

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.001

纱罗网格织物增强 PP/ 黄麻复合材料力学性能

吴帅¹, 吴华伟², 王春红¹, 鹿超¹, 左祺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: 为了进一步提升天然纤维非织造布增强复合材料的力学性能以及可设计性, 以纱罗网格织物作为加强筋, 覆盖于聚丙烯 (PP)/ 黄麻非织造布表面, 采用模压成型工艺制备纱罗网格织物增强 PP/ 黄麻复合材料 (LRPJC)。研究了 LRPJC 的拉伸性能、弯曲性能以及冲击性能, 探讨了其能量吸收机理。采用扫描电子显微镜和超景深三维显微系统观察复合材料的断面, 分析了 LRPJC 的损伤机理。研究表明, LRPJC 的拉伸强度和拉伸弹性模量分别为 43.09 MPa 和 5.02 GPa, 比未加筋的 PP/ 黄麻复合材料 (PJC) 的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了 7% 和 20.67%。LRPJC 的弯曲强度和弯曲弹性模量分别为 71.13 MPa 和 6.60 GPa, 比 PJC 的弯曲强度和弯曲弹性模量分别提高了 18.87% 和 23.33%。与 PJC 在拉伸和弯曲过程中的能量吸收相比, LRPJC 拉伸过程中能量吸收和弯曲过程中能量吸收分别为 124.64 kJ/m² 和 8.51 kJ/m², 分别提高了 65.97% 和 135.45%。LRPJC 的冲击强度与 PJC 相比提高了 141.17%。动态热机械测试结果显示, 随着温度的升高, LRPJC 具有更好的黏塑性和阻尼性能。

关键词: 黄麻纤维; 聚丙烯; 纱罗网格织物; 加强筋; 模压成型

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0001-07

Mechanical Properties of Leno Mesh Fabric Reinforced PP/Jute Composite

Wu Shuai¹, Wu Huawei², Wang Chunhong¹, Lu Chao¹, Zuo Qi¹

(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 : In order to improve the mechanical properties and designability of natural fiber nonwoven composite, the leno mesh fabric was used as a reinforcing rib on the surface of the polypropylene (PP)/jute nonwoven, and the leno mesh fabric reinforced PP/jute composite (LRPJC) material was prepared by the compression. The tensile, flexural and impact properties of LRPJC were studied, and the energy absorption mechanism was discussed. The scanning electron microscope and the super-depth three-dimensional microscopy system were used to observe the fracture section of the composite and its damage mechanism was analyzed. The results show that the tensile strength and tensile modulus of LRPJC are 43.09 MPa and 5.02 GPa, which are 7% and 20.67% higher than those of PP/jute composites (PJC), respectively. The flexural strength and flexural modulus of LRPJC are 71.13 MPa and 6.60 GPa, which are 18.87% and 23.33% higher than those of PJC, respectively. Compared with the energy absorptions of PJC during stretching and bending, the energy absorptions of LRPJC is 124.64 kJ/m² and 8.51 kJ/m², which are increased by 65.97% and 135.45%, respectively. Compared with PJC, the impact strength of LRPJC is increased by 141.17%. The dynamic mechanical analysis result show that with the increasing of the temperature, LRPJC has better viscoplastic and damping properties.

Keywords : jute fiber ; polypropylene ; leno mesh fabric ; reinforcing rib ; compression molding

天然纤维增强热塑性树脂复合材料由于具有优异的韧性、密度小、易加工、可设计性高以及对环境友好等优点, 已广泛应用于汽车内饰、体育用品和家装建筑等领域^[1]。与其它天然纤维相比, 黄麻纤维

以其产量高、中等比强度、密度小和廉价^[2-5]等优势成为重要研究对象, 以黄麻纤维作为增强体制备的复合材料环保性能优越^[6]。聚丙烯 (PP) 密度小、熔点低, 同时具备中等刚度和强度, 是目前应用最为

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11802205)

通信作者: 王春红, 教授, 博士, 主要研究方向为天然纤维增强复合材料

收稿日期: 2022-01-22

引用格式: 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.

广泛的热塑性树脂之一^[7]。

目前,麻纤维增强热塑性复合材料多数以单一增强体的形式出现,比如非织造布增强热塑性复合材料,织物增强热塑性复合材料等。非织造布增强热塑性复合材料具有较高的变形能力和能量吸收能力,且工艺简单,成本较低^[8]。非织造布增强树脂基复合材料单位成本的拉伸性能优越,但是增强纤维排列杂乱无序,各向异性,与织物相比非织造布的性能预测会更加困难^[9]。织物增强树脂基复合材料虽然力学性能优越,材料尺寸稳定性好,但是热塑性树脂熔融状态下黏度大,织物增强体结构紧密,使得树脂难以浸渍^[10-11]。另外纱线的加捻结构、机织物和编织物中纱线屈曲的存在以及针织物的不稳定结构,均会使得复合材料力学性能下降^[12-14]。

复合材料的力学性能受增强体结构的限制,复合材料的结构单一时其可设计性受到限制。国外的Bcomp公司率先提出将天然纤维网格织物与平纹织物联合使用,通过真空树脂传递模塑(VRTM)成型工艺制备复合材料^[15-16]。研究表明,增加单层网格织物可使复合材料的承载能力提升250%。Stephen^[17]使用单向纤维(碳纤维、玻纤等)增强热固性树脂作为增强杆,将增强杆作为加强筋制备复合材料,增强了最终产品的单向力学性能。

张旭峰等^[18]采用湿法预浸工艺分别将平纹织物和网格织物浸渍,然后将植物纤维网格织物覆盖在平纹织物上通过树脂传递模塑成型(RTM)、模压等工艺制备复合材料。研究表明,含加强筋复合材料承载力提升约20%~40%。董晓阳等^[19]将含镂空网格结构的连续纤维增强树脂预浸料铺放在连续纤维增强树脂预浸料上,通过模压工艺制成三明治结构复合材料用于电池箱上盖。采用的镂空网格的连续增强纤维材料与短切纤维增强复合材料混合制备预浸料,可以实现不同结构强度的需求,提高复合材料的力学性能。

目前有关加筋型复合材料,大部分的研究集中于织物增强热固性树脂基复合材料,而以热塑性树脂为基体,以非织造布为增强体形式的研究较薄弱。为了扩展非织造布增强复合材料的应用,解决其承载力不足的问题,笔者通过对半自动小样织机进行改造,采用弱捻单股黄麻粗纱织造纱罗网格织物,同时将黄麻纤维与PP纤维混合开松梳理成非织造布,然后将纱罗网格织物覆盖在PP/黄麻非织造布表面,最后通过模压成型工艺制备纱罗网格增强

PP/黄麻复合材料(LRPJC)。为了研究LRPJC的力学性能,以相同的制备工艺条件分别制备了PP/黄麻复合材料(PJC)和平纹网格织物增强PP/黄麻复合材料(PRPJC)。测试结果表明,LRPJC与PJC和PRPJC相比具有更好的拉伸性能、弯曲性能和冲击性能。动态机械分析(DMA)仪三点弯曲测试结果表明,随着温度的升高LRPJC具有优异的黏塑性、阻尼性能,具有应用在汽车外饰领域的前景。

1 实验部分

1.1 原材料

黄麻纤维:长度为70 mm,直径100~350 μm ,濉溪县蕴丰麻纺有限公司;

PP纤维:纤维细度840D,长度64 mm,软化点温度120 $^{\circ}\text{C}$,熔点180 $^{\circ}\text{C}$,山东寿光永旭防水材料有限公司;

单股弱捻黄麻粗纱:直径1 mm,嘉琦绳网有限公司;

PP纱线:直径0.5 mm,山东捷锐化纤绳网有限公司。

1.2 仪器及设备

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/TD71-45A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;数显摆锤冲击试验机:XCJD系列,承德金和仪器制造有限公司;

DMA仪:DMA242E型,德国耐驰公司;

扫描电子显微镜(SEM):Phenom XL型,荷兰Phenom-World公司;

超景深三维显微系统:Z16APOA型,徕卡微系统有限公司。

1.3 复合材料的制备

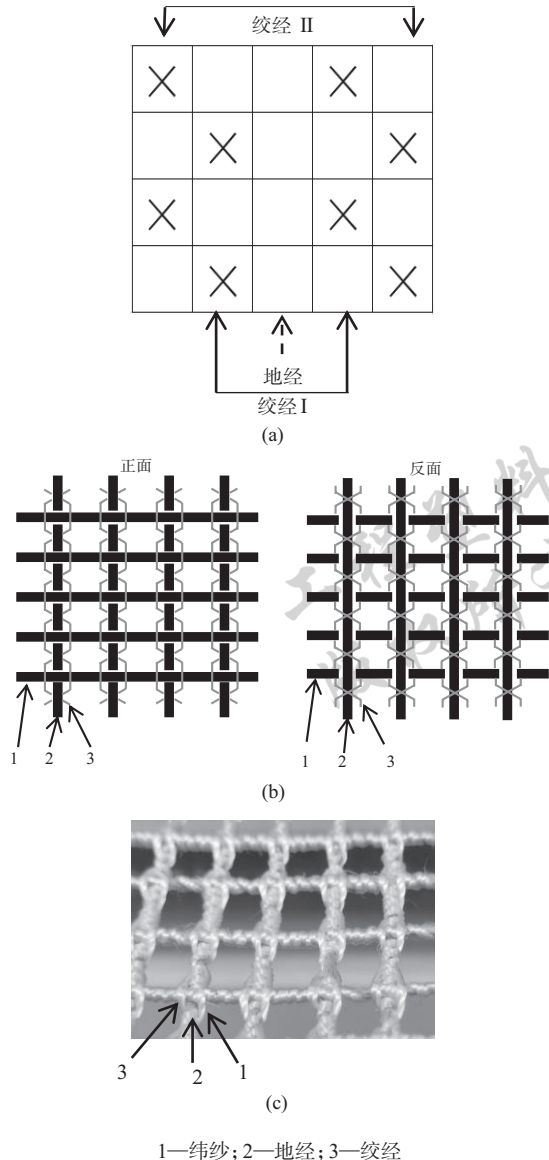
(1) PP/黄麻非织造布制备。

采用小和毛机对黄麻纤维和PP纤维分别进行开松,然后混合处理(黄麻与PP质量比为4:6)。采用小型罗拉梳理机将混合纤维进行梳理成毡。

(2) 纱罗网格织物织造。

为了提高单股黄麻纱上机强力、减少黄麻粗纱的毛羽以及缩短 PP 树脂熔融状态下的浸渍距离,通过花式捻线机,使用 PP 纱线对单股弱捻黄麻粗纱进行包缠处理。

对半自动小样织机进行改进,用于纱罗网格织物的织造。纱罗网格织物的组织图、示意图及实物图如图 1 所示。为了与纱罗网格织物进行比较,以相同的材料和钢筘制备了平纹网格织物。



a—组织图; b—示意图; c—实物图

图 1 纱罗网格织物的组织图、示意图、实物图

(3) 复合材料的制备。

将 PP/ 黄麻纤维非织造布沿着梳理方向铺放,然后将纱罗网格织物覆盖在 PP/ 黄麻非织造布表面,最后将其放入塑料制品液压机中进行模压加工。

首先是预处理,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,然后加压至 5 MPa,保压 4 min,如此循环 3 次去除处于高弹态基体中的气泡,减少成品复合材料中的孔隙,保证其力学性能的优越性^[20]。最后将压力调至 14 MPa,温度阶梯式调至 185℃,保压 11 min。以相同的成型工艺分别制备 LRPJC, PJC 和 PRPJC,相关参数列于表 1。

表 1 复合材料基本参数

复合材料	层数	网格大小/mm	纤维体积分数/%
PJC	8	-	40.20
LRPJC	8+1	5×5	38.89
PRPJC	8+1	5×5	39.73

注:1) PP/ 黄麻纤维非织造布:单层长×宽为 320 mm×320 mm,每层面密度(240±10) g/m²。2) 纱罗网格织物:每层面密度(580±10) g/m²。3) “8”代表 8 层 PP/ 黄麻纤维非织造布。4) “1”代表一层网格织物。

1.4 性能测试与表征

(1) 力学性能测试。

拉伸性能按照 GB/T 1447-2005 测试。试样长×宽×厚为 250 mm×25 mm×*d* (*d* 为试样厚度,mm),拉伸速度为 5 mm/min,拉伸试样跨距为 170 mm,每组测试 5 个试样取其平均值。

弯曲性能按照 GB/T 9341-2008 测试。试样长×宽为 (20×*d*)×25 mm;加载速度为 1 mm/min;弯曲试样跨距为 16×*d*。每组测试 5 个有效试样取其平均值作为最后结果。

冲击性能按照 GB/T 1043.1-2008 测试。试样长×宽为 (25×*d*)×15 mm;冲击试样跨距为 20×*d*。摆锤能量 7.5 kJ,冲击速度为 3.8 m/s,摆锤预扬角为 160°。每组测试 10 个有效试样取其平均值作为最后结果。

动态力学性能测试。采用三点弯模式,试样长×宽×高为 60 mm×12 mm×*d*,升温速度 5℃/min,振幅 15 μm,频率 1 Hz。

(2) 微观断面分析。

SEM:对试样喷金处理,然后采用 SEM 对断面微观形貌进行观察并拍照;

超景深测试:采用超景深三维显微系统观察断面的形状以及纤维抽拔断裂的形态。

(3) 复合材料拉伸/弯曲过程能量吸收。

复合材料拉伸试样测试过程中,试样的能量吸收受拉伸强度和断裂伸长率共同影响^[21]。定义试样拉伸过程中吸收的能量除以试样的横截面积为单

位面积上的能量吸收值如(1)式所示。

$$a_t = \frac{\int_0^{x_{\max}} f_s dx}{bd} \quad (1)$$

式中: a_t ——试样拉伸断裂吸收的能量, kJ/m^2 ;

$x_{\max}$ ——试样拉伸至断裂最大位移, mm ;

f_s ——试样拉伸测试过程中受到的力, N ;

b ——试样宽度, mm ;

d ——试样厚度, mm 。

复合材料弯曲测试存在两种能量积分值用于评价试样在弯曲过程中的能量吸收,一种是整个弯曲过程中的能量吸收,另一种是弯曲损伤应力之前的能量吸收^[21]。为了准确地比较弯曲过程中的能量吸收,只讨论弯曲损伤应力之前的能量吸收。定义弯曲试验过程中吸收的能量除以试样的横截面积为单位面积上的能量吸收值如(2)式所示。

$$a_f = \frac{\int_0^{x_N} f_i dx}{bd} \quad (2)$$

式中: a_f ——试样弯曲过程吸收的能量, kJ/m^2 ;

x_N ——试样弯曲载荷最大时弯曲位移, mm ;

f_i ——试样弯曲测试过程中受到的力, N 。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的力学性能及损伤机理

LRPJC, PJC 和 PRPJC 的拉伸性能如图2所示。

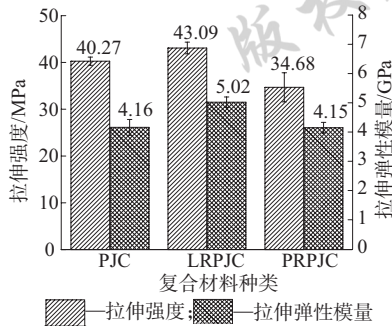


图2 复合材料的拉伸性能

由图2可以看出, LRPJC 的拉伸强度、拉伸弹性模量分别为 43.09 MPa, 5.02 GPa, PJC 的拉伸强度、拉伸弹性模量分别为 40.27 MPa, 4.16 GPa, PRPJC 的拉伸强度、拉伸弹性模量分别 34.68 MPa 和 4.15 GPa。其中, LRPJC 的拉伸性能最优。与 PJC 相比, LRPJC 的拉伸强度、拉伸弹性模量分别提高 7%, 20.67%。与 PRPJC 相比, LRPJC 的拉伸强度、拉伸弹性模量分别提高 24.25%, 20.96%。

LRPJC 和 PJC 的拉伸断裂失效形式如图3所示, 可以看到 LRPJC 的力学失效主要是因为纤维断裂和基体断裂所致, 而 PJC 的力学失效主要是因为

纤维的抽拔断裂导致。黄麻纤维的抽拔断裂与直接断裂相比, 力学性能未得到充分的利用。另外, 通过超景深三维显微系统观察复合材料拉伸断面, 如图4所示。从图4可以清楚地看到, PJC 的拉伸断面呈“锯齿状”, 纤维抽拔得更多, 而 LRPJC 的拉伸断面相比 PJC 的拉伸断面则更加平整。纱罗网格织物的强力要高于黄麻纤维, 因此在试样拉伸过程中, 保证了黄麻纤维断裂的同时性, 提高了复合材料吸收能量的能力, 使得黄麻纤维的力学性能得到充分利用, 进而提高了复合材料的力学性能。

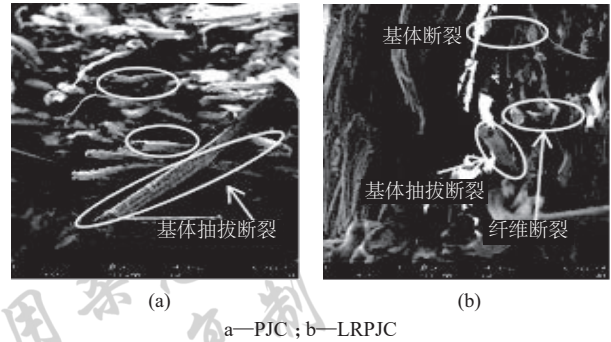


图3 PJC 和 LRPJC 拉伸断裂失效形式

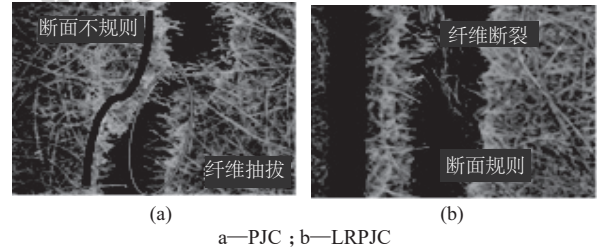


图4 PJC 和 LRPJC 的拉伸断面 SEM 照片

平纹网格织物和纱罗网格织物结构简图如图5所示。PRPJC 的拉伸性能之所以最差, 主要有两个原因, 一方面平纹网格织物的经纬纱交织产生的屈曲较为明显, 经纬纱屈曲的存在严重影响着复合材料的力学性能。另一方面, 纱罗网格织物经纬纱由

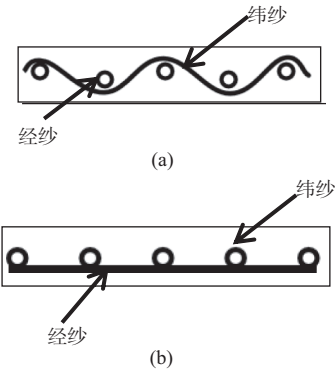


图5 平纹网格织物和纱罗网格织物示意图

绞经固定, 织物结构稳定, 而平纹网格织物由于经纬密度太小而导致织物结构不稳定, 进而织物经纬纱在复合材料中分布不匀使得拉伸性能下降。

复合材料的弯曲性能如图 6 所示。从图 6 可以看出, PJC 的弯曲强度和弯曲弹性模量分别为 59.83 MPa 和 5.10 GPa, LRPJC 的弯曲强度和弯曲弹性模量分别为 71.13 MPa 和 6.60 GPa, PRPJC 的弯曲强度和弯曲弹性模量分别为 64.17 MPa 和 5.43 GPa。其中 LRPJC 的弯曲性能最优, LRPJC 相比 PJC 弯曲强度和弯曲弹性模量分别提高 18.87% 和 23.33%。LRPJC 相比 PRPJC 弯曲强度、弯曲弹性模量分别提高 10.84% 和 21.55%。

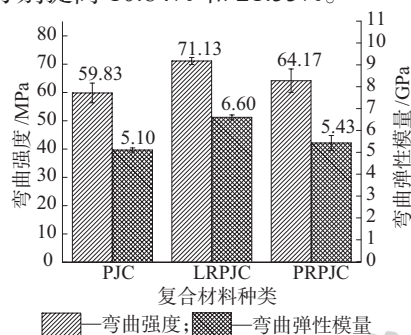


图6 复合材料的弯曲性能

在弯曲测试过程中同时存在着复合材料下半部分拉伸, 上半部分压缩以及内部的剪切等变形方式。纱罗网格织物覆盖在复合材料表面起到类似于钢筋的作用, 可以有效地提高复合材料的损伤应力。此外, 在相同的应力下, 加筋的复合材料具有高应变, 减缓基部复合材料因受拉以及受压带来的损伤, 进而提高复合材料的承载能力。

2.2 复合材料拉伸/弯曲过程能量吸收

复合材料的拉伸应力-应变曲线如图 7 所示。由图 7 可以看到, 在相同的应变条件下, LRPJC 具有高应变和高应力。加筋复合材料在到达最大值载荷后并未直接失效, 而是阶梯式下降, 主要是因为非织造布部分应力失效后加强筋再逐个失效, 起到一定的承载作用, 保证了复合材料具有更好的韧性。

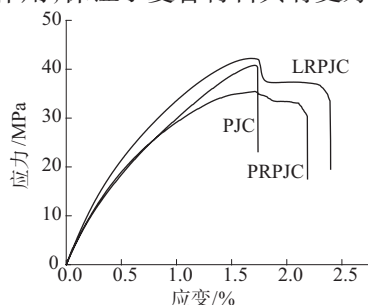
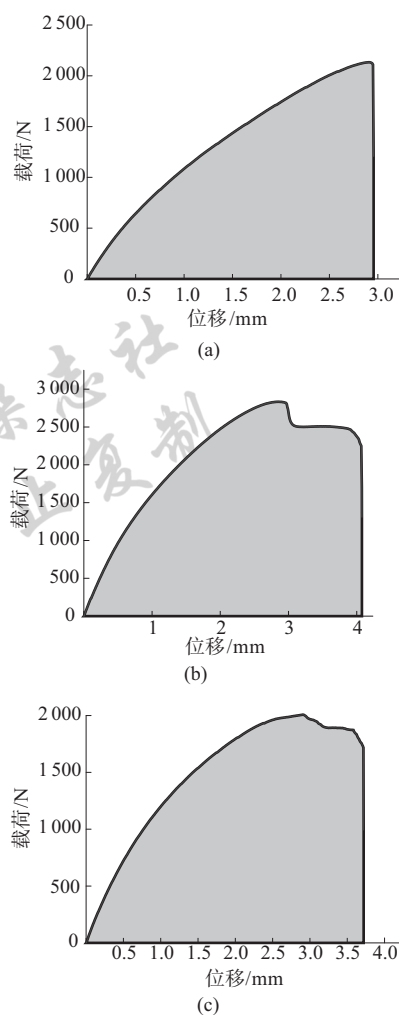


图7 复合材料拉伸应力-应变曲线

图 8 为在试样拉伸过程中 3 种复合材料吸收的能量值。由图 8 可以看出, PJC, LRPJC 和 PRPJC 的吸收能量值分别为 3 927.97, 8 367.44, 5 498.63 J。单位面积上能量吸收值分别为 75.1, 124.64, 88.92 kJ/m²。LRPJC 在拉伸实验过程中单位面积吸收能量值最大, 与 PJC 相比, 提高了 65.97%, 与 PRPJC 相比提高了 40.17%。



a—PJC ; b—LRPJC ; c—PRPJC

图8 PJC, LRPJC 和 PRPJC 拉伸过程能量吸收值

复合材料弯曲应力-应变曲线如图 9 所示。当复合材料到达损伤应力时, 加筋的复合材料具有更高的应力和应变值。图 10 为在试样弯曲过程中三种复合材料吸收的能量。PJC, LRPJC 和 PRPJC 的能量吸收值分别为 174.06, 579.58, 398.29 J。三种复合材料的单位面积上的能量吸收值分别为 3.61, 8.51, 7.02 kJ/m²。LRPJC 单位面积上的能量吸收值比 PJC 单位面积上的能量吸收值提高 135.45%, 突出了加筋复合材料优异的韧性。

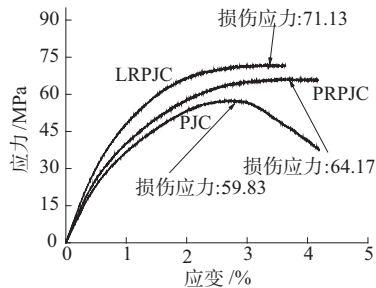


图9 复合材料的弯曲应力-应变曲线

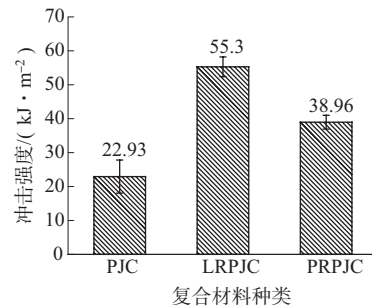
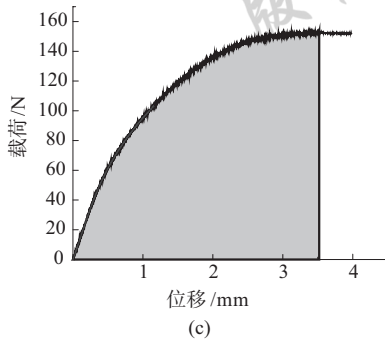
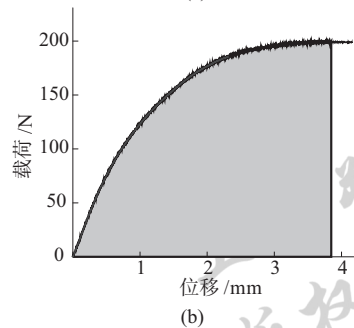
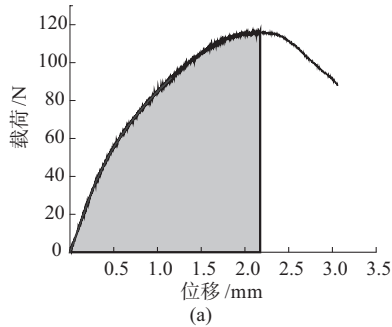


图11 复合材料的简支梁冲击性能



a—PJC ; b—LRPJC ; c—PRPJC

图10 PJC, LRPJC 和 PRPJC 弯曲过程的能量吸收值

2.3 复合材料冲击过程的能量吸收

为了更加直观地描述复合材料的能量吸收问题,进行了简支梁冲击实验。简支梁冲击实验结果如图11所示。由图11可以看到, PJC, LRPJC, PRPJC 复合材料的冲击强度分别为 22.93, 55.3, 38.96 kJ/m^2 , 其中 LRPJC 与 PJC 相比, 其冲击强度提高 141.17%, 与弯曲过程中能量吸收有着相同的趋势。冲击强度的提高进一步说明纱罗网格织物增

强 PP/ 黄麻复合材料韧性的提高以及冲击破坏时吸收能量的能力优异性。

2.4 复合材料动态力学性能分析

优良的阻尼特性能起到减振降噪的作用, 进而使机械系统的稳定性增强^[22]。损耗因子 $\tan\delta$ 即储能模量 E' 与损耗模量 E'' 比值, 常用来反映材料的黏性特性以及阻尼特性^[23]。

复合材料的储能模量、损耗模量和损耗因子如图12所示。由图12可以看出, 在交变应力模式下, LRPJC 的储能模量低于 PJC, 但随着温度的升高, LRPJC 的储能模量下降速率明显低于 PJC, 说明随着温度的升高, LRPJC 力学损耗速率小。在玻璃化转变温度之前, LRPJC 的损耗因子上升的速率高于 PJC, 峰值后, 二者以几乎相近的速率下降。通过比较损耗因子发现, LRPJC 的损耗因子大于 PJC, 这说明在 25~100℃, 随着温度的提高, LRPJC 具有更好的黏塑性和阻尼性能。

3 结论

(1) 单股弱捻黄麻粗纱增强 PP 复合材料具有一定的强力与刚度, 将平纹网格织物和纱罗网格织物与非织造布联合使用, 可以有效地提高非织造布复合材料的承载能力。

(2) 网格织物作为加强筋用于增强 PP/ 黄麻复合材料, 其拉伸性能、弯曲性能和冲击性能均高于未加筋的 PP/ 黄麻复合材料。

(3) 与平纹网格织物相比, 纱罗网格织物经纬纱互不交织, 通过绞经固定经纬纱, 保证织物结构稳定。因此, 纱罗网格织物作为加强筋增强 PP/ 黄麻复合材料具有更加优异的力学性能。此外, 随着温度升高, 纱罗网格织物增强 PP/ 黄麻复合材料具有更好的黏塑性和阻尼性能。

纱罗网格织物以其独特的特征, 经纬纱无屈曲产生且通过绞经固结使得织物结构稳定, 利于异型件的制备。且以纱罗网格织物作为增强材料与 PP/

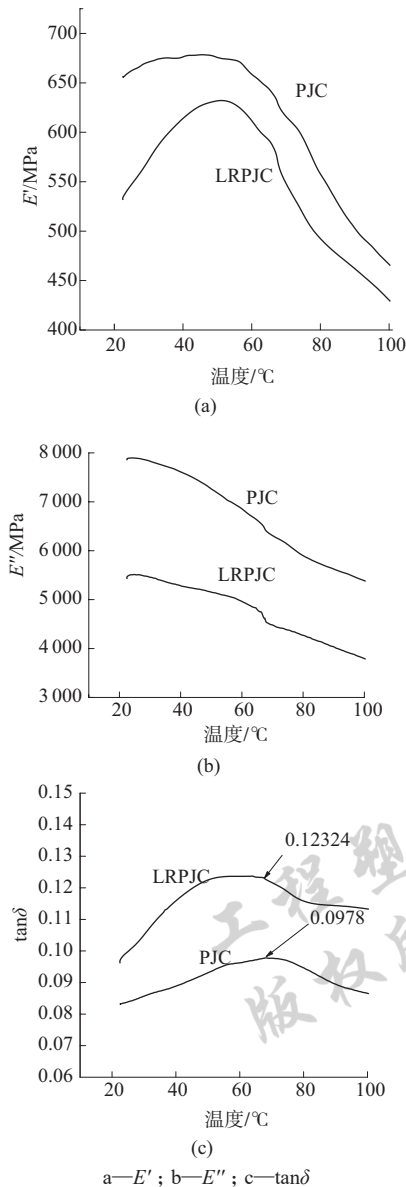


图 12 复合材料储能模量、损耗模量和损耗因子

黄麻复合材料复合使用可以有效地提高 PP/ 黄麻复合材料的力学性能,使其具有在汽车外饰等高承载力领域的应用前景。

参考文献

- [1] Darshil U S, Peter J S, Mike J C. Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study[J]. Composites:Part B, 2013, 52:172–181.
- [2] Chandekar H, Chaudhari V, Waigaonkar S. A review of jute fiber reinforced polymer composites[J]. Materials Today:Proceedings, 2020, 26:2079–2082.
- [3] Al-Oqla F M, Sapuan S M. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications:Feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66:347–354.
- [4] Pickering K L, Efendy M G A, Le T M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2016, 83:98–112.
- [5] Sinha A K, Naran H K, Bhattacharya S, et al. Mechanical properties of natural fibre polymer composites[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 37(9):879–895.
- [6] Alves C, Ferrao P M C, Silva A J, et al. Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(4):313–327.
- [7] Chawla U K V K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. International Materials Reviews, 2008, 53(4):185–218.
- [8] Valadez T N, Norton J R, Neary M C. The reaction of $Cp^*(Cl)M(Diene)(M=Ti, Hf)$ with isonitriles[J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(32):10152–10155.
- [9] Awais H, Nawab Y, Amjad A, et al. Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites:A review[J]. Composites:Part C Open Access, 2021, 4. DOI:10.1016/j.jcomc.2020.100082.
- [10] 章亚东,段跃新,左璐,等. 经编织物法制备连续纤维增强热塑性复合材料的微观形貌和浸润过程分析[J]. 复合材料学报, 2004(6):63–69.
- [11] Zhang Yadong, Duan Yuexin, Zuo Lu, et al. Analyses of microstructure and impregnation process of FRTP composites manufactured from warp-knitting fabric[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004(6):63–69.
- [12] Das S C, Paul D, Fahad M M, et al. Effect of fiber loading on the mechanical properties of jute fiber reinforced polypropylene composites[J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2016, 8(8):1–5.
- [13] Tanguy M, Bourmaud A, Beaugrand J, et al. Polypropylene reinforcement with flax or jute fibre ; Influence of microstructure and constituents properties on the performance of composite[J]. Composites Part B:Engineering, 2018, 139(15):64–74.
- [14] Baghaei B, Skrifvars M, Berglin L. Characterization of thermoplastic natural fibre composites made from woven hybrid yarn prepreps with different weave pattern[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2015, 76:154–161.
- [15] Awais H, Nawab Y, Amjad A, et al. Effect of comingling techniques on mechanical properties of natural fibre reinforced cross-ply thermoplastic composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 177. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.107279.
- [16] Mathijssen D. The renaissance of flax fibers[J]. Reinforced Plastics, 2018, 62(3). DOI:10.1016/j.repl.2017.11.020.
- [17] Régis C, Voillat C, Noréaz C, et al. Manufacturing device and stiffened thin-walled fiber composite material product:DE102015108573A1[P]. 2016-12-01.

- membrane properties in MBR treated food processing wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(8):76–81.
- [6] 李莹, 刘强, 陈卫, 等. 胞外聚合物响应污泥龄的傅里叶变换红外研究 [J]. *工业水处理*, 2020, 40(11):28–32.
- Li Ying, Liu Qiang, Chen Wei, et al. A Fourier transform IR study of the extracellular polymer in response to sludge age [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(11):28–32.
- [7] 周超, 吴东海, 陆光华, 等. 膜法水处理中膜污染的化学控制研究进展 [J]. *工业水处理*, 2019, 39(2):6–10.
- Zhou Chao, Wu Donghai, Lu Guanghua, et al. Progress in the chemical control of membrane pollution in membrane water treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(2):6–10.
- [8] Lin Yichen, Liu Kuanmiao, Chi Peiling, et al. Enhancing the hydrophilicity and biofoulant removal ability of a PVDF ultrafiltration membrane via $\pi-\pi$ interactions as measured by AFM [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 641:119 874–119 881.
- [9] Oliveira fayolle M, Mailler R, Rocher V, et al. Comprehensive study of supported PVDF membrane ageing in MBR: A direct comparison between changes at bench scale and full scale [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 279:119 695–119 700.
- [10] 杨景璇, 李娜娜, 史雪勤. 聚偏氟乙烯中空纤维膜亲水改性研究进展及应用 [J]. *纺织科学与工程学报*, 2021, 38(1):89–92.
- Yang Jingxuan, Li Nana, Shi Xueqin. Progress and application of hydrophilic modification of polyvinyl ethylene difluoride hollow fiber membrane [J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2021, 38(1):89–92.
- [11] 高哲, 王磊, 苗瑞, 等. 亲疏水性溶解性有机物对聚偏氟乙烯超滤膜污染行为 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(6):2 639–2 644.
- Gao Zhe, Wang Lei, Miao Rui, et al. Fouling behavior of hydrophilic and hydrophobic organic matter in PVDF ultrafiltration membranes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(6):2 639–2 644.
- [12] 张轩, 宋小三, 王三反, 等. PVDF 膜的应用与污染改性分析 [J]. *水处理技术*, 2021, 47(8):8–13.
- Zhang Xuan, Song Xiaosan, Wang Sanfan, et al. Application of PVDF membrane and pollution modification analysis [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(8):8–13.
- [13] Sinha M K, Purkait M K. Enhancement of hydrophilicity of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)(PVDF-HFP) membrane using various alcohols as nonsolvent additives [J]. *Desalination*, 2014, 338(1):106–114.
- [14] Zou Dong, Jeon, SM, Kim HW, et al. In-situ grown inorganic layer coated PVDF/PSF composite hollow fiber membranes with enhanced separation performance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 637:119 632–119 644.
- [15] 夏宇, 郭永福, 李焱, 等. 聚偏氟乙烯膜亲水化改性研究进展 [J]. *工业水处理*, 2016, 36(10):5–10.
- Xia Yu, Guo Yongfu, Li Yan, et al. Progress in the hydrophilic modification of polyvinyl dene fluoride membrane [J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, 36(10):5–10.
- [16] 刘静春, 韩洪军, 徐春艳, 等. 陶瓷平板膜生物反应器处理煤化工废水研究 [J]. *水处理技术*, 2020, 46(9):86–89.
- Liu Jingchun, Han Hongjun, Xu Chunyan, et al. Research on coal chemical waste water treatment with ceramic plate film biological reactor [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(9):86–89.
- [17] 陈素华, 申欢, 程新燕, 等. 浸没式平板膜生物反应器处理钞票纸厂废水的中试研究 [J]. *水处理技术*, 2013, 39(4):84–86.
- Chen Suhua, Shen Huan, Cheng Xinyan, et al. Pilot study of immersion plate membranm bioforeactor [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(4):84–86.
-
- (上接第 7 页)
- [17] Stephen N, James H. Composite rods for stabilization of composite laminates : US2020/0262171A1 [P]. 2020-08-20.
- [18] 张旭峰, 全建峰, 益小苏. 一种含网格加强筋结构的预浸料及制备方法 : CN202 010764809.7 [P]. 2020-11-27.
- Zhang Xufeng, Tong Jianfeng, Yi Xiaosu. Prepreg containing grid reinforcing rib structure and preparation method: CN202010764809.7 [P]. 2020-11-27.
- [19] 董晓阳, 龚建峰, 吴国庆, 等. 复合电池箱上盖的成型工艺 : CN111730876A [P]. 2020-10-02.
- Dong Xiaoyang, Gong Jianfeng, Wu Guoqing, et al. Molding process of upper cover of composite battery box: CN111730876A [P]. 2020-10-02.
- [20] 刘胜凯. 汉麻纤维增强聚丙烯复合材料 VOC 释放及性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- Liu Shengkai. Study on VOC release and performance of hemp fiber reinforced polypropylene composite [D]. Tianjin: Tiangong University, 2016.
- [21] 邵博. 棉织物增强聚丙烯复合材料黏塑性变形研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- Shao Bo. Investigation of viscoplastic deformation of cotton fabric reinforced polypropylene composite [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [22] 仲耿. 纤维增强复合材料阻尼性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- Zhong Geng. Study on damping properties of fiber reinforced composite [D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [23] 王伟. 木质短纤维 / 聚丙烯复合材料的力学性能与耐久性研究 [D]. 上海: 东华大学, 2021.
- Wang Wei. Research on mechanical properties and durability of wood short fiber/polypropylene composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2021.