3500\text{ cm}^{-1}$; b—羰基区域 $1600\sim 1800\text{ cm}^{-1}$

图8 氨纶的FTIR谱图

氢键化程度 HD 可由式(12)计算^[16]:

$$HD = [A_b / (A_b + A_f)] \times 100\% \quad (12)$$

式(12)中, A_b 和 A_f 分别表示氢键化羰基和游

离羰基的吸收峰面积,计算结果见表3。

表3 氨纶的氢键化程度计算结果

扩链剂 配比	吸收峰面积				氢键化程 度/%
	氢键化的 脲羰基	游离的 脲羰基	氨基基上氢 键化的羰基	氨基基上游 离的羰基	
3.4 : 1	1.3096	0.0720	1.6070	1.3791	66.78
4.5 : 1	1.4371	0.1053	1.7280	1.4674	67.11
6.3 : 1	1.3841	0.0271	1.7769	1.4736	67.81
10 : 1	1.4032	0	1.7821	1.4908	68.12
21 : 1	1.4394	0	1.8228	1.5184	68.24

由表3可知,氨纶氢键化程度随扩链剂配比的增大而增大,这与2.2节中模型粘滞系数和弹性模量的变化规律一致。当1,2-PDA作为扩链剂时,合成的氨纶结构中含有侧甲基,如图3扩链产物所示,侧甲基会形成空间位阻,影响氨纶硬段间氢键的键合,削弱分子间作用力。扩链剂配比越大,侧甲基的含量越少,对氨纶形成氢键造成的空间位阻也越小,因此氢键化程度随之增大,氨纶链段排列更加紧密,分子间作用力增强,所以抵抗变形的能力也越强,在拉伸模型上就表现为弹性模量和粘滞系数随扩链剂配比的增大而增大。

3 结论

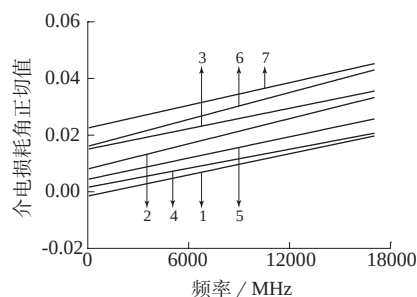
提出一个与现有模型不同的新模型来模拟氨纶的拉伸过程,对5种扩链剂配比氨纶的拉伸曲线进行拟合,并结合氨纶的氢键化程度分析模型参数的变化,得出如下结论。

(1) 由Maxwell元件与粘滞系数随应变增大的粘壶并联组成的模型能较好的拟合氨纶的拉伸过程,拟合度大于0.999。

(2) 模型的弹性模量与粘滞系数随扩链剂配比的增大而增大,与氨纶氢键化程度的变化规律一致。扩链剂配比增大使氨纶抵抗变形的能力增强,模型上体现为弹性模量与粘滞系数的增大。

参考文献

- [1] Aslan S, Kaplan S. Thermomechanical and shape memory performances of thermo-sensitive polyurethane fibers[J]. *Fibers & Polymers*, 2018, 19(2):272-280.
- [2] Alsop J, Sinclair M, Adve S. Spandex: A flexible interface for efficient heterogeneous coherence[C]//2018 ACM / IEEE 45th annual international symposium on computer architecture (ISCA). Washington, DC: IEEE Computer Society, 2018:261-274.
- [3] Meng Qinghao, Hu Jinlian, Zhu Yong, et al. Polycaprolactone-based shape memory segmented polyurethane fiber[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 106(4):2515-2523.
- [4] Choi J, Moon D, Ryu S, et al. N-chloro hydantoin functionalized polyurethane fibers toward protective cloth against chemical warfare agents[J]. *Polymer*, 2018, 27(8):138-146.
- [5] Qian H F, Song X Y. The structure of azo disperse dyes and its distribution on polyurethane fiber blend with polyester, or polyamide fiber[J]. *Dyes & Pigments*, 2007, 74(3):672-676.
- [6] Zhu Yong, Hu Jinlian, Yeung L Y, et al. Development of shape memory polyurethane fiber with complete shape recoverability[J]. *Smart Materials & Structures*, 2006, 15(5):1385-1394.
- [7] 梅淑琴. 基于Z-pinch的氨纶粘弹性研究及寿命预测[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Mei Shuqin. Research on viscoelasticity and life prediction of spandex in Z-pinch[D]. Guangzhou: South China University of technology, 2017.
- [8] 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理[M]. 3版. 上海: 复旦大学出版社, 2006.
- He Manjun, Zhang Hongdong, Chen Weixiao, et al. *Polymer physics*[M]. 3rd ed. Shanghai: Fudan University Press, 2006.
- [9] Sanches A O, Ricco L, Malmonge L, et al. Influence of cellulose nanofibrils on soft and hard segments of polyurethane / cellulose nanocomposites and effect of humidity on their mechanical properties[J]. *Polymer Testing*, 2014, 40:99-105.
- [10] Briody C. The characterisation and numerical modelling of viscoelastic polyurethane foams for use in custom wheelchair seating[J]. *Pathways to Irish Research*, 2012, 31(7):56-64.
- [11] Almetwally A A, Idrees H M F, Hebeish A A. Predicting the tensile properties of cotton / spandex core-spun yarns using artificial neural network and linear regression models[J]. *Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts*, 2014, 105(11):1221-1229.
- [12] 刘鑫森. 基于不同异氰酸酯指数氨纶的力学性能及其模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Liu Xinsen. Study on mechanical properties and model of spandex with different isocyanate index[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [13] 陈竹生, Yang W P, Macosko C W. 傅里叶变换红外光谱衰减全反射谱研究聚氨酯和聚脲[J]. *高分子材料科学与工程*, 1992, 8(6):84-88.
- Chen Zhusheng, Yang W P, Macosko C W. The study of polyurethanes and polyureas by attenuation total reflection of fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1992, 8(6):84-88.
- [14] 艾青松, 许冬梅, 方心灵, 等. 利用红外光谱和核磁共振氢谱分析聚氨酯弹性体的原料及配比[J]. *塑料科技*, 2016, 44(1):39-43.
- Ai Qingsong, Xu Dongmei, Fang Xinling, et al. Analysis on formula raw materials and their proportions of polyurethane elastomer by IR and ¹H-NMR[J]. *Plastics Science and Technology*, 2016, 44(1):39-43.
- [15] 张世杰. 胺扩链聚氨酯的氢键相互作用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.



1—TLCP0; 2—TLCP-30GF; 3—TLCP-60GF; 4—TLCP-10HGB;
5—TLCP-30HGB; 6—TLCP-30BT; 7—TLCP-60BT

图4 介电损耗角正切值数据拟合结果

系介电损耗最大, GF填充体系次之, HGB填充体系最小; 而相同填充体系中, 填料含量越多, 介电损耗越大。

3 结论

(1) 在频率 100 MHz~17 GHz 范围内, TLCP 树脂及其不同含量无机物填充改性 TLCP 材料的介电常数不随频率增大而变化, 介电损耗则随频率增大而上升。

(2) 当 GF 质量分数由 30% 增加到 60% 时, TLCP 材料的介电常数由 3.70 升至 4.09; 当 HGB 质量分数由 10% 增加到 30% 时, TLCP 材料的介电常数由 3.08 降至 2.42; 当 BT 质量分数由 30% 增加到 60% 时, TLCP 材料的介电常数由 4.68 升至 7.05。

(3) 填充无机物会使 TLCP 材料的介电损耗增大, 含量越高, 介电损耗越大。在无机物质量分数为 30% 的情况下, 介电损耗大小程度排序为: BT 改性 TLCP 材料 > GF 改性 TLCP 材料 > HGB 改性 TLCP 材料。

参考文献

- [1] Kubota H, Kosako S, Nakao K, et al. Macromolecular dispersion type liquid crystal display element and method of manufacturing the same:US6355314[P]. 2002-03-12.
- [2] Hirao A, Miyamoto H, Nishizawa H, et al. Recording Medium:US5800950[P]. 1998-09-01.
- [3] 马会茹, 段华军, 唐红. 液晶高分子分子复合材料的新进展[J]. 玻璃钢复合材料, 2001(6):13-15.

Ma Huiru, Duan Huajun, Tang Hong. New progress in molecular composite[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2001(6):13-

15.

- [4] 周广亮, 易庆锋, 蒋智强, 等. 低介电常数液晶聚合物材料的制备与研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(4):77-80.
- Zhou Guangliang, Yi Qingfeng, Jiang Zhiqiang, et al. Preparation and research of low dielectric constant liquid crystal polymer (LCP) materials[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(4):77-80.
- [5] Park S J, Jim F L, Lee C. Preparation and physical properties of hollow glass micarospheres reinforced epoxy matrix resins[J]. Materials Science and Engineering:A, 2005, 402(2):335-340.
- [6] 张翠琴, 周宏, 朱君. 环氧树脂/SiO₂空心球低介电常数材料的制备与性能研究[J]. 绝缘材料, 2011, 44(3):1-9.
- Zhang Cuicui, Zhou Hong, Zhu Jun. Preparation and characterization of epoxy/SiO₂ hollow spheres composites with low dielectric constant[J]. Insulating Materials, 2011, 44(3):1-9.
- [7] Yung K C, Zhu B L, Yue T M, et al. Preparation and properties of hollow glass microsphere-filled epoxy-matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(2):260-264.
- [8] Qi L, Lee B L, Chen S, et al. High-dielectric-constant silver-epoxy composites as embedded dielectrics[J]. Advanced Materials, 2005, 17:1777-1781.
- [9] Kim P, Jones S C, Hotchkiss P J, et al. Phosphonic acid-modified barium titanate polymer nanocomposites with high permittivity and dielectric strength[J]. Advanced Materials, 2007, 19:1 001-1 005.
- [10] 卢鹏荐, 王一龙, 孙志刚等. 高介电常数、低介电损耗的聚合物基复合材料[J]. 化学进展, 2010, 22(8):1 619-1 625.
- Lu Pengjian, Wang Yilong, Sun Zhigang, et al. Polymer-based composites with high dielectric constant and low dielectric loss[J]. Progress in Chemistry, 2010, 22(8):1 619-1 625.
- [11] 王惠民, 梁伟荣. 液晶聚合物薄膜的介电性能[J]. 液晶与显示, 1999, 14(4):238-242.
- Wang Huimin, Liang Weirong. Dielectric properties of liquid crystalline polymer films[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 1999, 14(4):238-242.
- [12] 肖中鹏, 麦堪成, 曹民, 等. 热致液晶聚合物的研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41(3):9-12.
- Xiao Zhongpeng, Mai Kancheng, Cao Min, et al. The research development of thermotropic liquid crystalline polymers[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(3):9-12.
- [13] 李景德, 雷德铭. 电介质材料物理和应用[M]. 广州: 中山大学出版社, 1992.
- Li Jingde, Lei Deming. Physics and applications of dielectric materials[M]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1992.

影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(9):23-26.

You Gexin, Mei Shuqin, Zeng Tao, et al. Influence of wind amount on structures and properties of dry spinning spandex[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9):23-26.

(上接第 104 页)

Zhang Shijie. Study on the intermolecular H-bond interactions in segmented polyurethane-ureas[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University, 2006.

- [16] 游革新, 梅淑琴, 曾韬, 等. 甬道风量对干纺氨纶结构与性能的