

文章编号: 1671-0444(2018)01-0033-05

# 低密度山羊绒纤维集合体的压缩性能

景 慧<sup>a, b</sup>, 于伟东<sup>a, b</sup>

(东华大学 a. 纺织面料技术教育部重点实验室; b. 纺织学院, 上海 201620)

**摘要:**采用变密度纤维集合体力学和传导性原位综合测量系统,测试低密度山羊绒纤维集合体在压缩及回复过程中的受力情况,通过计算特征值对集合体的压缩性能进行表征。结果表明:低密度的山羊绒纤维集合体在压缩的初始阶段,空隙率为主导因素,力-位移曲线和模量曲线均比较平缓;压缩结束阶段,集合体内纤维间的挤压占主导因素,挤压变形为主,特征曲线斜率表现为急剧增大;回复曲线表现出明显的滞后性,表明一次压缩回复过程中存在能量损耗。另外分别对压缩、回复曲线积分可计算一次循环过程中的压缩功、回复功以及能量损耗。

**关键词:**低密度;山羊绒;纤维集合体;压缩;回弹

**中图分类号:**TS 102.3      **文献标志码:**A

## Compressibility of Cashmere Fibrous Assembly with Low Packing Density

JING Hui<sup>a, b</sup>, YU Weidong<sup>a, b</sup>

(a. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education;

b. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** A FACBES (fiber assembly complex behavior evaluation system) was used to investigate compressional behavior of cashmere fibrous assembly with low packing density, and some structural values were calculated to characterize compressional properties. Results show that porosity may be the essential factor during the initial stage of compressional test, and the slopes of force-replacement and modulus curves are quite smooth. Extrusion between fibers which leads to extrusion deformation is more significant when the compressional test comes to the final stage, and the slopes of curves increase sharply. Pronounced hysteresis during recovery stages demonstrates the existence of energy loss. In addition, compressional energy, recovery energy and energy loss are calculated during one successful circle.

**Key words:** low packing density; cashmere; fibrous assembly; compression; recovery

山羊绒是山羊的绒毛,可通过抓、梳获得,无髓质,其强伸性和弹性都优于同细度的绵羊毛,鳞片的外形与完整性特征明显,且大而稀,紧贴于毛干,手感柔软滑糯。山羊绒纤维作为保暖材料,则要求其具有优良的压缩回复性能,这样它的密度较稳定,能

始终保持相当数量的空隙,保暖性优良<sup>[1]</sup>。由于测量方面的困难,至今对单根山羊绒纤维沿径向的压缩性能研究不多。其集合体的压缩主要表现在单向受压,例如纺纱过程中加压罗拉间的受压、机织过程中经纬纱交织点处的受压等。散纤维集合体的压缩

收稿日期:2017-07-04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0802802)

作者简介:景 慧(1989—),女,江苏南通人,博士研究生,研究方向为纤维集合体的结构及力学表征,E-mail:1125132@mail.dhu.edu.cn  
于伟东(联系人),男,教授,E-mail:wdu@dhu.edu.cn

及回复性能是 60 多年来学者们一直探讨的问题,已经建立了以 Wyk 为首的经典理论<sup>[2]</sup>及数学和计算机模拟<sup>[3-4]</sup>等方法,实现了对纤维集合体压缩性能定性或定量的研究。目前,大多研究集中于高压强(即高密度)作用下纤维集合体的压缩性能。低密度是指纤维集合体密度为  $0.001 \sim 0.100 \text{ g/cm}^3$ ,即比纤维密度低 1~3 个数量级。在此填充密度或空隙率下,纤维导热性质、堆砌稳定性与弹性等将发生显著的变化。

本文利用变密度纤维集合体力学和传导性原位综合测量系统,测试低密度山羊绒纤维集合体在压缩及回复过程中的受力情况,对集合体的压缩性能包括抗压性能和压缩回复性能进行了系统的研究和表征,以期对山羊绒纤维在纺织加工和新型面料的开发提供理论依据和基本性能参数。

## 1 试 验

### 1.1 试验材料

试验对象为松散的山羊绒纤维团,单纤维细度为  $15 \mu\text{m}$  左右,长度为 40 mm 左右。

### 1.2 试验仪器及测量原理

采用东华大学纺织材料与技术实验室自行研制的变密度纤维集合体力学和传导性原位综合测量系统<sup>[5-6]</sup>对山羊绒纤维集合体的压缩性能进行测试。

压缩试验的测量原理图如图 1 所示。计算机控制驱动电路,激磁式步进电动机驱动推筒测量腔上下移动,位移精度为 0.01 mm,最大动程为 90 mm,

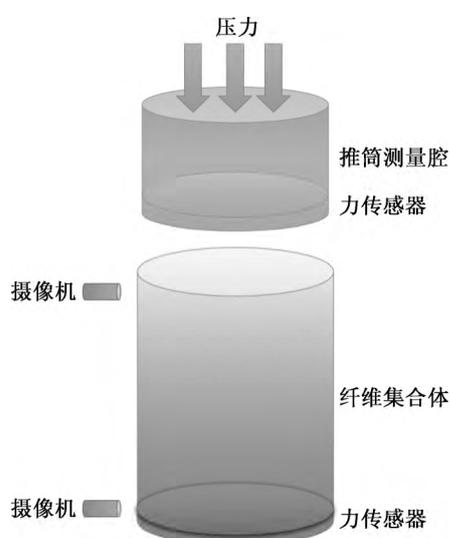


图 1 压缩试验测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of compressional apparatus

分频参数为 3~250,对应的移动速度为  $0.0256 \sim 2.1300 \text{ mm/s}$ 。对圆柱形容器中集合体试样的上端施加压力,下端受力不动,通过推筒和圆柱形容器下方的力学传感器,分别测出集合体施力端和受力端的力值,测量精度为  $1/10^4 \sim 2/10^4 \text{ cN}$ 。活塞两端和试样筒底端均有气孔,以保证试验过程中气流通畅,排除空气阻力的影响。

### 1.3 试样准备和测试方法

将山羊绒纤维团静置于温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  和相对湿度为  $(65 \pm 5)\%$  (3 级标准大气环境)的恒温恒湿室内进行预调湿处理。采用精度为 0.5 mg 的 JN-A 型精密扭力天平,分别称取 0.3 g (1<sup>#</sup>) 和 2 g (2<sup>#</sup>) 的纤维团。试验前,尽可能将山羊绒纤维团反复轻柔扯松,平稳地置于直径为 36 mm 和高为 85 mm 的圆柱形玻璃容器中,以保证纤维初始排列的随机性良好。

以一定速度下降的推筒测量腔压缩纤维集合体,待施力端压力增加到一定数值后再以原速度回复至原高度。由于内部纤维自身的回弹性,集合体可回弹至一定的高度。分别测试压缩和回弹阶段纤维团上下两端(施力端和受力端)所受的力,完成山羊绒纤维集合体压缩及回复特征曲线的提取以及特征值的计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 施力端与受力端特征曲线分析

1<sup>#</sup> 山羊绒纤维集合体试样的施力端(主力)、受力端(受力)与压缩位移/堆砌密度曲线如图 2 所示。

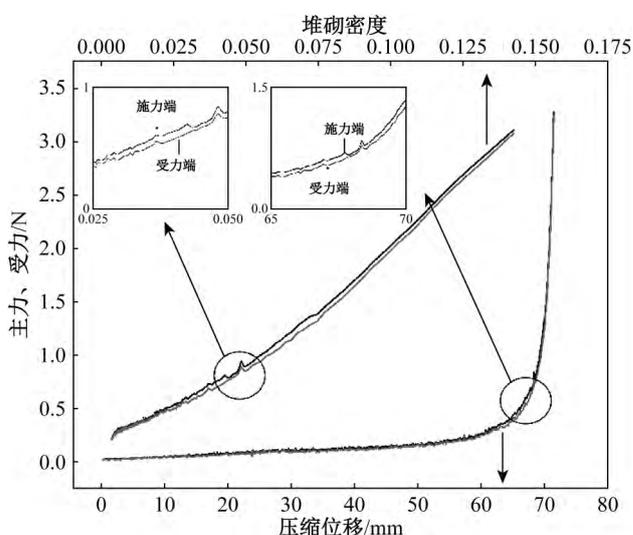


图 2 山羊绒纤维集合体主力、受力与压缩位移/堆砌密度曲线

Fig. 2 Active and passive force-displacement/packing density curves of cashmere fibrous assembly

由图 2 可知:压缩位移在 0~60 mm 之间时,随着压缩位移的增大,主力、受力缓慢上升;压缩位移在 60~70 mm 之间时,主力、受力随着压缩位移的增大而明显增大;压缩位移在 70 mm 之后,主力、受力急剧增大。总体来说,主力和受力变化趋势一致,且相差不大,主力略大于受力。山羊绒纤维集合体密度随压力的增大而增大,呈近似线性关系。

将图 2 中的主力、受力曲线进行差值运算,结果如图 3 所示。由图 3 可知:在压缩的初始阶段,主力、受力相当,差值在零附近波动;随着压缩的进行,主力、受力差值逐渐增大,最后又趋于一致。这一结果与刘茜<sup>[7]</sup>对羊毛、腈纶等纤维集合体的压缩性能研究一致。纤维在压缩过程中会发生移动和重排,压力从施力端通过纤维自身和纤维之间的接触点不断向下传递,传递依赖于时间,故受力端较施力端的力值要小,试验结果重现性较强。

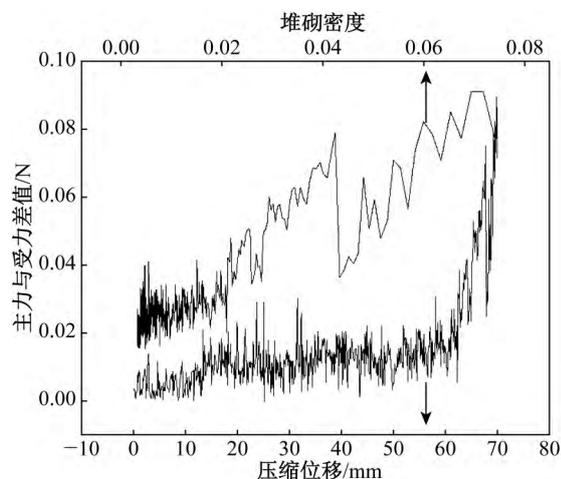


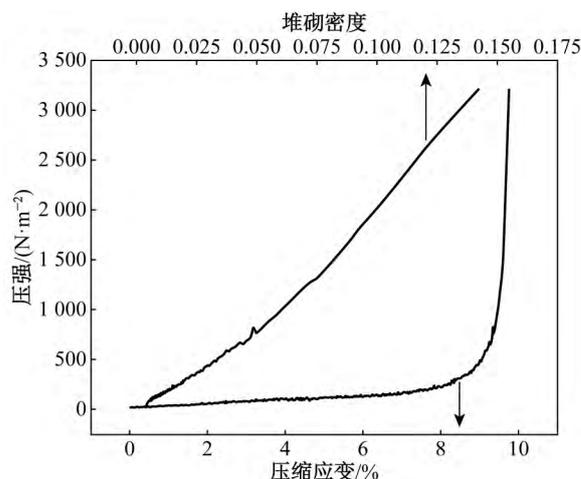
图 3 羊绒纤维集合体主力与受力差值与压缩位移/堆砌密度曲线

Fig. 3 The difference of active and passive force-displacement/packing density curves of cashmere fibrous assembly

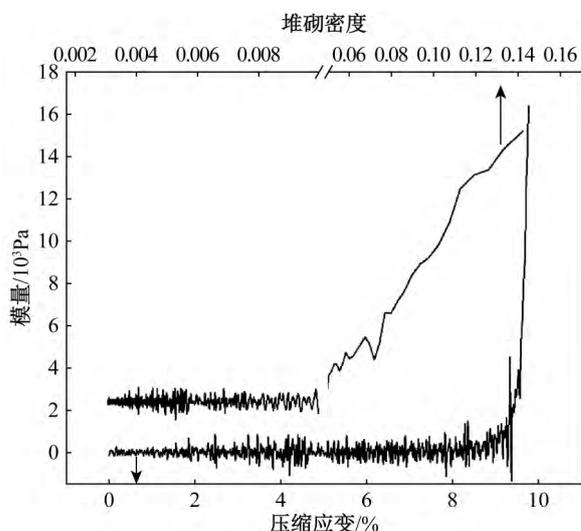
## 2.2 模量分析

单向压缩过程中 1<sup>#</sup> 山羊绒纤维集合体试样的压强与压缩应变以及压强与堆砌密度的关系曲线如图 4(a)所示。对压强—应变曲线进行微分,可得模量曲线,如图 4(b)所示。压缩初始阶段,由于纤维集合体的密度较低,纤维间的空隙占有较大的比例,使得纤维有较大的空间移动和重排,压强和模量变化不大;当压缩进行到一定阶段时,纤维集合体的堆砌密度不断增大,空隙所占比例越来越小,留给纤维自我移动和重排的空间也相应越来越少,取而代之的是纤维与纤维之间新的接触点的形成以及相互挤压,故此时集合体的压强和模量急剧增大。压强—

堆砌密度曲线与力—堆砌密度曲线相似,均呈近似线性的关系。模量—堆砌密度曲线与模量—应变曲线类似,随着堆砌密度的增大,模量几乎不变,堆砌密度达到一定的值时,模量显著增大。



(a) 压强与压缩应变/堆砌密度曲线



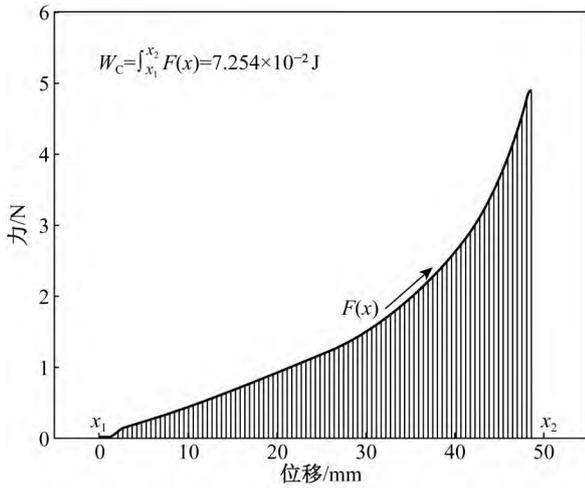
(b) 模量与压缩应变/堆砌密度曲线

图 4 羊绒纤维集合体压强与模量曲线

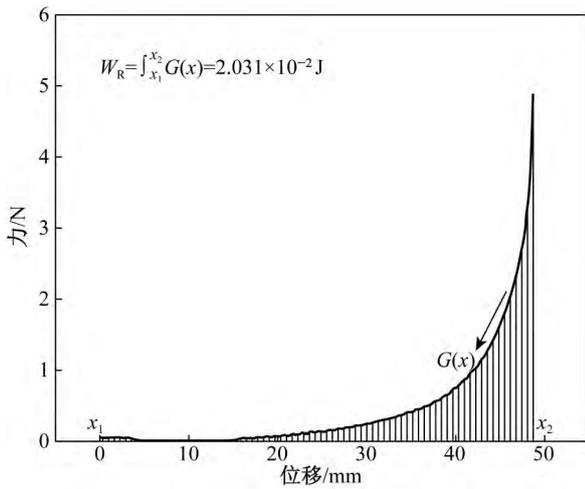
Fig. 4 Pressure and modulus curves of cashmere fibrous assembly

## 2.3 压缩与回复曲线分析

2<sup>#</sup> 山羊绒纤维集合体试样的压缩和回复曲线如图 5 所示。曲线与坐标轴所围成的阴影部分的面积分别表示压缩功  $W_C$  和回复功  $W_R$ , 计算可知一次压缩和回复过程中的  $W_C$  和  $W_R$  分别为  $7.254 \times 10^{-2}$  和  $2.031 \times 10^{-2}$  J。将图 5(a)和(b)结合,可得一次压缩回复曲线,如图 6 所示。对集合体加压再去除压力后,集合体体积逐渐膨胀,但不能恢复到原来的高度,表现为压缩和回复曲线并不重合,这与文献[8-9]对羽绒纤维集合体的研究结果相一致。



(a) 压缩曲线



(b) 回复曲线

图 5 山羊绒纤维集合体的压缩回复曲线

Fig. 5 Compression and recovery curves of cashmere fibrous assembly

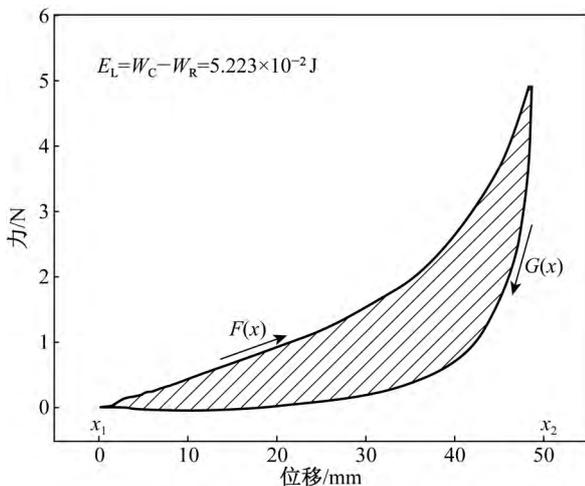


图 6 山羊绒纤维集合体的一次压缩回复曲线

Fig. 6 Compression and recovery curve of cashmere fibrous assembly during one successful circle

该现象主要是由于山羊绒纤维由长链分子聚集而成,在受到压缩变形时除了分子链主价键的键长和键角变形外,还有次价键逐步断裂而分子链逐步伸展、纤维结构重排的过程,这一过程使纤维的变形具有时间效应或者时间依赖性,所以山羊绒纤维的力学性能兼具弹性固体和黏性流体的变形特征,即黏弹性<sup>[10]</sup>。压缩曲线与回复曲线所围成的阴影部分的面积则表示一次压缩回复过程中的能量损耗  $E_L$ ,经计算可知  $E_L = 5.223 \times 10^{-2} \text{ J}$ 。

### 2.4 多次压缩回复循环曲线分析

2# 山羊绒纤维集合体试样的 3 次压缩回复循环曲线如图 7 所示。

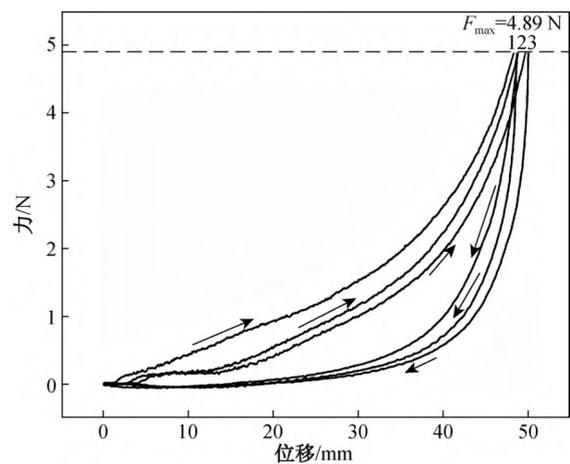


图 7 山羊绒纤维集合体的 3 次压缩回复循环曲线

Fig. 7 Three recycled curves of cashmere fibrous assembly

由图 7 可知,每个循环周期内压缩曲线与回复曲线均单调下凹且形成一个封闭的圈,回复曲线存在明显的滞后性,表明压缩回复过程中存在能量损耗。这是由于纺织纤维的黏性与弹性共存,压缩回复过程中纤维存在明显的蠕变和应力松弛,因而在反复压缩—释放的条件下会出现类似于拉伸、弯曲和扭转的压缩滞后曲线<sup>[11]</sup>。对比 3 次压缩回复曲线,在不断加压和释压的过程中,压缩回复圈不断右移,分别计算 3 次压缩回复循环过程中的压缩功、回复功和能量损耗,结果如图 8 所示。由图 8 可知,  $W_{C1} > W_{C2} > W_{C3}$ ,  $E_{L1} > E_{L2} > E_{L3}$ ,压缩功和能量损耗降低明显,但回复功相差不大,压缩功的降低主要是由于纺织纤维自身的黏弹性。释压过程中,纤维由于自身的弹性会回弹至一定的高度,但由于能量损耗不能回复至原始高度,3 次压缩高度依次  $h_1 > h_2 > h_3$ 。从试验过程考虑,推筒测量腔匀速下降压缩纤维集合体,压力不断增大,待压力达到一定值时再释放压力,可认为纤维集合体回弹的初始状态一样,此时,集合体的回弹性能只与纤维本身的性

质有关,所以多次压缩回复过程中,回复功基本不变。

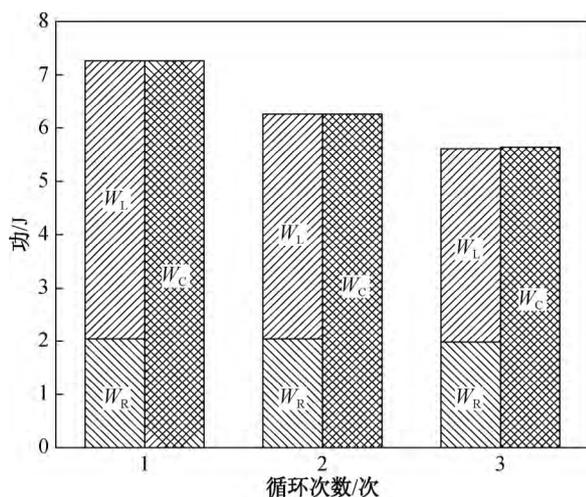


图8 3次压缩回复循环中的压缩功、回复功和能量损耗

Fig. 8 Work and energy loss during three successful compression-recovery circles

### 3 结 语

本文采用变密度纤维集合体力学和传导性原位综合测量系统对山羊绒纤维集合体压缩和回复特征曲线进行了表征,并提取特征值。结果表明:低密度的山羊绒纤维集合体在压缩初始阶段,空隙率为主导因素,力-位移曲线和模量曲线均比较平缓;结束阶段,集合体内纤维的挤压为主导因素,以挤压变形为主,特征曲线的斜率表现为急剧增大。山羊绒纤维的黏弹性是多次压缩回复曲线存在明显滞后的主要原因,表现为能量损耗明显,通过压缩回复曲线可计算一次循环的压缩功、回复功和能量损耗。

### 参 考 文 献

- [1] 于伟东. 纺织材料学[M]. 北京:中国纺织出版社, 2006:20-21.
- [2] WYK M V C. 20—Note on the compressibility of wool[J]. Journal of the Textile Institute Transactions, 1946, 37(12): 285-292.
- [3] BEIL N B, ROBERTS W W. Modeling and computer simulation of the compressional behavior of fiber assemblies: Part I: Comparison to van Wyk's theory[J]. Textile Research Journal, 2002, 72(4): 341-351.
- [4] BEIL N B, ROBERTS W W. Modeling and computer simulation of the compressional behavior of fiber assemblies: Part II: Hysteresis, crimp, and orientation effects[J]. Textile Research Journal, 2002, 72(5): 375-382.
- [5] 于伟东,刘茜. 纤维集合体变密度力学性能和密度分布测量装置与用途: 1282869C[P]. 2004-03-02.
- [6] 于伟东,刘茜. 变密度纤维集合体传导性的原位综合测量方法与装置: 1687788[P]. 2005-10-26.
- [7] 刘茜. 变密度纤维集合体的压缩、透气与隔声行为的组合表征[D]. 上海:东华大学纺织学院, 2006.
- [8] GAO J, PAN N, YU W. Compression behavior evaluation of single down fiber and down fiber assemblies[J]. The Journal of the Textile Institute, 2010, 101(3): 253-260.
- [9] YAN J, FANG C, WANG F M, et al. Compressibility of the kapok fibrous assembly[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(10): 1020-1029.
- [10] 于伟东,储才元. 纺织物理[M]. 上海:东华大学出版社, 2002: 79-80.
- [11] SUKIGARA S, YOKURA H, FUJIMOTO T. Compression and thermal properties of recycled fiber assemblies made from industrial waste of sweater products [J]. Textile Research Journal, 2003, 73(4): 310-315.

(责任编辑:杨 静)