

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180306806

锯齿形三维机织间隔复合材料的弯曲性能

张雪飞, 王晶晶, 吕丽华, 叶方

(大连工业大学, 辽宁 大连 116034)

摘要 为解决层间隔复合材料易开裂和整体性差的问题,采用绿色环保的玄武岩低捻长丝作为经、纬纱,合理设计经向截面图和组织图,并在普通织机上织造3种不同间隔高度的锯齿形三维机织间隔织物。以所得的锯齿形三维机织间隔织物作为增强材料,环氧树脂基树脂作为基体,利用真空辅助成型工艺,制备锯齿形三维机织间隔复合材料,同时对三维机织间隔复合材料进行三点弯曲性能测试,得到弯曲载荷-位移曲线、能量吸收图和破坏模式。结果表明:复合材料的纬向是主要承力方向;组织循环个数越多的材料表现出更好的弯曲性能;在一定间隔高度范围内,间隔高度越高的锯齿形三维机织间隔织物承受的弯曲载荷和吸收的能量也越高;锯齿形三维机织间隔复合材料的破坏模式是材料上表层受压,下表层受拉,而连接层受压;在作用力下材料只是出现明显的变形,但未出现材料整体的破坏。

关键词 三维机织间隔复合材料;玄武岩纤维;弯曲性能;真空辅助成型工艺

中图分类号:TS 101.2 文献标志码:A

Bending properties of zigzag 3-D woven spacer composites

ZHANG Xuefei, WANG Jingjing, LÜ Lihua, YE Fang

(Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

Abstract For solving the easily-cracking and poor-integrated problem of laminated composites, the zigzag 3-D woven spacer fabric with the basalt fiber filaments tows as warp and weft yarns were fabricated on the common loom by reasonable design, which had three different spacer heights. The 3-D woven basalt fiber spacer composites were obtained from epoxy vinyl resin as matrix and 3-D woven basalt fiber spacer fabric as reinforced material by vacuum assisted resin transfer molding process. Then, the three-point bending property of 3-D woven basalt fiber spacer composite was tested by using RGY-5 microcomputer to control electronic universal machine, and the load-displacement curves, absorption energy-displacement histogram and failure model were obtained. Results show that the main bearing direction is the weft of material. The more numbers of organization will have better bending property at the rang of certain heights, the values of the load and absorption energy are bigger with the higher spacer height. The failure model of zigzag shaped 3-D woven spacer composite is that the upper surface of the material is under pressure, the bottom surface is under tension, and the connecting layer is under pressure. Under the bending load, the material are not integrally destructed, but obviously deforms.

Keywords 3-D woven spacer composite; basalt fiber; bending property; vacuum assisted resin transfer molding process

层间隔复合材料在加工成型过程中会产生较多的不可控的结构缺陷,导致材料整体性能差,且当材料处于高温高湿环境或交变外力作用时,层与层结构黏合处容易开裂破坏或脱落^[1-2]。为改善层合

间隔复合材料的层间性质及满足对结构和多功能复合材料的需要,三维纺织技术应运而生。三维间隔复合材料是在长、宽、高3个方向形成1个不分层的三维整体网状结构,消除了传统层间隔材料的

收稿日期:2018-03-28 修回日期:2018-11-21

基金项目:辽宁省高等学校产业技术研究院重大项目(6999180102);辽宁省科技创新团队项目(LT2017017)

第一作者:张雪飞(1992—),男,硕士生。主要研究方向为三维纺织结构与功能复合材料。

通信作者:吕丽华(1978—),女,副教授,博士。主要研究方向为三维纺织结构与功能复合材料。E-mail:lvlh@dlpu.edu.cn。

“层”的结构,从根本上解决了传统层间隔材料的结构缺陷^[3],使得三维间隔复合材料可以成为结构件,用作轻质板材、壳体材料、噪声屏蔽材料,也可用在流体的输送管道等领域,具有广阔的发展前景。

作为三维间隔复合材料的增强结构,三维纺织间隔织物的成型方式主要包括非织造、针织、编织和机织^[4-6]。Vasile 等^[7-8]对非织造三维间隔织物的生产工艺及其复合材料的力学性能进行了研究,发现材料的孔洞结构需要经过特殊的成型机械来保留和稳固,而且织物的间隔结构式依靠纤维之间固结形成,所以材料的整体内部约束不够牢固,难以成为承力结构件。陈思等^[9-10]研究了针织三维间隔织物的成型工艺及材料的力学性质,表明针织三维间隔织物形式多样且效率高,但该类间隔织物的连接层因为针织成型工艺的特殊性只能是纱线连接,故该类材料的结构不够稳定。李嘉禄^[11]自主研发了三维异形整体编织工艺及相关机械,开发了多品类的先进多功能复合材料制件和主承力复合材料制件的增强体织物;但由于编织工艺是多纱线同时参与织造,其制备机械相对特殊,故而编织三维间隔织物生产成本高昂。Mountasir 等^[12]研究了机织三维间隔织物的织造工艺,介绍了普通织机和特殊织机织造的工艺流程和原理,表明机织三维间隔织物可在普通织机设备上通过“压扁—织造—还原”工艺进行开发,极大地降低了研发成本和对织造机械的要求,具有良好的应用前景。

玄武岩纤维是以天然火山喷出岩为原材料制备的无机非金属材料,具有优异的环境亲和特性,可直接降解为土壤母质,不会污染破坏环境,且该纤维也具有强度高、模量高、抗压强度高、剪切强度高、优良性能^[13]。前期研究在小样织机上对玄武岩纤维三维机织物进行了开发,并对玄武岩纤维三维机织复合材料的力学性能进行了测试^[14-15],本文结合玄武岩纤维低价、环保、高性能优势和三维机织物易成型、整体性能好的特点,开发不同间隔高度的三维机织间隔复合材料,并探究材料的弯曲性能,得到材料对应的载荷—位移曲线和破坏形态。

1 实验部分

1.1 锯齿形三维机织间隔织物的设计

基于探究间隔连接层为织物的间隔复合材料,本文选择锯齿形经向截面作为探究对象,如图 1 所示。其中小圆代表纬纱,线条代表经纱。在该示意图的基础上,再根据经、纬纱的交织情况得到上机组织图,如图 2 所示,其中 H 为不同织物的高度。

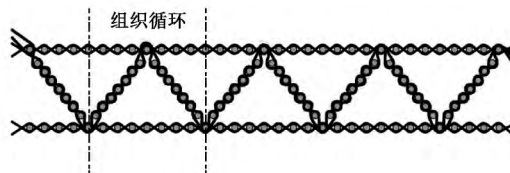


图 1 锯齿形三维间隔织物经向截面示意图

Fig.1 Warp section of zigzag 3-D spacer fabric

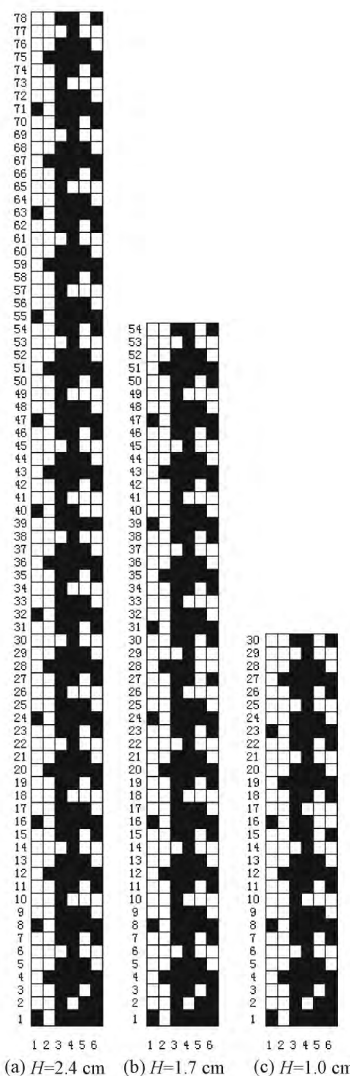


图 2 锯齿形三维间隔织物组织图

Fig.2 Weaving diagram of zigzag 3-D spacer fabrics

1.2 锯齿形三维机织间隔织物的织造

选用浙江石金玄武岩股份有限公司生产的 383 tex 玄武岩低捻(10 捻/(10 cm))长丝纱作为经、纬纱,在普通小样织机 SGA598 上进行织造。锯齿形三维机织间隔织物的间隔分别为斜边 7、13、19 纬,单层经、纬密分别为 60、118 根/(10 cm),筘入数为 6 根,筘号为 30 筘片数/(10 cm),总经根数为 360。

1.3 锯齿形三维机织间隔复合材料的制备

选用无锡钱广化工原料有限公司生产的 V-118

环氧树脂改性基树脂及其配套的促进剂及固化剂,其体积比为 $V(\text{树脂}) : V(\text{促进剂}) : V(\text{固化剂}) = 100 : 1.25 : 1.25$ 。将制备的间隔织物填充进尺寸合适的水泥模具,并将其放置于真空辅助成型(VARTM)系统(见图3)中密封并抽真空,之后吸入调制好的树脂。在常温下固化24h,然后在80℃的烘箱中热化2h得到成品。采用燃烧法,测得 H 为1.0、1.7、2.4cm的锯齿形三维机织间隔复合材料的纤维体积分数分别为22.51%、19.94%、17.64%。

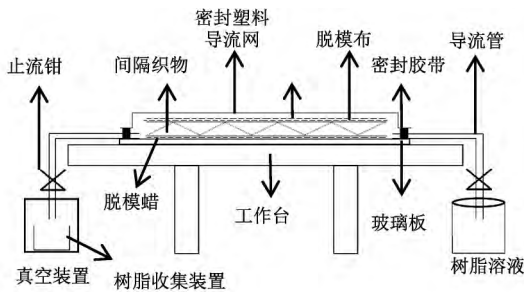
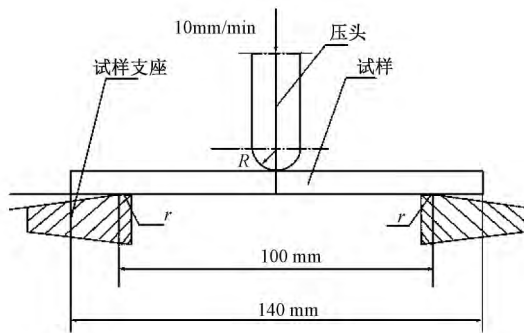


图3 VARTM系统
Fig.3 VARTM system

1.4 弯曲性能测试

参照GB/T 1446—2005《纤维增强塑料性能试验方法总则》和GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》,对所制得的三维机织间隔复合材料进行制样和三点弯曲测试。将试样制成长为140mm,间隔分别取1.0、1.7、2.4cm,跨距选用100mm。在加载速度为10mm/min的RGY-5型微机控制电子万能试验机上进行弯曲测试,得到相关性能指标。图4示出弯曲装置示意图。



r 为支座圆角半径; R 为加载上压头半径。

图4 弯曲装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of bending device

2 结果与讨论

2.1 试样方向对材料弯曲性能的影响

由试样测试得到经、纬向锯齿形三维间隔复合材料载荷-位移曲线,如图5所示。

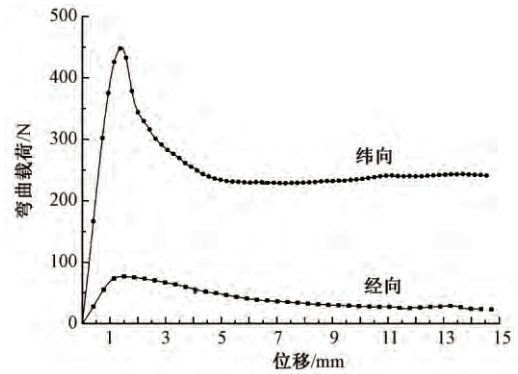


图5 经、纬向锯齿形三维间隔复合材料
载荷-位移曲线

Fig.5 Bending load-displacement curves
of zigzag 3-D spacer composites with
warp and weft orientation

从图5可发现,经、纬向锯齿形三维机间隔复合材料的弯曲载荷-位移曲线有明显不同的最大载荷点和曲线趋势形态,这说明经、纬方向上的锯齿形三维机织间隔复合材料在相同的实验条件下,存在不同的受力形式和破坏形式。

从单一的经向试样来看,试样材料中包括连续的锯齿状结构,但单个锯齿形组织宽度有限且材料的上、下层和连接层的厚度较小,如图6所示。在三点弯曲实验中可观察到:当压头作用到试样表面时,试样整体迅速出现弯曲,上层受压,下层受拉,继而压头接触表面出现破坏,且材料表面出现变形,弯曲载荷-位移曲线也达到最大载荷点;材料继续受力,破坏扩张,曲线出现下降。结合曲线和实验情况可知,经向锯齿形三维机织间隔复合材料的受力面仅仅只是压头和材料的接触表面,而锯齿形状结构在三点弯曲测试中并不能为材料整体提供支撑。随着位移的逐步增加,试样表面受作用力进而较快地出现变形和破坏,这是因为材料增强体结构是采用平纹结构,形成复合材料后表层较薄,因而所能承受的作用力也相对较小。由此可知,表层不能提供较大的抗破坏强力。

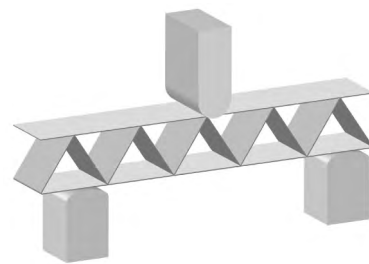


图6 经向试样材料示意图

Fig.6 Warp sample schematic diagram

纬向试样只有一个纬向锯齿形结构贯穿整个试

样,且试样表面有中间连接层与上层表面连接的结节,亦是贯穿试样表面。在三点弯曲实验过程中,如图 7 所示,当压头与试样接触后,试样受力整体出现小幅度弯曲,上层受压,下层受拉,但没有迅速地出现明显的破坏,表层平面完整。随着位移的继续增加,试样上层弯曲明显,上层平面出现较大的弯曲,且受挤压处出现白色痕迹,中间连接层发生破坏,向下塌陷且发出明显的材料断裂声,而下表层则是呈稍微弯曲的状态,曲线载荷达到最大值。材料继续受力,材料破坏加大,曲线开始下降。对比经向试样实验结果可以发现,因为单一表面能承受的作用力较小,所以纬向试样主要承受作用力的部位是锯齿形状结构,连接层的 2 个支撑墙为整体结构提供支撑,使得锯齿结构具有良好的抗弯曲性能。且由经、纬向曲线对比可知,锯齿形状结构可明显提升材料的力学性质。

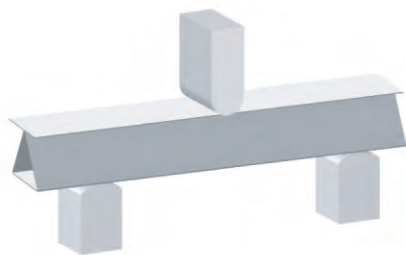


图 7 纬向试样示意图

Fig.7 Weft sample schematic diagram

由以上分析可知:所制锯齿形三维机织间隔复合材料的主要承力方向为纬向,且承力部位为锯齿形状结构;而复合材料经向则是保证锯齿形状结构的连续。

2.2 组织循环个数对材料弯曲性能的影响

图 8 示出单、双锯齿形三维间隔复合材料载荷-位移曲线。

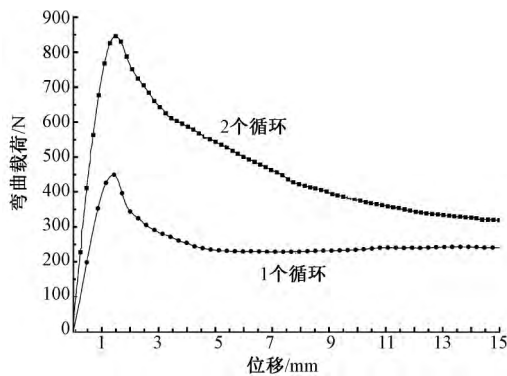


图 8 单、双锯齿形三维间隔复合材料载荷-位移曲线

Fig.8 Bending load-displacement curves of single and doublezigza 3-D spacer composites

从图 8 可以看出:双锯齿形的曲线峰值要高出

单锯齿形的曲线峰值,也就是说明 2 个锯齿形结构材料的抗弯曲性能要高出单个结构的材料,即材料的抗弯曲性能与材料支撑结构的数量相关:材料在作用力下的支撑结构越多,材料的抗弯曲性能越好。这是因为 2 个锯齿形结构之间存在相互的协同作用,使得作用力被分配到更多的锯齿形结构上,故而抗弯曲性能更加优异。

2.3 试样间隔高度对材料弯曲性能的影响

表 1 示出复合材料弯曲强度测试结果。图 9 示出不同高度三维间隔复合材料载荷-位移曲线。可以看出:3 种不同高度的锯齿结构的弯曲载荷-位移曲线形状大体上相似,局部存在一些不同的细节,这说明 3 个梯度的试样具有相似的破坏情况和失效模式,这是由于它们具有相同的结构和成型方式。在所得曲线中,2.4 cm 间隔高度的试样表现出最好的抗弯曲能力,其弯曲载荷数值最大;1.7 cm 间隔高度的试样,其弯曲载荷数值次之;1.0 cm 间隔高度的试样,其弯曲载荷数值最小。由此可见,在一定的高度范围内,间隔高度越高的锯齿形三维机织间隔复合材料表现出更加优良的抗弯曲性能,可以获得更大的弯曲载荷。

表 1 弯曲强度测试结果

Tab.1 Results of bending strength

H/cm	方向	试样平均数/个	方差	强度/MPa
1.0	纬	415.7	21.1	5 668.6
1.7	经	74.0	10.1	153.6
1.7	纬	449.3	12.1	1 166.0
2.4	纬	499.3	24.9	433.2

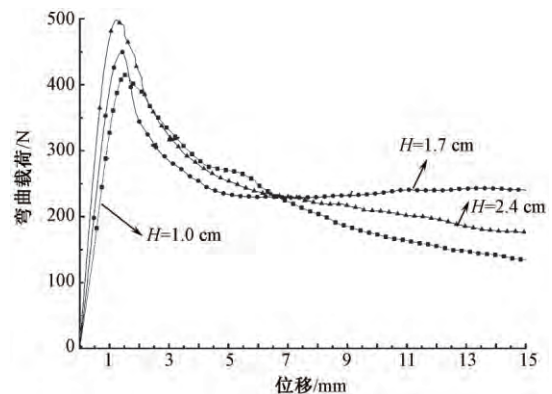


图 9 不同高度三维间隔复合材料载荷-位移曲线

Fig.9 Bending load-displacement curves of zigzag 3-D spacer composites with different heights

2.4 复合材料能量吸收值

通过弯曲载荷-位移曲线进行面积积分得到锯齿形三维机织间隔复合材料在 10 mm/min 加载速度下的能量吸收值, H 为 2.4、1.7、1.0 cm 的复合材料能量吸收值分别为 10.5、7.8、6.1 J。不同高度的

三维机织间隔复合材料的能量吸收情况也不相同。间隔高度越小的三维机织间隔复合材料,所吸收能量也越少。在一定的间隔高度内,三维机织间隔复合材料的能量吸收量随间隔高度的增加而增加。而导致这种趋势的原因与三维机织间隔复合材料本身的抗弯曲能力和材料破坏状态相关,从实测的弯曲载荷-位移曲线可知,间隔高度越高的三维机织间隔复合材料具有更加优异的抗弯曲性能。

材料对于能量的吸收能力与自身受力破坏情况相关,本文实验中材料的破坏形式主要有:1) 环氧树脂基树脂的破坏。主要包括树脂的开裂和分层,在弯曲载荷的施加过程中,作用力沿着纤维方向扩散、传递,并在压头处形成应力集中区域,造成树脂破坏,且在连接层引起树脂分层。2) 纤维和树脂基体的分离。作用力在纤维方向上进行传递时,引起纤维和树脂的不同形变,使得纤维和树脂黏合界面产生变化,纤维和树脂形成脱黏和剥离。3) 纤维的损伤。纤维在三维机织间隔复合材料中提供大部分的抗张强度,使得材料在变形过程被拉伸和抽拔出集体,而玄武岩纤维本身就具有高强高模的特性,故而使压头的部分动能也转化为纤维的动能。

2.5 复合材料破坏模式

图10示出锯齿形三维机织间隔复合材料三点弯曲测试过程。压头以10 mm/min的速度匀速下降,首先与矩形三维机织间隔复合材料上表面相接

触(见图10(a)),上表面轻微弯曲变形并发出轻微噼啪响声。随压头的下降,矩形三维机织间隔复合材料上下表面出现不同程度的弯曲(见图10(b)),材料上表面出现明显的凹陷,且出现在压头作用附近,区域有限;而下表面也出现向下凸出现象,但程度轻微。在材料弯曲的过程中伴有清脆的噼啪响声,即树脂破坏,而连接层则因受力出现明显向外凸的变形,且连接层树脂出现明显的分层破坏现象;压头继续下降,锯齿形三维机织间隔复合材料变形更加严重(见图10(c)),三维机织间隔复合材料上表面向下凹陷严重,下表面也出现明显的向下凸现象,连接层则是明显的向外凸且有树脂的分层剥离。但是材料并未出现断裂情况,且破坏严重的区域只在压头附近。

图11示出锯齿形三维机织间隔复合材料弯曲破坏形态图。锯齿形三维机织间隔复合材料在弯曲载荷作用下发生明显的弯曲变形,材料上表面受到压缩作用向下凹陷,但表面没有明显的破坏(见图11(a));下表面受到拉伸作用,因为玄武岩纤维的高强性能,并未有破坏(见图11(c));而连接层则受到压缩作用向外凸出,纤维和树脂出现脱离,而纤维并未受到破坏(见图11(b))。由此可知,弯曲载荷对锯齿形三维机织间隔复合材料的作用只能使材料纤维和树脂发生分离,但不能破坏材料的整体结构,所以玄武岩纤维三维机织间隔复合材料抗破坏性能优异。

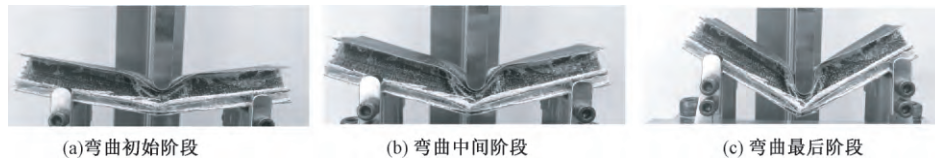


图10 锯齿形三维机织间隔复合材料三点弯曲测试过程

Fig.10 Process of three-point bending test of zigzag 3-D woven spacer composites.

(a) Initial stage of bending; (b) Intermediate stage of bending; (c) Last stage of bending

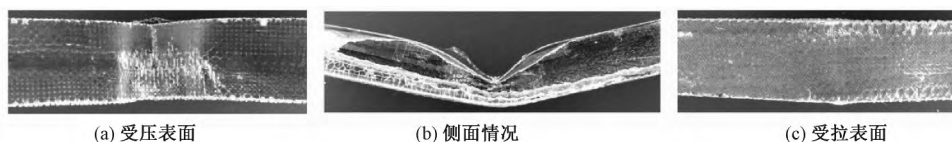


图11 锯齿形三维机织间隔复合材料弯曲破坏形态

Fig.11 Bending failure mode of zigzag 3-D woven spacer composites.

(a) Compressed surface; (b) Side surface; (c) Strained surface

3 结论

以玄武岩低捻长丝纱作为经、纬纱,通过合理设计经向截面图和组织图,可在普通织机上织造3种

不同间隔高度的锯齿形三维机织间隔织物。以其作为增强材料,环氧树脂基树脂作为基体,通过真空辅助成型工艺制备锯齿形三维机织间隔复合材料,并研究其弯曲性能,得到以下结论。

1) 间隔材料的主要承力方向是纬向,而材料经

向则是保证锯齿形状结构的连续。在一定间隔高度范围内,三维机织间隔复合材料的最大弯曲载荷随材料间隔高度的增加而增加;并且组织循环个数越多的材料表现出更好的弯曲性能。间隔高度越高的三维机织间隔复合材料具有更高的能量吸收值。

2) 锯齿形三维机织间隔复合材料的破坏模式是材料上表层受压,下表层受拉,而连接层受压。在作用下材料只是出现明显的变形,但并未出现材料整体的破坏,玄武岩纤维增强体也未产生拉伸断裂情况。

FZXB

参考文献:

- [1] 沈浩清,曹海建,黄晓梅,等. 三维间隔织物复合材料弯曲性能研究[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(11): 6-9.
SHEN Haoqing, CAO Haijian, HUANG Xiaomei, et al. Study on bending properties of three-dimensional spacer fabric composites [J]. Technical Textiles, 2016, 34(11): 6-9.
- [2] MENTA V G K, VUPPALAPATI R R, CHANDDRASHEKHARA K, et al. Manufacturing and mechanical performance evaluation of resin-infused honeycomb composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(6): 415-423.
- [3] 李嘉禄,杨红娜,寇长河. 三维编织复合材料的疲劳性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 172-176.
LI Jialu, YANG Hongna, KOU Changhe. Fatigue properties of three dimensional braiding composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 172-176.
- [4] LI M, WANG S, ZHANG Z, et al. Effect of structure on the mechanical behaviors of three-dimensional spacer fabric composites [J]. Applied Composite Materials, 2009, 16(1): 1-14
- [5] SHANNA M, GARY S. Three-dimensionally knit spacer fabrics: a review of production techniques and applications [J]. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management 2005, 4(4): 1-25.
- [6] PEREIRA S, ANAND S C, RAJENDRAN S, et al. A study of the structure and properties of novel fabrics for knee braces [J]. Journal of Industrial Textiles, 2007, 36(4): 279-300.
- [7] VASILE S, LANGENHOVE L V, MEULEMESTEER S D. Effect of production process parameters on different properties of nonwoven spacer produced on a 3D web linker [J]. Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2006, 14(4): 68.
- [8] RUSSELL S J, POURMOHAMMADI A, MAO N, et al. Nonwoven spacer fabrics: US7814625 [P]. 2010-05-08.
- [9] 陈思. 经编间隔织物增强聚氨酯复合材料吸能性能[D]. 上海: 东华大学, 2015: 1-36.
CHEN Si. Energy absorption properties of warp-knitted spacer fabrics reinforced polyurethane composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2015: 1-36.
- [10] 李晓英,蒋高明,马丕波,等. 3D横编间隔织物的编织工艺及其性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(7): 66-70.
LI Xiaoying, JIANG Gaoming, MA Pibo, et al. Knitting processes and properties of three-dimensional computer flat-knitted spacer fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(7): 66-70.
- [11] 李嘉禄. 3D编织技术和3D编织复合材料[J]. 新材料产业, 2010(1): 46-49.
LI Jialu. 3D braiding technology and 3D braided composites [J]. Advanced Materials Industry, 2010(1): 46-49.
- [12] MOUNTASIR A, HOFFMANN G, CHERIF C. Development of weaving technology for manufacturing three-dimensional spacer fabrics with high-performance yarns for thermoplastic composite applications: an analysis of two-dimensional mechanical properties [J]. Textile Research Journal, 2011, 81(13): 1354-1366.
- [13] 张敏,吴刚,蒋语楣,等. 连续玄武岩纤维增强复合材料力学性能试验研究[J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(2): 15-21.
ZHANG Min, WU Gang, JIANG Yumei. Experimental research on mechanical properties of continuous basalt fiber reinforced composites [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2007, 32(2): 15-21.
- [14] LÜ L, ZHANG X, YAN S, et al. Bending properties of T-Shaped 3-D integrated woven composites: experiment and FEM simulation [J]. Journal of Fiber Science and Technology, 2017, 73(7): 170-176
- [15] LÜ L, ZHANG X, LIU G, et al. Mechanical properties of 3D woven basalt fiber composite materials: experiment and FEM simulation [J]. Journal of Fiber Science and Technology, 2016, 72(1): 33-39.