



循环拉伸载荷对负泊松比纱力学性能的影响

李轶助, 李昕炫, 刘 赛, 徐国平

(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: 为研究负泊松比纱力学性能和膨胀效应的稳定性及有效性, 获得负泊松比复合纱应用于运动防护材料时的评价依据, 通过设置定伸长循环拉伸模式, 根据形态结构和径向应变的原位测试和记录, 解析负泊松比纱力学性能的疲劳失效规律, 以研究复合纱结构和负泊松比性能的有效性。结果表明: 在定伸长循环拉伸作用下, 负泊松比纱的弹性回复性较好; 轴向应变较大时, 涤纶长丝的塑性变形会使得复合纱整体结构散乱并出现线圈。增加循环拉伸次数, 不利于复合纱保持稳定的负泊松比性能; 当循环拉伸次数达到 20 次时, 复合纱的泊松比减小至零, 即塑性变形积累引起负泊松比结构和性能失效。在复合纱弹性应变处于范围内且小于 20 次的重复拉伸作用下, 复合纱的形态结构和膨胀效应基本稳定有效。选材时综合考虑弹性伸长性能和模量, 可以有效改善负泊松比复合纱的结构破坏和性能失效。

关键词: 负泊松比效应; 复合纱; 定伸长循环拉伸; 力学性能; 弹性回复率

中图分类号: TS195.644

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 05-0308-05

The influence of cyclic tensile load on mechanical properties of yarns with negative Poisson's ratio

LI Yizhu, LI Xinxuan, LIU Sai, XU Guoping

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

Abstract: In order to obtain the evaluation basis for the applicability of the complex yarns in the field of sports protective materials, the stability and effectiveness of mechanical properties and expansion effect of negative Poisson's ratio yarns were deeply studied. By setting the constant elongation cyclic stretching mode, the fatigue failure law of mechanical properties of negative Poisson's ratio yarn was analyzed with the in-situ test and record of morphological structure and radial strain. Then, the effectiveness of the structure and negative Poisson's ratio property of complex yarn could be carried out. The stretching experimental results based on negative Poisson's ratio yarn samples showed that good elastic recovery property under constant elongation cyclic tension; with the larger axial strain, the overall structure of complex yarn was scattered and coils appeared due to the plastic deformation of polyester filament; cyclic stretching times was harmful to the stability of negative Poisson's ratio effect of complex yarn; when the cyclic stretching times were close to or more than 20, complex yarn showed positive Poisson's ratio, that is, the accumulation of plastic deformation led to the failure of yarn structure and performance. Therefore, under the repeated tension of less than 20 times within the elastic strain range of the complex yarn, the

收稿日期: 2021-07-15 网络出版日期: 2022-03-18

基金项目: 浙江理工大学科研启动基金项目(20202090-Y)

作者简介: 李轶助(2000—), 男, 浙江平阳县人, 本科生, 主要从事功能性纺织材料方面的研究。

通信作者: 刘 赛, E-mail: sai.liu@zstu.edu.cn

morphological structure and expansion effect was stable and effective. The material selection can be carried out by comprehensively considering the elastic elongation performance and modulus, so as to improve the structural damage and performance failure of the complex yarn.

Key words: negative Poisson's ratio effect; complex yarns; cyclic stretching; mechanical properties; elastic recovery rate

0 引 言

因结构特殊而呈现受拉膨胀变形的材料具有负泊松比特性,被称为负泊松比材料^[1]。负泊松比材料在断裂韧性^[2]、抗压痕性^[3]、能量吸收性^[4]等方面具有优势,在运动防护材料^[5]、生物医用材料^[6]等领域均具有潜在应用价值。针对负泊松比纺织材料,学者们围绕其结构成形、力学性能及形变机理等方面开展了系列研究,包括负泊松比纱^[7]、负泊松比织物^[8]、负泊松比纺织复合材料^[9]等。其中,负泊松比纱的研究主要集中在结构参数优化、结构成形方法、结构变形机理等基础理论^[10-12]层面。根据已有的研究成果,负泊松比纱的复合结构主要为螺旋包缠结构,即模量较大的刚性长丝组分螺旋包缠在弹性芯纱表面^[13]。在轴向拉伸载荷作用下,刚性长丝从螺旋状态逐渐过渡到伸直状态,在此形变过程中两组分间的相互挤压作用力也使得弹性芯纱产生螺旋弯曲变形。当负泊松比纱整体轮廓直径增大时,其泊松比值呈现由正到负的动态变化趋势。通常螺旋包缠角被认为是决定负泊松比效应大小的关键结构参数^[14]。

柔弹性负泊松比纱优异的能量吸收特性和适形性对运动防护材料的耐用性、防护性、舒适性等需求十分契合^[15]。然而,若要推进负泊松比纱在不同领域中的应用,需进一步聚焦负泊松比效应的稳定性和有效性问题的研究,即疲劳失效问题的研究。材料的疲劳失效是一个塑性变形积累的过程,从微观结构的破坏到宏观断裂形变的产生,失效机理不同,疲劳破坏的形式也不同。负泊松比纱在重复拉伸作用下的性能及其稳定性和有效性与其可应用性评价息息相关。若要充分发挥负泊松比纱的性能优势,不仅需要考虑复合纱的力学性能,更要探究重复拉伸作用下负泊松比效应的变化及其失效模式。

本文基于循环往复拉伸模式下负泊松比纱的结构和性能变化展开研究,以探明其负泊松比性能的失效规律。考察定伸长循环拉伸作用下复合纱的形态结构变化,探究多次循环拉伸后复合纱的弹性回复率和塑性变形,分析多次循环拉伸后复合纱泊松比值的变化及失效条件。本文的研究结果可为负泊松比复

合纱在运动防护材料领域中的应用提供评价依据。

1 负泊松比纱制备与测试

1.1 实验材料与负泊松比纱制备

选用 91.5 tex 氨纶作为芯纱组分、3.7 tex 涤纶长丝作为包缠组分,利用基于空心锭纺纱原理的 HKV-151 花式捻线机制备两组分负泊松比纱。负泊松比纱结构示意图如图 1 所示,其中涤纶长丝螺旋缠绕在氨纶芯纱表面,形成负泊松比纱。

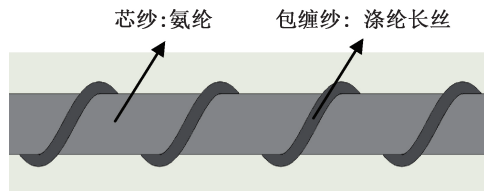


图 1 负泊松比纱的结构示意

1.2 力学性能测试原理与方法

设置循环拉伸测试模式,探究纱线在重复拉伸作用下的变形行为与力学性能。通过对小变形循环应力的作用下的变形行为研究,可对材料的弹性回复率及疲劳失效性能进行评价。在轴向拉伸作用下,复合纱产生结构形变,其轮廓直径和泊松比值也随之变化。基于纱线强力仪施加载荷和 USB 摄像头记录的共同作用,可实现复合纱力学性能和形态结构的同步变化记录,有利于进一步分析负泊松比纱的形变规律。

复合纱力学性能及形态测试装置如图 2 所示,通过 XL-2 纱线强伸度仪进行定伸长循环拉伸测试,并运用高清微焦电子显微镜对复合纱拉伸形变过程进行记录。定伸长循环载荷分别设置为 10% 和 25%,循环次数为 5~30 次,复合式试样夹持长度为 250 mm,拉伸速度为 250 mm/min。通过 Imagej 软件对图像进行处理,得到复合纱在不同轴向应变作用下的径向应变,从而通过泊松比的定义计算获得复合纱的动态泊松比值。

2 结果与讨论

2.1 负泊松比纱形态结构变化分析

选定循环拉伸模式,将定伸长值设置为 25%、



图2 复合纱力学性能及形态测试装置

循环拉伸次数设置为30次,轴向拉伸作用前后复合纱的形态结构如图3所示。循环拉伸前的复合纱试样的形态结构如图3(a)所示,从图中可以看出,涤纶长丝较均匀的螺旋包缠在氨纶表面;经过30次循环拉伸后的复合纱试样的形态结构如图3(b)所示,从图中可以看到,复合纱试样整体结构松散,涤纶长丝脱离氨纶芯纱表面。该现象主要是氨纶和涤纶长丝的弹性回复性不同造成的。由于轴向伸长率较小,涤纶长丝受到循环拉伸载荷作用时易累积塑性形变,而氨纶的伸长形变则在弹性变形范围内;去掉载荷作用后,氨纶基本回复至初始状态,而涤纶长丝产生塑性形变的部分无法回复,导致整体长度增大,表现出脱离氨纶表面的散乱或线圈状态,其中拱起的部分即对应于涤纶长丝因塑性形变伸长的部分。上述结果表明,重复拉伸不利于复合纱整体结构的均匀性和稳定性。

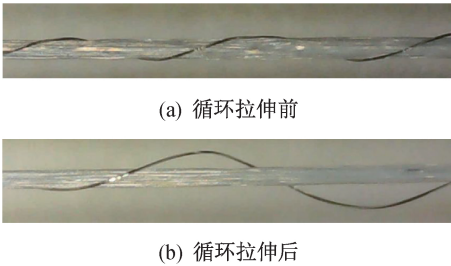


图3 循环拉伸前后复合纱试样的照片

2.2 复合纱变形及拉伸性能分析

经过5次和30次循环拉伸,复合纱的塑性变形和弹性回复率如表1所示。当定伸长为10%、循环拉伸次数由5次增加至30次时,复合纱的弹性回复率由88.6%减小至87.9%,塑性变形则相应地由11.4%增大至12.1%。定伸长为25%的多次循环拉伸实验结果显示,弹性回复率和塑性变形呈现出相同的变化趋势,即随着次数增大,复合纱的弹性回复率减小、塑性变形增大,这表明循环拉伸次数加剧了复合纱的塑性变形的积累以及疲劳破坏程度。另外,经过30次循环拉伸后,复合纱试样的弹性回复率均保持在85%以上,这也表明负泊松比纱可以保持较好的弹性回复性,具有重复利用的可能性。同

时,设置相同的循环拉伸模式,即定伸长25%、循环拉伸次数为5次,对复合纱试样的芯纱组分氨纶进行循环拉伸实验,得到氨纶的塑性变形和弹性回复率分别为4.9%和95.1%,这与复合纱测试结果接近,进一步表明氨纶是决定复合纱弹性回复率的主要因素。

表1 经多次循环拉伸后复合纱的变形情况

拉伸次数/次	定伸长 10%		定伸长 25%	
	塑性变形/%	弹性回复率/%	塑性变形/%	弹性回复率/%
5	11.4	88.6	4.3	95.7
30	12.1	87.9	5.4	94.6

经过30次循环拉伸(定伸长为10%和25%),负泊松比纱的拉伸曲线(负荷—伸长率曲线)分别如图4和图5。在10%轴向伸长率范围内,复合纱的拉伸形变接近线性变化,其力—伸长率曲线如图4所示;随着轴向伸长率的进一步增大,复合纱的拉伸形变由线性逐渐过渡到非线性,且在伸长率达到20%左右时曲线斜率显著增大,其力—伸长率曲线如图5所示。该结果与复合纱的结构形变规律一致:在涤纶长丝螺旋包缠氨纶阶段,氨纶为复合纱轴向拉伸的主要受力组分;当涤纶长丝由螺旋状态转变为伸直状态后,涤纶长丝为复合纱轴向拉伸的主要受力组分,且在不断伸长的过程中产生部分塑性变形。经过30次循环拉伸(定伸长为25%),氨纶的拉伸曲线(负荷—伸长率曲线)如图6所示,发现在25%轴向伸长率范围内,氨纶的拉伸形变接近线性变化,这也进一步验证了上述对复合纱的结构形变规律和拉伸曲线变化规律的分析,即复合纱的模量变化主要与涤纶长丝形态结构变化和受力情况转换有关,且涤纶长丝为决定复合纱模量的主要因素。另外图4、图5和图6中经过30次循环拉伸后的曲线未完全重合,这也与表1中复合纱的塑性形变结果一致,表明复合纱在多次循环拉伸过程中塑性形变的积累现象。

2.3 复合纱负泊松比效应分析

经过1、10、20、30次拉伸(定伸长10%)后,复合纱的结构形态变化如图7所示。当轴向伸长率首次达到10%时,芯纱氨纶由初始的伸直状态转变成弯曲变形状态,复合纱整体轮廓直径明显增大,如图7(a)所示;当循环拉伸至第10次,复合纱在轴向伸长率为10%时的形态结构如图7(b)所示,氨纶弯曲形变不显著,复合纱基本保持初始的螺旋包缠结构;当循环拉伸至第20次,复合纱在轴向伸长率为10%时的形态结构如图7(c)所示,复合纱结构与循

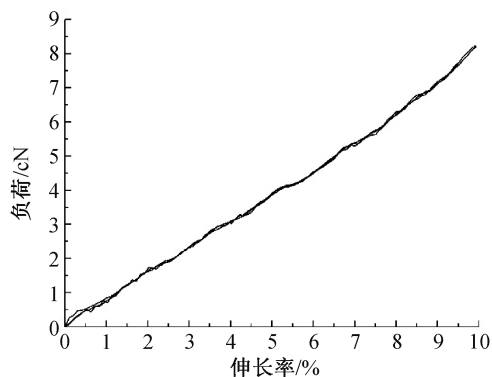


图 4 循环拉伸 30 次(定伸长 10%)复合纱力—伸长率曲线

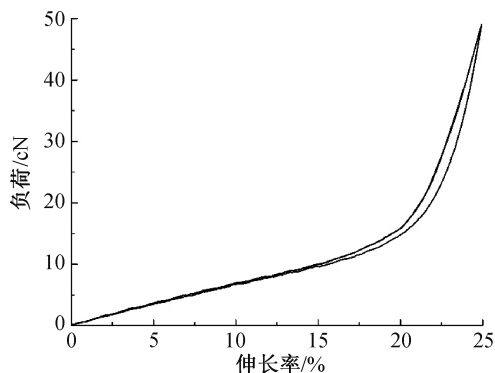


图 5 循环拉伸 30 次(定伸长 25%)复合纱力—伸长率曲线

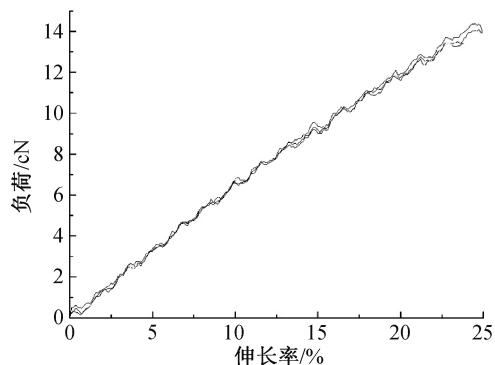


图 6 循环拉伸 30 次(定伸长 25%)氨纶力—伸长率曲线

环拉伸 10 次时相近;当循环拉伸至第 30 次,复合纱在轴向伸长率为 10%时的形态结构如图 7(d)所示,氨纶直径显著减小,复合纱整体轮廓直径明显小于首次拉伸后的直径。另外,随着循环拉伸次数增加,螺旋包缠密度存在轻微增大现象,即一个螺旋单元长度减小,该现象主要归因于涤纶长丝因塑性形变而长度增大。另外,该结果也验证了高弹性氨纶作为正泊松比材料,在拉伸载荷作用下,直径逐渐减小,特别是经过多次循环拉伸后,细度下降显著。因此,复合纱的轮廓直径和泊松比值随循环拉伸次数增大而动态变化,且复合纱的结构形变以及涤纶长丝由螺旋状态至伸直状态的转变存在滞后现象。

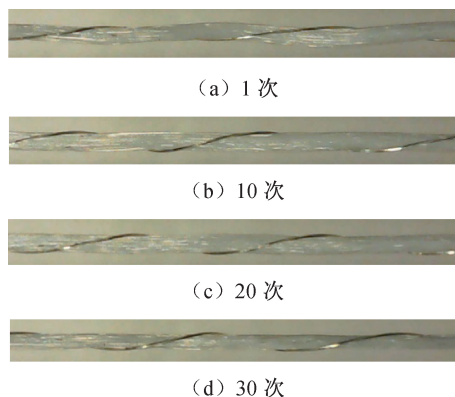


图 7 不同次数循环拉伸后复合纱试样的照片

以复合纱在自然伸直状态下的初始轮廓直径为基准,分别提取第 1、5、10、15、20 次拉伸至伸长率为 10%时的轮廓直径,得到相应的直径变化率和泊松比值曲线如图 8 和 9 所示。当循环拉伸次数在 1~20 次范围内时,复合纱的轮廓直径变化率均为正值,如图 8 所示。该结果表明,多次拉伸作用后复合纱的轮廓直径均大于初始值,但变化率逐渐降低,说明随着次数的增加,复合纱轮廓直径不断减小,直至第 20 次时减小至与初始值相同。复合纱轮廓直径的变化与泊松比值的变化一一对应,泊松比随循环拉伸次数变化曲线如图 9 所示,复合纱泊松比值由 -0.56 逐渐减小为 0,表明当循环拉伸次数接近或超过 20 次时,复合纱的负泊松比效应失效。

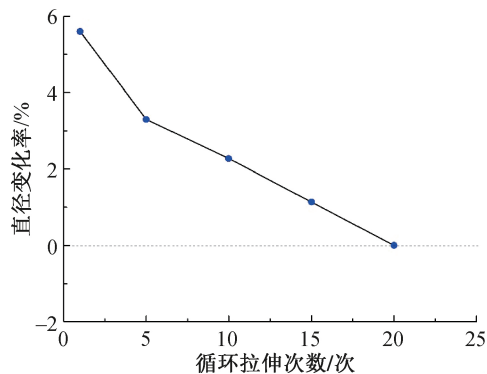


图 8 不同次数循环拉伸后复合纱的直径变化率曲线

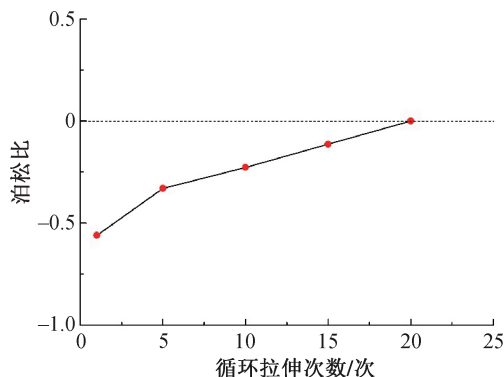


图 9 不同次数循环拉伸后复合纱的泊松比值变化曲线

3 结 论

本文利用花式捻线机将涤纶长丝包覆在氨纶表面,制备出了具有负泊松比效果的复合纱,并设置循环拉伸模式进行了复合纱力学性能的测试,探究其形态结构和负泊松比效应的变化,从而分析其疲劳失效规律,所得主要结论如下:

a)经过 30 次循环拉伸(定伸长 25%)后,负泊松比纱试样结构散乱并出现线圈现象,氨纶芯纱与涤纶长丝部分纱段分离,复合纱整体结构有一定程度破坏。

b)在不同次数循环拉伸作用下,复合纱弹性回复率均在 85%以上,但也存在一定的塑性形变,表明塑性形变积累是复合纱形态结构破坏和负泊松比效应失效的主要原因。

c)当定伸长 10%、循环拉伸次数在 1~20 次范围内时,复合纱保持负泊松比效果,但随着重复拉伸次数增加,泊松比数值逐渐减小,即膨胀效应逐渐下降;当循环拉伸次数达到 20 次时,复合纱泊松比值由负减小至 0,即负泊松比效应失效。

在弹性变形范围内,复合纱可以承受一定次数的重复形变,保持结构和负泊松比效应的有效性,但是与实际应用需求还有较大差距,有必要进一步探究优化复合纱性能稳定性和有效性的原理和方法。

参考文献:

- [1] Evans K E, Nkansah M A, Hutchinson I J, et al. Molecular network design [J]. *Nature*, 1991, 353 (6340): 124.
- [2] Ren X, Das R, Tran P, et al. Auxetic metamaterials and structures: a review [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 023001.
- [3] Saxena K K, Das R, Calius E P. Three decades of auxetics research-materials with negative poisson's ratio: a review [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18(11): 1847-1870.
- [4] Steffens F, Oliveira F R, Fangueiro R. Energy absorption from composite reinforced with high

- performance auxetic textile structure [J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 55(7): 1003-1013.
- [5] 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.
- [6] Alderson A, Alderson K. Expanding materials and applications: Exploiting auxetic textiles [J]. *Technical textiles international*, 2005, 777: 29-34.
- [7] Jiang N, Hu H. Auxetic yarn made with circular braiding technology [J]. *Physica Status Solidi (b)*, 2019, 256(1): 1800168.
- [8] 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.
- [9] Wang X T, Wang B, Wen Z H, et al. Fabrication and mechanical properties of CFRP composite three-dimensional double-arrow-head auxetic structures [J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 164: 92-102.
- [10] Ge Z Y, Hu H, Liu S R. A novel plied yarn structure with negative Poisson's ratio [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2016, 107(5): 578-588.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Sloan M R, Wright J R, Evans K E. The helical auxetic yarn-a novel structure for composites and textiles; geometry, manufacture and mechanical properties [J]. *Mechanics of Materials*, 2011, 43(9): 476-486.
- [14] Zhou M, Du Z Q. Effects of structural parameters and performance on Poisson's ratio of auxetic yarn [C]// *Advanced Materials Research*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2013, 821: 252-258.
- [15] 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.

(责任编辑:刘国金)