

# 基于折叠结构的负泊松比纬编针织物设计

宋晓霞, 陈秀玲

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

**摘要:** 为了进一步开发具有实际意义的负泊松比针织物, 并探讨工艺参数对负泊松比效应的影响, 基于折叠结构对负泊松比纬编针织物进行设计。根据产生负泊松比效应的折叠结构原理建立几何模型, 并推导出各几何参数与负泊松比值间的关系; 分别改变花型针数和行数的比值、线圈长度两种工艺参数, 使用电脑横机花型软件对负泊松比纬编针织物进行设计并织造; 对各织物进行负泊松比测量并分析测量结果, 探讨工艺参数与几何参数之间的联系。结果表明: 张角  $\theta$  是影响负泊松比折叠针织物的重要几何参数, 因为花型针数和行数的比值、织物线圈长度两种工艺参数的变化都使张角  $\theta$  改变, 从而导致负泊松比值的变化。

**关键词:** 折叠结构; 几何模型; 工艺参数; 负泊松比效应; 纬编针织物

**中图分类号:** TS 184.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2023)01-0037-05

## Design of Weft Knitted Fabric with Negative Poisson's Ratio Based on Folded Structure

SONG Xiaoxia, CHEN Xiuling

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to further develop practical negative Poisson's ratio knitted fabrics and explore the influence of process parameters on the negative Poisson's ratio effect, a negative Poisson's ratio weft knitted fabric was designed based on the folded structure. Firstly, a geometric model is established according to the principle of folding structure with negative Poisson's ratio effect, and the relationship between each geometric parameter and the value of negative Poisson's ratio is deduced. Negative Poisson's ratio weft-knitted fabrics were designed and woven by computerized flat knitting software; finally, the negative Poisson's ratio was measured for each fabric and the results were analyzed to discuss the relationship between process parameters and geometric parameters contact. The results show that the opening angle  $\theta$  is an important geometric parameter that affects the negative Poisson's ratio folded knitted fabrics. Changing the ratio of the number of pattern stitches to the number of rows and the length of the stitches of the fabric is due to the change of the opening angle  $\theta$ . Causes a change in negative Poisson's ratio.

**Key words:** folded structure, geometric model, process parameters, negative Poisson's ratio effect, weft-knitted fabrics

泊松比 ( $\nu$ ) 是以法国科学家 Simeon-Denis Poisson (1787—1840) 命名的用以度量材料泊松效应的系数, 表示材料垂直于载荷方向的应变与载荷方向的应变比值。负泊松比材料又称为拉胀材料。负泊松比材料由于其优异的特性, 如抗剪切性能、

抗压痕性能、断裂韧性<sup>[1]</sup>、能量吸收性<sup>[2]</sup>, 良好的透湿透气性以及表面贴合性等吸引了很多学者及研究人员关注, 但负泊松比材料在纺织领域的研究是近 20 年才开始的<sup>[3]</sup>, 负泊松比纺织品的开发和应用仍处于初级阶段。

收稿日期: 2022-09-22; 修订日期: 2022-12-29。

基金项目: 企业事业委托科研项目 [(0239-E4-6000-19-0339)(19)FZ-020]。

作者简介: 宋晓霞 (1972—), 女, 教授, 硕士生导师。主要研究方向为针织服装舒适性与工艺。

Email: songxiaoxiaivivian@126.com

目前,大多数的负泊松比纺织品都是基于针织结构织造的,因为与机织和编织相比,针织工艺不仅生产效率高,而且工艺灵活、结构多样,更容易织造具有负泊松比效应的织物<sup>[4-5]</sup>。目前,制备负泊松比针织材料的方法有两种:①利用具有负泊松比效应的纤维或纱线织造;②采用常规纤维或纱线,通过具有负泊松比效应的织物结构织造。许多学者为了解释负泊松比材料产生负泊松比效应的变形机理,建立了一系列几何结构模型并使用针织技术织造织物。已经被开发的负泊松比针织物几何结构模型有内凹结构<sup>[6-7]</sup>、旋转结构<sup>[8-9]</sup>、螺旋纱线结构等<sup>[10]</sup>。

文中开发了一种新的负泊松比折叠几何结构,并推导出几何参数与负泊松比值间的关系,然后改变针织花型行数和针数的比值、线圈长度两种工艺参数,使用电脑横机针织技术织造出负泊松比折叠针织物。通过对织造织物进行负泊松比值的测量,评估织物的负泊松比值,探讨影响织物负泊松比效应的因素。

## 1 理论分析

### 1.1 织物设计原理

负泊松比材料的特点是拉伸时材料垂直于拉伸方向的宽度变宽,压缩时材料垂直于压缩方向的宽度变窄。文中根据负泊松比材料的特点,设计了一款变形结构,具体如图1所示。

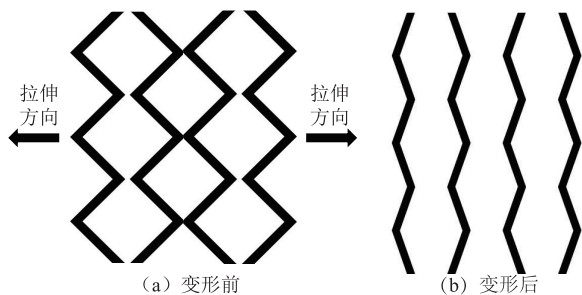


图1 负泊松比折叠结构

Fig. 1 Negative Poisson's ratio folded structure

图1是由相同形状和大小的平行四边形以“之”字排列形成的空间结构,当在其水平或垂直方向拉伸时,每个平行四边形改变其相对于结构表面的倾斜位置致使整个结构打开,从而增加其在水平或垂直方向的尺寸。在编织成型过程中,该折叠结构“之”字展开的空间越大,负泊松比效应越明显。

### 1.2 几何模型建立与数值分析

为了便于分析结构参数对织物负泊松比值效应的影响,根据织物设计原理,建立折叠结构几何

模型,推导出各几何参数与负泊松比值间的关系,将该结构看成是刚性结构。重复单元的几何模型如图2所示。

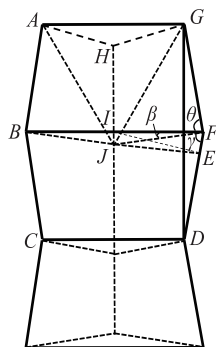


图2 重复单元折叠结构几何模型

Fig. 2 Repeating unit folded structure geometric model

图2中 $\square ABJH$ 和 $\square GFJH$ 对称相等,假设 $\overline{GF} = \overline{HJ} = a$ ,  $\overline{GH} = \overline{FJ} = b$ ,  $\angle JFB = \beta$ ,  $\angle JFD = \gamma$ ,  $\angle GFB = \angle DFB = \theta$ 。由于负泊松比效应主要源于平行四边形位置的倾斜变化,所以 $a, b$ 和 $\gamma$ 在拉伸中保持不变。在不考虑四边形的厚度时,当 $\overline{DG} = 0$ 时,结构完全闭合,此时 $\theta = 0, \beta = \gamma$ ;当 $\overline{BF} = 2b$ 时,结构完全打开, $\theta = \gamma, \beta = 0$ 。

因为 $\overline{JH} \perp \triangle AHG$ ,所以 $\overline{JH} \perp \overline{HG}$ 。在 $\triangle BJF$ 中,  $\overline{BJ} = \overline{FJ}$ ,所以 $\triangle BJF$ 为等腰三角形,可作 $\overline{JI} \perp \overline{BF}$ ,  $I$ 为 $\overline{BF}$ 的中点。因为点 $A, B, C, D, F, G$ 在同一平面,因此 $\overline{JI} \perp$ 平面 $ABCDGF$ ,所以 $\overline{JI} \perp \overline{FD}$ 。作 $\overline{IE} \perp \overline{FD}$ ,因为 $\overline{IE}$ 和 $\overline{JI}$ 相交,故 $\overline{FD} \perp \triangle EIJ$ ,所以 $\overline{FD} \perp \overline{JE}$ 。根据 $\cos \gamma = \frac{\overline{FE}}{\overline{FJ}}$ ,  $\cos \beta = \frac{\overline{FI}}{\overline{FJ}}$ ,  $\cos \theta = \frac{\overline{FE}}{\overline{FI}}$ 得如下方程:

$$\cos \gamma = \cos \theta \cos \beta. \quad (1)$$

由于 $\overline{GD} \perp \overline{BF}$ ,得到如下方程组:

$$\begin{cases} \overline{GD} = 2 \overline{GF} \sin \theta, (\theta \in [0, \gamma]) \\ \overline{FB} = 2 \overline{FJ} \cos \beta, (\beta \in [\gamma, 0]) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得:

$$\begin{cases} \overline{GD} = 2a \sin \theta \\ \overline{FB} = 2b \cos \gamma / \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

当分别沿 $\overline{GD}$ 和 $\overline{FB}$ 方向拉伸织物时,由负泊松比的定义得出负泊松比值:

$$\begin{cases} v_{\overline{GD}} = - \frac{(\overline{FB} - \overline{FB}_0) / \overline{FB}_0}{(\overline{GD} - \overline{GD}_0) / \overline{GD}_0} \\ v_{\overline{FB}} = - \frac{(\overline{GD} - \overline{GD}_0) / \overline{GD}_0}{(\overline{FB} - \overline{FB}_0) / \overline{FB}_0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\overline{FB}_0, \overline{GD}_0$  为初始长度;  $\overline{FB}, \overline{GD}$  为拉伸后的长度;  $v_{\overline{GD}}$  为织物纵向的负泊松比值;  $v_{\overline{FB}}$  为织物横向的负泊松比值。

将式(3)代入式(4),得:

$$\begin{cases} v_{\overline{GD}} = -\frac{\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} - 1}{\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} - 1}, \\ v_{\overline{FB}} = -\frac{\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} - 1}{\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} - 1}, \end{cases} \quad (\theta \in [0, \gamma])。 \quad (5)$$

式中: $\theta_0$  为初始张角,即拉伸前  $\angle GFB$  或  $\angle DFB$  的角度; $\theta$  为拉伸后  $\angle GFB$  或  $\angle DFB$  的角度。

由式(5)可以看出:①该折叠织物的负泊松比值  $v_{\overline{GD}}$  和  $v_{\overline{FB}}$  仅取决于  $\theta$  和  $\theta_0$ ,而其他结构参数  $a, b, \beta$  和  $\gamma$  在推导过程中被消除,说明理论上负泊松比值与这些参数无关。②张角  $\theta$  对负泊松比效应有很大的影响, $\theta$  越小,负泊松比值越大,织物结构在编织后初始或者自然松弛状态下折叠的越多。随着横向拉伸的增加,张角  $\theta$  会逐渐增大,负泊松比效应也会逐渐减小。

## 2 负泊松比折叠结构针织物的织造

### 2.1 仪器与材料

**2.1.1 仪器与软件** CMS 530HP 7.2 针电脑横机,德国 STOLL 公司制造;M1-PLUS 花型准备系统,STOLL 公司研发;30 cm 山型夹,市售。

**2.1.2 原料** 双股 30S 混纺纱 [ $m$ (棉): $m$ (竹) = 50:50],山东润宇纺纱有限责任公司生产。

### 2.2 织造方案

基于上述负泊松比折叠几何结构,使用 CMS 530HP 电脑横机 M1-PLUS 花型软件创新设计针织花型图案。该花型使用正反针结合,反面线圈以平行四边形排列,正面线圈呈现“之”字结构,织出的织物由于正面线圈和反面线圈的结构不平衡导致折叠卷曲,从而产生负泊松比效应。为探讨织物线圈长度、平行四边形针数与行数的比值两种工艺参数对负泊松比效应的影响,设计了 5 种不同针数-行数方案,每种方案分别采用 12.0,11.5,11.0 mm 3 种线圈长度织造,织成 15 个小样。织物花型设计方案见表 1。

根据织造方案,织造出的负泊松比折叠小样如图 3 所示。图 3 中织物的几何形状与图 2 折叠结构的几何模型一致。

表 1 织物花型设计方案			
Tab.1 Design scheme of fabric pattern			
针数-行数	循环单位花型图案	针数-行数	循环单位花型图案
$C_9-W_9$		$C_9-W_{25}$	
$C_{17}-W_{17}$		$C_{17}-W_{25}$	
$C_{25}-W_{25}$			

注:针数与行数的比值以  $C_9-W_9$  为例, $C_9$  表示反面线圈形成的平行四边形区域针数数量为 9, $W_9$  表示行数数量为 9;循环单元花形图案中黑色代表反面线圈,白色代表正面线圈。

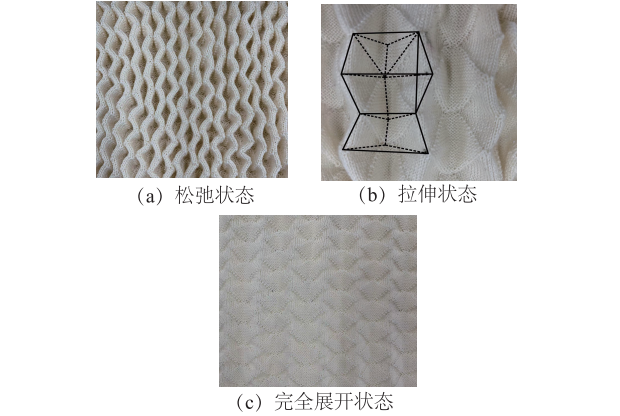


图 3 负泊松比折叠针织物的不同状态  
Fig. 3 Different states of folded knitted fabrics with negative poisson's ratio

## 3 负泊松比值的测量与计算

织物在机器中取出后自然放置 3 天(见图 4)。用夹子夹持织物的两侧,保证其初始状态不受任何拉力的作用,在织物的中间取值并在平行四边形的顶点进行标记以减小误差。设定初始横向宽度 50 mm,初始纵向高度 40 mm。由于负泊松比效应仅存在于纬向拉伸,因此沿纬向拉伸使横向宽度依次增加 10 mm,即横向应变依次按照初始宽度的 20% 递增,同时测量对应的纵向高度的距离,直到织物产生正泊松比停止拉伸。

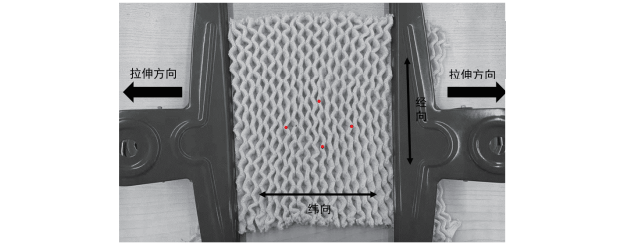


图 4 负泊松比测试方法  
Fig. 4 Negative poisson's ratio test method  
织物载荷方向(即横向)的应变值  $\varepsilon_x$  与垂直于

载荷方向(即纵向)应变值  $\varepsilon_y$  可用下列公式计算:

$$\varepsilon_x = \frac{x_k - x_0}{x_0}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{y_k - y_0}{y_0}. \quad (7)$$

式中:  $x_k$  和  $y_k$  分别为第  $k$  次变形后横向和纵向标记点之间的距离;  $x_0$  和  $y_0$  分别为初始横向宽度和初始纵向高度。

由  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$ , 再推得负泊松比值  $v_{yx}$ , 即

$$v_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}. \quad (8)$$

## 4 结果与分析

对 15 种织物小样进行泊松比值的测定和计算, 并绘制泊松比应力应变曲线。

### 4.1 线圈长度对负泊松比值的影响

织物在拉伸的过程中负泊松比值越大, 织物的负泊松比效应越好。不同线圈长度织物负泊松比值与横向应变的关系如图 5 所示。

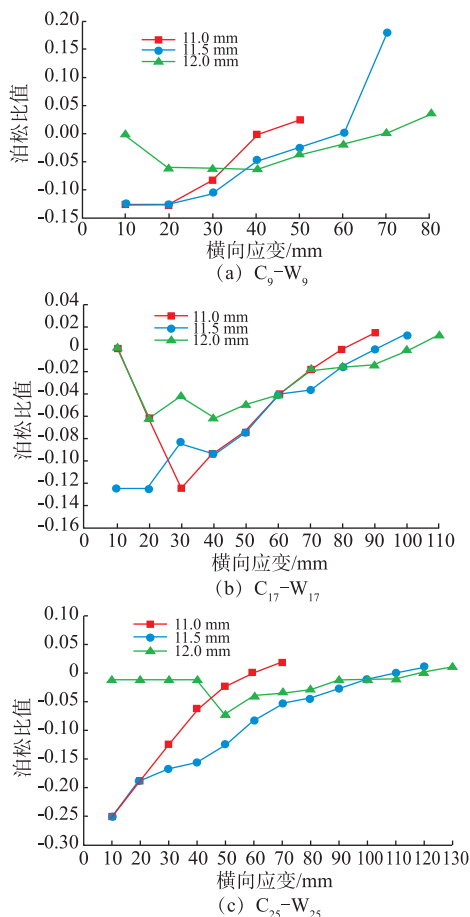


图 5 不同线圈长度的织物负泊松比值与横向应变的关系曲线

Fig. 5 Relationship between negative Poisson's ratio and transverse strain of fabrics with different loop lengths

由图 5 可以看出, 当行数与针数的比值相同时, 织物的负泊松比值整体上随横向应变的增加而减小, 然而也有特殊情况。理论分析认为, 反面线圈形成的平行四边形区域行数和针数比值相同时, 初始张角  $\theta_0$  也相等, 随着横向拉伸的增加,  $\theta$  会逐渐增大, 负泊松比值也会逐渐减小; 但个别织物横向应变前期, 由于线圈长度较长, 花型的针数与行数比值较大, 织物松散, 折叠部位较多, 拉升时织物没有产生弹性, 负泊松比值不稳定。即织物的负泊松比效应越持久。此外织造时可以发现, 当行数和针数的比值相同时, 织物线圈长度越大, 织物越松弛, 这使织物横向拉伸时具有负泊松比值的时间越长, 张角  $\theta$  变化的范围增大, 因此负泊松比的效应越持久。

根据式(5)分析, 当行数和针数的比值相同时, 理论上初始张角是一样的, 但织物对应的最大负泊松比值与理论预测相反, 它们最大负泊松比值关系为:  $v_{11.0 \text{ mm}} \geq v_{11.5 \text{ mm}} \geq v_{12.0 \text{ mm}}$ , 即织物线圈长度越小, 对应的最大负泊松比值越大。在织造时也可以发现相同织物结构线圈长度越小, 编织的织物初始或者自然松弛状态下折叠的越多。说明织物的线圈长度影响横向拉伸过程中张角  $\theta$  的变化, 织物线圈长度越小, 最大负泊松比值越大, 负泊松比的效应越明显。因此, 当织物花型针数与行数的比值相同时, 线圈长度通过改变张角  $\theta$  影响负泊松比效应的持久性和最大负泊松比值。

### 4.2 针数和行数的比值对负泊松比值的影响

不同针数和行数比值的织物负泊松比值与横向应变的关系如图 6 所示。由图 6 可知, 当线圈长度相同、针数与行数的比值不同时, 织物的负泊松比值整体上随横向应变的增加而减小, 这种变化趋势与理论分析一致, 但也有特殊情况原因与 4.1 同。因为横向拉伸的增加,  $\theta$  会逐渐增大, 负泊松比值会逐渐减小。当线圈长度相同时, 织物花型行数不变针数增加, 所对应的最大负泊松比值也会相应增大, 最大负泊松比值关系为:  $v_{C_{25}-W_{25}} > v_{C_{17}-W_{25}} > v_{C_9-W_{25}}$ , 与理论预测值一致。因为行数和针数的比值不同, 导致初始张角  $\theta_0$  不同, 行数不变针数越大, 初始张角  $\theta_0$  越小, 最大负泊松比值越大, 负泊松比的效应越明显。

当线圈长度相同时, 织物花型行数不变, 随着针数的增大, 织物在拉伸过程中具有负泊松比值的时间越长, 即负泊松比效应的持久性也在增加。因为在织造时可以发现织物花型行数不变针数增加时, 织物越松弛, 这使织物横向拉伸的范围变大, 张

角  $\theta$  变化的范围增大,负泊松比的效应越持久。因此,当线圈长度相同时,针数和行数的比值通过影响张角  $\theta$  可以影响负泊松比效应的持久性。

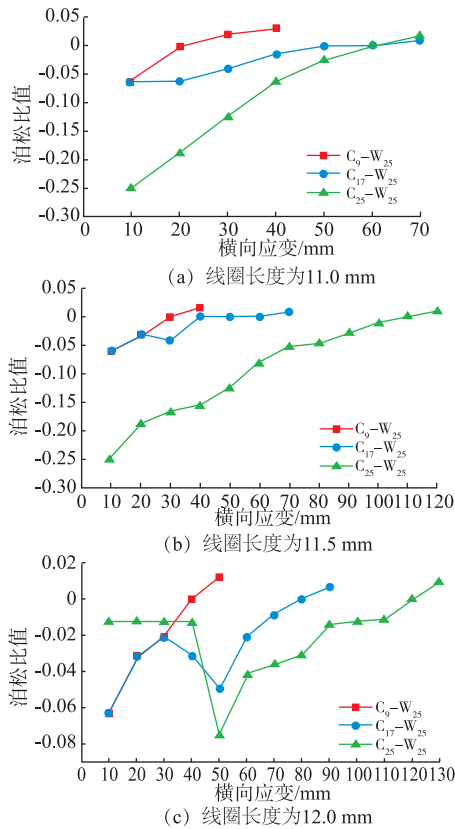


图 6 不同针数和行数比值的织物负泊松比值与横向应变的关系曲线

Fig. 6 Relationship between the negative Poisson's ratio and transverse strain of fabrics with different stitch and row ratios

### 5 结 语

- 1) 提出了一种新型折叠几何结构,可实现具有较好的负泊松比效应的针织织物的制备。
- 2) 电脑横机纬编技术为负泊松比织物的织造提供了一种新的途径。基于负泊松比几何结构,可以通过电脑横机实现负泊松比针织物的织造。
- 3) 张角  $\theta$  是影响负泊松比折叠针织物的重要参数,因为织物线圈长度和织物花型针数和行数的比值变化都改变了张角  $\theta$ ,从而导致织物负泊松比值的变化。
- 4) 负泊松织物特殊的拉胀性(即拉伸时织物垂直于拉伸方向变宽)能使其在各行业有较大的发展空间,如使用防护材料开发负泊松比防护服,可以解决防护材料硬挺限制防护部位活动的问题,这些应用还需要进一步研究。

参考文献:

[ 1 ] CHOI J B, LAKES R S. Fracture toughness of reentrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis[J]. International Journal of Fracture, 1996, 80(1): 73-83.

[ 2 ] BIANCHI M, SCARPA F, SMITH C W. Shape memory behaviour in auxetic foams: mechanical properties [J]. Acta Materialia, 2010, 58(3): 858-865.

[ 3 ] 常玉萍,程锡慧,马丕波,等. 具有负泊松比效应经编织物的制备及其力学性能[J]. 纺织学报, 2015, 36(8): 43-48.

CHANG Yuping, CHENG Xihui, MA Pibo, et al. Manufacture and mechanical properties of negative Poisson's ratio warp knitted fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(8): 43-48. (in Chinese)

[ 4 ] BOAKYE A, CHANG Y P, RAFIU K R, et al. Design and manufacture of knitted tubular fabric with auxetic effect [J]. The Journal of the Textile Institute, 2018, 109(5): 596-602.

[ 5 ] 冯含笑,魏孟媛,薛文良,等. 负泊松比纺织材料的研究现状与应用前景[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(6): 1-5.

FENG Hanxiao, WEI Mengyuan, XUE Wenliang, et al. Research status and application prospect of negative Poisson's ratio textile materials [J]. Technical Textiles, 2017, 35(6): 1-5. (in Chinese)

[ 6 ] EVANS K E, ALDERSON A. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking! [J]. Advanced Materials, 2000, 12(9): 617-628.

[ 7 ] 高玉魁. 负泊松比超材料和结构[J]. 材料工程, 2021, 49(5): 38-47.

GAO Yukui. Auxetic metamaterials and structures [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(5): 38-47. (in Chinese)

[ 8 ] GRIMA J N, GATT R, ALDERSON A, et al. On the auxetic properties of Rotating rectangles with different connectivity[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2005, 74(10): 2866-2867.

[ 9 ] 周铭,杜赵群. 负泊松比结构纺织材料的研究进展[J]. 纺织学报, 2014, 35(2): 99-108.

ZHOU Ming, DU Zhaoqun. Research advances in negative Poisson's ratio structured textile materials [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(2): 99-108. (in Chinese)

[ 10 ] 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(5): 651-655.

(责任编辑:卢杰)