

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.11.011

纱罗网格织物铺层位置对聚丙烯/黄麻复合材料弯曲性能影响及有限元模拟

李苏文¹, 吴华伟², 王春红¹, 吴帅¹, 刘胜凯¹, 左祺¹, 张昊¹, 陈澄¹

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 浙江农林大学暨阳学院工程技术学院, 浙江绍兴 312000)

摘要:以纱罗网格织物为增强体,通过模压工艺制备纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料,并结合三点弯曲试验和有限元分析探究纱罗网格织物不同铺层位置对复合材料弯曲性能影响,进一步分析复合材料弯曲损伤机理。结果表明,纱罗网格织物铺放在中上层时复合材料弯曲性能较好。当纱罗网格织物铺放在上层、中层和下层时,复合材料的弯曲强度相比于未带有纱罗网格织物的复合材料分别提高了19.28%,18.79%,5.30%,弯曲弹性模量分别提高了24.12%,18.24%,11.76%。通过有限元建立了纱罗网格织物铺在不同位置的聚丙烯/黄麻复合材料模型,分析了不同铺层位置下材料的弯曲损伤机理。当纱罗网格织物铺在复合材料上表面时,主要受到压力作用,而铺在下表面时,主要受到拉力作用。随着纱罗网格织物的下移,应力逐渐集中。因此纱罗网格织物铺放在下层时,损伤较大,力学性能较差。有限元模拟应力值与试验得到的应力值误差分别为4.48%(上层),2.74%(中层),3.27%(下层),模拟得到的载荷-位移曲线与弯曲试验得到的曲线吻合度较高。

关键词:黄麻纤维;聚丙烯;纱罗网格织物;弯曲性能;有限元模拟;复合材料;损伤机理

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)11-0067-07

Influences of Placement Position of Leno Mesh Fabric on Flexural Properties of PP/Jute Composite and Finite Element Simulation

Li Suwen¹, Wu Huawei², Wang Chunhong¹, Wu Shuai¹, Liu Shengkai¹, Zuo Qi¹, Zhang Hao¹, Chen Cheng¹

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. College of Engineering and Technology, Jiyang College of Zhejiang A & F University, Shaoxing 312000, China)

Abstract : Based on the leno mesh fabric as the reinforced rib, the leno mesh fabric reinforced polypropylene (PP)/jute composite was made with compression molding process. With the three-point flexural test and finite element analysis, the effects of the leno mesh fabric's different placement positions on the flexural performances of the composite were explored. Besides, the flexural damage mechanism of the composite was analyzed furthermore. The results show that the flexural performances of the composite are better when the leno mesh fabric is placed on the middle and upper layers. Compared with the composite without leno mesh fabric, when the leno mesh fabric is placed on the upper, middle and lower layers, the flexural strength of the composite is increased by 19.28%, 18.79%, 5.30%, and the flexural modulus is increased by 24.12%, 18.24%, and 11.76%, respectively. The PP/jute composite models with different placement positions of the leno mesh fabric were established by finite element, and the flexural damage mechanisms of the composite under different placement positions were analyzed. When the leno mesh fabric is placed on the upper layer, it is mainly subjected to pressure, while when it is placed on the lower layer, it is mainly subjected to tension. As the leno mesh fabric moves down, the stress gradually concentrates. Therefore, when the leno mesh fabric is placed on the lower layer, the damage is greater and the mechanical properties are poor. The stress value error between the finite element simulation and the flexural test is 4.48% (upper), 2.74% (middle) and 3.27% (lower), respectively, and the load-displacement curve obtained by the simulation is highly consistent with the curve obtained by the flexural test.

Keywords : jute fiber ; polypropylene ; leno mesh fabric ; flexural property ; finite element simulation ; composite ; damage mechanism

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2021057), 天津市研究生科研创新项目(2020YJSB063)

通信作者: 吴华伟, 硕士, 教授, 主要研究方向为天然纤维复合材料

收稿日期: 2022-08-26

引用格式: 李苏文, 吴华伟, 王春红, 等. 纱罗网格织物铺层位置对聚丙烯/黄麻复合材料弯曲性能影响及有限元模拟[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(11):67-73.

Li Suwen, Wu Huawei, Wang Chunhong, et al. Influences of placement position of leno mesh fabric on flexural properties of PP/jute composite and finite element simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11):67-73.

天然植物纤维因其具有环保、低成本、可再生、可降解、力学性能良好等优点,被广泛用于制备复合材料^[1-2]。其中黄麻纤维作为一种环境友好型绿色材料,以其产量高、密度小、价格低廉、资源可再生等特点,逐渐成为重要的研究对象^[3-5]。聚丙烯纤维具有密度小、价廉、力学性能优异、耐热性良好、尺寸稳定性好、可加工性强以及可回收等优势^[6-7]。使用聚丙烯/黄麻等热塑性纤维制备的复合材料具有密度低、性价比高、吸声性能好、耐冲击、可回收等优点,被广泛应用于汽车内饰结构,促进汽车轻量化发展^[8-10]。

为了提高聚丙烯/黄麻复合材料的力学性能,国内外学者对黄麻纤维进行改性以提高黄麻纤维增强聚丙烯复合材料的力学性能。刘晓烨等^[11]使用2%的NaOH处理黄麻纤维,并加入1%的马来酸酐接枝聚丙烯,制备了改性黄麻纤维增强聚丙烯复合材料,相较于未改性的聚丙烯/黄麻复合材料,弯曲强度提高了68%,弯曲弹性模量提高了93%。Margoto等^[12]使用*N,N*-二甲基苯胺改性黄麻织物用于增强聚丙烯复合材料,发现在使用0.5%的*N,N*-二甲基苯胺处理黄麻织物后,复合材料拉伸强度和弯曲强度分别提高了41%和30.50%。黄麻纤维的化学改性虽能够提高其性能,但却给环境带来了污染。已有研究发现,使用复合型增强结构能够提高复合材料的力学性能。钱程^[13]以机织物作为加强筋增强非织造复合材料,所得产品拉伸强度和撕裂强度均得到提高,这是因为非织造布与机织物中的经、纬纱线产生缠结,从而使复合材料具有更好的力学性能。使用复合型增强结构在提高复合材料力学性能的同时,也减少了对环境的污染。

为了降低因一般织物结构紧密所导致的树脂浸润性差对复合材料力学性能的不利影响,可选用网格织物作为第二增强相增强复合材料。目前使用较多的网格织物增强体多为经编网格织物。然而,经编网格织物在受到拉伸时会出现明显的“束腰”或“颈缩”现象^[14-15],织物变形较大,稳定性差,影响复合材料的性能^[16]。而纱罗网格织物的纬纱全部浮在地经表面,经纬纱之间屈曲小,减少了普通机织物中纱线屈曲对复合材料力学性能的影响。且纱罗网格织物织造工艺简单,织物结构紧密,稳定性好^[17-18]。因此选用纱罗网格织物作为第二增强相增强复合材料能够明显提升复合材料力学性能。

以纱罗网格织物作为复合材料的加强筋已有初步探索。Sankar等^[17]发现纱罗网格织物结构牢固,具有良好的拉伸性能和抗穿刺性能,同时用纱罗网格织物与其它织物组织混合,可以改善纱罗网格织物的性能。Zhang等^[18]研究了玄武岩纱罗织物作为混凝土加固材料的力学性能,发现用直线织成的纱罗织物的性能比捻线织成的纱罗织物性能好。Karbhari等^[19]在牙科树脂中加入纱罗织物,弯曲应变提高了126%。然而纱罗网格织物不同铺层位置对复合材料力学性能的影响尚不清楚。

复合材料的弯曲性能是反映材料综合性能的一个指标。通过有限元仿真模拟,可以观察到内部应力分布情况。笔者以聚丙烯纤维和黄麻纤维为原料,制备了纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料,对使用纱罗网格织物增强的聚丙烯/黄麻复合材料进行三点弯曲试验与有限元模拟分析,研究了纱罗网格织物不同铺层位置对聚丙烯/黄麻复合材料弯曲性能的影响,并进一步分析了不同铺层位置的纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料弯曲失效机理。

1 实验部分

1.1 原材料

黄麻纤维:长度为68~72 mm,直径为100~350 μm ,濉溪县蕴丰麻纺有限公司;

聚丙烯纤维:细度840 D,长度64 mm,山东寿光永旭防水材料有限公司;

单股弱捻黄麻粗纱:680 tex,滨州惠民县嘉琦绳网有限公司;

聚丙烯纱线:细度450 D,山东捷锐化纤绳网有限公司。

1.2 主要仪器与设备

小和毛机:XFH型,青岛市胶南针织机械厂;

小型罗拉梳理机:天津嘉诚机电设备有限公司改造组装;

花式捻线机:HN32-04型,苏州市华飞纺织科技有限公司;

半自动小样织机:DWL150型,苏州市华飞纺织科技有限公司;

塑料制品液压机:Y/TD71-45 A型,天津市天锻压力机有限公司;

万能强力机:Instron3369型,美国Instron公司;

超景深三维显微系统:Z16APOA型,德国徕卡

微系统有限公司。

1.3 复合材料的制备

(1)聚丙烯/黄麻毡及纱罗网格织物制备。

采用小和毛机对黄麻纤维和聚丙烯纤维分别进行开松,然后将质量比为4:6的黄麻纤维和聚丙烯纤维混合开松,最后采用小型罗拉梳理机将混合纤维进行梳理成毡,制备的聚丙烯/黄麻毡如图1所示。

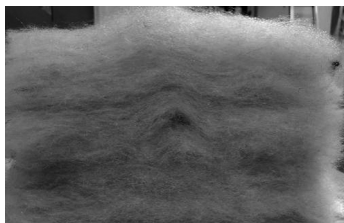


图1 聚丙烯/黄麻毡

使用半自动小样织机,用聚丙烯纱线包缠的单股弱捻黄麻粗纱织造纱罗网格织物,实物图如图2所示。

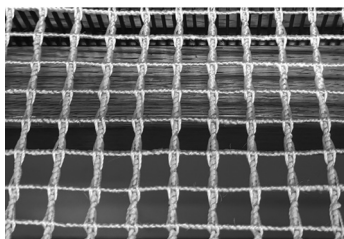
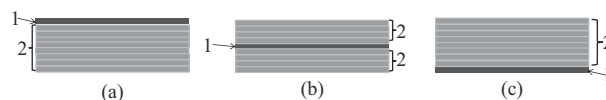


图2 纱罗网格织物实物图

(2)纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料的制备。

将聚丙烯/黄麻毡沿着梳理方向铺放,然后将网格大小为5 mm×5 mm的纱罗网格织物分别覆盖在聚丙烯/黄麻毡的上层、中层、下层,最后将其放入塑料制品液压机中进行模压加工。首先将温度升至80℃(上下模同时到达指定温度,下同),压力调至5 MPa,保压60 min,去除纤维中的水分;然后将温度阶梯式(10℃为一阶)升至150℃,卸压1 min,再加压至5 MPa,保压4 min,如此循环3次,以去除处于高弹态聚丙烯基体中的气泡,减少成品复合材料中的孔隙,保证其力学性能的优越性;最后将压力调至14 MPa,温度阶梯式调至185℃,保压11 min^[20]。以同样的方式,制作不带有纱罗网格织物的聚丙烯/黄麻复合材料用来和带有纱罗网格织物的复合材料进行比较。铺层设计如图3所示。其中聚丙烯/黄麻复合材料铺层数为8层,未加纱罗网格织物时,聚丙烯/黄麻复合材料板的厚度为2 mm,纱罗网格织

物增强聚丙烯/黄麻复合材料板的厚度为2.5 mm。制备的纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料板如图4所示。



1—纱罗网格织物; 2—聚丙烯/黄麻复合材料
a—纱罗网格织物铺在上层; b—纱罗网格织物铺在中层;
c—纱罗网格织物铺在下层

图3 纱罗网格织物不同铺层位置设计

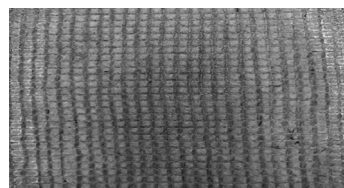


图4 纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料板

1.4 性能测试与表征

在万能强力机上对试样进行三点弯曲加载试验,如图5所示。复合材料弯曲性能测试参照ASTM D790-2010。试样长度为60 mm、宽度为25 mm,加载速度为1 mm/min,弯曲试样跨距为48 mm,试验过程实时记录位移-载荷曲线。纱罗网格织物铺在上层表示离加压载具较近,铺在下层则离加压载具较远。试验结束后,使用超景深三维显微镜对试样断面形貌进行表征。

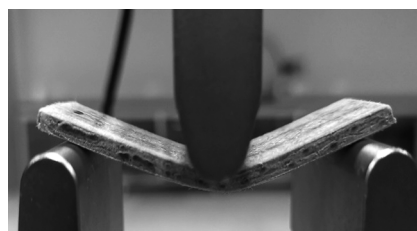


图5 纱罗网格织物三点弯曲试验

2 有限元仿真

根据纱罗网格织物具体参数构建模型。经纱,纬纱长轴长1.4 mm,短轴长0.6 mm。有限元模型如图6所示。根据试样尺寸60 mm×25 mm×2.5 mm建立聚丙烯/黄麻复合材料模型。建立底座部件(半径为2 mm)以及加载头部件(半径为5 mm),装配结果如图7所示。

经试验测试得到聚丙烯/黄麻非织造复合材料的拉伸弹性模量为4 160 MPa,泊松比为0.38,通过origin软件计算出屈服应力为33.11 MPa。纱罗网格织物的拉伸弹性模量为6 600 MPa,泊松比为0.35。

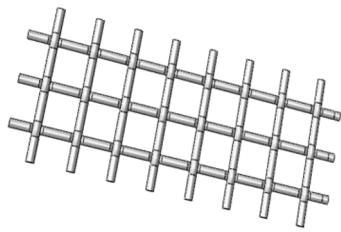


图6 纱罗网格织物有限元建模图

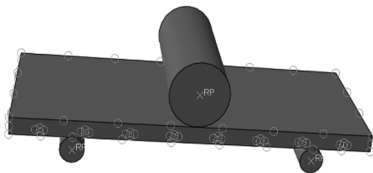


图7 有限元装配模型

3 结果与讨论

3.1 弯曲性能分析

图8为未加纱罗网格织物和纱罗网格织物不同铺层位置的聚丙烯/黄麻复合材料的弯曲应力-应变曲线,图9为对应的弯曲性能数值。从图8和图9可以看出,未加纱罗网格织物的聚丙烯/黄麻复合材料的弯曲性能低于纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料的弯曲性能。当纱罗网格织物铺放在上层、中层、下层时,复合材料的弯曲强度依次为71.36, 71.07, 63.00 MPa,相比于未加纱罗网格织物的复合材料,分别提高了19.28%, 18.79%, 5.30%;弯曲弹性模量依次为6.33, 6.03, 5.70 GPa,相比于未加纱罗网格织物的复合材料,分别提高了24.12%, 18.24%,

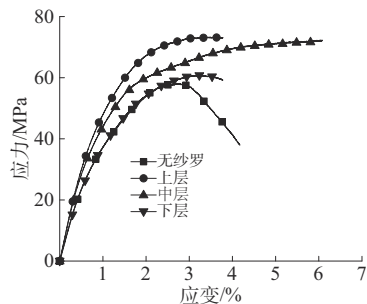


图8 未加纱罗网格织物和纱罗网格织物不同铺层位置的复合材料弯曲应力-应变曲线

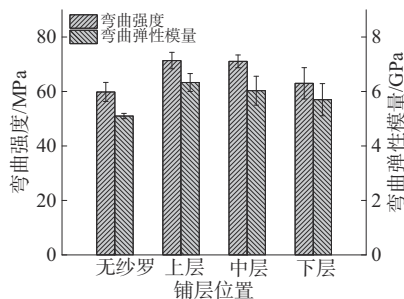
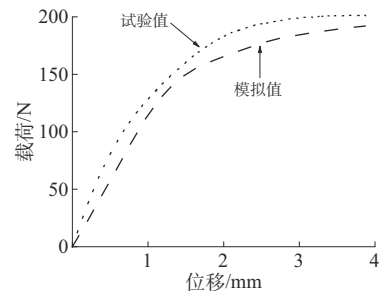


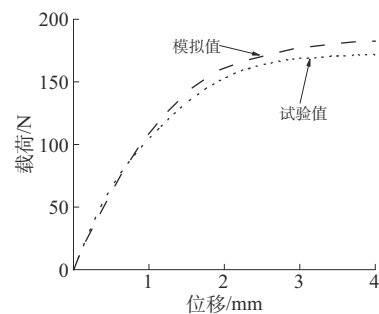
图9 未加纱罗网格织物和纱罗网格织物不同铺层位置的复合材料弯曲性能

11.76%。且纱罗网格织物铺放在上层和中层时,弯曲性能差异不明显,但均大于铺放在下层时复合材料的弯曲性能。不同铺层位置的纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料的弯曲应力-应变曲线基本一致,其斜率大小表明两个上升阶段:第一阶段为快速上升阶段,此时纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料上表面受到压应力作用,下表面受到拉应力作用,复合材料尚未发生损伤,曲线斜率基本保持一致,都呈现出明显的线弹性关系;第二阶段为缓慢增长阶段,在达到最大载荷前缓慢爬升,载荷由纱罗网格织物和聚丙烯/黄麻复合材料共同承担,复合材料表现出渐进破坏特征。

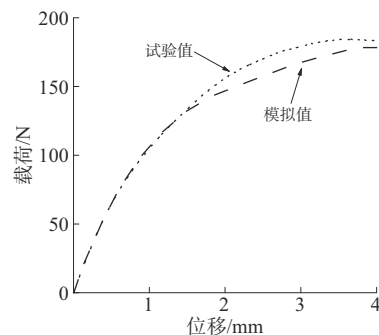
纱罗网格织物铺放不同位置时,复合材料载荷-位移曲线如图10所示,弯曲性能模拟结果和试验测试结果见表1。从表1可以看到,当纱罗网格织物铺



(a)



(b)



(c)

a—上层; b—中层; c—下层

图10 纱罗网格织物不同铺层位置的复合材料弯曲载荷-位移曲线 (试验值与模拟值对比)

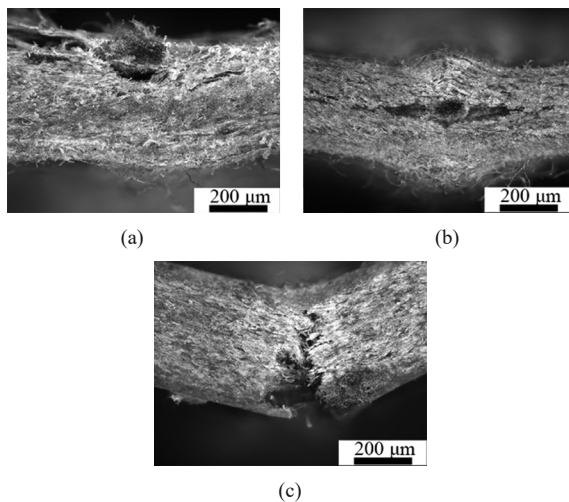
表1 复合材料试验测试弯曲应力值和有限元软件模拟值的对比

铺层位置	试验测试弯曲应力/MPa	软件模拟弯曲应力/MPa	相对误差/%
上层	71.36	68.16	4.48
中层	71.07	69.12	2.74
下层	63.00	65.06	3.27

放在聚丙烯/黄麻非织造材料上层、中层以及下层时,通过有限元软件模拟的弯曲应力值分别为68.16,69.12,65.06 MPa,与试验值的相对误差分别为4.48%,2.74%和3.27%。另外,从图10可以看到,试验测试得到的载荷-位移曲线与模拟分析得到的载荷-位移曲线基本吻合。

3.2 弯曲失效行为分析

图11为纱罗网格织物铺放在不同位置时的复合材料弯曲断面形貌。在弯曲载荷的加载下,复合材料上表面受到夹具的压力作用,下表面受到夹具的拉力作用,纱罗网格织物铺放在不同位置时出现不同程度的破损。当纱罗网格织物铺放在下层时,破损程度较铺放在上层和中层时较大。图11a为纱罗网格织物铺放在上层时的复合材料断面图,从图11a可以看出,因压力作用,在应力集中处会产生损伤,裂纹向下扩展,上表面表现出聚丙烯/黄麻复合材料的开裂,因聚丙烯/黄麻复合材料变形大于纱罗网格织物,导致纱罗网格织物与聚丙烯/黄麻复合材料脱离,破坏主要是由于上表面受压引起的破坏。图11b为纱罗网格织物铺放在中间层时的复合材料断面图,从图11b可以看出,受压侧表现出聚丙烯/黄麻复合材料的团簇向上拱起,出现“鼓包”,受拉侧表现出聚丙烯/黄麻复合材料的向下拱起且出现破损,因聚丙烯/黄麻复合材料的变形大于纱罗网格

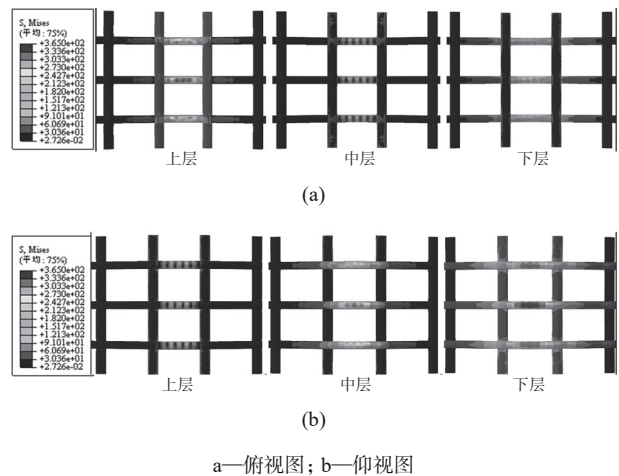


a—上层; b—中层; c—下层

图11 纱罗网格织物不同铺层位置的复合材料弯曲断面图

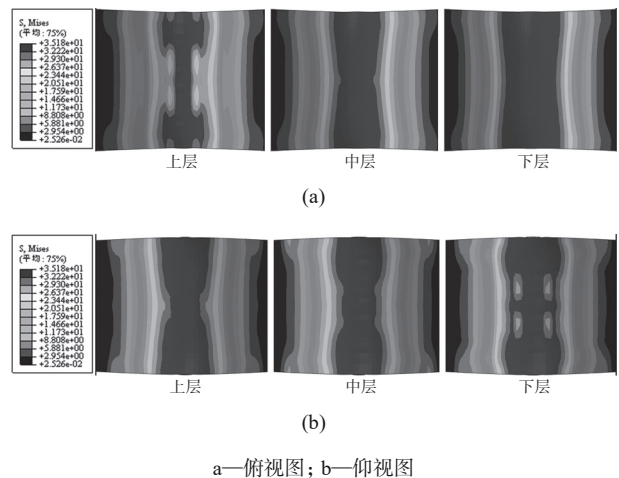
织物,纱罗网格织物铺放在中间层起到支撑的作用,纱罗网格织物与聚丙烯/黄麻复合材料分离,载荷被分散到沿着纱罗网格织物横向传递,表现出沿着纱罗网格织物横向的开裂。图11c为纱罗网格织物铺放在下层时的复合材料断面图,由图11c可以看出,聚丙烯/黄麻复合材料和纱罗网格织物均出现破坏,且随着纱罗网格织物的断裂,弯曲载荷不断作用,载荷向上传递,导致聚丙烯/黄麻复合材料出现更大的破坏。

图12和图13分别为纱罗网格织物铺放在不同位置时,纱罗网格织物和聚丙烯/黄麻复合材料的应力云图。观察应力云图大小范围可以看出,纱罗网格织物增强聚丙烯/黄麻复合材料的主要承力部件为纱罗网格织物,说明纱罗网格织物能够增强复合材料的弯曲性能。通过观察图12应力云图的俯视图和俯视图可以看出,纱罗网格织物铺放在上层和



a—俯视图; b—仰视图

图12 纱罗网格织物不同铺层位置时的纱罗网格织物应力云图



a—俯视图; b—仰视图

图13 纱罗网格织物铺放在不同位置时的聚丙烯/黄麻复合材料应力云图

中间层时,其应力集中现象几乎一样;而纱罗网格织物铺放在下层时,其应力集中现象明显大于铺放在上层和中间层的织物。同时由图13观察聚丙烯/黄麻复合材料所受应力发现,纱罗网格织物铺放在下层时,应力集中面积大于铺放在上层和中层的面积。所以当纱罗网格织物铺放上层和中间层时,其弯曲性能优于铺放在下层的弯曲性能。这也解释了纱罗网格织物铺放在下层时,其弯曲断面破坏较铺放在上层和中层时较大的原因。

图14a是纱罗网格织物铺放在不同位置时纱罗网格织物拉应力云图。从图14a可以看出,随着纱罗网格织物的下移,纱罗网格织物应力逐渐集中,所以当纱罗网格织物铺放在复合材料下表面时,主要是受拉应力引起的破坏。反映在弯曲断面图上,表现出的是外侧受拉面的破坏。图14b是纱罗网格织物铺放在不同位置时纱罗网格织物压应力云图。从图14b可以看到,当纱罗网格织物铺放在复合材料上表面时,主要受压应力作用,所以当纱罗网格织物铺放在复合材料上表面时,主要受到的是压应力的破坏。反映在弯曲断面图上,表现出的是内侧受压面的破坏。

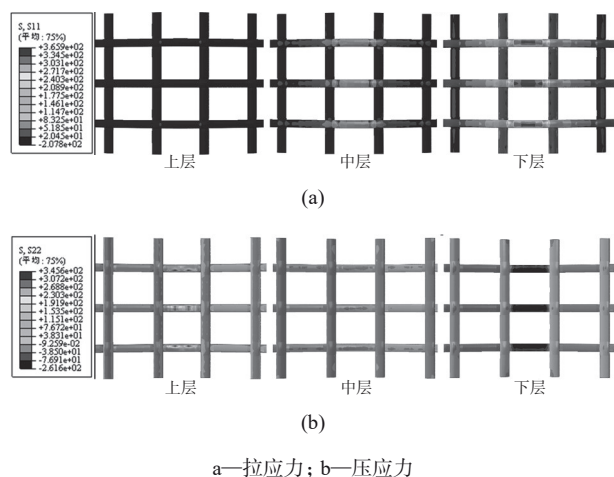


图14 纱罗网格织物铺放在不同位置时纱罗网格织物分应力云图

4 结论

通过弯曲试验和数值模拟,研究了纱罗网格织物铺层位置对复合材料的弯曲性能影响,得到结论如下。

(1)纱罗网格织物铺放在上层、中层、下层时,相比于未带有纱罗网格织物的聚丙烯/黄麻复合材料,带有纱罗网格织物的复合材料弯曲强度分别提高了19.28%,18.79%,5.30%,弯曲弹性模量分别提高了24.12%,18.24%,11.76%。说明纱罗网格织物确

有提高复合材料弯曲性能的效果。

(2)试验数据与模拟数据两者吻合度较高,且都显示纱罗网格织物铺放在中上层时,复合材料弯曲性能较好,因此在使用纱罗网格织物作为增强织物时,可将其铺放在中上层,以提高复合材料的弯曲性能。

(3)对纱罗网格织物不同铺层位置的复合材料的弯曲过程进行了数值模拟,分析显示,纱罗网格织物为主要的承力部件,当纱罗网格织物铺在复合材料上表面时,主要受到压力作用,而铺在下表面时受到拉力作用更为显著且出现应力集中现象。随着纱罗网格织物的下移,应力逐渐集中。因此纱罗网格织物铺放在不同位置时,复合材料弯曲断面呈现出不同的形态。

参考文献

- [1] Faruk O, Bledzki A K, Fink H P, et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(11). DOI:10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [2] Karahan M, Karahan N. Investigation of the tensile properties of natural and natural/synthetic hybrid fiber woven fabric composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(10): 795–806.
- [3] Sinha A K, Narang H K, Bhattacharya S. Mechanical properties of natural fibre polymer composites[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 37(9):879–895.
- [4] Pickering K L, AruanEfendy M G, Le T M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance[J]. Composites Part A, 2016, 83:98–112.
- [5] Chandekar H, Chaudhari V, Waigaonkar S. A review of jute fiber reinforced polymer composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26(2):2 079–2 082.
- [6] 韩锐,王晓荣,李明,等.表面粗糙化玄武岩纤维的制备及其对PP基复合材料拉伸性能的影响[J].塑料工业,2021,49(12):40–45.
Han Rui, Wang Xiaorong, Li Ming, et al. Preparation of layer roughened basalt fiber and its effect on tensile properties of polypropylene matrix composites[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(12): 40–45.
- [7] 韩贤新,刘喜军,王宇威. PP/EPR/改性纤维素复合材料的制备及性能研究[J].中国塑料,2021,35(12):37–44.
Han Xianxin, Liu Xijun, Wang Yuwei. Preparation and performance of PP/EPR/modified cellulose composite[J]. China Plastics, 2021, 35(12):37–44.
- [8] 窦艳丽,李雪菲,张天琪,等.β-环糊精-聚磷酸铵对黄麻/聚丙烯复合材料阻燃性能的影响[J].复合材料学报,2019,36(11):2 568–2 578.
Dou Yanli, Li Xuefei, Zhang Tianqi, et al. Effect of β-cyclodextrin and ammonium polyphosphate on flame retardancy of jute/polypro-

- pylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(11):2 568–2 578.
- [9] 王定,王春红,陈祯,等.天然纤维增强聚丙烯基复合材料的制备及静、动态力学性能研究[J]. *塑料工业*, 2017, 45(1):108–112.
- Wang Ding, Wang Chunhong, Chen Zhen, et al. Preparation and static and dynamic mechanical properties research of natural fiber reinforced polypropylene composites[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(1):108–112.
- [10] Boopalan M, Umapathy M J, Jenyfer P. A comparative study on the mechanical properties of jute and sisal fiber reinforced polymer composites[J]. *Silicon*, 2012, 4(3):145–149.
- [11] 刘晓烨,戴干策.黄麻纤维毡的表面处理及其增强聚丙烯复合材料的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2006(5):63–69.
- Liu Xiaoye, Dai Gance. Pretreatment of jute fiber and the mechanical properties of jute fiber mat reinforced polypropylene[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006(5):63–69.
- [12] Margoto O H, Prado K D S D, Mergulhão R C, et al. Mechanical and thermal characterization of jute fabric-reinforced polypropylene composites: Effect of maleic anhydride[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2020, 19(5):1 792–1 804.
- [13] 钱程.机织物与非织造布复合材料的制备及性能[J]. *纺织学报*, 2005(6):108–110.
- Qian Cheng. Preparation and characterization of the composite material made from woven and non-woven fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2005(6):108–110.
- [14] 李楠,蒋金华,邵光伟,等.经编菱形网格织物的性能研究[J]. *产业用纺织品*, 2016, 34(4):24–28.
- Li Nan, Jiang Jinhua, Shao Guangwei, et al. Research on the performance of warp-knitted diamond mesh fabric[J]. *Technical Textiles*, 2016, 34(4):24–28.
- [15] 邵慧奇,李建娜,邵光伟,等.复合材料增强用经编网格结构的性能对比[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(10):76–81.
- Shao Huiqi, Li Jianna, Shao Guangwei, et al. Performance comparison of typical warp knitted meshes for composite reinforcement[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(10):76–81.
- [16] Sterling D, Balash C. Engineering and catching performance of five netting materials in commercial prawn-trawl systems[J]. *Fisheries Research*, 2017, 193:223–231.
- [17] Shaker K, Nawab Y, Asghar M A, et al. Tailoring the properties of leno woven fabrics by varying the structure[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(22):1 865–1 872.
- [18] Zhang X, Wang X, Peng Z Q, et al. Parametric study on mechanical properties of basalt leno textile applied as concrete reinforcement[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2022, 25(1):48–62.
- [19] Karbhari V M, Strassler H. Effect of fiber architecture on flexural characteristics and fracture of fiber-reinforced dental composites[J]. *Dental Materials*, 2007, 23(8):960–968.
- [20] 吴帅,吴华伟,王春红,等.纱罗网格织物增强PP/黄麻复合材料力学性能[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(3):1–7, 24.
- Wu Shuai, Wu Huawei, Wang Chunhong, et al. Mechanical properties of leno mesh fabric reinforced PP/jute composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(3):1–7, 24.

(上接第 16 页)

- [19] 鲁元.基于PDMS/SCF/CNT的柔性压阻式传感器的研究[D].北京:北京化工大学,2020.
- Lu Yuan. Research on flexible piezoresistive sensor based on PDMS/SCF/CNT[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [20] Qian H, Kucernak A R, Greenhalgh E S, et al. Multifunctional structural supercapacitor composites based on carbon aerogel modified high performance carbon fiber fabric[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(13):6 113–6 122.
- [21] Reece R, Lekakou C, Smith P A. A structural supercapacitor based on activated carbon fabric and a solid electrolyte[J]. *Materials Science and Technology*, 2019, 35(3):368–375.
- [22] Shirshova N, Qian H, Shaffer M S P, et al. Structural composite supercapacitors[J]. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 2013, 46:96–107.
- [23] You Y J, Kim H Y, Ryu G S, et al. Strengthening of concrete element with precast textile reinforced concrete panel and grouting material[J]. *Materials*, 2020, 13(17). DOI:10.3390/ma13173856.
- [24] Hudak N S, Schlichting A D, Eisenbeiser K. Structural supercapacitors with enhanced performance using carbon nanotubes and polyaniline[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017, 164(4):A691–A700.