

DOI: 10. 13475/j. fzx. 20180105105

负泊松比经编间隔织物的抗低速冲击性能

徐婉丽¹, 常玉萍¹, 马丕波^{1, 2}

(1. 江南大学 教育部针织技术工程研究中心, 江苏 无锡 214122;
2. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122)

摘要 为研发具有不同负泊松比效应的经编间隔织物, 对 5 种负泊松比经编间隔织物试样进行落锤冲击实验, 通过冲击载荷与时间和位移的关系曲线分析 5 种织物在低速冲击载荷下的形态变化和能量吸收性能, 研究负泊松比织物在低速冲击下的能量吸收性能与负泊松比值及初始冲击能量的关系。结果表明: 织物的能量吸收性能随织物负泊松比值的增大而提高, 织物的能量吸收性能越好, 耐冲击性能也越好; 初始冲击能量的大小也会影响织物的能量吸收速率和耐冲击性能, 初始冲击能量越高, 织物的耐冲击持久性越差, 但对织物总的能量吸收影响不大。

关键词 负泊松比; 经编间隔织物; 低速冲击; 能量吸收

中图分类号: TS 184. 3 文献标志码: A

Low velocity impact resistance of warp-knitted spacer fabrics of negative Poisson's ratio

XU Wanli¹, CHANG Yuping¹, MA Pibo^{1, 2}

(1. *Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*; 2. *Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China*)

Abstract In order to study the impact resistance and energy absorption of warp-knitted spacer fabrics of different negative Poisson's ratios under low velocity impact, five different auxetic warp-knitted samples were used for falling weight impact tests, and the influence relations of energy absorption rate and impact resistance to auxetic performance and initial impact energy were analyzed based on impact load-time curves and impact load-displacement curves. Results show that the energy absorption rate and impact resistance increase with the increase of the negative Poisson's ratios value. The initial impact energy can also affect the energy absorption rate and impact resistance but have few influences on the overall energy absorption value of the fabrics under low velocity impact.

Keywords negative Poisson's ratio; warp-knitted spacer fabric; low velocity impact; energy absorption

近年来, 利用纺织技术编织的负泊松比材料越来越受重视^[1]。负泊松比纺织材料具有特殊的单元结构, 因此表现出很多不同于传统纺织材料的优异性能^[2], 如力学性能、抗压痕性能、抗剪切性能、断裂韧性、同向曲率、能量吸收性能等^[3]。负泊松比纺织材料作为一种新型材料, 广泛应用于防护、汽车工业、航天航空以及国防等领域^[4]。

经编间隔织物是指在双针床拉舍尔经编机上编

织的一种三维立体织物, 它是由在前后针床上形成的 2 片相互独立的织物以及在 2 片织物之间起连接和支撑作用的间隔丝构成^[5]。由于其独特的结构, 经编间隔织物具有良好的抗压弹性、透气透湿性、吸音隔音性、结构整体性以及可成形性等^[6], 因此, 经编间隔织物在成型鞋材、时装面料、建筑增强材料、包装材料等方面有着广泛的应用^[7]。

目前对具有负泊松比效应的经编间隔织物在低

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-08-10

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016M591767, 2017T100325); 中国纺织工业联合会应用基础研究项目(J201604)

第一作者简介: 徐婉丽(1994—), 女, 硕士生。研究方向为产业用针织物结构与性能。

通信作者: 马丕波, E-mail: mapibo@jiangnan.edu.cn。

速冲击载荷下的能量吸收性能的研究还较少^[8-9]。为此,本文针对负泊松比经编间隔织物在低速冲击下的能量吸收性能进行研究,分别分析了不同负泊松比经编间隔织物在相同初始冲击能量下的能量吸收性能,以及同种负泊松比经编间隔织物在不同初始冲击能量下的能量吸收性能。

1 实验

1.1 试样制备

设计了 5 种具有不同负泊松比效应的经编间隔织物试样,其中 1#~4# 织物仅 GB4 的垫纱数码不同,1# 试样与 5# 试样仅送经量不同,试样所用原料规格与垫纱组织设置以及送经量设置分别如表 1、2 所示。经编间隔织物在 RD7/2-12EN 型拉舍尔型经编

机上编织完成。下机后经编间隔织物的厚度为 3.5 mm,横密为 10 纵行/cm,纵密为 12 横列/cm。

负泊松比经编间隔织物试样具有负泊松比效应的原理是:在典型的经编六角网眼间隔织物的基础上添加编链和缺垫组织,使得原来结构较为规整的经编六角网眼间隔织物由于受力不匀而产生歪斜,当受到拉伸作用力时,原本歪斜的六角网眼就会发生旋转变形,使六角网眼受力变形后膨胀变大,从而使经编间隔织物具有一定的负泊松比效应^[10]。采用 R-3 型定型烘焙机对负泊松比经编间隔织物进行热定型整理(定型温度为 150 °C,定型时间为 120 s),使得原本就倾斜的六角网眼织物获得更为显著的歪斜效应。在拉伸时,六角网眼受力变形程度更大,经编间隔织物的负泊松比效应更加明显^[11]。

表 1 原料规格及垫纱组织设置

Tab.1 Material specification and guide bar setting

梳栉	原料规格	垫纱组织
GB1	22.22 tex 涤纶低弹丝	(2-3-2-2/2-1-2-2) × 3 / (1-0-1-1/1-2-1-1) × 3 // 1 穿 1 空
GB2	22.22 tex 涤纶低弹丝	(1-0-1-1/1-2-1-1) × 3 / (2-3-2-2/2-1-2-2) × 3 // 1 穿 1 空
GB3	11.11 tex 涤纶半光丝	1-0-0-0/0-1-0-0/0-0-0-0/0-0-0-0/0-1-1-1/1-0-0-0/0-1-1-1/1-0-1-1/1-1-1-1/1-1-1-1/1-0-0-0/0-1-1-1 // 满穿
GB4	0.09 mm 涤纶有光单丝	1# 试样: 0-1-0-1/1-0-1-0 // 满穿; 2# 试样: 1-0-1-0/0-1-0-1 // 满穿; 3# 试样: (0-1-0-1) × 6 / (1-0-1-0) × 6 // 满穿; 4# 试样: (1-0-1-0) × 6 / (0-1-0-1) × 6 // 满穿; 5# 试样: 0-1-0-1/1-0-1-0 // 满穿
GB5	11.11 tex 涤纶半光丝	1-1-1-0/0-0-0-1/1-1-0-0/0-0-0-0/0-0-0-1/1-1-1-0/0-0-0-1/1-1-1-0/0-0-1-1/1-1-1-1/1-1-1-0/0-0-0-1 // 满穿
GB6	22.22 tex 涤纶低弹丝	(1-1-1-0/1-1-1-2) × 3 / (2-2-2-3/2-2-2-1) × 3 // 1 穿 1 空
GB7	22.22 tex 涤纶低弹丝	(2-2-2-3/2-2-2-1) × 3 / (1-1-1-0/1-1-1-2) × 3 // 1 穿 1 空

表 2 送经量设置

Tab.2 Let-off setting

试样编号	梳栉编号	横列数	送经量 / (mm·腊克 ⁻¹)
1#			
2#	GB1、GB2、	12	970
3#	GB6、GB7		
4#			
		4	1 010
		1	900
	GB1、GB7	6	1 010
		1	900
5#		5	1 010
		1	900
	GB2、GB6	4	1 010
		1	900
		1	1 010

1.2 泊松比值测定

分别对 5 种试样截取适当的长度,用夹子将织物的纵向固定,保证其初始状态下基本不受纵向力的作用。设定织物初始状态下纵向宽度为 50 mm,横向宽度为 40 mm,再将夹子沿纵向向下移动,且每

次增加 1 mm,即纵向应变依次按照初始宽度的 2% 递增,同时测量织物正中间横向 2 点间的水平距离,从而得到织物载荷方向(即纵向)的应变与垂直于载荷方向(即横向)的应变,再根据泊松比的定义式分别计算出所有试样的泊松比值^[11]。每块试样测试 5 次,结果取平均值。试样 1#~5# 的泊松比值分别为 -0.375、-0.437、-0.513、-0.614、-0.625。

1.3 冲击性能测试

根据 ASTM D7136 /D7 136 M—2012 《纤维增强聚合物基体复合材料抗落锤撞击损失测量的标准试验方法》,采用美国英斯特朗公司生产的 Instron Dynatup 9250HV 型冲击试验机对织物进行低速冲击实验,测试条件为:温度(25 ± 2) °C,相对湿度(65 ± 2)%。该机器的冲击头呈半球形且直径为 12.5 mm,在冲击头的上方连接有一个压力传感器,其可承受的最大载荷为 22.4 kN。冲击测试方案如表 3 所示,其中每种试样均测试 5 次,测试结果取平均值。

表 4 冲击实验方案

Tab. 4 Parameters of impact tests

试样编号	冲击速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	冲击能量/J
1 [#]	1.5	7.013
2 [#]	1.5	7.013
3 [#]	1.0	3.125
3 [#]	1.5	7.013
3 [#]	2.0	12.500
4 [#]	1.5	7.013
5 [#]	1.5	7.013

2 结果与讨论

2.1 冲击过程分析

对负泊松比经编间隔织物试样进行低速冲击实验,整个冲击过程包括 3 个阶段:第 1 个阶段是重锤接触试样前,落锤作自由落体运动,将重力势能转换为动能;第 2 个阶段是试样被冲击阶段,落锤首先与织物试样相接触,落锤加速度减小,落锤落至最低点时完成冲击,落锤速度为零,织物对落锤冲击的能量吸收主要发生在这个阶段;第 3 阶段是冲击结束阶段,落锤被织物试样弹离,剩余能量再次转换为落锤的动能和势能等。与此同时,处于上升运动状态的落锤再次下落且被防二次冲击装置挡住^[12]。

2.2 冲击载荷-时间曲线

5 种负泊松比经编间隔织物试样在 7.013 J 的初始冲击能量下的冲击载荷-时间关系曲线如图 1 所示。可知,在冲击过程中,冲击载荷-时间曲线的斜率逐渐增大,且织物试样的耐冲击时间从长到短依次为试样 5[#]→4[#]→3[#]→2[#]→1[#]。其中,试样 4[#]和试样 5[#]的冲击时间较长。5 种织物试样的冲击载荷峰值从大到小分别为试样 4[#]→3[#]→5[#]→2[#]→1[#]。结合测定的负泊松比值得出:织物的负泊松比性能越好,织物耐冲击时间越长,耐冲击性能越好。试样 3[#]、4[#]、5[#]的冲击载荷峰值都明显高于试样 1[#]、2[#],可推断较好的负泊松比性能可带来较高的耐低速冲击载荷峰值。

试样 3[#]在 3.125、7.013、12.500 J 的初始冲击能量下的冲击载荷-时间曲线如图 2 所示。可看出,在冲击的初始阶段,12.500 J 初始冲击能量下的试样所受到的冲击载荷-时间曲线斜率最大,其次是 7.013 J 初始冲击能量下的试样,3.125 J 初始冲击能量下的曲线斜率最小,但织物在 3 种不同初始冲击能量下的冲击载荷峰值相差不大。由此可见,初始冲击能量越大,试样所受到的冲击载荷的增速越大,但初始冲击能量对织物冲击载荷峰值的影响不大。从图 2 还可得出,当冲击结束时,3.125 J 初始

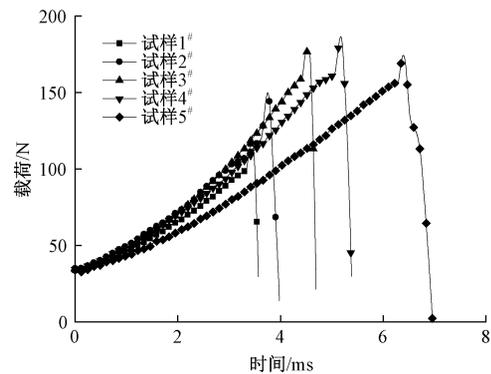


图 1 相同初始冲击能量下 5 种试样冲击载荷-时间曲线

Fig. 1 Impact load and time curve of five samples under same initial impact energy

冲击能量下织物试样的耐冲击时间最长,12.500 J 初始冲击能量下的最短,而 7.013 J 初始冲击能量下的介于二者之间;故初始冲击能量越大,织物的耐冲击时间越短,耐冲击性能越差。

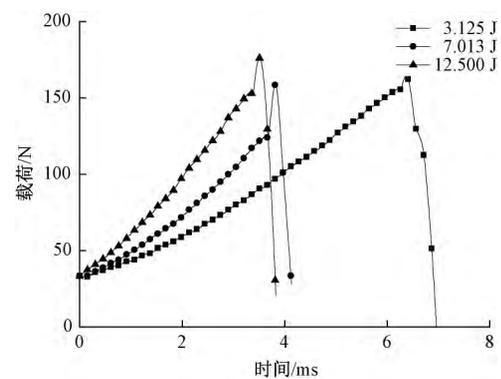


图 2 不同初始冲击能量下 3[#]试样的冲击载荷-时间曲线

Fig. 2 Impact load and time curve of sample 3[#] under different initial impact energies

2.3 冲击载荷-位移曲线

5 种负泊松比经编间隔织物试样在 7.013 J 初始冲击能量下的冲击载荷-位移曲线如图 3 所示。在冲击过程中,冲击载荷-位移曲线的斜率逐渐变大,且织物试样从开始受到冲击到冲击结束,最大位移从大到小分别为试样 4[#]→5[#]→3[#]→2[#]→1[#],试样的载荷峰值从大到小分别是试样 4[#]→3[#]→5[#]→2[#]→1[#]。可得出,具有较好负泊松比性能的织物在低速冲击下,会发生相对较大的位移。同样的,在整个低速冲击过程中,负泊松比性能较好的织物试样可承受的最大冲击载荷普遍高于负泊松比性能较差的织物。

试样 3[#]在 3.125、7.013、12.500 J 初始冲击能量下的冲击载荷-位移曲线如图 4 所示。可知:在 3 种不同的初始冲击能量下,试样 3[#]从开始受到冲击到冲击结束,位移极限值相差不大,均为

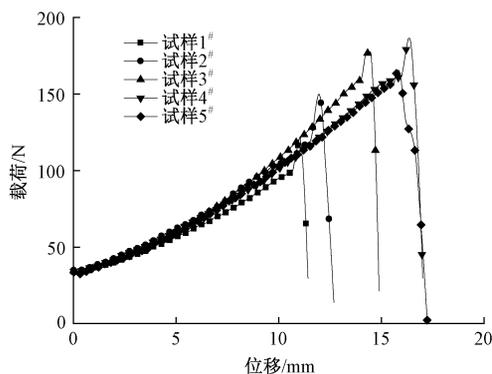


图 3 相同初始冲击能量下 5 种试样冲击载荷-位移曲线

Fig. 3 Impact load and displacement curve of five samples under same initial impact energy

15.5 mm左右; 试样 3# 的冲击载荷峰值在初始冲击能量为 3.125 J 时相对较小, 但与初始冲击能量为 12.500、7.013 J 时的冲击载荷相差不大, 因此, 初始冲击能量的大小对织物在低速冲击下的冲击载荷峰值影响甚微。

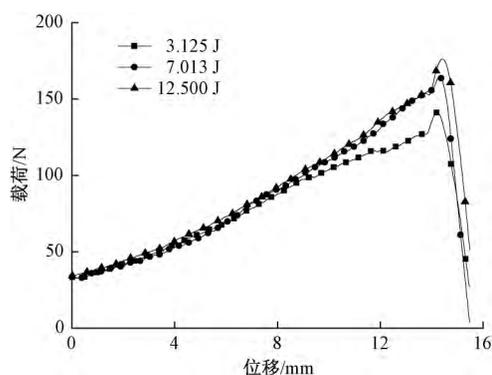


图 4 不同初始冲击能量下 3# 试样的冲击载荷-位移曲线

Fig. 4 Impact load and displacement curve of sample 3# under different initial impact energies

2.4 能量吸收-时间曲线

5 种负泊松比经编间隔织物试样在 7.013 J 初始冲击能量下的能量吸收-时间曲线如图 5 所示。冲击载荷-时间曲线下的面积即为织物试样在整个低速冲击过程中吸收的能量。由图可知, 试样 2#、3#、4#、5# 的能量吸收曲线较为接近, 这与 4 种织物的泊松比值差异不大有关。织物能量吸收的增长速率随时间变化逐渐增大, 即织物的能量吸收越来越快; 且试样 3#、4# 和 5# 在整个冲击过程中的总能量吸收较高, 而试样 1#、2# 总能量吸收则相对较低。结合 5 种试样的泊松比值可推断: 在低速冲击下, 经编间隔织物的负泊松比值越大, 织物在冲击下的能量吸收性能越好, 且随着低速冲击的发生, 织物吸收能量的速率越来越快。

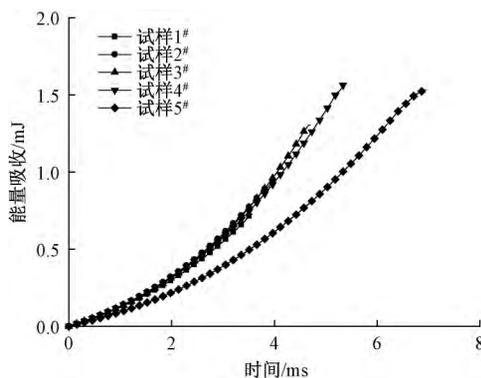


图 5 相同初始冲击能量下 5 种试样的能量吸收-时间曲线

Fig. 5 Energy absorption and time curve of five samples under same initial impact energy

在低速冲击过程中, 经编间隔织物对冲击能量的吸收过程为: 当冲击头与织物试样表面接触时, 冲击头的能量首先通过织物的结构变形被吸收, 其次通过织物的材料变形进行吸收, 当 2 种变形均达到极限时, 织物的能量吸收也达到极限, 剩余的能量会转换为冲击头向上的动能等。冲击发生时, 负泊松比经编间隔织物的负泊松比结构从冲击点开始发生变形, 折线形排列的旋转六角网眼开始膨胀展开成普通的六角网眼, 之后织物在冲击方向和冲击点附近均会产生压缩效应, 此时, 冲击点附近的织物局部密度陡然上升, 织物试样对能量的吸收也急剧上升。这也解释了负泊松比性能较好的织物耐冲击性能也更好的现象。

试样 3# 在 3.125、7.013、12.500 J 初始冲击能量下的能量吸收-时间曲线如图 6 所示。当负泊松比经编间隔织物受到这 3 种初始冲击能量的冲击时, 尽管织物的能量吸收速率不同, 但整个冲击过程结束后, 织物总体的能量吸收值相差不大, 即初始冲击能量的大小对负泊松比经编间隔织物在低速冲击下的能量吸收性能影响不大。

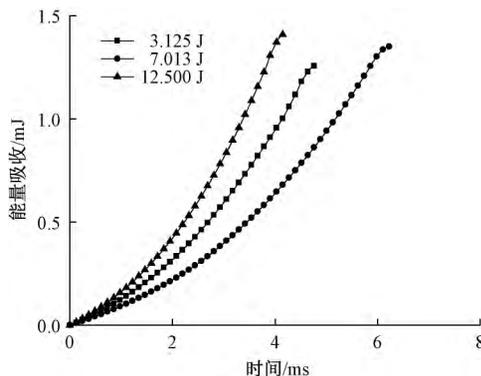


图 6 不同冲击能量下 3# 试样的能量吸收-时间曲线

Fig. 6 Energy absorption and time curve of fabric sample 3# under different initial impact energies

3 结 论

为研究负泊松比经编间隔织物在低速冲击下的能量吸收性能,本文对 5 种具有不同负泊松比效应的经编间隔织物试样进行了冲击实验,分别研究了不同负泊松比效应和不同初始冲击能量对织物耐冲击性能以及能量吸收性能的影响,得出如下结论:

1) 经编间隔织物的负泊松比性能与织物对冲击能量的吸收能力、织物的耐冲击性能成正相关,即经编间隔织物的负泊松比性能越好,织物在同等条件下可吸收的冲击能量也越多,耐冲击性能也越好。主要原因是经编间隔织物的负泊松比结构在受到冲击载荷时会发生结构展开变形,可吸收部分冲击能量,同时也延长了织物的耐冲击时间,使织物具有更大的冲击位移极限值。

2) 不同的初始冲击能量会影响负泊松比经编间隔织物的耐冲击性能和能量吸收速率,但对织物的可承受载荷、耐冲击位移极限和能量吸收性能影响不大。初始冲击能量越大,负泊松比经编间隔织物的耐冲击时间越短,耐冲击性能越差。 FZXB

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨鸣波,阳霞,李志明,等. 负泊松比材料的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程,2001,17(6): 15-18.
YANG Wubo, YANG Xia, LI Zhongming, et al. Structure and properties of non-Poisson's ratio material[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2001, 17(6): 15-18.
- [3] 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.
- [4] 杨智春,邓庆田. 负泊松比材料与结构的力学性能研究及应用[J]. 力学进展,2011,41(3): 335-350.
YANG Zhichun, DENG Qingtian. Research and application of mechanical properties of material and structure with negative Poisson's ratio[J]. Progress in Mechanics, 2011, 41(3): 335-350.
- [5] 郭晓芳,龙海如. 经编间隔织物的冲击性能[J]. 纺织学报,2013,34(4): 45-52.
GUO Xiaofang, LONG Hairu. Impact properties of warp knitted spacer fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(4): 45-52.
- [6] 蒋高明,李大俊. 经编间隔织物的结构与性能[J]. 江南大学学报(自然科学版),2003,2(4): 395-398.
JIANG Gaoming, LI Dajun. The structure and properties of the warp-knitted spacer fabrics[J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition), 2003, 2(4): 395-398.
- [7] 叶晓华,胡红,冯勋伟. 经编间隔织物的应用与开发前景[J]. 针织工业,2005(2): 1-2.
YE Xiaohua, HU Hong, FENG Xunwei. Application and development prospect of warp-knitted spacer fabric[J]. Knitting Industries, 2005(2): 1-2.
- [8] 魏俊,赵建华. 复合材料板受低速冲击时能量吸收的实验研究[J]. 实验力学,1998(2): 207-211.
WEI Jun, ZHAO Jianhua. Experimental study on energy absorption of composite plate by low-speed impact[J]. Experimental Mechanics, 1998(2): 207-211.
- [9] 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.
- [10] 常玉萍,马丕波,钟文鑫,等. 基于经编网眼结构的负泊松比织物设计[J]. 纺织学报,2016,37(2): 44-49.
CHANG Yuping, MA Pibo, ZHONG Wenxin, et al. Design of auxetic fabrics based on warp-knitted net Structure[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(2): 44-49.
- [11] 常玉萍,马丕波. 负泊松比经编间隔织物的准静态拉伸性能[J]. 纺织学报,2018,39(4): 47-53.
CHANG Yuping, MA Pibo. Tensile properties under quasi-static of autextic warp-knitted spacer fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(4): 47-53.
- [12] GUO Xiaofang, LONG Hairu, LI Zhao. Investigation on the impact and compression-after-impact properties of warp-knitted spacer fabrics[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(9): 904-916.