



导电负泊松比纱的制备和性能

刘 赛,陈浩宇,田 伟,祝成炎,朱斐超

(浙江理工大学纺织科学与工程学院(国际丝绸学院),杭州 310018)

摘 要: 为获得结构稳定且可重复拉伸的导电负泊松比纱,以弹性氨纶丝为芯纱,镀银锦纶长丝为包缠和导电组分,分别用2根、4根、6根镀银锦纶长丝与氨纶进行编织,制备了3种负泊松比纱;利用强力仪、高清微焦电子显微镜和万用表测量这几种负泊松比纱的轴向拉伸性能、结构形变和电阻值,探究镀银锦纶长丝根数与负泊松比纱性能之间的关系。结果表明:镀银锦纶长丝根数越多,负泊松比纱的断裂强力越大,断裂伸长率越小;包缠2根镀银锦纶长丝的负泊松比纱,在伸长率为10%时具有最显著的负泊松比效应,泊松比值为-3.26;经过定伸长10%循环拉伸30次后,负泊松比纱能保持较好的拉伸性能和负泊松比效应;制备的3种负泊松比纱均具有导电性。该结果可为优化负泊松比纱线传感器的设计和加工工艺提供参考。

关键词: 负泊松比纱;拉伸性能;结构形变;导电性;编织

中图分类号: TS195.644

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)07-0415-05

引文格式:刘赛,陈浩宇,田伟,等.导电负泊松比纱的制备和性能[J].浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(4):415-419.

Reference Format: LIU Sai, CHEN Haoyu, TIAN Wei, et al. Preparation and property of conductive yarns with negative Poisson's ratio[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(4): 415-419.

Preparation and property of conductive yarns with negative Poisson's ratio

LIU Sai, CHEN Haoyu, TIAN Wei, ZHU Chengyan, ZHU Feichao

(College of Textiles Science and Engineering (International Institute of Silk),
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To obtain conductive negative Poisson's ratio yarns with stable structure and repeatable drawing property, elastic polyurethane filaments were selected as the core, and silver-coated polyamide filaments as the wrapping component and conductive component. Two, four, and six silver-coated polyamide filaments were braided with polyurethane to form three kinds of negative Poisson's ratio yarns. The tensile property, structural deformation and resistance of the negative Poisson's ratio yarn were tested by a tensile tester, a high-definition micro-focus electron microscope and a multimeter, respectively. The relationship between the number of silver-coated polyamide filaments and the performance of the negative Poisson's ratio yarn were analyzed. The results showed that the negative Poisson's ratio yarn with more conductive filaments presented the greater breaking strength and the smaller elongation at break. Negative Poisson's ratio yarns including two silver-coated polyamide filaments had the maximum negative Poisson's ratio of -3.26 when the elongation was 10%. After 30 cycles of stretching of at constant elongation 10%,

收稿日期: 2022-11-23 网络出版日期: 2023-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52203050); 浙江理工大学科研启动基金(20202090-Y)

作者简介: 刘 赛(1992—),女,河南驻马店人,讲师,博士,主要从事负泊松比纺织材料的研究。

通信作者: 朱斐超, E-mail: zhufeichao@zstu.edu.cn

the yarns with negative Poisson's ratio maintained good tensile properties and negative Poisson's ratio effect. All the three kinds of negative Poisson's ratio yarns showed conductivity. The results may provide reference for the optimization of the structural design and preparation of yarn sensors with negative Poisson's ratio.

Key words: negative Poisson's ratio yarn; stretching property; structural deformation; conductive property; braiding

0 引言

负泊松比材料^[1]是一种新型结构材料,受拉会产生膨胀变形,且具有同向曲率特性^[2]和能量吸收特性^[3]。该材料应用于人体肘部、膝部等曲面部位时表现出优异的形状适应性,因而在安全防护类材料^[4-5]、功能性服装^[6]、生物医用材料^[7]和智能可穿戴材料^[8]等领域具有广阔的应用前景。关于负泊松比纺织材料^[9-10]的结构设计、性能表征、形变机理^[11]等方面的研究受到了学界和产业界的关注。

负泊松比纱在轴向拉伸作用下产生结构形变,引起轮廓直径增大^[12],泊松比为负值。负泊松比纱可通过环锭纺^[13]、空心锭纺^[14]以及编织法^[15-16]等方法编织,主要结构为芯纱和包缠纱构成的螺旋结构。芯纱常选用高弹长丝,如氨纶丝;而包缠纱的组分一般为相对高强高模的长丝,如涤纶、锦纶等^[17]。影响该纱负泊松比效应的关键结构参数主要有初始包缠角、芯纱与包缠组分的直径比与模量比^[18]。已有研究表明,在循环拉伸 20 次过程中,采用空心锭纺制备的两组分负泊松比纱,其膨胀效应会逐渐减小直至失效^[12],因此为了提高负泊松比纱的可应用性,其结构和性能的稳定性的有待提高。

为了改善负泊松比纱的结构稳定性,同时赋予其导电性,本研究选用弹性氨纶丝作为芯纱,以导电的镀银锦纶长丝作为刚性长丝包缠在芯纱外层,采用编织法实现负泊松比纱的结构成形和制备;利用强力仪、高清微焦电子显微镜和万用表等进行测试和表征,探讨镀银锦纶长丝包缠根数对负泊松比纱拉伸性能、结构形变、负泊松比效应和导电性的影响;同时测试负泊松比纱循环拉伸 30 次前后断裂强力和伸长率以及泊松比和轴向伸长率的关系,分析其结构和性能的稳定性的,为负泊松比纱线传感器的结构设计和制备提供依据。

1 实验部分

1.1 材料和仪器

材料:氨纶(93.33 tex,市售)和镀银锦纶长丝

(15.56 tex,市售)。

仪器:16 锭编织机(徐州泽龙编织机械有限公司)、YG026T-II 强力仪(宁波纺织仪器厂)、高清微焦电子显微镜(上海圆迈贸易有限公司)和 UT71B 智能型数字万用表(昆山京东尚信贸易有限公司)。

1.2 负泊松比纱的制备

以氨纶为芯纱、镀银锦纶长丝为包缠纱,首先将氨纶喂入编织机的中心孔中,然后镀银锦纶长丝随纱管转动退绕,两者经汇聚编织形成负泊松比包缠结构;依次放置不同数量的镀银锦纶长丝纱管,制备 3 组试样。试样 1 由 2 根镀银锦纶长丝对称包缠氨纶构成,试样 2 和试样 3 分别包含 4 根和 6 根镀银锦纶长丝。

1.3 测试与表征

1.3.1 力学性能测试

选用 YG026T-II 强力仪测试负泊松比纱的轴向拉伸性能,试样夹持长度和拉伸速度分别设置为 10 mm/min、60 mm/min。在定伸长拉伸模式下,设置定伸长为 10%,拉伸次数为 30 次,试样夹持长度和拉伸速度保持不变,测试并探究试样的结构稳定性和性能稳定性。

1.3.2 泊松比测试

泊松比 ν 可表征材料的横向变形性能,用材料垂直于载荷方向应变与沿载荷方向应变的比值的负值来定量计算。纱线的泊松比可用式(1)计算:

$$\nu = -\epsilon_y / \epsilon_x \quad (1)$$

其中: ϵ_x 表示纱线的伸长率; ϵ_y 用纱线的直径变化率来表示,可用式(2)计算:

$$\epsilon_y = (D - D_0) / D_0 \quad (2)$$

其中: D_0 表示纱线的初始直径,mm; D 表示纱线受到轴向拉力时的直径,mm。

通过强力仪对负泊松比纱施加轴向拉力,采用高清微焦电子显微镜记录试样的形态结构;将试样的显微照片导入 ImageJ 软件,测量纱线轮廓直径,并代入式(1)和式(2)计算得到试样的泊松比值。

1.3.3 导电性能测试

采用灯泡电路模型,将负泊松比纱用作导线,形

成闭合回路,通过灯泡能否发光来验证纱线试样的导电性,并采用万用表对纱线试样的电阻值进行定量测试。

2 结果与讨论

2.1 镀银锦纶长丝根数对负泊松比纱力学性能的影响

结构是影响负泊松比纱性能的重要因素,通过强力仪施加轴向拉伸载荷,分别测得试样1、试样2和试样3的断裂强力和断裂伸长率,每组试样的平均值如表1所示。从表1可以看出:试样1、试样2和试样3的断裂强力分别为12.9、22.9 N和28.3 N,断裂伸长率分别为42.9%、41.4%和39.3%;随着镀银锦纶长丝根数增多,负泊松比纱的断裂强力逐渐增大,断裂伸长率逐渐减小。单根镀银锦纶长丝的断裂强力为6.7 N,试样1的断裂强力(12.9 N)小于两个单根镀银锦纶长丝断裂强力的总和(6.7×2 N),表明试样1中镀银锦纶长丝的强力利用系数小于1,同样地,试样2和试样3中镀银锦纶长丝的强力利用系数也都小于1。这主要是由于在轴向拉伸作用下,多根镀银锦纶长丝存在断裂不同步性;而试样1的断裂伸长率在3种负泊松比纱中最高,这表明包缠组分根数的增多不利于负泊松比纱沿轴向的拉伸形变。

表1 3种负泊松比纱试样的断裂强力和断裂伸长率

试样	断裂强力/N	断裂伸长率/%
1	12.9	42.9
2	22.9	41.4
3	28.3	39.3

在定伸长10%拉伸模式下,经过30次循环拉伸后试样1的强力-伸长率关系曲线如图1所示。图1显示:经过30次循环拉伸后试样1的断裂强力由12.9 N变化至13.0 N,断裂伸长率由42.9%变化至42.2%,与试样1首次拉伸曲线变化趋势相近,表明在10%的轴向伸长范围内,镀银锦纶长丝未产生塑性形变,力学性能保持稳定未受损伤;断裂伸长率降低至1%范围内,进一步表明负泊松比纱在0~30次的重复拉伸范围内,结构稳定性和力学性能稳定性较好。

2.2 负泊松比纱的形变规律和泊松比曲线

利用高清微焦电子显微镜记录负泊松比纱的形态结构,3种负泊松比纱试样照片如图2所示。试样1的初始结构为2根镀银锦纶长丝包缠在氨纶表面,其未拉伸的正面和侧面照片如图2(a)和图2(b)

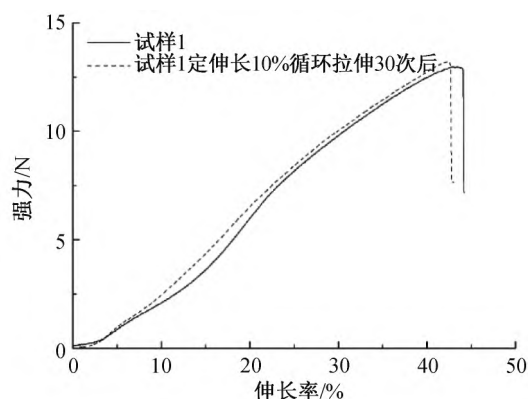


图1 试样1定伸长10%循环拉伸30次前后强力-伸长率关系曲线

所示,从图中可以看出:沿轴向拉伸至10%伸长率时,镀银锦纶长丝在拉伸作用下从螺旋状态逐渐伸直;在此过程中,氨纶由伸直状态逐渐呈现弯曲状态,试样整体的轮廓直径增大。试样1拉伸至10%的正面和侧面照片如图2(c)和图2(d)所示。试样2和试样3初始结构照片如图2(e)和图2(f)所示,从图中可以看出,在拉力作用下,镀银锦纶长丝汇聚并伸直,氨纶因挤压弯曲。试样2和试样3拉伸至10%的照片如图2(g)和图2(h)所示,从图中可以看出,试样轮廓直径增大,具有负泊松比效果。

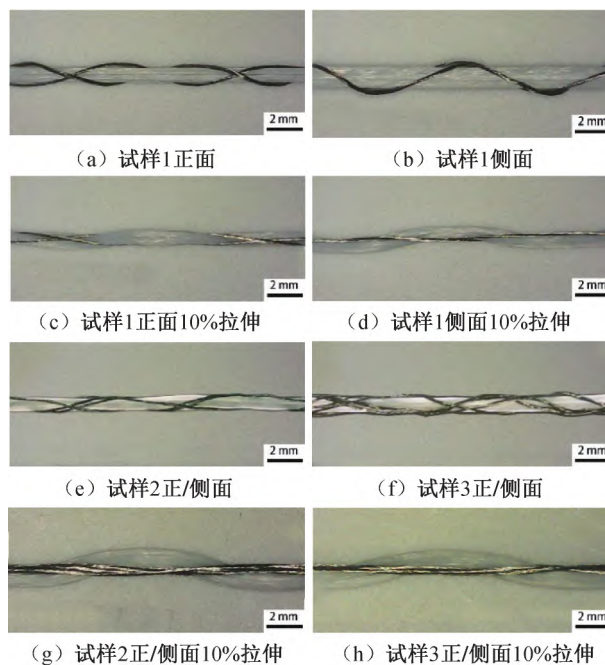


图2 负泊松比纱拉伸前后形态结构照片

记录负泊松比纱在轴向拉力作用下的形态结构变化,进而获得伸长率和泊松比的关系曲线,结果如图3所示。由图3可知:试样1在伸长率为10%~35%时泊松比均为负值,即试样1的轮廓直径持续增大,在该应变范围内具有负泊松比效果;试

样1在10%伸长率时负泊松比值为-3.26,表明试样1在伸长率为10%时轮廓直径远远大于初始直径,具有显著的负泊松比效果;随着伸长率增大,试样1的负泊松比值逐渐减小,表明负泊松比效应在逐渐减弱。这主要是因为氨纶芯纱在伸长的同时直径减小,试样1因氨纶弯曲呈现的轮廓直径增大效应减弱,负泊松比效应降低。试样2在伸长率为10%时具有最大负泊松比值为-1.89,试样3在伸长率为15%时具有最大负泊松比值为-0.79,均远远小于试样1。因此,3种试样中包含2根镀银锦纶长丝的负泊松比纱具有最显著的负泊松比效果,包缠组分根数的增加不利于复合纱的拉伸结构形变和产生负泊松比效应。

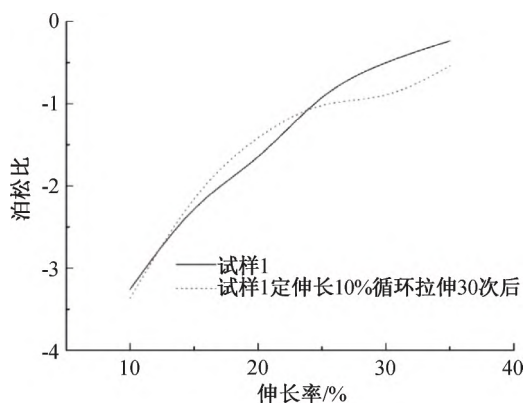


图3 试样1定伸长10%循环拉伸30次前后泊松比-伸长率关系曲线

为了进一步探究负泊松比纱结构和性能的稳定性,将试样1定伸长10%循环拉伸30次,然后测试其泊松比并得到泊松比-伸长率的关系曲线,结果如图3所示,从图中可以看出,该结果与试样1首次拉伸的泊松比-伸长率关系曲线变化趋势相近。在10%~35%伸长率范围内,经30次循环拉伸后试样1保持负泊松比效应,其中在10%应变时泊松比值为-3.37,在15%~25%应变范围内的负泊松比效应低于首次拉伸结果,在25%~35%应变范围内的负泊松比效应高于首次拉伸结果。这主要是因为经过30次循环拉伸后,试样1的结构有一定程度松散,因此在较大的伸长率时负泊松比效应相对更显著。该结果表明,负泊松比纱在0~30次重复拉伸的范围内,具有较好的结构稳定性和负泊松比性能稳定性。

2.3 负泊松比纱的导电性能

采用灯泡电路模型测试纱线试样的导电性,负泊松比纱用于闭合电路的实验照片如图4所示。从试样1中截取一段10 cm长的负泊松比纱,分别连

接导线两端;打开电源,小灯泡持续正常发光,表明包含镀银锦纶长丝的负泊松比纱具有导电性。

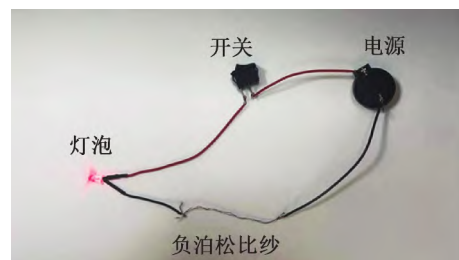


图4 负泊松比纱用于闭合电路的实验照片

从试样1、试样2和试样3中分别截取一段长度为10 cm的负泊松比纱,采用智能型数字万用表测量负泊松比纱的电阻值,对其导电性能进行定量分析。试样1、试样2、试样3的电阻值随伸长率变化的曲线如图5所示。从图5可以看出,随着伸长率增大,3种负泊松比纱的电阻值均增大,符合材料电阻值与长度的正相关关系。试样1、试样2和试样3在初始状态的电阻值分别为29.1、15.3 Ω 和9.9 Ω ,小于单根镀银锦纶长丝在自然伸直状态下的电阻值32.7 Ω ,以上结果表明本研究制备的导电负泊松比纱在伸长率为20%的情况下仍然具有一定的导电性能。

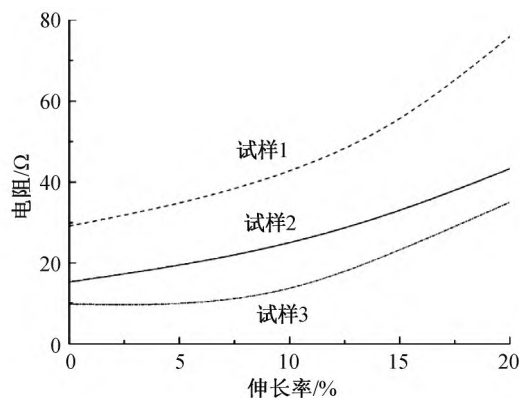


图5 负泊松比纱电阻-伸长率关系曲线

3 结 论

本研究利用16锭编织机,分别将2根、4根、6根镀银锦纶长丝与弹性氨纶长丝包缠,得到3种负泊松比纱;通过拉伸测试、结构形变分析和电阻值测试,探究负泊松比纱的拉伸性能、导电性、负泊松比效应及其稳定性,分析镀银锦纶长丝根数对负泊松比纱性能的影响。所得主要结论如下:

a)包缠镀银锦纶长丝根数越多,负泊松比纱的断裂强力越大、轴向断裂伸长率越小;经定伸长10%循环拉伸30次后,负泊松比纱力学性能与首次

拉伸结果相近,结构稳定性和力学性能稳定性较好。

b)包缠2根镀银锦纶长丝的负泊松比纱具有最显著的负泊松比效应,在10%伸长率下的负泊松比值为-3.26,远大于包缠4根、6根镀银锦纶长丝试样的负泊松比效果,表明包缠根数增加不利于负泊松比纱的结构形变;经过定伸长10%循环拉伸30次后,负泊松比纱具有显著的负泊松比效应,结构有效性和负泊松比性能稳定性较好。

c)包含2根、4根、6根镀银锦纶长丝的负泊松比纱作为导线可持续点亮灯泡,即使在伸长率为20%时,该负泊松比纱仍然具有较好的导电性,可用于制备负泊松比纱线传感器。

综上所述,包缠镀银锦纶长丝编织形成的负泊松比纱具有显著的负泊松比效应和导电性,且结构稳定性、拉伸性能和负泊松比效应稳定性较好。本研究结果为负泊松比纱线传感器的结构和性能优化提供了较好的基础。

参考文献:

- [1] Evans K E, Alderson A. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking! [J]. *Advanced Materials*, 2000, 12(9): 617-628.
- [2] Wang Z Y, Hu H. 3D auxetic warp-knitted spacer fabrics[J]. *Physica Status Solidi (b)*, 2014, 251(2): 281-288.
- [3] Zhang J J, Lu G X, You Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 201: 108340.
- [4] 任鑫,张相玉,谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. *力学学报*, 2019, 51(3): 656-687.
- [5] Duncan O, Shepherd T, Moroney C, et al. Review of auxetic materials for sports applications: Expanding options in comfort and protection[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(6): 941.
- [6] Shukla S, Behera B K. Auxetic fibrous structures and their composites: A review[J]. *Composite Structures*, 2022, 290: 115530.
- [7] Andy U, Alderson K. Expanding materials and applications: exploiting auxetic textiles [J]. *Technical Textiles International*, 2005, 14(6): 29-34.
- [8] Taherkhani B, Azizkhani M B, Kadkhodapour J, et al. Highly sensitive, piezoresistive, silicone/carbon fiber-based auxetic sensor for low strain values[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 305: 111939.
- [9] Cao H J, Zulifqar A, Hua T, et al. Bi-stretch auxetic woven fabrics based on foldable geometry[J]. *Textile Research Journal*, 2019, 89(13): 2694-2712.
- [10] Ma P B, Chang Y P, Boakye A, et al. Review on the knitted structures with auxetic effect[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2017, 108(6): 947-961.
- [11] Zeng J F, Hu H. A theoretical analysis of deformation behavior of auxetic plied yarn structure [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(7): 075003.
- [12] 李轶助,李昕炫,刘赛,等.循环拉伸载荷对负泊松比纱力学性能的影响[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(3): 308-312.
- [13] Du Z Q, Zhou M, He L G, 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.
- [14] Zhang G H, Ghita O R, Lin C P, et al. Large-scale manufacturing of helical auxetic yarns using a novel semi-coextrusion process[J]. *Textile Research Journal*, 2018, 88(22): 2590-2601.
- [15] Jiang N, Hu H. A study of tubular braided structure with negative Poisson's ratio behavior [J]. *Textile Research Journal*, 2018, 88(24): 2810-2824.
- [16] Jiang N, Hu H. Auxetic yarn made with circular braiding technology [J]. *Physica Status Solidi (b)*, 2019, 256(1): 1800168.
- [17] 刘赛,郑冬明,潘行星,等.交叉螺旋结构拉伸纱线及其织物的成形与表征[J]. *纺织学报*, 2019, 40(2): 26-29.
- [18] McAfee J, Faisal N H. Parametric sensitivity analysis to maximise auxetic effect of polymeric fibre based helical yarn[J]. *Composite Structures*, 2017, 162: 1-12.

(责任编辑:张会巍)