

# 复合弹性非织造材料拉伸力学分析

刘吉祥

天津工业大学纺织学院纺织工程系, 天津 (300160)

E-mail: [humor861011@126.com](mailto:humor861011@126.com)

**摘要:** 随着复合弹性非织造材料的应用范围越来越广泛, 其拉伸力学性能方面的研究也越来越重要。本文在基本线性粘弹性力学模型的基础上建立起复合弹性材料的结构模型, 并对模型分析得出: 结构特殊性赋予了材料特有的力学表现, 这种弹性层压材料在低变形区经历了一个不同于普通纺织材料拉伸变形过程的更复杂的应力应变过程, 接着本文对这一过程建立起粘弹性力学模型, 通过函数的拟合与分析得出: 形变参数的拟合值可以反映弹性层压材料在拉伸初始阶段的弹性伸长性能; 粘度参数的拟合值可以反映弹性层压材料抵抗变形的能力。

**关键字:** 弹性; 复合; 非织造; 力学模型

**中图分类号:** TS176.5

## 1 引言

从世界范围看, 非织造布技术发展的一个十分明显的趋势就是向混杂化、复合化方向发展。将各种工艺的复合能弥补单一工艺的不足, 因此人们创造出了许多新型的、丰富多彩的非织造布产品。其中, 复合非织造材料是应用需求广泛, 但生产工艺要求高的一类。

近些年来, 双组分纺粘非织造布因其具有较高的强力、良好的伸长性能和柔软的手感正日益受到人们的关注。采用双组份纺粘工艺, 不同原料的组合以及组合形式的选择互换, 都可以改变双组分纺粘非织造布的品种, 使产品丰富多彩, 各具特色, 性能迥异, 极大地拓展了纺粘非织造布的用途和市场。

复合材料外层采用非织造布层, 还能够在制造最终成品(如纸尿裤)的过程中加入到一次成型的工艺中。而且, 这种复合材料具有特殊的结构, 结构特殊性赋予了材料特有的力学表现, 因此, 对新型材料的特殊结构进行结构模型和力学模型的建立和分析, 可以更好地理解这种特殊结构材料的机械性能。

## 2 试验

### 2.1 试样制备

#### 2.1.1 试验原材料

- (1) 面密度为  $15\sim 50\text{ g/m}^2$  的 PE/PP 双组分纺粘非织造布。
- (2) 厚度为  $0.015\text{mm}$  的 TPU 弹性薄膜。

#### 2.1.2 层压材料制备仪器

本试验采用 QLB 型平板硫化机对各层原材料进行层压复合。QLB 型平板硫化机使用电加热升温对上两个试验平板加热, 加热程度可以根据温度指示得知。设置试验所需压力范围, 当温度加热到试验使用温度后, 合上试验平板对各层材料进行层压复合, 压力指针指示当前压力值, 并由时间指示得出热压时间。

#### 2.1.3 弹性复合材料的制备方法

按一定比例拉伸 TPU 弹性薄膜，平行铺上条状聚酰胺热熔胶，再覆盖上一层 PE/PP 纺粘非织造布；将这些材料用一对薄铝板送入 QLB 型平板硫化机进行热压，使得热熔胶熔融把弹性薄膜和 PE/PP 纺粘非织造布间隔层压起来；把复合后的材料取出并自然释放，弹性薄膜层由于良好的弹性回复性能收缩回复，而非粘合区域的非织造布隆起，从而形成有褶皱的弹性层压材料，如图 1 所示，其中 1 为 TPU 弹性薄膜，2 为 PE/PP 纺粘非织造布，3 为粘合点，箭头所指方向为材料的弹性方向。

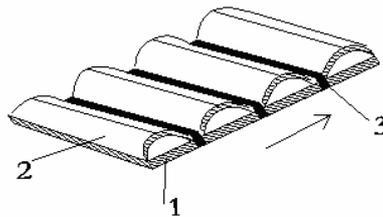


图 1 弹性层压材料外观示意图

## 2.2 粘弹性力学模型的理论基础与分析

### 2.2.1 基本线性粘弹性力学模型及分析

线性粘弹性力学模型是指用虎克弹簧和服从牛顿粘滞定律的粘壶组成的力学模型，它能直观、形象地描述高聚物的粘弹性现象，并有利于深入研究和理解粘弹性的本质。可以用一个弹性元件(弹簧)来模拟以弹性固体，如图 4-2 所示。设弹簧的弹性模量为  $E$ ，则应力与应变的关系式可表示为  $\sigma = E\varepsilon$  [1]。



图 2 虎克弹簧

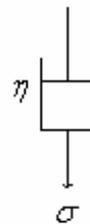


图 3 牛顿粘壶

类似地，可以用一个阻尼元件(牛顿粘壶)来模拟粘性流体，如图 2 与 3 所示，设粘度系数为  $\eta$ ，由于粘性流体的应力与应变率相关，因此对于线粘性流体，有  $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$ 。对于兼有弹性和粘性的粘弹性材料，可以用弹性元件和阻尼元件这两种基本元件的组合来模拟。

### 2.2.2 弹性层压材料的拉伸曲线分析及力学模型建立

此弹性层压材料沿弹性方向典型的拉伸断裂曲线如图 4 所示：

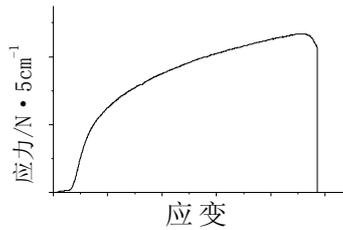


图4 弹性层压材料典型的拉伸断裂曲线

PE/PP 纺粘非织造布和 TPU 弹性薄膜层压而成的弹性层压材料的典型拉伸断裂曲线如图 4 所示,从图中可以看到,弹性层压材料在低变形区经历了一个不同于普通纺织材料拉伸变形过程的更复杂的应力应变过程。把这一复杂变形过程放大,如图 5,弹性层压材料在刚开始拉伸时,模量很低,拉伸到某一转折点 $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ 时,模量陡然升高。通过对实际拉伸过程的观察,这是由从弹性薄膜单独拉伸变形阶段(简称前段)到它与非织造布共同变形受力阶段(简称后段)的转变造成的。非织造布在这一转折点后开始受拉伸产生变形,过高的拉伸变形会严重破坏非织造布的结构,也超出了此弹性层压材料的使用限度。因此,根据图 4-13 建立这种弹性层压材料在较低变形区的拉伸力学模型,对分析这种弹性层压材料的力学性能特点和使用性能都具有重要意义<sup>[2]</sup>。

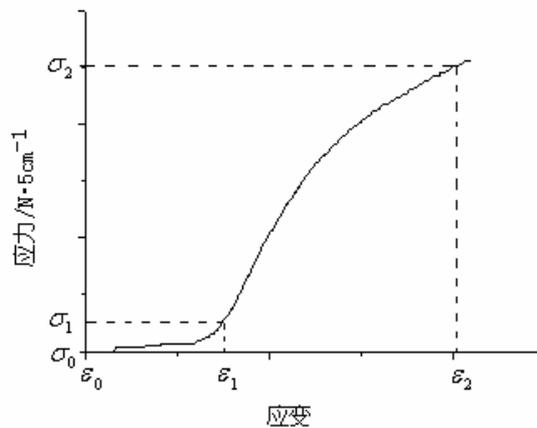


图5 弹性层压材料在低变形区的应力应变曲线

(1) 在前段拉伸阶段,即  $\varepsilon \in (\varepsilon_0, \varepsilon_1)$ , 主要是弹性薄膜受到拉伸力作用处于弹性伸长的过程,而非织造布处于褶皱伸平的过程,受到的拉伸应力可忽略不计。TPU 特有的软段相和硬段相二相形态结构赋予了弹性薄膜在低变形区域良好的弹性伸长和弹性回复性能,因此可以用一个弹性模量为  $E_1$  的虎克弹簧来模拟其前段的拉伸变形过程,如图 6(a)。在前段,弹性薄膜的应力应变关系即为层压材料整体的应力应变关系,因此,总应力( $\sigma$ )和总应变( $\varepsilon$ )的关系为<sup>[3]</sup>:

$$\sigma = E_1 \varepsilon \tag{1}$$

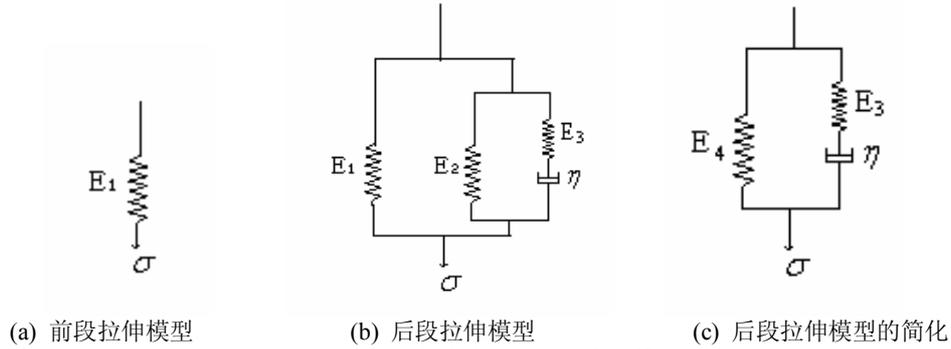


图6 层压材料低应变区的拉伸力学模型

(2)通过简化并联的虎克弹簧,即用一个弹性模量为  $E_4$  的虎克弹簧来代替弹性模量为  $E_1$  的虎克弹簧和弹性模量为  $E_2$  的虎克弹簧,  $E_1 + E_2 = E_4$ , 使后段拉伸模型得到简化, 如图 4-14(c), 模型参数的减少也有利于后面对于函数拟合的准确性。这里需要注意的是, 由于虎克弹簧  $E_1$  在  $t_1$  时, 已有一个伸长率  $\varepsilon_1$ 。所以由波尔兹曼叠加原理得, 虎克弹簧  $E_1$  和虎克  $E_2$  并联后, 即  $\varepsilon > \varepsilon_1$  的阶段, 虎克弹簧  $E_4$  的应力为  $E_1\varepsilon_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon_1)$ , 也即  $\sigma_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon_1)$ , 因此, 虎克弹簧  $E_4$  是一个有初始应力  $\sigma_1$  的弹簧。

在  $\varepsilon \in (\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  的阶段发生的新应变为  $\varepsilon_h = \varepsilon - \varepsilon_1$ , 代入式 (4-13) 可得新产生的应力为:

$$\sigma_h = E_4(\varepsilon - \varepsilon_1) + k\eta \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}} \right) \quad (2)$$

总应力为前段产生的应力与后段新产生的应力的加和, 即:

$$\sigma = \sigma_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon_1) + k\eta \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}} \right) \quad (3)$$

总结(1)和(2)的分析结果, 用分段函数表征弹性层压材料在较低变形条件下的应力-应变关系为:

$$\sigma = \begin{cases} E_1\varepsilon & \varepsilon \in (\varepsilon_0, \varepsilon_1) \\ \sigma_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon_1) + k\eta \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}} \right) & \varepsilon \in (\varepsilon_1, \varepsilon_2) \end{cases} \quad (4)$$

观察图 5 中层压材料拉伸应力-应变曲线, 可以看到, 从前段到后段的变化有一个渐变的过程,  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  并不能确定选择在哪一点, 但随意地选择前段与后段的分界点  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  必然会对拟合的结果造成影响。因此, 在拟合后段的方程时, 需要选择一个临近的点  $(\varepsilon'_1, \sigma'_1)$  来代替后段起始点  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ , 而且选择的点  $(\varepsilon'_1, \sigma'_1)$  要明显属于后段, 即  $\varepsilon'_1 \geq \varepsilon_1, \sigma'_1 \geq \sigma_1$ 。下面证明这种做法的合理性。

由  $(\varepsilon'_1, \sigma'_1)$  满足式(3)得:

$$\sigma'_1 = \sigma_1 + E_4(\varepsilon'_1 - \varepsilon_1) + k\eta \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon'_1 - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}} \right) \quad (5)$$

根据式(5)对式(3)进行分析:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon_1) + k\eta \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}} \right) \\ &= \sigma'_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon'_1) + \frac{k\eta}{e^{-\frac{E_3(\varepsilon'_1 - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}}} \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon - \varepsilon_1 - \varepsilon'_1 + \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}} \right) \end{aligned}$$

由于 $(\varepsilon'_1, \sigma'_1)$ 临近 $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ , 所以 $e^{-\frac{E_3(\varepsilon'_1 - \varepsilon_1)}{\eta \cdot k}}$ 约等于1, 则上式可简化为

$$\sigma \approx \sigma'_1 + E_4(\varepsilon - \varepsilon'_1) + k\eta \left( 1 - e^{-\frac{E_3(\varepsilon - \varepsilon'_1)}{\eta \cdot k}} \right) \quad (6)$$

比较式(6)和式(3), 其形式是一致的, 这也就证明了在对拉伸曲线的后段进行拟合时, 可以在拉伸曲线后段选择一个临近的点 $(\varepsilon'_1, \sigma'_1)$ 来代替后段起始点 $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ 进行拟合, 而且,  $(\varepsilon'_1, \sigma'_1)$ 离 $(\varepsilon_1, \sigma_1)$ 越近, 拟合结果越精确。

### 2.3 最小二乘法原理

设已知 $x_1, \dots, x_n$ 及 $y_i = f(x_i) (i = 1, \dots, n)$ , 在一类曲线 $\Phi$ 中求一曲线 $\varphi(x)$ , 使之与 $f(x)$ 在节点 $x_1, \dots, x_n$ 的误差 $e_i = |y_i - \varphi(x_i)| (i = 1, \dots, n)$ 总体上最小。

这里, 一类曲线 $\Phi$ 可指全体直线、全体抛物线、全体不超过 $n$ 次的多项式、全体指数函数 $ae^{bx}$ 、全体正弦函数 $a\sin(bx+c)$ 等。又, 上述 $e_i (i = 1, \dots, n)$ “总体上最小”一般指向量 $\mathbf{e} = (e_1, \dots, e_n)$ 的范数 $\|\mathbf{e}\|$ 最小。在拟合算法中一般取2-范数作为总体误差的定义, 称为最小二乘法<sup>[4]</sup>。

$$\|\mathbf{e}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2} \quad (7)$$

最小二乘拟合就是在一类曲线 $\Phi$ 中求一曲线 $\varphi(x)$ 使之与被拟合曲线 $f(x)$ 在节点 $x_1, \dots, x_n$ 的误差平方和 $\sum_{i=1}^n [f(x_i) - \varphi(x_i)]^2$ 最小<sup>[5]</sup>。

#### 2.3.1 较低变形条件下拉伸曲线的拟合

根据本试验的测试方法, 定速拉伸的速度为200mm/min, 夹持隔距(s)为100mm, 则由 $\varepsilon = kt$ ,  $k$ 为常数得:

$$k = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\frac{\Delta s}{s}}{t} = \frac{\Delta s}{t/s} = \frac{200}{60/100} \approx 0.0333 \quad (8)$$

式中， $\Delta s$  为伸长长度，单位为 mm。

任意选择制得的某个试样代表层压材料的弹性方向垂直于 PE/PP 双组分纺粘非织造布的长丝方向、得到的应力-应变曲线图，如图 7 所示。

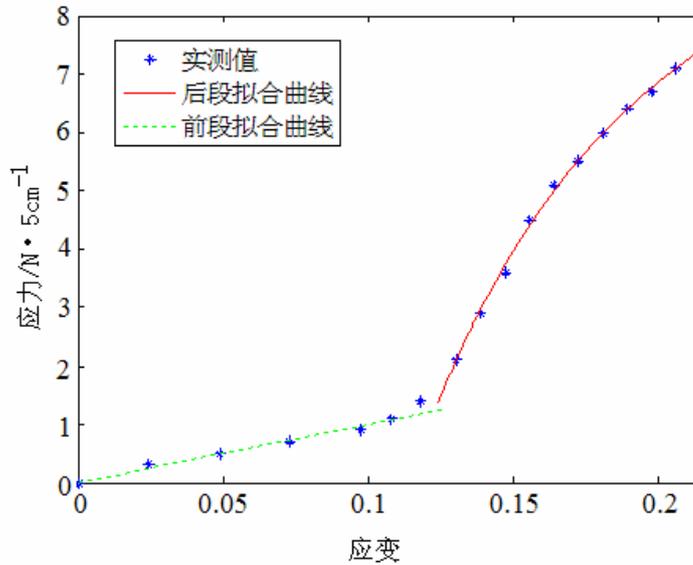


图 7 试样的拟合图形

式(4)中各参数的拟合值见表 1。

表 1 模型参数的拟合值

试样	前段	后段			
	$E_1 / \text{N} \cdot 5\text{cm}^{-1}$	$E_2 / \text{N} \cdot 5\text{cm}^{-1}$	$E_3 / \text{N} \cdot 5\text{cm}^{-1}$	$E_4 / \text{N} \cdot 5\text{cm}^{-1}$	$\eta / \text{N} \cdot \text{s} \cdot 5\text{cm}^{-1}$
	9.5829	7.8724	9.2832	16.2931	143.2183

### 2.3.2 拟合结果分析

把拟合曲线与实际拉伸曲线进行对比分析，延长部分的实际意义为在没有同非织造布层压时，同等条件下弹性薄膜的应力-应变关系。当应力从  $\sigma_a$  变化到  $\sigma_b$  时，从层压材料的拟合曲线上(红色实线)，得出层压材料的应变为  $\varepsilon_b, \varepsilon_a$ ；而从绿色虚线延长线上可以得到，如果没有非织造布的限制作用，即如果没有实施层压工艺时，弹性薄膜本身的应变为  $\varepsilon_c, \varepsilon_a$ 。从图中明显可以看出： $\varepsilon_c, \varepsilon_a$  甚大于  $\varepsilon_b, \varepsilon_a$ 。从上面的拟合结果和分析中可以推导出以下结论：

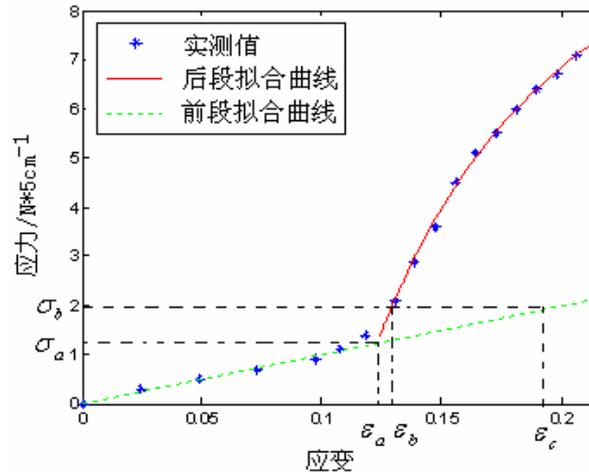


图8 试样的拟合曲线与实际拉伸曲线的对比

(1) 弹性层压材料的弹性伸长性能主要体现在前段，层压材料的弹性性能由弹性薄膜的弹性提供，但层压材料的结构限制弹性薄膜的弹性只有在较低变形的条件下才能得以发挥。

(2) 弹性模量  $E_1$  反映了弹性层压材料在前段的弹性伸长性能，当弹性层压材料前段的伸长一定时， $E_1$  值越小，反映弹性伸长性能越好。

(3) 弹性层压材料的拉伸伸长明显受到非织造布层的制约，也可以说是非织造布层对弹性层压材料起到保护作用。

(4) 粘滞系数  $\eta$  可以用来表示纺织材料中粘性流动单元的变形， $\eta$  值小表示流动变形能力大<sup>[6]</sup>。

### 3 结论

本课题设计了弹性层压材料在松弛状态下的拱形结构模型，并且对基本的线性粘弹性力学模型进行了介绍和分析，并着重对线性三元件模型进行了分析，得出：等速拉伸线性三元件模型；使用 Matlab 语言程序和最小二乘拟合，对弹性层压材料试验样品的实际拉伸曲线进行很好的拟合，并得到力学模型参数的拟合值。其中， $E_1$  反映了弹性层压材料在前段的弹性伸长性能，当弹性层压材料前段的伸长一定时， $E_1$  值越小，反映弹性伸长性能越好；参数  $\eta$  拟合值可以用来反映弹性层压材料抵抗变形的能力， $\eta$  越大，弹性层压材料抵抗变形的能力越强。弹性层压材料的拉伸伸长明显受到非织造布层的制约，也可以说是非织造布层对弹性层压材料起到保护作用。在弹性层压材料的拉伸断裂过程中，非织造布层首先断裂。非织造布层对弹性层压材料的断裂强力和断裂伸长率起决定作用。

## 参考文献

- [1] 梁伯润. 高分子物理学. 第一版, 北京:中国纺织出版社, 2000:36~38
- [2] 傅明源, 孙酣经. 聚氨酯弹性体及其应用. 第二版, 北京:化学工业出版社, 1999:28~29, 142
- [3] 于伟东, 储才元. 纺织物理. 第一版, 上海:东华大学出版社, 2002:71~117
- [4] 郁崇文, 汪军, 王新厚. 工程参数的最优化设计. 第一版, 上海:东华大学出版社, 2003:73~78
- [5] 姜健飞, 胡良剑, 唐剑. 数值分析及其 MATLAB 实验. 第一版, 北京:科学出版社, 2004:91~103
- [6] 张洪弟, 谢莉青, 官爱华. 聚丙烯非织造土工布蠕变性能初探. 北京纺织, 2001, 22(4):21~23

## Mechanical Property Analysis of a Combination Nonwoven Material and Elastic Film

Liu Jixiang

Textile College, Tianjin Polytechnic University, Tianjin (300160)

### Abstract

With the development of composite elastic nonwoven material are used more and more widely, the studies of its tensile mechanical properties have become increasingly important. In this paper, based on the basic linear viscoelastic model, I build the composite elastic material structure model, and by model analysis I obtained: the structural specialty gives material a special mechanical performance. This type of elastic combination material experiences a more complicated stress-strain course in low distortion area which is different from the tensile strain course of common textile material. Then, this dissertation establishes the viscoelastic mechanics model for this course. Through function fitting and analysis a conclusion can be gotten, namely, the elastic performance of elastic combination material is supplied by elastic film, but the structure of combination material limits the elasticity of the elastic film and make it work only in low distortion condition; nonwoven layer has the crucial effect on the breaking strength and the ultimate elongation of the elastic combination material.

**Keywords:** elasticity; composite; non-woven; mechanical model