

DOI: 10. 13475/j.fzxb.20181100504

# 交叉螺旋结构拉胀纱线及其织物的成形与表征

刘 赛<sup>1</sup>, 郑冬明<sup>2</sup>, 潘行星<sup>3</sup>, 刘 贵<sup>3</sup>, 杜赵群<sup>1</sup>

(1. 东华大学 纺织面料教育部重点实验室, 上海 201620; 2. 江西省羽绒制品质量监督检验中心, 江西 九江 332020; 3. 福建省纺织品检测技术重点实验室(福建省纤维检验局), 福建 福州 350026)

**摘 要** 为改善螺旋包缠结构拉胀纱线的结构稳定性和应用性, 设计了新型交叉螺旋包缠结构和成形方法, 并对相同材料及结构参数的 2 种纱线负泊松比效果进行对比分析。借助小型显微镜和纱线强伸性测试仪对纱线在各轴向拉伸应变下的直径变化进行测试, 得到纱线即时的泊松比值。实验结果表明: 拉胀纱线的结构稳定性得到明显改善, 同时负泊松比效果也有一定提高, 其中在轴向应变为 22.5% 时得到最大的负泊松比值为 -1.6。对基于此纱线的机织物的初步探索表明, 拉胀纱线的变形会引起织物孔隙率的变化, 在纬向应变达到 20% 时, 孔隙率为 4%, 这也为其在智能过滤材料及时装设计方面的应用提供可能性。

**关键词** 交叉螺旋包缠结构; 拉胀纱线; 机织物; 孔隙率

中图分类号: TS 102 文献标志码: A

## Formation and characterization of auxetic yarns with interlaced-helical structure and fabrics

LIU Sai<sup>1</sup>, ZHENG Dongming<sup>2</sup>, PAN Xingxing<sup>3</sup>, LIU Gui<sup>3</sup>, DU Zhaoqun<sup>1</sup>

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Jiangxi Provincial Center for Quality Inspection and Supervision on Down Products, Jiujiang Jiangxi 332020, China; 3. Fuzhou Fujian Provincial Key Laboratory of Textiles Inspection Technology (Fujian Fiber Inspection Bureau), Fuzhou, Fujian 350026, China)

**Abstract** In order to improve the structural stability and applicability of auxetic yarn with a helical wrapping structure, a novel interlaced-helical structure and a forming method were designed. The auxetic effects of two kinds of yarns with the same materials and structure parameters were studied. By means of of USB microscope and tensile tester, the diameter of yarn under axial tensile strain were measured, and then, Poisson's ratio were calculated. The experimental results show that both the structure stability and the auxetic effect of the novel auxetic yarn are improved obviously. The maximum negative Poisson's ratio is -1.6 with the axial strain of 22.5%. In addition, the preliminary investigation results of the woven fabric based on the yarn show that the deformation of the auxetic yarn causes the variety of the fabric porosity. When the latitudinal strain is 20%, the porosity of the fabric is 4%. It also provides the possibility for the application of intelligent filter materials and fashion designing.

**Keywords** interlaced-helical wrapping structure; auxetic yarn; woven fabric; porosity

负泊松比材料是指具有拉胀效应的材料, 即其垂直于作用力方向会产生收缩(或膨胀)变形, 对于传统材料在某一方向上受到拉伸(或压缩)时, 拉胀材料在某一方向上受到拉伸(或压缩)时, 其垂

收稿日期: 2018-11-01 修回日期: 2018-11-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0802802); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2232018G-01); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BEM041); 霍英东教育基金会资助项目(151071)

获奖说明: 本文荣获中国纺织工程学会颁发的第 19 届陈维稷优秀论文奖

第一作者: 刘赛(1992—), 女, 博士生。主要研究方向为拉胀材料的成形与表征。

通信作者: 杜赵群(1981—), 男, 教授, 博士。主要研究方向为纺织材料结构与性能原位组合表征与数理建模。E-mail: duzq@dhu.edu.cn。

直于作用力方向会产生膨胀(或收缩)变形,这一特性在过滤材料<sup>[1]</sup>与生物医用材料<sup>[2]</sup>等领域具有潜在应用前景。拉胀纱线的泊松比值定义为在轴向施加拉力作用下,纱线径向应变与对应的轴向应变的比值的负值<sup>[3]</sup>。

目前,拉胀纱线主要为螺旋包缠结构<sup>[4-5]</sup>,即直径较细、刚性相对较大的包缠纱缠绕在直径较粗、弹性相对较大的“芯纱”上,在轴向拉伸作用下,包缠纱会逐渐伸长取代芯纱,而芯纱则逐渐弯曲成螺旋状,使得纱线整体轮廓直径变大,选用合适的材料以及较小的包缠角度可获得负泊松比效果<sup>[6-7]</sup>,另外,也有研究对纱线建立模型并进行泊松比值的理论计算<sup>[8]</sup>。此结构存在的主要问题是自由状态下,包缠纱组分易从芯纱上退绕脱散下来,造成结构的不稳定性,大大限制了拉胀纱线的应用。针对此问题,有学者提出了含第 3 组分的涂层方式<sup>[9]</sup>以及较稳定的编织结构<sup>[10]</sup>来改善;因此要提高拉胀纱线的可应用性,

需从结构上进行创新和完善。

本文针对螺旋包缠结构易脱散、稳定性较差的问题,设计了一种具有新型交叉螺旋结构的拉胀复合纱线,同时,通过相同材料的两结构纱线对比分析,验证了新型包缠结构突出的稳定性和拉胀效果。另外,考虑到此新型拉胀纱线在拉伸作用下的变形效果,对基于该纱线的织物在拉力作用下的孔隙效应也进行了测试和分析,探讨其在过滤材料以及时装设计方面的潜在应用性。

## 1 实验材料与结构设计

选用相同规格的氨纶和涤纶分别纺制螺旋包缠结构和交叉螺旋包缠结构的拉胀复合纱线,各组分相关参数如表 1 所示。另外,由于初始包缠角度为影响纱线拉胀效果的主要因素之一,因此设计二者的初始包缠角度均为 33°以保证对比效果的有效性。

表 1 纱线和织物的相关材料和结构参数

Tab.1 Details of yarns and fabrics

| 名称   | 结构及参数                   | 材料   |
|------|-------------------------|--|
| 拉胀纱线 | 单螺旋包缠结构<br>(初始包缠角 33°)  | 芯纱-氨纶(线密度 124.4 tex)<br>包缠纱-涤纶复丝(线密度 16.7 tex, 拉伸模量 48.8 cN/tex)   |
|      | 交叉螺旋包缠结构<br>(初始包缠角 33°) | Y <sub>1</sub> : 芯纱-氨纶(线密度 124.4 tex);<br>包缠纱-涤纶复丝(线密度 16.7 tex, 拉伸模量 48.8 cN/tex)<br>Y <sub>2</sub> : 芯纱-氨纶(线密度 124.4 tex);<br>包缠纱-涤纶单丝(线密度 6.7 tex, 拉伸模量 180.8 cN/tex) |
| 机织物  | 平纹组织                    | 经纱: 超高分子量聚乙烯(线密度 13.3 tex, 拉伸模量 20 000 cN/tex)   |
|      | 蜂巢组织                    | 纬纱: 交叉螺旋包缠结构拉胀纱线 Y   |

为探讨拉胀纱线在织物中的变形效果,基于纺制的交叉螺旋包缠结构的拉胀复合纱线作为纬纱,以超高分子量聚乙烯作为经纱,分别制备了平纹组织和蜂巢组织的机织物试样,其经密为 110 根/(10 cm),纬密为 90 根/(10 cm)。

## 2 拉胀纱线及其织物的成形

螺旋包缠结构的拉胀复合纱线采用环锭纺细纱机纺制,通过导纱装置和张力调节装置可形成涤纶对氨纶的螺旋包缠,而由于交叉螺旋包缠结构的拉胀复合纱线由 1 根芯纱和 2 根包缠长丝构成,因此选用编织机进行制备,其中氨纶从位于底座中心的导纱管穿入,2 根涤纶长丝位于相对位置的 2 个纱管上,在纱管的运动作用下,2 根涤纶长丝形成对氨纶的交叉螺旋包缠。

在拉胀纱线完成后,采用 SGA598 型半自动小

样机进行平纹组织和蜂巢组织的机织物试样的制备。由于经纱在织机开口和打纬运动过程中要多次反复受到摩擦作用,为避免对拉胀纱线的形态结构和负泊松比效果造成不好的影响,因此用作纬纱,采用拉伸模量较大的超高分子量聚乙烯纱线作为经纱,并按照经密 110 根/(10 cm)和纬密 90 根/(10 cm)分别制备平纹织物和蜂巢织物。

## 3 结果与讨论

### 3.1 纱线的形态结构

初始角度为 33°的螺旋包缠结构拉胀纱线和交叉螺旋包缠结构拉胀纱线 2 种纱线在自然无张力状态的结构如图 1 所示。图中螺旋包缠结构的拉胀纱线在无张力作用时,初始部分的包缠组分从芯纱上退绕下来呈现松脱状态,这是由于纱线本身存在的残余扭矩为回复至平衡状态造成的,而交叉螺旋包缠结构的拉胀纱线几乎无退绕,因此说明此设计在

纱线结构稳定性上有较大改善。

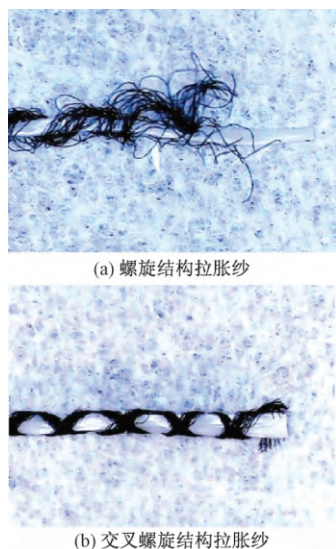


图 1 纱线结构

Fig.1 Structures of yarns. ( a) Helical wrapping auxetic yarns in natural state; ( b) Interlaced-helical wrapping auxetic yarns in natural state

从拉伸变形过程来说,2种结构纱线均有轮廓直径变大的负泊松比效果,但螺旋包缠结构拉胀纱线在变形后,芯纱由初始的中心伸直状态变成螺旋包缠状态,而包缠纱由初始的螺旋缠绕状态变成位于纱线中心伸直状态,这是两组分的强伸性能差异及相互挤压作用的结果,而交叉螺旋包缠结构的拉胀纱线仅发生形态的变化,芯纱依然位于纱体中心位置,这应该是2根涤纶长丝对称分布的作用。

### 3.2 2种纱线的拉胀效果

借助 USB 型小型显微镜和纱线强伸性测试仪的共同作用,获得纱线在轴向拉伸应变下的直径变化,从而计算得到纱线即时的泊松比值。图 2 示出 2 种结构纱线的泊松比值随轴向应变的变化曲线。可见 2 种结构纱线泊松比值的变化趋势相同,其中螺旋包缠结构拉胀纱线的泊松比值在较小轴向应变下由正变为负值,且在较小应变下达到最大值,而交叉螺旋包缠结构拉胀纱线在负泊松比值最大处获得了更好的拉胀效果。因此,交叉螺旋包缠纱线在结构稳定性以及拉胀效果上都更有优势。

### 3.3 纱线及织物的孔隙效果

交叉螺旋包缠结构拉胀纱线在轴向拉伸变形过程中的形态结构如图 3 所示,芯纱氨纶由初始的伸直状态变成弯曲状态,因此将 2 根纱线平行放在一起并施加轴向拉力作用时,就会呈现孔隙效果如图 4 所示。利用图像处理软件 ImageJ 对纱线形态结构图进行分析处理,得到孔隙率为 24%,即空隙部分的面积占以纱线轮廓边沿为基准的总面积的百分比。

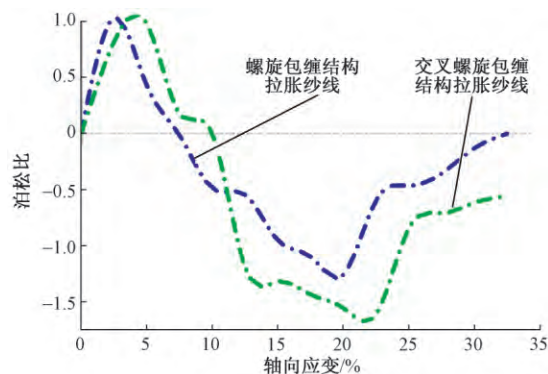


图 2 螺旋包缠结构拉胀纱线和交叉螺旋包缠结构拉胀纱线的泊松比随轴向应变变化的曲线图

Fig.2 Poisson's ratio and axial strain curves of helical and interlaced-helical wrapping auxetic yarns

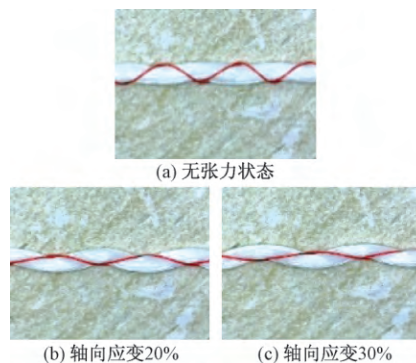


图 3 交叉螺旋包缠结构拉胀纱线形态结构图  
Fig.3 Structures of interlaced-helical wrapping auxetic yarn. ( a) In natural state; ( b) Under weft strain of 20%; ( c) Under weft strain of 30%

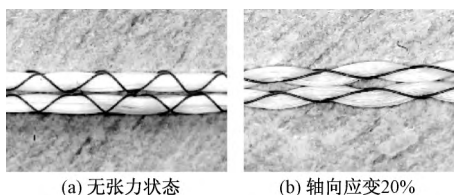


图 4 2根并在一起的交叉螺旋包缠结构拉胀纱线形态结构图

Fig.4 Structures of two interlaced-helical wrapping auxetic yarns. ( a) In natural state; ( b) Under weft strain of 20%

为验证该纱线拉胀结构在织物中的变形效果,对以交叉螺旋包缠结构拉胀纱线为纬纱的平纹织物和蜂巢织物进行对比分析,结果如图 5、6 所示。平纹织物试样沿纬向施加拉力,由于纱线的变形作用同样产生了孔隙效果,图 5 ( b) 的孔隙率为 4% (即空隙部分的面积占织物总面积的百分比)。与单独的纱线相比,织物的孔隙率大大降低,一方面是因为经纬纱的交织作用在一定程度上限制了拉胀纱线的

变形,另一方面部分经纱刚好处于纬纱变形产生的空隙位置。

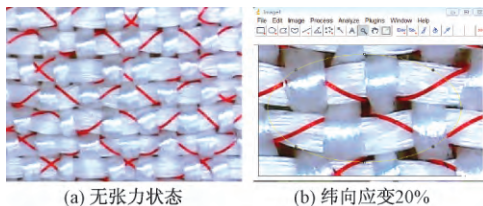


图5 平纹织物的形态结构图

Fig.5 Structures of plain fabric. (a) In natural state;  
(b) Under weft strain of 20%

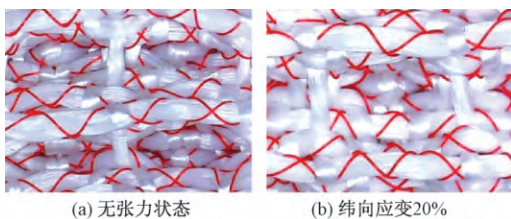


图6 蜂巢织物的形态结构图

Fig.6 Structures of honeycomb fabric. (a) In natural state;  
(b) Under weft strain of 20%

由交叉螺旋包缠结构拉胀纱线和超高分子量聚乙烯分别作为经纱和纬纱形成的蜂巢织物,凹凸效果十分明显,同时纱线堆积较为紧密,在达到与平纹织物相同的纬向应变时,纱线未产生明显变形,且织物也未产生明显空隙效果。

#### 4 结束语

通过同规格材料及结构参数的螺旋包缠结构和交叉螺旋包缠结构的拉胀复合纱线进行对比分析,验证了新型设计的交叉螺旋包缠纱线在结构稳定性以及负泊松比效果方面的双重优势。另外,对以交叉螺旋包缠结构拉胀纱线为纬纱和超高分子量聚乙烯长丝为经纱的平纹织物沿纬向施加拉力,在纬向应变达到20%时获得了4%的空隙效果,因此可选用合适的原材料以此结构来制备智能过滤材料,即根据需过滤的粒子尺寸,对其施加不同程度的力来形成相应尺寸的空隙以满足各种不同的过滤效果;而制备的蜂巢织物凹凸的立体效果明显,可通过

不同颜色的纱线搭配形成独特的装饰用或时装用面料。

FZXB

#### 参考文献:

- [1] ALDERSON A, RASBURN J, EVANS K E, et al. Auxetic polymeric filters display enhanced de-fouling and pressure compensation properties [J]. Membrane Technology, 2001, 2001(137): 6-8.
- [2] ALDERSON A, ALDERSON K. Expanding materials and applications: exploiting auxetic textiles [J]. Technical Textiles International, 2005, 14(6): 29-34.
- [3] WAN H, OHTAKI H, KOTOSAKA S, et al. A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2004, 23(1): 95-106.
- [4] MILLER W, HOOK P B, SMITH C W, et al. The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(5): 651-655.
- [5] WRIGHT J R, BURNS M K, JAMES E, et al. On the design and characterisation of low-stiffness auxetic yarns and fabrics [J]. Textile Research Journal, 2012, 82(7): 645-654.
- [6] DU Z Q, ZHOU M, HE L E, et al. Study on negative Poisson's ratio of auxetic yarn under tension: part 2: experimental verification [J]. Textile Research Journal, 2015, 85(7): 768-774.
- [7] SIBAL A, RAWAL A. Design strategy for auxetic dual helix yarn systems [J]. Materials Letters, 2015, 161: 740-742.
- [8] DU Z Q, ZHOU M, LIU H L, et al. Study on negative Poisson's ratio of auxetic yarn under tension: part 1: theoretical analysis [J]. Textile Research Journal, 2015, 85(5): 487-498.
- [9] ZHANG G H, GHITA O, EVANS K E. The fabrication and mechanical properties of a novel 3-component auxetic structure for composites [J]. Composites Science and Technology, 2015, 117: 257-267.
- [10] JIANG N, HU H. A study of tubular braided structure with negative Poisson's ratio behavior [J]. Textile Research Journal, 2017. DOI: 10.1177/0040517517732086.